

Planning Lecture | Technical division and Network : Advanced Reactor Division

📅 Thu. Sep 12, 2024 1:00 PM - 2:30 PM JST | Thu. Sep 12, 2024 4:00 AM - 5:30 AM UTC 🏢 Room
G(Recture RoomsB 1F B101)

[2G_PL] New technology development expected for advanced reactors toward massive expansion of renewable energy capacity

Chair:Takaaki Sakai(Tokai Univ.)

[2G_PL01]

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

*Hidemasa Yamano¹ (1. JAEA)

[2G_PL02]

Advanced reactors and energy mix

*Ryoichi Komiyama¹ (1. UTokyo)

[2G_PL03]

Annual simulation of fast reactor with thermal energy storage based on price following model

*Shoma Fujii¹ (1. UTokyo)

[2G_PL04]

Safety design technologies of fast reactor with thermal energy storage

*Kazuya Takano¹ (1. JAEA)

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/>

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

(2) 新型炉とエネルギーミックス

(2) Advanced reactors and energy mix

*小宮山 涼一¹¹ 東京大学

1. はじめに

エネルギー政策での 3E（安定供給、経済効率性、環境性）+ S（安全性）の基本方針を踏まえ、2050 年までのカーボンニュートラル達成が目標とされている¹。また、近年の自然災害の激甚化を踏まえた強靱化(レジリエンス)や、再生可能エネルギー主力電源化、非効率石炭火力のフェードアウトの方針等を踏まえ、それらの様々な方針に適合した電力エネルギーシステムの構築が重要であると考えられる。その中で近年、エネルギーセキュリティや脱炭素への関心等を背景に、新型炉への注目が内外で高まり、例えば、小型モジュール炉（SMR）は安全性や機動性、水素製造等の多目的利用、そして分散配置可能性を踏まえ、エネルギー・環境問題解決への貢献が期待される。一方、SMR 等の新型炉の導入可能性を考える上で、エネルギーシステムの将来像を具体的に示すことが重要になる。将来像を示すことで、例えば、再エネ大量導入時に求められる新型炉に必要とされる具体的な技術要件への示唆を得ることが可能になると考えられる。中でも、太陽光発電や風力発電の拡大に向けては、電力安定供給対策強化が重要となり、系統の供給力や調整力の確保、電力系統制約などの諸課題への取組が必要となる。調整力や電力貯蔵等による電力系統の柔軟性向上、送配電線容量の増強、電力系統安定性強化(周波数や電圧安定化)などが求められる中、再エネ大量導入時の新型炉に望まれる技術性能を客観的に検討することが大切になると考えられる。

筆者らは、カーボンニュートラル、再エネ主力電源化、電力レジリエンス強化など電力エネルギー市場を取り巻く様々な要因を踏まえ、既存の大型原子炉や小型軽水炉、水素製造が可能で機動性に優れた高温ガス炉、燃料の安定供給性に優れた小型高速炉を組み込んだ最適導入シナリオを導出可能な数値シミュレーション手法の開発を進め(図 1)、原子力の最大限の活用と再エネ大量導入によるエネルギー安定供給、脱炭素を実現するエネルギーシステムの定量的分析をこれまで実施しており²⁾、本発表では主として電力部門での主要な分析結果に関して報告する。

