



令和2年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業
ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査
最終報告書

デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社
2021年3月

Make your impact
国境 を超え、信をつなぐ。

目次

はじめに	3
1 技術動向調査	6
2 技術動向の比較分析	41
3 提言	63

■ 本報告書に記載されている情報は、公開情報に加え、本調査の分析に利用する承諾を得た上で、ヒアリング等で第三者から提供を頂いたデータも含まれています。これら情報自体の妥当性・正確性については、弊社では責任を負いません。

■ 本報告書における分析手法は、多様なものがありうる中でのひとつを採用したに過ぎず、その正確性や実現可能性に関して、弊社がいかなる保証を与えるものではありません。

■ 本報告書は、調査委託契約に従って貴省の政策決定の参考資料として作成されたものです。内容の採否や使用方法については、貴省自らの責任で判断を行うものとします。

はじめに

本調査の背景と目的は以下のとおり

調査の背景と目的

本プロジェクトの背景

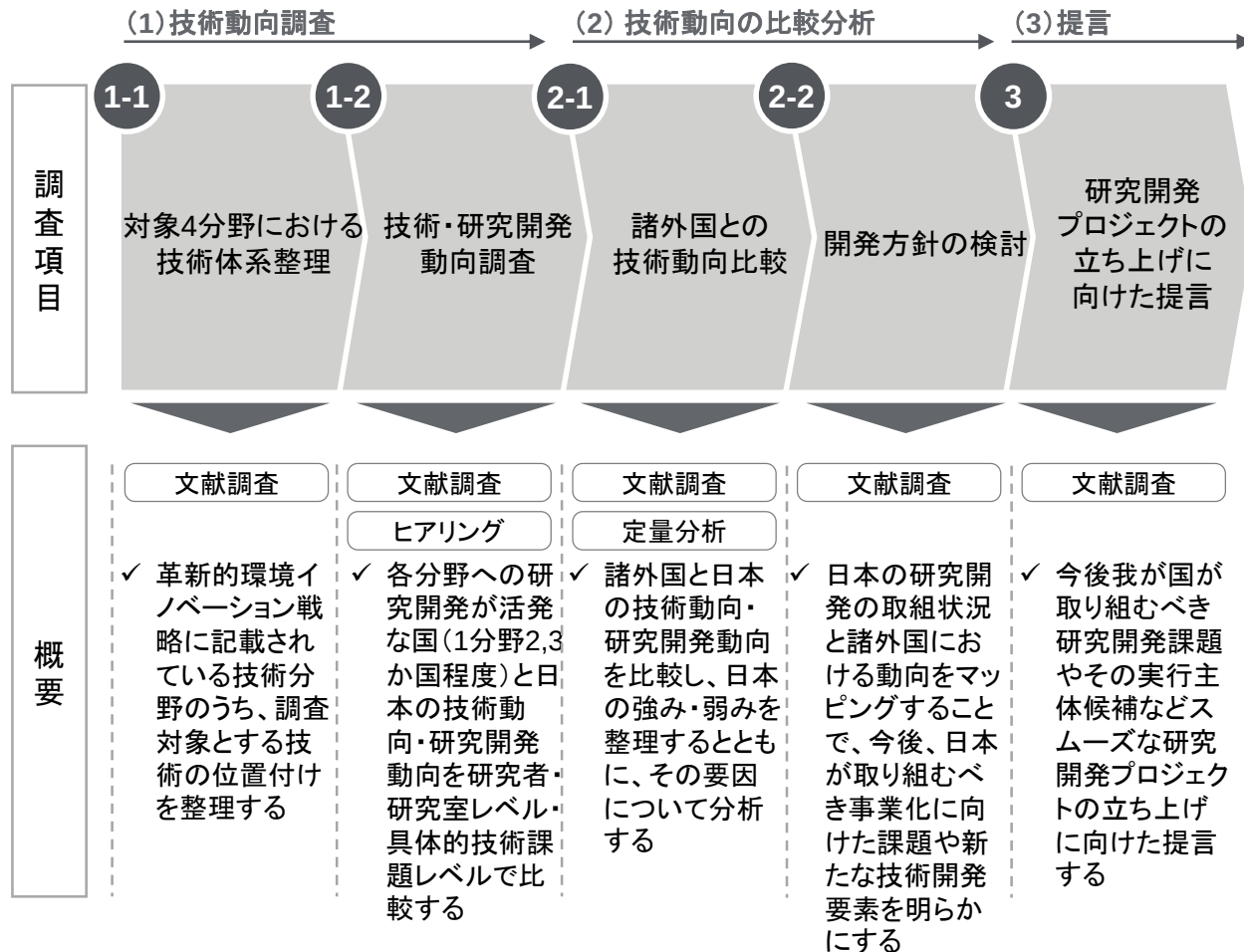
- CO2削減の国際的な取り決めを行う気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)にて、パリ協定が採択された。同協定の中で言及された長期的ヴィジョンである「2℃目標」達成のためには、世界全体で抜本的な排出削減のイノベーションを進めることが不可欠であり、環境保全及び産業発展の両観点を両立させながら、低炭素化を見据えた社会システムの在り方を検討することが求められている。
- 気候変動対策におけるイノベーションの重要性を踏まえ、同会議(COP21)の場で、有志国によるクリーン・エネルギー分野の研究開発についての官民投資拡大を促すイニシアティブ「ミッション・イノベーション」が立ち上がった。賛同国は、クリーン・エネルギー分野の政府研究開発支出を5年間で2倍にすることを目指すほか、関連した取組として、8つの個別分野を定め、それぞれのリード国を主導に参加国が協力して技術開発推進に取り組む「イノベーション・チャレンジ」や、クリエイティブで新しいアイデアについて実績のある個人を表彰する制度である「チャンピオン・プログラム」などが立ち上がっている。
- 我が国も、経済成長とCO2削減の両立の鍵となるとして、「ミッション・イノベーション」への支持を首脳間で合意し、研究開発費を倍増する計画に賛同している。

本プロジェクトの目的

- 本事業は、「ミッション・イノベーション」に係る取組を通じて、各国の政策動向、及び各分野での各国の技術動向・研究開発動向の調査を行い、これに対比して、国内の技術動向・研究開発動向を比較するとともに、特定分野においては、経済性、LCAなどの試算などを踏まえながら技術比較及びビジネスモデルを検討し、我が国が他国と連携出来る案件の模索を目的とする。

対象4分野の研究開発動向を比較し 今後の研究開発の方向性を検討した

調査フロー



1.1 対象4分野における技術体系整理

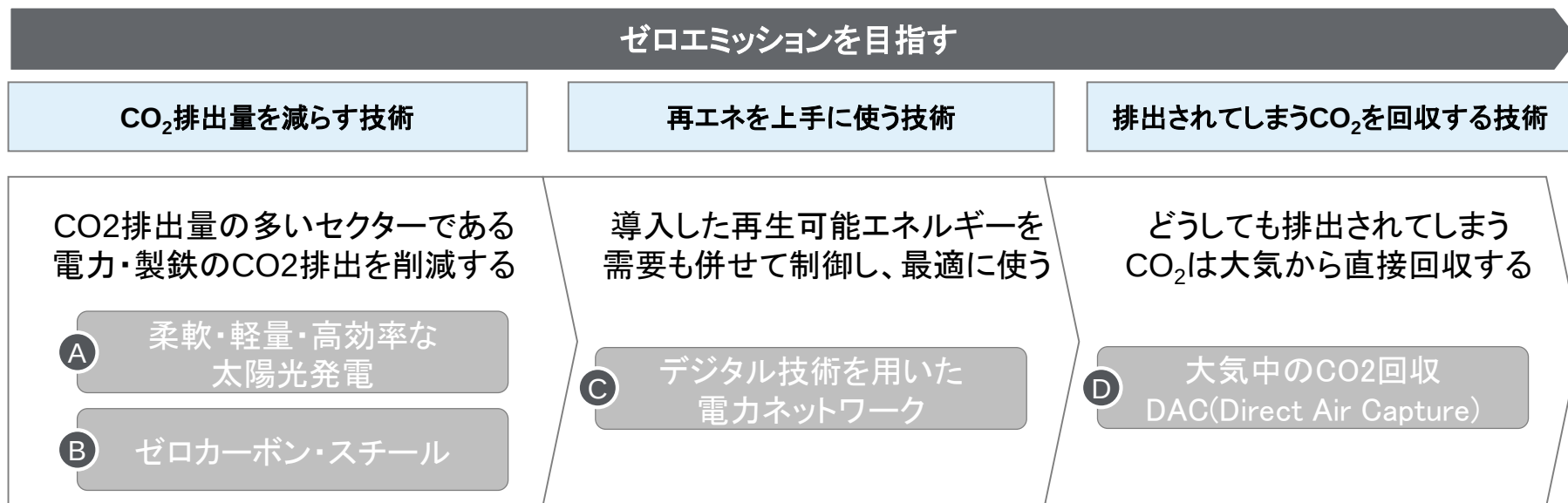
以下4分野の技術に関する研究開発動向について分析する

調査対象分野と革新的環境イノベーション戦略の目標

調査項目		対象技術	革新的環境イノベーション戦略における目標
諸外国 との技術 動向比較 4分野	仕様に基づく 対象技術	ゼロカーボン・スチール	2050年以降のできるだけ早い時期までに、現在の高炉法による鉄鋼製造と同等のコストで「ゼロカーボン・スチール」を実現する水素還元製鉄技術等の超革新技術の開発を行う
		大気中のCO2の回収 DAC(Direct Air Capture)	やむなく大気中に排出されたCO2を分離回収し、得られるCO2を利用、固定化する。また、CO2の分離や利用等に要するエネルギーは再生可能エネルギーを用いるなど、受容可能なコストでネガティブエミッションを実現する技術開発を2050年までに確立する
		柔軟・軽量・高効率な 太陽光発電	高効率化（現状の2倍、35%以上）、軽量化（現行の1/10）、曲面追従化等、立地制約を克服する革新的な技術を確立するとともに、そのコストをkWhあたり既存電源のコスト水準以下とし、2050年に向けて、2030年頃からの社会実装開始を可能とすることを目指す
		デジタル技術を用いた 電力ネットワーク	＜次世代蓄電池＞セルコストが～5,000円/kWhとなる車載用の次世代蓄電池を開発し、定置用蓄電システムにも活用を広げ、変動性の高い再エネの調整力として機能させることにより、システム全体としてのCO2削減に貢献 ＜エネルギー制御システム＞電力ネットワークのコスト増を抑制するエネルギーマネジメントシステムの開発・実装を行う。電力システム全体としてのCO2削減に貢献 ＜パワーエレクトロニクス等＞発電・送電・配電・消費の各段階における電力変換で生じてしまう電力損失を、大幅に低減できるパワーエレクトロニクス技術の高性能化・低コスト化のための研究開発を行い、新規用途等に向けたデバイスの2050年までの普及拡大を目指す

CO₂を減らす技術に加え 再エネを上手に使う技術で排出量削減を図るとともに どうしても排出されるCO₂は回収していくことで ゼロエミッションを目指す

本調査における対象4分野の位置付け



1.2 技術開発／研究開発動向調査

A. 柔軟・軽量・高効率な太陽光発電

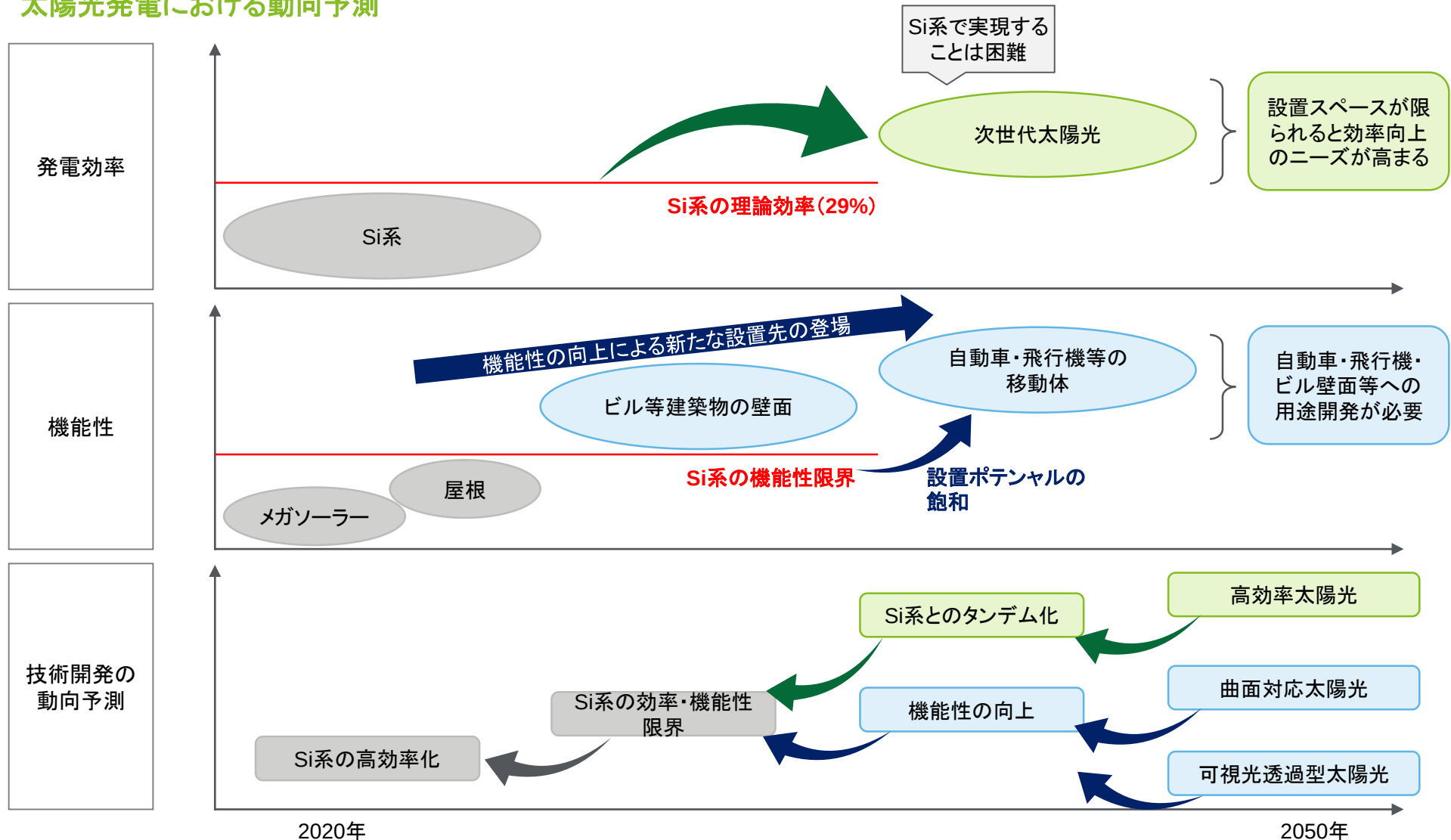
B. ゼロ・カーボン製鉄

C. デジタル技術を用いた電力ネットワーク

D. 大気中のCO₂の回収

今後もPVの大量導入が進み 将来的に設置スペースが限られてくるとPVの高效率化やビル壁面等への導入ニーズが高まると予想される

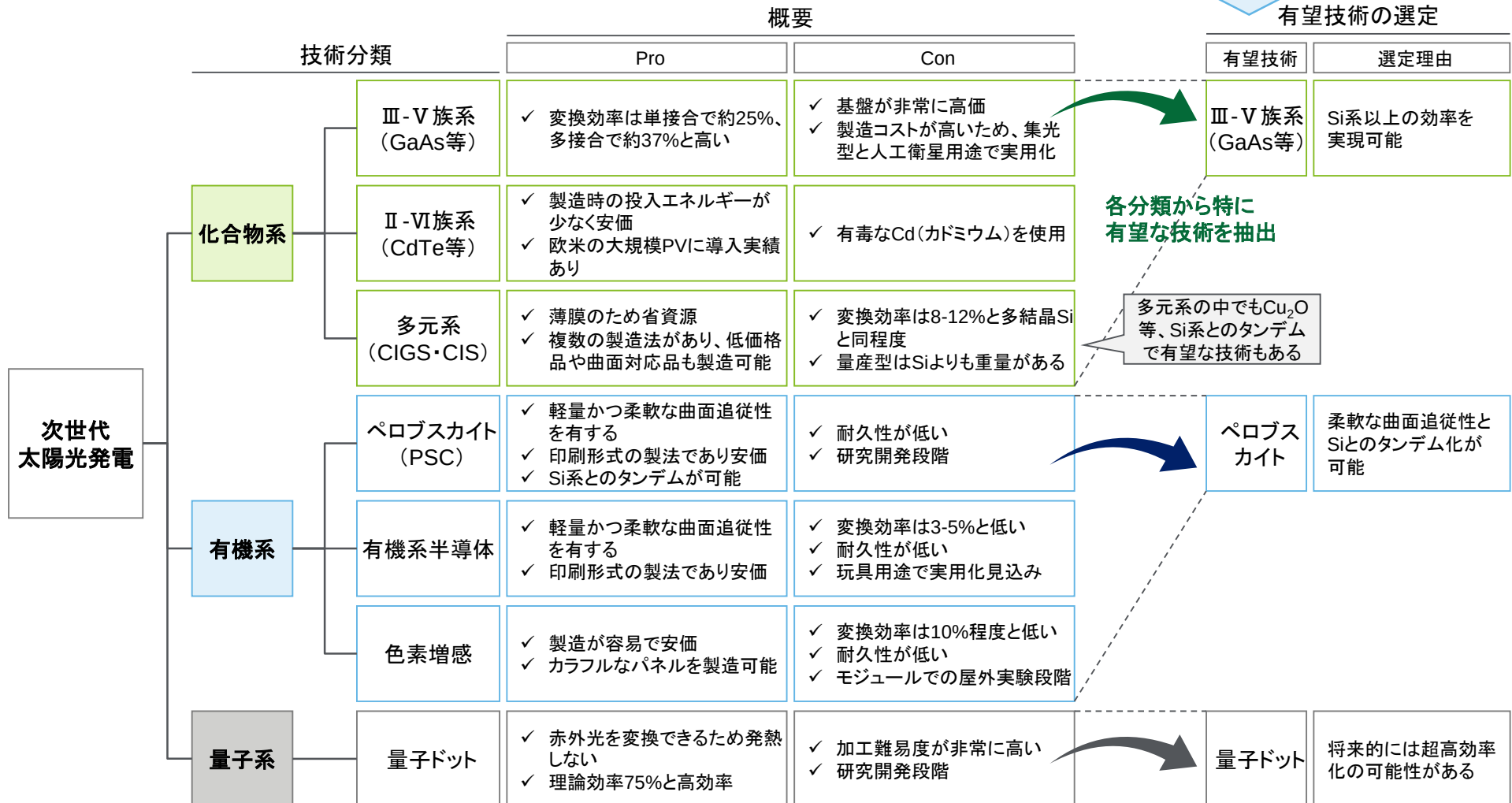
太陽光発電における動向予測



Si系以上の効率・機能性を条件に各分類から有望な技術として Ⅲ-V族・ペロブスカイト・量子ドットの3技術を抽出した

次世代太陽光発電に関する技術分類

(参考)NEDO太陽光発電開発戦略2020
 ✓ Si系: 結晶型の深掘り・薄膜型の開発
 ✓ Ⅲ-V族系:
 GaAsの低コスト化・多接合化
 CISの軽量化・高効率化
 ✓ 有機系:
 ペロブスカイトの高耐久性化・半透明化
 ※量子系は技術紹介のみ



ペロブスカイト系であればSiとのタンデムで高効率を狙えるとともに 曲面追従性や軽量化の観点で建材一体型PVに適しているため有望ではないか

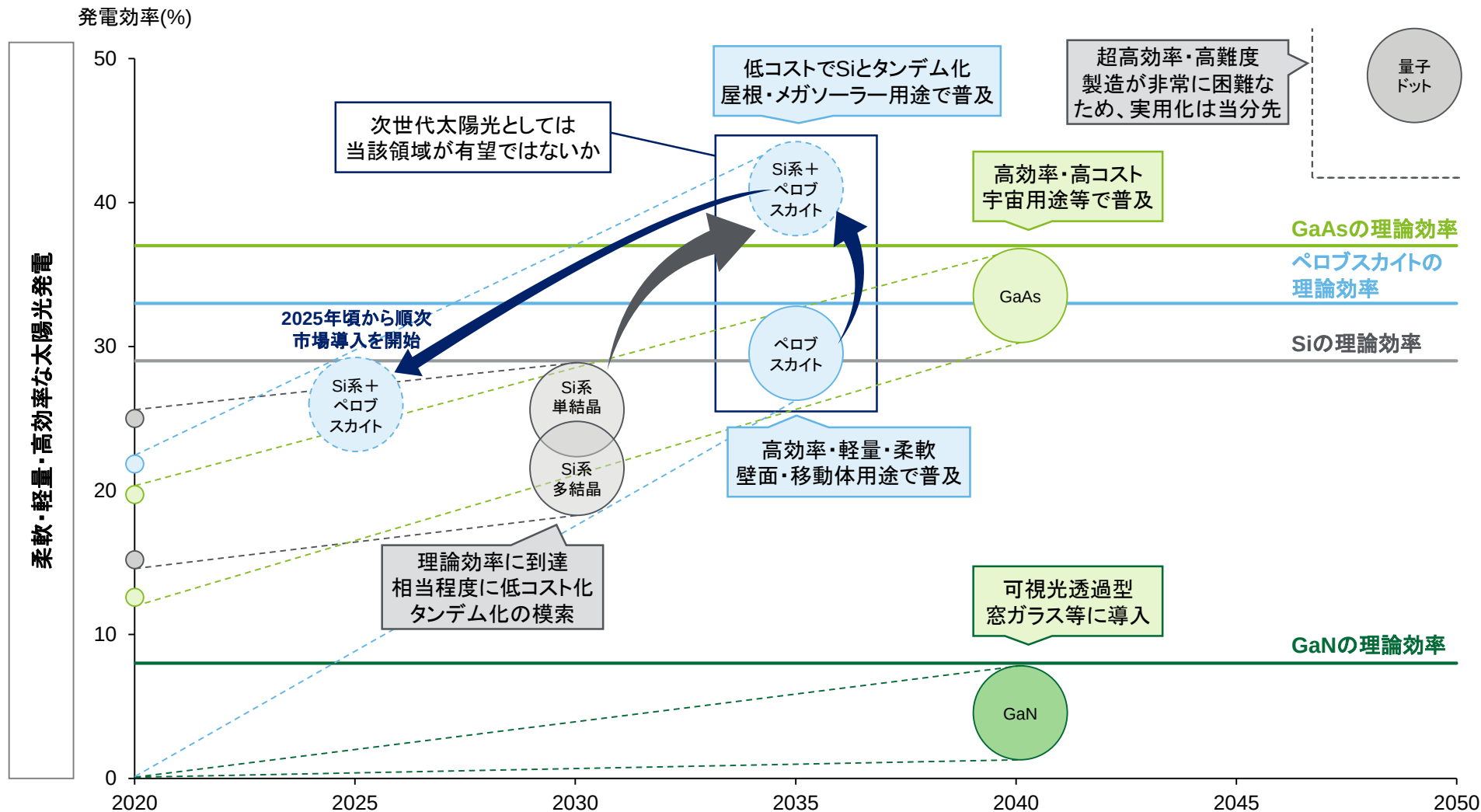
有望な次世代太陽光とSi系の技術比較

	技術分類	技術名	概要		理論 変換効率	プロジェクト事例		
			Pro	Con		主体企業	プロジェクト名	変換効率
太陽光発電	シリコン系	単結晶	✓ 住宅用PVとして実用化 ✓ 変換効率は19%と多結晶と比較して高い	✓ 多結晶と比較して製造コストが高い	29%	JinkoSolar	24.79%Efficiency Large-Area N-Type Monocrystalline Silicon Solar Cell	24.8%*1
						ISFH	Laser contact openings for local poly-Si-metal contacts enabling 26.1%-efficient POLO-IBC solar cells	26.1%*2
	多結晶	多結晶	✓ メガソーラー用PVとして実用化 ✓ 単結晶と比較して製造コストが低い	✓ 変換効率は15%と単結晶と比較して低い	29%	CanadianSolar	23.81% Conversion Efficiency N-type Large Area Multi-Crystalline Silicon Solar Cell	23.8%*3
	III-V 族系	GaAs (砒化ガリウム)	✓ 集光型PVと人工衛星用PVとして実用化 ✓ 理論変換効率は単接合で約25%、多接合で約37%と高い	✓ 基盤が非常に高価なため、製造コストが高い ✓ 製造時のエピタキシャル成長に時間がかかる	37%	NREL	GaAs Solar Cells with High Carrier Collection Grown on Unpolished, Spalled Ge Substrates	12.8%*4
						Fraunhofer ISE	A 19.9%-efficient ultrathin solar cell based on a 205-nm-thick GaAs absorber and a silver nanostructured back mirror	19.9%*5
	GaN (窒化ガリウム)	GaN	✓ 紫外線のみを変換するため、可視光透過型PVとして期待	✓ 基盤が非常に高価なため、製造コストが高い ✓ 変換する波長が限られるため、変換効率が低い	8%	JECRC University	GaN as Semiconductor Material for Solar Photovoltaic: A Review	-
	有機系	ペロブスカイト	✓ 軽量かつ柔軟な曲面追従性を有する ✓ 印刷形式の製法であり安価 ✓ Si系とのタンデムが可能	✓ 研究開発段階にあり、実用化されていない	33%	KRICT	Perovskite based solar battery	22.7%*6
						NEDO	高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発	16.1%*7
	量子系	量子ドット	✓ 赤外光を変換できるため発熱せず、高効率な発電が可能	✓ 加工難易度が非常に高い ✓ 研究開発段階にあり、実用化されていない	75%	Swiss Federal Institute of Technology	Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency	22.0%*8
						東京大学	Solution-processed intermediate-band solar cells with lead sulfide quantum dots and lead halide perovskites	26.8%*9
						University of Queensland	High-efficiency colloidal Cs1-xFAPbI3 quantum dot solar cells with reduced phase segregation	16.6%*10
						NREL	Enhanced mobility CsPbI3 quantum dot arrays for record-efficiency, high-voltage photovoltaic cells	13.4%*11

