



# カーボンニュートラルに向けた わが国のエネルギー戦略について

(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE) システム研究グループリーダー・主席研究員 あきもと けいご 秋元 圭吾氏

いま、カーボンニュートラルに向けたさまざまな取り組みが国内外で展開されています。今回の特集では、エネルギー、環境システムの専門家として、政府の各種審議会・委員会の委員を務めてきた著者が、カーボンニュートラル実現のために重要な要素といわれる水素系エネルギーを中心に解説します。

直接的で目に見える利点を持つ対策や技術についてはもちろんのこと、定量的なシナリオ分析による費用効率性やその背景にある課題についても探究。わが国のGX推進法や水素社会推進法、CCS事業法についても触れるなど、科学者として、また政府戦略立案に参画する立場として多角的視点から、注目すべき考え方を私たちに提示しています。

## はじめに

2015年12月にパリで開催された国連気候変動枠組条約(UNFCCC)第21回締約国会議(COP21)において、2020年以降の温室効果ガス排出削減枠組み・目標となるパリ協定が合意され、2016年11月4日に発効した。パリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前比で2℃を十分下回るようにし、1.5℃未満も追求するとされた。2021年11月には第26回締約国会議(COP26)が英国グラスゴーで開催され、世界の平均気温の上昇を1.5℃に抑える努力を追求することを決意すると合意し、その後のCOPにおいて1.5℃目標を目指すことが確認されている。

日本政府も2020年10月、菅首相(当時)が所信表明演説で「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」と宣言した。また、2021年4月には、2030年の温室効果ガス排出量を46%減、さらに50%減の高みを目指すと従前の目標から深掘りを行った。2021年10月には、第6次エネルギー基本計画が閣議決定されるとともに地球温暖化対策計画、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略についてもそれぞれ改定し閣議決定された。

このように国内外で温室効果ガス排出の大幅な削減に向けた取り組みが加速している。他方、国内外で再生可能エネルギー(以下、再エネ)は大きく導入されてきたものの、世界の温室効果ガス排出量は引き続き増大し続けている。

これは、先進国では排出削減が進んでいるものの、鉄鋼や化学などのエネルギー多消費産業が先進国から途上国へと移転し、その排出量が大きく増大しているためである。先進国で化石燃料使用量が減っても、途上国で化石燃料のエネルギーを使って製品製造を行い、その製品を先進国が購入する構造になっている。グローバルに、産業でのCO<sub>2</sub>排出を含めカーボンニュートラルを進めていくことが求められている。

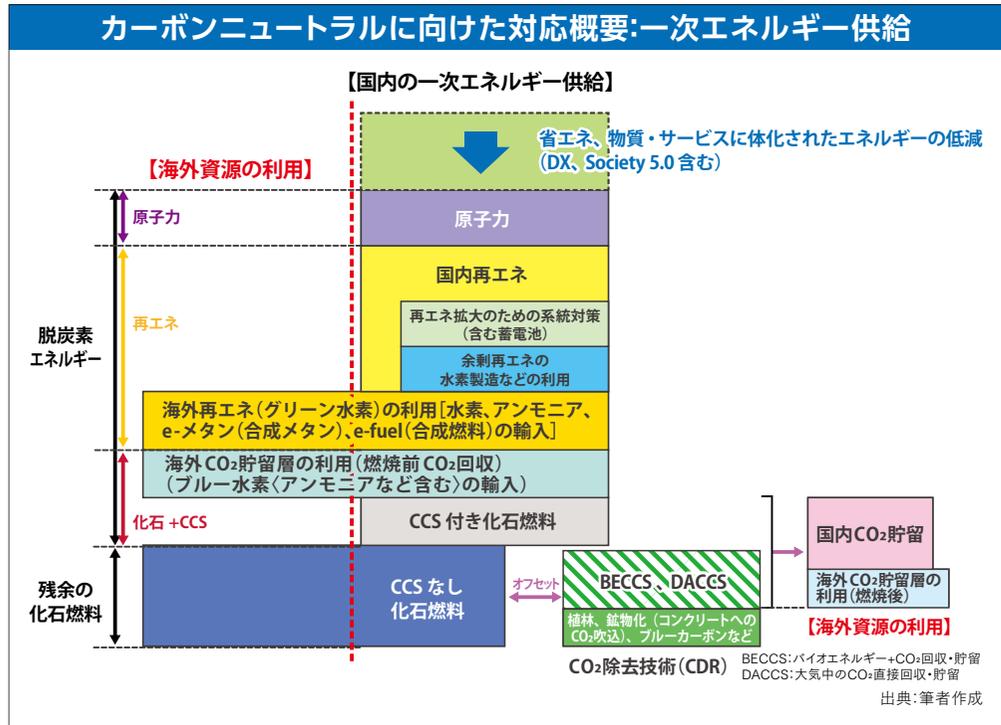
本稿では、カーボンニュートラル実現に向けた対策の方向性、とりわけ産業のカーボンニュートラル実現に向けて重要となる水素や水素系エネルギーの役割について述べることにしたい。また、これらに関連する政府の政策動向などについても紹介する。

