

調査報告書

令和3年度地球温暖化・資源循環対策に資する調査委託費
**2050年カーボンニュートラルに伴う革新的環境イノベーション戦略等
各種施策の横断調査分析**

株式会社野村総合研究所

コンサルティング事業本部

サステナビリティ事業コンサルティング部

2022年3月



1. 調査方法	・・・p.3
2. 次世代太陽光発電	・・・p.27
3. CO2フリー水素（製造）	・・・p.43
4. CO2フリー水素（輸送・貯蔵）	・・・p.65
5. CO2フリー水素（利用・発電）	・・・p.77
6. ゼロ・カーボンスチール（水素還元製鉄）	・・・p.89
7. CO2分離回収	・・・p.98
8. CO2を原料とするセメント製造	・・・p.111
9. 機能性化学品	・・・p.124
10. 高効率・低コストなパワーエレクトロニクス技術	・・・p.141
11. 未利用熱	・・・p.159
12. 高性能蓄電池	・・・p.177
13. 金属の高効率リサイクル技術	・・・p.192
14. ゲノム編集	・・・p.210
参考	・・・p.222

背景

令和2年10月26日の国会での菅総理の所信表明演説にて、成長戦略の柱に経済と環境の好循環を掲げてグリーン社会の実現に最大限注力すること、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすること（2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現）を目指すことを宣言した。

カーボンニュートラルの実現には、革新的なイノベーションに基づく技術開発が必要不可欠である。現在、2050年までのカーボンニュートラルを表明する国は、120ヶ国を超え、脱炭素技術の大競争を行う時代となっており、各国の事情に応じて、複数の技術シナリオが予想される。そのような状況の中、我が国も世界各国の技術開発動向を踏まえて、技術開発を行うことが重要である。我が国が、各種戦略（革新的環境イノベーション戦略、グリーン成長戦略等）を効果的に実行していくため、世界各国で行われる、海外の技術開発及び支援の動向について体系的に分析を行い、分析結果を政策に活かすことを目的とする。

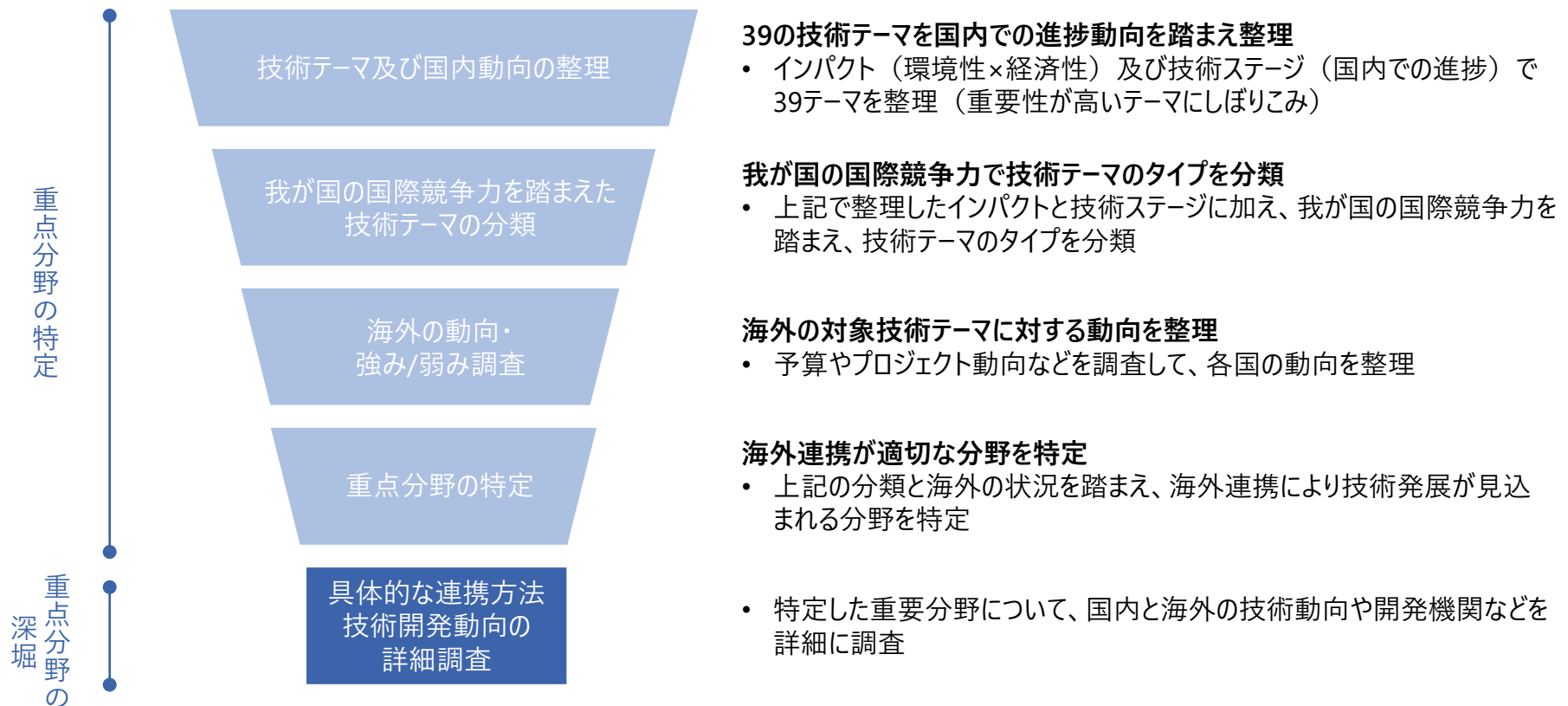
実施内容

主要国（米国・EU・ドイツ・英国）のカーボンニュートラルに関する、技術開発動向の分析調査最新の主要国のカーボンニュートラルに関する技術の研究開発・技術実証に関する、政策的支援、実証事業など具体的な取組み内容を調査分析し、体系的にまとめる。

1. 調査方法

本検討では、革新的環境イノベーション戦略の39テーマを対象とし、技術テーマ及び国内外の動向を踏まえ、重点分野を特定する

図表1：調査フロー



1. 調査方法 | 重点分野の特定

技術テーマをタイプで分類するにあたって、インパクト（環境性×経済性）と技術ステージ（国内における進捗状況）、我が国の国際競争力から整理する

図表2：技術テーマ分類に当たっての観点

観点	整理方針	活用方法
インパクト ×	<ul style="list-style-type: none">✓ CO2削減量と市場規模を1~3点で点数付けし、合計点により整理<ul style="list-style-type: none">• CO2削減量（環境性）：革新的環境イノベーション戦略より引用<ul style="list-style-type: none">• ~19億t：1点 20~49億t：2点 50億t~：3点• 市場規模（経済性）：文献調査またはNEDOやIEAを基にNRI推計。実装時点での市場規模を推計。<ul style="list-style-type: none">• ~100,000億円：1点 100,001~599,999億円：2点 600,000億円~：3点• インパクトについては合計点をもとに以下の区分で整理<ul style="list-style-type: none">• ~2点：小 3~4点：中 5~6点：大	<ul style="list-style-type: none">• インパクトが低いものを優先順位が低いものとして除外（インパクトが大きい項目は海外の関心も高いと想定）• 連携方法の検討 連携先が異なる可能性がある
技術ステージ ×	<ul style="list-style-type: none">✓ 現時点での技術ステージを整理<ul style="list-style-type: none">• 実装：すでに社会に普及しているもの（普及、社会実装）• 実証：社会実装、または技術実証の段階にあるもの（技術実証）• 研究：基礎研究、技術開発段階にあるもの（基礎応用研究、技術開発）	<ul style="list-style-type: none">• 既の実装されているものを除外• 連携方法の検討 実証または研究によって連携先、資金調達方法が異なる
我が国の国際競争力	<ul style="list-style-type: none">✓ 我が国の国際競争力を3つの観点で整理<ul style="list-style-type: none">• 関連製品・サービスの市場シェア（<u>現在の国際競争力</u>）：既存の関連する製品等の市場シェアをNEDOのレポート等を参照して評価• 特許数（<u>将来の国際競争力</u>）：関連テーマや製品に関する日本国籍の特許の割合等を参照して評価• 経年変化等：既存の日本企業等のシェア動向や、周辺環境について整理	<ul style="list-style-type: none">• 技術テーマに対する国内の強み/弱みを整理

1. 調査方法 | 重点分野の特定

【参考】革新的環境イノベーション戦略における39の技術テーマ

【凡例】

青字：革新的環境イノベーション戦略にてCO2削減量が示されていないもの

灰字：市場規模算出が困難なもの

図表3：革新的環境イノベーション戦略における39の技術テーマ

課題 (略称)	No.	テーマ名
		略称
再エネの主力電源化	1	次世代太陽光発電
	2	超臨界地熱発電
	3	浮体式洋上風力
デジタル技術を用いた電力ネットワーク	4	次世代蓄電池
	5	エネルギー制御システム
	6	高効率パワーエレクトロニクス技術
低コストな水素サプライチェーン	7	CO2フリー水素製造
	8	水素輸送・貯蔵※7に含める
	9	水素ステーション・水素発電※7に含める
革新的原子力核融合	10	安全な原子力技術
	11	核融合エネルギー
CCUS	12	CO2分離回収技術
グリーンモビリティ	13	自動車・後期等高性能蓄電池 ※4に含める
	14	水素を燃料としたモビリティ※7に含める
	15	自動車・船舶用等バイオ・合成燃料
化石資源依存からの脱却	16	ゼロカーボンスチール
	17	高効率金属リサイクル
	18	プラスチックの高度資源循環
カーボンリサイクル	19	人工光合成
	20	機能性化学品製造の実現
	21	メタネーション
	22	カーボンリサイクルによるセメント製造

課題 (略称)	No.	テーマ名
		略称
最先端のGHG削減技術	23	横断的な省エネ技術
	24	定置用燃料電池※7に含める
	25	未利用・再エネ熱利用
	26	グリーン冷媒
ビッグデータ等を活用した都市マネジメント	27	スマートシティ
シェアリングエコノミー	28	シェアリング等
科学的知見の充実	29	気候変動に関する情報基盤
バイオ技術等を活用した資源利用・CO2固定	30	バイオテクノロジーの応用
	31	バイオマス原料
	32	バイオ炭活用
	33	木造高層建築、木材製品利用
	34	スマート林業
	35	ブルーカーボン
農業産業からの排出削減	36	農畜の最適管理技術
スマート農林水産業	37	地産地消型エネルギー
	38	農林水産業のゼロエミ
大気中のCO2回収	39	DAC ※12に含める

1. 調査方法 | 重点分野の特定

【参考】技術ステージの定義

- 革新的環境イノベーション戦略で示された39テーマを対象に整理を行っていくにあたり、普及までの技術ステージを以下のように定める。
 - ただし、ステージ間の境界は、明確に定まっているわけではない。
- 普及に至るまでには、「技術開発」や「技術実証」を反復することもありうるが、総じて以下の経路をたどると想定する。

図表4：技術ステージの定義

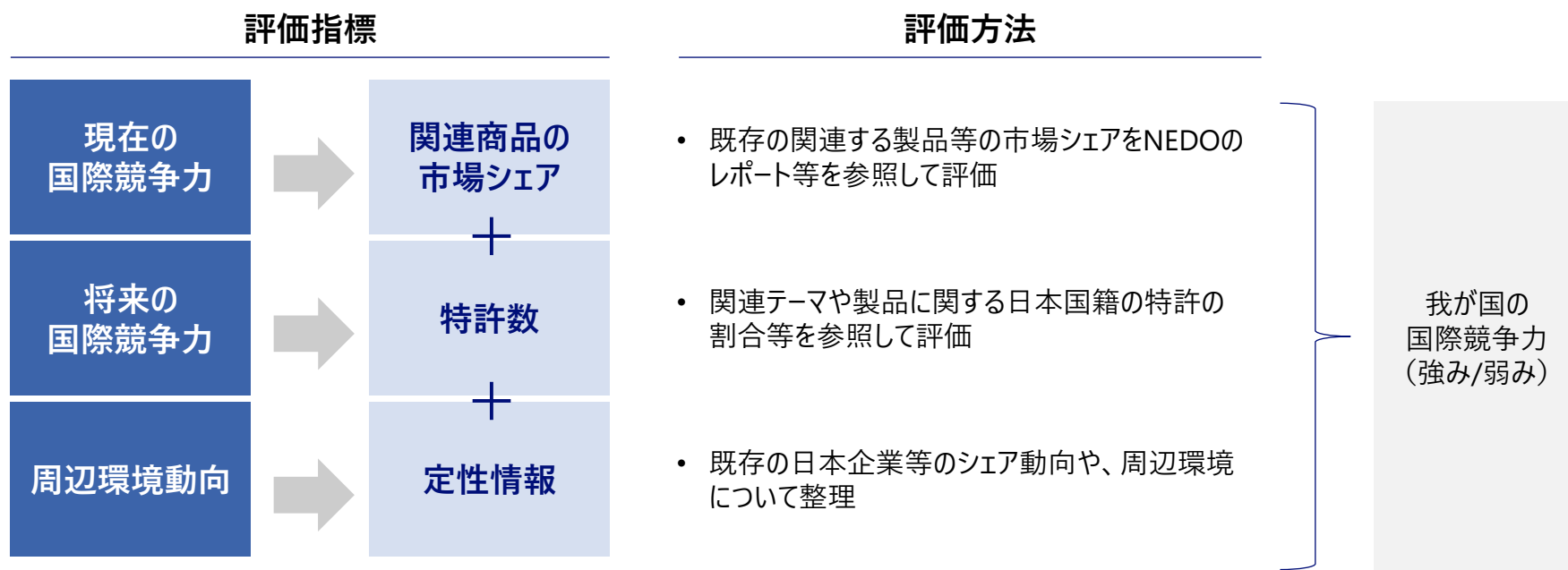


1. 調査方法 | 重点分野の特定

我が国の国際競争力については、特許に占める国内の割合や国際シェアといった定量情報とシェアの経年変化や周辺環境動向等の定性情報をもとに整理

- 国際競争力については、既存の国際競争力と将来の国際競争力を踏まえて総合的に判断する
- 具体的には以下の方法で評価する

図表5：我が国の国際競争力の評価方法

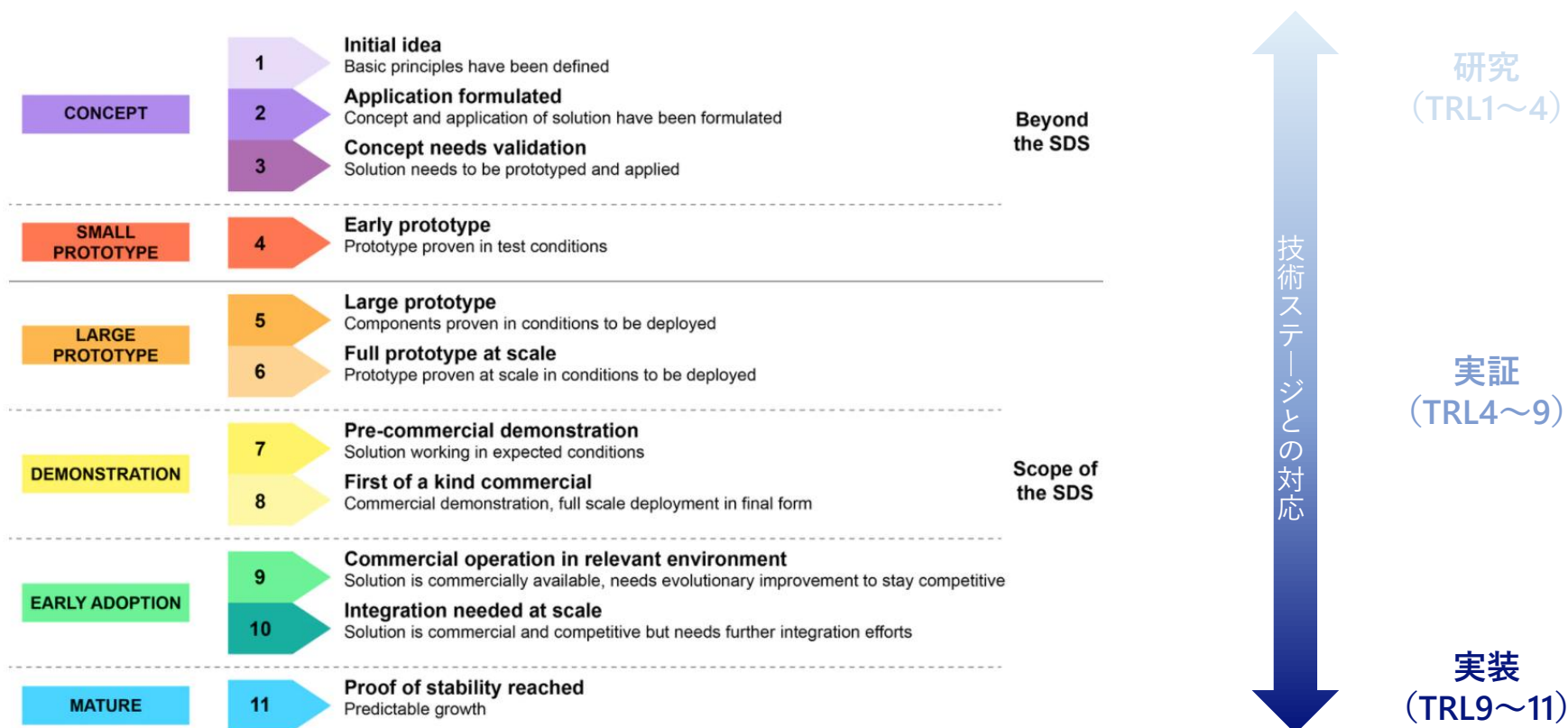


1. 調査方法 | 重点分野の特定

【参考】IEAにおけるTRLの分類

- 本検討において定義した技術ステージとの対応を右に示す
- ただし、対応はあくまでも目安であり、TRLは大幅なずれを確認するために用いる

図表6：IEAにおけるTRLの分類と本調査における技術ステージの対応



1. 調査方法 | 重点分野の特定

国内の技術レベルを国際水準で比較することを目的に技術ステージとIEAのTRLを比較。
核融合、DAC、ゼロカーボンスチールで国内技術が一部遅れている。

図表7：国内の研究ステージとTRLの比較

橙：技術ステージが異なるもの 灰：IEAの個別技術にあわせて技術ステージを再評価したもの

#	革新的環境イノベーションの分類	技術ステージ	IEA技術名	TRL
1	次世代太陽光発電	研究	Perovskite solar cell	4
1	次世代太陽光発電	－	Organic thin-film solar cell	6
1	次世代太陽光発電	－	Thin-film PV	8
3	浮体洋上風力	実証	Floating offshore wind turbine	8
6	高効率パワエレ	実証	Flexible Alternating Current Transmission Systems	8
7	水素製造(個体酸化物系水電解)	実証	Solid oxide electrolyser cell	6~7
7	水素製造(個体高分子系水電解)	実証	Polymer electrolyte membrane	8
7	CO2フリー水素(水素発電)	実証	Hybrid fuel cell-gas turbine system	6
7	CO2フリー水素(水素発電)	実証	Hydrogen-fired gas turbine	7~8
7	FCEV車	実証	Hydrogen fuel cell electric vehicle > Fuel cell	9
7	水素(輸送、貯蔵、運輸)	－	Salt cavern storage	9~10
7	水素(輸送、貯蔵、運輸)	実証	Liquid hydrogen tanker	5~7
10	核融合	研究	Fusion	1~3
10	核融合	研究	Light water reactor-based small modular reactor	6~9
12	DAC	研究	Liquid DAC (L-DAC)	6
12	DAC	研究	Solid DAC (S-DAC)	6
13	高性能蓄電池(自動車)	研究	Solid state + Li-metal	5
13	高性能蓄電池(自動車)	研究	Li-S	4
13	高性能蓄電池(航空機)	研究	Battery electric vehicle	3~4
15	バイオ燃料・合成燃料	実証	Gasification and Fischer-Tropsch	6
15	バイオ燃料・合成燃料	実証	Alcohol-to-Jet	6
16	ゼロカーボンスチール	研究	Based on 100% electrolytic hydrogen	5
16	ゼロカーボンスチール	研究	Based on natural gas with high levels of electrolytic hydrogen	7
17	高効率金属リサイクル	研究	Collaborative human-robot recycling	2~3
22	カーボンリサイクルセメント	実証	Chemical absorption (full capture rates)	7
22	カーボンリサイクルセメント	実証	CO2 sequestration in inert carbonate materials	9
22	カーボンリサイクルセメント	実証	Direct separation	6

※各分類の技術ステージは様々な技術の平均をとっているため、該当するIEAの個別技術が革新的環境イノベーションに明記されている場合は、記載されている技術ステージを採用

※②機能性化学品製造、③横断的な省エネ、⑤未利用・再エネ熱利用、⑥グリーン冷媒、⑩バイオテクノロジーの活用、⑫バイオ炭活用、⑭スマート林業、⑯農畜の最適管理技術は該当なし

出所) IEAよりNRI作成

1. 調査方法 | 重点分野の特定

重点分野の特定に際して、網羅的に海外動向を把握するため、革新的環境イノベーション戦略の分類に基づき予算や取組状況（プロジェクトや技術ステージ等）について調査。

- 海外動向を把握することで日本の技術の進展性や各国のプロジェクトへの注力状況等を把握。
- 後段で実施した技術タイプの分類に活用した。
- 調査結果については参考資料に掲載した。

図表8：海外動向の調査観点

観点	整理方針	活用方法
政策の予算・ 研究機関の 投資額	✓ 各国が力を入れている分野を革新的環境イノベーションの17の課題に基づいて調査 <ul style="list-style-type: none">• 政策の予算• 研究機関の投資額• 技術ステージ	<ul style="list-style-type: none">• 各国の重点分野や取組状況を踏まえ、連携方法の検討に活用

各国のRD&D予算額 まとめ

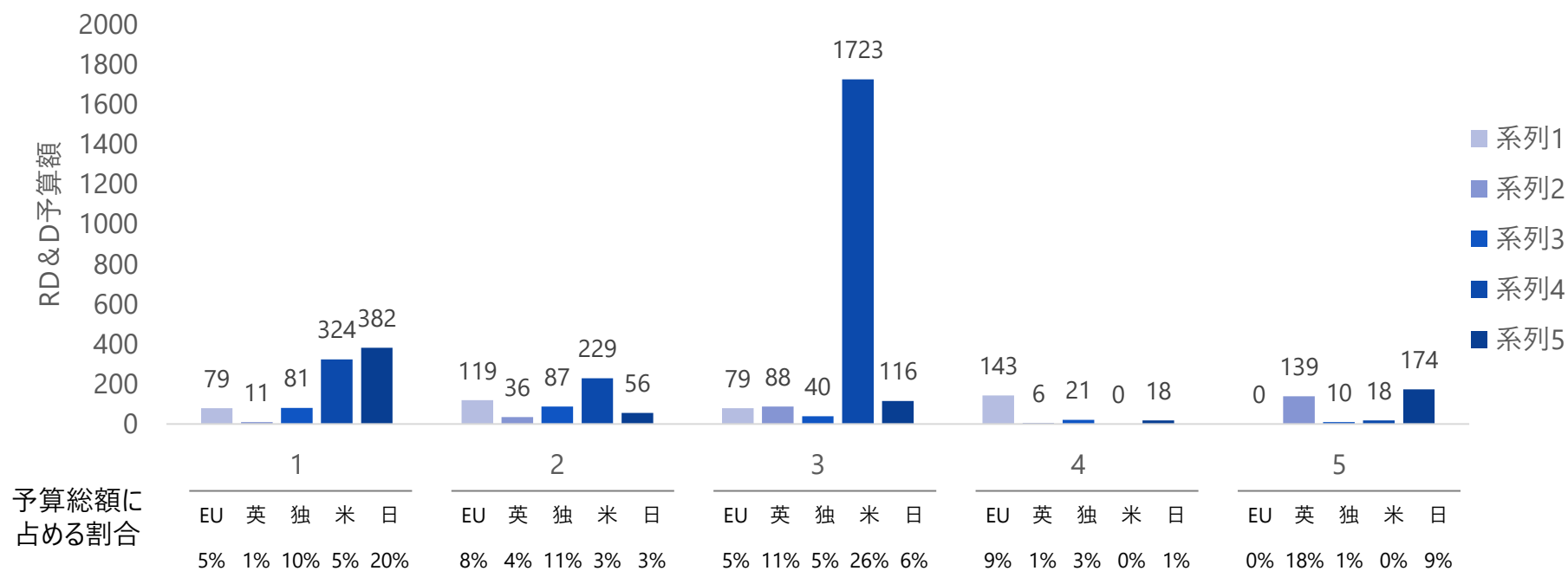
図表9：各国RD&D調査結果概要

国	予算額が他国と比較して多い分野		自国内で予算割合が高い分野	
EU	<ul style="list-style-type: none"> 住宅 エネルギー効率化 太陽光 バイオ燃料 	<ul style="list-style-type: none"> その他再エネ 水素 送電・配電 蓄電 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー効率化 太陽光 	<ul style="list-style-type: none"> 送電・配電 蓄電
英	<ul style="list-style-type: none"> － 		<ul style="list-style-type: none"> 交通 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギーに関する基礎研究
独	<ul style="list-style-type: none"> 太陽光 風力 	<ul style="list-style-type: none"> 地熱 送電・配電 	<ul style="list-style-type: none"> 交通 	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー効率化
米	<ul style="list-style-type: none"> 産業 住宅 交通 石炭 石油・ガス 	<ul style="list-style-type: none"> CCS 太陽光 風力 送電・配電 	<ul style="list-style-type: none"> 産業 	<ul style="list-style-type: none"> 水素
日本	<ul style="list-style-type: none"> 産業 CCS 風力 バイオ燃料 	<ul style="list-style-type: none"> 水素 燃料電池 省エネ 	<ul style="list-style-type: none"> 産業 住宅 太陽光 	<ul style="list-style-type: none"> 風力 送電・配電

各国のRD&D予算額 1/6

図表10：エネルギー効率化に関わる各国のRD&D予算額（2019年）

単位：10億USD

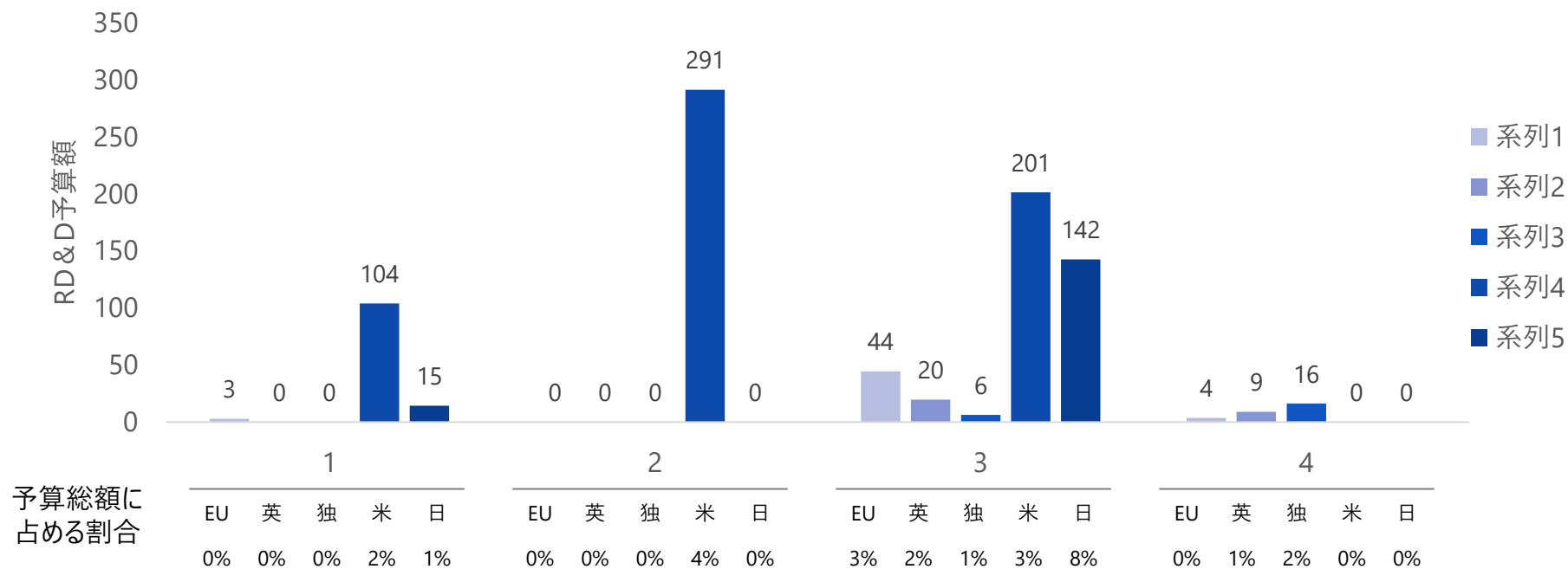


出所）IEA Energy Technology RD&D BudgetsよりNRI作成

各国のRD&D予算額 2/6

図表11：化石燃料に関わる各国のRD&D予算額（2019年）

単位：10億USD

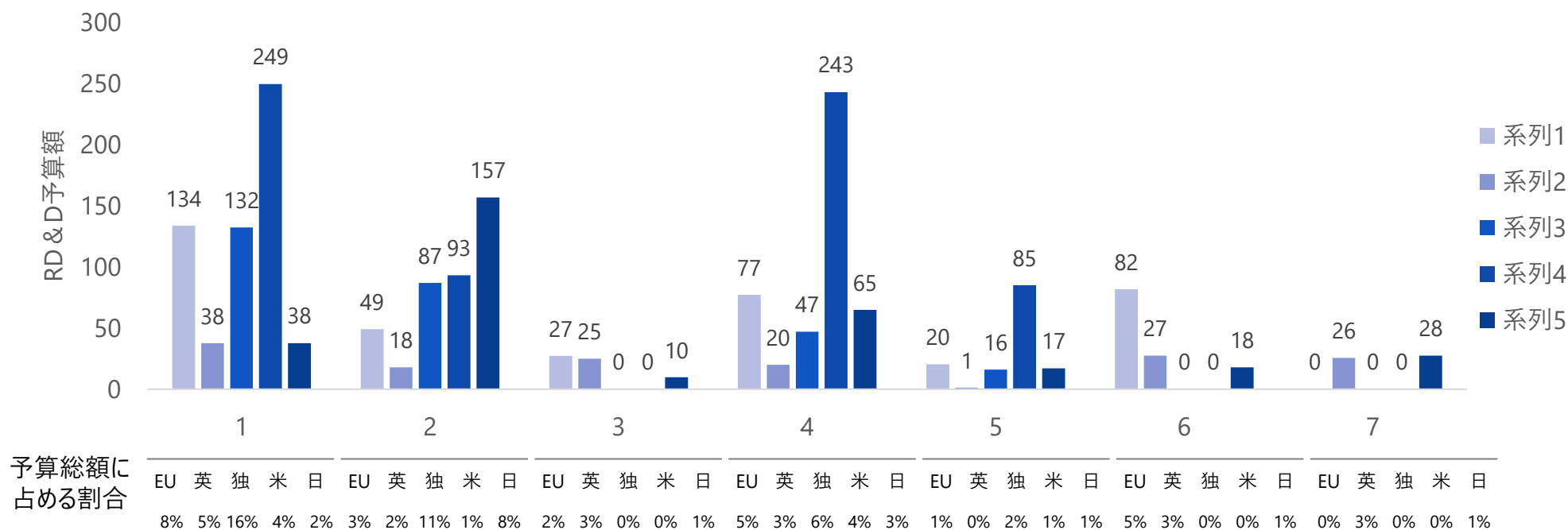


出所）IEA Energy Technology RD&D BudgetsよりNRI作成

各国のRD&D予算額 3/6

図表12：再エネに関わる各国のRD&D予算額（2019年）

単位：10億USD

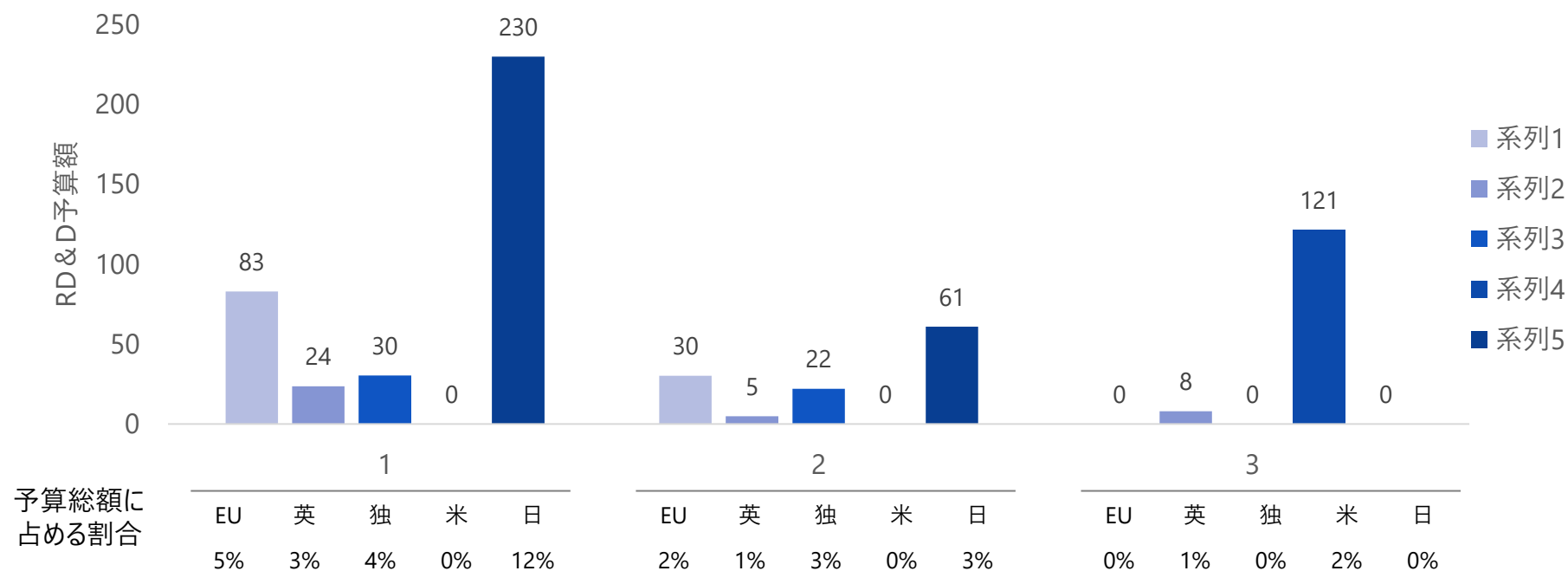


出所）IEA Energy Technology RD&D BudgetsよりNRI作成

各国のRD&D予算額 4/6

図表13：水素・燃料電池に関わる各国のRD&D予算額（2019年）

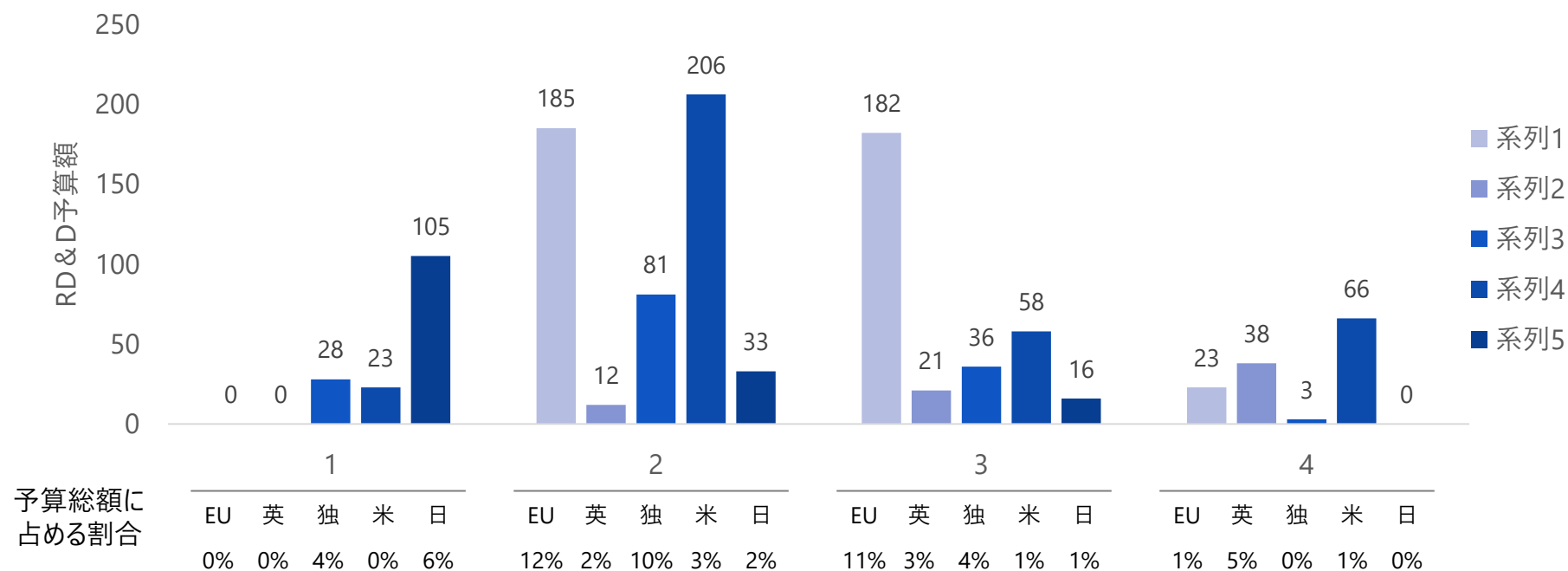
単位：10億USD



出所）IEA Energy Technology RD&D BudgetsよりNRI作成

図表14：その他電力・蓄電に関わる各国のRD&D予算額（2019年）

単位：10億USD

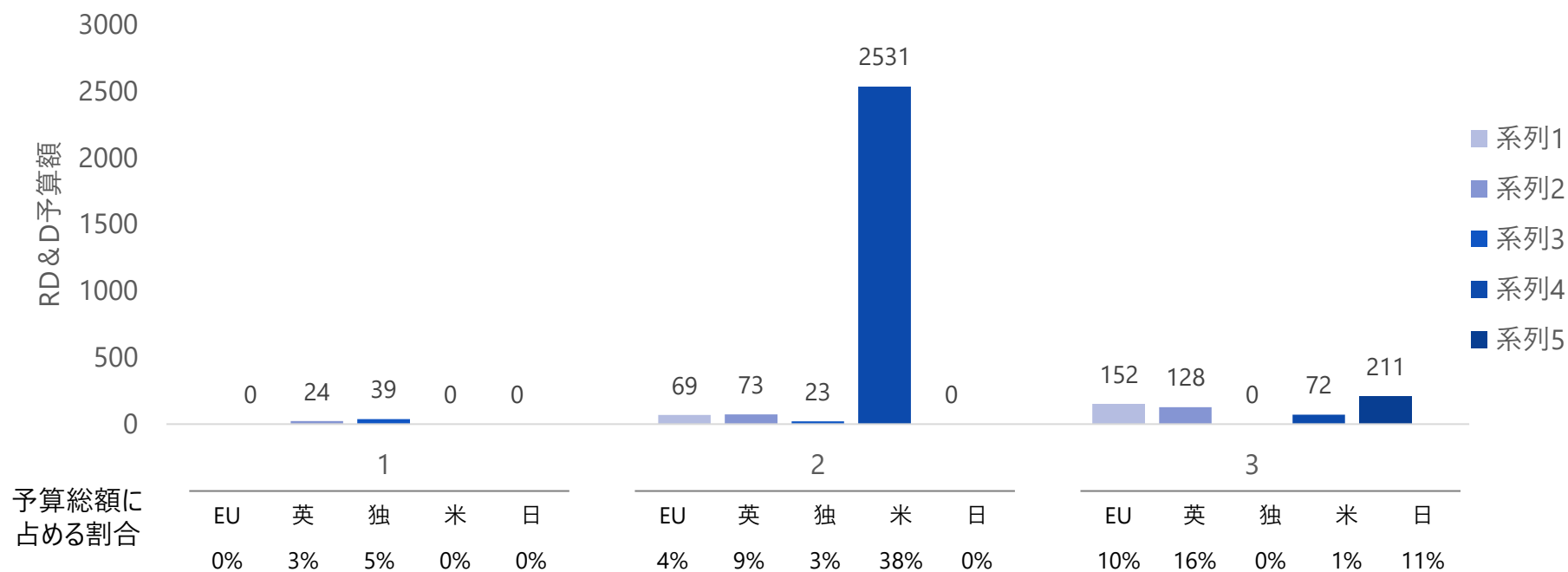


出所）IEA Energy Technology RD&D BudgetsよりNRI作成

各国のRD&D予算額 6/6

図表15：その他革新的技術・研究に関わる予算額（2019年）

単位：10億USD



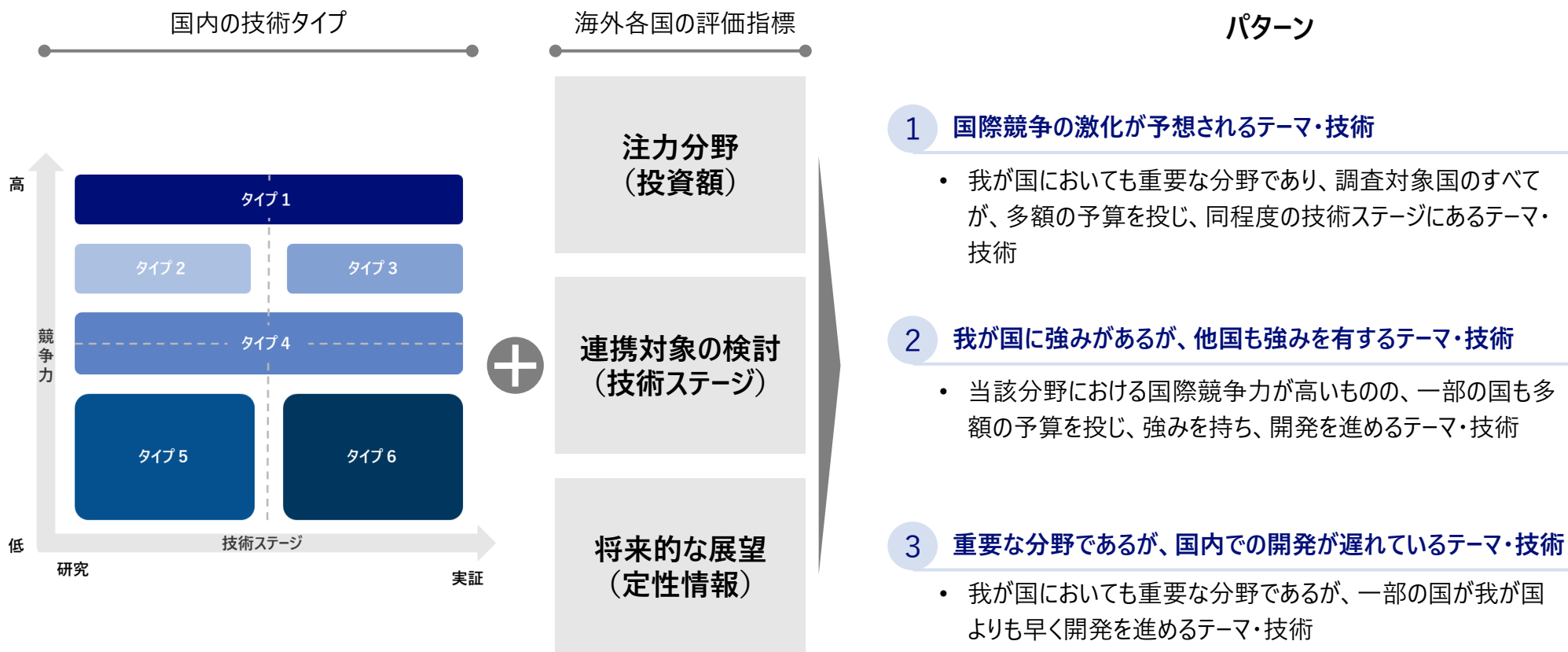
出所）IEA Energy Technology RD&D BudgetsよりNRI作成

1. 調査方法 | 重点分野の特定

国内の技術タイプと調査対象国の動向を踏まえ、テーマ・技術を3つに分類

- 海外調査では対象国の公的予算や関連プロジェクト、技術ステージ、研究機関などを取得可能な範囲で整理
- 前頁までで分類した国内における技術タイプと上記情報を踏まえ、テーマ・技術を3つのパターンに分類する

図表16：技術テーマのパターン分類方法



国内技術テーマの分類結果 1/3

- 連携可能性は、予算状況やIEAの記載等をもとに判断し、該当するプロジェクトや政策があるものについては、主に深堀を予定する国として記載

図表17：国内技術テーマの分類結果 1/3

青字：今後の調査対象 灰字：要検討

	技術テーマ	詳細	連携可能性
タイプ1	⑦CO2フリー水素（FCEV車）	<ul style="list-style-type: none"> 日本や韓国が中心となっており、今後規模の経済により価格も低減する見通し 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の国際競争力も高く、実証段階にあるため検討候補から除外
	②⑥グリーン冷媒	<ul style="list-style-type: none"> 冷凍冷蔵、ルームエアコン等のシェアは15%以上を占めており、競争力はある 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の国際競争力も高く、実証段階にあるため検討候補から除外
タイプ2	⑬高性能蓄電池	<ul style="list-style-type: none"> 自動車で高いシェアを誇るが、中国・韓国が台頭 航空機では要素技術に強みがあるが採用実績は低く、航空機のシェアも低い 	<ul style="list-style-type: none"> 諸外国との連携により、特にシェアが低い航空分野などで実証が進むことが期待される 米：BMR Programなど
	⑫CO2分離回収技術（DAC等）	<ul style="list-style-type: none"> 市場形成期のため競争力は不明だが、特許数は1位 各国で様々な研究が加速しており、欧米のベンチャー企業で研究が加速 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の投資額も多い 米：NETLやDOEがプロジェクトを実施 EU：Northern Lights Project
	⑮ゼロカーボンスチール	<ul style="list-style-type: none"> 地産地消産業であり、自動車向け鉄鋼生産で高い技術力・競争力を有する H-DRI等の実証では欧州企業が先行 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の鉄鋼生産量は多く、海外技術を活用しながら実証等を想定 独：Thyssenkrup等
	①次世代太陽光発電（新しい原理に基づくもの）	<ul style="list-style-type: none"> シェアは減少しているが、特許割合は高水準を維持しており、次世代太陽光発電については実験室レベルで高い成果を上げている ペロブスカイト系はどの国でも特筆すべき成果や実証は行われていない 	<ul style="list-style-type: none"> 日本が強みを持っていた分野だが、現在競争力が低下しており、海外との連携を模索 ペロブスカイト系はTRLが低いため、一部先行する英独を中心に幅広く検討
タイプ3	⑥高効率パワエレ	<ul style="list-style-type: none"> パワー半導体の特許数は減少しているものの、高いシェアを有する ただし、技術開発は欧州がけん引しているうえ、中国も追随 	<ul style="list-style-type: none"> パワー半導体の主要取引先は自動車業界など日本が強みを要する分野。今後の競争激化も踏まえ連携検討対象とする EU等幅広く検討

国内技術テーマの分類結果 2/3

図表18：国内技術テーマの分類結果 2/3

青字：今後の調査対象 灰字：要検討

タイプ
4

技術テーマ	詳細	連携可能性
⑦CO2フリー水素（水素製造）	<ul style="list-style-type: none"> 再エネを活用した世界最大級の水素製造施設が国内に位置 一部技術は商用・実証化に至っておらずドイツが先行する 	<ul style="list-style-type: none"> 水素への投資は日本でも伸びており、注力分野の一つ 競争優位の分野もあるが、他国が先行している分野もあり、相互協力の連携可能性がある 独：水素製造の技術で先行しているうえ、輸入水素への関心も示す EU：予算が増加傾向 The Recovery and Resilience Facility等
⑦CO2フリー水素（水素発電）	<ul style="list-style-type: none"> タービンを用いた大規模実証が国内で実施されており、競争優位 ただし水素の利用は様々な分野で検討されており今後競争は激化する見込み 	
⑦CO2フリー水素（輸送・貯蔵）	<ul style="list-style-type: none"> 市場形成期のため競争力は不明だが、輸送は早期から取組を実施 貯蔵については既に実用化されているものを除けば英米が先行 	
⑰高効率金属リサイクル	<ul style="list-style-type: none"> 科学分離の特許件数の上位に日本企業（2005～2014年） ただし、多くの分野で中国企業のシェア、特許割合が増加 	<ul style="list-style-type: none"> 蓄電池需要の高まりを受け重要な技術となる見込み 英：Transforming Foundation Industries
⑩安全な原子力技術	<ul style="list-style-type: none"> 国際的なシェアは1%以上で特許数も世界有数だが、シェアは低下傾向 核融合については様々な国が研究開発、小規模軽水炉でやや日本は出遅れている 	<ul style="list-style-type: none"> 国際比較で国内技術が遅れているため、連携の意義はあるが原子力関連の優先度は要検討 既に多くの連携も進んでいる
⑮バイオ燃料・合成燃料	<ul style="list-style-type: none"> 市場形成期であるが、特許数では他国に劣る ただし航空分野における米との連携等が行われている 	<ul style="list-style-type: none"> 既に航空分野では連携が進む 対象を検討するならば自動車等航空分野以外が適切ではないか

国内技術テーマの分類結果 3/3

図表19：国内技術テーマの分類結果 3/3

青字：今後の調査対象 灰字：要検討

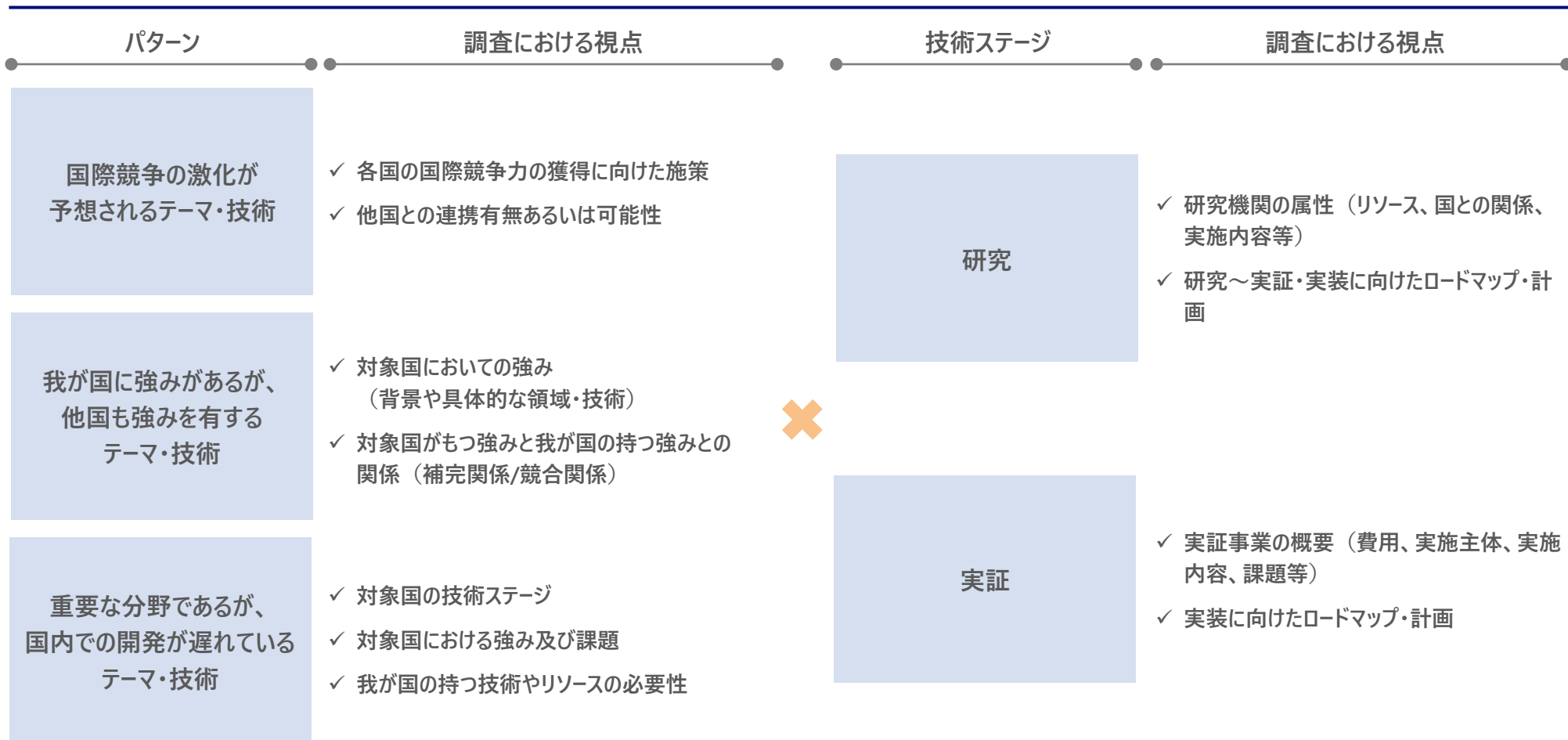
	技術テーマ	詳細	連携可能性（想定）
タイプ5	⑳機能性化学品製造	<ul style="list-style-type: none"> 個別の市場でシェアを確保しているものの、特許数は少ない バイオPE/PET市場は中国や欧州が先行 	<ul style="list-style-type: none"> 英：CCUD innovation programme Tata Chemicalsなどがプロジェクトを実施
	㉑バイオテクノロジーの活用	<ul style="list-style-type: none"> ゲノム分野の特許取得率は2%と世界的にも低い 	<ul style="list-style-type: none"> 独：German Research Foundation
タイプ6	㉒浮体式洋上風力	<ul style="list-style-type: none"> 風車メーカーは欧米企業が強く、日本のシェアは低い 日本でフランス企業が実証を行っている 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の投資額は増加傾向にあり注力分野の一つ 既に連携実績はあるため優先度検討
	㉓カーボンリサイクルセメント製造	<ul style="list-style-type: none"> 省エネに関する強みはあるが、産業としての競争力に劣る 欧米を中心に技術開発も盛んでTRLも高い 	<ul style="list-style-type: none"> CO2をコンクリート製造に用いる技術は既に実装段階に入っている その他の技術はCO2の回収・分離にて検討
	㉔未利用・再エネ熱利用	<ul style="list-style-type: none"> 地熱中ヒートポンプの製品市場における日本のシェアは低い 熱エネルギーに関する論文数は横ばいで研究開発は維持されているものの欧州や中国と比較した際の競争力は低下 	<ul style="list-style-type: none"> 先行する海外との連携による意義は見込まれる 英：Low Carbon Heating Technology Innovation

1. 調査方法 | 重点分野の深堀

分類したパターンごとに以下の観点から連携方法の特定に向けた調査を行う

- パターン及び技術ステージごとに調査における視点は異なると想定

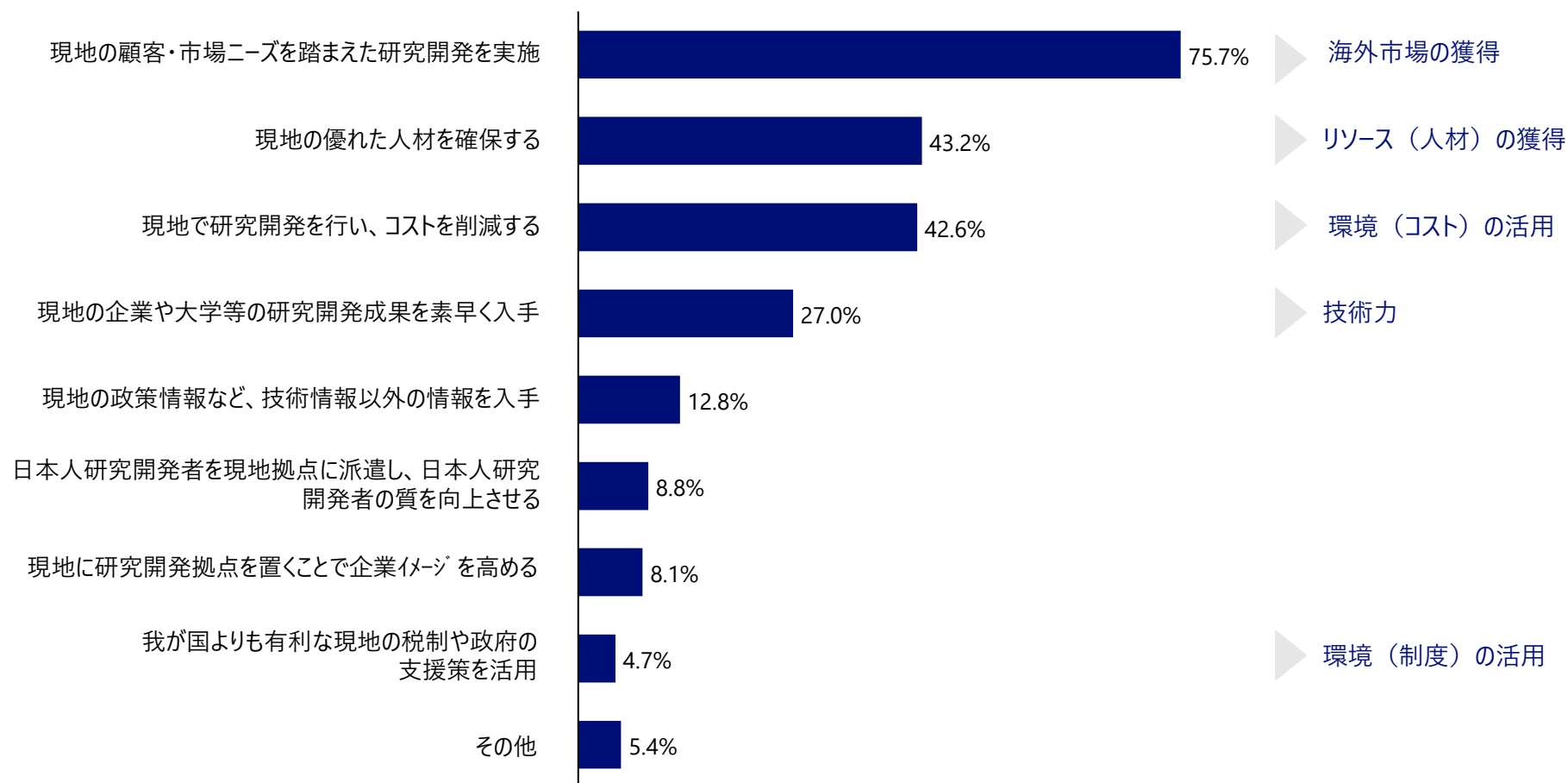
図表20：調査の観点



【参考】海外連携・拠点設置による企業へのメリット

図表21：海外研究開発拠点の設置目的

(2011年 有効回答数148社、延べ有効回答数338)



【参考】UNFCCCによる海外連携の想定パターン

■ UNFCCCでは気候分野の技術における海外連携のパターンを以下のように整理している

図表22：想定される海外連携のパターン一覧

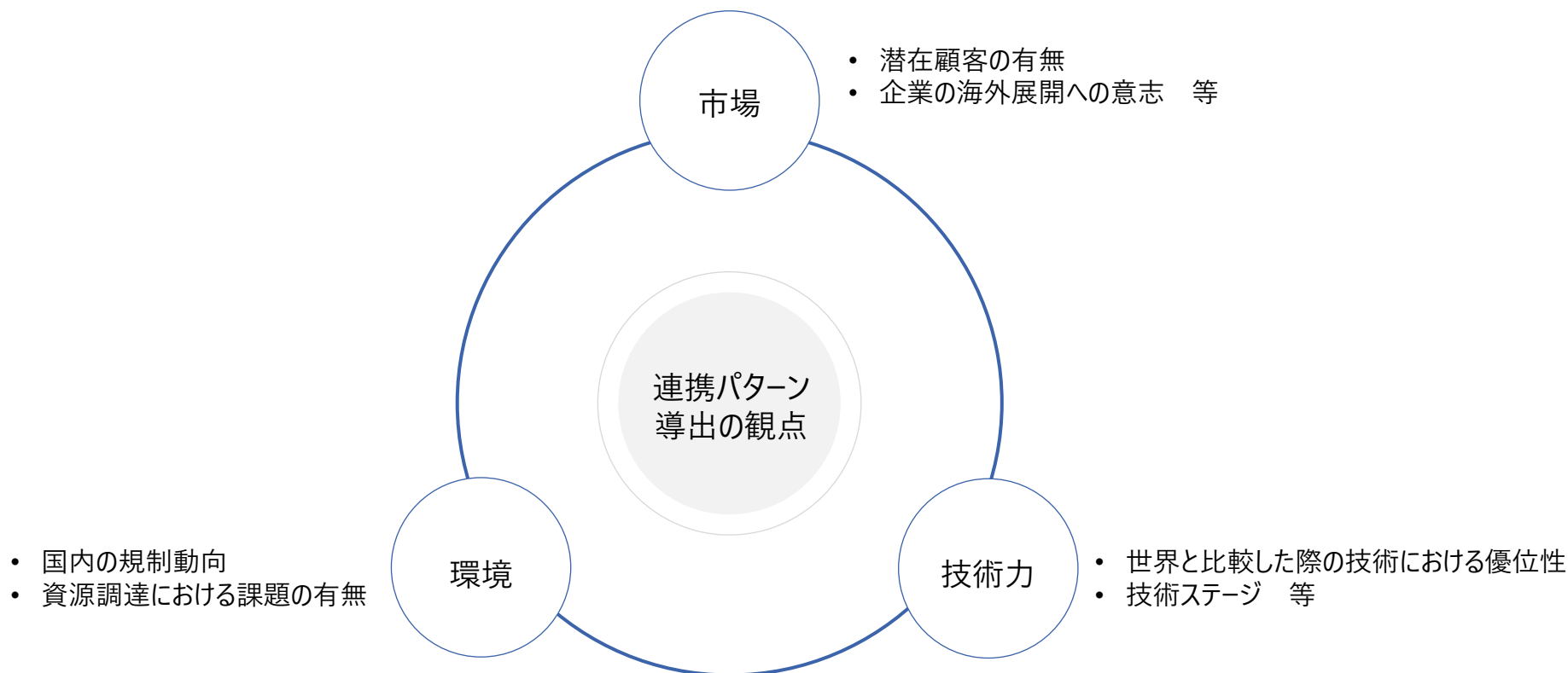
目標	イノベーション段階	R&Dのパートナー	連携パターン	資金提供者
従来技術と製品の 応用/改良	中期 (市場志向の新製品開発)	<ul style="list-style-type: none"> 企業 研究機関 大学 	企業間連携	<ul style="list-style-type: none"> 公的資金 民間投資
			官学連携	<ul style="list-style-type: none"> 公的資金 民間投資
			CGIARタイプ※	公的資金
“見落とされた需要” の喚起	初期～中期 (顧客志向の新製品開発)	<ul style="list-style-type: none"> 企業 研究機関 NGO 	製品開発 パートナーシップ	公的資金
			CGAIRタイプ	公的資金
			受賞技術を対象とした 共同研究	<ul style="list-style-type: none"> 公的資金 慈善事業
			産学連携	官民投資
長期R&D	初期	<ul style="list-style-type: none"> 企業 研究機関 大学 	大学間連携	公的資金
			産学連携	
			産業コンソーシアム	
			CGIARタイプ	
			国際的な研究機関の 創設	