出所：*1: JinkoSolarニュース記事より抽出、*2: ISFHニュース記事より抽出、*3: CanadianSolarニュース記事より抽出、*4: NREL "GaAs Solar Cells with High Carrier Collection Grown on Unpolished, Spalled ge Substrates"。*5: PV Magazineニュース記事より抽出、*6: Swiss Federal Institute of Technology "Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency"、*7: NEDOニュース記事より抽出、*8: NRELサイトより抽出、*9: 東京大学 "Solution-processed intermediate-band solar cells with lead sulfide quantum dots and lead halide perovskites"、*10: University of Queensland サイトより抽出、*11: NREL "Enhanced mobility CsPbI₃ quantum dot arrays for record-efficiency, high-voltage photovoltaic cells"

ペロブスカイト系であればSiとのタンデムで安価に高効率化が狙えるとともに 曲面追従性や軽量化の観点で壁面・移動体用途にも適していると考えられる

技術開発動向の予測



ペロブスカイトでは 主に高効率化・大面積化・Si系とのタンデムについての研究開発がされている

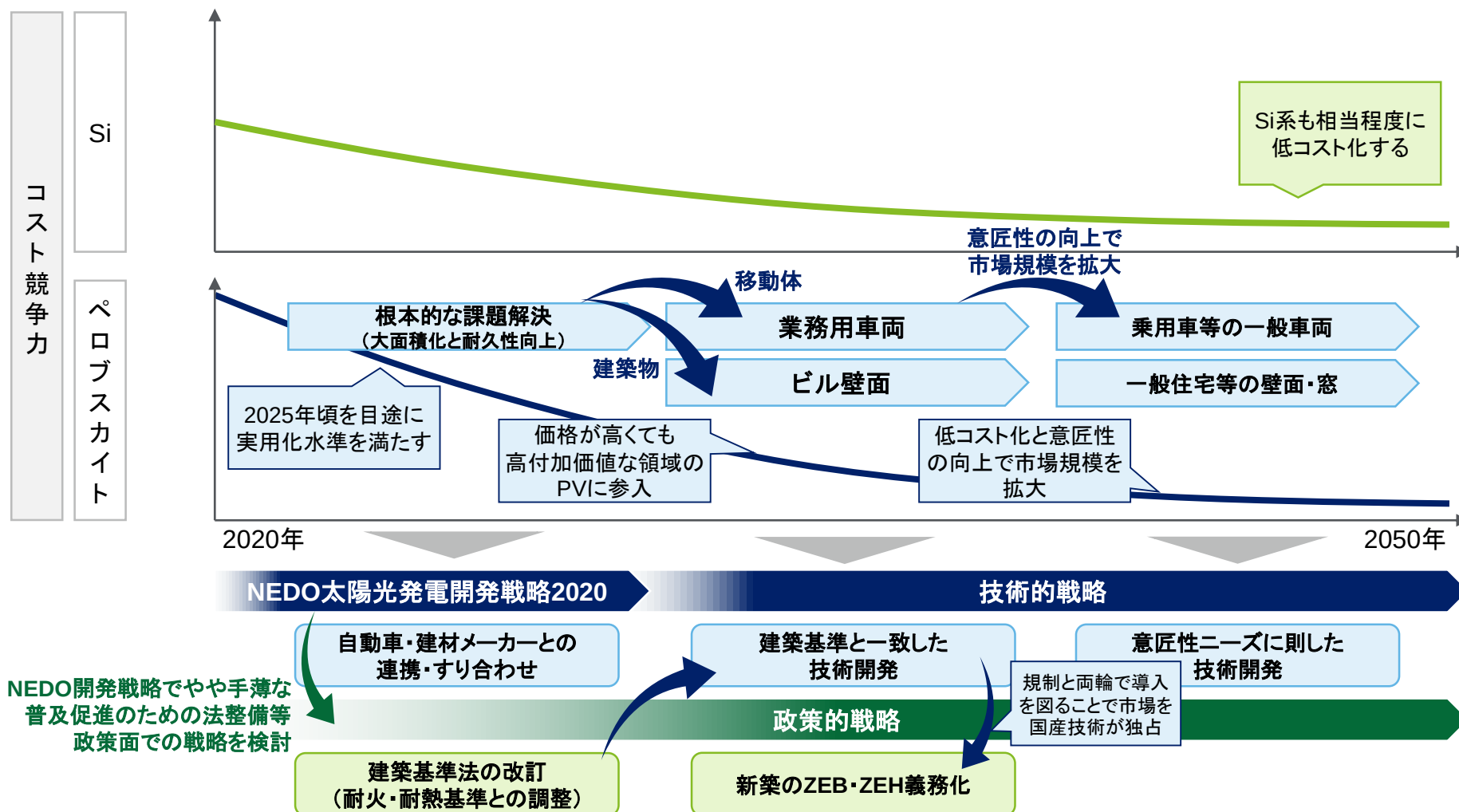
ペロブスカイトにおける研究開発事例

技術分類	プロジェクト事例					
	研究テーマ	研究主体	プロジェクト名	概要	変換効率	技術的課題
	高効率化	 KRICT (韓国化学 技術研究所)	Perovskite based solar battery	✓ P型有機半導体は通常、PTAA及びN,N-di-p-methoxyphenylamine-spiro-OMeTAD^{*4}を使用しているが、これらをP3HT^{*5}に変えることで世界最高変換効率22.7%を実現	22.7% ^{*1}	✓ 0.09cm²での変換効率であり、25cm²まで面積を拡大すると、変換効率が16%まで低下
	大面積化	 パナソニック NEDO	高性能・高信頼 性太陽光発電の 発電コスト低減 技術開発	✓ ペロブスカイト太陽電池で世界最大面積(開口面積802cm²)のモジュールを実現 ✓ モジュール作製の加熱工程で結晶が崩壊するCH₃NH₃の一部を、FA、Cs、Rbに置き換えることでインクジェット塗布に適したインクを開発 ✓ インクジェット塗布法の塗布量・速度を制御し、ドット上のインクから安定した結晶成長を実現	16.1% ^{*2}	✓ 結晶シリコン太陽電池モジュールに匹敵する高効率化の実現 ✓ 低コスト化(モジュール生産コスト15円/w)
	Si系との タンデム化	 Swiss Federal Institute of Technology	Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency	✓ シリコン太陽電池のセル上にペロブスカイト系のセルを積層したタンデム型太陽電池の開発 ✓ 従来はSiセルの表面を研磨しペロブスカイトを塗布するが、Si単結晶の上に直接ペロブスカイトを結晶成長させる技術を確認	25.2% ^{*3}	✓ さらなる変換効率の向上(変換効率を最終的に30%超まで高められる可能性あり) ✓ ペロブスカイト膜の長期安定性向上
	長寿命化	 東京大学	Lithium-Ion Endohedral Fullerene (Li ⁺ @C ₆₀) Dopants in Stable Perovskite Solar Cells Induce Anti-Oxidation	✓ 疑似太陽光照射下において封止状態で1000時間の長寿命化を実現(未封止状態では500時間) ✓ ドープするリチウム塩の代わりに、フラーレンC₆₀の殻で包んだリチウム塩「リチウムイオン内包フラーレン」を用い、ペロブスカイト太陽電池の耐久性を従来より約10倍向上させた	16.8% ^{*4}	✓ さらなる変換効率の向上(変換効率を最終的に30%超まで高められる可能性あり) ✓ ペロブスカイト膜の長期安定性向上

出所: *1:Nature, "Efficient, stable and scalable perovskite solar cells using poly(3-hexylthiophene)"より抽出*2:NEDOニュース記事より抽出、*3:NRELサイトより抽出、*3:Swiss Federal Institute of Technology, "Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency"、*4:東京大学 大学院工学系研究科"Lithium-Ion Endohedral Fullerene (Li⁺@C₆₀) Dopants in Stable Perovskite Solar Cells Induce Anti-Oxidation"

Si系も相当程度に低コスト化する中において 次世代PVを普及させていくためには 高付加価値領域への導入を足掛かりにコスト低下に伴って市場拡大する必要がある

次世代太陽光における我が国の勝ち戦略



1.2 技術開発／研究開発動向調査

A. 柔軟・軽量・高効率な太陽光発電

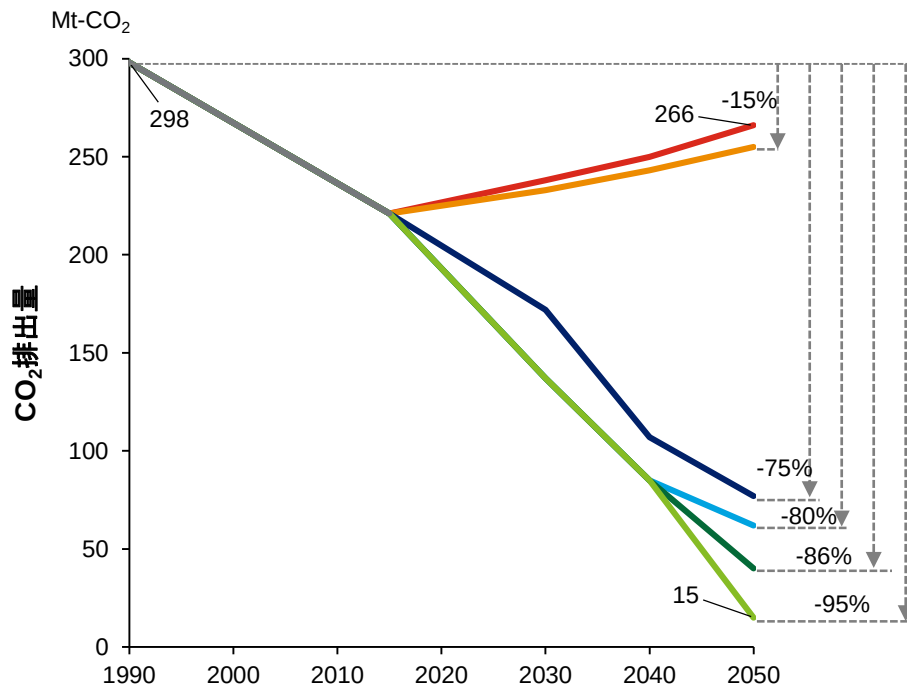
B. ゼロ・カーボン製鉄

C. デジタル技術を用いた電力ネットワーク

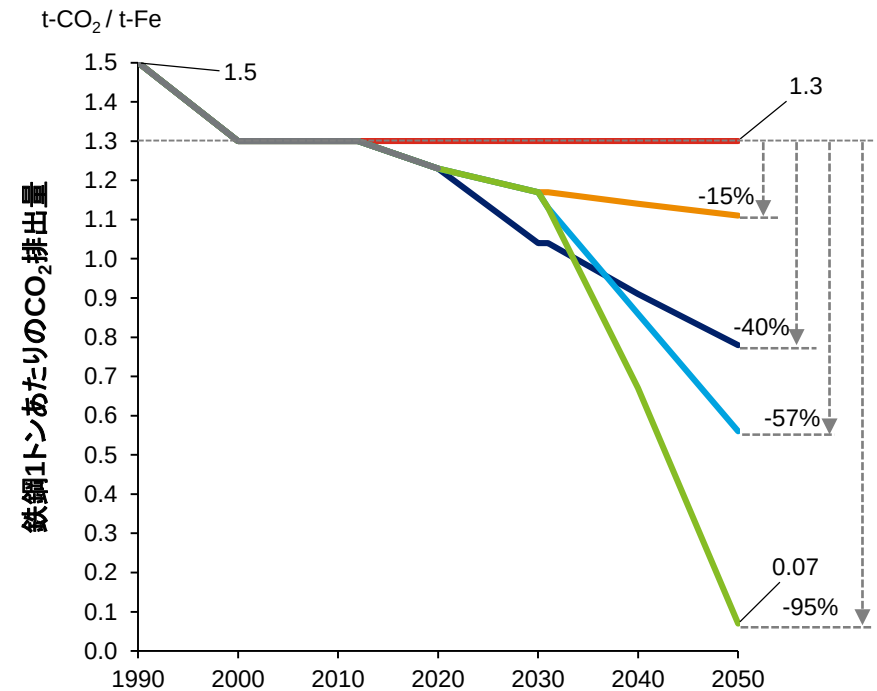
D. 大気中のCO₂の回収

EU鉄鋼業界ではCO₂排出量を1990年比で95%削減することを目標に掲げており 高炉のEAF転換・炉頂ガス循環・CCS等あらゆる技術を組合せて実現するとしている

ゼロカーボン・スチールにおける動向予測

EU鉄鋼業界におけるシナリオ別CO₂削減目標*1*2

- a: ベースライン
- b: 設備の高効率化
- c: 既存技術の実現
- d: 新規技術の導入
- e: 既存技術をCO₂フリーエネルギーで実施した場合
- f: 新規技術をCO₂フリーエネルギーで導入した場合

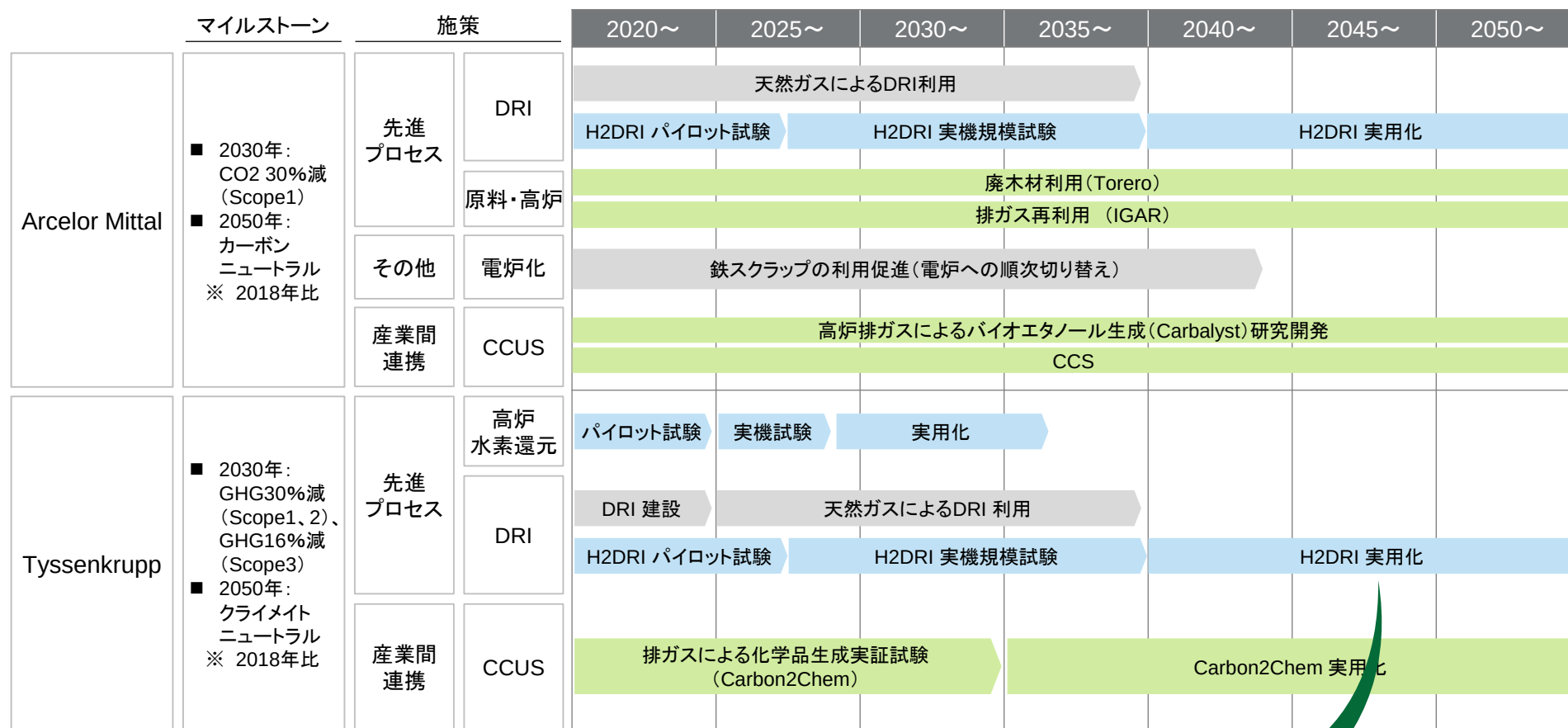
製鉄における技術別CO₂削減ポテンシャル*3*4

- a: ベースライン
- b: 設備の高効率化
- c: EAF 転換
- d: 炉頂ガス循環+CCS
- e: 既存・新規技術の組合せ+CCS

*1: EUROFER "Low Carbon Roadmap Pathways to a CO₂-Neutral European Steel Industry"、*2: CO₂削減目標は1990年と比較した場合の値、*3: EUROFER "A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050"、*4: CO₂削減ポテンシャルは2010年と比較した場合の値

ArcelorMittalとTyssenkruppは2050年までにカーボンニュートラルを目指しており天然ガスDRIや電炉への転換といった脱高炉化の取組も発表している

海外鉄鋼メーカーのロードマップ



日本においては高炉技術によるCO₂削減や、産業間連携(CCUS)が有望な施策である
(H₂DRI は将来の日本の水素調達価格に依存する)

出所: ArcelorMittal HP「Our carbon emissions reduction roadmap」(2020年5月)、thyssenkrupp Annual Report 2019/2020、各種公開情報よりDeloitte作成

ゼロカーボン・スチールに関する近年の研究開発は主に先進製鉄プロセスとCCUSに分類される

ゼロカーボン・スチールの技術概要

① CO2排出量を減らす技術

先進製鉄プロセス

- ✓ 炭素の利用効率向上、脱炭素化を目的として入力側の所要炭素を削減

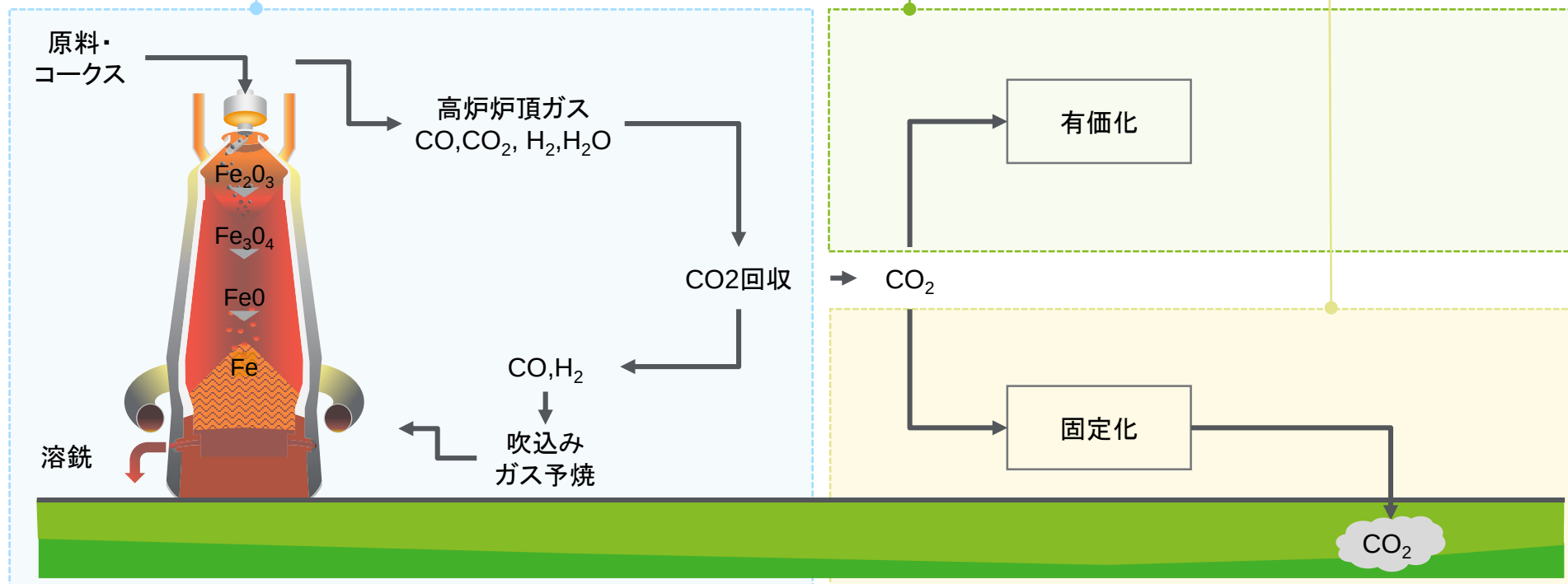
② 排出されたCO2を処理・活用する技術

CCU (Carbon Capture and Utilization)

- ✓ 高炉炉頂ガスより分離したCO₂を有価化し、カーボンを有効利用

CCS (Carbon Capture and Storage)

- ✓ 高炉炉頂ガスより分離したCO₂を地中、海洋等に隔離・保存



出所: 各社プレスリリース、有山達郎「鉄鋼における二酸化炭素削減長期目標達成に向けた技術展望」

脱炭素プロセスは欧州で研究開発が盛んにおこなわれており 特に近年はCO₂削減効果が大きい水素還元製鉄のPJが数多く立ち上がっている

A 先進プロセスの技術分類

先進プロセスの技術分類

分類	技術名	特徴	CO ₂ 削減量	制約・課題	PJ名	国	サイト	
原料プロセス	新高炉原料							
	フェロコークス (Ferro-coke)	✓ 一般炭と鉄鉱石を混合成型したフェロコークスを使用することで、混合した鉄の触媒作用が還元効率を高め、コークス消費を削減	10%	✓ 鉄鉱石の混合比率からCO ₂ 削減量は6.1%程度	フェロコークスプロジェクト		福山	
	廃木材利用 (Torero)	✓ 解体現場等で発生する廃木材を木炭化することでコークスを代替	少	✓ 代替は現時点は一部に限定	Torero		Ghent	
製鉄プロセス	高炉法	排ガス再利用 (IGAR)	✓ 製鉄プロセスから排出されるCO ₂ および水素を補足し合成ガスを生成	少	✓ N/A	IGAR		Dunkirk
		排ガス再利用 (iACRES)	✓ 製鉄プロセスから排出されるCO ₂ をCOに再生し、循環再利用	理論上CO ₂ 排出ゼロ	✓ CO再生のため外部からのエネルギー源が必要	iACRES		-
		酸素高炉 (Oxygen BF)	✓ 酸素送風と炉頂ガス循環によりCO間接還元率を増加させ、C直接還元率を低減	25%	✓ 炉頂ガスの熱量が足りず、天然ガス等の補填が必要	ULCOS-BF		Lorraine
		水素活用還元 (COURSE50)	✓ 還元反応の一部を炭素から水素に代替することで、CO ₂ の排出を削減	10%	✓ 吸熱反応による熱不足等	COURSE50		君津
	直接還元製鉄法	熔融還元 (Finex)	✓ 熔融ガス化炉で発生するガスを4段の流動層に導き、還元鉄を熔融ガス化炉に供給	4%	✓ CO ₂ 削減量は4%程度	Finex		Pohang
		熔融還元 (Hlsarna)	✓ 石炭と鉄鉱石を事前加工せず、直接炉に注入し、高温溶解し反応	20%	✓ N/A	Hlsarna		Ijmuiden
		直接還元鉄 (DRI)	✓ 天然ガスを還元剤として、粉鉱石を加工したペレットをシャフト炉によって還元	20~40%	✓ 下工程は電炉が一般的	-	-	-
		水素還元製鉄 (H ₂ DRI)	✓ 再生可能エネルギー由来の電力によって水素を製造し、その水素によって還元鉄をシャフト炉で炭素フリーの状態に製造	80%以上	✓ 吸熱反応による熱不足、浸炭のために天然ガスの追加が必要	MIDREX H2		Hamburg
						HYBRIT		Luleå
						SALCOS		Wilhelmshaven

