

## 6. 再生可能エネルギー・蓄エネルギー

太陽光、風力、地熱などの再生可能エネルギーの活用はサンシャイン計画以来、既に多くの研究開発投資が実施され、社会導入されている。しかしながら、国内では発電単価が火力発電などと比較してまだ高価であることに加え、国内の再生可能エネルギーの適地が限定的であるという問題もある。再生可能エネルギーは、脱炭素化のため、一次電源となるだけでなく、CO<sub>2</sub>フリー水素の製造や電化技術と組み合わせることにより、産業分野などでの化石燃料利用を減少させることに貢献し得るため、課題を克服し導入を拡大することが求められている。

再生可能エネルギーの形態としては、世界的に太陽光発電、風力発電の普及が進んでいるが、これらは、水力発電や地熱発電と異なり出力が変動する点に留意が必要となる。本検討会では、太陽光・風力のような変動する再生可能エネルギーの大量導入に向けて、安定した電力供給のため、より柔軟な系統運用に加えて、技術の観点から、如何にして適切な量の調整力を確保できるかという点に着目をして検討を行った。

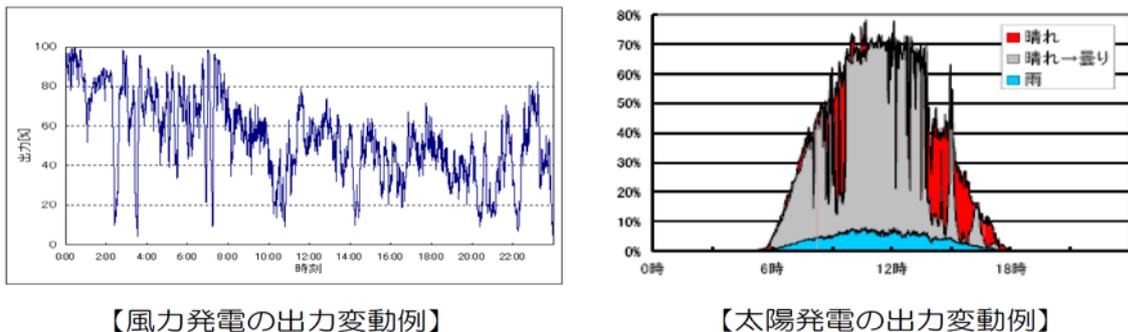


図 6-1 再生可能エネルギー電源の出力変動例

出所：経済産業省（第 6 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 3-1）

現在、国内では、揚水発電の他、火力発電が調整力としての機能を担っているが、今後は調整力の脱炭素化も重要になってくる。調整力を効率的に調達するため、需給調整市場の導入に向けた検討も進められている。将来的には、系統で受け入れきれない再生可能エネルギー由来の電力を貯蔵するなど、得られた再生可能エネルギーの最大限の活用も必要となってくる。

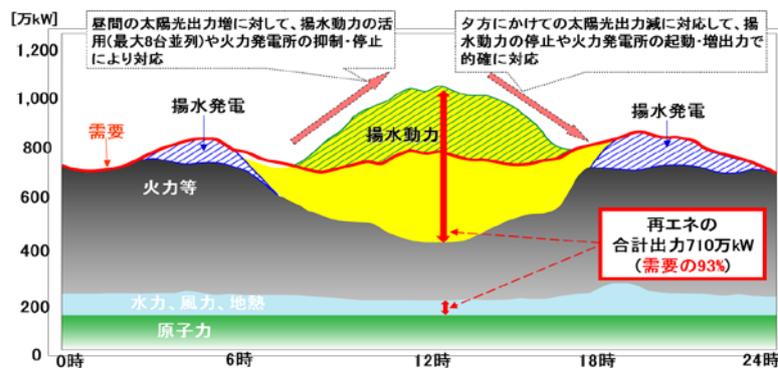
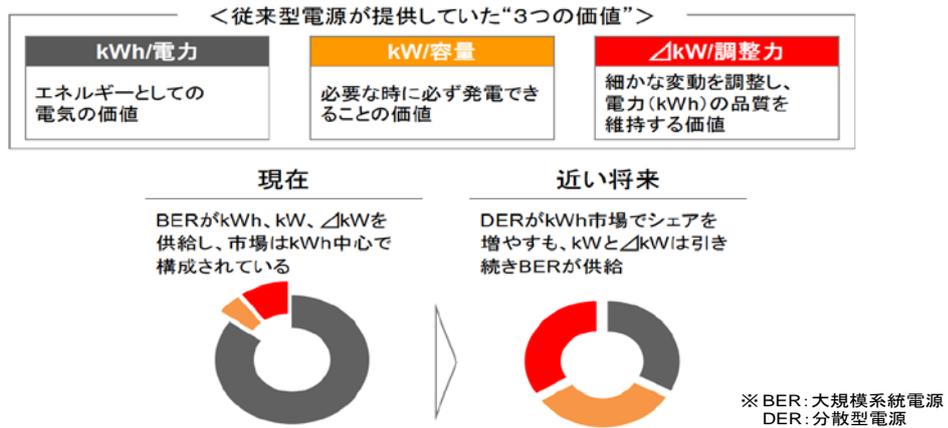


図 6-2 揚水・火力発電の調整力としての活用イメージ（九州エリア）

出所：資源エネルギー庁（第 6 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会検討会資料 4）



出所: 経済産業省「次世代技術を活用した新たな電力プラットフォームの在り方研究会」、東京電力「低炭素化に向けた電力システムの方向性と課題」

図 6-3 電力価値変化の方向性

出所: 経済産業省 (第 6 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 3-1)

近年は、周波数調整力の重要性が認識され始めている。その一つの契機となったのが、2016年9月に発生した南オーストラリア州での大停電である。50年に1度レベルのストームにより送電線事故が発生し、事故当日の電源構成は約半分が風力という状況であった。同期発電機の保有する慣性力が少ないことから、想定を上回る速度で周波数が低下したことが全州停電に至った主要因として報告されている。

- **オーストラリアの電力事情**
  - 国土が広く歴史的な経緯から、地理的に離れたエリア毎に系統が発展。エリア間連系容量が小さい。
  - 気候・地形の違いから、地域によって再エネ資源量が偏在(北部: PV 南部: 風力)
- **南オーストラリア州の電力事情**
  - 再エネが発電電力量の4割を占める。(風力発電が主体)
  - 再エネ導入拡大に伴い石炭火力退出。
  - ベース電力を隣のビクトリア州に依存。(連系線容量: 約90万kW)
- **停電事故概要**
  - 日時: 2016年9月28日(水)16時台
  - 場所: 南オーストラリア州、停電約85,000軒(当日需要1,826MW)
  - 原因: 50年に1度レベルのストームにより送電線事故が発生。(高圧送電線3回線断、鉄塔22基倒壊)

電源構成の約半分が風力であり、同期発電機の保有する慣性力が少ないことから、想定を上回る速度で周波数が低下したことが全州停電に至った主要因として報告されている。



出典: ABC News (29 Sep 2016)



図 オーストラリア電力系統

出典: <https://www.electranet.com.au/>

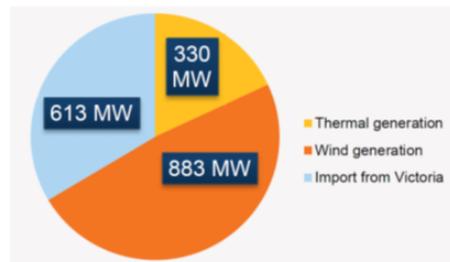


図 事故当日の南オーストラリア州電源構成

出典: BLACK SYSTEM SOUTH AUSTRALIA 28 SEPTEMBER 2016(AEMO, 2017) <sup>0</sup>

図 6-4 南オーストラリア州での停電事例

出所: NEDO (第 6 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 9)

以上の背景をもとに、再生可能エネルギー大量導入に向けた課題と必要とされる打ち手を整理すると、再生可能エネルギー大量導入に向けては、より柔軟な系統運用に加え、様々な調整力が必要である。現在我が国においては、主に火力発電や揚水発電により調整力を確保している。調整力の脱炭素化に向け、今後は蓄エネルギーによる調整力確保を中心に、再生可能エネルギーを最大限活用するための火力動特性向上、DR・VPPによる需要側における調整力確保が重要となる。加えて、容量市場や需給調整市場の立ち上がりも含め、系統で受け入れきれない再生可能エネルギーを貯蔵して売却するなど、得られた再生可能エネルギーの最大限の活用も再生可能エネルギー投資を拡大する上では重要となる。

世界においても、再生可能エネルギーの普及に向けて技術開発の重要性が指摘されており、国際再生可能エネルギー機関(IRENA)は、デジタルテクノロジーを組み合わせた蓄電池や需要家の電化などが必要と主張している。