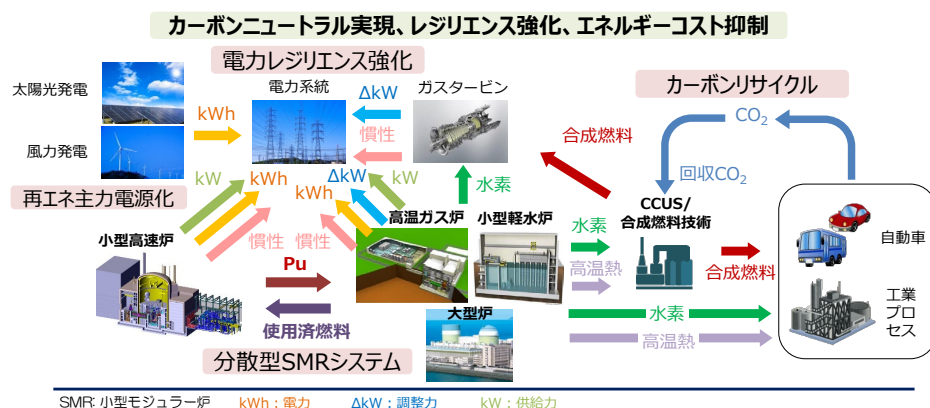


図 1 既存大型炉、革新炉、再エネを活用したエネルギーシステムの概念図

*Ryoichi Komiya¹¹The University of Tokyo

2. エネルギーシステムの数値シミュレーション手法の開発

コスト最小化や脱炭素化分析で利用されるエネルギーモデル(ボトムアップ型技術選択モデル)の多くは、電力部門の時間・空間的解像度が十分な水準に達しておらず、導入拡大が進展する自然変動電源(太陽光発電、風力発電)の出力変動や送電線による電力輸送制約、蓄電池などの需給調整技術の詳細な技術性能および動的挙動を詳細に組み込める仕様には至っていない。そこで本研究では、再生可能エネルギー発電の最適導入量評価が可能な時間解像度を有し、日本全体の地域間・地内の主要な電力基幹システムを考慮した地理的解像度の下で、電力・水素併給が可能な SMR の導入ポテンシャルの地域性、SMR の負荷追従性能や最低出力条件等の工学的制約条件等を考慮可能な電力需給分析ツールを開発する。また、電力部門に加えて燃料供給部門を含んだモデルを開発して、SMR によるクリーン水素製造・CO₂ 再資源化(カーボン・リサイクル)等への導入可能性を評価した。これにより、脱炭素・レジリエンス・再生可能エネルギー主力電源化といった社会ニーズに適合するための SMR のあり方に関する総合的検討が可能になると考えられる。

電力部門の分析では、日本全体の電力基幹システム(集中型電源や再エネ電源が主として接続される上位システム)を約 400 地点の母線、約 500 本の基幹送電線でモデル化の上、レジリエンス強化(電力システムの分散化、システムの供給力・調整力の確保、電力システムの安定性強化、電源投資インセンティブの維持等)とシステムコストや燃料消費量を最小化可能な電源構成と電力需給運用、原子力・再生可能エネルギー共存戦略、および SMR の地点別導入量を分析可能なツールを開発した。モデルでは、軽水炉 SMR、高温ガス炉 SMR、高速炉 SMR を考慮し、さらに年間 8,760 時間にて送電線制約ならびに技術間のコスト競合(例えば、コスト低下が進む自然変動電源、システム用蓄電池や、水素混焼・専焼火力などとの経済的競合)を考慮しており、経済合理的な観点から中立的に SMR の最適導入量と最適出力配分に関する数値シミュレーションを可能としている。分析結果の一例では、再エネ大量導入時においては、一定の技術的想定の下では、負荷追従性能の低い大型原子炉の年間稼働率が低下するため、大型炉の活用には制約が顕在化する可能性のある一方、負荷追従性能の高い SMR は、一定の建設費で建設可能と想定した場合においては、再エネとも親和性の高い調整力を有する技術オプションとして選択される可能性が示唆される結果となった。

3. おわりに

本研究では、自然変動電源の影響を考慮した分析ツールを開発し、SMR の導入可能性や SMR に求められる技術要件等を分析した。今後の課題として、将来の電力システムを展望した場合、DER(Distributed Energy Resource)や Grid Edge Technology と呼ばれる需要家に近い配電システムに接続する調整力等を有する技術の普及進展が、SMR の導入可能性に影響を与える可能性も考えられる。これまでのアプローチでは、主に基幹システムといった上位側の電力システムのみを分析対象としているが、自然変動電源の接続量拡大が見込まれるローカルシステムや配電システムなど電力の下位システムを考慮に入れた拡張版モデルを開発し、需要端技術による電力需給安定化の効果を考慮した SMR 導入可能性評価を行う必要などが挙げられる。