出所: 各種公開情報

欧州の鉄鋼業界では

CO₂の海底貯留や燃料・化学品への変換に関するプロジェクトが多数行われている

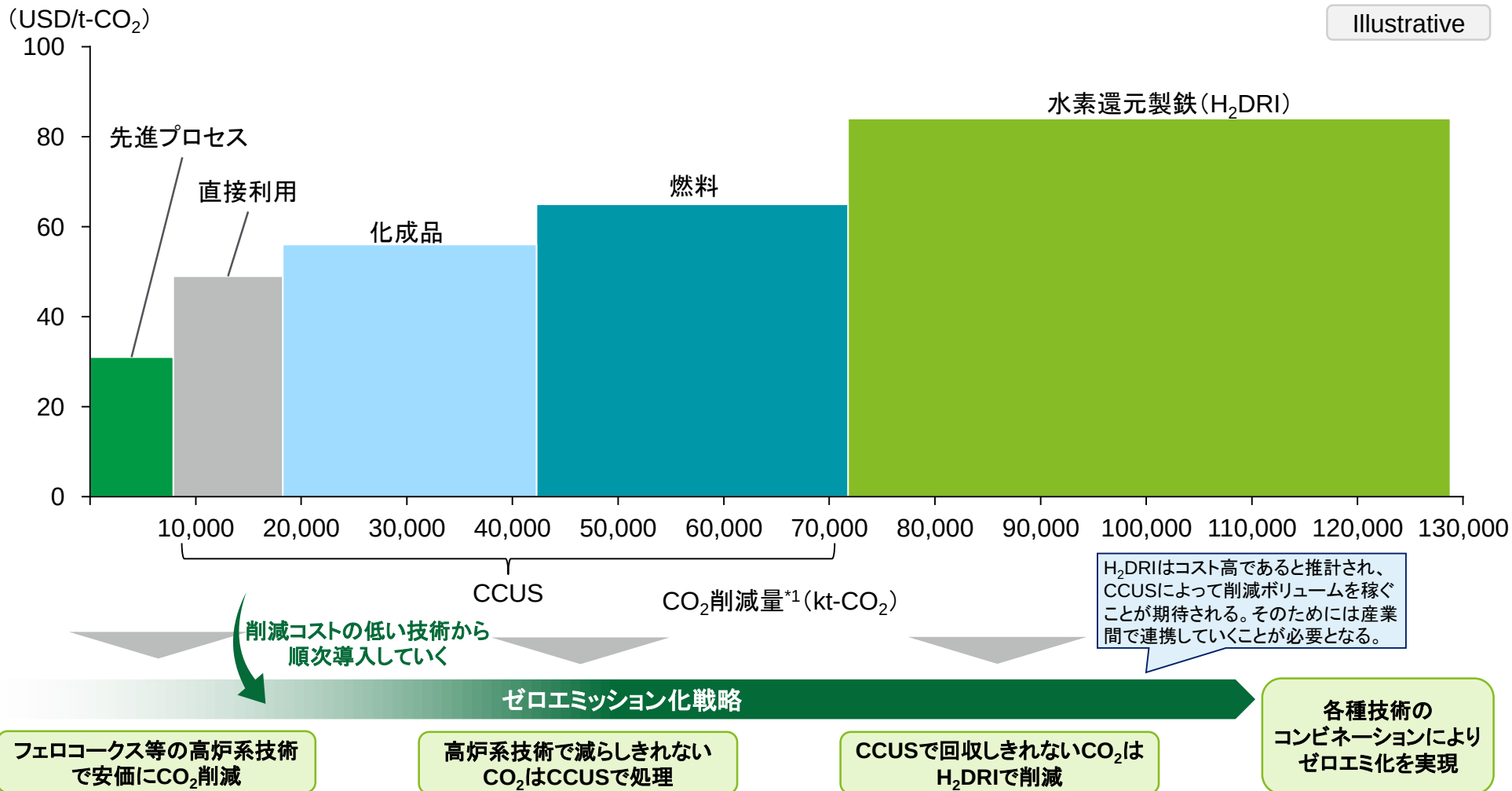
B CCUSの技術分類

プロジェクト	国	サイト	ステータス	対象技術				CO ₂ 削減ポテンシャル (万t/年)	概要
				化学品	燃料	CCS	その他		
Carbon2Chem		Duisburg	実証中	メタノール アンモニア オキシメチレン エーテル				-30% (2018年比)	✓ 発生ガスよりメタノール等を製造 ✓ 2018年9月、パイロットプラント稼働開始
Steelanol		Ghent	実証プラント 建設中		バイオ エタノール			35	✓ 製鉄所発生ガスよりアルコール類を製造 ✓ 足元パイロットプラント建設中
FReSMe		Luleå	実証終了 (2021年～燃料 供給開始)		メタノール			-20% (1990年比)	✓ 発生ガスよりメタノールを製造 ✓ 2020年末まで実証試験
Athos		Amsterdam	計画段階			海底貯留	温室・ 化学産業へ の供給	750	✓ 海底パイプラインにより空のガス田へ貯留、一部を温室、化学産業に供給
Porthos		Rotterdam	環境アセス 完了			海底貯留	温室への供 給	250	✓ 既存海底パイプラインにより空のガス田へ貯留、一部を温室に供給
Northern Lights		Northern North Sea	実証プラント 建設中			海底貯留		500	✓ Equinorとの協業で、北海北部にてCCSを実施
DMX Demonstration in Dunkirk		Dunkirk	実証プラント 建設中			海底貯留		100	✓ 製鉄所発生ガスを回収し北海海底に貯留
Carbon4PUR		N/A	研究開発 段階	ポリオール				-20～-60%	✓ 発生ガスからポリウレタンの中間体であるポリオールを製造

出所:各種公表資料

H₂DRIはCO₂削減量は大きいものの 一般的には最もコストが高くなるため 排出されたCO₂をどれだけ処理・活用できるかが論点となる

核技術における一般的なCO₂削減量・コストカーブ(2050年)



*1: 2018年の高炉の生産量CO₂ 0.75億トン、排出量1.29億トンを起点とし、生産量に変化がないと仮定する。なお1USD=104.31¥(2021年1月28日)とする

1.2 技術開発／研究開発動向調査

A. 柔軟・軽量・高効率な太陽光発電

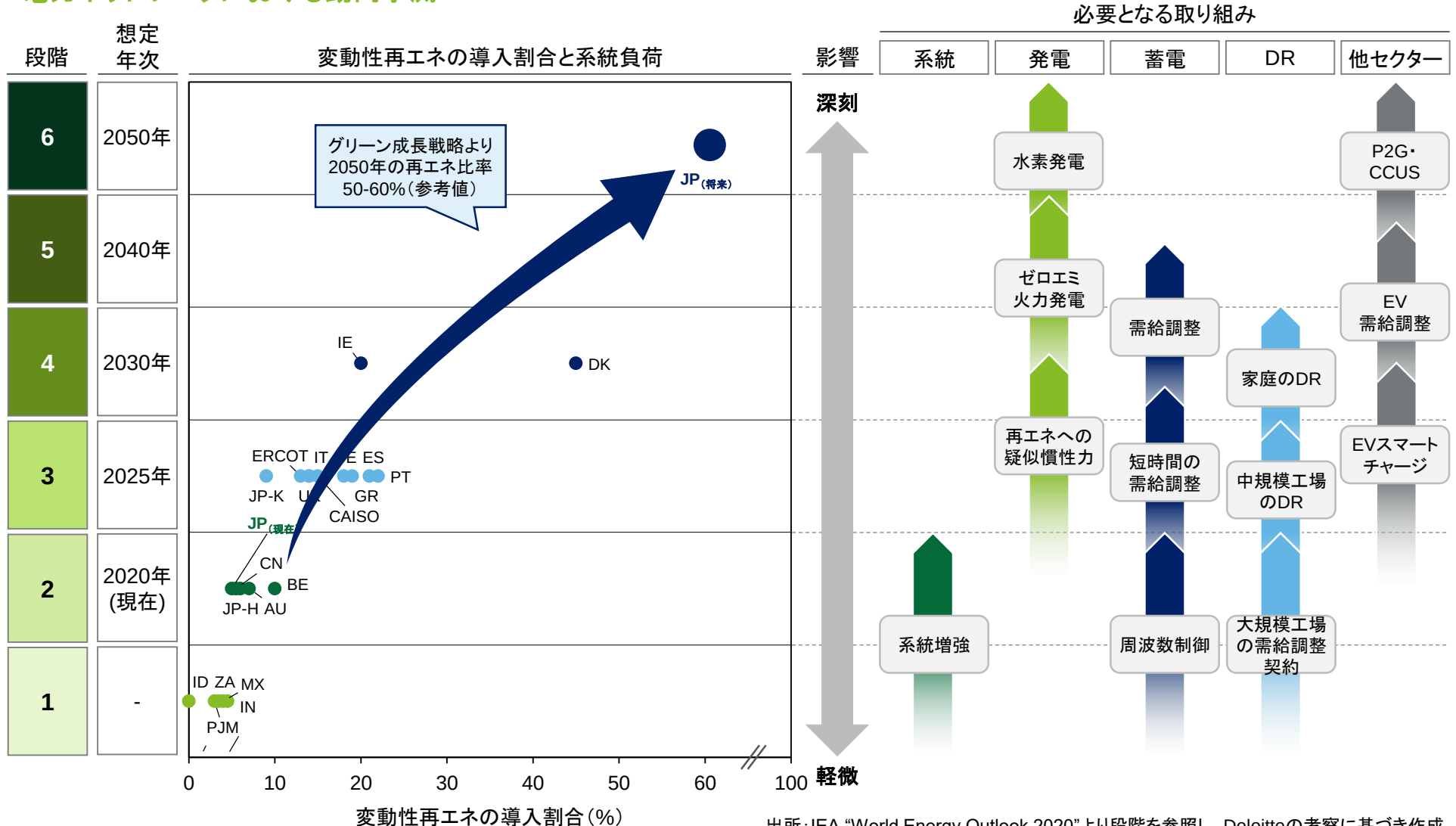
B. ゼロ・カーボン製鉄

C. デジタル技術を用いた電力ネットワーク

D. 大気中のCO₂の回収

再生可能エネルギーが大量導入され 電源構成に占める比率が高くなれば 調整力や慣性力の不足といった問題が生じると予想される

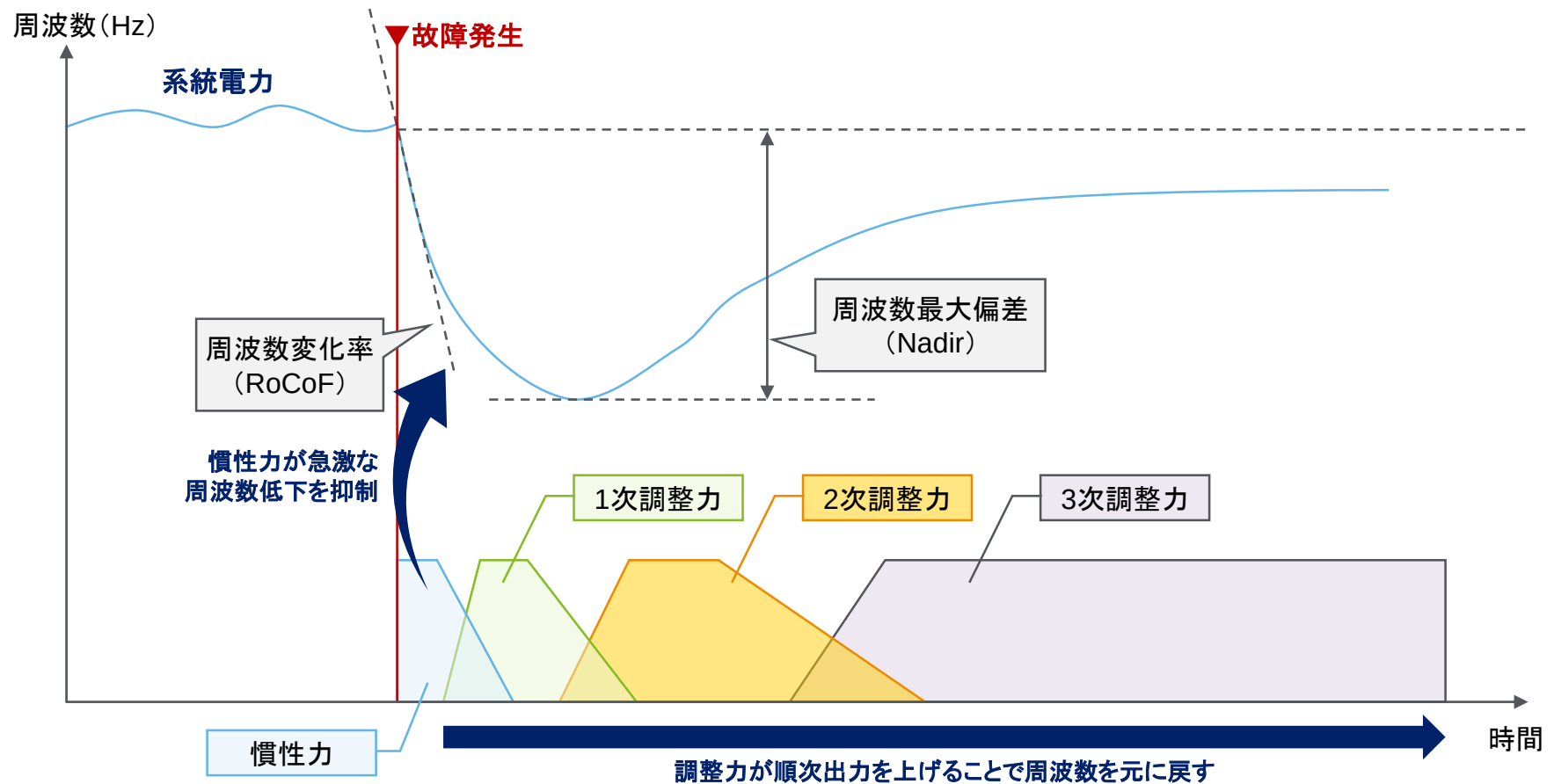
電力ネットワークにおける動向予測



出所: IEA "World Energy Outlook 2020"より段階を参照し、Deloitteの考察に基づき作成

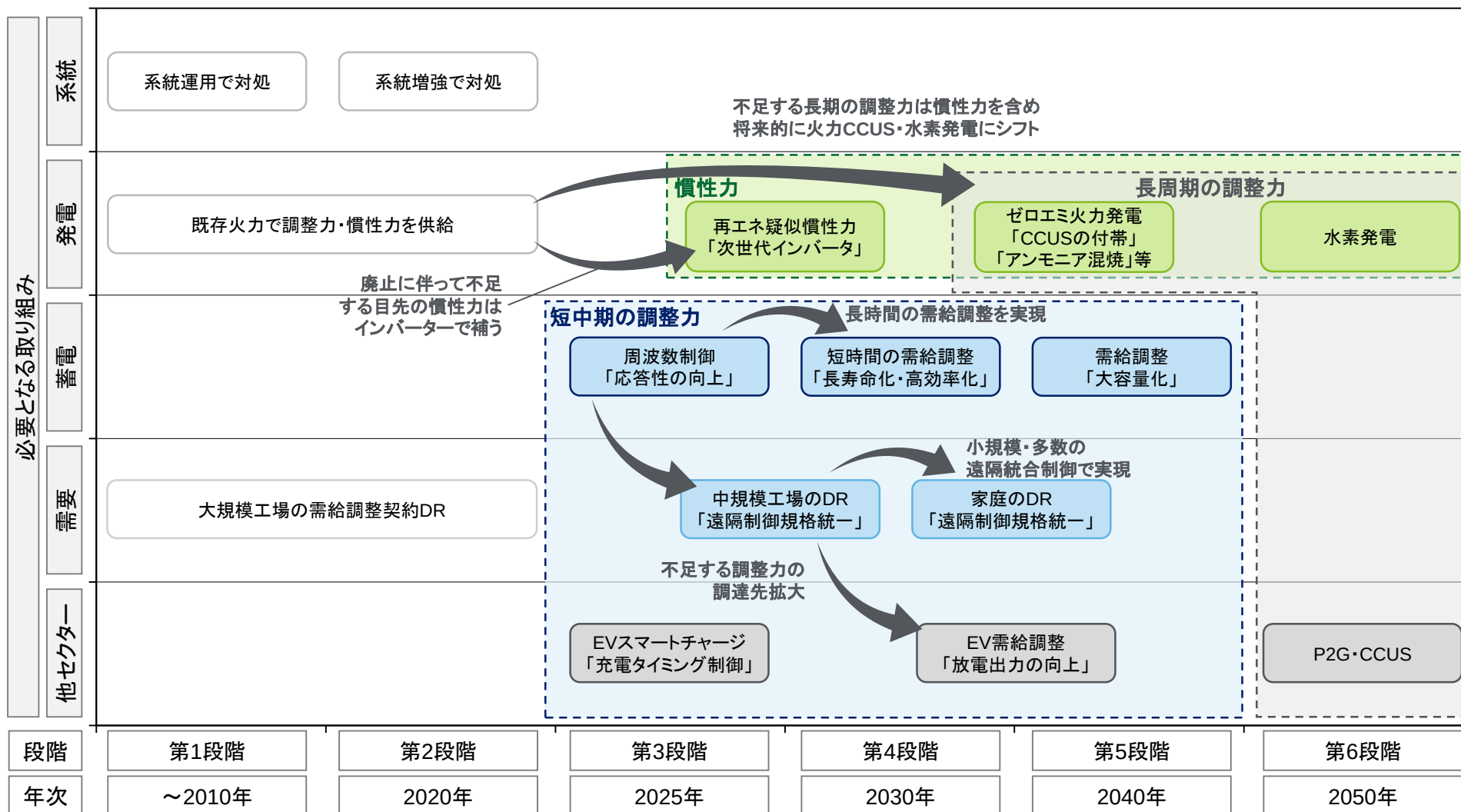
発電所や系統の障害が発生した場合でも 慣性力が周波数の急激な低下を抑制し 調整力が順次出力を上げていくことで 系統の安定性が保たれる

系統における障害発生時の慣性力・調整力の位置付け



再エネの導入に段階に応じて 系統安定化に必要な技術を導入し それらを活用した次世代の電力ネットワーク形態に移行していくことが望ましい

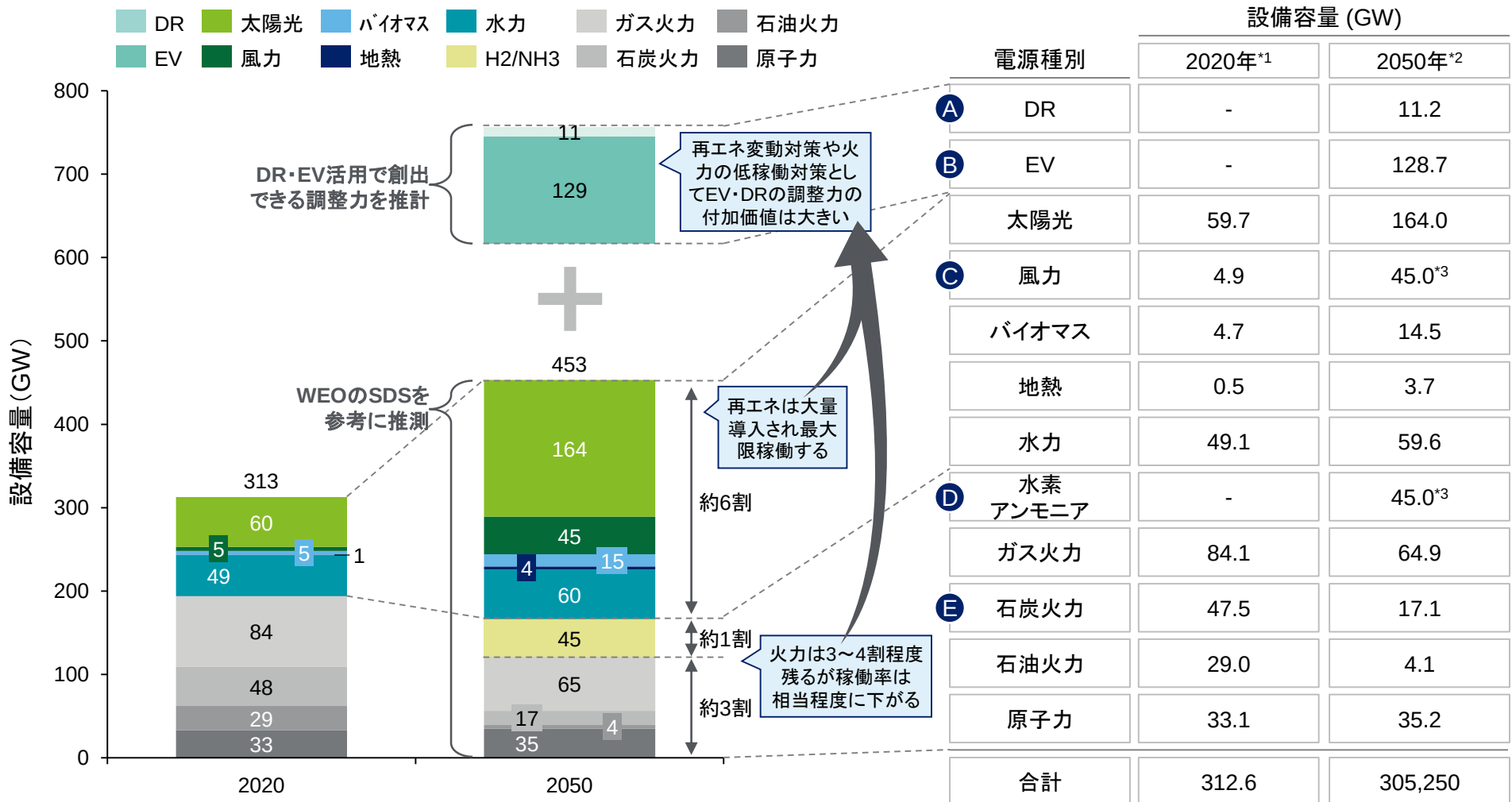
技術開発動向の予測



グリーン成長戦略を想定しうる2050年の電源構成において

DR・EV活用で創出できる調整力は非常に大きなウェイトを占めると考えられる

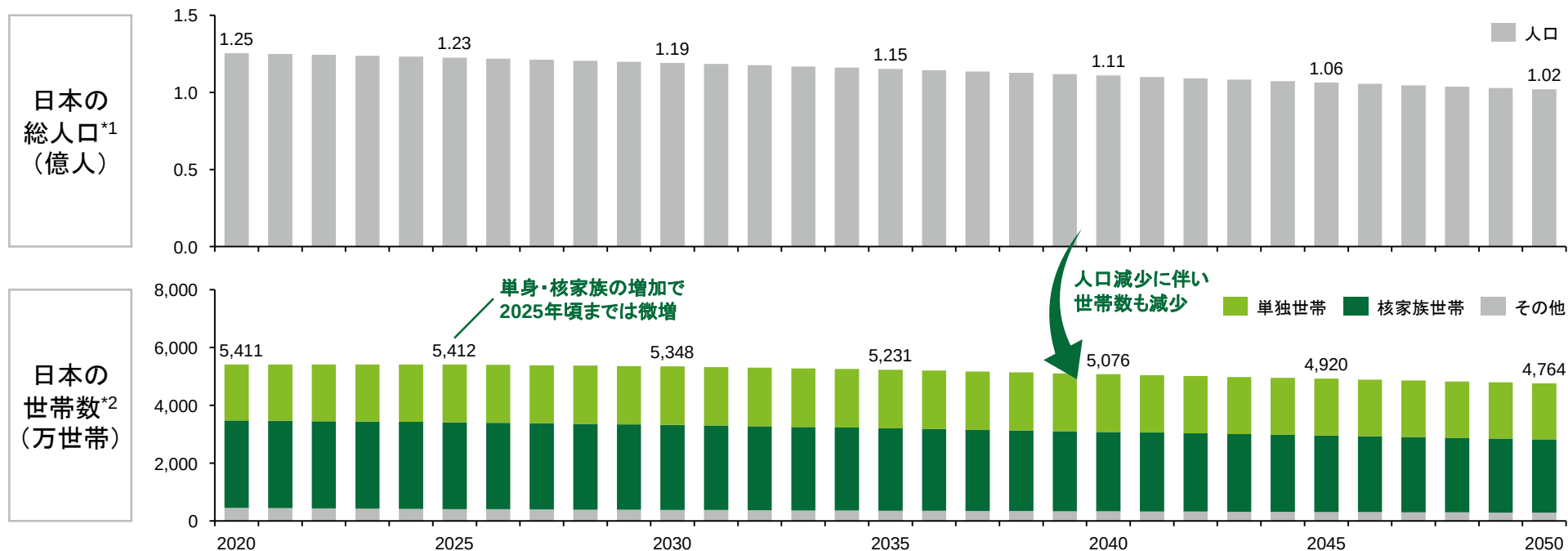
2050年における電源構成



*1: 電力広域的運営推進機関「2020年度供給計画の取りまとめ」より抽出、*2: IEA “World Energy Outlook 2020”のSDSにおける2040年予測値を抽出、*3: 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を参考にDeloitte推計

世帯あたり0.5 kWのDRが可能と仮定すると 2050年の世帯数から11.2 GWのポテンシャルがあると推計した

A 家庭DRによる需給調整ポテンシャル推計



需給調整
ポテン
シャル

制御可能出力

0.5 kW/世帯
(仮定値)



制御可能な世帯数

2,238万世帯
(2050年世帯数の50%)