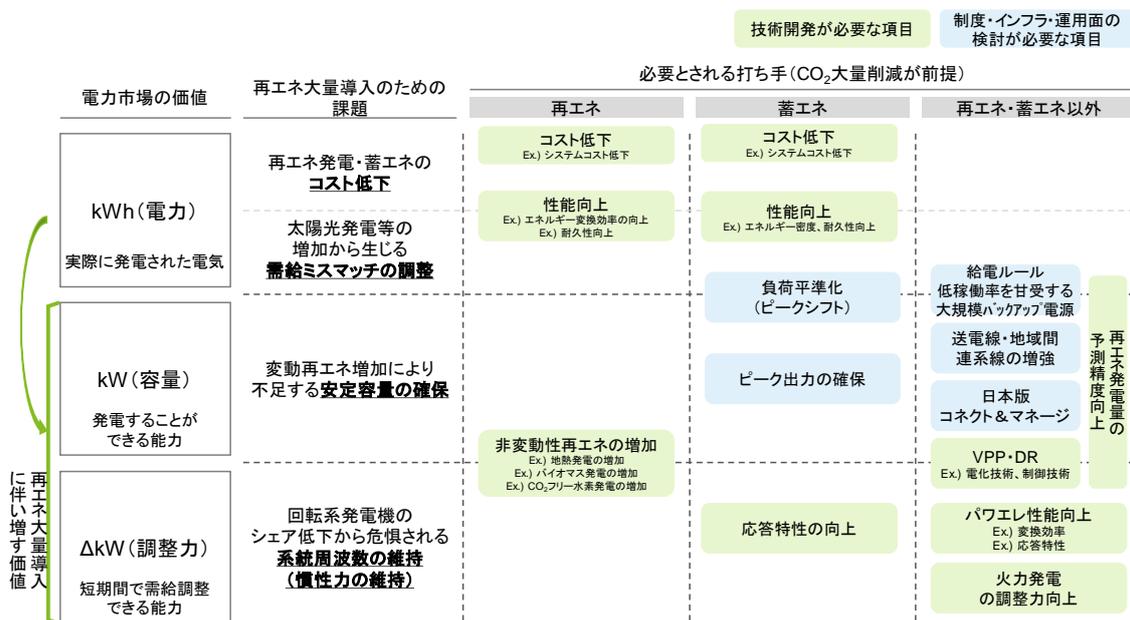


図 6-5 再生可能エネルギー大量導入に向けた課題

出所：経済産業省（第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 3-1）

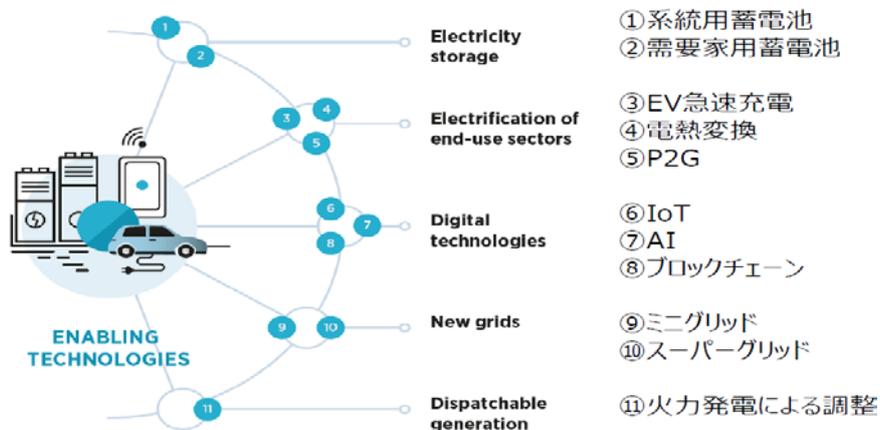


図 6-6 国際再生可能エネルギー機関(IRENA)が挙げる再生可能エネルギー普及に重要な技術  
出所：経済産業省（第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 3-1）

## 6.1.1 ポテンシャル・実用化評価

### (蓄エネルギー技術)

蓄エネルギー技術は多様な用途での活用が期待されている。用途一覧と必要な性能などを整理すると、蓄エネルギー技術の用途先は様々であり、そこで必要とされる応答時間や出力も用途ごとに異なる。今後は特に、調整力となる  $\Delta kW$  のニーズが高まると想定され、応答時間が短い領域の調整力を兼ね備えた蓄エネルギー技術が必要とされる。

提供価値	主要な用途先	必要な能力	応答時間	現在の主要調整場所			出力形態	典型的な設備出力(MW)	放電時間	実施回数
				発電	送配電	需要家				
kWh	Seasonal storage	季節間の需給バランスを調整する	day	●			電力・熱	500 - 2000	Days to months	1 - 5 per year
	Arbitrage / Storage trades	安価な電力を調整し、高値で電力を供給する(市場内・市場間)	> 1 hour	●			電力	100 - 2000	8 - 20 h	0.25 - 1 per day
	Combined heat and power	CHPにて蓄エネ技術を活用し、熱と電力の需給バランスを調整する	< 15 min	●			熱	1 - 5	min to h	1 - 10 per day
	Waste heat utilization	廃熱利用設備で蓄エネ技術を活用する	< 10 min	●			熱	1 - 10	1 h - 1 day	1 - 20 per day
kW	Transmission & distribution (T&D) congestion relief	送電線・配電線の一時的な混雑を緩和する	> 1 hour		●		電力・熱	10 - 500	2 - 4 h	0.14 - 1.25 per day
	T&D infrastructure investment deferral	送配電網の増強を一時的に先延ばしにする	> 1 hour		●		電力・熱	1 - 500	2 - 5 h	0.75 - 1.25 per day
	Demand shifting and peak reduction	需要シフトおよびピーク需要を削減する	< 15 min			●	電力・熱	0.001 - 1	1 min - 1 h	1 - 29 per day
$\Delta kW$	Non-spinning reserve	供給力不足時に電力を提供する(指令から15分以上)	> 15 min	●			電力	10 - 2000	15 min - 2 h	0.5 - 2 per day
	Spinning reserve	供給力不足時に電力を提供する(指令から15分以内)	< 15 min	●			電力	10 - 2000	15 min - 2 h	0.5 - 2 per day
	Load following	短時間での負荷変動に対応した出力調整運転を行う	< 15 min	●			電力・熱	1 - 2000	15 min - 1 d	1 - 29 per day
価値が高まる理由 回転系発電のシェア低下による慣性力不足	Frequency regulation	連続的に需給バランスを調整する	1 min	●			電力	1 - 2000	1 - 15 min	20 - 40 per day
VRE増加による系統の不安定化	Variable supply resource integration	変動性電源の集積により、供給力の変動を平滑化する	< 15 min		●		電力・熱	1 - 400	1 min - h	0.5 - 2 per day
	Voltage support	送電・配電システム内で電圧調整を行う	msec - sec		●		電力	1 - 40	1 sec - 1 min	10 - 100 per day
非常時対応	Black start	停電時に外部電力供給なしに起動する	< 1 hour	●			電力	0.1 - 400	1 - 4 h	< 1 per year
限定地域に対し kWh, kW, $\Delta kW$	Off-grid	オフグリッドの消費者に対して、需給調整する	< 1 hour	●			電力・熱	0.001 - 0.01	3 - 5 h	0.75 - 1.5 per day

出所:IEA「Technology Roadmap Energy storage」

図 6-7 蓄エネルギー技術の活用が期待される主要な用途先

出所: Deloitte (第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 3-2)

蓄エネルギー技術の特性一覧からは、現時点においては揚水発電の蓄エネルギーコストが最も安いことが分かる。将来的には、リチウムイオン電池、NaS 電池、レドックス・フロー電池、水素、蓄熱、圧縮空気貯蔵(CAES)などの適用も検討されている。また、コスト以外の特性として、導入規模、エネルギー密度、サイクル効率、サイクル寿命などがあり、蓄エネルギー技術ごとに長所および短所が存在することが分かる。

それぞれの蓄エネルギー技術ごとに短所を克服するため、多くの研究開発・実証が行われてきているが、他の脱炭素技術同様、大規模社会導入にはコストが最大の課題と言われている。将来的には現在稼働している揚水発電並みの低コストを実現する大規模な蓄エネルギー技術の確立が求められる。

方式	ユニット容量					設備コスト [千円/kWh]	設備コスト [千円/kW]	エネルギー密度 [Wh/L]	サイクル効率 [%]	サイクル寿命	需給調整時間幅			
	100kWh	MWh	10MWh	100MWh	GWh						分	時	日	月
揚水式水力				●	●	25-47	55-506	0.2-2	50-85	>15,000	●	●	●	
Li-ion電池	●	●	●	●		40-	80-	89-	85-98	~10,000	●	●	●	
NaS電池	●	●	●	●		47-108	187-539	38-	75-85	~4,500	●	●	●	
レドックスフロー電池	●	●	●	●		32-81	158-407	7-	60-75	~10,000	●	●	●	
水素化 (Power to Gas)			●	●	●	48-91 (変換のみ)	55-83	600 (200bar圧縮水素)	22-50	1,000~10,000		●	●	●

### 研究開発段階

方式	ユニット容量					設備コスト [千円/kWh]	設備コスト [千円/kW]	エネルギー密度 [Wh/L]	サイクル効率 [%]	サイクル寿命	需給調整時間幅			
	100kWh	MWh	10MWh	100MWh	GWh						分	時	日	月
圧縮空気貯蔵(CAES)※地中式	●	●	●	●		7-14	55-165	2-6	27-70	>10,000	●	●	●	
Brayton battery	-	-	●	●	-	-	-	-	<72 <sup>*1</sup> (蓄熱のみ) *1:作動温度により変化	-	-	-	●	-
熔融塩蓄熱	-	-	●	●	-	-	44-77	-	40-93	-	-	-	●	-
液化空気貯蔵(LAES)			●	●	●	29-58	99-209	-	55-85	-	●	●	●	
フライホイール	●					858-968	14-55	20-80	90-95	20,00-100万	●			
超電導電力貯蔵(SMES)	●	●				10,630-	59-	6	90-95	-	●			
電気二重層キャパシタ	●					1,100	14-57	10-20	90-95	>100万	●			

