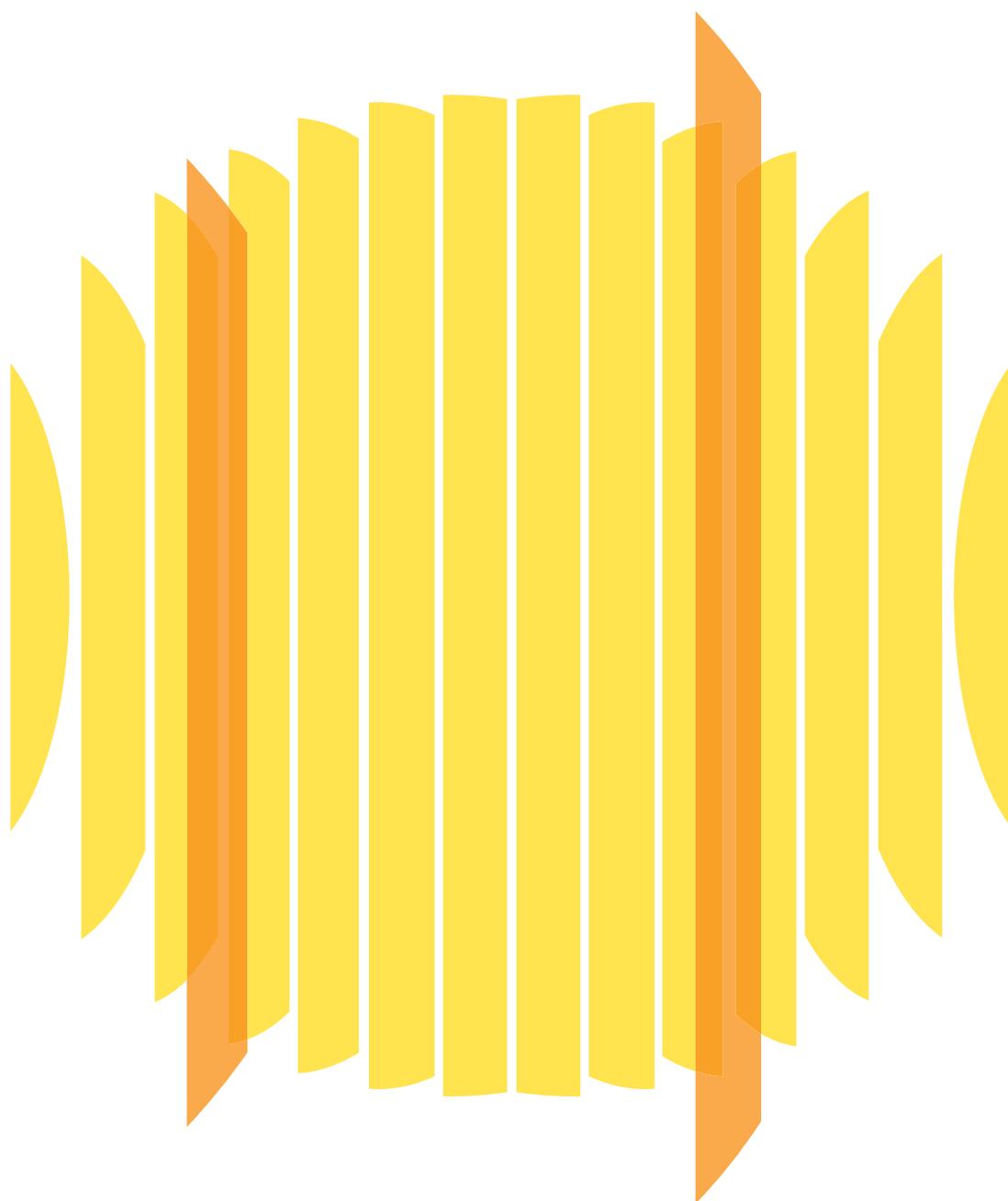


季報 エネルギー総合工学

Vol. 45 No. 3 2022. 10



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】

日本原子力研究開発機構における
福島第一原発の廃炉に向けた取り組みの概要

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点 所長

宮本 泰明 …………… 1

【寄稿】

脱炭素への動きとロシアによるウクライナ侵攻
～シェール・ガス革命, シェール・オイル革命の今後～

和光大学 経済経営学部 教授

岩間 剛一 ……………15

【寄稿】

次世代太陽熱発電・蓄熱発電のための
高温潜熱・化学蓄熱材料

新潟大学 教育研究院 自然科学系
生産デザイン工学系列 准教授

郷右近 展之 ……………34

【調査研究報告】

送電業界の課題とその解決に向けた取り組み
～電力供給の安定性と安全性確保のために～

プロジェクト試験研究部 主任研究員

谷地 浩明 ……………47

【研究所のうごき】 …………… 57

【編集後記】 …………… 60

[寄稿]

日本原子力研究開発機構における福島第一原発の廃炉に向けた取り組みの概要

宮本 泰明

（国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島研究開発拠点 所長



1. 概要

(1) はじめに

日本原子力研究開発機構（JAEA）は、2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力ホールディングス（東電HD）福島第一原子力発電所（1F）の事故の発生直後から環境モニタリング・除染活動を行うとともに、福島支援本部（同年、福島技術本部に組織再編）を設立し、また、2013年に発足した国際廃炉研究開発機構（IRID）にも参画する等、1F廃止措置等に向けた研究開発を実施してきた。

図1にJAEAの福島での環境回復・1F廃止措置等に向けた取り組みの沿革を示す。

2014年に組織再編により発足した福島研究開発部門は、現在では、廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）、大熊分析・研究センター（CLADS）、大熊分析・研究センター、楢葉遠隔技術開発センター（NARREC）、福島事務所といわき事務所で構成し、政府の廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議において決定される「東京電力(株)福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」（中長期ロードマップ、最新版：2019年12月27日）に基づく1F廃止措置等に向けた研究開発、福島復興再生基本方針に基づく環境回復に係る研究開発、福島県浜通り地区での研究開発基盤の整備を進めている。



図1 JAEAの福島での環境回復・1F廃止措置等に向けた取り組みの沿革

(2) JAEAにおける福島復興に向けた重点活動

JAEAは、わが国で唯一の原子力に関する総合的な研究開発機関として、福島の実地環境回復・1F廃止措置等に向けた研究開発とこれを担う持続的な人材育成の基盤整備に総力を挙げて取り組んでいる。

図2に福島研究開発部門の福島復興に向けた重点的な取り組みの概要を示す。

福島復興に向けて、地元の関係機関とのコミュニケーション、地元企業との連携、人材育成に取り組むとともに、1F廃止措置等に関する研究開発、福島の実地環境回復に関する研究開発、研究開発基盤の整備を3つの柱として実施している。

1F廃止措置等に関する研究開発としては、中長期ロードマップに基づいて研究開発を進め、現場ニーズを踏まえて、燃料デブリの取り扱い、放射性廃棄物の処理処分、事故進展シナリオ解析、遠隔操作技術などの基礎基盤研究を実施している。

福島の実地環境回復に関する研究開発としては、福島復興再生基本方針に基づき、福島県環境創造センター（三春町、南相馬市）において、福島県及び環境省国立環境研究所と密接に連携して環境動態等に係る研究、環境モニタリング・マッピングにかかる技術開発を実施している。

研究開発基盤の整備としては、福島県浜通り地区に研究開発施設を整備・運用するとともに、国内外の大学、研究機関、産業界などとのネットワークを形成し、人材交流を進めている。

また、福島県内に整備した研究センターのみではなく、放射性物質を取り扱うことが可能な施設を持ち、多くの研究者が駐在し、これまでの原子力に関する研究実績が蓄積されている茨城地区の原子力科学研究所（東海村）、核燃料サイクル工学研究所（東海村）、大洗研究所（大洗町）と密接に連携を行っている。さらに、関連する研究開発を実施し、特色のある施設・設備を保有する青森研究開発センター（青森県むつ市）、物質科学研究センター（SPring-8、兵庫県佐用町）、敦賀廃止措置実証部門（福井県敦賀市）等とも連携している。特に、原子力科学研究所、核燃料サイクル工学研究所、大洗研究所、敦賀廃止措置実証部門との連携においては、双方の若手研究者・技術者の交流を通して人材育成を進めている。

(3) 情報発信・人材育成

地域の関係機関との連携事業・イベント、報道発表などを通じて情報発信を積極的に行うことにより、1F廃止措置等、環境回復に係る取り組みの理解促進を図っている。地元住民などを対象とした施設見学会、地元イベントでの事業説明ブース出展、地元小学校を対象とした科学教室等を継続的に実施することにより、参加者の理解促進に資することができた。2015年度から2021年度までの7年間で76件の研究開発成果などの報道発表を行っており、研究成果の公表、報道発表、報道機関との勉強会を通じて一層広い層へ情報発信・提供してきた。

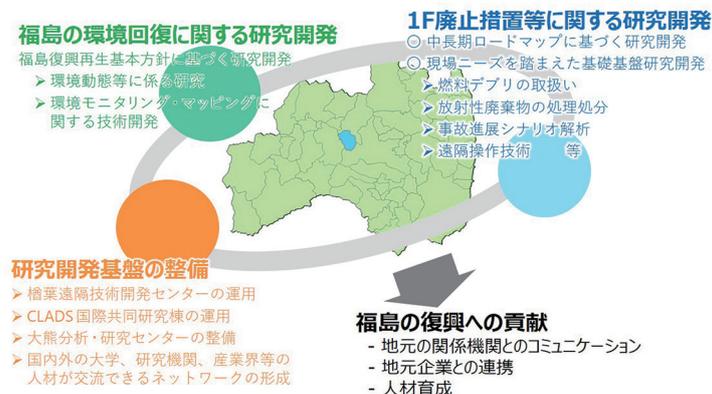


図2 福島研究開発部門の福島復興に向けた重点的な取り組みの概要

教育機関などとの連携事業を継続的に進め、地元高校・大学、高専などを対象とした出前講座、講演会及びロボット操作実習プログラム等のイベントを継続的に実施している。また、全国の高専を対象として廃炉創造ロボコンを継続的に開催し、将来を担う人材を育成している。

(4) 研究開発ネットワークの構築

国内外の英知を結集し、1F 廃止措置等に向けた中長期的な課題の研究開発を実施している。また、国内外の研究機関や大学、産業界などの人材が交流するネットワークを形成することで、産学官による研究開発と人材育成を一体的に進めている。

1F 廃止措置等に係る基盤研究を扱う国際ワークショップ（福島リサーチカンファレンス（FRC））を継続的に開催し、国内外の英知を結集するとともに、人材育成ネットワークを整備、1F 廃止措置等に係る技術に関する幅広い専門分野の人材の育成を図っている。

図3に示すように、CLADSを中心とした産学官連携の一環として、文部科学省の廃炉研究棟推進事業費補助金により「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（英知事業）を実施し、課題解決型廃炉研究プログラム、共通基盤型原子力研究プログラム、国際協力型廃炉研究プログラム、研究人材育成型廃炉研究プログラムを展開している。2018年度から2021年度までの4年間で国内外のアカデミア・研究機関・企業に対し、60

研究代表、再委託含め延べ185研究機関との連携を達成している。

(5) 研究開発成果の展開

1F 廃止措置等に関する研究開発・実証、成果の現場実装において、地元企業の参加や技術移転の促進を通じ、浜通り地域の技術力向上、地域活性化・雇用創出に貢献している。

地元産業界とのマッチング促進として、福島県との協力を通じ、地元企業・大学と現場とのマッチングの場を提供している。いわき商工会議所が開催する「いわきものづくり塾廃炉コース」において1F 廃止措置等およびロボット産業の推進を担う人材の育成並びに1F 廃止措置等に関する技術開発状況を広く伝えるため施設見学と講義を実施している。また、福島イノベーション・コースト構想推進機構、相双復興推進機構とも連携を図り、より多くの地元企業との連携を模索している

研究開発成果の民間企業への移転、研究開発・実証、現場実装における地元企業の参加を促進している。代表的な例として、汚染水モニター、プラスチックシンチレーションファイバーを用いた放射線検出器、広範囲の放射性物質分布を上空から測定・可視化するシステムの開発・実用化、海洋モニタリング及びサンプリングを自動で行う海洋ドローンの開発・実用化、1F 廃止措置等に活用するレーザー遠隔性計測装置（LIBS）などがある。

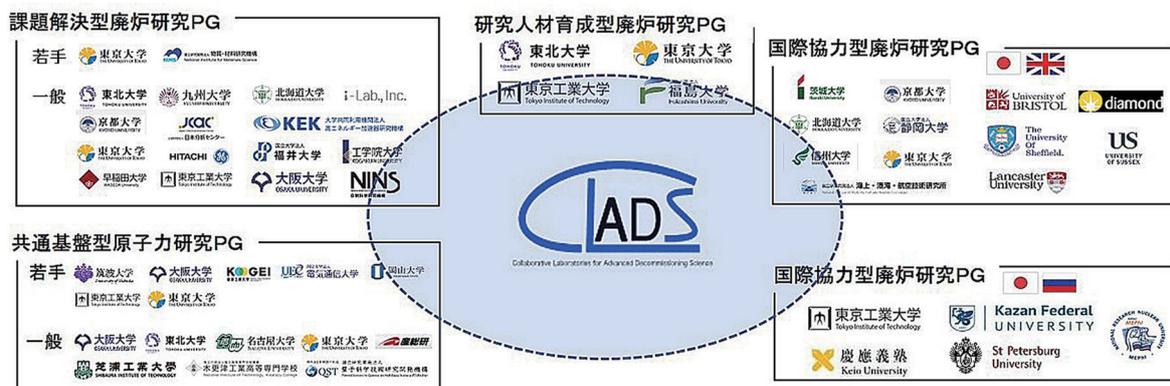


図3 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の状況

2. 1F 廃止措置等研究開発に向けた取り組み

(1) 1F 廃止措置等にかかる研究開発体制

1F 廃止措置等は、中長期ロードマップに沿って実施される。

図4に中長期ロードマップに基づいた1F 廃止措置等のスケジュールを示す。

JAEAにおいても、1F 廃止措置等に向けた中長期ロードマップや関係機関の方針を踏まえて、炉内状況把握、デブリ取り出し・性状把握、遠隔技術開発、放射性廃棄物性状把握・処理・処分などの1F 廃止措置等に向けた研究開発を実施している。

図5に1F 廃止措置等に係る研究開発実施体制の概略を示す⁽¹⁾。

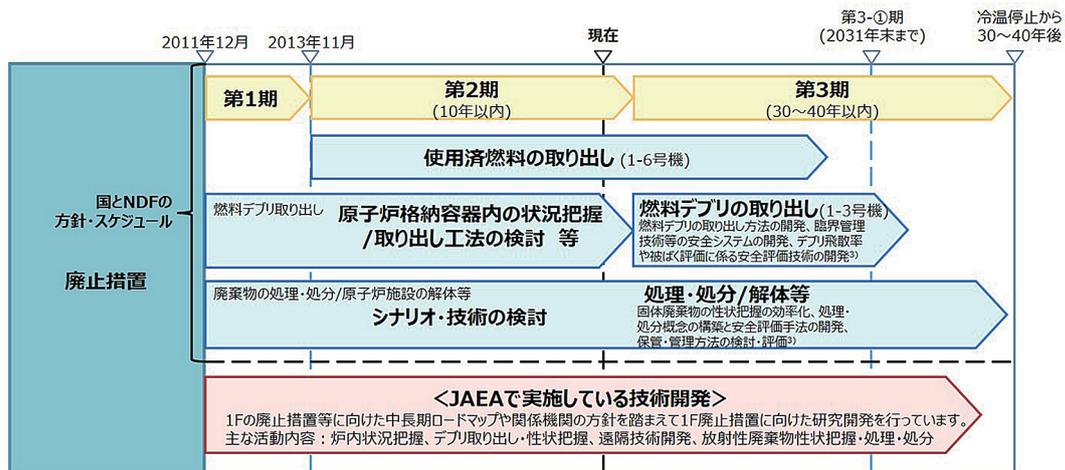
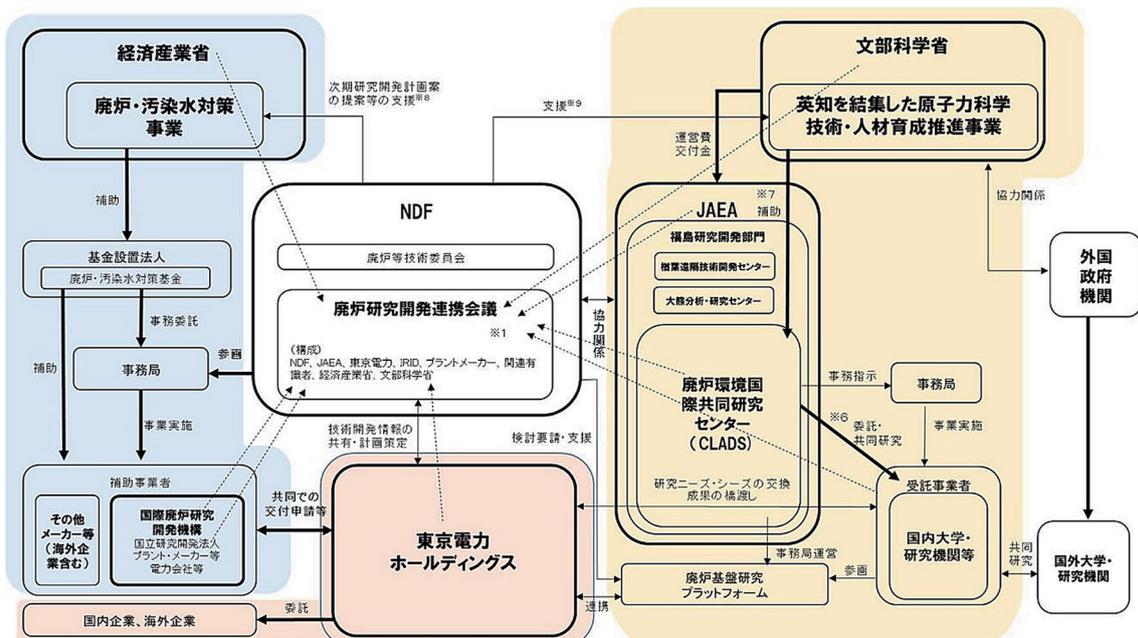


図4 中長期ロードマップに基づいた1F 廃止措置等のスケジュール



※1 廃炉研究開発連携会議は、廃炉・汚染水対策チーム会合決定によりNDFに設置。
 ※2 太い実線矢印は研究費・運営費等の支出(施設費除く)、細い実線矢印は協力関係等、点線矢印は廃炉研究開発連携会議への参加を示す。
 ※3 JAEA等、一部機関は複数個所に存在している。
 ※4 各機関はそれぞれMOU等に基づき外国機関との協力関係を有する。
 ※5 電力中央研究所等が独自に実施する研究開発は本図では省略した。
 ※6 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業のうち、平成29年度までの採択分は文部科学省から受託事業者への委託であるが、本図では省略した。
 ※7 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の補助金は、JAEAに交付されるが、わかりやすいためCLADSに交付されるものと表現した。
 ※8 廃炉・汚染水対策補助金事業は、中長期ロードマップや戦略プランにおける方針、研究開発の進捗状況を踏まえ、NDFがその次期研究開発計画の案を策定し、経済産業省が確定する。
 ※9 NDFは、英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業のステアリングコミティに構成員として参加する。

図5 1F 廃止措置等に係る研究開発実施体制の概略

東電HDは、現場適用に直結した技術開発に取り組み、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）は、研究開発中長期計画や次期研究開発計画の企画検討、推進及び英知事業の支援を実施し東電HDを支援している。また、NDFは、JAEAもメンバーとして参画する「廃炉研究開発連携会議」を設置し、研究開発のニーズとシーズの情報共有、廃炉作業のニーズを踏まえた研究開発の調整、研究開発・人材育成に係る協力促進などの諸課題について検討している。

JAEAは、運営費交付金による研究開発を実施する他、IRIDの組合員として経済産業省の廃炉・汚染水対策事業費補助金による研究開発を実施し東電HDを支援している。また、英知事業の中で国内外の大学、研究機関などと密接に連携して、東電HDとの研究ニーズ・シーズの交換、成果の橋渡しを実施している。

(2) JAEAにおける1F廃止措置等研究の総合的考え方

東電HDなどとの連携体制を強化し、研究成果を1F廃炉現場に適用することで1F廃止措置等を加速すると共に、JAEA内廃止措置等への適用、一般産業界も含めた社会実装を図る。基礎・基盤研究の成果を製品化し事業化するためには「死の谷」といわれる障壁をクリアする必要がある。英知事業などによる研究開発

成果を事業化につなげるために、研究開発段階から1F廃炉現場でのニーズとJAEAが持つシーズをマッチングし、成果の橋渡しを促進しなければならないと考えている。

JAEAに、燃料デブリ取出し、汚染水対策、固体廃棄物処理・処分の分野で成果を期待されている。一例として、燃料デブリ取出し分野では、燃料デブリの性状把握・推定、取り出し後の燃料デブリの分析・評価、燃料デブリの取扱いの安全性評価が挙げられる。汚染水対策分野では、汚染水二次処理廃棄物の性状把握、処理・処分方法の検討、ALPS処理水の濃度測定（第三者分析）が挙げられる。また、固体廃棄物処理・処分分野では、ガレキ等固体廃棄物の性状評価方法の検討、大熊分析・研究施設第1棟での分析、処分の安全評価に係る検討が挙げられる。

(3) 基礎・基盤研究の全体マップの整備

JAEAでは、アカデミアとの連携を強化し、1F廃止措置等に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することを機に廃炉全体を俯瞰する「基礎・基盤研究の全体マップ」(<https://clads.jaea.go.jp/jp/rd/map/map.html>)を整備した。

図6に基礎・基盤研究の全体マップの全体構成を、図7に基礎・基盤研究の全体マップ

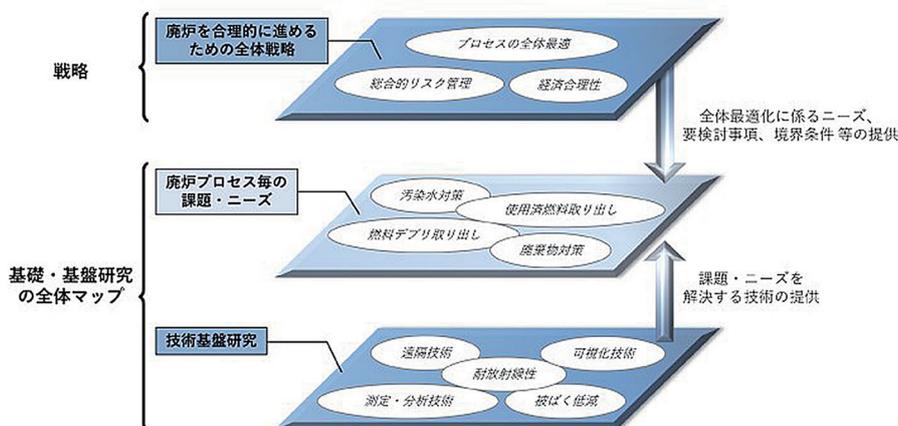


図6 基礎・基盤研究の全体マップの全体構成

福島第一原子力発電所廃炉のための
『基礎・基盤研究の全体マップ』

→ 大まかな廃炉作業の流れ

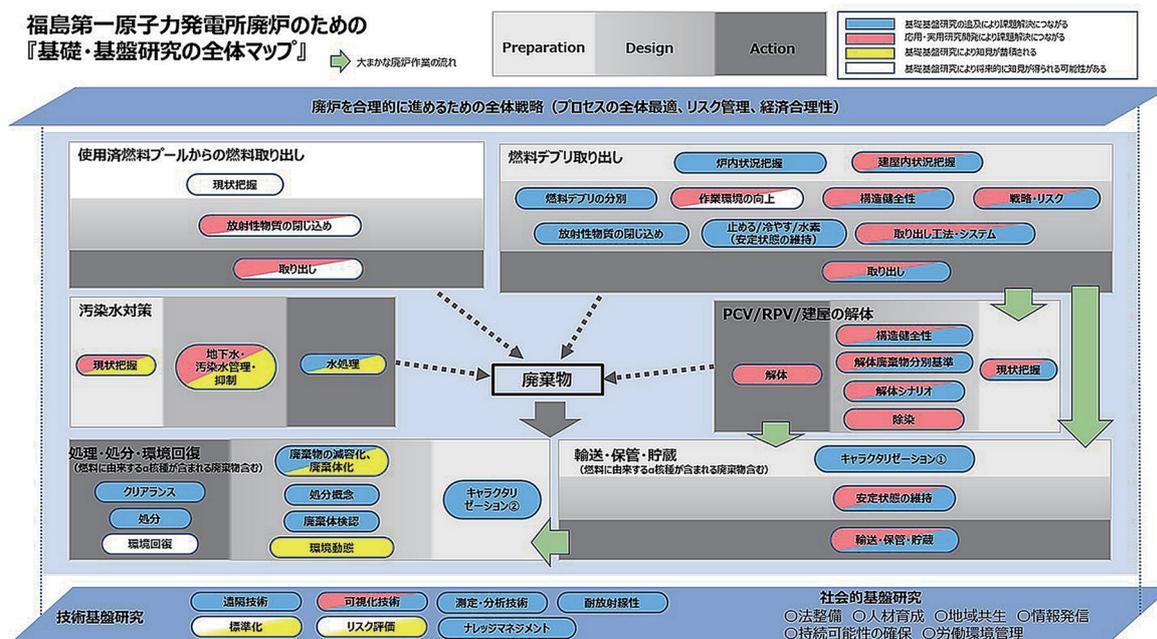


図7 基礎・基盤研究の全体マップの「廃炉を合理的に進めるための全体戦略」ページのイメージ

の「廃炉を合理的に進めるための全体戦略」ページのイメージを示す。

基礎・基盤研究の全体マップは、「廃炉を合理的に進めるための全体戦略」「廃炉プロセス毎の課題・ニーズ」「技術基盤研究」の三層構造で構成したものを二次元上にマッピングしたものである。また、汚染水対策から処理・処分・環境回復までの廃炉全体を俯瞰し、それぞれの廃炉プロセスの中にあるニーズの相関を示すことで、基礎・基盤研究の解決すべき課題を整理している。

「基礎・基盤研究の全体マップ(詳細版)」は、そのニーズを選択することで「一件一葉」の詳細情報を得ることができる。

1F 廃止措置等プロジェクトを合理的に進めるためには、現在だけでなく将来も見据えて必要と考えられる重要な研究課題を、実施時期と実施方法とあわせて同定する必要がある。そのため、プロジェクトのニーズ、研究のシーズのマッチングを検討し、プロジェクト全体を対象として手つかずの重要な研究や埋もれている(気づかれていない)研究課題を掘り起こし、重要な研究課題として提示している。

基礎・基盤研究の全体マップは、1F 廃止措置等の進捗により、そのニーズやニーズの重要度は変化するため継続的に更新を実施する。

3. JAEA の 1F 廃止措置等に向けた研究開発の成果

(1) 1F 廃止措置等研究開発に向けた基盤の整備

① NARREC 研究管理棟、試験棟

図8にNARREC施設の概略を示す。

NARREC 研究管理棟、試験棟は、2016年4月に運用を開始した。

NARREC は研究管理棟、試験棟から構成し、VR システム、要素試験エリア及び実規模試験エリアを整備し、供用施設として 1F 廃止措置等を推進するための技術開発を支援する場の提供を行っている。1F の作業環境を模擬したモックアップ設備等および遠隔操作機器・装置(ロボットなど)の実証試験設備を有しており、研究管理棟及び試験棟要素試験エリアは 1F 廃止措置等に限らず企業などによる利用が可能である。

