

2023 年度～2024 年度調査報告書

情報収集費/グリーン成長戦略を中心とした俯瞰調査

2025 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

委託先名 アーサー・ディ・リトル・ジャパン株式会社

目次

1. 研究開発の内容及び成果等	3
1.1 要約	3
(1) 和文要約	3
(2) 英文要約	3
1.2 本文	5
(1) 調査背景	5
(2) 調査概要	6
(3) 調査内容	8
(4) テーマ別最新動向調査結果	10
2. 成果	11
3. その他特記事項	11
別添1：テーマ別最新動向メモ	
[1] 洋上風力発電の低コスト化	12
[2] 次世代型太陽電池の開発	18
[3] 大規模水素サプライチェーンの構築	24
[4] 再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造	34
[5] 製鉄プロセスにおける水素活用	39
[6] 燃料アンモニアサプライチェーンの構築	50
[7] CO ₂ 等を用いたプラスチック原料製造技術開発	58
[8] CO ₂ 等を用いた燃料製造技術開発	67
[9] CO ₂ を用いたコンクリート等製造技術開発	76
[10] CO ₂ の分離回収等技術開発	81
[11] 廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現	88
[12] 次世代蓄電池・次世代モーターの開発	98
[13] 電動車等省エネ化のための車載コンピューティング・シミュレーション技術の開発	102
[14] スマートモビリティ社会の構築	107
[15] 次世代デジタルインフラの構築	111
[16] 次世代航空機の開発	124
[17] 次世代船舶の開発	134
[18] 食料・農林水産業のCO ₂ 等削減・吸収技術の開発	142
[19] バイオものづくり技術によるカーボンリサイクル推進	158
[20] 製造分野における熱プロセスの脱炭素化	167
出所	173
別添2：テーマ別最新動向メモ補足説明資料・データ集	259

1. 研究開発の内容及び成果等

1.1 要約

(1) 和文要約

本調査では、グリーンイノベーション基金における20の個別プロジェクトを取り巻く市場・競争環境等の最新動向を獲得し、研究開発マネジメントやモニタリングに必要な情報・データ収集・分析、考察を行った。

「調査項目①：基礎情報の収集」では、個別プロジェクトの基礎情報として、市場動向、技術動向、国際動向、およびルールメイキング動向を調査、整理した。得られた結果を基に、レファレンス情報として基金事業と海外の類似プロジェクト等の研究開発目標・内容等との比較を行い、相違点とその要因分析を行った。また、個別プロジェクトに関連する分野有識者・専門家等にヒアリングを行い、非公開情報も収集した。

「調査項目②：基礎情報に関する分析」では、

基礎情報の収集結果、およびヒアリングでの収集結果に基づき、社会情勢・外部環境の変化等に関する国内外の直近の動向やそれらの変化に伴う競争環境や競合技術の開発状況の変化などを、最新動向として補足説明資料に取り纏め、20の個別プロジェクトの方向性の妥当性や、モニタリングにおいて今後注視すべき動向等を簡潔に最新動向メモとして取り纏めた。

(2) 英文要約

In this survey, we obtained the latest trends in the market and competitive environment surrounding the 20 individual projects in the Green Innovation Fund, and collected, analyzed, and discussed the information and data necessary for R&D management and monitoring.

In "Survey Item (1): Market trends, technology trends, international trends, and rulemaking trends were investigated and organized as basic information for individual projects. Based on the results obtained, we compared the R&D goals and contents of the Fund projects with those of similar projects overseas as reference information, and analyzed the differences and their factors. Analysis of Basic Information," interviews were also conducted with experts and specialists in the field related to individual projects, and non-public information was collected.

In "Survey Item 2: Based on the results of the collection of basic information and the results of the interviews, we compiled the most recent domestic and international trends related to changes in social conditions and the external environment, as well as changes in the competitive environment and the development status of competing technologies that accompanied these

changes, into supplementary explanatory materials as the latest trends, and analyzed the appropriateness of the direction of the 20 individual projects, the latest trends are briefly summarized as a latest trend memo, including the validity of the directions of 20 individual projects and trends that should be monitored in the future.

1.2 本文

(1) 調査背景

日本政府は「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、新たな成長戦略として、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略1」を策定した。これに伴い関連産業の市場獲得を目指し、技術開発支援を目的とした「グリーンイノベーション基金事業」(以下、基金事業という。)がNEDOに創設された。基金事業に限らずNEDO事業においては、技術開発の成果を着実に社会実装につなげるため、事業期間を通じ、社会情勢の変化を継続的に的確に捉え、市場・技術情報の収集・分析等を基にしたモニタリングが欠かせない。

本調査では、基金事業のプロジェクトを中心に、以下に掲げる必要な情報・データ収集・分析、考察を行い、基金事業を含むNEDO事業の適切なモニタリングを実施する上で必要となる国内外の競争環境の変化、競争技術の開発状況の変化などを「基礎情報」として取りまとめ、これらの「基礎情報」に変化が有る場合は技術開発や社会実装の目指すべき方向性に関する仮説・シナリオ形成(推論)の作成を行うことを目的とする

(社会情勢) 社会情勢等の変化、市場ニーズ等の変化、その理由・要因

(施策等の変化) 諸外国の政策・施策、戦略、企業活動の状況、その理由・要因

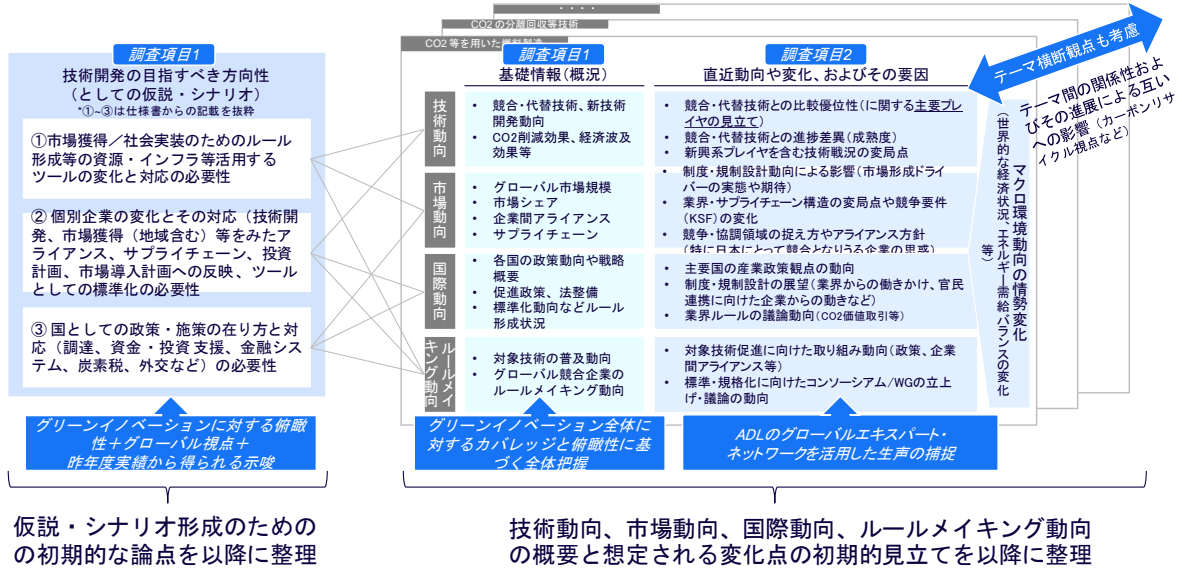
(技術情報) 革新的技術、競合技術の状況、既存技術、実証・社会実装の進展

(考察) 対象となる領域・分野における市場獲得の勝ち筋・戦略・戦術、

なお、実施に当たっては、基金事業の各プロジェクト及び関連する技術領域の取り組みを広く分野として捉え、横断的に調査・分析することで、ポートフォリオの重点化やプロジェクト間の連携に係わる考察も行う。

(2) 調査概要

調査内容は、「調査項目①：基礎情報の収集」、及び、「調査項目②：基礎情報に関する分析調査」の方法により、世界の国際情勢、社会情勢変化を捉えつつ、諸外国や国際機関の政策・施策、技術、市場の動向、変化及びその要因の調査、取得、分析を実施した。



図：調査研究の目標

対象範囲は、基金事業において実施中のプロジェクトのうち以下の 20 のプロジェクトとした。調査、分析等に関しては NEDO のプロジェクト担当課室に基礎情報、分析結果を提供した。

- [1] 洋上風力発電の低コスト化
- [2] 次世代型太陽電池の開発
- [3] 大規模水素サプライチェーンの構築
- [4] 再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造
- [5] 製鉄プロセスにおける水素活用
- [6] 燃料アンモニアサプライチェーンの構築
- [7] CO₂ 等を用いたプラスチック原料製造技術開発
- [8] CO₂ 等を用いた燃料製造技術開発
- [9] CO₂ を用いたコンクリート等製造技術開発
- [10] CO₂ の分離回収等技術開発
- [11] 廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現
- [12] 次世代蓄電池・次世代モーターの開発
- [13] 電動車等省エネ化のための車載コンピューティング・シミュレーション技術

の開発

[14] スマートモビリティ社会の構築

[15] 次世代デジタルインフラの構築

[16] 次世代航空機の開発

[17] 次世代船舶の開発

[18] 食料・農林水産業のCO₂等削減・吸収技術の開発

[19] バイオものづくり技術によるカーボンリサイクル推進

[20] 製造分野における熱プロセスの脱炭素化

※〔数字〕は、基金事業のプロジェクト通し番号

(3) 調査内容

<調査項目①：基礎情報の収集>

基礎情報として、技術動向、市場動向、国際動向、およびルールメイキング動向に着目し、基金事業の計画等との相違点・要因分析を行うとともに、技術的関連性やサプライチェーン上の相互関連性にも着目し、関連するNEDO事業や分野・技術領域の基礎情報についても明らかにし、調査・分析を実施した。また、基礎情報の収集にあたり、公開情報だけでは把握できない内容も収集するため、競合プロジェクト企業や自社で有する技術系のエージェント、国際機関、公的機関等の有識者に対するヒアリングも通じ、最新の国際動向も含めることで基礎情報の高度化を図った。これらを通じ、特に基金事業の研究開発・社会実装推進計画における計画値や目標値、開発計画等との比較を中心に行い、相違点とその要因分析を行った。具体的には下記を検討した。

- ・ 各プロジェクトのモニタリングに必要な基礎情報の調査分析
 - 技術動向：競争、競合関係にある技術の開発動向（アカデミア、企業等の動向）、革新的技術、新たな技術の有無、CO₂削減効果（ポテンシャル）、経済波及効果。社会情勢の変化、市場変化を受けた要望される技術の変化、ニーズ、その要因等
 - 市場動向：主要各国（米・独・英・仏・EU・中等）のカーボンニュートラルに関わる政策動向、具体的にはその戦略概要、重点分野と促進政策、法整備等の政策、標準化活動の動向、各国および関係国間のルール形成の状況等とその要因等（主要プレイヤー、スタートアップ等も含む）
 - 国際動向：対象（または関連）プロジェクトの技術の普及、競争力強化に向けたグローバル企業のルールメイキング動向（レギュレーション、デファクト、デジュール）、標準・規格、知財戦略等
- ・ 基金事業の計画等との相違点とその要因分析
 - 研究開発・社会実装推進計画における計画値や目標値
 - 開発計画等との比較、等

<調査項目②基礎情報に関する分析調査>

基礎情報として整理した公開・非公開情報の分析を踏まえて、技術開発の目指すべき方向性に関する仮説・シナリオを導出した。具体的には下記を検討した。

- ・ 国内外の社会情勢・外部環境の変化や競争環境の変化等の事実の整理
 - 社会情勢・外部情勢の変化等
 - 競争環境の変化
 - 競争技術の開発状況
- ・ 変化が見られる場合、その要因を踏まえて、技術開発の目指すべき方向性に関する「仮説・シナリオ形成」の構築・分析

- ①市場獲得／社会実装のためのルール形成等の資源・インフラ等活用するツールの変化と対応の必要性
- ②個別企業の変化とその対応（技術開発、市場獲得（地域含む）等をみたアライアンス、サプライチェーン、投資計画、市場導入計画への反映、ツールとしての標準化の必要性
- ③国としての政策・施策の在り方と対応（調達、資金・投資支援、金融システム、炭素税、外交など）の必要性

なお、調査項目①、調査項目②の実施に際し、有識者へのヒアリングを実施した結果を表に示す。

表：プロジェクト別ヒアリング実績

プロジェクト名	ヒアリング件数	
	2023年度	2024年度
[1]洋上風力発電の低コスト化	6	4
[2]次世代型太陽電池の開発	6	2
[3]大規模水素サプライチェーンの構築	3	2
[4]再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造	5	4
[5]製鉄プロセスにおける水素活用	3	2
[6]燃料アンモニアサプライチェーンの構築	5	4
[7]CO ₂ 等を用いたプラスチック原料製造技術開発	4	4
[8]CO ₂ 等を用いた燃料製造技術開発*	0	4
[9]CO ₂ を用いたコンクリート等製造技術開発*	0	3
[10]CO ₂ の分離回収等技術開発	2	1
[11]廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現*	0	4
[12]次世代蓄電池・次世代モーターの開発	2	1
[13]電動車等省エネ化のための車載コンピューティング・シミュレーション技術の開発*	0	2
[14]スマートモビリティ社会の構築*	0	2
[15]次世代デジタルインフラの構築	4	8
[16]次世代航空機の開発	4	4
[17]次世代船舶の開発	3	4
[18]食料・農林水産業のCO ₂ 等削減・吸収技術の開発	10	2
[19]バイオものづくり技術によるカーボンリサイクル推進	6	1
[20]製造分野における熱プロセスの脱炭素化*	0	5
合計	63	63

※2023年度に関しては、新規に調査対象となったプロジェクトや、各プロジェクトの調査の緊急性を考慮し、優先度をつけてインタビューを実施した

(4) テーマ別最新動向調査結果

20の個別プロジェクト別に、調査項目①と調査項目②の結果を整理した調査結果を別添1に示す。

但し、報告書において、有識者へのヒアリング情報のような非公開情報については、公開が難しい情報が含まれることから、本調査報告書から削除している。

2. 成果

本調査において研究発表・講演、論文、特許等に関しては特に公表しておらず、受賞実績も存在しない。

3. その他特記事項

特になし。

契約管理番号：	23200970-0
---------	------------

別添1 テーマ別最新動向メモ

[1] 洋上風力発電の低コスト化

[市場動向]

- a) グローバルでは、'50年CNの実現に向けて現状の10倍以上の約23,900~38,000TWh以上の発電量が必要とされており、洋上風力については現状比7-8倍の6,900-8,600TWh程度の発電量が必要とされている。^{1,2,3,4}
- b) 風力メーカーの市場シェアについては米国(GE等)・欧州(Siemens, Vestas等)・中国(Goldwind, Envision等)のメーカーが大きな割合を占めている。⁵ 洋上風力においては国内での積極的な導入を背景に、中国メーカーが過半数を占めている。'22年と比較し'23年ではSiemensが引き続き首位、MingYangが2位を守りつつVestasが運用数を伸ばし3位となった。⁶
- c) 今後の洋上風力の導入量の見通しについては、欧州も拡大が予想されるが、中国を含むアジア太平洋(APAC)地域の拡大が世界全体での導入量増加を牽引することが予想される。⁷
- d) 各国で増加する需要が市場拡大を後押しする一方で、欧州や北米、中国を除くAPAC地域においては今後数年で需要が供給を上回るなど各社供給量の増強が求められている。^{7,8}
- e) アジアでは、中国を除くと、台湾やベトナムが先行し、韓国や日本が後を追う形となる。東南アジアではベトナムに加えてフィリピンが洋上風力の導入に積極的^{9,10}
 - 昨年度報告時との差分としては、韓国が微増、日本・ベトナムが微減の想定ではあるが、オーストラリアの導入が'30年以降進むことが新たに予想された。⁷
 - 中国国内は内陸部の再エネ資源と沿岸部の電力需要地の地理的なミスマッチが存在。より需要地近傍での発電ニーズを背景に、引き続き洋上風力の積極的な導入が進むことが見込まれる。¹¹
 - 東南アジアではベトナムやフィリピンにおいて、導入目標の設定に加えて'23年以降法的枠組みの整備が進む。^{9,12,13}
 - 他国に関しては洋上風力に関する具体的な見通しが立っていない。但し、洋上風力エネルギーのポテンシャルとしては、インドネシアも市場として期待出来る。¹⁴
- f) 東・東南アジア地域は、価格下げ圧力が欧州と比較して弱いなどの事業環境の違いから、一定の導入規模が期待される韓国・台湾では拠点設置など各社引き続き事業拡大を推進していくと見られる。^{15,16}
- g) '23年頭から'24年頭に、プレイヤーの増加による競争の激化や入札価格の下落に加え、パンデミック以降のサプライチェーン(SC)の寸断、'22年2月に発生したウクライナ戦争により物流コストや資材コスト高騰が発生する等、風車業界には逆風が発生。^{17,18} 欧州においては事業採算性が悪化し、各社アジア地域を含む各地での事業中止や経営悪化が発生。但し、足元では主要プレイヤーにおいて一部業績の回復傾向も見られる。
- h) 加えて、洋上風力においては、PJ数の増加による備船費用の高騰、欧州・中国以外のSC整備が不十分な地域でのPJが増加した影響を受けて、洋上風力の発電コストはこれまでと

比較して下落幅が小さくなりつつある。¹⁹

- i) '23年は英国や米国における入札不調が生じる一方で、ドイツやアイルランド等における入札が成立するなど市況の混乱が見られた。^{20,21}
 - 入札不調の結果を受けて英国では次回入札の上限価格の引き上げが為される等の対策が講じられた。
- j) 近年、各社風車の大型化を進めてきたが、大型化による R&D 費増加・採算性や市況悪化で GE は更なる大型化を中断。一方、Siemens や中国系メーカは引き続き大型化を進めている状況。^{22,23}

[技術動向]

<欧米の開発領域との比較 (2023 年度調査) >

- k) 風力発電システムの変換効率²⁴は理論上最大値(約 60%)に近づきつつあり改善の余地は少なく、発電量増加に向けてはより多くの風力エネルギー確保のための風力タービンの大型化が潮流となっている。
- l) 欧米の研究開発領域としては、風車の大型化に加えて、シミュレーションや気流モデル、デジタルツインを用いた風車や発電所の設計・運用の高度化、係留システムや海底ケーブルの高度化が中心となっている。加えて、生態系・周辺産業への影響評価や負荷低減策の検討、既存貨物船・プラットフォームの風車専用船への転換や省資源・リサイクルに向けた材料や設計の最適化も特徴的な取組となっている。²⁴
- m) 一方で、国内では浮体の低コスト化やデジタルツインや UAV (無人航空機) を用いた保守管理の低コスト化が図られる他、軸受け関連の開発やタワー製造、落雷対応技術や専用船の開発が特徴的な取組となっている。²⁵

<東・東南アジア地域の環境要件/SC 構築状況を踏まえた開発領域 (2023 年度調査) >

- n) 海外進出を見据えた開発領域としては、東・東南アジア特有の環境・地理的特性を踏まえることが重要。洋上風力導入が進む国においても環境要因等に関する設計基準の有無は異なるが、日本や台湾の設計基準を踏まえると台風や地震、落雷、水深等の特性を踏まえた課題領域が東・東南アジア地域の特徴となる。^{26,27,28,29}
 - フィリピンやインドネシア、ミャンマーは地震や台風、落雷、水深等の環境要件が日本と似通っており、同地域への展開を見据えてこれらの環境要件に対応する研究開発を行うことも重要。
- o) また、東・東南アジアにおける洋上風力の SC の構築状況を見ると、技術的難易度が高く主要風車メーカがバリューチェーン (VC) を押さえるナセル組立や内部部品は既に東アジアを中心に SC 構築が進んでいる。一方で、ケーブルや係留システム、浮体基礎は日本企業に参入余地が存在。**エラー! ブックマークが定義されていません。**³⁰

<追加実施項目関連の海外取組 (2024 年度調査) >

- p) 技術動向では、フェーズ II での実証が想定される開発項目、フェーズ I の追加開発項目、及び欧州における対中国の動きから想定される研究開発について海外の開発事例等を調査・

整理。

<フェーズ II 実証関連>

q) 主要な浮体式洋上発電事業の計画や浮体基礎メーカーは、現時点で最大規模の 15-20MW 級を想定し、大型風車向け基礎について'27-'30 年頃実用化を目指す。浮体デザインについては依然として業界コンセンサスが形成されている段階ではないが、セミサブ方式の採用が他方式と比較して突出している。

➤ 浮体基礎のデザインは大まかにセミサブ・バージ・スパー・TLP の 4 方式に分類され、現時点で業界のコンセンサスが形成されてはいないが³¹、現在公表されている浮体式洋上風力発電プロジェクトにおける採用数ではセミサブ方式が突出。^{31,エラー! ブックマークが定義されていません。}

➤ 計画されている 15MW 級以上の大型風車を想定した浮体式洋上風力発電事業の多くは '29 年以降に運転が開始される予定。^{32,33} 浮体基礎メーカーの動きを見ると、15MW 級の大型風車向け基礎を、'27-'30 年頃の実用化を目指して開発を進めている他^{34,35,36,37}、一部 20MW 級の開発も行われており³⁸、凡そ GI 基金の想定する'30 年頃の事業化時期や想定する風車の規模は、類似の取組と比較しても同等の目標値となっている。

➤ 米国 DOE の FLOWIN プロジェクトでも、最終フェーズにおいても特定の方式に絞られることなく、バージを除く 3 方式が選出されている一方で、セミサブ方式が 5 社中 3 社と最多となっている。

◇ FLOWIN の最終フェーズ選出基準では浮体設計について、技術実現性や設置環境の設計上の考慮、システム互換性（現在-将来想定される風車デザインや BOP との互換性）、大量生産性等が基準となっているが、水深の浅い海域に適するバージ方式を除く 3 方式が最終フェーズに選出。³⁹

r) 浮体式洋上風力で想定されるコストとしては、英国 BVG Associates 等が浮体基礎やケーブル、変電所の製造費、設置コスト等や想定される発電コストの試算を公開。同分析を踏まえると'28 年運転開始の想定で LCOE £ 75-120/MWh、浮体基礎は £ 96 万/MW、ケーブルは £ 31.5 万/MW、洋上変電所は £ 15 万/MW、設置費用は £ 37 万/MW の実現がベンチマークとなる。⁴⁰

➤ DOE も同様に発電コストの試算を行っているが、BVG Associates と同等の見立てをしている。⁴¹

s) 送電においては、インターレイケーブルでは次世代として 132kV の導入等が進むが^{42,43,44}、GI 基金の開発目標は 154kV となっており、海外 PJ 等と同様の目標設定となっている。なお、エクスポートケーブルは欧州や中国で 525kV への大容量化の取組も進んでいる。^{45,46}

t) 洋上変電所の容量については、浮体式では開発が進む風力発電所の規模も踏まえると 1GW 級のものが中心になると見られ^{32,エラー! ブックマークが定義されていません。}、GI 基金で検討されている想定とも一致していると言える。

<フェーズ I 追加項目関連>

- u) フェーズ I 追加項目として、浮体システムの最適設計基準・規格化や大量/高速生産技術、大水深での係留・アンカー施工等を共通基盤開発として 2024 年度から開始。海外での関連取組を踏まえると、事業実施において以下のような観点を見ていくことが重要と思慮。
 - 浮体システムの設計では個別部品とシステム全体を最適に設計するためのモデリングツールや設計プロセスの整理等が重要な領域となる。⁴⁷
 - 浮体基礎の高速・大量製造においては、モジュール化による生産効率向上や自動化を活用した連続製造の取組が海外プレイヤー動向として見られる。^{48,49,50}こうした観点での開発が有効。
 - 大水深での係留・アンカー施工では、設置/修理コスト低減を見据えた合成ロープや負荷低減装置、デジタルツイン、共有アンカー等が開発領域と想定される。^{51,52,53}
 - 大水深向けを含む送電技術では、素材コスト低減や敷設/修理コスト低減、故障率低減等を見据えた開発に加え、試験設備や認証基準等の整備が課題領域と見られる。^{54,55}
 - 遠洋における風況観測の取組例として、米国風力エネルギー技術局が運用する浮体式科学調査ブイの取組が実施されており⁵⁶、AUV 等を活用し風況や海底情報等を収集する方向性が想定される。

<欧州の対中国を見据えた開発領域>

- v) 対中国を見据えた欧州での入札における非価格要素の導入が議論される中で、こうした動きへの対応としては、サイバーセキュリティや環境フットプリントに関する開発が想定される。
 - 英国 ORE Catapult や米国 NREL でも風力向けのレファレンス・アーキテクチャやサイバー脅威検知のアルゴリズム開発等複数の取組が実施されている。^{57,58}
 - 更に EU 域内調達での環境フットプリント等の非価格項目による評価の検討が進む中、Carbon Trust では洋上風力発電所ライフサイクルにおける CO2 排出測定のガイダンスを開発。⁵⁹

[国際動向]

- w) EU は洋上風力について‘30 年や’50 年の導入目標を設定し、目標達成のために注力分野の設定や必要な投資規模(約 8,000 億ユーロ)の試算等を発表。ドイツ、フランス、英国、米国、中国においてもそれぞれ洋上風力に関する導入目標やロードマップを設定すると共に、研究開発プロジェクトの実施により技術革新を促す。
- x) 中国は、各省目標を合計すると‘20 年から’25 年までに 70GW 以上の導入が見込まれる。14 次 5 年計画の下で、洋上風力については重点課題項目を設定し研究開発を後押し。ブレードからナセル・浮体基礎・電気系統まで幅広く課題を設定。^{60,61,62}
- y) 韓国は、政府が開発計画を地域単位で公表することで、地域単位の SC 形成を促進（政権交代後も再エネ普及の方向性は一定維持されている）。外資開発事業者や風車メーカーの進出も進んでいる一方⁶³、国内市場が未だ小さく独自技術の開発が困難なことより、ブレードや発電機の技術力の遅れが指摘されているが、国内メーカーも外資風車メーカーと積極的に提携し巻

返しを図る状況。⁶⁴

- '24年にはVestasが現地生産拠点設立等⁶⁵、Siemensが韓国メーカ（Doosan Enerbility）との生産協力⁶⁶に向けた協力覚書等を締結。
 - 一方、戦略的な産業育成計画の不在によるSC形成への課題や、国内のタービンやナセル内部品等に関して依然としてグローバルメーカと比較して技術力・供給力が不足する等の指摘がされている。^{67,68}
- z) 台湾政府は、ローカルコンテンツ規制の政策により外資参入と国内産業育成を図る。'25年までの開発区域の多くを外資企業主導で開発しつつも、段階的に国産化を進めることで'25年までに国内のサプライチェーンの構築を目指す。⁶⁶⁶
- '24年8月、Siemensは海龍事業を想定した台中工場の生産能力拡張工事完了とナセル生産の開始を発表（従来比で生産能力を3倍に増強）。同拡張工事により14MW級の完全な現地生産が可能となったと同社関係者は述べている。⁶⁹
 - 一方、Vestasはラウンド3.2からの撤退を踏まえ台湾工場のアップグレードを行わず、15MW級のブレード生産を台湾では行わないことを表明する等⁷⁰、各メーカで台湾国内における生産網構築における温度差が生じている。
 - 加えて、24年7月に現地調達要件についてEUがWTOへ提訴されていた問題について、同年11月に将来の入札に現地調達要件を課さないことで和解が成立。⁷¹台湾国内における供給網構築への影響が想定される。
- aa) 日本国内への風車メーカの工場誘致・サプライチェーン構築という観点では、日本国内の市場規模の小ささが海外OEMの足踏み要因となっている。
- SC構築を見据えた不足プレイヤーの誘致には、国内の事業規模やその実現時期が周辺国と比較して優位であることが重要である。風車メーカの拠点立ち上げには、一拠点当り年1GW程度の需要が10年間継続して必要であるが、現状、日本市場は十分な規模ではないなど風車メーカには厳しい事業環境。⁷²
 - 但し、東南アジアを含めると一定の市場規模が見込める。

[ルールメイキング動向]

- bb) 標準化は、国際標準化団体の国際標準化機構（ISO）や国際電気標準会議（IEC）の他、地域標準化団体、第三者認証機関が取組を実施。特に浮体式洋上風力においてはIECや米国船級協会（ABS）、ビューローベリタス（BV）、Det Norske Veritas（DNV）、中国船級協会（CCS）等が規格やガイドラインを策定しており^{73,74}、ABSは'23年には洋上変電所に関するガイドライン⁷⁵を、BVは'23年に浮体式も想定した環境条件やその負荷、構造的応答を評価するガイドライン⁷⁶を発行している。
- cc) また、欧米各国において、国内・域内生産の優遇措置を取る動きが活発化。欧州では入札時に非価格基準として持続可能性等を謳うと共に関税を強化するなど域内優遇を進めている。
- dd) 欧州委員会は'23年3月に欧州の重要原材料の調達精製能力の向上を目的として重要原材料法（CRMA）を発表。永久磁石に用いるレアアースやケーブル用の銅など、風力発電産業に

も重要な原材料の EU 域内調達を目指し、'30 年までにこれら材料の少なくとも 1 割を域内で採掘し、4 割を加工すると共に、'50 年までに原材料消費量の 15%をリサイクルすることを目指す。⁷⁷

- ee) 同様に同月に温室効果ガス排出 **NetZero** 実現に貢献する技術の EU 域内での生産能力拡大を支援するネットゼロ産業法 (NZIA) 案を発表、同案は'24 年 5 月に理事会承認により成立。洋上風力も「戦略的ネットゼロ技術」に指定。⁷⁸
- ff) 既に中国企業は欧州の洋上風力産業においてポジションを確立しつつあり、事業者目線では中国企業の締め出しは産業への悪影響もあり現実的ではないとの見方も一定程度存在。しかし、中国の欧州市場参入に対して風力業界は大きな危機感を抱いており、業界団体は早くも NZIA の強化の必要性を主張。⁷⁹こうした動きを背景に欧州委員会は、'23 年 10 月に風力産業の競争力強化のため加盟国と域内産業向けに対応すべき措置や支援策を示す欧州風力発電行動計画を発表。対中国として補助金規則等の積極活用を示唆。⁸⁰
 - 欧州委員会は、'24 年 4 月に公平な競争を阻害しているとし、中国製風力タービンの調査開始を発表。併せて友好国に対し環境フットプリント等の信頼性基準策定を求めている。⁸¹

[2] 次世代型太陽電池の開発

[市場動向]

- a) カーボンニュートラルの達成に向けて、近年太陽光の導入が急拡大している。
- カーボンニュートラル達成に向けた国際社会や各国の積極的な取り組みを背景に、太陽光の累積導入量は毎年拡大を続けている。2023年には1,624GWに達し、10年前と比較して約11.6倍に拡大した⁸²
- b) 太陽光導入拡大の流れは今後も一段と進む見通しで、2050年には太陽光が世界の発電電力量の3割以上を占め、中心的な電源となる見通し
- 主要な国際機関のIEA、IRENAは、いずれのシナリオでも太陽光の世界の発電電力量の構成に占める割合が、風力等の他の電力源を抑え、最大になる見通しを示している^{83,84}
 - IRENAの1.5-S（1.5°Cシナリオを指し、今世紀末までに地球の平均気温上昇を産業革命以前と比較して1.5°C以内に抑制された場合のシナリオ）では、太陽光が2050年の世界の発電電力量に占める割合を33%程度と予測している。また、IEAのNZE（2050年排出量実質ゼロとするシナリオ）では、太陽光が2050年の世界の発電電力量に占める割合を40%以上と予測している^{83,84}
- c) 太陽光導入量の内訳では、自家消費を想定した屋根上設置型と系統接続用の地上設置が概ねシェアを二分、半導体種類別では太陽電池生産量の9割以上を結晶シリコンが占めている
- 設置箇所別では、地域毎に屋根設置型と系統用地上設置型のシェア傾向が異なり、米国・インド・スペイン等は系統用が多く、ドイツ・ブラジル・イタリア等は屋根設置型のシェアが高い⁸²
 - 半導体種別では2022年では、結晶シリコンが95%が占めており。薄膜シリコンは5%⁸⁵
- d) 主要国政府においても、脱炭素社会の実現に向けて、太陽光の導入拡大が重要視されており、高い導入目標が設定されている
- EUでは、ロシアによるウクライナ侵攻を契機に、ロシアへの化石燃料の依存度を減らすため、太陽光を含む再生可能エネルギー導入拡大の動きが活発化している。2023年4月、EU理事会と欧州議会は、法的拘束力のある目標として、最終エネルギー消費に占める再エネの割合を現行の32%から42.5%に引き上げる改正案が成立^{86,87}
 - 米国ではエネルギー省が2021年9月にSolar future studyを発表。将来の米国の発電電力量に占める太陽光の割合について、Decarbシナリオ（2035年までに電力部門の二酸化炭素排出量が2005年のレベルから比べて95%削減され、2050年までに100%削減される場合）では、2035年までに36.9%、2050年には40.1%になる見通しを示した^{88,89}
 - 中国では、政府が2060年までにCN達成を目指しており、目標達成のためには発電電力量容量において、2030年には太陽光が28%を占め（割合が風力等の他の電力源を抑え、最大になる）、2060年に全体の5割を占める必要があるとの認識を示した⁹⁰

- 日本は 2050 年の CN 達成に向け 2030 年の電源構成における太陽光比率を 14~16%にする目標を設定⁹¹
- e) 太陽光設置場所の拡大に向けては従来の地上・建物屋根に加え、建物壁面や農地・水上等の新たな用途への太陽光の導入が肝要で、次世代太陽電池の技術開発による市場開拓が期待される
 - 日本の国土に占める平地面積の割合は 34%と他国と比べ相対的に低い上、(ex.独 68%、英 87%、中 77%)、既に平地面積当たりの太陽光導入量は他国の 2 倍以上となっており、新たな用途開拓が喫緊の課題となっている⁹²
 - シンガポールは国土面積が小さく、建物や空き地に設置できる太陽光発電パネルの数には限界があるため、2021 年 7 月に世界最大級の浮体式太陽光発電所をテング貯水池にオープンした⁹³
 - 同様の課題を抱える国が存在する EU は、欧州太陽光発電技術・イノベーションプラットフォームが、2021 年 5 月に発表した“A European Strategic Research and Innovation Agenda for PV” (SRIA) において、新たな用途開拓を重要な研究開発テーマと位置づけ、建材一体型 (BIPV)、車両統合型、アグリ PV、浮体式 PV、インフラ統合型等に取り組む方針を示した⁹⁴
- f) 新用途開拓が期待される次世代太陽電池の一つとして、ペロブスカイト太陽電池が有望視されている
 - ペロブスカイト太陽電池のバリューチェーンはシリコンとは異なり、ペロブスカイト太陽電池の主な原料であるヨウ素で日本は世界第 2 位の生産国であり、ペロブスカイト太陽電池が普及すれば、太陽電池のサプライチェーンの強化につながる^{95,96}
 - ペロブスカイト太陽電池はフィルム状で製造することができるため、軽量でかつ柔軟性を有し、設置場所や用途を飛躍的に増やせる可能性がある
 - 富士経済の予測に基づくと 2035 年までにペロブスカイト太陽電池の市場規模は 1 兆円、40GW に成長する見通し⁹⁷
- g) 2030 年時点では地上、水上等より、屋根・壁面・窓といった建物に関連する場所の市場が大きくなる見通し
 - 資源総合システムの 2030 年の国内の年間太陽光導入量 (注:累積量ではない) の予測によると、建物系が 55%、新用途が 20%¹、農地が 9%、水上が 3%程度を占めると予測⁹⁸
 - 中国では、太陽光の累積導入量において、屋根・壁・窓等の建物が大部分を占める分散型が 2030 年 5 割、2050 年に 6 割を占めると予測されている⁹⁹

[技術動向]

- h) ペロブスカイト太陽電池の開発では、この 1 年で中国系プレイヤーがタンデム及び単結合セルの変換効率記録を更新、モジュールでは韓国系プレイヤーが記録更新する等、海外プレイヤーとの開発競争が激しくなっている
 - 単接合セルの効率向上の伸びは少しずつ飽和してきている中¹⁰⁰、中国科学技術大学

- (USTC) がペロブスカイトセル単接合セルで定常効率 26.7%の世界記録を樹立¹⁰¹する等、中国を中心とする海外プレイヤーとの競争が激化している
- モジュールでは、2024 年に韓国が 20.6% (面積：200cm²) で記録を更新しトップとなった¹⁰²
 - ペロブスカイトと結晶シリコン太陽電池を積層したタンデム太陽電池については、LONGi が変換効率 34.6%¹⁰³を発表し最高記録を更新。
 - ただし、上記の記録に関しては、性能の測定方法や条件が異なるためフェアに比較することができない点に留意
 - 性能の測定方法に関する国際的な基準が存在せず課題となっている¹⁰⁴
- i) 耐久性については、研究室内ではなく、屋外で一定期間性能を維持したとの結果が発表されるなど開発競争が活発化している。中国企業はシリコン型太陽電池の評価手法で IEC の認証を取得する事例が増加。
- 2023 年 2 月サウジアラビアの KAUST がペロブスカイト/シリコン・タンデム型で 1 年間の屋外テストを屋外テストを行い、初期効率の 80%以上を維持したと発表¹⁰⁵
 - GCL はシリコン太陽電池と同様の条件で耐久試験を行い、IEC61215 と IEC61730 を取得したとプレスリリースし、自社製品の耐久性をアピール¹⁰⁶
- j) 大型化について、中国企業が商用サイズの製品を相次いでリリースしている。
- GCL は 2m×1m のペロブスカイト太陽電池をリリース
 - Utmolight は 2.8m² の商用サイズのペロブスカイト単接合セルの生産を開始¹⁰⁷
- k) 量産技術については製造方式 (Sheet to Sheet/Role to Role) と膜形成技術 (スロットダイ/インクジェット/スクリーン印刷・・・) により分類が可能
- 先行して商用化を進める企業は Sheet to Sheet の方式を採用する傾向、ガラス基板の単接合ではスロットダイによる膜形成を選択する傾向が存在¹⁰⁸
 - 一方でタンデム型を開発する企業は蒸着による膜形成技術の開発も実施
 - Role to Role 方式等の中国と異なる手法で量産する技術が確立されれば、現在主流のシリコン太陽電池よりも大幅に製造コストを抑えることが可能で、コスト競争で優位に立つ可能性が有る¹⁰⁹

[国際動向]

- l) 各地域で次世代太陽光の開発に対し補助を実施、ペロブスカイト型の開発専用の補助金も存在
- 欧州では、Horizon Europe (期間 2021-2027 で、955 億ユーロの予算を持つ EU の研究とイノベーションのための主要な資金提供プログラム) において、太陽光関連のプログラムにすでに約 3 億ユーロの予算を組成。そのうち、ペロブスカイト太陽電池指定のプログラムに 1 割 (2,900 万ユーロ) 程度の予算を投入。用途開拓には 9,600 万ユーロ (太陽光関連の予算の約 3 割) の予算を投入¹¹⁰
 - 米国では、米国エネルギー省 (DOE) 太陽エネルギー技術室 (SETO) を中心に技術開

発に対する補助を実施。ペロブスカイト太陽電池指定のプログラム（6,900 万ドル）に加え、太陽パネルのリサイクルや EoL 管理技術開発の補助を実施¹¹¹

- 中国では、具体的な予算は不明であるものの、第 14 次五カ年計画の現代エネルギーシステム計画において、ペロブスカイト太陽電池を重点開発テーマに位置付けている¹¹² 実際に、主要国政府はペロブスカイト太陽電池の研究開発を積極的に支援している
- m) 欧米等では、パネルメーカーだけでなく、装置メーカー、材料メーカー等、サプライチェーン全体を巻き込んだコンソーシアムを組成することにより、開発の効率化を図っている
 - 米国は、国内のペロブスカイト太陽電池の商業化（サプライチェーンと生産）を加速するため 2020 年にコンソーシアムである US-MAP を設立。国立再生可能エネルギー研究所が主導し、First solar や Tandem PV の他、製造技術を有する BlueDot Photonics 等が参加。研究開発装置や測定装置、パイロット生産設備を参加者で共有する等の取り組みを行い、研究開発や事業化に係る時間短縮・負担削減を目指している¹¹³
 - 欧州では、2019 年に European Perovskite Initiative (EPKI) が発足。Oxford PV や Saule 等のパネルメーカーのみでなく、AGFA (材料メーカー)、SMIT Thermal solutions (製造装置・製造技術) も参加¹¹⁴。また、2022 年に発足した PEPPERONI コンソーシアムでもパネルメーカーの Hanwha Q CELLS に加えて Mondragon Assembly (製造装置・製造技術)、YPAREX (材料メーカー) が参加¹¹⁵

[ルールメイキング動向]

- n) ペロブスカイトの性能測定、寿命・耐久性に関する測定については、国際基準がなく、各国の業界団体により議論が始まっている
 - PACT/US-MAP の有識者によると、米国では US-MAP からスピニアウトする形で PACT が 2021 年に設立された。PACT では、耐久性や寿命の測定に関する基準策定等が行われており、2024 年 7 月にはペロブスカイト太陽電池の耐久試験プロトコル Ver3 をリリースする等、耐久性評価の標準化にむけて精力的に取り組む。¹¹⁶
 - 中国の太陽光産業の業界団体である CPIA は、2023 年 1 月にペロブスカイト太陽電池の性能評価、耐久性評価の基準を策定するため、UtmoLight などのペロブスカイトのトッププレイヤーを招集しワーキンググループを立ち上げた。現状では議論が始まったばかりの状況である
 - 国際団体の IEC は 2019 年にペロブスカイト太陽電池等の性能評価に関する見解を発表。以来、議論は行われるものの具体的な成果は出ていない状況。2019 年、IEC は、「IEC TR 63228:2019」として、新しい PV 技術、特に OPV、DSC、および PSC デバイスの性能評価に関する見解を発表。時間の経過に伴うパフォーマンスの不安定性等を理由に、シリコンウェーハ太陽電池の文脈で開発された既存の IEC 60904 シリーズの規格の下での正確な測定は困難との見解を示した¹¹⁷
- o) 今後急増する太陽パネルの廃棄物について、各国は廃棄・リサイクル規制の導入を検討。
 - 米国では 2017 年に WA 州が太陽パネルのリサイクルを義務付ける法律を設定した以降

に州レベルの規制が拡大、連邦レベルでは EoL 管理やリサイクル技術の開発支援やパネルに使用される材料データベースの構築を推進^{118,119,120}

- 中国ではこれまで一般電化製品と同様の規制で太陽パネルの適切な廃棄やリサイクルを推進してきたが、太陽光パネルの廃棄物が急増する見通しから強制力をもつリサイクル体系を整備する方針を公表^{121,122}
- p) 中国は再エネ比率向上のため、2018年に太陽光と風力の出力制御上限目標を設定、その後出力制御の比率は低減したが、足元は再エネの施設増加と送配電インフラ補強の遅れから出力制御比率は再度増加傾向となっている¹²³
- q) 再エネ導入拡大に向けた施策として米中では蓄電池の設置を推進している。
 - 米国では連邦と州でそれぞれ推進施策が存在、蓄電池設置に関する法的緩和や蓄電池設置の収益性を高めるインセンティブ等が存在。¹²⁴再エネ導入に積極的なテキサス州やカリフォルニア州が蓄電池の導入を牽引している^{125,126}
 - 中国は2020年に再エネに対する蓄電池の併設義務化や蓄電池の収益性を高める政策を発表したことを受け各省で併設義務規制を実施、結果として早期に国の蓄電池導入目標(2025年30GW)を達成し追加目標(2025年78GW)に向けて取り組みを進める等蓄電池の導入が進行^{127,128}
- r) 結晶シリコン太陽電池におけるサプライチェーンの中国依存度の高さが問題となっており、各国は太陽光発電のサプライチェーンを国内で構築することで、中国リスクの回避と産業の振興を目指している
 - 太陽光発電のサプライチェーンについては、すべての工程で、中国への依存度が高い。(各工程の生産能力において、金属シリコンの75%以上、ポリシリコンの76%、ウエハの98%、太陽電池セルの78%、太陽光モジュールの70%を中国が占めている)¹²⁹
 - 米国は、セーフガードの発動や人権問題を理由とした輸入停止措置を実施し、中国製の太陽電池の国内流通を制限している。2022年8月には、バイデン政権がIRA法を成立させ、太陽光の国内生産に積極的に補助金を拠出し太陽光の製造投資はIRA成立前の約10倍に拡大。政府の補助金・インセンティブを含めると、欧州、中国、インドと比較して、米国が太陽電池の製造・設置コストが一番安い状況となっている^{130,131,132,133,134,135}
 - 欧州では、欧州内での製造サプライチェーンを構築するため、2022年12月、欧州太陽光発電産業同盟を設立。本同盟ではEU資金を用いた投資活動を行うなどして、2025年までに年間30GWの太陽電池の生産能力を欧州内で構築するという目標を掲げている。¹³⁶
 - 加えて、2023年2月、欧州委員会は米国のIRA法や中国の台頭に対抗するため、グリーン・ディール計画を発表。規制環境の改善、資金調達支援等によるネットゼロ産業の競争力強化を目指す方針が示された¹³⁷。同年3月、グリーンディール計画の具体的な取り組みの一つとして、ネットゼロ産業法案を提案。太陽光等を対象分野として、行政手続きの緩和等を行う方針で、2030年の太陽光生産量を域内需要の40%程度に拡大する目標を設定^{138,139,140}

- ▶ インドやオーストラリアでも欧米同様に太陽電池の国内製造を志向した政策を推進。インドは 2030 年に 150GW 程度のモジュール製造能力保有を見通し国内製造投資の優遇策を展開^{141,142,143}。オーストラリアは 2030 年に国内需要の 20%の生産量を目標に国内の技術開発や生産投資を支援^{144,145}。

[3] 大規模水素サプライチェーンの構築

[市場動向]

(水素需要動向)

a) 国際的なレポート：IEA レポート Net Zero Emission シナリオ (2021.5)

前提：2050年カーボンニュートラル（CN）からバックキャストして、需要・供給エネルギーの最適化を試算した結果、水電解で製造する水素に関して、より水素活用量を増大する必要があることを示唆。ただし、IEA レポートでは技術的なクリア（コスト）の点で検討が不十分であり、コスト80%削減には現状の技術の延長では到達しない。試算であるため、必ずしもではないが、将来的な新技術や大幅な大量生産技術などで、コストを大幅に下げると効果を検討する必要があるものの、現時点では世界的に見ても解決策を持つ国、研究機関、企業等は存在していないと思われる。しかしながら、カーボンニュートラル実現のためには、水素の利活用を大幅に増大させることが期待されている。

b) 2030年までの水素関連プロジェクトに関しては、最終投資決定していない場合も含めると計画が存在するプロジェクトの合計生産量は2022年比で50%増加。アンモニア等の水素ベース燃料は、GHGの排出削減が困難な分野の脱炭素化において重要な役割を担っており、今後の需要増加が見込まれる¹⁴⁶。

- IEAによると、2030年以降に低炭素水素の需要はブルー水素・グリーン水素ともに増加が予測されており、2030年の低炭素水素生産量は、計画中のプロジェクトも含めると、グリーン水素は欧州・豪州を中心に年間約2800万t、ブルー水素は欧州・米国を中心に年間約1000万tに達する見込み。ただし、Net Zero Emission by 2050シナリオにおける2030年の想定値に対しては、ブルー・グリーン共に未だギャップが存在する。
- 今後世界的に水素の需要増加が見込まれ、欧州のオランダやドイツは欧州内に加え、豪州・南米・アフリカから、韓国が豪州や米国から水素を輸入する計画を発表^{146,147}。
- EUは2023年の「ReFuelEU」において航空分野でのSAF使用義務付けを発表しており、それに伴う航空燃料（SAF）需要の増加など、新規用途での利用が拡大する見込み¹⁴⁶。
- 既存の水素需要の多くを占める化学産業においては、アンモニアやメタノール合成が主な用途であり¹⁴⁶、Yaraによる欧州内のアンモニア製造プラントで発生したCO₂をノルウェーに運搬し貯留する計画や、韓国のロッテファインケミカルによる水素SC構築への参画など、グレー水素からブルー水素への移行する動きが見られる
- 世界で稼働・計画中のブルー水素プロジェクトは、2022年10月時点のプロジェクト累計数に対し2023年には約1.1倍、グリーン水素プロジェクトは、約1.3倍に増加。ブルーアンモニアプロジェクトは、2021年10月時点のプロジェクト累計数に対し2022年には約1.9倍、グリーンアンモニアプロジェクトは、約2.6倍に増加。¹⁴⁸

(水素製造 市場動向)

- c) 中国の太陽光発電メーカーの水電解水素製造への参入 ←太陽光発電の利益が大きくないので、水素事業まで含め、付加価値をつけて、利益の大きいエネルギー販売をねらっているのではないか

米国では、新たに燃料電池メーカーの参入 ←サプライチェーンの需要側で水素製造と燃料電池による消費を連携させて大きなシステムとして販売するねらいか。

欧州では、再編が進んでいる ←製造量を増やすことによる経済性の向上をねらっているのではないか。

←製造からサプライチェーンの一气通貫を指向するプロジェクト実施の動向が見える。日本の地理的特殊性から、安価なエネルギー活用と供給（海外輸送）を踏まえた日本型のサプライチェーンの検討が先んじているので、優位性があると考えられる。ただし、製造ビジネスからサプライチェーンへ進出する狙いもあると思われ、注視が必要である。

- d) 2030年頃においては、グリーン水素の製造コスト低下により生産量増加が見込まれるものの、現時点では、ブルー水素の製造コストが低いため、ブルー水素の生産量の方が多い状況。2025年以降にはグリーン水素の電解装置のコスト削減や電力コストの低下により、製造単価の低減が見込まれ、利用が拡大する見通し¹⁴⁶

➤ IEAによると、2021年から2023年においては、世界的なインフレとエネルギー価格高騰の影響を受け、材料費・人件費・機器価格や資本コストの上昇により、電解水素生産にかかるコストが増加し、グリーン水素関連プロジェクトの成長停滞の要因となった¹⁴⁶。一方で、IRENAによると、量産化による水電解装置のコスト削減や再エネ電力のコストダウン、水素生成効率の向上等を前提に、2050年には、グリーン水素の製造単価は現状から80%の削減が見込まれる。¹⁴⁹

➤ ブルー水素は石油・ガス、化学等の他産業等の既存設備やサプライチェーンを活用できることから、北米や蘭・仏などの欧州の企業を中心に既にプロジェクトが稼働している。そのため、インフラ開発に係る投資が少なく、グリーン水素よりも直近でのコスト競争力が高いといえる。加えて、北米を中心に政府による資金支援の対象でもあることから、短期的に生産量は増加傾向にある¹⁴⁶。

➤ 米国のIRA法（Inflation Reduction Act）では水素製造に関するインセンティブを設定しており、グリーン水素に対し、単位水素あたりのCO₂排出量に応じて最大3USD/kg-H₂の税額控除を受けることが可能。ブルー水素においては、水素製造のインセンティブには非該当となるが、CO₂の分離・貯留に関する税額控除を受けることが可能。¹⁵⁰

- e) 世界的なESG投資への関心の高まりや水素関連技術の発展に伴い、水素関連スタートアップへの投資額が2021年および2022年に急増。一方、インフレに伴う金利上昇の影響を受け、2023年の投資額は前年から減少となる可能性が高い¹⁴⁶。

➤ 電解技術や水素ベース燃料に関する投資は米国を中心に行われており、燃料電池では中国での注目度が高い。電解技術に加え、天然ガスの主成分であるメタンの熱分解により水素を生成する技術を開発するスタートアップ企業も多くの資金を集めており、注目度

の高い分野といえる。

- **Hydrogen Concea**によると、水素関連での投資は欧州を中心に増加傾向であり、2023年の水素関連の投資は、2022年の2200億ドルから1.45倍となる3200億ドルに増加しているものの、FIDの獲得割合は10%以下に留まる。2030年のネットゼロエミッション実現に向けては、水素製造・インフラ整備・利用拡大全ての分野において、3800億ドルの追加投資が必要と推定。FID獲得においては、長期のオフテイク契約の締結や長期の政府資金の確保など、長期的かつ安定的に需要が見込め、収益の見通しが立つことが要件となる¹⁵¹。

(大規模水素 SC 構築 市場動向)

- f) 長距離の水素輸送における水素キャリアとしては、液化水素・LOHC・アンモニアが有望な選択肢とされ、各キャリアの利点を活かし、用途・地域・プロジェクト規模等に応じた活用方法が模索されている
 - 現時点で計画されているプロジェクトの8割はアンモニアを水素キャリアとしており、発電燃料等としての利用を想定。IEAの予測によると、2025年まではこの傾向が続き、アンモニアが主流と想定される。一方、2050年に向けては、天然ガス関連設備への投資減少に伴い、それらの設備を活用可能な液体水素や水素パイプラインに対する投資が増加する見込み¹⁵²。
- g) 各キャリアを用いた水素輸送に関するプロジェクトは、2020年以降から実証が開始されている¹⁴⁶。
 - アンモニアによる輸送は、2020年のサウジアラビアから日本への輸送に始まり、2022年にはサウジアラビアから韓国、アラブ首長国連邦からドイツへの輸送が、2023年にはサウジアラビアからインドや中国への輸送実証等が実施されている。
 - LOHCによる輸送は、2020年及び2022年にブルネイから日本への輸送実証が行われているほか、2023年5月に独CWP GlobalとHydrogenious LOHC TechnologiesがMoUを締結。LOHC技術を使用し、モロッコから欧州への500tの水素輸送を実証予定¹⁵³。
 - 液化水素による輸送では、2022年にオーストラリアから日本への水素輸送実証や、韓造船企業DSMEが液化水素輸送船の実証を実施している。
 - 今後は、2027年にENEOS・PetronasがLOHCをキャリアとし、マレーシアから日本への輸送を、2028年頃にENGIE・Shell・Vopak等がポルトガルからオランダのロッテルダムへの輸送の実証を計画している

(社会情勢)

- h) ロシア・ウクライナを受けた情勢変化として、戦争状態が継続しているが、ロシア産の化石燃料への依存を低減するための種々の検討が行われている。その中で、EUは、ウクライナ侵攻を受けて、2030年までにロシア産の化石燃料依存度の低減を目指した計画

「REPowerEU」を策定した(2022.5)。再生可能水素は、2030年までに1000万t製造、1000万t輸入と3.5倍に拡大する。

←パイプラインによるガス輸入一辺倒になるのではなく、LNGでの輸入を併用することが地政学リスクを低減する上で重要であることが再認識された。欧州での水素の国際取引においても、海運での輸出入が重要視されると考えられる。これにより、2050年における大規模水素サプライチェーンに関しても、複数の方式を有することが重要と考えられる。

【技術動向】

(水素キャリア全体)

- i) IRENAによると、輸送距離やスケールアップによるコストダウンの割合により、種々の水素サプライチェーンの適材適所が存在すると想定される。2050年にはアンモニアが水素キャリアとしてコスト競争力が高いと予測されるものの、個別の立地・既設等の条件や、ユーザーの要求圧力・純度等により競争力は変化し、LOHC・液化水素がコスト優位になるレンジが出現するとしている。試算によると、小規模、短距離・中距離で、MCHなどのLOHC、中規模・大規模の数km以下の比較的短距離で、液体水素、数千km以上の長距離で、アンモニア変換輸送という、適材適所の最適手法が存在する¹⁵⁴。
- ←試算条件には、既存設備の転用の可能性などは考慮されていないので、種々の条件での試算を積極的に実施し、種々の方法のメリットを主張していくことが重要である。また、エネルギーセキュリティの上からの複数のサプライチェーンの必要性も考慮することが重要である。特に、MCHに関しては、既存設備や既存プラントの転用の有効性を示して、積極的に試算をしてPRしていくことが重要と思われる。なお、試算に当たっては、製造・輸送・需要プロセス全体にわたった、ライフサイクルアセスメント的な観点での検討も重要と思われる。
- j) 現在有力とされる水素キャリアである液体水素・LOHC・アンモニアについては、それぞれにメリット・デメリットがあり、現状は各キャリアが横並びで検討されている¹⁵⁴。また、各キャリアのコスト構造を比較すると、液体水素では貯蔵タンクや液化に係るコストの割合が高く、LOHC・アンモニアにおいては、輸入先における水素への再変換コストの割合が高く¹⁵²、これらが普及に向けたボトルネックとなり得る。IEAの試算によると、輸送距離約3000km～4000kmの範囲ではアンモニアとLOHCのコストが拮抗しており、短距離ではLOHC、長距離ではアンモニアが優位となる。
- 液化水素は再ガス化のためのエネルギー消費が少ないというメリットがある一方、液化に多大なエネルギー供給が必要であることや輸送中のボイルオフの発生がデメリットとなる。
 - LOHCは貯蔵や取り扱いが容易であり、石油や化学プラント等の既存設備を活用することが可能である一方、キャリア単体重量あたりの水素貯蔵割合効率の低さやキャリア自体が化石燃料由来であることがデメリットとなる。
 - アンモニアは既に世界各地でアンモニアプラントとして大規模な生産・取引がされてお

り既存の設備を活用することが可能である一方、毒性の高さや、輸入先港においてクラッキング技術の開発が必要であることがデメリットとなる。

(液化水素関連技術)

- k) ボイルオフを低減する貯蔵システムやボイルオフガスの輸送船推進システムへの活用を進める等の技術開発が進められている。
- Shell とマクダーモット社の貯蔵事業部門 CB&I は、2022 年 3 月に、DOE の下、独自の真空断熱技術に基づき、最大 10 万 m³ のタンク設計を実施 (2021-2024) ¹⁵⁵。運搬船の設計にも展開され、ボイルオフ率を 1 日あたり 0.1%未満に抑えた容量 4 万 m³ の貯蔵タンクを開発。
 - 仏 TotalEnergy、船級協会ビューローベリタス (BV)、GTT、LMG マリンは、2023 年 4 月に、大型液体水素 (LH2) 運搬船の共同開発プロジェクトを開始¹⁵⁶。
 - 韓国の重工大手 HHI 及び造船会社 KSOE は、輸送中のボイルオフガスをハイブリッド推進システムに利用し、水素二元燃料エンジンと燃料電池を統合したシステムを提案。2027 年までに液化水素輸送船の実証を実施する見込み¹⁵⁷。
 - Linde 社は 2021 年 7 月に、米テキサス州で 30TPD の液化水素プラントの運転開始¹⁵⁸。2023 年 4 月には、ノルウェーのフェリー運営会社 Norled が推進する液体水素を燃料とするフェリー「MF Hydra」に向けて船上の水素システム提供と、最終段階の性能試験実施を発表¹⁵⁹。
 - Air Liquide 社、2022 年 5 月に米ネバダ州で 30TPD の液化水素プラントの運転開始¹⁶⁰。2023 年 2 月に仏 TotalEnergy と大型車用向け水素ステーションネットワーク構築のための合弁会社設立を発表¹⁶¹。
 - 2024 年 2 月、商船三井が豪エネルギー会社 WOODSIDE、韓国造船 HD KSOE と韓国船社 HYUNDAI GLOVIS が進める液化水素輸送共同検討に参画¹⁶²
 - 2024 年 5 月、現代グループとシェルは液化水素運搬船開発のための技術共同開発協約締結を発表し、2030 年の商用化を目標に開発を推進¹⁶³
 - LATTICE テクノロジー社は、オーストラリア産の再生可能水素を韓国に輸出するため、輸出入ターミナルと大型タンカーを備えた輸送プロジェクトを推進¹⁶⁴
 - Air Liquide は 100 tpd の液化機を開発中。Large scale hydrogen export と言っている。輸出向けも考えている模様¹⁶⁵。なお Air Liquide が DOE の"LIQUID HYDROGEN TECHNOLOGIES WORKSHOP"(2022 年 2 月)で、液化効率について下記のように発言している¹⁶⁶。
"1-10 tpd capacity liquefaction plants having a >12 kWh/kg efficiency, while plants with capacity greater than 100 tpd have about 6-7 kWh/kg efficiency"
(川崎重工業が GI 基金で開発中なのは 50 TPD。現在、キャパアップを検討中と思われる。)

(LOHC 関連技術)

- l) LOHC 輸送技術においては、スケールアップと脱水素化におけるエネルギーコストがボトルネックであり、小規模なプラントにおいて実証が進められている状況。各国が進める大規模な水素ハブ拠点の構築における安全な水素の保管と大量輸送実現を目的に、LOHC 輸送船の開発など主要プレイヤー間の提携の動きがみられる。
- Vopak (蘭タンクメーカー)、Hydrogenious (独, DBT をキャリアとする有機ハイドライド法の会社) が JV を設立。LOHC 事業の実施を計画¹⁶⁷。
 - Hydrogenious は LOHC による水素ステーションへの水素供給を実証中 (期間は 2020-2022) ¹⁶⁸
また、英・独の各海運会社と提携し、輸入場所における大規模な水素ハブ拠点構築を目的として、LOHC 輸送船の実証に向けた技術開発を推進。
 - 2023 年 1 月に、千代田化工は、スコットランドからロッテルダムに向けて LOHC による水素運搬実証を行う LHyTS プロジェクトに参画することを発表。千代田は LOHC として MCH を使用し、国際水素サプライチェーンの実証を目的とする¹⁶⁹。ロッテルダム港は欧州の水素ハブとして、北西ヨーロッパの各産業にパイプラインを通じて分配することを目的に掲げている。
 - 2023 年 1 月に、アブダビ-アムステルダム間の水素サプライチェーン検討に係る MoU の締結を発表。水素キャリアは液化水素または LOHC が候補とされている¹⁷⁰。
- m) LOHC には GI 基金で採用している MCH (メチルシクロヘキサン) をキャリア物質とする企業に加え、独 Hydrogenius のようにベンジルトルエンをキャリア物質とするプロジェクトも存在。ただし、ベンジルトルエンは特にスケールアップが課題であり、小規模プラントにおいて、脱水素化における触媒開発や運転条件の最適化等の検討が進められている状況。LOHC となる物質は、ライセンスを所有する企業の意向にも依存し、プレイヤーの多いアンモニアと比べて競争性のある技術開発が起こりにくい。

(NH₃ 関連技術)

- n) 水素キャリアとしてのアンモニア利用に関するプロジェクトは主に欧州にて進められている¹⁷¹
- 「Centralized model」に関して、触媒開発等さらなる効率化へ向けた取り組みが求められているものの、既存技術による SC 確立が可能
 - 「Decentralized model」に関して、オンサイトでのクラッキングが可能な新規触媒開発や毒性の高いアンモニアのハンドリング等課題が存在
 - 課題の少なさを背景に Centralized model が先行して進む可能性が高い一方、革新技術の適用により Decentralized model がコスト優位になる可能性も存在
- o) アンモニアを水素キャリアとして利用する場合、アンモニアを水素に変換するアンモニアクラッキング工程および精製工程が必要
- アンモニアクラッキング工程には、熱触媒、プラズマ、電気分解、光触媒等の技術方式

が存在し、うち熱触媒技術は基礎研究-実証試験まで様々な検証がなされている¹⁷²

- ✓ 従来の熱触媒に関して、Ni/Co/Fe 系触媒、テニウム(Ru)系触媒は高転化率を達成する温度が高温であるために、より低温で高い活性を有する触媒材料が求められている
- ✓ 新規な熱触媒開発に関して、遷移金属+アミド/イミド系触媒等、従来熱触媒と比較し高活性な触媒材料の研究が進められている
- ✓ PSA 法に関する取り組みのうち、Haldor Topsøe 社の H2Retake process は最大水素純度が 99.999%である¹⁷³
- ✓ 膜分離法に関する取り組みのうち、オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO) の金属製膜 (MMT, Metal Membrane Technology) 技術はクラッキング後の混合ガスから、FCEV グレードの高純度水素を生成可能であり、トヨタ燃料電池車 MIRAI のロードテストを実施した実績を保有¹⁷⁴

➤

(水素発電技術(専焼/混焼))

- p) 水素発電においては、エネルギー需給における調整力確保を目的とし、ガスタービンの単体実証に加え、小型のガスタービンを用いたグリーン水素との連携含めた VC 全体での実証が進められている。一方、実用化に向けては、大型ガスタービンの試験で必要となる大量の水素供給がボトルネックであり、安価な水素原料の調達が現状難しいことから、実現は 2030 年以降となる見込み¹⁷⁵。
- GE は既存の大規模 GT で 50%まで混焼可能であることを確認しており¹⁷⁶、DOE の支援の下、2030 年までの 100%水素燃焼技術の確立を推進¹⁷⁷。2023 年 11 月には、米国フロリダ州の Duke Energy 向けにグリーン水素の生産・貯蔵・利用を行う発電システムの開発を発表¹⁷⁸。
 - MHI グループ (MHIET) は、2023 年 10 月に単気筒エンジンの試験により水素混合物の安定した燃焼を確認。50vol%までの水素混合量でも定格出力を失うことなく安定した燃焼可能であることを実証¹⁷⁹。
- q) アンモニア混焼は石炭火力発電のリプレース手法として、日本や韓国で検討されているが、欧州を中心とした環境団体からは、石炭火力の延命措置になることや GHG 排出削減効果が低いことから批判の声も挙がっている。2023 年 5 月に、フィンランドの環境団体により、アンモニア混焼に起因する NOx の増加が PM2.5 等の大気汚染増加につながると指摘¹⁸⁰。本指摘に対し、JERA によれば、排煙脱硝装置が設置されており、排出される NOx 量はコントロールされており問題ないと主張もある¹⁸¹。

[国際動向]

- r) EU における 2023 年 3 月のグリーンディール産業計画の施行や、ドイツにおける 2023 年 7 月の水素戦略の改定により、欧州域内外での生産を促進するなど、水素需要の増加に備え、水素確保に向けた取り組みを推進。

- EU のグリーンディール産業計画は GHG 排出ネットゼロの実現に貢献する産業に対しする支援を提供するものであり、「ネットゼロ産業法案」として、水素製造における電解槽含めたネットゼロ実現に貢献する技術の EU 域内での生産能力拡大を支援する¹⁸²。
 - ドイツは、「国家水素戦略」の改定において、国内での水素生産能力拡大に加え、国外からの水素輸入にも取り組むことを発表し、特に水素輸入においては、域外での水素生産投資を促進するための「H2Global」の取り組みを開始した¹⁸³。
- s) 低炭素水素に関する政府支援として、欧米では低炭素水素の製造に対するインセンティブを付与。米国に加え、欧州でもインセンティブが具体化。
- 米国では、IRA 法の一環として、水素製造の炭素原単位に基づき、0.6～3 米ドル/kg H₂ の税額控除の提供を開始¹⁸⁴。
 - 欧州では、2023 年 2 月に発表したグリーンディール産業計画の一環として、グリーン水素の製造を支援するための競争的入札を 2023 年秋に実施予定。今後の支援額として 400 億ユーロ程度（約 5 兆 6 千億円）が予定されている¹⁸²¹⁸²。
- t) 水素 SC 構築に向けては、パイプラインの整備や水素ハブとしてのモデル都市の整備が進められており、欧州・中国に加え、米国でもモデル都市の選定が具体化。
- 欧州では、2022 年 11 月に、水素を含む革新的技術開発を目指す大規模プロジェクトの支援を目的として、30 億ユーロの拠出を発表。欧州のガスインフラ事業者 33 社が参加する欧州水素バックボーン・イニシアチブは、天然ガスのパイプラインを再利用し、2030 年までに 3.3 万 km のパイプライン・ネットワーク構築を構想¹⁸⁵。
 - 米国では、2023 年 10 月に 7 つの「地域クリーン水素ハブ（H2Hubs）」候補を選定。IRA 法を財源とし、合計で 70 億米ドル（約 1 兆円）の拠出を発表。補助金獲得企業による投資も合わせ、全体で 500 億米ドル（約 7.5 兆円）の経済効果を見込む¹⁸⁶。DOE では天然ガスパイプラインにおける水素混合する際の技術的障壁に対して検討を行う HyBlend プロジェクトを推進中¹⁸⁷。
 - 中国では、2021 年に燃料電池車の普及に向けたモデル都市群を選定し、モデル都市に対しては約 340 億円の助成を実施。
- u) 各国は、国家戦略として水素関連技術に関する研究開発プロジェクトを継続して推進中。米国 DOE や欧州では、社会実装のための GI 基金に相当する規模の PJ が開始（2021.11～）しており、中国では、基礎技術に関する大型プロジェクトが実施されている
- ←日本が先行しており、社会実装への優位性を持つと考えられるが、世界の動きを注視することも重要。
- 欧州では、Innovation Fund、Horizon Europe Cluster 5、IPCEI 等様々な技術開発支援が進められている
 - ✓ Innovation Fund において、100MW を超える大型の電解槽建設や要素開発、新規水素製造プロセスおよび水素利用（合成燃料、製鉄）等の検証が進められている

- ✓ Horizon Europe Cluster 5（予算：2兆円）の中で、低炭素水素を含めた研究開発を2021～2027で実施中。
- ✓ IPCEIにおいて、複数の加盟国が共同で実施する「欧州共通利益に適合する重要プロジェクト（IPCEI）」が承認されており、水素SCに関する複数技術領域の技術開発を支援¹⁸⁹
- ✓ EUのうち、ドイツのTransHyDEプロジェクトにおいて、液化水素、LOHC、アンモニア等の水素輸送方法の研究・実証が進められている¹⁹⁰
- 米国では、IRAに基づく技術開発支援が進められている
 - ✓ OCED（Office of Clean Energy Demonstration）の予算9600億円により、2022年から5年程度、水素製造を含めたインフラハブの4カ所の実証事業を実施。社会実装を目指し、2023年11月時点で公募プロセスが進行中。また、DOEにおいては、ShellやCB&I、NASA等と共に、大型の液化水素の貯蔵容器の開発を推進
 - ✓ 米国DOEは2024年3月13日、インフラ投資雇用法とインフレ抑制法（IRA）に基づき、クリーン水素の6つの領域で計52の支援プロジェクトを選定しており、特に低コスト・高生産量の電解槽の技術開発に大規模な予算を投じている¹⁹¹
- 中国では、2019年に国家科学技術部による国家重点研究開発「再エネと水素エネルギー技術」の枠組みにおいて、基礎技術に関する大型プロジェクトを実施。
- 韓国では、2023年1月に「第10次エネルギー需給計画」において、発電用途での水素活用拡大を発表。技術開発として、2025年までにガスタービンでの水素混焼50%、石炭発電所でのアンモニア混焼20%達成を目標に推進。加えて、韓国が強みを持つ造船事業においては、世界での競争力獲得のため、燃料のアンモニアや水素化に取り組んでいる¹⁹²。また、2024年3月、「K-Shipbuilding Next Generation Initiative」において、今後5年間で造船業界に9兆ウォンを投資する計画を発表され、アンモニア船や液化水素船のフラグシッププロジェクトが2024年以降実施される見込み¹⁹³

[ルールメイキング動向]

（水素の認証に関する動向）

- v) 各国において、LCA分析に基づく単位水素当たりの基準を達成した水素に認証を与える動きが進みつつある。一方で、各国の認証制度における相違点は市場の細分化につながる可能性があることから、G7やG20などの政府間フォーラムにおいて、相互承認に向けて取り組みが始まっている¹⁹⁴。
 - 欧州委員会を中心とした認証機関CertifHyによる認証や、ドイツ・スペインなど各国の基準に基づく認証を取得した企業も増加している¹⁹⁵¹⁹⁶。
 - 各国で定義の異なるグリーン水素に対し、欧州委員会は2023年6月にグリーン水素の要件定義に関する委任規則を発表、7月に施行している¹⁹⁷。
 - 水素に関する認証として、CertifHyでは、生成された水素が、化石燃料と比較して60%以上のGHG削減効果を有していれば、グリーン水素製造認証書を発行することが

可能¹⁹⁸。

- 2023年1月時点において、OECDの会合では、世界各国で複数の水素認証制度が乱立しており、CO₂排出原単位の基準も異なるとの指摘があり、水素サプライチェーン全体を通じた認証制度設計作業が必要との言及がある¹⁹⁹。
- 2023年12月に開催されたCOP28において、「水素ハイレベルラウンドテーブル」にて世界各国における水素認証制度の統一の必要性が議論され、「再生可能かつ低炭素な水素および水素派生物の認証制度の相互承認にかかるCOP28意向宣言」が発表された

200

(標準化・規格化に関する動向)

- w) 水素輸送技術に関する標準化においては、ISO TC197（水素技術）において18件の国際規格を策定済みであり、現在18件の規格を策定中。2022年からSC1（Subcommittee 1）を設置し、FCVや水素ステーションに加えて、大量輸送・貯蔵、サプライチェーン、商用車、鉄道、船、航空機等に係る水素関連テーマを取り扱う²⁰¹。
- x) 水素タービンに関する標準化においては、ISO TC192（ガスタービン）の中で検討が進められており、ISO TC 192では18件の国際規格を策定済み、現在3件の規格を策定中²⁰²。

[4] 再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造

■市場の変化

●市場規模と主要企業：2022年の世界の水電解市場は1.2GW(5.2億USD、571億円)、2023年で2.0GW(8.3億USD、915億円)と60%程度成長。2030年以降のGI基金における推定値毎年88GW規模と比べると、数十分の一程度で、市場規模はまだ小さい。

2023年の最大の製造企業は、Peric Hydrogen Technology(中国、アルカリ)で、277MW規模、Nel Hydrogen(ノルウェー、PEM)、Longi Green Energy Technology(中国、アルカリ)、Sangrow Power Supply(中国、アルカリ)、Hydrogen Pro(ノルウェー、PEM)、Plug Power(米、PEM)などが続いている。

日本は、Kobelco Eco-Solutions(神鋼環境ソリューション)が4.5MW規模、Toshiba(東芝)が、3.8MW規模、で、世界で20位台後半

●水電解装置価格の低減

アルカリ型：中国プレイヤーの有識者、QY researchのアナリストによると、中国プレイヤーの水電解装置の設備コスト(補機等を含める、1MW)は、現在、1,600-1,800元/kW(3.2-3.6万円/kW)となっている。2022年時点の設備コストは、2,000-2,200元/kW(4.0-4.4万円/kW)であり、更なる改善を実現している。設備コスト低減の主な理由としては、膜技術等の改善によるセルコストの低減、量産技術の向上による自動化の推進、ニッケル等の原材料調達価格の市況の変化の3つである。特に膜技術等の改善によるセルコストの削減(45%程度の寄与)、量産技術の向上(30%程度の寄与)が大きく寄与している。中国プレイヤーの有識者によると、中国プレイヤーは2030年までに5GWで1,000元/kW(2.0万円/kW、1MW換算で2.1万円)を目指している模様である。

一方、欧州プレイヤーの設備コスト(補機等を含める、1MW)、現在、500€(6.5万円)/kWとなっている。2000年頃からの進化は10%程度の低減にとどまる。設備コスト低減の主な理由は、量産効果、自動化によるもので、技術的なブレークスルーは見られていない。欧州プレイヤーは2030年までにEUの定めた目標に沿い、400€(5.2万円)/kWを達成することを目指している。欧州プレイヤーは中国プレイヤーと比較して価格は高いものの、イリジウムを含む高価な触媒(Activated coating)を使用する等して寿命が長い。(欧州プレイヤー：約24年、中国プレイヤー：約6年)

以上を踏めると、アルカリ型に関しては、一見中国プレイヤーの設備コストがかなり低く、GIの2030年目標を凌ぐ水準にあるように思えるが、価格を抑制する代わりに、欧州プレイヤーと比較して寿命が短い。今後、中国プレイヤーが現在の価格でどれだけ寿命等の品質改善を進めていくか注視が必要である。

主な理由は①自動化等の量産効果、②膜の薄層化等の技術の向上による。欧州プレイヤーは、EUの2030年目標として、5MWの場合で400€/kW(5.2万円、1MW換算で6.3万円)を目標と

している。電極材料に使用している高価なイリジウムの使用量を現在の 10%程度に減らし、安価な代替材を導入することで達成する方針である。

一方で、中国プレイヤーは依然として、膜等のキーパーツの内製化に苦戦しており、出荷実績がほとんどない。

EU 目標が定める 2030 年の目標 (500€/kW、6.5 万円) は GI 基金の 2030 年目標 (6.5 万円 /kW) に近い水準である。今後も、欧州プレイヤーの動向を注視する必要がある

■国際的なレポート：IRENA レポート(2023、World Energy Transition Outlook 2023 1.5°C Pathway)など

GI 基金では、2050 年に 2640GW の水電解装置の設備容量を想定している (IEA Energy Technology Perspective 2020 Faster Innovation Case) が、IRENA-1.5°C Scenario では、2050 年に 2 倍以上の 5722GW の水電解装置の普及を想定している。この値は、IEA-NZE (Net Zero Emission) の 3670GW よりもさらに増加している。IRENA-1.5°C Scenario と IEA-NZE は、共に、2050 年カーボンニュートラル (CN) からバックキャストして、需要・供給エネルギーの最適化を試算した結果、世界のカーボンニュートラルを達成するためには、水電解水素を用いた水素活用量を大幅に増大する必要があることを示唆した結果となっている。

IEA レポートでは、コストを現状の 80%削減を仮定して、大幅な普及を想定している。2-3 年前の段階では、技術的な観点から、コスト 80%削減の見通しはつきづらかったものの、例えば、中国プレイヤーは既に 3 万円台/kW まで設備コストを低減しており、依然よりは、現実感が高まっている。

■技術面改善の動向：水電解効率

アルカリ型：2018 年時点で、5kWh/Nm³ であったが、現在、4.3-4.4kWh/Nm³ 程度まで改善されてきており、理論値の 2.9kWh/Nm³ を目指して技術開発が進むと思われる。

中国の Longi Hydrogen や Cockerill Jingli が膜や電極の改善により、昨年より約 0.3 kWh/Nm³ 改善し、4.3-4.4kWh/Nm³ (ピーク時測定、制御装置等で使用する電力を含む) に到達している。Cockerill Jingli の有識者によると 2030 年には 4.3kWh/Nm³ を目指している。

ただし、実際の稼働で、上記の水電解効率の値が維持できる期間は短いこと、既載の安価な設備コストと上記の値を両立させている製品は存在しないとの欧州プレイヤーのコメントには留意が必要である

一方、欧州プレイヤーは、現状 4.4-4.5kWh/Nm³ (ピーク時測定、制御装置等で使用する電力を含む) であり、昨年度からの進化はあまり見られない。2030 年に向けては EU 目標と同じ水準の 4.3 kWh/Nm³ の達成を目指している。設備コストの低減との両立が求められていることもあり、目標達成に向けては、触媒に使用されている貴金属の代替材の開発が大きな技術課題となっている

以上を踏まえると、欧州プレイヤーの研究開発は想定より早いペースで進んでいる可能性がある。日本としても、膜の薄層化等の技術開発を一層強化する必要がある

■企業の考え方・動き（ヒヤリング調査に基づく）

中国企業動向：

中国は 2022 年末からの 1 年間で、設備コスト、水電解効率を着実に改善してきている

➤ 設備コスト

- ✓ アルカリ型（1MW）： 2,000-2,200 元/kW（4.0-4.4 万円/kW）⇒ 1,600-1,800 元（3.2-3.6 万円/kW）
- ✓ アルカリ型（5MW）： 2,000 元/kW（4.0 万円/kW）⇒ 1,400-1800 元/kW(2.8 万円/kW-3.6 万円/kW)
- ✓ PEM 型：市場受容レベル未達のため、具体的な製品がない

➤ 設備コスト低減の背景

- ✓ 技術の向上：2022 年からのコスト削減分の 45%に該当。膜等の性能向上により、電流密度を改善し、セルコスト削減を実現
- ✓ 量産化によるコストダウン：2022 年からのコスト削減分の 30%に該当。2022 年の自動化率は 5%、2023 年では 60%にまで自動化が進んだ
- ✓ 原材料の取引価格の低下：2022 年からのコスト削減分の 25%に該当。原材料のニッケルのコストが約 13%低下した

➤ 水電解効率（ピーク値、冷却装置や制御装置の電力を含む）

- ✓ アルカリ型（Longi）： 4.6 kWh/Nm³（2022）⇒ 4.3 kWh/Nm³(2023)
- ✓ PEM 型：市場受容レベル未達のため、具体的な製品がない
- ✓ アルカリ型の進化の理由は、膜に関する技術改善による進化

➤ 水素の出力圧は 5MW で 2MPa の水準。測定法に関する基準がないため、欧州等との比較は困難

中国プレイヤーは、アルカリ型ではコスト面、水電解効率で他国をリードしており、高い競争力を有するとの認識

PEM 型については、昨年同様、開発が他国より遅れており、膜などのキーパーツは欧州部品を用いているため、コスト競争力も高くない

今後は、国内外でシェア拡大に努め、量産効果による更なるコスト競争力強化に努める方針である

■主要国・共同体の施策

米国政府/欧州： 米国、欧州では、水電解装置に関して、GI 基金の規模を超える予算を編成。また、研究開発支援だけでなく、生産設備に関する初期投資の支援、水電解装置の需要を喚起する施策にも多額の支援を行っている

米国政府：超党派インフラ投資計画法において、水電解装置の開発等に 5 年間で約 1,540 億円を投入する計画である。また、IRA 法において、水電解装置の製造について、投資額の 3 割を税控除する制度を整備した。さらに、超党派インフラ投資計画法に基づき、水素ハブの設置に 5 年間で約 1 兆,320 億円を投じる計画である

欧州：EU は、Horizon「クリーン水素パートナーシップ」（2023 年に約 84 億円を水素製造の開発支援に充当）や IPCEI（水電解装置関連で 20PJ を支援。金額は不明）という枠組みの中で水電解装置の研究開発を支援している。また、ドイツ政府が単独で、「H2Giga」プロジェクトを推進している（水電解の量産化技術に 5 年間で約 840 億円）。現在審議しているネットゼロ産業法において、水電解装置に関する域内投資に対するインセンティブを検討している。加えて、欧州水素銀行を通じて、2022 年、約 1,202 億円を域内の水素生産 PJ 投じ、水電解装置の実装、需要喚起を行っている

主要プレイヤー：主要プレイヤーは、政府の強力な支援を背景に、2025 年までに年間生産量を 1GW を超える規模に拡大する計画を発表している。国内外でシェアを拡大し、量産効果を用いて高いコスト競争力を獲得することが狙い

■社会情勢

ロシア・ウクライナを受けた情勢変化。

EU は、ウクライナ侵攻を受けて、2030 年までにロシア産の化石燃料依存度の低減を目指した計画「REPowerEU」を策定(2022.5)。再生可能水素は、2030 年までに 1000 万トン製造、1000 万トン輸入と 3.5 倍に拡大する。予算 260 億円

■PFAS 規制

2023 年 2 月に欧州化学物質庁が PFAS 規制に関する規則案を公表。本規則案では PFAS の使用を全面的に規制する内容となっており、PEM 型に使用されている Nafion も対象となっている。代替品の実現が難しい場合、5～12 年の猶予期間が与えられるが、今回の規則案では、水電解装置での利用は猶予期間の対象となっておらず、長年 PEM 型で使用されてきた Nafion に対して、規制がなされる可能性が高まっている。2021 年に東レが発表した「炭化水素系電解質膜」は PFAS フリーの製品である。

(結論)

水電解装置の市場は、2023 年に年 2GW を突破した。2030 年以降に想定される年 88GW 規模に比べると、まだ、市場はまだ小さいものの、足元では、年成長率 60%で、生産量を増やしている。また、2050 年のカーボンニュートラル実現のためには、水電解による水素製造にきわめて大きな期待がかかっており、大量普及が想定される。

しかしながら、市場の大部分を占めるアルカリ型において、中国プレイヤーが市場を席捲している。特に設備コストは他国より圧倒的に安い水準となっている。中国プレイヤーは、膜技術の改善等により、直近1年間でも10%以上の設備コストの低下に成功している。ただし、安価な分、寿命は欧州プレイヤーの1/4と短く、水電解効率の劣化も早いとの指摘がある。今後は、寿命、水電解効率の劣化速度についても注視が必要である

一方、PEM型に関しては、膜等に使用されるNafionがPFAS規制の対象となる可能性が高まっている中で、PFAS-freeの膜技術を有する日本企業（東レ）の強みが生かしやすい環境となっている。ただし、欧州プレイヤーが、膜の薄層化に成功するなど、想定より早いペースで改善を進めている。日本としても中国が得意とするアルカリ型の代替を狙い、膜等のキーパーツの開発強化を一層進める必要がある。

中長期的な観点では、2030年以降、アルカリ型、PEM型の脅威となり得るSOEC、AEM型の研究開発の強化を合わせて検討することも重要である

[5] 製鉄プロセスにおける水素活用

[市場動向]

