

# 2050年カーボンニュートラルで生じる エネルギー需給のパラダイムシフト



植村哲士



蓮池勝人

## CONTENTS

- I 2050年実質脱炭素に向けて舵を切った日本のエネルギー業界
- II エネルギー分野におけるパラダイムシフト
- III 実質脱炭素時代のエネルギーインフラ整備の留意点
- IV 不易流行を見極めた対応が必要

## 要約

- 1 菅首相の2050年実質脱炭素化社会宣言以降、電力・ガス・石油業界は、業界団体・企業ごとに脱炭素に向けたビジョンなどを公表している。主な対応策は、再生可能エネルギーの最大限の開発、原子力発電の利用、火力発電所燃料の脱炭素化（グリーン水素／アンモニア／合成メタン、ブルー水素／アンモニア、カーボンオフセットLNG）、水素から合成メタン・合成燃料の製造などである。
- 2 カーボンオフセットは必要不可欠な対策であるが、その基になる排出権の取り扱いには2050年に向けて変化すると予想される。具体的には、森林吸収、CCUS由来の排出権の需要増、途上国の脱炭素化への取り組みによる供給減である。
- 3 脱炭素化に向けて電力重視の流れがあるが、エネルギー供給のリダンダンシーや既存インフラの有効活用を考えると、電力・ガス・液体燃料のバランスが重要になる。エネルギー流通コストを含んだ最終エネルギー需要家時点のエネルギー価格を考慮しながら技術選択を行う必要がある。
- 4 Power-to-Gas／Fuel設備の整備方法について、先行する欧州でも議論が生じている。日本においても整備の促進や競争環境の整備など、さまざまな視点から設備整備ルールについての議論を始める必要がある。

## I 2050年実質脱炭素に向けて 舵を切った日本のエネルギー業界

2020年10月の菅首相の2050年実質脱炭素宣言以降、日本のエネルギー業界は脱炭素に向けて大きく舵を切っている。JERA、関西電力、日本ガス協会、東京ガス、大阪ガス、石油連盟などの主要な業界団体や企業が次々と2050年ビジョンを公表している（表1）。電力業界は、電力事業連合会からビジョンなどは公表されていないが、各社はビジョンなど

を公表しており、主に発電分野の燃料転換（石炭・天然ガスからグリーン水素・アンモニアへ）や再生可能エネルギー（再エネ）の利用増、原子力発電所の再稼働を想定している。

一方、都市ガス業界は、ガスの優位性が発揮できる高温の熱需要を想定して、メタネーションや排出権でオフセットしたカーボンニュートラルLNG（液化天然ガス）を中心に対応しようとしている。

石油業界は、21年4月12日時点で各社から

表1 電力・ガス・石油業界の業界団体・主要企業の2050年脱炭素社会に向けたビジョンなど

企業・団体名	主要文書	取り組み方針	URL
JERA	JERAゼロエミッション2050	2050年におけるCO <sub>2</sub> 排出量ゼロを目指し、再生可能エネルギー（洋上風力）とゼロエミッション火力（アンモニア専焼、LNG火力+水素）の開発に取り組む	<a href="https://www.jera.co.jp/corporate/zeroemission">https://www.jera.co.jp/corporate/zeroemission</a>
J-Power	BLUE MISSION 2050	2050年に発電事業のCO <sub>2</sub> 排出実質ゼロを目指し、石炭からCO <sub>2</sub> フリー水素発電への移行（CO <sub>2</sub> フリー水素製造）や再生可能エネルギーをはじめとした（原子力発電所を含む）CO <sub>2</sub> フリー電源の拡大を目指す	<a href="https://www.jpowers.co.jp/bluemission2050/">https://www.jpowers.co.jp/bluemission2050/</a>
関西電力	ゼロカーボンビジョン2050	発電事業をはじめとする事業活動に伴うCO <sub>2</sub> 排出を2050年までに全体としてゼロにする。そのために、デマンドサイドのゼロカーボン化（グリーン電力の普及、エネルギー機器の電化、エネルギーマネジメントの高度化、スマートシティの推進、水素利用の推進、eモビリティを活用したMaaSの実現）、サプライサイドのゼロカーボン化（洋上風力・水力発電の活用、DXを用いた送配電ネットワークの高度化、原子力の活用と水素製造、火力発電所での水素・アンモニアの利用、CCUSの活用）、水素社会への挑戦に取り組む	<a href="https://www.kepco.co.jp/sustainability/environment/zercarbon/index.html">https://www.kepco.co.jp/sustainability/environment/zercarbon/index.html</a>
中部電力	ゼロエミチャレンジ2050	需要家側で省エネ・創エネ・活エネを三位一体で推進し、供給側で再エネや原子力などの非化石エネルギーの最大活用、化石燃料の脱炭素化（水素、アンモニア、CCUS）に取り組む	<a href="https://www.chuden.co.jp/publicity/teirei/_icsFiles/afieldfile/2021/03/23/20210323b.pdf">https://www.chuden.co.jp/publicity/teirei/_icsFiles/afieldfile/2021/03/23/20210323b.pdf</a>
日本ガス協会	カーボンニュートラルチャレンジ2050	高温の熱利用分野を中心に、水素やメタネーションなどのイノベーションによりガス自体の脱炭素化を進めると同時に、CCUSも活用しカーボンニュートラルLNGの活用にも取り組む	<a href="https://www.gas.or.jp/pdf/about/challenge2050.pdf">https://www.gas.or.jp/pdf/about/challenge2050.pdf</a>
東京ガス	グループ経営ビジョン「Compass2030」	CO <sub>2</sub> ネット・ゼロに向けた再エネ拡大、ガス体エネルギーの脱炭素化技術開発、CCUS技術の活用、カーボンニュートラルLNG、超効率燃料電池の導入などに取り組む	<a href="https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/2050_gas_jigyoo/pdf/007_03_00.pdf">https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/2050_gas_jigyoo/pdf/007_03_00.pdf</a>
大阪ガス	カーボンニュートラルビジョン	再生可能エネルギーや水素を利用したメタネーションを軸とした都市ガス原料の脱炭素化や再生可能エネルギー導入を軸とした電源の脱炭素化に取り組む	<a href="https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/_icsFiles/afieldfile/2021/01/25/210125_3_1.pdf">https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/_icsFiles/afieldfile/2021/01/25/210125_3_1.pdf</a>
石油連盟	石油業界のカーボンニュートラルに向けたビジョン	燃料製造のSCOPE1+2についてCO <sub>2</sub> フリー水素（グリーン水素）やCCUSを活用した精製プロセスの変革、SCOPE3について次世代バイオ燃料やCO <sub>2</sub> フリー水素、合成燃料（カーボンリサイクルによるe-fuel合成（フィッシャー・トロプシュ法<FT法>）、石化分野では廃プラスチックリサイクル、石化製品の原料転換などによる低炭素化、脱炭素化の推進	<a href="https://www.paj.gr.jp/from_chairman/20210319_02.pdf">https://www.paj.gr.jp/from_chairman/20210319_02.pdf</a>

