

提言

長期の温室効果ガス大幅排出削減に
向けたイノベーションの加速



令和2年（2020年）5月12日

日 本 学 術 会 議

総合工学委員会

エネルギーと科学技術に関する分科会

この報告は、日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会での審議結果を踏まえ、総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会において取りまとめ公表するものである。

日本学術会議総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会

委員長	鈴置 保雄	(第三部会員)	愛知工業大学工学部教授、名古屋大学名誉教授
副委員長	山地 憲治	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構副理事長・研究所長、東京大学名誉教授
幹 事	秋元 圭吾	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループグループリーダー・主席研究員
幹 事	疇地 宏	(連携会員)	大阪大学レーザー科学研究所名誉教授
	朝倉 薫	(連携会員)	日本電信電話株式会社研究企画部門担当部長
	伊藤 公孝	(連携会員)	自然科学研究機構核融合科学研究所フェロー、中部大学総合工学研究所特任教授、自然科学研究機構名誉教授
	犬竹 正明	(連携会員)	東北大学名誉教授
	岩城智香子	(連携会員)	東芝エネルギーシステムズ株式会社エネルギーシステム技術開発センター原子炉システム・量子応用技術開発部主幹
	大久保泰邦	(連携会員)	一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構技術参与
	北川 尚美	(連携会員)	東北大学大学院工学研究科教授
	小長井 誠	(連携会員)	東京都市大学総合研究所特任教授、東京工業大学名誉教授
	近藤 駿介	(連携会員)	原子力発電環境整備機構理事長、東京大学名誉教授
	齋藤 公児	(連携会員)	日本製鉄株式会社技術開発本部フェロー
	笹尾真実子	(連携会員)	東北大学名誉教授、同志社大学研究開発推進機構嘱託研究員
	高田 保之	(連携会員)	九州大学大学院工学研究院機械工学部門教授
	柘植 綾夫	(連携会員)	公益社団法人日本工学会顧問・元会長
	日高 邦彦	(連携会員)	東京電機大学大学院工学研究科特別専任教授、東京大学名誉教授
	藤田 修	(連携会員)	北海道大学大学院工学研究院教授
	三間 罔興	(連携会員)	大阪大学名誉教授、学校法人光産業創成大学院大学特任教授
	宮崎久美子	(連携会員)	東京工業大学環境・社会理工学院イノベーション科学系教授、放送大学客員教授
	門出 政則	(連携会員)	佐賀大学名誉教授、佐賀大学海洋エネルギー研究センター特任教授

矢川 元基	(連携会員)	公益財団法人原子力安全研究協会会長、東京大学名誉教授
和田 元	(連携会員)	同志社大学理工学部教授
藤岡 恵子	(特任連携会員)	株式会社ファンクショナル・フルイッド代表取締役

地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会

委員長	秋元 圭吾	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構システム研究グループグループリーダー・主席研究員
幹 事	江守 正多	(連携会員)	国立環境研究所地球環境研究センター気候変動リスク評価研究室室長
幹 事	杉山 大志		一般財団法人キャノングローバル戦略研究所研究主幹
	秋葉 澄伯	(第二部会員)	鹿児島大学大学院歯学総合研究科疫学・予防医学教授
	鈴置 保雄	(第三部会員)	愛知工業大学工学部教授、名古屋大学名誉教授
	近藤 駿介	(連携会員)	原子力発電環境整備機構理事長、東京大学名誉教授
	齋藤 公児	(連携会員)	日本製鉄株式会社技術開発本部フェロー
	山地 憲治	(連携会員)	公益財団法人地球環境産業技術研究機構副理事長・研究所長、東京大学名誉教授
	木村 宰		一般財団法人電力中央研究所上席研究員
	小宮山涼一		東京大学大学院工学系研究科附属レジリエンス工学研究センター准教授
	中垣 隆雄		早稲田大学理工学術院創造理工学部総合機械工学科教授
	中山寿美枝		電源開発株式会社経営企画部審議役

本提言の作成に当たっては、以下の職員が事務を担当した。

犬塚 隆志	参事官 (審議第二担当)
五十嵐 久留美	参事官 (審議第二担当) 付参事官補佐
柳原 情子	参事官 (審議第二担当) 付審議専門職

要 旨

1 背景

2015 年に 2020 年以降の気候変動対応の国際枠組みである「パリ協定」が合意され 2016 年に発効した。パリ協定では、長期目標として「世界的な平均気温上昇を産業革命前に比べて 2℃より十分低く保つと共に、1.5℃に抑える努力を追求する。」とされた。そのため、世界の温室効果ガスの排出量は今世紀後半に実質ゼロが目標とされた。また、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）1.5℃特別報告書は、1.5℃上昇を抑えるには、2050 年頃に世界の CO₂ 排出量を正味でほぼゼロにすることが必要とした。IPCC 第 5 次評価報告書では、CO₂ の累積排出量と気温上昇との間には線形に近い関係が見られることが示されている。気温を安定化させようとするれば、気温上昇の水準に依らず、その時点では世界の正味 CO₂ 排出量をほぼゼロにする必要があり、長期的には実質ゼロ排出（脱炭素化）が求められている。一方で、世界気温は上昇し続けており、世界の温室効果ガス排出量の上昇も止まっていない。効果的な排出削減の推進のためには、世界排出量が減らない現在の構造をより良く理解しなければならない。温暖化問題の本質上、世界すべての国による排出削減への協調が重要であり、その追求は必要である。しかし、IPCC など多くの分析からは、2℃目標、1.5℃目標や実質ゼロ排出実現のためには、極めて大きな削減費用が必要とされている。世界全体が参加する協調体制の確立には大きな困難が伴うことを認識する必要がある。

日本政府は、2019 年に「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を策定した。ここでは、「最終到達地点として『脱炭素社会』を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指す」とした上で、非連続なイノベーション等を推進し、環境と経済の好循環を実現するとした。また、第 5 次エネルギー基本計画に沿って、環境性及び安全性、エネルギー安全保障・安定供給、経済性（S+3E）、SDGs 達成を目指す方針が示された。気候変動対策は喫緊の課題ではあるが、気候変動対応を持続可能なものとするためには、S+3E や SDGs の同時達成が不可欠であり、そのためにはイノベーションが必要という認識に基づいた戦略を示している。これらは、IPCC がとりまとめている排出削減費用見通しや、気候変動をめぐる国際情勢の現実を踏まえると、妥当な戦略と考えられる。

いくつかの望ましい技術進展、社会変化も見られている。気候変動問題の重要性への認識は、国内外で徐々に高まっている。また、太陽光発電のコスト低減は大きく進展した。半導体デバイスのコスト低減は一層進み、安価に大量のデータを保存し扱えるようになってきている。また、コンピュータの高速化も引き続き進み、高速な情報処理が可能となってきた。このような技術進展と社会変化の芽が、新たな結合を生み出し、大きな技術、社会イノベーションを生み出す可能性も出てきている。このような新たな技術革新の芽を気候変動対策に結び付けていくことが必要であり、以下のように提言する。

2 提言

この背景を踏まえて、エネルギー及び気候変動対策を効果的に推進するため、とりわけエネルギー、気候変動、科学技術政策を所管する行政機関（内閣官房、総合科学技術・イノベーション会議、経済産業省、環境省、文部科学省等）には以下の対応が求められる。

提言 1 安定的なエネルギー及び気候変動政策の確立 脱炭素化に向けて大きな投資が必

要な中、安定的なエネルギー及び気候変動政策の確立が重要である。不安定な政策は投資を難しくする。エネルギー基本計画には状況を踏まえた変化が必要ではあるが、骨格であるS+3Eのバランスを踏まえたエネルギーとする方針は今後も安定的に維持すべきである。

提言2 低炭素、脱炭素を実現するエネルギーインフラ投資の予見性の向上 低炭素化、脱炭素化対策は、基本的に設備費が高いことが一般的である。電力自由化の下では、初期設備費が小さく、短期的に投資回収が可能な投資に向かいやすい。また、再生可能エネルギー（再エネ）の拡大のためにも、電力ネットワークへの投資が必要であるが、これも電力自由化の下では大規模な投資が難しい状況にある。そのため、発電、送配電ともに、投資予見性を高める料金回収の制度など、エネルギーインフラ事業者に投資のインセンティブを与える制度の再構築を行うべきである。

提言3 電力化率向上と電源の低炭素化、脱炭素化の加速、再エネの課題認識と取組 脱炭素化のためには、電力化率向上と電源の脱炭素化（再エネ、二酸化炭素回収利用・貯留など）が求められる。再エネの拡大においては、電力需給の調整力確保と偏在する再エネを経済効率的に送電する系統制約の克服が大きな課題となってきた。電力需要側技術を制御するバーチャルパワープラント、デマンド・レスポンスといったビジネスモデルが、IT技術を活用しながら課題の一部を解決できる可能性もある。こうした新たなビジネスモデルが適切に展開できるよう、提供される価値に見合った報酬が得られるように制度の再構築を進めるべきである。ただ現在見通せる範囲では、再エネに電力の大部分を依存するシステムは難しく、エネルギー需給両面での広範なイノベーションが不可欠である。

提言4 基礎的な研究に重きをおいたイノベーションの誘発 気候変動緩和策が進まない根本的な理由は、費用が低廉で大きな排出削減を実現できる技術が乏しいためと考えられる。回り道のように思えるかもしれないが、基礎的な研究を充実させながら広範なイノベーションを誘発することが必要である。特に、ICT、AI、IoT等の情報技術、デジタル技術、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー等は、幅広い社会イノベーションを誘発できる可能性がある。例えば、IoT、AI、ビッグデータ等の進展により完全自動運転車が実現すれば、シェアリング経済が誘発される。必要な自動車台数は減少し、それに伴って素材生産量も減り、結果、製品の製造やサービス提供において消費されるエネルギーも減少する。更に、自動車の稼働率が上昇することで、電気自動車などが初期費用が高くても経済合理的になりやすく、導入が促進され、CO₂排出削減に大きく貢献する可能性がある。

提言5 長期的な視点を踏まえた費用対効果の検証と基礎研究の充実 非連続的なイノベーションを誘発するために政府の支援が必要であるが、予算は限られており、費用対効果の検証を的確に進めながら支援し、効率化を図った分で、短期的には評価が難しい基礎的な研究にも研究資金の厚みを増すことは、気候変動対策の視点からも重要と考えられる。

技術イノベーションの芽は生まれつつある。それを進展させ、更に部門横断的に波及させ、社会イノベーションまで昇華しなければ、大きな排出削減にはつながらない。行政機関のみならず、産業界、消費者、学术界等すべてが、変革を求められていることを共通的に理解して取り組むことが求められている。早急かつ強力に取り組むべきである。

目 次

1	はじめに.....	1
(1)	エネルギー政策及び気候変動政策等の動向.....	1
(2)	気候変動対応の状況と構造的課題.....	2
(3)	本提言の構成.....	4
2	再生可能エネルギーの導入進展と主力化への課題.....	5
(1)	再生可能エネルギーのコストと普及の動向.....	5
(2)	VRE 大量導入における系統安定化の課題と対応方策	6
3	エネルギーシステム投資の過小化の課題に対する取組.....	8
(1)	エネルギーシステム改革と電源・送配電インフラの投資過小化の課題.....	8
(2)	イノベーション誘発のエネルギーインフラ構築に向けた投資予見性の向上..	10
4	エネルギー及び気候変動対策のイノベーション.....	11
(1)	SDGs 同時達成のための低廉かつ低炭素なエネルギーの重要性	11
(2)	汎用目的技術(GPT)のイノベーションの重要性.....	12
(3)	技術・社会イノベーションの可能性と効果.....	12
(4)	データ利用、データ接続、制度の改善によるイノベーション誘発.....	16
5	エネルギーと気候変動政策の費用対効果の見える化の一層の推進と基礎研究の 充実.....	17
6	まとめ.....	18
	＜略語一覧＞.....	21
	＜用語の説明＞.....	22
	＜参考文献＞.....	26
	＜参考資料1＞審議経過.....	33
	＜参考資料2＞シンポジウム開催.....	35
	＜付録図表＞.....	36

1 はじめに

(1) エネルギー政策及び気候変動政策等の動向

2015 年 12 月、国際連合気候変動枠組条約（UNFCCC）*の第 21 回締約国会議（COP21）において、2020 年以降の気候変動対応の国際枠組みであるパリ協定*[1]が合意され、2016 年 11 月に発効した。パリ協定では、長期気温目標として「世界的な平均気温上昇を産業革命前に比べて 2℃より十分低く保つと共に、1.5℃に抑える努力を追求する。」とされた。そのため、「長期目標を達成するよう、世界の温室効果ガス*の排出量が最大に達する時期をできる限り早くするものとし、その後、迅速な削減に取り組み、今世紀後半には、温室効果ガスについて人為的起源排出と吸収源による除去量との間の均衡を達成する。」ともされた。COP21 の招請を受け、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）*は、1.5℃特別報告書を作成し、2018 年 9 月に公表した[2]。そこでは、1.5℃上昇に抑えるには、2050 年頃に世界の CO₂ 排出量を正味でほぼゼロにする必要性が指摘された。また、IPCC 第 5 次評価報告書 [3]の評価では、CO₂ の累積排出量と気温上昇との間には線形に近い関係が見られることが示されている（付図 1）。すなわち、気温を安定化させようとするれば、気温上昇の水準に依らず、その時点では世界の正味 CO₂ 排出量をほぼゼロにする必要がある。そして、2019 年 9 月に開催された国連気候行動サミットでは、66 カ国・地域が 2050 年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにすると約束するなど、実質ゼロ排出（脱炭素化）への動きが加速している[4]。

また、16 歳（2019 年 9 月時点）のスウェーデンの環境活動家グレタ・トゥンベリ氏が 2018 年 8 月に始めた、強力な気候変動対応の行動を求める「学校ストライキ」は、世界的に広がった。国連気候行動サミット前後には、世界 185 カ国以上で若者を中心に約 760 万人がデモ行進をしたとされる[5]。2019 年 12 月 3 日時点で、1219 の地方政府・自治体（住民総数は約 7 億 9800 万人）が気候非常事態宣言を行うなど、気候変動危機への懸念も広がっている[6]。また、日本学術会議も、国連気候行動サミット開催にあわせ、会長談話として「『地球温暖化』への取組に関する緊急メッセージ」を発出した[7]。

一方、2030 年頃の自国の排出削減目標として各国が提出している国別貢献 NDCs（Nationally Determined Contributions）を積み上げても、2℃目標とは大きなギャップが存在するとされており[8]、パリ協定の長期目標達成の道筋は不透明である。更には、米国トランプ政権は、2019 年 11 月にパリ協定から正式に離脱通告するなど、国際的な取組は一枚岩とは言えない状況である。2019 年 6 月に開催された G20 大阪サミットでも、気候変動対応について、米国政府はパリ協定を前提とした取組の方針に反対をし、首脳による合意文書は米国の主張を追加する形でまとめられた。COP24 では「Just Transition Declaration（公正な移行のための宣言）」[9]が打ち出されるなど、適切な雇用の移行、そのための十分な議論の必要性も国際的に認識されてきている。

日本政府は、2018 年 7 月に 5 次エネルギー基本計画*[10]を閣議決定した。そこでは、2050 年に向けて、野心的な目標（80%削減、そしてさらには脱炭素化を目指す）とした

* 以降、「用語の解説」があることを示す。

上で、多くの不確実性に対応して、「複線シナリオ」で対応していくとする指針を示した。そして、G20 大阪サミット前の 2019 年 6 月には、パリ合意において 2020 年までの提出を求められている「長期低炭素発展戦略」（以下、「長期戦略」と記載）として、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」を策定[11]し、UNFCCC 事務局に提出した。そこでは、「最終到達地点として『脱炭素社会』を掲げ、それを野心的に今世紀後半のできるだけ早期に実現することを目指す」とした上で、非連続なイノベーション等を推進し、環境と経済の好循環を実現するとした。また、第 5 次エネルギー基本計画に沿って、環境性及び安全性、エネルギー安全保障・安定供給、経済性（S+3E）、SDGs 達成を目指す方針が示された。気候変動対策は、喫緊の課題ではあるが、気候変動対応を持続可能なものとするためには、S+3E や SDGs の同時達成が不可欠であり、そのためにはイノベーションが必要という認識に基づいた戦略を示している。

金融機関における ESG 投資（環境（Environment）・社会（Social）・ガバナンス（Governance）要素も考慮した投資）の動きも活発になっている。2006 年に国際連合の責任投資原則の中で提唱された後、注目を集めてきた投資手法であり、近年、特に SDGs、気候変動対策の文脈で活発化してきている。2018 年における世界全体での ESG 投資は 2012 年と比べて約 2,000 兆円増加し、国内の ESG 投資も 2016 年から 2018 年にかけて 4 倍以上増加している[11]。そのような中で、先進国を中心に化石燃料への投資を控えるなどの動きが強まってきている。また、ESG 投資等を促進するため、気候関連財務情報開示タスクフォース（TCFD）において気候変動に関する企業の対応の情報開示の仕方が提示され、それに沿って企業情報を開示する動きも進んできている。この動きは、事実上の CO₂ 排出の外部費用の内部化を促すという考え方に基づくものであるが、先進国から途上国の金融機関等による投資へとつけ変わって、世界の金融機関間で移転する結果、漏れになる可能性もある。例えば、欧州中央銀行（ECB）理事会メンバーであるドイツ連邦銀行総裁が、ECB が気候変動問題への取組で明確な役割を担うのは政策運営上、負担が重すぎるし、ECB の独立性や中立性を脅かす、環境目標の達成は、銀行を利用するのではなく、政治的に実現すべきであると指摘している[12]。

（2）気候変動対応の状況と構造的課題

IPCC 1.5℃特別報告書[2]によれば、世界平均気温は産業革命以前に比べて既に約 1℃上昇しており、このままのペースでは、2040 年前後に 1.5℃に達する推計されている。また、IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書 [13]は、高排出シナリオにおいては、海面水位は年間数センチを超える速度で上昇し、その結果今後数世紀にわたって数メートル上昇すると予測されるとした。そして、世界気象機関（WMO）は、2019 年の世界気温は過去 2 番目か 3 番目になると推計し、また、過去 5 年（2015～19 年）、過去 10 年（2010～19 年）の平均は過去最高となることが確実と報告している[14]。