- a) 粗鋼生産量については、2021年の約19億トンに対し、持続可能な開発シナリオ（SDS）²⁰³において将来20億トン/年で維持されると予測されており、産業部門の中で最もCO₂を排出する業種であることから、低炭素化に向けて需要側、供給側双方で急速に対応が進められ、足元の予測では低炭素鉄鋼製品（以下グリーンスチール）は2030年で市場の5～25%を占める見通し
- IEA レポート、“Energy Technology Perspectives 2020”（以下 ETP2020）では SDS では、建設資材削減、加工時ロスの削減など資源の利用効率が高まることで、粗鋼生産量は現状同等の約20億トン/年で維持される見通しで、2070年に向け、中国の粗鋼生産量の減少分が、インドの増加分で相殺するとしており、一方、STEPS（公表政策シナリオ）では約28億トン/年に増大するとしている（最新の ETP2023 でも見通しに変更なし²⁰⁴）
 - グリーンスチールに関しては、2030年までにニア・ゼロエミッション・スチールの生産量は年間1億トン～5億トン（世界の生産の5～25%）と見込まれており²⁰⁵、GI基金の社会実装計画を策定した時点（ETP2020）より増加・前倒しの傾向
 - SSAB は2026年に130万トンの水素直接還元鉄を製造する計画であり、これに先駆け、化石燃料を使用しない鉄鋼製品の供給をボルボやメルセデスベンツに行うと発表しており^{206,207}、SSAB 以外にも欧州において水素 DRI の計画が2025～2030年において複数存在^{208,209}、また、日本製鉄、神戸製鋼、JFE スチールもグリーンスチールの供給を開始²¹⁰
- b) グリーンスチールの購入を表明する企業は増加傾向にあり、主要顧客が調達先に対してCO₂排出量低減目標の設定、および長期での実質ゼロ実現を目指すよう求めるなど、グリーンスチール調達に向けた動きが表出している
- IEA の ETP2023 によると低排出鉄鋼の購入をコミットする企業は2022年に対前年比で倍増した。またコミットした企業の業種は輸送機器、エネルギー、家電製品など多岐にわたっている²
 - 確認できる限り、グリーンスチールのオフテイク協定/供給契約の発表は2021年に6件^{211,212,213,214,215,216}、2022年に8件^{217,218,219,220,221,222,223,224}、2023年には14件^{225,226,227,228,229,230,231,232,233,234,235,236,237}にまで拡大している。また、サプライチェーン構築や採用に向けた研究開発などのグリーンスチール導入実現に向けたパートナーシップ、および資本参加の発表が2021年に2件^{238,239}、2022年に7件^{240,241,242,243,244,245,246}、2023年に11件^{226,247,248,249,250,251,252,253,254,255,256,257}に増加している。近年は、自動車業界にとどまらず、機械、建材などの他用途でも、市場創出に向けた需給協調の動きが活発化している。国内企業では日産がグリーンスチールの採用を表明、トヨタ、ホンダが主要部品メーカーにCO₂排出量削減を求めている

- ◇ ドイツフォルクスワーゲンはザルツギッターと 2025 年末からのグリーンスチール供給に関する覚書を締結²²⁷
 - ◇ 米 Siemens はドイツ Klöckner & Co. から 40 トンのグリーンスチールを調達し、開閉装置および配電システムの製造においてテスト予定²³⁰
 - ◇ スペイン GRI Renewable Industries はドイツ風力タービン向けのグリーンスチール実用化に向けて提携²³¹
 - ◇ 国内では、日産が神戸製鋼所のグリーンスチール「Kobenable Premier」を順次、採用していくと発表²²¹、トヨタは主要部品メーカーに対し CO₂ 排出量を前年比 3%減らすよう²⁵⁸、本田は 2019 年比毎年 4%減らし 2050 年に実質ゼロにするように求めている²⁵⁹
- c) 国際的に合意されたグリーンスチールの定義は未整備であるものの、鉄鋼メーカー各社はマスバランス方式の適用や、CO₂ 排出量の多い高炉法プロセスをベンチマークとして、CO₂ 排出量の差を根拠にグリーンスチールを上市、もしくは上市予定であり、CO₂ 削減率は 50~100%まで幅がある
- マスバランス方式では設備や操業方法の転換などによる CO₂ 排出の削減分を第三者機関の認証を受けて販売量の一部に割り当てることでグリーンスチールとしての販売を可能にしている
 - ◇ 神戸製鋼所がマスバランス方式を適用して上市したグリーンスチールは CO₂ 排出削減率 50%と 100%の製品が提供されている²⁶⁰
 - ◇ ArcelorMittal は各種取り組みでの CO₂削減効果を、同一事業所内で生産する鉄鋼製品に割り当て、第三者機関による削減量の認定を示す「XCarb™グリーンスチール証書」を付して販売²⁶¹
 - マスバランス方式でない各社独自のグリーンスチールに関しては、詳しい算出方法は公開されていないが、CO₂ 排出量の大きい従来型の高炉法をベンチマークとして、CO₂ 排出量の差を削減量として謳ってグリーンスチールとして販売しているとみられる
 - ◇ H2 グリーンスチール社が上市予定のグリーンスチールは従来法に比べ CO₂ 排出削減率 95%であるとしている²¹²
 - ◇ ザルツギッターが 2021 年よりミーレ、BSH に供給を開始したグリーンスチールはカーボンフットプリント 66%削減とのこと²¹⁴
 - ◇ 河北鋼鉄集団が BMW に 2023 年中頃から提供するグリーンスチールは電炉と再生可能エネルギーを組み合わせることで従来法に比べ CO₂ 排出削減率 95%であるとしている²⁴⁹
 - ◇ 宝鋼集団が 2022 年 9 月に上市した自動車向けグリーンスチールは電炉と再生可能エネルギーを組み合わせる等して CO₂ 排出削減率 50%以上としている²²⁰

[技術開発]

- d) 日本の主要な鉄鋼メーカーは、2050 年にカーボンニュートラルを目指すロードマップを発

表しており、中期目標として 2030 年までに 20~30 %程度の GHG 排出削減を目指すことを表明、また、GHG 削減策としては、省エネ・効率化に加え、水素（または天然ガス）を利用した直接還元（DRI）や CCUS 活用を挙げている

- 日本製鉄は 2030 年までに GHG 排出を 2013 年比 30%削減し、2050 年までにカーボンニュートラルを目指しており、達成のロードマップにおいて、大型電炉での高級鋼製造、100%水素直接還元プロセス、高炉水素還元の 3 つの超革新的技術、および CCUS 技術の開発などの外部条件によって目標を達成するとしている²⁶²
 - JFE スチールは 2030 年までに鉄鋼事業における GHG 排出を 2013 年比 30%削減し、2050 年までにカーボンニュートラルを目指しており、施策として、カーボンリサイクル高炉+CCU（Carbon dioxide Capture and Utilization）を軸とした超革新的技術開発への挑戦、および水素製鉄（直接還元）の技術開発、電気炉技術の最大活用を挙げている²⁶³
 - 神戸製鋼所は生産プロセスにおける CO₂削減目標を 2030 年に 2013 年度比 30~40%とし、2050 年にカーボンニュートラルを目指しており、カーボンニュートラルに向けたロードマップ内で主な活動内容として、省エネ技術、スクラップ活用拡大、高炉 CO₂排出低減の独自ソリューション（MIDREX プロセスで製造した HBI の高炉装入）、CCUS、高炉での水素還元製鉄の実用化等を挙げている²⁶⁴
- e) 世界の主要な鉄鋼メーカーも、日系鉄鋼メーカー同様、2050 年にカーボンニュートラルを目指すロードマップを発表しており、中期目標として 2030 年までの GHG 排出削減を目指すことを表明、GHG 削減策としても、省エネ・効率化に加え、水素（または天然ガス）を利用した直接還元（DRI）や CCUS 活用を挙げている
- 中国宝武鋼鉄集団は、グループの CO₂排出量を 2023 年をピークとし、その後 2035 年までに 30%削減し、2050 年までにカーボンニュートラル達成を目指しており、再生可能エネルギー利用増、水素部門の強化、全体のエネルギー消費を厳格に管理し、上流と下流の協力強化等を実施するとしている²⁶⁵
 - ルクセンブルク ArcelorMittal 社は 2030 年までに GHG 排出を 25%削減し、2050 年までにカーボンニュートラルを目指す。2030 年までに 100 億ドルの投資を行い、高炉から DRI 等への製鉄法の転換、エネルギーの転換（CCUS,水素、バイオエネルギーを含む）、スクラップ利用の拡大、クリーンな電気の調達、および排出のオフセットの 5 つの施策を組み合わせる目標達成を目指すとしている²⁶⁶
 - 韓国 POSCO 社は 2030 年までに CO₂排出量を 2017-2019 年平均の 10%削減し、2050 年にカーボンニュートラル達成することを宣言しており、短期的（~2030 年）には電炉の導入、および高炉・転炉の低炭素化技術開発、中長期的（2030~2050）には流動床反応器を用いた低品位鉱石の水素還元技術の実用化、および CCUS を組み合わせることによって達成するとしている²⁶⁷
 - インド Tata Steel 社は GHG 排出ネットゼロを 2045 年までに目指しており、2025 年までに CO₂排出原単位 2t CO₂/tcs（粗鋼 1 トン当たりの CO₂排出量）未満、2030 年ま

で1.8t CO₂/tcs未滿を達成する計画で、欧州では、遅くとも2030年までにオランダでグリーン・スチールを製造し、英国とオランダの両方で2050年までにカーボンニュートラル・スチールを製造する計画である²⁶⁸

- 米国 Nucor 社は、2030年までに GHG 排出を 2015 年比 35%削減するとしていた目標を 2023 年 11 月に改訂。スコープ 1、2、3 における GHG 排出量について、2050 年までに 116kg/MT、中間の 2030 年までに、976kg/MT を目指すと表明。従来と異なり、スコープ 3 を含め、より厳しい目標に変更。主な施策として再生可能エネルギーの利用、エネルギー効率の向上、CO₂ 捕捉、サプライチェーンにおける炭素排出削減、革新的技術の探索としている²⁶⁹
 - 米国 Cleveland-Cliffs 社は 2030 年までに 2017 年比 25%の GHG 削減という従来の目標を既に達成したと発表。2024 年 5 月に新たな目標として、2035 年までに粗鋼 1 トン当たりのスコープ 1 及び 2 の GHG 排出を 2023 年比 30%削減、スコープ 3 で 20%削減すると発表。主な施策として、Carbon Capture and Sequestration (CCS)の研究開発、Great Lakes Clean Hydrogen (GLCH)参画によるグリーン水素の商用化促進、直接還元鉄だけでなく高炉や他の設備にも水素を活用して GHG 排出の削減を目指すとしている²⁷⁰²⁷¹
 - 米国 US Steel 社は、2030 年までに 2018 年比 20 %の GHG 削減を目指す。主な施策は電炉の生産性向上で、2050 年に向けては天然ガス・水素を利用した直接還元製鉄 DRI の導入などにより、カーボンニュートラルを目指すとしている²⁷²。
- f) 短期的な低炭素化達成手段として、マスバランス方式を活用した商品化、大型電炉の導入、既存手法で製造した DRI の電炉装入が推進されている
- 日本鉄鋼連盟が策定したガイドラインにおいて、設備や操業方法の転換などで CO₂ を削減した分を販売量の一部に割り当てるマスバランス方式の採用を推奨²⁷³
 - 日本製鉄はマスバランス方式でのグリーンスチールの販売を開始、一部の高炉の電炉への転換を進めている
 - ◇ マスバランス方式を採用したカーボンニュートラルスチール「NS カーボレックス ニュートラル」を 23 年度上期に市場投入²⁷⁴。瀬戸内製鉄所広畑地区の新電炉（2022 年 10 月商業運転開始）のグリーン電力を使った生産による CO₂ 排出量削減効果を活用しており、その他の CO₂ 排出量削減施策の効果についても順次活用し、供給量を拡大していく予定
 - ◇ 高炉プロセスから電炉プロセスへの早期の転換が必要として、九州製鉄所八幡地区および瀬戸内製鉄所広畑地区を候補地として本格検討を開始²⁷⁵
 - JFE スチールはマスバランス方式のグリーンスチール販売を開始、直接還元鉄のサプライチェーン構築、および一部高炉の大型電炉への転換を表明
 - ◇ 2023 年度上期よりマスバランス方式によるグリーンスチール「JGreeX™（ジェイグリークス）」の販売を開始。年間 20 万トンの供給が可能²⁷⁶
 - ◇ 伊藤忠商事株式会社、アラブ首長国連邦（UAE）鉄鋼最大手の Emirates Steel

Arkan と共に、鉄鋼業界のグリーン化に向けた低炭素還元鉄のサプライチェーン構築に関して、コアメンバーとして参画し、プロジェクト候補地をアブダビとする詳細な事業化調査を共同で推進することで合意²⁷⁷

- ◇ 移行期に（脱炭素で）有効なのは電炉と考え、倉敷製鉄所の高炉 1 基を 2027 年に大型電炉に転換する方針を発表し、還元鉄を用いた高級鋼材の生産を目指す²⁷⁸
- 神戸製鋼所は米国の 100%子会社である MIDREX 社を通じて還元鉄製造技術を保有しており、この技術を用いて製造した HBI を高炉に挿入することで削減した CO₂ をマスバランス方式で特定鋼材に割り当てることでグリーンスチールの商品化を行っている
 - ◇ MIDREX 社は天然ガスを改質したガス（CO+H₂）を還元剤とする MIDREX NG、100%水素を還元剤とする MIDREX H2、および天然ガスを最大 100%まで水素に柔軟に置き換えることが出来る MIDREX Flex という 3 つのプロセスを保有しており、MIDREX Flex はドイツ ThyssenKrupp の水素直接還元鉄プラントに、MIDREX H2 はスウェーデン H2 Green Steel の水素直接還元鉄プラントに採用される等している²⁷⁹
 - ◇ MIDREX 技術を用いて製造した HBI を加古川製鉄所の高炉に多量に装入することで、高炉からの CO₂ 排出量を削減できる技術を活用し、“Kobenable Steel”を商品化しており、トン当たりの CO₂ 排出量の削減率は「Kobenable Premier」で 100%、「Kobenable Half」で 50%である²³⁶
- ルクセンブルク ArcelorMittal 社はマスバランス方式を用いた CO₂ 排出削減実績に基づいたグリーンスチール証明書の販売を開始するとともに、複数の製鉄所で、直接還元鉄プラントの導入および高炉から電炉への転換を進めている
 - ◇ 各種取り組みでの CO₂削減効果を、同一事業所内で生産する鉄鋼製品に割り当て、第三者機関による削減量の認定を示す「XCarb™グリーンスチール証書」を付与して販売しており、購入した顧客はスコップ 3 の削減実績として報告することが可能となる²⁸⁰。
 - ◇ フランスダンケルク製鉄所で直接還元鉄プラントと 2 基の電炉を新設し、2026 年にも年間 400 万トンのグリーン鉄源を造る予定で、フランス政府から 8 億 5 千万ユーロの助成を受け、今の高炉 3 基のうち 2 基を置換し、CO₂ 排出量を少なくとも 440 万トン削減することを見込む²⁸¹
 - ◇ カナダのハミルトン製鉄所で 18 億カナダドルを投じ DRI 設備および電炉の新設を検討しており、高炉・転炉法との併用から、2028 年に完全移行予定で、DRI 設備は天然ガスで操業し、将来的にグリーン水素への切り替えを想定している²⁸²
 - ◇ スペインのヒホン製鉄所に電炉と DRI 設備を導入予定で、スペイン政府が財政支援を実施²⁸³
 - ◇ オーストラリア Voestalpine 社の米国テキサス州における HBI 事業を買収しており、電炉で HBI を活用した高級材の製造が狙い²⁸⁴
- 米国 US Steel 社は還元鉄用ペレットに進出し、電炉向けの鉄源事業を拡大、電炉の新

設も進めている²⁸⁵

- ◇ ミネソタ州ミンタックとケータックで最大1億5千万ドルを投資し還元鉄向けペレットの生産に進出。他社へのDRI外販や、将来自社でのDRI設備新設時に活用予定
 - ◇ 電炉・薄板メーカー、**Big River Steel (BRS)**社を買収して以降、電炉事業の拡大を推進。BRS社隣接地に電炉工場を新設中
 - 韓国POSCO社は2030年までは高炉・転炉の低炭素化でグリーンスチール上市を目指し、低炭素製品1000万トン供給体系を完成させる方針²⁸⁶
 - ◇ HBI使用拡大などの高炉・転炉の低炭素化技術開発に集中
 - ◇ 光陽製鉄所において2026年から本格稼働予定の電気炉でグリーンスチール生産体制を構築
- g) 長期的な低炭素化達成手段として、高炉での水素活用、グリーン水素を用いた直接還元での炭素排出量ゼロを目指す動きがある
- 日系高炉メーカーは高炉での水素活用での共同開発（GI基金事業）、および日本製鉄、JFEスチールの2社は直接還元鉄を用いたグリーンスチール製造の開発（GI基金事業）を行っており、神戸製鋼所は水素還元技術を独自に保有
 - ◇ 日本製鉄は「カーボンニュートラルビジョン2050」の中で100%水素直接還元を「3つの超革新的技術」の中のひとつとし、長期的に水素DRIを用いた大型電炉での高級鋼の量産製造を目指すとしており、GI基金事業においては技術開発本部波崎研究開発センター（茨城県神栖市）に、小型シャフト炉を設置し、水素で低品位鉱石を還元する試験を2025年度より開始予定
 - ◇ JFEスチールは直接還元鉄のサプライチェーン構築後は水素還元技術の導入によるCO₂排出量のネットゼロ化を目指すとしており、GI基金事業において東日本製鉄所千葉地区において小型ベンチ試験炉建設し2024年度試験開始予定
 - ◇ 神戸製鋼所は米国の100%子会社であるMIDREX社を通じて還元鉄製造技術を保有。高炉の還元機能の一部を水素リッチガスを活用したMIDREXプロセスに代替させる（水素HBIの高炉投入）方法も検証²⁸⁷
 - ドイツThyssenKrupp社は、2019年11月、デュイスブルクで操業中の第9高炉での水素試験の第1段階を成功裡に完了²⁸⁸
 - ◇ 28個の羽口の1つで水素吹き込みがなされ、24時間の試験において各種データを収集・分析
 - ◇ 約1,000 m³/h水素を吹き込むことが可能なことを確認
 - アメリカCleveland-Cliffs社は、2023年5月、オハイオ州の高炉で水素ガスの吹き込み試験に成功²⁸⁹
 - ◇ 同工場の第三高炉（炉容積1,493m³）²⁹⁰で、空気を吹き込むためのノズルである羽口20本すべてに水素ガスを吹き込み試験を5~7日間連続で実施
 - ◇ 高炉への水素注入の実現可能性、設備上の課題等を確認するための初期的試験の位

置づけとして、最大で 30%程度の送風ガスを水素で置換

- アメリカ Cleveland-Cliffs 社は、2023 年 5 月、インディア州の高炉で水素圧入試験に成功²⁹¹
 - ◇ 北米最大の高炉「Indiana Harbor #7」(炉容積 4163m³) で水素圧入試験を実施
- スウェーデン SSAB 社は HYBRIT を設立し、水素 DRI の実証を進めており、2026 年に商業規模で脱化石燃料鉄鋼の市場投入を目指している²⁹²
- 韓国 POSCO 社は水素還元製鉄技術を完成するため、浦項製鉄所でのデモプラント「HyREX」の建設をプライメタルズテクノロジーズと共同で進めており、2024 年に運用を開始し、2028 年までの技術開発完了を想定している²⁹³
- 中国 Baowu は、2022 年 7 月に、400m³の水素富化炭素循環酸素高炉 (Hycrof) が稼働し、3 カ月間の実証試験後、炭素排出量を 20%以上削減²⁹⁴。2023 年 10 月から炉容積 2,500m³ の高炉での実証を開始。また、2024 年 1 月、シャフト炉で初の直接還元鉄 (DRI) の生産に成功としたと発表²⁹⁵
- 中国 HBIS (河鋼集団) は、2023 年 6 月、COG (コークス炉ガスで水素が主成分) による DRI の製造に成功。注入ガスの中で水素を 60%以上使用²⁹⁶
- h) 現在の DRI で原料として活用できるのは平均鉄分の高い最高品質グレードの鉄鉱石 (DR グレード) だが、DR グレードは現在世界の鉄鉱石輸出量の 4%のみであるため、「直接還元・溶融装置・転炉」や「流動床反応器(fluidized bed reactor: FBR)」などの低品位な鉄鉱石を活用を目指す複数の技術開発テーマが存在しているが²⁹⁷、特に POSCO 社は 2024 年頃から FBR を用いた水素還元デモプラント (HyReX) を運用開始予定で、2028 年までの技術開発完了を目指す方針を表明し、実用化に向けた動きが具体化しており、既存のシャフト炉ベースの直接還元技術の有力な競合となる可能性がある
 - ドイツ ThyssenKrupp 社は低品位の鉄鉱石の活用方法として DRI 製造後にサブマージドアーク炉 (submerged arc furnace: SAF) による溶融段階を経て転炉に送るプロセスを計画し、デュイスブルグ市の製鉄所で 40 万トン/年の生産能力を有する水素 DRI プラントを建設する「H2Stahl」としてプロジェクトを推進中²⁹⁸
 - ◇ ドイツ経済・エネルギー省より 3,700 万€の助成を受け、2045 年までに 4 つの高炉を DRI-SAF に置き換える計画で、最初の 2 プラントは 2025、2030 年に計画、2030 年までにグリーンスチール 300 万トン/年の生産を見込み、CO₂ 排出の 30% 削減を掲げる
 - ◇ SAF を用いることで高炉向けグレードの鉄鉱石 (Fe<65%) を DRI で処理可能とのこと
 - ◇ 2025 年建設予定のプラントは 1.2Mt の容量で、還元ガスは当初は天然ガスで開始し、水素に置き換えていく
 - オーストラリア BlueScope 社も DRI-Melter-BOF を検討しており、Rio Tinto と MOU を締結し、Rio Tinto の BF グレードの活用を狙っている²⁹⁹
 - イタリア Tenova 社は Open Slag Bath Furnace(OSBF) と呼ばれる溶融プロセスを低

品位鉄石向けに検討³⁰⁰

- 韓国 POSCO が開発中の「HyREX」は多段階の FBR を用いて鉄鉱石微粉の熔融還元を行うことで、低品位な鉄鉱石微粉を、ペレット化や凝集を必要とせずに直接利用することが可能であり、鉄鉱石ペレットを装入するシャフト炉ベースの DRI よりも、コストと効率の面で有利であるとしており³⁰¹、2024 年にデモプラント運用開始、2028 年の技術開発完了を目指す方針を表明している³⁰²
- i) 鉄鋼メーカーが水素の活用を目指す中で、特に欧州系メーカーで製鉄所併設の水素製造拠点の整備や、水素サプライチェーン構築に参画する等、供給確保を目指す動きが顕在化している
 - 欧州においては、ArcelorMittal がハンブルク、ゲントで自社水素製造拠点の整備を行う他、ヨーロッパで水素サプライチェーン網構築を目指す HyDeal プロジェクトに参画し 20 年間のオフテイク契約を実施、ThyssenKrupp はデュイスブルクで自社水素製造拠点の整備を行う他、複数の水素サプライチェーン構築プロジェクトへの参画を行っている^{303,304}
 - 米国においては、Cleveland-Cliffs は高炉維持の姿勢を明確にした上で、Great Lakes Clean Hydrogen (GLCH)参画によるグリーン水素の商用化促進を行っている³⁰⁵
- j) 水素活用に関連した鉄鋼業サプライチェーン上の動きとして大手資源メジャーは、低品位鉄石の直接還元利用を目指した、鉄鋼メーカーとの共同技術開発の動きや DRI 製造ハブ事業への参画等が見られる
 - Rio Tinto は中国 Baowu との合弁事業を通じて、DRI 原料としてオーストラリアの鉄石のペレット化技術を最適化³⁰⁶
 - BHP Group は微生物を用いた低品位鉄石からのリン除去の研究開発を実施³⁰⁷
 - Fortescue Metals Group は中国 Baowu との共同開発で、低排出製鉄技術および、鉄鉱石選鉱に関する研究開発を実施³⁰⁸
 - Vale は南米や中東の港湾地区に DRI 用原料生産の「メガハブ」を建設する複数の計画を発表^{309,310}
- k) DRI 製造は、コークスを用いた直接還元製鉄が盛んなインドや、天然ガス資源が豊富な中東地域で盛んで、生産量は増加傾向にあるが、水素活用の普及にあたっては、将来的に水素が安価に調達可能な地域での増加が見込まれる
 - イランは、鉄鉱石および天然ガス資源が豊富で安価に調達可能なことから、DRI 製造が盛んであり、特に天然ガスを還元材として用いた DRI 製造では世界の生産量³¹¹
- l) 製造方式別での DRI 生産量は、ガスを還元材として用いる方式では、MIDREX が 8 割程度、ENERGIRON が 2 割程度のシェアを持っている
- m) 本格的な普及に至るかは不透明であるが、米国スタートアップや欧州の一部の企業を中心に、電解還元、水素プラズマ還元等の新しい製鉄方法に取り組む動きが顕在化している
 - ルクセンブルク ArcelorMittal は、電気を使用して鉄鉱石から鉄を抽出する直接電解プロセスを開発。John Cockerill とともに、4~8 万トン/年の電解プラントを建設し、

2027年に生産を開始する計画³¹²

- 2012年創業の米国 **Boston Metals** は、電気分解の過程で発生する高熱と腐食に耐えられる電極素材（クロム合金の一種）を発見。ArcelorMittal やビルゲイツが運営するブレイクスルー・エナジー・ベンチャーズ（BEV）から支援を受けている³¹³
- 2020年創業の米国 **Electra** は、湿式製錬プロセスを活用し、低品位の鉄鉱石を60°Cで高純度の鉄に精製する技術を開発。Nucor、BEV、BHP、Temasek、ARPA-E から支援を受けている³¹⁴
- 2000年創業の航空宇宙スタートアップ 米国 **Blue Origin** は、月面で鉄等の素材を生み出すため、電気分解の技術を開発。同技術をもとに新しい製鉄法の研究開発に参入している。ARPA-E の支援を受けている³¹⁵
- 2017年創業の米国 **Form Energy** は、粉末状の鉄鉱石を低温アルカリ溶液に入れ、電流を流すことで、粉末状の金属鉄を製造することができる技術を開発。ARPA-E から支援を受けている³¹⁶
- 2021年創業の米国 **Limelight steel** は、レーザーを使用して鉄鉱石を照らし、熱分解を生じさせることで、低品位の鉄鉱石から酸素を分離する技術を開発。ARPA-E の支援を受けている³¹⁷
- オーストリア **Voestalpine** は、2016年から、**Susteel** プロジェクトにおいて、水素プラズマ還元技術の開発を実施³¹⁸。2024年からは欧州委員会からの支援を受け、**H2plasmared** プロジェクトを開始³¹⁹

[業界動向（産業構造）および競合動向]

- n) 日本では高炉による鉄鋼生産が8割近くを占めるため、高炉でのグリーンスチールの製造を重視しつつ電炉導入を検討しているが、同じく高炉法が主流の欧州では、再生エネルギーおよびグリーン水素が比較的安価に調達可能になる見込みであることから、脱炭素化の手段として電気消費量の大きい水素 **DRI** に大きく傾いている
- 欧州をはじめとして商用化を目指した低炭素プロジェクトが2021年以降に増加傾向
 - 国内の高炉のうち、2030年までに稼働開始から20年以上を経過し、改修などの再投資が必要と思われる高炉は9基存在しており、国内鉄鋼メーカーは、電炉への転換を相次いで発表^{228,231}

[国際動向]

- o) 欧州ではEUを中心としたトップダウンの目標設定や排出権取引による動機付け、および大型の支援策の発表が行われ、中国でも国主導で目標設定が行われている一方で、アメリカでは連邦政府が方向性や大型支援策を打ち出しつつ、削減目標や排出権取引等の政策は各州の独立性に基づくボトムアップの取り組みにより鉄鋼業の脱炭素を目指している
- 欧州では、産業の脱炭素支援策である「グリーンディール産業計画」の発表³²⁰や、産業保護のために現在は無償で鉄鋼業に割り当てられているGHG排出権が段階的に有償化され³²¹、カーボンリーケージへの対策は炭素国境調整メカニズム（CBAM）に置き換えられていく³²²動きを背景に、脱炭素への動きが加速している

- 加えて、2021年6月、欧州委員会と主要鉄鋼メーカーが参加する ESTEP（欧州鉄鋼技術プラットフォーム）が Clean steel partnership（CSP）を設立し、共同で鉄鋼産業の脱炭素化を支援。³²³同年10月、鉄鋼産業の脱炭素化に関する指針 Strategic Research and Innovation Agenda（SRIA）を発表。現在、CSP のプロジェクトでは、電炉技術の改善、水素直接還元、生成ガス・残滓の回収及び再利用、スクラップの選別技術、水素プラズマ還元等の開発が行われている³²⁴
- アメリカでは連邦政府によるインフラ投資・雇用法、およびインフレ削減法の2つの法案に基づく鉄鋼業を含む産業の脱炭素への大規模な支援策が成立³²⁵、
- また、2022年9月にアメリカのエネルギー省（DOE）は Industrial decarbonization road map を発表し、鉄鋼産業の脱炭素化に関する指針を発表³²⁶。DOE は、2023～4年にかけて、ROSIE 等の支援プログラムを立ち上げ、新しい製錬・精錬プロセスの開発にも積極的に支援を行っている³²⁷
- 中国では鉄鋼業界が排出する CO₂ の量をピークアウトの目標達成に向けて 2010 年初頭から取り組んでいる過剰生産への対応の継続が主要政策とみられる³²⁸が、水素製鉄の国家政策への組み込み³²⁹や、スクラップ利用の促進を図るなどプロセスの脱炭素に向けた動きもみられる³³⁰

[ルールメイキング]

- p) 製鉄は CO₂ 排出量が多く、対策が難しい分野として国際的にも関心が高く、グリーンスチールに関する国際協調の動きが出始めている
- 日本を含め 26 か国が参加した、COP26（2021年11月）で発表された、「グラスゴー・ブレイクスルー・アジェンダ」で鉄鋼分野については、「2030年またはそれより早い段階で、すべての地域で効率的な消費とニア・ゼロ・エミッション・スチールの生産が実現し、ニア・ゼロ・エミッション・スチールがグローバル市場で選好される」との目標が示された³
 - COP26 で立ち上げられた First Movers Coalition イニシアティブ（FMC）で、鉄鋼分野の加入メンバーは 2030 年までに年間の調達量の少なくとも 10%がニア・ゼロ・エミッションスチールであることを目標として設定した³³¹
 - 2022 年、ドイツ開催の G7 において、各国はニア・ゼロ・エミッションスチール（NZS）の共通定義が必要との認識で一致。IEA の NZS 定義案をもとに検討が進められたものの、同案に対する合意には至らなかった
- ◇ IEA は議長国ドイツの委託で報告書「Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members」を作成³³²し、NZS の共通定義を提案した。提案において、IEA は、NZS を、従来の高炉製鉄（BF-BOF）での GHG 排出量と比べて、直接・間接排出合わせて 85%以上削減したものと定義した。その上で、NZS の GHG 排出量の閾値を、スクラップ鉄を使わない場合で 400kgCO₂e/トン以下、100%スクラップ利用の場合で 50kg CO₂e/トン以下とし、スクラップ比率によるス

ライディングスケールで規定した

- 2023年、日本開催のG7で、各国は、国ごとの鉄鋼産業の構造の違いにより、脱炭素化の道筋が異なることを共有した。また、GHG排出量算出方法に関して、新たな算出方法を開発するのではなく、既存の5つのGHG排出量算出方法を2025年までに相互運用可能な形に改訂することで合意³³³
 - ◇ 2023年日本開催のG7で、各国は、議長国の日本がOECDに委託して作成した報告書「鉄鋼の脱炭素化の道筋の異質性」に基づき、各国間の鉄鋼産業の構造の違いにより、脱炭素化の道筋が異なることを共有した³³⁴
 - ◇ また、議長国の日本がIEAに委託して作成した報告書「ネット・ゼロ鉄鋼産業に向けた排出量の測定とデータ収集」に基づき、GHG排出量算出方法に関して、新たな方法を開発するのではなく、既存の5つのGHG排出量算出方法を相互運用可能な形に改訂を進めることで合意した。改訂作業は2025年までに行うこととなっている。その5つのGHG排出量算出方法の中には、日本が主導して策定したISO14404、ISO20915が含まれている³³⁵
 - ◇ 加えて、GHG排出量のデータの収集に関して、G7各国は、報告書でIEAが示した「グローバル・データコレクション・フレームワーク (GDCAF)」に沿って、段階的に進めることで合意した。収集したデータは排出量算出方法の開発や政策策定に活用されることとなっている³³⁶
 - ◇ 2024年のイタリア開催のG7では、上記の合意内容について、G7各国が引き続きコミットしていくことが確認された^{337,338}
- 米国とEUは中国などの炭素集約型鉄鋼に障壁を設ける「グリーンスチール」協定について2021年10月から交渉中で³³⁹、中国等の過剰な鉄鋼生産能力に対処するために、多くの炭素排出によって生産された鉄鋼に貿易障壁を設けることを目指しており³⁴⁰、³⁴¹、EUは協定はEUのCBAMに基づくべきとしている一方で、米国は独立した制度を目指しており交渉は難航中³⁴²

[6] 燃料アンモニアサプライチェーンの構築

[市場動向]

(業界構造)

- a) 既存のアンモニア市場は、約 8 割が肥料用途として消費され、ほぼ全量が生産域内で消費される地産地消型の市場となっている³⁴³
 - アンモニアは、2020 年において世界で約 1.8 億トンが生産されており、その用途は肥料が約 8 割、化学原料等が約 2 割
 - 世界の貿易量は、生産量の約 1 割 (0.18 億トン) と少なく地産地消型
- b) また、地域ごとに多数のアンモニア製造業者が存在し、フラグメント化したプレイヤー構造となっている
 - 2016 年のアンモニア生産量上位 10 社 (Yara International/ CF Industries/ Orascom Construction Industries/ Hubei Yihua Chemical Industry 等) の市場シェア (生産量ベース) の合計は約 26%しか占めていない
- c) アンモニアの輸出入量を大陸別に見ると、2019 年時点で、輸出量上位 3 地域はユーラシア (輸出総量の 23%)、中南米 (同 23%)、中東 (同 16%)、輸入量上位 3 地域は欧州 (輸入総量の 27%)、東アジア (同 17%)、南アジア (同 13%) となっている³⁴⁴
 - 輸出量上位の国は、2021 年の金額ベースで、ユーラシアは主にロシア (輸出総額の 17.3%)、中南米は主にトリニダード・トバゴ (同 16.8%)、中東はサウジアラビア (同 15.1%) やカタール (同 2.73%) が占める³⁴⁵
 - 輸入量上位の国は、2021 年の金額ベースで、欧州はベルギー (輸入総額の 3.97%) やエストニア (同 3.3%)、ドイツ (同 3.28%) 等、東アジアは韓国 (同 7.19%) や中国 (同 3.47%)、南アジアは主にインド (同 13.8%) が占める³⁴⁵

(アンモニア価格動向)

- d) アンモニア価格は、2021-2022 年で上昇しつつ、現在は以前の価格水準に戻る。³⁴⁶中長期的には、再エネ価格の低下によりグリーンアンモニアが大幅に廉価になることで、アンモニア全体の価格が低下していくことが予想されている³⁴⁷
 - 国内アンモニア価格は 2021-2022 年の高騰を除くと、過去 20 年間で約 30~75 円/kg の範囲で変動。³⁴⁸また、アンモニア価格の主な変動要因は原料価格・需給バランスの 2 つ
 - 過去の変動推移を見ると、特に原料価格の変動に大きく影響を受けている。⁶加えて製造コストでもグレーでは約 8 割、ブルーやグリーンでは約 5-7 割が原料価格に由来³⁴⁹
 - 原料価格では LNG は新規設備稼働による供給力増加で、再エネはエネルギー変換効率向上と大量生産による設備コスト低下により将来価格は低下していくと見られる³⁵⁰³⁵¹
 - 需給バランスはグレーアンモニアを含めると需要に対して供給容量が上回ることから、長期的には主に原料価格の低減によりアンモニア価格が低下していくと見られる³⁵²

(クリーンアンモニア需要動向)

- e) 国際エネルギー機関 (IEA) や国際再生可能エネルギー機関 (IRENA) 等の主要機関は、船

- 船や発電等の新規用途による需要増加により、2050年におけるアンモニア需要量をそれぞれ約5.6億トン（IEA NZE シナリオ）³⁵³、約6.88億トン（1.5°Cシナリオ）³⁵⁴と見込む
- 船舶用途では、2050年に約120~245百万トン（IEA）、約197百万トン（IRENA）の需要が見込まれている
 - 発電用途では、2050年に60~84百万トン（IEA）、約30百万トン（IRENA）の需要が見込まれている
- f) 既存プレイヤーは、新規用途だけでなく、肥料等の既存用途のCN化に対しても積極的な姿勢が伺える
- Yara は、オランダの Zeeland 州にある Sluikil プラントにおいて、化石燃料由来の水素を洋上風力発電由来のグリーン水素へ置き換え、製造したグリーンアンモニアをカーボンニュートラルな肥料製品の生産に使用予定³⁵⁵。また、スウェーデンの農業協同組合 Lantmännen と、化石燃料を使用しないグリーン肥料を市場に投入する商業契約を世界で初めて締結³⁵⁶
 - CF Industries は、米国オクラホマ州にある同社の Verdigris Complex において、再生可能エネルギー企業の NextEra Energy Resources と共同でグリーンアンモニアプロジェクトを開発する合弁事業に関する MoU を締結。米国におけるグリーンアンモニア由来の窒素肥料の普及および農業サプライチェーンの脱炭素化を目指す³⁵⁷
- g) IEA 等の国際機関の予測では、将来的にクリーンアンモニアの需給ギャップ発生が見込まれているが、需給ギャップに対する考え方もプレイヤー間で意見が分かれている

（グリーンアンモニア SC 構築動向）

- h) IEA 発表（24年10月）によると、世界で稼働・計画中のブルーアンモニアプロジェクトは、21年10月時点の累計に対し約3.7倍に増加。24年10月時点の生産量ベース（計画中含む）では米国が6割を占めている³⁵⁸
- 21年10月の発表では、稼働・計画中のブルーアンモニアプロジェクトは、累計13件であり、24年10月には累計48件まで増加
- i) また、同発表によると、世界で稼働・計画中のグリーンアンモニアプロジェクトは、21年10月時点の累計に対し約8.9倍に増加。24年10月時点の生産量ベース（計画中含む）では豪州・エジプト・ブラジル・チリ・インドがそれぞれ約16-7%を占め、合計6割弱を占めている
- 21年10月の発表では、稼働・計画中のグリーンアンモニアプロジェクトは、累計34件であり、24年10月には累計304件まで増加
 - グリーンアンモニア生産量の国別シェア（稼働・計画中のPJのうち生産量が公開されているPJを基に推計）は、豪州約16.5%、エジプト約11.6%、ブラジル約10.6%、チリ約9.5%、インド約6.9%であり、5カ国で6割弱を占める
- j) 日本では、JERA が Yara Clean Ammonia（Yara International の子会社）および CF Industries とブルーアンモニア製造・調達の協業に向けた MoU を締結し、年間最大50万トン程度を米国から輸入する計画³⁵⁹³⁶⁰

- k) 韓国では、KEPCO 及び豪 Hydrogen Utility 社は、豪クイーンズランド州で開発中の H2-Hub からグリーンアンモニアを調達する契約を締結³⁶¹
- l) 日本向けには、主に総合商社等の調達・供給事業者が製造プロジェクト初期段階から参画しているが、韓国では電力会社、鉄鋼メーカー等の利用事業者も初期段階から参画し、自社向けの供給量を確保する動きも見られる
 - 三菱商事は、独 RWE Supply & Trading、Lotte Chemical と米国で年最大 1,000 万トンの燃料アンモニアの供給網構築に向けた共同調査を締結³⁶²
 - Korea East-West Power・POSCO は、Engie（フランス）、Samsung Engineering 等と共同でオマーンにおけるグリーンアンモニア製造プロジェクト（120 万トン/年）へ参画³⁶³
- m) また北米において、新たなブルーアンモニア PJ を計画
 - 北米 2 つ目のブルーアンモニア PJ（80~100 万トン/年）への投資を計画するほか³⁶⁴、BASF と共同で FS を実施中³⁶⁵
- n) Exxon Mobil は、ブルーアンモニアプロジェクトを推進するほか、CO₂パイプラインネットワークを保有する Denbury を買収する等、低炭素ソリューション事業を拡大
 - 米国テキサス州でのブルーアンモニアプロジェクトについて、24 年中に FID を下す予定。アジアでの発電用途を想定し、27~28 年での出荷を予定³⁶⁶
 - 米国の石油・ガス会社であり、CO₂パイプラインネットワークを保有・運営する Denbury を買収。低炭素ソリューション事業を収益性の高い形で成長させる方針³⁶⁷

(グリーンアンモニア SC 構築に向けた課題)

- o) 日本におけるアンモニア関連の主な法規制に高圧ガス保安法があり、製造・貯蔵・販売等サプライチェーン全体に関わる規制を定めている³⁶⁸
 - 高圧ガス保安法ではアンモニア等の高圧ガスの製造・貯蔵・販売・移動その他の取り扱い等が規制され、製造・貯蔵・販売等に際しては都道府県知事の認可が必要
 - その他、道路法で水底トンネル等における危険有害物積載車両の通行を制限（アンモニアは通行制限品目に該当）
- p) 米国では、日本と同様に大気汚染防止・廃棄等に関する規制を設けているが、運搬では、適切な梱包・危険性の表示を求めるのみで、特に通行禁止・制限は設けていない
 - アンモニアを出荷書類および包装上の危険表示で吸入の危険性があることを明示するように義務付け
 - 統一的なルールはないが、企業は社会的責任（訴訟リスク）に対応するため、独自にルールを規定し、事業運営・展開に際してリスク評価を行っている³⁶⁹
- q) 欧州では、日本と同様に大気汚染防止・廃棄等に関する規制を設けているが、運搬では、英仏海峡トンネルを除いて通行制限は設けておらず規定の容器での運搬のみを要求
- r) CF Industries は、アンモニアの新用途における法規制面での課題克服に向けて、需要側企業とパートナーシップを締結
 - 需要側企業（電力会社）とパートナーシップを締結し、現在の流通規格に合わせて供給

できるように対応

【技術動向】

(クリーンアンモニア製造)

- s) 現在、アンモニアはほとんど全量がハーバーボッシュ (HB) 法によって生産されているが、HB 法で低温低圧での反応を可能にする触媒、HB に依らない電解合成や人工光合成等の製造方式も開発されている
- HB 法は、100 年以上前に確立された鉄を触媒とする製造方式であるが、400～600℃の高い反応温度と 100～300 気圧という高温高压の条件を必要とするにも関わらず、アンモニア収率が 30%と低い³⁷⁰
 - HB 法の触媒を改良し、より低い温度と圧力でもアンモニアを生産できるようにする技術も模索されている。しかし、200℃以上かつ 10 気圧以上の反応条件が必要な技術がほとんどで、常温常圧での技術は現状ラボレベルである³⁷¹
 - 電解合成は、再生可能エネルギー等を利用し、温和な反応条件でアンモニアを合成する方法である。水電解において水素が発生する電極側に適切な電極触媒を配置しアンモニアを合成する³⁷²
 - 人工光合成は、光エネルギーを化学エネルギーに変換し、化学物質の合成に用いる手法である。北海道大学が 2014 年、大阪大学が 2020 年、東京大学・九州大学等が 2022 年にアンモニア合成に成功している^{371,373,374}
- t) HB 法では大手ライセンサーはいずれも近年再エネ電源にも対応したグリーンアンモニア製造向けプロセスの開発・提供が相次ぐ³⁷⁵
- u) 触媒は、グローバルでは既存鉄触媒メーカーの Clariant/Johnson Matthey/Topsoe 等が技術開発をリード。日本では主に大学等の研究機関が中心となって触媒開発を行っている
- HB 法に比し低温低圧の条件下で NH₃ を合成するため、Ru・Co 等の貴金属を用いて従来触媒 (Fe) を代替する研究が主^{376,377}
 - 一方、BaH₂ 等の化合物と Fe を組み合わせ、Fe 触媒の課題である低温での NH₃ 合成を克服する動きも見られる³⁷⁸

(アンモニア混焼)

- v) 日本では、商用規模の石炭火力発電所におけるアンモニア 20%混焼の実証実験を 23 年度に実施
- JERA や IHI は、碧南火力発電所 4 号機 (発電出力：100 万 kW) において、23 年度末よりアンモニア 20%混焼の実証実験を実施³⁷⁹
- w) 韓国では、KEPCO、その他発電を担う公企業等が参画する「水素・アンモニア発電実証推進団」がアンモニアや水素を燃料とした二酸化炭素フリーの発電を推進中
- 2027 年までにアンモニア 20%混焼の実証を完了し、2030 年には 43 基ある石炭火力発電所のうち半分以上となる 24 基で 20%混焼発電を実用化する計画³⁸⁰
 - 韓国では'22 年以降 2 つの事業で'27 年までに 20%混焼技術の実証完了・TRL8 達成を目

標に開発に取り組む。’23年9月には30%混焼可能なバーナーの性能試験に成功^{381,382,383,384}

- x) 中国では、国有発電大手の国家能源投資集団が石炭火力発電設備（発電出力：4万kW）において、最大35%のアンモニア混焼発電に成功³⁸⁵
 - また、万能同菱発電、合肥市総合国家科学センターエネルギー研究所は、30万kW石炭火力発電ユニットにおいて、10～35%のアンモニア混焼発電に成功。アンモニアは毎時21トン以上注入され、燃焼率は99.999%、アンモニア漏出量は2ppm未満を実現³⁸⁶。次のステップでは、50%以上のアンモニア混焼、100万kWの発電ユニットでの実証試験の実施を目指す³⁸⁷
- y) 他地域においては、東南アジアを中心として、石炭火力発電所へのアンモニア混焼導入に関するMoU締結の動きが活発。マレーシアでは既に混焼試験が実施済み
 - マレーシアでは、IHIや国営電力TNB、国営石油ペトロナスが共同で、TNB所有の石炭火力発電所においてNH₃混焼試験に成功³⁸⁸
 - インドネシア、タイ、ベトナム等においても、アンモニア混焼の導入に向けたFSが実施されている^{389,390,391}

(アンモニア専焼)

- z) 日本では、アンモニアガスタービンの試験運転が世界で初めて実施され、数十万kW級の大型タービンでの専焼技術確立を目指している
 - IHIはGEとGE社製大型ガスタービン（数十万kW級）でのアンモニア専焼技術開発で提携³⁹²
 - 三菱重工は、4万kW級ガスタービンでのアンモニア専焼技術開発に着手し、24年のシステム実証、25年の実用化を計画³⁹³
- aa) 米国では、Gas Technology Institute (GTI) や Raytheon Technologies Research Center (RTRC) 等は、DOEによる資金援助の基、アンモニアを燃料とするガスタービン燃焼器の技術開発を行っている
 - GTIは、アンモニアを燃料とするガスタービンのプロトタイプを設計、開発、検証するために、DOEより420万ドルの資金を獲得³⁹⁴
 - また、GTIやElectric Power Research Institute等は、Low-Carbon Resources Initiativeにおいて、アンモニア及びアンモニア・水素混合ガスの双方におけるガスタービン燃焼器の開発を進めている³⁹⁵
 - RTRCは、ガスタービン用の低NO_xアンモニア燃焼器を開発、実証するために、DOEより380万ドルの資金を獲得³⁹⁴
 - DOEの国立エネルギー技術研究所(NETL)は、アンモニア関連の研究情報の共有を目的として、Ammonia Combustion Technology Groupを設立³⁹⁶
 - GEはIHIとの燃焼器共同開発等の協業を行っているが、ガス火力の排出削減手段としてコンバインドサイクルと水素混焼、CCSを想定、最終的に水素専焼での排出ゼロを目指しており、アンモニアの取組は多くはない^{397,398}
- bb) 韓国では、KIER (Korea Institute of Energy Resources) がアンモニア専焼技術の開発に着

手したほか、アンモニア分解による水素を燃料とするガスタービンの技術開発も行われている

- KIER の Advanced Combustion Power Research は、21 年にアンモニア専焼技術の開発に着手³⁹⁹
- 斗山重工業は、KEPCO E&C と共同で、アンモニア燃料ガスタービン発電所の商用化に関する業務提携を締結。アンモニアから取り出した水素を燃料とするガスタービンにより発電する⁴⁰⁰

cc) 中国では、ガスタービンでのアンモニア利用の動きは見受けられない

(貯蔵・運搬)

dd) 国内に存在する化学工業用途等のアンモニアタンクは 1~2 万トン前後であり、既存技術でも 4 万トン級が限界であるのに対し、10 万トン級の大型タンクの開発も行われている

- 一般的な平底円筒 PC (プレストレスコンクリート) タンクは、内槽と呼ばれる鋼製タンクで内圧を保持し、内槽の溶接部には規格により PWHT (溶接後熱処理) が要求されるが、大型タンク全体に PWHT を実施することは現実的ではない。そのため、PWHT が免除される板厚以下で設計することになり、アンモニアタンクの既存鋼材で PWHT が免除されるのは 38mm までであり、この板厚では 4 万トン規模が上限⁴⁰¹
- IHI は容量 10 万トン級のアンモニアタンクを開発中。既に LNG タンクで型式認証を受けている PC メンブレン (鋼材は SUS304) の技術をアンモニアタンクに適用する方針^{401,402}

ee) 現在アンモニア輸送における主流の運搬船は、2~2.5 万トン級の MGC であり、最大規模でも 4 万トン級の LGC であるが、20 年代後半には 5~6.5 万トン級が実用化を見込み、10 万トン超の運搬船も基本設計承認を得ている状況

- アンモニア運搬船は LPG 運搬船と共用されており、主流の運搬船は 2~2.5 万トン級の MGC (Mid-size Gas Carrier) であり、海上貿易で投入されている最大規模でも 4 万トン級の LGC (Large Gas Carrier) ⁴⁰³
- JERA は、日本郵船・商船三井と共同で、5~6 万トン級の運搬船を開発し、27 年度までに 2~3 隻市場投入する計画⁴⁰⁴
- サムスン重工業は、NH₃ を燃料とする約 13 万トン級の NH₃ 運搬船について、韓国船舶協会より設計基本承認 (AiP) を取得済み⁴⁰⁵

[国際・ルールメイキング動向]

(政策動向)

ff) 日・韓は、主に発電向けの SC 構築を推進。米は経済支援により自国でのブルー化が基本で、中国は近年自国でのグリーン化の動き。欧州は水素キャリアとして位置付け

- 日本は、世界規模でのアンモニア調達サプライチェーンを構築し、主に発電・船舶用途での利用を推進
- 米国は、自国生産を基本方針とし、ブルー/グリーン双方でプロジェクトを推進

- 欧州は、ロシア産化石燃料からの脱却に向けて水素への燃料転換を重点施策とし、アンモニアは水素キャリアとして位置付け
- 韓国は、国外生産を基本方針とし、韓国国内へ移送後主に発電・船舶用途での利用を推進
- 中国は、輸入による発電利用が主であるも、近年は自国内においてグリーン PJ も推進
- gg) ドイツや英国では水素/アンモニアへの値差支援を実施。日本でもアンモニアに対して価格差に注目した支援と拠点整備に係る支援が行われる^{406,407}
 - 関連プレイヤーからは、生産設備等の設備投資支援に加え、長期的な価格予測が可能になる支援メカニズムに対するニーズが存在⁴⁰⁸
- hh) 農業分野においては、CN 化に向けた取り組みの一種として、日本・欧州・中国では化学肥料の使用量を段階的に削減していくことが計画されている
 - 日本は、農林水産業に伴う温室効果ガスの放出や、化石燃料由来の肥料の使用量を削減することを目的とした、みどりの食料システム戦略（2021 年 5 月）を策定。数値目標として、輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料の使用量を 2050 年までに 30%低減、化学農薬の使用量（リスク換算）を 50%低減等を計画⁴⁰⁹
 - 欧州は、Farm to Fork 戦略（2020 年 5 月）において、30 年までに化学農薬の使用及びリスクを 50%減、有機農業を 25%へ拡大する計画^{409,409}
 - 中国は、『十四五』全国農業グリーン発展計画（2021 年 9 月）において、農業のグリーン化に向けたロードマップを公表。化学肥料削減に向け、有機肥料での代替を促進⁴¹⁰
- ii) 日本等が技術協力を行うアジア各国の政策でもアンモニア発電の導入への言及が見られる。特に台湾やマレーシア、ベトナムでは導入に関する数値目安も示されている等積極的と見られる。^{411,412,413}インドネシアやシンガポール、フィリピンにおいても具体的な数値目安等はないが、アンモニア混焼の導入に関してロードマップ等で言及^{414,415,416}
- jj) 欧州ではアンモニア発電の取組が見られるのはアイルランド・ドイツのみ。他国は再エネや水素発電、原子力利用等で化石燃料ベースの火力発電からの脱却を図る
 - アイルランドでは欧州初のアンモニア発電所建設に向けた取組が進む他⁴¹⁷、ドイツでも将来の水素・アンモニア対応が可能な火力発電所の開発に向けた取組が進む⁴¹⁸

(ルールメイキング動向)

- kk) クリーン NH₃ の普及に向けて、製造ではクリーン NH₃ 定義・評価/測定方法の統一等、貯蔵・運搬ではバンカリング体制構築・タンク貯槽指針制定等、利用では発電・船舶等の用途ごとに安全ガイドライン・燃焼器/エンジン性能等の規格・標準化が必要。一方で各々は連関しておらず、規格・標準化の策定に向けて個別の議論が必要と見られ、クリーン NH₃ の普及に必要な規格・標準化はおおよそ連関しておらず、個別の議論が必要と見られる
- ll) ISO において、船舶・発電関連でのクリーン（燃料）アンモニアに関する規格策定が始まった状況
 - 船舶では、TC 8/SC 3 において、アンモニア燃料システムに関する標準用語の定義が行われている⁴¹⁹

- 発電では、TC 67において、ボイラー製造者が環境性能（NO_x、N₂O等）を満たすために実施する試験に関して、指針の規定が行われている⁴²⁰
- mm) 船舶業界では、23年9月末に開催されたCCC9において、日本が提案した水素・アンモニア燃料船の安全ガイドライン案について参加国が合意。CCC10に向けて、引き続き検討が行われる⁴²¹
 - アンモニア燃料船においては、毒性エリアの範囲の設定方法に関して合意がなされている
- nn) 一方で、アンモニアの主要プレイヤー・主要機関は、船舶業界でのルールメイキングはあくまで船上に係る範囲であり、他産業にも波及していくとの考えは持っていない
 - IMOが主導するルールメイキングはあくまで船上（+燃料補給等の船舶に関わる範囲）のみであり、他産業とは重なっていない⁴²²

[7] CO₂ 等を用いたプラスチック原料製造技術開発

[市場動向]

(プラスチック市場を取り巻く動向)

y) 化学産業は、産業別に見ると、鉄鋼業に次いで GHG 排出量が多く、化学メーカー各社において、各国の GHG 削減目標引上げに応じて、CN（カーボンニュートラル）に向けた取り組みを推進中

- グローバルでは、化学メーカー最大手である BASF、Sinopec、Dow は、それぞれ、2050 年の CN 化を目標として公表し、2030 年での CO₂ 排出量削減目標について言及、さらに BASF はスコープ 3 の削減目標と再生可能製品の売上高、Dow は再生可能ソリューションの販売数量についても言及⁴²³
- 国内においても、化学メーカー大手の三菱ケミカル、住友化学、東レは、同様に、2050 年の CN 化目標、および、2030 年での CO₂ 排出量削減目標について公表、さらに東レは GHG の排出量売上収益原単位の削減目標の引き上げを公表⁴²⁴

(プラスチック市場)

z) プラスチックの需要は、先進国において、リサイクル量の大幅な増加と使い捨てプラスチックの抑制の取り組みが推進されるが、新興国での経済発展による急激な需要増により、今後とも増加していく見通し

- IEA は、2018 年に、当時公表されている政策や化学業界の動向等に基づいた熱可塑性樹脂の生産量予測を公表しており、2020 年 398 百万トンから年平均成長率 1.3% (2020~2050 年) で成長し、2050 年 589 百万トンに到達すると予想⁴²⁵

aa) CN や CE（サーキュラーエコノミー）への対応のため、産業界においては、消費財の容器・包装や自動車を筆頭に、リサイクル・バイオマス樹脂の需要が増大する見込み

- 飲料食品メーカー（Coca-Cola や PepsiCo 等）は、リサイクル・リユースやバイオマス、CN 等に関するビジョン・目標を提示して取り組みを推進しており、リサイクルプラスチックの使用量は大きく増加する見込み
 - ◇ Coca-Cola は、2025 年までに、パッケージの 100%をリサイクル可能にし、2030 年までに、パッケージに 50%以上のリサイクル素材を使用すること等を提示⁴²⁶
 - ◇ PepsiCo は、2025 年までに、パッケージの 100%をリサイクル可能・堆肥化可能・生分解可能とし、2030 年までに、再生プラスチックの使用量を 50%にまで引き上げ、2040 年までにカーボンニュートラルを達成すること等を提示⁴²⁷
- 自動車の欧州系 OEM 各社（VW、BMW、Mercedes-Benz 等）は、素材を含むライフサイクル全体で長期的に CN を達成する目標を提示しており、2030 年には、自動車部品に使用される樹脂に対しても一定程度の CO₂ 排出量削減が求められる見込み
 - ◇ VW は、2030 年までに、ライフサイクル全体で車 1 台当たり CO₂ 排出量を 30%削減、2040 年までに主要な市場での新車のほぼ全てをゼロエミッション車にする等

を提示⁴²⁸

☆ BMW は、2030 年までに、Scope1~2 の 1 台あたりの GHG 排出量を 80%削減（2019 年比）し、商品購入・上流の輸送・流通に係る Scope3 の 1 台あたりの GHG 排出量を 22%削減すること等を提示⁴²⁹

☆ Mercedes-Benz は、2030 年までに製品ライフサイクルを通じた CO₂ 排出量を 2020 年比で 50%以上削減すること等を提示⁴³⁰

bb) プラスチックの種類としては、容器・包装における使い捨てプラスチック（PE、PP、PET 等）や、CN 化対応を迫られている自動車向け樹脂（PP、PU（ポリウレタン）等）等に関し、リサイクルプラ・バイオプラの活用や CO₂ 排出量の削減が求められている

➤ 容器包装においては、PE、PP、PET で需要量全体の約 9 割⁴³¹を、自動車用樹脂においては、PP、PU、PA（ポリアミド）、ABS、PE、PVC、UPE（超高分子量ポリエチレン）、PE で需要量全体の約 9 割⁴³²を含む

ee) 2024 年においては、既にプラスチック関連目標を提示している企業の全社定量目標について、一部引き下げの動きが見られた

➤ Coca-Cola のグループ企業である Coca-Cola Europacific Partners は、2022 年 11 月に環境関連のコミットを更新し、2030 年にはバージンプラスチックの使用を止めることを提示する等、コミット強化の動きが見られていた⁴³³⁴³⁴

➤ 一方で、2024 年、Coca-Cola は、目標の進捗状況等を踏まえて販売するボトルのリサイクル素材・缶に関する回収目標の引き下げを発表、Coca-Cola は 2030 年までに包装におけるリサイクル素材の使用率を 50%まで引き上げることを目標としていたが、再生 PET の割合は、2021 年に 13%、2022 年に 15%、2023 年に 17%であり、2030 年の目標達成が困難な状況であった⁴³⁵

（業界動向）

dd) CN、CE 対応のため、化学業界では、製造プロセスの CN 化、および、製品の CN・CE 化を推進している

ee) 基礎化学品製造プロセスについては、主に入手容易な原料に依存し、地域によって異なっており、主要なプロセスであるナフサの熱分解に関しては、アジアや欧州を中心に広く実施されている⁴³⁶⁴³⁷⁴³⁸⁴³⁹

➤ 日本を含むアジアや欧州では、原油やナフサを輸入し、ナフサから種々の基礎化学品を製造しているため、ナフサ熱分解炉が主に採用されている

➤ エチレン生産能力が現時点で最も大きい米国では、シェールガスが安価に調達可能でエタンの水蒸気分解が増加傾向にある（2022 年では生産能力の約 4 割を占める）

➤ エチレン生産能力が現時点で次に大きい中国では、中国企業や中国に進出する企業（BASF）を含めナフサ熱分解炉の新設計画が存在し、ナフサの熱分解が依然として主流であり、安価な石炭を原料に用いた CTO(Coal to Olefin)による製造も一部採用（2022 年では国内生産能力の約 2 割を占める）されているが、環境負荷の大きさ等か

ら増加は限定的である

- ff) 製品の CN・CE 化の一手段として、廃プラ、バイオマス、CO₂の原料化が、基礎化学品メーカー、機能性化学品メーカーにより進められている
 - GI 基金事業では、「廃プラ・廃ゴムからの化学品製造技術の開発」において、基礎化学品メーカーや顧客となる化学品ユーザーを中心に廃プラ、バイオマス原料の活用を、「CO₂からの機能性化学品製造技術の開発」、「アルコール類からの化学品製造技術の開発」において、基礎化学品・機能性化学品メーカーを中心に CO₂の原料化を推進中
 - 海外でも、廃プラ、バイオマス原料の活用に関しては、基礎化学品メーカーや化学品ユーザー、CO₂の原料化においては、同様に基礎化学品・機能性化学品メーカーを中心に、互いに提携し、取り組みを推進中
- gg) リサイクル技術を有するスタートアップへの投資が盛り上がりを見せており、これまで盛んであった化学メーカーに加え、飲料メーカー等のプラスチックユーザーにも拡大している
 - 2023 年 7 月、Coca-Cola はボトラー 8 社と連携し、\$137.7M 規模のサステナビリティ特化型のベンチャーキャピタルファンドを設立⁴⁴⁰
 - 2020 年にサントリーの呼びかけにより設立されたアールプラスジャパンには、複数の消費財メーカー等が参画しており、プラスチックのケミカルリサイクル技術を有するスタートアップである Anellotech 社の技術を社会実装化させるべく 2023 年時点においても活発に活動中⁴⁴¹

[技術動向]

【ナフサ分解炉の高度化技術の開発】

- hh) GI 基金事業では、ナフサ熱分解プロセスの脱炭素化に向け、CN 燃料への熱源転換として、アンモニアを熱源とした技術開発を推進中
 - 熱源変換により、既存の熱分解炉でのオフガス燃焼時とは異なる温度分布となり、所定の生成物が得られないため、温度分布制御のための技術開発を推進中（GI 基金：燃料アンモニアサプライチェーンの構築で課題となっているグリーンアンモニアの合成コスト削減や NO_x 低減の開発も必要。GI 基金事業以外では、国内において、出光興産が 2024 年 2 月商業用ナフサ分解炉の燃料として、既存燃料の約 2 割をアンモニアに切り替えて操業し、アンモニア燃焼が可能であることを確認⁴⁴²
- ii) 一方、CN 燃料ではなく、再エネ電力を熱源とした取り組みについても進められており、主に欧州において、グローバル大手化学メーカーによる企業連合等の動向が見られ、温度分布制御のための技術開発と、ナフサ熱分解に必要な電力を供給するための大規模な再生エネ供給設備の導入検討を推進中
 - BASF は、SABIC、Linde とともに、独連邦経済・気候変動省の助成プログラムにおいて、2021 年 3 月から従来の熱分解炉と比較して 90%の CO₂削減を見込む電気加熱式ナフサ分解炉の開発を開始し、2024 年 4 月に実証プラントの稼働開始を発表。20 年代後半までに実証段階完了、2030 年以降での商用化を目指しており、同時に、化石燃料に

依存している基礎化学品製造の電熱化の電力源として、独エネルギー企業 RWE と北海に大規模な洋上風力発電所を建設するプロジェクトを推進⁴⁴³

- Dow は、Shell とともに、オランダ政府からの助成金を受け、既存の熱分解炉の電化を目指すと同時に、長期的には電化された熱分解炉の新設計に用いる革新的な技術開発を推進中で、Scope1 の CO₂ 排出量を 90%削減できる見込み⁴⁴⁴
- LG Chem は、既存のナフサ熱分解炉を電熱化した e-furnace に関し、2025 年までに導入することに言及⁴⁴⁵

【廃プラ・廃ゴムからの化学品製造技術の開発】

- jj) GI 基金事業では、i) 使用済みタイヤのケミカルリサイクル（油化）による C2-C4・BTX・カーボンブラック製造、ii) 廃プラからのケミカルリサイクル（熱分解（オレフィン化））によるオレフィン・ポリマー製造、そして iii) 植物原料からの合成ゴム原料（バイオブタジエン・イソプレン）製造に関し、技術開発を推進中
- ケミカルリサイクルの技術において、ガス化、熱分解（油化）、熱分解（オレフィン化）のうち、ガス化は一部商用化されている技術があるが、GI 基金事業で取り組んでいる、熱分解（油化）、熱分解（オレフィン化）は海外含め技術開発中
- kk) 実用化に向けては、リサイクル可能な廃プラスチックの選択の自由度の向上（分別・前処理技術の高度化、原料自由度の高い触媒開発等、静脈側の取り組みと、リサイクルし易い素材の活用に向けた素材設計等動脈産業側の取り組み）、収率の向上、製造コスト・CO₂ 排出量の削減の観点での技術開発が重要で、バリューチェーンを構築する企業との連携が必要。廃タイヤおよび廃プラのケミカルリサイクル事業においては、海外ではスタートアップを起点に商用化が加速している
- i)~iii)の技術開発に対し、それぞれ類似の技術開発が国内外で実施されており、樹脂製造バリューチェーンの構築に向け、各企業と提携し、技術や事業化に向けた検証や、規模拡大の取り組みを推進中
 - ◇ i) 使用済みタイヤのケミカルリサイクル（油化）では、Pyrum が廃タイヤを原料として熱分解油とカーボンブラックを製造する技術を確認しており、熱分解油から樹脂を製造する技術を確認している BASF と連携し、2022 年から Mercedes-Benz の自動車部品向けの量産樹脂を生産を開始（Mercedes-Benz は廃タイヤを供給）^{446,447}。Pyrum は、2024 年に既存商用プラントの容量を 3 倍に拡張させる見通しであり、更に今後パートナー企業と連携し、世界各地でプラント建設を進める予定で事業を急拡大し、2025 年以降も複数のプラントの着工を開始する見通し⁴⁴⁸。2024 年には Continental とリサイクルカーボンブラックの 10 年間の購入契約を締結し、2024 年 11 月に追加の 2 ラインから製造する rCB について無制限の納入許可を取得⁴⁴⁹
 - ◇ 同様に廃タイヤのケミカルリサイクル技術を有する LD Carbon は、2022 年時点でカーボンブラックを年間 9000 トン生産する商用リサイクルプラントを稼働中。

タイヤメーカー大手の **Hankook** および化学大手の **SK Innovation** 等と連携し、VC 構築を推進中。2024 年上期には rCB と熱分解油それぞれ 2 万トン/年の商用プラントを稼働見込み。更に 2022 年 11 月に LD Carbon は住友ゴムと MoU を締結し、2026 年までにカーボンブラック年間 3,500 トン、熱分解油年間 4,000 トンの商品化を目指すことを公表^{450,451}

- ◇ ii) 廃プラからのケミカルリサイクル（熱分解（オレフィン化））では、**Anellotech** が廃プラを触媒により **BTX** とオレフィンに分解する技術開発を進めており、出資先である **Suntory** の主導により、国内企業を中心に原料調達から包装容器製造、使用までの企業と連携して事業化を検討中であり、現状はパイロットレベルの実証試験中で、2024 年にはエンジニアリング会社の **Technip Energy** と提携して実証プラントでの試験を行うなど、2030 年での再資源化技術の商用化を目指している⁴⁵²
 - ◇ また、原料として廃プラを使用し、オレフィンを製造する技術としては、ケミカルリサイクル（油化）も競合となり得、**Recenso** や **Quantafuel** 等の **BASF** と連携しているスタートアップや、**Mura Technology** といった **Dow** や三菱ケミカルと連携しているスタートアップ、環境エネルギーといった出光と連携しているスタートアップ等が存在し、商用化に向けた検討を推進中⁴⁵³
 - ◇ 特に **Plastic Energy** の熱分解技術を採用する商用プラントの建設計画が従来の欧州内に留まらずマレーシアや韓国等にも拡大⁴⁵⁴
 - ◇ 欧州では、**Pryme** が商用プラントの稼働の開始を発表するほか、米国では **LyondellBasell** が実証プラントの建設を発表⁴⁵⁵
 - ◇ iii) 植物原料からの合成ゴム原料（バイオブタジエン・イソプレン）製造では、**Shell Eastern Petroleum** 社が廃プラやバイオ原料から製造したブタジエン原料を調達し、合成ゴムを製造する旭化成の取り組みが存在
- ll) 開発したリサイクル技術については、技術ライセンスの販売によりグローバル展開が可能
- 廃プラのケミカルリサイクル（油化）のスタートアップである **Mura Technology** は、**Dow** やエンジニアリング大手の **KBR** 等から出資を受けつつ、技術ライセンスを三菱ケミカル等大手化学メーカーに販売⁴⁵⁶

【CO₂からの機能性化学品製造技術の開発】

- mm) GI 基金事業では、主に、CO₂を原料として機能化学品原料（PU 原料、PC 原料）を製造する技術開発を推進中
- nn) 国内外では、CO₂から、カーボネート、ポリオール、アクリル酸等を経由しての、PC、PU 等の化学品の製造に関する技術開発が推進されている
- 旭化成では、国内で CO₂を原料としたカーボネートを用いた、汎用 PC の量産化を実現、中国では 2024 年 11 月に高純度 EC 及び DMC を技術ライセンスした新プラントが稼働を開始⁴⁵⁷

- Covestro では、ドイツにて CO₂ を原料としたポリオールを用いて、発泡軟質 PU の量産化を実現しており、2021 年に大手シートメーカーの Adient がシートシステム用クッションに Covestro の持続可能材料を採用する等、既に商用化の段階にある
 - BASF では、CO₂ とエチレンから、高吸水性樹脂の原料となるアクリル酸ナトリウムを製造する方法について実験室レベルでの実証を終え、規模拡大に向け技術開発中
 - スタートアップによる商用プラント建設が公表される等、海外では事業展開が加速しており、Twelve は電解還元により、CO₂ からポリカーボネート・ポリウレタン・ポリプロピレン・SAF 等の生産を実現し、2023 年に商用プラントの建設(SAF 中心の見込み)を公表し、2024 年 9 月には 972 億円の資金調達を発表⁴⁵⁸
- oo) CO₂ から製造する化学品の機能性を高めることで、高付加価値品化を実現した製品が存在
- 三菱ケミカルは、バイオ原料からバイオポリカーボネート (DURABIO) を製造しており、環境性に加え透明性や硬度が高いことから、石油由来ポリカーボネートの数倍の流通価格を実現⁴⁵⁹
- pp) CO₂ から化学品を製造する際は、原理的に多くのエネルギーが必要になるため、環境価値を訴求するには製造工程を含めた CO₂ 排出量を把握することが必要
- ポリカーボネートの製造において、CO₂ を原料とする製法の方が、CO₂ を原料としない製法に比べ、全体の CO₂ 排出量は大きいという試算結果も存在⁴⁶⁰
- qq) CO₂ による機能化学品製造においては、CO₂ の調達や技術開発、更に顧客の採用による需要拡大が重要であるため、コンソーシアムを構築し各企業と連携して技術開発や製品展開を進めている
- Econic は、三洋化成、Changhua Chemical、Chimcomplex 等の化学メーカーに対してライセンス契約の締結を発表⁴⁶¹

【アルコール類からの化学品製造技術の開発 ①グリーン水素 (人工光合成) 等からの化学原料製造技術の開発・実証】

- rr) GI 基金事業では、人工光合成により水から H₂ を直接製造し、基礎化学品の原料として活用する技術開発を推進中
- 水素製造について、100m² 級人工光合成フィールドテストフィールドに成功
 - 基礎化学品 (特にオレフィン) 製造については、CO₂ と H₂ から、アルコールを経由して、オレフィンを製造するプロセスが主流で、技術開発を推進中
- ss) 海外では、原料となる H₂ について、人工光合成による水素製造に関する技術開発は推進されているものの、ラボレベルの研究開発段階で、未だ事業化の動きは見られていない⁴⁶²
- tt) 人工光合成については、電力ではなく太陽光で反応が進むため低コストというメリットが存在し、有望用途として化学品製造を捉え、国内で小規模の実証試験が行われている
- uu) 一方、人工光合成以外のグリーン水素製造方法として、再エネ利用による水電解について主に開発が進められ、国内外で大規模な実証試験が実施されている
- Siemens Energy は、PEM 形水電解装置の開発を手掛け、大規模グリーン水素製造プ

プロジェクトや産業向けの販売を進めており、国内では東レ等とともに、GI 基金事業として国内最大級 10MW 級の PEM 型大型水電解装置の技術開発、建設、実証を共同で推進中⁴⁶³

- ITM Power は、PEM 形水電解装置の大型案件の受注を進めており、量産化によるコスト削減を目指しており、国内では住友商事と東京ガスとともに、メガワット級水電解装置の実証試験を実施中⁴⁶⁴
- vv) CO₂ と H₂ からの化学品製造技術については、メタノールを合成する技術が存在し、既に商用化されており、商用プラント建設の動きも見られる⁴⁶⁵
 - スペインでは Anasol、中国では Goldwind による商用プラント建設開始などの動きも見られる⁴⁶⁶

【アルコール類からの化学品製造技術の開発 ②メタノール、エタノール等からの基礎化学品製造技術の開発・実証】

- ww) GI 基金事業では、メタノールやエタノール等のアルコールから、エチレン・プロピレン等を製造するプロセス (MTO/ETO) の技術開発を推進中
- xx) 海外、特に中国では、既に MTO 技術の商用化実績があり、製造コスト削減のための技術開発が進展
 - 中国では、安価に産出される石炭を原料として、メタノールを経由してエチレンを生産する CTO/MTO 技術に関して、数十万トン規模の商用化設備を複数稼働している⁴⁶⁷
 - スタートアップによる商用プラント建設が公表される等、海外では事業展開が加速しており、Carbon Recycling International は、CO₂→メタノール→化学品の商用プラントを 2022 年と 2023 年に相次いで建設しており事業展開が加速⁴⁶⁸
 - 中国では、2024 年 1 月に化学メーカー Guangxi Huayi Energy Chemical が、エンジニアリング会社の Wison Engineering に設備の建設を発注し、年産 100 万トンの MTO プロジェクトを開始⁴⁶⁹
 - 化学メーカー LG Chem は、ETO 技術の特許を取得している Gevo とのバイオプロピレンの共同開発に関する契約の延長を発表⁴⁷⁰

【国際・ルールメイキング動向】

- yy) GHG 削減の流れに加え、海洋プラスチック汚染に関する問題提起から、各国のプラスチック関連の主要戦略にも則り、使い捨てプラスチックに関する規制や、CO₂ 削減量に応じたインセンティブ等の政策策定が各国において進行中。商用化プラントの投資決定には長期の収益見込みが必要であるため、10 年以上に及ぶ支援制度も存在
 - EU は 2018 年に欧州プラスチック戦略を、日本は 2019 年にプラスチック資源循環戦略を、米国は 2021 年に国家リサイクル戦略を策定し、2024 年に新たに国家リサイクル戦略を策定⁴⁷¹

- EU ではリサイクル材使用規制において 2030 年に飲料ボトルにおいてリサイクルプラスチック含有量を 30%以上に⁴⁷²、ELV 法改正案において規則発行日から 6 年以内に新車のリサイクルプラスチック含有量を 25%以上にするよう定められた（ただし、ELV 法改正案は審議中）⁴⁷³
 - EU では PPWR が発効し、包装に対する流通要件や、リサイクルプラの最低含有量についての目標が設定された⁴⁷⁴
 - EU ではグリーン・ディール産業計画において、グリーン水素 1kg あたり固定プレミアムの補助を 10 年間にわたり提供⁴⁷⁵
 - EU で発生した廃棄物について、EU 域内から域外国への処分を目的とする輸送、及び、非 OECD 国への回収を目的とする輸送を禁止する法律が発効⁴⁷⁶
 - 米国では IRA により、単位水素あたりの CO₂ 削減量に応じて最大 3 ドル/kg の税額控除を、CCUS に対しては、採用技術や稼働開始時期等に応じて、12 年間にわたり最大 180\$/ton-CO₂ の控除を提供⁴⁷⁷
 - 英国ではグリーン水素製造プロジェクトを対象に、事業の初期費用及び継続的な活動に対する支援を開始⁴⁷⁸
 - ドイツでは企業の脱炭素の取り組みに対して、資本的支出及び事業運営費の支援を開始⁴⁷⁹
- zz) CCUS ビジネスに関しては、CO₂ の固定期間や固定効果に関する議論が存在。CCU により、CO₂ から化学品や燃料を合成する場合は、ワンパス分は化石資源を新たに掘削せず CO₂ が削減されたとみなされる
- 米国 IRA 法では、CCU により CO₂ から化学品や燃料を合成する場合、CO₂ 削減効果があるとみなし、税制控除の対象となっている
- aaa) IEA の「Net Zero by 2050」によると、2050 年に向け、燃料用途の石油や石炭はバイオマスや太陽光・風力等の再エネに置き換わるが、化学品の原料用途の石油の需要は横ばいで、世界的にも当面使い続ける予測⁴⁸⁰
- bbb) 環境影響指標の評価のための樹脂の認証として、原料評価の指標、GHG 等排出量の指標、製品の品質・安全性に関する指標の 3 区分があると考えられる
- 原料評価に関しては、原料のサステナブル性の評価・担保のため、投入された廃プラやバイオマス由来の原料の量に相当する製品に対し、概念的にリサイクル率 100%と認める方法であるマスバランス方式が検討され、マスバランス方式を用いた認証制度が設立⁴⁸¹
- ◇ ケミカルリサイクルのマスバランスアプローチに関しては、BASF のケミカルリサイクルのバリューチェーンに係る企業を中心に設立された Ecocycle による ecoloop という認証や、BASF も参画していた Ellen McArthur 財団でのマスバランスアプローチの検討など、一部地域での認証設立・導入や、グローバル機関での各国の主要プレイヤーを巻き込んだ検討を経て、ISCC Plus 等のグローバル認証が確立

- 廃プラのケミカルリサイクルにおいては、ISCC PLUS の認証取得が普及し、業界のスタンダードになりつつある
 - ◇ TotalEnergies, Aramco, SABIC は、廃プラスチックをケミカルリサイクルしポリマーを生産することに成功し、2023年7月に中東地域で初となる ISCC PLUS 認証を取得⁴⁸²
 - ◇ Neste 等 4 社は、フィンランドケミカルリサイクル再生原料で架橋ポリエチレン (PEX)パイプの製造に成功し、2023年2月に ISCC PLUS 認証を取得⁴⁸³
 - 製品品質に関しては、UL や EN など、主要地域での既存認証に組み込まれる形で、制定が進んでいる⁴⁸⁴
 - GHG 排出量に関し、CFP やカーボンニュートラル性を示す認証の活用が進展しており、更に、リサイクルプラやバイオマスプラの LCA フレームワークや、Scope3 排出量の算出方針に関連するルール形成も進んでいる⁴⁸⁵
- ccc) 水素に関する認証として、CertifHy では、生成された水素が、化石燃料と比較して 60%以上の GHG 削減効果を有していれば、グリーン水素製造認証書を発行することが可能⁴⁸⁶

[8] CO₂ 等を用いた燃料製造技術開発

【合成燃料市場】

[市場動向]

- q) 世界的に CN 実現が求められる中で、エネルギー密度やインフラ敷設の観点から今後も電動化・水素化が難しいアプリケーションが存在し続けるため、液体燃料の脱炭素化が必要とされている⁴⁸⁷
- r) 水素と CO₂ を原料とする液体燃料である合成燃料は、環境価値が高いと考えられており、同様に環境価値が高いバイオ燃料よりも原料の供給量に余裕がある為、世界的に需要が増加すると想定されている
- IEA の NZE シナリオにおいては 2035 年、APS シナリオにおいては、2040 年以降に合成燃料の導入量が本格的に増加する見通し⁴⁸⁸
 - ◇ NZE シナリオでは 2035 年に 1,600 万 toe (石油換算トン)、2040 年に 5,600 万 toe、2050 年に 13,500 万 toe と推移する見立て
 - ◇ APS シナリオでは 2040 年に 1,800 万 toe、2050 年に 7,600 万 toe と推移する見立て
 - ◇ STEPS シナリオでは合成燃料は導入が進まない見立て
 - これまで発表された合成燃料製造プロジェクトによると、2030 年時点において合成燃料生産に必要な水素は、世界における水素製造プロジェクトの 45% 程度を占める見込み(ただし、水素製造に関する IEA の統計には、アンモニア、メタノール、合成炭化水素(合成メタン、ディーゼルや灯油のようなフィッシャー・トロプシュ製品)等の製造に必要な水素量が記載されているため、GI 基金の対象とする合成燃料とは差異があることに注意)⁴⁸⁹

[技術開発]

- s) 合成燃料の製造技術は、① FT 合成によるものと②メタノール合成によるものに大別される。さらに①の中では、現在主流となる①-1: 逆シフト反応と FT 合成を用いる既存プロセスと、製造効率向上を目的とする①-2: 革新的プロセス(CO₂ 電解、共電解、Direct-FT 等)に大別することができる。一方で②の例としては MTG 法が挙げられる⁴⁹⁰
- t) ①は、触媒開発や電解装置の大型化・制御の面で技術的な課題を抱える⁴⁹¹
- ①-1 は、低温下で工業的に使用されているシフト反応用の触媒を流用することが困難である為、高温に耐え得る触媒の開発が必要
 - ①-2 のうち CO₂ 電解は、現存する電解装置では大規模かつ安定的に CO を生成することが出来ない為、複数の電解装置を一体運用するための設計開発が必要
 - ①-2 のうち共電解は、CO₂ 電解と同様、電解装置の大型化が必要であることに加え、高温下の反応で、電解装置の劣化や副反応が起こる為、電解装置の耐久性向上や副反応の制御が必要

- ①-2のうち Direct-FT は、逆シフト反応と FT 合成反応の双方の反応を同時に進行させ、かつ生成する炭化水素の C の数が大きい触媒の開発が必要

[業界動向（産業構造）および競合動向]

- u) 欧州を中心に、合成メタノール製造を含む数多くの研究開発・実証プロジェクトが立ち上がっており、今後も大幅な生産数量の増加が見込まれている^{492,493}
 - プロジェクト実施地域に関して、発表されているプロジェクトのほとんどを欧州企業が占めており、北米ではより大規模なプロジェクトが進行している。
 - プロジェクトの実施時期に関して、2020 年代の前半に小規模の製造が開始され、早期の商用化を目指すプロジェクトでは 2020 年代後半以降に大規模な生産が達成される見込み
- v) プロジェクトの実行主体は、自動車会社やオイルメジャーに加え、水電解や CO₂ 回収の技術を持つスタートアップやそれらのコンソーシアムが多い⁴⁹⁴
 - 自動車会社としては Audi が 2018 年 60 リットルの e-ガソリン生産に成功。またポルシェはシーメンスなどと共同で Haru Oni プロジェクトを主導し、e-ガソリンの生産に着手
 - 石油会社では Repsol がアラムコと共同で合成燃料工場を建設しており、2024 年の稼働開始時は 50BPD 規模となる予定。また Total は Sunfire などと共同で e-メタノール（回収した CO₂ とグリーン水素によるメタノール生成）の製造に着手しており、将来的に合成燃料へのアップグレードも見据える
 - スタートアップでは、共電解技術を有する Sunfire が、DAC 技術を有する Climeworks や FT 合成技術を有する Ineratec と連携して、CO₂ 回収から燃料精製までを一気通貫で行う試験を 2019 年に実施
- w) 合成燃料は水素製造コストが占める割合が大きい為、再エネが安価な地域で実証が進められている。また、安価な再エネ電源獲得に向けた動きも見られる⁴⁹⁵
 - チリの Haru Oni プロジェクトでは風が強いという地域特性を生かし、風力発電によって得た再エネ電力で水電解を行って水素を生成
 - WESTKUSTE100（ドイツのコンソーシアム）ではセメント工場から排出される CO₂ を回収し利用。また電力は洋上風力発電によって賄う
 - Shell はロッテルダム港に欧州最大規模 200MW の水電解プラントを建設。洋上風力発電所「ホランドセ・カスト・ノード」から安価な水素製造の実現を目指す⁴⁹⁶

[国際・ルールメイキング動向]

- x) 欧州では複数のプログラムを通じて、合成燃料等のカーボンニュートラルに関する技術開発を支援⁴⁹⁷
 - Horizon Europe（2021～2027 年、予算額 976 億ユーロ）は、全ての化学分野を対象に、基礎からパイロット研究段階までの支援を行うプログラム。合成燃料に関する技術開発においては、Proof of Concept からパイロット試験までの支援を担う
 - 欧州イノベーションファンド（2021 年～2030 年、予算額 100 億ユーロ）は、GHG 削