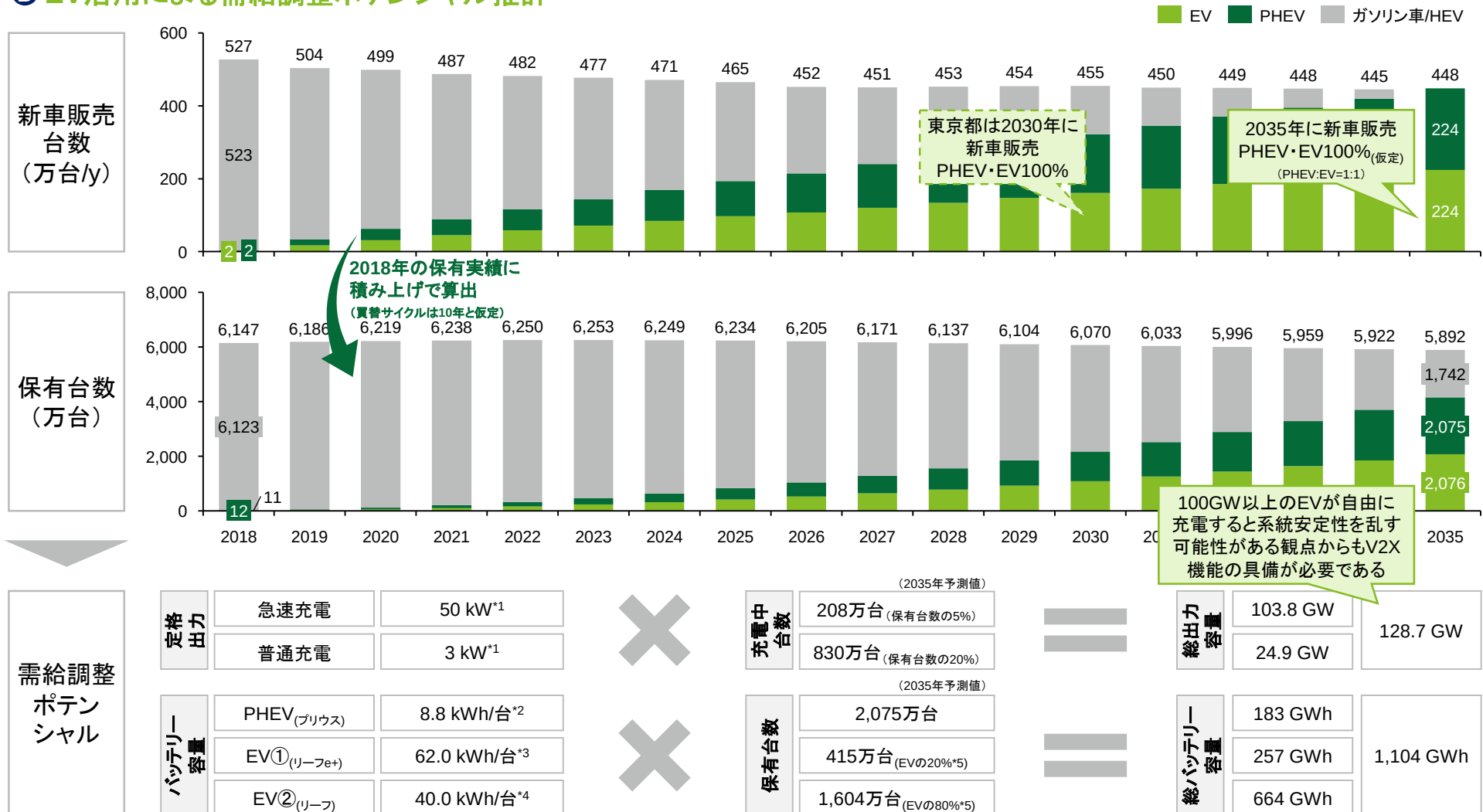
総出力容量

11.2 GW

*1: 国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口(平成29年推計)結果の概要」、*2: 国立社会保障・人口問題研究所「日本の世帯数の将来推計(全国推計)」

2035年に新車販売の100%がEV・PHEVになると EVを需給調整に活用した場合のポテンシャルは約129GWになると推計した

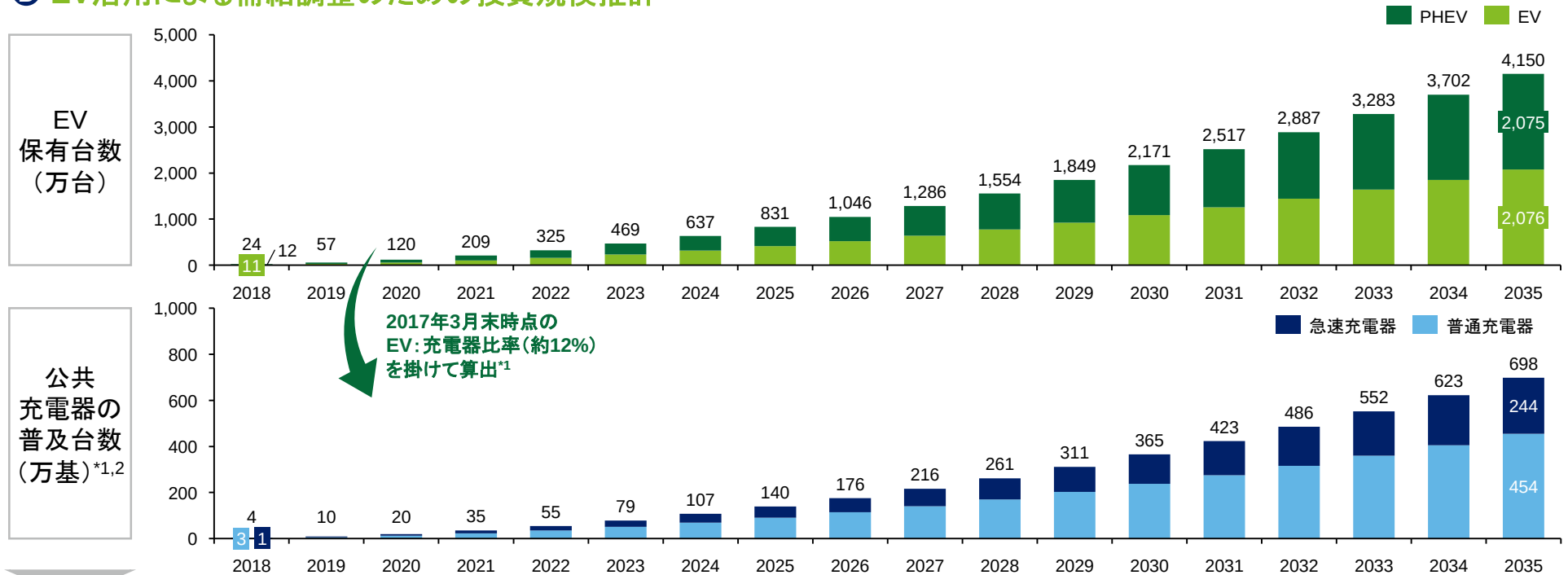
B EV活用による需給調整ポテンシャル推計



*1: 一般社団法人 次世代自動車振興センターのHPより抽出、*2: プリウスPHV 2017年モデルの実績値、*3: リーフe+ 2019年モデルの実績値、*4: リーフ 2018年モデルの実績値、*5: 欧州における販売実績より仮定 (2019年上半期欧州リーフ販売4万台中0.8万台がe+)

4,000万台以上のEVを普及させるためには 公共インフラとして700万基以上の充電器が必要と考えられ

B EV活用による需給調整のための投資規模推計



投資規模

公共充電器の機器価格*1

急速
充電器

200 万円/基

普通
充電器

80 万円/基



公共充電器の普及台数

244 万基
(2035年予測値)454 万基
(2035年予測値)

投資規模

4.9 兆円

3.6 兆円

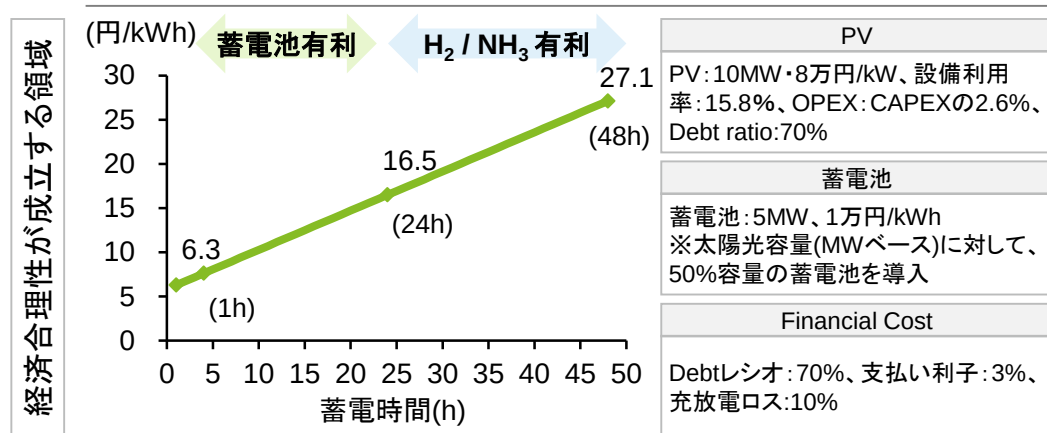
8.5 兆円

*1: 経済産業省 製造産業局 自動車課「電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の充電インフラ整備事業費補助金について」より2017年3月末時点のEV・PHEV普及台数と公共充電器設備の普及台数から算出、*2: CHAdeMO 協議会「充電設備位置情報」より急速充電器と普通充電器の導入施設数の比率をもとに総数を按分

蓄電池は充電時間が長くなると稼働率が下がり 貯蔵に要するコストが高くなるため 水素やアンモニアに変換し 長周期の需給調整に活用する方が経済合理性がある

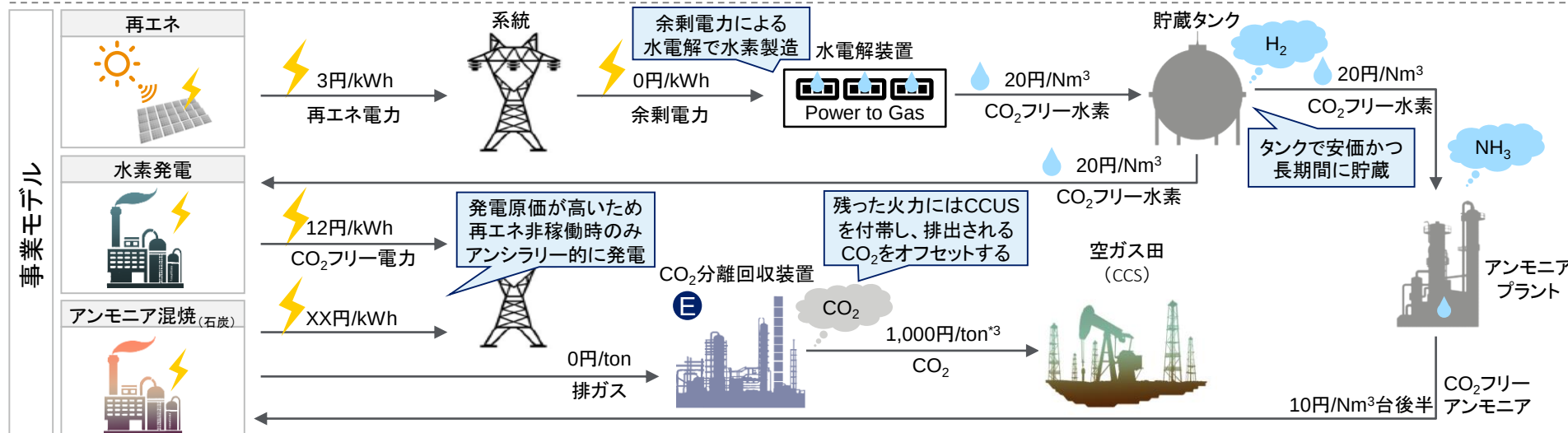
④ ⑤ 水素・アンモニアを中心とした需給調整

蓄電コスト試算*1



コスト・規模の政策目標*2

種別	燃料価格	発電原価	燃料需要	設備容量
水素発電	20円/Nm ³	12円/kWh	2,000万ton/y (発電以外も含む)	27.9GW (電源構成の10% -アンモニア混焼)
アンモニア 混焼	10円/Nm ³ 台 後半 (熱量等価での 水素換算)	-	2,138万ton/y (50万ton/GW より算出)	17.1GW (石炭火力の50%)

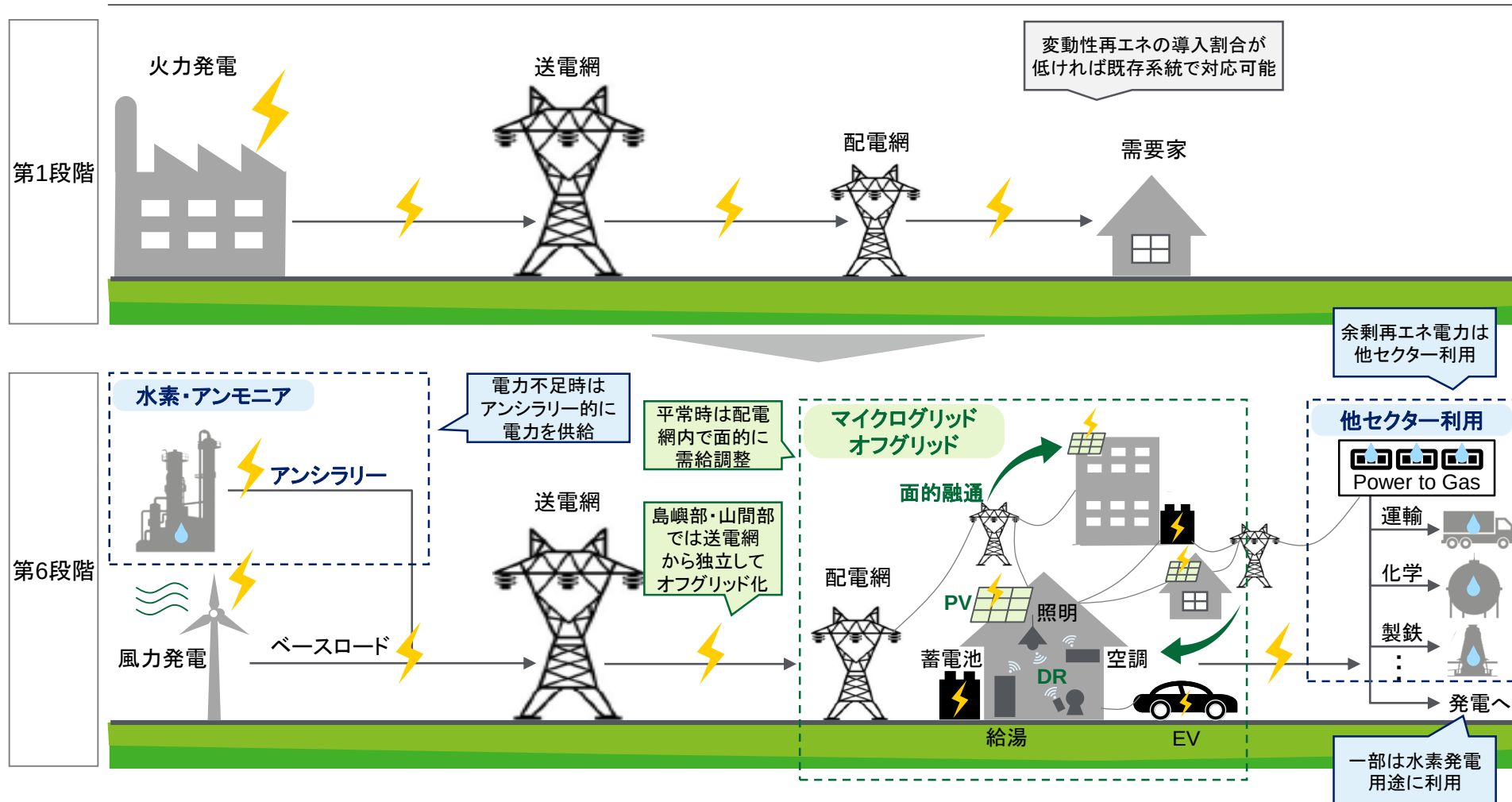


*1: 経済産業省「エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会」資料より抽出、*2: 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」より抽出、*3: 革新的イノベーション戦略「⑫ CCUS／カーボンサイクルの基盤となる低コストなCO₂分離回収技術の確立」より抽出、*4: 天然ガス価格はCO₂-EORを実施している米国(約\$3/MMBTU)と同水準と仮定し、USD/JPY=120として算出

平常時は需要端の分散型エネルギーを活用して需給調整しつつ 電力不足時には水素発電をアンシラリー的に稼働させ 電力を供給する形態になると想定される

次世代電力ネットワークの形態予測

電力ネットワーク形態



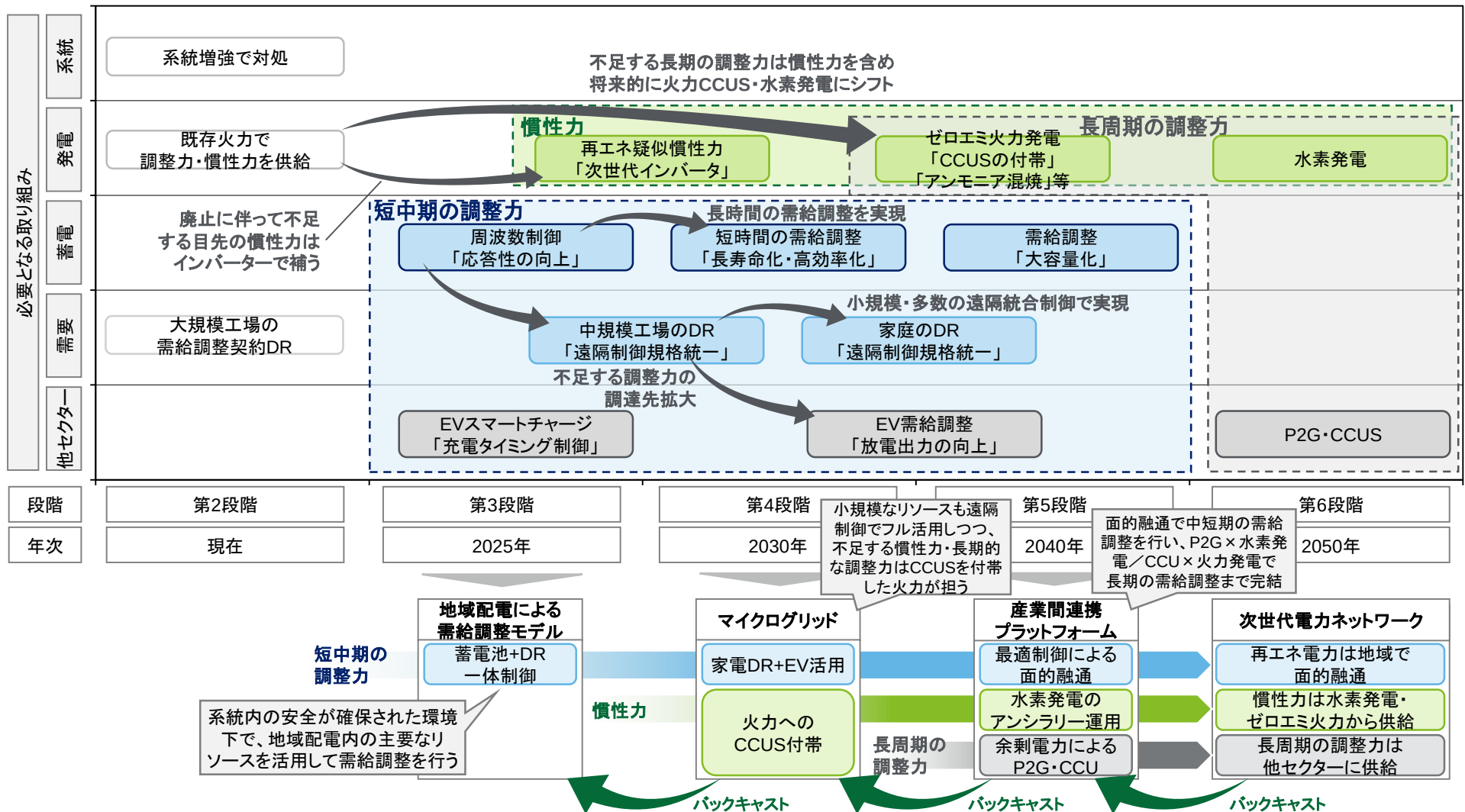
本調査で予測した次世代電力NWの形態は 想定されるシナリオの一つであり 当該シナリオから外れる要因をリストアップした

次世代電力ネットワークの形態予測における懸念事項

セクター	項目	懸念事項	検討すべき対策
系統	送電容量	✓ 再エネ大量導入に伴う送電線の空き容量不足が、系統の老朽化等で、想定より深刻化する可能性	✓ コネクト&マネージやダイナミックラインレーティング等の実装を含めた既存系統活用の最大化に向けた検討 ✓ 2050年を見据えた戦略的な系統の増強・更新計画の検討
発電	再エネ導入量	✓ 再エネが想定しているほど大量に導入されない可能性	✓ 洋上風力におけるゾーニング及び国内バリューチェーン構築によるコストダウン・開発速度の向上等の検討
	バックアップ電源	✓ 火力発電所のバックアップ電源化による稼働率の低下に起因した収益性の悪化	✓ 稼働率が低下すると考えられる火力発電所において、新技術を導入する方向に誘導する措置の検討
	水素価格	✓ 水素価格が高止まりし目標価格まで低下しない可能性	✓ パイプライン等の供給基盤を構築し、発電以外の産業とも連携した大規模供給・消費を行う拠点・実証の検討
	アンモニア価格	✓ アンモニア価格が高止まりし目標価格まで低下しない可能性	✓ パイプライン等の供給基盤を構築し、発電以外の産業とも連携した大規模供給・消費を行う拠点・実証の検討
	CCSコスト	✓ 分離回収コストが目標価格まで低下しない可能性	✓ 戦略的な技術開発計画の検討 ✓ 市場拡大に向けた導入補助・実証の検討
蓄電	蓄電コスト	✓ 蓄電池価格の高止まり等により、充放電コストが想定しているほど安価にならない可能性	✓ 車載用蓄電池のリユースの検討 ✓ 充放電に伴う託送費用の二重課金の解消に向けた検討
	蓄電池の普及台数	✓ 蓄電池の普及が進まず、需給調整に有効となる出力が集まらない可能性	✓ FIT切れと並行して蓄電池の普及を政策的に進めるとともに、マイクログリッド・オフグリッドを行う拠点・実証の検討
DR	機器の普及率	✓ DRに対応した制御可能な機器の普及が進まず、需給調整に有効となる出力が集まらない可能性	✓ 新築におけるZEH・ZEBの義務化等による規制面での導入政策の検討
	通信・制御規格	✓ DRに対応する通信・制御規格が導入する工場・家庭ごとに異なり、需給調整に必要な統合制御ができない可能性	✓ 通信・制御規格の統一に関するルール of 検討
他セクター利用	EVの普及台数	✓ EVの普及が進まず、需給調整に有効となる出力が集まらない可能性	✓ 内燃機関廃止等の規制面での導入政策の検討 ✓ V2Xインフラ先行整備の検討
	P2Gコスト	✓ 水電解装置の価格が高止まりし、目標価格まで低下しない可能性	✓ 戦略的な技術開発計画の検討 ✓ 市場拡大に向けた導入補助・実証の検討

