

特集

水素エネルギーインフラ
の実装動向〜つくる・は
こぶ・つかう・まもる〜日本のカーボンニュートラルの将来像と
水素エネルギーインフラ

光島 重徳・黒田 義之

Future Outlook of Carbon Neutrality in Japan and Hydrogen Energy Infrastructure

1. はじめに

我が国では、1973年の第一次石油危機をきっかけとし、1974年に石油代替エネルギーの開発を目的としたサンシャイン計画の一環で太陽エネルギー、水素製造などの水素エネルギー関連技術などの研究開発を開始した。1978年に開始したムーンライト計画の一環として水素の高効率利用技術である高効率ガスタービンや燃料電池発電技術の研究開発が進められ、1993年からはサンシャイン計画とムーンライト計画を統合したニューサンシャイン計画および水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）で様々な技術開発が進んだ。これらのなかで、特にWE-NETは水素による二次エネルギー体系の確立を目指し、体系的に水素製造技術、水素大量輸送・貯蔵技術、水素利用技術の研究開発が推進された。その後、国際的なエネルギー価格が比較的廉価で安定していたため、2000年以降の水素関連技術は固体高分子形燃料電池実用化の研究開発中心となり、エネルギーのサプライチェーン全体にわたる研究開発は中断した。

一方、地球環境問題は1992年にリオ・デ・ジャネイロで開催された国連環境開発会議（地球サミット）を契機に気候変動に関する政府間パネル（IPCC）での科学的な解析や政策提言、締約国会議（COP）での具体的な行動計画の策定や国際的な合意形成が継続的に行われている。

温室効果ガス削減に対する取り組みを含む日本のエネルギー政策は2011年の福島第一原子力発電所の事故を契機に見直され、カーボンニュートラルな水素に関する製造、

輸送・貯蔵、利用までのサプライチェーンに関わる研究開発が推進されている。あわせて、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および利用の促進に関する法律（水素社会推進法）が2024年10月23日に施行されるなど、社会実装に向けて色々な動きがある。

カーボンニュートラル実現には、個別技術開発とともに、技術を組み合わせてサプライチェーンを構築しなければならない。このため、様々な機関がエネルギーモデルに基づくシナリオ分析を公表しており、水素は重要な役割を果たさなければならないと考えられるが、そのためのインフラ整備を含めた議論は十分とはいえない。

本稿では水素エネルギー協会（HESS）が2024年に発表したシナリオ分析¹⁾に基づき、水素エネルギー社会構築のために必要なインフラについて概観する。

2. カーボンニュートラルに向けた将来像のシナリオ分析

ここでは、HESSの「カーボンニュートラルに向けた水素エネルギーの将来像のシナリオ分析」の概要を紹介する。図1にはエネルギーシステム概念図を示す。左側がエネルギー供給であり、上から白抜き文字が炭化水素である化石燃料および合成燃料、その下が輸入水素である。ここまでが輸入エネルギーであり、原子力以下が国産エネルギーである。

シナリオ分析では、これらの供給されたエネルギーを交換して消費する構成である。それぞれのプロセスについてコストが最小になるように最適化して、設備の規模、効率



Shigenori MITSUSHIMA
1989年 横浜国立大学工学研究科物質工学専攻博士課程前期修了
1998年 横浜国立大学 博士(工学)
現在 横浜国立大学大学院工学研究院 教授・副研究院長 兼 先端科学高等研究院先進化学エネルギー研究センター長
連絡先；〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
E-mail mitsushima-shigenori-hp@ynu.ac.jp

2025年10月7日受理



Yoshiyuki KURODA
2011年 早稲田大学先進理工学研究科応用科学専攻博士課程修了
現在 横浜国立大学大学院工学研究院 兼 先端科学高等研究院先進化学エネルギー研究センター 教授
連絡先；〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5
E-mail kuroda-yoshiyuki-ph@ynu.ac.jp