現在のエネルギー消費や CO₂ 排出の現状をよく理解することが今後の効果的な対策を考える上で重要である。世界の CO₂ 排出量は、2013-16 年にかけて、世界 GDP は上昇したにも関わらず、ほぼ横ばいであった（付図 2）[15]。再生可能エネルギー政策が功を奏

したためとの評価も聞かれた。しかし実際には、2010-13 年頃に中国を中心に鉄鋼などの CO₂ 原単位の高い製品の生産が増し世界 CO₂ 排出量が大きく上昇し、そして 2013 年以降にその反動で生産調整がなされた効果が大きく寄与して、世界の排出が横ばいになった[16]。米国のシェールガスは、経済合理的に石炭からガスへシフトし、CO₂ 排出の低減に大きく貢献した。これらの効果に比べると再エネは相対的に排出削減への効果は小さいと見られる。また、高価な再エネを政策的な措置により普及させている場合は、導入時点では投資増大によって GDP を押し上げる効果があるが、長期的には電力料金の引き上げや補助金の負担などによって、GDP を押し下げる可能性が高く、その正味の効果は長期で見る必要がある。2016 年頃までは世界の CO₂ 排出量は横ばい傾向だったが、2017 年以降、再び増大に転じている（付図 2）。2017 年以降も再エネの導入量は大きく伸びたにも関わらず、中国の鉄鋼生産量が回復した効果によるものである [17][18]。そして、世界の取組にも関わらず、2018 年の世界排出量も過去最大となった[19]。効果的な対策のためには、世界排出量が減らない構造をより良く理解しなければならない。

一部の先進国では、GDP は上昇しているものの、CO₂ 排出量や電力消費量等は低下し、デカップリングの傾向も見られている[18]。しかし、世界全体では CO₂ が大きく減る構造になっていない。特に電力消費については、世界 GDP と世界電力消費量の関係を見ると、明確に強力な正の相関関係が続いている（付図 3）[20]。先進国を中心にエネルギー多消費産業が海外移転し、かわりにサービス業などのエネルギー寡消費産業にシフトしている傾向がある[18]。鉄鋼、化学などエネルギー多消費な製品は、自国外からの輸入を増大し、見掛け上のみ CO₂ 排出が減少している傾向が見られる。CO₂ を製品等の消費地側で計上する消費ベース CO₂ 排出量（製品等を製造する際に化石燃料を燃焼した生産地で計上する、通常使われている CO₂ 排出量は、生産ベース CO₂ 排出量と呼ぶ）で計測すると、2011 年以降のしばらくの間の福島第一原子力発電所事故に伴う原子力発電所の停止による日本の CO₂ 排出増の期間を除けば、多くの先進国は同じようなペースでしか CO₂ 原単位改善が進んでいない（付図 4）[21][22]。消費構造は多くの先進国で大きな差異はなく、エネルギー多消費産業の配置が先進国から途上国へとシフトしている影響が大きく、世界全体の CO₂ が大きく減る構造になっていないことがわかる。

つまり、世界全体で CO₂ 排出量を低減させるには、エネルギー多消費産業の製造段階での CO₂ 排出量を直接的に抑制しようとしても、製造地が国家間で移転しやすく、世界全体での抑制効果が極めて乏しいことが理解できる。よって、世界全体での協調が大変重要となる。しかしながら、世界全体での真の協調が本当に現実として機能するののかという疑問がある。たしかにパリ協定は発効したが、国別貢献 NDCs の排出削減を実現するための限界削減費用*には国によって大きな差異が見られる（付図 5）[23]。ほとんど排出削減努力無し、即ち限界削減費用ゼロで排出削減目標が達成できると見られる国も散見される。これは、米国トランプ政権がパリ協定から離脱する理由の一つにもされている。2018 年の COP24 では、パリ協定運用のルールブックも概ね合意されたが、決定されたルールブックにおける運用方法からして、各国の国別貢献 NDCs の排出削減を調整し、限界削減費用に大きな差異が生じないように、修正していくようなメカニズムは事実上存

在していない。更には、米国はパリ協定から離脱を通告している。限界削減費用の差異が大きいと、エネルギー多消費産業を中心に、国際競争力の潜在的な歪みが生じ、限界削減費用の高い国から低い国へとエネルギー多消費産業が移転しやすくなり、世界全体での排出削減効果が乏しくなる恐れがある。UNFCCC 外の枠組みなども活用し、排出削減努力が乏しいと見られる目標を提出した国に対して一層の排出削減を促していくことは必要である。ただ、それが実効ある形で実現可能かは、懐疑的に見ておくべきだろう。

そもそも、IPCC 第3作業部会第5次評価報告書[24]も1.5℃特別報告書[2]も、2℃や1.5℃、正味ゼロ排出を達成するには、技術の漸進的な進展を想定し、さらに世界のCO₂限界削減費用が均等化し費用最小となる状況を想定したとしても、相当大きな削減費用が必要としている。例えば1.5℃報告書では、2050年に2℃目標のうち排出高位の場合でも45～1050 US\$/tCO₂(中央値130 US\$/tCO₂程度)、1.5℃未満では245～14300 US\$/tCO₂(同2800 US\$/tCO₂程度)としている。産業の国際競争力に生じる歪みなどを踏まえると、現実的に世界の対策として機能する費用水準とは考えられない。このような状況では、「長期戦略」でも強調されているイノベーションの役割は大変大きいと考えられる。

一方、エネルギー供給をめぐるのは、2019年6月には、日本の海運会社が用船したタンカーがホルムズ海峡周辺で攻撃を受けて炎上するなど、中東は不安定化しており、石油、LNGの供給のリスクが高まっている可能性がある。気候変動対応に偏ることなく、エネルギー安全保障にも適切に配慮したエネルギー戦略が一層求められている。

いくつかの望ましい進展も見られている。気候変動問題の重要性への認識は、国内外で徐々に高まっている[25]。また、太陽光発電のコスト低減は大きく進展した(付図6)[26]。半導体デバイスのコスト低減は一層進み、安価に大量のデータを保存し扱えるようになってきている。また、コンピュータの高速化も引き続き進んでおり、量子コンピュータ実現の可能性も高まってきており、一層、大量のデータを高速に演算できるようになると見られる。このような技術進展と社会変化の芽が、新たな結合を生み出し、大きな技術、社会イノベーションを生み出す可能性も出てきている。

(3) 本提言の構成

本提言¹では、以上のような認識の下、長期の温室効果ガス排出大幅削減のためには、費用が低廉なエネルギー対策が必須であり、そしてその実現のためには、とりわけ非連続なイノベーションが必要であると指摘する。そして、技術だけではなく、社会イノベーションの誘発が求められ、そのために、何に留意すべきかを提言するものである。

本提言の構成は以下のとおりである。脱炭素化が求められており、電力の脱炭素化のみならず、最終エネルギー消費における広範な熱利用の脱炭素化も必要であるが、本提言では、第2章において、電源の脱炭素化において特に重要と考えられる再生可能エネルギーの拡大について様々な課題もあることを指摘した。その上で、変動性再生可能エ

¹ 本提言は、日本学術会議 総合工学委員会 エネルギーと科学技術に関する分科会や同地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会での議論、令和元年6月6日にエネルギーと科学技術に関する分科会が主催して開催した公開シンポジウム「長期の温室効果ガス大幅排出削減に向けたイノベーションの役割と課題」における議論も踏まえて作成した。

エネルギー（VRE）を系統の安定性を保ちながら導入拡大を図るイノベーションの誘発が、取り組むべき大きな課題であることを指摘した。第3章では、低炭素化、脱炭素化に向けた投資の促進が必要だが、電力システム改革*の下ではむしろ逆行の可能性がある、投資の予見性向上のための政策が必要なことを指摘した。第4章では、これまで温暖化対策技術に過度に注目してきたが、直接的な対策にのみ注目するのは効果的でなく、広範な技術・科学の進展を目指すことが必要なことと、情報、材料、バイオ技術など、イノベーションが温暖化対策につながるような芽は出てきていることも指摘した。これら広範な技術イノベーションによって安価な対策が実現することで、CO₂排出削減と共にSDGsの同時達成にも寄与することが期待される。第5章では、リソースには限りがあり、特に目先の費用対効果の低い温暖化対策を取り過ぎれば、長期のイノベーションにつながる対応に資金が回らなくなることにより留意し、政策の費用対効果に目を配りながら、より基礎的な分野も含め幅広いバランスのとれた研究開発投資配分を行うことが重要であることを指摘した。第6章では提言をとりまとめた。

2 再生可能エネルギーの導入進展と主力化への課題

気候変動対策として脱炭素化が求められてきており、その最も重要なオプションの一つとして再生可能エネルギー（再エネ）が挙げられる。エネルギー最終消費を電力と非電力に区分すると、電力は非化石電源、つまり再エネ、原子力等の割合を高めていくことにより低炭素化できる。理論的には、100%非化石電源として、非電力のエネルギー消費を電力に変える、つまり電化すれば完全に脱炭素化することは可能である。ただし、特に原子力は社会的側面での課題は多く、気候変動対応以外の側面を十分に踏まえた対応が必要である[27]。再エネは、特に近年、世界的に風力と太陽光の導入拡大が進むとともに、比較的低温の熱需要やモビリティを中心とした電化と再エネ増大による電源の低炭素化が並行して実際に進んでおり期待が高い。世界で新設された年間の発電設備容量は、2015年に再エネ計で火力発電合計を上回り、2017年には太陽光と風力だけでも火力発電合計を上回った（付図7）[28]。再エネの中でも、変動性再生可能エネルギー（VRE）と呼ばれる太陽光と風力がその大半を占めており、低炭素化に向けた政策支援と継続的な導入コスト低下による経済性向上が両輪となって世界的なVRE導入進展を押し進めている。

(1) 再生可能エネルギーのコストと普及の動向

国内外で再エネ、特に風力発電と太陽光発電のコスト低減が急激に進んでいる（付図6）[26]。世界平均値で見ると、陸上風力発電の均等化発電原価（LCOE）は、2010年の0.085 US\$/kWhから2018年には0.056 US\$/kWhへと35%低下した。要因としては、技術開発により高効率かつ大型の風車が可能になったことで、利用率及び1基あたりの発電電力量が増加したこと、ウィンドファームが大規模化して建設コストの効率化が図られたこと、などが挙げられる。太陽光発電については、大規模設備の均等化発電原価の世界平均値が2010年0.37 US\$/kWhから2018年の9年間で0.09 US\$/kWhへと77%低下した。要因として、大量生産による生産コストの低下、入札による価格競争の影響などが

挙げられる。しかしコスト低下には地域差が見られる。太陽光発電の設置費用は世界平均で2010年の4,621 US\$/kWから2018年には1,210 US\$/kWへと74%、前年比で13%低下している。しかし、日本では2018年の太陽光発電の設置費用は世界最高レベルの2,101 US\$/kWで、これは前年比3%の低下に留まる。2018年の設置費用が最も低いのはインドで、前年比27%ダウンの793 US\$/kWを記録した[26]。

費用低減が進む一方で、各国で再エネへの政策支援が継続しているのは、一部の国、一部の条件の良い地点で、再エネは既存火力よりも費用効率的となっていて、多くの国、多くの地点においては、未だ完全に経済自立的とまではなっていないためである。そして、気候変動対策としてエネルギーの低炭素化・脱炭素化が求められており、再エネはその重要な手段だからである。世界の年間の一次エネルギー需要に占める再エネの割合は2000年の13%から2017年には15%へ、発電電力量に占める割合は2000年の19%から2017年には25%へと増加している。しかしながら、パリ協定の長期目標の達成に向けたエネルギーの低炭素化のためには、更に再エネの導入を大幅に拡大する必要がある。国際エネルギー機関(IEA)による代表的な低炭素シナリオでは、再エネの発電電力量は持続可能シナリオSDS(2°Cシナリオ)で2040年66%と想定し[28]、国際再生可能エネルギー機関(IRENA)はREmap(well below 2°Cシナリオ)で2040年に75%、2050年に86%と想定している[29]。即ち、これらシナリオの実現には、現状の再エネ電力割合25%を20年間で約70%へと増加させ、30年間で約90%にする必要があるとしている。非電力エネルギーの低炭素化は、電化が有効だが、輸送及び産業の高温熱需要など、電化が容易でない分野もある。輸送においては、電化が難しいトラック、航空、船舶のバイオマス燃料利用など再エネ直接利用と再エネ由来水素利用の強化が、産業用熱需要においては再エネ由来水素の利用などが鍵となる。

なお、VREを大きく導入拡大すると、カニバリゼーション(共食い)効果*が生じ、大量導入時には、太陽光の導入が増えるに従って、発電時間帯における電力価値が低下する。よって、太陽光発電コストが安価になったとしても、導入拡大によって価値が低下していくので、あるところで導入のインセンティブがなくなってしまう。それを越えて導入インセンティブが生じるためには、電力貯蔵も加えた費用で、電力市場価値を下回ることが必要となってくる。電力貯蔵の技術開発等は重要と考えられる。

ただし、再エネ電源の導入拡大にあたっては、環境調和、環境保全に配慮することが必要である。世界的に、太陽光発電の大規模開発に伴う自然や生態系の破壊、風力発電開発に伴うバードストライクや低周波音の問題、景観への懸念、バイオマス発電における輸入パーム油の持続可能性の懸念などが指摘されている。また、日本国内では、台風の際に太陽光発電設備が災害被害を誘発するなどの問題も起きている。これらの問題に十分配慮して、対処する必要がある。

(2) VRE 大量導入における系統安定化の課題と対応方策

電力系統を安定的に運用するためには、需要と供給をバランスさせることが必須であるが、太陽光と風力の設備増加に従って「変動性と柔軟性」というもう一つのバランス

の重要性も顕在化してくる。VRE である太陽光と風力は天気や時間により出力が変動するので、VRE が大量に電力系統に連系される場合、その変動性、間歇性を調整するために、「柔軟性」（調整力）が必要である。系統での VRE 接続量に応じて、短周期から季節間といった長周期の変動に対応するための柔軟性が求められる。柔軟性を提供するのには、系統連系、制御可能な発電設備、揚水やバッテリーといった貯蔵設備、応答性のある需要の4種類である。電力需要にも変動性、不確実性があることから柔軟性が必要であり、電力需要と VRE が必要とする柔軟性を、柔軟性資源が提供することで、安定的な電力需給が行われる。2017 年に世界の電力システムに提供された柔軟性の約 60%は火力発電、約 30%は水力発電であり、その多くを火力発電に依存している[28]。

需要と VRE の変動性に対して提供可能な柔軟性が不足する場合は、VRE を抑制して柔軟性の必要量を調整することになる。電力系統に占める VRE の割合が大きくなるに従って VRE 発電量が増加する分、火力発電の発電量が減らされるが、それによって提供できる柔軟性も減少するため、VRE 抑制の割合が増加する、という現象が起こる。コスト効率的な VRE 導入拡大のためには、全ての柔軟性資源を余すことなく活用して VRE 抑制を最小化する必要がある、そのためには柔軟性に価値を認めて対価を支払うような制度設計や市場メカニズムが不可欠である。特に、VRE が再エネ固定価格買取制度（FIT）で優遇されている場合は、電力市場の需給において VRE の分だけ供給費用曲線がスライドして限界費用が低下し、火力発電所は電力（kWh）販売量も減少する。VRE の導入量で先行するドイツなどでは、従来ベースロード電源として最大負荷一定運転をしていた火力発電所までもが、VRE の変動に合わせて変動的な発電を要求され、発電電力量が減るだけでなく、部分負荷運転や起動停止により発電効率も低下している。柔軟性（ ΔkW ）に価値をつけて取引できるようにすることで、火力発電所には新たな収入源として柔軟性を最大限提供するインセンティブが生まれる[30]。また現状、VRE の多くは非同期電源である一方、電力系統では火力など同期発電機が供給する慣性により系統安定度が維持されている。そのため、VRE の普及拡大が一層進展すれば、系統故障時などの状況下において、系統安定度の維持に問題が発生する可能性も認識する必要がある。

VRE の特徴の一つとして、小規模で分散している点がある。日本国内に FIT 電源として運転中の太陽光発電は 2019 年月末時点で 10kW 未満の住宅用が約 260 万件で合計約 1100 万 kW、10kW 以上の非住宅用が約 60 万件で合計約 4000 万 kW である。平均の設備出力は、住宅用を含めると約 16kW、住宅用を除いても約 66kW である[31]。連系された数百件程度の数十万～百万 kW レベルの発電所を制御して系統運用していた時と比べて、規模は 1/1000 以下、数は 1000 倍以上の制御不能な発電所が追加的に連系されているため、系統を安定的に運用することは当然のことながら難しくなっている。

このように分散した数多くの VRE をとりまとめて（「アグリゲート」して）、需要側や系統に接続されたリソースと共に、それらを遠隔制御し 1つの発電所のように電力供給と調整機能を提供するバーチャルパワープラント（VPP）という活用方法がある。能動的な需要をアグリゲートしたディマンド・レスポンス（DR）は調整機能を提供することができ、特に電気自動車のバッテリーの活用が期待されている。レジリエンスの観点か

ら、地域の VRE と貯蔵、自営線及び系統配電線を活用することで、災害時などの大規模停電時にも地域のエネルギー安定供給を可能にする活用方法もある[31][32]。

日本国内では、VRE 導入が進むにつれ、調整力の確保に加えて系統制約の克服が大きな課題となってきた。小規模で分散しているという VRE の特徴に加えて、地域的な VRE 導入の進捗が電力需要及び系統の規模と一致しておらず、一部の電力系統では系統制約が顕在化しているためである。これらに関しては、電力広域的運営推進機関が専門の委員会を設置して課題抽出と検討を行い、対策について中間整理を行って取組を開始している。前者に関しては、広域的かつ柔軟な調整、調整力の低炭素化を方向性として、地域連系線の更なる活用、火力電源の最低出力の引き下げ、再エネ電源のオンライン制御の拡大、需給調整力市場の創設、を定めて取り組んでいる。後者に関しては、既存系統の徹底利用に向けて、日本版コネクト&マネージ*と呼ばれる新たな系統利用ルールの創設を行うこととしている。さらに、系統増強が必要になる場合には、CO₂削減効果を含む費用便益分析を行って合理性を判断し、費用負担については再エネ促進や CO₂ 削減に伴う便益に応じて全国で負担する方式の導入を進めている。今後は更に、電源コストに加えて電力ネットワークに伴うコストを含めた再エネ電源主力化に伴うトータルコストの削減に向けて、需要側資源の活用など更なるイノベーションが必要である。

