

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



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](http://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](http://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](http://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](http://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<sup>1</sup>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

---

<sup>1</sup> 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鋳鉄	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
<b>9</b>	<b>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</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>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</b>	<b>59</b>
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
<b>11</b>	<b>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</b>	<b>68</b>
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
<b>12</b>	<b>Exelon: Exelon Generationにおける原子力サイクル</b>	<b>73</b>
<b>13</b>	<b>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</b>	<b>75</b>
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
<b>14</b>	<b>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</b>	<b>79</b>
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
<b>15</b>	<b>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</b>	<b>92</b>
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
<b>16</b>	<b>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</b>	<b>104</b>
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
<b>17</b>	<b>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.....</b>	<b>108</b>
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
<b>18</b>	<b>結論.....</b>	<b>115</b>
<b>19</b>	<b>柔軟な原子力の将来への展望.....</b>	<b>118</b>
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 <sub>2</sub> 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

# 1 序論

電力、産業、運輸といった部門で、よりクリーンなエネルギーが必要とされている。これは、多くの地域、国、及び組織が設定したクリーンエネルギーに関する目標からも明らかになっている（Benahmed 及び Walter 2019年）。このクリーンエネルギーに関する目標を達成するには、排出物のない供給制御可能な電力源を含む、利用可能なすべてのクリーンエネルギー源を活用する必要がある。また、大規模なエネルギー貯蔵能力と送電性能の拡充も必要である。

このレポートの目的は、現在及び将来のクリーンエネルギーシステムにおける原子力エネルギーの潜在的な柔軟性に関する役割を検討することである。これらのシステムは、変動する再生可能エネルギー源からの増加する貢献に対応するために、本質的により大きな柔軟性を必要としている。このレポートは、世界中のさまざまな地域からの分析をまとめて、多様なクリーンエネルギーシステムにおける柔軟性の必要性と価値を明らかにする。この取り組みは、第8回エネルギー大臣会合（CEM）諸国に、柔軟な原子力システムの画期的な能力に関するさらなる研究の基盤を提供することを目的としている。このレポートの目的上、柔軟な原子力は次のように定義される。

*「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。」*

クリーンで持続可能性をもつエネルギーの未来を実現するために、エネルギーの生産、分配、使用の新しいパターンが出現している。原子力は、先進国における低排出電力への最大の貢献者であり、国際エネルギー機関（IEA）（IEA 2020年a）によって定義されているように、これらの国では2018年の総発電量の18%を占めている。クリーン発電への原子力の貢献は、CEM Nuclear Innovation : Clean Energy Future（NICE Future）イニシアチブの加盟国ではさらに重要である。しかし、世界の電力供給に占める原子力の割合は近年減少傾向にある。原子力発電所は老朽化しており、1970年代と1980年代に建設された多くのプラントは廃止され、新しい設備の設置は限定されている。

同時に、再生可能エネルギー技術は、過去10年間に世界中でかなりの数の発展をしてきた。この中には、風力や太陽光などの変動する再生可能エネルギー、及び水力や地熱資源などの供給制御（ディスパッチ）可能な再生可能エネルギーによって生産される電力の増加が含まれる。現在世界で建設中の60基を超える原子炉を含むすべてのクリーンエネルギー源の拡大にもかかわらず（IEA 2020年a）、また電力部門における排出量が減少しているにもかかわらず（IEA 2020年b）、世界の排出量は2019年に横ばいとなっている。これは、電力部門におけるクリーンエネルギーの割合を増加し、原子力、風力、太陽光などの技術を革新し、電力以外のエネルギーサービスを提供するなどのことを行う必要があることを示唆している。

電力源の多様化に伴い、柔軟性は信頼性の高い電力システムにとって重要な特性になりつつある。また、非電力エネルギーへのニーズに対応する意味でも必要性を増加させてきている。柔軟性は、電力供給側と使用側の両方でさまざまな形で必要性を増している。電力供給側では、柔軟性の観点から、需要を満たすために電力供給量を制御する必要がある。理論的には、エネルギーは、後で使用するために保存することもでき、必要な時間と電力需要に応じて、熱エネルギー、電気エネルギー、化学エネルギーなどの代替製品を生産するために使用することもできる。電力使用側では、需要予測や把握に基づき、可能な場合は需要をシフトし、それによってピーク電力使用量を減らし、電力変化率を下げ、グリッドへの要求を限定することができる。

CEM NICE Futureイニシアチブの柔軟な原子力キャンペーンは、経済全体の柔軟性に対するニーズに基づき、電気プロダクトと非電気プロダクトの両方を供給するために必要となる原子力の柔軟性に対し、必要となる潜在的な役割に焦点を当てている。

原子力から多大な貢献を受けている国では、原子力発電所は、季節に応じた、あるいは週、日ベースの需要の変化に基づき、電力の需給のバランスをとるために、時折電気出力を減らすように求められることがある。たとえば、フランスの原子力発電所は、原子力発電のかかなりの部分（現在は約70%であるが、前の年にはそれ以上の割合を占める）において、すでに十年以上の柔軟な運転経験がある（IEA 2019年c）。このように原子力は広く浸透しているが、需要の減少に応じて、時にはプラントの出力を減らす能力がある。

米国のコロンビア発電所やカナダのオンタリオ州のBruce原子力発電所など、水力発電が盛んな地域で稼働している原子力発電所は、春に水力発電所からの発電量が増えるため、季節的に電力供給量を低下させる。この運用経験は次世代システムの設計者には役に立つが、再生可能エネルギーの変動性としては、異なる動的応答性を持っている注意することが必要である（例えば、応答周波数と必要な変化幅が異なる場合がある）。



## 2 目的と構成

このレポートは、エネルギーシステムの柔軟性に着目し、柔軟性が原子力にどのように適用されるかについて、本技術固有の課題に焦点を当てている。また本レポートは、原子力発電所の柔軟な運用方法における、これまでの経験例を提供している。柔軟な原子力の運用方法に関する物理的または経済的なモデル化にも、NICE Futureイニシアチブの参加国及びパートナーによって実施されている研究にも焦点を当てている。将来を見据えて、このレポートには、採用したときに、将来的に柔軟なエネルギー源としての原子力の価値を増加させうる方法も示している。特に、原子力に変革をもたらす可能性のある新しい収入源を提案している。このレポートは、私たちに協力してくれた著名な専門家の貢献によって発表された、国際協力を拡大する潜在的な機会を提供している。様々な貢献者がクリーンエネルギーシステムにグローバルに貢献し、原子力と再生可能エネルギーがより調和して機能する可能性を高めることができる、柔軟な原子力エネルギーの実現に役立つ、具体的なアイデアを教えてくれる。これら貢献者が示唆しているように、原子力と再生可能エネルギーは相互に調和することができ、これら2つのコミュニティはお互いの技術的アプローチと経験からともに学ぶことができる。

柔軟な原子力キャンペーンの目的は、世界的に起こっている原子力イノベーションを最大化する機会を検討することである。このレポートは、電力システム全体、特に原子力システムの柔軟性に関する背景情報を提供することから始まっている。以降の章には、外部組織より、つまりNICE Futureイニシアチブのパートナーからの視点、経験、分析に関する紹介が行われている。

### 3 電力システムの柔軟性に関する背景

世界中のエネルギーシステムは、10年前には存在しなかった新しい運用上の制約に直面している。発展途上国が近代化するにつれて、世界のエネルギー需要はほぼ2倍になると予想されており、同時に各国は排出量の削減にも取り組んでいる（UNDP 2018年、IEA 2019年a）。過去10年間で、風力や太陽光などの新しい発電技術が、電力部門においてコスト競争力のある発電技術として浮上してきた。風力や太陽エネルギーなどのエネルギー源には燃料費はかからないが、さまざまな資源に基づいて生産されており、また出力をエンドユーザーの需要に一致させるためにグリッドとの統合性について考慮する必要がある。この章では、運用の柔軟性を高める電力システムの変動性について説明し、原子力システムの柔軟性に焦点を当てる。

#### 3.1 電力システムにおける柔軟性の傾向

電力部門で発生している大きな変化は、1つの発電源が最小システム需要を満たし、高速な応答性を提供する従来のベースロードモデルから、需要がエネルギー資源の多様な混合によって満たされる電力システムへのシフトである。この傾向は、将来の電力グリッドには、常に最小負荷を提供するベースロードオペレーターがほとんど含まれない可能性が高いことを示唆している。代わりに、「変動する」エネルギーと「供給制御可能な」エネルギーの組み合わせを使用し、需要を満たすことを示唆している（Chang 他 2017年）。このような組み合わせは、操作がより複雑になるが、最小コストの発電技術による電力エネルギーを最適に供給することにより、現在のシステムよりも信頼性が高く、手頃な価格になる可能性がある。図1は、テキサス州電気信頼性評議会（ERCOT）のデータと容量拡張モデルを使用して作成された図であり、グリッドがこれまでどのように運用されてきたかを示している。歴史的に、グリッドは、図1に示すように、電気を生産するために燃料を消費するベースロード事業者に依存してきた（たとえば、原子力や化石燃料）。この構成下で大規模な発電所に障害が発生すると、グリッドに障害が発生したり、より高コストの発電所を起動する必要性が生じたりする。最新のグリッドでは、図2に示すように、変動する再生可能エネルギー（VRE）が急速に導入されているため、需要に同期していない、より変動的な発電傾向を示している。この不一致により、一部のエネルギー源は出力を低下させなければならない。市場構造に応じて、これはエネルギーを提供中のVRE、あるいは出力降下が可能な原子炉などのより伝統的な発電システムのいずれかになる。（Dolley 2018年）。いずれの場合も、発電能力が無駄になり、システム全体のコストが増加する。図2は、このことを示している。

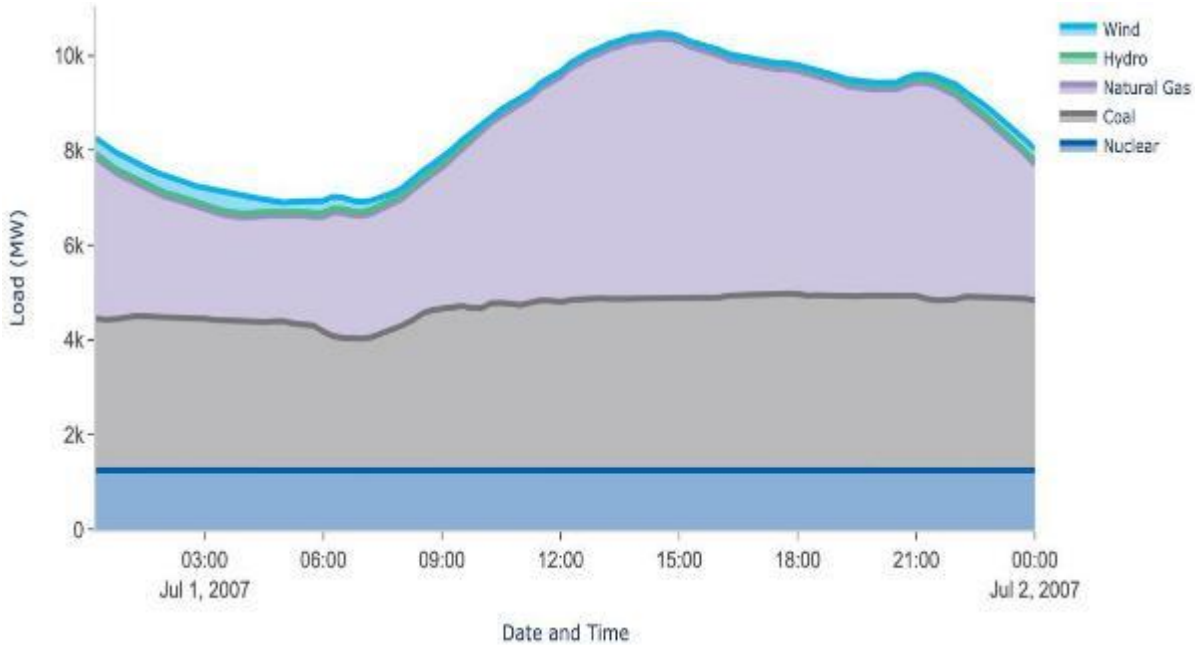


図1. 燃料種類別の発電割合（ERCOT）2007年7月1日

Source: (ERCOT 2020)

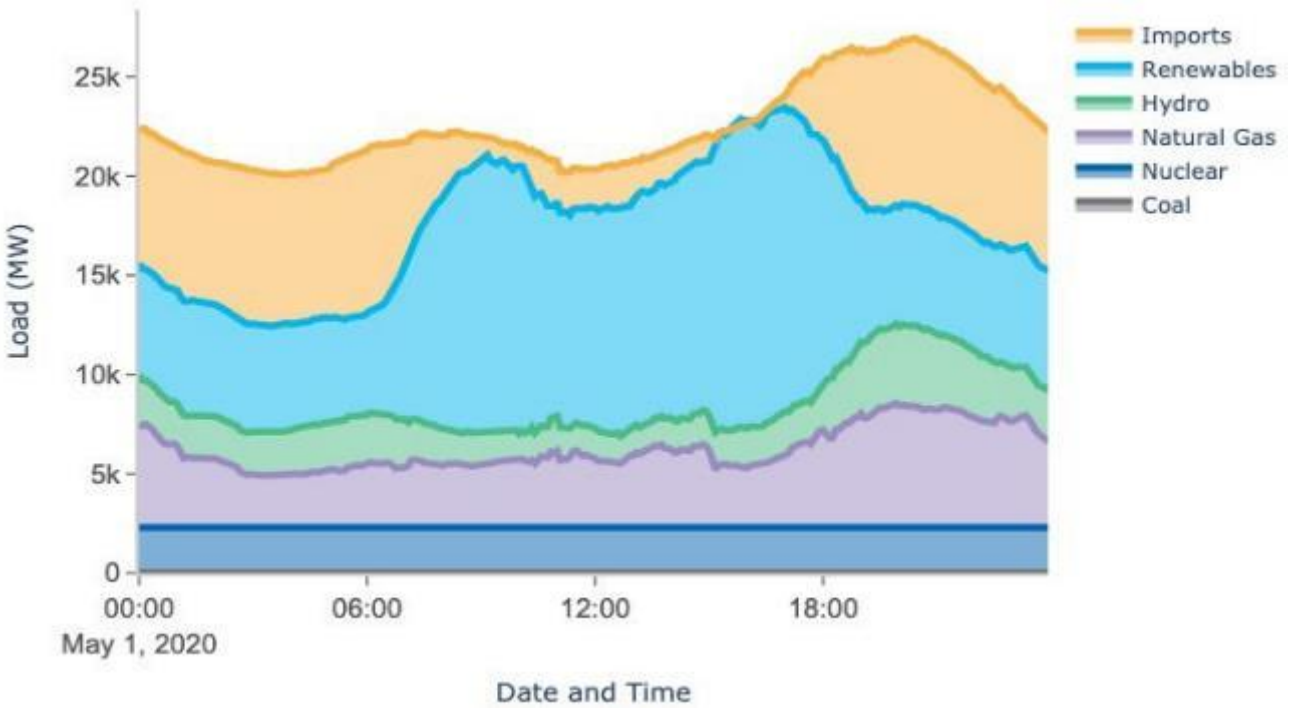


図2. 燃料種類別の発電割合（カリフォルニア独立システムオペレーター：CAISO）2020年5月1日

Source: (“FERC: Documents & Filing - Forms - Form 714 - Annual Electric Balancing Authority Area and Planning Area Report - Data Downloads” n.d.)

### 3.1.1 非電気エネルギーサービス

将来の電力グリッドには、柔軟な発電システムを組み込むと同時に、経済性をもったエネルギーサービスとして、電力システムの効率と信頼性を提供することが期待されている（Bragg-Sitton 他 2016年）。この将来シナリオは、図2に示すグリッド以上の革新性を持つ必要がある。信頼性の高い電力、より多くの再生可能エネルギーの使用、原子力などの供給制御可能な電力エネルギーに発生する経済的補償を両立させるために、非電力プロダクトを考慮していく必要がある。

今日、再生可能エネルギー（バイオマス、地熱、太陽熱などの技術を除く）と原子力発電技術によって生産されるエネルギーの大部分は電力に変換される。電力と非電力の両方の分野で、より柔軟なエネルギーシステムへの移行は、すべてのエネルギー源に新しい価値を生み出す可能性を秘めている。電力は重要であるが、将来の原子力システムは、この低排出、高エネルギー密度の資源の可能性を最大限に発揮するために必要なときに、必要な場所で熱及び/又は電力エネルギーを柔軟に提供するように設計することができる。これは、原子力及び再生可能エネルギーのコミュニティが、従来の電力部門の枠組みを超えてエネルギーサービスを拡大するパートナーシップを構築するためのユニークな機会を生み出すであろう。

### 3.1.2 電力システムにおける柔軟性の要因

現在の電力システムは、一般的に以下の3種類のメカニズムによって柔軟性を実現している。

- 高速ランピングエネルギー発生源（物理的又は仮想）
- エネルギー負荷の柔軟性（デマンドレスポンスやエネルギー貯蔵など）
- エネルギーの輸出入に関する地理的な市場構造（Katz、Milligan、及びCochran 2015年）。

高速ランピング、負荷の柔軟性、及び地理的なエネルギー輸入は、複数のエネルギーシステム（天然ガス、配水、電気通信など）に適用されうる柔軟性の有用な例である。電力システムは、何十年にもわたって瞬時に必要な電力を供給するために柔軟性をしめしてきた。図3は、それぞれのタイムスケールにおいてマッピングされた変動電力エネルギーサービスを示している。熱及び化学電力システムにも類似した運用予備力と補助サービスのカテゴリがある（Denholm、Sun、及びMai 2019年）。

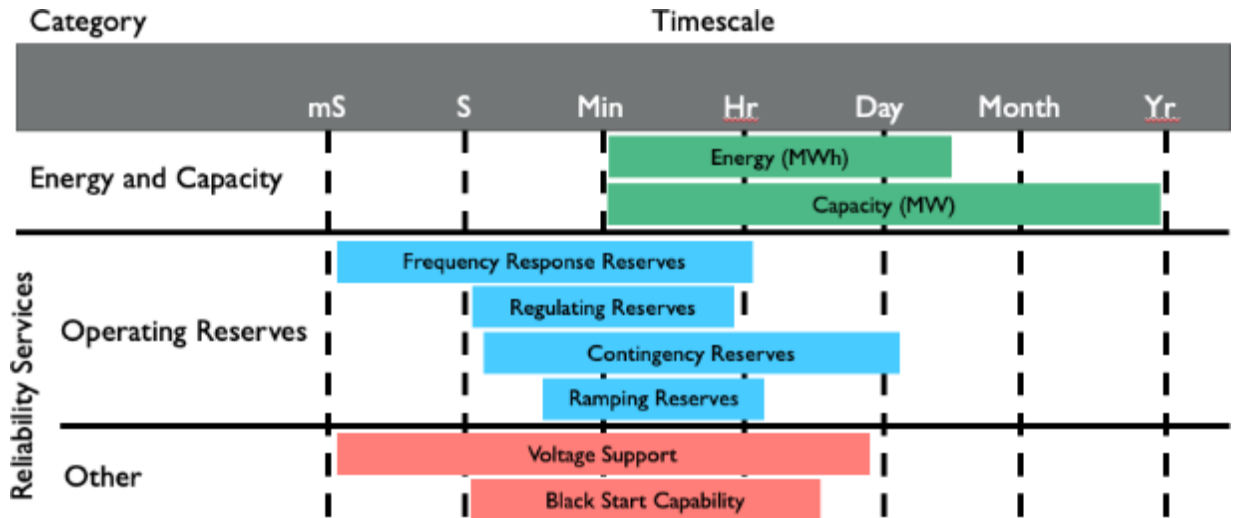


図3. 変動電力システムの種類と運用タイムスケール（すべてのMWはMWe単位）

Source: (Denholm, Sun, and Mai 2019)

図4は、図3に示されている情報を拡張したものである。一般的に、電力網は、前日の天気と電力負荷の予測に基づいて、12~24時間のタイムスケールで、低速ランピング電力ソースの日ベースでのスケジューリングを行っている。負荷追従型の電力源は、数分から数時間のオーダーで能力を発揮している。出力制御は、数秒から数分のオーダーで使用される（NREL 2011年）。

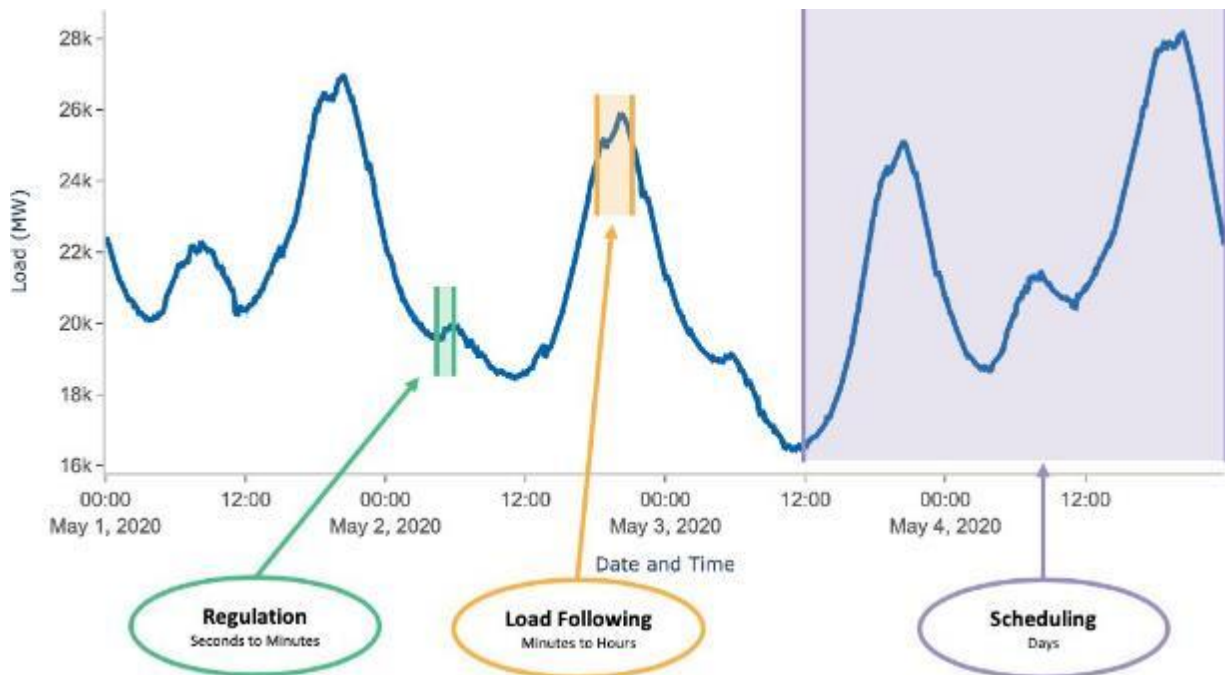


図4. CAISOの負荷データに示されているタイムスケールで分類されたエネルギーサービス

Source: (CAISO 2020; NREL 2011)



### 3.1.3 デマンドレスポンス及びエネルギー貯蔵

電力システムでは、ピーク負荷に対応できない場合、負荷制限や計画停電などの対策を講じる必要がある。このようなことが起こらないように、めったに需要がないケースに対しても、利用可能なインフラストラクチャ設備容量がピーク需要を超えている必要がある。電力会社は、デマンドレスポンスとエネルギー貯蔵の調査における先駆者である。これらのアプローチは、基本的にシステム需要を低減及び/又はシフトして、インフラストラクチャと発電設備容量への要求レベルを低下させる（O. Ma 他 2016年）。スペースの予冷や電気自動車の充電機能などのデマンドレスポンスの例を使用して、システム全体のピーク負荷を正常に低下させ、経済的及び運用上の価値を提供できる。多くの大規模な負荷エンドユーザーは、デマンドレスポンスに参加する可能性を有している。さまざまな形態（電気、熱、機械、化学など）で適用可能なエネルギーの貯蔵性は、供給をより高い負荷の時間からシフトする際に同様の役割を果たすことができる。

### 3.1.4 柔軟な運用における市場の地理的特性

発電システムの運用上の柔軟性とグリッド資産の活用（特に大規模プラントの場合）のために、地域間接続を備えた大規模な地域グリッドを持つ必要がある。相互接続により、地理的な多様性により、発生エネルギー量に影響を与える局地的な気象イベントの影響を最小限に抑えることができる。さらに、1時間ごとの電力市場から15分又は5分の電力市場に移行して電力市場の精度を高めることで、柔軟な資源を最も価値のある場所に向けることができる（Cui 他 2017年）。市場構造に由来する柔軟性は、基本的に柔軟な発電システムや需要応答性などと結びついているが、市場構造とエネルギー取引は、柔軟な資源を調達するために必要なメカニズムを提供する。米国では、Western Electricity Coordinating Council全体で相互接続性を増やすことの価値を評価するための調査が実施された。この研究は、送電容量の増加と主要なバランシングエリア当局間の協力により、特にVREの浸透を促進し、柔軟なエネルギー源のプロバイダーの価値を高めるために、電力網の柔軟な運用性が活用できることを示した（GE Energy 及びNREL 2010年）。

## 3.2 原子力システムの柔軟性

原子力発電所は基本的に熱エネルギー（熱）発電機であり、化石、太陽熱、地熱発電機と同様に、電力を生成するために電力変換システムを必要とする。現在、原子炉の炉心で核分裂反応を介して放出される熱エネルギーは、作動流体によって捕捉され、蒸気タービンに渡されて電気を生成する。高度な原子炉は、蒸気を含む多くの作動流体を使用するだけでなく、今日では一般的ではない。したがって、このレポートでの蒸気タービンへの将来の言及は、ヘリウムや熔融塩などの他の作動流体、及びガスタービンなどの他の電力変換システムにも適用される可能性がある。したがって、他の熱システムに柔軟性をもたらすバックエンドアプリケーションの多くは、原子力にも適用できる。原子力発電所の柔軟な運用への主要なアプローチには、制御操作によるコア電力の増加、タービンを通る流量の減少（蒸気ベント又は統合システムの代替ユーザーへのリダイレクトによる）、及び需要応答のオプションを提供するエネルギー貯蔵が含まれる。

### 3.2.1 炉心ランピング

核分裂を減らすことによって原子炉の熱出力を減らすことは、柔軟な原子力操作への一つのアプローチである。これは、制御棒の動きによって、又は中性子吸収に影響を与える炉心内のホウ素濃度の変更によって達成できる。従来の制御棒よりも少量の中性子吸収材を含むように特別に設計された制御棒の部分的な挿入は、1つのアプローチである。常に必要というわけではな

いが、これらの「灰色」の制御棒は、設計に含まれている場合、炉心の熱出力を低減するための標準的なアプローチである。これは、フランスのプラントで使用されている典型的なアプローチである（Jenkins 他 2018年、Ludwig 他 2010年、Morilhat 他 2019年）。フランスは、灰色の制御棒を使用した柔軟な原子力発電所の運転において最も広範な運用経験を持っている（詳細については第5章を参照）。

伝統的に、フランスの原子力発電所は、グリッド上での原子力発電の大部分のために柔軟に運用されており、季節、毎週、及び毎日の負荷の変化のためにプラントを出力上昇又は出力降下する必要がある。2010年以降、フランスは年間約1.8 GWの変動する再生可能エネルギー発電容量を追加し、変動する再生可能エネルギーと柔軟な原子力発電の出力を一致させることでグリッドの信頼性を維持することができた（Morilhat 他 2019年）。複数の研究により、現在の原子力発電所の柔軟な運用が、特定のタイムスケールで変動する再生可能エネルギー発電を補完できることが実証されている（Jenkins 他 2018年）。

非常に便利であるが、炉心ランピングには制限がある。物理学の観点から、炉心出力を減らすと、炉心出力の急速な周期的ランピングを制限する中性子吸収同位体が蓄積される。さらに、炉心出力を増減すると、燃料温度が急速に変化し、熱的及び機械的ストレスが発生してランピング速度が制限され、燃料の寿命が短くなる可能性がある（Jenkins 他 2018年）。経済的観点から、炉心ランピングは一般に補償されていない。つまり、原子炉はより少ないエネルギーを生成しているが、補償を受けずに同じ運用コストを負担している。したがって、原子力事業者は、すべてのエネルギー市場に参加するように経済的に動機付けられているわけではない。これは、原子力発電所が中央当局によって運用されているフランスなど、すべての管轄区域に当てはまるわけではないが、灰色の制御棒を通る炉心ランピングは、柔軟な原子力運用の終盤ではなく、最初のステップと見なされることがよくある。

### 3.2.2 統合エネルギーシステム

原子力発電所からの発電量を減らすための別のメカニズムは、蒸気が発電タービンに到達する前に蒸気を排出して、発電量を急速に降下させることである。可能であり、緊急事態で時折使用されるが、このランピングは不採算であり、タービンアセンブリの動作寿命が短くなる可能性があるため、広く実施されていない（IAEA 2018年a）。

統合エネルギーシステムは、この過剰な蒸気、熱エネルギー、及び/又は電気を結合された非グリッドアプリケーションにリダイレクトすることにより、原子力発電所の柔軟性に対するこのアプローチに価値を提供しようとする。グリッドの電力需要が低い場合、原子力発電所は、タービンアセンブリから結合されたプロセス（脱塩、水素製造、地域熱供給、産業施設など）にエネルギーを転用することができる。これらのプロセスのいくつかは、グリッド相互接続の背後にある原子力発電所によって直接提供される可能性のある電気入力も必要とする場合がある。予備分析によると、この技術はさまざまなシナリオで経済的に実行可能であり、単に電気出力を絞るために熱を浪費する代わりになる（Alameri 及び King 2013年、Garciaetal 2013年、M.F. Ruth 他 2014年）。蒸気バイパス操作と同様に、プラントの二次側に追加の変更を加えることなく可能な最大変化率とターンダウンを定義するときは、タービンアセンブリへの影響を考慮する必要がある。現在、原子力発電所の出力を熱負荷と結合するための相乗的アプローチを特定するための重要な研究が行われている（Boardman 他 2019年、Epiney 他 2019年、Frick、Talbot、他 2019年）。

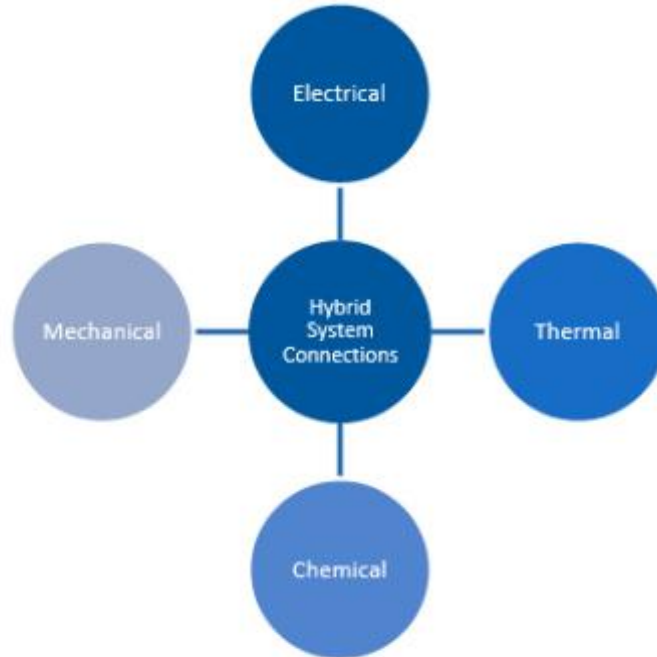


図5. 原子力の柔軟性のための相互接続メカニズム

Source: (Suman 2018)

### 3.2.3 デマンドレスポンス及びエネルギー貯蔵

デマンドレスポンスとエネルギー貯蔵は、時間の経過とともにエネルギー生産と需要をシフトさせる可能性がある。これらのアプローチは、グリッド規模で急速に展開されている。製造やエネルギー生成などの多くの大規模な運用では、重要なのは、これらのプロセスを「メーターの後ろ」<sup>2</sup>に移動することである。これは、電力会社の料金体系に、請求期間中の最大15分間の平均エネルギー需要又は他の同様の料金に基づいてコストを増加させる需要料金が含まれている場合に特に役立つ。これは、季節的及び日中の電力需要と価格設定に大きな変動があり、課題と機会の両方を生み出す管轄区域にも同様に当てはまる (Bassett, Rupp、及びTing 2018年)。原子力は大きな発電機であり、「家の負荷」も大きいいため、最大の経済的利益を得るために、電力生産と家の負荷をシフトするために、メーターの後ろにあるデマンドレスポンス又はエネルギー貯蔵を見つける機会がたくさんある。これは、バッテリーストレージが純粋なエネルギー調停のための経済的競争力をまだ達成していないにもかかわらず、フィンランドのグリッド及びメーターの後ろのリチウムイオンバッテリーストレージにとって経済的に価値があることが示された (Forsberg, Brick、及びHaratyk 2018年、McLaren, Gagnon、及びMullendore 2017年、Olkkonen 他 2018年)。電気エネルギー貯蔵には経済的な事例があるが、原子力発電が熱電発電機であるという事実は、この分野で最も有望な仕事の一部である熱エネ

<sup>2</sup>メーターの後ろは、エネルギーグリッドへの接続の背後に存在する、発電又は消費のいずれかの利点を指し、多くの場合、電力会社には「見えない」が、地域の回復力又は経済的価値を提供する利点を指す。従量制電力は多くの場合、顧客のコスト又は発電機の補償であるため、メーター利点の背後には、発電機の出力又は顧客の需要を最も有益なエネルギー価格に合わせるか、回復力サービスを提供するように設計されている。



ルギー貯蔵と組み合わせる方が経済的である可能性が高いことを意味する（Forsberg、Brick、及びHaratyk 2018年）、第7章でさらに説明する。

### 3.2.4 原子力の柔軟性のためのモデリング技術

柔軟な原子力エネルギーの使用に必要な前身は、グリッドへのメリットを実証及び定量化できる正確で詳細なモデリングである。これらのモデリング結果を主要な利害関係者に広めることは、政策に影響を与え、投資家や運営者に情報を提供し、使用の増加への道を開くことができる。このレポートの後半では、パートナー組織からの寄稿により、柔軟な原子力運用のモデリングの最先端を紹介している。このセクションでは、モデリング作業のさまざまなカテゴリについて説明する。

#### 3.2.4.1 物理ベースのモデリング

「プラントのバランス」モデルと呼ばれることもある原子力発電所の物理ベースのモデリングの目標は、電力が増減するときの原子力システムの動作を示すことである。これは、原子力発電所の安全な運転を確保し、原子炉の熱出力の変化が原子力発電所全体にどのように伝播するかを理解するために特に重要である。原子力発電所の物理学をモデル化するには、原子炉の物理学と熱流体油圧の両方を考慮する必要がある。大規模な原子力発電所と小型のモジュール式原子炉（SMR）の両方を含む、さまざまな原子炉システムのプラントのバランスをシミュレートするために、複数の研究が実施されている。設計とプラント構成に応じて、多くの研究では、SMRはサイズが小さく、モジュール式で動作するため、柔軟な出力の貴重なソースになることが多いことが示されている（Ingersoll 他 2015年、Q.Ma 他 2019年、Subki 2017年）。

#### 3.2.4.2 経済的派遣モデリング

運転経験は、原子炉が安全にランピングして電力システムの柔軟性を提供することが物理的に可能であることを明確に示しているが、柔軟な運転をサポートする経済的インセンティブがない場合がある。現在、多くの電力市場は柔軟な資源を補償していない。これらの電力市場は、より柔軟な電力網を構築するための最初のステップとして、そのような運用を奨励するために再構築される可能性がある（Varro 他 2019年）。経済モデリングの目的は、エネルギーシステム運用の経済的競争力を理解することであり、柔軟な原子力運用の経済的利益と、その開発を促進する可能性のある補償メカニズムへの洞察を提供する可能性がある。プラントには複数の評価メカニズムがあり、その一部には、正味現在価値、全体的な収益性、及び電力システムの場所の限界価格に対する柔軟な原子力発電の影響が含まれる。今日、これは主に電力市場に焦点を当てているが、この効果は火力及び化学発電システムにも当てはまる。分析結果は、仮定、展開地域、選択した技術などの変数に応じて変化する可能性があるが、多くの研究により、柔軟な原子力は経済的に競争力があることがわかっている。この発見は、原子力が高再生可能エネルギーの将来のシナリオで果たす重要な役割を持っていることを示唆している（Ingersoll 他 2015年、Jenkins 他 2018年、NEA 2019年）。

#### 3.2.4.3 原子力の柔軟性に関する大規模研究

個々のユニットの動作を評価するだけでなく、長期的なエネルギー計画に専念するモデリングとシミュレーションのブランチがある。エネルギー生成及び送電設備は、複数年の投資回収期間を伴う大規模な設備投資であるため、このタイプのモデリングは、数十年先のシナリオプランニングを提供しようとする。これらの研究は、物理学と経済学の両方のモデリングを利用

している。柔軟な単位操作の価値を捉えるには理想的ではないが、電力システムの信頼性のために柔軟なグリッド資源の特定の必要な容量を指定し（Brown 他 2020年b、EPRI 2020年a）、政府やグリッドオペレーターが柔軟な原子力の重要性を実証する上で重要な役割を果たす。

## 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

執筆： Gordon Burton、Megan Moore、Ali Siddiqui（カナダ 主要な原子力科学技術組織 Canadian Nuclear Laboratories）

Canadian Nuclear Laboratories (CNL) は、カナダの主要な原子力科学技術組織である。CNLには、Atomic Energy Canada Limitedが管理する連邦原子力科学技術作業計画を通じて連邦政府のニーズをサポートすると同時に、国内及び世界の両方で商業サービスを提供することを競うという二重の使命がある。CNLは、既存の原子炉（CANDU®及び軽水炉、LWR）及びSMR技術を含む将来の先進的な原子炉のために、原子力技術の平和的で革新的なアプリケーションを開発している。

CNLの長期計画と使命には、高度な原子炉設計/ SMRの商業的実行可能性を実証し、持続可能なエネルギーソリューションを世界に提供することが含まれる。例えば、原子炉の運転寿命の延長（例えば、改修）、水素エネルギー技術、そして明日の原子炉設計のための高度な燃料開発。この章では、次の研究分野について説明する。

- さまざまなクリーンテクノロジーを組み合わせ、それらのシステムに関連する経済的利益を評価するためのハイブリッドエネルギーシステムモデル
- 国の水素経済をサポートするためのクリーンエネルギーの代替手段を提供するためのクリーン水素技術（つまり、生産、貯蔵、安全性）
- 再生可能エネルギーやその他のクリーンテクノロジーとChalk River siteでのSMRの柔軟な運用との統合を実証するためのClean Energy Demonstration Innovation and Research park。

CNLが主導するこれらの研究分野は、CEM NICE Futureイニシアチブの柔軟な原子力キャンペーンをサポートしている。カナダ天然資源省は、原子力政策を担当するカナダの連邦部門であり、CEMでのカナダの関与を主導している。カナダ天然資源省（NRCan）は、CNLの科学的専門知識を利用して、カナダの参加を支援している。

### 4.1 ハイブリッドエネルギーシステムの背景

カナダでは、エネルギー環境が変化しており、多くの州が低炭素エネルギー源に移行する機会を生み出している。変更点は次のとおりである。

- 2050年までにネットゼロ排出量に向けたエネルギー生産に関連する温室効果ガス（GHG）排出量の削減を目標とする（Wilkinson 2019年）
- 2030年までに、先住民コミュニティがディーゼル燃料への依存からクリーンで再生可能で信頼性の高いエネルギーへと移行する（Trudeau 2019年）
- VREソースの浸透を高めながら、グリッドの信頼性を維持し、システムコストを最小限に抑えることに重点を置く

- 輸送や製造（例えば車両の電化）など、他の分野での画期的な変化から予想されるエネルギー需要の増加（“Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change” 2016年）。

将来のクリーンエネルギーシステムは、実行可能で持続可能であるために、すべてのクリーンエネルギー源を含む必要がある。原子炉からの従来のベースロード発電は、変動する再生可能技術（風力や太陽光など）の普及の増加によって必然的に影響を受ける。これにより、変動する再生可能技術からの生産を優先するために、原子炉の定格が低下する。ただし、原子力及び再生可能技術は、GHG排出技術よりも好まれる。このため、原子炉と変動する再生可能技術は、もはや互いに対立しているとは認識されていない。代わりに、各技術の独自の機能を活用して、信頼性が高く費用効果の高い「上記のすべて」のクリーンなソリューションを作成するエネルギーシステムが必要である。

2018年、CNLは、ハイブリッドエネルギーシステム最適化モデルを開発するために、カナダ原子力公社の連邦原子力科学技術作業計画に基づく研究プロジェクトを開始した。このモデルは、さまざまなエネルギーシステムのトレードオフと、費用対効果の高い低炭素エネルギーシステムに移行するために必要なものをよりよく理解するために、カナダ全土のさまざまな地域で、時間、季節、及び年次の時間枠でさまざまな需給源間の相互作用を研究するために開発された。ハイブリッドエネルギーシステム最適化モデルは、GHG目標排出量を満たす最低コストのエネルギーシステムを特定することを目的として、図6に示すように、さまざまな技術を組み合わせ、相互に補完する方法を強調している。

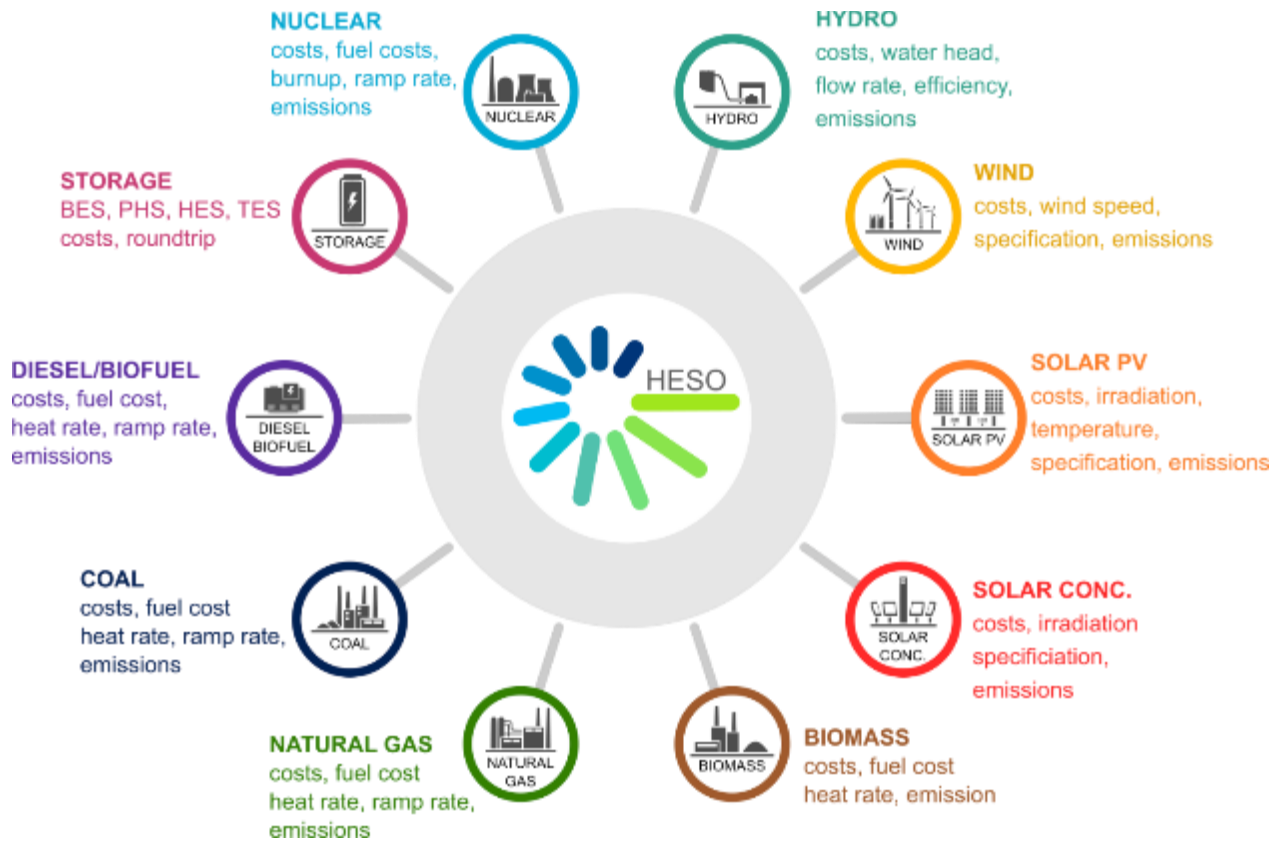


図6. ハイブリッドエネルギーシステム最適化モデルの入力

Source: CNL. Used with permissions.

2020年には、このモデルを使用して、住宅用給湯器の電化の影響を調査した事例を含め、多くの事例が評価された。

## 4.2 住宅用給湯電化のケーススタディ

カナダで水を加熱するための2つの主な方法は、電気又は化石燃料（最も一般的には天然ガス）である。特定の地域で化石燃料給湯器を電気給湯器に変換することの影響を理解するために、ケーススタディが実行された。原子力などの低炭素電源は、電化によって天然ガスに取って代わり、全体的な排出量を削減できると期待されている。

このシナリオでは、現在42 TWhをわずかに超える熱エネルギーが天然ガスによって水を加熱するために供給され、年間21メガトン（MT）をわずかに下回るGHGを排出していると想定した。電力網は現在135TWhの電力を生産し、2.65MTのGHGしか排出していない。化石燃料給湯器の一部が、25%の普及から100%の普及までの範囲で、電気温水器に変換されるいくつかの代替シナリオが研究された。

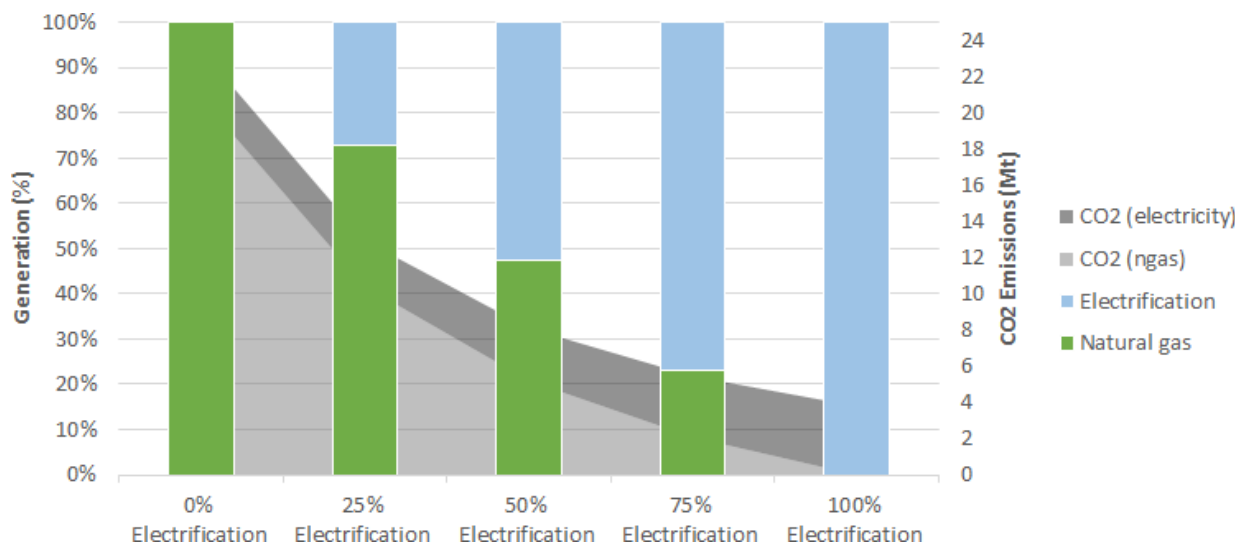


図7. 給湯器の電化によるGHG排出量の削減

Source: CNL. Used with permissions.

