

本レポートの和訳は、本レポートの目的と重要性を踏まえ、JAEA高速炉・新型炉研究開発部門 国際・社会環境室が実施したものであり、和訳の内容については、本課室の責任のもと実施した（2021年3月10日版）。なお、NICE Futureイニシアチブの概要及び本レポート（英語版）は、[GIFの日本国内向けホームページ等](#)から入手することが可能である。

https://gif.jaea.go.jp/event/2020_NICE_Future_Flexibility_Report/index.html

抜粋版



NICE Future

Nuclear Innovation: Clean Energy Future

クリーンエネルギーシステムのための 柔軟な原子力エネルギー

原子力イノベーションのキャンペーンである、原子力・再生可能エネルギー統合のための柔軟な原子力キャンペーン（FNC）の成果物。Clean Energy Ministerial（クリーンエネルギー大臣会合／CEM）の下のClean Energy Future（NICE Future）イニシアチブにおいて、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）によって、NICE Futureの運営機関としての立場で調整されている。



技術レポート
NREL/TP-6A50-77088
2020年9月

Contract No. DE-AC36-08GO28308

クリーンエネルギーシステムのための 柔軟な原子力エネルギー

原子力イノベーションのキャンペーンである、原子力・再生可能エネルギー統合のための柔軟な原子力キャンペーン（FNC）の成果物。Clean Energy Ministerial（クリーンエネルギー大臣会合／CEM）の下のClean Energy Future（NICE Future）イニシアチブにおいて、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）によって、NICE Futureの運営機関としての立場で調整されている。

戦略的エネルギー分析合同研究所（JISEA）及びその関連機関である国立再生可能エネルギー研究所（NREL）は、NICE Futureイニシアチブの技術的専門知識を調整及び提供し、Clean Energy Ministerial（CEM）事務局への連絡役を務める。NRELは、CEM、イニシアチブの参加者、パートナー、及び利害関係者からのガイダンスに基づいて、NICE Futureイニシアチブ活動を実施する。NRELは、米国エネルギー省、エネルギー効率及び再生可能エネルギー局の国立研究所であり、Alliance for Sustainable Energy、LLCにより運営されている。

国立再生可能エネルギー研究所
15013 Denver West Parkway
Golden, CO 80401
303-275-3000 • www.nrel.gov

技術レポート
NREL/TP-6A50-77088
2020年9月

契約番号 DE-AC36-08GO28308

通知

この作業結果は、米国エネルギー省（DOE）との契約番号DE-AC36-08GO28308の下で、Alliance for Sustainable Energy、LLCが運営する国立再生可能エネルギー研究所によって作成され、さまざまな個人や団体によって作成されたセクションが含まれている。本書に記載されている見解は、著者の見解のみであり、DOE又は米国政府を含む他の個人又は団体の見解を表明するものではない。

このレポートは、国立再生可能エネルギー研究所（NREL）（www.nrel.gov/publications）から無料で入手可能である。

1991年以降に作成された米国エネルギー省（DOE）のレポートと、1991年以前のドキュメントの数は、www.OSTL.govから無料で入手可能である。

NRELは、リサイクルされたコンテンツを含む紙に印刷する。

レポートの内容に関する免責事項

このレポートは、世界中の専門家やさまざまな組織によって作成された。報告書で表明された見解は著者の見解であり、必ずしもClean Energy Ministerial (CEM) 若しくはその加盟国、原子力イノベーション：Clean Energy Future (NICE Future) イニシアチブ、その参加者若しくはそのスポンサーとなる政府や組織、合同戦略的エネルギー分析研究所、又はNRELのいずれかの見解の声明を表すものではない。開示された情報、装置、製品、又はプロセスの正確性、完全性、又は有用性について、保証は明示又は黙示されておらず、法的責任又は責任は負わず、その使用が個人所有の権利を侵害しないことを表明するものではない。本書での特定の商用製品、プロセス、若しくはサービスへの商号、商標、製造元、又はその他の参照は、必ずしもその保証、推奨、又は支持を構成又は暗示するものではない。

レポートの内容に関する英国の免責事項

第10章で表明された見解は、必ずしも英国のビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）の見解を表すものではなく、またこの章の情報は、承認されたBEISポリシー又はポリシー提案を構成又は形成したり、その一部を形成したり、そのように解釈したりするものではない。

パートナーの免責事項：国際原子力機関

国際原子力機関（IAEA）の専門家がこの報告書に寄稿した。ただし、本書に記載されている見解は、必ずしもIAEA又はその加盟国の見解を反映しているわけではなく、IAEAもその加盟国も、その使用から生じる可能性のある結果について責任を負わず、報告書に関連していかなる種類の保証も行わない。

この文書、及びここに含まれるデータと地図は、いかなる領土の地位又は主権を害することなく、国際的な国境及び境界線の決定、及び領土、都市、地域の名前を侵害することはない。

このレポートは、国立再生可能エネルギー研究所（www.nrel.gov/publications）から無料で入手可能である。

パートナーの免責事項：経済協力開発機構原子力機関

この作業結果は、OECD事務総長の責任の下で公開されている。ここで表明された意見及び採用された議論は、必ずしもOECD加盟国又はその原子力機関（NEA）の公式見解を反映するものではない。

共同主導国の見解

Clean Energy Ministerial (CEM) の下で、米国エネルギー省 (DOE)、カナダ天然資源省 (NRCan)、日本の経済産業省 (METI)、及び英国のビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) は、世界的なクリーンエネルギーの変革を加速することを目指している。

この取り組みは、現在及び未来のエネルギーシステムにおける技術開発とイノベーションに対する継続的なサポートに反映されるべきものである。私たちの組織はそれぞれ、さまざまなエネルギー需要を満たすためにさまざまな技術を探索及び利用する国立研究所、学界、及び業界パートナーと協力して、さまざまな研究開発活動及びイニシアチブをサポートしてきた。

原子力は世界のクリーンエネルギー供給において重要な位置づけをしめており、世界の有意な排出物をもたらさない電力のほぼ3分の1を提供し、再生可能エネルギーを含む他のクリーンエネルギーソースと協調している。原子力のこの現在及び未来の可能性を認識し、Nuclear Innovation : Clean Energy Future (NICE Future) イニシアチブは、デンマークのコペンハーゲンにある第9回CEMで2018年に開始された。

NICE Futureイニシアチブは、発足以来、CEM加盟国間で幅広い分野横断的な対話を開始し、経済成長、エネルギー安全保障、及び環境管理を強化していく上で原子力が果たすことができる役割を強調することに成功している。これには、小型モジュール式原子炉 (SMR) やその他の次世代型原子炉などによる、小規模及び大規模アプリケーションの両方の分野における、革新的な原子力技術による、クリーンな成長を促進する方法についての調査と認識の構築が含まれている。

原子力技術が将来の統合クリーンエネルギーシステムで果たすことができる、ますます柔軟な役割を検討し伝えるために、NICE Futureイニシアチブは、2019年、カナダのバンクーバーでの第10回CEMにおいて、原子力・再生可能エネルギー統合のための柔軟な原子力キャンペーン (柔軟な原子力キャンペーン) を開始した。