また、日本においては合計約 25GW に上る揚水発電所が存在し、再エネの導入拡大において貯蔵と調整力供給の両面で重要な役割を果たす能力を有している。巨大な蓄電池ともいえる揚水発電所の有効活用が、経済効率的な再エネの導入拡大における一つの鍵である。その能力を十分引き出すためには、設備費が非常に大きいという特徴のある揚水発電所の維持運用が可能になるような、その能力に応じた対価を与え得る制度設計が必要である[32-37]。容量市場、需給調整力市場の導入が計画されており、その設計が課題としてあり、貯蔵機能の価値を市場で評価するようなしくみも考えられる。

以上のように、太陽光発電、風力の再エネのコスト低減が進んできているが、VRE としての課題がある。ただし、VPP、DR といったビジネスモデルが、情報通信技術 (ICT) を活用しながら、VRE によって変動する電力供給に対して、電力需要の一部を費用効率的に制御できるようになり、課題の一部を解決できる可能性もある。また、新たなビジネスモデルが適切に展開できるよう、提供される価値に見合った適切な報酬が受け取れるようなインセンティブが生じるように、制度の再構築を進めることが重要である。ただし、現在見通せる範囲では、再エネに電力の大部分を依存するシステムは難しいと考えられ、4章で記述するような様々なイノベーションが求められる。

3 エネルギーシステム投資の過小化の課題に対する取組

(1) エネルギーシステム改革と電源・送配電インフラの投資過小化の課題

日本政府は、電力を中心としながら、ガスも含めたエネルギーシステム改革*を行ってきた（付図 8、9）[38]。ところが、先進国とりわけ電力システム改革を行ってきた諸国国では、電力送配電インフラ、発電インフラの設備更新、新規投資が十分に進まないという課題が顕在化してきている。市場を介した電力取引においては取引価格の変

動が激しいため、発電技術のように長期の視点において長期投資が必要な電源については、本来求められるべき適正な設備容量に対して過小投資になる恐れがある（付図 10 はそのイメージ図[39]）。一般に低炭素化、脱炭素化電源は、設備費単価が高い。将来投資回収の見通しの不確実性が高い場合には、より設備費が安価な電源を選択することが合理的になり、長期間を要するイノベーションの成果を取り組むことが困難になる。温暖化対策のイノベーションの社会実装に向けて、次の(2)項に述べるように長期的なエネルギーシステムへの投資環境を整備する必要がある。

更には、2章の調整力の課題においても触れたが、FIT 制度で太陽光や風力発電等の VRE の導入が促進された場合、FIT 賦課金などの費用が付加されるため、小売電力料金は上昇する。ただし、太陽光、風力発電は、変動費がほぼゼロ、つまり限界費用がゼロであるため、自由化された電力市場ベースの卸取引市場では、価格が低減する。そのため、化石燃料発電は販売電力量と販売価格の双方が低下し、設備費の費用回収が困難になり、発電設備の新設、更新が困難になってきている（付図 11）[40]。これはミッシングマネー問題と言われ、電力会社の経営体力を奪い、新たな大規模投資を難しくしている。

これらの問題に対処するため、海外では容量市場や需給調整市場などの市場整備がなされてきており、日本においても、これら市場の整備が検討されてきている（付図 12）[41]。容量市場では、実際に容量を調達する 4 年前に取引が開始される設計となっている。しかし、通常、電源が建設、運開に至るまでのリードタイムはもっと長い。そのため、計画時には容量市場からの収益が予見しにくく、ファイナンス上もハードルが高くなる。投資リスクが高まれば、コスト上昇要因となってしまう。欧米で導入された容量市場においても、電源が足りなくなり、価格が上昇した場合には、効率が良くなく、短期での導入が可能な小規模なディーゼル発電の導入が見られている[42]。容量市場は、自由化市場において既存の発電設備の廃棄を加速しようとする動きを留める目的には基本的に有効と考えられる一方、新規の設備投資にとって十分な制度とは考えにくい。

また、欧州では排出量取引制度が導入されており、日本は非化石電源価値取引市場の導入を予定している。欧州排出量取引では低炭素化の誘導につながり、日本の非化石電源価値取引市場では脱炭素化の誘導につながるものと考えられる。しかしながら、欧州では、炭素価格変動に応じて、低炭素化電源導入の誘発よりも、既存発電設備で石炭と天然ガスの運用を変化させる行動が多くみられ、必ずしも大きな投資変化につながってきたという評価はなされていない。非化石電源価値取引市場では、市場価格は、FIT 電源の場合は下限価格 1.3 円/kWh（ただし、卒 FIT 電源*、大型水力、原子力発電等の FIT 電源以外の電源は下限価格無し）で、上限価格 4 円/kWh として導入が予定されている[43]。ただし、FIT 電源以外の電源については下限価格の設定もなく、収益には不確実性が高い。そのため、新規の脱炭素電源の投資を促すのに十分ではない可能性も高い。

更には、送配電設備についても、過小投資の懸念が出てきている。送配電部門は、電力自由化後も規制部門として総括原価が認められている（付図 9）。しかしながら、効率化を行えば、託送料金の値下げにつながるため、効率化のインセンティブが乏しい。一方、設備投資の増強を行えば、必要な投資であれば本来託送料金の値上げは認められ

得るが、同時に他の項目の査定が入るため、電気事業者にとって値上げ申請は避けたいというインセンティブも働く。よって、設備増強を躊躇する可能性がある。そのため、送配電部門においても過小な設備投資に陥りやすい。送配電設備の老朽化が進み（付図13）[44]、更新が必要な設備が増大してくることに加え、今後、日本では人口の減少に伴い、地方の過疎化が進展すると見られる。それに応じて、過疎地域における送配電設備の維持、投資回収が難しくなり、その負担が大きくなっていく可能性がある。

これに加えて、昨今、一部、気候変動影響に起因すると見られるような自然災害が増加してきている。そのため、例えば、鉄塔・電柱の技術基準見直し、無電柱化推進、電源車の適切な配備などのレジリエンス強化も必要となってきた。

つまり、電力システム改革によって、無駄の削減といった効率化を進めることは重要なことだが、一方で、短期の効率性が追求された結果、長期的に本来必要と見られる投資が不十分になる事態を避け、低炭素、脱炭素電源そしてレジリエンスの高いエネルギーインフラを構築していくという課題が存在している。これらの状況のため、欧州等でも、市場化を取りやめ、規制化に戻す必要性についても一部で議論が起こっているが、一旦、行った市場化を戻すことも非現実的との議論の方が主流であり、市場を使いながらも、市場ベースの電力システムの欠点をどう補っていくべきかが課題とされている。

(2) イノベーション誘発のエネルギーインフラ構築に向けた投資予見性の向上

例えば、国際エネルギー機関（IEA）の「世界エネルギー展望 2018」[28]によれば、2018-40年の間に必要な累積投資額は、現状政策では約60兆ドルに対して、持続可能シナリオ SDS（2℃シナリオ）では約68兆ドルとなり、8兆ドル程度追加的に必要となるとされている。大幅な排出削減を目指して、より大きなエネルギー投資を行っていくことが求められている。

エネルギーインフラ投資においては、予見性の向上が重要である。投資回収の予見性向上のためには、まず、安定的なエネルギー政策が必要である。エネルギー政策の頻繁な変更は、投資の予見性を低下させる。市場設計は、企業間の競争を促す環境を作り出すことが必要で、市場設計の初期段階では、市場設計を柔軟に見直していくことも必要な一方で、予見性の高い市場にしていくことが必要である。例えば、英国では、「発電事業者が電力価格の変動に長期的に晒されることを防ぎ、投資リスクを減らし、需要家への負担を最小にした上で低炭素発電への投資を呼び込むことを目的とし」[45]で FIT-CfD*制度を導入した。電力ネットワーク投資については我が国でもインセンティブ規制*による託送料金制度の検討が進められている。これは、託送料金の上限のみを設定し、それを上回る効率化に対しては利潤として認めることで送配電事業の効率化のインセンティブを与えるものである。そして同時に、電力ネットワークの強靱化への投資など、必要な投資については料金転嫁を容易な仕組みとすることで、過少投資を回避しようとするものである。このように市場競争を活用しつつ、政策的に投資を誘導できる仕組みの構築が必要である。

このように海外では、発電では FIT-CfD、送配電ではインセンティブ規制などの事例

が既にあるが、市場を用いた効率化と共に、市場でカバーしきれない長期投資を促すことが可能な予見性の高い投資回収のスキームの組み合わせを志向すべきである。さもないければ、長期的に設備の老朽化、過小化が進み、安定的なエネルギー供給と低炭素・脱炭素化の方向性を実現できない可能性がある。イノベーションを生み出すためにも安定性を有する強靱なエネルギーインフラが必要であろう。また、温暖化対策のイノベーションの社会実装を容易にするためにも、発電設備、ネットワーク設備への安定的な投資を可能とする制度設計を急ぐべきである。

4 エネルギー及び気候変動対策のイノベーション

(1) SDGs 同時達成のための低廉かつ低炭素なエネルギーの重要性

国連は2015年に、持続可能な開発目標（SDGs）として2030年までの達成を目指した17の目標を定めた。IPCC第5次報告書[24]では、SDGsの達成において17の目標間でシナジーやトレードオフが存在することをまとめている。気候変動対策（Goal 16）はSDGsの1つの目標であり、やはり他のSDGsとの間にシナジーやトレードオフが存在する。気候変動対策は、例えば省エネを通じてエネルギーアクセスを改善するなど、シナジーを生みながら実施できる場合もある。しかし高価なエネルギーを必要とする場合もある。Goal 7は低廉でクリーンなエネルギーの実現を目指したものであり、気候変動対策としてクリーンなエネルギーは同時達成できるかもしれないが、低廉なエネルギーを同時に達成できない可能性がある。また、エネルギーが非常に高価になれば、貧困の撲滅、飢餓の撲滅、健康の増進など、多くの重要なSDGsの達成が妨げられる可能性もある。

イノベーションによって気候変動対策のコストを下げることは、気候変動対策がSDGsの達成とシナジーを生むために、重要な手段である。日本政府は、技術開発における横断的な取組として、社会実装可能なコストを可能な限り早期に実現し、非連続なイノベーションを創出するため、2020年1月に革新的環境イノベーション戦略*を策定し、革新的技術の2050年までの確立を目指す具体的な行動計画を公表した[46]。国によるコスト等の明確な目標、官民のリソースの最大限投入、投資額を含めた長期にわたるコミット、国内外における技術シーズの発掘や創出、ニーズからの課題設定、革新的なテーマに失敗を恐れず挑戦することへの柔軟な制度による支援、ビジネスにつなげる支援の強化、各事業を一体として推進・フォローアップする体制整備等を含み、技術が実際に事業化し、世界の排出削減に貢献できるようにするとしている[47]。これまで、政府は、2050年の社会が求める技術の需要・ポテンシャルを再評価し（付図14）、脱炭素社会の実現に向けたボトルネック課題を抽出し、「見える化」を図っている。候補となる技術分野として、次世代太陽光発電、次世代地熱発電、革新的原子力、次世代蓄電池、モビリティの電動化・水素化、CO₂ニュートラル燃料、革新的製造プロセス、省エネ、VPP等のエネルギーマネジメント、CCUS*等を挙げている[47]。

このように日本政府もイノベーションの促進を志向しているが、特に近年注目されているのは、情報通信技術（ICT）等の汎用目的技術（GPT）が急速に共進化することによって、経済的に魅力があり、かつCO₂削減にもつながる技術が発達し、やがて大規模な

排出削減が可能になるのではないかと、という視点である。以下にこの点を詳述する。

(2) 汎用目的技術(GPT)のイノベーションの重要性

汎用目的技術(GPT)とは、様々な用途に利用される技術であり、絶対的な概念というよりは、特定の対象に応用される技術に対しての相対的な概念で[48]、蒸気利用技術、電気利用技術、そしてICTはGPTの例とされてきた[49]。更に化学、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー[50]、レーザー[51]等の技術についても、GPTであるとされてきた。

GPTについては、以下のような特徴を有する[51][52]。

- 1) 多くの経済部門で共通して利用されるもので、
- 2) それ自体に長足の技術進歩の可能性があり、かつ、
- 3) 補完的なイノベーションを誘発し、収穫逓増をもたらす技術である。

例えば、太陽光発電のコストは急速に減少してきた(付図5や文献[53]など)が、これは太陽光発電に限ったものではなく、急激なコスト低減は、近年のエネルギー技術に限っても、蓄電池[54]、車載用燃料電池[55]、シェールガス・シェールオイル開発技術[56]等においても見られた。エネルギー技術以外に目を転じれば、AI、センサー、インターネット通信、情報記憶装置、微小電気機械システム等の多くのICTでも急激なコスト低減が観察されている[57][58]。

この同時並行的かつ相互に影響を及ぼし合う技術進歩の根底に存在するダイナミクスを要約するならば、それはICT(AI、IoT等)、ナノテクノロジー、バイオテクノロジーなどの「GPTの共進化」である(OECD[59]はこれらの生産性革命をとりまとめている)。新規の技術は既存の技術の組み合わせで生まれ、技術システムは全体としては複雑系を為し、技術は共進化する。今、これがGPTを中心として加速度的に進んできている。

(3) 技術・社会イノベーションの可能性と効果

GPTは通常は所謂「温暖化対策技術」とは分類されないが、エネルギー効率の向上等を通して、温室効果ガスの削減に大きく寄与し得る[60]。先述のように、太陽光発電やシェールガス技術もGPTであるICTや材料技術の進歩の恩恵を受けている[60]。そして、GPTの活用によって温暖化対策技術のイノベーションが起き、それが社会の在り方そのものも変容させる、いわば「社会イノベーション」も誘発し得る。以下、まず、部門別に具体的なイノベーションの可能性について記述した後、特にGPTの共進による部門横断的なイノベーションの波及と社会イノベーションの可能性について記述する。

① 運輸部門

運輸部門については、自動運転、カーシェア・ライドシェアリング、電気自動車の組み合わせによって、乗用車部門からの温室効果ガス排出削減を大幅に減らすことができる可能性が示されている[61-66]。大幅な排出削減は、自動運転、カーシェア・ライドシェアリング、低炭素の電源を前提とした電化の3つの技術の相乗効果による。これらをつなぐ、コネクティングが加わり、CASE(Connected, Autonomous, Sharing/Service, Electric)がキーワードになってきている。そして、これまでの乗

用車を保有することから、Mobility as a Service (MaaS) へと、新しいビジネスモデルが生まれつつある。自家用車の稼働率は通常低く 5%前後とされている。これら技術の相乗効果で、利便性を大きく損なうことなく、効率よく、低廉にサービスが提供され得る。ただし、利便性の向上によって排出がかえって増大する可能性もあり、大幅な排出削減を可能にするには、リバウンド効果を抑制する適切な政策介入が必要となる[64]。また、気候変動影響被害への懸念の高まりは、欧州を中心に一部において CO₂ 削減を目的に航空機移動を避ける「フライトシェイム」など、モビリティ選択に影響を与えつつある。また、地球環境等に配慮した消費「エシカル消費」の動きも徐々に高まっている。それと革新的な技術変化が結び付いて、大きく社会変化を引き起こす可能性がある。貨物部門についても、ICT の活用による効率向上と物流の最適化、電化等の燃料転換によって、75%の排出削減が可能という推計がある。大型トラックの電化としては、高速道路へ架線を設置し給電するシステムが有望とする試算がある[67]。

ハイテン鋼の活用等による車両の軽量化はこれまでも省エネの重要な柱であった。今後はこれが炭素繊維強化プラスチックなどの素材に置き換わることによって省エネが可能になると見られている。また自動運転技術の進歩により衝突が激減するようになれば、車両の構造を簡素化でき、素材利用の低減に加え、重量が下がり省エネにつながる可能性がある。

② 産業部門

GPT の活用による生産性の向上は、産業部門や民生部門でも同様に起きており、また今後も急速な発展が期待される[59][68][69]。例えば IoT によって工場の操業の効率最適化がなされるようになった[70]。産業用ロボットの導入は自動車、電機産業を中心に進んできたが、今後はより広範な産業への導入が期待されており、これもエネルギー・資源効率の向上に寄与する。既に航空機部品の多くは 3D プリンタと遺伝的アルゴリズムの活用によって生産されるようになり、機体の軽量化による省エネを実現している。3D プリンタは、製造時には電力多消費の場合もあるが、斬新な設計が可能になり軽量化や流体力学的特性の向上によって、使用時のエネルギー消費を減らすことが出来て、ライフサイクルベースでは大幅な排出削減をもたらす[59][71][72]。また、ゲノム情報の蓄積（ビッグデータ）、AI、ゲノム編集技術の結合により、バイオマスから化学品やエタノール等の液体燃料を効率良く製造できるスマートセル（高度に機能がデザインされ、機能の発現が制御された生物細胞）を従来よりも格段に短い時間サイクルで創製する「スマートセルインダストリー」が構築されつつある[73][74]。

③ 農業部門

世界の温室効果ガス排出の約 25～30%は食料システムに関係しているとされており[75]、しかも食料の 3 分の 1 は廃棄されている[76]。この内訳は、フードサプライチェーン全般にわたり、農業によるエネルギー消費や肥料利用、輸送、冷蔵・冷凍、店舗によるエネルギー消費などである。従って、大規模な排出削減を目指すならば、農業部門を避けて通ることはできない。持続可能な開発のための世界経済人会（WBCSD）は、農業のスマート化によって、2030 年までに農業起源の温室効果ガス排出量をベ-