## カーボンニュートラル実現に向けた対策

カーボンニュートラルの実現に向けて、一次エネルギー供給の視点で記載したのが【図1】(6ページ)である。カーボンニュートラルはエネルギーの脱炭素化が不可欠であるが、脱炭素化に貢献し得る各エネルギーには、技術的、社会的、経済的な制約がある。そのため、全体コストの最小化の視点も踏まえると、省エネルギーはカーボンニュートラル実現においても重要である。個別技術の省エネルギー

を超えて、シェアリング経済、サーキュラー経済の実現をもたらしような、デジタルトランスフォーメーション(DX)による社会変革が重要になってくると考えられる。

【図1】



るプロセスが追加的に必要なものの、水素を直接運ぶために液化水素などにするよりも、安価に運ぶことができる。また、既存のガス・石油インフラ、そして既存のガス機器や内燃機関自動車などを利用しながら、カーボンニュートラルを実現できるという長所がある。

いずれにしても、水素や水素系エネルギーは、電力同様、二次エネルギーとしてさまざまな一次エネルギーから製造でき、また多くの利用先があり、そして実質CO<sub>2</sub>ゼロ排出を実現し得る。

他方、分散的な排出源など、水素系エネルギーの利用が技術的、コスト的に難しい部門も存在し得る。そのため、負排出を実現するCO<sub>2</sub>除去技術(CDR)の活用も重要とみられる。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の最新報告書でも、「CO<sub>2</sub>またはGHG(温室効果ガス)の正味ゼロを達成しようとするならば、削減が困難な残余排出量を相殺するCDRの導入は避けられない」としている。CDRには植林や鉱物化などがあり、これらは相対的には安価な費用で実現できる可能性があり重要な対策であるが、ポテンシャルが限定的なため、CCS付きバイオエネルギー(BECCS)や大気中CO<sub>2</sub>直接回収貯留(DACCS)の活用も重要度が高いと考えられる。

再エネは、世界的には発電コストが急速に低減し、化石燃料発電と比べてもコスト競争力のある電源となってきた。わが国においても、2012年7月の再エネの固定価格買取制度(FIT制度)の導入以

その上で、一次エネルギーとしては、原則、再エネ、原子力、CO<sub>2</sub>回収貯留(CCS)付きの化石燃料のみで構成することが必要となる。そして、最終エネルギーとしては、電化を進めることが重要なカーボンニュートラル対策となる。電力は原子力や再エネなどの直接的な対策がある一方、非電力はこの後に説明する水素系エネルギーなどへの転換が必要なため、高コストになりやすい。そのため、ヒートポンプ給湯器や電気自動車など、電化を促進することは重要である。他方、電化に不向きな高温の需要用途も多く存在することから、エネルギー種を適切に組み合わせることが重要となる。

しかし、太陽光や風力発電など変動性再エネは、大量に導入すると時間帯によっては余剰になることが多いため、蓄電池などへの貯蔵とともに、水素エネルギーへの転換も重要な対策となり得る。ただし、国内の太陽光、風力発電は、一般的に海外に比べてコストや量の制約が大きいため、経済合理性の点から、海外の再エネ由来の電力を利用して生成された水素やCCS付きの化石燃料を転換した水素を活用することも考えられる(前者はグリーン水素、後者はブルー水素とも呼ばれる)。