国際エネルギー機関 (IEA) の2019 World Energy Outlookは、変動する再生可能エネルギーからの発電は2040年までに36%から67%の範囲になると予測している。より多くの再生可能エネルギーがグリッドに接続するにつれて、多くの国が、需要を満たすために電力と熱を生産するために、原子力などの従来のベースロードエネルギーソースのより柔軟な運用を行う革新的なオプションを求めている。

このレポートでは、世界中の専門家が集まり、革新的で高度な原子力システムが柔軟に運用され、再生可能エネルギーと連携して機能し、将来のクリーンエネルギーシステムに貢献するための専門知識と研究の機会を共有した。

このレポートに要約されている技術分析で示されているように、原子力は世界中の特定の電力市場で柔軟性を提供し、新しい原子力技術は原子力システムの多様性をさらに拡大する可能性がある。

原子力は、グリッドの需要に合わせて電力出力を増減することにより、柔軟に運用できる。また、原子力が提供するサービスは、発電だけにとどまらない。世界中で、原子力システムによ

り生産された熱エネルギーを直接使用して、各家庭を暖めたり、工業プロセスを実行したり、精製水などの非電気プロダクトを生産したりする方法に関する研究が進行中である。原子力システムによって生成された水素は、その後の電力生産のために必要なエネルギーを貯蔵するために使用したり、肥料や鉄鋼から新しい合成燃料まで、さまざまな製品を生産するための原料として使用したりすることができる。さらに、化学プラントや再生可能エネルギーと並行して運用することにより、現在及び未来の原子力エネルギーシステムを使用して、多数の代替収入源を生み出し、エネルギー、運輸、及び産業部門における二酸化炭素、二酸化硫黄、窒素酸化物、水銀、及びスモッグの原因となる粒子状物質の排出量を削減できる。また、現在開発中であり、近い将来の展開が見込まれる新しい小型の原子炉では、原子力は、コミュニティのエネルギー需要と特定の原子炉技術を統合させることにより、ほぼすべての規模で事実上どこにでもこの多様性をもたらすことができる。

私たちは、私たちの未来を動かすために探求されている革新的なシステムに期待している。より緊密なグローバル協力を通じて原子力エネルギーのイノベーションを活用することにより、世界はよりクリーンで、より健康で、より繁栄するであろう。

Dr. Rita Baranwal
原子力次官補
米国エネルギー省 (DOE)

Mollie Johnson
低炭素エネルギー部門副大臣補佐
カナダ天然資源省 (NRCan)

Kihara Shinichi
資源エネルギー庁 (ANRE) 国際局副長官
経済産業省 (METI)、日本

Stephen Speed
民間原子力局長
英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS)

NGOからの見解：ClearPath及びEnergy for Humanity

私たちは、Clean Energy Ministerial (CEM)の原子力イノベーションの創設において政府が示したコミットメントとビジョンを称賛する。本イニシアチブの下で立ち上げられたこのイニシアチブ及び原子力・再生可能エネルギー統合のための柔軟な原子力キャンペーン（柔軟な原子力キャンペーン）は、原子力と再生可能エネルギーが一緒になって、手頃な価格で信頼性が高く、クリーンなエネルギーシステムを提供する上で果たすことができる複数の役割に関する事実を提供しようとしている。

COVID-19のパンデミックをきっかけに、よりクリーンな環境下で、人々の健康が確保された状況で、経済回復を行うこと求められている。そのため、私たちの組織は、CEMのすべてのメンバーに、このレポートで提供された事実に基づいて、世界のエネルギー供給の再編を主導し続けることを求めている。

私たちの抱負は、経済、環境、エネルギーを組み合わせた課題に必要な規模及び緊急性に見合ったものでなければならない。

過去10年間で、風力及び太陽光発電は、電力部門からの排出量を大幅に削減するのに役立つ手頃な技術に発展した。柔軟で先進的な原子炉は、将来のエネルギーシステムにおいて、変動性をもつ再生可能エネルギーのより高い普及性を補完し、それを可能にすることができる。

しかし、再生可能エネルギーを手頃な価格で大規模に商品化するのに役立つコミットメント、創造性、技術革新とビジネス革新の組み合わせは、他の技術には広く適用されていない。

排出量を大幅に削減するためのリスク軽減方策に関し、より幅広い技術が果たす必要のある役割を見直し、活用することを実現する時が来た。具体的には、これは、再生可能エネルギーの成功から学んだ教訓を、より広く、より高度な排出量削減のテンプレートとして適用することを意味する。これはまた、海運や航空など、他の大規模で生産性の高い産業に目を向けることも意味する。「目的に合わせて設計された」施設での革新的な配送及び実装モデルは、非常に低コストで、さまざまなクリーンテクノロジーの大規模な展開を迅速に実現し、迅速で短期的な排出量削減を実現する。

NICE Future イニシアチブとは？

- 第9回Clean Energy Ministerial（2018年5月、コペンハーゲン）で開始されたNuclear Innovation : Clean Energy Future (NICE Future) イニシアチブは、原子力イノベーションとアプリケーションがクリーンエネルギーの目標を前進させる世界を想定した国際協力である。
- イニシアチブの参加者は、原子力・再生可能エネルギー統合、柔軟な電力網、地方の電化、工業プロセス、浄水、クリーンな輸送燃料、水素などの代替エネルギーキャリアなど、革新的な技術と原子力の多様な用途を模索している。
- 第10回Clean Energy Ministerial（2019年5月、バンクーバー）で、イニシアチブの数人の参加者が、再生可能エネルギーと連携して機能する柔軟な原子力システムの評価にグローバルな専門家を参加させるための市民社会と政府の共同の取り組みである、原子力・再生可能エネルギー統合のための柔軟な原子力キャンペーンを開始した。このレポートは、そのワークストリームの一部である。

この重要な10年間で、私たちはクリーンエネルギーの選択肢を拡大し、コスト競争力があり、投資家へのリスクが低く、幅広い市場アプリケーションに対応できる柔軟な原子力技術と設備を有効な技術オプションと位置付けることを目指している。

これらの高度な原子力設備は、各国が追求しているクリーンエネルギーへの移行に対応し、再生可能エネルギーの普及率が高い将来のエネルギーシステムにおける柔軟性、手頃な価格、セキュリティ、及び可用性に関する市場の要件を満たすように設計する必要がある。これらの貴重な技術の迅速な商業化は、今後数十年にわたって世界の総エネルギー消費量のかなりの割合を変革していくために必要なアクションである。

原子力エネルギーの従来の電力供給としての利用に加えて、既存の原子力発電所と次世代の原子力発電所は、家庭、企業、及び産業プロセスに熱源を供給する可能性がある。水素と合成燃料を生産して、航空と海運の部門を含む、よりクリーンな輸送手段をサポートできる。水不足に苦しむ地域の海水を淡水化して浄化できる。遠隔地及び発展途上のコミュニティにおける最新のエネルギーサービスへのアクセスをサポートできる。そして、すべて社会に利益をもたらし、世界中の生活水準を向上させることができるエネルギー変革の一部として、有意な排出物のない高温熱源を業界に提供できる。