出所) 各社・各業界団体のWebサイトより作成

ビジョンなどは公表されていないが、石油連盟としてバイオ燃料やグリーン水素、フィッシャー・トロプシュ法（FT法）による合成燃料を中心に対応しようとしている。また、石油分野の特徴として、石化製品の原料に対しても脱炭素の対策が必要であり、廃プラスチックリサイクルの推進や合成燃料の活用などを想定している。

基本的に、電力分野は再エネ、原子力発電およびブルー水素／アンモニア・グリーン水素・アンモニア・合成メタンによる火力発電、排出権でオフセットしたカーボンニュートラルLNGによる火力発電で対応することが想定されており、ガス・石油分野ではグリーン水素・ブルー水素からメタネーションやFT法により、合成メタンや合成燃料を製造することが基本的な方向性として想定されている。

## II エネルギー分野における パラダイムシフト

従来の温室効果ガス排出削減から実質脱炭素（カーボンフリー）を実現するためには徹底的に省エネを進める必要があり、この観点から、2050年に向けて今取り組むべき課題に大きな変化はないともいえる。一方で、「現状をベースラインとした二酸化炭素排出削減何トン」と「カーボンフリーをベースラインとした何トンまだ排出している」という議論は、同じ温室効果ガス排出に関して似て非なる世界であり、ある種のパラダイムシフトともいえる。

また、従来は、一次エネルギー源である石油や石炭、天然ガスから火力発電所で二次エ

ネルギーである電力をつくったり、石油製品を製造していたりしたため、人口集中地域の臨海部や製油所、石炭火力発電所、原子力発電所の集中立地する地域からエネルギー大消費地の人口集積地域へエネルギー供給インフラが整備されてきたが、実質脱炭素社会では、再エネ賦存地域の北海道・東北や九州などがエネルギー供給地域に変わる。地方部は、森林による二酸化炭素吸収という観点からも、今まで以上にエネルギー供給において重要性が増すと考えられる。

以下、実質脱炭素社会に向けて、エネルギー分野のパラダイムシフトと考えられる事項について紹介する。

### 1 日本流セクターカップリング： 非化石エネルギーに必要な時間 と空間の柔軟性確保

世界的に見ると再エネのコストが想定以上に低下し、カーボンニュートラルに向けて電力セクターの果たす役割が大きくなっている。たとえば、欧州では運輸部門をはじめとして大幅な電化を進め、再エネによる電力で賄うことが想定されている。しかしながら、再エネは時間と空間の偏在性があることから、電力部門のカーボンニュートラルの最大の課題は、蓄電や送電による時間と空間の融通である。そのため、発電のコストは低下しても電力流通のコストは増加することが見込まれる。

日本でもこうした問題は顕在化している。たとえば九州では、原子力がベース電源を供給する一方で、太陽光を中心に再エネが大量に導入され、2020年5月にはエリア需要のうち実に94%が再エネで供給される時間帯も出

た。需給のバランスを保つために、エリア需要の約3割に相当する電力は連系線を通じてエリア外に供給され、太陽光の発電量の約1割は、系統安定化のために発電を抑制され捨てられた。

電力セクターのカーボンニュートラルを再エネで進めるためには、需要地に大量の再エネを導入するか、再エネ資源が豊富なエリアから需要地に向けて大容量の送電線を整備することが必要である。また、電力が必要な時間に再エネが発電するとは限らない。カーボンニュートラルでは、太陽光がない夜間にもカーボンフリーの電力を供給することが必要になる。このように、時間と空間を超えて再エネの電力が融通されることが必要になる。すなわち、大量の送電線と蓄電システムが必要になるということである。

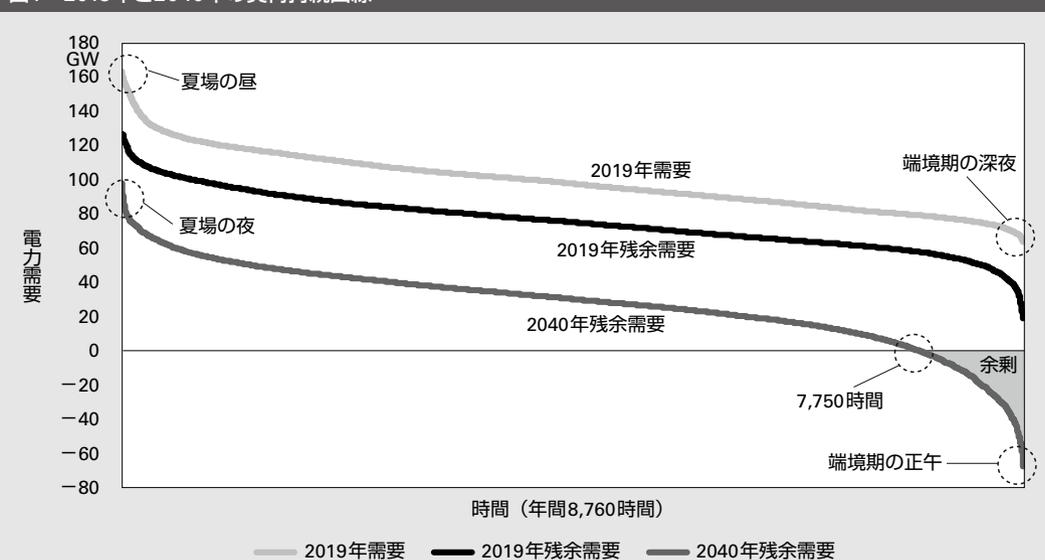
### (1) カーボンニュートラルにおける時間の最適化：蓄電システムの限界

短時間の蓄電であれば蓄電池が活用できる。近年、リチウムイオン電池をはじめとす

る蓄電システムのコストダウンが進み、電力システムへの導入が拡大している。これまで日本では、ダムで水を貯め、電力需要と水資源の供給を時間・日・季節単位でバランスさせてきた。しかしながら、カーボンニュートラルの世界で長時間の蓄電をするためには、大量の蓄電システムを要し、現実的ではない。ビジネスの観点から考えると、蓄電システムは、電力の価値が低い時間帯に充電をして、価値が高い時間帯に放電するのが効率的である。1日1回充放電すると1時間放電できる蓄電池だと、一番価値の高い1時間しか放電できない。残りの時間帯を担う電源が必要になる。

図1に2019年と2040年の負荷持続曲線を示す。負荷持続曲線とは、1年間（8760時間）の電力需要を大きい順に並べてつないだ曲線であり、通常、夏場や冬場の空調需要が大きい時間帯が左側の需要の大きい時間帯に、端境期といわれる春や秋の深夜・早朝が右側の需要の小さい時間帯にプロットされる。図1では、2019年の需要、2019年の残余需要、