さらに、利便性を高めるため、窒素や回収したCO<sub>2</sub>の炭素を水素に付加して、アンモニアや合成メタン(eメタン)<sup>※1</sup>、合成液体燃料(e-fuel)<sup>※2</sup>にして利用することも重要性が高いと考えられる。eメタンやe-fuelは、水素の直接的な利用に比べて、CO<sub>2</sub>を回収し合成す

降、再エネは約3倍に増加したが、これは欧州や世界平均を大きく上回るものである。日本は平地が少ないため、平地面積あたりの太陽光の導入容量は主要国の中では世界一となっている。再エネは希薄なエネルギーを活用するため、どうしても大きな土地面積が必要となる。そのため、一部では不適切な設置などもみられ、地域との共生を図った設置が重要になってきている。

また、太陽光や風力発電のポテンシャルは、需要地と離れたところに大きいため、送電線の増強が必要となる。また、太陽光や風力発電は変動性再エネであるが、電力は時々刻々、需要と供給をバランスさせなければならない。太陽光、風力発電が大量に導入されると、バックアップの火力発電、揚水発電、蓄電池、さらには電力から水素に転換するなど、需要と供給をバランスさせる方策が必要となる。現状では、これらには大きな費用を要するとみられる。よって、カーボンニュートラル実現に向けて、再エネの拡大は必須であるものの、費用抑制の点からも、またエネルギー安定供給・安全保障の点からも、バランスのとれたエネルギー構成を図ることが求められる。

CCSも有望な対策オプションである。CCSは、発電所や製鉄所などから排出されるCO<sub>2</sub>を回収して、地中深く(地下1000m〜3000m程度)に貯留すること、カーボンニュートラルを達成するものである。CO<sub>2</sub>はもともと、石油やガスなどの形で地中深くにあったものであるが、簡単にいえば、CO<sub>2</sub>の形で地中に戻すイメージを持て

【表1】

パリ協定長期目標準拠の複数のシナリオ想定								
シナリオ名	気温上昇	政策のスピード#	CDR	再エネ、EV	政策の地域差	他シナリオとの類似性		
						IPCC AR6	NGFS(2022)	IEA
Disorderly Below 2°C	1.7~1.8°C (ピーク:1.8°C、2100年1.7°C)	遅 (2030年 NDC)	中	中位進展	大 (主要先進国 2050年CN)	Likely below 2°C、NDC [C3b]	Disorderly: Delayed Transition	APS (WEO 2022)
Orderly Below 2°C	1.7°C程度	早 (2030年 NDC:全世界 MAC均等化)	小	高位進展	小 (MAC均等化)	Likely below 2°C with immediate action [C3a]	Orderly: Below 2°C	SDS (WEO 2021)
Disorderly 1.5°C	1.4°C (ピーク:1.7°C、2100年1.4°C)	遅 (2030年 NDC)	大	中位進展	大 (主要先進国 2050年CN)	1.5°C with high overshoot (IMP-Neg)[C2]	(Disorderly: Divergent Net Zero)*	
Orderly 1.5°C	1.4°C (ピーク:1.6°C、2100年1.4°C)	早 (2030年 NDC:全世界 MAC均等化)	中	高位進展	中 (主要先進国 2050年CN)	1.5°C with no or limited overshoot [C1]	Orderly: Net Zero 2050	
1.5°C-CO <sub>2</sub> -CN	1.5°C程度 (CO <sub>2</sub> パスからの概略値)	早 (2030年 NDC:全世界 MAC均等化)	小 (部門別 Near-zero of CO <sub>2</sub> )	高位進展	中 (主要先進国 2050年CN)	1.5°C with no or limited overshoot [C1]		NZE