出所:各種公開情報を基に技術戦略研究センター作成(2018)

図 6-8 蓄エネルギー技術の特性一覧(NEDO)

出所: NEDO (第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料9)

電力貯蔵様式	建設費(億円)	出力容量(MW)	エネルギー容量(MWh)	耐用年数(年)	建設費/出力容量(億円/MW)	建設費/エネルギー容量(億円/MWh)	建設費/(出力容量×年)(億円/(MW×年))	建設費/(エネルギー容量×年)(億円/(MWh×年))
揚水式水力 (神流川発電所)	4.845	2.820	19,458	60	1.7	0.25	0.028	0.0041
Li-ion電池 (南オーストラリア)	20	25	50	10~20	0.80	0.40	0.080(10年耐用) 0.040(20年耐用)	0.040(10年耐用) 0.020(20年耐用)
レドックスフロー (中国, Dalian)	5.720	200	800	20	29	7.2	1.4	0.36
レドックスフロー (日本, 南早来)	200	15	60	20	13	3.3	0.67	0.17
NaS電池 (West Virginia)	9.9	2	14	20	5.0	0.71	0.25	0.035
NaS電池 (日本, 豊前)	215	50	300	20	4.3	0.70	0.22	0.035

図 6-9 各電力貯蔵技術のコスト比較(プロジェクト費または建設費を基に計算)

出所: NEDO (第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料9)

以下、蓄エネルギー技術として活用が進んでいる蓄電池の課題についてまとめる。例えば、現在電気自動車に活用され、今後も更なる市場拡大・コストダウンが見込めるリチウムイオン電池は、再生可能エネルギーの蓄エネルギー技術としても活用が始まっているが、現状では可燃性の電解液であることもあり、その設置に相当のスペースを占有する他、安全設計が求められるため、設置場所についての制約が伴うといった課題が残っている。コストダウンの観点では、今後大量に市場に出てくることが予想される中古品を如何に活用していくかについても検討が必要とされている。

また、車載用蓄電池として活用・開発が進められているリチウムイオン電池、全固体電池に加え、米国などでは定置用蓄電池のレドックス・フロー電池の低コスト化などに向けた研究プロジェクトがいくつか立ち上がっている。

種類	良い特徴	懸念される特徴	
リチウムイオン電池（現状）	高エネルギー密度、高効率、室温作動	高温（60℃以上）に弱い、有機電解液が不安定（電極被膜で保護） <b>危険物取扱所</b>	携帯からEV、大型まで利用。
ナトリウム硫黄電池（Na/S）	高温作動（約300℃）で安定、高いエネルギー密度、効率は80%程度止まり	約300℃の保持が必要なため常時運転がよい。設置場所が限定的（工場等） <b>危険物取扱所</b>	工場用バックアップ、電力貯蔵、系統安定
レドックスフロー電池	大容量化が容易、変動追従も可能。メンテナンスが可能。V系なら長期間運転可能	効率が低い。有機電解液が高温に弱い。元素2つ以上の構成は難しい（混合による性能低下）。 占有面積が大きい。	系統安定、バックアップ電源
全固体リチウム電池（硫黄、酸化物、高分子系の電解質）	高安全、低温でも高出力が期待できる。	電極と電解質間などの界面活性が難しい。高温保存に依存。デンドライトの心配あり。電極などの形成が困難	期待の電池
水系電池	安全	水素発生を伴う、効率が低い（濃厚電解質などで研究開発中）。	可能性を探索

図 6-10 大規模蓄電池技術の比較

出所：電力中央研究所（第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料8）

また、最近のトピックとして、近年蓄熱発電技術も注目されている点を挙げる事ができる。低コストでの蓄電が可能になるのではないかと期待されている。

	場所	規模	蓄熱材料、温度	熱電変換	発表
Siemens	独	120MWh(熱)	碎石、600℃超	Rankin 25~50%	2016, 2017
Google (Malta-X)	米	10MW (2020 予定)	硝酸塩+揮発油 560℃ & -100℃	Brayton 60~80%	2017
Vattenfall	独	10MWh(熱)	ナノ被覆炭酸塩、 化学蓄熱、530℃	Rankin	2017
LUMENION	独	2.4MWh	鉄、650℃	Rankin	2018
seas-nve	デンマーク	1億円、2年	碎石、600℃	Rankin	2017
NEST	ノルウェー	10MWh(熱)	コンクリート	Rankin 25~40%	2015 (当初はCSP付属)
1414degree	豪	10MWh	シリコン、潜熱	Rankin?	2018
NREL(国研)	米	3億円	砂、空気、1100℃	Brayton	2018

図 6-11 海外における蓄熱発電プロジェクトの概要

出所：エネルギー総合工学研究所（第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料11-1）

（火力発電による調整力の確保）

既存の火力発電はCO<sub>2</sub>排出を伴うが、設備容量が豊富に存在するため、調整力が大きく、調整力確保に係る投資が抑えられる可能性があるため、再生可能エネルギーに対応するための調整力としての役割が増してきている。将来的には、CO<sub>2</sub>排出を伴わない水素発電による調整力が期待されている。

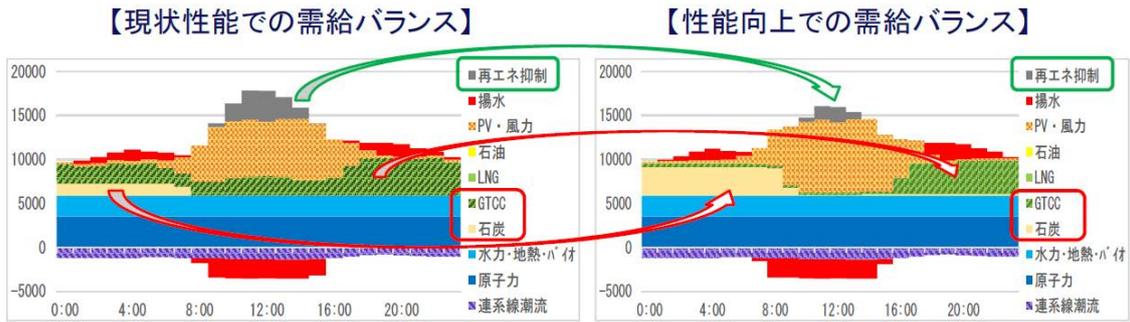


図 6-12 火力発電の調整力向上と再生可能エネルギー導入の拡大

注釈：NEDO 「再生可能エネルギー大量導入時の電力系統安定化における火力発電の役割とガスタービンの負荷変動吸収能力の向上によるCO<sub>2</sub>削減効果に関する調査研究」(2016) 成果から、軽負荷期を想定した1日の需給バランスを比較(2030年九州エリアの例)したもの

出所：電力中央研究所(第8回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料3-1)

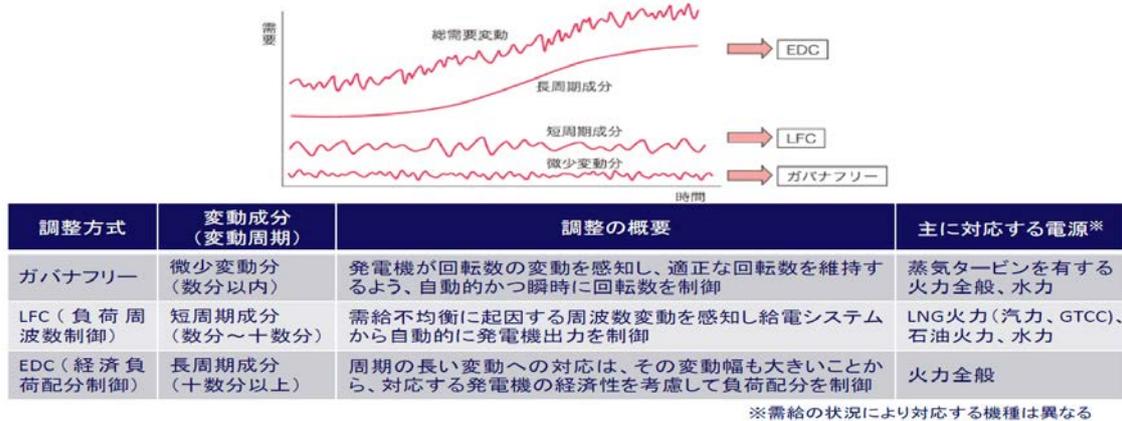


図 6-13 既存の火力発電が果たしている需給調整機能

出所：電力中央研究所(第8回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料3-1)

発電タイプ別の調整力としては、火力発電の中で、比較的新しい設備であるガスタービンコンバインド発電は汽力発電に比べ、負荷変動、最低出力、DSS、WSSの性能値が高く調整力が高い。