図7は、電化によって給湯器からのGHG排出量が大幅に減少し、発電からのGHG排出量がわずかに増加することを示している。これは、図8に示すように、電力コストを一定に保ちながら、風力、太陽光、従来の原子力発電所からの発電量を増やして同じ総発電量を維持すると同時に、天然ガスからの発電量を増やしてシステムの変動性の増大に対処することで達成された。高度な原子炉は、天然ガス発電を置き換えることによってGHG排出量をさらに削減し、風力と太陽光発電のより広い普及を可能にする可能性のある負荷追従機能が改善されることが期待される。

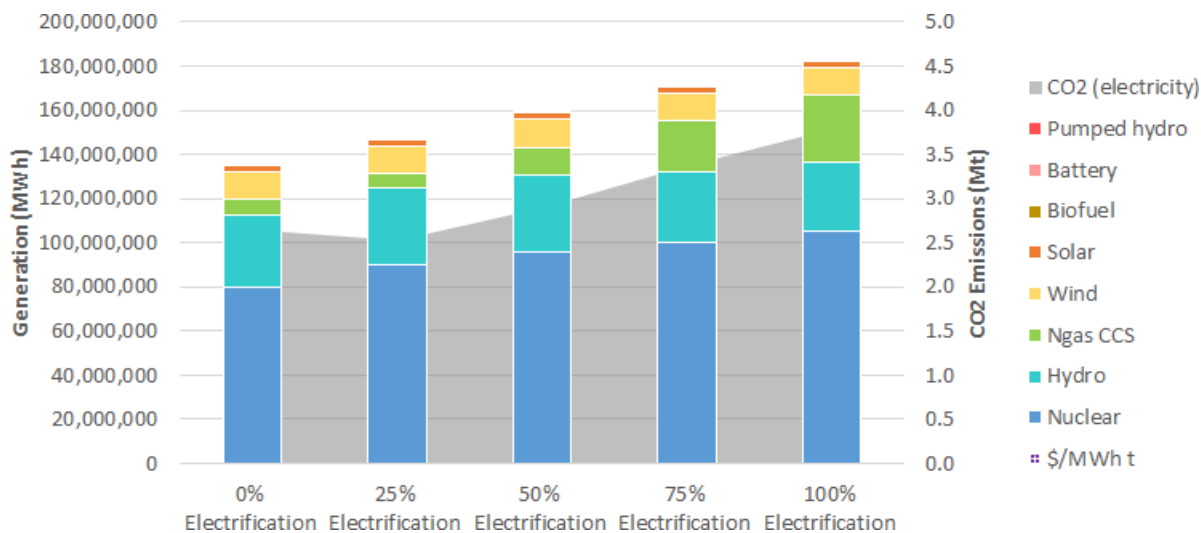


図8. 電化レベル（発電）に基づくソース別のオンタリオ発電

Source: CNL. Used with permissions.

有望ではあるが、電熱のコスト競争力を向上させるために追加の作業が必要である。化石燃料による直接熱と比較して往復効率が低く、北米には低価格の天然ガスが豊富にあるため、カナ

ダの多くの地域で電熱が法外に高価になっている。天然ガスの価格は低いままであるが、クリ



ーな水素などの代替製品がこの用途に適している可能性がある。

### 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

柔軟なエネルギーシステムにおける原子炉の最大の強みの1つは、熱と電気の両方を提供する能力である。歴史的に、ほとんどの原子炉はベースロード需要を満たすために発電に焦点を合わせてきた。電力需要がベースロードレベルを下回ると、発電量が減少し、その期間中に得られる収入も減少する。しかし、原子炉で発生する熱を利用することで、原子力はクリーンエネルギーシステムの一部として柔軟な運用を改善するいくつかの機会を可能にすると同時に、収益を増やすことができる。

柔軟な操作への1つのアプローチでは、原子炉からの高温熱を利用できる工業プロセス（水素製造など）に原子炉を結合する必要がある。蒸気の経路を変えることで、電力需要の変動に応じて製品間で運転を切り替えることができる。電力需要が高い場合、すべての蒸気はタービンセットを介して送られ、発電する。需要が少ない期間には、蒸気の一部（又はすべて）が工業プロセスに転用される。

生産の柔軟性をサポートするために、CNLは水素経済の側面に関する研究を進めており、水素の生産と貯蔵を明日の柔軟なエネルギーソリューションの一部として安全に使用できるようにしている。

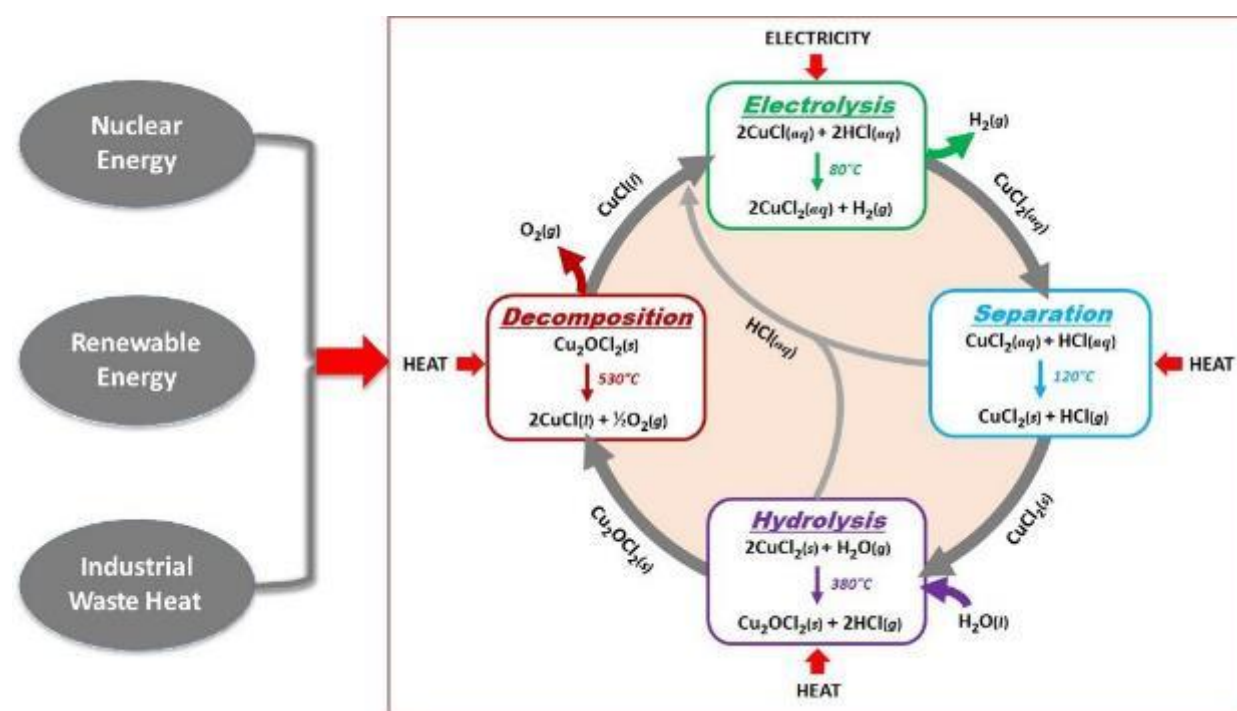
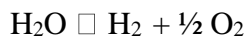


図9. ハイブリッドCu-Cl熱化学水素製造

Source: CNL. Used with permissions.

CNLは、重水生産、水素の安全性、トリチウム管理、そして最近では水素生産と燃料電池の研究において、CANDU産業に適用される水素研究の長い歴史を活用している。CNLは現在、完全な銅-塩素（Cu-Cl）プロセスを実証している。これは、熱と電気を使用してラボスケールで水素を生成するハイブリッド熱化学サイクルであり（図9を参照）、GHGを排出せずに大規模な水素製造に向けて進んでいる。熱化学サイクルは、熱エネルギーを直接使用するため、電気分

解よりも大規模で、潜在的に効率が高いという利点がある。Cu-Clサイクルは、3つの化学反応ステップ（電気分解、加水分解、分解）と補助的な物理プロセス（乾燥/結晶化による水分除去、種の分離、熱回収）で構成される。サイクルの全体的な反応は、水を水素と酸素に分解することである。



簡単に言うと、CuCl熱化学サイクルは、水、熱、電気を入力として使用して、水素と酸素を生成する。銅含有化合物はプロセス全体に循環し、消費されない。Cu-Clプロセスの魅力的な特徴は、他の熱化学サイクルと比較して、動作温度が低いことである（サイクルの最高温度は530°Cで、多くの第4世代技術との結合に適している。したがって、腐食の問題はより扱いやすい。Cu-Clプロセスの主な技術的課題は、いくつかのステップに関連する複雑な反応と、固体材料の移動の困難さ（特に高温で）に関連している。CNLは、これらの課題に対処し、プロセスを実験室規模からパイロット規模、そして最終的には工業生産規模にスケールアップするためのデータを生成する。

CNLはまた、金属合金、液体有機物、及び地下の水素の場所に水素を貯蔵する技術を開発している。CNLは、原子力部門のアプリケーションから得られた水素の安全性の専門知識を活用して、エネルギー貯蔵媒体及びより広い経済における燃料としての水素の安全な使用を促進するために、従来の水素の安全性アプリケーションの開発に貢献してきた。最近、CNLは、燃料電池を動力源とする旅客列車（鉄道（CH2M、EY、CNL 2018）など）に必要な水素システムネットワーク全体をモデル化する機能を拡張した。モデリング機能を適用して、原子炉を他の産業プロセスに結合し、システム全体の柔軟性を高めることができることを実証することもできる。

#### 4.4 その他のイニシアチブ

カナダ政府は、Chalk River 研究所を活性化するために、2016年から10年間で12億ドルの投資を提供した。新しく更新された科学インフラストラクチャへのこの投資は、カナダ政府の原子力研究のニーズと、カナダ及び世界の原子力産業の進化する科学技術のニーズをサポートする。ワールドクラスの核科学技術キャンパスを構築し、組織を原子力科学技術のグローバルリーダーとして位置付け、商業ビジネスを成長させ、Chalk River 研究所に近代的で効率的で協調的なキャンパス環境を構築する。

この投資は、小型及び超小型のモジュール設計を含む、高度な原子炉の商業的実行可能性を実証するというCNLの長期目標をサポートする。SMRを他の技術やエネルギー源と組み合わせる使用して原子力の柔軟性を実証するには、実証ユニットが必要である。したがって、CNLは、上記で特定されたものに加えて、カナダでのSMRの展開を進めるためのイニシアチブを追求している。CNLは、2026年までに管理サイトの1つにSMRを展開するという戦略的目標を持っている。現在までに、いくつかのSMRベンダーは、CNLのSMR Siting Invitation Processを通じて実証原子炉プロジェクトを立ち上げることに関心を示しており、並行して、国内規制当局であるカナダ原子力安全委員会とのライセンス供与の側面に取り組んでいる。2019年、CNLは、SMR技術の研究開発ニーズを前進させるために、カナダ原子力研究イニシアチブを立ち上げた。カナダ原子力研究イニシアチブプログラムでは、CNLとSMRのベンダーは、カナダでのSMRの展開の加速と、SMR業界向けの革新的なソリューションの開発に焦点を当てた、CNLで実行される共同研究プロジェクトを追求している。

SMRの展開は、カナダでの柔軟な原子力運用に向けた主要なマイルストーンである。SMRのサイズが小さく、高度な原子炉技術により、遠隔地のコミュニティや工業用地など、脱炭素化が



難しい地域でクリーンな原子力を活用できるようになるからである。CNLにSMRを設置することに関連して、Clean Energy Demonstration Innovation and Research parkの概念が開発されている。この Clean Energy Demonstration Innovation and Research Parkの目的は、産業パートナーと技術開発者をSMRベンダーと結び付けて、SMRを他の技術と結合する機能を実証し、それによってシステムの柔軟性を高めることである。その公園は、関心のある利害関係者に技術を紹介し、技術的な問題（ライセンスなど）を解決し、技術の統合（水素製造、地域熱供給、脱塩など）を示して、1日中及び年間を通して、最適なエネルギー使用量を通知する場所となる。

今日、CNLは、カナダ人と世界が原子力の安全とセキュリティが保証されているという自信を持って、原子力科学技術からクリーンエネルギー、健康、環境の恩恵を受けることを保証するという義務を負い続けている。

## 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

執筆： ShannonBragg-Sitton、KonorFrick（DOE研究所複合施設の下で運営されている研究所、アイダホ国立研究所（INL））

INLは、米国にある17のDOE国立研究所の1つである。INLは、DOE原子力エネルギー省（DOE-NE）のBattelle Energy Allianceによって管理されており、原子力の研究開発の主要なセンターである。INLのビジョンは、世界のエネルギーの未来を変え、国の重要なインフラストラクチャを保護することである。そのため、INLの使命は、革新的な原子力ソリューション、その他のクリーンエネルギーオプション、及び重要なインフラストラクチャを発見、実証、及び保護することである。ここで紹介する作業で強調されているINLの統合エネルギーシステムイニシアチブは、最適化されたエネルギーの未来を提供するために、複数の使用部門にわたるエネルギー需要が非排出エネルギー源の組み合わせによって満たされる未来を達成するための中心となるものである。この章では、原子力を新しい方法で利用する統合エネルギーシステムオプションを評価するために、Argonne国立研究所、Oak Ridge国立研究所、NRELなどの他の国立研究所と協力してINLが主導する作業に焦点を当てる。原子力産業の主要な協力者と協力することにより、これらの分析研究は現在、実証プロジェクトで現実のものになりつつある。

このレポートの冒頭で規定したように、原子力システムは、運用の柔軟性（さまざまなアプローチによって炉心出力を変化させる）や製品の柔軟性など、多くの経路を介して柔軟にすることができる。この章では、電力の純需要の変化に対応する代替製品の生産による原子力の柔軟性に焦点を当てる。EDFとExelonが提供する章で説明されているように、原子炉は柔軟な出力の実証された記録を持っていることを認識し、この操作モードはすべてのシナリオ又はすべての電力市場で経済的に望ましいとは限らず、またこれらの熱発電システムに投資された資本を効率的に使用するものでもない。

INLの研究者が主導する統合エネルギーシステムに関するDOE-NEプログラムの主な焦点は、原子力発電所から供給されるエネルギーの柔軟性を高め、それによってこれらのシステムによって提供されるクリーンエネルギーの使用を最大化する統合エネルギーシステムの可能性を評価することであった（Bragg-Sitton 他 2020年）。この作業は、「過剰なエネルギーを使用してどのような追加の製品の流れを作成できるか」という質問から始まる。この質問は、特定の展開場所のコンテキスト内で対処する必要があり、これは、工業プロセスに利用可能な原料、及び利用可能な製品市場について、電力市場の構造、供給、及び需要に関連する影響がある。飲料水から水素、合成燃料、アンモニアベースの肥料、及びさまざまな化学物質に至るまでの製品の流れが検討されてきた。各製品の流れには、収益性を最大化する独自の市場と市場の推進力、及び独自の地理的位置がある。これらの製品の中には、生産をサポートするために電気のみを必要とするものもあれば、熱エネルギーと電気エネルギーの両方を必要とするものもある。

### 5.1 モデリング及びシミュレーションツールセット

DOE-NE統合エネルギーシステムプログラムは、さまざまなモデリング及びシミュレーションツールを活用して、さまざまな市場構造のコンテキスト内で統合エネルギーシステム構成を設計、評価、及び最適化するための特殊な要件を具体的にサポートする計算フレームワークを開発した。この特殊なフレームワークは、疎結合（電気のみ統合）と密結合の両方のシス

テム設計の潜在的なシステム構造の技術的及び経済的実行可能性を評価するために適用される。

これらのシステムは、効率的に動作するために、大量のデータ、プロセス条件、エネルギーストリーム、及び制御コマンドの動的な交換を必要とする。統合エネルギーシステムシミュレーションフレームワークは、定常状態と動的システム動作の両方をサポートするように設計されており、すべての条件下でエネルギーバランスが維持されるようにする。サブシステムは、技術的なパフォーマンスを評価するのに十分な忠実度で定義されている。実行可能な技術的ソリューションが定義されると、経済的パフォーマンスの最適化は、定義された運用上及び技術上のパフォーマンスの制約内で適用できる。5つの主要コンポーネントがシミュレーションエコシステムを構成する。シミュレーションエコシステムは、システムオプション（複数の原子炉の概念、プロセスオプション、エネルギー市場など）の評価をサポートできるように継続的に強化されている。

1. 確率的時系列で表される再生可能エネルギープロファイルとエネルギー需要
2. INLが開発した原子炉分析及び仮想制御環境（RAVEN）に実装された確率的分析及び最適化アルゴリズム（Cristian Rabiti 他 2017年）
3. プロセスユニット操作（熱交換器、ポンプ、コンプレッサー、化学反応器など）のレベルでのプラント設計とシステム統合のための詳細なプロセスモデル
4. Modelica言語で開発されたプラント設計モデル（発電技術、電力変換、エネルギーユーザーなど）から開発されたサブシステムの動的な物理的動作を表す低次元モデル（Modelica Association 2018年）
5. 経済パフォーマンス分析用の統合エネルギーシステム固有のRAVENプラグイン、経済分析ツール（TEAL、以前はCashFlowと呼ばれていた）（C Rabiti 他 2017年）、及びHeuristic Energy Resource Optimization Network（HERON）（Talbot, Gairola, 他 2020年）。

このシミュレーションアプローチは、さまざまなプロセスアプリケーションをサポートするために原子力エネルギーを使用することの経済的可能性を明らかにするために適用する。フレームワークは、これらの分析を実行する際に確率論的アプローチを適用して、モデルがプロジェクトのコストと収益を予測する際の固有の不確実性を捉えることができるようにする。統合エネルギーシステムシミュレーションフレームワークは、図10に示すように、複数の市場とユニットの同時確率モデリングをサポートする。

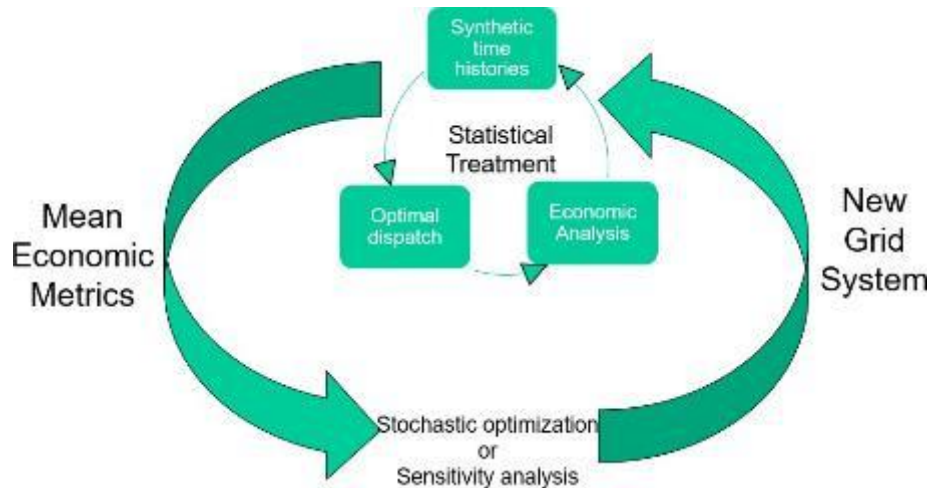


図10. 確率論的技術経済分析ワークフロー

Source: INL. Used with permissions.

RAVENは、統合エネルギーシステムフレームワークの主戦力として機能する。そのタスクは次のとおりである。

- 以下を使用して、トレンドの再構築による外因性の市場条件（つまり、電力需要、変動する再生可能エネルギー発電）の作成。
  - ・ フーリエ分解
  - ・ 自己回帰移動平均を使用した確率的行動（Talbot、Rabiti、他 2020年）。
- デスクトップと高性能コンピューティングマシンの両方で、物理モデルを表すソフトウェアの並列ディスパッチ
- システムの設計と運用の最適化
- 不確実性の定量化。

これを実現するために、RAVENは人工知能アルゴリズムに大きく依存して、不確実性の定量化、信頼性分析、及びパラメトリック研究を実行するための計算コストを削減する。これは、複雑な物理システムのモデルを代理する機械学習アルゴリズムをトレーニングすることで実現される。

TEALは、RAVENが正味現在価値、内部収益率、収益性指数など、いくつかの財務指標を計算できるようにするプラグインである。TEALは、RAVENによって実行されるシミュレーションを監視し、一連の規定されたコストドライバーの値を抽出して、財務指標を構築する。これらのインデックスは、最適化検索の目標相関係数として使用できる。TEALには、税金、インフレ、割引に対処するための柔軟なオプションも含まれており、ライフタイムが異なるコンポーネント又はサブシステムの合計キャッシュフローを計算する機能を提供する。

HERONは、RAVENが一般的なアプローチでグリッドエネルギーシステムの確率論的技術経済分析を実行できるようにするプラグインである。HERONの主な機能は、確率的システムの下でコンポーネントの容量を最適化し、システム資源の最適なディスパッチを実行するために必要な複雑なRAVENワークフローを生成することである。HERONは、生産コンポーネントやさまざまな市場など、さまざまな商品を転送する複雑なコンポーネントを備えたシステムを分析できる。

忠実度の高い動的プロセスモデルは、Modelica言語で作成される。Modelica言語は、複雑な物理システムのモデリングをサポートする、非独占的なオブジェクト指向の方程式ベースの言語である。このように、それは商業的応用のために業界全体で広く採用されてきた。Modelicaは本質的に時間依存のモデリング言語であり、独立して開発されたモデルの迅速な相互接続を可能にし、システムの相互接続性と新しい制御戦略の開発をサポートしながら、システム全体の物理学を網羅する。モデルは、システム設計オプションの評価、システム慣性の特性評価、熱損失の計算、及び統合システムの効率の決定に使用される。INLライブラリの現在のモデルには、熱エネルギー貯蔵、電気エネルギー貯蔵、逆浸透、4ループ原子炉、一体型加圧水型原子炉（PWR）（IRIS原子炉に基づく）、天然ガスタービン、高温蒸気電解（HTSE）、及び開閉所がある。増え続ける一連のケーススタディをサポートするために、必要に応じて追加の動的モデルが開発される。

提案された統合エネルギーシステム構成の分析は、調査に含める展開場所と技術を選択することによって開始される。分析では、既存のプラント（たとえば、容量が確立された現在の原子力発電所群）の使用を検討する場合もあれば、すべてのサブシステムのグリーンフィールド構築を検討する場合もある。意図された展開場所は、電力及び製品市場、需要構造などを確立する。次に、RAVENは地域の市場データを取得し、データの自己回帰移動平均とFourier表現を作成し、それをサンプリングして、基になる傾向を保持する元のデータの合成時間履歴を作成する。統計的には同じであるが、異なる潜在的な一時的なシナリオを表している。時間依存の電力需要及び/又は価格、太陽光及び/又は風力発電データ、市場要件、及び最適化を推進するために必要なその他の入力データは、ディスパッチプラグインHERONに供給される。HERONはこの情報を使用して、ユーザー定義の目標相関係数（限界費用、最大正味現在価値、総需要をカバーする信頼性など）に基づいて、すべてのプラントの派遣スケジュールを作成する。これらのディスパッチシナリオは、シミュレーションを推進するための物理Modelicaモデルへの入力として使用される。変化率やさまざまなサブシステムの物理的制限などの技術的制約から生じる需要の欠落が報告され、ディスパッチ戦略の変更又は分析でのペナルティ相関の適用につながる。次に、正味現在価値は、CashFlowプラグインを使用して、満たされた需要、失われた需要、及び補助的な製品の売上に基づいて計算される。このプロセスは、最適なソリューションが見つかるまで繰り返される。

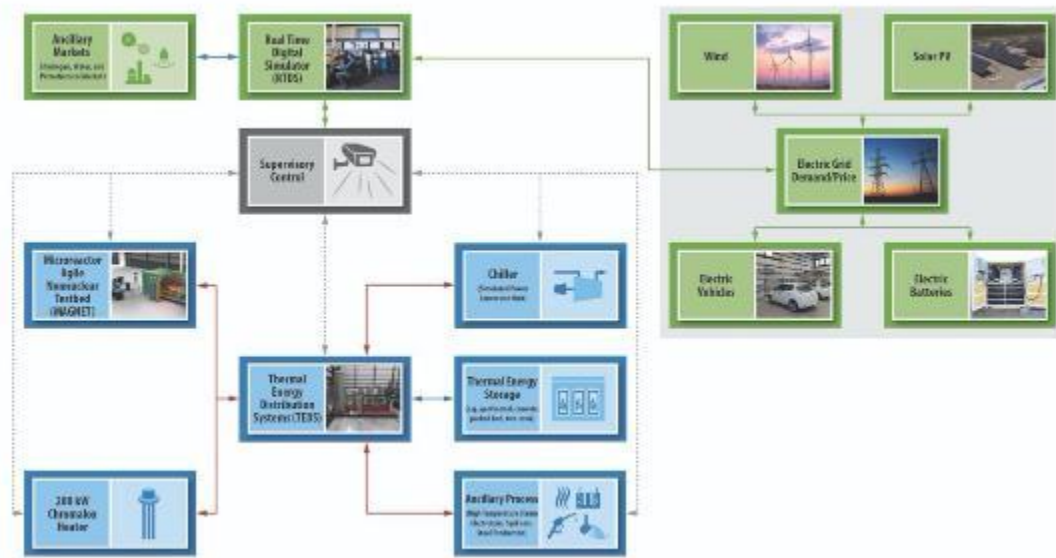
このフレームワークは、地域のエネルギーネットワークをうまくシミュレートして、原子力事業者に経済的に最適化されたソリューションを提供するための重要なツールである。特定のケーススタディの結果は、この章の後半で報告されるように、米国の既存の原子力発電所での統合エネルギーシステム、特に水素生産を実証するためのユーティリティ計画につながった。

## 5.2 実験的ツールセット

実験室の研究チームは、物理モデリングの結果と結論の妥当性確認と検証をサポートするためのコンセプトデモンストレーション用の実験システムを開発している。デモンストレーションでは、最初にINLのスケールリングされた電気加熱式統合テスト施設を利用し、次に原子力シス

テム内でデモンストレーションを行う。動的エネルギー輸送及び統合研究所は現在、ラボ環境での統合システム操作を実証するために、INLエネルギーシステム研究所内に設置されている。動的エネルギー輸送及び統合研究所は、制御可能な電気ヒーターを利用して、発電、エネルギー貯蔵、及び産業の最終用途のための電気と熱の同時、調整、及び効率的な過渡分配を実証する（Frick、Duenas、他 2019年）。施設全体では、図11に示すように、電力網、再生可能エネルギー入力、熱及び電気エネルギー貯蔵、エンドユーザーへのエネルギー供給とのリアルタイム統合のデモンストレーションを提供する。システムの安定性とシステム内のすべての資産の効率的な運用を維持しながら、エネルギーフローを最適化する方法の理解を深めるために、ハードウェアインザループでエミュレートされる。さらに、そのようなシステムは、統合エネルギーシステムに存在する新しい制御アルゴリズムのパフォーマンス、ヒューマンファクターのニーズ、及びサイバーセキュリティ要件への洞察を提供する。





(a)



(b)

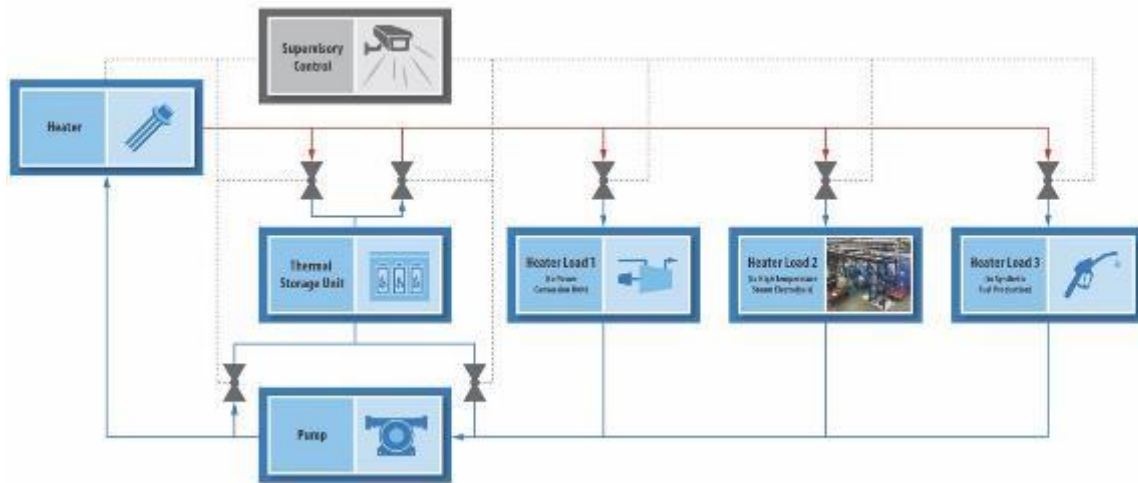
図11. INL動的エネルギー輸送及び統合研究所のシステム構成：

- (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。

Source: INL. Used with permissions.



設置のバックボーンとして機能するのは、図12に示すTEDS (Stoots 他 2019年) である。このシステムは、接続されたサブシステム間で熱エネルギーを大量に移動できるようにする、バルブ、パイプ、及び熱交換器の「プラグアンドプレイ」ネットワークとして設計されている。TEDSは現在、市販の伝熱流体Therminol-66を利用するように設計されている。Therminol-66の動作条件は-3°Cから343°Cの範囲であるが、蒸気圧は動作帯域全体で低いままである。この大きな動作帯域により、別の流体に交換することなく、さまざまなシステムをTEDSに接続できる。このシステムは、原子力発電機又は石炭発電機からのエネルギー入力のエミュレーションをサポートするように設計されている。これらの発電機は、通常、メインシステムの蒸気発生器から300°C程度の出口温度を持っている。



(a)



(b)

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。

Source: INL. Used with permissions.

最初の補助製品のエンドユーザーは、HTSE水素製造施設である。現在の施設は25kWe HTSEシステム（O'Brien 他 2020年）であるが、近い将来、より大規模なシステム（～150 kWe）に置き換えられる予定である。この結合により、システム制御を検証できると同時に、システムダイナミクスとヒートアップ及びクールダウンの特徴的な時間スケールを定量化できる。TEDS運用の初期段階でテストされる追加の熱負荷には、シングルタンク充填層サーモクラインとシミュレートされたランキンサイクル電力変換ユニットが含まれる。

より広範な動的エネルギー輸送及び統合研究所には、グリッド内の電力システムを表し、他の地理的に多様な施設へのリアルタイム接続を容易にするデジタルリアルタイムシミュレーターステーション、風力エネルギー入力、太陽光発電（PV）入力、ケミカルフロー電池、電気自動車及び電池の充電など、いくつかのマイクログリッドコンポーネントが含まれている。デジタルリアルタイムシミュレーターは、リアルタイムの風力データを使用して需要曲線を相殺する、NRELの国立風力技術センターなどの外部の風力発電所への接続を可能にする。オレゴン州立大学のNuScaleIntegral System Test施設など、原子炉の初期のダイナミクスをエミュレートする既存のテスト施設との仮想接続も評価されている。さらに、システムが順守しなければならない現実的な時間遅延と熱時定数を提供するハードウェアインザループが存在する。追加の熱エネルギープロバイダー及びエンドユーザーとの相互接続をサポートするために、いくつかの追加のフランジがTEDSに追加され、プラグアンドプレイタイプのシステムとしてのTEDSの機能が向上した。電気加熱式原子炉エミュレーションシステムと熱エネルギー分配インフラストラクチャは、2020年に設置される予定である。

### 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

INLは、DOE-NE統合エネルギーシステム及びLWR持続可能性プログラム（INL n.d.）から利用できる膨大な知識ベースとシミュレーションツールセットを活用して、既存の非電気アプリケーションの可能性を評価するための、原子力発電所とのいくつかのコスト共有プロジェクトのリードパートナーである。米国の公益事業パートナーの原子力発電所には、アリゾナ公共サービス（APS）、Exelon、Energy Harbor、及びXcel Energyが含まれる。各公益事業パートナーは、現在稼働中の原子力発電所で、特に製品の柔軟性を介して柔軟な運用を実装し、プラントに代替の収益源を提供することを検討している（Wald 2019年）。一般に、これらの公益事業体は、柔軟な運用への段階的なアプローチを模索しており、最初はメーターの前の電気統合を使用して、追加のプロセス（たとえば、浄水や水素製造）をサポートし、最終的にはより高い効率を組み合わせることを目標としている。経済的なケースが強い場合は、熱的統合と電氣的統合を組み合わせる。これらの活動の要約を表1に示す。

表1. 米国のLWR（現在の発電所群）IESケーススタディの概要

公益事業体	製品の流れ	技術	市場	変動性の要因	併用
APS	水	逆浸透	規制あり	太陽と水の不足	電気及び物理的な送水管
Energy Harbor/Xcel/Arizona Public Service	水素	低温電解	規制あり (Energy Harbor), 規制緩和 (APS, Xcel)	風と天然ガス	電気
Exelon	水素	HTSE	規制緩和	風と天然ガス	電気及び熱
Exelon	水素	低温電解	規制緩和	風と天然ガス	電気

表1に見られるように、これらの最初の米国のケーススタディでは、原子力発電所の柔軟性のオプションとして水素生産に重点が置かれている。水素は、いくつかの大規模なエネルギー市場の基本的な原料として、既存の原子力発電所の価値を高め、さまざまな需要に対応する能力をさらに高めるための追加の収入源を提供する可能性がある。この目的のために、公益事業体は低温及び高温電解技術の両方の実証プロジェクトを実施している。低温電解は、水分子を入力として受け取り、電解セルに電流を流して、水分子を純粋な酸素と水素に分解する。HTSEも同様のプロセスに従うが、はるかに高い温度（650°C～800°C）で動作するため、より高い効率が得られる。両方のプロセスは現在、原子力産業内での実証とパイロットアプリケーションのために検討されている。低温電解は、電気エネルギーしか必要としないため、原子力発電所での構成が容易であるが、HTSEは、より経済的に競争力のある価格で水素を生成する可能性がある。両方のエネルギー要件の詳細な概要を表2に示す。

表2. 水素製造技術のエネルギー要件の内訳

水素製造技術	電氣的要件と熱的要件	電気変化率制限	蒸気 <sup>3</sup> 変化制限	ホットスタンバイモードに必要な固定需要 <sup>4</sup>
低温電解	100% 電気, 0% 熱	100%瞬時にランピング可能	該当なし	PEM電解を想定して0%
HTSE	85%–95% 電気, 5%–15% 熱	80–90%は瞬時にランピングさせることができ、残りはトッピング熱として使用される	現在の設計における固定蒸気流量	トッピング熱として10%–20%の電気エネルギー。原料の予熱に使用されるすべての熱エネルギー

水素製造技術に加えて、逆浸透による水処理も、地域の水供給が限られている公益事業体のために考慮されている。4つのケーススタディのそれぞれの詳細を以下に示す。

### 5.3.1 APS

APSは、最近太陽光発電設備がブームになっている米国南西部の乾燥地域にあるPalo Verde発電所の運営所有者である。米国最大の原子力発電所であるPalo Verde発電所には、3基のPWRがある。Palo Verde発電所は、蒸気サイクル廃熱の除去を提供する機械式ドラフト蒸発冷却塔を使用している。Palo Verde発電所の冷却水は、再生された都市下水を利用するために地方自治体との契約を通じて提供される。米国南西部では、水資源が限られており、地域の人口増加と同時に天然水資源の不足が増大するにつれて、排水はこれらの自治体にとってますます価値が高まっている。その結果、排水の年間コストが急激に上昇している。これにより、プラントの冷却コストが増加し、APSは施設の冷却ニーズに使用する代替の水源を探すようになる。

APSは、INLの研究者と協力してこの問題を調査し、Palo Verde発電所からの電力の一部を逆浸透を使用して汽水地下水を脱塩する可能性を評価している。逆浸透の追加は、プラントが地域で高まる太陽光発電の浸透を管理すると同時に、冷却水のコストを削減するのに役立つ可能性がある。逆浸透は電氣的統合のみを必要とし、電気料金の変動に応じて自由にオンとオフを切り替えることができる。熱交換器を汚すような過酷なミネラルを含まないこの淡水化水は、

<sup>3</sup> 蒸気供給の柔軟性は、運転出力レベルとタービン設計に依存する。原子炉がその火力定格の90%から100%の間である場合、一部のPWRプラントでは、電気及び非電気アプリケーションへの蒸気流量の変動が1時間あたり3%未満に制限される場合がある。タービンとHTSEなどのいくつかの補助プロセスとの間の蒸気流量の変化率の制限は、一定の原子炉火力を維持しながら、特定のプラントとタービンセットについて調査する必要があるため、ここでは報告しない。プラントの二次部分をシャットダウンせずにタービンから結合プロセスに蒸気を最大限に迂回させることは、プラントとコンポーネントの設計に依存する。

<sup>4</sup> ホットスタンバイとは、プロセスがゼロ製品を生産しているが、ほぼ瞬時に100%の製品生産を行うことができる場合である。

プラントを冷却するために使用でき、過剰な淡水は潜在的に一般に販売される。APSは地下水を淡水化することにより、地方自治体から購入しなければならない再生廃水の量を減らすことができる可能性がある。

RAVEN / HERON / Modelica ツールセットを利用して、逆浸透及びPalo Verde water trainプロセスモデルとともに、Phoenix west valleyの地域水市場が構築された。これらのツールを使用して、いくつかの分析が実行された。結論は予想外であり、大規模な逆浸透プラントから排出されたブラインを使用して冷却水に希釈し、その後Palo Verde 発電所の蒸発池を使用して処分する可能性を浮き彫りにした。これは、逆浸透での廃棄物管理コストの削減により、飲料水を生成するためのコストの削減につながる。さらに、分析はまた、水調達のコストの削減によるPalo Verde 発電所への可能な利益を示した。

INLで開発された技術経済分析フレームワークにより、近隣のすべての自治体が参加した場合、正味現在価値の差が約1億ドルになる可能性があるこのビジネスチャンスを特定できた (Epiney 他 2019年)。

### 5.3.2 Energy Harbor/APS/Xcel

Energy Harbour、APS、及びXcel Energyの3つの公益事業体コンソーシアムに授与されたプロジェクトの主な目的は、LWR発電所に接続された統合エネルギー技術の計画、設計、設置、テスト、デモンストレーション、及び評価を実行することである。スケーラブルな水素生成パイロットプラントに焦点を当てている。このプロジェクトでは、オハイオ州のDavis-Besse原子力発電所に低温電解水素生成パイロットプラントユニットを設置する (Boardman 他 2019年)。Davis-Besse発電所の財政的安全性は、最近、天然ガスや再生可能エネルギーの価格が下落していることから、厳しい状況にある。その地理的位置、大規模な輸送ネットワーク、及びアメリカの中心部にある大規模な産業ユーザーに近いことから、Davis-Besseは低温電解水素製造のパイロット原子力実証施設として選ばれた。このプロジェクトは、DOEからのコストシェアアワードによってサポートされており、水分子をH<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>に分解して水素を生成する2MWeの低温電解ユニットを設置することを目的としている。この最初のデモンストレーションは、2021年1月から2023年1月 (Henry 2020年) まで実施される予定である。Energy Harbor は、電力需要が高いときに最大容量でグリッドをサポートしながら、原子力施設の二次的な収入源として生成されたクリーンな水素を利用する。多くの石油化学産業のベース製品としての水素は、周辺の製油所、肥料工場、及びその他の農業生産施設に販売される。期待される結果は、原子力発電所の通常の運転ルーチンに統合された、完全に機能する運転水素生成スキッドを持つことである。さらに、蓄積された運用データは、この統合システムの技術的実現可能性と経済的実行可能性を浮き彫りにする。

このプロジェクトには、米国のさまざまな電力市場で原子力発電施設を運営しているAPSとXcel Energyの技術的及び経済的評価も含まれる。これらの評価は、水素生成のための統合システム運用の技術的及び財政的実現可能性をサポートする。この情報は、協力ユーティリティからのプレフロントエンドエンジニアリングデザイン入力とともに、他のLWR発電所で水素生成を実装するための同様のプロジェクトを実施するためのビジネスケースを要約した投資家グレードのレポートの作成をサポートする。システムデモンストレーションの結果は、最終的に他の原子力発電事業者が利用できるようになり、100s-MWe規模での統合エネルギーシステム技術の大規模な商業化をサポートする。



最初のデモンストレーションが成功した場合、Energy Harbourは、高温電解をサポートするための熱統合コンポーネントを含む可能性のある大規模システムへの投資を増やす可能性を検討している。この最初のデモンストレーションは、公益事業体がそのようなシステムのマルチマーケット運用の利点、課題、規制及び市場の要件を理解するのに役立つ。大規模な水素製造システムは、さらに低コストで、前述のさまざまな顧客に追加のクリーンな水素を供給することができる。

### 5.3.3 Exelon

APSとEnergy Harborの地域的な事例に加えて、米国中西部全体の送電網の制約と相まって、風力資源は、Exelon社が運営する原子力発電所の価格変動シナリオを引き起こしている。最初の対応として、いくつかのExelonプラントは「高度な原子力ディスパッチ」で運転を開始し、プラントからの電力出力を変化させて、電力の損失を回避した。この動作モードは、米国原子力規制委員会の規制とタービンランプ制限によって制限されている。Exelonは、代替製品を介して柔軟性を拡張することも検討している。Exelonプラントからの過剰なエネルギーを使用した水素生産は、中西部全体の石油化学、製鋼、及び農業産業のニーズをサポートする可能性がある。

Exelon社がDOE国立研究所と協力して主導するコストシェアプロジェクトでは、Exelonが所有する原子力発電施設で、商用統合エネルギーシステムの展開に関連する技術的及び財政的リスクをさらに軽減するために必要なデータを提供し、エンドツーエンドの統合グリッドスケールの無炭素H<sub>2</sub>生産、貯蔵、及び利用パイロットプラントを実証する。INL、NREL、Argonne 国立研究所、Exelon、及び燃料電池エネルギーの間のパートナーシップを介して、このプロジェクトは、HTSEを介して水素（H<sub>2</sub>）を生成するために既存のPWRを改造する実行可能性の技術経済分析によって開始された。これらの分析は、そのような統合により、原子力施設が成長する水素市場をサポートできるようになることを示している。水素生産のための過剰又は低価格の電力の使用は、本質的に、原子力施設による電力の販売に経済的な作業場を提供し、原子力発電所と電力市場との間の相互作用のパラダイムシフトにつながる。原子力発電所は、水素生産を停止することによって失われるであろう収入を補うのに十分な価格が高い場合にのみ、市場に電力を販売する。この点で、多くの原子力発電所は、電力市場で尖頭プラントとして効果的に稼働することができる。

このような統合に対応するために、HTSEプロセスの操作、要件、及び柔軟性の詳細な分析が行われた。技術分析には、原子力発電所への熱接続と電気接続の両方を介したHTSEの動的動作を可能にするために提案された原子力システム制御スキームの変更が含まれる。忠実度の高いModelicaシミュレーションは、このような制御スキームの実行可能性を示している。

原子力統合とHTSEプロセス設計の詳細な分析から、商業的に受け入れられているAspen Process Economic AnalysisモデルとHydrogen Analysis Productionモデルで包括的なコスト見積もりを実施し、原子力施設からの水素の生産、圧縮、及び流通に関連する資本コストと運用コストを解明した。このコスト分析に加えて、市場分析が、Exelon原子力発電所が運営されている地域の送電組織であるPJM相互接続（ペンシルベニア、ジャージー、メリーランド電力プール）で、電気市場と水素市場でそれぞれNRELとANLによって実施された。



NRELからのPJM相互接続の電力データ市場予測とANLからの水素需要/価格予測を利用して、RAVENとその資源ディスパッチプラグインHERONを使用して、コンポーネント容量、割引率、水素価格の5変数スイープが完了した。変数の各組み合わせは、2026年から2042年までの17年間にわたって評価され、最も経済的に有利なソリューションが決定された。

結果は、すべての予測される水素市場の価格設定レベル及びすべての割引率でプラスの利益が達成可能であることを示唆している。ただし、正確なコンポーネントのサイズと純利益はこれらの値に基づいて異なり、誤ったサイズを選択すると、大きな純損失が発生する可能性がある。全体として、Exelonの調査結果は、市場の多様化を通じて、既存の原子力発電所が現在の利益率を大幅に高め、市場への浸透を高め、最終的には米国中西部のエネルギー生産の中心としての地位を固める可能性があることを示している。研究の完全な結果は、Frickらによるレポートで入手できる（Frick、Talbot 他 2019年）。

Exelonは現在、DOEとの後続のコストシェアプロジェクトを通じて、Exelonが所有及び運営するプラントで、最初に電氣的に統合された低温電解を使用して水素製造を実証するために前進している。このプロジェクトでは、Exelonプラント（特定のプラントは発表予定）に1 MWの低温電解ユニットを設置し、組織化された電力市場への統合水素生産及び原子力発電所施設の参加に関連する市場機会と規制要件を評価する。これは、電解槽の動的制御と操作を実証し、水素生産からの収益源と組み合わせた動的参加の経済性を評価することによって達成される。このプロジェクトの主な目的は、水素を原子力を使用して大規模に経済的に生産できることを実証することである。このデモンストレーションでは、商業的にスケーラブルな水素電解ユニットの応答特性と、ローカルユーザー向けに水素を生成しながらグリッド調整をサポートする機能をテストすることにより、提案された操作スキームも検証する。このデモンストレーションは、大規模な熱的に統合されたHTSEの潜在的な将来のデモンストレーションへの道を開く。

## 5.4 今後の作業：高度な原子炉アプリケーション

LWR産業コミュニティは、非電気製品の生産をサポートするために現在稼働中のLWRからの余剰エネルギーの使用に焦点を当てた初期パイロットケーススタディの定義に尽力した。特に、淡水化と水素生産、及び短期的で価値の高い機会に焦点を当てた。LWRの研究がExelon及びEnergy Harbor プラントでの水素製造のデモンストレーションに移行するにつれて、DOEと国立研究所は、成功を確実にするためにその作業を引き続きサポートする。さらに、DOE-NE統合エネルギーシステムプログラムは、高度な原子炉技術を利用して幅広い産業及び化学製造プロセスをサポートする統合エネルギーシステムの可能性を評価するために前進している。

## 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

執筆：永澤 剛（経済産業省（METI）資源エネルギー庁（ANRE））、上出英樹、柴田大受（日本原子力研究開発機構（JAEA）高速炉・新型炉研究開発部門）

ANREは、経済産業省の外局の1つである。ANREは、原子力、再生可能エネルギー、天然資源を含む日本のエネルギー政策に責任を負っている。

JAEAは、原子力の分野における日本で唯一の包括的な研究開発機関である。先進的な原子炉開発の分野では、JAEAは、将来のエネルギーの持続可能性、安全性、経済競争力、及び柔軟性のさらなる向上を達成するために、高速炉、高温ガス炉（HTGR）、及び関連する燃料サイクル技術の研究開発を実施している。

### 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

原子力エネルギーは、2018年に日本政府が発表した第5次戦略的エネルギー計画に記載されているように、経済効率が高く、炭素を含まない不可欠なベースロード電源である。2050年に向けて、原子力エネルギーは脱炭素化のために実行可能なエネルギー源オプションの1つとして説明されており、パリ気候変動協定（UNFCCC 2015）で指定されている気候変動のリスクの軽減に貢献している。一方、再生可能エネルギーの急速な拡大や水素製造やプロセス熱の利用のための新エネルギー需要などの最近の傾向により、革新的な原子力技術の必要性が高まっている。言い換えれば、統合エネルギーシステムにおけるさまざまな社会的ニーズを満たす柔軟性を確保することは、原子力技術開発の長期的な課題であり機会である。

このような状況下、日本政府は、原子力技術のイノベーションを目指して、2019年度に原子力×イノベーション推進イニシアチブを開始した。このイニシアチブには、民間主導の技術革新を誘発し、国立原子力研究所JAEAの施設や知識資源を最大限に活用するという特徴がある。原子力×イノベーション推進イニシアチブでは、非電力製品の生産と使用（水素生産など）や再生可能エネルギーとの調和した組み合わせを目的としたSMRやその他の原子力発電システムなど、さまざまな原子力発電システムと安全性向上技術が現在進化している。JAEAには、いくつかの原子炉と関連する照射後試験施設、重要な数値シミュレーションツール、原子力システム設計に関する知識データベース、及び高度な原子炉の運転経験がある（<https://www.jaea.go.jp/04/orai/en/index.html>）。JAEAは原子力イノベーションの推進に重要な役割を果たしていく。

## 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

原子力技術の柔軟性は、先進的な原子炉の商業化を考えると、重要な技術の1つである。電力研究所（EPRI）（Sowder 2019年）によって示された拡張された柔軟性の概念は、高度な原子炉を評価するための柔軟性のサブ基準と属性が次のように定義されている。（1）操作の柔軟性（操作性、ハイブリッドシステムとの互換性、アイランドモード操作）、（2）商業化の柔軟性（規模拡張性、立地、建設可能性）、（3）製品の柔軟性（電気、プロセス熱、放射性同位元素）。

JAEAは、ナトリウム冷却高速炉（SFR）やHTGRなど、さらなる柔軟性を提供するイノベーションを目指したいくつかの研究開発活動を行っている。これらの活動は次のとおりである。

1. SFR及びその他の次世代原子炉用の革新的な設計評価コードシステムの開発
2. 次世代原子炉の保守のための基準類
3. 実験用高速炉常陽を用いた高速中性子照射
4. HTGRのより高い安全性能と水素製造能力の実証

これらの活動の詳細と、これらの活動がSFRやHTGRなどの次世代原子炉の柔軟性（つまり、運用の柔軟性、展開の柔軟性、製品の柔軟性）の向上にどのように貢献するかを以下に説明する。

### 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

JAEAは、次世代原子炉のプラントライフサイクル全体をカバーするARKADIAという名前の数値シミュレーション及び設計システムを開発している。

ARKADIAシステムは、マルチレベル及びマルチフィジックスシミュレーションと、原子炉設計、運用経験、実験成果、数値シミュレーションを組み込んだ知識ベースを通じて、より高い安全性と信頼性を備えた革新的なプラント設計をサポートしている。システムの一部は、熱水力学、ニュートロニクス、及び炉心構造の変形相互作用を組み込んだ、SFRの炉心挙動シミュレーションとして最近開発された。ARKADIAは、高度な原子炉の安全性の評価と設計の改善に貢献する。これは、商業化の柔軟性にとって不可欠な要素である。SPECTRAという名前の安全性評価コードは、ARKADIAの一部として最近開発された。図13に、SPECTRAの物理モデルを示す。

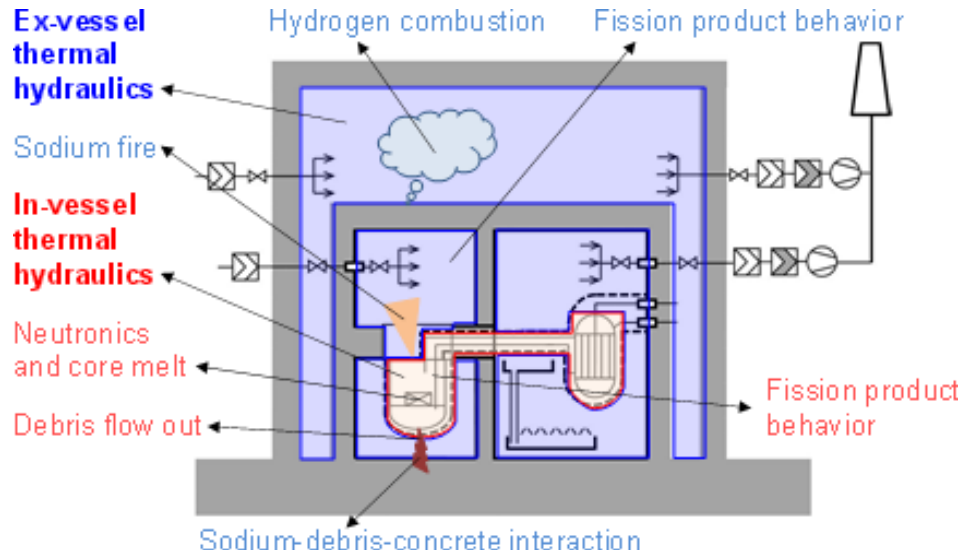


図13. SPECTRAに統合される物理モデル

Source: JAEA. Used with permissions.