謝辞

本発表は JSPS 科研費 JP22H00572、JSPS 科研費 24K08320、文部科学省原子力システム研究開発事業 JPMXD0220354480 の助成を受けた。

参考文献

- 1) 内閣官房他 ”2050 年カーボンニュートラル に伴うグリーン成長戦略” 令和 3 年 6 月 18 日
<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf>
- 2) 小宮山” 脱炭素化・レジリエンス強化に資する分散型小型モジュラー炉を活用したエネルギーシステムの統合シミュレーション手法開発” 文部科学省国家課題対応型研究開発事業 令和 3 年度「原子力システム研究開発事業」成果報告会 https://www.nsystemkoubo.jp/result/r03/document/5_r3sys_seika.pdf

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

(3) 蓄熱型高速炉の価格追従モデルに基づく通年シミュレーション

(3) Annual simulation of fast reactor with thermal energy storage based on price following model

*藤井 祥万¹

¹ 東京大学

1. はじめに

近年、太陽光発電を中心とする変動性再生可能エネルギー（以下再エネ）の大量導入に伴い、エネルギーストレージの重要性が上昇しているなか、蓄熱技術を用いたエネルギー貯蔵が注目されている。いわゆる"Carnot Batteries"と呼ばれる、再エネ余剰電力を熱として貯蔵し、需要に応じて電力に再変換するプロセス^[1]や、電力には再変換せず、直接熱利用するプロセス^[2]などが検討されている。原子力発電に関しては、炉熱を蓄熱し、需要に応じて発電することでフレキシビリティを向上させる観点からも検討されてきており^[3]、近年では再エネとの協調の観点からの研究開発や実証が進んでいる^[4]。ただし、コンセプトや蓄熱材、適用温度域などはよく議論されているが、発電システムとしての年間シミュレーションによる検討などは限定的である。

そこで本研究では小型モジュール炉（Small Modular Reactor、以下 SMR）への熔融塩蓄熱の適用を想定し、通年の運転パターンを模擬する価格追従モデルを開発、シミュレーションを実施し、蓄熱の導入効果を検討した。

2. 価格追従モデルによる蓄熱技術を導入した年間シミュレーション

2-1. 価格追従モデルの開発

図 1 に本研究で検討したシステムの概要図を示す。蓄熱方式としては熔融塩を直接熱媒として用いる二槽式とした。熔融塩は低温側で 290 °C とし、SMR の冷却材のナトリウムとの熱交換で 560 °C まで昇温され、高温タンクに貯蔵されることとした。高温タンクの熔融塩は蒸気発生器に送られ、12.6 MPa/370 °C の過熱蒸気を生成すると仮定した。なお、SMR からの熱出力は一定とした。また、比較のために入熱を太陽光発電とした P2H2P (Power to Heat to Power)のプロセスも試算した。図 1 に示すように太陽光発電でヒーターを駆動し、太陽光由来の入熱により熔融塩を昇温、SMR のケースと同様に 560 °C まで昇温させると仮定した。

発電出力については、スポット市場価格に応じて発電量を調整する、価格追従モデルを新たに構築した^[5]。制約条件としては、設定する熔融塩量に対応する熔融塩タンクの上限・下限、および蒸気タービンの定格・最低負荷（定格の 20%と仮定）の 4 条件を考慮した。