2050年における次世代ネットワークの絵姿からバックキャストし 必要となる技術を確認するための実証事業を組成していくべきである

次世代電力ネットワークにおける我が国の勝ち戦略



1.2 技術開発／研究開発動向調査

A. 柔軟・軽量・高効率な太陽光発電

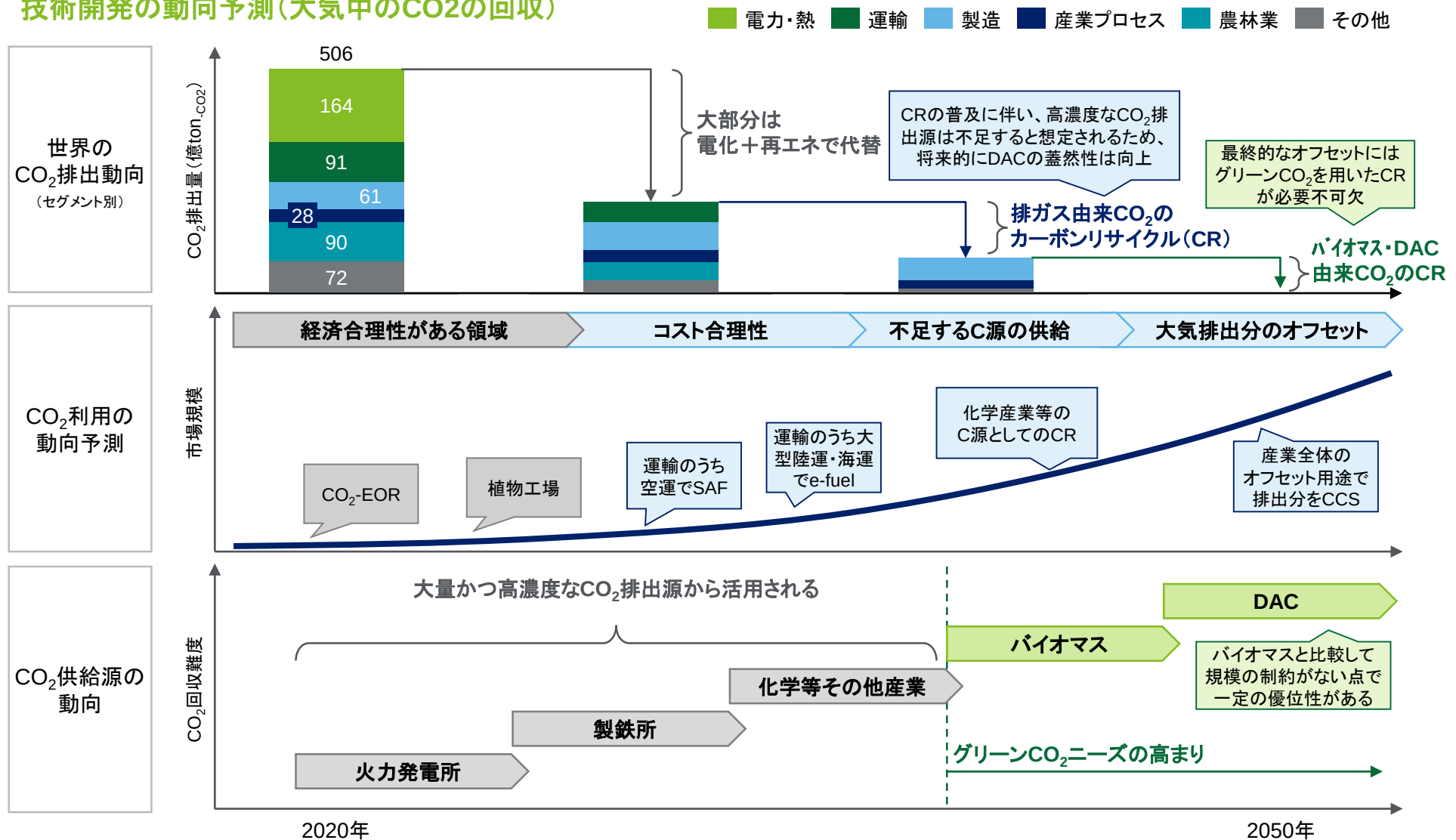
B. ゼロ・カーボン製鉄

C. デジタル技術を用いた電力ネットワーク

D. 大気中のCO₂の回収

CO₂排出産業のうち再エネや水素で化石燃料を代替できない領域において カーボンリサイクルが拡大し 将来的にDACの蓋然性は上がると想定される

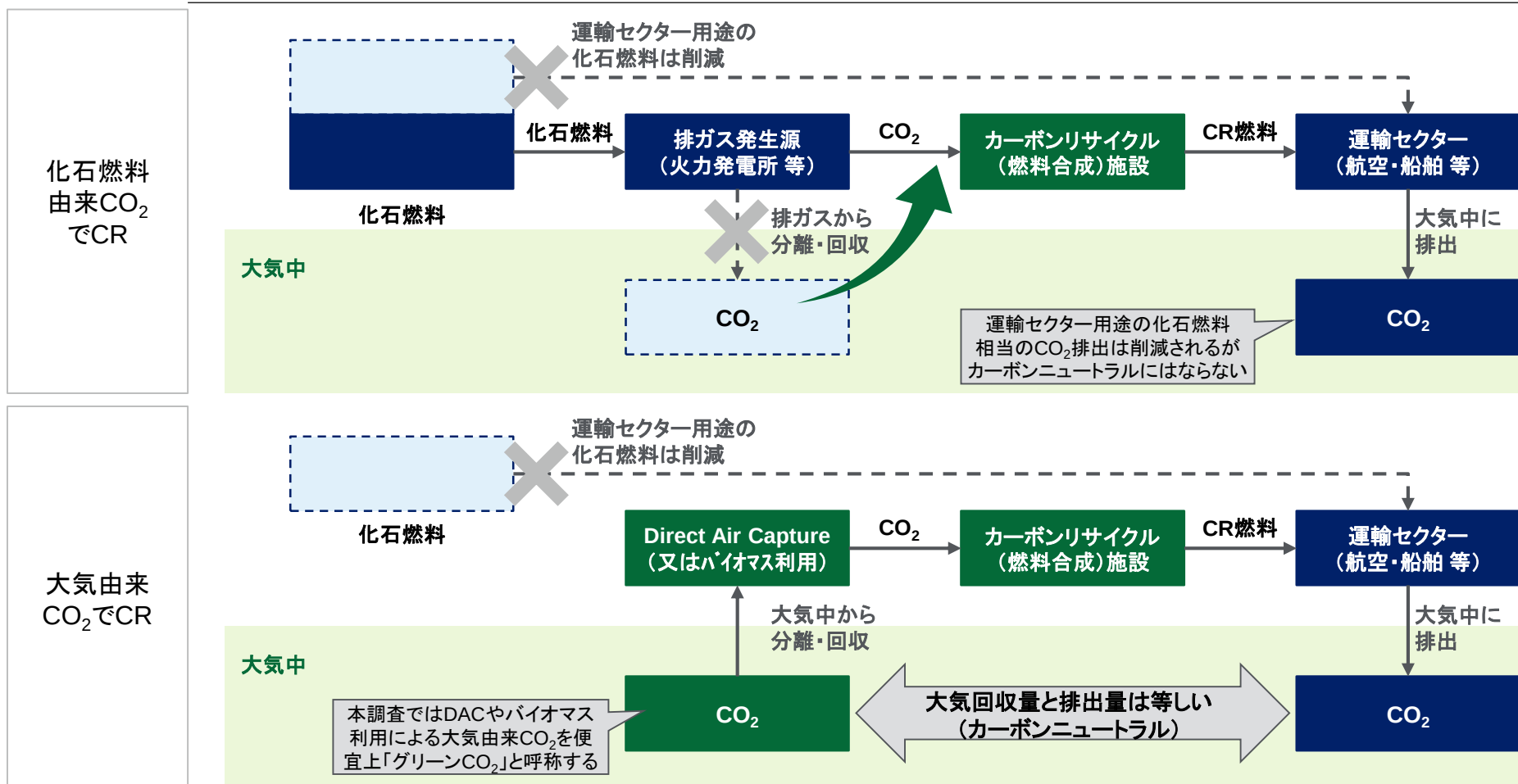
技術開発の動向予測(大気中のCO₂の回収)



化石燃料由来CO₂を用いたカーボンリサイクルでもCO₂削減には寄与するがカーボンニュートラルの実現には DAC等によるグリーンCO₂の活用が不可欠である

カーボンリサイクルにおけるCO₂排出の考え方

カーボンリサイクル製品(燃料)のマテリアルフロー



化学吸収法や物理吸収法等はエネルギー効率が課題であり よりエネルギー効率の高い膜分離が今後台頭するのではないか

主要な実施国と組み合わせ可能な技術

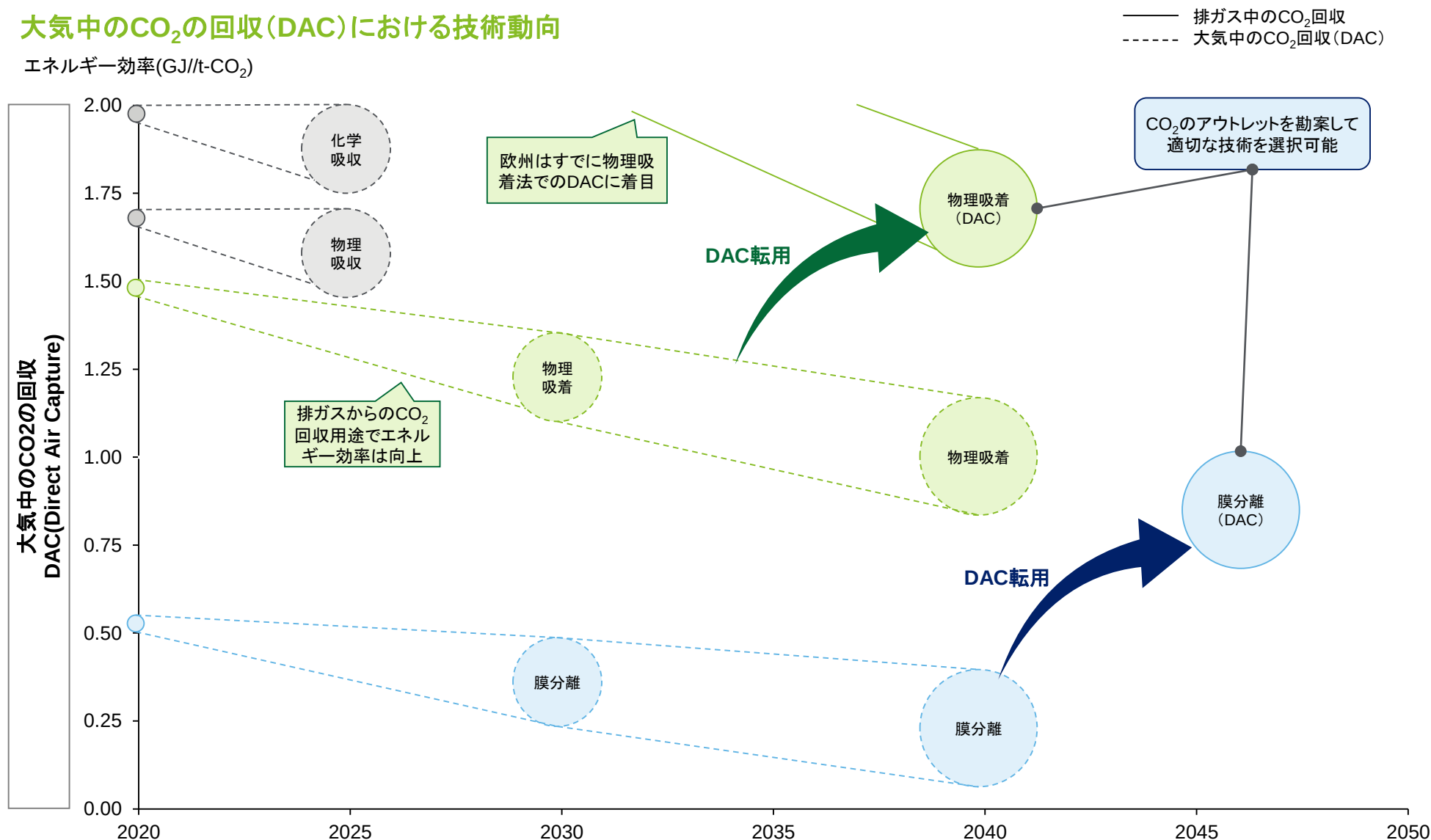
技術分類		概要		エネルギー 効率	プロジェクト事例			
		Pro	Con		主体企業	プロジェクト・技術名	エネルギー効率	
大気中のCO ₂ の回収 (DAC)	化学プロセス	化学吸収法	✓ CO2 吸収液にCO2 を化合させて分離する技術 ✓ 低分圧ガス向きで大容量に適する	✓ アミン等の吸収液が高価 ✓ 腐食性・浸食性がある ✓ 吸収液の再生用に熱源が必要	2.0 GJ/t-CO2~	RITE	高性能吸収液の開発	2.0 GJ/t-CO2 ^{*1}
						TNO (応用科学研究機構)	CESAR	2.8 GJ/t-CO2 ^{*2}
						DONG Energy	CASTOR2	3.5 GJ/t-CO2 ^{*3}
	物理プロセス	物理吸収法	✓ メタノール等の溶媒を用いて圧力差によりCO2を吸脱する技術	✓ CO2溶媒が高価	1.7 GJ/t-CO2~	電源開発	EAGLE	N/A
						Lurgi, Linde	Rectisol	N/A
						UOP	Selexol	1.7 GJ/t-CO2 ^{*4}
		深冷分離法	✓ 気体の種類による沸点の違いを利用して、CO2を分離する技術 ✓ 高純度での精製が可能で大容量に適する	✓ 装置が複雑 ✓ 建設費及び運転費が高い	1.64 GJ/t-CO2 ^{*6} ~	POSCO	N/A	N/A
		物理吸着法 (PSA/TSA)	✓ 活性炭等の固体の吸着剤にCO2を吸着・脱離させる技術 ✓ 装置が比較的容易で安価	✓ 水蒸気により吸着剤の性能が低下するため除湿が必要 ✓ 大容量化に不向き	1.5 GJ/t-CO2~	RITE	先進的二酸化炭素固体吸収材実用化研究開発	0.9~1.7 GJ/t-CO2 ^{*5}
		膜分離法	✓ 高分子膜等を用いて圧力差を駆動力として CO2 を分離回収する技術	✓ 大容量化に不向き	0.53 GJ/t-CO2~	RITE	二酸化炭素分離膜モジュール実用化研究開発事業	0.53 GJ/t-CO2 ^{*6}
						豪州系企業・研究機関等	CO2CRC	N/A
MTR社	Polaris膜					N/A		

出所:環境省「平成25年度シャトルシップによるCCSを活用した二国間クレジット制度実現可能性調査委託業務報告書」、*1:RITE Websiteより抽出、*2:RITE「CO₂分離回収技術開発の世界動向とRITEの取り組み」より抽出、*3:IEAGHG, "Performance Review of CASTOR Pilot Plant at Esbjerg"より抽出、*4:RITE「高圧再生型化学吸収液プロセスによる革新的CO₂分離回収技術」より抽出、*5:RITE「RITEにおける高効率CO₂分離回収技術の開発状況」より抽出、*6:産業構造審議会産業技術環境分科会「二酸化炭素回収技術実用化研究事業(プロジェクト)技術評価結果報告書(中間評価)」より抽出、*6:東京ガス「高効率酸素製造装置(HT-PSA)の開発」に記載の深冷分離法のエネルギー効率をもとに算出

化学吸収法や物理吸収法等の吸収剤を用いたDACはエネルギー効率が課題でありよりエネルギー効率の高い膜分離が台頭するのではないか

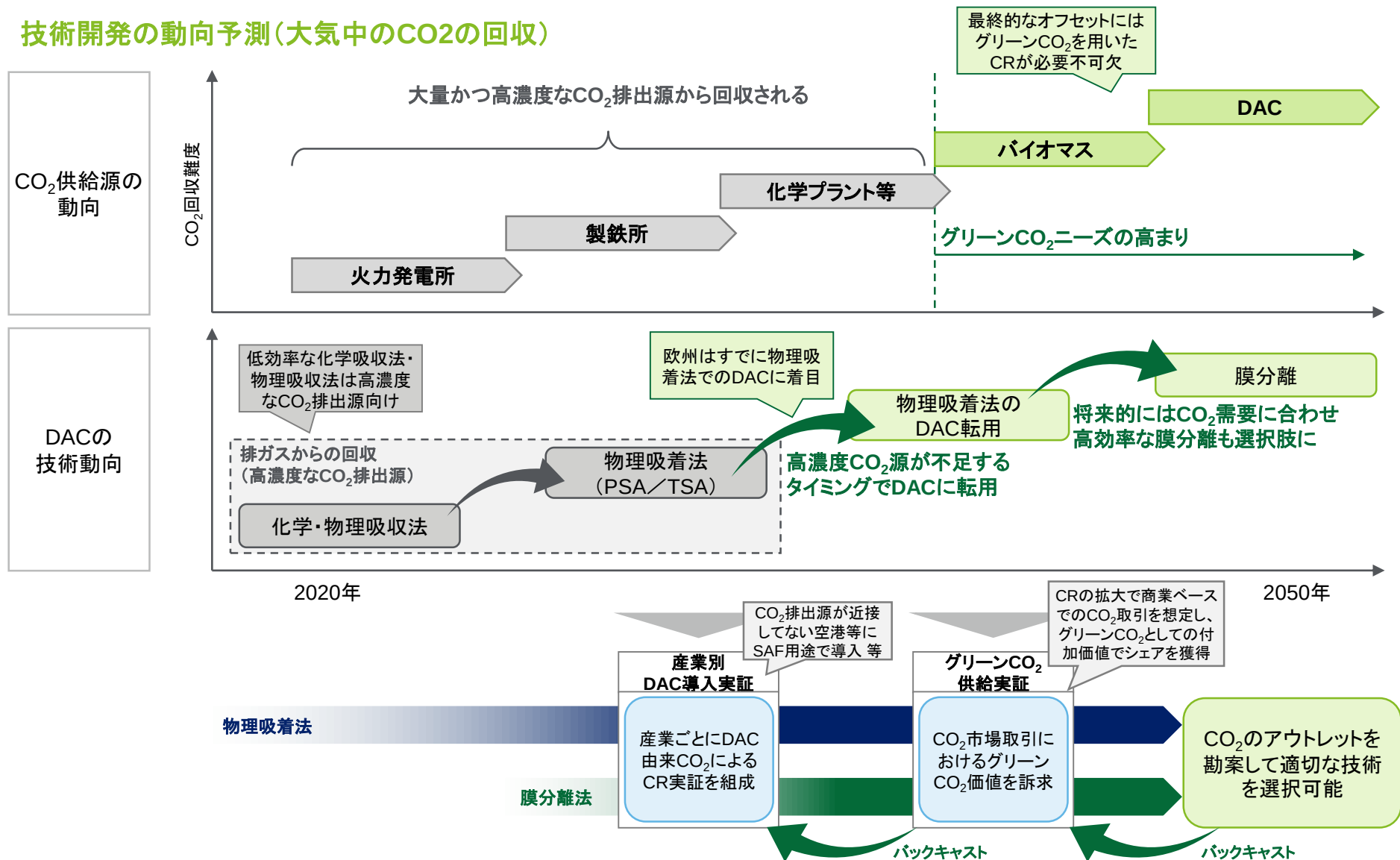
大気中のCO₂の回収(DAC)における技術動向

エネルギー効率(GJ/t-CO₂)



初めは排ガス由来のCO₂を活用しながらカーボンリサイクルを実行し 将来的にはグリーンなCO₂源としてDACを活用したらどうか

技術開発の動向予測(大気中のCO₂の回収)



2.1 諸外国との技術動向比較

A. 柔軟・軽量・高効率な太陽光発電

B. ゼロ・カーボン製鉄

C. デジタル技術を用いた電力ネットワーク

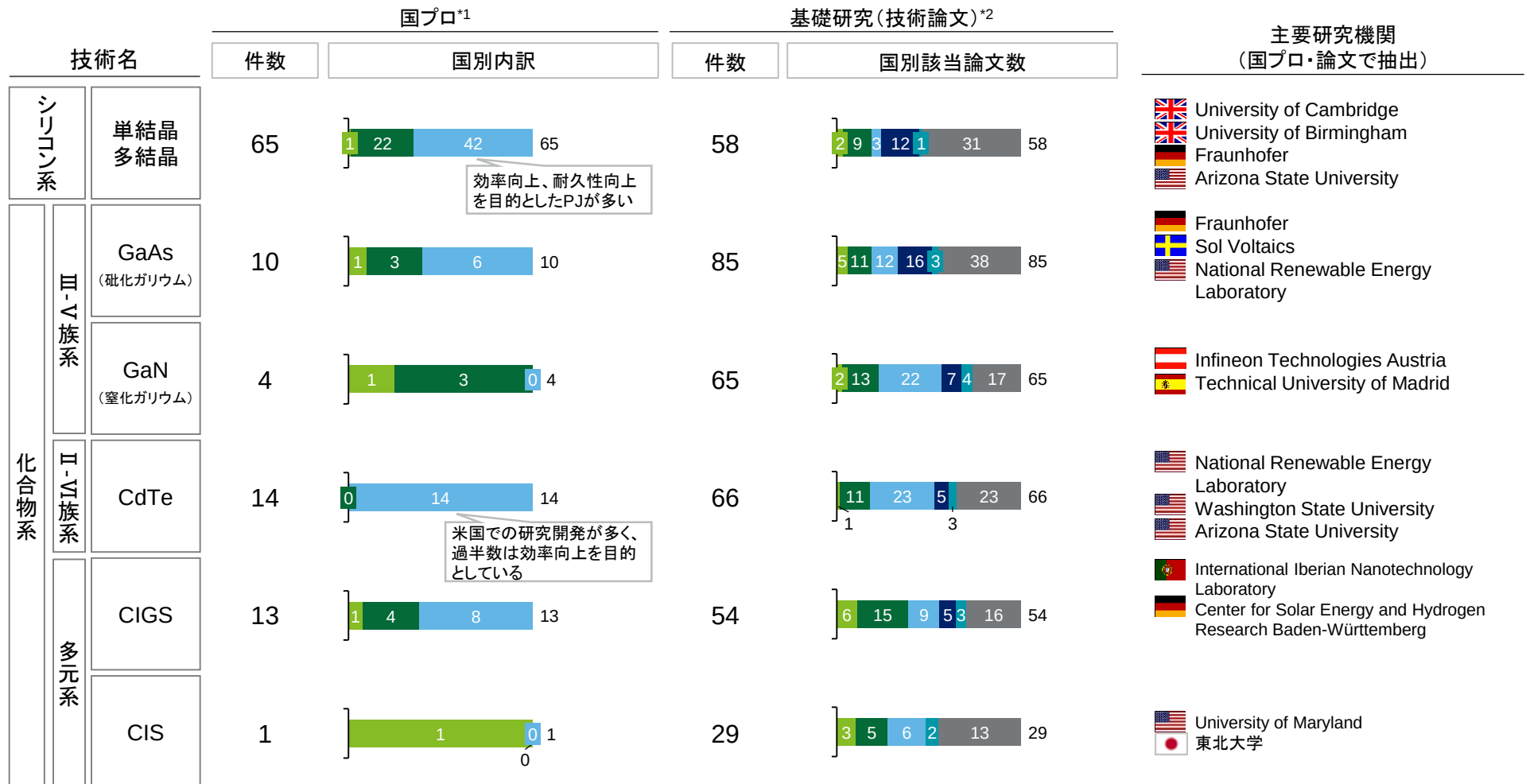
D. 大気中のCO₂の回収

シリコン系の国プロが最も多いものの 一部でIII-V族系や多元系の国プロも組成されている

太陽光発電の主要研究機関(1/2)

日本 米国 韓国
欧州 中国 その他

太陽光発電



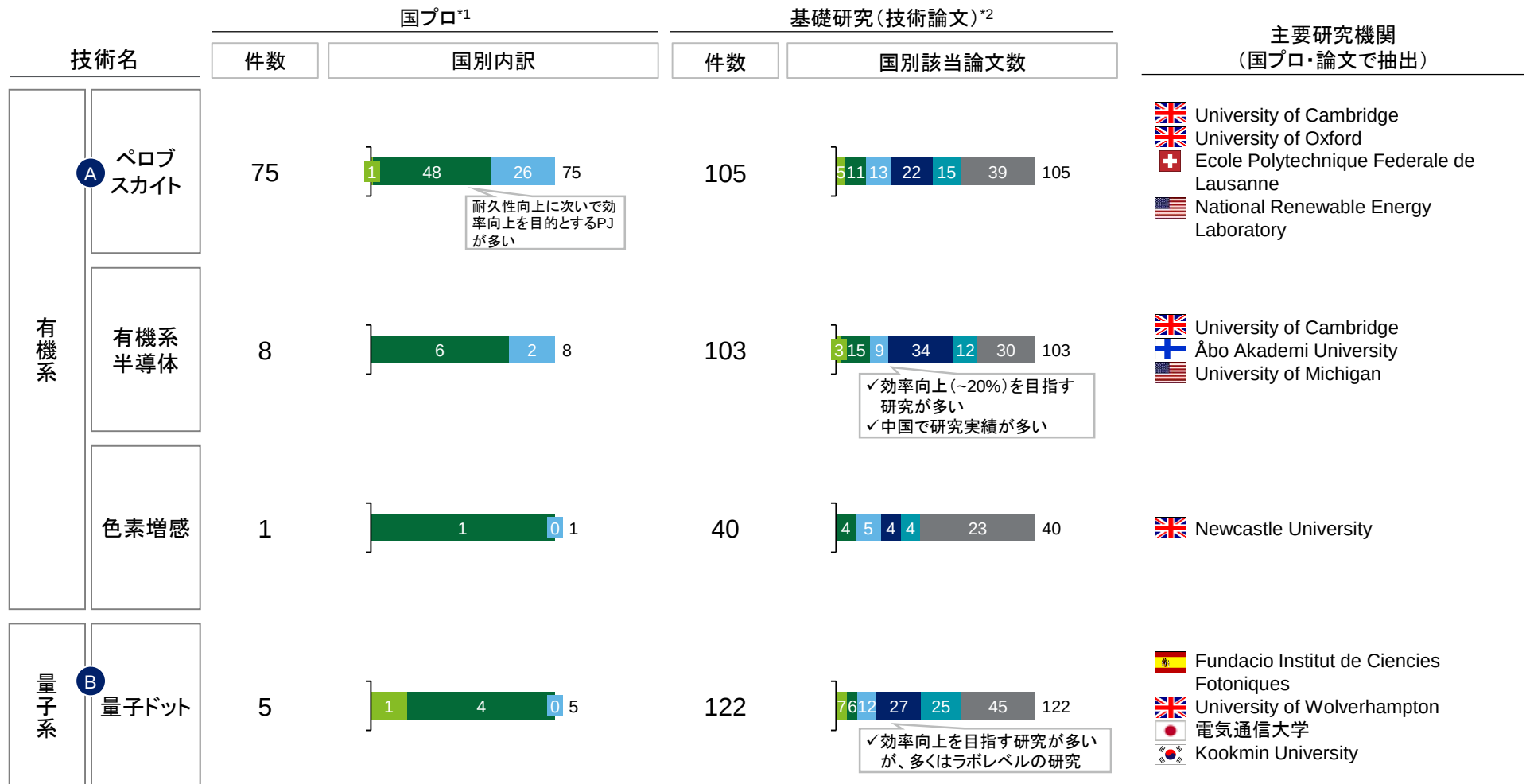
^{*1}: 日本(METI・NEDO)、米国(NREL)、欧州(EU Horizon 2020、EU ConnectingEuropeFacility)を対象に2016~2020年(5年間)に実施されたCO2排出削減に有用な国プロ、^{*2}: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で論文タイトルに検索ワードを含み、かつ2015~2019年(5年間)に発行された論文の検索結果のうちCO2排出削減に有用な論文数(同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上)

有機系・量子系の太陽光発電技術においてはペロブスカイトに関する国プロが最も多い

太陽光発電の主要研究機関(2/2)