スライン比で 30%以上削減するという目標を掲げている[77]。農業部門では家畜からのメタン排出抑制剤等のバイオテクノロジーや ICT を活用した精密農業によって、コスト低減と排出削減の同時達成が可能になる[78][79]。精密農業では、最適化された肥料・農薬・水の投入によって、エネルギー・資源の利用効率が高まると共に、過剰な肥料投入を避けることで、温室効果ガスの亜酸化窒素の発生も抑制できる [80][81]。更に将来には、藍藻を利用するなどして工場で生産された合成肉によって食肉を代替することで、大幅な温室効果ガス削減が可能とする試算もある[82]。また食品ロスを減らす試みとしては、気象予測やビッグデータを用いた需要予測の高度化、IoT による需給マッチングなどが進展してきている[83]。

④ 民生部門

照明や空調のスマート化による省エネは既に図られている。e-コマースによって、既に物流の効率が向上し CO₂削減に寄与し得る [84]。その他、オフィス、学校、ホテル、卸売り、小売り、病院などでも ICT の活用によって大幅な CO₂削減ポテンシャルがある[85]。現在、照明は LED が普及し、ディスプレイは液晶パネルが主力で、省エネルギーに優れているが、レーザー照明が主力になることで、更に大幅な効率改善が期待できる。例えば、レーザーによって直接網膜に画像を書き込む技術はすでに試作品が出来ている。目をレンズとして使わなくて済むため、視力の弱くなった人の医療用途としてまずは考えられているが、バーチャルリアリティなどで極限の没入感を生み出すことが出来る可能性もあり、ディスプレイを代替する可能性もある。微小電気機械システムで半導体レーザーを制御することで、コストも安価になり大きく普及する可能性もある。そして、優れたバーチャルリアリティはテレワーク等を促し、運輸、建物などのエネルギー低減にもつながる可能性がある。

⑤ エネルギー供給部門

太陽光発電のコストは急激に下がり、アラブ首長国連邦では3セント/kWh という入札価格が実現した ([53] など)。また携帯機器用途の技術開発によって蓄電池技術が進歩し[54]、この恩恵で電気自動車のコストも下がりつつある。蓄電池や電力系統管理等のイノベーションによるブレークスルーが期待される。太陽光発電、蓄電池等のコストが同時に大きく下がり、多くの場所で、既存技術による電力供給とコスト的に遜色が無くなり、電力系統の安定性も維持できるシステムとなれば、爆発的な普及が起きるかもしれない。そこでも GPT がキーになると考えられる。なお、シェールガス採掘技術等、化石燃料関連の技術も進歩しコストも下がるので[86]、最終的に再生可能エネルギーの方が安くなるか否かは予断を許さない。だが、イノベーションによって、再エネと化石エネルギーのコストの差分を、世界の多くの地域において受容可能な範囲まで低減させることは、21 世紀半ばまでの長期的視野であれば十分にありうる。

他方では、AI、IoT を活用して、原子力、火力、水力発電、送配電システムの維持管理を高度化して、エネルギー効率も向上させることは、既に広範に実施されつつある。

⑥ セクター横断の経済全体

以上、各部門における GPT の活用によるイノベーションの可能性を記述した。一部

の部門において既に触れたが、大きなエネルギー消費の削減、CO₂排出削減が期待されるのは、GPT の進展が、特定部門のエネルギー消費の低減をもたらすだけでなく、部門横断的に他部門にも波及し、社会の大きな変化、社会イノベーションを実現する可能性である。現在の社会では、モノは本当に必要なサービスを提供するために必要な以上に製造され、エネルギーサービスも必要以上に供給されている。最終的なサービス提供に近いところでエネルギーは有効に利用されず、無駄に消費されている。IoT の進展とその活用は、企業は製品を売るだけではなくサービスを売ることが出来るようになることで、ライフサイクルベースで見たエネルギー・資源効率の向上に寄与する。

Grübler らは、最終エネルギー消費量からではなく、シェアリング経済の可能性を含め、必要なサービスレベルを基に推計し、必要な Low Energy Demand (LED) シナリオという従来のモデル分析よりも低エネルギー需要が実現するシナリオを提示し[87]、そのシナリオは、IPCC 1.5°C 特別報告書[2]でも特に焦点を当てて取り上げられた。このシナリオは、低エネルギー需要を比較的低廉な費用で実現し得るとするシナリオであり、SDGs の同時達成もしやすいシナリオとして提示されている。

また、例えば、世界のエレクトロニクス産業の業界団体である Global e-Sustainable Initiative (GeSI) は、ICT によって、経済成長を促進し人類の福祉を向上させながら、エネルギー効率の大幅改善と CO₂ の大規模削減が可能になるとした上で、ICT による 2030 年における排出削減ポテンシャルは、世界全体の排出の 4 分の 1 に上ると推計している[85]。利用事例としては、例えば ICT の使用によって病院における医療行為を代替する e-hospital 等によって、排出を削減できるとしている。また佐野ら[65]は、自動運転車実現により、カーシェア・ライドシェアリングが誘発され、自動車の稼働率が上昇し、車の台数の低下、そして鉄鋼製品や化学製品の低減、また電気自動車等の初期投資が高い車でも、稼働率上昇によって相対的に経済性が上昇し得ることを指摘している。とりわけ、エネルギーは最終利用に近いところにおいて、本当に必要な製品やサービスを越えて、消費がなされているケースが多い。ICT、AI 等の技術進展と展開で、技術・社会イノベーションが期待できる。ICT の本領は、情報によって資本（設備）やエネルギーを代替し、経済活動全般の効率を高めることで、GDP とエネルギー消費量のデカップリングを起こすことと見ることができる。

⑦ 排出削減ポテンシャル推計の不確実性とリバウンド効果

以上に述べたような技術は、排出削減につながると期待できるが、排出削減量推計は、個々の技術の仕様・コスト・普及量の見通し、誘発される人間活動の変化の推計など、容易ではない。仮に良い技術が出来ても上手くビジネスモデルが確立出来ない場合もある。また、リバウンド効果によって、排出削減ポテンシャルの一部が打ち消されたり、逆に排出が増加するという推計まで、計算結果には大きな不確実性が伴う。ICT の利用においては、データセンターなどにおいて大きな電力消費が伴う。例えば、先述の GeSI の推計[85]は 10～30%程度の一定のリバウンドを想定しているが、マクロで見たリバウンド効果の推計は容易ではなく、更なる詳細研究が必要と考えられる。

(4) データ利用、データ接続、制度の改善によるイノベーション誘発

社会イノベーションを生み出すには、真に社会で広く共有可能な望ましい社会像を提示することが重要である。第5期科学技術基本計画では、Society 5.0を打ち出した。これは、社会イノベーションを生み出す、望ましい社会増を提示したものであり、次期の第6期科学技術基本計画でもそれを強化した概念の提示が求められる。

一方、社会イノベーションを加速するには、そのインパクトをできるだけ定量的に提示することも重要である。IoT、AI等を含む汎用目的技術（GPT）進展に伴う社会イノベーションの可能性とそのCO₂排出削減への効果を、多くの方がより実感を伴って認識することが、当該分野の技術イノベーション、ビジネスモデルのイノベーションを加速すると考えられる。GPTが具体的にどの程度、世界のCO₂排出削減に貢献し得るのか、リバウンド効果はどの程度なのか、などは、現状では、包括的、整合的かつ定量的な評価は十分には行われていない。G20 軽井沢アクションプラン[88]では、「我々は、将来のエネルギー需給のより良い理解に関する定量分析の重要性、並びに、デジタル化、人工知能（AI）、インターネットオブシングス（IoT）及びシェアリングエコノミーによって牽引される需給両面のイノベーションの役割を認識する。我々は、世界の科学コミュニティ及び国際機関・枠組によってなされる、エネルギー・気候モデルのための経済全般にわたる全範囲シナリオのさらなる洗練及び開発のための努力を支持する」とされ、研究の進展が必要である。具体的かつ説得力のあるシナリオ提示は、技術開発、社会変化の方向性を作り出し、イノベーションの加速をもたらす可能性がある。

また政府の重要な役割として、新しい技術が現れた際に、その技術の利点が十分に活用され、更なる発展を促すように制度を整備し、逆に妨げとなる制度は改革するという、「規制者としての役割」がある。急速な技術進歩に遅れぬよう、迅速な対応が必要である。例えば自動車については、電化、自動運転、シェアリングの3つの革命的な進歩の何れについても、規制体系の整備が必要になる。同様に、ロボットが家庭・オフィス・工場に入り、より人間に近い場面で活動するようになると、新たな規制体系の整備が必要になる。また、政府では電力スマートメーターデータの活用なども議論されている。

一般的に言って、制度を変えるのは多くの既得権益が関係することもあり容易ではない。また、ビッグデータの活用には、個人情報保護の問題とのトレードオフが生じるケースもあるかもしれない。個人情報保護への十分な配慮は必須である。完全自動運転車については、条約や協定等の変更の課題があると共に、機械は完全であることはあり得ず、不具合やそれによる損害等を社会がどのように受容していくかという社会受容性に大きくかかっている[89]。完全自動運転車実現が気候変動対策につながるとしても、リスクとリスクのトレードオフをよく議論していくことが求められる。しかし、イノベーションの果実を最大限に得て、気候変動対策につなげるためには制度は適切なタイミングで変えていかなければならない。なお、政府には「事業者としての役割」もある。e-government、e-health、e-hospital、e-education等、政府部門でのICTの導入によって、サービスの質の向上のみならず、ICTの進歩自体にも大きな効果が期待できる。

以上で言及してきた様な技術には、先ずは何よりも経済的な便益が期待される。だが

効用はそれに留まらず、経済合理的な形で大幅な CO₂ 削減が実現し得るという、大きな社会的な便益も期待できる。

5 エネルギーと気候変動政策の費用対効果の見える化の一層の推進と基礎研究の充実

エネルギー・気候変動対策のイノベーションを促進するために、政府が果たすべき役割は大きい。民間により投資されにくい基礎研究やハイリスク・ハイリターンの研究開発への投資だけでなく、開発された技術を実用化・普及につなげていくための実証・導入支援、また知的財産権制度の構築、大学・研究機関制度や産学連携制度の整備等も政府の重要な役割とされる（付図 15）[90], [4], [91]。

政府はこれまで、さまざまなエネルギー技術、低炭素・脱炭素技術の開発・普及において重要な役割を果たしてきた。原子力発電は無論のこと、太陽光発電[92]、風力発電等の再エネ技術[93]、コンバインドサイクル発電[94]等が顕著な例である。気候変動対策において非連続なイノベーションが求められる中、政府には一層の役割が期待され、重要性の高い研究開発、実証・導入支援等に大きな予算を投入する必要がある。ただ政府予算には限りがあるため、効率的・効果的に用いる必要がある。このためには、どれだけの政府予算を何に投じているか、どのような成果が上がっているかを見える化し、評価した上で今後の施策に生かすという PDCA サイクルが不可欠である。このような政府予算の使途や成果の透明化については、政府全体としては過去の行政改革等を通じて大きく改善されてきたものの、エネルギー・気候変動政策の分野について見れば決して十分とは言えない。

まず、エネルギー・気候変動対策として何にいくらの政府予算を投じたのか、つまりインプットの見える化が必要である。環境省は「地球温暖化対策関係予算」を集計しているが、補正予算が含まれていない他、温暖化対策と関連が薄い対策が含まれる等の問題がある。この点でより透明性が高いと考えられるのが、行政事業レビューシートを用いた温暖化対策関連事業の集計である。木村ら[95][96]は、原子力や森林吸収源に関する事業予算を除いた温暖化対策予算約 5,000 億円/年の内訳において、エコカー・エコポイントといった一部の巨額事業への予算集中、ハード支援への偏重とソフト支援への過小投資といった問題を指摘している。このように、まずインプットを見える化した上で、その予算配分に偏りがいないか、適切な分散投資がなされているかといった視点から評価する必要がある。

また、エネルギー・気候変動対策に投じた政府予算がどのような成果を出しているか、いわゆるアウトプット・アウトカムの見える化が必要である。行政事業レビューでは温暖化対策関連事業については CO₂ 削減の費用対効果の評価が求められているが、実際には評価されていない事業も多い。温暖化対策に関連する設備導入補助事業に絞っても、4 割程度の事業において費用対効果が評価されていない[96]。さらに、削減効果が評価されている事業については、CO₂ 削減単価が数万円～数 10 万円/tCO₂ に上る事業も多数存在しており、費用対効果に大きな疑問がある事業も多い（付図 16）[96]。評価手法の点からも、政策の「追加性」、つまり、仮に政策がなくとも実現していたであろう効果を控除した正味の政策効果を考慮していないといった問題がある。このような評価を事業担当部局に限られたリソースで実施するのは困難であり、少なくとも規模の大きい事業については外部の

評価専門家を交えた詳細な評価を実施すべきと考えられる。

研究開発事業に関しては、短期的に実現した CO₂ 削減効果や経済的便益よりも、研究開発により得られた知識的・技術的な成果や将来的なインパクトの可能性が主な評価対象となる。NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）や JST（科学技術振興機構）等の資金配分機関は既に研究開発評価の体制を構築し、プロジェクトレベルでの詳細な評価を実施している。このような評価は必要かつ有益な活動である一方、NEDO や JST の投資全体としてどのような成果が得られているのか、長期の温室効果ガス大幅排出削減に向けて十分な進捗が得られているか、といった俯瞰的な視点からの評価メカニズムが不十分と考えられる。例えば、米国研究評議会は 2001 年に、エネルギー省による研究開発投資から生まれた成果を多面的・包括的にレビューする評価プロジェクトを実施し、多くの研究開発投資は経済的・環境的便益につながらなかったものの成功した一部の技術が大きな便益をもたらしたこと、過去の重要なエネルギー分野の技術革新のうち半数程度に同省は何らかの寄与をしており、一部の技術には決定的な貢献をしたこと等を明らかにした [97]。このような、プログラムレベルないし省庁レベルでの研究開発評価を定期的実施することが必要ではないか。第 5 次エネルギー基本計画では、レビューメカニズムを働かすとしているが、その具体化は不明瞭なままであり、いずれにしても政策の評価、見える化が必要である。

本提言では、実効ある気候変動対策のためには、非連続なイノベーションが不可欠とし、そのためには、汎用目的技術（GPT）のような基礎的な技術の充実が必要とした。日本学術会議による「第 6 期科学技術基本計画に向けての提言」[98]においても、長期的視野から腰を据えて基礎研究に取り組む環境が急速に失われ、学術の裾野を形成する研究者の活動が弱体化していることに懸念を示し、このような状況では、SDGs や Society 5.0 等に見えるような世界及び日本の諸課題の解決への期待に応えることは難しいとしている。そして、予測困難な変化に迅速かつ適切に対応するためには、幅広い分野における多様な学術研究、とりわけ短期的視野にとらわれない基礎研究の分厚い蓄積と、それを可能にする継続的な投資の努力が不可欠であるとしている²。気候変動対策技術は応用技術の側面が強いと考えがちであるが、幅広い非連続的イノベーションの誘発なくして、パリ協定で要請されているような、2℃や 1.5℃目標、そして脱炭素化の実現は、現実的には不可能と考えられる。そして非連続的イノベーションのためには、GPT のような基礎的研究の幅広い充実が必須である。気候変動対応は喫緊の課題との認識は必要だが、それゆえに、回り道であるかのようにとらえられるが、むしろ、大学等教育研究機関において行われる基礎研究の安定的かつ充実した支援が求められる。

6 まとめ

気候変動影響被害は未だ不確実性が大きい、日本では毎夏のように豪雨、大型台風による大きな被害が続いている。世界でも気候変動リスクへの懸念が強まってきている。リ

² なお、政府の基礎研究資金は低下していないとされている[99]。ただし、大学の内部資金(運営費交付金等)と外部資金(科学研究費補助金)の割合が後者にシフトする中で[100][101]、短期的には成果の出にくい研究費が低下し、また、多様性が失われてきている可能性がある。競争を促すことは重要だが、長期の視点を持った評価を行うことが重要であろう。

スク回避の点からも、気候変動緩和策を推進していく必要がある。また、気温安定化のために、長期的には世界排出量の実質ほぼゼロ排出が求められている。しかし、現状技術の延長線上では、大きな排出削減費用が必要と推計されている。このような費用推計では世界全体の費用が最小化、つまり CO₂ 限界削減費用が世界で均等化することが前提での解であることが多い。ところが気候変動に関する国際枠組みは不安定な状況が続いており、その大きな排出削減費用でさえ、理想的な条件での費用と考えるべきである。国際的に安定的に協調体制を築き、気候変動枠組みを求めることは引き続き行うべきであるが、気候変動対策という長期間に亘る取組の必要性を考えると、むしろ安定的な気候変動対応の国際政治状況を前提とすることは大きなリスクがあると考えられるべきである。そして、このとき、非連続的なイノベーションの役割の大きさを強く認識しなければならない。

一方、ICT、AI、IoT 等の情報技術、デジタル技術が、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー等の技術イノベーションを誘発し、近年、共進的な進歩を見せている。これら技術は、一見、気候変動対策技術とは見なされていないが、これらがベースとなって、様々な部門でエネルギー効率の大幅な向上をもたらす可能性がある。これまで「隠れたコスト」によってエネルギーを必要以上に消費してきた。デジタル技術の進展が「隠れたコスト」を費用効率的に除去して、モノ、サービスの効率化をもたらし、社会イノベーションを誘発し、結果、大幅な CO₂ 排出量の減少をもたらす可能性がある。直接的なエネルギー対策、気候変動緩和策ではない、間接的な技術のイノベーション誘発にもっと注力し、また、そのイノベーションを誘発し得る政策を検討すべきである。

具体的には、以下の提言を行う。

安定的なエネルギー・気候変動政策の確立： 脱炭素化に向けて大きな投資が必要な中、安定的なエネルギー・気候変動政策の確立が重要である。不安定なエネルギー・気候変動政策は、投資を難しくする。エネルギー基本計画が策定されているが、状況を踏まえた変化は必要だが、骨格である S+3E のバランスを踏まえたエネルギーとする方針は今後も安定的に維持すべきである。