まず入熱と出熱のバランスを取るサイクル時間を戦略的放熱期間 t_{cycle} と定義した。蒸気タービンの最低出力に対応する入熱量 $q_{\text{in_min}}$ は維持しなければならないため、戦略的放熱期間内で最低出力を維持する合計投入熱量 $Q_{\text{in_min}}$ は式(1)のように表せる。

$$Q_{\text{in_min}} = q_{\text{in_min}} \times t_{\text{cycle}} \quad (1)$$

*Shoma Fujii¹

¹The University of Tokyo

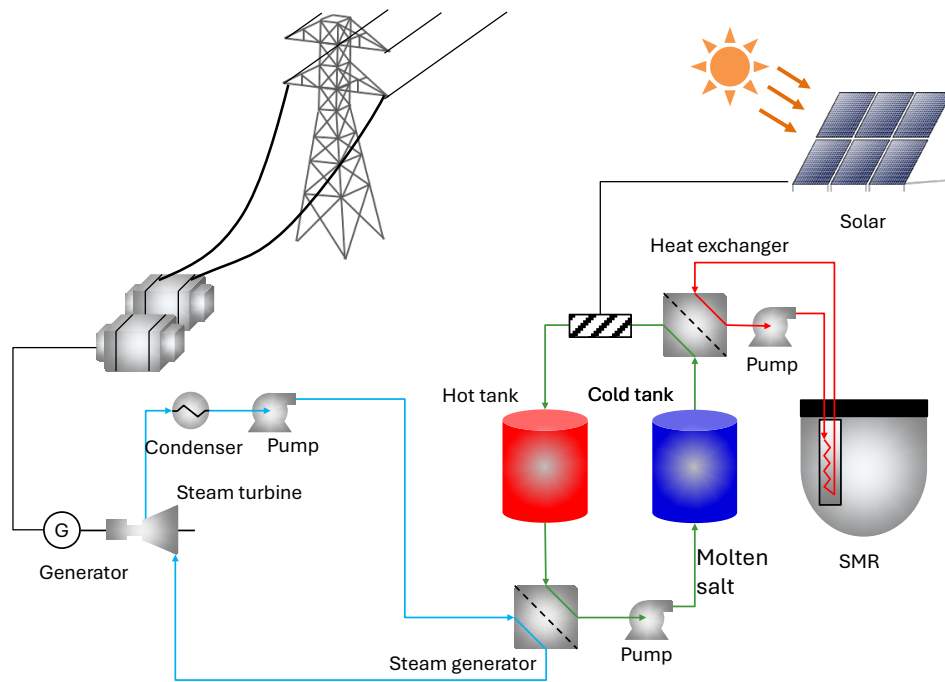


図1 小型モジュール炉および太陽光発電を入熱源とする溶融塩蓄熱システムの概要図

また、戦略的放熱期間中での入熱量 $Q_{in}(t)$ の合計は1時間あたりの入熱量 $q_{in}(t)$ を用いて式(2)のように表せる。

$$Q_{in}(t) = \int_{t_i}^{t_i+t_{cycle}} q_{in}(t) dt \quad (2)$$

式(3)で示す戦略的放熱期間内 ($t_i \sim t_i+t_{cycle}$) における、一定出力で発電し続けた場合のスポット価格の合計と時刻 t におけるスポット価格 $c_{spot}(t)$ の比 $x(t)$ を用いて、 $Q_{in}(t)$ と Q_{in_min} の差分の熱量を配分し、式(4)に示すように最低出力に対応する入熱量 q_{in_min} を加算することで戦略的放熱期間中において入熱量をスポット価格が高い時間帯から優先的に出熱に割り当てる出熱パターンを模擬することが可能であり、この出熱パターンを理想的な出熱パターン $q_{out_1}(t)$ として設定した。なお、 $q_{out_1}(t)$ はタンクの上限・下限制約は考慮していない。

$$x(t) = \frac{c_{spot}(t)}{\int_{t_i}^{t_i+t_{cycle}} c_{spot}(t) dt} \quad (3)$$

$$q_{out_1}(t) = q_{in_min} + [Q_{in}(t) - Q_{in_min}] x(t) \quad (4)$$

次にタービンの上限、下限の制約下において、式(5)に示すように入熱と同じ挙動を示すカーブ $q_{out_2}(t)$ を設定した。

$$q_{out_2}(t) = q_{in}(t) \quad (5)$$

このカーブ $q_{out_2}(t)$ は、スポット市場価格には追従しないが、入熱を蓄熱せずに、溶融塩を介してそのまま出熱するため、高温タンク、低温タンクの液面が変化せず、必ずタンクの上限・下限の制約を満たすことができる。以上の理想的な出熱カーブ $q_{out_1}(t)$ と蓄熱機能を利用しない $q_{out_2}(t)$ の間を式(6)のように $\alpha=0 \sim 1$ まで0.1刻みで11段階に分割し、サイクル内で制約条件をすべて満たす α を決定、最終的な出熱カーブ $q_{out}(t)$ を設

