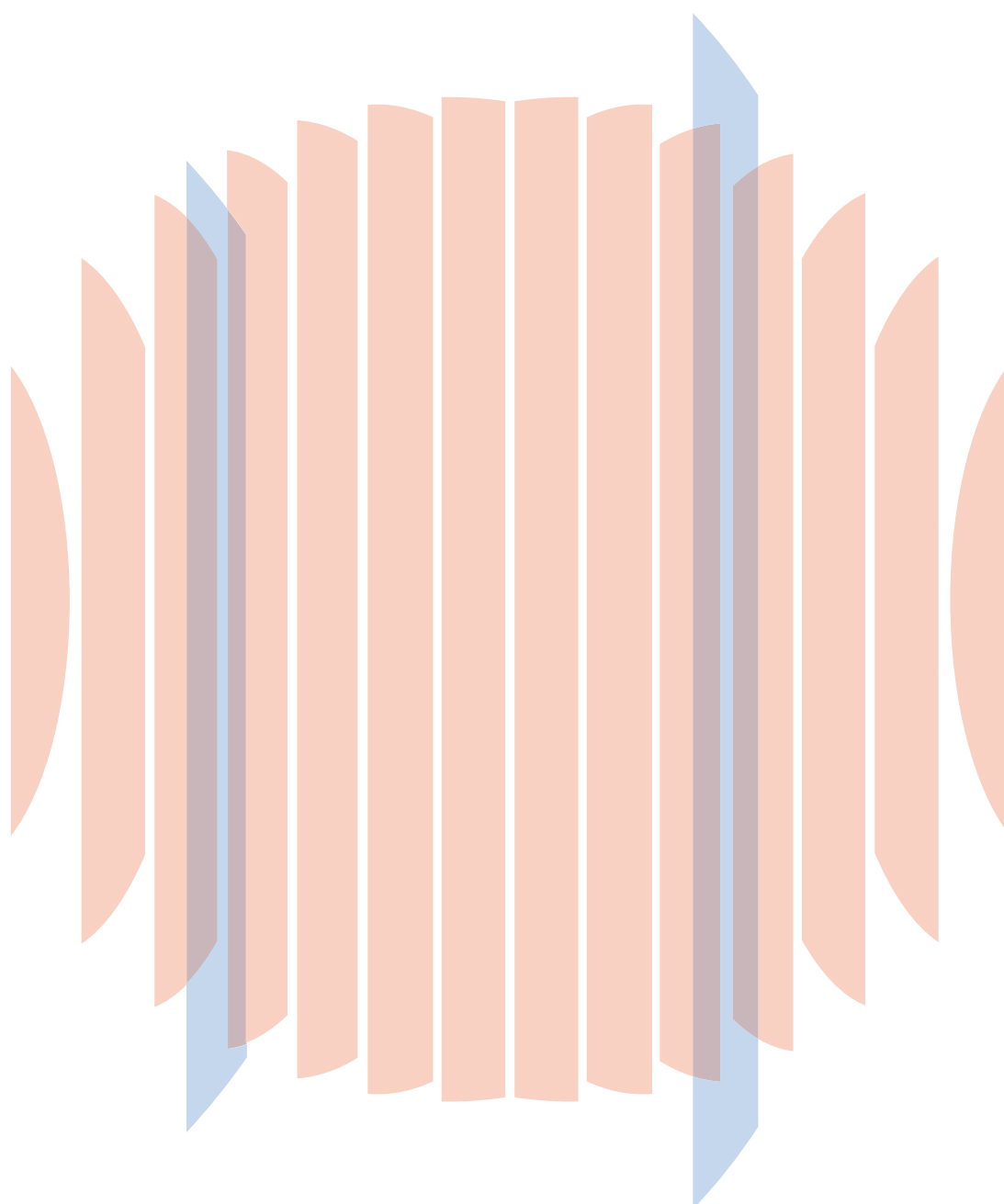


季報 エネルギー総合工学

Vol. 45 No. 1 2022. 4



一般財団法人 エネルギー総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

目 次

【寄稿】

ENEOS の水素社会実現に向けた取り組み

ENEOS 株式会社 水素事業推進部 主幹 前田 征児 …………… 1

【寄稿】

関西電力の水素社会実現に向けた取り組み

関西電力株式会社 水素事業戦略室 戦略グループ 部長 水田 真夫 ……………10

【調査研究報告】

カーボンニュートラルに向けた世界および日本の

エネルギーシステムにおける水素の寄与

プロジェクト試験研究部 水素グループ 副部長 石本 祐樹 ……………17

【寄稿】

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全確保の考え方

～国際基準とフランスの事例の紹介～

(一社) 日本原子力学会 フェロー 田辺 博三 …………… 25

【事業計画】

令和4年度 事業計画 (一財) エネルギー総合工学研究所 …………… 40

【研究所のうごき】 …………… 51

【第44巻通巻目次】 …………… 53

【編集後記】 …………… 57

[寄稿]

ENEOS の水素社会実現に向けた取組み

前田 征児

(ENEOS 株式会社
水素事業推進部 主幹)



1. はじめに

(1) 背景

パリ協定の発効を契機に世界のエネルギー政策の潮流が「カーボンニュートラル」へと転換している中、水素は発電・運輸・産業分野等の幅広い経済活動の脱炭素化に寄与するポテンシャルを有することから、世界各国において関心の高まりを見せている⁽¹⁾。

ENEOS グループはアジアを代表する「エネルギー・素材企業グループ」として、上流の資源開発から下流の製品販売・リサイクルに至るまで、グローバルなバリューチェーンの最適化を追求し、130 年以上の長きにわたって、石油や天然ガスといったエネルギーや石化原料等の素材の安定供給に貢献してきたが、今後の本格的なカーボンニュートラル社会への対応と、持続可能な成長に向けた「次世代型エネルギー供給」の一環として、新たに、図 1 に示す「CO₂ フリー水素サプライチェーン」や「再生可能エネルギー（再エネ）合成燃料」といった、水素を活用した取組みを強

化している。

本稿では、ENEOS における、これらの水素社会実現に向けた取組みと将来展望について紹介する。

(2) 国内外の動向

国内外の動向を図 2 に示す。日本は世界に先駆け 2017 年 12 月に「水素基本戦略」を策定した⁽²⁾。その後、菅前首相の「2050 年カーボンニュートラル宣言」を受け、2020 年に閣議決定された「グリーン成長戦略」では、水素を新たな資源と位置付け、2030 年に年間 300 万トン、2050 年には 2,000 万トンに導入拡大し、長期的には化石燃料と同等程度の価格となる 20 円 /Nm³ 以下を目指すという、野心的な目標が掲げられた⁽³⁾。これを実現すべく、総額 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」が創設され、うち、水素関係では約 7000 億円のプロジェクトが採択されている⁽⁴⁾。また、「第 6 次エネルギー基本計画」でも 2030 年の電源構成のうち、1% 程度を水素・アンモニアとする目標設定がなされた⁽⁵⁾。



図 1 CO₂ フリー水素サプライチェーン

日本		海外	
20年10月	菅首相所信表明演説の中で「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 (国内温暖化ガス排出を50年までに「実質ゼロ」)	豪州	19年11月に「国家水素戦略」を発表 50年までに約8,000億円の経済効果を見込む 21年4月に450億円の水素ハブ・CCUS基金を発表 - 豪州グリーン水素貿易プログラム公表。「日本向け輸出を焦点に」
20年12月	2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略の発表 - 水素は、運輸・産業・民生・電力の幅広い分野で活用可能。今後は新たな資源と位置付け - 水素発電コスト目標として、ガス火力以下に低減 - CO₂フリー水素の導入量は30年に最大300万トン、50年に2,000万トン程度に拡大	EU	20年7月に水素戦略を発表 30年までに電解水素の製造能力40GWを目指す 50年までの投資額35～70兆円
20年12月	グリーンイノベーション基金創設(総額2兆円-10カ年) ・具体的な目標年限とターゲットへのコミットメントを示す企業の研究開発を10年間継続支援	アメリカ	21年4月気候変動サミットにて30年までに05年対比50～52%の温室効果ガス削減を発表 21年11月総額120兆円のインフラ投資法案可決(水素はクリーンエネルギー/テクノロジー投資総額10兆円の内数)
21年6月	グリーン成長戦略(閣議決定) ・温室効果ガスの排出を削減する観点で14の重要分野を設定 ・エネルギー産業の「水素産業」は重要位置づけ	ドイツ	20年6月に国家水素戦略を策定 - 国内再生水素製造能力の目標を設定(30年:5GW、40年:10GW) - 欧州エネルギー取引所(EEX)にて水素価格指標を開始する計画
21年8月	グリーンイノベーション基金、水素関連PJの採択決定	フランス	20年9月に水素戦略を改訂 30年までに電解装置6.5GWの設置、年間60万トンのグリーン水素生産を目標として設定
21年10月	エネルギー基本計画閣議決定		
21年12月	岸田首相「クリーンエネルギー戦略」策定・実行を表明(～22年6月)		

図2 国内外の水素エネルギー関連政策の動向

その後、岸田総理の所信表明演説にて、脱炭素社会実現に向けた「クリーンエネルギー戦略」を策定する方針が宣言され⁽⁶⁾、今年6月頃までに、エネルギー転換のための具体策を提示すべく、有識者会議での議論が進展している⁽⁷⁾。これと並行して、総合資源エネルギー調査会に水素政策に関する分科会が設置され、中長期の導入シナリオと、政策支援の在り方が活発に議論されている⁽⁸⁾。

海外に目を転じると、日本に次いで最も早い段階で「国家水素戦略」を発表したのが豪州である。現状では、化石資源や鉄鉱石など、温室効果ガス(GHG)排出負荷の大きな資源輸出型の経済構造からの転換を目指し、豊富な再生エネルギー由来の水素を新たな資源ビジネスの柱に育てていくことで、大きな経済効果の創出を目指している⁽⁹⁾。今年1月に公表した豪州グリーン水素貿易プログラムでは、「日本向け輸出を焦点」とする旨の言及もあり⁽¹⁰⁾、今後、政府間の一層の連携による国際協力に進展することが期待される。

これに続き欧州連合(EU)では2020年に水素戦略を発表し、2030年までに40GWもの電解水素製造能力の実装を目標に掲げ、2050年までの財政投入額として最大70兆円を見込んでいる⁽¹¹⁾。

国レベルでは、英国とドイツの動きが活発

で、日本を含む他国に先駆け、水素供給事業者にとって投資回収の予見性を高めるべく、水素導入支援制度の具体的なスキーム案が示された。英国では、2030年までに5GWの水電解水素製造能力を確保する目標を掲げ、40億ポンド規模の投資を呼び込み大きな雇用創出を見込んでいる。英国では“Low Carbon Hydrogen Business Model”で、洋上風力発電の導入実績のある「差額決済型固定価格買取制度(FIT-CFD)」をベースとした水素事業開発の支援制度案と2.4億ポンドの基金提案がなされている⁽¹²⁾。一方のドイツも同じく2030年までに5GWの水電解導入目標を設定しているが、“H₂ Global”施策の一環で、9億ユーロを原資とし、海外グリーン水素供給事業者に対し、10年間固定価格で政府が一括で買取契約を締結し、水素需要家への販売価格との差額を補てんする仕組みとなっている⁽¹³⁾。いずれも導入初期段階の民間の事業リスクを政府が一部肩代わりすることをコミットするものであり、日本においても、類似の制度に関する議論が早急に進展することが望まれる。

米国ではバイデン政権の目玉政策である「インフラ投資法案」が議会で可決されたが、このうち水素関連では、地域クリーン水素ハブや水電解プログラム等に総額100億ドルの拠出が決まっている⁽¹⁴⁾。これまで目立った動

きの無かったオイルメジャーによる取組みも活発化している模様で、今後の動向に注視する必要がある。

2. CO₂ フリー水素サプライチェーン構築の取組み

(1) ENEOS 水素導入の長期戦略ロードマップ

図3は、ENEOSの水素導入戦略に関するロードマップである。足元の実証段階を経て、2025年頃から年間数万トン規模での社会実装を開始し、2030年から本格的な商用段階に移行し、2050年には国内需要の約半分に相当する量の水素を供給することを目標に掲げている。当初は製油所で受け入れた水素を自社の

発電設備等で活用することが中心だが、国内外のサプライチェーンを段階的に構築しながら、受入拠点の近隣にある発電所や製鉄所などの産業需要や、自動車・鉄道・船舶といった運輸分野の需要拡大への対応を目指す。この目標を達成するため、図4に示すように、
①CO₂フリー水素のサプライチェーン構築
②モビリティ分野を中心とする水素・合成燃料事業による需要創出
③再エネと水素を組合せた地産地消型エネルギー供給プラットフォームの確立
の3つを戦略方針の柱としている。

以下、個別に具体的な取組み内容を詳しく述べる。

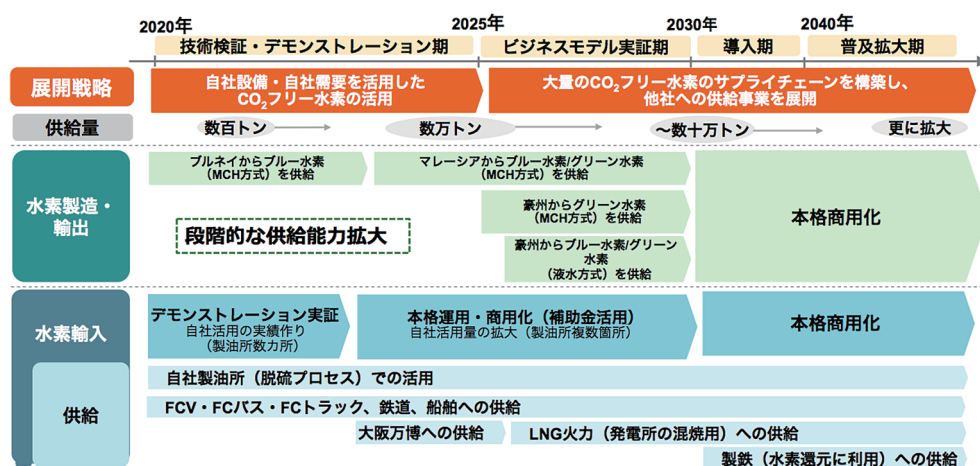


図3 ENEOSの水素サプライチェーン構築に向けた長期戦略

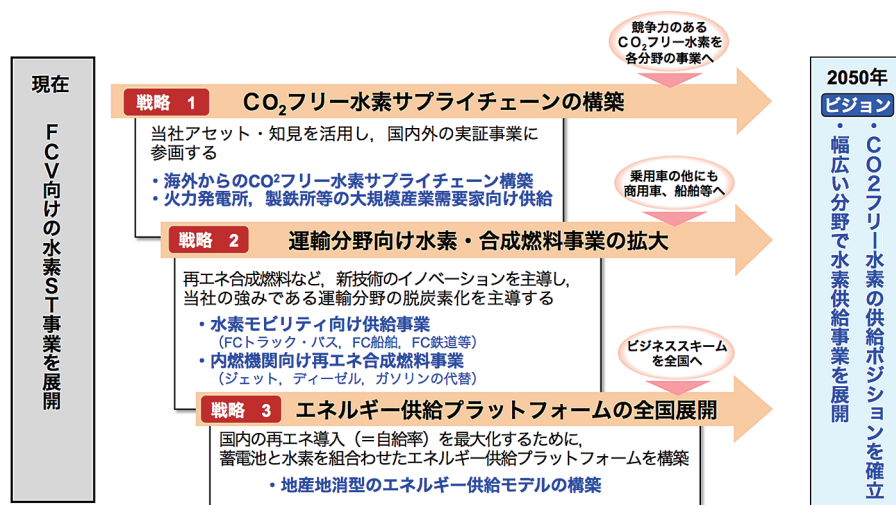


図4 ENEOSの水素・合成燃料事業のビジョンと長期戦略

(2) 海外の水素源開発の状況

図5に海外のCO₂フリー水素源の開発状況をまとめる。豪州ではクイーンズランド州、南オーストラリア州、西オーストラリア州の三地域にて、現地の有力企業と協業し、太陽光や風力など豊富な再生エネルギー由来の安価なグリーン水素源の開発を進めている⁽¹⁵⁾。東南アジアでは、サラワク州の未利用水力発電を利用したグリーン水素源に加え⁽¹⁶⁾、国営石油会社のペトロナス社の未利用副生水素を活用した水素源を検討している⁽¹⁷⁾。一方、中東では、世界最大の石油会社であるサウジアラムコ社と共同で、化石資源由来でCCS技術を組み合わせたブルー水素製造の可能性を検討している⁽¹⁸⁾。

これまでのエネルギー事業で培った、広範囲なネットワークとアライアンスを活かし、本格的な水素の大量消費社会を見据えたサプライチェーンの早期拡大を目指している。

(3) 水素キャリアの選定について

海外から水素を効率的に輸送する水素キャリアの候補としては、表1に示すように「液化水素」「メチルシクロヘキサン (MCH)」「アンモニア」の3方式がある。中でもMCH方式については、貯蔵タンクや輸送船舶・ローリーなどの、石油事業の既存インフラをほぼ

そのままの形で有効活用できる利点があることから、社会実装の初期段階では着手しやすい方式と言える。

液化水素方式については、マイナス253℃の極低温で液化した水素を貯蔵する大型設備の技術開発途上であるが、既に商業ベースで技術が確立されたLNG設備に近いコストが実現されれば、大型ガス火力発電所等の大規模需要向けの貯蔵輸送手段としての普及が見込まれる。

アンモニア方式については、石炭火力の脱炭素化に向けた燃料アンモニア用途が期待されており、将来的には3方式がそれぞれの長所を生かし、用途ごとに棲み分けながら普及していくのではないかと考える。

(4) 国内の受入れ拠点整備と需要確保

海外水素の受入れ拠点としては、港湾・棧橋・タンク等のアセットと大規模な産業需要家へのアクセスが容易であることが望まれるが、製油所はこれらの条件を満たしている。図6に製油所をハブとするCO₂フリー水素の供給モデルを示す。

中長期的に国内石油製品の需要減退が見込まれる中、石油業界各社は製造拠点の統廃合を模索している状況下であるが、当社においては、遊休化する設備やスペースを活かしながら、製油所を脱炭素時代の新たなCO₂フ

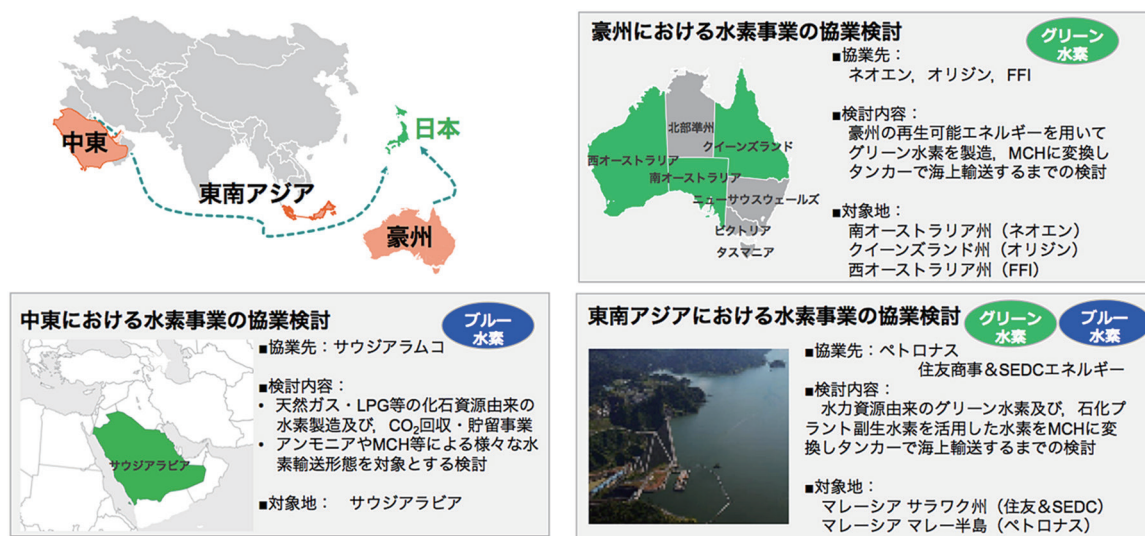
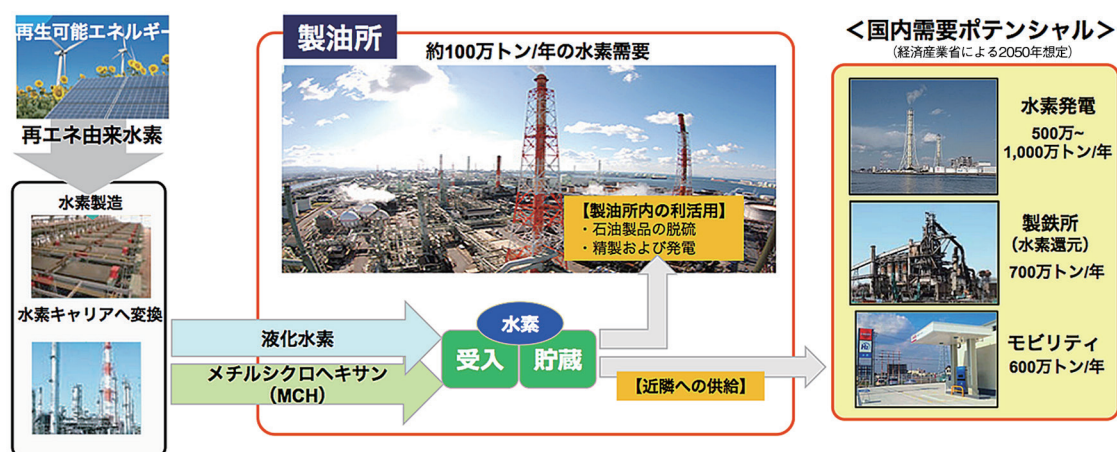


図5 海外からのCO₂フリー水素の調達に関する取組み

表1 CO₂フリー水素キャリアの比較

		液化水素	MCH	アンモニア	メタン（メタネーション）
基本物性	液体となる条件	-253℃・常圧 （漏洩時：ガス）	常温・常圧 （漏洩時：液体）	-33℃・常圧 （漏洩時：ガス）	-162℃・常圧 （漏洩時：ガス）
	体積 （対常圧水素）	1/800	1/500	1/1300	1/600
	ガス密度	0.09	-	0.77	0.56
	毒性	無し	トルエンにあり	毒性・腐食性あり	無し
エネルギー効率 （well to 発電）	褐炭水素+ CCSケース	28%	29%	27%	—
	風力+ 水電解ケース	34%	35%	32%	28%
環境性 （well to 発電） g-CO ₂ /kWh LNG火力:430	褐炭水素+ CCSケース	191	205	211	—
	風力+ 水電解ケース	36	48	49	41
既存インフラの活用可否		・ 国内輸送インフラ活用可能（国際輸送は新設必須）	・ タンカーや貯蔵タンク等の既存インフラが活用可能 ・ 既存精製設備活用により初期投資を抑制可能	・ 既存のアンモニアインフラが活用可能	・ LNGタンカーや都市ガス配管等の活用が可能
課題		・ 輸送貯蔵技術の大型化 ・ MCH対比でCAPEX比率が大きく巨額	・ 脱水素エネルギーのグリーン化（排熱利用等） ・ 高純度化（FCV向け）	・ 製造時の低温/低圧化 ・ 燃焼性（直接利用時） ・ 脱水素設備の技術開発（水素利用時） ・ 高純度化（FCV向け）	・ CO ₂ 調達 ・ 高純度化（FCV向け）



（出所：「2050年カーボンニュートラルに伴う成長戦略」，経済産業省，令和2年12月25日）

図6 製油所をハブとするCO₂フリー水素の供給モデル

リー水素を安定供給するための重要拠点として維持・発展させていくことを目指している。

（5）グリーンイノベーション基金プロジェクト

当社は昨年創設された新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「グリーンイノベーション（GI）基金事業／大規模水素サプライチェーン構築プロジェクト」に応募し、図7に示す4件が採択された^{（19）}。

1つ目が、MCH方式のサプライチェーン実

証で、海外にてグリーン水素やブルー水素を年間数万トン規模で製造する大型プラントを建設し、MCH方式で製油所にて受入れ、水素を取り出す実証となる。2020年代中頃までに国内外のインフラ整備を終え、CO₂フリー水素を自社電源等で利用するとともに、製油所近隣の発電所等の需要家への供給も検討する計画で、MCHを利用して「作る・運ぶ・使う」という一連のサプライチェーン構築に取り組んでいく。