低炭素、脱炭素を実現するエネルギーインフラ投資の予見性の向上： パリ協定が要請しているような 2℃目標や 1.5℃目標、そして実質ゼロ排出のような目標達成のためには、これまでの研究で、大きな投資の増額が必要とされている。日本においては、エネルギーインフラ等は老朽化を迎えつつある。低炭素化、脱炭素化は、基本的に設備費が高いことが一般的である。電力自由化の下では、初期設備費が小さく、短期的に投資回収が可能な投資に向かいやすい。自由化の下での市場ベースが実現しやすい短期の効率性と、市場では実現しにくい長期の適切な投資双方を促す制度設計を進めなければならない。また、再エネの拡大のためにも、電力ネットワークへの投資が必要であるが、3 章記載のような送配電事業者に投資のインセンティブを与える制度の再構築を行うべきである。安定的かつ強靱なエネルギー供給は、経済にとっての基盤であり、広範なイノベーションを生み出す基盤でもある。また、イノベーションの果実を迅速に社会実装していくためにも、民間事業者が投資回収の予見性が高く、不要な投資リスクに晒さない制度を志向すべきである。

電力化率向上と電源の低炭素化、脱炭素化の加速、再エネの課題認識と取組： 脱炭素

化のためには、電力化率向上と電源の脱炭素化（再生可能エネルギー、CCUS など）が求められる。再エネの拡大においては、電力需給の調整力確保や系統制約の克服が大きな課題となってきた。VPP、DR といったビジネスモデルが、ICT 技術を活用しながら、課題の一部を解決できる可能性もあり、新たなビジネスモデルが適切に展開できるよう制度の再構築を進めるべきである。ただ現在見通せる範囲では、再エネに電力の大部分を依存するシステムは難しく、エネルギー需給両面での広範なイノベーションが不可欠である。

基礎的な研究に重きをおいたイノベーションの誘発： 気候変動緩和策が進まない根本的な理由は、費用が低廉に大きな排出削減を実現できる技術が乏しいためと考えられる。回り道のように思えるかもしれないが、基礎的な研究を充実させながら広範なイノベーションを誘発することが必要である。特に、デジタル技術や関連した暗号化技術等や、ナノテクノロジーを含む材料工学、バイオテクノロジー等は、部門を超えて幅広い社会イノベーションを誘発できる可能性がある。例えば、IoT、AI、ビッグデータ等の進展により完全自動運転車が実現すれば、シェアリング経済を誘発して、必要な自動車台数を減らし、それに伴って素材生産量も減らし、製品の製造やサービス提供において消費されるエネルギー、言い換えれば、製品やサービスに体化されるエネルギー消費量を減らすほか、稼働率が上昇することで、電気自動車など初期費用が高くても経済合理的になりやすくなって、CO₂ 排出削減に大きく貢献する可能性がある。例えば、個人情報保護には十分に留意しつつも、社会的な便益を認識しビッグデータが広範に活用できるような施策をとることが望まれる。部門を超えたビッグデータの活用と統合は、経済合理的にエネルギー消費を抑制し、CO₂ 排出削減に寄与する。なお、従来のような個別技術、部門毎の対策ではなく、部門横断的な対策となるため、それに対応できる組織体制の構築を志向すべきである。

長期的な視点を踏まえた費用対効果の検証と基礎研究の充実： 非連続的なイノベーションを誘発するために政府の支援が必要であるが、予算は限られており、費用対効果の検証を的確に進めながら支援しなければならない。リスクマネジメントの観点からも、複数の技術にかけてリスクヘッジすることは必要である。とは言うものの、費用対効果を適宜検証しながら、無駄な支出を抑制していくことが、より良いイノベーションを生み出すために必須である。効率化を図りながら、一方で、気候変動対策の観点からも、短期的には評価が難しい基礎的な研究にも研究資金の厚みを増すべきである。

技術イノベーションの芽は生まれつつある。それを進展させ、更に部門横断的に波及させ、社会イノベーションまで昇華しなければ、世界規模での大きな排出削減にはつながらない。政府、地方政府、産業界、消費者等すべてが、変革を求められていることを理解して、一体的に取り組むことが求められているのである。また、我々が置かれた状況をより良く理解し、また変革に促すためには、エネルギーや気候変動対応策を総合的な視点で捉えることが必要であるため、エネルギーに関連した総合的な教育を充実させることも同時に必要である。早急かつ強力に取り組むべきである。

<略語一覧>

AI : Artificial Intelligence (人工知能)
CASE : Connected, Autonomous, Sharing/Service, Electric
CCS : CO₂ Capture and Storage (二酸化炭素回収・貯留)
CCU : CO₂ Capture and Utilization (二酸化炭素回収・利用)
CCUS : CO₂ Capture, Utilization and Storage (二酸化炭素回収・利用・貯留)
COP : Conference of Parties (締約国会議)
DR : Demand Response (ディマンド・リスポンス)
ECB : European Central Bank (欧州中央銀行)
ESG : Environment, Social, Governance (環境・社会・ガバナンス)
FIT : Feed-In Tariff (再生可能エネルギー固定価格買取制度)
FIT-CfD : Feed-in Tariff with Contracts for Difference (差額精算方式を用いた低炭素発電電力の固定価格買取制度)
GeSI : Global e-Sustainable Initiative
GPT : General Purpose Technology (汎用目的技術)
ICT : Information and Communication Technology (情報通信技術)
IEA : International Energy Agency (国際エネルギー機関)
IoT : Internet of Things
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (気候変動に関する政府間パネル)
JST : Japan Science and Technology Agency (科学技術振興機構)
LCOE : Levelized Cost of Electricity (均等化発電原価)
MaaS : Mobility as a Service
NDCs : Nationally Determined Contributions (国別貢献)
NEDO : New Energy and Industrial Technology Development Organization (新エネルギー・産業技術総合開発機構)
PDCA : Plan-Do-Check-Act (計画—実行—評価—改善)
SDGs : Sustainable Development Goals (持続可能な開発目標)
TCFD : Task Force on Climate-related Financial Disclosures (気候関連財務情報開示タスクフォース)
UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change (国際連合気候変動枠組条約)
VPP : Virtual Power Plant (バーチャルパワープラント)
VRE : Variable Renewable Energy (変動性再生可能エネルギー)
WBCSD : World Business Council for Sustainable Development (持続可能な開発のための世界経済人会)

＜用語の説明＞

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）

国際連合環境計画（United Nations Environment Programme: UNEP）と世界気象機関（World Meteorological Organization: WMO）が 1988 年に共同で設立した、国際的な専門家で作る、気候変動に関する科学的な知見の収集、整理のための組織である。数年おきに発行される「評価報告書」（Assessment Report）や、特別なテーマについて科学的な知見の整理を行う「特別報告書」（Special Report）などもまとめている。現時点の最新の評価報告書は、2013～2014 年にかけて出版された「第 5 次評価報告書」である。現在、第 6 次評価サイクルにあり、2018 年 10 月に「1.5℃特別報告書」、2019 年 8 月に「土地関係特別報告書」、2019 年 9 月に「海洋・雪氷圏特別報告書」が出版された。2021～22 年にかけて「第 6 次評価報告書」が出版される予定である。

国際連合気候変動枠組条約（UNFCCC）

1992 年 6 月にブラジルのリオ・デ・ジャネイロにおいて開催された「環境と開発に関する国際連合会議」において採択された、気候変動問題に関する国際的な枠組みを規定した条約である。1994 年 3 月に発効した。最高意思決定機関が締約国会議（COP）であり、1995 年から毎年開催されている。

パリ協定

UNFCCC の下での 2020 年以降の地球温暖化対策の国際的な協定。第 21 回締約国会議（COP21）が開催されたパリにて、2015 年 12 月 12 日に採択された。2016 年 11 月 4 日に発効。1997 年に採択された京都議定書以来、18 年ぶりとなる気候変動に関する国際的枠組みであり、UNFCCC 加盟の 196 カ国全てが参加する枠組み。

温室効果ガス

京都議定書の第一約束期間においては、二酸化炭素 CO_2 （エネルギー起源、セメント等の産業プロセス、森林破壊などの土地利用変化）、メタン CH_4 、一酸化二窒素 N_2O 、ハイドロフルオロカーボン類（HFCs）、パーフルオロカーボン類（PFCs）、六フッ化硫黄（ SF_6 ）の 6 種類のガスが、温室効果ガスとして排出削減の対象とされた。第二約束期間では、それに加えて三フッ化窒素（ NF_3 ）が指定された。

エネルギー基本計画

「エネルギー基本計画」は、国のエネルギー政策の基本的な方向性を示す計画であり、2003 年に初めて決定された。「エネルギー政策基本法」において、情勢変化や施策効果をふまえて少なくとも 3 年ごとに「エネルギー基本計画」を策定することが定められている。現時点で最新の計画は、「第 5 次エネルギー基本計画」であり、2018 年 7 月に閣議決定された。

革新的環境イノベーション戦略

日本政府は、2020 年 1 月に「革新的環境イノベーション戦略」を策定した。本戦略は、2019 年 6 月に策定した「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」に基づいて策定されたもので、①16 の技術課題について、具体的なコスト目標等を明記した「イノベーション・アクションプラン」、②これらを実現するための、研究体制や投資促進策を示した「アクセラレーションプラン」、③社会実装に向けて、グローバルリーダーとともに発信し共創していく「ゼロエミッション・イニシアティブズ」から構成されている。世界のカーボンニュートラル（正味ゼロ排出）、更には、過去のストックベースでの CO₂ 削減（ビヨンド・ゼロ）を可能とする革新的技術を 2050 年までに確立することを目指し、長期戦略に掲げた目標に向けて社会実装を目指していくとされている。「イノベーション・アクションプラン」としては、革新的技術の 2050 年までの確立を目指す具体的な行動計画として、5 分野 16 課題を掲げ、①コスト目標、世界の削減量、②開発内容、③実施体制、④基礎から実証までの工程が明記されたものとなっている。

IoT（Internet of Things）

様々な「モノ（物）」がインターネットに接続され、情報交換することにより相互に制御する仕組みである。

二酸化炭素回収・利用・貯留（CO₂ Capture, Utilization and Storage: CCUS）

発電所や工場における燃料の燃焼によって排出される CO₂ を分離・回収し、それを地中もしくは海洋に貯留する技術。地中 1000 m 程度もしくはそれ以深の帯水層などに CO₂ を貯留する。地中貯留の場合、一般的には CO₂ 漏洩が起こりにくい不透水層（キャップロック層）の下に CO₂ 圧入を行い貯留する。なお、石油生産増進を行うために CO₂ を注入したり、ガス生産に付随している CO₂ を分離している場合、比較的安価に実施できるため、付随的便益のある CO₂ 回収、貯留は欧米を中心に既に実施されている。また、回収した CO₂ を化学品として利用（一般に別途水素が必要となる場合は多い）、また、コンクリートへ吹き込み利用するなど検討されている。

CO₂ 限界削減費用

ある排出削減目標を実現するとき、安価な排出削減費用の対策から実施したとしたとき（最も安価に排出削減目標を達成するとき）、排出削減目標達成のために最後の 1 t-CO₂ を削減するために要する費用。

エネルギーシステム改革（電力システム改革）

エネルギーシステム改革は、電力、ガスのシステム改革の総称であり、エネルギー企業の相互参入、異業種からの新規参入を促し、電力システム改革は、①広域的な送電線運用の拡大（2015 年 4 月に電力広域的運営推進機関の創設）、②小売の全面自由化（2016 年 4 月

実施)、③送配電部門の法的分離による中立性の一層の確保(2020年4月予定)が主な柱。ガスシステム改革においても、小売の全面自由化(2017年4月実施)、導管部門の法的分離による中立性の一層の確保(2022年予定)等の改革が進められている。

卒FIT電源

再生可能エネルギー固定価格買取制度(FIT)の認定を受け、規定の期間、固定価格で買い取りを受けていた再生可能エネルギーで、買取機期間が終了した電源のこと。

FIT-CfD

差額精算方式を用いた低炭素発電電力の固定価格買取制度(Feed-in Tariff with Contracts for Difference)。英国で導入され、Hinkley Point C原子力発電所計画は、2016年9月にCfD契約は正式に締結された。投資回収に必要な長期的な「基準価格(strike price)」を設定し、指標となる市場の価格である「指標価格(reference price)」との差額を発電電力量に応じて発電事業者と買取事業者の間で精算する制度。通常のFITでは、発電事業者から買取事業者への払い戻しは想定されていないが、FIT-CfDでは、指標価格が基準価格を下回る場合には発電事業者が差分を受け取り、上回る場合には発電事業者が差分を支払う仕組みとなっている。これによって、競争を働かせ効率性を高めながらも、投資予見性を向上させようとする制度。ただし、運開まで長期のリードタイムが必要な電源では建設遅延リスクが伴うことが多いが、建設遅延によって生じたコストはデベロッパーがすべて負うことになるため、建設遅延リスクが大きい電源への投資に対して十分なインセンティブとならない可能性もある。

日本版コネクト&マネージ

電力系統は、1回線が故障した場合でも、送電できる状態を維持するという国際的な原則のもとで運用されている。系統が2回線の場合は、原則1回線分の容量である50%が、平常時に流すことができる最大値となる。平常時に利用率が50%を超えることはないが、電源の運転状況(稼働率)によって送電線の平均利用率はさらに低くなっているのが現状である。

日本版コネクト&マネージとして、事故時に瞬時遮断する装置を設置することにより、緊急時に確保している1回線50%の枠を解放し、運用容量を拡大する「N-1電制」の適用を行う。また、系統が空いている時期のすき間の利用を可能とする「ノンファーム型接続」適用を行うというものである。これによって、既存系統の最大限の活用を図ろうとするものである。

カニバリゼーション(共食い)効果

変動性再生可能エネルギー(VRE)において起こり得るとされている効果。例えば、太陽光発電の費用が5円/kWhとなったとしても、同じ日、同じ時間帯に固まって発電が行われることで、その時間帯の電力の市場価値が5円/kWhまで下がれば、仮に太陽光発電の費用低

減がその後も期待できるとしても、太陽光導入によって、更に電力の市場価値が下がっていくため、導入インセンティブ、技術開発インセンティブがその段階で失われる可能性がある。太陽光は典型的だが、風力発電についても、同様の課題は存在する。なお、固定価格での買取の場合は、当然ながら導入インセンティブは失われないが、その分、電力消費者の負担が大きくなる危険性がある。

インセンティブ規制

送配電システムの託送料金が、料金水準が適正原価と適正利潤との総和で決定される場合、企業側の費用削減インセンティブを阻害することになると同時に、将来に対する設備投資へのインセンティブが乏しい（投資によって利潤を生み出しても、適正利潤を超えると料金水準が見直され、利潤を受け取れないため）。また、規制当局は、被規制企業の費用情報を完全に把握することは一般的に難しく、適正な料金水準の設定が難しい。そこで、経営効率化のインセンティブを与えながら規制当局の目的を達成しようとするのがインセンティブ規制である。インセンティブ規制には、ヤードスティック競争やプライスカップ制などがある。前者は事業者間で競争的刺激を与えて経営効率化を図ろうとする方式であり、後者は料金の上限のみを規制し、それを超える効率化は、利潤として受け取ることができるようにし、インセンティブを与えるものである。また、後者は規制コストを低減できるともされる。

＜参考文献＞

- [1] UNFCCC; Paris Agreement (2015)
http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- [2] IPCC; Special Report on Global Warming of 1.5 °C (2018)
<https://www.ipcc.ch/sr15/> (アクセス日 : 2019 年 12 月 6 日)
- [3] IPCC WG1; Fifth Assessment Report: The Physical Science Basis, Cambridge University Press (2013)
- [4] 国連気候行動サミット、<https://www.thenational.ae/world/the-americas/un-climate-action-summit-66-countries-vow-carbon-neutrality-by-2050-1.914095>
(アクセス日 : 2019 年 12 月 6 日)
- [5] The Washington Post (2019); How Street Protests Have Changed the Climate Debate. https://www.washingtonpost.com/business/energy/how-street-protests-have-changed-the-climate-debate/2019/10/18/887a0118-f15c-11e9-bb7e-d2026ee0c199_story.html
e (アクセス日 : 2019 年 12 月 19 日)
- [6] 気候非常事態宣言、<https://climateemergencydeclaration.org/climate-emergency-declarations-cover-15-million-citizens/> (アクセス日 : 2019 年 12 月 5 日)
- [7] 日本学術会議会長談話「「地球温暖化」への取組に関する緊急メッセージ」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-d4.pdf> (2019)
- [8] UNEP, Emissions Gap Report 2018 (2018)
- [9] Just Transition Declaration.
<https://cop24.gov.pl/presidency/initiatives/just-transition-declaration/>
(アクセス日 : 2019 年 12 月 6 日)
- [10] 第 5 次エネルギー基本計画 (2018)、
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf (アクセス日 : 2019 年 12 月 6 日)
- [11] パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略 (2019)、
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai40/pdf/senryaku.pdf> (アクセス日 : 2019 年 12 月 6 日)
- [12] ECB の気候変動対応 (2019 年 10 月 29 日記事)、
<https://jp.reuters.com/article/ecb-policy-climatechange-idJPKBN1X8179> (アクセス日 : 2019 年 12 月 6 日)
- [13] IPCC, Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (2019) <https://www.ipcc.ch/srocc/> (アクセス日 : 2019 年 12 月 6 日)
- [14] UN/WMO, “2019 concludes a decade of exceptional global heat and high-impact weather.” <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2019-concludes-decade-of-exceptional-global-heat-and-high-impact-weather> (アクセス日 : 2019 年 12 月 6 日)

ス日：2019年12月6日)