将来の原子炉及びその他の小型モジュール式原子炉（SMR）技術は、持続可能な開発とよりクリーンなエネルギー転換を同時に可能にする可能性がある。私たちは、これらの技術の可能性を実現するためのCEMの努力を称賛し、すべての国々が協力して、急速な世界変革のために今後10年間で開発と商業化を加速することを求める。

NGOはクリーンエネルギーの選択肢の範囲を広げることに焦点を合わせているため、国や利害関係者が検討するために、いくつかの行動の即時の実行を推奨する。

- **政府:** クリーンエネルギーを促進し、特定の省庁下における分担を超えて、クリーンエネルギー技術の発展と機会の創出に取り組むすべての関連機関をつなげていくために、原子力エネルギーと再生可能エネルギーの専門家及び利害関係者の間のさらなる協力を奨励し、協力してクリーンエネルギーシステムを作り上げる任務を負う。
- **政策立案者:** エネルギーの変革とイノベーション、気候変動、電力、熱、産業、及び輸送のための野心的で達成可能な戦略を立案する。健全な競争を促進し、効率を改善し、利用可能なすべてのオプションと、未開発のオプションの潜在的可能性を現実化していくために、市場設計を行うとともに、インセンティブを含む労力と資源を投資する。

各国は、雇用を創出し、経済を強化しながら排出量を削減できる経済回復策を設計しようとしている。そのため、解決策の一部を形成するために、柔軟な原子力技術のさまざまな特徴を認識し、評価するよう努めるべきである。

- **気候及びエネルギーモデラー:** より幅広い技術オプションを考慮することにより、排出量削減の可能性を高める。より多くのオプションの存在は、システムの他のオプションへのプレッシャーを軽減し、新しい機会が生じさせる。経済成長性を確保しながら排出量を大幅に削減するために、現実的で達成可能な未来を設計することは、投資家、サプライチェーン、政策立案者及び一般市民を、望ましい未来に導くための重要な部分である。

- **分析者及び技術者:** 代替オプションが大幅に過小評価されていたり、クリーンエネルギーオプションとして完全に省略されている技術オプションに対処し、原子力の柔軟性が、再生可能エネルギーと一緒に機能して、エネルギーシステム全体のコストと排出量を削減できる可能性を含めて、排出削減に焦点を当てる。
- **投資家:** 投資リスクを減らすために、さまざまな技術オプションにまたがるクリーンエネルギー投資へのポートフォリオアプローチを検討する。この目的を実現するには、すべての技術オプションを含む一貫した金融システムへの関与が不可欠である。
- **ビジネスリーダー:** 現在開発中のよりクリーンなエネルギー技術に関する市場の創出を支援し、これらの技術の実証に投資して、これらの市場を実現化し、規模の経済と市場主導の排出量削減を実現する。

私たちの見解としては、意味のあるタイムスケール内でこれらのクリーンエネルギーの変革を達成するには、新しい形の対話が必要となる。したがって、電力、熱、産業、輸送にまたがるシステム全体の考え方の観点から議論を組み立てるCEMの取り組みを歓迎している。

多様な技術ポートフォリオを使用して、可能な限り最高のパフォーマンスシステム（柔軟性、クリーン、信頼性、手頃な価格、復元特性）をどのように設計できるだろうか？

共通の目標と結果に焦点を当てた事実に基づく意思決定を可能にする議論が必要である。私たちの将来のエネルギーシステムは、低排出、信頼性、手頃な価格、そして柔軟性が必要であろう。大気汚染の削減、陸と海の生息地と生物多様性の保護、経済的繁栄の推進、そして世界中の女性と子供を含む生活の質と機会へのアクセスを改善すると同時に、有意な排出物をもたらすことなく電気及び燃料の両方のエネルギー供給を増やし、環境への影響を根本的に減らすことを含めて、社会的、経済的、及び環境的利益を確保する必要がある。

私たちは、事実に基き、結果に焦点をあて、意思決定に断固として焦点を当てることで、共通のグローバルな課題に対処するために必要な行動のスピードと規模が得られると信じている。

謝辞

原子力イノベーション：Clean Energy Future (NICE) Future イニシアチブは、このレポートのコンテンツと研究の提供に参加してくれた以下の組織に感謝申し上げます。NICE Futureイニシアチブは、Clean Energy Ministerial (CEM) のイニシアチブであり、メンバー主導のイニシアチブとして、その作業は参加国とパートナー組織の貢献によってのみ可能である。NICE Futureイニシアチブは、柔軟な原子力キャンペーン国際的な専門家ワーキンググループのメンバーと以下の寄稿者に特に感謝する。

共同主導寄稿者

カナダ天然資源省

Zainab Feroz 及び Micah Melnyk

英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省：

Daisy Ray博士

米国エネルギー省及び国務省

Giulia Bisconti, Russell Conklin, 及びConnor Hook

経済産業省資源エネルギー庁

Daigo Minoshima, Risa Higaki, 及び Takehiro Sasagawa

ClearPath

Luke Bolar

Energy for Humanity

Kirsty Gogan 及び Eric Ingersoll

個別の謝辞

Jordan Cox博士、米国国立再生可能エネルギー研究所、NICEフューチャーイニシアチブ運営エージェントに所属する著者、レポートオーガナイザー、及びShannon Bragg-Sitton博士、米国アイダホ国立研究所に所属する著者、レポートオーガナイザー。

寄稿者
順不同

カナダ原子力協会
John Gorman

カナダ原子力研究所
Gordon Burton博士,
Megan Moore博士,
and Ali Siddiqui博士

経済産業省資源エネルギー庁
Takeshi Nagasawa

日本原子力研究開発機構
上出 英樹博士及び
柴田 大受博士

日本原子力産業協会
新井史朗

ヨルダン原子力委員会
Kamal Araj博士

ケニア原子力エネルギー庁
Edwin Chesire

英国原子力産業協会
Tim Stone

英国原子力イノベーション研究室
Philip Rogers博士及び
Gareth Peel

第4世代原子力システムに関する国際
フォーラム
上出 英樹博士及び
Michel Berthelemy博士

国際エネルギー機関 (IEA)
Peter Fraser, Brent Wanner, 及び
Claudia Pavarini

国際原子力機関 (IAEA)

Victoria Alexeeva博士, Ed Bradley,
Marco Cometto博士, Clement Hill
博士, Ness Kilic博士, Ki Seob Sim
博士, Stefano Monti博士, Henri
Paillere博士, 及び Alik Van Heek
博士