減技術実証を目的とした支援プログラムで、合成燃料に関する技術開発においては、パイロットプラント建設後の実証試験に係る補助を行う

- y) 欧州では RFNBO (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) とみなす合成燃料の条件に関して近年議論が進められ、DAC 由来の CO₂ を原料とする合成燃料に加えて、CCU 由来の CO₂ を原料とする合成燃料も、2040 年までは RFNBO として認められる
- 欧州では代替燃料の定義への検討が進められており、欧州では合成燃料原料 CO₂ に関し、CCU と DAC の 2 パターンの内、DAC しか認めない動きが見られていた^{498,499}
 - 2023 年 2 月、欧州委員会は RFNBO* とみなす合成燃料の条件を採択。CCU 由来の CO₂ を原料とする合成燃料も、2040 年までは RFNBO として認められる想定⁵⁰⁰
 - CCU 由来 CO₂ を原料とする合成燃料の RFNBO 認定に対する障壁は高いとみられているが、2040 年以降も現行認定制度を維持し、利用を進める動きがみられる^{501,502}
 - 欧州は 2030 年の GHG 削減目標 55% の達成に向けて「Fit-for-55」の中で合成燃料の利用促進に向けて各種政策を発表した
 - ◇ RED II 改正案 (RED III) において、RFNBO の定義を改定した上で、「RFNBO の CO₂ 排出削減量を 70% 以上」と定めた⁵⁰³
 - ◇ RefuelEU Aviation について、2023 年 4 月に欧州議会は、欧州理事会と暫定的な政治的合意に達し、航空燃料における SAF と合成燃料の最低導入比率に関して 2030 年に 1.2%、2050 年に 35% を目指す⁵⁰⁴
- z) 合成燃料等 CO₂ を活用した燃料の社会実装に向けては、これらの燃料が脱炭素燃料であるとの国際的評価の確立、CO₂ 削減価値の帰属に関する議論の整理、合成燃料製造時に回収される CO₂ のオフセット制度構築、燃料の規格・標準化等、様々なルール整備が必要となる。欧州を中心に様々なプレイヤーが議論を進めている状況
- 2021 年 7 月の公表された EU-ETS 改正法案において、カーボンリサイクル燃料の CO₂ 排出は、排出・回収側で排出量を計上する事と、排出の二重計上を回避すべきとの案が示されている
 - ◇ その後、2022 年 12 月欧州議会で合意。EU 官報掲載後、発効予定^{505, 506}
 - 2021 年 12 月にドイツで発足した 3 党連立政権は、クリーンな電力と水素を用いて製造される E-fuel を燃料とする内燃エンジン車の使用を許可する方針と発表⁵⁰⁷
 - 自動車関連企業やエネルギー会社などが参画する独系コンソーシアム E-fuel Alliance は、CN 燃料としてバイオ燃料と E-Fuel を認めるよう主張⁵⁰⁸
 - EC (欧州委員会) は「自動車は電動化が優先であり、E-fuel は船舶や航空機を優先すべき」との考え。2035 年以降のエンジン搭載車の販売を認めない方針であったが、2023 年 3 月、ドイツの主張も踏まえ、合成燃料を前提に 2035 年以降のエンジン搭載車の販売を認める意向を示した⁵⁰⁹
 - 日独米は 2023 年後期に、efuel の有用性や国際的ルール確立の必要性について国際会議にて取り上げ議論が進められている^{510,511,512}
 - RED の RFNBO では e-fuel としての性状・品質は規定されず、ASTM 規格や EN 規格

等、適用先業界の規格・標準にて別途規定される^{513,514,515}

- ◇ 航空機用燃料について、国際規格制定済みのため、国別の規格制定は不要である
- ◇ 自動車用燃料について、従来燃料同様国別に規格制定が進む見通しである
- ◇ 船舶用燃料について、規格未整備だが、IMO が規格整備を推進している

【SAF 市場】

[市場動向]

- aa) 航空分野における CO₂ 排出量は世界全体で 2.6% を占め、CO₂ 排出量削減に向けて SAF（持続可能な航空燃料）の導入が検討されている⁵¹⁶
- 航空業界の国際機関である ICAO は、国際航空輸送分野における 2021 年以降の CO₂ 排出量を 2019 年水準に抑えることを短中期目標に掲げ、2016 年にカーボンオフセットの仕組み（SAF やクレジットの利用）等を規定する CORSIA（Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation）導入を決定した。また 2022 年 10 月には 2050 年ネットゼロ達成という長期目標を採択するとともに、2024 年の CORSIA ベースラインを 85%（2019 年排出量比）とすることで合意⁵¹⁷
 - 航空機メーカーや業界団体等が参加する ATAG は、2021 年 9 月に公表した気候変動アクション「Waypoint 2050（第 2 版）」において 2050 年のネットゼロ達成を目標として発表。この中で 2050 年時点で必要となる CO₂ 排出削減量の半分以上を SAF 導入により実現することを想定⁵¹⁸
- bb) Waypoint2050（第 2 版）は 2030 年のジェット燃料全体の必要供給量を 5.5 億 kL と推計。世界経済フォーラム「2030 年 Ambition Statement」は 2030 年の SAF 割合 10% を目標に掲げる為、ジェット燃料全体の必要供給量に同目標 10% を乗じると、2030 年の SAF 供給目標量は 5,500 万 kL となる⁵¹⁹
- cc) ICAO は既存 SAF 製造プラント及び製造計画の積み上げから 2030 年の SAF 供給量を 1,360 万 kL と推計。世界経済フォーラムの目標踏まえた SAF 供給目標量と、(ICAO の積み上げによる) SAF 供給量の乖離が大きい⁵²⁰

[技術開発]

- dd) SAF 製造技術を原料によって大別すると、バイオマスを用いるもの、回収した CO₂ と水素を用いるものの 2 種類存在するが、前者の方が技術成熟度が高い状況
- バイオマスを原料とする製造方法のうち主要な方式は HEFA（廃食油・植物油を原料とした炭化水素製造）、FT（ガス化 FT 合成）、ATJ（アルコール経由）の 3 つ⁵²¹
 - 将来的にバイオマス原料の不足が懸念されることから、発電所や工場、大気中から回収した CO₂ とグリーン水素からジェット燃料を生成する PtL（Power-to-Liquid）技術も研究開発が行われている⁵²²
- ee) 技術成熟度、原料制約を踏まえた製造量ポテンシャルの観点から、SAF 業界における中心的な製造技術は、HEFA→ATJ および FT→PtL の順で移行すると見られている⁵²³

[業界動向（産業構造）および競合動向]

- ff) 原料の安定的な調達を目的に、大手サプライヤは買収や長期契約締結の動きを見せている⁵²⁴

- 例えば、HEFA 方式を採用する NESTE は、米国の大手廃食用油処理業者の Mahoney Environmental を買収。加えて、中国に新たな拠点を開設するなど、原料の安定調達に向けた動きを見せている⁵²⁵
 - また、FT 方式を採用する Fulcrum は、原料である都市ごみをごみ処理会社との長期契約で確保しており、合成粗油や SAF 等のバイオ燃料を生産している⁵²⁶
- gg) SAF の製造に関する多数の研究開発・実証プロジェクトが立ち上がっており、今後も生産数量の増加が見込まれる^{527,528}
- 実施地域に関して、欧州、北米を中心に今後多数のプロジェクトが立ち上がる見込みであり、南米においては、大規模なプロジェクトが立ち上がる見込みである
 - 技術方式に関して、現状 HEFA 方式により生産された SAF が市場のほとんどを占めており、今後 ATJ や FT 合成による SAF 生産が立ち上がる見込み
 - 製造原料に関して、CO₂/H₂ 原料を利用するプロジェクトとバイオマス原料を利用するプロジェクトに分かれる
 - ◇ CO₂・H₂ 原料を用いた SAF 生産プロジェクトは、現状プロジェクト数や生産数量が限られているものの今後増加する計画であり、多くのプロジェクトにおいて、2020 年台後半での稼働開始が見込まれている。また、CO₂・H₂ 原料由来 SAF 製造は主に欧州で盛んに実施される見込みである
 - ◇ バイオマス原料を用いた SAF 生産プロジェクトは、HEFA 方式による生産が先行して進んでおり、今後も 2030 年までに増産が進む計画である。また、今後 ATJ や FT 合成による生産が増加する計画であり、多くのプロジェクトにおいて 2020 年台後半での稼働開始が見込まれている。また、バイオマス原料由来 SAF 製造は主に欧米において盛んに実施される見込みである

[国際・ルールメイキング動向]

- hh) 欧米各国で SAF 導入促進に向けた各種政策が発表されているほか、グローバル全体としても SAF 利用に関するコミットメントがなされている状況
- 米国は「SAF Grand Challenge」において、SAF 導入に関する税制優遇策や製造量目標（2030 年 1,140 万 kL、2050 年 1.3 億 kL）を発表⁵²⁹
 - 米国は「インフレ削減法(IRA)」において、SAF 生産に対する設備投資支援や税額控除を実施している
 - ◇ 設備投資支援に、約 360 億円強の補助金を措置⁵³⁰
 - ◇ 米財務省と内国歳入庁（IRS）は 2023 年 12 月、インフレ抑制法（IRA）により創設された SAF 減税に関するガイダンスを発行⁵³¹
 - 欧州は「ReFuel EU Aviation 規則案」において、2050 年までの定量的な SAF 導入義務（2025 年までに 2%、2050 年までに 70%）を発表⁵³²
 - 欧州は「EU-ETS」において、航空会社に対して排出量取引制度への参加を義務付け、航空部門の排出枠を確保している⁵³³
 - ◇ 2023 年 4 月、2030 年 12 月 31 日まで 2,000 万件の排出枠を確保し、航空機

運航会社の化石燃料使用からの移行を奨励する変更がなされた

- ◇ 航空会社に対して排出量取引制度への参加を義務付け、燃料の一部として要件を満たす SAF を使用した場合には、SAF に含まれるバイオマス燃料部分につき排出ゼロとして扱うことが可能
- SAF の導入促進を目指す世界経済フォーラムの連合「Clean Skies for Tomorrow Coalition」に参画する企業 60 社が SAF の使用割合を 2030 年時点で 10%に増やすコミットメントを表明⁵³⁴
- ii) 官主導で森林残渣や植物油脂の燃料調達サプライチェーン構築に関する実証試験を行う動きも存在⁵³⁵
 - 米国農務省が主導で実施した NARA プロジェクトでは、収集された森林残渣からのバイオジェット燃料製造を実証
 - 欧州委員会が実施した ITAKA プロジェクトでは、農場でのカメリナの栽培・HEFA の供給を実証

【合成メタン市場】

[市場動向]

- jj) IEA の NZE シナリオによると、合成メタンの消費量は 2040 年に 2050 年に 919 億 m³となる見込み⁵³⁶
- kk) 但し、欧州では、ガスの脱炭素化は水素、バイオメタンが本命と位置付けられており、合成メタンは補助的な位置付け。2050 年においても、合成メタン需要は都市ガス全体の 3%程度に留まると見られる⁵³⁷
- ll) 日本はグリーン成長戦略において、2030 年に国内都市ガス需要の 1% (4 億 m³、28 万トン)、2050 年に 90% (360 億 m³、2500 万トン) を合成メタンで代替することを目標としている⁵³⁸

[技術開発]

- mm) メタネーション (合成メタン製造) 技術としては、既存技術であるサバティエ反応と、革新的技術である SOEC 共電解、ハイブリッドサバティエ、PEMCO₂ 還元の 4 種類が存在する⁵³⁹
 - サバティエ反応はグリーン水素と CO₂ を原料にメタンを合成する技術で、水電解による水素製造とメタネーションの複数プロセスを経ることから、エネルギー変換効率が低い点が課題。プロセス全体で熱マネジメントを高度化させつつ、変換効率を高める取り組みが求められる
 - SOEC 共電解は再エネ電力により水電解と CO₂ 電解と同時に行って合成ガスを生成し、触媒反応によってメタンを合成する技術。メタン合成の排熱を有効利用できるため 85-90%と高いエネルギー変換効率が期待できるが、SOEC の低コスト化とスケールアップの実現に課題が残存する状況
 - ハイブリッドサバティエは水電解と低温サバティエ反応を組み合わせた技術で、サバテ

イエ反応の排熱を水電解で有効利用できる点、低温プロセスであるために負荷変動に対応できる点が強み。一方で大型化や耐久性・信頼性に課題を抱える

- PEMCO₂還元は PEM を活用して水と CO₂ から直接メタンを合成する技術で、設備コストがシンプルであるため、CAPEX を大幅に低減できる点が強み。一方で大型化や耐久性・信頼性に課題を抱える

[業界動向（産業構造）および競合動向]

nn) 欧州を中心に研究開発・実証プロジェクトが立ち上がっている^{540,541,542}

- 実施地域に関して、発表されているプロジェクトのほとんどを欧州企業が占めているが、近年米国におけるプロジェクトも立ち上がり始めている^{543,544}
- 一部プロジェクトは 2025 年までの稼働開始を見込んでいるものの、稼働時期未確定のプロジェクトも一定数存在
- 欧州は合成メタンよりも水素、バイオメタンを本命と位置付けているが、合成メタンに関する実証プロジェクトも一定数存在している⁵⁴⁵
 - ◇ 「Store&Go」プロジェクト（2016～2020 年）では、ドイツ、スイス、イタリアの 3 拠点でメタネーションの実証試験が行われた。EU の研究助成制度である Horizon2020 の支援を受けた全 27 の機関が参加
 - ◇ フランスでは、ガス事業者 GRTgaz 社により 2018 年から「Jupiter1000 プロジェクト」が進んでおり、現時点では 25 Nm³/h の製造能力を有する
 - ◇ ドイツでは、Audi 社が 2013 年に e-gas plant を設置。製造能力は最大で 315 Nm³/h

[国際・ルールメイキング動向]

oo) 欧州では欧州委員会により 2021 年 12 月に「Hydrogen and decarbonized gas markets package」が発表され、電化が困難な産業部門や輸送部門においては、2050 年までに天然ガスから再エネ由来水素、バイオガス・バイオメタン、そして合成メタンを含む低炭素ガスに転換させる方針が示された⁵⁴⁶

pp) 2024 年 3 月世界初となる、合成メタンの世界的な普及拡大を目指す国際的アライアンス「e-NG Coalition」を設立が合意され、今後合成メタンの世界的な認知度向上や市場創出・取引促進の働きかけ、政策提言活動等が実施される見込み⁵⁴⁷

【グリーン LPG 市場】

[市場動向]

- qq) LP ガス（以下 LPG）は、国内においては都市ガスが接続されていない郊外・離島地域で普及しており、4 割の世帯（2,300 万世帯）で使用されている⁵⁴⁸
- rr) 海外ではインド・中国を中心としたアジア大洋州で LPG 消費が拡大しており、2030 年までに 5,000 万トンの需要増が見込まれる状況。これらの地域の脱炭素化ニーズを背景にグリーン LPG 輸出に取り組むことで、アジアのグリーン LPG 市場 2.7 兆円を取り込める可能性がある⁵⁴⁹

ss) グローバルにおける LPG 需要（エタン含む）は 2022 年時点で 4.4 億トンであり、2030 年頃まで需要の拡大が続く見込み。また 2050 年時点においても、一部新興国等における暖房・調理用途を中心に需要は一定存在する見立て⁵⁵⁰

➤ STEPS シナリオにおいては 2030 年に 5.0 億トン、2050 年に 5.2 億トンと推移⁵⁵¹

➤ APS シナリオにおいては 2030 年に 4.7 億トン、2050 年に 3.3 億トンと推移⁵⁵²

【技術開発】

tt) グリーン LPG 製造技術を原料によって大別すると、バイオマスを用いるもの、回収した CO₂ と水素を用いるものの 2 種類存在するが、前者の方が技術成熟度が高い状況⁵⁵³

➤ バイオマス原料を用いる場合、現在は主流のバイオディーゼルの副産物として生産する方法と、バイオガスを原料として合成する方法が存在する

☆ バイオガスをを用いた製造技術については古河電工などが研究開発を行っている。原料の性質上農地等での少量生産に向いている⁵⁵⁴

➤ CO₂ と水素を原料とするものには、プロパネーション（合成ガスに対して FT 合成を行う方式）、ブタネーションなどがあり、触媒技術の開発が必要となる⁵⁵⁵

☆ ブタネーションは HiBD 研究所藤元氏が開発したもので、CO₂ から LP ガスを 100%近い収率で合成可能な革新的技術。現状日本グリーン LP ガス推進協議会のもと研究開発が行われている⁵⁵⁶

【業界動向（産業構造）および競合動向】

uu) バイオ燃料の副産品としてバイオ LPG を製造している商用プラントが全世界に 30 あり、生産能力は総計 45 万トンに及ぶ。バイオ燃料の普及に伴い、その生産能力は今後も拡大すると想定される⁵⁵⁷

➤ Neste（フィンランド）はこの方式で大規模商用化に成功した最初の会社であり、シンガポールやオランダ・フィンランドに 3 拠点・計 13 万トンの製造設備を有する。また ENI はイタリアに 2 拠点・計 7.5 万トンの製造設備を有する

vv) 但し、既にバイオ燃料の副産物としてバイオ LPG が商用化されている欧州を見ると、現在のバイオ LPG の生産能力は欧州の LPG 総需要量の約 2%で、2050 年には約 9~21%を占めると想定されている。LPG の CN 達成に向け、プロパネーション、電化、CCUS 等を含めた総合的な取組が必要となる⁵⁵⁸

【国際・ルールメイキング動向】

ww) このような背景から、Liquid Gas Europe（欧州各国における LPG の業界団体や関係会社で構成される機関）は、再生可能エネルギー指令にてグリーン LPG に関するルール整備とインセンティブ設計を進めるべきと主張⁵⁵⁹

【自動車市場】

【市場動向】

xx) グローバルの GHG 排出量を部門別に見ると、運輸部門の排出量は全体の約 2 割を占める。うち、自動車の GHG 排出量が最多で 75%を占めることから、CN 達成のためには自動車か

らの CO₂ 排出削減が課題⁵⁶⁰

- 電動車の販売目標が導入されるだけでなく、ICE・HEV の販売禁止も検討されている⁵⁶¹

[技術開発/業界動向（産業構造）]

yy) 自動車から排出される CO₂ を削減するため、燃費や熱効率を向上させる取り組みが進んでいる

- 日本では、内閣府 SIP「革新的燃焼技術」研究グループが、2019 年に正味最高熱効率 50%超を達成⁵⁶²

[競合動向/国際・ルールメイキング動向]

zz) 欧米では、燃費や熱効率の向上に向け、国が主体となって研究開発目標を設定したり、産学連携プロジェクトを組成する動きが存在

- 欧州では、環境政策パッケージ「Fit for 55」の中で提案されていた「2030 年に乗用車の CO₂ 排出量を 2021 年（95g-CO₂/km）比で 55%削減する」という目標が 2022 年 10 月に合意済⁵⁶³
- 米国では、エネルギー省が産学連携の R&D プロジェクト「Supertruck2 プログラム」を推進した結果、Cummins が 2021 年にディーゼルエンジンにおける正味熱効率 55% を達成済⁵⁶⁴

[9] CO₂ を用いたコンクリート等製造技術開発

最新動向の整理

[市場動向]

- a) 世界における CO₂ 排出のうち、セメント業界による CO₂ 排出量が占める割合は高く、カーボンニュートラル達成に向けてアクションが期待されている
 - 世界においてセメント業界は、CO₂ 大量排出セクターの一つであり、2017 年において全排出量の 7%を占める⁵⁶⁵
 - 世界では、IEA が 2023 年に公開したセメント産業見通しによると、CO₂ 削減技術適用により CO₂ 排出量が 2021 年以降減少傾向に転じる⁵⁶⁶
- b) セメント生産における CO₂ 排出のうち、焼成プロセスにおける「原料由来 CO₂」と「燃料由来 CO₂」の排出が全排出量の大部分を占める⁵⁶⁷
- c) セメント分野における CO₂ 削減方法は主に「原料由来の CO₂ 排出量低減」、「燃料由来の CO₂ 排出量低減」、「CCUS による CO₂ 貯蔵・利用量の増加」に分類される⁵⁶⁸
 - 「原料由来の CO₂ 排出量低減」に関して、セメント中のクリンカ成分の比率を低減させることにより、焼成プロセスにおける CO₂ 排出の削減が期待される
 - 「燃料由来の CO₂ 排出量の低減」に関して、製造設備の改善や製造時に使用するエネルギーのグリーン化による削減効果が期待される
 - 「CCUS による CO₂ 貯蔵・利用量の増加」に関して、IEA より 2023 年に公表されたセメント分野におけるカーボンニュートラルへ向けたロードマップによると、2050 年時点で CCUS による大幅な CO₂ 排出抑制を見込む⁵⁶⁸
- d) CO₂ 削減に対する政策の影響および市場からの圧力を背景に、低炭素セメントの生産量は増加傾向であり、2050 年時点で 3,655Mt に達する見込み⁵⁶⁸

[業界動向]

- e) コンクリート・セメント業界は地産地消型の産業であり、バリューチェーンの構造は各地域・国で異なる⁵⁶⁹
 - 北米やアジアにおいては、セメント製造とコンクリート製造はそれぞれ専門のプレイヤーが実施する、分離型の構造を有する
 - 欧州においては、大規模な垂直統合型の企業が複数存在し、セメント製造からコンクリート製造まで一貫して実施する
- f) 低炭素コンクリート商業化に関して、DOE の発表によると主要な 6 つの課題が存在⁵⁶⁸
 - 「低炭素コンクリートを定義づけるシステムの不在」が主要な課題として存在し、低炭素セメント・コンクリート製品の定義と検証のための標準、データインフラの確立が解決策として挙げられている
 - 「新規ブレンド製法や新規原料の開発へ向けた投資の遅れ」が主要な課題として存在し、政府や産業界による低炭素セメント混合物や新素材の試験、検証、実証への投資やバリューチェーンでの採用促進策の制定が解決策として挙げられている

- 「セメントの調達モデル」が主要な課題として存在し、低炭素セメントプロジェクトに直接オフテイクする代替調達モデルの開発が解決策として挙げられている
- 「CCUS 含めた各脱炭素アプローチにおける構造的なコスト上昇」が主要な課題として存在し、政府による金銭的な支援や制度設計が解決策として挙げられている
- 「新興技術の技術成熟度の低さとコストパフォーマンス」が主要な課題として存在し、技術開発に対する政府の継続的な支援が解決策として挙げられている
- 「環境や健康リスク等に関する懸念に起因する公共サポートの不足」が主要な課題として存在し、地域経済との強固な関係構築と説明責任の履行が解決策として挙げられている

【技術動向】

- g) ベンチャー/欧米等、各主体の着目する技術領域には差異が存在し、欧州は製造プロセスにおける炭素分離回収に注力する一方、米国やスタートアップは製造プロセス以外の原料製造やコンクリート施工も含めた炭素固定・削減に注力している
- 累計資金調達額が大きい有望ベンチャーにおいて、そのほとんどがクリンカ代替品の選定・利用プロセス開発による原料由来 CO₂ 排出量の削減と、原料製造・コンクリート施工時の CO₂ 固定技術の開発に注力しており、既存セメント生産設備における CCUS 技術開発に注力するプレイヤーは見られない
 - ◇ LC3 Project においては、地球上に豊富に存在する低品質カオリナイト含有粘土と石灰石を使用し、ポルトランドセメント（欧州規格 CEM I）と同等の強度の低炭素コンクリートを製造する技術を開発⁵⁷⁰
 - ◇ Hoffmann Green Cement Technologies は、スラグを原料とし焼成なしの低炭素コンクリートを開発、販売。活性剤・超活性剤の添加とミキシングに独自性あり⁵⁷¹
 - ◇ MCI Carbon は、低温・低圧下で低濃度 CO₂ を産業副産物に固定して炭酸塩を製造する技術を有する⁵⁷²
 - ◇ Blue Planet Systems Corporation は、カルシウムを含む産廃と CO₂ から合成石灰骨材を製造⁵⁷³
 - ◇ Carbon Upcycling Technologies は、製鋼スラグなど地元で排出される産業副産物を中心とする固体原料に CO₂ を反応させてセメント補助材料を製造⁵⁷⁴
 - ◇ Solidia Technologies は、コンクリートを硬化させる際の水を CO₂ で代替する技術を開発し、大気中の CO₂ を固定^{575,576}
 - ◇ Fortera は、焼成後の石灰と排出された CO₂ を溶媒に溶かし ReCarb™ プロセスにより反応性炭酸カルシウムを形成⁵⁷⁷
 - ◇ CarbonCure Technologies は、産業分野から排出される CO₂ を原料に、既存のコンクリートへ注入し、成形製品を製造・販売⁵⁷⁸
 - 欧州プロジェクトにおいて、既存セメント生産施設に対する CCS 設備の適用が主に注

力されており、低コスト技術（酸素燃焼+液化）や Air Liquiid 社の Cryocap™ FG 技術（PSA 法と液化技術の組み合わせ）の適用可能性の検証が進められている⁵⁷⁹

◇ 欧州 Innovation Fund に支援されている CCS 関連プロジェクトは 2025 年から 2030 年にかけて操業開始を見込んでおり、GI 基金と比較して早期の立ち上がりが見込まれている

- 米国プロジェクトにおいて、電解槽を利用した新規セメント製造プロセスをやカーボン材料の利用等、最先端の技術含め、原料・燃料由来 CO₂ 低減施策および CCUS 技術開発の両方が取り組まれている⁵⁸⁰
 - 欧米において、大規模なセメント工場への CCS 設備適用に関するプロジェクトが始動する見込みである⁵⁸¹
- h) セメント・コンクリート業界は地産地消型の産業であるためプロセスを標準化することが難しい中、低炭素セメント関連の技術は地域間で共通する場合もありライセンスの動きが見られる
- Hoffmann Green Cement は、サウジアラビアにて、Shurfah Group とのライセンス契約を締結し、2024 年に初号機プラントの建設開始予定⁵⁸²
 - MCi Carbon は、2021 年に伊藤忠商事に、日本での事業展開の独占権を付与⁵⁸³
 - Fortera は、2022 年より米 Lehigh Hanson（HeidelbergCement 子会社）にてパイロットプラントを建設中（15,000t/年）⁵⁸⁴
 - CarbonCure Technologies（加）は、2020 年に會沢高圧コンクリート等に対して、ライセンス契約を締結⁵⁸⁵
 - 一方、CarbonCure の生コンに CO₂ 注入するようなセメント製造ほど各社の製造プロセスに依存しない技術であれば、CO₂ 吸収量の測定方法等のルールを策定上で、ライセンスによりグローバルでの横展開が可能²⁰
- i) 世界各地でセメント・コンクリート領域での CCS プロジェクトが複数計画されており、Heidelberg Materials 社が担当しているノルウェー・ドイツの 2 つのプロジェクトのみ現在建設中⁵⁸⁶
- Heidelberg Materials 社はノルウェーにて、セメント工場で発生した CO₂ を分離回収し適地で貯留する CCS プロジェクトを計画しており、2024 年に稼働開始予定。ノルウェー政府主導で CCS インフラの整備を進めたことも、本プロジェクトの進捗に寄与している^{587,588}
 - Heidelberg Materials 社はドイツにて、セメント工場へモジュール式の CO₂ 分離回収設備を適用する実証試験を計画しており、2025 年に試運転を開始予定^{589,590}

[国際動向]

- j) コンクリート・セメント業界では、国内外で 2050 年カーボンニュートラルを目指す動きが推進
- 米国において、ポルトランドセメント協会がカーボンニュートラル達成実現へ向けたロ

ードマップを 2021 年 10 月に公表した⁵⁹¹

- 欧州において、セメント協会がカーボンニュートラル達成実現へ向けたロードマップを 2020 年に公表した⁵⁹²
 - 日本において、セメント協会が 2050 年に向けた「カーボンニュートラルを目指すセメント産業の長期ビジョン」を 2022 年 3 月に公表した⁵⁹³
 - コンクリート・セメント業界団体である GCCA が 2050 年までにカーボンニュートラルを達成実現へ向けたロードマップを 2021 年 10 月に公表した⁵⁹⁴
 - 気候変動対策プロジェクトを対象として活動する Climate Works 財団が、米国、中国、インドにおけるカーボンニュートラルへ向けたロードマップを 2021 年に公表した⁵⁹⁵
- k) 欧米において、コンクリート・セメント業界のカーボンニュートラル実現へ向けた政府機関による技術支援が実施された
- 米国において、DOE や ARPA-E による研究開発支援や政府が施行した IRA 法案による CCUS の導入促進へ向けた税額控除プログラムが実施された^{596,597}
 - 欧州において、欧州委員会による研究開発支援や欧州グリーンディールの一環として、CCUS の導入促進へ向けた法案が施行された^{598,599}
- l) コンクリート・セメント業界では、カーボンニュートラル達成に向けて、市場創出や技術開発へ向けた組織形成が推進
- コンクリート・セメント業界団体である GCCA において、アカデミアと産業界による基礎研究推進のための「Global Cement and Concrete Research Network」、有望なスタートアップの事業展開促進のための「Open Challenge」、および気候変動対策調整用の業界プラットフォームとして機能する「Concrete Action for Climate」が形成された⁶⁰⁰
 - 大規模な二酸化炭素排出量が予想されるセクターに所属する企業からなる First Movers Coalition において、所属する主要なコンクリート/セメントメーカーが 2030 年までのセメント・コンクリートの消費量の 10%以上に相当するニアゼロ製品の購入目標を発表し、低炭素製品のグローバルリポジトリである First Suppliers Hub を立ち上げるなど、ゼロエミッションの製品やサービスを購入することを現時点で約束することで、市場を創出し、成長を促進^{601,602}
 - 持続可能で脱炭素化された建築環境の導入を目的とする建設会社の団体である World Green Building Council において、需要サイド（建設分野）からの明確なニーズを示すことで低炭素コンクリート・ネットゼロコンクリート市場の早期の立ち上げを目的とするグローバルイニシアチブである「Concrete Zero」が形成された⁶⁰³

[ルールメイキング動向]

- m) 技術の社会実装には CO₂ コンクリートに関する国内/国際標準化が重要であり、コンクリートにおける CO₂ 固定量の評価方法について、方法論の提案や適用が始まっている

- IEAにおいて、2022年5月にG7会合に向けて出した提案文書では、ニア・ゼロ・エミッションのセメント用クリンカーの市場として2030年に250百万トンまで成長する可能性があり、ニア・ゼロ・エミッション製品の定義に関する議論も必要と提案⁶⁰⁴
 - ボランタリークレジット認証機関である、VCS、Gold Standard、Puro.earthによって、方法論が策定され、クレジットが発行されている^{605,606,607}
 - コンプライアンスクレジット認証機関である、J-クレジット制度によって、方法論が策定され、クレジットが発行されている⁶⁰⁸
 - コンクリート・セメント業界団体である、GCCAによって、方法論が策定されている⁶⁰⁹
- n) セメント・コンクリートに関する国際的な排出量算定方法論にはISO規格とGCCAの標準化方法があり、CCUS等新規技術の適用へ向けて更新が進行中である
- 国際標準であるISOに関して、セメント業界におけるGHG排出決定法に関するISO規格（ISO19694パート3）が2023年3月に制定された⁶¹⁰
 - 業界団体であるGCCAに関して、業界団体であるGCCAよりGHGH排出決定法に関するマニュアル（CO₂ and energy Protocol、2020年1月）や計算をサポートするスプレッドシートが公開された⁶¹¹
 - IEAによると、セメントとコンクリートに関する既存の国際的な排出量算定方法論には、ISO19694パート3とGCCAのCO₂ and energy Protocolがあり、これらはすでに整合済みである。（ISOとGCCAは共通のバウンダリやCO₂排出源に基づき算定を行っている）⁵⁶⁶
 - CCUS、焼成クレイ、水素利用のような新しい技術のための更新は、追加で対応が必要であり、GCCAが2022年にこの分野での更新作業を開始している⁵⁶⁶
- o) 製造会社は、自社の低炭素コンクリートの化学組成や物性等を既存のセメント・コンクリート規格に適合可能な形に調整し、認証を進めている
- 米国において、セメントの組成、仕様、試験方法等を規定するASTM規格や建築構造物適用へ向けたACI規格、AASHTO規格等が存在^{566,612,613}
 - 欧州において、EN規格がセメント・コンクリートの規定やその建築構造物への応用に関する規定を実施^{566,614,615}
 - 日本において、JIS規格や建築基準法、JASS5等の規格に関して改定実施が求められている^{616,617,618}

[10] CO₂ の分離回収等技術開発

[市場動向]

- a) 2050年CNに向け、各産業で再エネ導入や電動化・水素化が進むが、これらを最大限進めたとしても電力・産業・輸送部門で一定のCO₂排出は不可避であり、CO₂分離回収技術の活用が必須である。またカーボンリサイクルを社会実装する上でも、CO₂分離回収技術は最初に求められる重要技術である⁶¹⁹
- 電力部門では電力の安定性とレジリエンスの観点から火力発電を一定確保する必要がある
 - 産業部門では工業プロセス中で発生するCO₂が一定量存在しCO₂排出が不可避である
 - 輸送部門では新たに需要が高まる水素・バイオ燃料の製造により一定量のCO₂が発生する
- b) このような背景の中でCO₂分離回収技術に関する需要は高まりつつあり、当該技術による経済波及効果は2050年に10兆円超となる見立て⁶²⁰
- 経済波及効果はCO₂分離回収量（IEA「Energy Technology Perspective 2017」を参照）と分離回収コスト（日・米・中の目標値を参照）を乗じて算出した数値
- c) これまでも工業プロセス等から分離回収したCO₂を、炭酸ガスや尿素として利用する産業は存在していたものの、今後その用途は変化していくと想定される。具体的にはCCSが本格的に増加することが見込まれるほか、現在実証が盛んに行われている合成燃料や鉱物等新たな製品への利用も増加すると想定される⁶²¹
- CO₂分離回収施設については、現時点で94件が稼働中ないし建設中であり、今後500件以上が新たに計画されている⁶²²
 - ◇ 排出源別では、現時点で天然ガス・LNGが中心のところ、今後はバイオエネルギー/エタノール、水素・アンモニア・肥料製造、発電・発熱等に対して大きな増加が見込まれる
 - ◇ 地域別では、現在は北米・欧州にCO₂分離回収施設が集中しており、今後もこの傾向は継続する見込みである。特に北米ではバイオエネルギー/エタノール、欧州で水素・アンモニア・肥料製造、発電・発熱等に対するCCS施設が増加すると考えられる。また、中東も天然ガス・LNGに対するCCS施設の増加が見込まれる
 - CO₂輸送貯蔵専用施設については、現時点で10件が稼働中ないし建設中であり、今後200件以上が新たに計画されており、近年高い増加率で開発が進行している⁶²³
 - ◇ 地域別では、北米・欧州に集中してCO₂輸送貯蔵専用施設の開発が進行する見込み
 - ◇ 貯留先別では、今後地下貯留（dedicated storage）が大きく増加する見込み
 - ◇ CO₂輸送貯蔵専用施設の増加に伴い、ネットワークモデルやTransport & Storage as a serviceモデルが登場していることから、①CO₂分離回収事業に関して、（自社でインフラを整備する）コスト削減や輸送・貯蔵のリスク分散が可能となる

②CO₂を流す際の基準（濃度、夾雑物、その他化学物質の含有）が異なる可能性が考えられることから、利用する輸送・貯蔵施設に合わせた分離・回収技術の開発・選択が必要となる等の影響があると予測される

- d) 現在主要な CO₂分離回収技術としては、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離法、固体吸収法の 5 つが存在し、排出源の特性に応じて使い分けられる⁶²⁴
- e) 排出源別に CO₂分離回収設備の導入件数を見ると、現状は設備コストが抑えられる天然ガスの脱炭酸工程が主な導入先であり、発電所や工場等の低濃度排出源への導入は少ない⁶²⁵
 - 天然ガスの脱炭酸工程に最も導入されているのは化学吸収法である。これは最も商用化実績が長いことコスト競争力も高いことが背景にあると想定される
- f) 主要な技術方式を CO₂分離回収量ベースで比較すると、現状は化学吸収法による回収量が最も多い。今後もこの傾向は継続するとの見立てもあるが、これは技術成熟度の高い本方式が優先的に採用されると現時点では想定されるためであり、今後の技術開発動向次第では他の方式の採用が増える可能性もある⁶²⁶
- g) CCS の商業化は、CO₂濃度が高く夾雑物の少ない排ガスが生じるような、CO₂の回収が容易と見込まれる産業領域において実施されている
 - 米国において、CCS の商業化は盛んであり、近年主に天然ガス・LNG、水素・アンモニア・肥料生産、バイオエネルギー/エタノールの分野で適用が進んでいる^{627,628}
 - 欧州において、CCS の商業化件数は米国の約半数であるものの、商業化が進行中であり、主に天然ガス・LNG、発電・発熱等米国と異なる排出源への適用も進んでいる^{629,630}

【業界動向（産業構造）】

- h) CCS のビジネスモデルは①フルバリューチェーンモデル②ネットワークハブモデル③Capture as a service モデル④Transport and/or storage as a service モデルに大別される^{631,632}
 - ①フルバリューチェーンモデルについて、近年は単独企業や企業グループにより垂直統合され、従来の複数企業のコンソーシアムにより回収・輸送・貯蔵が実施される形式と異なる動きが見られる。^{633,634,635,636,637,638}
 - ◇ Shell は、自身が CO₂排出事業者でありながら、買収等を通じて CO₂分離回収技術を獲得し、分離回収プレイヤーとして他社に技術提供等も行っている。また、CCS プロジェクト「Quest」を主導しながら、貯留に関する実績も蓄積しつつある⁶³⁹
 - ◇ 三菱重工は単に CO₂分離回収技術を提供するだけでなく、CO₂の回収引き取りから貯留・利用までのプロセスを一手に担う事業モデルを検討している。加えて、CO₂流通を可視化する IT プラットフォームである「CO₂NNEX」の開発に着手。センサを導入し、設備単位の CO₂排出量・削減価値を可視化する事で、CCUS ビジネス全体を活性化することを狙う⁶⁴⁰
 - ②ネットワークハブモデルは、一つの企業（もしくは複数企業によるジョイントベンチ

ヤー) が CO₂ 輸送・貯蔵インフラに投資し、産業クラスターが設立される形で実施される形式をとる^{641,642}

- ③ Capture as a service モデルは、回収設備の設置・運用サービスを提供した CCS 事業会社が、CO₂ 回収量あたりの利用量や運用費をエミッターより受け取る事業形態であり、近年着目されている^{643,644,645,646}
 - ◇ ノルウェーのエンジニアリング会社 Aker Carbon Solution は親会社が開発した CO₂ 分離回収技術を活用して、プラント設計から運用までを一気通貫で実施し、回収 CO₂ 1t あたりの価格を排出者から受け取る独自のサービスを展開⁶⁴⁷
- ④ Transport and/or storage as a service モデルは、特定の企業が開発した CO₂ 輸送網をエミッターが有償で利用する事業形態である^{648,649,650,651}
- i) 越境 CCS に向けた協力が各国で結ばれ始めており、輸送コストの観点から域内での取組みが盛んである⁶⁵²
 - 欧州において、2023 年以降 CCS に向けた MoU や Lol が盛んに結ばれており、域内での積極的な協力体制構築が見受けられる
 - アジア太平洋において、日本・韓国とマレーシア、シンガポールとインドネシアが越境 CCS の検討・協力に向けて動き出している
- j) CCS 事業拡大に伴い、大規模なパイプライン建設が発表される一方、安全性への懸念や CCUS への疑念を背景に、パイプライン建設に反対する声が上がっている^{653,654}
 - 米国中西部では、Summit Carbon Solutions 社により世界最大規模となる CO₂ パイプライン (Mid West Carbon Express) の開発が進められている一方、安全性への懸念や CCUS への疑念を背景に、建設に反対する声が上がっており、州委員会によりパイプラインの敷設申請が却下されたことから、ルートの変更も含め見直した計画を再申請する予定
 - 過去に米国で生じたパイプライン建設に関する事故や抗議活動もパイプライン建設の反対意見に影響している

【競合動向および技術開発動向】

(CO₂ 分離回収技術)

- k) CO₂ 分離回収技術は、方式毎に技術成熟度や技術課題が異なるため、各社が注力している研究開発領域も新材料の開発から装置・プラントの改良まで様々である
 - 化学吸収法
 - ◇ BASF は新たなガス精製プロセス「OASE」を開発し、エネルギー消費量低減 (分離エネルギー : 1.18GJ/t CO₂) を実現。日揮は本技術に対するライセンス契約を締結しており、苫小牧大規模実証プロジェクトでも導入されている⁶⁵⁵
 - ◇ 本基金事業研究開発項目②-v では、名古屋大と東邦ガスが LNG 未利用冷熱を活用した化学吸収法プロセスの開発に取り組む⁶⁵⁶
 - ◇ 溶剤の改良・新規開発に各社取り組んでおり、Honeywell は次世代アミン溶液技術である ASCC を開発^{657, 658}。C-Capture はアミンフリーの溶剤を開発し実証実験

を進めている^{659、660}

➤ 物理吸収法

- ◇ Linde は Lurgi と共同で、ポリエチレングリコール系吸収液より安価で入手しやすいメタノール系吸収液を用いた新プロセス Rectisol 法を開発した（Lurgi が Air Liquide によって買収されたため、現在は Linde/Air Liquide がこの技術を保有）⁶⁶¹
- ◇ 本基金事業では物理吸収法による CO₂ 分離回収技術の開発は実施されていない（「石炭ガス化燃料電池複合発電実証事業」において、大崎クールジェンが本方式に対する研究開発を実施中）⁶⁶²
- ◇ RITE が新たに開発した吸着材は、水分との親和性が低いため除湿工程が不要となり、CO₂ 分離回収コストの削減と装置のコンパクト化を可能にしている⁶⁶³
- ◇ Svante は PCP を活用した吸着材 CALF-20 の開発を進めている
- ◇ ベンチャー企業の CAPTIVATE TECHNOLOGY は特許取得済みの MOF で、オンサイト試験を実施している^{664、665}
- ◇ 本基金事業研究開発項目②-ii ではレゾナック、日本製鉄が革新的分離材である PCP を低濃度排出源向けに改良する研究開発を行う⁶⁶⁶

➤ 膜分離法

- ◇ 日本ガイシは産業排ガスに対して従来製品の 5 倍の CO₂ 分離精度を実現する新たな分離膜の開発に成功した⁶⁶⁷
- ◇ 本基金事業研究開発項目②-iii では住友化学と OOOO が低濃度排出源向けの膜分離システムを開発する⁶⁶⁸
- ◇ その他 NEDO「CCUS 研究開発・実証関連事業」においても技術開発が行われている⁶⁶⁹

➤ 固体吸収法

- ◇ 例えば、川崎重工は移動層方式を採用した固体吸収法プロセス KCC（Kawasaki Carbon Capture）を開発しており、大規模化に向けた開発に取り組んでいる⁶⁷⁰
 - ◇ 本基金事業研究開発項目①では千代田化工と RITE が新たな固体吸収材とそれを活用したプロセスの開発に取り組む⁶⁷¹
 - ◇ 本基金事業研究開発項目②-iv は戸田工業、埼玉大学が Na-Fe 系酸化物を用いた新型吸収材の開発、エア・ウォーターがそれを用いた排熱利用型分離回収プロセスの開発に取り組む⁶⁷²
- このほかにも有望な技術方式が複数存在しており、各社が開発を進める⁶⁷³
- ◇ 本基金事業研究開発項目②-i はデンソーが電圧印加により CO₂ を吸脱着する方式の開発に取り組む⁶⁷⁴
- 各社技術開発を推進する中で、事業領域の拡大や共同開発等が実施されている
- ◇ BASF と日揮は化学吸収法の課題であるエネルギーコスト低減を目指し共同で開発を進める。また、川崎重工と RITE も共同で固体吸収法の確立に向けた開発を進め

ている⁶⁷⁵

◇ Svante や Honeywell Uop は材料、あるいは装置・ソリューション・プラントだけで無く、その両方の開発に注力する動きを見せている⁶⁷⁶

- l) 低濃度排出源向けの技術開発においては、化学吸収法を用いた取り組みが有望視されている一方、経済合理性の観点で市場での取り組み事例は限られる
 - Global CCS Institute によると、低濃度排出源向けの CO₂ 分離回収技術開発は、主に天然ガス火力発電所向けに行われており、化学吸収法が検討されるケースが多い^{677,678}
- m) 中小規模排出源向けの技術開発においては、物理吸着法（PSA 法）を用いた取り組みが有望視されている一方、経済合理性の観点で市場での取り組み事例は限られる
 - 特に吸着剤の研究開発が進められており、AI を使用した材料設計が導入され、新しいタイプの MOF の開発が盛んである^{679,680}
- n) 米国・欧州において、近年 CCS 技術に対する大規模な予算提供が実施されており、2023 年においても複数プロジェクトが選定され、動向が着目されている
 - 欧州において 2023 年、特に CO₂ 排出の大きいセメント分野での CCS 技術開発およびバリューチェーン検討に Innovation Fund の予算が投じられている⁶⁸¹
 - 米国において近年、各種発電所から生じる排ガス中の CO₂ を化学吸収法により回収・輸送・貯蔵するプロジェクトに Carbon Capture Demonstration Projects の予算が投じられている⁶⁸²
 - 欧州委員会や米国 DOE により、近年予算が投じられたプロジェクトは吸着剤（sorbent）、溶剤(solvent)等の要素技術やシステム設計等様々な分野を対象にしている^{683,684}

（CO₂ 分離性能評価技術）

- o) 海外には多数の実ガス評価センターが設けられており大規模な試験環境の構築が進む⁶⁸⁵
- p) 一方日本にはそのような設備が現状存在しないため、日系企業は海外のセンターに依存せざるを得ず、要素技術レベルでは先進的な日本企業の技術力が海外に流出するリスクなどが指摘されている⁶⁸⁶

【国際・ルールメイキング動向】

- q) CCUS を支援・規制するための政策メカニズムは①法律や規則の制定②コスト削減策③産業活動の規制④戦略的シグナル⑤収入支援の 5 つに分類され、世界各地域において異なるカテゴリの政策が用いられている⁶⁸⁷
 - 欧州において、幅広い政策メカニズムが採用されており、近年では、Fit for 55 主要法案採択を受けて、EU-ETS の改定が実施され、対象となる CO₂ 輸送手段の更新や排出枠の割り当てに変更が生じたことから、CO₂ 回収源の選定や（特にオフショアプロジェクトや越境プロジェクト等における）CO₂ 輸送経路、輸送方法、貯留地の選定に影響が生じると想定される⁶⁸⁸

- 欧州において、2024年2月にEU産業カーボンマネジメント戦略（EU Industrial Carbon Management Strategy）が発表され、ネット・ゼロ産業法における2030年時点の年間貯留容量の目標値5,000万トンから2040年時点で2億8,000万トンまで大幅に増加させる必要があることが発表された⁶⁸⁹
 - 欧州において、2024年11月にCCSカーボンクレジットへのEU公式認証制度が発足し、欧州内でのCCSプロジェクトの加速が見込まれる⁶⁹⁰
 - 米国において、多数のコスト削減策が採用されており、近年では、Inflation Reduction Act (IRA)制定に伴い45Q（所得税控除）が改定され、所得税控除の増額や対象となる施設基準の緩和等が実施されたことからCCS・CCUSの利用が促進されている⁶⁹¹
 - 欧米などのCCS先進国において、CAPEX（設備への直接補助金）、OPEX（分離回収から貯留までの直接補助金や排出クレジットの特別対応等）の両面でCCS事業者に対する政府支援が整備されている。事業全体に対してCAPEXとOPEX支援の合計の補助率は100%（全額負担）に近い水準となっている⁶⁹²
 - 英国において、近年、Net Zero Strategyが策定され、CCUS事業による年間CO₂貯蔵量の目標が設定された。また、目標達成に向けて多数の助成金プログラムが策定されている⁶⁹³
 - 中国において、コスト削減策として、国営企業によるCCS事業の推進が盛んに進められている⁶⁹⁴
 - 日本において、近年、CCS長期ロードマップが策定され、CCS事業による年間CO₂貯蔵量の目標が設定された。また、コスト削減策として、行政独立法人であるJOGMECが、2030年までの事業開始と事業の大規模化・圧倒的なコスト削減を目標とする7つのプロジェクトを選定し、支援を開始している^{695,696}
 - 日本において、2024年5月に「CCS事業法」が成立し、2030年までに民間事業者がCCS事業を開始するための事業環境を整備することを目指している⁶⁹⁷
 - オーストラリアにおいて、2024年7月に「Carbon Capture Technologies Program」が公表され、セメント製造時に排出されるCO₂からメタノールや建材を製造するプロジェクトに、約3,000万ドルの資金を提供している⁶⁹⁸
 - ◇ Calixは、南オーストラリア州に世界初の再生可能エネルギーを利用したCCU実証プラントを建設するため、政府より1,500万ドル受給。年間最大2万トンのCO₂を回収し、最大1.5万トンのCO₂を販売予定（メタノール等の生成に利用予定）⁶⁹⁹
 - ◇ MCi Carbonは、CCU施設のプラントアップグレードを行い、幅広い原料の処理能力を拡大・最適化（セメント製造含む）するため、政府より1,450万ドル受給。年間1,000トン以上のCO₂を回収し、最大5,000トンの建築材料を生成予定⁷⁰⁰
- r) 日本はCO₂分離回収技術に関して、他国と比較しても十分価格競争力のあるコスト目標を掲げている。

- 米国では DOE が「Carbon capture R&D」の中で、2030 年に 30USD/t-CO₂ という目標を設定（排ガス条件不明）⁷⁰¹
- 中国では「第 14 次五か年計画」で CCUS 等のプロジェクト実施に関して言及しているのみで、CO₂ 分離回収に関する定量的なコスト目標はなし。但し、民間機関のレポートにおいて言及されている予測値として、2035 年に 1970 円（100 元）という記載がある⁷⁰²
- 欧州では「CCUS ROADMAP TO 2030」で CCUS の費用対効果向上に関して言及されているが、CO₂ 分離回収に関する定量的なコスト目標はなし⁷⁰³

[最新動向サマリ]

- 市場動向：CCUS 向け CO₂ 分離回収技術の需要は高まりつつあり、CO₂ 分離回収施設については現時点で 94 件が稼働中ないし建設中であり、今後 500 件以上が新たに計画されている。また、CO₂ 輸送貯蔵専用施設については、現時点で 10 件が稼働中ないし建設中であり、今後 200 件以上が新たに計画されており、近年高い増加率で開発が新興している。CO₂ 分離回収施設が対象とする排出源については、今後は、CO₂ 濃度が高く夾雑物の少ない排ガスを生じるような、CO₂ の回収が容易と見込まれる産業領域において商業化が進むとみられており、現時点では天然ガス・LNG 精製が中心だが、バイオエネルギー/エタノール、発電・発熱、水素・アンモニア・肥料製造等向けの需要増加が見込まれる
- 業界動向：CCUS のバリューチェーンは①CO₂ 排出②CO₂ 分離回収③CO₂ 輸送④CO₂ 利用・貯留の 4 つの工程で構成され、それぞれの工程に多くのプレイヤーが存在。最近は買収等により複数の工程を一気通貫で担えるプレイヤーや環境価値を含めた CO₂ 流通を可視化するプレイヤーに加えて、ネットワーク-ハブモデルやプレイヤー e as a service モデル、Transport and Storage as a service 等、新たなビジネス展開の動きがみられる
- 競合動向および技術開発動向：これまでの分離回収施設で最も実績の多い化学吸収法が当面主流であるが、化学吸収法を含め、様々な技術で様々なプレイヤーが分離回収コストの低減に向けた技術開発を推進している。また、低濃度 CO₂ 排出源向けの新規アミン開発や中小規模 CO₂ 排出源向けの新規 MOF 開発が進められている。分離回収技術単体の性能向上に関する検討に加えて、酸素燃焼プロセスと液化回収技術の組み合わせによる CO₂ 回収プロセスを特定分野（セメント分野）へ展開するための技術開発・実証試験が欧州 Innovation Fund 支援のもと、推進されている（GeZero、IFESTOS 等）
- 国際・ルールメイキング動向：欧米では CO₂ 分離回収技術開発や実装に対する政府支援を強化している。炭素価格は CO₂ 分離回収の重要な実装要件なので、注視が必要

[11] 廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現

[市場動向]

- a) 本基金事業では、廃棄物処理において、一般ごみのうちリサイクルに適さない紙類、プラスチックや生ごみ等の資源化技術、および焼却処理で排出される CO₂ の分離回収技術の開発による脱炭素化を目指す⁷⁰⁴
 - 本基金事業では焼却、あるいは再利用処理が行われる一般廃棄物を対象としており、将来的には産業廃棄物への適応も視野に開発を推進⁷⁰⁵
- b) 日本における一般廃棄物は、基本的には消費者由来の廃棄物であり、厳密な定義は異なるが、米国や欧州では都市ごみ (Municipal Wastes/ Municipal Solid Waste) に相当^{706、707、708} (以下、一般廃棄物に相当する廃棄物は都市ごみと呼称)
- c) 各産業共通の基盤である廃棄物分野は、世界の GHG 排出量の 3.5% を占めており、産業全体のカーボンニュートラル化のためには同分野の脱炭素化が必須⁷⁰⁹
- d) 世界における廃棄物量は 2050 年までに 34 億トンに増加すると予想され、特に経済成長率の高いサブサハラアフリカや南アジアで大きく増加⁷¹⁰ (引用元レポートでは都市ごみに相当する廃棄物を集計)
 - サブサハラアフリカでは、2016 年の 1 億 7,400 万トンから 2050 年には 5 億 1,600 万トンと約 3 倍に増加する見込み
 - 南アジアでは、2016 年の 3 億 3,400 万トンから 2050 年には 6 億 6,100 万トンと約 2 倍に増加する見込み
- e) 国内では、資源の投入量も廃棄物の発生量も減少する一方で、循環利用される廃棄物の割合は上昇⁷¹¹
 - 国内の物質フローにおける総物質投入量は 2000 年度の約 21 億トンから 2020 年度は約 14 億トンとおおよそ 3 割減少
 - 循環利用される物質の量は 2000 年度は投入量に対して 10% 程度であったのに対し、2020 年度には 16% 程度に上昇
 - 国内における一般廃棄物の処理量はいずれの処理方法 (直接償却、資源化などの中間処理、直接資源化、直接最終処分) においても減少傾向にあり、ごみ焼却施設の全体数も減少傾向であるが、ごみ焼却施設のうちガス化溶融・改質施設数は横ばい⁷¹²
- f) 世界の廃棄物処理方法においては、発酵やリサイクルの構成比が増加する一方で、焼却処分の絶対量は長期的に増加傾向と予測されている⁷¹³
 - 経済発展が進んだ地域では処理方法に占める焼却の割合が高いため、現時点で焼却処理の割合が低い地域でも、経済成長に伴って焼却の需要増大が見込まれる⁷¹⁴
 - 但し、リサイクル推進や、メタン発酵等の他の処理方法への関心などの焼却処分の減少要因も一定存在⁷¹⁵
- g) 欧州・米国の一般廃棄物処理フローとしては、欧州においては、可燃ごみの前処理として選別・減容化を行う MBT (Mechanical biological treatment) が普及している一方で、米国

では排出時の分別が未徹底であり、大部分が直接埋立処理されている

- 廃棄物の前処理には大きく、廃棄物からリサイクル可能な材料を選別分離・加工する MRF (Materials Recovery Facility) での処理と機械的選別と生物処理を組み合わせた MBT が存在
 - MRF では廃棄物からリサイクル可能な材料を選別分離・加工し、廃棄物からリサイクル可能な材料の量を最大化すると共にサイクル材料を利用可能な状態とする
 - 欧州で普及している MBT は埋立物の減量化や前処理による負荷削減を目的とし、日本の分類における可燃ごみに相当するごみを対象に機械的選別と生物的減容化・乾燥を組合せたシステム⁷¹⁶
- h) 欧州における廃棄物発生量はドイツ、フランスが高く、処理方法としては、埋め立て比率が高い地域と焼却の比率が高い地域が存在
- 早期からリサイクルの推進や埋立の減少に取り組んでいるドイツや、地域熱供給のエネルギー源として廃棄物焼却熱回収施設を整備したデンマークやスウェーデン等の北欧では埋立比率が低い一方で、未だに埋立率が高く、焼却施設の導入やリサイクルの推進が課題となっている国も多い⁷¹⁷
 - EU 各国の 1 人当たりの都市ごみ発生量はオーストリア、デンマーク、ルクセンブルクで多い⁷¹⁸
 - EU では熱回収を伴わない単純焼却は減少傾向にあり、現在は極僅かしか行われていない⁷¹⁹
- i) 米国では都市ごみの全体量は増加傾向であるが、処理方法として、リサイクル等が増加しており、埋立量は横ばいで推移している
- 都市ごみの発生量は 1990 年から 2018 年にかけて 5 割弱増加した一方で、埋立量は横ばいとなっており、廃棄に占める割合は減少傾向⁷²⁰
- j) 欧州では、運営コスト低減、発電効率向上のため、広域処理を行う 600 ton/day 以上の廃棄物焼却施設の割合が比較的高く、今後も増加見込み
- 欧州では、大規模化によるスケールメリットを追求するため、複数の自治体が共同で処理施設を設置する傾向が強まっている⁷²¹
- k) 焼却残渣の処理・資源化方法としては、ストーカ式焼却炉で発生する主灰・飛灰は安定化や重金属溶出抑制処理を経て、セメント原料化による資源化が可能であり、ガス化熔融炉ではスラグ・メタルから金属を分離し、有効活用することが可能
- l) 廃棄物焼却の排熱の用途は直接利用と発電の 2 つであり、エネルギー効率の高い直接利用の代表的な利用例としては地域熱供給（地域暖房）がある^{722,723}
- 焼却で発生する熱は発電に用いるよりも、直接利用したほうがエネルギー効率が高いため、北欧などの寒冷地域では地域暖房への利用が積極的に行われている他、工場や農業での熱利用も一部で行われている
 - 熱の適当な直接利用先がない場合は、発電を行い電力グリッドに供給を行うが、焼却施設で発電を行う場合と蒸気を近隣の発電施設に供給する場合がある

- m) 化石原料由来製品を含む廃棄物処理・利用に関しては将来的に、排出量規制の対象となる見込みであり、CE 性の価値についても議論が出始める可能性
- 化石原料由来製品を含む廃棄物の焼却で発生する CO₂ を EU-ETS、UK-ETS に含める方向で議論が進行中であり、ETS の対象となれば、現状のままでは CN 性の価値は認められない⁷²⁴
 - ◇ CN 性を確保するためには焼却やガス化に伴って排出される化石由来 CO₂ を分離・回収する必要
 - 汚泥や木質系廃棄物などの生物由来の廃棄物から製造された製品は、現状 CN 性、CE 性ともに価値は認められており、特に懸念はなく継続して CN 性、CE 性が認められると考えられる
- n) 廃棄物焼却・発電施設の世界市場（2011~2020 累計）は上位 6 社でシェア約 8 割を占めており、そのうち 4 社が海外メーカー
- 中国光大環境を除く各プレイヤーはグローバルに事業を展開しており、廃棄物焼却施設だけでなく、汚泥処理施設の設計・建設を手掛けるプレイヤー（中国光大環境、Keppel Seghers）も存在⁷²⁵
 - CN 化に関わる取り組みとしては、B&W が CO₂ 分離回収技術、燃焼技術の双方を開発・保有しているが、他企業の取り組みは顕在化していない⁷²⁶
- o) 世界における廃棄物処理方法として焼却を用いる廃棄物処理・発電分野の市場推計では中国が最も市場規模が大きく、次いで欧州が大きい、特に東南アジア、インドの経済成長に伴う市場拡大が見込まれている
- 日立造船株式会社による推計によると、2024 年の発注処理能力ベースで、中国が最も大きく 20,100 t/day、次いで欧州が 10,650 t/day⁷²⁷
 - 2016 年に東南アジアは 2,550 t/day、インドは 750 t/day であったのに対し、2024 年はそれぞれ、7,550 t/day、2,700 t/day と経済成長に伴い大きく市場拡大する見込み⁷²⁸
- p) 産業廃棄物においても、基金事業を適用可能な廃棄物が全体の 7 割程度を占めており、産業廃棄物への基金事業適用ポテンシャルは高いと言える⁷²⁹
- 産廃の 65% を占める汚泥、動物の糞尿については、バイオメタネーションの適用可能性有
 - ◇ 汚泥区分のうち、ビルピット汚泥や動植物原料を伴う排水等にはバイオメタネーションの原料として活用可能
 - 産廃の 2% 程度をそれぞれ占める廃プラの一部、木くずについては、ガス化の適用可能性有
 - ◇ 廃プラのうち、複数組成の混合廃プラや汚染された廃プラについては、石油由来という観点で性状は均一であり、ガス化による資源化ポテンシャルが高いが、現状サーマルリサイクル以外の方法がほとんど適用されていない
 - ◇ 木くずも廃プラ同様に性状が均一であることから、ガス化による資源化が期待できる

【技術動向】

- q) 廃棄物処理における CO₂ 排出削減技術としては、大きく焼却・CO₂ 分離回収と再利用が存在し、再利用には熱処理と生物処理の 2 つの手法が存在
- 焼却・CO₂ 分離回収の技術としては、廃棄物焼却排ガスに含まれる CO₂ を化学吸収法等を用いて分離回収する燃焼後回収と酸素と CO₂ リッチの排ガスを混合させ、炉へ再循環させて燃焼することで排ガス中の CO₂ 濃度を高めて回収する酸素燃焼が存在
 - 再利用のうち、熱処理は熱分解により得られたガスを化学工業原料や化石燃料の代替として再利用するガス化と原料の熱分解によって得られた油を、化成品原料や燃料として再利用するオイル化がある
 - 再利用のうち有機性廃棄物に適用される生物処理には有機性廃棄物を嫌気環境で微生物によって分解して得たバイオガスを利用する嫌気性消化（メタン発酵）とメタン発酵で得られたバイオガス中の CO₂、および水素を原料に、水素資化性メタン生成菌等による発酵によってメタンガスに変換するバイオメタネーションが存在する
- r) 焼却・CO₂ 分離回収技術の課題として、燃焼後回収は廃棄物焼却由来の排ガス特性への対応、酸素燃焼は高コストであるため、酸素製造技術の低コスト化が挙げられ、本基金事業では双方に取り組む
- 燃焼後回収は排ガスの圧力、装置規模から主に化学吸収法が検討されているが、排ガスが排出基準値以下まで浄化された後でも、塩化水素、硫黄酸化物等、微量の酸性ガスが残存しており、吸収液劣化、プラント構成部材の腐食をもたらすことや廃棄物の性状変動に伴って排ガス中の CO₂ 濃度の変動が非常に大きいことが特に性状不安定な都市ごみにおいて課題^{730、731}
 - 酸素燃焼は燃焼後回収と比べ回収のエネルギー効率は高いとされるが、高コストであるため、酸素製造技術の低コスト化が課題であり、現在使用されている深冷分離法よりも低コストな酸素製造方法の確立や酸素製造で発生する窒素の有効活用によるビジネスモデル確立等が必要^{732、733}
- s) 廃棄物焼却への CO₂ 分離回収技術適用に取り組むプレイヤーは基金事業者を含む日系企業が目立つ
- 海外プレイヤーとしては、B&W が燃焼後回収技術 SolveBright（化学吸収）、酸素燃焼技術である OxyBright を開発・保有する他、carbon clean が Veolia とパートナーシップを組み、英国の焼却施設等で燃焼後回収の実証を行う
 - ◇ B&W の燃焼後回収技術はアプリケーションごとに最適な溶液をカスタマイズ可能で、焼却への知見に基づく、顧客設備への統合支援が強みとしている⁷³⁴
 - ◇ B&W の酸素燃焼技術は、燃焼空気を、純粋な酸素に再循環させた CO₂ を多く含む排ガスを混合したガスに置き換えることで排ガスの高 CO₂ 濃度化を実現⁷³⁵
 - ◇ carbon clean はモジュラー式の化学吸収装置を開発・提供しており、独自の回転充填床と溶剤設計が特徴で⁷³⁶、Veolia が運営する焼却施設での試験を 2021 年から実

施⁷³⁷

- 日系プレイヤーとしては、東芝が佐賀市清掃工場向けに化学吸収法を採用したシステムを納入（2016年稼働開始）している他、日鉄エンジニアリング（本基金事業において、燃焼後回収技術開発を実施）、日立造船（本基金事業において、酸素燃焼技術開発を実施）、JFEエンジニアリングが実証プロジェクトを実施⁷³⁸
- t) 都市ごみを原料にした CO₂分離回収技術導入・実証事例としては、国内事例が先行
 - 佐賀市清掃工場では、廃棄物処理施設では、世界初の試みとして2016年8月より化学吸収法でのCCUSが稼働開始（設備設計は東芝）、排気ガス中の酸性ガスの課題に対しては、排ガス前処理設備を設けることで酸性ガスを除去して対応している⁷³⁹
 - 小田原市環境事業センターにおいて2018年～2022年に日立造船が物理吸着による分離回収と回収CO₂のメタネーションを実証、排ガスの有害物除去のため前処理条件を検証⁷⁴⁰
 - ふじみ衛生組合とJFEエンジニアリングはアミン吸収法の適用を実証、吸収塔入口前にガス温度と酸性ガス濃度を低減するプロセスを導入⁷⁴¹
 - 海外においては、デンマーク Fortum/Fjernvarme Fyn、イギリス PMAC Energy がCCUSの実現を目指しているが、いずれも基礎研究・構想段階⁷⁴²
- u) 廃棄物処理事業者による CO₂分離回収技術導入・実証の取り組みとしては、木質系廃棄物を原料とした組み合わせ事例が多く見られる
 - デンマーク Ørsted は、2つのバイオマス発電所にCO₂回収装置を建設中で2025年末から稼働予定であり、年間43万トンのCO₂を回収・貯留予定⁷⁴³
 - アメリカ Fidelis New Energy はB&Wの酸素燃焼（OxyBright）技術を採用したカーボンネガティブなバイオマス発電施設を計画⁷⁴⁴
 - アメリカ NorthStar Clean Energy、CONSOL Energy はいずれもB&Wの燃焼後回収技術の採用に向けた検証を行っている⁷⁴⁵
 - スウェーデン Växjö Energi はルンド工科大学等と共同で従来よりもエネルギー消費が低いCO₂回収技術を実証中⁷⁴⁶
- v) 廃棄物の主なガス化技術としては、固定床、流動床、噴流床等を用いた方法が存在し、得られるガス構成やタール含有量が異なっている
 - 固定床は炉の上から下に乾燥層、熱分解層、ガス化反応層、燃焼層を連続的に形成、酸化剤の供給方向によってアップドラフトとダウンドラフトに分かれる
 - 流動床式は粒子を酸素豊富なガス中に懸濁浮遊させた流動床を形成し、ガス化を行う
 - 噴流床式は原料と酸化剤がガス化装置に並行に供給され、酸化剤が原料粒子を取り囲んでガス化炉を通して流れる
 - 上記の炉形式と組み合わせると熱源としてプラズマの活用が検討されており、飛灰中の高揮発性重金属不溶化、ダイオキシン類等の無害化等が可能
- w) 欧州では都市型廃棄物や木質系廃棄物を原料としたガス改質技術の開発・実証が複数行われており、プラズマ方式の開発が進展

- チェコ Millenium Technologies、ルクセンブルク Boson Energy、スウェーデン Plagazi が固定床とプラズマを組み合わせたガス化システムの開発を実施⁷⁴⁷
 - ◇ Boson Energy は廃棄物の組成や品質の変動によるプロセスの不安定化の課題に対して、高品質で安定した合成ガスを供給する独自の反応器（固定床）を開発、乾燥、熱分解、ガス化、ガラス化を従来よりも緩やかな温度勾配で発生させることで廃棄物の前処理を行うことなく安定した処理が可能⁷⁴⁸
 - その他、オランダ GIDARA ENERGY、スイス GreenCI.fi、オランダ OCI Global が都市ごみを原料としたガス化の研究開発を実施している⁷⁴⁹
 - スウェーデン Meva Energy やイギリス CSS 等、木質系廃棄物を原料にしたガス化開発も複数見られる⁷⁵⁰
- x) 北米、豪州でも都市型廃棄物等を原料としたガス改質技術の開発・実証の取り組みが複数見られる
- Fulcrum Bioenergy は、都市ごみから燃料を製造する商業規模プラントを 2022 年 11 月より稼働開始、埋立廃棄物を原料にすることで回収・運搬コストを削減⁷⁵¹
 - Enerkem は、カナダの実証施設での検証を完了し、現在 3 つの商用化プロジェクトが進行中であり、廃棄物由来の合成ガスに含まれる汚染物質や組成の不安定さの課題に対して、独自の合成ガス洗浄・調整手順により純度および組成を正確に調整し、目的の製品に合わせた調整が可能としている⁷⁵²
 - その他、アメリカ H-Cycle、オーストラリア Wildfire Energy、Green Hill Energy 等が都市ごみを原料としたガス化技術の開発を実施⁷⁵³
- y) バイオメタネーションは、メタン発酵で得られたバイオガスから生物化学的な方法で合成メタンを得る手法のひとつであり、CO₂分離・回収プロセスを経ずに CO₂のメタン変換が可能で効率が高い点が利点として挙げられるが、グリーン水素の調達・価格が課題
- バイオメタネーションのプロセス構成には in-situ 型、ex-situ 型、ハイブリッド型の 3 通りが存在⁷⁵⁴
- z) バイオメタネーション技術の開発・実証の取り組みは、欧州・米国で Ex-situ 方式の取り組みが見られるほか、大阪ガスが In-situ 方式の実証を行っている
- ドイツ Electrochaea はグリーン水素と回収した CO₂を原料にバイオメタネーションによる Power-to-Gas 技術の開発を実施⁷⁵⁵
 - ドイツ MicroPyros は農業残渣、都市ごみを原料としたバイオメタネーションおよびガスグリッド注入の研究開発を実施⁷⁵⁶
 - フィンランド Q Power は発電所、バイオガスプラント、埋立地などさまざまな業界にモジュール型のバイオメタネーションシステムをターンキーで提供⁷⁵⁷
 - デンマークに 13 か所、オランダに 1 か所のバイオガス製造拠点を所有、運営するデンマーク Nature Energy（2023 年にシェル子会社化）はエネルギー会社の Andel との共同プロジェクトにおいてバイオメタネーションを実証
 - ◇ デンマークのグランサガー・オン・アルスにおいてグリーン水素によるバイオメタ

ネーションを行う Power-to-X プラントが 2023 年 3 月稼働開始⁷⁵⁸

- 大阪ガスは京都大学、NJS、大阪市と共同で、2022 年 11 月より下水処理場で発生するバイオガスを活用したバイオメタネーションのフィールド試験を実施⁷⁵⁹
 - ◇ 大阪市の海老江下水処理場に新たに設置した小規模の試験装置を用いたフィールド試験を実施
 - ◇ 同試験装置に下水汚泥と水素を投入し、下水処理場と同じ条件のもとで下水汚泥をバイオガス化しながら、バイオガス中の CO₂ と水素を微生物によりメタン合成する in-situ バイオメタネーションを検証し、将来の実規模導入を目指す
 - NREL はバイオメタネーションプロジェクトにおいて実証支援のための移動式バイオリアクターの開発、およびバイオメタネーションの LCA を実施⁷⁶⁰
 - ◇ 移動式バイオリアクター・システムを使用した統合 2 段階変換プロセスにより、実際のガス原料を使用した CO₂ 変換実証によるコストとリスク削減を目指している
 - ◇ CASE A: 現状、CASE B: 発酵バイオガスのガス分離による精製メタン製造、CASE C: バイオネーションによる合成メタン製造の 3 つのケースについて LCA を実施しており、バイオメタネーションはバイオガスのガス分離精製に比べて得られるエネルギー量を 2 倍にしながら、カーボンネガティブ達成可能であると結論づけている
 - in-situ バイオメタネーションに関わる論文報告は 2021 年以降活発化
 - ◇ 2012 年～2020 年は年 0～5 報だった論文数は 2021 年に 17 報、2022 年に 13 報、2023 年に 8 報⁷⁶¹
 - バイオメタネーションの GHG 削減効果/LCA を取り扱った論文は 2 報存在
 - ◇ Farm-scale Bio-power-to-methane: Comparative Analyses of Economic and Environmental Feasibility, International Journal of Energy Research (2019) では、を行わない参照シナリオ (A)、バイオメタネーション (B)、膜バイオメタネーション分離とバイオメタネーションを組み合わせたシナリオ (C)、および (C) を再生可能エネルギーのみを使用したシナリオ (D) の 4 つのシナリオを比較検討
 - ◇ Biowaste-to-Biomethane: An LCA study on biogas and syngas roads, Waste Management (2019) では、既存プラントからのデータに基づき、バイオガスと合成ガス由来のバイオメタンについて、物質のフロー分析と帰属ライフサイクル評価を使用して定量的な環境評価を実施
 - バイオメタネーションに用いる菌の権利化例としては、Electrochaea による高温水素資化性メタン菌が存在
 - ◇ EP2661511B1、US9428745B2 等において、Methanothermobacter thermautotrophicus strain UC 120910 が独立項で権利化されている⁷⁶²
- aa) (参考) 廃棄物のオイル化技術には、大きく廃プラスチックを原料とするものと有機性廃棄物を原料とするものの二つが存在
- 廃プラスチックを原料としたオイル化は熱分解、および触媒や薬剤による反応により常

温で液状である油の回収を行い生成油は一般的に A 重油、軽油等に類似した性状を持ち、クラッカー等への投入原料として利用

◇ 国内の適用事例としては、ENEOS/三菱ケミカルが年間 2 万トンの処理能力を備えた廃プラスチック油化設備（超臨界水方式）を建設、両社の既存設備において原料として使用

◇ 海外においては、Fuenix Ecology Group、Nexus Fuels,Plastic Energy が商用プラントを稼働しており、Dow や Shell 等向けに供給を実施

➤ 有機性廃棄物を原料としたオイル化は、木材や汚泥等を原料に熱分解とその後の冷却によって 200 を超える異なる化合物を含む粘り状な褐色液体としてオイルが得られ、重油代替等として利用

◇ 適用事例としては、鉄鋼大手 ArcelorMittal はカナダケベック州の直接還元製鉄用ペレット工場において、BioÉnergie から年間 1,600 万リットルの製材後木材残渣由来の熱分解油を調達し、重油使用量を 23%削減

[国際動向]

bb) 各業界団体や各国公的機関においては、米国 DOE が Waste-to-energy における重要研究開発項目として都市ごみのガス化、水熱処理と嫌気性消化等を挙げる

➤ EERE は、次世代 WTE 施設の R&D 機会として、ガス化技術および合成ガスの活用方法と次世代型嫌気性消化システムを挙げている⁷⁶³

➤ EERE 下部組織の BETO では主に食品廃棄物や畜産排出物等の有機性廃棄物の変換技術を検討しており、DOE 所管の国立研究所で関連研究を実施^{764,765,766}

cc) 欧州が、埋立処分の削減目標やリサイクル率の目標を掲げている一方で、米国は国家的な方針・目標としては、リサイクル率のみを掲げている

➤ EU の廃棄物削減に関する方針・目標としては「廃棄物枠組み指令」において、廃棄物管理関連の立法・政策における優先順位設定や、各指令における包装廃棄物、使用済み自動車、バッテリー廃棄物、電気電子機器、建設廃棄物、解体廃棄物に関する各指令で、回収率やリサイクル効率の目標値を設定がある⁷⁶⁷

➤ EU は最新の廃棄物埋立指令の改正（2018 年）において、生分解性都市ごみの埋立量を、2035 年までに総重量の 10%以下に削減すること等を規定し、「廃棄物の発生を防止することも、リサイクルすることもできない場合」に waste-to-energy を推奨⁷⁶⁸

➤ 米国の廃棄物削減に関する方針・目標としては「国家リサイクル戦略」において、2030 年までに米国のリサイクル率を 50% に高めるという目標のため、リサイクル商品市場の改善、資材管理インフラ改善、リサイクル材料の汚染の削減、リサイクル支援政策強化、測定を標準化しデータ収集増加の 5 つの戦略を推進⁷⁶⁹

➤ EU では、直接の廃棄物処理技術開発・導入への支援は行われていない一方で、米国では地方自治体への技術支援や研究開発プロジェクトへの助成金事業を実施

◇ EU では、Communication from the (European) Commission: Guidelines on

State aid for climate, environmental protection and energy (CEEAG) 2022 の枠組みに従い廃棄物処理技術開発・導入への各国政府支援策が実行可能⁷⁷⁰

- ◇ CINEA による L'Instrument Financier pour l'Environnement (LIFE) プログラムでは、4つのプログラム（自然と生物多様性、循環経済と生活の質、気候変動の緩和と適応、クリーンエネルギーへの移行）のうち「循環経済と生活の質」で廃棄物処理関連の活動が支援され得る⁷⁷¹
- ◇ 米国では DOE 主体で、複数の廃棄物処理関連の支援策を実施
 1. Waste-to-Energy Technical Assistance for State, Local, and Tribal Governments では、NREL によって、米国の州、地方自治体、および部族政府に対し Waste-to-energy 技術を推進するための技術支援を無償で提供⁷⁷²
 2. “FY22 Waste Feedstocks and Conversion R&D” funding opportunity では廃棄物を有効活用するための科学技術開発、およびインフラ導入に関わる 15 のプロジェクトに総額 2950 万ドルの資金を提供⁷⁷³
 3. クリーン水素の製造技術開発への助成金事業のテーマ分野の一つに廃棄物のガス化システムが存在（採択テーマの発表は 2024 年半ば頃を予定）⁷⁷⁴

[ルールメイキング]

dd) EU では繊維や食品廃棄物の削減を目的とした規制導入や、畜産生産者に対して汚染排出削減設備導入を義務付ける動き等が見られている

- 「廃棄物枠組指令」の 2023 年 7 月発表の改正案において、繊維廃棄物の製造事業者などに拡大生産者責任を課し、食品廃棄物の削減目標を設定⁷⁷⁵
- 発電所や廃棄物焼却場、および大規模畜産施設を対象とし、汚染物質の排出を規制する「産業排出指令」の 2023 年 11 月改正案：一定以上の規模を持つ豚・鶏生産者に対し汚水やアンモニアの排出削減を目的とした設備導入等の規定について暫定合意⁷⁷⁶

ee) EU では、バイオメタンに関する品質基準が 3 つ存在し、天然ガスに関する既存の規格に加え、グリッド注入および輸送用燃料利用については、該当する規格を満たす必要がある一方で、米国では品質基準の統一標準化に向けた取り組みが進行中

- EN 16726: Gas infrastructure - Quality of gas - Group H は貯蔵所への注入、流通、利用、輸送される天然ガスの品質基準（密度、硫黄含量、酸素含量、二酸化炭素含量等）について規定しており、2025 年発行に向けて改定作業が進行中
- EN 16723: Natural gas and biomethane for use in transport and biomethane for injection in the natural gas network では、Part 1 で天然ガスグリッドに注入されるバイオメタンが EN 16726 に加えて満たすべき基準（ケイ素、一酸化炭素、アンモニア、アミン等の含量の上限値）について規定。Part 2 で輸送用燃料として利用されるバイオメタンが EN 16726 に加えて満たすべき基準（ケイ素、水素、酸素、一酸化炭素、アンモニア、アミン等の含量の上限値）について規定されており、2024 年末に改定（シロキサン等の微量元素のパイプラインやエンドユースへの影響の検証および反映）が実施される予定

- 米国では、グリッド注入可能なバイオメタンに関する品質基準は各業者ごとに存在し、統一標準化に向けたステークホルダー間での取り組みが進行中⁷⁷⁷
- ISO では TC 255 の下で嫌気性消化等によって生成されるバイオガス/バイオメタンの品質の標準化を実施しているが、グリッド注入に関わる規格設計は行われていない

[12] 次世代蓄電池・次世代モーターの開発

最新動向の整理

(自動車を取り巻く市場)

- a) 至近では、欧州における EV 登録台数が 2023 年から減少しているが⁷⁷⁸、IEA Global EV Outlook 2024 の電動車 (BEV、PHEV) のグローバル販売台数予測によると、2023 年の販売台数は約 1,380 万台で、2030 年には STEPS では約 4,070 万台、APS では約 4,410 万台まで成長すると想定されており、今後 BEV のさらなる拡大が予測されている⁷⁷⁹。そのため、この 2030 年の予測値約 4,070 万台は、IEA Global EV Outlook 2020 における 2030 年の Stated Policies Scenario の約 2,500 万台より、約 1,500 万台増加しており、この予測値自体が急激に増加している現状に対して、日本企業がどのように対応するかは重要である⁷⁸⁰

(STEPS=各国表明済の政策を反映、APS=未実施分含め、発表済公約が全て実施された場合)

(蓄電池・リサイクル市場)

[市場動向]

(蓄電池)

- b) 蓄電池に対する投資状況は、2022 年に入ってからだけで、VW、トヨタ、ホンダ、日産、Tesla などの自動車メーカー、また、LG Energy Solution、CATL、パナソニックなどの車載用の蓄電池企業が、5,000 億円以上の蓄電池工場の投資計画を発表しており、電気自動車用の蓄電池獲得競争が激しさを増してきている⁷⁸¹。この急激な蓄電池獲得競争の中で、日本企業がどのように対応するかは重要である。

[技術開発動向]

(蓄電池)

- c) 2030 年の電気自動車の販売台数が約 4,000 万台以上に急激に増大すると推定されること⁷⁷⁹から、車載用の蓄電池の技術開発も、2030 年の急激に増大する市場に貢献出来るように、早期の市場投入を目指していると考えられる。このような早期の市場投入を目指す技術開発競争の中での日本企業の対応は重要である。
- d) OEM 各社は車両販売価格、及びコスト低減を狙い、相次いでエントリーレベルでの LFP 採用を公表しており、採用が加速している状況⁷⁸²
- OEM による次世代電池開発動向について、日系自動車メーカーは自社開発を重視する一方、米国や欧州の自動車メーカーは、多くの電池メーカーに広く浅く出資、または提携する形で開発を進めている⁷⁸³
- e) 電池メーカー各社は OEM による LFP 採用の流れを受け、車載 LFP 事業における技術開発や全固体電池を見据えた研究開発に取り組んでいる状況⁷⁸⁴

- f) 電池メーカー各社は全固体電池への取組みも盛んであり、プロトタイプモデルの実験・実証や量産目標を公表している
- CATL は 2024 年 9 月に、全固体電池の技術開発レベルがプロトタイプモデルの実験・実証段階であることを発表⁷⁸⁵
 - LG ES は 2024 年 8 月に、硫化物系全固体電池を 2030 年までに量産予定であることを発表⁷⁸⁶

[業界動向（産業構造）]

（蓄電池）

- g) Tesla を筆頭とした自動車 OEM による蓄電池内製化や Cell to chassis 技術の誕生により、蓄電池の地産地消、並びにバッテリーサプライヤーと自動車 OEM との距離接近が、今後より一層進むと想定される⁷⁸⁷
- Tesla の新工場「ギガテキサス」（2022 年新設）では、同一建屋内の各階で、セル（4 階）、パッキング（3 階）、車両への搭載（2 階）がそれぞれ行われている⁷⁸⁸
- h) 電池サプライチェーンについて、中・欧・米の三極が大多数を占める電池生産拠点化する見込みであり、韓国除き地産地消傾向は進展、現地電池生産が鍵となる⁷⁸⁹

（リサイクル）

- i) 欧州系自動車 OEM は欧州系リサイクルプレイヤーと、米系自動車 OEM は米系リサイクルプレイヤーとの提携を進めており、地域毎のリサイクルスキームが形成されている⁷⁹⁰
- j) リサイクルプレイヤーとしては、Umicore（ベルギー）、Li cycle（加）、Volkswagen（独）、Tesla（米）、BYD（中）などが存在する

[社会・国際情勢]

（蓄電池・リサイクル共通）

- k) 米 IRA 法では、電動車の税控除条件として、米国及び FTA 国にて調達した原料を一定割合使用している事、部材含む電池が一定以上米国で製造されている事を条件としている⁷⁹¹
- IRA 法において、補助金の適用対象として、電池製造（重要材料の大きな割合含む）及び車両製造が北米であることが求められる
 - 日系企業など非北米系メーカーであっても、現行の自動車の地産地消体制を維持すれば、概ね対応は可能と見られるが、重要高資源（正極材等）の高い割合が FTA 締結国であることが求められるため、結果的にサプライチェーンの脱中国依存が焦点になる（経済安全保障の推進）とみられる⁷⁹²
 - IRA 法案設立後に発表された蓄電池の製造工場およびリサイクル工場の建設への合計投資額は、2023 年 11 月時点で 514 億ドル以上に達し、それに伴う新規雇用予定数は 2 万 4000 人を超える見通しであり、雇用創出の面で北米地域にメリット

が生じるとみられる⁷⁹³

- 韓国系プレイヤーは、北米にバッテリー工場を建設するために米系 OEM と合弁会社を立上げ、米国市場へ積極的に投資をしている⁷⁹⁴
- l) 中国政府は、一部黒鉛とその関連製品に関して政府無許可での輸出を禁止する法案を2023年12月より施行^{795,796}
 - 黒鉛関連製品（3種類の高純度・高強度・高密度の人造黒鉛とその製品、6種類の天然片状黒鉛と関連製品）に関して中国政府の許可なく輸出することを禁止
 - 天然・人造黒鉛ともに EV 用蓄電池分野において重要な原料であり世界市場における中国のプレゼンスが大きい
- m) また、中国政府は、2024年に「新エネルギー自動車用廃棄動力電池の総合利用に関する業界標準の要求（2024年版）」を公表し、バッテリー材料のリサイクル回収率を定めている⁷⁹⁷
 - リサイクル回収率目標は、リチウム 90%以上、ニッケル・コバルト・銅 98%以上、希土類およびその他有価金属 97%以上