メンテナンスは、次世代炉の安全性と経済性にとっても重要な問題である。ARKADIAの開発では、マルチフィジックスシミュレーションシステムを使用して、熱衝撃や熱疲労などのプラント損傷のメカニズムを検討する。マルチフィジックスシミュレーションシステムは、建設前にプラント設計に関するフィードバックを提供し、設計と保守の最適なバランスを確保する。このような熱衝撃と熱疲労は、軽水炉よりも高温で運転される高度な原子炉の運転の柔軟性にとって重要な問題である。

### 6.2.2 次世代原子炉の保守のための基準類

保守基準は、適切な検査を通じて次世代炉の高レベルの安全性を確保するための保守手順を確立するために重要である。適切な検査による適切なメンテナンスは、原子炉の柔軟な操作に貢献するだけでなく、より高い商業化上の柔軟性を備えたシンプルな設計につながる可能性がある。たとえば、過剰な検査要件では、溶接線の周囲に大きなスペースが必要になり、コンポーネントの形状が大きくなったり複雑になったりする可能性がある。設計の信頼性と検査要件は、保守手順の基準と基準に基づくコンポーネント設計で最適化できる。その結果、シンプルな設計により、工場での製造と現場での建設が可能になる。

JAEAは、日本機械学会を通じて、基準や規格の開発に貢献している。最近、LBBの概念に基づく新しい基準が企画承認の最終段階に入った。これは、SFRプラントの適切な保守のために必要かつ十分な検査戦略の標準化に貢献する。さらに、より高い柔軟性を目指して、シンプルな原子炉設計と簡単な操作に貢献している。

### 6.2.3 実験用高速炉常陽による高速中性子照射

照射試験は、次世代原子炉の開発、特にそれらの原子炉に使用される炉心材料の開発にとって重要である。炉心には、運転や商業化の柔軟性のために十分な安全マージンがなければならない。炉心材料の照射試験は、広範囲のプラント運転条件をカバーするために、燃料の健全性に

対する中性子照射の影響を確認するために重要である。JAEAは実験用高速炉常陽を運転している。常陽では、より高速の中性子束を使用して多くの照射実験が行われている。さまざまな測定技術も開発された（たとえば、照射中のオンラインモニタリングや、非破壊的な照射後検査としての照射済み燃料サブアセンブリの高解像度X線コンピュータ断層撮影）。

JAEAは現在停止中の常陽の再起動に向けて準備を進めている。JAEAは、2018年10月に日本の原子力規制委員会に原子炉設置許可の変更許可の修正を提出している、現在その内容は審査中である。

#### 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

JAEAは、その固有の安全特性、高い経済性、及び優れた運用、展開、及び製品の柔軟性のために、HTGRを開発してきた。製品の柔軟性に関しては、HTGRの供用温度は高温であるため、発電、水素製造、プロセス熱の供給、海水淡水化など、複数の熱用途で使用できる。原子炉熱出力の全体的な利用率は80%を超える可能性がある。運用の柔軟性に関しては、HTGRガスタービンと水素コージェネレーションシステムは、外部条件にตอบสนองし、VREの入力が大きい電力網の電力品質をサポートする優れた能力を備えている。展開の柔軟性に関しては、HTGRはその優れた安全機能により、産業施設や住宅地の近くに建設することができる。また乾式冷却塔を採用することで内陸設置が可能である。

HTGRの商業化に向けて、JAEAは以下を計画している。

- JAEA大洗にある高温ガス炉を使用して、HTGRの安全性を実証し、水素製造システムとヘリウムガスタービンシステムをHTGRに接続する技術を開発する。
- 国際協力を通じて、HTGRに接続するための蒸気発生システムを開発し、炉心性能を向上させる。

JAEAによるHTGRの開発が成功したことにより、民間企業は以下のことを行うことが期待されている。

- HTGRの経済的実行可能性と信頼性を実証し、国際協力を通じて開発される実証炉を使用してビジネスモデルを検証する。
- HTGRと組み合わせた水素製造及びヘリウムガスタービンシステムを日本で商業化する。

HTGR開発の重要な施設は、高温工学試験研究炉である。これは、950°Cの原子炉出口冷却材温度を供給できる世界で唯一の原子炉である。高温工学試験研究炉は、2011年の東日本大震災以降、停止している。2020年6月、JAEAは、新しい規制要件に準拠して、日本の原子力規制当局による再起動に向けて、高温工学試験研究炉の原子炉設置の変更の許可を取得した。高温工学試験研究炉の再起動は2021年初頭に行われ、高温工学試験研究炉の安全性実証試験（炉心冷却喪失試験及び炉容器冷却設備を停止させての炉心冷却喪失試験）が、経済協力開発機構のフレームワークのもとで、再起動後に実施される予定である。



## 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

執筆：Charles Forsberg（米国マサチューセッツ州ボストンの大学、MIT）

ベースロード原子力発電所を大規模蓄熱に結合することにより、原子力発電所が経済的に変動する電力をグリッドに提供できるようにする、原子力の柔軟性の新しい次元が可能になる。低炭素世界の経済学は、化石燃料で構築された世界とは異なる。化石燃料発電所、炉、及びその他の電力変換システムの資本コストは、化石燃料のコストに比べて低くなっている。化石燃料貯蔵のコストは低い。これらの特性により、これらのシステムを部分負荷で操作して、経済的に変動する電気、機械的作業、及び熱を顧客に提供することが経済的になる。

原子力、風力、太陽光は、資本コストが高く、運用コストが低くなる。化石燃料システムとは異なり、これらのエネルギー生産技術を公称全容量の半分で運用すると、エネルギーコストが約2倍になる。公称ベースロード容量は技術によって異なる（EIA 2020年）。米国では、設備利用率は原子力で90%以上、風力で34%、PVで約25%である。原子力発電所は給油とメンテナンスのために閉鎖されている。風力発電容量は時間とともに風速に依存する。夜間の太陽と雲量がないため、PV設備利用率は低くなる。原子力発電所の燃料費は低いので、45%の容量で運転すると、エネルギーの費用はほぼ2倍になる。風力と太陽光の運用コストは低くなる。したがって、公称容量の半分でそれらを運用すると、エネルギーコストが2倍になる。エネルギー貯蔵システムは、低炭素発電と相まって、必要に応じて顧客に変動するエネルギーを提供しながら、これらの技術がそれぞれの公称全容量に近い状態で動作できるようにすることで、低炭素世界のエネルギーコストを最小限に抑える可能性を提供する。ストレージは、化石、原子力、風力、太陽光が混在するシステムもサポートできる。

大規模なエネルギー貯蔵技術には、次の3つのクラスがある。（1）仕事（電気）貯蔵：バッテリー、揚水発電など。（2）蓄熱；（3）化学薬品の保管（水素など）。電力貯蔵は、電力網や風力や太陽光発電などの発電技術に最適である。蓄熱技術は、原子力、集光型太陽光発電（CSP）、炭素の回収と隔離を伴う化石燃料、地熱などの発熱技術と結びついている。水素貯蔵は、電気及び熱エネルギー入力によって駆動される可能性があり、季節的なエネルギー貯蔵の機能を備えたさまざまな水素生産技術と結合する。

MIT、INL、及びExelonは、最近のワークショップ（Forsberg 2018年、Forsberg、Sabharwall、及びGougar 2019年）を実施し、数百MWhから100GWhの貯蔵容量を持つ原子炉に結合された提案された蓄熱システムを検討した。低コストの材料（砕石、液体塩など）が使用されているため、蓄熱は電気貯蔵よりも安価である。原子炉と組み合わせた非常に低コストの蓄熱を開発して展開できれば、これらの技術を最も経済的なモードでフル稼働できるようにすることで、原子力、風力、太陽光にメリットがある。大規模蓄熱は、もともとCSPシステム用に開発されたもので、日没後にこれらのシステムがグリッドに電力を供給できるようにする。現在のCSP

システムには、最大数GWhの熱の蓄熱能力がある。この章では、蓄熱システム、蓄熱技術、及び統合された熱/水素貯蔵システムについて説明する。

## 7.1 蓄熱システム

原子力蓄熱システムを図14に示す。同じシステム設計をどの熱発生技術にも使用できる。エネルギーコストを最小限に抑えるために、原子炉は全容量で運転する。電力需要が高く、価格が高くなると、原子炉の熱がタービンに送られ、発電する。需要が少なく、電気料金が安い場合、熱の大部分は蓄熱に転用される。ピーク需要がベースロード原子炉の電力出力を超えると、原子炉と蓄熱の合計熱が発電用のタービン発電機に送られ、タービン発電機のサイズを大きくするか、ピーク電力出力用に別のピークタービン発電機を構築する。電気料金が非常に低い（又はマイナスの）場合、蓄熱システムに接続された抵抗ヒーターを使用して、グリッド電力を蓄熱に変換できる。したがって、発電所システムは電力の販売と購入の両方を行うことができる。蓄熱がピーク需要を満たすのに不十分である場合、天然ガス又は低炭素バイオ燃料と水素の燃焼は、ピーク発電をサポートするための熱を提供することができる。

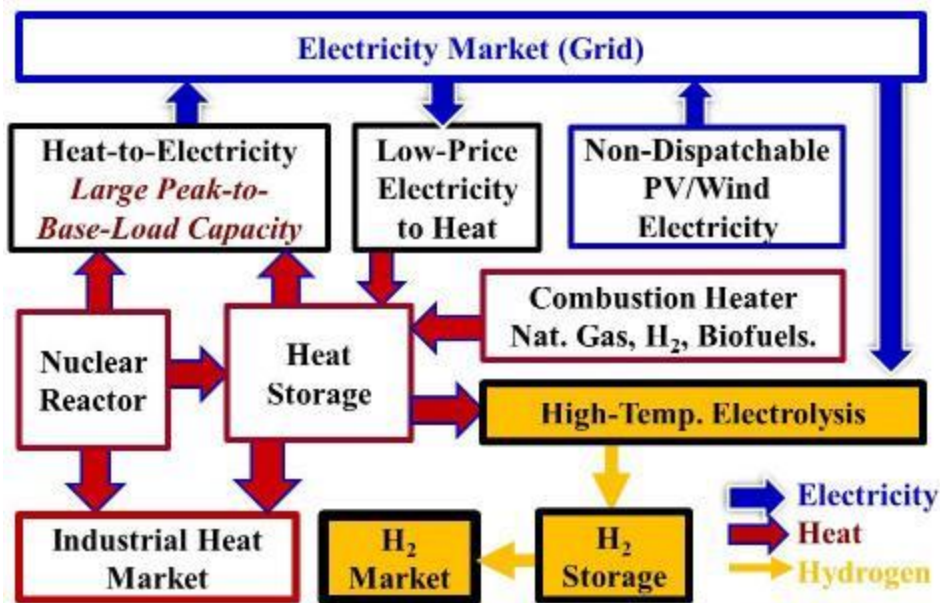


図14変動する熱、電気、及び水素を提供するための蓄熱を備えたベースロード原子力、風力、及び太陽光

Source: MIT. Used with permissions.

システム設計により、風力とPVを経済的かつ大規模に使用できる。第一に、大量の風力と太陽光発電は、高出力のときに電気の価格を崩壊させ、したがって収益を崩壊させる。過剰な発電がある。このシステムは、蓄熱に変換し、太陽光と風力をサポートするための電気の最低価格を設定することにより、余分な電気を吸収することができる。第二に、このシステムは、ガスタービンでバックアップされた電力貯蔵を使用するよりも低コストで、風力と太陽光の出力が少ないときに確実な発電能力を提供する。



このシステムは、産業用の電気と熱のコージェネレーションをサポートする。コージェネレーションは、産業用熱市場と電力市場を直接結び付けるため、電力網に大きな影響を及ぼす。一部の産業プロセスは、柔軟に動作したり、熱需要を変化させたりして、必要に応じて電力生産のために熱を解放し、電力需要が少ないときに追加の熱を消費する。ストレージを介して産業部門と電力部門を結合することで、エネルギー生産と需要のバランスをとるという追加の側面が追加される。

エネルギーは水素の形で貯蔵することもできる。水素は、季節の天然ガス貯蔵に使用されるのと同じ施設で地下に貯蔵することができる。したがって、水素は季節ごとのエネルギー貯蔵を可能にする。原子力水素製造の有力な候補は、熱と電気を必要とするプロセスである水の高温（蒸気）電気分解である。水素製造施設は、製造プロセスだけでなく、コンプレッサー、パイプライン、及び関連施設もすべて資本集約的であり、すべて規模の経済が大きくなっている。したがって、そのような施設を低い設備利用率で運用することは不経済である。これには、水素を生産するプラントが80%以上の時間稼働する必要がある場合がある（Boardman 他 2019年）。高温電解プラントは、原子力発電機と再生可能エネルギー発電機、及び蓄熱を含むシステムに組み込まれている。電力価格が低いときは、送電網からの電力、又は原子炉によって生成された電力を電気分解に使用でき、原子力発電所からの熱は貯蔵及び水素製造用の高温電解プラントに送られる。電気料金が低いときは、原子炉と蓄熱からの熱がピーク電力を生成し、水素は生成されない。

この原子力蓄熱水素システムには3つの特徴がある。第一に、天然ガスと同じ地下貯蔵施設を使用する場合、1時間ごとから季節ごとの柔軟性をサポートする大規模な水素貯蔵は安価である。したがって、電力需要の増加によって水素生産を停止しても、顧客への水素供給が中断されることはない。第二に、システム設計により、余剰の低価格の風力及び太陽光発電が利用可能な場合、より価値の高い水素を生成し、原子力発電所からの余剰熱を後で使用するために貯蔵することができる。第三に、原子力発電所は、80%もの時間水素を生産しながら、発電のピークユニットとしてフル稼働することができる。これにより、原子力発電所は電力需要の季節的なピークに対処するために電力を供給することができる。

## 7.2 蓄熱技術

単一の最適又は最良の蓄熱技術は存在しない。さまざまな種類の原子力発電所がさまざまな温度で熱を供給し、さまざまな冷却材を使用する。蓄熱技術は、原子炉のタイプと一致する必要がある。さらに、市場が異なれば、必要な蓄熱技術も異なる。太陽光発電の容量が大きいシステムのように、蓄熱を日常的に使用する場合、蓄熱技術は年間数百回使用され、効率的な貯蔵に対する大きな経済的インセンティブを生み出す。蓄熱を利用して、需要の少ない週末から需要の多い平日に余剰エネルギーを蓄える場合、蓄熱システムは最大で年間52回使用される。ストレージシステムの資本コストを支払うために、年間のストレージサイクルが少なくなる。このようなアプリケーションでは、経済学では、効率が多少低下しても、資本コストが非常に低いストレージシステムを好むであろう。

### 7.2.1 液体塩

高温CSPシステムで使用される主な蓄熱材料は硝酸塩であり、最も一般的な塩は60 wt%NaNO<sub>3</sub>-40 wt%KNO<sub>3</sub>の組成のソーラーソルトである。これらのシステムには、低温及び高温の硝酸

塩貯蔵タンクがある。冷塩はCSPシステムを介して送られ、加熱されて、高温塩貯蔵タンクに送られる。顕熱貯蔵は、塩の温度を290°Cから565°Cまで変化させることによって得られる。高温の塩は蒸気発生器に送られ、蒸気を生成する。この蒸気は電気を生成するために使用され、結果として生じる低温の塩は低温塩貯蔵タンクに戻される。最大のCSP硝酸塩貯蔵システムのサイズは、ギガワット時の熱で測定される。硝酸塩は、熱を産業顧客に移動するために使用できる。

同様の硝酸塩貯蔵システムの設計が、SFR、固体燃料と液体塩冷却材を備えたフッ化物塩冷却高温反応器、塩に溶解した燃料を備えた熔融塩原子炉（MSR）、及び液体塩ブランケットを備えた熔融機に対して提案されている。これらの場合のそれぞれにおいて、硝酸塩は、低压反応器を高圧パワーサイクルから分離する中間熱伝達ループに取って代わる。硝酸塩は中間ループ内の他の流体を高温の塩に置き換えるため、これらの反応器に貯蔵を追加しても効率が低下することはない。加熱後の塩は、CSPシステムの場合と同様に、直接貯蔵に送られる。

## 7.2.2 熱媒体油

低温CSPシステムは、Therminol-66などの熱媒体油を使用する。これらのシステムの動作温度は、これらのオイルの上限である400°C未満である。これらの蓄熱システムは、ピーク温度が約300°Cの既存のLWRと互換性がある。

## 7.2.3 砕石及びセメント

液体塩及び熱媒体油蓄熱システムのコストは、蓄熱用の塩又は油を部分的に置き換えるタンク内の低コストのフィラー材料を使用することで削減できる。砕石と特殊高温セメントの両方が充填材として検討されている。セメントは、熱伝達流体のストックを最小限に抑えるために、貯蔵タンク内の狭いチャンネルを備えた平行板などの特定の形状に形成することができる。砕石は最も低コストの充填材であるが、空隙容量が大きくなる。

Westinghouseは、蒸気を使用してオイルを加熱し、その熱を、プレート間に小さな冷却チャンネルを備えた密に詰まったセメントプレートで満たされたプレハブボックス内のコンクリートに伝達するLWRのシステムを検討している。これにより、より高価な熱媒体油のストックが最小限に抑えられる。電力需要が高いとき、石油は熱を蒸気サイクルに戻す。

韓国の研究者（Amuda 及び Field 2019年）は、蓄熱材として砕石を使用する軽水炉の同様のシステムを検討している。熱が蒸気サイクルから砕石に、又は砕石から蒸気サイクルに戻されるタンクにのみ、熱媒体油を含む砕石の複数のタンクがある。これにより、高価な熱媒体油のストックが減る。往復の効率は80%に近づく可能性がある。つまり、MWhが貯蔵なしで生成される場合、0.8メガワット時の電力が貯蔵された熱から生成される。韓国の設計では、貯蔵システムは、20GWhの電力の蓄熱能力を持つ複数のタンクを備えた大型のはしけ（60 m x 450 m）として構築することを提案している。スーパータンカーほどの大きさのはしけは、沿岸の原子力発電所に運ばれ、そこで原子炉サイトの乾ドックに浮かぶ。ホットオイルの熱伝達により、工業用熱の顧客と簡単に結合することもできる。

ドイツ（Odenthal、Klasing、及びBauer 2018年）は、低温塩の上に低密度の高温塩を入れた砕石で満たされた単一のタンクでの硝酸塩の蓄熱を調査している。単一のタンクは、別々の高温

塩タンクと低温塩タンクを使用する場合に比べてコストを削減する。砕石は蓄熱媒体であり、高温と低温の硝酸塩の混合を防ぐのに役立つ。

限られた作業しか行われていない第3世代のシステム（Forsberg 2020年）は、幅60メートル、高さ20メートル、長さ1キロメートルまでの断熱され覆われたトレンチ内の砕石に熱を蓄える。熱伝達媒体としてオイルを使用するLWRに結合されたシステムの場合、200°Cの高温から低温への温度変動を想定すると、砕石10メートルごとに約1GWhの蓄熱が提供される。過剰なエネルギーが利用できる場合、原子炉からの蒸気の一部は、発電のためにタービン発電機に送られるのではなく、石油を加熱する。砕石の下のオイルパンに流れ落ちる岩を加熱するために、砕石の一部に熱い油が噴霧される。油は集められ、再加熱されるために反応器に戻される。電力需要が高いときは、冷たい油が熱い岩に噴霧され、岩の中を流れ、オイルパンによって集められ、水を蒸気に変換するために使用される。蒸気はピーキング蒸気タービン発電機に送られ、発電する。より高い温度で作動する硝酸塩のための並列システムがある。コストは3つの機能によって最小限に抑えられる。砕石は最も安価な蓄熱材である。すべての岩の空隙を埋めるのではなく、塩又は油を岩の上に流すと、熱伝達流体のストックが最小限に抑えられる。ストレージシステムのサイズが大きいと、表面と体積の比率が最小限に抑えられるため、断熱材とライナーのコストが最小限に抑えられる。

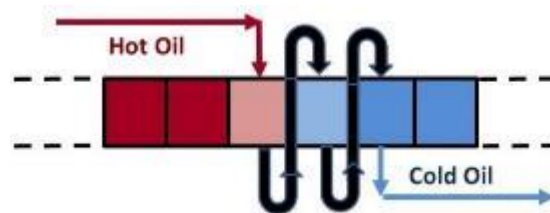


図15. 砕石床のホットオイルによる連続加熱

Source: MIT. Used with permissions.

他にも、低コストを理由として、GWh蓄熱システムに砕石を使用する進行中の作業がある。Siemens（Kosowatz 2019年）は、電気料金が安いときに電気抵抗ヒーターで空気を加熱し、砕いた岩を吹き飛ばして650°Cに加熱するホットロック蓄熱システムを開発している。電気料金が低いときは冷気が熱い岩に吹き付けられて、蒸気ボイラー用の熱風を生成する。

#### 7.2.4 クラッディング処理した鋳鉄

顕熱は、ナトリウム、塩、鉛、又はヘリウムなどの冷却剤に適合するように化学的適合性のために選択されたステンレス鋼の被覆を備えた鋳鉄製の高さ10~20メートルの固く密に詰まった六角形のアセンブリに蓄えられる。クーラントは、ソリッドアセンブリ間を流れる。このオプションは、水、塩、ナトリウム、ヘリウムなどの冷却剤に関連する蓄熱のコストに上限を設けている。それは、適切なクラッドの選択により、あらゆる原子炉冷却材と互換性がある。二次ナトリウムループでの貯蔵を可能にすることにより、低圧二次ループを備えたSFRにとって特に魅力的である可能性がある。このシステムは、貯蔵システム内の可燃性ナトリウムを最小限に抑え、鋳鉄はナトリウムよりも安価である。

蓄熱システムの資本コストのDOE目標は、15ドル/kWhの熱である。市販の硝酸塩貯蔵システムのコストは約\$ 20/kWhである。第2世代の硝酸塩砕石蓄熱システムの予測コストは10ドル/

蓄熱システムの資本コストのDOE目標は、15ドル/kWhの熱である。市販の硝酸塩貯蔵システムのコストは約20ドル/kWhである。第2世代の硝酸塩砕石蓄熱システムの予測コストは10ドル/kWhに近いのに対し、一部の第3世代システムの予測資本コストは週末/平日のストレージを可能にするために100GWhまでの容量でkWhあたりわずか数ドルである。今日、電気の単位あたりの商用蓄熱システムのコストは、電気貯蔵技術よりも3~4倍低くなっている。高度な蓄熱技術は、低コストの建築材料（つまり、リチウム、コバルト、炭素、又は鋼に対する破碎岩石及び蓄熱塩）と高い運用効率を反映して、電気貯蔵技術よりも1桁低いコストになる可能性がある。

## 7.2.5 水素

2つのエネルギー貯蔵技術（熱と水素）の相乗的な組み合わせにより、原子力発電所は、需要とエネルギー生産の間の1時間未満、1時間ごと、及び季節ごとの不一致に対処できる。これには、原子力システムと再生可能システムの統合が含まれ、すべての低炭素生成技術の高い設備利用率を可能にして、総エネルギーコストを最小限に抑える。中心的な問題は、水素市場の将来の規模がこの目標を達成するのに十分な大きさであるかどうかである。

水素生成は、エネルギーを化学的な形で貯蔵するアプローチを提供し、熱又は電気の貯蔵と比較してさまざまな利点を提供する。肥料や液体燃料の生産には大量の水素が使われている。低炭素の世界では、水素は鉄鋼の生産における化学還元剤として石炭に取って代わり（Millner 他 2017年）、バイオ燃料の生産に使用される可能性がある。これらの役割では、水素はその化学的性質のために使用されるが、主にエネルギー源としては使用されない。水素は、輸送車両、ピーキングガスタービンの燃料として、及び工業プロセス用の非常に高温の熱を生成するためにも使用できる。

最近の評価（Miller 他 2020年）は、低炭素経済では水素が総エネルギー需要の10%から30%になる可能性があることを示している。同様に重要なのは、この規模の操業が単一の水素市場や技術に依存していないことである。熱と水素の貯蔵の組み合わせが、必要な規模で季節ごとの貯蔵要件に1時間未満で対処できることは確かである。



## 8 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

執筆：Jordan Cox、Maxwell Brown、及びCaroline Hughes（DOE研究所複合施設の下で運営されている研究所、NREL）

再生可能エネルギーには、水力、バイオエネルギー、地熱、海洋、風力、太陽光など、幅広い技術が含まれる。これらの技術は近年大幅に改善されており、風力と太陽光は独自の急速な改善とコスト削減を達成している（NREL 2019年a）。米国では、非水力再生可能エネルギーから生成される電力は、2010年の合計167.2TWhから2019年には446TWhに増加した。米国エネルギー情報局（EIA 2019a）によると、米国の場合、これは、ユーティリティ規模で2010年の総発電量の4.05%から2019年には10.9%に増加する。水力発電（6.6%）と原子力発電（19.7%）を考慮すると、米国は37.2%の低炭素発電を達成している。

再生可能エネルギーの競争力の高まりにより、過去5年間で、他の発電源と比較して大幅な展開が実現した（EIA 2019年a）。2010年以降の米国における再生可能エネルギーの成長のほぼすべて（98.9%）は、VRE、特に風力と太陽光によるものである（EIA 2019年a）。VRE生成のかなりの割合と電力システムの電力需要（現在の技術を使用して70%以上）のバランスをとることの実現可能性を調べるための研究が行われている（Brinkman 2015年、Novacheck、Brinkman、及びPorro 2018年）。これらの研究は、柔軟な従来の生成ソースにより、VRE資源の展開の増加を統合することが容易になることを示唆している。革新的な技術は、予想される（予測可能な毎日の太陽の傾斜など）又は不確実な（風速の急激な変化など）VRE出力の変化を補うのに役立つ（Mai 他 2012年）。電気の柔軟性に加えて、多くの非電気アプリケーションには、現在、（産業用熱や空の旅などの電化が難しい部門などのアプリケーションについて）コスト競争力のある再生可能エネルギー源がない。したがって、NRELなどの研究機関はINLと積極的に提携して、原子力エネルギーがVREのコンパニオンとして機能する方法と、経済全体の低排出エネルギー供給を増やしながらかVREの展開を支援するための貴重な資産となる原子力の柔軟性を調査している。この章の目的は、米国の電気システムへの再生可能エネルギーの浸透の高まりと相まって、柔軟で低コストの原子力エネルギーの価値を調べることである。この章では、最初に将来の電力シナリオの評価に使用されるNRELソフトウェアについて説明し、次に、実行された分析、結果、及びこの作業から導き出された結論の要約を示す。

### 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

いくつかの組織は、米国の電力システムの進化を調査するために洗練されたモデルを作成した。これらのうち、容量拡張モデリングは一般的なアプローチである。全国的な米国の長期予測ツールの例には、ReEDS（Brown 他 2020年a）、EPRIの米国地域経済、温室効果ガス、及びエネルギー（EPRI 2020年b）、及び米国エネルギー情報局のNational Energy Modeling System（Nalley 他 2019年）がある。これらの各モデルは、将来の電力システムのさまざまな側面を調査し、さまざまな技術や政策シナリオの影響をよりよく理解するためによく使用される。以前

の研究では、モデル間の結果を比較し、これらのモデル間の構造の違いが結果の違いにどのようにつながるかについて説明した（Cole 他 2017年、Hodson 他 2018年）。一般に、これらのモデルは、主要な期間（「夏のピーク」や「冬の朝」など）を表すことで、システムコストを最小限に抑えるか、運用と投資の社会的利益を最大化することを目的としている。すべてのモデルは単純化されており、モデルの結果は常にこれらの単純化と近似に固有の不確実性を反映する。それでも、これらの仮定は、コストの仮定、技術的特性、及び政策が将来のエネルギーポートフォリオと米国の排出削減に与える影響を推定するためにシナリオ間で変更できるという点で有用である。ReEDSは、2050年までの電力部門の進化を調査する幅広い分析に使用されてきた（Cole他 2019年、Mai、Cole、及びReimers 2019年）。

米国版のReEDSは、電力バランスの制約が満たされなければならない134の地域（つまり、発電量と正味の送電損失が負荷に等しくなければならない）と、風力、PV、及びCSP容量の固有の特性と供給曲線を持つ356のサブ地域で構成されている。134のバランシングエリアは、グリッドの信頼性とピーク需要を満たすのに十分な容量がそれぞれ存在することを保証するための運用予備力と計画予備力の要件など、システムの信頼性の制約にも直面している。技術固有の削減率は、資源の可用性を説明するサブモジュールで計算され、技術固有の容量クレジット（計画予備マージンへの潜在的な貢献）は、ピーク正味負荷時間での技術の可用性を計算するサブモジュールで計算される。（Zhou、Cole、及びFrew 2018年）。図16は、ReEDSで表される米国の地域を示している。ReEDSの別のバージョンは、インドを表すように変更されている。米国版とインド版の両方が公開されている。<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> 詳細については、こちらをご覧ください: <https://www.nrel.gov/analysis/reeds/>.



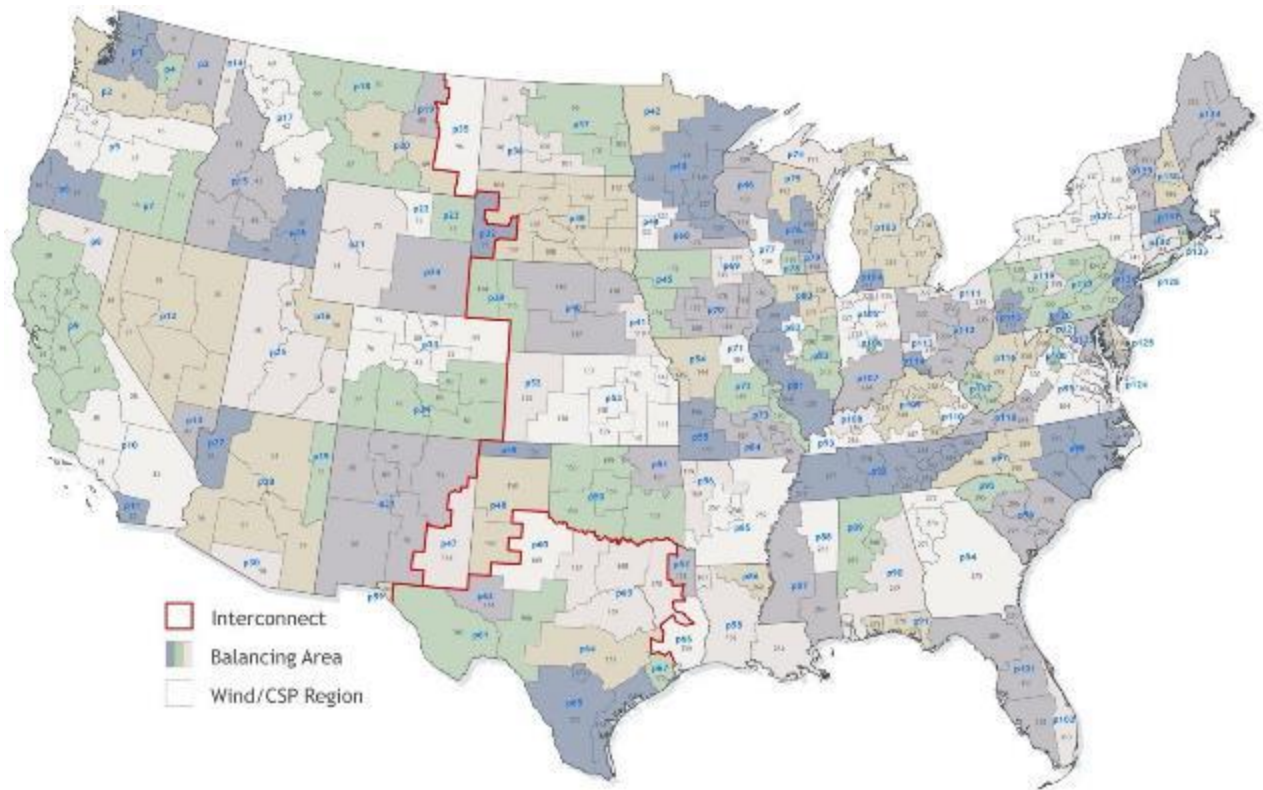


図16. バランシングエリアのある米国のReEDSマップ

Source: (Brown et al. 2020a)

前述のように、ReEDSは、混合整数線形最適化を使用して、投資と生成のコストを最小限に抑える。これは、ReEDSの結果の解釈にいくつかの影響を及ぼす。おそらく最も重要なことは、これは、企業が戦略的に競争する状況とは対照的に、完全な情報を備えた完全競争市場を暗黙的に反映し、経済的に最適化された結果をもたらすことである。さらに、モデルの結果は、新しい発電機のコストと性能、又は燃料の将来の価格などの入力の仮定に大きく影響される。

容量拡張モデルを使用する場合、分析は通常、単一のシナリオに対して実行されるだけでなく、技術パフォーマンス、燃料価格、発電に影響を与えるポリシーなど、さまざまな将来の条件の影響を理解するのに役立つように構築されたさまざまなシナリオで複数のモード実行が実行される。このように、容量拡張モデリングの価値は、将来を完全に予測することからではなく、イノベーション、値下げ、及び技術の決定が将来の世代のポートフォリオに与える影響をよりよく理解することから得られる。ReEDS開発チームは毎年、米国の電力システムにとって重要ないくつかの「標準シナリオ」を作成している (Cole他 2018年、2019年)。

DOE LWR持続可能性プログラムが主導する米国の原子力産業の主要メンバーは、既存のLWRが当初の40年間の運転免許を超えて運転するための技術的及び経済的障壁の両方を研究している。一部の原子炉は、60年及び80年まで運転するための免許を更新した (McCarthy 2017年)。eEDSのベースラインシナリオには、原子力発電所の60～

80年のプラント固有の外因的に課せられた除却率が組み込まれているが、原子炉が最大80年稼働できると仮定する別のオプションがある。内因性の引退が可能になったときにReEDSが示唆しているように、原子炉は経済的な理由で閉鎖される可能性がある。閉鎖を発表した原子炉は、ReEDSモデルで強制的に閉鎖される。これら2つのシナリオの結果を表3に示す。システムの均等化発電原価は、システム全体のコストを総発電量で割ったものであり、エネルギーの単位 (MWh) あたりの米ドル (\$) で表される。

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)

シナリオ	システムの均等化発電原価 (ドル/MWh)	2050年の原子力発電容量 (GWe)	基本シナリオに対する容量増加率 (GWe) の原子力発電
基本シナリオ (60年の原発電寿命)	48.2	47.3	該当なし
80年の原発電寿命	47.2	89.3	188%

表3に要約されているシナリオは「通常のビジネス」タイプのシナリオであるため、原子力の柔軟性のイノベーション、SMRの可用性、統合エネルギーシステムの可用性、又は原子力発電に影響を与える可能性のある政策の変更などの潜在的な将来は含まれない。ただし、この例の目的は、全体的な原子力発電容量を予測することではなく、電力システムの原子力の柔軟性の価値を調べるためのベースラインを設定することである。このシナリオでは、ReEDSによって評価されるように、プラントの寿命を参照の仮定から80年に変更できるようにすることの影響は、原子力発電全体にとって重要である。

## 8.2 原子力の柔軟性のReEDS分析：シナリオの説明

柔軟な原子力キャンペーンでは、NRELはReEDSツールを使用して、米国の電力システムのコンテキスト内での原子力の柔軟性の影響のいくつかを調査した。キャンペーンの主な焦点は、柔軟な原子力エネルギーがVREの高い貢献を補完し、可能にする方法を示すことである。したがって、高VREと高柔軟性の両方の原子力シナリオ、そして最も重要なこととして、全体的な展開に対する原子力の柔軟性（既存の機能と将来のイノベーションの両方）の影響を調べるシナリオが選択された。以下のサブセクションでは、調査されたケースについて詳しく説明する。調査したシナリオの要約も表4に示されている。

このReEDS分析は、原子力エネルギーに独自に関連しているため、いくつかの注意点に注意することが重要である。ReEDSは、米国に焦点を当てた、完全に経済ベースの最適化及び分析ツールである（技術固有の物理的制約がある）<sup>6</sup>。米国の原子力のコストは他の多くの国よりも高い（Wittenstein 他 2015年）。この作業のコストは、国際的な経験とSMRに予測されるコスト

<sup>6</sup> ReEDSのコンテキストでは、ReEDSは原子力建設を線形に推定し、離散単位を推定しない。つまり、ReEDSはSMRを値下げとしてのみモデル化し、柔軟性を高めている。SMRの最小容量又は離散化容量と他のSMR品質は、ReEDS分析の考慮事項ではない。さらに、SMRはまだ米国で商業化されていない技術であるため、これらのパラメータはまだ予測を超えて確立されていない（Varro 他 2019年）。

の一部の両方を含むように選択されたが、分析は米国に対してのみ実行される（Wittenstein 他 2015年、MITEI 他 2018年）。これは、米国の原子炉の建設が最低の国際コストと同等になるように、米国のコスト障壁に対処していることを意味する。原子力は、国家安全保障に価値を提供できること、又は戦略的価値の高い非電気製品（原子力生成液体燃料など）を提供することによっても提供できることを強調することも重要である。ReEDSはこれらの属性を取得しないため、原子力がエネルギーシステムに付加価値を提供する機会を取得できない可能性がある。

### 8.2.1 基本シナリオ

容量拡張と原子力配備に関する以前の作業（Bistline、James、及びSowder 2019年）の主導に続いて、ReEDS分析は、原子力技術に関する唯一の変更が資本コストである基本シナリオを最初に調査した。年次技術ベースラインによると、米国における原子力の現在の夜間資本支出（OCC）は6200ドル/kWである（NREL 2019年a）。OCCは、システムのコストを銘板容量で割る単純化されたメトリックである。原子力配備に対する資本コストの影響を示すために、5つの追加シナリオが実行された。これらの価格は2025年に発効し、その後は年率1%の削減率で削減される。基本ケースと反事実ケースの両方における他のすべての技術の価格は、年次技術ベースライン（NREL 2019年a）から取得された。以前はベースラインを参照していたが、今後この文書では、「ベース」シナリオとそれに基づいて構築されたすべてのシナリオは、80年の原発寿命を想定する。

3,000ドル/kW以上では、原子力の容量と年間発電量はReEDSモデルで変化しない。2,000ドル/kWと1,500ドル/kWの低コストで、原子力発電の大幅な増強がある。これらのシナリオは、原子力イノベーション、高いRE貢献、及び排出政策が原子力配備に与える影響をさらに調査するために使用される。3,000ドル/kW未満のコストは米国では低いが、他の国では達成されていることに注意されたい（MITEI 他 2018年）。今後の作業では、先進国（Gogan 及び Ingersoll 2018年、MITEI 他2018年）におけるこれらのコスト削減（6,200ドル/kWから3,000ドル/kW以下）の実現可能性を検討し、より広いシナリオ空間を検討して、ここで見られるよりも高い資本コストで経済的に展開される電力へと、原子力の機会を特定する必要がある。表4は、原子力の資本コストのみが変更される基本シナリオのシステムパラメータをまとめたものであり、原子力コストが電気システム全体にどのように大きく影響するかを示している。たとえば、原子力の設備利用率が高いため、低コストの原子力は、全体的なエネルギー生成を維持しながら、システム全体の銘板容量を削減する。

この章の残りの部分では、コストは4つのカテゴリに分類される。数値を潜在的な将来のシナリオとより適切に結び付けるために、変更なし（6,200ドル/kW）、ベースライン（3,000ドル-5,000ドル/kW）、低コスト（2,000ドル/kW）、及び非常に低コスト（1,500ドル/kW）とする。

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)

新しい原子力の設備投資	変更なし	ベースライン	低コスト	非常に低コスト
2050年の総システム容量 (TWe)	1.75	1.75	1.75 <sup>7</sup>	1.71
2050年の年間システム需要合計(TWh)	5.27e3			
2050年の設置された原子力発電容量(GWe)	89.3		105.2	107.0
2050年の発電量 (TWh)	713.5		840.2	854.9
発電容量中の原子力発電%	5.1%		6.0%	6.3%
発電量中の原子力発電%	13.5%		15.9%	16.2%
システムの均等化発電原価 (ドル/MWh)	47.2		46.6	46.0
2050年のGHG排出量 (百万トン)	884		891	893 <sup>8</sup>

### 8.2.2 柔軟な原子力、高いVRE浸透、及び排出制限

低コスト及び非常に低コストのCapExシナリオを使用して、これらのCapExシナリオの他の順列が開発された。これらの順列は、原子力の柔軟性、高いVREの寄与、高いVREの浸透と結びついた原子力の柔軟性、及び低排出シナリオを取り巻くイノベーションの影響であった。それぞれ、このセクションでさらに説明する。

原子力の柔軟性のシナリオでは、原子力は1時間でその出力を100%に上昇させることができ、最小発電要件はなかった。さらに、ランピング中に原子力が特定の電力レベルに留まらなければならない最小時間はなかった。これは、原子力がほぼ完全な柔軟性を達成しているが、数分で100%の容量に上昇させるバッテリーなどの電子駆動ソースほど高速ではないことを前提としている。このランピング率は非物理的であるが、ReEDSは物理ベースのモデルではなく経済的なモデルであるため、このパラメータは、原子力配備に対する柔軟性の影響に上限を設けるために選択された。より現実的なランピング率は天然ガスに近く、ReEDSでは毎分約10%の速度で変化させる可能性がある (Brown 他 2020年a)。この観点から、物理ベース又は生産コストモデルは、電力システム運用のさらなる解決を考えると、異なる結果を生み出す可能性がある。

高いVRE寄与をシミュレートするために、低いVRE価格の年次技術ベースラインシナリオが使用された (NREL 2019年a)。表5は、基本及び低コスト (高浸透) VREシナリオのこの分析に使用されるVREのOCCの一部をまとめたものである。表5にリストされているもの以外にも

<sup>7</sup> これらのシナリオ全体で、システムの総容量の変動は0.005TWe未満であった。

<sup>8</sup> 直観に反するが、低コストの原子力のシナリオでは、原子力発電容量の増加に伴って排出量が増加する。これは、原子力が排出資源であるためではなく、これらの場合に原子力を追加することで天然ガスの増加が可能になるためである。この場合に挙げられているシナリオは、原子力コストのみに焦点を当てており、VREの増加や排出量の減少には焦点を当てていない。これらは後のシナリオで対処される。



追加の技術があり、詳細については、年間技術ベースラインをご覧ください。ただし、ここに挙げられている技術は参照用に提供されている。VREコストが低いため、VRE容量が大幅に展開され、柔軟な原子力イノベーションと組み合わせて、柔軟性の追加がVREの高い普及の下で米国の電力システムにどのように影響するかを調べた。