- [15] Global Carbon Project (2019)
https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/19/files/GCP_CarbonBudget_2019.pdf (アクセス日：2019年12月6日)
- [16] 秋元圭吾、「気候変動対応を踏まえた長期のエネルギー政策の動向」、第28回日本エネルギー学会大会 (2019)
- [17] Carbon brief, Why China's CO₂ emissions grew 4% during first half of 2019 (2019) [https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-chinas-CO₂-emissions-grew-4-during-first-half-of-2019](https://www.carbonbrief.org/guest-post-why-chinas-CO2-emissions-grew-4-during-first-half-of-2019) (アクセス日：2019年12月6日)
- [18] 秋元圭吾、日本学術会議公開シンポジウム「長期の温室効果ガス大幅排出削減に向けたイノベーションの役割と課題」講演資料 (2019)
- [19] UNEP, Emissions Gap Report 2019 (2019)
<https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019> (アクセス日：2019年12月8日)
- [20] IEA, World Energy Balances 2018 (2018)
- [21] RITE、「経済とCO₂排出量のデカップリングに関する分析：消費ベースCO₂排出量の推計」(2018) [http://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/Analysis_Consumption-Based-CO₂.pdf](http://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/Analysis_Consumption-Based-CO2.pdf) (アクセス日：2019年12月6日)
- [22] 本間他、「消費ベースCO₂排出量の推計に基づく、経済とCO₂排出量のデカップリングに関する分析」、第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス (2019)
- [23] K. Akimoto, F. Sano, B. Shoai Tehrani, The analyses on the economic costs for achieving the nationally determined contributions and the expected global emission pathways, Evolutionary and Institutional Economics Review, 14(1), 193-206 (2017) (アクセス日：2019年12月6日)
- [24] IPCC WG3 ;Fifth Assessment Report: Mitigation of Climate Change, Cambridge University Press (2014)
- [25] Pew Research Center ;A look at how people around the world view climate change (2019) <https://www.pewresearch.org/fact-tank/2019/04/18/a-look-at-how-people-around-the-world-view-climate-change/> (アクセス日：2019年12月6日)
- [26] IRENA; Renewable Power Generation Costs in 2018 (2019)
- [27] 日本学術会議；「我が国の原子力発電のあり方についてー東京電力福島第一原子力発電所事故から何をくみ取るか」(2017)
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t250-3.pdf>
- [28] IEA; World Energy Outlook 2018
- [29] IRENA; Global Energy Transformation, A Roadmap to 2050 (2019)
- [30] IEA; Status of Power System Transformation 2018, Advanced Power Plant Flexibility (2018)

- [31] 固定価格買取制度 情報公表用ウェブサイト <https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>
- [32] 経済産業省：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 再生可能エネルギー主力電源化制度改革小委員会（第1回）資料
- [33] 経済産業省：NEDO スマートコミュニティサミット2019 講演資料（2019）
- [34] 電力広域的運営推進機関：再エネ大量導入・次世代電力NW小委員会 第二次中間整理（2019）
- [35] 経済産業省：総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会 制度検討作業部会（第31回）資料（2019）
- [36] 新エネルギー・産業技術総合開発機構：再生可能エネルギー連系拡大に資する需給調整量の揚水発電等の水力発電所に関する技術動向調査（2016）
- [37] 中山寿美枝、日本学術会議公開シンポジウム「長期の温室効果ガス大幅排出削減に向けたイノベーションの役割と課題」講演資料（2019）
- [38] 資源エネルギー庁、「電力システム改革について」（2015）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/pdf/system_reform.pdf
- [39] 秋元圭吾、「パリ協定を踏まえて日本のエネルギーの将来を考える」、大阪科学技術センター エネルギー技術対策委員会 講演会（2017）
- [40] 電力広域的運営推進機関、「容量メカニズムと容量市場の検討について」（2017）
https://www.occto.or.jp/soukaihouka/hyougiinkai/2017/files/2017_2_houkoku_1.pdf
- [41] 資源エネルギー庁、電力・ガス基本政策小委員会資料（2019）
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/016_08_01.pdf
- [42] 電力広域的運営推進機関、「新設電源と既設電源の扱い、及び経過措置の考え方について」、容量市場の在り方等に関する勉強会（2017）
https://www.occto.or.jp/iinkai/youryou/benkyoukai/2017/files/youryoushijou_study_04_03.pdf
- [43] 電力・ガス基本政策小委員会制度検討作業部会 第二次中間とりまとめ（2019）
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/20190724_01.pdf
- [44] 資源エネルギー庁、基本政策分科会 持続可能な電力システム構築小委員会資料（2019）
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/system_kouchiku/001/pdf/001_007.pdf
- [45] 下郡けい、「原子力発電をめぐる英国 FIT-CfD の現状と課題」（2018）
<https://enen.ieej.or.jp/data/7940.pdf>
- [46] 統合イノベーション戦略推進会議：革新的環境イノベーション戦略（2020）

- <http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tougou-innovation/dai6/siryo3-2.pdf>
- [47] 経済産業省・文部科学省：革新的環境イノベーション戦略検討会資料（2019）
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/kankyo_innovation/pdf/001_05_02.pdf
- [48] 清水洋. (2016). ジェネラル・パーパス・テクノロジーのイノベーション ― 半導体レーザーの技術進化の日米比較. 有斐閣
- [49] エルハナン・ヘルプマン. (2009). 経済成長のミステリー. 九州大学出版会
- [50] OECD. (2017). The Next Production Revolution. The Next Production Revolution. <https://doi.org/10.1787/f69a68e9-en>
- [51] Bresnahan, T. F., & Trajtenberg, M. (1995). General purpose technologies “Engines of growth” ? Journal of Econometrics, 65(1), 83-108.
[https://doi.org/10.1016/0304-4076\(94\)01598-T](https://doi.org/10.1016/0304-4076(94)01598-T)
- [52] 井上智洋. (2016). 人工知能と経済の未来 2030 年雇用大崩壊. 文藝春秋
- [53] IEA. (2017). Digitalization & Energy. Retrieved from
<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/DigitalizationandEnergy3.pdf>
- [54] Nykvist, B., & Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. Nature Climate Change, 5(4), 329-332.
- [55] 井熊均・木通秀樹. (2015). なぜ、トヨタは700 万円で「ミライ」を売ることができたか?-技術革新のメガトレンドが市場構造を変える. 日刊工業新聞社
- [56] Mills, M. P. (2015). Shale 2.0: Technology and the Coming Big-Data Revolution in America’ s Shale Oil Fields. Trends Magazine, (147), 21-26.
Retrieved from
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=plh&AN=109071233&site=eds-live>
- [57] Holdowsky, J. et al. (2015). Inside the Internet of Things (IoT). Deloitte University Press, 54. <https://doi.org/10.5120/19787-1571>
- [58] Manyika, J. et al. (2015). The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype. McKinsey Global Institute, (June), 144.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-05029-4_7
- [59] OECD. (2017). The Next Production Revolution. The Next Production Revolution. <https://doi.org/10.1787/f69a68e9-en>
- [60] 杉山大志 (2018)、「地球温暖化問題の探究ーリスクを見極め、イノベーションで解決するー」、デジタルパブリッシングサービス
- [61] Viegas, J. et al. (2016). Shared Mobility: Innovation for Liveable Cities. International Transport Forum’ s Corporate Partnership Board.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1787/5j1wvz8bd4mx-en>
- [62] Greenblatt, J. B., & Saxena, S. (2015). Autonomous taxis could greatly

- reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles. *Nature Climate Change*, 5(9), 860-863. <https://doi.org/10.1038/nclimate2685>
- [63] OECD/ITF. (2015). Urban Mobility System Upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic. Corporate Partnership Board Report. <https://doi.org/10.1007/s10273-016-2048-3>
- [64] Wadud, Z. et al. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>
- [65] Fulton, L. et al. (2017). Three Revolutions in Urban Transportation. UC Davis. Jarret Walker Jamie Knapp. Retrieved from <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2017/04/UCD-ITDP-3R-Report-FINAL.pdf>
- [66] 佐野史典他、シェアリングエコノミーの進展を考慮した社会経済シナリオの下での温暖化対策の評価、エネルギー・経済・環境コンファレンス (2019)
- [67] IEA. (2017). The Future of Trucks. OECD/INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TheFutureofTrucksImplicationsforEnergyandtheEnvironment.pdf>
- [68] World Economic Forum. (2015). Industrial Internet of Things. Retrieved from http://www3.weforum.org/docs/WEFUSA_IndustrialInternet_Report2015.pdf
- [69] Snatkin, A. et al. (2013). Real time production monitoring system in SME. *Estonian Journal of Engineering*, 19(1), 62. <https://doi.org/10.3176/eng.2013.1.06>
- [70] Manyika, J. et al. (2015). The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype. McKinsey Global Institute, (June), 144. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05029-4_7
- [71] Beyer, C. (2014). Strategic Implications of Current Trends in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 064701. <https://doi.org/10.1115/1.4028599>
- [72] Faludi, J. et al. (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 14-33. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>
- [73] 経済産業省 (2017); 「スマートセルインダストリーの実現に向けた取組」 https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shomu_ryutsu/bio/pdf/008_03_00.pdf (アクセス日: 2019年12月6日)
- [74] 乾将行 (2019); 「脱炭素社会の実現を目指した グリーンバイオプロセスの開発」 <http://www.rite.or.jp/news/events/pdf/inui-ppt-kakushin2019.pdf> (アクセス日: 2019年12月6日)
- [75] IPCC (2019). Special Report on Climate Change and Land.
- [76] FAO; Global food losses and food wastage: extent, causes and prevention.

FAO, Rome (2011)

- [77] WBCSD. (2015). Climate Smart Agriculture, (November), 40.
- [78] Wollenberg, E. et al. (2016). Reducing emissions from agriculture to meet the 2C target. *Global Change Biology*, 22(12), 3859-3864.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13340>
- [79] Brown, R. M. et al. (2016). The carbon footprint and economic impact of precision agriculture technology on a corn and soybean farm. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 5(3), 335-348.
<https://doi.org/10.1080/21606544.2015.1090932>
- [80] Schimmelpfennig, D., & Ebel, R. (2016). Sequential adoption and cost savings from precision agriculture. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 41(1), 97-115.
- [81] Pierpaoli, E. et al. (2013). Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. *Procedia Technology*, 8(Haicta), 61-69.
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>
- [82] Tuomisto, H. L., & Teixeira de Mattos, M. J. (2011). Environmental Impacts of Cultured Meat Production. *Environmental Science & Technology*, 45(14), 6117-6123. <https://doi.org/10.1021/es200130u>
- [83] 経済産業省：食品ロス削減に向けた経済産業省の取組 (2017),
http://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_policy/information/food_loss/conference/pdf/adjustments_index_10_170915_0006.pdf
- [84] 電子情報技術産業協会 (JEITA) . (2016). 「ITソリューションによる温暖化対策 貢献 調査報告書 — 2030 年に向けた温室効果ガス削減ポテンシャル」
- [85] GeSI. (2015). SMARTer2030: ICT Solutions for 21st Century Challenges.
Retrieved from http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf
- [86] Mills, M. P. (2015). Shale 2.0: Technology and the Coming Big-Data Revolution in America's Shale Oil Fields. *Trends Magazine*, (147), 21-26.
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=plh&AN=109071233&site=eds-live>
- [87] Grubler, A. et al. (2018) A low energy demand scenario for meeting the 1.5C target and sustainable development goals without negative emission technologies, *Nature Energy*, <https://www.nature.com/articles/s41560-018-0172-6>
- [88] 持続可能な成長のためのエネルギー転換と地球環境に関する G20 軽井沢イノベーションアクションプラン (仮訳) (2019)
https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190618008/20190618008_16.pdf
- [89] 日本学術会議, 「提言：自動運転のあるべき将来に向けて — 学術界から見た現状理解 —」 (2017) <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-23-t246-1.pdf>

- [90] 一橋大学イノベーション研究センター, et al. (2017). イノベーション・マネジメント入門, 日本経済新聞出版社
- [91] Stern, N. (2007). The Economics of Climate Change: The Stern Review, Cambridge University Press
- [92] Nemet, G. F. (2019). How solar energy became cheap: a model for low-carbon innovation, Routledge.
- [93] Norberg-Bohm, V. (2000). "Creating Incentives for Environmentally Enhancing Technological Change: Lessons from 30 Years of U.S. Energy Technology Policy." Technological Forecasting and Social Change 65(2): 125-148.
- [94] 木村幸, 加治木紳哉, (2008). ガスタービン開発における国プロの役割ー「高効率ガスタービンプロジェクト」についての事例分析ー, 電力中央研究所研究報告 Y07009
- [95] 木村幸, (2016). 国の温暖化対策事業の現状と課題ー公会計資料と行政事業レビューシートに基づく分析ー, 電力中央研究所研究報告, Y15018
- [96] 木村幸, (2018). 国の温暖化対策関連経費の推移と費用対効果ー温暖化対策税収は有効に使われているのかー, 電力経済研究, No. 65, 32-44
- [97] National Research Council (2001). Energy research at DOE was it worth it? : energy efficiency and fossil research 1978 to 2000. Washington, D.C., National Academy Press.
- [98] 日本学術会議 ; 「提言 第6期科学技術基本計画に向けての提言」(2019)
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t283-1.pdf>
- [99] 経済産業省 ; 我が国の産業技術に関する研究開発 活動の動向 ー主要指標と調査データー (2019)
https://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/tech_research/aohon2019.pdf
- [100] 豊田長康 ; 科学立国の危機: 失速する日本の研究力、東洋経済新報社 (2019)
- [101] 科学技術・学術政策研究所 ; 「科学技術の状況に係る総合的意識調査 (NISTEP 定点調査 2015)」報告書 <https://www.nistep.go.jp/research/science-and-technology-system/nistep-teiten-survey>

＜参考資料１＞審議経過

＜第２４期＞

平成３０年

- １月１０日 エネルギーと科学技術に関する分科会（第２４期第１回）
役員の選出、今後の進め方について 等
地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会設置、
小委員会委員選任等について討議、設置承認
- ３月２９日 地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会（第２４期第１回）
役員の選出、調査報告、今後の進め方について 等
- ９月８日 エネルギーと科学技術に関する分科会（第２４期第４回）
地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会活動報告、今後の進め方について 等
- １１月１日 地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会（第２４期第２回）
調査報告、今後の進め方について、シンポジウム企画 等

平成３１年

- ３月８日 エネルギーと科学技術に関する分科会（第２４期第６回）
地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会活動報告、今後の進め方について、シンポジウム企画 等

令和元年

- ７月１６日 地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会（第２４期第３回）
調査報告、今後の進め方について、シンポジウム結果報告 等
- １１月２０日 地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会（第２４期第４回）
提言案の検討、今後の進め方について 等
- １２月２７日 エネルギーと科学技術に関する分科会（第２４期第４回）
地球温暖化対応の視点からのエネルギー対策・政策検討小委員会活動報告、提言案の検討、今後の進め方について 等
提言「長期の温室効果ガス大幅排出削減に向けたイノベーションの加速」（案）について、本分科会でのコメントを踏まえて修正し委員長が確認を行うことを条件として、承認^３