日本 米国 韓国
欧州 中国 その他

太陽光発電



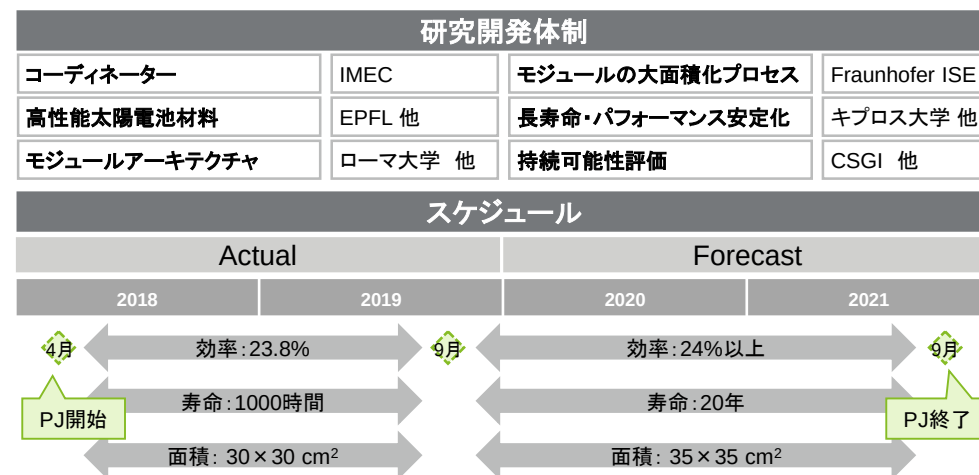
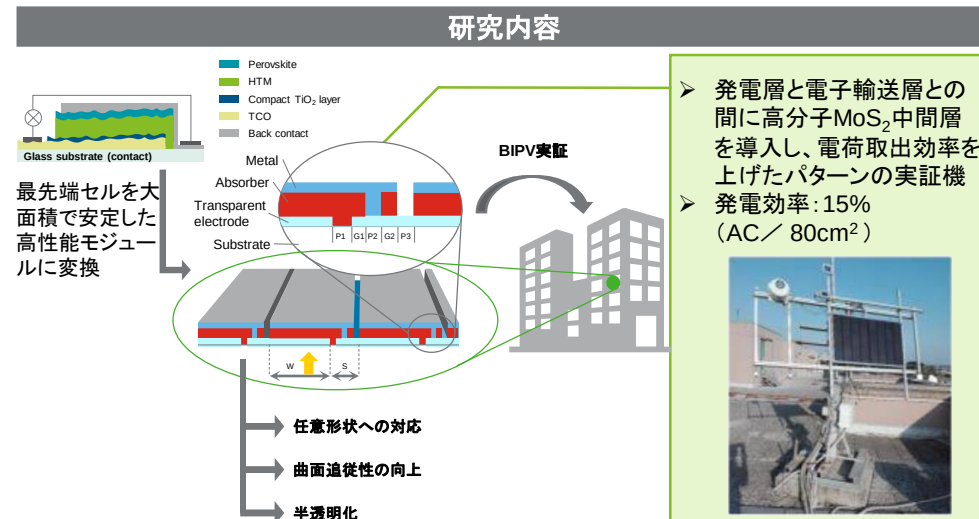
^{*1}: 日本(METI・NEDO)、米国(NREL)、欧州(EU Horizon 2020、EU ConnectingEuropeFacility)を対象に2016~2020年(5年間)に実施されたCO2排出削減に有用な国プロ、^{*2}: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で論文タイトルに検索ワードを含み、かつ2015~2019年(5年間)に発行された論文の検索結果のうちCO2排出削減に有用な論文数(同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上)

欧州のペロブスカイト研究は13の企業・研究機関のコンソーシアムによりセル開発からBIPVモジュールの実証試験までを一気通貫で実施している

A ペロブスカイト: ESPResSo



特徴	✓ IMEC^{*1}を中心とした13の企業・研究機関がコンソーシアムを組み、ペロブスカイトPVのセル開発からBIPVモジュールの実証試験までを一気通貫で実施 ✓ 材料と製造プロセスの組合せにより柔軟性、半透明性など、様々な特性をもつセル・モジュールアーキテクチャを提唱
実証地	✓ イタリア ローマ・トール・ヴェルガータ大学 他
変換効率	✓ セル: 23.8% (最大値) ✓ モジュール: 14% (最大値)
耐久時間	✓ 600時間 (効率低下10%未満) ✓ 1000時間の安定稼働を確認
パネル面積	✓ セル: 1 × 1 cm² ✓ モジュール: 10 × 10 cm² / 30 × 30 cm²
投資額	✓ €5.4M (補助率100%) - 欧州委員会からの補助金: €5.4M
開発目標	✓ 変換効率: 17%以上 (35 × 35cm² モジュール) ✓ 耐久性: 20年以上 ✓ 発電コスト: 南ヨーロッパで€ 0.05 / kWh
研究開発推進に係る課題	✓ ペロブスカイト組成と輸送層の組合せの最適化 ✓ 高不浸透性パッケージの開発



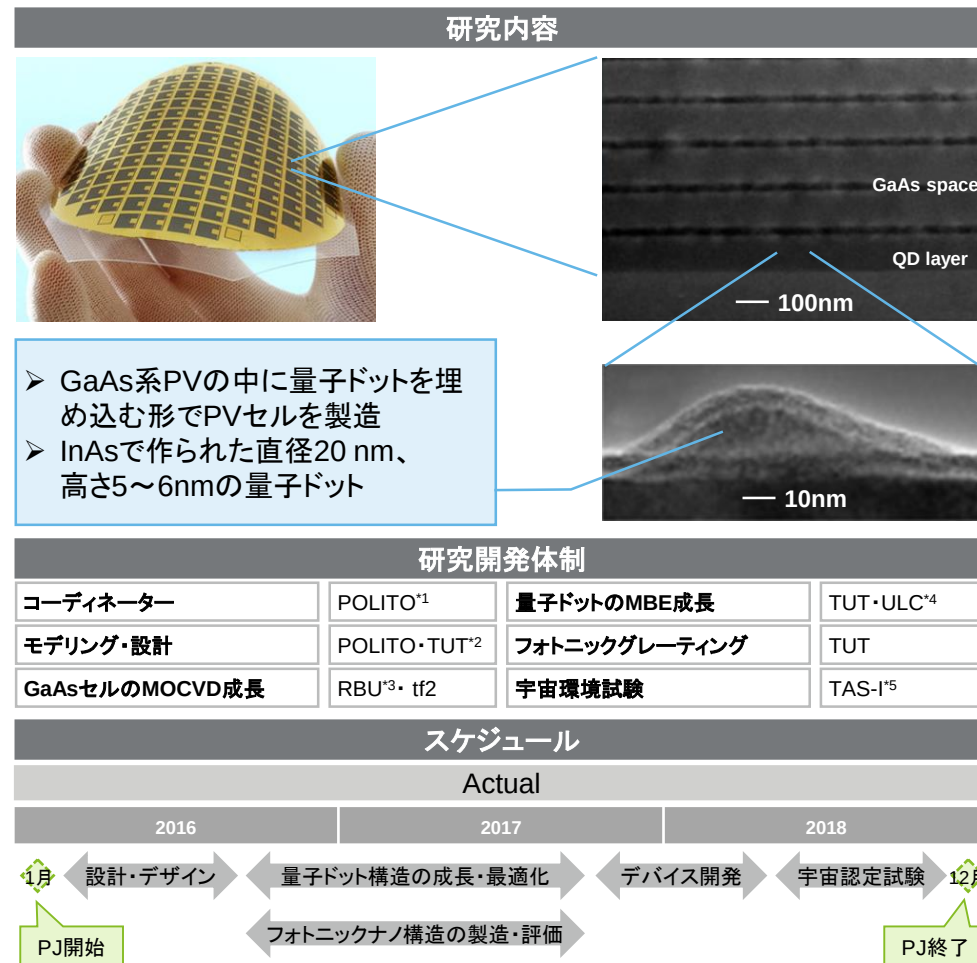
出所: 各種公開情報よりDeloitte作成、*1: Interuniversitair Micro-Electronica Centrum、ベルギーの非営利団体、超微細電子工学と情報技術分野において国際的な研究開発を主導している

欧州では6つの研究機関のコンソーシアムにより III-V族系(GaAs)の薄膜にInAsで量子ドット構造を埋め込む研究を実施している

B 量子ドット:TFQD



特徴	✓ POLITO^{*1}を中心とした6の企業・研究機関がコンソーシアムを組み、量子ドットPVを宇宙用途で実装する取り組み ✓ InAsで作られた量子ドットを薄膜III-V族(GaAs)PVに埋め込んだPVセルの製造に成功
実証地	✓ イタリア トリノ工科大学 他
変換効率	✓ — - パワーウェイトレシオ(重量出力比): III-V族系の8倍 - 光電圧: 0.88 ~ 0.95 V
耐久時間	✓ —
パネル面積	✓ 1 × 1 cm ²
投資額	✓ €1.0M(補助率100%) - 欧州委員会からの補助金: €1.0M
開発目標	✓ AM0環境下: 26%以上 ✓ AM1.5環境下: 30%以上 ✓ 曲げ半径: 3 cm未満
研究開発推進に係る課題	✓ 基盤の再利用やエピタキシャル構造の簡素化による低コスト化



出所: 各種公開情報よりDeloitte作成、*1: Politecnico di Torino、*2: Tampere University of Technology、*3: Radboud University、*4: University College London、*5: Thales-Italia Space

2.1 諸外国との技術動向比較

A. 柔軟・軽量・高効率な太陽光発電

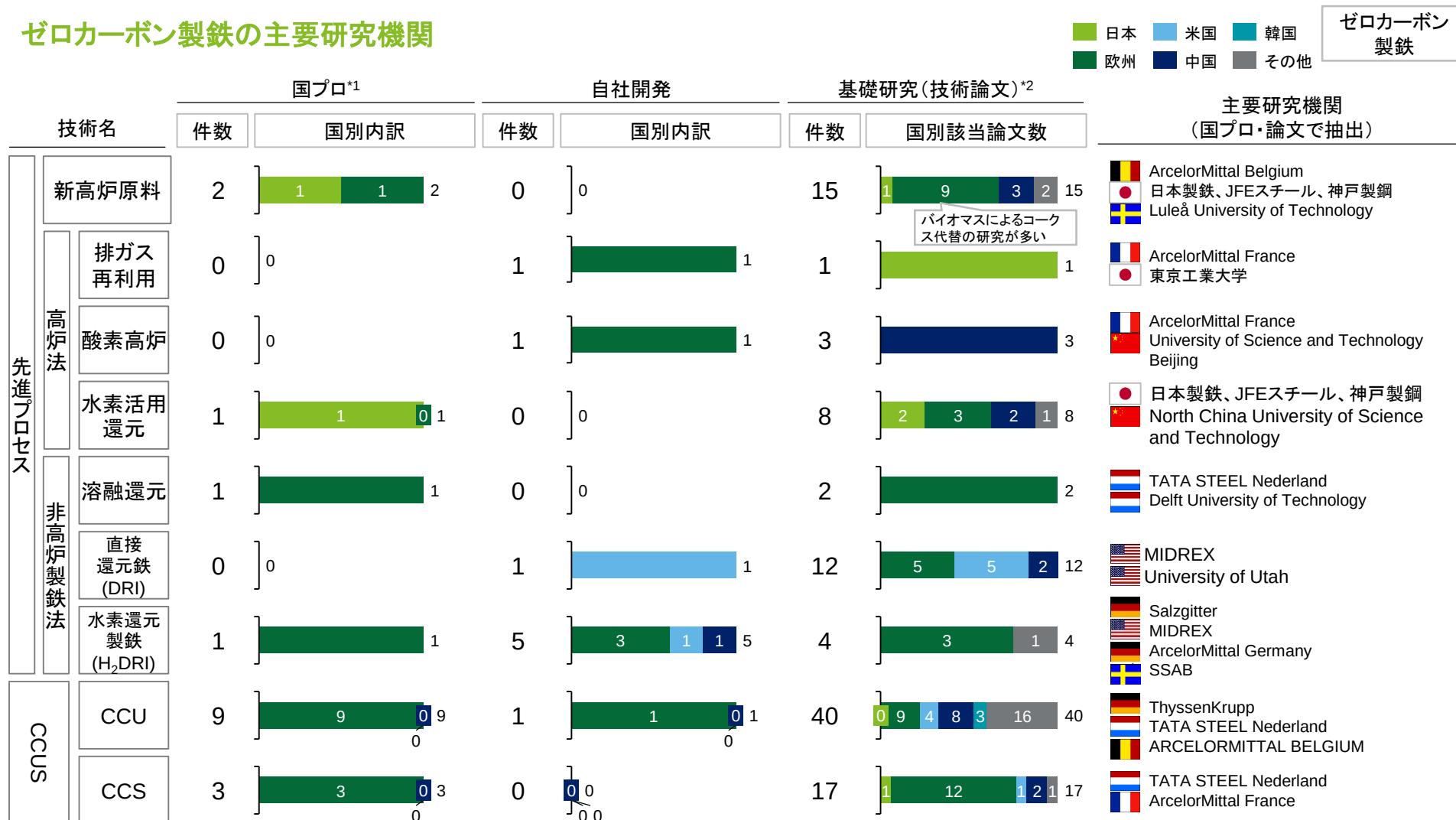
B. ゼロ・カーボン製鉄

C. デジタル技術を用いた電力ネットワーク

D. 大気中のCO₂の回収

先進プロセスは自社開発で行う傾向が強く 中でもDRIが多いのが特徴であり CCUSは国プロとして産業間で連携して取り組むケースが主流である

ゼロカーボン製鉄の主要研究機関



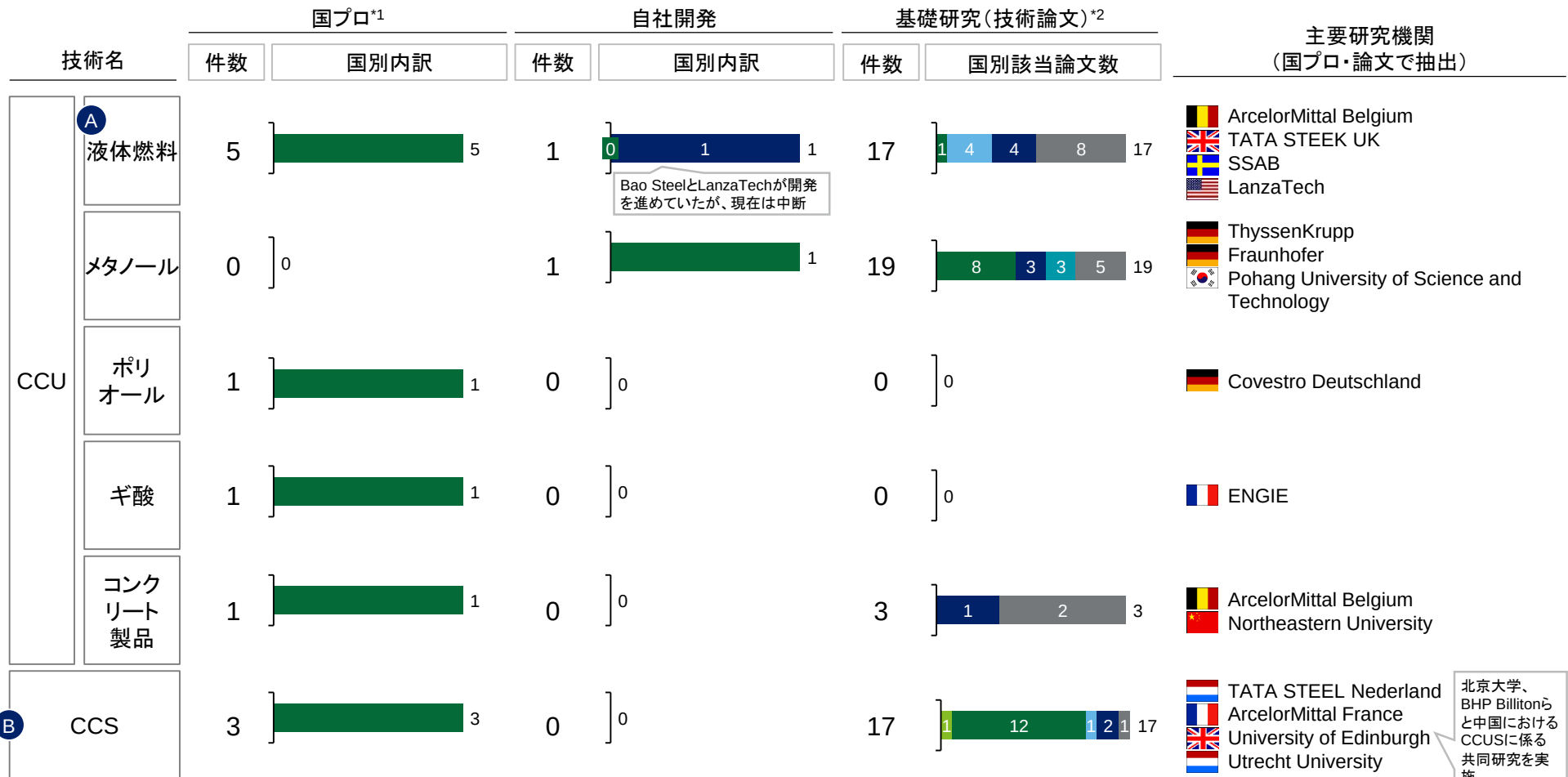
*1: 日本(METI・NEDO)、米国(NREL)、欧州(EU Horizon 2020、EU ConnectingEuropeFacility)を対象に2016~2020年(5年間)に実施されたCO2排出削減に有用な国プロ、*2: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で論文タイトルに検索ワードを含み、かつ2016~2020年(5年間)に発行された論文の検索結果のうちCO2排出削減に有用な論文数(同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上)

CCUSは国プロとして産業間で連携して取り組むケースが主流で 中でも液体燃料とCCSに関する国プロが多い

CCUSの主要研究機関

日本 米国 韓国
欧州 中国 その他

ゼロカーボン
製鉄



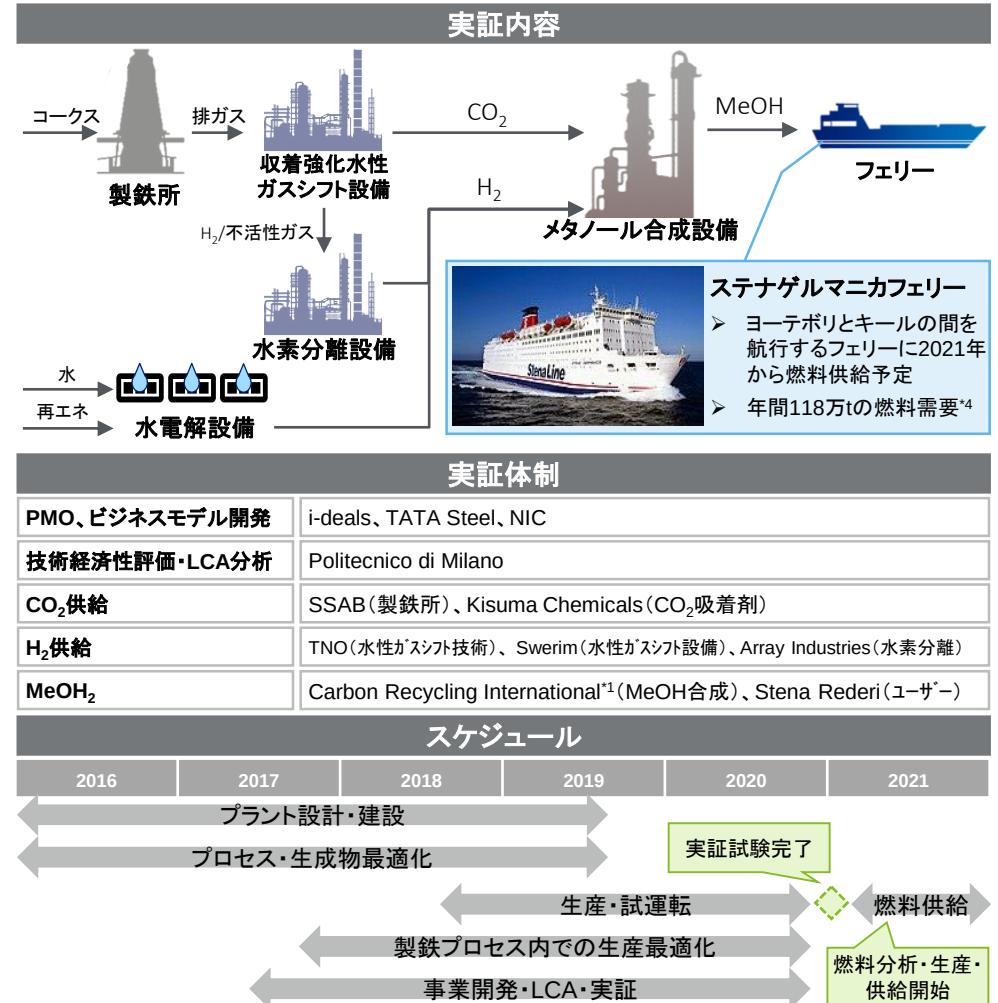
*1: 日本(METI・NEDO)、米国(NREL)、欧州(EU Horizon 2020、EU Connecting Europe Facility)を対象に2016~2020年(5年間)に実施されたCO2排出削減に有用な国プロ、*2: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で論文タイトルに検索ワードを含み、かつ2016~2020年(5年間)に発行された論文の検索結果のうちCO2排出削減に有用な論文数(同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上)

SSABは製鉄所発生ガスからCO₂を回収し 水電解水素との合成によりメタノールを生成する大規模実証を進めている

A CCU:FreSMe



特徴	✓ 高炉ガスよりCO₂を回収し、水電解装置で製造した水素と合成することで、1日あたり1トンの船舶用メタノールを生成 ✓ 2020年まで実証を行い、2021年以降に燃料供給開始
実証地	✓ スウェーデン ルレオ製鉄所(SSAB)
CO ₂ 削減効果	✓ 1990年比でおよそ20% (1,050 kg-CO ₂ /t-MeOH)
メタノール製造コスト	✓ €700/t-MeOH*2 ✓ 船舶用燃料(A重油)の価格は約€440/ton*3のためコスト削減が必要
設備規模	✓ メタノール: 1 t / day ✓ CO₂回収: 1.5 t / day ✓ 水電解: 600 kW (120 Nm³/h)
投資額	✓ €11.4M(補助率100%) - 欧州委員会からの補助金: €11.4M
経済性確保の手法	✓ 政府による補助金
研究開発推進に係る課題	✓ CO ₂ 及びH ₂ の調達パターンとプラント運転条件のさまざまな組合せによる最適化が課題