表5. ReEDS分析で使用する選択された基本及び低VREの夜間資本コスト (NREL 2019年a)

	2025年の 基本VRE夜間資本コスト (ドル/kW)	2025年の 低VRE夜間資本コスト (ドル/kW)
陸上風力	1,360ドル	1,283ドル
公益事業体規模の太陽光発電	956ドル	724ドル
住宅の 分散型太陽光発電	1,960ドル	1,510ドル

低排出シナリオでは、2005年のレベルから2050年までに95%削減される排出上限が選択された。これにより、モデルは、発電時点での最終用途排出量が少ないかゼロの発電源を選択する必要がある。これには通常、ライフサイクル排出量が少ない (<50 gCO<sub>2</sub> / kWh) 技術が含まれるが、ライフサイクル排出量はReEDSには含まれていない。この基準に適合する技術は、原子力、炭素回収を伴う天然ガス、選択された再生可能エネルギー (CSP、地熱、太陽光発電、風力を含む)、及びバッテリー貯蔵技術である (Schlömer他 2014年)。上記の技術は、発電の時点で排出量を、ほとんど又はまったく生成しないが、ライフサイクル排出量の見積もりには、これらの技術のコンポーネントの開発、構築、及び輸送に使用されるすべての排出量が組み込まれているため、ゼロではない。

複数の発電機と複数のエネルギーユーザーを組み込んだ統合エネルギーシステムについては、詳細に検討されていない。統合されたエネルギーシステムを適切に分析するために、ReEDSは、原子炉の電気出力が低下するときに補償を提供する必要がある。現在、これはReEDSに実装されておらず、この作業から除外されている。

この調査で検討した指標は、電力システム容量 (GW) と年間発電量 (TWh)、原子力発電容量 (GW) と年間発電量 (GWh)、容量と発電量の両方における原子力からの寄与率、MWhあたりのシステム平均コスト (均等化発電原価 (ドル/MWh))、システム全体のコスト<sup>9</sup>、基本ケースからの節減 (ドル)、及び2050年排出量 (MMton)。ここで説明するシナリオのパラメータの要約を表6に示す。

<sup>9</sup> この場合、システムコストは、投資と運用のコストのモデル化された年数の合計と見なされ、5%の割引係数で2020年まで割引される。

表6. シナリオの要約

シナリオ (ラベル)	記述
柔軟な原子力 (Flex)	既存及び新規の両方の原子力発電は、最小発電時間又は保持時間に制限なしに、1時間あたり100%上昇することが許可されている。
高いVRE浸透 (High VRE)	2025年以降、ベースシナリオのVREコストの代わりに、年間テクノロジーベースラインの低いVREコストが使用される。
柔軟な原子力+高VRE (High VRE+Flex)	柔軟な原子力と低VREコストの両方が実装されている。
低排出量	原子力の柔軟性もVREコストも変更されないが、電力のGHG排出量は2005年の排出量の5%に制限されている（95%の排出量削減）。

### 8.3 結果

前述のシナリオについて、ReEDSシミュレーションの結果を表7に示す。必要に応じて、ここで検討したシナリオと基本シナリオの比較値が表に含まれている。計算の重要な注意点は、エネルギーシステムの節減は将来価値の割引率に基づいているということである。割引率を変更するか、2050年だけの値を分析すると、システムコストとシステム節減の数値が大幅に増加する。さらに、両方の低排出シナリオで、基本シナリオを超える節減はマイナスである。つまり、すべての排出技術を非排出技術に置き換える場合、排出上限は追加の電力部門コストを負担する。この計算では、排出によって発生する可能性のある外部コストは無視される。表7は、これらの結果を原子力発電容量（GWe）及び原子力年間発電量（TWh）の観点からグラフで表したものである。



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

シナリオ	コスト	Flex	High VRE	High VRE+ Flex	上限
総システム容量 (TWe)	低コスト	1.713	2.032	2.054	2.11
	非常に低コスト	1.710	2.053	2.044	1.93
原子力発電容量 (GWe)	低コスト	104.8	89.3	89.6	135.2
	非常に低コスト	107.4	90.6	99.6	214.2
原子力発電量 (TWh)	低コスト	836.9	714.5	708.8	998.2
	非常に低コスト	857.0	722.9	791.3	1626
原子力発電容量%	低コスト	6.12	4.39	4.36	6.41
	非常に低コスト	6.28	4.41	4.87	11.10
原子力発電量%	低コスト	15.8	13.5	13.4	18.8
	非常に低コスト	16.2	13.6	14.9	30.7
システムの均等化発電原価 (ドル/MWh)	低コスト	45.9	43.3	43.0	53.4
	非常に低コスト	45.8	43.0	42.9	49.0
2050年年間システム <sup>10</sup> コスト (10億米ドル)	低コスト	243.27	229.49	227.9	283.02
	非常に低コスト	242.74	227.9	227.37	259.7
基本シナリオに対する2050年の年間節減 (10億米ドル)	低コスト	6.89	20.67	22.26	-32.86
	非常に低コスト	7.42	22.26	22.79	-9.54
2050年のGHG排出量 (百万トン/年)	低コスト	889	519	501	121
	非常に低コスト	889	509	506	121

<sup>10</sup> 2050年のシステムコストと節減額は、2050年の年間システムコストと節減額であるが、2004年には、5%～7%の調整済み割引率に基づいて米ドルを調整した。詳細については、将来のコストの調整方法に関するReEDSのドキュメントを参照されたい (Brown 他 2020年a)。

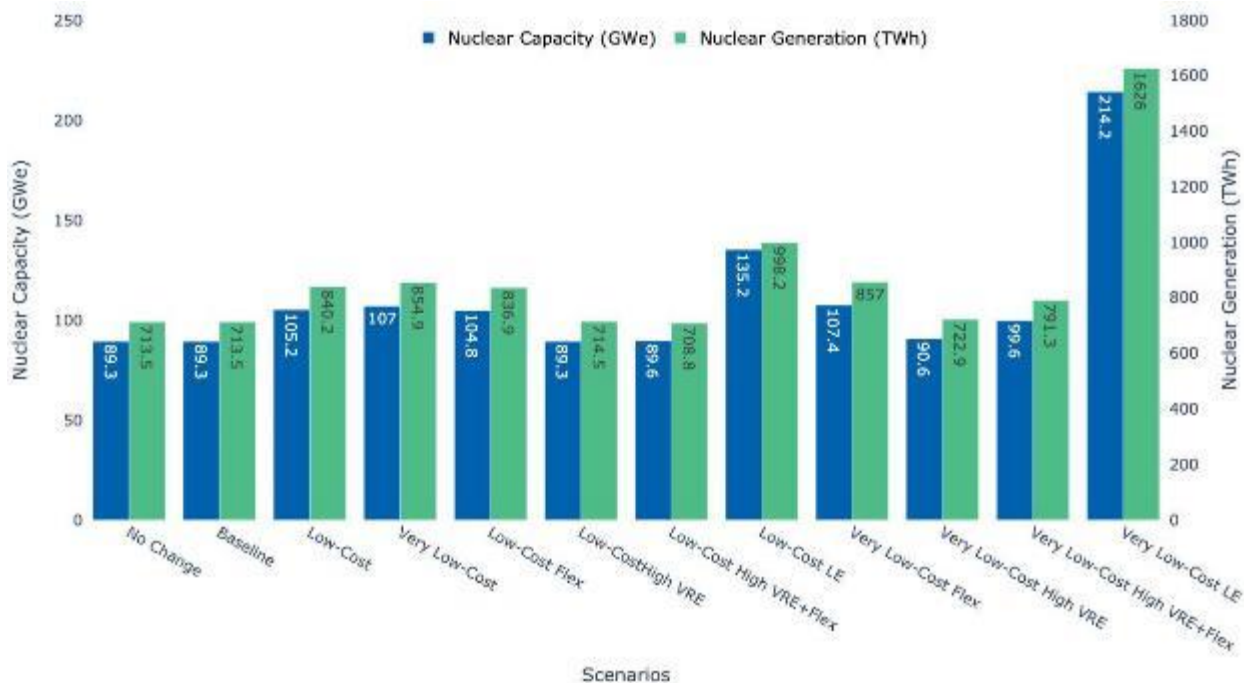


図17. 表4及び表6の所定のシナリオに基づいて、2050年にReEDSで計算された原子力発電容量

Source: NREL. Used with permissions.

## 8.4 考察

この作業の主な結果は、原子力エネルギーのどの属性が高VREシナリオの下で電力システムにとって最も価値があるか、及び予測される展開を生成するためにこの値をどのように測定するかを理解するための追加調査の必要性を示している。これらの結果から、追加の観察により、柔軟な原子力、VRE、及びそれらを組み合わせて低コストで信頼性の高いグリッド性能を提供する能力の間の相互作用を解明できる。

- 低コストと非常に低コストの両方のシナリオで、原子力の柔軟性のみを追加すると、原子力の全体的な展開とVREの展開にわずかな影響がある。ただし、どちらのシナリオでも、基本シナリオに原子力の柔軟性を追加すると、割引されたシステムコストがそれぞれ68.9億ドルと74.2億ドル削減され、低コストと非常に低コストになる。これらはそれぞれに、原子力の柔軟性は、採用されている他の技術の代わりに、VREのバックストップとして電力システムにとっての貴重な資産であることが証明できることを意味する。
- 低排出シナリオでは、低コストの原子力を利用できるため、低コストの原子力がない低排出シナリオと比較して、全体的な電力コストが大幅に削減される。結果は、排出量が制限されたシステムが、原子力の柔軟性を追加することで、平均価格の53.4ドル/MWhから49.0/MWhに減少することを示している。この差は小さいように見えるかもしれないが、TWhの年間発電量を掛けると、低コストの原子力を利用できるため、システムコストの現在価値が233億2000万ドル変化する。原子力発電容量に関しては、この排出制限シナリオにより、低コストシナリオでは40 GW、非常に低コストシナリオでは約120GWの原子力発電容量が

増加する。これは、ベースラインのVREコストシナリオにも当てはまる。このシミュレーションには、低コストの原子力に加えて、柔軟な原子力の影響は含まれていなかった。これは、将来の分析のための次のステップである。

- 低コストのVREと柔軟な原子力が利用できるため、柔軟性のない対応するシナリオと比較して、システム全体のコストが削減される。言い換えれば、低コストで柔軟な原子力エネルギーの導入は、単なる低コストの原子力だけでなく、システムコストの削減とVRE容量の増加に貢献する。代替のReEDSシナリオでは、システムの柔軟性は、炭素回収を伴う天然ガス、エネルギー貯蔵、又は再生可能エネルギーの削減の増加などの他のエネルギー源によって提供される。原子力がこの低価格に達すると、これらの代替技術のいくつかに取って代わり始める。この章で説明するシナリオには、柔軟性の代替ソースの堅牢な分析が含まれていないため、さらに調査する必要がある。

NICE Futureイニシアチブと柔軟な原子力キャンペーンの目標は、原子力コミュニティと再生可能コミュニティの間のコラボレーションを促進することである。このレポートの調査結果、特に低コストのVREと柔軟な原子力の両方を利用できることによるシステムコストの削減に関する調査結果は、NICE Futureイニシアチブのテーマをサポートするのに役立つ。柔軟な原子力とVRE生成の利点を組み合わせて検討する全体的な計画プロセスは、より持続可能で、経済的で、信頼性の高い米国の電気システムをサポートする可能性がある。この分析は、これらの利点をさらに定量化するために将来の作業を実施できることも示唆している。

## 9 東京工業大学：低炭素社会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

執筆：尾本彰（東京工業大学）

MIT-Japanの調査は、2015年初頭から2018年初頭にかけて実施され、2017年9月に最終報告書MIT-ANP TR171（MITEI 他 2018年）がリリースされた。

以下に示すこのレポートの重要なメッセージは、今日でも有効である。

1. 蓄熱技術と原子炉と組み合わせ、信頼性の高い送電可能な電力を提供する。このことにより、変動する再生可能エネルギーの大規模な展開と持続的なエネルギー供給を同時に達成できる。
2. 蓄熱や原子力のハイブリッド運転など、原子力を使用して非電力部門を脱炭素化することは非常に重要である。たとえば、Nuclear Air-Brayton Combined Cycleなどである。
3. 規制及びその他の政策に変更が必要である。

MITのGenXコードをモデリングツールとして使用したこの研究では、原子力を使用した脱炭素化は手ごろな価格の電気料金をもたらすことも明らかになり、集中的な脱炭素化のための統合エネルギーネットワークとして提案された（図18及び図19を参照）。

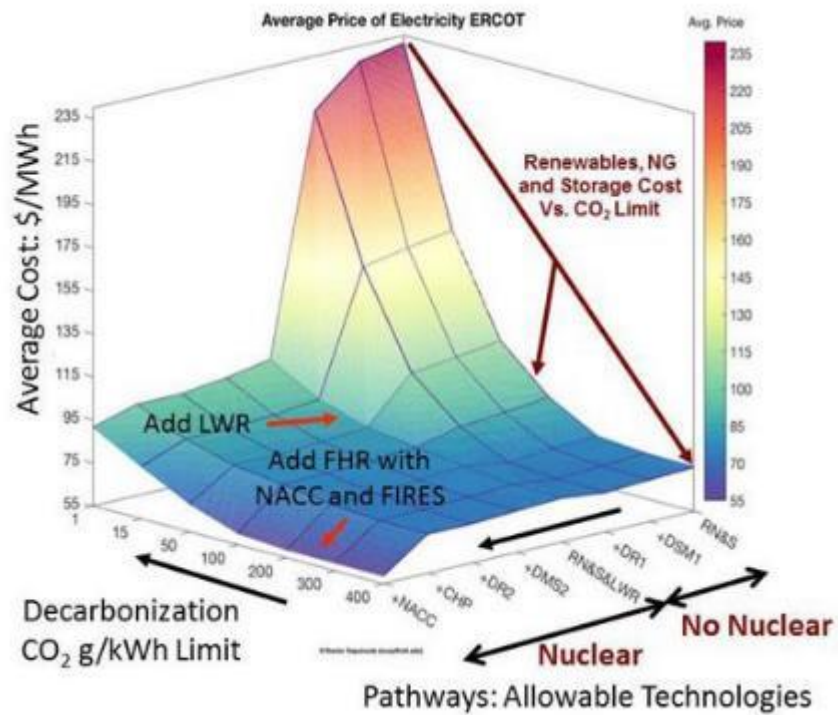


図18. 脱炭素化に関するMITの研究によって予測されたさまざまな技術ポートフォリオによる脱炭素化のコスト

Source: MIT. Used with permissions.

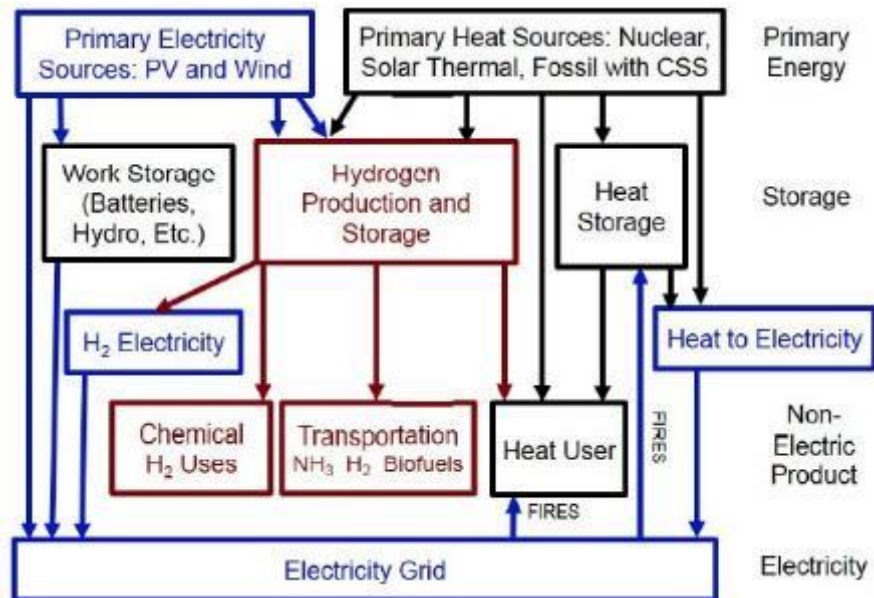


図19. 電気と水素の生産、熱と電気の貯蔵、化学処理を可能にするハイブリッドエネルギーシステムのエネルギーフロー

Source: MIT. Used with permissions.

MITのGenXコードは、2050年の米国のさまざまな独立系システムオペレーター（具体的には、高品位の風力及び太陽光設備を備えたテキサス電力網）の電力部門のモデル化するために作られた。モデル化における仮定とデータの詳細は該当レポート及びSepulvedaによるレポート（Sepulveda 2016年）に記載されている。さまざまな管轄区域での同様の検討結果と使用されたデータは、2018年9月にリリースされたMITのレポート（MITEI 他 2018年）で入手できる。

この研究は、将来的に原子力分野で民間の活力を活性化するために、政府（DOE / METI）と学界（MIT / Titech）によって2014年半ばに開始された。候補の中から、原子力と再生可能エネルギーの統合がトピックスとして選定され、2014年後半に作業内容が合意された。MITと東京工業大学（Titech）の他に、参加した研究者は東京大学、JAEAなどであった。

MIT-Japan研究の継続実施は、財政上の理由により2018年に中断された。日本では、現在、東芝/東京大学/Titechが、LWR蓄熱の実行可能性について研究を行っており、グリッド内で変動する再生可能エネルギーの割合、システムの経済的実行可能性、及び貯蔵のサポートアプローチと適合するLWR蓄熱システムを検討している。

(a) エネルギー分野がGHG排出量の約70%を占める。(b) 各国の削減計画の集計結果は、地球温暖化を2°C未満に制限し、1.5°Cを目標とするパリ協定によって設定された世界的な行動目標をはるかに下回っている（UNEP 2019年）という現在の状況を考えると、クリーンな原子力エネルギーの必要性は大幅に拡大し、単に発電するだけでは十分ではないことは明らかである。

原子力と変動する再生可能エネルギーとの関係について、一般の人々は、原子力は太陽光や風力と関係性がないと考えるかもしれない。GHG排出量を削減するには、原子力と変動する再生可能エネルギーの両方が重要であり、どちらも資本集約的であるため、経済性からは高い設備利用率が必要である。MIT-Japanレポートは、両方の適用においては、相互互換性が存在し、原子力は、原子力の設備利用率を維持しながら、太陽光又は風力からの電力供給をサポートできると指摘している。例えば、原子炉が発電量を減らし、そのエネルギーの一部を水素生産に使用したり、あるいは貯蔵すれば、太陽光発電による電力供給を削減（供給が需要を超えている場合）するようなケースは減ることになる。この章において、「変動する」とは、太陽光発電の場合、雲、夜、季節による電力供給量の変化を意味し、「ディスパッチ可能」とは、需要状況に応じて、負荷ディスパッチセンターから供給を制御し、変化させることを意味する。つまり、原子力発電所や化石燃料発電所などの供給源において、電力供給を制御可能であることを意味する。

また、ヨーロッパ諸国の比較研究では、ディスパッチ可能エネルギー（原子力及び水力）のシェアが高い国は、gCO<sub>2</sub> / kWhの観点から電気料金とコストが低いことを示している。エネルギー政策とエネルギー制度は、ディスパッチ可能エネルギーを確保する上で重要な役割を果たしている。重要なのは、社会への負担を最小限に抑えて脱炭素化を実現する方法である。これは、MIT-Japan研究の原動力であり、現在でも有効な考慮事項である。



## 10 英国原子カイン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

執筆：Philip Rogers 博士、Gareth Peel 氏（英国原子カインノベーション研究室）、及び Daisy Ray 博士（英国ビジネス・エネルギー・産業戦略省）。

2019年、英国は2050年までにネットゼロGHG排出量を法制化した最初の主要経済国であった。ネットゼロとは、生成されるGHG排出量と大気から除去される量のバランスをとることを指す。ネットゼロを達成するために連携して機能する2つの貢献アクションがある。既存の排出量を削減することと、GHGを積極的に除去することである。つまり、2050年までの道のりでは、英国のエネルギーシステムを完全に脱炭素化する必要があり、残りの排出量は、直接的な空気を取り込みや土地利用やライフスタイルの変更などの炭素除去活動で補う必要がある。これは、変化するエネルギー使用プロファイルと需要の全体的なスケールアップを実現するために、低炭素技術をどのように展開できるかを検討するきっかけとなった。英国の気候変動委員会（CCC）は、図20に課題の規模を示している。

最も排出量の多い4つの部門は、運輸、エネルギー供給（石炭、石油、天然ガスなどの燃料の燃焼から発電）、ビジネス（電力の商用利用）、住宅（住宅の暖房）である。これらを合わせると、2018年の排出量の約84%を占める（BEIS 2020年）。

英国の全体的なエネルギー使用量は約1,700TWh（BEIS 2019年b）であり、2050年までにこれは約40%～50%増加すると予想され、電力需要は現在の300 TWhから2倍になる（Stark 他 2019年a）。英国の電力供給の53%は低炭素であり、VREから21%、原子力から20%、バイオエネルギーと水力から10%である（BEIS 2019年b）。このエネルギー構成は、一般的に、原子力が柔軟に機能することを必要としなかった。しかし、最近、需要が非常に少ない時期に、英国の原子力発電所の1つは、電力網のバランスをサポートするために出力が減少した。



図20. CCCレポートの重要なメッセージ

出典: CCC.

図21は、原子力からさまざまな部門への予想される脱炭素経路を示している。これらの多くは、脱炭素化が困難な分散型又は移動式の炭素エミッターである。英国のエネルギーシステムに関する最近のモデリング出力は、これらの目的に適用される原子力が、最低コストのネットゼロエネルギーシステムを達成するのに有利であることを示している。そうすることで、これはまた、商業的に魅力的な方法で、電気及び他のエネルギーベクトル（水素及び熱）のより柔軟な供給の必要性との相乗効果を提供する可能性がある。したがって、システム全体の脱炭素化は、原子力が確立された技術と新しい方法で連携する機会を提供する。

英国には、第2世代Magnox炉、第3世代先進ガス炉、第3世代PWRの群を商業運転してきた、民間原子力の研究、開発、運用、廃止措置の長い歴史がある。英国でのこれらの原子炉群の配備は、1950年代の最初の商用民間原子炉群にまでさかのぼる、柔軟な運用の要素を含む民間原子力の経験をもたらした。

ベースロード発電と並んで、英国は歴史的に民間の原子炉の出力を次の目的で使用してきた。

- 安全な電力源に依存する産業施設の補完的な立地
- 原子力発電所の近くにある揚水発電などのエネルギー貯蔵システム
- 原子力発電所と併置された工業用地の地域熱供給。

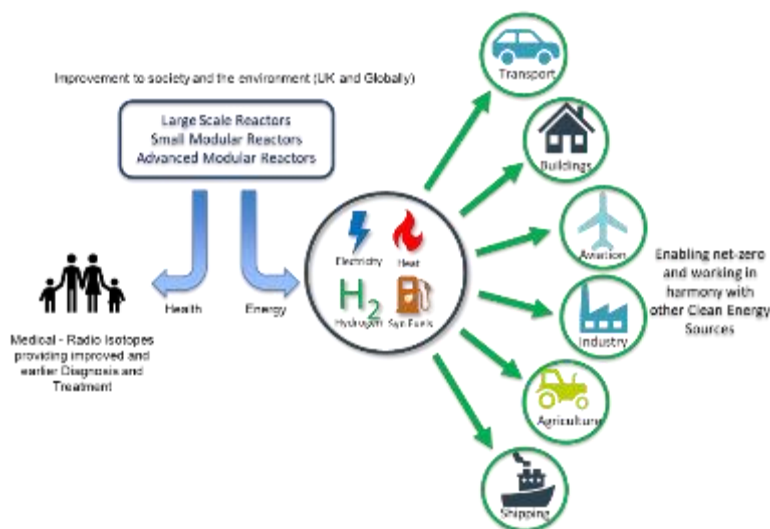


図21. 民間原子力の柔軟な可能性

出典: U.K. BEIS. Used with permissions.

## 10.1 英国の柔軟な原子力

英国の民間原子力発電所は、1956年にエリザベス2世女王が、世界初の商用民間原子力発電所であるCumbriaのCalder Hallに新しい発電所を開設したことにさかのぼる。これは英国での民間原子力発電の始まりであり、これまでに3種類の原子炉が配備されてきた。11基のサイトにまたがる26基の原子炉のMagnox群（現在は廃止）、7基のサイトにまたがる14基の原子炉の改良型ガス炉群、及びSizewell Bの単一PWRである。

これらの技術タイプの運用統計は例外的であり、原子力は引き続き英国のクリーンな電力生産に最大の貢献者の1つである。前世紀の後半を通じて、英国の原子力発電容量は着実に増加し（図22を参照）、1994年に12.7GWeでピークに達した。これは、当時、総設備容量の約17%であった（Roberts及びClark 2018年）。

ほとんどの場合、英国の原子力発電所はフルパワーで稼働しており、ベースロード電力を供給している。1950年代から1960年代にかけて、原子力からのエネルギー供給、貯蔵、使用の相乗効果を利用して、英国の原子力発電所の出力を最大化した。この章では、採用されたアプローチのいくつかについて説明する。

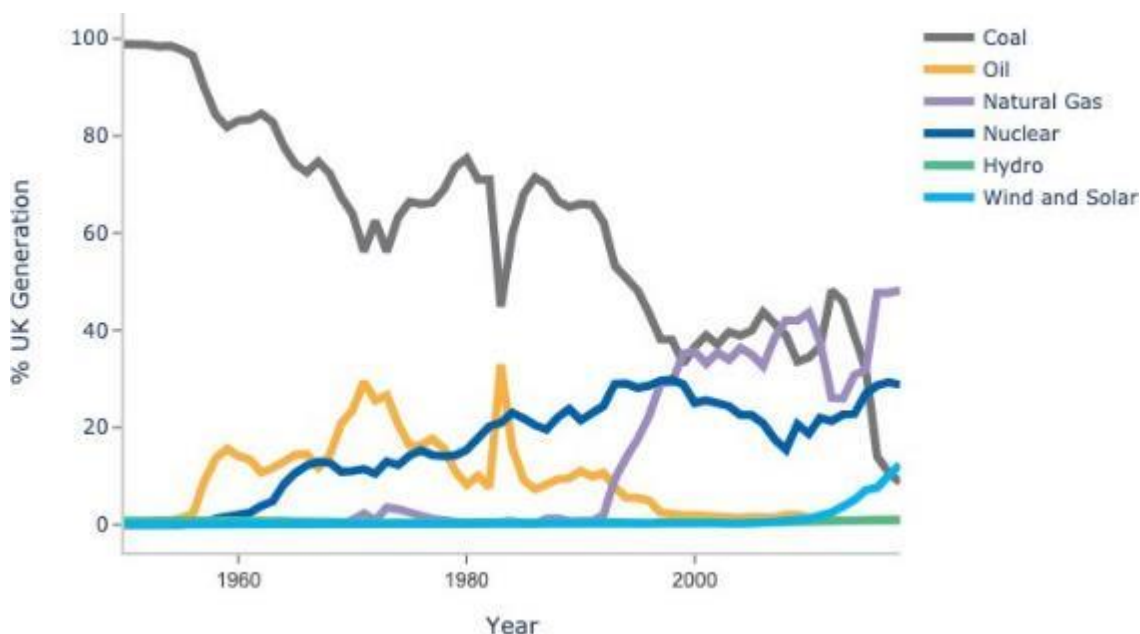


図22. 燃料源による英国の電気出力

出典: (BEIS 2019c)

### 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

Wylfa 原子力発電所は、英国の Magnox 発電所の最後のものであった。その2基の原子炉は1971年から2015年の間に運転され、合計980MWeの出力を提供した。この工場は、ウェールズ北西部に位置する Anglesey 島に建設され、重要な都市開発や産業開発から遠く離れている。島の経済の成長を刺激し、地元の仕事を提供するために、アルミニウム製錬所が発電所から15マイル以内に同時に建設され、新しい地元の信頼できるエネルギー資源を活用した。運転中、アルミニウムプラントは専用の大容量電気ケーブルを介してWylfaプラントから255MWeの電力を引き出した。Anglesey Aluminum は1971年から2009年まで成功裏に運営され、540人の労働者を雇用し、Wylfaサイトの直接的な地域経済的利益を追加した。

Anglesey Aluminum プラントの課題は、Wylfa プラントの閉鎖が予定された後、電力供給の契約を再交渉できず、現実的な地域の代替の電力源がないため、アルミニウム業が2009年に閉鎖されたことであった。

### 10.1.2 エネルギー貯蔵システム

英国には、北ウェールズに2つの揚水エネルギー貯蔵プラントがあり、それらは Ffestiniog と Dinorwig である。両方のプラントは、現在廃止されている2つの原子力発電所、Wylfa と Trawsfynydd の手の届くところにある。当時の記事は、揚水発電所と地元の原子力発電所との相乗効果を活用するという戦略的意図に言及している (Lovins 1973年)。エネルギー貯蔵プラントは、それぞれ1963年と1982年に稼働を開始し、現在も稼働を続けている (Electric Mountain n.d.)。

揚水エネルギー貯蔵システムは、需要が少ない時間帯（夜間と想定）にグリッドに過剰な電力を利用して、水を隆起した貯水池に汲み上げる。その後、電力需要が高い時期（たとえば夕方）

に重力を利用して水を放出し、ポンプを逆転させてタービンにする。Ffestiniogの容量は、Dinorwigの2セットのポンプ/タービンで360 MW、6つのポンプ/タービンで1.7 GWで、後者の稼働時間はフルトップ貯水池から5時間である。

### 10.1.3 地域熱供給

地域熱供給を推進するための民間原子力の使用は、Calder Hallでの最初の民間原子炉の運転にまでさかのぼる。40年以上にわたり、SellafieldサイトのCalder Hall原子炉は、地域の熱ネットワークを介した工業プロセスの熱と熱供給に対するサイトの需要を満たすために蒸気を供給していた。

産業用熱用途での原子炉の使用は、2003年に原子炉が廃止されるまで稼働していたCalder Hallの設計に不可欠であった。1998年に、エネルギーの需要の継続に対応するために、サイトの周辺に168MWeの代替ガスプラントが建設された。これは、電気及び熱エネルギーコージェネレーションでサイトをサポートするための原子炉の貢献の価値と規模の概要を示している。

## 10.2 歴史的教訓

原子力技術と非原子力技術の相乗効果を活用するための以前の活動から得られる教訓は、地域と国のエネルギーシステムのバランスをとるためのエネルギー資産の戦略的計画と、地域の利益を可能にする地域の考慮事項に焦点を当てている。FfestiniogとDinorwigの揚水発電資産は、英国のVRE供給のバランスをとることを含め、より一般的にエネルギー貯蔵に焦点を合わせているが、どちらも重要な国の資産であり続けている。

Wylfa発電所と提携したAnglesey Aluminiumの運用上の成功と、Calder Hall原子炉からSellafieldサイトへの地区及びプロセス熱の長期供給は、地域のエネルギー供給を最大化するための並行思考が成功し、重工業、恒久的な地元の仕事とより広い経済的利益をサポートできることを示している。ただし、立地や規制と同様に、供給問題の長期的な安全性を考慮する必要がある。これは、産業クラスターの脱炭素化に関する英国の現在の考え方に関連している。

英国政府は、最もエネルギー密度の高い工業地域、つまりクラスター（BEIS 2019年a）の調査を実施した。これは、これらの地域の需要が電力と工業用熱の点でかなりのものであることを示している。エネルギー供給と産業エネルギー使用の地域及び地域の戦略計画を通じて、大きなメリットを得ることができる。英国の以前の経験からの教訓を理解することにより（第10.1章で述べたように）、産業クラスターが地域レベルでの脱炭素化のために原子力エネルギーを活用する機会がある。SMR（第3世代と第4世代の両方の高温）も、これらの地域の脱炭素化の取り組みをサポートするためのより柔軟な立地の機会を提供する可能性がある。

### 10.3 将来のネットゼロエネルギーシステムのモデル化

今日、政府は、最も費用効果の高いルートで将来のエネルギーを満たす必要があることを可能にするという課題を抱えている。関連する意思決定をサポートする多数の予測ツールがあり、それらはすべて、経済的、技術的（技術の成熟度を含む）、社会的/政治的基準を含む一連の選択基準に応じて、さまざまな入力を使用してソリューションを導き出す。それらはまた、思考とデータの可用性の制限に基づいている。



英国が2050年までのネットゼロGHG排出量を法制化して以来、モデル化される潜在的な将来のエネルギーシナリオの範囲が新たな焦点になった。この章では、柔軟性に関連するいくつかの結果について説明する。

### 10.3.1 CCCレポート

CCCレポート (Stark 他 2019年b) は、他のツール (Stark 他 2019年a) の中でも、エネルギーシステムモデリング環境ソフトウェアを使用して、2050年の英国の将来のエネルギーシステム要件のいくつかのシナリオと、ネットゼロを果たす可能性のあるルートを予測する。エネルギーシステムモデリング環境モデルは、排出原単位、資源の利用可能性、技術開発率、及びシステムの容量と柔軟性を考慮したコスト最適化モデルである。CCC作業の場合、入力はCCCメンバーとそのアドバイザーによって特別に設定される。

さまざまな低炭素技術、ライフスタイルの変化、土地利用の変化に基づいて、多くのエネルギーシステムシナリオがモデル化されている。2019年以前は、英国は1990年のベースラインレベルから2050年までに排出量を80%削減することを目標としていた。分析によると、エネルギーシステムに合理的な変更を加えることで、この目標を達成する信頼性は比較的高くなる。ただし、100%の排出削減目標 (ネットゼロ) を達成するには、幅広い投機的対策と技術 (又は予測可能な技術に関する仮定) を導入する必要がある。投機的な仮定の例は、炭素回収及び貯留技術からの非常に高い (すなわち、99%) 回収率を果たすことができるというものである。

レポートは、主に輸送と熱供給の電化のために、2019年から2050年の間に英国の発電量を2倍にする必要性を概説している。これは、低炭素電力の4倍の増加に相当し、30~60GWeの柔軟なベースロード発電の要件が等しいと予測している。これは、再生可能エネルギーインフラストラクチャの大規模な構築に追加される。CCCは、将来のエネルギー生成資産の商業的事例が、それ自体で、又は柔軟なエネルギー変換システムと提携することによって、プロジェクトによってどのようにサポートされるかを強調する柔軟性の重要性を概説している。

### 10.3.2 Energy Systems Catapult

Energy Systems Catapultは、ネットゼロエネルギーシステムを実現するための潜在的な将来の経路を分析した。最新の作業 (McKinnon、Milne、及びThirkill 2020年) は、2つの主要な展開シナリオに焦点を当てている。(1) 時計仕掛け、国レベルの意思決定がエネルギーシステムの開発を推進する集中型アプローチ。(2) パッチワーク、地方及び地域の意思決定が全国的なアプローチの変動性をもたらす分散型アプローチ。

入力パラメータのセットが与えられると、モデルは2050年に最小コストのエネルギー構成を見つけ、必要となる位置エネルギーシステム資産を生成する。出力は5年間隔で提供され、短期、中期、及び長期の技術への投資と展開に関する後悔の少ない決定が何であるかをユーザーに示す。

原子力は、いくつかの個別の技術、つまり大規模な原子力とSMR (HTGRの形で第3世代と第4世代の両方) としてモデル化されている。これらのさまざまな資産タイプの経済的、立地的、及び技術的属性はすべて、コージェネレーションと柔軟性を含めて考慮される。本稿の執筆時点で、エネルギーシステムモデリング環境モデルは、高温熱からの水素の明示的な生成を含むように、さらに更新される可能性があった。



図23と図24は、各シナリオに基づいて2050年に予測されるエネルギー構成を示している。時計仕掛けのシナリオは、プロジェクトの実施学習を通じてコストを削減する国家プログラムにより、より高いレベルの原子力配備を示している。パッチワークのシナリオでは、VREから供給されるエネルギーの割合が高いため、季節間及び日中の貯蔵に非常に高い需要があり、水素タービンがピーク電力需要を提供する。水素供給は主に、削減された再生可能供給と専用の再生可能供給の両方を使用した電気分解から行われる。

Energy Systems Catapultの調査結果は、柔軟性を重視し、さまざまなエネルギーニーズ、特に地域熱供給と電気に対応する原子力の可能性を強調している。原子力配備に関する感度調査の一環として、熱化学水素製造と提携したHTGRは、予測される2050年の需要の約3分の1、つまり50～100 TWhまで水素を生成するコスト競争力があるようである（McKinnon、Milne、及びThirkill 2020年）。

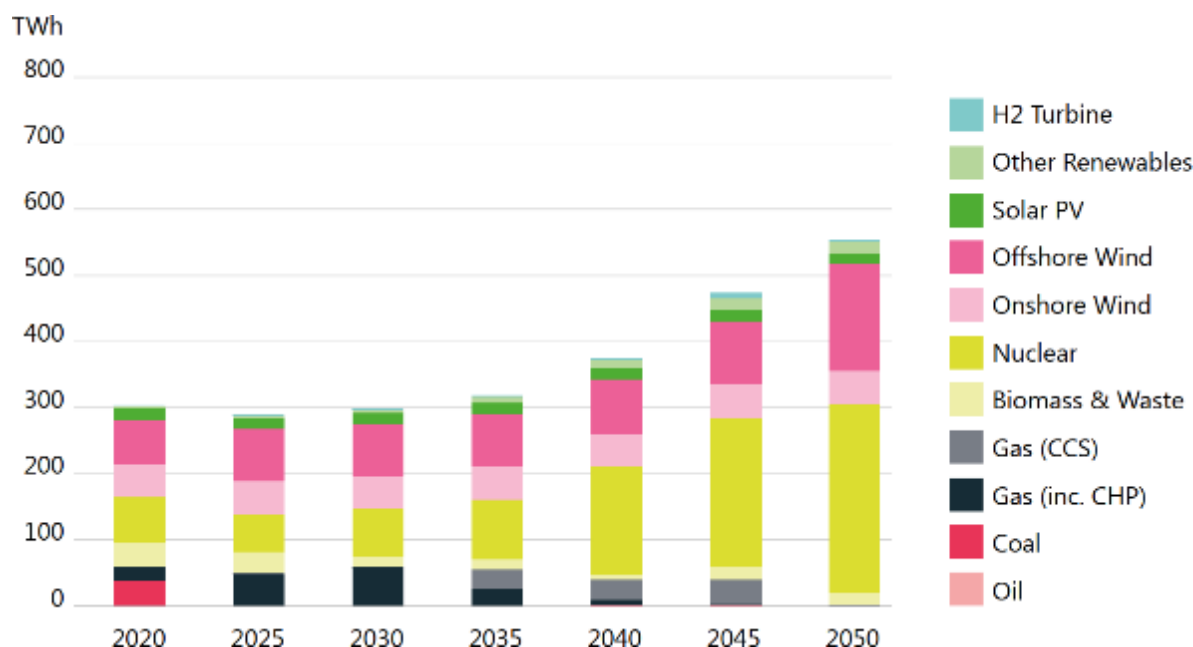


図23. 2050年の最小コストの発電構成のEnergy Systems Catapult時計仕掛け予測

出典: Energy Systems Catapult.

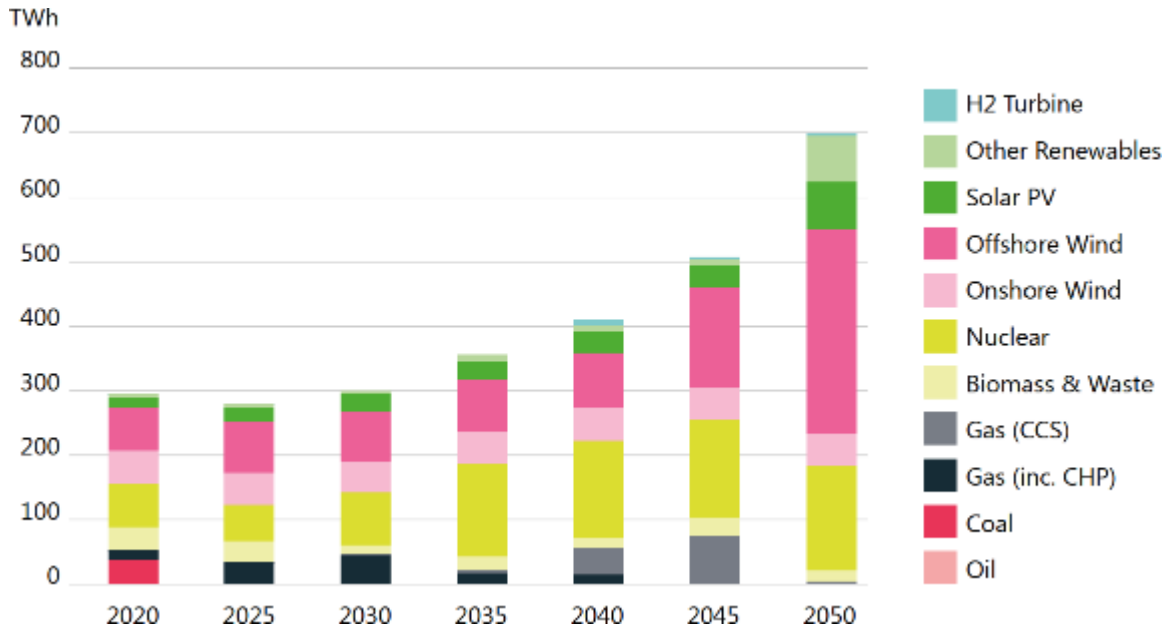


図24. 2050年の最小コストの発電構成のEnergy Systems Catapultパッチワーク予測

出典: Energy Systems Catapult.

## 10.4 英国における原子力の未来

ネットゼロを達成するための英国での取り組みは、システム思考の重要性と、エネルギーの柔軟な供給と管理によって提供されるオプション性を示している。柔軟性を提供することは、コージェネレーションとより大きなエネルギー貯蔵システムを通じて、将来の水素経済との相乗効果をもたらす。

これらのシステムは、他のさまざまな低炭素エネルギー源と一緒に民間の原子炉によって駆動される可能性があり、柔軟な水素経済の一部としての原子力の役割がはるかに広く探求されるようになっている。これは、英国のエネルギーシステムに関する最近のモデリング作業の対象であり、英国国立原子力研究所は現在、原子力エネルギーからの水素の技術経済学に関する英国の知識ベースを開発するための幅広い作業を主導している。

特に、電気と将来の原子力発電所からの高温熱は、さまざまな水素製造技術との提携に適している可能性がある。水素は、電力の需給の季節間及び日中のバランスをサポートする化学エネルギー貯蔵媒体として提案されているため、歴史的に、英国で展開されている揚水発電システムと類似点がある。将来のエネルギーシステムを計画する際には、過去に取られたアプローチから取られることを学ぶことがある。

エネルギー供給技術と地方及び国のエネルギー需要との間の協力には、政府レベルで設定された市場の枠組みの下で運営されている技術提供者と地域グループの間の協力が必要である。これは、コスト競争力のあるソリューションの必要性を促進するだけでなく、電力、水素、熱

市場などのいくつかの製品ラインを通じて収益を最大化するためのプラント出力の柔軟性の重要性を浮き彫りにする。

英国における柔軟性とそのエネルギー供給、貯蔵、水素生産における役割の全体像は現在浮上しており、将来の脱炭素エネルギーシステムを構成する正確な技術と展開モデルは不確実である。商用ドライバーは、たとえば、専用システムから単一の製品を配送するために原子炉を配備するか、それとも多数を配備するかを決定する。ただし、プロジェクトからのエネルギー供給の柔軟性、原子炉技術及び関連するエネルギー変換システムの多様性は非常に重要である。

章の免責事項：この章で表現されている見解は、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、この章の情報は、その一部を構成又は形成したり、承認されたBEIS政策又は政策提案であると解釈されたり、又はそれを生じさせるものではない。

## 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群の貢献

執筆：Stéphane Feutry、Antoine Herzog（仏電力会社 *Électricité de France (EDF)*）

仏国の発電は、脱炭素電力の割合が非常に高いのが特徴である。2019年の発電量538TWhのうち92%の495TWhが、原子力と再生可能エネルギー（水力、風力、太陽光、バイオエネルギー）である（NREL 2019a）。仏国は欧州の主要な電力輸出国でもあり、2019年の電力輸出量は56TWhである。今日、仏国の脱炭素電力量の約3/4を占める原子力発電所で実証されている柔軟性は、脱炭素経済において、変動する自然エネルギーと原子力の相補性に関する道筋を明確に示している。

### 11.1 仏国では既に利用されている原子力の柔軟性

仏国で稼働している原子炉には、かなりの柔軟性が組み込まれている。仏国の原子炉は、原子炉の種類にも依るが、1日2回、定格容量の100%から20%まで出力を30分以内に下げることが出来るように設計されている。従って、毎分30~40MW（定格出力の約3%）の出力増減能力があり、ガス燃焼タービンの通常出力上昇能力（毎分7~12MW、定格出力の5~8%）やガス・コンバインド・サイクルのそれ（毎分15~40MW、定格出力の3~7%）と比較しても、要求を満たすのに十分である。変動する電力需要に対応するため、大規模な負荷変動プログラムが電力系統運用者と事前に合意されている。

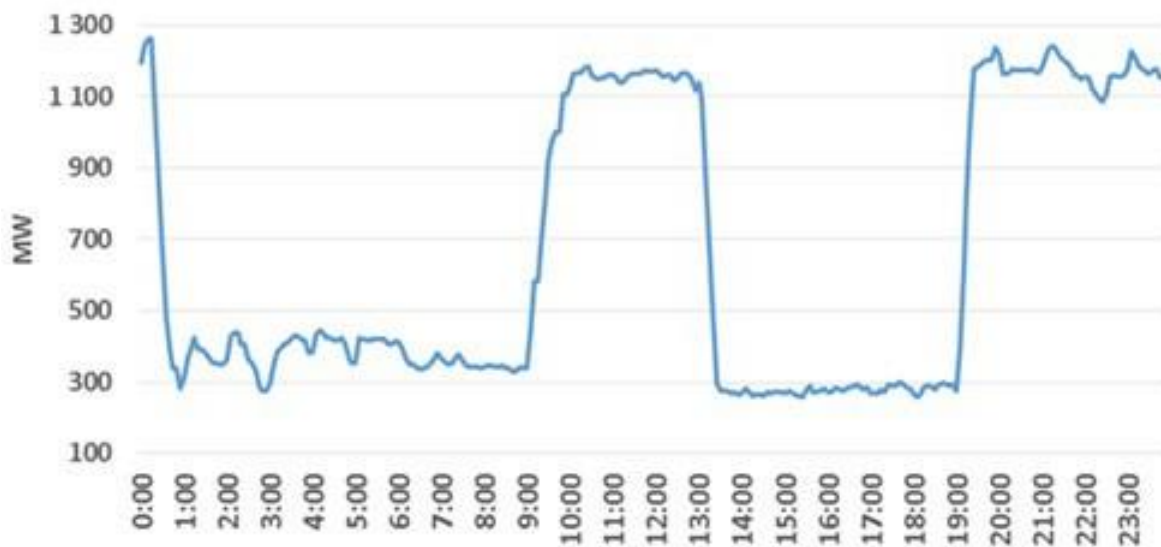


図25. Golfech原子力発電所2号機（130万kW）における1日の出力変動の例

Source: Jun Zeng, EDF. All rights reserved.

