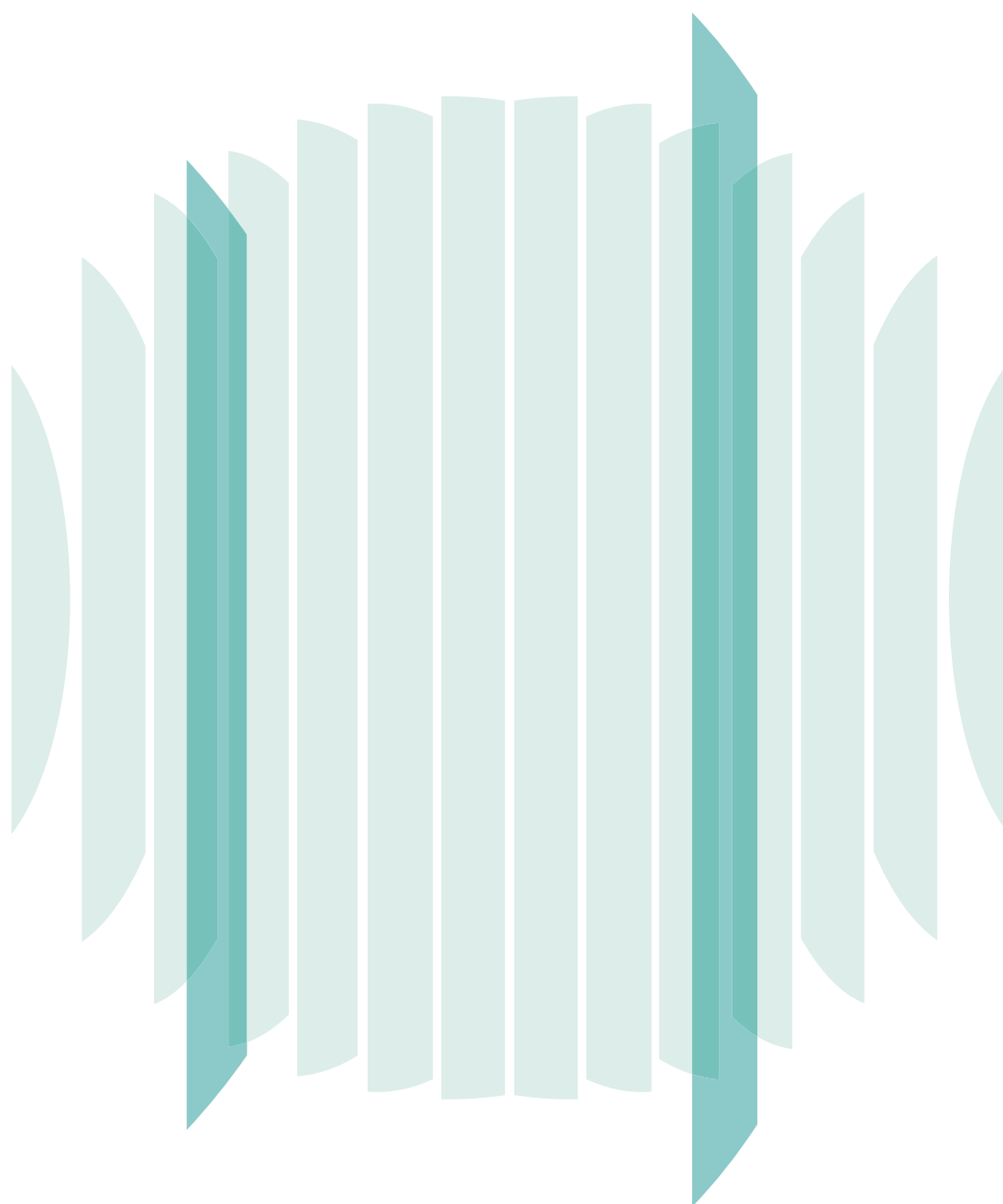


季報 エネルギー総合工学

Vol. 45 No. 2 2022. 7



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

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

バックエンド総括本部 バックエンド推進部長

目黒 義弘 …………… 1

【寄稿】

国際廃炉研究開発機構における研究開発への取り組み

国際廃炉研究開発機構 開発計画部 部長

奥住 直明 …………… 8

【寄稿】

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 ……………17

【調査研究報告】

再エネ主力電源化に向けた電力系統の慣性力低下への対応

プロジェクト試験研究部 特任参事

新谷 隆之 ……………26

【調査研究報告】

カーボンニュートラルのための地政学

～エネルギー・セキュリティの国際比較と日本への提言～

研究顧問

小野崎正樹

プロジェクト試験研究部 部長

橋崎 克雄 ……………34

【事業報告】

令和3年度 事業報告の概要 (一財) エネルギー総合工学研究所 …………… 49

【研究所のうごき】 …………… 62

【編集後記】 …………… 64

[寄稿]

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

目黒 義弘

(国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
バックエンド総括本部 バックエンド推進部長)



1. はじめに～ARTEMIS レビューに至った背景～

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)は、前身の日本原子力研究所および核燃料サイクル開発機構(旧 動力炉・核燃料開発事業団)の期間を含めて65年以上にわたり日本の原子力に係る研究開発を担ってきており、燃料加工施設、試験研究炉、再処理施設、廃棄物管理施設、燃料試験施設など、様々な研究施設を保有している。しかし、これらの施設の多くは老朽化が進み、近年、高経年化への対応が大きな課題の1つとなっている。

原子力機構は、保有する原子力施設の安全強化と放射性廃棄物の処理や原子力施設の廃止措置などのバックエンド対策を着実に実施することによって研究開発機能を維持・発展させるため、①施設の集約化・重点化、②施設の安全確保、③バックエンド対策を三位一体で進めることとし、2017年4月に2028年度までのこれらの計画を具体化した「施設中長期計画」※⁽¹⁾を策定した。このうちバックエンド対策については、東海再処理施設(TRP)の廃止措置に約70年を要するなど、放射性廃棄物(以下、廃棄物)の処理・処分を含めた長期にわたる見通しと方針が必要であること、および「核原料物質、核燃料物質および原子炉の規制に関する法律」の改正に伴い原子力施設の廃止措置実施方針を作成・公表することとなったことから、原子力機構

全体のバックエンド対策の長期にわたる見通しと方針を「バックエンドロードマップ」⁽²⁾として取りまとめ、2018年12月に公開した。

「バックエンドロードマップ」では、バックエンド対策の推進に向けた廃止措置、廃棄物処理・処分、核燃料物質の管理についての方針を記載するとともに、「バックエンドロードマップ」で対象とした70年間のバックエンド対策に要する費用の見積もり結果、バックエンド対策の効率化・最適化に向けた取り組みの方針などを記載した。また、今回の費用見積もりの対象とした原子力施設は、試験研究炉のほか、核燃料使用施設、再処理施設、加工施設および廃棄物管理施設と多様であり、それぞれの施設解体実績が十分でないことなど、不確定要素があることから、「バックエンドロードマップ」では、見積もり額について、海外機関を含む外部組織のレビューなども踏まえつつ、継続した見直しを行うことを明記している。

そこで、バックエンド対策費用の見積もり額のみならず、原子力機構のバックエンド対策全般について、外部組織のレビューを受けることを決定し、外部組織のレビュープログラムとして、国際原子力機関(IAEA)で実施している専門家レビュー「ARTEMIS」(IAEA Integrated Review Service for Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Management, Decommissioning and Remediation Programmes)(以下、ARTEMIS レビュー)を選択した。

※ 2035年度までの計画に改訂し、2022年4月1日に公開した。

2. ARTEMIS レビューについて

(1) レビューの目的と範囲

ARTEMIS レビューは 2014 年に開始された、放射性廃棄物および使用済み燃料の管理、廃止措置および環境修復プログラムに関する国際的な専門家による総合的なレビューサービスである。IAEA 加盟国からの要請に基づき、レビューの対象範囲や内容を調整した上で、国際的な専門家を招集してレビューチームを作り、ピアレビューを実施する。

本レビューの目的は、レビュー結果をバックエンドに係る加盟国やその原子力組織のパフォーマンスの向上、安全性の向上、費用の削減、透明性および利害関係者との信頼の向上などにつなげることである。

レビューの範囲は、要請する組織や対象施設のニーズによって異なるが、廃止措置や廃棄物などに関する国の枠組み、規制システムおよび国家プログラムなどについて実施してきている。本レビューには、技術、安全、またはその両方に重点を置いた、レビュー対象のプログラムおよびプロジェクト活動の実施に関する詳

細な評価と技術的助言が含まれている。レビューチームは、ARTEMIS レビューのガイドラインに従って、IAEA の安全基準と技術刊行物、およびこの分野での実証済みの国際的な慣行と経験に基づいて結論を出す。

(2) これまでの実績

これまでの ARTEMIS レビューは、主に欧州原子力共同体 (EURATOM) の 2011 年 7 月 19 日 付 指 令 Council Directive (2011/70/EURATOM) に基づき、EURATOM 加盟国からの要請で実施されているが、特定の施設などを対象としたレビューはまだ多くない。2022 年 3 月末時点で、11 カ国が EURATOM 指令に関してレビューを受けており、特定の施設の廃止措置などに関するレビューは今回の原子力機構を含め、3 カ国 4 回にとどまっている。

(3) レビューを受けるための流れ

ARTEMIS レビューを受けるための流れを図 1 に簡単にまとめた (詳しくは <https://www.iaea.org/services/review-missions> 参照)。

まず、レビューを受ける希望がある旨を

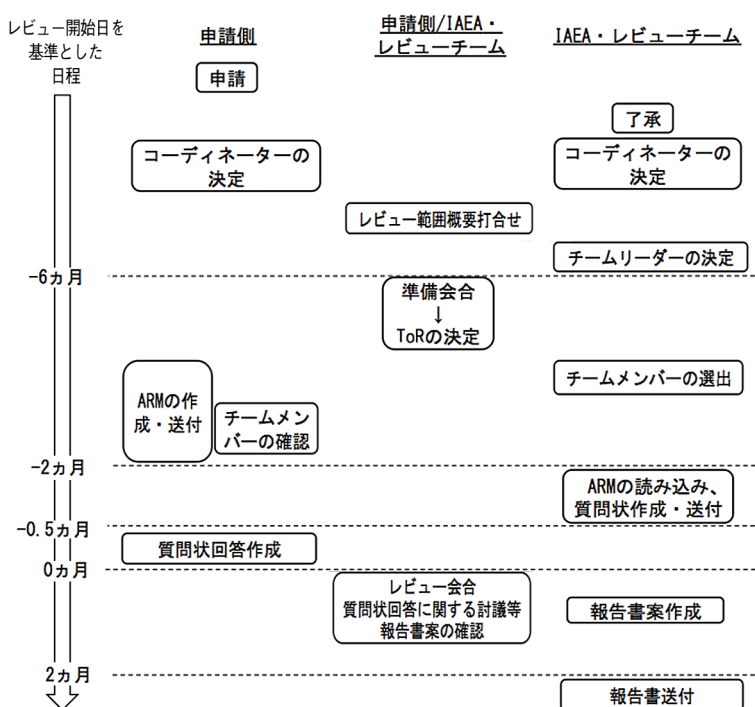


図 1 レビューの流れ

IAEA に申請する。IAEA は申請を了承した後、正 / 副のコーディネーターを指定する。申請側のコーディネーターは、彼らとレビューの範囲について事前協議を実施する。事前協議の結果に基づき、IAEA がレビューチームのリーダーを指定する。次いで、レビューチームリーダー、コーディネーター、申請側の関係者が集まって、準備会合を実施し、レビューの仕様書（ToR：Terms of Reference）を確定させる。次に、ToR に基づいて IAEA 側がレビューチームメンバーを選定し、申請側はレビュー範囲に関する情報をまとめた配布資料（ARM：Advance Reference Material）を作成し、IAEA に送付する。レビューチームメンバーは ARM の各担当分を確認し、質問状を作成して申請側に送付する。申請側は質問状への回答を作成する。レビューは申請側の施設においてレビュー対象の研究施設の見学も含めて実施され、質問状への回答の説明を中心に質疑、レビューを行う。引き続きレビューチームが作成したレビュー結果（申請側への提言、助言、良好事例をまとめたもの、エグゼクティブ・サマリー、報告書）案について検討し、事実確認をもって終了とする。最終報告書は、後日 IAEA から申請側に送付される。

基本的な日程では、レビューの約 6 カ月前に準備会合を実施し、レビューの 2 カ月前にまでに ARM を送付、レビューの約 2 週間前に質問状が届き、レビューまでにその回答を準備する流れとなっている。レビューの実施期間はレビュー範囲によるが、10 日から 2 週間程度である。最終報告書はレビュー終了後 2 カ月以内に提出される。場合によっては、IAEA からフォローアップミッションが提案されることがある。

3. 原子力機構に対するレビュー

（1）レビューの経過

表 1 に、原子力機構に対する今回のレビュー

に関する申請から報告書の受理までの実際の経過を示す。申請は文部科学省が行った。今回のレビューミッションは、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の影響により、準備や会合が図 1 に示した流れ通りには進まなかったとともに、通常は施設見学を含めた申請側の施設で行うレビュー会合も、2 回の延期を経て最終的に Web 会議で実施した。施設見学は実施できなかった。

表 1 原子力機構の ARTEMIS レビューの実際の流れ

年 月	項 目
2019 年 4 月	文部科学省より IAEA に要請文書を発出
6 月	IAEA からの受入れ返信文書を受領、コーディネーター & チームリーダーの決定
9 月	準備会合の開催、ToR の決定
2020 年 1 月	ARM を IAEA に送付
6 月	質問状の受理
2021 年 4 月	レビュー会合
6 月	報告書受理

（2）レビュー範囲（ToR の概要）

準備会合を 2019 年 9 月に開催し、ToR を検討、決定した。準備会合では、レビュー会合のスケジュール、チームメンバーを選定するためのレビュー項目、レビューを実施するため事前に準備、配布する ARM の項目を決定した。ARM の提出が 2020 年 1 月末、質問状の送付が 2020 年 3 月、レビュー会合が 2020 年 5 月 18 日～28 日の 11 日間に設定された。レビュー期間には、レビューチームによる報告書の作成や施設見学を予定した。

ToR では、表 2 に示すように、本レビューの主要テーマを 3 つ定め、評価項目を 7 つ設定した。各評価項目にはそれらを主に担当する専門家が設定された。それぞれの項目を担当するために選任された専門家およびチームリーダーを表 3 に示す。また、ARM の項目として、「バックエンドロードマップ」の背景情報を含め、「国の枠組み」から「バックエンド対策の合理化、最適化」までの 5 つを設定した。

表2 原子力機構の ARTEMIS レビューの主要テーマ，評価項目，ARM 項目

主要テーマ	評価項目	ARM 項目
●施設の解体，関連する放射性廃棄物の処理と処分，および核燃料物質の取り扱いに対する時間枠と一般的なアプローチを含む，全体的な廃止措置プログラムの適切性。 ●施設の解体，および関連する放射性廃棄物の処理と処分のための廃止措置費用の見積もりの方法論，およびその正確性 ●原子力機構とその請負業者との関係の管理や，利用可能な人的，技術的，財政的資源の最適な活用を含む，現在の優れた国際慣行に沿った廃止措置プログラムの効果的な実施。	① 廃止措置プログラム全体の最適化 ② 放射性廃棄物管理 ③ 核燃料物質管理 ④ 廃止措置費用評価 ⑤ 放射性廃棄物管理費用評価 ⑥ プロジェクトマネジメントと契約管理 ⑦ 廃止措置に関する技術	●国の枠組み ●原子力機構の概要 ●バックエンドロードマップ ●施設解体，放射性廃棄物処理・処分のための費用の見積もり方法 ●バックエンド対策の合理化，最適化

表3 レビューチームのチームリーダーおよびメンバー

Role/Expertise Domain	Name of Expert	Member State
<u>Team Leader</u>	Francesco Troiani	Italy
Optimization of the Overall Decommissioning Programme	Roger Cowton	United Kingdom
Waste Management	Peter Ormai	Hungary
Nuclear Fuel Material Management	Robert Walthery	Belgium
Decommissioning Cost Assessment	Simon Carroll	Sweden
Waste Management Cost Estimation	Alastair Laird	United Kingdom
Project and Contract Management	Christine Marie Gelles	United States
Technology for Decommissioning	Jean-Michel Chabeuf	France

(3) レビュー結果

レビュー会合に先立って原子力機構が作成した ARM は約 850 ページに及び，2020 年 1 月末に IAEA に提出した。COVID-19 の影響でレビュー会合が当初予定していた 5 月から 10 月に延期となったため，ARM に対する IAEA からの質問状は 2020 年 6 月末に送付された。質問状は背景情報を含め 20 ページを超え，レビュー会合で回答を準備して討議する質問が 37 問，更にレビュー会合で取り上げる可能性がある質問が 100 以上含まれていた。

レビュー会合は 2 回延期（1 回目：2020 年 5 月から 2020 年 10 月へ）後，2021 年 4 月 12 日～22 日に開催された。前半はレビューチームからの質問に対する回答とその内容についての討議に費やされ，後半はレビューチーム

が作成した提言，助言，良好事例（good practice），エグゼクティブ・サマリー，報告書の案の内容についての事実確認などに費やされた。その後，レビューチームによって附属書を含め 74 ページの報告書が作成され，2021 年 6 月に IAEA から公開された。

報告書は，表 2 に示した評価項目ごとのレビュー概要，所見，各評価項目についての提言と助言，およびレビューで見出した良好事例などで構成されている。レビューの総括として，「原子力機構は，将来にわたるバックエンド対策の方向性を確立しているとともに，直面している課題もはっきり示したロードマップも評価でき，今後も引き続き安全で責任ある高水準のバックエンド対策管理を実施できる状態にあると判断した。」とまとめられている。

報告書にはレビューチームが確認、評価した原子力機構のバックエンド対策の現状への認識が「所見」として提示されている。また、7つの評価項目に対し、原子力機構の今後のバックエンド対策におけるリスク削減と時間とコストの最適化の観点から、21の提言、17の助言、1つの良好事例が提示された。以下に代表的なものをまとめた。詳細はIAEAから公開されている報告書を参照されたい⁽³⁾。

レビューチームの代表的な所見と提言は以下の通りである。

<代表的な所見>

- 原子力機構が現在、3つの大規模な原子力施設（東海再処理工場、高速増殖原型炉「もんじゅ」、新型転換炉原型炉「ふげん」）の廃止措置に集中しており、それらの廃止措置とそれに伴う核燃料物質と廃棄物の管理を行っている。これらのプロジェクトは、関連する廃棄物の管理技術上の課題を提供するだけでなく、廃止措置の第1段階におけるコストおよびその他のリソースニーズを支配的にシェアしている。
- 原子力機構が実施している全体的な廃止措置戦略は、より大きなリスク軽減が達成される可能性があり、メンテナンス関連の大幅なコスト削減効果が期待される施設を優先していることを認識した。原子力機構が、将来の廃止措置および廃棄物処理プログラムに利益をもたらす可能性のある技術開発に長い歴史を持っていることを確認した。さらに、最近の組織変更により、技術開発イニシアチブの統合、優先順位付け、および各種調整を満足のいく方法で可能にする集中管理構造の導入が容易になったことを確認した。
- 原子力機構は、敦賀地域における廃止措置デモンストレーションの一環として、廃止措置活動の経験のない地元産業を敦賀のモックアップ施設（スマデコ）において訓練するために招待している。この活動は、良好事例として認識した。

<代表的な提言>

① 廃止措置プログラム全体の最適化

各ミッションへの対応を強化するために、研究開発と廃止措置に対する組織と資源（人員と予算）の責任をより明確に分離し、さまざまなオプションを検討する必要がある。

プログラムレベルのリスクと機械分析、および短期的な資源配分とプログラム管理を可能にする統合された資源配分プログラム計画を設定する必要がある。

② 放射性廃棄物管理

処分施設の整備が遅れる可能性を考慮し、すべての廃棄物区分に対し計画されている処分施設の利用可能性と廃棄物貯蔵能力を整合させることを目的とした明確な戦略を示す必要がある。

③ 核燃料物質管理

使用済燃料やその他の核燃料物質の管理を考慮して、安全が長期にわたって維持されることを保証し、安全性をさらに高めるための可能な活動を特定するために、恒久的に停止している施設の定期的な安全レビューを実施する必要がある。

④ 廃止措置費用評価

廃止措置の費用に関する不確実性とリスクに対処し、施設の解体にかかる総費用を包括的に理解するために、廃止措置費用の評価方法をさらに発展させる必要がある。

⑤ 放射性廃棄物管理費用評価

現在対象外としているすべての分野の費用を含めていく必要がある。また、現場の廃棄物の処理、中間貯蔵、最終処分の選択肢に関連する不確かさをリストアップして評価し、それらに対処する必要がある。

⑥ プロジェクトマネジメントと契約管理

廃止措置と廃棄物管理に関する教育と訓練プログラムを開発し、プログラムの実施に必要なスキル、能力、要員数に対応するための枠組みを確立する必要がある。

サプライチェーンを拡大する戦略を策定し、短期的な廃止措置作業計画活動と整合するサプライヤーとの提携アプローチを実施するとともに、リスクと説明責任のバランスのとれた分担を確保するための選択肢と契約方法を検討し、詳細な契約計画を産業界と共有する必要がある。

⑦ 廃止措置に関する技術

潜在的に問題のある廃棄物の性質と量を完全に理解するために、サンプリングを含むプラントのすべての主要なプロセス機器やセルにおいて、幅広い特性評価を行う必要がある。

4. 原子力機構の対策案

レビューチームから提出された提言、助言のうち、前章に示した代表的なものに対する原子力機構の対応方針案を以下にまとめた。

すべての提言、助言への対応方針案は、2021年に開催された文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力バックエンド作業部会（第3回）の資料を参照されたい⁽⁴⁾。

① 廃止措置プログラム全体の最適化

原子力機構の第3期中長期目標期間（2015年～2021年）において、敦賀廃止措置実証部門やバックエンド統括本部の設置およびバックエンドに特化した予算枠の確保など、研究開発と廃止措置の組織や予算の責任の明確化を進めてきているが、研究開発と廃止措置を並行して進めている拠点などにおける責任の明確化やバックエンドへの資源の充当が不十分である。さらなる役割分担及び責任の明確化、予算及び人材の拡充を第4期中長期目標期間（2022年～2028年）中に取り組むこととする。

代替シナリオを加味した廃止措置計画及び資源配分計画、技術開発計画などを統合したプログラムスケジュールの作成が必要であることが指摘されている。現在の施設中長期計画⁽¹⁾をもとに、様々な要素を考慮した統合された詳細なプログラムを策定し、第4期中長期目標期間中に実行していく。

② 放射性廃棄物管理

埋設事業計画の遅延が、廃止措置の実施に影響することがないよう、これまでにも行っている設備等の解体撤去を完了したスペースを廃棄物保管として活用を図るなどの手段によって廃棄物保管容量を確保し、着実な廃止措置を進める。

③ 核燃料物質管理

廃止措置対象施設においても廃止措置の終了までの期間の安全を維持するため、定期検査などを通じて安全確保に係る性能を維持する施設等を維持管理していく。さらに、廃止措置の進展に伴い変化する状況を踏まえて、定期事業者検査をはじめ定期的なレビューを行い、さらなる安全確保に努める。

④ 廃止措置費用評価

これまでの費用評価において不足している項目を取り入れた積み上げ方式による高精度評価法の開発に速

やかに取り組む。また、海外の例などを参考に評価法を更新していくことや廃止措置の段階に応じた適切な評価法を採用することなどによって、不確実性やリスクの影響を最小化していく。

⑤ 放射性廃棄物管理費用評価

廃棄物管理に関するコストは、これまでは処理施設計画及び埋設事業計画に係わる項目から単価を設定して見積もっているが、今後、これら計画の積算や時期等の不確実性に加え、現時点で見積もられていない中間貯蔵等の費用についてもリスト化し、評価していく。また、これらの評価において、①の対応で示した統合的な廃止措置計画と整合を取って進める。

⑥ プロジェクトマネジメントと契約管理

第3期中長期目標期間において、廃止措置対象施設が急増したことにより、廃止措置のスキルを有する人員が不足しており、人材育成方法の検討を2019年より開始している。今後は外部の訓練プログラムを活用しつつ、廃止措置のスキルのみならずプロジェクトマネジメントの能力開発を含めた教育プログラムの検討などに着手していく。また、知識継承などのためのデータベースの構築、拡充、並びに知見、経験に基づく改善を行い、廃止措置に係る知識の体系化を進めていく。

これまでに、廃止措置の教育／訓練プログラムを活用し、原子力施設で作業経験のない地元企業の参入支援の仕組みをスマデコで実施している。また、自治体と連携した地元企業向けの説明も実施してきている。サプライチェーンを拡充する戦略を策定するため、自治体と連携して地元企業の関心の有無を調査するとともに、地域に応じた参入のための支援策の検討を進める。

⑦ 廃止措置に関する技術

処理が困難な廃棄物の性状や量などの全体像を把握するため、汚染された設備の工程洗浄や系統除染などを行う機器解体の準備期間において、設備内に滞留する処理が困難な廃棄物の調査を実施し、そのような廃棄物が存在した場合、適切な回収や処理のための計画を策定し、実施していくこととする。

5. まとめ

原子力機構が作成した「バックエンドロードマップ」は、今後のバックエンド対策の方針として大筋において妥当なものであるとの評価を受けた。他方、更なる対策の向上やコ

スト削減などにおいて、改善すべき示唆に富んだ提言、助言を受けた。これらを今後のバックエンド対策の改善に取り入れ、安全はもとより、より合理的、効率的な廃止措置および廃棄物管理事業を原子力機構において進めていく。

参考文献

- (1) 日本原子力研究開発機構, 「施設中長期計画」, 2022 年 4 月 1 日 (https://www.jaea.go.jp/about_JAEA/facilities_plan/)
- (2) 日本原子力研究開発機構, 「バックエンドロードマップ」, 2018 年 12 月 (https://www.jaea.go.jp/about_JAEA/backend_roadmap/s02.pdf)
- (3) IAEA, “ARTEMIS REVIEW OF JAEA BACK-END ROADMAP: FINAL REPORT,” 2021 (https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/review-missions/artemis_jaea_backend_roadmap_final_report_11june2021.pdf)
- (4) 文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会 原子力バックエンド作業部会 (第 3 回), 資料 3, 「原子力機構のバックエンド対策に関する国際的なレビューの結果等について」, 2021 年 7 月 5 日

[寄稿]

国際廃炉研究開発機構における研究開発への取り組み

奥住 直明 (国際廃炉研究開発機構
開発計画部 部長)



1. はじめに

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID: International Research Institute for Nuclear Decommissioning) は、2013 年 8 月の設立以来、「廃炉技術の基盤強化を視野に、当面の緊急課題である福島第一原子力発電所の廃炉に向けた技術の研究開発に全力を尽くす」ことを基本理念に掲げ、政府の作成する「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止措置等に向けた中長期ロードマップ」、原子力損害賠償・廃炉等支援機構 (NDF) の作成する「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」に基づき、現場作業を担う東京電力ホールディングス(株)のニーズを踏まえながら研究開発に取り組んできた。本稿では IRID の活動内容について紹介する。