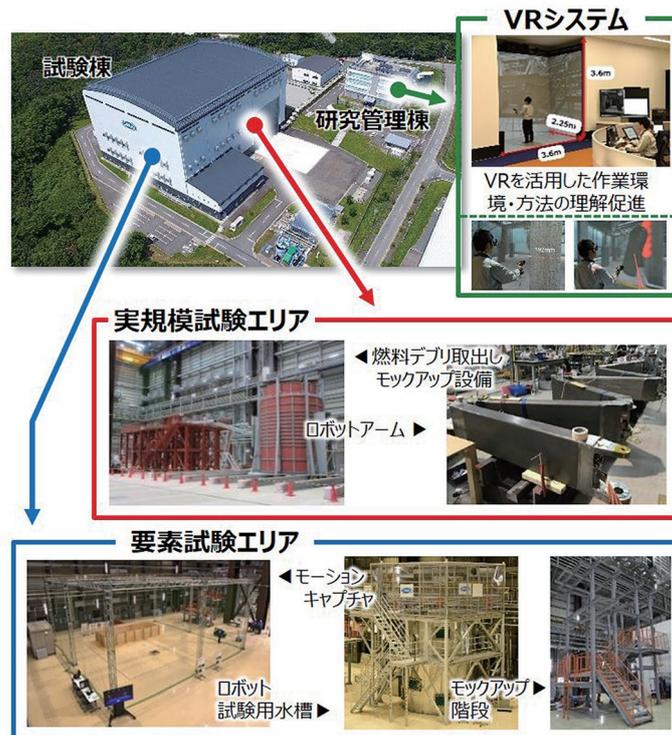


図8 NARREC施設の概略

②大熊分析・研究センター

1Fの放射性廃棄物や燃料デブリの性状などを把握するための分析や研究を行う放射性物質分析・研究施設を、1F隣接地に整備している。図9に大熊分析・研究センター放射性物質分析・研究施設の完成イメージを示す。

放射性物質分析・研究施設は、施設管理棟、第1棟、第2棟の3施設で構成される。施設管理棟は、居室並びに分析のモックアップなどを行うワークショップを有する施設であり、2018年3月に運用開始した。第1棟は、ガレキ類、伐採木、焼却灰、汚染水処理に伴い発生する二次廃棄物などの低中線量試料の分析などを行

う施設であり、2022年6月に運用開始した。第2棟は、燃料デブリ等の分析などを行う施設であり、現在、整備中である。原子力機構の各拠点および東電HDと連携して、放射性物質の分析や取扱いなど放射性物質取扱施設での業務について、既存施設でのOJT（実務を通じた研修）などを実施し要員を育成していく。

(2) 燃料デブリ安全に係る研究開発

①炉内状況把握⁽²⁾

エネルギー総合工学研究所、東電HD、東芝エネルギーシステムズ、日立GEニュークリア・エナジーとの協働で、2017年時点で活



図9 大熊分析・研究センター放射性物質分析・研究施設の完成イメージ

用できる全ての知見（プラントデータ、シビアアクシデント解析、過去知見、模擬試験など）に基づく、総合的な評価を実施し、1～3号機の炉内状況を把握して推定図（デブリ分布・RPV・PCV 状態 / 線量分布）にまとめ、東電HDに提示した。

2017年以降は、東電HDと協働で情報を更新すると共に推定図を精緻化している。その成果については、廃炉研究基盤データベース（debrisWiki）（<https://fdada-plus.info>）で広く公開している。図10に3号機のデブリ分布・RPV・PCVの推定図を示す。

②プラント内線源・線量率分布評価技術の開発⁽³⁾

時間的・空間的に断片的かつ限定的な1F内部調査による実測データの情報と、事故進展解析、燃焼・放射化計算、放射線輸送計算などの理論計算を組み合わせ、将来の連続的なPCV内の線量率分布を予測可能とした。

図11にデブリ取り出し開始時の空間的に連続な線量率分布予測結果を示す。

NDF、東電HD、IRID、規制庁などの1F廃炉実務関係者および国内外の研究者に最新知見の情報提供と提言を継続的に行ってきた。これまでの実績として、①2号機内部調査高

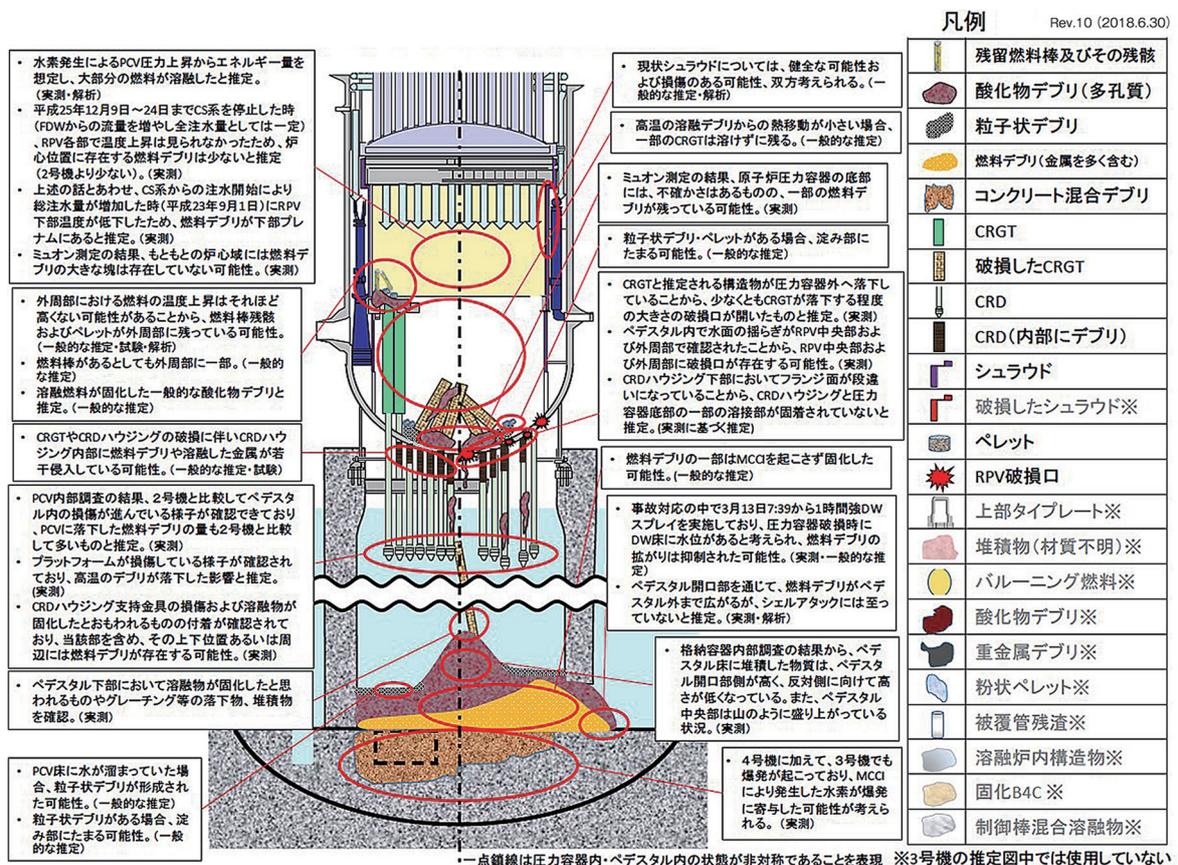


図10 3号機のデブリ分布・RPV・PCVの推定図

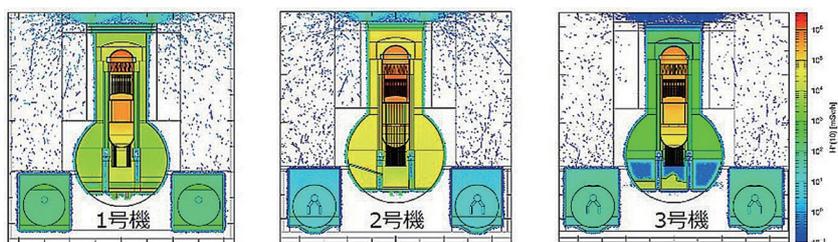


図11 デブリ取り出し開始時の空間的に連続な線量率分布予測結果

線量率報道の修正提言（6ヵ月後に修正），②燃料デブリ特有放射線による検知手法の提言（IRID，CLADS 英知事業による燃料デブリ検出器開発の契機），③人為的または地震による水位低下による線量率影響評価，④東電 HD の規制庁対応支援（原子炉ウェル調査，シールドプラグ穿孔調査解析）がある。

③金属デブリ形成挙動解析⁽⁴⁾

2号機内部調査で観察された3つに分類されている堆積物などの形成に関わる知見を得る目的で，事故シナリオを参照し，事故の初期の温度が上昇している段階での，長尺試験体を用いた水蒸気雰囲気での大型試験を実施し，試験で形成した堆積物等の材料科学的な特性を提示した。図12に大型試験に供した制御棒ブレード破損試験装置（LEISAN）の外観，図13に試験状況及び試験後試験体を示す。

制御棒は一部が熔融し，一部が未熔融で下部へ落下した。この段階では，燃料集合体は形状を維持していた。また，試験体上部の制御棒溶融物（金属系物質）が，試験体下部の低温部（1200℃以下）で固まり，冷却ガス流路を“部分的に”閉塞していた。

（3）放射性廃棄物管理に係る研究開発

①分析計画法の開発⁽⁵⁾

母集団に不確実性と不均一性がある廃棄物を効率的に分析するため，ベイズ統計を取り入れた分析計画法の有用性を明らかにした。

環境修復分野において開発された DQO（Data quality object）プロセスは，廃棄物分野においても標準的な方法とみなされており，これを基盤として母集団に不確実性と不均一性がある対象への適用についてベイズ統計を援用しつつ検討した。

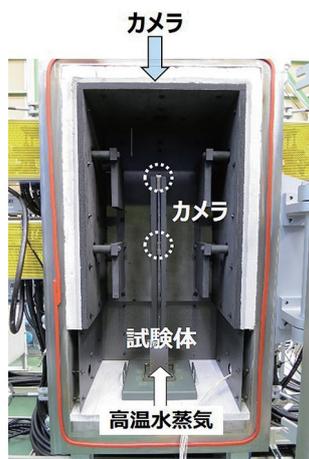


図12 制御棒ブレード破損試験装置（LEISAN）の外観

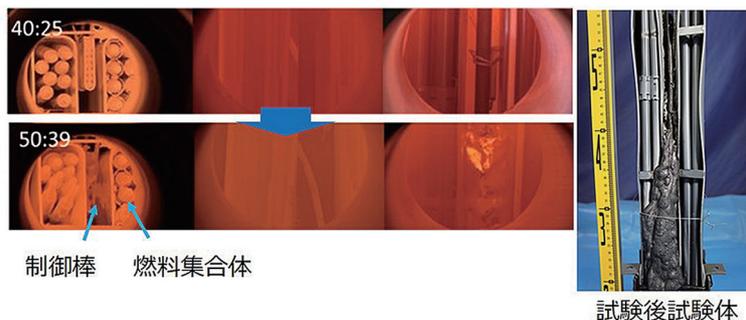
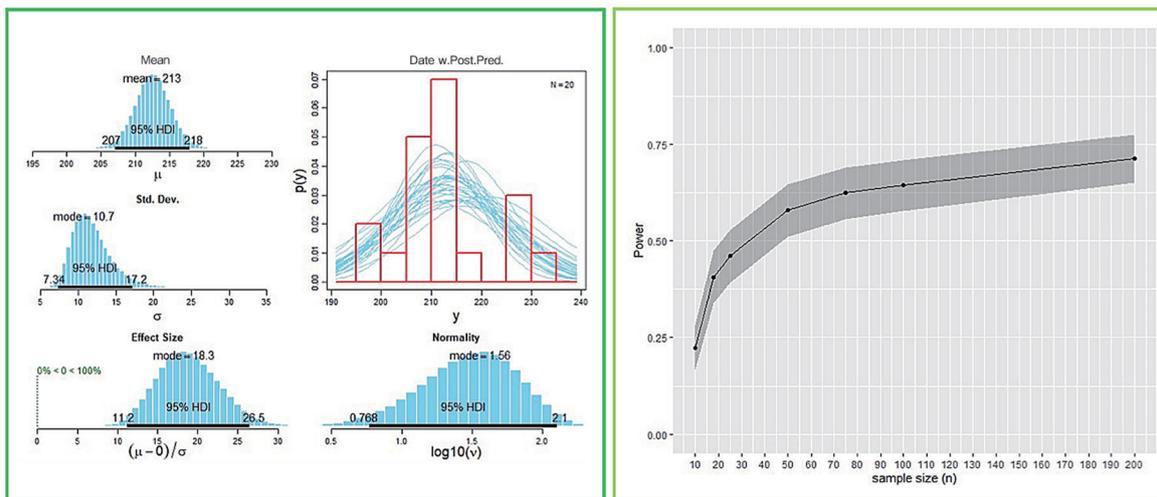


図13 試験状況及び試験後試験体



<ベイズ統計による濃度分布パラメータの計算>

<分析点数に対する基準を満足する確率のプロット>

図 14 ベイズ統計による分析点数の計算例

図 14 にベイズ統計による分析点数の計算例を示す。分析の目的として、基準濃度の充足や濃度分布の同一性を挙げて試行し、分析試料の数をパラメータとして基準を満たす確率を求め、決定することができた。試行は廃棄物管理のステイクホルダーを交えて行い、本法の有用性をともに確認することができた。

②多核種除去設備（ALPS）で発生するスラリーのたまり水の評価⁽⁶⁾

多核種除去設備（ALPS）から排出された炭酸塩スラリーの保管容器（HIC）で発生したたまり水の原因について実験データをもとに示した。

図 15 に模擬スラリー照射試験での水位上昇の時間変化を示す。

炭酸塩スラリーを入れた HIC 中の水位上昇による水が溢れた事象について、模擬のガンマ線照射試験を迅速に行い、放射線分解によって発生した気泡水素のスラリー内の保持と放出に伴う水位上昇を明らかにした。成果は、東電 HD により特定原子力施設放射性廃棄物規制検討会に報告され、対策の検討へ適時に反映された。

図 16 に模擬スラリーの静置写真（左）、沈降部の降伏応力と Mg/Ca 重量比の関係（右）を示す。

HIC 内スラリーの水素ガスの保持と放出のメカニズムの検討を進めた。溢水した HIC に保管されていた実スラリーの条件（原水の代表的な組成）を設定し、実機と同様の型式（クロスフローフィルタ）により模擬の濃縮スラ

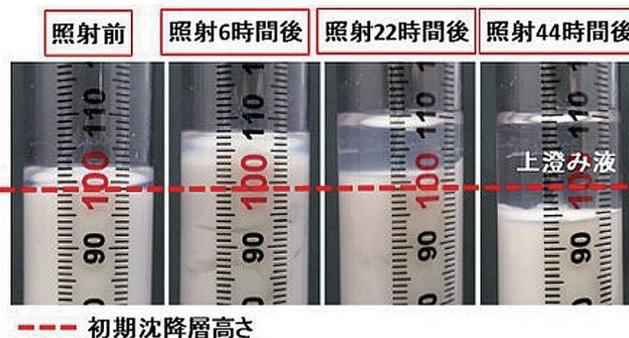


図 15 模擬スラリー照射試験での水位上昇の時間変化

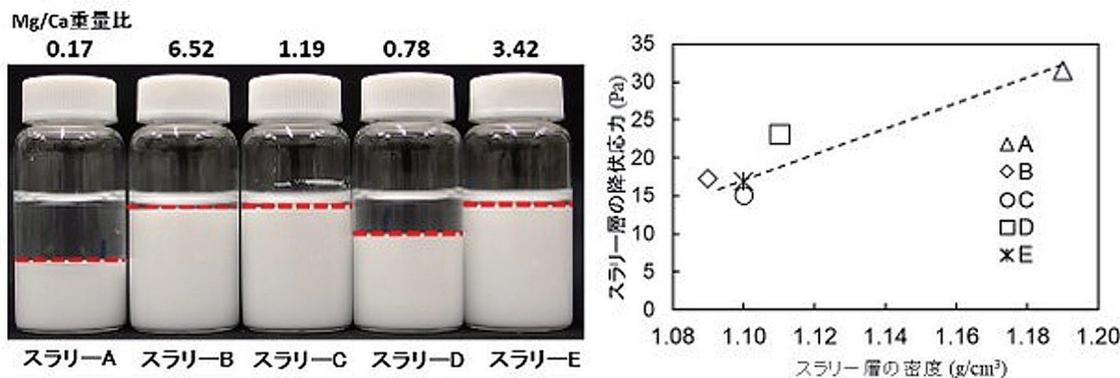


図 16 模擬スラリーの静置写真（左）、沈降部の降伏応力と Mg/Ca 重量比の関係（右）

りを作製した。静置したスラリーには上澄み液が形成され、Ca 含有量が多いスラリーで白色沈降部の密度が高かった。沈降部の密度が高くなると水素などの気泡の動き出しに必要な降伏応力も増大する傾向を示した。このことから、スラリーの Mg/Ca 重量比が水素ガスの保持と放出に影響することがわかった。

③ 廃棄物の分析、データの蓄積と公開⁽⁷⁾⁽⁸⁾

1F にて採取、収集された試料を保管管理するとともに、JAEA の茨城地区の分析施設（5 か所）へ輸送し、瓦礫、水処理二次廃棄物などの試料を継続して分析した。得られた分析データを公開のデータベース（FRAnDLi）(<https://frandli-db.jaea.go.jp/FRAnDLi/>) に収録してインベントリ推定などの研究開発の促進に供した。

分析試料の保管から輸送、分析に至る一連の工程を確立し、継続して実践し、2021 年 5 月の時点で約 500 点の試料を分析した。大量に発生する瓦礫類とともに、主要なリスク源とされる廃棄物（除染装置スラッジ、ALPS スラリー、ゼオライト土嚢、濃縮廃液、建屋内滞留水など）を優先して取り組んだ。

また、JAEA、MHI 原子力研究開発株式会社（NDC）と日本核燃料開発株式会社（NFD）の施設にて、放射化学分析とともに、保管や処理などのニーズに合わせた分析（元素分析、密度や粒径など）、汚染共同の解明に資する分析（イメージングプレート）を行った。

（4）放射線共通・基盤強化に係る研究開発

① 3D 放射線分布測定による汚染源情報解析⁽⁹⁾

1F 現場の放射能汚染を 3 次元的に可視化するための装置として、統合型イメージングシステム（iRIS）を開発した。図 17 にその概念を示す。

iRIS は 3 次元測域センサ、コンプトンカメラ、サーベイメータを組み合わせた構成になっており、コンプトンカメラで撮影する汚染分布とサーベイメータで計測する移動ルート上の線量率を、測域センサで取得する作業環境の 3 次元モデルデータに投影して、放射線情報を可視化した現場の 3 次元マップを描画するものである。



図 17 統合型放射線イメージングシステム（iRIS）の概念

実証試験は、東京電力の協力のもと 1F1/2号機の排気筒付近で実施した。コンプトンカメラを用いた従来の定点測定（放射能汚染の2次元分布測定）では、高濃度汚染箇所の特定制のためには複数の視点から対象エリアを測定する必要があり、コンプトンカメラの移動・測定を繰り返す必要があった。一方で iRIS では、歩行移動しながら連続的に測定を実施することにより、わずか5分未満でデータ取得を完了した。さらに、取得データをもとに、測域センサで取得した作業現場の3次元モデルに、コンプトンカメラで取得した放射性物質のイメージをカラー表示することによって、図 18 のように、高濃度汚染箇所（排気筒下

部の配管）を可視化した汚染の3次元マップを描画することに成功した。同時にサーベイメータの測定データを組み合わせることにより、オペレータの移動ルート上の線量率もマップ上に可視化できる。今後、原子炉建屋内部における実証試験を進める。

②炉内レーザーモニタリング・内部観察技術の開発⁽¹⁰⁾

耐放射線性を備えた可搬型レーザー誘起発光分析（LIBS）装置を開発し、1F構内において2号機から採取された試料の分析を実施した。図 19 に LIBS の概念を示す。

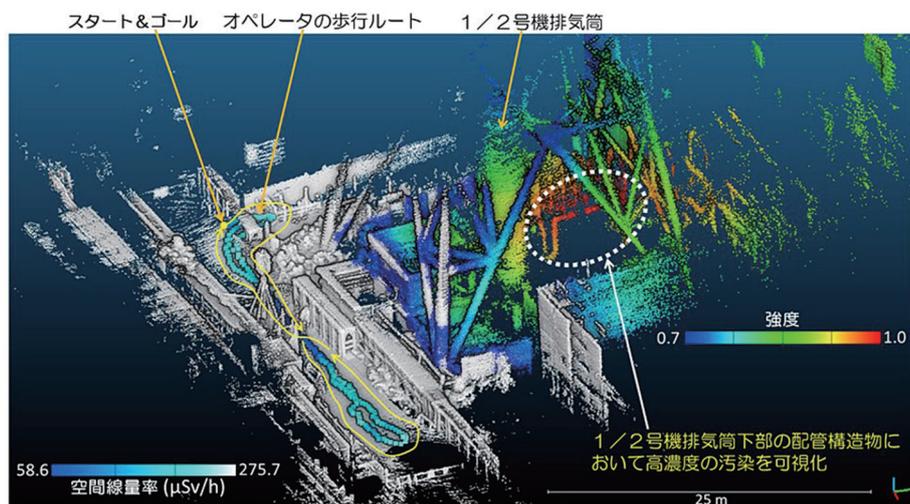


図 18 iRIS を用いて描画した 1F1/2 号機排気筒周辺の放射線情報可視化マップ

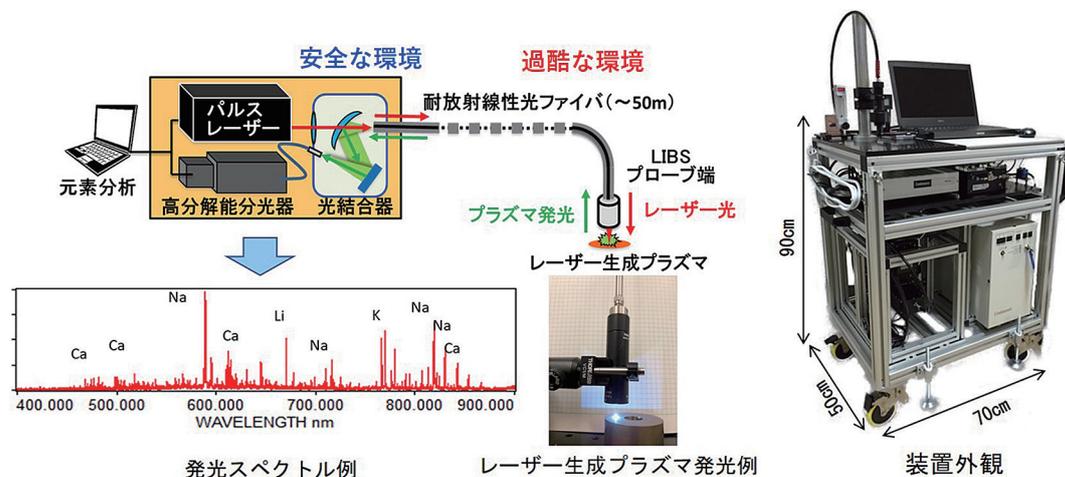


図 19 可搬型レーザー誘起発光分析（LIBS）法 の概念

また、図 20 に、2021 年度に実施した東電 HD との共同研究で実施した 66kV 開閉所での試験の様子を示す。



図 20 東電 HD との共同研究で実施した 66kV 開閉所での試験

可搬型 LIBS 分析装置を用いて 2 号炉ウェル内調査時の資料の測定を行い、海水塩成分、鉄、一部試料で Cs 成分を確認した。1F 現場適用可能な高耐放射線性を備えた遠隔・その場・迅速簡易分析 LIBS システムの開発とその場スクリーニング分析への適用を目指す。

4. JAEA 第 4 期中長期計画期間の主要課題

JAEA は、国が策定した「中長期目標」を受けて、「中長期計画」を策定（第 4 期、2022 年度 -2028 年度の 7 年間）している。その際、

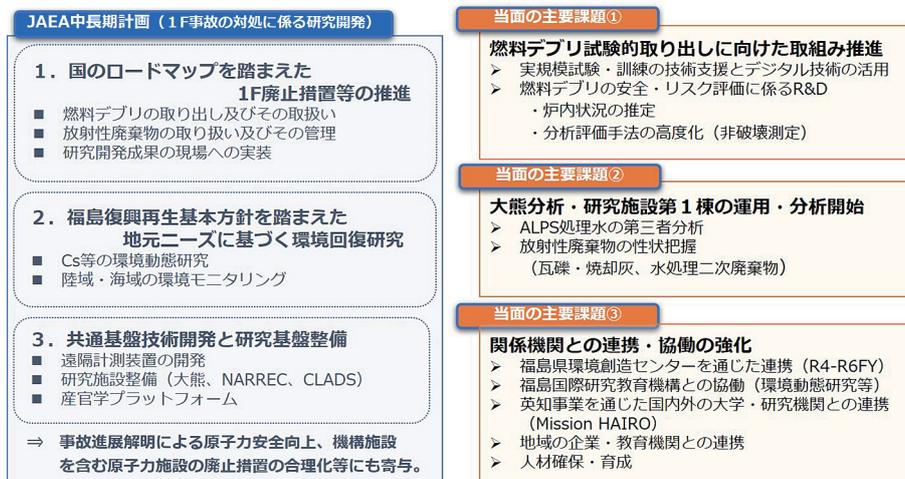


図 21 JAEA 福島研究開発部門の中長期計画と当面の主要課題

地域の自治体や教育機関のニーズやご意見を可能な限り反映している。

図 21 に JAEA 福島研究開発部門の中長期計画と当面の主要課題を示す。

第 4 期中長期計画では、2021 年度までの第 3 期中長期計画と同様に「国のロードマップを踏まえた 1F 廃止措置等の推進」、「福島復興再生基本方針を踏まえた地元ニーズに基づく環境回復研究」、「共通基盤技術開発と研究基盤整備」を 3 つの柱として取り組みを行う。また、当面の主要課題として、①燃料デブリ試験的取り出しに向けた取り組みの推進、②大熊分析・研究施設第 1 棟の運用・分析の開始、③関係機関との連携・共同の強化に取り組む。廃炉作業上の安全・リスク評価を専門機関として確実にを行い、当面重視すべき課題に優先的に取り組むとともに、地域の人材育成や理解促進にも貢献すべく尽力する。

5. まとめ

JAEA は 2011 年に発生した東日本太平洋沖地震に伴う 1F 事故が発生して以来、1F 廃止措置等に関する研究開発、環境回復に関する研究開発、浜通り地区での研究拠点整備（楢葉遠隔技術開発センター、CLADS 国際共同研究棟、大熊分析・研究センター）などの研究開発基盤整備を行うなど、福島復興に向け

た取り組みを継続して実施した。

また、研究開発のみならず、地元住民への情報発信、人材育成、研究開発ネットワークの構築、研究開発成果の地元企業とのマッチングなどを実施した。

研究開発成果の1F廃炉現場適用に向けて、「基礎・基盤研究の全体マップ」を整備し、英知事業を実施している。

燃料デブリ取出し、放射性廃棄物管理に係る研究開発、放射線共通・基盤強化に係る研究開発を実施し、様々な研究開発成果を得ており、これらは1F廃止措置等に貢献した。

2022年度から開始するJAEA第4期中長期計画期間(2022年度-2028年度)においても、引き続き、1F廃止措置等に関する研究開発を継続する。

参考文献

- (1) 原子力損害賠償・廃炉等支援機構,「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃炉のための技術戦略プラン2021」, https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/strategic-plan/book/20211029_SP2021FT.pdf, 2021年10月29日
- (2) 国際廃炉研究開発機構, 一般財団法人日本エネルギー総合工学研究所,「廃炉・汚染水対策事業費補助金(総合的な炉内状況把握の高度化)平成29年度成果報告」, https://irid.or.jp/_pdf/20170000_01.pdf, 2018年6月
- (3) 奥村啓介,「PCV内の線量率分布評価」,「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会報告書, pp.116-121, (社)日本原子力学会, 2021年5月
- (4) A. Pshenichnikov et al., "Features of a Control Blade Degradation Observed In Situ during Severe Accidents in Boiling Water Reactors", J. Nucl. Sci. Technol, 56 (5), pp.440-453 (2019)
- (5) C. Pyke et al., "Radioactive waste sampling for characterisation - A Bayesian upgrade", Nucl. Eng. Technol, vol.54, no.1, pp.414-422 (2022)
- (6) 本岡 隆文, 永石 隆二, 山岸 功他,「HIC模擬炭酸塩スラリーの照射実験(1)-(3)」, 日本原子力学会「2016年春の年会」(於東北大学), 2I19-21, 2016年3月27日
- (7) 佐藤義行ほか,「福島第一原子力発電所において採取した瓦礫試料の放射化学分析」, 保健物理, 51(4), pp.209-217 (2016)
- (8) 浅見誠ほか,「東京電力福島第一原子力発電所において採取された汚染水および瓦礫等の分析データ集」, JAEA-Data/Code 2017-001 (2017)