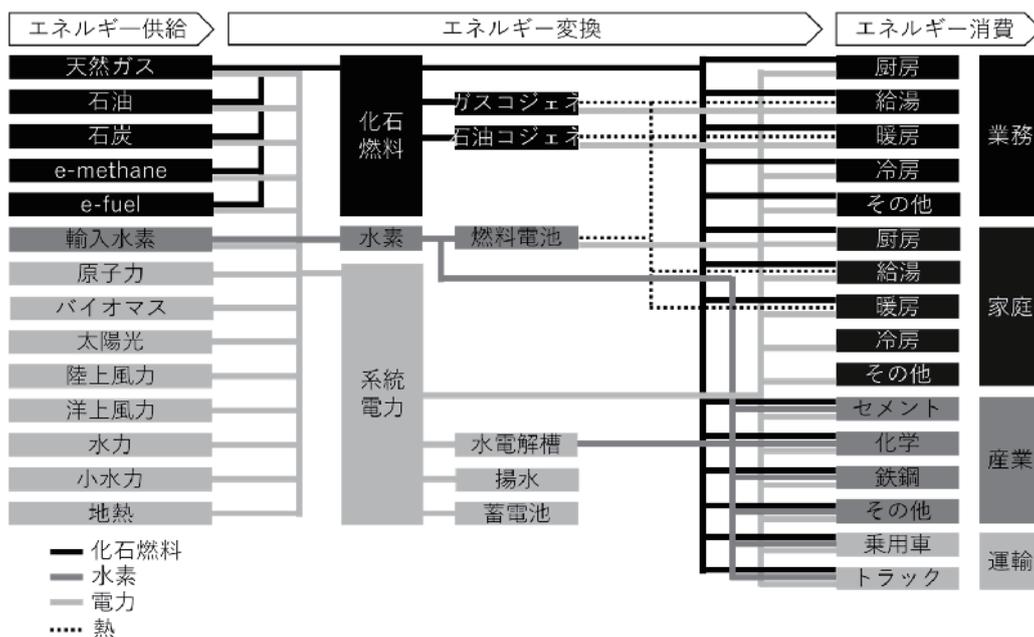


図1 エネルギーシステムの概念図¹⁾

水素エネルギーシステム, 49(2)(2024) より承諾のうえ, 転載

や設置のための投資などを検討することができる。この一連のプロセスを国際エネルギー機関 (IEA) で開発されている長期のエネルギーシステムを分析する The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES) にて、入力条件に対してエネルギーシステムの総資本コストが最小化するように最適化した。このなかで、日本の森林吸収に対応した量の化石燃料を使用し、国内の再エネ、原子力に加えて、輸入燃料としてカーボンニュートラルな水素あるいは合成燃料を輸入するシナリオとした²⁾。

表1に想定したシナリオの前提条件の概略をまとめる。基本となる最も確からしい値として“輸入水素活用シナリオ”，水素輸送コストを高く、合成燃料の製造コストを安く見積もった“合成燃料活用シナリオ”，水素輸送のみを高く見積もった“国内水素活用シナリオ”の3つを考えた。輸入燃料の価格のベースとなる再エネ電力はIEAの予測の世界平均である3.4円/kWhとした。水電解水素製造、合成燃料やエネルギーキャリアの合成、海上輸送についてコストを評価し、輸入水素活用シナリオでは、水素輸入価格は2.89円/MJとした。これを換算すると37円/Nm³と政府目標の2030年に30円/Nm³、カーボンニュートラルを達成する2050年には20円/Nm³以下と比較すると高価である。その他の日本国内での発電、インフラ、貯蔵に関わる前提条件は各シナリオ共通である。このなかで、短距離水素輸送コストはいわゆる“ラストワンマイル”の小口需要への配送コストの評価であり、デフォルトの5円/Nm³は供給導管を使用する都市ガスと同程度の金額の想定、55円/Nm³はLPガスのようにポンペをトラックで輸送する戸別配送を想定した値である。この2つについては輸入水素活用シ

表1 各シナリオの前提条件 (2050年以降)¹⁾

分類		輸入水素活用シナリオ	合成燃料活用シナリオ	国内水素活用シナリオ
燃料	グリーン水素輸入価格	2.89円/MJ	3.83円/MJ	
	e-methane輸入価格	7.31円/MJ	4.51円/MJ	7.31円/MJ
	e-fuel輸入価格	8.18円/MJ	4.51円/MJ	8.18円/MJ
	燃料輸入量	上限なし		
発電	太陽光価格	住宅用太陽光 10.5-14.0万円/kW 事業用太陽光 8.8-13.5万円/kW		
	風力価格	洋上風力 21.1-31.1万円/kW 陸上風力 10.8-29.3万円/kW		
	CCS貯留量	CCS年間貯留量は900万トン上限		
	原発再稼働数	現状稼働中の12基のみ残ると想定(2050年時点では7基)		
インフラ貯蔵	長距離水素輸送コスト	5円/Nm ³ (港湾から大規模需要地または小口需要地近傍)		
	短距離水素輸送コスト	5円/Nm ³ (小口需要への供給, 水素インフラの影響では55円/Nm ³ を比較例で評価)		
	系統増強量	OCCTOマスタープランを下限とし、さらに増強可能と想定		
	水電解槽価格	5.2万円/kW		
	蓄電池価格	6.0万円/kWh		