2. 設立の経緯

福島第一原子力発電所の事故が発生して 4 カ月が経った 2011 年 7 月、福島第一原子力発電所の中長期対策の最初の答申が作られた。その際、国としてこの廃炉に専任的に当たる組織が必要であるとの意見が専門家などから出され、原子力委員会で取り上げられた。この流れを受け、2013 年 3 月の東京電力福島第一原子力発電所廃炉対策推進会議において具体的に新組織設立の表明がなされ、準備組織を立ち上げて検討を進めてきた結果、同年 7

月下旬、技術研究組合法に基づく非営利公益法人として IRID の設立認可申請を経済産業省に行い、8 月 1 日に同省大臣から認可を受けた。その後組織の自主的な議決機関である総会を開催し活動を開始した。

3. 行動理念・組織構成

IRID は以下に示す五つの行動理念を掲げて研究開発に取り組んでいる。

- (1) 極めて難しい多くの技術課題に直面している中、早期に現場に適用できる最良の技術・システムを開発・提案するための統合的なマネジメントを進めながら、効果的・効率的に研究開発に取り組む。
- (2) 組合員はもとより関係機関との協働を進め、国内外の叡智を結集することにより、最善の研究開発体制を構築する。
- (3) 大学・研究機関との連携等を含め、廃炉や関連技術の分野で次世代を担う人材の育成・確保を図るための取り組みを積極的に推進する。
- (4) 福島をはじめとする国民の皆様や国際社会からの理解・安心を得るために、研究開発活動・成果に対する情報の発信・公開に努める。
- (5) これらの研究開発活動を通して、国際的な研究拠点 (センター・オブ・エクセレンス) を形成し、廃炉、福島復興の加速化、国際社会における技術力の向上に貢献する。

IRID は 18 の法人 (組合員) で構成される技術研究組合であり、組合員は 2 つの国立研究開発法人 (日本原子力研究開発機構、産業技術総合研究所)、4 つのプラント・メーカーなど (東芝エネルギーシステムズ(株)、日立 GE

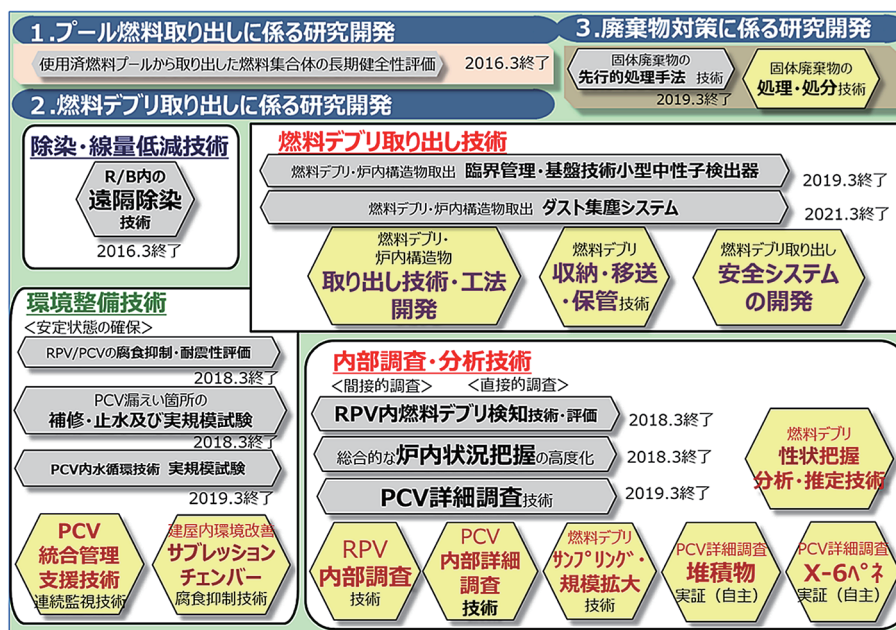


図1 IRIDにおける研究開発プロジェクト

ニュークリア・エナジー(株)、三菱重工業(株)、(株)アトックス)、12の電力会社など（東京電力ホールディングス(株)他）で構成されている。IRIDの議決機関は総会であり、18法人の総意により事業活動が決定され、執行部門として理事会が設置されている。さらに国内外の叡智を結集するという行動理念に基づき、理事会には直轄組織として「国際顧問」を置き、3名の海外の専門家から組織運営・マネジメント面の助言をいただいている。また様々な研究開発を進める上で、専門家から技術的な助言をいただく体制として、「技術委員会」を設置している。

IRIDの研究開発は一部の自主研究事業を除いて、経済産業省「廃炉・汚染水対策事業費補助金」の一部として実施されている。

4. 研究開発内容

図1にIRIDにおける研究開発プロジェクトを示す。IRIDでは大きく分けて「使用済み燃料プールからの燃料取り出しに係る研究開発」「燃料デブリ取り出しに係る研究開発」「固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発」の3つの分野の研究開発を実施してきている。

IRIDで実施している研究開発は、このように多岐に亘っているが、以下、本稿ではその中の代表的な研究開発プロジェクトの概要を紹介する。本稿で紹介するプロジェクトは、図2に示す構成となっている。

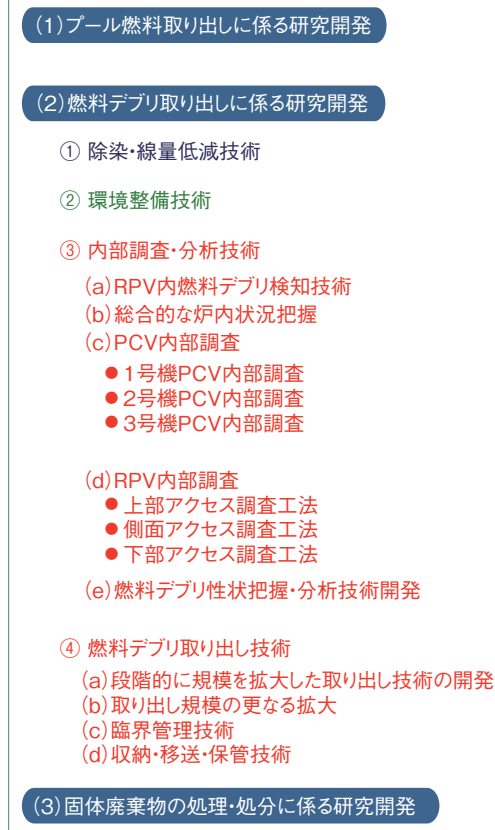


図2 本稿での研究開発内容紹介の構成

(1) 使用済み燃料プールからの燃料取り出しに係る研究開発

福島第一原子力発電所1～4号機の使用済み燃料プールに保管されていた燃料集合体は、海水注入や瓦礫混入といった通常とは異なる水質環境で保管されていたことから、今後共用プールや乾式貯蔵などで長期にわたり安全に保管していくために、部材への影響や最適な保管環境条件などをしっかりと評価する必要がある。

IRIDでは共用プールに保管中の4号機使用済み燃料部材（ロックナット）の堆積物について成分分析などを実施した。その結果堆積物の構成成分はMg, Al, Siなどが主体であり、Clは検出限界以下であったことから腐食の可能性はないと考えられ、また電気化学試験でも共用プールでの腐食の可能性はほぼないことを確認した。

さらに乾式保管時の健全性については、水素化物析出挙動確認試験、クリープ試験を実施し、瓦礫損傷、海水付着などの重量状態においても影響は小さいことを確認した。

また、燃料部材（上部端栓部材）すきま構造部への海水成分の移行挙動評価試験を行い、すきま構造部で海水成分が濃縮することはないことを確認した。

(2) 燃料デブリ取り出しに係る研究開発

① 除染・線量低減技術

福島第一原子力発電所1～3号機から燃料デブリを取り出すにあたっては原子炉建屋内で各種作業が計画・実施されている。その円滑な作業遂行には建屋内作業エリアの総合的な線量率低減を図り、作業環境を改善することが必要である。

このためIRIDでは遠隔除染技術の開発を行った。開発対象としては床面、壁面（高さ約2m程度まで）、高所などを対象とし、除染技術としては「高圧水ジェット除染」「ドライアイスブラスト除染」「吸引・ブラスト除染」を候補として取り上げ、実証試験、実機適用試験を実施した。

② 環境整備技術

環境整備に関する技術開発としては「RPV（原子炉圧力容器）/PCV（原子炉格納容器）の腐食抑制・耐震性評価」、「PCV漏えい箇所の補修・止水技術」、「PCV内水循環技術」などの開発を行った。

「RPV/PCVの腐食抑制・耐震性評価」については事故直後から実施されている注水の脱気処理やPCV内への窒素封入により、RPV/PCVの腐食は通常的环境より抑制されていると考えられるが、燃料デブリ取り出し時、PCV内は大気開放状態になることも考えられることから窒素封入に代わる腐食抑制技術（防錆剤）の開発と実機適用性の評価を進めた。また防錆剤を実機適用するための腐食抑制システムの概念設計を実施した。耐震性評価については大規模地震による大型機器の損傷を起因とする潜在的なリスクに対して、燃料デブリ取り出し開始までに実施すべき設備対策および準備すべき機動的対応をまとめ、安全シナリオを構築した。またRPVベデスタル部について想定されるベデスタル温度履歴と分布、および燃料デブリによる浸食影響評価のための手法開発などを行った。

「PCV漏えい箇所の補修・止水技術」については冠水工法採用時のPCVからの水の漏洩箇所を補修・止水するための技術開発を行った。ベント管内や真空破壊ラインに閉止プラグを入れる技術やサプレッションチャンバー（S/C）内にコンクリートを打設し止水する技術の開発、実規模試験などを実施した。さらにS/C内にコンクリートを打設した場合のS/C脚部補強技術の開発も行った。

「PCV内水循環技術」は燃料デブリ取り出し時に発生するダストをPCV内に閉じ込めておくため、PCV内部の水を循環するシステムを構築する技術である。ここではドライウェル（D/W）とS/Cそれぞれを用いた水循環システムを構築するために必要となる技術を開発した。

③ 内部調査・分析技術

(a) RPV 内燃料デブリ検知技術

燃料デブリを取り出すためには原子炉内の燃料デブリの分布などを把握することが重要である。しかし、原子炉内部は極めて高い放射線環境下にあるため、人が近寄れず確認は困難である。このため、宇宙線ミュオンを利用した原子炉内部の透視技術を開発し、実機にて測定を行った。

この結果、1号機については、元々の炉心位置には高密度の大きな物質の塊が確認できず、燃料はほとんどないと考えられること、また、2号機については、RPV 底部に燃料デブリと考えられる高密度の物質が存在していること、さらに、3号機については、元々の炉心位置には燃料デブリの大きな塊は存在していないが、不確かさはあるものの一部の燃料は RPV 底部に残っている可能性があるなどの結果が得られた。

(b) 総合的な炉内状況把握

ミュオン調査と並行して、総合的な炉内状況把握のための技術開発も行ってきた。これは主に解析コードを用いて事故進展解析や実機データなどを活用し総合的な分析・評価を実施することで炉内状況の把握を行った。

(c) PCV 内部調査

ミュオン調査などの情報をもとに、各号機の燃料デブリの状況をより詳細に把握するため、遠隔による PCV 内部調査技術の開発と現地実証試験を行ってきた。

● 1号機 PCV 内部調査

1号機については、PCV 内部の RPV 本体基礎（RPV ペDESTAL）外側に燃料デブリが流れ出た可能性が考えられたため、まずこのエリアの調査を行うこととし、形状変化型ロボットを開発して現地実証試験を行った。

2015 年 4 月にロボットを X-100B ペネトレーション（PCV 貫通部）から PCV 内部に

アクセスさせ、PCV 内部の 1 階グレーチング上を走行させて映像 / 放射線量などのデータを取得した。これにより、PCV 内部の既設設備に大きな損傷のないことを確認するとともに 1 階グレーチング上の約 4 分の 3 週の範囲の放射線量などのデータを取得した。

2017 年 3 月には形状変化型ロボットを改良し、小型のカメラと放射線線量計を 1 階グレーチング上から PCV 底部につり下ろすことにより、画像データと放射線量データの取得を行った。PCV 底部を撮影した画像データには何らかの堆積物が PCV 底部に堆積していることが確認された。図 3 に改良された形状変化型ロボットを示す。

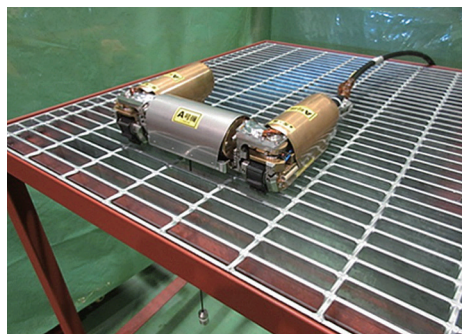


図 3 形状変化型ロボット

なお、1号機では RPV ペDESTAL 内側に直接アクセスすることのできる X-6 ペネトレーション周辺の放射線量が高く、作業者が長時間滞在することが困難であるため、ロボットのアクセスルートとして X-6 ペネトレーションは現在までのところ使用されていない。

● 2号機 PCV 内部調査

2号機については、RPV ペDESTAL 内側に直接アクセスすることの出来る X-6 ペネトレーション周辺の放射線量が 1号機に比較して低く、ロボットを X-6 ペネトレーションから PCV 内にアクセスさせるためのセッティング作業ができるため、X-6 ペネトレーションを使用しての調査を実施した。

2017 年 1 月から 2 月にかけて、図 4 に示すクローラ型遠隔調査ロボットによる調査

を試みたが、X-6 ペネトレーションとペデスタル内側を結んでいる傾斜路（CRD レール）上に堆積している異物に阻まれ、クローラ型遠隔調査ロボットはRPV ペデスタル内側まで到達できなかった。一方で、事前の検討により、このような事態も想定されていたため、別に用意していた長いポールの先端にカメラを取り付けたものをX-6 ペネトレーションからRPV ペデスタル内側へと挿入し画像情報を取得した。

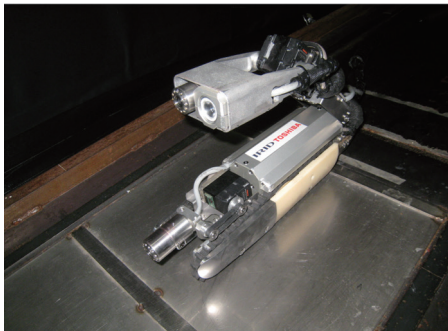


図4 クローラ型遠隔調査ロボット

この後、2018年1月には、図5に示す長いポール先端のカメラをPCV底部へ釣り下ろせるように改良した釣りざお型調査装置により、RPV ペデスタル内部のより詳細な画像情報および放射線量データを取得した。

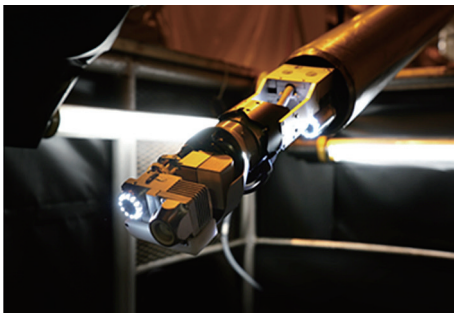
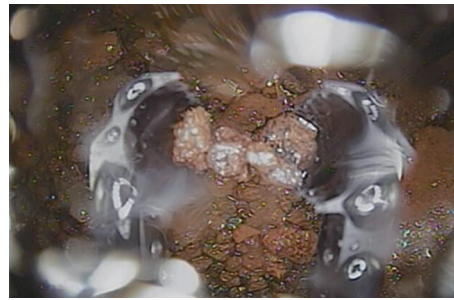


図5 釣りざお型調査装置

画像データからは堆積物の一部は小石状のように見えたことから、2019年2月には釣りざお型調査装置先端部分に物をつまむことができる装置を取りつけ、堆積物に対する接触調査を実施した。この結果、図6に示すように、一部の堆積物は摘み上げることなどにより動かせることを確認した。



(東京電力㈱ 提供)

図6 堆積物に対する接触調査

●3号機 PCV 内部調査

3号機は、1号機/2号機と比較するとPCV内部の水位が高いため、図7に示す水中遊泳型ロボットを開発し、RPV ペデスタル内部を含むPCV内部の調査を実施した。3号機のX-6 ペネトレーションは現状水没しているため、ロボットはX-53 ペネトレーションからPCV内部にアクセスした。



図7 水中遊泳型ロボット

調査は、2017年7月に実施され、RPV ペデスタル内側下部の損傷状況などが明らかとなった。

●現在実施中および今後計画しているPCV内部調査（2022年5月現在）

前項に述べたように、PCV内部の状況は次第に明らかとなっているが、より多くの情報を得ることを目的に、新たな調査装置の開発に取り組んでいる。

1号機のPCV内部は水位が約2m程度あることから、新たに図8に示す潜水機能付ボート型アクセス・調査装置を開発した。

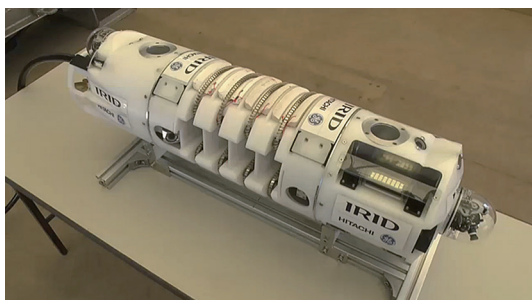


図8 潜水機能付ボート型アクセス・調査装置

この装置は、全長約 1.1m 直径 25cm の円筒形で、PCV 底部の堆積物形状データ取得のための走査型超音波距離計や、堆積物の厚さを測定するための高出力超音波センサー、燃料デブリの分布を把握するための放射線計測器など、多くの情報を得るためのセンサー類を搭載する。搭載する計測器ごとに専用のボート型アクセス・調査装置を使用し、あわせて堆積物の少量サンプリングをすることのできるボート型アクセス・調査装置も用意している。さらに、小型の調査装置も用意し、パンチルトカメラにより PCV 内部の状況を確認する。

これらの調査装置を PCV 内に安全に投入し、より広範囲・長時間の調査が可能となるようなアクセスルートを構築する技術および高い耐放射線性を有する各種センサーの開発も進めてきた。現在これら装置を使用しての調査を実施中である。

2号機については、既存の X-6 ペネトレーションを使用して PCV 内部にアクセスし、より詳細な調査を実施するとともに、燃料

デブリの試験的取り出しができるアーム型アクセス装置の開発を進めている。装置のイメージを図9に示す。この装置は全長が約 22m あり、使用前は PCV 外側に接続された収納箱（エンクロージャ）に折りたたんだ形で収納され、使用時にアームを順次展開して PCV 内部に挿入していく。アーム先端には約 10kg までの調査装置などを搭載できる。

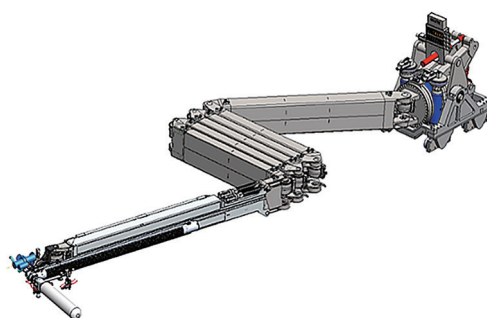


図9 アーム型アクセス装置

アーム型アクセス装置による PCV 内部調査のイメージを図10に示す。エンクロージャ内に収納されているアームが PCV への接続構造を経由し、X-6 ペネトレーションを通過して PCV 内部に順次送り出されていく構成となっている。アーム型アクセス装置の先端に取り付ける極細線金ブラシ方式と真空容器方式の2種類の燃料デブリサンプル採取・回収装置（試験的燃料デブリ取り出し回収装置）を設計し、動作確認を行っている。

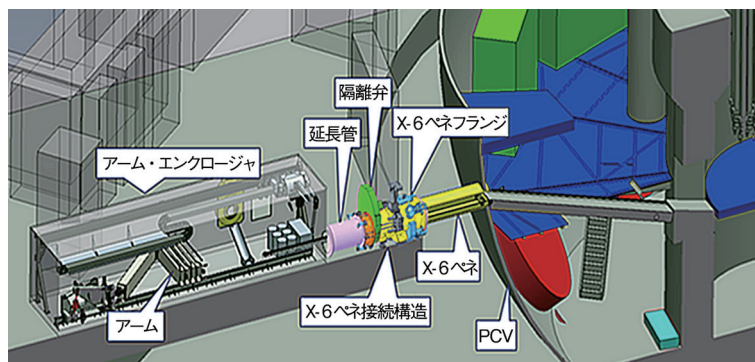


図10 アーム型アクセス装置による PCV 内部調査のイメージ

(d) RPV 内部調査

前節で述べた PCV 内部調査がまずは先行しているが、RPV 内部の状況を把握することも重要な課題である。RPV 内部は構造が複雑で、かつ放射線量も極めて高いためアクセスすること自体が困難であり、放射線の遮蔽や加工に伴う放射性ダストの舞い上がりを防ぎながらアクセスできる新たな調査工法が求められている。

現在 RPV 上部・側面・下部の三方向からのアクセスルートを選定し、上部・側面からは PCV 外部から穴開けにより炉心部を目指す工法、下部からは PCV 内部調査などで構築されたアクセス方法を利用して RPV 内部へアクセスする工法を検討している。

● 上部アクセス調査工法

RPV 内部へ上部からアクセスするルートや調査ニーズを検討し、オペレーティングフロアから穴あけによりアクセスする工法を開発している。

上部アクセス調査工法の技術のコアとなる作業用セル、バウンダリ機能維持装置、加工装置および調査システムを対象として要素試験を実施し、それらの実現性を確認するとともに、装置仕様の策定に資するための設計情報を取得した。

● 側面アクセス調査工法

上部アクセス調査工法は、オペレーティングフロアなどで他作業との干渉なども考えられることから、代替案として、RPV 側面にアクセスルートを構築する案も検討している。

PCV のバウンダリを維持しつつ、生体遮蔽壁や、PCV、RPV などを穿孔して、調査装置を炉心内に送り込む装置を検討した。加工装置、処理水回収装置、シール、ガイドチューブ保持機構などを対象として要素試験を実施し、実現性を確認するとともに、装置仕様の策定に資するための設計情報を取得した。

● 下部アクセス調査工法

穴開けによる上部／側面アクセス調査工法の実現にはまだ時間を要すると考えられ、より早期に情報を入手すべく、RPV 下部からアクセスする調査工法も検討した。

1 号機は、RPV 下部の開口径が比較的大きいと想定されるため、ドローン（有線、無線）により RPV 内部へアクセスする工法を検討している。2 号機と 3 号機は、RPV 下部の開口径が比較的小さいと想定されるため、アーム型アクセス装置にテレスコピック装置を搭載しアクセスする工法を検討している。

(e) 燃料デブリ性状把握・分析技術開発

燃料デブリの取り出し方法の立案や安全対策の策定には、炉内に存在する燃料デブリの性状把握が必要である。

現在はまだ燃料デブリを直接観察、分析をすることができないため、燃料デブリの性状を、国内外の類似した研究例や福島第一原子力発電所で採取された汚染試料の分析結果から推定している。また、福島第一原子力発電所の事故条件を模擬した MCCI（溶融炉心 - コンクリート相互作用）の炉外模擬試験を実施している。

④ 燃料デブリ取り出し技術開発

(a) 段階的に規模を拡大した取り出し技術の開発

図 9、10 に示した PCV 内部詳細調査用の装置構成をベースとして、段階的に燃料デブリ取り出し量を拡大していくことを検討している。

アームの積載量を向上させるためにアームの前半部分の剛性を高めるとともに、先端部のアクセス範囲を拡大させたり、エンクロージャを取り外すことも考慮したダブルドアシステムを設置するなどの改良を検討している。

また、燃料デブリ回収装置として、小石・砂状燃料デブリ回収用（バケット型、フレキシブルグリッパ型）、切削・粉状燃料デブリ回

収用，円柱状燃料デブリ切削・回収用の各燃料デブリ回収装置について，実作業に向けて課題を抽出し，実用性の向上を図った改良設計を実施した。改良した装置で，模擬デブリの回収試験や切削試験を行っている。

(b) 取り出し規模の更なる拡大

将来行われる「取り出し規模の更なる拡大」を見据えた技術開発としては，RPV 上部からアクセスする「上アクセス工法」について，構造物単位で一括搬出し，原子炉建屋から離れた場所に新設する建屋にて細断して容器へ収納する「構造物一括撤去・搬出」技術や，構造物は RPV に近い位置で分割し容器に収納し搬出する「構造物大分割」技術などを検討している。

また，主に PCV 下部に存在する燃料デブリ取り出し工法として検討している「横アクセス工法」については，原子炉建屋（R/B）1 階の床に大きな荷重をかけずに燃料デブリ搬出ルートを構築する案として，R/B 外の増設建屋と PCV を遮へい機能を有するアクセストンネルで接続して搬出入ルートを構築し，アクセストンネルの荷重を R/B 外壁と生体遮へい壁で受ける「アクセストンネル」方式や，既存の X-6 ペネトレーションを拡幅し，最短距離で PCV ベデスタル内にアクセスする横アクセス工法を検討している。

(c) 臨界管理技術

現状の燃料デブリは，プラントの監視データから未臨界であることが確認されている。しかし，今後の燃料デブリ取り出し作業などにおいては，燃料デブリの形状やまわりの水量が変化することも想定される。

現実的なデブリ組成を考えれば臨界リスクは小さいと評価しているが，デブリ取り出し作業を安全かつ円滑に進めるためには未臨界を維持し，適切に臨界を管理することが必要である。未臨界を維持し万が一の臨界発生を防ぐために，深層防護に基づく臨界管理案を検討している。

大きな反応度が入らないようにする作業手順制限や，必要に応じて中性子吸収材を使用する臨界防止技術，作業中に臨界に近づいていなかを監視する臨界近接監視技術，早期に臨界を検知する臨界検知技術，万が一に臨界が検知された場合は，緊急ホウ酸水注入系にて臨界を止める，といった案を検討している。

(d) 収納・移送・保管技術

燃料デブリを安全かつ合理的に収納・移送・保管するため，燃料デブリの仕分けから長期保管設備での管理までのシナリオを仮構築した。

検討の結果，長期的に燃料デブリを乾式保管することが，湿式保管（プール保管）と比較して有力な保管方法であることが確認され，本技術開発のゴールとなるシナリオとして仮設定した。福島第一原子力発電所では，米国スリーマイルアイランド原子力発電所 2 号機と比較して事故初期の海水注入や溶融した炉心が RPV 下部のベデスタル底部に到達しているなど，収納缶に要求される条件はより複雑／高度となることや燃料デブリの搬出方法なども異なることから，燃料デブリを安全かつ合理的に収納・移送・保管するための福島第一原子力発電所専用の収納缶や関連する技術開発を進めている。

(3) 固体廃棄物処理・処分技術

福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた取り組みを進めるには廃炉に伴い発生する放射性廃棄物を適切に管理するとともに，性状把握，処理，処分の検討を進めて行く必要がある。しかし，福島第一原子力発電所の廃棄物は，従来の原子力発電所で発生する放射性廃棄物とは様々な点で異なる特徴を有している。種類の点では事故直後に水素爆発により飛散した瓦礫や放出された放射性核種が付着した樹木，土壤などのほか，汚染水から放射性核種を取り除くのに用いられた吸着塔などの水処理二次廃棄物など様々なものがある。