経済協力開発機構原子力局 (OECD/NEA)
Michel Berthelemy博士及び Sama
Bilbao-Y-Leon 博士

世界原子力協会 (WNA)
Agneta Rising博士

Électricité de France (フランス電力)
Stéphane Feutry 及び Antoine Herzog

Exelon
David Throne

原子力エネルギー協会 (NEI)
Maria Korsnick

アイダホ国立研究所
Konor Frick博士

マサチューセッツ工科大学
Charles Forsberg博士

米国国立再生可能エネルギー研究所
Caroline Hughes 及び Maxwell
Brown

東京工業大学
尾本 彰博士

レビューアに感謝

国立再生可能エネルギー研究所

Jill Engel-Cox博士 及び Mark D. Jacobson

アドバイザーに感謝

また、このプロジェクトの実施中にFNCワーキンググループに貴重なアドバイスをいただいた以下の組織、業界、及び若者の代表者にも感謝申し上げます。

アメリカ原子力学会

John Kelly博士

原子力研究所

Carol Berrigan及び Matthew Wald

IFNEC

Suzanne Jaworowski

米国原子力産業評議会

Caleb Ward

国際青年原子力会議

Denis Janin博士

世界原子力協会

King Lee博士

LucidCatalyst

John Herter, Andrew Foss, and
Romana Vysatova

エグゼクティブサマリー

技術報告書「クリーンエネルギーシステムのための柔軟な原子力エネルギー」は、将来のエネルギー需要を満たすために必要となる柔軟性に関する見解の提供を目的に、原子力エネルギーの現在及び未来の役割に関する技術分析結果をまとめたものである。このレポートの目的上、柔軟性は次のように定義した。

エンドユーザーが必要とする時間と場所で、エネルギーサービスを経済的に提供する原子力発電の能力。これらのエネルギーサービスには、従来型及び次世代型の原子力発電システムが提供するエネルギーサービスと電気及び非電気の両者のエネルギーサービスが含まれる。

世界中の電力システムは急速かつ有意な変化をおこしている。新しい費用対効果の高い低排出エネルギー技術と、経済全体のクリーンエネルギーの必要性に関するコンセンサスの高まりに後押しされて、過去10年間で、人間がエネルギーを生産、伝達、消費する方法の変化とイノベーションが加速している。これらの変化はほんの始まりに過ぎない。次の10年間は、複数のグローバルな課題（たとえば、ユニバーサルエネルギーアクセス、エネルギー安全保障、経済回復、環境の管理、気候回復力、グローバルヘルス）に対処するために、すべての分野でクリーンエネルギーの使用を促進し、ほぼ確実にさらなるイノベーションと変化が必要となるであろう。各国は、個々のエネルギー転換の一環として、経済性と信頼性が高く、手頃な価格でクリーンなエネルギーを調達する方法を模索している。エネルギーシステムの場所、使用されるエネルギー生成物の種類、生産のタイミングと規模、多様なエネルギーアプリケーション、及び複数のエネルギーキャリアと貯蔵における、柔軟性と多様性をさらに活用していくことは、経済全体のクリーンエネルギー変革を達成するために不可欠である。

基本的に、すべてのエネルギーサービスは、何らかの方法で柔軟性を提供できる。たとえば、分散型太陽光発電（PV）や家電製品などを通じた分散型資源の運用は、10年前には存在しなかった技術を使用して集約及び自動化することで、まったく新しいビジネスモデルとエネルギーシステムの柔軟性として発生したものである。原子力も例外ではない。原子力エネルギーは、過去10年間で、急速なイノベーションを経験している。原子力エネルギーは、従来のベースロードとしての役割に加えて、既存及び潜在的な柔軟な特性を発揮することへの期待を急速に高めている。原子力エネルギーには、電気出力をどれだけ速く変化させることができるか、又は電力をどれぐらい低レベル出力で長期間運用できるかという制約があるが、原子力システムは、あきらかにシステムの柔軟性に独自の価値を提供できる。

今日、原子力エネルギーはすでにいくつかの国でメガワット（MW）からギガワット（GW）スケールで特定のタイプのエネルギーシステムとしての柔軟性を提供している。この柔軟性はクリーンエネルギーとしての貴重な特性であるが、これまでのところ、原子力は主に電力分野におけるエネルギー源として使用されてきた。将来に目を向けると、更なるイノベーションは、原子力エネルギーの利用において柔軟性をさらに向上させることにより生じる。既存あるいは新しく設計される原子力発電所は、エネルギー貯蔵、エネルギー変換技術、及び水素生産との新しい統合を通じて、ディスパッチ可能な電力システムとしてだけでなく、熱エネルギー及び化学製品の新しい供給源として再考されている。システムの出力規模に革命をもたらし、多様化させるいくつかのパイロットプロジェクトが世界中で進行中である。

第4世代原子炉¹は、エネルギー出力を変更して、より小さく、より分散され、より速く建設・運転することができる。そのため、次世代型の原子炉は、電気及び非電気エネルギーサービスを提供するように設計される可能性がある。要するに、原子力イノベーションはクリーンエネルギーシステムに革命を起こす可能性を秘めている。

このレポートは、Nuclear Innovation : Clean Energy Future (NICE Future) イニシアチブのパートナー組織の国際的な経験と新しい研究をまとめている。著者それぞれが固有の視点や興味を持っているため、各章のデータと分析は異なることがあるかもしれないが、著者は全員が柔軟な原子力エネルギーの価値を探求しようとしている。章全体を見ると、本レポートでは高レベルで要約されているいくつかの重要なポイントが浮かび上がる。

既存の原子力発電所において柔軟な運用を行う技術はすでに確立されている。 既存の原子力発電所において柔軟な運用を行う技術はすでに確立されている。炉物理学、熱水力学、及び材料科学の研究は、原子炉が安全に柔軟な出力変更を行うことができることを示している。研究データと運用データの両方が、この主題に関する世界的な技術体系を構築している。この報告書で取り上げられている国を含むいくつかの国は、原子炉の柔軟な運転において既に十年以上の経験を持っている。さらに、複数の組織が、柔軟な原子力運用がもたらす安全性への影響を研究している。彼らの研究は、柔軟な運用が原子力安全に既知の脅威をもたらさないことを示している。一部の国では、原子力発電所を柔軟に運用した経験が豊富であり、その実現性を示しているが、他の国では、追加の設備と規制レビュー及びコンプライアンスを必要とする柔軟な運用を採用することが難しい場合もある。しかしながら、既存の原子炉は、適切な原子炉設計の結果として、確立された制約条件の下で、柔軟な電力出力を提供する能力を基本的に持っている。なお、柔軟性が各国の電力システムに及ぼす影響レベルは国による異なったものとなる。

既存の原子炉の柔軟性を高めて、クリーンな電力と有益な非電気サービスの両方を生み出すことができる。 既存の原子炉の柔軟性を高めて、クリーンな電力と有益な非電気サービスの両方を生み出すことができる。多くの組織は、原子炉が電気出力を変更する速度を上げ、エネルギーサービスを多様化する方法を研究している。原子力エネルギーのもつ容量と熱出力の大きさにより、運転中の原子炉は、後で使用するためにエネルギーを貯蔵する設備を追加したり、運転方法の変更を行うことができる。原子炉は、電気エネルギーに加えて熱エネルギーを提供して、水素や有益な化学物質などの多様な製品の生産をサポートすることもできる。これらの機能強化により、グリッド管理を柔軟にサポートしながら、プラントを最大定格電力レベルで継続的に運用できるようになる。