#2021年12月までに提出されたNDCの2030年排出削減目標を反映  
\*排出経路については Orderly 1.5°Cに近い

出典:RITE「カーボンニュートラルに向けたトランジションロードマップの策定(2023年度版)」

### 定量的なシナリオ分析例

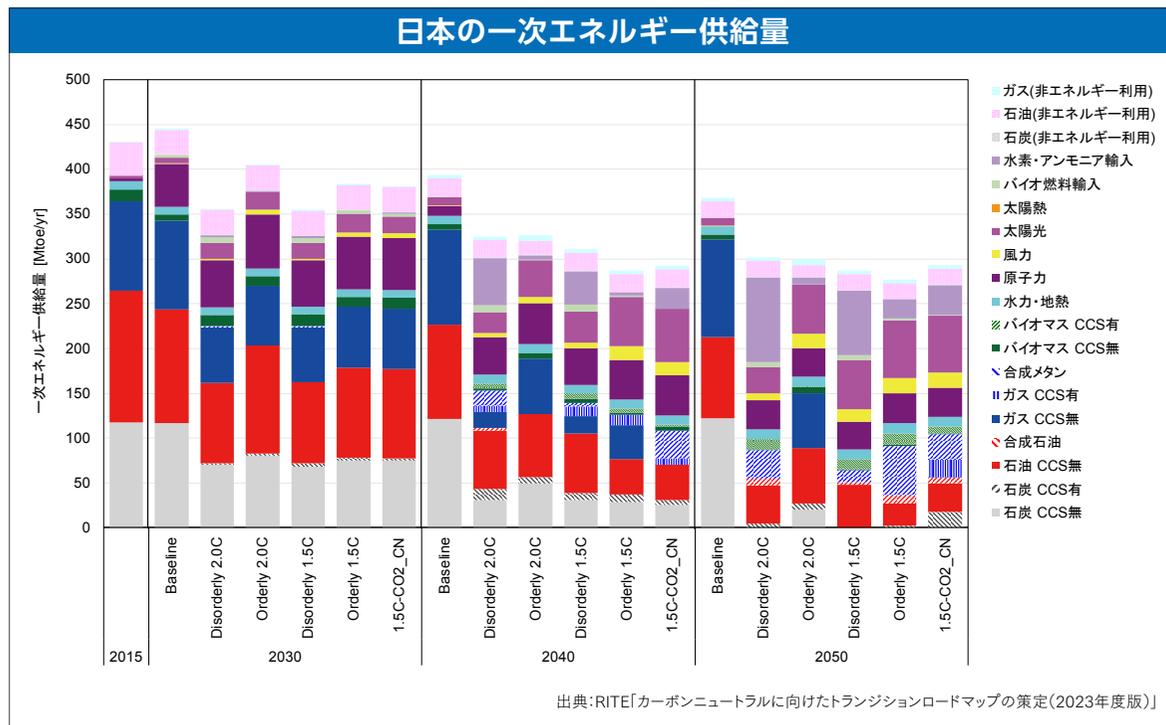
万能な技術は存在しないため、さまざまな技術を組み合わせ、できる限り安価なカーボンニュートラルを実現していくことが重要である。高いエネルギー価格は、ほかの消費を押し下げ、経済成長を妨げてしまう。また、他国との相対的なエネルギー価格も重要である。日本や一部の先進国だけが高い対策をとれば、日本などではCO<sub>2</sub>排出が減ったとし

※1 e・メタン/グリーン水素などの非化石エネルギー源を原料として製造された合成メタン(日本ガス協会HPより)  
※2 e・fuel/再エネ由来の水素を用い、発電所や工場などから回収したCO<sub>2</sub>を利用した合成燃料(資源エネルギー庁HPより)

ばよい。カーボンニュートラルの実現のためにはCCSも必須とみられる。ただし、日本の場合、海外に比べ、CO<sub>2</sub>貯留に適した地層が相対的には少ないことから、排出量と比べて貯留可能量は相対的には小さいとみられる。よって、回収したCO<sub>2</sub>を海外で貯留することも可能性としては追求しつつ、オプションを幅広く持ちながら対策を考えていく必要がある。

いずれにしても、現状では万能な技術は存在していない。また、各種技術の将来見通しや社会的な制約などについて不確実性が高い。第6次エネルギー基本計画では「あらゆる選択肢を追求する」とされているが、広い技術オプションを考え、技術中立で対策を考えていくことが重要である。

【図2】



でも、より安価なエネルギーが入手できる国に製造業の生産拠点が移り、世界全体ではCO<sub>2</sub>排出が減らないという事態になりかねないが、それは回避しなければならない。