図1 2019年と2040年の負荷持続曲線



出所) 各一般送配電事業者の需給実績およびIEA「World Energy Outlook2020」より作成

2040年の残余需要を示している。残余需要とは、電力需要の変化に応じて出力の調整が難しい電源による供給を需要から控除したものであり、系統運用機関の給電指令によって制御可能な火力発電などがこの残余需要に対する供給力を担う。

ここでは原子力発電、水力発電、太陽光発電、風力発電の供給を控除して算出している。また、2040年の残余需要は、2019年の需要からIEA「World Energy Outlook2020」における「持続可能な開発シナリオ」の2040年の電源構成を参考にして想定した供給を控除して、簡易に算出したものである。図1の通り、再エネの供給が増える2040年においては、需要の小さい時間帯には供給が需要を上回り、多くの余剰が生じることが分かる。また従来、年間を通じて稼働するようなベースロード電源は必要なくなることも分かる。蓄電システムは、こうして発生した余剰を蓄電し、原子力や再エネで賄えない時間帯に放電して需給をバランスさせることになる。

しかしながら、前述の通り、蓄電システムが放電するためには充電が必要であり、システムの経済性を成立させるためには、充放電の値差でシステムの投資額を回収しなければならない。そのため、カーボンニュートラルな電力システムにおいて、蓄電池で残余需要を賄うことは現実的ではない。特に、稼働時間が長い残余需要を賄う電源の技術選択が重要になる。図1では2040年の残余需要がゼロとなるのは7750時間であるが、この最も稼働時間が長い電源としては、設備利用率約90%の非化石電源が必要となる。

このような電源として想定されるのが、バイオマスやグリーン／ブルー燃料の火力発

電、CCS（Carbon dioxide Capture and Storage：二酸化炭素回収・貯留）付き火力発電、原子力発電である。電源だけでなく、デマンドレスポンスといわれる需要家の負荷調整や後述する排出権も一翼を担い得る。それぞれ一長一短あり、現時点では銀の弾丸が定まっているわけではなく、コスト（特に変動費）と稼働時間に応じた組み合わせの最適化が必要である。たとえば、原子力発電は安全対策の費用が高くなってはいるものの、再エネ＋蓄電システムでは供給が難しい、稼働時間が長い残余需要を担う電源としては有望な選択肢となる。

## (2) 日本流セクターカップリング：

### 空間の最適化

カーボンニュートラルに向けて、欧州を中心にセクターカップリングという言葉が聞かれるようになった。輸送用燃料、産業用燃料、暖房用燃料の脱炭素化が難しい中で、運輸セクター、産業セクター、建物セクターを電力セクターと融合し、コスト低減が著しい再エネの電力でこれらのエネルギーを賄うというコンセプトである。再エネの電力で水素を製造し、その水素を活用し、電化が難しい産業・運輸への活用など、水素社会に向けた動きがここ数年急速に活発になっている。

日本でも、カーボンニュートラルに向け、洋上風力を大量に導入する一方で、非電力部門の電化を進める方向性が示されている。しかしながら、日本ではコストの安い再エネの資源が欧州ほど恵まれていない。中東や豪州からグリーン水素、グリーンアンモニアを輸入するという検討も進んでいる。

エネルギー供給のパラダイムシフトが起き

ることは分かっていても、現時点ではいずれもコストが高く、エネルギー需給構造の全体像は不確実性が高い。日本において、どのような需給構造がカーボンニュートラルにおいて効果的なのか、そのカギは、再エネの送電とグリーン燃料の最適化にあると考えている。

日本では、現在、洋上風力発電に注目が集まっている。日本の電力システムの長期的な整備方針（マスタープラン）が、日本全体の広域的な電力システムの効率的な整備・運営を担う電力広域的運営推進機関において議論されている。図2の通り、マスタープラン策定に向けた系統増強の考え方<sup>文獻1</sup>においては、再エネ資源が豊富な北海道、東北、九州から東京、中部、関西といった需要地に向けて、大幅な系統整備が想定されている。

欧州のように、あらゆる部門の電化を進めようとするれば、再エネによる電力がさらに必要となり、それを輸送する送電線の整備も必要となる。たとえば自動車用燃料は、現在は需要地に近い港湾に製油所を設け、ガソリンや軽油を自動車に供給している。自動車が電化され電気自動車になれば、そのための電力

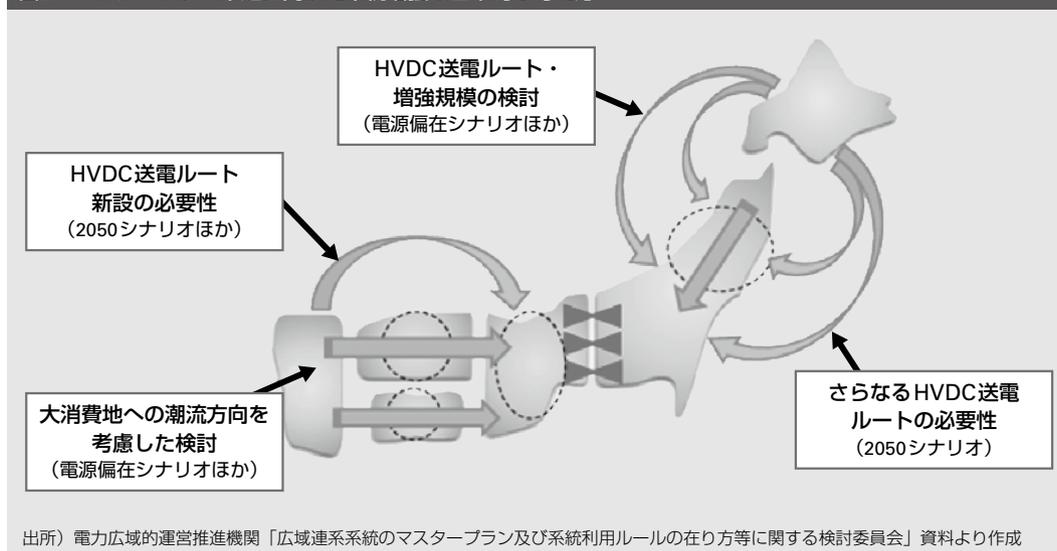
を北海道でつくり、東京に送電することが必要になる。または、海外から再エネの電力で製造した水素やアンモニアを輸入し、それを燃料として発電し電気自動車向けに供給することとなる。

こうしたことから、日本におけるセクターカップリングは、再エネの偏在性を解く方法について、電力と燃料、国内と海外といった複雑な最適化が求められる。たとえば後述するように、わが国では電化をむやみに進めず、既存の化石燃料に関するインフラを最大限に生かして燃料の脱炭素化を進めた方が効率的なケースも想定される。このように、電源の技術選択と同様、不確実性が大きい。

## 2 ブルー水素／アンモニアとカーボンオフセットLNGの取り組みと課題

既に脱炭素社会への取り組みが始まっており、化石燃料由来のLNGや水素、アンモニアについて、生成時に生じる二酸化炭素をEOR（Enhanced Oil Recovery：原油増進回収法）やCCSを利用して大気に放出されない