IRID では，実処理に適用できる見通しのある安定化・固定化処理方法の研究開発，適用

可能な処理技術を踏まえた処分概念の検討，燃料デブリ取り出しに際して発生する高線量廃棄物の保管・管理方法の検討，多核種除去設備発生スラリー安定化，固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術の開発などを進めている。

5. まとめ

IRID 設立の経緯とその活動内容についてまとめたが，本稿が少しでも IRID の活動をご理解いただく一助となればと考えている。福島第一原子力発電所の廃炉は言うまでもなく大変困難な道程であるが，ここで得られた技術的知見は必ず将来の原子力安全の向上や，遠隔技術の発展などに資するものであると考えている。引続き，福島第一原子力発電所の廃炉にご関心を寄せていただければ幸いである。

[寄稿]

ナッジによるエネルギー消費行動変容と脱炭素化方策

平山 翔 (株) 住環境計画研究所
副主席研究員

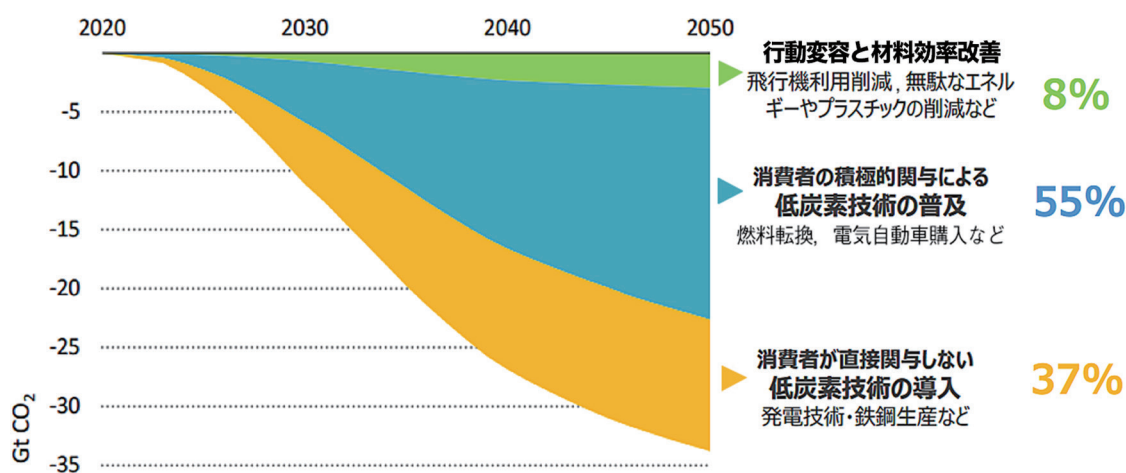


1. カーボンニュートラルと行動変容

近年、カーボンニュートラルに向けた取り組みが世界各国で加速している。今世紀半ばまでのカーボンニュートラル目標を表明している国や地域は、2021年11月時点で、154カ国・1地域にまで拡大した⁽¹⁾。温室効果ガスのうちエネルギー起源二酸化炭素(CO₂)の削減では、再生可能エネルギーの供給と、需要サイドの効率化や燃料転換などが主要な施策として挙げられてきている。このような中で、近年では「行動変容」が着目されるようになってきた。

行動変容と言うと「不要な照明をこまめに消す」、「空調の設定温度を1℃緩和する」などの普及啓発が長らく行われてきているが、

カーボンニュートラルのような大きな目標に対するインパクトを疑問視する読者もいるのではないだろうか。確かに、図1からも分かるように、国際エネルギー機関(IEA)の推計では、2050年までに温室効果ガスの排出を正味ゼロにするネットゼロエミッション化に必要な排出削減量のうち、無駄なエネルギー使用の削減や、交通手段の変更、省資源化などで実現できる割合は8%と小さい。しかし、燃料転換や電気自動車購入など消費者の積極的関与による低炭素技術の普及で達成される割合は55%と大きく、両者を合わせると、脱炭素化に必要な排出削減方策のおよそ3分の2に消費者の行動変容が関係するため、「消費者の積極的な関与なしにネットゼロエミッションは実現しない」と整理されている⁽²⁾。



(出所: IEA, "Net Zero by 2050," 2021 に筆者一部加筆)

図1 ネットゼロエミッション化に向けた排出削減における技術と行動変容の役割

2. 公共政策へのナッジ応用の国内外動向

一方で、ナッジ（Nudge）など行動科学の知見に基づくアプローチにより、国民一人ひとりの行動変容や意思決定を促す取組が世界的に注目されている。ナッジは、もともと「ひじで軽くつつく」を意味する英単語であるが、行動経済学者リチャード・セイラーと法学者キャス・サンステーンが、著書“Nudge”（邦題：実践行動経済学：健康，富，幸福への聡明な選択）⁽³⁾でナッジを「人間の行動特性を踏まえて制度や選択肢を設計して，社会を望ましい方向へ導く手法」（筆者意訳）と提唱したことで，この考え方が広がった。

特に，公共政策領域においては，規制や財政的手法に比べ極めて低い政策コストで社会の誘導を実現できることから，従来政策の補完ツールとしてナッジが世界で注目されてきている。実際に，2010年に英国で初めて政策・政府のサービス改善に行動科学を応用する政府機関である行動インサイトチーム（BIT：Behavioural Insights Team，通称ナッジユニット）が設立されたことを皮切りに，2018年時点で，行動科学を活用する機関は世界で200以上に増えている⁽⁴⁾。また，国内においても，環境省，経済産業省，横浜市，尼崎市，岡山県，つくば市，堺市，北海道庁などが相次いでナッジユニットを設立しており，ナッジを活用した施策例も続々と生まれている。

次章からは，省エネルギー・脱炭素分野においてナッジを応用した具体的事例を，筆者らが協力した実証実験からいくつか紹介する。

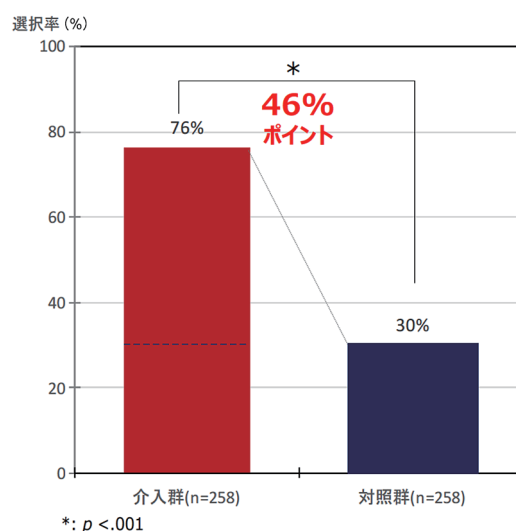
3. ナッジの省エネルギー・脱炭素分野での応用例

（1）一人暮らしを始める大学生に省エネ型家電購入を促すには？

東京都は，大学が集中していることから国内で最も大学生が多く，また，就職などで上京する若者も多い。このような背景のもと，

家庭部門のCO₂排出量のうち集合单身・若中年世帯が占める割合が最も大きいという特徴を有する。一方で，一人暮らしの若者は概して省エネ意識が低く，また在宅率も低いため暖冷房や照明用の省エネルギー余地は小さい。そこで，在宅時間の短い若年単身世帯でも常時稼働する冷蔵庫に着目し，購入時に高効率機器の選択を促す実証実験を，東京都環境局の委託事業の一環として，当社とデロイトトーマツコンサルティング合同会社，早稲田環境研究所，凸版印刷㈱の共同で行った⁽⁵⁾。

人間には複数の選択肢を提示された場合にデフォルト（基準）設定に従うという傾向（現状維持バイアス）がある。この特性を踏まえて「家電セット商品のデフォルトを高効率型冷蔵庫にすると，高効率型の選択率が上がるのではないか？」との仮説を立て，インターネット（Web）アンケートを使った仮想実験で効果を検証した。その結果，高効率型をデフォルトにして選択肢を提示された対象者（介入群）による高効率型冷蔵庫の選択率は，図2のように，そうでない対象者（対照群）の2.5倍に向上し，冷蔵庫のCO₂排出量は，年間10.6%の削減になると推定された。



（注）一人暮らしをする大学生の子を持つ人で，家電選定に関わった人を対象に，仮想のチラシを提示して選択させた結果であり，実際の購買行動ではない。

（出所：東京都環境局，行動科学を活用した家庭部門における省エネルギー対策検討会 第4回，資料1-3（㈱住環境計画研究所作成）

図2 高効率型冷蔵庫の選択率

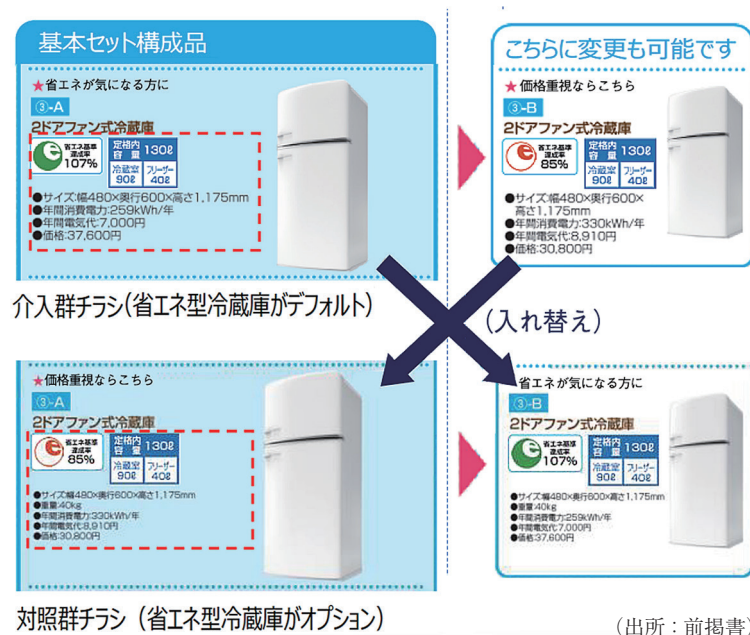


図3 実証実験で用いた提示チラシ(冷蔵庫部分)

実証設計上のポイントは2点ある。まず、図3上段のデフォルトを高効率冷蔵庫にしたチラシと、図3下段のデフォルトを通常型の冷蔵庫にしたチラシのいずれかを、回答者ごとにランダムに提示して、選択を比較するランダム化比較試験(RCT: Randomized Controlled Trial)という厳格な検証手法を採用している点である。これにより、提示情報の違いだけに起因する因果効果を推定できる。

もう1点は、図3上段のデフォルトを高効率型としたチラシであっても、効率の低い通常型の冷蔵庫を選択できるようにしてある点である。これは、ナッジがあくまでも対象者に選択の自由を残しつつ、望ましい方向にそっと後押しする手法であり、選択を強制するものではないためである。

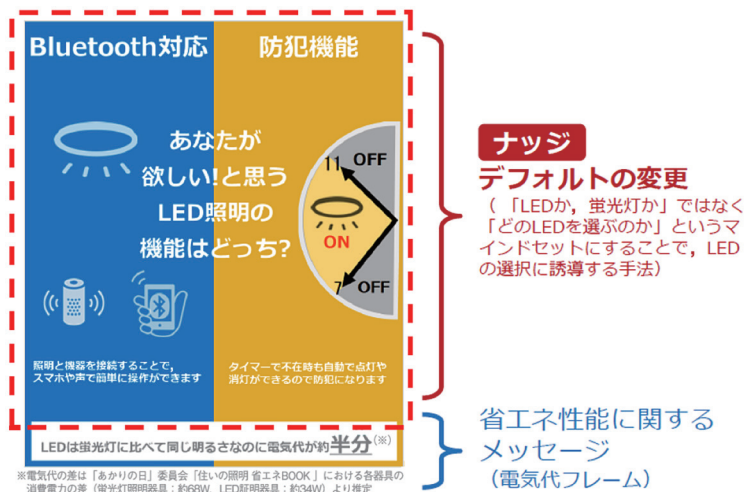
(2) 蛍光灯利用者にLED照明器具を購入してもらうには？

蛍光灯シーリングライトを使用している自宅で蛍光灯ランプが切れたことを想像していただきたい。このとき、照明器具自体をLEDに切り替えることは、ランプのみの交換に比べ一時的に初期費用がかかっても、長期的には光熱費が下がることで経済的になる。しかし、人間

には長期よりも短期のコストやメリットを重視する傾向(大きな時間割引率)や、何か問題がない限りは現状維持を選ぶ傾向(現状維持バイアス)があるため、LED照明器具への交換が進まない。そこで、当社は、LEDへの買替意欲を強めるためのメッセージを検討し、Webアンケートを用いた検証を経済産業省資源エネルギー庁の委託事業の一環として行った⁽⁶⁾。

実証実験では、自宅で蛍光灯シーリングライトを使用している消費者を対象に、「リビングの蛍光灯シーリングライトが暗くなっていることに気づき家電量販店に行きました」というシナリオを設定して7パターンのメッセージを作成し、それをRCTで回答者に提示した。その後、蛍光灯とLED照明器具のどちらを購入するかを選択してもらった。

実験の結果、いくつかのパターンでLED選択率の向上が見られた。最もLED照明器具の選択率が高かったのは、図4の「Bluetooth対応と防犯機能、あなたが欲しい!と思うLED照明の機能はどっち?」というメッセージを提示した場合であった。他のメッセージでは「LEDは蛍光灯に比べて消費電力が半分(または長寿命、電気代が安い)」と蛍光灯がデフォルトであったのに対し、このメッセージは「どのLED



（出所：土屋友和，小林 翼，玄 姫 他，「省エネルギー性能以外の価値（NEV：Non-energy-value）」を活用した省エネ機器普及促進事業－省エネ関連ナッジプロジェクトの実証結果について－，BECC JAPAN 2020，2020 年 8 月 25 日）

図4 デフォルト変更を使ったLED 切替メッセージ

を選ぶのか」とLED がデフォルトであったことが選択率向上に寄与したと考察している。

（3）若年層の気候変動への危機意識や関心を高めるには？

欧州など諸外国では，気候変動に対する危機意識や関心がミレニアル世代やZ世代を中心に高まっており，ライフスタイルの変化や投票行動にも影響を与えている。一方で，日本国内においては，気候変動への危機意識や関心が特に若年層で低い傾向があり，どのように普及啓発を進めるべきかが課題となっていた。

そこで，環境省の委託事業の一環として，若年層の危機意識，関心を惹起するためのメッセージを検討し，当社とデロイトトーマツコンサルティング合同会社，（株）インテージの共同で Web アンケートを用いた検証を行った。

メッセージ検討に先立ち，意識調査や若年層に対するインタビュー調査を行ったところ，気候変動に対して「自分事ではない」という意識や，「自身の行動がもたらす影響に対する無力感」が影響していることが示唆された。このため，図5に示す，若年層に気候変動を身近な環境問題として捉えてもらい，自身の



（出所：福田守宏，平山 翔，小林 翼，「若年層の環境意識向上を促す情報提供手法の実証調査」，BECC JAPAN 2021，（2020 年 8 月 31 日）を基に筆者作成）

図5 若年層の危機意識・関心を高めるメッセージ

表1 メッセージ別の関心・自己効力感の向上効果

	対照群	介入群A	介入群B
気候変動問題に関心がある	24%	35%*	26%
気候変動問題はあなたの行動で改善できる	34%	42%*	37%

* P < 0.05



(出所：前掲書を基に筆者作成)

行動で問題を解決できるという希望的要素を伝えるメッセージを2種類作成した。

実証調査では、事前調査で環境意識が低かった10～20代を対象に、2種類のメッセージを提示する介入群A/Bと、メッセージを提示しない対照群の3群にランダムに分類し、提示後の危機意識や関心の差を比較した。

調査の結果、表1に示すように、「地域愛・身近さ+希望」を訴求した介入群Bでは有意な差は見られなかったが、「身近な災害への危機意識+希望」というメッセージを提示した介入群Aでは、「気候変動問題に関心がある」と「気候変動問題はあなたの行動で改善できる」の割合が有意に向上した。具体的な気候危機（わたしの地域の大雨）と具体的な対策行動（エコバッグを使う）を示したことで、気候変動と対策について理解度が上がったことが有効だったのではないかと考察している。

本章で紹介した3つの事例は、いずれもWebアンケートを採用した実証実験であったが、次章では、実際のフィールドにおいて大規模な社会実証を行った事例を紹介する。

4. ホームエネルギーレポートによる省エネ効果の実証

海外では、エネルギー事業者が個別の家庭にエネルギー使用状況などの情報提供を行うホームエネルギーレポートを送付することで、省エネ効果が得られることが実証されてきた。国内でも、北陸電力(株)管内における短期間の実証調査により省エネ効果が見られることが実証されていたが⁽⁷⁾、寒冷地や蒸暑地でも同

様の効果が見られるか、効果が中長期的に継続するかは検証されていなかった。

そこで、環境省ナッジ事業の一環として、日本におけるホームエネルギーレポートによる省エネ効果の地域性・持続性の実証研究を、当社と日本オラクル(株)の共同で行った。

(1) 実証用ホームエネルギーレポートの開発

ホームエネルギーレポートは、エネルギー事業者が保有する検針データや顧客情報をもとに、エネルギー消費量や省エネアドバイスをレポートとして送付する省エネルギー支援サービスである。中でも、米オーパワー社（2016年に米オラクル社が買収）のホームエネルギーレポートは、ナッジを応用した省エネルギー施策としてよく知られており、実際に、米国を中心に175社以上のエネルギー事業者で採用されている。

コンテンツには多様な行動科学の知見が活用されているが、特に有名なのが、エネルギー消費量の近隣世帯比較である。これは、人間が他者の多くが実施している行動に同調する傾向（社会規範・記述的規範）を応用して、レポート受領世帯のエネルギー消費量を近隣100世帯の平均である「よく似たご家庭」、消費量の少ない上位20%の平均である「省エネ上手なご家庭」と比較することで、特に平均よりも多消費の世帯に省エネルギーを促すものである。この他にも、多数の選択肢や複雑な選択肢が提示されると最適な選択肢が選べなくなる傾向（選択肢過多）を踏まえ省エネアドバイスを3種類に絞って提示する、同じ金額表現でも得より損の方が強く印象に残る損失回避性を応用して、近隣世帯とのエネル

ギー消費量の差を光熱費の出費増として表現するなどの工夫が凝らされている。

我々の実証研究では、オラクル社が世界中で採用するレポート構成をもとに、省エネアドバイスや表現を日本の消費者向けに変更したホームエネルギーレポートを開発した。ホームエネルギーレポートは、図6がA4サイズ1枚に両面印刷され、封筒に入れて郵送された。

(2) 効果検証方法

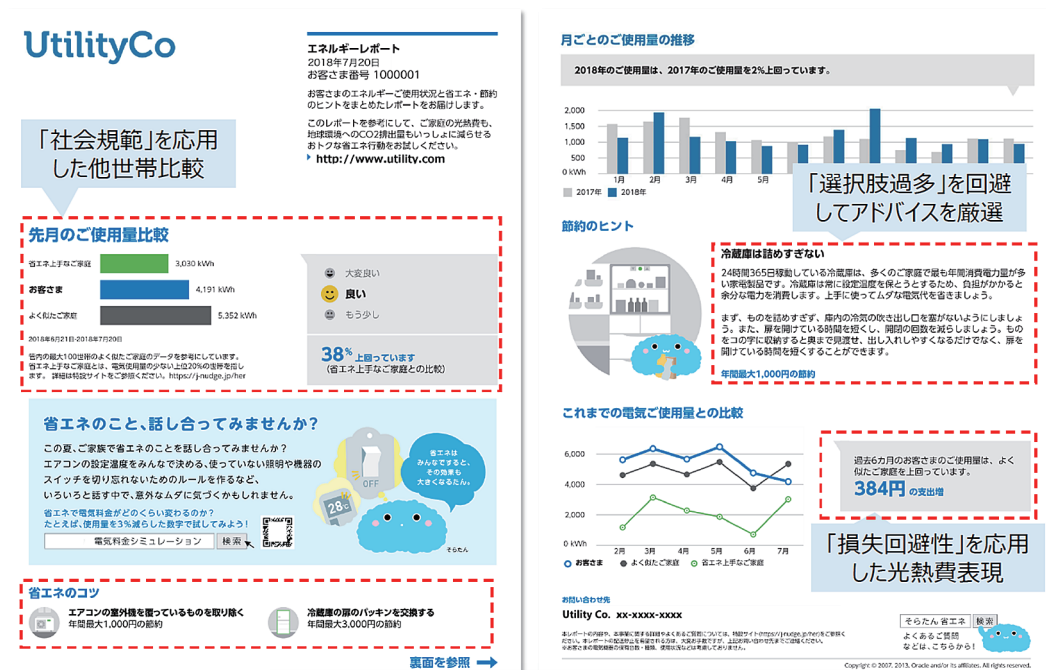
日本国内の気候の異なる5地域における5社のエネルギー事業者（北海道ガス㈱、東北電力㈱、北陸電力㈱、関西電力㈱、沖縄電力㈱）の家庭用需要家を実証フィールドとして、ランダムに選ばれた45万世帯（9万世帯×5地域）を対象に、レポート送付世帯（6万世帯×5地域）と対照世帯（3万世帯×5地域）を設定する大規模なRCTを実施した。

レポート送付期間は、2017年12月～2020年2月（東北電力㈱は2017年度のみ実証参加）の約2年間で、その後1年間はレポートを送付せずに省エネ効果の持続性を観察した。

(3) 省エネ効果の検証結果

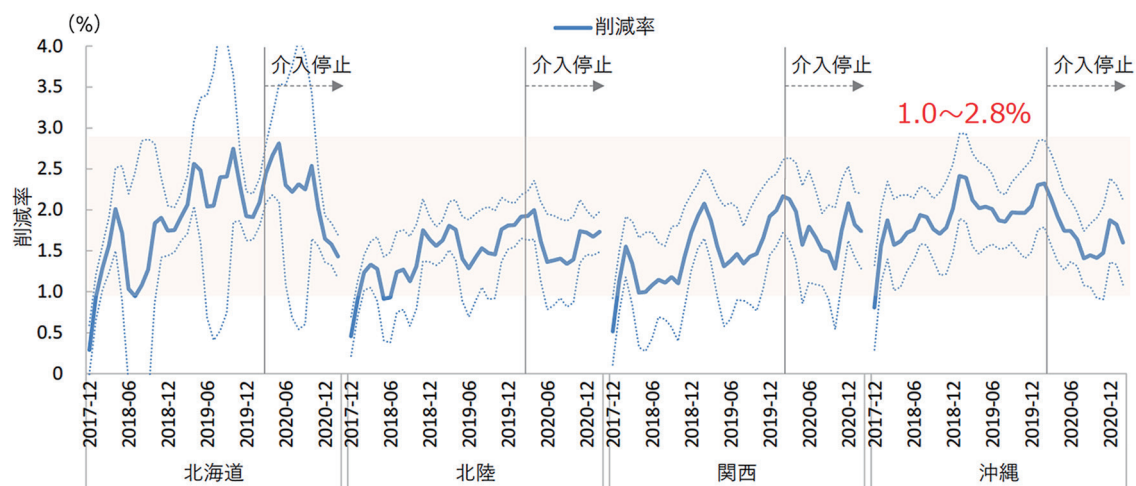
レポート送付世帯では、北海道から沖縄までいずれの地域でもどの季節でも、対照世帯と比較して平均2%の省エネ効果が見られることが確認できた。また、省エネ効果はレポート送付期間中に少しずつ高まり、送付停止後も1年間は持続することが確認された。加えて、最大30万世帯で毎月約2%の省エネ効果を積み上げたことにより、4年間の累積CO₂削減量は4.7万トンとなり、停止後の持続効果も含めると、将来的には11.1万トンのCO₂削減効果に達すると推計された。これは、41万世帯における年間CO₂排出量、または、冷蔵庫135万台分の買替効果に相当する。さらに、レポート送付世帯では、エネルギー事業者との契約継続の意向が高まることもアンケート結果から明らかになった。

エネルギー事業者が既に保有している検針データや顧客情報を分析・情報提供することで、大きなCO₂削減と顧客満足度向上が実現できることを実証した事例である。図7に、実証研究で得られた地域別・月別エネルギー削減率を示す。



（出所：平山 翔，小林 翼，中上英俊 他，「ホームエネルギーレポートによる省エネ効果の地域性・持続性に関する実証研究－介入停止後における省エネ効果の持続性検証－」，BECC JAPAN 2021，2020年8月31日）

図6 実証研究用に開発した日本版ホームエネルギーレポートのイメージ



(注) 上下の点線は95%信頼区間、削減率=平均介入効果/(送付世帯エネルギー消費量-平均介入効果)

(出所：前掲書)

図7 ホームエネルギーレポートの地域別・月別エネルギー削減率

5. ナッジ応用のためのフレームワーク

前章までは省エネルギー・脱炭素分野におけるナッジ応用事例を紹介してきたが、実際に身近な業務などでナッジを応用するにはどうすればよいのだろうか？ここでは多数ある行動変容、行動デザインフレームワークの中から筆者がよく使うものを2つ紹介したい。

まずは、世界初のナッジユニットである英国BITが開発したEASTフレームワーク⁽⁸⁾を紹介する。EASTフレームワークは、幅広い学術文献やBIT独自の研究に基づき、政策

立案者や専門家が適用する際に活用できるよう、行動科学の知見をシンプルな4つの原則である、簡単に(Easy)、印象的に(Attractive)、社会的に(Social)、タイムリーに(Timely)の頭文字を取って解説したチェックリスト型フレームワークである。表2にEASTの手法と具体例・具体策を示す。

このフレームワークは、変容を促したい特定の標的行動に対して、使えるナッジがないかを検討する際に有用である。横浜市行動デザインチーム(YBiT)が邦訳・加工して公表しているEAST_YBiT版⁽⁹⁾も非常に分かり易いため、

表2 英国BITのEASTフレームワーク

原則	手法	具体例・具体策
Easy	デフォルト活用	スポーツジムの月額料金、SNSのプライバシー設定
	面倒な要素を減らす	納税者をWebフォームに直接送客して納税率4%アップ
	メッセージの簡略化	簡単な言葉で、推奨する行動に特化し、行動に必要なことのみ記載する
Attractive	注意を引く	色・写真や勘定に訴えることで顕著性を高める、情報をパーソナライズ
	報酬・罰の設計	福引き効果、希少性を強調、自己イメージ活用、ゲーミフィケーション
Social	社会規範	地元世帯の多くが納税していることを伝えて納税率5%アップ
	ネットワーク	口コミサイト、エネルギーの共同購入スキーム、個別訪問による投票依頼
	コミットメント	結婚は最古のコミットメントデバイス
Timely	タイミング	ライフステージ転換期(進学・引越・結婚・出産・退職など)
	目先の費用・便益を考慮	家電購入時に耐用年数分の光熱費表示
	行動計画支援	予防接種・健診の予約日を記入させる

(出所：The Behavioural Insights Team, "EAST: Four Simple Ways to Apply Behavioural Insights," (2014) を基に筆者作成)

合わせて参照されることをお勧めする。

次に紹介するのは、図8に示す経済協力開発機構（OECD）のBASICツールキット⁽¹⁰⁾である。政策課題の原因となる標的行動の特定（Behaviour）から始まり、標的行動の分析（Analysis）、行動科学を応用した施策戦略検討（Strategy）、施策の有効性を検証する介入実験（Intervention）、実験の結果を実装させる（Change）までの流れを包括的に示すプロセスフロー型フレームワークである。これに対して、先に紹介したEASTは、BASICのうち戦略検討（Strategy）を詳細に説明したものであると整理できる。