(9) Y. Sato et al., "Radiation imaging using an integrated Radiation Imaging System based on a compact Compton camera under unit 1/2 exhaust stack of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station", J. Nucl. Sci. Technol, 59(6), pp. 677-687 (2022)

(10) 廃炉環境国際共同研究センター,「研究開発成果の1F廃炉現場適用事例」, 第10回廃炉研究開発連携会議資料2-1-2, <https://www.dd.ndf.go.jp/files/user/pdf/decommissioning-research/dr-committee/materials/10/doc2-1-2.pdf>, 2022年2月25日

[寄稿]

脱炭素への動きとロシアによるウクライナ侵攻 ～シェール・ガス革命，シェール・オイル革命の今後～

岩間 剛一（和光大学 経済経営学部 教授）

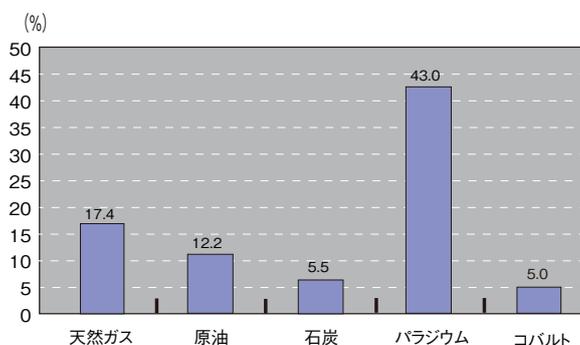


1. 世界を震撼させたロシアによるウクライナ侵攻

2022年2月24日に勃発した，世界有数の資源エネルギー大国であるとともに核保有国であるロシアによるウクライナへの侵攻は，東西冷戦後の国際秩序に対する力による挑戦として，国際エネルギー情勢を震撼させている。社会主義諸国の崩壊後，イラクによるクウェート侵攻，イラク戦争など，様々な国際紛争があったものの，ロシアによる主権国家ウクライナへの軍事侵攻は，①米国と並ぶ世界最大の核兵器保有国が国際法秩序を軍事力により揺さぶっていること，②ロシアは，世界有数の資源エネルギー大国であり（図1参照），ウクライナ危機は，同時に国際エネルギー危機を意味する，などの特徴が挙げられる。ロシアは，天然ガス生産量が米国に次ぐ世界第2位，原油生産量は米国，サウジアラビアに次ぐ世界第3位であるうえに，国内の経済

規模が小さいことから，相対的に原油，天然ガス，石炭の輸出余力が大きく，天然ガス輸出量は世界第1位，石油輸出量は世界第2位と，ロシア産天然ガス，石油，石炭の供給途絶は，世界的なエネルギー需給逼迫をもたらす。侵攻当初は，ロシアの圧倒的な陸上戦力から，数日のうちにウクライナの首都キエフ（キーウ）が陥落すると考えられていたものの，携行式対戦車ミサイル「ジャベリン」，携行式地对空ミサイル「スティンガー」，高機動ロケット砲「ハイマース」をはじめとした欧米諸国からの近代兵器の供与と，ウクライナ軍の士気の高さもあって，ロシア軍の攻撃に対して，ウクライナ軍は善戦している。2022年8月以降はウクライナ軍の反攻も強まっており，戦闘は長期化の様相を見せている。2022年9月時点においても，戦闘行為は2023年以降まで続くという見方が有力となっている。

ロシアによる主権国家に対する軍事侵攻に対して，欧米民主主義国家は強く反発し，ウ



（出所：BP 統計，2022年6月）

図1 ロシアの世界におけるエネルギー生産割合（2021年）

ウクライナへの武器供与を行うとともに、SWIFT（国際銀行間通信協会）からの排除をはじめとした金融制裁、ハイテク製品輸出制裁、ロシア産石炭の輸入禁止などの制裁を次々と打ち出している。しかし、資源エネルギー大国ロシアに対する強硬な制裁は、欧州諸国が報復を受けるリスクを孕んでいる。シェール・ガス革命、シェール・オイル革命により、エネルギーの100%自給を達成した米国は、いち早くロシア産石炭、石油、液化天然ガス（LNG）の禁輸制裁を発動している。しかし、欧州諸国は、ロシア産石油、天然ガスに対する依存が強く、地続きのロシアと欧州諸国との間には、網の目のような天然ガス・パイプラインが敷設されており、欧州諸国は、ロシア産天然ガスに依存してきた歴史がある。欧州連合（EU）の中心国ドイツは、ロシアとの間にノルドストリーム1、ノルドストリーム2（ロシアによるウクライナ侵攻により、パイプラインそのものは完成しているものの、ドイツが認証を止めており、将来的に稼働の見通しが立たない）という天然ガスパイプラインを建設し、ロシア産天然ガスを利用し、原子力発電を廃止すると同時に、単位熱量当たりの炭酸ガス排出量が天然ガスの2倍ある石炭火力発電を削減して、炭酸ガス排出削減を図ろうとしてきた。EUは、石油輸入の3割、天然ガス輸入の4割を、ロシアからの輸入に依存している（図2参照）。

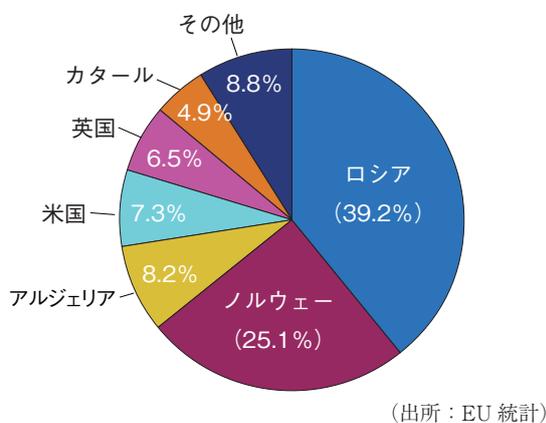


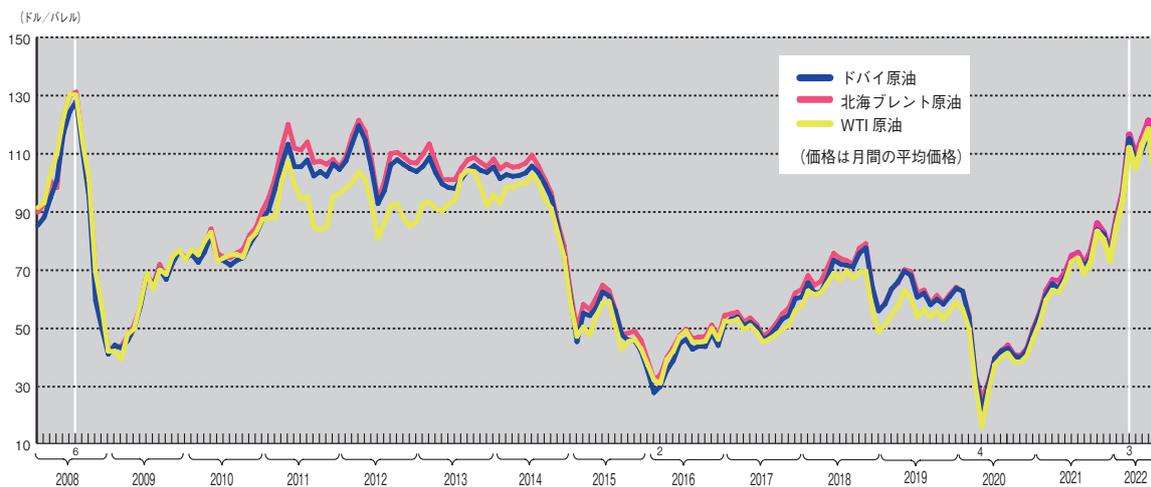
図2 EUの国別天然ガス輸入割合(2021年)

つまり、EU諸国は、ロシア産天然ガスを大量に輸入することによって、エネルギーの安定供給を図るとともに、脱炭素へのトランジション（橋渡し）を構想していた。ロシアによるウクライナ侵攻によって、欧州諸国の構想が完全にシナリオの修正を迫られている。当然のことながら、欧米先進国による制裁への報復として、ロシアも石油・天然ガスを外交上の武器として使ってくる。ロシアの国営天然ガス企業ガスプロムは、2022年春から東欧諸国への天然ガス供給量を削減しており、ドイツのノルドストリームについても、タービンの修理が欧米諸国の制裁により完了しないとして、天然ガス供給量を、6月に6割削減し、7月に8割削減したうえで、2022年8月31日からは天然ガス供給を完全に停止している。ノルドストリームは、欧州の天然ガス消費量の1割を占めており、ノルドストリームからの天然ガス供給が停止し、欧州諸国に寒波が来襲すると、欧州諸国の天然ガス在庫は底を尽く。

2. ウクライナ危機はエネルギー価格の高騰に

想定外のロシアによるウクライナ侵攻は、歴史的な原油価格、天然ガス価格、石炭価格の高騰を引き起こしている。2022年3月に、米国がロシア産の石炭、石油、LNGの禁輸を打ち出すと、WTI（ウェスト・テキサス・インターミディエート）原油価格は130ドル/バレルと2008年の資源エネルギー・インフレーション以来の高値となっている（図3参照）。

欧州の天然ガス価格は、ロシアによるノルドストリームによる天然ガス供給停止を受けて、2022年8月26日に343ユーロ/MWhと2022年3月7日の335ユーロを更新する史上最高値となり、94.4ドル/百万Btu（英国熱量単位）と史上最高値をつけている。これは、石油換算では566ドル/バレルという高値となる。欧州の天然ガス価格の高騰は、極東ア



(出所：ニューヨーク商品取引所 (NYMEX) 統計)

図3 主要原油価格の推移 (2008年1月～2022年7月)

ジアのLNGスポット価格にも波及し、2022年3月に84.8ドル/百万Btuと過去最高を記録し、2022年9月7日時点においても、欧州の天然ガス価格の高騰に引っ張られる形で70ドル/百万Btuを超えている。こうしたLNG価格の高騰は、LNG火力発電に依存する電気料金的大幅な上昇につながり、欧州諸国の電力危機、日本の電気料金の上昇をもたらす。

石炭についても、ロシア産の石炭が高熱量の品質の良い石炭であることから、同じような品質の良い豪州の一般炭への争奪戦が起こり、豪州ニューカッスル港渡しの石炭価格は2022年5月に425ドル/トンと過去最高値を記録している。

国際原油価格の上昇は、自動車社会である米国のガソリン価格にも及び、米国のガソリン小売価格が5ドル/ガロンを超え、米国のバイデン政権の支持率低下をもたらしている。2022年11月の米国中間選挙を控え、バイデン大統領は2022年7月、サウジアラビアをはじめとした中東諸国を訪問し、サウジアラビアのムハンマド皇太子が関わったとされる著名記者殺害事件というバイデン政権にとって重要な人権問題をあえて重要な論点として扱わず、ムハンマド皇太子との関係強化に力点をおき、中東産油国に原油生産量の引き上げを要請している。日本も、原油価格の高騰と

円安を受けて、レギュラー・ガソリンの小売価格が170円/ℓを超え、家計の負担を軽減するために、2022年に入って、総額2兆円近くの補助金を支給している。

3. 重要性を増す米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命

言うまでもなく、21世紀最大のエネルギー革命は、米国を震源地としたシェール・ガス革命である。米国は、2010年代に入って、急速に天然ガス生産量を増加させている(図4参照)。広く知られているように、在来型の油田・天然ガス田において用いられてきた、水圧破碎(Fracturing)、水平掘削(Horizontal Well)という既存の技術を応用し、チェサピークをはじめとした米国の中堅石油企業が、頁岩(シェール)という硬い岩盤の中に含まれている石油・天然ガスの成分を経済的に採取することに成功した。最初は、頁岩に含まれている天然ガスの生産が中心であったものの、シェール・ガス開発の技術をシェール・オイル開発の技術に応用し、米国は原油生産も急速に増加させている(図5参照)。

米国は、石油産業発祥の地であるとともに、1970年代まで1,000万バレル/日を超える世界最大の原油生産国であった。しかし、

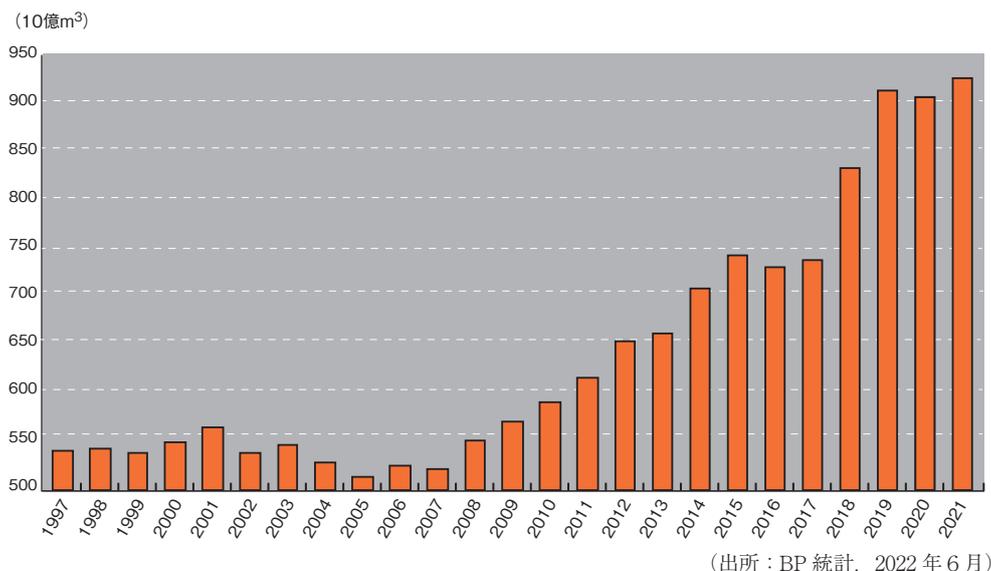


図4 米国の天然ガス生産量推移 (1997年～2021年)

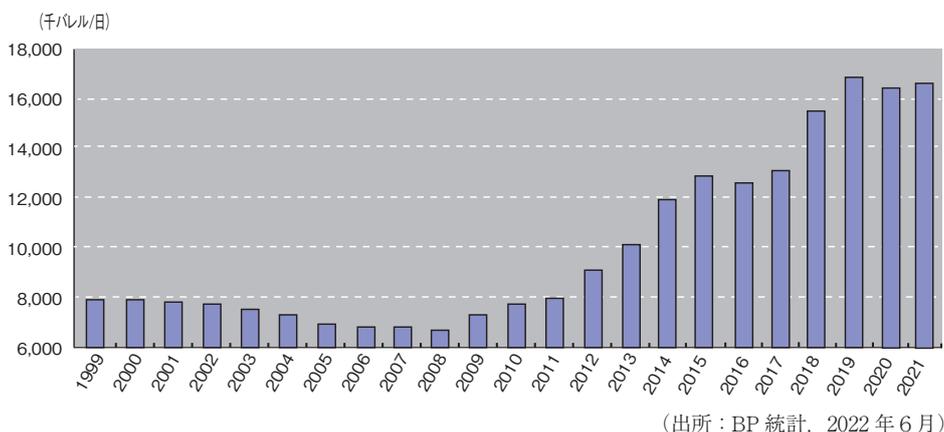


図5 米国の原油生産量推移 (年別：1999年～2021年)

Dismal (陰鬱) な「オイル・ピーク論」により、米国の原油生産量は減退の一途を辿り、2008年には原油 (Crude Oil) だけの生産量は500万バレル/日程度にまで減少し、中東産油国からの原油輸入に依存するしかないと考えられていた。米国が、1991年の湾岸戦争、2003年のイラク戦争において主導的な役割を果たした理由として中東からの石油の安定供給が挙げられ、「石油のための戦争」と呼ばれていた。しかし、2010年代からのシェール・ガス革命、シェール・オイル革命を通じて、米国は再び世界最大の原油生産国、天然ガス生産国となり、石油・石炭・天然ガスの純輸出国となっている。米国は、シェール・オイル革

命により、中東の石油を必要としなくなった。2005年の原油輸入量は1,000万バレル/日に達し、そのうち48%は石油輸出国機構(OPEC)から輸入していたものの、2020年には原油輸入量が590万バレル/日まで減少し、そのうちOPECからの輸入量は14%まで縮小している(図6参照)。

米国が、世界最大の原油生産国、天然ガス生産国となったことは、ロシアによるウクライナ侵攻を経て、一段と重要性を増している。欧州諸国が、強権国家ロシアへの反発を強め、ロシア産石油、ロシア産天然ガスからの脱却に動く場合、パイプラインを経由したロシア産天然ガスに替わって、大量かつ安定的な天

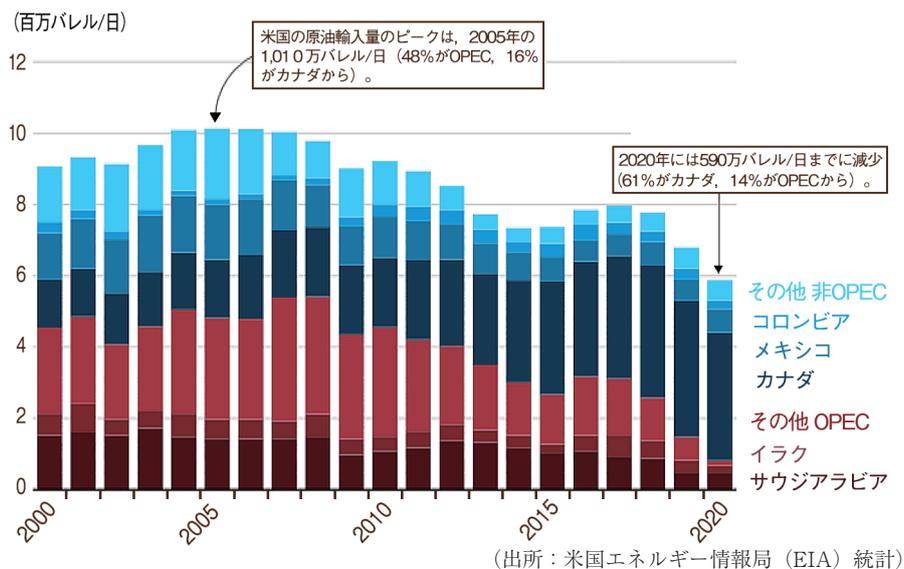


図6 米国の原油輸入量の推移（2000年～2020年）

然ガスを供給できるのは、米国のシェール・ガスしかない。米国は、まさに欧州諸国の「天然ガス危機」、それにともなう電力危機の救世主となった。

4. 米国のシェール・ガス革命, シェール・オイル革命の重要な歴史的意味

米国のシェール・ガス革命, シェール・オイル革命の歴史的な意味を改めて検討する。

第1に国際エネルギー需給の緩和が挙げられる。米国は、21世紀初頭には、在来型の原油生産量が減退の一途を辿り、中東産油国からの原油輸入が急速に増加した。世界的な原油需給の逼迫から、2008年7月11日にWTI原油価格は147.27ドル/バレルという史上最高値をつけ、「資源エネルギー・インフレーション」が発生した。しかし、その後の米国のシェール・ガス革命, シェール・オイル革命により、米国の天然ガス生産量, 原油生産量が増加し、米国は資源エネルギー純輸出国となった（図7参照）。それにより、国際的な資源エネルギー需給が緩和し、米国の天然ガス価格は低位安定し、2014年秋以降は国際原油価格が100ドル/バレルを大幅に下回り、日本の貿易収支改善にも貢献した。

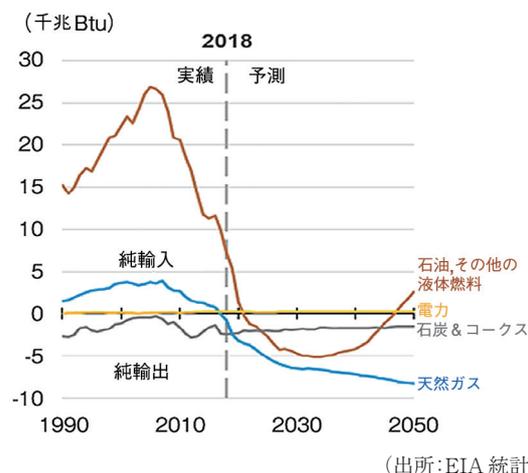


図7 米国の石油・石炭・天然ガスの純輸出入量

米国は、経済規模、軍事力において、中国に追い上げられているというものの、世界最大の石油消費国、天然ガス消費国であり、米国がネット・ポジョンにおいて、石油・天然ガス純輸入国から、石油・天然ガス純輸出となり、玉突き的に国際石油・天然ガス需給が緩和する意味は大きい。

第2に、2022年においても、シェール・ガス革命, シェール・オイル革命は、米国においてのみ現実のものとなった資源エネルギー革命である。中国、ロシアなどにも米国を上回る、シェール・ガス, シェール・オイルの資源量があると米国地質調査所（USGS）により推計さ

れているものの、その生産では顕著な成果を挙げている。米国が、世界最大の原油生産国、天然ガス生産国となったということは、「民主主義国家の盟主」である米国が、国家としての自信を取り戻す基礎となり、シェール・ガスを原料としたLNGの輸出を増加させることは、米国の貿易収支の改善につながる。

第3に、ロシアのウクライナ侵攻を契機として、民主主義国家と強権国家の対立が深刻化する状況において、民主主義国家・米国が、エネルギーの安定供給者としての立場を強める意味は大きい。ロシア産天然ガス依存からの脱却を目指す欧州諸国は、米国からのLNG輸入を増加させ、米国から欧州向けのLNG輸出は2022年に入って増加している(図8参照)。

米国において、シェール・ガス革命が起これば、2022年時点においても米国が大量のLNG輸入国にとどまっていたならば、欧州諸国は2023年の冬に備えて、暖房用、電力用を目的としたロシア産天然ガス輸入に依存する他なく、ロシアの軍事侵攻に対して、民主主義陣営として正当な人権と平和の理念を主張し、ロシアに制裁を課することができず、ロシアの横暴を黙認せざるを得なかったであろう。シェール・オイル革命についても、米国が原油生産量を増加させ、中東からの石油輸入を減少させたことから、欧州諸国もサウジ

アラビアをはじめとした中東諸国から原油・石油製品の輸入を増加させることができ、制裁としてロシア産石油の禁輸に踏み切れたという背景がある。

第4に、世界が「脱炭素」に向かう流れにおいて、環境先進国である欧州諸国が2050年にカーボンニュートラル(温室効果ガス排出実質ゼロ)を目標とするなか、化石燃料では単位熱量当たりの炭酸ガス排出量が一番少ない天然ガスの生産量が米国において増加したことの意味は大きい。米国は、シェール・ガス革命により、安価かつ大量の天然ガスの供給が可能となり、炭酸ガス排出量が多い石炭火力発電から天然ガス火力発電に切り替えることによって、経済成長を実現しつつ、炭酸ガス排出量削減に成功している(図9参照)。

欧米先進国が、低炭素社会、脱炭素社会を構築するシナリオは、燃料を石炭から石油、天然ガスへ切り替え、炭酸ガス排出量を徐々に削減していくことである。その意味で、天然ガスは、トランジション(橋渡し)のエネルギーとして極めて重要であり、米国のシェール・ガス革命は、欧米先進国の脱炭素への大きな切り札となる。COP26(第26回国連気候変動枠組み条約締約国会議)において、世界はカーボンニュートラルに向かうことで一致している(表1参照)。

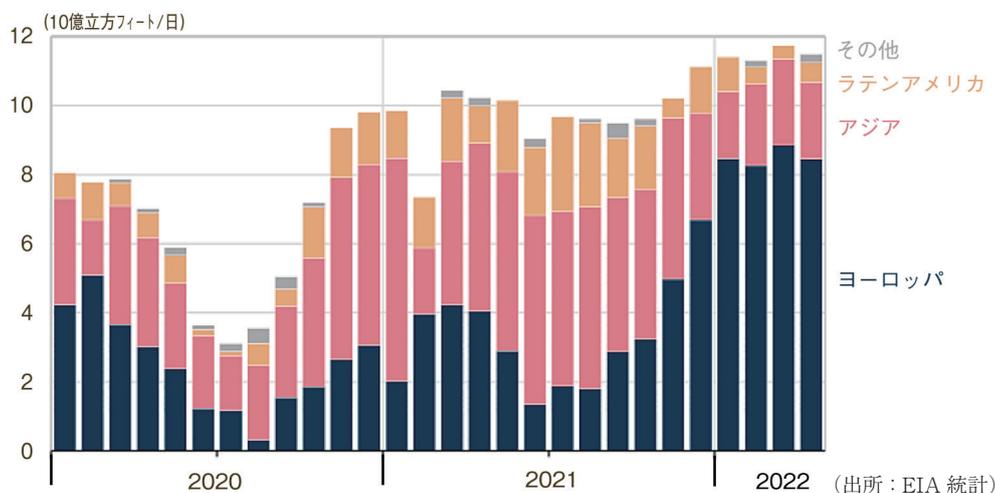


図8 米国の相手先別LNG輸出量 (2020年1月～2022年4月)

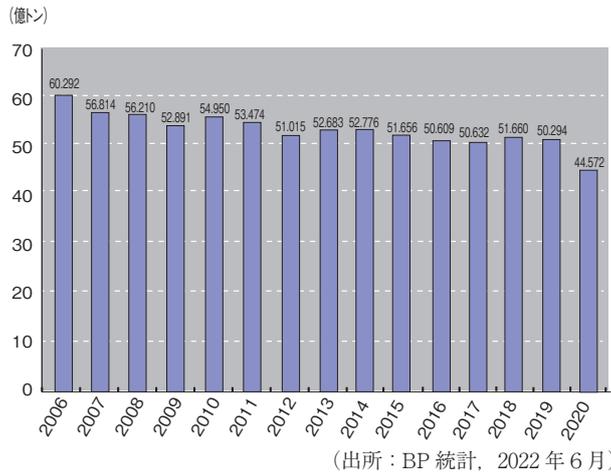


図9 米国の炭酸ガス排出量 (2006年～2020年)

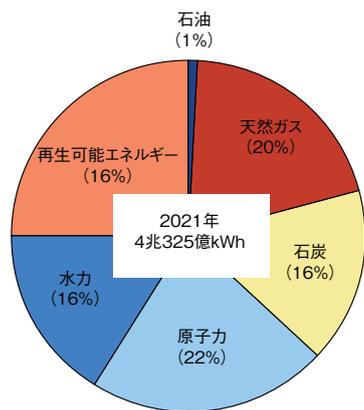
表1 主要国の温室効果ガス排出量削減目標 (2022年9月現在)

国名	温暖化ガス削減目標 (%)
日本	2050年に実質ゼロ
米国	バイデン政権は2050年までに実質ゼロ
カナダ	2050年までに実質ゼロ
英国	2050年までに80%削減→2019年に2050年実質ゼロ
EU	2050年に実質ゼロ
中国	2060年に実質ゼロ
インド	2070年に実質ゼロ

(出所：各種新聞報道)

第5に、シェール・ガス革命により、天然ガスの重要性が改めて理解された。脱炭素の流れが加速する現状において、太陽光発電、風力発電をはじめとした再生可能エネルギー（再エネ）の普及が拡大しているといっても、天候、時間、季節によって出力が変動する再エネの割合が増加した結果、世界各国において、電力危機が発生している。2021年冬に米国テキサス州に寒波が来襲したときには、風力発電が凍結して出力せず、大停電が発生した。2021年秋には欧州諸国に例年ほどの風が吹かず、風力発電の出力低下で電力危機が発生し、天然ガス火力発電への依存を強めたことから、2021年10月には欧州の天然ガス指標価格オランダTTFが54ドル/百万Btuと史上最高値を記録した。2022年に入ってから、ロシア産天然ガス供給途絶懸念に加えて、米国、中国における記録的な猛暑による水不足と水力発電の出力低下、日本、英国、ポ

