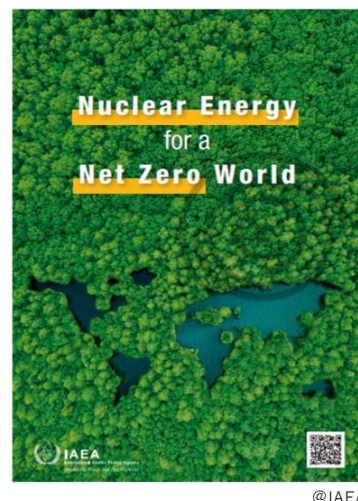


IAEA 特別報告書「ネットゼロの世界のための原子力」について

2021年11月29日
(一社)日本原子力産業協会
情報・コミュニケーション部

国際原子力機関（IAEA）は2021年10月15日、世界の指導者や広く関係者向けに特別報告書「ネットゼロの世界のための原子力 英語名：“Nuclear Energy for a Net Zero World”」を発表した。報告書は、国連気候変動枠組条約第26回締約国会議（COP26、開催期間：2021年10月31日～11月13日、英グラスゴー）での議論の参考用に作成されたもので、気候変動対策における原子力の重要な役割を概説している。

報告書は約70頁（前書き、各国代表声明を含む）からなり、「ネットゼロへのロードマップ：原子力の貢献」「石炭からの脱却：持続可能で正当な移行のための原子力」など6章に分けて、原子力の役割・貢献について説明している。ここでは、IAEAのプレスリリースと第3章「ネットゼロに向けたエネルギーシステム：水素を含む原子力再生可能エネルギーシステム」、第6章「原子力技術と持続可能な開発」を紹介する。



.....

【IAEA 特別報告書のプレスリリース、2021年10月15日】

IAEA、特別報告書「ネットゼロの世界のための原子力」発表
COP26 気候サミットに向け

国連気候変動枠組条約締約国会議（COP26）に先立ち、国際原子力機関（IAEA）は2021年10月15日、特別報告書「[ネットゼロの世界のための原子力](#)」を発表した。特別報告書は、原子力が石炭やその他の化石燃料に代替し、再生可能エネルギーのさらなる拡大を可能にし、大量のクリーン水素の経済的な供給源になるとして、パリ協定と持続可能な開発のための[アジェンダ 2030](#)の目標を達成するうえでの原子力の重要な役割を強調している

10月31日～11月12日に英グラスゴーで開催予定の[COP26](#)に世界中の政府、企業、社会の指導者が集まる準備を進めるなかで、IAEAの報告書は、エネルギー政策と気候政策が議論される際には常に原子力が議題にのらなければならない理由を明らかにしている。さらに、カナダ、中国、フィンランド、フランス、日本、ポーランド、ロシア、米国、英国の9カ国は、原子力発電が気候変動対策に果たす役割に関する調査結果を支持する声明を報告書に寄せた。

報告書の発表にあたり、ラファエル・マリアーノ・グロッシーIAEA事務局長は、ミハウ・クリティカ・ポーランド気候・環境大臣と後ほどオンラインイベントで対話を行う予定である。グロッシー事務局長は報告書の前書きで、「過去50年間、原子力発電は累計で約700億トンの二酸化炭素(CO₂)の排出を回避し、毎年10億トン以上の排出を抑制し続けている」と述べている。「我々がCOP26に向かう時、証拠に基づいた決定を下し、原子力への投資を増やす時である。さもないと、コストは耐えられないほど高くなってしまふ」。

報告書は、24時間年中無休でエネルギー供給を確保することによって、温室効果ガス排出量をネットゼロにするという目標を達成するために、原子力発電がいかに不可欠であるかを示している。原子力発電は、電力網の安定性とレジリエンスを提供し、クリーンエネルギーへの移行を推進するのに必要な風力や太陽光などの出力変動性の再生可能エネルギーとのより広範な一体化（調和）を促進する。さらに、低炭素電力の強固な供給源である原子力発電は、石炭やその他の化石燃料に代替するだけでなく、排出削減が難しい産業や輸送などの部門の脱炭素化に向けた熱や水素の供給にも適している。このように、原子力発電は、パンデミック後の世界経済の回復に最も効果的な投資対象の一つであり、エネルギー、経済拡大、気候行動に関する国連の持続可能な開発目標に直接に貢献する。

GOP26の重要なトピックは、[石炭からの移行を加速すること](#)である。報告書によると、世界の石炭発電の20%を2.5億kWの原子力発電で代替することで、排出量は20億トンCO₂を削減、つまり年間の電力部門の排出量の約15%が削減される。地域暖房や産業用の石炭火力ボイラーも原子力発電で代替することができる。

報告書はまた、原子力発電が経済成長の重要な原動力となり、多くの部門で雇用を生み出し、クリーンエネルギーへの移行を可能にする方法を概説している。世界の発電量の10%を占める原子力発電は、すでに80万人以上の雇用を提供している。国際通貨基金(IMF)の推計によると、原子力への投資は他のエネルギー形態よりも大きな経済的影響をもたらす、持続可能な経済回復と回復力のあるネットゼロのエネルギーシステムへの移行に向けた最も効果的な行動の一つとなっている。

ポーランドは、現在同国の電力の約70%を生産し、約20万人を雇用している石炭火力への依存を減らすために原子力発電所の建設を計画している国である。「ポーランドでの原子力発電所の運転は、気候中立性の目標を達成し、新たに高度に専門化された産業部門を構築しながら経済にプラスの影響を与え、国のエネルギー安全保障を強化するのに役立つだろう」と、ポーランドがホスト国として2018年に開催した国連気候会議COP24の議長を務めたクリティカ大臣は報告書の声明で述べている。「再生可能エネルギーと原子力発電に関連する新しい産業部門が、約30万人の新規雇用を創出するのに役立つと推定される」。

報告書によると、原子力発電が再生可能エネルギーと連携することは、排出量をネットゼロに向かわせる鍵となる。原子力発電は、給電可能であり、低排出、柔軟で信頼性が高いため、電力部門でのネットゼロミックスを支える一方で、発電システム全体のコストを下げるのに役立つ。