発電タイプ	負荷変動	最低出力	DSS	WSS
汽力発電(ドラムボイラー)(35万kW級)	1~3%/分	約30%	3~5時間	20~30時間
汽力発電(天然ガス、石油)(60万kW級)	5%/分	15~30%	5~10時間	30~40時間
蒸気タービン発電(石炭)(60万kW級)	3%/分	約30%	4時間	30~40時間
コンバインドガスタービン発電(GTCC)(1100℃級)	7%/分	単軸80% 系列20%	1時間	12時間
コンバインドガスタービン発電(GTCC)(1300℃級)	10%/分	単軸50% 系列20%	1時間	12時間
コンバインドガスタービン発電(GTCC)(1700℃級)	5%/分	45%	0.5~1時間	

経済産業省 低炭素電力供給システムに関する研究会 2009年7月に加筆

図 6-14 負荷変動能力の観点から火力発電による現状の調整力

出所：電力中央研究所(第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料8)

部分負荷運転時の発電効率は、石炭火力は定格出力に対して 30%の負荷で運転すると発電効率は約 20%低下し、GTCC は定格出力に対して 50%の負荷で運転すると発電効率は約 15%程度低下するといった特徴がある。部分不可運転時であっても発電効率の低下を最低限にする技術開発が行われている。

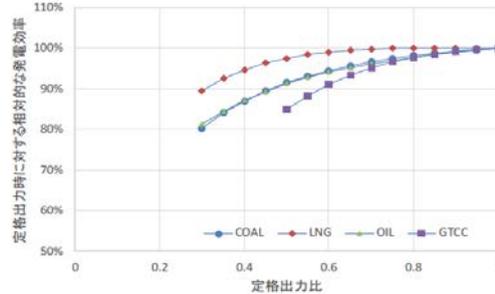


図 火力機の発電効率の特性

電気学会の拡充システムモデル：燃料毎に平均して発電効率を示した。汽力発電の最低負荷は30%、GTCCの最低負荷は50%とした。  
 (電気学会 電力システム標準モデルの普及・拡充調査専門委員会、「モデル拡充に関する報告書(マニュアル)」, 2001モデルを基に作成)

図 6-15 火力発電の部分負荷運転時の発電効率

出所：電力中央研究所（第8回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 3-1）

(需要側による調整)

また、脱炭素社会を目指すに当たり、系統・発電側だけでなく、需要側の調整も期待されている。既に IoT 技術を駆使しつつ、VPP や DR といったエネルギーマネジメントの導入が進んでいるところであり、今後 AI、ブロックチェーン技術などの活用も期待されている。VPP とは、需要家側のエネルギーリソース（蓄電池や電動車、発電設備など）を IoT 技術により遠隔で統合制御し、あたかも一つの発電所のように機能させ、電力需給調整に活用する技術である。VPP の取組は、我が国では実証事業が行われているところであるが、ドイツやイギリスなど、既にビジネス化している事例も存在する。

Next Kraftwerke(ドイツ)のビジネスモデルと事業特徴

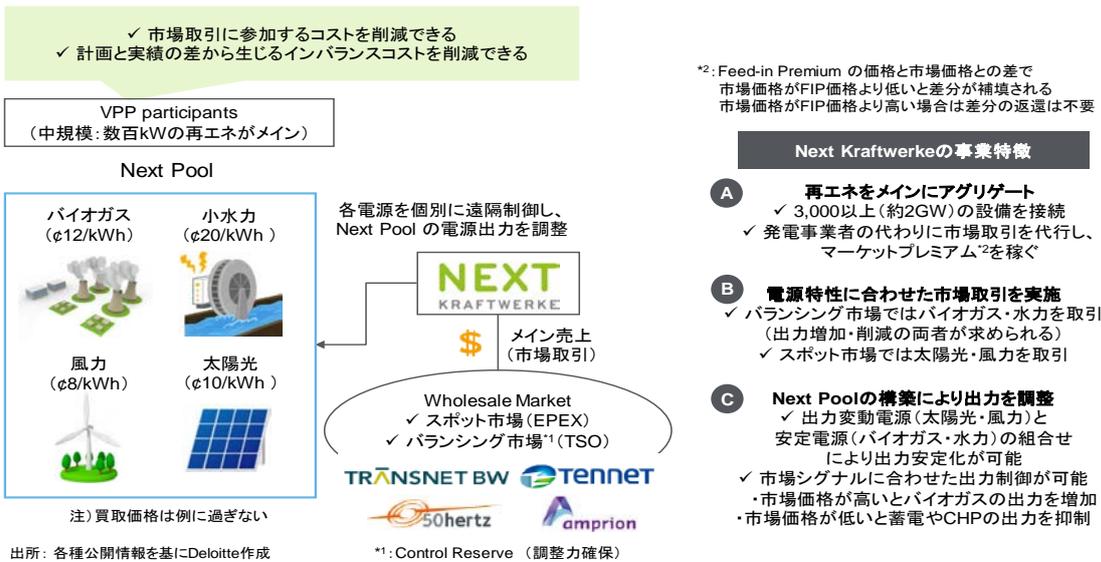


図 6-16 国外の VPP 動向①

出所：Deloitte（第8回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 2-2）

再生可能エネルギーによる発電抑制を極力抑えるため、余剰電力を機動的に活用する上げDRへの注目も高まっている。我が国においても、2018年10~11月にかけて、九州において電炉を利用した上げDR実証プロジェクトが実施された。

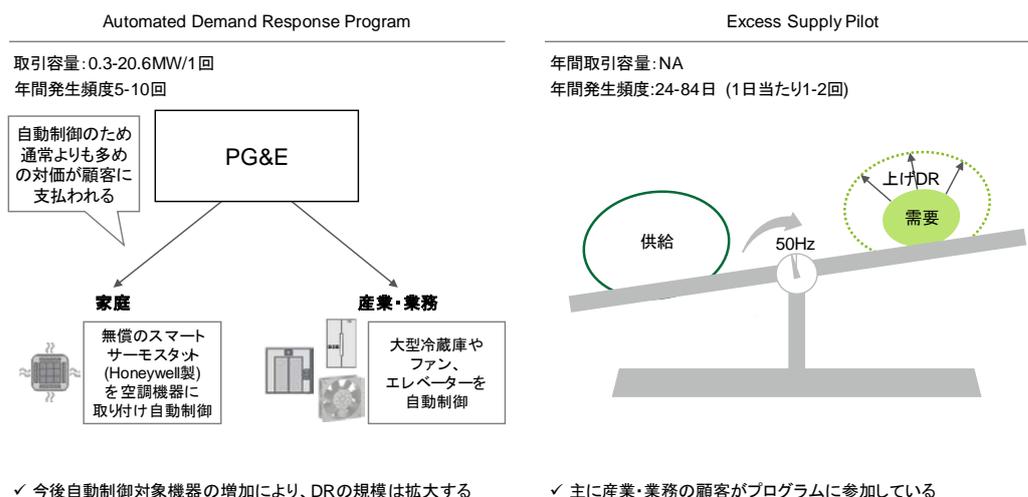


例：電気を大量消費する電解プロセス（左）および電炉（右）

図 6-17 上げDR実証を実施した生産プロセス例

出所：経済産業省（第8回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 2-1）

今後、再生可能エネルギーの出力抑制増加が見込まれる中、電炉や電解合成など電力多消費産業における上げDRを用いることで、産業分野をはじめとした電化が有用な方策の一つとなる。電炉の上げDRはまだ数回の実証を完了した段階であるため、今後も検証を積み重ね、課題を洗い出していくことが必要である。



出所: PG&Eウェブサイト等を基にDeloitte作成

図 6-18 国外の上げDR動向 (PG&E 保有する DR プログラム例)

出所: Deloitte (第8回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 2-2)

### 6.1.2 実用化を見据えた長期的な研究開発等の方向性

揚水並みの低コストを実現する大規模な蓄エネルギー技術の確立への対応として、例えば、今後需要増加が見込まれる電動車で価格低下が期待されるリチウムイオン電池や全固体電池の活用の他、安価な材料を使ったレドックス・フロー蓄電池の開発などが期待される。