次世代型の原子炉は、原子力システムの柔軟性のためにさらに多くの機会を提供できる。 既存のGW規模の原子炉システムの周りで起こっている重要で有意義なイノベーションにもかかわらず、先進的な原子炉だけがサポートできるエネルギーサービスもいくつかある。先進的な原子炉はGW規模のシステムとして設計されることもあるが、1~100MWの規模のシステムとしても設計可能である。これらの規模の原子炉は、従来のGW規模のプラントを設置できないエネルギー需要の少ない地域に設置でき、一部のプラントはこれらの地域をサポートするために特別な設計が行われている。遠隔地のコミュニティや産業（鉱業など）に熱と電力を供給するなどのオフグリッドアプリケーションは、次世代型の原子炉が柔軟にサポートできる用途の例である。さらに、これらのプラントを熱エネルギー貯蔵や水素製造などの新しいエネルギー貯蔵

¹ 第4世代原子炉の詳細については、第13章を参照のこと。

システムと組み合わせて、柔軟性をさらに高めることができる。

他のクリーンエネルギー源の更なる活用を可能にする上で、原子力の柔軟性は、鍵となる可能性がある。クリーンエネルギー供給手段は、過去数十年で急速なイノベーションとコスト削減を見てきた。太陽光発電と風力発電は最も一般的に連想される手段であるが、分散型河川水力発電、ディスパッチ可能地熱（深部と浅部の両方）、バイオマス、集光型太陽光発電、炭素回収による化石エネルギーなどの他のエネルギーソースもまた、過去10年間で急速な技術的及び経済的進歩を経験している。エネルギー生成技術が進歩するたびに、エンジニアと政策立案者は、考えられるエネルギーの相互接続方法についての見解を再考し、更新していく必要がある。原子力エネルギーは、他の多くのエネルギーソースと相乗的に結合できる可能性があり、その結果、単独で使用する以上の価値を持った統合システムが実現する。

各国が展開するクリーンエネルギーシステムは、地域の天然資源、地理、トポロジー、インフラストラクチャ、及び社会的価値に依存している。クリーンエネルギー大臣会合（CEM）の使命は、多様な国際的経験を共有することにより、クリーンエネルギーの変革を促進することである。したがって、NICE Futureイニシアチブは、原子力エネルギーが該当国において現在エネルギーシステムの一部であるかどうかにかかわらず、政府関係主導者らが原子力エネルギーによって提供される機会と潜在的な利益を再検討することを求めている。この報告書は、柔軟な原子力エネルギー運用と、それらを実現することを選択した国々の経済全体のクリーンエネルギー変革に役立つイノベーションに関する情報を提供している。

略語リスト

ANRE	資源エネルギー庁
APS	アリゾナ 公共サービス
BEIS	ビジネス・エネルギー・産業戦略省
CAISO	カリフォルニア独立システムオペレーター
CapEx	資本的支出
CCC	英国気候変動委員会
CEM	クリーンエネルギー大臣会合
CNL	カナダ原子力研究所
CSP	集光型太陽光発電
DOE	米国エネルギー省
DOE-NE	米国エネルギー省原子力局
EDF	Électricité de France(フランス電力)
EPRI	電力研究所
ERCOT	テキサス電気信頼性評議会
GHG	温室効果ガス
GIF	第4世代原子力システムに関する国際フォーラム
HERON	ヒューリスティックエネルギー資源最適化ネットワーク
HTGR	高温ガス冷却炉
HTSE	高温蒸気電解
IAEA	国際原子力機関
IEA	国際エネルギー機関
INL	アイダホ国立研究所
JAEA	日本原子力研究開発機構
LWR	軽水炉
MIT	マサチューセッツ工科大学
METI	経済産業省
MSR	熔融塩原子炉
NGO	非政府組織
NICE Future	原子力イノベーション : Clean Energy Future
NRCan	カナダ天然資源省
NREL	国立再生可能エネルギー研究所
PV	太陽光発電
PWR	加圧水型原子炉
RAVEN	原子炉分析及び仮想制御環境
ReEDS	地域エネルギー導入システム
SFR	ナトリウム冷却高速炉
SMR	小型モジュール式原子炉
TEAL	経済分析のためのツール
TEDS	熱エネルギー分配システム
VRE	変動する再生可能エネルギー

目次

1	序論	1
2	目的と構成	3
3	電力システムの柔軟性に関する背景	4
3.1	電力システムにおける柔軟性の傾向	4
3.1.1	非電気エネルギーサービス	6
3.1.2	電力システムにおける柔軟性の要因	6
3.1.3	デマンドレスポンス及びエネルギー貯蔵	8
3.1.4	柔軟な運用における地理的特性	8
3.2	原子力システムの柔軟性	8
3.2.1	炉心ランピング	8
3.2.2	統合エネルギーシステム	9
3.2.3	デマンドレスポンス及びエネルギー貯蔵	10
3.2.4	原子力の柔軟性のためのモデリング技術	11
4	カナダ原子力研究所：カナダの過去の経験と原子力の柔軟性に関する将来の目標	13
4.1	ハイブリッドエネルギーシステムの背景	13
4.2	住宅用給湯電化のケーススタディ	15
4.3	柔軟性を高めるための原子力プロセスと産業プロセスの結合	17
4.4	その他のイニシアチブ	18
5	アイダホ国立研究所：統合エネルギーシステムにおける複数の製品による原子力の柔軟性	20
5.1	モデリング及びシミュレーションツールセット	20
5.2	実験的ツールセット	23
5.3	ケーススタディ及びLWRデモンストレーションプロジェクト	28
5.3.1	APS	30
5.3.2	Energy Harbor/APS/Xcel	31
5.3.3	Exelon	32
5.4	今後の作業：高度な原子炉アプリケーション	33
6	経済産業省 資源エネルギー庁、日本原子力研究開発機構：日本の原子力イノベーションへの取り組み	34
6.1	原子力イノベーションの必要性和原子力×イノベーション推進イニシアチブの立ち上げ	34
6.2	JAEAにおける原子力の柔軟な利用のためのイノベーション	35
6.2.1	SFR及びその他の高度な原子炉用の革新的な設計評価コードシステムの開発	35
6.2.2	革新的な原子炉の保守のためのコードと基準	36
6.2.3	実験用高速炉常陽による高速中性子照射	36
6.2.4	HTGRのより高い安全性能の実証と水素製造への応用の可能性	37
7	マサチューセッツ工科大学（MIT）：蓄熱とベースロード原子炉の結合	39
7.1	蓄熱システム	40
7.2	蓄熱技術	41
7.2.1	熔融塩	41
7.2.2	熱媒体油	42
7.2.3	砕石及びセメント	42
7.2.4	クラッディング処理した鉄	43
7.2.5	水素	44
8	米国国立再生可能エネルギー研究所：柔軟な運用、高いVRE、及び排出制限シナリオを備えた原子力	45
8.1	将来の米国電力システムのモデル化：地域エネルギー展開システム（ReEDS）モデル	45