（モーター市場）

[市場動向]

- n) EV 普及に伴い、車載向けモーター市場も急成長が続くと想定されている
 - 車載向け主機モーターのグローバル市場は、2023年は約 1.5 兆円、2030年は 4.4 兆円規模と想定されている⁷⁹⁸
- o) eAxle については、矢野経済によると、eAxle 販売台数は 2021年に約 30万台で、特に新興系 OEM 中心に 2030年は約 530万台へと拡大すると想定されている⁷⁹⁹

[業界動向（産業構造）]

- p) モーターに使用される希土類磁石の採掘・選鉱から磁石製造までのプロセスに、中国が占める割合が高く、サプライチェーンの中国偏重が見受けられる⁸⁰⁰。米・韓等は、サプライチェーンの中国偏重から脱却するため、ベトナムやマレーシアでの精錬機会を窺っている^{801, 802}

[社会・国際情勢]

- q) 米国商務省（BIS）は 2021年9月、ネオジム磁石の輸入が国家安全保障に与える影響に関する調査を実施⁸⁰³。現在の中国からの輸入依存状態は政治的懸念がある事を指摘しつつも、追加関税を課すのではなく、同盟国との連携や国内生産に対する税額控除を改善策として挙げている
- r) 2022年に入って、ロシア・ウクライナ戦争や米中間の緊張の高まり等地理学的リスクの向上及び世界的なインフレ・資源高により、レアアースの中国における偏在性への懸念がより一層高まっている。このようなサプライチェーンリスクに対し、中国依存度の高

いレアアース使用量の低減（レアアース使用量削減技術の開発、或いは、中国からの輸入量削減）が図られている⁸⁰⁴

[13] 電動車等省エネ化のための車載コンピューティング・シミュレーション技術の開発

(自動運転車を取り巻く市場)

- a) 自動運転車両の販売台数は、レベル 2 以下を中心とした 2021 年の販売台数 4,090 万台から CAGR 8.7%で成長し、2030 年にはレベル 3 の比率も増加した約 8,000 万台（世界）となる見込みであり、自動運転車両の拡大が予測される⁸⁰⁵。また、自動運転と親和性の高い電動車（BEV、PHEV）は、IEA Global EV Outlook 2024 のグローバル販売台数予測によると、2021 年の販売台数は約 770 万台であるが、2030 年には STEPS では約 4,070 万台、APS では約 4,410 万台まで成長すると想定されており、今後 BEV のさらなる拡大が予測されている⁸⁰⁶。

(STEPS=各国表明済の政策を反映、APS=未実施分含め、発表済公約が全て実施された場合)

(自動運転のオープン型基盤ソフトウェアに関する動向)

[市場動向]

- b) Technavio によると、自動運転ソフトウェア市場は CAGR39.0%(2023-2028)で成長し、2028 年には約 12,000 億円以上の市場規模（世界）に達すると見込みである⁸⁰⁷。自動運転車の普及に加え、自動運転レベルの高度化が成長要因となり、現在のレベル 2 以下を中心とした市場から、レベル 3 や一定程度のレベル 4 の導入が進むことで、市場が拡大するとみられる。

[技術開発動向]

(Vehicle OS の導入による車載ソフトウェア共通化)

- c) 従来、車載ソフトウェアは車種毎に個別のソフトウェア開発を推進していたが、OEM グループ内で横断的な共通ソフトウェア（Vehicle OS）を導入することにより、車種間のソフトウェアの共用化が進んでいる。
- VW では、車両に共通なプラットフォームとして自動運転ソフトウェアから車載 OS まで自社開発を進めており、自社グループ内での展開・共通化を図る方針とみられる⁸⁰⁸

(自動運転ソフトウェアへの要求)

- d) 自動車の運転は一般的に認知・判断・制御の 3 つのプロセスに分類されるが、レベル 4 ではこれら一連の動作をソフトウェアで処理できるよう設計される必要がある。認知プロセスでは、周辺物（隣接車両、歩行者、走行レーン等）がより複雑になり、キカイの信頼性要求として平均的なドライバー以上であることが求められる。判断プロセスにおいては、限定的な区間や異常発生時のドライバーへのハンドオーバーが前提となっていたレベル 3 と異なり、レベル 4 では ODD 内においてはシステムが操作主体となり、複雑なシナリオ・パターンに対応することが求められるなど、より高い安全性・信頼性が

求められる。

(レベル4高精度マップの導入状況)

- e) ODD 内での完全自動運転の実現においては、センサーの検知限界や誤差を考慮し、路面情報や信号・交差点等の道路上の対象物を高精度マップにより補完する方法が検討されている。やや OEM 間でスタンスが分かれるものの、主要 OEM 及び IT 系各社ともに高精度マップを導入する前提でのレベル4開発を進めるプレイヤーが多く、カメラによるセンシングを軸にレベル4の開発を進めている会社もある。他社が LiDAR を中心として車両位置特定を行うのに対し、当該メーカーはカメラの画像データベースに AI が解析・判断し自動運転を成立させる戦略をとっているため、現時点では高精度マップは不要の方針としている⁸⁰⁹。

(消費電力削減に関する方向性)

- f) 現時点では、各 OEM 及び IT 系プレイヤーともに、レベル4の機能確立に注力しており、自動運転ソフトウェアの消費電力低減に関する議論は少ないが、将来、画像処理の最適化やセンシングデータのインプット簡素化による実現が検討されている。例えば、画像処理の最適化では、動くものや、その軌道のみを回収する効率的なプログラムの構築が検討されており、センシングデータの簡素化としては、レーダーで物体を検知したときのみカメラを ON とすることでカメラの処理データを削減するようなアルゴリズムの開発等が検討されている⁸¹⁰。

(実証実験進捗動向)

- g) 実証実験では各社取り組みを進めており、運転手同乗での実証実験から、無人自動運転への移行が進んでいる。一方で、自動運転時事故により実証実験走行許可の停止を受ける企業も出てくるなど、技術的な課題も依然存在
 - カリフォルニア州における運転手同乗での実証試験走行距離は 2022 年 2 月がピーク。その後は GM クルーズを中心に無人運転による実証実験走行距離が増加傾向⁸¹¹
 - 一方で、GM は 2023 年の人身事故によりカリフォルニア州道路管理局より営業及び無人走行試験許可の停止を受ける。加え、同年に Tesla は NHTSA (米国運輸省道路交通安全局) より FSD 機能搭載車両のリコールを発表⁸¹²

(自動運転技術 Lv3 以上の技術開発動向)

- h) Lv3 以上の自動運転車開発において技術的及び採算性の課題が存在。特に自家用車に関しては各社当初計画からの導入遅れが生じており、Lv4 に関しては技術開発の中止を行う企業もある
 - 自家用車に関しては、Lv3 以上の自動運転ではホンダ・メルセデス・BMW が市販車販売しているが、各社 2~7 年程度市場導入が当初計画より遅れている⁸¹³
 - タクシー車に関しては、OEM/IT プレイヤーは既に限られた走行ルートにおける完全無人サービスを展開しており、当初計画より数年の遅れはあるものの自家用車よりも先行して商用化が進んでいる⁸¹⁴

[業界動向]

(主要プレイヤーの動向)

- i) 自動運転ソフトウェアの基盤的ポジションを狙う IT 系プレイヤーは、従来の中堅 OEM との提携のみならず、物流系のサービサー・オペレータとも提携し、自動運転をベースとしたビジネスモデルも含め、自社サービスを中心としたエコシステムの構築を図っている。

(自動運転センサーシステムに関する動向)

[技術開発動向]

(レベル 4 に向けたセンサー構成)

- j) レベル 4 の自動運転ではレベル 3 以下に比べて搭載するセンサー数が増えると同時に、センシングデバイスの種類や必要な精度も高度化する。今後センサーパッケージやソフトウェアが成熟するにつれ、センサー構成や数は効率化されていくと思われる。
 - VW が自動運転商用車として実証試験を行っている ID.Buzz では、カメラ 14 台、LiDAR6 台、ミリ波レーダー11 台が搭載されているほか、高精度マップやジャイロセンサーなども搭載されており、自動運転性能の確立を重視した過剰な設計になっているとみられる⁸¹⁵

[業界動向]

(主要プレイヤーの動向)

- k) 主要サプライヤ各社では、レベル 4 向けのデバイス構成は、基本的にカメラ（ステレオカメラ等）、ミリ波レーダー、LiDAR 等を組み合わせるが、どのセンサーを主機能とするか、LiDAR の活用度合い等各社により方向性がやや異なり、データ処理の方式（センサーフュージョン）も検討段階とみられる⁸¹⁶
 - Continental は、複数のセンサーを組み合わせた構成を想定しているが、センサーフュージョンにおいては、各センサの生データを直接融合する方法を想定しており、堅牢性を高めることを目指している⁸¹⁷
 - 国内の自動車メーカー/サプライヤ/半導体メーカー中心に計 14 社で 2023 年 12 月に ASRA（自動車用先端 SoC 技術研究組合）を設立。チップレット先端半導体の車載化研究開発と仕様共通化を目的として活動しており、2030 年以降に成果物の量産車への搭載を目指している⁸¹⁸

(電動車両シミュレーション基盤に関する動向)

[市場動向]

- l) BIS によれば、車両・自動運転開発シミュレーションツールの市場規模は、2031 年までに CAGR 約 13%で成長し、3,800 億円以上（世界）となる見込みである⁸¹⁹。

[技術開発動向]

- m) シミュレーションを活用した AD の開発においては、主にシナリオ生成ツール、環境モデル・センサーモデル等が特に活用されている。シナリオ生成ツールは、天候・歩行者・路上物標・道路形状などの組み合わせにより、AD/ADAS で発生し得る、周囲のあらゆる状況を想定したシナリオを作成するものである。特に、レベル 4 においては、安全に関わる制御機能の評価が重要であり、発生が稀なケースも含め、異なる条件で効率的にシナリオを生成することが必要となる。環境モデルは走行環境を再現させるものであり、センサーモデルはセンシング機能の仮想評価モデルを提供する。車両モデルも活用されており、Path planning による車両制御シミュレーションやブレーキ・ステアリングに関連する運動シミュレーションを行う⁸²⁰。
- n) SOTIF(ISO21448)は、システム障害がない状態において発生しうる「既知と未知の危険なシナリオ」に対し、リスクを低減することを目的とした活動である。SOTIF で求められる「未知で危険なシナリオ」の識別及びリスク低減処置を支援するため、シミュレーションベンダは、膨大かつ効率的なシナリオ生成機能を提供する必要がある⁸²¹。

(全テーマ共通)

[社会・国際情勢]

(国際標準化動向、機能安全標準化動向)

- o) 国際標準および機能安全標準化は ISO および W29 GRVA によって推進されており、2022 年には ISO が SOTIF を発表し、安全規格に関する標準化が進められている。主には、車両の電装化やコネクテッド化に伴い、これらに対応するガイドラインの設定および議論が進められている。ISO に関しては、ISO21448 (SOTIF)、ISO26262 (E/E 機能安全、システム故障防止) において、安全規格の標準化を進めており、W29 GRVA に関しては、UNR155、UNR156 において、車両のコネクテッド化に向け、サイバーセキュリティや OTA に関する標準化ガイドラインを設けている⁸²²

(各国の主要政策、法規整備動向)

- p) 各国ではそれぞれ法律を制定して自動運転に関する規定を定めている。米国では、州ごとに要件が異なっていた自動運転に関するルールを「SELF DRIVE Act」として国内で統一化している⁸²³
- q) 自動運転の普及目標は主要各国でそれぞれ設定されており、2025 年～2030 年を一つの区切りとしてゴールについて言及されており、特に、条件付き自動運転や ADAS 機能の搭載に関して、明確に目標値を設けている⁸²⁴。
- r) インド等発展途上国の自動運転に関する法整備は依然として進んでない模様
- スタートアップ企業の台頭やグローバル OEM メーカーとの協業も企業間では見られるが、2019 年自動車(改正)法では自動運転車に関する法整備は進んでいない模様⁸²⁵
 - National Strategy for Artificial Intelligence(公共政策シンクタンク作成,2018 年)では AI を医療、農業、自動車などの分野にどのように導入できるかについて論じ

ているが、AI の責任問題については議論できていない模様⁸²⁶

[14] スマートモビリティ社会の構築

最新動向の整理

(商用車を取り巻く市場)

- a) IEA Global EV Outlook 2024 の電動車 (BEV、PHEV) のグローバル販売台数予測によると、2022 年の商用車 (バス、トラック、バン) の販売台数は約 43 万台であるが、2030 年には STEPS では約 370 万台、APS では約 490 万台まで成長すると想定されている⁸²⁷。BEV の大幅な増加が見込まれる状況において、一体的なエネルギー需給管理と車両の運行管理 (BEV の充電管理、稼働管理等) が求められる。

(STEPS=各国表明済の政策を反映、APS=未実施分含め、発表済公約が全て実施された場合)

(商用 EV・FCV が関わる社会全体最適を目指したシミュレーションシステムに関する動向)

[業界動向]

- b) 商用 EV・FCV が関わる社会全体の計画・オペレーション最適化・シミュレーションを実施するアプローチとして、地域単位での電力利用の最適化や、データ活用による運行最適化の取り組みが推進されている他、自社フリートのオペレーション最適化のために充電インフラの設置や車両調達を実施するプレイヤーも存在
 - BIPOLOGY (旧ユニシス) の Enability EMS では、BEV 種別や運行特性等の車両情報を収集し、需給・電力価格予測をしつつ充電計画を作成することでオペレーション最適化を実現する⁸²⁸
 - DiDi 及び傘下子会社の小桔充電は、自社フリートの配車サービス/充電状況に関するデータ (及び他社インフラに関する間接データ) を用いて、インフラ整備の計画・実装を行っている⁸²⁹
- c) データ連携に関するプロジェクトとしては、Apollo PJT や Catena-X は幅広い自動車 SC のプレイヤーが参画、GAIA-X は幅広い業界を対象として、データ連携を図っているが、運行管理やエネマネに関する機能は有するものではない
 - 欧州 OEM が中心となって構築されているデータプラットフォーム GAIA-X は、通信インフラや設備、産業・個人データの収集・活用を統合するデータ共有インフラとして検討されている⁸³⁰

(運行管理と一体的なエネルギーマネジメントに関する動向)

[市場動向]

- d) エネルギーマネジメント市場は、Statistics Market Research Consulting 「エネルギーマネジメントシステムの世界市場予測」 (2022) によると、同市場は 2028 年までに CAGR 約 20% で成長し、約 2,900 億ドル (世界) となる見込みである⁸³¹。市場成長の背景としては、BEV の普及に加え、再エネをはじめとする変動性電源 (VRE) の増加等か

らグリッド負荷の安定化要求が重要になっているためと考えられる。また、新たなサービスとして BEV を用いたアンシラリーサービス、蓄電池利用が検討されており、高度なエネルギーマネジメント機能に対する需要が高まっている。

- e) フリートマネジメントの世界市場は、MarketsandMarkets「フリートマネジメントの世界市場」(2024)によると2028年までにCAGR 14%以上で成長し、約560億ドルとなる見込みである⁸³²。市場成長の背景としては、フリートオーナーによるオペレーションへの効率性追求が最大の要因であるが、車両のICT化・フリート管理ソフトウェア・通信デバイス・通信量の高度化といった技術面の発展も市場成長を後押ししている。さらに、BEVのフリートマネジメントの実施は、オペレーション効率化のみならず、BEVバッテリーの残価管理にも繋がることから、今後さらに重要性が高くなると考えられる。

[技術開発動向]

(運行管理)

- f) テレマティクスデバイスとして個別車両に取り付けられるデジタコ、ドラレコ、スマホなどから位置情報、速度、走行距離等のデータを収集し、フリートの動態把握や安全管理、労務管理等に活用されている。さらに、個別車両から収集した情報を統合し、リアルタイムな車両管理、走行履歴記録、ドライバ日報等の機能を提供することにより、フリート全体の運行の効率性向上、ドライバ管理を提供するフリートマネジメントソフトウェア・アプリケーションの開発も進められている⁸³³。

(BEVの運行管理と一体となったエネルギーマネジメント)

- g) リアルタイム車両管理、走行履歴記録、ドライバ日報等のBEV運行管理における基本機能に加え、バッテリーの状況(SOC等)を収集し、フリートのオペレーションに応じて、バッテリーの状態も考慮して、充電タイミングを管理する車両オペレータがいる。
- h) 車両のオペレーション状況に応じて、大容量バッテリーを搭載しているBEVバスやトラックを輸送手段ではなく、バッテリーとして用いるサービス(BaaS等)も検討されている⁸³⁴。
- i) 将来的にBEVが大幅に普及すれば、大規模なフリートを保有するフリートオペレータは、系統オペレータと連携しつつ、系統安定化やダイナミックプライシングも想定した運行管理を実施することが想定される。一方で、フリートオペレータと系統オペレータの各々の立場において、期待する効果は異なるため、両立が難しい可能性がある。例えば、フリートオペレータでは車両の運用効率がKPIとして設定されるのに対し、系統オペレータでは電力需給の平準化(ピークシフト)を期待するといった違いがある。しかし、現状BEV普及率がまだ低いためフリートオペレータと系統オペレータとの連携や実際の運用により実績が出ているものは限定的である⁸³⁵。

[業界動向]

- j) 運行管理と一体となったエネルギーマネジメントにおいては、フリートオペレータにより、運行管理の効率最大化を軸に系統安定化も図るアプローチがとられている⁸³⁶。一方で、EnelX 等のようなグリッドオペレータや充電システムサプライヤが同領域に対して、電力需給と充電インフラの情報を用いて、フリートオペレーションや BEV の TCO 管理に対するソリューションを提供するプレイヤーも存在する⁸³⁷。
- ABB のスタートアップ PANION は AWS と連携し、エネルギーと運行管理の一括管理及び BEV 導入における事業性評価を目的として、ハードウェアに依存しないクラウドベースの BEV フリートの管理プラットフォームを提供している⁸³⁸

[社会・国際情勢]

(BEV 等に関する導入・普及政策)

- k) 電動車・EV 充電器に関しては、米中欧の各国ともに積極的に推進しており、ともに 2030 年前後において、新車販売等での xEV 導入率に関する目標や充電ステーションの整備を目標に掲げている。
- 米国では 2030 年までに新車販売台数の 50%以上を EV に、全米で 50 万台の充電ステーションを整備することを目標とする⁸³⁹。カリフォルニア州では、2045 年までに商用車の完全な ZEV 移行を目標に掲げており、ガソリンや軽油を燃料とする中型・大型トラックの州内販売を 2036 年に終了⁸⁴⁰、ZEV バスに最大 17.5 万ドル、FC バス/トラックに最大 30 万ドルなど電動商用車の購入における補助金を支給している⁸⁴¹
 - 中国では 2027 年までに新車販売台数のうち 45%を電気自動車など新エネルギー車にするとして、普及目標を前倒し⁸⁴²。商用車における EV の導入台数目標は設定されていないが、FCV に関しては地方自治体において導入台数目標が制定されており、例えば広州市は 2022 年末までにバス、物流、倉庫、港湾など施設での FCV の運行を 3,000 台以上にするとしている⁸⁴³。IEA によると、中国における 2023 年の BEV 商用車 (Bus, Truck, Van) 販売台数は約 30 万台、ストック台数は約 158 万台となっている⁸⁴⁴。また、中国のみ、バッテリー交換ステーションの政策を推進しており、乗用車やトラックなど商用車でのバッテリー交換サービスが拡大している⁸⁴⁵。例えば、中国の乗用車 BEV の新興 OEM である NIO は 2023 年 11 月 21 日時点で、中国全土で 2,113 カ所のバッテリー交換ステーションを設置している⁸⁴⁶
 - EU では 2035 年以降の EU 内における全ての新車販売を原則 CO₂ 排出ゼロ車とする(例外として合成燃料 (e-fuel) や水素を利用する ICE 車に限り新車販売を 2035 年以降も容認)他⁸⁴⁷、公共充電ステーションを毎年末時の BEV/PHEV 登録台数に応じた整備目標数設定と「汎欧州運輸ネットワーク (TEN-T)」沿いなどに設置間隔などを定め整備する新たな規則案を採択⁸⁴⁸。IEA によると欧州(EU 加盟国および、ノルウェー、アイスランド、スイス、イギリス)における 2023 年の

BEV 商用車 (Bus, Truck, Van) 販売台数は約 17 万台、ストック台数は約 46 万台となっている⁸⁴⁹

(BEV 関連の系統安定化に関する政策動向)

- l) V2G 充電インフラの整備に向けた政策が一部の国や地域で見られ始めており、ダイナミックプライシング、グリッド安定化及びスマートグリッドに関する政策の推進も行われている。
- 米国では、連邦政府レベルで V2G 関連の政策は見られないもののカリフォルニア州が 30 年までに 800 万台の電気自動車を、配電可能な電力源として活用することを目指して V2G 充電インフラの整備政策を推進⁸⁵⁰。スマートグリッドについては、DOE 内での OE (Office of Electricity) においてスマートグリッドの技術開発を主導している他、GDO (Grid Deployment Office) 主導の「グリッドレジリエンスとイノベーションパートナーシップ (GRIP) プログラム」(23 年～)を通じて、スマートグリッド関連のプロジェクトへの資金援助を実施⁸⁵¹
 - 中国では、「十四次五カ年計画」において、送電網インフラのスマート化による電力負荷の最適化を推進している⁸⁵²。また、ダイナミックプライシング推進の方向性としては、使用時間に応じた電気料金の設定を地方自治体に求めている⁸⁵³
 - 欧州では、ドイツやオランダで 21 年発表の **Fit for 55 package** に含まれた再生可能エネルギーと交通インフラとの統合を促進する規定に基づき、ドイツやオランダ等で V2G システム実現に向けた法整備や技術検討が進行している⁸⁵⁴他、EU 域内のグリッド新設とスマートグリッドの導入を加速させるための行動計画を発表⁸⁵⁵。また、各国に対し、2025 年までにダイナミックプライシングに関する法律を導入することを義務付けている⁸⁵⁶。英国では、ゼロエミッション車への移行支援を目的として **Office for zero emission vehicle** を設立し、EV 導入を促進するため、商用及び住宅への充電インフラ設置に関するガイドラインの制定や助成金制度を推進している⁸⁵⁷

(データに関する政策動向)

- m) 米国においては、車両データ活用に関する動向は確認できないが、中欧においては、ともにデータ通信や車両データ活用に関する政策を設け、車両のテレマティクス化を推進している。
- 中国では、クラウドセンターを各拠点に設置することで重点的な研究開発を目指しており、規格の統一、共有の基礎データセンターの開放、リスクコントロール、安全で信頼できるクラウドソフトウェア等の領域における基礎データの融合応用を徐々に実現することを目標としている⁸⁵⁸
 - 欧州では、車両データの活用の際に、個人情報の保護の枠組みと、公正な企業間の競争性を推進するための相互運用性の確保等を目的とした戦略を公表している⁸⁵⁹

[15] 次世代デジタルインフラの構築

【次世代グリーンパワー半導体開発】

[市場動向]

- a) 次世代パワーデバイスの市場は、2030年頃まではEV普及をドライバーにSiCが中心に拡大していく見通し
- SiCパワーデバイスの市場規模は、EV普及をドライバーに急速に拡大していく見通し⁸⁶⁰
 - ✧ 2022年時点で18億\$であり、年率31%で成長し2028年に89億\$に到達する見通し
 - ✧ SiCパワーデバイス市場における自動車向け（主にEV）向けの比率は2022年で70%、2028年で79%
 - GaNパワーデバイスの市場規模は2022年時点で1.8億\$であり、年率49%で成長し、2028年に20億\$に到達する見通し⁸⁶¹
 - ✧ GaNパワーデバイスにおいて、“Consumer”（主にPC・スマホ向け）が占める割合が大きく2022年で79%、2028年で64%
 - Ga₂O₃ウェハ・デバイス（オプト・高周波・パワーを含む）の市場規模は2020年で0.09億ドルであり、2030年に3.1億ドルに到達する見通し⁸⁶²
- b) EV向けのSiCパワーデバイス市場は、2025年にかけてSiCの本格的な設備投資・量産に向けた技術開発が進むことでハイエンド～ミドルクラスでの普及が開始され、2030年にかけては需要拡大に伴い低コスト化が進展することでローエンドでの普及が進む見通し⁸⁶³

[産業構造]

(SiC)

- c) SiCパワーデバイス市場では大手企業による寡占化が進んでいる⁸⁶⁴
- 2021年時点では、STMicroelectronics（端）（以下ST Micro）、Infineon（独）、Wolfspeed（米）、ローム（日）、ON Semiconductor（米）（以下Onsemi）の5社で市場の96%を占める
- d) EVの市場成長に伴いSiCパワーデバイス市場が急成長しており、大手のSiCパワーデバイスメーカーはSiCウェハを確保するべく、SiC素材・ウェハメーカーの買収・提携を進めてきた⁸⁶⁵
- Onsemiは2021年にSiC素材メーカーのGT Advanced Technologies（米）を買収
 - STMicroは2019年にSiCウェハメーカーのNorstel AB（典）を買収
 - （最近ではないが）ロームは、2009年にSiCrystal（独）を買収
- e) 大手のSiCパワーデバイスメーカーは下流事業者（パワーモジュールメーカー・インバーターメーカー）と共同開発を実施している⁸⁶⁶
- STMicroは2022年に、EV向け駆動システム用のパワーモジュールメーカーである

SEMICON (独) と 4 年間にわたって共同開発を実施していたと発表

- Infineon は 2022 年に、EV 向けインバーターメーカーの Vitesco (独) とパートナーシップを締結し、SiC パワーデバイスの共同開発を実施することを発表
 - Wolfspeed は 2023 年 2 月の ZF と次世代モビリティ実現に向けた戦略的パートナーシップを締結
- f) 2030 年に向け再エネ発電や蓄電池の普及に伴い次世代パワー半導体の採用が進む見通しが示されている
- 2024 年 7 月に Infineon の SiC がダイヘンの系統蓄電池用パワコンに採用と発表
 - 2023 年 8 月に東芝が太陽光発電のインバータ用途を想定し SiC-MOSFET を開発

(GaN)

- g) GaN パワーデバイス市場では、SiC パワーデバイスメーカーと比較して中小規模のプレイヤーが市場を寡占している⁸⁶⁷
- Power Integrations (米)、EPC (米)、Navitas (米)、GaN Systems (加)、Transphorm (米) の 5 社で市場の約 80%を占める
- h) 大手パワーデバイスメーカーは GaN パワーデバイスメーカーの買収を通して GaN パワーデバイス市場に参入し始めている⁸⁶⁸
- 2020 年に STMicro は GaN パワーデバイスの開発を行う Exagan (仏) を買収
 - 2023 年に Infineon は GaN パワーデバイスの開発を行う Gansystems (カナダ) を買収

[競合動向]

(SiC)

- i) 主要 SiC パワーデバイスメーカーは、2025 年頃に向けた SiC 事業の拡大 (売上で 1000 億円程度) を目指し、上流・下流の強化を行っている⁸⁶⁹
- OEM は足元では SiC デバイスメーカーに対して品質・コスト・供給能力を求めており、デバイスメーカーは現状 SiC の調達に制約があるため、SiC ウェハ確保に向けてウェハ事業の獲得やウェハメーカーとの長期供給契約を締結している
 - また、OEM からの受注拡大に向けて、OEM によって SiC パワーデバイスへの要求が異なるため、OEM・部品メーカーへの営業活動や設備投資や共同の技術開発を活発化させている
- j) EV 普及の本格化に向けて、主要パワーデバイスメーカーは、SiC パワーデバイスの供給力増加に向けて積極的な投資を行っている
- ST Micro はイタリアで SiC ウェハ製造工場 (6 インチ SiC EPI) の新設を計画 (23 年稼働)。また、中国で SiC 合弁会社を三安光電と共同設立し、8 インチウェハで SiC を生産 (25 年稼働)
 - Infineon はマレーシアの Kulim(クリム)工場に第 3 製造棟(モジュール)の新設を計画

- (24年稼働)。また、中国 TankeBlue、SICC と契約を締結、6 インチ SiC ウェハ・ブールを調達予定（中国 SICC は 8 インチウェハの提供も検討）
- Onsemi は米やチェコでの SiC ブールや EPI の設備増強を実施
 - Wolfspeed は米国ノースカロライナ州 Chatham 郡に SiC ウェハ製造工場（8 インチ）を新設（24 年稼働）。また 23 年 2 月にドイツ・ザールラント州エンドルフに SiC8 インチウェハ工場の建設計画を発表。
 - ロームは福岡県筑後市に SiC デバイス製造の新棟を開所（22 年 6 月）
- k) ウェハメーカーは、デバイスまで手掛ける統合型と Epi Wafer まで手掛ける専門型に分類され、主要各社は EV 市場での SiC 需要立ち上がりを見据えて 8 インチの量産化準備を始めている⁸⁷⁰
- l) Wolfspeed は他社に先駆けて 2022 年に 8 インチウェハの量産開始。その他主要各社も 2023 年以降を目処に量産化を目指している⁸⁷¹
- Wolfspeed は 2022 年に 8 インチウェハを量産化。2024 年にノースカロライナに 8 インチウェハの製造工場を完成させる計画
 - STMicro は 2023 年に既設のカターニャ工場にて 8 インチ SiC ウェハの量産を予定している
 - ROHM は既に 8 インチウェハの開発を終了し 2023 年に外販を開始予定
 - Coherent（旧 II-VI）は 2015 年に 8 インチ SiC ウェハ（基板）のサンプル出荷を実施。2022 年 3 月には既設のペンシルベニアとスウェーデンの工場に 8 インチ SiC ウェハの生産を増加させると発表
 - また、Coherent は 2022 年 8 月 23 日に Infineon と 8 インチ SiC ウェハの複数年に渡った供給契約を拡張したと発表
 - SK Siltron は 2022 年に米国ミシガン州に SiC ウェハ工場を建設し、6 インチウェハの供給能力を強化。2023 年後半から 8 インチウェハの供給を目指している
 - Onsemi は韓国の SiC ウェハ工場拡張し 2025 年から 8 インチへ移行予定
- m) 近年は SiC ウェハの安定調達を目的に、パワーデバイスメーカーとウェハサプライヤによる長期（複数年）の供給契約が相次いで締結されている⁸⁷²
- STMicro は 2021 年 8 月に Wolfspeed と既存の SiC ウェハの複数年に及ぶ長期供給契約の拡大した
 - Infineon は 2022 年 8 月に Coherent（旧 II-VI）と SiC ウェハ供給に関する複数年契約を締結。また 2023 年 1 月にレゾナックと SiC エピウェハの供給契約を締結
 - SiC エピウェハメーカーの Dongguan Tianyu Semiconductor Technology（中）は 2022 年 9 月に Coherent（旧 II-VI）と SiC ウェハ（基板）の長期供給契約を締結した締結の補完・拡大)
 - ルネサスは 2023 年 Wolfspeed と 10 年間の SiC ウェハ供給契約を締結
 - 三菱電機は 2023 年 Coherent に出資し、長期供給契約を締結

(GaN)

- n) 大手パワーデバイスメーカーは GaN パワーデバイスの開発に向けて同業他社との共同開発を実施している⁸⁷³
 - 2018 年にロームは GaN Systems とパートナーシップ締結を発表し、GaN パワーデバイスの共同開発を開始した
 - 2021 年に Infineon はパナソニックと 650 V GaN パワーデバイスの共同開発を発表した
 - 2023 年に Infineon は GaN Systems を買収

(中国動向)

- o) 2000 年から 2018 年までは、SiC パワー半導体関連の特許取得において、日本のプレゼンスが高かったが、近年、中国が急速に特許取得の動きを加速させている⁸⁷⁴
 - 中国では SiC 半導体の産業化に向けて、国策としてサプライチェーン全体での SiC 技術開発を支援している
- p) 中国では SiC パワー半導体の上流から下流まで幅広く特許を出願しており、その顔ぶれは大学等の研究機関や国営企業、及び SiC を専門とした民間企業を中心に、その他にもスタートアップと多様⁸⁷⁵
- q) 中国の SiC ウェハプレイヤーは現状 4-6 インチを中心に供給。一部先行するプレイヤーが 8 インチに向けて研究開発を開始した段階⁸⁷⁶

[技術動向]

- r) 2030 年に向けてウェハの供給能力の向上（大口径化）だけではなく、ウェハの品質向上（欠陥密度の低下）・低コスト化に向けた技術開発が重要となる⁸⁷⁷
- s) ウェハ製造のコスト削減に向けて、①ウェハのバルク成長でのコスト削減、②ウェハの加工プロセス③エピ成長での各プロセスでのコスト削減に向けて開発を進めている⁸⁷⁸

[国際・ルールメイク動向]

- t) 半導体の製造機器メーカー、フラットディスプレイ（FPD）製造装置メーカー、材料メーカーなどの国際的な業界団体である SEMI（Semiconductor Equipment and Materials International）が半導体ウェハ（Si）に関する規格を策定⁸⁷⁹
 - SEMI には世界の 2,500 社以上の会員企業が存在
 - International board of Directores には東京エレクトロンや JSR、村田機械、ニコンといった日系企業のメンバーが存在
 - 規格を定める”International Standards Committee”の下に 3 つの”Regional Standards Committee (EU/NA/JA)”が存在
 - シリコンウェハの場合、”仕様”、”特性及び品質に関する試験方法”などが規定されている
- u) ただし、SiC、GaN 等の化合物パワー半導体に関する国際規格は未整備な状況にあり、

2023年 IEC 白書においてパワー半導体の国際規格や認証制度の整備・拡充の必要性に関する提言された⁸⁸⁰

[グローバル動向サマリ]

- SiC パワーデバイス市場では、EV 向けが過半を占め、EV 普及に伴い拡大する見通し
- OEM からの受注獲得・シェア拡大に向けて、各パワーデバイスメーカーは SiC ウェハの確保に向けてウェハ事業の獲得やウェハメーカーとの長期供給契約の締結、OEM・部品メーカーへの営業活動や設備投資や共同の技術開発を活発化させている
 - OEM は足元では SiC デバイスメーカーに対してコストと供給能力を求めており、SiC デバイスメーカーはウェハ事業の獲得、ウェハメーカーとの長期供給契約の締結を進めている
 - OEM によって SiC パワーデバイスへの要求が異なるため、パワーデバイス各社は OEM との共同開発を行っており、デバイス単体のみならずパワーモジュールの共同開発や提案を強化
- 中長期的（2025～）には、現状の高級車だけでなく大衆車にも SiC デバイスが搭載され、OEM は SiC パワーデバイスメーカーに対して更に低コスト・高品質（耐久性）の要求を高めると想定されるため、SiC デバイスメーカーは低コスト化・品質向上技術の開発に積極的に取り組んでいる
 - ミドルクラスへの搭載開始は 2025 年前後、ローエンドへの搭載開始は 2030 年頃に本格化すると OEM は想定している
- そのような下流側の動きを受けて、ウェハメーカー（ウェハ専業、統合型の両方）は需要拡大に向けて 8 インチ SiC ウェハの量産計画を発表、又は開始するなど、需要の獲得を目指している
- 加えて、ウェハの製造コスト削減に向けて、①ウェハのバルク成長での成長スピード改善、②ウェハの加工プロセス③エピ成長での各プロセスでのコスト削減に向けた開発が進んでいる
- ①のバルク成長方式は各社ともに最適な方式を見極めている状況。主要 SiC ウェハメーカーは 8 インチの量産化に向けて設備投資を行っており、次の設備新設・更新タイミングを見据えた実用化に向けて、今後も各方式の技術動向の把握が必要
- 加工プロセスでは、Infineon による Cold Split 技術や、SOITEC の SMARTSIC などの技術開発が行われている
- エピ成長はウェハの品質・性能に大きく寄与する重要な工程であり、主要ウェハは各社独自の最適なレシピの獲得に向けてテストを繰り返すことで、製造パラメータを蓄積し、設計・製造ノウハウを獲得しようとしている
- また、中国市場に関しては、中国の SiC ウェハプレイヤーは 4-6 インチ中心の供給にとどまっているものの、ST Micro、Infineon との提携により中国企業は欧州企業に SiC ウェハを提供予定であり、更に 8 インチ化に向けた動きも顕在化、現状はグローバルプレイヤーの優位性

が高いが、近年は中国の SiC パワー半導体のプレゼンスが急激に向上してきており、今後も動向を注視する必要がある

- 系統向け SiC パワーデバイスに関しては、2030 年にかけて EV 向け程の成長が期待されない領域でもあるため、競合である大手 SiC パワーデバイスメーカーの、系統向けに対する積極的な動きは限定的であるが、顧客ニーズ次第では急激な動きを見せる可能性があるため、顧客動向を注視する必要がある
- GaN パワーデバイスに関しては、2030 年にかけてスマートフォン・PC 向け電源及びデータセンターのサーバー向け電源が市場を牽引する見込みである
- この市場では、現状は、SiC と比較して中小規模の複数主要プレイヤーを寡占している状況であり、市場拡大に合わせて徐々に大手パワーデバイスメーカーが市場参入を始めている状況
- SiC と同様に市場拡大に伴う大手パワーデバイスメーカーの参入により、GaN パワーデバイス市場において競争が激しくなる見通し

【次世代グリーンデータセンター技術開発】

[市場動向]

- a) 近年、DXの進展やインターネットサービスの利用拡大やクラウドサービス需要の増加に伴いハイパースケール型DCは急拡大しており、データセンターでの電力消費量の急増が想定され、DCにおける省エネと電力の脱炭素化が課題となっている
- グローバルDC市場規模(DC運営に必要なコンピュータ/ストレージリソース/ネットワーク等を含む,出所:Verified Market Research)は2021年時点で552億米ドルと推定されており、2030年には1,241億米ドルまで拡大する見込み(CAGR+9.2%)⁸⁸¹
 - DCは平均的なオフィスの10倍以上の電力消費量であることに加え、AI/IoT/ブロックチェーン等技術により、更なる電力消費量増加が見込まれるため、省エネ化・グリーンな電力利用が課題となる⁸⁸²
 - IEAはDCの消費電力が2022年の460TWhから2026年には800TWhに増加する見通しを公表しており、その要因の一部に生成AIの利用拡大を上げている⁸⁸³
- b) DC脱炭素化の目標値として、ITU standard（電気通信の標準化を行う国連機関）が掲げるデータセンターのGHG排出量削減目標は2030年にかけて45%減（2020年度比）と設定されている⁸⁸⁴
- 2018年時点でグリーンDC（参照レポート定義：通常DCと同等の機能を前提とし、環境への影響に配慮し、スペース及び消費エネルギーの抑制を図るDC）の市場規模は65億米ドルであり、2026年には350億米ドルまで拡大すると予想される（CAGR+23.4%）⁸⁸⁵
- c) スマホ/クラウドに加え、IoT/5G/AI/ブロックチェーンといった新技術により、データセンターのデータ量及び発生熱量は増加傾向であり、それらに対処するためサーバ台数増加/処理能力増強/熱処理/電力量削減といった対応が必要となる⁸⁸⁶

[業界動向(産業構造)]

- d) データセンター産業は今後「クラウドサービス提供者による集約」と「エッジ活用による分散」の二極化が進むと想定される
- 自動運転やスマートファクトリーに代表されるIoTの普及に伴い、エッジ領域で生み出されるデータ量が急増するため、データのエッジでの処理ニーズが高まる⁸⁸⁷
 - 他方、急速なクラウドサービスの普及により企業のデータセンターがクラウド系DCに集約される⁸⁸⁸
- e) 半導体供給体制の安定化・省電力化に加え、クラウド系DCのデータ処理速度等の要求水準向上によるチップ自社開発を背景に、クラウド系プレイヤーのGAFAMは半導体チップの内製化による性能向上・他社差別化を目指してきた
- 2015年にAmazonはデータセンター向けチップを開発するイスラエルの”Annapurna Lab”を買収⁸⁸⁹
 - 2015年にGoogleは自社開発したチップを自社データセンターで使用開始⁸⁹⁰

- f) また、サーバ市場では従来のサーバメーカーの市場シェアが低下し、GAFAM等のクラウド系プレイヤーがODMに委託してサーバを調達するように変化している
- 従来サーバの中身はサーバメーカーがサーバ単位でセット販売するなどブラックボックスであったが、更なる性能向上に向けGAFAM等がサーバのオープン化を主導⁸⁹¹
 - クラウド系プレイヤーはプロセッサやフラッシュメモリなどを半導体メーカーから直接調達し、自社開発したサーバやネットワーク機器を台湾などのODMに製造させるように変化してきた⁸⁹²
 - サーバ市場では2014年ではODMのシェア（金額ベース）が8.0%であり、2020年の同期では25%に上昇している⁸⁹³
- g) さらに、クラウド市場の成長による更なる収益性向上のため、GAFAM等のクラウド系企業は自社でDC事業を展開し自社専用のDCを保有・運営するように変化してきた
- Google/Apple/Facebook(現Meta)は米国メサ市に自社保有のDC建設を発表⁸⁹⁴
 - 2019年5月、グーグルは千葉県に自社専用DCの建設に向けて土地を購入⁸⁹⁵
- h) 省電力ニーズを背景に不揮発メモリの開発が進んでおり、プロセッサに近いDRAM、そしてプロセッサ内のSRAMキャッシュも不揮発メモリになる可能性がある
- Samsung等が開発しているMRAMは、動作電圧がCMOS並みに低く、書き換え時間が10n秒以下と高速であり、書き換え可能回数も非常に多い⁸⁹⁶
 - 米Global-Foundriesや韓国Samsung Electronics、台湾TSMCなどの大手ファウンドリーや半導体メーカーがMRAMを量産済み⁸⁹⁷
- i) 大手クラウド系企業は既存DCへのGPU内臓等により生成系AI向けDCを既に導入している一方で、ソフトバンク等モデル開発事業者が自前で生成AI向けDCを整備するなど、アプリケーション特化を軸としてインフラ（DC）投資を行う企業が台頭
- Microsoftは自社サービスの生成系AIサービス対応として設備投資を行い、GPUクラウド事業者との大型契約締結⁸⁹⁸
 - ソフトバンクは生成系AIと5G/6Gに向けた次世代プラットフォームの構築に向け、ソフトバンクが今後構築する日本各地の分散型AIデータセンターに関してNvidiaと協業を開始⁸⁹⁹

[国際・ルールメイク動向]

【光エレクトロニクス】

- j) GAFAMや主要半導体チップメーカー・サーバメーカーは次世代技術（コ・パッケージド・オプティクス等）の展開に向けたコンソーシアムの設立や参加を実施し、ルールメイキングを実施
- ネットワーク機器（サーバ等）の製造において、光モジュールの使用を可能にするための仕様策定を進めるコンソーシアム”Consortium for On-Board Optics（基板実装型光モジュールのコンソ）”が存在⁹⁰⁰
 - ◇ DELLやMicrosoft、Cisco、Broadcomなどが設立メンバー
 - ◇ NECや富士通、フジクラなどがAssociate Memberとして加入

- 2019年3月に Microsoft と Facebook (現 : Meta) はコ・パッケージド・オプティクス技術の普及に向け、Co-Packaged Optics (CPO) Collaboration の設立。このコンソーシアムでは共通の設計要素を採用することで、コ・パッケージド・オプティクスの設計と製造において、サプライヤーにガイダンスを提供することを目的としている⁹⁰¹
- k) RISC-Vに関しては米国政府が米国企業の開発に規制をかけるような意見も出ている一方で、RISC-Vの標準化団体である RISC-V International はスイスを拠点に既に2度の ISA プロファイルを発表しており、業界普及に向けて標準化を推進⁹⁰²

【光に適合したチップ等の高性能化・省エネ化】

- l) GAFAM や主要半導体チップメーカー・サーバメーカーは次世代技術 (メタバースやコ・パッケージド・オプティクス等) の展開に向けたコンソーシアムの設立や参加を実施し、ルールメイキングを実施
 - 2022年3月に主要な半導体メーカー・GAFAM がチップレットの規格化に向けたコンソーシアム”Universal Chiplet Interconnect Express”を設立。以下が設立メンバー⁹⁰³
 - ◇ 半導体チップ関連 : ASE、AMD、Arm、Intel、Qualcomm、Samsung、TSMC
 - ◇ GAFAM : Google Cloud、Meta、Microsoft

【ディスアグリゲーション】

- m) グローバルでディスアグリゲーション技術に関するコンソーシアム等は存在せず、国内では NTT の IOWN 構想にディスアグリゲーション技術を用いたサーバの最適制御を掲げる⁹⁰⁴
 - IOWN 構想では、NTT・インテル・ソニーと2020年に Global forum を形成

【技術動向】

【光エレクトロニクス】

- n) 業界としてエネルギー削減・データの高速度処理を背景に、通信量が多い長距離通信市場では DC 間/ラック間を中心に Intel/Cisco/NVIDIA 等が光電融合デバイスを商品化済である一方で、チップ間/チップ内では未実装
 - チップ間/チップ内での光電融合デバイス開発の背景として、2021年に通信規格 PCIe6.0 が策定され、通信速度が従来約2倍となったことで、消費電力をおさえるため光対応の必要性が出てきた⁹⁰⁵
 - 長距離通信市場ではボード/ラック間では NVIDIA/Cisco、ラック間/DC 間では住友電工 /II-VI/Intel 等が光トランシーバーを開発・実装⁹⁰⁶
 - チップ間/チップ内の光電融合デバイス開発事例として、アイオーコアの搭載可能な超小型トランシーバーが存在しており、2023年には量産体制に入る⁹⁰⁷
 - NEC は IOWN 技術を活用したデータセンター間通信ソリューションを提供開始⁹⁰⁸
- o) 光スマート NIC の取組を公表している企業はグローバルではおらず、国内では NTT IOWN 構想で DC/サーバ内の通信規格の統合の重要性を述べている

- データセンターの CPU には大きな計算負荷がかかるため、異なるネットワーク間で暗号化された通信規格の処理を分担するプロセッサを搭載したスマート NIC の開発・利用が進展⁹⁰⁹
- 従来型のスマート NIC は主に長距離通信（データセンター間/ラック間）で利用⁹¹⁰
- Ethernet/PCIe/CXL（CPU とメモリ/その他デバイスの接続規格）を統合した通信規格の策定が必要⁹¹¹

【光に適合したチップ等の高性能化・省エネ化】

- p) クラウドサービスの高性能化に伴う消費電力増に対してエネルギー削減を背景に、GAFAM は自社のデータセンターの消費電力を削減するべく、半導体チップの省エネ化に向けた自社開発を実施している
- Google は自社開発したチップ搭載等により一般的なエンタープライズ DC の 2 倍のエネルギー効率を実現した⁹¹²
 - Amazon は自社開発したチップ” Inference”の電力効率が Nvidia のチップ” Turing T4” の約 2 倍改善していることを発表⁹¹³
- q) 同様に半導体チップメーカーも省エネ・エネルギー効率の改善に向けたチップの開発を実施している
- AMD は 2014 年に 2020 年までに 25 倍のエネルギー効率を実現するという目標(x86 アーキテクチャ)を発表。現在も継続的に CPU のエネルギー効率改善に向け開発を行っている⁹¹⁴
- r) 半導体チップメーカーはクラウド系企業やサーバメーカーと共同で半導体チップの開発、又は顧客のニーズを汲み取る座組構築を実施
- AMD と AWS はクラウドコンピューティングにおいて 2018 年から AMD EPYC で協業を開始⁹¹⁵
- s) 主要な演算処理を光にて行う光チップ（光アクセラレーターチップ）を開発する企業（Lightmatter）は生成系 AI ブームを起点として 200 億円程度の資金調達を 2023 年に行うなど、On-Board Optics 及び Co-Packaged Optics の次の技術も台頭⁹¹⁶
- t) メインメモリ市場では DRAM を中心に 3 社(Samsung/SK/Micron)の大容量化・低コスト化の投資競争が進むなか、業界の省エネ要請及び生成系 AI モデル開発向けメモリとしての適性を背景に不揮発メモリの技術が注目を集めている
- 不揮発メモリには MRAM/FeRAM/NRAM が技術方式として存在し、DRAM 同等の書き込み速度(10ns 程度)及び製造コストを実現するにはカーボンナノチューブを用いた NRAM が有望⁹¹⁷
 - 生成系 AI のトレーニングにおいて、メモリの書き込み可能回数が多い不揮発メモリはモデル開発におけるメモリの長寿命化によるコスト削減・トレーニング期間短縮が期待されるため、生成系 AI モデル開発に適している模様⁹¹⁸
- u) NAND フラッシュメモリ市場は大容量化・低コスト化の投資競争が進むなか、データ量増

加に伴いインターフェイスの高速化が課題。広帯域化に向け、PCIe 変調方式改善/CXL 採用及び光インターフェイス搭載に向け各社取り組みを推進

- NAND メモリでは Samsung/キオクシア/WD がシェア上位企業⁹¹⁹
- Samsung は PCIe Gen4 対応の SSD を 2020 年に開発し、さらに帯域幅が 2 倍高速化された PCIe Gen5 接続の SSD 開発も表明⁹²⁰
- 長引くメモリ不況を背景とした生産効率向上を目的として低コスト化に向けキオクシアと WD の経営統合の交渉も行われたが、株主との条件で整わないとして交渉は破断⁹²¹

【ディスクアグリゲーション】

- v) IBM・NTT はディスクアグリゲーション技術の研究に取り組む。加えて、GAFAM 等も省エネ及びデータの効率的な処理技術は競争領域と捉えて、各社が自社 DC の最適化に向け技術開発を推進
- IBM は EU イノベーションプロジェクトの HORION2020 で継続的にディスクアグリゲーション技術を開発⁹²²
 - NTT の IOWN 構想ではディスクアグリゲーション技術を 2030 年に実装することを掲げる⁹²³

【IoT センシングプラットフォームの構築】

[市場動向]

- a) 近年、デジタル化の推進に伴いクラウドへのデータの送信、クラウド上でのデータ貯蔵・処理量が増加しており、データセンターにおける電力消費量の急増が課題となっている⁹²⁴
- b) エッジコンピューティングは従来クラウドに送信していたデータをエッジで処理する技術で、エッジとクラウド間の通信やクラウド上でのデータ貯蔵量を軽減する効果が期待されており、データセンターにおける消費電力増加の課題に対する打ち手の一つと考えられている⁹²⁵
 - エッジコンピューティングの市場規模（エッジに設置されるハードウェア/エッジコンピューティングを実現するソフトウェア/付帯サービス,出所:IDC）はグローバルで2022年の1,790億ドルから2027年には3,500億ドルに、国内で2024年の1.6兆円から2027年に2.3兆円に拡大する見込みである⁹²⁶
- c) エッジコンピューティングへの移行によるGHG排出削減量は、EUおよび日本が効果算定を行っている
 - (ア) EUではエッジにおけるデータ処理への移行が期待される13の用途（自動車/セキュリティ/エネルギー/輸送/製造業/ヘルスケア/農業における各個別用途）を対象に、2027年時点の現実的なエッジコンピューティングの普及状況を想定したシナリオで効果を算定し、グローバルで1,900万トンのCO₂削減効果が得られるとの見解を示している⁹²⁷
 - (イ) 国内ではNEDOグリーンイノベーション基金において、開発技術の普及率を100%とした最大限のGHG排出削減ポテンシャルを算定し、グローバルで2030年に11億トン、2050年に84.7億トンと見積もっている

[技術動向]

- d) 本基金の開発テーマはエッジにおける信号処理技術の開発および当該信号処理技術を活用可能なIoTセンシングプラットフォームの機能拡充から構成される
 - (ア) エッジにおける信号処理では、イメージセンサから得られた信号をAI活用に適したデータへ変換処理する技術を開発する
 - (イ) IoTセンシングプラットフォームの機能拡充に向けた開発では、SDK及びプラットフォーム開発/ハードウェア開発/アプリケーション開発を行う

【エッジ信号処理技術】

- e) イメージセンサから得られる信号の処理技術は従来スマートフォンやデジタルカメラの撮影補助や撮影した画像の綺麗化のために開発が進められたが、近年は自動運転のための信号処理や監視やIoTの用途に適した信号処理技術の開発が進む
 - スマートフォン用途ではSamsungが自社開発したISP（イメージシグナルプロセッサ：イメージセンサから受け取った信号を処理するプロセッサ）を搭載した製品を販売⁹²⁸、Qualcommは自社開発したISPを搭載したスマートフォン向けチップセットを販売⁹²⁹
 - 車載用途ではArmが自動運転用プロセッサIP（IP：知的財産、特定の機能を果たすた

めに開発された汎用的に利用可能な半導体設計ブロック)を開発し、Mobileye やルネサスが自社半導体に採用^{930,931}、Omnivision は複数センサ情報を統合処理する技術を発表⁹³²

- 監視・IoT 用途では、Samsung は ToF センサ (ToF センサ:光が対象物に当たり戻ってくるまでの時間を計測し距離や深度を測定するセンサ) から得られた信号を処理する ISP を内蔵したパッケージ製品を IoT 向けに市場投入しシステム消費電力を最大 40% 削減⁹³³

[国際・ルールメイク動向]

- f) IoT に関するルールメイク動向では主にサイバーセキュリティ、AI 活用、データ保護の観点で地域毎にルールメイクが進行している⁹³⁴
- サイバーセキュリティの観点ではセキュリティ担保された製品にラベリングする制度設計が進行しており、米国では U.S. Cyber Trust Mark 制度が開始されセキュリティ担保された製品をラベル付けする事で市場原理による優位形成を推進⁹³⁵しつつ中国製品の貿易制限を実施⁹³⁶、欧州では Cyber Resilience Act を採択しセキュリティが担保されない製品の欧州内における販売を規制⁹³⁷
 - AI 活用の観点では欧州が先行してルールメイクを進めており、AI 含むソフトウェアやデジタルファイルを適用対象とする新たな製造物責任指令案を政治合意⁹³⁸
 - データ保護の観点では世界的に個人データの越境移転を規制しサーバのローカル設置を求めるデータローカライゼーション規制が拡大している⁹³⁹。このほか米国では州毎の個人情報保護規制に加え連邦プライバシー法の議論が進行⁹⁴⁰、欧州では IoT 機器が収集するデータの利用者に向けた公開を求める欧州データ法を採択⁹⁴¹
- g) IoT 関連の技術開発を促進する補助事業も各国で推進されている
- 米国では CHIPS 法により 5 年で約 2,800 億ドルを半導体の研究開発及び製造能力強化に対し補助⁹⁴²
 - 欧州は様々な補助プログラムを用意し、半導体・通信・クラウド構築等の幅広い領域に対し補助を提供⁹⁴³

[16] 次世代航空機の開発

[市場面の動き]

- a) 国際航空においては今後も CO₂ 排出量の増加が見込まれており⁹⁴⁴、業界団体や専門機関、G7 各国は航空分野における 2050 年ネットゼロを目標に掲げるなど、官民が一致してネットゼロ達成に向けて取り組む姿勢が見られている
- 国際エネルギー機関 (IEA) の NZE シナリオによると、パリ協定の枠組みに沿って各国が取り組む国内航空については、直接排出量 (CO₂ 換算) は 3 億 2,793 万トン (2021 年) から 3 億 4,144 万トン (2030 年) までほぼ横ばいの見通しの一方、国際航空分野は 3 億 8,446 万トン (2021 年) から 5 億 4,145 万トン (2030 年) まで増加する見込み⁹⁴⁴
 - 国際航空運送協会 (IATA) は、“Commitment to Fly Net Zero by 2050”(2021 年 10 月)において、航空業界に関わるステークホルダー全体の努力として、2050 年に炭素排出をネットゼロとする目標を採択したと発表した。特に、水素航空機への期待も大きく、2035 年にリージョナル市場、2040 年に短距離線市場に上市されることが期待されている。また、2050 年のネットゼロを達成するための航空機技術・エネルギー/新燃料インフラ・航空オペレーション・政策・財務の 5 分野に関する戦略的ロードマップを公開し、ネットゼロ達成に向けたマイルストーンを設定している⁹⁴⁵
 - ◇ バッテリー駆動の電動航空機に関する主なマイルストーンは、2030 年までの全電動航空機 (席数 30、航続距離 100 海里 (約 185km) 程度) 実用化、30~35 年でのエネルギー重量密度 225Wh/kg への到達、および 35~40 年でのエネルギー重量密度 350Wh/kg への到達等⁹⁴⁶
 - 国際民間航空機関 (ICAO) は、2022 年の第 41 回 ICAO 総会において国際航空分野で 2050 年までに CO₂ 排出をネットゼロにする長期目標 (LTAG: Long-Term Aspirational Goal) を採択。2020 年以降 GHG ガスの総量を増加させないとの従来目標から排出削減へと大きく方針を転換した。また、ベースラインを超過した排出量を炭素クレジットでオフセットする CORSIA において、2024 年以降の第 1 フェーズにおけるベースラインを、2019 年比 85%とすることで合意⁹⁴⁴
 - G7 三重・伊勢志摩交通大臣会合において、航空分野の目標として、2050 年までの CO₂ 排出ネットゼロ目標の履行、より環境負荷の小さい持続可能な航空燃料 (SAF) への導入促進への協働、脱炭素技術の研究開発等の協働等に取り組むことを、G7 交通大臣宣言として採択⁹⁴⁷
- b) ネットゼロに向けた推進系のエネルギーは、あらゆる機体サイズの航空機において足元では SAF への移行が中心であるが、2020 年代後半~30 年にかけて、コンピューター機やリージョナル機等の一部において、バッテリーや水素燃料電池を搭載する航空機の実用化が始まる見込み⁹⁴⁸
- 航空輸送行動グループ (ATAG) が 2021 年 9 月に発表した「Waypoint 2050」では、

コンピューター機、リージョナル機、短・中・長距離路線機の全ての航空機において SAF の活用が見込まれ、コンピューター機やリージョナル機では、20 年代後半～30 年にかけて、バッテリー/水素燃料電池を搭載する航空機の実用化、短・中距離路線機では、35～40 年にかけて、水素燃焼エンジンを搭載する航空機の実用化が見込まれている。また、長距離路線機では、50 年までの当面の間は基本的に SAF への移行が中心となる⁹⁴⁹

- c) ネットゼロに向けた当面の取り組みは SAF であると既に合意がなされており、従いどのように SAF を確保・調達していくか、というフェーズに移行している
- 2021 年の世界経済フォーラム (WEF) において、グローバルな航空会社グループ、空港、燃料供給会社等 60 社は、航空業界で使用される燃料のうち、SAF の割合を 2030 年までに 10% に増加させることを宣言したコミットメント「2030 Ambition Statement」に署名⁹⁴⁹
 - バイオ由来の SAF の生産量は、2022 年に 21 年比約 3 倍の 3 億リットルに増えたものの、世界の航空燃料消費量の 0.1% にとどまっている。そのため、欧州議会と理事会は、2023 年 4 月、航空燃料の供給事業者に対し SAF 利用を義務付ける法案について合意。EU 域内の空港で使用される燃料が対象で、段階的に SAF の混合比率を高め、50 年に 70% 以上とする⁹⁵⁰
 - Boeing 社は、2023 年に民間航空機部門が使用する SAF の調達割合を、22 年比で倍増することを発表。併せて、再生可能エネルギー大手の Neste 社が製造する混合 SAF を 2,120 万リットル (560 万ガロン) 購入する契約を締結⁹⁵¹
 - American Airlines 社は、バイオ燃料企業の Gevo 社と SAF を 5 年間で 5 億ガロン購入することで合意し、2026 年に納入を予定。当該企業が加盟する Oneworld は、2030 年までに、加盟航空会社全体で 10% の SAF 利用を達成する中間目標を発表している⁹⁵²
 - 日本においても、ANA や JAL 等を幹事会社とする有志団体「ACT FOR SKY」を設立し、国産 SAF の商用化および普及・拡大に取り組んでいる⁹⁵³
 - SAF に関連して、DAC (Direct Air Capture) 技術で回収した CO₂ を活用して H₂ と共に液体燃料化する PtL (Power to Liquid) が、2030 年以降に主流になる可能性について複数の国際機関で検討されている
 - ◇ IATA の戦略的ロードマップでは、大気中の CO₂ を回収して SAF を製造するだけでなく、大気中に残留する CO₂ 除去や永久保存、SAF 製造工程で残留する CO₂ フットプリントの中和のために、DAC が必要であることを述べている⁹⁵⁴
 - ◇ 2023 年時点で世界最大の炭素回収プラントの公称容量は 4,000t/y だが、このプロジェクトを推進するスイス Climeworks 社は、その 10 倍の規模のプラントを 2025 年に稼働させる予定⁹⁵⁴
 - ◇ 一方で、大気中の CO₂ 回収は排ガス中の CO₂ 回収に比し、10 倍以上のコストや大量のエネルギーを要するため普及に向けた課題は多い⁹⁵⁵。DAC による PtL は、仮にグリーン電力を大量に獲得できることができれば有望であると述べる有識者

も存在⁹⁵⁶

- d) SAFの生産量は増加傾向にあるが、今後5年間のSAF生産量の85%はHEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) に由来すると予想されており、SAF生産経路の多様化が求められている⁹⁵⁷
- IATAは、HEFAが廃脂肪・油脂原料等の限られた原料の入手可能性に依存していることを懸念し、SAFの多様化を実現するための3つの主要な手段を挙げている⁹⁵⁷
 - ◇ Alcohol-to-Jet (AtJ) や Fischer-Tropsch (FT) 等の既に認証されているSAF経路の規模拡大
 - ◇ 現在開発中のSAF生産経路の研究開発の加速
 - ◇ 原料/原料転換技術のスケールアップ
- e) 一方SAFにおいては、原料の供給量に伴う生産量拡大への課題などもあり、需要量に対して供給量が不足する可能性が指摘されており、こうした地域における水素利用機や電動機の参入余地があると見られる
- IATAが2024年4月に公開した複数の脱炭素ロードマップの比較研究によると、バイオSAFとPtLが2050年ネットゼロ実現に最も高い排出削減効果をもたらす一方で、SAF供給量はその需要量を満たさない可能性があることを指摘⁹⁵⁸
 - ◇ 足元では再生可能燃料の増産分の多くが他業界の燃料に割り当てられており、航空業界向けに供給された量は全体の約3%の過ぎなく、政策的後押しの必要性についても警鐘を鳴らしている⁹⁵⁹
 - 同様に世界経済フォーラムも2030年断面で現在計画の供給量では、航空業界の需要量の約半分以下しか賅えないと予測⁹⁶⁰
 - 地域別に見ると北米では、多くのSAF供給が見込める中で、欧州やAPAC地域は、多くの需要が予測される一方、需要に対してそれぞれ6割、1割程度しか供給出来ないと見られ、これらの地域における中長期的な次世代機導入ニーズが想定される^{961,962}
- f) 脱炭素化を背景とした次世代機導入ニーズにおいて、CO₂排出量の約9割を占めるShort-haul向け以上の水素利用機の実用化の期待が大きい。一方で、リージョナル機も一定程度の需要が見込まれ、これら分野におけるハイブリッド電動機の開発取組も進む
- 世界経済フォーラムやEUが参画するロードマップにおいては、SAFに次ぐ有力な脱炭素手段として水素利用機が挙げられている^{963,964}
 - 航空機のCO₂排出量の9割近くはShort-haul以上とされている。⁹⁶⁵一方で、電動機は蓄電池のエネルギー密度の課題が存在しており、長期的にShort-haul以上への対応は困難とされる中で、Short-haul以上へも適用可能とされる水素利用機による脱炭素化が期待されている⁹⁶⁶
 - 一方、リージョナル機についても、CO₂排出量はShort-haul以上と比較して少ないものの、ユナイテッド航空等、ハイブリッド電動機等による脱炭素化に向けた取組を開始する航空会社も存在。^{967,968}Airbus及びBoeingの2大OEMはShort-haul向け以上をメインターゲットする一方で、EmbraerやATR、COMAC等のリージョナル機向け市

場が想定される⁹⁶⁹

- EU や米国においてもリージョナル機向けのハイブリッド電動機の開発取組が進んでいる^{970,971}
- g) ネットゼロを見据えて、バッテリーや燃料電池等の脱炭素関連コンポーネントの重要性は増しているが⁹⁷²、現時点では従来の航空機開発サプライチェーンを大きく変化させるほどには至っていない。一方で、航空機メーカーが自動車向け燃料電池サプライヤーを買収する等、自社サプライチェーンへ取り込む動きも見られ、今後は他産業向けサプライヤーと航空機メーカーの提携等が活発化していく可能性も見て取れる⁹⁷³
 - 水素電気航空機メーカーの ZeroAvia 社は、主に自動車向けに燃料電池スタックを供給している HyPoint 社を買収⁹⁷⁴
 - 航空機産業への部品供給は、他産業に比し特に安全性の観点で要求レベルが高いが、Airbus 社や Boeing 社等の主要 OEM との提携や合弁設立によって、航空機産業の専門知識・技術を獲得していくことが重要⁹⁷³

[技術面の動き]

- h) '30-40 年頃の実用化を目指し、Airbus 等が電動/水素利用機開発、Lufthansa や Air France-KLM が水素インフラ・整備体制構築、Rolls-Royce 等が水素エンジン開発等に取組む
 - Airbus 社は、水素を燃料としたゼロ・エミッションを達成する旅客機の運用を目標に掲げ、ZEROe コンセプトを提唱。機体開発と並行して研究機関・メーカー・空港・エアライン・二次輸送事業と協力し生産、貯蔵、輸送の水素のサプライチェーン・インフラの構築を目指している。⁹⁷⁵ZEROe イニシアチブの一環として、A380（スーパージャンボ）の改造機の主翼と尾翼の間に水素燃料電池エンジンを搭載し 2026 年に試験飛行を実施する計画を発表⁹⁷⁶。加えて eVTOL 開発も実施している⁹⁷⁷
 - ◇ ZEROe で示した 3 つのコンセプトモデルのうち、ターボプロップ型のリージョナル機（席数 100、航続距離 1,000 海里）を最も実現可能性のある機体と位置付けている⁹⁷⁸
 - Lufthansa は水素利用機の整備プロセスの設計・テストを実施する他⁹⁷⁹、Air France-KLM は水素インフラや地上運用体制の整備⁹⁸⁰、燃料電池機の飛行実証への取組も進める⁹⁸¹
 - Rolls-Royce は水素燃焼エンジン開発を小中型機サイズを想定して実施中⁹⁸²
- i) 電動機は Urban/Commuter 向けが中心となる。一方、燃料電池型は Commuter/Regional 向けが、水素燃焼型は航続距離・乗客数を拡大した Short/Medium-haul 向けの取組も見られる
 - Joby や Lilium 等が Urban 向けの全電動機の開発を進める他^{983,984}、magniX や Heart Aerospace 等が Commuter/Regional 向けのハイブリッド電動機の開発に取組む^{985,986}
 - Zeroavia や Embraer⁹⁸⁷等が Commuter/Regional 向けの水素燃料電池機を⁹⁸⁸、Airbus

等が Short/Mid-haul 機の開発に取り組む⁹⁷⁷

- j) 水素燃焼型は'35-'40 年実用化を目指し、燃焼実験やコンディショニングシステムの POC 等を実施中。燃料電池型は'30-'35 年実用化を目指し、プロトタイプ構築、上空試験等を実施中
- Airbus は 35 年実用化を目指しコンディショニングシステムの PoC を実施した他⁹⁸⁹、Rolls-Royce がエンジンの燃焼試験を実施⁹⁸²
 - Embraer は水素燃焼型の実用化は 2040 年頃を想定⁹⁸⁷
- k) ハイブリッド型は'30-'35 年頃実用化を目指し、コンセプト設計や推進システム試験等を実施中。全電動型は'25-'30 年頃実用化を目指し、飛行試験や認証取得等を実施中
- Embraer は 30 年実用化を目指しハイブリッド機のコンセプトを発表した他、Boeing は 35 年実用化を目指し NASA EPFD 事業で開発を推進⁹⁹⁰
 - 全電動機では Joby が 25 年中の実用化を目指し既に飛行試験を実施している他⁹⁹¹、Lilium も認証試験に用いる試験機の製造を進める⁹⁹²
- l) 水素利用機は貯蔵タンク、供給システム、燃料電池、水素燃焼エンジン、電動推進システムが主な技術開発領域。Airbus は供給システム・水素燃焼エンジン・電動推進システムについては GI 基金と比較して取組が先行、一方、Boeing は水素を含む次世代機開発の取組は遅れている模様
- Airbus 社は水素貯蔵タンク・水素供給システム・燃料電池・水素燃焼システム・燃料電池からの電力供給を想定した電動推進システムについてそれぞれ開発を進める。特に、水素供給システムや燃料電池、水素燃焼システムや電動推進システムでは、システムとしての地上試験の実施が既に 2023 年以降に実施されており、2024 年以降に試験を積み重ねながら最適化の取組が続く⁹⁹³
 - ◇ 水素利用機の 2035 年実用化に向けて 2026-2028 年に掛けての上空試験を予定しており、それまでに各システムを TRL3-4 とすることを目指す
 - ◇ 2023 年 6 月に水素コンディショニングシステムの PoC を実施。燃料電池や電動推進システムについても 2023 年の 6 月以降にそれぞれ出力試験に成功、水素燃焼エンジンについても協働する GE が地上試験を 2023 年 7 月に実施している
 - ◇ 一方、水素貯蔵タンクは金属製・複合材料性の 2 つのアプローチが研究されているが、現時点で具体的な成果は発表されていない。また、燃料電池は 2024 年 1 月に高温 PEFC 開発に向けて Advent Technologies との協業が開始された
- m) Boeing・Airbus 共に、2024 年 4 月・5 月にそれぞれ日本に研究開発拠点を設けることを発表。水素技術や新素材等の技術を中心に開発や企業・大学等との連携を同拠点を軸に進めるとしている^{994,995}
- n) Boeing 社は、2000 年代半ば以降、水素燃料電池と水素燃焼を使用した有人・無人の航空機による 6 回の水素技術実証を実施しており⁹⁹⁶、2021 年には液体水素 16,000 ガロン（一般的なリジョナル機のジェット A 燃料のエネルギー量に相当）を収納可能な完全複合材製の大型極低温燃料タンクが、一連の重要な試験に合格したことを発表^{996,997}

- 一方で、同社 Chief Sustainability Officer の Christopher Raymond 氏は、足元の SAF 利用機の導入や航空機の耐用年数等を踏まえると、2050 年に水素利用機が大きな市場シェアを獲得していくことは期待できないと述べている⁹⁹⁸
 - 水素燃料電池航空機メーカーの Universal Hydrogen 社は、2023 年 3 月、水素燃料電池を搭載した航空機としては過去最大規模（席数 50）での初飛行に成功⁹⁹⁹
 - ◇ 15 分間飛行して高度 3,500 フィート（約 1km）に到達¹⁰⁰⁰
 - ◇ 機体内部には 30kg の水素（気体）が入った 2 つのタンクが格納され飛行により約 16kg を消費⁹⁹⁹
- o) バッテリーを搭載する航空機は、コンピューター機やリージョナル機サイズでの実用化が 20 年代後半から 30 年にかけて始まると想定されている。⁹⁴⁸ また、eVTOL やコンピューター機ほどのサイズであれば現状のバッテリー技術で完全電動化が実現可能である一方、リージョナル機については現状の技術では完全電動は実現困難であり、ハイブリッド電動であれば実現可能と目されている模様¹⁰⁰¹
- EU においても電動ハイブリッド機の開発が Clean Aviation programme の中で実施されており、2027 年後半の推進システムの地上試験及び、2029 年の上空試験に向けて GE や Rolls-Royce 等による開発が進められている⁹⁷⁰
 - NASA は、2023 年 1 月時点で、計 8 つの電気推進（EAP: Electrified Aircraft Propulsion）に関連するプロジェクトを推進中。そのうち、電動ハイブリッド実証機の開発プロジェクトである EPFD では、2021 年 9 月より GE Aviation 社（現 GE Aerospace 社）と約 1.8 億ドル、magniX 社と約 0.7 億ドルの契約を締結¹⁰⁰²。2035 年実用化を見据えて、2025-2026 年の飛行試験の実施を予定⁹⁷¹
 - ◇ GE Aerospace 社は、2022 年 7 月、NEAT（NASA's Electric Aircraft Testbed）施設において、高度 45,000 ft. までをシミュレートした条件下で、MW 級のマルチ kV ハイブリッド電気推進システムを稼働。今後も EPFD プロジェクトの一環として本システムの開発継続し、Boeing 社の子会社である Aurora Flight Sciences 社と Saab 340B 型機での飛行試験を行う予定¹⁰⁰³
 - ◇ MagniX 社は、電動航空機メーカーの Eviation Aircraft 社へ電気推進システムを提供し、2022 年 9 月に全電動航空機 Alice の飛行試験に成功。EPFD の範囲外の成果であるが、当該プロジェクトでの飛行試験への重要なリスク軽減となっている^{966,1004}。2024 年 4 月には GE と同様に、高高度を模した環境でのエンジンの地上試験を実施。より過酷な飛行条件下での試験を継続する予定⁹⁷¹
 - ◇ EPFD では 2035 年までの実用化を見据えて、2025-2026 年までに飛行テストを予定している⁹⁷¹
 - 電動化では、ARPA-E において、電動航空機を開発する Wright Electric 社、蓄電池ベンチャーである 24M Technologies, Inc のプロジェクト採択事例が見られる
 - Boeing 社は、2019 年に 15 席で航続距離 600km の短距離型ハイブリッド航空機を開発、2023 年から 2027 年までに席数を 50~100 席まで拡大し、航続距離を 1000km に

伸ばしたモデルを市場投入する見込みである。また、Kitty Hawk 社と 2019 年に共同出資した自律型 eVTOL メーカーの Wisk Aero 社について、2023 年 6 月に全株式を取得し完全子会社化。Boeing 社は Wisk Aero 社に対して、22 年 1 月に \$450MUSD の投資を行っており、Wisk 社は 28 年の型式証明取得を目指している¹⁰⁰⁵

- Airbus 社は、Daher 社、Safran 社と共同開発した電動ハイブリッドの実証機 (EcoPulse) の外観をパリ航空ショーで初めて一般公開。本実証機では、Airbus 社が提供する統合型高電圧バッテリー (DC 約 800V) が Safran 社が提供する 100kW のターボジェネレーターを搭載した 6 基のスマートモーターに電力を供給する¹⁰⁰⁶
- Heart Aerospace 社は、バッテリー駆動航空機 ES-30 (席数 30) を開発。SAF を燃料とする 2 台のターボジェネレーターからなるリザーブ・ハイブリッド構成も含まれ、必要な予備エネルギーを確保。完全電動による航続距離 200km、ハイブリッド構成による航続距離 400km を実現し、2028 年の市場投入を予定¹⁰⁰⁷
- p) 低燃費に適する空力性能、推進方式の変化をもたらす新たな構造コンセプトの検討も進展している
 - NASA は、SFD (Sustainable Flight Demonstrator) プログラムの一環として、Boeing 社と協力して次世代遷音速機に適用する遷音速トラスブレース翼 (Transonic Truss-Braced Wing) 実証機 (X-66A) を開発・製造し、2028 年に飛行試験を実施することを発表^{1008,1009}
 - ◇ NASA は本プロジェクト 7 年間で \$425M を投じ、Boeing 社およびその他の産業界パートナーは \$725M を拠出
 - ◇ TTBW の技術と推進システム・素材・システムアーキテクチャ等の技術革新と組み合わせた場合、既存の単通路機と比し、燃料消費および CO₂ 排出量を最大 30%削減することを目指す
- q) 水素燃料電池航空機の実用化上の問題点は水素供給面と考え、空港に関連する水素供給インフラの構築に注力する動きも見られている
 - 英航空宇宙技術研究所 (ATI) FlyZero による調査では、燃料補給のために航空機に水素を供給するためには、空港の規模、水素の利用量、技術開発に応じて、3 つの方法が考えられると述べている¹⁰¹⁰
 - ◇ 一つ目はトラックによる低温水素供給で空港内に貯蔵する方法、二つ目はパイプラインによる水素供給で液化・貯蔵は空港内で行う方法、三つ目はグリーン電力の供給のみを必要とし、水素の製造・液化・貯蔵は空港内で行う方法
 - Airbus は、空港運営者、水素業界の大手企業が支援する航空機向け水素ハンドリング・補給プロジェクトを、欧州の 3 つの空港で小規模な液体水素航空機の地上運用の実証を想定し 24 年 5 月に開始した他¹⁰¹¹、24 年 10 月には川崎重工や関西エアポートと水素供給インフラに係る初期設計や供給ロードマップ策定で協業することを発表¹⁰¹²
 - 仏ガス大手の Air Liquide 社と仏空港運営会社の Groupe ADP 社は、空港における水素インフラの開発支援を行う合弁企業 Hydrogen Airport 社を設立¹⁰¹³

- ◇ 空港とその立地特有の要件に基づくロジスティクスの最適化や安全性と CO₂ 排出量の予備調査等のサービスを提供
- ◇ 将来の水素拠点（北米・欧州・アジア太平洋）に位置する約 200 の国際空港および地方空港に焦点を当て事業開発を行っていく
- Universal Hydrogen 社は、水素燃料供給インフラを提供することで、水素を動力源とする航空への移行を支援することに注力している¹⁰¹⁴
- ZeroAvia 社は、液体水素輸送の仏 Absolut Hydrogen 社と航空機運行のための液体水素補給インフラの開発で提携すると発表¹⁰¹⁵
 - ◇ 席数 40～80 の航空機向けのモジュール式パワートレイン ZA2000（出力 2～5.4MW）で 27 年の就航を目指しており、液体水素を必要としている
 - ◇ 空港での液化・貯蔵の実証を行い、最終的にはより大規模な展開に向けた技術開発、運用コンセプト、安全手順、基準等を検討
- r) 電動機においても Beta Technologies や Lilium 等の eVTOL 開発企業は、充電ステーション網の拡大に取り組む。Beta の充電ステーションは他社の eVTOL や EV も充電可能で連動したアプリの提供する等のインフラ構築の動きが見られる^{1016,1017}
- s) eVTOL では、24～25 年の実用化が見込まれる機体は主にバッテリーのみを動力源とし、航続距離は 100km 程度が主流。一方、20 年代後半～30 年頃の実用化を目指す機体は、バッテリーとガスタービン発電や燃料電池のハイブリッドが主流となり、航続距離は最大 1,000km 程度まで伸びる見込み¹⁰¹⁸
 - eVTOL は、その多くが All Electric eVTOL と呼ばれる、バッテリーの電力のみで飛行するタイプで航続距離は 100km 程度に限定される。一方で、移動需要が大きいのは、最大 400km 程度の都市間移動とされている¹⁰¹⁹
 - Honda は、ガスタービン・ハイブリッド・パワーユニットを搭載し、航続距離 400km を確保した Honda eVTOL を開発。垂直離着陸時にはガスタービン発電機とバッテリーの電力を組み合わせ、高度を確保した後の航続時には、発電した電力をバッテリーに蓄えながらモーターを駆動して飛行する^{1019,1020}
 - 豪 AMSL Aero 社は、eVTOL 「Vertiia」の飛行試験に成功。4 人の乗客と 1 人のパイロットを巡航速度 300km/h で運ぶことができ、航続距離はバッテリーのみの場合 250km、水素燃料電池も使用した場合最大 1,000km に及ぶ。航空医療や貨物等の顧客に対して、26 年に同機を納入予定¹⁰²¹
 - United Airlines は、eVTOL メーカーの Eve Air Mobility 社と共同で、サンフランシスコのベイエリアで eVTOL の定期便を 2026 年より運航する計画を発表。Eve 社の機体は完全電動で航続距離 60 マイル（約 97km）を誇る¹⁰²²
 - eVTOL の開発を行う Joby Aviation 社は、水素燃料電池を動力とする小型航空機の開発を行う H2FLY 社を買収し、完全電動だけでなくハイブリッド領域へ拡大する動きを見せている¹⁰²³
 - Rolls-Royce 社は、従来より燃費を 15%改善できる新型ガスタービンの試作品の提供を

2024 年前半に始めると発表。eVTOL で内燃機関も使うハイブリッドタイプの機体や最大 19 席のコミューター機に向けた試作品で、出力範囲は 500~1,200kW を持つ¹⁰²⁴¹⁰²⁵

- Volocopter 社と Groupe ADP は、フランス民間航空局とともに、24 年夏にパリにおいて世界初の eVTOL 商用サービスを開始することを発表。EASA から 24 年の認証取得を目指している¹⁰²⁶
- t) パイロットが搭乗しない「無操縦者航空機」に関する地上設備や空域管理ルールは、欧米で議論が始まった段階
 - NASA は新しい飛行操作モードである DFR (Digital Flight Rule) を提案するホワイトペーパーを発表し、その中で無操縦者航空機を含めた新しい飛行ルールを検討¹⁰²⁷
 - また、航空通信分野の民間標準化団体 RTCA でも Digital Flight に関するシンポジウムを開催し、CONOPS (concept of operation) の検討を開始¹⁰²⁷
- u) eVTOL の機体開発だけでなく、充電インフラの整備に注力する企業も存在する
 - 貨物用 eVTOL メーカーの Beta Technologies 社は、Charge Station Network (CSN) の整備にも注力しており、離発着施設や空港に充電設備を整備する計画で、自社の機体だけでなく、他社の機体や EV の充電もサポートする予定。さらに、CSN 向けモバイルアプリを使用すると、オペレーターはルート上の最寄りの充電ステーションを見つけ、その場で充電を開始できる
- v) 現在の eVTOL 市場は Joby 社等のスタートアップによって支配されているが、今後は自動車メーカーが優位性を築く可能性も指摘されている¹⁰²⁸
 - eVTOL のスタートアップは、車両設計の最適化、規制当局の認可の取得、商業的な応用の模索をリードしてきたが、バッテリーを調達するサプライチェーンがまだ成熟していない。その点、自動車メーカーは BEV の展開に向けて、バッテリー開発に必要な原材料を確保するため多額の投資を行っているため、優位性を持っている

[社会情勢の変化 (国際・ルールメイキングの動き)]

- w) 業界団体や国際会議の場でも航空産業における脱炭素化に向けた目標設定等の動きが足元見られる
 - 第 41 回 ICAO 総会において、2050 年までのネットゼロおよび CORSIA 第 1 フェーズ (2024 年) 以降のベースラインは 19 年比 85%とすることで合意¹⁰²⁹
 - G7 三重・伊勢志摩交通大臣会合において、2050 年までの CO₂ 排出ネットゼロ目標の履行や SAF 導入促進への協働等に取り組むことを G7 交通大臣宣言として採択¹⁰³⁰
- x) ジェット燃料については、ウクライナ情勢の緊迫を受けて上昇を続けていたが、その後世界的な景気後退懸念等から下落。'23 年 9 月前後で上昇基調が見られるも足元は再度下落基調。¹⁰³¹ジェット燃料の価格変動により相対的に低炭素燃料への移行圧力が変化することが想定される
- y) 必要な政策支援として、業界団体は、脱炭素化移行コストへの財政支援や排出源取引の透明性・市場拡大、規制/認証の改正・整備、燃料供給インフラの計画的整備等を挙げられており¹⁰³²、欧州では規制/認証の整備に向けて規制当局と新推進システム開発プロジェクトが連

携した動きが見られる

[動向サマリ]

- z) ICAO や G7 交通大臣による 2050 年ネットゼロ達成の目標が新たに採択され、官民一致の動きを見せる中、航空機メーカーやエアライン各社は、既存航空機への適用が容易な SAF をネットゼロ達成の当面の取り組みと位置付け、足元で SAF を安定的に調達するための動きを見せている
- aa) 一方、SAF は CO₂ 排出量の削減効果はあるが、現在の SAF の主流であるバイオ燃料は生成から使用されるまでのライフサイクルがネットゼロではなく、需要量に対して十分な供給量が確保出来ない可能性も存在するため、航空機メーカーは水素やバッテリー等を利用する次世代航空機の開発を進めている
- bb) コミューター機やリージョナル機については、2030 年前後に、水素燃料電池やバッテリーを利用する電動航空機の実用化が想定されており、水素燃料電池については、技術成熟度や導入難易度の観点で、足元は特にリージョナル機サイズでの開発に各社注力している様子。バッテリーによる電動航空機は、コミューター機や eVTOL のようなモビリティのサイズであれば、現状のバッテリー技術で完全電動化が可能であるが、リージョナル機サイズで完全電動化を達成するためにはバッテリー技術の革新が必要とされている。また、水素燃料電池については、実用化上の課題は水素供給インフラ面にあると捉え、Universal Hydrogen 社等、インフラ構築に注力する企業も存在する
- cc) 中・長距離路線機においては、蓄電池のエネルギー密度の制約により電動機（全電動機）の適用が困難と見られ、ネットゼロ達成に向けて水素燃焼エンジンの利用が想定される。また、長距離路線機において水素燃焼エンジンを利用する場合、水素燃料はジェット燃料に比し約 4 倍の容積が必要となることから、新しい構造の航空機開発も併せて必要である

[17] 次世代船舶の開発

最新動向の整理

[市場動向]