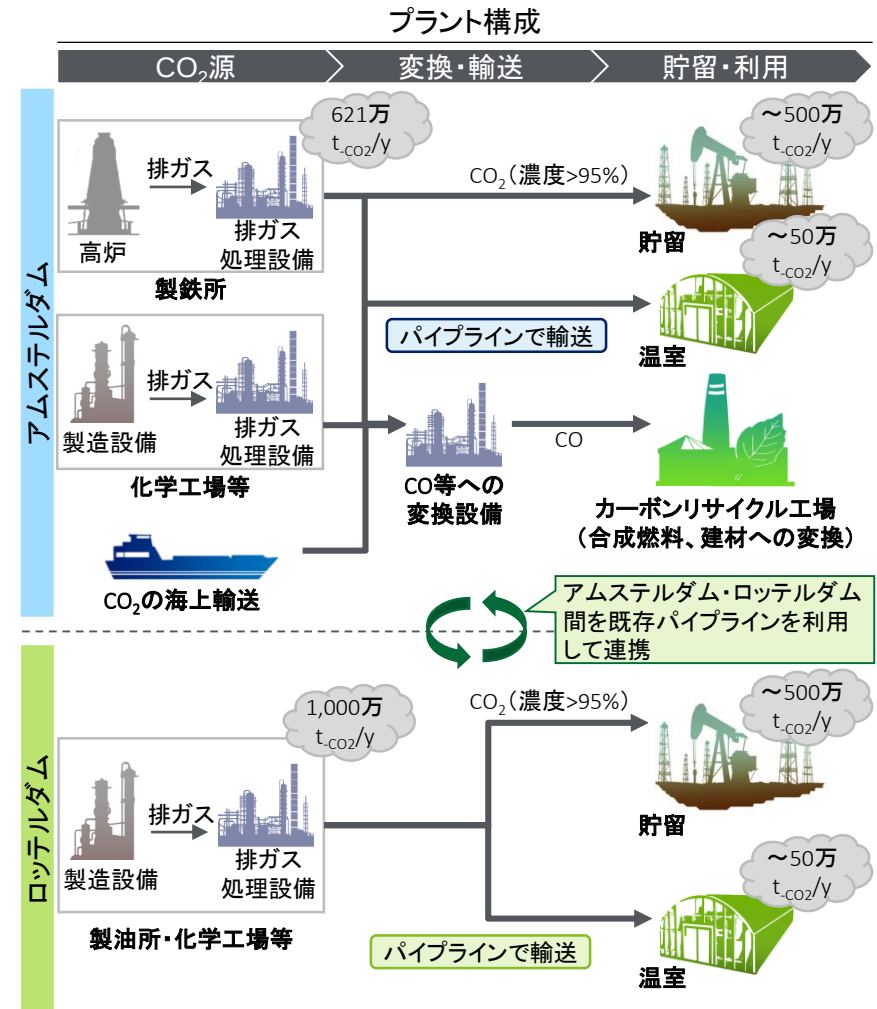
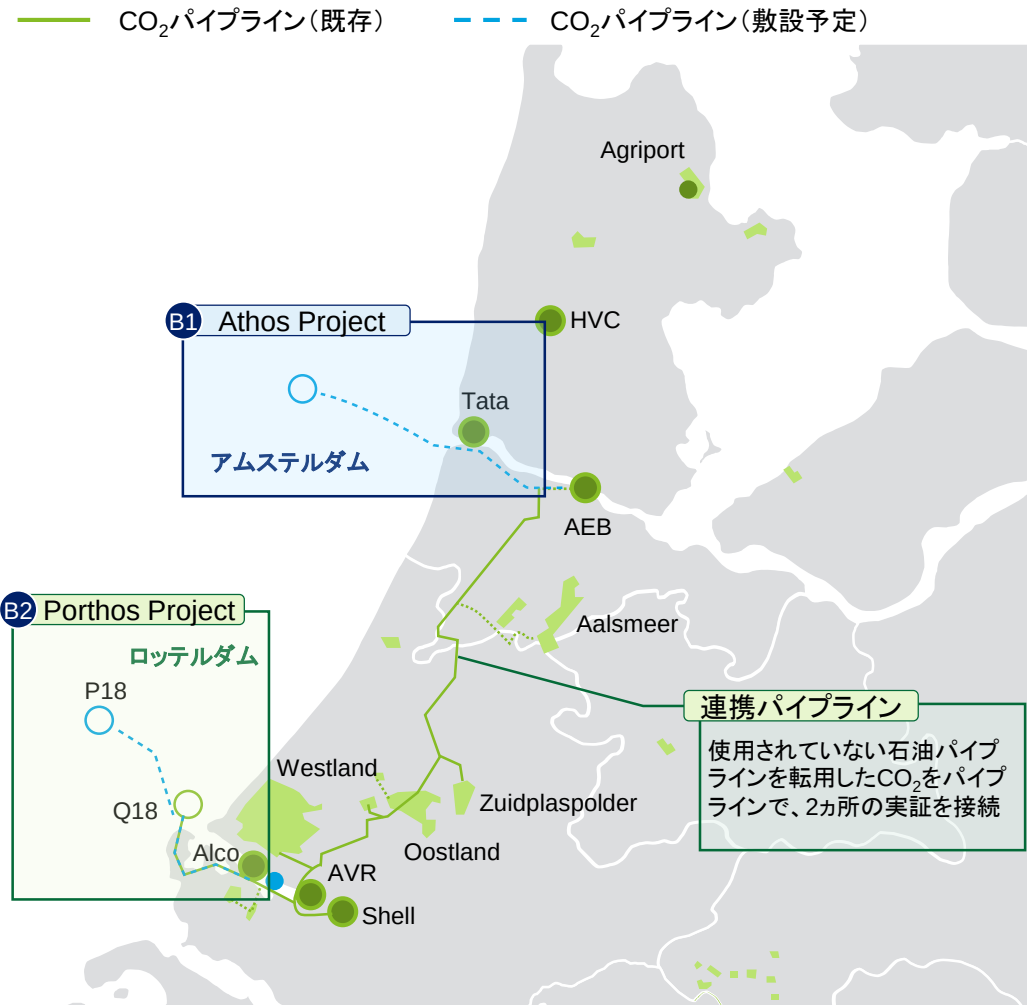
出所: FreSMe Website、欧州委員会Website、*1: 水電解あるいは廃ガスから回収された水素とCO₂をもとにメタノール等の燃料を製造する企業、*2: Judit Nyari et al., "Techno-economic barriers of an industrial-scale methanol CCU-plant"をもとに、一般にCCUでメタノールを化学合成により製造する場合の費用を抽出、*3: Ship & Bunker Websiteより、2018年1月~2021年1月におけるA重油(MGO)の平均価格\$515/ton(Rotterdam)にUSD/EUR=0.82EURを掛け算出、

*4: 2019年のSTENAグループにおける船舶の燃料消費量

49 ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査

アムステルダム事例からも 火力発電所・製鉄所・製油所等のCO₂ゼロ化には貯留をオプションとして持てなければ都市全体のCO₂ゼロ化は困難である

B CCS: Athos・Porthosの全体像



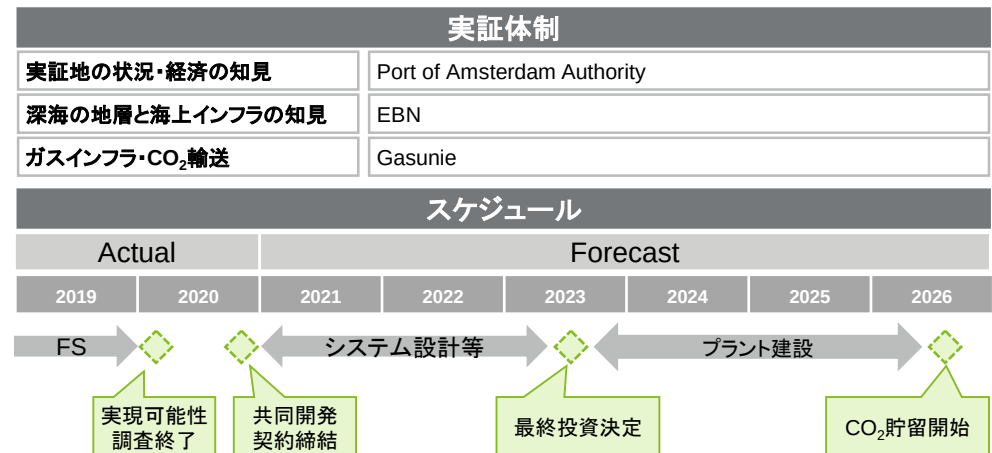
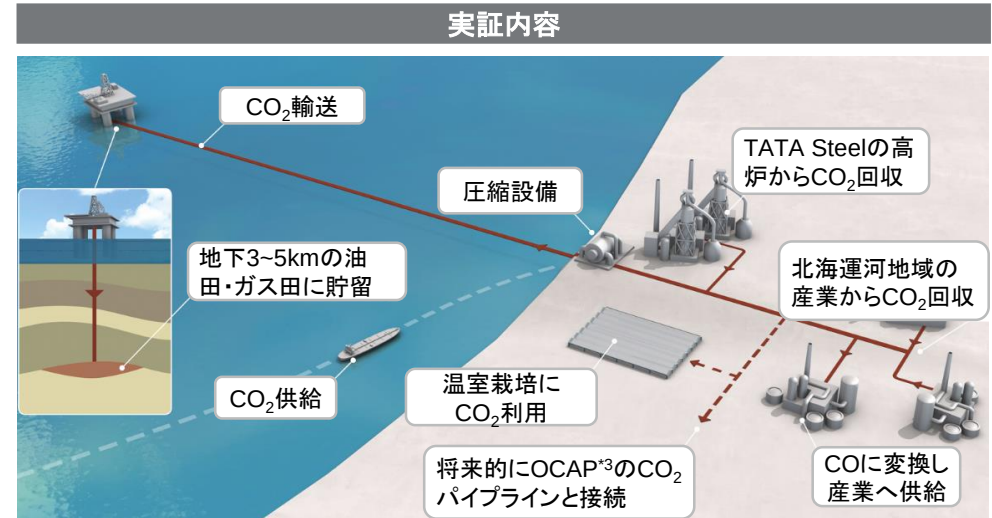
出所: Ministry of Economic Affairs and Climate Policy, "Workshop on the Innovation Fund", OCAP Website

Athosはアムステルダム港周辺の工場からCO₂を回収し 海底への貯留や温室への供給等により 年間750万トンのCO₂を削減する

B1 CCS: Athos



特徴	✓ TATA Steelの高炉及びアムステルダム港周辺地域の産業からCO₂を集め、COを分離して化学産業へ合成燃料や建材の原材料として供給 ✓ CO₂は温室への供給や既存の海底パイプラインによりアムステルダム港周辺地域にある空の油ガス田へ貯留
実証地	✓ アムステルダム港沖(詳細未決定)
CO ₂ 削減効果	✓ 2030年までに年間750万トン (うちTATA Steelで年間400~500万トン ^{*1})
CO ₂ 輸送・貯留コスト	✓ 計画段階のため不明
設備規模	✓ 計画段階のため不明
投資額	✓ 補助金として€15M (欧州委員会 ConnectingEuropeFacility)
経済性確保の手法 ^{*2}	✓ CO₂プライシング対策 (排出元企業によるCO₂輸送・貯留費用の負担) ✓ 政府による補助金
研究開発推進に係る課題	✓ CCUSネットワークのルート選定 ✓ システム技術仕様の決定 ✓ 貯留場所の選定



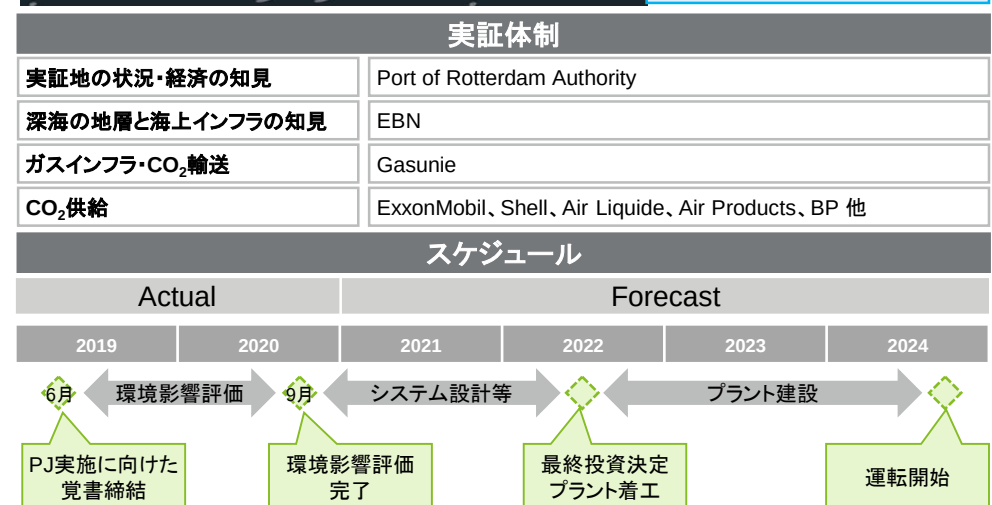
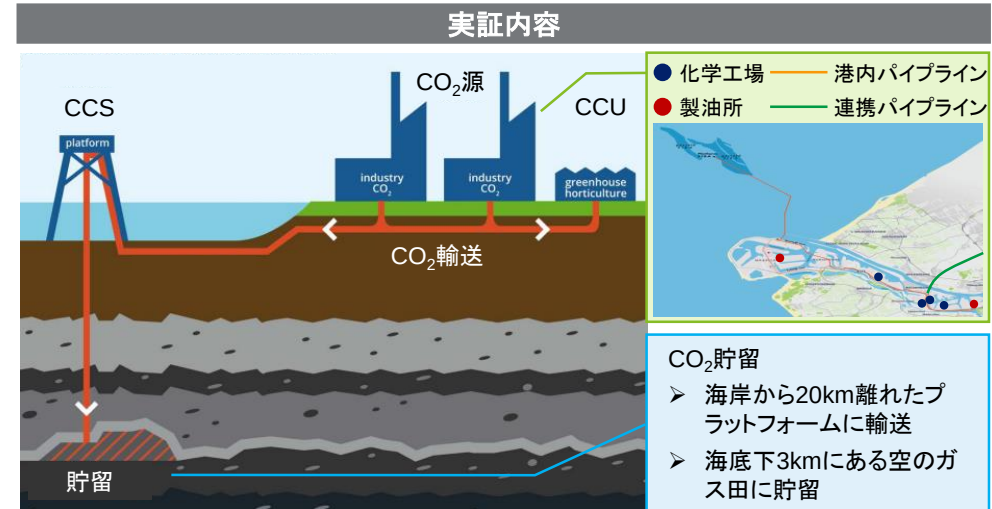
出所: Porthos Website、TATA Steel Website、*1: TATA Steel(全社)のCO₂排出量は年間1,250万トンであり、約40%の削減効果がある、*2: Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Industrial carbon capture business models"におけるPorthosの収益源をもとに、本PJも同様の収益源となると仮定、*3: パイプラインで輸送するためにはCO₂濃度を95%以上にすることが必要(Zaina Abbas, Toufic Mezher, Mohammad R.M. Abu-Zahra, "Evaluation of CO₂ Purification Requirements and the Selection of Processes for Impurities Deep Removal from the CO₂ Product Stream")

Porthosはロッテルダム港周辺の工場等からCO₂を回収し 海底への貯留や温室への供給等により 年間250万トンのCO₂を削減する

B2 CCS:Porthos



特徴	✓ ロッテルダム港をCO₂のハブ拠点として複数の排出源からCO₂を集め、既存海底パイプラインにより空のガス田へ貯留 ✓ 植物の発育促進のため、一部のCO₂は温室に利用
実証地	✓ ロッテルダム港から約20km沖合の北海
CO ₂ 削減効果	✓ 年間約250万トン (ロッテルダムの産業部門からのCO₂排出量の10%に相当)
CO ₂ 輸送・貯留コスト	✓ €15/t(貯留)、€45/t(輸送)程度*1 (CO₂排出者による回収コスト負担及び設備利用率70%を前提)
設備規模	✓ CO₂パイプライン(総延長55km、うち新設25km*2) ✓ 貯留地(海底3.2~3.5km、最大貯留量3,700万トン)
投資額	✓ €450~500M ✓ うち補助金として€1.2M(Netherlands Enterprise Agency) ✓ €6.5M(欧州委員会 ConnectingEuropeFacility)(調査) ✓ €102M(欧州委員会 ConnectingEuropeFacility)(実証)
経済性確保の手法*3	✓ CO₂プライシング対策 (排出源企業によるCO₂輸送・貯留費用の負担) ✓ 政府による補助金
研究開発推進に係る課題	✓ 排出源から供給されるCO₂流量の変化への対策 ✓ CO₂に含まれる不純物の低減



出所:Porthos Website、Energy Voice Website、*1:K.Afzari, "The role of power-to-methanol technologies in the energy mix"より抽出*2:Menno Ros, "Start of a CO2 Hub in Rotterdam: Connecting CCS and CCU"より抽出、*3:Department for Business, Energy & Industrial Strategy, "Industrial carbon capture business models"

2.1 諸外国との技術動向比較

A. 柔軟・軽量・高効率な太陽光発電

B. ゼロ・カーボン製鉄

C. デジタル技術を用いた電力ネットワーク

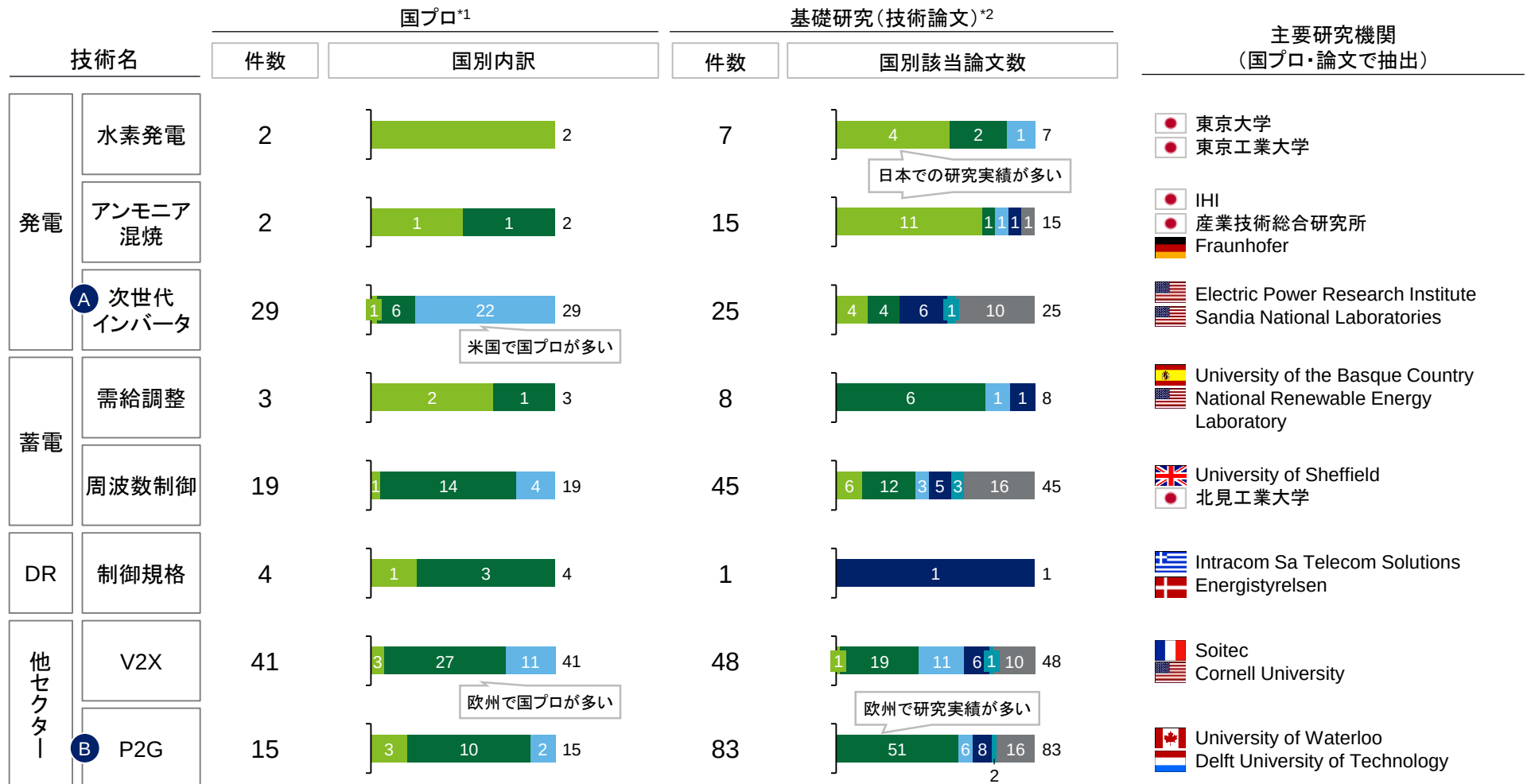
D. 大気中のCO₂の回収

水素発電やアンモニア混焼においては 我が国の研究開発実績が多いが V2XやP2Gでは欧州の研究開発実績が多い

デジタル技術を用いた電力ネットワークの主要研究機関

日本 米国 韓国
欧州 中国 その他

電力ネットワーク



^{*1}: 日本(METI・NEDO)、米国(NREL)、欧州(EU Horizon 2020、EU ConnectingEuropeFacility)を対象に2016~2020年(5年間)に実施されたCO2排出削減に有用な国プロ、^{*2}: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で論文タイトルに検索ワードを含み、かつ2015~2019年(5年間)に発行された論文の検索結果のうちCO2排出削減に有用な論文数(同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上)

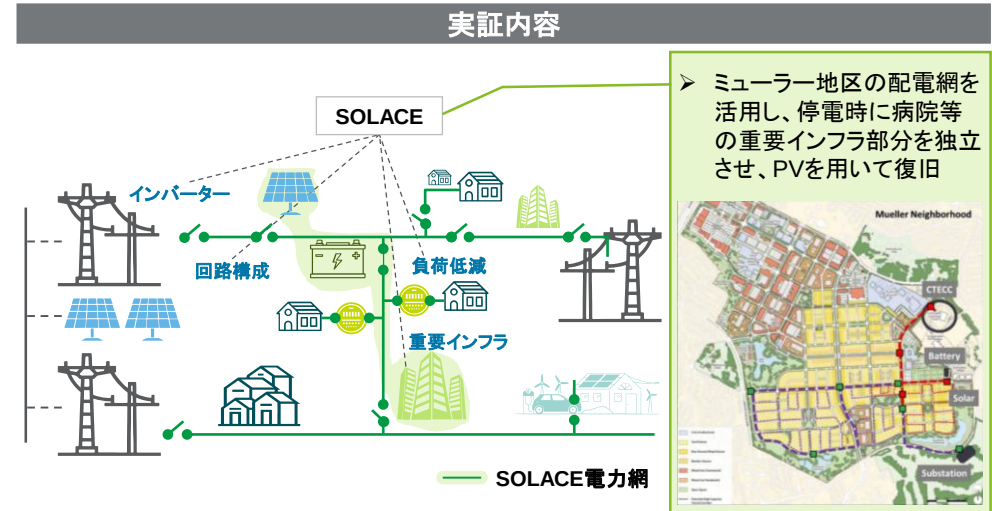
米国では停電が発生した際に 病院等の重要施設がある配電網を切り離し PVの電力を用いて独立して復旧させるシステムの構築を進めている

A 次世代インバータ 他: SOLACE (SOLAr Critical infrastructure Energization system)



米国

特徴	✓ 米国電力研究所 (EPRI) は、次世代インバータや分散型制御システム等の技術開発を主導 ✓ グリッドの異常を識別し、PVを用いて停電時にも病院等の重要な施設に電力を供給できるシステムを構築
実証地	✓ 米国 テキサス州 ミューラー
再エネ導入量	✓ 太陽光発電: 1.51 MW
需給調整実績	✓ — (計画段階のため実績なし)
設備規模	✓ 屋根置きPV: 累計1.51 MW (ミューラー地区全体) ✓ 蓄電池・インバータ等 (計画段階のため詳細不明)
投資額	✓ \$9.0M - うち米国エネルギー省からの補助金: \$6.0M
経済性確保の手法 ^{*2}	✓ システム及び付随する機器をパッケージ化し、TSO/DSOに販売するような商用化プランを検討中
研究開発推進に係る課題	✓ サイバー攻撃や災害等が発生した際に、自律化可能なグリッド領域を特定できる分析手法の確立・システム構築



実証体制			
全体統括・サイバーセキュリティ	EPRI	PVシステム・蓄電システム	Solecristia, Yaskawa, Yunicos
分析・理論構築・計画策定	Schneider, Sandia 他	TSO/DSO調整	ERCOT
フィールド実証	Austin Energy 他	DER制御アーキテクチャ	NREL 他

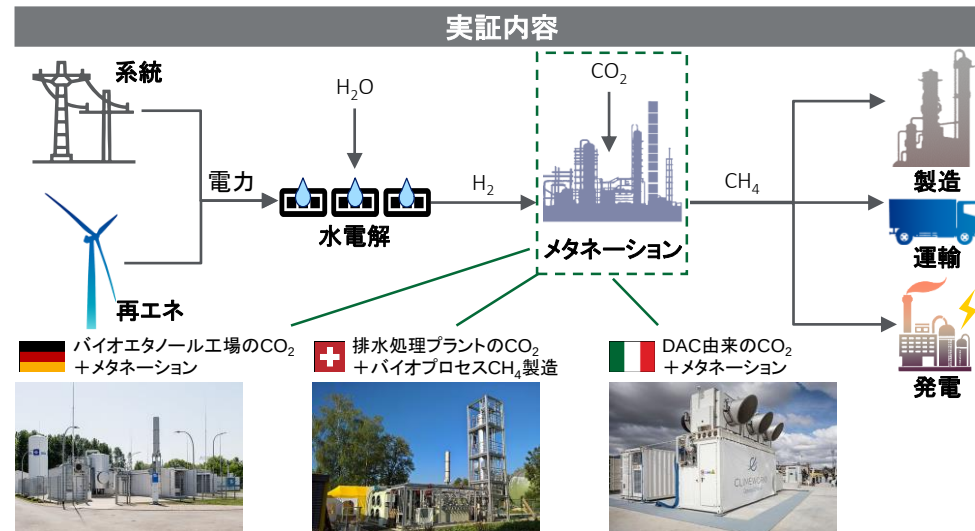


欧州では再エネの余剰電力を用いてメタンを合成し 既存のガスインフラに流通させるP2Gの大規模実証試験を実施している

B P2G: STORE & GO



特徴	✓ DVGWは欧州26の企業・研究機関と提携し、再エネをメタンとして貯蔵し、既存インフラで流通させる実証を計画 ✓ 南イタリア、スイス、北ドイツで3つの実証サイトを建設しており、スイス・ドイツでは都市ガスパイプラインへの混入、イタリアではLNG化してトラック等運輸セクターへの供給を実現
実証地	✓ ドイツ ファルケンハーゲン ✓ スイス ゾロトゥルン ✓ イタリア トロイア
ドイツ	✓ アルカリ水電解(2MW)でH₂を、隣接するバイオエタノールプラントからCO₂を調達して、メタネーション(1MW) ✓ 合計稼働時間1,186h・都市ガス混入量11,367kg
スイス	✓ PEM水電解(350kW)でH₂を、排水処理プラントからCO₂を調達して、バイオプロセス(微生物)でメタンを製造(700kW) ✓ 合計稼働時間1,300h・都市ガス混入量11,165kg
イタリア	✓ アルカリ水電解(1MW)でH₂を、DACにより大気中からCO₂を調達して、メタネーションし、LNG化(200kW) ✓ 合計稼働時間1,142h・LNG製造量441kg
投資額	✓ €28.0M - うち欧州委員会からの補助金: €17.9M - うちスイス政府からの補助金: €6.0M
経済性確保の手法 ^{*2}	✓ 余剰再エネ貯蔵による出力抑制回避 ✓ CO₂プライシング対策
研究開発推進に係る課題	✓ 電解槽のCAPEX低減によるガス製造コストの削減 ✓ プラントの再エネ負荷追従性の向上



実証体制			
コーディネーター	DVGW ^{*1}	実証: Falkenhagen/Germany	Uniper ^{*5} 他
ガス・グリッド統合	DBI ^{*2} ・HUAS ^{*3}	実証: Solothurn/Switzerland	Regio Energie ^{*6} 他
社会コスト評価・プロセス評価	ECN ^{*4}	実証: Troia/Italy	Engineering ^{*7} 他



出所: 各種公開情報よりDeloitte作成、*1: Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches、ドイツのガス・水道協会、*2: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH、*3: Hanze University of Applied Sciences、*4: ECN Energy Research Centre of the Netherlands、*5: Uniper Energy Storage GmbH、*6: Regio Energie Solothurn、*7: Engineering - Ingegneria Informatica S.p.A.