※CGIARタイプ：国際農業研究協議グループのように、技術を特定分野・地域に適応させることに力点をおく機関の設立

国内技術がおかれている現状や課題をもとに海外連携のパターンを整理する

- 海外連携のパターンは連携の目的によって整理することを想定。各技術に適した目的を特定するため、以下3つの観点から国内技術の状態を定性的に調査。

図表23：国内技術評価の定性的観点



1. 調査方法 | 重点分野の深堀

連携パターン

■ 目的・背景を基に想定する連携の方法を以下のように整理。ただし連携の理由や方法は実際の主体によって多様になると想定。以下はあくまでも例示とする。

図表24：連携パターンの想定

類型	目的		海外連携の理由	連携の方法	想定タイプ
技術獲得・共創型 持ち帰り型	技術進歩	技術力	<ul style="list-style-type: none">技術力やノウハウ不足	<ul style="list-style-type: none">海外政府・企業と連携した共創（研究・実証）	タイプ2～6 （技術ステージにより連携先は異なる）
		環境	<ul style="list-style-type: none">リソース（研究設備・資金・人材）不足	<ul style="list-style-type: none">海外リソース・環境の活用	
		環境	<ul style="list-style-type: none">環境（資源・制度）が整っていない		
市場獲得・創出型	海外市場進出	市場	<ul style="list-style-type: none">有力な顧客・市場が日本にいない（潜在顧客が海外）	<ul style="list-style-type: none">関連製品に強みを持つ企業と連携製品のデファクト化 等	タイプ3・6
		市場	<ul style="list-style-type: none">より競争力を得るために海外市場の獲得		
⋮			⋮		

次世代型太陽光発電

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

2. 次世代型太陽光発電 概要

市場規模（2050年）

・ 699,900億円

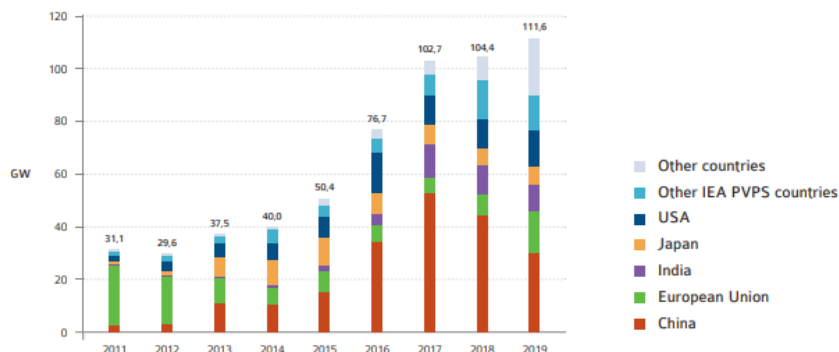
CO2削減ポテンシャル

・ 70億トン

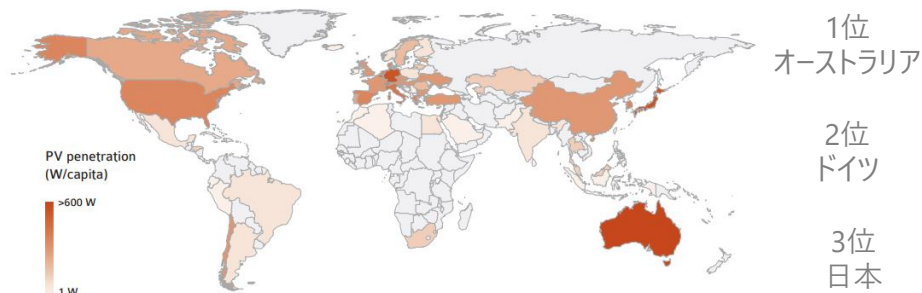
■ 市場概要

- ・ 累積設置容量では依然として中国が1位（32.9%）を占めるが、経年でみると2017年以降の年間設置容量は減少。2位は米国（12.2%）
- ・ 欧州や新興国市場の伸びにより市場全体は拡大。欧州では英国の市場規模が低迷する一方、ドイツとオランダの導入量が拡大。
- ・ 人口当たりの導入量ではオーストラリアとドイツの伸びが顕著。

図表25：累積設置容量



図表26：設置容量の世界分布

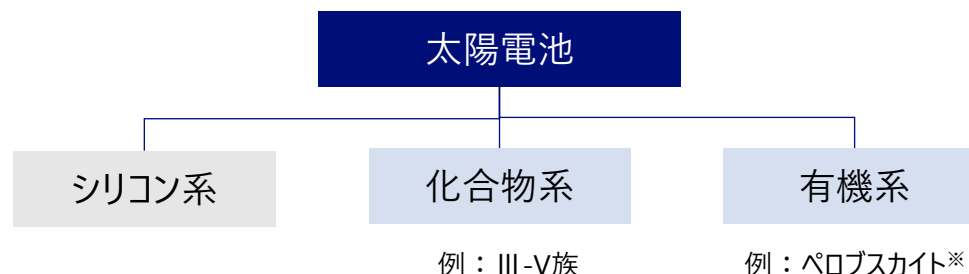


出所）IEA, NEDO等公開情報より

■ 技術概要

- ・ 太陽電池の技術は一般的にシリコン系・化合物系・有機系の3種類に大別される。
- ・ 特にペロブスカイトとIII-V族は革新的環境イノベーション戦略に含まれる等国内の注目度も高い。

図表27：太陽光発電技術概要



シリコン系

- ・ 変換効率：18~24%程度
- ・ 変換効率：23.26%（結晶シリコンベースのタンデム型）
- ・ 最も普及している技術で、セル生産量全体の97%程度を占める

化合物系

- ・ 変換効率：25～30%
（III-V族化合物半導体太陽電池セル（薄膜））
- ・ 変換効率は高いが、結晶シリコンの価格に劣り、基本的には宇宙での応用に利用

有機系

- ・ 変換効率：28%（ペロブスカイト系）
- ・ 最も急速に発展している太陽光発電技術

※ペロブスカイトは完全無機型のものも開発されているが、太陽光電池の一般的な分類として有機系に含める

国内動向

研究段階 国際競争力：強

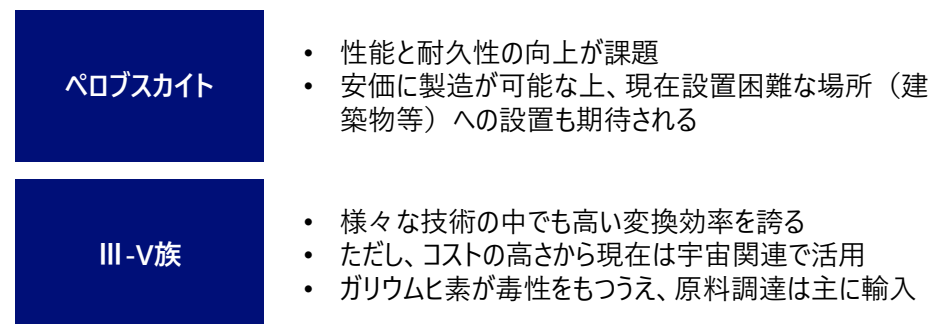
次世代型太陽光発電の技術に強く、塗布技術等に有用性がある
 今後は耐久性を高めながら日本や海外の市場獲得、製品化を目指す

現状	<ul style="list-style-type: none"> ・ 既存市場でのシェアは中国の台頭により減少 ・ 平地面積当たりの太陽光パネル導入量は第1位 ・ 特許割合は高水準を維持しており、次世代太陽光発電については実験室レベルで高い成果を上げている
方針	<ul style="list-style-type: none"> ・ 太陽光発電市場の拡大には現状設置困難な場所に設置可能な次世代型の設置が不可欠 ・ 研究開発と併せて、海外市場の獲得も見据え、次世代型太陽電池に係る性能評価等の標準化を進めるや関連製品の社会実装に向けた実証等に取り組む
目標	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2030年太陽光14~16%（第6次エネルギー基本計画） 2018年太陽光6.8%（IEA試算） ・ 2030年次世代太陽光の発電コスト 14円/kWh

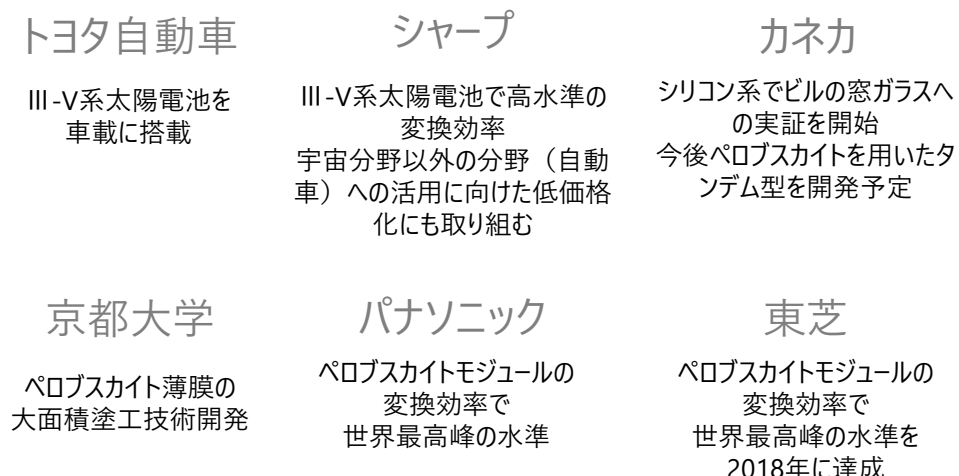


■ 技術開発状況

図表29：各技術の課題・特徴



図表30：主要な事業者・機関



2. 次世代型太陽光発電 国際動向

主要国 米国・ドイツ

■ 各国動向

図表31：太陽光発電の海外政策動向

米国 (投資額大)	<ul style="list-style-type: none"> メガソーラーの導入等設備容量は世界2位 投資額も多く、大学やベンチャーをはじめとしたプロジェクトが国からの資金提供を受ける ペロブスカイト系の開発に特化したプログラム（Solar Energy Technologies Office Fiscal Year 2020 Perovskite Funding Program）等もエネルギー省主導で実施
ドイツ (投資額大)	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ連邦経済局（BMWi）を中心に太陽光の開発や実証実験に積極的 2018年にはBMWiと連邦教育・研究省（BMBF）主導で7th Energy Research Programmeが開始され、タンデムペロブスカイトなど次世代型太陽光の研究を注力分野に特定
EU (投資額大)	<ul style="list-style-type: none"> 再生エネルギー指令や建築物のエネルギー性能に関する欧州指令（EPBD）が出され、建築部門における太陽光発電の役割が期待される ドイツ・フランス・オランダ・スペインを中心に市場は拡大する見込み 輸送コストを鑑みて生産回帰傾向も見受けられる
英国	<ul style="list-style-type: none"> 再エネ比率向上にむけ太陽光も議論されるが主軸は風力

図表32：主要な事業者・機関

※（）内の数値は参照先のページ数を示す

Fraunhofer ISE

ドイツの研究機関
BIPV※の実証も行う（P40）

Oxford PV

英国研究機関
ペロブスカイトシリコンタンデムで世界最高の変換効率（P38）

Swift Solar

米国の企業
ペロブスカイトタンデム系開発を目的に設立（P33）

Hunt Perovskite Technologies

ペロブスカイト系のモジュール生産の実用化に向けて資金提供を受ける（P37）

Massachusetts Institute of Technology

III－V族系のコスト低減に関する研究
エネルギー効率・再生可能エネルギー局から表彰と資金提供を受ける（P34）

Skanska

半透明ペロブスカイト太陽電池を搭載したビルを世界で初めて商用化スケールで建設（P41）

※BIPV（Buildings Integrated Photovoltaics）：建材一体型太陽光発電
出所）IEA, NEDO, 各国政府HP等公開情報より

2. 次世代型太陽光発電

国内動向 | 技術の定性評価

図表33：太陽光発電国内技術の定性評価

技術	強み	弱み	
ペロブスカイト	技術 <ul style="list-style-type: none">モジュールでは最高の変換効率を記録（パナソニック）先進的な塗布技術（東芝・京都大学）	技術 <ul style="list-style-type: none">ペロブスカイト-シリコンタンデムセルの最高変換率はOxford PV	技術進歩 海外市場進出 （デファクト化 デジュール化）
	市場 <ul style="list-style-type: none">薄膜型設置は平地面の少ない日本に適しており需要はある		
	環境 <ul style="list-style-type: none">主な原料となるヨウ素の生産量世界の30%を占める		
III-V族	技術 <ul style="list-style-type: none">国内最高峰の変換効率は31.17%（NEDO事業の一環, SHARP）新規活用方法として車載への搭載実験を開始（SHARP-トヨタ・日産）	技術 <ul style="list-style-type: none">有名な研究機関はフィンランドのTAMPEREEN大学。変換効率39%を達成。	技術進歩 海外市場進出
		市場 <ul style="list-style-type: none">主な活用先である宇宙関連市場（衛星）の製造数は中国・欧州・米が主	

2. 次世代型太陽光発電 想定する連携

図表34：太陽光発電において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
有機系	海外進出による市場拡大	国内に有する変換効率の高い太陽光を活用し、BIPVを推進する欧州と連携	・ 企業 (PV製造)	・ 企業
	海外進出による市場拡大	既に実証中のノウハウを活用し、商用化を見据え更なる実証を海外で実施	・ 企業	・ 企業 (PV製造)
	技術進歩	日本が強みを持つ塗布技術や豊富な原材料（ヨウ素）を活用し、より高い成果を持つ海外機関と連携	・ 研究機関 ・ 企業	・ 研究機関
化合物系	海外進出による市場拡大	宇宙関連市場は国内より海外のほうが規模が大きいと、海外の宇宙産業関連企業との連携による市場を拡大	・ 企業	・ 企業
	技術進歩	低価格化に向けたHVPE法などの共同研究や一部自動車への搭載実証を活用した共同研究	・ 研究機関 ・ 企業	・ 研究機関



USA Swift Solar

図表35：Swift Solarのプロジェクト概要

組織	• Swift Solar
期間	• 2017年～
投資額	• 現在まで1600万ドルのエクイティ資金を調達 (前回の増資ラウンドでは800万ドルを調達)
資金源	• Solar Energy Technologies Office • Good Growth Capital • Safar Partners • Climate Capital
概要	• 技術：ハロゲン化金属ペロブスカイト • 技術ステージ：実証 • 新規事業では、研究レベルから商用化へ拡大可能な製造プロセスの開発に取り組んでおり、2022年までに第1号製品の実現を見込んでいる

図表36：Swift Solarプロジェクトの主な特徴

背景

- 2017年に設立されたスィフト・ソーラー社は、ハロゲン化金属ペロブスカイトを用いたSolar PVシステムの革命に取り組んでおり、実現すれば今後10年で最も柔軟、高効率、安価なPV製品となる。
- 共同創始者チームは6人のドクター、4人のForbes 30 Under 30 fellowshipsにより組成されている。また、80,000回以上の論文被引用数、およびMITの起業家エコシステムからの強力なサポートを得ている。

プロジェクト情報

- 同社は、軽量、超高効率、安価および柔軟な製品の開発により、太陽光発電を大幅に増やすことを図る
- 同社のペロブスカイト技術は、安価かつ、太陽光の吸収と発光に優れ、エネルギー変換効率が高い半導体素材である
- 技術効果：製造・設置コストの削減、単位面積あたりの出力電力の増加



USA Massachusetts Institute of Technology

図表37：Massachusetts Institute of Technologyのプロジェクト概要

組織	• Massachusetts Institute of Technology
プロジェクト名	• Two-Dimensional Material Based Layer Transfer for Low-Cost, High-Throughput, High-Efficiency Solar Cells
期間	• 2017年～
投資額	• DOE受賞金：225,000ドル
資金源	• 米国エネルギー省
概要	<ul style="list-style-type: none">• 技術：III-V族• 技術ステージ：研究• プロジェクト立地：ケンブリッジ、マサチューセッツ州

図表38：Massachusetts Institute of Technologyプロジェクトの主な特徴

背景

- 化合物系太陽光電池は発電効率に優れているものの、材料となるガリウムなどが高価であることから、一般的にはあまり用いられておらず宇宙産業での活用が主になっている

プロジェクト情報

- 最終的には多接合の2次元のIII-V族電池の開発を目標とする。
- 上記の実現に向けて本プロジェクトではGaAsを用いた単接合のセル開発に取り組む
- 特に低コストを実現しつつ、グラフェン層を通過した後の変換効率を高い値で維持する新たな手法の確立に注力する



USA Perovskite Funding Program 2020概要

図表39：ペロブスカイト資金提供事業2020年 プロジェクトの候補リスト





図表40：Stanford Universityのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> ・スタンフォード大学
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> ・ Perovskite Funding Program 2020 耐空性と低コストを実現する効率的な大面積ペロブスカイト太陽電池のオープンエア製造
期間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2020年～
投資額	<ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー省助成金：150万ドル ・ 費用分担契約金：370,000ドル
資金源	<ul style="list-style-type: none"> ・ Perovskite Funding Program 2020
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 技術：ペロブスカイト ・ 技術ステージ：研究 ・ プロジェクト立地：カリフォルニア州スタンフォード

図表41：Stanford Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ 研究領域-機器の研究開発(効率&安定性)は、ペロブスカイト資金提供事業2020年度の一部として資金提供を受けた
- ・ ペロブスカイト技術の研究開発、製造、性能検証を支援することを目的としたプログラム

プロジェクト情報

- ・ 真空ベース処理工程を省き、デバイスの耐久性を改善するペロブスカイトセルを開発する
- ・ 既存のペロブスカイトセルを、特許取得済みの快速噴霧プラズマ法で作製された安定的な噴霧被覆ニッケル酸化物正孔輸送層で補完する
- ・ 20年後に最高出力の80%で性能を発揮できる商業用に競争力のある安定的なペロブスカイト太陽電池モジュールを製造するために、ペロブスカイトモジュールのカプセル化と水分バリア技術を今後の実証実験に応用する予定



USA Hunt Perovskite Technologies

図表42： Hunt Perovskite Technologiesのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Hunt Perovskite Technologies
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">Perovskite Funding Program 2020 鉛安全、高耐久性、安定なメタルハライドペロブスカイトモジュールのロットダイ製造
期間	<ul style="list-style-type: none">2020年～
投資額	<ul style="list-style-type: none">DOE助成金額：250万ドルコスト分担契約金額：200万ドル
資金源	<ul style="list-style-type: none">米国エネルギー省太陽エネルギー技術室によるペロブスカイト資金提供事業2020年
概要	<ul style="list-style-type: none">技術：ペロブスカイト技術ステージ：研究プロジェクト立地：ダラス、テキサス州連携：米国陸軍技術研究所(ERDC-CERL)、ノースカロライナ大学(UNC)およびペロブスカイトテクノロジーズ(HPT)

図表43： Hunt Perovskite Technologiesプロジェクトの主な特徴

背景

- 研究領域-製造技術の研究開発は、ペロブスカイト資金提供事業2020年度の一部として資金提供を受けた
- ペロブスカイト技術の研究開発、製造、性能検証を支援することを目的としたプログラム

プロジェクト情報

- ロット・ダイ・コーティングによって作製されたネームプレート容量において、20%以上の変換効率を達成する高効率・高耐久性なメタル・ハライド・ペロブスカイト太陽電池モジュールの実証を目的としている
- プロジェクトは、HPTのペロブスカイトインクテクノロジー、UNCのモジュール設計とリードキレート化のノウハウ、陸軍ERDC-CERLを用い、耐久性を実証する
- ペロブスカイトPVモジュールの製造可能性、スケーリング、耐久性、および化学的安全性を実証し、プロジェクト中の商業化の可能性と融資可能性を事前調整する予定

UK・Germany Oxford PV

図表44：Oxford PVのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Oxford Photovoltaics Ltd
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> Prepare perovskite-silicon solar cells for high-volume manufacturing
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2017年～
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 8.8 百万ユーロ(2020年) 3.1 百万ユーロ(2018年)
資金源	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ、ブランデンブルク経済省(2020年) EUの地域開発プログラム(2018年)
概要	<ul style="list-style-type: none"> 技術：ペロブスカイト 技術ステージ：普及 立地：Brandenburg

図表45：Oxford PVプロジェクトの主な特徴

背景

- オックスフォードPV社がEUの地域開発プログラムの一環として助成金を授与されたのは今回が2回目である。
- 2018年に、実験室から工業規模の機器およびプロセスへの技術の移転をサポートするために、同社の小規模生産ラインに対して310万ユーロを授与された。

その他の情報

- 2016年以降、同会社の拠点となっているデル・ハベルグの製造設備の拡大に4400万ユーロを投資している
- 広範な申請とデューデリジェンスのプロセスに従って、同社は事業の拡張計画の実行可能性を実証し、総コストがどこで費やされるかについての詳細を提供したことで、880万ユーロの助成金が製造ラインへの投資として授与された
- ペロブスカイト太陽電池は製造コストが低いが、当初は変換効率が低かった。2020年末に、太陽エネルギーから電気への変換効率が29.52%に達し、この数値が第三者に認証されたと発表した。会社の声明によると、彼らはこのテクノロジーを30%以上の変換効率にするための明確な将来のロードマップを持っている
- 太陽電池の製造は2021年に開始される見込み



図表46： ISFHのプロジェクト概要

組織	・ ハメルン太陽エネルギー研究所(ISFH)
プロジェクト名	・ 27plus6 Project ペロブスカイト/シリコンタンデム太陽電池の変換効率向上
期間	・ 2020年開始
投資額	・ 3.2 百万ユーロ
資金源	・ ドイツ経済エネルギー省(BMWi)
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 技術：ペロブスカイト、タンデム太陽電池 ・ 技術ステージ：研究 ・ 連携先： Karlsruhe Institute of Technology (KIT)、Centrotherm International AGおよびその他のサポートパートナー

図表47： ISFHプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ 現在、シリコン太陽電池の最高のエネルギー変換効率は29%※
- ・ 27plus6 Project では、シリコンとペロブスカイト型太陽電池を組み合わせ、最大33%の変換効率を達成する計画である

※ 最高変換効率の値は前提条件により異なる可能性がある

プロジェクト情報

- ・ ISFHは裏側接着による有機薄膜太陽電池の開発と、共蒸着法によるテクスチャー表面にコンフォーマルな固体層を堆積させるペロブスカイト吸収体の作製を主に担当。KITはペロブスカイト電池開発、Centrothermは接点を用いた不動態化用の有機薄膜層の堆積を担当。
- ・ 主流のシリコン太陽電池と比較して、エネルギー変換効率の大幅な増加を実証することを目的としており、これにより、PVによる発電コストを、ドイツのエネルギー市場におけるすでに低水準である4 ユーロct/kWhを下回るレベルまで削減することが可能となる。
- ・ まずはシリコン技術で変換効率27%の達成を目指し、タンデム構造にすることでペロブスカイトの活用を計画する。これにより、最終的には33%の変換効率を達成する。



図表48： Fraunhofer ISEのプロジェクト概要

組織	• Fraunhofer ISE
プロジェクト名	• 50Prozent Project 集光型で変換効率50%以上を達成するモノリシック構造多接合III-V族太陽光発電セルの開発
期間	• 2020年3月～ 2023年8月
投資額	• 3,200万ユーロ
資金源	• ドイツ経済エネルギー省(BMWi)
概要	• 技術：モノリシックIII-V型多接合太陽電池 • 技術ステージ：研究

図表49： Fraunhofer ISEプロジェクトの主な特徴

背景

- Fraunhofer ISEは、SOITECおよびCEAとともに、集中太陽光下において世界最高の変換効率（46%）を四重接合太陽電池で保持していた
- この記録は米国立再生可能エネルギー研究所（NREL）が作製した6重接合太陽電池によって記録更新された（変換効率47.1%）
- 50%プロジェクトの目標は、世界で最も効率的な太陽電池の記録をドイツのフラウンホーファーISEに取り戻すことである

プロジェクト情報

- 世界初の変換効率50%以上の多接合太陽電池セルと、変換効率40%を達成する集光型太陽電池モジュールを製造することを目標とする
- シミュレーション計算によると、シャドウを減らした金属フィンガーと改良された反射防止層との組み合わせで、この目標を達成できることが示されている



EU Skanska

図表50： Skanskaのプロジェクト概要

組織	• Skanska/Salue Technologies
プロジェクト名	• – 半透明ペロブスカイト電池を装備したビジネスセンターの建築
期間	• 2018年～
投資額	• –
資金源	• 自社
概要	• 技術：ペロブスカイト • 技術ステージ：実証・実装 • プロジェクト立地：ポーランド

図表51： Skanskaプロジェクトの主な特徴

背景

- 建築一体型の太陽光発電の開発は欧州や日本を中心に進められている
- スウェーデンに本社をおくSkanska社はLEEDをオフィス建築市場に導入するなど環境問題への取組を積極的に行っている
- ペロブスカイトを使った建築物は同社の戦略目標にふくまれている
- Salue Technologiesはポーランドに本社をおく太陽光発電製造企業。耐久性と耐水性に優れたペロブスカイト系電池の製造を得意としており、日本やアメリカなど各国から資金提供をうけ研究開発を行っている

プロジェクト情報

- 世界で初となる半透明ペロブスカイトを搭載したオフィスビルをポーランドに建設し。ペロブスカイトの商用スケールでの利用も世界初とされる
- Salue Technologiesが強みを持つインクジェットによって生産された52のペロブスカイトモジュールがポーランドのSkanskaオフィスの一部に利用
- 太陽光がカバーした面積は1.3×0.9m²



EU HZB, ENERGIE GMBHのHELMHOLTZ-ZENTRUM BERLIN FUR MATERIALIEN

図表52： HZB等のプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">HZB, ENERGIE GMBHのHELMHOLTZ-ZENTRUM BERLIN FUR MATERIALIEN
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">VIPERLAB
期間	<ul style="list-style-type: none">2021年6月1日~2024年9月30日
投資額	<ul style="list-style-type: none">552万€
資金提供	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020 EU
特定の情報 (定性的情報)	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：ペロブスカイト技術ステージ：研究

図表53： HZB等のプロジェクトの主な特徴

背景

- VIPERLABは、ペロブスカイトPVのコストが安く、カーボンフットプリントが最も少ないことから、EUベースのPV生産の将来市場浸透のための景気となる重要な新興技術として特定
- VIPERLABは、ヨーロッパの学術研究者と産業研究者らを主として構成され、次世代の太陽電池技術の研究開発に協力し、ヨーロッパにおけるペロブスカイトPV技術開発を加速させる

プロジェクト情報

- VIPERLABプロジェクトの目的は、新しい産業セクターの創出により社会経済的に重大な影響を与える、ヨーロッパのペロブスカイトを基盤とした光電圧太陽エネルギー製造業を推進すること

CO2フリー水素（製造）

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

3. CO2フリー水素（製造）

前提

- 水素は生成方法によって主に下記の4つに分類される。
- 欧州では、長期的に持続可能なCO2フリーエネルギーとして、グリーン水素の利用推進を掲げている。

図表54：水素の種類と特徴

* 欧州水素戦略での予想投資額

	特徴	主な課題	欧州水素戦略での評価	2050年までの 累積投資額*
グリーン水素	<ul style="list-style-type: none"> 再エネ由来電力を用いた水電解による水素製造（生成物は水素と酸素のみでCO2フリー） 実証・実装段階 	<ul style="list-style-type: none"> 耐久性・効率性の向上 低コスト化 	<ul style="list-style-type: none"> 長期的に持続可能なCO2フリーエネルギー 最終的な優先事項 	1,800～4,790億€
ブルー水素	<ul style="list-style-type: none"> 天然ガスの水蒸気改質による水素製造（CCSによるCO2回収により実質CO2フリー） 実証・実装段階 	<ul style="list-style-type: none"> 低温化のための触媒開発 CO2の分離・回収技術の向上 	<ul style="list-style-type: none"> グリーン水素への転換過渡期に利用 短期・中期的な役割を期待 	30～180億€
ターコイズ水素	<ul style="list-style-type: none"> メタンの熱分解による水素製造（生成物は水素と固体炭素のみでありCO2フリー） 要素技術開発段階 	<ul style="list-style-type: none"> 高活性・低コスト触媒の開発 効率的な分離が可能な触媒・システムの開発 生成する炭素の利用 	<ul style="list-style-type: none"> グリーン水素への転換過渡期に利用 短期・中期的な役割を期待 	
グレー水素	<ul style="list-style-type: none"> 化石燃料の水蒸気改質による水素製造（CO2を排出する） 現在の水素製造方法 	<ul style="list-style-type: none"> CO2排出削減 	<ul style="list-style-type: none"> CO2を排出するためグリーン・ブルー水素等への移行が必要 	—

出所）JOGMEC資料「欧州が進める脱炭素化の動きとロシアの対応」、東レ資料「エネルギー・環境分野における有望技術の技術課題における包括的調査」などをもとにNRI作成

3. CO2フリー水素（製造） | 水電解による水素製造

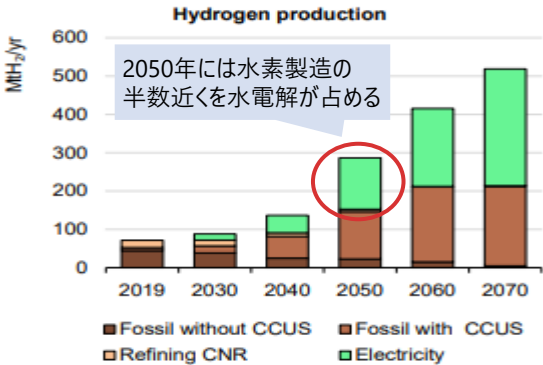
市場・技術概要

市場規模（2050年）	・ 648,000億円
CO2削減ポテンシャル	・ 60億トン

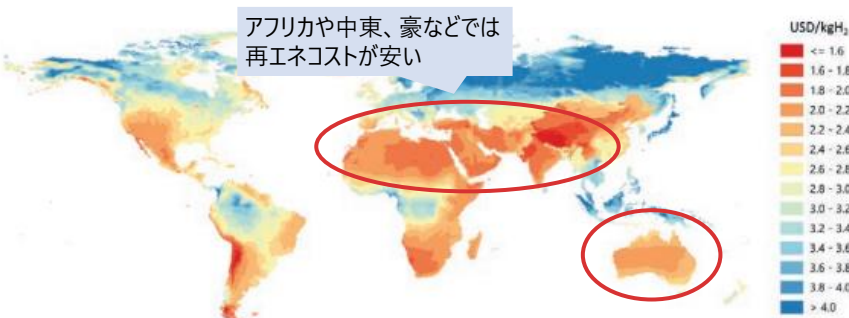
■ 市場概要

- ・ 現時点では、水電解水素製造は世界水素製造量の0.1%以下ではないが、2050年までに最大で平均8.8GW/年（約4.4兆円）の導入が見込まれる。
- ・ 欧州では再エネと両輪で水電解装置の導入を積極的に推進しており、先行して市場が立ち上がることが予想される。（欧州全体では2030年時点で40GWの導入目標を掲げる）
- ・ また、今後は欧州に限らず再エネコストが安価な地域を中心に、世界的に大きな市場が形成されることが見込まれる。

図表55：製造原別の水素製造量の推移（予測）



図表56：再エネ由来の水素製造コスト



■ 技術概要

図表57：CO2フリー水素（製造） | 水電解による水素製造技術概要

水電解装置				
	アルカリ形 (アルカリ水電解)	PEM形 (固体高分子水電解 ：陽イオン交換膜)	SOEC (高温水蒸気水電解)	AEM形 (固体高分子水電解 ：陰イオン交換膜)
TRL	9 (実用段階)	8 (実用段階)	6-7 (実証段階)	— (研究段階)
電解効率 (LHV, %)	63-70	56-60	74-81※1	—
運転圧力 (bar)	1-30	30-80	1	—
運転温度 (°C)	60-80	50-80	650-1000	—
運転時間 (hour)	60000-90000	30000-90000	10000-30000	—
負荷追従性 (%)	10-110	0-160	20-100	— (膜電解のため動作範囲は広い)
資本コスト※2 (USD/kW)	500-1400	1100-1800	2800-5600	— (貴金属を利用しないため低コスト)
特徴	・ 低コストで大型化に向く	・ 小型で負荷変動範囲が広い	・ 熱の有効利用により高効率	・ 負荷変動範囲が広く低コスト

※1：ラボレベルでは最も高いとされているが、実証では不明、※2：2019年時点

国内動向

■ 方針・戦略

要素技術では高い水準にあるものの、大型化等の実装に向けた技術開発は一部で欧州等に先行されており、商用化に向けた研究開発の支援を行う方針

図表58：CO2フリー水素（製造） | 水電解による水素製造国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">世界最大級の水電解装置を建設し、要素技術でも高い水準にあるしかし、大型化や低コスト等の実用化に向けた課題が残っており、水電解装置の積極的な導入が進む欧州等に一部先行される構図となっている
方針	<ul style="list-style-type: none">先行して立ち上がる欧州等の市場獲得に注力するため、大型化等への集中的な支援を実施し、コスト削減や耐久性向上による国際競争力の維持・強化を目指す欧州等と同じ環境で水電解装置の性能評価を行える環境（装置内圧力の規制見直しなど）を国内で整備することで、海外市場への参入障壁を低下させることを目指す
目標	<ul style="list-style-type: none">2025年までに水電解装置の性能評価基盤を整備2030年までにアルカリ形水電解装置の設備コスト5.2万円/kW、PEM形水電解装置の設備コスト6.5万円/kWを見通せる技術の実現

2021	2022	2023	2024	2025	~2030	~2040
水電解装置等の大型化等支援・性能評価環境整備						普及 拡大
海外展開支援（先行する海外市場の獲得）						
余剰再エネ活用のための国内市場環境整備（上げDR等）を通じた社会実装促進						

■ 技術開発状況

図表59：各技術の課題・特徴

	特徴	課題
アルカリ形	<ul style="list-style-type: none">白金等の希少金属を用いないため、比較的低コスト耐久性が高く大型化が可能	<ul style="list-style-type: none">水電解装置の大型化・モジュール化による低コスト化
PEM形	<ul style="list-style-type: none">比較的小型で、変動電力に対する柔軟性が高い高純度・高圧縮の水素が製造可能であり、柔軟な運用が可能	<ul style="list-style-type: none">長寿命化などによる低コスト化
SOEC	<ul style="list-style-type: none">熱の有効利用により、ラボレベルでは最も電解効率が高い燃料電池として動作できるため、装置の稼働率が高い	<ul style="list-style-type: none">実用化に向けた高性能化、長寿命化に関する要素技術開発
AEM形	<ul style="list-style-type: none">低コストかつ変動電力に対する柔軟性が高い	<ul style="list-style-type: none">実証に向けた要素技術開発

図表60：主要な事業者・機関

旭化成 (アルカリ形水電解装置)	日立造船・東レ (PEM形水電解装置)
FH2Rプロジェクトにて世界最大級の水電解装置(10MW)を受注	山梨県との実証実験でメガワット級(1.5MW)水電解装置を受注
東芝 (高温水蒸気水電解装置“SOEC”)	東京工業大学 (AEM形水電解装置)
NEDOからの委託事業にてSOECの研究開発を実施	NEDOからの委託事業にて高耐久・高効率のシステム開発に成功

3. CO2フリー水素（製造） | 水電解による水素製造

国際動向

■ 各国動向

図表61：政策・方針

EU	<ul style="list-style-type: none">エネルギー政策の中で、再エネ導入の拡大等により、2030年までにGHG40%削減、2050年までに実質排出量ゼロとする方針を打ち出す。また、「欧州の気候中立に向けた水素戦略」の中で、再エネ水素電解槽の導入目標を2030年までに40GWとし、最大420億ユーロを投資するとしている。
	オランダ
	フランス
ドイツ	<ul style="list-style-type: none">2030年までに電解装置6.5GWの設置、年間60万トンのグリーン水素生産を目標として設定。フランス-日本間で国際的な協力に向けた動きが複数見られる。その他インドとの水素分野での研究に関する協力も発表。
英国	<ul style="list-style-type: none">国内水素製造能力の目標を設定（2030年5GW、2040年10GW）。水電解による水素製造設備に対して、再エネ賦課金を免除水素技術の開発に連邦政府が7億8000万€の投入を発表。また、独蘭、独中の国際協力も発表など、水素分野への取り組みが強まる。
米国	<ul style="list-style-type: none">水素戦略を発表し、貯蔵容量の大きさ等の地質学上の優位性を活かして水素製造を含む産業全体を活性化させる。2030年までに低炭素水素製造の5GW導入目標を設定。CCUS付きのブルー水素製造に取組みつつ、小規模でのグリーン製造にも取組む予定。
	<ul style="list-style-type: none">随伴ガスからの水素製造の取組が中心（油田からのフレアガスを補足して水素に転換するパイロットプロジェクトなど）。DOEを中心に天然ガスや石炭、原発を活用した水素製造の技術開発、コスト低減に向けた研究がおこなわれている。再エネを用いた水素製造に関してはEEREを中心に初期研究段階にある。

図表62：主要な事業者・機関

Fuel Cells and Hydrogen
Joint Undertaking

2008年に欧州委員会と産業界が共同で設立した官民パートナーシップ
欧州全体の水素・燃料電池の技術開発・実証をリード（総予算：13.3億ユーロ（2014-2020））

Siemens

FCH-JUによるグリーン水素製造および水素還元製鉄実証プロジェクトにて、世界最大規模のPEM水電解装置（6MW）を建設

Sunfire

固体酸化物電池技術をベースとしたSOECの開発・製造を行っており、欧州の実証等で採用実績がある

Nel

ノルウェーの世界最大の水電解槽製造企業であり、世界各国で多数の受注実績を持つ

DLR

太陽熱エネルギー利用の研究分野で世界トップの研究機関
FCH-JUによる電解層のモジュールスタック設計の研究開発にて効率と操作性を大幅に向上させる革新的な電解層の開発に取組む

GreenLab

デンマークの国立研究施設であり、世界初のグリーン水素とメタノールの大規模製造施設を建設中。稼働開始は2022年を予定

3. CO2フリー水素（製造） | メタン熱分解による水素製造

国内動向

タイプ4 研究段階 国際競争力：不明

方針・戦略（国内）

低炭素水素製造の革新的技術の1つとして、研究開発・実証に取り組む方針

図表63：CO2フリー水素（製造） | メタン熱分解による水素製造国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">現在のところ、メタン熱分解に関する研究実績はそれほど多くなく、水素利用等先導研究開発事業などを通じて研究開発を実施している
方針	<ul style="list-style-type: none">水電解以外の多様な技術の選択肢の追及を目的に、今後とも研究開発・実証を推進する方針
目標	<ul style="list-style-type: none">2040年以降という長期視点での技術確立を目指す



技術開発状況

図表64：各技術の課題・特徴

	特徴	課題
メタン熱分解	<ul style="list-style-type: none">従来のメタンの水蒸気改質とは異なり、水素製造過程でCO2を発生しない	<ul style="list-style-type: none">反応温度を下げることでできる高性能な触媒の開発触媒表面が精製炭素に覆われることによる失活の回避プロセスの開発生成炭素の有効利用に向けた検討

図表65：主要な事業者・機関

産総研・IHI・京都大学	伊原工業・岐阜大学
水素利用等先導研究開発事業にて、触媒開発・プロセスの最適化、事業性評価などを実施	水素利用等先導研究開発事業にて、触媒の失活回避や精製炭素の排出プロセスの研究を実施

地球環境産業技術研究機構
(RITE)

水素利用等先導研究開発事業にて、膜反応器を用いたメタン直接分解を研究

国際動向

- ドイツを中心とした欧州各国は、グリーン水素の供給に向けて水電解装置の開発・導入に力点を置いており、メタン等を活用したブルー水素製造技術の優先度は劣後している
- 一方、天然ガスの産出が豊富な米国では、ブルー水素製造技術の先進的な研究開発が進められており、下記のような独自技術を保有する企業が存在する

図表66：米国のメタン熱分解技術を保有する企業

Monolith

- 2012年に設立された米国のスタートアップ
- 天然ガスの直接熱分解技術に加え、カーボンブラックなど利用価値の高い固体炭素を製造できる技術を有している
- 既にメタン熱分解を商用化レベルにスケールアップしており、2020年に三菱重工業が出資している

C-Zero

- カリフォルニア大教授の開発したメタンガスを固体炭素に熱分解できる特殊な熱触媒を保有するスタートアップ
- 2020年にはBreakthrough Energy Venturesや三菱重工などから約12億円の資金調達に成功し、また米国から約2億円の助成金も得ている
- 現在は商用化に向けた研究開発を進めている

3. CO2フリー水素（製造）

国内動向 | 技術の定性評価

国内では要素技術の開発が進むものの、実用化に向けた実証や法整備の後押しで欧州に遅れをとっているほか、需要側の市場形成が弱い

図表67：CO2フリー水素（製造）国内技術の定性評価（1/2）

技術	強み	弱み
アルカリ形	技術 <ul style="list-style-type: none">電解槽、膜、電極などの要素技術に関して高い水準の技術力を有する<ul style="list-style-type: none">✓ <u>1ユニットとして世界最大級の水電解システムを製造(旭化成)</u>	技術 <ul style="list-style-type: none">コスト低減のための大型化技術開発や高効率なシステム開発などで出遅れている
		市場 <ul style="list-style-type: none">欧州等の再エネ導入が先行する海外に比べて、市場の立ち上がりが遅れている<ul style="list-style-type: none">✓ <u>Cadent等のエネルギー会社を中心に利用側が積極的に市場を形成。再エネの水素製造プロジェクトも英国・ドイツを中心に開始される。</u>✓ <u>米は豊富な太陽光など比較的安価なグリーン水素が製造しやすい</u>
		環境 <ul style="list-style-type: none">高圧ガス法などの改正が進まず、法整備が遅れている
PEM形	技術 <ul style="list-style-type: none">電解槽、膜、電極などの要素技術に関して高い水準の技術力を有する<ul style="list-style-type: none">✓ <u>CCM(触媒付き電解質膜)の供給実績No.1(東レ子会社 Greenerity GmbH)</u>	技術 <ul style="list-style-type: none">要素技術の装置への実装技術開発、モジュール化技術開発などで出遅れている<ul style="list-style-type: none">✓ <u>FCH-JUを中心に大規模な電解プロジェクトが複数立ち上がる海外では、電解システムの大型化・効率化に関するノウハウが蓄積されている</u>
		市場 <ul style="list-style-type: none">欧州等の再エネ導入が先行する海外に比べて、市場の立ち上がりが遅れている<ul style="list-style-type: none">✓ <u>Cadent等のエネルギー会社を中心に利用側が積極的に市場を形成。再エネの水素製造プロジェクトも英国・ドイツを中心に開始される。</u>✓ <u>米は豊富な太陽光など比較的安価なグリーン水素が製造しやすい</u>
		環境 <ul style="list-style-type: none">高圧ガス法などの改正が進まず、法整備が遅れている

• 技術進歩
• 海外市場進出
• デファクト化

• 技術進歩
• 海外市場進出
• デファクト化

3. CO2フリー水素（製造）

国内動向 | 技術の定性評価

研究段階の初期にある以下技術は国内支援が不足しており、技術開発レベルも海外諸国に出遅れている

図表68：CO2フリー水素（製造）国内技術の定性評価（2/2）

技術	強み	弱み	
SOEC	技術 <ul style="list-style-type: none">NEDOや東芝を中心として高性能化・長寿命化に関する研究開発が進められているが、研究開発段階であるため、特筆すべき強みは不明	技術 <ul style="list-style-type: none">実証レベルの技術開発には至っておらず、先行する海外企業に出遅れている<ul style="list-style-type: none">✓ <i>Sunfire</i>(独)などの一部の先行する海外企業は実証レベルの技術を有している	技術進歩
		環境 <ul style="list-style-type: none">実用化段階にあるアルカリ・PEM以外の水電解技術に関する支援が十分でない<ul style="list-style-type: none">✓ 水電解装置の導入を政策的に後押ししている欧州では、既にSOECの実証を行う国も現れ始めている(例：オランダ)	
AEM形	技術 <ul style="list-style-type: none">NEDOや東工大を中心として高性能化・長寿命化に関するラボレベルの研究開発が進められているが、研究開発段階であるため、特筆すべき強みは不明	技術 <ul style="list-style-type: none">製品化レベルの技術開発には至っておらず、先行する海外企業に出遅れている<ul style="list-style-type: none">✓ <i>Enapter</i>(独)などの一部の先行する海外企業は製品化レベルの技術を有している	技術進歩
メタン熱分解	技術 <ul style="list-style-type: none">NEDOや産総研などを通じて研究が進められているが、研究開発段階であるため、特筆すべき強みは不明	技術 <ul style="list-style-type: none">商用化レベルの技術開発には至っておらず、先行する海外企業に出遅れている<ul style="list-style-type: none">✓ <i>Monolith</i>(米)などの一部の海外先行する海外企業は商用化レベルまでスケールアップが見込まれる技術を保有している	技術進歩

3. CO2フリー水素（製造）

想定する連携

図表69：CO2フリー水素（製造）において想定される連携（1/2）

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
アルカリ形	技術進歩	海外（特に欧州）の大規模電解プロジェクトへの参画を促し、システムの大型化・高効率化等に向けた技術開発を進める	・ 企業(電解装置製造元)	・ 研究機関 ・ 企業(電解装置製造元)
	デファクト化	グリーン水素製造で世界を牽引する欧州企業らと連携し、国際標準仕様に関する検討・開発を行う	・ 企業(電解装置製造元)	・ 企業(電解装置製造元)
	海外進出による市場拡大	先行して市場が立ち上がる欧州等の水素販売事業者や水素需要家に対して、海外企業等と連携して開発した商用化技術の導入促進を図る	・ 企業(電解装置製造元)	・ 企業(水素需要家)
PEM形	技術進歩	海外（特に欧州）の大規模電解プロジェクトへの参画を促し、システムの大型化・高効率化等に向けた技術開発を進める	・ 企業(電解装置製造元)	・ 研究機関・企業
	デファクト化	グリーン水素製造で世界を牽引する欧州企業らと連携し、国際標準仕様に関する検討・開発を行う	・ 企業(電解装置製造元)	・ 企業(電解装置製造元)
	海外進出による市場拡大	先行して市場が立ち上がる欧州等の水素販売事業者や水素需要家に対して、海外企業等と連携して開発した商用化技術の導入促進を図る	・ 企業(電解装置製造元)	・ 企業(水素需要家)

3. CO2フリー水素（製造）

想定する連携

図表70：CO2フリー水素（製造）において想定される連携（2/2）

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
SOEC	技術進歩	海外研究機関・企業等と連携し、実証・実用化に向けた技術開発を進める	<ul style="list-style-type: none">研究機関企業(電解装置製造元)	<ul style="list-style-type: none">研究機関企業(電解装置製造元)
AEM形	技術進歩	海外研究機関・企業等と連携し、実証・実用化に向けた技術開発を進める	<ul style="list-style-type: none">研究機関企業(電解装置製造元)	<ul style="list-style-type: none">研究機関企業(電解装置製造元)
メタン熱分解	技術進歩	海外研究機関・企業等と連携し、実証・実用化に向けた技術開発を進める	<ul style="list-style-type: none">研究機関企業(電解装置製造元)	<ul style="list-style-type: none">研究機関企業(電解装置製造元)



3. CO2フリー水素（製造） | 参考 | 海外の取組

EU Project GreenHyscale（GreenLab）

図表71： Project GreenHyscale（GreenLab）のプロジェクト概要

組織	コンソーシアムパートナー-GreenLab、Green Hydrogen Systems、Lhyfe、Energy Cluster Denmark、Everfuel、Siemens Gamesa Renewable Energy、Equinor Energy、Technical University of Denmark、Imperial College London、Quant
プロジェクト名	Project GreenHyscale
期間	2021年-2024年
投資額	€ 3000万 (推計投資額)
資金源	• European Green Deal Funding 2.2
プロジェクト情報	<div><div>• 主要技術：アルカリ水電解</div><div>• 開発段階：実証</div><div>• 場所 - : デンマーク</div></div>

図表72： Project GreenHyscale（GreenLab）プロジェクトの主な特徴

背景

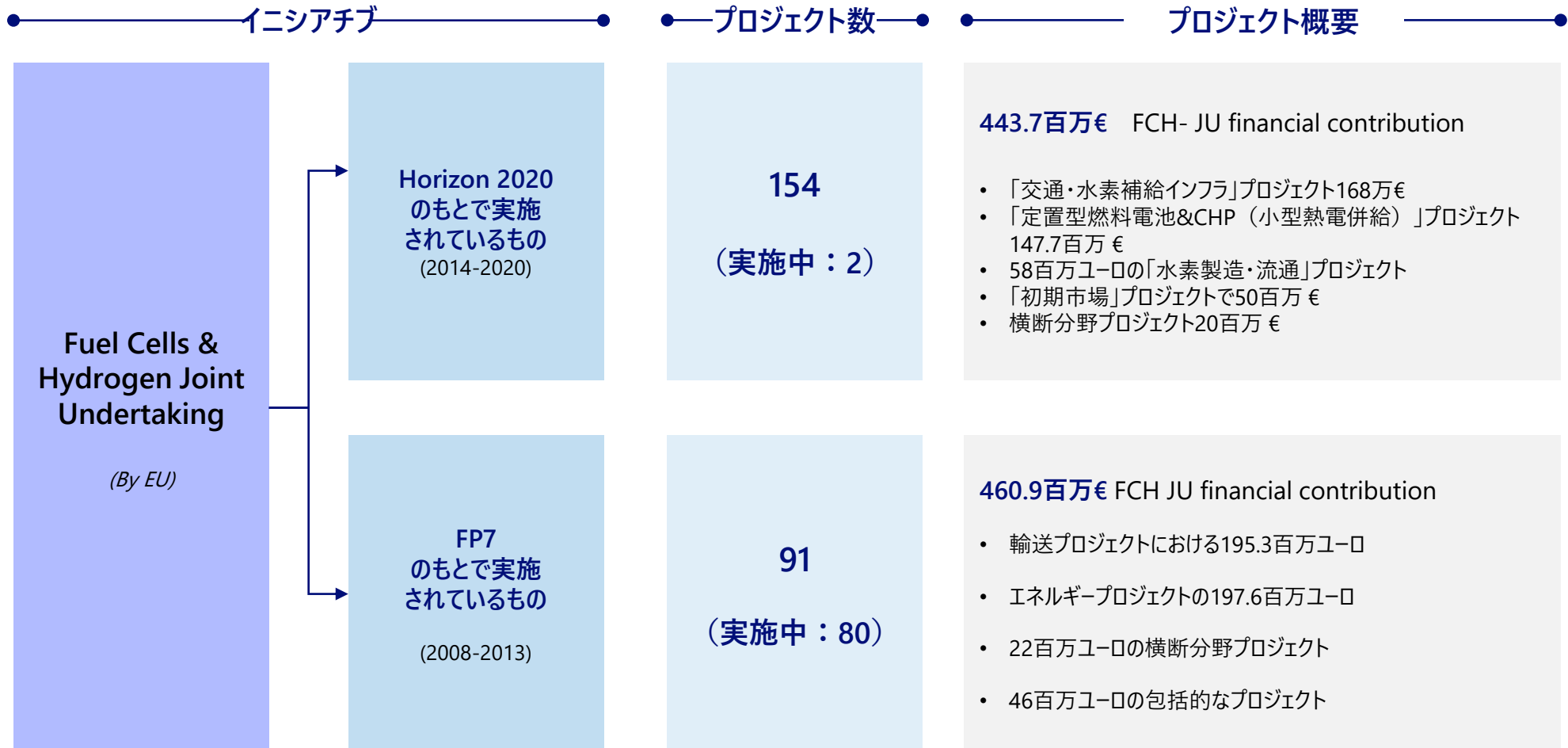
- GreenLabは600,000立方メートルのグリーン工業用エネルギー公園で、デンマークのSkiveのそばに位置している。これは、グリーンエネルギー移行における最大の課題の1つを解決することを目的としている。すなわち、従来にない量の再生可能エネルギーをエネルギーシステムに統合し、新たな工業団地が、既存の集成的エネルギーネットワークに負の影響を与えることなく、共同のエネルギー生産と消費を設立することを可能にすることである。エネルギー生産、産業、農業、熱分解、Power-to-Xを一つのプラットフォームに統合する。
- GreenHyScaleプロジェクトはGreenLab施設を設置する予定

プロジェクト情報

- 目的
EUの水素戦略と洋上再生可能エネルギー戦略に沿って、陸上と洋上の両方における電気分解の大規模展開を実現すること
- 現状
CINEA (European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency)と 新規電気分解プラント建設に向けた資金提供 の契約準備段階 100MWの電解プラントが2024年に稼働予定で1日30tの水素を製造。
- 将来的な目標
Green Hydrogen Systemを通じてデンマークのGreenLab Skiveに、最低 100MWの再エネ水素電解プラットフォームを導入・実証する

EU Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking

図表73：Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking



Projects for briefing are categorized and shortlisted based on the scale of project & data availability



EU Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking

図表74：FCH-JU（NEWLY）のプロジェクト概要

組織	Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking
プロジェクト名	NEWELY – （成分・素材を改善した次世代アルカリ型水電解装置）
期間	2020年1月-2022年12月
投資額	総資金-2.597百万ユーロ 政府拠出金-2.204百万ユーロ
資金源	• Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：AEM（アニオン交換膜水電解）開発段階：研究開発パートナー：プロジェクトコーディネーターであるDLRを含む11のパートナーその他のパートナー：Air Liquide、Membrasenz、Proplus、Cutting Edge Nanomaterials

図表75：FCH-JU（NEWLY）のプロジェクトの主な特徴

背景

- Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking（FCH JU）は、欧州市場において水素のエネルギー源としての活用を目指してFCH技術の導入に資する取組を実施。
- 上記目標の達成に向けてR&I（リサーチ＆イノベーション）や最適化に関する研究などを行っている。

プロジェクト情報

目的-

- 水素出力圧力を向上させた5セルスタックの試作品の開発
- 純水原料のみで作動するアルカリ型水電解（AEMWE）の最新技術の性能を現在の2倍に引き上げる



EU Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking

図表76： FCH-JU（ANIONE）のプロジェクト概要

組織	Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking
プロジェクト名	ANIONE- 陰イオン交換膜電気分解法による再生可能エネルギーを用いた水素製造の大規模化
期間	2020年1月-2022年12月
投資額	総資金-1.9百万ユーロ 政府拠出金-1.9百万ユーロ
資金源	• Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：AEM（アニオン交換膜水電解）開発段階：研究開発パートナー：プロジェクトコーディネーターであるConsiglio Nazionale Delle Ricerche (CNR-ITAE)を含む7パートナーその他のパートナー：CNRS, Hydrolite, TFP Hydrogen, IRD Fuel Cells A/S, Hydrogenics Europe NV, Uniresearch BV

図表77： FCH-JU（ANIONE）のプロジェクトの主な特徴

背景

- Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking（FCH JU）は、欧州市場において水素のエネルギー源としての活用を目指してFCH技術の導入に資する取組を実施。
- 上記目標の達成に向けてR&I（リサーチ＆イノベーション）や最適化に関する研究などを行っている。

プロジェクト情報

目的-

- 水素生成速度が約0.4 Nm³/h（TRL 4）の2kWアルカリ型水電解槽の検証を行い、2050年までにEUのCO₂排出量ゼロの目標実現に向けて大規模な分散型水素製造インフラ整備計画の達成に資すること。
- 上記目的達成に向けて重要な原材料（CRM）、高表面積電極触媒および膜電極接合体による革新的な強化アニオン交換膜を開発する。



EU H2FUTURE (Siemens)

図表78： H2FUTURE (Siemens)のプロジェクト概要

組織	Voestalpine, VERBUND, Siemens, Austrian Power Grid, K1-MET and TNO
プロジェクト名	Project H2FUTURE - 長期的な鉄鋼生産における化石燃料の代替手段としてのグリーン水素の工業生産に関する研究
期間	2017-2022 (4.5年)
投資額	総額 €18 M
資金源	<ul style="list-style-type: none">• Horizon 2020• FCH-JU (€12 M)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">• 技術：PEM電解• 開発段階：実装• 場所：オーストリア

図表79： H2FUTURE (Siemens)プロジェクトの主な特徴

背景

- H2FUTUREは、再生可能エネルギーからグリーン水素の製造を目的としたヨーロッパのフラッグシッププロジェクト。
- 製鉄業界・エネルギー部門、研究機関、国家、ヨーロッパ全体など企業・国境を越えた広範かつ集中的な協力であり、技術開発における連携の重要性を象徴するプロジェクトになっている。

プロジェクト情報

各主体の役割

- シーメンス社：PEM電解装置の技術の供給。
同社が提供するSILYZER電解装置はメンテナンス回数が少ないうえ、高純度からグリーンな水素を製造する。また腐食性溶液や酸などの有害物質が使われていないため、操作者のリスク低減にも貢献
- VERBUND：プロジェクトコーディネーター。再生可能エネルギー源から電力の供給、およびグリッド関連サービスの開発。
- Austrian Power Grid：予備力市場への発電所の接続
- Voestalpine, TNO & K1-MET：工場稼働、および欧州・世界の鉄鋼部門での応用可能性の実証



EU Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking

図表80： FCH-JUのプロジェクト概要

組織	Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking
プロジェクト名	NEPTUNE – Next Generation PEM Electrolyser under New Extremes
期間	2018年2月～2021年10月
投資額	総資金-1.927百万ユーロ 政府拠出金-1.927百万ユーロ
資金源	• Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：PEM電解開発段階：研究開発パートナー：ITM Power, Engie Lab, Solvay, Institute for Advanced Energy Technologies (CNR-ITAE), IRD Fuel Cells & Pretexo,

図表81： FCH-JUのプロジェクトの主な特徴

背景

- Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)は、欧州市場において水素のエネルギー源としての活用を目指してFCH技術の導入に資する取組を実施。
- 上記目標の達成に向けてR&I（リサーチ＆イノベーション）や最適化に関する研究などを行っている。

プロジェクト情報

目的-

- PEM型水電解装置の大規模化を実現するためには、高い効率性と安全性を確保しながら、水素の生成速度と出力圧力の大幅な向上とともに、資本コストの大幅な削減が必要である。
- これらの課題に対処するためには、PEM電解技術の段階的な変更が必要となる。NEPTUNEプロジェクトは、電力消費を通常のレベルに維持したまま、ベース負荷の水素圧力を100barに、電流密度を4A/cm²に上げるために、セルの素材、スタック、システム、それぞれにおいて画期的なソリューションの開発を目指す。



EU Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking

図表82： FCH-JU（PROMETEO）のプロジェクト概要

組織	Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking
プロジェクト名	PROMETEO – 高温固体酸化物電解槽における太陽熱と電力を活用した水素生産
期間	2021年1月～2024年6月
投資額	総資金-2.7百万ユーロ 政府拠出金-2.5百万ユーロ
資金源	• Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：SOEC開発段階：研究開発パートナー： ENEA、Capital Energy、Fondazione Bruno Kessler、Solid Power、Institute Imdea Energy、EPFL、Snam、NextChem、Stamicarbon

図表83： FCH-JU（PROMETEO）の主な特徴

背景

- Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking（FCH JU）は、欧州市場において水素のエネルギー源としての活用を目指してFCH技術の導入に資する取組を実施。
- 上記目標の達成に向けてR&I（リサーチ＆イノベーション）や最適化に関する研究などを行っている。

プロジェクト情報

目的-

- 太陽エネルギーから発生する熱と発電を最も効率的に使用し、グリーン水素を生成する高温固体酸化物電解（SOE）に基づく革新的な試作装置の開発を目指す。
- ガスグリッド（SNAM、イタリア）への水素の注入、再生可能電力の化学貯蔵（Capital Energy、スペイン）、およびアンモニアと肥料製造のための水素の使用（Stamicarbon、オランダ）の3つの産業用途において、グリーン水素に対する顧客のニーズを満たすように設計される。



EU Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking

図表84： FCH-JU（NewSOC）のプロジェクト概要

組織	Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking
プロジェクト名	NewSOC -次世代固体酸化物形燃料電池・電解技術
期間	2020年1月～2023年6月
投資額	総資金-4.9百万ユーロ 政府拠出金-4.9百万ユーロ
資金源	・ Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：SOEC開発段階：研究開発パートナー：プロジェクトコーディネーターであるDANMARKS TEKNISKE Universitet(DTU)を含む15のパートナーその他のパートナー: CEA、UNISA、IREC、IEN、TNO、FORTH、CERTH、VTT、EPFL、POLITO、SolidPower、Elcogen、Sunfire、CeresPower、Hexis

図表85： FCH-JU（NewSOC）の主な特徴

背景

- Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking（FCH JU）は、欧州市場において水素のエネルギー源としての活用を目指してFCH技術の導入に資する取組を実施。
- 上記目標の達成に向けてR&I（リサーチ＆イノベーション）や最適化に関する研究などを行っている。

プロジェクト情報

目的

- 最先端の水素製造技術を目標に固体酸化物セル（SOC）&スタックの性能、耐久性、コスト競争力の大幅な向上。
- ライフサイクルへの影響およびコスト評価（LCA）法を用い、新しいSOC素材と製造プロセスを評価する。
- 欧州の主要SOC製造業者6社がコンソーシアムの一部として参加することで、幅広いSOCの概念や製品、市場戦略を踏まえることができる。



Germany Air Liquide, Siemens

図表86： Air Liquide, Siemensのプロジェクト概要

組織	Air Liquide (フランスの工業用ガス供給業者) Siemens
プロジェクト名	Building 30MW electrolyzer for the production of green hydrogen in Oberhausen in Germany (グリーン水素製造用30MW電解槽の建設)
期間	2021-2023
投資額	NA
資金源	・ドイツ連邦経済エネルギー省
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：PEM開発段階：実装場所：ドイツ Oberhausenプロジェクトは、30MWに拡大される前に、20MWの能力で2023年までに稼動するように設定されている。エレクトロライザーは、エアリキッドの既存の現地パイプラインインフラに統合され、主要産業と再生可能な水素を伴う移動性を供給する

出所）Air Liquideプレスリリース、Business Wire等

図表87： Air Liquide, Siemensプロジェクトの主な特徴

背景

- Air Liquideはパリ協定の達成に向けて、2050年CN目標を設定。これに向けて2030年までに3GWの電解容量の達成と、2035年までに低炭素水素バリューチェーンに\$ 9.4 bn投資を公表。
- ドイツ政府は、国家の水素戦略を掲げるなどエネルギー転換を進めており、規制・法的枠組みの構築に取り組んでいる。グリーン水素推進の一環として、Air Liquide のプロジェクトに資金提供を行う。

プロジェクト情報

- 15の大規模産業施設につながる水素パイプラインと酸素パイプラインの両方に接続された世界初の大規模グリーン水素製造施設となる。これにより、鉄鋼、化学、製錬業、などの分野に貢献する。
- Air Liquideの既存の水素パイプラインネットワークを活用し、グリーン水素を製造することで、ライン・ルール産業流域の脱炭素を加速し、人口密集地域におけるグリーンなモビリティの推進に貢献する事が期待される。