- a) 現時点では、代替燃料（石油・重油等の従来型の燃料以外）により運航している船舶はわずかであるが、GHG 排出量削減を目的として、近年、LNG・メタノールを中心に代替燃料の導入が増加している
- 現時点で運航中の船舶のうち、代替燃料の割合は 0.83%（割合は隻数ベース）。代替燃料の中で一番多くを占めるのが LNG で、代替燃料の中で 75%程度（全体の 0.62%）を占める。そのあとは、LPG（全体の 0.15%）、メタノール（全体の 0.06%）、水素（全体の 0.01%）と続いている¹⁰³³
 - 現在、発注されている船舶のうち、16.8%は代替燃料となっている。代替燃料の中で一番多くを占めるのが LNG で、代替燃料の中で 54%（全体の 9.0%）を占める、次いでメタノール（全体の 5.03%）、LPG（全体の 1.88%）、水素（全体の 0.5%）と続いている¹⁰³³
- b) 中長期的にはアンモニア・バイオ燃料等のゼロエミッション船の需要が拡大する見込み
- IEA、IRENA は、2050 年にアンモニアがそれぞれ、46%（エネルギー消費量ベース）、44%占めると予測。また、水素については、17%、7%と予測^{1034,1035}
 - ABS は 2050 年にアンモニア・水素が 35%（エネルギー消費量ベース）を占めると予測¹⁰³⁶
- c) ゼロエミッション燃料として有力視される水素・アンモニア・メタノールにおいては、ブルー水素/アンモニア、グリーン水素/アンモニアの供給確保が重要である。しかし、現状ある計画のみでは、需要追いつかないことが懸念されている
- IEA によると水素の需要は 2030 年に 100M H₂程度である。発表されている PJT が全て稼働しても、ブルー水素とグリーン水素を合計した生産量は 24Mt H₂。生産量の増強が課題¹⁰³⁷
 - ブルー/グリーンアンモニアの普及拡大を目指すコンソーシアムの Mission Possible Partnership によると 2030 年時点で、現状のパイプラインでは 30Mt/year のブルー・グリーンアンモニアの生産量が見込まれている。一方で、2030 年時点の需要は 239～270Mt/year の需要が見込まれており、需給に大きなギャップが生まれることが懸念されている¹⁰³⁸
 - メタノールについても国際海運会議所によると公表されたグリーンメタノール PJ の建設予定を踏まえると、メタノールを燃料とする全船を賄うことは難しいと予測¹⁰³⁹
- d) 特にアンモニアに関しては、供給側の主な課題として①製造施設の大規模化・高効率化（ブルーアンモニアでは CO₂回収技術の効率化を含めて）、②ハーバーボッシュ法に代わる新たな製造法の確立、③海外の調達先の確保があげられる¹⁰⁴⁰
- e) カーボンフリーのアンモニア製造は、規模ではブルーアンモニアが先行しており、特に、

CCUS が進む米国と石油資源が豊富な中東系が中心となっている。グリーンアンモニアは、製造法を含めて研究段階の企業も多く、オーストラリアやチリなど再エネ適地での製造が中心。ブルー・グリーンアンモニア共に工場の稼働開始は 2020 年代後半が多く、大規模系は 2030 年頃に集中していることから、本格的な供給量の拡大は 2030 年頃となる見込み¹⁰⁴¹

➤ 2022 年 11 月、米国の Clean Hydrogen works はルイジアナ州に年間 720 万トンのブルーアンモニアを製造する拠点の建設を検討していると発表。商船三井も計画に出資¹⁰⁴²

➤ 2023 年 3 月ノルウェーの Yara とカナダの Enbridge は年 120-140 万トンの生産能力を有するブルーアンモニアの製造拠点を開発・建設すると発表。2027-28 年の稼働予定¹⁰⁴³

f) グレー、ブルー、グリーンいずれにおいても、アンモニアの化学合成プロセスは、鉄主体の触媒を用いて高温高压で反応させるハーバー・ボッシュ法 (HB 法) が基本である。同法はエネルギー消費が課題となっている。新しい製造方法として、電解合成、人工光合成等の開発が進められているが、現時点では研究開発段階にある¹⁰⁴¹

g) 海外調達先の確保に関しては、商社、電力会社を中心に取り組みが加速。昨年度時点で日本政府の目標である 2030 年 300 万トン確保できる見通し。加えて、直近の新しい動きとして三菱商事は 2030 年代前半の稼働に向けて生産能力世界最大の 1000 万トンの製造拠点立ち上げを検討している

➤ 2023 年、三菱商事が米テキサス州で燃料用ブルーアンモニアの製造拠点の立ち上げを検討しているの報道あり。想定では 2030 年代前半に稼働を始める予定で、生産能力は最大で年 1000 万トンと、世界最大級の製造拠点となる可能性がある¹⁰⁴⁴

h) また、各代替燃料の価格動向を見ると、アンモニア・水素は 2021-2022 年頃に価格上昇するも足元は以前の価格水準に戻る。中長期ではいずれの脱炭素燃料も従来品と同程度の価格帯への価格低下を見込む

➤ アンモニア価格は 2021-2022 年で上昇しつつ、現在は以前の価格水準に戻る。中長期では、グリーンアンモニアが大幅に廉価になり全体価格も低下することが予想される^{1045,1046}

➤ 国内アンモニア価格 2021-2022 年を除くと、過去 20 年間で約 30~75 円/kg の範囲で変動¹⁰⁴⁷

➤ またアンモニア価格の主な変動要因である原料価格・需給バランスについて、原料となる LNG や再エネは将来価格の低下が見込まれる

◇ LNG は新規設備稼働による供給力増加、再エネはエネルギー変換効率向上や大量生産による設備コスト低下により将来価格は低下していくと見られる^{1048,1049}

➤ 加えて、需給バランスにおいてはグレーアンモニアを含めると需要量に対して供給容量が上回ることから、主に原料価格の低減によりアンモニア価格は将来低下していくと見られる¹⁰⁵⁰

➤ 水素価格も 2021-2022 年で上昇しつつ、現在は以前の価格水準に戻る。グリーン水素はグレー水素比で 1.5 倍程度価格差があるが、価格低減で同価格程度も視野に入る^{1051,1052}

- 足元メタノール価格は\$350-600/ t 前後で推移。クリーンメタノールは化石燃料由来品と比べ〜3 倍程度価格差があるが、2030 年以降の価格低減で同価格程度となる見込み^{1053,1054}
- i) 小型・短距離船の領域において、エネルギー効率の観点でバッテリーも有力視されており、2030 年頃からの普及が想定される
 - 日本郵船は、2030 年代の代替燃料のすみ分けイメージとして、短距離・小型船は電気、観光船や一般貨物船等の中距離領域は燃料電池、長距離はアンモニアと予測している¹⁰⁵⁵
 - 国土交通省は、国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップの中でバッテリー推進船の適用領域として、内航船 想定航続距離 200mile と考えを示している¹⁰⁵⁶
 - Maersk の有識者は、バッテリーはエネルギー密度が低いいため、短距離領域に限って使用されるとの考えを示している
- j) 主要各社の各代替燃料に対するポジショニングは足元 LNG やメタノール対応を進める一方、中長期的にアンモニア・水素への取組を実施。LNG 向けエンジンとの互換性が高いアンモニア向けへの取組が多い
 - MSC は化石燃料ベースの LNG を将来のバイオ/合成 LNG への移行燃料として捉える一方、中長期的には合成/バイオメタノール・アンモニア・バイオ/合成 LNG を大型外航船向け、水素・燃料電池等を小型近海船向けと想定¹⁰⁵⁷
 - Maersk は外航船の CN 化に向けては短期ではバイオディーゼル・グリーンメタノールの探索を優先しつつ、中長期ではアンモニアも将来的に最も有望な燃料として捉えている¹⁰⁵⁸
 - 商船三井は、足元は LNG やメタノール、バイオ燃料に注力しつつ 2030 年以降はアンモニアや水素燃料船を導入・運用を拡大させる¹⁰⁵⁹
 - MAN は 2 ストローク向け代替燃料で、2030 年まではその 6 割以上を LNG が占め、2 ストローク向け代替燃料で、2050 年にはアンモニアが 4 割、メタノールが 3 割、LNG が 2 割を占めると予想¹⁰⁶⁰
 - Wärtsilä は 2030 年に向けてバイオ燃料 (LNG/メタノール) が広く活用される他、徐々にブルーアンモニアの利用が始まり、2030 年以降にブルーアンモニアの利用が拡大すると共に、2030 年代後半から 2040 年代前半に掛けてグリーンアンモニアが普及ことを想定¹⁰⁶¹
- k) 韓国系造船所は欧州主要エンジンメーカーとの連携を進める他、韓国政府も各国との造船分野での連携を推進
 - サムスン重工業は Wartsila とアンモニア船の共同開発に関する契約を 2021 年に締結した他¹⁰⁶²、WinGD と船舶用アンモニアエンジンの共同開発の MOU を 2023 年に締結¹⁰⁶³
 - 現代重工業も 2021 年に MAN とメタノール船の共同開発¹⁰⁶⁴、WinGD とアンモニアエンジンの開発に向けた MOU を 2022 年に締結¹⁰⁶⁵
 - 韓国政府は 2021 年にはデンマークと CN 船実現を含む包括的なグリーン戦略パートナーシップを締結¹⁰⁶⁶、2023 年にギリシャとクリーン造船技術共同開発に関する MOU を

締結¹⁰⁶⁷、ノルウェーとは 2024 年に環境に優しくスマートな船舶等に関する協力強化に同意¹⁰⁶⁸

【技術動向】

- l) 水素エンジンについて、海外の主要プレイヤーは 2 ストロークエンジンを搭載した大型・長距離船での活用に懐疑的であり、開発に関する目立った動きはない。主要な海外プレイヤーは、将来的に水素エンジンの活用は 4 ストロークエンジンを搭載した小型・短距離船となると考え、開発を推進
- 元 MAN 有識者、日本海事協会有識者によると、大型船の搭載を志向した水素エンジンの開発に関して、海外プレイヤーにおける目立った動きはない
 - Maersk やサムスン重工有識者は大型船・長距離における水素エンジンの導入にはエネルギー密度の低さ、貯蔵・保管の難しさから技術的なハードルが高いと認識し実現に懐疑的。水素の活用が実現するのであれば、小まめに燃料を補給できる小型・短距離船が中心となるとの認識を示す
 - IMO で次世代燃料に関する分析を担う FFT PROJECT (FUTURE FUELS AND TECHNOLOGY FOR LOW- AND ZERO-CARBON SHIPPING PROJECT) では、水素は貯蔵量に関する限界があり、短距離船で適用が検討され、2 ストロークエンジンの開発に対する関心はあまりないと指摘している¹⁰⁶⁹
 - DNV はエネルギー密度の低さを理由に、2 ストロークエンジンでの活用は限定的であると指摘¹⁰⁷⁰
 - CMB(ベルギー)が先行して 4 ストロークエンジンを開発しており、既に日本で竣工済み¹⁰⁷¹。2023 年には水素を燃料とする 5,000 総トンの一般貨物船 4 隻の建造に合意¹⁰⁷²
 - 2022 年 12 月に、韓国の現代重工が「1.5MW 級 LNG・水素ハイブリッドエンジン (HiMSEN)」の性能検証に成功。2023 年までに水素比率を高めたハイブリッドエンジンの開発を完了し、2025 年には完全な水素エンジンを開発を完了させる計画¹⁰⁷³。2030 年までに技術・商業的に実現可能な大型液化輸送船の開発を目指す¹⁰⁷⁴
 - Wartsila も改めて 2025 年までに 100%水素駆動のエンジンコンセプトを発表する予定と表明¹⁰⁷⁵
- m) 海外の主要プレイヤーはアンモニアを有力な代替燃料と認識し、2024~2025 年頃の商用化を目指し、積極的な開発を進めている
- 現状では、海外主要プレイヤーへのヒアリング等を踏まえると各社共通でコストの安さ、GHG の排出がない等の観点から将来の代替燃料としてアンモニアを有力視している。ただし、現状では毒性、インフラの整備、ブルー及びグリーンアンモニアの確保等の課題が存在。2020 年後半から運航が徐々に始まり、2035-40 年頃からの本格的な市場の立ち上がりが期待されている^{1076,1077,1078}
 - 韓国主要 3 社 (現代重工、DSME、サムスン重工) が MAN 製エンジンを搭載した大型船を 2024-2025 年までに商用化予定。それぞれ、2021-2022 年にかけて、基本設計承認

- (Aip) を得ている^{1079,1080,1081}
- MAN Energy Solutions は最初のアンモニア エンジンの納入スケジュール (2024 年納入) はおおむね維持され、その後 2026 年頃から商船上で稼働する予定であると述べた^{1082,1083,1084}
 - サムスン重工業はアンモニア船開発に向けて実証設備を建設。2024 年に竣工した同設備は燃料供給システムや排出削減システム、漏洩検知・警報、有害物質の中和装置等の開発・検証が行われる予定¹⁰⁸⁵
 - n) アンモニア燃料エンジン船の開発について、多くの主要造船メーカーはエンジンメーカーの MAN を開発パートナーとしている。MAN は既に多くの主要造船メーカーをライセンスとして確保し、アンモニアエンジンの事業拡大を志向しているとみられる
 - 日本海事協会の有識者は、MAN は主要な造船メーカーと積極的にアンモニア燃料船の開発を進めることで、ライセンス先を確保していると指摘
 - o) MAN や Wärtsilä はアンモニア燃料エンジンは超大型船も航行可能な 60MW 級まで見据え開発を推進。水素対応エンジンは最大 15MW 程度の出力を想定して開発に取り組む。
 - MAN の元エンジン開発関係者によると MAN のアンモニア燃料エンジンの事業化は～43MW が 2026-2028 年頃、～60MW が 2027 年以降に、水素燃料エンジンは'14-'15MW の二元型が 2030 年頃となる
 - 同様に Wartsila の有識者によるとアンモニア燃料エンジンの事業化は～10MW 級が 2027 年頃、70MW 級が 2030 年以降に、水素燃料エンジンは 10MW 程度が 2030 年以降になる見込み
 - p) LNG 燃料船のメタンスリップ削減技術については、MAN と WÄRTSILÄ が 4 ストロークエンジン、MAN と WinGD (スイス、CSSC と WÄRTSILÄ の合弁会社) が 2 ストロークエンジンの開発を進行中。MAN はエンジン内部の設計、酸化触媒、直噴技術、WinGD は排ガス再利用システムによる削減を目指す。
 - 業界プレイヤーのコンソーシアムである SEA-LNG、SGMF 等によると低圧 DF 中速 4 ストロークでは、2030 年までに酸化触媒の開発によって 2020 年比で 70% (2.0gCH₄/kWh ⇒ 0.6gCH₄/kWh) 削減されると予測。また、低圧 SI 中速 4 ストロークでは、2030 年までに直噴技術で 90%削減 (3.98gCH₄/kWh ⇒ 0.4gCH₄/kWh) 可能との見通し (2000 年比) を示している¹⁰⁸⁶
 - MAN は酸化触媒の活用等により、メタンスリップをさらに最大 70%削減できる見込み。MAN は 2023 年に最初のパイロットを実施し、2025 年に使用できるようになる見通しを示している。直噴技術で 90%削減可能との見通しを示している¹⁰⁸⁷
 - Wärtsilä はメタンスリップを 95%削減する触媒システムを開発し、2027 年までに実証試験を完了させる方針^{1088,1089,1090}
 - 低速 2 ストローク LPDF エンジンにおいて、排ガス再循環技術から派生した技術排ガス再利用システム (iCER) によってメタンスリップ削減を 50%実現。第 1 世代機のものメタンスリップ 2.0～2.5g/kWh が第 2 世代機では 1.0～1.2g/kWh に低下すると見込んで

いる¹⁰⁹¹

- q) N2O 対応は燃焼最適化・SCR 等の手段があるが MAN 等は燃焼最適化による N2O 発生回避を狙う^{1092,1093}。現代重工業は AI やドローンを活用した自律型のアンモニア検知・安全システムの開発等統合した Sol としての開発に取り組む^{1094,1095}
- MAN や WinGD が過去に実施したエンジン燃焼試験では、燃焼時間や燃焼温度等の条件の最適化により N2O 排出濃度は 10-50ppm に抑えることに成功している^{1096,1097}

[国際・ルールメイキング動向]

- r) 主要な海運会社、IMO（国際海事機関）等の業界団体は 2050 年までに GHG ネットゼロを目標に掲げている。
- ICS（国際海運会議所）は、2021 年 5 月、IMO に対して 2050 年までに正味ゼロ排出量の目標を設定するよう要請¹⁰⁹⁸
 - 2022 年 1 月に Maersk は 2021 年に目標を変更し、2040 年までに GHG 排出ゼロとするより厳しい目標を導入¹⁰⁹⁹
 - 2023 年 7 月、IMO は、2050 年までに 2008 年比で GHG50%削減としていた従来の目標を改定し、2050 年までに GHG ネット排出ゼロを目指すと発表した。また、2030 年目標には GHG の削減量とゼロエミッションの導入率が目標に付加された。加えて、2040 年目標が追加され、GHG 総排出量の最低 70%削減を目指すとした¹¹⁰⁰
 - 日本海事協会の有識者によると 2023 年 7 月に IMO が GHG 削減戦略を改定する以前から、主要大手海運会社は 2050 年ネットゼロを先行して掲げている。IMO は環境対策に後ろ向きな新興国を含む多様な国の意見を調整する必要がある、他の団体や企業に比べ対応が遅れる傾向にある
- s) 代替燃料の導入を積極的に進めるため、規制的手法（ゼロエミッション船への移行を強制的に推進）や経済的手法（ゼロエミッション船への移行を経済的に誘導）の導入が進められている
- 2023 年の MEPC80 において、IMO は、今後、中期対策として規制的手法と経済的手法を検討を行い、2025 年 4 月までに承認を行う計画を示した。日本政府は経済的手法として化石燃料への課金とゼロエミッション船への還付を義務付ける Feebate 制度を IMO に提案した¹¹⁰¹
 - 欧州議会は 2023 年 4 月、EU（欧州連合）の排出量取引制度「EU-ETS」を海運に拡大する気候変動対策の強化案を承認。2024 年以降、EU 域内港湾を発着する 5,000 総トン以上の船舶は GHG（温室効果ガス）排出実績に応じて「排出枠」の購入が必要。海運 EU-ETS は 24 年から GHG 排出量の計測と報告義務が始まり、移行措置として 3 年間の段階的な強化を予定。前年の排出実績に対し、25 年は 40%の排出枠購入を義務付け、26 年は 70%、27 年以降は 100%の購入が求められる^{1102,1103,1104}
- t) アンモニアの導入に向け国際的な安全ガイドラインが 2024 年 9 月に策定、水素燃料船の安全ガイドラインは次回会合で最終化することが合意されている

- 水素の安全ガイドラインについては、IMO が CCC11（2025 年 9 月予定）で最終化を行う方向で議論を進めている¹¹⁰⁵
 - 国土交通省、日本海事協会有識者によると、水素に関しては燃料電池に関する安全ガイドラインはすでに存在しており、今回の CCC8 での議論を通じて、水素エンジンへも適用できるようになる見通し。現在、主に爆発性への対処、水素による金属脆化への対処が話し合われている
 - アンモニア燃料船向けの安全ガイドラインは、国際海運からの温室効果ガスの排出削減のため、アンモニアを燃料とする船舶の開発が世界中で進められており、IMO においてその検討が実施されてきたもの。2024 年 9 月に開催された CCC10 において、アンモニア漏洩検知器の閾値や毒性エリアの範囲の設定方法等について審議が実施され、ガイドライン案を最終化¹¹⁰⁶
- u) Tank to wake（船上排出）ではなく、Well to Wake（ライフサイクル）での GHG 削減に対する関心が高まっており、IMO でもガイドラインが採択された
- IMO は、MEPC80 の中で船舶燃料のライフサイクル（Well to tank）GHG 排出強度に関する IMO ガイドラインを採択¹⁰³⁸
- v) 代替燃料の導入に向けては、海運や造船会社のみでなく、国内外でバリューチェーン全体（港湾等）での協力を促す取り組みが進められている
- 2023 年、国土交通省は港湾法の一部を改正。港の役割として、水素・燃料アンモニアの補給を明記。また、港湾管理者（自治体）に対して、立地企業や物流企業らと共に港湾脱炭素化推進協議会を設置し、連携を強化するよう定めた¹¹⁰⁷
 - 2022 年 11 月、COP27 において、アメリカとノルウェー政府が中心となり、海運業界全体として二酸化炭素排出量の削減に取り組むことを目的とする「Green Shipping Challenge」が発表された。これは国家や企業など海運のバリューチェーンに携わる関係者らに対し、港湾と海上の両方において、二酸化炭素排出量を削減する具体的な施策を発表することを求めている^{1108 1109}
- w) 造船業界でシェア 1 位の韓国政府は、自国の産業を保護・強化の観点から、金融支援等を活用し、ゼロエミッション船の開発・導入を積極的に後押し
- 2021 年、韓国政府は環境対応船市場でのシェア拡大のため、「2030 green ship-k promotion strategy」を発表¹¹¹⁰¹¹¹¹
 - 2023 年韓国政府は、2050 年に向けた国際海運脱炭素化推進戦略を発表。2008 年比で 2030 年▲60%、2040年▲80%、2050 年▲100%を掲げた。戦略として、2030 年までに e メタノール、LNG に活用できるデュアル燃料エンジン船の導入を進める。加えて、アンモニア・水素の導入も推進する。代替燃料導入による民間企業のコスト増を緩和するため、金利の引き下げや金融機関を通じた融資のため最大約 4500 億円の公的資金の調達を行う。また、中小の海運会社向けに最大 1,000 億円相当の基金を設立する¹¹¹²¹¹¹³
 - 2024 年 7 月には、船舶技術に関するロードマップを発表。官民連携で 3 分野 100 のコア技術開発を見据えた 10 の旗艦 P J に対して 10 年間で約 2,000 億円を支援すると表明

- x) IMO は 2021 年に公表された IMO 第 4 次 GHG 調査から、内航、外航の区分けについて、従来からの船舶ベースに加え、航海ベースの数値を併記するようにしている。航海ベースがより正確な算出方法とする見解がある一方、船舶ベースを使用するケースも依然として存在する¹¹¹⁵
- IMO が 2023 年の GHG 削減目標改定の検討のために立ち上げたプロジェクトにおいては、航海ベースの GHG 算定で検討が進められている¹¹¹⁶
 - 英国の海事系コンサルティング会社の UMAS は、航海ベースがより正確な手法だとし、外航を過大評価し、内航を過少評価する従来の算定手法が是正されたと指摘¹¹¹⁷
 - 国土交通省では、資料によって、船舶ベースの数値を掲載する場合もあれば、航海ベースの数値を掲載する場合もある^{1118,1119}

[18] 食料・農林水産業の CO₂ 等削減・吸収技術の開発

最新動向の整理

【高機能バイオ炭等の供給・利用技術の確立】

[市場動向]

- a) 人口増加に伴い、農作物の生産量は今後も世界的に増加する見通しで、特に農業生産性の向上が求められている
- 2024年に発表された統計によると、世界における人口増加と所得向上を理由に農作物需要は世界的に拡大し、それに伴い、農作物生産量も拡大する見通し¹¹²⁰
 - 農作物生産量拡大に向けては、世界の農地面積拡大がピークに達しているため、農地面積当たりの作物収量の向上が求められている^{1121,1122}
- b) 農業生産性の向上を目的として、肥料使用量は直近 10 年間堅調に増加し、需要は今後も世界で拡大する見込み
- 肥料（窒素・リン酸・カリウム）使用量は、アジアを除いた各地域で、2020 年までの 10 年間堅調に増加¹¹²³
 - IFA（International Fertilizer Association）は、ウクライナ危機の中間的シナリオにおいて、2026 年に 2020 年の肥料需要量（窒素・リン酸・カリウム）を回復すると見込む¹¹²⁴
 - 農業生産性の向上を目的として、環境要因の植物ダメージを軽減する物質や微生物であるバイオスティミュラントが新しい農業資材として注目を集めており、世界市場が今後 CAGR16%で拡大し、2026 年に 50 億ドルの規模になる見込み¹¹²⁵
- c) 農業生産性向上への対応策としてバイオ炭の利用が近年進められている
- 2018 年の IPCC において、バイオ炭が低コストで実現できる二酸化炭素除去技術として初めて明記されて以降、新興国支援等の観点からバイオ炭の普及・利用促進の国際的な活動が実施された^{1126,1127}
 - 2015 年段階ではバイオ炭事業者の分布は約半数が北米、ついで欧州、アジアの順に数が多い
 - 最近のバイオ炭市場では、アジアが圧倒的なシェアを占めており、特に中国がシェア向上に寄与している^{1128,1129}
 - また、米国、EU におけるバイオ炭生産量はそれぞれ 7 万トン(2018 年)、2 万トン(2020 年)に達している。^{1130,1131}
- d) バイオ炭はその土壌改質効果等による農業生産性向上だけでなく、近年は CO₂貯留ポテンシャルが着目されており、今後世界で供給量が拡大する見込み¹¹³²
- 欧州においては、バイオ炭の生産能力が増加傾向にあり、仮に 2035 年まで成長率 45% それ以降は成長率 50%まで上昇した場合、2040 年で 70 Mt の CO₂回収を実現する見込み¹¹³³
 - バイオ炭の CO₂回収ポテンシャルは 0.01 Gt-CO₂-equiv./year (2021 年)から 0.03~6.6

Gt-CO₂-equiv./year(2050年)に増加する見通し¹¹³⁴

- e) 国内外において、バイオ炭原料として、各種農林残渣の検討がなされている
 - 日本においては、主要な原料として、もみ殻、剪定枝等が存在しており、その他林地残材・放棄竹林、家畜排せつ物・食品廃棄物等についても検討が実施された¹¹³⁵
 - 海外においては、種々のバイオマス資源に関してバイオ炭原料適用への検討が実施された¹¹³⁶

[技術動向]

- f) GI 基金事業では、農地への CO₂貯留手段確立へ向けて、もみ殻等を炭化（炭素を固定化）させたバイオ炭の技術開発を推進中であり、バイオ炭の製造技術開発、有用微生物の探索・培養およびそれらを組み合わせた高機能バイオ炭の開発等を実施¹¹³⁷
 - バイオ炭の製造技術に関しては、もみ殻や剪定枝等を原料として想定し、それらのバイオ炭収率の改善および装置の最適化設計等を通じて製造コストを 3 万円/トン以下とする技術の確立が目的
 - 有用微生物の探索・培養に関しては、バイオ炭等と親和性があり、肥料成分の供給や生育促進等を助ける有用微生物を数菌体特定することを目標に探索を進めており、加えてその大量培養法の確立を目指している
 - バイオ炭自身に農作物の生育促進効果がないため、当該効果の発現が期待される微生物機能を付与し、農作物収量向上効果を有する高機能バイオ炭等の開発を推進中（農業者の導入インセンティブを高めるため、高機能バイオ炭を用いて栽培した農産物の環境価値の評価手法の確立も必要）¹¹³⁸
- g) バイオ炭には複数の製造方法が存在し、中でも炭化率に優れる熱分解がバイオ炭製造方式として主流
 - 製造方式には、熱分解（低速・高速）、ガス化、燃焼等の方式があり、適用温度や反応時間、生成物が異なる(IPCC ガイドラインでは「燃焼しない水準に管理された酸素条件下、350°C超でバイオマスを加熱して得られる固形物」をバイオ炭として定義)^{1139,1140}
- h) 熱分解方式によるバイオ炭の製造に関して、製造方式改良、生産効率向上、生産コストが検討され、その他サプライチェーンを含めた技術開発が実施されている
 - バイオ炭の製造について、賦活及び添着等の高機能(活性化)が可能な装置技術の検討がなされた¹¹⁴¹
 - 熱分解によるバイオ炭の製造装置に関して、バッチ方式、連続方式等の形式による生産性向上の検討が進められている¹¹⁴²
 - バイオ炭製造コストについて、単一炭化炉と、複数炭化炉（製造プラント）を使用したケースにおける見積もりが英国と米国においてそれぞれ検証された^{1143,1144}
 - また、USBI で発表された 2024 年の研究では、森林残渣や廃棄物から製造された燃料

用バイオ炭のコストが 300～500\$/t となっており、2011 年の英国の研究と近い結果となっている¹¹⁴⁵

- 国内において、サプライチェーン構築に関して、水稻、小麦等、大豆等の農業残渣の回収およびそれらのバイオ炭化、利用まで社会実装モデルを構築し、検討が実施された¹¹⁴⁶
- i) バイオ炭の農業生産性向上能力について、各種成分・構造に基づいたメカニズムが提案されている
 - バイオ炭成分に起因するメカニズムとして、土壌中有機汚染物質の分解（表面における酸化・還元反応等）、植物栄養元素の保持（陽イオン交換容量）、pH 矯正、肥料効果が存在^{1147,1148,1149,1150,1151}
 - バイオ炭の構造に起因するメカニズムとして、透水性/保水性の向上および土壌微生物活性が存在^{1152,1153,1154,1155,1156}
 - その他のメカニズムとして、抵抗性誘導や病害抑制が存在(詳細に関して検討中)^{1157,1158,1159,1160}
- j) 農業生産性向上を目的とするバイオ炭の高機能化には、バイオ炭自体の改質とバイオ炭への別成分の担持という 2 つの方向性が存在
 - バイオ炭自体の改質に関して、製造時の原料選択、熱分解条件や後処理等により、バイオ炭物性が変化し、農業生産性向上効果が変化^{1161,1162}
 - バイオ炭への別成分の担持に関して、無機成分（金属成分）を担持する方法と有機成分（微生物）を担持する方法が存在^{1163,1164,1165,1166}
- k) バイオ炭と共生しうる有用微生物やその培養技術に関する研究に関して報告がなされており、農業生産性向上のメカニズムの検証が進められている
 - 一部菌類（アーバスキュラー菌根菌）を用いた微生物資材は農業生産性向上の効果が認められており、政令指定資材として認定されている¹¹⁶⁷
 - アーバスキュラー菌根菌に関して、培養方法に関する検討が進められている^{1168,1169,1170}
 - その他、PGPB/PGPR（植物成長促進細菌/根菌細菌）や PGPF（植物成長促進菌類）に関する農業生産性向上の可能性に関して研究がなされている^{1171,1172,1173,1174,1175}
- l) 国内外において、バイオ炭の農地利用・効果検証がなされている一方、高機能バイオ炭の実地検証はほとんど進んでいない
 - バイオ炭による農業生産性向上効果に関しては、種々の土壌・バイオ炭種類・適用量・作物での検討事例が存在^{1176,1177,1178}
 - 直近 1 年間では、バイオ炭による農業生産性向上効果の事例として、穀物由来バイオ炭と家畜排せつ物を併用した土壌改良剤の研究が多く見られる^{1179,1180,1181,1182,1183}
 - 高機能バイオ炭による農業生産性向上効果に関しては、国内における実地試験例が少数存在するのみ^{1184,1185,1186}
 - その中でも、株式会社 TOWING は先行しており、SBIR フェーズ 3 基金事業で約 12.5 億の採択を受けており、今後量産化に向けたプロセス開発等を推進する予定^{1187,1188}

- また、2024年6月にオーストラリアのバイオ炭事業者である **Biocare** と提携し、自社が開発した高機能バイオ炭の利用拡大を狙っている様子¹¹⁸⁹
- 基本的に国外主要プレイヤーは高機能バイオ炭の開発は未着手。但し、例外として **Carbon Gold** は微生物添加による高機能化を実施していると推察^{1190,1191}

【国際・ルールメイキング動向】

- m) 農業分野において生産性向上と持続性に向けた取り組みが各国でなされており、各取り組みにおいて肥料使用量削減や有機農業の農地面積比率等が定量目標として設定されている一方、バイオ炭の活用に関しては日本・インドのみが具体的技術として明記している¹¹⁹²
- 国内においては、2050年でのカーボンニュートラル達成に向けたグリーン成長戦略や、農業生産性の向上と持続性の両立を目的としたみどりの食料システム戦略を掲げている^{1193,1194}
 - 欧州においては、グリーンディールの中心政策として、持続可能な食料システム構築を目的とする **Farm to Fork Strategy** 策定や、**Carbon Farming** 利用促進へ向けた技術ハンドブックの公開、および炭素除去の独自認定規格である **Carbon Removal Certification** 策定等を行っている^{1195,1196,1197}
 - 米国においては、農作物生産者に対するコミットメント、農業イノベーション研究戦略推進を目的に、**Agriculture Innovation Agenda** を掲げており、GHG 環境負荷 50%削減（2050年）、肥料栄養流出 30%以上削減（2050年）等を目標に炭素貯蔵を実施予定¹¹⁹⁸
 - インドにおいては、効率的な水・土壌管理による生産性・持続性の向上を目的に、**National Mission for Sustainable Agriculture** を掲げており、土壌保全技術の一環としてバイオ炭を推進^{1199,1200}
- n) 各地域でバイオ炭関連の団体が複数立ち上がっており、大学機関や民間企業を巻き込んでネットワークを構築している¹²⁰¹
- 北米では米国を中心に 10 以上の団体が立ち上がっている他、欧州では英国で **The UK Biochar Research Centre (UKBRC)** が立ち上がっている
 - また、アジアではインドで **India Biochar and Bioresources Network** が立ち上がる等、先進国以外にも取り組みが広がっている
- o) カーボンクレジット市場は、政府主導のコンプライアンスクレジットと民間セクター主導のボランタリークレジットに二分され、二国間クレジット（JCM）は前者に分類される
- 日本では、2011年からJCMに関する協議を行っており、これまで計 29 カ国と締結¹²⁰²
- p) 農業分野の取り組み指針を受けて、日本では政府主導の J-クレジット制度でバイオ炭の取り扱いが可能である一方、海外ではボランタリー市場主導でバイオ炭の環境価値反映の取り組みがなされている
- 日本において、政府主導の J-クレジット制度において、「バイオ炭の農地施用」に関する

- る方法論が 2020 年に策定され、バイオ炭により農地に固定化された炭素貯留量をクレジットとして認証可能^{1203,1204}
- J-クレジットでは、GHG 排出量削減を自主的な取り組みとして評価するベースライン & クレジット方式を採っていたが、2023 年より GX リーグで参加企業に対し義務化を企図¹²⁰⁵
 - GX リーグ立ち上げ当初の構想では、参加企業に対して GHG 排出量削減を義務化しているものの、目標未達時のペナルティが存在せず、履行力を疑問視されていた¹²⁰⁶
 - 但し、GX 推進法の下、2033 年より発電事業者に対し一部有償で CO₂ の排出枠（量）に応じた特定事業者負担金を徴収する予定であり、規律強化に向けて現在動いている¹²⁰⁷
 - 海外において、バイオ炭によるカーボン除去クレジットを取り扱うボランタリー市場として、Puro.earth、Carbonfuture、VCS が存在
 - Puro.earth はバイオ炭、炭化物混合建築資材、風化促進、木質バイオマス埋設、地質貯留炭素（DACCS, BECCS）をクレジットとして取り扱っており、IPCC のガイドラインをもとに策定した独自の規格（CORC）を用いた認証を、独立機関(DNV, bio.Inspectra, Energy Link Services, 350 solutions)により実施^{1208,1209}
 - Carbonfuture はバイオ炭（家畜飼料、土壌改良剤、都市緑化、資材）をクレジットとして取り扱っており、主流な認定制度である EBC を用いて認証を実施(EBC 認証は Carbon Standard International により実施)^{1210,1211}
 - VCS(Verified Carbon Standard)は、バイオ炭を含め十数種類のクレジット創出の方法論を策定しており、国際基準機関 Verra によるメソドロジーVM0044 v1.1 にて規定されたバイオ炭の定義・算出式や原料・製造方法および使用用途等により認証を実施¹²¹²
 - 各認定機関におけるバイオ炭の環境価値の算出方法は CO₂ 固定量のみに着目するという点で共通である一方、原料の種類、バイオ炭の生産に使用できる技術、適格な製品の種類が異なる等、各マーケットそれぞれが独立した動きを見せていたが、Puro.earth 認定プロジェクトが Carbonfuture 市場で取り扱い可能になる等近年統一化の動きも始まっている¹²¹³
 - 一方、一部の金融機関が ESG 投資から撤退するという揺り戻しが直近起きており、カーボンクレジット市場動向には注視が必要¹²¹⁴
- q) バイオ炭の品質認定は各認定機関により独自にルール制定がなされており、含有炭素量・貯留炭素量・元素組成・サイズ等分類条件に関して、統一化の動きは未だ見られない
- 国内において、日本バイオ炭コンソーシアム（立命館大学・日本バイオ炭研究センター主導）がバイオ炭の品質証明発行を実施しており、日本バイオ炭普及会(JBA)が定めた規格と測定方法により品質を規定¹²¹⁵
 - 欧州において、EBC(European Biochar Certificate)は、バイオ炭分類のためのガイドラインを独自に発表¹²¹⁶
 - 米国において、USBI(US Biochar Initiative)は 2025 年 Q2 に ANSI 規格を公開するこ

とを目標として掲げている¹²¹⁷

- 海外において、IBI(International Biochar Initiative)は、バイオ炭分類のためのツールを独自に発表している¹²¹⁸

【高層建築物等の木造化に資する等方性大断面部材の開発】

[市場動向]

- r) 日本は世界有数の森林資源保有国であり、森林蓄積については人工林を中心に増加傾向であり、人工林資源を有効活用すると同時に、循環利用に向けて計画的に再造成することが求められている¹²¹⁹
- 森林率については、日本は OECD 加盟国の中でフィンランド、スウェーデンに次いで第三位の位置づけ
 - 森林蓄積については、日本では人工林の育成により、過去 50 年間で約 3 倍に増加し、2019 年に約 54 億 m³に達したが、人工林の半分が 50 年生を超えて成熟し、利用期を迎えており活用用途の探索が課題
- s) 世界において、木材の使用量は増加傾向で、建築用途への使用は 3 割程度を占めており、今後も増加が続く見込み
- 世界の木材生産量は 2013 年の 37 億 m³から、2022 年には 40 億 m³に増加しており、内訳では、主に建築用途である製材、ベニア向けの生産量が 10 億 m³から 11 億 m³に増加し、全体の約 3 割を占めている¹²²⁰
 - 建築用木材の原料となる産業用丸太の生産量は世界全体で 2018 年から 2040 年にかけて約 1.5 倍になると予測されている^{1221,1222}
- t) 国内における木材の総需要量は増加傾向が継続すると予測されており、建築用材（製材用材、合板用材）も堅調に推移し、全体の 5 割弱となる見込み
- これまで、木材需要は、特に燃料材（薪炭材）の需要増を背景に、2009 年から増加傾向¹²²³
 - 将来、木材需要は 2018 年の 8,200 万 m³から 2030 年に 8,800 万 m³に増加し、建築用材のシェアは全体の 5 割弱で推移すると見込まれている¹²²⁴
- u) 国内における木材自給率は 2002 年以降改善傾向にあり、木材製品工場における国産材の使用割合は増加傾向にあるが、集成材の国産材使用率の増加率は低い水準に留まっている
- 国内における木材自給率は、森林資源の充実や合板原料としてのスギ等の国産材利用の増加、木質バイオマス発電施設での利用の増加等を背景に、2002 年の 18.8%を底として増加傾向にあり、2022 年は 42.9%であった¹²²⁵
 - 国内の製材工場、合板工場、集成材工場における国産材使用割合は増加傾向だが、集成材に関しては増加率が他の製品に比べ低い傾向にある¹²²⁶
- v) 国内の建築物の木造比率については、低層住宅では高いが、4 階以上の中高層建築物では非常に低い一方で、米国や欧州においては低層住宅の木造率は林業の存在や歴史・文化的背景から高い地域と低い地域が存在し、中高層については木造率は国内同様に低い、近年活発化
- 国内における低層住宅の木造比率は 8 割程度である一方で、4 階建て以上の建築物は鉄筋コンクリート（RC）造、鉄骨造がほとんどを占めている状況であり、木造化の推進による木材需要拡大ポテンシャルが存在^{1227・1228}

- 世界においては、2022年2月時点で、世界では8階建て以上の木造高層建築物は竣工済みが66棟、建設中が18棟、計画が55棟となっており、建築ペースが増加傾向にある¹²²⁹
- w) 世界において、マスティンバー建設市場は2033年には2B\$規模になる見込み。地域別では、サステナビリティ推進に向けた法整備等を背景に、欧州が現状34%と最大規模を誇る¹²³⁰
 - 市場の促進要因としては、カーボンニュートラルへのニーズ増加や軽量性による工事の簡易化等が挙げられる
 - 一方、阻害要因としては、耐火性能や音響性能の強化、吸湿耐性向上による工事費の膨張や原料調達のハードルの高さが指摘されている
 - 例えば、英国では吸湿耐性が問題視されており、浸水の影響で一部CLT建築物の腐食が見つかっている他、保険会社が木造建築に対して火災リスクよりも漏水リスクを懸念する声が上がっている¹²³¹¹²³²
- x) 国内においては国による建築物への木材利用拡大に向けた制度面の整備や支援策が進められている
 - 制度面では、建築基準法の一部改正（2019年施行）において、耐火基準の見直しによる木材利用可能範囲の拡大¹²³³、「公共建築物等木材利用促進法」（2010年施行）で低層の公共建築物（2021年に「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」に改称・改正後は対象が一般建築物に拡大）は原則として木造を検討することが義務付けられる等の取り組みが行われている¹²³⁴
 - また、直近も建築基準法の改正が進んでおり、中層建築物における耐火構造の要求性能緩和（2023年施行）の他、耐火規定の合理化による大規模建築物の木造化促進/部分的な木造化推進/低層部分の木造化促進や、簡易な構造計算で建築可能な範囲の拡大による木造化推進（2025年施行）が実施されている¹²³⁵
 - 支援策としては、国交省主導の「サステナブル建築物等先導事業（木造先導型）及び優良木造建築物等整備推進事業」における先導的な設計・施工技術が導入される木造建築物等に対する費用の一部支援（令和4年度は木造先導型4件、優良木造建築物18件が採択）^{1236、1237}、林野庁主導の「建築用木材供給・利用強化対策」における建築用木材の利用の実証等への支援がある¹²³⁸
- y) 世界において、マスティンバーの中でもCLT（Cross Laminated Timber）は壁材や床材として大きな需要増が見込まれ、国内においても普及が進められており、木造高層建築にも数多く採用が行われている
 - CLTの世界市場規模は2021年に11億1,000万米ドルと評価され、2030年までに年率15%で成長し、特に欧州市場の伸びが最も大きいと予想されている¹²³⁹ヨーロッパや北米においては、もともと木造建築の需要が高くCLTとの親和性が高いことや、コンクリートやレンガの製造工程が環境へ与える影響等からの意識の高まり、またいくつかの政府はCLT使用者への財政面等での優遇措置を進めたこと等により、CLTの需要が拡

大した

- 日本政府は令和3年策定の「CLTの普及に向けた新ロードマップ～更なる利用拡大に向けて～」において、5か年計画でCLTの認知度向上、コスト改善、供給体制の整備、設計・施工の担い手の拡大等に取り組んでいる¹²⁴⁰
 - 近年竣工した6階建て以上の木造高層建築は、鉄骨造や鉄筋コンクリート造等の既存構造とCLTパネル工法の組み合わせ、もしくはCLTを耐力壁等として部分活用した例が大半を占めている^{1241、1242}
 - また、上記建築において2023-2024年の事例を見ると、ほぼ新築工事であり、建て替えは1件のみ
- z) 国内において、これまでに木造中高層建築の普及が進まなかった理由として、耐火基準の厳しさ、耐震性確保のための設計ノウハウの不足、非木造に比べて高コストとなる等の課題があったが、これらの課題克服に向けた進展も見られている¹²⁴³
- これまでの建築基準法の基準を満たすための特注の耐火被覆材の使用や施工手間の多さ等によるコスト増が普及の阻害要因であったが、建築基準法の改正による規制緩和や、耐火部材開発が進展
 - 木造中高層建築の設計・施工ノウハウが不足しているため、設計や施工のための実験にコストが掛かっていたが、木造中高層建築の事例が増えるにしたがって設計・施工ノウハウが蓄積され始めている
 - 中高層建築向けの大断面集成材等は一般流通しておらず特注生産となるため、部材コストが非木造に比べ高いが、設計ノウハウの蓄積による材料使用の最適化、木造中高層建築市場の拡大による大量生産によりコスト減が期待される一方、大断面化に2次加工が必要である本質的な課題には個社では取り組むのが難しい状況
 - 木造は他の既存建築に比べ、工期が短い、環境負荷軽減のメリットが存在するが、現時点においては建築方法の選定要件の充足度においては建築コストで劣後している状況
- aa) 木材利用の拡大を進める上で、木材供給体制に課題が存在
- 日本は斜面が多く、フォワーダ（積載式集材車両）等の利用が難しい背景から、伐採は人力で実施するケースも多く、人材確保や伐採効率の点で課題^{1244、1245}
 - 国内における国産材の流通については、各段階が小規模かつ分散的で多段階を経る構造となっており、需要に応じた品質、納期、ロットで流通できておらず、建材等のサプライチェーンについても、中小企業が多く、多段階の商流が存在しており、非効率が存在¹²⁴⁶
 - 木材の製造に関わる製材機械、合板機械、木材加工機械の国内出荷額は2016年以降、増加傾向にある¹²⁴⁷一方で、合板製造機械の輸出は減少傾向¹²⁴⁸

[技術開発]

- bb) GI基金事業では伐採木材製品利用拡大へ向けて、木造高層建築物等へ活用が期待される等方性大断面部材の開発を推進中であり、等方性大断面部材の製造要素技術の開発およびその連続製造技術の確立に加えて、部材の性能評価指標・設計法の提案に関して検討を実施して

いる

- 部材開発においては、国産材を原料とし、長さや幅の両方向からの荷重に強い力学特性を有する等方性大断面部材を木材複数層からなる合板を用いることで目指しており、木材の厚み調整や層構造の検討を実施
 - 部材の製造要素技術開発において、歩留まりが高く効率的に製造する技術確立を推進中であり、特に接着工数削減と木材特性（軽量、弾性力等）活用のため加熱による接着工程を中心に検討を進めている
- cc) 建築物への応用が期待されるマスティンバーには直交集成板（CLT：Cross Laminated Timber）、単板積層材（LVL：Laminated Veneer Lumber）、超厚物合板（MPP：Mass Plywood Panel）等が存在する
- CLTはラミナ（ひき板）が繊維方向が直交するように積層接着され、優れた構造特性を有することから、国内外において木造高層建築への応用が進められており、生産に関しては、欧州が最も盛んであり、米国、日本においても国産の供給能力向上が図られている¹²⁴⁹
 - LVLは丸太を切削した単板（厚さ2～4mmの薄板：ベニヤ）が繊維方向に平行に積層接着され、優れた構造特性を持った長尺部材が製造可能であることから、主に柱や梁等の軸材として中層大規模木造建築への応用が進められている¹²⁵⁰
 - MPPはオレゴン大学と米国Feres Engineered Wood社が共同開発し、2018年に上市した比較的新しいマスティンバーで、合板をたて継ぎし、部分的に直交層を入れた構成を採用することで長いスパンを実現した部材である¹²⁵¹
 - 構造用合板は、切削・乾燥された木材を接着・加圧して製造され、国内ではJAS規格により、寸法、強度等級（曲げ・せん断）、接着耐久性、許容応力度、健康安全度等が規格化されている^{1252、1253}
- dd) 国内外でCLTやLVLを中心に活用が拡大。LVLでは、LVLブロックを積み上げた後に圧着することで強固な耐力壁を築く木造ポストテンション構造が台頭
- 住友林業が自社研究施設の建設に、LVLブロックを積み上げた後に鉛直方向に鋼棒を貫通させて圧着することで強固な耐力壁を築く木造ポストテンション構造を採用¹²⁵⁴
 - 他にも、Naylor Love（ニュージーランド）は、オークランド工科大学の増築で、LVLブロックを積み上げた後に鉛直方向に鋼棒を貫通させて圧着することで強固な耐力壁を築く木造ポストテンション構造を採用¹²⁵⁵
- ee) CLTを始めとするマスティンバーには、工期短縮、環境負荷軽減等のメリットが存在する一方、施工知見の不足、製造コスト等の課題が存在している
- 木造高層建築の施工知見・諸性能のデータ知見の不足、製造コスト等の課題が存在^{1256、1257}
 - 欧米においても、CLTのフレーム利用時のコストは鉄筋コンクリートに比べて16～29%高コストになると報告されている¹²⁵⁸
 - マスティンバーはRC造等に比べて工期が短いメリットがあるため、部材製造から施工

までのトータルコストによって既存構造と比較検討することが重要

- 国内では各建築資材の高騰を背景にいずれの構造の建築費も増加傾向にあるが、木造は他構造と比較して増加幅が小さく、価格優位性を構築¹²⁵⁹
- ff) 木材を建築に使用する上では、構造耐力以外にも、外部露出部位等への耐久性付与や、耐火性の付与が必要となる
 - 木造建築の外部露出部位等には、吸湿等に対して耐久性を付与した材料を用いる必要があり、国は「木造・設計基準」にて、耐用年数に応じた材料選定基準を規定している¹²⁶⁰
 - 建築基準を満たすための木材への耐火性能付与には被覆型、燃え止まり型、鉄骨内蔵型の三つの方式が存在し、製品への展開が行われている¹²⁶¹
- gg) 海外において、建築物への木材利用を推進する目的で、部材開発やその適用方法に関して検討が進められている
 - 米国において、CLT・LVL・MPP等の高強度化木材の高層建築での耐用実験である NHERI TallWood Project が進行中¹²⁶²
- hh) 国内業界団体や公的機関において、製造コスト低下や木材を建築物へ適用する際の手法設計等の検討が進んでいる
 - CLT や大断面集成材の低コスト化技術、木造高層建築の工法の評価研究の開発が公的研究機関で進行中^{1263、1264}
 - 国内業界団体でも、厚物合板の開発や木材の建築への適応方法についての検討がなされている^{1265、1266、1267}
- ii) 国内外の民間企業において、CLT や LVL を中心にマスティンバー建築の耐火性・耐震性の向上や工期の短縮、建築費の削減を目的とした新規技術の開発が進んでいる
 - 国内では、大林組が耐火性の高い LVL/耐震性の高い剛接合技術/工期の短縮を実現する CLT ユニット工法/建築費の削減に繋がる改良あられ組技術を開発。他にもアキュラホームが、建築費の削減と工期の短縮に繋がる住宅用技術・部材を用いた工法と、住宅用部材でも高い耐震性を実現する構造を開発¹²⁶⁸¹²⁶⁹¹²⁷⁰
 - 国外では、Lindbäcks（スウェーデン）が木造中～大規模建築物（主に住宅）の施工に際して、工期の短縮と建築費の削減に繋がるリーン生産方式に基づいたモジュール工法を開発¹²⁷¹
- jj) 2001年以降の木材開発の特許動向については、中国が最も多く、日本は4位¹²⁷²
 - 中国が11件でトップであり、次いで米国10件、欧州7件、日本5件、韓国3件と続いている

[国際・ルールメイキング動向]

- kk) 海外では北米における木造中高層建築の実証プロジェクトやマスティンバー生産体制強化に対しての補助金や、木造化率の低いドイツやフランスでも木材利用新興政策が実施・検討されている

- アメリカとカナダにおいては木造建築の推進やマスティンバーの国産化率を向上するための支援策が行われている^{1273・1274・1275}
 - ヨーロッパにおいては、建築物の木造化率が低いドイツやフランスで、政府としての木造建築推進のイニシアティブの取りまとめや、公共建築物への木材の利用を義務付ける等の政策が実施・検討されている^{1276・1277}
- ll) 各国で木造建築に関して耐火基準や構造に対する規定が設けられており、耐火基準については大きな差が見られないものの、構造については差が見られ、特にヨーロッパ各国において比較的階数制限が厳しい傾向にある
- 国内では3階建て以上の建築物は構造計算が必要となり、他の建築法と同様に構造に関する基準を満たす必要があり、低層住宅等で基準に従った構造計算を行わない場合には、筋交い等の仕様規定を満たす必要がある¹²⁷⁸
 - アメリカでは全国的なガイドラインである国際建築基準（IBC: International Building Code）の中で木造建築の構造をタイプ別に規定しているが、建築基準は州によって異なり、多くの州がベンチマークとするカルフォルニア州では2022年に木造建築の階数制限を20階に緩和した¹²⁷⁹
 - ヨーロッパにおいては、Eurocode（建築や土木に関する構造性能の基準）内において木構造の設計についての規定が存在し、各国の建築基準により木造建築の階数が原則6～10階に制限されている¹²⁸⁰
- mm) 各国の標準化団体において、建築物への応用が最も進むCLTに関して、木材の分類および性能等の規格化が進められており、今後世界レベルでのCLT標準化が求められている¹²⁸¹
- 国内においては2013年、品質や強度が明らかな建築資材への需要の高まりを背景にCLT木材に関する日本農林規格（JAS）が制定¹²⁸²
 - 米国においては、米国規格協会(ANSI)の認定を受けた規格開発者であるAPA-The Engineered Wood Associationより、米国とカナダ間の二国間規格であるANSI/APA PRG 320-2019が制定¹²⁸³
 - 欧州においては、欧州30か国で構成されるCEN(欧州標準化委員会)やCENELEC(欧州電気標準化委員会)、ETSI(欧州通信規格協会)が発行する欧州の統一規格(EN規格)において、CLT木材に関する規格（EN16351-2021）が制定¹²⁸⁴
 - 国際標準化機構（ISO）より、米国と欧州の規格を組み合わせる形で、CLTに関するISO規格(ISO 16696-2019)が制定されており、CLT製造の最低要件の規定を行っている¹²⁸⁵

【ブルーカーボンを推進するための海藻バンク整備技術の開発】

[市場動向]

- nn) 主にアジア圏の食料向け需要の増加に伴い、世界の海藻類生産量は増加傾向
- 世界の海藻類生産量は 1960 年頃の養殖栽培の振興から大きく増加しており、2019 年で 3,576 万トン（うち養殖が 97%）¹²⁸⁶
 - 2019 年時点で全世界の海藻類生産の 97%がアジアで行われており、中国・インドネシア・韓国・フィリピン・北朝鮮・日本の順に生産量が多い¹²⁸⁷
 - 国内においては、海面養殖海藻類の生産量は減少傾向¹²⁸⁸
- oo) 藻類は食用用途だけでなく、近年は CO₂ 貯蔵ポテンシャルが着目されており、利用促進へ向けた国際的な議論がなされている
- 藻場・浅場等の海洋生態系に取り込まれた炭素が「ブルーカーボン」と命名され、炭素固定の新しい選択肢として提示された^{1289,1290}
 - 国連グローバル・コンパクトは、「Seaweed Manifesto」で、持続可能な開発に貢献可能な海藻産業に関して、構築や CO₂ 貯留に向けた機会や障壁等を提言¹²⁹¹
 - パリ協定における「国が決定する貢献（Nationally Determined Contribution）」では世界 74 カ国がブルーカーボンについて言及。但し、そのうち GHG 排出・吸収量の算出・報告をしているのは、オーストラリア・米国・英国・マルタの 4 カ国となっている^{1292,1293}
 - 17 の主要海洋国家で構成される「High Level Panel for A Sustainable Ocean Economy」等、ブルーカーボンの利活用に関する議論が世界規模でなされている¹²⁹⁴
- pp) 藻類の保全・再生活動により、今後、CO₂ 貯蔵量は拡大する見込み
- 欧州において、海藻類の CO₂ 貯留量の推計値が公開され、水質汚染等で生息地は大きく失われたと推定されるも、欧州の藻場・塩性湿地（300 万 ha）のブルーカーボン蓄積量は全世界の 1.5–4%と見積もられた¹²⁹⁵
 - 世界において、藻場の保全・再生活動による、海藻類の CO₂ 回収ポテンシャルは 2050 年時点でそれぞれ 0.19–0.65、0.03–0.05 Gt-CO₂-equiv./year となる見通し¹²⁹⁶

[技術動向]

- qq) GI 基金事業では、ブルーカーボン創出へ向けて、CO₂ 固定能を有する海藻類を着生・生育促進機能を持たせた基盤ブロックへ繁殖させ、運搬するシステムを想定した技術開発等を実施¹²⁹⁷
- 海藻類の生育を促進する材料を混入した基盤ブロックと、海藻移植用カートリッジの軽量化（従来の 1/4 程度）等の技術確立が目的
 - 開発した海藻類育成用ブロック・カートリッジを利用し、藻場を効率的に回復・造成する海藻供給システムの開発を目指している
- rr) ブルーカーボン創出にかかわる生態系に関して、その全体像（種別、生息領域等）把握に関する調査が進行中

- 世界、各国家、各地域レベルにおいて、生態系別の炭素貯留効果確認・定量化や沿岸生態系の理解と調査および沿岸生態系のマッピングに関して研究が実施された^{1298,1299,1300}
 - 利用可能な海域のポテンシャル推定に関しては、実施している政府（カリブ海諸国、ケニア等アフリカの一部）はあるものの民間団体による取り組みが主体であり、情報は未公開¹³⁰¹
- ss) ブルーカーボン創出にかかわる生態系のうち海藻の育苗・栽培・収穫は、地球温暖化に伴う海水温上昇による影響をすでに受けており、今後深刻化する可能性があることから、適応策として品種開発・海洋モニタリング等が世界的に取り組まれている
- 生態系に関する現状理解と、将来生じる可能性の高い問題に関して対応策が検討された¹³⁰²
- tt) CO₂固定化能を有する海藻類の品種開発は主にアジア圏において実施された
- 国内においては、食用海藻類の高温耐性種の開発が進行中¹³⁰³
 - 東アジア地域においては、海藻類の品種改良が進められてきており、商業栽培種が存在する一方、遺伝子編集技術で造られた品種の商業栽培は未実施¹³⁰⁴
 - 国内外において、育種法の開発に向けた研究開発や遺伝子解析・データバンク化の動きが見られる¹³⁰⁵
- uu) CO₂固定化能を有する海藻類繁殖システム開発に関して、海洋環境と海藻類食文化の点で類似な日本・中国・韓国と欧米で開発の方向性に差異が存在
- 国内においては、生態系回復を企図した製鉄・建設業による藻場改善ブロックの開発事例が存在し、加えて漁業権の及ばない洋上風力発電施設や海上公共施設建設地域における大型藻類養殖の検討例が存在^{1306,1307,1308,1309}
 - 韓国においては、海洋水産部の支援を受けて、ブルーカーボン情報システム構築やと評価管理技術の研究開発が実施された実績があり、2030年までのNDCや2050年のカーボンニュートラルロードマップの目標を達成するためのブルーカーボン推進戦略が策定された^{1310,1311}
 - 中国においては、国家気象局、教育省等主導により、海洋炭素貯留プロセスのメカニズムを探求するアライアンスが官民協力のもと形成されており、グローバルな研究開発プログラムの構築にも取り組んでいる^{1312,1313,1314}
 - 欧米等の海外においては、ブルーカーボンの増大を主目的に、バイオマス生産を企図した沖合での大規模海藻培養システムの設計事例等が存在し、沿岸部における藻類栽培に関してはアジア等でプロジェクトを行う欧米企業も多い¹³¹⁵
- vv) ブルーカーボンの利活用に向けては、栽培・出荷における効率向上やCO₂固定能の評価に課題が存在するため、技術・コスト面の検討が実施されている
- ブルーカーボン取り扱い拡大に向けて、海藻養殖における自動化の一環としてのIoT活用事例や、ブルーカーボン評価のためのリモートセンシング技術開発事例が存在¹³¹⁶
 - 養殖業については、限られた養殖適地の有効かつ効率的な活用が必要であり、生産増加・コスト削減に向けた大規模化・自動化等の技術的課題の解決が必要¹³¹⁷

- 海藻類の CO₂ 貯留量とその持続性の観測技術は開発途上にあり、特に持続性評価技術については開発余地が大きい¹³¹⁸。
 - 国内でも国交省が、「地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する検討会」を開催して議論を進めている¹³¹⁹
- ww) ブルーカーボン創出へ向けた海藻類の利用が見込まれる一方、その炭素貯蔵メカニズムに関しては不明な点も存在するため、生態系に関する研究開発や炭素循環を定量・モニタリングするための観測等へ支援がなされている
- ブルーカーボンのモニタリングでは、対象生態系面積の算出に必要な境界・被度と、吸収係数の引用に必要な生態系種別の全 3 項目の把握が必要とされている¹³²⁰
 - ブルーカーボンのモニタリング技術は多数存在するが、それぞれ課題を抱えている状況。UAV/ROV/水中 IoT を中心に、次世代技術の開発が進行中^{1321,1322}
 - 米国政府は、Ocean Climate Action Plan において Macroalgae による炭素貯留効果はさらなる研究が必要と課題提起した上で、ブルーカーボンのポテンシャル解明に向けた研究開発をアクションプランに盛り込む¹³²³
 - 米国エネルギー省 (DOE) は、最大 4,500 万ドルの資金提供により、MRV (測定・報告・検証) 技術を通じて海洋二酸化炭素除去 (mCDR) 産業の発展を促進することを目的とした新しいプログラム (MARINER、SEA-CO₂) を支援^{1324,1325}

[国際・ルールメイキング動向]

- xx) 海洋養殖・漁業を含めたブルーエコノミーに関して、各国家・組織における取り組みが実施されており、経済活動と持続可能性の両立に向けて指針が発表されている
- 国連は「持続可能な開発のための国連海洋科学の 10 年」において、持続可能な海洋開発のための行動枠組みと挑戦課題等を公開し、国際協調による海洋開発を主導¹³²⁶
 - 欧州委員会は、技術革新と持続的成長を目指す海洋分野の政策とその戦略や指標 (Blue growth, Sustainable blue economy) を策定^{1327,1328}
 - 米国政府は、NOAA(米国海洋大気庁)が、ブルーエコノミーに貢献するデータ、サービス、技術リソースの強化・改善等を目的に「Blue Economy Strategic Plan」(2021～2025 年)を策定¹³²⁹
 - また、バイデン大統領府は生物多様性の保全を目的に、環境 DNA 技術の利活用推進を目指す「National Strategy for Aquatic Environmental DNA」を策定¹³³⁰
 - 中国政府は、第 12 次国家社会開発 5 年計画 (2011-2015) で、中国の国家開発戦略として「海洋経済の発展」を初めて含めて以来、一帯一路政策の重要施策にも、ブルーエコノミーを位置付けており、地方政府においても独自にブルーエコノミー関連の政策を策定¹³³¹
- yy) ブルーカーボン創出へ向けた藻類の利用に関して、各国家・地域レベルで取り組みが実施されており、持続可能な藻類の生態系の構築および利用へ向けた技術開発が進行中
- 世界において、沿岸および海洋の生態系の保護と復元をすることで気候変動の緩和を進

めることに焦点をあてた統合的なグローバルプログラムである **Blue Carbon initiative** が発足¹³³²

- 欧州において、藻場再生プロジェクトや、食品・化粧品・医薬品・エネルギー分野での海藻需要拡大に備えたアクションプランが策定された^{1333,1334}
- 米エネルギー省 **ARPA-E** は、海藻類関連プログラム **MARINER** で 2017 年より 21 のプロジェクトを、海洋二酸化炭素センサー関連プログラム **SEA-CO₂** で 2023 年より 11 のプロジェクトを支援中^{1335,1336}

zz) 欧米において、ブルーカーボン創出へ向けた藻類利用促進のためのプラットフォームが構築中

- 米国海藻養殖産業の情報プラットフォームとして **Seaweed Hub** が 2020 年に設立され、マニュアル・査読済み論文・ワーキンググループ議事の公開やシンポジウム開催を通じて課題やニーズの整理・業界発展を目標に掲げる¹³³⁷
- **EU4Algae** は、欧州海藻産業・技術の確立と活性化を目的として、養殖事業者・研究者・事業者・公的機関・NGO 等の協業プラットフォームとして 2022 年 4 月に設立された¹³³⁸

aaa) ブルーカーボンのカーボンクレジット化に関して、市場ごとのルール制定がなされている

- 国内においては、ジャパンプルーエコノミー技術研究組合が「J ブルークレジット」として海藻類等による CO₂ 貯留を審査認証、取引を実施。また、世界初となる海藻の方法論を開発^{1339,1340}
- **JBE** は、2023 年に 2,170t-CO₂、2024 年に 113t-CO₂ の J ブルークレジットを認証・発行（但し、2024 年度の数値は 2024 年 11 月 26 日時点）¹³⁴¹

bbb) 藻類栽培にあたり、「廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約（ロンドン条約）」を考慮した栽培システム構築の必要性がある¹³⁴²

[19] バイオものづくり技術によるカーボンリサイクル推進

[市場動向]

- a) 世界では、産業構造の脱化石資源を進めていく中で、バイオテクノロジーが経済生産に大きく貢献できる市場（バイオエコノミー）の規模は2030年には1～30兆ドル規模に達すると予測されている
- 経済協力開発機構（OECD）は、OECD加盟国のバイオテクノロジー産業は2030年には1兆ドル規模になると予測している¹³⁴³
 - McKinsey Global Instituteによるバイオエコノミーに関する報告書“The Bio Revolution: Innovations transforming economies, societies, and our lives”によると2030～2040年にバイオエコノミーのグローバル経済効果は2～4兆ドル/年で、そのうち素材・化学エネルギーセグメントは1割弱を占めると試算されている¹³⁴⁴
 - 米国政府のファクトシートでは、今後10年以内にバイオものづくりが世界の製造業の1/3以上を占めるようになり、その市場規模が30兆ドル近くに達すると、2022年に試算¹³⁴⁵
 - 素材製品の需要側では、使用原料を含むサプライチェーンの脱炭素化の目標設定を行う企業は増加しており、サプライヤーへの脱炭素要請の動きが顕在化している一方で、将来的に低炭素排出なプラスチック、化成品は、最も供給不足が懸念される領域
 - ◇ 温室効果ガス排出量削減に対する国際認証であるSBT（Science Based Targets）認証において、使用原料を含むサプライチェーンの脱炭素化（Scope 3）の目標を設定する企業は増加傾向にあり、サプライヤーへの脱炭素要請の動きが顕在化¹³⁴⁶
 - ◇ 低炭素排出素材のうちプラスチック、化成品は需要に対する供給側の供給計画の不足が最も顕著な領域となっている¹³⁴⁷
- b) CO₂国内のバイオものづくりの市場規模の推移について、「バイオ戦略」において試算がなされており¹³⁴⁸、特に伸びが大きいのが高機能バイオ素材・バイオプラスチック・バイオ生産分野で、バイオマスプラスチックの導入を進めるなどして、23.1兆円（2018年）から41.4兆円（2030年）に拡大すると見込んでいる
- c) バイオものづくりの原料として活用されるのは光と水素であり、水素は低炭素である必要があるが、今後世界的に低炭素水素の需要、供給量は大きく拡大する見込み¹³⁴⁹
- 低炭素水素の需要は2050年にかけて大きく増加し、特に航空、発電の用途で大幅に増加する見込み
 - 低炭素水素の供給は、2030年頃に立ち上がり始め、2050年には水素供給量の大半をグリーン水素が占める見込み

[技術動向]

- d) CO₂を直接原料とするバイオものづくり技術としては過去に1970年代、2000年代の原油高等を背景に石油化学の代替手段としての検討などの動きが複数回興ったが、一部食品・養殖用飼料を除いて実用化には至らず、近年、カーボンニュートラルへの要請、合成生物学の進

歩等を背景に再注目されている

- 水素を還元力として、水素細菌等を用いて炭素固定を行う方法においては、生成物であるタンパク質を食品に応用する研究が 1960 年代に行われたが実用化に至らず、2010 年頃から、その炭素固定能が再び着目され、原料となる水素の普及を見込み、人工肉原料や燃料・化成品原料の製造を目指す企業が存在している
 - 水素もしくは一酸化炭素を還元力として、酢酸生成菌等を用いて炭素固定を行う方法については、エタノールの商業規模プラントが存在している他、合成生物学を用いた代謝経路の改変により生来の生成物ではないエチレンやブタノール等の実用化に向けた研究開発が進められている¹³⁵⁰
- e) グリーンイノベーション基金事業「バイオものづくり技術による CO₂ を直接原料としたカーボンリサイクルの推進」において、CO₂ を原料とした新しいバイオものづくり製品の社会実装と CO₂ の資源化による産業構造の変革を目指し、3 つの研究開発項目に対して 6 つのテーマを採択¹³⁵¹
- 開発項目 1 「有用微生物の開発を加速する微生物等改変プラットフォーム技術の高度化」においては、2030 年までに、DBTL サイクルの 1 サイクルあたりの時間を短縮するための技術を開発し、有用微生物開発期間を 1/10 程度にすることを旨す
 - 開発項目 2 「CO₂ を原料に物質生産できる微生物等の開発・改良」においては、2030 年までに、一般的な天然株と比較して物質生産機能または CO₂ 固定化能を 5 倍程度向上させ、商用レベルで物質生産できる微生物（商用株）の開発を目指す
 - 開発項目 3 「CO₂ を原料に物質生産できる微生物等による製造技術等の開発・実証」においては、2030 年までに、微生物等を用いて、CO₂ を原料として生産した物質の製造コストが 2030 年時点の代替候補の製品の 1.2 倍以下となる技術の開発を目指す
- f) 有用微生物の開発プロセスである D:Design(細胞設計)→B:Build(宿主構築)→T:Test(生産性評価)→L:Learn(結果の学習)プロセスの研究開発は、各国で各プロセス効率化によるサイクル全体の短縮や、基点となる物質の微生物製造技術の整備が進められている
- 米国では、公共機関による研究開発の他に、民間バイオフィアウンドリも存在しており、それぞれ研究開発が進められている
 - ◇ 公共機関の取り組みとしては、主に DOE 傘下の Agile BioFoundry において、有用微生物の開発からスケールアップまでの期間を現状の 10 年間から 50%短縮すること目標に掲げて、DBTL サイクルの短縮に係る研究開発の他、様々な物質変換への基点となる物質“Bridgehead Molecules”を複数定め、微生物による製造の研究開発を行うことで業界全体のバイオ製造開発の促進を目指している¹³⁵²他、MIT-Broad Foundry も存在したが、2023 年に民間の ASIMOV Labs に吸収される形で合流¹³⁵³
 - 民間では Ginkgo Bioworks¹³⁵⁴、Zymergen、Amyris¹³⁵⁵の 3 社が豊富な遺伝子データベース、実験サイクルの自動化、AI 活用等を強みにバイオフィアウンドリ事業で先行し、それぞれ 10 億ドル規模以上の資金を調達・株式上場を果たしていたが、資金繰りの悪化を背景に Zymergen は Ginkgo Bioworks により買収¹³⁵⁶、消費者向け事業の収益性悪化から Amyris は破産を申請・事業再建中¹³⁵⁷であるなど再編が進んでおり、中国での DBTL

サイクル開発は大学や国立研究機関が主体で実施されており、中央政府および地方政府による大型の投資と米国アカデミアからの帰国人材等の人材を活用し、最先端の研究体制の整備が進行中^{1358,1359}

- 韓国では、韓国科学技術院 (KAIST)と韓国生命工学研究院 (KRIBB) によって運営される K-Biofoundry において、民間および公共部門の研究者がアクセスできる統合されたバイオ製造プラットフォーム開発を目指し、生物工学、データ分析、スケールアッププロセスの研究開発を実施¹³⁶⁰
- 欧州でもデンマークの DTU Biosustain BioFoundry¹³⁶¹、英国の London BioFoundry¹³⁶² 等の公共バイオフィュードリーが立ち上げられ研究開発が実施されている
- 国内においては、グリーンイノベーション基金事業のほかに NEDO「バイオものづくり革命推進事業」(事業期間：2023 年度～2032 年度)¹³⁶³、「カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発事業」(事業期間：2020 年度～2026 年度)¹³⁶⁴、「植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発 (スマートセルプロジェクト)」(事業期間：2016 年度～2020 年度)¹³⁶⁵、文科省/JST の「革新的 GX 技術創出事業 (GteX)」の研究課題「多様な微生物機能の開拓のためのバイオものづくり DBTL 技術の開発」(研究機関：2023 年 10 月～) においても DBTL 技術の開発を実施¹³⁶⁶
- g) CO₂ を直接原料とするバイオものづくりの微生物改変プラットフォームを構築し、活用していく上では、合成生物学と機械学習などの AI 分野の融合を可能な人材の確保、およびターゲットとしている微生物種ごとの Design、Build、Test の知見の確立が重要となる
 - AI 分野のプレイヤーである DeepMind は、遺伝子改変後のタンパク質の構造やタンパク質と他分子との相互作用の高精度での予測を可能にする技術を開発中¹³⁶⁷
- h) 微細藻類やシアノバクテリアの光合成プロセスを利用した CO₂ を原料としたバイオものづくりに関して、国内外プレイヤーが複数存在し、航空燃料用途のスケールアップ等が進んでいる
 - 米国 Phytonix 社は、ブタノールを高効率で合成するように遺伝子編集したシアノバクテリアを開発、工業用化学製品原料やバイオ燃料として量産を狙っている¹³⁶⁸
 - Viridos 社は、遺伝子編集により微細藻類のオイル生産性向上を実施し、またスケールアップ試験のための施設として、California Advanced Algae Facility (CAAF) を保有し、大量培養の条件最適化も実施している¹³⁶⁹
 - Pond Technologies 社は、食品・飼料・バイオ燃料向けの藻類大量培養を実施しており、Pond Biotech にて医薬品用物質を産生する遺伝子組換え藻類の開発を実施している¹³⁷⁰
 - Photanol 社は、シアノバクテリア類の光合成プロセスに合成生物学的にアプローチすることで、求める炭素化合物を合成可能にすることを目標に研究開発を進めており、有機酸の生産の商用化を進めており、2024 年 2 月には、糖とタンパク質の生産について、バリューチェーン強化のためのコンソーシアムの形成を発表¹³⁷¹
 - Bondi Bio 社は、独自プラットフォーム Cyanoworks を活用した高効率な遺伝子編集プ

プラットフォームを保有し、食品・飼料・医薬品・化学品向けの物質生産を行うシアノバクテリアを作成¹³⁷²

- **Provectus Algae** 社は「**Precision Photosynthesis**」という、AI を駆使したフォトバイオリアクターでの培養・生産性の最適化技術を開発、また、合成生物学による有用物質合成にリソースを配分¹³⁷³
 - ユーグレナは、ミドリムシ油脂を用いたバイオ燃料製造、油脂生産性の向上のための合成生物学にもとづく品種改良等を実施しており、2024 年 11 月には、使用済み食用油及びユーグレナ油脂を原料とするバイオ燃料の普及に取り組む合意を **EcoCeres** 社と締結¹³⁷⁴
 - **Algal Bio** 社は、微細藻類のライブラリ・変異体育種をもとにした遺伝子改変プラットフォームを開発し、微細藻類によるバイオものづくり技術を目指す¹³⁷⁵
 - ちとせ研究所は、微細藻類を用いたバイオ燃料・食品・化学品等の製造を目指し、微細藻類の品種改良・大量培養・商用化に向けたスケールアップの研究を実施¹³⁷⁶
- i) 水素細菌等を用いた水素の還元力を利用した CO₂ を原料としたバイオものづくりにおいては、漁業用飼料、食品用途の商業化に向けた開発が先行している他、燃料や工業用化学品製造を目指す国内外プレイヤーが存在し、微細藻類から水素細菌に開発領域をシフトしたプレイヤーも存在するなど活発化
- **Oakbio** 社は、独自のバイオプラットフォームを活用して好気性水素酸化細菌によるエタノール、PHA、航空燃料等の商用生産を目指している¹³⁷⁷
 - **NovoNutrients** (**Oakbio** の食品部門) は、CO₂ と水素から飼料・食料タンパク質を合成するガス発酵プロセスを開発¹³⁷⁸
 - **Kiverdi** 社は、独自のバイオリクターを用いた発酵プロセスにより CO₂ と水素等から食品、肥料、飼料、プラリサイクルの技術を開発しており、特に子会社 **Air Protein** で人工肉の開発が進展¹³⁷⁹
 - **Deep Branch Biotechnology** 社は、水素酸化細菌を利用した CO₂ を原料とした飼料用タンパク質「**Proton**」の上市を目指しており、2024 年 8 月に経営陣が事業買収 (MBO) し、新会社 **Aerbio** 社を設立¹³⁸⁰
 - **Solar Foods** 社は、代替タンパク質食品である「**Solein**」を微生物の発酵プロセスにより CO₂ と水素から生産し、シンガポールで上市をしたほか、2024 年 4 月に食用タンパク質の商用生産をフィンランドにて開始¹³⁸¹
 - CO₂ 資源化研究所は、UCDI 水素菌株を用いた食料飼料製造、遺伝子改変 UCDI 水素菌株を用いたバイオ燃料・化学品製造を目指している¹³⁸²
 - 中国電力は広島大学生命研の秋研究室・中島田研究室と共同で、酢酸生成菌と油糧微生物の二段階発酵による CO₂ を原料としたバイオものづくりプロセスを開発¹³⁸³
 - **Electrochaea** 社は、CO₂ と水素を原料にメタン生成古細菌によりバイオメタンの合成を行うプラントを開発中であり、2024 年 8 月に **EIC** からの資金援助を受け、スケールアップに成功¹³⁸⁴

- Symbiobe は、海洋性紅色光合成細菌を利用し、繊維、飼料、肥料等を製造する予定で、2025 年から量産に向けた実証試験を開始する見込み¹³⁸⁵
 - 例えば燃料と化学品のバイオ製造に係る技術会合である Symposium on Biomaterials, Fuels and Chemicals (SBFC) では、2021 年開催の第 43 回、2022 年開催の第 44 回会合では水素細菌に係る発表は 0 件であったのに対し、2023 年開催の第 45 回会合では、2 件であった^{1386・1387・1388}
- j) 還元力として水素または CO を利用したバイオものづくりを行う企業が存在し、LanzaTech 社が商業化で先行
- LanzaTech 社は、独自に遺伝子編集した細菌類 (Acetogen) を駆使し、CO₂・CO・H₂ を原料として種々の製品を製造し、グローバルに 500 以上の企業とパートナーリングを締結しており、新たにエタノールを製造するとき使用する微生物を乾燥させタンパク質を生成するプロセスについてのパイロット設備を建設し、現在試験運転中¹³⁸⁹
 - Again.Bio 社は好熱性 Acetogen を使用して排ガスから有用化学物質の製造を目指しており、H₂・CO 活用のバイオものづくりを目指しているとみられ、2025 年 2 月時点ではデンマークにて製造プラントが稼働しており、CO₂ を原料に酢酸を製造する技術が実装済み。Helm AG との販売契約の締結も完了¹³⁹⁰
- k) 還元力や利用する微生物は非公開であるが、CO₂ を原料として、工業用化学品等の製造を目指す企業も存在
- Visolis 社は、AI 技術を駆使したモデリングを用いて、微生物の産生能向上のための合成生物学、化学触媒の設計、プロセススケールアップの最適化を行う¹³⁹¹
 - Phase Biolabs 社は、ガス発酵プロセスを利用した CO₂ を原料とする工業用化学品や E-Fuel の製造をおこなう¹³⁹²
- l) 微生物を用いずに、CO₂ を原料とし、工業用化学品等の製造を目指す企業も存在
- Twelve 社は、CO₂ の電解還元により、CO を製造し、CO からの化学品製造を目指しており、現在商用プラントを建設中¹³⁹³
- m) 有用微生物の大量培養技術研究のトレンドとして、微生物技術関連のキーワードを含む論文数は増加基調であり、大量培養に関する論文数も増加基調¹³⁹⁴
- キーワードに”bioreactor”を含む研究論文数は、2000 年の 247 報から、2024 年には 1,949 報発表されており、このうち約 5~10%が大量培養のキーワードも同時に含んでいる
 - キーワードに”photobioreactor”を含む研究論文数は、2000 年の 13 報から、2024 年には 116 報発表されており、このうち約 0~10%が大量培養のキーワードも同時に含んでいる
- n) 水素酸化細菌、光合成細菌に関する研究論文は増加傾向にあり、特に 2020 年以降水素酸化細菌の論文発表が増加、このうち培養等に関する研究論文数は限定的ではあるものの共に増加傾向¹³⁹⁵
- キーワードに”hydrogen-oxidizing bacteria”を含む研究論文数は、2000 年代の平均 1.3

報/年から、2020年代には平均12.4報/年と増加傾向にあり、培養に関するキーワードを含む論文数も2014年以前には全く見られなかった一方で、2015年以降は発表が見られる

- キーワードに”cyanobacteria”を含む研究論文数は、2000年の476報から、2024年には1,915報発表されており、大量培養のキーワードを含む発表も増加傾向

[国際・ルールメイキング動向]

o) 米国と欧州では2012年に作成されたバイオ戦略に基づく活動を継続してきたが、米国は新たなバイオ戦略を発表、欧州でも複数のバイオものづくり支援策が進行中であり、中国も2022年にバイオエコノミーに関する国家戦略を発表する等、バイオエコノミー領域で主導権を握るための国家間競争が激化

- 米国では、2012年に打ち立てられた戦略に基づいて、複数の政府機関によるR&Dの支援が実施されており、足元ではバイデン政権もバイオ分野の強化計画を発表している
 - ◇ 「National Bioeconomy Blueprint」(2012)の中で、バイオエコノミーを今後の経済成長と社会問題の解決を牽引する重要な分野と位置付け、ライフサイエンス、環境エネルギー、バイオ製造プロセス、食糧・農業分野と幅広い分野においてエネルギー省(DOE)や国立衛生研究所(NIH)等の組織を中心に合成生物学領域への投資を実施している¹³⁹⁶
 - ◇ バイデン政権は2022年9月に大統領令「国家生命工学およびバイオ製造イニシアチブ」において、生命工学とバイオ製造力を強化することによって、保健・気候変動・エネルギー・食糧安保・農業・サプライチェーンなどにおける革新的な解決策を創出するという計画を提示した¹³⁹⁷
 - ◇ 2023年3月に発表された「米国のバイオ技術およびバイオ製造のための大胆な目標」の中で「20年以内に、現在のプラスチックやその他の市販ポリマーをバイオ原料を用いたリサイクル可能なポリマーに90%以上転換可能な、費用対効果の高い持続可能なルートを実証し、大規模に展開する」、「20年以内に、米国内の化学品需要のうち、30%を国内でバイオ製造する」等、複数の野心的な目標を設定している¹³⁹⁸
 - ◇ 市場創出支援策として、政府機関へのバイオ由来製品調達義務化と民間企業による自主認証・ラベリング制度を提供する「BioPreferred Program」を実施¹³⁹⁹
 - ◇ DOEは2023年5月に発表したClean Fuels & Products Shotにおいて、燃料および化学産業の脱炭素化を推進し、2035年までにGHG排出量を少なくとも85%削減する費用対効果の高い技術を推進することを目標に掲げ、CO₂捕捉変換技術を含む5つの研究注力領域を示した¹⁴⁰⁰
 - ◇ DOEの下部組織であるBioenergy Technologies Office(BETO)は活動計画の中で、2030年までに少なくとも1つの費用効率の高い(cost-effective)バイオベースプラスチックの開発を目標に掲げる¹⁴⁰¹

- 欧州では **Horizon Europe** と **Bio Based Europe** の共同によりバイオ技術開発の支援を行う他、循環経済への移行を目的とした **Circular economy action plan (CEAP)**に基づく政策の中でバイオ素材の市場創出を促進
 - ◇ **Circular Bio-based Europe Joint Undertaking (CBE JU)** は、**Horizon Europe** プログラムのもと、**2021–2031** 年にかけて欧州内のバイオものづくり関連技術を支援しており、**13** のフラッグシッププロジェクトに**2億5千万ユーロ**の資金補助を行っている¹⁴⁰²
 - ◇ **PYROCO₂** プロジェクトのもと、**2021–2026** 年にかけて好熱性細菌を利用した **CO₂** からアセトンへの変換技術支援が欧州で進行中¹⁴⁰³
 - ◇ **Horizon2020** の採択プロジェクト **BioRECO₂VER** において、**CO₂** を用いた有用物質生産技術に関する研究が実施されていた（**2021** 年プロジェクト終了）¹⁴⁰⁴
 - ◇ **2020** 年に更新された **Circular economy action plan (CEAP)** に基づき、循環型経済プロセスの促進、持続可能な消費の奨励等を目的とする法的小よび非法律的措置の導入を進めている¹⁴⁰⁵
 - ◇ **2024** 年には、「**Building the future with nature: Boosting Biotechnology and Biomanufacturing in the EU**」を発表し、EUにおけるバイオものづくりの課題や今後の政策の方向性等を提示¹⁴⁰⁶
- 中国においても、政府主導のバイオエコノミー推進策が進行中¹⁴⁰⁷
 - ◇ **2022** 年 **5** 月に発表された国家戦略「バイオテクノロジー革新のための第 **14** 次 **5** 年計画」において「遺伝子・バイオテクノロジー」を含む **8** 領域を国家科学技術戦略上の戦略的重要分野に指定し、研究開発支援を強化する方針
 - ◇ 地方政府レベルでも深圳市、山西省などにおいて研究開発拠点整備などを実施
- p) 国内では、「**2030** 年に世界最先端のバイオエコノミー社会を実現」することを目標とする総合的な政策パッケージとして「バイオ戦略」を策定しており、「市場領域の拡大」と「バイオエコノミーの成熟」を掲げており、**2024** 年には更なる市場の拡大を目指した「バイオエコノミー戦略」を策定¹⁴⁰⁸¹⁴⁰⁹
 - バイオ戦略では、**2030** 年の我が国全体のバイオエコノミー市場規模目標を **92** 兆円としており、うちバイオものづくりが約 **53** 兆円を占める
 - **2024** 年に発表されたバイオエコノミー戦略では、日本全体のバイオエコノミー市場規模だけでなく海外での市場拡大も目標に入れており、海外も含めて合計 **100** 兆円以上の市場規模を目指す
 - 「バイオエコノミーの成熟」は定性的に「バイオフィースト発想」、「バイオコミュニティ形成」、「バイオデータ駆動」の **3** つの要素ごとにレベルと基準を設定し、達成を目指す
 - バイオものづくりの促進策としては、(1) バイオものづくりの実践に向けた開発・生産体制の整備、(2) バイオ由来製品の市場拡大に向けた取組、(3) グローバルバイオ