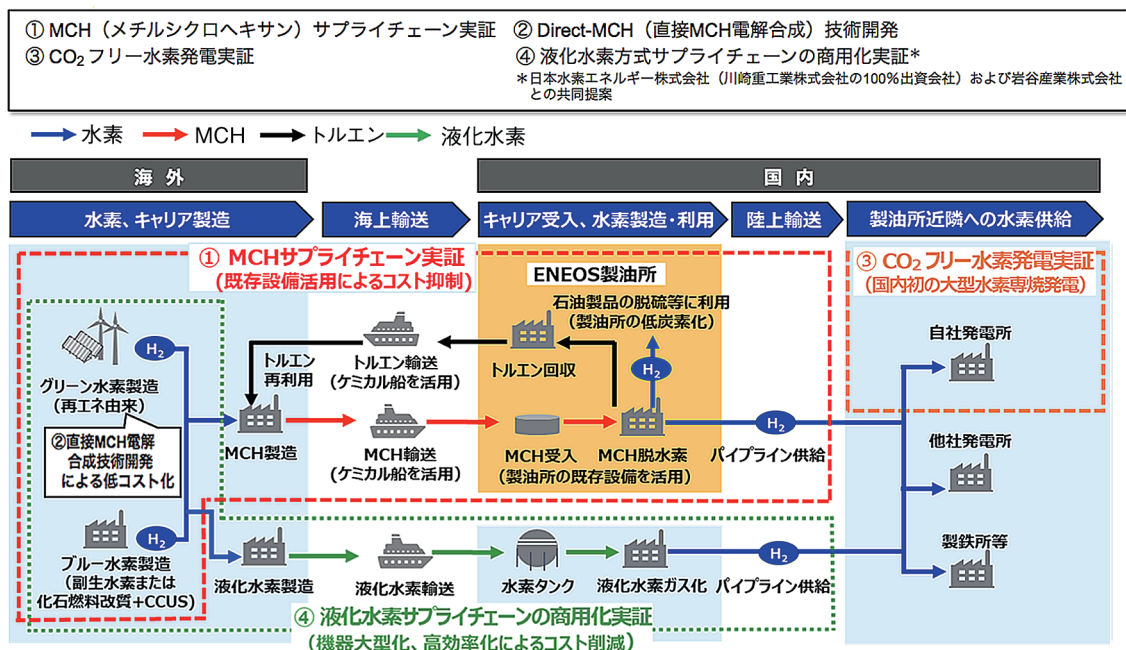


図7 GI事業による水素サプライチェーン構築プロジェクト

2つ目が、「MCH 直接電解合成（Direct-MCH）技術開発」で、クイーンズランド工科大学などと共同開発したもので、図8に示すように、電解槽で直接トルエンからMCHを合成することができ、製造工程を大幅に簡略化することができる画期的な製造技術である。GI基金事業で2025年頃までに5MW級のDirect-MCH大型電解槽を実証し、商用技術の確立を目指す計画である。

3つ目が、自社発電設備を活用し、国内で初めて大型水素専焼発電技術を実証する計画である。

4つ目が、液化水素サプライチェーンの商用実証で、商用規模の大型液化・輸送・貯蔵設備を始めてプラントとして導入するもので、川崎重工の100%子会社である日本水素エネルギー

(株)と岩谷産業(株)との共同で取り組む計画である。

事業総額は4プロジェクトで総額4000億円を超える規模となり、2030年までにCO₂フリー水素サプライチェーンの社会実装を目指している。これらを推進する上で、昨年11月に川崎市および横浜市と連携協定を締結した⁽²⁰⁾。火力発電所や化学工場等が多数集積し、水素需要ポテンシャルが大きく見込まれる京浜臨海部における水素利用の拡大に向けて、水素パイプライン等の供給インフラ整備に関する調査や実証、普及啓蒙活動等を連携して取り進めることを目的としており、カーボンニュートラルポート形成等により臨海部の脱炭素化に貢献することを目指している。図9に水素パイプラインの整備構想図を示す。

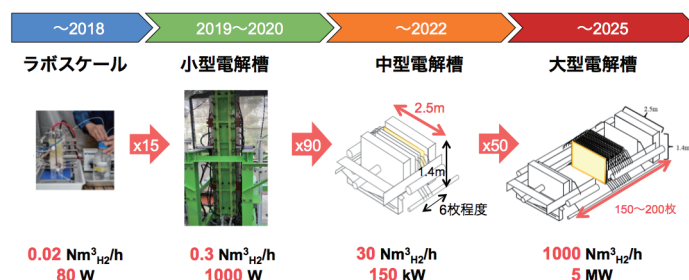


図8 Direct MCHの技術開発ロードマップ



図9 京浜臨海部における水素パイプライン整備構想

(6) モビリティ分野の取組み

当社は2014年より燃料電池自動車向けの水素供給を担う、水素ステーション事業に取り組んでいる。現在、47カ所の水素ステーションを営業展開しており、国内全体の約3割強を占めている。今後の事業展開の方向性としては、1つ目に需要拡大が見込まれる「バス・トラック等の商用車向けの大型ステーション建設」、2つ目に「カーボンニュートラルへの

対応」を考えている。

後者については、図10に示すように、昨年8月に横浜旭水素ステーションの敷地内に、水電解型の水素製造装置を設置し、自社の再エネ電力由来のグリーン水素を製造し、国内で初めて一般客向けに販売を開始した。従来は天然ガスやLPガスを原料とした水素を供給していたが、今後は水電解型の方式が主流になるものと見込んでいる。



図10 再エネ電解型水素ステーション（横浜旭 ST）

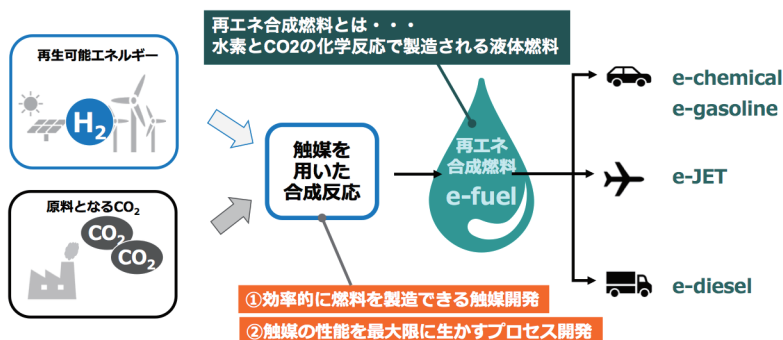


図11 再エネ合成燃料「ENEOS E-Fuel」の実用化検討

輸送用燃料の脱炭素化に向けたもう1つの柱は、図11に示す再エネ合成燃料「ENEOS E-Fuel（エネオス イーフュエル）」の製造技術開発である。再エネ合成燃料は、CO₂フリー水素と大気中のCO₂を原料とする液体燃料で、燃焼時に大気中のCO₂濃度を増やすことなく、内燃機関の脱炭素手段として極めて有効である。当社は合成反応における選択性を高めた高性能触媒の開発に成功しており、今後、大規模な製造プロセス技術の開発・実証に取り組む計画である。モビリティの中でも電動化が困難で内燃機関と液体燃料が不可欠な航空機用燃料等の用途やナフサなどの基礎化学品原料になり得るだけでなく、既存の石油流通インフラをそのまま活かせることから、石油業界にとっても大変重要な政策的テーマと位置付けられる⁽²¹⁾。

(7) 地産地消型ビジネスモデルの展開

今後国内では再生可能エネルギーが主力電源化される中で、電力系統で供給しきれない余剰電力が多く見込まれる。特に、北海道、東北、九州地区などでは、地域の再エネ資源を有効利用するためにも、その一部を水電解装置で水素に転換する地産地消型のエネルギー供給プラットフォームへのニーズが高まるものと予想される。地域の配電系統や再エネ発電の自営線に複数の水電解装置を設置し、

相互に連携したエネルギーマネジメントシステムを構築することで、蓄電池を補完する形で電力エネルギーをよりダイナミックに調整し、より多くの再エネ電源を電力系統に安定的に接続できるような付加価値も提供できる可能性がある。

図12に示すとおり、現在、NEDO事業にて、再エネ資源が豊富なむつ小川原地区を対象とした事業のフィージビリティスタディに取り組んでいる他、トヨタ自動車(株)が静岡県で建設する実証都市「ウーブンシティ（Woven City）」での協業の中でも実証展開を目指している⁽²²⁾。加えて、昨年、国内有数の再エネ事業者であるジャパン・リニューアブル・エナジー社の株式取得を決定しており、今後、再エネ事業と融合した地産地消型の次世代エネルギー供給事業を本格的に検討するほか、電力小売り事業とのシナジー効果も追求していく考えである。

3. まとめ

水素を活用したカーボンニュートラルへの取り組みは、まだ緒に就いたばかりではあるものの、石油産業が牽引役として最も大きな役割を果たすべきものと認識している。国内外の幅広いステークホルダーと協業・協調しながら、水素サプライチェーン構築を着実に推

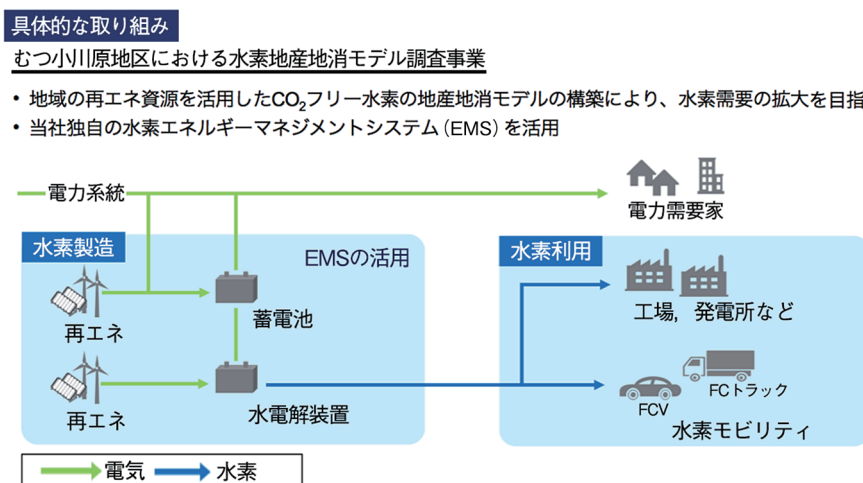


図12 国内の地産地消型 CO₂ フリー水素事業の展開イメージ

進することで、持続可能な社会実現に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 塩田智夫; JXTG エネルギーの水素社会実現に向けた取り組み, 燃料電池, 19, 2, 10 (2019)
- (2) 内閣官房 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 水素基本戦略, 2017 年 12 月 26 日 (https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf)
- (3) 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, 2020 年 12 月 25 日 (<https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-2.pdf>)
- (4) 経済産業省, グリーンイノベーション基金プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画, 2021 年 5 月 18 日, 「大規模水素サプライチェーンの構築」(<https://www.nedo.go.jp/content/100932374.pdf>), 「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造」(<https://www.nedo.go.jp/content/100932387.pdf>)
- (5) 経済産業省; 第 6 次エネルギー基本計画, 2021 年 10 月 22 日 (<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005.html>)
- (6) 首相官邸; 第 207 回国会における岸田内閣総理大臣所信表明演説, 2021 年 12 月 6 日 (https://www.kantei.go.jp/jp/101_kishida/statement/2021/1206sho-shinhyomei.html)
- (7) 経済産業省; 産業構造審議会産業技術環境分科会グリーントランスフォーメーション推進小委員会, (https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/green_transformation/index.html)
- (8) 経済産業省; 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会 水素政策小委員会 (https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene-shinene/suiso_seisaku/index.html)
- (9) Australian Government, Department of Industry, Science, Energy and Resources, Australia's National Hydrogen Strategy, 2019 年 11 月 22 日 (<https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-12/australias-national-hydrogen-strategy-overview-japanese.pdf>)
- (10) Australia Japan Clean Hydrogen Trade Partnership, 2022 年 1 月 7 日 (<https://www.minister.industry.gov.au/ministers/taylor/media-releases/australia-japan-clean-hydrogen-trade-partnership>)
- (11) EU, A Hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, 2020 年 7 月 8 日 (https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf)
- (12) UK Government; Design of business model for low carbon Hydrogen, 2021 年 8 月 17 日 (<https://www.gov.uk/government/consultations/design-of-a-business-model-for-low-carbon-hydrogen>)
- (13) German Government; Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, New funding instrument H₂ Global launched H₂ Global Foundation established, 2021 年 6 月 14 日 (<https://www.bmwide/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2021/06/20210614-new-funding-instrument-h2global-launched.html>)
- (14) US DOE, Regional Clean Hydrogen Hubs (<https://www.energy.gov/bil/regional-clean-hydrogen-hubs>)
- (15) ENEOS プレスリリース 2021 年 8 月 2 日 (https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20210802_01_02_1170836.pdf), ENEOS プレスリリース 8 月 23 日 (https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20210823_01_01_1170836.pdf), ENEOS プレスリリース 9 月 16 日 (https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20210916_01_01_1170836.pdf)
- (16) ENEOS プレスリリース 2020 年 10 月 23 日 (https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20201023_01_2011051.pdf)
- (17) ENEOS プレスリリース 2021 年 9 月 10 日 (https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20210910_01_01_1103035.pdf)
- (18) ENEOS プレスリリース 2021 年 3 月 25 日 (https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20210325_01_01_1090046.pdf)
- (19) NEDO プレスリリース 2021 年 8 月 26 日, グリーンイノベーション基金事業, 第 1 号案件として水素に関する実証研究事業に着手 (https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101471.html)
- (20) 川崎市 / ENEOS プレスリリース 2021 年 11 月 17 日 (https://www.city.kawasaki.jp/590/cmsfiles/contents/0000135/135644/211117_Release.pdf), 横浜市記者発表資料 2021 年 11 月 26 日 (<https://www.city.yokohama.lg.jp/city-info/koho-kocho/press/ondan/2021/20211126eneos.files/20211126eneos.pdf>)
- (21) 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 (目指す姿), 2021 年 3 月 (https://www.paj.gr.jp/from_chairman/20210319_02.pdf)
- (22) ENEOS/ トヨタ自動車 / ウーブン・プラネット・ホールディングスプレスリリース, 2022 年 3 月 23 日 (https://www.eneos.co.jp/newsrelease/upload_pdf/20220323_01_01_1170836.pdf)

[寄稿]

関西電力の水素社会実現に向けた取組み

水田 真夫

（関西電力株式会社 水素事業
戦略室 戦略グループ 部長）



1. 水素に関する動向とサプライチェーン

（1）水素に関する動向

2020年10月、日本は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「2050年カーボンニュートラル」を宣言した。2021年4月には2030年度の新たなGHG削減目標として、2013年度から46%削減することを目指す方針が示されるなど、カーボンニュートラルに向けた流れが日々強くなっている。

2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」では、2030年の電源構成において、再生可能エネルギー比率を大幅に引き上げ、水素・アンモニアを新たな資源として位置付けている。

社会全体としてカーボンニュートラルを実現するには、電力部門の脱炭素化を前提に、産業・民生・運輸などの非電力部門における脱炭素化は、電化を中心として、熱需要など電化できない領域では水素化などにより進めることが必要となる。

これを踏まえ、当社は、電化が難しい部門において、“水素”を活用したソリューションを提案・提供すべく取組みを進めている。

（2）水素サプライチェーン

水素は、利用時に二酸化炭素（CO₂）を排出しないため環境負荷を低減することができ、運輸・産業などの電化が難しい分野での利用拡大が期待されている。その一方で、水素利用には、発電技術の確立、燃料製造コストの低減、燃料の輸送・貯蔵などに係る供給網の

構築などが必要であることなどが課題となっている。従って、ゼロカーボン化に向けては、水素の製造から輸送・供給・発電用燃料としての利用まで、サプライチェーン全体において一貫した技術開発、コスト低減の取り組みが必要である。

2. 関西電力の水素事業戦略

関西電力グループは、持続可能な社会の実現に向け、「ゼロカーボンエネルギーのリーディングカンパニー」として、安全確保を前提に安定供給を果たすべくエネルギー自給率向上に努めるとともに、地球温暖化を防止するため、発電事業をはじめとする事業活動に伴うCO₂排出を2050年までに全体としてゼロにすることを宣言した。

この実現のため、図1に示すように①デマンドサイドのゼロカーボン化、②サプライサイドのゼロカーボン化、③水素社会への挑戦の3つの柱に取り組む。

3つの柱のうち、「③水素社会への挑戦」では、水素のあらゆる可能性を追求し、関連する研究開発・実証・検討を積極的に行い、ゼロカーボン水素の製造・輸送・供給・発電用燃料としての利用に挑戦している。

2050年のゼロカーボン社会実現に向けて、当面は図2に示すように、海外での競争力のある水素調達先の探索、火力発電所を活用した水素発電などに重点的に取り組んでいく。具体的な取組み内容については後述する。

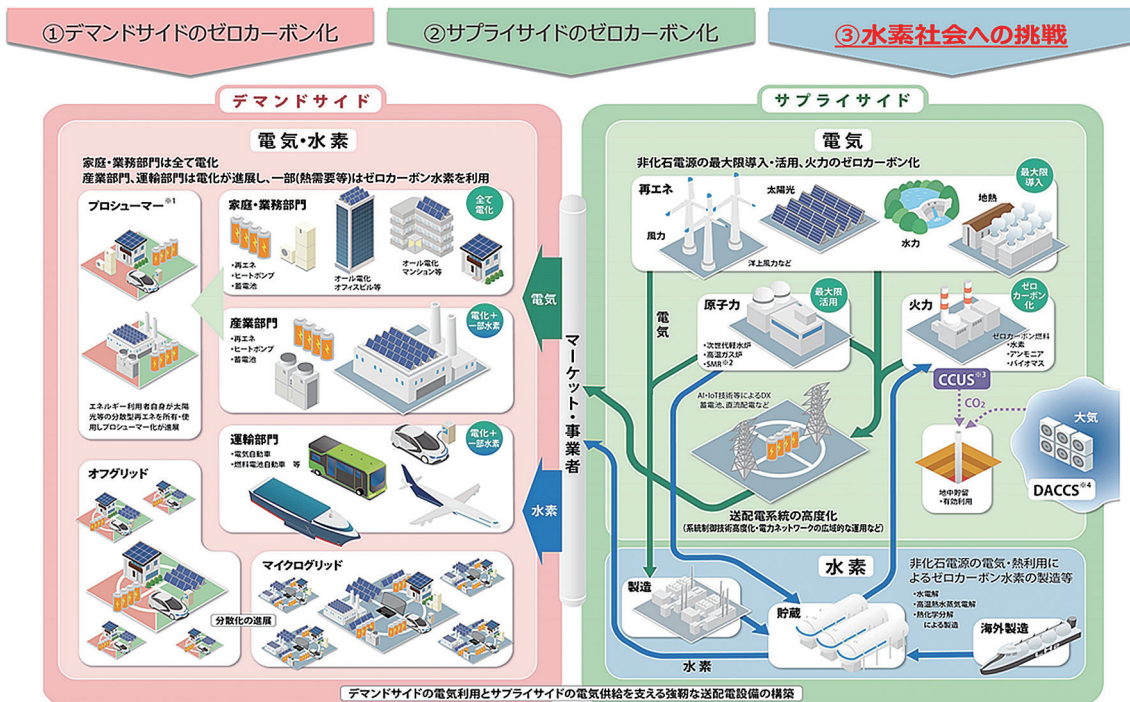


図1 「ゼロカーボンビジョン2050」取組みの3つの柱

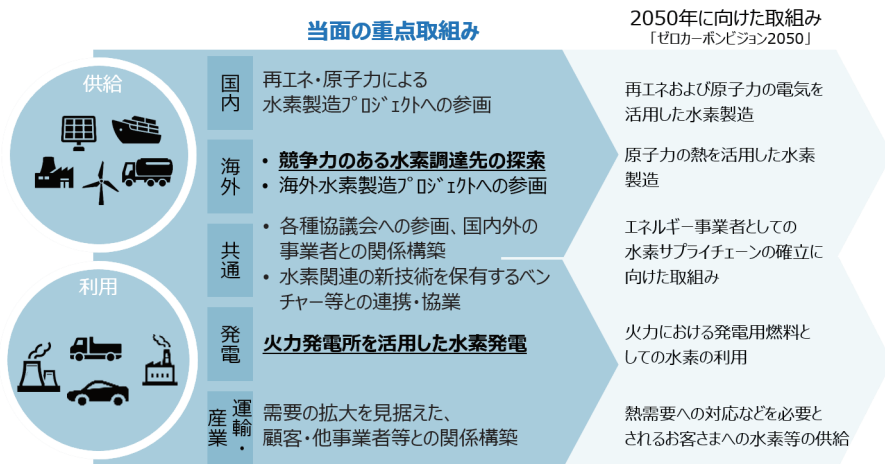


図2 関西電力の当面の重点取組み

3. 関西電力の水素の取組み

(1) これまでの取組み

① 株式会社ハイドロエッジ

関西電力グループでは、水素エネルギーの将来性に着目し、岩谷産業(株)と共同で、(株)ハイドロエッジを大阪府堺市に設立し、2006年から液化水素などを製造・販売している。図3に同社の事業内容を示す。

堺 LNG から供給される液化天然ガス (LNG) の冷熱を利用し、空気から窒素・酸素・アルゴンの産業用ガスを分離・製造するとともに、更にそこで生産される液化窒素の冷熱を利用し、原料である天然ガスから水蒸気改質して得た水素ガスを液化している。

② 神戸水素 CGS 実証

神戸市に、世界初となる水素を燃料に市街

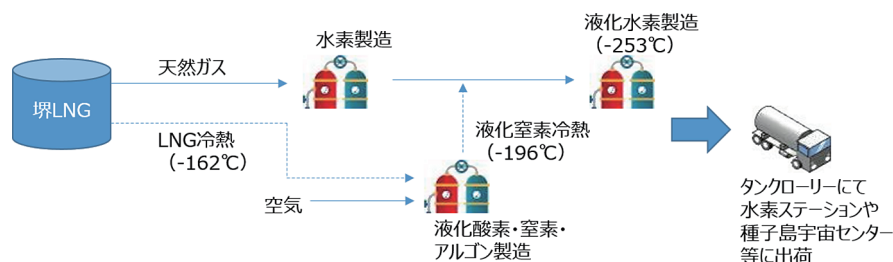


図3 株式会社ハイドロエッジの事業内容

地での熱電供給を行うシステム（1MW 級水素コージェネレーションシステム（CGS））を構築し、発電効率および環境性能向上に向けた技術実証に取り組んでいる。図4に水素CGS設備の外観を示す。

2015～2018年度は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」を、また、2019～2020年度は同機構の「ドライ低NO_x水素専焼ガスタービン技術開発・実証事業」を実施した。

実証主体は川崎重工業㈱、㈱大林組であり、神戸市や当社グループなどは協力企業として参画し、実証に係る運転操作や日常管理、運

用評価などに関して、要員派遣などを含めグループ大で協力している。

③ 水素混焼発電に関する調査

当社は、NEDO から受託した「我が国における水素発電導入可能性に関する調査」（2018～2019年度）において、既設発電設備を活用した水素混焼発電の実現可能性やその技術課題について机上検討を実施した。その結果、水素混焼率はガスタービンの機種や改造範囲などにより3～23vol%程度期待できるものの、「水素関連設備の制御性」や「発電設備の運用性」などの技術課題があることから、水素混焼発電実現に先立つ詳細検討や実機実証などが必要であることを明らかにした。

（2）新たな取組み

① 水素発電の実現に向けた検討

当社は、水素の混焼発電および専焼発電を実現するために、既設火力発電所に設置のガスタービン発電設備を活用し、水素の受入・貯蔵から発電に至るまでの運用技術の確立を目指す。図5に取組みの範囲を示す。この取組みは、NEDOの2021年度「グリーンイノベーション基金事業」に採択された。



（出所：川崎重工業㈱）

図4 水素CGS設備の外観

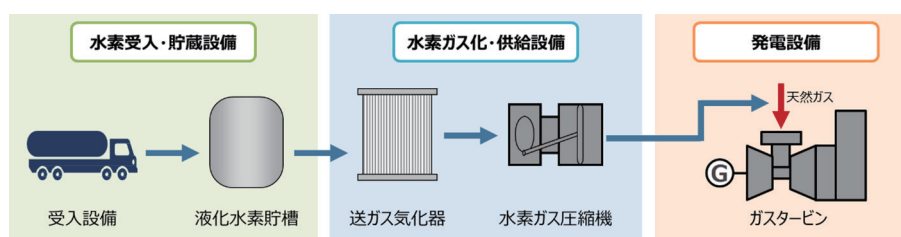


図5 水素発電の実現に向けた検討の取組み範囲（イメージ）

研究開発期間は2021～2026年度までの6年間で想定しており、まずは2021～2022年度でフィージビリティスタディ（FS）を行い、想定される技術課題やその解決方法の確認に加えて、水素発電に伴う火力発電所の改造範囲などについて詳細な検討を行う。その後、水素発電設備の設計・製作・据付を進め、2025年度に水素発電の実証開始を目指す。

② 豪州－日本間の大規模なグリーン水素サプライチェーンの事業化調査

当社は、岩谷産業(株)、川崎重工業(株)、丸紅(株)、Stanwell Corporation Limited、APT Management Services Pty Ltd.、らとともに、豪州クイーンズランド州グラッドストーン地区において再生可能エネルギー由来の水素を大規模に製造・液化して日本へ輸出するプロジェクトの事業化調査を日豪両政府（豪州：再生可能エネルギー庁（ARENA）、日本：経済産業省）の支援を受け、共同で行っている。図6にプロジェクトの全体像を示す。

