

システム研究グループ



グループリーダー・
主席研究員

秋元 圭吾

主席研究員	友田 利正	主任研究員	伏見 温子
副主席研究員	永田 敬博	研究員	王 楠
主任研究員	和田 謙一	研究員	陳 姝凝
主任研究員	長島美由紀	研究員	中野 優子
主任研究員	本間 隆嗣	研究員	榊田 仁次
主任研究員	佐野 史典	研究助手	山本 清美
主任研究員	小田潤一郎	研究助手	斎藤美三子
主任研究員	山川 浩延	研究助手	北村喜代美
主任研究員	金星 春夫 (企画調査グループ兼務)	研究助手	工藤 幸子
主任研究員	林 礼美	研究助手	大西 尚子 (企画調査グループ兼務)
主任研究員	魏 啓為		

システム研究グループの研究活動報告

システム研究グループは、システムの思考、システムの分析を通して、地球温暖化やエネルギー対応に関する有用なる情報提供を国内外に行っている。本稿では、脱炭素化に向けた対応戦略について、システムの現状理解を踏まえた上で、将来のシナリオ分析を実施した結果を紹介する。

1. 国内外の情勢認識

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ともに、1.5℃に抑える努力を追求する。」とされ、そのために、世界の温室効果ガスの排出量を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 (SR15) 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¹⁾。IPCC第5次評価報告書²⁾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る。近年、長期的な実質ゼロ排出 (脱炭素化) の実現を目指す動きが強まっている。日本政府が2019年に策定した「パリ協定長期戦略」でも「最終到達点としての『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」とされた。

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。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。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、明確に強い正の相関関係が続いている。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。システム研では消費ベースCO₂排出量の推計とその要因分析を行うなどして、動向の把握を行ってきた³⁾。

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。例えばSR15では、世界が協調し世界の限界削減費用が国間で均等化した場合で、2050年に2℃目標のうち排出高位のケースでも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¹⁾。世界の協調体制が困難な現実、産業のリーケージなどを踏まえると、現実的に世界の対策として機能するような費用水準とは考えられない。

このような状況においては、「パリ協定長期戦略」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。いくつかの望ましい進展も見られている。太陽光発電のコスト低減は大きく進展した。半導体デバイス等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。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。

気候変動影響、国際情勢など、様々な不確実性が存在する。また、イノベーションは重要だが、すべての技術が成功するわけではない。逆に思いもつかなかった技術の革新が起こるかもしれない。長期的な実質ゼロ排出を目指しつつ、総合的なリスクマネジメント戦略が重要である。

2. 低炭素化・脱炭素化に向けた技術進展

脱炭素化においては、最終エネルギーは、原則、電気が水素とする必要がある。ただし、一部、バイオエネルギーおよび太陽熱等の直接熱利用、また、CO₂フリー水素と回収CO₂によって合成（メタネーション）したメタンでの利用などは可能となる。このとき、回収CO₂は水素の輸送媒体の役割を果たす。事実上、都市ガスをCO₂フリー水素で代替した効果でCO₂の削減となる。メタネーションは、既存の都市ガスインフラを利用できるメリットがある。IPCC報告書^{1, 4)}等でも示されているように、大きな排出削減を目指すほど、電力化率の向上が求められる。

当然ながら、脱炭素化を実現するには、電気、水素製造においては、脱炭素化（再生可能エネルギー、原子力、CCS）が必要である。

なお、完全に炭化水素を使わないことは現実的ではないので、正味ゼロ排出においても、ある程度の排出は許容し、植林、バイオエネルギーCCS（BECCS）、DACs（直接大気回収・貯留）等の負の排出技術（NETs）活用はあり得るし、対策オプションとして費用対効果やその他の視点から検討されるべきである。

2.1. 再生可能エネルギー

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。

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。例えば、アラブ首長国連邦では、3円/kWh程度の太陽光発電のプロジェクト例も見られてきている。ただし、これらは変動性再エネ（VRE）であり、導入比率が高くなれば、バックアップ電源や、バッテリー、水素など、系統安定化のための費用が別途必要になる。