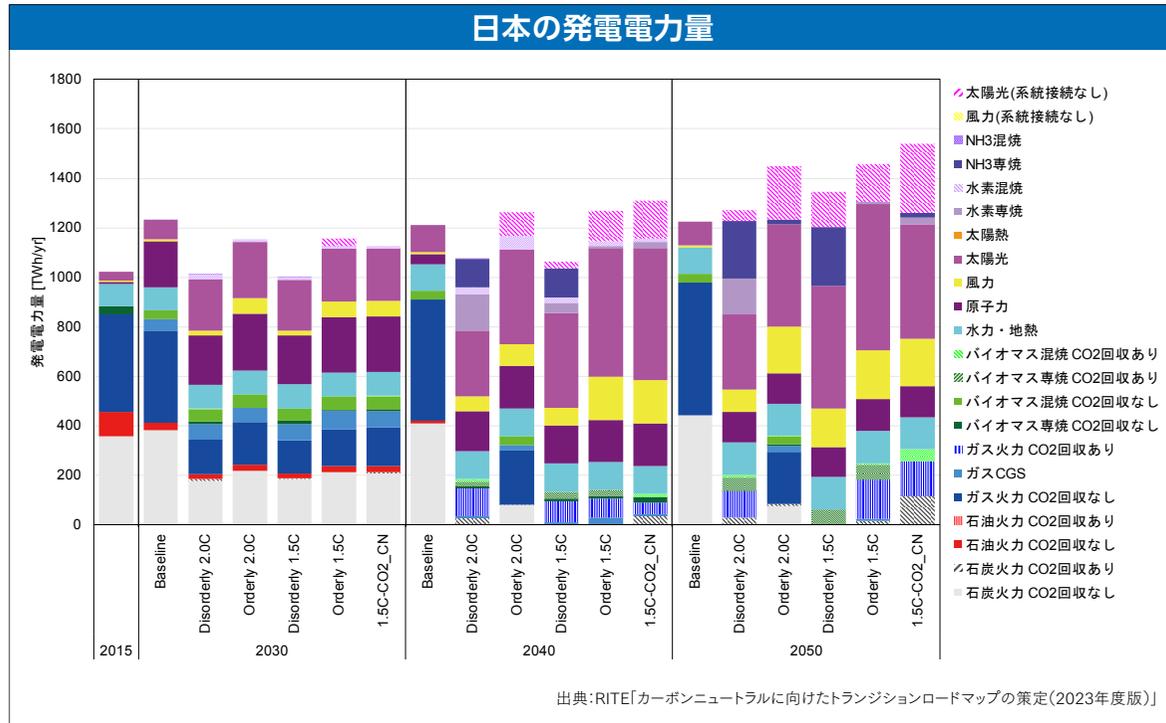
そこで、筆者らが開発してきた「エネルギー・温暖化対策評価モデルDNE21+」を用いて、パリ協定長期目標の2°Cや1.5°C目標、そして、日本で2050年カーボンニュートラルを実現する際に、費用を抑制する対策について分析したシナリオ例を示すこととした。

【表1】は分析において想定したシナリオである。将来の技術の不確実性は大きく、ここで示した想定以外のシナリオも多数考えられるが、典型的なシナリオとその幅として理解されたい。想定シナリオのうち、Orderlyシナリオは全世界で排出削減の規律がとれた世界観であり、また再エネのコスト低減をより大きく想定したシナリオである。他方、Disorderlyシナリオは不規則な世界観である。これに加えて、国際エネルギー機関(IEA)のNet Zero by 2050(NZE)に近いシナリオとして、CDRへの依拠が少ないシナリオを想定している。

なお、日本については、いずれのシナリオにおいても、2050年の総発電電力量に占める原子力比率の上限を10%で想定している。仮にこの上限の想定を緩和すれば、原子力はこれらの排出削減目標の下では費用を抑制する対策である。

【図2】に、日本の一次エネルギー供給量を示す。日本は、水素、アンモニア、e・メタンやe・fuelなどの水素系エネルギーの多くを輸入して利用することが費用対効果が高い