鉄鋼、セメント、化学生産、陸上輸送、船舶輸送、航空輸送などの非電力部門は、エネルギー関連の世界の排出量の約60%を占めており、熱や低炭素フットプリント（フットプリント：原材料調達から廃棄・リサイクルに至るまでのライフサイクル全体を通して排出される温室効果ガスの排出量）で生産しなければならない水素などのエネルギーキャリア（輸送、貯蔵技術）の導入が必要である。[原子力は低炭素熱を供給し、水素の製造に使用することができ](#)、特に現在開発中の高温原子炉はそれに適している。

報告書は、レジリエントなエネルギーシステムが、個々の発電技術、グリッドインフラおよび需要側の措置の堅牢性にどのように依存しているかを強調している。原子力部門は、より頻繁で極端な気象事象のリスクを含む気候変動がもたらす課題に直面する準備ができており、これらのリスクを軽減するための具体的な適応策を開発している。IAEAの[発電炉情報システム \(PRIS\)](#)のデータによると、原子力発電所の気象関連の停電の頻度は過去30年間で増加しているが、総発電量の損失は軽微で、過去10年間では損失は減少した。

今回の特別報告書は、原子力発電のより広範な展開が加速されることを目的として、一連の行動を推奨している。

- ・ 低炭素エネルギーの価値を評価する炭素価格と炭素対策の導入
- ・ 低炭素投資のための目標および技術中立枠組の採用
- ・ 市場や規制、政策が、信頼性のある、レジリエンスな低炭素エネルギーシステムへの原子力の貢献を評価し、報酬を与えることの確保
- ・ 「グリーンディール」および経済再建パッケージの一環として、原子炉の運転期間延長を含む原子力発電への公共投資と民間投資に対する支援の強化
- ・ エネルギーインフラに対する気候リスクを軽減するため、多様な電力システムを推進し、電力サービスの継続性と質を確保

「世界の平均気温上昇を 1.5°C に制限し、2050 年までにネットゼロ排出を達成するという課題は、手ごわい挑戦であるとともに巨大な経済的機会でもある」と、ジョン・ケリー米国気候担当特別大統領特使は IAEA 報告書の声明の中で述べている。「世界のクリーンエネルギーへの移行には、今後 10 年以上にわたり、原子力を含む全範囲のクリーンエネルギー技術が大規模に展開する必要がある」。

【IAEA 特別報告書「ネットゼロの世界のための原子力」の内容】

A4 版 73 頁

前書き (ラファエル・マリアーノ・グロッシー IAEA 事務局長)

各国代表声明 (9 カ国)

- ・ジャン・フランソワ・トレンブレイ カナダ天然資源省次官
- ・張 克儉 中国国家原子能機構主任
- ・リク・フットネン フィンランド経済雇用省エネルギー局長
- ・ジャン＝イヴ・ル・ドリアン フランス欧州・外務大臣
- ・梶山 弘志 日本経済産業大臣
- ・ミハウ・クリティカ ポーランド気候・環境大臣
- ・ルスラン・エデルゲリエフ ロシア気候問題大統領特別代表・顧問
- ・グレッグ・ハンズ 英国エネルギー・クリーン成長・気候変動担当閣外大臣
- ・ジョン・ケリー 米国気候問題担当大統領特使

第1章 ネットゼロへのロードマップ：原子力の貢献

第2章 石炭からの脱却：持続可能で正当な移行のための原子力発電

第3章 ネットゼロに向けたエネルギーシステムの推進：水素を含む原子力-再生可能エネルギーシステム

第4章 原子力発電と気候レジリエントなエネルギーインフラストラクチャー

第5章 パンデミック後の持続可能な世界のための原子力投資

第6章 原子力技術と持続可能な開発

参考資料

【「第3章 ネットゼロに向けたエネルギーシステムの推進：水素を含む原子力-再生可能システム」の内容】

キーポイント：

- ・給電可能で低排出、柔軟で信頼性の高い電源が、ネットゼロの電力システムの基盤に必要。
- ・原子力発電は、給電可能な電力を供給し、送電網の拡張と貯蔵の必要性を減らすことにより、発電システム全体のコスト削減に役立つ。
- ・原子力は、低炭素熱を供給し（確立済、または新たな生産プロセスのいずれの方法でも）炭素削減が難しい部門向けに水素を製造することができる。

ネットゼロのエネルギーシステムを実現するには、世界中のエネルギーの生産・供給・使用方法の迅速かつ抜本的な変革が必要である。電力システムはこの移行において重要な役割を果たすことが期待されており、交通、建物、産業の電化が進み、発電ミックスがほぼ完全に脱炭素化されることになる。これは、ネットゼロの世界を実現するパスウェイを示した長期的なシナリオ研究全体にわたって反映されており、経済のいくつかの部門、特に普通自動車と暖房の多くの形態を脱炭素化するために最も効率的かつ経済的な方法の一つとして、直接電化を認識している。しかし、鉄鋼、セメント、化学生産、長距離輸送、航空輸送などの排出削減が難しい部門では、水素や熱などの他のエネルギーキャリアの配備が必要であり、かつ低炭素フットプリントで生産する必要がある。

低炭素移行への礎として、電力部門は、より大きく、より複雑で統合されたシステムへと進化し、より広範な低炭素技術に依存することが期待されている。世界の発電量の約 60%を占め、排出削減対策を施してい

ない化石燃料発電所は、今後わずか 30 年でゼロに減らすか、ピーク時の需要、またはシステムサービスの提供に限定しなければならない。電力インフラ資産の平均寿命よりもはるかに短い時間枠で実現しなければならないという事実によって、事態は一層複雑化している。このような変革を達成し、気候変動の最悪の影響を回避するためには、既存の低炭素発電施設を維持しながら、あらゆる低炭素発電オプションを迅速に展開するとともに、それらのエネルギーシステムへの統合を促進する技術が必要となる。それはまた、恐らく大幅な化石燃料発電所の早期退役が必要になる。このような急激な移行は、技術的・工学的な観点からだけでなく、経済的・社会的な側面からも課題を生み出し、政策立案者が理解して、取り組まなければならない。