トガルをはじめとした記録的な猛暑による冷房目的の電力需要の増加に対して、太陽光発電が十分に出力できず、天然ガス火力発電の負荷を強めた。実は、脱炭素の流れによる再エネの普及と電力需給逼迫は、構造的な関連性がある。夏の場合、太陽光発電は、昼頃に出力が最大となり、午後4時以降太陽が沈み始めると出力が低下する。それに対して、冷房用の電力需要は夕方以降も伸び、太陽光発電の出力と電力需要の間にミスマッチが発生する。冬の場合も、悪天候、夜間により気温が低下すると、暖房用の電力需要が増加するのに対して、太陽光発電は、ほとんど出力しない。東京電力(株)管内を例にとると、合計1,300万kW程度の太陽光発電設備をもっているものの、冬の悪天候、真夏の夜には、ほとんど出力せず、東京電力(株)の最大電力需要6,000万kWの21%相当の発電能力を失い、即時に出力調整が可能な天然ガス火力発電に頼る他



(出所：BP 統計，2022年6月)

図10 欧州の電源構成 (2021年)

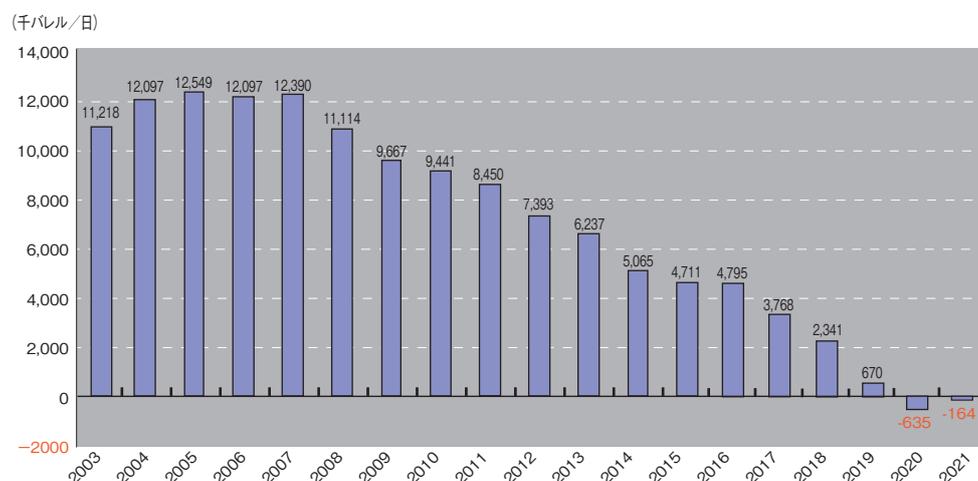
はない。欧州諸国も、発電量の20%を天然ガス火力発電に頼っている(図10参照)。

欧州諸国も、冬場の太陽光発電の出力低下、夏場の風力発電の出力低下、渇水期の水力発電の低下に対して、電力需要が増加した場合には、電力需給調整として天然ガス火力発電に大きく頼るしか方法がない。ドイツは、環境政策の優等生として、太陽光発電、風力発電をはじめとした再エネを普及させ、炭酸ガスを多く排出する石炭火力発電の抑制、事故の危険がある原子力発電の2022年末の廃止などを政策として打ち出していた。しかし、ロシア産天然ガスに天然ガス輸入の5割を依存しているドイツは、2022年秋にロシア産天然ガスの供給途絶危機に直面し、石炭火力発電

の出力増強、原子力発電所の稼働延長という、従来のエネルギー政策の大幅な修正を迫られている。ドイツは、従来は安価かつ安定的なロシアからのパイプラインによる天然ガス供給に依存し、米国からのLNG輸入を計画していなかった。しかし、ウクライナ危機に直面して、2022年3月には初めてのLNG受入基地建設を表明した。

第6に、米国がシェール・ガス革命、シェール・オイル革命により、資源エネルギー面において自立し、中東産の原油への依存度が低下するとともに、米国の中東に対する関心が低下した。米国とサウジアラビアとの間には、米国がサウジアラビアの安全保障に積極的に関与し、その代わりにサウジアラビアが米国に石油の安定供給を行う信頼関係が成立していた。前述のように、米国にとって中東の石油は必要不可欠であり、中東地域の安定は、米国のエネルギー安全保障とつながっていた。しかし、シェール・オイル革命により、米国の石油純輸入量は急速に減少している(図11参照)。

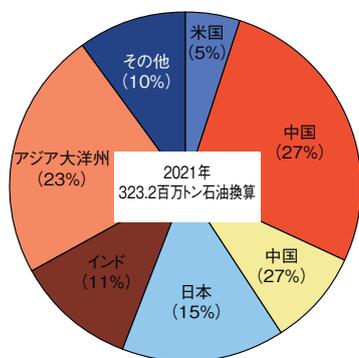
米国は、石油自給率が100%を超え、中東の石油を必要としなくなっている。中東の石油を必要としない以上、巨額の軍事費を投入し、米軍兵士の生命を危険にさらしてまで、中東に関与する必要がなくなってくる。トラ



(出所：EIA 統計)

図11 米国の原油・石油製品の純輸入量推移 (2003年～2021年)

ンプ大統領が、中東諸国の反発を承知のうえで、聖地エルサレムをイスラエルの首都と認定し、バイデン大統領が、ムハンマド皇太子の強権的な政治手法、人権侵害を強く非難する政策も、米国のシェール・オイルの生産量の増加によって、米国がサウジアラビアをはじめとした中東諸国に配慮しなくなった1つの例といえる。しかし、もともと政治的・宗教的に不安定な中東地域への米国の関心の低下は、中東地域の地政学リスクを高める。さらに、米国が中東に対する関心を低下させる隙を突いて、中国、ロシアが中東との関係強化を図ってくる。ロシアのウクライナ侵攻に関して、欧米先進国は一致して非難しているものの、中東諸国は必ずしも欧米先進国が主張する民主主義の価値観、人権尊重に同意しているわけではない。国連安全保障理事会におけるロシアへの非難決議にも、アラブ首長国連邦（UAE）は、中国、インドとともに棄権し、ロシアを強く非難する欧米先進国とは一線を画している。サウジアラビアの国営石油企業サウジアラムコも、従来とは異なり、最大の原油販売先として、中国との関係強化に動いている。サウジアラビアにとって、最大の原油と石油製品輸出先は中国となっている（図12参照）。米国は、もはやサウジアラビアにとって巨額の石油収入が得られる魅力的な顧客ではない。



(出所：BP 統計, 2022年6月)

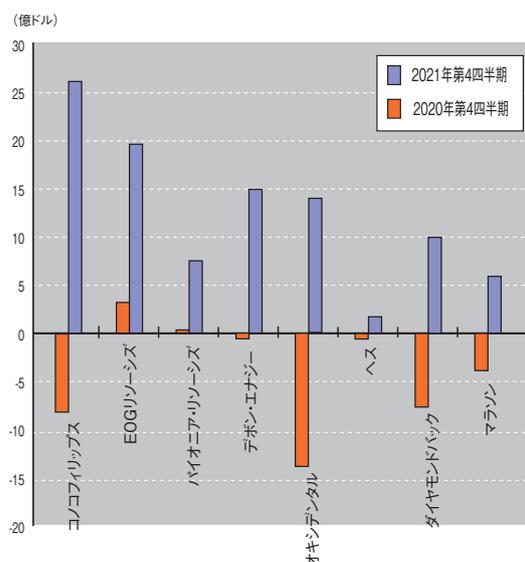
図12 サウジアラビアの相手先別石油輸出量

5. 米国のシェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業が直面する状況

脱炭素政策を掲げるバイデン政権の誕生と、ロシアのウクライナ侵攻がもたらす資源エネルギー危機は、米国のシェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業に、追い風と逆風という、いくつかの状況をもたらしている。

[追い風の状況1]

新型コロナウイルスの感染拡大の収束、ワクチン接種による世界的な石油需要の回復にともなって、国際原油価格が上昇した。米国のシェール・オイル生産企業は、多くの企業が純利益を2020年第4四半期の赤字から2021年第4四半期に黒字としている（図13参照）。新型コロナウイルスの感染拡大により、2020年4月にWTI原油価格はマイナスに落ち込んだものの、その後のワクチン接種、自動車の走行距離の増加、国内航空機の乗客数の回復により、世界の石油需要が、多くのエネルギー専門家の予想よりも早く回復し、2021年に入って原油価格が上昇した。



(出所：各種新聞報道)

図13 米国のシェール・オイル生産企業の純利益

[追い風の状況 2]

欧州諸国の天然ガス在庫が 2021 年秋に減少したことによる欧州諸国の天然ガス価格の高騰、2022 年 2 月のウクライナ危機によるロシア産天然ガスの供給途絶懸念から、米国のシェール・ガスを原料とした LNG への特需が発生した。欧州諸国は、ロシアから LNG 換算 1 億 1,000 万トンの天然ガスを輸入しており、将来的にロシア産天然ガス輸入からの脱却を目指すならば、米国、豪州、カタールなどの有力 LNG 輸出国からの輸入の引き上げを図るしかない。米国は、欧州をはじめとした LNG 需要の増加を見込んで、LNG 輸出能力の増強を計画している（図 14 参照）。

米国は、2016 年に輸出基地の 1 つであるサービンパス LNG から、シェール・ガスを原料とした LNG の輸出を開始した。LNG 輸出開始から 6 年後の 2022 年には、カタール、豪州を抜いて世界最大の LNG 輸出国となる。2022 年 12 月における米国の LNG 輸出能力は 1 億 100 万トンに達すると見込まれる。表現として適切であるかどうかは別として、ウクライナ危機により、最も大きなビジネス・チャンスをつかんだのは、米国の LNG 輸出事業者と言える。米国の競争相手の状況を見ると、カタールの LNG 輸出能力増強は、世界最大の天然ガス埋蔵量を誇るノース・フィールド天然ガス田の開発モラトリアムもあって、新規

プロジェクトの稼働開始は 2026 年以降となる。また、ロシアのサハリン 2、ヤマル LNG の LNG についても、将来的には供給途絶懸念がある。さらに、今後も計画されている、ロシアの新規 LNG プロジェクトとして、アークティック LNG 2 プロジェクトなどについても、強権国家ロシアへの制裁が続き、欧米石油メジャーの技術力と資金力を期待できない。豪州は、2021 年時点において、世界最大の LNG 輸出国であったが、国内の天然ガス不足から、LNG 輸出の制限を検討しており、将来的に大量の LNG 輸出が期待できない状況に陥っている。これらのことから、2023 年冬の寒波、2023 年夏の猛暑における電力危機を回避するための重要なエネルギーは、米国の LNG に集中する。米国においては、新たな LNG 輸出プロジェクトが次々と誕生する状況となっている（表 2 参照）。

日本企業でも、キャメロン LNG のプロジェクトに三菱商事(株)、三井物産(株)が参画し、フリーポート LNG には大阪ガス(株)と中部電力(株)が参画している。コープ・ポイント LNG には住友商事(株)、東京ガス(株)が事業に加わっている。米国の LNG プロジェクトに参画することによって、プロジェクトの配当金受け取りという形で、日本企業もシェール・ガス革命の果実を得ることができる。シェール・ガスを原料とした LNG は、日本の LNG 輸入量の 1

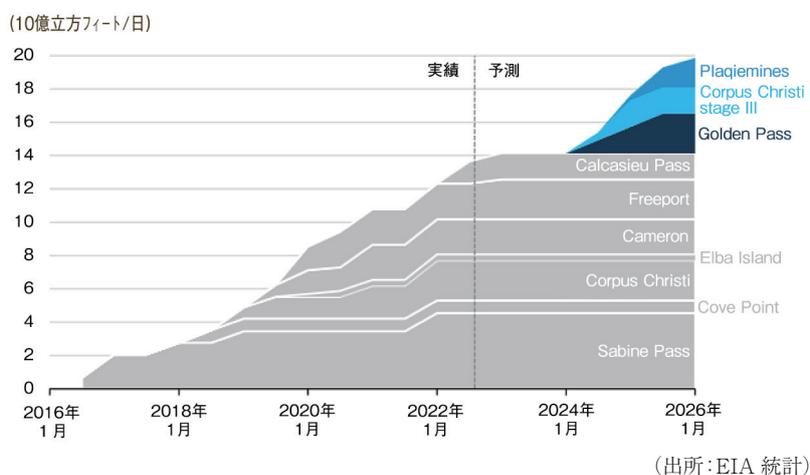


図 14 米国の LNG 輸出プロジェクト

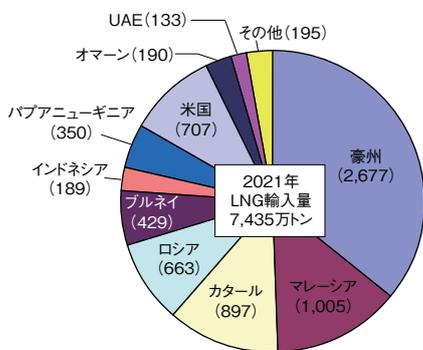
表2 米国のLNG輸出プロジェクト（2022年）

地域	プロジェクト名	事業主体	液化能力（単位：百万トン）
アラスカ	ケナイ LNG	コノコ・フィリップス, マラソン	20.0
ルイジアナ	サービンパス LNG	シェニエール・エナジー	22.5
テキサス	フリーポート LNG	フリーポート, 豪州マッコリー	13.9+5
テキサス	コルバス・クリスティー LNG	シェニエール・エナジー	9.0
ジョージア	エルバ・アイランド LNG	キンダー・モーガン	2.5
メリーランド	コーブ・ポイント LNG	ドミニオン	5.25
ルイジアナ	ドリフトウッド LNG	テルリアン	27.0
ルイジアナ	レイク・チャールズ LNG	サザン・ユニオン, シェル撤退 2020年4月	16.4
テキサス	コルバス・クリスティー LNG	シェニエール・エナジー	4.5
ルイジアナ	キャメロン LNG	センブラ・エナジー	13.5+6.7
テキサス	ポート・アーサー LNG	センブラ・エナジー	11.0
テキサス	ゴールデン・パス LNG	エクソンモービル, QP	18.1
オレゴン	ベレセン LNG	ベレゼン	7.8
テキサス	リオ・グランデ LNG	ネクスト・ディケード	11.4

割に達し、日本にとっても重要な LNG 供給源となっている（図 15 参照）。米国のシェール・ガスを原料とした LNG 輸出プロジェクトは、①米国という地政学リスクが極めて小さい国家からの生産である。②仕向け地条項、転売禁止等の規制がなく、その時々々の LNG 需給情勢によって、買い手が機動的に転売を行って、ディーリング益を上げることも可能である。③米国ルイジアナ州ヘンリー・ハブという天然ガス・パイプラインの集積拠点（ハブ）渡しの価格を指標として、液化コストと輸送コストを乗せて、LNG 販売価格が決定されるため、価格形成の透明性が高いうえに、LNG プロジェクトのコスト構成がはっきりと分かるというメリットを持っている。

米国の LNG は、その時々々の LNG 需給情勢によって、LNG が余剰な国から不足する国への転売が可能であり、2022年9月時点においては、中国はロシアからのパイプラインによる天然ガスの購入価格のほうが割安であることから、米国から購入した LNG を割高に販売できる欧州諸国に転売している。日本にとっても、脱炭素政策の今後の動向が不透明であり、天然ガス需要の見通しが立たない状況においては、米国との間で LNG 輸入の長期契約を締結して、寒波あるいは暖冬による需要の変動に対して、機動的に LNG のディーリングを行うことが可能となる。その点において、長期契約かつ仕向け地条項を求める豪州、カタールなどの LNG では、2050年のカーボンニュートラルに向けて天然ガス火力発電の廃止への動きが加速した場合、LNG を受け入れても、日本国内で LNG 消費の見通しが立たないというリスクが発生する。そのため、東京電力ホールディングス(株)と中部電力(株)が共同出資する(株)JERA は、2021年にはカタールとの長期契約の更新を見送っている。

世界全体の LNG 需要の増加は確実に見込まれる（図 16 参照）。この状況で、国内の LNG に関して将来需要が見通せない日本にとっては、機動的なディーリングが可能な米国の LNG は極めて重要なプロジェクトとなってくる。



(出所：国際 LNG 輸入者協会統計)

図 15 日本の国別 LNG 輸入量

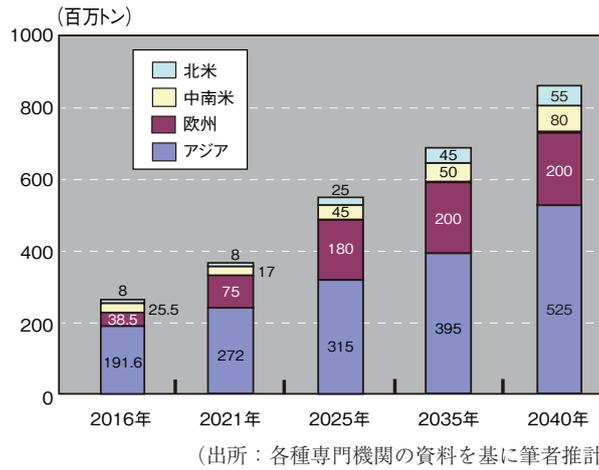


図 16 世界の LNG 需要見通し (2022 年 9 月)

[逆風の状況 1]

石油産業寄りのトランプ政権から、地球温暖化対策重視のバイデン政権となり、当初の予想よりも厳しい脱炭素政策が行われており、米国のシェール・オイル生産企業の先行き不透明感が強まっている。トランプ前大統領は、石油業界寄りの政策を実行し、シェール・オイル生産企業の経営者とも親密な関係にあった。炭酸ガスの排出による地球温暖化はなく、シェール・ガス、シェール・オイルの開発は、米国経済を繁栄させ、雇用を創出するという考え方であった。それに対して、バイデン大統領は、民主党環境保護派の意見を取り入れ、石油業界とは距離を置き、環境保護政策を前面に打ち出している。シェール・ガス、シェール・オイルともに、炭酸ガスを排出する化石燃料の1つであるという位置づけであり、生産を抑制する必要があるという立場にある。

政府保有地におけるシェール・ガス開発、シェール・オイル開発の開発規制、石油パイプライン建設への規制を強化している。脱ガソリン車への政策も行っており、2030年までに新車販売の50%を電気自動車(EV)とするという政策を打ち出している。バイデン新大統領とトランプ前大統領は、極めて対照的なエネルギー政策を打ち出している(表3参照)。

ロシアのウクライナ侵攻を契機として、原油価格、天然ガス価格が高騰し、米国のガソリン価格が上昇した。自動車社会である米国のガソリン価格の上昇は政権の支持率、大統領選挙に直結する。トランプ前大統領であれば、米国のシェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業に、天然ガス開発、油田開発の促進を奨励したと考えられる。シェール・オイルの生産量増加は、石油業界に利益をもたらし、消費者も安価なガソリンという恩恵

表 3 トランプ前大統領とバイデン新大統領の対立 (2022 年)

	トランプ政権	バイデン政権
パリ協定	雇用を減らすことから離脱	地球環境保護のため復帰
化石燃料	石炭など化石燃料産業保護	環境インフラに4年間で2兆ドル投資
炭酸ガス	地球温暖化はない	2050年までにカーボンニュートラル
環境規制	オバマ政権時代の環境規制緩和	2035年までに発電部門からの炭酸ガス排出ゼロ
シェール・オイル	政府保有地の環境規制緩和	政府保有地の開発規制
自動車	排出ガス規制を緩和	2030年までに電気自動車を50%
再生可能エネルギー	安定供給を損なう	再生可能エネルギーに積極投資
人権外交	権威主義的政権との宥和	人権保護を強調
イラン	核合意破棄	核合意復帰

を受けられる、という発想である。それに対して、バイデン大統領は、ガソリン価格の高騰と物価上昇による米国消費者の不满と支持率低下に悩み、2022年11月に行われる中間選挙で民主党が惨敗する危機感があるにもかかわらず、米国内のシェール・オイル生産企業に増産を求めるといった政策をとっていない。むしろ、原油価格を沈静化させるために、2018年10月に起こった、サウジアラビアの著名記者殺害事件に関与していたと、バイデン大統領自身が断定した、サウジアラビアのムハンマド皇太子を2022年7月15日に訪問し、人権保護の問題を封印して、原油生産量の引き上げを懇願した。

こうしたバイデン大統領のシェール・オイルに対する政策は色々な意味で失敗していると言える。本来であれば、米国内のガソリン価格の高騰に対しては、米国内のシェール・オイル生産企業を奨励し、原油生産量を引き上げ、石油精製設備の能力を増強する政策をとれば、石油企業も事業を拡大することができ、消費者にとってもガソリン価格が下がる。いわば、ウィン・ウインの関係となる。しかし、脱炭素政策を公約としている以上、その政策に縛られて、米国内のシェール・オイル開発促進政策がとれない。また、人権

問題を棚上げして、サウジアラビアのムハンマド皇太子に擦り寄れば、民主党左派の批判が強まる。実際に、ムハンマド皇太子に対して形だけ人権問題に言及したものの、主要な議題が、サウジアラビアへの原油生産の増産要請であった。しかし、サウジアラビアから具体的な回答はなかった。一面では、サウジアラビアに対する増産要請は理に適っている部分もある。世界的に大きな増産余力を持っているのは、サウジアラビアとUAEの2カ国だけだからである(図17参照)。

サウジアラビアとUAEの2カ国を合わせると、2022年9月時点において、220万バレル/日程度の増産余力はある。しかし、老朽化した油田の原油生産量を無理に引き上げて、わざわざ自分から原油価格を引き下げるといった政策を米国のために行う必要はない。サウジアラビアをはじめとしたOPEC加盟国と、ロシアをはじめとした非OPEC加盟国によるOPECプラスは、2022年9月からは10万バレル/日の増産を決めて、バイデン大統領の要請に配慮した形を示したものの、2022年10月からは、逆に10万バレル/日の減産が決定され、バイデン大統領の面目は潰れている。こうした政策の失敗により、民主党の人権擁護派からは、「人権を軽視している」と批判され、

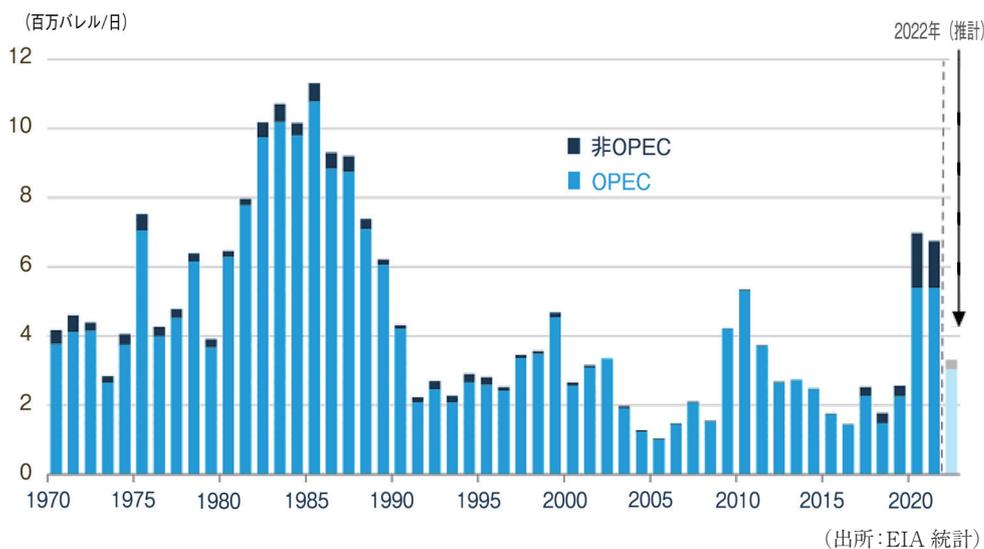


図17 世界の原油生産余力 (1970年～2022年)

共和党からは、「原油生産量の引き上げに対して指導力がない」という攻撃を受けている。

[逆風の状況2]

米国の投資家、金融市場からの ESG（環境・社会・企業統治）投資の強まり、配当金の引き上げをはじめとした利益重視の要求に、シェール・ガス生産企業、シェール・オイル生産企業が直面している。実際に、原油価格が上昇しても米国の石油企業は、新規投資を増加させていない（図 18 参照）。

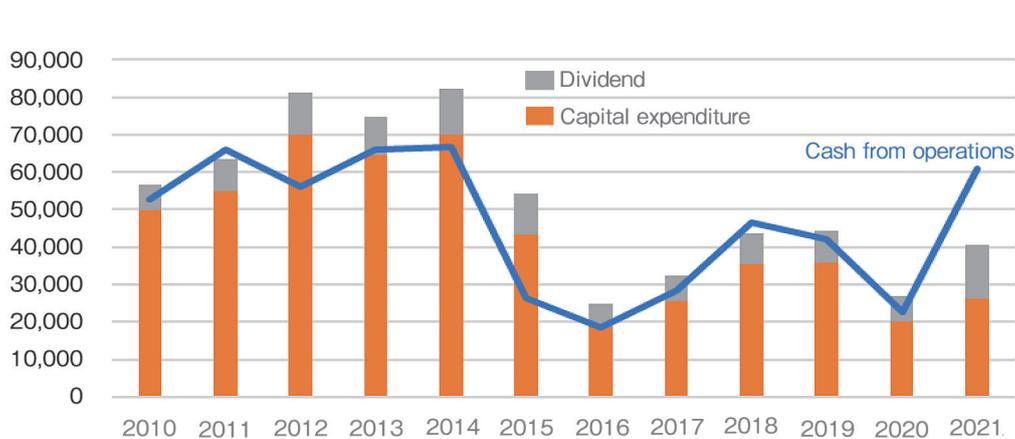
新型コロナウイルスの感染拡大によるマイナス原油価格から、原油価格の上昇とともに、米

国の石油企業のキャッシュ（現金）収入は増加しているものの、キャッシュ（Cash from Operation）収入の増加に見合った新規開発投資（Capital Expenditure）の増加が見られない。従来であれば、米国のシェール・オイル生産企業は、原油価格が上昇すると、いっせいに原油生産能力の増強投資に向かい、短期間のうちに原油生産量を増加させ、結果として国際原油価格を沈静化させる役割を果たしてきた。しかし、2018 年頃から、米国のシェール・オイル生産企業は、内部留保を重視し、得られるキャッシュ・フロー以下の投資と配当金支払いしか行わないようになってきている（図 19 参照）。



(出所：EIA 統計)

図 18 米国の石油企業 42 社のキャッシュフロー (2016 年～2021 年)

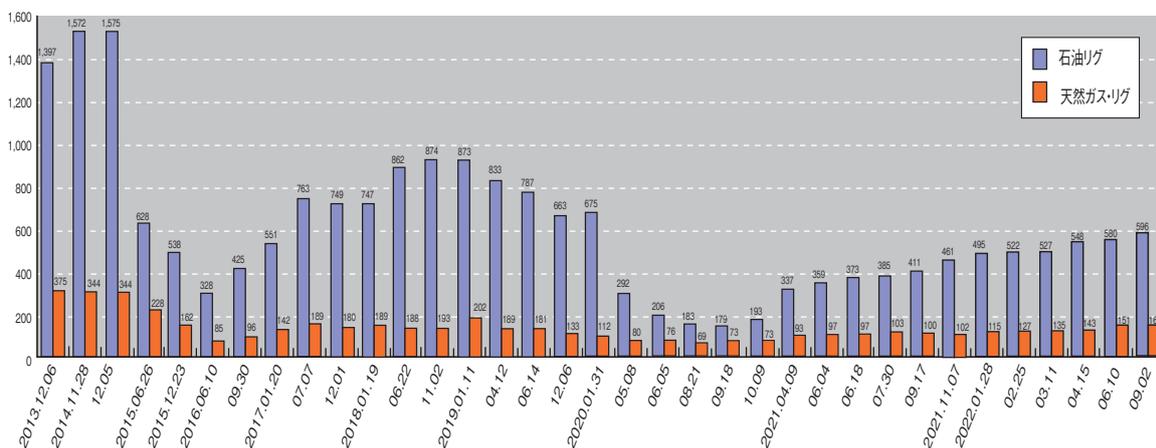


(出所：EIA 統計と石油天然ガス・金属鉱物資源機構資料)