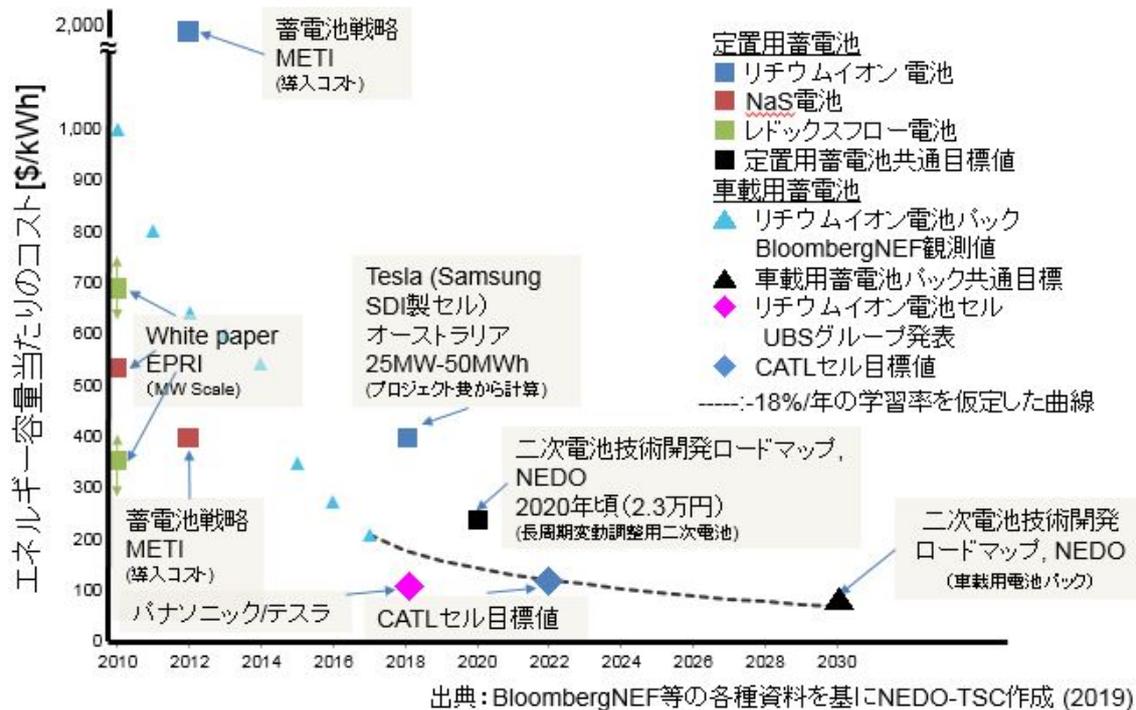


図 6-19 車載用蓄電池コストの低下のトレンドの強さ

出所：NEDO（第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料9）

定置用蓄電池は、例えば20年といった長期運用の実績がない状態である。劣化評価技術や電池交換技術の向上を実現しながら、長期運用の実績を積み上げる必要がある。車載用蓄電池については、使用後の二次利用も想定できるため、このような劣化評価技術・残存価値評価方法の標準化やその適正評価が必要とされている。さらには、資源のリサイクル利用を進めることが肝要である。

寿命延伸のための方策	課題
二次電池の部品交換	不可（シール型電池ではできない） （レドックスフロー電池は可能（膜、電解液、ポンプなど））
容量低下は不可避	劣化抑制条件での運転、容量の割り増し（コスト増）
蓄電池システムの交換	セル交換、または、モジュール化で、系列毎の交換（劣化判断技術で判定）
電池劣化判断技術	運転条件での劣化抑制 電池交換時期の見極め
判定で、リユースに	使える電池はほとんど使う。劣化判断技術で見極めて、EVは加速性能（出力特性）の低下などでは、利用できる定置用などで活用

図 6-20 蓄電池の長期間運転での課題と方策

出所：電力中央研究所（第6回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会 資料8）

また、従前、低効率で着目されていなかった蓄熱や、低コストかつ低圧で充填・放出可能な不燃性の水素吸蔵合金など水素を活用した蓄エネルギーのシステムなど、大規模かつ安価に達成できる場合には、必ずしも電気だけでなく、様々なエネルギー貯蔵の形態を追求す

ることも重要である。その場合、エネルギー変換には損失が伴うという点からは、場合によっては、熱は熱として、水素は水素として、電気に戻さずに活用するという観点も必要である。

また、火力発電については、新設及び既設火力発電所の改修において、より短時間での出力調整や部分負荷運転時の効率向上を図っていくことが重要である（将来的には水素発電への適用も含み得る）。

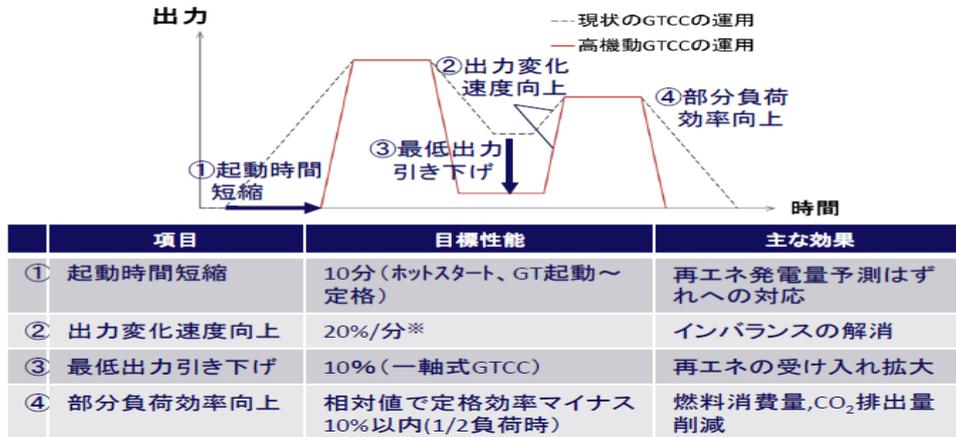


図 6-21 今後火力発電に求められる機能（GTCCの開発目標例）

注釈：※定格出力 50 万 kW を想定

出所：電力中央研究所（第 8 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 3-1）

VPP の調整力向上に向けて最も重要な課題は制御性の高いリソースを拡大することであり、そのためには蓄電池の低コスト化が不可欠である。その他にも、秒単位の速い制御システムの開発が必要であり、通信速度・データ処理速度の向上を実現する必要がある。また、技術開発のみならず、将来的には多くの市民や企業を大規模に巻き込む必要があるため、制度面の工夫や実証の積み重ねも併せて必要である。

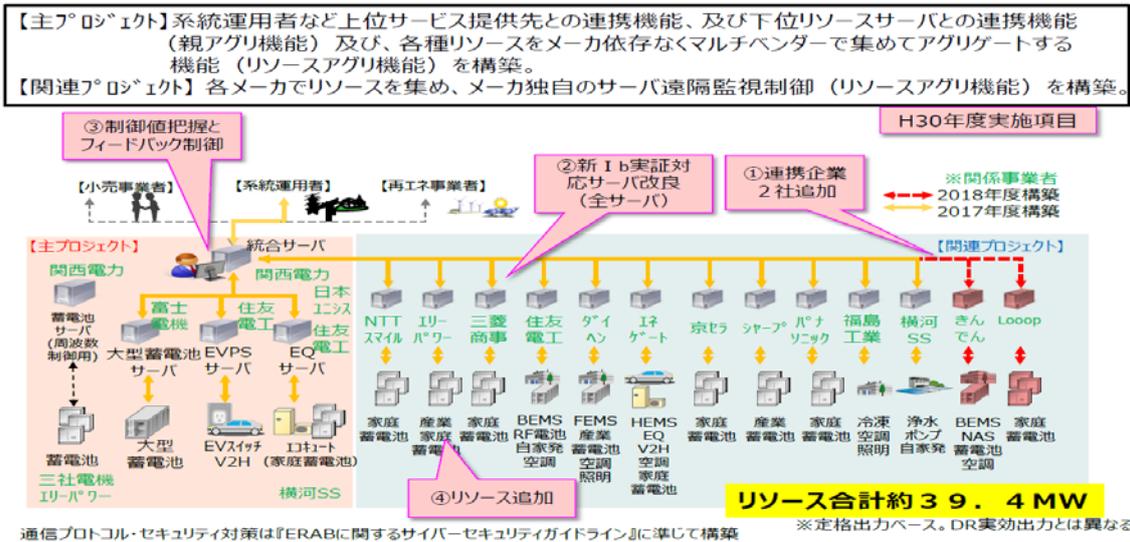


図 6-22 関西 VPP 実証プロジェクトの概要

出所：関西電力（第 8 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 4-3）

上げ DR に関しては、今後も検証を積み重ね、課題を洗い出していくことが必要である。現時点においては、電力会社の要請にどれだけ迅速に対応できるか、オン・オフに伴うエネルギーロスなどをどこまで低減できるか、などの課題が想定されている。

これに加え、電源の脱炭素化の取組と併せて、産業分野をはじめとした最終エネルギー消費における電化は、一部の電力を多く消費する生産工程を機動的に運用することにより系統安定化のための調整力となる可能性がある。また、適用に困難が伴う分野や工程もあるものの、加熱や乾燥工程など産業プロセスでの化石燃料消費を削減する可能性や、プロセスの制御性を高めることにより、エネルギー消費の低減だけでなく、少量多品種生産・自動化といった生産プロセスへの付加価値の提供も期待される。