脱炭素化経済における水素の役割

近年、産業界、研究機関、各国政府、国際機関の間で、水素に対する関心が高まっている。水素に関する政府のイニシアチブ、計画、プログラムは、カナダ、EU(欧州グリーンディールの一環として)、日本、韓国、ロシア連邦、英国、米国などで策定されている。水素は、直接電化が不可能または非経済的である部門を脱炭素化するための効果的で汎用性の高いエネルギーキャリアとして注目されている。低炭素水素は、直接またはアンモニアや合成燃料の形で使用することで、長距離輸送、製鉄、化学製品だけでなく、その他の様々な熱源としてカーボンフットプリントを削減することができる。水素はまた、低炭素電力システムを運用するうえでの課題の一部を克服し、エネルギー貯蔵を行うことにより、変動する再生可能エネルギーの大量導入を促進することができる。

世界の水素需要は 2019 年に約 1.2 億トンに達し、主に石油精製と化学部門で、アンモニアやメタノール生産の原料として使用されている。鉄鋼生産(2019 年の総需要の 5%)、輸送、その他の金属、ガラス、エレクトロニクスなどの材料や機器の製造にも少量使用されている。ネットゼロの経済への移行が進むなか、水素需要は今後 30 年間で大幅に増加すると予想されている。[エネルギー移行委員会\(ETC\)](#)は、2050 年には 5 億~8 億トン/年が必要になると見積もっており、それは現在の需要レベルの 4~6 倍である。ETC は、クリーン水素に対する長期的な利用の可能性の範囲を特定した(図 7 参照)。長期的に高い可能性を持つ部門には、鉄鋼生産、海運、航空、電力部門が含まれる。家庭用暖房、高温熱利用、プラスチック製造、長距離輸送などの他の分野では、水素は直接電化または他の脱炭素化オプションの代替となる可能性があると考えられている。排出削減のための水素の短期的かつ過渡的な利用の可能法としては、従来の発電所でのアンモニアや水素の混焼、天然ガスとのブレンドが含まれる。

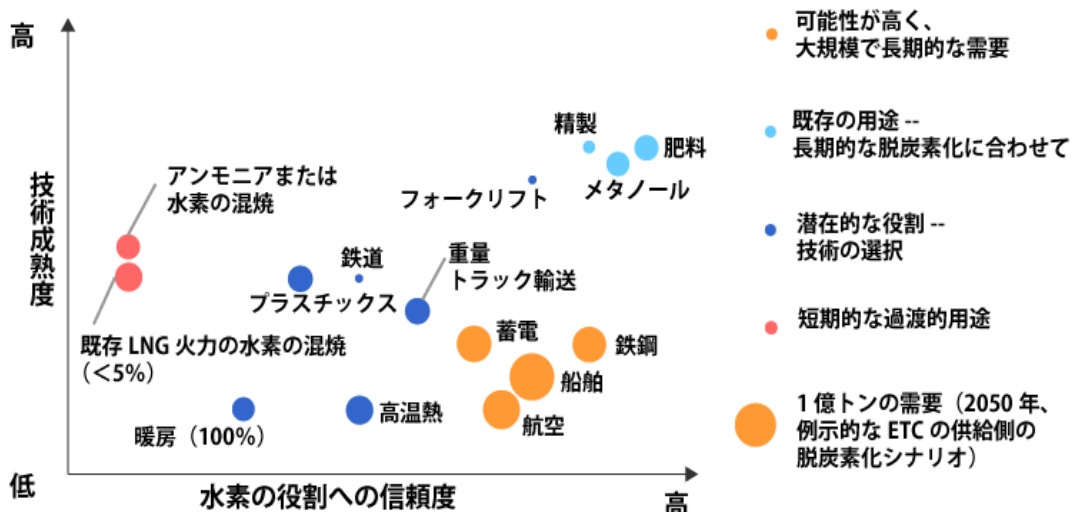


図 7. 低炭素経済における水素の利用ポテンシャル

水素は、天然ガス、石炭、バイオマス、電気など、様々なエネルギー源を用いて様々な方法で製造される。現在、ほぼすべての水素は化石燃料から製造されている。天然ガスの水蒸気メタン改質(全体の75%)、または石炭ガス化(23%)のいずれかである。どちらのプロセスもCO₂を排出し(天然ガスの場合、9 kg CO₂/kgH₂、石炭の場合、20 kg CO₂/kgH₂)、炭素回収・貯留(CCS)の採用は今のところ非常に限定的である。炭素回収技術は、水蒸気メタン改質による直接排出を最大90%削減するが、水素製造コストを増加させる。しかし、ライフサイクル全体を考慮する必要がある。特に、天然ガスの生産と流通の上流プロセスから排出される大量の残留メタンを考慮する必要がある。石炭のガス化プロセスでのCCSの使用は、技術的に困難であり、厳しい削減戦略としては経済的に競争力がないと思われる。

水素は、電気や熱を使って水を水素と酸素に分割する電気分解によっても製造することができる。現在、電気分解による水素製造は全体量の0.1%しか占めていないが、非常に低いカーボンフットプリントで水素を製造できる可能性があるため、大きな関心を集めている。アルカリおよびプロトン交換膜(PEM)による電気分解は低温で動き、技術的に成熟している。固体酸化物電解セルを含むその他の技術は、高温蒸気を使用し、はるかに高い電気効率を持っている。電気分解は直接CO₂排出を伴わないが、間接的な炭素強度は、その過程で使用される電源によって異なる。排出削減対策のない水蒸気メタン改質と比較して、電解槽による水素製造は、電気の炭素含有量が200g CO₂/kWhを下回る場合、炭素排出量の面でメリットがある。これは現在、世界でも数少ない国でしか達成していないレベルである(図8参照)。CCSによる水蒸気メタン改質と比較して、CO₂排出量を削減するには、電気の炭素含有量をさらに低くする必要がある。従って、電解槽の普及は、風力、太陽光、原子力などの低炭素電源に直接結合している場合、あるいは発電ミックスがほぼ完全に脱炭素化されている場合にのみメリットがある。