図25は、2020年5月3日における仏国南西部に在るGolfech原子力発電所2号機の出力を示したものである。出力は深夜と午後の2回、急激にカットされ、30分以内に1,250MW（125万kW）から300 MW（30万kW）へと変動した。

この柔軟性は、原子力発電所が複数有る事による効果（fleet effect）によって増幅される。2020年初頭、仏国の58基の原子炉は、EDFにより運転され、63GWeの発電容量を有していた。これらの原子炉は、平均して30分以内に21GWeに出力上昇することが出来た。年間平均では原子力発電所は約50GWeを供給しているため、これは大きな調整能力である。また、電力システムの周波数を制御するために、微小の負荷変動を自動的に行なえるため、原子力発電所群は電力システムの安定性にも貢献している。

また、原子力発電所群は季節的な変動にも対応している。核燃料は一定期間の備蓄とも考えられるため、短期的な核出力と中期的な燃料管理の両方の柔軟性を最適化し、必要な時に原子力発電所を稼働出来るようにする事ができる。そのため、同時に計画される燃料交換のための炉停止の基数は年間で大きく変動し、電力需要が最も少ない夏場には、58基のうち15基以上の原子炉が同時に燃料交換のために停止する。

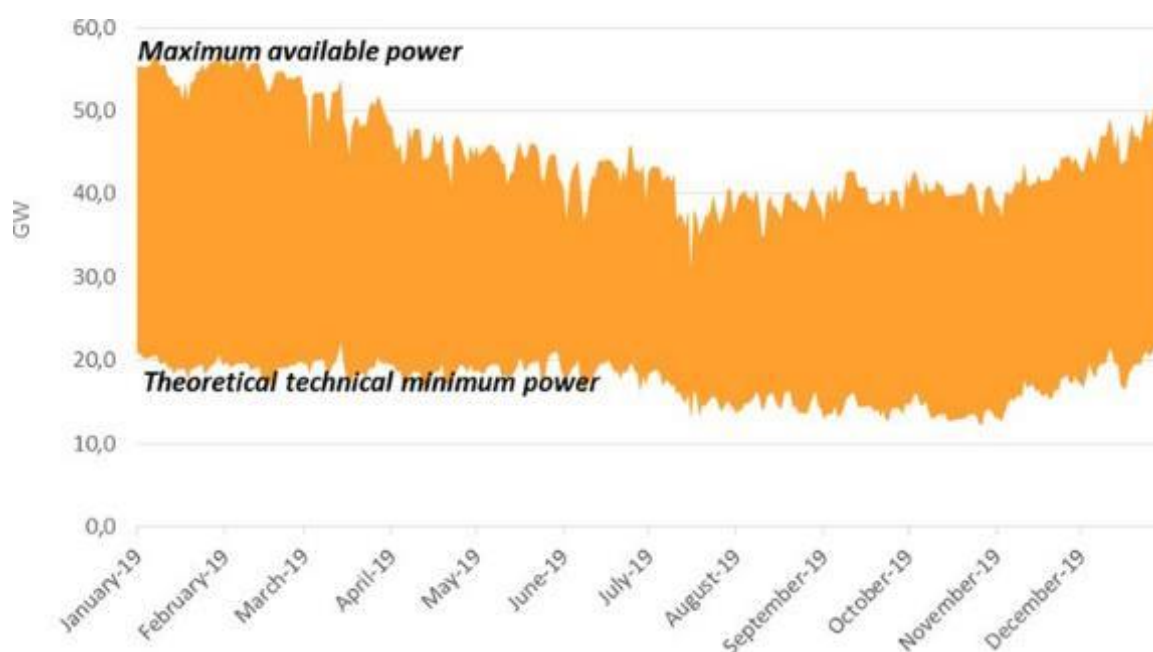


図26. 2019年におけるEDF原子力の「最大可能出力」及び「技術的な最小出力」

Source: Jun Zeng, EDF. All rights reserved.

## 11.2 仏国原子力計画の成功を反映した今日の柔軟性

1974年から1999年までの25年間で、EDFは58基の原子炉を建設・運転した。標準化とシリーズ建設のお蔭で、原子力はこれまでも今もコスト競争力が高い。仏国の原子炉の経済性が良いことから、ベースロード負荷発電を超えて負荷追従発電した場合でも、費用対効果が高いことに繋がった。

仏国の電力構成では原子力が最大の割合を占めており、原子力には日々の需要変動への対応・調整が必要である。電力需要は、夜間は低く、冬場は午後7時頃、夏場は午後1時頃にピークを迎え、平均供給電力は冬場が最大60GWe、夏場が最大40GWeである。

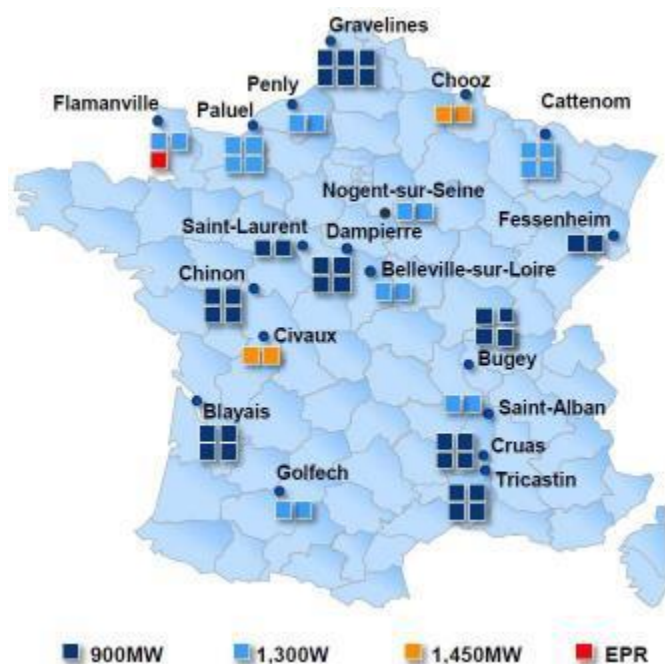


図 27. 仏国の原子力発電所

全ての原子炉はEDFが運転するPWRで、同一の会社が製造・供給している。

Source: EDF. Used with permissions. All rights reserved.

### 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

最終エネルギー利用を電化し、すべての部門で省エネを実現することは、気候変動と戦い、エネルギー部門の脱炭素化を実現する際の鍵となる。このため、無炭素電力の需要が急増しており、自然エネルギーと柔軟性を有する原子力の相補性は、エネルギー移行（energy transition）の柱となっている。また今日、消費者にとって競争力のある価格につながり、経済的にも理にかなっている。仏国の家庭用電気料金はEUの平均値より18%も低い。さらに、2018年のCO2排出量は49g/kWhと欧州平均の1/5以下であり、仏国は既に低炭素の電気を手に入れていると言える。

仏国は2050年に向けたゼロ・カーボン（無炭素）エネルギー目標に全面的に取り組んでいる。仏国の低炭素戦略によれば、2050年には電力消費量は現在の水準から30%増の約600TWhに達するはずであり、これは主に最終エネルギーの電化に依る。仏国のエネルギー移行法

（French transition energy law）では、2035年に電力構成における原子力発電と再生可能エネルギー発電について、50対50の目標を設定しているが、これにははるかに大きな柔軟性が必要となる。再生可能エネルギー発電が大幅に増加し、仏国の原子炉が将来的に寿命を迎えることを考えると（現在は50年から60年の間に予定されている）、再生可能エネルギーと原子力のバランスがうまく取れているためには、今後数十年の間に新たな原子炉を稼働させる必要があることを示唆している。



変動型再生可能エネルギー（風力、太陽光発電）のシェア拡大に対応することは、電力システムの課題である。この課題に対応するためには、電力網を強化するだけでなく、電力の品質と需給バランスを維持するためのバックアップ用無炭素電源を追加する必要がある。従って長期的には、開発中の他の電源（例：蓄電池、車両搭載電池と電力網の結合、電力需要管理、その他のディスパッチ可能な低炭素電源）と共に、原子力は運用上の柔軟性が証明された電源となる。この潜在能力を活用するには、原子炉運転が全ての安全基準を満たすことを保証する事が必要であり、設計工学と運転の両方においてスキルと専門知識が必要となる。

柔軟性が運転性能に与える影響に関する質問がしばしば提起される。例えば、追加メンテナンスが必要かどうか、プラント稼働率が影響されるか等である。EDFの研究では、そうした影響は存在するが、重大なものではないことが分かっている。今後数十年の間に、必要な柔軟性が増加した場合には、将来の電力市場状況に応じて柔軟性に対する報酬を適切レベルに維持するよう、電力市場設計を適応させなければならない。

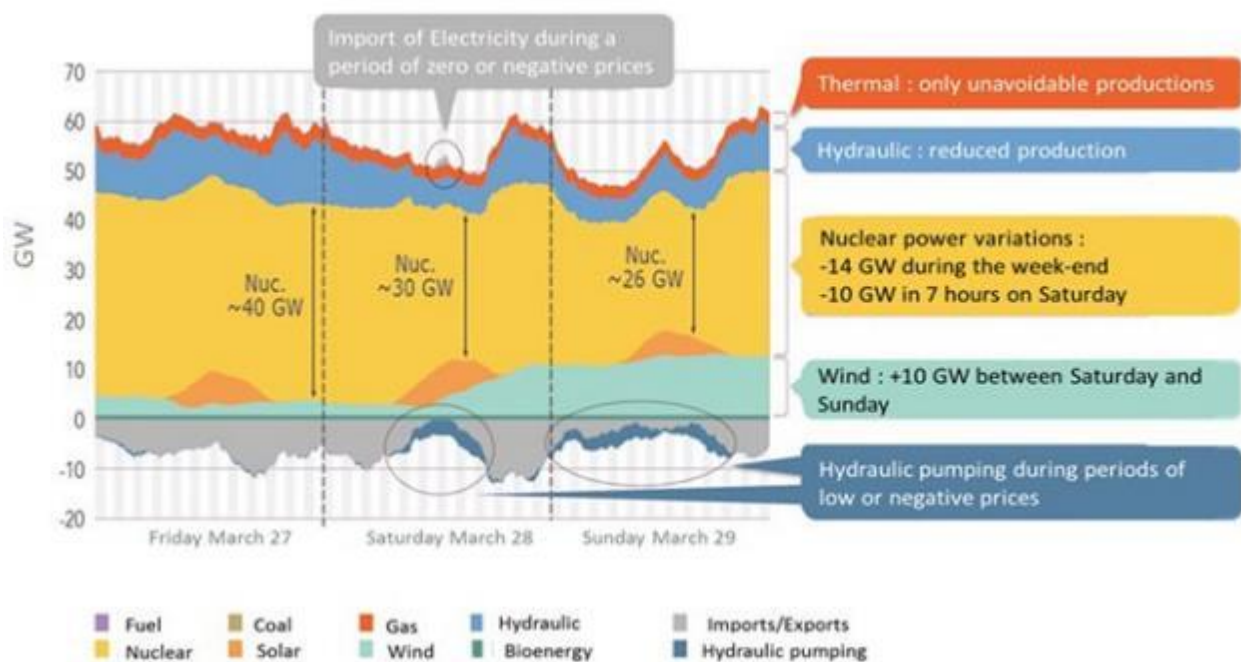


図 28. 2020年3月27～29日の間に記録された電源構成の変化

Source: Jun Zeng, EDF. All rights reserved.

3日間の間に、原子力発電出力は40GWから数時間で30GWに急激に減少(ランプ・ダウン) し、電力需要や輸出が少なく太陽光や風力の発電が多い時には26GWにまで減少した。一方、電力価格が安い時やマイナスの電力価格の時には、電力輸入や揚水発電用の汲み上げが行われる。

## 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

技術革新により、EDFは原子力発電所を柔軟に運転し、原子力発電所運転者のための技術的スキルを開発することが出来た。イノベーションの主な分野は、設計変更、拡張された安全研究、十分な訓練を受けた人材を必要とする制御室での運転である。

**設計の強化：**仏国の原子力発電所の設計は、標準的PWRには無い機能を組み込むように進化してきた。変更は主に、異なる種類の制御棒を使用し、出力レベルに応じて炉心内の制御棒位置を変えることに関係している。標準的制御棒よりも中性子吸収量が少ない材料で構成された特別な「gray rods」を使用することで、連鎖反応をより正確に制御することが可能になった。

**拡張された安全研究：**幅広い出力範囲を考慮して、安全性研究が拡張された。仏原子力安全当局によって検証された専用の仕様が、柔軟な運転（出力変動を伴う運転）向けには適用されている。

**十分に訓練した運転員：**制御室の運転員は、制御室の機器を正確に物理的に複製したフルスコープ・シミュレータで、各種操作モードでの特別な訓練を受ける。また、過去15年間で支援ツールも開発されている。

フランスで達成されたことは、世界の他の場所で複製することができる。設計段階の早い段階でこれらの操作手順を統合した新しい原子炉を開発することは、この柔軟性の経済的影響を制御するための鍵となる。新たな原子力に関連するコストが、この無炭素で柔軟な電源が、今後利用可能な他のツールと比較したメリットで、どの順位に収まるかを決定する。

## 12 Exelon: Exelon Generationにおける原子力サイクル

執筆 : David Throne (発電、送電、配電の各レベルでエネルギーサービスを提供する米国のエネルギー会社、Exelon Corporation)

2015年、Exelon は、送電の混雑や電力価格など、混雑によりマイナスになる可能性のある送電網の状況に対応する必要性を認識した。Advanced Nuclear Dispatchプログラムは、ソリューションとして作成された。Advanced Nuclear Dispatchは、Exelon Constellation Market Operations Centerが状態を監視し、原子力発電所の選択されたサイトにディスパッチ信号を提供して電力を削減できるリアルタイムシステムである。結果は良好であり、コストの削減とともに顕著な節減が生み出されている。サイクリングによる節減とコスト削減の大部分(約90%)は、先物市場のコスト削減の影響によるものである。先渡価格は安定しており、選択したユニットを循環させた場合ほど低くはない。

Advanced Nuclear Dispatchプロセスは、ExelonのGenerationManagerコンピュータシステムを介して選択したサイトに送信される信号を介して物理的に機能する。サイトは中央制御室のコンピュータで信号を受信し、オペレーターはConstellation Generation Dispatcherでディスパッチ信号を確認し、サイトの原子力規制委員会の認可を受けた上級原子炉オペレーターが負荷軽減を承認する。負荷を上げるためのディスパッチ信号が受信されるまで、電力の削減が維持される。

表8. サンプルランピングシナリオの要約

サンプルのみ							
原子炉	実際の MW	ISO計算セットポイント	MW偏差	最小 MWe	最大 MWe	出力上昇率	出力低下率
Byron 1	1,203	1,205	-2	845	1,205	0.6	4
Byron 2	1,177	1,180	-3	820	1,180	0.6	4

高度な計画は、プログラムを成功させるための1つの鍵である。オペレーターはシミュレーターで負荷追従運転を練習し、各シフトの前にブリーフを作成し、反応度操縦文書を事前に作成する。負荷の軽減と回復の機能制限はステーションによって計算され、Generation Managerコンピュータシステムを介して Market Operations Center に提供されるため、機能が明確に理解される。

他のロードサイクリングプログラムには、送電システムの制約を解決するための独立したシステムオペレーターイニシアチブである混雑緩和が含まれる。前日スケジューリングは、前日市場でのマイナスの価格設定による経済的損失を最小限に抑えるために公益事業体によって開始される。前日スケジューリングでは、翌日の価格設定でプロセスの使用が指示されたときに、Market Operations Centerとステーションによって事前にスケジュールされ、伝達され、合意された固定MWの時間単位の出力が使用される。

要約すると、原子力負荷サイクリングは、原子力発電所の収益性を高めながら、リアルタイム及び前日条件で局所的な負の価格設定を排除するための安全で成功した方法であることが証明されている。オペレーターの基準と基本事項は、トレーニング、手順の開発と順守、及びAdvanced NuclearDispatchディスパッチ中の効果的なコミュニケーションを通じて強化される。

原子力ユニットは、削減と回収率の技術的能力の範囲内でのみ循環し、同じ日にユニットを繰り返し上下に循環させないように対策が講じられている。原子力規制委員会の上級原子炉運転免許保持者であるシフトマネージャーは、原子力安全を確保するために市場操作センターから要求されたすべての電力操作を承認する。事前の計画、良好なコミュニケーション、及びサイクリングが必要な理由に関する技術的知識は、プログラムを成功させるのに役立った。

## 13 第4世代原子力システムに関する国際フォーラム： 次世代原子力システムの導入

執筆： 上出英樹 （多国間協力 GIF 議長）

第4世代原子力システムに関する国際フォーラム（GIF）は、次世代原子力システムの導入促進に必要な研究開発を推進するために設立された多国間協力の取り組みである。

GIFは2000年に設立されて以来2030年以降のシステム導入を目標とし、目標達成に最も近いシステムとして以下の6つのシステムを選定した（Petti et al. 2014）。

- ナトリウム冷却高速炉（SFR）
- 超高温炉（VHTR）
- ガス冷却高速炉（GFR）
- 熔融塩炉（MSR）
- 鉛冷却高速炉（LFR）
- 超臨界水冷却炉（SCWR）

これら6システムの概念は、図29に示す第4世代原子力システムであり、持続可能性、経済性、安全性及び信頼性、及び核拡散抵抗性・核物質防護の厳しい基準を満たしている。これら全てのシステムはもちろん発電可能であるが、特に、原子炉出口温度が700度～950度のシステム（VHTR、GFR、LFR、及びMSR）及び550度以下のSFRでは開発当初から原子炉の熱エネルギーの活用を考慮し開発されている。原子炉から供給される熱エネルギーは、水素製造、又は石油精製のような産業プロセス熱として化学処理施設へ供給可能である。

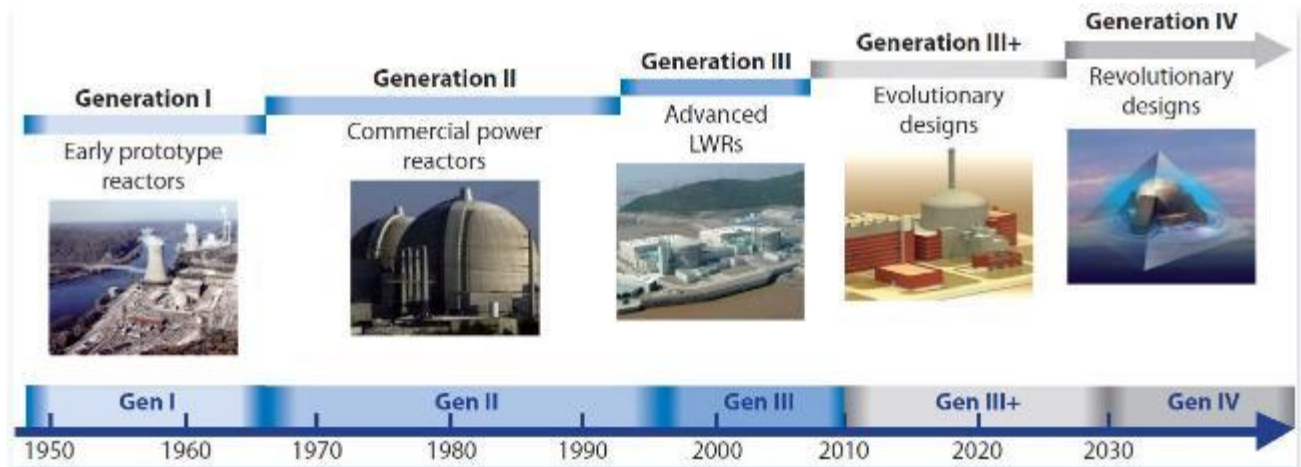


図 29. 原子炉設計の四世代

Source: (Stanculescu 2019)

これらに加え、GIFは将来の原子力システムに対する要求として、柔軟性を考慮する必要性を強く認識している。GIFの上級産業諮問パネル（SIAP）の提言により、GIFでは運転柔軟性（操作性、ハイブリッドシステムとの互換性、アイランドモードでの運転、様々な燃料の利用）、展開柔軟性（規模変更性、設置性、建設性）、生産柔軟性（電力、プロセス熱）に対処する、広い意味でのシステムの柔軟性を目指している。

本件についてはGIFの研究開発アウトルックの最新版に反映されており（EMWG2018）、GIFの分野横断的ワーキンググループ（WG）（特に経済性モデルWG：EMWG）における様々なイニシアチブにて検討され、6システムの研究開発では、研究開発の優先順位の一つとして位置づけられている。

### 13.1 経済的観点からの第4世代システムの柔軟性

EMWGは現在、第4世代原子力システムの展開にかかる市場課題に取り組んでおり（EMWG 2018）、その中でも、変動的な再生可能エネルギーによる発電の増加、及び将来の原子力に競争力を持たせるための資本コスト削減の重要性を特に念頭においている。

6つのGIFシステムの研究開発に取り入れるため、EMWGはSIAPと協力し、再生可能エネルギーと原子力の統合に関して世界で行われている研究に注視している。この活動が2018年の最初のポジションペーパー（Bredimas 2011）の発行に繋がった。そこでは、GIFの研究開発活動に関する2つの提言が述べられている。

- 当初のGIFの目標において柔軟性への直接的な言及はないが、GIFの6システムは今後の研究開発の優先事項の一部として柔軟性の観点が入り入れられるよう保証すべきである。
- 分野横断的な研究開発が促進されるべきである。典型的には、これには熱疲労に耐性を有する先進材料、発電・発熱の動的バランスに関する高度計装制御、並びに超



臨界CO<sub>2</sub> ブライトンサイクル等の効率的かつ柔軟性の高いエネルギー交換系等の研究開発が含まれる。

さらにSIAPは、第4世代原子力システムを将来のエネルギー市場により良く融合させるために対処すべき、以下の3つの戦略的課題を挙げている。

- 間欠性エネルギー源のシェアが増えるエネルギーミックスの中で運転できるよう、操作性を強化する。現在の自由化された電力（エネルギーのみ）市場に加わる場合、柔軟な運転が収益の減少につながる可能性もあるが、第4世代原子力システムの設計者は、柔軟性の強化が、信頼性、レジリエンシー、容量、その他の補助的なサービスを重要視し得る将来の電力市場において重要となり得ると認識している。
- エネルギー生産（電力、熱、水素等）の柔軟性を強化する。第4世代原子炉は、従来の電力に加えて、熱又は水素といった様々なエネルギー生産をもたらす性能を持つよう設計される。これはエネルギーシステムの信頼性及び回復性を全体的に強化し第4世代技術のビジネスケースを最適化させると同時に、システムのコスト面から見ても有益である。
- エネルギー貯蔵も可能な原子炉運転に対する信頼性の強化。この解決策はベースロードと変動的電力生産のバランスを向上させる可能性がある。エネルギー貯蔵機器の経済的、技術的影響の評価には更なる研究が必要である。

## 13.2 第4世代システムの柔軟性の技術的性能

第4世代原子力システムの柔軟性に関する経済的評価及び戦略的評価をベースとし、6システム概念の開発者は、技術開発上、重点を置くべき技術分野の特定に取り組んでいる。このための技術ワークショップが、2019年5月、バンクーバーにて開催された第10回クリーンエネルギー閣僚級会合の会期にて開催され、研究開発のニーズについて議論が行われた。そこでの重要な結果を以下に示す。

### 13.2.1 運転柔軟性

全体としては、第4世代原子力システムは柔軟な特性として少なくとも軽水炉と同等の負荷追従性能を持つと予想されているが、システムによって大きな違いがある。

いくつかの第4世代原子力システム、特に液体燃料のMSRシステムには本質的に柔軟性がある。運転柔軟性に関して言えば、主な制約は蒸気サイクルによるものと考えられる。SFRやLFR等のその他の第4世代原子力システムは、過去に送電網に変動的な運用を提供したことがある（例：フランスのPhénix、Superphénix SFR）が、負荷追従をするには技術的制約がある。この制約の要因の一つは、これら原子炉の当初の設計に運転柔軟性の要件が無かったことが挙げられる。このことから、これに対応するいくつかの研究開発の優先事項が特定された。SFRでは以下のとおり。

- 温度勾配を最小化させるための原子炉容器の再設計

- ナトリウム冷却材の自由液面レベルの変化を避けるための背圧の設定
- 最大定格出力での原子炉運転を維持できるにするためのエネルギー生産の多様化

### 13.2.2 展開柔軟性

第4世代原子力システムは概して、従来の軽水炉よりも設置制約が少ない。例えばその固有の安全特徴により、緊急時対策区域の規模要件が小さな設計概念もある。また第4世代原子力システムの熱効率が高いため、ユニット毎の最終ヒートシンクの必要性が小さくなっている。これらシステムは展開柔軟性に富み、特定の市場のニーズに合わせ大規模な出力に設計することも可能である。

建築においても、高いモジュール性と先進的な製造プロセスが展開柔軟性を助長するだろう。

### 13.2.3 生産柔軟性

第4世代原子力システムは出口温度が高く、軽水炉よりも優れた生産柔軟性を備えることが予期されている。第4世代原子力システムは全て、軽水炉よりも出口温度が高いためプロセス熱の様々な利用に理想的である。特に、600°C以下の蒸気に対して現在及び近い将来に大規模な市場がある。例えばヨーロッパでは現在100 GWthのプロセス熱市場があり、550°Cまでのプロセス熱に対してはその50%の市場（主に化学産業及び精製施設）がある（“Cost and Performance Requirements for Flexible Advanced Nuclear Plants in Future U.S. Power Markets” 2020）。長期的にはVHTRが950°C以上の利用機会をもたらす得るが、それには特に材料化学の更なる研究を要する。柔軟性に特化した研究開発に加え、最初の原型炉の建設及び非電力利用と組み合わせた産業実証（特に産業熱及び水素製造）が第4世代原子力システムの商用展開における近い将来の重要な目標であることに変わりはない。

## 14 人類のためのエネルギー：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

*EricIngersoll* 及び *KirstyGogan*、*LucidCatalyst*（米国 マサチューセッツ、ケンブリッジ）及び *Energy for Humanity*（英国 ロンドン） 寄稿: *John Herter*、*Andrew Foss*、及び *Romana Vysatova* (*LucidCatalyst*)

2019年、いくつかのクリーンエネルギー非政府組織が柔軟な原子力キャンペーンの構想と共同設立を支援した。これは、排出量を大幅に削減するための追加の経路を模索することにより、リスクを軽減する国のエネルギー移行において原子力が果たすことができる拡大された役割を探求するときであった。この章では、クリーンエネルギーの移行において原子力が果たすことができる役割を広げるための3つの方法について説明する。

1つ目は、将来のグリッドで再生可能エネルギーを補完することを目的とした、柔軟な運用と熱エネルギー貯蔵の組み合わせを使用した原子力構成の設計による発電における役割の拡大である。ここで重要なのは、高度な原子力システムの設計者に、将来の電力市場で設計をより価値のある競争力のあるものにする機能と資本コストについてのガイダンスを提供することである。

2つ目は、原子力が、直接又は合成燃料の原料として使用できる水素を提供することにより、現在石油とガスによって供給されているエネルギー消費の4分の3を占める一次エネルギー部門で、発電を超えたエネルギー移行に貢献できるようにすることである。

3つ目は、大量、低コスト、迅速に展開可能、商業的に魅力的な製造モデルに基づいて原子力エネルギーの展開パラダイムを再定義することである。これにより、排出量を大幅に削減し、すべての人にクリーンで手頃なエネルギーを確保することを目標として、すべてのエネルギー部門における原子力の役割を拡大する。

これらの概念は、再生可能エネルギー業界が学んだように、原子力業界がコミットメントと創造性を、技術革新と商業革新とを組み合わせ適用し、クリーンエネルギーの移行に向けて大規模でタイムリーな貢献を提供するために必要な規模と速度を実現する方法を示している。この章は、これが実現するために何が必要かについて、幅広く厳密な議論を開くための取り組みである。

### 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

米国では、競争力のある電力市場は、主に低コストの天然ガスの大量供給に牽引されて、非常に低い電力価格を長期間経験している。同時に、米国の多くの地域で、産業空洞化と効率の改善により、電力需要の伸びが停滞している。これらの電力市場の状況は、通常、新規参入者を思いとどまらせる。しかし、連邦政府のインセンティブ、州の政策、及び再生可能エネル

ギーの企業による購入は、風力及び太陽光の大幅な展開を推進しており、卸電力価格をさらに押し下げている。驚くべきことに、これらの状況にもかかわらず、今では他のどの時期よりも高度な原子炉を開発している企業が増えている。しかし、今日の原子炉開発者は、原子力発電所が過去に見たものとは非常に異なる将来の市況に合わせて設計する必要がある。

この新しい環境では、高度な原子炉設計者が魅力的な投資を行うために必要なプラントと、プラント所有者にとって最大の価値を生み出すパフォーマンス特性について、市場から明確なシグナルを得ることが重要である。多くの高度な原子炉設計、特にそれらのプラントのバランスは、まだ概念設計段階にあり、したがって、インテリジェント設計の選択を行い、目標コスト設計手法を適用することにより、設備投資を削減する大きな余地がある。設計者は、次のような重要な質問に直面する。プラントが市販された後、プラントを構築できる最大許容設備投資はどれくらいであるのか？ さらに、原子炉はどの程度柔軟である必要があるのか？ その柔軟性はどのくらいの価値があるのか？ 柔軟なパフォーマンスを実現するためにどのくらいの労力やコストを費やす必要があり、それがプラント所有者にどれだけの価値を生み出すことができるのか？

LucidCatalystは、PLEXOS®発電コストモデリングソフトウェアを使用して、2034年に規制緩和された電力市場で一般的な高温先進原子力発電所が獲得した収益を推定した（LucidCatalyst 2020年）。次に、これらの収益（今日の市場で見られる容量の支払いを受け取る機会を含む）を発電所の財務モデルで分析して、市場の収益率を満たすために発電所の納入しなければならない最大許容設備投資を決定した。目標は、原子炉が商業的に利用可能になるまでに達成する必要のある設備投資目標に関する情報を、原子炉開発者に提供することであった。チームはまた、いくつかの高度な原子力発電所がコンバインドサイクル天然ガス発電所と同様のランピング及び負荷追従機能を備えて設計されているため、柔軟な運転の価値を分析した（LucidCatalyst 2020年）。

LucidCatalystは、それぞれ異なる資源構成を含む2つの異なる将来のシナリオをモデル化した。1つ目は、ベースラインの低再生可能エネルギーシナリオであり、既存の再生可能エネルギー政策の継続（及び最終的な満了）を前提としている。2つ目は、NREL ReEDSシナリオと同じ資源構成を持つ高再生可能エネルギーシナリオであり、再生可能エネルギーと天然ガスのコストが低いことを前提としている（したがって、両方の資源タイプが高く浸透している）。これらのシナリオは、規制緩和された4つの米国電力市場（ISO-NE、PJM、MISO、及びCAISO）でモデル化された。

PLEXOSモデリングでは、すべてのシナリオと独立したシステムオペレーターの平均許容設備投資額が3,234ドル/kWであることが明らかになった（電力市場、資源構成、及び容量支払い額に応じて、1,965ドル/kWから4,503ドル/kWの範囲を反映している）。モデル化された各シナリオには、12時間同じ場所に配置された熱エネルギー貯蔵システムを使用した実行も含まれていた。価格の上昇から得られる追加のエネルギー収入と、プラントの実効容量を2倍にすることから得られる追加の容量支払いにより、モデル化されたシナリオ及び独立したシステムオペレーター全体で、原子力+貯蔵プラントの許容設備投資を613ドル/kWから1,891ドル/kWに増やすことができた。次の表は、モデル化された各シナリオと電力市場の最大許容設備投資を示している。

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）

ESS：エネルギー貯蔵システム		低再生可能エネルギー		高再生可能エネルギー					
		ESSなし	ESSあり	ESSなし	ESSあり				
<b>ISO-NE</b>									
低容量価格の場合（50ドル/kW-年）		2,289	ドル	2,962	ドル	1,965	ドル	2,788	ドル
中容量価格の場合（75ドル/kW-年）		2,566	ドル	3,515	ドル	2,242	ドル	3,341	ドル
高容量価格の場合（100ドル/kW-年）		2,843	ドル	4,068	ドル	2,519	ドル	3,894	ドル
<b>PJM</b>									
低容量価格の場合（50ドル/kW-年）		2,358	ドル	2,988	ドル	2,186	ドル	3,038	ドル
中容量価格の場合（75ドル/kW-年）		2,634	ドル	3,541	ドル	2,462	ドル	3,591	ドル
高容量価格の場合（100ドル/kW-年）		2,911	ドル	4,095	ドル	2,739	ドル	4,144	ドル
<b>MISO</b>									
低容量価格の場合（50ドル/kW-年）		2,244	ドル	2,857	ドル	2,000	ドル	2,654	ドル
中容量価格の場合（75ドル/kW-年）		2,521	ドル	3,410	ドル	2,276	ドル	3,207	ドル
高容量価格の場合（100ドル/kW-年）		2,797	ドル	3,963	ドル	2,553	ドル	3,760	ドル
<b>CAISO</b>									
低容量価格の場合（50ドル/kW-年）		2,187	ドル	3,397	ドル	1,968	ドル	3,306	ドル
中容量価格の場合（75ドル/kW-年）		2,464	ドル	3,950	ドル	2,244	ドル	3,859	ドル
高容量価格の場合（100ドル/kW-年）		2,740	ドル	4,503	ドル	2,521	ドル	4,412	ドル

LucidCatalystは、追加の感度分析を実行して、エネルギー貯蔵システムの場合と同様のシナリオを含め、最大許容設備投資に対する他の要因の影響を評価した。予想通り、運用コストが低いため、高度な原子力発電所はエネルギーの清算価格を低く設定し、許容される設備投資のしきい値を下げた。

表10. ISO-NE、PJM、MISO、及びCAISOの年間平均市場価格

		平均年間エネルギー価格	
<b>ISO-NE</b>	今後の高再生可能エネルギー（柔軟な高度の原子力発電所なし）	26.32/MWh	ドル
	柔軟な高度な原子力発電所配置群	22.64/MWh	ドル
<b>PJM</b>	今後の高再生可能エネルギー（柔軟な高度の原子力発電所なし）	27.03/MWh	ドル
	柔軟な高度な原子力発電所配置群	22.67/MWh	ドル
<b>MISO</b>	今後の高再生可能エネルギー（柔軟な高度の原子力発電所なし）	26.13/MWh	ドル
	柔軟な高度な原子力発電所配置群	24.70/MWh	ドル
<b>CAISO</b>	今後の高再生可能エネルギー（柔軟な高度の原子力発電所なし）	38.06/MWh	ドル
	柔軟な高度な原子力発電所配置群	29.61/MWh	ドル

高度な原子力発電所は、負荷追従だけでなくベースロード資源としても機能するため、全体的な電力コストを上げることなく、企業の電力の大部分を供給することができる。これらの調査結果は、独立したシステムオペレーター、公益事業委員、政策立案者、公益事業者、及びその他の利害関係者に、これらの生産が将来のグリッドで果たす可能性のある潜在的な役割を調査し、高度な原子力商業化の取り組みを引き続き支援する動機を与える。これはまた、国内及び国際的なエネルギーモデリングを担当する組織が、将来のエネルギーシステムの予測に熱エネルギー貯蔵を備えた柔軟で高度な原子力を含めることを奨励するはずである。図30は、さまざまなシナリオでのPJMのインストール済み容量を示し、図31は生成を示している。これは、排出量を削減しながら柔軟かつ費用効果の高い方法で運転するためのエネルギー貯蔵を備えた高度な原子炉プラントの潜在的な有効性を示している。

このレポートで強調表示されているCapExのしきい値は、北米及び欧州連合の従来の原子力新設プラントと比較して比較的低くなっている。とはいえ、それらはサードパーティのコスト調査（Energy Innovations Reform Project 2017年）や高度な原子力開発者自身によって報告された範囲内に十分収まっている。この範囲は、継続的な新設原子力プログラムを実施している国で達成されているコストの範囲内でもある（Energy Technologies Institute 2018年）。設計者は、これらのコスト要件をプラント設計に統合し、蓄熱を追加することがターゲット市場で意味があるかどうかを検討する必要がある。

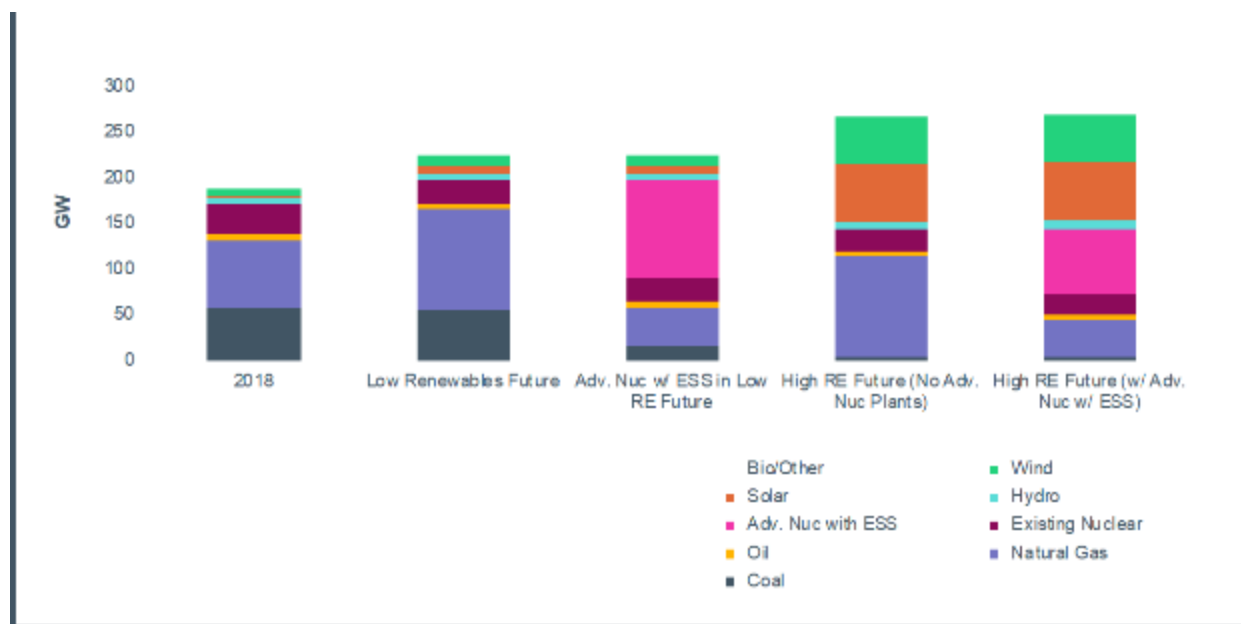


図30. PJMのインストール容量

Source: LucidCatalyst.



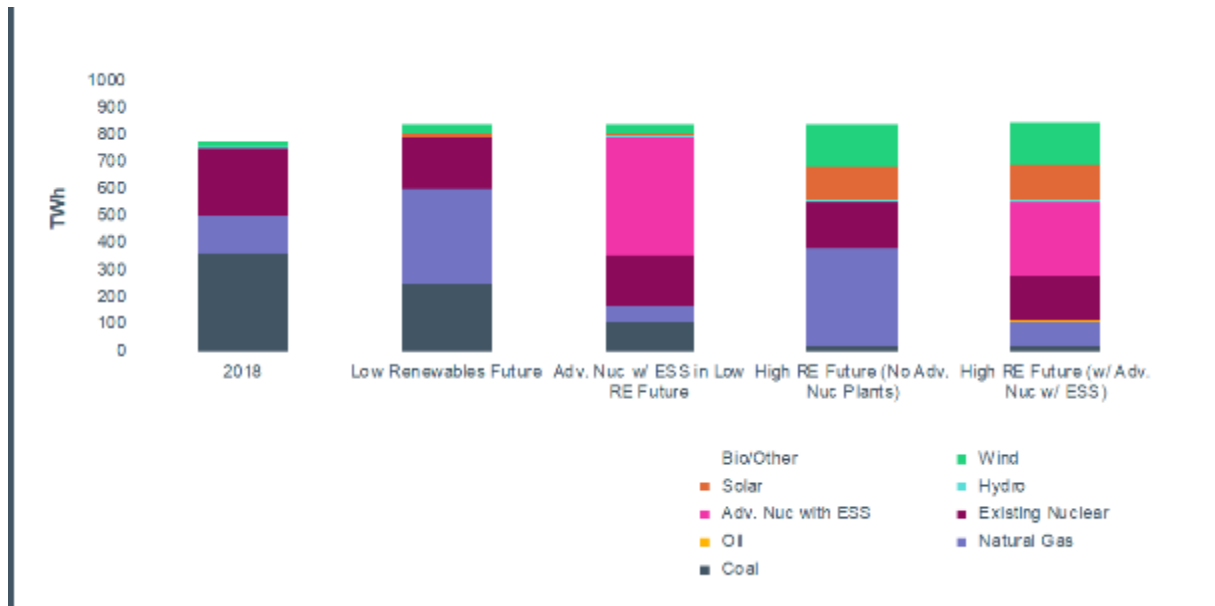


図31. PJMの生成

Source: LucidCatalyst.