コミュニティの形成、(4) バイオ分野の人材育成、を挙げている

- q) CO₂を原料とすることに対する環境価値認証の動向については、現状 CO₂原料を明確に対象に含む認証は存在しないが、CO₂削減効果を訴求した認証の活用例はあり、今後の CO₂原料化に関する認証への注視が必要
- 化学メーカー製品で採用されている認証団体である ISCC、REDcert²はバイオバイオマス原料、バイオ廃棄物・残渣、化石資源由来廃棄物等を対象にしており、CO₂原料に対する認証は行っていない^{1410、1411}
 - Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) による認証はバイオマスや、リサイクル品のほか「非生物学的な使用済み製品、副産物、または残渣を変換する生物変換プロセス」が対象に含まれており、CO₂の明記はないが、対象に含まれるとみられる¹⁴¹²
 - CO₂原料によるバイオものづくりの事業化で先行する LanzaTech は、RSB 認証を取得しているほか、中国において China Electronic Energy Saving Technology Association (CEESTA) によるカーボンフットプリントの削減を認証するカーボンラベルも取得^{1413,1414}
- r) 合成生物学における国際的なルール作りに関しては、標準化、および規制の面では、生命倫理、環境影響、公平な利益分配などの論点が存在し、国際的な議論が進められている
- 標準化に関する動きとして、ISO のような標準化団体に加え、民間や財団が研究機関を巻き込む形での議論が活発化
 - ◇ 国際標準化機構 (ISO) においても、ISO/TC 276「バイオテクノロジー」専門委員会において、バイオテクノロジーの国際標準の整備が進められている。¹⁴¹⁵
 - ◇ Schmidt Sciences 主催のワークショップ”Engineering Biology Metrics and Technical Standards for the Global Bioeconomy”において、バイオものづくり指標化と標準化に関する専門家らによる議論が実施され、2024 年 5 月に報告書が発表された¹⁴¹⁶
 - ◇ 2024 年 10 月には、NSF とそのパートナー機関は、グローバルセンターに投資をし、標準化を含むバイオエコノミー研究の支援を実施¹⁴¹⁷
 - 生命倫理 (Bioethics) に関わる国際的議論が UNESCO 傘下の国際生命倫理機関 (International Bioethics Committee) において実施されているが、ここ数年でバイオものづくりに大きく関わる議論は行われていない¹⁴¹⁸
 - 環境影響については、カルタヘナ議定書の責任と救済に関する名古屋・クアラルンプール補足議定書が 2018 年に発行され、国境を越えて移動した「遺伝子組換え生物」により発生した損害に対する責任と救済を規定されて以降、国際的なルールメイキングの動きはみられていないが、地域的な動きとして、特に規制が厳しい欧州において、ここ 20 年で急速に研究開発が進んだ新ゲノム技術に対応するための規制案が発表されるなど、法整備の議論が進められている¹⁴¹⁹
 - 生物多様性条約第 15 回締約国会議 (COP15) 遺伝資源のデジタル配列情報 (DSI) の使用から得られる利益が公正かつ衡平に配分に関する合意が行われており、次回

COP16 に向け、利益配分の具体的な方法、および DSI の定義や利用の範囲等について議論されることから、日本の国益確保に向けた十分な戦略的な対応が求められる¹⁴²⁰

- 2024 年には OECD や WEF 等の国際機関から、バイオエコノミー拡大への課題等に関するレポートが刊行されるなど、より議論の活発化が見られる^{1421,1422}

[20] 製造分野における熱プロセスの脱炭素化

[市場動向]

- a) 産業熱は世界のエネルギー需要の 24%を占めるが、その多くは化石燃料によって賄われているため、脱炭素電源の使用やグリーン水素などへの燃料転換が必要
- 世界のエネルギー需要のうち 2 割強を産業熱が占めており、そのうちの約半分を金属を取り扱う工業炉の温度領域¹⁴²³
- b) 本基金事業の主なターゲットは金属製品の製造で工業炉を使用する製造業における鋳造、鍛造、ダイカスト、熱処理などのプロセス
- 金属製品の一次加工および二次加工の製造業部門が国内工業炉の基数の 7 割を占める¹⁴²⁴
 - 鉄鋼と機械は国内の産業部門におけるエネルギー起源 CO₂ 排出量のうち過半を占めており¹⁴²⁵、排出量削減が今後の課題
- c) 工業炉の市場規模は 2028 年に 2 兆円弱に達し、脱炭素化の動きを背景に電気炉の割合が 4 割程度まで上昇すると予測されている¹⁴²⁶
- d) 主要自動車メーカーからの具体的な CO₂ 排出量削減目標達成の要請や、契約上でカーボンニュートラルを義務付けるなど強い脱炭素圧力を受け、自動車部品メーカーは積極的に CO₂ 排出量削減に向けた取り組みを進めており、熱プロセスを含めた製造プロセスの脱炭素化を目指す具体的な取り組みが顕在化
- トヨタ自動車は世界で売れる新車の CO₂ 排出量を 2035 年に 2019 年比で 50%以上削減することを目標に掲げており¹⁴²⁷、サプライヤーに対し、CO₂ 排出量の把握と排出量削減を要請¹⁴²⁸
 - Volkswagen はヨーロッパで生産される車両 1 台あたりの CO₂ 排出量を 2030 年までに 40%削減 (2018 年比) する「Way to ZERO」を掲げ¹⁴²⁹、電気自動車「ID.3」の部品供給企業には、部品製造時におけるカーボンニュートラルを契約中で義務付けており、他の車種へも同様の方針を拡げる予定¹⁴³⁰
 - Ford は 2035 年に SBTi 目標を達成、2050 年までにサプライチェーンを含め CN 達成を目標に掲げており、2022 年にサプライヤーの GHG 削減目標を調査、今後は共同でロードマップ作成等の支援を実施予定¹⁴³¹
 - デンソーは 2035 年 Scope 1・2 の CN 達成を目指して省エネ、再エネ電力導入、ガスの CN 化を推進しており、NEDO 支援の下で工業炉の水素燃焼技術の実証にも着手¹⁴³²
 - アイシンは 2035 年 Scope 1・2 の CN 達成を目指してエネルギー消費の最小化とクリーンエネルギー使用の取り組みを進行中で、工業炉の水素燃焼技術の実証にも着手¹⁴³³
 - ◇ 熱処理炉での検討においては、水素燃料はアルミニウム製品の水素脆化による加工性の不具合の課題、アンモニア燃料は炉内の温度分布の最適化などの品質面の課題を抱えており、アルミニウム溶解炉への応用を初期的ステップとして検討中
 - ◇ アンモニアを燃料コスト、調達性から有望視しており、グレーアンモニアの活用か

ら開始し、将来的にブルー/グリーンアンモニアへ転換することを計画

- e) 主要鉄鋼メーカーでは、CN化に向けては上工程の脱炭素化を主に取り組むが、下工程の製造プロセスの高効率化、エネルギー転換の取り組みも一部顕在化
 - ArcelorMittal はプラントエンジニアリング会社 Sarralle と共同で世界初の 100%グリーン水素取鍋予熱器の実証プロジェクトを実施¹⁴³⁴
- f) Thyssenkrupp は Danieli から供給を受け、天然ガスと水素を任意の混合比で燃焼可能な再加熱炉を導入し、2024 年内に稼働予定¹⁴³⁵金属製品を取り扱う熱プロセスにおいては、短期的な脱炭素化の取り組みとして電化が進められており、中長期的な取り組みとして電化では対応できない領域の水素等への燃料転換を進めている
 - ドイツ環境庁向けにドイツアーヘン工科大学が行った調査報告においては、電化困難なプロセスは高エネルギー密度を必要とする高温および高生産量のプロセスで、電化は既に広く対応可能であるが、多くの場合、初期投資とエネルギー費用が導入の障壁であるとしている¹⁴³⁶
- g) ブルー/グリーン水素およびアンモニアの供給インフラの整備が欧州を中心に進められており、工業炉の燃料転換を図る上では、安定的な供給確保も重要な観点
 - 現状、グリーン水素はブルー水素に比べて単位水素当たりの生産コストが高いものの、2030 年頃には同程度、2050 年頃には下回るレベル（0.7 ドル～1.6 ドル/kg）までコスト低減が実現する見込み¹⁴³⁷
 - 世界で計画中の水素製造プロジェクトのうち、製鉄を除く化学などの産業向けのキャパシティは 2030 年に約 7000 kt-H₂/年に達する見込みであるが¹⁴³⁸、化学業界の大手メーカーに比べ工業炉ユーザーはグリーン水素顧客としての優先度は低いと考えられるため、現時点で具体的な動きはないが、水素への燃料転換を図る上では供給確保に向けた動きも今後重要¹⁴³⁹
 - 欧州では、ガスインフラ会社 33 社が参画する団体が、天然ガスのパイプラインを再利用し、2040 年までに欧州内の水素パイプラインネットワークを構築する方針¹⁴⁴⁰であり、特にドイツでは、国内・欧州内の水素パイプライン構築に加え、将来的な水素への転用を想定した LNG インフラの建設も推進^{1441、1442}
 - ブルーアンモニアの価格は現在、9～25 ドル/GJ であり、エネルギーあたりの価格の観点で他の価格競争力があり、グリーンアンモニアも 2050 年までに 17～33 USD/GJ まで価格が低下する見込み¹⁴⁴³
 - アンモニアの生産量においては、IRENA は、2050 年時点での生産量は、グレーは約 50 百万トン、ブルーは約 70 百万トン、グリーンは約 570 百万トンとなり、8 割強がグリーンとなると予測¹⁴⁴⁴
 - アンモニアの需給においては、船舶用途のみでも 2030 年時点で 10～110 百万トンの需要が見込まれる一方¹⁴⁴⁵、稼働・計画中 PJ からの積み上げで生産量を算出すると 7 百万トンとなり¹⁴⁴⁶、供給不足が発生し、確保が困難になる可能性
- h) ブルー/グリーンアンモニアの供給網として、欧州では既存のアンモニアパイプラインの延

長が構想されており¹⁴⁴⁷、産業用電気価格が比較的高い地域では、電化による運用コスト増加が著しいため、燃料転換をより重視する傾向が強いと考えられる

- 各国の電源構成や、原料価格によって電気価格に差異があり、原子力を廃止しており、再エネ比率が高い（約4割）ドイツでは電気価格は150～200USD/MWh前後と高水準である一方で、原料に安価な自国産原料を利用可能な米国（天然ガス）や中国（石炭）では50～100USD/MWh前後と低水準^{1448、1449}

[技術動向]

- i) 各業界団体や各国公的機関においては、米国エネルギー省が熱プロセスの技術開発に関わる研究開発目標の設定している他、欧州では、**Research Fund for Coal and Steel (RFCS)**の援助の下で鉄鋼製造下工程の燃料転換に関わる実証プロジェクトが進行中
 - 米国エネルギー省は **Energy Earthshots Initiative** の一環で産業熱の脱炭素化を目指す **Industrial Heat Shot** を2022年に立ち上げ¹⁴⁵⁰
 - ◇ 目標として、2035年までに温室効果ガス排出量を少なくとも85%削減するコスト競争力のある産業用熱脱炭素技術を開発することを掲げる
 - ◇ 産業熱の3つの脱炭素化手段（電化、低排出熱源の統合、低熱または無熱プロセス技術の革新）に関わる研究開発を推進するとしており、燃料転換への言及は見当たらない
 - ◇ 実施体制としては、**IEDO** を含む関連 **DOE** 下部組織および **DOE** が所管する国立研究所が組織横断的（**All-hands-on-deck effort**）に目標達成に向けて取り組むとしている
 - ◇ 国立研究所が主導する **Industrial Heat Shot** に関連する研究テーマとして、製鉄プロセスにおける電気合成および、触媒化学プロセスの電化に関わるテーマが存在
 - 米国エネルギー省 **Advanced Manufacturing Office** 主導で実施された産業の熱プロセスの脱炭素化のための研究開発ギャップと機会を特定するためのワークショップの報告書において、電化技術の普及障壁として、電気需要対応やコスト増が挙げられている¹⁴⁵¹
 - ◇ 大学、公的研究機関、民間企業（熱プロセス利用産業、装置メーカー/商社）、NGO、各種有識者が参加
 - ◇ 本基金事業に関連する内容としては、「主要な金属における高温プロセス」グループにおける「代替エネルギー源技術」の技術方向性についてブレインストーミングセッションが実施されており、電化技術の普及障壁として電気需要対応やコスト増が挙げられている
 - 欧州では、**Research Fund for Coal and Steel (RFCS)**の援助の下、9つの企業・大学が共同で、鉄鋼分野の下工程の再加熱炉において水素燃焼を用いる実証プロジェクト **TWINGHY** を2023年～2027年の期間で実施中であり、デジタルツインを用いた運用制御も開発予定¹⁴⁵²

- j) 製造分野におけるシミュレーション・デジタルツイン技術の開発が各国で推進されており、海外工業炉メーカーにおける開発事例も顕在化している
- デジタルツインはデジタルデータをもとに物理的な製品をサイバー空間上で仮想的に複製する技術概念であり、各国では製造分野におけるデジタルツインのモデリング技術やプラットフォーム構築に関する技術開発を推進¹⁴⁵³
 - 海外メーカーによる工業炉のシミュレーションに関わるデジタルツイン開発の取り組みとしては、Fives の INTERFACE プロジェクトが存在¹⁴⁵⁴
 - ◇ 再加熱炉の高精度シミュレーションプラットフォームの開発を目的に CELSA、およびバルセロナスーパーコンピューティングセンターと共同で 2022 年～2024 年の期間で実施
 - ◇ センサーデータとシミュレーションに基づいてシステムの状態をほぼリアルタイムでシミュレーションおよび分析するための炉とそのコンポーネントのデジタルツイン開発を目指している
- k) 熱プロセスにおける水素/アンモニア燃焼に関わる学術論文報告は 2018 年以降活発化しており、増加傾向¹⁴⁵⁵
- 熱プロセスにおける水素燃焼に関わる学術論文数は 2014 年の 3 報から、2023 年は 11 報へ増加
 - 熱プロセスにおけるアンモニア燃焼に関わる学術論文数は 2014 年の 1 報から、2020 年以降は年 3～4 報で推移しており、増加
- l) 水素燃焼炉に関する特許出願は、2023 年頃から活発化¹⁴⁵⁶
- 2001 年以降の国別の出願件数は、中国が 255 件で最も多く、次いで日本が 75 件で、出願全体は 2023 年から活発化
 - 同期間における出願人別の出願件数において、上位は三菱重工、明電舎、中外炉工業など日系企業が目立っている
 - 国別の国際出願においては、日本が首位であり、中国は国内出願が突出して多い一方で、国際出願は 3 件と活発に行われている状況ではない
- m) アンモニア燃焼炉に関する特許出願件数は、2022 年頃から活発化¹⁴⁵⁷
- 2001 年以降の出願件数は、中国に次いで、日本、韓国で多く、中国を除くと 2022 年頃から活発化の傾向
 - 出願件数において、1 位の中外炉工業、3 位の川崎重工以外は中国系の企業・大学による出願が上位を占める
 - 国別の国際出願においては、日本が首位であり、中国は国内出願が突出して多い一方で、国際出願は 0 件と活発に行われている状況ではない
- n) 水素もしくはアンモニア燃焼と電気炉のハイブリッド運転技術に関する特許出願は見当たっていない¹⁴⁵⁸

[国際動向]

- o) 熱プロセスの脱炭素化に関わる研究開発においては、日本のみが燃料代替および電化推進の双方向で研究開発を実施しており、先導的
- 日本では本基金事業で、熱プロセスの燃料代替および、電化推進の双方向で研究開発を実施しており、先導的な立ち位置
 - 欧州では、ネットゼロ産業の競争力の強化計画の方向性を示す政策文章として、規制環境の改善、資金調達へのアクセス整備、ネットゼロ技術関連のスキル向上と人材プールの増強、公正な貿易と強靱なサプライチェーンの4つの政策を柱とする **Green Deal Industrial Plan** を2023年に発表、具体的法案として **Net-Zero Industrial Act** が2024年成立見込みであるが、方針が示された段階であり、研究開発イニシアティブは具体化していない¹⁴⁵⁹
 - 英国では、排出量やビジネスを海外移転することなく、ネット・ゼロ目標に沿いながら産業部門を繁栄させる方法、およびそのための政府の支援策を提示する **Industrial Decarbonization Strategy** を2021年に発表、熱プロセスに関わる施策として熱回収技術への投資促進や、燃料転換技術開発への開発資金援助等が存在しているが、補助金政策に留まっており、研究開発のイニシアティブは存在していない¹⁴⁶⁰
 - 米国では、2022年発表の **Industrial Decarbonization Roadmap** において5つのエネルギー集約型部門（鉄鋼、セメント・コンクリート、食品・飲料、化学工業、石油精製）に焦点を当て、これらの部門で排出量を削減するための4つの道筋を提示、ロードマップの実現に向けた総額1億400万ドルのプロジェクトへの資金提供も実施しているが、電化に重点を置いており、燃料代替に関わる国家的プロジェクトは見受けられない¹⁴⁶¹
 - ◇ IEDO は FY23 **Industrial Efficiency and Decarbonization Multi-Topic FOA** における8つのトピック分野に「産業用熱の脱炭素化」を設定しており、大学や民間企業から10テーマを採択し、最大300万ドルを援助¹⁴⁶²
 - ◇ IEDO は、現在募集中の資金援助プログラムのトピック分野の一つに「産業熱の電化」を設定しており、2024年後半に採択が発表される見込みであるため、注視が必要¹⁴⁶³
 - ◇ 熱プロセスに関わる研究開発イニシアチブである **Industrial Heat Shot** では、2035年までにGHG排出量を85%以上削減する産業用熱ソリューションの開発を目指す、燃料代替は取り組み内容に含まれていない¹⁴⁶⁴
 - 中国では、2021年発表の「工業グリーン発展に関する第14次5カ年計画」において、工業分野の脱炭素化のための主要な目標と各重点産業の取組を定めているが、熱プロセスに関わる施策としては省エネ熱処理炉、高効率熱再生バーナー、機械産業のグリーン熱処理への設備転換等、言及は限定的¹⁴⁶⁵

[ルールメイキング]

- p) 欧州や英国はカーボンリーケージを防ぐための炭素国境調整メカニズム（CBAM）の導入を

進め、高炭素排出製品の輸入に対する規制を強化する方針である一方で、米国では同様の動きは見られていない

- 欧州では、セメント、鉄・鉄鋼、アルミニウム、肥料、電力、水素など（将来的には化学品等も対象となる可能性）を対象に、カーボンリーケージを防ぐための CBAM を設置し、輸入品の EU-ETS 相当の炭素価格の支払いを 2026 年から義務付け¹⁴⁶⁶
 - 英国では、アルミニウム、セメント、セラミック、肥料、ガラス、水素、鉄鋼を対象に、新たな CBAM を 2027 年までに導入予定であり、具体的な対象製品を含めた制度設計や実施に関しては、2024 年中により詳細な意見公募を実施する予定¹⁴⁶⁷
 - 米国では、CBAM の前提となる連邦レベルでの炭素価格や、炭素税制度が存在せず（カリフォルニア州など一部の州レベルで存在）、規制導入については消極的で、新たな動きは顕在化していない¹⁴⁶⁸
- q) 熱プロセスに関して、各国の標準化団体および国際標準化機構において、燃焼プロセスの安全性について規定されているため、代替燃料の使用においても準拠が必要
- 北米では NFPA（全米防火協会）が、NFPA 86-2019 Standard For Ovens And Furnaces において加熱システムの構造やと安全性について規定
 - 欧州では CEN(欧州標準化委員会)が CEN/TC 186: Harmonized Standards for Industrial Thermoprocessing equipment (ITPE)下で EN 746 Part 2: (10:2010) Safety requirements for combustion and fuel handling systems 等において、燃焼および燃料ハンドリングについての安全性について規定
 - 世界標準としては、ISO（国際標準化機構）が ISO 13577-2:2023 Industrial furnaces and associated processing equipment Safety Part 2: Combustion and fuel handling systems において、燃焼および燃料処理システムの安全性について規定

出所

- ¹ IEA 「World Energy Outlook 2024」 (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>)
- ² IRENA 「World Energy Transitions Outlook」 (<https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>)
- ³ Bloomberg New Energy Finance 「New Energy Outlook 2024」 (<https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>)
- ⁴ IRENA 「Future of wind」 (<https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>)
- ⁵ GWEC 「Wind Turbine Manufacturers See Record Year Driven by Growth in Home Markets」 ([https://gwec.net/wind-turbine-manufacturers-see-record-year-driven-by-growth-in-home-markets/#:~:text=A%20total%20of%2023%2C833%20wind,%2C%20the%20US%2C%20and%20Europe.\)](https://gwec.net/wind-turbine-manufacturers-see-record-year-driven-by-growth-in-home-markets/#:~:text=A%20total%20of%2023%2C833%20wind,%2C%20the%20US%2C%20and%20Europe.)))
- ⁶ WFO 「Global Offshore Wind Report 2021/2022/2023」 (<https://wfo-global.org/knowledge/reports/>)
- ⁷ GWEC 「Global Offshore Wind Report 2020/2024」 (<https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2024/>)
- ⁸ Rystad Energy 「Shortage looming as Europe’s demand for offshore wind towers to surpass manufacturing capacity by 2028」 (<https://w3.windfair.net/wind-energy/pr/44617-rystad-energy-offshore-wind-turbine-europe-manufacturing-capacity-tower-component>)
- ⁹ 日本船用工業会 「ASEAN 及びオセアニアの主要国における洋上風力発電の状況調査」 (<https://www.jstra.jp/PDF/64bcfa3e4f67c4fa8f62f6fe5f1db15d664c0265.pdf>)
- ¹⁰ 日本船用工業会 「ベトナム・フィリピン・オーストラリアにおける洋上風力発電の動向調査」 (https://www.jstra.jp/PDF/report9_2023.pdf)
- ¹¹ Integral 「China’s Renewable Energy: Offshore Wind Takes Off, What Does the Future Hold? (2022/5/9)」 (<https://www.integralnewenergy.com/?p=34818>)
- ¹² JOGMEC 「ベトナム：第8次国家電力開発基本計画（PDP 8）決定、2050年に再生可能エネルギー約70%、石炭火力を全廃し移行期にガス火力の展開を図る野心的な目標」 (https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1009585/1009795.html)
- ¹³ Allens 「Key insights into draft Electricity Law and PDP8 Implementation Plan」 (<https://www.allens.com.au/insights-news/insights/2024/04/key-insights-to-vietnams-draft-electricity-law-and-pdp8-implementation-plan/>)
- ¹⁴ World Bank Data Catalog 「Global Offshore Wind Technical Potential」 (<https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0037787/Global-Offshore-Wind-Technical-Potential>)
- ¹⁵ 有識者インタビュー

-
- 16 有識者インタビュー
- 17 Vestas 「Annual Report 2022」 (<https://www.vestas.com/en/media/company-news/2023/vestas-annual-report-2022---a-challenging-year-with-neg-c3710817>)
- 18 Wind Europe 「Decision to extend EU steel safeguard will worsen pressure on costs」 (<https://windeurope.org/newsroom/press-releases/decision-to-extend-eu-steel-safeguard-will-worsen-pressure-on-costs/#:~:text=Higher%20steel%20prices%20increase%20the%20costs%20of%20making%20towers&text=WindEurope%20Chief%20Policy%20Officer%20Pierre%20Tardieu.>)
- 19 IRENA 「Renewable Power Generation Costs in 2023」 (https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf)
- 20 Linklaters 「U.S. BOEM Announces Second Offshore Wind Auction in the Gulf of Mexico」 (<https://www.linklaters.com/en/knowledge/publications/alerts-newsletters-and-guides/2024/march/26/us-boem-announces-second-offshore-wind-auction-in-the-gulf-of-mexico>)
- 21 JETRO 「英政府、次期再エネ支援スキーム CfD オークションの上限価格引き上げを発表」 (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/11/202a6155af56c219.html>)
- 22 Renewables 「GE to focus on 'workhorse' 15.5MW Haliade-X」 (<https://renews.biz/91439/ge-to-focus-on-workhorse-155mw-haliade-x/>)
- 23 Evwind 「Siemens Gamesa will install a wind turbine of around 21 MW and between 270 and 280 meters in rotor diameter」 (<https://www.evwind.es/2024/04/23/siemens-gamesa-will-install-a-wind-turbine-of-around-21-mw-and-between-270-and-280-meters-in-rotor-diameter/98039>)
- 24 WETO(DOE)、NOWRDC、Carbon Trust、EU、Offshore Wind Innovation Hub 等の HP
- 25 NEDO HP
- 26 洋上風力発電施設検討委員会 「洋上風力発電に関する技術基準の統一的解説」
- 27 DNV 「Overview of offshore wind standards and certification requirements in selected countries」
- 28 BSMI 「Offshore Wind Farm (OWF) Third Party Certification and Certification Review System」
- 29 World Bank 「Offshore Wind Roadmap for Vietnam」
- 30 有識者インタビュー
- 31 IRENA 「Floating Offshore Wind Outlook」 (https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_G7_Floating_offshore_wind_outlook_2024.pdf)
- 32 Quest Floating Wind Energy 「Floating Wind Projects MAP 2024-2025」

(<https://questfwe.com/map-2024/>)

³³ 4C Offshore 「Global Offshore Wind Farm Database And Intelligence」

(<https://www.4coffshore.com/windfarms/>)

³⁴ Recharge 「New-look floating wind platform for world's largest sector project seals 'detailed design」」 (<https://www.rechargenews.com/wind/new-look-floating-wind-platform-for-worlds-largest-sector-project-seals-detailed-design/2-1-1397289>)

³⁵ Technip Energie 「Floating Offshore Wind Delivering assurance with end-to-end solutions」 (https://www.ten.com/sites/energies/files/2023-01/Floating_offshore_wind_brochure.pdf)

³⁶ Power Technology 「Ulsan Floating Offshore Wind Project, South Korea」

(<https://www.power-technology.com/projects/ulsan-floating-offshore-wind-project-south-korea/>)

³⁷ OffshoreWIND.biz 「Saitec Unveils Plans for 50 MW Floating Wind Farm Offshore Spain」 (<https://www.offshorewind.biz/2022/06/02/saitec-unveils-plans-for-50-mw-floating-wind-farm-offshore-spain/>)

³⁸ OffshoreWIND.biz 「Danish Consortium Setting Up Test Lab for 20 MW Floating Wind Turbines」 (<https://www.offshorewind.biz/2023/10/26/danish-consortium-setting-up-test-lab-for-20-mw-floating-wind-turbines/>)

³⁹ DOE 「FLoating Offshore Wind ReadINess (FLOWIN) Prize」

(<https://www.herox.com/FLOWIN>)

⁴⁰ BVG Associates 「Guide to a Floating Offshore Wind Farm」

(<https://guidetofloatingoffshorewind.com/wind-farm-costs/>)

⁴¹ DOE 「Offshore Wind Market Report 2023 Edition」

(<https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-09/doe-offshore-wind-market-report-2023-edition.pdf>)

⁴² WFO 「Floating Offshore Wind Dynamic Cable: Overview of Design and Risks」

(<https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2024/02/WFO-Cables-and-FOSS-White-Paper.pdf>)

⁴³ Carbon Trust 「132kV array cable requirements and the need for improved testing standards」 (<https://www.carbontrust.com/our-work-and-impact/guides-reports-and-tools/132-kv-array-cable-requirements-and-the-need-for-improved-testing-standards>)

⁴⁴ Deep Wind Offshore 「Deep Wind Offshore has been granted €1million by Enova」

(<https://www.deepwindoffshore.com/news/deep-wind-offshore-has-been-granted-eu1-million-by-enova>)

⁴⁵ Euro access 「HVAC, HVDC and High-Power cable systems」 (<https://www.euro-access.eu/en/calls/787/HVAC-HVDC-and-High-Power-cable-systems>)

⁴⁶ OffshoreWIND.biz 「Eolink, Kranendonk Eye Floating Wind Foundation Gigafactory」

(<https://www.offshorewind.biz/2021/04/27/eolink-kranendonk-eye-floating-wind-foundation-gigafactory/>)

47 Carbon Trust 「Floating Wind JIP Phase IV summary report」

(<https://www.carbontrust.com/our-work-and-impact/guides-reports-and-tools/floating-wind-joint-industry-programme-phase-iv-summary-report>)

48 Odjell oceanwind 「Odjell Oceanwind addresses floating wind bottleneck and creates Windsteel Technologies」 (<https://knowledge.odjelloceanwind.com/odjell-oceanwind-addresses-floating-wind-bottleneck-and-creates-windsteel-technologies-as>)

49 OffshoreWIND.biz 「BW Ideol Unveils Mass Production-Ready Floating Wind Foundation」 (<https://www.offshorewind.biz/2024/04/26/bw-ideol-unveils-mass-production-ready-floating-wind-foundation/>)

50 Business Norway 「Archer Wind industrialises floating offshore wind foundations」 (<https://businessnorway.com/solutions/archer-wind-industrialises-floating-offshore-wind-foundations>)

51 WFO 「Mooring Systems for Floating Offshore Wind: Integrity management Concepts, Risks and Mitigation」 (<https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2023/01/Mooring-Systems-White-Paper.pdf>)

52 DNV 「DNV launches joint industry project on ground investigations for offshore wind turbine」 (<https://www.dnv.com/news/dnv-launches-joint-industry-project-on-ground-investigations-for-offshore-wind-turbines/>)

53 NOWRD 「Innovative Deepwater Mooring Systems for Floating Wind Farms」 (<https://nationaloffshorewind.org/projects/innovative-deepwater-mooring-systems-for-floating-wind-farms-deepfarm/>)

54 WFO 「Floating Offshore Wind Dynamic Cables: Overview of Design and Risks」 (<https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2024/02/WFO-Cables-and-FOSS-White-Paper.pdf>)

55 EU Cordis 「Innovative offshore wind technologies in deep waters」 (<https://cordis.europa.eu/project/id/101084321/results>)

56 WETO 「Wind Resource Assessment and Characterization」 (<https://www.energy.gov/eere/wind/wind-resource-assessment-and-characterization>)

57 Plymouth University 「Cyber-Resilience of Offshore Wind Networks (CROWN)」 (<https://www.plymouth.ac.uk/research/crown-cyber-resilience-of-offshore-wind-networks>)

58 NREL 「Wind Cybersecurity」 (<https://www.nrel.gov/wind/cybersecurity.html>)

59 Carbon Trust 「Offshore Wind Sustainability JIP」 (<https://www.carbontrust.com/our-work-and-impact/impact-stories/offshore-wind-sustainability-jip>)

60 JST Science Portal 「14次五カ年計画及び2035年までの長期目標綱要」 (https://spc.jst.go.jp/policy/national_policy/downloads/r_gvm_2022.pdf)

-
- 61 「8 个风电项目方向！2023 年度国家重点研发计划重点专项」
(<http://m.eastwp.net/news/show.php?itemid=68685>)
- 62 「2024 年度国家重点研发计划风电研发专项公布！」
(<http://mm.chinapower.com.cn/flfd/hyyw/20240816/257779.html>)
- 63 経済産業省「令和 2 年度エネルギー需給構造高度化対策に関する調査事業」
(https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2020FY/000410.pdf)
- 64 KISTEP 「브리프 해상 풍력발전」
(https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306040000&bid=0031&list_no=43110&act=view)
- 65 OffshoreWind.biz 「Vestas and Maersk to Build Offshore Wind Hub in South Korea」
(<https://www.offshorewind.biz/2024/04/22/vestas-and-maersk-to-build-offshore-wind-hub-in-south-korea/>)
- 66 Equinor 「Equinor signs MoU with Siemens Gamesa and Doosan Enerbility on Ulsan Bandibuli Floating Offshore Wind Project」 (<https://www.equinor.co.kr/en/news/equinor-signs-mou-with-siemens-gamesa-and-doosan-enerbility-on-ulsan-bandibuli-floating-offshore-wind-project>)
- 67 GWEC 「Global Wind Report 2024」 (https://gwec.net/wp-content/uploads/2024/04/GWR-2024_digital-version_final-1.pdf)
- 68 韓国エネルギー公団「韓国洋上風力発電のサプライチェーンの現状」
(https://www.energy.or.kr/energy_issue/mail_vol239/pdf/issue_342_03_all.pdf)
- 69 OffshoreWIND.biz 「Siemens Gamesa Produces First 14 MW Wind Turbine Nacelle Outside Europe」 (<https://www.offshorewind.biz/2024/11/12/siemens-gamesa-produces-first-14-mw-wind-turbine-nacelle-outside-europe/>)
- 70 Energy Watch 「Vestas will not invest in upgrade of Taiwan factory」
(<https://energywatch.com/EnergyNews/Renewables/article17256598.ece>)
- 71 JETRO 「洋上風力発電の開発事業者に対する現地調達要求を緩和」
(<https://www.jetro.go.jp/biznews/2024/11/bfb4165a9c19ce57.html>)
- 72 有識者インタビュー
- 73 DNV 「Offshore Wind Regulations」 (<https://www.dnv.com/publications/offshore-wind-regulations-235148/>)
- 74 CATAPULT 「Floating Offshore Wind-Application of Standards, Regulations, Project certification and Classification-Risks and Opportunities」 (https://fowcoe.co.uk/wp-content/uploads/2023/09/PN000405-RPT-002-D1-FOW-Standards-Certification-and-Classification-Mapping-Report_Formatted.pdf)
- 75 ABS 「Offshore Substations and Electrical Service Platforms」
(<https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/offshore/339-requirements-for-offshore-substations-and-electrical-service-platforms/339-offshore->

substations-reqts-jun23.pdf)

76 Bureau Veritas 「NI691 Environmental Conditions, Loads and Induced Responses of Marine Units」 (<https://marine-offshore.bureauveritas.com/ni691-environmental-conditions-loads-and-induced-responses-marine-units>)

77 GWEC 「Global Wind Report 2023」 (<https://gwec.net/globalwindreport2023/>)

78 European Council 「Industrial policy: Council gives final approval to the net-zero industry act」 (<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/05/27/industrial-policy-council-gives-final-approval-to-the-net-zero-industry-act/>)

79 Wind Europe 「EU enshrines tighter pre-qualification criteria for wind farms in law」 (<https://windeurope.org/newsroom/press-releases/eu-enshrines-tighter-pre-qualification-criteria-for-wind-farms-in-law/>)

80 JETRO 「欧州委、風力発電の整備加速に向けた行動計画発表」 (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/10/77b09ba805501370.html>)

81 JETRO 「欧州委のベスタエア―執行副委員長、中国製風力タービン調査を発表」 (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2024/04/a8b73f9b05e13923.html>)

82 IEA 2024 年 4 月 “PVPS 報告書” (<https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2024/>)

83 IRENA 2023 年 6 月 “WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2023” (https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Mar/IRENA_WETO_Preview_2023.pdf?rev=2ca35086907b42cca651b0179a7c639c)

84 IEA 2024 年 10 月 “World Energy Outlook 2024” (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024?language=en>)

85 資源総合システム 2023 年 2 月 1 日 “太陽光発電主力電源化推進技術開発／動向調査等／太陽光発電の技術および産業・市場動向調査（含、国際技術協力プログラムへの参画）” (<https://www.nedo.go.jp/content/100963948.pdf>)

86 電力事業連合会 2023 年 11 月 6 日 ”【EU】各国のエネルギー事情を踏まえた再エネと原子力を含むその他の低炭素エネルギー源の共存” (https://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1261344_4115.html)

87 ジェトロ 2022 年 5 月 20 日 “欧州委、ロシア産化石燃料依存からの脱却計画「リパワー EU」の詳細発表” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/05/aa40178dd246ac03.html>)

88 United States Department of Energy 2021 年 9 月 “Solar Future study” (<https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/Solar%20Futures%20Study.pdf>)

89 Solar Journal 2021 年 11 月 6 日 “米脱炭素化で高まるソーラーの貢献。拡大する電化で、電力需要の 45%を供給” (<https://solarjournal.jp/information/43301/>)

90 SOLARBE 2021 年 9 月 7 日 “发改委能源研究所：到 2050 年，光伏将成我国第一大电源” (<https://news.solarbe.com/202109/07/343514.html#:~:text=%E5%88%B02050%E5%B9%>)

[B4%EF%BC%8C%E5%85%89%E4%BC%8F%E5%B7%B2%E6%88%90%E4%B8%BA%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E7%9A%84%E7%AC%AC%E4%B8%80%E5%A4%A7%E7%94%B5%E6%BA%90%EF%BC%8C%E5%85%89%E4%BC%8F%E5%8F%91%E7%94%B5%E6%80%BB%E8%A3%85%E6%9C%BA%E8%A7%84%E6%A8%A1%E8%BE%BE%E5%88%B050%E4%BA%BF%E5%8D%83%E7%93%A6.%285000GW%EF%BC%8C%E7%9B%B8%E5%BD%93%E4%BA%8E2020%E5%B9%B4%E5%BA%95%E7%9A%8419.8%E5%80%8D%29%EF%BC%8C%E5%8D%A0%E5%85%A8%E5%9B%BD%E6%80%BB%E8%A3%85%E6%9C%BA%E7%9A%8459%25%EF%BC%8C%E5%85%A8%E5%B9%B4%E5%8F%91%E7%94%B5%E9%87%8F%E7%BA%A6%E4%B8%BA6%E4%B8%87%E4%BA%BF%E5%8D%83%E7%93%A6%E6%97%B6%EF%BC%8C%E5%8D%A0%E5%BD%93%E5%B9%B4%E5%85%A8%E7%A4%BE%E4%BC%9A%E7%94%A8%E7%94%B5%E9%87%8F%E7%9A%8439%25%E3%80%82https://wenku.solarbe.com/p-22437.html\)](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/003_05_00.pdf)

- 91 資源エネルギー庁 2021年10月14日 “2030年に向けた今後の再エネ政策”
(https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/community/dl/05_01.pdf)
- 92 資源エネルギー庁 2023年6月21日 “今後の再生エネルギー政策について”
(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/052_01_00.pdf)
- 93 科学技術振興機構 2021年6月 “海上で太陽光発電供給へ シンガポール、巨大な浮体式発電所設置”
(https://spap.jst.go.jp/asean/news/210601/topic_na_06.html)
- 94 EITP 2021年5月 “European Strategic Research and Innovation Agenda for PV” [sriapy-fullreport_web.pdf](https://www.eitp.eu/fullreport_web.pdf) (etip-pv.eu)
- 95 産総研マガジン 2022年11月24日 “ペロブスカイト太陽電池”
(https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20221124.html)
- 96 NHK Web 2023年5月25日 “日本発の太陽電池「ペロブスカイト」どこがすごい?”
(<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20230525/k10014076631000.html>)
- 97 富士経済 2023年3月30日 “2023年版 太陽電池関連技術・市場の現状と将来展望”
(<https://www.fuji-keizai.co.jp/file.html?dir=press&file=23037.pdf&nocache>)
- 98 資源総合システム 2022年3月30日 “日本市場における2030年に向けた太陽光発電導入量予測 (2022年版)”
(https://www.rts-pv.com/news/202203_9775/)
- 99 澎湃新聞 澎湃号 湃客 2023年7月20日 “未来30年分布式光伏将增长18倍，中国的屋顶够用吗?”
(https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_23919909)
- 100 NEDO グリーンイノベーション基金事業/次世代型太陽電池の開発 WG 報告資料 2022年11月29日
(https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/003_05_00.pdf)
- 101 NREL “Champion Photovoltaic Module Efficiency Chart”
(<https://www.nrel.gov/pv/pvdp/>)

-
- ¹⁰² Taiyang news 2023年7月25日 “UtmoLight’s Perovskite Module Efficiency Included In NREL & More From Sineng Electric, GCL Integration, SPIC, NEA”
(<https://taiyangnews.info/markets/china-solar-pv-news-snippets-54/>)
- ¹⁰³ Perovskite info 2023年6月1日 <https://www.perovskite-info.com/kaust-team-announces-337-efficiency-perovskitesilicon-tandem-solar-cell>
- ¹⁰⁴ 産総研マガジン 2022年11月24日 “ペロブスカイト太陽電池とは”
(https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20221124.html#tid-7)
- ¹⁰⁵ Perovskite-info 2023年2月14日 “KAUST team reports results of one-year outdoor testing of perovskite/silicon tandem solar cells” ([KAUST team reports results of one-year outdoor testing of perovskite/silicon tandem solar cells | Perovskite-Info](#))
- ¹⁰⁶ GCL PEROVSKITE 2024年10月12日 “Large size, higher efficiency and stability”——GCL Perovskite is certified by TÜV Rhein IEC 61215 and IEC 61730” (<https://www.gcl-perovskite.com/en/xw/290.html>)
- ¹⁰⁷ Pv Magazin 2024年11月13日, “UtmoLight unveils 450 W perovskite solar module with 16.1% efficiency” (<https://www.pv-magazine.com/2024/11/13/utmolight-unveils-450-w-perovskite-solar-module-with-16-1-efficiency/>)
- ¹⁰⁸ 経済産業省 2024年2月29日 “令和5年度 エネルギー需給構造高度化対策調査等事業”
- ¹⁰⁹ Merck 2018 “ペロブスカイト太陽電池の基礎”
(<https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/technical-documents/technical-article/materials-science-and-engineering/photovoltaics-and-solar-cells/zknk-psc>)
- ¹¹⁰ Européan commission 2023年9月1日閲覧 “Funding & tender opportunities”
(<https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-search;callCode=null;freeTextSearchKeyword=;matchWholeText=true;typeCodes=1,0;statusCodes=31094501,31094502,31094503;programmePeriod=2021%20-%202027;programCcm2Id=43108390;programDivisionCode=null;focusAreaCode=null;destinationGroup=null;missionGroup=null;geographicalZonesCode=null;programmeDivisionProspect=null;startDateLte=null;startDateGte=null;crossCuttingPriorityCode=null;cpvCode=null;performanceOfDelivery=null;sortQuery=sortStatus;orderBy=asc;onlyTenders=false;topicListKey=topicSearchTablePageState>)
- ¹¹¹ United States Department of Energy 2024年12月25日閲覧 “Solar Research and Development Funding Programs” (<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-research-and-development-funding-programs>)
- ¹¹² NEDO 2022年6月 “国家発展改革委員会 国家エネルギー局 財政部 自然資源部 生態環境部 住宅都市農村建設部 農業農村部 中国気象局 国家林業草原局 「第14次5か年」再生可能エネルギー発展計画の印刷配布に関する通知”
(<https://www.nedo.go.jp/content/100952924.pdf>)

-
- 113 US MAP website 2023 年 9 月 11 日閲覧 (<https://www.usa-perovskites.org/about>)
- 114 EPKI 2019 年 10 月 “Perovskite-based photovoltaics:A unique chance for European PV-industry”
(<https://www.bing.com/search?q=EPKI+White+Paper+v2.pdf&form=ANNH01&refig=779ff3afde6749b1bc0a1f41da823a56>)
- 115 Pepperoni project website 2023 年 9 月 28 日閲覧 (<https://pepperoni-project.eu/network/>)
- 116 PACT 公式 HP 2024 年 12 月 18 日閲覧 (<https://pvpact.sandia.gov/>)
- 117 IEC 2019 年 7 月 8 日 “Measurement protocols for photovoltaic devices based on organic, dye-sensitized or perovskite materials” (<https://webstore.iec.ch/publication/64040>)
- 118 U.S. International Trade Commission 2024 年 11 月 “Photovoltaic Circularity: Solar Panel Recycling and End-of-Life Considerations”
(https://www.usitc.gov/publications/332/executive-briefings/ebot_gracia_sardana_solar_panel_circularity.pdf)
- 119 U.S. Environmental Protection Agency 2024 年 12 月 18 日閲覧 “End-of-Life Solar Panels: Regulations and Management” (<https://www.epa.gov/hw/end-life-solar-panels-regulations-and-management>)
- 120 U.S. Department of Energy 2024 年 12 月 18 日閲覧 “Photovoltaics (PV) End-of-Life (EOL) Action Plan” (<https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-10/2024%20SETO%20PV%20EOL%20Action%20Plan%20Update%20Webinar%20-%20Agency%20Slides.pdf>)
- 121 PV Tech 2023 年 10 月 21 日 “China to build solar recycling system by 2025”
([https://www.pv-tech.org/china-to-build-solar-recycling-system-by-2025/#:~:text=In%20an%20announcement%20by%20the%20National%20Development%20and,decommissioned%20equipment%20in%20solar%20PV%20plants%20by%202025.\)](https://www.pv-tech.org/china-to-build-solar-recycling-system-by-2025/#:~:text=In%20an%20announcement%20by%20the%20National%20Development%20and,decommissioned%20equipment%20in%20solar%20PV%20plants%20by%202025.)))
- 122 IEA PVPS 2022 年 7 月 “Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task 12 Countries” (<https://iea-pvps.org/key-topics/status-of-pv-module-recycling-in-selected-iea-pvps-task12-countries/>)
- 123 IEA 2024 年 11 月 “Meeting Power System Flexibility Needs in China by 2030”
(<https://www.iea.org/reports/meeting-power-system-flexibility-needs-in-china-by-2030>)
- 124 富士経済「エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望 2023 ESS・定置用蓄電池分野編」
- 125 U.S. Energy Information Administration 2024 年 12 月 26 日 “Batteries are a fast-growing secondary electricity source for the grid”
- 126 U.S. Energy Information Administration 2024 年 12 月 26 日 “U.S. battery storage capacity expected to nearly double in 2024”
- 127 IEA 2024 年 4 月 “Batteries and Secure Energy Transitions”
(<https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>)

-
- 128 経済産業省 2023年2月 “定置用蓄電システムの普及拡大策の検討に向けた調査”
(https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2020FY/000647.pdf)
- 129 資源総合システム 2022年11月 “太陽光発電海外市場レポート 2022年版 ～海外主要市場と新興市場～” (<https://www.rts-pv.com/wp-content/uploads/2023/05/Overseas-Sample-2022.pdf>)
- 130 ロイター 2022年11月11日 “米、中国製太陽光発電部品 1000件超を輸入差し止め ウイグル巡り” (<https://jp.reuters.com/article/usa-solar-forced-labor-idJPKBN2S10I6>)
- 131 ジェトロ 2022年8月16日 “米ウイグル強制労働防止法、太陽光発電製品の輸入差し止めか、メディア報道” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/08/99fe29589c41635a.html>)
- 132 ジェトロ 2022年2月7日 “バイデン米大統領、太陽光発電製品輸入へのセーフガードを4年間延長” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/02/5e5f2f03d44900b2.html>)
- 133 日本経済新聞 2018年1月23日 “米、16年ぶり緊急輸入制限 太陽光など中国勢に対抗”
(<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO26014850T20C18A1MM0000/>)
- 134 ESMC 2022年12月15日 “New McKinsey Report: Building a competitive solar-PV furnish chain in Europe” (<https://vasti.eu.org/mckinsey-report-on-solar-industry>)
- 135 Rhodium Group - MIT CEEPR 2024年8月7日 “Clean Investment Monitor: Tallying the Two-Year Impact of the Inflation Reduction Act” (<https://rhg.com/research/clean-investment-monitor-tallying-the-two-year-impact-of-the-inflation-reduction-act/>)
- 136 電子デバイス産業新聞 2022年10月28日 “欧米で太陽電池の生産回帰、中国依存からの脱却模索” (<https://www.sangyo-times.jp/article.aspx?ID=7893>)
- 137 ジェトロ 2023年2月3日 “欧州委、米インフレ削減法に対抗するグリーン・ディール産業計画を発表” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/02/61fa6e9285deed7f.html>)
- 138 ジェトロ 2023年3月20日 “欧州委、グリーン・ディール産業計画の規制緩和策のネットゼロ産業法案を発表” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/03/ec1b743971c623b9.html>)
- 139 一般財団法人 日欧産業協力センター 2023年5月 “グリーンディール産業計画とネットゼロ産業法案” (https://ja.eu-japan.eu/sites/default/files/publications/docs/EU-Green-Deal_green%20deal%20industrial%20plan%20and%20net%20zero%20industry%20act_23_1.pdf)
- 140 Pv magazine,” EU solar installations hit 65.5 GW in 2024, says SolarPower Europe”, 2024/12/18 ([https://www.pv-magazine.com/2024/12/18/eu-solar-installations-hit-65-5-gw-in-2024-says-solarpower-europe/#:~:text=Solar%20installations%20grew%204%25%20year,installations%20from%20025%20to%202028.\)](https://www.pv-magazine.com/2024/12/18/eu-solar-installations-hit-65-5-gw-in-2024-says-solarpower-europe/#:~:text=Solar%20installations%20grew%204%25%20year,installations%20from%20025%20to%202028.)))
- 141 Fortune INDIA, “The future of solar manufacturing in India”, 2024/12/28
(<https://www.fortuneindia.com/opinion/the-future-of-solar-manufacturing-in-india/119747>)
- 142 Renewable Watch,” AISMA Announces Historic Milestone of 60 GW Installed Solar

Module Manufacturing Capacity”,2023/11/9 (<https://renewablewatch.in/2023/11/09/aisma-announces-historic-milestone-of-60-gw-installed-solar-module-manufacturing-capacity/>)

143 JETRO,” 主要 10 分野で生産連動型優遇策 (PLI) を導入”,2020/11/17

(<https://www.jetro.go.jp/biznews/2020/11/0544579505b028fc.html>)

144 ACAP,” SOLAR PANEL END-OF-LIFE MANAGEMENT IN AUSTRALIA”,2024/3

(<https://www.acap.org.au/post/solar-panel-recycling-end-of-life-management-scoping-study>)

145 Pv magazine,” Australia targets 20% market share with domestic solar module manufacturing”,2024/3/23 (<https://www.pv-magazine.com/2024/05/23/australia-targets-20-market-share-with-domestic-solar-module-manufacturing/>)

146 IEA 「Global Hydrogen Review 2023」

147 有識者インタビュー

148 IEA Hydrogen Projects Database(2022/10 公開データ、2023/10 公開データ)

149 IRENA 「Green Hydrogen Cost Reduction」

150 カーネル大学法科大学院 Website <https://www.law.cornell.edu/uscode/text/26/45V>

151 Hydrogen Council 「Hydrogen Insights 2023」 (2023/5)

152 IEA 「Energy Technology Perspectives 2023」

153 Hydrogenius LOHC Technologies

154 IRENA 「Global Hydrogen Trade To Meet 1.5°C Climate Goal Part II」

155 DOE <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-03/Liquid%20H2%20Workshop-CBandI.pdf>

156 <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/gtt-totalenergies-lmg-marin-and-bureau-veritas-join-forces-develop-large-scale-lh2-carrier>

157 <https://www.offshore-energy.biz/dnv-okays-hd-ksoes-hydrogen-system-for-liquefied-hydrogen-carrier/>

158 <https://www.linde.com/news-media/press-releases/2021/linde-starts-up-new-liquid-hydrogen-plant-in-texas> (2021 年 7 月ニュースリリース)

159 https://engineer.fabcross.jp/archieve/230414_mf-hydra.html

160 <https://usa.airliquide.com/air-liquide-inaugurates-us-its-largest-liquid-hydrogen-production-facility-world> (2022 年 5 月ニュースリリース)

161 <https://www.airliquide.com/group/press-releases-news/2023-02-02/air-liquide-and-totalenergies-join-forces-develop-network-over-100-hydrogen-stations-heavy-duty>

162 日本経済新聞「商船三井、豪エネルギー会社「WOODSIDE」と韓国造船・船社の3社と覚書を締結し液化水素輸送共同検討に参画」

https://www.nikkei.com/article/DGXZRSP668374_U4A210C2000000/

163 海事プレス ONLINE 「HD 現代、シェルと液化水素船を共同開発へ」

<https://www.kaijipress.com/news/shipbuilding/2024/05/184410/>

¹⁶⁴ CSIRO 「Darwin Green Liquid Hydrogen (LH2) Export Project」

<https://research.csiro.au/hyresource/darwin-green-liquid-hydrogen-lh2-export-project/>

¹⁶⁵ <https://engineering.airliquide.com/technologies/hydrogen-liquefaction>

¹⁶⁶ <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/liquid-hydrogen-technologies-workshop>

¹⁶⁷ <https://hydrogenious.net/vopak-and-hydrogenious-lohc-technologies-jointly-take-hydrogen-logistics-to-the-next-level/>

¹⁶⁸ <https://fuelcellworks.com/news/worldwide-novelty-hydrogenious-supplies-hydrogen-filling-station-in-erlangen-germany-via-liquid-organic-hydrogen-carriers/>

¹⁶⁹ <https://www.chemengonline.com/lhyts-hydrogen-transport-project-will-span-rotterdam-to-scotland/>

¹⁷⁰ <https://www.worldoil.com/news/2023/1/13/uae-and-the-netherlands-partner-to-develop-green-hydrogen-supply-chain-through-amsterdam/> (2023年1月ニュース)

¹⁷¹ IEA 「Hydrogen Production and Infrastructure Projects

Database」<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>、MIZUHO 「Ammonia cracking technology development

[https://www.mizuhogroup.com/binaries/content/assets/pdf/mizuho-](https://www.mizuhogroup.com/binaries/content/assets/pdf/mizuho-bank/insights/industry/msif_229.pdf)

[bank/insights/industry/msif_229.pdf](https://www.mizuhogroup.com/binaries/content/assets/pdf/mizuho-bank/insights/industry/msif_229.pdf)、各種種公開情報

¹⁷² Siemens, Engie, Science & Technology Facilities Council, Ecuity 「Ammonia to Green Hydrogen Project Feasibility Study」

[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/880826/HS420 - Ecuity - Ammonia to Green Hydrogen.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/880826/HS420_-_Ecuity_-_Ammonia_to_Green_Hydrogen.pdf)、Krystina E. Lamb et al.

「Ammonia for hydrogen storage; A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification」

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319918339272>

¹⁷³ Haldor Topsøe

<https://www.topsoe.com/ammonia-cracking>、Topsoe 「Topsoes Ammonia

cracking technology – Delivering green Hydrogen」

<https://ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2021/11/Rasmus-Topsoe-NH3-cracking-AEA-2021.pdf>

¹⁷⁴ Ammonia energy association 「CSIRO: new progress in ammonia energy」

[https://ammoniaenergy.org/presentations/csirus-metal-membrane-technology-mmt-technical-](https://ammoniaenergy.org/presentations/csirus-metal-membrane-technology-mmt-technical-update/)

[update/](https://ammoniaenergy.org/presentations/csirus-metal-membrane-technology-mmt-technical-update/)、「CSIRO Demonstrates Ammonia-to-Hydrogen Fueling System」

<https://ammoniaenergy.org/articles/csiro-demonstrates-ammonia-to-hydrogen-fueling-system/>

¹⁷⁵ 有識者インタビュー

¹⁷⁶ <https://www.euractiv.com/section/energy/news/ge-eyes-100-hydrogen-fuelled-power-plants-by-2030/> (2021年5月)

¹⁷⁷ <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-is-awarded-66-million-in-us-federal-funding->

to-develop-breakthrough-technologies

178 <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-doe-accelerating-the-path-towards-100-hydrogen-combustion-in-gas-turbines>

179 <https://fuelcellsworks.com/news/mhiet-achieves-stable-combustion-of-up-to-50-vol-hydrogen-on-single-cylinder-test-engine/>

180 CREA 「石炭アンモニア混焼による大気質への影響」 https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2023/05/CREA_Air-quality-implications-of-coal-ammonia-co-firing_Briefing_2023_JP_FINAL.pdf

181 JERA プレスリリース https://www.jera.co.jp/en/news/notice/20230531_1456

182 EU EUR-Lex (COM/2023/156) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0156&qid=1682349760946>

183 H2Global Website <https://www.h2global-stiftung.com/project/h2g-mechanism>

184 カーネル大学法科大学院 Website <https://www.law.cornell.edu/uscode/text/26/45V>

185 European Hydrogen Backbone Website <https://ehb.eu/>

186 DOE Website <https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-0>

187 DOE Website <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-12/hyblend-tech-summary-120722.pdf>

188 Innovation Fund Dash board https://cinea.ec.europa.eu/programmes/innovation-fund/innovation-fund-project-portfolio_en

189 IPCEI ウェブサイト <https://ipcei-hydrogen.eu/>

190 The Federal Ministry of Education and Research (BMBF) ウェブサイト <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/projects>

191 DOE ウェブサイト 「Funding Selections for Clean Hydrogen Electrolysis, Manufacturing, and Recycling Activities under the Bipartisan Infrastructure Law」
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/bipartisan-infrastructure-law-clean-hydrogen-electrolysis-manufacturing-and-0>

192 https://www.koreatimes.co.kr/www/tech/2023/07/129_344238.html

193 Ministry of Trade, Industry and Energy プレスリリース (출처=산업통상자원부 보도자료) <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/169270/view>

194 Hydrogen council <https://hydrogencouncil.com/ja/advancing-global-cooperation-on-certification-of-hydrogen-and-derivatives-hydrogen-certification-101/>

195 <https://sustainablejapan.jp/2023/03/28/iberdrola-aenor-hydrogen/88135>

196 <https://sustainablejapan.jp/2023/04/09/giz-sap-green-hydrogen/88543>

197 JETRO <https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/06/707789640ea06dcf.html>

198 CertifHy Website

https://www.waterstofnet.eu/_asset/_public/CertifHy/CertifHy_Leaflet_final-compressed.pdf

199 OECD Certification for facilitating international trade of green hydrogen, 31 January 2023

<https://www.youtube.com/watch?v=HKfjs-ZSH4>

200 JETRO 「COP28 で低炭素な水素認証制度の相互承認についての宣言が発表」

<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/12/17dcf113dbda3f03.html>

201 ISO <https://www.iso.org/committee/54560/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>

202 ISO <https://www.iso.org/committee/54432/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>

203 IEA “Energy Technology Perspectives 2020” (<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>)

204 IEA “Energy Technology Perspectives 2023” (<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>)

205 IEA “The Break Through Agenda Report 2022” (<https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2022>)

206 SSAB プレスリリース “SSAB to deliver fossil-free steel to Volvo Trucks” (<https://www.ssab.com/en/news/2022/05/ssab-to-deliver-fossilfree-steel-to-volvo-trucks>)

207 SSAB プレスリリース “SSAB to deliver fossil-free steel to Mercedes-Benz” (<https://www.ssab.com/en/news/2021/09/ssab-to-deliver-fossilfree-steel-to-mercedesbenz>)

208 thyssenkrupp Newsroom “EU Commission approves German federal and state government funding for thyssenkrupp Steel's "tkH2Steel" decarbonization project” (<https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/newsroom/press-releases/eu-commission-approves-german-federal-and-state-government-funding-for-thyssenkrupp-steels-tkh2steel-decarbonization-project.html>)

209 日経新聞 2021年6月10日 “ミタルが「水素製鉄」へ始動 脱炭素、独設備に2000億円”

210 鉄鋼新聞 2023年5月9日 “高炉3社、グリーンスチール市場創出／JFE、今上期に市場投入／鉄スクラップ使用拡大でCO₂削減／千葉に溶解用電炉も導入／既存技術で供給量拡大”

211 FastMarkets MB 2021年7月28日 “EU GREEN STEELMAKING: Salzgitter delivers green strip steel to Mercedes-Benz”

212 FastMarkets MB 2021年10月21日 “BMW to source material from H2 Green Steel from 2025”

213 FastMarkets MB 2021年11月11日 “Automotive, industrial supplier agrees to purchase volumes from H2 Green Steel”

214 FastMarkets MB 2021年9月16日 “EU GREEN STEELMAKING: Germany's Salzgitter starts to supply green steel to BSH Hausgeräte”

215 FastMarkets MB 2021年10月21日 “Germany's Salzgitter starts supply of green steel to Miele Group”

-
- 216 鉄鋼新聞 2022年7月25日“ゲシュタンプと脱炭素鋼材で協業／A・ミッタル”
- 217 Volkswagen Group News 2022年3月21日 “Volkswagen Group and Salzgitter AG sign Memorandum of Understanding on supply of low-CO2 steel from the end of 2025”
- 218 FastMarkets MB 2022年2月1日 “Salzgitter to deliver green steel to BMW from 2026”
- 219 FastMarkets MB 2022年10月26日 “Ford seeks green steel supplies from Tata Steel, Salzgitter, Thyssenkrupp”
- 220 FastMarkets MB 2022年11月22日 “Baosteel to supply green steel for Beijing Benz from 2023”
- 221 日刊産業新聞 2022年12月20日“神戸製鋼／日産車に低CO2材採用／鋼材ブランド、量産車で初／グリーンアルミ板材も／スコープ3 来年から順次適用”
- 222 Green Steel World 2023年7月4日 “H2 Green Steel in 1.5 billion Euro agreement with ZF” (<https://greensteelworld.com/h2-green-steel-in-1-5-billion-euro-agreement-with-zf>)
- 223 Green Steel World 2022年10月7日 “thyssenkrupp Steel and automotive supplier Mubea sign MoU for supply of low-CO2 steel” (<https://greensteelworld.com/thyssenkrupp-steel-and-automotive-supplier-mubea-sign-mou-for-supply-of-low-co2-steel>)
- 224 Green Steel World 2022年9月23日 “Tata Steel to supply low-CO2 steel product tailor-made for Hardt Hyperloop” (<https://greensteelworld.com/tata-steel-to-supply-low-co2-steel-product-tailor-made-for-hardt-hyperloop>)
- 225 H2Green steel 2023年5月2日 “H2 Green Steel in €1.79 billion green steel deal with Marcegaglia” ([H2 Green Steel in €1.79 billion green steel deal with Marcegaglia — H2 Green Steel](https://www.h2greensteel.com/news/h2-green-steel-in-1-79-billion-green-steel-deal-with-marcegaglia))
- 226 Mercedes-Benz 2023年6月7日 “Mercedes-Benz and H2 Green Steel secure supply deal.” (<https://group.mercedes-benz.com/responsibility/sustainability/climate-environment/h2-green-steel.html>)
- 227 Cargill 2023年6月19日“Cargill and H2 Green Steel Sign Multi-year Offtake Contract to Supply Near Zero-Emission Steel” (<https://www.cargill.com/2023/cargill-and-h2-green-steel-sign-multi-year-offtake-contract>)
- 228 H2 Green steel 2023年6月7日 “Scania places first green steel order in further step towards decarbonized supply chain” (<https://www.h2greensteel.com/latestnews/scania-places-first-green-steel-order-in-further-step-towards-decarbonized-supply-chain>)
- 229 H2 Green steel 2023年7月4日 “H2 Green Steel in 1.5 billion Euro agreement with ZF” (<https://www.h2greensteel.com/latestnews/h2-green-steel-in-1-5-billion-euro-agreement-with-zf>)
- 230 EUROMETAL 2023年8月21日 “Knauf Interfer sources green steel from tk Hohenlimburg” (<https://eurometal.net/knauf-interfer-sources-green-steel-from-tk-hohenlimburg/>)

-
- ²³¹ SSAB 2023年9月1日 “SSAB ja Vesivek sopivat fossiilivapaan teräksen toimituksista” (<https://www.ssab.com/fi-fi/uutiset/2023/09/ssab-ja-vesivek-sopivat-fossiilivapaan-terksen-toimituksista>)
- ²³² H2 Green steel 2023年9月13日 “Ingka Group (IKEA) and H2 Green Steel sign agreement for the supply of green steel across its warehouse operations” (<https://www.h2greensteel.com/latestnews/ingka-group-ikea-and-h2-green-steel-sign-agreement-for-the-supply-of-green-steel-across-its-warehouse-operationsnbsp>)
- ²³³ Volvo 2023年9月14日 “Volvo Group secures increased volumes of near zero emissions steel through collaboration with H2 Green Steel” (<https://www.volvogroup.com/en/news-and-media/news/2023/sep/volvo-group-secures-increased-volumes-of-near-zero-emissions-steel-through-collaboration-with-h2-green-steel.html>)
- ²³⁴ H2 Green steel 2023年10月2日 “Roba Metals in 7-year supply agreement for near zero emissions steel with H2 Green Steel” (<https://www.h2greensteel.com/latestnews/roba-metals-in-7-year-supply-agreement-for-near-zero-emissions-steel-with-h2-green-steel>)
- ²³⁵ H2 Green steel 2023年10月31日 “Porsche plans to use CO2-reduced steel from H2 Green Steel in sports cars from 2026” (<https://www.h2greensteel.com/latestnews/porsche-plans-to-use-co2-reduced-steel-from-h2-green-steel-in-sports-cars-from-2026>)
- ²³⁶ H2 Green Steel 2023年11月6日 “Purmo Group in 7-year agreement with H2 Green Steel for near zero emission steel supply” (<https://www.h2greensteel.com/latestnews/purmo-group-in-7-year-agreement-with-h2-green-steel-for-near-zero-emission-steel-supply>)
- ²³⁷ EUROMETAL 2023年12月18日 “Tata Steel signs lower carbon emission steel offtake agreement with auto supplier” (<https://eurometal.net/netherlands-tata-steel-signs-lower-carbon-emission-steel-offtake-agreement-with-auto-supplier/>)
- ²³⁸ 日刊産業新聞 2021年6月18日 “SSAB、ボルボと連携／化石燃料フリー車用鋼材開発へ”
- ²³⁹ FastMarkets MB 2021年7月14日 “SSF 2021: Automotive producers likely to lead the drive to ‘green steel’”
- ²⁴⁰ FastMarkets MB 2022年8月4日 “BMW to use green steel from China's HBIS for car production”
- ²⁴¹ Green Steel World 2022年7月27日 “SSAB and Shape partner on fossil-free steel for automotive applications” (<https://greensteelworld.com/ssab-and-shape-partner-on-fossil-free-steel-for-automotive-applications>)
- ²⁴² Green Steel World 2022年9月20日 “Oshkosh Corporation to use SSAB’s fossil-free steel in commercial vehicles” (<https://greensteelworld.com/oshkosh-corporation-to-use-ssabs-fossil-free-steel-in-commercial-vehicles>)
- ²⁴³ Green Steel World 2022年12月15日 “Klöckner & Co supplies green steel to Siemens

plants in Frankfurt and Cham” (<https://greensteelworld.com/klockner-co-supplies-green-steel-to-siemens-plants-in-frankfurt-and-cham>)

²⁴⁴ Green Steel World 2022年8月2日 “Salzgitter and GRI Renewable Industries agree to use green steel in wind towers” (<https://greensteelworld.com/salzgitter-and-gri-renewable-industries-agree-to-use-green-steel-in-wind-towers>)

²⁴⁵ Green Steel World 2022年12月2日 “Epiroc unveils world’s first underground mine truck made of SSAB’s fossil-free steel” (<https://greensteelworld.com/epiroc-unveils-worlds-first-underground-mine-truck-made-of-ssabs-fossil-free-steel>)

²⁴⁶ Green Steel World 2022年2月22日 “GMH Gruppe, Heine + Beisswenger and Sandvik Coromant enter into partnership on Green Steel” (<https://greensteelworld.com/gmh-gruppe-heine-beisswenger-and-sandvik-coromant-enter-into-partnership-on-green-steel>)

²⁴⁷ Salzgitter Flachstahl GmbH 2023年4月25日 “The SPAETER Group and Salzgitter Flachstahl GmbH enter into a partnering agreement” (<https://www.salzgitter-flachstahl.de/en/news/details/the-spaeter-group-and-salzgitter-flachstahl-gmbh-enter-into-a-partnering-agreement-20719.html>)

²⁴⁸ SSAB 2023年5月5日 “SSAB and DS Stålprofil begin a fossil-free steel partnership with deliveries starting in 2026” (<https://www.ssab.com/en/news/2023/05/ssab-and-ds-stlprofil-begin-a-fossilfree-steel-partnership-with-deliveries-starting-in-2026>)

²⁴⁹ Epiroc 2023年6月1日 “Epiroc and SSAB to explore sustainable options for manufacturing spare parts and components” (<https://www.epiroc.com/en-id/newsroom/2023/epiroc-and-ssab-to-explore-sustainable-options-for-manufacturing-spare-parts-and-components>)

²⁵⁰ Salzgitter Flachstahl GmbH 2023年5月23日 “Klöckner & Co and the Salzgitter Group partnering for the transformation to a green steel industry” (<https://www.salzgitter-ag.com/en/newsroom/press-releases/details/kloekner-co-and-the-salzgitter-group-partnering-for-the-transformation-to-a-green-steel-industry-20786.html>)

²⁵¹ SSAB 2023年6月1日 “Ponsse to become first forest machine manufacturer to use SSAB fossil-free steel” (<https://www.ssab.com/en/news/2023/06/ponsse-to-become-first-forest-machine-manufacturer-to-use-ssab-fossilfree-steel>)

²⁵² Schaeffler 2023年9月11日 “Schaeffler and H2 Green Steel intensify cooperation” (<https://www.schaeffler.com/en/media/press-releases/press-releases-detail.jsp?id=87946242>)

²⁵³ SSAB 2023年7月14日 “SSAB and KIRCHHOFF Automotive start collaboration on fossil-free steel” (<https://www.ssab.com/en/news/2023/07/ssab-and-kirchhoff-automotive-start-collaboration-on-fossilfree-steel>)

-
- 254 SSAB 2023 年 10 月 26 日 “SSAB and Gestamp begin partnership in fossil-free steel for automotive components” (<https://www.ssab.com/en/news/2023/10/ssab-and-gestamp-begin-partnership-in-fossilfree-steel-for-automotive-components>)
- 255 SSAB 2023 年 11 月 2 日 “SSAB to deliver future fossil-free steel to Sandvik for loaders and trucks” (<https://www.ssab.com/en/news/2023/11/ssab-to-deliver-future-fossilfree-steel-to-sandvik-for-loaders-and-trucks>)
- 256 SSAB 2023 年 11 月 14 日 “Scania and SSAB agree on far-reaching steel decarbonisation” (<https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/press-releases/press-release-detail-page.html/4679777-scania-and-ssab-agree-on-far-reaching-steel-decarbonisation>)
- 257 Vattenfall 2023 年 12 月 1 日 “Vattenfall and SSAB in new fossil-free steel collaboration” (<https://group.vattenfall.com/press-and-media/pressreleases/2023/vattenfall-and-ssab-in-new-fossil-free-steel-collaboration>)
- 258 日本経済新聞 2021 年 6 月 2 日 “トヨタ、部品会社に 21 年排出 3%減要請 供給網で脱炭素”
- 259 日本経済新聞 2021 年 11 月 16 日 “ホンダ、調達網全体で 50 年に CO2 ゼロ 年 4%減を要請”
- 260 神戸製鋼所 プレスリリース 2023 年 5 月 17 日 国内初 低 CO₂高炉鋼材“Kobenable Steel”の商品化について (https://www.kobelco.co.jp/releases/1210184_15541.html)
- 261 ArcelorMittal “XCarb™ green steel certificates” (<https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/xcarb/xcarb-green-steel-certificates#>)
- 262 日本製鉄 「カーボンニュートラルビジョン 2050」の推進 (<https://www.nipponsteel.com/csr/env/warming/zerocarbon.html>)
- 263 JFE スチール “カーボンニュートラルに向けた取り組み” (<https://www.jfe-steel.co.jp/company/carbon.html>)
- 264 神戸製鋼所 “グリーン社会への貢献” (<https://www.kobelco.co.jp/materiality/mate1.html>)
- 265 Reuters 2021 年 1 月 21 日 “China's top steelmaker Baowu Group vows to achieve carbon neutrality by 2050” (<https://www.reuters.com/article/us-china-climatechange-baowu-idUSKBN29Q0G1>)
- 266 ArcelorMittal, Sustainability “Climate Action Reports” (<https://corporate.arcelormittal.com/sustainability/climate-action-reports>)
- 267 POSCO “Carbon Neutral Strategy” (<https://www.posco.co.kr/homepage/docs/eng7/jsp/climate/s91c6000010a.jsp>)
- 268 Tata newsroom 2022 年 12 月 “Project Aalingana - Forging Sustainable Steel” (<https://www.tata.com/newsroom/business/tata-steel-sustainable-aalingana>)
- 269 Nucor 2023 年 11 月 13 日 “NUCOR SETS NET-ZERO SCIENCE-BASED

GREENHOUSE GAS TARGETS FOR 2050” (<https://nucor.com/news-release/nucor-sets-net-zero-science-based-greenhouse-gas-targets-for-2050-122870>)

270 Cleveland-Cliffs “Emissions Reduction”

(<https://www.clevelandcliffs.com/sustainability/environment/climate-change-commitment>)

271 Cleveland-Cliffs 2024年5月24日 “Cleveland-Cliffs Announces New Greenhouse Gas Emissions Reduction Goals” (<https://www.clevelandcliffs.com/news/news-releases/detail/639/cleveland-cliffs-announces-new-greenhouse-gas-emissions>)

272 US Steel “ROADMAP TO 2050” (<https://www.ussteel.com/roadmap-to-2050>)

273 一般社団法人日本鉄鋼連盟 “グリーンスチールの普及に向けた鉄連ガイドラインの策定” (<https://www.jisf.or.jp/news/topics/documents/greensteel.pdf>)

274 日本製鉄 プレスリリース 2022年9月14日 “「NSCarbolex™ Neutral」の販売開始について” (https://www.nipponsteel.com/news/20220914_100.html)

275 日本製鉄 ニュースリリース 2023年5月10日 “高炉プロセスから電炉プロセスへの転換に向けた本格検討を開始” (https://www.nipponsteel.com/common/secure/news/20230510_400.pdf)

276 JFE スチール ニュースリリース “グリーン鋼材「JGreeX™」の供給開始について” (<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2023/05/230508-2.html>)

277 JFE スチール ニュースリリース “鉄鋼業界のグリーン化に向けた低炭素還元鉄のサプライチェーンの構築について” (<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2022/09/220901.html>)

278 日本経済新聞 2022年9月1日 “JFE 電炉転換 27年にも 倉敷市の高炉、鉄鋼大手で初” (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC010RO0R00C22A9000000/>)

279 神戸製鋼所 プレスリリース 2023年3月14日 “ドイツ thyssenkrupp 社向け水素直接還元鉄プラントにおける MIDREX Flex™の採用について” (https://www.kobelco.co.jp/releases/1211657_15541.html)

280 ArcelorMittal “XCarb™ green steel certificates”

(<https://corporate.arcelormittal.com/climate-action/xcarb/xcarb-green-steel-certificates#>)

281 鉄鋼新聞 2023年7月24日 “A・ミッタルとティッセンの脱炭素投資／欧州委員会、補助金を承認”

282 産業新聞 2022年10月17日 “Aミッタル／カナダで脱炭素投資／DRI 設備と電炉新設”

283 産業新聞 2022年6月3日 “Aミッタル／スペイン 2工場脱炭素化／現地政府が財政支援”

284 鉄鋼新聞 2022年4月19日 “フォーカス～ニュース深掘り～／A・ミッタルがフェストの米 DRI 工場買収（4月15日1面）／日鉄合弁カルバート、電炉での高級鋼生産へ鉄源対策”

285 鉄鋼新聞 2022年6月30日 “US スチール／電炉向け鉄源事業拡大／還元鉄用ペレットに進出／イリノイ拠点、高炉売却と銑鉄増産を検討”

286 亜細亜経済 2023年7月13日 “ポスコ、2030年の売上100兆ウォン…「Better World with Green Steel」ビジョン宣言”

-
- 287 神戸製鋼技報/Vol. 70 No. 1 (Jul. 2020) “MIDREX プロセサーその進化と脱炭素製鉄への展望” (https://www.kobelco.co.jp/technology-review/pdf/70_1/081-087.pdf)
- 288 Thyssenkrupp Newsroom <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/newsroom/press-releases/thyssenkrupp-steel-concludes-first-test-phase-successfully.html>
- 289 Cleveland-Cliffs News Releases 2023年5月8日 “Cleveland-Cliffs Completes Successful Blast Furnace Hydrogen Injection Trial at Middletown Works” (<https://www.clevelandcliffs.com/news/news-releases/detail/591/cleveland-cliffs-completes-successful-blast-furnace>)
- 290 AIST Cleveland Cliffs Website 2022 AIST Basic Oxygen Furnace Roundup". Association for Iron & Steel Technology. April 2022
- 291 Cleveland-Cliffs News Releases 2024年1月26日 “Cleveland-Cliffs Completes Successful Blast Furnace Hydrogen Injection Trial at Indiana Harbor #7 Blast Furnace” (<https://www.clevelandcliffs.com/news/news-releases/detail/620/cleveland-cliffs-completes-successful-blast-furnace>)
- 292 SSAB “HYBRIT®. A new revolutionary steelmaking technology” (<https://www.ssab.com/en/fossil-free-steel/insights/hybrit-a-new-revolutionary-steelmaking-technology>)
- 293 プライメタルズテクノロジー プレスリリース 2022年8月31日 “グリーンスチール実証プラントを POSCO と共同建設” (https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/press-releases/2022/2022082601/PR2022082601jp.pdf)
- 294 JFE テクノリサーチ 2023年3月 “令和4年度省エネルギー等に関する国際標準の獲得・普及促進事業委託費” (https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2022FY/000092.pdf)
- 295 一般社団法人金属系材料研究開発センター JRCM NEW 2024年1月 “ビジュアルになりつつある鉄鋼のグリーントランスフォーメーション戦略と新たな方策の探索” (<http://www.jrcm.or.jp/jrcmnews/2401jn443.pdf>)
- 296 Tenova 2023年5月29日 “HBIS is producing DRI by using more than 60% of hydrogen” (<https://tenova.com/newsroom/latest-tenova/hbis-producing-dri-using-more-60-hydrogen>)
- 297 Institute for Energy Economics & Financial Analysis “Solving iron ore quality issues for low-carbon steel” (<https://ieefa.org/resources/solving-iron-ore-quality-issues-low-carbon-steel>)
- 298 Thyssenkrupp プレスリリース “thyssenkrupp Steel awards a contract worth billions of euros to SMS group for a direct reduction plant: one of the world's largest industrial decarbonization projects gets underway” (<https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/thyssenkrupp-steel-awards-a-contract-worth-billions-of-euros-to-sms-group-for-a-direct-reduction-plant-one-of-the-worlds-largest-industrial-decarbonization-projects-gets-underway-163184>)

-
- ²⁹⁹ BlueScope News 2021 年 10 月 29 日 “BlueScope and Rio Tinto sign MOU for low-emissions steelmaking at PKSW” (<https://www.bluescope.com/bluescope-news/2021/10/bluescope-and-rio-tinto-sign-mou-for-low-emissions-steelmaking-at-pksw/>)
- ³⁰⁰Tenova “Open Slag Bath Furnace for Hot Metal production (OSBF)” (<https://tenova.com/technologies/open-slag-bath-furnace-hot-metal-production-osbf/>)
- ³⁰¹ POSCO “[Great Conversion to Low-carbon Eco-friendly Steelmaking Process] ① HyREX” (<https://newsroom.posco.com/en/special-project-for-great-conversion-to-low-carbon-eco-friendly-steelmaking-process-%E2%91%A0-hyrex/>)
- ³⁰² 日刊産業新聞 2022 年 12 月 12 日 “韓 P O S C O / 水素還元製鉄 28 年開発完了”
- ³⁰³ IEA “Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database” (<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database#hydrogen-production-projects>)
- ³⁰⁴ HyDeal (<https://www.hydeal.com/>)
- ³⁰⁵ Cision PR Newswire “Great Lakes Clean Hydrogen Hub Coalition Submits Application for DOE Funding” (https://www.prnewswire.com/news-releases/great-lakes-clean-hydrogen-hub-coalition-submits-application-for-doe-funding-301813234.html?tc=eml_cleartime)
- ³⁰⁶ Engineering & Mining Journal 2023 年 7 月 1 日 “Rio Tinto Pursues Decarbonization Projects With Chinese Steelmaker”
- ³⁰⁷ MINING.com 2023 年 7 月 7 日 “BHP looks to tiny microbes to cut stubborn steel emissions” (<https://www.mining.com/web/bhp-looks-to-tiny-microbes-to-cut-stubborn-steel-emissions/>)
- ³⁰⁸ Platts SBB Steel Markets Daily 2023 年 6 月 14 日 “Fortescue and China Baowu sign deal to cut emissions in iron, steel production”
- ³⁰⁹ MarketLine News and Comment 2023 年 9 月 27 日 “Vale, Brazil’s Port of Açú team up for low-carbon steel production”
- ³¹⁰ SNL Metals & Mining Daily: East Edition 2022 年 11 月 3 日 “Iron ore giant Vale considers building 'mega hubs' in Saudi Arabia, UAE, Oman”
- ³¹¹ World Direct Reduction Statistics 2022 (<https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf>)
- ³¹² ArcelorMittal 2023 年 6 月 14 日 “ArcelorMittal and John Cockerill announce plans to develop world’s first industrial scale low temperature, iron electrolysis plant” ([ArcelorMittal and John Cockerill announce plans to develop world’s first industrial scale low temperature, iron electrolysis plant | ArcelorMittal](https://www.arcelormittal.com/press-releases/arcelor-mittal-and-john-cockerill-announce-plans-to-develop-worlds-first-industrial-scale-low-temperature-iron-electrolysis-plant))
- ³¹³ Forbes 2024 年 3 月 11 日 “ビル・ゲイツらも出資、「CO2 を出さない」製鉄企業 Boston Metal” (<https://forbesjapan.com/articles/detail/69622>)
- ³¹⁴ Forbes 2023 年 8 月 27 日 “The ‘Steel Curtain’ Won’t Stop Electra’s Pursuit Of

Decarbonization” (<https://www.forbes.com/sites/kensilverstein/2023/08/27/the-steel-curtain-wont-stop-electras-pursuit-of-decarbonization/>)

315 ARPA-E “Blue Origin” (<https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/ouroboros-novel-reactor-zero-emission-electrolytic-reduction-iron>)

316 ARPA-E “Form Energy” (<https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/intensification-continuous-alkaline-electrochemical-ironmaking-net-negative>)

317 ARPA-E “Limelight steel” (<https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/laser-furnace-reduction-iron-ore-iron-metal>)

318 Vestalpine “Breakthrough technologies”
(<https://www.voestalpine.com/greentecsteel/en/climate-neutral-steel-by-2050/>)

319 H2plasmared “HOME” (<https://h2plasmared.eu/>)

320 日本貿易振興機構 ジェトロの海外ニュース “欧州委、米インフレ削減法に対抗するグリーン・ディール産業計画を発表”

(<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/02/61fa6e9285deed7f.html>)

321 鉄鋼新聞 2021年12月16日 “独・有力シンクタンク分析／欧州鉄鋼業の脱炭素投資／「排出権無償枠削減で加速」／グリーン水素は「奪い合い」に”

322 日本貿易振興機構 ジェトロの海外ニュース “EU、気候変動対策パッケージ「Fit for 55」の重要法案を正式採択”

(<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/05/53eaa93e60019070.html>)

323 日本貿易振興機構 “低炭素の製鋼への移行に向けた欧州官民パートナーシップが発足”

(<https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/06/6b8615dd1ee4ca58.html>)

324 Clean Steel Partnership (<https://www.estep.eu/clean-steel-partnership>)

325 日本貿易振興機構 2021年6月25日 “米国環境エネルギー政策動向マンスリーレポート Vol. 8~19 2022年1月~12月”

(https://www.jetro.go.jp/ext_images/world/n_america/us/biden_administration/report/2022_8-19.pdf)

326 DOE “DOE Industrial Decarbonization Roadmap” (<https://www.energy.gov/industrial-technologies/doe-industrial-decarbonization-roadmap>)

327 ARPA-E 2024年4月18日 “U.S. Department of Energy Announces \$28 Million to Decarbonize Domestic Iron and Steel Production” (<https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/us-department-energy-announces-28-million-decarbonize-domestic-iron>)

328 アジア経営研究 No.27 2021 “中国鉄鋼業における過剰能力削減政策”

(https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamsjsaam/27/0/27_35/pdf)

329 中国政府 “关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见(鉄鋼産業の高品質発展促進に関する指

-
- 導意見)” (https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/08/content_5672513.htm)
- 330 日本経済新聞 2021年2月8日 “中国、脱炭素で鉄くず輸入を再緩和 日本相場押し上げも” (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQODJ026960S1A200C2000000/>)
- 331 First Movers Coalition (<https://www.weforum.org/first-movers-coalition>)
- 332 IEA (<https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members>)
- 333 環境省 “気候・エネルギー・環境大臣会合コミュニケ 附属文書 産業の脱炭素化アジェンダに関する結論” (<https://www.meti.go.jp/information/g7hirosima/energy/pdf/Annex-11.pdf>)
- 334 OECD “THE HETEROGENEITY OF STEEL DECARBONISATION PATHWAYS” (<https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/fab00709-en.pdf?expires=1718874117&id=id&accname=guest&checksum=86B19C8AED04C8D8BBFFA87F050A51AE>)
- 335 IEA “Emissions Measurement and Data Collection for a Net Zero Steel Industry” (<https://iea.blob.core.windows.net/assets/8f6568aa-1dd8-4578-bc61-24ceba4a07dd/EmissionsMeasurementandDataCollectionforaNetZeroSteelIndustry.pdf>)
- 336 鉄鋼新聞 2023年5月23日 “G7広島サミット／共同声明、「鉄鋼」に言及／CO₂データの収集開始を歓迎”
- 337 G7 Italy “Climate, Energy and Environment Ministers’ Meeting Communiqué”
- 338 鉄鋼新聞 2024年5月2日 “イタリア・トリノG7声明／鉄鋼など「産業の脱炭素化」、削減努力追求で合意”
- 339 EU Press release “Joint EU-US Statement on a Global Arrangement on Sustainable Steel and Aluminium” (https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_5724)
- 340 ロイター 2023年5月17日 “米政権、EUなどとの「グリーンスチール」協定に注力＝商務長官” (<https://jp.reuters.com/article/usa-trade-steel-idJPKBN2X808I>)
- 341 THE WHITE HOUSE, STATEMENTS AND RELEASES “Fact Sheet: Biden-Harris Administration Advances Cleaner Industrial Sector to Reduce Emissions and Reinvigorate American Manufacturing” (<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/02/15/fact-sheet-biden-harris-administration-advances-cleaner-industrial-sector-to-reduce-emissions-and-reinvigorate-american-manufacturing/>)
- 342 The Wall Street Journal 2023年6月8日 “U.S. Struggles to Turn Steel Imports ‘Green’ With Tariffs; Biden has yet to deliver on pledge to apply levies based on greenhouse gases generated in production”
- 343 三井住友信託銀行 調査月報 2022年9月 “アンモニア発電は脱炭素社会の新潮流となるのか” (https://www.smtb.jp/-/media/tb/personal/useful/report-economy/pdf/125_3.pdf)
- 344 資源エネルギー庁 2021年8月 “燃料アンモニアの導入・拡大に向けた取組について” (<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001418023.pdf>)

-
- 345 OEC “Ammonia HISTORICAL DATA”
(<https://oec.world/en/profile/hs/ammonia#exporters-importers>)
- 346 Business AnalystIQ 「Ammonia price Index」
(<https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/ammonia-price-index/>)
- 347 BloombergNEF 「Scaling up hydrogen: The case for low carbon ammonia」
(https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/CTC-whitepaper_Ammonia_Final.pdf)
- 348 財務省貿易統計 (<https://www.customs.go.jp/toukei/srch/index.htm?M=29&P=0>)
- 349 Martin Tjahjono et al 「Assessing the feasibility of gray, blue, and green ammonia productions in Indonesia」 (<https://ijred.cbio.re.id/index.php/ijred/article/download/58035/pdf>)
- 350 IEA 「World Energy Outlook 2024」 (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>)
- 351 DNV 「Transition Outlook 2024」 (https://www.dnv.com/energy-transition-outlook/download/?utm_source=googlecpc&utm_medium=search&utm_campaign=eto_2024_download&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiArby5BhCDARIsAIJvjISkCQixDOAWBrXI3TRHt8OIUr06e_bNfsVADcSS3pvfijU8NqeF-I0aApT9EALw_wcB)
- 352 Rystad Energy Cube Browser 「Ammonia Market」 (<https://www.rystadenergy.com/client-portal>)
- 353 IEA 2021 年 10 月 “Ammonia Technology Roadmap”
(<https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap>)
- 354 IRENA 2022 年 5 月 “Innovation Outlook: Renewable Ammonia” (https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf)
- 355 Yara International プレスリリース 2020 年 10 月 5 日 “Ørsted and Yara seek to develop groundbreaking green ammonia project in the Netherlands”
(<https://www.yara.com/corporate-releases/orsted-and-yara-seek-to-develop-groundbreaking-green-ammonia-project-in-the-netherlands/>)
- 356 Yara International プレスリリース 2022 年 1 月 13 日 “Yara and Lantmännen sign first commercial agreement for fossil free fertilizers” (<https://www.yara.com/corporate-releases/yara-and-lantmannen-sign-first-commercial-agreement-for-fossil-free-fertilizers/>)
- 357 CF Industries プレスリリース 2023 年 4 月 24 日 “CF Industries and NextEra Energy Resources Announce Green Hydrogen Project MOU to Support Ag Supply Chain Decarbonization” (<https://www.cfindustries.com/newsroom/2023/cf-nextera-mou-green-hydrogen>)
- 358 IEA 2024 年 10 月 “Hydrogen Projects Database” (<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>)
- 359 JERA プレスリリース 2023 年 1 月 17 日 “ブルーアンモニア製造事業の共同開発および燃

料アンモニア調達に向けた Yara International ASA との協業検討について”

(https://www.jera.co.jp/news/information/20230117_1069)

360 日本経済新聞 2023 年 1 月 17 日 “JERA、アメリカから燃料アンモニア輸入へ 2 社と協議”

(<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC176OH0X10C23A1000000/>)

361 Ammonia Energy Association 2022 年 12 月 7 日 “Kepeco agrees to ammonia offtake from Gladstone” (<https://www.ammoniaenergy.org/articles/kepeco-agrees-to-ammonia-offtake-from-gladstone/>)

362 日本経済新聞 2023 年 2 月 8 日 “三菱商事、米国で燃料アンモニア生産へ 独企業などと”

(<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC085EJOY3A200C2000000/>)

363 ENGIE プレスリリース 2023 年 6 月 21 日 “ENGIE and POSCO Led Consortium to develop a Green Ammonia Project of up to a 1.2mtpa in Oman”

(<https://en.newsroom.engie.com/news/engie-and-posco-led-consortium-to-develop-a-green-ammonia-project-of-up-to-a-1-2mtpa-in-oman-8360-314df.html>)

364 Profercy 2023 年 6 月 26 日 “Yara enticed by new blue ammonia capacity in the US as European plants face uncertain future” (<https://www.profercy.com/2023/06/yara-to-invest-up-to-2billion-in-second-blue-ammonia-plant/>)

365 Yara プレスリリース 2023 年 6 月 29 日 “BASF and Yara to evaluate low-carbon blue ammonia project at U.S. Gulf Coast” (<https://www.yara.com/corporate-releases/basf-and-yara-to-evaluate-low-carbon-blue-ammonia-project-at-u.s.-gulf-coast/>)

366 NIKKEI Asia 2023 年 2 月 23 日 “Exxon to sell 'blue' ammonia to Asia from new Texas plant” (<https://asia.nikkei.com/Editor-s-Picks/Interview/Exxon-to-sell-blue-ammonia-to-Asia-from-new-Texas-plant#:~:text=The%20Texas%20facility%20will%20make,to%20Asia%20on%20chemical%20t>

ankers.)

