

新型炉部会セッション

再生可能エネルギー導入拡大を見据えた新型炉に期待される新たな技術開発
New technology development expected for advanced reactors toward massive expansion of
renewable energy capacity

(1) 再エネ協調技術開発の国内外動向

(1) Development trends of nuclear-renewable hybrid energy technologies in Japan and foreign countries

*山野 秀将¹, 豊岡 淳一¹¹ 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

2022 年 12 月、「GX（グリーン・トランスフォーメーション）実行会議」が開かれ、「GX 実現に向けた基本方針 ～今後 10 年を見据えたロードマップ～」が取りまとめられ、2023 年 2 月、閣議決定された。同基本方針は、エネルギー安定供給の確保に向け、徹底した省エネに加え、再生可能エネルギー（再エネ）や原子力などのエネルギー自給率の向上に資する脱炭素電源への転換など GX に向けた脱炭素の取組を進めるとともに、GX の実現に向け、「成長志向型カーボンプライシング構想」の実現・実行を行うとされている。2023 年 7 月、それらを具体化した「脱炭素成長型経済構造移行推進戦略」（GX 推進戦略）が閣議決定され、2023 年 12 月、GX 分野別投資戦略が策定された。GX 経済移行債を活用した投資促進策により、GX の取組が加速している状況にある。2024 年 5 月、GX 実行会議にて、今後、経済社会の大変革と脱炭素の取組を一体的に検討し、2040 年を見据えた国家戦略「GX2040 ビジョン」を策定する方針が示された¹⁾。2024 年からは年度内をめどとした次期エネルギー基本計画の改定のため、基本政策分科会にて議論が進められている²⁾。

2021 年 10 月の第 6 次エネルギー基本計画の閣議決定以降、ロシアによるウクライナ侵略や、中東情勢の緊迫化など、地政学リスクの高まりを受け、エネルギー安全保障の重要性が増している。また、カーボンニュートラルに向けて、エネルギー安定供給や脱炭素化に向けたエネルギー構造転換を、自国の経済成長につなげるための政策を強化する必要がある。原子力については、エネルギー安全保障に寄与し脱炭素効果の高い電源とされ、最大限活用することが期待される。GX 基本方針には、「エネルギー基本計画を踏まえて原子力を活用していくため、原子力の安全性向上を目指し、新たな安全メカニズムを組み込んだ次世代革新炉の開発・建設に取り組む。そして、地域の理解確保を大前提に、廃炉を決定した原発の敷地内での次世代革新炉への建て替えを対象として、六ヶ所再処理工場の竣工等のバックエンド問題の進展も踏まえつつ具体化を進めていく」と記述されている。原子力（次世代革新炉）の分野別投資戦略では、高速炉（実証炉）と高温ガス炉（実証炉）に GX 先行投資支援がなされるとともに、原子力サプライチェーンや原子力人材などの基盤強化支援を行っている。

2030 年度の電源構成は再エネを 36～38%程度、原子力を 20～22%程度を見込んでおり、残りを天然ガスや石炭といった火力とする計画である。2022 年時点の電源構成は、再エネ 22%、原子力 6%、化石火力 73%となっている³⁾。再エネ・原子力共に引き上げる必要がある一方、火力発電については、2050 年カーボンニュートラルに向けて火力発電の比率をできる限り引き下げる方針である。しかしながら、当面の間、化石燃料による火力発電は太陽光発電や風力発電のもつ再エネの変動性を補う調整力としての役割を果たす必要がある。次世代革新炉（新型炉）は、再エネの変動性を補う調整力という新たな価値⁴⁾を有しており、原子力の新たな活用方法を提起することができる。本報では、再生可能エネルギー導入拡大を見据えた新型炉に期待される新たな技術開発として、IAEA と GIF の取組を中心に、再エネ協調技術開発の国内外動向を紹介する。

*Hidemasa Yamano¹, Junichi Toyooka¹¹Japan Atomic Energy Agency

2. 国際機関の取組

2-1. IAEA 報告書

2018 年 10 月、IAEA では、Technical Meeting on Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems for Decarbonized Energy Production and Cogeneration を開催し、各国における原子力-再エネ協調システムについて紹介され、開発資金や戦略、計画管理、技術的な課題が議論された⁵⁾。それを基に、包括的に整理された報告書が 2023 年に発行された⁶⁾。ここでは、その報告書内の再エネ協調技術を紹介する。