化石燃料からの水素製造コストは主に、原料の天然ガスや石炭の価格(その価格は地域変動の影響を大きく受ける)、使用される技術(CCSの有無)、ならびに炭素排出コスト(炭素価格が設定されている場合)によって影響を受ける。水蒸気メタン改質による現在のコストは、排出削減対策なしで製造する場合は1.0~1.6 US\$/kg H₂、CCSを使用する場合は1.5~2.2 US\$/kg H₂である。電気分解による水素のコストは、電解槽の設備投資、効率、年間稼働時間、電気の価格など、多くの要因が複雑に絡み合っている。現在のコスト見積もりは、3~10 US\$/kg H₂の間と幅広く、化石燃料との競争力を持つためには大幅なコスト削減が必要であることを示している。しかし、電気分解による水素の製造コストは、電解槽の資本コストと低炭素技術(主に出力変動性の再生可能エネルギー)による発電コストが現在の水準から低下していくなかで、近い将来に大幅に減少すると予想される。

低炭素電源の中でも、電気分解のために原子力を使用することで、電解槽を非常に高く効率的に利用することができ、関連する資本コストを最小限に抑えることができる。しかし、約2~2.5 US\$/kg H₂の水素製造コストを達成するには、均等化発電コスト(LCOE)は、世界の多くの地域の新規原子力発電所の予測コストよりもはるかに低い35~45 US\$/MWhの範囲である必要がある。しかし、このようなコストは、既存の原子炉の運転期間延長で達成することができ、既存のプラントは次に説明するように収益を多様化することができる。

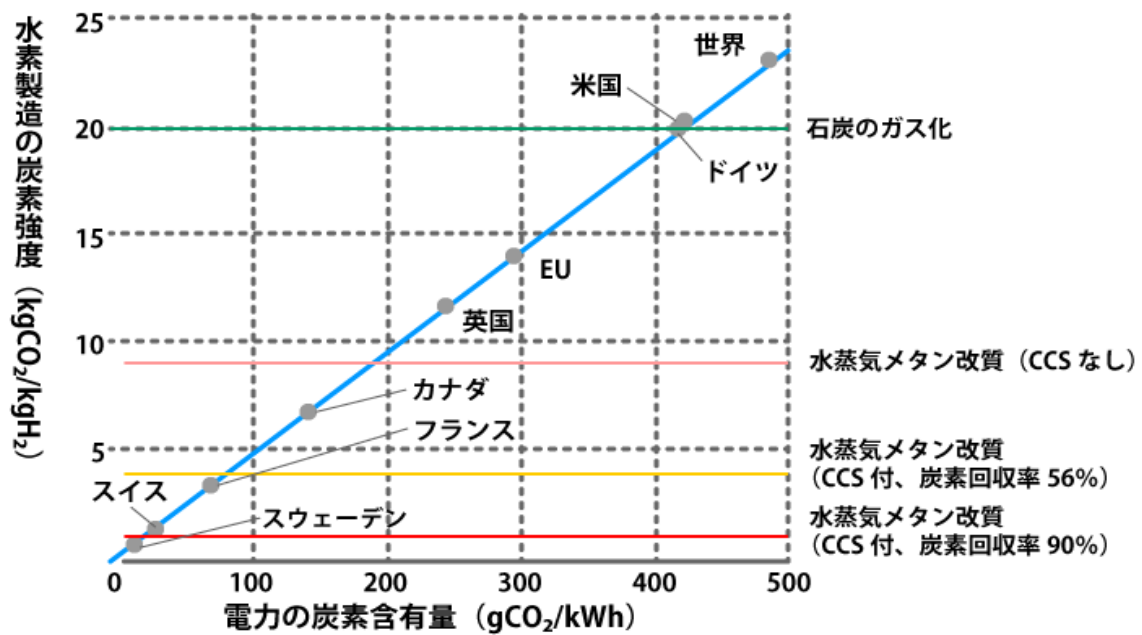


図 8. 様々な水素製造法の炭素強度

統合低炭素エネルギーシステムにおける原子力、再生可能エネルギー、水素

ネットゼロのエネルギーシステムを実現するには、2050年までに発電をほぼ完全に脱炭素化し、風力や太陽光などの出力変動性の再生可能エネルギーと、原子力、CCS 装備の化石燃料火力、一部の水力発電などの給電可能な低炭素技術の組み合わせに依存する必要がある。相互接続、革新的な貯蔵技術、需要側の対策、水素などのエネルギーキャリアも、将来の低炭素電力システムにおいて重要な役割を果たす可能性が高い。

採用された技術の特定の組み合わせに関係なく、低炭素電力システムへの移行は、技術的にも経済的にも新たな課題を生み出す。しかし、これらの課題とシステムの関連コストは、出力変動性の再生可能エネルギーの割合が増えると大幅に増加する。なぜならば、再生可能エネルギーは不安定で予測不可能であり、毎日、毎週、季節の需要パターンから分離していることが多いためである。

これは、柔軟性が将来の低炭素電力システムの中心となる重要な理由の1つである。不安定な出力変動性の再生可能エネルギー (VRE) の発電に対応して、需要と供給のバランスを確保するために、ミリ秒から数時間の短期的な柔軟性がますます必要になる。風力や太陽光の循環的な生産プロファイルを補うには、時間単位から日単位まで、中期的な柔軟性が必要となる。特に VRE のシェアが高い場合、再生可能エネルギーによる発電だけで長期間にわたって総需要を上回る可能性があることから、大規模な季節貯蔵容量のための長期的な柔軟性のニーズが追加される。これは、現在の電力システムにおける柔軟性とアンシラリー・サービスの主な供給源であるガスおよび石炭火力発電所の段階的廃止と同時に起きることになる。

柔軟性の新たな措置が必要となり、既存の措置は、他のネットワークとの相互接続、需要側の対策、既存および新規の貯蔵技術、および火力や再生可能エネルギー発電所からの負荷変調を含む現在のレベルから拡大する必要がある。原子力発電所は、実現可能な設備利用率の増減に対応して、負荷追従性と柔軟性への要件が大幅に高まった場合、技術的にも経済的にも対応できるかもしれない。