367 Reuters 2023 年 7 月 14 日 “Exxon to buy Denbury for \$4.9 billion in carbon storage bet”

(<https://www.reuters.com/markets/deals/exxon-buy-denbury-49-bln-deal-2023-07-13/>)

368 広島大学 H29 年 1 月 30 日 “アンモニア燃料の安全性に係わる法規制等の調査”

(https://hih2.hiroshima-u.ac.jp/pdf/report_170130.pdf)

369 有識者インタビュー

370 東京工業大学 2023 年 4 月 18 日 “鉄はレアメタルより強し”

(<https://www.titech.ac.jp/news/2023/066470>)

371 日経クロステック 2023 年 1 月 27 日 “アンモニア合成に大変革、東大などが空気と太陽光のみで実現へ” (<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/07621/>)

372 公益社団法人 化学工学会 第 86 巻 第 7 号 “総論：新規反応場の開拓”

(<https://www.scej.org/docs/publication/journal/backnumber/8607-open-article.pdf>)

373 北海道大学 プレスリリース 2014 年 7 月 29 日 “可視光を用いて空気中の窒素をアンモニア

-
- に変換する人工光合成の開発に成功” (https://www.hokudai.ac.jp/news/140729_pr_es.pdf)
- 374 大阪大学 Resou 2020年4月3日 “太陽光と“海水”と空気から常温・常圧下でアンモニアを合成!” (https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20200403_3)
- 375 Ammonia Energy Association 「Licensor selection picking up for renewable ammonia synthesis loops」 (<https://ammoniaenergy.org/articles/licensor-selection-picking-up-for-renewable-ammonia-synthesis-loops/>)
- 376 名古屋大学 プレスリリース 2021年10月14日 “安価で高性能なコバルト系アンモニア合成触媒を開発” (https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/upload/20211014_engg.pdf)
- 377 産総研 プレスリリース 2022年7月22日 “変動する水素供給条件下でも安定してアンモニア合成が可能な触媒を開発” (https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220722/pr20220722.html)
- 378 東工大ニュース 2023年4月18日 “鉄はレアメタルよりも強し” (<https://www.titech.ac.jp/news/2023/066470>)
- 379 JERA プレスリリース 2022年5月31日 “碧南火力発電所のアンモニア混焼実証事業における大規模混焼開始時期の前倒しについて” (https://www.jera.co.jp/news/information/20220531_917)
- 380 ジェトロ ビジネス短信 2021年11月22日 “官民合同の水素・アンモニア発電実証推進団が発足” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/11/ddc57799fd454e34.html>)
- 381 KEPCO リリース (2022.9.13, 2024.6.5)」
- 382 Energytimes 「두산 석탄발전 암모니아 30% 성능시험 성공」
- 383 Energy & Environment News 「초초임계압(USC) 보일러 암모니아 혼소발전 기술개발 본궤도」
- 384 KOMICO 「한국중부발전 정부 R&D 과제 참여기관 공모」
- 385 電気事業連合会 2022年2月9日 “[中国]国家能源投資集団、石炭火力でのアンモニア混焼技術開発に成功と発表” (https://www.fepec.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1260681_4115.html)
- 386 www.news.cn 2023年4月8日 “安徽：氨能清洁能源发电取得突破 煤电机组将实现掺氨降碳” (http://www.news.cn/2023-04/08/c_1129505294.htm)
- 387 中国新闻网 2023年4月8日 “中国燃煤机组大比例掺氨清洁高效燃烧技术实现国际领先” (<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1762613647711791345&wfr=spider&for=pc>)
- 388 NNA ASIA 2022年8月9日 “アンモニア混焼実験に成功 IHI と国営電力ら、脱炭素目指し” (<https://www.nna.jp/news/2374774>)
- 389 IHI プレスリリース 2022年4月5日 “インドネシアの火力発電所において、アンモニア混焼および専焼に向けた技術の検討を開始” (https://www.ihico.jp/all_news/2022/resources_energy_environment/1197852_3473.html)
- 390 三菱重工 プレスリリース 2023年1月16日 “タイ・BLCP パワー社の石炭火力発電所に対

するアンモニア混焼導入へ覚書に調印 20%混焼実現に向けた調査・検討へ、燃料の調達・活用までを視野に” (<https://www.mhi.com/jp/news/230116.html>)

391 亜洲日報 2022年12月24日 “斗山エナビリティ、ベトナムにアンモニア混焼発電所導入の推進” (<https://japan.ajunews.com/view/20221224154336561>)

392 日本経済新聞 2023年3月27日 “アンモニア、脱炭素の「伏兵」 IHI が世界初タービン” (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUF074NZ0X00C23A3000000/>)

393 三菱重工 プレスリリース 2021年3月1日 “世界初となるアンモニア焚き 4万kW級ガスタービンシステムの開発に着手 カーボンフリー発電のラインアップを拡充、2025年以降の実用化目指す” (<https://power.mhi.com/jp/news/20210301.html>)

394 Ammonia Energy Association 2022年5月26日 “DoE funding for ammonia energy” (<https://www.ammoniaenergy.org/articles/doe-funding-for-ammonia-energy/>)

395 LCRI(Low-Carbon Resources Initiative) 19th Annual Ammonia Energy Conference 2022年10月 “Combustion of Ammonia and Ammonia-Hydrogen Mixtures for Gas Turbines” (<https://www.ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2022/10/AEA-Conference-RSteele-EPRI.pdf>)

396 NETL HP 2023年8月2日 “NETL HEADS UP AMMONIA COMBUSTION TECHNOLOGY GROUP TO ADVANCE AMMONIA AS FUEL TECHNOLOGIES” (<https://netl.doe.gov/node/12765>)

397397 GE 「Renewables and gas power can rapidly change the trajectory on climate change」 (https://www.ge.com/news/sites/default/files/2020-12/future_of_energy_whitepaper_final_0.pdf)

398 GE 「Hydrogen factsheet」 (https://www.governova.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/future-of-energy/hydrogen-overview.pdf)

399 World Intellectual Property News 2021年7月2日 “KIER Initiates Developing a Pollution-free 'Ammonia' Combustion Technology” (<http://www.wip-news.com/news/articleView.html?idxno=7486>)

400 Doosan プレスリリース 2022年2月17日 “Doosan Heavy Expands Cooperation on Eco-Friendly Hydrogen Energy Business” (https://www.doosan.com/en/media-center/press-release_view?id=20172373)

401 IHI HP “アンモニアタンク大型化の実現と試験法の確立 困難といわれるアンモニアタンク大型化を実現する技術” (https://www.ihico.jp/technology/techinfo/contents_no/1199803_13491.html)

402 日本経済新聞 2022年5月1日 “IHI、世界最大級のアンモニアタンク 次世代燃料普及へ” (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC268A30W2A420C2000000/>)

403 丸紅 SIP 終了報告書 H30年6月1日～H31年3月31日 “カタール産CO₂フリーアンモニアの日本向け供給に係わる検討” (<https://www.jst.go.jp/sip/dl/k04/end/team3-18.pdf>)

-
- 404 日本経済新聞 2022年11月21日 “JERA、海運2社と世界最大級のアンモニア輸送船導入へ” (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC194MQ0Z11C22A1000000/>)
- 405 OFFSHORE ENERGY 2023年9月6日 “SHI’s 200K cbm ultra-large ammonia carrier wins KR’s clearance” (<https://www.offshore-energy.biz/shis-200k-cbm-ultra-large-ammonia-carrier-wins-krs-clearance/>)
- 406 経済産業省 「目前に迫る水素社会の実現に向けて～「水素社会推進法」が成立」 (https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suisohou_02.html)
- 407 JOGMEC 「水素・アンモニア海外公的支援制度の動向」 (https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1009992/1010010.html)
- 408 有識者インタビュー
- 409 農林水産省 2021年4月20日 “脱炭素社会実現に向けた農林水産分野の取組” (<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/datsutanso/dai2/siryu3-3.pdf>)
- 410 SOHU.com 2021年9月10日 ““十四五”农业绿色发展规划印发，强调继续推进化肥农药减量增效” (https://www.sohu.com/a/489067754_121118717)
- 411 Ammonia Energy Association 「Ammonia takes key role in Taiwan’s energy transition strategy」 (<https://ammoniaenergy.org/articles/ammonia-takes-key-role-in-taiwans-energy-transition-strategy/>)
- 412 Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi (MOSTI) 「Hydrogen Economy & Technology Roadmap」 (<https://intelligence.gasworld.com/wp-content/files/uploads/uploads/documents/Malaysia-2023-Hydrogen-Economy-and-Technology-Roadmap-1.pdf>)
- 413 Vietnam Briefing 「Vietnam Government Approves Power Development Plan 8」 (<https://www.vietnam-briefing.com/news/vietnam-power-development-plan-approved.html/>)
- 414 三菱商事他 「インドネシア国 スララヤ石炭火力発電所向け アンモニア混焼実施可能性調査並びにバリューチェーン全体評価事業」 (https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2022FY/000794.pdf)
- 415 Ministry of Trade and Industry Singapore 「Singapore National Hydrogen Strategy」 (https://www.mti.gov.sg/-/media/MTI/HPO/Singapore-Hydrogen-Strategy/ebrochure_HPO_Oct_26.pdf)
- 416 Department of Energy Philippine 「Philippine Energy Plan 2023-2050」 (<https://doe.gov.ph/pep>)
- 417 Bord Gáis Energy 「Bord Gáis Energy, Centrica Energy and Mitsubishi Power Announce Development of Europe's First Ammonia Fired Power Generation Facility」 (<https://www.bordgaisenergy.ie/news/20232911>)
- 418 Ammonia Energy Association 「Updated German hydrogen strategy includes target for hydrogen & ammonia “sprinter” power plants」 (<https://ammoniaenergy.org/articles/updated->

german-hydrogen-strategy-includes-target-for-hydrogen-ammonia-sprinter-power-plants/)

419 ISO/AWI 23397 “Ships and marine technology – Ammonia fuel systems for ships - Vocabulary” (<https://www.iso.org/standard/87422.html?browse=tc>)

420 ISO/AWI TS 21343 “Fuel ammonia – Guideline for boilers for power generation – Environmental performance” (<https://www.iso.org/standard/86727.html?browse=tc>)

421 国交省プレスリリース 2023年10月4日 “国際海事機関（IMO）第9回貨物運送小委員会（CCC 9）の開催結果概要” (<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001633430.pdf>)

422 有識者インタビュー

423 BASF Website <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2021/03/p-21-166.html>,

<https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2023/12/p-23-372>

<https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2024/09/BASF-.....>

SinoPec Website

http://www.sinopecgroup.com/group/en/Sinopecnews/20220111/news_20220111_499601361458.shtml, Dow Website <https://corporate.dow.com/en-us/science-and-sustainability/commits-to-reduce-emissions-and-waste.html>, <https://jp.dow.com/ja-jp/news/dow-commits-to-accelerating-the-circular-ecosystem.html>

424 三菱ケミカルグループ Website [https://www.mitsubishichem-](https://www.mitsubishichem-hd.co.jp/news_release/01138.html)

[hd.co.jp/news_release/01138.html](https://www.mitsubishichem-hd.co.jp/news_release/01138.html), 住友化学 Website [https://www.sumitomo-](https://www.sumitomo-chem.co.jp/news/detail/20211210_2.html)

[chem.co.jp/news/detail/20211210_2.html](https://www.sumitomo-chem.co.jp/news/detail/20211210_2.html), 東レ Website

https://www.toray.co.jp/sustainability/four_worlds/greenhouse_gas.html,

<https://www.toray.co.jp/sustainability/tcfd/>

425 「The Future of Petrochemicals」 IEA(2018/10) [https://www.iea.org/reports/the-future-of-](https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals)

[petrochemicals](https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals)

426 CocaCola Website <https://www.coca-colacompany.com/reports/world-without-waste-2021>

427 PepsiCo Website <https://www.pepsico.com/our-impact/esg-topics-a-z/climate-change>,

<https://www.pepsico.com/our-impact/esg-topics-a-z/packaging>

428 VW Website [https://www.volkswagenag.com/en/news/2021/04/way-to-zero--volkswagen-](https://www.volkswagenag.com/en/news/2021/04/way-to-zero--volkswagen-presents-roadmap-for-climate-neutral-mob.html)

[presents-roadmap-for-climate-neutral-mob.html](https://www.volkswagenag.com/en/news/2021/04/way-to-zero--volkswagen-presents-roadmap-for-climate-neutral-mob.html)

429 BMW Website <https://www.bmwgroup.com/en/sustainability/our-focus/co2-reduction.html>

430 Mercedes-Benz Group Website [\[benz.com/dokumente/investoren/presentationen/mercedes-benz-ir-sustainability-esg-goals.pdf\]\(https://group.mercedes-benz.com/dokumente/investoren/presentationen/mercedes-benz-ir-sustainability-esg-goals.pdf\)](https://group.mercedes-</p></div><div data-bbox=)

431 “Global plastic packaging market” Plastic News(2019/01/28)

[https://www.plasticsnews.com/article/20190128/FYI/190129903/global-plastic-packaging-](https://www.plasticsnews.com/article/20190128/FYI/190129903/global-plastic-packaging-market)
[market](https://www.plasticsnews.com/article/20190128/FYI/190129903/global-plastic-packaging-market)

-
- 432 「自動車用ケミカル&マテリアル市場調査総覧 2020」 富士キメラ総研
- 433 Coca-Cola Europacific Partners Website <https://ir.cocacolaep.com/static-files/4d8517ef-7f2b-4690-b00d-1000819d5393>
- CNN (2024/12/5) <https://www.cnn.co.jp/business/35226941.html>
- 434 Coca-Cola Europacific Partners Website
<https://www.cocacolaep.com/assets/Sustainability/CCEP-ESG-Commitments.pdf>
- 435 PACKAGING DIVE <https://resource-recycling.com/recycling/2024/09/24/coca-cola-behind-on-2030-plastics-goals/>
- 436 「世界の石油化学製品の今後の需給動向（2019年10月）-世界の主要石油化学プラント」 経済産業省
- 437 「カーボンリサイクル関連プロジェクト（化学品分野）の研究開発・社会実装の方向性」 経済産業省（2021/9/13）
- 438 “The Future of Petrochemicals” IEA
- 439 “Oil 2020 Analysis and forecast to 2025” IEA
- 440 Coca-Cola Europacific Partners Website
<https://www.cocacolaep.com/media/news/2023/coca-cola-europacific-partners-joins-the-coca-cola-company-and-seven-bottling-partners-to-launch-sustainability-focused-venture-capital-fund/>
- 441 アールプラスジャパン Website <https://rplusjapan.co.jp/>
- 442 出光興産 Website (2024/3/15) <https://www.idemitsu.com/jp/news/2023/240315.html>
- 443 BASF Website(2022/09/01) <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2022/09/p-22-326.html> ,BASF Website (2024/5/12)
<https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2024/05/p-24-177>
- 444 Shell Website(2022/06/16) <https://www.shell.com/business-customers/chemicals/media-releases/2022-media-releases/shell-and-dow-start-up-e-cracking-furnace-experimental-unit.html>
- 445 LG Chem Website https://www.lgchem.com/upload/file/sustainability-reports/2021_LGC_Sustainability_F_EN.pdf
- 446 BASF Website (2022/10/31) <https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2022/10/p-22-370.html>
- 447 Pyrum Innovations AG Website https://www.pyrum.net/wp-content/uploads/presentation_eigenkapitalforum_frankfurt_30_11_2022.pdf
- 448 Pyrum Innovations AG Website https://www.pyrum.net/wp-content/uploads/Pyrum-Presentation-1-HY-2023_homepage.pdf
- 449 Pyrum Innovations AG Website <https://www.pyrum.net/en/corporate-news/pyrum-innovations-ag-concludes-framework-agreement-with-continental-for-long-term-acceptance>

[of-its-recovered-carbon-black/](#)

450 Business Korea(2023/11/3)

<https://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=204974>

451 PRWire(2022/12/13) <https://kyodonewsprwire.jp/release/202212131088>

452 Anellotech Website

<https://anellotech.com/sites/default/files/Anellotech%20Presentation%20March%202022.pdf>

, アールプラスジャパン Website <http://rplusjapan.co.jp/technology/>, Technip Energies Website (2024/4/22) <https://www.ten.com/en/media/press-releases/technip-energies-and-anellotech-jointly-develop-sustainable-plastics-recyclingv>

453 BASF Website(2018/12/18) [https://www.basf.com/jp/ja/media/news-](https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2018/12/p-18-385.html)

[releases/global/2018/12/p-18-385.html](https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2018/12/p-18-385.html), (2021/04/28) <https://www.basf.com/jp/ja/media/news-releases/global/2021/04/p-21-192.html> 出光興産 Website

<https://www.idemitsu.com/jp/news/2023/230420.html>

454 化学工業日報(2023/10/13) <https://chemicaldaily.com/archives/369327> (2023/11/7)

<https://chemicaldaily.com/archives/378831>

455 MarketScreener (2024/1/22) <https://uk.marketscreener.com/quote/stock/PRYME-N-V-119018998/news/Pryme-N-V-produces-first-oil-45782132/>, KYODO NES PRWIRE (2023/11/21) <https://kyodonewsprwire.jp/release/202311213117>

456 KBR Website (2022/06/01) <https://www.kbr.com/en/insights-news/press-release/kbr-announces-investment-mura-technology-advance-plastics-circular>

457 旭化成 Website (2024/12/5) https://www.asahi-kasei.com/jp/news/2024/ze241205_2.html

458 DCVC Website <https://www.dvc.com/news-insights/twelve-breaks-ground-on-commercial-scale-plant-for-sustainable-aviation-fuel-made-from-co2/>, Adadvanced Technology X (2024/11/14) <https://www.atx-research.co.jp/contents/twelve>

459 三菱ケミカル Website https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/pc/product/1200363_9344.html

460 環境科学会誌 11(2):147-154(1998)

https://www.jstage.jst.go.jp/article/sesj1988/11/2/11_2_147/_pdf

461 Eonic Website (2024/10/22) <https://www.eonic-technologies.com/eonic-and-chimcomplex-sign-mou-to-explore-production-of-co2-polyols-in-europe/>, (2024/6/25)

<https://www.eonic-technologies.com/changhua-chemical-breaks-ground-on-first-production-plant-for-polyols-from-renewable-carbon/>, (2024/4/15) <https://www.eonic-technologies.com/eonic-signs-mou-with-sanyo-chemical-to-advance-co2-based-polyols/>

462 日本経済新聞(2022/03/24)

-
- <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC14ADT0U2A310C2000000/>
- 463 Siemens Energy Website <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions.html>
- 464 ITM Power Website <https://itm-power.com/products>
- 465 Carbon Recycling International Website <https://www.carbonrecycling.is/co2-methanol>
- 466 Pledge Times (2024/12/26) <https://pledgetimes.com/ansasol-will-produce-150000-tons-of-green-methanol-in-huelva/>, Goldwind Website (2024/4/18) <https://www.goldwind.com/en/news/focus-980492940273130496/>
- 467 「中国エチレン、プロピレン近況」触媒懇談会ニュース (2018/11/01)
- 468 Carbon Recycling International Website <https://www.carbonrecycling.is/projects>
- 469 Wison Engineering Website (2024/1/15) <https://www.wison-engineering.com/en/site/newsDetail/274>
- 470 Gevo Website (2024/9/16) <https://investors.gevo.com/news-releases/news-release-details/us-grants-gevo-patent-breakthrough-ethanol-olefin-process>
- 471 EPA Website (2024/11/21) <https://www.epa.gov/newsreleases/biden-harris-administration-announces-national-strategy-prevent-plastic-pollution>
- 472 JETRO Website https://www.jetro.go.jp/ext_images/Reports/01/a4731e6fb00a9859/20190051_01.pdf
- 473 EuRIC Website <https://euric.org/resource-hub/press-releases-statements/press-statement>
- 474 PPWR 規則原典 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL_202500040
- 475 JETRO Website <https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/03/67609a7d67e2c0ae.html>
- 476 廃棄物の輸送に関する規則原典 https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AL_202500040
- 477 Congressional Research Service Website <https://sgp.fas.org/crs/misc/IF11455.pdf>
- 478 GOV.UK Website (2023/12/14) <https://www.gov.uk/government/news/major-boost-for-hydrogen-as-uk-unlocks-new-investment-and-jobs>
- 479 BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (2024/10/15) https://www.klimaschutzvertraege.info/news/habeck_ueberreicht_klimaschutzvertraege
- 480 Net Zero by 2050 (IEA) <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- 481 ISCC PLUS <https://www.iscc-system.org/about/circular-economy/>
- 482 Totalenergies Website <https://totalenergies.com/media/news/press-releases/totalenergies-aramco-and-sabic-complete-mena-regions-first-processing-oil>
- 483 Neste Website <https://www.neste.com/releases-and-news/circular-economy/neste-uponor-wastewise-group-and-borealis-enable-chemical-recycling-hard-recycle-plastic-waste-new>
- 484 UL Website <https://www.ul.com/news/mass-balance-new-approach-calculating-recycled->

content

- 485 Carbon trust Website <https://www.carbontrust.com/>, TÜV NORD <https://www.tuev-nord.de/de/>
- 486 Certifhy Website <https://www.certifhy.eu/>
- 487 IEA 「World Energy Outlook2023」
- 488 IEA 「World Energy Outlook2023」
- 489 IEA 「Global Hydrogen Review 2023」 (2023)(<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>)
- 490 経済産業省 (2021) 合成燃料研究会 「中間取りまとめ」
- 491 経済産業省 (2021) 合成燃料研究会 「中間取りまとめ」
- 492 ICAO ウェブサイト(https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/SAF_ProductionFacilities.aspx)
- 493 Methanol Institute ウェブサイト(<https://www.methanol.org/renewable/>)
- 494 経済産業省 合成燃料研究会 『中間取りまとめ』、シーエムシーリサーチ「世界の CCUS 総合分析」
- 495 経済産業省 (2021) 合成燃料研究会 「中間取りまとめ」
- 496 ESG Journal(<https://esgjournaljapan.com/world-news/18769>)
- 497 J P E C レポート
(https://www.peci.or.jp/wpcontent/uploads/2021/12/JPEC_report_No.211201.pdf)
- 498 欧州委員会『欧州の気候中立に向けた水素戦略』、欧州再生可能エネルギー指令 (RED II)
- 499 京都大学大学院再生可能エネルギー講座「No.248 すれ違う日本と欧州の E-fuel」
(2021/6)(https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0248.html)
- 500 EC HP (Renewable energy – method for assessing greenhouse gas emission savings for certain fuels、Questions and Answers on the EU Delegated Acts on Renewable Hydrogen)(https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12713-Renewable-energy-method-for-assessing-greenhouse-gas-emission-savings-for-certain-fuels_en)
- 501 東洋経済 ONLINE 「e-fuel は「自動車脱炭素化」の切り札となれるか」
(2023/8)(<https://toyokeizai.net/articles/-/691597>)
- 502 CEMBUREAU POSITION PAPER 「DRAFT DELEGATED ACT ON GREENHOUSE GAS SAVINGS FROM RFNBOS & RECYCLED CARBON FUELS」
(2023/3)(<https://www.cembureau.eu/media/ja012bje/230302-cembureau-position-on-draft-delegated-act-on-rfnbos.pdf>)
- 503 EU HP
- 504504 B.A.U.M. Consult Japan 株式会社ウェブサイト「EU で航空燃料をグリーン化する法案「ReFuelEU Aviation」が成立へ～e-fuel を含む SAF(持続可能な航空燃料)の使用が義務化され

る～」(2023年5月)

(<https://baumconsult.co.jp/2023/05/10/eu%e3%81%a7%e8%88%aa%e7%a9%ba%e7%87%83%e6%96%99%e3%82%92%e3%82%b0%e3%83%aa%e3%83%bc%e3%83%b3%e5%8c%96%e3%81%99%e3%82%8b%e6%b3%95%e6%a1%88%e3%80%8d%e3%81%8c%e6%88%90%e7%ab%8b/>)

505 合成メタン利用の燃焼時のCO₂カウントに関する中間整理

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/010_04_04.pdf)

506 みずほリサーチ&テクノロジーズ

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/methanation_suishin/pdf/010_04_04.pdf)

507 各種二次情報

508 E-fuel Alliance(<https://www.efuel-alliance.eu/>)

509 京都大学大学院再生可能エネルギー講座(https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0273.html)

510 Ministry of Economy, Trade and Industry news release

(2023/09/08)(https://www.meti.go.jp/english/press/2023/0908_003.html)

511 経済産業省ニュースリリース

(2023/09/05)(<https://www.meti.go.jp/press/2023/09/20230905003/20230905003.html>)

512 METI ニュースリリース(23/9/28), 「合成燃料、利用拡大に弾み ステランティスは24車種対応」(2023/10/6,日本経済新聞)、「CR市場の創造」を環境価値評価へ協力強化/CR国際会議」(2023/10/5, ガスエネルギー新聞)

513 IATA 「Sustainable Aviation Fuel: Technical Certification」

(2019/05)(<https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>)

514 自動車研究所「令和3年度次世代燃料における基礎的調査業務報告書」

(2022/03)(https://www.env.go.jp/air/report/r03_04/page_01.html)

515 IMO 「Alternative marine fuels: Regulatory mapping」

(<http://greenvoyage2050.imo.org/alternative-marine-fuels-regulatory-mapping/>)

516 経済産業省(2021)「次世代航空機に向けた研究開発・社会実装の方向性」

517 ICAO 「ICAO Regional Workshop on CORSIA」

518 ATAG 「Waypoint 2050 (第2版)」

519 世界経済フォーラム「2030年Ambition Statement」

(https://www3.weforum.org/docs/WEF_EMBARGOED_CST_Ambition_Statement_for_Signatories.pdf)

520 ICAO(https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF_Stocktaking.aspx)

-
- 521 世界経済フォーラム「Clean Skies for Tomorrow Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation」
- 522 世界経済フォーラム「Clean Skies for Tomorrow Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation」
- 523 世界経済フォーラム「Clean Skies for Tomorrow Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation」
- 524 SMBC「持続可能な航空燃料(SAF)国産化に向けた取組と事業機会」
- 525 NESTE HP
- 526 Fulcrum HP
- 527 ICAO ウェブサイト(https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/SAF_ProductionFacilities.aspx)
- 528 Methanol Institute ウェブサイト(<https://www.methanol.org/renewable/>)
- 529 運輸総合研究所・三菱総合研究所（2022）「我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策」
- 530 経産省「持続可能な航空燃料（SAF）の導入促進に向けた施策の方向性について（中間取りまとめ（案）」（2023年5月）
(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/saf/pdf/003_07_00.pdf)
- 531 Sustainable Japan 「【アメリカ】財務省、SAF 減税ガイダンス発行。CORISIA 基準採用も改訂版 GREET モデルにも道」（2024年1月）(<https://sustainablejapan.jp/2024/01/09/usa-saf-credit-guidance/98518>)
- 532 EU 「Fit for 55 and ReFuelEU Aviation」
- 533 EASA ウェブサイト
- 534 世界経済フォーラム「Clean Skies for Tomorrow Coalition」
- 535 日本財団「我が国における SAF の普及促進に向けた課題・解決策 別添 3 SAF 関連政策事例集」
- 536 IEA 「Net Zero by 2050」
- 537 欧州電力系統運用者ネットワーク（ENTSO-E）「TYNDP 2022 Scenario Report – Version. April 2022」
- 538 経済産業省等「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」
- 539 東京ガス（2022）「革新的メタン製造技術開発および合成メタンの社会実装に向けた当社取組み」、大阪ガス（2022）「Daigas グループの脱炭素に向けた取組み ～ 合成メタンの社会実装に向けて～」
- 540 IEA 「Gas Market Report Q1 2024」（2024）(<https://origin.iea.org/reports/gas-market-report-q1-2024>)
- 541 IEA 「Clean Energy Demonstration Projects Database」（2024年2月閲覧）([Clean Energy Demonstration Projects Database – Data Tools - IEA](https://www.iea.org/clean-energy-demonstration-projects-database))

-
- 542 富士経済「カーボンリサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022」
- 543 Tree energy solution 社 HP (<https://tes-h2.com/>)
- 544 東京ガス HP(<https://www.tokyo-gas.co.jp/letter/2023/20230927.html>)
- 545 富士経済「カーボンリサイクル CO2削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022」
- 546 「Hydrogen and decarbonized gas markets package」
- 547 東京ガス プレスリリース「e-メタンの国際的アライアンス「e-NG Coalition」の設立について」(2024年3月) <https://www.tokyo-gas.co.jp/news/press/20240319-02.html>
- 548 「CO2燃料製造プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」
- 549 「CO2燃料製造プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」
- 550 IEA「World Energy Outlook2023」
- 551 IEA「World Energy Outlook2023」
- 552 IEA「World Energy Outlook2023」
- 553 日本LPガス協会(2021)「グリーンLPG生産技術の整理」
- 554 古河電工 HP
- 555 日本LPガス協会(2021)「グリーンLPG生産技術の整理」
- 556 HiBD 研究所 HP
- 557 RENEWABLE FUELS INCENTIVE POLICIES A survey of how governments encourage renewable fuels and lessons for renewable LPG
- 558 RENEWABLE FUELS INCENTIVE POLICIES A survey of how governments encourage renewable fuels and lessons for renewable LPG、BioLPG A Renewable Pathway Toward 2050、有識者インタビュー
- 559 BioLPG A Renewable Pathway Toward 2050
- 560 経済産業省「次世代蓄電池・次世代モータの開発PJに関する研究開発・社会実装の方向性」
- 561 加州 HP
- 562 JST HP (<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190116/index.html>)
- 563 JPEC レポート (https://www.pecj.or.jp/wp-content/uploads/2021/09/JPEC_report_No.210901.pdf)
- 564 Cummins HP (<https://www.cummins.com/jp/news/2021/08/10/supertruck-ii-team-reaches-never-achieved-55-brake-thermal-efficiency>)
- 565 IJRASET Volume 11 Issue V May 2023
https://www.researchgate.net/publication/371470061_Optimizing_and_Predicting_Compressive_Strength_of_One-Part_Geopolymer_Concrete

-
- 566 IEA 「Breakthrough Agenda Report 2023」 <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023> 「Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry」 <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>
- 567 DOE 「Pathways to Commercial Liftoff : Low-carbon Cement」 (2023 年 9 月) <https://liftoff.energy.gov/industrial-decarbonization/>
- 568 IEA 「Net Zero Roadmap A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach」 (2023) [Net Zero Roadmap A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach](https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap)
- 569 DOE 「Pathways to Commercial Liftoff : Low-Carbon Cement」 (2023 年 9 月) <https://liftoff.energy.gov/industrial-decarbonization/>、有識者インタビュー
- 570 LC3 Project Website <https://lc3.ch/>
- 571 Hoffmann Green Cement Website <https://www.ciments-hoffmann.com/>
- 572 Mci Carbon Website <https://www.mineralcarbonation.com/>
- 573 Blue Planet Systems Corporation Website <https://www.blueplanetsystems.com/>
- 574 Carbon Upcycling Technologies Website <https://carbonupcycling.com/>
- 575 Solidia Technologies Website <https://www.solidiatech.com/>
- 576 Anthropocenemagazine Website <https://www.anthropocenemagazine.org/cement/>
- 577 Fortera Website <https://forteraglobal.com/>
- 578 CarbonCure Technologies Website <https://www.carboncure.com/>
- 579 Innovation Fund ウェブサイト https://dashboard.tech.ec.europa.eu/qs_digit_dashboard_mt/public/sense/app/6e4815c8-1f4c-4664-b9ca-8454f77d758d/sheet/bac47ac8-b5c7-4cd1-87ad-9f8d6d238eae/state/analysis
- 580 DOE ウェブサイト 「Funding Selections: Industrial Efficiency and Decarbonization FOA」 <https://www.energy.gov/eere/iedo/funding-selections-industrial-efficiency-and-decarbonization-foa-0> 「<https://www.energy.gov/oced/industrial-demonstrations-program-selections-award-negotiations>」 <https://www.energy.gov/oced/industrial-demonstrations-program-selections-award-negotiations>
- 581 Innovation Fund ウェブサイト https://dashboard.tech.ec.europa.eu/qs_digit_dashboard_mt/public/sense/app/6e4815c8-1f4c-4664-b9ca-8454f77d758d/sheet/bac47ac8-b5c7-4cd1-87ad-9f8d6d238eae/state/analysis DOE ウェブサイト 「Funding Selections: Industrial Efficiency and Decarbonization FOA」 <https://www.energy.gov/eere/iedo/funding-selections-industrial-efficiency-and-decarbonization-foa-0> 「<https://www.energy.gov/oced/industrial-demonstrations-program-selections-award-negotiations>」 <https://www.energy.gov/oced/industrial-demonstrations-program-selections-award-negotiations>
- 582 Global Cement(2023/9/5) <https://www.globalcement.com/news/item/16253-hoffmann->

green-cement-technologies-confirms-deal-with-shurfah-group

583 伊藤忠商事プレスリリース <https://www.itochu.co.jp/ja/news/press/2022/220815.html>

584 PR Newswire(2021/5/11)<https://www.prnewswire.com/news-releases/lehigh-hanson-and-fortera-work-together-to-economically-reduce-carbon-dioxide-emissions-301245247.html>

585 會澤高圧コンクリートプレスリリース <https://www.aizawa-group.co.jp/news2021111201/>

586 IEA CCUS Projects Explorer <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ccus-projects-explorer>

587 Heidelberg Materials 「Brevik CCS – Carbon Capture at Norcem Brevik」

<https://unece.org/sites/default/files/2022-04/Brevik%20HeidelbergCement.pdf>

588 The Chemical Engineer (2022/9/28)

<https://www.thechemicalengineer.com/news/norwegian-government-funds-full-scale-ccs-project/>

589 Heidelberg Materials ウェブサイト 「Heidelberg Materials plans LEILAC-2 carbon capture project at its Ennigerloh site in Germany」 (2024年3月)

<https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2024-03-06>

590 Leilac-2 FEED Study Summary Report: Public Version<https://www.leilac.com/wp-content/uploads/2023/10/2023-10-15-Leilac-2-Public-FEED-Study.pdf>

591 The Portland Cement Association 「ROADMAP TO CARBON NEUTRALITY」 (2021)<https://www.cement.org/sustainability/roadmap-to-carbon-neutrality>

592 The European Cement Association 「Cementing the European Green Deal」 (2020) <https://cembureau.eu/library/reports/2050-carbon-neutrality-roadmap/>

593 一般社団法人セメント協会 「カーボンニュートラルを目指すセメント産業の長期ビジョン」 (2020年3月)

594 Global Cement and Concrete Association 「The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete」 (2023) <https://gccassociation.org/2050-net-zero-roadmap-one-year-on/>

595 ClimateWorks 「Decarbonizing concrete: Deep decarbonization pathways for the cement and concrete cycle in the United States, India, and China」 (2021年3月) <https://www.climateworks.org/report/decarbonizing-concrete/>

596 The Cement Industry Journal of the America 「DOE Funds Five Projects to Help Decarbonize Industry」 (2023年6月)<https://cementproducts.com/2023/06/19/doe-funds-five-projects-to-help-decarbonize-industry/>

597 ARPA-E 「HESTIA」 <https://www.arpa-e.energy.gov/technologies/programs/hestia>

598 欧州委員会ウェブサイト 「HORISON 2020 CO₂ capture from cement production」 <https://cordis.europa.eu/article/id/255162-carbon-capture-for-the-cement-industry>

599 JETRO 「欧州委、グリーン・ディール産業計画の規制緩和策のネットゼロ産業法案を発表」

(2023/3)<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/03/ec1b743971c623b9.html>

600 GCCA HP<https://gccassociation.org/>

601 First Movers Coalition: 「Introduction and overview of commitments」 (2023 年 11 月)
<https://www.weforum.org/first-movers-coalition>

602 World Economic Forum 「Rethinking cement and concrete could pave the way to net zero」 (2024 年 3 月)<https://www.weforum.org/agenda/2024/03/cement-concrete-net-zero/>

603 Concrete zero HP<https://www.theclimategroup.org/concretezero>

604 G7 「Annex to the Climate, Energy and Environment Ministers' Communiqué
Conclusions regarding the Industrial Decarbonisation Agenda」 (2022)
<https://www.meti.go.jp/press/2022/05/20220530005/20220530005-3.pdf> IEA 「Achieving Net
Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members」 <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members/recommendations-for-the-g7>

605 VCS 「Methodology for CO₂ Utilization in Concrete Production Carbon
Cure」<https://verra.org/programs/verified-carbon-standard/>

606 Gold Standard 「CARBON SEQUESTRATION THROUGH ACCELERATED
CARBONATION OF CONCRETE AGGREGATE」 <https://www.goldstandard.org/>

607 Puro.earth 「Carbonated Materials Methodology for CO₂ Removal」
<https://puro.earth/carbon-removal-methods/>

608 J-クレジット制度 「EN-S-040 ポルトランドセメント配合量の少ないコンクリートの使用」
<https://japancredit.go.jp/case/18/>

609 GCCA 「CO₂ uptake in cement containing product」
<https://flexisync.eu/download/18.34244ba71728fcb3f3f8f9/1622457897161/B2309.pdf>

610 ISO ウェブサイト 「ISO 19694-3:2023」 <https://www.iso.org/standard/70747.html>

611 GCCA ウェブサイト 「Cement CO₂ and Energy Protocol」 [https://www.cement-CO₂-protocol.org/en/#Internet_Manual/index_about.htm%3FTocPath%3DAbout%2520Internet%2520Manual%7C_____0](https://www.cement-CO2-protocol.org/en/#Internet_Manual/index_about.htm%3FTocPath%3DAbout%2520Internet%2520Manual%7C_____0)

612 PCA 「Cement Types」 <https://www.cement.org/cement-concrete/concrete-materials/cement-types#:~:text=For%20instance%2C%20portland%20cements%20and%20blended%20hydraulic%20cements,Cement%29%20or%20C1157%20%28Performance%20Specification%20for%20Hydraulic%20Cements%29.>

613 Sublime Systems <https://sublime-systems.com/>

614 The European Cement Association 「Cement」 <https://www.cement.org/cement-concrete/concrete-materials/cement-types#:~:text=For%20instance%2C%20portland%20cements%20and%20blended%20hydraulic%20cements,Cement%29%20or%20C1157%20%28Performance%20Specification%20for%20>

Hydraulic%20Cements%29.

615 LC3 project <https://lc3.ch/>

616 経産省「規制改革推進会議スタートアップ・イノベーションWG 環境配慮型コンクリートの社会実装に向けた環境整備」(2023年1月) https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/meeting/wg/2210_01startup/230127/startup07_0201.pdf

617 日経クロステック「「コンクリートの概念は変わる」、脱炭素評価でJASS5再改定へ」(2023年5月)<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/na/18/00209/052200009/>

618 西松建設 <https://www.nishimatsu.co.jp/>

619 経済産業省(2021)「CO₂の分離回収等技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」(<https://www.meti.go.jp/press/2021/01/20220120007/20220120007.html>)

620 経済産業省(2020)「第1回 グリーンイノベーション戦略推進会議 兼 第1回グリーンイノベーション戦略推進会議ワーキンググループ 資料7-1」

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/001.html)

621 富士経済(2022)「カーボンリサイクル CO₂削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022」

622 Global CCS Institute(2024)「GLOBAL STATUS OF CCS 2024」

(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>)

623 Global CCS Institute(2024)「GLOBAL STATUS OF CCS 2024」

(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>)

624 富士経済(2022)「カーボンリサイクル CO₂削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022」

625 富士経済(2022)「カーボンリサイクル CO₂削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022」

626 富士経済(2022)「カーボンリサイクル CO₂削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022」

627 Global CCS Institute データベース「CO₂RE」 <https://co2re.co/>

628 有識者インタビュー

629 Global CCS Institute データベース「CO₂RE」 <https://co2re.co/>

630 有識者インタビュー

631 Global CCS Institute(2023)「GLOBAL STATUS OF CCS 2023」

(<https://status23.globalccsinstitute.com/>)

632 IEA「CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market」(2023)

(<https://www.iea.org/reports/ccus-policies-and-business-models-building-a-commercial-market>)

633 Shell ウェブサイト(<https://www.shell.co.jp/>)

634 シーエムシー・リサーチ(2022)「世界のCCUS総合分析」

-
- 635 環境省 (2022) 「第3回 CCS 事業コスト・実施スキーム検討ワーキンググループ (CCS バリューチェーンコスト
(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/jisshi_kento/003.html)
- 636 富士経済 (2022) 「カーボンリサイクル CO2 削減関連技術・材料市場の現状と将来展望 2022」
- 637 三菱重工「CCUS 説明会」
(https://www.mhi.com/jp/finance/library/business/pdf/2021_ccus.pdf)
- 638 三菱重工プレスリリース (2021年5月6日)
(<https://www.mhi.com/jp/news/210506.html>)
- 639 シーエムシー・リサーチ (2022) 「世界の CCUS 総合分析」
- 640 三菱重工 (2021) 「CCUS 説明会」
(https://www.mhi.com/jp/finance/library/business/pdf/2021_ccus.pdf)
- 641 Global CCS Institute (2023) 「GLOBAL STATUS OF CCS 2023」
(<https://status23.globalccsinstitute.com/>)
- 642 IEA 「CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market」 (2023)
(<https://www.iea.org/reports/ccus-policies-and-business-models-building-a-commercial-market>)
- 643 Global CCS Institute 「STATE OF THE ART:CCS TECHNOLOGIES 2023」(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/state-of-the-art-ccs-technologies-2023/>)
- 644 Anker Carbon Capture ウェブサイト (<https://akercarboncapture.com/>)
- 645 LINDE ウェブサイト (<https://www.engineering.linde.com/CO2>)
- 646 Carbon Clean ウェブサイト(<https://www.carbonclean.com/>)
- 647 Aker Carbon Capture ウェブサイト (<https://akercarboncapture.com/>)
- 648 Summit carbon solutions ウェブサイト(<https://summitcarbonsolutions.com/>)
- 649 Denbury ウェブサイト(<https://www.denbury.com/>)
- 650 The Oakland Institute 「THE GREAT CARBON BOONDOGGLE」
(2022)(<https://www.oaklandinstitute.org/midwest-carbon-express-summit-carbon-solutions>)
- 651 JOGMEC 「ExxonMobil、CCS の Denbury とシェールの Pioneer を買収へ」
(2023)(https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1009585/1009920.html)
- 652 Global CCS Institute (2024) 「GLOBAL STATUS OF CCS 2024」
(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>)
- 653 The Oakland Institute 「THE GREAT CARBON BOONDOGGLE」
(2022)(<https://www.oaklandinstitute.org/midwest-carbon-express-summit-carbon-solutions>)
- 654 JETRO 「CCUS 普及のカギを握るパイプライン、中西部開発の行方は (米国)」 (2023)

-
- (<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0903/39128e9433965acc.html>)
- 655 シーエムシー・リサーチ (2022)「世界の CCUS 総合分析」。エネルギー効率は苫小牧 PJ を参照したもので、CO₂ 放散に要する熱量と分離回収設備の電力消費を加味した数値（算出式は「CO₂ 放散塔リボイラー熱量 (GJ/t-CO₂) / (スチームボイラー効率) + 分離・回収設備電力消費量 (kWh/t-CO₂) × (電気熱量換算係数) / (代表発電効率)）
- 656 NEDO ウェブサイト (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101541.html)
- 657 Global CCS Institute 「STATE OF THE ART:CCS TECHNOLOGIES 2024」
(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technologycompendium2024/>)
- 658 Honeywell ウェブサイト (<https://www.honeywell.com/us/en>)
- 659 Global CCS Institute 「STATE OF THE ART:CCS TECHNOLOGIES 2024」
(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technologycompendium2024/>)
- 660 C-Capture ウェブサイト (<https://c-capture.co.uk/>)
- 661 シーエムシー・リサーチ (2022)「世界の CCUS 総合分析」
- 662 NEDO ウェブサイト (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101541.html)、
(https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101534.html)
- 663 RITE ウェブサイト (<https://www.rite.or.jp/chemical/theme/2014/04/solid3.html>)
- 664 Global CCS Institute 「STATE OF THE ART:CCS TECHNOLOGIES 2024」
(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technologycompendium2024/>)
- 665 CAPTIVATE TECHNOLOGY ウェブサイト (<https://www.captivatetechnology.com/>)
- 666 NEDO ウェブサイト (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101541.html)
- 667 日本ガイシプレスリリース (2021/11/12) (https://www.ngk.co.jp/news/20211112_1.html)
- 668 NEDO ウェブサイト (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101541.html)
- 669 NEDO ウェブサイト (https://www.nedo.go.jp/koubo/EV3_100246.html)
- 670 川崎重工プレスリリース (2020/9/24)
(https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20200924_1.html)
- 671 NEDO ウェブサイト (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101541.html)
- 672 NEDO ウェブサイト (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101541.html)
- 673 経済産業省 (2021)「CO₂ の分離回収等技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」(<https://www.meti.go.jp/press/2021/01/20220120007/20220120007.html>)
- 674 NEDO ウェブサイト (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101541.html)
- 675 シーエムシー・リサーチ (2022)「世界の CCUS 総合分析」
- 676 シーエムシー・リサーチ (2022)「世界の CCUS 総合分析」
- 677 Global CCS Institute (2021)「GLOBAL STATUS OF CCS 2021」

(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/global-status-of-ccs-2021/>)

678 Global CCS Institute (2021) 「Technology Readiness and Costs for CCS」

(<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/technology-readiness-and-costs-of-ccs/>)

679 有識者インタビュー

680 Svante プレスリリース (<https://www.svanteinc.com/news/svante-secures-commercial-supply-of-mof-advanced-sorbent-materials-with-basf-for-carbon-capture-market/>)

(<https://www.svanteinc.com/news/svante-to-deploy-first-of-a-kind-commercial-scale-carbon-capture-plant-at-delek-uss-texas-refinery-with-doe-support/>)

681 Innovation Fund ウェブサイト

(https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3787)

682 Carbon Capture Demonstration Projects ウェブサイト

(<https://www.energy.gov/oced/carbon-capture-demonstration-projects-program-update>)

683 NETL 「SUMMARY INFORMATION FOR EXTRAMURAL R&D AWARDS」

(<https://www.netl.doe.gov/node/2476>)

684 CORDIS(<https://cordis.europa.eu/projects>)

685 経済産業省 (2021) 「CO₂ の分離回収等技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」 (<https://www.meti.go.jp/press/2021/01/20220120007/20220120007.html>)

686 経済産業省 (2021) 「CO₂ の分離回収等技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画」 (<https://www.meti.go.jp/press/2021/01/20220120007/20220120007.html>)

687 IEA 「CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market」 (2023)

(<https://www.iea.org/reports/ccus-policies-and-business-models-building-a-commercial-market>)

688 JETRO 「EU、2030年までのGHG排出55%削減に向けたFit for 55関連法案がほぼ成立」 (2023/10)

689 GCCSI 最新ニュース (<https://jp.globalccsinstitute.com/news-media/latest-news/gccsi%E3%83%A1%E3%83%87%E3%82%A3%E3%82%A2%E3%83%AA%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%82%BC%E3%82%B0%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%83%90%E3%83%ABccs%E3%82%A4%E3%83%B3%E3%82%B9%E3%83%86%E3%82%A3%E3%83%86%E3%83%A5-6/>)

690 EU 理事会 プレスリリース (<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/11/19/council-greenlights-eu-certification-framework-for-permanent-carbon-removals-carbon-farming-and-carbon-storage-in-products/>)

691 JOGMEC 「米国インフレ削減法成立と石油・天然ガス上流開発産業に対する影響」 (2022/9)(https://oilgas-info.jogmec.go.jp/info_reports/1009226/1009474.html)

-
- 692 IFRI (2019) 「Carbon Capture, Storage and Utilization to the Rescue of Coal? Global Perspectives and Focus on China and the United States」
(<https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/carbon-capture-storage-and-utilization-rescue-coal-global-perspectives>)
- 693 IEA 「CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market」 (2023)
(<https://www.iea.org/reports/ccus-policies-and-business-models-building-a-commercial-market>)
- 694 IEA 「CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market」 (2023)
(<https://www.iea.org/reports/ccus-policies-and-business-models-building-a-commercial-market>)
- 695 IEA 「Policies database」 (<https://www.iea.org/policies/about>)
- 696 IEA 「CCUS Policies and Business Models: Building a Commercial Market」 (2023)
(<https://www.iea.org/reports/ccus-policies-and-business-models-building-a-commercial-market>)
- 697 経済産業省 「二酸化炭素の貯留事業に関する法律（CCS 事業法）について」
(https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/carbon_dioxide/pdf/001_03_00.pdf)
- 698 オーストラリア政府 「Carbon Capture Technologies Program」
(<https://www.dcceew.gov.au/about/news/carbon-capture-technologies-program-grant-recipients-announced>)
- 699 Calix ウェブサイト (<https://calix.global/news/calix-awarded-15m-grant-zero-emissions-lime-cement-ccu-plant/>)
- 700 MCI Carbon ウェブサイト (<https://mcicarbon.com/mci-carbon-awarded-14-5m-carbon-capture-technologies-program-grant-to-accelerate-mission/>)
- 701 ADB (2022) 「Road Map Update for Carbon Capture, Utilization, and Storage Demonstration and Deployment in the People's Republic of China」
(<https://www.adb.org/publications/road-map-update-carbon-capture-utilization-storage-prc>)
- 702 CCUS SET-PLAN (2021) 「CCUS ROADMAP TO 2030 EU」 (<https://ccus-setplan.eu/news/ccus-roadmap-to-2030/>)
- 703 経済産業省 (2022) 「CCS 長期ロードマップ検討会中間とりまとめ 参考資料」
(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/20220527_report.html)
- 704 環境省 「「廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性」 (2023/9)
- 705 貴機構提供情報
- 706 東京都環境局ウェブサイト

-
- 707 Euro-Lex ウェブサイト
- 708 米国 EPA ウェブサイト
- 709 World Resources Institute 「World Greenhouse Gas Emissions: 2020」 (2023/10)
- 710 世界銀行 「What a Waste 2.0, A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050」
- 711 環境省 「令和 5 年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書」
- 712 環境省 「令和 3 年度一般廃棄物処理実態調査結果」 (2023/4)
- 713 David Meng-Chuen Chen *et al* 2020 *Environ. Res. Lett.* 15 074021 「The world's growing municipal solid waste: trends and impacts」
- 714 世界銀行 「What a Waste 2.0, A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050」
- 715 世界銀行 「What a Waste 2.0, A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050」
- 716 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 27, No. 5, pp. 319-324, 2016 「廃棄物処理技術としての MBT システムの現状と展望」
- 717 一般社団法人産業環境管理協会 「リサイクルデータブック 2023」 (2023/07)
- 718 一般社団法人産業環境管理協会 「リサイクルデータブック 2023」 (2023/07)
- 719 一般社団法人産業環境管理協会 「リサイクルデータブック 2023」 (2023/07)
- 720 一般社団法人産業環境管理協会 「リサイクルデータブック 2023」 (2023/07)
- 721 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 26, No. 2, pp. 120 - 129, 2015 「国外の廃棄物焼却炉における高効率発電のための焼却技術」
- 722 有識者インタビュー
- 723 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 30, No. 4, pp. 253 - 263, 2019 「再生可能エネルギー100%に向けた第4世代地域熱供給の動向と国内への展望」
- 724 Zero Waste Europe “Zero Waste Europe urges comprehensive inclusion of waste incineration in EU Emissions Trading System” (2024/06)
- 725 各社ウェブサイト、サステナビリティレポート
- 726 各社ウェブサイト、サステナビリティレポート
- 727 日立造船株式会社 「JCM 設備補助事業シンポジウム 2019 「廃棄物処理・発電分野における海外インフラ展開」」 (2018/11)
- 728 日立造船株式会社 「JCM 設備補助事業シンポジウム 2019 「廃棄物処理・発電分野における海外インフラ展開」」 (2018/11)
- 729 環境省 「産業廃棄物の排出及び処理状況等 (令和 3 年度実績) について」 (2024/03)
- 730 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 33, No. 1, pp. 54- 61, 2022 「廃棄物焼却施設における CCUS への取り組み」
- 731 東芝レビュー, 第 74 巻, 第 3 号, pp. 35-39 (2019) 「北村英夫: 様々な排ガス源に対応可能な二酸化炭素分離回収技術」
- 732 “Waste-to-energy technology integrated with carbon capture – Challenges and opportunities” P. Wienchol *et al.* / *Energy* 198 (2020) 117352

-
- 733 都産技研 TIRI NEWS [EYE] 第 17 回 酸素燃焼技術による CCS
- 734 B&W ウェブサイト
- 735 B&W ウェブサイト
- 736 carbon clean ウェブサイト
- 737 GLOBAL CCS INSTITUTE 「Veolia 社及び Carbon Clean 社、英国エネルギー回収施設で初の CO2 回収試験を開始」 (2021/02)
- 738 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 33, No. 1, pp. 54- 61, 2022 「廃棄物焼却施設における CCUS への取り組み」
- 739 佐賀市ウェブサイト
- 740 第 10 回メタネーション推進官民協議会「日立造船グループの廃棄物・資源 循環分野における脱炭素化の取組」
- 741 JFE エンジニアリング ニュースリリース「清掃工場の排ガスから CO2 を回収する実証実験を開始 ～CO2 回収提案の標準化 (JFE CCU-Ready) ～」 (2021/01)
- 742 各社ウェブサイト
- 743 Ørsted News 「Ørsted begins construction of Denmark's first carbon capture project」 (2023/12)
- 744 businesswire 「Babcock & Wilcox Partners with Kiewit Industrial to Develop and Deliver World's Largest Net-Negative CO2 Biomass-to-Energy Facility for Fidelis New Energy Using B&W's Advanced Biomass and Proprietary OxyBright™ Carbon Capture Technologies」 (2022/03)
- 745 各社ウェブサイト
- 746 Sysav 「Lunds universitet och Sysav samarbetar kring att utveckla världsunik energisnål metod för att fånga in koldioxid」 (2021/12)
- 747 各社ウェブサイト
- 748 Boson Energy ウェブサイト、有識者インタビュー
- 749 各社ウェブサイト
- 750 各社ウェブサイト
- 751 Fulcrum Bioenergy ウェブサイト
- 752 Enerkem ウェブサイト
- 753 各社ウェブサイト
- 754 廃棄物資源循環学会誌「資源循環分野におけるバイオメタンおよびバイオメタネーション技術」 (2022)
- 755 Electrochaea ウェブサイト
- 756 MicroPyros ウェブサイト
- 757 Q Power ウェブサイト
- 758 Nature Energy 「Power-to-X plant put into operation」 (2023/03)

-
- 759 Daigas グループ「バイオガス中の未利用 CO2 の有効利用を目指したバイオメタネーション技術の開発」
- 760 DOE BETO 「2023 Peer Review Biomethanation to Upgrade Biogas to Pipeline Grade Methane」(2023/5)
- 761 PubMed を用いて ADL 調査
- 762 Electrochaea Press Release 「Power-to-Gas: Electrochaea is awarded patent on super single-celled organisms for biomethane Production」(2017/02)
- 763 DOE EERE 「Waste-to-Energy from Municipal Solid Wastes」(2019/8)
- 764 BETO 「Waste-to-Energy」
- 765 PNNL 「PNNL Announces Hydrothermal Liquefaction Innovation」(2023/3)
- 766 NREL 「Biogas Upgrading and Waste-to-Energy」
- 767 JETRO 「欧州委、繊維製品に関する拡大生産者責任を提案、域外事業者も対象」(2023/07)
- 768 JETRO 「EU の循環型経済政策 (2022 年 10 月)」(最終更新 2023/03)
- 769 JETRO 「米環境保護庁、2030 年リサイクル率 50%達成のための「国家リサイクル戦略」を発表」(2021/11)
- 770 EU 「Questions and answers; Guidelines on State aid for climate, environmental protection and energy 2022」
- 771 EU 「LIFE Programme」
- 772 DOE 「DOE Announces Technical Assistance for Local Governments on Waste-to-Energy」(2021/6)
- 773 DOE 「Department of Energy Announces \$29.5 Million for Improved Bioenergy Resource Recovery and Conversion System」(2022/8)
- 774 DOE 「Funding Notice: Clean Hydrogen Production, Storage, Transport and Utilization to Enable a Net-Zero Carbon Economy」
- 775 JETRO 「欧州委、繊維製品に関する拡大生産者責任を提案、域外事業者も対象」(2023/07)
- 776 JETRO 「EU、エネルギー部門のメタン排出削減規則案で政治合意、化石燃料輸入時に排出制限も」(2023/11)
- 777 BIOGAS WORLD 「RENEWABLE NATURAL GAS QUALITY SPECIFICATIONS IN NORTH AMERICA」(2019/3)
- 778 欧州自動車工業会 (ACEA) プレスリリース <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-1-9-in-november-2024-year-to-date-battery-electric-sales-5-4/>
- 779 IEA 「Global EV Outlook 2024」<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- 780 IEA 「Global EV Outlook 2020」<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
- 781 日経新聞 (2020/12/26)

-
- <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUF140BC0U2A710C2000000/>
360KrJAPAN(2020/12/26)<https://36kr.jp/110700/>
- 782 OEM 各社 HP、公開情報等
- 783 日系クロステック「次世代電池業界地図、30年超ぶりの革新技術実用化ラッシュ」
(2023/6) <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/08070/?P=2>
- 784 電池メーカー各社 HP、公開情報等
- 785 360KrJAPAN「中国 CATL 会長「EV 用電池、実際の安全性は試算より低い」」(2025/1)
<https://36kr.jp/305851/>
- 786 アジア経済ニュース「硫化物系固体電池、LG が 30 年までに量産へ」(2025/1)
<https://www.nna.jp/news/2694598>
- 787 有識者インタビュー
- 788 日経新聞 (2022/5/10)
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC287U50Y2A420C2000000/>
- 789 LMC Automotive「Global Light Vehicle Powertrain Forecast with Battery & e Motor Module」(2023 年 Q1 予測値)
- 790 JOGMEChttps://mric.jogmec.go.jp/news_flash/20191225/122050/、
Marklineshttps://www.marklines.com/ja/members/sign_up?unloginurl=%2Fja%2Fnews%2F249378、
CATL <https://www.catl.com/en/news/841.html>、Nikkei Asia (2020/12/25)
<https://asia.nikkei.com/Business/Technology/BYD-s-EV-battery-recycling-goes-global-with-Itochu>
- 791 Jetro <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/08/9f42f54936de1e86.html>、日経
BP<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01231/00075/>、有識者インタビュー
- 792 有識者インタビュー
- 793 日経 XTECH「蓄電池の地政学」(2023/11)
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02421/111300026/>、ロイター (2023/8)
<https://jp.reuters.com/business/UO2K5PEHTRIGZPHANPPMF6KQFE-2023-08-16/>
- 794 電池メーカー各社 HP、公開情報等
- 795 安全保障貿易情報センター「中国商務部による黒鉛及びその関連品目の輸出規制について」
(2023/10) <https://www.cistec.or.jp/service/uschina/20231026.pdf>
- 796 JETRO「EU、重要原材料法案で政治合意、中国依存軽減を狙う」
(2023/11)<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/11/08d025683aa6c90d.html>
- 797 Mysteel「China used EV batteries recycling standards 2019 vs. 2024」(2025/1)
<https://www.mysteel.net/news/5060681-china-used-ev-batteries-recycling-standards-2019-vs-2024>
- 798 富士経済「HEV, EV 関連市場徹底分析調査 2023」
- 799 矢野経済「車載モータ市場の最新動向と将来展望 2020」

-
- 800 JOGMEC 「レアアースの供給と課題」 https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2024/06/mrseminar2024_01_02.pdf
- 801 SPEEDA 「レアメタル 業界の動向 -世界市場-
- 802 株式会社レアリサ 「マレーシアの輸出制限及びベトナムの増産による希土類市場への影響」 (2025/1) <https://rareresearch.co.jp/impact-on-the-rare-earth-market-due-to-malaysias-export-restrictions-and-vietnams-production-increase/>
- 803 Jetro 「米商務省、ネオジム磁石の輸入に関する 232 条調査を開始」 (2021/9) <https://www.jetro.go.jp/biznews/2021/09/b8f95a3cbdabf7e4.html>
- 804 ENEOS 総研 https://www.eri.eneos.co.jp/report/research/pdf/20220822_01_write.pdf, 有識者インタビュー
- 805 富士キメラ総研 「2022 自動運転・AI カー市場の将来展望」、矢野経済研究所 (2022) 「Global Automated Driving Systems Market: Key Research Findings 2022」、IDTechEX (2020) 「Autonomous Cars and Robotaxis 2020-2040: Players, Technologies and Market Forecast」を基に ADL 作成
- 806 IEA 「Global EV Outlook 2024」
- 807 Technavio 「Autonomous Cars Software Market by Product and Geography - Forecast and Analysis 2023-2028」、有識者インタビュー
- 808 日経 xtech <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/05843/>、Volkswagen/CARIAD <https://cariad.technology/de/en/news/stories/vw-os-software-platform-explained.html>
- 809 Energy Shift <https://energy-shift.com/news/3554e02e-3264-4c00-9b56-3cc0689fc5db>、有識者インタビュー
- 810 有識者インタビュー
- 811 JETRO 「自動運転の社会実装を進める米国」 (2023/06/29) <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2023/bcdf631c4ffdb352.html>
- 812 WIRED 「自動運転タクシーに強まる逆風、GM が傘下のクルーズへの支出を大幅削減へ」 (2023/11)、「テスラの自動運転技術のリコールに見る「本質的な課題」の中身」 (2023/02) <https://wired.jp/article/cruise-gm-spending-accident/>, <https://wired.jp/article/teslas-full-self-driving-recall-targets-a-fundamental-flaw/>
- 813 各社 HP 及びプレスリリース
- 814 各社 HP 及びプレスリリース
- 815 Response <https://response.jp/article/2021/09/09/349320.html>、日経 Xtech <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01537/00064/>
- 816 有識者インタビュー
- 817 Continental <https://www.continental.com/en/presse/studien-publikationen/autonomous-mobility-sensortechnology/>

-
- 818 ASRA <https://asra.jp/>, Car Watch
「<https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/1580381.html>」
- 819 BIS 「自動運転車シミュレーションソリューションの世界市場（2020年～2031年）」
- 820 有識者インタビュー
- 821 有識者インタビュー
- 822 富士カメラ総研 「2022 自動運転・AI カー市場の将来展望」、
pwc <https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/column/automotive-research-and-development/iso-sotif.html> 、
MONOist <https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/1108/30/news002.html>
- 823 富士カメラ総研 「2022 自動運転・AI カー市場の将来展望」、
TheVerge <https://www.theverge.com/2022/2/3/22916045/congress-autonomous-vehicle-hearing-av-start-legislation> 、
JETRO <https://www.jetro.go.jp/biznews/2020/01/9968da679ddc1b89.html>
- 824 NHTSA 「Automated Vehicles for Safety」、
ERTRAC 「Connected Automated Driving Roadmap – 2019 update」、
日経新聞（2020/11/11）
- 825 india.gov.in(National portal of india) HP、SVKM'S NMIMS LAW REVIEW 2022-2023
Journal and blog <https://indiaai.gov.in/article/five-autonomous-navigation-initiatives-by-indian-government>、<https://lawreview.nmims.edu/self-driving-cars-and-india-a-call-for-inclusivity-under-the-indian-legal-position/>
- 826 SVKM'S NMIMS LAW REVIEW 2022-2023 Journal and blog,
<https://lawreview.nmims.edu/self-driving-cars-and-india-a-call-for-inclusivity-under-the-indian-legal-position/>
- 827 IEA 「Global EV Outlook 2024」、 「Global EV Data Explorer(2024/4/23 更新版)」
- 828 BIPROGY <https://pr.biprogy.com/solution/lob/energy/ems/>
- 829 小桔充電 <http://xjcd.didiglobal.com/> 、有識者インタビュー
- 830 GAIA-X <https://gaia-x.eu/> 、
MARKLINES https://www.marklines.com/ja/report_all/rep1787_201811 、
ビジネス IT <https://www.sbbi.jp/article/cont1/56622> 、
日経 XTREND（2019/2/4） <https://xtrend.nikkei.com/atcl/contents/18/00042/00018/>
- 831 Statistics Market Research Consulting 「エネルギーマネジメントシステムの世界市場予測」
- 832 MarketsandMarkets（2024） 「フリートマネジメントの世界市場：コンポーネント別、フリータイプ別、業界別、地域別・予測（～2028年）」
- 833 有識者インタビュー
- 834 三井物産 https://www.mitsui.com/jp/ja/ir/investor/plus/1226476_11083.html

-
- 835 有識者インタビュー
- 836 有識者インタビュー
- 837 Enel X <https://evcharging.enelx.com/ca/en/products/juicenet-software/juicenet-enterprise>
- 838 PANION <https://www.panion.org/de/panion-charging/#charging-operation-monitoring>
- 839 JETRO (2022/9/22) <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/09/5c0986fa2a9a53ff.html>
- 840 JETRO (2023/11/29) <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0903/ee20a6e817f98cd5.html>
- 841 California Air Resources Board <https://ww2.arb.ca.gov/resources/fact-sheets/advanced-clean-fleets-regulation-summary>、HVIP <https://californiahvip.org/>
- 842 日本経済新聞 (2024/1/12) <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGM11DS30R10C24A1000000/>
- 843 「広州市水素産業発展計画(2019-2030年)」
- 844 IEA 「Global EV Data Explore(2024/4/23 更新版)」
- 845 中国国務院 「新能源汽车产业发展规划 (2021—2035年)」、
Batteries News <https://batteriesnews.com/china-already-doing-ev-battery-swapping-heres-everything-you-need-know/>
- 846 ロイター (2023/11/21) <https://jp.reuters.com/business/autos/5VFSVWLUOFKXPPCDFXTK25WTZE-2023-11-21/>
- 847 IEEI <https://ieei.or.jp/2021/06/yamamoto-blog210602/>
- 848 IEEI <https://ieei.or.jp/2021/06/yamamoto-blog210602/>
- 849 IEA 「Global EV Data Explorer(2024/4/23 更新版)」
- 850 driivz <https://driivz.com/blog/california-bill-bidirectional-charging/>
- 851 GDO <https://www.energy.gov/gdo/grid-resilience-and-innovation-partnerships-grip-program>
- 852 中国 国家发展改革委 国家能源局 https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202203/t20220322_1320017.html?code=&state=123
- 853 Energy Monitor <https://www.energymonitor.ai/sectors/china-looks-to-apply-flexible-time-of-use-electricity-tariffs-nationwide/>
- 854 Hager group <https://hagergroup.com/en/blog/sustainability/bidirectional-charging-legislation>
- 855 JETRO <https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/12/b83d70ee519eab78.html>
- 856 Emissions-EUETS.com <https://emissions-euets.com/internal-electricity-market-glossary/1434-dynamic-pricing>
- 857 Office for zero emission vehicle <https://www.gov.uk/government/organisations/office-for-zero-emission-vehicles>

-
- 858 MARKLINES https://www.marklines.com/ja/report/rep2012_202004
- 859 EUR-Lex <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016DC0766>
- 860 SiC; yole “Power SiC 2023
- 861 yole “Power GaN 2022”
- 862 ResearchandMarkets “Gallium Oxide in Semiconductors Market (2021-2030)”
- 863 日系 XTECH “SiC パワーデバイスが 2025 年について離陸、EV への大量搭載が契機 (2022/06/29)”、有識者インタビュー
- 864 Yole “Power SiC 2022”、2022 化合物半導体関連市場の現状と将来展望 (富士キメラ総研)
- 865 各種公開情報
- 866 各種公開情報
- 867 Yole “Power GaN 2022”
- 868 各種公開情報、有識者インタビュー
- 869 日系 XTECH “テスラ採用で ST が SiC 第 1 ラウンド制す、ロームやインフィニオンが猛追 (2022 年 7 月 7 日) ”、“マツダが SiC 搭載 EV を 2025 年以降に投入、ローム製モジュールを使用 (2022 年 11 月 22 日) ”、各社 HP、各種公開情報
- 870 各種公開情報
- 871 各種公開情報
- 872 各種公開情報
- 873 各種公開情報
- 874 Silicon Carbide (SiC) patents support the emergence of a complete domestic supply chain in China (Knowmade)
- 875 Silicon Carbide (SiC) patents support the emergence of a complete domestic supply chain in China (Knowmade)
- 876 SiC 成本逐步下降, 行业有望迎来爆发拐点 (德邦证券)
- 877 各種公開情報
- 878 各種公開情報
- 879 各種公開情報
- 880 各種公開情報
- 881 Verified Market Research(2021) Data Center Market Size, Share, Trends, Opportunities & Forecast (verifiedmarketresearch.com)
- 882 DBJ Report(2021/11) 「データセンター業界レポート～データセンター業界の最新の動向～」
- 883 IEA 「Electricity 2024 Analysis and forecast to 2026」
- 884 ITU プレスリリース(2020/2) [Press Release \(itu.int\)](https://www.itu.int/press-releases/2020/02/)
- 885 DBJ Report(2021/11) 「データセンター業界レポート～データセンター業界の最新の動向～」

-
- 886 DBJ Report(2021/11)「データセンター業界レポート～データセンター業界の最新の動向～」, 日経クロステック (2020/05) SRAM と DRAM を代替へ、AI では 1/1000 の省エネに | 日経クロステック (xTECH) (nikkei.com)
- 887 DBJ Report(2021/11)「データセンター業界レポート～データセンター業界の最新の動向～」
- 888 DBJ Report(2021/11)「データセンター業界レポート～データセンター業界の最新の動向～」
- 889 ZD Net Japan(2015/01)アマゾン、イスラエルの半導体企業 Annapurna Labs を買収へ--米報道 - ZDNet Japan
- 890 Google Website Train and run machine learning models faster | Cloud TPU | Google Cloud
- 891 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画 (案) の概要」
- 892 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画 (案) の概要」
- 893 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画 (案) の概要」
- 894 日経クロステック(2021/8) 砂漠に向かう GAF A の巨大データセンター、新たな環境問題を生む「迷惑施設」に反発も | 日経クロステック (xTECH) (nikkei.com)
- 895 日系クロステック (2019/5) グーグルが日本に自社データセンター建設へ、立地は首都圏屈指の「DC 銀座」 | 日経クロステック (xTECH) (nikkei.com)
- 896 日経クロステック (2020/05) SRAM と DRAM を代替へ、AI では 1/1000 の省エネに | 日経クロステック (xTECH) (nikkei.com)
- 897 日経クロステック (2020/05) SRAM と DRAM を代替へ、AI では 1/1000 の省エネに | 日経クロステック (xTECH) (nikkei.com)
- 898 日経クロステック(2023/11) Microsoft が Oracle クラウドの顧客に、生成 AI に使う GPU 不足はここまで深刻 | 日経クロステック (xTECH) (nikkei.com)
- 899 ソフトバンク プレスリリース (2023/05) NVIDIA、ソフトバンクの生成 AI と 5G/6G 向け次世代データセンターでの Grace Hopper Superchip 活用に向けソフトバンクと協業～Arm ベースの Superchip と BlueField-3 DPU を活用した革新的なアーキテクチャーにより、生成 AI を活用したワイヤレス通信を実現～ | 企業・IR | ソフトバンク (softbank.jp)
- 900 COBO Website HOME | COBO - Consortium for On-Board Optics (onboardoptics.org)
- 901 CPO Website Co-Packaged Optics Collaboration (copackagedoptics.com)
- 902 RISC-V International HP https://riscv.org/
- 903 UCle Website Home | My Site (uciexpress.org)
- 904 NTT Website IOWN 構想とは? その社会的背景と目的 | NTT R&D Website (rd.ntt)

-
- 905 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要」
- 906 Cisco Website [Silicon Photonics in Pluggable Optics White Paper - Cisco](#), Intel Website [Intel Labs Announces Integrated Photonics Research Advancement](#), Nvidia Website [NVIDIA LinkX Ethernet Optical Transceivers | NVIDIA](#)
- 907 AIO Core Website [Optical I/O core | AIO core Co., Ltd.](#), 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要」
- 908 NEC (2024/9)「400Gbps 高速データセンタ間接続と構築運用コスト 50%削減・電力消費量 40%削減を実現する IOWN ネットワークソリューションの提供開始」
- 909 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要」
- 910 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要」
- 911 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要」
- 912 VentureBeat (2020/7)[Energy-efficient processors and memory reduce your carbon footprint | VentureBeat](#)
- 913 VentureBeat (2020/7)[Energy-efficient processors and memory reduce your carbon footprint | VentureBeat](#)
- 914 AMD Website [AMD エネルギー効率イニシアチブ「25x20」 | AMD](#)
- 915 AMD Website [AMD EPYC™ and Amazon Web Services \(AWS\) EC2 Instances | AMD](#)
- 916 Lightmatter HP <https://lightmatter.co/>
- 917 日経クロステック (2020/05) [SRAM と DRAM を代替へ、AI では 1/1000 の省エネに | 日経クロステック \(xTECH\) \(nikkei.com\)](#), 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要」
- 918 日経クロステック (2020/05) [SRAM と DRAM を代替へ、AI では 1/1000 の省エネに | 日経クロステック \(xTECH\) \(nikkei.com\)](#), 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要」
- 919 経済産業省商務情報政策局 (2021/07)「次世代デジタルインフラの構築」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画(案)の概要」
- 920 IT media PC USER (2022/01) [PCI Express 6.0 の仕様策定が完了 転送速度は 16 レーンで最大毎秒 256GB に - ITmedia PC USER](#)
- 921 REUTERS 「米WDとキオクシアの統合交渉、条件整わず中断＝関係者」(2023/10/27)
- 922 IBM Website [DRMaestro: orchestrating disaggregated resources on virtualized data-centers for Journal of Cloud Computing | IBM Research](#)

-
- 923 NTT Website IOWN 構想とは？ その社会的背景と目的 | NTT R&D Website (rd.ntt)
- 924 IEA (2024/01) 「Electricity 2024 Analysis and forecast to 2026」
- 925 EU (2021/05) 「European industrial technology roadmap for the next generation cloud-edge offering」
- 926 総務省 「令和 6 年版 情報通信白書 第 II 部 情報通信分野の現状と課題 第 8 節 データセンター市場及びクラウドサービス市場の動向」
- 927 Europe Commission (2023/09) 「Study on the Economic Potential of Far Edge Computing in the Future Smart Internet of Things Final Report」
- 928 Samsung (2022/08) 「技術ブログ[Exynos のすべて]①GPU・ISP 開発リーダーとの対話」
- 929 ケータイ Watch(2023/10)「インタビュー クアルコム「Snapdragon 8 Gen 3」カメラ機能開発の背景、キーパーソンのヒープ氏に聞く」
- 930 Arm (2022/02) 「Arm、運転支援・自動化テクノロジーの採用拡大に向けて、車載向けイメージングプロセッサの新製品を発表」
- 931 日経 XTECH (2022/06) 「ルネサスが真っ先に採用、8カメラ対応の Arm の新 ISP コア」
- 932 日経 XTECH (2021/05) 「搭載数を半減できる」、オムニビジョンが新画像プロセッサ」
- 933 日経 XTECH (2023/12) 「サムスンがソニー対抗イメージセンサー、ロボや XR に向けグローバルシャッター品」
- 934 経済産業省 (2024/08) 「IoT 製品に対するセキュリティ適合性評価制度構築方針」
- 935 経済産業省 (2023/02) 「IoT 製品に対するセキュリティ適合性評価制度の構築について」
- 936 JETRO (2022/11) 「米連邦通信委、安全保障上の脅威となる通信機器の中国 5 社からの輸入・販売認証を禁止」
- 937 NTT データ経営研究所 (2024/04) 「本年施行予定の EU サーバーレジリエンス法について」
- 938 JETRO (2023/12) 「EU、デジタル化や循環型経済に対応の製造物責任指令案で政治合意」
- 939 総務省「平成 30 年版 情報通信白書」
- 940 長島・大野・常松法律事務所 (2024/02) 「個人情報保護・プライバシー 2023 年の振り返りと 2024 年の展望」
- 941 Business Lawyers (2024/04) 「EU データ法の解説 - 適用場面ごとのルールと日本企業が講ずべき実務対応を整理」
- 942 JETRO (2023/05) 「始動した CHIPS プログラム、サプライチェーンが与える影響は」
- 943 EU (2024/12) 「EU Funding Programmes」
- 944 ジェトロビジネス短信 2022 年 10 月 12 日 “国際航空で 2050 年に CO2 排出実質ゼロへ、ICAO が採択” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/10/a09b7eb79a104e10.html>)
- 945 IATA プレスリリース 2023 年 6 月 4 日 “IATA Releases Strategic Roadmaps to Showcase Critical Steps to Reach Net Zero by 2050” (<https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-06-04-03/>)
- 946 IATA “Aircraft Technology Net Zero Roadmap”

(<https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/aircraft-technology-net-zero-roadmap.pdf>)

947 国交省 プレスリリース 2023年6月20日 “G7 三重・伊勢志摩交通大臣会合の結果について” (<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001615280.pdf>)

948 ATAG 2022年9月 “WAYPOINT 2050 second edition”
(https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf)

949 WEF プレスリリース 2021年9月23日 “持続可能な航空燃料の割合を2030年までに10%に増加、「クリーン・スカイズ・フォー・トゥモロー」のリーダーたちが発表”

(<https://jp.weforum.org/press/2021/09/jp-clean-skies-ambition-statement/>)

950 日本経済新聞 2023年6月6日 “世界の航空、再生燃料で連携 脱炭素へ置き換え9割必要”
(<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGR051EE0V00C23A6000000/>)

951 Boeing プレスリリース 2023年2月15日 “ボーイング、民間航空機用の SAF 調達量を倍増” (<https://www.boeing.jp/ニュース/プレスリリース/2023/february/ボーイング、民間航空機用のSAF調達量を倍増.page>)

952 TRACY 2022年7月24日 “アメリカン航空、Gevo と SAF 購入に合意 5年間で5億ガロン” (<https://www.traicy.com/posts/20220724245940/>)

953 JAL プレスリリース 2022年3月2日 “国産 SAF（持続可能な航空燃料）の商用化および普及・拡大に取り組む有志団体「ACT FOR SKY」を設立”

(<https://press.jal.co.jp/ja/items/uploads/31deea543ce119ed0408a64dbefcf135611efa0e.pdf>)

954 IATA “Energy and New Fuels Infrastructure Net Zero Roadmap”

(<https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/energy-and-new-fuels-infrastructure-net-zero-roadmap.pdf>)

955 有識者インタビュー

956 有識者インタビュー

957 IATA プレスリリース 2023年6月6日 “SAF Production Set for Growth but Needs Policy Support to Diversify Sources” (<https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-06-06-01/>)

958 IATA 「IATA and Partners Release Aviation Net Zero Roadmaps Comparative Review」
(<https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-04-17-01/>)

959 IATA 「SAF Volumes Growing but Still Missing Opportunities」
(<https://www.iata.org/en/pressroom/2023-releases/2023-12-06-02/>)