2.2. 水素技術・CCUS

厳しい排出削減下においては、水素の役割も重要と考えられる。石炭・褐炭からガス化し、CCSを行って水素を製造する方法と、再エネ電気から水電解を行って水素を製造する方法が有望なCO₂フリー水素の製造方法と見られる。図1で見られるように、水素も燃料電池によって最終的には電気に転換されることは多く、水素を電気の代替手段として捉えるよりも、脱炭素化に向けた電化進展の大きな方向性の中での補完的な手段として捉えるべきと考えられる。

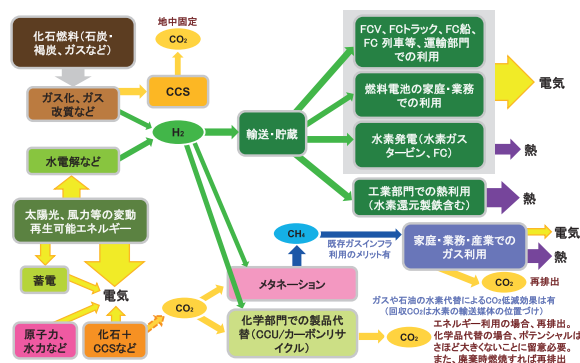


図1 脱炭素化における電気、水素システム

2.3. IoT進展によるシェアリング経済誘発の可能性

運輸部門では、CASE（Connected, Autonomous, Sharing/Service, Electric）が大きな変化の方向性となってきている。そして、これまでの乗用車を保有する形態から、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。完全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、それにより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（EV）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。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超えて、必要以上にエネルギー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。

ただし、利便性の向上によってGHG排出がかえって増大する可能性には注意が必要である。

3. 世界エネルギー・温暖化対策モデルによる分析・評価

3.1. モデル概要

世界エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+ (Dynamic New Earth 21+) によって分析・評価を行った。DNE21+は2100年までについての評価が可能であり、世界を54国・地域に分割している（面積の大きな国は更に分割しており計77地域分割）。エネルギー供給サイドのみならず、需要サイドについても多くの技術を具体的に積み上げてモデル化しており、400程度の技術を具体的に評価可能なモデルとなっている。モデルの改良は継続しており、とりわけ正味ゼロ排出が求められてきている中で、従来以上に、多様なオプションについて、具体的なモデル化を進めてきている。例えば、2019年においては、国際海運部門についても、DNE21+において技術を具体的に積み上げたモデル化を行い、LNGや水素船等への転換オプションを考慮した。また、メタネーションオプション等についても考慮した。

3.2. 分析シナリオの想定

表1のようなシナリオを想定し、パリ協定2℃目標と整合的、また、日本の地球温暖化対策計画における長期目標2050年▲80%と整合的な目標（G7各国が▲80%と想定）について分析を行った。2℃シナリオについては、>50%確率（IEA ETPシナリオの2DS相当で、世界GHG排出量は2050年に▲40%程度）と、>66%確率（B2DS相当で、世界GHG排出量は2050年に▲70%程度）の2種類の排出経路を想定した。また、上記2節で指摘した動向を踏まえたシナリオ想定を行った。具体的には、太陽光発電のコスト低減がとりわけ中東・北アフリカ地域で一層進み、2050年には2~4円/kWh程度で多くのポテンシャル供給が可能と想定したケース、および、完全自動運転車が2030年以降に実現して、カーシェアリング・ライドシェアリングが進展し、自動車台数が減少し、それに

伴い、鉄鋼や化学製品需要が低下するケースについても分析を行った。なお、社会経済シナリオは共有社会経済パス（Shared Socioeconomic Pathways: SSPs）のうち、中位的なSSP2ベースを用いた。2050年の世界人口は92億人、2000~2050年間の世界GDPの平均成長率は2.4%/yrである。