柔軟性に対する新たな需要は新たな機会も生み出す。エネルギーベクトルとして電気分解による水素製造に補完され、発電とより広範なエネルギー部門との間の緊密な連携は、柔軟性の大きな可能性を開き、低炭素システムを達成するためのいくつかの課題に対処するのに役立つ可能性がある。特に、電力システムにおける水素の使用は、電池の導入と組み合わせて、VREの大規模な導入に必要な様々な時間スケールでの柔軟性を提供するために不可欠である。

電力システムの観点から、電解槽は、追加の非常に柔軟な負荷として見ることができる。電解槽は、需要の少ない、または過剰なVRE発電の時に動かすことができるので、需要と供給をより良くマッチングさせ、システムのバランスを取り、電力消費量を急速に変化させることができる。水素はまた、燃料電池やガスタービン発電の燃料として、天然ガスと併用したり、単独で使用することもできる。このように、水素は電力システムに短期的な柔軟性を提供し、電力需要が多く再生可能エネルギー発電が少ない時間帯（期間）に、ピーク用発電所（通常、炭素排出の火力発電所）に置き換えることができるので、全体的な炭素排出量の削減に貢献することができる。大量の水素は、長期間にわたり貯蔵され、岩塩空洞や枯渇した天然ガス田や油田に貯蔵され、損失も限定的であるので、季節的な貯蔵のための解決策を提供し、VREの高いシェアを持つ電力システムに典型的な発電と需要の不均衡を解決する可能性がある。長期貯蔵では水素はまた、電池や揚水発電貯水池など、現在利用されている他の貯蔵技術よりも効果的で経済的な可能性がある。

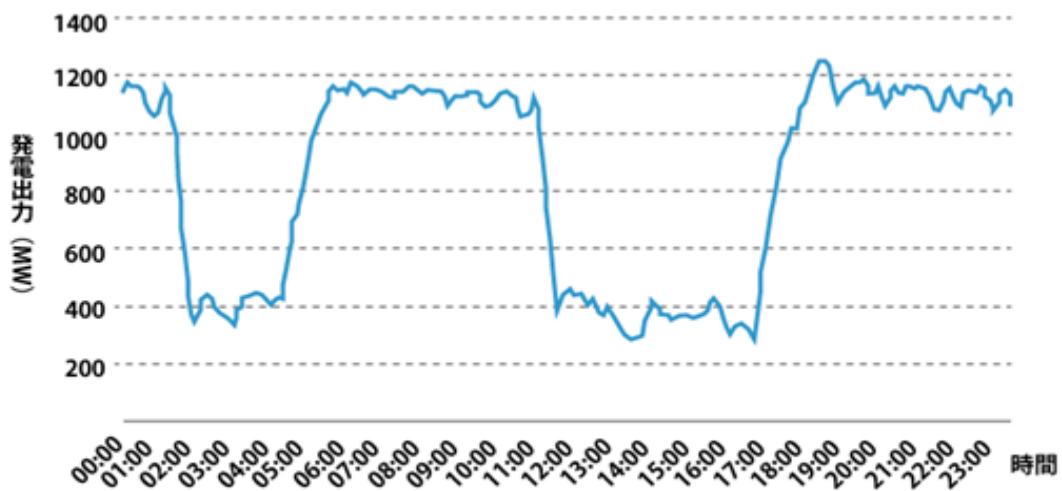
電池と水素の使用の広範な展開によって、電力システムの全体的な安定性が向上する。具体的には、VREによる発電量の減少を抑え、原子力発電所など全ての給電可能な発電設備に対して、負荷変動と発電出力の増減要求を減らすだけでなく、起動・停止の回数を減らすのに役立つ。この結果、全体として、より効率的な運転と設備利用率の向上が期待できる。経済的な観点から、電解槽は電力需要を円滑にし、副次的な影響として、電力価格の不安定性を減らし、結果的にVRE、原子力発電所、および消費者に同様に利益をもたらす。英国のネットゼロのエネルギーシステムへの移行に焦点を当てた最近の研究は、急速な脱炭素化を達成し、化石燃料への依存を減らし、全体的な炭素排出量を最小限に抑えるために、原子力、再生可能エネルギー、および水素の組み合わせが必要であることを確認している。風力や太陽光発電とならんで原子力発電がかなりのシェアで展開することは、このような移行を最小限のコストで達成し、関連するリスクを軽減することになる。

より緊密に結合されたエネルギーシステムは、原子力発電が純粋な電力生産を超えたサービスを提供する新たな機会を生み出す。大抵の再生可能エネルギー技術とは異なり、原子力発電はシステムに熱やその他の電力以外の利用を提供し、化石燃料に代替することができる。原子力発電所が他のエネルギー製品（熱、水素、淡水化サービスなど）と組み合わせて発電する柔軟性は、持続可能なシステムのニーズに特に適している。原子力発電所は、電力と非電力利用の間の出力を調整しながら、フルパワーで安定的に運転することによって、非常に低コストで柔軟性サービスを提供することができる。すなわち、原子力発電所は、高い設備利用率を実現しつつ、各製品（電力、熱、水素）の市場需要に応えることができ、かくして収益の最大化につながる。

国別事例：フランスにおける原子力の柔軟性

フランスの原子力発電は全電力需要の70%を供給し、原子力による排出量はライフサイクル全体(ウラン採掘、製錬、燃料製造、プラント建設、運転、廃炉、廃棄物処分)でわずか12 gCO₂/kWh(中央値推定)である。1980年代以来、フランスの原子力発電所は、安全で費用対効果の高い方法で電力網の安定性に必要な周波数や電圧調整などのアンシラリー・サービスを提供するために、柔軟に運転されてきた。電力需要の変化に対応するだけでなく、原子力の柔軟性は、大幅に増加することが予想される再生可能エネルギー発電の変動に対して、ガスや石炭プラントに依存せずに対応するための1つのソリューションとなり得る。