2-1-1. 熱

原子力発電は熱エネルギーを電気エネルギーに変換しており、再エネ集光型太陽熱発電やバイオマス発電といった再エネ発電技術と同じである。調整力を備えた原子力エネルギーと再エネを組み合わせることで、変動性再エネのエネルギー損失を最小化でき、従来型化石燃料火力発電と比肩できる。このような原子力-再エネ協調システムは主要国で表明している二酸化炭素排出削減に貢献できる。また、発電以外にも、産業界での高温熱利用や地域暖房での低温熱利用という利点を有している。食料サプライチェーンにもエネルギーは重要な役割を果たしており、農業や食料市場においても原子力-再エネ協調システムは貢献できる。

2-1-2. 水素

世界の水素製造は、天然ガスの改質によるものが主流であり、2019 年に 60 Mt/year (8.5 EJ/year)を超えている。加えて、40 Mt/year (5.7 EJ/year)が石油精製や製鉄といった産業での副生成物として生産され、ほぼ全てがプロセス内で使用されている。水素はエネルギー貯蔵の役割を担うことも可能であり、エネルギーキャリアアとして活用していくことが期待される。2050 年には、世界で 550 Mt/year (78 EJ/year) の潜在的な需要が見積もられており、蓄電、運輸、産業エネルギー、炭素利用プロセスの原料、鉄鉱石の還元等への利用が想定される。

IAEA はガスタービン発電と水素製造を可能とする GTHT300C を検討済みであり、45-50%の高効率発電を達成し、他電源と競合できる技術を有している。負荷追従運転も可能であり、変動性再エネと協調できる技術である。また、水素製造法として、化石燃料を用いた製造法に加え、熱化学法による水分解、低温水電解や高温水蒸気電解があり、原子力-再エネ協調システムとして高温水蒸気電解との組み合わせを検討したものが多い。軽水炉でも 800℃まで過熱した水蒸気を用いる方法も検討されている。原子力-再エネ協調システムによる水素製造は市場と適合さえすれば有力な技術オプションである。

2-1-3. その他

世界では浄水を必要とする国が多い。既存原子力発電所では 250 炉年の水浄化（海水脱塩化）の経験がある。我が国でも、大飯、高浜、伊方、玄海の各原子力発電所で淡水化装置が運転されていると報告されている。世界の浄水化問題に対して、原子力-再エネ協調システムは貢献できる。

セメント製造過程や化学産業に必要な熱エネルギーを原子力-再エネ協調システムで賄うことが期待される。また、集光型太陽熱発電や海洋温度差発電との組み合わせが考えられる。

2-2. GIF ワークショップ

第四世代原子力国際フォーラム（GIF）では、原子力熱の非電力利用（Non-Electric Applications of Nuclear Heat: NEANH）に関するタスクフォース（NEANH-TF）を立ち上げ⁷⁾、2022 年 10 月に第 1 回ワークショップをカナダで開催した。GIF では様々な炉型があり、柔軟性を活用することで再エネ主流のエネルギー市場での共存と統合を可能にし、送電網の安定性や品質を高めることができる。ワークショップでは、第 4 世代原子炉と組み合わせた非電力利用に関する進行中の活動の紹介、可能性のある利点を追求した研究について技術開発者とエンドユーザーといった利害関係者による議論が行われ知識レベルの向上が図られた。2024 年 4 月には第 2 回ワークショップを韓国で開催した⁸⁾。参加者は、ネットゼロの未来に向けた技術の進歩を追求するため、原子力エネルギーを産業用途に結びつける際の具体的なニーズ、要件、潜在的な課題や懸念事項に関する情報を共有した。主要な結論は以下のとおり。

- ・ 原子力の非電力利用には有益な歴史があるが、それは軽水炉技術を用いた低温用途に限られる。より高温の産業用途では、異なる点に考慮が必要であるが、第四世代原子炉技術の利用により、多くのメリッ