図 19 米国の独立系シェール・オイル9社のキャッシュと投資の関係 (2010 年～2021 年)

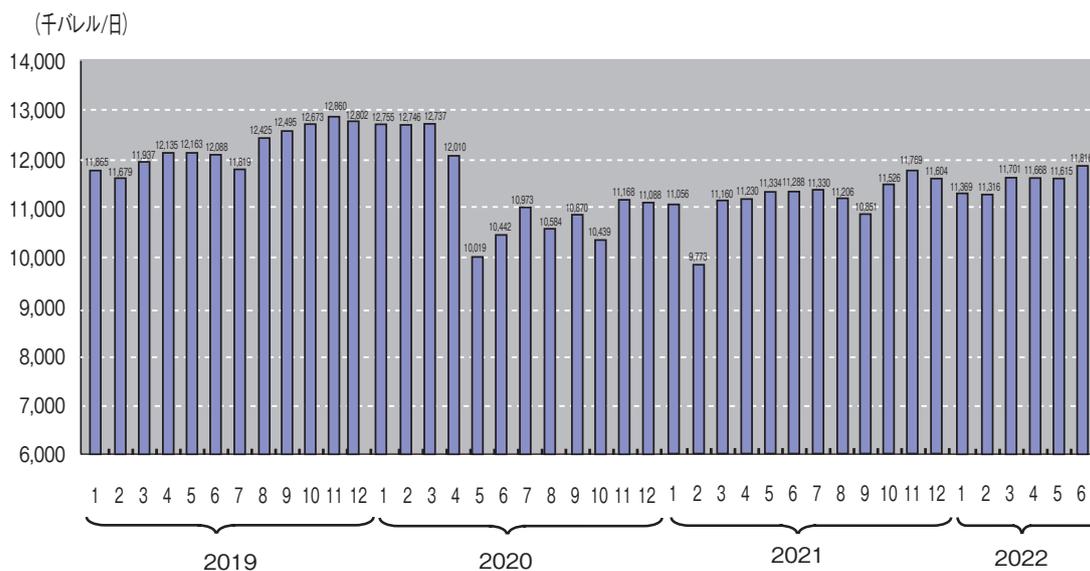
米国の石油・天然ガス開発企業は、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命が始まった時期から、原油価格、天然ガス価格が上昇し、利益が挙がると見るや、堰を切ったように開発競争に走り出し、キャッシュ収入を上回る新規投資を実行し、結果として原油生産量の増加とともに原油価格が下落し、損益は赤字というパターンを繰り返してきた。しかし、この数年の米国金融市場の環境変化により、シェール・オイル生産企業の経営方針が変わってきた。投資家、金融機関から、① ESG 投資により、炭酸ガスを排出する原油・天然ガス開発への投資資金が集まりにくくなり、金融機関からの借り入れも難しくなってきた。そのため、新規開発投

資が抑制傾向になった。②株主、投資家から、原油生産量という量よりも、純利益という質を求められるようになり、配当金の引き上げ、自社株買い等により株主還元を重視するようになり、キャッシュ収入をできるだけ株主への配当、自社株買いに回し、新規投資はキャッシュ収入以下に抑制している。2022年に入り、原油価格は一段と上昇し、本来であれば原油価格の上昇から数ヵ月程度の短期間のうちに、米国のシェール・オイル生産が増加するはずであるが、原油価格が高止まりしているにもかかわらず、米国のリグ（新規油田・天然ガス田開発のための掘削装置）稼働数は伸び悩んでいる（図20参照）。



(出所：ベーカー・ヒューズ社統計)

図20 米国のリグ稼働数推移



(出所：EIA 統計)

図21 米国の原油生産量推移（月別：2019年1月～2022年6月）

シェール・ガス開発、シェール・オイル開発の特徴として、地下 3,000 メートル程度の井戸の掘削期間は、技術革新により数日間程度に短縮され、坑井仕上げ等を含めても、掘削から数カ月間で原油・天然ガス生産を開始できる。中東の巨大油田、メキシコ湾の深海部油田のように 5～10 年程度の開発期間が必要であることと対照的であり、原油価格の動きに対して、機動的な開発が可能である。こうした特徴が、2014 年秋からの原油価格の低位安定に貢献してきた。しかし、2022 年に入ってからシェール・オイル開発企業の動きを見ると、原油価格が上昇しても新規開発を抑制し、むしろ原油価格の上昇によって純利益を増加させることに力点を置いている。実際に、米国の原油生産量は、ロシアのウクライナ侵攻による原油価格の上昇に対して、2019 年 11 月に記録した史上最高の生産量を下回っている（図 21 参照）。

6. シェール・オイル開発企業のジレンマ

2021 年秋以降における新型コロナウイルスの感染拡大の収束傾向、2022 年 2 月のロシアによるウクライナ侵攻などにより、原油価格、天然ガス価格は上昇局面に入っている。こうした原油価格の上昇は、米国のシェール・オイル生産企業にとっては、強い追い風となるはずで

ある。米国の天然ガス価格も、従来の 2～3 ドル/百万 Btu から 8～10 ドル/百万 Btu に高騰し、安価な天然ガスの時代とは様変わりしている。実際にシェール・オイル生産企業の業績は極めて好調であり、石油企業の株式を、「ウクライナ銘柄」として購入する投資家も多い。

しかし、業績の改善、株価の上昇が、そのままシェール・オイルの開発にむすびつかないジレンマがある。第 1 に、上述のように、バイデン政権の脱炭素政策、投資家、金融機関による ESG 投資、株主への利益還元重視により、シェール・オイル生産企業は、事業拡大のための新規投資よりも、稼いだキャッシュを借入金の返済にあて、財務体質を改善し、自己資本比率を引き上げ、配当金支払いを引き上げ、自社株買いを優先している。第 2 に、ウクライナ危機を契機とした世界的な物価上昇により、米国の石油産業においても、掘削に用いるパイプラインの鋼材価格の上昇、シェールンベルジェ社、ハリバートン社、ベーカー・ヒューズ社をはじめとした石油サービス会社のサービス契約価格の上昇、人件費の高騰によって、新規のシェール・オイル油田の開発コストが上昇し、開発のための必要な資機材、掘削装置が十分に手に入らない状況にある。米国の代表的なシェール・オイルの構造である、イーグルフォード鉱区の原油生産量も低迷した状況が続いている（図 22 参照）。

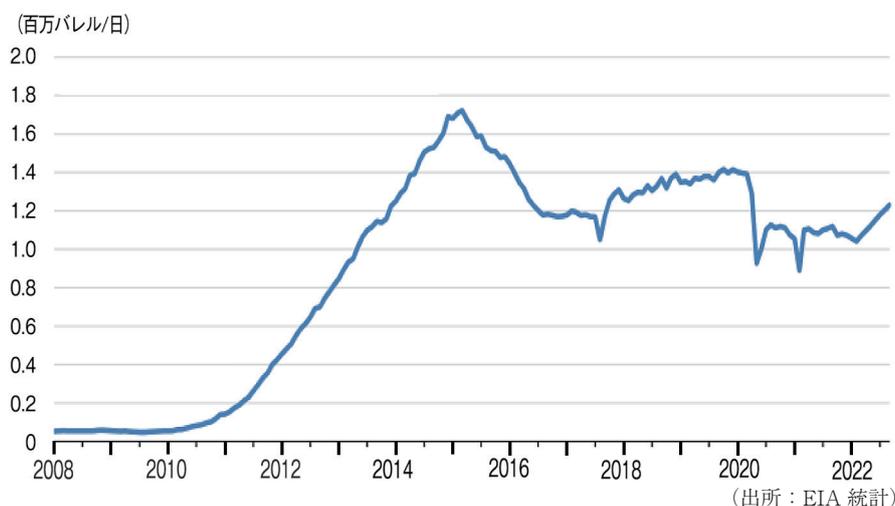


図 22 テキサス州イーグルフォード鉱区の原油生産量推移 (2008 年 1 月～2022 年 9 月)

米国のシェール・オイルの代表的な鉱区は、バッケン・シェール・オイル油田、イーグルフォード・シェール・オイル油田、パーミアン・シェール・オイル油田のビッグ・スリーと呼ばれる鉱区であり、そのどの鉱区も、シェール・オイルの生産が低迷している。シェール・オイル開発には、専用の掘削鋼管が必要であり、鋼材価格の高騰、世界的な鋼材の物流停滞により、シェール・オイル開発に向けた鋼管が手に入りにくい状況となっている。他方、鋼材価格の上昇により、シームレス・パイプラインを生産する日本の鉄鋼メーカーの利益は上向いている。さらに、シェール・オイルの開発には、水圧破碎等の専門のノウハウを持った技術者が多数必要であるものの、2020年における原油価格の暴落により、多くの専門技術者が他業種に転職してしまったことから、専門の人材が払底しており、こうした資機材、人材の両面からも、シェール・オイルの生産量の増加を行えない状況にある。

7. ウクライナ危機に直面し、民主主義はシェールを必要とする

国際エネルギー情勢は、米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命により大きく変貌した。米国は石油生産・天然ガス生産

の合計で、サウジアラビア、ロシアを抜いて世界最大の石油・天然ガス生産国に返り咲いた（図23参照）。

米国が、世界最大の天然ガス生産国、原油生産国となることによって、①世界は、資源枯渇の恐怖と原油価格高騰への懸念から解放され、安価かつ大量の石油と天然ガスを利用することが可能となり、②中東の地政学リスクに国際原油市場が振り回される懸念も小さくなった。こうした状況が生まれることによって、国際原油市場におけるOPECの存在感は相対的に小さくなり、2014年秋以降のサウジアラビアの陸上油田と米国のシェール・オイルとの消耗戦が続き、原油価格は低位安定し、天然ガス価格も下落して、米国はエネルギー大国としての地位を確立し、米国経済繁栄の基礎となった。米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、安価な原油と天然ガスの供給を通じて、確実に米国のみならず世界の人々に恩恵を与えた。しかし、その後の新型コロナウイルスの感染拡大、脱炭素への世界的な流れ、ロシアによるウクライナ侵攻によって、再び原油価格が上昇局面に入り、シェール革命による原油価格の低位安定は剥落した。現在の原油価格であれば、中東諸国の財政は黒字となる（図24参照）。

米国のシェール・ガス革命、シェール・オ

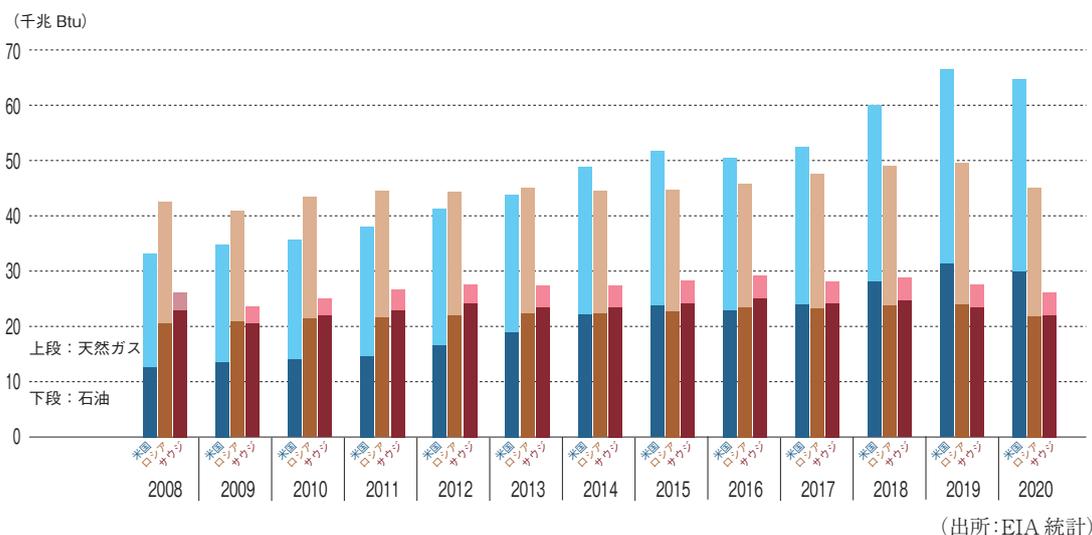


図23 世界三大産油国（米国、ロシア、サウジアラビア）の石油・天然ガス生産量比較

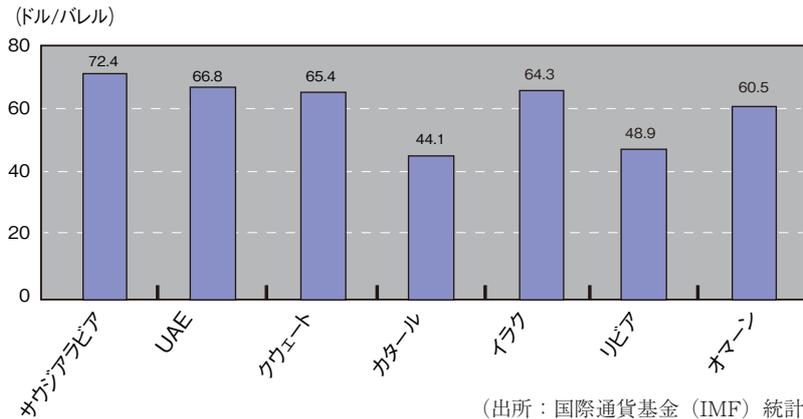


図 24 産油国財政均衡原油価格

イル革命を経て、米国のみならず世界の人々は、安価な石油と天然ガスを手に入れたものの、脱炭素の流れによる新規開発投資の抑制と、ロシア産の石油、天然ガスの供給途絶懸念が相まって、再び原油価格の上昇、天然ガス価格の高騰の時代が始まり、米国の「シェール革命」の勢いが低下したようにも感じる。しかし、米国のシェール・ガス革命、シェール・オイル革命は、不思議な運命を背負っている。ロシアのウクライナ侵攻により、長期的にも強権国家ロシアの豊富な石油、石炭、天然ガスを欧米諸国は期待できなくなり、民主主義国家にとって、米国のシェール・ガスを原料としたLNG、シェール・オイルの必要性が一段と強まっている。欧州諸国は、ロシア産天然ガスを利用し、石炭から天然ガス、そして

太陽光発電、風力発電をはじめとした再エネによる、低炭素社会、脱炭素社会の構築という道筋を描いていたが、ロシアのウクライナ侵攻により、そのシナリオは完全に修正を余儀なくされた。民主主義は米国のシェールを必要としている。幸運なことに、米国のシェール・オイルの生産量は、長期的にも増加すると見込まれている (図 25 参照)。

民主主義国家は、強権国家の石油・天然ガスに依存することなく、長期的にも、民主主義国家・米国からの石油・天然ガスの安定供給を期待することができる。民主主義体制の安全保障、エネルギーの安定供給、脱炭素への経済社会の変革にとって、米国のシェール・ガス、シェール・オイルの重要性が改めて理解されたうえに、米国は十分な量の石油と天

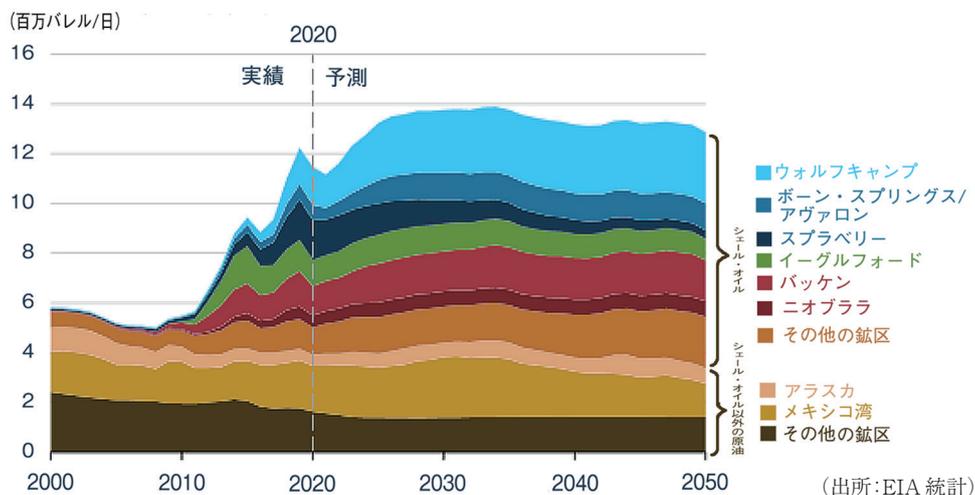


図 25 米国の原油生産量見通し

然ガスを供給できる体制にある。

ここで重要なことは、第1に、脱炭素という世界的な流れのなかにおいて、現在の人類が持つ技術と、カーボンニュートラルをいかに調和させるかである。現時点におけるリチウム・イオン電池の技術革新、出力変動の激しい再エネだけでは、人類の持続的な発展を保障できない。2021年秋から2022年夏にかけて頻発した、世界的な電力危機は、猛暑、寒波の来襲による電力需要の増加に対して、再エネだけでは対応できず、余剰な電力を十分に蓄電する技術をもっていないことによる。脱炭素社会に向けて、アンモニア、水素も期待されているものの、量的、経済的に、シェール・ガス、シェール・オイルに匹敵する力はない。現実的には、世界の石油需要は、今後とも増加すると見込まれる（図26参照）。

現実的に考えれば、自動車用ガソリン、航空機用ジェット燃料をはじめとした輸送用燃料、石油化学原料としては、石油以外に経済的かつ有用なエネルギーはない。発電用燃料としても、瞬時に出力調整が可能であり、炭酸ガスの排出削減を実現しつつ電力の需要変動に対応できるエネルギーはシェール・ガス以外にはないのである。今ある人類の技術によって、どのように炭酸ガス排出削減を実現していくのか。脱炭素への理想と現時点の技術との調和のなかで、米国のシェール・ガス

革命、シェール・オイル革命が持つ意味を冷静に考える必要がある。

第2に、脱炭素社会構築への工程表において、各国政府が、どのような具体的かつ現実的な政策を導入し、人類にとって必要なシェール・ガス、シェール・オイルの生産を促す仕組みをつくるかが重要となってくる。欧州のみならず、米国においても、化石燃料投資への抑制の動きがあるなか、原油価格をパラメーターに市場メカニズムを通じて、市場における自由な経済活動によって、個々の私企業が巨額の新規投資を行うことは難しい。巨額の初期投資と長いリード・タイムを必要とする油田開発、LNGプロジェクトの開発において、脱炭素の理念と調和させながら、シェール・ガス開発、シェール・オイル開発に、米国政府がどのようにコミットしていくかが注目される。2022年9月時点においても、ウクライナ危機は見通しがたたず、2023年冬の電力危機、天然ガス危機も懸念される。シェール・ガスは、米国国民だけではなく、欧州諸国の国民にとっても重要なものとなっている。2022年11月の米国中間選挙、2024年秋の米国大統領選挙により、民主党政権となるのか、共和党政権となるのか。米国のシェール・ガス開発、シェール・オイル開発に対する政策がどうなるのか。それは21世紀の民主主義の未来を決めることにもなるのである。

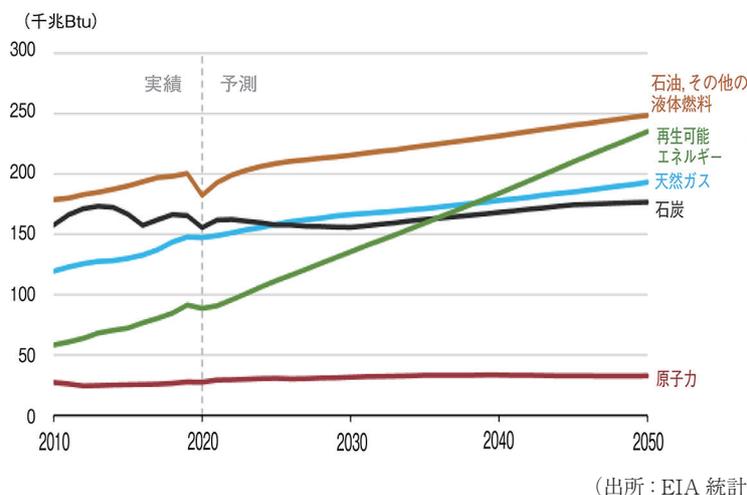


図26 世界のエネルギー需要見通し (2010年～2050年)

[寄稿]

次世代太陽熱発電・蓄熱発電のための高温潜熱・化学蓄熱材料

郷右近 展之 (新潟大学 教育研究院 自然科学系
生産デザイン工学系列 准教授)



1. はじめに～

(1) 背景

国際エネルギー機関 (IEA) の 2020 年における持続可能な開発シナリオでは、世界の二酸化炭素 (CO₂) 排出量は 2030 年に 270 億トン未満に減少し、低炭素電力は世界の総発電量のほぼ 3 分の 2 を占めると予測されている⁽¹⁾。太陽エネルギーは、低炭素電力を産み出す、最も環境に優しい再生可能エネルギー源の 1 つである。その利用法では、主に、太陽日射を受光して熱として利用する太陽熱変換システム (主に太陽熱利用と太陽熱発電) と「メガソーラー」で知られる太陽光発電の 2 つが知られている⁽²⁾。

太陽熱発電では、「コレクタ」や「ヘリオスタット」と呼ばれる太陽日射を追尾する機能を有する反射鏡などで集光して得られる集光太陽熱を、熱力学サイクルの熱源として利用する発電技術が「集光型太陽熱発電」(CSP) として知られている⁽³⁾。CSP 技術は、集熱した熱エネルギーを蓄熱システムに貯蔵可能であることから、中長期における太陽エネルギーの利用効率が大きく、24 時間の発電が可能である⁽⁴⁾。

太陽光発電では、日射量が豊富なときは、発電量が一時的に需要を上回り、余剰電力が発生する場合があります。電力システムの安定化や蓄電設備の整備が急務となっている。この蓄電技術には、蓄電池、蓄熱発電、揚水発電、圧縮空気貯蔵、水素貯蔵など実用段階や開発中のさまざまな技術がある。このうち、蓄熱発電は、太陽光発電

や風力発電などで余剰電力が発生したときに、電気を熱に変換して一時的に貯蔵、電力需要が高くなるときに貯蔵した熱を電気に変換して電力供給する技術である⁽⁵⁾。

太陽熱発電や蓄熱発電におけるキーテクノロジーは、熱エネルギー貯蔵 (TES) である。その作動原理は、物理化学的メカニズムに従って、通常、顕熱貯蔵、潜熱貯蔵、および熱化学的蓄熱の 3 つのタイプに分類される^{(6) (7)}。

太陽熱発電において、熔融塩は高温で高い熱安定性を有することから、液体として顕熱蓄熱に利用されたり、ソーラーレシーバーで得られる高温太陽熱を発電設備に熱輸送する熱輸送流体 (HTF) として利用されたりしている。図 1 に示すスペインの Gemasolar や図 2 に示すアメリカの Crescent Dunes は、「中央タワー CSP 技術」を採用した熔融塩蓄熱型の太陽熱発電所の例である。中でも混合熔融塩の 1 つである Solar Salt (60wt% NaNO₃-40wt% KNO₃) には、290～560°C の温度範囲で CSP プラントにおける豊富な実績がある⁽⁸⁾。しかし、熔融塩の最高温度は、熔融塩の熱分解温度によって大きく制限され⁽⁹⁾、管材や貯蔵タンクの熔融塩による腐食も改善が必要な研究要素となっている。近年では、腐食性化学種の生成を制御することで、560°C 以上の高温においても Solar Salt を利活用する研究が精力的に進められている⁽¹⁰⁾。熔融塩の高温限界は、発電効率に直接影響することから、次世代 CSP では高温での化学的安定性・耐久性・耐腐食性に優れた HTF の研究開発が進められている。



図1 スペイン・Gemasolar 太陽熱発電所⁽¹¹⁾

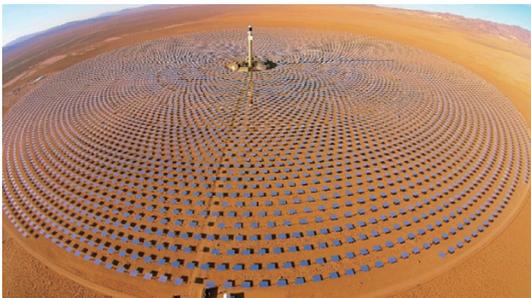


図2 米国・Crescent Dunes 太陽熱発電⁽¹²⁾

(2) 海外の動向

米国エネルギー省は、現在の CSP プラントにおける商業的実行可能性の改善を目指して、第3世代の集光型太陽熱発電に関わる要素技術開発を行う研究開発プログラム (Gen3CSP) を開始している⁽¹³⁾。

この研究プロジェクトでは、気相、液相、固相の3種類の HTF と熱貯蔵流体を使用して CSP プラントの動作温度を 700℃ に上げることでプラントの効率を高めることで、均等

化発電原価 (Levelised Cost of Electricity) を低減することを目指している。Gen3CSP の開発対象は、図3、図4に示すような、中央タワー CSP 技術を採用した高温動作型の次世代向け熱輸送媒体による太陽熱発電である。気相は超臨界二酸化炭素など、液相は塩化物系溶融塩や液体金属ナトリウムなど、固相は固体の酸化物粒子である。

また、オプションとしての開発ターゲットには、熱伝導性に優れた液体ナトリウムを利

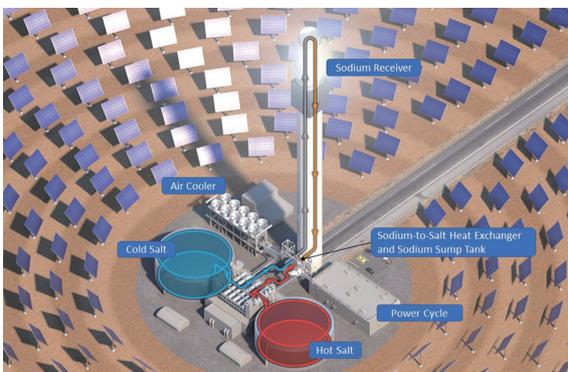


図3 米国・Gen3CSP におけるナトリウム / 溶融塩利用型太陽熱発電所の模式図 (左) Vast Solar's 5-MWth Jemalong pilot plant (右)⁽¹⁴⁾

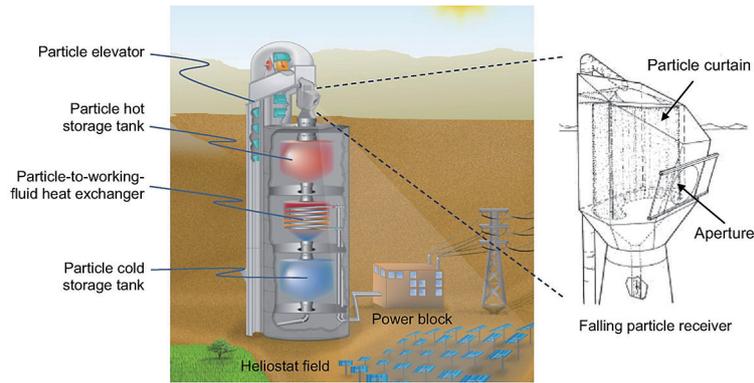


図4 米国で開発中の固体粒子を熱輸送蓄熱媒体とする次世代太陽熱発電所とソーラーレーザーの概念図⁽¹⁵⁾

用した管状ソーラーレーザー，熱分解温度を高温化した3成分混合物から構成される塩化物系溶融塩と発電部との熱交換機，蓄熱した熱エネルギーを電力に変換するための超臨界二酸化炭素（sCO₂）ブレイトンサイクルなどがある⁽¹⁶⁾。