8.2	原子力の柔軟性のReEDS分析：シナリオの説明	48
8.2.1	基本シナリオ	49
8.2.2	柔軟な原子力、高いVRE浸透、及び排出制限	50
8.3	結果	52
8.4	考察	54
9	東京工業大学：低炭素世界における原子力の将来に関するMIT-Japan共同研究からわかる柔軟性に関する知見	56
10	英国原子力イノベーション研究室：柔軟な原子力の経験とネットゼロへの道	59
10.1	英国の柔軟な原子力	61
10.1.1	原子力発電所の地元の主要なエネルギーユーザー	62
10.1.2	エネルギー貯蔵システム	62
10.1.3	地域熱供給	63
10.2	歴史的教訓	63
10.3	将来のネットゼロエネルギーシステムのモデル化	63
10.3.1	CCCレポート	64
10.3.2	Energy Systems Catapult	64
10.4	英国における原子力の未来	66
11	フランス電力（EDF）：電力システムの柔軟性に対する仏原子力の貢献	68
11.1	仏国で既に利用されている原子力の柔軟性	68
11.2	仏国原子力計画の成功を反映した今日の柔軟性	69
11.3	変動する再生可能エネルギーと柔軟な原子力の相補性は、脱炭素発電の柱	70
11.4	仏国で柔軟な原子力を可能にしたイノベーションは広く（海外でも）同様に実施可能	72
12	Exelon: Exelon Generationにおける原子力サイクル	73
13	第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（GIF）：次世代原子力システムの導入	75
13.1	経済的観点からの第4世代システムの柔軟性	76
13.2	第4世代システムの柔軟性の技術的性能	77
13.2.1	運転柔軟性	77
13.2.2	展開柔軟性	78
13.2.3	生産柔軟性	78
14	Energy for Humanity（NGO）：電力及び燃料部門におけるエネルギー転換のリスクを軽減するための原子力の拡大された役割のための経済的要件	79
14.1	電力網に対する原子力の価値の向上：柔軟な先進原子力発電所の設計と資本コストの目標	79
14.2	原子力は、排出物のない水素生産に最適である	83
14.2.1	合成燃料の原料としての水素の目標コスト	84
14.2.2	電力、水素、及び燃料の低コスト化及び大規模展開のための変革的原子力プロジェクト提供モデル	86
15	国際原子力機関（IAEA）：柔軟な原子力及び発電に関する加盟国の経験	92
15.1	既存及び将来の電力システムにおける原子力発電所の柔軟性	92
15.1.1	現在の原子炉の負荷追従の技術的側面	95
15.1.2	負荷追従が燃料性能に与える影響	96
15.1.3	柔軟な運用の経済的研究	97
15.1.4	柔軟な運用のコスト関連の影響	99
15.1.5	現在及び将来の補助市場における原子力	100
15.2	高度な原子力システムと非電気アプリケーション	100
15.2.1	高度な原子炉の柔軟性：SMR及び第4世代原子炉	100
15.2.2	生産柔軟性：原子力の非電氣的応用	102
16	国際エネルギー機関（IEA）：柔軟性の新しいフロンティアを探る	104
16.1	電力システムの柔軟性要件は大幅に増加する	104

16.2 柔軟性オプションの多様なポートフォリオが必要になる	106
17 経済協力開発機構原子力局（OECD/NEA）：将来のエネルギーシステムの柔軟性要件に向けた原子力の役割.....	108
17.1 将来のエネルギー市場における高度な原子炉システムの柔軟性属性	109
17.2 将来のエネルギーシステムにおける原子力の柔軟な運用の役割と価値に関するNEAシステム分析研究からの洞察	111
18 結論.....	115
19 柔軟な原子力の将来への展望.....	118
19.1 ヨルダン	118
19.2 ケニア	120
19.3 原子力産業のリーダー	122
参考文献.....	124

図のリスト

図1. 燃料源によるERCOTの発電2007年7月1日	5
図2. 燃料源によるカリフォルニア独立システムオペレーター (CAISO) の発電2020年5月1日 ...	5
図3. 電力システムの発電源とそれぞれの運用タイムスケール (すべてのMWはMWe単位)	7
図4. CAISOの負荷データに示されているタイムスケールで分類されたエネルギーサービス	7
図5. 原子力の柔軟性のための相互接続メカニズム	10
図6. ハイブリッドエネルギーシステム最適化モデルの入力	15
図7. 給湯器の電化によるGHG排出量の削減	16
図8. 電化レベル (発電) に基づくソース別のオンタリオ発電	16
図9. ハイブリッドCu-Cl熱化学水素製造	17
図10. 確率論的技術経済分析ワークフロー	22
図11. INL動的エネルギー輸送及び統合研究所のシステム構成: (a) すべてのコンポーネント の全体的な計画構成。 (b) 主要な実験施設のレンダリング。 熱エネルギー配電シ ステム (TEDS) とMAGNET施設は現在建設中である。	25
図12. INL TEDSの簡略化されたシステム構成。以下を示している。 (a) 流路。 (b) ハードウ ェアコンポーネントのレンダリング。 TEDSハードウェアは現在インストールされ ており、2020年に運用可能になる。	27
図13. SPECTRAに統合される物理モデル	36
図14. 変動する熱、電気、及び水素を提供するための蓄熱を備えたベースロード原子力、風力、 及び太陽光	40
図15. 砕石床のホットオイルによる連続加熱	43
図16. バランシングエリアのある米国のReEDSマップ	47
図17. 表4及び表6の所定のシナリオに基づいて、2050年にReEDSで計算された原子力発電容量	54
図18. 脱炭素化に関するMITの研究によって予測されたさまざまな技術ポートフォリオによる脱 炭素化のコスト	57
図19. 電気と水素の生産、熱と電気の貯蔵、化学処理を可能にするハイブリッドエネルギーシ ステムのエネルギーフロー	57
図20. CCCレポートの重要なメッセージ	60
図21. 民間原子力の柔軟な可能性	61
図22. 燃料源による英国の電気出力	62
図23. 2050年の最小コストの発電構成のEnergy Systems Catapult時計仕掛け予測	65
図24. 2050年の最小コストの発電構成のEnergy Systems Catapultパッチワーク予測	66
図25. Golfech原子力発電所2号機 (130万kW) における1日の出力変動の例	68
図26. 2019年におけるEDF原子力の「最大可能出力」及び「技術的な最小出力」	69
図27. 仏国の原子力発電所	70
図28. 2020年3月27~29日の間に記録された電源構成の変化	71
図29. 原子炉設計の四世代	76
図30. PJMのインストール容量	82
図31. PJMの生成	83
図32. 2018~2030年の水素製造コスト	85
図33. 水素製造コスト2030~2050年	87
図34. 水素、アンモニアの製造及び脱塩を行う施設を備えた浮体式生産貯蔵施設	88
図35. 2018~2030年のHydrogen Gigafactory	89
図36. 2018~2030年の水素製造コスト	90
図37. 50%VREシェアでの電力需要と残余需要	93