BASICツールキットのうち、当社が行動変容実証を数多く支援させていただいた中で特に重要と感じるプロセスは、1番目の課題解決につながる標的行動の特定（Behaviour）と、4番目のナッジの効果を検証する介入実験（Intervention）である。前者については、例えば、最終的な目標が「地域の脱炭素化」であったとしても達成するための施策は無数にあり、さらには施策ごとに改善可能な行動要素も無数にある。そのため、最初の段階で関係者へのヒアリングや事前調査を通じた仮説設定ができないと行動変容を計画できない。また、後者については、行動変容は効率改善のように工学的に計測することができず、また、ナッジの効

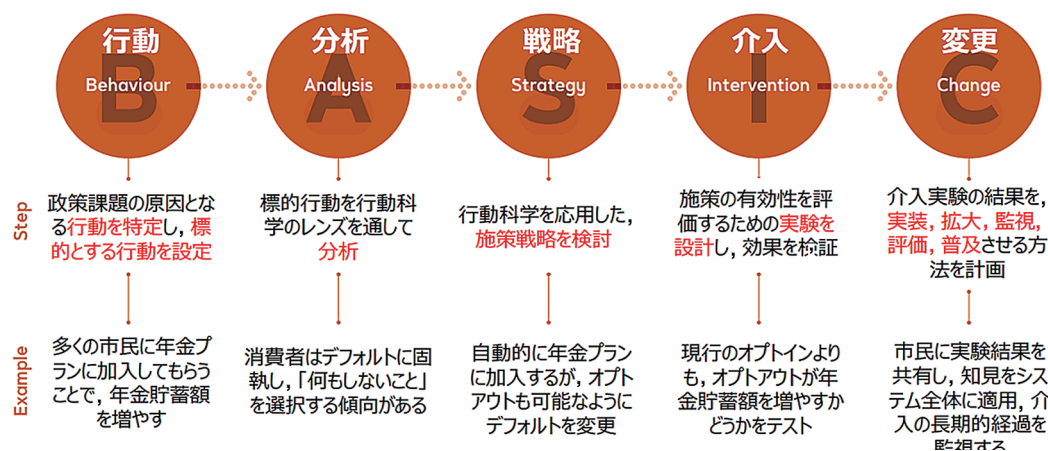
果も概して非常に小さいため、ランダム化比較試験（RCT）のような実験手法で施策の因果効果を推定（因果推論）する必要がある。筆者は工学系出身であったため、当初、因果推論手法に馴染みがなく、その習得に苦勞したが、この数年で日本語の書籍が数多く出版されるようになり習得しやすい環境が整ってきている。

6. まとめ

本稿では、人間の行動特性を踏まえてナッジ（そっと後押し）することで省エネルギー・脱炭素化を促した事例を中心に、ナッジ応用の国内外動向やナッジ応用のためのフレームワークを紹介した。

各施策の効果は小さく、単独で脱炭素化を実現するだけの効力はないが、図1のIEAの推計で示したとおり、消費者の関与なしにネットゼロエネルギーを実現することは難しいこと、また、ナッジは汎用性や拡張性が高く、従来型政策手法の補完ツールとしてなり得ることを感じていただければ幸いである。

最後に、(株)住環境計画研究所では、気候変動対策や省エネルギーのための行動変容に着目した学際的な情報交換・交流の場として、BECC JAPAN⁽¹¹⁾という会議を2014年以来



（出所：OECD, "Tools and Ethics for Applied Behavioural Insights: The BASIC Toolkit," (2019) を基に筆者作成）

図8 OECDのBASICツールキット

毎年開催している。2022 年は 7 月 27 ～ 28 日に開催予定であるため、ご関心があればぜひご参加をご検討いただきたい。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁,『令和3年度エネルギーに関する年次報告』(エネルギー白書 2022), 2022 年 6 月 (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2022/pdf/>)
- (2) IEA, “Net Zero by 2050,” 2021 (<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>)
- (3) リチャード・セイラー / キヤス・サンスティーン (著), 遠藤真美 (訳),『実践行動経済学: 健康, 富, 幸福への聡明な選択』, 日経 BP 社, 2009 年 7 月
- (4) OECD Behavioural insights (<https://www.oecd.org/gov/regulatory-policy/behavioural-insights.htm>)
- (5) 東京都環境局,「行動科学を活用した家庭の省エネ推進事業」(<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/home/cat8690/index.html>)
- (6) 資源エネルギー庁 ウェブサイト, 話題の「ナッジ手法」も検証! 省エネの輪を広げるための情報発信, (https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/shoene_nudge.html)
- (7) 資源エネルギー庁,「エネルギー使用合理化促進基盤整備事業 (エネルギー使用状況等の情報提供による家庭の省エネルギー行動変容促進効果に関する調査) 調査報告書」(受託者: (株) 住環境計画研究所), 2016 年 3 月 (<https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11279541/1>)
- (8) The Behavioural Insights Team, “EAST: Four Simple Ways to Apply Behavioural Insights,” 2014, (<https://www.bi.team/publications/east-four-simple-ways-to-apply-behavioural-insights/>)
- (9) EAST_YBiT 版 (https://ybit.jp/download/east_ybit_edition_201903)
- (10) OECD, “Tools and Ethics for Applied Behavioural Insights: The BASIC Toolkit,” 2019, (<https://www.oecd.org/gov/regulatory-policy/tools-and-ethics-for-applied-behavioural-insights-the-basic-toolkit-9ea76a8f-en.htm>)
- (11) BECC JAPAN: 気候変動・省エネルギー行動会議ウェブサイト (<https://seeb.jp/>)

再エネ主力電源化に向けた電力系統の慣性力低下への対応



新谷 隆之 (プロジェクト試験研究部 特任参事)

1. はじめに

太陽光発電や風力発電など、天候の影響で出力が変動する再生可能エネルギー（変動再エネ/VRE）は、地球温暖化対策の切り札として注目されている。日本でも、「第5次エネルギー基本計画」（2018年7月閣議決定）において、再エネの「主力電源化」の方向が打ち出され、「第6次エネルギー基本計画」（2021年10月）では、2030年度の電源構成での再エネ比率を36～38%に拡大するとともに、「S+3E」すなわち、安全性（Safety）を大前提に、安定供給（Energy Security）、経済効率性（Economic Efficiency）、環境適合性（Environment）を同時達成するべく、取り組みを進めていくとしている。しかし、再エネ、

特にVREを主力電源化するにはいくつかの課題がある。

本稿では、まず、VRE主力電源化への5つの課題について説明し、次に、その中でも系統の慣性力低下への具体策について論じ、日本より再エネ導入が進んでいる諸外国の事例も紹介する。

2. 再エネ主力電源化の課題

（1）再エネ大量導入に向けた課題の整理

表1は、再エネ導入拡大に向けた課題である⁽¹⁾。5つの課題のうち、「①出力変動への対応」は、VREの特性に起因するものである。「②送電容量の確保」および「④自然条件や社会制約への対応」は、再エネ特有の課題

表1 再エネ導入拡大に向けた課題⁽¹⁾

① 出力変動への対応 (調整力の確保)	- 変動再エネ（太陽光・風力）は、自然条件によって出力変動するため、需給を一致させる「調整力」が必要。現在は調整電源として火力・揚水に依存。 - 調整力が適切に確保できないと、再エネを出力制御する必要。結果として、再エネの収益性が悪化し、再エネ投資が進まない可能性。 - 今後、変動再エネの導入量が増加する中で、①調整力の脱炭素化（水素、蓄電池、CCUS/カーボンサイクル付火力、バイオマス、デマンドレスポンス等）を図りつつ、②必要な調整力の量を確保する、といった課題をどのように克服していくか。
② 送電容量の確保	再エネポテンシャルの大きい地域（北海道等）と大規模需要地（東京等）が離れているため、送電容量が不足した場合には、物理的に送電ができず再エネの活用が困難。 - 特に北海道については、北海道内の需要規模が小さいこともあり、導入拡大が難しい状況。 社会的な費用に対して得られる便益を評価しながら、どのように送電網の整備を進めていくか。
③ 系統の安定性維持 (慣性力の確保)	突発的な事故の際に、周波数を維持しブラックアウトを避けるためには、系統全体で一定の慣性力（火力発電等のタービンが回転し続ける力）の確保が必要。 太陽光・風力は慣性力を有していないため、その割合が増加すると、系統の安定性を維持できない可能性。 - その克服に向けて、疑似慣性力の開発等を進めていく必要があるが、現時点では確立した技術がない状況。
④ 自然条件や社会制約への対応	- 自然条件に左右される再エネの導入にあたっては、平地や遠浅の海が少なく、また日射量も多くない我が国の自然条件を考慮する必要。 - また、他の利用（農業、漁業）との調和、景観・環境への影響配慮を含む地域等との調整が必要。 導入できる適地が限られている中で、各電源毎の現状・課題を踏まえ、どのように案件形成を進めていくか。
⑤ コストの受容性	- 上記のような諸課題を克服していくためには、大規模な投資が必要。また、適地が限られている中で大量導入した場合には、適地不足により今後コストが上昇するおそれ。 - 既に再エネ賦課金の負担が大きくなっている中で、こうしたコスト負担への社会的受容性をどのように考えるか。また、イノベーションの実現が不確実な中で、どのようにリスクに備えた対応をしていくべきか。

ではない。例えば、新規に大型原発を建設しようとすると同じようなことが発生する可能性がある。「⑤コストの受容性」は、再エネ導入に係る日本固有の課題である。海外では既に、既存火力などと再エネの発電コストが同等（グリッドパリティ）に達している国・地域がある。そして、「③系統の安定性維持」が本稿で論じる課題である。これは、VRE に固有の出力変動に伴う課題ではなく、発電方式に起因する課題である。

（２）同期電源と非同期電源

図 1 左は、火力／水力／原子力や、非変動再エネ（地熱／バイオマス発電など）での発電方式である。これらは同期電源と呼ばれ、発電出力は交流となる。火力では、化石燃料を燃やした熱で作った高温・高圧の蒸気や、化石燃料の燃焼ガスで発電機のタービンを回

転させ、水力では水流が発電機の水車を回転させて発電し、系統に電気を送る。

一方、図 1 右は、太陽光／風力など VRE の発電方式である。これらは非同期電源と呼ばれ、発電出力は直流だが、系統の状態に追従して、パワーコンディショナー（PCS、図 1 中のパワコン）で直流波形から交流波形に変換して系統に電気を流す仕組みとなっている⁽²⁾。

（３）慣性力と同期化力

同期電源は、系統側で何か問題が発生しても回転子を一定回転に維持しようとする力（慣性力）および、周波数が変化しても元に戻そうとする力（同期化力）を持っている。これに対して、非同期電源は、その特性から慣性力を持たない。

図 2 は、電力系統における慣性力・同期化力のイメージである⁽³⁾。

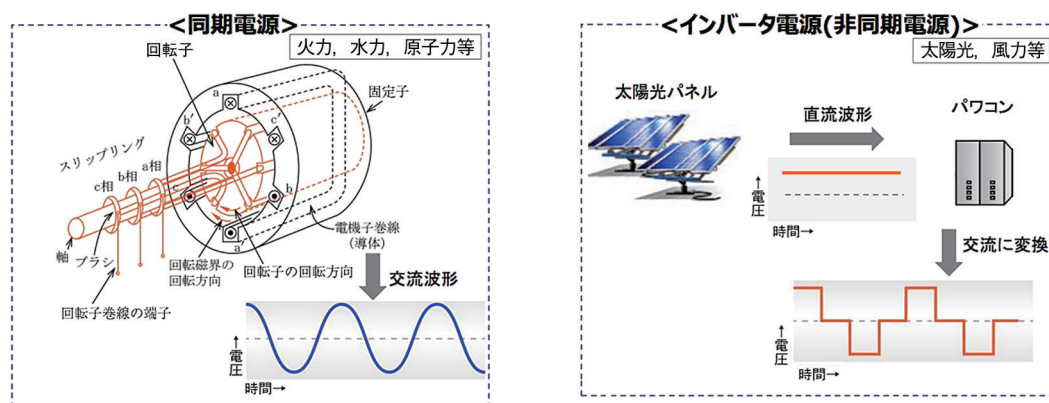


図 1 同期電源（左）と非同期電源（右）の原理⁽²⁾

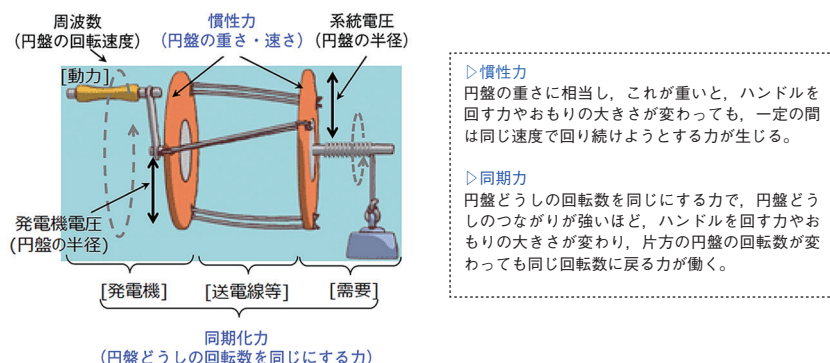


図 2 電力系統の慣性力と同期化力のイメージ⁽³⁾

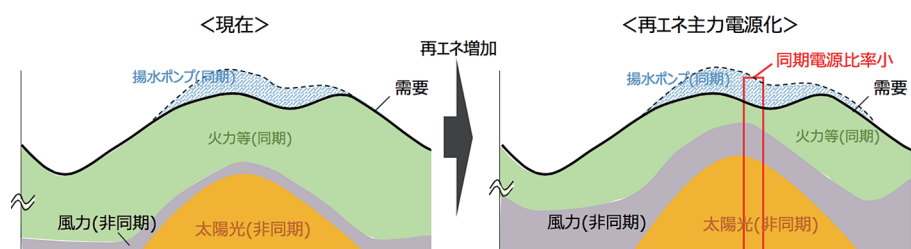


図3 再エネ主力電源化に伴う同期電源の減少⁽⁴⁾

(4) 系統安定性を確保する上での再エネ（非同期電源）主力電源化の問題点

図3は、現在および再エネ主力電源化が行われた場合の電源構成を比較したもののだが、時間帯によっては、同期電源比率が非常に小さくなることが想定されている⁽⁴⁾。

このように太陽光・風力など非同期電源は慣性力を持たないため、その割合が増加すると、系統の安定性を維持するための慣性力が不足する。また、同期化力も減少するので、送電線事故などが発生して発電機間の加速/減速が大きくなると、発電機は同期運転を継続することができず、連鎖的に系統から脱落し、系統の周波数が低下して安定した運転ができなくなり、電力会社管内が全域停電（ブラックアウト）に至る可能性がある。

3. 再エネ主力電源化に向けた系統安定性維持対策

表2は、系統安定性を維持するため、慣性

力や同期化力を確保する具体的な対策について、費用対効果や技術開発面で、再エネ主力電源化を視野に入れて検討されている項目一覧である⁽³⁾。

対策メニューのうち、「同期発電機台数の確保」、「系統増強」は自明なので、それ以外の対策について補足する。

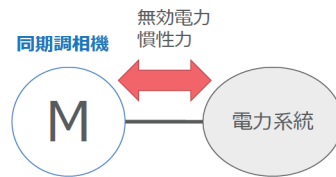
(1) 同期調相機

同期調相機（ロータリーコンデンサ）は、無負荷で運転される同期電動機で、調相設備の1つとして、1920年代から1960年頃まで各所に建設されてきたが、その後は経済性と保守性に優れている電力用コンデンサが主流となっている。しかし、電力用コンデンサは無効電力を供給することだけを目的とし、かつ無効電力調整が段階的であり、系統電圧低下時には無効電力供給量も低下するという欠点がある。

それに対して同期調相機は、①界磁電流を調整することにより、無効電力の供給から吸

表2 再エネ主力電源化に向けた系統安定性維持対策⁽³⁾

対策メニュー例	慣性力改善	同期化力改善	概要・特徴	課題
同期発電機台数の確保	○	○	・ 必要な慣性力に応じて、同期発電機等を優先的に系統並列	・ 再エネ抑制につながる可能性
同期調相機	○	○	・ 無負荷同期電動機であり、慣性力を有するほか、電圧維持も可能 ・ 既設発電機を改造して同期調相機として使用する事例もあり	・ 運転中のロス発生 ・ 回転機のため保守コストが大きい
MGセット	○	○	・ 再エネ（+蓄電池）と同期電動機を組み合わせ、同期発電機より電力を出力する。	・ 電動機や発電機、蓄電池など多くの設備が必要 ・ 回転機のため保守コストが大きい
仮想同期発電機（疑似慣性）	○	○	・ インバータに同期発電機の動きを再現する制御を組み込み、同期化力を持たせ、蓄電池等と使用することで慣性力相当の出力をさせる。	・ 慣性力を出力するためにインバータの大容量化や蓄電池等によるエネルギー源の確保が必要。
系統増強	×	○	・ 系統インピーダンスを低減させ、同期化力を改善	・ 慣性力には効果なし ・ 送電線の増設等、大規模工事が必要でコスト大きい
STATCOM	×	○	・ 電圧を支える（維持）することで同期化力を改善	・ 慣性力には効果がない



- <特徴>
- 無負荷の同期電動機と同じであり、無効電力を調整することで電圧維持が可能。
 - 同期速度で回転しているため慣性力があり、周波数変化に応じて慣性力を出力。
 - 火力発電所のタービンを切り離せば同期調相機として使用可能。
- <課題>
- 回転機のため、保守コストが大きい。

図4 同期調相機 (3) (5)

収まで連続的に広範囲に無効電力を調整することができる、②内部誘起電圧により自己電圧が確立しているため、系統電圧低下時でも一定の無効電力が供給できるなどのメリットがある。そのため、系統電圧安定度の向上を目的として、電力用コンデンサではなく、図4に示すように、同期調相機を採用する場合がある (3) (5)。

(2) 電動発電機 (MG セット)

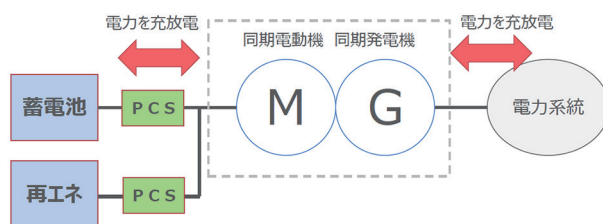
電動機 (Motor) と発電機 (Generator) とを直結した電動発電機 (MG セット) は、交直変換、周波数変換などの電力変換を目的とする回転機であり、パワーエレクトロニクス機器が普及する以前に使われていたものである。

ところが、再エネ主力電源化にあたって、

再エネおよび蓄電池を接続した MG セットを系統連系すれば、系統事故時などにおいても回転系の発電機と同様な挙動を示し、図5のように、電力系統の安定化に貢献することが期待されている (3)。

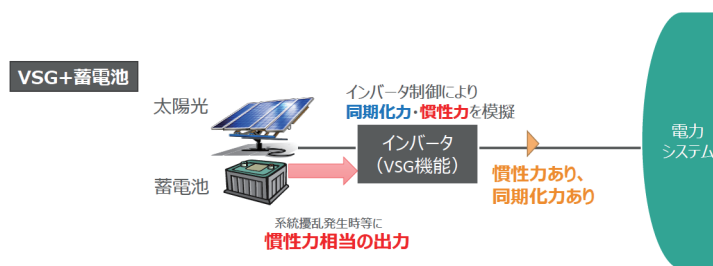
(3) 仮想同期発電機 (疑似慣性)

仮想同期発電機 (VSG) は、インバータ連系の非同期電源に疑似的に慣性力を具備させるものである。具体的には、回転機の運動方程式に基づいて同期発電機の過渡特性をインバータで模擬し、過渡的なエネルギーを発電機の慣性に相当する電力貯蔵装置で吸収する (3)。図6にシステムのイメージを、図7に制御インバータの構成例を示す。



- <特徴>
- 再エネ・蓄電池と同期電動機を組み合わせ、同期発電機より系統へ電力を出力する。逆に系統の電力を吸収し充電も可能。
 - 同期発電機と同様に慣性力を保有しているうえ、蓄電池容量に応じた瞬動予備力の出力も可能。
- <課題>
- 発電機、モーター蓄電池など多くの設備が必要であり、比較的高額。

図5 MG セット (3)



- <特徴>
- 発電機の慣性力や同期化力をインバータ電源に持たせるように制御を実施 (仮想同期発電機: VSG (Virtual Synchronous Generator))。
 - 蓄電池とインバータ制御により同期発電機のように同期化力があり仮想的な慣性力を出力可能。
- <課題>
- 発電機と同等の特性を持たせるには、大容量のインバータ、蓄電池が必要。
 - 多量の VSG が系統に導入された際の制御系の不安定性について懸念あり。

図6 仮想同期発生機 (3)

$$\frac{M}{\omega_n} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_n} \cdot \frac{d \delta}{dt} = P_m - P_{out}$$

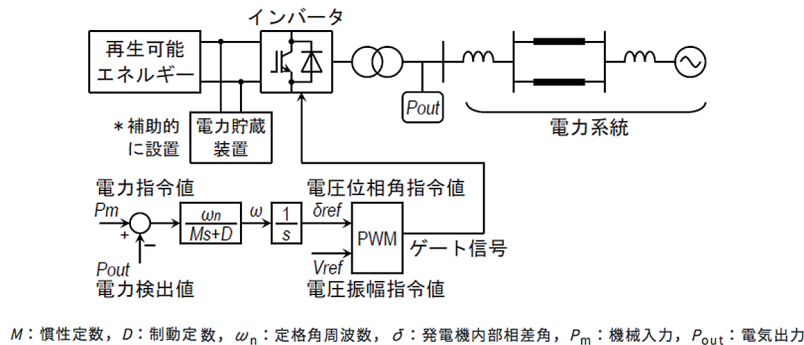


図7 仮想同期発電機の制御インバータ構成例⁽⁶⁾

(4) 無効電力補償装置 (STATCOM)

STATCOMは、自励式変換装置を用いた無効電力補償装置で、日本では、自励式 SVC あるいは SVG と呼ばれている。図8にシステムのイメージを示す。

静止型無効電力補償装置 (SVC) は受電端電圧の安定化、系統安定度の向上、負荷変動による電圧フリッカの補償などの目的で使用されるが、その構成としては、サイリスタを用いてリアクトル電流の位相制御やコンデンサの開閉制御を行う方式と自励式変換装置を用いて無効電力の制御を行う方式がある^{(3) (6)}。

(5) イナーシャ制御

海外文献では、合成慣性力という用語は、先述の仮想同期発電機 (疑似慣性) の意味で用いられていることが多い。

ただし、「風車」(wind turbine) と同時に「合

成イナーシャ」(Synthetic Inertia) という用語が用いられている海外の文献では、それは風車が回転する際の慣性力を利用した合成慣性力という意味で用いられている⁽⁷⁾。これは、従来の発電機のタービンや水車の慣性力を模擬し、系統の周波数が急激に変化した際、風車の回転力に応じて追加の有効電力を系統側に供給する仕組みである。

合成慣性力を生成するトリガー (きっかけ) としては、図9に示す周波数低下の閾値による方式 (under-frequency trigger) や系統周波数変化率 (RoCoF) の閾値による方式 (RoCoF trigger) などがある⁽⁸⁾。

風車の回転力を利用した、この合成慣性力の生成は「イナーシャ制御」と呼ばれている。風力発電の制御モードの1つとして国際標準 IEC61400-21-1 で測定および評価方法が定義されており、多くの風力発電メーカーがその機

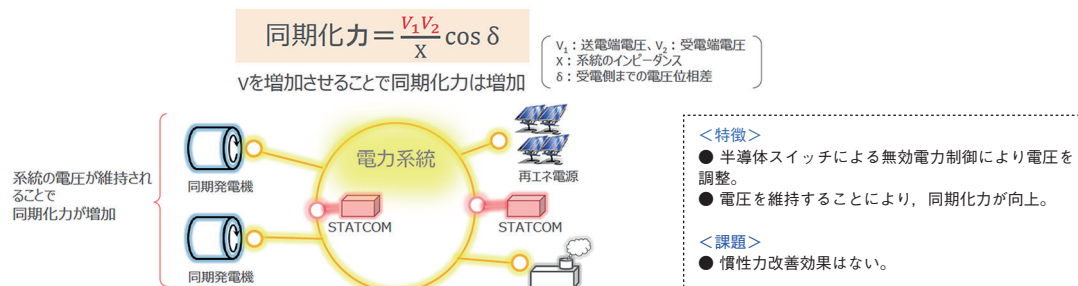
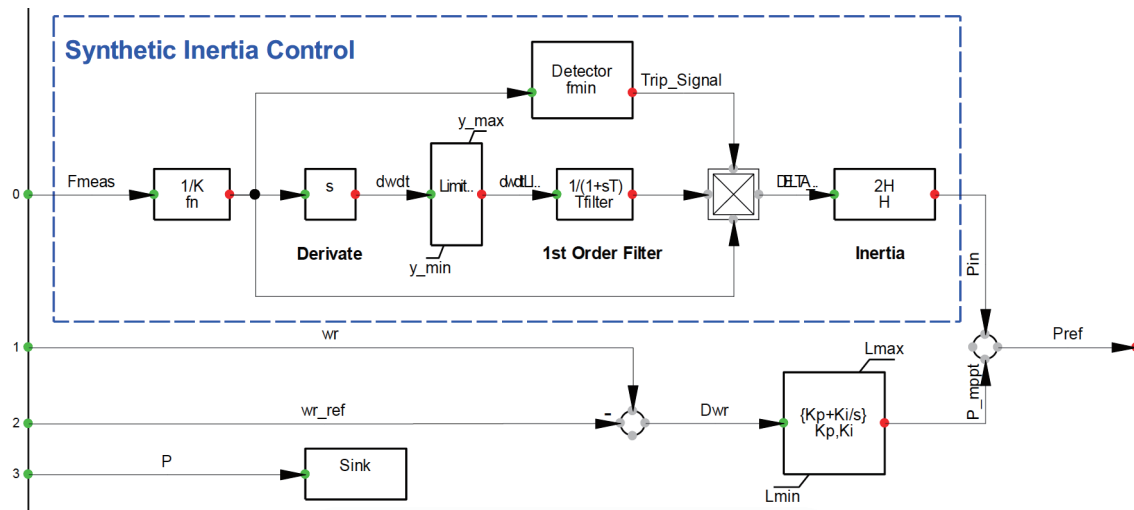
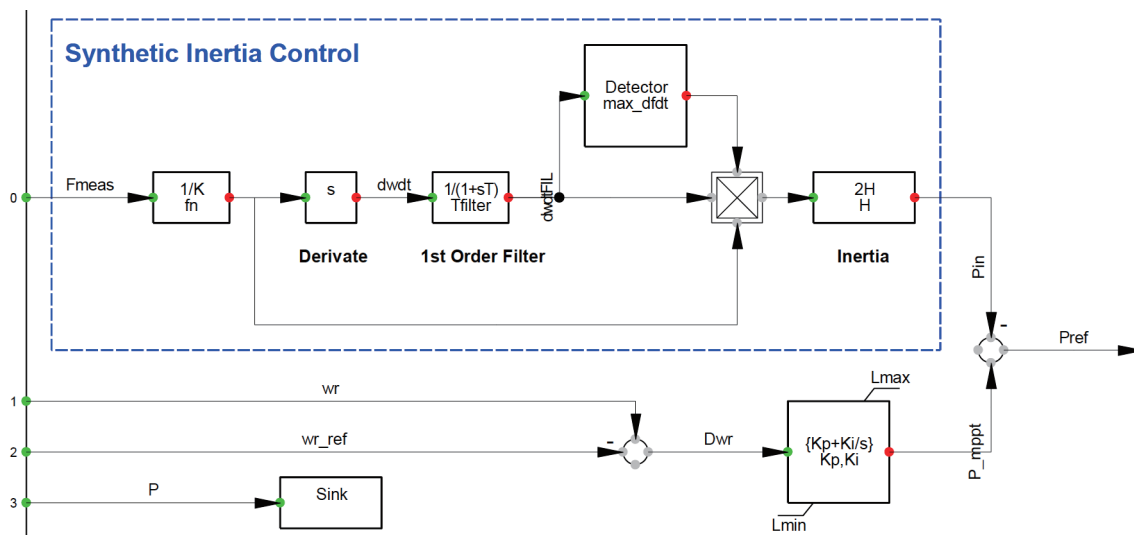