UK-Germany CO2フリー水素製造コスト1/10の実現

図表88：CO2フリー水素製造コスト1/10の実現のプロジェクト概要

組織	燃料電池&水素共同事業
プロジェクト名	REFHYNE - ヨーロッパ向けクリーン精製水素
期間	2018年1月～2022年12月
投資額	総資金-19.7百万ユーロ 政府拠出金-9.98百万ユーロ
資金源	・ Horizon 2020プログラム
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術 - 水蒸気メタン改質・PEM電解による水素 開発段階-研究開発段階 <p>パートナー-</p> <ul style="list-style-type: none"> SINTEF (プロジェクトコーディネーター)を含む5パートナー 他のパートナー: シェル、エレメントエネルギー、スフェラ、ITM パワー

図表89：CO2フリー水素製造コスト1/10の実現プロジェクトの主な特徴

背景

- 燃料電池水素共同実施機構（FCH JU）は、欧州におけるFCH技術の市場導入を促進し、エネルギーキャリアとしての水素とエネルギー転換器としての燃料電池の特性を活用し、ポートフォリオを開発するために最適な研究と技術革新（R&I）プログラムを実装することにより、市場に対応できるクリーンで効率的なエネルギーソリューションを実現するために取り組んでいる。

プロジェクト情報

目的-

- REFHYNEプロジェクトは、欧州向け清浄精製水素供給の取り組みの最前線にある。このプロジェクトは、欧州委員会の燃料電池・水素共同受託事業（FCH JU）から資金提供を受け、ドイツ・ウェッセリング州のシェル・ラインランド精油所に世界最大の水素電解装置を設置し、運営する
- ITM Power社で構築したPEM電解装置は、大規模な工業規模で展開されるその種類の中で最大規模となるであろう。このプロジェクトでは、他の産業プラントへの導入の可能性を調査するとともに、技術の技術的、経済的、環境的利益を精製し、決定する将来に向けた一歩となる可能性を検討する



USA PNNL, West Virginia University

図表90： PNNL, West Virginia Universityのプロジェクト概要

組織	Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) West Virginia University (WVU)
プロジェクト名	New Clean Energy Process Converts Methane to Hydrogen with Zero Carbon Dioxide Emissions
期間	2021年～
投資額	NA
資金源	<ul style="list-style-type: none">Southern California Gas Company (SoCalGas)C4-MCPエネルギー省（Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office within the Office of Energy Efficiency and Renewable Energy）
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：メタンの熱触媒分解による水素製造開発段階：研究開発パートナー：Southern California Gas Company (SoCalGas) and C4-MCP

図表91： PNNL, West Virginia Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- 水素燃料はカーボンニュートラルを達成する上で必要不可欠である。ゆえに経済的かつ炭素を排出しないクリーンな水素の製造方法が重要。産業界では日々技術開発がおこなわれており、多様な手法の内の一つにメタンの熱触媒分解による水素製造が位置付けられている。

プロジェクト情報

- 現状：天然ガスの主成分であるメタンを水素に変換し、CO2フリーな水素製造プロセスの開発に成功。
- 課題：ガス反応が低いことが熱分解を困難にしており、現在技術は研究段階にとどまっている。これが熱分解を困難にしている。変換には、高温度を要するため多くのエネルギーが必要となり、既存のメタン熱分解法は非効率かつ低炭素とは言えない。
- 展望：流動床反応器におけるパイロット規模の実証を目指す。これが成功すれば、低炭素製品販売によるコストオフセットとあいまって、燃料電池車の普及がより現実的になる。

CO2フリー水素（輸送・貯蔵）

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

4. CO2フリー水素（輸送・貯蔵）

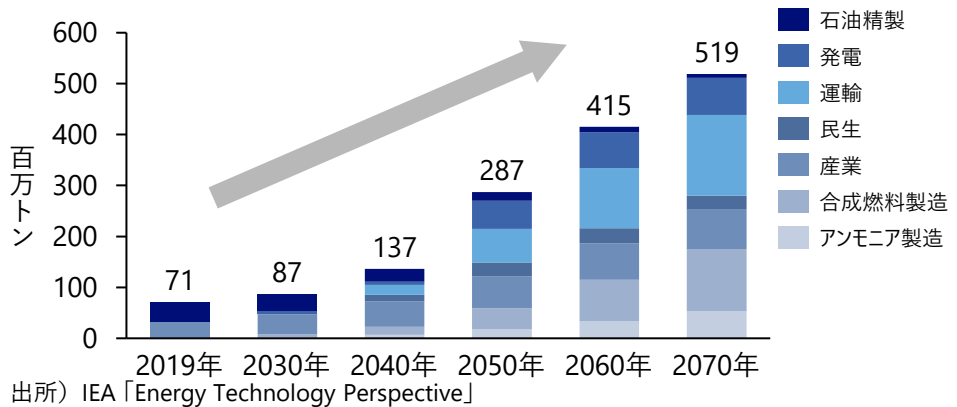
市場・技術概要

市場規模（2050年）	・ 5.5兆円
CO2削減ポテンシャル	・ 60億トン

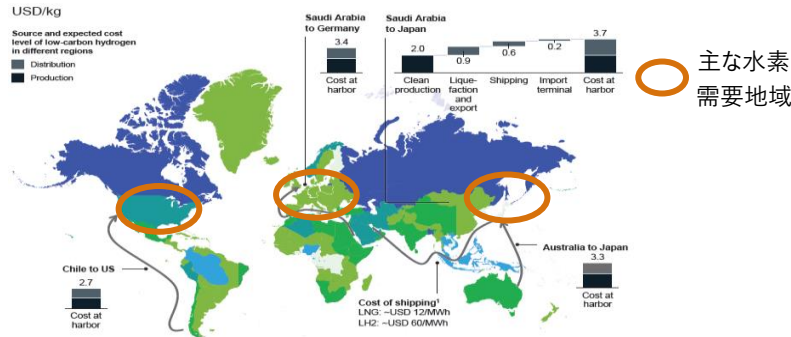
■ 市場概要

- ・ IEA予測によると、世界の水素需要は2050年に2億8,700万トン/年に達する見通しであり、今後の国際市場の立ち上がりが期待される
- ・ 主な水素需要地域と、再エネ等のコストが安く水素を安価に製造できる地域が離れているため、水素の国際輸送に関する技術開発が喫緊の課題となっている
- ・ 国際水素サプライチェーンの構築に向けて先進的な取組が進められている日本では、主に液化水素・有機ハイドライド(MCH)・アンモニアの3種類の水素キャリアの技術開発が同時に進められている

図表92：世界の水素需要予測



図表93：水素の国際輸送



■ 技術概要

図表94：CO2フリー水素（輸送・貯蔵）技術概要

水素輸送キャリア					
		液化水素	MCH	アンモニア	
プロセス及び技術の成熟度*	変換	小規模：高 大規模：低	中	高	
	貯蔵	高	高	高	
	輸送	船舶：低 パイプライン：高 車両：高	船舶：高 パイプライン：高 車両：高	船舶：高 パイプライン：高 車両：高	
	再変換	高	中	中	
	サプライチェーン全体	中/高	中	高	
	毒性**	可燃性、無臭	可燃性、中程度の毒性	可燃性、毒性（急性）、腐食性	
変換によるエネルギー損失***		現在：25-35% 理論値：18%	現在：35-40% 理論値：25%	現在：7-18% 理論値：<20%	

* 高：商業段階、中：プロトタイプの実証段階、低：研究開発段階

** 吸入に基づく毒性の基準

*** 水素の低位発熱量に対する割合を示したもので、燃料電池に使用できる水素純度の値

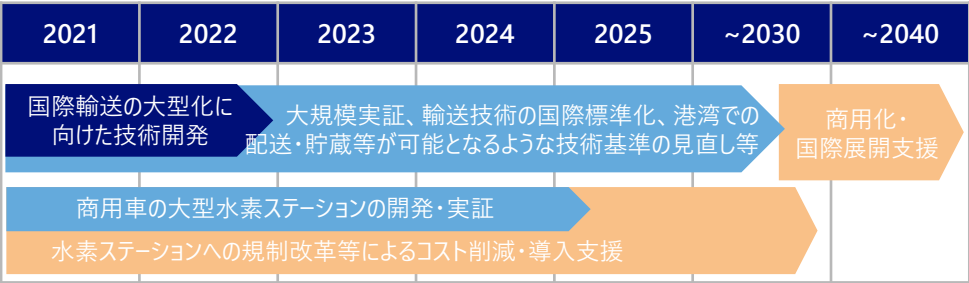
国内動向

方針・戦略

日本は長距離海上輸送に係る技術開発で世界をリードしており、今後政府として、大型化の実証や需要創出を支援する方針

図表95：CO2フリー水素（輸送・貯蔵）国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">将来的に大規模なCO2フリー水素の輸入が想定される日本では、世界に先駆けて長距離海上輸送に係る技術開発・実証を実施官民連携で国際水素サプライチェーン構築に向けた実証を進めており、技術面では世界をリードしているが、実用化に向けては大型実証や大規模需要の創出などが必要
方針	<ul style="list-style-type: none">国際水素サプライチェーンの構築に向けた、輸送設備の大型化等の技術開発や大規模水素輸送実証支援、および大規模需要創出に向けた水素発電実証等の支援を実施する方針（国費負担額：上限3,000億円）
目標	<ul style="list-style-type: none">2030年までに水素サプライチェーンの商用化（2030年30円/Nm3の供給コスト）関連機器（液化水素運搬時のローディングアーム等）の国際標準化



技術開発状況

図表96：各技術の課題・特徴

	特徴	課題
液化水素	<ul style="list-style-type: none">圧縮水素の1/800の体積高純度水素の供給に適する	<ul style="list-style-type: none">液化効率の向上とボイルオフガスの低減が必要技術の大幅なスケールアップおよび新規の大規模インフラ整備が必要
MCH	<ul style="list-style-type: none">常温・常圧でケミカルタンカー等による輸送が可能利用時に脱水素＋精製が必要	<ul style="list-style-type: none">脱水素時の熱の確保が必要MCHとトルエンの両方の貯蔵設備が必要のため、新規のインフラ整備が必要
アンモニア	<ul style="list-style-type: none">他のキャリアと比較して体積水素密度が高い水素ST等での利用時には脱水＋精製が必要	<ul style="list-style-type: none">水素として利用する際の変換コストが高いため、低コスト化に向けた技術開発が必要アンモニア燃料として使用する際には、大きな課題はない

図表97：主要な事業者・機関

HySTRA
(CO2フリー水素サプライチェーン推進機構)

褐炭を有効活用したCO2フリー水素サプライチェーンの構築、2030年の商用化を目指した技術開発・実証に取り組む企業団体
川崎重工・岩谷・ENEOSなど7社が参画

クリーン燃料アンモニア協会

CO2フリーアンモニアの供給から利用までのVC構築を目指し、技術開発や国際連携を進める
IHI、日揮など100社以上が参画

AHEAD
(次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合)

MCHを利用した国際水素サプライチェーンの構築を目指した技術開発・実証を行う企業団体
千代田化工建設・日本郵船など4社が参画

4. CO2フリー水素（輸送・貯蔵）

国際動向

■ 各国動向

図表98：政策・方針

アメリカ	<ul style="list-style-type: none"> \$2/kg-\$5/kgの供給コスト目標に向けて高圧水素、液化水素、化学キャリアの研究開発を進めるとしており、2030年に向けて大規模パイプラインの敷設や輸出に向けた取組を実施する方針
EU	<ul style="list-style-type: none"> 欧州水素戦略「2x40GW Green Hydrogen Initiative」のなかで2030年に300万トンの水素を欧州域外から輸入する構想を示す インフラについては、天然ガス向けパイプラインや貯蔵施設を最大限活用するとしつつ、FCH-JUなどが主導して液体有機水素キャリアの実証プロジェクトなどが進められている
ドイツ	<ul style="list-style-type: none"> 将来的には需要の大部分は輸入で賄われると想定しており、EU域内・域外での連携可能性を探索している 現在検討が進められているEU域外からの輸入は、主に北アフリカからの輸入と想定されるが、イタリア-ギリシャ間やギリシャ-黒海間で水素輸送用パイプラインを新設し、既存のEUの天然ガス網に連結する構想を打ち立てている
イギリス	<ul style="list-style-type: none"> 2021年8月に公表した国家水素戦略の中で、ベルギーやオランダ、アイルランドなどの近隣諸国との間で既存または新規のガス供給網によって水素取引をする可能性に言及している

出所）JETRO、NEDO資料等公開情報をもとにNRI作成

図表99：主要な事業者・機関

United States Department of Energy (DOE)

2020年12月に水素研究の開発・実証計画である「Hydrogen Program Plan」を発表し、水素の社会実装に向けた取組を進めている

Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking

欧州全体の水素・燃料電池技術開発・実証をリードする官民パートナーシップ

有機液体水素キャリアによる水素供給・輸送に関する「HySTOC」プロジェクトを主導

Air Liquide

ガス国際メジャーの一角で国際水素協議会「Hydrogen Council」の共同座長を務めるなど水素の利活用を推進
21年2月には伊藤忠との間で水素VC構築に関する戦略的協業を発表

Hydrogenious

ドイツに拠点を置く水素貯蔵・輸送技術を開発する企業であり、液体有機水素キャリア(LOHC)の独自技術を有する
現在、ドイツで世界最大のLOHCプラントを建設中

Siemens

Innovate U.K.などの公的研究機関等と連携しながらアンモニアサプライチェーン構築に向けた研究開発を進めている

4. CO2フリー水素（輸送・貯蔵）

国内動向 | 技術の定性評価

図表100：CO2フリー水素（輸送・貯蔵）国内技術の定性評価

技術	強み	弱み	
液化水素	技術 <ul style="list-style-type: none">世界ではじめて液化水素運搬船を建造するなど、技術的に世界をリード	技術 <ul style="list-style-type: none">【各国共通課題】<ul style="list-style-type: none">供給コスト引き下げのために運搬船等の輸送設備の大型化に関する技術課題が存在	<ul style="list-style-type: none">技術進歩市場創出デファクト化海外市場進出
	環境 <ul style="list-style-type: none">政府として海上輸送に力点を置いており、補助事業を通じた実証支援や国交省主導での国際ルールの整備が進められている	市場 <ul style="list-style-type: none">国内の需要創出による供給コストの引き下げが必要<ul style="list-style-type: none">✓ 欧州等の海外市場では先行して水素市場が立ち上がるため、輸送・貯蔵の低コスト化に向けた投資が積極的に行われ、技術開発が進みやすい	
MCH	技術 <ul style="list-style-type: none">ブルネイで製造した水素をMCHを利用して輸送する世界初の国際実証を行うなど、技術面で世界をリード	技術 <ul style="list-style-type: none">【各国共通課題】<ul style="list-style-type: none">エネルギー効率向上のための既存技術の改良および革新的技術の確立が必要	<ul style="list-style-type: none">技術進歩市場創出海外市場進出
	環境 <ul style="list-style-type: none">政府として海上輸送に力点を置いており、補助事業を通じた実証支援が進められている	市場 <ul style="list-style-type: none">国内の需要創出による供給コストの引き下げが必要<ul style="list-style-type: none">✓ 欧州等の海外市場では先行して水素市場が立ち上がるため、輸送・貯蔵の低コスト化に向けた投資が積極的に行われ、技術開発が進みやすい	
アンモニア	技術 <ul style="list-style-type: none">国際水素サプライチェーン構築実証など世界的にみて先進的な取組を実施	技術 <ul style="list-style-type: none">【各国共通課題】<ul style="list-style-type: none">供給コスト引き下げのために運搬船等の輸送設備の大型化に関する技術課題が存在	<ul style="list-style-type: none">技術進歩市場創出海外市場進出
	環境 <ul style="list-style-type: none">政府として海上輸送に力点を置いており、補助事業を通じた実証支援が進められている	市場 <ul style="list-style-type: none">国内の需要創出による供給コストの引き下げが必要<ul style="list-style-type: none">✓ 欧州等の海外市場では先行して水素市場が立ち上がるため、輸送・貯蔵の低コスト化に向けた投資が積極的に行われ、技術開発が進みやすい	

4. CO2フリー水素（輸送・貯蔵）

想定する連携

図表101：CO2フリー水素（輸送・貯蔵）において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内連携先	海外連携先
液化水素	技術進歩	海外の主要機関・企業等と連携し、輸送船の大型化等の低コスト化に向けた研究開発を進める	・ 企業・企業団体	・ 研究機関・企業
	デファクト化	水素分野で世界をリードする欧州（ドイツなど）と連携し、港湾等におけるルール整備を進める	・ 政府	・ 欧州諸国
	海外進出による市場拡大	先進的な技術開発の強みを活かし、海外市場に技術・機器等を輸出	・ 企業・企業団体	・ 企業・企業団体
MCH	技術進歩	海外の主要機関・企業等と連携し、低コスト化に向けた研究開発を進める	・ 企業・企業団体	・ 研究機関・企業
	海外進出による市場拡大	先進的な技術開発の強みを活かし、海外市場に技術・機器等を輸出	・ 企業・企業団体	・ 企業・企業団体
アンモニア	技術進歩	海外の主要機関・企業等と連携し、輸送船の大型化等の低コスト化に向けた研究開発を進める	・ 企業・企業団体	・ 研究機関・企業
	海外進出による市場拡大	先進的な技術開発の強みを活かし、海外市場に技術・機器等を輸出	・ 企業・企業団体	・ 企業・企業団体
各キャリア共通	市場創出	水素生産国・需要国と連携し、国際水素サプライチェーン構築に向けた取組みを進める	・ 日本政府	・ 中東・豪など(水素生産国) ・ 欧米諸国(水素需要国)



4. CO2フリー水素（輸送・貯蔵） | 参考 | 海外の取組

EU HySTOC（FCH-JU）

図表102： HySTOC（FCH-JU）のプロジェクト概要

組織	Fuel Cells & Hydrogen – Joint Undertaking
プロジェクト名	HySTOC Project (LOHCを用いた水素輸送・供給)
期間	2018年-2022年
投資額	総額：€2億4990万 (全額EUによる資金提供)
資金源	• Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：液体有機水素キャリア (LOHC)技術ステージ：実証参画： Hydrogenious LOHC Technologies GmbH HyGear B.V. (HYG) Voikoski Oy VTT Technical Research Centre of Finland Ltd Institute of Chemical Reaction Engineering (CRT)

図表103： HySTOC（FCH-JU）プロジェクトの主な特徴

背景

- Horizon2020のresearch & innovation programmeの1つに位置づけられるFCH-JUによるプロジェクトである。
- Horizon2020はEUで最大規模のResearch & Inovation Programmeであり、7年間で€800億の規模のプロジェクトを実施（2014~2020年）EUの国際競争力を先進的な分野で維持する事を目的とする。

プロジェクト情報

- 本プロジェクトは高純度水素をフィンランドのVoikoskiに位置する水素ステーションへ高いコスト効率で輸送するためにLOHCを活用しており、**本規模での実施は世界初となる。**
- ジベンジルトルエンという可燃性の低い物質を利用するため、**既存の補給ステーションを活用して大量の輸送を行っている点が特徴。**
- 本プロジェクトは水素の輸送から利用まで分配に係るすべての工程をカバーする。
- LOHCによる貯蔵・輸送、および水素の取り出しはフィンランドの-23度という環境下で成功を収めた。この成功はフィンランド・デンマーク・ドイツ3国の関係者の協力のもとに成立。



4. CO2フリー水素（輸送・貯蔵） | 参考 | 海外の取組

EU PRESLHY（FCH-JU）

図表104： PRESLHY（FCH-JU）のプロジェクト概要

組織	Fuel Cells & Hydrogen – Joint Undertaking
プロジェクト名	PRESLHY （液化水素の安全な活用に向けた予備調査）
期間	2018年-2021年5月31日
投資額	総額：€190万 （うちEU出資€172万）
資金源	• Horizon 2020
プロジェクト情報	<div><div>• 技術：液化水素（極低温）</div><div>• 技術ステージ：研究</div><div>• 参画： Karlsruhe Institute of Technology (coordinator) Air Liquide Health & Safety Laboratory International Association for Hydrogen Safety INERIS National Center for Scientific Research Demokritos Pro-Science GmbH University of Ulster University of Warwick</div></div>

図表105： PRESLHY（FCH-JU）プロジェクトの主な特徴

背景

- Horizon2020のresearch & innovation programmeの1つに位置づけられるFCH-JUによるプロジェクトである。
- Horizon2020はEUで最大規模のResearch & Innovation Programmeであり、7年間で€800億の規模のプロジェクトを実施（2014~2020年）EUの国際競争力を先進的な分野で維持する事を目的とする。

プロジェクト情報

- 水素輸送の手段として安全に極低温の液化水素を用いるための予備調査を行う。
- 主な目的は、特定の基準や知識不足の補填など安全確保が必要な分野を特定する事である。
- 予備調査の結果、安全確保に向けて危険緩和の手法などの評価や統一されたルールの策定が重要と結論付けられた。



図表106： HyMARCのプロジェクト概要

組織	HyMARC
プロジェクト名	The Hydrogen Materials Advanced Research Consortium (HyMARC)
期間	－
投資額	－
資金源	・エネルギー省（DOE）
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：研究～実証 参画 Sandia National Laboratories National Renewable Energy Laboratory Pacific Northwest National Laboratory Lawrence Livermore National Laboratory Lawrence Berkeley National Laboratory

図表107： HyMARCプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ 米エネルギー省Energy Material Network（EMN）により設立された研究コンソーシアム
- ・ 水素の輸送・貯蔵の研究を中心とし、産業利用に向けた開発を目的とする。特に注視している分野が既存の貯蔵・貯蔵技術の効率化とDOEが掲げる政府目標の達成に向けた技術開発（輸送コスト\$2/kg～\$5/kgの達成）

プロジェクト情報

- ・ ワシントン州立大学が主導する“A Reversible Liquid Hydrogen Carrier System Based on Ammonium Formate and Captured CO₂”ではアンモニウムと固定した二酸化炭素を活用した水素輸送の実証に取り組む。
- ・ プロジェクトは水素のアンモニウムへの貯蔵と取り出す技術のコスト効率を高め、最終的に商用可能なレベルに持っていくことを目的とする。
- ・ プロジェクト終了時には既存の**高圧ガスによる輸送と同程度のコスト効率を達成する見込み**。

※HyMARCでは複数のプロジェクトが行われており、上記ではアンモニアに関連したプロジェクトを記載

UK Green Ammonia to Hydrogen

図表108： Green Ammonia to Hydrogenのプロジェクト概要

組織	Engie, Siemens, Science & Technology Facilities Council (STFC) & Ecuity Consulting
プロジェクト名	Green Ammonia to Hydrogen
期間	2019年～
投資額	£249,000
資金調達先	• 英国事業エネルギー産業戦略局(BEIS) (£ 3億9000万の政府投資の一部として出資)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：アンモニア技術ステージ：実証場所：Harwell, Oxfordshire, UK

図表109： Green Ammonia to Hydrogenプロジェクトの主な特徴

背景

- グリーン水素の活用は英国がネット・ゼロ目標を達成する上で重要となる。多くの場合水素の製造と利用の立地がことなるため、水素の貯蔵および輸送が喫緊の課題である。
- この課題に対し、既に貯蔵・輸送技術が確立してるアンモニアは画期的な解決策になりうる。そのため、現在はアンモニアの活用に向けたクラッキング技術の開発が進められている。

プロジェクト情報

- 本プロジェクトは大規模かつ高効率なアンモニアのクラッキング技術開発を目的とする。
- STFCが開発した最先端の触媒技術、Engieのエンジニアリング能力、Siemensのグリーンアンモニアのノウハウ、Ecuityの市場分析を結集し、実現可能性を実証するための全体的なアプローチを行う。
- 現在集中型のアンモニアクラッキング技術は大規模で実用化する段階には至っていない。本実証を通じて、**革新的な小型反応器の性能実証を行い、既存の集中型アンモニアクラッキングと経済性や性能を比較し、より優れたアンモニアクラッキング手法の開発を目指す。**



図表110： Siemensのプロジェクト概要

組織	Siemens
プロジェクト名	－ （水素輸送手段としてのアンモニアの活用検討）
期間	2018年より開始
投資額	£150万 （200万USD）
資金調達先	・シーメンス：全体の3分の1 ・Innovate U.K.（政府機関）：全体の3分の2
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：アンモニア技術ステージ：実証場所：Harwell, Oxfordshire, UK参画：英国科学技術施設研究会議 オックスフォード大学 カーディフ大学

図表111： Siemensプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ シーメンスは、自社における発電の脱炭素化に向け、多様なエネルギー貯蔵技術の開発に取り組んでいる。短距離輸送かつ低容量のエネルギー貯蔵では蓄電池が中心的な位置づけを占めるが長距離の大規模貯蔵ではアンモニアが重要になると想定される。特にエネルギーの製造場所と利用施設が離れている場合や、丘のない場所に貯蔵する場合にアンモニアの重要性はより高まると想定する。
- ・ 100%水素燃焼を目標に数多くの技術開発、実証に取り組む先進的企業。

プロジェクト情報

- ・ OxfordshireのHarwell実証施設は、炭素を排出することなく、電気、水、空気によるアンモニア製造を目指す。
- ・ アンモニアは、タンクに貯蔵された後、発電や車両用・工業用の燃料等様々な用途に活用されるほか、水素の製造にも活用される。今回の概念実証ではアンモニアの製造に係るプロセス全体の効率性の検証が目的となっている。



Germany LOHC Industrial Solutions NRW（Hydrogenious）

図表112： LOHC Industrial Solutions NRWのプロジェクト概要

組織	LOHC Industrial Solutions NRW GmbH (Hydrogenious LOHC Technologiesの子会社)
プロジェクト名	－ (産業規模でLOHC中に水素を貯蔵すること)
期間	2021年-2023年
出資金額	€900万
資金調達先	• progres.nrw programme ノースライン・ウェストファリア州
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：液体有機水素キャリア (LOHC)技術ステージ：実証場所：Chempark Dormagen, ドイツ参画 LOHC Industrial Solutions NRW GmbH Covestro Deutschland AG Jülich Research Centre

図表113： LOHC Industrial Solutions NRWプロジェクトの主な特徴

背景

- LOHCを活用した水素貯蔵・輸送の全体的な効率の上昇が課題の1つとして認識されていた
- プラントの容量：1,800トン

プロジェクト情報

- Dormagenに建設予定のプラントでは、LOHCの1つであるベンジルトルエンの形態での水素貯蔵の大幅な規模拡大を目的としており、従来のプラントサイズの単一貯蔵容量の約20倍の容量を有する。
- 本実証では以下に着目
 - 運用時の触媒の状況
 - 水素化プロセスやLOHCが水素発電の品質に及ぼす影響
 - LOHCサプライチェーンの大規模実証

CO2フリー水素（利用・発電）

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

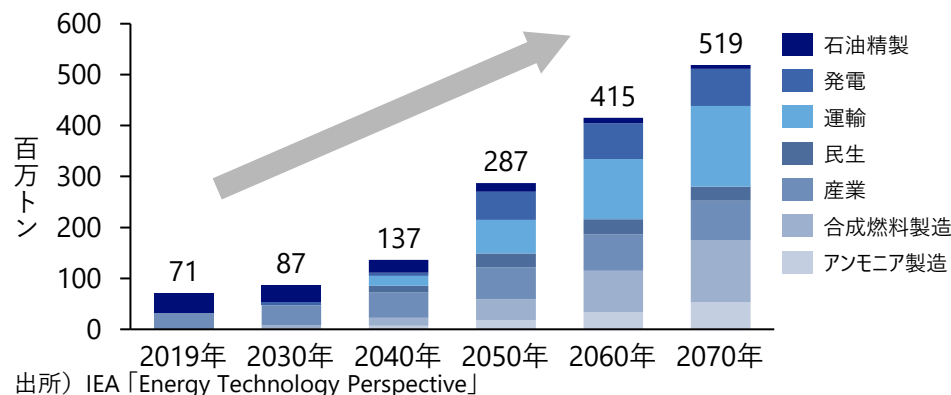
5. CO2フリー水素（利用・発電）

市場・技術概要

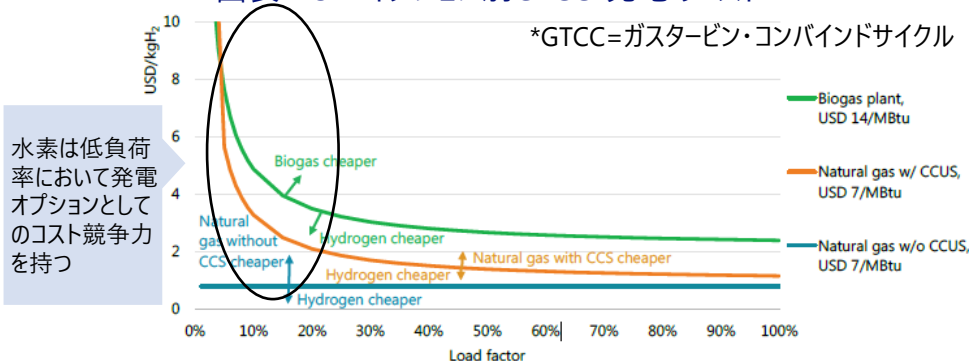
■ 市場概要

- 現在の電力部門の水素による発電量は0.2%にも満たないが、2070年にかけて**電力分野での水素需要は大幅に拡大**する見通し。
- 2030年までに世界のガス火力発電の1%に水素が導入されると仮定すると、その容量は25GWとなり、4.5Mtの水素を消費されることとなる。
- 日本や欧米などの水素先進国では、**水素の混焼・専焼発電の実用化に向けた実証が複数実施**されている。

図表114：世界の水素需要予測



図表115：オプション別GTCC*発電のコスト



市場規模（2050年）

・ 最大約23兆円

CO2削減ポテンシャル

・ 60億トン

■ 技術概要

** 正確には、ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせであるコンバインドサイクル発電

- 水素発電の方法には、①ガスタービン式②蒸気タービン式③燃料電池の3つが存在するが、効率性や規模拡大の観点から、**大規模発電用には主に①のガスタービン式**の水素発電の技術開発が進められている。**
- 水素の燃焼速度が比較的近いガス火力発電への混焼に向けた技術開発が進められているが、**燃焼を制御する技術開発が必要**であり、その技術を応用することで水素専焼化も可能である。
- 大型のガスタービンで混焼率30%、小型のガスタービンでは専焼の技術開発が完了しており、2030年頃には大型のガスタービンでの専焼化が実現する見通しである。**

図表116：CO2フリー水素（利用・発電）技術概要

	水素発電		
	ガスタービン	蒸気タービン	燃料電池
発電方法	・ ガスを燃焼させ、ガスタービンから回転力を得ることで発電	・ ガスを燃焼させ、発生した蒸気でタービンから回転力を得ることで発電	・ 水素と酸素の化学反応から直接電気を取り出す
特徴	・ コンバインド発電として利用すれば高効率で、規模拡大も可能	・ 規模拡大は可能だが、コンバインド発電に比べて効率は劣る	・ 化学反応であるため最も効率が良いが、規模拡大は高コスト
開発状況	・ 大規模では30%混焼、小規模では専焼の技術開発が完了	・ 技術的には容易で、既に技術が確立されている	・ 既に確立された技術であり、市場での普及・拡大が進む

国内動向

■ 方針・戦略

日本はガスタービンでの水素燃焼技術において世界的に先行。今後は、実機での実証などを通じて商用化を支援し、海外市場の獲得を目指す。

図表117：CO2フリー水素（利用・発電）国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none"> 小型器（1MW）での専焼では実機での実証が開始されており、大型機（数十万kW級）は30%の混焼率を達成するための燃焼器の技術開発が完了 既に日本企業が米国やオランダなどで、大型水素発電の具体的なプロジェクトを受注している
方針	<ul style="list-style-type: none"> 実機での安定燃焼性の実証を支援し、商用化を加速させ、海外案件の獲得を目指す 電力会社へのCO2フリー電力の調達義務化やCO2フリー電源としての水素の適切な評価などを通じて、国内での大規模需要を喚起する
目標	<ul style="list-style-type: none"> 水素発電コストをガス火力以下に低減（水素コスト：20円/Nm³）させ、2050年に化石燃料に対して十分な競争力を有する水準を目指す

2021	2022	2023	2024	2025	~2030	~2040
大規模専焼発電の技術開発						
水素発電の実機実証 (燃料電池・タービンにおける混焼・専焼)						
				エネルギー供給構造高度化法等による 社会実装促進		

※1 GTCC発電（ガスタービン・コンバインドサイクル発電）：ガスタービンと蒸気タービンで2回発電することにより、従来は捨てられていた熱を再利用できる高効率な発電方法

※2 高効率かつクリーンな水素と酸素の混焼に関する技術開発は日本を中心に進められているが、技術的な課題も多く、天然ガスにCCUSをつけるものが一般的

出所）グリーン成長戦略、NEDO資料などをもとにNRI作成

■ 技術開発状況

図表118：各技術の特徴・課題・開発実績

	特徴	課題	開発実績
開放系	<ul style="list-style-type: none"> GTCC発電※1に水素を利用 水素と天然ガスの混焼or水素専焼 発電効率：約60% 	<ul style="list-style-type: none"> 燃焼制御技術(混焼率)の向上 低NOx化・高効率化 実機での実証 	<ul style="list-style-type: none"> 小型：専焼の技術開発が完了 大型：混焼率30%まで技術開発が完了(専焼用は開発中)
閉鎖系	<ul style="list-style-type: none"> 革新的なクローズドサイクルによる発電 水素と酸素のみによる混焼※2 発電効率：約68% 	<ul style="list-style-type: none"> クローズドサイクルシステム技術の確立 高温高压燃焼器の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 2022年に試作器の基本設計完了を目指す

図表119：主要な事業者・機関

三菱パワー

- 大型(数百MW級)の水素発電技術を有する
- 2016~2019年のNEDOでの研究開発により、水素専焼ドライ低NOx燃焼器を開発(2025年に水素専焼タービンの開発完了を見込む)
- 米国やオランダの大型水素発電プロジェクトにて水素焚きタービンを受注

川崎重工業

- 小型(数MW級)の水素発電技術を有する
- 2016~2018年のNEDOでの研究開発により、2MW級自家発電用小型ガスタービンに適用可能な水素専焼ドライ低NOx燃焼器を開発
- 2017年には神戸市で世界初の水素専焼による市街地への熱電併給を達成

5. CO2フリー水素（利用・発電）

国際動向

■ 各国動向

図表120：政策・方針

アメリカ	<ul style="list-style-type: none">米エネルギー省 (DOE) は、大学主導の水素ガスタービン発電の研究に620万ドルを投資。2035年の100%クリーン電力化に向けて水素発電を有効な手段の1つと認識また、カリフォルニア州では石炭火力から水素発電への移行計画を策定し、三菱パワー製の水素ガスタービンを導入
EU	<ul style="list-style-type: none">FCH-JUが2019年に策定した「Hydrogen Roadmap Europe」では、野心的な見通しとして2030年時点で65TWh (水素換算166万トン/年) の発電による新規水素需要を見込む一方、FCH-JUはモビリティ分野や水素の製造・輸送・貯蔵に関する研究開発・実証に多くの予算を割いており、水素発電の優先度は劣後していると考えられる
ドイツ	<ul style="list-style-type: none">国家水素戦略の中で、水素発電分野は重点分野としての位置付けからは外れている一方、ドイツのバーデン・ビュルテンベルク州の水素戦略では、電力セクターにおける水素への燃料転換を支援としている
イギリス	<ul style="list-style-type: none">2030年時点で発電部門の水素需要を~10TWhと見込んでおり、需給に応じた調整が可能な水素発電システムの構築をロードマップに掲げる世界初の100%水素を燃料とする水素専焼発電所の建設計画が発表されるなど、積極的な取組が見られる

図表121：主要な事業者・機関

SSE

イギリスの電力事業者SSEは、Equinorと共同でイギリスに世界初の水素専焼発電所を建設する計画を発表

ANSALDO ENERGIA

イタリアのタービンメーカーであるAnsaldo Energiaは、ノルウェーのエネルギー会社Equinorと共同で100%水素ガスタービン燃焼器の検証を実施

GE

ガスタービンメーカー世界トップの3社の一角であるGEは、50%の水素混焼が可能な世界最大・最高高効率を誇るガスタービンシステムを有する

Siemens

ガスタービンメーカー世界トップの3社の一角であるSiemensは、Horizon2020からの助成を受け、世界初の総合型P2X2Pによる水素燃焼ガスタービン実証機を納入

Purdue University

DOEより助成金を得て、水素系燃料と天然ガスの混合物を用いたガスタービン燃焼の火炎構造とダイナミクスに関する研究を実施

The Ohio State University

DOEより助成金を得て、ガスタービンの高水素含有量運転を促進するための実験・計算プログラムを提案

出所) JETRO、NEDO資料等公開情報をもとにNRI作成

国内動向 | 技術の定性評価

図表122：CO2フリー水素（利用・発電）国内技術の定性評価

技術		強み	弱み
水素 ガスタービン	技術	<ul style="list-style-type: none">水素燃焼に関して世界トップクラスの技術力を有する	<ul style="list-style-type: none">国内で実施される実証が少なく、商用化に向けた技術開発に時間を要している他のガスタービンメーカーとのさらなる差別化要素となりうる高効率化や低コスト化などの技術開発ができていない
	市場		<ul style="list-style-type: none">安価な水素を調達可能な海外と比較して水素発電のコストが低下しづらく、現時点での需要は小さい

- 技術進歩
- 海外市場進出

5. CO2フリー水素（利用・発電）

想定する連携

図表123：CO2フリー水素（利用・発電）において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内連携先	海外連携先
液化水素	技術進歩	海外の研究機関と連携し、高効率化や低コスト化に向けた研究開発を進める	・ 企業	・ 研究機関
	技術進歩	海外の電力会社等と連携し、実証を通じて商用化に向けた技術開発を進める	・ 企業	・ 電力会社
	海外進出による市場拡大	先進的な技術の強みを活かし、海外市場にガスタービン機器機器等を輸出	・ 企業	・ 電力会社

Germany Siemens



図表124： Siemensのプロジェクト概要

組織	SIEMENS ENERGY GLOBAL GMBH & CO. KG
プロジェクト名	HYFLEXPOWER
期間	2020年-2024年
投資額	総予算=15.252百万ユーロ EU拠出金=10.475百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術：水素ガスタービン (Power-to-H2) 開発段階：実証 パートナー：Engie Solutions、Siemens Gas and Power、Centrax、Arttic、German Aerospace Center (DLR)、ヨーロッパの4つの大学

図表125： Siemensプロジェクトの主な特徴

背景

- 本プロジェクトを通じて、フランス、Saillat-sur-Vienneの産業施設内の既存発電設備の最新化・強化を目指す。
- 再エネからの余剰エネルギーを活用し、実証施設内でのエネルギー変換（power-to-H2）を行う。

プロジェクト情報

- EUが出資するHYFLEXPOWERプロジェクトでは、高機能ドライ低エミッション水素ガスタービンを含む、初の完全一体型power-to-hydrogen-to-power産業規模発電所を開発・運転する予定。
- HYFLEXPOWERプロジェクト全体のゴールは、完全にカーボンフリーなエネルギーミックスを目指した100%グリーン水素による電力供給試験を行うことである。これにより、SGT-400のベースロード運転で年間最大65,000トンのCO2削減につながる。



EU Ansaldo Energia

図表126： Ansaldo Energiaのプロジェクト概要

組織	Ansaldo Energia
プロジェクト名	100%水素ガスタービン燃焼器の検証
期間	不明
投資額	総予算=15.252百万ユーロ EU拠出金=10.475百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Equinor & Ansaldo Energia
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：低NOx発電・水素燃焼ガスタービン開発段階：研究開発パートナー：Ansaldo Energia & Equinor

図表127： Ansaldo Energiaプロジェクトの主な特徴

背景

- 本格的な全圧燃焼器検証試験を通して水素燃焼技術を高めることを目指し、本プロジェクトが実施された。
- 主な目標は、窒素酸化物（NOx）排出のための最適化、高い水素含有量での運転上の柔軟性向上とエンジン・デレーティングの最小化である。

プロジェクト情報

- Ansaldo社のGT36およびGT26天然ガスタービンは、低NOx混合システムで水素燃料の利用を既に実現している。
- Hクラスガスタービン燃焼器GT36は、最大50%の水素混合での運転が可能。

UK Equinor & SSE Thermal

図表128： Equinor & SSE Thermalのプロジェクト概要

組織	Equinor、SSE Thermal
プロジェクト名	Keadby Hydrogen Plant & Keadby 3
期間	2021-2027 (Keadby 第3発電所) 2021-2039 (Keadby 水素発電所)
投資額	予算不明
資金源	• Equinor および SSE Thermal
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術：CCS技術による低炭素発電所 開発段階：実証 パートナー：Equinor および SSE Thermal

図表129： Equinor & SSE Thermalプロジェクトの主な特徴

背景

- EquinorとSSE Thermalは、英国初のCCS（Carb Capture and Storage）技術を有する、世界で初めてとなる100%水素を燃料とする2つの低炭素発電所を、イギリスのハンバー地方で共同開発する計画を発表した。

プロジェクト情報

- Keadby 第3発電所**は、天然ガスを燃料としており、CO2固定の設備も併設した900MWの発電所である。回収されたCO2は共用パイプラインを用いて輸送され、北海の南部で安全に貯蔵される。
- Keadby 水素発電所**の水素のピーク需要は1,800MWと予測される。燃焼時にはCO2を一切排出せず、世界初の水素専約の大型発電所となる見込み。今後数十年にわたり地域の大規模な水素需要を満たすことが期待される。



USA Purdue University

図表130： Purdue Universityのプロジェクト概要

組織	Purdue University
プロジェクト名	水素燃焼ガスタービン
期間	期間不明
投資額	総予算=100万ドル 米国拠出金=80万ドル
資金源	<ul style="list-style-type: none">米国エネルギー省（DOE）
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：水素&水素系燃料による水素ガスタービン燃焼開発段階：研究開発

出所）米国エネルギー省ホームページ

図表131： Purdue Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- DOEは、ガスタービンによる水素発電の効率化に関するプロジェクトの推進を目的に、研究開発プロジェクトとして連邦政府から8つの大学に総額620万ドル近くの資金提供を行うことを発表。
- 水素電力の信頼性、効率、性能を高めることで、二酸化炭素排出量を削減し、2035年までにクリーン電力100%を目指す。

プロジェクト情報

- Purdue Universityの研究者らは、水素やその他水素ベースの燃料（アンモニア）、およびこれらの燃料と天然ガスとの混合物によるガスタービン燃焼のための火炎構造および動力学を調査することをプロジェクトの目的に設定。
- 研究者らは、火炎の安定化、着火、フラッシュバックなどのプロセスを探索し、商用航空誘導体および大容量F-およびH-クラスガスタービンシステムに特徴的な燃焼条件下での燃焼効率と汚染物質排出量の特徴を明らかにする。
- 本研究は、加熱された空気を運ぶための直線チャネルを備えている。チャネル出口で混合の度合いを変えるために、燃料の段階的横方向ジェット噴射を特徴とする多段多管マイクロ混合(M3)インジェクタの添加剤製造に焦点を当てる。



USA Ohio State University

図表132： Ohio State Universityのプロジェクト概要

組織	Ohio State University
プロジェクト名	水素燃料がガスタービン燃焼器の安定性と運転に及ぼす影響に関する調査
期間	不明
投資額	予算総額=102.4万ドル 米国拠出金=80万ドル
資金源	・米国エネルギー省（DOE）
プロジェクト情報	・ 技術：ガスタービンの高水素含有運転&低NOx化技術の進展 ・ 開発段階：研究開発

図表133： Ohio State Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- DOEは、ガスタービンによる水素発電の効率化に関するプロジェクトの推進を目的に、研究開発プロジェクトとして連邦政府から8つの大学に総額620万ドル近くの資金提供を行うことを発表。
- 水素電力の信頼性、効率、性能を高めることで、二酸化炭素排出量を削減し、2035年までにクリーン電力100%を目指す。

プロジェクト情報

- 主な目的は以下の3点。
 - 高度なレーザー診断を用いて、複数の火炎関連量の同時測定を行い、火炎保持、フラッシュバック、軸方向燃料ステージングを研究する
 - 火炎安定化とフラッシュバックに関連する不安定で一過性のプロセスをシミュレートするための包括的な一連の計算モデルを開発する
 - 軸方向燃料ステージング設計を有する多管式一次バーナーの操作性と限界を明らかにするための実験を行う
- エンジン回りでの水素/メタン混合物を使用することで、低NOx多管式バーナー技術における設計の課題の解消を目指す。

USA GE & Cricket Valley Energy Center

図表134： GE & Cricket Valley Energy Centerのプロジェクト概要

組織	GE、Cricket Valley Energy Center（CVEC）
プロジェクト名	H2 Roadmap Project -クリケットバレー発電所の二酸化炭素排出削減
期間	2022年後半～
投資額	非公表
資金源	<ul style="list-style-type: none"> GEおよびCVEC
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術：水素を動力源とするガスタービンの展開 開発段階：研究開発 パートナー：GE 及び Cricket Energy Center (EthosEnergy Group & Advanced Power主導のコンソーシアム所有)

図表135： GE & Cricket Valley Energy Centerプロジェクトの主な特徴

背景

- GEとCVECは、グリーン水素技術ロードマップ（H2 Roadmap）を策定し、ニューヨーク州ドーバー・ブレインズにあるCVECの複合サイクル発電所での炭素排出削減実証プロジェクトを進めるため、基本合意書（MOU）に署名したことを発表。
- 100%水素燃焼（専焼）が可能な発電所への転換に向けての第一歩となる。

プロジェクト情報

- プロジェクトの初期段階では、天然ガス燃料施設から水素利用施設への転換についての実現可能性を実証する
- 本プロジェクトは、現在CVECで運転中の3つのGE 7F.05ガスタービンのうち1つで実施する。水素と低BTU燃料を用いた燃焼技術に関するGEのノウハウを活用しながら、天然ガスと混合した5%の水素を数週間導入して行う。
- H2 Roadmapは、水素の割合を高め、最終的には水素専焼の実現に向けた研究開発計画としての役割を果たす。

ゼロカーボン・スチール（水素還元製鉄）

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

6. ゼロカーボン・スチール（水素還元製鉄）

概要

市場規模（2050年）

・ 721,600億円

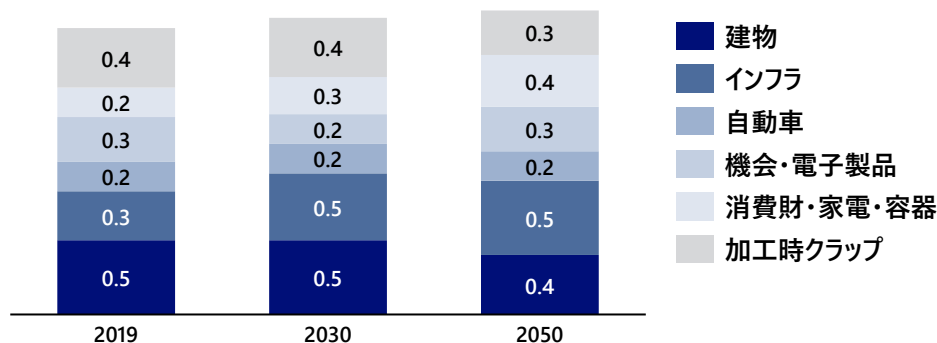
CO2削減ポテンシャル

・ 38億トン

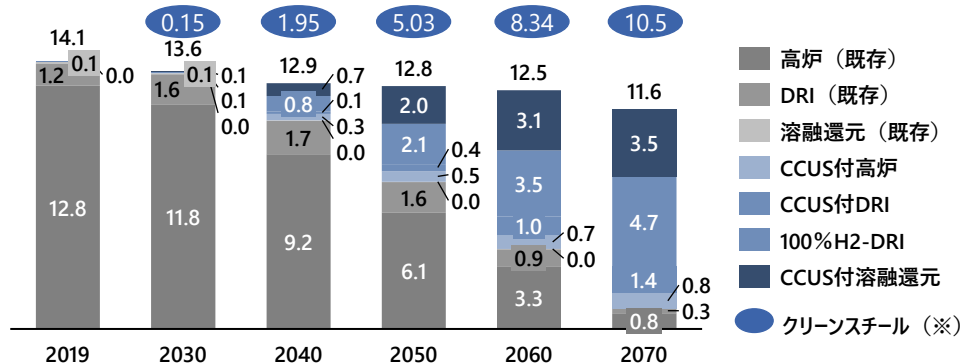
■ 市場概要

- 鉄鋼生産量（2019年）は中国が世界の約51%を占め1位、日本は約5.8%を占めインドに次ぎ世界3位。
- 建物や各種インフラ、自動車等の製造分野を中心に鉄鋼需要は世界的にも増加する見込み。
- 2050年では約5億トンの鉄鋼がクリーンスチールになると推計。

図表136：粗鋼需要推計（10億トン）



図表137：クリーンスチール生産量推計（億トン）



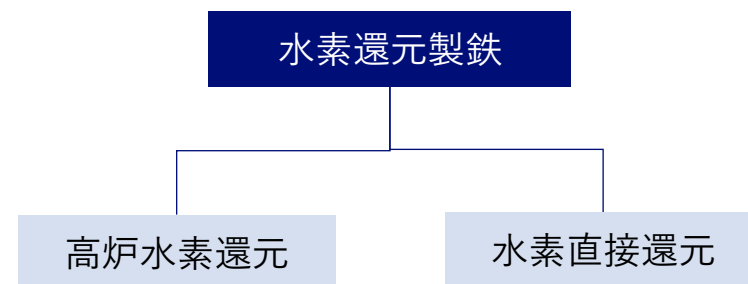
※クリーンスチールにはCCUS付き高炉、DRI、溶融還元法及び100% H2-DRIが含まれる

出所）IEA, worldsteel, NEDO等公開情報より

■ 技術概要

- 製鉄方法は主に高炉法、直接還元法、電炉法が現在活用されているが、国内では高炉法と主力であり、一部が電炉法で生産されている。
- 水素を活用する製鉄方法としては、高炉法と直接還元法が想定されている。

図表138：水素還元製鉄技術概要



高炉法による水素活用（高炉水素還元）

- 国内の粗鋼生産の約75%が高炉－転炉法
- 還元と溶解を一貫して行えるためエネルギー効率が低い
- 不純物除去技術が確立されており高級鋼の製造が可能
- コークスを鉄鉱石の還元剤として活用しているが、その一部を水素を活用する

水素のみでの鉄鉱石の直接還元（水素直接還元）

- 国内での実績はない
- 還元と溶解を別の炉で行うためエネルギー効率が低い（CO2排出量は高炉法よりは少ない）
- 不純物除去技術が確立されていない
- 鉄鉱石を水素のみで直接還元する製鉄方法

国内動向

■ 方針・戦略

日本は競争力の源泉である高炉法を活用した高級鋼の製造を行いつつ、
世界に先駆け水素還元製鉄技術の確立を目指す

図表139：水素還元製鉄国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none"> 粗鋼生産量の割合は減少傾向 日本鉄鋼業は自動車等の製造分野への粗鋼供給の割合が他国と比較して多く、世界最高水準の高級鋼を供給 高炉法での水素を活用した技術の開発に向けた研究・実証事業を実施
方針	<ul style="list-style-type: none"> 日本鉄鋼業の競争力の源泉である高炉を有効活用し、水素を用いて鉄鉱石を還元する技術を開発 2050年までの「ゼロカーボン・スチール」の実現を見据え、水素のみで鉄鉱石を還元する「水素直接還元法」の実現に向けた技術の確立を目指す
目標	<ul style="list-style-type: none"> 2030年までに所内水素を活用した高炉法の実装 2030年までにCO2排出を50%以上削減する直接水素還元技術の実証

2021	2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050
COURSE50の大規模実証					導入支援		
水素還元製鉄の技術開発・実証						技術確立	導入支援

出所）IEA, NEDO, 各社HP等公開情報より

■ 技術開発状況

図表140：各技術の課題・特徴

高炉水素還元	<ul style="list-style-type: none"> 試験高炉から実高炉への規模の拡大（約400倍） 水素還元で奪われた熱の補償技術の確立、通気技術等の確立
直接水素還元	<ul style="list-style-type: none"> 水素直接還元は実用実績がなく、一から関連設備構築し操業技術を確認させることが必要 熱補償技術の確立の他、鉄鉱石の直接還元に伴う粉化や固着化への対応 電炉法での高級鋼の製造

図表141：主要な事業者・機関

日本製鉄・JFEスチール・神戸製鋼所

- 水素還元製鉄技術の技術開発としてCOURSE50プロジェクトを開始。2013年から試験高炉（12m3、実機の約1/400）を用いた試験を開始
- 還元工程においてCO2排出量を10%削減できることを検証。今後は更なる削減に向けた技術開発を進行させる
- 2040年までには水素のみで直接鉄鉱石を還元する「水素直接還元法」の技術確立をし、2040年以降それら技術を導入していく

■ 各国動向

図表142：政策・方針

米国	<ul style="list-style-type: none"> 鉄鋼セクターを含む産業全体での大規模な水素利用の実証を促進するための予算を2020年度よりDOEが開始。 H2@Scaleでは、DOEのイニシアティブのもとステークホルダーが集まり水素の製造～利用までを対象とした事業を実施。鉄鋼製造も水素利用の対象として含まれる。
EU	<ul style="list-style-type: none"> 長期的にはグリーン水素の活用先として認識。社会実装・導入まで一貫した支援をすることを計画。 European Partnership for Clean Steelでは、2027年までに2つのパイロットプロジェクトで50%の削減、2050年までに80～95%のCO2削減、究極的にはカーボンニュートラルを目標に掲げている。
ドイツ	<ul style="list-style-type: none"> 産業セクターにおける水素利用を促進するため2024年までに€4.3億を用意。 エネルギー転ジションに関する規制サンドボックスの対象に鉄鋼生産を含んでいる。 鉄鋼産業で使用するためのグリーン水素の生産に関する入札スキームなど様々な資金調達プログラムを評価。
英国	<ul style="list-style-type: none"> 総額£2.5億のClean Steel Fundを設立し、水素還元等の新技術やプロセスにより低炭素鉄鋼生産への移行を支援。（ただし、2023年までは資金供給は開始しない）

図表143：主要な事業者・機関

※（）内の数値は参照先のページ数を示す

HYBRIT

SSAB,LKAB、Vatterfallはスウェーデンにてパイロット規模で水素還元スポンジ鉄を製造し、ボルボに納品 (P22)

HYFOR

HYFORでは焼結やペレット化等の前処理を必要としない方法において水素を還元剤とすることでCO2排出をほぼゼロとする。同事業にはMHIが参加 (P22)

SWIC

TATA steelは同クラスターのパートナーと協力して水素を含む鉄鋼生産などの脱炭素化に向けたインフラなどを特定 (PX)

ArcelorMittal

ドイツの2か所の製鉄所で水素で鉄鉱石を還元する設備を約2,000億円をかけて導入 (P22)

thyssenkrupp

稼働中の高炉で水素を使用するテストを実施
また、水素を活用するために直接還元プラントの建設を発表 (PX)

U. S. Steel

Equiring US Holdingsと連携し、水素開発に関する調査をTri-state地域で実施 (P22)

国内動向 | 技術の定性評価

図表144：水素還元製鉄国内技術の定性評価

技術	強み	弱み	
高炉水素還元	技術 <ul style="list-style-type: none">世界に先駆け試験高炉における還元工程におけるCO2削減を実証済み	技術 <ul style="list-style-type: none">－	海外市場拡大
	市場 <ul style="list-style-type: none">自動車産業を中心に高級鋼への需要は今後も一定水準存在するまた、それら産業ではクリーンスチールが求められる	市場 <ul style="list-style-type: none">国内鉄鋼需要は拡大しない見込み	
	環境 <ul style="list-style-type: none">－	環境 <ul style="list-style-type: none">安価で大量な水素の確保が難しい	
直接水素還元	技術 <ul style="list-style-type: none">－	技術 <ul style="list-style-type: none">国内では直接還元による製鉄は現在行われていない高級鋼を製造するための不純物除去技術の開発が必要	技術進歩
	市場 <ul style="list-style-type: none">自動車産業を中心に高級鋼への需要は今後も一定水準存在するまた、それら産業ではクリーンスチールが求められる	市場 <ul style="list-style-type: none">国内鉄鋼需要は拡大しない見込み	
	環境 <ul style="list-style-type: none">－	環境 <ul style="list-style-type: none">安価で大量な水素の確保が難しい	

6. ゼロカーボン・スチール（水素還元製鉄）

想定する連携

図表145：水素還元製鉄において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
高炉水素還元	海外進出による市場拡大	既の実証中のノウハウを活用し、商用化を見据えた更なる実証を海外で実施	・ 企業	・ 企業
	海外進出による市場拡大	既の実証中のノウハウを活用し、海外で同様に高炉での水素還元を検討する企業と連携	・ 企業	・ 企業
直接水素還元	技術進歩	既に直接還元において水素を活用した実証を進めている企業と連携し、技術を開発	・ 企業	・ 企業
共通	海外進出による市場拡大	水素利用に関する先進的な技術を活用して、水素を活用した製鉄を検討する企業やそのインフラを検討する国・地域政府と連携	・ 企業 （重工業メーカー）	・ 企業 ・ 国・自治体政府



UK Clean Steel Fund

図表146： Clean Steel Fundのプロジェクト概要

組織	Department for Business, Energy & Industrial Strategy
プロジェクト名	Clean Steel Fund
期間	2023年～
投資額	£ 2.5億
資金源	・英国政府 (Department for Business, Energy & Industrial Strategy)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：粗鋼生産プロセスの脱炭素化開発段階：研究開発英国政府の2050年までのGHG排出ネットゼロを達成するに当たり、排出削減困難なセクターの1つである鉄鋼セクターにおける脱炭素技術を長期的に支援する。

図表147： Clean Steel Fundプロジェクトの主な特徴

背景

- 英国政府が掲げた2050年GHG排出ネットの実現に向け、英国産業において戦略的重要性が高く、かつ排出削減困難なセクターの1つである鉄鋼セクターの脱炭素化技術を長期的に支援する。
- 本ファンドは2023年の開始を目指し、2019年の選挙前に設立が発表された。発表では、£ 2.5億の規模とすることが盛り込まれた。（他ファンドIndustrial Energy Transformation FundやNet Zero Hydrogen Fundとも連携する必要性が示されている。）

プロジェクト情報

支援の対象となる脱炭素化に向けた主な技術としては以下が想定されている。

- 高炉におけるCCUSの活用及び活用に向けたインフラの再設計（今後10年で商用化される想定）
- 水素製鉄（高炉での水素活用と直接還元における水素利用の両方が対象）
- 電炉を活用したリサイクルの促進
- エネルギー効率化

UK South Wales Industrial Cluster (SWIC)

図表148： SWICのプロジェクト概要

組織	Industrial Strategy Challenge Fund & SWIC Consortium
プロジェクト名	South Wales Industrial Cluster (SWIC)
期間	2030年までに完了（予定）
投資額	Phase 1： £ 29.5万 Phase 2： £ 2,000万
資金源	• UK Research & Innovation under Industrial Strategy Challenge Fund
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：低炭素スチールに活用する水素及びCCUS技術開発段階：研究開発パートナー： TATA Steel UK、Costain、CR Plus、RWE、Progressive Energy、University of South Wales、Celsa Manufacturing、Tarmac、Valero Energy、Progressive Energy、Capital Law、Flexible Process Consultants the Port of Milford

図表149： SWICプロジェクトの主な特徴

背景

- 英国 South Walesには発電から鉄鋼、化学等多排出産業が集積しており、本地域における脱炭素化は産業競争力を維持・強化した形で実施されるとともに、コミュニティの経済的なレジリエンスの強化も同時に実現することが求められる。
- 上記背景のもと、コンソーシアム（SWIC）が設立され、発電セクターから鉄鋼、化学、紙・パルプ等多様な産業から事業パートナーが参加している。
- SWICでは、TATA Steel等が先導し、脱炭素化に向けたロードマップ及びインフラ普及計画をまとめることが予定されている。

プロジェクト情報

- ph2においては、TATA SteelはSWICのパートナーと連携し、CO2輸送や貯蔵、低炭素発電、水素といった脱炭酸に必要な外部インフラへのアクセス方法を特定する。
- 同プロジェクトを通じて、TATA Steelは英国で世界初のネットゼロ産業クラスターの構築を目指す。同クラスターにおいては、Port Talbotにある製鉄所がアンカーサイトとしての役割を果たすことを目指している。



Germany ArcelorMittal

図表150： ArcelorMittalのプロジェクト概要

組織	ArcelorMittal
プロジェクト名	水素直接還元プラント
期間	2019年 – 2030年
投資額	設備費用：€1.1億 (うち€0.55億が補助)
資金源	• German Federal funding
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：水素直接還元開発段階：実証水素直接還元プラントでは、鉄鉱石の還元剤としてグリーン水を活用することで、CO2フリー製鉄プロセスを実現 2025年までにはグリーン水素による製鉄方法で10万トンの生産を見込む

図表151： ArcelorMittalプロジェクトの主な特徴

背景

- ArcelorMittal GermanyはSteel4Future戦略において、今後数年間でドイツにある4つのプラント（ハンブルク、ブレーメン、デュイスブルク、アイゼンヒュッテンシュタット）の製鉄プロセスを脱炭素化することを表明。
- 同プロジェクトの対象である、ハンブルク工場単独で2030年までに年間100万トン以上のゼロカーボンスチールを生産し、年間約80万トンのCO2排出量を削減する予定である。

プロジェクト情報

- ArcelorMittalは2019年9月に同工場における実証プラントを設計するためにMidrex Technologies（神戸製鋼傘下）とFramework Collaboration Agreement（FCA）を締結。
- トランジション機関では、排ガスの分離により生成された水素を還元剤として活用する。再生可能エネルギーを活用して製造されるグリーン水素が十分な量を実用可能な価格で供給されれば、同プラントで活用することを予定。

CO2分離回収

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

7. CO2分離回収

概要

市場規模（2050年）

・ 80,000億円

CO2削減ポテンシャル

・ 80億トン

■ 市場概要

- IEAのSDSにおけるCCUSの役割は大きく、2070年までに電力部門の累積排出削減の15%を担う。
- 発電設備や産業プラントは設備回収期間以前に工場を閉鎖するより、既存設備へのCCUSの導入のほうが経済効率が高い場合が多く、資産の所有者にとっても受け入れやすい戦略である。
- 近年では排気ガスからCO2を分離回収する技術に加え、大気中から直接CO2を回収する技術がネガティブエミッションに寄与するとして着目されている。