図38. さまざまなVREシェアでの残留負荷持続曲線、実例.....	94
図39. 柔軟な運用の経済的インターフェイス：すべてのレベルでの影響、価値、インセンティブ、規制	98
図40. 風力のみとのシステムと比較した仮想発電所からの電気的変動の低減.....	102
図41. 選択した地域とシナリオによる電力需要と柔軟性のニーズの増加、2018～ 2040年	105
図42. 規定されたポリシーシナリオにおける地域別の柔軟性のソース.....	106
図43. 産業用途及び原子炉機能によるプロセス温度範囲.....	112
図44. 1kWhあたり50gCO ₂ の低炭素電力システムのコストを調査するための8つのシナリオ...	113
図45. VREのさまざまなシェアでの容量構成.....	114
図46. 原子力発電所からの予測される発電パターン	114
図47. 発電における一次エネルギーソースと再生可能エネルギーソースの貢献.....	119
図48. 2019年技術シェア別の設備容量.....	121
図49. 2014年から2019年に購入されたエネルギーGWh.....	121

表のリスト

表1. 米国のLWR（現在の発電所群）IESケーススタディの概要.....	29
表2. 水素製造技術のエネルギー要件の内訳.....	30
表3. ReEDSの標準シナリオ シナリオ中期の2050年の原子力発電容量 (Cole 他。2019年).....	48
表4. 米国内で80年の原発寿命を持つ原子力のさまざまな資本支出（CapEx）.....	50
表5. ReEDS分析で使用される選択された基本及び低VREの夜間資本コスト（NREL 2019年a）	51
表6. シナリオの要約.....	52
表7. 原子力及び再生可能エネルギーの容量、発電量、割合、及びコストに関する2050年の 結果.....	53
表8. サンプルランピングシナリオの要約.....	73
表9. 独立したシステムオペレーター及びシナリオによる最大許容設備投資（ドル/kW）.....	81
表10. ISO-NE、PJM、MISO、及びCAISOの年間平均市場価格.....	81
表11. グリッドの発生に応じた柔軟性に関する基本的な考慮事項.....	96
表12. IAEA調査における2050年の最大一時予算と要求された柔軟性（欧州連合平均）.....	99
表13. ソース及びシナリオ別の世界の発電量（テラワット時）.....	104
表14. 他のディスパッチ可能技術と比較した既存の原子炉の負荷追従能力(Source: NEA, 2012).....	109
表15. ベースロード電力を超えて：明日の原子力エネルギーシステムの新しい柔軟性属性 (Source: NEA based on EPRI framework).....	110
表16. ヨルダンの主要なエネルギー指標.....	119
表17. ケニアの主要なエネルギー指標.....	120

18 結論

NICE Futureイニシアチブと柔軟な原子力キャンペーンの主目的は、原子力のエネルギー供給システムとしての柔軟性に関する国際的な知見・経験を蓄積し、この経験をより広いコミュニティと共有することである。コラボレーションを通じて、さまざまな低排出エネルギー源の大きな可能性を現実のものにすることができる。キャンペーンはまた、原子力エネルギーの柔軟性を、広範に使用していくことに対する障壁を克服していくことを呼びかけている。このレポート全体を通して、研究機関、エネルギー業界、及び国際機関は、柔軟な原子力エネルギーに関連する経験と研究結果を共有できた。この一連の作業から、引き出された結論は以下のようになる。

原子力は再生可能エネルギーと調和して機能し、クリーンなエネルギー源の使用を拡大することができる。 電力システムにおける変動性再生可能エネルギー（VRE）の割合が増加するにつれて、原子力エネルギーの柔軟性は、風力及び太陽光エネルギーのようなVRE生成において生じる気象由来の影響を補完する方法としてしばしば言及される。本レポートの各章では、柔軟な特性をもつ原子力エネルギーが、電力システムにおける風力と太陽光エネルギーの更なる活用寄予できることを示した。原子力エネルギーはまた、他のクリーンエネルギー源が利用できない、あるいは季節的にしか利用できない可能性がある地域で、水力発電と同様に、信頼できるクリーンエネルギー源となりえる。さらに、運輸や非電力産業界などの他のエネルギー部門においては、原子力によって生成された水素を使用することで温室効果ガス排出量を削減できる。このレポートに示されているように、原子力の導入を選択した国は、他のクリーンエネルギー源の活用可能性をも高めることができている。

今日、原子力エネルギーの柔軟な運用は既に行われており、イノベーションによって、この原子力の柔軟性をより多くの形態で使用していくことができる。これまでの運転経験が示すように、一部の原子力発電所は、季節的なあるいは日々の需要の変動に対応するために柔軟に運転することができ、実際に運転している。多くの研究プログラムは、クリーンなエネルギーの使用機会をより増加するために、原子力が運用方法と非電力エネルギー生産の両方の分野において、柔軟性を提供する機会を検討している。現在稼働中の原子力発電所と今後建設される原子力発電所の両者が、原子力の将来の柔軟性において、果たすべき大きな役割を担っている。

複数のエネルギー生産プロセスを、原子力システムに接続する統合エネルギーシステムは、原子力の柔軟性とシステム価値向上の観点から、新しい機会を作り出す。 原子力は、他の多くのエネルギー源と比較して、これまで資本集約的な投資であった。また、原子力システムは、稼働期間を通じて非常に高い設備利用率で信頼性が高く、手頃な価格で、再生可能エネルギー同様の低排出エネルギーを生産することにより、プラント所有者と社会の両方により多くの価値を提供してきた。商用原子炉は主に発電用途で使用されてきたが、それ以外にも、原子炉からの熱エネルギーと電気エネルギーの両者を利用できる実証済みの革新的な応用利用手段も数多く存在している。原子力システムが生成した熱及び電気エネルギーは、社会にとって価値のある一次又は二次製品を生産するために使用できる。統合エネルギーシステムは、非電力製品の生産を、原子力システムに結合したシステムの中で行うことにより、全体的な運用効率を高め、原子力が電力だけでなく複数のエネルギー需要に対応する機会を増やすことを目指している。これらの技術は、原子力をより効果的かつ効率的に活用していく可能性を秘めているため、収益源と関連する設備投資を最大化することができる。

原子力システムは、確立された国際的な知識・経験に基づいて、安全かつ柔軟に運用することができる。柔軟な原子力運用のより広範な適用を促進するために、原子力コミュニティは、研究機関と業界の経験に基づいて柔軟な運用が安全であることの実証を推進することができる。これまでの経験と柔軟な原子力システムに関する今後の研究は、原子力発電所の柔軟な運転をサポートするための国家レベルのライセンスフレームワークに変換することができる。国際機関や各国政府は、すでにこのように原子力システムを運用している国々との協力を通じて、原子力システムの柔軟な運用に関する安全性を実証し、規制当局に伝えることができる。