トを受けられる可能性がある。

- ・ より高い温度を必要とする産業では、燃料転換 (fuel switching) が容易ではなく、既存のプロセスに大幅な変更が必要である。この移行を可能にするには、統合システム分析と財政的支援が必要と考えられる。
- ・ 産業の脱炭素化のための熱と電力の需要は増加すると考えられる。
- ・ エンドユーザーが事業活動に原子力を活用する機会や可能性を評価するための報告書やツールが存在する。原子力業界と産業界との関わりを深めることが推奨される。
- ・ 産業部門での排出削減のために原子力を利用する大きなチャンスがあり、システムが商業的に利用可能となれば、エンドユーザーはすぐにでも原子力を導入するだろう。
- ・ 水素製造は特に関心が高く、水素製造における原子力の競争力を理解するためにはバリューチェーン分析が必要である。
- ・ NEANH には規制上の不確実性があり、リスク情報に基づいたグレーデッドアプローチによるケースバイケースのシステム分析が必要である。他方、明らかに克服できない技術的障壁はない。
- ・ 特有の規制環境、国内政策、代替エネルギーオプションの利用可能性、産業ユーザーのエネルギー需要およびサプライチェーン能力により、NEANH のビジネスチャンスは、地理的な差異が明確である。
- ・ この分野の進捗状況を伝えることも含め、原子力部門を超えた協力体制の強化が不可欠である。規制当局、投資家、一般市民の信頼を築くためには、コミュニケーションと透明性が重要である。
- ・ 今後のワークショップには、エンドユーザーや、金融機関、投資家、保険会社など、関連性のあるステークホルダーを追加で参加させるべきである。

3. 国内外の再エネ協調技術

3-1. 統合エネルギーシステム

再エネによる電力供給の急速な拡大に伴い、その変動性を補完する制御可能な電力、熱の供給源としての原子力、特に SMR への関心が拡大している。再エネ、原子力、炭素回収付化石燃料等のエネルギー源による電力、熱、水素等エネルギー供給全体の最適化を図る「統合エネルギーシステム (IES)」⁹⁾の検討が各国で開始されている。

統合エネルギーシステム (IES) は、複数のエネルギー源 (再生可能エネルギー、原子力、化石燃料、バイオエネルギー) を組み合わせ、複数のベクトル (電気、熱、水素、燃料) に変換して、複数のユーザー (建物、産業、輸送) に提供する。統合アプローチにより、各国はさまざまな技術の利点を活用して、環境への影響を最小限に抑えながら、信頼性が高く低コストのエネルギーを提供できる。統合エネルギーシステムの個々のコンポーネントは成熟している可能性があるが、多くの場合、これらを一貫性のある機能的なシステムに統合するには、さらなる研究、開発、および実証が必要になる。

ネットゼロの未来への移行には、再生可能エネルギーや原子力などの多様なエネルギー源と、クリーンな電気、熱、水素などを供給するためのエネルギー貯蔵の統合が必要である。この必要性を認識し、カナダ、フランス、日本、英国、米国の 8 つの国立研究所等が力を合わせ、統合エネルギーシステムの進歩を先導し、年次報告書(2023)としてまとめた¹⁰⁾。2022 年 1 月、8 つの国立研究所等が初のサミットを開催し、世界中の大幅な脱炭素化に向けた統合エネルギーシステムの極めて重要な役割を強調した。2023 年 1 月、国立研究所等はロンドンで会合し、今後の協力計画を議論するとともに、各産業エネルギーの脱炭素化、ガス供給網の水素への転換、電解装置の開発に関する洞察が共有された。

3-2. 蓄熱

2020 年に米国エネルギー省により支援が決定された NatriumTM は 2030 年頃までに運転開始を目指して開発が進められており、熱利用として硝酸系溶融塩を有した蓄熱システムを備えている (定格 345MWe に対して、5.5hr の間に 500MWe への発電量の増大を実現する蓄熱が可能)¹¹⁾。蓄熱技術そのものは硝酸系溶融塩を熱媒体とした顕熱蓄熱技術が国外の太陽熱発電 (500℃前後の温度範囲) 等で既に実用化されており、技術開発の余地は小さい¹²⁾。仏国でもスタートアップ企業が溶融塩蓄熱を備えた高速炉開発に着手すると 2023 年 3 月に発表された¹³⁾。我が国でも、2023 年 3 月に次世代革新炉に必要な研究開発基盤として新たな高速中性子

照射場を提案しており、蓄熱システムとの組合せによる再生可能エネルギーを補完する調整電源としての役割に期待が高まっている¹⁴⁾。

電力・熱供給を目的として、米国では、X-energy はテキサス州シードリフトの Dow プラントへの Xe-100 (4 基) を導入することを計画している。中国では、2023 年 12 月、HTR-PM (高温ガス炉) の運転を開始し、2024 年 3 月、HTR-PM による地域暖房プロジェクトを開始した。また、海陽原子力発電所 (PWR) からの熱利用プロジェクトを開始した。ポーランドでは、化学工場への熱供給の目的での高温ガス炉の活用を検討している。