フランスの各原子炉は平均して年間30回の出力変動を実施している。ただし、これらの出力変動のほとんどは少数の原子炉ユニットで実施されており、年間125回もの大規模な負荷変調を実行できる。原子力発電所の柔軟な運転を示す典型的な1日の時間変化を以下の図に示す。原子力発電所は1日に2回の大きな出力変動を行い、30分で公称出力を100%から20%に減らし、周波数(公称出力の最大7%)と電圧調整をシステムに提供する。



フランスの原子力発電所の1日の発電出力の変化 (EDF 提供)

フランス電力公社(EDF)は、その原子炉群が提供する柔軟性は、2030年と2040年までに想定される電力システムのニーズを満たすのに十分であると予測している。原子力発電は、水力発電、電池、水素などの他の技術とともに、フランスの増大していく再生可能な電源との一体化(調和)にとって不可欠であると考えられている。

国別事例：中国初の原子力+スマートエネルギープロジェクト（山東省栄成）

中国の原子力産業は2021年4月13日、山東省威海市の栄成でスマートエネルギープロジェクト「Guohe One+（国和1号+）」の建設を開始した。国和1号+プロジェクトは、中国東海岸の威海市を、原子力やその他の低炭素エネルギー技術を統合したカーボンニュートラルの実証都市に変えることを目指している。

栄成に2基の最先端の加圧水型炉（CAP-1400）を設置する国和1号+プロジェクトは、原子力、太陽光発電、洋上風力、その他の技術をクリーンな電力システムに統合するためのスマートエネルギー管理・サービスプラットフォームを実施する。この低炭素の統合化されたスマートシステムはまた、原子力を用いた熱、海水淡水化、水素製造を最適化した形で実施する。

プロジェクトが稼働すると、（2つの加圧水型炉からの貢献に加えて）クリーンな電力の供給量を年間平均6GWh増加させ、1,889トンの標準石炭を節約し、二酸化炭素排出量を5,167トン削減する。第1段階の投資総額は約3,000万人民元（460万米ドル）で、内部資本利益率は8%を超える見込みである。

国和1号+は地方自治政府から高く評価されており、同自治政府は、国家電力投資集团公司（SPIC）、国和1号+の開発者、中国の主要発電事業者と協力協定を締結した。今後、地方自治政府とSPICは、さらに2つの統合エネルギーシステム実証プロジェクトを共同で開発する計画である。このプロジェクトは、中国全土でスマートエネルギープロジェクトのモデルとなるだろう。

（国家電力投資集团公司）

原子力を用いた水素オプシオンの探求

原子力を用いた水素製造への関心は、持続可能で低炭素、かつコスト効率の高い方法で水素製造のための電気と熱を供給する可能性があるため、国際的に高まっている。これは、既存の軽水炉（LWR）と低温式電解槽を使用して、水素製造の実現可能性とビジネスチャンス进行分析するための実証プロジェクトや国際パートナーシップの増加に反映されている。例えば、主要な原子力事業者であるロスアトム社とEDFの連携などに見られる（図9参照）。これらのプロジェクトは、経済性を向上させる必要性に迫られていることが多く、特に低価格、時にはマイナス価格の電力市場においては、付加価値の高い製品を生産することで経済性を向上させる必要がある。

研究開発活動は、電力以外の利用、特に高温蒸気電解法（HTSE）または熱化学プロセスを用いた水素製造のために、高温ガス炉（HTG）を含む先進型原子炉やSMRに焦点を当てている（スポットライト1参照）。現在、市場展開に近い技術を含む、様々な技術が開発中である（図9参照）。

スポットライト1:小型モジュール炉（SMR）

改善された経済性、より高い運転の柔軟性、より幅広いプラントサイズ、そして持続可能なエネルギーシステムの新たなニーズを満たすために複数のエネルギーサービスを提供する能力を持つことをめざして現在、いくつかのタイプのSMRが開発中である。

これらの原子炉の一部は、280～325℃で運転する現在のLWRと比較して、高温または非常に高温（ガス冷却炉の場合は最大700～950℃）で運転するように設計されている。その結果、エネルギー効率が高く

なり、より高温を必要とする工業プロセス熱を供給する可能性が出てくる。高温の先進原子炉は、高温蒸気電気分解や熱化学サイクルなどのよりエネルギー効率の高いプロセスによる水素製造も期待されている。

SMR の設計はまた、水素製造や電力以外の利用に対していくつかの大きな利点がある。小型化と立地の容易さは、100~1,000 MWt の範囲のエネルギー出力を必要とする多くの電力以外の利用に適していると予想される。

推奨されるアクション

- ・コスト削減に対処し、新興エネルギー市場のニーズに応え、他の低炭素発電オプションとの相乗効果を活用することにより、原子力発電の競争力を向上させる。
- ・エネルギー市場の規制・政策の枠組が、信頼性の高い低炭素エネルギーシステムに対する原子力エネルギーの貢献を評価し、報酬を与えるようにする。
- ・複数の低炭素エネルギーキャリア(電気、熱、水素など)を活用し、エネルギー分配コストを削減する、総合的なクリーンエネルギー・産業クラスターを育成する。
- ・技術中立的な低炭素水素の展開を支援する。



既存の軽水炉と電解槽による水素製造

米国	<ul style="list-style-type: none"> DOE の H2@Scale: H₂ 製造と一体化した LWR の柔軟な運転を進めるための官民パートナーシップ。 デービスベッセ原子力発電所でパイロット試験。2MW・固体高分子型 (PEM) 電解槽利用。 パロベルデ原子力発電所でのリバーシブル・PEM 電解槽の可能性研究。電力のピーク需要時には電力を生産し、電力需要が低い時期に H₂ を製造。 エクセロン社、H₂ 製造のための 1 MW・PEM 電解槽の実証。
英国	<ul style="list-style-type: none"> EDF は、ヘイシャム原子力発電所で低炭素水素製造の技術的実現可能性を確認したが、プロジェクトは実証段階に進んでいない。 EDF は、英国の原子力発電所を用いた大規模な水素製造を検討しており、Sizewell C プロジェクト建設の脱炭素化のために H₂ を供給する 2MW の実証電解槽を開始する予定。
ロシア	<ul style="list-style-type: none"> ロスアトム社は、コラ原子力発電所でマトリックスアルカリ電解を用いて水素を製造するパイロットプロジェクトを開始中。水素液化ユニットや液体水素輸送装置の開発も行う予定。
カナダ	<ul style="list-style-type: none"> ブルースパワー社は、2027 年までにブルースサイトでネットゼロを達成する目標を支援するために、同サイトでの原子力水素製造の技術的実現可能性とビジネスケースを模索中。
スウェーデン	<ul style="list-style-type: none"> バッテンフォール社は、1997 年よりリングハルス原子力発電所で水素を製造中。 バッテンフォールは、鉄鋼メーカー (SSAB) や鋳業会社 (LKAB) とともに、低炭素電力と水素を用いた鉄鋼生産の脱炭素化に向けた新たなイニシアチブを開始し、2026 年までに年間 100 万トンの化石を用いない鉄鋼を生産する計画。