この研究は柔軟性に関する技術のギャップを埋めているが、既存の研究、開発、実証プログラム、及びエネルギー計画プロセスに原子力の柔軟性をさらに組み込んでいくためには、今後も多くの活動を行う必要がある。本レポートに寄稿している組織は、原子力安全、システム効率・経済性、信頼性、持続可能性、及び核拡散抵抗のトピックに関し、世界的に著名な研究に従事してきた。柔軟性は原子力システムにとってますます価値のある資産になりつつあるため、幅広いエネルギー需要に対応し、社会に利益をもたらすために、これらのシステムにさらなる柔軟性を確保し、さらに多くの価値を生み出すことができるであろう。材料科学、原子炉物理学、及び熱流体力学といった分野は、原子力の柔軟性の概念を研究に組み込むことでより多くの価値を生み出すであろう。同じことが、エネルギー計画、モデリング、及び分析の分野にも当てはまる。

費用対効果の高いエネルギー貯蔵技術は、すべての発電技術、特に原子力発電技術に利益をもたらす。エネルギー供給源の出力を低下させ、グリッド全体のバランスをとるために、それぞれのエネルギー供給源は、複数のオプションを所持している。地熱発電では出力を徐々に低下させる（ランプダウン）ことができ、太陽光発電では電子制御システムによって低下させることができ、原子力発電では炉心熱出力を低下させることができる。原子力システムのように資本コストが高く運用コストが低い技術の場合、エネルギー貯蔵を行うことにより、発電能力のすべてを利用し、原子力システムに結合された貯蔵システムを柔軟性のソースとして使用することが有効である。発電設備をフル稼働することで、均等化発電原価が下がり、エネルギーシステムの効率も向上する。エネルギーサービスのタイムスケールが異なれば、必要な貯蔵技術も異なる。電気化学式電池は数秒から数時間のオーダーで経済的であり、熱エネルギー貯蔵は数時間から数日のオーダーで経済的となり、化学貯蔵（水素など）は数日から数ヶ月のオーダーで経済的である可能性が高い。もちろん、すべてのエネルギー貯蔵システムは、エネルギー生成技術がより優れた柔軟性と効率を発揮する機会を提供している。NICE Futureイニシアチブは、エネルギー貯蔵がすべての発電技術に利益をもたらすことを認識し、エネルギー貯蔵に関して他のCEMワークストリームと提携することを期待している。

適正な柔軟性は、使用しているエネルギーシステム、国情、又は経済システムに依存する。そのため、最適な柔軟性は、各々のシステムや国情に基づき再検討される必要がある。原子力の柔軟性に関する分析結果は、国情や地域性に合わせて調整する必要がある。このレポートに要約されている内容は、多くの国や国際機関からの視点と経験が含まれている。使用している技術、経済システム、及びパブリックアクセプタンスの観点から、各国は国情に応じた価値観や懸念因子を所有している。したがって、世界中のどこでも適用可能な普遍的な柔軟性の価値評価手法は存在しない。しかしながら、これらの分析から得られる教訓・知見は、どのようなエネルギーシステムにも適用又は転用することができる。このレポートは、各国が自国の経済システムにおいて原子力の柔軟性がもたらす価値を理解するために、分析結果、方法論、及び経験を提供している。他の人たちがクリーンエネルギーへの移行を検討する際に使用できる、幅広い技術的及び経済的知識を提供している。

19.3 原子力産業界のリーダー

執筆： *Maria Korsnick*（原子力エネルギー協会、社長兼最高経営責任者） *Agneta Rising*（世界原子力協会、事務局長） *Tim Stone*（英国原子力産業協会、会長） *John Gorman*（カナダ原子力協会、社長兼最高経営責任者） 新井史朗（日本原子力産業協会、会長）

人類は2つの矛盾した緊急性のあるニーズに直面している。

まず、より多くのエネルギーに対するニーズが挙げられる。何億もの人々が貧困から抜け出し、食糧の冷蔵と調理、きれいな水、冷暖房、照明、通信と輸送を行うためのエネルギーである。米国エネルギー情報局は、2050年までに世界の電力需要が50%近く増加すると予測している。他の見積もりでは、さらに大幅な増加を見込んでいる。

また、温室効果ガス排出量を削減する必要がある。2050年までに、気候変動に関する政府間パネルは、電力分野からの二酸化炭素排出量をゼロ近くまで減少させる必要があると述べている。これにより、気候変動に対する最悪の結果を防ぐことができる。これは、空気をよりきれいにし、1億5000万人以上の人々を避難させる可能性がある海面の上昇を防ぎ、家、農場、工場を建設したときに基準にしてきた状態に近い降雨、暑さ、寒さのレベルを維持することであり、地球を共有しているすべての生物が依存している生活環境を維持することである。

これらのニーズをどのように調整していけばよいのか？ エネルギーシステムからの排出量を削減する方法を見つけ出す必要がある。私たちは、健康、安全、通信など非常に多くの重要な用途のために電気を使用している。このことは、風力や太陽光のような炭素フリー可変エネルギー資源の増加を、原子力を使った炭素フリーであり供給制御可能な電力で補完することによって、システムの信頼性を確保することを意味している。原子力は、このニーズを満たすことができる唯一の大規模展開が可能で炭素排出が最小の電力源である。

私たちの多くは、この方程式を解く上で原子力の不可欠な役割を認識している。しかし、我々の抱えている課題はもはや遠い将来の課題ではないため、私たちは今行動する必要がある。飢餓、喉の渇き、そして病気は、それらに直面している人々にとって抽象的な問題ではなく、干ばつ、熱波、寒波、そしてより激しい嵐は、私たちが無視できる状況ではない。実際、新世紀の5分の1はすでに過ぎ去っており、科学的コンセンサスは、気候変動のさらに悪い影響を回避するために、今世紀半ばに目標を達成するために行動を早急にする必要があることを示している。

これらの課題には、エネルギー利用に関する根本的な再考が必要である。商用エネルギーシステムが始まって以来、これらは最小コストのソリューションを中心に編成されてきた。しかし、世界がより複雑になり、76億人の人々の健康と繁栄がより相互に関連するようになるにつれて、より多くの考慮事項が存在するようになった。これは、ゼロカーボン技術をシステムに統合する方法だけでなく、市場がこれらのゼロカーボン発電エネルギーをどのように補完・統合していくかについても取り組む必要があることを意味している。

膨大な量の新しいゼロ排出エネルギー手段を統合していく必要がある。化石燃料を燃焼させることは簡単なエネルギー確保手段であったが、きれいな空気と安定した気候のために新しいエネルギー確保手段が必要である。

そしてその一部として、より多くの原子力エネルギーの使用が該当する。IEAによると、そのために、既存の原子力発電所の多くを維持し、さらに新しい原子力発電所を、従来の形式や革新的な形式など、さまざまな形で建設していく必要がある。

人間の創意工夫により、太陽、風、流れ落ちる水、そして元素の力である原子力を利用することで、私たちの問題を解決することができる。これらすべてのものが問題解決に対し必要になっている。

新井史朗
日本原子力産業協会
会長

John Gorman
カナダ原子力協会
社長兼最高経営責任者

Maria Korsnick
原子力エネルギー協会 (NEI)
社長兼最高経営責任

Agneta Rising
世界原子力協会 (WNA)
事務局長

Tim Stone
英国原子力産業協会
会長