【図3】

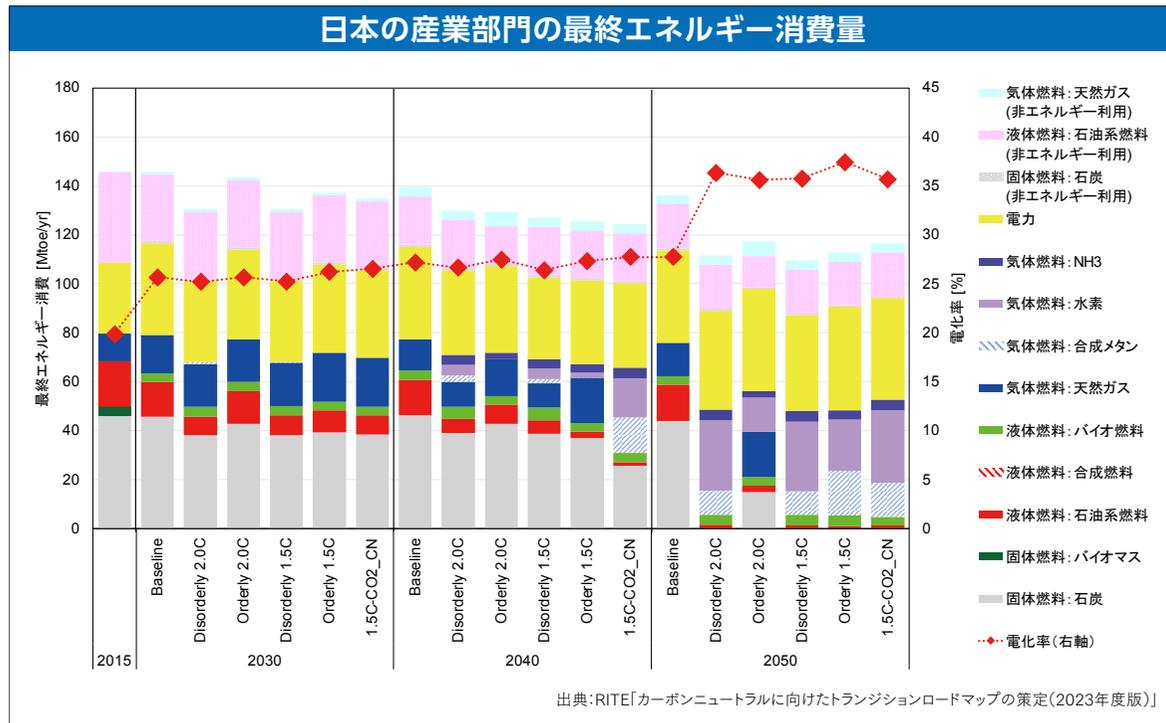


と評価されている。日本は、水素系エネルギー製造に必要な再エネ(グリーン水素)やCO<sub>2</sub>貯留(ブルー水素)のポテンシャルが海外に比べ大きくなく、またコストも高いため、大量の利用には海外からの輸入が経済合理的になりやすい。ただし、2050年に2013年比▲70%程度の排出削減を行うOrderly 2.0Cにおいて、それらの量は相対的に少なく、世界全体での2.0C目標達成のためには他国で排出削減を深掘りすることが全体として費用対効果が高く、CCSなしの石炭やガスの供給が残っている。

【図3】は発電電力量の展望である。電化を促進するため、とりわけ厳しい排出削減シナリオの下では総発電電力量が増加する。太陽光発電などの再エネの普及拡大やCCSの利用のほか、輸入した水素・アンモニアによる発電を行うことにより、CO<sub>2</sub>排出削減を進めることが費用効率的な対策と評価される。再エネのコスト低減を大きく想定した、Orderly 2.0C、Orderly 1.5Cと1.5C-CO<sub>2</sub>-カーボンニュートラルシナリオでは、再エネの比率がいつそう高まっている。しかしながら近年、大規模な太陽光発電や陸上風力発電の設置が難しくなってきた。地域と共生しつつ、社会制約を克服して、経済計算で試算される、このように大幅な拡大が可能かは議論の余地があるだろう。

水素供給については、再エネのコスト低減を大きく想定したシナリオでは、国内での水電気分解による製造もみられるが、そのほかのシナリオではもっぱら海外からの輸入となっている。利用用途については、2030年や2040年にお

【図4】



いては発電での利用が多いが、2050年になると鉄鋼部門の水素直接還元製鉄での利用が多くなる。アンモニアについては、海外で製造したブルーアンモニア<sup>※3</sup>の発電部門で利用が多いが、石油化学部門など、産業部門での利用もみられる。e-メタンは、民生部門やその他産業部門で利用されるほか、発電部門でも利用されている。e-メタン、e-fuelは、水素直接に比べて、輸送コストにも利点があることから、とりわけ再エネコストが安価な海外で製造し、国内まで輸送して利用するのが費用対効果が高いと評価されやすい。