先進型原子炉や SMR による水素製造に焦点を当てた研究開発活動

米国	<ul style="list-style-type: none"> 次世代原子力発電所 (NGNP) プロジェクトのもとで、DOE、アイダホ国立研究所 (INL) および産業界パートナーが、水素製造用に熱を供給する可能性を実証するため 2 つの HTGR を研究中。 INL の評価によると、ニュースケール社の 250 MWth・SMR は、天然ガスからの H₂ 製造と比較して、年間 168 ktCO₂ の排出を回避しながら、経済的に約 50t H₂/日 を製造することができる。12 モジュールのプラントは、中規模の石油精製所をサポートすることができる。
英国	<ul style="list-style-type: none"> ビジネス・エネルギー・産業戦略省 (BEIS) は、HTGR の開発者である U-バッテリー社など、いくつかの先進型モジュール炉 (AMR) 技術プロジェクトを支援している。
ロシア	<ul style="list-style-type: none"> ロスアトム社は、2030 年までにメタンの断熱変換と二酸化炭素の利用により水素を製造する HTGR を運転する計画。 水からの熱化学水素製造もロシアで構想されている。
中国	<ul style="list-style-type: none"> 実証高温炉プロトタイプモジュール (設計温度 750°C) が、2020 年に成功裏に冷態機能試験を終え、2021 年末には運転開始予定。
日本	<ul style="list-style-type: none"> 2019 年にヨウ素・硫黄 (IS) の熱化学プロセスを用いて、高温工学試験研究炉 (HTTR) で水素製造を実証済み。
ポーランド	<ul style="list-style-type: none"> ポーランド国立原子力研究センターは、日本と協力して HTGR 開発プロジェクトを開始。

図 9. 主要な原子力水素製造プロジェクトの地図と概要

【「第6章 原子力技術と持続可能な開発」の内容】

キーポイント：

- ・原子力技術は多くのSDGs（持続可能な開発目標）を支え、特に原子力発電は、エネルギーや経済成長、気候変動対策に貢献する

気候変動に対処する緊急の必要性、低炭素技術への移行の前例のない規模、およびその目標を達成するための原子力発電の重要性に関する科学的コンセンサスにもかかわらず、原子力技術への支持はわずかである。原子力に対する批判者は、「将来の世代が自らのニーズを満たす能力を損なわずに現在のニーズを満たす」という、長期的な持続可能性に疑問を投げかけている。持続可能性を定義することは役立つが、いわゆる「持続可能な未来」を達成するための様々な枠組があり、原子力が持続可能な技術を構成するかどうかについてそれぞれが異なる視点を持っている。

持続可能な未来を実現するための特に注目すべき枠組の1つは、国連のアジェンダ 2030 持続可能な開発目標(SDGs)で、これは 2030 年までにより持続可能な世界を創出することを目的とした 17 の相互に関連した世界目標で構成される。SDGs は一般的に技術中立的であり、目標達成における有効性を除いて、ある技術を他の技術より優先しない。特に、全ての目標は相互に強化されており、持続可能なエネルギー源としての原子力発電の可能性を無視することは、気候変動だけでなくそれ以外にも連鎖的に影響を及ぼす。原子力の排除が気候変動に関連する SDGs の達成をより困難にするならば、他の目標の達成を妨げるか達成を遅らせる結果になる可能性がある。表 2 は関連する SDGs に対する原子力技術の利点の例を示している。目標を達成するには、気候変動や経済、移民、紛争が相互に関連し、より大きな世界的課題に作用していることを認識することが重要である。

持続可能な未来を実現するためのもう一つの枠組は、持続可能な活動のための EU のタクソノミーである。これは、金融投資を判断するための環境的に持続可能な経済活動のリストを定める分類システムである。EU の共同研究センター(JRC)は最近、原子力がタクソノミーの中に「持続可能な技術」として含まれるポテンシャルを持つとする調査結果を発表した。

この分析は、原子力はタクソノミーに既に含まれている他の発電技術と比べて、人間の健康や環境に害を与えないと結論付けた。原子力が人の健康と環境に与える影響は、主に水力発電やその他の再生可能エネルギー源とほとんど同等である。特に、最新の商用原子炉(第3世代炉)の評価では、すべての発電技術の中で最も死亡率が低かった。

さらに、報告書は、原子力エネルギーの様々なライフサイクル段階が人間の健康と環境に及ぼす潜在的に有害な影響はすべて、きちんと防止または回避することができるかと結論付けた。原子力に基づく発電と核燃料サイクル(ウラン採掘、核燃料製造など)は、関係するすべての具体的な産業活動が確立された包括的な技術基準を満たすならば、JRC 研究で評価された目標のいずれにも重大な損害を与えない。これら 2 つの枠組は、持続可能な未来を実現するための原子力エネルギーと原子力技術の価値を示している。

表 2. 各 SDGs に対する原子力技術と原子力エネルギーの利点の例

注：NE 直接—原子力エネルギーの直接的な利点

NE 間接—原子力エネルギーの間接的な利点

NE 良好—原子力エネルギーは他のエネルギー技術と比較して良好なパフォーマンスを発揮

NT 直接—原子力エネルギー以外の原子力技術の直接的な利益。

SDG 1：貧困をなくそう	NE 間接：エネルギー消費の大幅拡大以外に貧困から脱出する方法はない。原子力発電は、経済成長を促進する信頼できる大規模な低炭素電力を供給することができ
---------------	---