2. 最近の金属系潜熱蓄熱材料技術の進歩

(1) 金属系潜熱蓄熱材料について

固体／液体相変化材料（PCM）を用いる金属PCMが2成分および3成分の共晶混合物の融解エンタルピーによって熱エネルギーを潜熱として蓄積する可能性が報告されている^{(17) (18)}。これまでのCSP向けの金属利用型のTESに関するほとんどの研究は，Al-Mg-Zn，Mg-Zn，Al-Mg-Zn，Zn-Sn，Zn-Al-Mg，Zn-Al，Zn-Mg，およびAl-Snなど400℃以下の低溶融温度に焦点が当てられている。これらは線集光型のパラボラトラフやリニアフレネル方式太陽熱発電での利用を想定したものである。

近年，太陽熱発電の高温化・高効率化が進む中，開発ターゲットとなる太陽熱発電の方式が集中タワー型にシフトしている。HTFとしてSolar Saltを使用する集中タワー型に対応した600℃の上限溶融温度の金属PCMは，Al-Mg-Zn，Mg-Cu-Zn，Mg-Bi，Al-Cu，Al-Cu-Si，Cu-Mg，Al-Siなどが報告されている。また，800℃までの液体熱伝達および熱貯蔵流体の使用を想定した次世代CSPとの組

み合わせを可能にする金属PCMの有望なTESには，Fe-Mg，Cu-Si，Fe-Ge，Zn-Cu-Mg，Cu-Zn-Si，Cu-Si-Mgなどがある。

金属PCMの有利な特徴の1つは，固体／液体相変化の際の小さな体積変化である。近年，Si含有合金は，次世代太陽熱発電におけるTESの潜在的なPCMとして注目が集まっている。また，当研究室ではGe含有合金が固体／液体相変化の際の小さな体積変化を示すことを発見し，次世代太陽熱発電向けの金属PCMとして研究を行って来た。

次節以降ではSiやGe含有合金のPCMとして的高温領域の熱物性と蓄熱性能について概説する。

(2) 当研究室における研究開発事例1：

Al-Si系について⁽¹⁹⁾

硝酸系溶融塩による潜熱蓄熱は，これまでのCSPで一部実用化されたが，集中タワー型CSPにおける潜熱蓄熱システムの本格導入は研究開発中である。一方で，金属合金の潜熱蓄熱利用については，上述のように30年以上前から提案されており，主に，金属系PCMによる潜熱蓄熱材料・蓄熱システムについても研究開発が進められている。金属・合金は，一般に，無機系溶融塩の約10～100倍の高い熱伝導率を有することから，図5に示すように，迅速な熱応答が期待される。しかし，当研究室で従来検討してきた炭酸塩系溶融塩の場合には，低い熱伝導率，ステンレス鋼に対

Na₂CO₃ 溶融塩とAl-Si合金の蓄熱体としての比較

Na₂CO₃ 溶融塩蓄熱の特徴

利点

- 高い融解温度(約 900°C)
- 大きな潜熱蓄熱密度(約 300kJ/kg)

問題点

- 低い熱伝導率
- ステンレス鋼に対する高い腐食性
- 固液相変化の際の大きな体積変化

	融点[°C]	潜熱蓄熱密度 [kJ/kg]	熱伝導率 [W/m K]
Na ₂ CO ₃	858	280	1.84

Al-Si合金の蓄熱体としての可能性

利点

- 高い熱伝導率190[W/mK]
- ステンレス鋼に対する低い腐食性
- Al-Si合金の組成変化により潜熱量を調整できる。
- 共晶点(577°C)の化学組成で潜熱蓄熱が可能+ 過共晶の組成では初晶のSiの融解潜熱が蓄熱に利用できる
- Siの添加により熱膨張を制御できる。
- 固液相変化の際の体積変化を抑制

問題点

- 高温におけるステンレス鋼に対する高い反応性
- 空気雰囲気における脆弱な耐酸化性

図5 Al-Si合金の潜熱蓄熱体としての可能性 (19)

する高い腐食性、固体／液体の相変化の際の大きな体積変化があることが知られており、これらが蓄熱システム化における問題点となっている。

一方、Al-Si合金系では金属系特有の高い熱伝導率、相変化温度、高い蓄熱密度(容量)、および高い熱再現性と信頼性は、太陽集光に伴う熱衝撃、太陽日射の経時変動、および放射過渡現象の緩和が期待できる。87.2% Al-12.2% Siの共晶組成と、共晶組成より多くのSiを含む過共晶混合物は、550-700°Cの範囲で優れた蓄熱特性を示すことが知られている。平衡状態図に基づいて狭い温度範囲で動

作することから、共晶点近傍の化学組成は、熱安定性と再現性からPCMとして好ましく選択される。さらに、Siは固相から液相の相変化する際に体積が減少する特異な性質を有することから、Siの添加により潜熱の蓄熱・放熱の際の熱膨張を制御することが可能となる。図5にも示したが、主な問題点は高温におけるステンレス鋼に対する高い反応性と、空気のような酸化性雰囲気における脆弱な耐酸化性である。

Al-Si合金の潜熱蓄熱容量と蓄熱密度の比較を図6に示す。この合金系は共晶点が575°Cであり、大きな潜熱蓄熱を有することがわかる。

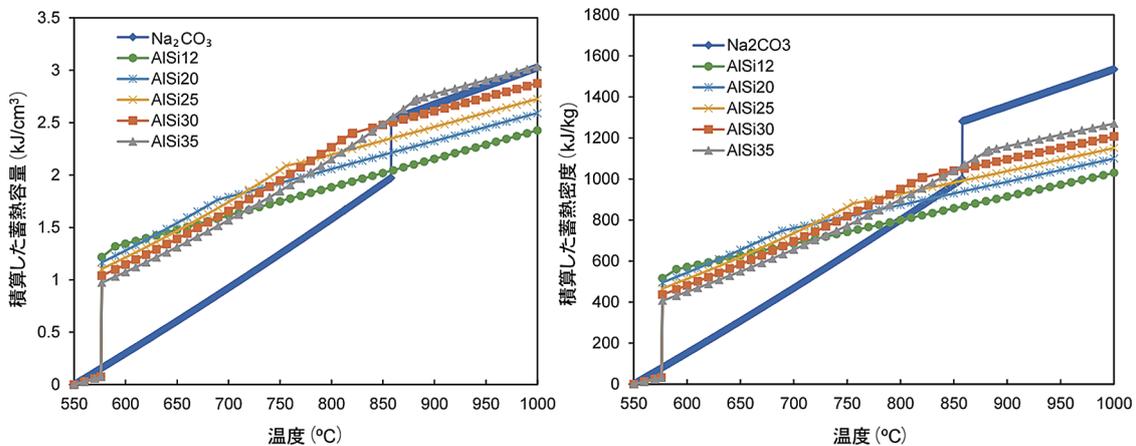


図6 Al-Si合金の潜熱蓄熱容量と蓄熱密度の比較 (19)

Siが過剰な過共晶組成では、共晶組成の融解後に初晶Siの融解潜熱と液相顕熱が蓄熱に利用できる。図6に掲載のAl-Si合金の化学組成範囲では、蓄熱容量・蓄熱密度の観点いずれにおいても炭酸ナトリウム（溶融塩）と比べて大きな蓄熱が可能であることがわかる。

(3) 当研究室における研究開発事例2：

Cu-Si系について⁽²⁰⁾ ⁽²¹⁾

次世代太陽熱発電に関するGen3CSPプログラムでは、2030年までにCSPコスト50ドル/MWhを目標に掲げ、温度700℃を超える高温で安定に動作する熱輸送流体を開発し、コンバインドサイクル発電によりCSPプラントの総合効率を高め、CSPシステムのコスト削減を目指している。有力候補の1つが塩化物系溶融塩や金属ナトリウムであり、蓄熱方式は金属ナトリウムの液体顕熱蓄熱や溶融塩の液体顕熱蓄熱や潜熱蓄熱が検討されている。

当研究室では、欧州・米国で進む次世代太陽熱発電の高温化に対応した金属系PCMによる潜熱蓄熱材料・蓄熱システムの研究開発を進めている。本節ではSi含有合金であるCu-Si合金について紹介する。

Cu-Si合金の平衡状態図を図7に示す。

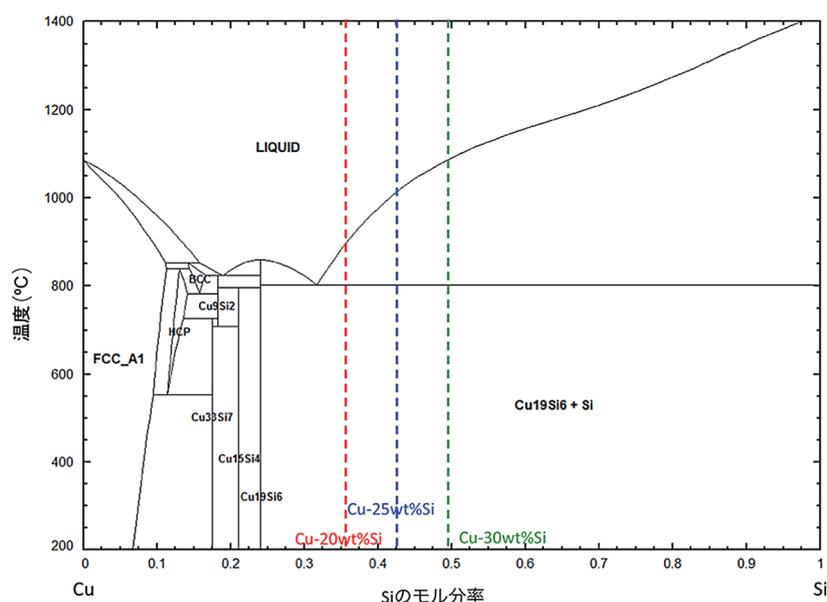


図7 Cu-Si合金の平衡状態図⁽²⁰⁾

802℃の共晶点で次の相変化が進行する。



共晶点の温度が従来のCSPシステムの運転温度よりも高く、次世代太陽熱発電に向けた潜熱蓄熱材料である。この相変化は、Al-Si合金と同様に固相のSiを含有することから、相変化の際の体積変化は小さくなると期待される。Si含有量を増やす過共晶組成を採用することで、相変化の際の体積変化を調整できると推察される。現在、当研究室ではCu-Si合金系の蓄熱システム化について検討を進めている。

Cu-Si合金系の潜熱蓄熱性能の一例を図8に示す。太陽熱発電用途において潜熱蓄熱システムを活用する場合、変動する太陽日射に迅速に追従して、高密度で太陽熱を蓄熱する必要がある。この場合の蓄熱および放熱モードの運転は非平衡状態となり、金属系PCMに求められる特性は、迅速であり繰り返し特性に優れた熱応答である。図8(a)の蓄熱プロセスでは、802℃の共晶点において下に凸の大きな吸熱ピークが観測され、907℃の液相線温度付近において吸熱に変化していることが読み取れる。この挙動は20サイクルを通じてほぼ変化せず安定した熱応答を示す。図8(b)の放熱プロセスにおいて、907℃の液相線温度

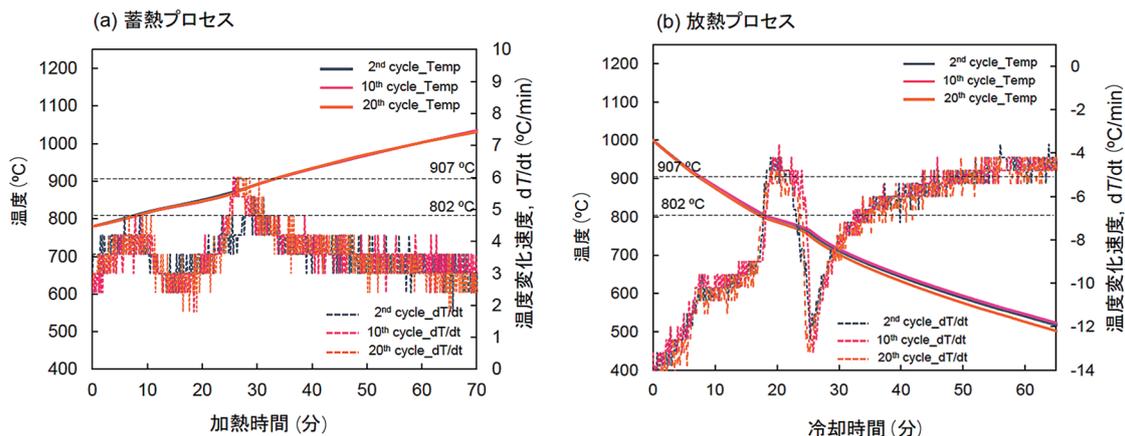


図8 非平衡状態における Cu-Si 合金の蓄熱放熱挙動⁽²⁰⁾

で上に凸の発熱ピークが観測され、802°Cの共晶点で大きな発熱ピークがみられる。これらから、Cu-Si 合金系の潜熱蓄熱性能は繰り返し特性に優れ、かつ平衡状態図にほとんど追従し、良好な熱応答性を保持したまま蓄熱・放熱を示すことがわかる。

(4) 当研究室における研究開発事例3：

Fe-Ge 系について⁽²²⁾

次世代太陽熱発電の高温化に対応した金属系 PCM による潜熱蓄熱材料として、Ge 含有合金系について紹介する。

Si と Ge はともに周期表の第 14 族元素に属しており、当研究室では、Ge も Si 同様に潜熱蓄熱特性を高める効果があることを見出した。Fe-Ge 合金の蓄熱密度と蓄熱容量を表 1 に示す。Fe-75wt%Ge 合金は共晶混合物の化学組成であり、Fe-90wt%Ge 合金は共晶混合物よりの過剰に Ge を含有する過共晶の化学組成に対応する。共晶混合物の化学組成では、

838°Cの共晶点において 320-360 kJ/kg 程度の潜熱蓄熱・放出がある。過共晶の化学組成では、共晶混合物の相対含有率が低く共晶混合物の潜熱蓄熱密度が低下するが、初晶 Ge の存在により蓄熱密度が大きく向上していることがわかる。平衡状態図を参照すると、この合金系の特徴は、共晶混合物よりも Ge 含有量を連続的に 100% Ge 組成まで蓄熱密度が大きく調整できることにある。従って、今後進展することが予想される次世代太陽熱発電の高温化に対応した金属系 PCM として期待される。

蓄熱システム化に必要とされる熱特性に長期サイクル特性がある。金属系 PCM は高温化で温度スイングに曝され、融解凝固を繰り返すことから、合金の揮発に伴う質量損失性能を評価することが重要となる。Fe-Ge 合金の長期サイクルに伴う合金の質量損失評価を図 9 に示す。熱重量分析において、Fe-Ge 合金を 750 ~ 1000°C の温度スイング環境下において、合金の揮発損失を評価した結果である。

表 1 Fe-Ge 合金の蓄熱密度と蓄熱容量⁽²²⁾

相変換材料	プロセス	蓄熱密度 [kJ/kg]			蓄熱容量 [GJ/m ³]		
		共晶混合物	初晶Ge相	共晶混合物 + 初晶Ge相	共晶混合物	初晶Ge相	共晶混合物 + 初晶Ge相
Fe-75wt%Ge	蓄熱	363.7	-	363.7	2.16	-	2.16
	放熱	321.9	-	321.9	1.91	-	1.91
Fe-90wt%Ge	蓄熱	137.4	390.9	528.3	0.79	2.24	3.03
	放熱	72.6	425.4	498.0	0.42	2.44	2.86

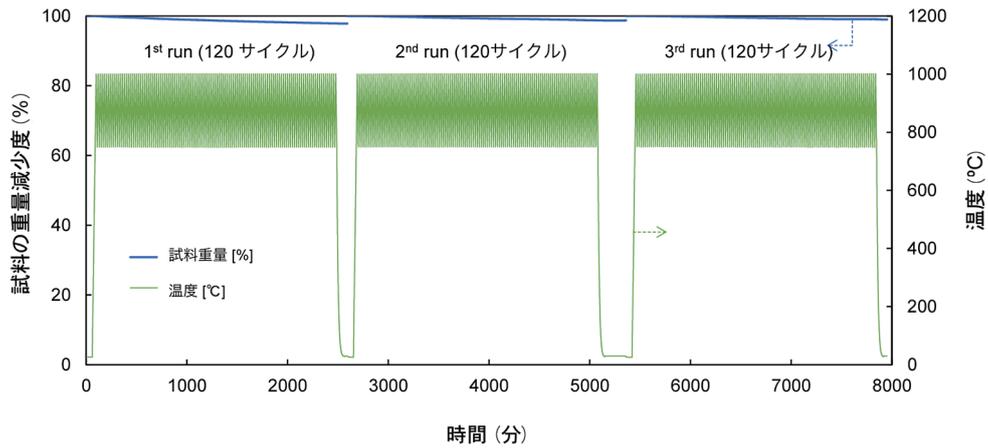


図9 Fe-Ge合金の長期サイクル特性（合金の損失評価）(22)

最初の120サイクル試験で2%以下程度の重量減少が観測され、次の120サイクル試験で1.3%の重量減少、3回目の120サイクル試験で0.8%の重量減少と極めて小さな重量損であり、熱的に安定した性能を長期サイクルにわたって保持することがわかる。

(5) 当研究室における研究開発事例4：

Cu-Ge系について(23)(24)

上述のGe含有合金は優れた長期サイクル特性と蓄熱放熱性能を有することが明らかとなった。当研究室ではGe含有合金が、Si含有合金同様に相変化時の体積膨張を緩和する効果があることを新たに見出した。本節ではCu-Ge合金系における熱物理特性とともにその結果の一部を紹介する。Cu-Ge合金の熱物

理特性（比熱の温度依存性と体積変化の温度依存性）を図10に示す。

Cu-Ge合金は614°Cに固相/固相の相転移があり、644°Cに共晶点を有する合金系である。650°C近傍に共晶点を有する合金系は、研究開発が進む次世代太陽熱発電の蓄熱温度帯に適した合金系として選択した。図10(a)（比熱の温度依存性）に見られるように、共晶混合物組成(Cu-40wt%Ge)と過共晶組成(Cu-50wt%GeとCu-60wt%Ge)いずれにおいても614°Cと644°Cに大きな比熱の変化が観測される。過共晶組成では644°Cの共晶点より高温領域において、初晶Geの存在により相対的に大きな比熱を示すことが特徴である。図10(b)（体積変化の温度依存性）では、614°Cに固相/固相の相転移に伴う体積増加がある

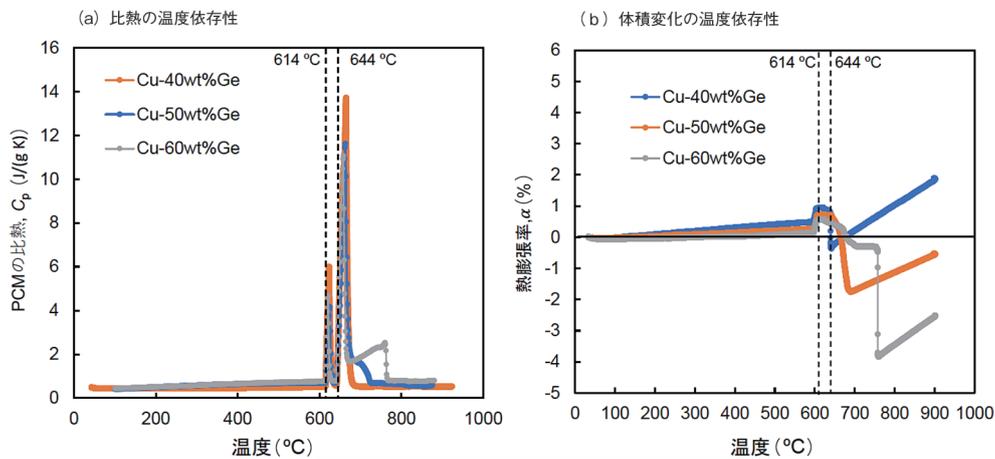


図10 Cu-Ge合金の熱物理特性（比熱の温度依存性と体積変化の温度依存性の評価）(24)

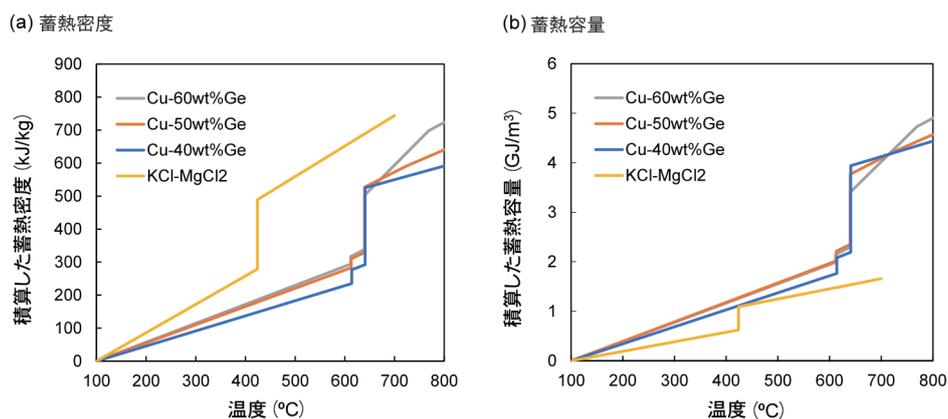


図 11 Cu-Ge 合金の蓄熱密度と蓄熱容量 (24)

が増加は 1%程度と小さいことから、PCM としての利用に問題は生じないと推察される。644°Cの共晶点において大きな体積収縮があることを初めて見出した。共晶混合物組成では体積変化が負 (-1%以下) となり、固相/液相の相変化を伴う潜熱蓄熱/放熱過程において、この挙動は非常に有益となる。過共晶組成では初晶 Ge の融解により、さらなる体積収縮が観測され、化学組成によるが -4%程度の体積収縮が可能であることがわかる。

Cu-Ge 合金の蓄熱密度と蓄熱容量を図 11 に示す。100°Cを基準とした積算蓄熱密度を見るとこの合金系は 500 ~ 700kJ/kg 程度の蓄熱密度を有することがわかる。これは次世代太陽熱発電において液相系熱輸送流体/蓄熱媒体として期待される塩化物系溶融塩と比べて、相転移温度は異なるが同程度の蓄熱密度であることがわかる。積算蓄熱容量で比較すると、この合金系は塩化物系溶融塩と比べて密度が大きく、優れた蓄熱容量を示すことがわかる。

3. 高温向けの化学蓄熱材料技術の進歩

(1) 海外の動向

米国では、上述のように、固体粒子蓄熱による次世代太陽熱発電 (Gen3 Particle Pilot Plant: Integrated High-Temperature Particle System for CSP) に関する研究プロジェクトが進行している。このプロジェクトでは、高

温で安定な固体粒子を顕熱蓄熱媒体/熱輸送流体として利用することを目指し、これに適合したソーラーレシーバー (数 MW の高温落下粒子レシーバー) の開発・設計とソーラー試験を行う計画である。動作時間は数千時間、6時間の蓄熱、超臨界二酸化炭素 (sCO₂) や空気などの作動流体を 700°C以上に加熱するシステム開発である。

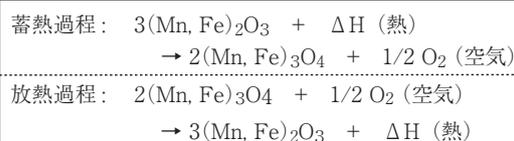
また、欧州では、欧州連合の H2020 プログラムの Next-CSP プロジェクトにおいて、新しい概念の固体粒子ソーラーレシーバーを開発し、1.2MWe のデモンストレーションプラントで検証する計画である (25)。このプロジェクトでは作動温度 (~ 1000°C) における熱物性・熱耐久性・環境や健康への影響の観点から、かんらん石 (Olivine particle) やボーキサイト粒子による顕熱蓄熱システムやマンガン/酸化鉄、酸化コバルト、ペロブスカイト酸化物による高温化学蓄熱システムでの 12 時間のエネルギー貯蔵が検討されている。発電では、620°Cでの超臨界水蒸気/CO₂ タービンが想定されている。化学蓄熱では、顕熱蓄熱や潜熱蓄熱よりも高温・高蓄熱密度が可能となり、蓄熱タンクの小型化による建設・貯蔵コストの削減が期待され、技術経済評価が現在進行中である。

当研究室では、次世代太陽熱発電に対応する固体酸化物粒子を採用した新規蓄熱システムとして、マンガン/酸化鉄、酸化コバルト、ペロブスカイト酸化物による高温化学蓄熱シ

システムの構築を目指して、化学蓄熱材料開発とシステム化に向けた取り組みを進めている。次節からは当研究室における化学蓄熱材料の研究事例について概説する。

(2) 当研究室における研究開発事例 5 :
マンガン / 酸化鉄系について (26) - (28)

次世代太陽熱発電の高温化に対応した固体酸化物による化学蓄熱材料として、反応温度、繰り返し反応性、高い蓄熱密度、環境・安全性の観点からプレスクリーニングを行い、マンガン / 酸化鉄系とペロブスカイト酸化物系の酸化還元系を有力候補と推定している。マンガン / 酸化鉄系化学蓄熱の蓄熱・放熱機構は次の通りである。



蓄熱過程は高温熱によるマンガン / 酸化鉄の吸熱的な熱還元反応に対応し、放熱過程は気相の熱輸送流体（もしくは酸化剤）である空気に含まれる酸素による発熱的な酸化反応である。当初は鉄を含有しないマンガ氧化物による化学蓄熱の評価を進めてきたが、図 12 (a) に示すように、放熱過程における反応速度の低下・繰り返し反応性の顕著な低下が観察された。これらはマンガ氧化物の高温焼結による反応表面積に低下と推察している。

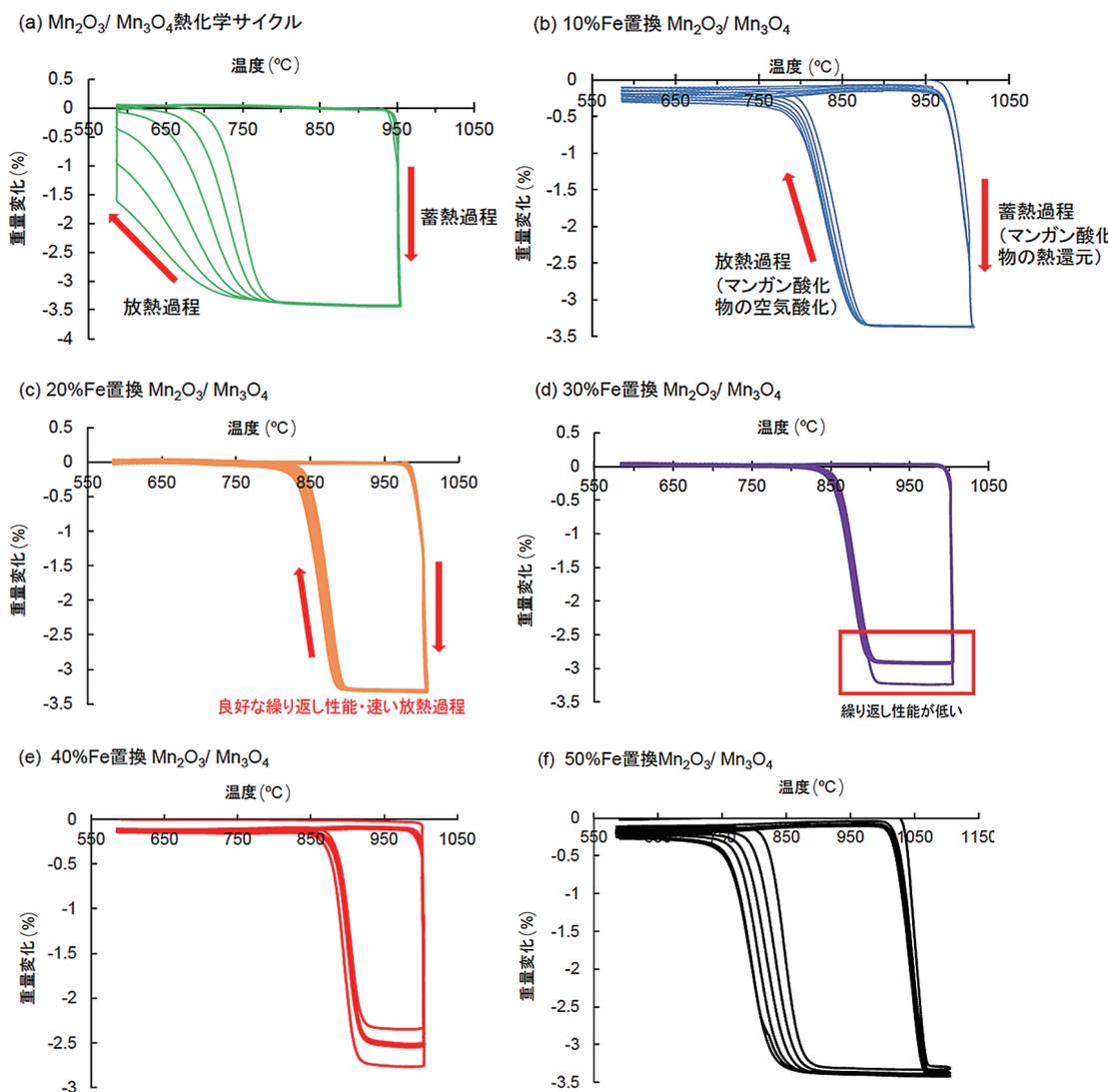


図 12 Fe 置換マンガ氧化物の蓄熱・放熱ヒステリシス曲線と繰り返し性能 (26)