水素エネルギーシステム, 49(2)(2024) より承諾のうえ, 転載

ナリオでケーススタディしてラストワンマイルの影響を検討した。

図2に解析結果の代表的な例として、各種試算結果をもとに求めたエネルギー自給率と電力価格の関係を示す。比較対象として、2019年および2021年の実績とBAU(Business as usual)として、化石燃料使用に伴うCO₂排出は全てIEAの2050年のネットゼロエミッション (NZE) ケースの市場

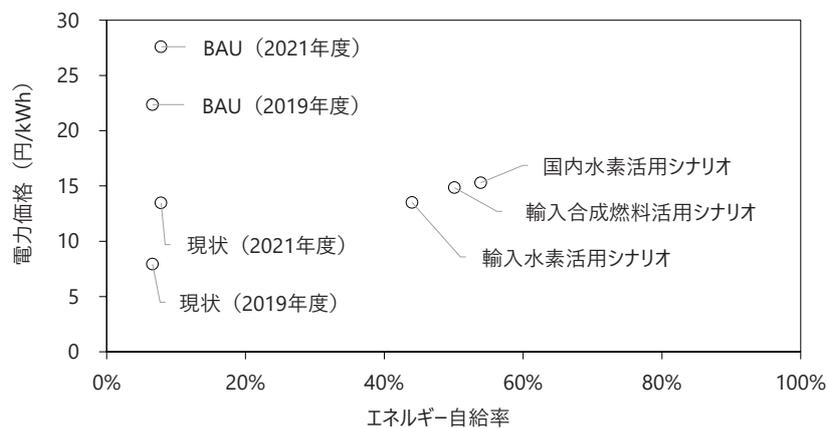


図2 各シナリオでのエネルギー自給率と電力価格¹⁾
水素エネルギーシステム, 49(2)(2024)より承諾のうえ, 転載

表2 主要技術の設備規模と設備投資額¹⁾

分類	設備規模(上段) 設備投資額(下段)			
	輸入水素活用シナリオ	合成燃料活用シナリオ	国内水素活用シナリオ	
海外	再エネ	1783.2 GW 60.3兆円	1874.6 GW 63.4兆円	1522.5 GW 51.5兆円
	水電解槽	594.4 GW 30.9兆円	624.9 GW 32.5兆円	507.5 GW 26.4兆円
	合成反応装置	6.0 GW 0.5兆円	249.5 GW 15.5兆円	6.8 GW 0.6兆円
	海上輸送等	- 226.5兆円	- 48.8兆円	- 325.2兆円
国内	再エネ	410.9 GW 77.1兆円	482.0 GW 94.6兆円	554.7 GW 112.2兆円
	水電解槽	0.4 GW 0.02兆円	13.1 GW 0.7兆円	56.0 GW 2.9兆円
	電力系統	現状比1.9倍 7.8兆円	同2.2倍 10.6兆円	同2.3倍 10.9兆円
	国内水素輸送	- 30.3兆円	- 7.9兆円	- 23.7兆円
	民生用燃料電池	25.0 GW 5.5兆円	11.5 GW 2.5兆円	20.8 GW 4.6兆円
	燃料電池自動車	317.2万台 15.2兆円	223.2万台 11.2兆円	226.4万台 11.3兆円

水素エネルギーシステム, 49(2)(2024)より承諾のうえ, 転載

取引で相殺することで求めた電力価格も示す。いずれのシナリオでも現状より電力価格は高くなるが、現状の2倍以上になるBAUケースよりは低く、エネルギー自給率は約50%程度まで上昇した。3種のシナリオのなかでは、輸入水素活用シナリオがエネルギー自給率、電力価格とも最も低く、次いで輸入合成燃料活用シナリオ、国内水素活用シナリオの順であった。いずれのシナリオでも民生部門は電化され、高温の熱需要が多い産業部門が水素化あるいは合成燃料化に向かった。短距離水素輸送コストを導管供給の都市ガス想定した5円/Nm³から戸別配送想定した55円/Nm³にすると、水素化よりも電化の方が有利になり、民生部門での定置型燃料電池での水素需要がなくなり、輸入水素受入基地での集中型水素発電と電力需要に置き換わった。

表2にシナリオごとに必要な主要技術の設備規模と設備投資額をまとめる。どのシナリオでも国内外に約2000 GWの再エネ発電、600 GW程度の水電解水素製造が必要である。合成燃料活用シナリオでは、CO₂源に直接空気回収(DAC)を想定しているため、再エネ発電や合成反応装置の規模が大きく、海上輸送や国内での水素利用に関する設備が少ない。また、輸入水素活用シナリオと国内水素活用シナリオは基本的には同じ設備をどのように配置するかの違いであるのに対して、合成燃料活用シナリオは、国内に再エネ電力を導入する以外の変更は全て海外に設置することとなり、他のシナリオとは異質なものである。また、いずれのシナリオでもインフラ整備のために約500兆円の投資が必要であり、日本のGDPの約600兆円、国家予算の約340兆円と比べると非常に大きな投資である。本試算では、これらを投資額として計算しているが、このうち天然資源そのものの価格分は1割にも満たないと考えられること、すでにできあがった産業ではないことから、日本が参入可能な新たな産業の市場と見るほうが正しいと考える。