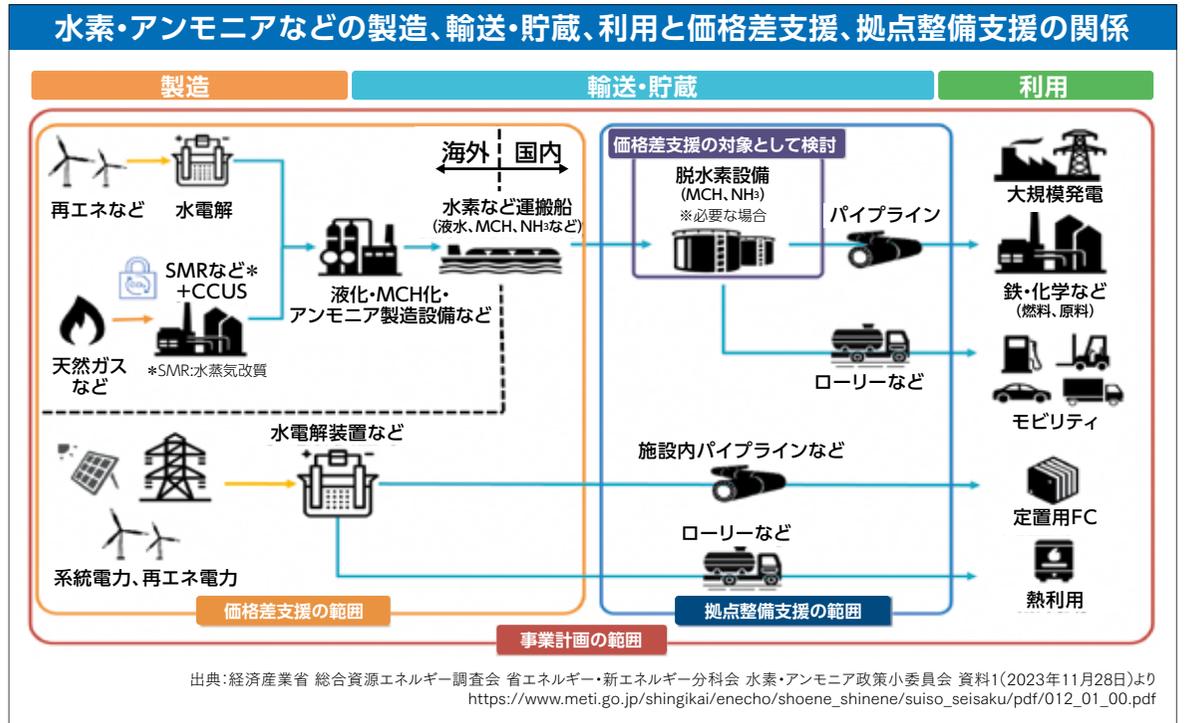
【図4】は産業部門の最終エネルギー消費量である。鉄鋼は現在、高炉・転炉法で石炭の高効率な利用がなされているが、2040年頃には鉄鋼部門での水素活用が必要になってくるほか、水素やアンモニア、e-メタン利用の必要性も示唆される。

※3 ブルーアンモニア/天然ガスや石炭を原料として開発・製造段階で生じるCO<sub>2</sub>をCCU/カーボンリサイクルやCCSによって回収したアンモニア(資源エネルギー庁HPより)

日本政府は、2022年2月のロシアによるウクライナ侵攻により、エネルギー安定供給の確保が世界的に大きな課題となる中、GXを通じて脱炭素、エネルギー安定供給、経済成長の3つを同時に実現するとしてきている。そして、2023年2月に「GX実現に向けた基本方針」を閣議決定

## 日本政府のGX政策動向

【図5】



まとめ

2050年頃のカーボンニュートラル実現に向けて、日本も世界主要国も対応をとってきている。そのためにも、カーボンニュートラルへのエネルギーシステムの円滑な移行が必要である。省エネルギー、再エネ、原子力、CCS・CDR、そして、それらの活用を促す、蓄電池、水素や水素系エネルギー(アンモニア、e・メタン、e・fuelなど)、蓄熱など、複合的な対策が求められている。