表1 モデル分析シナリオ

シナリオ名	世界排出シナリオ	G7排出シナリオ	再エネコスト	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)
REF_1	ベースライン (特段のCO ₂ 排出制約なし)		標準	想定せず
2DS-a_1	2℃未満 (>50%) : [2DS]相当	[a]▲80% in 2050	標準	想定せず
2DS-a_2			低コスト(中東・北アフリカ中心)	
2DS-b_1			標準	想定せず
2DS-b_2			低コスト(中東・北アフリカ中心)	シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)
2DS-b_3				
B2DS-b_1	2℃未満 (>66%) : [B2DS]相当	[b]世界限界削減費用均等化(費用最小)	標準	想定せず
B2DS-b_2			低コスト(中東・北アフリカ中心)	
B2DS-b_3				シェアモビリティ進展 (完全自動運転車実現)

注) 2DS、B2DSは、IEA ETP2017の2℃シナリオ

3.3. 分析結果

表2および3には、各シナリオの2050年のCO₂限界削減費用、CO₂削減費用を示す。まず、2℃目標でも、>50%確率（2DS）か、>66%確率（B2DS）かで世界の削減費用に大きな差が見られる。例えば、b_1, b_2ケースでは、B2DSにおける限界削減費用やCO₂削減費用は、2DSの3倍程度もしくはそれ以上にもなると推計される。なお、2DSシナリオにおいて、日本国内で▲80%を想定すると、相当コスト増となるため、国内での削減率の引き上げだけでなく世界貢献も含めた削減が求められる。中東等を中心とした再エネコスト低位ケースの場合（a_2, b_2）、世界の対策費用低減に大きな効果が認められる。また、シェアモビリティ実現ケース（b_3）では、限界削減費用が大きく低下する（B2DSでは、b_2ケースが477 \$/tCO₂に対して、b_3ケースは295 \$/tCO₂）とともに、シェアモビリティ非実現ケース比では、自動車保有に対する支出が減少し、他のCO₂排出削減費用を相殺し、正味で負の費用が推計されるほど大きな効果が推計される。

図2は、各シナリオの部門別の世界CO₂排出量である。排出削減が厳しくなるにつれ、まず発電部門での削減（再エネ、原子力、CCS等）、また、植林でのCO₂固定、運輸部門でのハイブリッド車（HV）、プラグインハイブリッド車（PHV）の拡大等が見られる。

更に厳しい削減が必要となると、BECCS、鉄鋼部門でのCCS、自動車のEV、燃料電池車（FCV）化等が費用効率的となる。更に厳しく正味ゼロから負CO₂排出となると、運輸部門トラックのFCV化、メタネーション利用等が費用効率的になる。シェアモビリティ想定ケース（b_3）では、特に2050年頃の発電での排出削減を緩和する。

表2 2050年のCO₂限界削減費用 (\$/tCO₂)

	2DS-a_1	2DS-a_2	2DS-b_1	2DS-b_2	2DS-b_3	B2DS-b_1	B2DS-b_2	B2DS-b_3
日本	552	512	161	157	132	528	477	295
その他の国	153	143						

表3 2050年のCO₂削減費用 (billion US\$/yr)

	2DS-a_1	2DS-a_2	2DS-b_1	2DS-b_2	2DS-b_3	B2DS-b_1	B2DS-b_2	B2DS-b_3
日本	110	82	24	27	ネガティブ費用	71	60	ネガティブ費用
世界全体	2102	1654	1603	1296	ネガティブ費用	5716	4164	ネガティブ費用