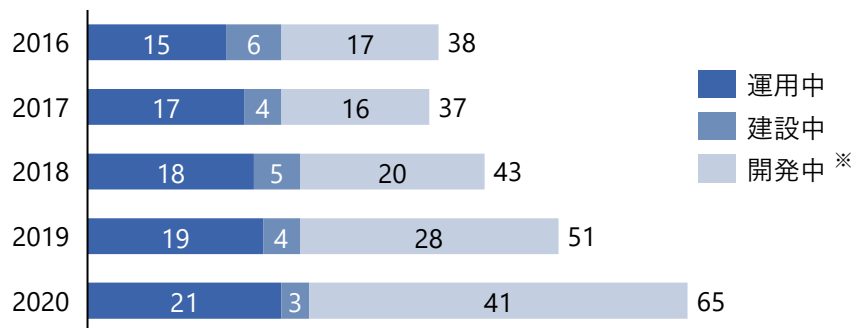
2030年～2040年

既存の産業排出・発電が主な吸収源。
85%が石炭/ガス火力、化学、セメント、鉄鋼から

2050年～2070年

2030年頃から徐々に導入される
DACの本格運用が開始予定。

図表152：既存の大型CO2回収設備数

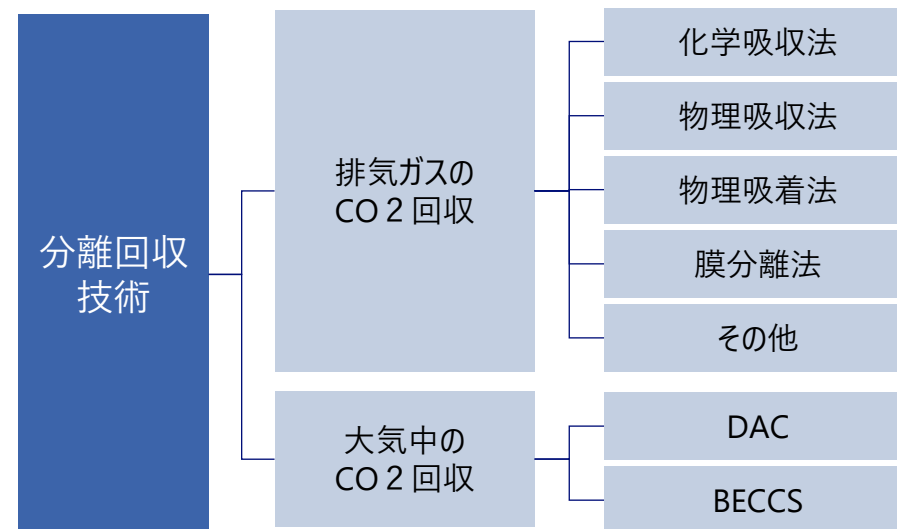


※開発初期と開発後期のものを合わせた数値
出所）IEA, NEDO等公開情報より

■ 技術概要

- 基本的な原理・原則に大きな差はないが、CO2の濃度によりコストや技術的な難易度が変化する。

図表153：CCUS | 分離・回収技術概要



排気ガスのCO2回収

- 鉄鋼、セメント、発電、化学プラントを中心に分離・回収技術が活用されている。
- コスト：USD40/t-CO2 ~ USD100/t-CO2
（吸収対象によりコストは変化。石炭火力発電や鉄鋼がUSD40/t-CO2程度）

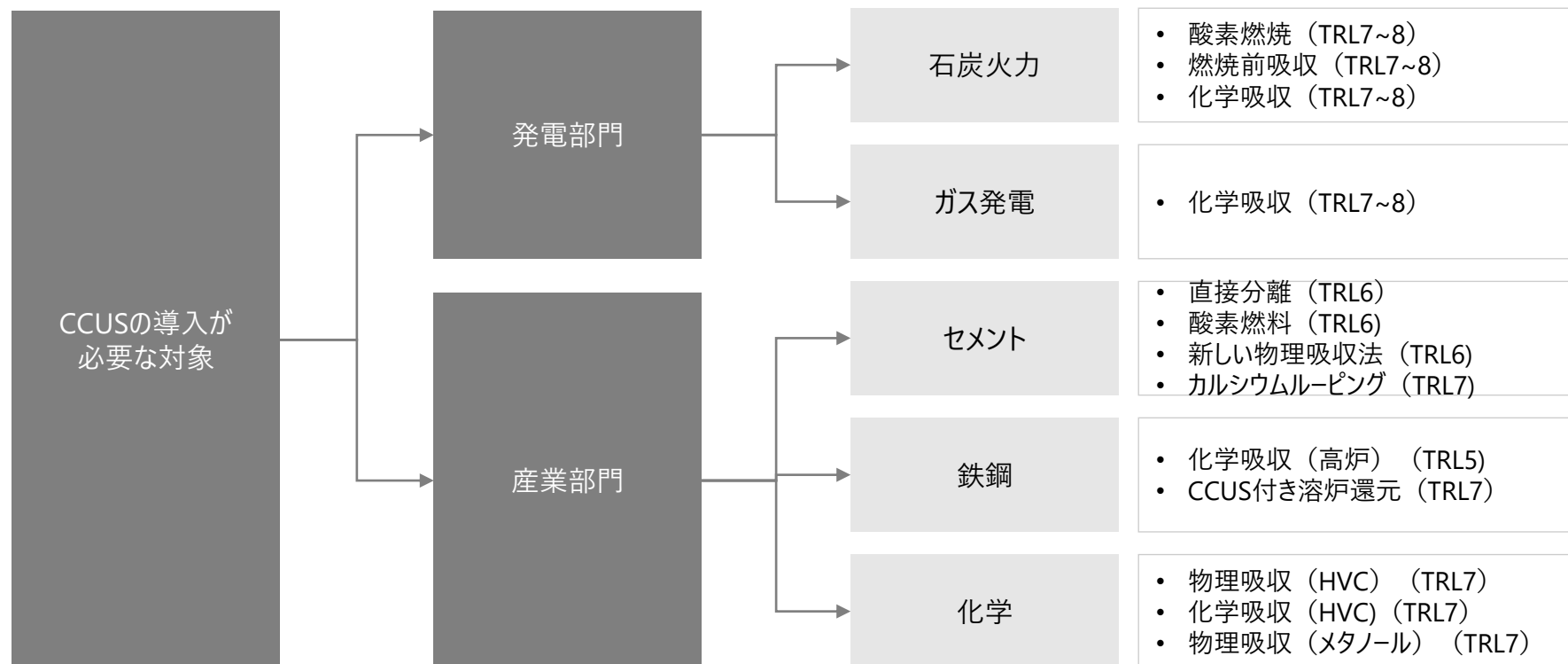
大気中のCO2回収（DAC）

- スイスのクライムワークスを中心に商用化されるが、大規模化には至っていない。
- コスト：USD100/t-CO2 ~ USD1,000/t-CO2
※昨今Carbon Engineering 社によりUSD94~232/t-CO2が将来的に達成される見込みが発表された

【参考】概要 | CCUSの導入が重要となる産業

図表154：IEA SDAで導入が想定される対象の前提

- 設備投資期間が長く、2070年以降も運転が予定されている化石燃料発電施設
IEAのSustainable Development Scenario（SDS）では2070年時点でも化石燃料主体の発電が残存する想定を置いており、CO2排出削減においては、残存施設へのCCUS導入が不可欠となる
- 多排出産業かつ、プロセス排出の回避が困難なもの
セメント、鉄鋼、化学産業は多排出産業であり、原材料の特性やCCUS技術がより発展していることから、CCUSの導入に適している。



7. CO2分離回収

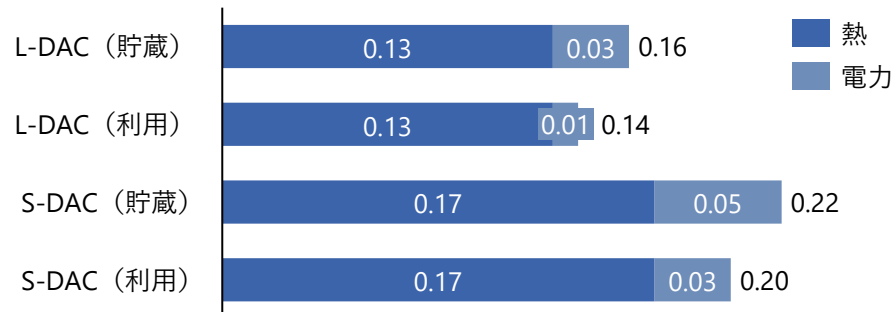
【参考】概要 | DAC

■ 課題

01 必要なエネルギー量とコスト

- 大気中のCO2濃度は0.04%程度と低いため、排気ガスからの回収より多くのエネルギーを必要とする。
- 結果としてCO2回収コストは高くなる。

図表155：CO2貯蔵・利用に必要なエネルギー量（Mtoe）



※S-DACは将来的に電力のみで運用可能となる見込み

02 場所

- 必要なエネルギーの多さからDACプラントの場所は制限される。
- また、再エネポテンシャルに依存する上、貯蓄や利用可能な施設が近くにあるかも重要となる。
- 必要な土地：15 km²/Mt of CO₂ removed

■ 運用中のプラント（2020年時点）

図表156：運用中のプラント

Company	Country	Sector	CO ₂ storage or use	Start-up year	CO ₂ capture capacity (tCO ₂ /year)
Climeworks	Switzerland	Greenhouse fertilisation	Use	2017	900
Climeworks	Switzerland	Beverage carbonation	Use	2018	600
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Netherlands	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2019	3
Climeworks	Switzerland	Power-to-X	Use	2018	3
Climeworks	Germany	Customer R&D	Use	2015	1
Climeworks	Switzerland	Power-to-X	Use	2016	50
Climeworks	Italy	Power-to-X	Use	2018	150
Climeworks	Germany	Power-to-X	Use	2020	50
Climeworks	Iceland	Mineralisation of CO ₂	Storage	2017	50
Carbon Engineering	Canada	Power-to-X	-	2015	365 (max)
Global Thermostat	United States	-	-	2013	2500
Global Thermostat	United States	-	-	2010	500
Global Thermostat	United States	-	-	2019	4000

Note: Power-to-X refers to a suite of technologies that convert electricity into other forms of energy such as ammonia or hydrogen.

国内動向

■ 方針・戦略

分離回収の技術では高い技術力を要しており、東南アジアをはじめとする各国と二国間クレジットの活用を通じた国際連携を行う。

ネガティブエミッション技術としてのDAC技術の開発にも今後力をいれる。

図表157：CCUS | 分離・回収国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none"> 分離回収は市場形成期ではあるが、特許割合は高水準を維持。 DACは2020年頃から国内でもラボレベルでの開発を開始
方針	<ul style="list-style-type: none"> 石炭火力の発電量当たりの温室効果ガス排出量を抜本的に下げるとの技術等（IGCC、CCUSなど）の開発を更に進める。 今後、高効率なCO2分離回収技術を開発し、2030年には分離回収技術の更なる低コスト化と、EOR以外の用途への拡大を実現。 「ムーンショット型研究開発事業」によりDACの研究を推進。
目標	<ul style="list-style-type: none"> 2030年：1000~2000円/CO2t（分離回収） 2050年：2000円/CO2t（DAC） 2050年：世界全体で約25億CO2tの回収

2021	2022	2023	2024	2025	~2030	~2050
高効率な分離回収技術による コスト低減			大規模実証			自立 商用
DACの研究開発コスト低減						導入 実証

■ 技術開発状況

図表158：各技術の課題・特徴

化学吸収法や固体吸収法など様々な手法があるものの、基本的な課題は共通

共通課題

- コスト低減
分離したCO2の回収に熱を要するため、エネルギーコストの割合が高い
- 市場形成（法整備）
現在は各工程毎に法律がことなるため、それぞれに適した資格者を確保する必要がある人材確保の面で事業者の負担になっている。
- 市場形成（貯蓄量の把握）
NEDOやRITEを中心に貯蓄ポテンシャルが高いと算出されているものの実態調査が不足している。貯蓄可能量の実態や具体的な候補地が明確になることで分離・回収の需要が高まると想定。現在はオーストラリア等を中心に企業が貯留地を探索している状態。

排気ガスのCO2回収

- 最も大きな課題はコストの低減
- 現在は化学吸収法（アミン）が一般的だが、価格が高く、RITEを中心に固体吸収材の開発が進められている。化学吸収法の吸収効率では世界トップクラスを誇る。
- 特に石炭火力発電への吸収技術に強みをもつ。

大気中のCO2回収

- 回収技術の中で最も高価。
- コスト低減もだが、低いCO2濃度（大気中）からそのままCO2を回収する技術は国内で実現されていない。
- また、早期にDACの開発に取り組んだ欧米諸国にやや遅れているが、RITEや大学の研究機関を中心に基礎技術の開発に取り組む。

図表159：主要な事業者・機関

地球環境産業技術研究機構

(RITE)

(固体吸収材・分離膜)

- 低温でのCO2再生率に優れた新型吸収材の特許取得。分離回収コスト2000円台を川崎重工との実証で達成
- 加えて、加湿条件下で効率よくCO2を分離する複合膜の開発にも成功。NEDO事業にて実証中
- DACの開発にも取り組む

三菱重工

(排気ガス中のCO2吸収に係る様々な技術)

- 米国における世界最大のCO2回収プロジェクトの実現や、様々な排ガス源への対応技術をもち、シェアも7割を誇る
- エネルギー効率が高い点が特徴

東芝

(化学吸収法)

- 世界初のバイオマス発電のCO2回収・貯蓄の実証を開始
- 現在毎日1,000トン排出されるCO2の内50%の回収を実現している

日揮ホールディングス・日本ガイシ

(CO2分離膜)

- 日本ガイシと共同で従来型のものより高効率なDDR型ゼオライト膜を用いたCO2分離・回収技術を開発
- 石油メジャーが集まるDeepStarと連携でR&Dプログラムを開始

ムーンショット型
研究開発事業 (JST)

(DAC)

- 九州大学、金沢大学、東海国立大学等がNEDOのムーンショット型研究開発事業を通じてDACの基礎研究開発に着手し始めている

7. CO2分離回収 国際動向

主要国

米国・EU・英国

■ 各国動向

図表160：政策・方針

米国	<ul style="list-style-type: none">CO2回収能力は年間25Mtで、世界の回収容量の3分の2近くを占める。CO2排出源が集積しており、かつ近くに貯留地がある米国では規模の経済が働きやすく、国も積極的にCCUSを推進。バイデン政権の気候対策の中心に水素とともにCCUSが位置付けられ、DOEのもと支援プログラムを実施。45Q 税控除やConsolidated Appropriations Actなどの法整備も進む。
EU	<ul style="list-style-type: none">ヨーロッパの全排出量の約68%が潜在的な貯留サイトの100km以内にあるとされ、CCUSへの市場も拡大政策的支援も充実しており、EU Innovation Fundにて、CCUSの実証に100億€の投資を決定。
英国	<ul style="list-style-type: none">2050年ネットゼロの目標設定以降、気候変動委員会 (CCC) によりCCUSを含むエネルギー効率化などの施策が提言された。CCS Infrastructure Fundを設立し、最低でも8億 £ を投資し、2030年までに2つのCCUS施設を立ち上げる目標を設定。
ドイツ	<ul style="list-style-type: none">2050年産業部門の姿として、CCUや水素を用いたCO2フリー燃料への転換、多排出産業におけるCCUSの活用を絵姿として設定。メルケル首相も演説にて、カーボンニュートラル達成に向けたCCUSの重要性を認識。特に欧州最大の排出国であるドイツにとってCCUSは重要になる。

図表161：主要な事業者・機関

Climeworks

DACの高い技術を要し、既にいくつかのプラントで実証・商用化に成功
アミン吸収材を用いる

Global Thermostat

クライムワークスと並ぶCO2回収技術の開発に取り組むベンチャー
ExxonMobile等と提携しDAC技術の開発に取り組む

事業者 (排出削減困難なセクター)

ExxonMobileやShell等の石油・ガス会社、化学メーカーのBASF、鉄鋼のArcelorMittalなど排出削減困難なセクターの事業者が開発を進める

大学・研究機関

ノットルダム大学や各国の研究機関等多くの団体が政府の支援プログラムのも基礎技術の開発に取り組む

出所) IEA、その他公開情報より

国内動向 | 技術の定性評価

図表162：CCUS | 分離・回収国内技術の定性評価

技術	強み	弱み	
排気ガスのCO2回収	技術 <ul style="list-style-type: none">研究段階の吸収材で高い経済性を実現（RITEの固体吸収材）石炭火力へのCCUS関連で多くの受注を国内外から獲得	環境 <ul style="list-style-type: none">各国政府が補助金やカーボンプライシング等市場発達のインセンティブを付与する中、国内の法規制は整備されておらず、排出削減のインセンティブも低い。	海外市場進出
	市場 <ul style="list-style-type: none">鉄鋼・化学産業等が発達しており、CO2回収の需要は存在する	市場 <ul style="list-style-type: none">CCUS設備の建設可能地に限りがある。海外ではCO2の分離回収に適した地（貯留地の近さ、再エネ供給の容易性）が多い。	
DAC	市場 <ul style="list-style-type: none">鉄鋼・化学産業等が発達しており、CO2回収の需要は存在する	技術 <ul style="list-style-type: none">国内のDAC技術は開発段階にあり、実際の運用に至ってない。既に商用運用を始める欧州（Climeworks）や企業間の共同研究が行われる海外に出遅れる	技術進歩
		環境 <ul style="list-style-type: none">各国政府が補助金やカーボンプライシング等市場発達のインセンティブを付与する中、国内の法規制は整備されておらず、排出削減のインセンティブも低い	

想定する連携

図表163：CCUS | 分離・回収において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
排気ガスのCO2回収	海外進出による市場拡大	新興国は設備が比較的新しいため、省エネ設備への更新より、CCUSの付帯ポテンシャルが高い	<ul style="list-style-type: none"> 研究機関 事業者 	<ul style="list-style-type: none"> 新興国の事業会社（他排出産業）
	海外進出による市場拡大	経済効率性に優れた回収技術を用いて、海外の事業者技術を提供	<ul style="list-style-type: none"> 研究機関 	<ul style="list-style-type: none"> 多排出産業の事業者
	海外進出による市場拡大	CCUSプラント建設の高いシェア率をもとにノウハウを活かして、海外の多排出産業と連携して市場獲得	<ul style="list-style-type: none"> 企業（重工業メーカー） 	<ul style="list-style-type: none"> 企業（産業）
DAC	技術進歩	リソースを提供し、共同研究を行うことにより、海外の進んだ技術を取り入れる	<ul style="list-style-type: none"> 研究機関 	<ul style="list-style-type: none"> 研究機関 企業

EU Climeworks

図表164： Climeworksのプロジェクト概要

組織	Climeworks
施設名	Orca
期間	2021年9月稼働開始
投資額	• 1.1億USD
資金源	• プライベート・エクイティ投資家
概要	<ul style="list-style-type: none">技術：DAC技術ステージ：実装立地：アイスランド・ヘリシェイディ容量：4,000 t-CO2/年連携：Carbfix

図表165： Climeworksプロジェクトの主な特徴

背景

- Climeworksは、二酸化炭素除去における世界的なリーダー企業の1つである。同社が特許を取得したDAC技術は、大気から二酸化炭素を直接除去することで、ネガティブエミッションに貢献する。
- 同社の技術はエネルギー源に再生可能エネルギーを使用することで、完全にクリーンな手法で二酸化炭素を除去する事を可能にした。

プロジェクト情報

- Climeworksが開発したDACプラントの「Orca」は年間4,000t-CO2（自動車800台分の年間CO2排出量に相当）の二酸化炭素を除去する。備え付けのファンで大気中の空気を取り込み、中央部のフィルタで二酸化炭素を吸収する。
- 「Orca」近くにあるHellisheiði地熱発電所の再生可能エネルギーを活用。
- 吸収された二酸化炭素は水と混ぜ合わされ、Carbfixの技術を用いて地中深くへ送られることで、約2年かけて石灰化される。このようにして、二酸化炭素は空気から除去され、永久的かつ安全に地球に戻される。
- 今後は事業規模の拡大による「Orca」の能力増強を計画している。



USA Global Thermostat

図表166： Global Thermostatのプロジェクト概要

組織	Global Thermostat
施設名	アラバマ州ハンツビルのダイレクト・エア・キャプチャー・プラント
期間	2018年に事業を開始
投資額	NA
資金源	NA
概要	<ul style="list-style-type: none">技術：DAC技術ステージ：実証立地：アラバマ州ハンツビル容量：4,000 t-CO₂/年

図表167： Global Thermostatプロジェクトの主な特徴

背景

- Global Thermostat's Proprietary Cyclic Adsorptive CO₂ Capture methodは、任意の場所で大気中から高純度のCO₂を吸収する。同社の技術は吸収に用いられるエネルギーは効率的なヒートサイクルの中で保全される仕組みになっている。
- 同社は、規模100万t-CO₂/年での二酸化炭素回収コストを\$ 50/tCO₂と推計しているが、詳細な情報は公表されていない

プロジェクト情報

- 最終的には、炭酸飲料や生分解性プラスチックの製造を商用規模で実現するために大規模かつ経済効率性の高いDAC技術の実装を最終的に目指す。
- 化学吸収材であるアミンを多孔質支持体に担持させたものを利用。多孔質支持体は通常自動車の触媒に用いられるモノリス構造を用いている。
- CO₂の放出には85~100°Cの蒸気を用いる。必要なエネルギー量は、電力が160kWh、熱量が4.4GJ。

EU Northern Lights



図表168： Northern Lightsのプロジェクト概要

組織	Northern Lights
プロジェクト名	Longship Project
期間	2021年
投資額	NOK168億円
資金源	・ノルウェー政府
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">・ 技術：DAC・ 技術ステージ：実証・ 連携：ノルウェー政府、Equinor Shell, Total・ 目的：ノルウェーとヨーロッパにおけるCCS市場の開始を目指し、DACのコスト低減を目指す

図表169： Northern Lightsプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ 欧州が気候目標を達成するためには、大規模CCSを含む様々な気候対策が必要である。
- ・ 欧州のグリーン・ディールの実施にとって重要であり、本プロジェクトは炭素回収・貯蔵のバリューチェーンの構築に向けた取組として位置付けられる。
- ・ ノルウェー産業における最大の気候関連プロジェクトであり、国境を越えたオープンソースCO2輸送・保管インフラネットワークを構築する世界初のプロジェクト。

プロジェクト情報

- ・ プロジェクトの第1段階は、2024年半ばに完了し、年間最大150万トンのCO2吸収能力を兼ね備える。
- ・ 主要事業
 1. ブレヴィックのノルセムセメント工場・およびオスロのフォートム・オスロ・ヴァームの廃棄物焼却施設でのCO2回収（水と有機アミン溶媒の混合物の活用）
 2. 吸収後のベストランド郡のOygardenのターミナルへの輸送
 3. パイプラインを通じた海底下の貯水池への二酸化炭素の汲み上げ

UK Neptune Energy, NEP, Eni 他

図表170： Neptune Energy, NEP, Eni 他のプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">気候変動委員会（Climate Change Committee）ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）応募者 Neptune Energy, Net Zero Teesside, Zero Carbon Humber & Northern Endurance Partnership (NEP) など
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">Carbon Capture and Storage Infrastructure Fund (CIF) - Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution
期間	-（2020年発表）
投資額	<ul style="list-style-type: none">10億GBP
資金源	<ul style="list-style-type: none">気候変動委員会ビジネス・エネルギー・産業戦略省
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：開発～実証目的 2020年代半ばまでに米国のCCを最低2クラスター（トラック-1）、2030年までに4クラスター（トラック-2）に展開し、2030年までに10MtCO₂/yearを獲得することを野望することを10ポイントプランに含めた。CIFは、提案されたクラスター・シーケンシング・プロセスを通じてクラスターに割り当てられることが期待される政府支援パッケージの重要な部分を形成する。

図表171： Neptune Energy, NEP, Eni 他プロジェクトの主な特徴

背景

- CCUSは英国政府が進めるTen Point Plan for a Green Industrial Revolutionにおいて重要な位置づけを占める。
- この計画では、2030年までに年間10Mtの二酸化炭素（年間400万台の自動車の排出量相当）の吸収を目指す。
- 2020年3月、北東部、ハンバー、北西部、スコットランド、ウェールズなどの地域に Super Place を創設し、4つの産業クラスターにおけるCCUSの設立を支援するために10億ポンドを投資する予定。

プログラムの詳細

- Neptune EnergyによるDelpHYnus
低炭素水素の生産を伴うCO₂輸送・貯蔵プロジェクト
- 東海岸クラスター
Net Zero Teesside, Zero Carbon Humber & Northern Endurance Partnership (NEP) の協力により英国の産業クラスター排出の50%削減が期待される
- イングランド北西海岸でのHynetプロジェクト
2030年までに年間10百万トンのCO₂排出削減が期待される
- スコットランドクラスター
Shell, ExxonMobil, Storegga, Harbour Energy, Macquarie, Ineos, Petrofac, Woodによる大規模プロジェクト
- Harbour Energyが主導するNet Zero-2029年末までに約11百万トンの炭素を貯蔵するためのアンビション

CO2を原料とするセメント製造

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

8. CO₂を原料とするセメント製造 概要

市場規模（2030年）

・ 438,000億円

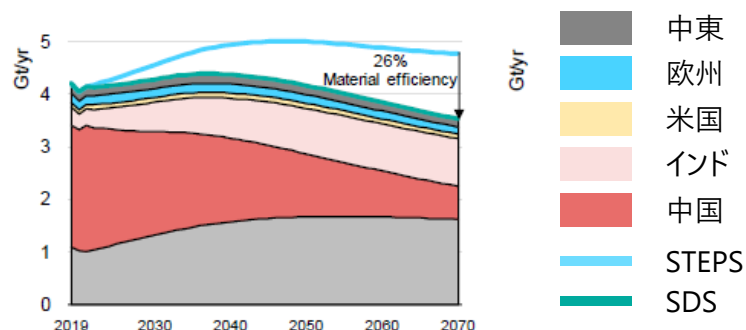
CO₂削減ポテンシャル

・ 43億トン

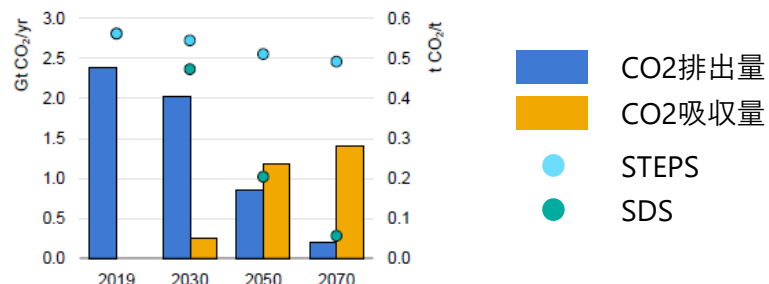
■ 市場概要

- ・ 素材効率性の向上と中国での生産量減少により、SDSにおける2070年のセメント製造量は3.5Gt程度となる見込み。
- ・ 現在最も活用されているポルトランドセメントの原料である石灰石からのプロセス排出が避けられないため、セメント業界におけるCCUSは喫緊の課題。SDSでは70%の排出削減をCCUS由来と推計。
- ・ 半永久的にCO₂を固定できるセメント・コンクリートへのCO₂活用はCCUの中でも気候変動緩和効果が大きく、市場としてのポテンシャルが期待される。

図表172：世界のセメント生産量



図表173：世界のセメント生産量



出所）IEA, NEDO等公開情報より

■ 技術概要

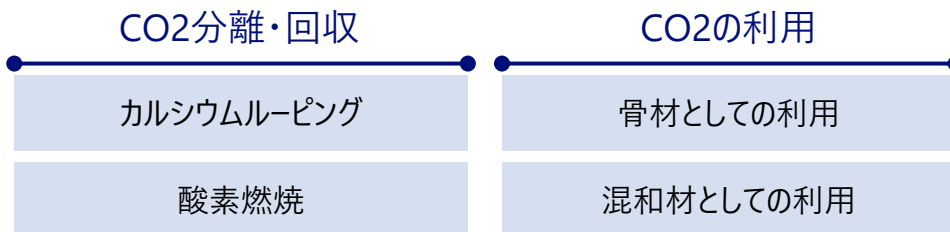
【前提】

- ・ セメント業界におけるCO₂排出の削減はCO₂の分離回収、または原料転換、燃料転換が主になる。
- ・ CO₂の利用はセメントからコンクリートを製造する段階が中心となる。

【技術概要】

- ・ CO₂を吸収する技術としてセメント業界で特に注目されているのが、カルシウムルーピングと酸素燃焼。
- ・ 利用においてはコンクリート製造時の混和材として活用する技術が日本を含む各国で開発されている。

図表174：カーボンリサイクルセメント技術概要



カルシウムルーピング

- ・ TRL 7（2025年実装予定）台湾やイタリア（その他欧州）を中心に開発、実証
- ・ 酸化カルシウム（CaO）を用いてCO₂を排ガスから吸収する技術。CaOとCO₂が結合することでCaCO₃が生成される。CO₂分離機能を失ったCaCO₃（石灰石）はセメントの原料として活用。

酸素燃焼

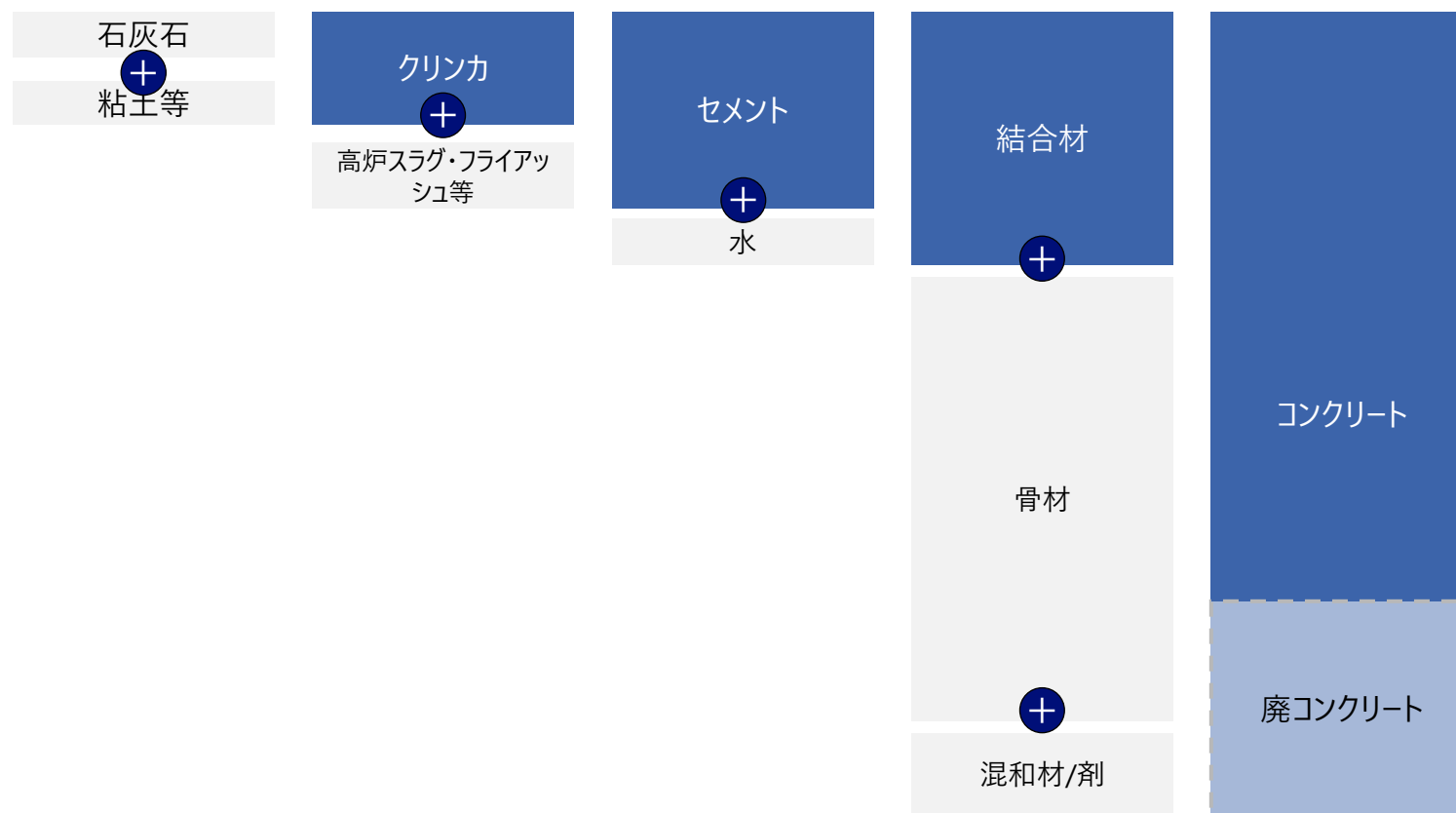
- ・ TRL 6（2030年実装予定）欧州を中心に開発、実証
- ・ 酸素を燃焼に活用することで、排ガスのCO₂濃度を95%程度にし、CO₂回収効率を上げる。

骨材・混和材としての活用

- ・ カナダをはじめ、英国、日本で企業が開発コスト削減に取り組む
- ・ コンクリート製造時の骨材や混和剤としてCO₂を活用しコンクリートを硬化させる

【参考】セメント・コンクリート製造

図表175：コンクリート製造に要する材料



※ 混和剤はコンクリート製造時に必要に応じて加えられる。
出所）セメント協会、Material Economics等よりNRI作成

8. CO2を原料とするセメント製造

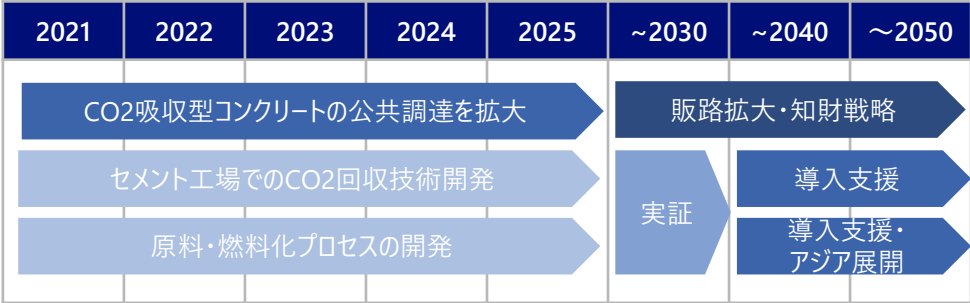
国内動向

方針・戦略

キルン方式では世界のデファクト化に成功したものの、
排ガスからのCO2回収技術の開発、CCUSへの対応には課題が残る。
回収技術の開発とともに環境配慮型コンクリートの低コスト化を推進。

図表176：カーボンリサイクルセメント国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">セメント工場の排出ガスに含まれるCO2を回収する要素技術の多くは海外が主流。国内のセメント企業は海外企業との連携により実証を行っている。国内では石炭火力からのCO2回収や、回収済みのCO2をセメント・コンクリート製造で活用するための技術開発が主流。NEDOが「カーボンリサイクル技術」の技術開発としてRD&Dを支援。
方針	<ul style="list-style-type: none">原料調達や物流の観点から地域性が高いセメント・コンクリート製造に合わせて、地域特性に対応可能な環境配慮型コンクリートの開発を推進。
目標	<ul style="list-style-type: none">公共調達の促進により、環境配慮型コンクリートを既存のコンクリートと同程度の価格まで下げる（30円/kg）



出所）NEDO,各企業HPより

技術開発状況

図表177：各技術の課題・特徴

CO2分離・回収	<ul style="list-style-type: none">国内では要素技術の開発が海外より遅れる。化学吸収法やCCUS設備を付帯させるためには設備の大規模化が避けられず、既存工場の対応が難しい。回収コストが高く、回収に必要な低炭素エネルギーの価格も高い。
CO2の利用	<ul style="list-style-type: none">コスト低減が必要（既存の約3倍の価格で販売）。CO2吸収型コンクリートは錆びやすいなどの特性から既存のコンクリートより用途が限定される。

図表178：主要な事業者・機関

太平洋セメント	三菱商事
JFEやRITEとともに炭酸塩を用いたCO2回収と炭酸塩の有効活用に向けた研究を開始 別途単独でNEDO事業を通じてCO2回収と利用の実証に取り組む	Blue Planetと協業契約を結び、CO2の骨材利用の事業化に取組む 鹿島建設等とも連携し、環境配慮型コンクリートの用途拡大も推進
鹿島建設・中国電力・デンカ	広島大学・中国電力 中国高圧コンクリート工業
共同で環境配慮型コンクリートの一つであるCO2-SUICOMを開発 材料として混和材の割合を増やし、固まる際にCO2を吸収することで原単位がマイナスとなる初のコンクリート	土木材料（緑化基盤材・軽量盛り土等）に利用されるライトサンドに相当するCO2-TriCOMを開発

国際動向

■ 各国動向

図表179：政策・方針

米国	<ul style="list-style-type: none"> セメント生産量は世界第3位で、原単位排出も比較的高い。 政策が掲げる業界の脱炭素施策は任意の低炭素商品開発、ラベリングが中心。 セメント産業を含む産業全体のCCSに対する取組にDOEが4500万ドル支出することを2021年10月に決定。
EU	<ul style="list-style-type: none"> 多排出産業の一つであるセメント産業は排出権取引を活用しているが、2017年～2018年にかけて炭素排出は1.3%増加。 産業全体の脱炭素化に向け2019年にGreen Dealを策定。Horizon 2020でセメント業界の排出削減の取組に資金援助。 ただし、セメント業界に対するEU加盟国間で政策に差異があり、EU全体での援助体制は未整備。
英国	<ul style="list-style-type: none"> 2017年にセメント産業向けの脱炭素計画※1を策定。 業界団体（mpa cement）も2050年ネットゼロ目標とロードマップを2020年10月に公表し、削減の61%はCCUSに由来。 Clean Energy Ministerialのもと、公共部門での調達による環境配慮型製品の需要創成にも取り組む。 ただし、多くの工場がCO2貯留地から離れている点が課題。
ドイツ	<ul style="list-style-type: none"> 業界団体（VDZ）が2020年にロードマップを策定。2050年ネットゼロ達成にはCCUSが不可欠とし、52%の削減がCCUSに由来。 主要製造業者が積極的にEU Innovation Fundを活用し、CCUSの実証実験を開始。 2021年2月に政府がCO2の回収に特化した資金供給※2の実施を公表。

※1 Cement Sector: Industrial Decarbonization and Energy Efficiency Action Plan

※2 CO2 avoidance and use in raw material industries

出所）IEA、その他公開情報より

図表180：主要な事業者・機関

Holcim

世界各国の自社工場でCCUS関連の研究開発・実証を行う
現在20以上のCCUS実証を行っている
また、米国の環境配慮型セメントの製造会社であるSolidia Technologiesと業務提携を5年間締結（2025年まで）

HeidelbergCement

各国の資金援助を受けながら酸素燃焼等CCSの実証に積極的に取り組む
世界で初めて産業規模でのCCS実証をノルウェーのセメント工場で開始

Solidia・CarbonCure・Blue Planet

CO2を骨材や混和材として活用することでCO2を固定化したコンクリートや骨材の製造を行う企業
Carbon Cureは既に生コンクリートプラントでの採用実績がある他、Solidiaもコンクリートの二次製品としての製品化実績がある

国内動向 | 技術の定性評価

図表181：カーボンリサイクルセメント国内技術の定性評価

技術	強み	弱み	
CO2分離 回収	市場 <ul style="list-style-type: none">－ （セメントの生産量は2019年時点で世界全体の0.9%程度と多くはないが、セメント産業の脱炭素化にはCCUSが不可欠であり一定の需要は見込まれる）	環境 <ul style="list-style-type: none">各国政府が補助金やカーボンプライシング等市場発達のインセンティブを付与する中、国内の法規制は整備されておらず、排出削減のインセンティブも低い分離回収後の貯留場所の確保・安価なエネルギーの確保に課題が残る	技術進歩 海外進出による 市場拡大
	環境 <ul style="list-style-type: none">建設業界がセメント・コンクリートの脱炭素の取組・研究開発に積極的（セメントの脱炭素化にはサプライチェーン全体での連携が重要）	技術 <ul style="list-style-type: none">CO2分離回収に関する多くの要素技術は石炭火力の排ガスからの回収（化学吸収法が中心）酸素燃焼やカーボンルーピングの技術開発は海外企業が主流	
CO2の利用	技術 <ul style="list-style-type: none">－ （一部企業で特許を取得）	技術 <ul style="list-style-type: none">海外企業が日本の建設事業者と協業する等、高い技術力で国内市場にも参入既に産業での導入実績を持つ企業も海外で出てきている	技術進歩
	市場 <ul style="list-style-type: none">混和材や骨材としての活用、環境配慮型製品はセメント協会や政府が有望視する取組であり、需要が見込まれる	環境 <ul style="list-style-type: none">各国政府が補助金やカーボンプライシング等市場発達のインセンティブを付与する中、国内の法規制は整備されておらず、排出削減のインセンティブも低い	

8. CO2を原料とするセメント製造

想定する連携

図表182：カーボンリサイクルセメントにおいて想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
CO2 分離回収	技術進歩	セメント工場に適したCCS技術を保有する企業と連携し、国内産業の脱炭素化を推進	・ 企業 (セメント)	・ CCUSに 特化した企業
	海外進出による市場拡大	CCUSプラント建設の高いシェア率をもとにノウハウを活かして、海外の多排出産業と連携して市場獲得	・ 企業 (重工業メーカー)	・ 企業 (セメント)
CO2の利用	技術進歩	コスト低減や、よりCO2削減効果の高い製品の開発に向けて研究実証を重ねている企業同士が相互の技術的な強みを用いて技術開発が促進される可能性がある	・ 研究機関	・ 企業



EU Holcim

図表183： Holcimのプロジェクト概要

組織	Holcim
プロジェクト名	Westküste 100
期間	2019年4月～
投資額	<ul style="list-style-type: none">1.1億USD
資金源	<ul style="list-style-type: none">ドイツ政府 (Federal Ministry of Economic Affairs and Energy)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：セメント工場の排ガスからのCCUS技術ステージ：実証立地：ドイツ シュレスヴィヒ・ホルシュタイン容量：1,000,000 t-CO2/年連携：EDF Germany, OGE, Ørsted, Raffinerie Heide, Stadtwerke Heide, thyssenkrupp Industrial Solutions, Thüga, Region Heide development agency, Westküste University of Applied Science

出所) Holcimのニュースリリース、プロジェクトのHP

図表184： Holcimプロジェクトの主な特徴

背景

- Holcimはセメント企業として初めて2050年カーボンニュートラルに資する目標を設定し、SBT認証を取得した業界内の先進的な企業。
- 自社の排出量削減に向け、サステナビリティ・リンク・ボンドを通じた資金調達や、グリーンセメントの開発・販売を積極的に行う。
- また工場排ガスに含まれるCO2削減に向けてCCUSを重視しており、世界各国の自社工場にCCUS施設を付帯する実証を20以上実施している。

プロジェクト情報

- Westküste 100は欧州の10団体（企業・大学・研究機関を含む）による産業間の取組。電解装置により製造されたグリーン水素を航空機の燃料やガスパイプラインに活用することを目指す。
- CCUSに関する産業間のマテリアルフローを組み合わせた画期的な取組として注目を集める。
- セメント業界からの削減困難な排出分は回収され、メタン合成に活用される。



EU Buzzi Unicem

図表185： Buzzi Unicemのプロジェクト概要

組織	Buzzi Unicem
プロジェクト名	CLINKER (Calcium looping processによるクリンカの生成)
期間	・ 2017年10月～2022年3月
投資額	・ 資金総額：923万€
資金源	・ Horizon 2020（897万€）
プロジェクト情報	・ 技術ステージ：研究 ・ 技術：カルシウムループिंग ・ 連携先： 研究センタ（LEAP、CSIC、VDZ） 大学（Politecnico di Milano, Tallinn University of Technology, Lappeenranta University of Technology, University of Stuttgart & Tsinghua University） 中小企業（数社） 技術提供者（IKN）

図表186： Buzzi Unicemプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ 2014年頃から台湾を中心に開発されてきたカルシウムループिंग技術を採用。
- ・ プロジェクトが位置するイタリアのVernascaは小さい村であり、毎年1300万トンのセメントを生産している。一方で施設は古く、CO2を多く排出。

プロジェクト情報

- ・ 工程は大きく2つに分けられる：
(1) 650°C前後の焼成炉でCaOを「炭酸化」してCaCO3を形成
(2) 920～950°Cの焼成炉での酸素燃焼。
これにより、CaOが再び利用可能になり、ほぼ純粋なCO2を分離可能。
- ・ 90%以上のCO2回収率と高いエネルギー効率の両立が見込まれる。
- ・ 特に燃焼時に90%以上の回収率を達成する点が先進的。



Germany・EU Heidelberg Cement

図表187： Heidelberg Cementのプロジェクト概要

組織	Heidelberg Cement
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">ノルウェーで世界初の本格的なCCS施設スウェーデンで世界初のカーボンニュートラルセメント工場
期間	<ul style="list-style-type: none">ノルウェー工場：2020年工場稼働開始、2024年からCO2回収開始スウェーデン：2021年に開始、2030年から本格的なCO2回収
投資額	NA
資金源	<ul style="list-style-type: none">ノルウェー政府
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実証技術：CO2回収連携先<ul style="list-style-type: none">Equinor（ノルウェーの工場）スウェーデン政府（スウェーデンの工場）

図表188： Heidelberg Cementプロジェクトの主な特徴

背景

- Heidelberg Cementは、2025年までにセメント材料1トン当たりのCO2排出量を1990年比で30%削減することを約束した。この達成に向け、全世界の工場で具体的なCO2削減対策を定めた。
- 2050年までにカーボンニュートラルコンクリートの提供を目指す。

プロジェクト情報

- ノルウェーのBrevikにあるHeidelberg Cement Norcem工場
 - 年間40万トンのCO2回収
 - 世界中のセメント工場における初の産業規模のCCSプロジェクト
 - 2024年までにCO2分離を開始、50%削減を目指す
- スウェーデン・アイランドの Heidelberg Cement
 - 既存の工場を改修
 - 2030年以降年間1.8百万トンのCO2回収、排出量100%削減を目指す

Germany Heidelberg Cement

図表189： Heidelberg Cementのプロジェクト概要

組織	Heidelberg Cement
実施場所	<ul style="list-style-type: none"> HeidelbergCement plant Colleferro (イタリア) LafargeHolcim plant Retznei plant (オーストリア)
期間	- (2019年にプレスリリース)
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 8億€
資金源	<ul style="list-style-type: none"> セメント業界 EUまたはドイツ政府に資金援助を申請 (ECRA※が申請中) ※European Cement Research Academy
プロジェクト概要	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実証 (準産業規模) 技術：酸素燃焼

図表190： Heidelberg Cementプロジェクトの主な特徴

背景

- Heidelberg Cementは、2025年までにセメント材料1トン当たりのCO2排出量を1990年比で30%削減することを約束した。この達成に向け、全世界の工場で具体的なCO2削減対策を定めた。
- 2050年までにカーボンニュートラルコンクリートの提供を目指す。
- 酸素燃焼自体は2030年頃の実装がIEAによって見込まれている。

プロジェクト情報

- 燃焼に酸素を活用することで、本プロジェクトでは排ガスのCO2濃度を70%にまで引き上げることを目指す。
- 実装可能性は産業規模のプラントでの実証が必要となるが、2009年の参照燃焼に関する技術開発移行、着実な成果を得ており、担当者は産業規模での実証も目前に迫っているとコメント。



UK Blue Planet Systems

図表191： Blue Planet Systemsのプロジェクト概要

組織	Blue Planet Systems
プロジェクト名	- (CO2のコンクリート注入に関する事業)
期間	・ 2021年6月公表
投資額	-
資金源	-
プロジェクト情報	・ 技術：CO2の利用（コンクリートへの注入） ・ 技術ステージ：実証 ・ 連携先：Sulzer Chemtech

図表192： Blue Planet Systemsプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ Blue Planet Systemsは骨材やコンクリートを製造するアメリカの企業。
- ・ Chevronや三菱商事等から出資を受ける。
- ・ 骨材を炭酸塩でコーティングした新たな骨材を開発しており、用途が一部限られるものの、コンクリート骨材として空港工事に活用された実績をもつ。
- ・ 回収した二酸化炭素を液化させずにコンクリートの骨材として活用する事が可能。

プロジェクト情報

- ・ Sulzer ChemtechはBlue PlanetのプラントにおけるCO2分離技術の導入を担当。
- ・ Blue Planetは回収されたCO2を用いた炭酸塩の生成、利用を目指す。
- ・ 本プロジェクトにより、セメントの製造をはじめとした石灰石を活用する産業の排出量削減に貢献。

UK O.C.O. Technology

図表193： O.C.O. Technologyのプロジェクト概要

組織	O.C.O. Technology
プロジェクト名	- (REPSOLとの協業によるCO2削減事業)
期間	<ul style="list-style-type: none">2024年半ばに施設完成
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none">Innovation Fund
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術：CO2の利用（炭酸塩）技術ステージ：実証プロジェクト立地：スペイン連携：Repsol

図表194： O.C.O. Technologyプロジェクトの主な特徴

背景

- O.C.O. Technology（O.C.O.）は都市ごみ焼却灰やフライアッシュ、鉄鋼スラグやセメント出すと等様々な廃棄物に含まれるカルシウムとCO2を活用し骨材の製造を行う。
- 同社の技術はAccelerated Carbonation Technology（ACT）として特許を取得している。
- 既に製造技術は実用化されており、英国に3つの工場を保有する。

プロジェクト情報

- 本プロジェクトでは、スペインの石油・ガス会社であるREPSOLの精製設備に適応する。
- これにより生成されるM-LS（製造された石灰石）は完全なカーボンネガティブを実現し、最終的に建設業界の資材として活用される。
- O.C.O.によると本プロジェクトを通じて22,000トンの廃棄物を削減し、2,200トンのCO2を年間削減することが可能としている。

機能性化学品

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

9. 機能性化学品

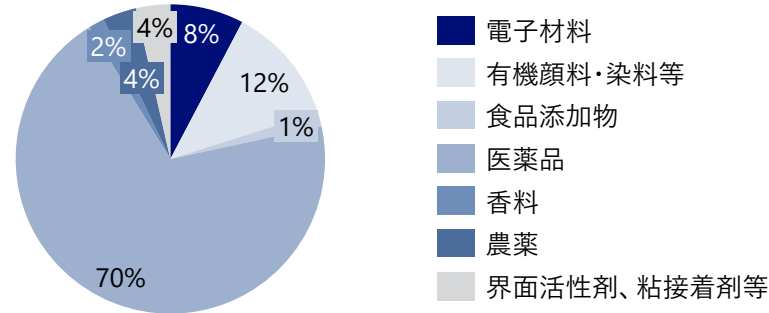
概要

市場規模（2030年）	・ 360,000億円
CO2削減ポテンシャル	・ 26億トン

市場概要

- 重量あたりの価格が高いもので、電子材料をはじめとする化学品を指す。ポリウレタンやポリカーボネイト等が該当する。
- CO2の利用はCCSの補完技術として着目。ただし8割程度は建築分野になり、ポリマー（機能性化学品）への利用は、市場規模と削減量の観点から限定的になる見込み。ただし、化学産業の脱炭素化において重要となる。
- 日本が強みを持つのは自動車等の電子材料。世界市場約169兆円のうち、電子材料の市場規模は約13兆円。
- 汎用性が限られる基礎化学品と比較して技術力が活かせる機能性化学品へのシフトに注力する欧米企業が多く、競争はますます激化。

図表195：ユーザー産業別機能性化学品消費割合（2018）



図表196：化学分野へのCO2利用の市場ポテンシャル

製品	収益ポテンシャル（億ドル）		削減ポテンシャル（百万トン）	
	2020年	2030年	2020年	2030年
燃料	10~50	100~2,500	10~30	700~2100
メタノール	1~2	10~120	0.1~1	5~50
ポリマー （機能性化学品）	1~6	20~250	0.02~0.05	0.1~2

出所）IEA, NEDO等公開情報より

技術概要

【技術概要】

- 通常CO2を利用した化学品製造には大量のエネルギーや水素が必要となるため、その他のCO2削減手段と比較してコスト競争力に劣る。
- 一方、機能性化学品に含まれるポリカーボネイトやポリウレタン等の含酸素化合物は、低エネルギーかつ、水素を用いらずに製造できるためCO2の利用先として着目される。
- CO2の原料利用化については各国の得意分野における機能性化学品の製造を中心に研究開発が進められている。

図表197：機能性化学品技術概要



連続精密生産（フロー法）

- 各段階で中間体の単離・精製操作を繰り返す従来のバッチ法と比較して、原材料を連続的に投入して生成物を得るフロー法は廃棄物が少なく、省エネなため環境負荷が低い。
- フロー法の基本的な技術は1900年代から存在していたが、機能性化学品の製造に必要な触媒の容易な分離等の課題に対する研究（不均一触媒の開発）等が進んだのは直近。

CO2の原料利用

- ポリウレタンやポリカーボネートの原料として一部をCO2で代替する技術が開発される。
- 実証プラントとしては旭化成が最大規模を有するが、中国企業の実証プラント数が最も多い。次いで米国企業の実証プラントと続く。

9. 機能性化学品
国内動向

タイプ5 研究段階 国際競争力：低

■ 方針・戦略

連続精密生成技術の多くは成熟しておらず、国を中心に技術開発が進められる。特に国内企業が強みを持つ、電子材料・自動車関連での応用を目指す。
CO2利用に関しては旭化成を筆頭に先進技術を保有しており、早期実用化を目指す。

図表198：機能性化学品国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">電子材料やリチウムイオン電池市場では市場規模が拡大した一方、参入企業数の増加により競争が激化。日本企業の世界シェアは低下傾向。 (半導体関連市場のCAGR：4.7%、日本企業のCAGR：1.7%)事業会社を中心に機能性化学品製造におけるCO2利用の特許取得や研究開発が活発に進められている。							
方針	<ul style="list-style-type: none">欧米諸国では自前主義にとらわれないイノベーションの促進がされており、国内でも製品ライフサイクルの短期化に向けたオープンイノベーションを促進する。NEDO未踏チャレンジ（2021年度予算48.9億）やNEDOの実証を通じ、機能性化学品におけるCO2利用を推進。水素を利用する必要がある汎用性プラスチックと比較し、早期実装を目指す。							
目標	<ul style="list-style-type: none">2030年時点で機能性化学品分野の市場規模 3.6兆円 (国内メーカーシェア10%想定)2025年時点で150時間連続運転可能な不均一触媒を用いて収率90%の反応を20種類以上の触媒で達成2025年時点で主生産量市場向け反応器モジュールを開発2030年までに、ポリカーボネート等で0.3kgCO2/kg※以上のCO2を原料化できる技術を実現。数百～数千トン／年スケールの実証で、既製品と同価格を目指す。(※目的物によって異なる。)							
	2021	2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050
	CO2を原料とする機能性化学品					既存品と同価格		

■ 技術開発状況

図表199：各技術の課題・特徴

連続精密生成	<ul style="list-style-type: none">分離回収が容易な不均一触媒を用いたフロー連続精密法において日本が強みを持つ。2015年にNatureに論文が掲載される。複雑な構造を有する様々な機能性化学品への応用に向けた開発が必要。比較的研究の初期にあり、今後も研究開発の促進が求められる。
CO2の原料利用	<ul style="list-style-type: none">有害物質（ホスゲン等）を用いない機能性化学品の製造はエネルギー消費が大きいいため製品価格の高さやCO2削減量に課題。

図表200：主要な事業者・機関

産業技術総合研究所 (連続精密生成)	旭化成 (CO2の原料利用)
NEDO実証を通じ、不均一触媒を活用した機能性化学品のフロー精密法の研究開発に取り組む。2020年8月には芳香族ハロゲン化合物の生成にも成功	ポリカーボネート樹脂製造におけるCO2利用のライセンスビジネスを展開 ポリウレタン原料製造のCO2利用も世界で初めて製造方法を開発、2023年商業化実証を目指す。製造規模も世界で最大を誇る
大阪市立大学・東北大学他 (CO2の原料利用)	東ソー (CO2の原料利用)
有害物質であるホスゲンの代替としてCO2を利用した他、酸化セリウム触媒を用いることで高収率でポリカーボネートジールの生成に成功	CO2とケイ素を触媒とし、ポリカーボネイト等の原料となるジエチルカーボネートの生成にラポレベルで成功

出所）経済産業省、NEDO,各企業プレスリリースより

国際動向

■ 各国動向

図表201：政策・方針

機能性化学品や、各技術に関する言及は少ないが、産業全体の脱炭素化に向けて政府が資金提供する他、事業会社自身による研究が進む。
連続精密生成では特に医薬品分野における研究開発が活発。

米国

- 化学業界全般の環境負荷低減に向けEPA（環境保護庁）を中心にグリーンケミストリーの促進が進められている。
- 連続精密生成やCO₂の原料化に特化した政策はないものの、資金供給の対象にこれらの技術を含む他、事業会社と大学の連携による独自の研究開発も盛ん。

EU

- 化学産業のCO₂削減に向けて2020年10月に“Chemicals Strategy for Sustainability”を策定。安全性と持続性を軸に化学産業の幅広いイノベーションを促進する。
- 戦略上に連続精密生成やCO₂の原料化に関する記述はないが、SPIREやHorizon2020等を通じて研究開発を支援する。

英国

- 2015年に化学産業の脱炭素アクションプラン“Chemicals Sector: industrial decarbonization and energy efficiency action plan”を策定。TRLとプロジェクト規模に応じてアクションプランを10個に分類。
- エネルギー効率化や排熱回収といった成熟した技術を促進しつつ、CCUやクラスター形成や連携による革新的技術の促進を含む。
- 連続精密生成については事業会社（CMAC等）を中心に企業間連携が進む。また、連続精密生成、CO₂の原料化についてはHorizon2020等を通じて欧州間で研究開発プロジェクトに参画。

ドイツ

- 産業全体の脱炭素に向けては水素等の活用によるエネルギー転換に関するプロジェクトが多く実施されている。
- 機能性化学品の分野ではBASFやCovestro、Fraunhoferが中心となり新たな技術開発を積極的に実施。大学との連携も進む。
- 上記研究の主な資金源はドイツ連邦教育・研究省（BMBF）や連邦経済エネルギー省（BMWi）が中心に資金提供。

図表202：主要な事業者・機関

BASF

連続フロー製造技術に関する特許で世界2位。機能性化学品における市場占有率も高い。2020年にはImperial College Londonと連携し、機能性化学品の製造等に対応した少量生産の手法開発に挑む
既に合成燃料へのCO₂利用に取り組んでおり、今後機能性化学品へのCO₂利用に関する研究開発に取り組む

CORNING

コスト効率の向上、将来的なスケールアップに向けてマイクロリアクター、Advanced-flow reactorsを開発。既にスペインの製薬会社等で導入されている

大学

マサチューセッツ工科大学、ワシントン大学等様々な大学で効率化や実用化に向けた研究が進められている
マサチューセッツ工科大学ではNovartisと共同で医薬品製造における連続製造の研究を行う

Covestro

ポリウレタンの製造に際し、従来利用されていた油の代わりに、二酸化炭素を20%注入して製造する技術を開発
2019年に研究開発を終了し、今後実装に向けた取組を行う

国内動向 | 技術の定性評価

図表203：機能性化学品国内技術の定性評価

技術	強み	弱み	
連続精密生成	市場 <ul style="list-style-type: none">機能性化学品分野の内、電子材料・自動車分野の日本企業のシェアは高い。機能性化学品の全体に占める割合は低いものの、今後も成長が期待される。	環境 <ul style="list-style-type: none">化学企業による選択と集中が行われており、より付加価値の高い機能性化学品への特化に向けて大規模なM&Aを実施している企業が多く、企業の収益率が向上。	技術進歩
	技術 <ul style="list-style-type: none">不均一触媒に関する初期研究は日本が優位性を持つ。 (東大の研究が2015年Natureに掲載)	技術 <ul style="list-style-type: none">機能性化学品の大部分を占める製薬における連続精密生成の開発を欧米が活発に実施。	
CO2の原料利用	技術 <ul style="list-style-type: none">大規模な製造能力を有する技術をはじめライセンスビジネスを展開する等機能性化学品へのCO2利用で高い技術力。 (旭化成等)	技術 <ul style="list-style-type: none">中国をはじめとする国でCO2利用に関する実証プラントや技術開発が進む。	海外市場獲得に向けた連携
	市場 <ul style="list-style-type: none">化学産業の脱炭素化の手法として、国内、国外で需要が存在する。特に機能性化学品製造へのCO2利用は水素を要しないため、国内でも早期実装が見込まれる。*	環境 <ul style="list-style-type: none">各国政府が補助金やカーボンプライシング等市場発達のインセンティブを付与する中、国内の法規制は整備されておらず、排出削減のインセンティブも低い	

※ただし、消費エネルギーの多さに伴う排出量やコストの問題がある

9. 機能性化学品 想定する連携

図表204：機能性化学品において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
連続精密生成	技術進歩	日本が得意とする機能性化学品分野（電子材料等）は海外で活発に生産されている分野（製薬）と異なるため、企業間連携は想定しにくい。一方連続精密生成は技術開発の段階にあるため、日本の強みを活かしつつ、技術進歩を目的に海外の研究機関との連携によるイノベーションの促進が検討される。	<ul style="list-style-type: none"> 研究機関 	<ul style="list-style-type: none"> － （大学）
CO2の利用	海外市場獲得に向けた連携	海外では回収したCO2の利用方法として機能性化学品や合成燃料への利用が期待されている。日本企業が持つCO2利用の技術力をDACプラントの実証を進める事業会社や化学事業者を提供することで海外市場進出が見込まれる。	<ul style="list-style-type: none"> 企業 （CO2利用に関する研究を行う研究機関） 	<ul style="list-style-type: none"> DAC等の実証企業 化学関連の事業会社

USA Novomer Inc.