世界は、カーボンニュートラル実現そして自国の競争力強化に向けて、技術開発・普及の新たな競争となっている。世界の厳しい競争の中で劣後することなく、いち早く、よりよい技術をより安価に提供できるようにしていかなければならない。他方、他産業における需要創出の予見性、そして全体としての政府支援と一体となった対応が重要と考えられる。しかしながら一方で、公式的な2050年頃のカーボンニュートラル実現目標と現実には大きなギャップが存在している。さまざまなオプションを有し、ある程度の柔軟性を持ちながら、意欲的なカーボンニュートラル目標実現に官民、そして社会全体が一体となって取り組んでいくことが求められている。

水素系エネルギーに限っても、政府はGX経済移行債を財源に、水素系エネルギーの価格差補填や拠点整備の助成金によって、その普及を促そうとしている。カーボンニュートラル実現のためには、水素系エネルギーの活用は必須とみられる。政府の補助金をてこにして、水素系エネルギーの

し、同年5月に「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行の推進に関する法律(GX推進法)」が成立した。

GX推進法では、①GX推進戦略の策定・実行、②GX経済移行債の発行、③成長志向型カーボンプライシングの導入などが規定された。20兆円規模のGX経済移行債を発行し、それを呼び水として、官民あわせて150兆円規模のGX投資を促していく方針となっている。

そして、2024年5月には「脱炭素成長型経済構造への円滑な移行のための低炭素水素等の供給及び利用の促進に関する法律(水素社会推進法)」と「二酸化炭素の貯留事業に関する法律(CCS事業法)」が成立した。

水素社会推進法では、GXを進めるためのカギとなるエネルギー・原材料として、安全性を確保しながら、低炭素水素などの活用を促進することが不可欠とした上で、国が前面に立って、低炭素水素などの供給・利用を早期に促進するため、基本方針の策定、需給両面の計画認定制度の創設、計画認定を受けた事業者に対する支援措置や規制の特例措置を講じるとともに、低炭素水素などの供給拡大に向けて、水素などを供給する事業者が取り組むべき判断基準の策定などの措置を講じるとしている。計画認定を受けた事業者は、化石燃料と水素などのエネルギーとの価格差の補填や、水素などの拠点整備などについて、(独法)エネルギー・金属鉱物資源機構(JOGMEC)を通して政府からの助成金を受けられるようになる。水素などの価格差支援や拠点整備支援の対象範囲は【図5】のように検討がなされている。

開発そして産業への展開を図り、カーボンニュートラルに向けての国際的な競争に勝つていかなければならない。

他方、少なくとも現状では、水素系エネルギーはいずれもかなり高価である。政府の補助金もきわめて大きな金額が必要となるため、水素の価格が大きく下がっていかねば、GX経済移行債という国債の負担は将来世代に大きくなるのしかかっていく。仮にコストが下がらないまま、補助金を打ち切れば、水素系エネルギーを利用して製造された製品の価格が上昇し、海外との製品の価格差が広がり、日本の製品は価格競争力を失うリスクも存在している。リスクを適切に認識しつつも、国内外の事業機会の拡大につなげるべく、水素系エネルギーを含めたGXの実現に向けた取り組みが加速されることを期待したい。



(公財)地球環境産業技術研究機構(PIET) システム研究グループリーダー・主席研究員

秋元 圭吾

横浜国立大学 大学院工学研究科電子情報工学専攻 博士課程後期修了、博士(工学)。地球環境産業技術研究機構構入所(1999)。2007年より同システム研究グループリーダー・副主席研究員、2012年より現職。この間、2010、2014年 東京大学 大学院総合文化研究科 客員教授兼務、2022年11月より 東京工業大学 科学技術創成研究院 特任教授兼務など。経済産業省 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス基本政策小委員会、水素・アンモニア政策小委員会 他、産業界調査会、調達価格等算定委員会、内閣官房 GX実現に向けた専門家ワーキンググループ委員をはじめ、政府審議会・研究会委員多数。IPCC第5次および第6次評価報告書代表執筆者。専門はエネルギーシステム工学。