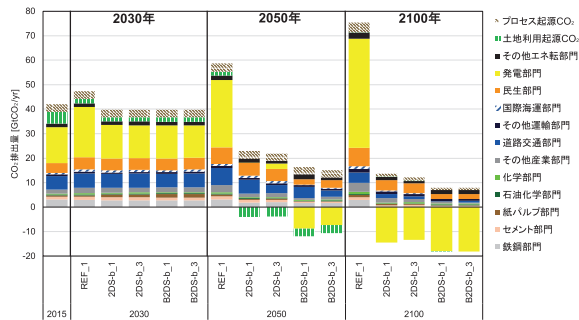


図2 世界の部門別CO₂排出量

図3～8には、それぞれ、世界の一次エネルギー供給量、世界の発電電力量、産業部門、民生部門、運輸部門、国際海運（運輸部門の内数）の最終エネルギー消費量を示す。

一次エネルギー供給量を見ると、2100年では、2DS、B2DSともに、石炭についてはほぼすべてCCSが求められ、ガスについても相当量がCCS付きと推計される。ただし、一部の化石燃料については、CCS無しも残っており、その分、BECCSで負排出として正味でゼロもしくは負排出とする方が、経済合理的との結果となっている。ただし、現実的にこのような大規模なBECCS利用が可能かどうかは検討、議論は引き続き必要と考えられる。

世界の発電電力量の伸びは大きい。2℃シナリオでは、2030年に向けてはガスの拡大、2050年以降は、再エネ、原子力の拡大、CCS利用が費用効率的になっている。2DSでは特に2050年に向けてコジェネの役

割の重要性が増す。2DSでは2100年頃、B2DSでは2070年頃のCO₂排出ゼロに対応して、BECCSの利用の増大が見られる。とりわけ、再エネコスト低位ケースの場合（a_2, b_2）、太陽光発電の一部については、系統に接続せず、水素製造に特化した使われ方も経済合理性を有する可能性が示されている。シェアモビリティケースでは、特に2050年前後においてはBECCSの役割が低下する。また、特にPVコスト低位シナリオでは、水素製造用も含め、2100年の太陽光発電のシェアは大きく増大する。