図表205： Novomer Inc.のプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Novomer Inc.
プロジェクト名	- (Novomer社のConverge®と呼ばれる技術によるポリプロピレンカーボネート（PPC）ポリオール類の製造）
期間	<ul style="list-style-type: none"> PPCポリオール類を2014年に発売
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Novomer Inc.
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実装 技術 - ポリウレタン配合物に使用するためのポリプロピレンカーボネートを製造する際の原料としてのCO2利用 技術仕様 - 製造されるポリオールは、CO2が重量の約50%に相当する原料として製造される。従来のポリエーテルポリオールは、100%プロピレンオキシドである。Novomer社は、50%までのプロピレンオキシドを費用効果の高いCO2で置き換えた。Novomer社が採用した技術を開発したのはCornell University

図表206： Novomer Inc.プロジェクトの主な特徴

背景

- Novomer社は、変換性があり機能的でカーボン有用性の高い材料に対する市場のニーズに対応する化学変換技術のパイオニアである。Novomer社の投資基盤には、戦略投資家であるSaudi Aramco、SABIC、DSM、金融投資家であるFlagship Ventures、OVP Ventures、Physic Venturesが含まれる
- 生分解性素材の開発、生産に注力している次世代バイオプラスチックカンパニーのDanimer Scientific社は、2021年7月の発表に基づき、Novomer社を買収する予定

プロジェクト情報

- 利点 - 1) 廃棄物の温室効果ガス（CO2）の永続的な固定化と大気への放出の防止 2) ポリオールは高性能で、かつ発泡体からコーティングまでの多用途に使用することができる 3) 回収したCO2は従来の石油由来の原料よりも安価であり、製造コストの削減につながる 4) ポリオールを用いた製造は、従来のポリエーテル、ポリエステル、およびポリカーボネートポリオールよりも熱量が40～50%低い
- 課題 - 1) 廃CO2は不活性。原料としてのCO2の、大規模用途のための費用効率が高い方法での使用が課題 2) 市場認知と人々への新しい素材の普及が課題
- ポリオールが性能、コストおよび持続可能性の特殊な統合であるため、Converge®として商標化した



USA Arizona State University

図表207： Arizona State Universityのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Arizona State University (ASU) とThe University of Texas at Austin, Northern Arizona Universityのパートナーシップ
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> Mining Air for Fuels and Fine Chemicals
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2019年-2022年
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 1.5百万USD
資金源	<ul style="list-style-type: none"> ARPA-E (Advanced Research Projects Agency-Energy) と米エネルギー省 (DOE) による Open 2018 program
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：研究開発 技術 - ファインケミカルおよび燃料製造原料としてのCO2利用 利点 - 大気中に無制限に存在するCO2を資源として、また費用面からも効果的に利用することで、(現在のボトル入りまたは点源のCO2では実現不可能な) 大規模な燃料、エネルギー貯蔵、およびファインケミカル市場の市場機会を大幅に拡大する

図表208： Arizona State Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- CO2回収の最大のハードルは、大量の電力が必要になることである。現行の直接空気回収 (DAC) では、主に捕獲媒体の再生と空気循環のために、二酸化炭素1トンあたり約2,445kwhを消費し、DACコストの見積もりは、1トンあたり92～232ドルの範囲となっている。DACの費用効果を高く維持するためには、燃料生産の費用は1トンあたり75ドル未満でなければならない
- ARPA-E Program - ARPA-Eプロジェクトは、米国の経済繁栄、国家安全保障、環境福祉を抜本的に改善する可能性がある。ARPA-Eは、アメリカのエネルギー研究者に対する資金提供、技術支援、市場準備を行う。民間投資としては時期尚早ではあるが、潜在力が高く、インパクトの強いエネルギー技術の開発プログラムである

プロジェクト情報

- 詳細 - 研究チームは、周辺の大気中から低圧の二酸化炭素を捕捉するための新規材料を用いた新しいDACコンセプトを実証する。このプロセスでは、分布するCO2排出を捕捉し、エネルギー密度の高い燃料、燃料原料、またはファインケミカル等、広範囲の素材の中に隔離、もしくは変換することができる
- 水の蒸発を利用したCO2の回収は、排出量を削減し、炭素回収プロセス全体のエネルギー効率を向上させる
- プロジェクトにより、大気中のCO2による低コストDAC技術を開発する

US Novartis International AG

図表209： Novartis International AGのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Novartis International AG、MIT
プロジェクト名	- (Novartis-MIT Center for Continuous Manufacturing – 低分子医薬品の連続製造を目指した長期的な研究協力)
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2007年に10年間のパートナーシップとしてスタート (現在はCONTINUUS Pharmaceuticals社として独立)
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 65百万USドル
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Novartis
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実装 技術 – 低分子医薬品の継続製造 特徴 – 連続製造プロセスは、全製造工程を1つの場所での1つの工程に統合する 連続フロー製造のメリット - 1)連続操業による開発・製造スピードの短縮 2)少量を大量同時加工するのではなく、連続加工により品質管理を強化 3)より小型の装置を使用することでのコストダウン 4)工程中断、中間保管ニーズ、材料搬送をなくすことでカーボンフットプリントを削減

図表210： Novartis International AGプロジェクトの主な特徴

背景

- 現在の医薬品製造であるバッチ法は、セグメント化され非効率で、製造過程が多大な時間と資源、財政投資を必要とし、またそれによるより高いカーボンフットプリントを生み出している
- Novartis社は、患者に迅速かつ効率的に治療を提供する必要性とこれらのニーズを満たすための現在の製造プロセスの限界を認識しており、連続製造による医薬品開発および製造プロセスの改革を目指している

プロジェクト情報

- パイロット試験 - 2011年にMITでパイロットラインが設置され、川上と川下の両コンポーネントが1つの連続プロセスに統合された。チームは200日間のバッチ法の工程をわずか2日間に短縮することができ、カーボンフットプリントの90%までの削減とコストの30～50%の削減、環境負荷の削減、および品質改善という追加のメリットを得ることもできた
- Continuus Pharmaceuticals社はNovartis-MITの共同研究から独立。同社は統合された連続製造の利点をより広範な製薬産業にもたらし、低分子製造を改革することを目指す

Germany Covestro AG



図表211：Covestro AGのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Covestro AG（ドイツのポリウレタン、ポリカーボネート原料製造会社）
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> Dream Resource Project – 建物用硬質ポリウレタンフォーム断熱ボード
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2016年-2019年に研究開発と実証を行い、現在は実装段階
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ連邦教育研究省（BMBF）の研究開発プロジェクト
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実装 技術 - CO₂を原料としたポリウレタンの製造 参画 - PSS Polymer Standards Service, Puren and BYK Additives & Instruments, RWTH Aachen UniversityおよびBerlin University of Technologyによるコンソーシアム 特徴 - 硬質ポリウレタンフォーム中の油の代わりに、温室効果ガスである二酸化炭素を20%使用する。この技術は、気候関連建設業への貴重な第一歩と見なされている

図表212：Covestro AGプロジェクトの主な特徴

背景

- Covestro社による別のプロセスは既に実施段階にあるもので、独自のZn触媒を使用したCO₂およびプロピレンオキシドベースの軟質ポリウレタンフォーム用のポリオールを製造すること。2016年にドイツでこの技術の生産工場を委託した
- 新たな軟質ポリウレタンフォームは、マットレスおよび布張り家具向けに導入された。プラントは年間5000トンの生産能力で、Cardyon®ポリマー製造ラインは従来のポリウレタンに比べ製造コストの削減を可能にした

プロジェクト情報

- Dream Resource Projectでは、400kgを超えるCO₂ベースのポリオールが、次工程の処理のためにパートナー企業のPuren社に届けられた。CO₂ベースの硬質発砲ポリオールで作られた初期の硬質フォーム断熱ボードは規格に準拠しており、主要な技術仕様において市場ニーズにすでに符合するものとなっている

Germany BASF

図表213： BASFのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> BASF、University of Heidelberg
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> (CO₂を利用したアクリル酸ナトリウムの製造)
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2006年から研究を開始、現在は実証段階
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none"> BASFとUniversity of Heidelbergの官民パートナーシップ
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実証 技術 - 高吸水性樹脂を製造するための出発原料であるアクリル酸ナトリウムの製造原料としてのCO₂利用 利点 - 現在のプロピレンベースの高吸水性樹脂の製造方法と比べ、新たなプロセスで、より規模の大きなプロセスでも安定しエネルギー的に有利なものであることが証明されれば、CO₂が化石燃料の約30%に取って代わることとなる。BASF社は、この製造プロセスのための触媒を特定した

図表214： BASFプロジェクトの主な特徴

背景

- BASF社の排出削減へのコミットメント - 世界最大の総合化学メーカーの一つとして、2030年までに化学物質の生産量を倍増させる一方、温室効果ガスの排出を50%削減することを約束した。また、2030年までに製品1トン当たりのCO₂排出量を3分の1に削減することを目指してきた。現在、研究項目には3,000のプロジェクトがあり、その多くはCO₂排出量の削減を目指すものとなっている

プロジェクト情報

- このプロジェクトを通じて、BASF社は、エチレンとCO₂からアクリル酸ナトリウムを生成する際の化学原料としてCO₂を使用する、新しいアプローチを提示した。アクリル酸ナトリウムは、おむつ及び他の衛生製品に広く使用されている高吸水性樹脂の重要な出発材料である
- 2006年から、BASF社が支援するUniversity of HeidelbergのCatalysis Research Laboratory (CaRLa) の研究者がこれに取り組んでおり、この反応の触媒サイクルを初めて完結させることに成功した。その後BASF社の専門家が本プロセスを産業規模に拡大するうえで重要な前進を遂げさせ、ミニプラントの実験室規模で実行できることを実証した



Germany Fraunhofer ICT-IMM

図表215： Fraunhofer ICT-IMMのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Fraunhofer ICT-IMM, Hansa Fine Chemicalsおよび Nanalysis Corporation
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">ファインケミカルの連続フロー製造
期間	<ul style="list-style-type: none">2014年に開始
投資額	<ul style="list-style-type: none">430,000ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">ドイツ連邦経済エネルギー省（BMWi）による中小企業のための中央イノベーション・プログラム（AIF/ZIM）と、カナダ・アルバータ州のGerman-Canadian Centre for Innovation and Research（GCCIR）が実施した、Alberta Ministry of Innovation and Advanced EducationのInternational Technology Partnership program
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - フッ素・蛍光体含有ファインケミカルの連続フロー製造目的 - フッ素および蛍光体含有ファインケミカル合成のオンラインプロセスモニタリングのための低磁場NMR分光計に基づく統合連続フロー分析法の開発と、それによるプロセス効率の増加およびカーボンフットプリントの減少

図表216： Fraunhofer ICT-IMMプロジェクトの主な特徴

背景

- フッ素および蛍光体含有ファインケミカルは、医薬品および農薬化合物にとって必須の構成要素である。NMR分光法のような非接触分析法と組み合わせた小反応器量での化学生成により、取り扱いの安全性を高め、実験作業員が有機リン酸塩にさらされる量を減らすことができる

プロジェクト情報

- プロジェクトにおける各パートナーの役割：
 - Fraunhofer ICT-IMM - 化学工学の専門知識を活用し、フッ素および蛍光体含有ファインケミカルの合成に適用される連続フローのベンチスケールのプラントを、統合NMRオンラインモニタリングと併せて設計
 - Hansa Fine Chemicals GmbH - 統合オンラインNMR分析をした連続フローのラボプラントを使用し、バッチ合成およびオフラインNMR分析と比較した詳細な性能評価をおこなう
 - Nanalysis Corporation - NMR技術に必要な知識を提供し、ベンチトップ型NMR分光計を連続フロー工程の条件に適合させる

EU & Germany Covestro Deutschland AG

図表217：Covestro Deutschland AGのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Covestro Deutschland AG
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> Carbon4PUR (産業廃ガス(CO/CO₂混合流)の、建築用断熱材である硬質ウレタンフォームおよび塗料用ポリウレタンプラスチック中間体への転用)
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2017年10月-2021年3月
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 欧州連合からの資金提供：776万5,000ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実証 技術 - ポリウレタン製造原料としてのCO₂利用 参画 - 欧州7カ国からの14のパートナーによるコンソーシアム。4つの産業パートナー、5つの大学、1つの研究機関、1つの産業団体、2つのサービスプロバイダ、およびGrand Port Maritime de Marseille-Fos

図表218：Covestro Deutschland AGプロジェクトの主な特徴

背景

- 産業主導の本学際的コンソーシアムは、EU Horizon 2020-SPIRE-8-2017「付加価値のある化学物質生産のための二酸化炭素の利用」の目標達成のため、製鋼所ガスで発生する炭素の付加価値化学品であるポリエステルポリオール生産のための、柔軟で新たな技術の開発と実証に焦点を当てている

プロジェクト情報

- COおよびCO₂は、代替的な、豊富で価値のある炭素源であり、適切な原料にもなりうる。プロジェクトではそれらの利用により温室効果ガスの排出を大幅に削減し、望ましくない気候変動の影響を減らすのに寄与する可能性を探る
- 産業主導の学際的なCarbon4PURコンソーシアムは、コストがかさむ物理的な分散を回避した製鉄所ガス混合物の直接化学変換に基づく新規プロセスを開発し実証する。またそれによりカーボンフットプリントの大幅な削減と金銭的節約に大いに貢献する



EU CARTIF Technology Center

図表219： CARTIF Technology Centerのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">CARTIF Technology Center
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">CO2SMOS (循環型バイオ産業におけるバイオCO2排出からの先進的な化学品生産)
期間	<ul style="list-style-type: none">2021年5月-2025年4月
投資額	<ul style="list-style-type: none">欧州連合からの資金提供：6.918百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実証技術 - ポリマー製造原料としてのCO2利用参画 - CARTIF Technology Centerが主導するCO2SMOSプロジェクトコンソーシアムは、国際パートナーである15の組織の幅広い専門知識と高い学際性を有し、今後4年間で一連の画期的でコスト競争力のあるCO2転換技術を開発する

図表220： CARTIF Technology Centerプロジェクトの主な特徴

背景

- CO2SMOSプロジェクトは、バイオプロセス（発酵など）から発生するCO2排出を、耐久性のあるポリマーや再生可能な生化学物質、生分解性素材といった様々な持続可能なバイオ製品に変換するためのソリューションを開発する。これらの化合物を用いることで、包装、コーティング、テキスタイル、および生物医学的用途のための材料など、よりグリーンな最終製品を製造することが可能となる

プロジェクト情報

- 異なるCO2SMOS技術における、技術的、経済的、環境的持続可能性の実証は、バイオ産業のCO2変換プロセスの統合プラットフォームの設計を可能にするだろう
- プラットフォーム設計により、炭素排出量ゼロまたはマイナスを達成し、化石ベースの化学物質を再生可能な資源（グリーンH2とバイオマス）とCO2を主原料とするより持続可能な化学物質に置き換えていく
- CO2SMOSの画期的な技術：1) 低エネルギー使用（<50kWh/kg CO2ベースの化学物質製造エネルギー）2) 低生産コスト（<1.75ユーロ/kg）3) 高製品製造収量（最大68%の収量目標）4) 卓越したGHG削減の可能性（原料使用1kgあたり最大10kgのCO2追加を回避）



EU Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

図表221： Teknologian tutkimuskeskus VTT Oyのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">• Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">• ICO2CHEM (工業用CO2を付加価値フィッシャー・トロプシュ化学品へ)
期間	<ul style="list-style-type: none">• 2017年10月-2022年3月
投資額	<ul style="list-style-type: none">• 欧州連合からの資金提供：5.948百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">• Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">• 技術ステージ：実証• 技術 - フィッシャー・トロプシュ化学品を製造するための供給原料としてのCO2利用• 参画 - ALTANA、Infraserv Hochst、Provadis、INERATEC、Politecnico Di Torinoを含む、VTT主導のコンソーシアム

図表222： Teknologian tutkimuskeskus VTT Oyプロジェクトの主な特徴

背景

- ICO2CHEMの研究は、廃CO2を再資源化するための解決策を提供する。新たなアプローチの主な成果は、CO2の緩和から廃棄物管理に至るまで、CO2の再転換・再利用を推進し、市場に即応した有価物にするという、あらゆるレベルでの環境負荷の低減に関するものとなっている

プロジェクト情報

- ICO2CHEMでは、ドイツのフランクフルトにあるIndustrial Park Höchstにコンテナ型化学パイロットプラントを設置し運転する。パイロットプラントは、バイオガス改良プラントからのCO2を工業用H2（塩素アルカリ電解槽プラントからの副産物）と共に、高価値のホワイトオイルおよび高分子量脂肪族ワックスに変換する
- パイロットプラントは、プロジェクトパートナーであるINERATEC社から提供される革新的な逆水性ガスシフト（RWGS）リアクターおよびフィッシャー・トロプシュ（FT）リアクターで構成される。RWGS工程は、H2を含むCO2を合成ガス混合物に変換し、FT反応工程は合成ガスを化学生成物に変換する

UK & EU Eindhoven University of Technology

図表223： Eindhoven University of Technologyのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Eindhoven University of Technology
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">ONE-FLOW (区画化されたグリーン溶媒「デジタル合成機械」内の「ONE-FLOW」における触媒カスケード反応 - 医薬品のためのエンドツーエンドのグリーンプロセス設計)
期間	<ul style="list-style-type: none">2017年1月-2021年6月
投資額	<ul style="list-style-type: none">欧州連合からの資金提供：3.896百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - フロー製造参画 - Graz University of Technology, Delft University of Technology, Bielefeld University, University of Lyon/ CNRS CPE Lyon, University of Cambridge, University of Hull, Microinnova Engineering GmbH

図表224： Eindhoven University of Technologyプロジェクトの主な特徴

背景

- ONE-FLOWは、複雑な機械を用いた化学品の多段階合成の「垂直階層」を、区画化されたフローリアクターシステムを用いた自己組織化する「水平階層」に変換する。ONE-FLOWは、たった1つのリアクター通路を有するバイオミメティックデジタルフローカスケード機械である
- 水平階層を管理しやすくする為には異なる連続反応間で直交性を高める必要があるが、それにあたり発明された触媒カスケードは大変有用である

プロジェクト情報

- ONE-FLOWは、全ての複数の反応をワンステップで実行するデジタルフローカスケードマシンの開発を全体的な目的としつつ、さらにその最先端技術を超えることを目指す
- ONE-FLOWが開発対象とするカスケード反応：1)「代謝経路」の4つの合成フロー反応ネットワーク 2)「シグナル伝達経路」の自動インテリジェンスで駆動される1つのフローカスケード 3) 1つのバイオヘテロ、2つのケモバイオ、1つの完全バイオからなる4つの触媒カスケード
- ONE-FLOWは4つの合成フロー反応ネットワーク「代謝経路」と自動インテリジェンスによって駆動される1つのフローカスケード「シグナル伝達経路」の開発により2020年度の医薬品トップリストのうち4つを製造した



EU Bio-On

図表225： Bio-Onのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Bio-On
プロジェクト名	- (大気から回収したCO2を利用したPHAバイオポリマーの製造、化石燃料不使用のエネルギーの製造)
期間	<ul style="list-style-type: none">2018年よりPHAを利用したバイオプラスチック製造を開始
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none">Bio-On およびパートナーのGruppo Hera
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - CO2 (PHA) を利用したバイオプラスチック製造パートナー - Bio-On, Gruppo Hera

図表226： Bio-Onプロジェクトの主な特徴

背景

- Bio-On社は開発された新しい技術を用いて、Bio-Onバイオプラスチック製造のために既に使用されているてん菜およびサトウキビ糖蜜、果物およびジャガイモ廃棄物、炭水化物、グリセロールおよび廃油に加えて、二酸化炭素をコストゼロの原料としたバイオプラスチック製造を行う
- CO2の使用による大気中の二酸化炭素削減に貢献する

プロジェクト情報

- 革新的な生産プロセスで使用する電力エネルギーは、太陽光発電システムによって生産されることになる。この太陽光発電システムは、直接的な発電とは別に、夜間電力のための貯蔵可能なエネルギーも24時間常時提供する
- バイオポリマー製造における持続可能な副産物の特定を目的とした第2の開発ラインも想定されている。Gruppo HeraによってPHA-CELと改称されたこのプロジェクトでは、切断と剪定されたセルロースを単純な糖に変換し、酵素処理後の発酵に使用できるようにする

高効率・低コストなパワーエレクトロニクス技術

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

10. 高効率・低コストなパワーエレクトロニクス技術

概要

市場規模（2050年）

・ 100,000億円

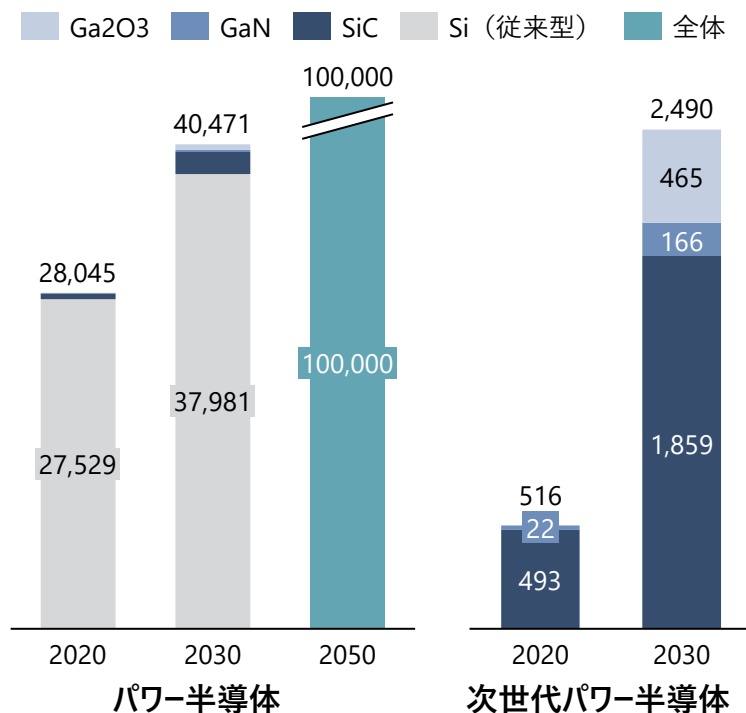
CO2削減ポテンシャル

・ 14億トン

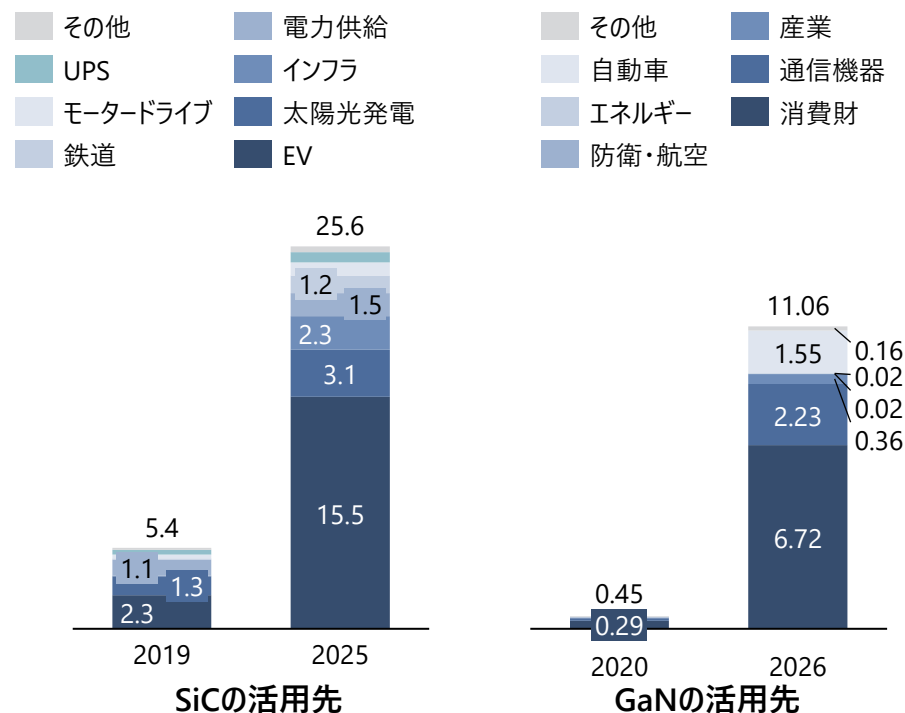
■ 市場概要

- IoTやDXが推進される中、デジタルインフラの基盤となる半導体の重要性は増している。
- 中でもパワー半導体※を含むパワーエレクトロニクスは省エネ化のコア技術であり、産業機器に加えて自動車、電力・鉄道、家電等の分野に利用されている。
- 2050年カーボンニュートラルの達成に向けて省エネに不可欠であり、そのためにパワー半導体の低コスト化や高効率化が重要。

図表227：パワー半導体市場予測（億円）



図表228：用途別パワーエレクトロニクス市場（億円）



※半導体の中でも、高い電圧、電流を扱うもの。正確な定義はないが、数十V以上の電圧を対象とする。

出所）経済産業省、Yole Developpement、NEDO等公開情報より

10. 高効率・低コストなパワーエレクトロニクス技術

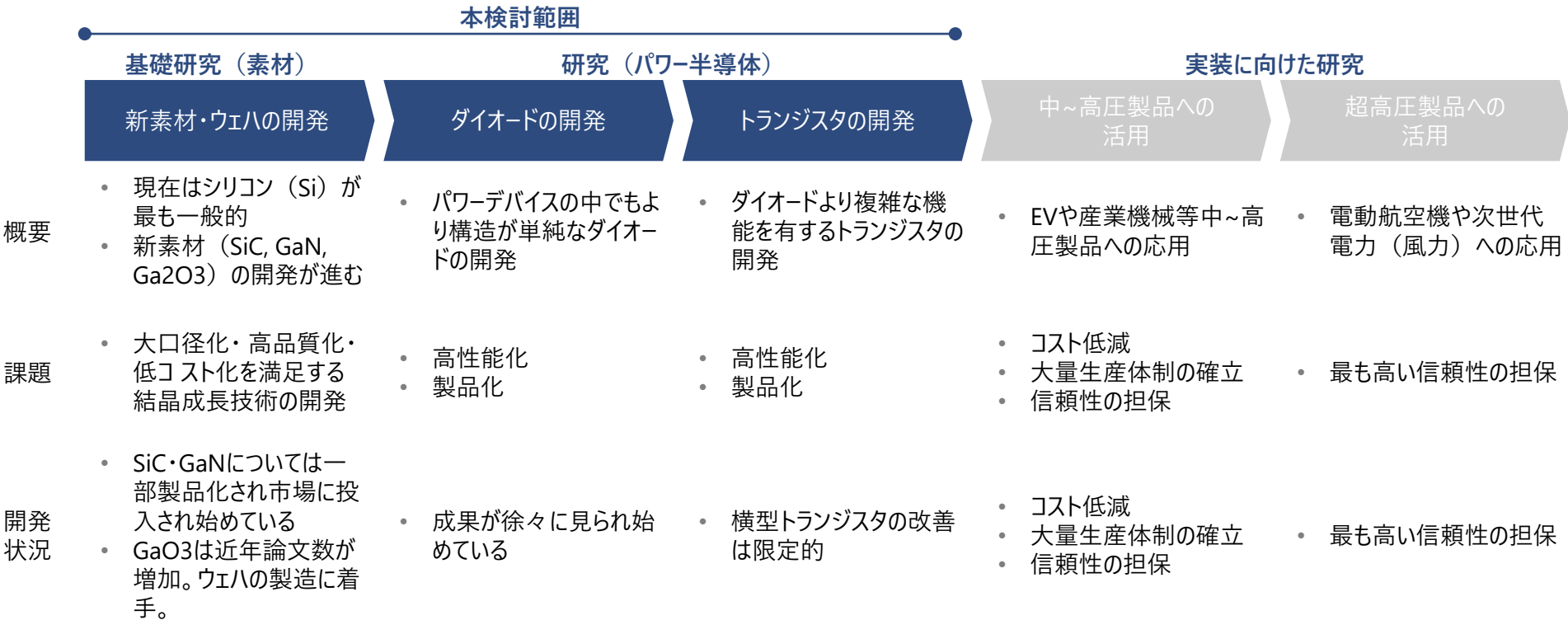
概要

■ 技術概要

【技術概要】

- ・ パワーエレクトロニクスはパワー半導体と電子部品によって成り立っており、これを活用することで電力損失を大幅に抑えることができる。
- ・ パワーエレクトロニクスの技術開発には製品への応用に向けた開発と素材の研究により高効率化を図る基礎研究の2つに大別される。
- ・ 素材により、適する製品分野が異なっており、基礎研究において効率化を図るとともに、製品への適用に向けたモジュールや機器回路の開発も重要。

図表229：パワー半導体の研究開発状況



出所） NEDO、JST、PowerAmerica等公開情報よりNRI作成

10. 高効率・低コストなパワーエレクトロニクス技術

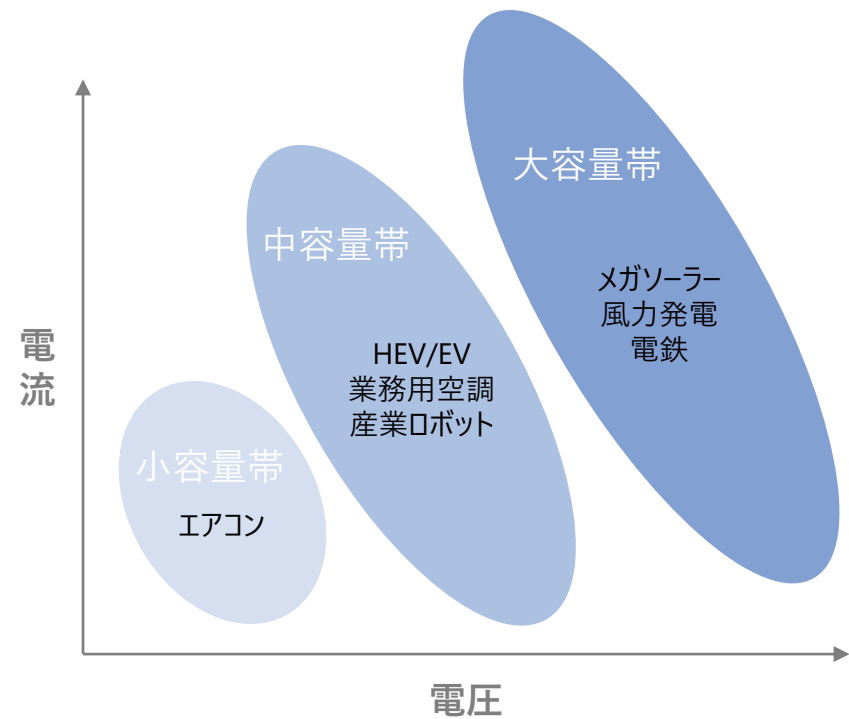
【参考】パワーデバイスの素材と領域区分

- パワーエレクトロニクスに使われる素材によって価格や適する電圧の領域が異なる。
- 特に既存のシリコンでは対応が難しい中容量から大容量の領域は脱炭素化への貢献が大きく、次世代素材の開発が重要となっている。

図表230：各素材の特徴

	シリコン	シリコン カーバイド	窒化 ガリウム	酸化 ガリウム
オン抵抗	×	○	○	◎
耐圧	×	○	○	◎
高速性	×	○	◎	△
熱伝導	○	◎	○	×
価格	◎	×	×	○
適した 領域	—	中容量	大容量	中容量 大容量

図表231：電流・電圧による領域の区分



出所) JST、富士電機等公開情報より

10. 高効率・低コストなパワーエレクトロニクス技術

国内動向

タイプ3

実証段階 国際競争力：高

方針・戦略

パワーエレクトロニクス普及のためには、高性能なデバイスの研究開発に加え低コスト化、信頼性向上、安定供給等の実装課題を解決していくことが求められている。
パワーエレクトロニクスのトータルシステム設計に取り組み社会実装につなげていく。

図表232：パワーエレクトロニクス国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">既存のシリコンについて高い世界シェアを誇るが、次世代パワー半導体の素材シェアでは米国が寡占状態で国際競争が激化。再エネ半導体実用化が競争力に直結する中、国内のパワー半導体は世界シェア29%。
方針	<ul style="list-style-type: none">省庁連携の下、国内外の大学・研究機関・企業との連携により次世代半導体素子、受動素子や周辺機器等の性能等の追求やモジュールの試作等を行い、企業による実用化研究開発につなげる。海外の次世代パワー半導体分野では、実証に向けた支援を通じたユースケースの開発促進が進む。国内でも開発対象の細分化やユーザー側との取り組みを通して実用化を推し進めていく。日本が強みを持つ、製造装置、素材のチョークポイント技術のさらなる強化に向けて海外ファウンドリとの連携を図る。
目標	<ul style="list-style-type: none">パワーエレクトロニクスの新規用途等に向けたデバイスの2050年までの普及拡大。次世代パワー半導体の2030年までの50%以上の損失低減と現行のSi並のコスト実現により、世界市場シェア4割（1.7 兆円）を獲得することを目指す。

2021	2022	2023	2024	2025	2026~
					次世代パワー半導体デバイス製造技術開発
					デバイス試作およびPoC
					次世代パワー半導体に用いるウエハ技術開発
					8インチ・低欠損に向けたSiC結晶成長技術

技術開発状況

図表233：技術の課題・特徴

材料の次々世代技術	<ul style="list-style-type: none">SiCやGaNは中国を中心に大部分を外国から輸入日本が先駆的に取り組んでおり、技術的な優位性を持つが、SiCをはじめとする次世代材料はアメリカの寡占状態
製造	<ul style="list-style-type: none">高圧向けではあるが、コスト低下と品質の担保が課題パワエレ回路システムやパワーデバイス、受動素子等の最適開発が不十分
その他	<ul style="list-style-type: none">デバイス化に向けた大学講座の少なさ等、当該分野の研究人材が不足

図表234：主要な事業者・機関

日本製鋼所・三菱ケミカル
(GaN基板製造)

世界最大級のGaN基板製造実証設備で4インチGaN結晶の成長を確認。

ノバルクリスタルテクノロジー
(β-Ga2O3パワーデバイス)

高耐圧の酸化ガリウムショットキーバリアダイオードとその量産プロセスを開発。

JST

(GaNの低コスト結晶製造装置)

東京農工大学が特許を持つ技術をもとに高温で結晶を成長させる装置を開発。品質とコストの面で優れたデバイスの開発につながる。

NICT・東京農工大

(Ga2O3半導体のコスト低下)

Ga2O3デバイスの低コスト製造に向けたイオン注入ドーピング技術を用いた縦型酸化ガリウムパワー半導体開発を世界で初めて実証。

佐賀大学

(ダイヤモンド半導体デバイス)

ダイヤモンドを用いて世界最高の電力性能を持つ半導体デバイスの製造に成功。大口径のダイヤモンドウエハ結晶の製造技術による。

国際動向

■ 各国動向

図表235：政策・方針

台頭する中国や台湾の半導体製造技術に対抗するため米国・欧州では半導体サプライチェーンの構築に向けて取組が行われている。

パワーエレクトロニクスの分野は経済的安全保障にも関わるため政府主導で動きが活発。特筆すべき地域はなく、全体として産業構築に向けて動いている。

米国

- Ultrawide bandgap（UWBG）と呼ばれる、SiCやGaNよりもバンドギャップの大きな半導体材料（Ga₂O₃、ダイヤモンド、AlN、立方晶BNなど）に対する注目が高まっており、研究ファンドが拡大し研究者人口も増加している。
- CHIPS FUNDを設立し、半導体の国内製造やR&Dに対して5年間で520億ドルを支出。
- 2014年頃からSWITCHESやDOEからも出資されており、それぞれアプリケーションを見据えたSiC製造プロセスやGaN基盤に対する資金援助が実施された。

EU

- アジア依存を脱却、欧州半導体エコシステムの構築を目指してEuropean Chips Actの制定が検討される。具体的なアクションプランはないがサプライチェーン構築による世界市場の20%獲得を目指す。
- 特に欧州が強みを持つ研究機関の取組をベースにする。
- 全体ではデジタル移行として半導体等に1345億€を投資する。

英国

- 2019年にElectech Roadmapを策定。また、Driving The Electric Revolutionの一環として半導体の活用を促進を図る。
- Horizon Europeとも連携しつつ、産業の発展を目的とする。

ドイツ

- 研究開発としてHorizon Europeの枠組みを利用しつつ、自国の支援策としてMicroelectronics Framework Programmeを実施。後者はより産業界を中心としてRD&Dに注視。
- Important Project of Common European Interest on Microelectronicsを英国、フランス、オーストリアと立ち上げ、Infineon等トップ企業に対して総額10億€以上を出資。

図表236：主要な事業者・機関

Infineon

- ディスクリートパワー半導体で世界トップシェアを誇る。熱効率の良いパワートランジスタ（MOSFETやIGBT）をはじめコスト的に有利な300mmウエハ製造ラインを持つなどその製品の幅広さに強みを持つ。
- 欧州の共同プロジェクトであるPower2Powerに参画。欧州委員会の資金援助を受け、シリコン型のより高効率で信頼性の高い半導体や薄型の革新的なウエハの製造に取組む。

STMicroelectronics

- コスト効率の向上、将来的なスケールアップに向けてマイクロリアクター、Advanced-flow reactorsを開発。既にスペインの製薬会社等で導入されている。

欧州研究機関・大学

- 英国ではバーミンガム大学、スワンジー大学らがデジタル関連の革新的技術開発に取組むThe Driving Electric Revolution Industrialisation Centres Projectのもとウエハ・デバイス関連の技術開発等を行う。

AKHAN Semiconductor

- ダイヤモンドを用いた半導体の製造で先進的な企業。米国エネルギー省傘下のアルゴンヌ国立研究所とはライセンス契約を締結。

Wolfspeed

- SiC市場で圧倒的なシェアを誇る米国企業。

国内動向 | 技術の定性評価

- 国内では既に半導体戦略が策定され、ロジック半導体の生産拠点を国内に持ち研究開発を促進する計画が出されている。
- 新素材については国内技術開発で強みを持っており、海外連携の優先順位はビジネス化、サプライチェーンの下流に向けた製造部分等日本が先行しきれていない部分での研究開発に係る取組を想定。

図表237：パワーエレクトロニクス国内技術の定性評価

技術	強み	弱み	
新素材・ ウェハ開発	市場 <ul style="list-style-type: none">省エネ需要が高まる中、次世代パワーエレクトロニクス市場は拡大が予測される	市場 <ul style="list-style-type: none">既に次世代素材のSiCウェハでは米国企業（Wolfspeed）が市場の62%占めるユーザー企業が主に海外に位置しており、生産拠点も徐々に国外に移転	技術進歩
	技術 <ul style="list-style-type: none">GaNやGa2O3の結晶生成やデバイス製造の基礎研究等素材産業に強みを持つ（東京農工大）	環境 <ul style="list-style-type: none">ドイツ企業等会議企業では次世代パワー半導体素材に注力することを表明し研究開発に多額資金を投じる研究者の不足	
製造	市場 <ul style="list-style-type: none">省エネ需要が高まる中、次世代パワーエレクトロニクス市場は拡大が予測される	技術 <ul style="list-style-type: none">要素技術をまとめ上げて最終的な製品につなげる技術力が課題	社会実装を 見据えた技術進歩
	技術 <ul style="list-style-type: none">製造装置に強みをもつ	環境 <ul style="list-style-type: none">海外では水平分離が実現している国内にはファウンダリが不足研究者の不足	
	環境 <ul style="list-style-type: none">老朽化してるものの世界で最も半導体工場の数が多い		

想定する連携

図表238：パワーエレクトロニクスにおいて想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
新素材・ ウェハ開発	技術進歩	日本は次世代と呼ばれるさらに先のダイヤモンドを用いた半導体の開発を含めて成果を上げている。人材を含めたリソースを持つ海外研究機関との研究開発が検討される	<ul style="list-style-type: none"> 研究機関 企業 	<ul style="list-style-type: none"> 研究機関
製造	社会実装を見据えた 技術進歩	将来的な競争力の獲得に向けてサプライチェーンの下流にいる企業のニーズをとらえた開発が重要。特に日本はパッケージ化や各要素をまとめ上げる点が弱く、技術力を提供しつつ、海外企業やまとめ上げに強みをもつ企業と連携	<ul style="list-style-type: none"> 研究機関 企業 (特に要素技術開発を行っている企業) 	<ul style="list-style-type: none"> 製造能力やパッケージ化の能力が高い企業



EU Robert Bosch GmbH

図表239： Robert Bosch GmbHのプロジェクト概要

組織	Robert Bosch GmbH
プロジェクト名	TRANSFORM (ヨーロッパのSiCバリューチェーンのグリーン化)
期間	2021年5月-2024年4月
投資額	総額：89.274百万ユーロ (うちEU出資 20.738百万ユーロ)
資金源	・ Horizon 2020 (ESCEL)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実証技術 - シリコンカーバイド (SiC) を用いたパワー半導体のサプライチェーン構築参画 - ヨーロッパ9カ国の企業や大学を含む35の組織によるコンソーシアム

図表240： Robert Bosch GmbHプロジェクトの主な特徴

背景

- EUが資金提供するTRANSFORMプロジェクトは、シリコンカーバイド (SiC) 素材のパワー半導体を用いたパワーエレクトロニクスのための、完全で競争力の高いヨーロッパサプライチェーンの構築を行う
- SiCのパワーエレクトロニクスは、現行のシリコン素材の半導体よりもかなり効率的な電気エネルギー利用の可能性を持っている。TRANSFORMはSiCの普及という現状の緊急ニーズに対処する一方、その野心的な目標は戦略的で技術的な性質を備えたものとなっている

プロジェクト情報

目的

- SiC技術の生産型装置の開発
- SiCの組立および相互接続技術の開発と、物理的調査およびデジタルツインによる性能、信頼性、コストの最適化
- エネルギー効率を高め、最適なアプリケーションドメインの総所有コスト (TCO) を削減するため、SiCベースのパワーエレクトロニクスシステムの設計とアーキテクチャを最適化
- デモンストレーターによって、異なる用途領域におけるヨーロッパSiC技術の広範な適用可能性を実証



EU STMicroelectronics

図表241： STMicroelectronicsのプロジェクト概要

組織	STMicroelectronics
プロジェクト名	- (Renault GroupとSTMicroelectronicsがパワーエレクトロニクスの戦略的提携を開始)
期間	2026年から生産予定の半導体対象、2030年まで
投資額	-
資金源	・ Renault Group & STMicroelectronics
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">・ 技術ステージ：実証・ 技術 - 次世代半導体材料（SiCデバイス、GaNトランジスタ）・ パートナー - Renault & STMicroelectronics

図表242： STMicroelectronicsプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ Renault GroupとSTMicroelectronics社が戦略的提携を発表。STMicroelectronics社は、電気自動車（EV）やハイブリッド自動車のパワーエレクトロニクスシステムのための製品および関連パッケージソリューションの設計、開発、製造、供給においてRenault Groupと協同する

プロジェクト情報

- ・ STMicroelectronics社のワイドバンドギャップ半導体技術と製品によって、Renault Groupの電気自動車およびハイブリッド車向けアプリケーションの電力性能を改善することを目的としている
- ・ 両社は、SiCデバイス、GaNトランジスタ、および関連するパッケージやモジュールへのRenault Groupの技術ニーズに基づき、小型・高効率のモジュール型コンポーネントを共同開発する予定（期間は2026年-2030年）
- ・ Renault Groupにとって、本プロジェクトにより生産上の主要コンポーネントの将来の供給安定性の確保と、無駄なエネルギーの45％の削減、e-パワートレインの30％のコスト削減が可能になる。一方、本プロジェクトはヨーロッパでの2040年までのカーボンニュートラルを達成する目標にも沿っている



EU Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi Scarl

図表243： Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi
のプロジェクト概要

組織	Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi Scarl
プロジェクト名	GaN4AP - GaN for Advanced Power Applications
期間	2021年6月-2024年5月
投資額	総予算/支出：64.021百万ユーロ (うちEU出資 15.320百万ユーロ)
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020 (ECSEL)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実証技術 - GaNベースのパワーエレクトロニクス参画 - ヨーロッパ6カ国からの41の組織によるコンソーシアム

図表244： Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi
プロジェクトの主な特徴

背景

- GaN（窒化ガリウム）ベースを採用した新しいデバイス技術と革新的な電源回路の開発は、EU産業の世界的な競争力のための重要な要素。
GaN4APは、欧州のすべての電力変換システムにおいて、GaNベースのエレクトロニクスをアクティブデバイスの主要技術の1つとする
- GaNエレクトロニクスの普及は、欧州委員会のエネルギー効率指令（EED）に沿った目的であり、エネルギー損失ゼロに近いパワーエレクトロニクスシステムの開発を可能にするであろう

プロジェクト情報

目的

- 要求されている99%の電力変換効率を達成できる、新しいコンセプトの高周波パッケージで入手可能な、最先端のGaNベース高電子移動度トランジスタ（HEMT）に基づく、高度なアーキテクチャと回路トポロジーによる電力変換と管理のための革新的なパワーエレクトロニクスシステムの開発
- 革新的な材料、窒化アルミニウムスカンジウム（AlScN）の開発により、高効率のパワートランジスタに優れた物理的特性を与え、それによる既存のトランジスタよりもはるかに高い電流（2倍）と電力密度（2倍）の新しいHEMTデバイスアーキテクチャを製作
- 最大1200Vの安全な電力スイッチングのための縦型p-GaN反転チャネルを備えた、MOSFET（金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ）アーキテクチャ上の、新世代のGaNベースの縦型パワーデバイスの開発
- システムインパッケージ（SiP）とモノリシック分散に導入する、革新的な統合GaNソリューション（STi2GaN）の開発により、新しいE-Mobility電力変換器の設計を可能にする

EU & Germany Infineon Technologies Dresden GmbH & Co. KG

図表245： Infineon Technologies Dresden GmbH & Co. KG
のプロジェクト概要

組織	Infineon Technologies Dresden GmbH & Co. KG
プロジェクト名	Power2Power (モビリティ、産業、グリッドにおける脱炭素化のための次世代シリコンベースのパワーエレクトロニクス)
期間	2019年6月-2022年5月
投資額	総予算/支出：74.257百万ユーロ (うちEU出資 16.917百万ユーロ)
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020 (ECSEL)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - 次世代半導体材料 (シリコンベース)参画 - ヨーロッパ8カ国からの43の組織によるコンソーシアム

図表246： Infineon Technologies Dresden GmbH & Co. KG
プロジェクトの主な特徴

背景

- 世界のエネルギー需要は絶えず増大しており、炭素排出削減のためには再生可能物の使用量を増やす必要がある。エネルギー源からグリッドを経由しエネルギーが使用されるまでのあらゆるタイプのエネルギー変換にパワー半導体が必要とされるため、効率的なパワー半導体の需要が高まっている
- IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) ディスクリートとIGBTモジュールの市場は毎年約15%拡大している。IGBTの最も競争力のある技術は、300ミリシリコンウェハをベースにしたものである

プロジェクト情報

目的

- 高電圧のシリコンベースのIGBTに関する技術的フロンティアの新たな次元への推進：IGBTの電流密度の増加と堅牢性、および信頼性の向上
- より高いエネルギー効率、より高い電力密度、およびその他の特性を併せ持つ、多くの電力アプリケーションシステムの提示：モビリティ、産業、およびグリッドでの使用向け
- Power2Powerのパートナーであるバリューチェーン (ウェハ、半導体、パッケージ、システム、およびアプリケーションの製造業者) とともに、将来に適した革新的なパワーエレクトロニクス開発のための、高度なインダストリー4.0の側面を備えた汎ヨーロッパパイロットラインの確立
- プロジェクトは、ヨーロッパでのウェハ基板、ウェハ処理、モジュール、並びにアセンブリ及びパッケージ製造の大規模生産に活用される



UK Swansea University

図表247： Swansea Universityのプロジェクト概要

組織	Swansea University
プロジェクト名	CISM (The Centre for Integrative Semiconductor Materials (CISM) の設立およびSiCパワー半導体デバイスの製造)
期間	-
投資額	イギリス政府の資金提供 (SOCRATES Project) : 4.8百万ポンド
資金源	<ul style="list-style-type: none">Industrial Strategy Challenge Fundの一部であるDER - Driving the Electric Revolution Fund (DER助成金総額 28.5百万ポンド)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - 次世代半導体材料 (SiC)参画 - Swansea University、Newport Wafer Fab、IQE、SPTSおよびその他 9 パートナー

図表248： Swansea Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- The Centre for Integrative Semiconductor Materials (CISM) は、Swansea Universityのベイキャンパスを拠点とする、半導体や先端素材プラットフォームを集めた、新技術や商品を研究・開発するためのリサーチ・イノベーション施設を含む新しいイニシアチブ
- CISMは、イギリスのカーボン排出量ネットゼロを達成するための長期的で持続可能な成長を実現する国家能力のコーディネートおよび構築を行う
- CISMプロジェクトにはこの地域のCS Connectedと呼ばれる半導体製造コミュニティに属する半導体製造業者をはじめとする複数のパートナーも含まれる

プロジェクト情報

- Swansea UniversityとNewport Wafer Fabの設備を使用した、ワイドバンドギャップパワーエレクトロニクス部品の産業パイロットラインの創出
- 自動車、航空宇宙、医療、エネルギーなどの分野向けの、効率的なパワーエレクトロニクスの製造に使用する6インチおよび8インチのSiC基板の製造
- CISMは、高度なシリコンや最先端の化合物半導体、および2D材料、有機物、ペロブスカイトなどの次世代の「ソフト半導体」の処理が可能な唯一の製造工場となる
- サウスウェールズの半導体コミュニティの成長により、今後5年間に地域全体で高い技術を必要とする3,000から5,000人の雇用機会の創出が予想される



Germany Infineon Technologies AG

図表249： Infineon Technologies AGのプロジェクト概要

組織	Infineon Technologies AG
プロジェクト名	- (オーストリアのフィラッハにある300ミリ薄型ウェハを利用したパワーエレクトロニクス向けハイテクチップ製造工場)
期間	2021年8月に工場の稼動を開始
投資額	16億ユーロ（欧州のマイクロエレクトロニクス部門における最大の投資のひとつ）
資金源	・ Infineon Technologies
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">・ 技術ステージ：実装・ 技術 - 高効率パワーエレクトロニクス・ Infineon社のメリット - 年間約20億ユーロのさらなる売上ポテンシャルの省エネチップがエネルギー転換の重要な根幹となり、欧州グリーンディールに貢献する。新たな生産設備で製造した製品は、1300万トン以上のCO2を削減する・ 省エネチップ - 省エネチップは電力をインテリジェントに切り替え、多くのアプリケーションでCO2排出量を最小限に抑え、家電製品、LED照明、モバイルデバイスのエネルギー消費を削減する

出所） Infineon ホームページ

図表250： Infineon Technologies AGプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ エネルギーの効率化とCO2の削減に基づく、長期的で収益性の高い成長の基盤となるパワーエレクトロニクス（省エネチップ）工場の建設を2018年に発表。フィラッハとドレスデンの2拠点でメガファクトリーを形成する
- ・ 拡張第一段階での省エネチップの主要な使用予定用途は、自動車産業、データセンターおよび太陽光と風力の再生可能エネルギー発電等

プロジェクト情報

- ・ 高エネルギー効率工場 – 冷却システムの廃熱を利用したりサイクルにより、敷地内の暖房需要の80％がカバーされ、将来的には年間約20,000トンのCO2を削減。また製造時に必要な水素は、2022年からは再生可能なエネルギー源から現場で生産されるため、生産および輸送中のCO2排出量を削減。このグリーン水素は、チップ製造に使用された後、公共交通機関のバスの燃料としてリサイクルされる
- ・ チップ工場は世界で最も近代的な設備の一つ。完全自動化とデジタル化が導入されており、人工知能によるデータ収集とシミュレーションによる施設の予知保全が行われている
- ・ 今後の計画 - 現在ドレスデンとフィラッハの2カ所にある拠点とも同一の標準化された生産とデジタル化のコンセプトに基づいている。そのため、2つの拠点の製造オペレーションをあたかも1つの工場のようにコントロールすることが可能。異なる製品の生産量を拠点間で素早く調整し生産性と製造の柔軟性の向上を行う
- ・ 2030年までに本工場はInfineonグループのカーボンニュートラル化を可能にする

Germany University of Bremen

図表251： University of Bremenのプロジェクト概要

組織	Leibniz Institute for Crystal Growth (IKZ) , ABB Power Grids Switzerland Ltd, Aixtron SE, Ferdinand Braun Institute (FBH) , The Institute for Electrical Drives, Power Electronics and Devices (IALB) at the University of Bremen
プロジェクト名	ForMikro-GoNext (パワーエレクトロニクス用縦型 β -Ga ₂ O ₃ デバイスの研究開発)
期間	2019年10月-2023年9月
投資額	約2百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">ドイツ連邦教育研究省 (BMBF)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - パワーエレクトロニクス用酸化ガリウム (Ga₂O₃) デバイスGa₂O₃の利点 - β-Ga₂O₃を使用したGa₂O₃トランジスタは、特定のブレイクダウン電圧での低いオン抵抗と、より高速なスイッチング・トランジエントにより、電力損失を抑えることができる。これらの特性をもったβ-Ga₂O₃は、次世代の電力アプリケーション向けの高性能素材になりうる

図表252： University of Bremenプロジェクトの主な特徴

背景

- ワイドバンドギャップ半導体素材の β -Ga₂O₃は、SiCやGaNの2倍の絶縁破壊電界強度を有するため、パワーコンバーターの効率性をさらに向上させる可能性がある
- 新たなマイクロエレクトロニクスのパイプラインを保つため、自然科学と工学科学の新知識を将来のマイクロエレクトロニクスに活用する必要がある。本プロジェクトにより、マイクロエレクトロニクスの基礎研究と業界主導の研究とのギャップを埋めることが期待されている

プロジェクト情報

- プロジェクトの目的は、完全に機能する新世代の縦型Ga₂O₃トランジスタの研究。また大学機関での研究に加え、産業パートナーによる工業用材料の品質改善、およびシリコン部品製造技術の新材料への適合を行う
- Leibniz Institute for Crystal Growth (IKZ) によるエピタキシーおよび材料特性評価技術と、FBHのデバイス設計、製造および試験の専門知識に焦点を当て、基礎研究から得られた成果をアプリケーションと産業指向の研究に転換する
- University of BremenのThe Institute for Electrical Drives, Power Electronics and Devices (IALB) は、パワエレ特性評価機能を備えた新しいデバイスの、適用可能性の適格な評価を提供
- 産業パートナーであるAixtron社はエピタキシー技術を、ABB Power Grids Switzerland社はデバイスの設計および試験の側面でプロジェクトを支援する

US Wolfspeed, Inc. & General Motors

図表253： Wolfspeed, Inc. & General Motorsのプロジェクト概要

組織	Wolfspeed, Inc., General Motors (GM)
プロジェクト名	- (GM社のEVプログラム用SiCパワーデバイスの開発・製造)
期間	2021年にパートナーシップ締結
投資額	-
資金源	-
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実装技術 - EV用SiCパワーデバイスGM社のメリット - Wolfspeed社のSiCデバイスにより、GM社の急速に拡大するEVポートフォリオの範囲を広げ、より効率的なEV推進システムの導入が可能になる。SiCは、GM社の次世代EVに搭載されるUltiumドライブユニットに内蔵されている集積化パワーエレクトロニクスに主に採用される見通し

図表254： Wolfspeed, Inc. & General Motorsプロジェクトの主な特徴

背景

- Wolfspeed社（ワイドギャップ半導体のSiCおよびGaN技術の世界的な普及におけるリーディングカンパニー）とGeneral Motors社（オール電化未来の推進に取り組む）が、GM社のEVプログラム用のSiCパワーデバイスの開発と供給のため、2021年パートナーシップを結んだ
- GM社にとって、SiCは顧客の需要を満たすためのパワーエレクトロニクスの設計において不可欠な材料である。自動車業界は、総合的な自動車性能を向上させるために、パワーマネジメントの最新の進歩を活用している

プロジェクト情報

- 契約の一環として、GM社はEV生産のための、米国内の持続可能でスケラブルな素材確保を目的としたWolfspeed Assurance of Supply ProgramTM（WS AoSP）に参加予定。GM社にSiCを長期間供給し、オール電化未来の約束を保証する契約となる
- Wolfspeed社のSiCパワーデバイスのソリューションは、世界最大のSiC製造施設であるニューヨーク州Marcyにある200mm径ウェハ対応可能なMohawk Valley製造工場で生産される。この施設は2022年初頭に稼働予定でWolfspeed社の最先端施設となる
- 世界中でEV生産をはじめとする先端技術分野の需要が高まっている中、施設の建設によりWolfspeed社のSiCの生産能力が大幅に拡大されることが見込まれる



US Ohio State University

図表255： Ohio State Universityのプロジェクト概要

組織	Ohio State University
プロジェクト名	- (高電圧電力制御および変換に適した現代のGaN半導体素材の開発)
期間	2019年度開始
投資額	2.2百万USD
資金源	<ul style="list-style-type: none">米国エネルギー省 (DOE)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - GaNパワー半導体プロジェクトには、ネイティブGaN基板上のGaN膜のMOCVD成長の開発、縦型GaNパワーデバイスの製造、GaN膜の欠陥の研究、GaNパワーデバイスのパッケージングの開発および信頼性試験の実施が含まれる

図表256： Ohio State Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- 「高電圧（15～20kV）縦型パワーデバイスのためのネイティブ基板上でのGaN MOCVD成長」は、Advanced Research Projects Agency-Energy (ARPA-E) OPEN+ program を通じ3500万ドルの資金提供を受けた12プロジェクトのうちの1つ
- アメリカのエネルギーランドスケープは絶えず進化しており、電力を生み出し、分配する新たな方法に注目が集まる中、その効用を最大限に引き出すツールを開発することが極めて重要である。ARPA-Eプロジェクトは、電力を安全、確実かつ効率的に動かす方法を近代化するもの
- 現在、主流のパワー半導体デバイスは、高出力や高温下での動作に対して脆弱なシリコンを使用している。中電圧のインフラを利用する産業、運輸、グリッド上やそれ以降のアプリケーションのためにも、代替手段の模索が必須となっている

プロジェクト情報

- 本プロジェクトは、最大15～20kVのスイッチング電圧を持つ縦型パワーデバイス製造を可能にする、ネイティブGaN基板上に成長させたワイドバンドギャップ半導体のGaN材料の開発を目的としている



US Transphorm Inc.