2.1 諸外国との技術動向比較

A. 柔軟・軽量・高効率な太陽光発電

B. ゼロ・カーボン製鉄

C. デジタル技術を用いた電力ネットワーク

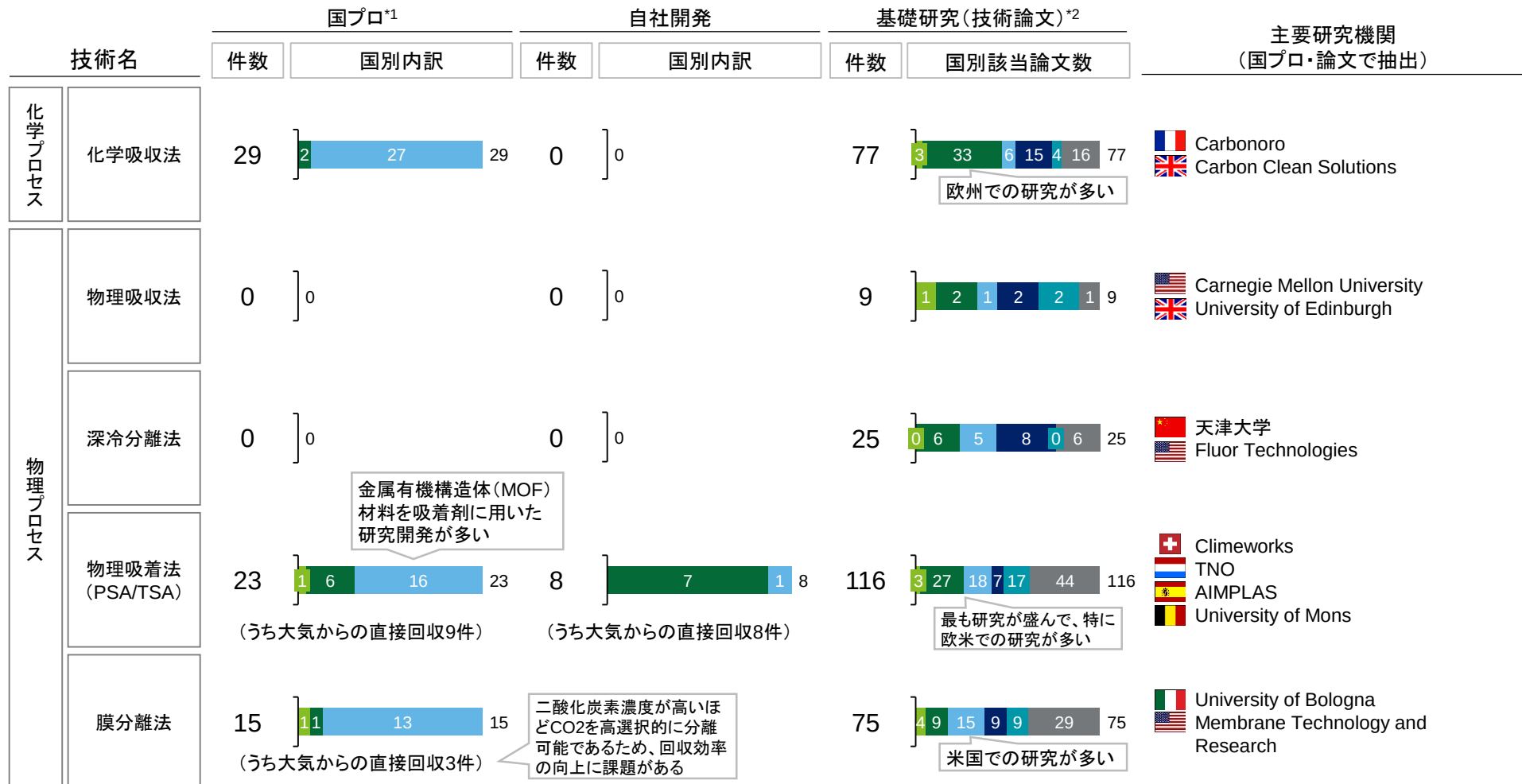
D. 大気中のCO2の回収

DACは物理吸着法に関する国プロが最も多く 民間企業での独自の取り組み実績も豊富である

DACの主要研究機関

日本 米国 韓国
欧州 中国 その他

DAC



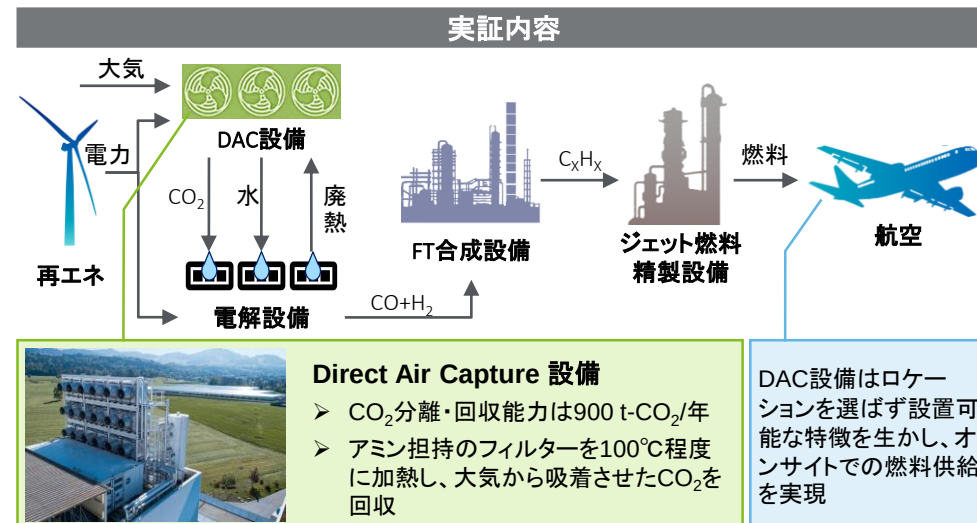
*1: 日本(METI・NEDO)、米国(NREL)、欧州(EU Horizon 2020、EU ConnectingEuropeFacility)を対象に2016~2020年(5年間)に実施されたCO2排出削減に有用な国プロ、*2: Google Scholar及びCiNiiを用いて日本語・英語で論文タイトルに検索ワードを含み、かつ2015~2019年(5年間)に発行された論文の検索結果のうちCO2排出削減に有用な論文数(同一論文に複数の研究機関が関連する場合は主席執筆者の研究機関を計上)

物理吸着法を用いたDAC技術を商用化しているClimeworks社は 航空産業等と連携してCO₂由来のジェット燃料を製造する事業に取り組んでいる

A 物理吸着法: Rotterdam The Hague Airport



特徴	✓ ロッテルダムハーグ空港はClimeworks^{*1}と提携し、大気中のCO₂からジェット燃料をオンサイトで精製する実証を計画 ✓ 大気中より回収したCO₂と水を電気分解で合成ガスにした後、炭化水素を生成し、ジェット燃料として精製して、空港から発着する航空機に供給する
実証地	✓ オランダ ロッテルダムハーグ空港
CO ₂ 削減効果	✓ CO ₂ 分離・回収量: 年間900 t-CO ₂
CO ₂ 分離回収効率	✓ 電力消費: 350~450 kWh/t-CO₂ ✓ 熱消費: 1,800~2,500 kWh/t-CO₂ (100°C)
設備規模	✓ DAC設備: 900 t-CO₂/年 ✓ ジェット燃料精製設備: 約1,000 L/日 (見通し)^{*2}
投資額	✓ 非公開 (自主事業) ✓ ロッテルダムハーグイノベーション空港 (RHIA) 財団が支援
経済性確保の手法 ^{*2}	✓ 航空産業に対するICAO ^{*3} のジェット燃料規制対策 (排出元企業によるCO ₂ 回収費用の負担)
研究開発推進に係る課題	✓ CO ₂ の脱着には膨大な電力と熱が必要であり、エネルギー効率の改善が必要



実証体制	
Direct Air Capture	Climeworks
ジェット燃料製造	Sunfire (水電解)、Ineratec (燃料合成)、EDL (ジェット燃料精製)
プロジェクト統括	EDL (製造プロセス)、Rotterdam The Hague Airport (空港)



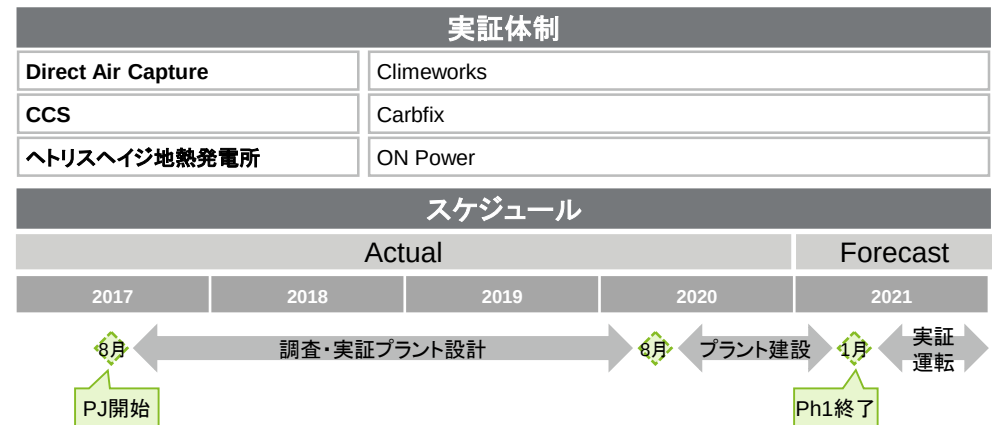
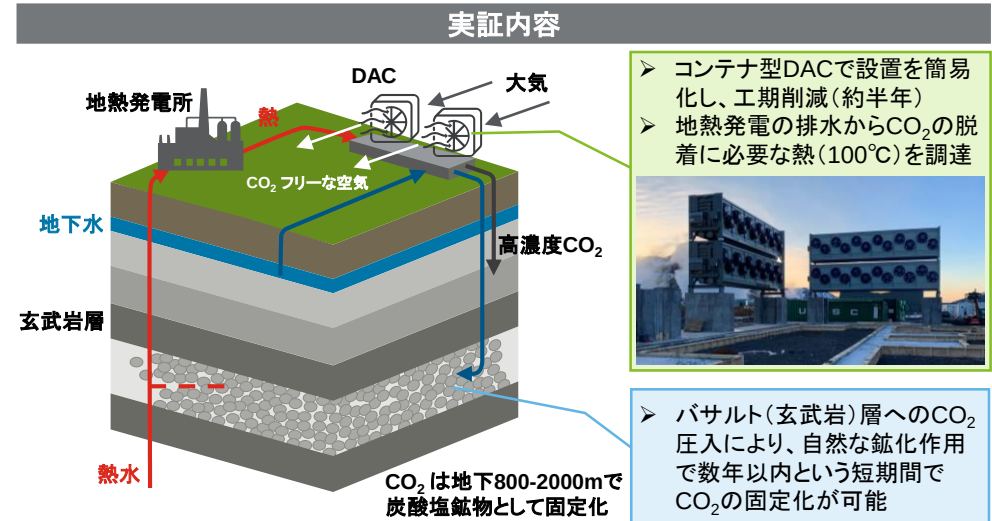
出所: 各種公開情報よりDeloitte作成、*1: スイスのチューリッヒにあるDAC技術のベンチャー企業、チューリッヒ工科大学からのスピンオフとして設立、*2: 生成できるジェット燃料の体積、DAC技術単体では900 t/年のCO₂を回収可能、*3: International Civil Aviation Organizationの略称、国際連合経済社会理事会の専門機関の一つ

アイスランドでは DACに必要となる電力や熱を既存の地熱発電所と組合せて調達し CO2は地下貯留することで 効率的なネガティブエミッションの実証を進めている

B 物理吸着法: Orca



特徴	✓ アイスランドではON Powerの地熱発電に、ClimeworksのDACとCarbfixによるCCSを組合せた、大気中CO₂を直接地下の玄武岩層に貯留する事業を計画 ✓ DACで回収したCO₂を水と混合して地下に圧入すると、玄武岩と反応して数年以内に固定化され、地熱発電ですべての消費電力を賄い、汲み上げた水の熱はDACで用いる
実証地	✓ アイスランド ヘインギットル ヘトリスヘイジ地熱発電所
CO ₂ 削減効果	✓ CO ₂ 分離・回収量: 年間4,000 t-CO ₂
CO ₂ 分離回収効率	✓ 電力消費: 350~450 kWh/t-CO₂ ✓ 熱消費: 1,800~2,500 kWh/t-CO₂ (100℃)
設備規模	✓ DAC設備: 4,000 t-CO₂/年 ✓ 発電設備容量: 303MW / 熱水生成設備容量: 133MW
投資額	✓ €2.2M (100%補助) - 欧州委員会からの補助金: €2.2M
経済性確保の手法 ^{*2}	✓ 地熱発電による再エネ電力 ✓ CO₂プライシング対策(ネガティブエミッション価値の提供)
研究開発推進に係る課題	✓ CO₂の脱着には膨大な電力と熱が必要であり、エネルギー効率の改善が必要

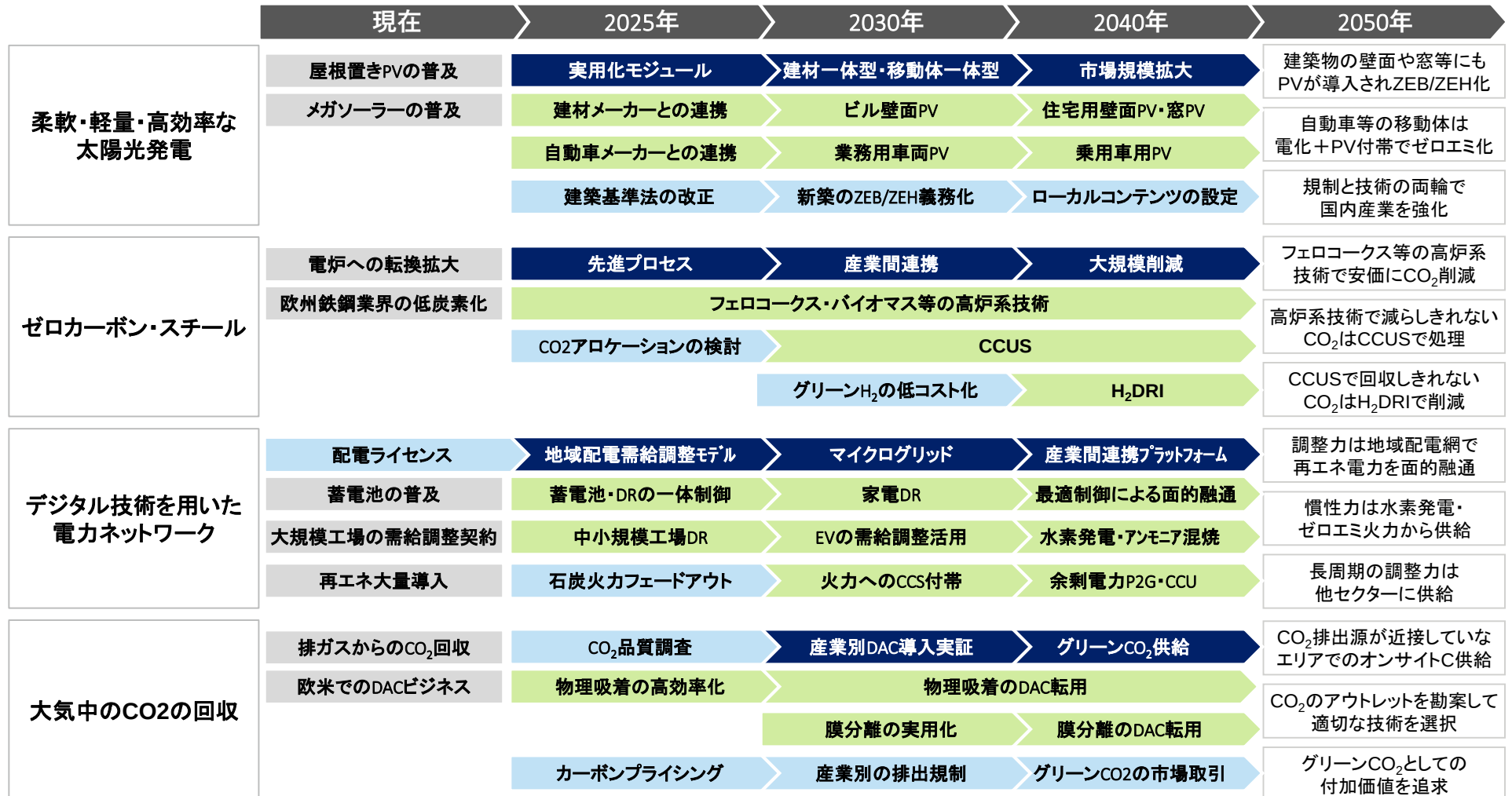


2.2 開発方針の検討

革新的環境イノベーション戦略の目標達成に向けて 対象4分野における2050年までの研究開発方針を検討した

開発方針

■ 制度 ■ 技術開発
■ 実証 ■ 既存の取組



3. 研究開発プロジェクトの立ち上げに向けた提言

対象4分野における革新的環境イノベーション戦略の目標達成に向けて 以下のとおり提言を取りまとめた

本調査における提言

1

次世代PVは建築・自動車メーカーとの連携に加え 各種規制との両輪で導入を進めていく必要がある

- シリコン系での差異化が難しいことから建築物の壁面や移動体に着目するのは合理的だと考えられるが、普及させるためには建築・自動車メーカーとの連携や法整備等の政策面での検討が不可欠である。
- 将来的に我が国産業の強化に繋げるためには、国内の建築基準法等の規制と技術水準をすり合わせ、規制と両輪で導入する必要がある。

2

ゼロカーボン・スチールはCO₂削減コストの低い技術から順次導入し コンビネーションでのゼロエミ化が必要である

- 最もCO₂削減効果の大きいH₂DRIは水素価格にもよるが高コストだと考えられ、全面転換は産業競争力の低下を招く恐れがあることから、CO₂削減コストの低い技術から順次導入していくことが重要である。
- 初期的にはフェロコックス等の高炉技術で排出量を削減しつつ、産業間連携でのCCUSによって排出されたCO₂を処理していき、それでも処理しきれないCO₂は高コストなH₂DRIで削減するなど、各技術のコンビネーションでゼロエミ化を目指す必要がある。

3

次世代電力NWでは不足する調整力・慣性力を供給するための各種技術を組合せた大規模実証が必要である

- 再エネ大量導入が予測される2050年において、家電等のDRやEVの需給調整活用で創出できる調整力は付加価値が非常に高いと思われることから、これらを一体的に制御し、地域配電網内での面的融通によって需給調整を行うモデルを実証していく必要がある。
- 不足する慣性力や長周期の調整力は水素発電やアンモニア混焼またはCO₂回収を付帯した火力をアンシリヤリ的に活用することが想定され、これらをゼロエミで運用するための再エネ余剰電力によるP2G・CCUSの導入を含めた産業間連携の検討が必要である。

4

DACはグリーンCO₂需要が生じる長期的な将来をターゲットにした技術開発が必要である

- CCU事業におけるCO₂供給源は回収しやすい石炭火力や製鉄等の高濃度なCO₂源から活用される。これは一定程度のCO₂削減効果が得られるが、最終的なCO₂をゼロ化するためには、化石燃料起源ではないグリーンCO₂の利用が不可欠である。
- 長期的にはグリーンCO₂の需要が生じると考えられるため、それに備えたDACの技術開発が必要ではないか。

Make your impact

国境 を超え、信をつなぐ。

本件に関するお問い合わせ先

Deloitte.

デロイトトーマツ コンサルティング 合同会社
エネルギーユニット

海外事業戦略・公共政策チーム リード
シニアマネジャー
榎本 哲也

Email : teenomoto@tohatsu.co.jp

〒100-6390 東京都千代田区丸の内 3-2-3 丸の内二重橋ビルディング
www.deloitte.com/jp/dtc

デロイト トーマツ グループは、日本におけるデロイト アジア パシフィック リミテッドおよびデロイトネットワークのメンバーであるデロイト トーマツ 合同会社並びにそのグループ法人（有限責任監査法人トーマツ、デロイト トーマツ コンサルティング 合同会社、デロイト トーマツ ファイナンシャルアドバイザー 合同会社、デロイト トーマツ 税理士法人、DT 弁護士法人およびデロイト トーマツ コーポレート ソリューション 合同会社を含む）の総称です。デロイト トーマツ グループは、日本で最大級のビジネスプロフェッショナルグループのひとつであり、各法人がそれぞれの適用法令に従い、監査・保証業務、リスクアドバイザー、コンサルティング、ファイナンシャルアドバイザー、税務、法務等を提供しています。また、国内約40都市に1万名以上の専門家を擁し、多国籍企業や主要な日本企業をクライアントとしています。詳細はデロイト トーマツ グループWebサイト（www.deloitte.com/jp）をご覧ください。

Deloitte（デロイト）とは、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド（“DTTL”）ならびにそのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人のひとつまたは複数を指します。DTTL（または“Deloitte Global”）および各メンバーファーム並びにそれらの関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体です。DTTLはクライアントへのサービス提供を行いません。詳細は www.deloitte.com/jp/about をご覧ください。

デロイト アジア パシフィック リミテッドはDTTLのメンバーファームであり、保証有限責任会社です。デロイト アジア パシフィック リミテッドのメンバーおよびそれらの関係法人は、オーストラリア、ブルネイ、カンボジア、東ティモール、ミクロネシア連邦、グアム、インドネシア、日本、ラオス、マレーシア、モンゴル、ミャンマー、ニュージーランド、パラオ、パプアニューギニア、シンガポール、タイ、マーシャル諸島、北マリアナ諸島、中国（香港およびマカオを含む）、フィリピンおよびベトナムでサービスを提供しており、これらの各国および地域における運営はそれぞれ法的に独立した別個の組織体により行われています。

Deloitte（デロイト）は、監査・保証業務、コンサルティング、ファイナンシャルアドバイザー、リスクアドバイザー、税務およびこれらに関連する第一級のサービスを全世界で行っています。150を超える国・地域のメンバーファームのネットワークを通じFortune Global 500® の8割の企業に対してサービス提供をしています。“Making an impact that matters”を自らの使命とするデロイトの約286,000名の専門家については、（www.deloitte.com）をご覧ください。

本資料は皆様への情報提供として一般的な情報を掲載するのみであり、その性質上、特定の個人や事業体に具体的に適用される個別の事情に対応するものではありません。また、本資料の作成または発行後に、関連する制度その他の適用の前提となる状況について、変動を生じる可能性もあります。個別の事案に適用するためには、当該時点で有効とされる内容により結論等を異にする可能性があることをご留意いただき、本資料の記載のみに依拠して意思決定・行動をされることなく、適用に関する具体的事案をもとに適切な専門家にご相談ください。



二次利用不可リスト

令和2年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業
報告書の題名 (ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査)

令和2年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業
委託事業名 (ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査)

受注事業者名 デロイトトーマツ コンサルティング合同会社

頁	図表番号	タイトル
12	図1	有望な次世代太陽光とSi系の技術比較
14	図2	ペロブスカイトにおける研究開発事例
17	図3	ゼロカーボン・スチールにおける動向予測
18	図4	海外鉄鋼メーカーのロードマップ
19	図5	ゼロカーボン・スチールの技術概要
20	図6	先進プロセスの技術分類
21	図7	CCUSの技術分類
24	図8	電力ネットワークにおける動向予測
27	図9	2050年における電源構成
28	図10	家庭DRIによる需給調整ポテンシャル推計
29	図11	EV活用による需給調整ポテンシャル推計
30	図12	EV活用による需給調整のための投資規模推計
31	図13	水素・アンモニアを中心とした需給調整
38	図14	主要な実施国と組み合わせ可能な技術
42	図15	太陽光発電の主要研究機関(1/2)
43	図16	太陽光発電の主要研究機関(2/2)
44	図17	ペロブスカイト: ESPResSo
45	図18	量子ドット: TFQD
47	図19	ゼロカーボン製鉄の主要研究機関
48	図20	CCUSの主要研究機関
49	図21	CCU: FreSMe
50	図22	CCS: Athos・Porthosの全体像
51	図23	CCS: Athos

二次利用不可リスト

令和2年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業
 報告書の題名 (ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査)
 令和2年度地球温暖化対策における国際機関等連携事業
 委託事業名 (ミッション・イノベーションを通じた国際連携に関する取組等調査)
 受注事業者名 デロイトトーマツ コンサルティング 合同会社

頁	図表番号	タイトル
52	図24	CCS:Porthos
54	図25	デジタル技術を用いた電力ネットワークの主要研究機関
55	図26	次世代インバータ 他:SOLACE
56	図27	P2G:STORE & GO
58	図28	DACの主要研究機関
59	図29	物理吸着法:Rotterdam The Hague Airport
60	図30	物理吸着法:Orca