定した。以上により、タービンの上限・下限、タンクの上限・下限全ての制約を $\alpha=0\sim1$ の間のいずれかのカーブで満たすことが可能である。

$$q_{\text{out}}(t) = (1-\alpha)q_{\text{out}_1}(t) + \alpha q_{\text{out}_2}(t) \quad (6)$$

以上の価格追従モデルを用いて、ケーススタディとして九州電力の 2022 年 4 月 1 日～2023 年 3 月 31 日までの 1 時間ごとの 1 年間のスポット市場価格のデータ^[6]を用いて 200 MWe 級の SMR に蓄熱機能を付与した場合の計算を実施した。蓄熱機能として、30000 ton の熔融塩を使用することとし、この場合の蒸気タービンの定格出力を 350 MWe とした。また、太陽光発電については同じ期間中の九州電力管内の太陽光発電^[6]の 5% を入熱とし、蒸気タービンの定格出力は 100 MW、熔融塩量は SMR のケースと同じ 30000 ton として試算した。戦略的放熱期間は SMR の場合は 12 時間、太陽光発電導入時には 168 時間と設定した。

2-2. コスト評価

蓄熱を組み込んだ発電システムのコスト評価を実施した。SMR の CAPEX (Capital Expenditure)、OPEX (Operating Expenses)は文献^[7]を参考に、スケールファクターを考慮して決定した。その他の蒸気タービン、タンク類の CAPEX は化学装置コストハンドブック等^[8]を用いて算出し、現在の価格に修正して算出した。また、蓄熱の OPEX に関しては、産業連関表の石油火力発電部門の投入係数表^[9]を用いて、設備費の 5%として算出した機械修理費をベースに賃金や広告、廃棄物処理などのその他経費を算出した。

3. シミュレーション結果

図 2 に定格発電出力 200 MWe の SMR に 30000 ton の熔融塩を用いた蓄熱を付加した場合の年間シミュレーションのうち、4 日間のシミュレーション結果を示す。図中、Heat input は SMR からの炉熱回収を示しており、Output は熔融塩を用いて生成した蒸気により発電した出力を示している。図からわかるように一定の熱入力に対してスポット市場価格が安価なときには発電出力を落として運転し、高価なときに出力を増大していることがわかる。SMR 単独で発電した場合の年間の発電時平均スポット市場価格は 14.4 円/kWh であるのに対して、蓄熱機能を付加した場合の発電時平均スポット市場価格は 16.7 円/kWh となり、蓄熱機能を付加することでより高い価格のときに発電できていることがわかる。現在日本のスポット市場価格は太陽光発電の影響を大きく受けているため、この結果は SMR に蓄熱機能を付与することで、日中の発電量を低減させ、夜間の発電量を増大させることが可能であることを意味しており、太陽光発電のさらなる導入を推進することが可能となる。また、SMR 単独で発電した場合の年間の発電量は 1757 GWh であるのに対して、蓄熱機能を付加した場合の年間発電量は 1686 GWh となり、わずかに減少する。これはフレキシビリティを確保するために定格発電出力 200 MWe の SMR に対して 350 MWe を定格とする蒸気タービンを導入しており、年間の平均のタービン負荷率とそれに伴う熱消費率が低下したことが理由である。