図表257： Transphorm Inc.のプロジェクト概要

組織	Transphorm Inc.
プロジェクト名	米国DARPA用GaN溶液の開発
期間	DARPAと2021年に契約を締結
投資額	1.4百万USDルの契約
資金源	<ul style="list-style-type: none">米国防総省国防高等研究計画局（DARPA）
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - GaNパワーエレクトロニクス目的 - DoDおよび商用の高周波（RF）/ミリ波（mm波）アプリケーション向けの代替窒素極性（N極性）GaNソリューション製造のための性能および価格帯の調査。Transphorm社はエピウェハの技術提供を担当し、下請け人であるUniversity of California Santa Barbara（UCSB）はRF/mm波トランジスタの製作をおこなう

図表258： Transphorm Inc.プロジェクトの主な特徴

背景

- Transphorm社は高電圧窒化ガリウム（GaN）半導体の設計・製造におけるリーディングカンパニーで、製品の信頼性は最高水準である
- DARPAとの共同プロジェクトは、RF GaNエピウェハの国内資源と供給の確立のため、N極性GaNに重点を置いたものである。N極性GaN技術は、RFおよびmm波の用途に今日多用されているガリウム極性（Ga極性）GaNよりも、高利益なことが証明されている
- Transphorm社は以前、Office of Naval Research (ONR) と1850万ドルの契約を締結しており、現在も共同開発を行っている

プロジェクト情報

- Transphorm社はDARPAとのプロジェクトにおいて、従来のSiCソリューション上のGa極性と比較して、より高いコスト効率を達成するため、サファイア基板を使用したN極性GaNソリューションの調査を行う
- プロジェクトの成果物として、高性能トランジスタにより確立された能力を有する、安定した高品質の薄エビ構造の生産が期待されている
- RF/mm波機器や未来のパワーエレクトロニクス用のN極性GaNは、94GHzの高周波における並外れた効率性に潜在的な価値があり、5G、6G、およびそれ以上の用途とともにDoDシステムに直接恩恵をもたらすことが見込まれる

未利用熱

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

11. 未利用熱 概要

市場規模（2030年）

・ 152,315億円

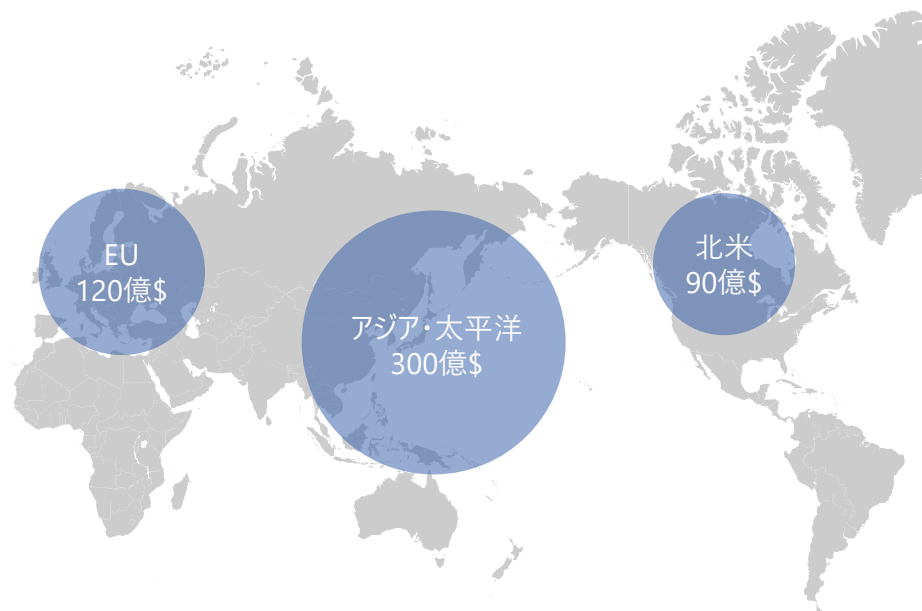
CO2削減ポテンシャル

・ 42億トン

■ 市場概要

- 2026年における建物分野と産業分野でそれぞれ14.4EJ、18.3EJと見込まれる。
- 2021年～2026年の累積GHG排出量は69.9Gt-CO₂、内約6割を産業分野からの排出が占める。
- 排出量の多くを占める産業分野での削減に向け、再エネ熱導入量の増加と排熱回収による未利用熱の有効利用が重要となる。

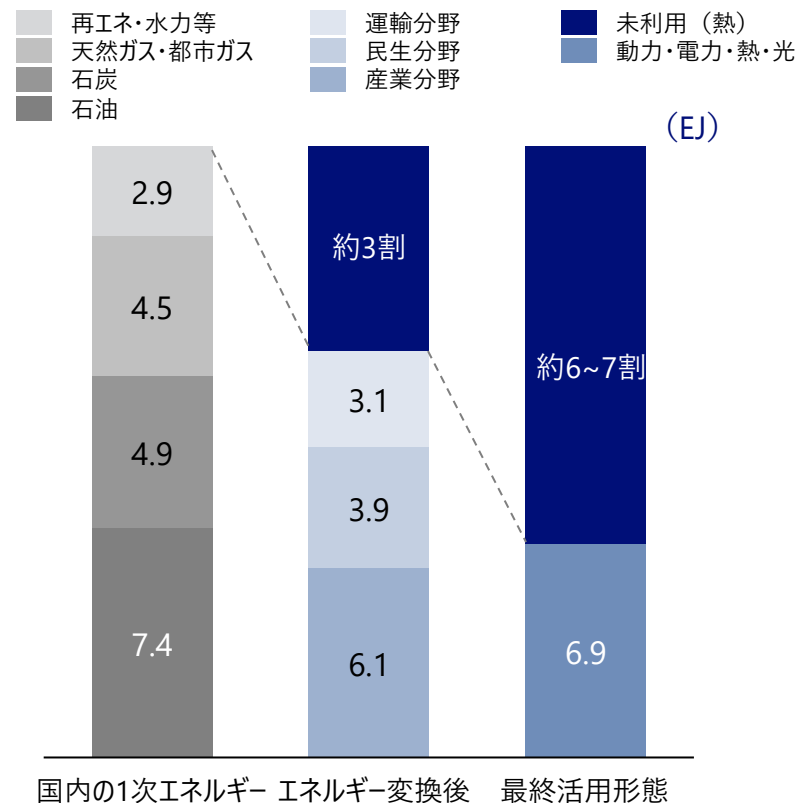
図表259：未利用熱市場（2025年）



出所）経済産業省、IEA、NEDO等公開情報より

- 現在実用化されているものの多くは350℃以上の排ガス熱回収に強みを持っており、100～250℃程度の排熱回収・利用効率の向上が必要となる。排熱回収・利用に向けた技術開発が産業部門の脱炭素化に向けて注目されており、ヨーロッパ・アジアを中心に市場の拡大が見込まれる他、北米でも相当程度の市場成長が見込まれる。

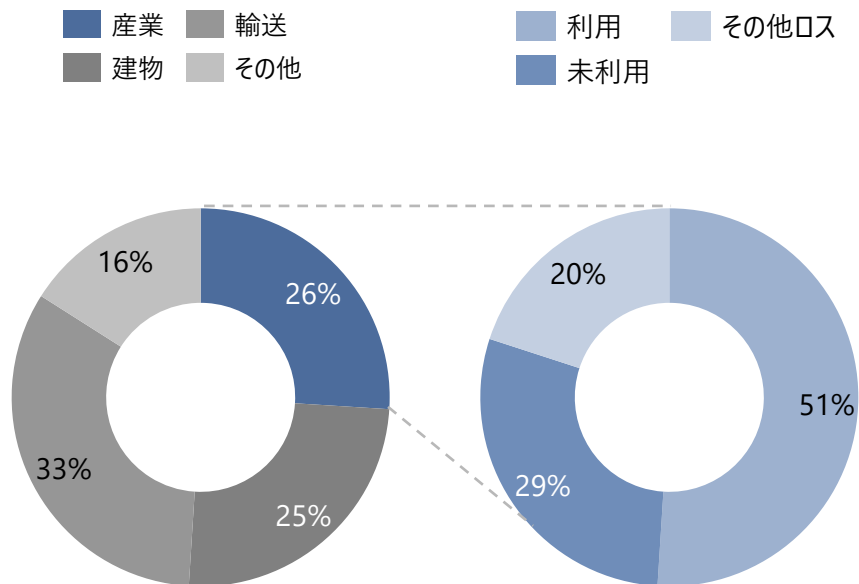
図表260：国内における未利用熱



11. 未利用熱

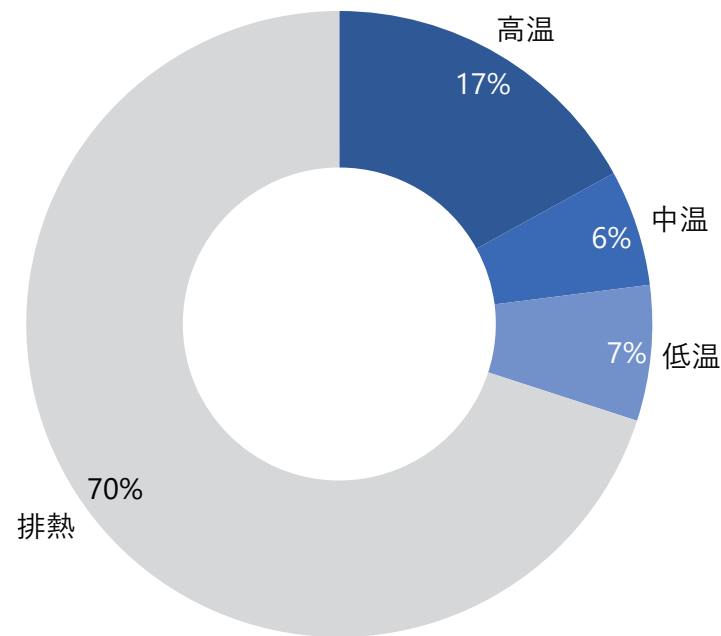
【参考】欧州における未利用熱の現状とポテンシャル

図表261：EU28か国におけるエネルギー消費内訳（2018年）



分野別エネルギー
計12,350TWh

図表262：産業分野における未利用熱の活用ポテンシャル



産業部門に未利用熱の内活用が
見込まれるもの
高温・中温・低温計 279TWh

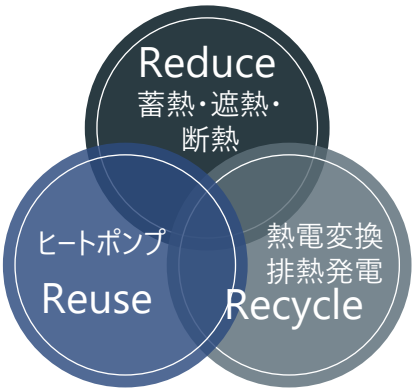
11. 未利用熱
概要

■ 技術概要

図表263：未利用熱

【技術概要】

- 熱供給によるCO2排出の80%が化石燃料の直接燃料によるため、熱を削減、再利用、リサイクルすることでCO2の削減が期待される
- 本調査の対象は特に注目される熱利用技術であるヒートポンプと熱電変換に着目する



ヒートポンプ：熱を熱として再利用

- 民生部門や100℃未満の熱を供給するものが実装済
- 100℃以上の熱を供給するための開発や不純物・有毒物質を含む排ガスからの熱の回収技術の研究が行われている。

熱電変換：熱を電気に変換して利用

- 200℃未満の熱を電力に効率よく変換する技術開発、および装置の小型化が求められる。
- 欧州を中心に小型熱電併給システム（ORC※等）の導入が進む。

※Organic Rankin Cycle：基本的な構造は蒸気タービンと同じだが水の代わりに沸点の低い有機流体を用いることで低温排熱の利用が可能

出所）IEA, NEDO, C. Arpagaus et.al (2018)等公開情報より

図表264：【参考】産業部門における排熱技術の開発状況

		実装済				商用段階				実証段階				研究段階			
産業	工程	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	℃					
紙	乾燥																
	蒸解																
	漂白																
	脱墨																
化学	蒸留																
	圧縮																
	熱成形																
	濃縮																
	煮沸																
	バイオ反応																
鉄	乾燥																
	酸洗い																
	脱脂洗浄																
	電気めっき																
	リン酸塩処理																
	クロメート処理																
	洗浄																

11. 未利用熱
国内動向

タイプ6 実証段階 国際競争力：低

■ 方針・戦略

200℃以上の熱を供給する技術が限定的であり、産業用に排熱を利用するための高温供給を可能にする技術開発が求められる。
また熱を電力に変換し活用するための高効率かつ安全な素材の研究やモジュールの開発が進められている。

図表265：未利用熱国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">家庭用を中心に低温の熱（100℃以下）を供給するヒートポンプの普及が進んだ一方100℃以上の熱を供給する産業向けの未利用熱技術は今後の技術発展、普及が必要
方針	<ul style="list-style-type: none">鉄鋼業をはじめとする産業部門では省エネルギー化が進んでおり、さらなる脱炭素化には工場排熱等の未利用エネルギーの利用に向けた取組が重要となる
目標	<ul style="list-style-type: none">200℃までの供給温度範囲に対応し、100→200℃加熱でCOP:3.5以上を達成するヒートポンプの技術開発（2022年度末）200℃以下の中低温排熱で高い発電効率（14%）を実現する小型装置の開発/50kW程度の発電装置の開発

2021	2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050
未利用熱利用の拡大の推進							

■ 技術開発状況

図表266：各技術の課題・特徴

特に産業部門においては技術開発とともに技術の適応可能性の周知や、導入に向けたインセンティブの提供が重要

ヒートポンプ	<ul style="list-style-type: none">産業用排熱を活用しつつ、より利用幅が広がる200℃以上の熱供給に向けたヒートポンプの技術開発が必要
熱電変換	<ul style="list-style-type: none">低温度の排熱を利用した発電効率の良い装置の開発に向けた技術進歩が必要（太陽電池の変換効率が10~15%、熱電変換は5~10%程度）工場への導入を見据えた装置の小型化有害物質やレアメタルより汎用的な素材の探索

図表267：主要な事業者・機関

前川製作所 (ヒートポンプ) 最高加熱温度200℃の産業用ヒートポンプ開発に着手。	三菱重工サーマルシステムズ (ヒートポンプ) 100℃程度の排熱を利用し、160~200℃程度の高熱を供給するヒートポンプ開発に着手。
Thermat (熱電変換) 産総研や日立製作所、古河機械金属らが、性能の高い熱電材料の開発や耐久性の優れた熱電モジュールの開発を行う。	トヨタ・大学 (熱電変換) 太陽電池の素材としても検討される銅亜鉛スズ硫化物を活用した熱電デバイスへの応用研究を進める。ユタ大学と宮崎大学との共同研究。

出所）経済産業省、IEA, NEDO,各企業プレスリリースより

11. 未利用熱 国際動向

主要国

欧州・英国・ドイツ

■ 各国動向

図表268：政策・方針

米国	<ul style="list-style-type: none">2000年代初期より産業排熱のエネルギー利用ポテンシャルに期待。エネルギー省は15GWのポテンシャルを見込む。特に低温（25℃～150℃程度）の排熱回収技術開発に着目。2021年1月に排熱回収プロジェクトに対して26%の投資税額控除を決定（Consolidated Appropriations Act）。有害な物質の除去や、排熱回収に使われる素材の開発等にR&Dの機会を特定している。
EU	<ul style="list-style-type: none">工業プロセスの排熱利用に関するプロジェクト（TASIO-Project, I-Therm Project等）を実施。多くがHorizon2020のプロジェクトとして資金援助を受けている。大規模な排熱利用に向けて研究機関・産業界等を集めたコンソーシアムでの取組・実証実験を行っている。
英国	<ul style="list-style-type: none">2020年に10-Point Plan for a Green Industrial Revolutionを発表。2028年までに600,000のヒートポンプ導入目標を掲げた。The Renewable Heat Incentive2022年3月まで延期し、民生部門と中小企業等の産業部門両方に補助金を給付。産業向けにはIndustrial Heat Recovery Support Programmeを実施し、2022年までに1800万 £ の投資を行う。
ドイツ	<ul style="list-style-type: none">連邦環境自然保護原子力安全省の分野別2050年Climate Action Planにて産業部門の省エネ化・エネルギー高効率化の一つに排熱利用が位置付けられた。エネルギー政策の一環として、中手企業に対しては連邦政府から省エネ・高効率化に関する技術導入に関する補助金が出されており、資金使途の一つに排熱利用を含む等、中小企業の排熱利用にも積極的。

図表269：主要な事業者・機関

大学・研究機関（熱電変換）

ORCをはじめとする熱電変換に排熱利用の導入が進む。近年では超臨界二酸化炭素を用いることでよりエネルギー効率の優れた廃熱利用システムの研究開発を行う。

熱電変換の材料に関する研究開発を含めて要素技術の研究を行う。昨今ではノースウェスタン大学とソウル大学の共同研究チームが脆弱性が課題だったセレン化スズを活用することで高い熱電変換性能指数を得た。Nature Materials誌に研究結果が掲載された。

GE・Thermax・Ormat Technologies・Siemens（排熱回収）

既に社会実装済の排熱回収技術市場における主要な事業者。Ormat TechnologiesやThermaxは廃熱回収・利用を事業の中核に据える企業。

各国が行う新たな技術開発の実証や研究開発のコンソーシアム等に参加。

国内動向 | 技術の定性評価

図表270：未利用熱国内技術の定性評価

	技術	強み	弱み	
ヒートポンプ	技術	<ul style="list-style-type: none">排熱を活用して高温（200℃近く）の熱を生み出す技術を中心に研究開発で成果を挙げる	<ul style="list-style-type: none">－ （欧州では研究開発より、建物向けの導入促進が進められている）	
	市場	<ul style="list-style-type: none">産業排熱の多くは低温（200℃以下）が占めており、需要は高い特に日本は世界で2番目の市場規模を有しており、欧州の市場規模も拡大傾向 ※ただし需要側の認知の低さが課題	<ul style="list-style-type: none">排熱装置の設置には大規模な土地が必要になるものも多いが、国内では設置面積が限られる場合もある需要側の生産量や、地理的情報が網羅的にデータベース化されマッチングできることが技術普及の条件に挙げられているが環境整備は限定的	(-)
熱電変換	技術	<ul style="list-style-type: none">自動車事業者を中心に多くの特許を取得しているほか、素材開発に強みを持つ	<ul style="list-style-type: none">小型システムの普及が海外と比較してやや遅れる（海外ではORCの普及が中小事業者で進む）	
	市場	<ul style="list-style-type: none">産業の脱炭素化に向けて再エネや省エネに貢献する技術として期待される（海外でもWaste Heat to Powerとして政策支援を実施）	<ul style="list-style-type: none">排熱装置の設置には大規模な土地が必要になるものも多いが、国内では設置面積が限られる場合もある	技術進歩

11. 未利用熱

想定する連携

図表271：未利用熱において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内企業	海外企業
ヒートポンプ	－	国内では200℃以上の熱を供給するヒートポンプ開発が産業用利用を中心に進められているが、海外では主に民間（ビル・住宅）での普及促進が行われており、技術開発は2010年代に盛んにおこなわれていた。まずは国内での技術開発が中心になると想定される。	・ －	・ －
熱電変換	技術進歩	素材開発で一部国内に技術の強みがあるが、ORCや超臨界CO2の活用やTRLの工場等欧州・英国・ドイツを中心に利用企業も含めた大規模な実証が進む。素材関連の技術力を提供しつつ連携による技術開発の推進が想定される。	・ 研究機関/ 企業	・ 企業 ・ 研究機関・企業のコンソーシアム



EU ACCADEMIA EUROPEA DI BOLZANO

図表272：ACCADEMIA EUROPEA DI BOLZANOのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">ACCADEMIA EUROPEA DI BOLZANO（イタリア）
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">REWARDHeat競合する地域冷暖房ネットワークのための再生可能な熱と廃熱回収
期間	<ul style="list-style-type: none">2019年10月～2023年9月
投資額	<ul style="list-style-type: none">総額：19.023百万ユーロHorizon 2020の助成金：14.99百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実証技術：再生可能熱エネルギーネットワーク提携：このプロジェクトはEUを拠点とする29の参加機関のコンソーシアムによって管理されており、ACCADEMIA EUROPEA DI BOLZANOが調整役をおこなう

図表273：ACCADEMIA EUROPEA DI BOLZANOプロジェクトの主な特徴

背景

- REWARDHeatのおおまかな目的は、低温で利用可能な再生可能エネルギー熱と廃熱を利用した、新世代の低温地域冷暖房ネットワークの実証である。低温で利用可能な、再生可能エネルギー熱と廃熱を利用することにより、ネットワーク内で生産と流通の効率を高めることが見込まれる

プロジェクト情報

詳細な目的

- REWARDHeatネットワークは、複数の都市再生可能エネルギーおよび廃棄物エネルギー源を効果的に統合：複数の低グレード都市エネルギー源の統合とネットワーク内での利用を可能にする
- 地域冷暖房（DHC）のネットワークにおける熱の柔軟な使用のための革新的技術を開発：REWARDHeatのソリューションでは、プレファブリケーション、標準化、モジュール性が特徴となる
- デジタル化を実証し、DHCネットワークの管理を最適化する：拡散熱生成、蓄熱および利用など、熱のバランスを保証する制御戦略および故障検出ソリューションの評価がおこなわれる



EU Ikerlan

図表274： Ikerlanのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Ikerlan (スペイン)
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">ETEKINAプロジェクト (産業用途における熱エネルギー回収のためのヒートパイプ技術)
期間	<ul style="list-style-type: none">2017年10月～2022年3月
投資額	<ul style="list-style-type: none">総額：550万ユーロHorizon 2020の助成金：460万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術：熱回収用ヒートパイプ熱交換器 (HPHE)提携：ブルネル大学ロンドン、Econotherm、Fagor Ederlan、SIJ Metal Ravne、Atlas Concorde、Ikerlan、Jožef Stefan Institute、Modena and Reggio Emilia大学、欧州科学通信研究所 (ESCI)

図表275： Ikerlanプロジェクトの主な特徴

背景

- ETEKINAは、エネルギー集約型産業の廃熱流の57～70%を回収することを目的としたEUの資金提供による研究プロジェクトである。ETEKINAは、“Heat Pipe Technologies for Industrial Applications”を表す
- ヨーロッパ各地の10の企業と研究所が、エネルギー集約型プロセスのエネルギー性能を向上させるために協力

プロジェクト情報

- このソリューションは、熱回収のためのヒートパイプを用いた熱交換器技術 (HPHE) に基づくもの
- プロジェクトの一環として、3つのHPHEプロトタイプを、アルミニウム、鉄鋼、セラミックスの3つの異なる業界の生産工場で製造し、テストする予定である
- 異なる産業環境では、異なる排熱量と質（化学成分、ガスと共に排出される異なる粒子、排ガスの温度と圧力）の異なる排気流が生成される。回収された熱が利用され得る異なるプロセスを提供する
- 課題：回収ソリューションは、全体的な効率を高め、費用対効果が高いものにしなければならない

EU FUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION

図表276： Tecnaliaのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">FUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION (Tecnalia)
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">TASIO
期間	<ul style="list-style-type: none">2014年12月～2019年5月
投資額	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020 の助成金：398万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実証技術：廃熱回収・利用（熱電変換）提携先：Tecnalia、Turboden、RINA S.p.A.、Geonardo、Sidenor、Cementirossi S.p.A.、Vidrala

図表277： Tecnaliaプロジェクトの主な特徴

背景

- TASIOプロジェクト：エネルギー多消費型産業における有機ランキンサイクル技術による排熱回収と電力の価値化

プロジェクト情報

- TASIOプロジェクトは、セメント、ガラス、製鉄、石油化学といった産業分野のエネルギー集約型プロセスで発生する廃熱を回収し、有用なエネルギーに変換するためのソリューションを開発
- 排ガスの熱エネルギーを回収し、設備の内部または外部での使用の為に電力に変換。また内部使用のための機械（コンプレッサー）のエネルギーに変換するための排熱回収システムの開発を行った
- 熱交換器の一部に使用される新たな熱伝導体および耐食材料の開発や、新たに統合された監視及び制御システムの設計・モデル化も開発課題であった
- コンソーシアムは、欧州4カ国の8つのパートナーで構成されており、セメント、鉄鋼、ガラス、石油化学といったエネルギー集約型産業の関連部門をカバーしていた



EU EUROPEAN TURBINE NETWORK

図表278： EUROPEAN TURBINE NETWORKのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">EUROPEAN TURBINE NETWORK
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">CO2OLHEAT (実稼働環境下での超臨界CO2発電の実証実験および産業廃熱の地域での価値化)
期間	<ul style="list-style-type: none">2021年6月～2025年5月
投資額	<ul style="list-style-type: none">総額：1,881万ユーロ (うちEUの助成金額：1,399万ユーロ)
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実証技術：廃熱回収・利用提携先：EDF、ENGIE、MYTH、CEMEX、SISECAM、CELSAを含む21の産学からなるコンソーシアム

図表279： EUROPEAN TURBINE NETWORKプロジェクトの主な特徴

背景

- 廃熱回収や廃熱発電は、化石燃料へのエネルギー依存度を減らし、資源効率を向上させるためのベストプラクティスとして確立されている。しかし、廃熱発電は多くの障壁があるため普及が進んでいない。特に、設備の大きさ、限られた技術競争力（20MWth以上、廃熱温度の限定、効率の低さ）と可燃性の流体は、依然として深刻なボトルネックとなっている
- 本プロジェクトは超臨界二酸化炭素（sCO2）ターボ機械の設計経験や産業廃熱の有効利用に関するこれまでのEUによる資金提供プロジェクト（TASIO、I-ThERM、sCO2-FLEXなど）から得た知識を活用する

プロジェクト情報

- CO2OLCHEATは従来の蒸気/有機ランキンサイクルソリューションと比較してより高温でも廃熱を有効活用することを目指す
- このプロジェクトは、より安価で柔軟な廃熱の価値化に向けて、EUのメガワット規模の世界初の廃熱CO2プラントでの実証を行う
- 9のワークパッケージに沿って、技術、経済、環境の観点からsCO2廃熱発電の可能性の分析や、サイクルとターボ機械の設計のための革新的なモデルの開発などを行う。またEUの関連産業界が参加し、技術・経済・ライフサイクルベースの再現性調査を通じてセメント、ガラス、アルミ、発電分野における二酸化炭素排出抑制サイクル効果を調べる

UK BRUNEL UNIVERSITY LONDON

図表280： BRUNEL UNIVERSITY LONDONのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> BRUNEL UNIVERSITY LONDON
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> I-ThERM
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2015年10月～2021年3月
投資額	<ul style="list-style-type: none"> Horizon 2020 の助成金：399万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実証 技術：廃熱回収・利用（熱電変換） 提携先：Spirax Sarco、Tata Steel、Synesis、Enogia、Energy Experts、ArcelorMittal、Econotherm、Avanzare、Cyprus University of Technology、Center for Technology, Research & Innovation、Technological Educational Institute of Sterea Ellada、ARLUY SL

図表281： BRUNEL UNIVERSITY LONDONプロジェクトの主な特徴

背景

- EUの一次エネルギー消費の1/3を占める工業プロセスに対して、熱回収・利用に関する技術開発を行いエネルギー利用の低炭素化を図る

プロジェクト情報

- I-ThERM（Industrial Thermal Energy Recovery Conversion and Management）プロジェクトは、工業プロセスにおける熱回収・マネージメント技術の開発が目的
- 詳細情報：プロジェクトは70°Cから1000°Cの温度範囲における工業施設からの効率的でコスト効率の良い熱回収、およびこれらの技術を既存のエネルギーシステムと最適に統合するための技術やプロセスの開発および実証、必要に応じて回収された熱と発電された電力の輸送を行うのを目指した
- 11のワークパッケージに沿って、熱回収監視・最適化技術、トリラテラルフラッシュサイクル（TFC）技術、有機ランキンサイクル（ORC）技術、フラットヒートパイプシステム（FHPS）の開発、ヒートパイプベースの凝縮エコマイザー（HPCE）の開発、システム設計手法の開発等を行った
- 熱電変換については既存のORC（オーガニックランキンサイクル）より効率の良いTFC（Tri-lateral flash cycle）を鉄鋼会社のTATA Steelの工場での試験導入するのを目的とした

UK Altek Europe

図表282： Altek Europeのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Altek Europe (イギリス)
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> Smartrec Project 熱回収と蓄熱の柔軟で適応的な統合のための、廃熱の回収と管理が可能な、標準的でモジュール化されたソリューションの開発
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2016年9月～2021年8月
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 総予算：460万ユーロ Horizon 2020 の助成金：370万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Horizon 2020
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実証 技術：廃熱回収 提携先：Altek, TWI, Commissariat a l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Econotherm (UK) Ltd, Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas, Spike Renewables SRL, Innora Proigmena Technologika Systimata kai Ypiresies Anonumi Eteria, Flowphys AS& Technovative Solutions Ltd.

図表283： Altek Europeプロジェクトの主な特徴

背景

- 廃熱は高温処理産業において、熱の価値化に関する課題があるため十分に活用されていない資源として共通の問題になっている。また、二次アルミニウムリサイクルとセラミック処理の際の廃熱は、経済的にも回収可能な重要な一例として特定された。そのため、熱回収と蓄熱の柔軟で適応的な統合のための標準的でモジュール化されたソリューションの開発が目的化された
- 本プロジェクトでは試験的なSmartrecシステムを構築し、二次アルミニウムリサイクル設備および/またはセラミック処理装置を実装する

プロジェクト情報

- Smartrecシステムは、様々な温度や産業に適応可能な、中～高グレード廃熱を価値化する、蓄熱と熱回収を統合するための標準的なモジュール式ソリューションを開発する
- Smartrecのパイロットシステムは、二次アルミニウムリサイクル設備および/またはセラミック処理装置に構築、実装される。それにより、継続的なエネルギー集約型、スラグリサイクルのため高グレード熱を価値化する
- Smartrecは、開発済の計測フレームワークを含む、6ヶ月を超える稼働の既存システムとの統合により検証される



UK London South Bank University

図表284： London South Bank Universityのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">LONDON SOUTH BANK UNIVERSITY
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">廃熱回収調査プロジェクト
期間	<ul style="list-style-type: none">2021年に開始 (3年間のプロジェクト)
投資額	<ul style="list-style-type: none">総資金：97万GBP
資金源	<ul style="list-style-type: none">工学・物理科学研究評議会 (EPSRC)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術：水素系廃熱回収提携：ロンドンサウスバンク大学

図表285： London South Bank Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- 新しい水素技術によって産業からの廃熱を回収し、加熱・冷却を脱炭素化する新しい方法を開発する本研究プロジェクトは、LSBUが率いるチームによって開始された。このプロジェクトでは、鉄鋼、ガラス、紙、食品などのエネルギー集約型産業から冷暖房を提供する新しい方法を調査する

プロジェクト情報

水素技術を使って廃熱を回収する新しいアプローチの3つの大きな利点

- 膨大なコストとエネルギーの節約：英国で産業によって生成される総廃熱の約60% (約48 TWh/年)は、地区ネットワークで再利用できる可能性がある。これにより、製造業は資金とエネルギーを節約するための大きな機会を与えられる
- 新しい水素技術の利用による大幅な炭素排出量の削減
- 熱回収施設の限定による低コスト化と、40°Cから1650°Cまでのより広い温度範囲により、再生可能エネルギーよりも高いエネルギーの取得、およびコストの節約になる

Germany Standardkessel Baumgarte GmbH

図表286： Standardkessel Baumgarte GmbHのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Standardkessel Baumgarte GmbH (SBG) Evonik Siemens AG
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> 先進的高効率ガス・蒸気タービン発電所の廃熱回収システム
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2019年～2022年
投資額	<ul style="list-style-type: none"> EvonikがSBGに60億円の契約金を提供 廃熱回収ボイラー (HRSG) 2基を供給するため
資金調達先	<ul style="list-style-type: none"> Evonik
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実装 技術：未利用産業熱 (廃熱回収ボイラー) ロケーション：ドイツ、マール

図表287： Standardkessel Baumgarte GmbHプロジェクトの主な特徴

背景

- Standardkessel Baumgarte GmbH (SBG)はJFEエンジニアリング (日本)の子会社
- ドイツ企業は、コージェネレーションシステム(CHP)の導入など、効率的なエネルギー利用の実現に向けて積極的に取り組んでいる。Evonik社は、Marl Chemical Parkの最後の石炭火力発電所を、新しいコンバインドサイクル発電所に置き換えることにより、効率的なエネルギー利用を促進することを決定した
- SBG社はこれまで、欧州を中心に100基以上の廃熱回収ボイラーの建設を行ってきた。また、オーダーメイドの焼却構想についても高い評価を得ている

プロジェクト情報

- Siemensガス & パワー社が元請となり、プロジェクトを実施する。SBG社は下請として、2つの廃熱回収ボイラーを設計・施工する。これらのボイラーは、ガスタービンで発生する排ガスと補助燃焼システムを利用して、高圧蒸気と低圧蒸気を発生させる。ボイラーで発生した蒸気を使って蒸気タービンで電気を作り、さらにボイラーで発生した蒸気を Marl Chemical Park の化学プラントの処理資源として利用する

Canada The Hamilton Chamber of Commerce

図表288：The Hamilton Chamber of Commerceのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> ハミルトン市商工会議所
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> 産業廃熱回収プロジェクト
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2019年～2020年
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none"> The Atmospheric Fund
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：研究開発 技術：産業廃熱回収 目的：隣接する建物の冷暖房ニーズに役立つ地域エネルギーシステムの可能性を含め、ベイフロント地域からの廃熱利用の実現可能性をチェックする。地域のエネルギー効率の改善、事業競争力、温室効果ガス排出量の削減を推進する 参加メーカー：Air Liquide、ArcelorMittal、Bunge、Collective Arts Brewing、National Steel Car、Stelco Hamilton Works

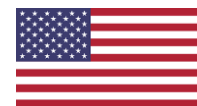
図表289：The Hamilton Chamber of Commerceプロジェクトの主な特徴

背景

- ハミルトン市商工会議所は、ハミルトンのベイフロント産業圏で活動するメーカー間で、廃熱の回収を増加させる機会を特定するため、The Atmospheric Fundから助成金を受け取った
- 世界的な研究によると、工業プロセスで消費される50%のエネルギーは廃熱として失われており、より多くの温室効果ガスが排出される原因になっている。このプロジェクトからの勧告は、ハミルトン市の廃熱に関する可能性を十分に活かすための将来の研究促進を目的とするものだった

プロジェクト情報

- このプロジェクトは、ハミルトン市の産業ベイフロントエリアを拠点にするメーカーが、廃棄物の熱回収と利用のための新しいアプローチを採用することを支援するというものだった
- プロジェクトの主要成果物：
 - 調査地域の産業エネルギーの実践と計画のベースライン一覧
 - 調査対象地域の廃熱の発生源を突き止め、その特性を把握するマップ
 - 廃棄物熱の選択肢をどのように活用するかに関する勧告を伴う最終報告書



US United Technologies Research Center

図表290： United Technologies Research Centerのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> United Technologies Research Center
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> - (低コスト熱交換器のための高熱伝導性ポリマーコンポジット)
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2014年12月～2016年9月
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 総額：93万USD (うちDOEの助成金額：74万USD)
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Advanced Manufacturing Office, U.S. Department of Energy
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：研究・開発 技術：廃熱回収・利用 パートナー：University of Massachusetts – Lowell, University of Akron

図表291： United Technologies Research Centerプロジェクトの主な特徴

背景

- 非金属製熱交換器の使用が増えれば、米国のエネルギー使用量と温室効果ガス排出量を削減し、生産性においても大きなメリットがある。例えば、ポリマー複合材製熱交換器の製造時間は、一般的な金属製熱交換器のものに比べて最大90%短縮されると予想される。材料費と製造コスト全体では、最大で50%の削減が期待できる。また、これらの技術革新は米国が世界市場において競争力を維持するのに役立つ。

プロジェクト情報

- 本プロジェクトでは熱伝導率が高く低コストな樹脂複合材料の熱交換機の研究を実施。
- 研究成果として以下が得られた：
 - ✓ 材料としての熱伝導率が金属よりも低い水準で、実用に足るものであった
 - ✓ 材料そのものの強度より、接合部や溶接部の強度が問題と判明
 - ✓ 冷媒漏洩防止の要請から材料への浸透防止が課題
 - ✓ プラスチック射出成型機械の改良が必要と判明
 - ✓ 熱交換器の構造再設計が必要と判明
 - ✓ 3D造形のような新たな成型手法の模索が必要と判明
 - ✓ 上記を考慮し、有力な材料としてポリフェニレンサルファイド樹脂を基材とした複合材料を特定した

高性能蓄電池

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

12. 高性能蓄電池

概要

市場規模（2050年）

・ 600,000億円

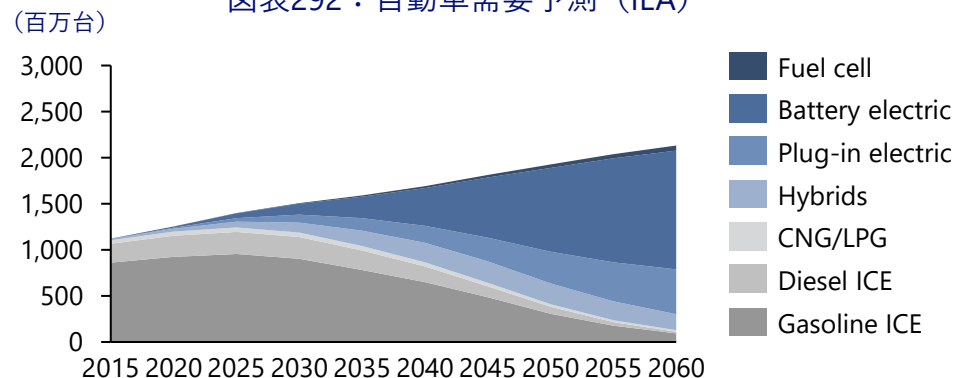
CO2削減ポテンシャル

・ 106億トン

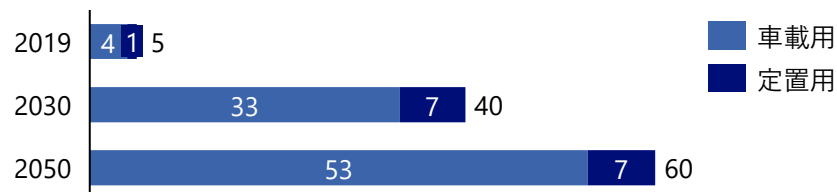
■ 市場概要

- CO2総排出量に占める運輸部門の割合は全世界で21.4%、国内では18.5%となっており、産業部門に次いで排出量が多い分野である。
- 運輸部門の内大半（74.8%）を占めているのが自動車であり、本分野の脱炭素化は重要な課題とされ、特に電動化を推進するための蓄電池の技術開発は各国で盛んに実施されている。
- また、欧州を中心にEV化が進展する中、車載用の蓄電池市場は今後も拡大が予測され、2050年には世界で約53兆円の市場規模が見込まれている。

図表292：自動車需要予測（IEA）



図表293：蓄電池市場の推移（兆円）



■ 技術概要

- 車載電池は現在主流とされる①液系LIB、②全固体LIB、③革新型電池の3つに大別される。
- 本調査では既に実用化されている液系LIBを除く残り二つの電池を調査対象とした。

図表294：高性能蓄電池技術概要



全固体電池（solid state battery）TRL 5

- 電解質を固体にすることで、薄型等構造を自由にできる。
- 固体のため劣化しづらく、既存の液化リチウムイオン電池で課題となっている発火等が起きにくくなることが期待される。
- 全固体電池はさらに硫化物系と酸化物系に分類され、前者は加工がしやすい一方有毒ガス発生の危険性がある。後者は可塑変化を起こさないが安全性が高い。

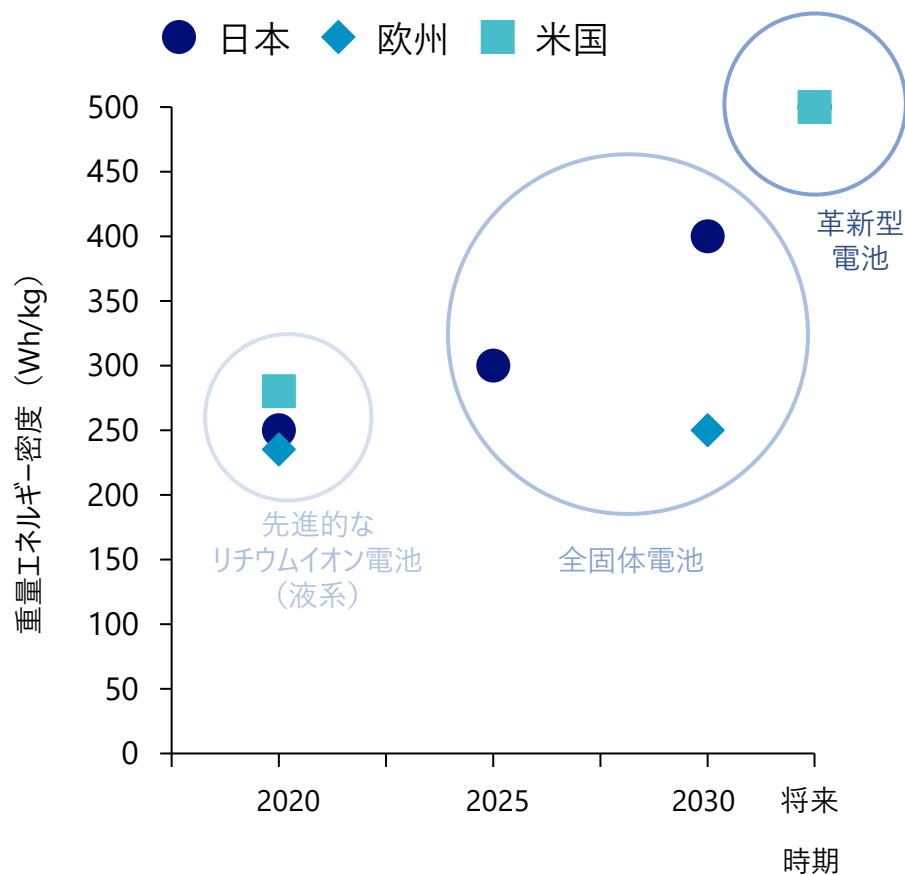
革新型電池 TRL1~4

- 既存のリチウムイオン電池の性能を超える電池、またはレアメタルを多く使うリチウムイオン電池の代替となるような蓄電池を目的に研究開発が行われている。
- ナトリウムイオン電池やシリコン系の電池等が含まれる。

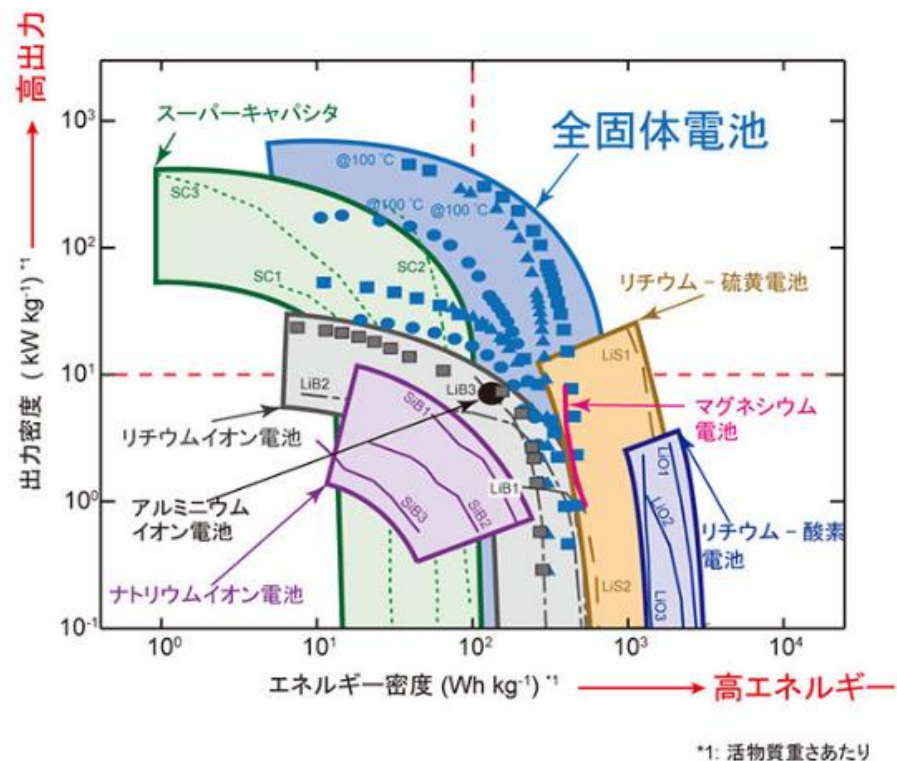
12. 高性能蓄電池

【参考】各国の開発目標および電池の種類別性能比較

図表295：電池技術に関する各国の目標



図表296：蓄電池別の性能比較



出所) 左図：経済産業省製造産業局自動車課よりNRI作成 右図：東京農工大学菅野教授資料

12. 高性能蓄電池 国内動向

タイプ2

研究段階 国際競争力：高

■ 方針・戦略

2030年にEVを本格導入するためには、2020年初期段階で革新型電池のセルの耐久性を
実用可能なものにする必要がある他、一部の地域（コンゴやオーストラリア）にレアメタルを
依存しており、代替素材による電池の開発が求められる。

図表297：高性能蓄電池国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">世界的にみた特許取得割合は高いが、既存の車載用蓄電池では中国（CATL）が1位を占める。一方近年低コスト化や性能の改善で中国や韓国のメーカーが台頭しており、OEMと一体となった研究開発や標準化が求められる。
方針	<ul style="list-style-type: none">蓄電池・資源・材料等への大規模投資支援等を行い、蓄電池のスケール化を通じた低価格化に取り組む。ニッケル、コバルト、リチウム等の鉱物資源の安定的な供給を確保。全固体リチウムイオン電池や革新型電池の性能向上、蓄電池材料の性能向上、蓄電池や材料の高速・高品質・低炭素生産プロセスの為の研究開発・技術実証を行う。蓄電池ライフサイクルでのCO2排出見える化や、材料の倫理的調達の担保、蓄電池パックの残存性能等の評価方法等のルール整備・標準化を行う。
目標	<ul style="list-style-type: none">高性能蓄電池は①高容量系蓄電池（例えば全固体電池）：700~800Wh/L パック②高入出力系蓄電池：2000~2500W/kg、かつ200~300Wh/L パック（いずれも2030年時点）の開発。高性能材料は正極材（コバルトフリー化、高効率・低炭素製造技術等）、負極材（金属リチウム負極等）、固体電解質等の開発。

2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
高性能蓄電池：量産へ向けた蓄電池設計、プロセス検討				中規模パイロットラインの設置、および生産技術開発・性能実証試験					
高性能蓄電池材料：要素技術開発・実証			特性プロセス検討			中規模パイロットラインでの生産技術開発・性能実証試験			

出所）経済産業省、NEDO,各企業プレスリリースより

■ 技術開発状況

図表298：技術の課題・特徴

全固体電池	<ul style="list-style-type: none">均一な電極 形成（塗工等）や電解質との積層、電極と電解質との接合のための加圧などの工程の 高効率化等の課題があり、引き続きの研究開発を要する。
革新型電池	<ul style="list-style-type: none">実用化に耐えられる耐久性の向上を今後5年以内に実践し、モジュール開発への移行。LiBの代替となる素材の研究。

図表299：主要な事業者・機関

トヨタ・パナソニック
(全固体電池)

車載用蓄電池で高いシェアを誇るパナソニックと車載用電池で高い特許保有率を誇るトヨタが合併会社を設立し、車載用全固体電池の開発に取り組む。

大阪府立大学
(全固体電池)

分解体制の関係性やメカニズムの解明等を行い、全固体リチウム硫黄電池の実用化に向けて正極の開発に成功。

日本電気硝子
(全固体電池・革新型電池)

負極、正極、固体電解質が一体化したオール酸化物全固体ナトリウムイオン電池の駆動に世界で初めて成功。ニッケルやコバルト等のレアメタルを使わずに生産。

RISING
(革新型電池)

大学・研究機関、国内の代表的自動車メーカー・電池メーカー等の企業研究者が拠点に集結し、2030年を見通し、レアメタルを使用しない電池の開発等に取り組む。

12. 高性能蓄電池 国際動向

主要国

米国、EU、ドイツ、英国

■ 各国動向

図表300：政策・方針

米国	<ul style="list-style-type: none">エネルギー省（DOE）の自動車技術局（VTO）が中心。Battery500等のコンソーシアムが立ち上げられ大手3社との連携も行いながら全固体電池、リチウム硫黄電池、ナトリウムイオン電池等の開発を行う。国としてEV導入の推進に関する補助制度等をインフラ投資計画で公表しており、研究開発に1000万ドルの投資を公表。
EU	<ul style="list-style-type: none">蓄電池エコシステムの構築に向けて原材料調達や製造時のカーボンフットプリント等の要請をバッテリー規制を通じて検討。Horizon2020等を通じて全固体電池や軽量化を含めた電池の研究開発に対して資金援助を実施。EVバッテリー生産や研究開発に対して総額8000億円規模の補助金を供給。
ドイツ	<ul style="list-style-type: none">European Battery Allianceのもとドイツにおけるバッテリー製造産業構築に向けてEnergy and Climate Fundを通じて10億€を投資。連邦教育科学研究技術省（BMBF）が全固体電池の基礎研究に対する資金供給を2018年より開始。1,600万€を投資する。
英国	<ul style="list-style-type: none">The Office for Zero Emission Vehicles (OZEV)がZEVの技術開発・実証に対して総額1700万£の資金供給を行う。Automotive Transformation Fundを通じて2025年までに5億£の資金供給を行い、EVサプライチェーンの構築を目指す。レアメタルへの依存リスクにも着目し、代替材料の開発にも言及。2035年の内燃機関完全廃止に向けたロードマップを策定。

図表301：主要な事業者・機関

Solid Power (全固体電池)

2013年頃から政府の資金供給対象となったプロジェクト（RANGE）に参加し研究開発を行う。2019年には、フォードやBMW等のOEMと連携し、全固体電池の電解質に関する研究を実施。
(→p.184)

カリフォルニア大学サンディエゴ校 (全固体電池・革新型電池)

シリコンを電極に用いた全固体電池を初めて開発し、Scienceに2021年に掲載された。本研究はLG Energy Solutionとともに実施された。サンディエゴ校は全固体電池だけでなく、ナトリウムイオン電池の開発に取組む等、企業と連携しながら車載蓄電池の研究開発を積極的に実施している。
(→p.185に一例記載)

スタートアップ (全固体電池・革新型電池)

蓄電池の研究開発は様々なステークホルダーによって実施されており、スタートアップの研究開発も盛ん。OEMや大学と連携している場合も多い。
例えばLytenやOxis Energyが欧州の資金提供を受けている
(→p.186等)

BMW・フォード・VW等のOEM (全固体電池・革新型電池)

スタートアップやバッテリー製造業者と連携して積極的に研究開発を実施している。

12. 高性能蓄電池

国内動向 | 技術の定性評価

全固体電池や革新型電池について、世界初の駆動に成功したり今後の実装に向けた基礎研究で成果を上げたりしているが、各国で技術の早期実装に向け研究は激化している。特に早期の市場投入と標準化・ビジネスモデルの検討が重要になると想定される。

図表302：高性能蓄電池国内技術の定性評価

技術	強み	弱み	
全固体電池	技術 <ul style="list-style-type: none">全世界での特許の6割程度を有する。特に硫化物の研究では強みをもつ。	技術 <ul style="list-style-type: none">中国（CATL）等を中心に中国の台頭がシェア及び新技術の特許数でも顕著に。	標準化 海外進出による市場拡大
	市場 <ul style="list-style-type: none">自動車産業は国内の主要産業であり、輸出も見据え電動化に伴うバッテリー需要は今後も拡大。	市場 <ul style="list-style-type: none">－	
		環境 <ul style="list-style-type: none">欧州ではバッテリーの域内エコシステムに向けた動きが活発化しており、カーボンフットプリント等を含めた対応が必要。	
革新型電池	技術 <ul style="list-style-type: none">Naイオン、有機系をはじめ革新型蓄電池の特許取得割合は世界一。	技術 <ul style="list-style-type: none">－	標準化 海外進出による市場拡大
	市場 <ul style="list-style-type: none">自動車産業は国内の主要産業であり、輸出も見据え電動化に伴うバッテリー需要は今後も拡大。	市場 <ul style="list-style-type: none">－	
		環境 <ul style="list-style-type: none">欧州ではバッテリーの域内エコシステムに向けた動きが活発化しており、カーボンフットプリント等を含めた対応が必要。	

12. 高性能蓄電池

想定する連携

図表303：高性能蓄電池において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内	海外
全固体電池	標準化	国内では既にOEMと電池メーカーが連携し、実用化に向けて研究を行っている。早期市場投入に向けて研究を進めつつ、将来市場獲得に向けた標準化への働きかけが想定される。	・ 政府・企業	・ 国際機関
共通	海外進出による市場拡大	蓄電池は車体によって多少の変更が必要となってくる。OEMと一体となった開発は活発に行われており、将来市場獲得に向けて研究開発段階からの連携が想定される。	・ 電池製造業者	・ 海外OEM



図表304： Solid Powerのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Solid Power (米国における電気自動車用全固体電池の業界トップメーカー)
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">電気自動車向け全固体電池
期間	<ul style="list-style-type: none">2012年～2019年からパイロット生産ラインを運用
投資額	<ul style="list-style-type: none">130百万ドル：2021年のシリーズB投資20百万ドル：2018年のシリーズA投資
資金源	<ul style="list-style-type: none">シリーズB：BMWグループ、フォード・モーター・カンパニー、ボルタ・エナジー・テクノロジーズシリーズA：BMWグループ、フォード・モーター・カンパニー、Samsung、Hyundai、Volta他
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">開発段階：実用化技術：EV用固体電池バッテリー特性：2Xバッテリー寿命、液体とゲルをすべて除去した不揮発性のもの、<充電速度20分、航続距離の延長

図表305： Solid Powerプロジェクトの主な特徴

背景

- Solid Power社は、EV & モバイル電力市場向けの全固体充電式バッテリーを生産しているが、これは広い温度範囲にわたってより安全で安定しており、入手可能な充電式バッテリーと比較してエネルギー密度は50～100%高く、より安価で、従来のLiイオン製造プロセスと互換性がある。同社はバッテリー開発におけるバリューチェーン全体に焦点を当てている。
- 同社は現在、連続ロールツーロール生産ラインで20アンペア時(Ah)の多層全固体電池を生産している。

プロジェクト情報

- Ford社とBMWグループは、シリーズB投資と同時にSolid Power社との既存の共同開発契約を拡大し、将来の電気自動車用の全固体電池を確保した
- 将来のロードマップ：Solid Power社は、同社の商業化努力に対するパートナーの継続的な取り組みの結果として、2022年初頭に同社のパイロット生産ラインで自動車規模のバッテリーの生産を開始する予定。Ford社とBMWグループは、2022年に始まる自動車の認定試験と車両統合のために本格的な100Ahセルを受け取る予定。



USA Natron Energy

図表306： Natron Energyのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Natron Energy (スタートアップはプルシアンブルー-アナログ電極とナトリウムイオン電解質を用いたバッテリーを構築中)
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">EV用ナトリウムイオン電池
期間	<ul style="list-style-type: none">2012年
投資額	<ul style="list-style-type: none">300万ドル
資金源	<ul style="list-style-type: none">電気自動車充電支援のための高度なエネルギー貯蔵のために、カリフォルニア州エネルギー委員会(CEC)から付与された2019年の助成金
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">開発段階：実証技術：EV用ナトリウムイオン電池バッテリー特性：Natron Energyが特許を取得したプルシアンブルー電極は、他のどの商用バッテリーよりも速く、より頻繁に、より低い内部抵抗でナトリウムイオンを貯蔵し、移動させる。充電時の歪みがゼロで、サイクルが10倍速く、サイクル寿命が5万回を超えるNatronのナトリウムイオン蓄電池は産業モビリティの未来を表している。

図表307： Natron Energyプロジェクトの主な特徴

背景

- Natron Energy社は、プルシアンブルー類似体電極とナトリウムイオン電解質を用いたバッテリーを構築中である。2020年にはABBテクノロジーベンチャーズ、NanoDimension Capital、Volta Energy Technologies、Chevron、Khosla Ventures、Prelude Venturesなどの投資家から、3500万ドルのシリーズD資金調達を実施した。

プロジェクト情報

- CECが資金提供したプロジェクトは、Liイオン電池に代わる、コスト競争力のある大規模な選択肢をもたらし、高出力/短時間のディスパッチとEV急速充電市場の長期サイクル寿命の要件に優れた性能を提供する。このシステムはカリフォルニア大学サンディエゴ校のキャンパスに設置される。



図表308： Lytenのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Lyten (米国カリフォルニア州の先端材料会社)
プロジェクト名	- (電気自動車用リチウム硫黄電池)
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2015年
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Lyten
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 開発段階：実証 技術：EV用リチウム硫黄電池 バッテリー特性：900Wh/kgの重量エネルギー密度に到達する可能性を持つ3Dグラフェンベースのリチウム硫黄アーキテクチャ。これが達成されれば、従来のリチウムイオンバッテリーと固体バッテリーの両方を大幅に上回る(3X)

図表309： Lytenプロジェクトの主な特徴

背景

- Lyten社のリチウム硫黄（Li-S）バッテリーは、電気自動車、航空宇宙、防衛用途に理想的に使用されている。関連技術について、260件以上の特許を取得、また出願中である
- Lyten社は、過去数年間にわたって米国政府とともに、厳選された防衛関連アプリケーションのLytCellの能力テストおよびその改善に取り組んでおり、現在EV市場にバッテリー技術プラットフォームを導入する準備が整っている

プロジェクト情報

- Lyten社は2021年9月、EV電池業界を破壊し得るリチウム硫黄(Li-S)電池プラットフォーム、「LytCell EV™」を発表した。
- Lyten Sulfur Caging™は、LytCell™バッテリーで使用される技術で、電気自動車へのLi-Sの実用化を現在まで妨げてきた、サイクル寿命を損なう要因である「ポリ硫化物シャトル」を止めることで硫黄の潜在性能を引き出すもの。DOD試験プロトコル下では、LytCell™プロトタイプ設計で1400サイクルを超えることが実証された。
- 将来のロードマップ：Lyten社は、2025～2026年にLi-S電池のフル生産と、市場での普及を見込む。



Germany Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS)

図表310： IWSのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">・ フラウンホーファー物質・ビーム技術研究所 (IWS)
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">・ 「SoLiS」 多層ポーチセルにおけるリチウム-硫黄固体電池の開発
期間	<ul style="list-style-type: none">・ 2021年
投資額	<ul style="list-style-type: none">・ 180万ユーロ： 科学・産業分野の5つの提携先へ提供
資金源	<ul style="list-style-type: none">・ ドイツ連邦文部科学省(BMBF)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">・ 開発段階： 研究開発・ 技術： リチウム硫黄固体電池・ 目的： Li-S固体技術をベースに複数の電極層を持つ電池セルを開発し、アプリケーション指向で評価する。研究者らは、特にLiSセルの電気航空機への応用を見込んでいる。

図表311： IWSプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ 大容量で、材料コストの低い硫黄を使用するため、リチウム-硫黄固体電池技術で、非常に軽量で費用効率の高い電池を構築できる可能性がある。ただ、応用分野のプロトタイプセルに関するデータが少なすぎるため、この技術进行评估することは今のところ不可能である

プロジェクト情報

提携先の役割-

- ・ Fraunhofer - プロジェクトの調整および「電極の製造およびプロトタイプ革新的プロセスに関するノウハウ」の提供
- ・ ドレスデン工科大学 - Cathode複合材料および適切な電極デザイン
- ・ ウェストファリアン・ウィルヘルム大学 - リチウム-硫黄電池における固体電解質とその輸送特性の調査
- ・ ユストゥス・リービヒ大学 - 固体電池における界面現象の特性化と添加剤の利点の可能性の評価
- ・ Schunk Kohlenstofftechnik GmbH - 炭素添加物および関連する複合材料の製造



Instituto Tecnológico de Aragon

図表312： Tecnológico de Aragonのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Instituto Tecnológico de Aragon (スペイン)
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">ASTRABAT 2025年に向けた全固体高信頼性電池
期間	<ul style="list-style-type: none">2020年1月～ 2023年6月
投資額	<ul style="list-style-type: none">総予算：7.8百万ユーロHorizon 2020 の拠出金：7.8百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020プログラム
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">開発段階：研究開発：技術：固体Liイオン電池提携：このプロジェクトはフランス原子力庁（CEA）がコーディネートしており、14のパートナー、主要な研究センター、大学、バッテリー・エネルギー業界の企業が参加している

図表313： Tecnológico de Aragonプロジェクトの主な特徴

背景

- ASTRABATは2020年1月に開始された、ヨーロッパの3年半のプロジェクトである。特に、電気自動車市場の需要が増加する中で、最適ナリチウムイオンバッテリーソリューションを開発することを目指している
- ASTRABATは、電気モビリティを次の輸送モードにし、2050年までに温室効果ガス(GHG)排出量を80～95%削減するというEU全体の目標に貢献するための、EUによるより広範囲な活動の一環である

プロジェクト情報

- ASTRABATのハイブリッド電解質は、ポリマー(ORMOCER®およびフルオロカーボンポリマー)と無機充填剤および膜(LLZO)をベースとする
- これらの材料で、NMC622とNMC811のようなニッケルマンガンコバルト酸化物(NMC)とSiベースのアノードをベースに、高電圧カソード材料を用いた4a世代のセルに取り組むだろう。開発したすべてのセルを標準的な安全性プロトコルに従って評価し、安全性認定を実施する
- 電極 - 電解質界面のインピーダンスの改善は、NMC材料上の無機被覆、LLZO上の有機被覆及びシリコン上の炭素被覆を開発することにより達成される。異なる粒子径の活性電極材料が合成され、材料のよりよい調和に寄与するであろう。



図表314： EU（LISA）のプロジェクト概要

組織	-
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> LISA 安全な電気道路のためのリチウム・硫黄
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2019年1月～ 2022年7月
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 総予算：7.9百万ユーロ Horizon 2020 の拠出金：7.9百万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none"> Horizon 2020プログラム
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 開発段階：研究開発 技術：固体リチウムイオン電池 提携：LEiTAT、OXIS Energy、Cranfield University、Varta、CIC Energi GUNE、ARKEMA、Fraunhofer IWS、Pulsedon、Accurec、Optimat、TU Dresden、VDL、Groupe Renault

図表315： EU（LISA）プロジェクトの主な特徴

背景

- LISAは、新しい、著しく改良された材料と革新的なプロセスを通して、リチウム硫黄成分とセルの最適化に焦点を当てている。
- このプロジェクトは、100以上のパウチ型セルを生産し、最初の2 kWh PHEV LiSバッテリーモジュールが供給されたALISEプロジェクトの結果を直接の基盤としている

プロジェクト情報

- LISAプロジェクトの技術は環境負荷が低く、グリーン・低エネルギープロセスによる大量生産に完全に対応している。天然黒鉛、コバルトおよびニッケルの使用は放棄され、重要な原材料および有毒成分を含まない技術が提供される
- 主な目的
 - 改善された特性をもつ高エネルギーLi-Sパウチ型セルを供給する
 - 安全な技術を開発する
 - リサイクル可能率50%を達成する
 - 研究室規模で経済的な実行可能性を実証する



UK Faradion Ltd. & AMTE Power

図表316： Faradion Ltd. & AMTE Powerのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Faradion Ltd. & AMTE Power
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">EVおよび他のエネルギー貯蔵用途向けのNaイオン電池
期間	<ul style="list-style-type: none">2011年 AMTE Power社の製造設備を活用可能
投資額	-
資金源	-
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">開発段階：実用化技術：Naイオン電池提携：AMTE Power & Faradion Ltd.