本プロジェクトは、長期安定的かつ安価な水素製造および供給を行うことを目指しており、2026年頃に100t/日規模以上、2031年以降に800t/日以上の水素生産規模を想定している。現在の日本の液化水素生産量は最大30t/日であり、2031年以降、800t/日以上の水素生産規模は現在の日本における約26倍の生産規模となる。

事業化調査では、主にグリーン水素の製造

技術や、水素を液化するプラントの建設、運搬船建造、それに伴うファイナンスおよび環境アセスメントの検討ならびに商用化モデルの検討を進めている。

③ クリーン燃料アンモニアサプライチェーンの構築に向けた検討

当社は、水素とともにアンモニアにも注目し、幅広く2050年のゼロカーボン化に向けた取り組みを推進していきたいと考えている。アンモニアは、水素と同様に燃焼時にCO₂を排出しないため、ゼロカーボン燃料として期待されており、また、水素やメチルシクロヘキサン（MCH）と比べて運搬性に優れており、既に肥料向けなどにおいてサプライチェーンが確立されていることから、水素キャリアとしての活用も含め、2050年の火力のゼロカーボン化を達成するための有力な選択肢と考えている。

本取組みは、（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）の公募事業に採択され、JOGMEC、丸紅(株)、北陸電力(株)、Woodside Energy Ltd. らと共同で研究を行っている。

天然ガス由来のアンモニア製造の過程で排出されるCO₂に二酸化炭素回収貯留（CCS）・二酸化炭素回収利用（CCU）や植林などのCO₂排出削減対策を組み合わせたクリーン燃料アンモニアについて、豪州での生産、日本への海上輸送、発電用・船舶用燃料用途としての利活用およびファイナンスの検討などを含めたサプラ

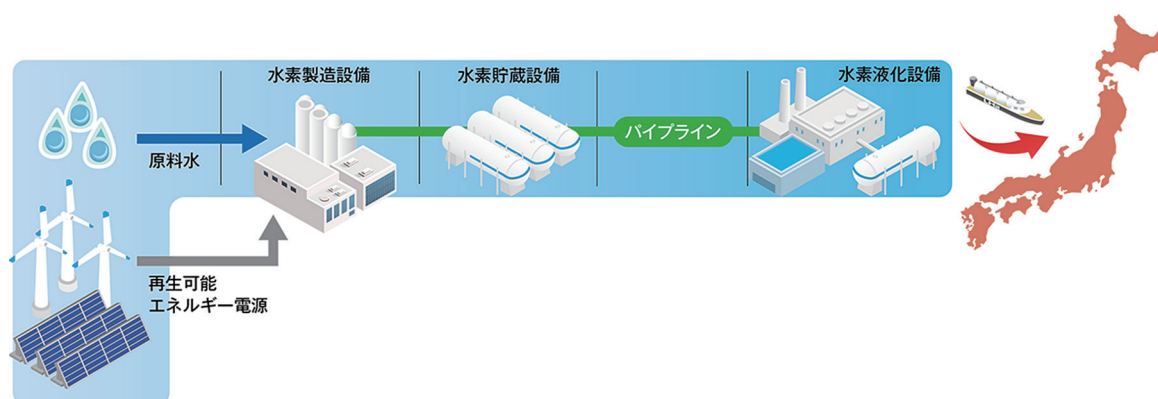


図6 豪州－日本間のグリーン水素サプライチェーンプロジェクトの全体像

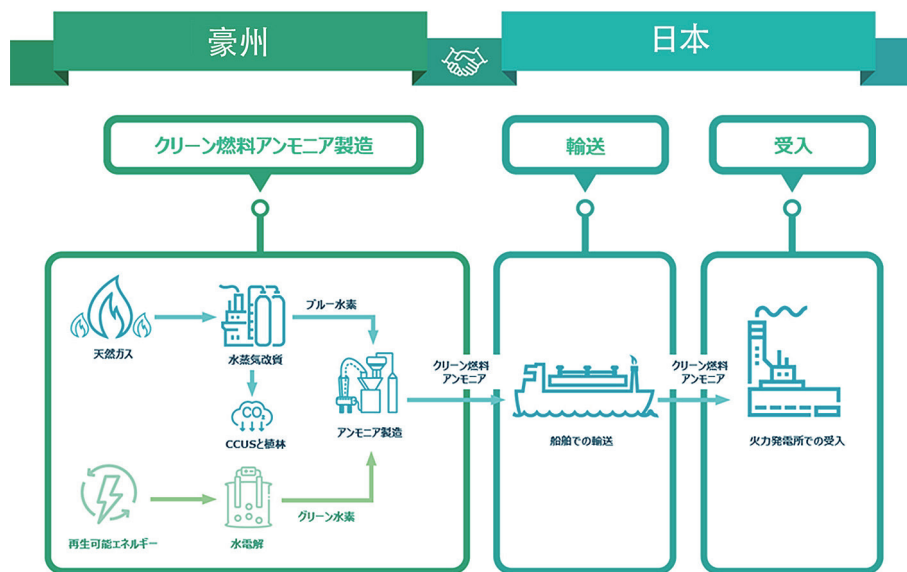


図7 豪州－日本間クリーン燃料アンモニアサプライチェーンの概念図

イチェーン全体の事業化調査を実施している。
図7にサプライチェーンの概念図を示す。

④ 水素燃料電池船と船舶用ステーションの実現に向けた検討

NEDOの助成事業に採択された本取組みは、万博における水素燃料電池船の運営を目指しており、岩谷産業㈱、国立大学法人東京海洋大学、㈱名村造船所などと協業しながら、実現に向けて取り組みを進めている。

当社は、船の運営スケジュールを踏まえた船舶用ステーションのエネルギーマネジメン

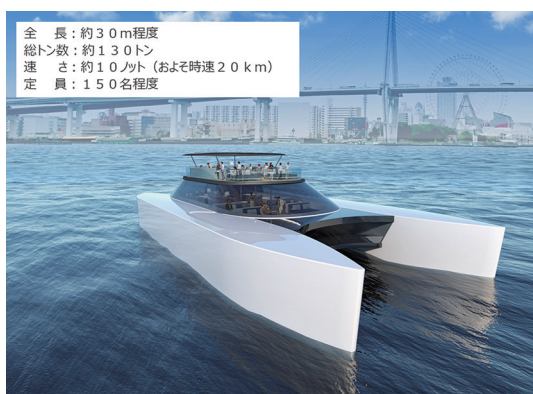


図8 水素燃料電池船のイメージ

トを担うことで、商用化に貢献したいと考えている。図8に水素燃料電池船のイメージを示す。

⑤ ハイドロエッジを活用したCO₂フリー水素・カーボンニュートラルメタン製造供給に関する調査

NEDO水素社会構築技術開発事業（調査委託事業）に採択された本調査では、水素の製造を担う当社グループ企業の㈱ハイドロエッジなどの既設設備を活用したブルー水素^{※1}やグリーン水素^{※2}の製造・供給およびメタネーション^{※3}によるカーボンニュートラルメタンの製造・供給モデルを検討する。また、当該モデルの実現に向けた課題整理や解決策の検討などを行う。これらは現時点において国内外で知見が確立しておらず、既存設備を最大限活用することができれば低コストでCO₂排出削減に大きく貢献できる取組みである。

図9にハイドロエッジを活用したCO₂フリー水素とカーボンニュートラルメタン製造の全体イメージを示す。

※1：化石燃料を原料としているが、二酸化炭素回収・利用・貯留（CCUS）を組み合わせる製造する水素。

※2：再生可能エネルギー由来の電力を用い、水電解により製造する水素。

※3：水素とCO₂からメタンを合成する技術。

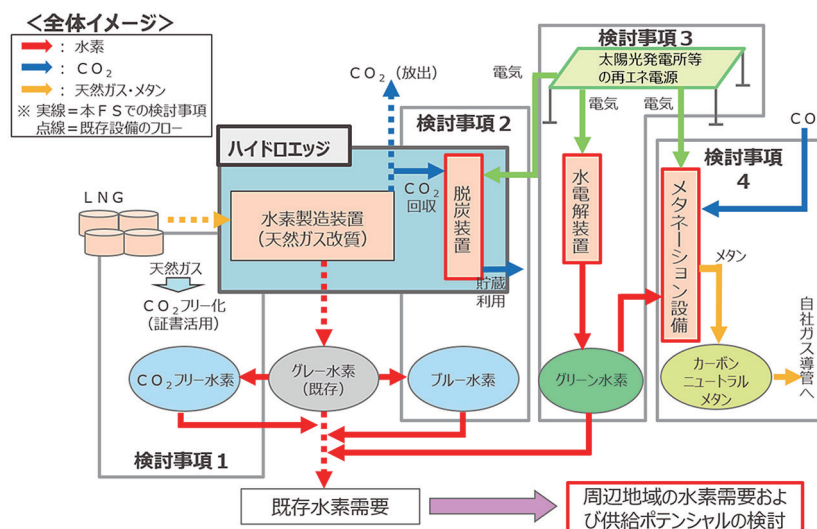


図9 ハイドロエッジを活用した CO₂ フリー水素・カーボンニュートラルメタン製造の全体イメージ

⑥ 水素 CGS の事業モデル確立に関する調査

NEDO 水素社会構築技術開発事業（調査委託事業）に採択された本調査では、これまで協力企業として参画してきた前述の神戸水素 CGS 実証を踏まえ、当社と川崎重工業(株)、大林組の3社で、水素 CGS の事業化を想定し、経済性や制度面、社会面での課題を洗い出すとともに、それを解決するための具体的方策や政策提言などを検討していく。図 10 に水素 CGS 事業モデルのイメージを示す。

本取組みを通じて、産業利用を含めた水素需要の拡大に貢献したいと考えている。

4. おわりに

図 11 に示すような水素サプライチェーンの実現には、技術面・コスト面などの様々な課題があり、関係者の方々と一体となって取組みを進めていくことが必要不可欠であると考えている。

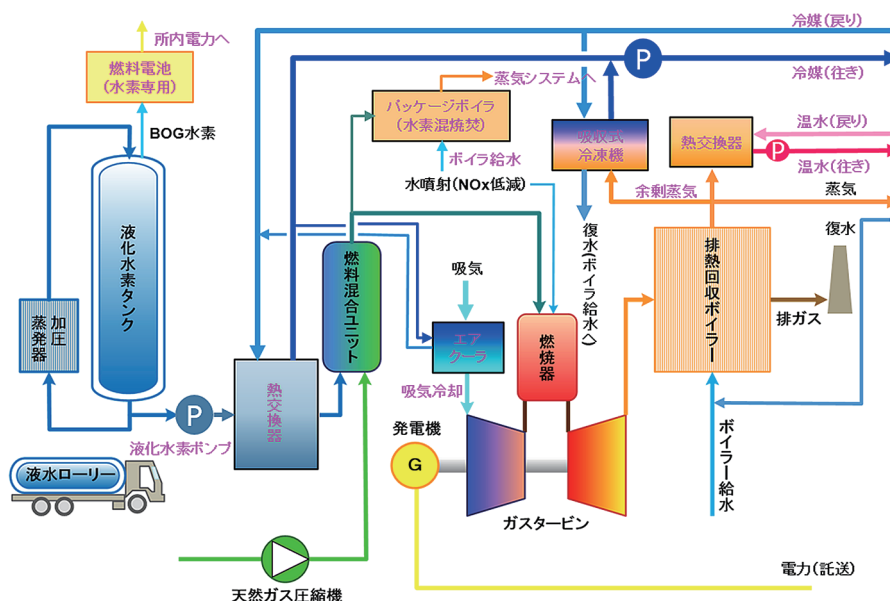


図 10 水素 CGS 事業モデルのイメージ

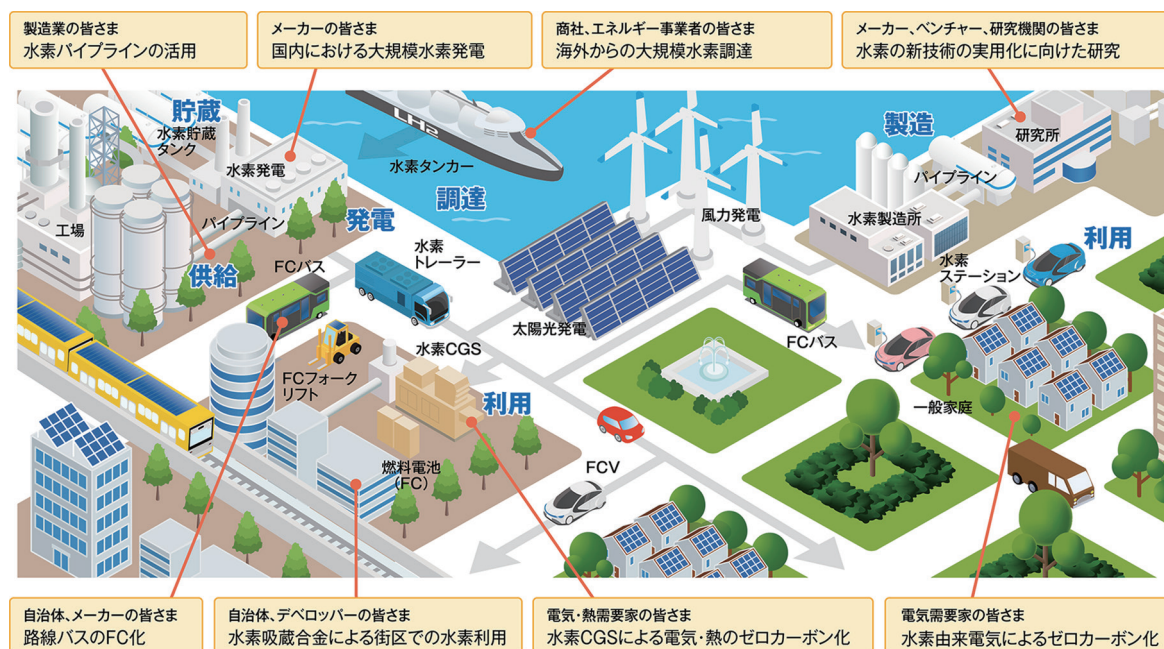


図 11 水素利活用・協業のイメージ

これまでも、前述した様々な FS・実証に取り組むとともに、水素バリューチェーン推進協議会や神戸・関西圏水素利活用協議会をはじめとする協議会にも参画するなど、幅広く協業を進めてきた。

今後は更に、水素サプライチェーン全体を視野に入れて協業を拡げていきたいと考えている。例えば、供給面では水素輸入における水素調達先の探索、水素の輸送・受入・発電技術の確立に向けた協業に加え、水素製造においては低コストなサプライチェーン構築に必要な新技術の実用化に向けて取り組んでいきたい。需要面では、脱炭素をキーワードに、自治体様からの水素を活用した脱炭素対策のご相談にお応えするとともに、産業界に対しても、水素利用設備の導入を検討される企業様とコミュニケーションを図っていききたいと考えている。

関西電力では前述のとおり、様々な取り組みを行ってきた。これまでご支援いただいた関係者の皆様にお礼を申し上げます。今後もビジネスパートナーや国・自治体、研究機関などの皆様との協業により、取組みを加速して

いく。水素社会の実現には様々な課題があるものの、ともに課題解決に取り組んでいきたいと考えている。引き続きのご支援をお願いしたい。

カーボンニュートラルに向けた世界および日本のエネルギーシステムにおける水素の寄与

石本 祐樹 (プロジェクト試験研究部
水素グループ 副部長)



1. 気候変動対策としての水素エネルギーの位置づけとその背景

気候変動対策は世界的な課題となっており、国際的には、気候変動枠組条約のもとで様々な取り組みを進めてきたが、2015年12月の第26回締約国会議（COP21）で合意したパリ協定⁽¹⁾では、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力や、そのため、できるかぎり早く世界の温室効果ガス排出量をピークアウトし、21世紀後半には、温室効果ガス排出量と森林などによる吸収量のバランスをとることなどが合意された。その後、2018年10月の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）1.5℃特別報告書⁽²⁾では、「気候モデルは、現在と1.5℃の地球温暖化の間、及び1.5℃と2℃の[地球温暖化の]間には、地域的な気候特性に明確な違いがあると予測する。」としている。このことから、各国がカーボンニュートラルの公表・宣言を始めている。さらに2021年8月のIPCC第6次評価報告書の気候変動の自然科学を取り扱う第1作業部会（WG1）報告書では、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。大気、海洋、雪氷圏及び生物圏において、広範囲かつ急速な変化が現れている。」ことが報告され、同年12月に英国のグラスゴーで開催されたCOP26では、1.5℃への努力の継続、そのための今後10年間の行動の加速が合意された。この「1.5℃への努力」は、気候システムの応答の不確実性などがあるものの、おお

むね、2050年世界全体でカーボンニュートラルを達成するための努力に言い換えられる。カーボンニュートラルを達成するには、エネルギー部門を始めとして、原則的にすべての部門で対策を取る必要が生じ、これまで対策が難しいと考えられてきた部門でも高コストの対策の導入が検討される。

このような状況において、水素は、使用時に二酸化炭素（CO₂）を発生しないエネルギーキャリアとしてエネルギーシステムの脱炭素化に貢献できる可能性を持っている。図1に示すように、水素は、様々な一次エネルギー資源、水素製造技術、貯蔵・輸送技術、利用技術、輸送規模を組み合わせることで、新規なエネルギーのサプライチェーンを創出したり、現在のエネルギーのサプライチェーンを代替したりできる可能性を持っている。しかしながらこの多様性のため、技術オプションの組み合わせの自由度が高く、関係するステークホルダーも多様であるため、水素導入を詳細に検討する上で、すぐに導入ができる技術と社会実装までに時間が必要な技術を分けて考える必要がある。

図2に世界全体の水素利用技術の量的ポテンシャルと市場シェアの分析例を示す。図中の円の半径が大きい水素需要量が多い技術は、発電、トラック、乗用車（小型・中大型）、業務用車両（バンなど）の燃料、高温の熱利用、ガス導管への注入、CO₂回収利用（CCU）との組み合わせによるメタノール等の製造、製油所、アンモニア・メタノール製造である。また、図中の右側に位置している高い市場シェアが

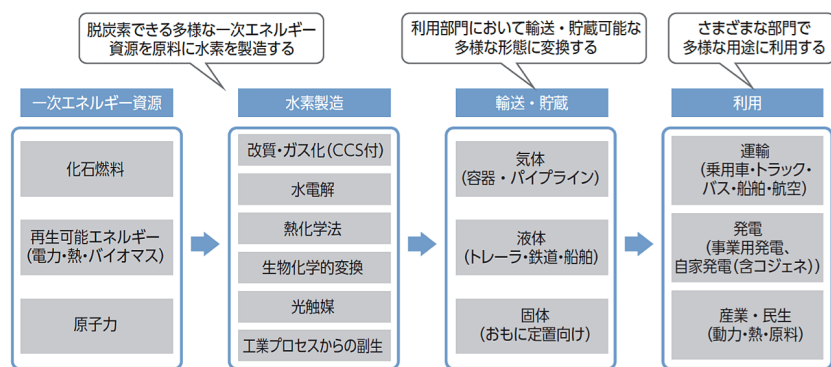


図1 水素サプライチェーンとそのカーボンニュートラルへの貢献⁽¹⁾

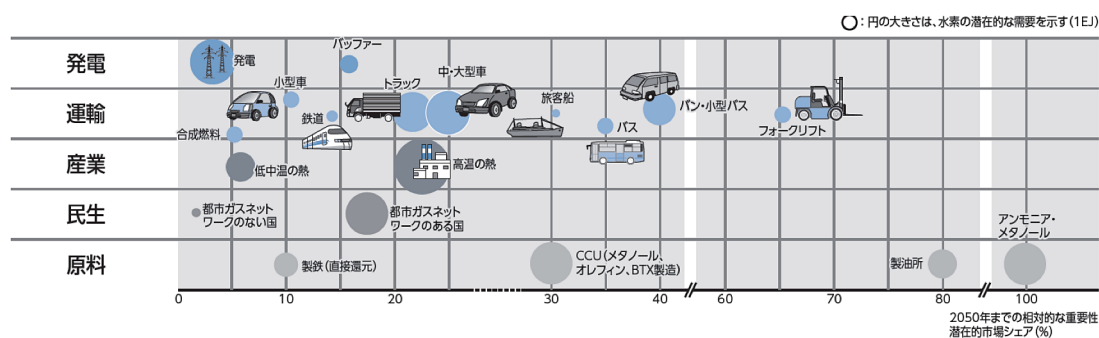


図2 水素の技術成熟度の分布⁽³⁾

期待技術は、アンモニア・メタノール製造、製油所、フォークリフト、業務用車両（バンなど）がある。このように、多くの需要技術での利用が期待されているが、原料として水素を用いる場合を除いて、水素は動力・熱に変換して用いられるため、バッテリーや代替燃料との競合が生じる。貯蔵量や輸送距離、需要技術の効率など、それぞれの特性により水素または競合技術が選択されていくと考えられる。

上記で述べた通り、脱炭素のための水素のポテンシャルは大きく、水素が導入されるマクロなドライバーは脱炭素であるといえる。しかし、競合技術も多くあることから水素の優位性は一定ではなく、導入の進みややすさは分野によって異なると思われる。水素の導入量は、脱炭素化の目標の差によりどの程度の違いが出るのだろうか？ということがこの報告における問題意識である。これに対して、エネルギーモデルを用い日本を含めた世界の水素需要量の試算と考察を行った。

2. エネルギーモデルを用いた水素需要量の試算

(1) モデルの概要

本報告では、図3に示すように日本のエネルギー需給を当研究所のTIMES-Japanモデルで分析し、その結果（エネルギー需要（電力、運輸、定置）と各部門・技術の水素需要）を世界のエネルギー需給を分析するGRAPEモデルの入力条件として利用し、世界全体の結果を得た。TIMES-Japanモデルの結果は、2070年の日本のゼロエミッションを試算した報告⁽⁴⁾をベースに条件を変更して試算を実施した。

本モデルは、様々な制約条件の下、与えたエネルギー需要を満たすよう世界全体のエネルギーシステムコストを最小化している。したがって、計算結果は、実世界の予測を示すのではなく、制約条件を満たす「規範的な姿」を示していると理解いただきたい。将来の前

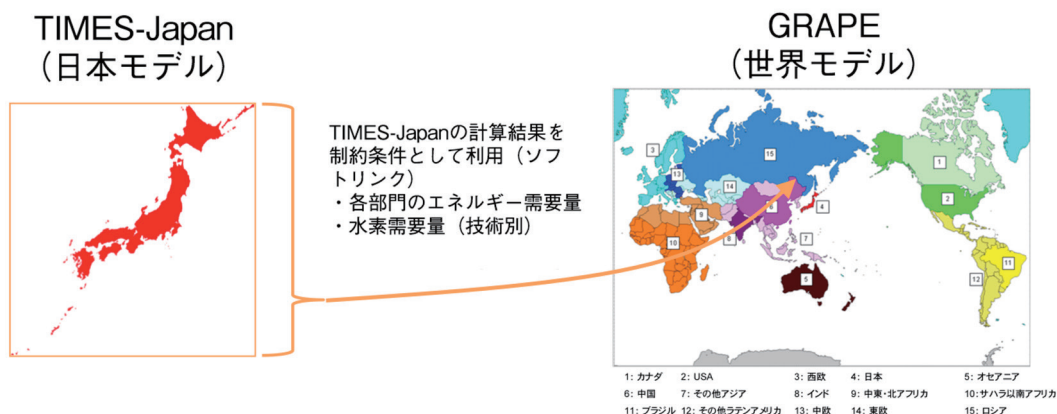


図3 本報告で用いたエネルギーモデルとその利用イメージ

提条件は不確実性があり，その前提条件が変化することで試算結果が大きく変化することもありえる。

地球環境統合評価モデル（GRAPE）モデルは，世界の国と地域を15地域に集約しており，本モデルを用いて2070年までの日本を含む世界のエネルギー需給における水素需要量を分析した。まず，発電，運輸，定置の各部門のエネルギー需要を推計し，次に想定するエネルギーフロー，利用可能な技術オプションの前提条件を設定する。分析では，CO₂排出制約等の制約を満たし世界全体のエネルギーシステムコストが最小になるようなエネルギー需給構造を探索・決定する。モデル分析の出力として，世界地域別のエネルギー需給，CO₂排出などの諸量（エネルギー供給構成，需要技術の構成，転換技術の構成（発電等），CO₂排出量，CO₂貯留量等）が出力される。

水素製造は2020年から日本国内の他，海外14地域からの液化水素等の水素キャリアによる輸入が可能と想定し，水素の需要先は，2020年から先進地域（カナダ，米国，西欧，日本，オセアニア）と2030年から中国，インド，ブラジル，ロシア，その他の地域は2055年以降に運輸，発電，定置部門の各水素利用技術で水素が利用可能と想定した。水素コストは，水素製造のために利用する一次エネルギー源によって異なるが，日本での陸揚げ時に約40円/Nm³から約30円/Nm³である。