また、図 3 に太陽光発電を入熱源とした場合の結果を示す。価格追従モデルにより、日中のスポット市場価格が安価なときに蓄熱し、夜間のスポット市場価格が高価になる時間帯に優先的に出熱することにより、蓄熱時平均スポット市場価格が 10.1 円/kWh であるのに対して、発電時平均スポット市場価格は 15.0 円/kWh となった。年間の発電量は 196 GWh であり、太陽光発電に蓄熱機能を付与した場合と比較して SMR の場合は同じ熔融塩量において約 9 倍の発電量を確保できることがわかった。

4. 結言

価格追従モデルによる通年シミュレーションにより SMR および太陽光発電に蓄熱機能を付与した場合の効果を検討した結果、同じ蓄熱容量に対して SMR は太陽光発電よりも多い発電量を確保できる一方、太陽光発電に蓄熱機能を付与した場合の方が、スポット市場価格が安価な日中に優先的に蓄熱することが可能なため、蓄熱と出熱の価格差をつけられることがわかった。

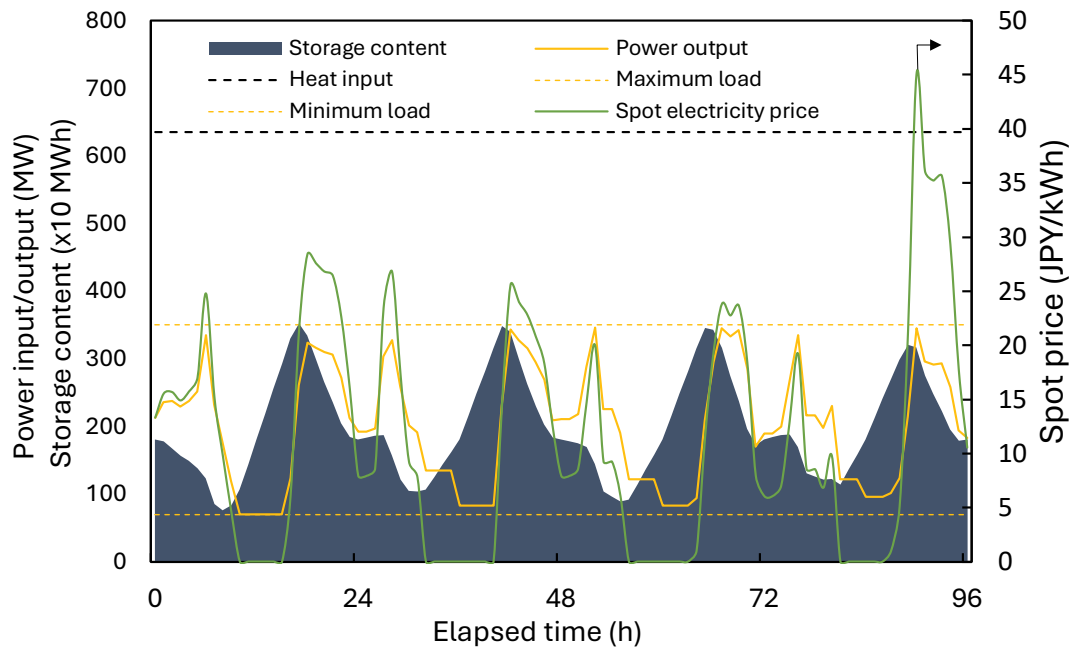


図2 SMRに蓄熱機能を付与した場合のシミュレーション結果

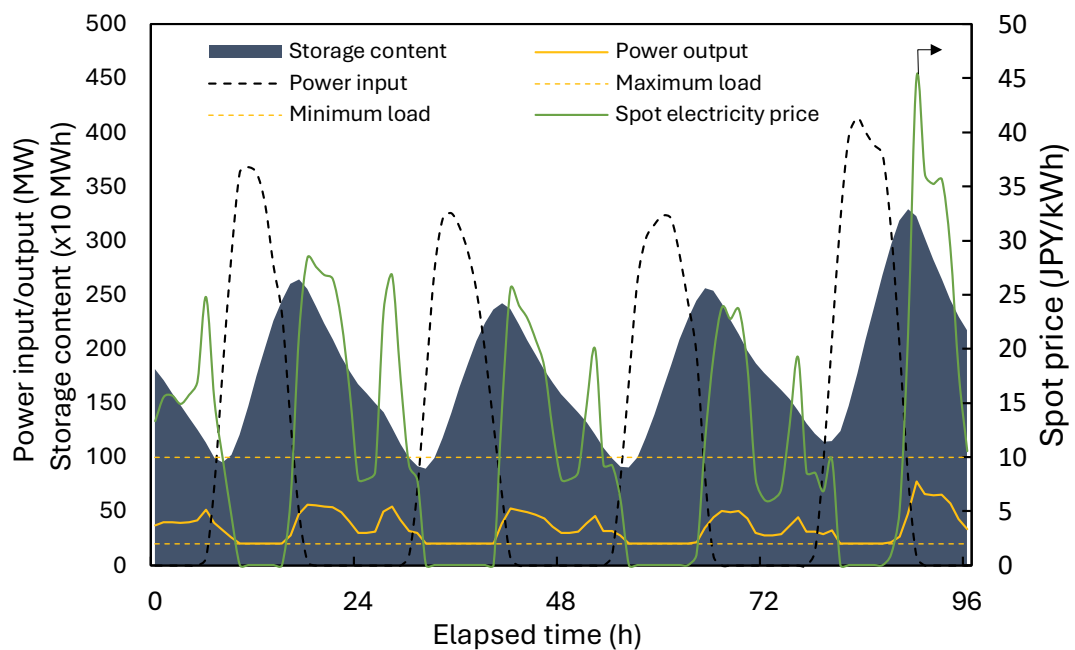


図3 太陽光発電に蓄熱機能を付与した場合のシミュレーション結果

謝辞

本研究は JST さきがけ (JPMJPR2278), JST 共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT:JPMJPF2003), JSPS 科研費若手研究(22K18061)の成果を含んでいる。

参考文献

- [1] Novotny, V., Basta, V., Smola, P., and Spale, J., "Review of Carnot Battery Technology Commercial Development", *Energies*, 15 (2), 647 (2022)
- [2] Trevisan, S., Buchbjerg, B and Guedez, R., "Power-to-heat for the industrial sector: Techno-economic

- assessment of a molten salt-based solution", Energy Conversion and Management, 272, 116362. (2022)