図2 マスタープラン策定に向けた系統増強の基本的な考え方



出所) 電力広域的運営推進機関「広域連系システムのマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会」資料より作成

表2 カーボンオフセットLNGの事例

供給者	購入者	時期	対象国	カーボンオフセットの方法	カーボンオフセットの対象
Shell	東京ガス	Jun-19	日本	Katingan Peatland Restoration and Conservation Project in Indonesia (インドネシアのカティンガン泥炭地の保全プロジェクト)、Cordillera Azul National Park Project in Peru (ペルーのコーディレラ・アズール国立公園プロジェクト)	液化から輸送、燃焼まで含めた全プロセス
Shell	GS Energy	Jun-19	韓国	Katingan Peatland Restoration and Conservation Project in Indonesia (インドネシアのカティンガン泥炭地の保全プロジェクト)、Cordillera Azul National Park Project in Peru (ペルーのコーディレラ・アズール国立公園プロジェクト)	液化から輸送、燃焼まで含めた全プロセス
JERA Global MarketsおよびADNOC	NA	Jun-19	インド	インドの再生可能エネルギープロジェクト	液化と輸送を含まず
Shell	CPC	Mar-20	台湾	Katingan Peatland Restoration and Conservation Project in Indonesia (インドネシアのカティンガン泥炭地の保全プロジェクト)、Cordillera Azul National Park Project in Peru (ペルーのコーディレラ・アズール国立公園プロジェクト)、ガーナの森林再生プロジェクト	液化から輸送、燃焼まで含めた全プロセス
Total	CNOOC	Oct-20	中国	Hebei Guyuan Wind Power Project (中国北部の石炭火力の排出削減目的の排出権)、Kariba REDD+ Forest Protection Project (ジンバブエの森林保全)	液化から輸送、燃焼まで含めた全プロセス

出所) 各社WebサイトやGiiGNL資料より作成

ようにする（ブルー水素、ブルーアンモニア）、あるいは排出権でオフセットしてカーボンニュートラル化する動きが生じている。表2は直近のカーボンオフセットLNG<sup>21</sup>の輸送事例を示したものである。それぞれの事例はCCSや森林吸収、再エネや石炭火力の効率改善による排出権でオフセットしている。問題は、このようなオフセットやブルー化で、2050年に実質脱炭素社会を実現できるかということである。

### (1) 二酸化炭素排出削減の基準の変化

京都議定書の採択以降、地球温暖化対策は、ある時点（現時点）の温室効果ガス排出量をベースラインに、そこから排出を何%削減できたかを目的に取り組みが進められてき

た（図3）。そこでは、ベースラインから二酸化炭素排出を削減できた主体から削減分を「排出権」として排出削減できなかった主体に移転し、全体として排出削減費用がより少ないところから順次排出削減を行うことで、経済性を維持しながら地球温暖化対策を行っていくことが目指されていた。

一方、脱炭素社会では、ベースラインは「ある時点（現時点）の排出量」ではなく、「二酸化炭素排出量0」に変わる。二酸化炭素を排出している主体は、省エネルギー化や燃料転換などを行いながら、エネルギー消費やそれに伴う二酸化炭素排出量を可能な限り減らしていく必要がある。どうしても残ったエネルギー消費については、再エネ由来のエネルギー（グリーンエネルギー）を調達する

ことも考えられるし、二酸化炭素吸収ができた主体から、そのカーボンマイナス分を排出権として二酸化炭素を削減し切れなかった主体に移転し、全体として脱炭素を実現することも考えられる（オフセット）（図4）。

図3と図4の違いは、図3は二酸化炭素排出削減分に着目されており、図4では減少したものの、まだ排出されている二酸化炭素に焦点が当たっている。また、図4では省エネ推進の結果の二酸化炭素排出削減分は、排出権として他主体に移転していないという点も

異なる。このことは、排出削減を取り巻く経済性の考え方が変化することを意味している。

従来は、省エネを推進することによるエネルギー費用の削減や、排出権としての転売益によって省エネ推進の経済性を生み出していたが、脱炭素社会では省エネを推進することで、より高価なグリーンエネルギー調達費の増分を抑制したり、高騰が予想される森林吸収やCCSなどの二酸化炭素吸収による排出権の購入費用を抑制したりすることで経済性を

図3 従来の基準年マイナス%の温室効果ガス（二酸化炭素）排出削減の考え方

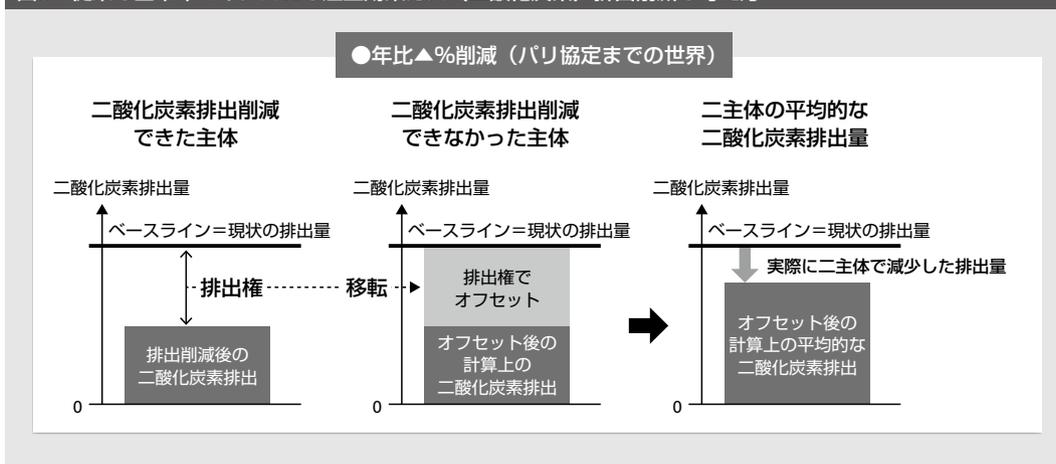
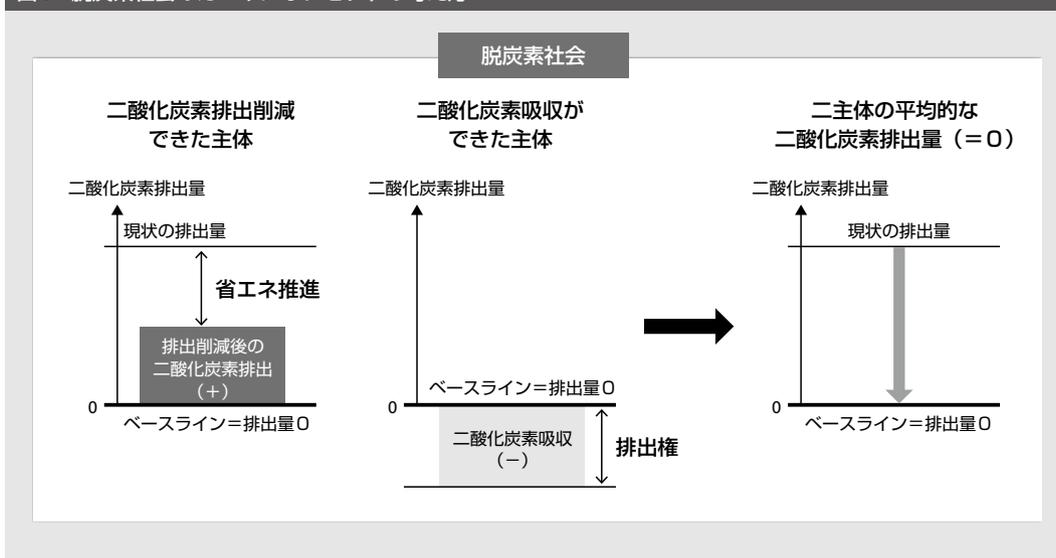