図8 STATCOM⁽³⁾



＜周波数低下の閾値による合成慣性力の生成＞



＜系統周波数変化率（RoCoF）の閾値による合成慣性力の生成＞

図9 合成慣性力の生成ロジック (8)

能を提供している⁽⁹⁾。図10に、イナーシャ制御を含む系統安定化の4つの機能について示す。

海外ではすでにVREが大量に導入されても系統安定性を確保するための一方策として、イナーシャ制御の具体的な検討が始まっている。例えば、英国の電力系統運用者（National Grid ESO）は、2019年、「周波数制御機能拡張可能性検証プロジェクト」（Enhanced Frequency Control Capability project）で、デンマークに本拠を置く電力会社オーステッ

ドのバーボバンクオフショアウインドファームで使われているシーメンスガメサ・リニューアブル・エナジー（SGRE）社製の3.6MW風力タービンを用いてイナーシャ制御を行い、規定よりも高速で周波数応答できたことが報告されている⁽¹⁰⁾。

（6）慣性力調達市場

さらに海外では、慣性力の調達市場が既に導入されている。アイルランドでは、2014年より島内の系統安定化のため急激な周波数

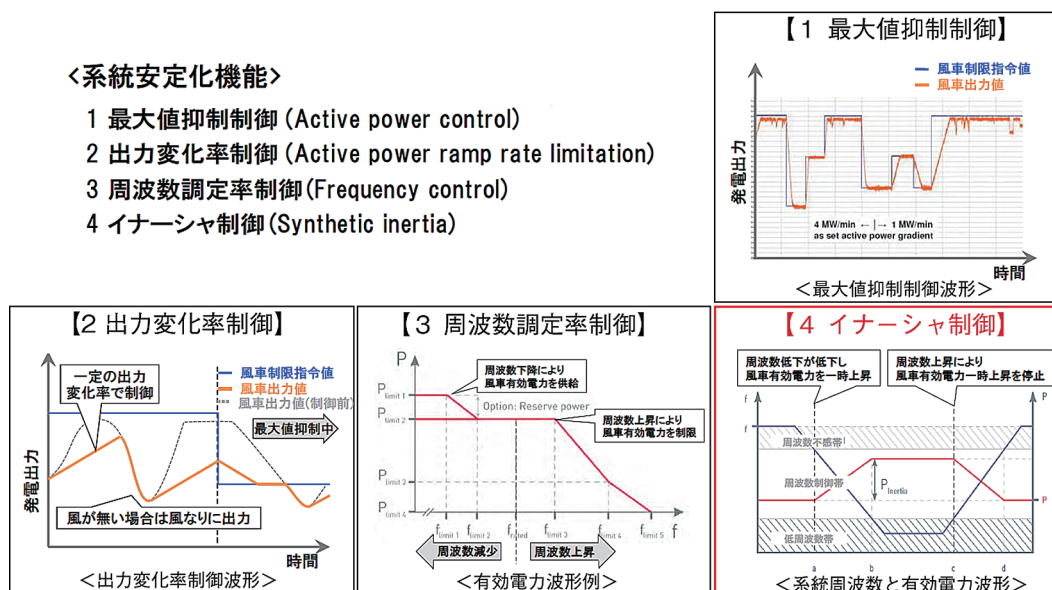


図 10 風力発電の制御モード (9)

変化対策を検討する“RoCoF Alternative & Complementary Solutions Project”を立ち上げ、RoCoFを緩和する種々のオプションの技術評価を経て、2018年度第3四半期、FFR (Fast Frequency Response) をアンシラリーサービス (周波数安定などの電力品質を維持するサービス) に追加している⁽²⁾。

英国でも、アンシラリーサービスとして、従来の周波数調整力であるFFR (Firm Frequency response) に加えて、2020年10月よりDC (Dynamic Containment) の市場調達を開始している。FFRが、10秒以内に契約した出力に達すればよいのに対して、DCでは0.5～1秒以内にフル出力に達することが要求され、大型発電所が事故停止したような系統周波数の急激な変化に対応するものである。この他にも、2022年4月から周波数が50Hzに近い場合の小さな偏差に対処するための周波数応答サービスとしてDR (Dynamic Regulation) が、2022年5月からは、VREのランプ変動のような急激な出力変動に起因する周波数変動に対処するDM (Dynamic Moderation) の市場調達が始まっている⁽¹¹⁾。

日本では、2024年から需給調達市場で一次調整力の市場取引が開始される予定となって

いるが、一時調整力の応動時間は英国のFFRと同じ10秒以内となっている。再エネ主力電源化に向けた対応として、日本でもDCやDMに相当する新たな需給調整市場商品導入の検討が必要ではないかと想定される。

参考文献

- (1) 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 第33回資料「2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討」2021年11月17日
- (2) 電力広域的運営推進機関、調整力及びバランス評価等に関する委員会 第55回資料3『「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討について』、2020年10月27日
- (3) 送配電網協議会、「同期電源の減少に起因する技術的課題」、2021年6月16日
- (4) 電力広域的運営推進機関、調整力及びバランス評価等に関する委員会 第64回資料3『「再エネ主力電源化」に向けた技術的課題及びその対応策の検討状況について』、2021年8月23日
- (5) 「電気事業事典」電気事業講座2008 別巻
- (6) 電気学会 電力・エネルギー部門の「用語解説」,「第32回テーマ：無効電力補償装置 (STATCOM)」
- (7) スウェーデンのエネルギー研究機関エネルギーフォロスク (Energiforsk), “SYNTHETIC INERTIA TO IMPROVE FREQUENCY STABILITY AND HOW OFTEN IT IS NEEDED,” 2015年
- (8) 英国ローボロー大学, “Activation schemes for synthetic inertia controller on wind turbines based on full

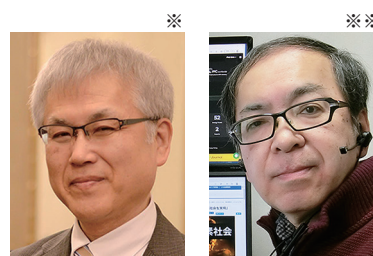
- rated converter,” 2015 年
- (9) 日立パワーソリューションズ, 「風力発電システムの現状とエネルギーインテグレーションへの寄与について」, 2018 年 5 月 9 日
- (10) 英国電力系統運用者 (National Grid ESO), “The Enhanced Frequency Control Capability (EFCC) project closing down report” 2019 年 4 月
- (11) 英国電力系統運用者 (National Grid ESO), “Full range of dynamic frequency response services now active,” 2022 年 5 月 10 日

[調査研究報告]

カーボンニュートラルのための地政学 ～エネルギー・セキュリティの国際比較と日本への提言～

※
小野崎正樹（研究顧問）

※※
橋崎 克雄（プロジェクト試験研究部
部長）



1. はじめに

カーボンニュートラルに向けて世界が急速に方向転換してきている。また、ロシアのウクライナ侵攻により、エネルギー・セキュリティ（エネルギー安全保障（安定供給））に対する注目度が高まっている。

地政学は、従来、領土拡張から植民地政策、さらには、化石資源確保の文脈で語られることが多かったが、カーボンニュートラルとの関連となると、大量の再生可能エネルギー（再エネ）をどこから、どれだけ確保するかということに視点を変える必要がある。太陽光が豊富な地域、風力が安定して得られる地域、火山帯で地熱を得られる地域は、今までの石炭、石油、天然ガスの産地にとって代わる。地産地消により、エネルギー・セキュリティが増すとの意見もあるが、日本の場合、それだけでは解決できない。

本稿では、まず、地政学における国家の特性について説明する。続いて、資源状況を検討した上、2050年の「実質カーボンニュートラル」を目指すヨーロッパの国々と米国について、日本との比較で、長期的なエネルギー・セキュリティ度を評価する。その後、セキュリティに影響する主な因子を個別に、または組み合わせて評価することで、エネルギー・セキュリティの度合いを数値化する。さらに、日本が長期にわたってエネルギー・セキュリティを高める方法を検討し、最後に、日本の針路について提言する。

2. 地政学とは

地政学とは、国の地理的な条件を基に、政治的・社会的・軍事的な影響を研究する学問である。地政学は、近年、関心を集め、多くの解説書が出版されている^{(1)～(5)}。米国の海軍大学校校長アルフレッド・セイヤー・マハン（Alfred Thayer Mahan）は、1890年に『海上権力史論』⁽¹⁾で、シーパワー（海洋勢力）とランドパワー（大陸勢力）の概念を提唱した。さらに、英国の地理学者で政治家のサー・ハルフォード・ジョン・マッキンダー（Sir Halford John Mackinder）は、1919年に『デモクラシーの理想と現実』⁽²⁾で大陸の中枢を成すハートランドとその周辺に位置するリムランドの概念を提唱した。ハートランド、リムランド、ランドパワー、シーパワーの関係は、図1⁽⁵⁾に示す通りである。ハートランドは、ユーラシア大陸の心臓部である。その周縁に位置するリムランドでは、ウクライナ侵攻に見られるように、大規模な国際紛争が発生することが多い。

シーパワーの国に該当するのは、海洋貿易で栄えた国々である、日本、英国、アジア諸国である。米国は、シーパワーとして発展し、西太平洋にまで勢力を拡大させてきた。シーパワーの国は、自国の利益を確保するために、かつては海軍力の増強を進めた。加えて、他国と連携して海洋貿易を進めることで発展してきた。マハン、シーパワーには海洋を支配する軍事力だけではなく、平和的な通商や

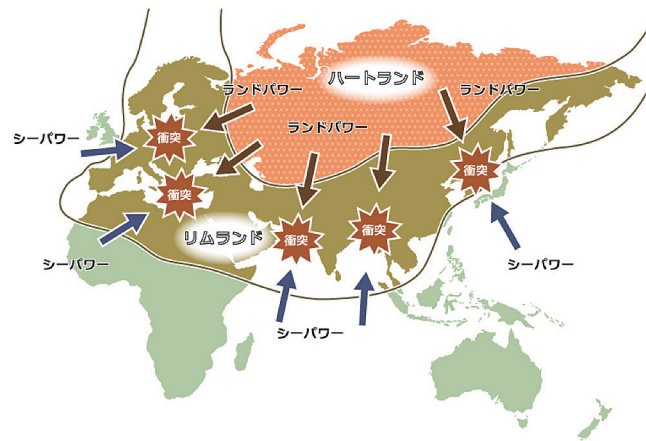


図1 ハートランドとリムランドの関係⁽⁵⁾

海運の力も含まれるとも述べている⁽¹⁾。シーパワーの国にとっては、現代にあっても、通商上・戦略上、重要な価値を有する海上交通路（シーレーン）の確保が重要な課題である。

一方、ハートランドには、広大な土地を擁し、その勢力を伸ばしてきたロシアや東欧、中国、中央アジアが該当する。ヨーロッパの中で領土紛争を繰り返してきたドイツやフランスはリムランドに位置するが、ドイツはランドパワーを誇ってきた。ランドパワーの国は、領土を広げ、エネルギーを確保することに専念するも、エネルギーの輸送に課題を抱えていたが、鉄道の発達とともにそれを克服し、さらに、今ではパイプラインも活用している。

マハン、マッキンダー両名の発想は、「大陸勢力（ランドパワー）がユーラシア大陸の枢要部分（ハートランド）を支配することに強い警戒感を示す」⁽⁴⁾もので、「英米のシーパワーの覇権を脅かしかねない」⁽⁴⁾ことを契機としている。両名の著書は、第一次世界大戦（1914～1918年）の前後に発表されたものであるが、そこで書かれた地理的条件は今も変わっていない。

植民地の時代を超え、化石燃料を各地から調達する時代となり、さらに、エネルギーとして従来の化石資源だけではなく、再エネを加えても、ランドパワーとシーパワーの位置づけは維持されよう。そして、同じような地理的条件であっても、2050年の実質カーボン

ニュートラルへ向かう中で、エネルギーの流れは大きく変わっていく可能性がある。

日本の隣りには、ロシアと中国というハートランドでありランドパワーでもある国々がある。また、リムランドである朝鮮半島にも接している。そのような中、海軍力を増強しているロシアは、将来、温暖化で北極海の氷が解けるとシーパワーにもなる。また、中国も海軍力を増強し、シーパワーとしての力を強めている。近年、中国は「海洋強国建設」を唱え、15世紀前半の鄭和艦隊に倣い東シナ海に進出している。それに対して、日本を始め、インド、米国、オーストラリアやアジアの中堅国との連携を基本とした「インド太平洋戦略」が注目されている⁽⁶⁾。これまでの歴史においては、ランドパワーとシーパワーが両立することはないと言われてきたこともあり、今後の勢力展開を憂慮するものである。

3. エネルギー・セキュリティに関する既往の研究

「国のエネルギー安全保障度は、個々の一次エネルギー源のエネルギー安全保障の程度を一次エネルギー総供給構成比により加重平均した値に、一次エネルギー源の分散による影響を乗じたもの」とされている⁽⁷⁾。

経済産業省は、エネルギーの安定供給に関する検討結果を、エネルギー白書などで発信

し続けている。「2010 年版エネルギー白書」⁽⁸⁾では、米国、カナダ、英国、ドイツ、フランス、中国、韓国と日本を、自給率、輸入先、チョークポイント（戦略的に重要な海上水路）、エネルギー源、停電時間、GDP 原単位、供給途絶対応の尺度で比較している。その中で、日本がエネルギー・セキュリティを高めるには、a) 自主開発権益を含む自主エネルギー比率の向上、b) わが国企業の権益確保に向けたリスクマネー供給支援の推進、c) チョークポイント低減と備蓄の整備、を挙げている。

2010 年版以降も、エネルギー白書では「主要国の安全保障の変化」の節を設け、最新のデータに基づき、変化を論じてきた。『エネルギー白書 2021』⁽¹⁰⁾では『エネルギー白書 2015』⁽⁹⁾も引用して、図2のように、日本の7個の定量指標の変化を示している。ここでは、「電力の安定供給能力」が電力システム改革などの影響で大きく変化している。

また、『エネルギー白書 2021』⁽¹⁰⁾では、

図1と同様の指標で各国を比較している。その一部として、エネルギー輸入先の多様化について図3に、エネルギー消費の GDP 原単位について図4に示す。これらに見られるように、国による違いが明確に示されている。日本は、図3に示すように、輸入先の多様化を図ってきており、欧米諸国と比べて遜色ないレベルに達している。また、エネルギー消費の GDP 原単位については、図4に示すように、十分に高いレベルにある。

さらに、2021 年からは、追加指標として、d) 蓄電能力と、e) 電力のサイバーセキュリティが加えられた。

また、2019 年には、（一財）日本エネルギー経済研究所が「各国エネルギー戦略の定量分析・災害時におけるエネルギーインフラ事業の在り方」⁽¹¹⁾を発行している。ここでは、米国、カナダ、英国、ドイツ、フランス、中国、韓国などを対象として、化石燃料の輸入先についてカントリーリスクの面から評価を行っている。

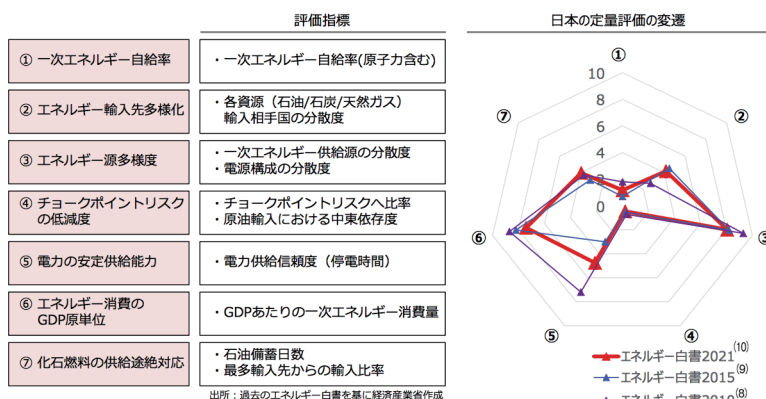


図2 日本のエネルギー・セキュリティ指標の変化⁽¹⁰⁾

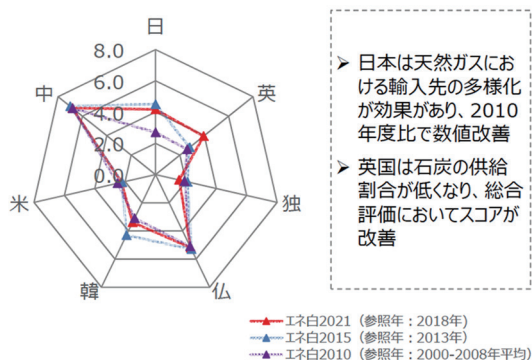


図3 エネルギー輸入先多様化の変化⁽¹⁰⁾

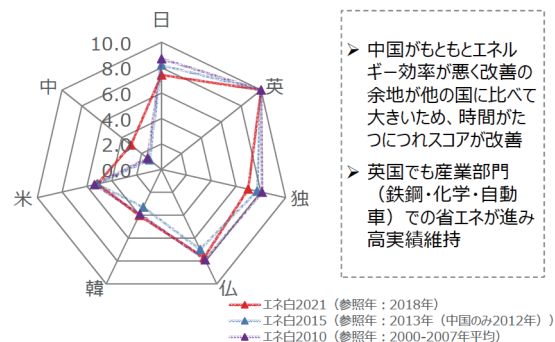


図4 エネルギー消費の GDP 原単位の変化⁽¹⁰⁾

カントリーリスクとは、投資する国・地域の政治、経済、社会情勢などの変化に起因するリスクのことである。日本は、多様化の面ではヨーロッパ諸国と大きくは変わらないものの、原油の輸入ではホルムズ海峡などのチョークポイントのリスクがあることが指摘されている。

4. 化石燃料資源

石炭、石油、天然ガスからなる化石燃料の埋蔵量と生産量を概説する。2050年のカーボンニュートラルに向けて、経済協力開発機構（OECD）加盟国では化石燃料の需要は大幅に減少する。しかし、世界では、石炭需要は大幅に減るものの、原油は半量程度に、天然ガスについては、現在より60%高まるとも言われている⁽¹²⁾。

そこで、原油と天然ガスに軸足を置き、BP統計⁽¹³⁾に基づき、年間生産量、埋蔵量、R/P（埋蔵量／生産量）を需要国と生産地域・国に分けて地域・国ごとに表1にまとめた。需要国には、日本、ドイツ、フランス、英国、米国を代表として挙げた。生産地域としては、オーストラリア、ヨーロッパ、北米、中南米、ロシア、アジア、アフリカに分けた。

中東は、原油の生産量が大きいだけでなく、天然ガスについても大きな埋蔵量を有していることがわかる。北米がそれに続く。南米は埋蔵量の割に生産量が少ない。天然ガスにつ

いては、ロシアが埋蔵量、生産量とも大きい。

表1からは分らないが、中国は化石燃料資源に恵まれている。しかし、原油埋蔵量は35億トン（ 3.5×10^9 トン）でアジア地域の過半を占めているものの、14億人の国民を養うには不足している。

5. 再生可能エネルギー資源

再エネの内、太陽光発電、風力発電、地熱発電、バイオマス、水力発電について、現状とそのポテンシャルを示す。

（1）太陽光発電

環境省のポテンシャル調査⁽¹⁴⁾によると、日本の太陽光発電の導入可能量（ポテンシャル）は、設備容量で14,450万kW、発電量で年間148.9TWhと推定されている。日本の消費電力である約900TWhには及ばない。「第6次エネルギー基本計画」（第6次エネ基）⁽¹⁵⁾では、2030年度に129～146TWhを想定しており、日本のポテンシャルと同程度である。

世界銀行（The World Bank）も世界各国の地政学情報を報告⁽¹⁶⁾している。各国の平地面積とともに表2に示す。生産地域の中での代表国のデータは国名とともに示した。時間ポテンシャルの総和の1%を年間ポテンシャルとすると、日本のポテンシャルは年間168TWhで、前述の環境省の値と同程度であ

表1 原油と天然ガスの埋蔵量、生産量、R/P⁽¹³⁾

	地域・国	原油			天然ガス		
		埋蔵量	生産量	R/P	埋蔵量	生産量	R/P
		10 ⁹ トン	10 ⁶ トン	年	10 ¹² m ³	10 ⁹ m ³	年
需要国	日本	—	—	—	—	—	—
	ドイツ	—	—	—	—	5	4
	フランス	—	—	—	—	—	—
	英国	0	48	9	0	40	5
	米国	8	713	11	13	915	14
生産地域・国	オーストラリア	0.3	20	14	24	143	17
	ヨーロッパ	1.8	167	10	3.2	219	15
	北米	36.1	1060	28	15.2	1109	14
	中南米	50.8	300	151	7.9	153	151
	ロシア	14.8	524	28	37.4	639	28
	アジア	5.8	333	17	14.2	510	17
	中東	113.2	1297	83	75.8	687	83
	アフリカ	16.6	327	50	129	231	50

注）R/Pは埋蔵量／年間生産量

表2 太陽光発電の地域、国別年間ポテンシャル⁽¹⁶⁾

	地域・国	代表国	面積	平地の割合	年間日射量	ポテンシャル
			万km ²	%		TWh
需要国		日本	36	35	3.6	168
		ドイツ	35	73	3.0	277
		フランス	55	81	3.5	563
		英国	24	85	2.6	194
		米国	915	66	4.5	9,916
生産地域・国	オーストラリア	オーストラリア	769	23	5.8	3,719
	ヨーロッパ	フランス	55	81	3.5	563
	北米	米国	915	66	4.5	9,916
	中南米	ブラジル	836	54	5.3	8,698
		チリ	74	48	5.8	750
	ロシア	ロシア	1,638	45	3.1	8,392
	アジア	インドネシア	181	33	4.6	1,008
	中東	サウジアラビア	215	38	6.2	1,852
	アフリカ	アルジェリア	238	23	5.9	1,184
		ナイジェリア	91	97	5.4	1,754
		南アフリカ	121	84	5.6	2,094

る。英国は、日本よりも国土面積が小さいが平地の割合は大きい。しかし、日射量が小さいため、ポテンシャルは同程度である。一方、ドイツやフランスは、国土面積が日本と同程度でも、平地の割合が大きく、ドイツは日本の2倍、フランスは3倍と、そのポテンシャルは大きい。

国土面積が日本より格段に広い、米国、オーストラリア、ロシア、ブラジルなどは、年間日射量は地域により差があるものの、年間の発電ポテンシャルは日本の数十倍規模もある。ポテンシャルの高さから、これらの国で生産される再エネを、日本や英国など再エネが十分ではない国に輸送し使用する可能性は高い。

と見込んでおり、ポテンシャルから見れば、十分に実現可能な量である。

海外文献⁽¹⁸⁾を基に、世界の風力発電ポテンシャルを表3に示す。環境省調査での日本のポテンシャルと比べると陸上風力発電は同等、洋上風力発電ではさらに大きくなっている。これは、日本周辺の海洋深度などを踏まえた事業性評価により、ポテンシャル推定に大きな違いが現れたものと考えられる。

英国は、国土面積は日本より狭いが、平野の割合が高く、風況が良い遠浅の北海を有し、陸上、洋上風力発電とも日本よりポテンシャルが大きい。

表3 風力発電の地域、国別年間ポテンシャル⁽¹⁸⁾

	地域・国	代表国	風力発電ポテンシャル	
			陸上	洋上
			TWh	TWh
需要国		日本	570	2,700
		ドイツ	3,200	940
		フランス	—	—
		英国	4,400	6,200
		米国	74,000	14,000
生産地域・国	オーストラリア	オーストラリア	—	—
	ヨーロッパ	フランス	—	—
	北米	米国	74,000	14,000
	中南米	ブラジル	—	—
		チリ	—	—
	ロシア	ロシア	120,000	23,000
	アジア	インドネシア	2,900	1,100
	中東	サウジアラビア	—	—
	アフリカ	アルジェリア	—	—
		ナイジェリア	—	—
		南アフリカ	—	—

(2) 風力発電

風力発電のポテンシャルは、陸上風力でこそ限られるが、洋上風力を含めると膨大な量となる。環境省のポテンシャル調査⁽¹⁷⁾によると、日本の陸上風力発電の導入可能量は、発電量で年間553.2TWh、洋上風力発電では着床式が年間237.9TWh、浮体式が年間116.2TWhで、合計すると年間907.3TWhである。これは、太陽光発電の6倍に相当する。

第6次エネ基では、2030年に陸上風力発電が年間34TWh、洋上風力発電が年間17TWh

(3) 地熱

地熱の資源量が多い国は、経済産業省⁽¹⁹⁾によれば、表4に示すように、1位から5位までが環太平洋火山帯に位置している。一方、6位のアイスランドは、大西洋上のホットブルームに位置している。

表4 世界の地熱資源量と地熱発電設備容量⁽¹⁹⁾

地熱資源量			地熱発電設備容量		
順位	国	万kW	順位	国	万kW
1	米国	300	1	米国	309.9
2	インドネシア	278	2	フィリピン	190.4
3	日本	235	3	インドネシア	119.7
4	フィリピン	60	4	メキシコ	95.8
5	メキシコ	60	5	イタリア	84.3
6	アイスランド	58	6	ニュージーランド	62.8
7	ニュージーランド	37	7	アイスランド	57.5
8	イタリア	33	8	日本	53.6

発電設備容量は、資源量の多い国が上位を占め、日本は2012年では8位と出遅れている⁽¹⁹⁾。第6次エネ基によると、現時点では、59.3万kW、年間2.8TWhと若干増えている。また、2030年には努力継続ケースとして66.6万kW、年間3.04TWhを想定している。

地熱資源量235万kWを年間発電量に換算すると、年間123TWh（利用率60%と仮定）となり、太陽光発電と同程度になる。太陽光発電や風力発電のような変動性再エネではないので、エネルギー・セキュリティー面から大いに期待したいが、日本全体の発電量に対して、その割合は小さいのが現状である。

地政学の観点からは、日本にとって、比較的近いインドネシアやフィリピンが有望である。しかし、両国とも地熱資源の規模が小さいため、「海外からの再エネ導入」として考慮するにとどめる。