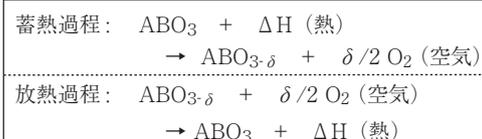
そこで、マンガン酸化物と同じ結晶構造を有し、高融点の金属酸化物である鉄酸化物(Fe₂O₃)との固溶体形成による高融点化が有効と推定し、高温焼結の緩和による反応速度と繰り返し反応性の向上を目指した。マンガン酸化物と鉄酸化物の割合と繰り返し反応性は、図12に示す通りである。鉄酸化物20%の固溶体において、耐高温焼結耐性が向上し、放熱速度の低下を抑制することでサイクル反応性を安定化することに成功した。

現在は、図13に示すように、鉄酸化物20%固溶体系の反応速度モデルを構築し、さらに化学蓄熱システム構築のためのラボスケール試験装置の作製および性能試験を進めている。

(3) 当研究所における研究開発事例6：

ペロブスカイト酸化物系について⁽²⁹⁾

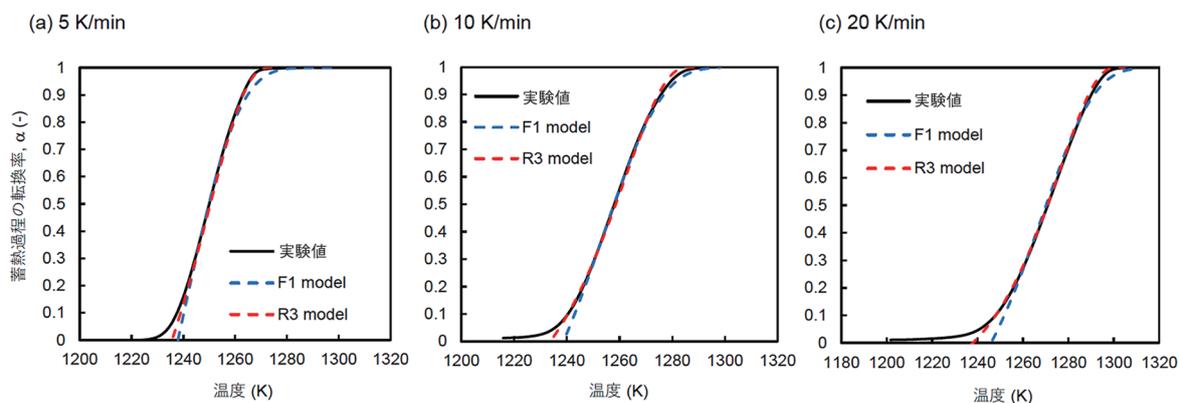
ペロブスカイト酸化物(一般にABO₃と表記する。)による高温化学蓄熱がラボスケールの研究開発段階であるが、研究報告が近年増えている。ペロブスカイト酸化物系の化学蓄熱・放熱過程は次のように進行する。



AとBはペロブスカイト構造のAおよびBサイトのイオン種、ABO_{3-δ}は熱還元された酸化物の状態、δは空気酸化と熱還元による酸素含有量の変化を定義する化学量論係数を表している。

蓄熱過程と放熱過程で異なる結晶構造をとる場合、化学蓄熱に構造相転移を利用できるケースがある。次世代太陽熱発電向けに開発されたペロブスカイト酸化物は、SrCoO₃, SrFeO₃, BaCoO₃, Ba_{0.5}Sr_{0.5}CoO₃, La_{0.3}Sr_{0.7}Co_{0.9}Mn_{0.1}O₃, La_{0.3}Sr_{0.7}Co_{0.8}Mn_{0.2}O₃などである。しかし、化学蓄熱サイクルの蓄熱過程は不活性なAr雰囲気のような比較的温和な試験条件での蓄熱温度や蓄熱密度の報告が多くみられる。

当研究室では、表2に示すように、多くのペロブスカイト酸化物について、化学蓄熱密度の計測と反応温度域の同定を進めてきた。



化学蓄熱材料	雰囲気	化学反応モデル	反応速度式(da/dt)
粉末状試料 (Mn _{0.8} Fe _{0.2}) ₂ O ₃	Air:N ₂ =4:1	R3 (α=0-1.0)	$\frac{d\alpha}{dt} = 7.28 \times 10^{23} \exp\left(-\frac{5.60 \times 10^5}{RT}\right) \times 3(1-\alpha)^{2/3}$
		F1 (α=0.46-1.0)	$\frac{d\alpha}{dt} = 2.92 \times 10^{24} \exp\left(-\frac{6.51 \times 10^5}{RT}\right) \times (1-\alpha)$
粒子連結した多孔質構造 (Mn _{0.8} Fe _{0.2}) ₂ O ₃	Air:N ₂ =4:1	A2 (α=0.20-0.48)	$\frac{d\alpha}{dt} = 8.38 \times 10^{18} \exp\left(-\frac{4.67 \times 10^5}{RT}\right) \times 2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$
		R2 (α=0.49-1.0)	$\frac{d\alpha}{dt} = 3.15 \times 10^{15} \exp\left(-\frac{3.89 \times 10^5}{RT}\right) \times 2(1-\alpha)^{1/2}$

図13 Fe20%置換マンガン酸化物の蓄熱過程の蓄熱速度モデル(上)と蓄熱速度式(下)⁽²⁶⁾

表2 当研究室で化学蓄熱材料として検討したペロブスカイト系酸化物群⁽²⁹⁾

Aサイト	Bサイト	AサイトにおけるA : Sr 比率	ペロブスカイト系 化学蓄熱材料	表記
La	Mn	0.5 : 0.5	$\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_{3-\delta}$	LS55M
		0.3 : 0.7	$\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{Mn}_{0.7}\text{O}_{3-\delta}$	LSAM3737
		0.4 : 0.6	$\text{La}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{O}_{3-\delta}$	LSAM4646
		0.5 : 0.5	$\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$	LSAM5555
	Fe	0.5 : 0.5	$\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{FeO}_{3-\delta}$	LS55F
		0.5 : 0.5	$\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Cr}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$	LSCrF5555
		0.5 : 0.5	$\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_{3-\delta}$	LSAF5555
	Co	0.3 : 0.7	$\text{La}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{CoO}_{3-\delta}$	LS37C
		0.5 : 0.5	$\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\delta}$	LS55C
		0.7 : 0.3	$\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_{3-\delta}$	LS73C
Ba	Co	0.3 : 0.7	$\text{Ba}_{0.3}\text{Sr}_{0.7}\text{CoO}_{3-\delta}$	BS37C
		0.5 : 0.5	$\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{CoO}_{3-\delta}$	BS55C
		0.7 : 0.3	$\text{Ba}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{CoO}_{3-\delta}$	BS73C

前掲した図2のような固体粒子蓄熱を利用した次世代太陽熱発電では、大気に暴露された固体粒子を太陽集光照射により高温加熱する構想であり、空気雰囲気による化学蓄熱性能の評価が必要と考える。当研究室で見出した構造相転移による化学蓄熱材料は、図14に示すように、空気雰囲気における蓄熱温度域860 – 1070℃、放熱温度域720 – 995℃であり、次世代太陽熱発電向けに開発中のソーラーレシーバーの動作温度域とおおよそ合致している。今後の検討課題は高コスト要因となるCo

やNiを含まない安価な酸化物組成の探索、長期サイクル反応性・安定性と蓄熱密度の向上、安価な大量合成法の開発である。

また、化学量論の不定比性を利用した化学蓄熱では、結晶格子の酸素空孔を利用することから酸素の取り込みおよび放出時に体積変化が小さく、固定層や充填層等の化学蓄熱システム化に有利となる。近年、幅広い温度域で酸素不定比性を有するカルシウムマンガン酸化物系ペロブスカイトが検討されている。安価で毒性がなく豊富な資源量が特徴であり、

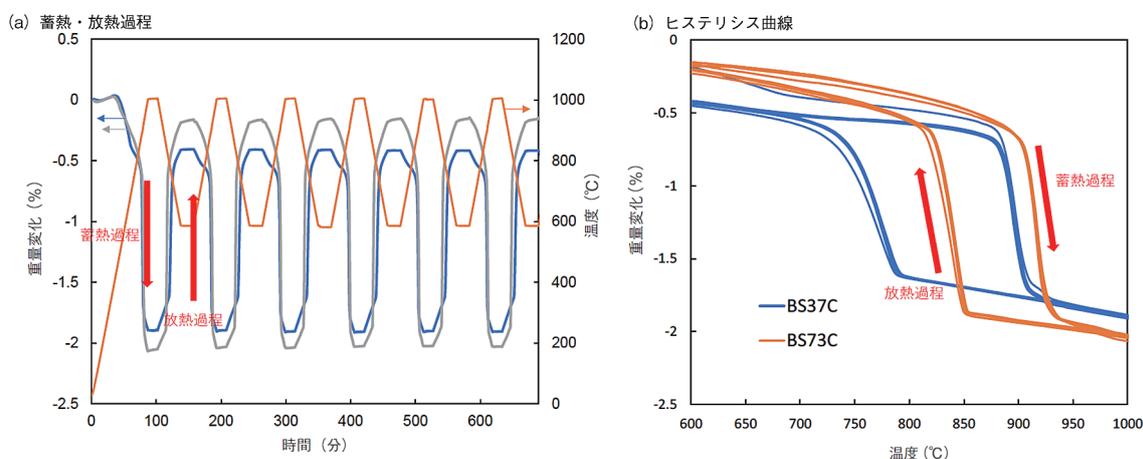


図14 ペロブスカイト酸化物の相転移利用型化学蓄熱の (a) 蓄熱・放熱過程と (b) ヒステリシス曲線⁽²⁹⁾

800℃以上での化学蓄熱材料として有望である。しかし、酸素分圧 $PO_2 < 0.01 \text{ atm}$ では1000℃付近で酸化物が分解し、可逆性が失われることが課題である。A および B サイトを異なるイオンに置換することで蓄熱密度の改善が進められている。本研究室ではイオン置換により、蓄熱開始温度の低下 (800℃以下)、分解温度の上昇 (1000℃以上)、反応エンタルピーの増大、サイクル反応性の向上を見出している。

4. おわりに

当研究室では、次世代太陽熱発電や蓄熱発電に対応した蓄熱システムの蓄熱密度と熱応答性の向上を目的として、高融点の金属PCMによる潜熱蓄熱材料や酸化物の酸化還元系を利用した化学蓄熱材料開発と蓄熱システムの開発に取り組んでいる。金属PCMによる潜熱蓄熱材料として、高熱伝導性金属のAlやCuなどと、固液相転移における負の熱膨張を示すSiやGeを組み合わせることで、融解(蓄熱)/凝固(放熱)による相変化時の体積変化を大幅に低減することに成功し、現在は、これらの金属PCM蓄熱材料の蓄熱システム化に取り組んでいる。具体的には、酸化物の酸化還元系を利用した化学蓄熱材料として、マンガン酸化物の繰り返し蓄熱・放熱性能向上やペロブスカイト酸化物による化学蓄熱密度の向上を図り、化学蓄熱システム化に取り組んでいる。

蓄熱技術は太陽熱発電だけでなく、世界で実用化が進む蓄熱発電や日本国内の工場排熱の有効利用技術にも活用できると考えられる。また、太陽日射が乏しい日本国内においては、比較的低温の太陽熱の有効利用技術にも蓄熱の基本コンセプトが応用可能である。本稿が当該分野の更なる発展の一助となれば幸いである。

参考文献

(1) International Energy Agency (IEA), "World Energy

Outlook 2020," (<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>)

- (2) Goswami, D.Y., "Principles of Solar Engineering, third ed.," (<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>) (2015)
- (3) Islam, M. T., Huda, N., Abdullah, A.B., Saidur, R., "A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends," *Renewable and sustainable energy reviews* 91, 987-1018, (2018)
- (4) Skumanich, A., "CSP: Developments in heat transfer and storage materials," *Renewable Energy Focus*, 11 (5), 40-43, (2010)
- (5) 稲田雄二, 「脱炭素社会に向けて開発進む蓄熱発電」, 三井物産戦略研究所レポート, 2021年2月
- (6) Pelay, U., Luo, L., Fan, Y., Stitou, D., Rood, M., "Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants," *Renew Sustain Energy Rev*, 79, 82-100, (2017)
- (7) Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., Cabeza, L.F., "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 - Concepts, materials and modellization," *Renew Sustain Energy Rev*, 14, 31-55, (2010)
- (8) Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D. Y., Rahman, M.M., Stefanakos, E. K., "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants," *Progress in Energy and combustion science*, 39, 285-319, (2013)
- (9) Xu, X., Wang, X., Li, P., Li, Y., Hao, Q., Xiao, B., Elsentriecy, H., Gervasio, D., "Experimental test of properties of KCl-MgCl₂ eutectic molten salt for heat transfer and thermal storage fluid in concentrated solar power systems," *Journal of Solar Energy Engineering*, 140, 051011-1-9, (2018)
- (10) Bonk, A., Braun, M., Hanke, A., Sötz, V. A., "Thomas Bauer, Enhancing the thermal stability of solar salt up to 600° C in extended lab-scale experiments," *SolarPACES proceedings 2019*, (2019)
- (11) SENER Energy Web Site, (<https://www.energy.sener/projects/gemasolar>)
- (12) Grupo Cobra Web Site, (<https://www.grupocobra.com/en/proyecto/crescent-dunes-solar-thermal-power-plant/>)
- (13) M. Mehos et al., "Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap," *Nrel/Tp-5500-67464*, no. January, pp. 1-140, 2017, (2017)
- (14) 米国エネルギー省ウェブサイト, (<https://www.energy.gov/eere/solar/project-profile-national-renewable-energy-laboratory-1-gen3-csp>)
- (15) Ho, C., "A review of high-temperature particle receivers for concentrating solar power," *Applied*

- Thermal Engineering, 109 958-969, (2016)
- (16) Carlson, M. D., Amogne, D., Dorsey, D., "200 MWth and 1 MWth chloride salt to supercritical carbon dioxide heat exchanger and test integration designs," SolarPACES proceedings 2020, (2020)
- (17) Birchenall, C.E., Reichman, A.F., "Heat-storage in eutectic alloys, Metallurgical Transactions A," 11 (8), 1415-1420, (1980)
- (18) Farkas, D., Birchenall, C.E., "New eutectic alloys and their heats of transformation," Metall. Trans. A, 16, 323-328, (1985)
- (19) Gokon, N., Nakamura, S., Yamaguchi, T., Kodama, T., "Cyclic properties of thermal storage/discharge for Al-Si alloy in vacuum for solar thermochemical fuel production," Energy Procedia, 69, 1759-1769, (2015)
- (20) Gokon, N., Yamaguchi, T., Kodama, T., "Cyclic thermal storage/discharge performances of a hypereutectic Cu-Si alloy under vacuum for solar thermochemical process," Energy, 113, 1099-1108, (2016)
- (21) Gokon, N., Yamaguchi, T., Cho, H. S., Bellan, S., Hatamachi, T., Kodama, T., "Thermal storage/discharge performances of Cu-Si alloy for solar thermochemical process," AIP Conference Proceedings 1850, 100008, (2017)
- (22) Gokon, N., Chew, S. J., Nakano, Y., Kodama, T., Bellan, S., Cho, H. S., "Thermal charge/discharge performance of iron-germanium alloys as phase change materials for solar latent heat storage at high temperatures," Journal of Energy Storage, 30, 101420, (2020)
- (23) Gokon, N., Chew, S. J., Bellan, S., Kodama, T., Hatamachi, T., Cho, H. S., "Chemical compatibility of Cu-Ge alloy with container materials for latent heat storage system," AIP Conference Proceedings 2303, 190014, (2020)
- (24) Gokon, N., Chew, S. J., Nakano, Y., Okazaki, S., Kodama, T., Hatamachi, T., Bellan, S., "Phase change material of copper-germanium alloy as solar latent heat storage at high temperatures," Frontiers in Energy Research, 9, 696213, (2021)
- (25) Next-CSP, (<http://next-csp.eu/>)
- (26) Gokon, N., Nishizawa, A., Yawata, T., Bellan, S., Kodama, T., Cho, H.S., "Fe-doped manganese oxide redox material for thermochemical energy storage at high temperatures," AIP Conference Proceedings 2126, 210003, (2019)
- (27) 郷右近展之, 「次世代太陽熱発電における化学蓄熱の研究動向と将来展望—金属酸化物による高温利用の化学蓄熱—」, セラミックス 56 (12) 813-816, 2021年12月
- (28) Gokon, N., Hayashi, K., Sawaguri, K., Ohashi, F., "Long-term thermal cycling test and heat-charging kinetics of Fe-substituted Mn_2O_3 for next-generation concentrated solar power using thermochemical energy storage at high temperatures," Energies 15 (13) 4812, (2022)
- (29) Gokon, N., Yawata, T., Bellan, S., Kodama, T., Cho, H.S., "Thermochemical behavior of perovskite oxides based on $LaxSr_{1-x}(Mn, Fe, Co)O_{3-\delta}$ and $BaySr_{1-y}CoO_{3-\delta}$ redox system for thermochemical energy storage at high temperatures," Energy 171 (15) 971-980, (2019)

送電業界の課題とその解決に向けた取り組み ～電力供給の安定性と安全性確保のために～



谷地 浩明 (プロジェクト試験研究部
主任研究員)

1. はじめに

送電業界は、国民生活と産業活動に必要な不可欠な電力を安定的かつ安全に供給する役目を担っている。さらに近年では、地球温暖化対策として、低炭素電源ではあるが出力変動が大きい太陽光や風力といった再生可能エネルギー（再エネ）電力の大量導入が進められており、送電の安定性と安全性の確保が益々重要になってきている。

電力インフラ構成設備の1つで、鉄塔や電線、がいしで構成される架空送電設備は、高度経済成長期（1955年頃～1973年頃）以降、特に1970年代に多く新設されたが、1990年代以降の経済成長の停滞や省エネ機器の普及などにより、電力需要は横ばい、減少傾向にある。このため、鉄塔新設基数は、2000年代以降、ピーク時から10%近くまで減少した。

一方、近年では老朽化した鉄塔の建替や電線張替などの劣化更新工事が増加していることに加え、2012年の固定価格買取制度（FIT制度）導入以降、再エネ電力を既存の架空送電設備へ繋ぐ（系統アクセス線）工事も増加傾向にある。これにより、新設や劣化更新などの架空送電設備にかかる工事（以下、送電線工事）の受注実績は2006年頃から増加している。ところが、それまでに減少してきた工事量に伴って作業員数も減少したため、増加に転じた工事量に必要な施工力の確保が困難な状況にある。

送電線工事は、ルート選定・測量から始まり、用地交渉、仮設工事、基礎工事、鉄塔組立工事、架線工事と各段階を経て進められ、ローカル系統における鉄塔数基の新設では完工までに2年以上、基幹系統における数十基の新設になると10年以上と、長期にわたり多くの労力を費やして遂行される。

本稿では、架空送電設備の概要と筆者の送電線工事経験^{*}も踏まえ、「送電線工事の概要」、「全国の工事量と作業員数の推移」から施工力確保の重要性を説明するとともに、「施工力確保に向けた送電業界の取り組み」を紹介する。

2. 架空送電設備の概要

架空送電設備は、7,000V（7kV）を超える電圧（特別高圧）で送電しており、日本では様々な電圧階級（22kV、33kV、66kV、77kV、154kV、187kV、275kV、500kVなど）がある。日本の送電線で最も高い1,000kVは「超々高電圧」（UHV）と呼ばれる。空気絶縁を行っている架空送電設備では、電圧が高くなるほど鉄塔の規模が大型化するが、送電損失は電流の2乗に比例するため、同じ電力を送電する場合には、電圧を高くし電流を少なくすることで損失が小さくなり長距離大容量送電が可能となる。また、上位2電圧で送電している系統を「基幹系統」、それ以外を「ローカル系統」と呼ぶ。

電気には交流と直流があるが、変圧が容易で送電線の本数を削減できるなどの理由から

^{*}中部電力パワーグリッド(株)にて架空送電設備の保守・建設などに従事、現在、当研究所（IAE）に出向中。

「三相交流」で送電するのが一般的である。ただし、直流送電にもメリットがあり、交流と直流を変換する変換所のコストが発生するが、交流と比べて送電損失が小さく、リアクタンス分により系統安定度が低下する問題もなくなるため、長距離送電では直流の方が優位となる場合がある。このため、2019年に運開した北海道と本州を結ぶ新北本連系線の海底ケーブルには直流が採用されている。今後、2050年のカーボンニュートラル実現に向け導入の推進が期待される洋上風力にも、海底ケーブルを用いた直流送電が検討されている。

架空送電設備には、基礎、鉄塔、電線、がいし、架空地線、電線を把持するクランプなどの様々な付属品がある。以下では、架空送電設備を構成する主要な設備について説明する。

(1) 鉄塔

鉄塔の構成材には、等辺山形鋼（断面形状がL字の形鋼）や中空鋼管（断面形状が筒状の鋼管）などがある。中空鋼管は等辺山形鋼に比べ荷重への耐力が大きいですが、溶接などの加工手間が発生するため費用が高くなることが多い。このため、ローカル系統などに用いる比較的規模が小さい鉄塔には、図1の山形鋼鉄塔を採用することが多く、基幹系統などの規模や荷重が大きく山形鋼鉄塔が適用でき

ない場合には、図2の鋼管鉄塔を採用する。

鉄塔の形状にも種類があり、わが国においては用地取得の困難さと供給信頼度確保の観点から、三相交流送電のための3本の電線を垂直に配置した四角鉄塔が採用されることが多い。その他にも、送電線に付着した雪が一斉脱落して電線が跳ね上がり、送電線同士の接触（相間短絡）を引き起こす「スリートジャンプ」への対策として、図3の送電線を水平に配列した烏帽子鉄塔、鉄道や道路をまたぐ必要がある場合の門型鉄塔など、建設地点の周辺環境や気象条件などに応じて形状が選定される。

また、送電線は様々な場所を通過していることもあり、必要に応じて各種環境対策もなされている。国立公園など景観に配慮が必要な場合には、茶色系の塗装を施し目立たなくしたり、沿岸部など潮風にさらされやすい鉄塔や経年によりめっきが減耗した鉄塔には、耐腐食性能を向上させるため防錆塗装を施したりする。防錆塗装は、下塗り塗料に防食性に優れた塗料（エポキシ樹脂系など）を塗布し、その上に対候性に優れた塗料（ウレタン樹脂系など）を塗布する2層塗りも積極的に採用されている。近年では、車の塗装にも使用される粉体（焼き付け）塗装も、一部沿岸部の鉄塔に導入されている。



(出所：愛知金属工業)

図1 山形鋼塔



(出所：愛知金属工業)

図2 鋼管鉄塔



(出所：愛知金属工業)

図3 烏帽子鉄塔

(2) 電線

電線は、鉄塔に引き留められる部分はいしで絶縁されており、地上高が高く一般人が接触する恐れがないことから裸線を使用している。過去、電線は高導電率かつ加工技術面から「硬銅より線」(HDCC)が用いられていたが、送電線工事が増加し始めた1950年代以降は、HDCCよりも安価で軽い、図4の「鋼心アルミより線」(ACSR)が主流となっている。また、戦後から高度経済成長期にかけて、電力需要が急激に上昇したこともあり、電線の太径化と多導体化(1相を複数の電線で送電)が図られるとともに、耐熱性と強度の向上のためアルミに元素を添加した合金を用いた電線も多数開発されている。それに加え、鉄塔と同様、電線にも必要に応じて環境対策がなされ、発生する風音を低減するため、突起となる素線をよりこんだ図5の「低風音電線」などもある。

(3) がいし

がいしは、電線と鉄塔を絶縁するために使用され、主に図6のような太陽光や温度変化による自然劣化が少ない磁器製が採用されている。

がいしには、電線の重量や張力、風圧などの荷重がかかる。このため、一列のがいしで強度が不足する場合には、荷重を分担させるため二列、三列と並列に増やしていく。

また、電圧が高くなると電線と鉄塔の距離を長くする必要があるので、直列に連結するがいしの個数を増やしている。このため、一

般にがいしが直列に多く連結されている箇所は電圧が高く、連結されている個数が少ない箇所は電圧が低い。

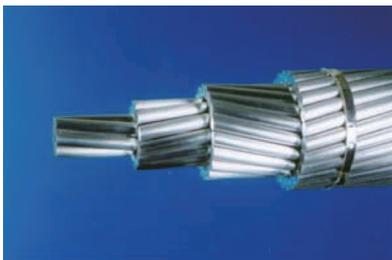
がいしの環境対策としては、景観に配慮するための茶色系がいしの採用や、がいし表面に塩分などの汚損物質が付着して発生する「部分放電」(コロナ放電)の低減などのため、撥水性を高めたポリマー性がいしなどがある。

3. 送電線工事の種類

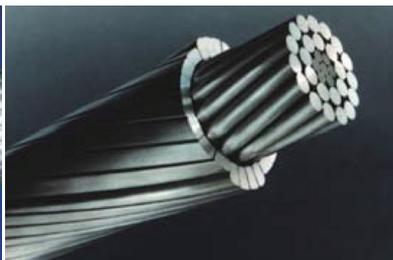
送電線工事には様々な種類があるが、本章では近年増加傾向にある劣化更新工事と系統アクセス線工事(再エネ関連)について説明する。

(1) 劣化更新工事

劣化更新工事とは、高経年設備や沿岸部などの環境要因による腐食で将来的に設計(安全)基準を満たさなくなる可能性のある設備の更新(鉄塔建替や電線張替など)工事などのことであり、様々な要因を考慮して計画的に実施される。例えば、鉄塔に使用される鋼材は、1960年代まで主に「造塊法」(溶鋼を鋳型で凝固させ、鋼塊にしてから圧延)という鋳造方法で製造されており、鋼塊内部に不純物が残存しやすい。その鋼塊を圧延して製造された鋼材は、内部から層状に腐食するラミネーションを発生させる可能性が高く、高経年鉄塔ほど腐食発生リスクが高いため優先的に建替える。また、沿岸部では、塩化物イオンを含む海塩粒子の影響により、鉄塔や電



(出所：住友電気工業)



(出所：住友電気工業)



(出所：IAE)

図4 ACSR電線

図5 低風音電線

図6 がいし装置

線が腐食しやすい。特に電線は、複数の層を持つより線となっているため、内部で腐食が進行していても外観からは気づきにくいケースがある。このため、沿岸部に位置する送電線の一部を採取して内部状況を調査し、張替の優先順位を決定するなど、設備の経年や点検結果、周辺環境などを考慮して劣化更新の計画を策定している。また、劣化更新は、単純に同一仕様で設備を新しくするのではなく、「送電線の下に背の高い樹木が多くある場合には、樹木接近に伴う伐採頻度を低減するため鉄塔を高くする」、「作業員の往来や資機材の搬入出が困難な山の尾根に位置している鉄塔は、点検や巡視などの保守業務や将来の劣化更新工事を見据え、道路に近い麓へルートを変更する」など、設計自体の大幅な見直しを伴うこともある。