^３ エネルギーと科学技術に関する分科会の承認をもって、総合工学委員会の承認も兼ねる。

令和2年

4月30日 日本学術会議幹事会（第289回）

提言「長期の温室効果ガス大幅排出削減に向けたイノベーションの加速
に向けて」について審議、承認

＜参考資料２＞シンポジウム開催

・公開シンポジウム「長期の温室効果ガス大幅排出削減に向けたイノベーションの役割と課題」

日時：令和元年6月6日（木）13:00～17:30

場所：日本学術会議講堂

主催：日本学術会議 総合工学委員会 エネルギーと科学技術に関する分科会

共催：一般社団法人エネルギー・資源学会

後援：一般社団法人日本エネルギー学会、環境経済・政策学会、公益財団法人地球環境産業技術研究機構

プログラム：

13:00 開会あいさつ

鈴置 保雄（日本学術会議第三部会員、愛知工業大学工学部教授、名古屋大学名誉教授）

13:05 長期大幅排出削減に関する動向と議論の方向性（課題提起）

山地 憲治（日本学術会議連携会員、公益財団法人地球環境産業技術研究機構理事・研究所長、東京大学名誉教授）

13:35 長期地球温暖化抑制におけるイノベーションの役割

杉山 大志（一般財団法人キャノングローバル戦略研究所 研究主幹）

14:05 人工知能による需要予測の進展と更なる可能性

曾我部 完（株式会社グリッド 代表取締役）

14:35 再エネ拡大下における電力系統の安定化対策の課題と機会

中山 寿美枝（電源開発株式会社 審議役）

15:05 IoT, AI 技術進展による低エネルギー需要社会実現によるパリ協定長期目標へのインパクト

秋元 圭吾（日本学術会議連携会員、公益財団法人地球環境産業技術研究機構 システム研究グループリーダー）

15:35－15:50 （ 休憩 ）

15:50 総合討論

（司会）山地 憲治

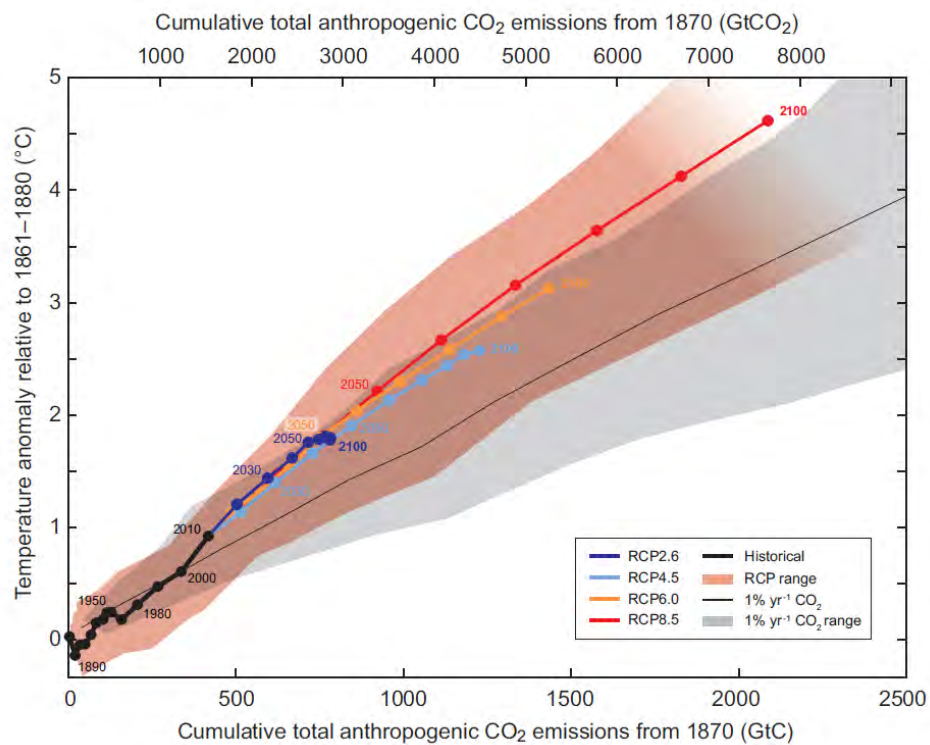
（コメンテーター）

秋元 圭吾、杉山 大志、曾我部 完、中山 寿美枝、

木村 宰（一般財団法人電力中央研究所 社会経済研究所 上席研究員）

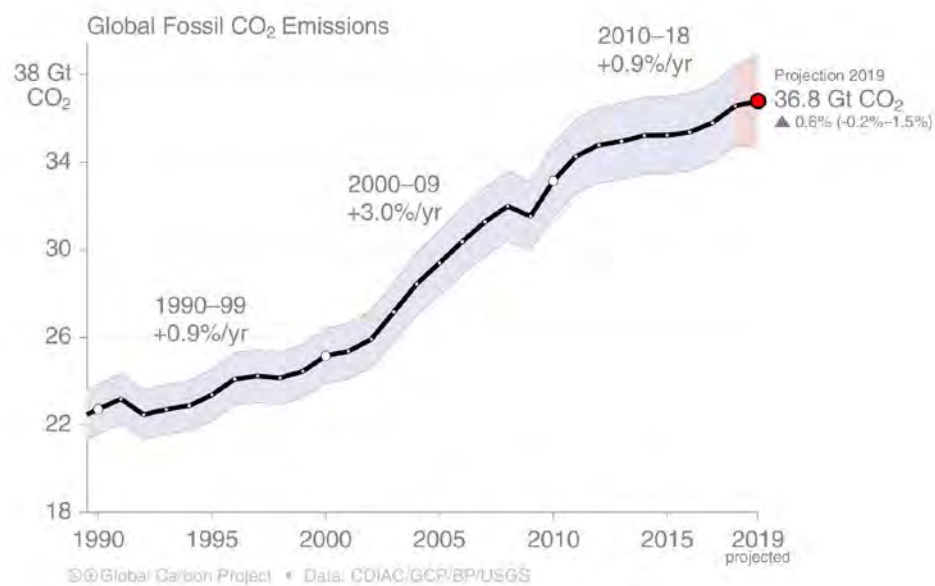
17:20 閉会

<付録図表>



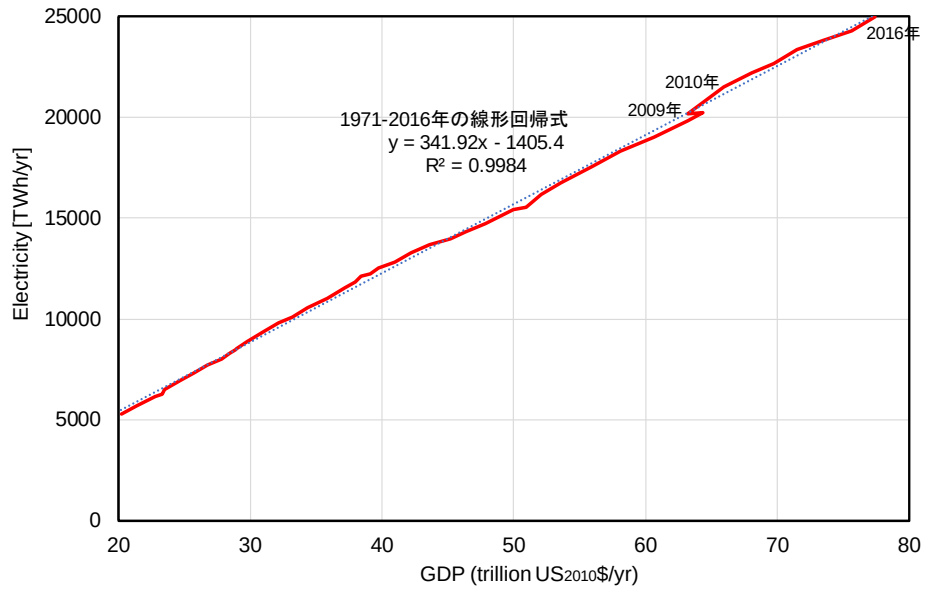
付図1 累積 CO₂ 排出量と全球平均気温上昇との関係

(出典) IPCC WG1 AR, 2013 (SPM, Figure SPM.10) [3]



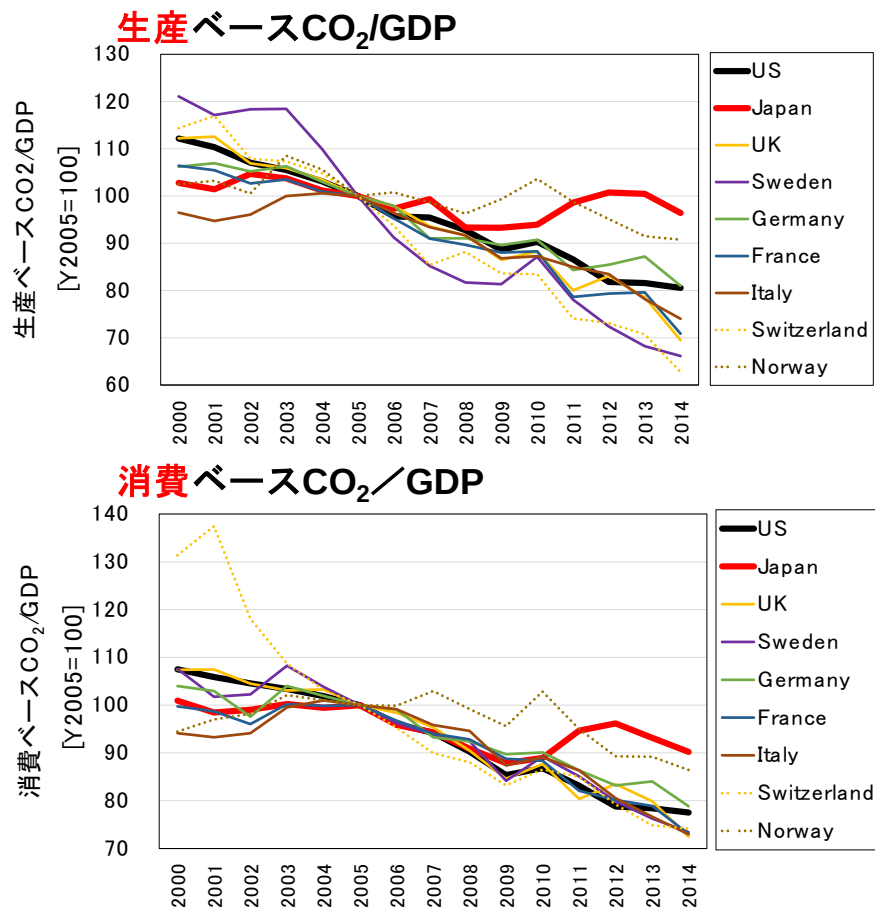
付図2 世界の化石燃料起因の CO₂ 排出量推移

(出典) Global Carbon Project、2019[15]



付図3 世界の経済成長と電力消費量の関係

(出典) IEA 統計、2018 [20]

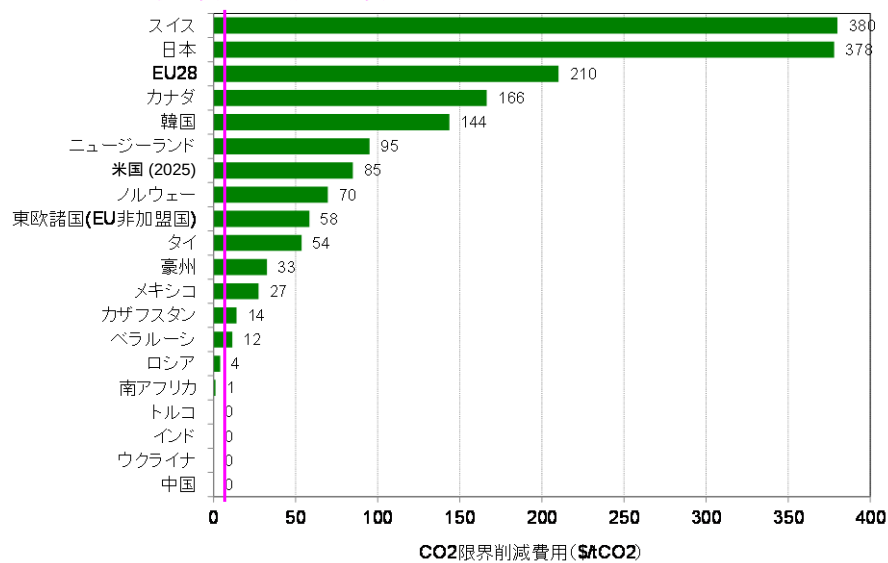


付図4 日、米、欧州主要国の GDP 当たり CO₂ 排出量（原単位）の比較

(出典) RITE による推計[21]；本間他 [22]

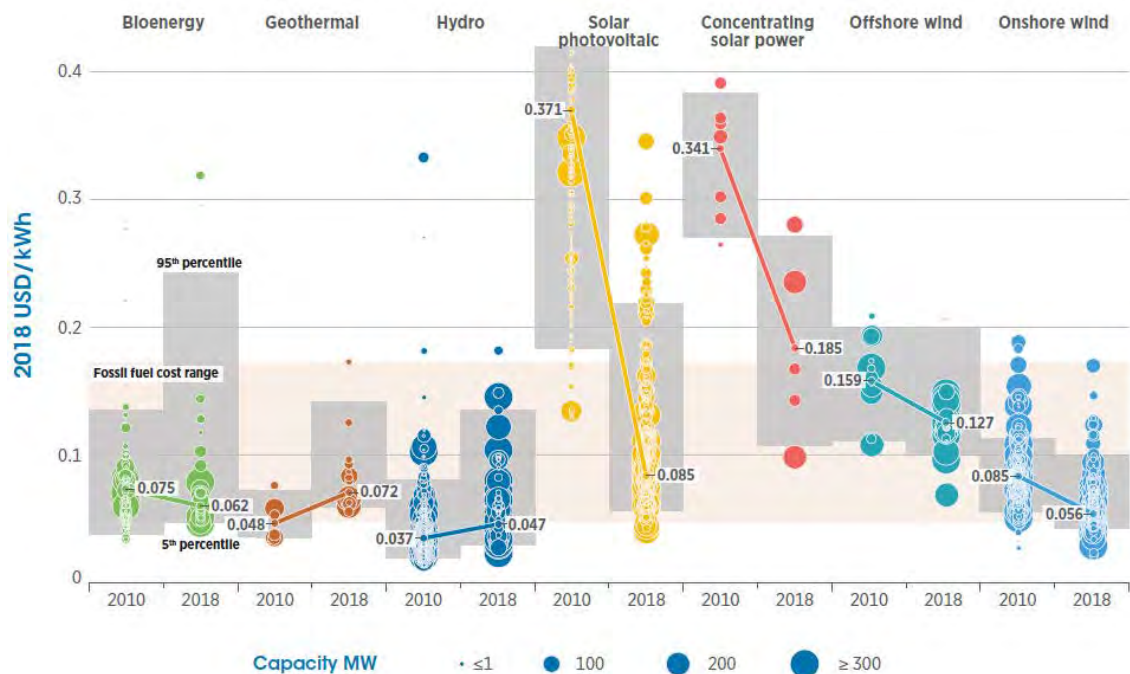
【世界GDP比削減費用】 NDCs:0.38% (6.5倍程度) ⇐ 最小費用 : 0.06%

最小費用 (限界削減費用均等化) : 6\$/tCO₂



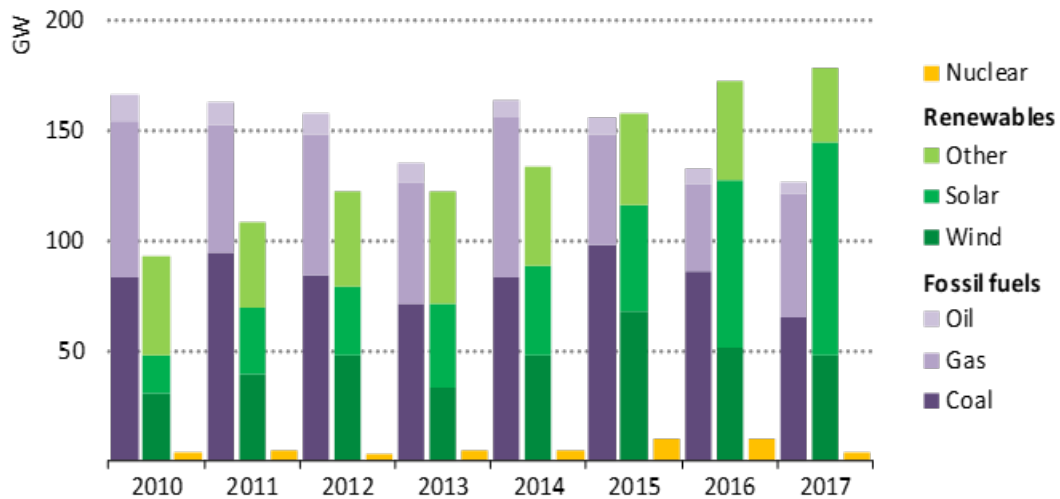
付図5 世界主要国の国別貢献 NDCs (2030 年、米国のみ 2025 年) の排出削減目標の限界削減費用推計

(出典) Akimoto et al. [23]

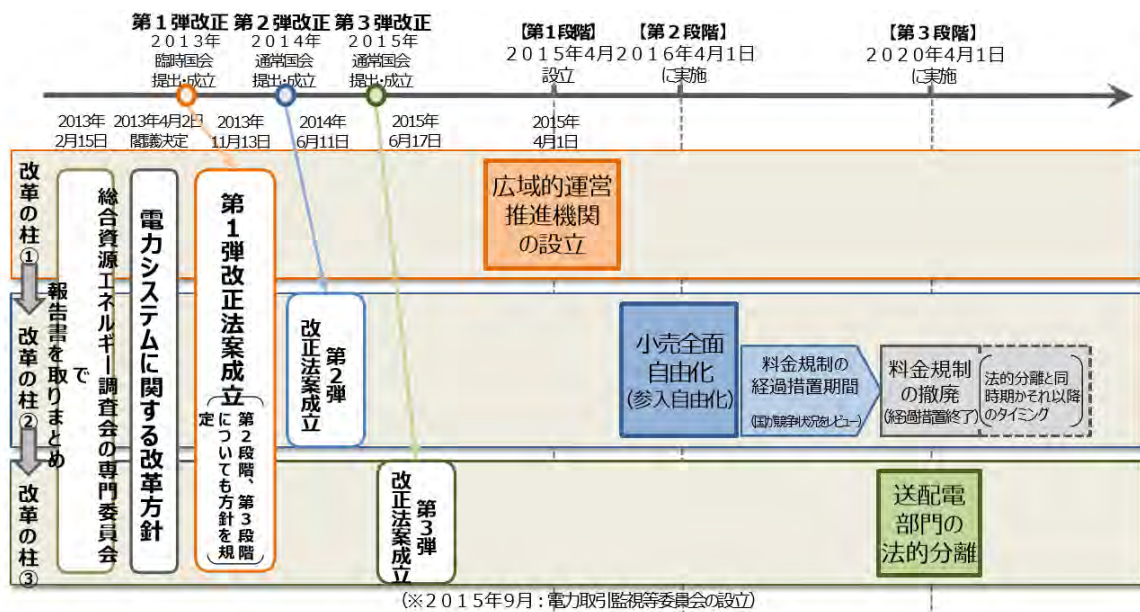


付図6 世界における太陽光発電コストの推移

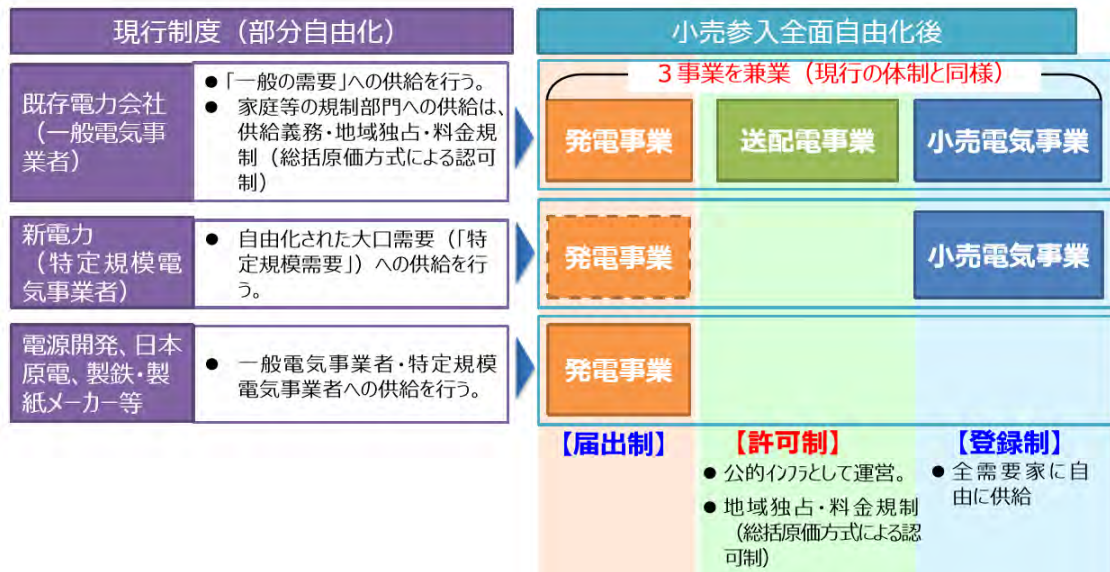
(出典) IRENA [26]



付図7 2010-2017年の年間の新設発電設備容量
(出典) IEA [28]