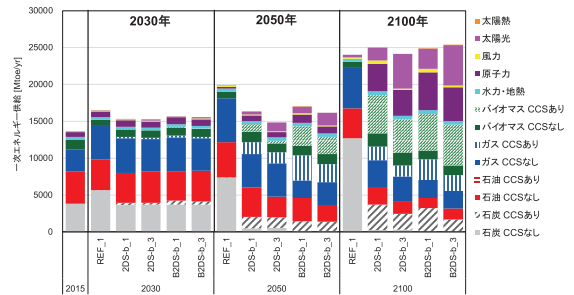


図3 世界の一次エネルギー供給量

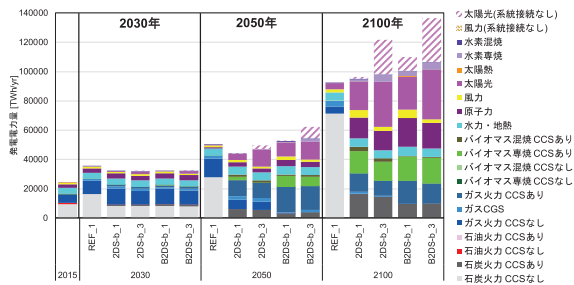


図4 世界発電電力量

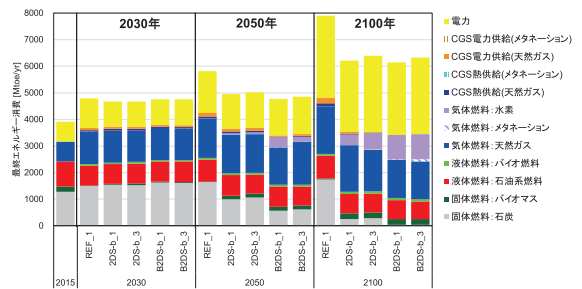


図5 産業部門の世界的最終エネルギー消費量

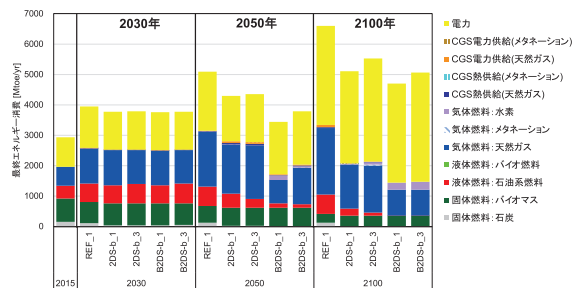


図6 民生部門の世界的最終エネルギー消費量

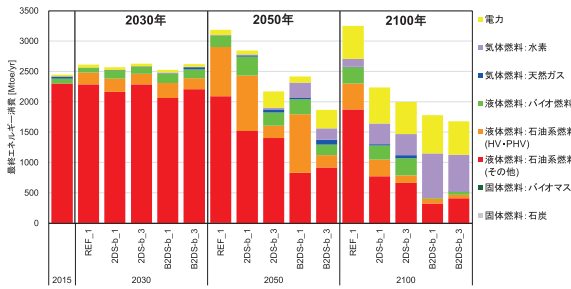


図7 運輸部門の世界の最終エネルギー消費量

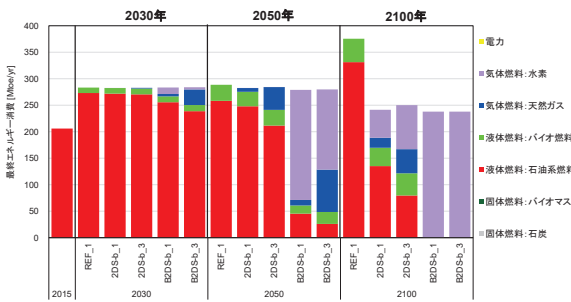


図8 国際海運の最終エネルギー消費量 (図7の内数)

産業部門においては、2100年に向けて電力、ガスの比率が増す。2℃シナリオでは、21世紀後半では、鉄鋼部門で、高炉・転炉法から水素直接還元製鉄への転換も見られる(石炭から水素利用に)。2℃シナリオでは、21世紀半ば頃から、セメント生産のガス利用増大が見られる。

民生部門では、非商業用バイオマスの利用は緩やかに低下していく。また、石油は2℃シナリオでは低下する。一方、電力とガス消費量は上昇する。とりわけ電力の消費量は大きく上昇する。2050年以降、2℃シナリオでは、一部、水素の利用(一部のケースでは水素をメタネーションして利用も)が見られる。

運輸部門においては、2℃シナリオでは、EV、FCV、バイオ燃料の拡大が見られる。特にB2DSの2050年以降は、FCトラックを含め水素燃料の利用が拡大する。B2DSの2100年になるとバイオ燃料が減少するが、それは、発電部門でのBECCS利用が費用対効果が高いためである。B2DSでは発電部門でバイオマス利用が増大するが、バイオマスの資源制約があるため、運輸部門では利用が減少する傾向が見られる。シェアモビリティシナリオ(b_3)では、他シナリオと比較し、特に2050年の石油の消費量が大きく低下する可能性が示される。また、稼働率の上昇によって、FCV、EVのシェアが増大する。国際海運では、2050年頃にかけてバイオ燃料およびガス利用が一部見られ

ようになり、また、B2DSでは2050年頃以降、水素利用が経済合理的になる可能性が示される。

図9、10には、それぞれ、世界のCO₂回収、利用、貯留バランス、水素バランスを示す。

当然ではあるが、排出削減が厳しいB2DSでは、CO₂回収量が増加する傾向がある。21世紀後半に向けて、正味ネガティブ排出が求められるため、特にBECCSの利用が大きくなっている。回収したCO₂は、メタネーションやCCUでの利用も若干見受けられるが、圧倒的に帯水層でのCO₂貯留が大きい。

水素製造は、PVコストが標準ケースの場合は、石炭・褐炭からのガス化+CCSが経済合理的な傾向となる。一方、PVコスト低位ケースの場合(a_2, b_3)は、PV+水電解が経済合理的な傾向が見られる。水素利用先は多様であり、発電や、水素直接還元製鉄、運輸部門での利用の他、一部、メタネーションでの水素利用も見られる。