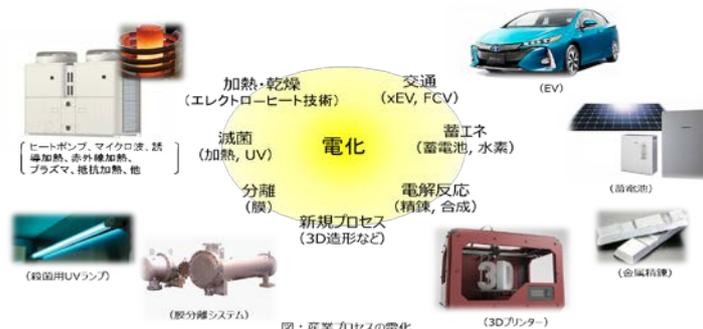
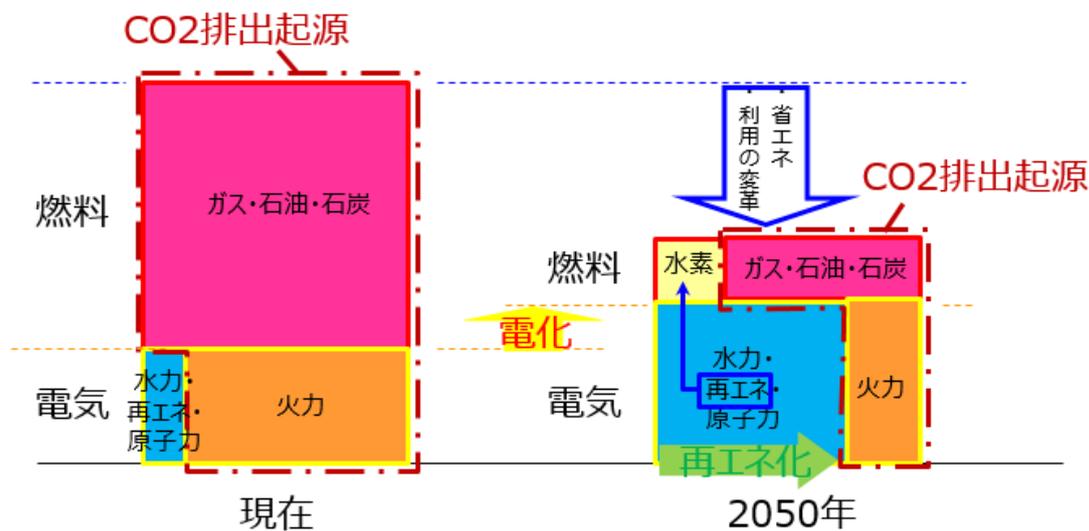


図 6-23 産業プロセスの電化

出所：経済産業省（第 8 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討資料 2-1）

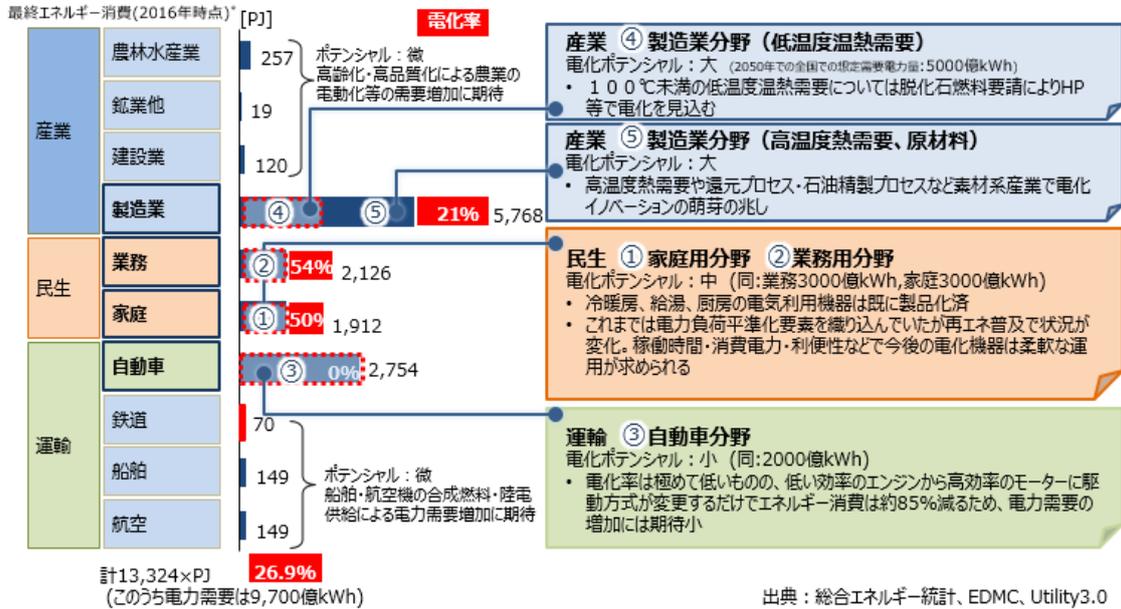


- CO2排出量を減らすためには、エネルギー源の転換（電化）と再エネ化が必要（但し、「電力需要の創出には電化による価値創造が伴うこと」）

図 6-24 最終エネルギー消費の内訳と CO<sub>2</sub> 排出量

出所：東京電力 HD 矢田部氏（第 8 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 6）

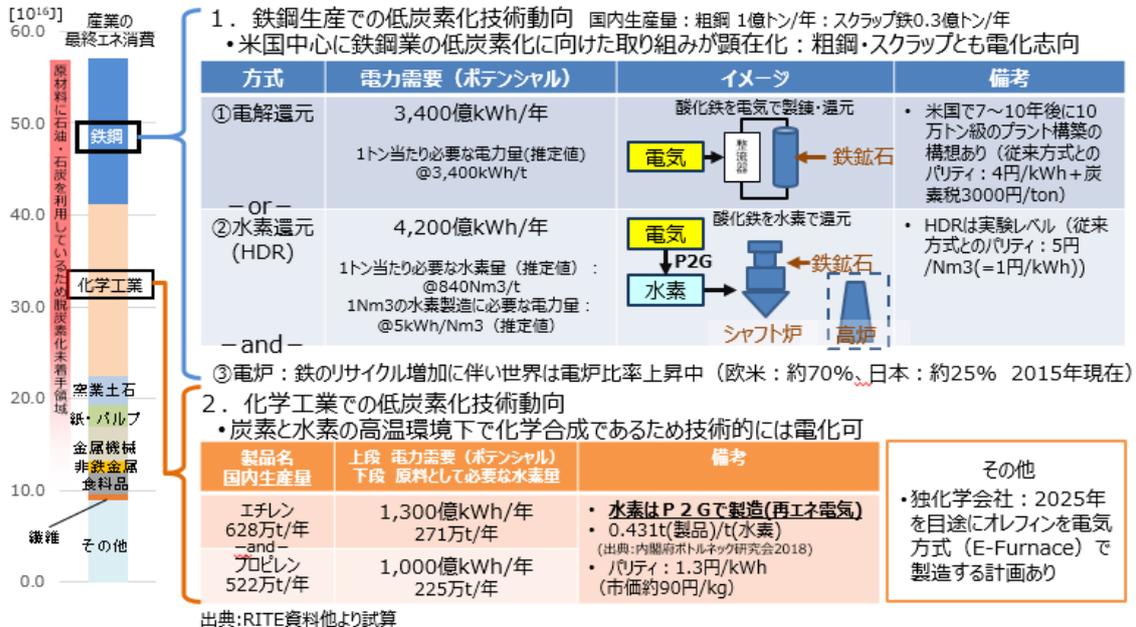
これまで、ヒートポンプや効率的に加熱できる赤外線乾燥設備といったエネルギー効率の高い設備や、作業環境を大きく改善できる金属加工用の誘導加熱設備などの付加価値を生み出す設備の導入は一部進んでいる。より一層の電化を促進させるためには、一品一様で高コストとなりやすい設備の低コスト化、電化によるプロセスやプロダクトの高付加価値化など、技術面・経済面での課題克服が重要である。



特に、製造業に脱炭素化が求められ、その方策として電化も期待される。

図 6-25 需要側の脱炭素化ポテンシャル

出所：東京電力 HD 矢田部氏（第 8 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 6）



電化は種々検討されており、技術は存在。  
 課題は電力単価。(製造コストのパリティは1~5円/kWh)

図 6-26 産業セクターの脱炭素化ポテンシャル

出所：東京電力 HD 矢田部氏（第 8 回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 6）

## 7. パワーエレクトロニクス

パワーエレクトロニクスは、パワー半導体を用いて、直流から交流への変換など、電圧や電流、周波数を制御する技術である。パワーエレクトロニクスは、家電、鉄道、自動車、産業用機器など、異なる要求特性をもつさまざまな製品群へ適用されている。省エネルギー効果を最大限発揮させる上で、電力供給の上流から電力需要の末端までを支えるパワーエレクトロニクス機器を導入することが有効であり、パワーエレクトロニクス技術は、電気機器の更なる省エネルギー化に繋がる横断的な技術である。