## 14.2 原子力は、排出物のない水素生産に最適である

電力部門での排出量削減の進展にもかかわらず、信頼できる予測は、化石燃料が世紀半ばまでに世界のエネルギーの大部分を供給し続けることを示している。これは、電化、効率、再生可能エネルギー、及びその他のクリーンテクノロジーの広範な展開を前提としている（BP 2019年、DNV GL 2019年、EIA 2019年b、IEA 2019年c）。IEA World Energy Outlook 2019年の規定されたポリシーシナリオは、運輸部門の大幅な電化と再生可能エネルギーの大幅な長期的成長を前提としている（IEA 2019年c）。それにもかかわらず、IEAは、化石燃料（石炭、石油、ガス）が2050年まで一次エネルギーの約75%を供給すると予測している<sup>11</sup>（IEA 2019年c）。

同時に、2050年には30億人が電気を利用できなくなる。これは、今日の十分な電力を利用できない8億4,000万人から増加している（Sustainable Energy for All 2019年）。この結果を回避するには、エネルギーアクセスの成長を世界的な気候緩和戦略でより適切に表現する必要がある（IEA World Energy Outlook 2019年）。

<sup>11</sup> IEAの国家政策シナリオでは、エネルギー需要は2040年まで毎年1%増加する。太陽光発電が主導する低炭素源はこの成長の半分以上を供給し、天然ガスは液化天然ガスの貿易の増加によってさらに3分の1後押しされる。石油需要は2030年代に横ばいになり、石炭使用の限度は低くなっている。電気を中心とするエネルギー部門の一部は、急速な変化を遂げている。一部の国、特にネットゼロ志向の国は、供給と消費のすべての側面を再構築することに尽力している。しかし、クリーンエネルギー技術の背後にある勢いは、拡大する世界経済と人口の増加の影響を相殺するのに十分ではない。排出量の増加は鈍化しているが、2040年までにピークがなく、世界は共有されている持続可能性の目標をはるかに下回っている。

ネットゼロ排出量を達成しないまま多数の人々に基本的な電力アクセスを提供することは、深刻な世界的影響をもたらすであろう。特に液体と気体の両方で燃料を使用する場合は、新しいソリューションが必要である。

これに照らして、多くの最近の研究は、脱炭素化ツールとして排出物のない水素生産を検討しており、さまざまなクリーンな電源からの推定生産コストは、これが潜在的に有望な機会であることを示している（Glenk and Reichelstein 2019年、IEA 2019年b、IRENA 2018年）。

2050年までに、原子力及び/又は再生可能エネルギーを使用して生成されたクリーンな水素は、他の方法で閉じ込められた化石燃料の大部分からの累積的な将来の炭素排出量の半分を回避するのに役立つ可能性がある。ただし、これは、短期的に利用できる非常に低コストのクリーンな水素に依存する。

IEA World Energy Outlook 2019年の規定されたポリシーシナリオを利用して、水素代替に最も関連する部門を特定することができる。これらは、非電気用途の天然ガス、輸送用の石油、及びその他の用途の石油である（IEA 2019年c）。

これらの分野の車両、機械、熱供給システム、及びその他のアプリケーションは、従来の化石燃料ではなく、水素からのドロップイン合成燃料を消費する可能性がある。これらの部門は、合成燃料ではなく他のクリーンな電源を使用して比較的簡単に脱炭素化できるため、すべての石炭消費量と発電用天然ガスはこの分析から除外されている。

検討されているIEA World Energy Outlook 2019年の規定された政策シナリオ部門（非電気用途の天然ガス、輸送用の石油、及びその他の用途の石油）（IEA 2019年c）の化石燃料消費は、2050年に約20 GTのCO<sub>2</sub>排出の原因となると予想される（化石燃料消費による総CO<sub>2</sub>排出量の55%）。含まれる部門からの排出量は、除外された部門からの排出量よりもIEAの国家政策シナリオでより速く上昇する（すべての用途の石炭と電気の天然ガス）。累積的に、2020年から2050年までの期間に、含まれる部門は525 GTのCO<sub>2</sub>を排出すると予測されている（IEA 2019年c）。

対象となる部門は、IEA分析で想定された規定の政策によって排出量が排除されていないため、定義上、軽減するのは困難である。したがって、概説された戦略は、実行可能な解決策が現在世紀半ばまでに利用可能であると予測されていない経済の一部で排出削減を推進することを目的としている。したがって、これらの戦略は補完的であり、世紀半ばまでのネットゼロ排出に必要であると見なされるべきである。

#### 14.2.1 合成燃料の原料としての水素の目標コスト

必要な排出削減の規模とペースを達成するには、ゼロニュートラル及びカーボンニュートラルの代替燃料が化石燃料と同等の価格と性能を達成する必要があると想定している。これは、エネルギーへのアクセスと継続的な経済成長を可能にし、価格が競争力がない場合の政治的支援、政府補助金、行動変容の必要性に関連するリスクを軽減するためにも必要である。

原子力発電所からの水素コストの急速な減少により、このレポートで取り上げられているIEA World Energy Outlook 2019年のStated Policies Scenario部門で大量の化石燃料消費をより迅速に代替できるようになる。分析された水素コストと市場規模のデータに基づくと、これらの部門の化

石燃料消費量の半分以上が2030年までに脱炭素化され、そのすべてが2050年までに脱炭素化される可能性がある。

図32に示すように、原子力技術を使用した排出物のない水素製造は、他のゼロCO<sub>2</sub>製造方法とコスト競争力があり、今日の水素製造に最も安価な経路である低コスト天然ガスの水蒸気メタン改質とコスト競争力がある可能性がある（Allen 他1986年、BloombergNEF 2020年、Boardman 他 2019年、Gogan 及び Ingersoll 2018年、Hydrogen Council 2020年、IEA 2019年b、NREL 2019年b、M. Ruth 他 2017年、Yan 2017年）。現在の初めての米国及びEUの従来型LWRでさえ、低コストの建設に最適化されていないため、優れた設備利用率で風力及び太陽光資源に匹敵するコストでクリーンな水素を生成できる。

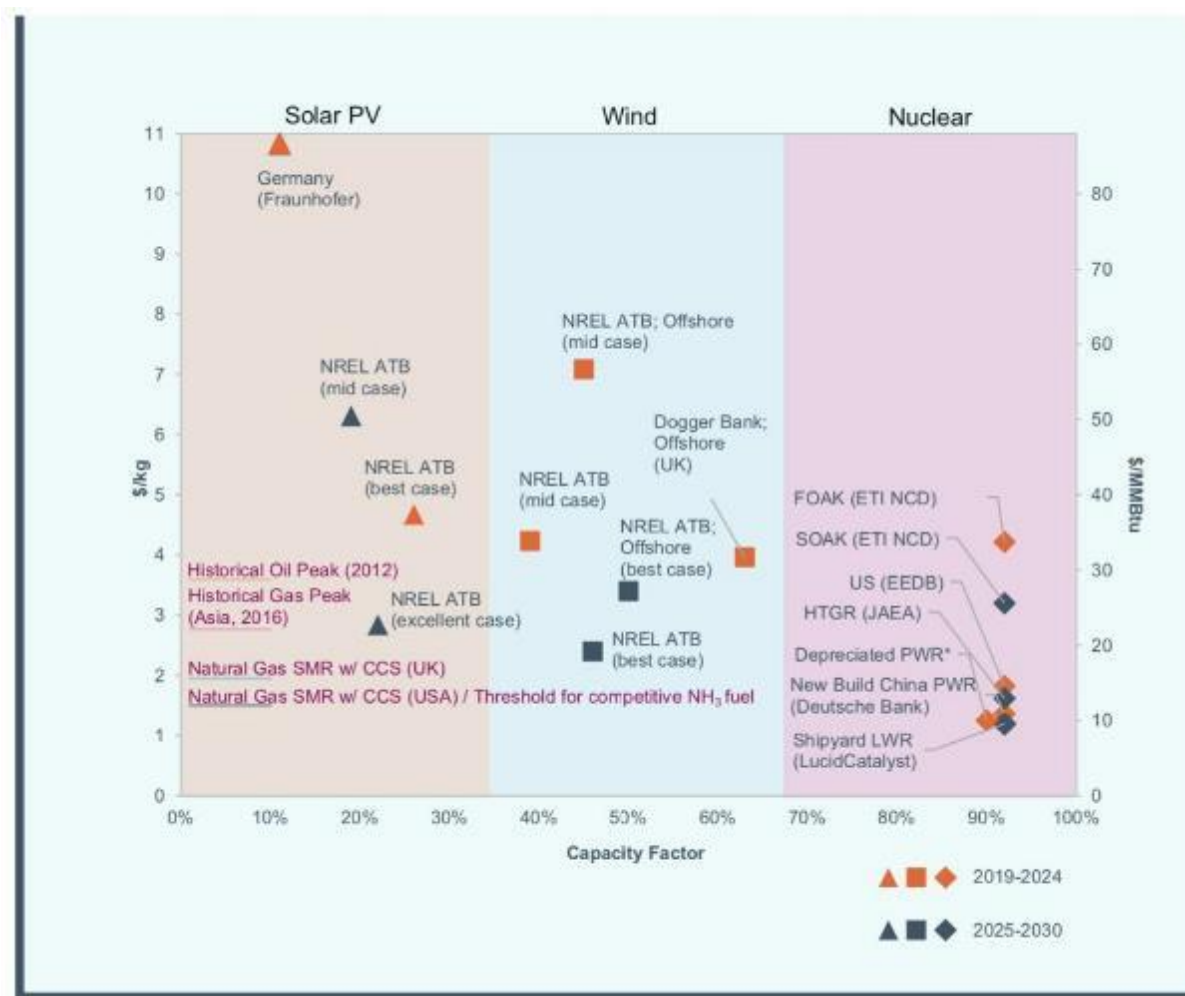


図32. 2018～2030年の水素製造コスト

Source: (LucidCatalyst 2020)

原子力には、水素の生成に適した特定の属性がある。非常に高い設備利用率での電力と熱の生産により、比較的 low cost のゼロCO<sub>2</sub>水素の大規模生産が可能になる（Boardman 他 2019年）<sup>12</sup>。

高電力密度により、比較的小さな環境フットプリントも可能になる。水素の原子力生産は、結合された水素プラントも柔軟な方法で運用できると仮定すると、原子力がグリッド需要をサポートする方法に追加の柔軟性を提供する。

水素は、グリッド電力又は再生可能エネルギーや原子力などのクリーンなエネルギー源からの余剰エネルギーで生成できる。ただし、将来の無炭素燃料市場は非常に大きいため、大規模な専用の無炭素水素製造施設でも対処する必要がある。これは、無炭素水素市場の最終的な規模が、化石燃料の合成代替品を生産するために拡大された場合、世界の電力市場よりもはるかに大きくなる可能性があるためである。したがって、ここでは主に、大規模な専用プロジェクトからの水素製造のコストとスケラビリティの可能性に重点を置いている。

低コストの水素（1.50ドル/kg未満）により、航空用のジェットA燃料や、海上輸送やピーカーガスプラントなどのバンカー燃料に代わるアンモニアなどの炭素中性燃料の大規模生産が可能になる。低コストの水素には、低コストで高設備利用率のエネルギーと、低コストで高効率の電解槽が必要である。高度な高温電気分解と熱化学、熱駆動プロセスを使用することで、積極的なコスト目標を達成することができる。

原子力技術は、90%を超える設備利用率で確実に電気と高温蒸気を生成する能力があるため、世界市場規模で大量の低コスト水素を生成するのに非常に適している。原子力技術からの生産は非常に進んでいる。従来の（軽水）原子炉と高度な原子炉の両方を備えた国立研究所のプログラム全体を含む数十年の研究は、低コストで大量のクリーンな水素生産の変革的かつ短期的な可能性を示している。米国での最近の分析と計画されているLWR生成水素の実証は、第5章に要約されている。

#### 14.2.2 電力、水素、及び燃料の低コスト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

今日構成されている原子力産業は、合成燃料の生産に大きく貢献するために必要な時間枠内に必要な規模のプラントを提供できる可能性は低い。クリーンな水素生産の大幅な増加を推進するために、原子力産業は、クリーンな熱、燃料、及び電力に必要な製品をスケールアップして提供するために、プロジェクトの提供及び展開モデルを変革する必要がある。これらは、再生可能エネルギー技術が世界のエネルギーシステムの変革を開始することを可能にした、コスト削減、パフォーマンスの向上、及び展開率に同じ集中力を適用することで達成できる。

従来の建設プロジェクトから、造船所で製造されたプラントや浮体式生産貯蔵及び荷降ろし船（図34）、Hydrogen Gigafactoryモデル（以下に定義及び写真を図35に示す）などの生産性の高い製造環境に移行することで、大幅な短期的なコスト削減を実現できる。

---

<sup>12</sup> 「原子力発電所からのエネルギーを使用して、手頃な価格のクリーンな水素を生成できる。水素製造の均等化発電原価（つまり、<2.00ドル/kg H<sub>2</sub>）のDOE目標を達成し、超えることができる。分析によると、LWR電気/ハイブリッドプラントは、特定の運転条件下及びクリーンエネルギー許容量の下で、従来の天然ガス水蒸気改質よりも優れた性能を発揮する可能性がある。経済的評価は、公的結合資本プロジェクトのために発動された財務パラメータに基づいて、H<sub>2</sub>が約1.50ドル/kgで生産できることを示している」（Boardman 他 2019年）。

従来の建設から高生産性の製造に移行することで、高温の高度な原子炉を使用したクリーンな水素と合成燃料の製造コストを劇的に削減できる。主要な造船所はすでに大規模な製造能力を備えており、目的に合わせて設計された水素製造施設を製造できる。新しい及び/又はアップグレードされた容量と組み合わせられた既存の世界的な造船所の容量は、この章で特定された脱炭素化が困難な部門の化石燃料を完全に置き換えるのに十分な合成燃料浮体式生産貯蔵及び荷降ろし船を提供できる。

これらの新しい供給モデルは、早くも2030年に大規模でコスト競争力のある合成燃料を可能にする水素コストを達成する。2030年から2050年に達成可能な水素生産コストを図33に示す。

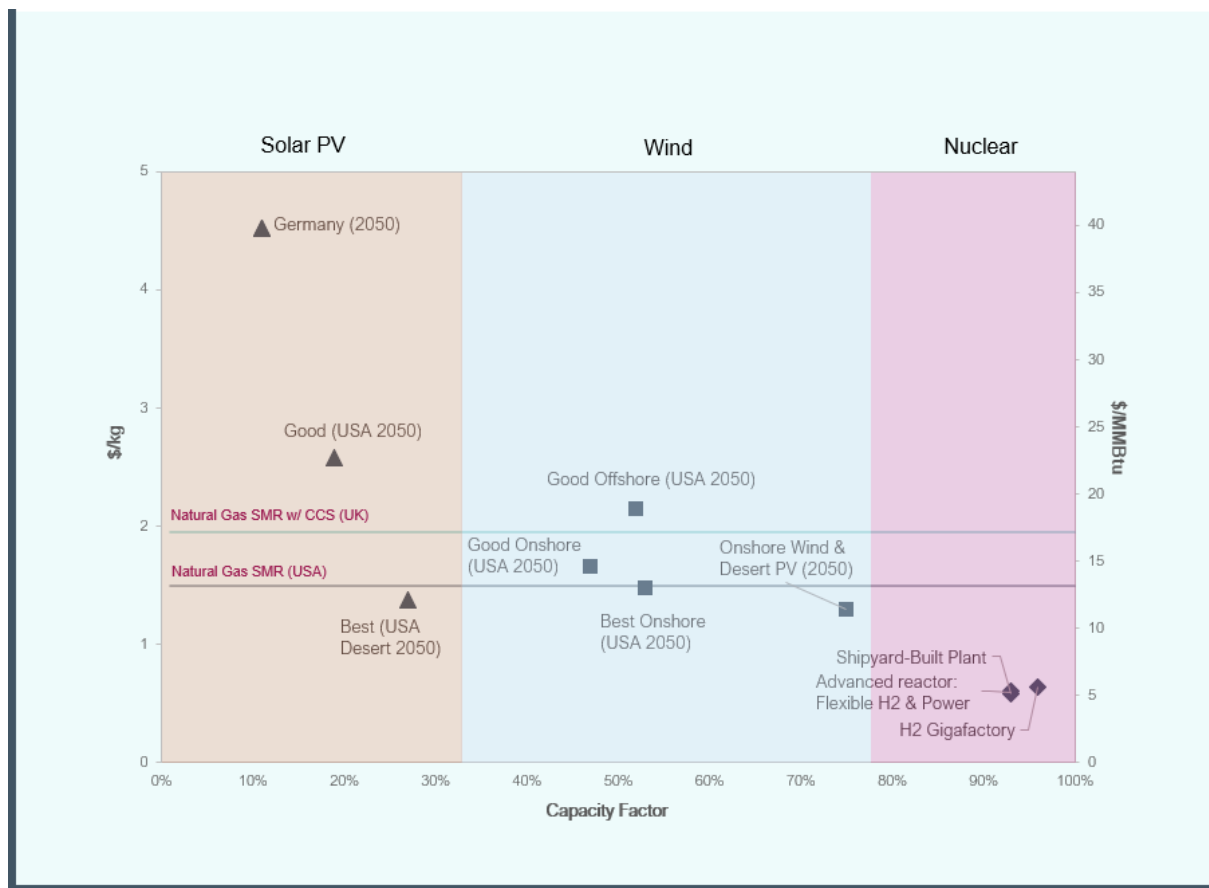


図33. 水素製造コスト2030～2050年

Source: LucidCatalyst.

図34と図35は、造船所で製造を行う浮体式生産貯蔵及び荷降ろし船の概念を示している。この船は、海岸近くに係留され、水素、電力、アンモニアの生成、及び脱塩を行う可能性を持つ。製品を岸に送るパイプラインと水中伝送ケーブルは示されていない。





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

Source: LucidCatalyst.

世界市場で輸送可能な商品である燃料の生産は、原子力の新しいビジネスモデルを可能にする。製品が地域の電力から世界の燃料供給に変わるにつれて、事業の立地と規模は変化する。オフショア展開は、立地の機会を増やし、コストを削減し、2030年代以降の低コストの水素及び合成燃料の世界規模の生産をさらに可能にする。

Hydrogen Gigafactoryの概念（図35に示されている）は、大規模な沿岸の石油及びガス精製所などの利用されなくなった工業用地に配置される次世代の精製所である。この製油所規模の水素生産施設は、2050年に英国の水素需要の10分の1を生産する規模になっている。Hydrogen Gigafactoryデリバリーモデルは、高度に統合された高生産性のオンサイト製造、組み立て、主要コンポーネントの設置、コンパクトなレイアウトを備えており、非常に低コストの水素を大量に供給することができる。このような製油所規模の施設を開発している国にとって、これは世界をリードする国内サプライチェーン能力、合成燃料の潜在的な競争力のある輸出、及び手頃な脱炭素化を確立する大きな可能性を表している。

この章では、このコスト削減の観点から原子力配備を再考し、運用を拡大することにより、1kg未満の超低コスト水素への道を定義する。これらの革新的な供給モードによる低水素コストの迅速な達成は、脱炭素化が困難な部門全体での深い脱炭素化を加速する可能性がある。2050年までに、低コストのクリーンな水素は、他の方法で閉じ込められた化石燃料の大部分からの実質的な世界的な累積的な将来の炭素排出を回避するのに役立つ可能性がある。





図35. 2018～2030年のHydrogen Gigafactory

Source: LucidCatalyst.

30年以内に必要な脱炭素化の程度を達成することは、大変な努力となるであろう。新しいインフラストラクチャへの投資に利用できる資本の範囲など、主要な制約を考慮する必要がある。予想される石油の流れ（1日あたり約1億バレルの石油）を維持するために必要な投資は、2020年から2040年の期間で16.8兆ドルである（Hureau 及び Serbutoviez 2020年）。

対照的に、ここで説明するイノベーションは、IEAが述べた政策シナリオから、脱炭素化が困難な部門の石油とガスの流れを置き換えるために必要な投資よりも少ない投資で済む。図36は、2050年までに浮体式生産貯蔵及び荷降ろし船<sup>13</sup>又は再生可能エネルギー（優れた設備利用率の風力と太陽光の組み合わせ）（NREL 2019年b）のいずれかによる350EJの全燃料代替に必要な総投資額を予測されたこの従来の石油とガスの流れを維持し、2050年まで成長させるために必要な生産投資の探査と比較して示している。言い換えれば、浮体式生産貯蔵及び荷降ろし船とGigafactoriesを通じて液体燃料とガス（前述の350 EJ）の同じエネルギー需要を満たすには、この将来の要件を満たすために石油とガスの生産に投資し続けるよりも、現在から2050年までの投資が大幅に少なく済む。原子力ケースは350EJを供給し、水素の全コストと合成燃料への変換が含まれているため、石油とガスの同等の供給フローを維持するための投資要件は、現在の投資予測よりも大幅に少なくなる。その意味するところは、これらの化石燃料の

<sup>13</sup> 浮体式生産貯蔵及び荷降ろし船の投資事例では、電解槽、燃料生産設備、及び船内貯蔵を含む、GWクラスの浮体式生産貯蔵及び荷降ろし船あたり13億の2030～2050年のタイムスケールでの加重平均設置コストを想定した。

供給は、従来の石油探査及び生産方法を通じて供給を継続するために必要とされるよりも少ない投資で、30年以内にクリーンな代替物に置き換えることができるということである。

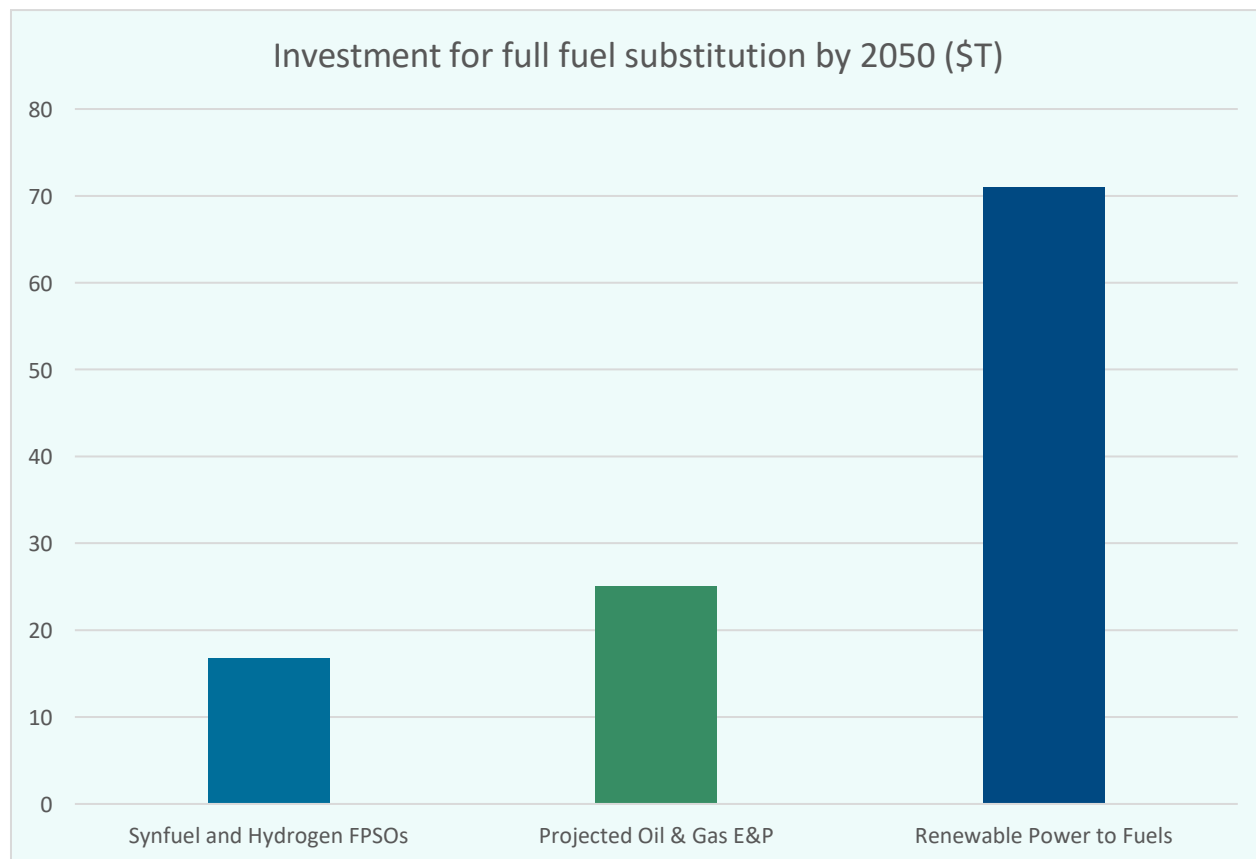


図36. 2018～2030年の水素製造コスト

Source: LucidCatalyst.

合成燃料の製造コストは、必要な水素原料のコストと相関している。合成燃料が標準燃料の一般的なコスト範囲に対応する価格範囲を達成するには、非常に低コストの水素原料が必要である。具体的には、船舶の燃料油に匹敵するアンモニアコストを達成するには、1.50ドル/kg以下の水素、及び航空燃料用のジェットAなどの合成炭化水素の場合は1.10ドル/kg以下の水素が必要である。これは、高度な原子力技術と革新的な配送及び展開モデルを組み合わせ、非常に低コストで大規模な展開を迅速に実現し、短期間の排出量を迅速に削減することを目的とした専用設計の施設で実現できる。

私たちの次の研究であるDecarbonizingProsperityは、スケーラブルで費用効果の高い水素を短期的にどのように生産できるかを示している（LucidCatalyst 2020年）。この研究は、クリーンな水素製造経路の技術経済モデリングから得られた重要な結果を組み合わせたものである。危険が大きいことを考えると、この可能性を実現するためにあらゆる努力を払う必要がある。あまりにも長い間、原子力に関連するリスクは、他の技術によるリスクのコンテキストの外で、脱炭素化に失敗するリスクを十分に考慮せずに考慮されてきた。この章は、リーダーが原子力について教育を受け、リスクを背景に置き、代替案を適切に評価して、情報に基づいた、証拠に基づいた、結果に焦点を当てた決定を下すための行動を促すフレーズである。このような情報

に基づいた意思決定を促進するために、政府は、クリーンな燃料生産のための工場ベース及び造船所製造モデルのコスト削減とスケールアップの可能性の調査をしたほうが良いのではないか。

## 15 国際原子力機関：柔軟な原子力及び発電に関する加盟国の経験

執筆：Victoria Alexeeva、Ed Bradley、Marco Cometto、Clement Hill、Ness Kilic、Ki Seob Sim、Stefano Monti、Henri Paillere、Alik Van Heek（IAEA原子力エネルギー一局（「IAEA Overview」2016年））(<https://www.iaea.org/about/overview>)

IAEAは、加盟国に安全で安全かつ保護された原子力技術を展開するためのガイダンスと支援を提供し、国のエネルギー戦略と政策を策定する上で重要な役割を果たしている。したがって、国連の気候変動目標と持続可能な開発目標の達成において加盟国を支援することは、IAEAの法定目標である、世界中の平和、健康、繁栄への原子力の貢献を加速し拡大することと密接に一致している。現在原子力の選択肢を追求している加盟国及び新しい原子力発電所の配備に関心のある加盟国にとって、原子力システムを他の低炭素技術と最適に統合する方法の問題は、注意深い分析を必要とする。従来ベースロード発電機として運用されていた原子力発電所は、風力発電所や太陽光発電所などの変動する再生可能エネルギーの大部分を占めるシステムでは、異なる方法でより柔軟に運用する必要がある場合がある。

この章では、原子力発電所の柔軟性の分野でIAEAが実施した作業と研究を要約する。ここで議論されているIAEAの技術的及び経済的分析は、さまざまな出版物、技術会議、ワークショップ、会議で収集された加盟国の専門知識と経験に基づいている。これは、今日の電力市場における現在の原子炉群と、原子力発電所（SMRや第4世代原子炉などの高度な原子炉を含む）が、変動する再生可能エネルギーが大きなシェアを持つ将来の電力市場で稼働する必要がある場合の両方をカバーしている。柔軟性は、原子力と再生可能エネルギーの統合を成功させるための鍵であり、IAEAは、運用の柔軟性（つまり、負荷追従と他のシステムサービスの提供）を超えて、生産の柔軟性（つまり、電気や非電気製品を生産する能力）を示している。水素、プロセス熱、又は飲料水）は、エネルギー部門全体を脱炭素化するための重要な手段となる可能性がある。関連するすべてのIAEA出版物及び進行中の活動への参照が提供されている。

### 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

エネルギー環境は、炭素排出量を大幅に削減するという世界的な取り組み、一部の低炭素生成オプションの経済競争力の向上、及び電力部門向けの画期的な技術とアプリケーションの出現に対応して急速に進化している（「Climate Change and Nuclear Power」2020年）。過去10年間で、VRE、風力、太陽光発電の発電シェアはほとんどの国で絶えず増加しており、この傾向は今後も続くと予想される。将来の電力部門は、化石燃料技術からの貢献が限られているものの、主に低炭素技術に依存する、より大きく、より複雑で、より統合されたシステムに向かって進化する可能性がある。将来の柔軟性と補助サービスのニーズは、今日の電力システムのレベルをはるかに超える可能性があり、原子力などのベースロードとして従来から運用されているものを含む、すべてのディスパッチ可能テクノロジーから要求される。負荷追従のニーズ



を事前に予測することはより困難になり、電力調整はより短いタイムスケールで必要になり、はるかに頻繁になる。

この変化の主な推進力は、システムにおけるVREテクノロジーのシェアの拡大である。VREのかなりの部分が存在する場合、残りの需要（つまり、システムの残りの部分が満たす必要のある需要）はますます不安定になり、負荷変動の振幅が大きくなり、変化が急になる（図37を参照）。これにより、システムの柔軟性の必要性が高まる。残留負荷も予測不可能になり、需要の変化よりもVREソースからの不確実な生成によって決定され（予測方法は大幅に改善されたが）、よく知られた日次、週次、及び季節のパターンが失われる。したがって、電力システムの信頼性を確保するには、より多くの予備容量と補助サービスが必要である。VREの大部分が存在する場合、電力システムは、発電に加えて、確固たる容量、柔軟性、及びその他のシステムサービスを提供する能力を必要とし、補償する必要がある。さもなければ、すべての火力発電所で達成可能な負荷率が低下する（図38を参照）。最適な構成は、ベースロードからピーク及びミッドメリットプラントにシフトする。

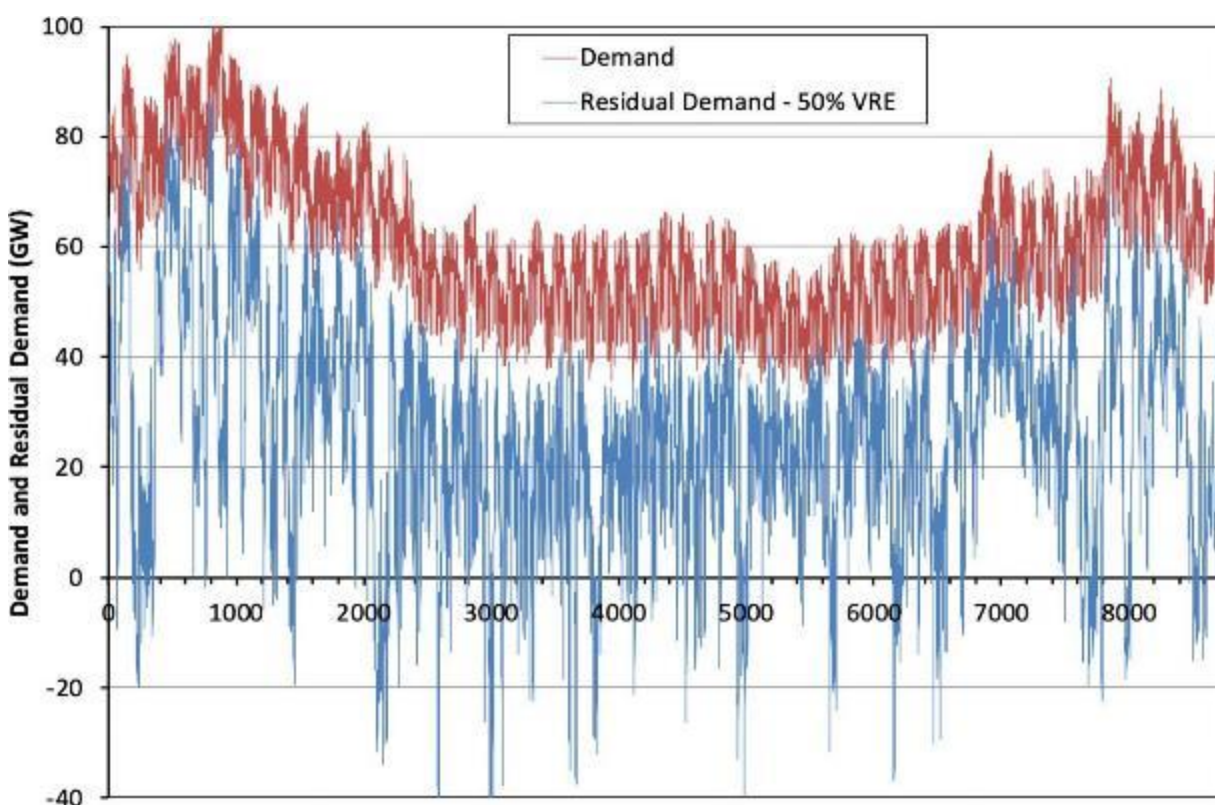


Figure 37. 50%VREシェアでの電力需要と残余需要

Source: IAEA, adapted from “The Costs of Decarbonization” (NEA 2019).

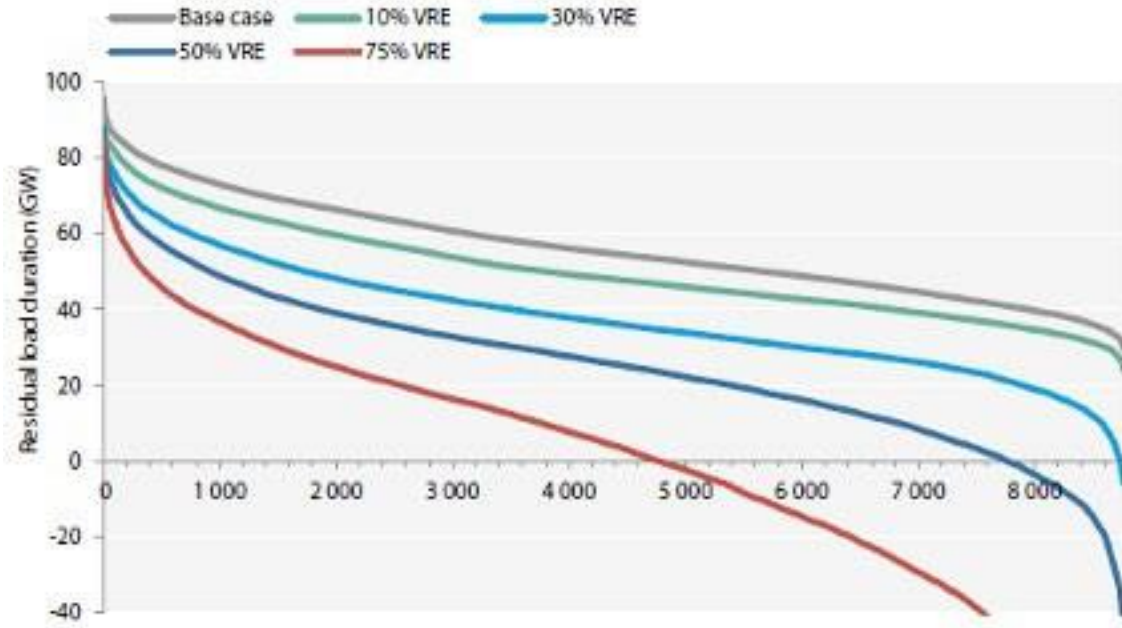


図38. さまざまなVREシェアでの残留負荷持続曲線、実例

Source: IAEA, adapted from “The Costs of Decarbonization” (NEA 2019)

システムにおけるVREのシェアに加えて、他の多くの要因と新技術が将来の電力システムを変革する可能性があり、したがって、原子力に必要な運用モードと柔軟性に影響を与える。最も有望な開発のいくつか（例えば、ストレージ技術の進歩、相互接続の開発、需要応答のレベルの向上、及びエネルギー部門とのより広範な統合）は、残りの需要を平坦化し、直接的又は間接的に柔軟性及びその他のサービスをシステムに提供するのに役立つ。これにより、システムへのVREの統合が容易になり、原子力などのベースロード発電に関連する技術の役割が高まる。

政策決定、特により低い電力システムの炭素強度レベルを必要とする政策は、将来の発電構成や原子力発電の柔軟性要件にも影響を及ぼす。より厳しい炭素制約は、システムへの化石燃料プラントの量と役割を制限する。したがって、現在多くのシステムに柔軟性とサービスの大部分を保証しているプラント（つまり、天然ガスの尖頭発電所）の役割はおそらく減少するであろう。したがって、他のすべての条件が同じであれば、炭素の制約が厳しくなると、電力システムにおける原子力の役割と、柔軟性やその他のシステムサービスを提供するための要件が高まる。

これが、パリ協定の目標に準拠した多くのシナリオで原子力の役割が増大している理由である（IPCC 2018年）。将来的には原子力発電はより柔軟に運用される可能性があるが、現在よりも負荷率は低くなる。発電と非電気の貯蔵可能な出力の組み合わせは、出力を最も価値のある製品にシフトするのに役立つ可能性がある。これにより、柔軟性とシステムサービスが提供され、原子力の経済性が大幅に向上する。



### 15.1.1 現在の原子炉の負荷追従の技術的側面

原子力発電の初期には、原子力発電所の所有者/運営者のなかには、柔軟な運用の潜在的な必要性を検討し、これらの機能を備えた設計を要求し、柔軟な運用テストを実施しているものがあった。彼らはまた、操作後に限られた量の負荷を実行した。それにもかかわらず、それ以来、原子力発電所の大部分はベースロードで運転されており、そのモードで運転するためにプラントと設備を最適化している。しかし、フランスやドイツなどの一部の加盟国は、柔軟な運用のために原子力発電所の大部分を設計又は改造した。これらの国々のプラントは柔軟に稼働しており（フランスの柔軟な運用の詳細については第4章を参照）、原子炉での長年の柔軟な運用に関する経験と知識が収集されている。さらに、他の国のいくつかの原子力発電所は、季節的、又は時折の発電操作を行っている（IAEA 2018年a）。

グリッドシステムのオペレーターが要求する技術要件は、既存の設計/施設がそれらを満たすことができるかどうか、又は設計/施設にどのような変更を実装する必要があるかを評価するために入力される。この段階で、グリッドシステムのオペレーターとプラントの所有者/運営者と設計者、及びグリッドと原子力の規制当局の間で数回の反復が行われ、特定のプラントの柔軟な運用の技術的側面を理解するために、何が要求され、何が提供できるか<sup>14</sup>について合意する。その段階で、原子力発電所の設計とライセンスの基礎を包括的に理解し、評価することは、次のことを行うために必要である。柔軟な運用の必要性と範囲について情報に基づいた決定を下す。柔軟な運用のための設計と構成の容量と機能を確認する。必要な機能を実現するための機能設計又は変更を計画及び実装する。プラント内で安全、確実、効率的に柔軟な運用を実行する。

表11に示す負荷追従について考慮すべき技術的側面の影響と範囲は、電力変化の大きさと頻度、電力変化率、拡張低電力運転の長さレベル、最小原子炉と電力出力などによって異なる。同じグリッド要件であっても、プラントへの影響と技術的側面は、プラントの場所、設計、構成、サイズ、年数（技術の年代を含む）、燃料の種類、運用と保守の慣行、既存のプログラムの有効性と範囲などによって異なる。（Persson 他 2012年）。特定された影響は、柔軟な運用の実装とパフォーマンスのための一連の技術的及び管理的制御とソリューションによって対処する必要がある。フランスとドイツの原子力発電所から得られた経験、及び最新の知識と技術的基礎に基づいて予測できる影響に基づいて、共通の技術的影響/問題/解決策がある（IAEA 2018年a）。

---

<sup>14</sup>いくつかの包括的なプラント仕様と手順は、設計者、開発者、ベンダー、及び電気及び原子力業界の協会で構成される組織によって開発された。これには、欧州公益事業体要件ドキュメントやLWR公益事業体要件ドキュメントなどの負荷追従及び周波数制御のパフォーマンス要件のガイダンスが含まれ、これは、地域、国、又は地域のグリッドコード（たとえば、発電機の要件に関する欧州ネットワークコード）によってグリッドシステムオペレーターによって要求される技術要件のほとんどをカバーする可能性がある。

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

イベント	対応	関連するメソッド又はパラメータ
予測される毎日の需要変動	負荷追従	低電力期間電力変化率 特定の時間あたりの発生数（季節、月次、週次） 長期間の計画需要に対する低電力での期間（拡張低電力操作） 二次システム効率のための最小電力
リアルタイムの小さな需要変動	周波数制御	周波数外乱に相当する電力変化（振幅、変化率、必要な制御タイプ、例：ローカル/リモート、手動/自動）
グリッドの乱れ、大きくてまれな電力変動	スピニングリザーブ	出力（振幅、レート、初期電力レベル） ステップ（振幅、初期電力レベル） 最小安定電力レベル、住宅負荷能力 瞬時（定格火力発電所の数パーセントの変更、フルパワーの通知に戻る）

たとえば、柔軟な操作の結果としての熱的及び機械的サイクルの増加は、疲労、摩耗、エロージョン/コロージョン、経年劣化などに関するコンポーネントの評価に悪影響を与える可能性がある。安全にとって重要なシステムについては、既存のコンポーネント設計の仮定からの逸脱、及びすべての運転モードで意図された寿命を通じて、安全機能を実行するための不十分なシステム及び設計能力を示した故障モード及び影響を確認して対処する必要がある。同様に、安全性にとって重要ではないシステムについては、柔軟な運用によるシステムの変更により、安全システムのパフォーマンス、効率、可用性に影響を与える可能性がないことを確認するための評価を行う必要がある。特に、二次システムコンポーネントの動作条件が変化するため、それらの設計上の仮定に影響を与える。サイクリングの範囲が保守的な寿命の仮定によって制限されている場合でも、それらを確認し、制限されたままであることを確認するために監視を行う必要がある。監視、検査、保守プログラムを含む設計機能のパフォーマンスに対する柔軟性の影響を説明する必要がある。

### 15.1.2 負荷追従が燃料性能に与える影響

核燃料棒は原子炉の安全に不可欠である。燃料棒は、すべての運転モードで構造的完全性が維持されるように設計されている（IAEA 2016年）。実際、原子力発電所での運転経験は、燃料棒が運転技術仕様の範囲内で使用されている限り、燃料棒が原子炉の柔軟な運転のさまざまなモード（表11にリストされているような）によって引き起こされる熱機械的負荷に燃料破損なしで耐えることができることを示している。柔軟な運用と関連する電力の変化は、ペレットと被覆管の相互作用/応力腐食割れ現象を通じて燃料の完全性に直接影響を与える可能性があり、特定の条件で燃料の故障につながる可能性がある。つまり、小さいペレットと被覆管の相互作用/応力腐食割れのマージンが燃料に影響を与えると予想されるいくつかの操作上の発生については、ペレットと被覆管の相互作用/応力腐食割れの失敗の数は良性ではなく、重大な放射線ソースタームが生成される可能性がある。このような状況を考慮して、一部の加盟国では、予想される運転中の発生電力過渡現象を含む運転状態でのペレットと被覆管の相互作用/応力腐食割れから燃料の故障が発生しないことを実証する規制要件が指定されている。長時間の低電力運転に続いて予想される動作発生イベントが主な懸念事項である。

従来、原子力発電所はベースロードモードで運転されており、柔軟な運用が可能であることが知られているが、オンラインのときはいつでも最大定格電力を生成する。原子炉内の燃料管理はベースロードモード用に最適化されているため、ペレットと被覆管の相互作用/応力腐食割れ燃料破損に対するマージンは、柔軟な運用で減少した。核燃料コミュニティは、拡張低電力運転を含む柔軟な運用条件下でのペレットと被覆管の相互作用/応力腐食割れの失敗に対するマージンを定量化するためのPCI設計検証手法を開発した（Paulin 2016年）。定量化されたマージンに基づいて、オペレーターは、原子炉の運転に控えめに課せられた制約を緩和して、グリッド要件によりよく対応することができる。言い換えると、運転限界が再評価されると、炉心は許容限界内で上昇し、同時に柔軟な発電を提供し、燃料の完全性を維持することができる。

IAEAは2019年に技術会議を開催し、ペレットと被覆管の相互作用/応力腐食割れを理解して軽減するための進捗状況に関する情報を加盟国間で共有した。会議の参加者は、出力操作運転中の燃料の挙動に関する最新の知識と実験を説明するIAEA技術レポートに寄稿することに同意した。出版は進行中である。

### 15.1.3 柔軟な運用の経済的研究

経済的な観点から、ベースロードで原子力発電所を運転することが一般的に最も有利であると考えられている。原子力ユニットは、化石燃料エネルギー生成ユニットと比較して、初期資本コストが高く、燃料及び運用コストが比較的低下している。個々の原子力発電所がプライステイカーとして機能する競争の激しい市場では、発電による収益は全負荷運転で最大化される。したがって、負荷追従モードで原子力発電所を運転することは、確かに発電所の運転の経済性に影響を及ぼす。プラントの所有者/運営者は、コストの原因と、グリッドシステムの運営者及び国全体のエネルギー政策に価値として柔軟な運用を提供することから利益を得る可能性を特定する。したがって、経済的な観点から、非ベースロード運転が電力システムに付加価値をもたらす理由と方法、及び関連するコストを評価する必要がある。

経済分析では、柔軟な運用による影響とベースロード運用モードによる影響の比較が求められる。柔軟な運用に関連するコストとメリットは、さまざまな規模で相互に排他的であり、特定のインターフェイスで相互に依存している可能性があるため、包括的かつ統合的に検討する必要がある。各規模の利害関係者は、さまざまな状況でさまざまな影響を受ける。一方で、原子力事業者は、柔軟性のために、初期設置コスト又は運用及び保守コストの増加という点で影響を及ぼす。一方、グリッドシステムの運営者にとっては、柔軟性が増すと、再生可能エネルギー資源を増やすことができ、グリッドの信頼性と安定性が提供又は改善される。ただし、同じプラントの所有者/運営者は、追加された柔軟性に対してプラントに支払う市場構造から利益を得る可能性がある。さらに、政府は主に経済全体への影響に関心を持っている。したがって、体系的な影響評価（費用便益分析）を行うことができる4つの異なるレベルが考慮される（図39を参照）。



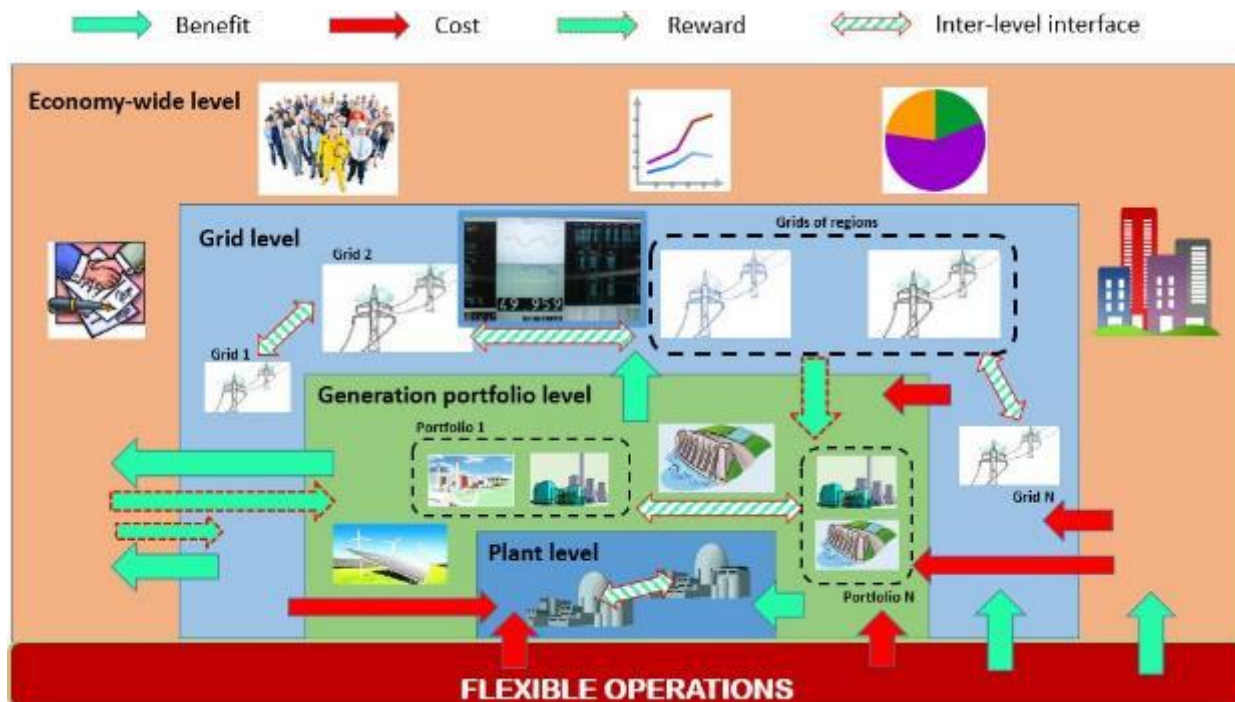


図39. 柔軟な運用の経済的インターフェイス：すべてのレベルでの影響、価値、インセンティブ、規制

Source: (IAEA 2018a)

IAEAは、(IAEA 2018年a)で説明されているように、2050年までの再生可能エネルギーの導入の増加に伴い、将来の電力市場における原子力発電所の運用（柔軟な原子力を含む）の経済的側面に関するモデルベースの研究を開発した。ケーススタディには欧州連合が選ばれた。後者は、現在及び将来の再生可能エネルギーの浸透率、全体的なエネルギー構成ポートフォリオ、グリッドの相互接続レベル、負荷プロファイル、及び電力市場の規模が欧州連合加盟国間で大幅に異なることを考えると、柔軟な運用の分析にとって重要なケースである。分析は個々の加盟国のレベルで実施され、派遣モデルと経済モデルの適用に基づいて構築された。

2050年の柔軟な原子力発電の最も高い要件は、原子力及び再生可能エネルギーの容量のシェアが高く、相互接続が低及び中程度の地域で特定された。上下の発電変動の同じ時的な割当量がすべての柔軟な原子炉に適用されたことに注意されたい。ただし、システムの柔軟性のニーズに応じて、サイクリングの種類は地域によって大きく異なる。欧州連合の一部の地域の原子力発電群は、2050年に深く短いサイクルを提供するように要求されているが、他の地域では、残留負荷に合わせて軽い頻繁なサイクルを実行する。さらに他の国では、割当量はすべてのサイクルタイプでバランスが取れている。シミュレートされたサイクル数は、ライセンスされた設計を超えない。モデリングフレームワークがプラントへの柔軟性サービスの提供の最適レベルを決定しなかったことを考えると、制約が設定されていない場合、柔軟な原子力発電の過度の循環の瞬間が観察される可能性がある(表12)。投資家とプラント運営者は、負荷追従パターンとそのライフサイクルコストへの潜在的な影響を予測する必要があると結論付けることができる。

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）

負荷サイクルの深さ（%定格 火力/定格電気出力）	10	20	40	60
ロードサイクルの年間予算	1,667	1,667	250	200
シミュレートされたロードサイクル数	57	63	86	259

Source: IAEA (IAEA 2018a).