図4 脱炭素社会のカーボンオフセットの考え方



生み出すことになる。

## (2) 選別が必要な排出権

図3と図4から、従来は省エネ、燃料転換（燃転）などによる排出権もオフセットに利用可能であったが、脱炭素社会では、二酸化炭素吸収を実現する排出権しかカーボンニュートラルのためのオフセットに用いられないことは明確である。現時点で、脱炭素社会に向けて排出権の区別を要求する明確なルールは存在していないようだが、2050年までにはルール化される可能性も考慮しておく必要がある。

表3は、クリーン開発メカニズム（Clean Development Mechanism：CDM）の方法論として認められている排出権の分野である。農業からCCS、森林、省エネ、燃転、漏洩排

出削減、産業ガス削減など、カーボンマイナスやカーボンプラスでも排出量が減少するような多様な方法論が多様な分野で認められていることが分かる。

18年時点の排出権の生成状況を見ると、全世界で生成されている排出権は累積量として3890.7 MtCO<sub>2</sub>eqが計上されているが、そのうちカーボンマイナスの排出権と見なせる「森林吸収」や「CCS/CCU」は生成量の10.7%にしか過ぎない。また、18年時点でそれまでに生成された排出権（CER）のうち相当量は既に使用されている（2323.37MtCO<sub>2</sub>eq）。この結果、現時点で利用可能な累積残存排出権（CER）は、1567.32MtCO<sub>2</sub>eq（15億6732万MtCO<sub>2</sub>eq）である（表4）。

18年の日本の二酸化炭素排出量は10.6億トンとされており<sup>注1</sup>、日本だけで世界の累積

表3 排出権分野の定義

CER分類	定義
農業	畜産を含む農業および農場管理に関連する活動
CCS / CCU	炭素の回収および貯蔵／使用に関連するあらゆる活動
省エネ	より効率的なプロセスによる廃熱／ガス回収および化石燃料発電を含む、エネルギー消費の削減を通じて排出量を削減する国内または産業活動
森林	植林、再植林、森林管理の改善、森林破壊と劣化による排出量の削減など、すべての林業関連活動が含まれる
燃転	ベースラインが電力または熱のための化石燃料を使用する活動には、炭素集約度の低い燃料への切り替えが含まれる（例：石炭からガスへの切り替え、ただし再生可能エネルギーは除く）
漏洩排出削減	油田や鉱業からのメタンの漏出／排出の回避など、産業用メタン排出に対処する活動（家畜や農業慣行（水田など）は含まれない）
産業ガス削減	すべてのフッ素化ガス-ハイドロフルオロカーボン（HFC）、パーフルオロカーボン（PFC）、オゾン層破壊物質の削減
製造分野の排出削減	材料（セメント、小売、建設、金属）の製造過程の排出量削減に関連するすべての活動
その他土地利用	湿地など、林業と農業を除くすべての土地利用管理活動
再生可能エネルギー	持続可能なバイオマスを含むすべての再生可能エネルギー活動
交通分野燃費改善	輸送と移動に関連する活動からの排出量を削減する活動
廃棄物	埋立地ガスおよび排水処理における排出削減

出所) World Bank, (2020) *State and Trends of Carbon Pricing 2020*, The World Bank. Available at: <https://ideas.repec.org/p/wbk/wboper/33809.html>

表4 2018年時点のCER登録量と分野別比率およびカーボンマイナス分排出量

メカニズム	排出権生成量 (MtCO2eq)	森林吸収	CUS / CUC	カーボンマイナス分 (MtCO2eq)	農業(一部、二酸化炭素貯留あり)(AG-004)	省エネ	燃 転	再エネ	その他土地利用	漏洩排出削減	産業力入削減	製造分野の排出削減	交通分野燃費改善	廃棄物	排出権総量・相殺分 (MtCO2eq)	残存排出権量 (MtCO2eq)
Clean Development Mechanism (CDM)	2002		0.01%	0.20			6.0%	32.0%		5.0%	45.0%	0.6%	0.3%	7.0%	1192	810
Joint Implementation Mechanism (JI)	872		0.6%	5.23	3.0%	25.0%	3.0%	2.0%		53.0%	14.0%	0.5%		0.2%	632	240
American Carbon Registry (ACR)	50	20.0%	43.0%	31.50	0.2%	1.0%	0.5%	1.0%			4.0%	15.0%	2.0%	12.0%	8.5	41.5
Climate Action Reserve	69	25.0%		17.25	2.0%				0.1%		27.0%			46.0%	40	29
Gold Standard	97	2.0%		1.94	0.2%	13.0%	26.0%	42.0%		6.0%				11.0%	59	38
Verified Carbon Standard (VCS)	410	42.0%		172.20	0.2%	0.1%	2.0%	45.0%		4.0%	2.0%	2.0%	0.0%	4.0%	251	159
Alberta Emission Offset System	56	1.0%	9.0%	5.60	29.0%	6.0%		31.0%		7.0%	9.0%	0.0%		8.0%	2	54
Australia ERF	72	56.0%		40.32	1.1%	1.0%			10.0%	1.0%			0.0%	31.0%	43	29
Beijing Forestry Offset Mechanism	0.2	100.0%		0.20											0	0.2
British Columbia Offset Programme	6	80.0%		4.80		3.0%	17.0%							1.0%	3	3
California Compliance Offset Program	168.6	80.0%		134.88	4.0%					5.0%	12.0%				89	79.6
China GHG Voluntary Emission Reduction Programme	53	0.01%		0.01		8.0%	14.0%	59.0%						18.0%	0	53
Fujian Forestry Offset Crediting Mechanism	2	100.0%		2.00											0	2
Guangdong Pu Hui Offset Credit Mechanism	1	4.0%		0.04				96.0%							0	1
J-Credit Scheme	5.9	1.4%		0.08		33.0%	0.1%	66.0%						0.6%	0	5.9
Joint Crediting Mechanism (JCM)	0.03			0.00		24.0%		75.0%					1.0%		0	0.03
Quebec Offset Crediting Mechanism	0.8			0.00							70.0%			30.0%	0	0.8
Regional Greenhouse Gas Initiatives CO <sub>2</sub> offset Mechanism	0.048			0.00										100.0%	0	0.048
Saitama Target Setting Emissions Trading System	6.2			0.00				100.0%							0.17	6.03
Saitama forest absorption certification system	0.01	100.0%		0.01											0	0.01
Republic of Korea Offset Credit Mechanism	16			0.00		0.8%					8.0%	18.0%	60.0%	13.0%	0	16
Switzerland CO <sub>2</sub> Attestations Crediting Mechanism	2.4	41.0%		0.98		0.2%	46.0%			3.0%	3.0%		2.0%	3.0%	3.6	-1.2
Tokyo Cap-and-Trade Program (Tokyo CaT)	0.5			0.00		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>							0.1	0.4
	3,890.69		10.7%	417.24											2,323.37	1,567.32