（2）試算の前提条件

エネルギー需要は，各国のNDCs（国が決定する貢献）を考慮し，2030年頃までは国際エネルギー機関（IEA）の“World Energy Outlook 2021”の公表政策シナリオ（STEPS）通りであるとして，2050年に向けて持続可能シナリオ（SDS）の需要に徐々に移行すると想定した。

資源価格の想定は，国際応用システム分析研究所（IIASA）の文献⁽⁵⁾などにに基づき作成した。このモデルでは，一次エネルギー資源として，石炭（高品位炭，低品位炭），原油，天然ガス，原子力，再生可能エネルギー資源（バイオマス，水力，太陽光，風力，地熱）を想定している。一次エネルギー資源の価格は，各地域の各資源それぞれの累積使用量が増加すると資源価格が上昇する想定した。

CO₂排出制約は，化石燃料由来のCO₂排出を対象とし，この報告では，これを正味でゼロにすることをカーボンニュートラルとした。2030年のCO₂制約は各国のNDCsを考慮して設定し，世界全体のCO₂排出制約として，2050年，2060年，2070年に世界全体でゼロエミッションになる3ケースについて分析を実施した。2050年カーボンニュートラルは，産業革命前からの温度上昇が1.5℃程度，2070年カーボンニュートラルはパリ協定の「2℃を十分に下回る水準」におおむね相当する。

図4に示すように水素需要技術は，発電部門では，事業用の大規模発電，ガスエンジ

【運輸(乗用車, トラック, バス, 航空, 船舶)】 【民生・家庭(燃料電池コジェネレーション)】



(出所: トヨタ自動車株)

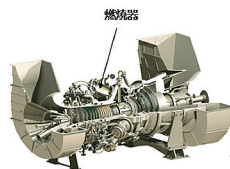


(出所: (一社) 燃料電池普及促進協会HP)

【発電(専焼・天然ガスとの混焼)】



【産業(コジェネレーション, 水素製鉄他)】



(出所: 川崎重工業株)

図4 水素需要技術(運輸, 産業・民生, 発電)

ンやガスタービンといった産業用のコジェネレーション, 民生用のコジェネレーションとして燃料電池を想定した。また, 産業部門と民生部門の非電力需要である定置部門では, コジェネレーションからの熱供給, 天然ガスとの混焼による直接燃焼, 水素製鉄を考慮した。運輸部門では, 水素重要技術として乗用車, トラック, バスについて燃料電池自動車を想定した。また, 船舶, 航空の燃料としての水素も想定している。また, 水素とCO₂から合成する液体の合成燃料も各部門で利用できる想定である。CO₂の回収貯留について, CO₂の貯留量は, IEAのEnergy Technology Perspectives 2017 (ETP2017)のSDSの各地域のCO₂貯留量を上限に設定した。

(3) 試算結果

図5にケース別の世界の水素需要の推移を示す。カーボンニュートラルの達成年が前倒しされることで, 水素需要が増加していることがわかる。また, エネルギーとしての水素の需要量は時間とともに増加しており, 世界全体の最終需要に占める水素の割合は, ケースにより異なるが, おおむね数%程度であり, すべてのエネルギー需要が水素によって置き換わるわけではなく, 経済性など水素が優位となる条件において水素が選択されている。

図6に世界と日本の水素需要量の推移を示す。ここでは分析した中では中庸の2060年カーボンニュートラルのケースについて各部門の詳細を述べる。本図に示すように, 世界全体の水素需要量は, 時間とともに増加し, 2060年には約1億4000万トン程度であ

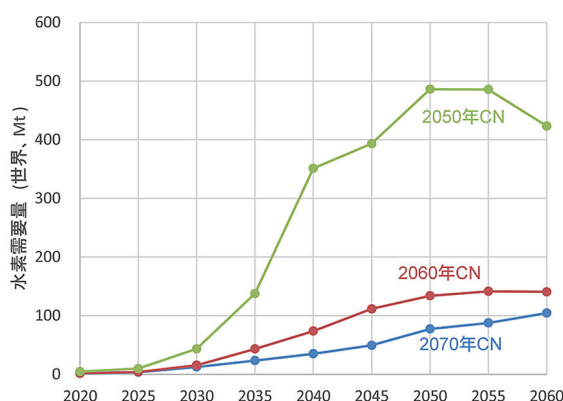


図5 ケース別の世界の水素需要の推移

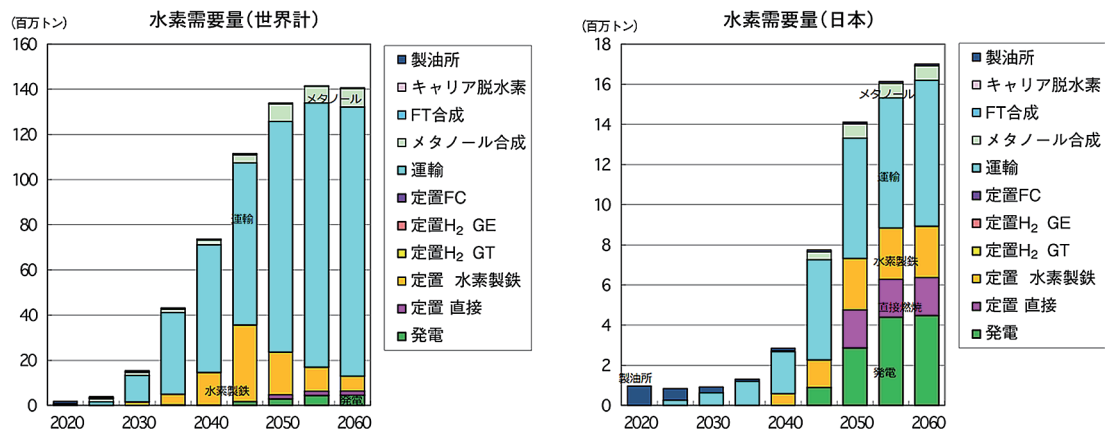


図6 世界と日本の水素需要量の推移 (2060年カーボンニュートラルのケース)

る。世界の水素需要の内訳は、運輸向けが8割、合成燃料製造製造向けに6%、大規模発電向けが3%である。また、世界では2060年に1億5,600万トンの水素が製造され、厳しいCO₂制約を反映し、主にCO₂回収貯留を備えた天然ガス改質(44%)、水力発電(34%)、風力発電(21%)を用いる水電解によって水素が製造され、水素の貿易量は、2060年には3,800万トンに上る。日本は発電、運輸、製鉄などに2060年に1,700万トンの水素を需要している。期によって異なるものの、日本の水素の需要の30～40%は海外からの輸入によって賄われている。

図7に2030年、2050年2060年における水素需要の地域別シェアを示す。この図からわかるように分析した期間における主要な水素需要地域は、日本、米国、西欧、中国、インドで、これらの地域はエネルギー需要が大きい、または、カーボンニュートラルの達成時期が早

い地域である。2050年にはこれらの5地域の需要量が世界全体の水素需要の9割弱を占めている。

図8に世界と日本のCO₂排出収支量の推移を示す。世界全体では、化石燃料の利用を再生可能エネルギーに置き換えることに加えてCO₂回収貯留(CCS)によるCO₂排出量削減も利用して2060年のカーボンニュートラルを達成している。さらに2030年から2060年に大気からCO₂を除去する直接空気回収(DAC)による大気からのCO₂除去技術が用いられている。このモデルでは、大規模化に適していると考えられる苛性溶液を用いた技術を想定した前提条件を用いている。さらに2055年以降にCO₂と水素を用いた合成燃料製造を産業部門において利用した際のCO₂も回収されている。日本では、2030年から発電部門でのCO₂回収が用いられ、2045年以降は水素製造時のCO₂も回収・貯留して、2050年にカーボ

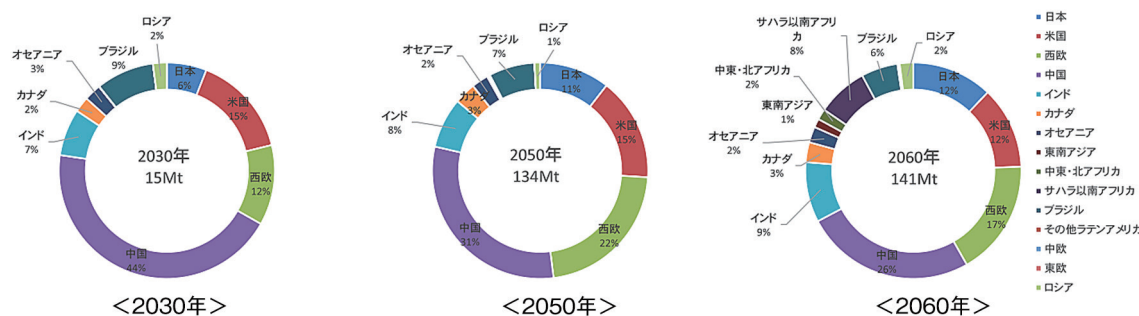


図7 水素需要の地域別シェア

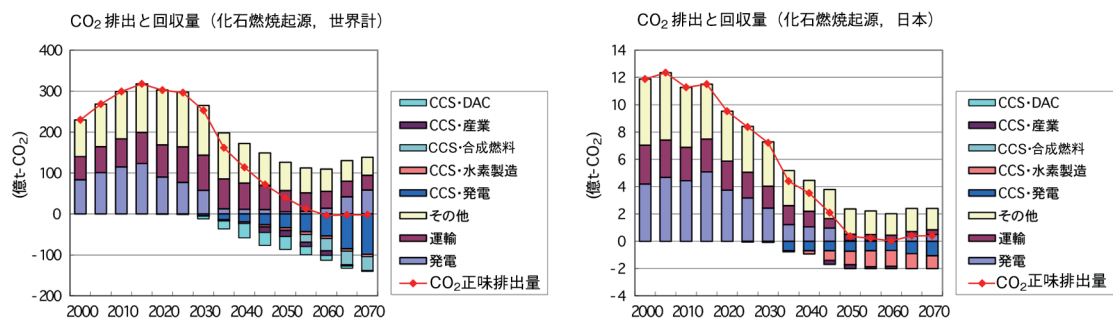


図8 世界と日本のCO₂排出収支量の推移

ンニュートラルを達成している。また、CO₂と水素から合成した燃料を利用し、そのCO₂を大気へ放出した場合は、製造地域でCO₂を回収し、利用地域でCO₂を排出した計上している。

図9に世界と日本の発電電力量の推移を示す。世界全体では、太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギー由来の発電技術が時間とともに増加し、2060年では、再生可能エネルギー由来の発電技術が74%、原子力発電が18%、負の排出であるCCSを備えたバイオマスガス化発電（いわゆるBECCS、図中ではBIGCC+CCS）も2060年では、全体の7%（再生可能エネルギーの内数）を占めている。この結果、2060年の世界の発電電力量当たりのCO₂排出量は負となっている（-66 g-CO₂/kWh）。日本では、2050年カーボン

ニュートラル達成のために、石炭火力、天然ガス火力の発電電力量が低下し、洋上風力、太陽光等の再エネの割合が上昇している。日本でもBECCSが導入されているほか、2060年に水素を燃料とする水素専焼火力は発電電力量の8%程度を占めている。

図10に世界と日本の乗用車の保有台数の推移を示す。世界全体の乗用車の台数構成は、2060年には多い順にプラグインハイブリッド車（PHEV）、電気自動車（EV）、燃料電池自動車（FCV）、ハイブリッド車を含む内燃機関自動車（ICE）となっているが、内燃機関自動車以外の車種の比率に大きな違いはない。日本では、2060年には、FCVは63%程度のシェアを占めている。日本でEVよりもFCVの台数が多いのは、日本は、電力コストが他地域よりも高く、EVの価格競争力が他地域よりも低い

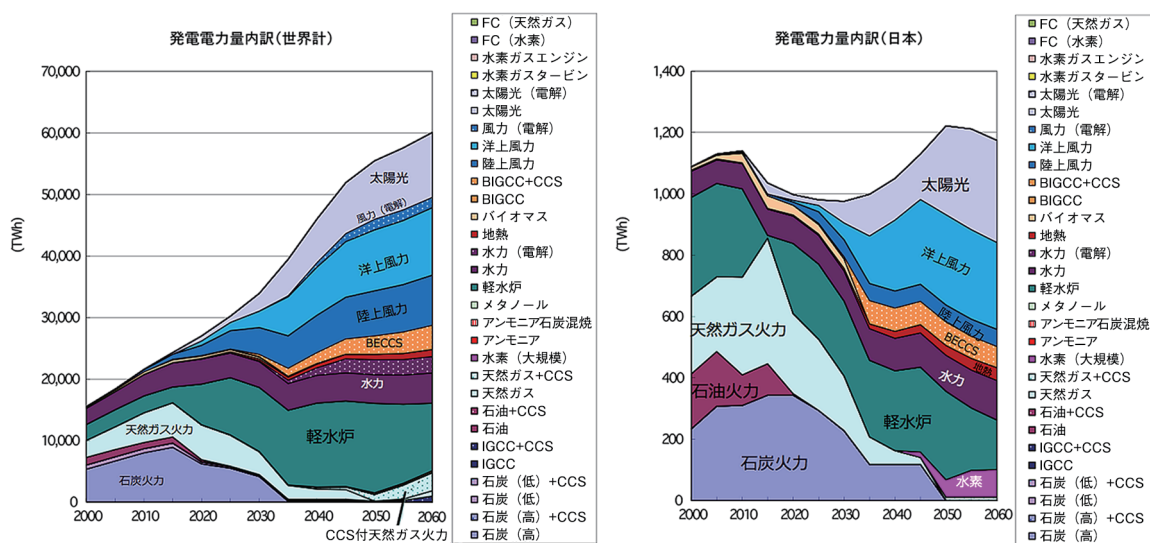


図9 世界と日本の発電電力量の推移

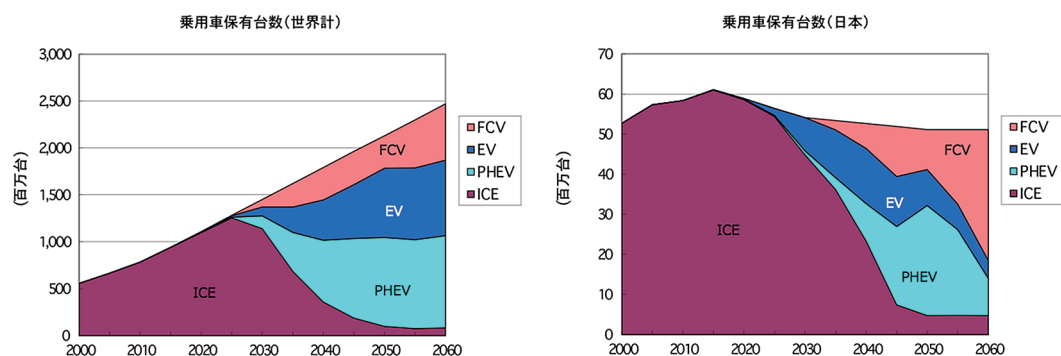


図 10 世界と日本の乗用車の保有台数の推移

ためと考えられる。しかしながら、車両の購入費用を耐用年数で除した償却コストと燃料費の和である乗用車の年間コストは、車種間で大きな違いはなく、車両コストや燃料コストの変化により車種構成は変わる可能性がある。また、乗用車の購入はコスト以外にも乗用車使用の目的や外観など多様な要素を含む個人の嗜好による影響も大きく、この点はモデルでは考慮していないので、留意いただきたい。

図 11 に世界と日本のトラックとバスの保有台数の推移を示す。世界全体では、トラックは、ディーゼルトラックから、天然ガストラック、バイオ燃料トラック、燃料電池トラックへ、バスは、ディーゼルバスから圧縮天然

ガス (CNG) バス、バイオ燃料バス、燃料電池バスへ移行している。2050 年以降、2060 年ゼロエミッションに向けてトラックでは CNGトラックとバイオ燃料トラック、バスでは燃料電池バスのシェアが大きく増加していることがわかる。日本はトラック、バスともに、ディーゼルから燃料電池へ変化している。なお、燃料電池バスは、燃料電池トラックに比べて燃料消費が少なく、技術進展による車両価格の低下によって、他燃料のバスと同程度のコスト競争力を持っているため、世界、日本で大きなシェアを持っている。

図 12 に 2060 年における水素の地域間輸送の概要を示す。輸入地域は、西欧、インド、

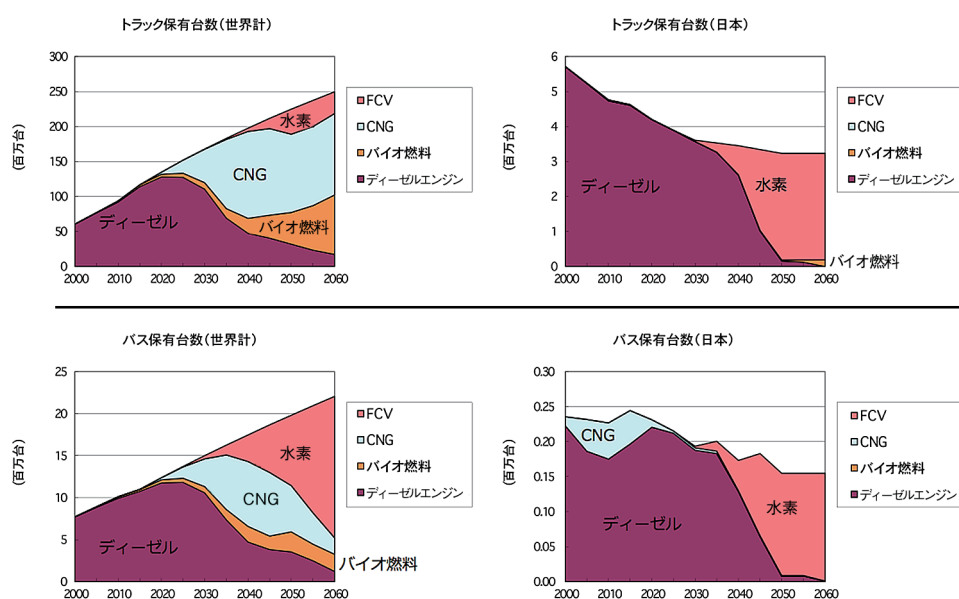


図 11 世界と日本のトラック (上段) とバス (下段) の保有台数の推移

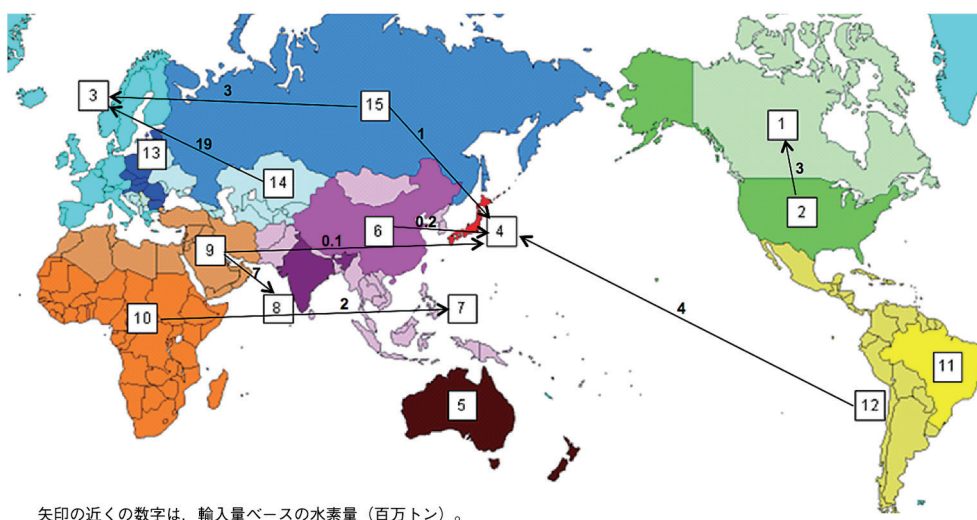


図 12 2060 年における水素の地域間輸送の概要

日本等で、輸出地域は、東欧、中東北アフリカ、その他ラテンアメリカ等となっている。このモデルでは、輸送コストが距離に依存するため、近い地域へ輸出、近い地域から輸入している。実際のエネルギー資源貿易は、資源生産者や輸送、利用に関連する多くのステークホルダーが存在し、また、エネルギー安全保障等多くの要素に関連している。したがって、ここで示す輸出入の経路や量が将来において必ずしも再現されるわけではなく、この図は、今回採用した前提条件や最適化の方法論において、水素を域外から調達することが経済合理的であることを示している。

3. まとめ

本報告では、分析対象をそれぞれ世界、日本とする当研究所の GRAPE モデルと TIMES-Japan モデルをソフトリンクさせ、2050、2060、2070 年にそれぞれカーボンニュートラルを達成する条件において日本を含めた世界の水素需要量を分析した。需要部門では、水素は主に運輸部門で用いられ、発電等の他の部門で用いられる地域もあることがわかった。水素輸送の観点では、日本は期によって異なるものの必要な水素の多くを輸入している。また、水素の多くは需要される地域内で製造

されるが、世界全体の需要量の 3 割程度は地域外から供給されているため、国際的な貿易によって一定程度の水素を供給することが経済的に合理性を有するといえる。製造では、厳しい CO₂ 制約を反映し、主に風力や天然ガス、水力、CO₂ を貯留する褐炭ガス化技術を用いた低品位炭から水素が製造されている。

また、世界全体がカーボンニュートラルを達成する期限を前倒しすると水素需要量が大きく増加する可能性があることがわかった。水素は世界や地域のカーボンニュートラルに貢献する有力な技術オプションの 1 つといえる。

参考文献

- (1) 国連気候変動枠組条約 (UNFCCC), パリ協定 (<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>)
- (2) IPCC, 1.5°C 特別報告書 (<https://www.ipcc.ch/sr15>)
- (3) (一財) エネルギー総合工学研究所, 『図解でわかるカーボンニュートラル』, 技術評論社, 2021 年 9 月
- (4) Kato and Kurosawa, Sustainability Science, 2021 (<https://doi.org/10.1007/s11625-021-00908-z>)
- (5) IIASA, Global Energy Assessment, 2012, (<https://previous.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/Home-GEA.en.html>)

[寄稿]

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全確保の考え方 ～国際基準とフランスの事例の紹介～

田辺 博三 ((一社) 日本原子力学会
フェロー)



1. はじめに

高レベル放射性廃棄物にはさまざまな放射性物質が多量に含まれる。放射性物質の出す放射線は、人に外部被ばく、あるいは吸入、摂取による内部被ばくを生じ、有意な影響を与える可能性がある。地層処分は、そのような影響から人と環境を防護するための方法であり、各国が採用して取り組んでいる。

本稿は、処分分野以外の技術的専門家の方々に、地層処分の安全確保の仕組みを理解してもらうことを目的としている。

はじめに、放射性廃棄物全般の発生、区分と処分方法について、国内や国際原子力機関(IAEA)の安全基準文書などに基づいて紹介し、処分が「閉じ込め」と「隔離」の方策に基づいていることを説明する。

次に、フランスの地層処分概念の研究事例を取り上げて、開発している地層処分において、安全確保を具体的にどのような仕組みで行っているかについて説明する。フランスの事例を取り上げる理由は、日本と同じ再処理後のガラス固化体を処分対象としていること、および粘土層の優れた低透水性、収着性により、放射性物質の生活環境までの移行時間が長いことを利用した処分概念で、評価モデルがシンプルであり、放射性物質の移行挙動と結果として生じる人への被ばく影響が理解しやすいと思われるからである。

地層処分の安全確保の仕組み、その結果ど

のような放射性物質が生活環境に出てくる可能性があるのか、安全防護目標を下回ることができるのか、などについて基本的な理解が得られることを期待している。

2. 放射性廃棄物の発生、区分と処分

(1) 放射性廃棄物の発生

原子力発電所、核燃料サイクル施設、大学、研究施設、医療機関等における原子力のエネルギー利用や放射線利用、関連する施設の廃止措置等において、廃棄物が発生する。これらの廃棄物には放射性物質を含むものがあり、放射性廃棄物と呼ばれる。

(2) 放射性廃棄物の区分、処理後の処分

原子力利用や放射線利用に伴い発生する廃棄物には、大きく区分して次の3種類のものがある。

- 放射性廃棄物でない廃棄物：一般の産業廃棄物として扱う。
- 放射性廃棄物として扱う必要のないもの(クリアランス^{※1}のレベル以下の廃棄物)：再利用(リサイクル)あるいは一般の産業廃棄物として処分ができる。
- 放射性廃棄物：放射性物質で汚染されたもので放射性廃棄物として処分する。

このような放射性廃棄物の管理の考え方の例を図1に示す。

IAEAは放射性廃棄物の安全基準を策定し

※1 クリアランスとは、認可された行為内にある放射性の物質または物を規制機関による更なる管理から解除することと定義されている⁽¹⁾。クリアランスされると放射性廃棄物として考慮されない。