図表317： Faradion Ltd. & AMTE Powerプロジェクトの主な特徴

背景

- 英国の電池メーカーAMTE Power社とナトリウムイオン電池技術の世界的リーダーであるSheffield-based Faradion Ltd社が、Faradion社のIPとAMTE Power社の設計・製造能力を組み合わせた共同研究を発表

プロジェクト情報

- この共同研究では、エネルギー貯蔵ソリューション(ESS)用のナトリウムイオンセル(バッテリーパックに組み込まれる)を製造・販売するための特定の使用分野および地理的分野のライセンスを、AMTE Powerに、付与する。
- このパートナーシップにより、ナトリウムイオン蓄電池技術を、住宅用エネルギー貯蔵、商業用マイクログリッド、風力タービンおよび潮力エネルギー貯蔵を含む一連の再生可能エネルギーアプリケーションに組み込むことが可能になる。
- Faradionの特許技術は、AMTE PowerのThursoにある既存のリチウムイオン製造設備を活用できるため、高度に拡張可能である



UK Oxis Energy

図表318： Oxis Energyのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Oxis Energy
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">ブラジルのLi-Sバッテリーセル製造工場
期間	<ul style="list-style-type: none">2023年までに生産開始
投資額	<ul style="list-style-type: none">総投資額：50百万ドル
資金源	-
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">開発段階：実用化技術：Li-S バッテリーセル提携先：OXIS Energy (英国)、ミナスジェライス開発会社 & メルセデスベンツ・ブラジル (MBB)

図表319： Oxis Energyプロジェクトの主な特徴

背景

- OXIS Energy社とミナスジェライス開発会社CODEMGE社は、ブラジル南東部のミナスジェライス州ジユイス・デ・フォルラのMBBの製造拠点にある工場を所有する15年間のリース契約を結んだ
- ブラジル初のリチウム-硫黄(Li-S)電池製造工場を建設する予定

プロジェクト情報

- この計画は、年間500万個のリチウム・イオウ(Li-S)セルを生産可能にする(出力倍増オプション付き)ことになっており、これはおそらく年間数百MWh以下である
- OXIS Energy社のLi-S電池は重量密度の点で非常にエネルギー密度が高い-400Wh/kg以上。ただし、この種の電池は弱点もあり、ハイスケールのシナリオでは決して使用されなかった
- Li-Sカソードと電解質は英国から供給される予定で、同社はサウスウェールズ州ポートタルボット付近のKenfig Hillの新しい施設で2021年に生産を開始する予定 (当初は年間500,000セル)

金属の高効率リサイクル技術

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

13. 金属の高効率リサイクル技術概要

市場規模（2050年）

・ 203,614億円

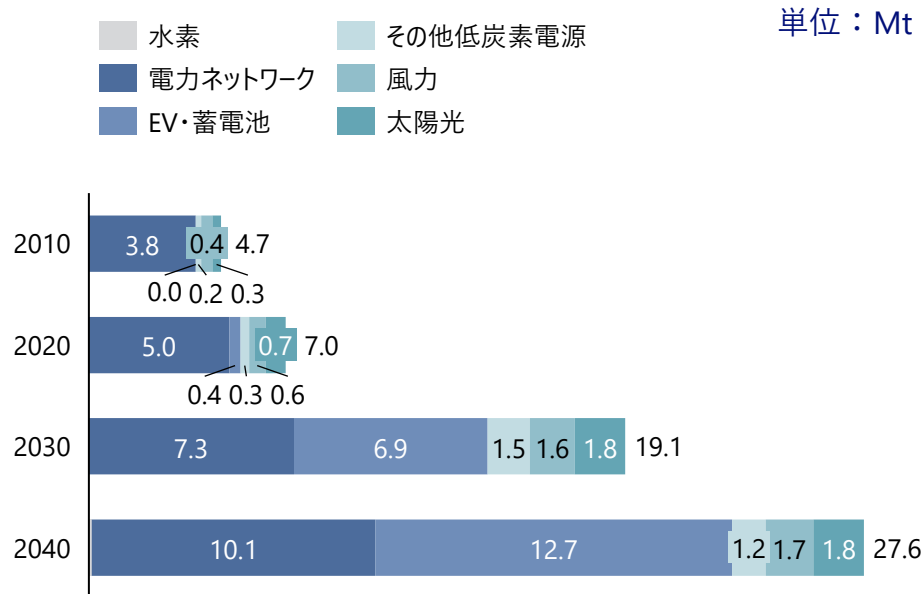
CO2削減ポテンシャル

・ 1.2億トン

■ 市場概要

- ・ レアメタルは自動車やICT関連機器、再エネ等生活を支える様々な技術に用いられている。
- ・ 特に脱炭素社会を目指すにあたって需要は今後も増加する見込みであり、2021年のレアメタル市場は53億USD。2026年には96億USDに成長する見込みである（CAGR12.3%）。
- ・ 脱炭素社会の実現に必要な技術の材料としてレアメタルスが欠かせない他、レアメタルのリサイクルにより、採掘するよりも約50%のGHG排出を削減できると見込まれている。

— 図表320：SDSにおける鉱物需要の予測 2010~2040（IEA） —

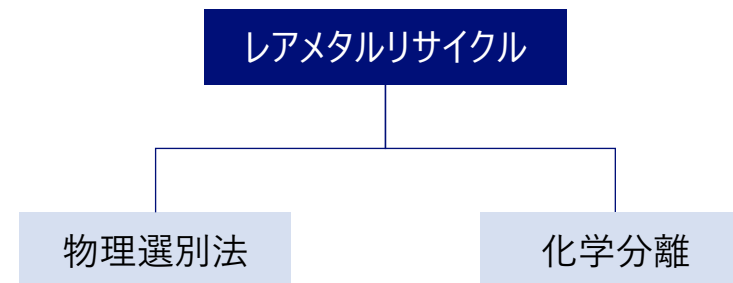


出所）IEA, 経済産業省等公開情報より

■ 技術概要

- ・ ベースメタルのリサイクル技術が進む一方、レアメタルの技術は発展段階にある。
- ・ また、リサイクルの際は経済性を考慮する必要もあり、一定量の廃棄物を収集できることも重要となる。その他有害な廃棄物を発生させないこと、高効率なプロセスであることも実証する上での要件となる。
- ・ 申請されている特許のうち9割は化学分離に関するものである。

図表321：金属の高効率リサイクル技術技術概要



物理選別法

- ・ センサーやAIを用いた廃棄物の化学組成の判別や、自動選別システムの開発により、リサイクルの効率化や低コスト化、リサイクル可能な金属合金の種類の増加等が期待される。
- ・ 具体的な技術にはX-RayやLOD (Laser Object Detection)があり、北欧企業が最先端技術の開発を行っている。

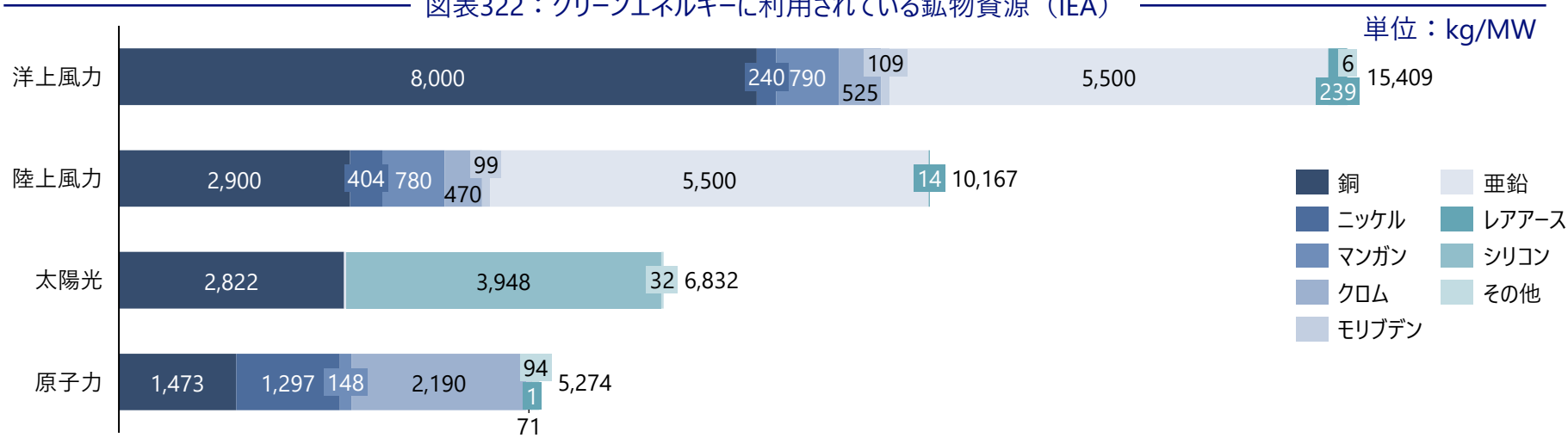
化学分離

- ・ 乾式精練と湿式精練の2つに大別される。
- ・ 乾式精練は加熱や酸化、水素還元等により金属を分離する方法。少量のスクラップから貴金属を回収する場合に用いられる。
- ・ 湿式精練は電気分解や微生物処理、酸・アルカリ浸出を含む。一定のスクラップが継続的に収集できる場合に用いられる。

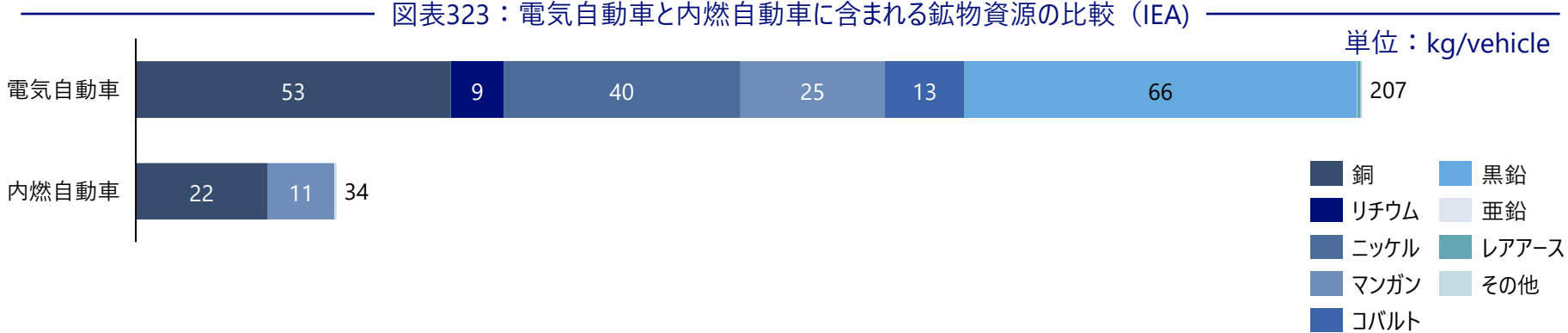
13. 金属の高効率リサイクル技術

脱炭素社会に重要な技術には貴重な鉱物資源が多く含まれており、リサイクル技術の重要性は増す

図表322：クリーンエネルギーに利用されている鉱物資源（IEA）



図表323：電気自動車と内燃自動車に含まれる鉱物資源の比較（IEA）



13. 金属の高効率リサイクル技術

鉱物資源の多くは一部地域に偏在しており、
安全保障の観点からもメタルリサイクル技術の重要性は高い

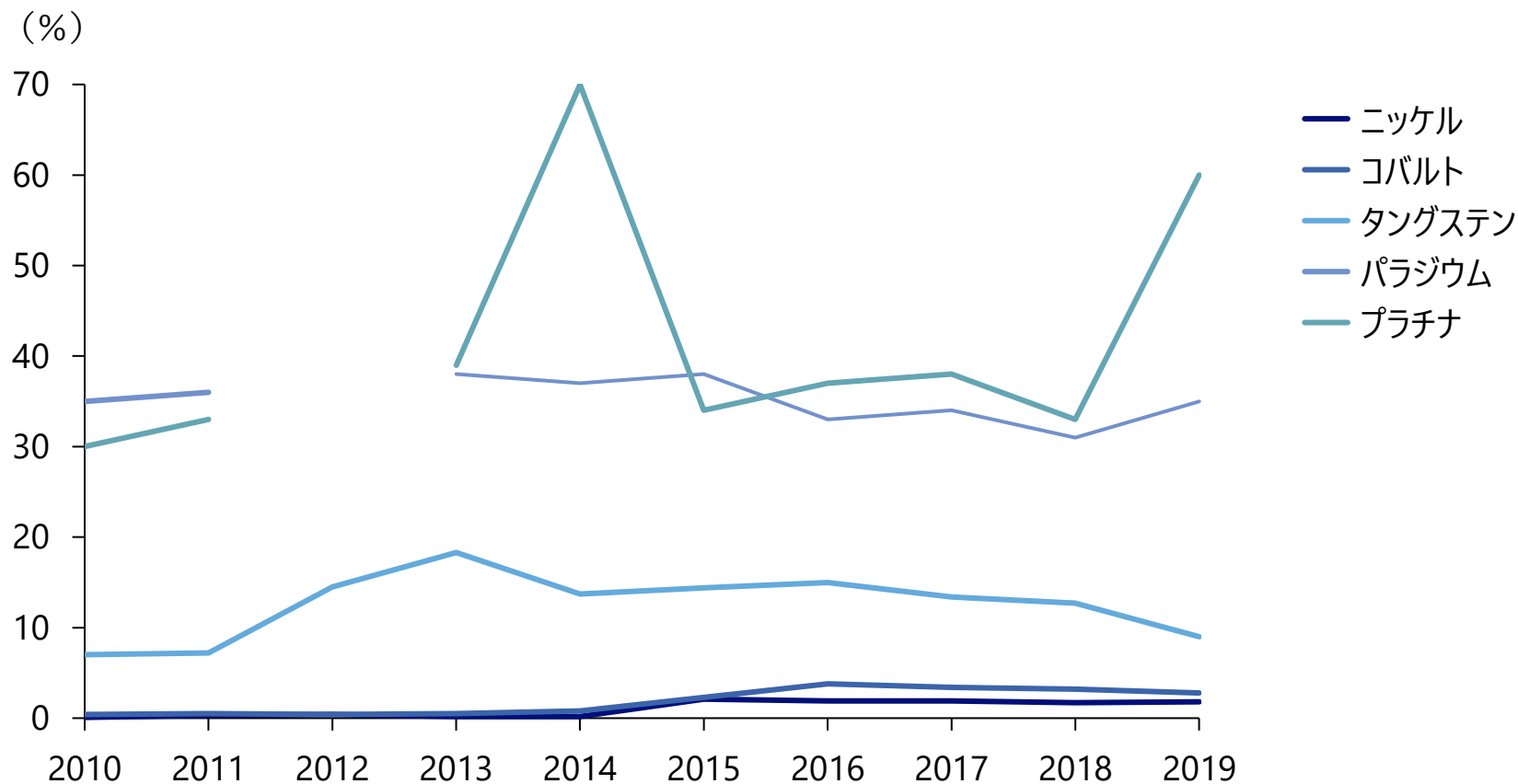
図表324：レアメタルの上位産出国

種別	上位産出国			合計シェア
	1位	2位	3位	
レアアース	中国	アメリカ	インド	98%
コバルト	コンゴ民主共和国	カナダ	中国	61%
タングステン	中国	ロシア	カナダ	92%
タンタル	ルワンダ	ブラジル	コンゴ民主共和国	68%
白金属	南アフリカ	ロシア	ジンバブエ	92%
リチウム	チリ	オーストラリア	中国	87%
マンガン	南アフリカ	オーストラリア	中国	58%

13. 金属の高効率リサイクル技術

国内におけるリサイクル率は一部を除いて低く、廃棄のためにアジアに流出している現状がある

図表325：鉱物別国内のリサイクル率



※パラジウム・プラチナの2012年のデータは記載がないため除外

13. 金属の高効率リサイクル技術

国内動向

■ 方針・戦略

我が国の都市鉱山を有効に活用するため、レアメタル等も含めた多様な金属について、低コストで高効率な金属のリサイクルを可能とする革新的な技術を開発する。同時にバリューチェーンを形成する動静脈連携を強化する情報、制度、社会システムの構築を目指す。

図表326：金属の高効率リサイクル技術国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">経済的にリサイクルが行われている金属種は鉄、アルミ、銅などの主要な元素群か、金、銀、白金などの高価な元素群である。レアメタル等は、国内で経済的なリサイクルビジネスの成立が困難な状況で海外へ流出、または路盤材や埋立等に利用されている。
方針	<ul style="list-style-type: none">AI・ロボット技術を活用した自動選別システム、高効率な金属製錬技術等のリサイクル技術の開発を進める。（NEDOによる3R分野への支援（2021年度予算：5.7億円）、JOGMECの金属リサイクル技術開発事業を継続）動脈産業・静脈産業情報連携システムの開発を行い、国内での金属資源循環の環率（自給率）の高度化、向上を図る。官民共同の下、ナショナルプロジェクトで調査技術開発段階にあるハイレントロピー合金による完全リサイクル技術開発を進めていく。
目標	<ul style="list-style-type: none">自動・自律型リサイクルプラント及び有用金属の少量多品種製錬技術導入により、中間処理コストを1/2に低減、レアメタル製錬コストを1/2～1/3に低減。2030年には約77万トン/年のCO2削減を目指す。ハイレントロピー合金の開発及び実用化を目指す。



■ 技術開発状況

図表327：技術の課題・特徴

物理選別	<ul style="list-style-type: none">センサの活用により人では分類できなかった微量の金属を探知し選別可能。リサイクルの効率化にもつながる。AIや高性能のセンサ開発が求められる。
化学分離	<ul style="list-style-type: none">微量しか含まれない金属を純度高く分離する技術の開発。

図表328：主要な事業者・機関

<p>東北大学</p> <p>（物理選別・化学分離）</p> <p>レアメタル・グリーンイノベーション研究開発センターを設置し、企業とも連携しながらリサイクル技術の開発に取り組む、NEDO事業や文科省事業にも参画。センサの開発や乾式分離法の研究等を幅広く行う。</p>	<p>SUREコンソーシアム</p> <p>（物理選別・化学分離）</p> <p>サプライチェーンとリサイクル業者・関連メーカーによるコンソーシアム。動脈産業と静脈産業が一体となり、リサイクルの効率化や革新技術の開発を行う。物理選別については2023年のパイロット機導入を目指す。</p>
<p>日産</p> <p>（化学分離 乾式精練法）</p> <p>乾式製錬法によりモーターを解体せずに高純度なレアアース化合物を効率良く回収することに成功。使用されているレアアースの98%を回収可能。</p>	<p>住友金属鉱山</p> <p>（化学分離 湿式精練法）</p> <p>世界で初めてリチウム化合物を再資源化し、電池材料へと水平リサイクルする技術の開発に成功。二次電池からのリサイクルは欧州委員会が2020年末に提案した「欧州電池規則案」でも提唱されている技術。</p>

出所）経済産業省、NEDO,各企業プレスリリースより

13. 金属の高効率リサイクル技術

国際動向

主要国 米国、EU

■ 各国動向

図表329：政策・方針

米国	<ul style="list-style-type: none">2014年以降エネルギー省（DOE）と国立エネルギー技術研究所（NETL）が中心となり、自国の産業に重要な素材Critical Material（CM）の供給確保に取り組む。レアメタルはCMの一部に含まれ、石炭やフライアッシュ、電気部品から回収する技術開発を行う。2014年から2018年にかけて年平均1,500万USDを出資、2019年2021年にはそれぞれ1,800万USD・2,300万USDと出資額は増加。
EU	<ul style="list-style-type: none">WEEE※ Directiveが2006年より策定され、2019年により厳しい目標に修正された。2020年にA new Circular Economy Action Planを策定し、ICT機器を早急な対策が求められている分野として記載。Green DealのもとCircular Electronicsの分科会を立ち上げる。北欧企業がメタルリサイクルの分野で先進的な取組をしており、REE4EUやSOLCRIMENT等のプロジェクトがHorizon2020を基に実施されている。
ドイツ	<ul style="list-style-type: none">法令により、一定基準を満たす製造業者とリサイクル業者に電子部品の回収義務が課されている。その他はEUの政策に沿う。E-Waste Expo2020をドイツで開催したり、ガーナ政府と長期にわたり電子部品のリサイクルプロジェクトに取り組む等積極的な取組を行う。
英国	<ul style="list-style-type: none">EUの制度をもとに2013年よりWEEE Regulationが英国でも制定され、埋め立て量を減らすために製造者・小売業者にリサイクルや回収の義務を課している。リサイクルの研究開発に対してはInnovate UKを通じて大学や企業に投資。レアメタルの地域偏在には政府も危機感を持っており、超党派の支持を2026年以降中国からの輸入を禁止する提案も出されている。

図表330：主要な事業者・機関

Idaho National Laboratory

（化学分離）

特許を取得したE-Recov技術は酸と化学物質を消費しない画期的な化学分離技術である。INLは引き続き政府の資金援助を受けながら米国のリサイクル企業と連携し、E-RECOV技術の商用化に向けた技術開発に継続して取り組む。（→p.201）

HyProMag

（化学分離）

英国内ではリサイクル技術の開発を行うバーミンガム大学と連携し、ネオジウム鉄等の選別を薄型テレビや自動車から行う方法・市場ポテンシャルを研究。EU全体ではSusMagProというプロジェクトに参加し、水素処理技術の開発に19のパートナー企業の一つとして取り組む。（→p.205）

Tomra Systems

（物理選別）

アルミニウムのリサイクルで高いシェアを持つノルウェーの企業。アルミニウム以外にも製品の中から特定の金属を探知する高性能なセンサを開発。LODを最初に開発した会社。

※Waste Electrical and Electronic Equipment
出所）IEA、経済産業省、各政府公開情報等より

13. 金属の高効率リサイクル技術

国内動向 | 技術の定性評価

図表331：金属の高効率リサイクル技術国内技術の定性評価

技術	強み		弱み
物理選別法	市場	• ICT関連機器や自動車等の発達した市場があるため市場としての需要有	技術 • 欧州の論文提出数が世界一 • フィンランドのZenRoboticsやノルウェーのTOMRA等が自動選別やX-Rayで先進的な技術開発を行う
		• コンソーシアムの立ち上げや東北大学で専門の研究センター等が立ち上げられている	
	環境		市場 • レアメタルを含む廃棄物の多くがアジア等の海外に流出している
化学分離	技術	• -	技術 • -
	市場	• ICT関連機器や自動車等の発達した市場があるため市場としての需要有	市場 • レアメタルを含む廃棄物の多くがアジア等の海外に流出している

技術進歩

13. 金属の高効率リサイクル技術

想定する連携

環境や技術、市場動向について技術別の差異はあまりみられなかった。
リサイクルにコンソーシアムの設立等を通じて取組んでおり、既に欧州ではリサイクルの規格等も制定されている。
各国とも安全保障を高めるために技術開発・商用化に取り組んでおり、技術の発展度合いからも標準化や国際市場獲得よりも、技術進歩による連携が想定される。

図表332：金属の高効率リサイクル技術において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内	海外
共通	技術進歩	大学・企業と、先進的な技術開発に取り組む北欧企業や米国の研究機関との技術進歩に向けた連携。特に物理選別技術において北欧企業は技術的優位性をもつ。	• 研究機関 企業	• 研究機関 企業
	（海外規制への対応）	欧州をはじめリサイクルの義務を小売り・製造業者に課す事業者が多く、海外規制への対応を目的にコンソーシアムに参加することも想定される。	• 政府・企業	• コンソーシアム等



13. 金属の高効率リサイクル技術 | 参考 | 海外の取組

US Idaho National Laboratory

図表333： Idaho National Laboratoryのプロジェクト概要

組織	Idaho National Laboratory, Colt Refining & Recycling, Inc., Quantum Ventura, Inc.
プロジェクト名	- (E-RECOV—電子廃棄物からの金属回収)
期間	2019年7月-2020年3月
投資額	総額：20万USD
資金源	・ Critical Materials Institute (Department of Energy)
プロジェクト情報	・ 技術ステージ：実証 ・ 技術 - 電子廃棄物からの貴金属および希土類鉱物の抽出

図表334： Idaho National Laboratoryプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ アイダホ国立研究所（INL）は、米エネルギー省設立のCritical Materials Instituteの資金提供のもと、廃棄電子機器から貴重な金属を再生する米国特許技術のE-RECOVを開発した
- ・ INLはColt Refining & Recycling社、Quantum Ventura社と共にエネルギー省のSmall Business Technology Transfer Program フェーズ2に採択された
- ・ 共同研究者であるQuantum Ventura社は、SBIR/STTRの技術移転機会（TTO）スキームのもと、E-RECOV技術の商業化のためのさらなる研究と検証を行い、実行可能で費用効果の高いサプライチェーンと経済モデルを構築。E-RECOVのラボモデルから最先端設備用へのスケールアップを提案する

プロジェクト情報

- ・ E-RECOV技術は、酸浸出とは異なり、陽極で初期酸化剤を継続的に作り出すため、酸と化学物質を消費しない
- ・ E-RECOV法では、貴金属を抽出する前に卑金属と希土類元素を回収し、不純物を低減。より多くの金属を回収し、化学試薬の使用を減らせる上、残った材料の毒性を軽減する持続可能で、安全、かつ環境にやさしい金属の抽出が可能になる
- ・ フェーズ2では、処理能力が一日あたり7kgのE-RECOVプロトタイププラントを建設。携帯電話やハードディスクなどの廃電子機器から貴金属やレアアースを従来の回収技術より30%安価に抽出、回収する



US Momentum Technologies, Inc.

図表335： Momentum Technologies, Inc.のプロジェクト概要

組織	Momentum Technologies, Inc.
プロジェクト名	- (電子廃棄物からのレアアース金属の回収)
期間	2019年にライセンス化
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none">Momentum Technologies, Inc.
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：実装技術 - 使用済みハードドライブの磁石くずからのレアアース金属回収Momentum Technologies社は、The Critical Materials Institute (CMI)、Oak Ridge National Laboratory (ORNL) および Idaho National Laboratoryと回収技術に関する2つのライセンス契約を結んだ最初の契約内容はORNLの膜抽出技術に関するもので、ネオジム、ジスプロシウム、プラセオジムなどのレアアースの選り分けと回収に関するもの。2つ目はハードディスクからの磁石回収のためのORNLの自動処理技術で、処理時のコンベア上のハードドライブの仕分け、整列のために採用されたシステムに関する

図表336： Momentum Technologies, Inc.プロジェクトの主な特徴

背景

- Momentum Technologies社ではリチウムイオン電池の廃棄物からのクリティカルメタル（必須金属）の回収を行っている
- ハードドライブに内蔵されている磁石には30～33%のレアアース元素が含まれる。DOE（米国エネルギー省）によると、データセキュリティの観点から米国では35%の使用済みハードドライバーが粉砕されており、リサイクルすれば年間約1,000メートルトンの磁石素材の回収につながる可能性があるという
- 中国によるレアアースの米国への輸出規制に備え、DOEは2020年にCritical Materials Strategyを策定、2013年にはCritical Materials Institute (CMI) を設立した

プロジェクト情報

- DOEの研究者により使用済みハードドライブやその他の廃棄磁石からレアアースを抽出するプロセスが発明された。彼らは、実験室での実証実験プロセスを特許化、規模を拡大しORNLによりライセンスを付与されたMomentum Technologies社の協力のもと、レアアース酸化物の商業的パッチ製造に向けたさらなるプロセスの拡大に取り組んでいる
- 回収された磁石はハードドライブ製造やモーター組立部品として再利用でき、サイズ変更や形状の変更、またはレアアース金属への再加工により他の用途でも再利用が可能となる
- Momentum Technologies社はORNLが開発した使用済みリチウムイオン電池からコバルトなどの金属を回収するプロセスのライセンスも2020年に取得した

USA USA Rare Earth LLC



図表337： USA Rare Earth LLCのプロジェクト概要

組織	USA Rare Earth LLC（Round Top Heavy Rare Earthの資金提供者および開発パートナー）、Geomega Resources Inc.、Critical Minerals Project、Texas Mineral Resources Corp.
プロジェクト名	- （ネオジム磁石製造からのレアアースリサイクル）
期間	2020年にパートナー間で取引意向書が取り交わされた
投資額	-
資金源	・ USA Rare Earth, Geomega Resources Inc.,
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">・ 技術ステージ：実装・ 技術 - ネオジム磁石製造設備の資源によるレアアースリサイクル・ Geomega Resources社は、永久磁石産業を中心にレアアースをリサイクルし、高需要、高価格の希土類元素4種（HHREE-具体的にはNd、Pr、Tb、Dy）を生産する独自の環境配慮型「ISR技術（Innord’s Separation of REE）」を開発した

図表338： USA Rare Earth LLCプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ Geomega Resources社はレアアースの精製およびリサイクルのためのレアアースクリーニングの技術開発を行っている
- ・ Round Topプロジェクトから提供される資材の60%以上は、クリーンテクノロジー、グリーンテクノロジー、再生可能エネルギーの用途に使用されており、プロジェクトパートナーによれば磁石廃棄物リサイクルは経済的にも効率的で、環境に配慮した自然な方法で行われているとのこと

プロジェクト情報

- ・ USA Rare Earth社は、Hitachi Metals Americaが以前所有し運営していたネオジム磁石製造装置を購入。工場では、米国内での現需要の約17%にあたる年間2000トン以上の焼結ネオジム磁石の生産が可能。工場でのネオジム磁石ブロックの製造、加工プロセスで最大30%の切りくずとスクラップ（最大600トン）が発生するためこれをリサイクルする必要があった
- ・ USA Rare Earth社の工場からの廃材は、Geomega社のリサイクルプラントの原料となり、加工後にUSA Rare Earth社の磁石工場に必要なレアアース酸化物原料の一つとなる。USA Rare Earth社は、Geomega社が最低5年間のリサイクルを可能にするための切りくずとスクラップを提供することになっている



図表339： Ohio State Universityのプロジェクト概要

組織	Ohio State University
プロジェクト名	- (合金混合によるハイレントロピー合金（HEA）の生産)
期間	2021年 調査論文の発表
投資額	-
資金源	-
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - 合金スクラップからのハイレントロピー合金純粋な金属を溶かす代わりに「合金混合」プロセスで、研究者たちは複数の合金スクラップを溶かしハイレントロピー合金を製造。それにより金属スクラップのリサイクルを可能にしながら生産コストを大幅に削減した

図表340： Ohio State Universityプロジェクトの主な特徴

背景

- 米国環境保護局が発表したデータでは、米国内に限っても、2018年の都市廃棄物（MSW）に3469万トンの金属片が含まれており、さらにそのうちリサイクルされていたのはわずか34.9%であったことが示されている。本来の金属製造の一次工程がコスト、およびエネルギー集約的であるため、リサイクルを行うことでその工程のコストとエネルギー消費を大幅に削減することが可能となる

プロジェクト情報

- ハイレントロピー合金は、ほぼ等しい比率で5種類以上の多種類の元素を有する新規な合金である
- 合金混合は、合金スクラップリサイクルの現実的な手段として機能しながら、ハイレントロピー合金の商業化も可能にし、ハイレントロピー合金製造のための有望な、持続可能で費用効果のある手法になるはずである
- 今後の研究は、流入スクラップ組成を効果的に制御し、強固なスクラップ前処理サイクル確立のため、実験と設計法による計算結果の裏付けに焦点を当てる必要がある

UK & Germany HyProMag Ltd.



図表341： HyProMag Ltd.のプロジェクト概要

組織	HyProMag Ltd.
プロジェクト名	- (磁石くずの水素処理 (HPMS技術)、オーディオからのレアアース抽出プロジェクト (REAP))
期間	2020年11月-2021年7月
投資額	総額：174,744ポンド
資金源	<ul style="list-style-type: none">Industrial Strategy Challenge Fund (Innovate UK)
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - 磁石くずの水素処理を用いたネオジム鉄ホウ素 (NdFeB) 磁石廃棄物のリサイクル参画 - HyProMag, European Metal Recycling (EMR), Mkango, University of Birmingham

図表342： HyProMag Ltd.プロジェクトの主な特徴

背景

- イギリスにはレアアースの国内供給源は存在しない。イギリスが持続可能で競争力のあるレアアース磁石生産の開発を迅速に進める上で、リサイクルレアアースの国内供給源の開発は重要な契機となる
- 2021年11月、Mkango社 (HyProMag社の49%までの権益を取得) はドイツの新子会社設立によるHyProMag社の拡張を発表し、ドイツでのレアメタルリサイクルに焦点を当てた「SusMagProプロジェクト」と呼ばれる14百万ユーロのEU資金プロジェクトを開始した
- SusMagProは、ヨーロッパ各国19のパートナーのコンソーシアムが主導し、レアアースリサイクルのための水素処理技術を実施

プロジェクト情報

- イギリスでのプロジェクトの目的は、独自の特許取得済み水素処理技術を用いたハードディスクドライブからのネオジム磁石のリサイクルに関する既知のナレッジに基づき、使用済み自動車や薄型テレビに内蔵されているスピーカーの新たな廃棄ストリームを調査することであった
- HyProMag社とUniversity of Birminghamは、水素処理技術により抽出された磁石成分の分析を行うと同時に、使用済み自動車と薄型テレビ分野でのネオジム鉄ホウ素の原料としての、また潜在的な市場ルートとしての可能性、リサイクルおよび市場の包括的な可能性の判断に焦点を当てた分析を行った
- SusMagProプロジェクトでは、磁性廃棄物からの希土類元素の回収とリサイクルを通じて、EUで持続可能な磁石サプライチェーンを確立することに焦点を当てている



EU Sintef AS

図表343： Sintef ASのプロジェクト概要

組織	Sintef AS
プロジェクト名	REE4EU (強固な、独立したヨーロッパの希土類元素サプライチェーンのための統合高温電解 (HTE) とイオン液体抽出 (ILE))
期間	2015年10月-2019年9月
投資額	総額： 906万3,000ユーロ (うちEU出資 7.522百万ユーロ)
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020 Program
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ： 実証技術 - 永久磁石からのレアアース合金 (REA) 抽出参画 - ノルウェーのSintef社が主導する14のパートナーによるコンソーシアム

図表344： Sintef ASプロジェクトの主な特徴

背景

- レアアースは、スカンジウム、イットリウムにランタノイドを加えた17種の化学元素の総称である
- 貿易データに基づく研究では、2010年のレアアース含有製品の国際貿易は国際貿易の約1兆5000億ユーロ、すなわち13%と推定されている。しかし、現在適切な手法が確立されていないため、レアアース廃棄物の1%しか回収されていない。REE4EUプロジェクトは永久磁石製造からの工程内廃棄物の回収を手が届く範囲内で行う、全く新しいルートを開拓した

プロジェクト情報

- REE4EUプロジェクトは、試用運転を通して、永久磁石とニッケル水素バッテリー廃棄物からの革新的なレアアース合金製造ルートの開発、検証、実証を行った。対象となった統合ソリューションは、レアアース合金生産の直接高温電解のために開発された実験室で実証された技術に基づくものであった
- このプロジェクトは、中小企業および大規模なレアアース金属製造業者、永久磁石製造業者、中小規模のプロセス工学企業およびライフサイクルアセスメント専門家、大規模電子機器およびバッテリーリサイクル企業、中小企業技術移転、イノベーション専門家ならびに化学品およびエンドユーザー協会を含むフルバリューチェーンに関与するものだった



図表345： Katholieke Universiteit Leuvenのプロジェクト概要

組織	Katholieke Universiteit Leuven
プロジェクト名	SOLCRIMET (クリティカルメタルの溶解冶金)
期間	2016年9月–2021年8月
投資額	EU出資総額：249万6,000ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020 Program
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - レアメタルをリサイクルするための溶解冶金参画 - Katholieke Universiteit Leuven（ベルギー）がプロジェクトコーディネーターを務める

図表346： Katholieke Universiteit Leuvenプロジェクトの主な特徴

背景

- 本プロジェクトの大まかな目的は、クリティカルメタル（レアアース、タンタル、ニオブ、コバルト、ガリウム、インジウム、ゲルマニウム、アンチモン）回収のための、様々な種類の消費前後廃棄物に適用可能な新しい冶金学的アプローチである溶解冶金の開発

プロジェクト情報

詳細な目的

- 金属および合金を有機溶媒に溶解するための新ルートの開拓
- 有機溶媒中の異なる溶解度に基づいて金属塩化物を分離する新たな手法の開発
- 相互に混和しない2種類の有機溶媒を用いてクリティカルメタルを精製する新規経路の発見
- 有機溶剤を用いて電解槽内のクリティカルメタルを精製する新技術の開発



EU WEEE Forum

図表347： WEEE Forumのプロジェクト概要

組織	WEEE Forum a.i.s.b.l.
プロジェクト名	- (電気・電子機器廃棄物生産者責任組織の国際協会)
期間	-
投資額	-
資金源	・ Horizon 2020 Program
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">・ 技術ステージ： N/A・ フォーラムについて - ベルギーブリュッセルに本部を置く、全世界の46の会員からなり、生産者責任組織を代表する国際的な団体・ 参画 - 携帯電話などの小型電子機器から冷蔵庫などの大型家電、太陽光発電パネルなどの大型製品まで、あらゆる電気・電子機器メーカーからの参画

図表348： WEEE Forumプロジェクトの主な特徴

背景

- ・ WEEEフォーラムは、WEEE（電気・電子機器廃棄物）バリューチェーン全体の組織間の知識とベストプラクティスの交換を促進するためのプラットフォーム
- ・ 非営利の生産者責任組織が電気・電子機器廃棄物の管理戦略と技術を継続的に改善するのを支援することに焦点を置き、フォーラムでヨーロッパが達成したことを世界的に広めるのを目標としている

プロジェクト情報

WEEEフォーラムが欧州連合の資金（Horizon 2020）を獲得した8つのプロジェクト

① CircThread：循環型経済製品・資源・サービスマネジメントのためのデジタルスレッドの構築（2021年6月～4年間）、② C-SERVEES：電気・電子（E&E）分野における新しい循環型経済ビジネスモデルの開発、テスト、検証、移転（～2022年）、③ COLLECTORS Collection：廃棄物収集システムの評価とグッドプラクティスの特定（～2020年11月）、④ ORAMA：WEEEフォーラムの生産者責任組織のための欧州全域の収集データをよりよく比較するためのプロジェクト（2017年～2019年11月）、⑤ CEWASTE：廃棄物処理に関する自主的な認証スキームの開発（～2021年4月）、⑥ CWIT Illegal Trade、⑦ ProSUM：EU全域でアクセス可能な初の都市鉱山プラットフォームを開発、構造化したデータを一元的に掲載、⑧ ReVolV：（WEEE指令準拠を支援するための）完全自動式使用済み液晶ディスプレイパネルの高スループット技術の開発

EU Tomra Systems

図表349： Tomra Systemsのプロジェクト概要

組織	Politecnico Di Milano
プロジェクト名	ATLAS (ハイレントロピー合金をベース材料とした宇宙推進の先進デザインプロジェクト)
期間	2021年1月-2023年12月
投資額	EU出資総額：293万2,000ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020 Program
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - ハイレントロピー合金材料および構造参画 - 多業種の8つのパートナーによるコンソーシアム

図表350： Tomra Systemsプロジェクトの主な特徴

背景

- アルミニウムのスクラップリサイクルで先進的な技術を持つ企業で、従来より様々な選別技術を開発。
- 次世代の宇宙探査推進システムの開発には、低密度、高強度と延性、耐酸化性、優れたクリープ特性を保證できる高温材料が必要である。ハイレントロピー合金は、高温での比強度と耐酸化性が高い可能性があり、材料として優れた候補であり、推進システムコンポーネントの超合金の代替品として特定されている

プロジェクト情報

目的

- 主な目標は、ハイレントロピー合金の利用を制限する現在の限界と未解決の問題を引受ることである。また多分野材料設計フレームワークを通じて、最先端のハイレントロピー合金および関連材料化合物を宇宙推進産業の現在および未来の実用的なニーズに合わせて進歩させることである
- プロジェクトで設計されたハイレントロピー合金材料および関連化合物材料を製造し、2つの異なる添加剤製造プロセスをクーポンやサンプルの製造から、最終的な実物大デモンストレーションまで適用。これにより新世代の宇宙推進のためのハイレントロピー合金適用の道筋を開く

ゲノム編集

- ✓ 市場・技術概要
- ✓ 国内動向
- ✓ 国際動向

14. ゲノム編集

概要

市場規模（2030年）

・ 617,299億円※2

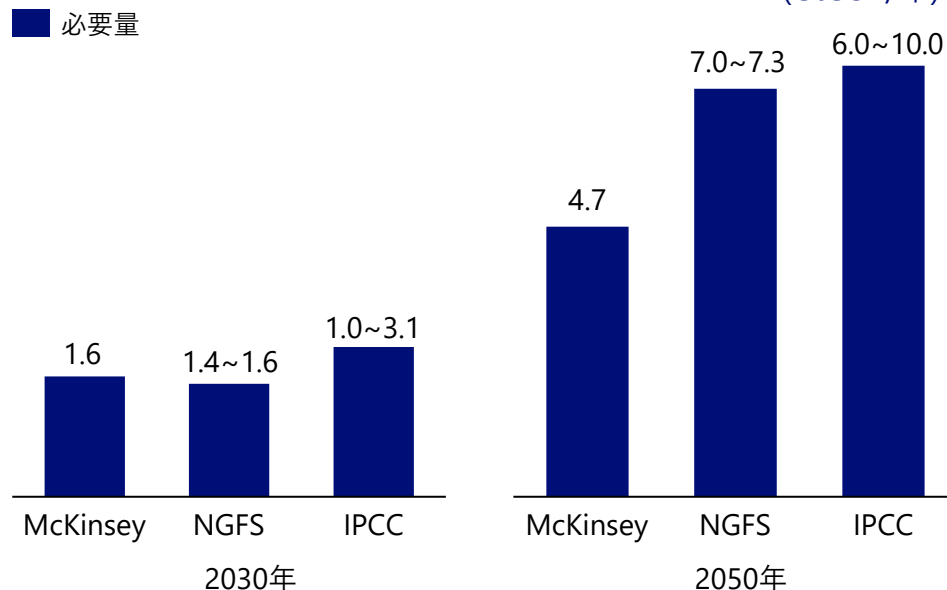
CO2削減ポテンシャル

・ 40億トン

■ 市場概要

- 2050年カーボンニュートラルの達成に向けてDACCSやBECCSを含むネガティブエミッション技術は重要な役割を果たすとされている。
- 1.5℃目標の達成に必要とされる削減量のうち、最大30%の削減に寄与するポテンシャル持つ。
- ネガティブエミッション技術は工学的プロセス（DACCS等）と自然プロセスの人為的加速（風化促進等）に分類されるが、UNEPの分析によると、ネガティブエミッション技術で最大ポテンシャルを実現するためには2050年までに8.1兆ドル※1の投資が必要とされている。現在は年間1330億ドルの投資に留まる。

図表351：ネガティブエミッション技術の必要性
(GtCO2/年)



※1風化促進等自然プロセスの人為的加速を含むNature Based Solution全体での投資額

※2世界のバイオ市場のうち農業分を想定した市場金額

出所）coalition for negative emissions, 経済産業省等公開情報よりNRI作成

■ 技術概要

- ネガティブエミッション技術とは、大気中のCO2除去に資する技術を指し、自然プロセスの人為的加速をする技術と工学的プロセスの2つに大別される。
- 本調査では、自然プロセスの人為的加速に資する技術として、革新的環境イノベーション戦略の技術テーマ30が対象とするゲノム編集（植物の光合成能力の向上等）を対象とする。

図表352：ゲノム編集技術概要



ゲノム編集

- 光合成は太陽光エネルギーを利用するため効率の良いCO2吸収法とされており、米国を中心にCRISPRという手法によるゲノム編集等が進められている。
- 国内でも成長が早い木（エリートツリー）や植物の光合成を効率的にした植物の開発等が進められている。
- 研究・開発段階の技術。

14. ゲノム編集
国内動向

タイプ5 研究段階 国際競争力：低

■ 方針・戦略

2050年カーボンニュートラルの達成に向けてネガティブエミッション技術に注目が集まる中、光合成によるCO2吸収促進に向けた技術開発も徐々に激化。
ゲノム編集技術の開発を進めるほか、評価手法やビジネス化に向けたクレジットの認定等の整備も求められる。

図表353：ゲノム編集国内動向

現状	<ul style="list-style-type: none">エリートツリーの認定やスーパー植物等植物の光合成性能を高めた植物の研究など、植物を用いた気候変動対策が革新的環境イノベーション戦略にて位置付けられ研究が進む。農林水産省でもゲノム編集のロードマップが示されており、SIPや農林水産研究推進事業・PRISM等により品種開発技術の確立が進められている。エリートツリーについては製紙企業を中心に植林面積の獲得等、将来的な植林に向けた動きが始まっている。森林・林業基本計画にもエリートツリーの活用が位置付けられている。				
方針	<ul style="list-style-type: none">引き続き正確なゲノム編集技術の開発を推進するとともに、特定母樹に指定された品種の植林を推進する。同時に植林した樹木の使い道や、食料生産との兼ね合いで想定されるコンフリクトの検討にも取り組む。				
目標	<p>(以下目標の達成はゲノム編集に限定しない)</p> <ul style="list-style-type: none">2030年までに、農地における温室効果ガスに係る循環技術確立・実証2050年までに農地由来温室効果ガスの80%削減を実現				
2022	2023	2024	2025		2030
実用化・実証開発フェーズ (基礎技術の普及・画期的品種の開発)					

■ 技術開発状況

図表354：技術の課題・特徴

ゲノム編集	<ul style="list-style-type: none">対象とする遺伝子を正確に編集する技術の開発生態系への影響の測地・考慮(LCAでの評価手法等削減量の計測手法の確立)
-------	---

図表355：主要な事業者・機関

大学
東京大学・神戸大学・東北大学・岩手大学の4大学が連携し、二重形質転換体イネを新たに作出し、従来のイネと比較し、高温下（40℃）における光合成速度を20%向上させることに成功。
CO2固定酵素であるルビスコとその活性化を促進する酵素を強化させたことで実現した。同時に生産性を25%向上させることにも成功。
東京大学ではゲノム編集技術の進展に向け、CRISPRの改良型の研究開発も行う。

NTT・リージョナルフィッシュ

藻類の二酸化炭素固定量を増加させるゲノム編集技術と魚類の体内に炭素を固定させるゲノム編集技術を融合させた。また生態系への影響を考慮し世界で初めて、ゲノム編集技術を提供した生物が放出されない環境下での実証を行った。

NARO

炭素循環社会構築と脱炭素ビジネス創出に向けて作物の光合成能力を最大化したスーパー作物を開発。一般的な作物（C3作物）より光合成効率の高いC4作物の研究を行う。

出所）経済産業省、農林水産省、NEDO業公開情報より

■ 各国動向

図表356：政策・方針

米国	<ul style="list-style-type: none">エネルギー省傘下のAPRA-Eが植物のCO₂やメタン吸収に着目した研究開発への資金援助プログラムROOTSを立ち上げ現在10のプロジェクトに約3450万ドルを投資している。生物学的CDR（Carbon Direct Removal）に15.75億ドルの投資も行う。大学を中心に光合成の性能を高めるゲノム編集の技術開発や根の研究が盛んに行われており、特許数も多い。
EU	<ul style="list-style-type: none">Farm to Fork（農業政策）やGreen Dealに貢献しうる可能性があることは認められているものの、人為的に遺伝子を組み換えることによる副作用が明確でない等の点から関係各所の反対も強い。2018年に欧州委員会はCRISPRを含む新たなゲノム編集技術に対して既存のGMOと同じ規制を適用することを公表。これにより遺伝子組み換えの生物は基本的に制限される。ただし、法整備が遅れているとの見解が欧州委員会からも出され、Horizon2020にてC4植物に関する研究が一部実施されている。
ドイツ	<ul style="list-style-type: none">ゲノム編集については欧州委員会の方針に従うため、積極的な研究は行われていない。バイオ関連ではバイオエコノミーに関する国のプロジェクトロードマップが策定（BioÖkonomie 2030）されており、カスケード利用の検討等が行われてる。
英国	<ul style="list-style-type: none">Department for Environment, Food and Rural Affairs により、植物に関するゲノム編集の規制が2021年末に緩和された。植物科学全体に関する研究では10年間の計画をUK Plant Science Research Strategyとして打ち出し5600万 £ の資金供給を見込んでいる。

図表357：主要な事業者・機関

Innovative Genomics Institute
(University of California Berkley, University of California San Francisco)

ゲノムの狙った箇所をはさみのような性質を持つたんぱく質CRISPR-Cas9を用いて切断し変質させるゲノム編集技術をバークレー校教授とマックス・プランク感染生物学研究所所長が開発しノーベル化学賞を受賞。IGIでは主要研究テーマ4つのうちの1つにゲノム編集を掲げ生産性向上、光合成に関する先進的な研究を行う。

Salk Institute

植物の炭素固定量を高めるためのゲノム編集技術の開発を行う。また、植物は枯れる際にCO₂を大気に出すが、Salk Instituteでは枯れた際のCO₂排出を減らすようなideal plantの開発にも取り組んでいる。

ORNL

植物のストレス耐性を高めるAaPEPC1と呼ばれる遺伝子を発見したことを2021年の研究論文にて公表。植物のストレス軽減により炭素固定量が増加することも発見。

国内動向 | 技術の定性評価

図表358：ゲノム編集国内技術の定性評価

技術	強み	弱み
ゲノム編集	技術 <ul style="list-style-type: none">エリートツリーやスーパー植物等技術開発を実施	技術 <ul style="list-style-type: none">ゲノム編集に関連する特許数では米国に出遅れる （現在主要となっている最新のゲノム編集技術も米国が開発）
	市場 <ul style="list-style-type: none">ネガティブエミッション技術の一つとして注目されており、研究開発も活発化している	市場 <ul style="list-style-type: none">－
	環境 <ul style="list-style-type: none">国がゲノム編集を含む植物関連の気候変動対策を後押し （ゲノム編集に強い規制がない）	環境 <ul style="list-style-type: none">－

海外市場獲得に向けた標準化（認証制度等）

14. ゲノム編集

想定する連携

図表359：ゲノム編集において想定される連携

技術	連携の目的	概要	国内	海外
ゲノム編集	海外市場獲得に向けた標準化（認証制度等）	徐々にゲノム編集に関する規制緩和が検討される中、ネガティブエミッション技術の重要性から一定の市場も期待される。一方評価手法や認証・クレジット化は今後の検討になっており、プライム獲得に向けて認証等の規格化に取り組むことが重要	<ul style="list-style-type: none">政府企業	<ul style="list-style-type: none">国認証機関



図表360： Salk Instituteのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Salk Institute
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">Harnessing Plants Initiative (HPI) 大気中の炭素を回収・貯蔵し、多様な気候条件に適応する植物の自然の能力を最適化することにより、気候変動と闘うための革新的、拡大可能かつ大胆なアプローチ
期間	<ul style="list-style-type: none">2018年開始
投資額	<ul style="list-style-type: none">\$35m
資金源	<ul style="list-style-type: none">The Audacious Project, TED
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 - 植物の炭素回収・貯蔵能力を最適化するための遺伝学的・ゲノム学的手法Ideal Plantsと呼ばれるこのプロジェクトで開発された新しい植物は、根系が深く、より強固に成長し、土壌をより健康にし、作物の生産量を高め土壌の浸食を食い止める。一般的な植物が枯死すると、空気中に大量のCO2を放出するが、Ideal Plantsが枯死した際には、より多くの炭素がより深い根と土壌に長期間貯蔵されるため、CO2の再放出が著しく少なくなる

図表361： Salk Instituteプロジェクトの主な特徴

背景

- 地球上の土壌の地表から2メートルは、大気中の炭素の3倍以上の量を保持しており、さらに炭素を保持するポテンシャルがある。ソーグ研究所は、彼らのソリューションを用いれば人間が生産する過剰なCO2排出量を年間46%削減できると考えている
- 植物の自然の炭素固定特性を強化するため、遺伝子組換えを用いれば、将来の気候変動の緩和に重要な役割を果たす。また、プロジェクトが大規模に行われれば、気候変動を遅らせるのに十分な炭素を大気中から吸い出すことができるとしている

プロジェクト情報

- このプロジェクトのコンセプトは、通常の作物や、豆、トウモロコシ、綿など日常の植物の遺伝子を、より多くの炭素を吸収する新しい化合物でスプライシング（一部を取除き残りの部分を結合）するものである。炭素は作物の根を通して土壌に運ばれ、土壌中に保たれる。このアプローチは、本質的には、自然が既に行っている作用を高めるものである
- Salk Instituteは、世界各地の農場でIdeal Plantsを導入するため、種子会社に向けて9種の農作物のプレッピング試験を行う交渉を行っている
- 課題 - 1)遺伝子組換え作物（GMO）がグリーンやオーガニックな風潮に対立するとされる時代において（EUではGMOは規制対象）遺伝子組換え作物が地球保全に貢献するということが受け入れられにくい可能性 2) 種子の価格設定と世界中の農家への販売 3)実験用農地の確保

US Oak Ridge National Laboratory



図表362： Oak Ridge National Laboratoryのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Oak Ridge National Laboratory (ORNL)
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">作物の気候適応、収量および炭素回収を高める遺伝子に関する研究
期間	<ul style="list-style-type: none">2021年に発表された研究
投資額	-
資金源	<ul style="list-style-type: none">アメリカ国立科学財団（NSF）
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 – 作物の気候適応、収量、炭素回収力を高める AaPEPC1遺伝子ORNLの科学者らによってAaPEPC1という単一の遺伝子が発見された。AaPEPC1は、干ばつや塩分といったストレスに対して植物の成長と耐性を同時に高める。またそれによる、植物の大気中からのより多くの二酸化炭素回収を可能にすることで、気候変動の根本原因の解決にも取り組んでいる。研究者らは、アガベ（砂漠植物）由来の遺伝子を用いて、収量とストレス耐性を向上させ、タバコ植物の炭素隔離を増大させた

図表363： Oak Ridge National Laboratoryプロジェクトの主な特徴

背景

- 砂漠植物は、ベンケイソウ型有機酸代謝(CAM)として知られる光合成の一形態を用いて、一夜細胞内に保持していたCO2を昼間に糖に変える。ORNLチームは、研究室のスーパーコンピュータ「Titan」を用いて、2017年にCAM光合成の鍵となる遺伝子を特定した。その研究に基づいて、研究者らは重要な酵素の新たな変異体に着目し、変異体が-1)炭素固定と植物成長 2)ストレス耐性を増加させることが知られているアミノ酸であるプロリンの生産、の2つの刺激伝達経路を同時に誘発することを見出した

プロジェクト情報

- このプロジェクトの研究はタバコ植物に関するものであったが、遺伝子の影響はタバコ植物に特異的なものではない可能性が高い。したがって、他種を用いた追加試験がさらに必要である
- 効果 – このプロジェクトを通じた研究は、バイオエネルギーと炭素隔離の両方に効果をもたらし、限界耕作地でのバイオマスの持続可能な生産量の増加を目標とした将来の研究の基盤になりうる。単一の遺伝子組み換えが複数の利益をもたらす可能性がある



Germany Max Plank Institute of Biochemistry

図表364： Max Plank Institute of Biochemistryのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Max Plank Institute of Biochemistry
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">- ルビスコ（植物の光合成酵素）が不活性化した際に、その修復に不可欠な酵素であるルビスコアクチベースの分子機構を解読する研究
期間	<ul style="list-style-type: none">2020年出版
投資額	<ul style="list-style-type: none">-
資金源	<ul style="list-style-type: none">-
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 – 植物の光合成酵素を修復する酵素を発見するための生化学、結晶学および結晶電子顕微鏡の利用目的 – 世界的な食料の需要の増大に対処し、温室効果ガスによる気候変動を減少させる

図表365： Max Plank Institute of Biochemistryプロジェクトの主な特徴

背景

- ルビスコという酵素は、大気中から有機物へのCO2の同化を触媒する。これは光合成の中心的な段階であり、本来すべてのバイオマスを生産するための糖分子を生成する。ルビスコはその極めて重要な役割にもかかわらず、比較的ゆっくりと作用し、砂糖製品によって容易に阻害されてしまう。ルビスコの機能を向上させることで、光合成のプロセスを高めることができると期待されている

プロジェクト情報

- ルビスコアクチベースという酵素Rcaは、植物、藻類およびある種のシアノバクテリアに存在する。Rcaは6つのサブユニットからなるリング状の複合体で、中央に孔がある。Rcaがどのようにして阻害されたRubiscoと相互作用し、結合した砂糖をRubiscoの活性部位ポケットから遊離させ、そのCO2固定活性を回復させるのかは、これまで不明であった。しかし、生化学、結晶学、および結晶電子顕微鏡の助けを借りて、研究者はシアノバクテリアRcaの分子機構の解読に成功した

EU & Germany Province Fryslan

図表366： Province Fryslanのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none"> Province Fryslan（オランダ）の拠点とその他18のパートナー団体
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none"> Circular BIOmass CAscade to 100% (Project BIOCAS)
期間	<ul style="list-style-type: none"> 2017-2021
投資額	<ul style="list-style-type: none"> 総予算/支出：496万ユーロ EUの資金提供：248万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none"> 欧州地域開発基金
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none"> 技術ステージ：実装 技術－バイオマスのカスケード利用 目的－北海地域（NSR）の開発に焦点を当て、農山漁村地域をバイオマスカスケード原理を用いた、統合的に付加価値のある特殊地域に変える。バイオマスカスケード原理とは、バイオマスの価値ある側面を処理する前に抽出することを意味する。資源効率の高い経済活動に向けた産業の移行を支援し、公共および民間部門におけるグリーン成長、エコイノベーション、環境パフォーマンス管理を促進する

図表367： Province Fryslanプロジェクトの主な特徴

背景

- 北海地域（NSR）の経済活動と成長は、主に都市部でみられる。一方、NSRの農山漁村地域では、人口の減少と経済成長の減退が進んでいる
- デンマーク、ドイツ、ベルギー、オランダの18のBIOCASパートナーは、プロジェクトがNSRに経済的、社会的、生態学的効果と展望を生み出すと確信している。プロジェクト実行による農山漁村のグリーン化・活性化の加速が目指されており、環状バイオエコノミーの地域的な発展に向けて、大きな役割を果たすことが期待されている

プロジェクト情報

- BIOCASプロジェクトの主な焦点は、バイオマスのより持続可能な変換のための具体的なバイオマスカスケードアライアンス（BCA）を実現することである。BCAは、バイオマスのバリューチェーン（飼料原料→加工→製品+廃棄物流/飼料原料）に関わるすべての利害関係者が対象となる。また科学、事業、政府の参入により、BCAを実現し、NSRの農山漁村地域における強力な地域環状経済の発展を促す

UK & EU University of Cambridge

図表368： University of Cambridgeのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">University of Cambridge
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">C4光合成の調節と進化
期間	<ul style="list-style-type: none">2016年9月-2022年8月
投資額	<ul style="list-style-type: none">総予算：249万ユーロHorizon 2020の助成金：249万ユーロ
資金源	<ul style="list-style-type: none">Horizon 2020プログラム
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術－C4光合成研究パートナー－THE CHANCELLOR MASTERS AND SCHOLARS OF THE UNIVERSITY OF CAMBRIDGE (UK) が調整

図表369： University of Cambridgeプロジェクトの主な特徴

背景

- 陸上植物の進化の過程での光合成効率の改善は、植物の葉内の細胞分化の増加と関連している
- 本研究の目的は、作物が用いる最も効率的な光合成経路がどのように進化したかの理解を深めることである。また研究により、生産効率の低い作物の生産性を高めるための遺伝子操作が可能になる原理を明らかにすることを目指す

プロジェクト情報

プロジェクトの詳細な目的

- 光合成器官の要素をコードする遺伝子がC4植物の特定の細胞型でどのように発現するかを理解する
- C4植物の葉における細胞特異的遺伝子発現が、C3種に見られる既存の調節ネットワークによって媒介されるという仮説の検証。光合成遺伝子を調節する細胞内機構がC3祖先種だけでなくC4葉にも派生したことが特定されること



図表370： Tropical Biosciencesのプロジェクト概要

組織	<ul style="list-style-type: none">Tropical Biosciences
プロジェクト名	<ul style="list-style-type: none">CRISPR を用いたバナナの品種改良
期間	<ul style="list-style-type: none">2016年創業
投資額	<ul style="list-style-type: none">スタートアップ総予算：\$40mn
資金源	<ul style="list-style-type: none">Temasek, 住友商事を含む複数の機関投資家
プロジェクト情報	<ul style="list-style-type: none">技術ステージ：研究開発技術 – CRISPR によるゲノム編集目的 – CRISPRを用いたキャンベンディッシュ種バナナのRNA鎖の編集による、パナマ病菌トロピカル・レース4（TR4）遺伝子の抑制、および気候変動によって加速する食物問題への取組み

図表371： Tropical Biosciencesプロジェクトの主な特徴

背景

- 世界で流通量の最も多いキャンベンディッシュ種バナナが、1989年に発見されたカビの一種であるパナマ病菌トロピカル・レース4（TR4）によって引き起こされる新しいパナマ病によって壊滅の危機に瀕している
- アジアやアフリカで猛威を振るっていたTR4によるパナマ病が気候変動により広がり、昨年アメリカ大陸でも発見された。経済面でも栄養面でもバナナが世界中で重要な役割を果たしていることから、企業は競ってTR4に強いバナナの品種改良を行っている

プロジェクト情報

- Tropical Biosciences社は、CRISPRなどの遺伝子編集ツールとRNA干渉（RNAi）テクノロジーを組み合わせることで作物の特性を編集する、GEiGSという名前の独自の計算発見および遺伝子工学プラットフォームを構築した
- 本プロジェクトは、植物が遺伝子を制御するのに利用しているRNA分子（sRNA）の中に、外部から侵入した病原菌の遺伝子の働きを抑制するものがあることに注目し、キャンベンディッシュ種のsRNAの働きを改変、TR4遺伝子の働きを抑制する試みを行う
- TR4に耐性のあるバナナを製造することで、栽培途中で売り物にならなくなるバナナを減らし、収穫効率を向上させる。結果的に肥料や水の最適な活用につながり、間接的に栽培段階でのCO2削減に寄与することが見込まれる

参考 | 技術別諸外国の取組

1. 再生可能エネルギーを主力電源に (1/2)

図表372：再生可能エネルギーを主力電源に (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	①設置場所の制約を克服する柔軟・軽量・高効率な太陽光発電の実現	Solar Research and Development Funding Programs	米国エネルギー省（太陽光エネルギー技術局（SETO））	総額 6億5,000万 USD（稼働中および非稼働中のプロジェクトに対して、現在までに助成された金額）	<ul style="list-style-type: none">太陽光エネルギー技術局は、国立研究所、州政府、地方自治体、大学、NPO、民間企業における太陽光発電技術の価格、信頼性、グリッドでの国内利益を向上させるプロジェクトに資金を提供。以前は太陽光発電、集光型太陽熱発電、システムインテグレーション等に研究分野を限定していたが、現在ではすべての研究分野が助成の対象。
	③厳しい自然条件に適応可能な浮体式洋上風車技術の確立	Wind Research and Development Funding Programs	米国エネルギー省（風力エネルギー技術局）	-（個別予算で複数プロジェクトに対応）	<ul style="list-style-type: none">風力エネルギー技術局は革新的な技術の研究開発、コスト削減、風力エネルギーの全米展開のための国家的取り組みを主導。企業、大学、研究所、その他組織との協力協定を通じて投資を行っている。
欧州	③厳しい自然条件に適応可能な浮体式洋上風車技術の確立	NER300 programme for innovative low carbon technology	欧州投資銀行、北海オフショアグリッドのための北海エネルギー協力（NSEC）	5億2,500万ユーロ（第2ラウンド）	<ul style="list-style-type: none">本プログラム下でEUの資金援助を受けて実施された中には、早ければ2024年にも出力規模が最大（容量20万kW）になり離島への電力供給を可能にするEquinor社のカナリア諸島沖浮体式風力発電所プロジェクト等が含まれる。2020年の洋上風力による主要な電力購入契約（PPA）の締結は6件となり、クリーンな洋上風力発電への企業の需要の高まりが見られる。なおNestle、Amazonをはじめ、Deutsche Bahn、Borealis、Ineosが新規にPPA契約を結ぶ。
英国	②地下の超高温・高压水による高効率発電（超臨界地熱発電）の実現	United Downs Deep Geothermal Power Project	コーンウォール州議会、欧州地域開発基金、スライプリニューアブルズ社	<ul style="list-style-type: none">1,790万英ポンド民間投資 500万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">欧州地域開発基金、コーンウォール州議会、スライプリニューアブルズ社など官民の資金が投入された英国初の地熱発電所建設プロジェクト。工業用地の地下にある高温の花崗岩を利用した電力と熱の生産を行う目的で、現在断層帯に2本の深井戸の掘削を行っている。

1. 再生可能エネルギーを主力電源に (2/2)

図表373：再生可能エネルギーを主力電源に (2/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	③厳しい自然条件に 適応可能な浮体式洋上風車技術の 確立	MAXimising wind Farm Aerodynamic Resource via advanced Modelling	イギリス工学物理科学研究会議（ESPRC）	140万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">本プロジェクトは、高度なモデリングによる風力発電所の空気力学リソースの最大化を試みる。エネルギー気象学、空気力学と空力弾性学、摩擦と構造力学、およびシステム制御の研究者の学際的なチームを結集し、条件のシミュレートを行いタービンへの影響につき調査している。
ドイツ	③厳しい自然条件に 適応可能な浮体式洋上風車技術の 確立	Westküste 100	ドイツ連邦経済エネルギー省、各種法人、地方自治体	89百万ユーロ	<ul style="list-style-type: none">Westküste 100プロジェクト：風力発電による再生エネルギーを利用し製油所で電気分解によりグリーン水素を製造する、実環境での実験アプローチを行う。5年間のプロジェクト期間中に、30メガワットの電解プラントの設置予定があり、次のスケールアップステップを見据えたプラントの運転、メンテナンス、制御、グリッドサービス性についての知見が深められる。初期プラントの次ステップとして、洋上風力発電で電力を供給する700MW規模の電解プラントなどが考えられている。

2. デジタル技術を用いた強靱な電力ネットワークの構築

図表374：デジタル技術を用いた強靱な電力ネットワークの構築

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑤系統コストを抑制できるデジタル技術によるエネルギー制御システムの開発	American Recovery and Reinvestment Act of 2009 (Recovery Act)	米国エネルギー省（配電・電力信頼性局）	80億USドル	<ul style="list-style-type: none">2009年のアメリカ復興・再投資法により、米国エネルギー省は電力網の近代化のため45億米ドルの予算が割り当てられた。スマートグリッド投資助成のもと、エネルギー省と電力セクターは共同で電力に関する前例のないレベルのデータ収集を目的に、200以上の電力会社やその他組織が関わる99の費用負担プロジェクトに80億ドルを投資してきた。
欧州	⑤系統コストを抑制できるデジタル技術によるエネルギー制御システムの開発	The Recovery and Resilience Facility	欧州委員会	1,350億ユーロ（復興レジリエンス・ファシリティの配分額の20%）	<ul style="list-style-type: none">欧州委員会により承認された「復興レジリエンス計画」の一部。脱炭素化の促進と、特にエネルギー部門を強化するためのエネルギーシステムのデジタル化（スマートグリッド、スマート家電、スマート需要サイドマネジメント）を行う。
英国	⑥高効率・低コストなパワーエレクトロニクス技術等の開発	Faraday Battery Challenge	英国政府	330百万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">英国国内での、世界レベルの電池の科学的、技術的な開発と製造工程におけるスケールアップの可能性を支援することが目的。高費用対効果で高性能、耐久性があり、安全かつリサイクル可能な電池の開発と成長する市場の獲得に重点に置いている。
ドイツ	⑤系統コストを抑制できるデジタル技術によるエネルギー制御システムの開発	Horizon 2020 (EU)	欧州委員会（コーディネート：シュトゥットガルト工科大学）	総額 5.5百万ユーロ（うちEU3.7百万ユーロ、ドイツ1.8百万ユーロ）	<ul style="list-style-type: none">SIMBLOCKは小規模な住宅・商業顧客向けのデマンド・レスポンス（DR）サービスを開発。需要柔軟性の技術的特性の特定と、DR能力の最適な利用に関する研究、建物ブロックが提供するDRモデルの市場参入とビジネスモデルの開発および実装を行った。

3. 低コストな水素サプライチェーンの構築 (1/2)