(4) バイオマス

バイオマス発電は、第6次エネ基によれば、現時点で年間26.2TWhであり、原料の安定供給確保と持続可能性に課題がある。努力継続ケースで、2030年度には年間43.1TWhの導入を想定している。この値は、太陽光発電や風力発電に比べて小さく、また、主に国内資源に限ったものである。なお、本稿では、海

外からのバイオマスの輸入は、「海外からの再エネ導入」の一部として扱う。

(5) 水力発電

水力発電は、第6次エネ基によれば、現時点で年間81.9TWh、2030年度には、努力継続ケースで年間85.4TWh、政策強化ケースで年間93.4TWhを想定している。リプレース（更新および増設）時期となっている大規模水力発電所も多く、中小水力の開発を進めるにしても、大幅な増加は難しい。

電力の国際間の流通は、ヨーロッパや北米などの地域内がほとんどである。本稿では、輸入電力の種類を分けることができないので、「海外からの再エネ導入」の一部として取り扱う。

6. 再生可能エネルギーの輸送

再エネの輸送法については、ケーブルでの送電だけではなく、様々なエネルギーキャリアに変換することが考えられる。再エネ電力を用いて、水の電気分解により水素を製造する場合には、水素、アンモニア、メタンのような気体を液化して輸送するケースや、液体であるメタノールやメチルシクロヘキサンに転換する方法が考えられる。

当研究所の報告書⁽²⁰⁾では、図5に示すように、4,000km以内であれば、ケーブルでの送電が考えられるが、4,000km以上となると、なんらかのエネルギーキャリアに変換して輸送の方が経済性で有利に働く。

天然ガスの輸送では、短距離ではパイプライン、長距離では液化天然ガス（LNG）の方が低コストである。Gaille Energy Blog⁽²¹⁾によると、両者の分岐点は、海洋パイプラインで700マイル（1,120km）、陸上パイプラインで2,300マイル（3,680km）である。日本の場合、サハリンであれ、インドネシア、オーストラリアであれ、LNGが選択される。ドイツの場合は、ロシアからのパイプライン「ノードストリーム1」が1,222km、「ノードストリーム2」が1,230kmあ

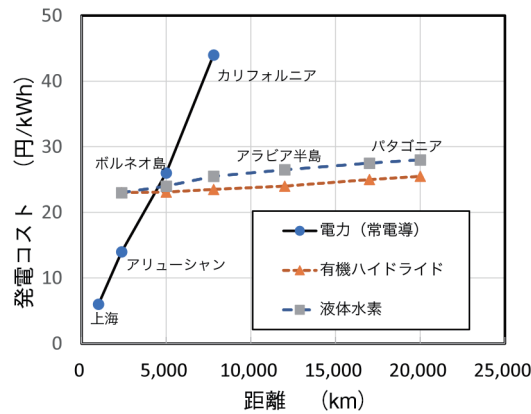


図5 3種類のエネルギーキャリアによる発電コストの比較⁽²⁰⁾

る。この距離は、およそパイプラインとLNGの分岐点であり、パイプラインが選択された。

また、ヨーロッパでは、多くの直流送電プロジェクトが実施されている⁽²²⁾。中でも、ノルウェーから英国まで、140万kWを送電する“North Sea Link” (720km) は最長である。

アジアでも、シンガポールに拠点を置くSun Cable社が主体となって「オーストラリア・ASEAN-パワーリンク」(AAPL) プロジェクトが進んでいる。これは、オーストラリア北部のノーザンテリトリー州にある世界最大級(12,000ha)の太陽光発電システムから、3,700kmもの長さの高電圧直流(HVDC)海底送電ケーブルを使って、インドネシアやシンガポールへ再エネ電力を届けようというものである。このプロジェクトを日本に応用するには、再エネ電力源の候補地オーストラリアとは、4,000km離れているので、ケーブルではなくエネルギーキャリアへの変換が必要となる。

なお、安価かつ豊富に再エネの調達が可能なおーストラリアのような国で、再エネ電力由来のエネルギーキャリアの輸送とCO₂輸送を組み合わせる国際的なカーボンリサイクルスキームを構築すれば、日本の一次エネルギーのかなりの割合を賄うことが可能であることは、既に著者ら⁽²³⁾が示している。

エネルギー・セキュリティの検討に当たっては、このように輸送距離に応じて適切な方法が採用されることを前提に、距離に応じて、輸送コストがかかることにも配慮した。

7. エネルギー・セキュリティ検討の方法

セキュリティに関わる因子として、以下の5つが考えられる。

- A：資源のポテンシャル
- B：輸入先の信頼性
- C：輸送ルート中のチョークポイントの有無
- D：生産における経済性
- E：輸送の利便性

ある国にとって、エネルギー供給の安全性を評価するには、これらの因子を組み合わせる新たな指標を策定するのが適当である。既往の研究では、個別の因子ごとにその影響を評価しているが、本稿では、それらを掛け合わせて新たな指標を策定し評価を行う。

各因子A, B, D, Eについて、各10ポイントを満点として、セキュリティ度が下がると点数が下がるものとした。Cについては、 $(10 - (\text{輸送ルート中のチョークポイントの個所数}) / 10)$ とし、これらを掛け合わせて得られた地域ごとの点数 X_{ij} を、化石エネルギーとCO₂フリーエネルギー(国内・海外再エネ+原子力)について各々、輸入先の地域・国ごとに求める。4因子のすべてがポイント「10」で、チョークポイントがない場合、 X_{ij} は10,000($= 10^4$)になる。 X_{ij} に地域・国ごとのシェアを掛けて加算し、さらに輸入先のシェアを点数化した「1-HHI」(後述)を掛けた値を、「国家エネルギー・セキュリティ指数」(Index of National Energy Security (INES))とする。

$$X_{ij} = A_{ij} \times B_{ij} \times C_{ij} \times D_{ij} \times E_{ij} \cdots \cdots (1)$$

$$C_{ij} = (10 - (\text{輸送ルート中のチョークポイントの個所数})) / 10 \cdots (2)$$

$$INES_i = \sum_{j=1}^n (X_{ij} \times Y_{ij}) \times (1 - HHI) \cdots \cdots (3)$$

A_{ij} : 資源のポテンシャル

B_{ij} : 国の信頼性

C_{ij} : 輸送ルート中のチョークポイント指数

D_{ij} : 生産における経済性

E_{ij} : 輸送の利便性

HHI_i : ハーフィンダール・ハーシュマン指数

X_{ij} : 需要国 i における生産国 j の点数, 「化石エネルギー」と「CO₂フリーエネルギー」各々に設定

Y_{ij} : 需要国 i における一次エネルギーに占める生産国 j のシェア, 「化石エネルギー」と「CO₂フリーエネルギー」各々に設定

i : 需要国の付番, 1 ~ m

j : 生産国の付番, 1 ~ n

以上を式で表すと上のようになる。 X_{ij} を各因子の掛け算としたのは、いずれの因子も、不十分な状況では、大きくマイナスの影響があるからである。各因子の和では、マイナスの因子があっても他の因子で補完が容易であることによる。

輸入先がある国に集中すると、輸入先の緊急時に安全性が低下する。そこで、この評価については、ハーフィンダール・ハーシュマン指数（HHI）を導入した。HHIは、企業の競争状態を示す指数として用いられ、個別事業者ごとに当該事業者の事業分野占拠率（%）を二乗した値を計算し、それを当該品目に係る全事業者について合計したものと定義される。本検討では、ある需要国の輸入先の一次エネルギーのシェアの二乗を求めて加算し、先に求めた指数に（1-HHI）を掛けることで反映することとした。すなわち、多くの国に分散すると、1に近づき、一国に集中するとゼロとなる。

$$HHI_i = \sum_{j=1}^n (Y_{ij})^2 \cdots \cdots (4)$$

2030年、2050年に海外から再エネを調達する場合、2019年度の再エネ地域ポイント X_{ij} の割合に基づくものとする。

自給率は、直接の入力因子ではないが、自国用のエネルギーの調達では、B（国の信頼性）、E（輸送の利便性）は「10」、C（チョークポイント）（後述）は「1」となるので、 X の値は高くなる。

8. 入力条件

（1）需要国、生産地域・国

日本、ドイツ、フランス、英国、米国の4カ国を需要国とする。日本の在り方を検討する上で、普遍的価値を共有するG7（主要7カ国）から、この4カ国を選定した。日本、米国、英国は、シーパワーの国であり、ドイツとフランスは、リムランドに位置し、ランドパワーの傾向にある。生産地域・国としては、オーストラリア、アジア、北米、中南米、ロシア、中東、アフリカ、ヨーロッパ、その他、とする。

（2）国の信頼度（カントリーリスク）

国の信頼度については、㈱日本貿易保険（NEXI）⁽²⁴⁾が逐次、OECDカントリーリスク専門家会合において評価を行っており、それをもとに、NEXIは各国をリスクの観点からA～Hのランクに分けている。また、「その他」はFとしている。

2022年の最新データを基に、表5のように自国のポイントを「10」、セキュリティ度が最も高いAのポイントを「9」とし、最も低いHのポイントを「3」と換算する。

（3）チョークポイント

チョークポイントとは、シーレーンの制約となる海峡や運河などである。日本にとって、原油輸入の観点から、ホルムズ海峡やマラッカ海

表5 国・地域のセキュリティ指標⁽²⁴⁾

地域・国	ランク	ポイント
自国	—	10
オーストラリア	A	9
ヨーロッパ	A	9
北米	A	9
中南米	E	5
ロシア	H	3
アジア	D	6
中東	C	7
アフリカ	F	4
その他	F	4

海峡が思い浮かぶ。世界では、この他にスエズ運河やパナマ運河、ジブラルタル海峡、バブ・エル・マンデブ海峡などの国際海峡が挙げられる。

資源を船で輸送する場合、これらのチョークポイントを各々「1」とカウントし、それを「10」から差し引いた。さらに、南沙諸島（スプラトリ諸島）やソロモン諸島など南太平洋についても、さらなる中国の勢力拡大を危惧して、当面「0.5」とした。例えば、中東から日本に原油を運ぶ際のチョークポイントは、ホルムズ海峡、マラッカ海峡、南シナ海の合計で「2.5」となる。

（4）ポテンシャルと生産の経済性

化石燃料、特に原油と天然ガスについて、表1の生産量と埋蔵量を参照し、さらに、原油の生産コスト（2016年時点）⁽²⁵⁾を考慮して、ポテンシャルおよび生産の経済性をポイント化し、表6に示す。

天然ガスの生産コストについて各国をリストアップしたものは、見当たらない。米国の Henry Hub（ヘンリー・ハブ）価格⁽²⁶⁾は、2018～2021年に、1.63～5.55米ドル/MMBtuで推移している。生産コストは、地域によるものの、2～3米ドル/MMBtu程度と推測される。原油への熱量換算で、11～17米ドル/バレル（1バレル＝5.5514MMBtuで換算）となる。また、オーストラリア東部では、標準的なケースで、2015年時点で、3.7～5.3豪ドル/GJ（16～23米ドル/バレル）と推算している⁽²⁷⁾。アジアについては、国際エネルギー機関（IEA）が、インドで2～6米

表6 原油と天然ガスのポテンシャルと生産の経済性⁽²⁵⁾

	地域・国	原油生産コスト		ポテンシャルの ポイント	経済性の ポイント
		代表国	米ドル/ バレル		
需要国	日本			3	2
	ドイツ			3	3
	フランス			3	3
	英国			7	5
	米国			9	8
生産地域・国	オーストラリア		—	7	9
	ヨーロッパ	英国	44	7	5
	北米（シェール以外）	米国	21	9	8
	北米（シェール）		23		
	中南米	ブラジル	35	8	5
	ロシア		19	9	8
	アジア	インドネシア	20	8	8
	中東	サウジアラビア	10	10	10
	アフリカ	ナイジェリア	29	8	7

ドル/MMBtu（11～33米ドル/バレル）、中国で3.5～6米ドル/MMBtu（19～33米ドル/バレル）と報告している⁽²⁸⁾。中東では、これらよりかなり低コストと考えられている。

また、再エネ発電について、表7に国際再生可能エネルギー機関（IRENA）⁽²⁹⁾が公表した太陽光発電コストと風力発電コストを示す。

該当する地域でエネルギーを生産する場合の経済性のポイントについて、日本のポイントを「5」とし、経済性が高い場合（コストが低い場合）を「10」、極めて低い場合（コストが高い場合）を「1」とした。化石エネルギーと再エネに分けて点数付けを行った。また、需要国の再エネのポテンシャルおよび経済性については、原子力、地熱、水力も考慮してポイントを決めた。

日本のポイントは「5」。英国は、太陽光発電は同程度であるが、風力発電のポテンシャルが大きいのので「6」、ポテンシャルが日本の2倍のドイツは「6」、3倍のフランスは、原子力のシェアが高いことも考慮し「7」、ポテンシャルが日本の20倍以上のロシア、米国、オーストラリアは「10」とした。

経済性については、太陽光発電と風力発電のコストを参照し、日本のポイントを「5」、経済性が優れている中東やオーストラリアのポイントを「10」として順次点数化する。原子力を含むものとしてフランスを高めに設定した。

表7 太陽光発電と風力発電のコストと CO₂ フリーエネルギー（再エネ+原子力）の経済性のポイント

	地域・国	太陽光発電		風力発電		ポテンシャルの ポイント	経済性 のポイント
		代表国	コスト (米ドル/kWh)	地域・国	コスト* (米ドル/kWh)		
需要国	日本	日本	0.17			5	5
	ドイツ	ドイツ	0.11			6	7
	フランス	フランス	0.10			7	8
	英国	英国	0.15			6	6
	米国	米国	0.10			10	9
生産地域・国	オーストラリア	オーストラリア	0.09	オセアニア	0.052	10	10
	ヨーロッパ	フランス	0.10	ヨーロッパ	0.047	6	7
	北米	米国	0.10	北米	0.037	10	9
	中南米	ブラジル	0.12	ブラジル	0.041	10	8
		チリ	0.07	その他	0.044		
	ロシア	ロシア	0.23	ユーラシア	0.047	10	4
	アジア	インドネシア	0.11	その他	0.081	7	6
	中東	サウジアラビア	0.09			8	10
	アフリカ	アルジェリア	0.05	アフリカ	0.055	10	10
		ナイジェリア	0.10				
		南アフリカ	0.11				

※ 風力発電コストは、陸上風力のケース

表8 船による輸送距離と輸送利便性ポイント

海 里	地域内	0 - 2,000	2,000 - 4,000	4,000 - 6,000	6,000 - 8,000	8,000 - 10,000	10,000以上
ポイント	10	9	8	7	6	5	4

※ 1海里は1.852 km

表9 国・地域間の距離によるポイント

地域・国	距離を求める上で 想定した港	日本	オーストラリア	ヨーロッパ	北米	中南米	ロシア	アジア	中東	アフリカ
日本	横浜	10	7	4	7	4	9	8	6	4
オーストラリア	ニューキャッスル		10	4	6	6	7	7	6	6
ヨーロッパ	ロッテルダム			10	8	6	9	5	6	8
北米	ニューヨーク/サンフランシスコ				10	7	7	6	5	8
中南米	サンパウロ/バルパライソ					10	6	6	7	7
ロシア	サンクトペテルブルク/ウラジオストク						10	7	6	8
アジア	ジャカルタ							10	7	6
中東	ドバイ								10	7
アフリカ	アルジェ/ケープタウン									10

（5）輸送の利便性

需要国が自国や同一の地域でエネルギーを消費する場合は、需要国・地域のポイントを「10」とし、離れるに従い、ポイントが下がるものとする。

対象となる国・地域間での船による輸送距離を求め、表8の基準でポイントに換算した結果を表9に示す。船の輸送距離は、各地域の代表的な港を基準に、SeaRoutes-distance calculator⁽³⁰⁾ および Ports.com⁽³¹⁾ で求めた。

北米、ロシア、中南米は表9に示す東西の港を、アフリカは南北の港を候補とし、近い方の距離をポイントに変換した。

（6）ポイントのまとめ

以上をまとめて、需要国である自国について表10に、生産国である輸入先について表11に要点を示す。生産地域の「その他」は、地域の平均とした。

（7）各国の一次エネルギー推移の検討

一次エネルギー推移については、エネルギーの収支を流れ図で表現したIEAのサンキー・ダイアグラム⁽³²⁾における2019年の統計を基準とする。2020年以降はコロナ禍のため例年から大きくずれるからである。また、2030年、2050年については、表12を仮定し、これを標準ケースとする。各国の想定値を表13に示す。

表 10 需要国のポイント

代表国	ポテンシャル		国の信頼性	経済性		輸送利便性*
	化石	CO ₂ フリーエネルギー		化石	CO ₂ フリーエネルギー	
日本	3	5	10	2	5	10
ドイツ	3	6	10	3	7	10
フランス	3	7	10	3	8	10
英国	7	6	10	5	6	10
米国	9	10	10	8	9	10

※ チョークポイントは無いものとする。

表 11 生産地域・国のポイント

エネルギー 生産地域・国 /分類	ポテンシャル		チョークポイント			経済性		輸送利便性		
	化石	CO ₂ フリーエネルギー	日本	ヨーロッパ	米国	化石	CO ₂ フリーエネルギー	日本	ヨーロッパ	米国
オーストラリア	7	10	0.5	2	0	9	10	7	4	6
ヨーロッパ	7	6	0	0	0	5	7	4	10	8
北米	9	9	0	0	0	8	9	7	8	10
中南米	8	10	0	0	0	5	8	4	6	7
ロシア	9	10	0	0	0	8	4	9	9	7
アジア	8	7	0.5	2	0.5	8	6	8	5	6
中東	10	8	25	1	1	10	10	6	6	5
アフリカ	8	10	1	0	0	7	10	4	8	8
その他*	9.7	10.0	0.6	0.8	0.3	8.8	9.0	7.5	8.0	8.2

※「その他」は、各地域の平均値として算出

表 12 各国の 2030 年，2050 年までの一次エネルギー推移検討の仮定

● 日本は 2030 年度については，第 6 次エネ基によると，2019 年度に比べて 89% となっている。他の国も同様の比率とする。
● 化石燃料の輸入先の比率は，2019 年度と同じとする。再エネの輸入先は，Xij の比率による。
● 2050 年度の一次エネルギー量は，2030 年と同量とする。
● 石炭は，2030 年に削減，2050 年には各国ゼロとする。
● 原油と天然ガスは，2030 年では第 6 次エネ基と同様の削減，2050 年には大幅削減とし，2019 年の 20% とする。化学品などの製造から，若干量が必要との考えによる。
● 原子力は，各国の政策から，フランスと英国で増強とする。
● 国内の再エネは，2030 年に 2019 年の 1.5 倍程度を標準とし，国によって調整する。例えば，フランスは 1.5 倍では，エネルギーがバランスしないので，1.2 倍とする。2050 年はさらなる導入とする。海外からの再エネは，残りの分とする。
● CO ₂ フリーエネルギー（国内・海外再エネ＋原子力）は，一次エネルギーの 80% 以上となるように設定している。残りの 20% 弱は，ブルー水素，ブルーアンモニアのような，化石燃料と炭素回収貯留（CCS）の組み合わせにより製造する燃料や，国内での CCS，カーボンフットプリントによる CO ₂ 削減を想定する。

表 13 各国の 2030 年，2050 年の想定値

	国	一次エネルギー合計	石炭	石油	天然ガス	原子力	国内再エネ	海外再エネ
2030年	日本※	第6次エネ基	19%	31%	18%	9%	22%	1%
	ドイツ	2019年比 89%	2019年の50%			廃止	2019年の1.5倍	残り
	フランス		0%	2019年の66%	2019年と同等	2019年と1.2倍		
	英国				2019年の1.5倍	2019年の1.5倍		
	米国				2019年の50%	2019年と同等	2019年の2倍	
2050年	日本	2030年と同等	0%	2019年の20%	2030年と同等	2030年の1.5倍	残り	
	ドイツ				廃止	2019年の2倍		
	フランス				2019年と同等			
	英国				2019年の1.5倍			
	米国				2019年と同等			2019年2の6倍

※ 一次エネルギー内の割合を示す。

9. INES の推移

(1) 各国の INES の推移

計算の結果、米国、ヨーロッパ諸国、日本では、図 6 に示すように、2050 年に向けて INES が若干向上する。これは、再エネが化石資源に比べて地域の偏在が少ないことによる。

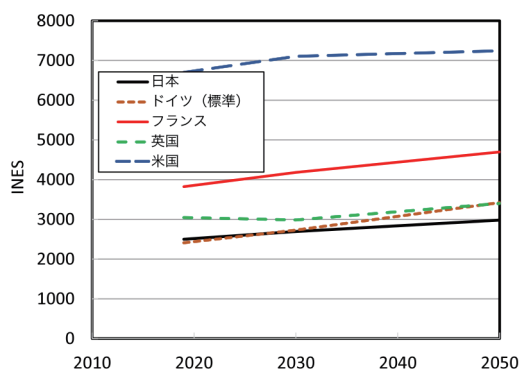


図 6 2050 年に向けた国ごとの INES の推移

これらの国の中で、米国は圧倒的に INES が大きく、エネルギー・セキュリティ度が高い。これは、国内に十分な化石資源と再エネ資源があることによる。一方、ヨーロッパでは、国により事情が異なる。ドイツが、フランス、英国に比べて低いのは、原子力を廃止すること、天然ガスをロシアに頼ってきたことによる。

日本の INES は、現在から 2050 年まで、英国やドイツに比べると、若干低い状態となっている。自給率が比較対象となる国々より格段に低いことによる。

CO₂ フリーエネルギーの割合は、2050 年に 80% 以上となるように設定している。図 7 に示すように、国により原子力の比率が異なるために、その道程は大きく異なる。

ドイツでは、ロシアから輸入している原油と天然ガスを全量、北米産に振り替えるとすると、図 8 に示すように INES が格段に上がる。そのためには、ロシア以外での天然ガス生産の増強だけでなく、大幅な LNG 設備の新設・増設が必要である。一方、2050 年では、再エネの割合が高いので、その差は小さい。

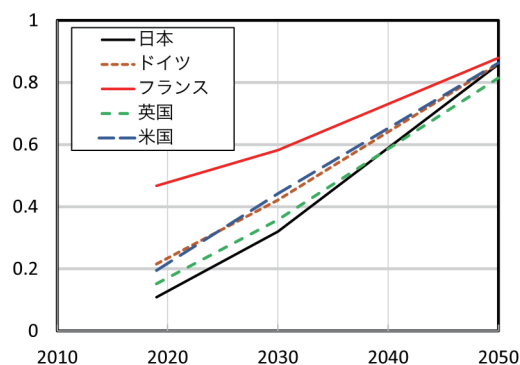


図 7 各国の CO₂ フリーエネルギー（国内・海外再エネ＋原子力）の割合の推移

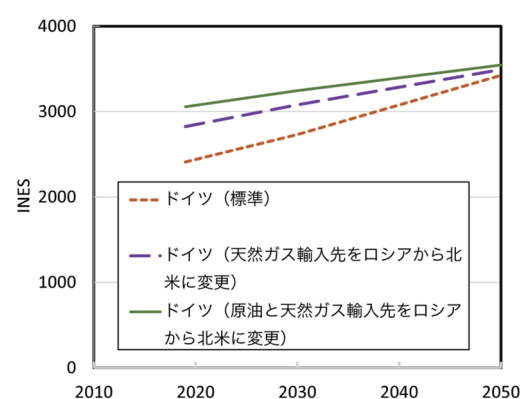


図 8 ドイツの原油・天然ガス輸入先をロシアから北米に変更した場合の INES の違い

(2) シェアの影響

図 9 に、2050 年に日本がオーストラリアから輸入する再エネのエネルギー全体に占めるシェアと INES の関係を示す。標準ケースでは、国内を含めた一次エネルギーに対するシェ

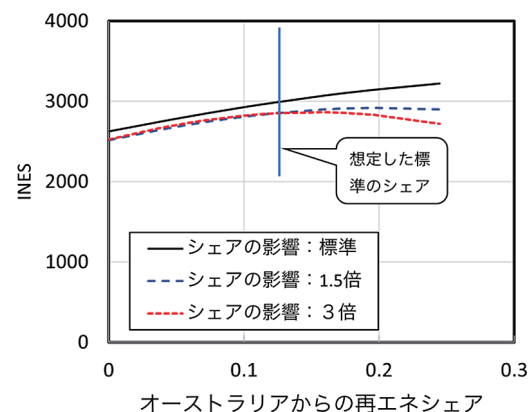


図 9 2050 年における日本の輸入先としてのオーストラリアからの再エネシェアの影響

アは12.2%あり、このシェアを上げることで INES は増加する。すなわち、シェアを上げることで HHI が増大し INES が下がるが、オーストラリアの「再エネにおける地域ごとの点数 X_{ij} 」が他国に比べて高いことから、INES が高くなっているのである。しかし、オーストラリアからの再エネシェアが大きいと、INES が下がる影響を標準の1.5倍、3倍に上げた場合、オーストラリアのシェアが15～20%前後の所で INES が極大となることが分かる。オーストラリアからの再エネシェアが15～20%と言うのは、日本の輸入エネルギーの28～37%に相当する。このことから、標準ケースから若干大きい20%程度のシェアが適当と考えられる。

2050年の日本の一次エネルギーに占める国内CO₂フリーエネルギー（国内再エネ＋原子力）のシェアは、46.4%と設定した。これを変化させたのが図10である。国内CO₂フリーエネルギーのシェアが40%までは INES は高い値となるが、さらにシェアを高めると、INES の値が下がる傾向にある。日本国内の再エネコストが、海外再エネのコストに比べて低い場合には、日本の再エネシェアを高めに、そうでない場合は、低めに設定することになる。

10. 考察

第6次エネ基では、日本のエネルギー自

給率は、2020年度で11%程度⁽³³⁾、2030年度には30%を目指すとしている。自給率は、2020年時点で、ドイツ35%、フランス55%、英国75%、米国106%であることに比べて格段に低い⁽³³⁾。現在、日本が欧米諸国に比べて、INES が若干低い程度で留まっているのは、長年の各界の努力により信頼できる輸入先があり、輸入ルートが守られていることによる。

今後の国内CO₂フリーエネルギーのシェアは、2030年に31%、2050年に46%を想定している。日本の一次エネルギーの20%程度の再エネを、オーストラリアから導入することで、実質カーボンニュートラルである2050年にあっても、INES を現在と同程度以上に保つことが可能である。

日本の国内CO₂フリーエネルギーのシェアを40～50%以上に上げると、INES は下がる傾向があることに注意を要する。国内の再エネと海外から導入する再エネのコスト差によっては、適正な国内シェアが変わることがある。また、変動性再エネについては、現状でも電力会社が再エネ事業者に出力抑制を要請する日が増えており、今後、送電網の整備と蓄電設備の設置が必要である。また、原子力の再稼働と増強や、地熱などの変動性ではない再エネの導入促進も欠かせない。