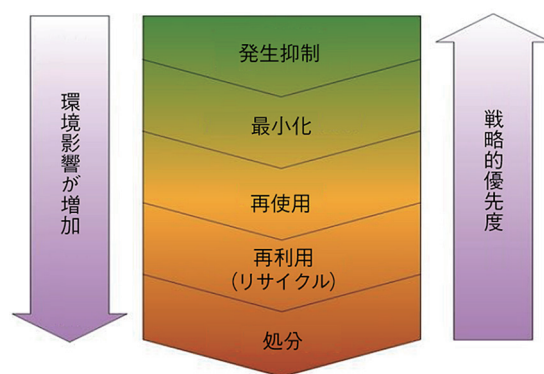


図1 低レベル放射性廃棄物の管理ヒエラルキーの例 (2)

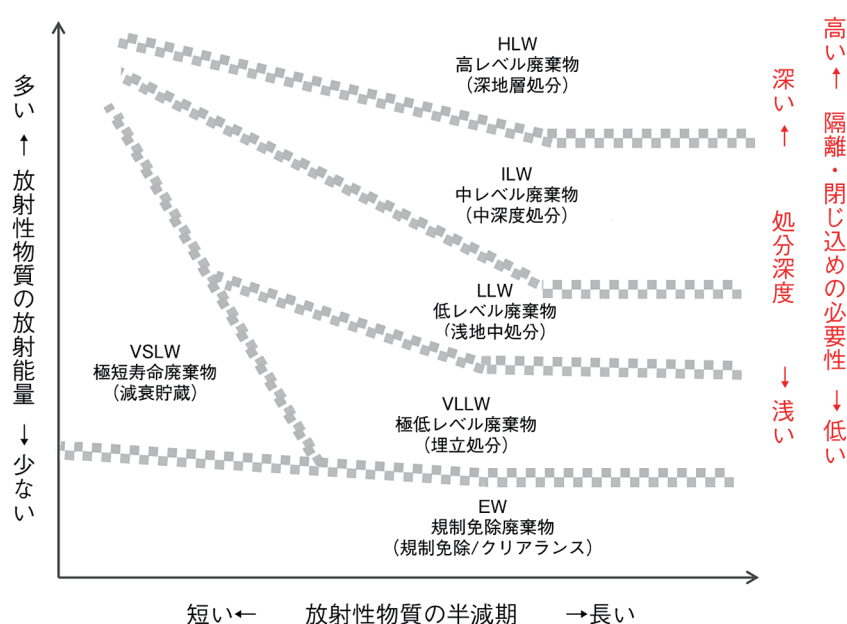


図2 廃棄物区分スキームの概念図 (3)

ている。安全基準文書は、安全原則 (SF : Safety Fundamentals), 安全要件 (SR : Safety Requirements), 安全指針 (SG : Safety Guides) の3段階の階層構造を有する多数の文書から構成されている。

一般安全指針、放射性廃棄物の分類 (GSG-1) (3) では、主に長期的な安全に関する考慮に基づいて、処分の観点から放射性廃棄物を区分するための一般的なスキームを設定している。図2に、GSG-1に示された放射性廃棄物の区分と処分方法を示す。以下には、図中の各区分の概要を示す。

① 規制免除廃棄物 (EW) : 放射線防護目的のための規制上の管理から、クリアランス、規制免

除または規制除外するための規準を満たす廃棄物。

② 極短寿命廃棄物 (VSLW) : 最長でも数年程度という一定期間にわたり減衰貯蔵されることができ、その後、管理無しの処分や利用あるいは放出のため、規制機関により承認された措置に従って、規制上の管理からクリアランスされることができる廃棄物。

③ 極低レベル廃棄物 (VLLW) : 必ずしも EW の規準を満たさないが、高いレベルの「閉じ込め」および「隔離」の必要がなく、そのため、限られた規制上の管理を伴う、浅地中の埋立方式の施設への処分に適している廃棄物。VLLW 中のより半減期の長い放射性物質の放射能濃度は、通常かなり限られる。

④ 低レベル廃棄物 (LLW)：クリアランスレベルを超えているが、長寿命放射性物質の量が限られている廃棄物。このような廃棄物は、最長で数100年程度にわたり頑健な「閉じ込め」と「隔離」を必要とし、浅地中施設での処分が適当である。どのような放射性廃棄物が浅地中および中深度処分に適しているかは、多くの場合、制度的管理が保証され廃棄物への人間侵入が回避できる時間枠にわたる管理の必要性に基づき区別される。多くの国では、制度的管理が最長で300年前後は信頼できると想定している。

⑤ 中レベル廃棄物 (ILW)：特に長寿命放射性物質を含んでいるため、浅地中処分で提供されるよりもより高い程度の「閉じ込め」と「隔離」が必要となる廃棄物。しかしながら、ILWは、貯蔵および処分期間中の熱放散に対する措置を必要としない、あるいは限られた措置だけを必要とする。ILWは長寿命放射性物質、とくにアルファ線を放出する放射性物質を含むかもしれず、それは、制度的管理に依存することができる期間において、浅地中処分に対して受入れ可能となる放射能濃度レベルまでには減衰しない。それゆえ、この区分の廃棄物は、数10メートルのオーダーから数100メートル程度のより深い深度での処分が必要となる。

⑥ 高レベル廃棄物 (HLW)：放射性崩壊プロセスにより多量の熱が発生するほど十分に放射能

濃度のレベルが高い廃棄物、あるいは、そのような廃棄物に対する処分施設の設計において考慮される必要がある長寿命放射性物質が大量である廃棄物。通常、地下数100メートル程度から、それ以上の深く安定な地層への処分が、HLWの処分オプションとして一般的に認識されている。

(3) 日本の放射性廃棄物の区分と処分方法

一般的に、放射性物質の含有量が多くなるほど、放射性物質の「閉じ込め」と生活環境からの「隔離」の必要性が高まる。しかしながら、実際の区分と処分の選択においては、各国の方針に基づいて、含まれる放射性物質の種類と量に応じて適切に区分した上で処分するという考え方にに基づき、必要な安全規制等の枠組みの整備を進めるとともに処分を推進してきており、区分や処分方法は必ずしも図2と同じではない。

日本の放射性廃棄物の区分と処分方法を図3に示す。放射性廃棄物は、地下300メートル以上の深さの地層に設置された地層処分⁽⁴⁾、地表から深さ70メートル以上の地下に設置された中深度処分、地上または地表から深さ70メートル未満の地下に設置されたピット処分、あるいはトレンチ処分に区分されて処分される⁽⁵⁾。

放射能レベルに応じた深度や障壁(バリア)を選び、トレンチ・ピット処分、中深度処分、地層処分に分けて処分が行われる。

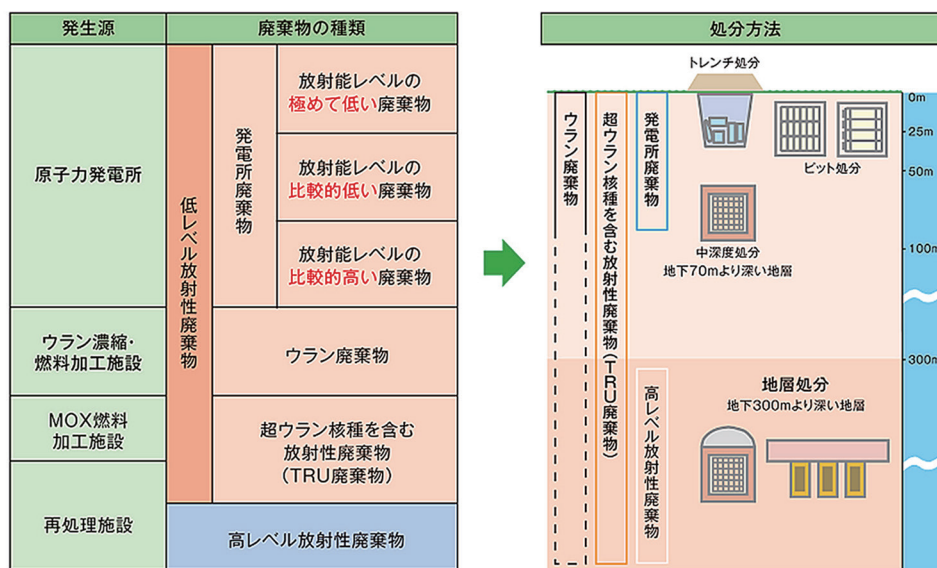


図3 放射性廃棄物の区分と処分方法（日本）⁽⁶⁾

3. 放射性廃棄物の処分の安全確保

安全原則, 基本安全原則 (SF-1) ⁽⁷⁾ によれば, 処分の基本安全目的は, 人と環境を電離放射線の有害な影響から防護することである。個別安全要件, 放射性廃棄物の処分 (SSR-5) ⁽⁸⁾ は, この基本安全目的を達成するために現在採用されている方策は, 必要な程度に廃棄物を「閉じ込め」, 生活環境からそれを「隔離」することである, とし, 処分に関する安全目的と安全基準を設定し, 放射性廃棄物の処分において満足されなければならない26の要件を規定している。

以下では, 日本の浅い地中での処分 (ピット処分) を例として, 「閉じ込め」と「隔離」について説明する。図4に日本のピット処分の概念図 ⁽⁹⁾ を示す。

原子力安全委員会の「低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について」 ⁽¹⁰⁾ は, 処分の方法毎に処分できる低レベル放射性廃棄物中の放射性物質濃度の最大値を定めるものである。この中で, ピット処分に想定された処分場管理期間終了後の人の被ばくは, 図5に示す3つのシナリオ (建設シナリオ, 居住シナリオおよび河川水利用シナリオ) の被ばく経路で生じることが想定されている。

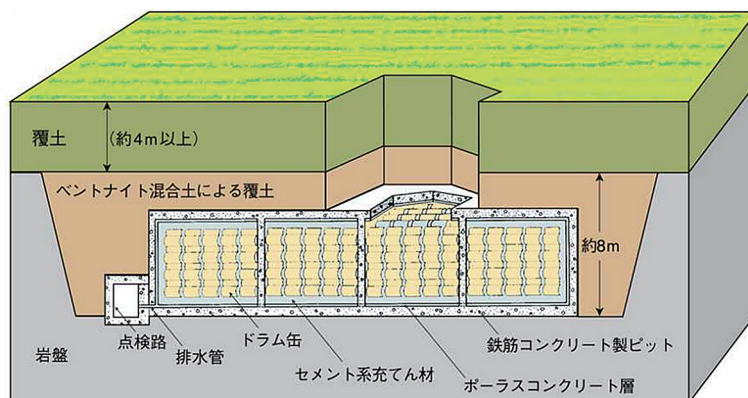


図4 ピット処分の概念図 ⁽⁹⁾

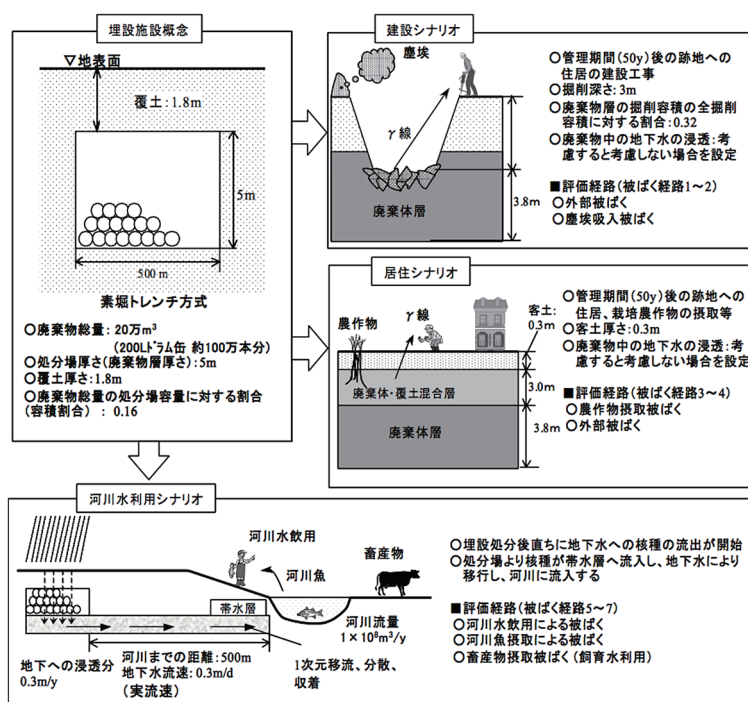


図5 ピット処分の管理期間終了後の評価シナリオ ⁽¹⁰⁾

河川水利用シナリオによる被ばくは、放射性物質が、処分施設（廃棄物、構造物など）から地下水へ漏えいし、地層中を移行し、河川に流出した後、飲用水、河川産物、畜産物として人に摂取されることにより発生する。これは、SSR-5で、放射性廃棄物に含まれる放射性物質の、廃棄物から生活環境への移行を常に抑制し、減らし、遅らせること（「閉じ込め」）を要求していることに対応する。建設シナリオと居住シナリオによる被ばくを防止するため、特に浅地中処分施設の場合は、廃棄物を定置した後の数100年間は処分場に人が侵入しないように管理期間を設けて管理するので、管理期間が終了した後に発生する。これは、SSR-5で、廃棄物を生活環境から「隔離」し、偶発的な廃棄物への人間侵入の可能性と全ての可能性のある影響を実質的に減らすことを要求していることに対応する。

いずれのシナリオでも、人の被ばくを減らす上で大切なことは、図6に示すように、放射性物質の放射能が時間の経過とともに減少するという特徴である。

このような特徴を踏まえると、放射性物質の「閉じ込め」においては、人の生活環境への到達時間をできる限り長くすることが、「隔離」においては、処分場の閉鎖後の管理期間の長さが、それぞれ重要になる。

なお、放射能濃度上限値を下回るからと言っ

て、直ちに埋設事業の許可がなされるものではなく、廃棄物埋設事業の許可の際の安全審査によって、個々の廃棄物埋設施設・埋設計画ごとに安全性が見極められ、その可否が判断されることに留意が必要である。

地層処分では、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性物質が多く寿命も長いことから、「隔離」は、ピット処分のような人による数100年間の管理期間に依存することはできない。

SSR-5では、「中レベルおよび高レベル廃棄物に対しては少なくとも数1000年程度の隔離をもたらすことを目指さなければならない。そのようにすることによって、処分システムの自然の変化と施設の擾乱を引き起こす事象の双方に考慮が払われなければならない」ことを要件としており、「放射性廃棄物の地層処分に対して、隔離は、処分の深度の結果として主に地層処分施設を設置する地層（母岩という。）によってもたらされることになる。」「安定な地層に処分施設を設置することによって、侵食や氷河作用のような地形学的プロセスの影響からの施設の防護をもたらす。処分施設は、有意な地下鉱物資源または他の価値のある資源がある既知の地域から離れて設置されなければならない。これは、施設の偶発的な擾乱の可能性を減少させ、また資源の掘削ができなくなることを避けることになる。」としている。

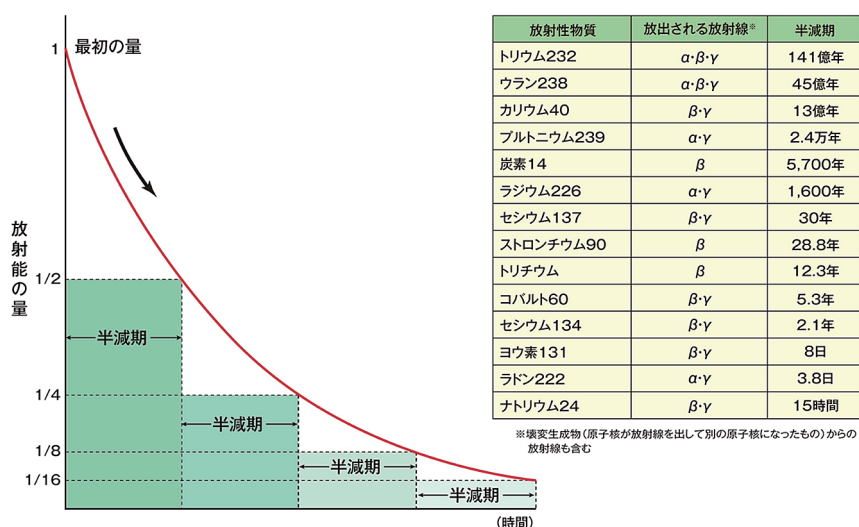


図6 放射性物質の特徴 (6)

4. フランスにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分研究の概要

本章と次章では、高レベル放射性廃棄物の地層処分でどのようにして安全確保を行うのかについて、フランスの事例⁽¹¹⁾⁽¹²⁾を紹介する。

(1) 地層処分研究の経緯

フランスでは、1991年に制定された「放射性廃棄物管理研究法」⁽¹³⁾により地層処分の実現可能性調査が本格的に開始された。

処分の実施主体である放射性廃棄物管理機関(Andra)は、フランス東部のムーズ県とオート＝マルヌ県にまたがるサイトで地下研究所を建設した。そこで、カロボ・オックスフォーディアン粘土層(処分場の候補地層)の特性、工学技術等の調査を行い、それらの成果も踏まえて、2005年に研究成果を、「処分場の設計・操業安全・可逆性」、「処分場の地層と工学バリアの長期変遷」、「処分場閉鎖後の安全評価」の3分冊の報告書“Dossier 2005”としてとりまとめた。

(2) 地層処分の安全防護目標

地層処分の安全規則は、規制機関である原子力施設安全局(DSIN)の安全基本規則(RFS: Règle fondamentale de sûreté) III .2.f 放射性廃棄物の深地層処分⁽¹⁴⁾(2008年改訂))に規定されている。閉鎖後長期安全性に係る主な規定内容を以下に示す。

① 基本目標

- 短期的および長期的な人および環境の防護が基本的な目標である。
- 考慮されるあらゆる状況において、放射性物質の放出に関連したリスクに対する防護がもたらされなければならない。また、一定期間以降は保証することのできない制度的管理に依存してはならない。
- 設計概念は、「放射線学的な影響を、技術的、経済的および社会的な要素を考慮した上で、合

理的に達成可能な限り低く制限」できるものでなければならない。

② 放射線防護基準等

- 基準状況：発生が確実であるか、極めて可能性の高い事象に伴って予想される処分場の将来の状況が、0.25 mSv/年に制限、1万年間の天然バリアの安定性立証と基準適用、1万年以降は定性的評価により補足。
- 仮想状況：自然を起源とする、あるいは人間活動に関連した偶発的な事象の発生に対応して生じる状況。確定的影響を生じるレベルを大きく下回ること。リスク概念の適用が可能。
- 評価期間：明確には規定されていない。

③ 隔離に関連する基準(サイト選定のための技術基準等から抜粋)

- 安定性：とくに1万年未満の期間に関して、この安定性が(限定的かつ予見可能な変遷をカバーする形で)立証されなければならない。
- 最小深度要件：サイトは、天然バリアの隔離性能が侵食現象(とくに氷河作用後のもの)、地震の効果、そして通常の人による侵入によって著しい影響を受けないことが、処分場の建設計画深度により保証されるように選定しなければならない。また、こうした方法による擾乱を受けやすい地表ゾーンの厚さが、150～200m程度になると仮定することも可能。
- 地下資源：サイトは、既知または推測される地下資源が重要性な性質のものである区域を避けて選定しなければならない。
- 記録保存：人の防護は、「限られた期間(500年)を超えて確実に期待することが不可能な制度的管理に依存することなく」提供されなければならない。

(3) 処分概念とその特徴

① 処分場サイト

処分場サイトになりうる互換性ゾーン(ムーズ/オート＝マルヌ地下研究所で研究されたカロボ・オックスフォーディアン粘土層の特性：厚さ130m以上、機械的・物理的・化学的・閉じ込め性に関する特性、および最大深度、と置き換えることができる範囲)を図7に、カロボ・オックスフォーディアン粘土層と周辺地層を図8に示す。

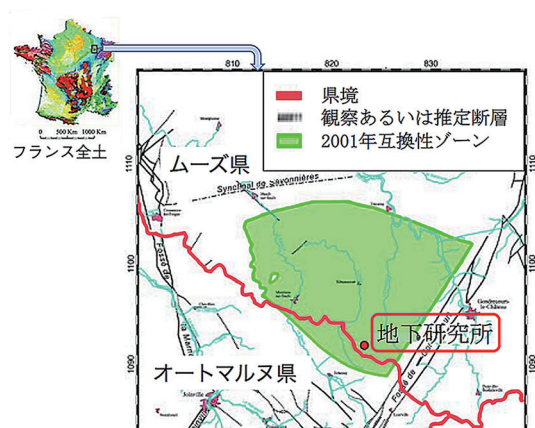


図7 地下研究所サイトと交換性ゾーン (11)

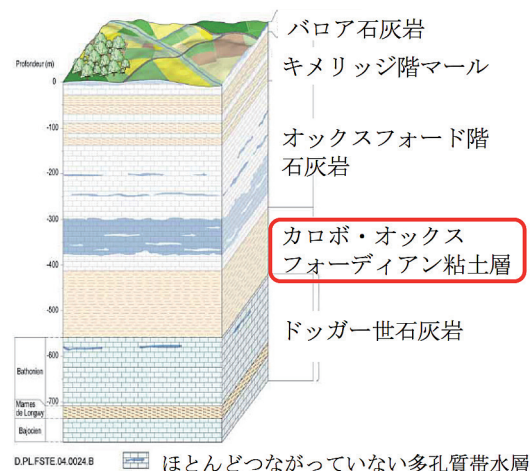


図8 カロボ・オックスフォードIAN粘土層と周辺地層 (11)

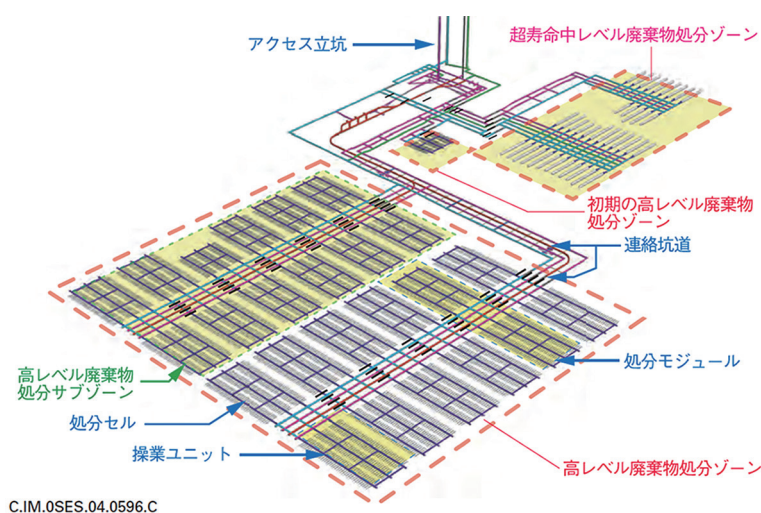


図9 処分場の全体概念 (12)

②処分概念

処分場の全体概念を図9に示す。深度約500mのカロボ・オックスフォードIAN粘土層の中央に設置される処分場地下施設はアクセス立坑により地上と連絡している。処分セルは処分の最小の単位であり、約70cm径で約40m長の坑道内部に鋼製スリーブが敷設され、その中に高レベル廃棄物が横置される。日本と異なり、周囲にベントナイト緩衝材は設置されない。高レベル廃棄物の発熱による粘土層への影響を避けるため、初期温度が90℃、1000年後には70℃以下になるように配置している。また地下水温度が50℃以下になるまではガラス固化体と接触しないようにオーバーバック

に密封するよう設計している。処分セルと高レベル廃棄物パッケージを図10に示す。

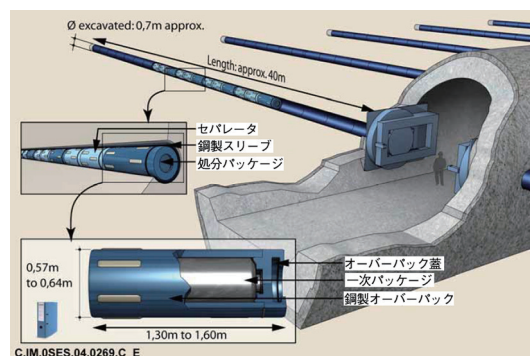


図10 高レベル廃棄物の処分セルと高レベル廃棄物パッケージ (12)

表 1 対象廃棄物 (11) (12)

項 目	特 徴
対象廃棄物： 高レベルガラス固化体 (C1+C2)	C1：燃料 UOx1 (平均燃焼度 33 GWd / t), UOx2 / URE (平均燃焼度 45GWd / t), および UOx3 (平均燃焼度 55 GWd/t) の再処理から発生する高レベル廃液をガラス固化したもの C2：燃料 UOx2 / URE (平均燃焼度 45GWd / t), および UOx3 (平均燃焼度 55 GWd/t) の再処理から発生する高レベル廃液をガラス固化したもの URE は回収ウランを含む燃料
処分量	32,100 本 (C1：4,640 本, C2：27,460 本) (42,300tHM の使用済燃料に相当)