研究のさらなる結論は、以下のように要約することができる。

- 再生可能エネルギー発電の統合は、多くのグリッドシステムでプラントを柔軟に運用するための中心的なケースとなる可能性があるが、原子力発電ユニットを柔軟に運用するための唯一の推進力ではない。グリッドコンポーネント間の相互接続の程度が低く、柔軟性のないエネルギー生成の構成により、柔軟性サービスの提供にさらなる圧力がかかる。
- 特定の一連の仮定の範囲内で柔軟に運用しても、一部の地域では2050年までに柔軟性のニーズが解決されない場合がある。
- 柔軟な運用により、負荷率が低下し、低電力で運用した場合に供給されるエネルギーの支払いが少なくなる可能性がある。
- 柔軟性サービスに関する特定の市場の取り決めがない場合、主に柔軟に運転されるプラントの負荷率の低下により、プラントの所有者/運営者の収益はベースロードモードと比較して減少する可能性がある。

#### 15.1.4 柔軟な運用のコスト関連の影響

プラントの収益性の低下は、柔軟な操業に伴う主要な経済的リスクの1つと考えられている。プラントの収益性に影響を与える可能性のあるチャネルの1つは、潜在的に高いプラントコストに関連している。負荷係数（機会費用）の低下による収益の損失に加えて、柔軟な運用が導入された場合、特に負荷追従が導入された場合、次のカテゴリの実際の費用が影響を受ける可能性がある（詳細については（IAEA 2018年a）を参照）。

- 原子力発電所からグリッドシステム運営者が要求する要件に応じて、柔軟な要件と互換性があるように設計を変更することにより、追加の資本コストが発生する場合がある。たとえば、ある程度の柔軟なモードでの運用に適格となるには、計装及び制御システム、コア内監視、制御棒駆動メカニズム、及び特に二次システムコンポーネントの物理的摩耗の監視を改善するために、高度な制御システムに追加の投資が必要になる場合がある。
- 柔軟な運用により、運用及び保守のコストが増加する可能性がある。柔軟な運用の結果として、追加のメンテナンスとコンポーネントの交換が必要になる場合があり、メンテナンス活動と資源が増加する。過度の使用、振動、及び温度変化によるコンポーネントの摩耗は、特に二次システムコンポーネントで発生する可能性がある。

負荷追従はまた、より頻繁なメンテナンスを誘発し、停止頻度及び/又は期間の増加という観点から発電所の可用性を低下させる可能性がある。

- 原子炉内の燃料管理がベースロード運転用に最適化されている場合、燃料費は最適ではない方法で燃料を使用することによって影響を受ける可能性がある。計画された電力操作（毎日の負荷追従、燃料補給停止のタイミングを管理するためのサイクル終了コストダウンなど）は、コアのリロード枯渇と安全性の分析に組み込む必要がある。ただし、計画外の電力操作は、配電及び燃焼プロファイルを変更し、コア物理パラメータを変更し、燃料利用効率に影響を与え、追加の分析を必要とし、コストを追加する可能性がある。
- 特にオペレーターの操作の一部が手動で行われる場合は、追加の人的コストも発生する可能性がある。さらに重要なことに、より頻繁又は活発なプラントシステム介入（化学物質管理など）のために、追加又は改訂された監視、監視、及び保守のための要員の初期及び継続的なトレーニングを検討する必要がある。

### 15.1.5 現在及び将来の補助市場における原子力

VREの導入が増えると、電力網の変動の拡大やネットワークの混雑に対処し、停電後の送電網の運用をタイムリーに復旧するための補助サービスが必要になる。しかし、規制緩和された電力業界を持つ加盟国間の比較は、現在の規制の取り決め、市場ルール、報酬構造、タイムスケールなどの点で大きな異質性を浮き彫りにしている。製品仕様も地域によって大幅に異なることを考えると、最初の標準化/調和の取り組みは、たとえばヨーロッパで最初に開始する必要がある。

このような背景から、新しく進化するアンシラリーサービス市場が原子力発電所に柔軟性サービスを提供する動機を与える可能性があるかどうかという疑問が生じる。卸売電力価格が低下し、変動が大きくなる場合、補助市場への参加は、原則として、原子力発電所に追加の収入源を提供することができる。しかし、いくつかの限られた証拠（たとえばドイツ）を除けば、現在の市場主導型及び/又は必要な負荷追従体制に参加している原子力発電所の収益関連の影響についてはほとんど知られていない。アンシラリーサービス市場における原子力の経済的機会の問題は、VREの量が多い将来の電力システムではさらに差し迫ったものになる可能性がある。アンシラリーサービスが表す経済的機会は、それらが調達される方法にリンクされる。今日、それらは通常、3つの主要な方法で調達される。補償される場合とされない場合がある強制的な対応、長期の二国間契約、及び市場ベースの調達メカニズムである。政策立案者は、グリッド及び経済全体のレベルで利益がある場合に、プラント所有者が柔軟な方法で運転するように奨励するメカニズムを検討する可能性がある。

## 15.2 高度な原子力システムと非電気アプリケーション

### 15.2.1 高度な原子炉の柔軟性：SMR及び第4世代原子炉

即時及び短期展開のためのSMRの技術開発は世界的に進んでいる。2019年10月にIAEAが主催した気候変動と原子力の役割に関する国際会議で、2019年10月にIAEAによって組織された参加加盟国は、最大300 MWeIの典型的な出力で、SMRは老朽化した化石燃料発電所に取って代わる最も効果的なCO<sub>2</sub>フリー電力源である可能性があると表明した。このような原子炉の開発の原動力は次のとおりである。幅広いユーザーとアプリケーション向けの柔軟な発電のニーズに



対応する。老朽化した化石燃料火力発電所の交換。固有の受動的な安全機能を通じて安全性能を強化。より低い初期資本コストの手頃な価格を提供する。コージェネレーション及び非電気アプリケーションへの適合性。物理インフラストラクチャがあまり開発されていない遠隔地にオプションを提供する。再生可能エネルギーを含む、原子力と代替エネルギー源を組み合わせた相乗的ハイブリッドエネルギーシステムの可能性を提供する（IAEA他 2018年、IAEA 2018年 b）。この観点から、すべての大陸で断続的な再生可能エネルギーのシェアが増加していることを考えると、SMRは、炭素を含まないエネルギーシステムの供給のセキュリティを確保するために、再生可能エネルギーと相乗効果でベースロードと柔軟な運用の両方を提供する非常に有望なオプションと見なされる。

SMRと再生可能エネルギーを単一のエネルギーシステムに統合し、スマートグリッドを介して結合することで、SMRを大容量で稼働させると同時に、発電速度の柔軟性の必要性に対応し、エネルギーサービス、補助サービス、及び低炭素副産物を生産できる。これらには、電気、水素、合成燃料、商用又は自家用の高温プロセスガス又は蒸気、及び輸送用燃料が含まれる（IAEA 2018年c）。SMRは、風力、太陽光、波、潮力などの変動するエネルギー源と組み合わせると、毎日及び季節ごとに変動を緩和できる。これは、時間の経過に伴う変動とシフトパワーを相殺するためにランピングすることによって達成される（つまり、デマンドフォロー）。システムからの残りの電力変動は、グリッドレギュレーターと交渉することができる。

図40は、同等の電力出力に基づいた柔軟なSMRとモジュラーSMRのパフォーマンスを比較している。モジュラーSMRの場合、1、4、及び7モジュールを使用する3つのトポロジが検討され、それぞれが100 MWeモジュールを使用して、100 MWe、400 MWe、及び700MWeの合計出力を生成する。フレキシブルケース（非モジュラー）では、同等の電力容量が使用された（つまり、100 MWe、400 MWe、及び700 MWe）。柔軟性は、定格電力の60%から100%の範囲である。風力が優勢な期間中、モジュラーSMRは、風力発電の変動を平滑化する上で、柔軟な単一ユニットの原子炉よりも効率的である。これは、モジュラーリアクターが出力を他の熱アプリケーションにリダイレクトする（つまり、電力出力をゼロに減らす）ことに起因する。これは、調査で単一ユニット原子炉に許可された操作モードではなかった。柔軟な原子炉は最低60%の電力を生成する必要があるため、風が吹く期間中にオーバーシュートする傾向がある。これは、たとえば、仮想発電所の出力電力が多くの場合1,200MWを超える、700MWの場合にはっきりと見ることができる。過剰容量の状態は、風力発電を削減することによっても軽減できる。ただし、この調査は、変動性の低減におけるSMRのみの潜在的な利点に焦点を当てている。風のギャップの間、モジュラーと非モジュラーの両方のSMRタイプは、エネルギーギャップを埋めるために完全な出力を等しく生成することができる。

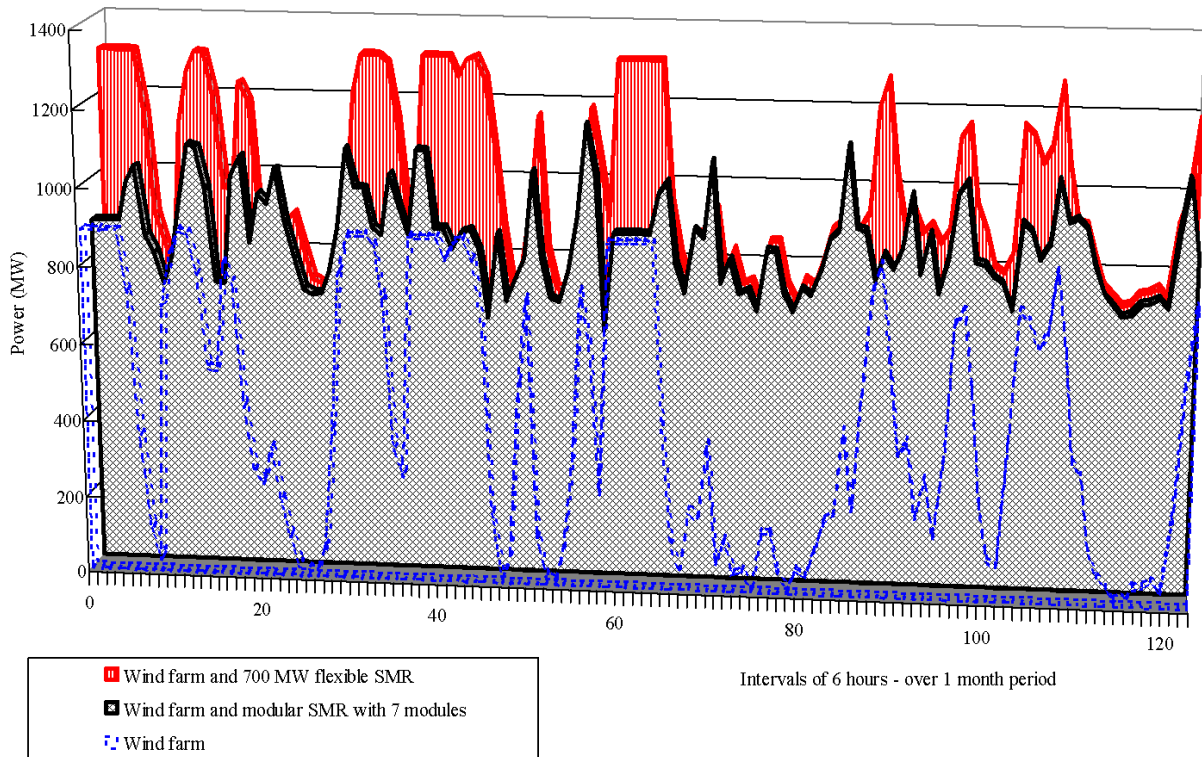


図40. 風力だけのシステムと比較した仮想発電所からの電気的変動の低減

Source: IAEA.

柔軟な運用のための最も有望なGen-IVの概念の1つは、MSRであると予想される。一部のMSRは、主に液体燃料に依存することにより、運用上の大きな柔軟性を提供するように設計されている（IAEA 2020年）。多くのMSR概念を特徴付ける負の反応度フィードバック係数は、コアの固有の安定性を提供する。さらに、この負のフィードバック係数は、熱が冷却剤で直接生成される場合（つまり、燃料塩自体が冷却剤として使用される場合）に非常に迅速に作用する。したがって、一部のMSRは、塩分温度の変動が非常に小さいまま、生成された電力を抽出された電力に迅速に調整できるため、グリッドの負荷追従に特に適している。実際、抽出された電力が変化するために塩の温度、したがって燃料の温度が変化するとすぐに、塩の密度の準瞬間的な変化によって生成された電力が変化する。したがって、塩の、そしてその結果としての反応器構造の温度変動の変動は制限される。この特性は、エネルギー構成が従来のグリッドよりも断続的な発電源に大きなシェアを与えるグリッドにとって貴重な資産である。このように、これらのMSRは、変動する再生可能エネルギーとの結合に特に適している。さらに、制御棒システムを必要とせずMSR調整を行うことができる。さらに、MSRは高温（ $>600^{\circ}\text{C}$ ）で動作する可能性があり、次に説明するように非電気アプリケーションをより効率的にサポートできる。

### 15.2.2 生産柔軟性：原子力の非電氣的応用

原子力は、海水の脱塩、水素製造、地域熱供給又は冷房、三次石油資源の抽出、及びコージェネレーション、石炭から液体への変換、化学的な原料の合成の支援などのプロセス熱アプリケーションなど、さまざまな産業アプリケーションに使用できる。代替製品の生産は、電気システムだけでなくエネルギー供給全体を脱炭素化する機会を提供する。特に、エネルギー消費の着実な増加、化石燃料の限られた入手可能性、及び化石燃料燃焼の環境及び気候変動の影響に対する感度の向上により、産業用途向けの原子力に対する大きな需要が急速に拡大すると予想される（IAEA 2017年、2019年）。2018年には、世界中で合計74基の稼働中の原子炉（アジア

で15基、ヨーロッパで59基)を使用して、原子力の非電氣的用途をサポートするために2,122.92GWhの電氣等価熱を生成した。これらの原子炉のうち、11基は淡水化をサポートし、58基は地域熱供給をサポートし、33基は工業プロセス熱アプリケーションをサポートした(IAEA 2019年)。

原子力の非電氣的応用への関心は世界中で高まり続けている。これらの部門にサービスを提供するための原子力の使用は、エネルギー安全保障を確保し、気候変動と戦うための持続可能なルートを提供する。原子力発電所からの廃熱を回収して非電氣用途に使用すると、発電所の熱効率が全体的に向上し、河川やその他の水域に放出される際のこの熱の環境への影響を減らすことができる。回収された廃熱を使用したコージェネレーションは、発電コストのかなりの部分を相殺することができる(IAEA 2019年)。たとえば、高温ガス炉からの廃熱は海水淡水化に使用でき、ガス又は石油火力発電所によって駆動される淡水化プラントから生成された水の価格に対してコストクレジットが発生する。実際、原子力発電所は、適切で費用効果の高いプロセス熱又は蒸氣を提供することもできる。これは、地域熱供給や冷房など、他のいくつかのアプリケーションに使用できる。

水素生産のための原子力の使用は、柔軟な原子炉群が将来の水素経済と気候変動の緩和において主要な役割を果たすことを可能にすることができる(IAEA 2018年d)。現在稼働中の原子力発電所は、高度な低温水の電氣分解によって水素を生成することができる。このプロセスの経済性は、オフピークで生成された電力を使用することによって改善される可能性がある。近年、高温電解や熱化学的又は電氣熱化学的水素製造サイクルなど、他のいくつかの水素製造技術が進歩している。これらの技術は、この10年間に配備されると予想される高温原子炉に統合することができる。

# 16 国際エネルギー機関：柔軟性の新しいフロンティアを探る

執筆：Brent Wanner 及び Claudia Pavarini (IEA)

再生可能エネルギー、特に風力及び太陽光PVは、現在から2040年の間に発電のシェアを大幅に増加させることが期待されている。2019年世界エネルギー見通し (IEA 2019c) で表明された政策シナリオでは、実施及び発表された政府の政策の影響とエネルギー技術のコストの進化を反映して、再生可能エネルギーからの発電は急速に増加し、2026年までに石炭を上回るとしている。風力と太陽光 PVは合わせて、電力供給の成長の半分以上を提供し、そのシェアを2018年の7%から2040年には24%に引き上げる。より環境的に野心的な持続可能な開発シナリオでは、温度上昇を2100年までに1.8°Cに66%の確率で制限することと一致し、風力と太陽光PVによる利益はさらに顕著であり、2040年までに世界の電力供給の40%に上昇するとした。

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)

	定められた政策						持続可能な開発	
	2000	2018	2025	2030	2035	2040	2030	2040
<b>石炭</b>	<b>5 994</b>	<b>10 123</b>	<b>10 291</b>	<b>10 408</b>	<b>10 444</b>	<b>10 431</b>	<b>5 504</b>	<b>2 428</b>
そのうち、炭素の回収、利用、貯蔵	-	-	1	16	43	69	246	994
<b>ガス</b>	<b>2 750</b>	<b>6 122</b>	<b>6 984</b>	<b>7 529</b>	<b>8 165</b>	<b>8 899</b>	<b>7 043</b>	<b>5 584</b>
そのうち、炭素の回収、利用、貯蔵	-	-	-	0	0	1	220	915
<b>石油</b>	<b>1 207</b>	<b>809</b>	<b>724</b>	<b>622</b>	<b>556</b>	<b>490</b>	<b>355</b>	<b>197</b>
<b>原子力</b>	<b>2 591</b>	<b>2 718</b>	<b>2 801</b>	<b>3 073</b>	<b>3 282</b>	<b>3 475</b>	<b>3 435</b>	<b>4 409</b>
<b>再生可能</b>	<b>2 863</b>	<b>6 799</b>	<b>9 972</b>	<b>12 479</b>	<b>15 204</b>	<b>18 049</b>	<b>15 434</b>	<b>26 065</b>
水素	2613	4203	4759	5255	5685	6098	5685	6934
バイオエネルギー	164	636	916	1085	1266	1459	1335	2196
風力	31	1265	2411	3317	4305	5226	4453	8295
太陽光PV	1	592	1730	2562	3551	4705	3513	7208
地熱	52	90	125	182	248	316	282	552
CSP	1	12	28	67	124	196	153	805
海洋	1	1	2	10	25	49	14	75
<b>合計</b>	<b>15 427</b>	<b>26 607</b>	<b>30 803</b>	<b>34 140</b>	<b>37 682</b>	<b>41 373</b>	<b>31 800</b>	<b>38 713</b>

## 16.1 電力システムの柔軟性要件は大幅に増加する

電力供給におけるVRE、すなわち風力及び太陽光発電のシェアの上昇は、より迅速な柔軟性、つまり電力システムの能力の必要性が大幅に増加する主要な要因である。すべての地域は、現在のエネルギーシステムとグリッドに比べてより多くの柔軟性を必要とする。ピークランピング

要件として表される場合、柔軟性のニーズは電力需要よりもはるかに速く増加する。これらは、このシナリオで電力需要の伸びのほぼ90%が発生する開発途上国、特にインドで最も速く増加する（図41）。

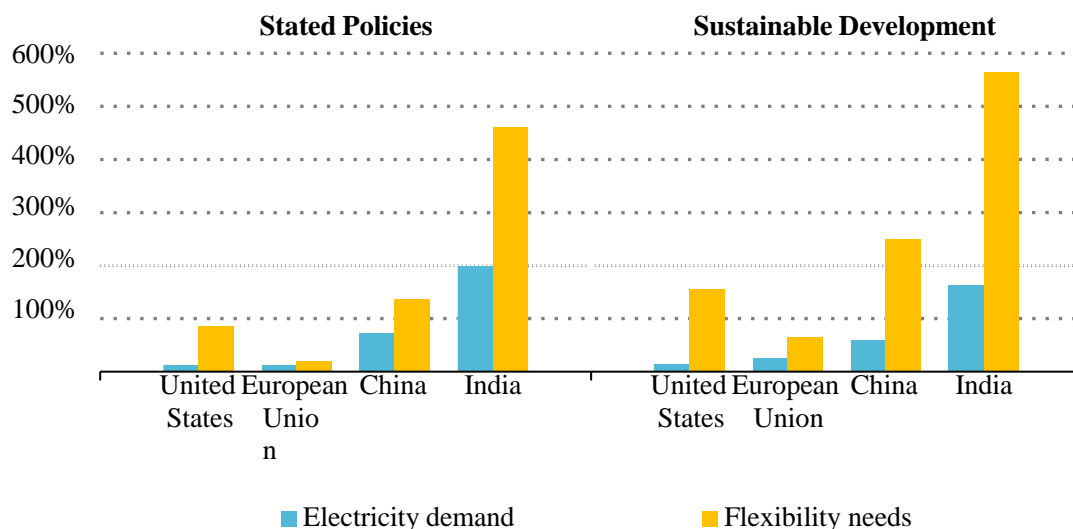


図41. 選択した地域とシナリオによる電力需要と柔軟性のニーズの増加、2018～2040年

Source: IEA.

キーポイント: 柔軟性のニーズ<sup>15</sup>は、変動する再生可能エネルギーのシェアの上昇、電気自動車の増加、及び冷却需要の増加により、電力需要よりもはるかに速く増加する。

柔軟性のニーズの増加の速度は、主にVREのシェアがどれだけ速く拡大するか依存する。発電構成における変動する再生可能エネルギーのシェアは、中国と米国の国家政策シナリオ、及び世界レベルで3倍以上に設定されている。インドでは5倍、東南アジアでは7倍に増加する。

柔軟性のニーズは、変化する需要プロファイル、上昇する変動する再生可能エネルギー供給が特定の電力システムの需要プロファイルとどの程度一致しているか、及び電力システムのサイズによっても影響を受ける。エアコンの使用の増加は、夏の間、特にピーク時に負荷を増やしている。電気自動車は、特にスマート充電が完全に開発されていない場合、ピーク需要に大きな影響を与える可能性がある。

持続可能な開発シナリオでは、電力部門が脱炭素化に向かって動き、電気の移動性が広がるにつれて、柔軟性のニーズはさらに強く高まる。このシナリオでは、インドの電力システムの柔軟性要件は、今日のレベルの6倍である。中国では3倍以上、米国では150%高くなっている。

<sup>15</sup> 柔軟性は多面的な概念であり、電力システムが需要と供給のバランスを取る能力を指し、さまざまなサービス（周波数調整、運用予備力、負荷分散など）によって提供できる。ある時間から次の時間への正味負荷の変化（1時間ごとのランピング要件）は、柔軟性の有用な指標を提供し、この分析で使用される。柔軟性と柔軟性のある供給源に対する需要の高まりの推進要因の詳細については、WEO-2018 Special Focus on Electricity（IEA 2018年b）を参照されたい。



## 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

シナリオでの柔軟性のニーズは、さまざまな地域で予測される年の1時間ごとの需要プロファイルを評価し、正味負荷の変動を世界エネルギーモデルで計算する分析に基づいている。特定の地域の容量構成に基づいて、電力システム資産が1時間ごとに出力を変更する機能をシミュレートして、必要な柔軟性を提供できるテクノロジーを特定する。

発電所や相互接続の形での従来の柔軟性のソースは、世界中の電力システムの信頼性を長い間維持してきた。今日、火力発電所（化石と原子力の両方）は、多くの電力システムに必要な柔軟性の大部分を提供しており、これは、州の政策シナリオの2040年まで当てはまる（図42）。これは、変化率の向上に役立つ既存の火力発電所の改造（IEA 2018年a）と、ガスタービンなどのより柔軟な発電所の建設によって可能になった。水力発電もまた、多くの地域で重要な柔軟性のソースである。電力システムと地域間の相互接続は、さまざまな需要と供給のパターンを利用し、利用可能な柔軟性のある資源をプールすることにより、ネットワークの混雑状態を緩和し続ける。

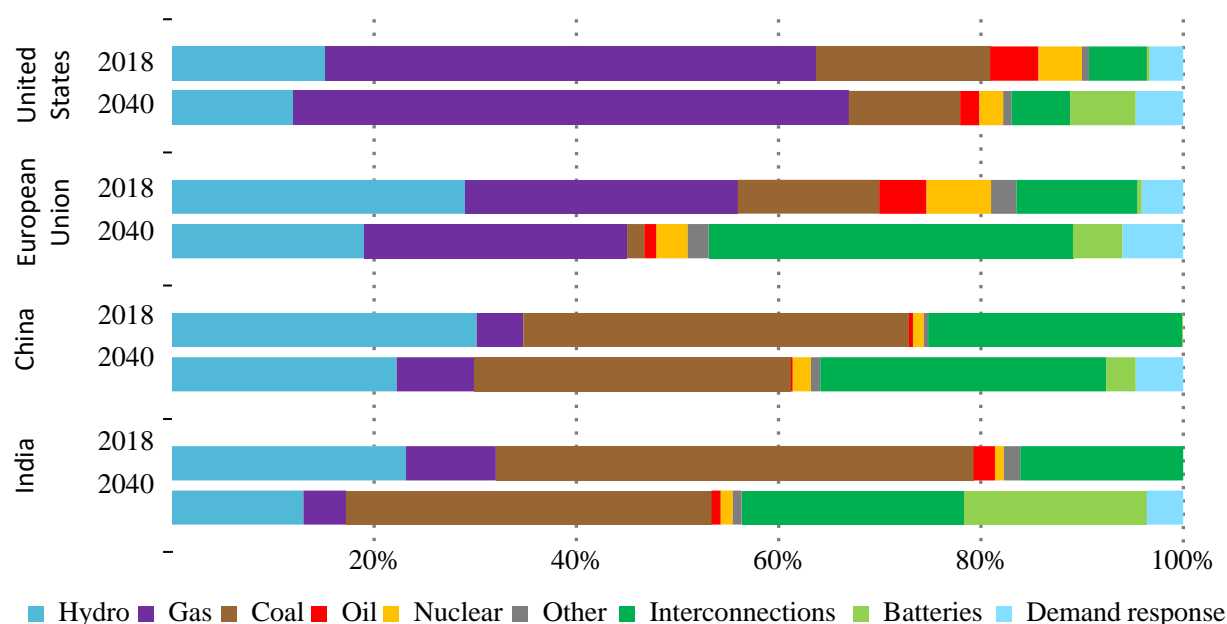


図42. 規定されたポリシーシナリオにおける地域別の柔軟性のソース

Source: IEA.

キーポイント：火力発電所は、相互接続とともに、柔軟性のニーズの大部分を提供し続けているが、バッテリーと需要側の応答は急速に上昇している。

それでも、新しい柔軟性のソースが必要になる。バッテリー、デマンドレスポンス、セクターカップリングは、将来の電力システムの安全性と信頼性を確保する上で極めて重要な役割を果たす態勢を整えている。需要側の対応も、ピーク需要を削減し、負荷が小さく、電力が安い期間に電力を再配分するなど、高まる柔軟性のニーズに対応する上で大きな役割を果たす。変動する再生可能エネルギー、貯蔵、需要応答などの分散型資源も、いくつかの国で起こっているように、適切な市場設計を備えた主要な柔軟性のソースになる可能性がある（IEA 2019年a）。

デジタル化は、柔軟性のオプションを活用する上で主要な役割を果たす可能性がある。2040年までの地域の傾向は、柔軟性に対する万能のアプローチがないことを示している。欧州連合は、相互接続の大規模な展開から、その柔軟性のニーズのかなりの部分を調達することが期待されている。中国は、より柔軟な石炭火力発電所と大規模な相互接続に依存するように設定されている。米国では、ガス火力発電所は2040年まで電力システムの柔軟性の安価な供給源であり続けるように設定されている。インドの追加の柔軟性のニーズのほとんどは、柔軟な石炭火力発電所、バッテリー、及び相互接続によって満たされる必要がある。

柔軟性資産へのタイムリーな投資を確保し、既存の発電所の柔軟性の可能性を最大限に活用するには、政策と規制の枠組みの変更、及び経済的インセンティブが不可欠である。競争力のある電力市場は、もともと、ディスパッチ可能発電所を念頭に置いて設計された。変動する再生可能エネルギーの台頭は、効率的でタイムリーな投資を提供するためのこれらの市場設計の適合性に挑戦している。たとえば、特に欧州連合と米国では、電力供給コストとエネルギー販売からの収益の間に大きなギャップがある（IEA 2019年a）。これらの市場では、投資を促進し、費用効果の高い一連の柔軟性対策を確立するための改革が必要になる場合がある。

発電群の変革は、持続可能な開発シナリオでさらに顕著であり、2040年までに変動する再生可能エネルギーが発電量の40%を占める。変動する再生可能エネルギーへの依存度の高まりは、多くの場合、1時間あたりの変化率の上昇につながる。これには、バッテリーやデマンドレスポンス対策など、より高い柔軟性が必要である。

## 17 経済協力開発機構原子力機関：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

執筆：Michel Berthélemy及びSama Bilbao-Y-Leon（経済協力開発機構内の専門機関、Nuclear Energy Agency）

伝統的に、原子炉は単に電力源と見なされ、ベースロード技術として運用されてきた。それらの高い固定費と低い変動費を考慮すると、定格電力レベルで原子炉を継続的に運転することは、通常、より効率的で、より単純で、より経済的である（NEA 2011年）。言い換えれば、これらの高い固定費を回収するために生成されるエネルギー（すなわち、負荷率）を最大化することは、原子力事業者の経済的利益になる。さらに、原子力発電は、ほとんどの国で電力構成に占める割合が比較的小さい<sup>16</sup>。したがって、プラントの運用要件は、通常、安全要件を満たすことに限定され（たとえば、負荷が拒否された場合の安全なシャットダウン）、システム運営者によって要求され、原子力規制当局によって許可された場合、周波数規制を提供する。

ただし、この状況は、経済協力開発機構の国々（フランス、ドイツ、ベルギー、スロバキア共和国、スウェーデンなど）では異なる。これらの国では、国の電力構成における原子力のシェアが非常に重要であるため、電力会社は原子力ユニットの運用性を実装又は改善する必要がある。あるいは水力発電の季節や年の変動に対応するために、原子力発電の柔軟な運用がすでに行われている。さもなければVREをシステムへ容易に統合する必要がある。最近では、一部の北米の原子力発電所は、規制緩和されたエネルギー市場での収益性を管理するために柔軟なモードで運用されており、VREが優先的に派遣されている。

新しい原子力発電所はすでに柔軟な運用のために設計されており、既存の原子力発電所は改造して操縦能力を向上させることができる（Patel 2019年）。上記の国々の既存の軽水炉の多くは、運用性能と操縦能力を向上させるためにアップグレードされている。必要な改造には、計装及び制御システム、炉内測定及び監視装置、吸収の少ない制御棒（つまり、4章で説明した灰色の棒）の採用、及び燃料棒とペレットの最適化が含まれる。

表14は、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をまとめたものである。

---

<sup>16</sup> 2018年の時点で、原子力発電は、原子炉が稼働している30か国のうち20か国の発電構成の3分の1未満を占めている。

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)

	起動時間	30秒後の 最大の変化	最大変化率 (%/分)
オープンサイクルガス タービン	10-20 分	20%-30%	20%/分
コンバインドサイクル ガスタービン	30-60 分	10%-20%	5-10%/分
石炭火力発電所	1-10 時間	5%-10%	1-5%/分
原子力発電所 (現在の技術)	2 時間 – 2 日	最大5%	1-5%/分

原子力発電所の柔軟性機能は技術的な観点からはよく知られているが、それらは、変動する再生可能エネルギーの進歩に伴うエネルギー市場の予想される変化、及びさまざまな程度の技術的及び産業的成熟度を備えた新しい柔軟性ソリューションの開発を考慮して、多くの経済的及び政策的問題を提起する。

将来のエネルギーシステムにおける原子力の役割の理解、及び柔軟な原子力生産のさらなる開発と実施の可能性は、NEAでの最近及び進行中の作業の中心的な焦点である。これらの分析は、技術的側面と経済的側面の両方をカバーし、重要なこととして、プラントレベルとシステムレベルの両方で実行される。

## 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

高度な原子炉と将来のエネルギー市場のニーズに関するNEA専門家グループは、高度な原子炉（すなわち、第3世代 / 第3世代 +、SMR、第4世代）が将来のエネルギー市場のニーズに対応するために提供できる柔軟性属性の詳細な分析を最終決定している。同時に、潜在的な新しい環境及び規制上の制約を検討する（NEA ARFEM Expert Group 2017年）。

1990年代初頭以来、ヨーロッパと米国の公益事業者は、新しい原子炉がシステムに柔軟性サービスを提供できることを保証するために、第3世代LWR（EPRI 2014年、EUR 2012年）の要件を発行している。これらの公益事業者要件は、主に原子力発電所の運用上の柔軟性に焦点を合わせている。

高度な原子炉（すなわち、第3世代、SMR、及び第4世代）も、発電以外の用途にも適している可能性があることがますます認識されている。たとえば、さまざまな燃料と冷却剤、及び高温での動作により、原子力が対応できる非電気用途の範囲が広がる。（EPRI 2017年）によって最初に提唱された柔軟性基準に基づいて、13.2章で説明したように、運転柔軟性、展開柔軟性、生産柔軟性という3つの属性を中心に柔軟な原子力生産の従来のアプローチを拡張することができる。

これらの柔軟性属性を表15に要約する。この分析からの重要な発見は、高度な原子炉は、運用面を超えて柔軟な原子力生産を拡張し、展開と生産の柔軟性属性を提供するのに適している必要があるということである。

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)

主な属性	下位の属性	利点
運転柔軟性	操縦性	負荷追従
	ハイブリッドエネルギーシステムとの互換性	変動する発電、代替ミッションの浸透の増加を伴う経済運営
	多様な燃料使用	燃料供給の経済性と安全性
	アイランドオペレーション	システムの復元力、リモート電源、マイクログリッド、非常用電源アプリケーション
展開柔軟性	スケラビリティ	必要な大規模に展開する機能
	立地	必要な場所に展開する機能
	構築可能性	スケジュールと予算に合わせて展開する機能
生産柔軟性	電気	信頼性が高く、ディスパッチ可能な電源
	工業用熱	信頼性が高く、ディスパッチ可能なプロセス熱供給
	地域熱供給	信頼性が高く、ディスパッチ可能な地域熱供給
	脱塩	信頼性が高く、ディスパッチ可能な淡水供給
	水素	信頼性が高く、ディスパッチ可能な水素供給
	放射性同位元素	独自の又は需要の高い同位体供給

生産の柔軟性に関しては、原子力コージェネレーションに対する新たな関心が、多くのNEA及び非NEA加盟国で見られる。これには、活発な研究開発プログラムだけでなく、中国でのHTR-PMなどの実証ユニットの建設も含まれる。この関心は、部分的には、産業用熱用途などの衰えにくいエネルギー部門を脱炭素化するための原子力の適合性によって推進されている。同時に、システムの観点からは、非電気アプリケーションは、原子力運用の全体的な経済性を改善しながら、グリッド上のVRE資源のシェアの増加と統合するための柔軟性のソースと見なすこともできる。

潜在的な用途のタイプは、原子炉によって供給される熱エネルギーの温度に依存する。世界中の74基の原子炉（世界の原子炉群の約17%）は、地域熱供給、淡水化、又はその他の形態のプロセス熱を産業用途に提供している。したがって、原子力コージェネレーションは、技術的及び産業的観点から変動する正味電力需要を満たすための実証済みの低炭素ソリューションである。より高温の先進的な原子炉は、化学工業、水素製造、石油精製などの追加の産業用途を可能にする。図43は、さまざまな高度な原子力システムがさまざまな産業用熱アプリケーションのニーズにどのように適合するかをまとめたものである。



これらの問題は現在、専用のNEA Expert Group (NEA COGEN Expert Group 2017年) で、低炭素エネルギーシステムにおける原子力コージェネレーションの役割と経済性について調査されている。このグループは、原子力コージェネレーションの過去の経験から学んだ教訓を検討し、原子力コージェネレーションの経済的事例を評価するための標準化された方法論を開発している。この進行中の研究の重要な焦点は、原子力コージェネレーションを促進できるさまざまなビジネスモデルにも関連している。

## 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

さまざまな柔軟性属性のプラントレベルの分析に加えて、電力システムとエネルギーシステムのさまざまな部分の間の相互作用と相殺取引を理解するためのシステムアプローチを開発する必要がある。この目的のために、Nuclear Energy Agencyは、パリ協定と一致する厳格な炭素排出削減を達成できる代替の低炭素電力システムの経済的及び技術的特徴を評価するために、MITと協力して過去数年にわたって特定のモデリング機能を開発した。

2019年のNuclear Energy Agency Cost of Decarbonization studyでは、代表的なOrganization for Economic Co-operation and Developmentの国の電力部門の6つの異なるシナリオの合計コストを評価している。これらはすべて、kWhあたりわずか50 gCO<sub>2</sub>の低炭素制約と一致しているが、原子力と再生可能エネルギー、特に風力と太陽光発電のさまざまなシェアが含まれている。これらのシェアは、総電力消費量の0%から75%の間で変動する。VREの投資コストが低いシナリオでは、VREの将来の大幅なコスト削減を想定して、この分析を完了する。さまざまなレベルの利用可能な柔軟性のある資源（相互接続の利用可能性又は柔軟な水力発電資源）を中心に構築された2つの感度分析により、合計8つのシナリオ一式が完成し、脱炭素化のコストの主要因を十分に理解できる（図44を参照）。特に、この研究は、風力及び太陽光発電の変動が電力システムのコストに与える影響を強調している。これは、残余システムのコストのかかる調整として表示される。

このモデルは、参照地域とその近隣諸国との相互接続も考慮に入れて、1年間にわたっての時間単位の解析で電力部門の最先端の容量拡張モデリングに基づいている。

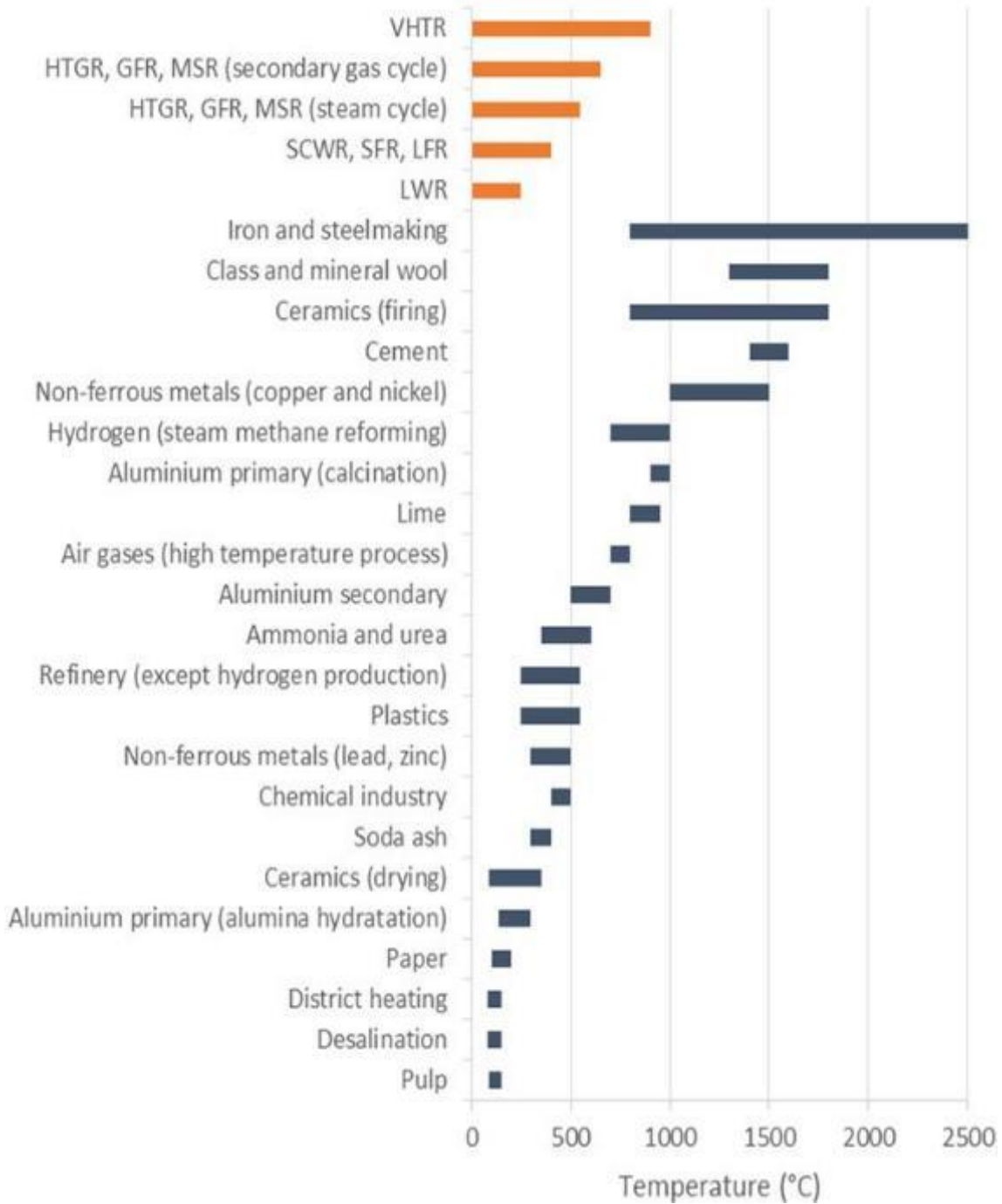


図43. 産業用途及び原子炉機能によるプロセス温度範囲

Source: NEA COGEN Expert Group.

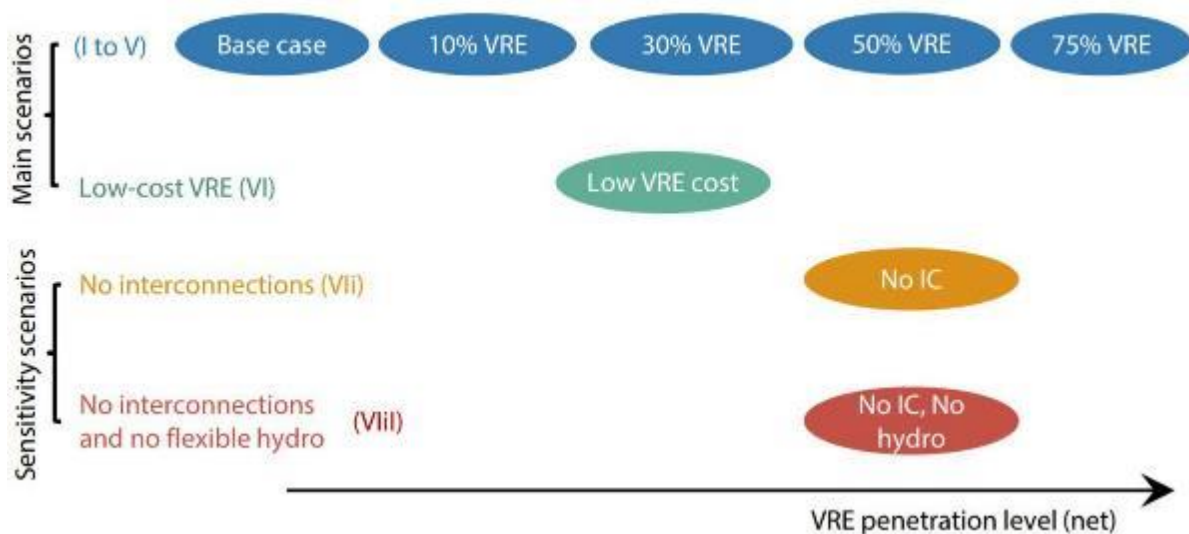


図44. 1kWhあたり50gCO<sub>2</sub>の低炭素電力システムのコストを調査するための8つのシナリオ

Source: NEA.

この Nuclear Energy Agency の調査は、VRE技術の明確な目標と炭素排出量の厳格な制限を組み合わせることは、発電構成とそのコストに重要な影響を与えることを示している。特に、必要な発電容量は、VRE資源の展開に伴って大幅に増加する。VREの負荷率と容量クレジットは従来の火力発電所よりも大幅に低いため、同じ量の電力を生産するには大幅に高い容量が必要である。VREを使用しない基本ケースシナリオでは約98GWがインストールされるが、浸透レベルが10%及び30%までのVREを導入すると、システムの総容量がそれぞれ118GW及び167GWに増加する。50%のVRE浸透レベルに到達する必要がある場合、総設置容量は2倍以上の220GWになる。VREが総電力需要の75%を生成する場合、325 GW以上（つまり、ピーク需要の3倍以上）が必要である。言い換えると、VREの浸透により膨大な余剰容量が増加するため、同じ需要を満たすために投資が必要になる。

図46は、検討した5つの主要なシナリオのうち4つについて、原子力発電所の1時間ごとの予測生成パターンを示している（75%VREでは原子力発電はない）。これにより、原子力発電所からの柔軟性要件の増加、及びVREの展開に関連する原子力容量の減少を視覚化できる。

原子力発電容量は、再生可能エネルギーの割合とともに徐々に減少する。コストが最も低く、VREがない基本ケースのシナリオでは、原子力は低炭素電力の主要な供給源であり、柔軟性に対する最小限の需要で総電力需要の約75%を生成する。VREの発生率が高くなると、原子力の柔軟性に対する需要は次第に高まる。VREが50%の場合、原子力ユニットは1時間で設置容量の最大30～35%増加及び減少する必要がある。逆に、10%のVREシェアの下では、電力システムの柔軟性のニーズのほとんどは、オープンサイクルガスタービンとコンバインドサイクルガスタービンで満たすことができる。つまり、原子力発電所をベースロードとして十分に活用できる。さらに、VREターゲットのない基本ケースは、50 g/kWhの炭素制約の下で、原子力がベースロードとして機能するだけでなく、需要の変動に応じてロードフォロワー構成を運用することが最適であることを示している。

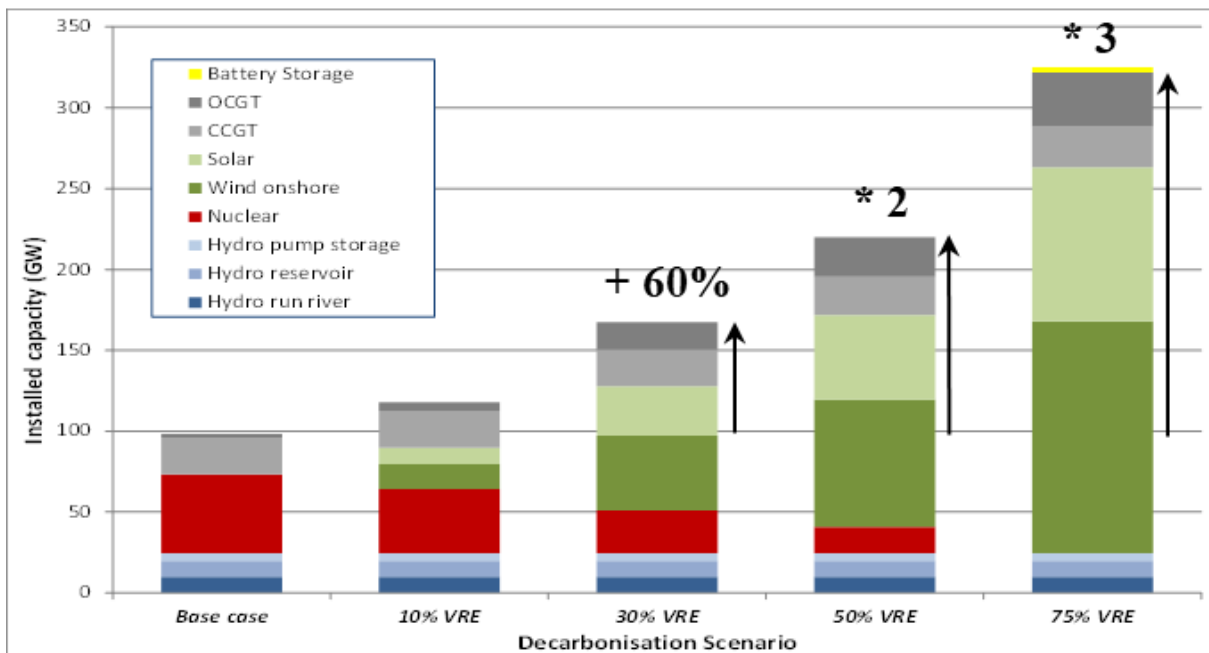


図45. VREのさまざまなシェアでの容量構成

Source: NEA.

さらに、すべてのモデリング作業と同様に、さまざまな仮定がこれらの結果を支えている。たとえば、コストの仮定は、IEA /Nuclear Energy Agency による2020年の予測コストに基づいている（Wittenstein 他 2015年）。VREとストレージ技術の予想されるコスト削減に関するより前向きな見方は、基本ケースシナリオでのVREの市場参入をサポートし、発電構成全体の最大約3分の1になる。

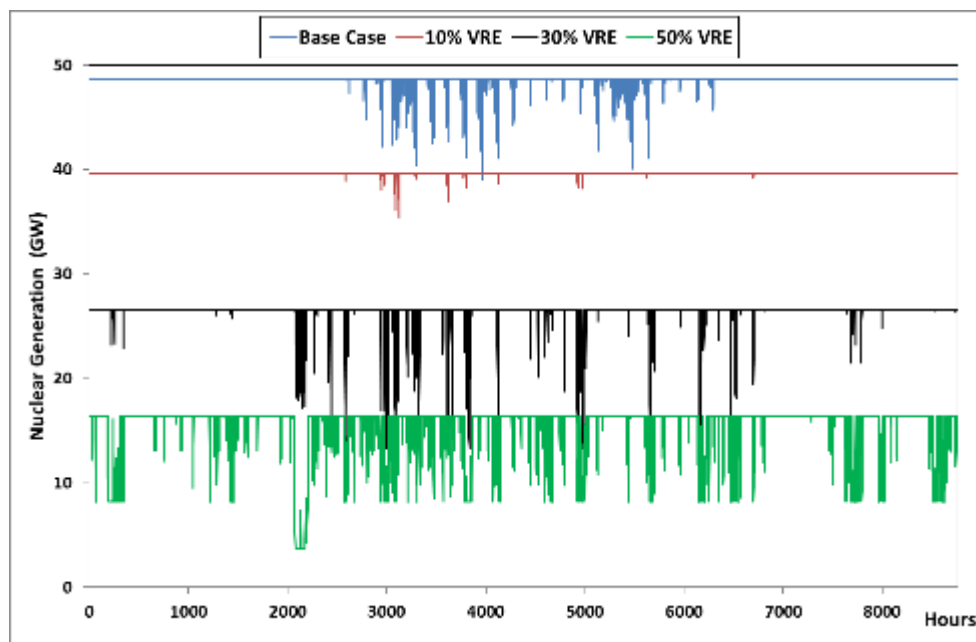


図46. 原子力発電所からの予測される発電パターン

Source: NEA.