【出典】平成25年9月13日 第114回総合科学技術会議 資料5

図 7-1 パワーエレクトロニクスを適用した製品

出所：文部科学省（第7回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料2）

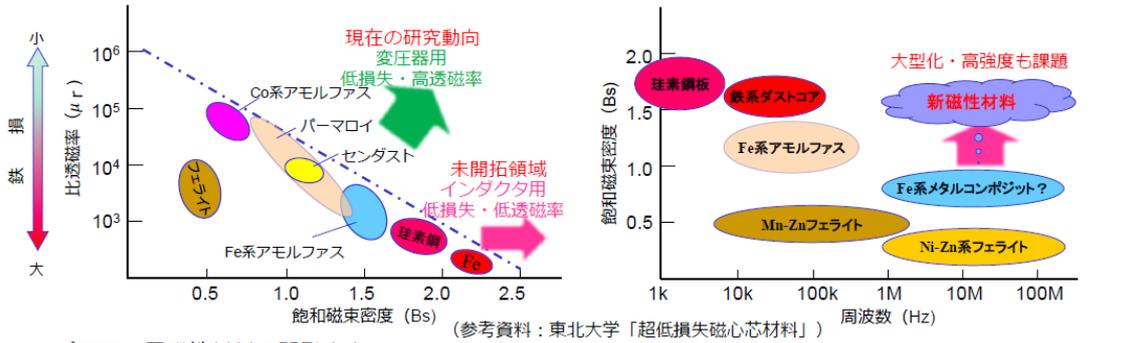
### 7.1 ポテンシャル・実用化評価

現在はシリコン (Si) が市場の9割以上を占めており、海外トップメーカーが更なる大口径化によりシリコン半導体のより一層のコスト低減に取り組んでいるが、より高い耐圧が求められる車載・産業用途や、より高速動作が求められる通信機器用途のために、シリコンデバイスの新構造化技術や、炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) といった次世代パワー半導体材料の開発が進められており、我が国においても世界トップレベルの顕著な成果が創出されつつある。しかしながら、ウェハ製造にかかる費用は、SiCはSiの10倍強、GaNはSiCの10倍以上と言われており<sup>3</sup>、次世代パワー半導体材料はまだ製造コストが高いという課題があり、大口径ウェハの製造プロセスや効率的な高品位結晶作製技術の開発が進められている。

さらに、パワーエレクトロニクスの省エネルギー性能を高めるため、パワーエレクトロニクスシステムについては、材料、デバイスのみではなく、周辺機器を含む汎用性のあるパワーモジュールや磁性体、熱設計、ノイズ対策まで含めたトータルシステム設計が重要である。

<sup>3</sup> SiC・GaNパワー半導体の最新技術・課題ならびにデバイス評価技術の重要性（筑波大学岩室憲幸、2016年）及び事業者ヒアリング。

➤ 軟磁性材料の磁化特性と損失



➤ パワエレ用磁性材料の開発方向

- ・現状：高透磁率・低損失／高磁束密度・大損失
- ・課題：用途に応じた特性開発
- 変圧器用：高透磁率、高磁束密度、低損失
- インダクタ用：低透磁率、高磁束密度、低損失

- ・現状は磁路ギャップを挿入して実効透磁率を下げる
- ・フリンジング磁束による損失増加 (周波数2乗比例)

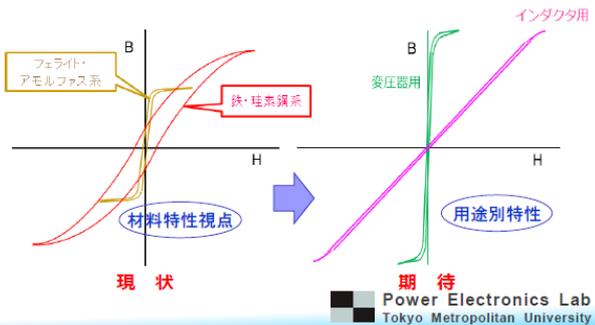
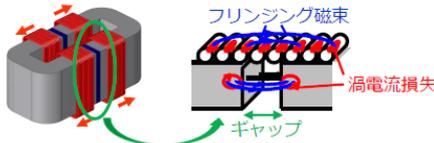
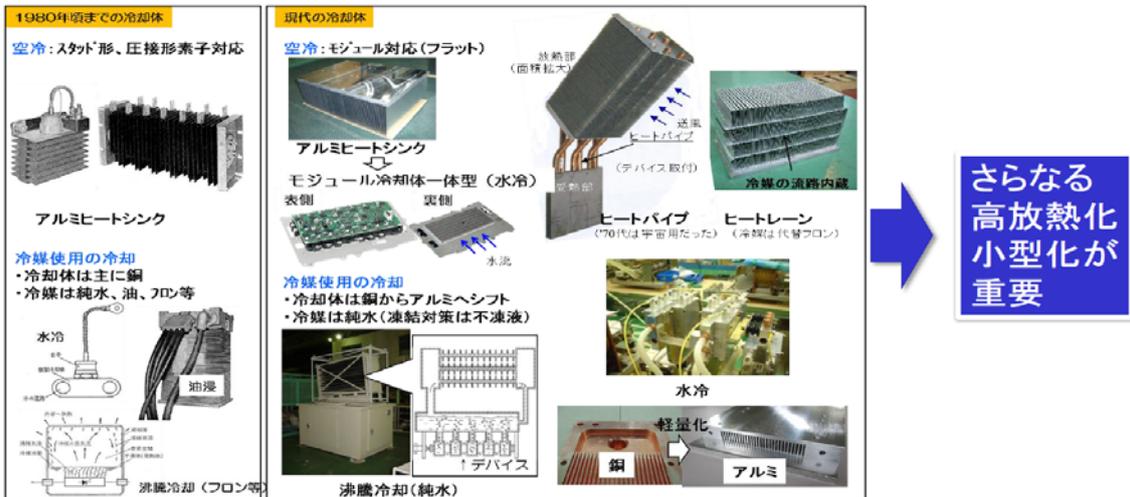


図 7-2 磁性部品の材料特性と技術課題

出所：首都大学東京 清水氏 (第7回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 8-4)



デバイスの性能が上がり、冷却体の開発遅れが目立つようになってきた (大きさなど)  
⇒特に今後はプロアレスなどの自然空冷技術が重要 (熱を如何に拡散させるかが重要)

図 7-3 冷却体の技術動向

出所：東北大学 高橋氏 (第7回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会 資料 7-4)

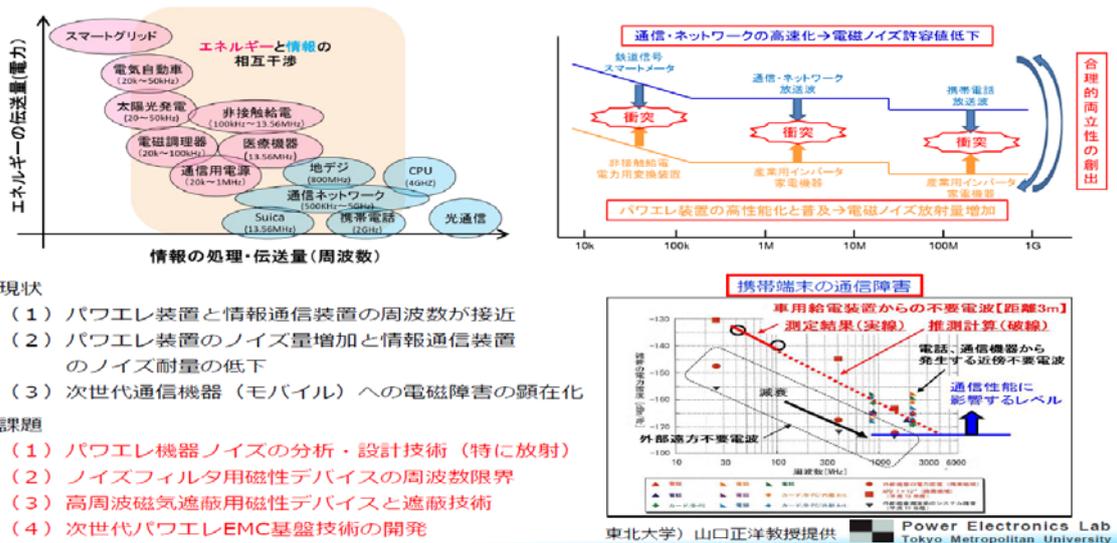


図 7-4 パワーエレクトロニクス機器の電磁ノイズに関する課題

出所：首都大学東京 清水氏（第7回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 8-4）

## 7.2 実用化を見据えた長期的な研究開発等の方向性

自動車の電動化、産業用機器のIoT化、ワイヤレス給電、電力制御のスマート化など、アプリケーション分野を絞った研究開発を行い、その用途別に、トータルの設計がどうあるべきかを踏まえた上で、コスト、効率、信頼性、大きさなどを最適化して社会導入することが必要である。また、低コスト化、標準化できる部分を切り出すなど、既存技術で低コスト化を目指して導入を進めることも重要となる。加えて、機械式のブレーカーなど半導体を導入可能だがまだ電化されていない領域を探すことも、省エネルギー技術の拡大につながる。

今後開発すべき具体的な技術としては、電力を高効率に制御できる次世代半導体の研究開発を推進するとともに、コスト低下に向けて、ウェハの大口径化や歩留まり改善、部品や回路の共通化、標準化、大量生産技術の導入などに向けた取組の推進が求められる。また、高機能化・高性能化に向けて、半導体のみならず、受動部品や実装技術などを含めた、パワーエレクトロニクス機器全体にかかる基礎的研究開発を推進することも重要である。