表 2 処分概念の主な特徴 (11) (12)

項 目	特 徴
地層	母岩：カロボ・オックスフォーディアン粘土層。層厚 130 ～ 160m 透水係数 $5 \times 10^{-13} \sim 5 \times 10^{-14}$ m/s, 拡散係数 2.5×10^{-11} m ² /s (トリチウム水), 5×10^{-12} m ² /s (ヨウ素), 還元性, pH7 程度, 周辺地層も移流 / 分散, 拡散による地下水移行経路として考慮するが放射性物質の減衰効果は考慮せず。地下水流出地点は 3 ヲ所を評価し保守的な地点 (Saulx 溪谷) を選択
処分深度	約 500m, カロボ・オックスフォーディアン粘土層のほぼ中間
ガラス固化体	ホウケイ酸ガラス。ケイ素の溶解度律速。溶解速度モデルは 2 段階 (初期溶解速度 $V_0 \cdot S$ と残存溶解速度 V_r)。50℃ ～ 90℃ の温度では初期速度は 30 倍, 残存速度は 15 倍に加速 放射性物質はガラスマトリックスとの調和溶解を想定 総溶解期間は少なくとも 30 万年。処分坑道横置き
オーバーバック	非合金鋼, 厚さ 55mm, 寿命 4,000 年 (保守的評価。現実的評価では約 15,000 年), 製造時の欠陥率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$, C1+C2 では 1 本が閉鎖後 200 年で貫通を想定
処分セルシール	低透水性。ベントナイト等。カロボ・オックスフォーディアン粘土層とともに, 処分セルの地下水の循環を抑えガラス溶解を抑制
坑道, 立坑シール	低透水性。ベントナイト等。地下水の移流を制限し循環を抑制
埋め戻し材	掘削粘土の再利用, プラグの支持, 地圧による坑道破損の防止, 低透水性

③ 処分概念の主な特徴

本稿で紹介する処分概念の対象廃棄物と処分概念構成要素の主な特徴を各々表 1, 表 2 に示す。

5. フランスにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価の概要

(1) 安全評価シナリオ

Andra は, 表 3 に示すように, 安全評価シ

ナリオを, 通常変遷シナリオ (SEN: Scénario d'évolution normale) (構成要素が期待される機能を果たし最も可能性の高いシナリオ) および変動変遷シナリオ (SEA: Scénario d'évolution altérée) (安全機能の機能不全あるいは非常にありそうもないシナリオ) に区分し, さらにその下にいくつかのケースを設定して, 「閉じ込め」, 「隔離」に関連する解析を行っている。

表 3 安全評価シナリオの全体 (11)

通常変遷シナリオ (SEN)	レファレンスケース (防護基準の基準状況に相当)	
	感度解析ケース	不確実性ケース 代替モデルケース
変動変遷シナリオ (SEA)	シーリング材の欠陥シナリオ	
	パッケージの欠陥シナリオ	
	機能の著しい欠陥シナリオ	
	ボーリング掘削シナリオ	

(2)「閉じ込め」に関連する安全評価

通常変遷シナリオのレファレンスケースの安全評価結果に基づいて説明する。

①安全評価モデル

通常変遷シナリオの安全評価モデルを図 11 に示す。

② 3つの主要な安全機能

Andra は、カロボ・オックスフォーディアン粘土層および人工バリア等工学的構造物の閉じ込め性を踏まえて、以下の3つの主要な安全機能（カッコ内は寄与する主な特性）を設定している。

安全機能 1：地下水の循環を抑制する機能（低透水性、拡散場）

カロボ・オックスフォーディアン粘土層の優れた低透水性の性質により、放射性物質の移流

による移行が制限され、拡散による移行が支配的な場となっている（ヨウ素 129 の解析例は図 15 に示す）。

廃棄物パッケージがもはや十分に隔離する役割を果たさなくなった場合、長期的に放射性物質の拡散は不可避である。移流運動が存在しないことは、劣化プロセスの反応速度をより遅く、より良好に制御するのに寄与する。図 12 に示すように、移流を制限することは、長期的には放射性物質の移行にも有利である。

安全機能 2：放射性物質の放出制限と処分場に固定する機能（容器、ガラス固化体、沈殿）

オーバーバックによる 4000 年間の密封、ガラス固化体による閉じ込め、一部の放射性物質（溶解度を越えるもの）の沈殿により、図 12 に示すように、放射性物質は処分セルに固定される。

安全機能 3：放射性物質の移行を遅延し低減する機能（地層の低透水性、収着性）

この機能は、図 13 に示すように、「放射性物

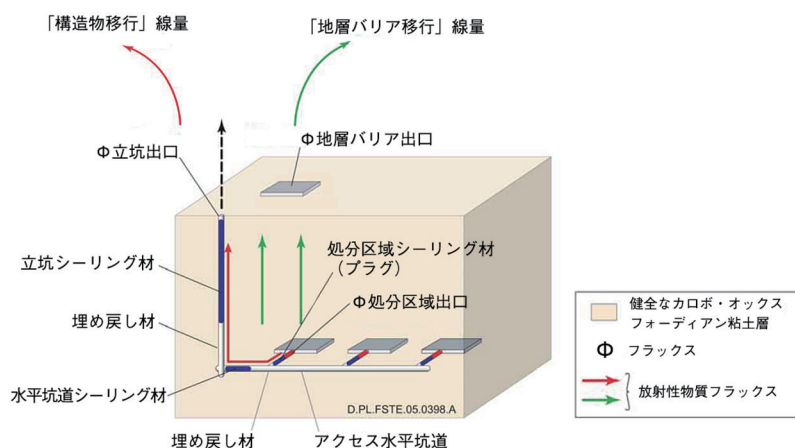


図 11 通常変遷シナリオの安全評価モデル (11)

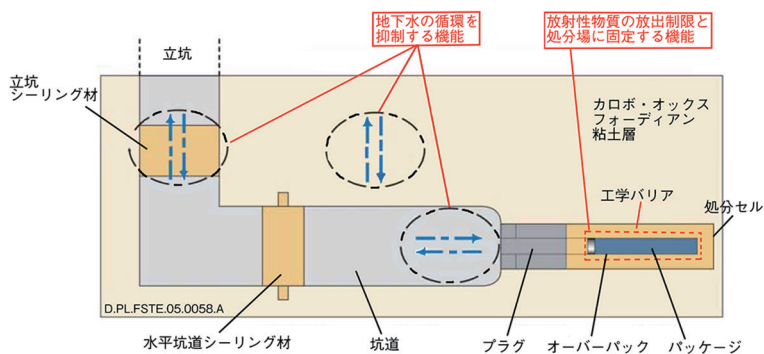


図 12 安全機能 1, 2 (11)

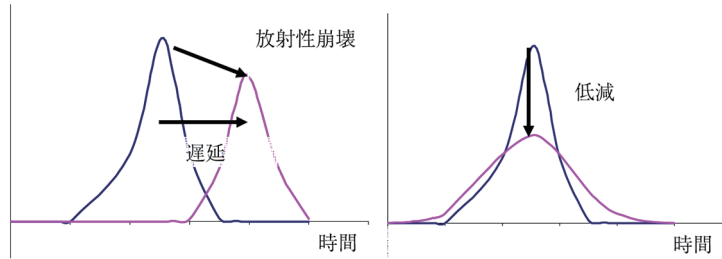


図 13 安全機能 3 ⁽¹¹⁾

質の放出を制限し、それらを処分場に固定する」機能が完全に効果的である期間は適用されないが、最初の放出が起こると直ちに作用し始め、それらの移行を遅らせ、低減することが可能である。「遅延」とは、それらが生活環境に移行するのにかかる時間を増加させることで、放射性崩壊による放射能の減衰によりその影響を減少させることを意味する。「低減する」とは、時間と物理的な二重の意味で低減することを意味しており、放射性物質の流れがカバーする距離が大きいほど、有害度が小さくなり、生活環境に到達するまでに時間がかかる。遅延と低減の機能により、生活環境への放射性物質の移行量を制限しピーク値を下げる。

③ 放射性物質の閉じ込めの評価

閉じ込め性に関連して、Andra が考慮している半減期が 6 カ月を超える 144 種類の放射

性物質（アクチノイド、核分裂生成物、放射化生成物）の移行解析が行われた。結果の概要を以下に示す。

(a) アクチノイドの予備評価

ガラス固化体、カロボ・オックスフォーディアン 粘土層におけるアクチノイドの高い化学的保持性能（溶解度が低く沈殿する、またガラス変質生成物への保持も大、収着性）のため、**図 14** に示すように「アクチノイドの放出を抑制し、処分場に固定する機能」により 50 万年では処分場近傍にほとんど留まり、100 年以上にわたり粘土層に留まる結果となったことから、通常変遷シナリオでは対象外とした。

(b) 核分裂生成物と放射化生成物の選択

2 段階の選択プロセスが採用された。第 1 段階では、母岩における理論上の移行時間が

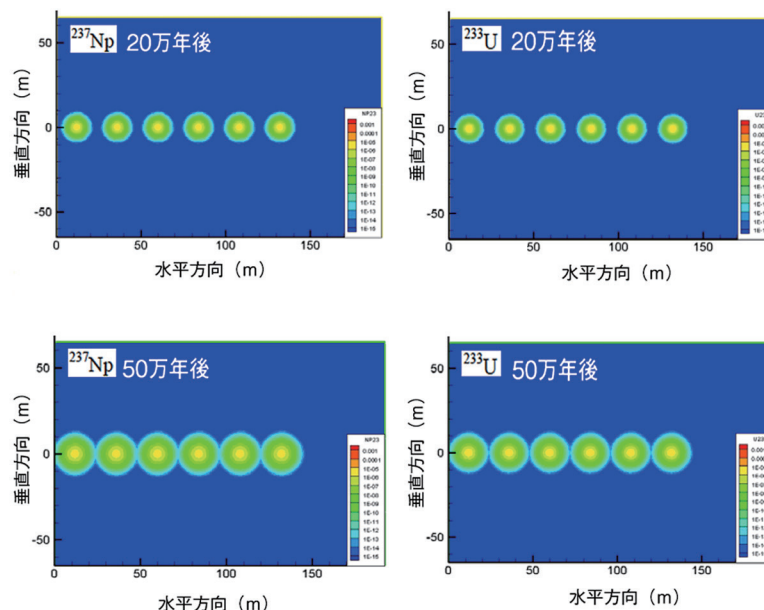


図 14 予備的計算による収着性の最も低いネプツニウム 237（半減期 214 万年）とウラン 233（半減期 16 万年）の 20 万年後と 50 万年後の質量濃度 (mol/m³) 分布 ⁽¹¹⁾

数 10 万年であることを踏まえ、母岩中で崩壊する半減期 1000 年未満の放射性物質を排除した。第 2 段階では、半減期が 1000 年を超える放射性物質を検討し、影響を与えない放射性物質を排除した。

また、このアプローチを検証し、それがいかなる重要な放射性物質も除外することにならないことを確認するために、半減期 1000 年以上のすべての放射性物質に関する包括的な計算も行われた。

以上により、すべての異なるタイプの廃棄物パッケージを考慮した後、最終的に、通常変遷シナリオの影響計算に使用する 1000 年を超える半減期を有する 15 種類の放射性物質と、ニオブウム 93m（ジルコニウム 93 の子孫）の 16 種類の放射性物質を選択した。表 4 にそれらの放射性物質を示す。

④安全評価結果

(a) 放射性物質の移行解析結果

高レベルガラス固化体から放出され、カロボ・オックスフォーディアン粘土層中の移行に伴う評価対象放射性物質の減衰（100 万年間）の検討結果を表 5 に示す。主な結果は以下の通りである。

● 検討対象の放射性物質の約半数が、カロボ・オックスフォーディアン粘土層内の 10 メートルの間で完全に減衰（> 99%）。したがって、それらはこの外では無視できる量である。

表 4 通常変遷シナリオで考慮される放射性物質⁽¹¹⁾

放射性物質	アニオン/カチオン	半減期（年）
¹²⁹ I	anionic form	15,700,000
¹⁰⁷ Pd	cationic form	6,500,000
¹³⁵ Cs	cationic form	2,300,000
¹⁰ Be	cationic form	1,600,000
⁹³ Zr (⇒ ⁹³ Nb)	cationic form	1,530,000 (TNb93m ≒ 16.4)
³⁶ Cl	anionic form	302,000
⁹⁹ Tc	cationic form	213,000
⁴¹ Ca	cationic form	103,000
¹²⁶ Sn	cationic form	100,000
⁵⁹ Ni	cationic form	75,000
⁷⁹ Se	anionic form	65,000
⁹⁴ Nb	anionic form	20,300
¹⁴ C	anionic form	5,730
⁹³ Mo	anionic form	3,500
¹⁶⁶ Ho	cationic form	1,200

- カロボ・オックスフォーディアン粘土層上部、すなわち母岩の外では、ほとんどの放射性物質の流れが完全に減衰する。同じことがカロボ・オックスフォーディアン粘土層下部でもいえる。
- ヨウ素 129、塩素 36、セレン 79、カルシウム 41 の 4 つの元素だけが、カロボ・オックスフォーディアン粘土層上部においてまだ存在している。しかし、カルシウム 41 とセレン 79 はすでに相当量が減衰している。
- ヨウ素と塩素のみが減衰量が小さく、塩素が 65～75%、ヨウ素が 20～30% である。

(b) ヨウ素 129 の移行解析結果

主要放射性物質であるヨウ素の移行挙動について、インベントリの多い使用済燃料を対象にして解析している。

カロボ・オックスフォーディアン粘土層中の移行に関する数値シミュレーションの結果から得られた拡散と移流によるモル流量の時間変化から、拡散による移行が移流による移行に対してほぼ 2 桁大きいことから、図 15 に示すように、拡散支配の場となっていることが確認された。

また、処分場構造物 / カロボ・オックスフォーディアン粘土層中を移行するヨウ素 129 の質量分布に関する数値シミュレーションの結果から得られたヨウ素 129 の移行経路

表 5 通常変遷シナリオで考慮される放射性物質の減衰⁽¹¹⁾

放射性物質	減衰に寄与する現象	粘土層（上部＋下部）から放出される放射性物質の質量の減衰
¹⁴ C	拡散	完全に減衰（100%）
⁹³ Mo	拡散，収着	
¹⁰ Be	収着	
^{93m} Nb		
⁹⁴ Nb		
⁹⁹ Tc		
¹²⁶ Sn		
^{166m} Ho		
¹³⁵ Cs		
¹⁰⁷ Pd		
⁵⁹ Ni		
⁹³ Zr		
⁷⁹ Se	拡散，沈殿	>99. 95%
⁴¹ Ca	拡散，収着	90～95%
³⁶ Cl	拡散	65～75%
¹²⁹ I		20～30%

注：背景が黄色の放射性物質は粘土層の 10m 以内で完全に減衰
背景が緑色の放射性物質は粘土層の 10m 以内でほとんど減衰

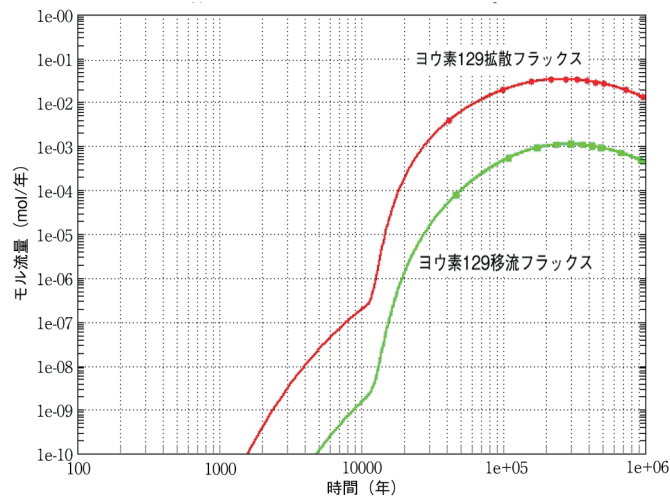


図 15 通常変遷シナリオ – カロボ・オックスフォーディアン粘土層と上部地層との境界における使用済燃料のヨウ素 129 のモル流量の時間変化⁽¹¹⁾

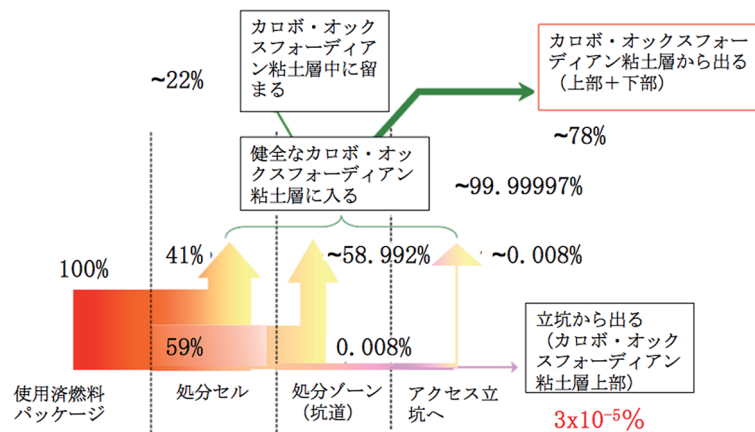


図 16 通常変遷シナリオにおける異なる移行経路を流れる使用済燃料のヨウ素 129 の質量分布⁽¹¹⁾

毎の質量分布を図 16 に示す。概要は以下の通りである。

- 廃棄物セル内を移行した後、パッケージから放出される質量の 41%が直接カロボ・オックスフォーディアン粘土層に到達する。
- パッケージから放出される質量の 59%が、パッケージとアクセス坑道（特に粘土プラグ）との間に位置する構造を通して拡散することによって坑道に達する。これは、パッケージとアクセス坑道との間で高濃度勾配となるようプラグ周囲に課されたゼロ濃度假説により保守的に計算した結果である。この保守的な仮説にもかかわらず、処分ゾーンの処分セルアクセス坑道および接続坑道に到達する 59%の質量のうち、ほぼすべてが最終的にカロボ・オックスフォーディアン粘土層に再び合流する。
- その結果、立坑から放出されるヨウ素 129 の

質量は総質量の約 $3 \times 10^{-5}\%$ となり、健全なカロボ・オックスフォーディアン粘土層の上部と下部から出るものより約 6 桁小さく、無視できる。

- ヨウ素 129 の約 22% はカロボ・オックスフォーディアン粘土層中に留まっており、生活環境に放出されていない。
- 以上の結果、最終的に使用済燃料パッケージから放出されたヨウ素 129 の質量のほぼすべて (99.999%) は、健全なカロボ・オックスフォーディアン粘土層を拡散により移行した後、カロボ・オックスフォーディアン粘土層の上部または下部から放出される。

(c) 線量評価結果

図 17 に、通常変遷シナリオの安全評価結果を示す。図 17 は、保守的に移行距離が短く希釈率の少ない流出地点（Saulx 谷）にお

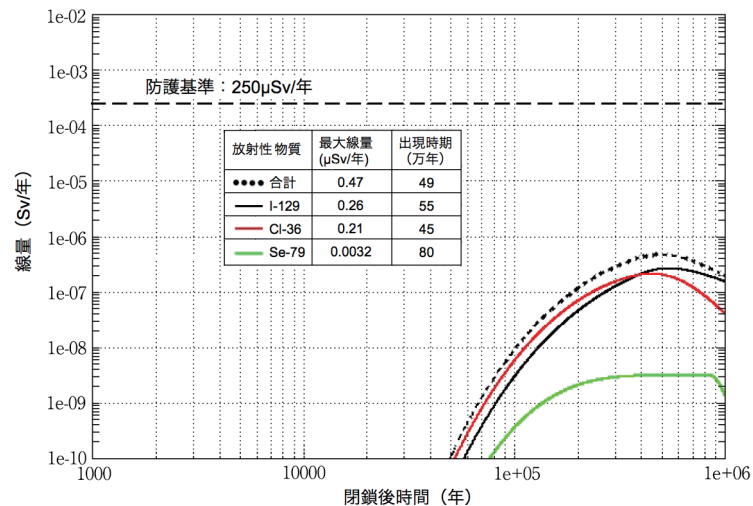


図 17 通常変遷シナリオの安全評価結果 - レファレンスケース - 100 万年水理モデル - (流出地点: Saulx 谷) - ガラス固化体⁽¹¹⁾

ける井戸水シナリオ（飲用水，農業用水）の被ばく線量を示している。以下に概要を示す。

- 粘土層の低透水性，収着性により，放射性物質の生活環境までの移行時間が長いことから，評価対象 16 放射性物質のうち，大半の放射性物質が放射性崩壊により影響を無視できるレベルまで減衰した。
- 一方，長半減期で，溶解度が大きく，粘土層への収着係数が小さい放射性物質（ヨウ素 129，塩素 36，セレン 79，特に前二者）が線量に寄与する重要放射性物質として現れている。その合計線量は最大約 $0.5 \mu\text{Sv}/\text{年}$ であり，約 50 万年後に現れる。主要放射性物質とその線量（出現時期）はヨウ素 129，約 $0.3 \mu\text{Sv}/\text{年}$ （約 55 万年後），塩素 36，約 $0.2 \mu\text{Sv}/\text{年}$ （約 45 万年後），セレン 79，約 $0.003 \mu\text{Sv}/\text{年}$ （約 80 万年後）となっている。
- いずれも防護基準値の $250 \mu\text{Sv}/\text{年}$ を大きく下回っている。

なお，Andra は，評価期間として，100 万年まで評価を行うこととしている。その妥当性は，母岩の安定性の予測可能期間（母岩の特性を使用できると見込める期間），放射能インベントリの減衰，放射性物質が母岩を通過する期間（影響がピークになる期間）の考察に基づいて説明している。

（3）「隔離」に関連する評価

① 隔離に関連する安全機能

Andra は隔離に関連する安全機能について次の通り評価している。

（a）地表の現象や人間の侵入から廃棄物を隔離する

既存の情報やデータ，および自ら取得したボーリングデータなどに基づいた評価の概要を以下に示す。

- 少なくとも深さ 500 メートルに処分場を設置することによって，侵食や日常の人間活動などの現象から廃棄物を遠ざける。
- 火山の影響を受けない場所を選択することで，廃棄物が地表に隆起するのを防ぐ。
- 内部の地球力学に起因する処分場内の主要な垂直方向の動きに関連するリスクも研究されており，廃棄物を大幅に移動させる可能性のある動きの可能性を排除することができる。
- 氷河に起因する現象は，150 メートルを超える深さでは大きな影響を及ぼさない。
- 粘土層ははるかに長い期間安定しており，この状況が今後 100 万年で変化する可能性があるという兆候はない。
- 以上の状況では，廃棄物は，掘削の形で，意図的な人間の行動によってのみ地表に上がることができるが，このリスクは，処分場の近くに有意な鉱物資源など（石炭，石油，地熱資源）がないことによって制限される。また，地下の

探査で鉱物の堆積物や水源を利用する可能性はほとんどない。

これらの観点から、「処分場候補サイトとその地域は、RFS.III.2fの推奨事項に従って保証を提供する」等と評価している。

(b) 処分場の記録の保存

Andra は、フランスではじめての短寿命・低中レベル放射性廃棄物処分場（浅地中処分場）であるマンシュ処分場の操業を 1994 年に終了し、現在、モニタリング・監視等を実施している。マンシュ処分場の記録の保存は、処分場の詳細な記録と記録の要約の確立、掘削制限を伴う土地登記所への記録、およびコミュニケーションの取り決めの 4 つの要素に依存している。Andra は、マンシュ処分場の経験も参照して、地層処分場の記録の保存システムの検討を行っている。以下に概要を示す。

- 記録の対象は、初期の調査段階から始まる処分場プロジェクトの開始から、処分場の設計と正当性および安全性実証、処分場の建設、操業および定置する廃棄物処分パッケージの管理、処分場の段階的閉鎖と最終閉鎖までに関連する知識とデータであり、知識ベースとデータベースとして管理することにより処分場の記録が段階的に確立される。全体の期間は、可逆性が要求される期間に応じて約 100 年以上になる。

- 蓄積された知識が失われる可能性を防ぐために、知識ベースの記録自体と、それらを活用するために必要なツールや機器を保護するために、いくつかの異なる方法を使用できる。さまざまな場所に保存されている別々のバックアップ媒体で重複するアーカイブは、記録を保存し、偶発的な損失を防ぐために一般的に使用される方法の 1 つである。操業者は、ほぼ毎日、取得および蓄積された知識を使用する必要があるため、処分場が操業段階にある間は、データの保存に問題はない。

- マンシュ処分場の記録の保存の要素を地層処分の場合に移すと、RFS.III.2f で提案されているように、処分場の記録を保存するための合理的な期間は約 5 世紀であると考えられることになる。さらに遠い将来にわたって、情報を失うことなく 2 セットの記録が定期的かつ正しく複製されることを保証することは困難である。処分場の