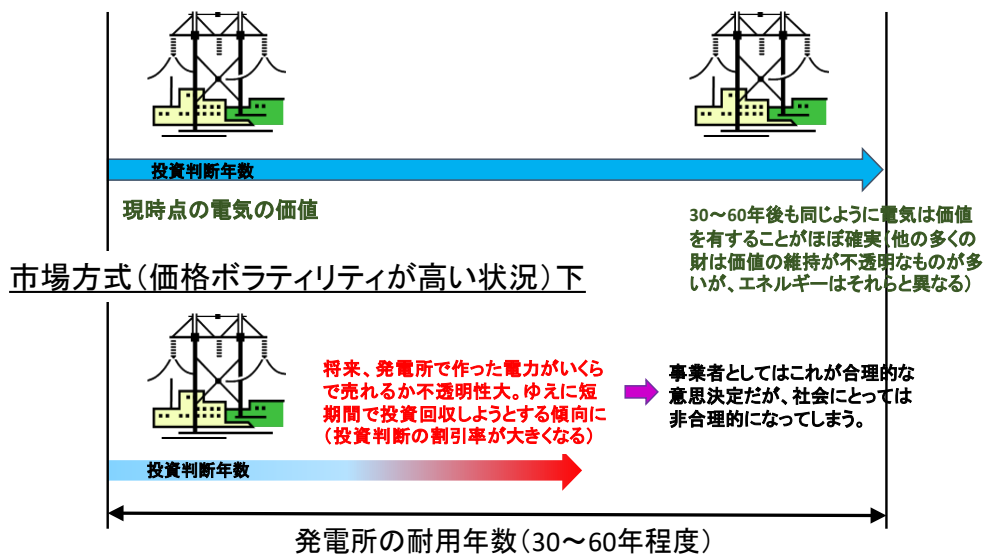
付図8 電力システム改革のスケジュール
(出典) 資源エネルギー庁 [38]



付図9 電力システム改革後の事業形態

（出典）資源エネルギー庁 [38]

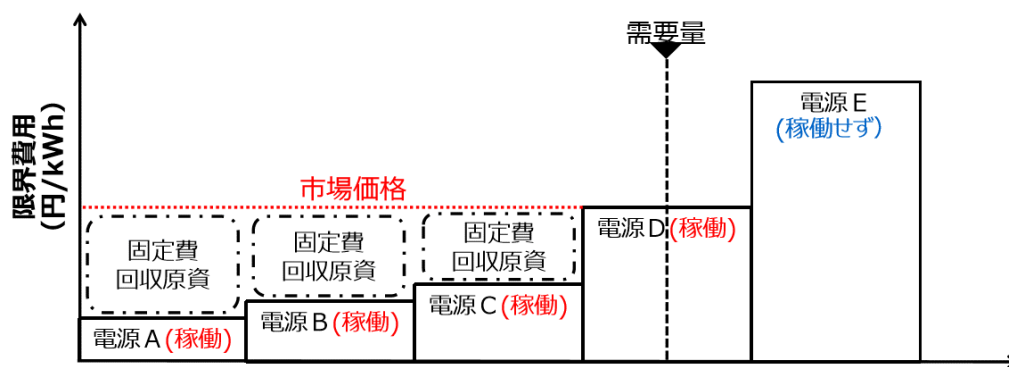
総括原価方式下



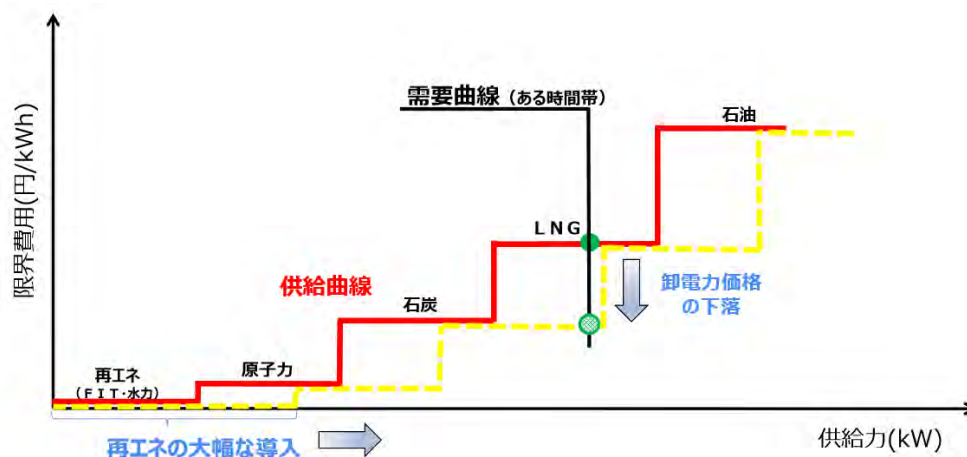
付図10 電力自由化の下での投資リスク増大時の電源投資と投資回収年のイメージ

（出典）秋元 [39]

a) 卸取引市場における発電コスト回収の仕組み（イメージ）



b) 再生可能エネルギー導入進展時の卸取引価格の変化（イメージ）



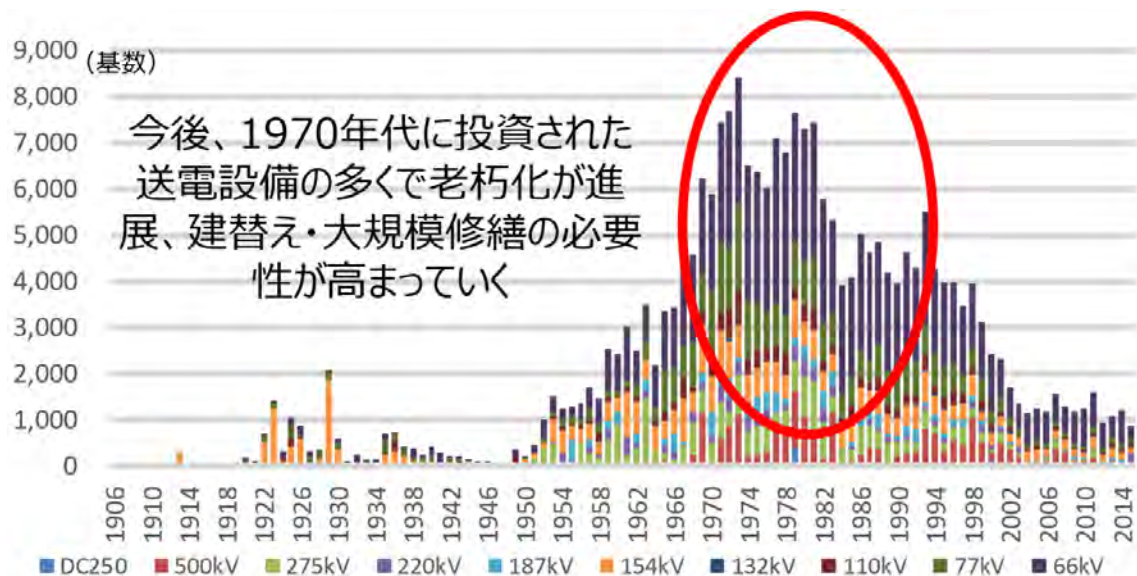
付図 1 1 電力卸取引市場における発電コスト回収の仕組みと再エネ導入拡大の影響
（出典）電力広域的運営推進機関 [40]

電源等の価値*	取引される価値（商品）	取引される市場
電力量 【kWh価値】	実際に発電された電気	卸電力市場 （スポット、ベースロード市場等）
容量（供給力） 【kW価値】	発電することが出来る能力	容量市場
調整力 【ΔkW価値】	短時間で需給調整できる能力	調整力公募 → 需給調整市場
その他 【環境価値**】	非化石電源で発電された電気 に付随する環境価値	非化石価値取引市場

(*) 上図は電源を想定して記載しているが、ネガワット等は需要制御によって同等の価値を生み出すことが可能。
また、一つの市場において、複数の価値を取り扱う場合も考えられる。
(**) 環境価値は非化石価値に加えて、それに付随する様々な価値を包含した価値を指す。

付図 1 2 日本で導入もしくは検討されている各種電力関連市場

（出典）資源エネルギー庁 [41]



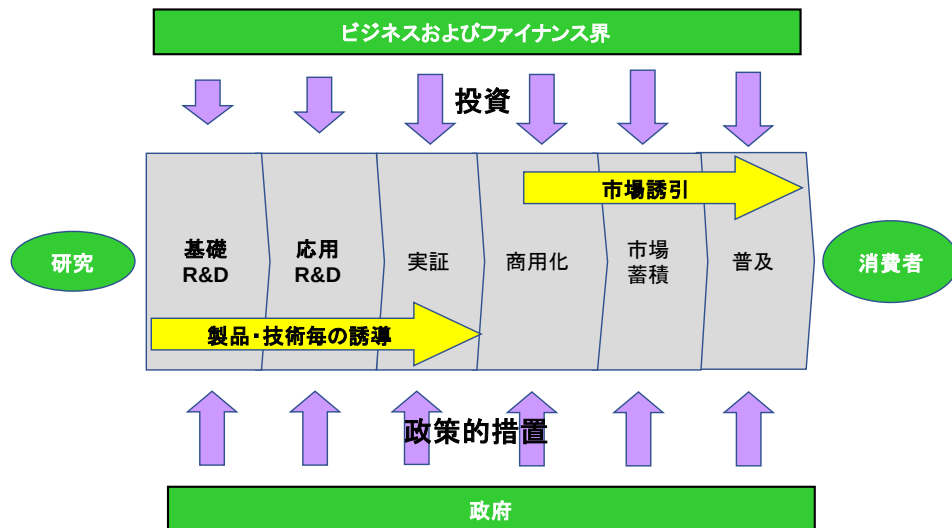
付図 1 3 全国の送電鉄塔の建設年別の内訳

(出典) 資源エネルギー庁 [44]

CO ₂ 大量排出セクター	プロセス・製品	排出量	主要な排出要因	代替技術例	技術分野
電力	火力発電	4.6億トン	✓ 石炭・石油の燃焼	✓ 再エネ・蓄エネ ✓ CCS ✓ パワエレ ✓ 原子力	水素 CCUS 再エネ・蓄エネ パワエレ
自動車	内燃機関	1.86億トン	✓ ガソリン・ディーゼルの燃焼	✓ 電気自動車 ✓ 燃料電池	
鉄鋼	高炉	1.2億トン	✓ 石炭の燃焼 ✓ 石炭による還元	✓ CCS ✓ 水素還元	
	電炉	0.07億トン	✓ 電気の使用	✓ 再生可能エネルギー	
化学	石油化学	0.31億トン	✓ ナフサの分解	✓ CCU ✓ CO ₂ フリー水素	
	アンモニア	0.03億トン	✓ 水素製造のための天然ガス改質	✓ CO ₂ フリー水素	
窯業・土石	セメント	0.4億トン	✓ 炭酸カルシウムの焼成	✓ 燃焼灰 + CCU ✓ CCS	
合計		8.2億トン	※電力と各セクターとのCO ₂ 排出量の重複分は除いて集計		

付図 1 4 CO₂ 排出量を大幅に削減できる技術分野（エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会 報告書）

(出典) 経済産業省・文部科学省、2019 [47]



付図 1 5 イノベーションプロセスにおける政府の役割（基礎研究から事業化・普及に至る各段階での支援が必要とされる）

（出典）Stern [91]

対象年度	事業名	CO2削減 単価 [円/tCO2]	執行額 累計 [億円]	所管省庁	シート 番号
2016	バイオ燃料利用体制確立促進事業	8,600,017	23.6	環境省	H29-36
2016	上下水道システムにおける省CO2化推進事業	2,100,000	5.3	環境省	H29-62
2016	再エネ等を活用した水素社会推進事業	772,000	34.1	環境省	H29-54
2016	アジア地域におけるコベネフィット型環境汚染対策推進事業	720,000	32.8	環境省	H29-92
2016	地方公共団体カーボン・マネジメント強化事業	606,423	10.3	環境省	H29-59
2016	離島の低炭素地域づくり推進事業	599,000	30.1	環境省	H29-38
2016	地下水水質汚濁対策に資する地域循環型バイオガssystem構築モデル事業	426,686	5.9	環境省	H29-12
2016	業務用施設等における省CO2促進事業	426,097	11.1	環境省	H29-66
2016	再生可能エネルギー電気・熱自立的普及促進事業	408,001	22.0	環境省	H29-58
2016	次世代省CO2型データセンター確立・普及促進事業	299,664	0.9	環境省	H29-64
2016	食品廃棄物・家畜排泄物等活用地域循環型バイオガssystem構築モデル事業	281,566	7.1	環境省	H29-13
2016	省エネルギー性能の優れた建設機械の導入事業費補助金	242,248	48.1	経産省	H29-245
2015	洋上風力発電実証事業	207,555	90.8	環境省	H28-29
2016	先進環境対応トラック・バス導入加速事業	183,636	1.1	環境省	H29-76
2015	地熱・地中熱等の利用による低炭素社会推進事業	179,803	24.7	環境省	H28-50
2015	次世代エネルギー技術実証事業費補助金	164,487	36.6	経産省	H28-327
2016	モーダルシフト・輸送効率化による低炭素型静脈物流促進事業	163,000	8.9	環境省	H29-7
2016	自立・分散型低炭素エネルギー社会構築推進事業	149,919	10.0	環境省	H29-35
2016	賃貸住宅における省CO2促進モデル事業	138,153	13.2	環境省	H29-65
2016	省CO2型社会の構築に向けた社会ストック対策支援事業	124,348	33.4	環境省	H29-60
2016	設備の高効率化改修支援モデル事業	97,656	7.6	環境省	H29-50
2016	先進技術を利用した省エネ型自然冷媒機器普及促進事業	87,545	180.7	環境省	H29-40
2016	輸送機器の燃費改善事業費補助金	70,629	39.6	経産省	H29-332
2016	低炭素化に向けた公共交通利用転換事業	68,000	18.1	環境省	H29-43
2016	木質バイオマスをエネルギーを活用したモデル地域づくり推進事業	66,100	51.3	環境省	H29-29
2015	地域での地球温暖化防止活動基盤形成事業	59,304	52.0	環境省	H28-23
2016	エネルギー使用合理化事業者支援補助金(民間団体等分・LPガス分)	46,804	28.2	経産省	H29-308
2015	省エネルギー・省ロジスティクス等推進事業費補助金	43,000	109.3	経産省	H28-346
2015	省CO2型リサイクル高度化設備導入促進事業	40,300	16.8	環境省	H28-55
2016	エネルギー使用合理化等事業者支援補助金(民間団体分・天然ガス分)	37,500	215.6	経産省	H29-311
2016	物流分野におけるCO2削減対策促進事業	36,017	22.9	環境省	H29-69
2016	先導的「低炭素・循環・自然共生」地域創出事業	26,280	90.2	環境省	H29-8
2015	小水力発電導入促進モデル事業費補助金	26,000	10.8	経産省	H28-328
2016	バーチャルパワープラント構築実証事業費補助金	25,789	16.0	経産省	H29-330
2016	LED照明導入促進事業	19,800	9.1	環境省	H29-63
2016	地域経済と連携した省CO2促進モデル事業	17,091	6.3	環境省	H29-49
2016	低炭素ライフスタイル構築に向けた診断促進事業	16,403	4.2	環境省	H29-41
2016	地域の特性を活かしたエネルギーの地産地消促進事業費補助金	16,000	45.8	経産省	H29-268
2016	燃料電池の利用拡大に向けたエネファーム等導入支援事業費補助金	14,196	704.9	経産省	H29-260
2016	低炭素型廃棄物処理支援事業	13,277	9.9	環境省	H29-57
2016	住宅・ビルの革新的省エネルギー技術導入促進事業費補助金	12,532	460.0	経産省	H29-275
2016	エコリース促進事業	9,783	91.0	環境省	H29-9
2016	地域交通のグリーン化を通じた電気自動車の加速普及促進事業	8,767	10.4	国交省	H29-43
2015	低炭素価値向上に向けた社会システム構築支援事業	7,232	217.3	環境省	H28-33
2016	エコチューニングビジネスモデル確立事業	6,859	4.8	環境省	H29-39
2016	CO2削減ポテンシャル診断推進事業	5,920	49.1	環境省	H29-25
2016	二国間クレジット制度(JCM)資金支援事業(ADB拠出金)	5,690	48.0	環境省	H29-86
2015	二国間クレジット制度(JCM)基盤整備事業(制度構築・案件形成支援)	5,360	161.0	環境省	H28-72
2016	廃棄物処理処分場等への太陽光発電導入促進事業	5,187	4.4	環境省	H29-6
2015	環境対応車普及促進対策	4,923	951.5	国交省	H28-43
2016	モーダルシフト等推進事業	4,712	2.8	国交省	H29-66
2016	自立・分散型エネルギー設備等導入推進事業	4,158	0.9	環境省	H29-79
2016	二国間クレジット制度(JCM)に係る地球温暖化対策技術の普及等推進事業	3,778	97.2	経産省	H29-397
2016	水力発電の導入促進のための事業費補助金	3,296	5.4	経産省	H29-336
2016	エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業	3,083	785.1	経産省	H29-286
2016	環境金融の拡大に向けた利子補給事業	2,711	40.0	環境省	H29-15
2016	廃棄物焼却施設の余熱等を利用した地域低炭素化モデル事業	2,456	0.6	環境省	H29-56
2016	二国間クレジット制度(JCM)資金支援事業(プロジェクト補助)	2,441	142.1	環境省	H29-85
2016	中小トラック運送業者における低炭素化推進事業	2,427	84.4	環境省	H29-44
2016	水力発電新技術活用促進事業費補助金	1,940	2.7	経産省	H29-337
2016	省エネルギー投資促進に向けた支援補助金	1,598	2,499.7	経産省	H29-274
2015	地球温暖化対策技術普及等推進事業委託費	1,498	22.9	経産省	H28-444
2016	電気・熱エネルギー高度利用支援事業費補助金	1,290	11.7	経産省	H29-331
2016	中小水力・地熱発電開発費等補助金	1,048	70.4	経産省	H29-313
2016	エネルギー使用合理化特定設備等資金利子補給金	632	14.5	経産省	H29-277
2016	省エネルギー設備投資に係る利子補給金助成事業費補助金	111	90.2	経産省	H29-278

注：2016年度および2017年度行政事業レビューシートに「横断的な施策に係る成果目標および成果実績」欄に記載された2015年度実績または2016年度実績（明らかな単位記入上の間違いは修正した）。事業名は一部省略したことがある。執行額合計は2010年度以降の当該事業の執行額合計。シート番号は行政事業レビュー年度-事業番号。

付図16 行政事業レビューシートに記載された温暖化対策事業のCO₂削減単価
(出典) 木村[95]