	る。
SDG 2：飢餓をゼロに	NE 間接：近代的なエネルギー供給は、農業の生産性を大幅に改善することができる。 NE 良好：原子力エネルギーは他の発電技術に比べて土地利用面積が格段に少なく、その分、農業用に土地を利用することができる。 NT 直接：原子炉やその他の原子力施設による放射性同位元素（RI）の製造は、害虫駆除や肥料の改善、収穫量の増加、家畜の健康と生産性の向上、食品の保存と安全性に使用される。放射線照射技術は、病気や生物的・非生物的ストレスに対してより耐性があり、貧しい土壌や様々な気候条件下でより良く成長する作物品種を作る。
SDG 3：すべての人に健康と福祉を	NE 間接：保健サービスは、照明や冷凍、現代設備のためのクリーンエネルギーによって強化される。 NE 良好：原子力エネルギーは、単位発電量当たりの死亡率を含む健康への影響を考慮すると、他のほぼすべてのエネルギー発電技術よりも安全である。 NT 直接：現代の保健サービスは、特にがん治療用に、安全な放射線と放射性同位元素（RI）を定期的に利用している。RI は研究用原子炉やその他の原子力施設で製造される。
SDG 4：質の高い教育をみんなに	NE 間接：信頼できるエネルギー供給が教育に不可欠である。同様に、効果的な原子力プログラムには高学歴の労働力が必要である。
SDG 5：ジェンダー平等を実現しよう	NE 間接：エネルギー貧困のジェンダーの性質上、近代的な持続可能なエネルギーへのアクセスは、時間と労働の負担を軽減し、健康を改善し、企業活動と能力開発（キャパシティ・ビルディング）の機会を提供することによって、女性のエンパワーメント（社会的地位の向上）を高めることができる。
SDG 6：安全な水とトイレを世界中に	NE 間接：原子力発電は、大規模な水衛生活動を支援するために発電することができ、排水を使用して冷却することができる。原子力発電は、人口の増加と経済の拡大に伴い、海水淡水化を支援することができる。 NT 直接：同位体技術は、地下水供給の領域のマッピング、帯水層の補充率や表面水量の決定、水資源汚染の評価、地熱発電所への蒸気供給に適した地下貯蔵量の特定のために利用することができる。
SDG 7：エネルギーをみんなに、そしてクリーンに	NE 直接：原子力発電は、1971～2018年の間に世界の低炭素電力の40%近くを供給した。さらに、原子力は、地域や産業用の有用な熱源であることが証明されている。
SDG 8：働きがいも経済成長も	NE 直接：原子力発電は、手頃な価格で信頼性の高い電力へのアクセスを提供し、経済成長と雇用創出に貢献する。原子力発電所自体は、直接・間接雇用に加え、誘引的な雇用をサポートする。
SDG 9：産業と技術革新の基盤をつくろう	NE 間接：原子力エネルギーは、例えば原子力産業における仮想現実（バーチャルリアリティ）やロボット技術等のイノベーションなどによって、産業やその他のエネルギー依存インフラの経済活動を刺激する。 NT 直接：放射性同位元素と放射線技術は、非破壊検査、電子線・ガンマ線による滅菌、材料加工、文化遺産の保存などの産業用途に使用されている。
SDG 10：人や国の不平等をなくそう	NE 間接：貧困指標は電力へのアクセスの欠如と大いに関係しており、収入とエネルギーの不平等は一緒に対処できることを示唆している。
SDG 11：住み続けられるまちづくりを	NE 間接：近代的で持続可能な都市は、大量のクリーンエネルギーを必要とする。 NE 良好：国連は、世界の人口の68%が2050年には都市に住むと予測している。原子力発電は、土地のフットプリント（占有面積）が非常に小さく、大規模な都市やメ

	ガシティに電力や暖冷房を届けることができる。
SDG 12：つくる責任、つかう責任	NE 間接：クリーンエネルギーは、廃棄物を削減し、資源効率を促進するのに役立つ。 NE 良好：原子力発電は資源の必要量が少なく、責任を持って廃棄物を管理する。
SDG 13：気候変動に具体的な対策を	NE 直接：原子力エネルギーは、気候にレジリエントなエネルギーシステムと経済を支えることができる。 NE 良好：気候緩和の観点から、原子力発電は最も低炭素なエネルギー技術の一つである。 NT 直接：放射性同位体技術は、気候変動適応と GHG モニタリングの両方において重要な役割を果たすことができる。
SDG 14：海の豊かさを守ろう	NE 間接：原子力発電は化石燃料に取って代わるものであり、海からの抽出と輸送を必要としない（注：ここの部分は日本語訳が難しいため、原文をご参照下さい。） NE 良好：原子力は、他のエネルギー技術と比較して海洋の生態毒性への影響が低い。 NT 直接：同位体技術は、海洋の健全性や酸性化や有害藻類の異常発生などの海洋の現象を支援、監視し、プラスチック汚染を含む海洋・沿岸環境における汚染や放射能の管理をサポートすることができる。
SDG 15：陸の豊かさを守ろう	NE 間接：原子力発電は、生態系や生物多様性への影響が比較的小さく、持続可能なエネルギーオプションとして EU のタクソノミーに含めることが推奨されている。 NE 良好：原子力エネルギーは、他の低炭素電源よりも少ないスペースで済み、空気をクリーンに保ちながら、化石燃料を代替することができる。 NT 直接：原子力技術は、汚染物質が環境に害を与えるのを追跡、停止し、土壌の質を評価し、作物がどのように栄養素を吸収するのか、また土壌がどのように動くかを研究するために使用される。これは、砂漠化対策のためにも使用できる。
SDG 16：平和と公正をすべての人に	NE 間接：エネルギーの利用可能性を高めることは、平和と公正を奨励する。
SDG 17：パートナーシップで目標を達成しよう	NE 直接：原子力発電は、平和と対話の重要な手段である強力な国際パートナーシップを奨励する。 NT 直接：原子力技術は、平和と対話のための重要な手段である強力な国際パートナーシップを奨励する。

以上