存在の記録をより長期間保存する必要がある場合のために、数 1000 年にわたる地表標識（巨石やその他の構造物など）の有効性を研究するための国際的な研究が、現在、進行中である。これらの研究は、地表標識の盗難や劣化のリスク、および、例えばそれらが正しく保存されていたとしても、私たちの世代によって与えられた真の意味を維持することの難しさに直面している。

Andra は、処分場サイトの選択により、地表の現象が処分場に及ぼす影響や放射性物質が地表に隆起する可能性を排除できるとしている。

一方で、有意な天然資源を有さないサイトを選択したとしても、ボーリング掘削による偶発的な人間の侵入など、特定の種類の行動を完全に排除することはできず、また、記録の保存を行ったとしても、それが無期限に続くことを信頼することはできないとしている。このため、深層防護の関連で、この掘削が天然資源の探査によって動機付けられていない場合も含め、ボーリング掘削が処分場ゾーンを横切る事象を設計や安全評価で考慮するため、コアの表面加工、破片、削りくず、および汚染した岩石に起因する状況、1 つまたは複数の試錐孔の放棄に起因する状況を調査している。

6. おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、日本を含む世界各国で開発に取り組んでいる方法である。フィンランドは建設を進めており、数年以内に操業を開始する、スウェーデンは建設を開始する、フランスは近年中に建設許可を申請する、などが予定されている。日本では文献調査を進めている。

地層処分とは、高レベル放射性廃棄物を地下深部の地層という天然のバリアと廃棄物形態（ガラス固化体、あるいは使用済燃料）、容器、緩衝材等の工学的に設けたバリアの組み合わせにより、長期間にわたり「閉じ込め」、生活環境から「隔離」する方法である。その結果、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性物質

の生活環境への移行を抑制し、放射性崩壊により減衰させるなどによって、生活環境に到達する量を減らし、人に与える影響を問題のないレベルにまで下げることができる。

地層処分を進めるためには、地層処分の安全確保の仕組み、その結果どのような放射性物質が生活環境に出てくる可能性があるのか、安全防護目標を下回ることができるのか、などについて、より多くの方々に理解していただくことが必要である。本稿がその一助となることを期待している。

参考文献

- (1) IAEA, Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Standard Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna, 2004
- (2) DECC, et al, UK Strategy for the Management of Solid Low Level Waste from the Nuclear Industry, 2016
- (3) IAEA, Classification of Radioactive Waste, Safety Standard Series No. GSG-1, IAEA, Vienna, 2009
- (4) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律
- (5) 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則
- (6) 日本原子力文化財団, 原子力・エネルギー図面集
- (7) IAEA, et.al, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna, 2006
- (8) IAEA, Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, IAEA, Vienna, 2011
- (9) 原子力規制庁, 第二種廃棄物埋設に係る規制制度の概要, 平成 27 年 1 月 26 日
- (10) 原子力安全委員会, 低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について, 平成 19 年 5 月 21 日
- (11) Andra, Dossier 2005 Argile Tome Safety evaluation of a geological repository, 2005
- (12) Andra, Dossier 2005 Argile Tome Architecture and Management of a Geological Disposal System, 2005
- (13) Loi n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, 1991
- (14) Direction de la Sûreté des Installations Nucléaires - 10 Juin 1991- Règle n° III.2.f - Stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde, 1991 (2008 年改訂)

令和4年度 事業計画

(一財) エネルギー総合工学研究所

1. 基本的な考え方

当研究所は、わが国のエネルギー工学分野の中心的な調査研究機関として、産・学・官のエネルギー技術に関する専門的な知見・経験を相互に結び付け、「総合工学」の視点に立脚して調査、研究、評価、成果の普及等に努めてきた。技術は、わが国が国際社会で優位性を維持・向上する上で不可欠な資産であり、将来のリスクに対応し得る強靱なエネルギー戦略の構築・実現に貢献するものである。

当研究所は、今後とも「エネルギーの未来を拓くのは技術である」との認識の下、俯瞰的、長期的な視座をもって、エネルギー技術に関する調査、研究、評価、成果の普及等に取り組んでいく。こうした取り組みにより、社会的価値を創出するとともに、当研究所の事業の推進、組織の発展に繋げる。

2019年度に発生した、受託事業に係る労務費の不適切計上事案を教訓に再発防止を徹底してきている。本事案のようなコンプライアンス違反は、当研究所の社会的な信頼を大きく失墜させ、その経営を根本から揺るがす重大な非違行為であり、コンプライアンスは収支均衡や利益追求に優先することを全役職員が認識し共有する。

再発防止策の継続的な実施と真摯な見直しを通じコンプライアンスファーストの意識を定着させるとともに、調査研究の品質の確保と向上に努め積極的で創造的な事業運営を行っていく。

2. 最近の情勢についての認識

(1) 世界のエネルギー情勢については、ロシアのウクライナ侵攻に代表される地政学的な要因、経済的な要因、新型コロナウイルス禍のような社会的な要因等が相互に関連しながらエネルギーの需給面や価格面に大きな影響を及ぼし、また、それらの先行きに不透明感を投げかけている。

温暖化防止への動きに関しては、昨年11月に英国グラスゴーで開催された国連気候変動枠組条約第26回締約国会議(COP26)において、1.5℃目標に向かって世界が努力すること、排出削減措置を講じていない石炭火力発電所の段階的削減等について合意された。また、各国による温暖化ガス排出削減の宣言も相次ぎ、グリーンファイナンスの圧力等も相まって、世界規模でのカーボンニュートラルの動きが名実ともに加速している。

(2) このような動きの下で、大企業を中心にサプライチェーンを含めた脱炭素化の動きも加速し、加えて、中小企業や地方においてもゼロエミッションの宣言が相次いでいる。また、多角的な視点からの国際的な取り組みである持続可能な開発目標(SDGs)などの動きもあり、エネルギー環境分野でのイノベーションの期待、脱炭素技術に対する更なる投資拡大、循環経済への取り組みの強化が見られる。加えて、デジタル技術の進化、データ活用や人工知能(AI)技術の進展により、エネルギー分野でも電力需給・ネットワーク技術をコアにしたサービスや、これらを活用したエネルギーマネジメント最適化による低炭素化ビジネス機会も高まっている。原子力分野では、中国、ロシアの存在感の増加に対し、先進国において、小型モジュール炉をはじめと

する次世代原子炉開発の進展、核融合炉開発等の動きも含め、数々の進展が見られる。

(3) 国内におけるエネルギー情勢については、2020 年、政府において、2050 年にカーボンニュートラルを目指すことが宣言され、続いて 2021 年には、エネルギー分野について 2050 年への道筋、新たな 2030 年目標を内容とする第 6 次エネルギー基本計画が閣議決定された。同年 12 月に温暖化対策を経済成長につなげる「クリーンエネルギー戦略」の策定に向けた議論が開始されるなど、社会全体として、イノベーションを通じたカーボンニュートラルの実現に向け大きく動き出している。基本的な方針として、電力部門では今まで以上の再エネ拡大等による脱炭素化、産業・民生・運輸部門での電化、水素等の活用、加えてネガティブエミッション技術等の活用が示されている。

(4) エネルギー需給面での具体的な取り組みでは、スマートグリッド、エネルギーマネジメントシステム等エネルギー利用の効率化技術、電気自動車、燃料電池自動車等の次世代自動車、エネルギーの貯蔵・輸送・最終利用媒体として期待される水素等に関する研究開発、導入支援、インフラの整備が進められている。また、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー（再エネ）の導入が進む中、大量導入時の出力変動の吸収や火力発電の稼働率低下による調整力不足等が課題となっており、制度面での検討とともに蓄エネルギー技術やデジタル技術を用いた系統運用に係る技術開発等が加速している。さらに、大きな自然災害の頻発、エネルギーインフラの高経年化等を踏まえ、強靱なエネルギー供給の基盤を確保する重要性が指摘され、電力自由化と再エネ拡大による環境変化の中で必要な投資確保への関心が高まり、取り組みが進められている。

(5) 東京電力福島第一原子力発電所の事故から 11 年となり、引き続き住民の方々の帰還に向

けた取り組みや事故炉の廃炉・汚染水対策が進められている。原子力発電所の状況については、10 基が再稼働した。新規制基準への適合性確認審査については、新たに、昨年 6 月、関西電力(株)美浜発電所 3 号機の原子炉設置変更許可がなされた。また、廃止措置については、今後 24 基の原子力発電設備が見込まれている。

(6) エネルギーに関する制度面では、電力システム改革の第 3 段階である 2020 年 4 月の送配電部門の法的分離、将来の供給力を安定的に確保するための 2020 年 7 月の容量市場メインオークション開始に続き、需給バランスのための調整力を広域的に取引する需給調整市場が 2021 年 4 月に一部商品から開設された。また、FIT 制度による賦課金増加などの課題に対応し、2022 年 4 月に再エネを電力市場へ統合するための FIP 制度が導入されることとなっている。

3. 令和 4 年度の事業

(1) エネルギー技術の俯瞰的評価

エネルギーを取り巻く種々の問題の解決に向けて技術の可能性と重要性を認識し、将来のエネルギー需給のあり方についてエネルギー技術の観点から調査・分析を行う。具体的には、広範なエネルギー技術分野を俯瞰し、3E+S（安定供給、経済効率性の向上、環境への適合、安全性）という考え方にに基づき、エネルギー技術に係る知見の最新化、エネルギー技術開発のあり方について調査、研究及び評価を行い、今後のエネルギー・環境に関する問題の解決に向けたエネルギービジョンや提言を発信する。

当研究所では 2019 年 1 月、当研究所が有するエネルギー環境シミュレーションモデルを用いたエネルギー需給構成等の分析を行い、エネルギー技術の現状と課題を整理し、2050 年に向けたエネルギー技術展望をとりまとめた。2021 年には、上記モデルを活用し、2050 年カーボンニュートラルの下でのエネルギー需給構造を展望し学会等で発表した。

また、2020年にカーボンリサイクル、2021年にカーボンニュートラル、に関する技術を中心にまとめた書籍を夫々上梓するとともに、2022年1月には、将来を担う子供向けに、エネルギー全般に関する基本的な知識と課題を紹介する書籍を出版した。

このように、今後とも、国内外の関係者がエネルギー・地球環境問題について議論する際の素材として活用することを期待し、エネルギーシステム、エネルギー技術等に関する知見、見解、提案等を書籍、文献、論文、ニュースレター等を通じ、紹介し、発信していく。

(2) エネルギーシステムや幅広いエネルギー技術分野での取組み

当研究所の地球環境統合評価モデル(GRAPE)等の機能強化を図るとともに、同モデルを用いたエネルギーシステムや地球環境問題に関する分析を行う。また、太陽・風力・バイオマス等の新エネルギー、二酸化炭素(CO₂)の回収・利用・貯蔵とも組み合わせた化石燃料の利用、次世代電力系統、原子力・廃止措置等に係る最新技術についての国内外の調査研究を行う。

特に、エネルギーの貯蔵・輸送・最終利用媒体としての水素やCO₂有効利用技術(CCU)等を加味した新たなエネルギー供給システムの構築貢献に注力する。変動電源である太陽光・風力発電導入に伴う系統連系に係る要件の課題、再エネの蓄熱技術適用によるエネルギー貯蔵・利用に係る課題等、再エネ大量導入時における対策技術、および新型コロナウイルス感染症の影響でも重要度が増している需要側に関する研究を行うこととする。

(3) 原子力に関する取組み

原子力は、世界的に脱炭素化の選択肢として評価されており、2022年2月に欧州でもタクソノミーへの原子力追加案が公表されるなど、その価値が改めて認識されている。国内外での革新炉や核融合開発の動向を踏まえ、エネルギーシステムにおける原子力の寄与や、革新的原子

力システムの研究開発動向等の調査を行う。また、東日本大震災を契機に、安全は国民が広く希求する普遍的な価値として一層重視されてきており、原子力の安全性向上に有効な要素技術開発の支援を引き続き進める。

軽水炉の廃止措置について、有識者により構成される委員会において第三者的な立場から、円滑な廃止措置の実施に向けた、工程、技術、制度に関する調査及び課題への対応策の検討を進め、その結果を技術レポートとして取りまとめている。これを継続するとともに、廃止措置に係る標準基盤の整備支援、人材育成事業等に引続き取り組む。

(4) エネルギー需要に関する取組み

省エネルギーに対する社会的な要請も大きくなる中、需要機器の制御によって電力需給調整に貢献するデマンドレスポンス技術やエネルギーマネジメントシステムに関する調査研究の実施、当研究所がその策定を支援した省エネルギー技術戦略に基づき、CO₂削減効果の見込める蓄熱等技術をはじめとするエネルギー利用効率向上に関する技術調査に取り組んでいく。

エネルギーマネジメントシステムに係る国際規格である、「複数の組織で共通のエネルギーマネジメントシステムを実施するためのガイドンス」が2021年3月にISO50009として発行された。ISO50001と共に、引き続き、それらの普及促進を図る。

(5) 標準化に関する取組み

標準化は、多くの技術について、その将来の開発や普及に大きな役割を果たしている。当研究所としても、(4)に記した、エネルギーマネジメントに加え、CCS(CO₂回収・貯留)、太陽熱利用等に係る国際規格の開発に精力的に取り組むとともに、国際標準化機構(ISO)や国際電気標準会議(IEC)での国際標準化活動に貢献していく。

(6) エネルギー技術分野におけるプラットフォーム機能の強化

次世代電力ネットワーク、原子炉廃止措置、太陽熱、CO₂有効利用技術等の重要な技術分野について、関係企業や大学等の専門家による研究会や勉強会を設置し、当該技術に関する情報収集、調査分析を行うとともに、検討会の開催、プロジェクト企画提案等を行う。

また、エネルギー・環境分野をはじめ経済社会の多くの分野で、産学官の協働を通じたイノベーションへの取組みが活発化している。賛助会員の皆様の取組みを支援するため、ベンチャー支援機関と連携して、スタートアップス、大学等による技術シーズ紹介の場として「IAE オープンイノベーションフォーラム」を、2021年7月に開催した（第2回）。個別面談の成立数が相当数あったこと等から、令和4年度においても幅広く参加を呼びかけ開催する。

(7) 情報発信・提供等賛助会員サービスの向上

賛助会員、関係機関等のステークホルダーに向け、賛助会員会議、シンポジウム、学協会等を通じ、当研究所の調査研究成果や提案を発信・提供するとともに、エネルギー技術、気候変動等に係る重要なテーマに関し、国内外での産・学・官の連携を図りつつ、月例研究会や個別分野研究会等を開催する等、アウトリーチ活動を積極的に行う。

また、最新の技術に関する「情報」と「評価」を、賛助会員、関係機関等のステークホルダーに提供するため、エネルギー技術情報プラットフォームや季報、メールマガジン、ウェブサイトの更なる充実化・活用促進に取り組んでいく。

4. 事業を進めるに当たって

(1) 「受託事業に係る労務費の不適切計上事案」の反省を踏まえ、事業活動及び組織運営においてコンプライアンスファーストの実践を継続する。調査研究事業においては品質向上に引き続き努め、数年後を目途に公的機関、民間企

業等からの受託事業収益によるバランスのとれたポートフォリオを構築し、結果として健全な事業・組織の運営を達成することを目指す。

(2) 上記の方針の下、令和4年度においては、引き続き民間企業からの調査研究事業の受託に注力するとともに、指名停止期間が終了する経済産業省の事業や他省庁、独法等の事業の受託に努める。また、役職員一丸となり、賛助会員サービスの向上と相俟った会費収入の維持・増加に繋がる営業活動に取り組む。

① 民間企業からの調査研究事業の受託増への取組み

- 所内各研究グループ、研究グループ間連携での個別提案活動
- コンサルティング事業、人材育成・研修事業等への取り組み

② 個別分野研究会での活動

- 次世代電力ネットワーク研究会（APNet）
- 太陽熱・蓄熱技術研究会（STE）
- ACC（Anthropogenic Carbon Cycle、人為的炭素循環）技術研究会
- 原子力施設の廃止措置へのデジタルトランスフォーメーション適用に係る勉強会

③ 情報発信・提供等賛助会員サービスの向上への取組み

- シンポジウム、賛助会員会議の開催
- 月例研究会の運営改善（Web およびハイブリッド開催含む）、賛助会員向け事前配布資料の充実
- メールマガジン（IAE Newsletter）の内容を充実し発信
- ベンチャー支援機関と連携した賛助会員とスタートアップスとの協業支援
- 技術相談、技術交流サービスへの取組みの強化

(3) 受託事業に係る労務費の不適切計上事案を踏まえ、2020年8月にIAE再発防止策実施委員会（委員長：理事長）を設置し、同委員会でIAE再発防止策実施計画（アクションプラ

ン：AP)の進捗状況を確認しつつ再発防止の徹底を図っている。その状況について全役職員に説明している。再発防止策の具体的な取組みについては、その実施状況及び実効性の確認のため、外部機関によるモニタリングを受け、昨年9月に公表した。本年度はモニタリングでの指摘にあるように、各再発防止策を実践し、確認し、継続する。また、昨年8月に実施した「コンプライアンスファースト月間」の取組みをはじめとした研修、教育等を本年度も実施し、コンプライアンスの意識と風土の醸成に努める。

(4) 再発防止策において、ガバナンス改革の一環として、経営層による適切なリスク管理が指摘されている。各研究グループ／チーム、一般管理部門からのリスク認識に関するヒアリングを踏まえ、①経営・コンプライアンス面、②人材育成・確保面、③情報基盤・セキュリティ面、④新たな働き方その他の面からリスクを取りまとめた。これらのリスクを評価し優先順位をつけ、人員配置、予算手当も含め順次対応していくこととしている。

(5) 本年度は、一昨年から新型コロナウイルス禍の中で定着化した在宅勤務と出社のハイブリッド型の勤務、更なる経費削減のためのフリーアドレス化を検討、実施することで生産性の向上、新たな付加価値の創造を図るとともに、働き方に対するニーズの多様化やワークライフバランスの満足度の向上に取り組んでいく。

5. 各エネルギー分野における調査研究等のテーマ

(1) エネルギー技術全般

(ア) エネルギー技術開発戦略に関する調査研究

環境・エネルギーを巡る状況を見ると、国際的には、英国のグラスゴーで開催されたCOP26では、世界全体で世界の気温上昇を1.5℃未満に抑制する方向性が確認され、パリ協定の実施指針に関するルールが固まった。並行して、エ

ネルギーや気候変動を含むSDGs(持続可能な開発目標)を目指した取組も継続して進められている。一方、EUでは、気候変動法に基づいて、2050年にむけて域内の温室効果ガス排出正味ゼロ政策が推し進められ、新型コロナウイルス向け経済対策でもある環境政策パッケージ(グリーンニューディール)が推進され、米国では、気候変動対策強化の方向性が明示され、エネルギー政策は脱炭素化に向かっている。中国も2060年にCO₂排出を正味でゼロにすることを宣言するなど、世界の各地域で正味の温室効果ガスゼロエミッションを目指す動きが定着した。なお、新型コロナウイルスによる感染症拡大は、全世界で日常生活や産業活動に大きな影響を与える転換点となり、エネルギーのみならず将来社会全般について長期的影響を与える可能性が高い。国内では、温室効果ガス排出を2050年正味でゼロに抑制する方向を踏まえて2020年に政策と重要技術分野実行計画のパッケージとして示された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が2021年6月に改定され、2021年10月には2030年の温室効果ガス削減目標と整合的なエネルギー需給見通しを含む「第6次エネルギー基本計画」、および「地球温暖化対策計画」の改訂が決定された。これらの政策目標を具体化し、エネルギーを含めた社会変革の具体的道筋を示す「クリーンエネルギー戦略」の検討も始まっている。

環境・エネルギー情勢の先行きが不透明な時代に、社会全体の安全性を確保し、エネルギーの安定供給・セキュリティ、環境保全、経済性など様々な要因を考慮しつつ、わが国の将来を中長期的な観点から見据えた、革新的なエネルギー技術戦略策定に関する調査研究、及び国際的動向を踏まえた、新しいエネルギー・環境技術について広範な調査を行う。

(イ) 地球規模でのエネルギーシステムに関する調査研究

発展途上国・地域の経済発展を主な要因として、世界全体の温室効果ガス排出量は増加を続

けている。これに対し、COP21において合意されたパリ協定の目標は、産業革命前からの世界平均温度上昇について2℃から1.5℃に強化されつつあり、各国は2030年頃の温室効果ガス削減目標や2050年の長期目標などの自主的削減の取組について報告している。さらに、長期的な温室効果ガスゼロエミッションを目指し、全世界の国・地域、企業、自治体は脱炭素への動きを加速させている。

令和4年度においては、当研究所が運用する地球環境システム分析評価ツールであり、原子力、再エネ、化石燃料、水素、気候工学の各分野における分析に用いてきたGRAPEモデルを活用し、1.5℃目標に整合する温室効果ガス排出経路実現可能性分析を行うとともに、当研究所が実施する各種の調査研究プロジェクトにおいて、地球環境の観点からの評価研究を実施する。また、日本の長期エネルギー需給を詳細分析するツールであるTIMES-Japanを用いて、2050年カーボンニュートラルの実現可能性を評価するとともに、カーボンリサイクルにおけるライフサイクルCO₂評価との整合的評価を試みる。さらに、カーボンニュートラルの実現の鍵を握るネガティブエミッション技術の役割に焦点をあてた詳細評価、ならびに今後の社会変化にとって大きな不確実性要因となる新型コロナウイルス感染症拡大や長期的な人口減少によるエネルギー需要への影響について、基盤的な調査分析を実施する。

- ①統合評価モデル GRAPE による世界長期分析
- ②エネルギーモデル TIMES-Japan を用いた日本のエネルギーシステム分析
- ③カーボンリサイクルにおけるライフサイクル分析とエネルギー需給分析の整合的評価
- ④カーボンニュートラルの実現におけるネガティブエミッション技術の役割に関する評価
- ⑤新型コロナウイルス感染症拡大や人口減少がエネルギー需要に与える影響の調査分析

(2) 新エネルギー・電力システム関連

太陽光、風力、地熱、バイオマス、小水力等の再エネの導入・普及を目的として2012年7月から開始された固定価格買取制度（FIT：Feed In Tariff）は、2019年11月以降、順次買取期間の満了を迎える中、賦課金による電気料金の大幅な負担増を抑制するとともに、電力卸売市場での再エネ電力の取引に向けたFIP（Feed In Premium）制度が2022年4月に開始される。また、2020年4月には電力システム改革の最後となる第3段階として送配電部門の法的分離が行われ、電力システム改革の一貫としての電力取引市場においては、2020年に容量市場が開設されるとともに、2021年4月に需給調整市場の制度が開始された。

2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」において、2030年の再エネの比率（電力量）は、36～38%と極めて高い目標が設定された。再エネが電力系統に大量導入された場合、電圧や周波数への影響および余剰電力の発生が懸念され、それに対応するため、系統の増強・運用の工夫とともに電力貯蔵を含む様々な調整力が必要となる。さらに、太陽光発電などの非同期電源の増加による慣性力低下への対応も必要になっている。また、再エネ電源の出力制御とともに急速な普及が期待されるEVおよび蓄電池などの需要側機器（DSR）の制御による電力需給調整への貢献が注目されている。これまでの電力システムは、大容量発電所・送電線が中心であったが、これからは再エネを中心とする分散型電源とエネルギーマネジメントシステム（EMS）、スマートメータ、バーチャルパワープラント（VPP）などのデジタル技術の活用による、需要地系統を中心とする電力システムへの期待が高まっている。海外の先進事例の調査とともに、わが国のエネルギー・電力事情に対応した技術開発や新しいビジネスモデルが求められている。

令和4年度においては、電力システム改革および再エネの主力電源化に対応する次世代の電力ネットワークのあり方、2050年のカーボン

ニュートラル達成に向けた調査研究を行う。また、再エネの普及拡大に伴う地域エネルギーの活用・自立化、電力のレジリエンス向上に向けた調査研究を行う。大量導入に向けた活動については、バイオマス利用技術や集光型太陽熱発電（CSP）等の調査研究に加え、再エネ等の電力を熱に変換して貯蔵し、需要に合わせて発電することにより電力需給バランスの確保を行う蓄熱発電が近年急速に注目されていることから、本技術についての調査研究を行う。

このような観点から当研究所では、「次世代電力ネットワーク研究会」を2009年9月に設立し、電力会社、大学・研究機関、通信事業者、機器メーカーなどの関係者が、幅広い分野の第一人者による講演受講や意見交換などを行い、考え方を共有するとともに、必要な技術開発についての提言や、次世代ネットワークへの移行シナリオの検討を進めている。

また、再エネの安定供給技術の1つとして注目されている、CSPや蓄熱発電の情報共有・情報交換の場として、「太陽熱・蓄熱技術研究会」を2009年から運営し、会員へ最新情報を提供するとともに、会員同士の情報交換や新規プロジェクトの立ち上げを目的に活動している。