出所) World Bank, (2020) State and Trends of Carbon Pricing 2020, The World Bank. Available at: <https://ideas.repec.org/p/wbk/wboper/33809.html>

残存排出権量を1.5年で消費する量になっている。また、二酸化炭素吸収による排出権に限定すると、累積排出権生成量は417.24MtCO<sub>2</sub>eq（4億1724万トン）でしかなく、日本の二酸化炭素排出量の約4割分に相当する量しかない。このことから、排出権によるオフセットに依存した2050年実質脱炭素社会は実現性が低いことが分かる。

### (3) 世界に広がる脱炭素宣言と

#### 森林吸収・CCS由来の排出権争奪戦

図5に示すように、世界では既に123カ国1地域が2050年までのカーボンニュートラルを表明している。表2ではカーボンオフセットにペルーの森林吸収由来の排出権が用いられていたが、ペルーは2050年までに自国のカーボンニュートラルを表明している。このことは、従来、CDMなどで排出権の出し手であった途上国が、将来的に自国のカーボンニュートラル化を推進することにより、従来、

先進国に供給されてきた森林吸収やCCS由来の排出権が減少する可能性を示唆している。

世界各国の2050年カーボンニュートラル表明は、グリーンエネルギー・オフセットエネルギー自給率の低い国にとっては、将来的にエネルギー調達コストが上昇したり、必要量を確保できなかつたりする危険性を生じさせる。

### (4) 重要性が高まる国内の省エネ・カーボンキャプチャー（森林吸収・CCS）とカーボンリサイクル

国立環境研究所「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」<sup>文献2</sup>によると、エネルギー、工業プロセスおよび製品の使用、農業、廃棄物からの温室効果ガスの排出は1,238.4MtCO<sub>2</sub>eqであるのに対して、土地利用・土地利用変化および林業による吸収は57.4MtCO<sub>2</sub>eqとなっている（表5）。前節でも指摘したように、諸外国が脱炭素化の取り組みを進めるこ

図5 2050年までのカーボンニュートラルを表明した国



出所) 資源エネルギー庁「日本が抱えているエネルギー問題（前編）」より作成  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/energyissue2020\\_1.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteiky/energyissue2020_1.html)

表5 2018年度の日本の分野別温室効果ガスインベントリ

MtCO <sub>2</sub> eq	X2018
エネルギー	1085.7
工業プロセスおよび製品の使用	100.1
農業	33.3
土地利用・土地利用変化および林業	-57.4
廃棄物	19.3
間接CO <sub>2</sub>	2.1

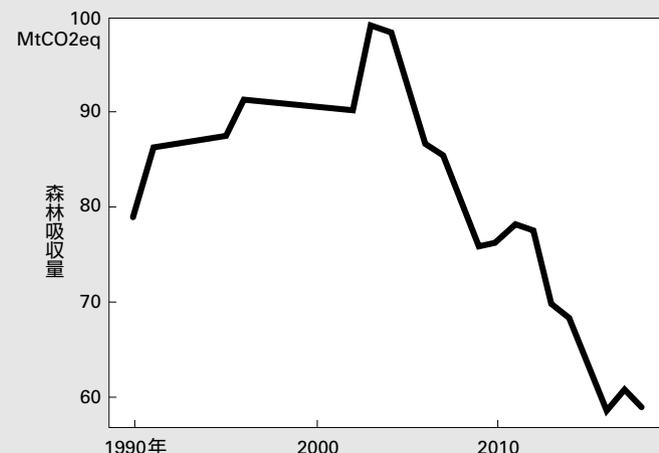
出所) 国立環境研究所「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」(2020年) 文献2より作成

とや、国内の再エネ発電設備の立地規制や原子力発電所の再稼働の困難さを考えると、日本国内で森林吸収などのカーボンキャプチャーの可能性を追求する必要がある。

排出量の4.6%しかない森林吸収量であるが、図6を見ると、森林吸収量は2003年の約100MtCO<sub>2</sub>eqから18年は約60MtCO<sub>2</sub>eqと、ピーク時の約6割に減少している。日本全体では森林材積の蓄積が増加している中で毎年の森林吸収が減少している理由として、インベントリの計算の際に森林総合研究所が06年に策定した新収穫表を用いており、その新収穫表で林齢50年以上の成熟林の材積蓄積量の増加が緩やかになっているためである文献2。

近年、日本の森林炭素蓄積量について、従来の推計結果は過小評価ではないかとの指摘がある文献3。森林総合研究所の06年時点の新収穫表に対して、文献3では14年～18年の全国森林資源調査における毎木調査による直接見積もり結果に基づいて森林炭素蓄積量を再評価した結果、2.44倍の差が生じていると指摘している。これを考慮しても、日本の森林吸収は二酸化炭素排出量の10%程度相当にす

図6 森林吸収量 (MtCO<sub>2</sub>eq) の推移



出所) 国立環境研究所「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」(2020年) 文献2より作成

ぎないが、海外の森林由来の排出権に依存せずに10%までの化石燃料をオフセットできるようになることは大きいと考えられる。

### 3 変わるエネルギーインフラ整備・運用の考え方

欧州では、脱炭素対策として、再エネによる余剰発電電力を用いてPower-to-Gas (P2G) 設備で水素を生成し(グリーン水素)、このグリーン水素を既存のガス導管へ注入する検討が行われている文献4、5、6。日本では、熱量バンド制に関する議論において、標準熱量制の引き下げを中心に都市ガス分野の脱炭素化対応を行うこととされている文献7。余剰の再エネをメタネーションやプロパネーションによりメタンやプロパンに変換し、都市ガス導管に注入することになると見られる。このため、メタネーション、プロパネーション技術が日本では重要になる。