3-3. 水素製造

米国では、既存の原子力発電炉を利用した水素製造の実証プロジェクト 4 件を国がサポートしている。

- ・ Nine Mile Point Nuclear Station (ニューヨーク州) (2023 年 3 月：低温電気分解による水素製造を開始)
- ・ Davis-Besse Nuclear Power Station (オハイオ州) (低温電気分解)
- ・ Prairie Island Nuclear Generating Station (ミネソタ州) (高温電気分解)
- ・ Palo Verde Generating Station (アリゾナ州) (低温電気分解)

2023 年 10 月、DOE は「地域クリーン水素ハブ」として 7 地域 (16 州をカバー) を選定したことを発表した。超党派のインフラ投資・雇用法に基づき計 70 億 US\$ を投資するものである。

ロシアでは、2023 年、コラ原子力発電所に電解装置を設置し、初めて水素製造の実証に成功した。

韓国では、2024 年 6 月、Hyundai E&C、韓国水力・原子力会社 (KHNP) 他韓国企業 8 社は 2027 年までに原子力水素製造実証プラント (10MW) を建設するための MOU を締結した。

英国では、2021 年 8 月、「水素戦略」を発表した¹⁵⁾。原子力に関する記載には、脱炭素電源として、小規模原子力技術に投資しつつ、新規大規模原子力技術を追求するとし、2030 年代半ば以降の水素製造源として原子力 (SMR 及び AMR による熱、電力供給) が記載された。具体的には、水電解、高温水蒸気電解、熱化学法に原子力を想定しており、それぞれ、2020 年代、2030 年代及び 2030 年代後半の適用を想定している。

我が国でも、2023 年 6 月、「水素基本戦略」を発表した¹⁶⁾。全体方針、水素産業戦略 (水素の産業競争力強化に向けた方針)、水素保安戦略 (水素の安全な利活用に向けた方針) が記述されている。また、HTTR による水素製造実証試験を進めている¹⁷⁾。

4. おわりに

再生可能エネルギー導入拡大を見据えた新型炉に期待される新たな技術開発として、IAEA と GIF の取組を中心に、再エネ協調技術開発の国内外動向を紹介した。世界中で再エネ導入拡大を目指している中、統合エネルギーシステム、蓄熱、水素製造といった再エネ協調技術により、原子力の新たな価値が生み出される。高速炉や高温ガス炉といった新型炉は高温域の熱エネルギーを提供でき、原子力-再エネ協調システムとして活かしやすい。ただし、諸外国に比べて、日本は再エネ協調技術開発が遅れている。民間の活力を活かした革新炉開発を国が支援していき、日本の原子力の人材・技術・産業基盤の維持・強化に繋げていくことが重要である。

参考文献

- 1) https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai11/index.html
- 2) https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/
- 3) https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2024/058/058_004.pdf
- 4) 大野、山野, “社会動向を踏まえた新型炉の価値 再生可能エネルギーと共存できる新型炉によるカーボンニュートラルへの貢献”, 日本原子力学会誌 Vol.65, No.7, pp.438-442 (2023).
- 5) <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1885web.pdf>
- 6) IAEA, Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems, NR-T-1.24, Dec. 2022.
<https://www.iaea.org/publications/15098/nuclear-renewable-hybrid-energy-systems>
- 7) https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_207897/task-force-on-non-electric-applications-of-nuclear-heat

- 8) NEANH-TF, Workshop on Non-Electric and Hybrid Applications of Nuclear Energy, April 26, 2024, Busan, Korea.
- 9) <https://ies.inl.gov/SitePages/Home.aspx>
- 10) https://www.nnl.co.uk/wp-content/uploads/2023/09/GNL_IES_Annual_Report_23.pdf
- 11) Natrium™ Reactor and Integrated Energy Storage, https://www.terrapower.com/downloads/Natrium_Technology.pdf
- 12) NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版 第5章 太陽熱発電・太陽熱利用
<https://www.nedo.go.jp/content/100544820.pdf>13)
- 13) <https://www.cea.fr/english/Pages/News/cea-presents-two-nuclear-startups-hexana-and-stellaria.aspx>
- 14) 文部科学省, “次世代革新炉の開発に必要な研究開発基盤の整備に関する提言”, 令和5年3月28日
https://www.mext.go.jp/content/20230328-mxt_genshi-000028687_01.pdf
- 15) <https://www.gov.uk/government/publications/uk-hydrogen-strategy>
- 16) https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_2.pdf
- 17) <https://www.jaea.go.jp/02/press2022/p22042202/>