（ア）電力システム改革、再エネ大量導入に関する調査研究

- ① 次世代電力ネットワークに関する調査研究および研究会の開催
- ② 再エネ大量導入に関する電力系統への影響と対策技術に関する研究
- ③ 電力業界および需要家のカーボンニュートラル達成に関する調査研究
- ④ 電力システムへのデジタル技術活用に関する調査研究
- ⑤ 電力供給のレジリエンス向上に関する調査研究

（イ）再エネに関する調査研究

- ① 再エネの利活用に関する調査研究
- ② エネルギーの蓄熱等による貯蔵技術に関する

る調査研究

- ③ 低温熱や未利用熱の利活用に関する調査研究
- ④ CSP技術開発に係るシミュレーションや評価に関する調査研究
- ⑤ 再エネ利用の地域自立モデルに関する研究開発

（3）水素エネルギー関連

水素は、①多様な一次エネルギーから製造可能、②電力との相互変換が可能、③貯蔵・輸送が可能、④利用時にCO₂を排出しない、との特徴がある。これらの特徴から、水素は、将来のエネルギー社会の中で、以下の2つの役割を果たすことが期待されている。1つは、再エネやCCSの適地からCO₂フリーのエネルギーを国内に供給する「エネルギーキャリア」としての役割。もう1つは、国内の再エネ（変動性電源）を最大限活用するための「蓄エネルギー手段」としての役割である。

水素は火力発電の低炭素化やこれまで低炭素化が難しいとされていた産業分野の熱需要の低炭素化にも寄与できる可能性があり、また、カーボンリサイクルを推進するうえでも、水素は必要不可欠である。このため、水素は、2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」においても、「カーボンニュートラルに必要不可欠な二次エネルギーである」と位置付けられている。

このように、水素は将来のエネルギー社会の中で大きな役割を果たすことが期待されているが、その実現には、水素に関する個別の技術の高度化はもちろんのこと、製造から輸送・貯蔵・利用に至るまでの水素のサプライチェーン全体にわたる多くのステークホルダーや技術分野の協調と協力が必要である。このような観点から当研究所では、自主研究会として、CO₂フリー水素の普及に関する研究会を2011年から運営し、30を超える企業・団体・大学のメンバーからなる産官学の関係者に自由な意見交換の場を提供するとともに、その成果をホームページや

学会等で広く公表してきた。

令和4年度は、「CO₂フリー水素普及ゼロエミビジョン研究会（ゼロエミ水素ビジョン研）」として、この研究会活動をさらに発展させるとともに、「エネルギーキャリアとしての水素」、「蓄エネルギー手段としての水素」の両面の調査研究に取り組む。加えて、水素の製造技術や利用技術等の「水素を支える個別技術分野」の調査研究にも取り組む。

(ア) エネルギーキャリアとしての水素に関する調査研究

- ① CO₂フリー水素普及シナリオに関する調査研究および研究会の開催
- ② 種々の条件における水素需要量（世界、国内）に関する調査研究
- ③ 種々の条件における水素エネルギーキャリア（液化水素、有機ハイドライド、アンモニア、合成燃料等）の経済性・環境性に関する調査研究
- ④ 水素エネルギーキャリアを活用した発電所や事業所の低炭素化に関する調査研究

(イ) 蓄エネルギー手段としての水素に関する調査研究

- ① 水素を用いた国内再エネの有効活用に関する調査研究

(ウ) 水素を支える個別技術分野に関する調査研究

- ① 再エネからの水素製造技術に関する調査研究
- ② 液化水素の製造技術に関する調査研究
- ③ 水素の輸送技術に関する調査研究
- ④ 水素燃焼タービン発電に関する調査研究

(4) 炭素循環エネルギー関連

2050年のカーボンニュートラルを目指すわが国において、化石燃料は、再エネ供給を安定化させるために重要な一次エネルギーとして引き続き利用せざるを得ない重要なエネルギー源にある

と予想される。従って、避けることのできない温室効果ガス排出量の削減を図りつつ、その安定供給、効率的な利用が重要である。

そのため、近年、再エネのコストが大幅に低下し、CO₂は排出するが出力調整可能な火力とCO₂は排出しないが変動電源である再エネの相互の利点を活かしたわが国独自のエネルギー供給インフラの構築が重要になりつつある。

かかる観点から、短期的には、化石燃料を使用しつつCO₂排出量削減を図るエネルギー供給システムの検討を中心に、そこに求められるカーボンリサイクル技術・システムの調査、評価を実施する。特に、CO₂分離・回収、輸送、CO₂利用技術（化学品、燃料、鉱物など）の各技術についての最新開発・実証試験状況について調査検討・評価を実施する。

さらに、再エネと化石燃料を組合せたカーボンリサイクル（炭素循環）エネルギーシステムの可能性についても検討を進めていく。

これにCO₂削減の身近で、重要な省エネ技術の産業展開、廃棄物の有効活用などにも積極的に取り組んでいく。

令和4年度においては、前述観点到立ち、短期的には、常に市場トレンド（CO₂削減取組状況、技術開発状況、規制動向、国内外エネルギー事情）の動向をウォッチし、技術を中心とした情報提供による社会貢献を目指す。

中長期的には、CO₂削減対策として有望で、見込みのありそうな要素技術について、共同研究の立ち上げを目指す。当該要素技術の社会実装時のCO₂削減効果を社会に発信すると共に、研究意義の社会への重要性・認知度向上を目指す。

(ア) カーボンリサイクル技術・エネルギーシステムの検討・調査・評価

- ① CO₂分離・回収、輸送、CO₂利用技術（化学品、燃料、鉱物など）の検討
- ② CO₂分離・回収・固定海外エネルギー輸入システムの検討
- ③ 海外CO₂分離・回収・固定プロジェクトの調査

- ④ カーボンニュートラルコンビナートの検討・調査
- ⑤ 製鉄業の低炭素化検討
- ⑥ 太陽熱利用エネルギーシステムの検討

(イ) 省エネ技術・廃棄物有効利用技術の検討・調査・評価

- ① 熱の有効利用などによる産業からの CO₂ 削減対策の検討
- ② 廃棄物の有効利用による CO₂ 削減対策・効果の検討
- ③ 革新的化学反応熱利用プロセスの開発

(5) 原子力関連

原子力は、世界的に、エネルギーの安定供給および地球環境問題への対応を図る上で重要な役割を担うと評価され、福島第一原発事故後においても、多くの国々が開発利用推進の方針を維持している。当研究所としては、パリ協定への対応、更にカーボンニュートラルへ向けた世界的動きの加速、欧州のタクソノミーや電力システム改革の進展など国内外の動向を踏まえ、原子力利用に伴う様々な課題について継続的な検討を行うこととし、令和4年度も、原子力技術に関するこれまでの研究や評価の経験を生かし、エネルギーシステムにおける原子力の寄与や、国内外の安全規制、革新的原子力システムに関する研究開発に係る動向等に関する調査研究を進める。また、福島第一原発事故の教訓を踏まえ、原子力の安全性向上に資する要素技術開発を継続するとともに、福島第一原発事故に関連する国際共同研究プロジェクトに参画する。

一方、エネルギーを巡る環境の変化や電力自由化による競争の進展等により、廃止措置を選択する原子力発電所が増加しており、廃止措置の重要性は今後一層高まると予想される。このため、有識者により構成される検討委員会において第三者的な立場から、円滑な廃止措置の実施のための課題解決に向け、廃止措置に係る工程や技術、制度に関する調査に基づき課題を把握するとともに、対応策をとりまとめた技術レ

ポート（提言書）を公表・公開する。また、廃止措置に係る標準整備に向けた調査研究を引き続き進めるとともに、廃止措置に向けた準備作業を効率的・効果的に実施するための調査研究や廃止措置に必要なとなる人材の育成事業を行う。

(ア) 福島第一原発事故関連および原子力安全の調査研究

- ① 原子力の安全性向上に資する技術開発の調査・検討
- ② 東京電力福島第一原発事故解析および汚染機構解明による廃炉作業促進に貢献する研究

(イ) 原子力分野全般に係る調査研究

- ① 国内外の原子力開発利用動向に関する調査研究
- ② 国内外の原子力安全規制動向に関する調査研究
- ③ エネルギーシステムにおける原子力の役割に関する調査研究
- ④ 原子力の社会受容性に関する調査研究

(ウ) 原子力プラント技術に係る調査研究

- ① 新型軽水炉に係る技術課題の調査研究
- ② 革新的原子力システム開発の国際動向に関する調査研究

(エ) 原子炉廃止措置等に関する調査研究

- ① 廃止措置に係る工程、技術、制度に関する調査および課題への対応策の検討
- ② 廃止措置を担う人材育成のための教材開発および研修システムの構築
- ③ 原子力施設の廃止措置へのデジタルトランスフォーメーション適用に関する調査
- ④ 廃止措置に係る放射能インベントリ評価用コードおよび基盤データ整備に関する調査研究

(オ) 放射性廃棄物の処理・処分にに関する調査 検討

- ① 原子力発電所廃止措置時に発生する極低レベル廃棄物処分の在り方に関する調査

6. 最新技術情報の発信、賛助会員サービスの向上

賛助会員をはじめとするステークホルダーや関係機関に向け、当研究所の調査研究事業で得られた成果のうち、技術情報として有用度の高いものについて情報提供を行う。これらの調査研究に係る活動内容や成果は、寄稿・投稿、講演会、学会発表、ホームページへの掲載等により公表するとともに、技術レポートの公表も実施し、新たなプロジェクトの提案に供することとする。

当研究所では、下記の手法により情報発信を行ってきており、2018年度に新たな検討体制を設け、より効果的な情報発信の方法等について検討を継続しつつこれらの情報発信を進めている。2020年6月から月例研究会は新型コロナウイルス感染症対策としてオンライン開催とした。2021年度は賛助会員会議、シンポジウムも個別にオンライン開催とし、内容も従来から大幅に変更した。オンライン開催ではあるが、案内送付先の拡充等も図っており、月例研究会、賛助会員会議、シンポジウム参加者は大きく増加している。

- ① 定期刊行物（季報エネルギー総合工学）の刊行
 - 2021年4月号より記事毎のダウンロードも可能にし、読みやすさ、閲覧自由度向上を継続
- ② 月例研究会の開催
 - 2020年6月より、新型コロナウイルス感染症対策でオンラインでの開催としている。オンライン開催は遠隔地からの参加も可能で参加者増に寄与している。今後は新型コロナウイルス感染症の状況をみつつ、オンラインでの開催、会場での開催およびそれらのハイブリッドを候補

として賛助会員等の意見を聞きつつ、柔軟に開催していく。

- ③ エネルギー技術情報プラットフォームの整備および運用
 - セキュリティの向上およびコンテンツの充実に加えて、使いやすさ向上のためトップページレイアウトの変更を実施予定である。
- ④ メールマガジン（IAE Newsletter）の発行
 - 2020年1月号より、研究員コラムの新設、月例研究会や個別研究会の概要掲載など、コンテンツを充実しており、今後も継続していく。

7. ISO センターの事業

当研究所のISOセンターは、2011年6月、ISO50001（エネルギーマネジメントシステム）の発行と同時に発足して以来、その普及・促進のための活動を行ってきており、令和4年度も引き続き個別企業からの依頼に基づき、下記事業を行う。

- ① 入門～実践研修、内部監査員研修の開催
- ② ISO50001の構築・運用、認証取得、継続的改善に資するコンサルティングの実施（2021年3月に発行されたISO50009の普及にも取り組む）

8. その他

(1) エネルギーに関するアンケート調査

エネルギーに係る一般公衆の意識調査は、東日本大震災以前より実施してきており、引き続き同様のアンケート調査を実施し、その経年的な意識変化等の動向を分析する。

(2) エネルギー技術に関する国際標準化の調査研究

ISOやIECにおける、下記分野での国際標準化に係る事業を行う。

- ① エネルギーマネジメントおよび省エネルギーの評価・検証関連、並びに日本提案の

規格案の推進

- ② CCS の CO₂ 削減量定量化・検証, およ
び横断的事項関連

研究所のうごき

(令和4年1月1日～3月31日)

◇ 第29回理事会

(Web開催および(一財)エネルギー総合工学研究所)

日 時：3月15日(火)

議 題：

- 第1号議案 令和4年度事業計画および収支予算について
- 第2号議案 評議員会の開催について
- 第3号議案 役員等賠償責任保険契約について
- 報告事項 再発防止策の実施状況について
業務執行の状況について

◇ 第16回評議員会(電磁的記録による決議)

決議があったものとみなされた日：3月29日(火)

議 題：

- 第1号議案 役員の一部改選について

◇ 月例研究会

第415回月例研究会(Web開催)

日 時：1月14日(金)14:00～16:30

テーマ：

- 1. ENEOSの水素社会実現への取組み
(ENEOS(株)水素事業推進部 副部長 前田 征児 氏)
- 2. 関西電力の水素社会実現に向けた取組み
(関西電力(株)水素事業戦略室 戦略グループ 部長 水田 真夫 氏)

第416回月例研究会(Web開催)

日 時：2月18日(金)14:00～15:00

テーマ：

- 1. COVID-19対策に伴う社会活動の変化とそのエネルギー需要への影響
(一財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 主任研究員 井上 智弘)
- 2. ナッジによるエネルギー消費行動変容と脱炭素化方策
(株)住環境計画研究所 副主席研究員 平山 翔 氏) -後日、申込者へ動画配信-

第417回月例研究会(Web開催)

日 時：3月11日(金)14:00～15:00

テーマ：

- 1. 日本原子力研究開発機構のバックエンド対策に関するIAEA ARTEMISレビューの結果について
(国研)日本原子力研究開発機構 バックエンド統括本部 バックエンド推進部長 目黒 義弘氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：森山 亮

テーマ：再エネ主力電源化の政府目標と導入に向けた課題

発表先：2021年度 地球環境技術推進懇談会 第4回 循環代謝型社会システム研究会
(一財)大阪科学技術センター(OSTEC))

発表時期：1月14日

発表者：橋崎 克雄

テーマ：2050年カーボンニュートラルに向けて～カーボンリサイクル技術の現状と今後の期待～

講演先：京都府中小企業技術センター+ZOOM 配信

日 時：1月31日

発表者：堀川 義彦

テーマ：原子力発電所から発生する大型機器の処理について～原子力発電所廃止措置調査検討委員会の取り組み～

講演先：日本原子力産業協会 輸送・貯蔵専門調査会 第112回定例会合

日 時：2月8日

発表者：酒井 奨

テーマ：CO₂分離回収・利用・貯留(CCUS)の国内外の最新動向から現状の課題と展望

講演先：(株)情報機構主催「カーボンニュートラル・二酸化炭素関連セミナー」(Web開催)

日 時：2月14日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：火力発電の脱炭素化に向けたカーボンリサイクル活用の検討

講演先：火力原子力発電技術協会東北支部講演会

日 時：2月24日

講演者：岡崎 徹

テーマ：脱炭素化に有効な蓄熱発電と、電力市場
JEPXでのビジネスモデル

講演先：新潟大学・環太平洋ソーラー燃料システム
研究センター「再エネ・熱エネ研究会」

日 時：3月16日

発表者：川村 太郎

テーマ：太陽光・風力の導入状況および将来予測

講演先：新潟大学・環太平洋ソーラー燃料システム
研究センター「再エネ・熱エネ研究会」

日 時：3月16日

発表者：都筑 和泰

テーマ：SMR開発の現状とこれから

講演先：北陸原子力懇談会

日 時：3月17日

発表者：小野崎 正樹

テーマ：カーボンニュートラルに向けてのメタ
ノールエコノミー

講演先：(公社)化学工学会春季大会

日 時：3月18日

発表者：酒井 奨

テーマ：カーボンリサイクルエネルギーシステム
の実現に向けて～国内外の最新動向から
現状の課題と展望～

講演先：第14回 けいはんな学研都市先端シーズ
フォーラム

日 時：3月24日

[学会発表]

発表者：手塚 健一、木野 千晶

テーマ：(1) 福島第一原子力発電所での放射性核
種の短長期挙動の評価～福島第一原子力

発電所2号機における長期間FP移行挙
動解析～

(2) CrコーティングZr合金製被覆管を
用いたATFのSAMPSONによる解析手
法の開発

(3) SA時のFP挙動モデルの評価～SA
コードにおけるエアロゾル生成・成長モ
デルの検討～

発表先：日本原子力学会2022年春の年会

日 時：3月16日～18日

[寄稿・投稿]

寄稿者：柴田 善朗

テーマ：水素技術の進展とコスト

発表先：『二酸化炭素利活用技術～CO₂削減に向
けた最新研究～』, (株)情報機構

発行日：1月21日

投寄者：坂田 興

テーマ：水素エネルギーの動向と展望

投稿先：月刊『JETI』(旧『石油と石油化学』)
1月号

投寄者：坂田 興

テーマ：脱炭素社会実現に向けた低炭素水素エネ
ルギーの大規模導入の貢献可能性

投稿先：(公社)空気調和・衛生工学会『空気調和
衛生工学』2月号(第96巻第2号)

寄稿者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクル技術に関する世界の
動向

寄稿先：日本塗装技術協会『塗装工学』3月号
(第57巻第3号)

投稿者：水田 美能

テーマ：研究者・実務者のためのエネルギー・資
源講座＜連載：カーボンリサイクル②＞
CO₂から燃料の製造

投稿先：エネルギー・資源学会『エネルギー・資源』
(Vol.43 No.2)

発行月：3月

第 44 卷 通 卷 目 次

VOL. 44, No. 1 (2021.4)

【寄稿】

- カーボンニュートラルに向けた世界の動きと日本の対応
～サーキュラー・エコノミー構築で「資源大国・日本」へ～
(公財)東京財団政策研究所 研究員 平沼 光 …………… 1

【寄稿】

- OECD/NEA の最新動向とポストコロナ時代を見据えた取り組み
経済協力開発機構／原子力機関
原子力安全技術・規制課原子力安全専門官 熊谷 裕司 …………… 14

【調査研究報告】

- 廃止措置で発生する低レベル放射性物質／放射性廃棄物管理の
最適化～ OECD/NEA の取り組み～
原子力技術センター 参事 田中 健一 …………… 28

【事業計画】

- 令和3年度 事業計画 (一財)エネルギー総合工学研究所 …………… 36

【研究所のうごき】 …………… 46

【第 43 卷通巻目次】 ……………48

【編集後記】 …………… 52

VOL. 44, No. 2 (2021.7)

【座談会】

自動車用燃料の低炭素化に関する取り組み

～運輸部門のカーボンニュートラル化に向けたバイオ燃料の寄与～

早稲田大学 名誉教授	大聖 泰弘
東京大学 名誉教授	横山 伸也
アメリカ穀物協会 日本代表	浜本 哲郎
(国研) 産業技術総合研究所	
エネルギー・環境領域長補佐	坂西 欣也
日本環境エネルギー開発 (株) 代表取締役社長	澤 一誠
司会：(一財) エネルギー総合工学研究所	
プロジェクト試験研究部 部長 副主席研究員	森山 亮 …………… 1

【調査研究報告】

非効率石炭火力のフェードアウトに関する考察

～動向と燃料転換技術オプション等について～

プロジェクト試験研究部 参事	濱田 利幸
主任研究員	徳永 貴道
主任研究員	橋上 聖 …………… 21

【調査研究報告】

原子力発電所から発生する大型機器の処理について

原子力技術センター 部長	堀川 義彦 …………… 32
--------------	----------------

【調査研究報告】

英国の脱炭素化政策と原子力研究開発の最近の動向について

原子力技術センター 参事	藤井 貞夫 …………… 42
--------------	----------------

【事業報告】

令和2年度 事業報告の概要	(一財) エネルギー総合工学研究所 …………… 53
---------------	----------------------------

【研究所のうごき】	…………… 64
-----------	----------

【編集後記】	…………… 66
--------	----------

VOL. 44, No. 3 (2021.10)

【巻頭言】

カーボンニュートラルに関する出版にあたって

(一財) エネルギー総合工学研究所 研究理事 黒沢 厚志 …………… 1

【寄稿】

バイデン新政権の誕生, 脱炭酸ガスへの動きと

米国のシェール・ガス革命, シェール・オイル革命の最新動向

和光大学 経済経営学部 教授 岩間 剛一 …………… 3

【調査研究報告】

COVID-19 対策に伴う社会経済活動の変化と

そのエネルギー需要への影響

プロジェクト試験研究部 主任研究員 井上 智弘 …………… 26

【調査研究報告】

2050 年カーボンニュートラルを目指す欧州連合の

エネルギー戦略と CCUS 取り組み状況

プロジェクト試験研究部 部長 橋崎 克雄 …………… 37

【調査研究報告】

多様性を増す蓄エネルギー技術～再エネ大量導入時代の選択肢～

プロジェクト試験研究部 副部長 主管研究員 川村 太郎

プロジェクト試験研究部 主管研究員 岡崎 徹

プロジェクト試験研究部 主任研究員 徳永 貴道

プロジェクト試験研究部 副参事 渡邊 建次 …………… 47

【研究所のうごき】 …………… 57

【編集後記】 …………… 60

特集 第34回エネルギー総合工学シンポジウム
ー 総合工学的視点からの2050年カーボンニュートラル ー
 令和3年12月8日(水) 13:30～16:00
 Web開催

【開会挨拶】	(一財)エネルギー総合工学研究所 理事長	寺井 隆幸 ……	1
【講演1】	カーボンニュートラルの背景と国際動向 プロジェクト試験研究部 地球環境グループ 研究理事	黒沢 厚志 ……	3
【講演2】	再生可能エネルギーのポテンシャル プロジェクト試験研究部 新エネルギーグループ 部長	森山 亮 ……	7
【講演3】	原子力の役割 原子力技術センター 原子力チーム 部長	都筑 和泰 ……	13
【講演4】	カーボンリサイクル プロジェクト試験研究部 炭素循環エネルギーグループ 部長	橋崎 克雄 ……	18
【講演5】	変わる電力システム プロジェクト試験研究部 電力システムグループ 部長	炭谷 一郎 ……	24
【講演6】	水素エネルギーへの期待 プロジェクト試験研究部 水素グループ 副部長	石本 祐樹 ……	29
【講演7】	ネガティブエミッションの役割 プロジェクト試験研究部 地球環境グループ 副部長	加藤 悦史 ……	36
【質疑応答】	テーマ：総合工学的視点からの2050年カーボンニュートラル モデレーター：飯田 重樹 理事 プロジェクト試験研究部 部長 回答者：黒沢 厚志 森山 亮 都筑 和泰 橋崎 克雄 炭谷 一郎 石本 祐樹 加藤 悦史	……………	42
【閉会挨拶】	(一財)エネルギー総合工学研究所 専務理事	中村幸一郎 …	49

【調査研究報告】	東京電力福島第一原子力発電所事故進展シナリオの推定 原子力技術センター 主任研究員	木野 千晶 ……	50
【研究所のうごき】	……………		61
【編集後記】	……………		64

編集後記

数年前には多くの人が考えなかったロシアの「ウクライナ侵攻」により、原油価格高騰やロシアからの石油・石炭・ガス供給遮断など、エネルギー安定供給へのリスクが顕在化した。また、ロシアへの依存度が高い鉱物資源が経済に与える影響も露呈した。これらの変化は一時的との見方も多い一方で、世界的に特定の国・地域に頼らないエネルギー源および鉱物資源確保へ向けた動きも急である。

最初の記事では、水素を供給する側から湾岸エリアや地域といった具体的な利用先を含めて、合理性を持ちつつ全方位的な取り組みが紹介された。2番目の記事では、電力会社の電力供給実績を踏まえた水素調達先から国内供給、需要側までの幅広い分野での検討例を示した。3番目の記事では、2050年以降のカーボンニュートラル達成時の水素利用の時系列、分野ごとの詳細な評価結果を示した。評価結果は、前提条件等によって異なり注意が必要であるが日本では水素が重要な役割を果たすものの、その一定量は輸入に頼るなど示唆が多い。「第6次エネルギー基本計画」に記載された「あらゆる可能性を排除せず、使える技術は全て使

うとの発想」での取り組みがカーボンニュートラル実現に重要な水素分野でも読み取れて興味深い。

4番目の記事は一転して、1000年、さらには100万年間の減衰や影響をも評価する原子力における高レベル廃棄物処分についてである。原子力も世界的には一部の国を除いてカーボンニュートラル実現に向けて重要視されており、世界的には革新炉や小型炉、さらには核融合開発も活性化している。

カーボンニュートラル実現には今後10年から30年が勝負という意見が多い。一方で、原子力分野では、数十年先を超え、1000年、100万年先までの評価もある。「あらゆる可能性を排除せず、使える技術は全て使うとの発想」で、1000年、100万年先のことまで評価している原子力が、「使える技術」の1つとして、今後の地球環境維持と人類の豊かで持続可能な発展に貢献できるよう、当研究所も様々な取り組みを進めている。

当研究所の活動や本号の記事が皆様の今後の事業活動に少しでもご参考となれば幸いである。

編集責任者 茶木雅夫

季報 エネルギー総合工学 第45巻第1号

令和4年4月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋1-14-2

新橋SYビル(6F)

電話 (03) 3508-8891

FAX (03) 3501-1735

<https://www.iae.or.jp/>

(印刷) 株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。