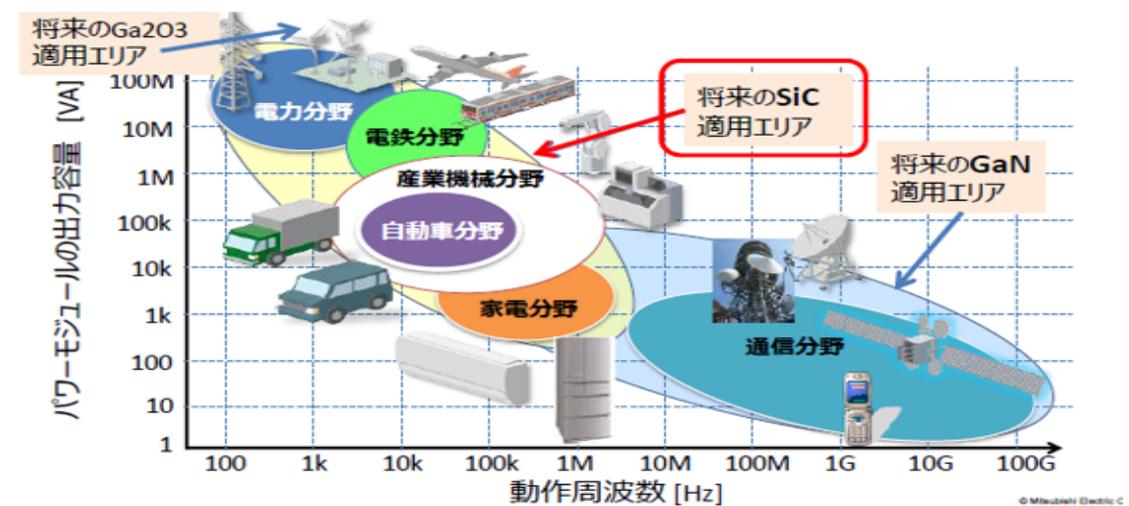


図 7-5 パワーエレクトロニクスの種類と用途

出所：三菱電機（第7回エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会資料 7-3）

## 8. 効果的な研究開発・実証支援に向けて

最後に 2050 年以降の脱炭素化に向けたエネルギー・環境分野での研究開発・実証支援の方向性についてまとめる。

他の分野と同様に、本分野の研究開発においても、民間の知見・資金を最大限活用することを促しつつ、基礎研究や実現可能性調査などの段階では、幅広い技術シーズに着目し、それらの中で成果の見込まれるものに重点化して、その先の実用化に向けた技術開発に挑戦し、2050 年やその先を見据えての脱炭素社会の実現に向けて取り組んでいくことが求められる。市場化に向けて技術レベル（Technology Readiness Level (TRL)）がどの段階であるのかに関して、専門家の知見を活用しつつ、国としても客観的に評価した上で、資金面などにおいて技術レベルに応じた適切な支援を行っていくための検討が必要である。その際、既に化石資源を中心に利用した比較的安定な市場が確立している本分野では、特に「コスト」など、ユーザーなどの立場・ニーズをより重視していかなければ、脱炭素化社会を実現していくことは困難である。科学的な価値観に基づく革新だけでなく、常に、ユーザーや未来社会像の観点から、不必要な技術目標を追求していないか、スピード感をもって上市できるか、精査することが求められている。

これまで我が国では、本分野において、サンシャイン計画を始め、ムーンライト計画、ニューサンシャイン計画などに基づき、多額の政府研究開発予算を投じてきている。太陽光発電のように、長期の研究開発投資が実を結んだ技術もある一方、なかなか市場化に結びつかない事例もあるが、技術課題の理解を含め、これまでの取組の蓄積を土台にしつつ、最新の科学的知見を継続的に取り入れ、研究開発・実証を継続する必要がある。その際、これまでと全く異なるコンセプトでコストを含めた課題を一気に解決し得る非連続な革新的技術と、革新的技術というイメージが薄い分野であっても、これまでの長期の研究開発投資を踏まえ、確実に社会実装に向かうための短中期での開発を目指す技術との両面を推進することが重要である。

非連続な革新的技術探求の取組としては、これまで、2050 年の脱炭素化に向け、経済産業省では、エネルギー・環境イノベーション戦略で示された分野を中心とした革新的な低炭素技術シーズを探索・創出するため、2017 年より、未踏チャレンジ 2050 を開始した。2050 年頃に第一線で活躍しているような若手研究者を育成するため、大学などの研究者は 40 歳未満の若手研究者を対象としている。また、文部科学省においても、2017 年より、未来社会創造事業を開始し、2050 年に向けた CO<sub>2</sub> 大幅削減の目標からバックキャストした技術課題を特定し、アカデミアの発想を活かしたハイリスク・ハイインパクトな研究開発を推進している。両省では、COMMIT2050 として、研究の進捗に伴い学術的課題が生じた場合の橋渡し、社会実装に近づいた研究課題の橋渡しをするなど連携してきたところである。今後とも、2050 年に向けた長期的な研究開発については、優れた個人の着想を活かせるような研究開発を促進する。

これらを含め、国の研究開発事業において、社会やユーザーの立場から必要となる技術課題を設定し、実現可能性調査の段階から、複線的な研究開発アプローチで技術間競争を促すような仕組みを検討していく。また、研究開発のステージが上がって、技術開発や実証事業を実施していくうちに新たな課題が生じ、場合によっては、基礎研究にまで遡った対応が求められることもある。上述のように経済産業省、文部科学省のみならず、関係府省庁の事業

がより有機的に連携できる仕組みを整えることが重要である。

また、地球温暖化という世界的な課題では、我が国にとどまらず世界から技術シーズを発掘するため、ミッション・イノベーションなどを活用した国際共同研究、ジョイントコールなどによる国際共同研究の実施という観点も重要となる。

更に、研究・技術開発に当たっては、コストやCO<sub>2</sub>排出のLCA分析により、その技術の客観的ポテンシャルを評価していくことが重要である。現状においては、そもそも温室効果ガス排出量のLCA分析が行われていない場合が多いことに加え、仮に分析が行われていたとしても、コスト分析と温室効果ガス排出量のLCA分析が別々に実施され、比較分析も困難である場合も多いことが実態である。前提条件を開示した上で、市場での普及までを見通した客観的なライフサイクルベースでの温室効果ガス削減効果の評価(LCA)の下に、技術選択・開発の注力をしなければ本末転倒である。LCA技術評価を通じた客観性の担保として、研究開発におけるLCA評価の要件化やLCAデータベースの充実、LCA技術評価の不確実性の評価が考えられるが、どのように実行できるかは今後の検討課題である。データ不足と各種不確実性などのため、CO<sub>2</sub>排出量のLCA分析は極めて大きな困難を伴うが、産学官の様々なプレーヤーを巻き込んだ上で、分析内容を精査できる環境を整えることが重要であると思われる。

CO<sub>2</sub>削減技術の普及のみならず、同技術の研究開発を活性化させるためにも、政府による研究開発予算の確保や、企業の環境貢献の見える化などのCO<sub>2</sub>削減技術導入インセンティブも求められる。

また、環境・エネルギーの分野では、研究開発段階では最先端にいても、商用化・産業化の段階において、その立ち位置を簡単に覆されることがあると指摘されている。こうした事態に陥らないよう、産業化に向けた方策の検討も必要となる。

最後に、技術は人と同義であり、若手研究者を始めとした人材育成は、本分野でも最も重要であると言える。環境・エネルギーに関する様々な分野における人材の育成、確保が重要である。これらの人材を将来に渡って輩出するためには、長期的視点での人材育成を継続的に取り組むことが望まれる。政府の研究開発支援事業においても、若手研究者の育成、技術シーズの市場化の促進の強化の観点から、若手研究者に着目した事業の推進を図りつつ、その際、若手研究者と経験を積んだ研究者や産業界などの情報交換の促進を継続的に進めていく。

本検討会において、官民の投資を促進し、脱炭素技術の大規模な社会導入を実現するため、脱炭素社会の実現に向けて、社会が求める技術の実用化・ポテンシャルを再評価し、ユーザーからのニーズやボトルネック課題の抽出による見える化、現在検討されている技術による到達可能性・限界を客観的に示してきたところであるが、今後とも、官民が継続して投資すべき技術の精査、その研究開発の進め方の見直しなどを継続的に行っていくことが重要である。

以上

エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会 参加者

(共同議長)

飯田 祐二 経済産業省 産業技術環境局長  
佐伯 浩治 文部科学省 研究開発局長

(有識者委員)

財満 鎮明 名城大学大学院理工学研究科 材料機能工学専攻 教授  
佐々木 一成 九州大学工学研究院 機械工学部門 主幹教授・副学長  
(産学官連携担当)  
関根 泰 早稲田大学理工学術院 先進理工学部 応用化学科 教授  
中岩 勝 (国研)産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 所長  
安井 至 (財)持続性推進機構 理事長  
山地 憲治 (財)地球環境産業技術研究機構 理事・研究所長

(事務局)

渡邊 昇治 経済産業省 大臣官房審議官 (産業技術環境局担当)  
梅北 栄一 経済産業省 産業技術環境局エネルギー・環境イノベーション戦略室長  
染矢 聡 経済産業省 産業技術環境局エネルギー・環境イノベーション戦略室  
産業技術総括調査官 (エネルギー・環境担当)  
横地 洋 文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課長  
渡邊 政嘉 (国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 理事  
土肥 英幸 (国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター  
環境・化学ユニット長  
仁木 栄 (国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター  
再生可能エネルギーユニット長  
矢部 彰 (国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター  
エネルギーシステム・水素ユニット長  
佐藤 順一 (国研)科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
環境・エネルギーユニット 上席フェロー

(関係府省・オブザーバー)

内閣府、環境省