オーストラリアに次いで、再エネにおける地域ごとの点数 X_{ij} が高いのは、北米と中東、

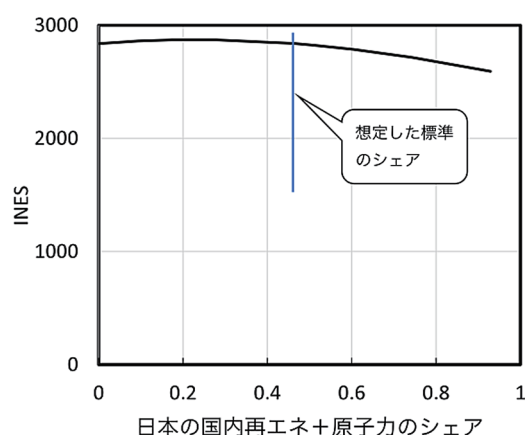


図10 2050年における日本の一次エネルギーに対する国内CO₂フリーエネルギー（国内再エネ＋原子力）のシェアの影響

中南米である。これらの国々からの再エネの導入も確保していくことが日本の INES を保つ上で望ましい。「インド太平洋戦略」に見られるように、これらの国から輸入する場合のシーレーンの確保は、再エネの時代になっても、化石燃料に頼っている現在以上に重要である。ランドパワーの国の海洋進出に対して、十分に対応していくことが「国是」である。今後、ますます、シーパワーの国同士の連携などの外交努力が必要となろう。

今回対象とした各因子の重みは、一義的に決まるものではない。過去の実績や将来の政治動向をも踏まえて、地政学的な判断を行っていくのが今後の課題である。

日本国内の変動性再エネを増やすに伴い、大規模な蓄電設備の製造で使われるリチウムやコバルト、ニッケルなどのレアメタル、モータなどに必要なネオジウムなどのレアアースが大量に必要となる。これらは地球上で偏在しており、エネルギー資源と同様、セキュリティの課題となる。2022年5月には、「経済安全保障推進法」が成立し、ますますエネルギーの安定供給確保が求められる。今後、これらレアメタル、レアアースの重要物資面から、さらなる検討が必要になろう。

11. 提言

本検討から、2050年に向けての日本の将来に対して次の点を提言する。

- 日本は、2050年に向けて、INESが主なヨーロッパ諸国より低い。エネルギー・セキュリティの観点から、国内の再エネをできるだけ活用することは重要であるが、同時に、安定電源や燃料の確保の観点から、原子力の活用や海外からの再エネ由来のエネルギーキャリアを大幅に導入することが必要である。
- オーストラリアは、太陽光発電と風力発電に十分なポテンシャルを有しており、また、経済性も有していることから、安定した信頼関係を維持していくことが重要であり、同時にシーレーンの確保、そのためのシーパワーが必要である。しかし、オーストラリアのみに頼るリスクも存在する。中東諸国や北

米、中南米諸国の再エネにも、戦略的にある程度のシェアを政策的に設定しておくことが望ましい。

- 2050年に向けて、化石燃料の利用が徐々に減少するものの、再エネ中心に一気に変わるわけではない。再エネを日本に輸入する際のエネルギーキャリアを適切に選択し、既存のエネルギーインフラを活用しつつ、トランジションをスムーズに行う視点が欠かせない。

12. おわりに

エネルギー・セキュリティに関わる因子をまとめて、現在から2030年、2050年への実質カーボンニュートラルへの道程を総合的に評価した。日本は、ドイツ、フランス、英国などの主要国と比べて、第6次エネ基での施策では、エネルギー・セキュリティ度は若干低い程度であった。原子力を積極的に導入している国は、エネルギー・セキュリティ度が高く、また、ロシアなどからパイプラインで天然ガスを導入するドイツでは低くなった。ロシアからの天然ガスに代わって、北米からLNGを調達することで改善するが、2050年の実質カーボンニュートラルが実現した際には、再エネが中心になるので、その差は小さい。

日本は、2050年に向けて、国内の再エネに頼るだけではなく、海外からも安価かつセキュリティに優れた再エネを、複数の国から導入していくことが必要であり、そのためには、これらの国々との強固な信頼関係とシーレーンの確保が必須である。また、国内では原子力の活用も重要である。折しも筆を走らせる中、ちょうど、バイデン米国大統領が来日し、日米豪印の4カ国による外交・安全保障の協力体制の確認のために日米豪印（QUAD）首脳会合が開かれた。まさに本稿で議論した内容に通ずるところがあるのではなかろうか。

本稿の試みは、従来の因子ごとの評価とは異なり、各因子をまとめて評価するものである。そのため、各因子の重みづけをどのように設定するかは課題がある。今後の研究で、

実績を踏まえて、これら因子間の相関や重みについて検討していきたい。

参考文献

- (1) アルフレッド・セイヤー・マハン,『マハン 海上権力史論』,原書房,2008年
- (2) ハルフォード・ジョン・マッキンダー,『マッキンダーの地政学 デモクラシーの理想と現実』,原書房,2008年
- (3) 出口治明,『教養としての地政学入門』,日経BP,2021年
- (4) 小泉悠,『「帝国」ロシア地政学』,東京堂出版,2019年
- (5) 奥山真司,『サクッとわかるビジネス教養 地政学』,新星出版社,2020年
- (6) ローリー・メドカーフ,『インド太平洋戦略の地政学』,芙蓉書房出版,2022年
- (7) 戒能一成,「エネルギー安全保障の定量的評価の研究」2004年 (<https://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/X0820GKAprt1.pdf>)
- (8) 資源エネルギー庁,『2010年版エネルギー白書』,2010年
- (9) 資源エネルギー庁,「エネルギー白書2015 第3節 主要国の「エネルギー安全保障」の変化」,2015年
- (10) 経済産業省,「エネルギー白書2021年版 第3章エネルギーセキュリティの変容」,2021年
- (11) (一財)日本エネルギー経済研究所,「平成30年度エネルギー戦略立案のための調査・エネルギー教育などの推進事業(各国エネルギー戦略の定量分析・災害時におけるエネルギーインフラ事業の在り方整理)調査報告書」,2010年
- (12) ダニエル・ヤーギン,『新しい世界の資源地図 エネルギー・気候変動・国家の衝突』,東洋経済新聞社,2022年
- (13) BP,“Statistical Review of World Energy 2021 70th edition”,2021
- (14) 環境省,「2012年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備 太陽光発電」,2012年
- (15) 資源エネルギー庁,「第6次エネルギー基本計画」,2021年
- (16) The World Bank,“Global Photovoltaic Potential Country Rankings”,2021
- (17) 環境省,「2015年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備 風力発電」,2015年
- (18) Lu X, et al.,“Global potential for wind-generated electricity”,Proc. National Academy Sci USA, 106, (27), 10933, 2009
- (19) 資源エネルギー庁,「地熱資源開発の現状について」,2017年
- (20) (一財)エネルギー総合工学研究所,「平成21年度エコイノベーション推進事業 海外再生可能エネルギーの大陸間輸送技術の調査」,2010年
- (21) Gaille Energy Blog,“LNG vs. Pipeline Economics”,2018 (<https://gaillelaw.com/2018/05/16/lng-vs-pipeline-economics-gaille-energy-blog-issue-66/>)
- (22) 資源エネルギー庁,「海底直流送電の導入に向けて」,2021年
- (23) 小野崎正樹,橋崎克雄,「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」,火力原子力発電,第72巻第5号,307-314,2021年
- (24) (株)日本貿易保険,「国カテゴリー表」,(2022年4月7日現在) (<https://www.nexi.go.jp/cover/categorytable>)
- (25) KNOEMA,“Cost of Crude Oil Production by Country and Crude Oil Prices, 2020”,2020
- (26) U.S. Energy Information Administration,“Natural Gas, DATA”,2022 (<https://www.eia.gov/dnav/ng/hist/rngwhhdm.htm>)
- (27) CORE Energy Group,“Gas Production and Transmission Costs Eastern and South Eastern Australia”,2015
- (28) International Energy Agency (IEA),“Domestic natural gas production costs, LNG import prices and industry gas prices in developing Asia import markets, 2018”,2020
- (29) IRENA,“RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2020”,2021
- (30) Ports.com,“Sea route & distance”,2022 (<http://ports.com/sea-route/>)
- (31) “SeaRoutes-distance calculator”,2022 (<https://classic.searoutes.com/routing?speed=13&panama=true&suez=true&kiel=true&rivers=block&roads=block>)
- (32) IEA,“Sankey Diagram”,2021
- (33) 経済産業省産業技術環境局・資源エネルギー庁,「クリーンエネルギー戦略 中間整理」,2022年

令和3年度 事業報告の概要

(一財) エネルギー総合工学研究所

1. 概況

(1) 当研究所は、昭和53年4月の設立以来、「エネルギーの未来を開くのは技術である」との認識の下、時々のエネルギー情勢を踏まえつつ俯瞰的長期的な視座を持って、産学官の連携を図りながら、エネルギー技術に関する調査、研究、評価、普及に取り組んできた。このような中、令和2年8月の「受託事業等の労務費計上に係る不適切事案」に関する経済産業省などによる補助金交付等停止措置を踏まえ、再発防止策を実施し、令和3年9月には第三者によるモニタリングにおいて概ね妥当との評価を頂いた。これに甘んずることなく、引き続き、モニタリング結果のフォローアップを通じ、コンプライアンス意識の維持・向上に努めていく。

(2) 令和3年度においては、上記補助金交付等停止措置もあり、調査研究については民間企業などからの受託事業および将来の研究能力向上などのための自主研究を中心に取り組んだ。具体的には、世界的なカーボンニュートラルへ向けた動きを踏まえ、国内外のエネルギー情勢、気候変動問題への対応、次世代電力ネットワーク、蓄熱システムに関わる技術開発、カーボンリサイクル技術を中心とした二酸化炭素(CO₂)有効利用技術、水素の製造・輸送・利用などに関する調査研究などを実施した。また、現在の軽水炉の安全性向上に資するための技術開発を継続するとともに、原子力開発を巡

る国内外の動向調査、廃止措置に関し、技術・制度などに関する調査、課題への対応策の検討、人材育成の支援なども進めた。さらに、個別分野研究会として、次世代電力ネットワーク(APNet)研究会、人為的カーボンサイクル(ACC: Anthropogenic Carbon Cycle)技術研究会など、受託事業の運営として、CO₂フリー水素普及ネットゼロエミッション研究会、原子力発電所廃止措置調査検討委員会などにおいて、検討会の開催、技術動向の情報共有など所定の活動を行った。

(3) 調査研究に加え、我々の諸活動を支えて頂いている賛助会員へのサービス向上の観点から、月例研究会のオンライン開催など運営改善、ニュースレターの内容充実に加え、会員の協業支援の観点からマッチング事業のような新しい取り組みも令和2年度に引き続き実施した。また、賛助会員への情報発信を主目的に9月に賛助会員会議を、12月にエネルギー総合工学シンポジウムをオンラインで開催した。当研究所内では、コンプライアンスファースト月間などの再発防止の取組、在宅およびオフィスでのハイブリッド勤務に係る規程整備など働きやすい環境を整備するとともに、情報およびサイバーセキュリティー対策としてハード面、ソフト面からの取組を強化した。

(4) 上記のような事業活動の状況により、令和3年度決算については令和2年度決算から改善したものの事業収支がマイナスとなった。今

後については、向こう数年間で健全な事業収支を達成できるよう、令和4年度事業計画に基づき、研究内容に見合った人員、フリーアドレス化などによるコスト削減、国、民間企業などからの受託事業の強化、賛助会員様へのサービスの強化など、精力的な取組みを進めていく。また、コンプライアンスの遵守徹底を図るとともに、新型コロナウイルスへの対応も含め、より働きやすい環境の整備を目指す。引き続き、関係者の皆様のご理解とご支援をよろしくお願い申し上げる次第である。

2. 各エネルギー分野における主な調査研究プロジェクトの概要

令和3年度に実施した主な調査研究プロジェクトの概要は以下のとおりである。

(1) エネルギー技術全般

国内外の地球温暖化に対する緩和策にとって重要な技術情報に関する調査全般を実施した。具体的には世界的なカーボンニュートラルへ向けた動きを踏まえ、長期的な地球温暖化対策を反映した温室効果ガス排出経路とネガティブエミッションの基礎的評価、および新型コロナウイルス感染症拡大がエネルギー需要に与える影響の評価を行った。加えて、国際エネルギー機関での会合を通じたエネルギー関連技術の海外情報調査を行った。また、エネルギーに関する最新の技術情報および評価を提供するエネルギー技術情報プラットフォームの更なる内容の充実、エネルギーに関する公衆の意識調査を実施した。

(ア) 地球規模でのエネルギーシステムに関する調査研究

① 正味ゼロ排出に向けたカーボンリサイクル技術イノベーションシナリオ分析

正味ゼロ排出に向けて特に重要となる燃料製造に関わるカーボンリサイクル技術のインプット・アウトプットデータを整理し、それら

の情報を統合したエネルギーシステムモデルを構築し、正味排出ゼロとなる社会における技術群の重要性を分析した。分析により、エネルギーシステムに関連する各カーボンリサイクル技術の導入時期、導入ポテンシャル、そのCO₂源について整理を行った。また、エネルギーシナリオと統合的なシステムにおけるメタノールおよびメタネーション技術、およびセメントのライフサイクル評価を試行した。

② 直近の社会情勢変化がエネルギー需要に与える影響に関する研究

2020年に世界的に広がった新型コロナウイルス感染症（COVID-19）に対する感染拡大対策としての人の移動や企業活動の制限は、社会経済活動に大きな変化をもたらした。エネルギー需要は社会経済活動と密接に関係しており、2020年のエネルギー需要の変化は、働き方の変化、社会経済活動量の変化を反映している。本研究では、人流データや経済指標などの社会経済活動のデータを用いて日本のエネルギー需要データを分析した。また、電力需要データを用いてCOVID-19対策による社会経済活動影響評価し、エネルギー需要の変化寄与度を推計して変化要因を評価した。

③ カーボンニュートラルに向けた脱炭素技術評価

パリ協定を受け、今世紀半ばでのカーボンニュートラル社会の実現に向けてエネルギーにも大きな変革が求められている。その中でも水素については、電化が難しい需要に対応する新しいエネルギーキャリアとしての期待が高まっている。また、熱需要のうち、特に高温熱需要は、従来は化石燃料燃焼に依存してきたが、経済面から電化が困難な場合が多い。また、発電コストについても、多数の将来見通しが公表されているが、その不確実性が大きい。このような背景を踏まえ、水素エネルギーキャリア、産業部門の高温熱需要技術、発電技術といった、カーボンニュートラルの実現にあたっ

て重要となる技術群について、将来見通しの参考になるデータを整理した。

④ 国際エネルギー機関 研究開発プライオリティセッティング専門家会合の活動支援

国際エネルギー機関のエネルギー研究技術委員会（CERT：Committee on Energy Research and Technology）の下で活動を行っている、研究開発プライオリティ設定に関する専門家会合（EGRD：Expert Group on R&D Priority Settings and Evaluation）の活動支援を実施した。

⑤ 世界の CCS 動向調査

MRS 2021 Fall Meeting & Exhibit で開催されたシンポジウム "EN13: Climate Change Mitigation Technologies" に参加し、CO₂ 回収・貯留（CCS）およびネガティブエミッション技術に関連する研究成果を発表するとともに、気候変動緩和技術に関する最新状況を収集した。

（イ）その他

① エネルギー技術情報プラットフォームの運用・整備

資源制約および環境制約の克服に資する有望な技術について、関連情報の収集・整理、分析・評価、関係機関・企業への情報提供を行うエネルギー技術情報プラットフォームを運用しており、国内外の情報を継続的に掲載するとともに、ホームページの一部配置変更含め、見やすさ、分かり易さを含めた情報の充実などを図った。

② エネルギーに関する公衆の意識調査

2003 年から継続的に調査を実施しており、令和 3 年度も引き続きインターネット調査を実施し、過去との比較を行った。福島第一原子力発電所事故については、現在も関心度は 8 割を超えている。事故以降、原子力発電の利用、有用性および安全性に関する意見は否定的方向に変化し、ここ 5 年は反対意見が 40% 台前

半で漸減傾向であったが、令和 3 年 11 月の調査では、事故後初めて反対が約 36% になるとともに、賛成が約 24% から約 29% へ増加した。

（２）新エネルギー・電力システム関連

電力システム分野では、再生可能エネルギー（再エネ）主力電源化およびカーボンニュートラル達成を見据えた次世代電力ネットワークの調査検討を進めるとともに、電力システム改革に伴う、電力取引市場、需給調整市場における需要家資源の活用、マイクログリッドへの直流技術の適用、自家発電設備の融通スキームなどの調査・検討を行った。

また、再エネ分野では集光型太陽熱発電（CSP）や蓄熱を活用した発電技術の調査研究および検討、洋上風力発電やバイオ燃料に関わる技術動向調査、廃棄物エネルギーの有効活用方法を検討した。

（ア）次世代電力システムに関する調査研究

① 次世代電力ネットワーク研究会の運営

本研究会は、国内外の情報収集および会員相互の意見交換に基づき、次世代電力ネットワークのあり方およびその実現に向けた方策の検討を行うことを目的として 2009 年に設立された。令和 3 年度の検討会およびシンポジウムは、新型コロナウイルスの感染状況を考慮して全てオンライン形式で開催したが、会員の利便性が向上して出席者が増加するとともに、遠隔地の講師を招くことが可能となった。特に、東京大学と共催したシンポジウムは、「2050 年の再エネ大量導入に向けた次世代電力ネットワークシステムの課題と展望」をテーマに各界を代表する講師を招き、500 名を超える参加者を得た。また、国内外の政策、新技術、ビジネスなどの動向を紹介するニュースレターを毎月発行し、注目を集める電力取引市場などの分析記事を掲載した。

② 電力システム改革に関する調査研究

2011 年の東日本大震災および福島第一原子

力発電所の事故を契機に始まった電力システム改革は、2015年の電力広域的運営推進機関（広域機関）創設による広域系統運用の拡大、2016年の小売完全自由化、2020年の送配電部門法的分離の3つの柱に加えて、再エネの主力電源化およびエネルギーの自立分散化を見据え、容量市場、需給調整市場などの新たな取引市場設立、配電事業制度導入など、様々な施策が進められている。これらは、今後の電力システムの基盤となるものであり、令和3年度は経済産業省、広域機関の委員会などでの審議情報の収集・分析とともに、下記テーマに関する調査研究などを行った。

(a) 需給調整市場における需要家資源活用の調査研究

出力が安定しない再エネの導入拡大に伴い、需給調整力の確保が重要になっている。調整力の調達は、従来は一般送配電事業者の公募により行われていたが、2021年度からは段階的に新設される需給調整市場で行われることになった。調整力は応答・継続時間により区分され、特に高速な調整力は価格が高く新たなビジネスチャンスとしても注目されている。また、調整力の資源は、大規模発電所に加えて需要家設備の活用に関心が集まっている。そこで、既の実績がある海外アグリゲーターの事例および国内の電化ポテンシャルや需要家資源の調査・分析を行い、今後の活用について検討し、取りまとめた。

(b) マイクログリッドへの直流技術適用の調査研究

再エネなどの分散型電源の導入拡大によりエネルギーの地産地消が注目され、マイクログリッドの実証事業が進められている。また、情報機器など多くの機器は直流で動作すること、太陽光などは直流出力であることから、需要地系統での直流配電導入に関する研究開発が国内外で進められている。そこで、2030年代を見据えて、直流を含むマイクログリッ

ドの国内外での政策・開発・実装状況の調査・検討、蓄電池などマイクログリッド実現に必要な基幹デバイスの調査・検討を行った。さらに5Gなどの高速・低遅延・大容量通信技術が、直流を含むマイクログリッドに将来的にどのように活用されるかについて展望した。

(c) 事業者間の自家発電設備の融通スキームの調査研究

2050年のカーボンニュートラルの達成のためには、産業部門でのエネルギー利用の効率化を図る必要がある。そこで、大規模なコンビナートを対象として、全体の電力需給を最適化するため、自家発電設備を所有する事業所が他事業所に発電電力を融通する際に適用可能となるスキームを検討した。その際、電気事業法などの法令の規制、必要な設備、実現に向けた課題などを明らかにした。

(d) 電力システムへの通信新技術適用の調査研究

従来、電気事業の通信設備は、系統保護・運用、業務設備、社内情報システムなどの基幹システムが主な用途であったが、近年のIoT技術の急速な進歩・低コスト化により、発電所の保全業務などへの新技術適用が急速に進んでいる。そこで、保全業務などにIoT・デジタル技術を活用する、通信以外の部門においても、通信インフラの構成要素と各要素間の関係を理解することが重要となっている。一方では、電力分野の通信設備・技術を体系的に整理したものは極めて少ないため、電力の通信インフラおよび関連するデジタル技術を分かりやすく取りまとめるとともに、今後の動向を展望し、課題を抽出した。

(イ) 再エネに関する調査研究

① 太陽熱・蓄熱技術研究会

太陽熱・蓄熱技術研究会は、集光型太陽熱発電（CSP）、高温太陽熱による水素・燃料製造および工業用として100℃～600℃程度の熱

を供給する集光型太陽熱利用に関する研究会であり、2012年6月14日に設立された。また、昨今は再エネ大量導入における電力平準化や、CO₂削減策の1つとして、熱による蓄エネルギー技術（蓄熱技術）に対する関心が高まっていることから、令和2年度から本技術についても積極的な検討対象とすることとした。令和3年度の5回の研究会では、毎年秋に行われるCSPの国際会議であるSolarPACESの紹介を行うとともに、カーボンニュートラル、太陽熱によるメタン熱分解、溶融塩、企業の取り組み、化学蓄熱などの最新技術動向および国際動向について講演会を実施した。本研究会は産学の連携を取り持つ場を提供し、本分野の国内産業への技術力向上、普及を促進する役割を担っている。

② 蓄熱システムに関わる技術開発の動向調査

CO₂排出量削減へ向けて、太陽光や風力などの再エネの大幅増加が見込まれるが、これらは天候や時間帯で発電量が大きく変動するため、安定的に電力供給を可能とすることが課題となる。このためには、負荷変動に対応して発電することを可能とする蓄エネルギー技術の開発・活用が考えられる。蓄熱エネルギー技術としては、蓄電池のほかに「熱」によって蓄える蓄熱技術が注目されている。令和2年度までに、蓄熱システムについて、公開情報ベースでの国内外の技術開発動向を整理および国外実証機での運用方法などを調査した。令和3年度は、蓄熱システムの先行事例調査と国内での実用化に向けた課題整理とその対応策を検討した。

③ 蓄熱発電の経済成立性の検討

自前の蓄エネルギー設備を持ち、JEPX市場（日本卸電力取引所）にて蓄電・放電を繰り返すことで経済性が得られるかどうかを試算・検討した。近年のJEPX市場価格が乱高下する状況であれば、蓄熱発電は、10年程度で投資回収ができる見込みとなった。

④ 圧縮・液化空気エネルギー貯蔵技術の動向調査

変動性再エネが、主力電源として機能するためには、需要に合わせた出力の調整が必要であり、デマンドレスポンスなどの需給調整方法に加えて、電力のエネルギー貯蔵技術が有用と考えられる。現状で、代表的な電力エネルギー貯蔵技術は蓄電池だが、それ以外のオプションとして、比較的高出力、大容量の用途に向く、圧縮空気エネルギー貯蔵技術（CAES）および液化空気エネルギー貯蔵技術（LAES）について、その開発状況を調査した。将来の変動性再エネ大量投入時代においては、これらの技術を適材適所で配置し、電力システム全体の安定性の向上に貢献することが確認できた。

⑤ 地域エネルギー・廃棄物エネルギー利活用調査

清掃工場におけるごみ処理量の減少や可燃ごみ中のプラスチックごみが減少することによる発熱量減少の課題と地域のバイオマス処理における課題を同時に解決する方策として、地域資源である未利用のバイオマスを清掃工場の燃料として利活用すること、および清掃工場の安定運用によって得られた熱エネルギーを地域に供給することを実証し、持続可能な清掃工場運用システムの構築に向けた検討を実施した。

（3）水素エネルギー関連

（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

「CO₂フリー水素普及シナリオ研究会」を自主研究会として開催し、2050年における国際市場と国内市場のゼロエミ水素ビジョンのイメージの共有化、水素需要推算、および国内外の水素関連動向調査を実施した。

ゼロエミ水素ビジョンでは、検討案を議論し、イメージの共有化を図った。水素需要推算では、下記②の日本および世界の水素需要量の分析結果を用いた。国内外の水素関連動向では、主に欧州・ドイツの水素戦略と関連インフラ整備を調査した。欧州では、2050年ネットゼロの実現に向けて化石エネルギーから水素エネルギーへの産業構造の転換を進めているが、継続的な動向調査の必要性が示された。

研究会の成果を「CO₂フリー水素普及ネットゼロエミビジョン研究 2021 年度報告書」としてとりまとめ、当研究所のホームページに公開した。

② エネルギーモデルを用いた将来の水素需要量に関する調査研究

分析対象をそれぞれ世界、日本とする当研究所の地球環境統合評価モデル（GRAPE モデル）と TIMES-Japan モデルをソフトリンクさせ、2050 年、2060 年、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。

需要部門において、水素は主に運輸部門で用いられ、発電などの他の部門でも用いられる。水素輸送の観点では、日本は時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、世界全体の需要量の 3～4 割程度は地域外から供給される。水素は、主に風力や天然ガス、水力、低品位炭から製造される。さらに、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。

結果を「CO₂フリー水素普及ネットゼロエミビジョン研究会」に示し、議論するとともに、成果を上述の報告書として公開した。

③ 水素エネルギーキャリアの経済性・環境性に関する調査研究

エネルギーシステムの低炭素化に貢献するため、再エネなどから製造した水素を様々な

エネルギーキャリアに変換して輸送し、需要地で利用するサプライチェーンの経済性と環境性の分析を継続して実施している。水素エネルギーキャリアには、それぞれ特徴があり、その経済性・環境性は、水素の製造場所・生産規模・輸送方法・輸送距離・利用場所・最終利用形態など、想定するサプライチェーンによって変動し、また利用時期（技術進展をどの程度見込むか）によっても大きく影響を受ける。主要な水素エネルギーキャリアについて、種々のサプライチェーンを想定した経済性・環境性の分析を実施するとともに、海外での製造ポテンシャルや製造適地の分析、法規制などの制度面の課題などを調査分析した。

④ 水素エネルギーに関する海外動向の調査研究

世界各国において脱炭素に向けた取り組みが加速しており、再エネの導入普及とともに水素エネルギーの利用拡大に向けた研究開発や実証事業が活発化している。水素エネルギーに関する世界各国の動向について、国家戦略（水素戦略）、規制、水素サプライチェーンの重点領域、研究開発や実証プロジェクトの実施状況などについて、継続して調査を実施している。欧州や米国に加え、南米、中東、アジア、オセアニアなどの主要国について調査を実施した。

（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

変動性電源である太陽光発電や風力発電などの再エネの大量導入をはかるためには、余剰電力の有効活用が 1 つのポイントとなる。国内特定地域に変動性再エネが大量に導入されたときに発生する余剰電力の活用方法として、蓄電池による電力貯蔵や水の電気分解による水素製造とその利用（Power-to-Gas）

を想定し、種々の条件での経済性・環境性の調査研究を継続して実施した。

② 国内外の PtG プロジェクトに関する動向の調査研究

CO₂ 排出量削減を目的に、再エネから水電解水素製造による PtG (Power-to-Gas) のプロジェクトが、世界各国で進行している。国内外の主要 PtG プロジェクトについて、そのシステム構成や規模、運転制御の方法、国・自治体からのファンドの状況や制度などについて調査を行うとともに、水素導管供給時の技術的な課題や法整備の状況などについて調査した。