3. カーボンニュートラルに向けたインフラ整備

ここまで紹介したシナリオ分析では、輸入水素価格が37円/Nm³と現在の化石燃料の価格を基本とした。2050年には20円/Nm³以下の政府目標より高価なため、現在よりもエネルギー自給率が高いのが特徴である。逆に政府目標の水素価格を達成したら、エネルギー自給率は下がると考えられる。カーボンニュートラルに向けたエネルギーシステムの変革が産業構造に影響を及ぼさないのであれば、エネルギー価格も、それぞれの産業に従事する人口割合も変化しないと考えられるが、現在の高度に集積した化石燃料を大規模に採掘、貯蔵・輸送、利用するシステムと比較し、太陽光発電や風力発電を基盤としたエネルギーシステ

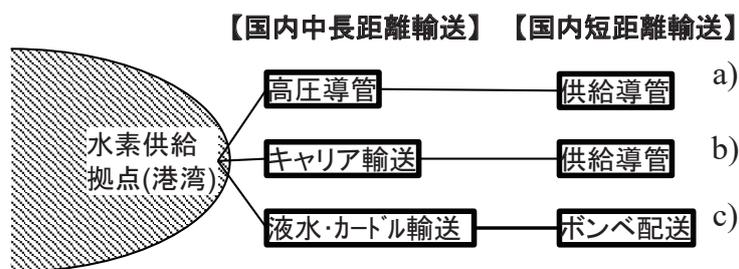


図3 国内の水素供給のイメージ

ムを維持するためにエネルギー産業従事者の人口割合が増えるとしたら、人件費に対応するエネルギー価格の上昇は受け入れざるをえないと考える。また、従来型の化石燃料とは違い、資源開発が余剰を生む可能性はほとんどないため、海外資源であっても、日本が開発投資から関与しないと合理的な価格でエネルギーを購入できないと考える必要がある。

新たなエネルギーシステムを構築するうえで、災害や気候変動、地政学的なリスクも含めたレジリエンスも重要である。すなわち、地政学的リスクが小さい複数の地域からの国際的なエネルギーサプライチェーンと、国内の電力だけではなく、カーボンニュートラルな化学エネルギーのサプライチェーンを構築する必要がある。

図3にカーボンニュートラルな化学エネルギーのサプライチェーンとして、国内の水素供給拠点から、中長距離輸送を経て、中間拠点から短距離輸送する3つのパターンを示す。a)は全てパイプライン、すなわち高圧導管と供給導管での構成、b)が水素エネルギーキャリア、例えば液体水素や有機ケミカルハイドライドのまま中間の供給導管の拠点に輸送して、この拠点で水素化して供給導管で供給、c)が液体水素あるいはカートルで中間の拠点まで輸送して、その後ポンプ配送する。これまでの多くの事業ではインフラ投資が少ないc)で技術実証され、ラストワンマイルのコスト低減が必要なこと、このためには供給導管の整備が必須であることが分かってきている。これを一気

にパイプラインに転換することは難しいので、c)からb)を経て、本格的な供給システムであるa)を目指すような段階的なインフラ整備が不可欠である。

4. おわりに

海外から船舶輸送でエネルギーを輸入する必要がある日本のカーボンニュートラル実現に向け、水素エネルギーインフラの整備が不可欠である。このためには、再エネ・水素製造・輸送・貯蔵・利用で構成される最適なシステムの構築が必要であり、単純な試算でも500兆円規模の投資が必要と推定される。このなかで、レジリエンスや地政学的リスクも考慮して、国内のエネルギーシステムがオール電化に向かわず、水素エネルギー社会を構築するためには導管供給の整備から始めるインフラ整備が重要である。以上のように、カーボンニュートラルに向けて、新たな産業を立ち上げてインフラを作り直すような視点で考えていく必要があると考える。

参考文献

- 1) 光島重徳, 黒田義之, 大久保辰哉, 大屋昌士, 辻上博司, 石本祐樹, 松岡孝司, 白崎義則, 河野龍興, 越智崇充, 濱崎博, 里川重夫: 水素エネルギーシステム, 49(2), 68-84 (2024)
- 2) IEA ETSAP, "Overview of TIMES Modelling Tool", (<https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>)
- 3) IEA, "World Energy Outlook 2022", p.471, 2022. (<https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>)