## 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 柔軟な原子力の将来への展望

**展望に関する免責事項:** 以下の展望に表示される各記事の著者は、その内容について単独で責任を負う。これらの展望の公表は、他の加盟国政府、研究機関、又はNICEイニシアチブの組織の見解を構成するものではなく、またそのようなものと見なされるものではない。

将来を見据えて、私たちが政府のリーダー、ビジネスリーダー、研究機関、技術開発者、投資家、アナリスト、政策アドバイザー、気候とエネルギーのモデラー、又はその他のクリーンエネルギーの利害関係者であるかどうかにかかわらず、私たちは皆、新しいクリーンエネルギーの選択肢とイノベーションを推進する上で、私たち自身の国の状況を踏まえて提供する役割と独自の洞察を持っている。

この章では、将来の多様なエネルギー構成の一部として原子力を検討又は積極的に追求しているNICEFutureイニシアチブ参加国からの貴重な洞察を提供する。これらのセクションでは、柔軟性の技術分析は提供していないが、エネルギーの多様化と排出削減の加速の両方を求める進化するエネルギーシステムのコンテキストで、エネルギーの将来について柔軟な原子力がどのように考慮されているかについての洞察を提供する。さらに、これらのセクションでは、参加国のエネルギーシステムと、原子力の検討を動機付けているクリーンエネルギーの目標に関する情報を提供する。

CEMの重要なアプローチは、高度な技術とイノベーションへの投資と実装の最前線にいる業界の見解に積極的に関与することである。クリーンエネルギーの移行を加速するためのオプションを開発する際の主要なパートナーである世界の原子力産業のリーダーからの将来についての展望で締めくくる。

### 19.1 ヨルダン

執筆： *Kamal Araj (the Jordan Atomic Energy Agency)*

ヨルダンは、2007年の時点で、エネルギーの多様化に着手している。エネルギーの95%以上を単一の資源に頼り、しかもほとんどが輸入という状況は、経済の実例から壊滅的であることが証明されている。アラブの春が起こりガス供給の中断が繰り返された後、再生可能エネルギー（主にPV）発電所が加速されたペースで建設された。今日、ヨルダンは総発電量の一部として再生可能エネルギーのシェアで地域のリーダーの1つである。原子力は2007年から将来のエネルギー構成の一部と見なされており、プラント（主にSMR）は2030年までに稼働することが想定されている。エネルギー源の多様化は柔軟性の問題を最前線にもたらす。

ヨルダンの電力網での原子力発電所の柔軟な運用は、技術的及び経済的ハードルの影響を受ける。さまざまな技術の検討では、定義された技術仕様の範囲内で、必要に応じて電力を増減するときに、ほとんどの原子力技術が安全に動作することがわかる。ただし、運用の柔軟性の経済性は、特にヨルダンの場合のように小さなグリッドの場合、考慮すべき別の問題である。原子力は資本集約的であるため、特に最初の数年間（債務返済年）にプラントが公称電力レベルを下回って運転されると、高額になりすぎて実行不可能になる可能性がある。

表16. ヨルダンの主要なエネルギー指標

国家クリーンエネルギー目標 (2018年の値のすべての数値)	2030年までに再生可能エネルギーによる発電量31%
一次エネルギーの総消費量	9.712 Mtoe
電力消費	17.5 TWh
総CO2排出量	2,600万トン
再生可能エネルギーの生成	2188 GWh
再生可能エネルギーの 発電の割合	11%
原子力政策	2030年までにSMR原子力発電所の配備

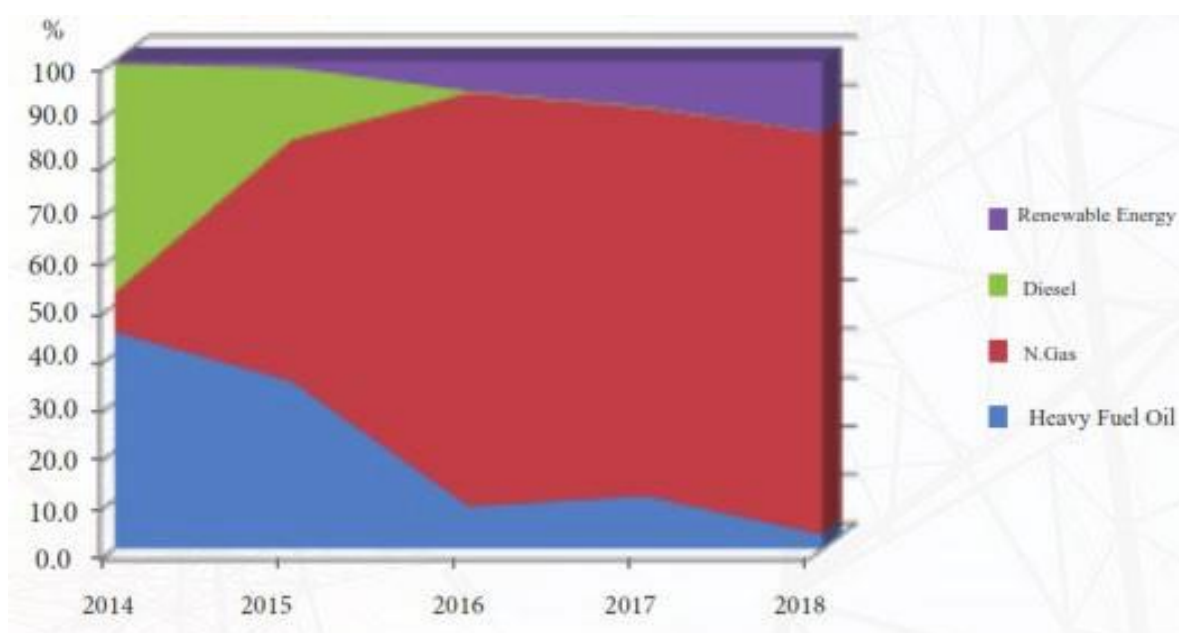


図47. 発電における一次エネルギーソースと再生可能エネルギーソースの貢献

ヨルダンの小さなグリッドでは、新しいSMRオプションが大規模な原子力発電所よりも優れている。ほとんどのSMRは本質的にモジュール式であり、モジュール式の拡張を念頭に置いてプラントに含まれている。そうは言っても、プラントは最初にベースロード発電機として動作でき、経済的に実行可能になると、第2フェーズに移行し（最初のユニットの債務は完済される）、これらの最初のユニットは動作後に負荷をかけることができる。この時点で、より多くのSMRモジュールが追加され、公称電力レベルで動作していると推定できる。SMRは、真のエネルギー多様化を達成するという目的に到達する機会を提供すると同時に、展開されたユニットの運用を通じて需要がどのように満たされるか均衡を取ることによって提供される柔軟性を備えている。SMRプラントの段階的な拡張と各ユニットの運転の柔軟性により、グリッド上の他のクリーンエネルギーシステムと連携する重要な機能が提供される。

原子力発電の経済的課題は、原子力だけにとどまらない。ヨルダンのエネルギー構成への再生可能発電機の導入は、需要の減速と相まって、従来の発電所を低負荷率で運転しなければならなかったグリッドの不均衡を引き起こし、電気料金を上昇させ、効率を低下させた。この定期的な過剰生産とグリッドの不均衡は、計画の迅速化とPV拡張の時期に発生した。適切な計画の

欠如と予期しない状況が相まって、望ましくない驚きが起こる。ベースロードと柔軟な需要の両方をサポートできるSMRプラントなどの柔軟な原子力技術の導入は、エネルギーの多様化に関するヨルダンの目標をサポートすることができる。

## 19.2 ケニア

執筆 : Edwin Chesire (ケニア原子力エネルギー庁、技術顧問)

ケニアは、将来のクリーンエネルギー構成を検討するために長期計画を実施している。この国は現在、電力の70%以上を再生可能エネルギーから発電しており、100%非排出発電を期待している。これにより、国は経済成長の可能性と非排出エネルギーのニーズを満たすことができる。

表17. ケニアの主要なエネルギー指標

国家クリーンエネルギー目標 (2018年の値のすべての数値)	2030年までに再生可能エネルギーによる 発電量100%
一次エネルギーの総消費量	10.012 Mtoe
電力消費	11.5 TWh
総CO2排出量	9600万トン
再生可能エネルギーの生成	10.196 GWh
再生可能エネルギーの 発電の割合	73.48%
原子力政策	NOAKとして2036年までに最初の原子力 発電所を配備。SMRも検討されている

2019年12月の時点で、ケニアの相互接続システムの総発電容量は2,789 MWで、水力826.2 MW、火力720.3 MW、地熱828.4 MW、風力335.5 MW、太陽光50.3 MW、コージェネレーションから28MWで構成されている。独立したミニグリッドも30.17MWの出力を持ち、総設備容量は2,819MWになる。設置容量の割合を図48に示す。

### % Installed Capacity (MW) December 2019

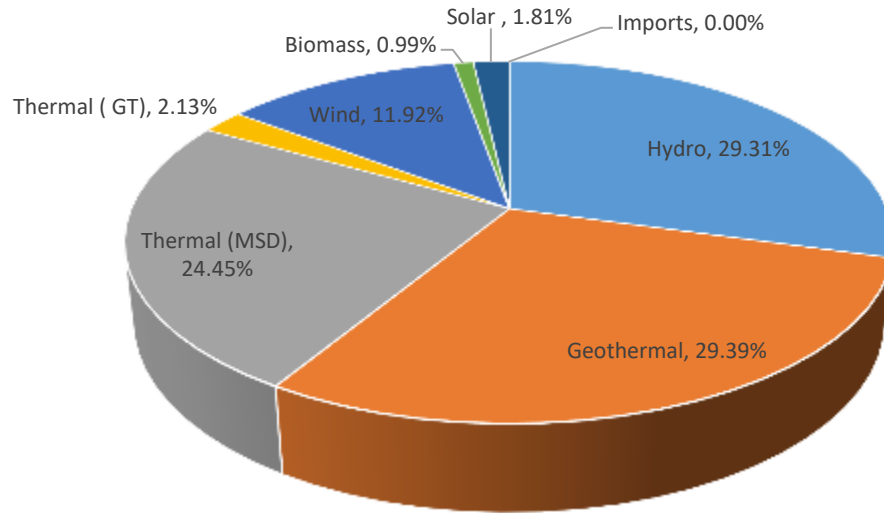


図48. 2019年技術シェア別の設備容量

Source: Kenya Power annual accounts. Used with permission.

購入されたエネルギーは、前会計年度の10,702GWhから2018/19会計年度には11,493GWhに増加した。図49に示すように、実際の売上高は2017/18年度の8,459 GWhから2018/19年度の8,769GWhに4%増加した。

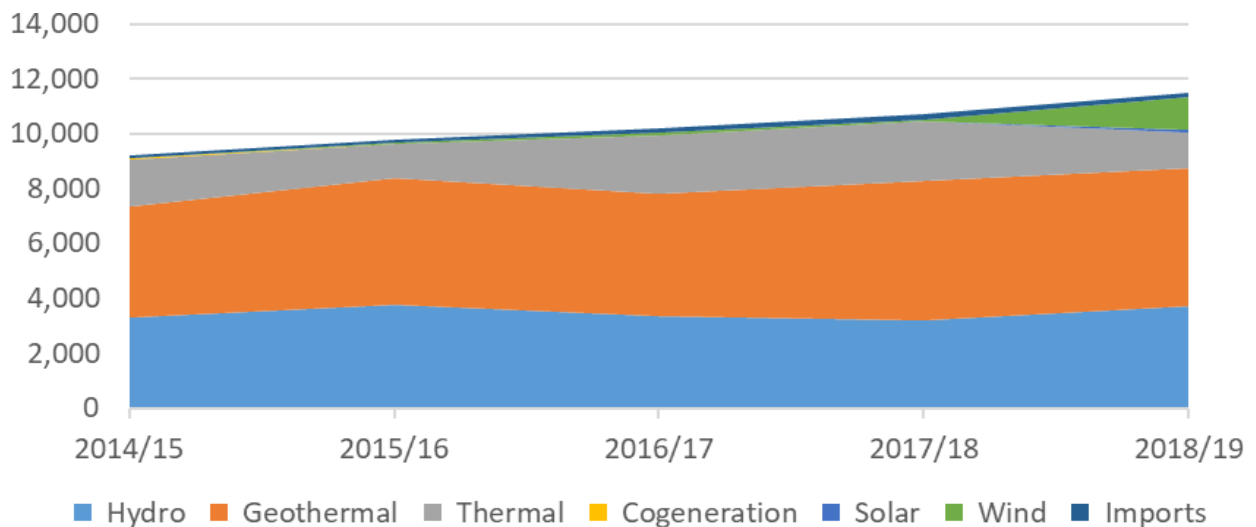


図49. 2014年から2019年に購入されたエネルギーGWh

Source: Kenya Power annual accounts. Used with permissions.



ケニアはまた、将来のエネルギー構成における原子力の潜在的な役割を検討している。国は、原子力発電のための国家インフラの開発におけるマイルストーンに定められたIAEAガイドライン、NG-G-3.1、rev. 1に従っている。ケニアが原子力発電プログラムに着手するにつれ、国内の原子力科学技術の適用を規制する強力な規制の枠組みの確立において、広範な国内の利害関係者の関与が行われた。さらに、ケニアは、立地、原子炉技術評価、グリッド評価など、さまざまな技術的研究を行ってきた。ケニアは、有能で熟練した労働力を確保するために、国内及び国際的な能力開発イニシアチブの確立に努めてきた。

2019年エネルギー法の制定に伴い、エネルギー省の準国家機関である原子力庁が原子力プログラムの実施機関として義務付けられている。原子力庁はまた、ケニアでの原子力発電の開発を促進し、エネルギー及び原子力部門での研究、開発、及び普及活動を実施する。

さまざまなエネルギー源を総合的に統合するために、原子力庁とエネルギー省は、長期的な経済及びその他のモデリングの予測とシナリオを検討している。現在の分析によると、ケニアには地熱、太陽光、風力などの再生可能エネルギーが豊富にある。

ケニアは、このグローバルな専門家ワーキンググループと情報を共有するこの機会を歓迎し、電気及び非電気アプリケーションを活用して、淡水化や工業工程用プロセス熱などのさまざまな利益を社会にもたらすために、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機会と役割をより完全に理解する。

### 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

**Agneta Rising**  
世界原子力協会 (WNA)  
事務局長

**John Gorman**  
カナダ原子力協会  
社長兼最高経営責任者

**Tim Stone**  
英国原子力産業協会  
会長

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

## 参考文献

- Alameri, Saeed A, and Jeffrey C King. 2013. “A Coupled Nuclear Reactor Thermal Energy Storage System for Enhanced Load Following Operation.” In *Proceedings of the International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013*, 12. Recife, Brazil. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/45/066/45066027.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/066/45066027.pdf).
- Allen, R. E., B. J. Menaker, D. O. Nicodemus, H. E. Painter, J. H. Crowley, R. G. Benedict, M. S. Cooper, et al. 1986. “Energy Economic Data Base Program (EEDB-VIII): Phase VIII Update (1986) Report.” Technical Report DOE/NE-0079. Philadelphia, PA: United Engineers and Constructors, Inc. <https://doi.org/10.2172/6927146>.
- Amuda, Kafilat F, and Robert M Field. 2019. “Nuclear Heat Storage and Recovery in a Renewable Energy Future.” In *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting*, 4. Jeju, Korea.
- Bassett, Kyle, Carriveau Rupp, and David Ting S.-K. 2018. “Energy Arbitrage and Market Opportunities for Energy Storage Facilities in Ontario.” *J Energy Storage* 20 (December): 478–84. <https://doi.org/j.est.2018.10.015>.
- BEIS. 2019a. “What Is the Industrial Clusters Mission?” Department for Business, Energy and Industrial Strategy. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/803086/industrial-clusters-mission-infographic-2019.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/803086/industrial-clusters-mission-infographic-2019.pdf).
- . 2019b. “Digest of UK Energy Statistics (DUKES) 2019: Chapters, Annexes A to J and Long-Term Trends.” Digest of United Kingdom Energy Statistics (DUKES). London, United Kingdom: Department for Business, Energy & Industrial Strategy. <https://www.gov.uk/government/statistics/digest-of-uk-energy-statistics-dukes-2019>.
- . 2019c. “Historical Electricity Data: 1920 to 2018.” Statistical Data Set. July 25, 2019. <https://www.gov.uk/government/statistical-data-sets/historical-electricity-data>.
- . 2020. “2018 UK Greenhouse Gas Emissions, Final Figures.” London, United Kingdom: Department for Business, Energy & Industrial Strategy. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/862887/2018\\_Final\\_greenhouse\\_gas\\_emissions\\_statistical\\_release.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/862887/2018_Final_greenhouse_gas_emissions_statistical_release.pdf).
- Benahmed, Farah, and Lindsey Walter. 2019. “Clean Energy Targets Are Trending.” *Third Way* (blog). December 11, 2019. <https://www.thirdway.org/graphic/clean-energy-targets-are-trending>.
- Bistline, John, Revis James, and Andrew Sowder. 2019. “Technology, Policy, and Market Drivers of (and Barriers to) Advanced Nuclear Reactor Deployment in the United States After 2030.” *Nucl Tech* 205 (8): 21. <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1574119>.
- BloombergNEF. 2020. “Hydrogen Economy Outlook: Key Messages.” BloombergNEF. <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Hydrogen-Economy-Outlook-Key-Messages-30-Mar-2020.pdf>.
- Boardman, Richard D, Cristian Rabiti, Stephen G Hancock, Daniel S Wendt, Konor L Frick, Shannon M Bragg-Sitton, Hongqiang Hu, et al. 2019. “Evaluation of Non-Electric Market Options for a Light-Water Reactor in the Midwest.” INL/EXT-19-55090-Rev000, 1559965. Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1559965>.
- BP. 2019. “BP Energy Outlook: 2019 Edition.” <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>.

- Bragg-Sitton, Shannon M., Richard Boardman, Cristian Rabiti, Jong Suk Kim, Michael McKellar, Piyush Sabharwall, Jun Chen, M. Sacit Cetiner, T. Jay Harrison, and A. Lou Qualls. 2016. “Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: 2016 Technology Development Program Plan.” INL/EXT--16-38165, 1333006. <https://doi.org/10.2172/1333006>.
- Bragg-Sitton, Shannon M., James O’Brien, Richard Boardman, and Cristian Rabiti. 2020. “Reimagining Future Energy Systems: Overview of the US Program to Maximize Energy Utilization via Integrated Nuclear-renewable Energy Systems.” *Int J Energy Res*, February, 1–14. <https://doi.org/10.1002/er.5207>.
- Bredimas, Alexandre. 2011. “Market Study on Energy Usage in European Heat Intensive Industries.” Deliverable EUROPAIRS D131-1105. Paris, France: European Commission.
- Brinkman, Gregory. 2015. “Renewable Electricity Futures: Operational Analysis of the Western Interconnection at Very High Renewable Penetrations.” *Renewable Energy*, 53.
- Brown, Maxwell, Wesley Cole, Kelly Eurek, Jon Becker, David Bielen, Ilya Chernyakhovskiy, Stuart Cohen, et al. 2020a. “Regional Energy Deployment System (ReEDS) Model Documentation: Version 2019.” *Renewable Energy*, 140.
- . 2020b. “Regional Energy Deployment System (ReEDS) Model Documentation: Version 2019.” Technical Report NREL/TP-6A20-74111. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74111.pdf>.
- CAISO. 2020. “Supply and Renewables.” 2020. <http://www.caiso.com/TodaysOutlook/Pages/supply.aspx>.
- CH2M, EY, and CNL. 2018. “Regional Express Rail Program Hydrail Feasibility Study Report.” CPG-PGM-RPT-245 Revision B. Metrolinx Report. [http://www.metrolinx.com/en/news/announcements/hydrail-resources/CPG-PGM-RPT-245\\_HydrailFeasibilityReport\\_R1.pdf](http://www.metrolinx.com/en/news/announcements/hydrail-resources/CPG-PGM-RPT-245_HydrailFeasibilityReport_R1.pdf).
- Chang, Judy, Mariko Geronimo Aydin, Johannes Pfeifenberger, Kathleen Spees, and John Imon Pedtke. 2017. “Advancing Past ‘Baseload’ to a Flexible Grid.” The Brattle Group. [http://files.brattle.com/files/7352\\_advancing\\_past\\_baseload\\_to\\_a\\_flexible\\_grid.pdf](http://files.brattle.com/files/7352_advancing_past_baseload_to_a_flexible_grid.pdf).
- “Climate Change and Nuclear Power.” 2020. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Cole, Wesley, Will Frazier, Paul Donohoo-Vallett, Trieu Mai, and Paritosh Das. 2018. “2018 Standard Scenarios Report: A U.S. Electricity Sector Outlook.” Technical Report NREL/TP-6A20-71913. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.osti.gov/biblio/1481848/>.
- Cole, Wesley, Bethany Frew, Trieu Mai, Yinong Sun, John Bistline, Geoffrey Blanford, David Young, et al. 2017. “Variable Renewable Energy in Long-Term Planning Models: A Multi-Model Perspective.” NREL/TP-6A20-70528. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.2172/1416124>.
- Cole, Wesley, Nathaniel Gates, Trieu Mai, Daniel Greer, and Paritosh Das. 2019. “2019 Standard Scenarios Report: A U.S. Electricity Sector Outlook.” Technical Report NREL/TP-6A20-74110. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74110.pdf>.
- Cui, Mingjian, Jie Zhang, Hongyu Wu, and Bri-Mathias Hodge. 2017. “Wind-Friendly Flexible Ramping Product Design in Multi-Timescale Power System Operations.” *IEEE Trans Sustain Energy* 8 (3): 1064–75. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2647781>.

- Denholm, Paul, Yinong Sun, and Trieu Mai. 2019. “An Introduction to Grid Services: Concepts, Technical Requirements, and Provision from Wind.” NREL/TP-6A20-72578. Golden, CO: National Renewable Energy Lab (NREL). <https://www.osti.gov/biblio/1493402/>.
- DNV GL. 2019. “Energy Transition Outlook 2019.” Oslo, Norway. <https://eto.dnvgl.com/2019/index.html>.
- Dolley, Steven. 2018. “Exelon Generation Cuts Output at Four Illinois Nuclear Units, Two Back at 100% Power.” *S&P Global Platts* (blog). May 11, 2018. <https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/051118-exelon-generation-cuts-output-at-four-illinois-nuclear-units-two-back-at-100-power>.
- EIA. 2019a. “Net Generation by Energy Source: Total - All Sectors.” Data. Electricity Data Browser. 2019. <https://www.eia.gov/electricity/data/browser/>.
- . 2019b. “Annual Energy Outlook 2019.” Washington, DC: U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf>.
- Electric Mountain. n.d. “Home.” Accessed May 5, 2020. <https://www.electricmountain.co.uk/>.
- EMWG. 2018. “Impact of Increasing Share of Renewables on the Deployment of Generation IV Nuclear Systems.” Position Paper. Generation IV International Forum.
- Epiney, Aaron S., James D. Richards, Jason K. Hansen, Paul W. Talbot, Pralhad Hanumant Burli, Cristian Rabiti, and Shannon M. Bragg-Sitton. 2019. “Case Study: Integrate Nuclear Water Desalination—Regional Potable Water in Arizona.” INL/EXT-20-55736-Rev001. Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1597896>.
- EPRI. 2014. “Advanced Nuclear Technology: Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Revision 13.” Technical Report 3002003129. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. <https://www.epri.com/research/products/3002003129>.
- . 2017. “Program on Technology Innovation: Expanding the Concept of Flexibility for Advanced Reactors, Refined Criteria, a Proposed Technology Readiness Scale, and Time-Dependent Technical Information Availability.” Technical Report 3002010479. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute. <https://www.epri.com/research/products/3002010479>.
- . 2020a. “US-REGEN Model Documentation.” Technical Update 3002016601. <https://www.epri.com/research/products/000000003002016601>.
- . 2020b. “US-REGEN Model Documentation.” Technical Update 3002016601. <https://www.epri.com/research/products/000000003002016601>.
- ERCOT. 2020. “Generation.” 2020. <http://www.ercot.com/gridinfo/generation/>.
- EUR. 2012. “European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants.” Lyon, France: European Utility Requirements. <http://www.europeanutilityrequirements.org>.
- “FERC: Documents & Filing - Forms - Form 714 - Annual Electric Balancing Authority Area and Planning Area Report - Data Downloads.” n.d. Accessed April 30, 2020. <https://www.ferc.gov/docs-filing/forms/form-714/data.asp>.
- Forsberg, Charles. 2018. “Variable and Assured Peak Electricity Production from Base-Load Light-Water Reactors with Heat Storage and Auxiliary Combustible Fuels.” *Nucl Tech* 205 (3): 377–96. <https://doi.org/10.1080/00295450.2018.1518555>.
- . 2020. “Multi-Gigawatt-Day Low-Cost Crushed-Rock Heat Storage Coupled to Nuclear Reactors for Variable Electricity and Heat.” In *Transcript of the American Nuclear Society*. <https://www.ans.org/meetings/am2020/session/view-57/>.



- Forsberg, Charles, Stephen Brick, and Geoffrey Haratyk. 2018. “Coupling Heat Storage to Nuclear Reactors for Variable Electricity Output with Baseload Reactor Operation.” *Electr J* 31 (3): 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2018.03.008>.
- Forsberg, Charles, Piyush Sabharwall, and Hans D Gougar. 2019. “Heat Storage Coupled to Generation IV Reactors for Variable Electricity from Base-Load Reactors: Workshop Proceedings: Changing Markets, Technology, 原子力・再生可能エネルギー統合 and Synergisms with Solar Thermal Power Systems.” Technical Report INL/EXT-19-54909. Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory. [https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort\\_20500.pdf](https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_20500.pdf).
- Frick, Konor, Alexander Duenas, Piyush Sabharwall, JunSoo Yoo, Su-Jong Yoon, James E O’Brien, and Thomas E O’Brien. 2019. “Thermal Energy Delivery System Operational Characteristics and Control Strategies.” In *Proceedings of the 11th Nuclear Plant Instrumentation, Control and Human Machine Interface Technologies (NPIC & HMIT)*, 12. Orlando, FL. <https://www.osti.gov/biblio/1498251/>.
- Frick, Konor, Paul Talbot, Daniel Wendt, Cristian Rabiti, Shannon Bragg-Sitton, Daniel Levie, Bethany Frew, Mark Ruth, Amgad Elgowainy, and Troy Hawkins. 2019. “Evaluation of Hydrogen Production Feasibility for a Light Water Reactor in the Midwest.” Technical Report INL/EXT-19-55395. Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory. <https://www.osti.gov/biblio/1569271/>.
- Garcia, Humberto E., Amit Mohanty, Wen-Chiao Lin, and Robert S. Cherry. 2013. “Dynamic Analysis of Hybrid Energy Systems under Flexible Operation and Variable Renewable Generation – Part I: Dynamic Performance Analysis.” *Energy* 52 (April): 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.022>.
- GE Energy, and NREL. 2010. “Western Wind and Solar Integration Study.” Technical Report NREL/SR-550-47434. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/981991>.
- Glenk, Gunther, and Stefan Reichelstein. 2019. “Economics of Converting Renewable Power to Hydrogen.” *Nat Energy* 4 (3): 216–22. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>.
- Gogan, Kirsty, and Eric Ingersoll. 2018. “The ETI Nuclear Cost Drivers Project: Summary Report.” Deliverable D7.3. Energy Technologies Institute. <https://www.eti.co.uk/library/the-eti-nuclear-cost-drivers-project-summary-report>.
- Henry, T. 2020. “Davis-Besse Chosen as Pilot Site for Hydrogen Production Research.” *Toledo Blade*. January 14, 2020. <https://www.toledoblade.com/business/energy/2020/01/14/davis-besse-chosen-as-pilot-site-hydrogen-production-research/stories/20200114139>.
- Hodson, Elke L., Maxwell Brown, Stuart Cohen, Sharon Showalter, Marshall Wise, Frances Wood, Justin Caron, Felipe Feijoo, Gokul Iyer, and Kathryn Cleary. 2018. “U.S. Energy Sector Impacts of Technology Innovation, Fuel Price, and Electric Sector CO2 Policy: Results from the EMF 32 Model Intercomparison Study.” *Energy Economics* 73 (June): 352–70. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.03.027>.
- Hureau, Geoffroy, and Sylvain Serbutoviez. 2020. “E&P Investments. Drilling Activities and Markets, Geophysics and Offshore Construction (2019).” IFPEN. April 3, 2020. <https://www.ifpenergiesnouvelles.com/article/ep-investments-drilling-activities-and-markets-geophysics-and-offshore-construction-2019>.
- Hydrogen Council. 2020. “Path to Hydrogen Competitiveness A Cost Perspective.” <https://hydrogencouncil.com/en/path-to-hydrogen-competitiveness-a-cost-perspective/>.

- IAEA. 2016. “Safety of Nuclear Power Plants: Design.” No. SSR-2/1 (Rev 1). IAEA Safety Standards Series. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/10885/safety-of-nuclear-power-plants-design>.
- . 2017. “Industrial Applications of Nuclear Energy.” NP-T-4.3. IAEA Nuclear Energy Series. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/10979/industrial-applications-of-nuclear-energy>.
- . 2018a. “Non-Baseload Operation in Nuclear Power Plants: Load Following and Frequency Control Modes of Flexible Operation.” NP-T-3.23. IAEA Nuclear Energy Series. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/11104/non-baseload-operation-in-nuclear-power-plants-load-following-and-frequency-control-modes-of-flexible-operation>.
- . 2018b. “Deployment Indicators for Small Modular Reactors: Methodology, Analysis of Key Factors and Case Studies.” IAEA TECDOC No. 1854. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/13404/deployment-indicators-for-small-modular-reactors>.
- . 2018c. “Nuclear–Renewable Hybrid Energy Systems for Decarbonized Energy Production and Cogeneration.” IAEA TECDOC No. 1885. Proceedings of a Technical Meeting. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/13594/nuclear-renewable-hybrid-energy-systems-for-decarbonized-energy-production-and-cogeneration>.
- . 2018d. “Examining the Technoeconomics of Nuclear Hydrogen Production and Benchmark Analysis of the IAEA HEEP Software.” IAEA TECDOC No. 1859. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/13393/examining-the-technoeconomics-of-nuclear-hydrogen-production-and-benchmark-analysis-of-the-iaea-heep-software>.
- . 2019. “Guidance on Nuclear Energy Cogeneration.” NP-T-1.17. IAEA Nuclear Energy Series. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/publications/13385/guidance-on-nuclear-energy-cogeneration>.
- IAEA, F. Reitsma, M. H. Subki, and H. Kiuchi. 2018. *Advances in Small Modular Reactor Developments*. 2018 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency. [https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book\\_2018.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf).
- “IAEA Overview.” 2016. Text. IAEA. June 8, 2016. <https://www.iaea.org/about/overview>.
- IEA. 2018a. “Status of Power System Transformation 2018.” Paris, France: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2018>.
- . 2018b. “World Energy Outlook 2018.” Paris, France: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
- . 2019a. “Status of Power System Transformation 2019: Power System Flexibility.” Paris, France: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2019>.
- . 2019b. “The Future of Hydrogen.” Paris, France: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
- . 2019c. “World Energy Outlook 2019.” Paris, France: International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.
- . 2020a. “Data and Statistics.” 2020. <https://www.iea.org/data-and-statistics>.

- . 2020b. “Global CO2 Emissions in 2019.” Paris, France: IEA.  
<https://www.iea.org/articles/global-co2-emissions-in-2019>.
- Ingersoll, D T, C Colbert, Z Houghton, R Snuggerud, J W Gaston, and M Empey. 2015. “Can Nuclear Power and Renewables Be Friends?” In *Proceedings of ICAPP 2015*, 9. Nice, France. <https://ecee.colorado.edu/~ecen5009/Resources/Nuclear/Ingersoll2015.pdf>.
- INL. n.d. “Home.” Light Water Reactor Sustainability Program. Accessed June 21, 2020.  
<https://lwrs.inl.gov/SitePages/Home.aspx>.
- International Atomic Energy Agency. 2020. *Status of Molten Salt Reactor Technology*, Vienna.
- IPCC. 2018. “Summary for Policymakers.” In *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, et al. <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/>.
- IRENA. 2018. “Hydrogen From Renewable Power Technology Outlook for the Energy Transition.” ISBN 978-92-9260-077-8. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>.
- Jenkins, J. D., Z. Zhou, R. Ponciroli, R. B. Vilim, F. Ganda, F. de Sisternes, and A. Botterud. 2018. “The Benefits of Nuclear Flexibility in Power System Operations with Renewable Energy.” *Appl Energy* 222 (July): 872–84.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.002>.
- Katz, Jessica, Michael Milligan, and Jaquelin Cochran. 2015. “Sources of Operational Flexibility, Greening the Grid.” NREL/FS-6A20-63039. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.osti.gov/biblio/1252416>.
- Kosowatz, John. 2019. “Heated Volcanic Rocks Store Energy.” ASME. November 14, 2019.  
<https://www.asme.org/topics-resources/content/heated-volcanic-rocks-store-energy>.
- Lovins, Amory. 1973. “Things That Go Pump in the Night.” *New Scientist*, May 31, 1973.
- LucidCatalyst. 2020. “Cost and Performance Requirements for Flexible Advanced Nuclear Plants in Future U.S. Power Markets.” Report for the ORNL Resource Team Supporting ARPA-E’s MEITNER Program.
- Ludwig, Holger, Tatiana Salnikova, Andrew Stockman, and Ulrich Waas. 2010. “Load Cycling Capabilities of German Nuclear Power Plants (NPP).” *VGB PowerTech* 91 (5): 38–44.
- Ma, Ookie, Kerry Cheung, Daniel J. Olsen, Nance Matson, Michael D. Sohn, Cody M. Rose, Junqiao Han Dudley, et al. 2016. “Demand Response and Energy Storage Integration Study.” Technical Report NREL/TP-6A20-61181; DOE/EE-1282. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1326329>.
- Ma, Quan, Xinyu Wei, Junyan Qing, Wen Jiao, and Risheng Xu. 2019. “Load Following of SMR Based on a Flexible Load.” *Energy* 183 (September): 733–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.172>.
- Mai, Trieu, Wesley Cole, and Andrew Reimers. 2019. “Setting Cost Targets for Zero-Emission Electricity Generation Technologies.” *Applied Energy* 250 (September): 582–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.001>.
- Mai, Trieu, Debra Sandor, Ryan Wiser, and Thomas Schneider. 2012. “Renewable Electricity Futures Study: Executive Summary.” Technical Report NREL/TP-6A20-52409-ES. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.  
<https://www.osti.gov/biblio/1338443/>.

- McCarthy, Kathryn A. 2017. “Light Water Reactor Sustainability Program: 2016 Accomplishments Report.” INL-EXT-17-42084. Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1364779>.
- McKinnon, Stuart, Scott Milne, and Adam Thirkill. 2020. “Innovating to Net Zero.” Birmingham, United Kingdom: Catapult Energy Systems. <https://es.catapult.org.uk/reports/innovating-to-net-zero/>.
- McLaren, Joyce A., Pieter J. Gagnon, and Seth Mullendore. 2017. “Identifying Potential Markets for Behind-the-Meter Battery Energy Storage: A Survey of U.S. Demand Charges.” Program Document NREL/BR-6A20-68963. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://www.osti.gov/biblio/1374803>.
- Miller, Eric L., Simon T. Thompson, Katie Randolph, Zeric Hulvey, Neha Rustagi, and Sunita Satyapal. 2020. “US Department of Energy Hydrogen and Fuel Cell Technologies Perspectives.” *MRS Bulletin* 45 (1): 57–64. <https://doi.org/10.1557/mrs.2019.312>.
- Millner, R.H., C. Boehm, J. Ripke, and G. Metius. 2017. “Future of Direct Reduction in Europe Medium and Long-Term Perspectives.” In *European Steel Technology and Application Days 2017 (ESTAD 2017)*. Vienna, Austria: Austrian Society for Metallurgy and Materials (ASMET). <http://bestevent.management/event/2/contribution/60.pdf>.
- MITEI, Jacopo Buongiorno, Michael Corradini, and John Parsons. 2018. “The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World.” Future Of. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology. <http://energy.mit.edu/research/future-nuclear-energy-carbon-constrained-world/>.
- Modelica Association. 2018. “Modelica Standard Library.” May 22, 2018. <https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary>.
- Morilhat, Patrick, Stéphane Feutry, Christelle Le Maitre, and Jean Melaine Favennec. 2019. “Nuclear Power Plant Flexibility at EDF.” *Atw Internationale Zeitschrift Fuer Kernenergie* 64 (3): 131–40.
- Nalley, Stephen, Angelina LaRose, Jim Diefenderfer, John Staub, James Turnure, and Lynn Westfall. 2019. “The National Energy Modeling System: An Overview 2018.” DOE/EIA-0581(2018). Washington, DC: Energy Information Association. [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2018\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2018).pdf).
- NEA. 2019. “The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables.” Paris, France: OECD Publishing. <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264312180-en>.
- NEA ARFEM Expert Group. 2017. “Expert Group on Advanced Reactor Systems and Future Energy Market Needs (ARFEM).” Group Page. OECD NEA. June 15, 2017. <https://www.oecd-nea.org/ndd/groups/arfem.html>.
- NEA COGEN Expert Group. 2017. “Ad Hoc Expert Group on the Role and Economics of Nuclear Co-Generation in a Low-Carbon Energy Future (COGEN).” Group Page. OECD NEA. February 14, 2017. <https://www.oecd-nea.org/ndd/groups/cogen.html>.
- Novacheck, Joshua, Greg Brinkman, and Gian Porro. 2018. “Operational Analysis of the Eastern Interconnection at Very High Renewable Penetrations.” *Renewable Energy*, 58.
- NREL. 2011. “The Importance of Flexible Electricity Supply.” Fact Sheet DOE/GO-102011-3201. Solar Integration Series. Golden, CO: Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/50060.pdf>.
- . 2019a. “2019 Annual Technology Baseline.” Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://atb.nrel.gov/>.

- . 2019b. “2019 Annual Technology Baseline.” Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://atb.nrel.gov/>.
- O’Brien, J. E., J. L. Hartvigsen, R. D. Boardman, J. J. Hartvigsen, D. Larsen, and S. Elangovan. 2020. “A 25 KW High Temperature Electrolysis Facility for Flexible Hydrogen Production and System Integration Studies.” *Int J Hydrog Energy* 45 (32): 15796–804. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.04.074>.
- Odenthal, Christian, Freerk Klasing, and Thomas Bauer. 2018. “Experimental and Numerical Investigation of a 4 MWh Single Tank Thermocline Storage.” In *Proceedings of the 24th SolarPACES International Conference (SolarPACES 2018)*, 2126:2. Casablanca, Morocco. [https://www.researchgate.net/publication/329337328\\_Experimental\\_and\\_Numerical\\_Investigation\\_of\\_a\\_4\\_MWh\\_Single-Tank\\_Thermocline\\_Storage](https://www.researchgate.net/publication/329337328_Experimental_and_Numerical_Investigation_of_a_4_MWh_Single-Tank_Thermocline_Storage).
- Olkkonen, Ville, Jussi Ekström, Aira Hast, and Sanna Syri. 2018. “Utilising Demand Response in the Future Finnish Energy System with Increased Shares of Baseload Nuclear Power and Variable Renewable Energy.” *Energy* 164 (December): 204–17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.210>.
- “Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change.” 2016. 978-0-660-07023-0.
- Patel, Sonal. 2019. “Flexible Operation of Nuclear Power Plants Ramps Up.” *Power Magazine*, March 31, 2019. <https://www.powermag.com/flexible-operation-of-nuclear-power-plants-ramps-up/>.
- Paulin, Philippe. 2016. “Operational Constraints Related to SCC-PCI.” In *Pellet-Clad Interaction (PCI) in Water-Cooled Reactors: Workshop Proceedings*. Lucca, Italy. <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2018/csni-r2018-9.pdf>.
- Persson, Jonas, Karin Andgren, Hans Henriksson, John Loberg, Christian Malm, Lars Pettersson, Johan Sandström, and Timmy Sigrids. 2012. “Additional Costs for Load-Following Nuclear Power Plants: Experiences from Swedish, Finnish, German, and French Nuclear Power Plants.” Elforsk. <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/21094/additional-costs-for-load-following-nuclear-power-plants-elforskrapport-12-71.pdf>.
- Petti, David, Wenquan Shen, Alexander Tuzov, and Martin Zimmermann. 2014. “Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems.” Nuclear Energy Agency (NEA) of the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf>.
- Rabiti, C, A Epiney, P. Talbot, J.S. Kim, S. Bragg-Sitton, and A. Alfonsi. 2017. “Status Report on Modelling and Simulation Capabilities for Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems.” Technical Report INL/EXT-17-43441. Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory. <https://www.osti.gov/biblio/1408526/>.
- Rabiti, Cristian, Andrea Alfonsi, Joshua Cogliati, Diego Mandelli, Robert Knoshita, and Sen Sonat. 2017. “RAVEN User Manual.” Technical Report INL/EXT-15-34123 (Revision 3). Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory. <https://www.osti.gov/biblio/1235208>.
- Roberts, Tim, and Helene Clark. 2018. “Nuclear Electricity in the UK.” London, United Kingdom: Department for Business, Energy & Industrial Strategy. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/789655/Nuclear\\_electricity\\_in\\_the\\_UK.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/789655/Nuclear_electricity_in_the_UK.pdf).
- Ruth, Mark, Dylan Cutler, Francisco Flores-Espino, and Greg Stark. 2017. “The Economic Potential of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems Producing Hydrogen.”



- NREL/TP-6A50-66764. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1351061>.
- Ruth, Mark F., Owen R. Zinaman, Mark Antkowiak, Richard D. Boardman, Robert S. Cherry, and Morgan D. Bazilian. 2014. “Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: Opportunities, Interconnections, and Needs.” *Energy Convers Manag* 78 (February): 684–94. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.030>.
- Schlömer, Steffen, Thomas Bruckner, Lew Fulton, Edgar Hertwich, Alan McKinnon, Daniel Perczyk, Joyashree Roy, et al. 2014. “Annex III: Technology-Specific Cost and Performance Parameters.” In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, et al., 1329–56. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge Univ Press. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf).
- Sepulveda, Nestor A. 2016. “Decarbonization of Power Systems: Analyzing Different Technological Pathways.” Master of Science, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology. <http://hdl.handle.net/1721.1/107278>.
- Sowder, Andrew. 2019. “EPRI Perspectives on Product Flexibility and Alternative Revenues for Increased Competitiveness of Existing and New Nuclear,” 19.
- Stanculescu, Alexander. 2019. “GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems: 2018 Update.” In *13th GIF-IAEA Interface Meeting*, 96. Vienna, Austria. [https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig\\_q=RN:50041690](https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:50041690).
- Stark, Chris, Mike Thompson, Tom Andrew, Georgina Beasley, Owen Bellamy, Peter Budden, Cloe Cole, et al. 2019a. “Net Zero – Technical Report.” London, United Kingdom: Committee on Climate Change. <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-technical-report/>.
- . 2019b. “Net Zero – The UK’s Contribution to Stopping Global Warming.” London, United Kingdom: Committee on Climate Change. <https://www.theccc.org.uk/publication/net-zero-the-uks-contribution-to-stopping-global-warming>.
- Stoots, C., A. Duenas, P. Sabharwall, J. O’Brien, J.S. Yoo, J.E. O’Brien, T. O’Brien, and T. O’Brien. 2019. “Thermal Energy Delivery System Design Basis Report.” INL/EXT-18-51351 (Revision 00). Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory.
- Subki, M. Hadid. 2017. “Small Modular Reactors: Design Specificities of LWR- and HTGR-Type SMRs, Identification of Issues of Their Deployments.” Presented at the IAEA Technical Meeting on Challenges in the Application of the Design Safety Requirements for Nuclear Power Plants to Small and Medium Sized Reactors, Vienna, Austria, September 4. <https://gnssn.iaea.org/NSNI/SMRP/Shared%20Documents/TM%204%20-%208%20September%202017/Light%20Water%20and%20High%20Temperature%20G as%20Small%20Modular%20Reactor%20Status.pdf>.
- Suman, Siddharth. 2018. “Hybrid Nuclear-Renewable Energy Systems: A Review.” *J Clean Prod* 181 (April): 166–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.262>.
- Talbot, Paul W., Abhinav Gairola, Purna Prateek, Andrea Alfonsi, Cristian Rabiti, and Richard D. Boardman. 2020. “HERON as a Tool for LWR Market Interaction in a Deregulated Market.” Technical Report INL/EXT-19-56933-Rev000. Idaho Falls, ID: Idaho National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/1581179>.

- Talbot, Paul W., Cristian Rabiti, Andrea Alfonsi, Cameron Krome, M. Ross Kunz, Aaron Epiney, Congjian Wang, and Diego Mandelli. 2020. “Correlated Synthetic Time Series Generation for Energy System Simulations Using Fourier and ARMA Signal Processing.” In *Proceedings of the 6th International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER2018)*. Jeju, Korea: Int J Energy Res: Special Issue. <https://doi.org/10.1002/er.5115>.
- Trudeau, Justin. Mandate Letter. 2019. “Minister of Natural Resources Mandate Letter,” December 13, 2019. <https://pm.gc.ca/en/mandate-letters/2019/12/13/minister-natural-resources-mandate-letter>.
- UNDP. 2018. “Sustainable Development Goals.” April 20, 2018. <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>.
- UNEP. 2019. “Emissions Gap Report 2019.” Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. <http://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019>.
- UNFCCC. 2015. “Paris Agreement.” In *Record Thumbnail Image Report of the Conference of the Parties on Its 21st Session*. Paris, France. <https://digitallibrary.un.org/record/831052>.
- Varro, Laszlo, Brent Wanner, César Alejandro Hernández Alva, Antoine Herzog, and Peter Fraser. 2019. “Nuclear Power in a Clean Energy System.” International Energy Agency. <https://webstore.iea.org/nuclear-power-in-a-clean-energy-system>.
- Wald, Matt. 2019. “Inventive Nuclear Plants Think Beyond Electricity to Hydrogen.” *Nuclear Energy Institute* (blog). November 14, 2019. <https://www.nei.org/news/2019/nuclear-plants-beyond-electricity-hydrogen>.
- Wilkinson, Jonathan. 2019. “Government of Canada Releases Emissions Projections, Showing Progress towards Climate Target.” News releases. Gcnws. December 20, 2019. <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/news/2019/12/government-of-canada-releases-emissions-projections-showing-progress-towards-climate-target.html>.
- Wittenstein, Matthew, Geoffrey Rothwell, Cyndia Yu, Marc Deffrennes, Henri Paillère, Uwe Remme, Cecilia Tam, et al. 2015. “Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition.” IEA, NEA. <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2015/7057-proj-costs-electricity-2015.pdf>.
- Yan, Xing. 2017. “HTGR Brayton Cycle Technology and Operations.” Presented at the MIT Workshop on New Cross-cutting Technologies for Nuclear Power, Cambridge, MA, January 30. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2017/02/2-3.-HTGR-Brayton-Cycle-YAN-MIT-talk-r1-min.pdf>.
- Zhou, Ella, Wesley Cole, and Bethany Frew. 2018. “Valuing Variable Renewable Energy for Peak Demand Requirements.” *Energy* 165 (December): 499–511. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.009>.