(ウ) 水素を支える個別技術分野に関する調査研究

① 水素の製造技術に関する調査研究

CO₂ フリーの水素の製造技術として、再エネで発電した電力による水の電気分解技術が注目され、国内外において、基礎研究からシステム実証まで、電解効率の向上、機器の大型化、耐久性・負荷追従性の向上、コストダウンなど、様々な観点での研究開発が行われている。アルカリ形水電解、プロトン交換膜形水電解、アニオン交換膜形水電解、高温固体電解質形水電解など、種々の方式の水電解技術の特徴と国内外の開発動向の調査分析を継続して実施するとともに、水電解設備を運用するに際しての課題の分析などを実施した。

② 水素エネルギーキャリアの製造・利用技術に関する調査研究

再エネなどから製造した水素を様々なエネルギーキャリアに変換して輸送し、需要地で利用するサプライチェーンの検討が活発に行われている。近年、注目が集まっているアンモニアについて、製造技術および利用時の分解技術などについて現状と技術面の課題を調査した。

③ 水素・燃料電池システムの持続可能性評価ガイドラインの開発研究

当研究所は、欧州連合 (EU) の Clean Hydrogen Partnership で実施されているプロジェクトにおいて、FCH (燃料電池・水素) システムのライフサイクルにおける持続可能性評価のガイドラインの開発に参画している。

令和 3 年度は、FCH 製品のライフサイクルコストリングのガイドライン作成のための文献レビューを行った。文献データベースから FCH 製品のライフサイクルコストリングの査読付き論文を約 300 報抽出し、レビュー対象として約 150 報を特定した。2010 年から 2021 年にかけて文献数は時間とともに増加しており、研究者の本分野への寄与が増加していることがわかった。今後は、コスト分析手法の共通点、相違点などの分析を進める予定である。

(4) 炭素循環エネルギー関連

脱炭素化・炭素有効利用・循環技術を核としたエネルギーシステム研究に関して、CO₂ 分離・回収 (CCS) 技術の開発状況調査、海外再エネ利用 CO₂ フリー燃料の経済性検討、廃熱の有効利用による CO₂ 排出量削減ポテンシャルの調査などを行うとともに、炭素を活用する CO₂ 有効利用 (CCU) 技術について積極的に ACC 技術研究会 (後述) の場において議論、意見交換を行った。

(ア) 炭素有効利用・循環技術などのエネルギーシステムに関する研究

① CO₂ 分離・回収技術開発状況調査

現在、世界中で取り組まれている脱炭素化について、CO₂ 分離・回収技術の開発状況、実証試験動向の調査を行った。海外の進捗状況については、地中貯留が昨今活発になっており、特に化石燃料からの水素製造時に発生する CO₂ の分離・貯蔵の動きが活発になりつつある。また、産業分野においても、CO₂ の削減が困難な分野から CO₂ を回収して、同じく CCS で隔離しようとする動きも出始めてい

る。主に、まずは既存のインフラを活用しながら早期にCO₂削減を図ろうとする現実解を求めている結果から始まっている動きのように観察される。

また、直接空気回収（DAC）についても回収箇所がCO₂排出場所に限定されることないことなどで注目が集まりつつあり、開発状況や技術情報について調査・検討を行った。

② 海外再エネ利用 CO₂ フリー燃料の経済性検討

海外の再エネによる発電単価は低下してきており、わが国の再エネだけでは賄えない一次エネルギー源分については、この海外の安い再エネの活用を考えることは有用である。温室効果ガスの1つであるCO₂を排出することなく、3E + Sを堅持すべく海外の太陽熱エネルギーをはじめとする再エネを活用し、安定的にCO₂フリー燃料（水素、アンモニア、メタン、メタノール）を製造し、国内に輸入することは、その目的に資する1つの解決策として期待される。

そこで、国内で分離・回収したCO₂、あるいはDACなどにより海外で回収したCO₂と、海外の太陽熱などを活用し製造した再エネ水素を用いて合成した各種CO₂フリー燃料経済性について、検討・評価を行った。

③ 廃熱の有効利用による CO₂ 排出量削減ポテンシャルの調査

産業分野では、製造プロセスに未だ多くの廃熱が存在しており、一工場のみならず周辺工場とこれらを融通し合うことにより、工業団地や化学コンビナートなどの多くの工場群でCO₂削減効果が期待できる。このポテンシャルを評価するために、特定地域における各企業に具体的にエネルギー消費形態のアンケート調査を行い、廃熱を蒸気供給に転換し融通し合った場合のCO₂削減効果について調査・評価を行った。また、当該地域における廃棄物焼却熱を活用した場合のCO₂削減効果

や、その実現可能性の評価、技術課題を抽出し、対策の整理を行った。

④ ACC（Anthropogenic Carbon Cycle）技術研究会

ACC技術研究会は、将来の低炭素／脱炭素化に向けたCO₂排出量のマネジメントの重要性に鑑み、CCU技術の中でも大量にCO₂を処理することが可能なエネルギーシステムの構築を目的として、2019年2月に設立された。

わが国の新しいエネルギー供給システムの構築のため、必要なCCU技術の調査・研究、開発・実証・検証などの実施を目指し、会員との技術情報交換、国への調査・実証研究の提案、必要な要素技術開発やシステム開発に関する提言などの発信を行い、産官学協力の下、新しいエネルギーシステムの早期社会実証・実装に向けた議論を深める場の提供を継続した。

（５）原子力関連

福島第一原子力発電所事故を踏まえ、さらに高い水準の安全確保を図るため、原子力の安全性向上に資する技術開発プロジェクトの支援を実施したほか、過酷事故解析コードを活用した福島第一原子力発電所の事故進展およびFP挙動評価を進めた。また、SMR開発の状況など、原子力をめぐる最新動向の分析と今後の原子力の役割に関する調査などを行った。原子力プラント技術では、浮体式原子力発電所に関する検討に参画した。国内廃止措置を円滑に進めるため、大型機器を含む放射性廃棄物の処理・処分に関する調査検討を含め、関連する工程、技術、制度に関する調査・提案、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、民間規格基準整備への支援、および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を行った。

(ア) 福島第一原子力発電所事故関連

① 安全対策高度化技術開発「プラント安全性高度化」支援

本技術開発は、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、深層防護の観点から原子力の安全性向上に資する技術開発を選定し、国の支援の下、プラントメーカーおよび電気事業者と協力して進めるプロジェクトである。2テーマの要素技術開発（希ガスフィルターシステムの開発、先進建設工法の開発）は、プラントメーカー3社が主体的に実施し、当研究所は、プロジェクトの着実な管理を実施している。

② SAMPSON コードによる福島第一原発事故解析

福島第一原子力発電所事故進展および現在のデブリ・FPの状態を推定するため、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）におけるBSAFの後継プロジェクトARC-Fに参加し、BSAFの経験を基に改良したシビアアクシデント解析コードSAMPSONを用いて、福島第一原発1～3号機の事故進展シナリオを構築した。また、同コードの解析結果をベースに、炉内から建屋や環境に放出された放射性核種の移行・沈着挙動を評価し、放射性核種による炉内・環境の汚染メカニズムを検討した。

(イ) 原子力全般

① SMR 開発の現状と今後の展望に関する調査・分析

近年、アメリカ、イギリス、カナダなどを中心に活発に開発が進められている小型モジュール炉（SMR）について、その開発の現状を調査し、今後の展望を分析した。開発中の炉型の特徴を幅広く分析するとともに、主要なプラント、主要なサイト候補地について、その最新動向を調査した。開発者や事業者から、2030年前に運転を開始するといった楽観的な計画が示される一方、現実には、設置に向けた課題を抱え、計画が遅延しているという状況も示した。

② 英国の原子力研究開発の最近の動向について

近年原子力、特にSMRについて積極的な原子力研究開発を進めている英国について、これまでの原子力研究政策の変遷も含めて調査した。原子力政策のベースとなる、気候変動対策や原子力産業の維持に関する考え方を整理の上、具体的な支援策についても整理した。イギリスではこの10年で2回政権交代があり、それに応じて政府の原子力政策や支援政策も変更されてはいるものの、原子力を積極的に推進していくという方針とその役割と重要性に対する認識は一貫して変わっていないということを示した。

③ 原子炉等施設に係る国際原子力機関の安全基準の動向調査

原子力規制庁が実施する国際原子力機関（IAEA）の安全基準文書に係る検討作業およびわが国の規制への反映に係る検討作業について支援業務を実施した。IAEAの原子力安全基準委員会で検討される安全基準文書などのドラフト（安全基準ドラフト）に関して、その対応のための情報収集、整理および仮訳の作成や、各国コメントの整理、コメント処理表および改定文書の変更箇所についての確認および整理、安全基準ドラフトに対するコメント案の作成を実施した。コメント案作成に際しては、専門家の意見を聴取するための調査会の開催などを行った。

(ウ) 原子力プラント技術

① 浮体式原子力発電所の揺動時BWR熱水力挙動評価および安全系設備の検討

産業競争力懇談会（COCN）の浮体式原子力発電検討会に参画し、沸騰水型原子炉（BWR）を炉型として採用した場合の揺動時熱水力評価および安全系設備検討のワーキンググループメンバーとして活動した。ワーキンググループ全体の成果として、揺動の影響を考慮した高温高压条件下での実験計画の策定を目的に、過去に実施された同種の実験に対する文献調査

を行うとともに、許認可における審査内容において揺動場の影響を考慮すべき項目を抽出し、許認可で使用する解析コードに揺動の影響を取り込むための方法論を検討した。これらの調査検討内容を踏まえ、実験で取得すべき熱水力パラメータを絞り込み、浮体揺動下での成立性を示すための実験計画を策定した。

安全系区分分離では、運用実績を有する既設炉（ABWR）をベースケースとして検討を行った。レイアウトでは、多様性、多重性の強化を検討し、区分分離オプションを提示した。また、冷却システムでは、ABWRよりも安全性を向上するため、静的な崩壊熱除去システムおよび溶融炉心冷却システムについて、浮体式の周囲に無限にある海水を利用することにより、長期間稼働可能な静的システムを検討し、冷却システムのオプションを提示した。

（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

廃止措置分野の学識経験者による検討委員会を開催し、通常炉の廃止措置状況や課題などについて検討を行うとともに、最近の国内外の廃止措置の実施状況に関する情報の共有を行った。また、課題解決策について関係機関の理解獲得のために社会へ提言を行う資料として、本年度は原子力発電所廃止措置時に発生する極低レベル放射性廃棄物の処分推進に関する技術レポートを作成した。

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

長期にわたる廃止措置のプロジェクト管理を確実にし、目標とする状態を達成し、廃止措置を完遂するためには、戦略的観点を持ってこれに取り組むことのできる人材が不可欠である。このような人材および彼らの構築する戦略は、法令の要求する廃止措置の計画と合わさって、プロジェクトとしての廃止措置の必要十分条件を満たすことになる。このよう

な要件を満たす技術者として、海外実施事例を参考に国際的な視野を持った、人材を育成することを目的とする事業の支援を行った。

また、原子力発電所だけでなく核燃料取扱施設、再処理施設などの多くの原子力施設の廃止措置が進められていることから、これまでに当研究所で培ってきた廃止措置に関する計画、実施にかかる人材育成の知見、経験、並びに最新動向をもとに、廃止措置を担う人材育成のための教材を開発するとともに研修システムを構築して事業化に取り組んだ。

③ 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

安全かつ合理的な原子力発電所などの廃止措置や運転中廃棄物の処理・処分の計画立案に当たって必要となる、施設に残存する放射能の性状、分布および量を把握する放射能インベントリ評価に関し、同評価に用いる中性子輸送計算および放射化計算に係る不確かさなどの技術的知見の提供などを実施した。

④ 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

世界では、原子力発電プラント（研究炉も含む）17基が廃止措置を完了しており、現在も約180基の原子力発電プラントの廃止措置が進められている。このようななかで欧米では、第4次産業革命といわれるデジタルトランスフォーメーション（DX）の廃止措置分野への導入を進めており、安全性向上、作業期間の短縮、被ばく線量の低減、放射性廃棄物量の低減、費用低減を推進している。

一方、わが国でも18基の商業用原子力発電プラント（福島第一原子力発電所を除く）が廃止措置段階（約30年から50年かけて実施）にあり、このうち、現在、原子炉周辺設備を解体する第2段階にあるのは、4基であり、原子炉などを解体する第3段階は、2020年代半ば以降に本格化する見通しであるが、廃止措置分野でのDX導入が進んでいない。この

ため、廃止措置を安全かつ効果的、効率的に進めていくためには、欧米と同様の取り組みが必要であるとともに、併せて人材・技術の維持・強化も不可欠である。

以上の状況を鑑み、わが国では、原子力施設の廃止措置への DX の適用については至近の課題と考えられることから、勉強会を設立し、この活動を通じて、原子力施設の廃止措置への DX に関する基礎情報を収集するとともに、廃止措置分野でのネットワークを形成し、効果的、効率的な廃止措置を推進する計画の議論を継続している。

(オ) 放射性廃棄物の処理・処分にに関する調査検討

① 循環経済における放射性物質／放射性廃棄物管理に関する海外動向調査

わが国でも、原子力発電所の廃止措置が本格解体段階へ移行すると放射性廃棄物の発生量が増加することから、これらを適切に処理・処分することが必要となる。このうち、量的に多いものは放射能レベルの極めて低い放射性廃棄物 (VLLW) であり、これを適切に処理処分できるかどうかにより、解体時期、方法、それらに伴う費用などが影響される。

このような状況を踏まえ、わが国の原子力発電所廃止措置の円滑な推進に資することを目的として、IAEA の基準および欧米諸国での取り組みなど、海外の先行実績を参考に、国内の原子力発電所から発生する放射性廃棄物のうち、量的にも大部分を占める VLLW の処分推進の在り方などについて評価を行った。

(六) 国際標準関連

① エネルギーマネジメント・省エネルギーに関する国際規格開発

「エネルギーマネジメント・省エネルギー量評価」分野の国際規格の開発に際して、わが国の意見を適切に反映させることを目的として、ISO/TC301 (エネルギーマネジメント・省エネルギー量) が実施する国際規格開発に

参画している。

令和 3 年度は、日本の 2 番目の提案に基づく ISO 50011「エネルギーマネジメント進展度の評価」の規格開発 (令和 3 年 2 月に規格開発開始) を中心に実施した。国内での規格検討体制は、国内審議委員会および同 WG を組織して、産業界、学識経験者、省エネルギー専門家などに参加いただき、課題を検討して国際規格案への対処案を作成した。さらに基本規格 ISO50001 を始めとする同分野の国際規格に影響を与えうる国際的動向について継続的に情報収集を実施した。

3. 情報発信・広報事業

(1) 定期刊行物の出版

当研究所の調査研究活動の紹介および重要なエネルギー技術開発の動向の周知を目的として、毎年、四半期毎に『季報エネルギー総合工学』を作成しており、令和 3 年度も表 1 に示すとおり 4 号 (第 44 巻第 1 号～第 4 号) を発行した。(発行部数各約 1,000 部)

(2) 月例研究会の開催

当研究所の賛助会員などを対象に、研究所の調査研究成果の報告および時宜を得た情報の提供を目的とした「月例研究会」を 1983 年度から開催しており、令和 3 年度も引き続き、表 2 に示すとおり計 10 回開催した。

新型コロナウイルス感染症の影響により令和 3 年度においても前年度から引き続き全てオンラインでの開催となった。講演資料のデジタル化および賛助会員限定ウェブサイトへの事前掲載を継続したことに加え、オンラインで遠方からの参加も容易となったこと、配信範囲の拡大などから、参加者数は全体的に増加傾向である。今後は新型コロナウイルス感染症の状況や参加者からのアンケート結果を踏まえつつ、オンラインのみでなく会場とオンラインのハイブリッド開催も検討することとしている。

表1 季報エネルギー総合工学の報告テーマ

号	寄稿・調査研究報告のテーマ名
第44巻第1号 (令和3年4月)	●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～ ●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 ●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～
第44巻第2号 (令和3年7月)	●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～ ●非効率石炭火力のフェードアウトに関する考察 ●原子力発電所から発生する大型機器の処理について ●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
第44巻第3号 (令和3年10月)	●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 ●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 ●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 ●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～
第44巻第4号 (令和4年1月)	特集 第34回エネルギー総合工学シンポジウム ～総合学的視点からの2050年カーボンニュートラル～ ●開会挨拶 ●カーボンニュートラルの背景と国際動向 ●再生可能エネルギーのポテンシャル ●原子力の役割 ●カーボンリサイクル ●変わる電力システム ●水素エネルギーへの期待 ●ネガティブエミッションの役割 ●質疑応答：総合学的視点からの2050年カーボンニュートラル ●閉会挨拶 ●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

表2 月例研究会の報告テーマ

開催年月	報告題目
令和3年4月	原子力発電所から発生する大型機器のリサイクル処理について ～原子力発電所廃止措置調査検討委員会の取り組み～
令和3年5月	発電事業のゼロエミッションに向けて
令和3年6月	バイデン新政権の誕生、脱炭酸ガスへの動きと、シェール・ガス革命、シェール・オイル革命の最新動向
令和3年7月	2021年度 供給計画の取りまとめの概要（今後の設備形成の動向なども交えて）
令和3年9月	圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES）装置の紹介
令和3年10月	高レベル放射性廃棄物の地層処分安全確保の考え方 国際基準と海外事例の紹介
令和3年11月	EUはグリーンになれるか？ ～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～
令和4年1月	ENEOSの水素社会実現への取り組み ----- 関西電力の水素社会実現に向けた取り組み ----- カーボンニュートラルに向けた世界及び日本のエネルギーシステムにおける水素の寄与
令和4年2月	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 ----- ナッジによるエネルギー消費行動変容と脱炭素化方策
令和4年3月	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

（3）メールマガジン（IAE Newsletter）の発行
エネルギー・環境分野の内外動向を賛助会員にタイムリーに発信するため、毎月メールにて発信している。具体的には当研究所の研究員によるコラムや月例研究会の開催概要や

今後の予定、個別研究会の動向、当研究所研究員の外部発表紹介を掲載するなど、コンテンツの充実を図っている。また、見やすさの改善と合わせて、賛助会員専用ホームページにPDFファイルで保存し閲覧しやすくする工

夫などを継続した。

(4) エネルギー・環境分野の本の出版と講演の実施

当研究所では、これまで行ってきた研究部門の幅広い知見を総括して情報発信することを意図した社会貢献を行うため、令和2年に出版した『図解でわかるカーボンリサイクル』に続き、令和3年9月に『図解でわかるカーボンニュートラル』を技術評論社から、令和4年1月に『子供の科学サイエンスブックスNEXT 見てわかる！ エネルギー革命気候変動から再生可能エネルギー、カーボンニュートラルまで』を誠文堂新光社から出版した。

前者は、カーボンニュートラル実現技術の現状と将来展望、およびその背景について、幅広い読者を対象として解説したものである。世界や主要国のカーボンニュートラル目標を概説し、エネルギー供給として再エネ、原子力、炭素資源利用について述べるとともに、エネルギーキャリアやシステムの視点からは、電力システム、水素、エネルギー貯蔵、ネガティブエミッションについて触れた。また、運輸・民生・産業のエネルギー需要についても解説した。

後者は身近にあるエネルギーの種類や歴史、注目されている再生可能エネルギーなどを小中学生向けに、写真や図解とともにくわしく紹介したものです。将来を担う小中学生がこの本を読むことで、エネルギーの特徴や問題を理解し、将来のエネルギーや環境問題について1つでも自分なりの考えをもってもらうことを目的に出版しました。

また、『図解でわかるカーボンリサイクル』および『図解でわかるカーボンニュートラル』の出版もあり、当研究所へ多くの機関からこれらの本の内容に関連する講演依頼を頂き、数多くの機関などで当研究所員が講演を行った。

(5) スタートアップスとの連携支援事業

近年、社会経済を巡る情勢や産業構造が変化し、企業を取り巻く競争環境がより厳しさ

を増す中、スタートアップス（ベンチャー企業）、大学などとの協働を通じたイノベーションへの取り組みが活発化している。この取り組みを賛助会員の関心の高いエネルギー分野を中心に拡大するため、ベンチャー支援機関のケーエスピー社と連携し、ベンチャー企業、大学などによる事業紹介・講演の場として、「IAE オープンイノベーションフォーラム」を令和3年7月にフルオンライン開催した。その結果、個別面談が22件成立したことから令和4年度も第3回を開催予定である。

研究所のうごき

(令和4年4月1日～6月30日)

◇ 第30回理事会

(Web開催および(一財)エネルギー総合工学研究所会議室)

日 時：6月7日(火)

議 題：

第1号議案 令和3年度事業報告および決算について

第2号議案 公益目的支出計画実施報告書について

第3号議案 定時評議員会の開催について
報告事項 業務執行の状況について

◇ 第17回評議員会

(Web開催および(一財)エネルギー総合工学研究所会議室)

議 題：

第1号議案 令和3年度事業報告(報告事項)および決算について

第2号議案 公益目的支出計画実施報告書(報告事項)について

第3号議案 評議員の選任について

第4号議案 常勤役員候補者選考委員会委員の選任について

◇ 月例研究会

第418回月例研究会(Web開催)

日 時：4月8日(金)14:00～16:00

テーマ：

1. 国際廃炉研究開発機構における研究開発の状況

(技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 開発計画部部長 奥住 直明 氏)

2. 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 氏)

第419回月例研究会(Web開催)

日 時：5月20日(金)14:00～15:00

テーマ：

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 氏)

第420回月例研究会(Web開催)

日 時：6月10日(金)14:00～15:00

テーマ：

2022年度供給計画の取りまとめの概要(今後の設備形成の動向なども踏まえて)

(電力広域的運営推進機関 理事 寺島 一希 氏)

◇ 外部発表

[講演]

講演者：酒井 奨

テーマ：CO₂分離回収・利用・貯留(CCUS)の最新動向

発表先：(株)日本ナレッジセンター「ライブ(Zoom生中継)配信」セミナー No.220407

日 時：4月13日

講演者：黒沢 厚志, 森山 亮, 橋崎 克雄

テーマ：カーボンニュートラル実務講座 入門編 & 実践編

発表先：(一社)人材開発協会

日 時：4月13日, 5月12日, 6月10日

講演者：坂本 茂樹

テーマ：国際規格 ISO 50003 改定の概要について

講演先：(公財)日本適合性認定協会

日 時：4月20日

講演者：飯田 重樹

テーマ：水素の輸送・貯蔵技術の開発動向と課題

講演先：(一社)日本機械学会 講習会

日 時：5月12日, 13日

講演者：橋崎 克雄

テーマ：カーボン・サーキュラー・エコノミー

講演先：令和4年度 石油技術協会 春季講演会 開発・生産部門シンポジウム

日 時：6月9日

講演者：酒井 奨

テーマ：産業部門におけるカーボンリサイクルシステムの構築
講演先：産業技術総合研究所 /CO₂ 分離回収・資源化コンソーシアム 第3回講演会 (Web)
日 時：6月9日

講演者：Yuki Ishimoto, Christina Wulf, Andreas Schönhoff, Wilhelm Kuckshinrichs

テーマ：Life Cycle Costing Approaches of Fuel Cell and Hydrogen Systems: A Literature Review
講演先：世界水素エネルギー会議 2022
日 時：6月29日

発表者：加藤 悦史

テーマ：大気中から CO₂ を取り除くネガティブエミッション技術の最新動向
講演先：2022 年度エコイノベーションとエコビジネスに関する研究会 夏季セミナー
日 時：6月30日

[寄稿]

寄稿者：飯田 重樹

テーマ：第6次エネルギー基本計画の概要
寄稿先：『水素エネルギーシステム』(Vol.47 No.1)

寄稿者：加藤 悦史

テーマ：ネガティブエミッションと BECCS による大気中 CO₂ の除去
寄稿先：西尾匡弘監修『CO₂ の分離・回収・貯留の最新技術』(株)エヌ・ティー・エス
発行日：4月11日

寄稿者：橋崎 克雄

テーマ：カーボンリサイクルに関する技術開発動向
投稿先：『電気学会誌』4月号 (Vol.142 No. 4)

寄稿者：塙 雅一

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③＞
CO₂ から化学品の製造
寄稿先：『エネルギー・資源』5月号 (Vol.43 No.3)

寄稿者：森山 亮, 濱田 利幸

寄稿先：(株)技術評論社刊, CN2 燃料の普及を考える会 編著『図解でわかるカーボンニュートラル燃料～脱炭素を実現する新バイオ燃料技術』
発行日：5月21日

寄稿者：橋崎 克雄

寄稿先：(株)情報機構『CO₂ 分離回収貯留技術及び有効利用技術～脱炭素社会での企業対応 /CCS・CCUS/ 排出量計算』(第3節 回収した CO₂ の有効利用方法5項・海外における CCS & CCUS プロジェクト動向)
発行日：6月27日

寄稿者：岡崎 徹

テーマ：蓄熱発電の現状と課題
寄稿先：(一社)日本ボイラ協会 機関誌 7月号

寄稿者：福場 伸哉
テーマ：はじめに～特集「電気と私」について～
寄稿先：『電気学会誌』7月号 (Vol.142 No.7)

寄稿者：酒井 奨

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④＞
CO₂ の炭酸塩化による固定
寄稿先：『エネルギー・資源』7月号 (Vol.43 No. 4)

編集後記

現在のロシアによるウクライナ侵攻の長期化による影響は、エネルギー価格上昇から世界的物価上昇へと拡大している。エネルギーの安定供給という点で原子力も世界的に見直しの機運が出ている。

原子力は唯一、低炭素エネルギー源の中で50年以上の継続的供給および大量導入の両方の実績を有する。一方で、放射性廃棄物処理・処分というバックエンドの実績は豊富とは言えない。本号最初の記事は国際的枠組みの中での取り組み、2番目の記事は福島第一原子力発電所の廃炉を中心としたバックエンド関連の動向である。どちらも各分野で日本の取りまとめ的な機関による記事である。

一転して3番目の記事は、「行動変容」による需要家側の脱炭素化に関する考察である。日本でも先月、6月としては記録的な猛暑により、経済産業省から需要家に対して節電要請が出された。2050年カーボンニュートラルに向けて、今後の需要側の行動変動も重要となる。行動変容につながる「ナッジ」などの手法は、日々のコミュニケーション、新製品のセールスや節電要請にも応用可能なものであり興味深い。

日本でも、再生可能エネルギー（再エネ）

導入だけでなく、同時に電力システム改革も進んでおり、電気を如何に安定的に供給するかも重要課題となっている。4番目の記事は、今まで電力システムの安定性維持に有効であった「慣性力」を再エネが持っていないことへの対応策とリスクについて考察している。欧米に比べても停電率が低く、電気はいつでも使いたければ安心して使えた日本でも、今後、前の記事の行動変容と合わせてより重要になると考える。

最後の記事は、地政学リスクに関する考察である。再エネが大量に導入されても、日本の場合、国内で全エネルギーを生産するのは困難であろう。足りないエネルギーは輸入するしかなく、地政学リスクは輸入する燃料の種類が変わっても残り続ける。輸入できないとなると電力も含め、エネルギーの安定供給もできなくなるリスクがある。国民にとっても無視できない問題である。

現時点ではロシアによるウクライナ侵攻で様々な変化が見られるが、脱炭素化への世界的な大きな流れは変わらないと考える。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2号

令和4年7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。