図表375：低コストな水素サプライチェーンの構築(1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑨利用・発電：低コスト水素ステーションの確立や、低NOx水素発電の技術開発	Energy Earthshot	米国エネルギー省（エネルギー効率・再生可能エネルギー局）	総額 52.5百万USD（31のプロジェクトへの資金提供）	<ul style="list-style-type: none">クリーンエネルギーソリューションのブレークスルーを10年以内に加速させることが目的。2021年からの10年間でクリーンな水素のコストを80％削減し、1USD/1kgにすることを目指す等、次世代のクリーン水素技術を推進する31のプロジェクトに対する資金提供を行う。燃料電池を含む水素の製造、貯蔵、流通、利用技術における技術ギャップを埋め、2035年までの電力業界の脱炭素化に向け端緒を開く。水素業界内での給与面で好待遇な雇用の創出を目指す。
欧州	⑧輸送・貯蔵：圧縮水素、液化水素、有機ハイドライド、アンモニア、水素吸蔵合金等の輸送・貯蔵技術の開発	The Recovery and Resilience Facility	欧州委員会	-（復興レジリエンス・ファシリティの予算総額は6,725億ユーロ）	<ul style="list-style-type: none">地域の産業エコシステムへの参加を希望する自治体（または他のステークホルダー）、地方当局を支援。バリューチェーンの各段階におけるプロジェクト運用のための適切な財政支援を行う。再生可能な水素製造への投資に対する資金ギャップに対し費用対効果の高い方法で支援する。
英国	⑦製造：CO2フリー水素製造コスト1/10の実現	BEIS Energy Innovation Program (Hydrogen Supply Programme)	ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）、民間企業（Orsted, ITM Power, Philips 66, Element Energy, etc.）、研究機関（クランフィールド大学など）	2,800万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">水素供給プログラムにより、現在5つの実証プロジェクトが資金援助を受ける：①洋上浮体式風力発電からの大規模な水素の製造（Dolphynプロジェクト）、②毎時10万Nm3のクリーン水素製造施設の開発を含むプロジェクト（HyNet）、③固体高分子電解質膜（PEM）電解槽を用いた大量かつ低コストでゼロカーボンな水素供給（Gigastack）、④低炭素水素技術の評価を含む高度な改質プロセスの評価・開発（Acorn）、⑤低炭素バルク水素供給の開発（HyPER）。

出所）各種政府ウェブサイトより

3. 低コストな水素サプライチェーンの構築 (2/2)

図表376：低コストな水素サプライチェーンの構築(2/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	⑦製造：CO2フリー水素製造コスト1/10の実現	Net Zero Hydrogen Fund	英国政府	<ul style="list-style-type: none"> 240百万英ポンド 民間投資 推定 40億英ポンド (2030年まで) 	<ul style="list-style-type: none"> 2030年までに5GWの低炭素水素製造能力を英国が産業界とともに開発することを目標とする。 2021年に水素ビジネスモデルとその収益メカニズムを定め民間部門の投資を呼び込むなど、さまざまな施策によっても支援されていく。
ドイツ	⑧輸送・貯蔵：圧縮水素、液化水素、有機ハイドライド、アンモニア、水素吸蔵合金等の輸送・貯蔵技術の開発	National Decarbonisation Programme	ドイツ政府	<ul style="list-style-type: none"> ドイツ国内 70億ユーロ 国際連携 20億ユーロ 	<ul style="list-style-type: none"> 新たなインフラ構築にあたり、道路輸送、鉄道網内の適切な場所、水路等での需要に基づいた水素充填ステーションネットワークの拡張整備が課題。 個人の自動車ユーザーに加え、大規模なフリート運営者も需要を特定する際の対象に含まれている。
	⑨利用・発電：低コスト水素ステーションの確立や、低NOx水素発電の技術開発	Horizon 2020 (EU)	欧州委員会 (コーディネート：シーメンス エネルギー グローバル GmbH & Co. KG)	<ul style="list-style-type: none"> 総額 15百万ユーロ (うちEU 10百万ユーロ) 民間投資 ~5百万ユーロ 	<ul style="list-style-type: none"> EUが資金提供するHYFLEXPOWERプロジェクトは、先進的な乾式低排出ガス水素ガスタービンを搭載した初の完全統合型で産業規模の発電所を開発・運営。 100%グリーン水素による発電を目指す。

4. 革新的原子力技術／核融合の実現 (1/2)

図表377：革新的原子力技術／核融合の実現 (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑪核融合エネルギー技術の実現	Innovation Network for Fusion Energy (INFUSE) program	米国エネルギー省（核融合エネルギー科学研究所（FES））	総額 2.1百万USD（9つの共同プロジェクトへの資金提供）	<ul style="list-style-type: none">核融合エネルギー開発における課題の克服が目的。選定された企業は米国エネルギー省が所有する国立研究所の世界クラスの専門知識と施設へのアクセスが提供される。研究者は核融合エネルギーシステムの追求における重要な科学的・技術的課題に取り組む。
	⑪核融合エネルギー技術の実現	-	米国エネルギー省（核融合エネルギー科学研究所（FES））	6.4百万USD	<ul style="list-style-type: none">世界最大、および世界第2位の超伝導ステラレータ装置であるドイツのヴェンデルシュタイン7-Xと日本の大型ヘリカル装置を備えた核融合エネルギー施設にて、米国の科学者が7つの研究プロジェクトを実施。これらの共同研究により、米国の研究者は海外の最先端研究施設で磁場核融合研究の最前線における科学技術課題を探索する。
	⑪核融合エネルギー技術の実現	-	米国エネルギー省（核融合エネルギー科学研究所（FES））	総額 11百万USD（10の量子情報科学プロジェクトへの資金提供）	<ul style="list-style-type: none">資金提供された10のプロジェクトは、核融合とプラズマ科学発展のための量子コンピューティングの可能性を模索し、核融合プラズマ測定の範囲と精度を高めるための量子センサー使用の調査を行い、極限状態における新たな材料の調査に革新的な量子技術を適用する。
欧州	⑪核融合エネルギー技術の実現	European DEMO Device	欧州委員会、ユーロフュージョン	2014年～2020年に（Horizon 2020の）EURATOMから678.8百万ユーロの資金提供	<ul style="list-style-type: none">DEMO（DEMOstration Power Station）は、国際協力によって開発が進められる核融合エネルギーの原型炉。欧州のDEMO装置は、純発電量300MW～500MWの実証発電所としても想定されている。

4. 革新的原子力技術／核融合の実現 (2/2)

図表378：革新的原子力技術／核融合の実現 (2/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	⑩安全性等に優れた原子力技術の追求	Advanced Nuclear Fund	英国政府	385百万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">英国政府によるグリーン産業革命の新政策Ten Point Planにより、次世代原子力技術に投資するための先進原子力基金。国内の小規模発電所技術設計を開発するための小型モジュール炉の開発と、2030年代初頭までの新型モジュール式原子炉の実証炉実現に向けた研究開発も行われる。
ドイツ	⑪核融合エネルギー技術の実現	Wendelstein 7-X	マックス・プランク・プラズマ物理研究所（IPP）	<ul style="list-style-type: none">プロジェクトの資金提供は約80%がドイツ、約20%が欧州連合ドイツ資金のうち90%は連邦政府、10%はメクレンブルク・フォアポンメルン州政府からの提供	<ul style="list-style-type: none">ヴェンデルシュタイン7-Xは前身の「ウェンデルシュタイン7-AS実験炉」をベースに開発された。本プロジェクトはステラレータ技術の発展を図ることを目的としている。実験炉では発電は行わず、今後の核融合発電所の主要機器の評価のために使用される。

5. CCUS／カーボンリサイクルを見据えた低コストでのCO2分離回収 (1/2)

図表379：CCUS(1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑫CCUS／カーボンリサイクルの基盤となる低コストなCO2分離回収技術の確立	Carbon Capture R&D	米国エネルギー省（化石エネルギー・炭素管理局）	-	<ul style="list-style-type: none"> 今ある技術と比べ、コストとエネルギー必要量を段階的に削減可能な、より高度な炭素回収技術に関する研究開発活動を実施。 炭素回収プログラムでは、先進的な溶媒、吸着剤、膜、新しいコンセプトの4つの主要技術の研究開発を進めており、これらのキーテクノロジーは燃焼前・後の両方の技術領域で開発されている。
欧州	⑫CCUS／カーボンリサイクルの基盤となる低コストなCO2分離回収技術の確立	Northern Lights project in Norway	民間企業（Equinor）、ノルウェー政府、欧州委員会	12億USDドル	<ul style="list-style-type: none"> Northern Lightsプロジェクトは、第三者に開かれたCO2輸送・貯蔵施設の開発・運用を含む史上初の国境を越えたオープンソースのCO2輸送・貯蔵インフラネットワークの構築を行う。 ヨーロッパの産業排出者向けにCO2を安全かつ恒久的に地下に貯蔵する機会を提供。 プロジェクトの第一段階として、2024年半ばの年間最大150万トンのCO2貯蔵を予定している。
英国	⑫CCUS／カーボンリサイクルの基盤となる低コストなCO2分離回収技術の確立	Acorn CCS Project	民間企業（Storegga、Shell、Harbour Energy）、英国政府およびスコットランド政府、欧州連合	270万英ポンド	<ul style="list-style-type: none"> 英国におけるCCS普及を阻む要因の1つである高額な資本コストを克服するため設計された炭素回収・貯留プロジェクト。 2020年代半ばまでに低資本コストでスタートし、Acorn水素やスコットランドの工業地帯からのCO2輸入を含む幅広いAcorn構築に必要な不可欠なCO2輸送・貯蔵インフラを確立する。
	⑫CCUS／カーボンリサイクルの基盤となる低コストなCO2分離回収技術の確立	Carbon Capture and Storage Infrastructure Fund (CIF)	気候変動委員会、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）	<ul style="list-style-type: none"> 10億英ポンド 民間投資 推定10億英ポンド（2025年まで） 	<ul style="list-style-type: none"> Ten Point Planには、遅くとも2030年までに4つの産業クラスターでCCUSを展開し、年間1,000万トンのCO2を回収することが盛り込まれている。 EBISは公約達成のため、CCUS導入先の順序を決めるアプローチの可能性についての意見を求めるコンサルテーションを発表した。

出所）各種政府ウェブサイトより

5. CCUS／カーボンリサイクルを見据えた低コストでのCO2分離回収 (2/2)

図表380：CCUS(2/2)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要	
ドイツ	⑫CCUS／カーボンリサイクルの基盤となる低コストなCO2分離回収技術の確立	National Decarbonisation Programme	ドイツ連邦経済エネルギー省	105百万ユーロ（2021年まで）、102百万ユーロ（2025年まで）	<ul style="list-style-type: none">炭素回収・利用・貯留（CCU/CCS）技術の開発における、同国の原料産業を支援することを目的とした補助金プログラム。対象となる技術に北海でCO2を貯留するために必要なインフラストラクチャー、CCSと組み合わせた直接空気技術（DACCS）、およびCCSでのバイオエナジーの使用（BECCS）が含まれる。

6. 多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 (1/4)

図表381：多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 (1/4)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	Acceleration of Deployment of Electric Vehicles and Chargers	米国運輸省、米国エネルギー省、米国一般調達局	150億USD（本予算における複数の補助金の総額）	<ul style="list-style-type: none">エネルギー省代替燃料データセンターの記録によると、2021年3月、米国は10万基の公共充電器設置のマイルストーンを達成した。今後は国内のあらゆる場所での電気自動車運転の利便性向上にむけた展開を加速させる。バイデン大統領のアメリカン・ジョブズ・プランには、50万基の充電ステーションの全国ネットワークを構築するための150億ドルの変革的投資が含まれる。
欧州	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	Recharge and refuel (The Recovery and Resilience Facility)	欧州委員会	-（復興レジリエンス・ファシリティの予算総額は6,725億ユーロ）	<ul style="list-style-type: none">都市、集積地が個別に持続可能な都市モビリティ計画を採択し、実施するための枠組みの構築。都市、集積地がスマートで安全かつクリーンな公共車両を調達可能にする補助金制度の創設。環境汚染度の高い車両に対するスクラップ・スキームの導入：環境汚染度の高い車両を手放すのと引き換えに、集団交通パス、自転車やゼロ・低排出ガス車購入のための手当等の提供を行う。
	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	ChargeUp Europe (The Recovery and Resilience Facility)	-	-	<ul style="list-style-type: none">ChargeUp Europeは充電サービスのプロバイダー、インフラメーカー、エネルギー会社、送電システム事業者、データプロバイダー等からなるEV充電インフラ協会。代替燃料インフラストラクチャー指令（AFID）の改訂に関する12の推奨事項からなるポジションペーパーを提出。
	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	Clean Vehicles Directive (The Recovery and Resilience Facility)	欧州委員会	-	<ul style="list-style-type: none">欧州連合は、様々な規制やインセンティブで商用ゼロエミッション車（ZEV）の導入を支援。2019年の重量車CO2基準は、2024年までディーゼルエンジン搭載トラックの最大2倍のクレジットをZEVメーカーに提供する。

出所）各種政府ウェブサイトより

6. 多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 (2/4)

図表382：多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 (2/4)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	Fund to advance support the electrification of UK vehicles and their supply	英国政府	<ul style="list-style-type: none">10億英ポンド民間投資 推定 総額 30億英ポンド（2026年まで）の一部	<ul style="list-style-type: none">英国車とそのサプライチェーンの電化を支援するため、必要とされるバッテリーを大規模に生産するための工場開発などをおこなう。英国自動車産業の電動化推進のため、2021年8月時点の議会で初めてとなる5億ポンドの投資を発表した。
	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	Accelerate the roll out of charging infrastructure across UK	英国政府	<ul style="list-style-type: none">13億英ポンド民間投資 推定 総額 30億英ポンド（2026年まで）の一部	<ul style="list-style-type: none">EV充電インフラの整備を加速。高速道路や幹線道路への急速充電器の設置や家庭や職場の近くの路上充電ポイントの設置を行い、従来の給油と同じくらい簡単に充電ができるよう整備を行う。
	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	Plug-in Car, Van, Taxi and Motorcycle grants	英国政府	<ul style="list-style-type: none">582百万英ポンド民間投資 推定 総額 30億英ポンド（2026年まで）の一部	<ul style="list-style-type: none">英国政府は、プラグインカー、バン、タクシー、オートバイの補助金を2022-23年まで延長。消費者向けに車両価格の引き下げを行う。
	⑭燃料電池システム、水素貯蔵システム等水素を燃料とするモビリティの確立	Zero Emission Heavy Goods Vehicles (HGVs)	英国政府	<ul style="list-style-type: none">20百万英ポンド民間投資 推定 総額 30億英ポンド（2026年まで）の一部	<ul style="list-style-type: none">2022年、英国政府は水素やその他のゼロ・エミッション・ローリーを開拓する貨物実験に2,000万ポンドを投資し、コスト効率の良いゼロ・エミッション大型貨物車を開発する産業をサポートする。
	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	FlyZero	英国政府	15百万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">航空宇宙技術研究所（ATI）において、2030年に運航開始可能なゼロエミッション航空機の設計・開発における戦略的、技術的、商業的な問題についてFlyZeroという名で、12カ月間の研究が行われた。

6. 多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 (3/4)

図表383：多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 (3/4)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	⑮カーボンリサイクル技術を用いた既存燃料と同等コストのバイオ燃料・合成燃料製造や、これら燃料等の使用に係る技術開発	Sustainable Aviation Fuels (SAF) Competition	英国政府（運輸省）	総額 15百万英ポンド（8つのプロジェクトへの資金）	<ul style="list-style-type: none">英国における持続可能な航空燃料（SAF）の製造を支援するためのコンペが行われ、8つの会社に総額1,500万ポンドが投資された。選定されたプロジェクトはすべて、従来の化石ジェット燃料の代わりに使用された場合、ライフサイクルベースで70％以上の排出量削減が可能なSAFを製造できる明確なポテンシャルを持つもので、大規模なSAF生産プロジェクトの開発初期段階が支援される。
	⑭燃料電池システム、水素貯蔵システム等水素を燃料とするモビリティの確立	Clean Maritime Demonstration Programme	英国政府（運輸省）	20百万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">クリーン・マリタイム・プランで設定されたビジョンに基づきクリーン・マリタイム実証コンペが実施され55のプロジェクトが選定され革新的企業に最大2,325万9000ポンドのマッチング資金が割り当てられた。ゼロエミッション船技術および環境に優しい港の設計・開発を支援、プロジェクトは2022年3月までに完了する予定。
ドイツ	⑬自動車、航空機等の電動化の拡大（高性能蓄電池等）と環境性能の大幅向上	National Decarbonisation Programme	ドイツ連邦交通省	<ul style="list-style-type: none">ドイツ国内 70億ユーロ国際連携 20億ユーロ	<ul style="list-style-type: none">水素を利用したパワートゥーXベースのモビリティは、電気の直接使用が合理的でない、または技術的に実現不可能なアプリケーションのための代替オプションになり得る。公共交通機関、大型車、商用車、物流など、さまざまな分野での利用が可能。燃料電池自動車の導入により、バッテリー駆動の電気モビリティを補完し、大気汚染物質と二酸化炭素排出を大幅に削減することに貢献する。

6. 多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 (4/4)

図表384：多様なアプローチによるグリーンモビリティの確立 (4/4)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
ドイツ	⑭燃料電池システム、水素貯蔵システム等水素を燃料とするモビリティの確立	National Decarbonisation Programme	ドイツ連邦交通省、 H2モビリティ	- <ul style="list-style-type: none">• H2 MOBILITYドイツは、国内で乗用車、商用車むけの水素充電所91カ所を運営、ドイツにおける全国的な水素インフラの確立を担う。• H2 MOBILITYの株主は、Air Liquide、Daimler、Linde、OMV、Shell、TOTALで、BMW、Honda、Hyundai、Toyota、Volkswagen、NOW GmbH National Organisation Hydrogen and Fuel Cell Technologyは関連パートナーとしてH2 MOBILITYに参画。

出所) 各種政府ウェブサイトより

7. 化石資源依存からの脱却 (再生可能エネルギー由来の電力や水素の活用) (1/3)

図表385：化石資源依存からの脱却 (1/3)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑮プラスチック等の高度資源循環技術の開発	BOTTLE: Bio-Optimized Technologies to Keep Thermoplastics out of Landfills and the Environment Funding	米国エネルギー省（エネルギー効率・再生可能エネルギー局）	総額 27百万USD（12のプロジェクトへの資金提供）	<ul style="list-style-type: none"> 高度なプラスチックリサイクル技術やリサイクル可能な新型プラスチックの開発を支援する12のプロジェクトに対する資金提供。 Plastics Innovation Challengeの一環として、選定されたプロジェクトはプラスチックを化学的ビルディングブロックに分解し新たに製品を作る既存のリサイクルプロセスの改善も行う。
欧州	-	Renewable Energy Directive 2018	欧州委員会	-	<ul style="list-style-type: none"> 改正EU再生可能エネルギー指令（REDII）：2021年、EUが自然エネルギーの世界的リーダーであり続けること、さらに広くはパリ協定に基づくEUの排出削減義務の達成を支援することを目的とした「すべてのヨーロッパ人のためのクリーンエネルギー」パッケージの一環として、改正再生可能エネルギー指令を発効。 新指令は、2030年のEUの最終エネルギー消費量の少なくとも32%を再生可能エネルギーとする拘束力のある目標を新たに設定。2023年までに上方修正する可能性のある条項と、2030年までに輸送における再生可能燃料の割合を14%増加させる目標を定めており、すべての加盟国が2020年までに輸送用燃料の10%を再生可能エネルギー源から調達することが義務づけられている。 加盟国が目標達成のために適用可能なさまざまなメカニズム（支援制度、原産地保証、共同プロジェクト、加盟国と第三国の協力）や、バイオ燃料の持続可能性基準も示している。

7. 化石資源依存からの脱却 (再生可能エネルギー由来の電力や水素の活用) (2/3)

図表386：化石資源依存からの脱却 (2/3)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	⑮金属等の高効率リサイクル技術の開発	Transforming Foundation Industries (TFI)	英国研究技術革新機構、ビジネス・エネルギー・産業戦略省	<ul style="list-style-type: none"> 66百万英ポンド（2020年～2025年まで） 民間投資 83百万英ポンド
	⑯水素還元製鉄技術等による「ゼロカーボン・スチール」の実現	Clean Steel Fund	ビジネス・エネルギー・産業戦略省	<ul style="list-style-type: none"> 英国の基礎産業（ガラス、金属、化学、セメント、紙、セラミック）全体の炭素削減を可能にするプログラム。 これらの産業は合わせて、英国経済において全材料の75%を生産し、国内の総炭素排出量の約10%を占めている（UKRI, 2020）。 本チャレンジによって、主要産業部門は競争力を維持し、2050年までのカーボンゼロという政府の公約を達成できるようにする。
ドイツ	⑮水素還元製鉄技術等による「ゼロカーボン・スチール」の実現	National Decarbonisation Programme	ドイツ政府、地方公共団体、企業	<ul style="list-style-type: none"> 総額 240百万英ポンド クリーン・スチール・ファンドは、英国の鉄鋼産業が新しい技術とプロセスを通じて、より低炭素な鉄鋼生産に移行することを支援。 気候変動法と調和しつつ、長年の専門知識とスキルを基にクリーン成長の機会を活用し、英国鉄鋼産業の長寿命化と回復力の最大化を図る。
	⑯水素還元製鉄技術等による「ゼロカーボン・スチール」の実現			<ul style="list-style-type: none"> 370百万ユーロ（2023年まで） Carbon2Chem研究プロジェクト：鉄鋼業（およびその他のセクター）における炭素回収・利用（CCU）の可能性についての調査を目的としたプロジェクトで、約1億4千万ユーロの資金提供を受ける（フェーズ1：2016～2020、フェーズ2：2020～2023）。 国家水素戦略は、鉄鋼および化学産業でのグリーン水素の製造のための入札制度など、さまざまな資金調達プログラムの評価について規定している。

7. 化石資源依存からの脱却 (再生可能エネルギー由来の電力や水素の活用) (3/3)

図表387：化石資源依存からの脱却 (3/3)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
ドイツ	-	Renewable Energy Act- Germany	ドイツ政府、地方公共団体、企業	-
				<ul style="list-style-type: none"> 再生可能エネルギー法の制定（2000年）により再生可能エネルギーを送電するすべての事業者に市場価格以上の補償が保証されたことで、ドイツでは産業が急成長。現在、数十万人が産業に従事している。 再生可能エネルギー発電技術は、シーメンス、エネルギーコン、SMAなどの大企業や大手電力会社から、太陽光による自家発電を行う家庭や商業施設まで、さまざまなプレーヤーによって開発、生産、所有、運営されており、間には、中小企業、市民協同組合、自治体電力会社、グリーン・スタートアップ企業が混在。それらは、ドイツ再生可能エネルギー連盟、再生可能エネルギー機関などの団体が組織している。 再生可能エネルギー機関（AEE）は、この分野の企業、連邦経済省、ドイツ風力エネルギー協会、ドイツ太陽エネルギー産業協会、連邦バイオエネルギー協会など、この分野のさまざまな部門を専門とする、多くの業界団体が出資するコミュニケーションプラットフォームである。

8. カーボンリサイクル技術によるCO2の原燃料化など

図表388：カーボンリサイクル技術によるCO2の原燃料化など

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑱人工光合成を用いたプラスチック製造の実現	The Fuels from Sunlight Energy Innovation Hub Program	米国エネルギー省	1億USDドル	<ul style="list-style-type: none">米国エネルギー省の2020年から5年間で1億ドルの資金提供を受けるプログラム。太陽光から燃料を製造するための人工光合成技術の進歩に焦点を当てている。
英国	⑳製造技術革新・炭素再資源化による機能性化学品製造の実現	Carbon Capture and Storage Infrastructure Fund (CIF)	英国政府	10億英ポンド	<ul style="list-style-type: none">CCUSインフラ基金は産業界でのCCUSの迅速かつ大規模な展開の確実性を高めるための基金。CCUSインフラストラクチャーの開発により英国の工業地域の経済変革に貢献。世界のネットゼロエコノミーにおける英国産業の長期的競争力を強化する。最も困難な産業の脱炭素化にむけて、低炭素電力とネガティブ・エミッションの道筋を提供する。
ドイツ	㉑製造技術革新・炭素再資源化による機能性化学品製造の実現	German Research Foundation (DFG)	ドイツ研究振興協会、ロシア基礎研究財団、ロシア連邦		<ul style="list-style-type: none">沈み込み帯のマグマティズムによる炭素のリサイクル。カンラン石中の実験的に均質化されたメルトインクルージョンに関する研究：ドイツとロシアの二国間研究プロジェクト。マントルの沈み込み帯のCO2循環や火山活動によって大気中に放出されるCO2に関する基礎的で現在欠けている情報を提供すること等が目的。

9. 最先端のGHG削減技術の活用 (1/2)

図表389：最先端のGHG削減技術の活用 (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	②⑥温室効果の極めて低いグリーン冷媒の開発	-	米国エネルギー省	2百万USD	<ul style="list-style-type: none"> 空調・暖房・業務用冷凍機器メーカーの北米の業界団体である空調・暖房・冷凍技術協会（AHRTI）は、エネルギー省から低GWP（地球温暖化係数）冷媒の研究資金を受け取る。 AHRTI（AHRIの研究部門）は、オークリッジ国立研究所および国立標準技術研究所と共同で、低GWP冷媒データベースを開発する予定。 これにより、米国のメーカーに正確な冷媒データを提供し、より環境に優しい冷媒を使用した効率的で信頼性の高い空調製品を設計、製造、商品化することを目的とする。
	②④低コストな定置用燃料電池の開発	-	米国エネルギー省（エネルギー効率・再生可能エネルギー局、水素・燃料電池技術室）	-（個別予算で複数の助成金を支給）	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー省は2003年以降、水素および燃料電池技術の研究、開発、実証を支援するため多くの科学研究プロジェクトに資金を提供。
欧州	②⑥温室効果の極めて低いグリーン冷媒の開発	European Green Deal	欧州委員会	-	<ul style="list-style-type: none"> Fガス規制のためのEU法：HFCを含むフッ素系温室効果ガス（Fガス）の排出を規制するため、欧州連合はFガス規制とMAC指令という2つの規則を採択している。Fガス規制によりEUのFガス排出量は2030年までに2014年比で3分の1に削減される。 Fガス規則の見直し：EU政策の評価のための標準的な枠組みに従い、規制の関連性、有効性、効率性、一貫性、EUの付加価値を検証し規制がどの程度機能してきたかを評価。今後、同規則を改善するための政策オプションについても分析する。欧州委員会は、2022年4月までに新規則を提案する予定。

出所) 各種政府ウェブサイトより

9. 最先端のGHG削減技術の活用 (2/2)

図表390：最先端のGHG削減技術の活用 (2/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	②⑤未利用熱・再生可能エネルギー熱利用の拡大	Low carbon heating technology innovation (grant)	ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS)	10百万英ポンド (2018年1月に申請締め切り)	<ul style="list-style-type: none"> 本助成金制度は、英国の建物への熱と温水の供給に伴う二酸化炭素排出量を削減する技術の開発を目的としている。 革新的なテクノロジー、プロセス、およびツールの開発を支援するため最大1,000万ポンドを投資。申請者は、20万ポンドから200万ポンドの助成金を申請した。これまでに8件のプロジェクトがこのスキームの下、助成金を獲得している。
ドイツ	②③分野間の連携による横断的省エネ技術の開発・利用拡大	Progress.nrw	ドイツ連邦経済エネルギー省、ノルトライン・ヴェストファーレン州デジタル化・エネルギー	20万ユーロ	<ul style="list-style-type: none"> ドイツのノルトライン・ヴェストファーレン州は、「progres.nrw」資金調達プログラムの一環として、新しい蓄電技術であるMAN ETESの技術・経済評価研究に20万ユーロの資金を提供。 MAN ETESは、再生可能なエネルギー（使用可能で保存可能な熱と冷気）を提供し、必要に応じて電力に再変換することが可能。この技術は従来の大規模な熱供給に代わる、CO2フリーの代替エネルギーとして期待されている。

10. ビッグデータ、AI、分散管理技術等を用いた都市マネジメントの変革 (1/2)

図表391：ビッグデータ、AI、分散管理技術等を用いた都市マネジメントの変革 (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	②7技術の社会実装の加速化（スマートシティの実現）	Advanced Transportation and Congestion Management Technologies Deployment (ATCMTD) grants	米国運輸省	総額 49.6百万USDル（10のプロジェクトへの資金提供）	<ul style="list-style-type: none">モビリティと安全性を向上させ、車両の接続性をサポートする高度なITS（知的交通システム）技術を用いたプロジェクトの助成。国のモデルとなるような先進的な技術の早期導入に資金を提供。渋滞緩和のためのITS技術に加え、コネクテッドカーや自動運転車の技術で運用するプロジェクト等に資金を提供する予定。
欧州	②7技術の社会実装の加速化（スマートシティの実現）	The Recovery and Resilience Facility	欧州委員会（改正EU再生可能エネルギー指令 2018）	-（復興レジリエンス・ファシリティの予算総額は6,725億ユーロ）	<ul style="list-style-type: none">欧州委員会は、「建築物のエネルギー性能に関する指令（EPBD）」に基づき、エネルギー性能証明書を改訂。新築に限らず既存の建築物のエネルギー性能の最低基準を段階的に導入する方針。
	②7技術の社会実装の加速化（スマートシティの実現）	The Recovery and Resilience Facility	欧州委員会	-（復興レジリエンス・ファシリティの予算総額は6,725億ユーロ）	<ul style="list-style-type: none">CEPSプロジェクトのスマートシティ情報システム（SCIS）は、エネルギー、モビリティ&トランスポート、ICTに焦点を当て、建物のエネルギー効率化、エネルギーシステムの統合、地域レベルでの持続可能なエネルギーソリューション、スマートシティとコミュニティ、戦略的な持続可能都市計画の分野におけるソリューションを紹介している。
英国	②7技術の社会実装の加速化（スマートシティの実現）	GovTech Catalyst	英国政府	総額 2,000万英ポンド（15のプロジェクトへの資金提供）	<ul style="list-style-type: none">GovTech Catalystは、革新的なデジタル技術を使って英国の中央政府機関、地方自治体、地方公共団体の問題解決のため、サプライヤー向けに2,000万ポンドの資金提供を行う。公共部門は現在抱える公共部門のサービスまたは政策提供に関する問題または課題を提示。最大5社のサプライヤーが3ヶ月間にわたり問題・課題解決に取り組むための資金提供を受ける。2018年以降、15以上のプロジェクトが選定されている。

出所）各種政府ウェブサイトより

10. ビッグデータ、AI、分散管理技術等を用いた都市マネジメントの変革 (2/2)

図表392：ビッグデータ、AI、分散管理技術等を用いた都市マネジメントの変革 (2/2)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要	
ドイツ	②7技術の社会実装の加速化（スマートシティの実現）	Horizon 2020 (EU)	欧州委員会（コーディネート：ハンボルト大学ベルリン校）	11百万ユーロ（2018年～2023年まで）	<ul style="list-style-type: none">• 欧州委員会はHorizon 2020でEdible Cities Networkに資金を提供。エディブル・シティ（食用都市）とは都市景観を食糧生産に体系的に利用すること。• Edible Cities Networkは、社会的回復力があり持続可能な生産性の高い都市を目指すEdible City Solutionsを統合したネットワークを構築する。• 製品、活動、サービスによって社会問題を克服し、新しいグリーンビジネスや雇用の創出、地域の経済成長への貢献、社会的結束の促進を行う。

11. シェアリングエコノミーによる省エネ／テレワーク、働き方改革、行動変容の促進 (1/2)

図表393：シェアリングエコノミーによる省エネ／テレワーク、働き方改革、行動変容の促進(1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑳シェアリングエコノミー／テレワーク、働き方改革、行動変容等の促進	Evaluating Policies and Incentives to Reduce Vehicle-Miles-Travelled and Air Pollutant Emissions through the Promotion of Telework and Remote Services	カリフォルニア州政府交通局	75,000USドル	<ul style="list-style-type: none"> 本研究では、テレワークと車両走行距離（VMT）や温室効果ガス（GHG）の排出量の削減との関係を定量的に調べ、統合的なアクティビティベースのダイナミックシミュレーションアプローチを提案する。
欧州	⑳シェアリングエコノミー／テレワーク、働き方改革、行動変容等の促進	Horizon 2020	地方公共団体、企業スタートアップ	-	<ul style="list-style-type: none"> EUでは、データ、経験、ノウハウを交換し、クリーンでエネルギー効率がよく、気候にやさしい都市環境で市民に高い生活の質を提供するスマートシティの創造に協力するためのナレッジプラットフォーム、スマートシティ情報システム（SCIS）を構築。 SCISは建物のエネルギー効率、エネルギーシステムの統合、地域レベルでの持続可能なエネルギーソリューション、スマートシティとコミュニティ、戦略的持続可能都市計画の分野におけるソリューションを提示している。
英国	⑳シェアリングエコノミー／テレワーク、働き方改革、行動変容等の促進	Economic and Social Research Council (ESRC)	英国研究技術革新機構（経済社会研究会議 - ESRC）	総額 202百万英ポンド（全補助金の総額）	<ul style="list-style-type: none"> 経済社会研究評議会（ESRC）は、InnovateUK、ResearchEnglandとともに、英国政府が出資する非省庁の公的機関である英国研究技術革新機構を構成する7つの研究評議会の1つ。 重点研究領域は Covid-19研究、メンタルヘルス、住まい、生産性、マクロ経済の理解、気候変動、医療・社会保障の革新、激動の時代における信頼とグローバル・ガバナンス。

11. シェアリングエコノミーによる省エネ／テレワーク、働き方改革、行動変容の促進 (2/2)

図表394：シェアリングエコノミーによる省エネ／テレワーク、働き方改革、行動変容の促進(2/2)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
ドイツ	⑳シェアリングエコノミー／テレワーク、働き方改革、行動変容等の促進	Horizon 2020 (EU) 欧州委員会 (コーディネート： ミュンスター大学)	490万ユーロ	<ul style="list-style-type: none"> EU 1.5 Lifestyles（Horizon 2020の助成）はパリ協定で定められた1.5度の目標を達成するため、個人のライフスタイルの分析を通し、選択肢を定量化し、効果的なライフスタイルの変化を可能にするために必要な関連構造の変化を特定。ライフスタイルの変革を地球温暖化防止につなげる。 ライフスタイル指向のアプローチによって、個人のライフスタイルの具体的な変容を、政策、経済、社会制度による構造的背景の変容に結びつけ温暖化防止策を見出す。

12. GHG削減効果の検証に貢献する科学的知見の充実 (1/2)

図表395：GHG削減効果の検証に貢献する科学的知見の充実 (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	⑳気候変動メカニズムの解明／予測精度向上、観測を含む調査研究、情報基盤強化	Climate Change Research Grants	アメリカ合衆国環境保護庁（USEPA）	-（個別予算で複数の助成金を支給）	<ul style="list-style-type: none">環境保護庁は、気候変動に関する知識の向上と、地域社会による気候変動への効果的な対応および軽減するための持続可能な解決策提供のため、気候変動研究助成金を提供。気候変動が大気、水、環境、および人の健康に及ぼす影響に関する研究をサポート。変化する気候下での大気、水、生態系の特性を予測するためのモデリングツールも提供する。
	㉑気候変動メカニズムの解明／予測精度向上、観測を含む調査研究、情報基盤強化	Federal Funding and Technical Assistance for Climate Adaptation	アメリカ合衆国環境保護庁（USEPA）	-（個別予算で複数の補助金を支給）	<ul style="list-style-type: none">米国環境保護庁（EPA）は、気候変動に対して地方自治体が地域社会へ効果的にサービスを提供できるようにするための対話型のリソース、適応資源センター（ARC - X）等の情報サービスを提供している。
欧州	⑳気候変動メカニズムの解明／予測精度向上、観測を含む調査研究、情報基盤強化	Copernicus (1998-2020)	欧州委員会	58億ユーロ（2021年～2027年）	<ul style="list-style-type: none">EUの地球観測プログラム「コペルニクス」：CO2を含む環境モニタリング、緊急事態管理、国境および海上安全保障のサポートにおけるEUの自律性とリーダーシップの維持を行う。コペルニクスのデータおよび情報アクセスサービス（DIAS）の提供により、中小企業や新興企業がデータを活用した革新的なアプリケーション開発につなげられるようにする。
	㉑気候変動メカニズムの解明／予測精度向上、観測を含む調査研究、情報基盤強化	EU CAP (Common Agricultural Policy)	欧州委員会 ライフプログラム（ドイツ、フランス、エストニア、スペインの4カ国政府）	-	<ul style="list-style-type: none">AgriAdapt project：2016年9月から2020年4月にかけて、4カ国で同時展開されたプロジェクト。気候変動に対するヨーロッパの主要な農産物の脆弱性の評価と、より回復力のある農業のための持続可能な適応計画の提案を目的とし、4カ国の126のパイロットファーム監視の主な結果の共有なども行った。

出所) 各種政府ウェブサイトより

12. GHG削減効果の検証に貢献する科学的知見の充実 (2/2)

図表396： GHG削減効果の検証に貢献する科学的知見の充実 (2/2)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要	
ドイツ	②9気候変動メカニズムの解明／予測精度向上、観測を含む調査研究、情報基盤強化	Horizon 2020 (EU)	欧州委員会 （コーディネート：マックス・プランク学術振興協会）	1,100万ユーロ	<ul style="list-style-type: none">NextGEMS（Horizon 2020の助成）は新世代の嵐解像地球システム連成モデル（SR-ESM）を開発し、人為的な気候変動の研究に適用する。SR-ESMにより大気・海洋循環システムをより物理的に表現可能にし、さらにシステムの発展を行い、将来の気候変動の数十年（30年）単位の予測を行う予定。

出所）各種政府ウェブサイトより

13. 最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO2吸収・固定 (1/2)

図表397：最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO2吸収・固定 (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
欧州	③⑩ゲノム編集等バイオテクノロジーの応用	Directive 2001/18/EC of the European Parliament and of the Council	欧州委員会	-	<ul style="list-style-type: none">遺伝子改変生物の環境への意図的放出に関する欧州議会および理事会指令（2001/18/EC）は遺伝子組換え生物（GMO）の使用下で新たな育種技術（NPBT）の適用を規制。許可なしで意図的に遺伝子組み換え作物を環境に放出すること（すなわち「栽培」）、またはEU域内で市場に出すことはできない。遺伝子組み換え作物のリスク評価は、欧州食品安全機関が行う。
	③⑤ブルーカーボン（海洋生態系による炭素貯留）の追求	EU LIFE	ライフ・ヨーロッパ・プロジェクト、CEPSA財団、MAVA財団、レッド・エレクトリカ	250万ユーロ（2015年～2019年）	<ul style="list-style-type: none">EU LIFE Blue Natura projectは欧州のプロジェクトで、地域環境計画省がコーディネート。Junta De Andalucíaがコーディネートし、アンダルシア州環境水庁、CSIC-CEAB、IUCN-Med、Man and Territory Association（HyT）と協力。2014年から2020年までの環境・気候変動対策サブプログラム（LIFE）は、開発と政策の変化に関連し、環境・気候変動分野における革新的な技術を促進することにより、環境・気候目標を達成するためのソリューションとベストプラクティスを提供することを基本としている。
英国	③⑩ゲノム編集等バイオテクノロジーの応用	Advanced Research & Invention Agency (ARIA) Bill	ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）	8億英ポンド	<ul style="list-style-type: none">英国は2021年2月、ハイリスク・ハイリターンのイノベーションに資金を提供することを目的に、新たな独立研究支援機関「先進研究・発明庁（ARIA）」の設立を発表。ARIAの考え方は、英国のライフサイエンス分野ではすでに実践されている。米国の国防高等研究計画局（DARPA）をモデルとし、ゲノム研究に部分的に焦点を当てる予定。

出所）各種政府ウェブサイトより

13. 最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO2吸収・固定 (2/2)

図表398：最先端のバイオ技術等を活用した資源利用及び農地・森林・海洋へのCO2吸収・固定 (2/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	③④スマート林業の推進、早生樹・エリートツリーの開発・普及	Green Recovery Challenge Fund	ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）	40百万英ポンド（第2ラウンド）	<ul style="list-style-type: none">生物多様性の改善と気候変動への対処を支援するのを目的とし2021年に実施。植樹・環境教育・泥炭地や湿地の再生などの分野で数千の雇用の創出・維持をめざす。第3ラウンドを2022年春に開始し、夏にはプロジェクトが開始される予定。
ドイツ	③⑩ゲノム編集等バイオテクノロジーの応用	German Research Foundation (DFG)	気候変動・森林遺伝学研究所（資金提供：連邦農業食糧庁（BLE））	-	<ul style="list-style-type: none">FitForClim（期間2014年～2019年）：気候変動下における将来の森林のための生産性の高い森林再生産材料の調達を行う。また共同プロジェクトは、高品質の森林再生材料（FRM）を市場に持続可能な形で供給するための基盤を築くことを目的としていた。
	③⑩ゲノム編集等バイオテクノロジーの応用	German Research Foundation (DFG)	気候変動・森林遺伝学研究所（資金提供：連邦教育研究省（BMBF））	-	<ul style="list-style-type: none">ポプラのDNAフリーゲノム編集（期間2018年～2021年）：連邦教育研究省が資金提供する新しいプロジェクト「aProPop」は、樹木の育種を大幅に加速させる機会を提供する新しい育種技術、CRISPR/Cas9を用いて、ポプラの木でDNAを含まないゲノム編集を行う方法の開発を行うことを目的としていた。

14. 農畜産業からのメタン・N2O排出削減 (1/2)

図表399：農畜産業からのメタン・N2O排出削減 (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	③⑥イネ品種、家畜系統育種、及び農地、家畜の最適管理技術の開発	Environmental Quality Incentives Program (EQIP)	米国農務省 (USDA)	10百万USD	<ul style="list-style-type: none"> 農業生産者が、炭素を固定し、温室効果ガスの排出を削減し、作業地における気候変動の影響を緩和する自主的な保全活動を計画・実施するための資金援助。 アーカンソー、フロリダ、ジョージア、ミシガン、ミネソタ、ミシシッピ、モンタナ、ノースカロライナ、ペンシルバニア、ウィスコンシン生産者を対象とする。
	③⑥イネ品種、家畜系統育種、及び農地、家畜の最適管理技術の開発	Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) Agroforestry Grants	国立食品・農業研究所 (NIFA) (米国農務省 (USDA))	- (個別予算で複数の助成金を支給)	<ul style="list-style-type: none"> アグロフォレストリー (森林農業) の研究・普及活動を支援する助成金。 農家/農民を対象とした助成金、専門家育成、パートナーシップなどが含まれ、また農地や家畜を通じた排出削減のためのプロジェクトも助成の対象に含まれる。
欧州	③⑥イネ品種、家畜系統育種、及び農地、家畜の最適管理技術の開発	Horizon 2020	欧州委員会	37億ユーロ (Horizon 2020)	<ul style="list-style-type: none"> 農業生産性と持続可能性のための欧州イノベーションパートナーシップ (EIP-AGRI) (Horizon 2020の助成) は2012年欧州委員会により発足。Horizon 2020など異なる資金調達の流れを統合し農業イノベーションを後押しする。 資金調達を援助する中には、Internet of Food & Farm 2020 (IoF2020) プロジェクトが含まれ、ユースケースの一つにGPS追跡を利用した個々の牛の居場所を監視する首輪の開発 (放牧牛モニタープロジェクト) が挙げられる。
英国	③⑥イネ品種、家畜系統育種、及び農地、家畜の最適管理技術の開発	Water Works Project	Wildlife Trust BCN、Cambridgeshire ACRE、イーストロンドン大学	1百万英ポンド	<ul style="list-style-type: none"> Water Worksプロジェクトは、イギリス・ケンブリッジシャーのフェンズ地方で、持続可能な農法の強化と泥炭地の再湿潤化を通じた炭素隔離を目的とし、湿地農法のフィールドスケールの試行を行っている。

出所) 各種政府ウェブサイトより

14. 農畜産業からのメタン・N₂O排出削減 (2/2)図表400：農畜産業からのメタン・N₂O排出削減 (2/2)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
ドイツ	③⑥イネ品種、家畜系統育種、及び農地、家畜の最適管理技術の開発	Minus Methane (For German agriculture)	ドイツ連邦環境・自然保護・原子力安全省、ドイツ環境支援協会 (DUH)	- <ul style="list-style-type: none"> 農業（畜産業）におけるアンモニアとメタン削減のためのさまざまな対策と、その局所的な実施について現場の専門家と一緒に話し合うマルチプレイヤーワークショップを開催。 議論の焦点は、実施のための前提条件、障害、政治的な取り組みや要求、またドイツでそれぞれの対策を全国的に適用するための資金調達手段や規制法について。

15. 農林水産業における再生可能エネルギーの活用 & スマート農林水産業 (1/2)

図表401：農林水産業における再生可能エネルギーの活用 & スマート農林水産業 (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	③⑧農林業機械・漁船の電化、燃料電池化、作業最適化等による燃料や資材の削減（農林水産業のゼロエミッション）	Conservation Innovation Grants (CIG) program	米国農務省（USDA） 自然資源保全局（NRCS）	15百万USD	• 私有地での自然資源保護を促進するための新たなツール、アプローチ、実践、技術の開発を支援するための資金援助を行う。
	③⑧農林業機械・漁船の電化、燃料電池化、作業最適化等による燃料や資材の削減（農林水産業のゼロエミッション）	Diesel Emissions Reduction Act (DERA) grants	米国環境保護庁	-（個別予算で複数の助成金を支給）	• ディーゼルエンジン排出削減プログラム：ディーゼルエンジンからの有害な排出を削減することで、人々の健康を守り、大気の質を改善するための補助金とリポートを提供。 • 助成の対象に農業に使用されるディーゼルエンジン、機器、車両が含まれる。
欧州	③⑧農林業機械・漁船の電化、燃料電池化、作業最適化等による燃料や資材の削減（農林水産業のゼロエミッション）	EU Common Agricultural Policies (CAP)	欧州委員会	557億1,000万ユーロ（2021年時点）	• EUの共通農業政策（CAP）：CAPは、農業者の所得を保障するための「価格・所得政策」と農業部門の構造改革、農業環境施策等を実施する「農村振興政策」の2つの政策を柱とする。 • 2023年～27年の次期CAPの目標として9つの項目を掲げており、その中に気候変動への対応と環境への配慮が含まれる。
	③⑧農林業機械・漁船の電化、燃料電池化、作業最適化等による燃料や資材の削減（農林水産業のゼロエミッション）	European Green Deal	欧州委員会	総額 800億ユーロ（Horizon 2020 の資金調達総額、2021年時点）	• -

出所）各種政府ウェブサイトより

15. 農林水産業における再生可能エネルギーの活用 & スマート農林水産業 (2/2)

図表402：農林水産業における再生可能エネルギーの活用 & スマート農林水産業 (2/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
英国	③⑦農山漁村に適した地産地消型エネルギーシステム構築	Transforming food production challenge	英国研究技術革新機構（UKRI）	90百万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">企業、研究者、産業界が食糧生産に変革をもたらし、増大する需要に対応し、2040年までに排出量ゼロを目指すため、最大9000万ポンドの資金を投入。資金提供の対象を将来の食糧生産システム、科学技術の実用化、国際的な機会と投資エコシステムとする。
ドイツ	③⑧農林業機械・漁船の電化、燃料電池化、作業最適化等による燃料や資材の削減（農林水産業のゼロエミッション）	German Research Foundation (DFG)	クライメート・スマート・アグリカルチャー (Climate-Smart Agriculture: CSA) （資金提供：Agency for Renewable Resources e.V. (FNR) ）	-	<ul style="list-style-type: none">BESTLANDプロジェクト（2018年～2022年）：多年生作物栽培下における排水性不良土壌のGHG削減と土壌生物多様性についての研究をおこない、これまで未開発のGHG削減の可能性を探る。プロジェクトでは、農家や農業指導員を継続的な研究活動に参加させ、フィールドデモンストレーションという形で知識の伝達を行うことを目的としている。
	③⑨農林業機械・漁船の電化、燃料電池化、作業最適化等による燃料や資材の削減（農林水産業のゼロエミッション）	German Research Foundation (DFG)	クライメート・スマート・アグリカルチャー (Climate-Smart Agriculture: CSA) （資金提供：連邦農業食料庁 (BLE) ）	-	<ul style="list-style-type: none">CarboCheckプロジェクト（2018年～2022年）：農家が土壌の有機物を豊かにすることを実現するための土壌管理ソフトウェアツールの開発を行う。

16. 大気中のCO2の回収 (1/2)

図表403：大気中のCO2の回収 (1/2)

	技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
米国	③⑨DAC（Direct Air Capture）技術の追求	Carbon Capture Program	米国エネルギー省（化石エネルギー局）、炭素管理基金	15百万USドル	<ul style="list-style-type: none">2001年以来、エネルギー省の炭素回収プログラムは、化石燃料を使用する発電所や工業プロセスなどの点源あるいは大気から直接二酸化炭素を除去することを目標に、技術の特定と進歩に取り組んできた。本プログラムでは、先進的な化石エネルギー技術のリスクとコストを削減し、国の化石資源の持続可能な利用を促進する。
	③⑨DAC（Direct Air Capture）技術の追求	-	米国エネルギー省（化石エネルギー・炭素管理局）、国立エネルギー技術研究所（NETL）	総額 12百万USドル（6つのプロジェクトへの助成）	<ul style="list-style-type: none">本プロジェクトでは、DACによるCO2回収量の増加、材料コストの低減、炭素除去作業のエネルギー効率向上を実現するツールの開発を行う。開発された次世代のクリーンエネルギー技術の導入によって、バイデン＝ハリス政権が掲げる2050年までのネットゼロの目標達成への貢献が可能となる。
欧州	③⑨DAC（Direct Air Capture）技術の追求	European Green Deal	欧州委員会	-	<ul style="list-style-type: none">EUはすでに、Horizon 2020の研究プロジェクトSTORE&GOを通じてDACの技術開発に資金提供を行っている（2016年～2020年）。STORE&GOプロジェクトで重要な点は、DAC技術の経済的・ビジネス的側面と市場導入の可能性についても評価したことである。
英国	③⑨DAC（Direct Air Capture）技術の追求	Direct air capture and Greenhouse gas removal programme	ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）	100百万英ポンド	<ul style="list-style-type: none">2020年11月に大気からの直接二酸化炭素回収など、全く新しい温室効果ガス除去への1億ポンドの投資の第一段階を開始した。第一段階の一部として9つのプロジェクトを採択した。

16. 大気中のCO2の回収 (2/2)

図表404：大気中のCO2の回収 (2/2)

技術テーマ	政策/プログラム名	主体	予算	概要
ドイツ	③⑨DAC（Direct Air Capture）技術の追求	-	1.5百万ユーロ	<ul style="list-style-type: none"> NECOC（Negative Carbon diOxide to Carbon）プロジェクト：カールスルーエ工科大学（KIT）では、大気中の二酸化炭素を削減するための独自の実験施設を構築することを目的とした研究プロジェクトを進めている。 プロジェクトのパートナーは、KITのスピンオフ企業であるINERATEC社と、チューリッヒ工科大学のスピンオフ企業であるClimeworks社。 この研究プロジェクトは2020年～3年間の予定で、連邦経済エネルギー省（BMWi）から総額150万ユーロの出資を受ける。

二次利用未承諾リスト

令和3年度地球温暖化・資源循環対策に資する調査委託費（2050年カーボンニュートラルに伴う革新的環境イノベーション戦略等各種施策の横断調査分析）

令和3年度地球温暖化・資源循環対策に資する調査委託費（2050年カーボンニュートラルに伴う革新的環境イノベーション戦略等各種施策の横断調査分析）

株式会社野村総合研究所

頁	図表番号	タイトル
8	6	IEAにおけるTRLの分類と本調査における技術ステージの対応
9	7	国内の研究ステージとTRLの比較
12	10	エネルギー効率化に関わる各国のRD&D予算額（2019年）
13	11	化石燃料に関わる各国のRD&D予算額（2019年）
14	12	再エネに関わる各国のRD&D予算額（2019年）
15	13	水素・燃料電池に関わる各国のRD&D予算額（2019年）
16	14	その他電力・蓄電に関わる各国のRD&D予算額（2019年）
17	15	その他革新的技術・研究に関わる予算額（2019年）
23	21	海外研究開発拠点の設置目的
24	22	想定される海外連携のパターン一覧
28	25	累積設置容量
28	26	設置容量の世界分布
33	35	Swift Solarのプロジェクト概要
33	36	Swift Solarプロジェクトの主な特徴
34	37	Massachusetts Institute of Technologyのプロジェクト概要
34	38	Massachusetts Institute of Technologyプロジェクトの主な特徴
36	40	Stanford Universityのプロジェクト概要
36	41	Stanford Universityプロジェクトの主な特徴
37	42	Hunt Perovskite Technologiesのプロジェクト概要
37	43	Hunt Perovskite Technologiesプロジェクトの主な特徴
38	44	Oxford PVのプロジェクト概要
38	45	Oxford PVプロジェクトの主な特徴
39	46	ISFHのプロジェクト概要
39	47	ISFHプロジェクトの主な特徴
40	48	Fraunhofer ISEのプロジェクト概要
40	49	Fraunhofer ISEプロジェクトの主な特徴
41	50	Skanskaのプロジェクト概要
41	51	Skanskaプロジェクトの主な特徴
42	52	HZB等のプロジェクト概要
42	53	HZB等のプロジェクトの主な特徴
45	55	製造原別の水素製造量の推移（予測）
45	56	再エネ由来の水素製造コスト
49	66	米国のメタン熱分解技術を保有する企業
54	71	Project GreenHyscale (GreenLab) のプロジェクト概要
54	72	Project GreenHyscale (GreenLab) プロジェクトの主な特徴
55	73	Fuel Cells & Hydrogen Joint Undertaking
56	74	FCH-JU (NEWLY) のプロジェクト概要
56	75	FCH-JU (NEWLY) のプロジェクトの主な特徴
57	76	FCH-JU (ANIONE) のプロジェクト概要

頁	図表番号	タイトル
57	77	FCH-JU (ANIONE) のプロジェクトの主な特徴
58	78	H2FUTURE (Siemens)のプロジェクト概要
58	79	H2FUTURE (Siemens)プロジェクトの主な特徴
59	80	FCH-JUのプロジェクト概要
59	81	FCH-JUのプロジェクトの主な特徴
60	82	FCH-JU (PROMETEO) のプロジェクト概要
60	83	FCH-JU (PROMETEO) の主な特徴
61	84	FCH-JU (NewSOC) のプロジェクト概要
61	85	FCH-JU (NewSOC) の主な特徴
62	86	Air Liquide, Siemensのプロジェクト概要
62	87	Air Liquide, Siemensプロジェクトの主な特徴
63	88	CO2フリー水素製造コスト1/10の実現のプロジェクト概要
63	89	CO2フリー水素製造コスト1/10の実現プロジェクトの主な特徴
64	90	PNNL, West Virginia Universityのプロジェクト概要
64	91	PNNL, West Virginia Universityプロジェクトの主な特徴
66	92	世界の水素需要予測
66	93	水素の国際輸送
71	102	HySTOC (FCH-JU) のプロジェクト概要
71	103	HySTOC (FCH-JU) プロジェクトの主な特徴
72	104	PRESLHY (FCH-JU) のプロジェクト概要
72	105	PRESLHY (FCH-JU) プロジェクトの主な特徴
73	106	HyMARCのプロジェクト概要
73	107	HyMARCプロジェクトの主な特徴
74	108	Green Ammonia to Hydrogenのプロジェクト概要
74	109	Green Ammonia to Hydrogenプロジェクトの主な特徴
75	110	Siemensのプロジェクト概要
75	111	Siemensプロジェクトの主な特徴
76	112	LOHC Industrial Solutions NRW (Hydrogenious) のプロジェクト概要
76	113	LOHC Industrial Solutions NRW (Hydrogenious) プロジェクトの主な特徴
78	114	世界の水素需要予測
78	115	オプション別GTCC*発電のコスト
83	124	Siemensのプロジェクト概要
83	125	Siemensプロジェクトの主な特徴
84	126	Ansaldo Energiaのプロジェクト概要
84	127	Ansaldo Energiaプロジェクトの主な特徴
85	128	Equinor & SSE Thermalのプロジェクト概要
85	129	Equinor & SSE Thermalプロジェクトの主な特徴
86	130	Purdue Universityのプロジェクト概要
86	131	Purdue Universityプロジェクトの主な特徴

頁	図表番号	タイトル
87	132	Ohio State Universityのプロジェクト概要
87	133	Ohio State Universityプロジェクトの主な特徴
88	134	GE & Cricket Valley Energy Centerのプロジェクト概要
88	135	GE & Cricket Valley Energy Centerプロジェクトの主な特徴
90	136	粗鋼需要推計（10億トン）
90	137	クリーンスチール生産量推計（億トン）
95	146	Clean Steel Fundのプロジェクト概要
95	147	Clean Steel Fundプロジェクトの主な特徴
96	148	SWICのプロジェクト概要
96	149	SWICプロジェクトの主な特徴
97	150	ArcelorMittalのプロジェクト概要
97	151	ArcelorMittalプロジェクトの主な特徴
99	152	既存の大型CO2回収設備数
101	155	CO2貯蔵・利用に必要なエネルギー量（Mtoe）
101	156	運用中のプラント
107	164	Climeworksのプロジェクト概要
107	165	Climeworksプロジェクトの主な特徴
108	166	Global Thermostatのプロジェクト概要
108	167	Global Thermostatプロジェクトの主な特徴
109	168	Northern Lightsのプロジェクト概要
109	169	Northern Lightsプロジェクトの主な特徴
110	170	Neptune Energy, NEP, Eni 他のプロジェクト概要
110	171	Neptune Energy, NEP, Eni 他プロジェクトの主な特徴
112	172	世界のセメント生産量
112	173	世界のセメント生産量
118	183	Holcimのプロジェクト概要
118	184	Holcimプロジェクトの主な特徴
119	185	Buzzi Unicemのプロジェクト概要
119	186	Buzzi Unicemプロジェクトの主な特徴
120	187	Heidelberg Cementのプロジェクト概要
120	188	Heidelberg Cementプロジェクトの主な特徴
121	189	Heidelberg Cementのプロジェクト概要
121	190	Heidelberg Cementプロジェクトの主な特徴
122	191	Blue Planet Systemsのプロジェクト概要
122	192	Blue Planet Systemsプロジェクトの主な特徴
123	193	O. C. O. Technologyのプロジェクト概要
123	194	O. C. O. Technologyプロジェクトの主な特徴
125	195	ユーザー産業別機能性化学品消費割合（2018）
125	196	化学分野へのCO2利用の市場ポテンシャル

頁	図表番号	タイトル
156	254	Wolfspeed, Inc. & General Motorsプロジェクトの主な特徴
157	255	Ohio State Universityのプロジェクト概要
157	256	Ohio State Universityプロジェクトの主な特徴
158	257	Transphorm Inc. のプロジェクト概要
158	258	Transphorm Inc. プロジェクトの主な特徴
160	259	未利用熱市場 (2025年)
160	260	国内における未利用熱
161	261	EU28か国におけるエネルギー消費内訳 (2018年)
161	262	産業分野における未利用熱の活用ポテンシャル
162	263	未利用熱
162	264	【参考】産業部門における排熱技術の開発状況
167	272	ACCADEMIA EUROPEA DI BOLZANOのプロジェクト概要
167	273	ACCADEMIA EUROPEA DI BOLZANOプロジェクトの主な特徴
168	274	Ikerlanのプロジェクト概要
168	275	Ikerlanプロジェクトの主な特徴
169	276	Tecnaliaのプロジェクト概要
169	277	Tecnaliaプロジェクトの主な特徴
170	278	EUROPEAN TURBINE NETWORKのプロジェクト概要
170	279	EUROPEAN TURBINE NETWORKプロジェクトの主な特徴
171	280	BRUNEL UNIVERSITY LONDONのプロジェクト概要
171	281	BRUNEL UNIVERSITY LONDONプロジェクトの主な特徴
172	282	Altek Europeのプロジェクト概要
172	283	Altek Europeプロジェクトの主な特徴
173	284	London South Bank Universityのプロジェクト概要
173	285	London South Bank Universityプロジェクトの主な特徴
174	286	Standardkessel Baumgarte GmbHのプロジェクト概要
174	287	Standardkessel Baumgarte GmbHプロジェクトの主な特徴
175	288	The Hamilton Chamber of Commerceのプロジェクト概要
175	289	The Hamilton Chamber of Commerceプロジェクトの主な特徴
176	290	United Technologies Research Centerのプロジェクト概要
176	291	United Technologies Research Centerプロジェクトの主な特徴
178	292	自動車需要予測 (IEA)
178	293	蓄電池市場の推移 (兆円)
179	295	電池技術に関する各国の目標
179	296	蓄電池別の性能比較
184	304	Solid Powerのプロジェクト概要
184	305	Solid Powerプロジェクトの主な特徴
185	306	Natron Energyのプロジェクト概要
185	307	Natron Energyプロジェクトの主な特徴

頁	図表番号	タイトル
186	308	Lytenのプロジェクト概要
186	309	Lytenプロジェクトの主な特徴
187	310	IWSのプロジェクト概要
187	311	IWSプロジェクトの主な特徴
188	312	Tecnológico de Aragonのプロジェクト概要
188	313	Tecnológico de Aragonプロジェクトの主な特徴
189	314	EU (LISA) のプロジェクト概要
189	315	EU (LISA) プロジェクトの主な特徴
190	316	Faradion Ltd. & AMTE Powerのプロジェクト概要
190	317	Faradion Ltd. & AMTE Powerプロジェクトの主な特徴
191	318	Oxis Energyのプロジェクト概要
191	319	Oxis Energyプロジェクトの主な特徴
193	320	SDSにおける鉱物需要の予測 2010~2040 (IEA)
194	322	クリーンエネルギーに利用されている鉱物資源 (IEA)
194	323	電気自動車と内燃自動車に含まれる鉱物資源の比較 (IEA)
195	324	レアメタルの上位産出国
196	325	鉱物別国内のリサイクル率
201	333	Idaho National Laboratoryのプロジェクト概要
201	334	Idaho National Laboratoryプロジェクトの主な特徴
202	335	Momentum Technologies, Inc. のプロジェクト概要
202	336	Momentum Technologies, Inc. プロジェクトの主な特徴
203	337	USA Rare Earth LLCのプロジェクト概要
203	338	USA Rare Earth LLCプロジェクトの主な特徴
204	339	Ohio State Universityのプロジェクト概要
204	340	Ohio State Universityプロジェクトの主な特徴
205	341	HyProMag Ltd. のプロジェクト概要
205	342	HyProMag Ltd. プロジェクトの主な特徴
206	343	Sintef ASのプロジェクト概要
206	344	Sintef ASプロジェクトの主な特徴
207	345	Katholieke Universiteit Leuvenのプロジェクト概要
207	346	Katholieke Universiteit Leuvenプロジェクトの主な特徴
208	347	WEEE Forumのプロジェクト概要
208	348	WEEE Forumプロジェクトの主な特徴
209	349	Tomra Systemsのプロジェクト概要
209	350	Tomra Systemsプロジェクトの主な特徴
211	351	ネガティブエミッション技術の必要性
216	360	Salk Instituteのプロジェクト概要
216	361	Salk Instituteプロジェクトの主な特徴
217	362	Oak Ridge National Laboratoryのプロジェクト概要

[illegible]