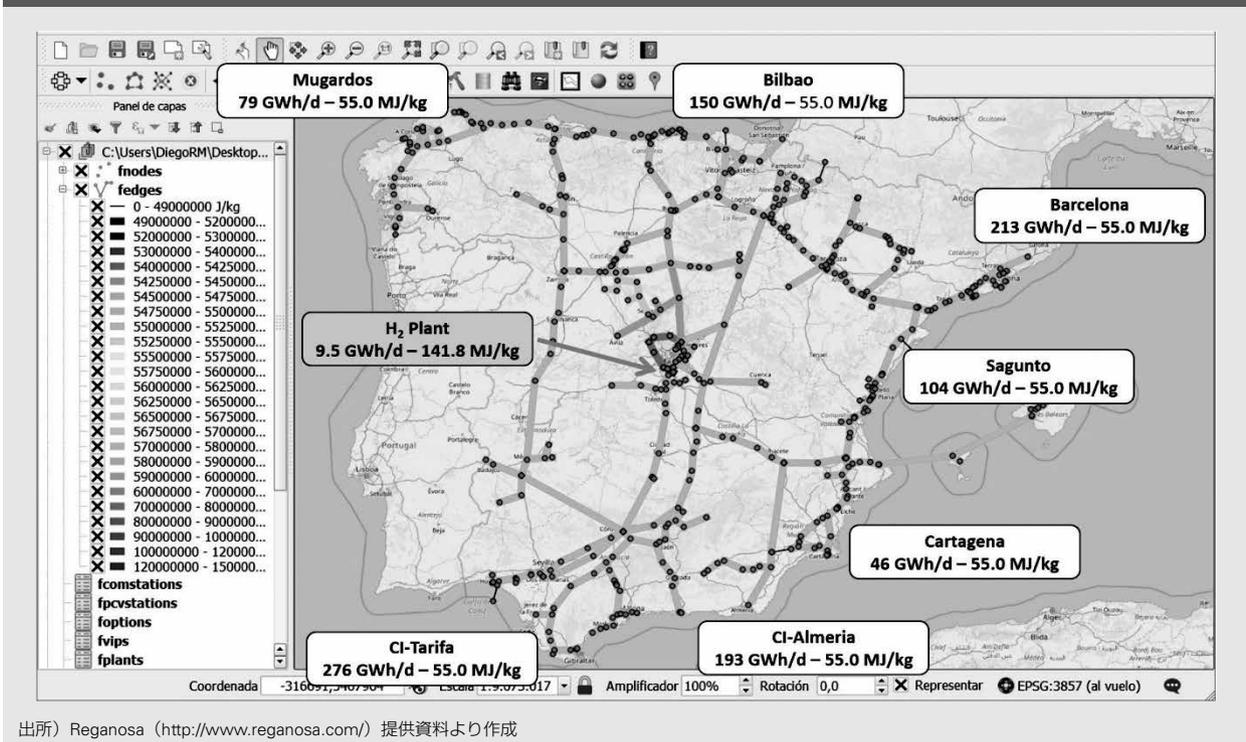
2021年1月25日に大阪ガスは、高効率のメタネーション技術の開発についてプレスリリ

ースを出している文献<sup>8</sup>。この資料によると、大阪ガスの技術は従来の電気分解による水素生成とメタネーションと比較して効率が大幅に改善されており、85~90%の変換効率を実現できているとのことである。この変換ロス、メタン化反応における発熱とSOEC共電解装置における吸熱の差によるものであり、10~15%の排熱ロスを活用できる熱需のある工場にメタネーション設備を設置すれば、理論的には100%の変換効率を実現することも不可能ではないだろう。原料になる二酸化炭素は、製造所からの排二酸化炭素や、液酸と呼ばれる液化した二酸化炭素を輸送して活用することが想定される。このように、脱炭素社会では、従来のエネルギー供給システムとは異なり、高压電線が引き込まれており、熱需要を有する工場（たとえば、ガラス工場）が、二次エネルギーとしての天然ガスを製造する拠点となる可能性がある。

このようなメタン製造拠点が都市ガス導管ネットワークのあちこちに散在し、実際に、合成メタンガスを導管に注入するようになると、エネルギーインフラの形と運用が変わる可能性が生じる。実際、既に、P2G設備で水素を発生させ都市ガス導管網に注入している欧州では、注入された水素（低熱量の合成メタン）の導管内での広がりやシミュレーションするソフトウェアが開発されている。図7は、Reganosa<sup>註2</sup>の「Ganesso」という水素注入影響シミュレーションソフトウェアの画面表示である。

前述のように、現段階で日本の都市ガス分野においては、今後も標準熱量制が続けられる見込みである。現在と同様に、P2G設備で生成された合成メタンやバイオガス製造設備で製造したグリーンメタンをガス導管に注入する際に、一定のガス品質に調整する必要がある。これらのガスは、海外の事例では中圧

図7 2018年時点の電力需給と再生エネ発電を最大限考慮した場合の電力需給



以下の圧力の管路網に注入されることも多い。日本の場合は、将来も標準熱量制度が継続される見通しであることから、ガス品質面は脱炭素社会においても安定することが予想されるが、配給管網で複数地点からガスが注入されることによる圧力管理については、図7のようなソリューションが必要になってくるであろう。

### III 実質脱炭素時代の エネルギーインフラ整備の 留意点

#### 1 リダンダンシーを考慮した エネルギー供給システムの 再構築が必要

「カーボンニュートラルは電化社会」<sup>文献9</sup>とされているが、特に、地震などの災害や送電線の事故<sup>注3</sup>、冬期の暖房需要などを考えると、単一のエネルギー源に依存することは危険である。

石油は国家備蓄制度があり2017年時点で約208日分の備蓄がある。また、LNGも二週間程度のバッファーがLNG基地に貯蔵されている。一方で電力は同時同量が必要であり、20ftコンテナに入れられたNAS電池で120日・世帯の蓄電能力とされている。

脱炭素社会の実現も重要であるが、エネルギー供給のリダンダンシーを考慮したエネルギーミックスや投資配分を行う必要がある。また、脱炭素社会への移行プロセスにおいて、今まで以上に電力・ガス・液体燃料分野のカップリングが進んでいくと予想される。電力、ガス、液体燃料それぞれでの最適化を進めるのではなく、エネルギー供給全体での

供給安定性に配慮した分担を目指すべきである。

#### 2 脱炭素社会への移行のための 既存インフラの有効活用が必要

米国や途上国と違い、日本は人口減少に直面している。電力連携線やガス高圧導管の整備も採算性の観点から進捗しない<sup>文献10</sup>中で、新たに再エネや水素のために多額の送電線整備投資や水素供給インフラ整備を実行できるのか疑問が残る。

既存の社会資本ストックですら、老朽化による維持管理費の増加や更新費の確保の難しさに直面しており<sup>文献11</sup>、投資回収の終わっているガソリンスタンドですら、利用者の減少により維持が難しくなっている<sup>文献12</sup>。脱炭素社会に向けた対策を進める上で、最終エネルギー消費者時点での仕上がり価格を比較し、最も価格が安くなる技術選択を行う必要がある。この観点から、既存の都市ガス導管網やガソリンスタンドネットワークが活用できる合成メタン、合成プロパンや合成燃料は一日の長があり、これらの合成コストを下げるための努力を徹底するべきといえる。