960 WEF 「Scaling Up Sustainable Aviation Fuel Supply: Overcoming Barriers in Europe, the US and the Middle East」 (<https://www.weforum.org/publications/scaling-sustainable-aviation-fuel-supply-overcoming-barriers-in-europe-north-america-and-the-middle-east/>)

961 PWC 「Sustainable aviation fuel study 2023 From feedstock to flight」

(<https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/aerospace-defense/sustainable-aviation->

fuel.html)

962 Boeing SAF Dashboard(<https://cascade.boeing.com/perspectives/boeing-saf-dashboard/>)

963 Mission Possible Partnership 「Making Net-Zero Aviation Possible An industry-backed, 1.5°C-aligned transition strategy」 (<https://www.energy-transitions.org/publications/making-net-zero-aviation-possible/>)

964 Royal Netherlands Aerospace Centre 「Destination 2050 A route To Net Zero European Aviation」 (https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/02/Destination2050_Report.pdf)

965 Clean Sky 「Hydrogen-powered aviation A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050」 (https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/06/20200507_Hydrogen-Powered-Aviation-report_FINAL-web-ID-8706035.pdf)

966 ICCT 「What to expect when expecting electric airplanes」 (<https://theicct.org/aviation-global-expecting-electric-jul22/>)

967 Heart Aerospace 社ニュースリリース(<https://heartaerospace.com/newsroom/>)

968 easyJet 「NET ZERO PATHWAY」 (https://s203.q4cdn.com/522538739/files/doc_downloads/easyjet-nz-roadmap.pdf)

969 各社 (Airbus, Boeing, Embraer, ATR, COMAC) 決算資料

970 Clean Aviation HP(<https://www.clean-aviation.eu/>)

971 NASA EPFD(<https://www.nasa.gov/directorates/armd/iasp/epfd/>)

972 有識者インタビュー

973 有識者インタビュー

974 ZeroAvia プレスリリース 2022年10月6日 “ZeroAvia Acquires Leading Fuel Cell Stack Innovator Hypoint” (<https://zeroavia.com/hypoint-acquisition/>)

975 Airbus プレスリリース 2022年6月23日 “Airbus and Linde to cooperate on hydrogen infrastructure for airports” (<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-06-airbus-and-linde-to-cooperate-on-hydrogen-infrastructure-for>)

976 CNN 2022年12月2日 “水素燃料電池を搭載する航空機、エアバスが計画発表” (<https://www.cnn.co.jp/travel/35196889.html>)

977 Airbus HP(<https://www.airbus.com/en/innovation/energy-transition/hybrid-and-electric-flight/cityairbus-nextgen>)

978 有識者インタビュー

979 Lufthansa Technik 「Redesigned A320 unveiled - Hydrogen Aviation Lab is taking shape」 (<https://www.lufthansa-technik.com/en/redesigned-a320-unveiled-hydrogen-aviation-lab-is-taking-shape-ced61fd858e5390f>)

980 Air France KLM 「Paris Region, Choose Paris Region, Groupe ADP, Air France-KLM and

-
- Airbus reveals the winners of the worldwide call for expressions of interest regarding the setup of an Hydrogen branch in airports」 (<https://www.airfranceklm.com/en/paris-region-choose-paris-region-groupe-adp-air-france-klm-and-airbus-reveals-winners-worldwide-call>)
- 981 Zero Avia 「KLM and ZeroAvia Plan Zero-Emission Demonstration Flight Using Liquid Hydrogen」 (<https://zeroavia.com/klm-plan-zero-emission-demo-flight/>)
- 982 Rolls Royce 「ロールス・ロイス、イージージェットと世界初の水素を使った航空エンジンの試験実施」 (<https://www.rolls-royce.com/country-sites/japan/discover/2022/rr-and-easyjet-test-worlds-first-hydrogen-powered-aircraft-engine.aspx>)
- 983 Joby Aviation HP(<https://www.jobyaviation.com/>)
- 984 Lilium Air Mobility HP(<https://lilium.com/>)
- 985 MagniX HP(<https://www.magnix.aero/>)
- 986 Heart Aerospace HP(<http://heartaerospace.com/>)
- 987 Embraer HP(<https://embraercommercialaviationsustainability.com/concepts/>)
- 988 ZeroAvia HP(<https://zeroavia.com/>)
- 989 Airbus 「Successful HyPERION pilot project paves the way for civil aviation hydrogen propulsion」 (<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2023-06-successful-hyperion-pilot-project-paves-the-way-for-civil-aviation>)
- 990 NASA 「NASA, Industry Partners Unveil Hybrid Electric Aircraft Paint Schemes」 (<https://www.nasa.gov/image-article/nasa-industry-partners-unveil-hybrid-electric-aircraft-paint-schemes/>)
- 991 Joby Aviation 「Joby Begins Flight Testing with Pilot on Board」 (<https://www.jobyaviation.com/news/joby-begins-flight-testing-pilot-on-board/>)
- 992 Lilium 「Lilium Reaffirms 2026 Target for First Customer Deliveries and Provides Additional Detail on Testing Program」 (<https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-reaffirms-2026-target-for-first-customer-deliveries-and-provides-additional-detail-on-testing-program>)
- 993 Airbus ニュースリリース(<https://www.airbus.com/en/newsroom>)
- 994 ボーイングジャパン 「ボーイング、日本に研究開発拠点を開設」 (<https://www.boeing.jp/press-releases/2024/boeing-opens-r-and-d-center-in-japan>)
- 995 日経新聞 「エアバス、日本に初の研究拠点 新素材や脱炭素技術開発」 (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUC23BRS0T20C24A5000000/>)
- 996 ESG Journal 2022年8月1日 “Boeing、炭素ゼロの未来への最適な飛行ルートを示すモデルを発表” (<https://esgjournaljapan.com/world-news/19681>)
- 997 CompositesWorld 2022年2月10日 “Boeing all-composite cryogenic fuel tank proves technology readiness” (<https://www.compositesworld.com/news/boeing-all-composite-cryogenic-fuel-tank-proves-technology-readiness>)
- 998 Fortune 2023年1月26日 “Boeing’s chief sustainability officer: ‘We can’t count on

hydrogen-powered commercial flights before 2050” (<https://fortune.com/2023/01/26/boeings-chief-sustainability-officer-we-cant-count-on-hydrogen-powered-commercial-flights-before-2050/>)

⁹⁹⁹ Tech Crunch 2023 年 3 月 3 日 “Universal Hydrogen takes to the air with the largest hydrogen fuel cell ever to fly” (https://techcrunch.com/2023/03/02/universal-hydrogen-takes-to-the-air-with-the-largest-hydrogen-fuel-cell-ever-to-fly/?guccounter=1&guce_referrer=aHR0cHM6Ly9oeWRyb2dlbi5hZXJvLw&guce_referrer_sig=AQAAAL1z0CsOHZTHsVZPx6Aq18JFQCCR9PAxvBGDntu3nZXVEUQ6tA1tLb41isatoI00QlRI7kXWuu1oa_nPQ0RvOMtjIYbovq24IWuBWDdaiq9yktk3dFJzkXJPDpByYMyLKwiK0cmDpzD2dOyXPC88XslkswlhcrwFtpZlpx-D1)

¹⁰⁰⁰ Aviation Wire 2023 年 4 月 7 日 “DHC-8-300、水素燃料電池で初飛行 三菱 HC キャピタル出資の米ベンチャーUH2” (<https://www.aviationwire.jp/archives/274133>)

¹⁰⁰¹ 有識者インタビュー

¹⁰⁰² NASA OIG 2023 年 5 月 17 日 “NASA’s Electrified Aircraft Propulsion Research and Development Efforts” (<https://oig.nasa.gov/docs/IG-23-014.pdf>)

¹⁰⁰³ GE 2022 年 7 月 19 日 “High Five: GE, NASA Test Hybrid Electric System For Planes At High-Altitude Conditions For First Time” (<https://www.ge.com/news/reports/high-five-ge-nasa-test-hybrid-electric-system-for-planes-at-high-altitude-conditions-for>)

¹⁰⁰⁴ PR Newswire 2022 年 9 月 28 日 “magnix Powers Aviation’s All-Electric Alice Aircraft for Historic First Flight” (<https://www.prnewswire.com/news-releases/magnix-powers-aviations-all-electric-alice-aircraft-for-historic-first-flight-301635377.html>)

¹⁰⁰⁵ Simple Flying 2023 年 6 月 8 日 “Wisk Aero Is Now A Fully-Owned Boeing Subsidiary” (<https://simpleflying.com/wisk-aero-boeing-subsidiary/>)

¹⁰⁰⁶ Airbus プレスリリース 2023 年 6 月 9 日 “EcoPulse demonstrator takes shape ahead of Paris Airshow” (<https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2023-06-ecopulse-demonstrator-takes-shape-ahead-of-paris-airshow>)

¹⁰⁰⁷ Heart Aerospace 2022 年 9 月 15 日 “Heart Aerospace unveils new airplane design, confirms Air Canada and Saab as new shareholders” (<https://heartaerospace.com/heart-aerospace-unveils-new-airplane-design-confirms-air-canada-and-saab-as-new-shareholders/>)

¹⁰⁰⁸ 航空新聞社 jwing.net 2023 年 1 月 19 日 “NASA・ボーイング、遷音速トラス支持翼実証機開発・飛行試験へ” (<https://www.jwing.net/news/61166>)

¹⁰⁰⁹ NASA プレスリリース 2023 年 6 月 13 日 “Next Generation Experimental Aircraft Becomes NASA’s Newest X-Plane” (<https://www.nasa.gov/press-release/next-generation-experimental-aircraft-becomes-nasa-s-newest-x-plane>)

¹⁰¹⁰ to70 2022 年 3 月 18 日 “How airports can prepare as hydrogen aviation advances” (<https://to70.com/how-airports-can-prepare-as-hydrogen-aviation-advances/>)

-
- ¹⁰¹¹ Airbus 「Innovative aviation liquid hydrogen project launched」
(<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-05-innovative-aviation-liquid-hydrogen-project-launched>)
- ¹⁰¹² Airbus 「Airbus, Kansai Airports, Kawasaki Heavy Industries to accelerate readiness of hydrogen aircraft operations」 (<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2024-10-airbus-kansai-airports-kawasaki-heavy-industries-to-accelerate>)
- ¹⁰¹³ Air Liquide プレスリリース 2023年6月16日 “Air Liquide and Groupe ADP announce the creation of “Hydrogen Airport”, the first joint venture to support the development of hydrogen infrastructure in airports”
- ¹⁰¹⁴ CompositesWorld 2020年10月23日(発行)/2022年7月11日(更新) “Carbon fiber in pressure vessels for hydrogen” (<https://www.compositesworld.com/articles/cfrp-pressure-vessels-for-hydrogen>)
- ¹⁰¹⁵ ZeroAvia プレスリリース 2023年4月17日 “ZeroAvia and Absolut Hydrogen Partner to Develop Liquid Hydrogen Refueling Infrastructure for Aircraft Operations”
(<https://zeroavia.com/absolut-hydrogen-partnership/>)
- ¹⁰¹⁶ Business leaders square wisdom 「空飛ぶクルマの商業化で一步先んじるのは米国か」
(<https://wisdom.nec.com/ja/series/koike/2023022401/index.html>)
- ¹⁰¹⁷ Lilium 「Lilium partners with Star Charge to develop best-in-class charging system for eVTOL operations」 (<https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-partners-with-star-charge-to-develop-best-in-class-charging-systems-for-evtol-operations>)
- ¹⁰¹⁸ 日経 XTECH 2022年8月5日 “空飛ぶクルマはハイブリッドが現実解、ホンダもガスタービンに注力” (<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/02128/00009/>)
- ¹⁰¹⁹ HONDA 社 HP “Honda eVTOL vol.2”
(https://www.honda.co.jp/future/EngineerTalk_eVTOL2/)
- ¹⁰²⁰ HONDA 社 HP “Honda eVTOL vol.1”
(https://www.honda.co.jp/future/EngineerTalk_eVTOL1/)
- ¹⁰²¹ fabcross for エンジニア 2023年3月17日 “航続距離 1000km の eVTOL 「Vertiia」 が初の飛行試験に成功” (https://engineer.fabcross.jp/arcive/230317_vertiia.html)
- ¹⁰²² Fabcross for エンジニア 2023年7月23日 “Eve Air Mobility とユナイテッド”
(https://engineer.fabcross.jp/arcive/230723_evtol.html)
- ¹⁰²³ FLYING 2022年6月9日 “Joby Secretly Bought a Hydrogen-Electric Aircraft Developer” (<https://www.flyingmag.com/joby-secretly-bought-a-hydrogen-electric-aircraft-developer/>)
- ¹⁰²⁴ Rolls-Royce プレスリリース “ロールス・ロイス、ハイブリッド電動による飛行の実現に向けて新型小型エンジンの試験開始へ” (<https://www.rolls-royce.com/country-sites/japan/discover/2023/new-rolls-royce-small-engine-set-to-begin-tests-to-advance-hybrid->

electric-flight.aspx)

1025 日本経済新聞 2023年6月20日 “ロールス・ロイス、ガスタービンで新型 燃費 15%改善へ” (<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOGR19CES0Z10C23A6000000/>)

1026 Volocopter プレスリリース “Groupe ADP & Volocopter at Forefront of Electric Urban Air Mobility: A World First in Summer 2024” (<https://www.volocopter.com/newsroom/volocopter-paris-routes/>)

1027 business leaders square wisdom 2023年2月24日 “空飛ぶクルマの商業化で一步先んじるのは米国か” (<https://wisdom.nec.com/ja/series/koike/2023022401/index.html>)

1028 SBD 2023年3月9日 “eVTOLの成長のカギは自動車メーカーが握る?” (<https://www.sbdautomotive.com/ja/post/do-car-makers-hold-the-keys-to-evtol-growth>)

1029 ジェトロビジネス短信 「国際航空で2050年にCO2排出実質ゼロへ、ICAOが採択」 (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/10/a09b7eb79a104e10.html>)

1030 国交省 プレスリリース 「G7 三重・伊勢志摩交通大臣会合の結果について」 (<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001615280.pdf>)

1031 IATA HP 「Jet Fuel Price Monitor」 (<https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>)

1032 IATA 「Net Zero Roadmaps」 (<https://www.iata.org/en/programs/sustainability/roadmaps/>)

1033 DNV 2024年10月3日閲覧 “Alternative fuels insight platform” (<https://afi.dnv.com/statistics/16486173-4f14-4cc5-b9f6-f2f4b4c47a15>)

1034 IEA 2021年5月 “Net Zero by 2050” (https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf)

1035 IRENA 2021年10月 “A pathway to DECARBONISE THE SHIPPING SECTOR By 2050” (<https://www.irena.org/publications/2021/Oct/A-Pathway-to-Decarbonise-the-Shipping-Sector-by-2050>)

1036 ABS 2020年4月 “Setting the Course to Low Carbon Shipping” (<https://absinfo.eagle.org/acton/attachment/16130/f-982b1623-4d26-4b04-91c5-25453a6e2fba/1/-/-/-/low-carbon-shipping-outlook.pdf>)

1037 IEA 2022年9月 “Global Hydrogen review 2022” (<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>)

1038 Mission Possible Partnership 2022年9月 “MAKING NET-ZERO AMMONIA POSSIBLE” (<https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-1.5-Aligned-Ammonia-possible.pdf>)

1039 International Chamber of Shipping “Vessel orders could outpace green methanol supply” (<https://www.ics-shipping.org/news-item/vessel-orders-could-outpace-green-methanol->

supply/)

1040 経済産業省 2022年3月29日 “水素・アンモニアを取り巻く現状と今後の検討の方向性”

(https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/001_03_00.pdf)

1041 SPEEDA レポート 2023年6月20日 “アンモニア” (<https://www.speeda.com/trends/119/overview?3>)

1042 商船三井 プレスリリース 2023年6月15日 “米国ルイジアナ州でのクリーンアンモニア生産・輸送プロジェクトに出資参画” (<https://www.mol.co.jp/pr/2023/23080.html>)

1043 Yala Press Release 2023年3月31日 “Yara and Enbridge to develop and construct a low-carbon blue ammonia project at Enbridge Ingleside Energy Center”

(<https://www.yara.com/corporate-releases/yara-and-enbridge-to-develop-and-construct-a-low-carbon-blue-ammonia-project-at-enbridge-ingleside-energy-center/>)

1044 日本経済新聞 2022年9月27日 “三菱商事、米国でアンモニア製造検討 最大年1000万トン”

(https://www.nikkei.com/nkd/industry/article/?DisplayType=1&n_m_code=092&ng=DGXZQOUC27B6T0X20C22A9000000)

1045 Business AnalytiQ “Ammonia price index”

<https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/ammonia-price-index/>

1046 BloombergNEF “Scaling up hydrogen: The case for low carbon ammonia”

1047 財務省貿易統計

1048 IEA 「World Energy Outlook2024」

1049 DNV 「Transition Outlook 2024」

1050 Rystad Energy Cube Dashboards 「Ammonia Market」

1051 Business AnalytiQ “Grey/Green Hydrogen price index”

<https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/green-hydrogen-price-index/>

<https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/grey-hydrogen-price-index/>

1052 IRENA “Global Hydrogen Trade to Meet The 1.5°C Climate Goal”

1053 Methanex (<https://www.methanex.com/about-methanol/pricing/>)

1054 IRENA “Innovation Outlook Renewable Methanol”

1055 日本郵船 2021年3月4日 “脱炭素化に向けた取り組みについて”

(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/023_01_00.pdf)

1056 国土交通省 2020年3月 “国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ”

(<https://www.mlit.go.jp/common/001386774.pdf>)

1057 MSC “2023 Sustainability Report”

1058 Maersk Decarbonising oceans(<https://www.maersk.com/sustainability/our-esg->

priorities/climate-change/decarbonising-ocean-shipping)

¹⁰⁵⁹ 商船三井 “環境ビジョン 2.2”

(https://www.mol.co.jp/sustainability/environment/vision/pdf/vision22/mol_group_environmental_vision_2.2.pdf)

¹⁰⁶⁰ MAN “Navigating the future-fuel outlook for large merchant marine vessels”

(<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/About/Events/Documents/Regional%20Conference%20in%20Asia%20and%20the%20Pacific/presentation%209%20-%20Sangbae%20Cha.pdf>)

¹⁰⁶¹ Wartsila “Sustainable fuels for shipping by 2050”

(<https://www.wartsila.com/insights/whitepaper/sustainable-fuels-for-shipping-by-2050-industry-report>)

¹⁰⁶² Green Car Congress “Wärtsilä and Samsung Heavy to collaborate on ammonia-fueled engines for future newbuilds” (<https://www.greencarcongress.com/2021/09/20210927-wartsila-2.html>)

¹⁰⁶³ Ammonia Energy Association “New marine engine partnerships to accelerate deployment” (<https://ammoniaenergy.org/articles/new-marine-engine-partnerships-to-accelerate-deployment/>)

¹⁰⁶⁴ Maersk “Maersk signs shipbuilding contract for world's first container vessel fueled by carbon neutral methanol” (<https://www.maersk.com/news/articles/2021/07/01/container-fueled-by-carbon-neutral-methanol>)

¹⁰⁶⁵ WinGD “WinGD and Hyundai Heavy Industries collaborate on ammonia two-stroke engine delivery” (<https://www.wingd.com/en/news-media/press-releases/wingd-and-hyundai-heavy-industries-collaborate-on/>)

¹⁰⁶⁶ Ministry of Foreign Affairs of Denmark (<https://sydkorea.um.dk/en/about-korea/bilateral-relations>)

¹⁰⁶⁷ 韓国産業通商資源部 “Korea and Greece enter MOU for joint tech development in green shipbuilding” (<https://english.motie.go.kr/eng/article/EATCLffca659a6/1639/view>)

¹⁰⁶⁸ Offshore Energy “Korea and Norway join forces on clean energy, eco-friendly and smart ships” (<https://www.offshore-energy.biz/korea-and-norway-join-forces-on-clean-energy-eco-friendly-and-smart-ships/>)

¹⁰⁶⁹ IMO 2023 年 3 月 31 日 “Report on the study on the readiness and availability of low-and zero-carbon ship”

(<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/WhatsNew/Documents/MEPC80.I NF10.pdf>)

¹⁰⁷⁰ DNV “Maritime Forecast to 2050 Energy Transition Outlook 2022”

(<https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2022/index.html>)

¹⁰⁷¹ 日本海事新聞 2021 年 9 月 16 日 “<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=270978>”

(<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=270978>)

¹⁰⁷² Riviera “WinGD-backed quartet clears way for China to build first ammonia engines”(https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/wingd-backed-quartet-clears-way-for-china-to-build-first-ammonia-engines-78813)

¹⁰⁷³ Hydrogen Central 2022年12月28日 “Hyundai Heavy Group Opens the Age of Hydrogen for Ship Fuel” (<https://hydrogen-central.com/hyundai-heavy-group-opens-hydrogen-ship-fuel/>)

¹⁰⁷⁴ HD Hyundai “HD Hyundai to Develop Large Liquefied Hydrogen Carrier” (<http://www.hd-hyundai.com/?p=115&idx=1039>)

¹⁰⁷⁵ TradeWinds “Wartsila targets 2025 for launch of pure hydrogen ship engine” (https://www.tradewindsnews.com/technology/wartsila-targets-2025-for-launch-of-pure-hydrogen-ship-engine/2-1-1591060?zephrr_sso_ott=1UzouM)

¹⁰⁷⁶ Ship & Banker 2023年4月25日 “Interview : Toft set out MSC’s view on future fuels” (<https://shipandbunker.com/news/world/807156-interview-ceo-soren-toft-sets-out-mscs-view-on-future-fuels>)

¹⁰⁷⁷ Hydrogeninsight 2022年11月30日 “Hydrogen-based shipping | We’ll use methanol now and ammonia later - if it’s ready, says Maersk” (<https://www.hydrogeninsight.com/transport/hydrogen-based-shipping-well-use-methanol-now-and-ammonia-later-if-its-ready-says-maersk/2-1-1363838>)

¹⁰⁷⁸ IMO 2023年3月31日 “Report on the study on the readiness and availability of low and zero-carbon ship” (<https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/WhatsNew/Documents/MEPC80.I NF10.pdf>)

¹⁰⁷⁹ Yonhap News Agency 2020年7月23日 “Hyundai Mipo gets approval for ammonia-fueled ships from Lloyd’s Register” (<https://en.yna.co.kr/view/AEN20200723004600320>)

¹⁰⁸⁰ OFFSHORE ENERGY 2021年8月19日 “Samsung Heavy gets AiP for basic design of ammonia fuel-ready ship” (<https://www.offshore-energy.biz/samsung-heavy-gets-aip-for-basic-design-of-ammonia-fuel-ready-ship/>)

¹⁰⁸¹ Lloyd’s Register Press release 2020年10月6日 “LR awards AiP to ammonia-fuelled 23,000 TEU ultra-large container ship” (<https://www.lr.org/en/about-us/press-room/press-release/lr-awards-aip-to-ammonia-fuelled-23000-teu-ultra-large-container-ship/>)

¹⁰⁸² Ship&Bunker1 2023年7月13日 “MAN B&W Complete First Test Run of an Ammonia Marine Engine” (<https://shipandbunker.com/news/world/668375-man-bw-competes-first-test-run-of-an-ammonia-marine-engine>)

¹⁰⁸³ 日刊海事プレス 2023年7月10日 “MAN、アンモニアでの試験を開始、新燃料エンジンの実現に前進” (<https://www.kaijipress.com/news/shipbuilding/2023/07/176782/>)

-
- 1084 ENERGYWATCH 2023 年 4 月 12 日 “MAN expects to put ammonia engine up for sale in late 2025” (<https://energywatch.com/EnergyNews/Renewables/article15573771.ece>)
- 1085 Korea IT Times 「Samsung Heavy Industries Completes 'Ammonia Demonstration Facility' for Eco-Friendly Ship Fuel」
- 1086 Sphera 2021 年 4 月 15 日 “2nd Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel” (<https://sphera.com/research/2nd-life-cycle-ghg-emission-study-on-the-use-of-lng-as-marine-fuel/>)
- 1087 MAN Energy & solution 「Can methane slip be controlled?」 (<https://man-es.com/discover/can-methane-slip-be-controlled>)
- 1088 日刊海事プレス 2023 年 3 月 1 日 “バルチラら、EU資金でメタンスリップ削減技術を開発” (<https://www.kaijipress.com/news/shipbuilding/2023/03/173618/>)
- 1089 Diesel & Gas Turbine WORLDWIDE 2023 年 2 月 27 日 “Wärtsilä, Shell part of methane slip project” (<https://www.diesलगasturbine.com/news/wartsila-shell-part-of-methane-slip-project/8026993.article>)
- 1090 日本財団 2023 年 3 月 “欧州主要造船関連企業動向 2022” (<https://www.jstra.jp/PDF/c804322a2058ba37272fcc4bcbac5ddc138d2c40.pdf>)
- 1091 日本海事新聞 2022 年 8 月 3 日 “WinGD、新システム初受注。メタンスリップ大幅削減” (<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=279521>)
- 1092 DNV “Smells like sustainability: Harnessing ammonia as ship fuel” (<https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Harnessing-ammonia-as-ship-fuel/>)
- 1093 WinGD “FAQS Ammonia Dual-Fuel Engines X-DF A”(<https://www.wingd.com/en/documents/general/brochures/wingd-ammonia-faq-booklet/>)
- 1094 Offshore Energy “HD KSOE develops scrubber technology for ammonia-fueled ships” (<https://www.offshore-energy.biz/hd-ksoe-develops-scrubber-technology-for-ammonia-fueled-ships/>)
- 1095 Marine LINK “Unmanned Engine Room Planned for Ammonia-Fueled Ships” (<https://www.marinelink.com/news/unmanned-engine-room-planned-517357>)
- 1096 Dupuy et al 「Experimental study of RCCI engine Ammonia combustion with diesel pilot injection」
- 1097 Technische Universität München 「Ammonia as a fuel for high-pressure direct injection combustion in marine engines」
- 1098 Argus 2021 年 10 月 5 日 “ICS urges IMO to target net zero by 2050” (<https://www.argusmedia.com/en/news/2260609-ics-urges-imo-to-target-net-zero-by-2050>)
- 1099 Maersk Press Release 2022 年 1 月 12 日 “A.P. Moller - Maersk accelerates Net Zero emission targets to 2040 and sets milestone 2030 targets” (<https://www.maersk.com/news/articles/2022/01/12/apmm-accelerates-net-zero-emission->

targets-to-2040-and-sets-milestone-2030-targets)

1100 日本海事協会 2023年7月10日 “IMO MEPC 80 審議速報”

(https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/info_service/imo_and_iacs/MEPC80_sum.pdf)

1101 国土交通省プレスリリース 2023年7月11日 “国際海運「2050年頃までに GHG 排出ゼロ」目標に合意” (<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001619435.pdf>)

1102 東京海上日動マリンニュース 2023年3月7日 “BIMCO ETS-Emission Trading Scheme Allowance Clause for Time Charter Parties 2022 の制定について” (https://www.tokiomarine-nichido.co.jp/hojin/marine_site/news/pdf/marine_news_230307.pdf)

1103 日本海事新聞 2023年4月20日 “欧州議会、海運の排出量取引を承認。24年開始、GHG がコストに” (<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=286108>)

1104 日本海事新聞 2023年5月31日 “令和時代の海事法務 (24) ”

(<https://www.jmd.co.jp/article.php?no=287093>)

1105 国土交通省プレスリリース 2022年9月29日 “国際海事機関 (IMO) 第8回貨物運送小委員会 (CCC 8) の開催結果概要” (<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001515070.pdf>)

1106 国土交通省“国際海事機関 (IMO) 第10回貨物運送小委員会 (CCC 10) の開催結果概要” (https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji06_hh_000328.html)

1107 国土交通省 内航カーボンニュートラル推進に向けた検討会 2023年1月24日 “第6回検討会 参考資料1-4” (<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001584357.pdf>)

1108 Think ESG 2022年11月9日 “海運の脱炭素に向けて「Green Shipping Challenge」COP27にて発表” (https://thinkesg.jp/green-shipping-challenge_cop27/)

1109 日本郵船 2022年11月28日 “海運業界における環境規制動向と日本郵船の取り組み” (https://www.nyk.com/ir/pdf/20221128_environment.pdf)

1110 South Korea Ministry of Oceans and Fisheries 2020年11月4日 “2030 Greenship-K Promotion Strategy to Dominate the Global Green Ship Market”

(<https://www.mof.go.kr/page/en/selectPage.do?menuSeq=1588&pageSeq=1017>)

1111 The Maritime Executive 2021年9月9日 “South Korean Government Pledges Premium Ship Construction Leadership” (<https://maritime-executive.com/article/south-korean-government-pledges-premium-ship-construction-leadership>)

1112 Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) Republic of Korea 2023年2月14日 “대한민국 해운산업, 바다위 무탄소 운송 이끈다”

(<https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?menuSeq=971&bbsSeq=10&docSeq=49155>)

1113 Argus Media Group 2023年2月22日 “Korea unveils roadmap for net zero in shipping by 2050” (<https://www.argusmedia.com/en/news/2422258-korea-unveils-roadmap-for-net-zero-in-shipping-by-2050>)

1114 韓国経済協会 「K-조선 초격차 비전

2040」(https://www.fomek.or.kr/main/policy/law/policy_view.php?wr_id=1050)

(https://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=220402#google_vignette)

-
- 1115 日本海事協会 2020年11月9日 “2020 ClassNK 技術セミナー IMO 第4次 GHG 調査結果の概略” (https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/seminar/2020/ri_1.pdf)
- 1116 IMO 2023年4月3日 “REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS Report on the study on the readiness and availability of low- and zero-carbon ship technology and marine fuels” (<https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/WhatsNew/Documents/MEPC80.I NF10.pdf>)
- 1117 UMAS “4th IMO GHG Study: Some answers to specific questions” (<https://www.seacargocharter.org/wp-content/uploads/2020/10/UMAS-4th-IMO-GHG-Study-Some-answers-to-specific-questions.pdf>)
- 1118 国土交通省 2022年3月 “国際海運の2050年カーボンニュートラル達成に向けて” (<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001484435.pdf>)
- 1119 国土交通省 2023年2月6日 “海事分野の低・脱炭素化に向けた取組” (<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001586146.pdf>)
- 1120 OECD-FAO Agricultural Outlook 「OECD-FAO Agricultural Outlook」 ([OECD-FAO Agricultural Outlook 2024-2033](#))
- 1121 国際農研 HP ([559. 世界の農地拡大の動向 | 国立研究開発法人 国際農林水産業研究センター | JIRCAS](#))
- 1122 Our World in Data([Fertilizers - Our World in Data](#))
- 1123 Statista” Global demand for agricultural fertilizer by nutrient from 2011/2012 to 2022/2023”(World fertilizer demand by nutrient 2023 | Statista)
- 1124 International Fertilizer Association (IFA) “Public Summary – Medium-Term Fertilizer Outlook 2022-2026”
- 1125 Mordor Intelligence 「GLOBAL BIOSTIMULANT MARKET」、BPIA (Biopesticide Industry Alliance) website
- 1126 IPCC 「Global Warming of 1.5°C」
- 1127 Biochar for Sustainable Soils
- 1128 International Biochar Initiative “State of the Biochar Industry 2015” (2016)
- 1129 <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/biochar-market-100750>
- 1130 US Biochar Initiative "Survey and Analysis of the US Biochar Industry Preliminary Report Draft; August 16, 2018" (2018)
- 1131 EBC 「European Biochar Market Report 2020」 (February 2021)([Market-Overview_public_2021-02-17_V1.01.pdf \(biochar-industry.com\)](#))
- 1132 農研機構農業環境変動研究センター“バイオ炭の国際的動きと今後の研究方針”(2021)
- 1133 European Biochar Industry (EBI) Consortium “European Biochar Market Report 2021/2022” (2022/03)

-
- 1134 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) AR6 WGIII “Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change” (2022)
- 1135 農林水産省農産局農業環境対策課「バイオ炭をめぐる事情」(令和5年6月) ([biochar-1.pdf](https://maff.go.jp/biochar-1.pdf) (maff.go.jp))
- 1136 Recent Perspectives in Biochar Production, Characterization and Applications, Asfaw Gezae Daful et al., Recent Perspectives in Pyrolysis Research (2021)([Recent Perspectives in Biochar Production, Characterization and Applications | IntechOpen](#))
- 1137 経済産業省グリーンイノベーション基金 HP
- 1138 International Biochar Initiative “State of the Biochar Industry 2014” (2015)
- 1139 Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources Washington State University “Biomass to Biochar: Maximizing the Carbon Value” (2022/01)
- 1140 International Biochar Initiative (IBI) “Biochar Production Technologies” European Biochar Industry (EBI) Consortium “European Biochar Market Report 2021/2022” (2022/03)
- 1141 農研機構プレスリリース (土層改良を目的とした「炭」の低コスト製造装置 | プレスリリース・広報 (naro.go.jp))
- 1142 明和工業株式会社 HP
- 1143 S. Shackley, et al., "The feasibility and costs of biochar deployment in the UK“ *Carbon Management* **2011**, *2*, 335
- 1144 Maryam Nematian et.al, A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass, *Waste Management* Volume 135, November 2021, Pages 467-477
- 1145 Suzanne Allaire, PhD “Economics of producing biochar” ([Economics of producing biochar](#))
- 1146 農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター フードサプライチェーンにおける脱炭素化の実践とその可視化の在り方等検討会資料 ([r2_3-8.pdf](#) (maff.go.jp))
- 1147 Leilei et al., Integrating Biochar, Bacteria, and Plants for Sustainable Remediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants, *Environ. Sci. Technol.* **2022**, *56*, 16546–16566([Integrating Biochar, Bacteria, and Plants for Sustainable Remediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants | Environmental Science & Technology \(acs.org\)](#))
- 1148 Yong et al., Biochar Production, Characterization, and Applications([Biochar: Production, Characterization, and Applications - 1st Edition \(routledge.com\)](#))
- 1149 Ghulam et al., Biochar-Soil-Plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate, *Front. Environ. Sci.*, 14 February 2023Sec. Soil ProcessesVolume 11 - 2023 | <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1059449>([Frontiers | Biochar-Soil-Plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate \(frontiersin.org\)](#))

-
- ¹¹⁵⁰ Kameyama et al., Biochar Amendment of Soils According to their Physicochemical Properties, JAQR 51(2), 117-127(2017)
- ¹¹⁵¹ Ornelle et al., A scoping review on biochar-based fertilizers: enrichment techniques and agro-environmental application, Heliyon 7 (2021) e08473([A scoping review on biochar-based fertilizers: enrichment techniques and agro-environmental application: Heliyon \(cell.com\)](#))
- ¹¹⁵² Leilei et al., Integrating Biochar, Bacteria, and Plants for Sustainable Remediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants, Environ. Sci. Technol. 2022, 56, 16546–16566([Integrating Biochar, Bacteria, and Plants for Sustainable Remediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants | Environmental Science & Technology \(acs.org\)](#))
- ¹¹⁵³ Yong et al., Biochar Production, Characterization, and Applications([Biochar: Production, Characterization, and Applications - 1st Edition \(routledge.com\)](#))
- ¹¹⁵⁴ Ghulam et al., Biochar-Soil-Plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate, Front. Environ. Sci., 14 February 2023Sec. Soil ProcessesVolume 11 - 2023 | <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1059449>([Frontiers | Biochar-Soil-Plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate \(frontiersin.org\)](#))
- ¹¹⁵⁵ Kameyama et al., Biochar Amendment of Soils According to their Physicochemical Properties, JAQR 51(2), 117-127(2017)
- ¹¹⁵⁶ Ornelle et al., A scoping review on biochar-based fertilizers: enrichment techniques and agro-environmental application, Heliyon 7 (2021) e08473([A scoping review on biochar-based fertilizers: enrichment techniques and agro-environmental application: Heliyon \(cell.com\)](#))
- ¹¹⁵⁷ Amit et al., Molecular insights into biochar-mediated plant growth promotion and systemic resistance in tomato against Fusarium crown and root rot disease, Scientific Reports | (2020) 10:13934 | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70882-6>
- ¹¹⁵⁸ Yang et al., A quantitative evaluation of the biochar's influence on plant disease suppress : a global meta-analysis, Biochar (2022) 4:43 <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00164-z> ([A quantitative evaluation of the biochar's influence on plant disease suppress: a global meta-analysis | Biochar \(springer.com\)](#))
- ¹¹⁵⁹ Giuseppina et al., The Suppressive Effects of Biochar on Above- and Belowground Plant Pathogens and Pests: A Review, Plants 2022, 11, 3144. <https://doi.org/10.3390/plants11223144>([Plants | Free Full-Text | The Suppressive Effects of Biochar on Above- and Belowground Plant Pathogens and Pests: A Review \(mdpi.com\)](#))
- ¹¹⁶⁰ Yigal et al., Induction of Systemic Resistance in Plants by Biochar, a Soil-Applied Carbon Sequestering Agent, Phytopathology Volume 100, Issue 9 September 2010Pages840-967([Induction of Systemic Resistance in Plants by Biochar, a Soil-Applied Carbon Sequestering Agent | Phytopathology® \(apsnet.org\)](#))

-
- ¹¹⁶¹ Kameyama et al., Biochar Amendment of Soils According to their Physicochemical Properties, JAQR 51(2), 117-127(2017) (Biochar Amendment of Soils According to their Physicochemical Properties (jst.go.jp))
- ¹¹⁶² Izzudin Ibrahim et al. , Surface Functionalization of Biochar from Oil Palm Empty Fruit Bunch through Hydrothermal Process, Processes 2021, 9(1), 149;
<https://doi.org/10.3390/pr9010149>
- ¹¹⁶³ Xing Yang et al., Multiple-functionalized biochar affects rice yield and quality via regulating arsenic and lead redistribution and bacterial community structure in soils under different hydrological conditions, Journal of Hazardous Materials Volume 443, Part B, 5 February 2023, 130308
- ¹¹⁶⁴ Jianhua Qu et al., Stabilization of lead and cadmium in soil by sulfur-iron functionalized biochar: Performance, mechanisms and microbial community evolution, Journal of Hazardous Materials Volume 425, 5 March 2022, 127876
- ¹¹⁶⁵ 日本バイオ炭普及会 “土壌改良用バイオ炭の施用目安 初版” (2019/01/31)、国際農研“535. 微生物の力で地球に優しい農業を実現” (2022/05/13)
- ¹¹⁶⁶ S. Mukherjee et al., "Biochar-microorganism interactions for organic pollutant remediation: Challenges and perspectives" *Environmental Pollution* **2022**, *308*, 119609.
- ¹¹⁶⁷ 農林水産省 “土壌改良資材”、森林総合研究所 “菌根とは”
- ¹¹⁶⁸ 科学技術振興機構プレスリリース “アーバスキュラー菌根菌の純粋培養に世界で初めて成功～微生物肥料としての大量生産に道～” (2019/06/25)
- ¹¹⁶⁹ 自然科学研究機構 基礎生物学研究所 共生システム研究部門 HP
- ¹¹⁷⁰ NEDO バイオものづくりプロジェクト “未培養/難培養微生物の可培養化技術”
- ¹¹⁷¹ Hongmiao Wu et al., The combination of biochar and PGPBs stimulates the differentiation in rhizosphere soil microbiome and metabolites to suppress soil-borne pathogens under consecutive monoculture regimes, GCB Bioenergy. 2022;14:84–103(The combination of biochar and PGPBs stimulates the differentiation in rhizosphere soil microbiome and metabolites to suppress soil-borne pathogens under consecutive monoculture regimes - Wu - 2022 - GCB Bioenergy - Wiley Online Library)
- ¹¹⁷² Leilei Xiang et al., Leilei et al., Integrating Biochar, Bacteria, and Plants for Sustainable Remediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants, Environ. Sci. Technol. 2022, 56, 16546–16566(Integrating Biochar, Bacteria, and Plants for Sustainable Remediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants | Environmental Science & Technology (acs.org))
- ¹¹⁷³ Fahim Nawaz et al., Biochar Amendment in Combination with Endophytic Bacteria Stimulates Photosynthetic Activity and Antioxidant Enzymes to Improve Soybean Yield Under Drought Stress, Journal of Soil Science and Plant Nutrition (2023) 23:746–760(Biochar Amendment in Combination with Endophytic Bacteria Stimulates

Photosynthetic Activity and Antioxidant Enzymes to Improve Soybean Yield Under Drought Stress | Journal of Soil Science and Plant Nutrition (springer.com)

1174 Laraib Malik et al., Unlocking the potential of co-applied biochar and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture under stress conditions, Malik et al. Chem. Biol. Technol. Agric. (2022) 9:58 <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00327-x>(Unlocking the potential of co-applied biochar and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture under stress conditions | Chemical and Biological Technologies in Agriculture | Full Text (springeropen.com))

1175 Seigo Oouchi et al., 植物生育促進菌類 (PGPF) 入り資材の開発(20000203_rw3.pdf (sumitomo-chem.co.jp))

1176 G. Murtaza et al., “Biochar-Soil-Plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate” *Frontiers in Environmental Science* 2023, 11, 1059449.

1177 Washington State University “Final Report: Use of Biochar from the Pyrolysis of Waste Organic Material as a Soil Amendment” (2009/07)

1178 日本農業新聞「バイオ炭」実証・活用 長野県でプロジェクト始動 農産物消費PRも JAや生協(2022/9/13)

1179 Solange Uwingabire et al., “French Bean Production as Influenced by Biochar and Biochar Blended Manure Application in Two Agro-Ecological Zones of Rwanda”

1180 Muhammad Umair Hassan et al., “Biochar Co-Compost: A Promising Soil Amendment to Restrain Greenhouse Gases and Improve Rice Productivity and Soil Fertility”

1181 Dong Liang et al., “Biochar and Manure Co-Application Increases Rice Yield in Low Productive Acid Soil by Increasing Soil pH, Organic Carbon, and Nutrient Retention and Availability”

1182 Eny Dyah Yuniwati et al., “Biochar technology to increase cassava crop productivity: A study of sustainable agriculture on degraded land”

1183 Han Liu et al., “Biochar and organic fertilizer drive the bacterial community to improve the productivity and quality of *Sophora tonkinensis* in cadmium-contaminated soil”

1184 立命館大学バイオ炭研究センター・日本バイオ炭コンソーシアム キックオフシンポジウム 2023

1185 株式会社 松本微生物研究所 特許第 5916098 号 “植物病害防除資材及び植物病害防除方法”

1186 株式会社 TOWING HP

1187 SBIR 「高機能バイオ炭の大規模製造プロセスの開発及び大規模農地実証」

1188 株式会社 TOWING 「株式会社 TOWING 約 12.5 億円で採択、農林水産省中小企業イノベーション創出推進事業 (SBIR フェーズ 3 基金事業)」

1189 株式会社 TOWING 「TOWING、オーストラリアのバイオ炭事業者 Biocare と CDR プロジェクトで連携」

-
- 1190 Carbon Gold HP
- 1191 Carbon Gold “How does biochar so effectively control nematodes?”
- 1192 バイオ産業人会議 “農業食料にかかわる国際動向について” (2021/07/05)、農林水産省 “みどりの食料システム戦略について” (2021/06)
- 1193 経済産業省 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」 ([2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 \(METI/経済産業省\)](#))
- 1194 農林水産省 “みどりの食料システム戦略について” (2021/06)
- 1195 農林水産省 “みどりの食料システム戦略について” (2021/06)
- 1196 European Commission HP 「Setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU Technical guidance handbook」 ([Carbon Farming \(europa.eu\)](#))
- 1197 European Commission 「Carbon Removal Certification」 ([Carbon Removal Certification \(europa.eu\)](#))
- 1198 USDA 「Agriculture Innovation Agenda」 ([Agriculture Innovation Agenda | USDA](#))、独立行政法人農畜産業振興機構 「海外情報 畜産の情報 2020年4月号」 ([米国農畜産業の展望～2020年農業アウトルック・フォーラムから～ | 農畜産業振興機構 \(alic.go.jp\)](#))
- 1199 Department of Agriculture & Farmers Welfare , Ministry of Agriculture & Farmers Welfare “National Mission for Sustainable Agriculture” (<https://nmsa.dac.gov.in/frmStructure.aspx>)
- 1200 India BioChar and BioResources Network “Policy: Policies From Central and State Governments” (<https://ibbn.org.in/wp-content/uploads/2023/01/Policy.pdf>)
- 1201 International Biochar Initiative (IBI) “Regional Biochar Groups”(<https://biochar-international.org/resources/regional-biochar-groups/>)
- 1202 外務省 「JCM パートナー国」 (https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page1w_000122.html)
- 1203 農林水産省農林水産分野のJ-クレジット制度“バイオ炭について” (<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/jcredit/biochar/biochar.html>)
- 1204 立命館大学バイオ炭研究センター・日本バイオ炭コンソーシアム キックオフシンポジウム 2023 (2023/03/08)
- 1205 三井物産 「【解説】 CO2 排出権取引の国際動向と J-クレジットの未来」 (<https://www.mitsui.com/solution/contents/solutions/offset/133>)
- 1206 GX リーグ設立準備事務局 「来年度から本格稼働する GX リーグにおける排出量取引の考え方について②」 (https://gx-league.go.jp/aboutgxleague/document/01_%E6%9D%A5%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E3%81%8B%E3%82%89%E6%9C%AC%E6%A0%BC%E7%A8%BC%E5%83%8D%E3%81%99%E3%82%8B%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%B0%E3%81%AB%E3%81%8A%E3%81%91%E3%82%8B%E6%8E%92%E5%87%BA%E9%87%8F%E5%8F%96%E5%BC%95%E3%81%AE%E8%80%83%E3%81%88%E6%96%B9%E3%81%AB%E3%81%A4%E3%81%84%E3%81%A6)

-
- 2.pdf)
- 1207 経産省 「GX実現に向けた排出量取引制度の検討に資する法的課題研究会の趣旨等について」
(https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/gx_implementation/pdf/001_03_00.pdf)
- 1208 Puro.earth HP ([Puro.earth - carbon removal standard and registry](#))
- 1209 Puro.earth 「Review of international offsets for Climate Change Authority , Australia」
([11. Puro.earth .pdf \(climatechangeauthority.gov.au\)](#))
- 1210 Carbonfuture HP([Carbonfuture - Carbon Removal You Can Trust](#))
- 1211 Carbonfuture HP([Carbonfuture - Carbon Removal You Can Trust](#))、EBC HP([C-Sink \(european-biochar.org\)](#))
- 1212 Verra methodology VM0044 “Methodology for Biochar Utilization in Soil and Non-Soil Applications, v1.1” (<https://verra.org/methodologies/vm0044-methodology-for-biochar-utilization-in-soil-and-non-soil-applications/>)
- 1213 Carbonfuture HP 「Carbonfuture and Puro.earth Partner to Accelerate Scaling of Durable Carbon Removal」 ([Carbonfuture](#))
- 1214 ESG Journal 「JP モルガン AM、クライメート・アクション 100+から撤退」
(<https://esgjournalljapan.com/world-news/36627>)
- 1215 日本バイオ炭普及会(JBA : Japan Biochar Association) HP ([バイオ炭の規格 | 日本バイオ炭普及会 \(biochar.jp\)](#))
- 1216 European Biochar Certificate (EBC) “Guidelines for a Sustainable Production of Biochar”
- 1217 USBI “Developing Markets to Scale Biochar as a Carbon Removal Technology”
(https://bioenergysummit.com/wp-content/uploads/Miles_Biochar.pdf)
- 1218 International Biochar Initiative (IBI) “Biochar Classification Tool”、
- 1219 林野庁 「森林資源の現況」
(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/keikaku/genkyou/h29/2.html>)
- 1220 FAO 「FAOSTAT」 (2024年10月1日参照)
- 1221 UNCE “Forest Sector Outlook Study, 2020-2040”
(<https://unece.org/forests/publications/forest-sector-outlook-study-2020-2040>)
- 1222 FAO, UNECE “STRUCTURAL CHANGES IN THE FOREST SECTOR AND THEIR LONG-TERM CONSEQUENCES FOR THE FOREST SECTOR A CONTRIBUTION TO THE FOREST SECTOR OUTLOOK STUDY 2020-2040”
(<https://unece.org/sites/default/files/2023-02/DP92-FSOS-2020-2040-structural-changes-web.pdf>)
- 1223 林野庁 “令和3年木材需給表”
- 1224 林野庁 “森林・林業基本計画”

-
- (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/attach/pdf/index-10.pdf>)
- 1225 林野庁 “令和 3 年木材需給表”
- 1226 林野庁 国産材製品の生産及び利用等
(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/singikai/attach/pdf/210115si-13.pdf>)
- 1227 林野庁 “令和 5 年度 森林・林業白書”
- 1228 国土交通省 “建築着工統計調査 2023 年”
- 1229 Council on Tall Building and Urban Habitat “The State of Tall Timber: A Global Audit”(The State of Tall Timber: A Global Audit - CTBUH)
- 1230 The Brainy Insights “Mass Timber Construction Market Size by Material Type (Cross-laminated Timber (CLT), Nail-laminated Timber (NLT), Glue-laminated Timber (GLT), and Others), Application (Residential Construction, Commercial Construction, and Industrial Construction), Regions, Global Industry Analysis, Share, Growth, Trends, and Forecast 2024 to 2033” (<https://www.thebrainyinsights.com/report/mass-timber-construction-market-14017?srsId=AfmBOOpdVd9Pu1ykBOvNjDxKMbALPWi9U8eLbl0pZ5ptcw7vQVFWh1V9>)
- 1231 CROSS-UK “Water ingress to cross-laminated timber structural frame”
(<https://www.cross-safety.org/uk/safety-information/cross-safety-report/water-ingress-cross-laminated-timber-structural-frame-1124>)
- 1232 Construction Management “Timber construction’s insurance challenges and how to overcome them” (<https://constructionmanagement.co.uk/timber-constructions-insurance-challenges-and-how-to-overcome-them/>)
- 1233 国土交通省 “木造建築物の新興施策について”
(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/kidukai/attach/pdf/wcn-35.pdf>)
- 1234 林野庁 “脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律（通称：都市（まち）の木造化推進法）”
(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/koukyou/>)
- 1235 国土交通省 「改正建築基準法について」
(<https://www.mlit.go.jp/common/001576404.pdf>)
- 1236 国土交通省 「木造住宅・建築物の新興施」
(<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/mokuzou.top.html>)
- 1237 木を活かす建築推進協議会 “令和 3 年度 住宅・建築物環境対策事業（サステナブル建築物等先導事業（木造先導型）に関する評価）報告書”
- 1238 林野庁 “森林・林業・木材産業グリーン成長総合対策のうち建築用木材供給・利用強化対策” (<https://www.rinya.maff.go.jp/j/rinsei/yosankesan/attach/pdf/R5kettei-1.pdf>)
- 1239 Polaris Market Research “Cross Laminated Timber Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Type (Adhesive Bonded, Mechanically Fastened); By Industry; By End-Use; By Region; Segment Forecast, 2022 - 2030”

-
- 1240 内閣官房 “CLT の普及に向けた新ロードマップ”
(<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/cltmadoguchi/roadmap.html>)
- 1241 ウッド・チェンジ協議会 高層ビルグループ 「高層木造ビル事例集 令和 6 年度 5 月版」
(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/kidukai/attach/pdf/wckyougikai-39.pdf>)
- 1242 内閣府 “CLT を用いた建築物の一覧 (都道府県別) (R4.7.31 現在) ”
- 1243 有識者インタビュー
- 1244 林野庁 “林業労働力の確保を巡る状況”
- 1245 林野庁 “林業を支える高性能林業機械”
- 1246 林野庁 ”令和 2 年度森林・林業白書”
- 1247 経済産業省 「工業統計調査 2020 年品目別統計表」(2011 年～2019 年)、「経済センサス」(2015 年)
- 1248 財務省貿易統計
- 1249 一般社団法人日本 CLT 協会 “CLT とは” (<https://clta.jp/clt/Imarc>)
- 1250 一般社団法人全国 LVL 協会 “LVL とは”(<http://www.lvl.ne.jp/lvl/index.html>)
- 1251 FRERES ENGINEERED WOOD (<https://frereswood.com/products-and-services/mass-ply-products/>)
- 1252 日本合板工業組合連合会 “合板のはなし”
- 1253 日本合板工業組合連合会 “構造用合板の手引き”
- 1254 日経 X-TECH 「千鳥状の LVL 耐力壁で緑と一体に」
(<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/na/18/00109/070100006/>)
- 1255 Thermosash “AUT A1 - Tukutuku Building” (<https://www.thermosash.co.nz/project-gallery/education/aut-a1-tukutuku/>)
- 1256 日本学術会議 “提言 地球温暖化対策としての建築分野での木材利用の促進”
- 1257 日本住宅・木材技術センター “CLT を活用した建築物等実証事業の成果”
- 1258 Concrete Reinforcing Steel Institute “Cost Comparison of Cross Laminated Timber (CLT) and Cast-in-place Reinforced Concrete Structures”
- 1259 国土交通省 ”建築着工統計調査 2023 年”
- 1260 「中大規模木造建築物の耐久設計と維持保全」(中島正夫)
- 1261 けんせつ Plaza “火災に負けない木材の利活用を考える” (<http://www.kensetsu-plaza.com/kiji/post/43863>)
- 1262 National Science Foundation (NSF) “NHERI Tallwood Project”
(<http://nheritallwood.mines.edu/>)
- 1263 国立研究開発法人 森林総合研究所 “研究成果選集 2020, 2021”
- 1264 国立研究開発法人 建築研究所 “木造高層建築物の社会実装に向けた技術開発”
- 1265 日本合板工業組合連合会 “超厚合板の開発のための性能試験等の実施と成果の普及事業 事業報告書(2021)”

-
- 1266 日本合板工業組合連合会 “超厚合板の開発のための性能試験等の実施事業 事業報告書 (2022)”
- 1267 日本建築学会 床工事 WG “床の性能に影響するコンクリートスラブおよび仕上材料の仕様と施工に関する基礎的検討”
- 1268 大林組 HP (<https://www.obayashi.co.jp/>)
- 1269 アクюраホーム HP (<https://www.aqura.co.jp/>)
- 1270 日経 X-TECH 「プレカット材の軸組み工法で日本初の耐震ビル、8階建て純木造の現場公開」
- 1271 Lindbäcks “Modular constructions in wood – the future way of building”
(<https://www.homag.com/en/company/news/case-studies/detail/modular-constructions-in-wood-the-future-way-of-building>)
- 1272 ADL 調査
- 1273 USDA Forest Service “Wood Grants” (<https://www.fs.usda.gov/science-technology/energy-forest-products/wood-innovation/grants>)
- 1274 カナダ政府 “Green Construction through Wood (GCWood) Program” (<https://natural-resources.canada.ca/science-and-data/funding-partnerships/opportunities/forest-sector/green-construction-through-wood-gcwood-program/20046>)
- 1275 カナダ ブリティッシュコロンビア州 “Mass Timber Demonstration Program”
(<https://www.masstimberbc.ca/funded-projects/>)
- 1276 ドイツ政府 “Holzbauinitiative (木造建築イニシアティブ)”
(<https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/holzbauinitiative.html>)
- 1277 The Architect’s Newspaper 2020年2月11日 “France mandates public buildings be built with at least 50 percent timber” (<https://www.archpaper.com/2020/02/france-public-buildings-timber-mandate/>)
- 1278 建築基準法施行令 (令和四年政令第三百九十三号による改正)
- 1279 Woodworks “Designing and Engineering Mass Timber Buildings in California”
(https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/presentation_slides-Drenick-New-Code-Provisions-Tall-Timber-in-CA-021623.pdf)
- 1280 有識者インタビュー
- 1281 Overview of Cross-Laminated Timber (CLT) and Timber Structure Standards Across the World, Shaghayegh Kurzinski et al., Mass Timber Construction Journal Volume.5(DOI: 10.55191/MTCJ.2022.1)
- 1282 日本農林規格 JAS3079:2019 直交集成板
- 1283 APA – The Engineered Wood Association HP([Cross-Laminated Timber \(CLT\) - APA – The Engineered Wood Association \(apawood.org\)](https://www.apawood.org/))

-
- 1284 European standards HP(BS EN 16351:2021 Timber structures. Cross laminated timber. Requirements - European Standards (en-standard.eu))
- 1285 ISO HP(ISO 16696-1:2019(en). Timber structures — Cross laminated timber — Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme)
- 1286 FAO “Global status of seaweed production, trade and utilization”
- 1287 FAO “Global status of seaweed production, trade and utilization”
- 1288 養殖業成長産業化推進協議会 “我が国の養殖業と成長産業化に向けた論点整理” (2020)
- 1289 国土交通省 HP (港湾：ブルーカーボンとは - 国土交通省 (mlit.go.jp))
- 1290 Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdrés, L., Young, C. D., Fonseca, L., & Grimsditch, G. (2009). Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. UN Environment, GRID-Arendal.(Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon | GRID-Arendal (grida.no))
- 1291 UN Global Compact “Seaweed Manifesto” (2020)
- 1292 ICEF “Blue Carbon Roadmap” (2022)(ロードマップ | Innovation for Cool Earth Forum (ICEF))
- 1293 国土交通省 「世界におけるブルーカーボンの活用に向けた取組の動向」
(<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001737798.pdf>)
- 1294 High Level Panel for A Sustainable Ocean Economy
- 1295 International Union for Conservation of Nature (IUCN) “Manual for the Creation of Blue Carbon Projects in Europe and the Mediterranean” (2021)
- 1296 UN Global Compact “Seaweed Manifesto” (2020)
- 1297 GI 基金 (HP) グリーンイノベーション基金 (METI/経済産業省)
- 1298 UN Global Compact “Seaweed Manifesto” (2020)
- 1299 UN Global Compact “Seaweed Manifesto” (2020)
- 1300 The Nature Conservancy HP(The Nature Conservancy and Planet Collaborate to Map Blue Carbon)
- 1301 有識者インタビュー
- 1302 農林水産省 “農林水産省気候変動適応計画” (2019)([top-7.pdf \(maff.go.jp\)](#))
- 1303 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター (ホーム - [kelplab ページ!](#))、青森県産業技術センター・北海道大学 (090428-事業報告-本文-1.indd ([aomori-itc.or.jp](#)))、熊本大学 くまもと水循環・減災研究教育センター (第7回市民公開講座—「養殖ノリの色落ちと環境ストレス応答」 | **【第5回】** ([kumamoto-u.ac.jp](#)))、国立研究開発法人 水産研究・教育機構 (高水温に適応した養殖ノリの育種技術：農林水産技術会議 ([maff.go.jp](#)))、三重県水産研究所 鈴鹿水産研究室 (000867525.pdf ([mie.lg.jp](#)))、沖縄科学技術大学院大学 ([KAKEN — 研究課題をさがす | 地球温暖化に適応するための海藻類の新品種開発手法の確立 \(KAKENHI-PROJECT-19KT0038\) \(nii.ac.jp\)](#))、国立研究開発法人 水産研究・教育機構 (フリー配偶体の活用とサポ

ート技術によるワカメ養殖のレジリエンス強化と生産性革命 (naro.go.jp)、徳島県立農林水産総合技術支援センター (<https://www.pref.tokushima.lg.jp/file/attachment/471985.pdf>)

¹³⁰⁴ E.-K. Hwang *et al.*, Seaweed breeding programs and progress in eastern Asian countries *Phycologia* **2019**, *58*, 484. <https://doi.org/10.1080/00318884.2019.1639436>

¹³⁰⁵ 三重大学 海藻バイオリファイナーセンター ([| 三重大学 海藻バイオリファイナーセンター | 卓越型研究施設・リサーチセンター | 三重大学ホームページ \(mie-u.ac.jp\)](http://mie-u.ac.jp))、東京海洋大学 兵庫県立農林水産技術総合センター ([KAKEN — 研究課題をさがす | ノリの倍数性育種に向けた基盤構築：異質倍数化したハイブリッドの探索と特性把握 \(KAKENHI-PROJECT-19K06184\) \(nii.ac.jp\)](http://kaken-nori.ac.jp))、理化学研究所 イオン育種研究開発室生物照射チーム ([重イオンビーム育種によるグリーンイノベーションの創出 \(jst.go.jp\)](http://ion-beam-jst.go.jp))、Hortimare (Breeding & Propagating Seaweed - Hortimare B.V. Breeding & Propagating Seaweed)、Seaweed Solutions ([Launching first large-scale organic seaweed-to-food cultivation and processing in EU | SeaBest | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission \(europa.eu\)](http://Launching first large-scale organic seaweed-to-food cultivation and processing in EU | SeaBest | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission (europa.eu)))、EU Horizon 2020 ([Launching first large-scale organic seaweed-to-food cultivation and processing in EU | SeaBest | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission \(europa.eu\), Macro Cascade](http://Launching first large-scale organic seaweed-to-food cultivation and processing in EU | SeaBest | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission (europa.eu), Macro Cascade))、ARPA-E Mariner (Woods Hole Oceanographic Institution | arpa-e.energy.gov)、神戸大学 ([Home / KU-MACC \(神戸大学 海藻類系統株コレクション\) \(nbrp.jp\)](http://Home / KU-MACC (神戸大学 海藻類系統株コレクション) (nbrp.jp)))、国立研究開発法人 水産研究・教育機構 ([ジーンバンク事業 | 旧増養殖研究所 \(affrc.go.jp\)](http://ジーンバンク事業 | 旧増養殖研究所 (affrc.go.jp)))、沖縄科学技術大学院大学 ([巨大な単細胞生物「海ぶどう」の全ゲノム解読 | 沖縄科学技術大学院大学 \(OIST\)](http://巨大な単細胞生物「海ぶどう」の全ゲノム解読 | 沖縄科学技術大学院大学 (OIST)))

¹³⁰⁶ 日本製鉄 ([鉄鋼スラグを活用した藻場再生「海の森プロジェクト」、新たに6カ所で試験開始 CO₂の吸収・固定が期待されるブルーカーボン効果も検証 \(nipponsteel.com\)](http://鉄鋼スラグを活用した藻場再生「海の森プロジェクト」、新たに6カ所で試験開始 CO₂の吸収・固定が期待されるブルーカーボン効果も検証 (nipponsteel.com)))、JFE スチール・広島大学 ([「SDGs 推進に向けた鉄鋼スラグの海陸での活用と社会実装」—JFE スチール・広島大学の共同研究講座の拡充について— | JFE スチール株式会社 \(jfe-steel.co.jp\)](http://「SDGs 推進に向けた鉄鋼スラグの海陸での活用と社会実装」—JFE スチール・広島大学の共同研究講座の拡充について— | JFE スチール株式会社 (jfe-steel.co.jp)))、東亜建設工業 ([生物共生型ブロックの製作・据付を開始 | プレスリリース | 東亜建設工業 \(toa-const.co.jp\)](http://生物共生型ブロックの製作・据付を開始 | プレスリリース | 東亜建設工業 (toa-const.co.jp)))

¹³⁰⁷ 日建工学株式会社 2017.12.4 第 111 回エコ塾 in 熊本「地域におけるエネルギー・資源循環」([8f871eb2546eba2916e3bdff1db3d1c6.pdf \(k-rip.gr.jp\)](http://8f871eb2546eba2916e3bdff1db3d1c6.pdf (k-rip.gr.jp)))

¹³⁰⁸ 一般社団法人 海洋産業研究会 “洋上風力発電等の漁業協調の在り方に関する提言” (2015)([洋上風力発電等の漁業協調の在り方に関する提言研究 | 一般社団法人 海洋産業研究・振興協会 \(rio.or.jp\)](http://洋上風力発電等の漁業協調の在り方に関する提言研究 | 一般社団法人 海洋産業研究・振興協会 (rio.or.jp)))

¹³⁰⁹ NEDO “ムーンショット型研究開発事業 目標 4 成果報告会 2022~Cool Earth & Clean Earth~” (ムーンショット型研究開発事業 目標 4 成果報告会 2022) の開催報告 | NEDO)

¹³¹⁰ Innovative Greenhouse Gas Reduction through Marine Ecosystem Blue Carbon([getPdf.do \(koem.or.kr\)](http://getPdf.do (koem.or.kr)))

¹³¹¹ 韓国海洋水産部 HP (보도자료 ‘블루카본 추진전략’ 발표... 블루카본으로 해양의 기후재해)

대응능력 강화 해양수산부 (mof.go.kr)

1312 Institute of Marine Microbes and Ecospheres (IME) Xiamen University HP 「全国海洋碳汇联盟」([全国海洋碳汇联盟-厦门大学海洋微生物与地球圈层研究所-Institute of Marine Microbes and Ecospheres \(IME\) Xiamen University \(xmu.edu.cn\)](http://全国海洋碳汇联盟-厦门大学海洋微生物与地球圈层研究所-Institute of Marine Microbes and Ecospheres (IME) Xiamen University (xmu.edu.cn)))

1313 [Advances in Climate Change Research 6 \(2015\) 118e125](https://doi.org/10.1016/j.clim.2015.11.025)([Climate change and anthropogenic impacts on marine ecosystems and countermeasures in China - ScienceDirect](https://doi.org/10.1016/j.clim.2015.11.025))

1314 Ocean Negative Carbon Emissions HP([Ocean Negative Carbon Emissions \(ONCE\) \(global-once.org\)](http://global-once.org))

1315 MacroSea ([MACROSEA - SINTEF](http://macrosea-sintef.no))、AlgaeDemo Project (EU fund) ([The project – AlgaeDemo](http://algademoproject.eu))、ARPA-E Mariner ([Ocean Rainforest | arpa-e.energy.gov](http://arpa-e.energy.gov))

1316 オプティム (佐賀県、佐賀大学、佐賀県有明海漁協、農林中央金庫、NTT ドコモ、オプティム、第4次産業革命型水産業の実現に向け、ノリ養殖業における IoT/AI/Robot の活用を行う6者間連携協定を締結 | [OPTiM](http://optim.jp))、三重県水産研究所 鈴鹿水産研究室 ([PowerPoint プレゼンテーション \(mie.lg.jp\)](http://mie.lg.jp))、GENIALG ([Module 1: Seaweed Cultivation and Monitoring Protocols - GENIALG - GENIALG \(genialproject.eu\)](http://genialproject.eu))、Dutch Seaweed Group ([The project – AlgaeDemo](http://algademoproject.eu))、MIT ([MPP conferencePoster .pdf \(mit.edu\)](http://mit.edu))、UMITRON ([UMITRON PULSE](http://umitron-pulse.jp))、アンデックス (株) (漁場をリアルタイムに監視し漁師を支援する海洋環境可視化システム「ウミミル」 :: [スマート IoT 推進フォーラム \(smartiot-forum.jp\)](http://smartiot-forum.jp))、国立研究開発法人水産研究・教育機構 ([project_2020-27.pdf \(maff.go.jp\)](http://maff.go.jp))

1317 水産庁栽培養殖課“養殖業成長産業化総合戦略”(2019)

1318 Rose, D.J.; Hemery, L.G. Methods for Measuring Carbon Dioxide Uptake and Permanence: Review and Implications for Macroalgae Aquaculture. *J. Mar. Sci. Eng.* **2023**, *11*, 175. <https://doi.org/10.3390/jmse11010175>

1319 国土交通省 “地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する検討会” (https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk6_000069.html)

1320 JBE 「Jブルークレジット認証申請の手引きーブルーカーボンを活用した気候変動対策ー ver.2.4」 ([https://www.blueeconomy.jp/wp-content/uploads/jbc2024/20240312_J-BlueCredit_Guideline v.2.4.pdf](https://www.blueeconomy.jp/wp-content/uploads/jbc2024/20240312_J-BlueCredit_Guideline_v.2.4.pdf))

1321 国土交通省 「海の次世代モビリティの種類・特性・役割」 (https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/SeaMobilityPF/pdf/mobility_basic1.pdf)

1322 三井物産 「ブルーカーボンを契機として重要性が増す海藻モニタリング技術ー海藻養殖のスマート化にも貢献ー」 (https://www.mitsui.com/mgssi/ja/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2024/06/25/240521_noza_ki.pdf)

1323 The White House “Ocean Climate Action Plan” (2023) ([Ocean Climate Action 2023 | Middlebury Institute of International Studies at Monterey](http://middlebury.edu))

-
- 1324 ARPA-E Press Release ([Press Release | arpa-e.energy.gov](#))
- 1325 ARPA-E SEA-CO2 ([SEA-CO2 | arpa-e.energy.gov](#))
- 1326 United Nations ”持続可能な開発のための国連海洋科学の 10 年 (2021 年-2030 年)” (2021)
- 1327 European Commission HP 「Blue Growth」 ([Blue growth - Smart Specialisation Platform \(europa.eu\)](#))
- 1328 European Commission HP 「Sustainable blue economy」 ([Sustainable blue economy \(europa.eu\)](#))
- 1329 National Ocean and Atmospheric Administration 「Blue Economy Strategic Plan for 2021-2025」 ([NOAA Blue Economy Strategic Plan: 2021-2025](#))
- 1330 Office of Naval Research 「National Strategy on Aquatic Environmental DNA」 (<https://www.onr.navy.mil/media-center/news-releases/national-strategy-aquatic-environmental-dna>)
- 1331 SUSTAINABLE BLUE ECONOMY, The Japan Research Institute, Limited Center for the Strategy of Emergence(2022)([SUSTAINABLE BLUE ECONOMY \(jri.co.jp\)](#))
- 1332 The Blue Carbon Initiative HP([The Blue Carbon Initiative](#))
- 1333 International Union for Conservation of Nature (IUCN) “Manual for the Creation of Blue Carbon Projects in Europe and the Mediterranean” (2021)
- 1334 European Commission ”Towards a strong and sustainable EU algae sector” (2022/11)
- 1335 ARPA-E MARINER (Macroalgae Research Inspiring Novel Energy Resources) <https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/mariner>
- 1336 ARPA-E MARINER SEA-CO2 (<https://arpa-e.energy.gov/technologies/programs/sea-co2>)
- 1337 Sea Grant (<https://seagrant.noaa.gov/About>), Seaweed Hub (<https://seaweedhub.org>)
- 1338 EU4Algae (<https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/en/frontpage/1727>)
- 1339 ジャパンブルーエコノミー技術研究組合 “J ブルークレジット® 認証申請の手引き” (https://www.blueeconomy.jp/wp-content/uploads/jbc2023/20230816_J-BlueCredit_Guideline_v2.3.pdf)
- 1340 国土交通省 「我が国の沿岸域に生息する海洋植物による二酸化炭素の吸収量 (約 3 5 万トン) が国連に報告されました ～海藻藻場による二酸化炭素の吸収量の報告は世界初～」 (https://www.mlit.go.jp/report/press/port06_hh_000290.html)
- 1341 <https://www.blueeconomy.jp/credit/vandi/>
- 1342 外務省 HP ([ロンドン条約及びロンドン議定書 | 外務省 \(mofa.go.jp\)](#))
- 1343 OECD, "The Bioeconomy to 2030: designing a policy agenda" (<https://www.oecd.org/futures/long-termtechnologicalsocietalchallenges>)

/thebioeconomyto2030designingapolicyagenda.htm)

1344 McKinsey Global Institute “The Bio Revolution: Innovations transforming economies, societies, and our lives” (<https://www.mckinsey.com/industries/life-sciences/our-insights/the-bio-revolution-innovations-transforming-economies-societies-and-our-lives>) (2020/5/13)

1345 米国 バイオものづくりに関するファクトシート

(<https://www.presidency.ucsb.edu/documents/fact-sheet-president-biden-launch-national-biotechnology-and-biomanufacturing-initiative>)

1346 世界経済フォーラム 「Winning in Green Markets:Scaling Products for a Net Zero World」

1347 世界経済フォーラム 「Winning in Green Markets:Scaling Products for a Net Zero World」

1348 内閣府 “バイオ戦略” (<https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html>)

1349 IEA 「Net Zero Roadmap : A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach」

(<https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>)

1350 LanzaTech IR 資料 (<https://ir.lanzatech.com/static-files/ccd51cf2-92a8-4a95-9b46-3779f0be7b8c>)

1351 NEDO “バイオものづくり技術による CO2 を直接原料としたカーボンリサイクルの推進” (<https://green-innovation.nedo.go.jp/project/bio-manufacturing-technology/>)

1352 ABF – Introduction and Overview (<https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-04/beto-01-project-peer-review-abf-apr-2023-hillson.pdf>)

1353 MIT-Broad Foundry (<https://web.mit.edu/foundry/>)

1354 Ginko Bioworks (<https://www.ginkgobioworks.com/>)

1355 Amyris (<https://amyris.com/>)

1356 Ginkgo Acquires Zymergen (<https://www.ginkgobioworks.com/2022/10/19/ginkgo-acquires-zymergen/>)

1357 Biotech firm Amyris files for bankruptcy in US

(<https://www.reuters.com/business/biotech-firm-amyris-files-bankruptcy-us-2023-08-10/>)

1358 国際科技创新中心 (https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/kjrd/202303/t20230320_113703.html)

1359 Shenzhen Institute of Synthetic Biology “Shenzhen Biofoundry”

(http://www.isynbio.org/institution-detail_en.aspx?detail=1651)

1360 K-Biofoundry (<https://kbiofoundry.org/>)

1361 DTU Biosustain BioFoundry (<https://www.biosustain.dtu.dk/biofoundry>)

1362 London Biofoundry (<https://www.londonbiofoundry.org/>)

1363 NEDO “バイオものづくり革命推進事業”

(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100246.html)

-
- 1364 NEDO “カーボンリサイクル実現を加速するバイオ由来製品生産技術の開発”
(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100170.html)
- 1365 NEDO ”スマートセル・プロジェクト成果集”
(<https://www.nedo.go.jp/content/100923930.pdf>)
- 1366 JST 革新的 GX 技術創出事業 バイオものづくり領域
(<https://www.jst.go.jp/gtex/field/bio.html>)
- 1367 Deepmind (<https://deepmind.google/>)
- 1368 Phytonix (<https://phytonix.com/>)
- 1369 Viriods (<https://www.viridos.com/>)
- 1370 Pond Technologies (<https://pondtech.com/>)
- 1371 Photanol (<https://photanol.com/>)
- 1372 Bondi Bio (<https://www.bondi.bio/>)
- 1373 Provectus Algae (<https://provectusalgae.com/>)
- 1374 ユーグレナ (<https://www.euglena.jp/>)
- 1375 Algal Bio (<https://algalbio.co.jp/>)
- 1376 ちとせ研究所 (https://chitose-bio.com/jp/business/chitose_laboratory)
- 1377 Oakbio (<https://www.oakbio.com/>)
- 1378 NovoNutrients (<https://www.novonutrients.com/>)
- 1379 Kiverdi (<https://www.kiverdi.com/>)
- 1380 Deep Branch Biotechnology (<https://deepbranch.com/>)
- 1381 Solar Foods (<https://solarfoods.com/>)
- 1382 CO2 資源化研究所ウェブサイト (<https://www.co2.co.jp/>)
- 1383 中国電力 “Gas-to-Lipids バイオプロセスの開発の概要”
(<https://www.energia.co.jp/assets/press/2020/p20200805-1a%20.pdf>)
- 1384 Electrochaea (<https://www.electrochaea.com/>)
- 1385 Symbiobe (<https://www.symbiobe.jp/>)
- 1386 SBFC 2021 (<https://sim.confex.com/sim/sbfc2021/meetingapp.cgi/Home/0>)
- 1387 SBFC 2022 (<https://sim.confex.com/sim/sbfc2022/meetingapp.cgi/>)
- 1388 SBFC 2023 (<https://sim.confex.com/sim/sbfc2023/meetingapp.cgi/>)
- 1389 LanzaTech (<https://lanzatech.com/>)
- 1390 again.bio (<https://again.bio/>)
- 1391 Visolis (<https://www.visolisbio.com/>)
- 1392 Phase Biolabs (<https://www.phasebiolabs.com/>)
- 1393 Twelve (<https://www.twelve.co/technology>)
- 1394 PubMed にてキーワード検索 (調査日時 : 2023/03/05)
- 1395 PubMed にてキーワード検索 (調査日時 : 2023/03/24)

-
- 1396 経済産業省 “生物化学産業に係る国内外動向調査”
(https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2021FY/000165.pdf) (2022/3/18)
- 1397 The White House “Executive Order on Advancing Biotechnology and Biomanufacturing Innovation for a Sustainable, Safe, and Secure American Bioeconomy”
(<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/09/12/executive-order-on-advancing-biotechnology-and-biomanufacturing-innovation-for-a-sustainable-safe-and-secure-american-bioeconomy/>)
- 1398 The White House Office of Science and Technology Policy (OSTP) “BOLD GOALS FOR U.S. BIOTECHNOLOGY AND BIOMANUFACTURING: HARNESSING RESEARCH AND DEVELOPMENT TO FURTHER SOCIETAL GOALS” (<https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/03/Bold-Goals-for-U.S.-Biotechnology-and-Biomanufacturing-Harnessing-Research-and-Development-To-Further-Societal-Goals-FINAL.pdf>)
- 1399 USDA “Biopreferred Program” (<https://www.biopreferred.gov/BioPreferred>)
- 1400 DOE “Clean Fuels & Products Shot” (<https://www.energy.gov/eere/clean-fuels-products-shottm-alternative-sources-carbon-based-products>)
- 1401 Bioenergy Technologies Office Multi-Year Program Plan 2023
(<https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-03/beto-mypp-fy23.pdf>)
- 1402 CBE JU (<https://www.cbe.europa.eu/>)
- 1403 PYROCO2 (<https://www.pyroco2.eu/>)
- 1404 BioReCo2VER (<https://bioreco2ver.eu>)
- 1405 European Commission “Circular economy plan”
(https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en)
- 1406 Building the future with nature: Boosting Biotechnology and Biomanufacturing in the EU
(https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/47554adc-dffc-411b-8cd6-b52417514cb3_en)
- 1407 JETRO ビジネス短信 “世界トップレベルのバイオエコノミーを目指す計画発表（中国）” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/05/cf726399a1a88ce2.html>) (2022/5/18)
- 1408 内閣府 “バイオエコノミー戦略” (https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/bio_economy.pdf)
- 1409 内閣府 “バイオ戦略” (<https://www8.cao.go.jp/cstp/bio/index.html>)
- 1410 ISCC (<https://www.iscc-system.org/>)
- 1411 REDcert (<https://www.redcert.org/en/>)
- 1412 RSB - Roundtable on Sustainable Biomaterials Association (<https://rsb.org/>)
- 1413 RSB “LanzaTech Technology Receives RSB Advanced Products Certification”
(<https://rsb.org/2021/01/31/lanzatech-technology-receives-rsb-advanced-products-certification/>)
- 1414 Shougang News 2023年3月13日 “Shougang LanzaTech Obtains Industry's First

Product Carbon Label Certification”

(<https://www.shougang.com.cn/en/ehhtml/ShougangNews/20230313/1749.html>)

1415 ISO “ISO/TC 276 Biotechnology” (<https://www.iso.org/committee/4514241.html>)

1416 EBRC “ENGINEERING BIOLOGY METRICS AND TECHNICAL STANDARDS FOR THE GLOBAL BIOECONOMY” (<https://ebrc.org/engineering-biology-metrics-and-technical-standards-for-the-global-bioeconomy/>)

1417 NSF (<https://www.nsf.gov/news/nsf-international-partners-invest-82m-six-2024-global>)

1418 UNESCO “International Bioethics Committee” (<https://www.unesco.org/en/ethics-science-technology/ibc>)

1419 JETRO “欧州委、持続可能な自然資源の利用と食料システムの強化に向けた政策パッケージを発表” (<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/07/effe37dfa7bd8c6b.html>)

1420 COVINGTON Outcome from COP 15: a New Global Biodiversity Fund Paid For by Life Sciences Companies that “Use Digital Sequence Information on Genetic Resources”

(<https://www.insideeulifesciences.com/2022/12/23/outcome-from-cop-15-a-new-global-fund-paid-for-by-life-sciences-companies-that-use-digital-sequence-information-on-genetic-resources/#:~:text=%E2%80%9CDigital%20sequence%20information%20on%20genetic,the%20monitoring%20of%20invasive%20species.>) (2022/12/3)

1421 OECD (https://www.oecd.org/en/publications/synthetic-biology-in-focus_3e6510cf-en.html#:~:text=Synthetic%20biology%20promises%20to%20revolutionise%20a%20swath%20of,products%20to%20boost%20economies%2C%20transform%20health%20and%20)

1422 WEF (<https://www.weforum.org/publications/accelerating-the-tech-driven-bioeconomy/>)

1423 IEA 「Insights Series 2017 Renewable Energy for Industry」 (2017/11)

1424 平成 26 年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業（工業炉等における省エネルギー技術に関する実態調査）報告書

1425 国立環境研究所「2021 年度（令和 3 年度）の温室効果ガス排出・吸収量（確報値）」 (2023/4)

1426 「製造分野における熱プロセスの脱炭素化」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性 (2023/2)

1427 トヨタ自動車「Toyota's Views on Climate Public Policies 2023」

1428 日本経済新聞「トヨタ、部品会社に 21 年排出 3%減要請 供給網で脱炭素」 (2021/6)

1429 Volkswagen Newsroom 「Way to Zero: Volkswagen presents roadmap for climate-neutral mobility」 (2021/04)

1430 日経クロステック「VW は義務付け、プーマは支援 悩ましい部品供給網の炭素中立」 (2021/08)

1431 Ford 「2023 Integrated Sustainability and Financial Report」

1432 デンソー ニュースリリース「デンソーとデンソー福島、水素を活用した「カーボンニュー

-
- トラル工場」実現に向けた実証を開始」(2023/03)
- 1433 アイシン ニュースリリース「工業炉バーナの水素燃焼技術に関する共同実証実験の開始」
(2021/06)
- 1434 Green Steel World 「Sarralle: delivering game-changing hydrogen technology」
(2023/12)
- 1435 Danieli Germany 「THYSSENKRUPP STEEL EUROPE LAUNCHES FOUR MAJOR PROJECTS FOR THE STEEL PRODUCTION OF THE FUTURE WITH THE SUPPORT OF DANIELI」
- 1436 Process Heat Reports 「CO2-neutral process heat generation –a study for the Federal Environment Agency of Germany (Umweltbundesamt)」(2024/02) ※ドイツ語版：
(<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>)
- 1437 BloombergNEF 「Hydrogen Economy Outlook」(2020/03)
- 1438 IEA Hydrogen Production Project Database (2023/10)
- 1439 有識者インタビュー
- 1440 European Hydrogen Backbone Website <https://ehb.eu/>
- 1441 JETRO 「ドイツ政府が国家水素戦略を改定」(2023/10/17)
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2023/52b33d2932a5aa7d.html>
- 1442 FNB Gas <https://fnb-gas.de/en/hydrogen-core-network/>
- 1443 IRENA 「Innovation Outlook :Renewable Ammonia」(2022/05)
- 1444 IRENA 「Innovation Outlook :Renewable Ammonia」(2022/05)
- 1445 IRENA 「World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway」(2021) Stated Policies
- 1446 IEA 「Ammonia Technology Roadmap」(2021/10) より実稼働・計画公表済みのブルー・グリーンアンモニアプラント生産量を引用
- 1447 Institute for Sustainable Process Technology 「Clean Ammonia Roadmap report」
(2024/01)
- 1448 IEA 「The State of Clean Technology Manufacturing An Energy Technology Perspectives Special Briefing」
- 1449 資源エネルギー庁「令和5年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2024)」
- 1450 米国エネルギー省「Industrial Heat Shot」(<https://www.energy.gov/eere/industrial-heat-shot>)
- 1451 米国エネルギー省「Thermal Process Intensification: Transforming the Way Industry Uses Thermal Process Energy」(2022/05)
(<https://www.energy.gov/eere/amo/articles/thermal-process-intensification-transforming-way-industry-uses-thermal-process>)
- 1452 TWINGHY ウェブサイト (<https://twinghy.eu/>)
- 1453 国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 「デジタルツインに関する国内

外の研究開発動向」(2022/03)

1454 fives news “Interface: jointly funded innovation for digital and low-carbon steel reheating furnace”(2023/04)

1455 Semantic Scholar を用いて ADL 調査

1456 Espacenet を用いて ADL 調査

1457 Espacenet を用いて ADL 調査

1458 Espacenet を用いて ADL 調査

1459 日欧産業協力センター「グリーンディール産業計画とネットゼロ産業法案」(2023/5)

1460 英国政府ウェブサイト「Policy paper Industrial decarbonisation strategy」(2021/03)

1461 米国エネルギー省「Industrial Decarbonization Strategy」(2022/9)

1462 米国エネルギー省「Funding Selections: FY23 Industrial Efficiency and Decarbonization Multi-Topic FOA」

1463 米国エネルギー省「FY24 Cross-Sector Technologies Funding Opportunity Announcement」

1464 米国エネルギー省「Industrial Heat Shot」(<https://www.energy.gov/eere/industrial-heat-shot>)

1465 中国・工業情報化部「工业和信息化部关于印发《“十四五”工业绿色发展规划》的通知」

1466 JETRO「EU 炭素国境調整メカニズム (CBAM) の解説 (基礎編)」(2024/02)

1467 JETRO「英政府、CBAM 導入に向けた意見公募を開始」(2024/03)

1468 JETRO「米環境団体、バイデン大統領に EU の CBAM への対抗措置を控えるよう要請」(2023/10)

契約管理番号：	23200970-0
---------	------------