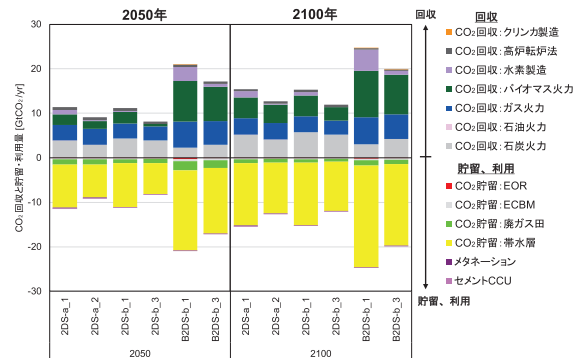


図9 世界のCO₂回収、利用、貯留バランス

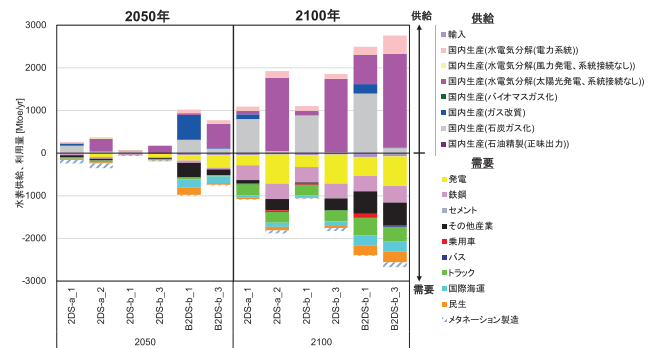


図10 世界の水素需給バランス

4. まとめ

パリ協定では、2℃目標や21世紀後半に実質ゼロ排出目標等が掲げられた。また、気温安定化のためにはいずれは正味でほぼゼロ排出とする必要がある。しかし、現状延長線での技術進展では、2℃目標、正味ゼロ排出等実現のためには、相当大きな費用が必要と見られ、その実現性は相当乏しいと考えざるを得ない。よって、広範なイノベーションが必須と考えられる。エネルギー供給サイドは無論のこと、デジタル技術等を利用したエネルギー需要サイドの技術イノベーションとそれに誘発される社会イノベーションは極めて重要である。

ただし、2℃目標を前提としたとしても、その排出経路は複数ある。また国際政治情勢も不確実性が大きい。不確実性を前提としつつ、賢いリスクマネジメントが必要である。脱炭素化に向けた各種技術の有用性は、想定する排出削減シナリオ、各技術の将来見通し等によって異なる。現時点では、気候変動科学、気候変動影響、気候変動対応の国際情勢を見極めながら、低炭素化を進める過程の中で、複数のオプションについて技術開発を行って、経済性の成立を徐々に見極めていくというリスクヘッジをせざるを得ない。

大幅排出削減に向けて、基本的に電力化率の向上が求められる。例えば、水素も、エネルギー、電力の脱炭素において重要なオプションである。一方、水素を現実に大規模に展開するためには、コストの大幅な低減が不可欠である。ただし需要が拡大しなければ、コスト低減は容易ではなく、コストを見極めながら、適切な需要拡大を志向することは重要と考えられる。

2℃シナリオ実現のためには、莫大な投資が求められる一方で、日本や欧米などにおいて、電力自由化の下で脱炭素化を進めていくことが必要となっており、資本集約的な（初期投資額が大きく、民間企業にとっては投資リスクが大きい）原子力、再エネ（+系統増強）、水素、CCS等に投資がしやすいような環境整備は重要である。また、投資回収の予見性が高い政策措置も重要と考えられる。

参考文献

- 1) IPCC 1.5℃特別報告書 (2018)
- 2) IPCC WG1 第5次評価報告書 (2013)
- 3) RITE Today (2019)
- 4) IPCC WG3 第5次評価報告書 (2014)