#### 3 Power-to-Gas/Fuel設備整備の ルール化が必要

熱需要や交通向けのカーボンニュートラルガス・燃料の製造は、電力→水素/CO→ガス/燃料というプロセスを経るが、このプロセスを実行するPower-to-Gas/Fuel設備の位置付けについて、先行する欧州でも議論になっている。エネルギーの保蔵を目的とするならば、ネットワーク設備であり、送電線やガス導管の一部と見なすことも可能であり、一

方で、電力の大規模需要家ととらえることもできる文献<sup>4, 5, 6</sup>。

前者であれば、Power-to-Gas/Fuel設備の設置費用は、送電網・導管網整備費用の一部として託送料金算定の際の費用に参入し、広く、電力・ガスユーザーから費用を回収することになる。この場合、Power-to-Gas/Fuel設備の整備は設備稼働率にかかわらず早く進むことが期待されるが、ガス・燃料の販売料金の設定方法を慎重に検討する必要があること、Power-to-Gas/Fuel設備が電力送配電会社の設備となり、エネルギー供給者が電力送配電会社に限定されることになる。

後者であれば、ガス会社、石油会社だけでなく、大規模再エネ発電会社が、系統連携できない電力を自社で合成メタン・合成燃料に転換し、販売する可能性があり、多様な主体が整備する可能性があるが、一方で、ガス・燃料の販売収益で投資回収を行うことになるため、投資採算性が合わない場合は整備が進まない可能性もある。整備が思うように進まない場合は、EV充電設備や水素ステーションのようにPower-to-Gas/Fuel設備についても補助金が必要になると考えられる。

#### IV 不易流行を見極めた対応が必要

実質脱炭素社会に向けて省エネを徹底したり、人口減少社会で実質脱炭素を進めるために都市ガス導管網や既存送電線をできるだけ活用したりするということは、変わらない(不易)であろう。一方、脱炭素社会への移行に向けて、一次エネルギーと二次エネルギーが部分的に入れ替わることに由来するエネルギー需給の空間変化や、それを踏まえたエ

ネルギーインフラの運用変化、カーボンオフセットに向けた排出権の選別、電力から合成メタン・合成燃料を製造することによるセクターカップリングの強化と接点であるPower-to-Gas/Fuel設備の整備のルール化など、多様な論点が山積している(流行)。特に流行部分については、まだ、日本国内で議論が始まっていない論点すらある。

人口減少時代に入っている日本において、エネルギーインフラを根本的に作り直す必要がある脱炭素社会への移行の取り組みは、資金的にもかなりの負担になると予想される。一般には、地球温暖化分野における国際社会への貢献や、製造業の国際競争力維持(グローバルサプライチェーンから締め出されない)のためにも脱炭素化への取り組みは正当化されるが、同時に、脱炭素化社会への取り組みは、人口減少社会における最適なエネルギーインフラ・エネルギー経済の再構築(分散化による配電網のコンパクト化)や、エネルギー自給率向上(一次エネルギー輸入を減らすことによる外貨流出抑止)にも資することは疑いない。難題ではあるが、各主体の積極的な取り組みが期待される。

注

- 1 [https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2020\\_2.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2020_2.html) (2021年4月7日閲覧)
- 2 <http://www.reganosa.com/> (2021年4月10日閲覧)
- 3 2016年10月12日に地下送電線を収容した新座洞道で火災が発生し、37万件、延べ58万世帯で停電した

## 参考文献

- 1 電力広域的運営推進機関「第8回広域連系系統のマスタープラン及び系統利用ルールの在り方等に関する検討委員会 資料1 マスタープラン1次案とりまとめの方向性について」  
[https://www.occto.or.jp/iinkai/masutapuran/2020/masutapuran\\_08\\_shiryoku.html](https://www.occto.or.jp/iinkai/masutapuran/2020/masutapuran_08_shiryoku.html)
- 2 国立環境研究所地球環境研究センター温室効果ガスインベントリオフィス編環境省地球環境局総務課脱炭素社会移行推進室監修「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」(2020年)  
<http://id.ndl.go.jp/bib/030442802>.
- 3 Egusa, T., Kumagai, T. and Shiraiishi, N., 「Carbon stock in Japanese forests has been greatly underestimated.」『Scientific reports』Vol.10, No.1, pp.1-9. 2020年
- 4 植村哲士「欧州における再生可能ガス関連インフラ整備の動向」『公益事業研究』第72巻第1号(2020年)、公益事業学会
- 5 植村哲士「欧州における再生可能ガスの市場規制動向」『公益事業研究』第72巻第1号(2020年)、公益事業学会
- 6 植村哲士「低炭素化・脱炭素化に向けた欧州のガス品質規制やガスインフラ整備に関する議論の動向」『公益事業研究』第72巻第2号(2021年)、公益事業学会
- 7 資源エネルギー庁「熱量バンド制に関する検討の結論」2021年3月  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/gas\\_jigyo\\_wg/pdf/20210407\\_1.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/gas_jigyo_wg/pdf/20210407_1.pdf)
- 8 大阪ガスエネルギー技術研究所「都市ガスの脱炭素化に貢献:「革新的メタネーション」実現のキーとなる新型SOECの施策に成功——水素・液体燃料などの高効率製造にも活用可能な技術の開発——」(2021年1月25日)  
[https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/\\_icsFiles/afieldfile/2021/01/25/210125\\_2\\_1.pdf](https://www.osakagas.co.jp/company/press/pr2021/_icsFiles/afieldfile/2021/01/25/210125_2_1.pdf) (2021年4月9日閲覧)
- 9 経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」『官公庁環境専門資料』2021年  
<http://id.ndl.go.jp/bib/031287810>.
- 10 野村総合研究所「平成30年度天然ガスの高度利用に係る事業環境等の調査事業 ガス導管の広域的利用に関する調査 報告書」(2019年)  
[https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/H30FY/000135.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000135.pdf)
- 11 宇都正哲ほか『人口減少下のインフラ整備』東京大学出版会、2013年
- 12 桐野裕之「利便性の定量的分析によるガソリンスタンド過疎地の定義に関する考察」『流通』2021 No.47、日本流通学会  
<https://ci.nii.ac.jp/naid/130007976026/>

## 著者

植村哲士 (うえむらてつじ)

野村総合研究所 (NRI) サステナビリティ事業コンサルティング部上級研究員

専門は人口減少時代のインフラ整備や公共財の管理、インフラの海外輸出、インド・インドネシア・ロシア・イランなどの新興国・資源国における地域開発・事業戦略など

PhD. (Geography)、電気通信大学データアントレプレナープログラム修了、日本証券アナリスト協会検定会員 (CMA)、Project Management Professional (PMP)、Certified Business Analysis Professional (CBAP)、Certified Asset Management Assessor (CAMA)、日本地理学会認定専門地域調査士、TPS 4 級

蓮池勝人 (はすいけかつひと)

野村総合研究所 (NRI) サステナビリティ事業コンサルティング部上級コンサルタント プリンシパル

専門はエネルギーセクターの事業戦略立案 (特に新規事業開発、海外展開)、政策立案、政策評価