(2) 系統アクセス線工事（再エネ関連）

系統アクセス線工事は、発電事業者が発電設備を新設し、一般送配電事業者の電力系統へ接続する工事である。系統への接続は、発電設備の受電点から直近の送電線を直線的に繋げられれば経済的であるが、実際にはルート上避けなければならない場所もあるため、送電線のルート検討や既存系統の増強要否などの技術検討が必要となる。

一般送配電事業者は、発電事業者からの申し込みを受け、工事にかかる工期や費用の算定を含めた技術検討を行う。技術検討は、発電事業者から提示される受電設備の位置図やレイアウト図などにより行う。受電点が最寄りの送電線から発電所建屋を挟んだ反対側にある場合などは、鉄塔基数削減のため、受電点の位置変更を打診するなど、合理的な設備形成となるよう双方で協議をしながら進める。図7はその一例である。発電事業者は、技術検討結果から事業性を判断し、系統連系を希望する場合には契約申し込みを行い、一般送配電事業者と工事費負担金契約を締結する。負担金は、原則工事着手前までに支払われ、その後一般送配電事

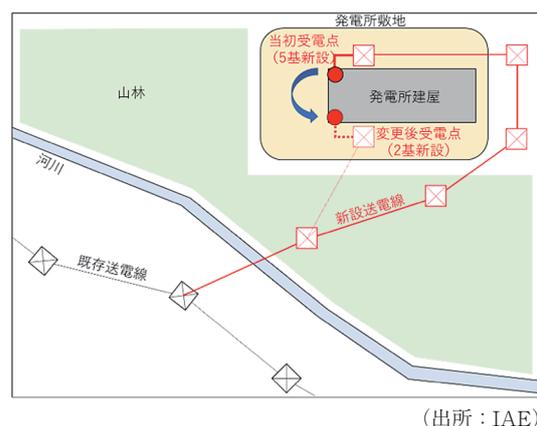


図7 系統アクセス線工事の協議例

業者が工事に着手する。技術検討時の工事計画は、測量や地盤調査、用地交渉前に策定される。その後の調査の結果、鉄塔建設地点の地盤状況が悪く、想定よりも鉄塔の基礎が大きくなり費用が増加したり、地権者の同意が得られずルート自体を見直したり、当初計画から変更となる可能性がある。

4. 架空送電線工事の概要

送電線工事は複数のプロセスを経て進められ、長期にわたり多くの労力を費やして行われる。本章では、ローカル系統における一般的な送電線新設（建替含む）工事の概要を説明する。

(1) ルート選定・測量

まずは概略ルートを決めるため、地形図や都市計画図、土地利用図、縦断図作成システム（地図上に鉄塔位置および鉄塔高さなどの各種諸元を入力することで、簡易的に縦断図を作製できるツール）などを用いて、鉄塔の建設が可能な場所を選定する。この際、径間長（鉄塔と鉄塔の間の距離）をできるだけ長くして鉄塔基数を削減するなど、経済性も考慮した検討を行う。送電線ルートは、極力鉄塔基数を削減した方が経済的であるが、地滑りしやすい地域や軟弱地盤、希少植物といった植生、景観など、ルート上で避けなければ

ならない場所が多く存在するため、ルートは直線的にならず、迂回する箇所が多くなるほど基数も増える。また、工事時には、資機材を建設位置まで運搬する必要があることや、建設後の巡視や点検などの保守を行いやすくするため、付近の道路状況を考慮することも忘れてはならない。

概略ルートの決定後、現地踏査を行い、鉄塔位置や地形、地質などの照合確認を行う。現地踏査では、山道のない森の中を進むこともあり、滑落や動物（クマやイノシシ）との遭遇、ヘビや蜂、アブなどの害虫の危険にさらされながら、最適なルートを構成するための鉄塔建設位置を模索する。

現地踏査によるルートの確定後、測量士により測量機器（トータルステーション）を用いた測量が行われる。この測量により、鉄塔の位置やルート上の物件類が図面に落とし込まれる。この図面を基に、送電線の下にある物件や樹木から必要な離隔を確保できる送電線高さを検討する（縦断設計）ことで、鉄塔の形状と高さが決定する。

(2) 用地交渉・取得

送電線位置決定後、鉄塔建設箇所および送電線下方の権利取得のため用地交渉を行う。地権者の同意が得られなければ工事に着手できないため、工事理由などの説明を真摯に行うことが重要となる。

複数の鉄塔を新設する場合には、1つの鉄

塔建設箇所では交渉が難航し位置を変更することもある。その際は、設計上、前後あるいはその先の鉄塔位置まで変更しなければならない場合もあるため、ルート選定からやり直す必要がある。また、ルート再検討の結果、鉄塔建設が困難な場合には、架空送電線から地中送電線への変更が必要となり、費用が大幅に増加することもあるため、用地交渉は送電線工事における最も重要な要素の1つである。

(3) 仮設工事

送電線工事を行うには、工事用地を確保するとともに、資機材を建設箇所まで運搬する必要がある。運搬路が確保できない山岳地では、すべての資機材を人力で運搬することができないため、図8に示す索道や図9に示すモノレールといった運搬設備を設置する。しかし、運搬設備の仮設には、大規模な伐採を伴うこともあるため、地権者から同意が得られない場合や急傾斜地が多く設置できない場合には、図10に示すようにヘリコプターによる運搬を行う。また、工事用地に木や不安定な地表面がある場合には、伐採・造成を行ったうえで鉄板を敷き、安定した作業用地を確保する。さらに、送電線工事を安全かつ確実に遂行するには、十分な作業用地が不可欠である。このため、急傾斜地などで造成だけでは平らな地表面を確保できない場合には、図11に示すように「作業用ステージ」と呼ばれる大きな作業台を設置する。



(出所：送電線建設技術研究会)

図8 索道



(出所：送電線建設技術研究会)

図9 モノレール



(出所：送電線建設技術研究会)

図10 ヘリコプター運搬



(出所：送電線建設技術研究会)

図 11 作業ステージ

(4) 基礎工事

台風のような強風下でも、鉄塔からの荷重を支える強固な基礎を設置する。一般的には、「逆 T 字型基礎」という T の字を逆にした断面形状の基礎（鉄筋コンクリート）が鉄塔各脚に据えられる。しかし、地盤が軟弱で、鉄塔からの荷重を地盤で支えられない場合には、地中の安定した地盤まで荷重を伝達させるため、「杭基礎」と呼ばれる長さ十数メートルにおよぶ長い杭を設置することもある。基礎工事の掘削作業で湧き水が発生する場合には、排水を溜める桶や基礎の配筋類置き場、コンクリートの搬入出などのための広い工事用地が必要となる。

また、基礎工事では、掘削、配筋といった手間のかかる作業に加え、主要材料のコンクリートには、打設後に一定の養生期間が必要になる。このため、基礎工事期間が工期全体に占める割合は大きい。鉄塔新設基数が複数ある場合には、順番に基礎を打設していき、



(出所：送電線建設技術研究会)

図 12 基礎工事の風景

必要養生期間を経過した箇所から順次鉄塔組立を開始することで、効率的に工事を進行させる。図 12 に工事の風景を示す。

(5) 鉄塔組立工事

鉄塔は、部材と呼ばれる「等辺山形鋼」や「中空鋼管」などで構成されるが、それらを 1 つ 1 つボルトで連結（鋼管の場合には溶接も含む）し組み上げていく。組み上げは、十分な工事用地がある場合には、図 13 に示すように、あらかじめ地上で組み上げたものをクレーンで釣り上げ継ぎ足していくが、クレーンが入れないような狭い現場では、部材を 1 つ 1 つ引き揚げながら組み立てるため時間を要する。部材同士を連結させるためのボルト数は膨大で、すべてのボルトが規定の力（トルク）で締められるよう、トルクメータが付いた工具で値を確認するとともに、確認したボルトにマーキングを行うなど、漏れのないようにしている。

(6) 架線工事

架線とは、鉄塔と鉄塔の間に電線を張る作業のことである。図 14 に示すように、最初は、ヘリコプターやラジコンヘリ、近年ではドローンを使い、細いロープで鉄塔と鉄塔を結ぶ。その後、細いロープから徐々に太いロー



(出所：IAE)

図 13 鉄塔組立工事の風景



(出所：送電線建設技術研究会)

図 14 架線工事の風景

プへ引き替え、最後に電線を決められた張力で張り上げる。

電線は、遠方からは一見細く軽そうに見えるが、ローカル系統でよく使われる ACSR160 mm² ~ 240 mm² の重さは 1 m 当たり 0.73 ~ 1.11kg であり、標準的な径間長 300m の場合、電線 1 本当たりの重さは 219 ~ 333kg にもなる。実際の電線は、弛み（弛度）が出るため径間長より長くなりさらに重くなる。電線は、強く張り上げるほど弛度が小さくなり、地上高を確保できるが、鉄塔にかかる荷重が増大し、部材が大きくなって不経済となるため、必要な地上高と鉄塔強度のバランスを考慮した張力で設計される。

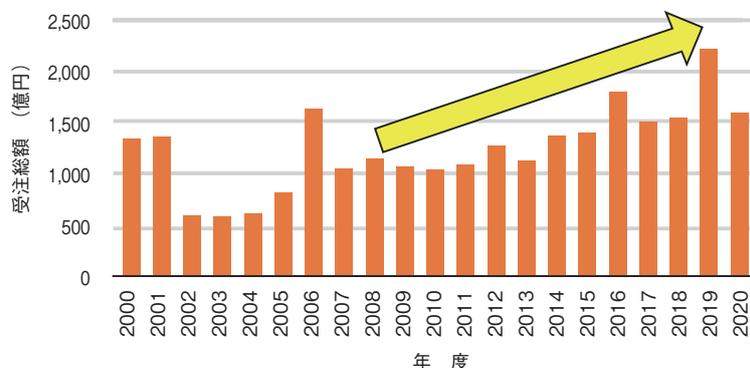
5. 送電線工事の物量と作業員数の推移

日本全体の送電線工事の受注実績は、2010 年頃から増加傾向にある。直近の実績では、図 15 に示すように、2010 年度の 1.5 ~ 2 倍

となっている。要因としては、高経年設備の劣化更新、再エネ連系に伴う送電線の新設・増強工事の増加がある。これに加えて、基幹系統の劣化更新や地域間連系線新設、東海旅客鉄道(株)のリニア中央新幹線開通に向けた送電線新設工事なども計画・進行しているため、工事量に対応できる施工力の確保がより一層重要となる。

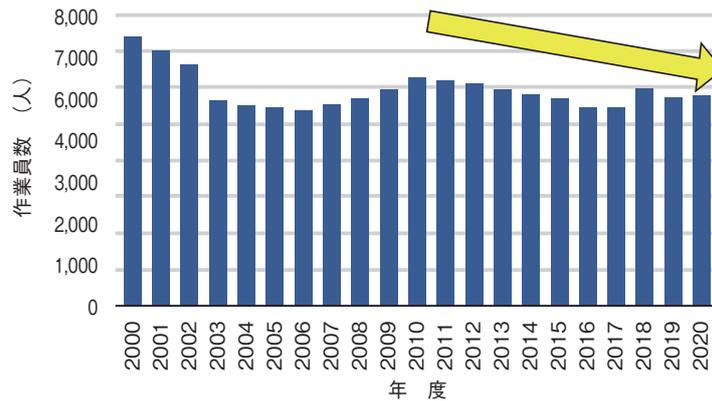
送電線工事では、鉄塔組立工事や架線工事など、高所での作業が必須である。送電業界は、いわゆる「3K」（きつい、きたない、きけん）と呼ばれ、3 年以内の離職が約半数と離職率が高く、新規採用者数も低迷していた。高所作業員数の推移を図 16 に示す。2010 年頃から増加している送電線工事に対し、高所作業員数は減少傾向になっていることがわかる。

送電線工事などの架空送電設備の作業に従事する人を「ラインマン」とも呼ぶ。一人前のラインマンになるには長い歳月が必要である。現場は全国各地にあり、山や雪中、住宅



(出所：送電線建設技術研究会のデータを基に IAE 作成)

図 15 送電線工事の受注実績



(出所：送電線建設技術研究会のデータを基にIAE作成)

図 16 高所作業員数の推移

街など様々な現場環境があることに加え、扱う設備の形態（鉄塔形状や規模など）も多種多様であるため、例えば、電線張替など同じ目的の工事でもその施工方法や使用する機械工具類には様々なバリエーションがある。作業中にやり方を細かく確認しては期日までに完工できないため、ラインマンには豊富な知識と高い技能が必須となる。当然、現在活躍しているラインマンも、入社当初からそのような知識と技能を身に付けているわけではない。入社後の机上・実技研修に加え、現場で先輩ラインマンとともに作業に従事する中で、指導を受けるだけでなく、見て覚えかつ自分でやってみることを繰り返し、1つ1つの作業を習得していく。長い歳月をかけ、このような地道かつ自発的な努力を経て初めて一人前のラインマンとなることから、高い離職率と採用者数の低迷は、一人前のラインマンが育ちにくいことを意味している。それは、電力の安定供給を脅かす重大な課題でもある。

送電業界では、この対策として次節で示す「施工力確保に向けた取り組み」が全国的に行われている。これにより、2018年度には高所作業員数が増加に転じた。しかし、増加する送電線工事に対応するには、適宜フォローアップを行い、より良い労働環境の整備に向けた取り組みを継続する必要がある。

6. 施工力確保に向けた取り組み

(1) 働き方改革（全国一斉休日の導入）

送電業界では、送電線施工会社などで構成される一般社団法人である送電線建設技術研究会と一般送配電事業者が中心となり、2020年度から「全国一斉休日」を導入している。例えば、基礎・鉄塔組立・架線作業者が携わる建設工事と修繕工事を対象に、原則として10月第2週の「スポーツの日」（体育の日）を含む土曜日、日曜日、月曜日を3連休とするほか、毎月第2週の土曜日、日曜日を連休とし、休日を固定化することで作業員が休みやすい環境整備を推進している。また、遠方の現場への休日の移動を避けるため、原則的に、一斉休日明けの初日や月曜日には、電線張替工事などの送電線を停止させて行う作業（停電作業）を設定しないことも盛り込んでいる。

(2) 工事の機械・省力化による労力の削減（ドローン運搬の適用）

山岳地における建設工事などの大規模工事では、索道、モノレール、ヘリコプターを使って資機材運搬を行うが、鉄塔の塗装や架空送電設備の付属品取替など、比較的小規模な工事は小運搬車や人力に頼っているのが現状である。このため、ドローンによる資機材運搬の検討が積極的に行われており、2022年8月、中部電力パワーグリッド(株)では山岳地に建つ

基幹系送電鉄塔の塗装工事に塗料の入った一斗缶運搬に初めて導入した。今後、山岳地での資機材運搬の省力化が期待される。

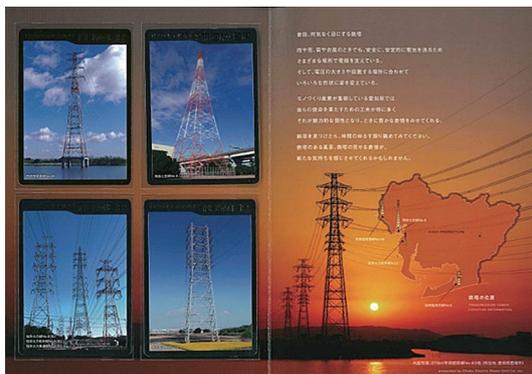
(3) PR 活動

①ラインマン PR 動画「進路相談室の恋人」

送電線建設技術研究会の YouTube チャンネルでは、確保に苦慮している作業員の採用増を目指し、主に工業系の高校生を対象に、送電業界の認知度向上のための PR 動画を公開している。動画では、送電線工事での仕事内容や魅力などをドラマ仕立てで紹介している。

②鉄塔カードの販売・配布

2019年3月以降、送電線に関する認知度向上や採用活動促進のため、東京電力パワーグリッド㈱を初めとし、一般送配電事業者や送電線建設技術研究会などの業界関係会社では、**図 17**のような鉄塔カードの作成、販売、配布を行っている。非常に大きな超高压送電鉄塔や珍しい形状の鉄塔など、特徴的な鉄塔が多くラインナップされており、送電業界への興味や関心を高めるように工夫されている。



(出所：IAE)

図 17 鉄塔カード

③採用活動の拡大

送電線工事の施工会社の一部では、スポーツクライミング施設の運営、ボルダリングジム運営会社と提携して、高い場所に登ることが好きな施設利用者を対象に、送電線工事に従事する魅力紹介や人材募集を行っている。送電線工事

では高所作業が必須であるため、高所を得意とする人材を積極的に誘致することで、人材不足解消に繋がるよう取り組んでいる。

7. まとめ

本稿では、送電業界の取り組みとして工事の機械化（ドローン運搬）も紹介したが、送電線工事は、最終的に人（作業員）の手によって完遂され、作業員は今も、険しい山や高所といった危険な環境下で作業を行い電力の安定供給を支えている。この姿は、送電線工事が最も盛んだった高度経済成長期から大きくは変わっていない。そうした作業員の安全を第一に確保するため、送電業界では安全を最優先とした作業遂行“ゼロ災”を目標に掲げている。しかし、2021年度には、送電線工事で死亡災害が2件（伐採木への挟まれ、蜂刺され）発生した。

確かに、新技術が次々に開発されてはいるが、組立作業では様々な位置や角度でのボルト締め、架線作業では決められた弛度での電線の張り上げ、がいし周りの細かい金具（架線金具）の連結など、細やかな作業が多く含まれている。現状では、これらの作業を人の手を介すことなく完遂させることは困難である。

また、近年では、ドローンや AI（人工知能）などの先進技術を活用した「スマート保安」による作業の効率化が進んできている。IoT（モノのインターネット）などの新技術が長年変わらなかった業界に変革をもたらしている。このような変革を起こすには、様々な業界の技術革新に深い関心を持つとともに、他業界からの積極的なアプローチを促す必要がある。そのために、送電業界の認知度を向上させるとともに、今後も様々な業界への情報発信と交流を図り、送電業界のさらなる変革が促進されることを期待する。

参考文献

- (1) 電力広域的運営推進機関, 「発電設備等に関する系統アクセスの流れ」, 2022年7月

- (2) 送電線建設技術研究会「送電業界の課題について」,
第2回 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分会
電力安全小委員会 令和元年度台風15号における鉄塔及
び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ, 2019年
11月14日
- (3) 電気学会 送電用鉄塔設計標準「JEC-127」, 1965年
- (4) 電気学会 送電用支持物設計標準「JEC-127」, 1979年
- (5) 送電線建設技術研究会「鉄塔工事施工技術解説書」,
2012年
- (6) 送電線建設技術研究会「架空送電線路調査測量技術
解説書」, 2005年
- (7) 電気新聞「スポーツライミング通じ仕事の魅力PR
北陸電気工事」, 2021年10月20日
- (8) 東京電力パワーグリッド(株)プレスリリース「鉄塔カー
ドによるリクルート活動について」, 2019年3月25日
- (9) 電気新聞「送電線工事, 4月から毎月第2週土日を
全国一斉休日に」, 2020年1月17日
- (10) 電気新聞「重量物運搬用ドローン, 中部電PGが初
導入/静岡幹線, 鉄塔塗装作業に」, 2022年8月5日

研究所のうごき

(令和4年7月1日～9月30日)

◇ 第31回理事会

(書面決議：7月15日(金))

議 題：

第1号議案 第18回評議員会の召集について

◇ 第18回評議員会

(書面決議：7月29日(金))

議 題：

第1号議案 評議員会の一部改選について

◇ 月例研究会

第421回月例研究会 (Web開催)

日 時：7月8日(金) 14:00～15:30

テーマ：

ヒートポンプ関連技術の最新動向
(早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空
宇宙学科 教授 齋藤 潔氏)

第422回月例研究会

日 時：9月16日(金) 14:00～15:00

テーマ：

小型モジュール炉 (SMR) の最近の開発動向と
び今後の見通し
(一財) エネルギー総合工学研究所 原子力技
術センター 原子力チーム 部長 都筑 和泰)

◇ 外部発表

[講演]

講演者：坂田 興

テーマ：低炭素社会実現に対する水素エネルギー
システムの貢献可能性と政策動向

発表先：(株)日本計画研究所

日 時：6月17日

講演者：坂田 興

テーマ：Significance of introduction of Large
Amount of Hydrogen to Japan

発表先：23rd World Hydrogen Energy Confer-
ence (WHEC) 2022, Istanbul (オンライン)

日 時：6月29日

講演者：酒井 奨

テーマ：CO₂ 排出削減, CO₂ 有効利用活用に向
けた技術開発動向と今後の展望

講演先：(株)技術情報協会技術セミナー(オンライン)

日 時：7月7日

講演者：黒沢 厚志

テーマ：「2050年カーボンニュートラル」実現に
向けた最新動向

講演先：東京都 職業訓練指導員特別研修

日 時：7月13日

講演者：黒沢 厚志

テーマ：エネルギー需給モデルによるカーボン
ニュートラル分析

講演先：早稲田大学 カーボンニュートラル技術
概論 a

日 時：7月29日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクルの基本と実現に向け
ての課題

講演先：滋賀大学 公共経営イブニングスクール

日 時：7月29日

講演者：酒井 奨

テーマ：CO₂ 排出削減, CO₂ 有効利用活用に向
けた技術開発動向と今後の展望

講演先：(株)技術情報「カーボンニュートラル・
二酸化炭素関連セミナー」(オンライン)

日 時：8月22日

講演者：坂田 興

テーマ：Perspective of Hydrogen and Ammonia
Technologies

発表先：2022年度新エネルギー人材育成事業
アルゼンチン・チリ対象「水素」研修

(主催：(一財)日本エネルギー経済研究所)

日 時：9月1日

講演者：岡崎 徹

テーマ：Thermal energy storage for economic de-carbonized society

講演先：蓄熱に関する国際シンポジウム
(於北海道大学)

日 時：9月5日

講演者：坂田 興

テーマ：低炭素社会実現に向けた水素エネルギーシステムの貢献可能性

発表先：JASIS (分析機器工業展・科学機器展)

日 時：9月7日

講演者：岡崎 徹

テーマ：経済的な脱炭素社会を実現する蓄熱発電

講演先：第17回関西伝熱セミナー2022

(主催：日本電熱学会関西支部)

日 時：9月9日

講演者：加藤 悦史

テーマ：ネガティブエミッション技術～その必要性・最新動向・課題・今後の展望～

発表先：(株)情報機構 オンラインセミナー

日 時：9月15日

講演者：黒沢 厚志

テーマ：脱炭素社会実現に向けた課題

講演先：科学技術に関する調査プロジェクト

2022 シンポジウム「2050年カーボンニュートラルの実現に向けた脱炭素技術の課題と展望」(主催：国立国会図書館)

日 時：9月30日

[学会発表]

発表者：黒沢厚志, 加藤 悦史, 井上 智弘他

テーマ：Times-JAPAN モデルによるカーボンニュートラルエネルギーシステム分析

発表先：第43回国際エネルギー経済学会 (IAEE) 年次世界大会

日 時：7月31日～8月5日

発表者：黒沢厚志, 加藤 悦史, 井上 智弘他

テーマ：ソフトリンクによる2050年のエネルギー需給分析 その3

(2) エネルギーシステムモデルを用いた

民生部門エネルギー需要変化の影響評価

発表先：第41回エネルギー・資源学会研究発表会

日 時：8月8日～9日

発表者：田中 健一

テーマ：Developing Database-Record Format and

Data Interface for Decommissioning in Japan

発表先：日本原子力学会 2022年秋の大会

日 時：8月29日

発表者：田中 健一

テーマ：Dependence of Neutron Activation on Elemental Compositions of Biological Shield Wall Concrete for the Purpose of Decommissioning

発表先：NUTHOS-13 2022 (オンライン)

日 時：9月7日

発表者：田中 健一

テーマ：廃止措置及び廃棄物処理処分における核データの利用と今後核データに期待すること

発表先：日本原子力学会 2022年秋の大会

日 時：9月9日

発表者：木野 千晶

テーマ：

(発表1) SAMPSON/JUPITER 連成シミュレーション手法による Phebus 解析

(発表2) 国内における浮体式原子力発電の検討状況 (2) 浮体式原子力発電における BWR 成立性の評価

(発表3) SA 時の FP 挙動モデルの評価

(3) SA コードにおけるエアロゾル沈着及び CsOH 再蒸発モデルの検討

発表先：日本原子力学会 2022年秋の大会

日 時：9月7日～9日

[寄稿]

寄稿者：石本 祐樹

テーマ：カーボンニュートラル燃料を輸送・貯蔵するエネルギーキャリア

寄稿先：『カーボンニュートラル燃料最新動向～
水素・アンモニア・e-fuel・バイオ燃料～』
(第2章 第1節 第2項) (株情報機構刊)
発行月：7月

寄稿者：森山 亮
テーマ：新エネルギーの普及と技術課題
寄稿先：日本鋼構造協会 会誌『JSSC』(No.50)
発行月：7月

寄稿者：井上 智弘
テーマ：社会経済活動によって変容するエネ
ルギー需要～ COVID-19 対策がもたらした
影響の評価～
寄稿先：日本原子力学会誌『ATOMOS』(64 巻 8 号)
発行月：8月

寄稿者：飯田 重樹
テーマ：2021 年における重要なエネルギー関係
事項 (Annual Energy Reviews 2021)
寄稿先：日本エネルギー学会機関誌『えねるみくす』
(101 巻 5 号)
発行月：9月

寄稿者：橋崎 克雄
テーマ：カーボン・サーキュラー・エコノミー
寄稿先：『石油技術協会誌』(第 87 巻第 6 号)
発行月：9月

寄稿者：岡崎 徹
テーマ：蓄熱発電の現状と課題
寄稿先：『月刊 研究開発リーダー』(株技術情報
協会刊)
発行日：9月 20 日

編集後記

ロシアのウクライナ侵攻により、経済を支えるエネルギーの安定かつ適切な価格での供給の重要性が世界的に認知された。カーボンニュートラルおよび原子力の見直し機運は注視要である。

日本でも原子力に関して革新炉の開発・建設の検討が始まるなど動きが急である。日本では福島第一原子力発電所の廃炉の着実な実施は国民的課題であり、原子力の信頼性回復に重要である。本号最初の記事には、この廃炉作業を中心に地域対策や人材育成も含む日本原子力研究開発機構の取組みが網羅されており、他分野の方々にも一読をお勧めする。

2番目の記事は、シェール革命により世界最大の原油および天然ガス生産国となった米国の状況から世界のエネルギー事情を洞察している。「二酸化炭素排出量が石炭の約半分のシェール・ガスは欧米先進国の脱炭素トランジション（橋渡し）の切り札」との記載は興味深い。客観的なデータから地政学的考察やESG（環境・社会・企業統治）投資の影響まで踏み込んだ貴重な記事である。シェール革命が無ければウクライナ侵攻への欧米諸国の対応も変わっていたとの

記載には重みがある。

再生可能エネルギー（再エネ）も多種多様である。3番目の記事は、太陽光エネルギーを熱に変えて貯蔵し、需要に応じてその熱で作った蒸気で発電する太陽熱発電に関する記事である。需要に応じて電力供給ができ、電力システム安定化への寄与も期待できることから、近年注目を集めている。筆者の研究を中心に世界的な動向も記載されており、技術的特徴と課題の把握に好適である。

最後の記事は、電力を送る送電業界の現状をまとめている。送電インフラは、電力供給上、極めて重要な社会インフラであり、送電業界の実情を知るのに貴重な記事である。再エネ導入増加に伴い系統アクセス線工事が増加するも、人手や技術の維持・伝承の課題と取組みが技術的説明と合わせて丁寧に記載されている。

シェール革命も米国の中堅石油企業の技術開発成功がトリガーである。当研究所の活動や本号の記事が技術立国日本における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3号

令和4年10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。