- [3] Frick, K., Misenheimer, C. T., Doster, J. M., Terry, S. D., and Bragg-Sitton, S. "Thermal energy storage configurations for small modular reactor load shedding", Nuclear Technology, 202 (1), 53-70, (2018)
- [4] Terrapower, <https://www.terrapower.com/natrium/> (アクセス日 2024 年 8 月 1 日)
- [5] 藤井祥万, 山野秀将, 大野修司, 早船浩樹, "変動性再生可能エネルギー大量導入に向けた蓄熱発電のシステム評価", 第 28 回動力エネルギー技術シンポジウム講演予稿集, D133, 2024 年 6 月, 京都
- [6] 自然エネルギー財団, "電力需給チャート", <https://www.renewable-ei.org/statistics/electricity/#demand> (アクセス日 2024 年 2 月 2 日)
- [7] Black, G. A., Aydogan, F., & Koerner, C. L., "Economic viability of light water small modular nuclear reactors: General methodology and vendor data", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 103, 248-258 (2019)
- [8] 斎藤義己, "化学装置コストハンドブック (改訂 3 版)", 工業調査会 (2000)
- [9] 森泉由恵, 本藤祐樹, 中野諭, "再生可能エネルギー部門拡張産業連関表の開発と応用", 日本エネルギー学会誌, 94 (12), 1397-1413 (2015)

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

(4) 蓄熱型高速炉の安全設計技術

(4) Safety design technologies of fast reactor with thermal energy storage

*高野和也¹, ¹JAEA,

1. はじめに

我が国では、多様な社会的要請の高まりも見据えた原子力イノベーションを促進しており、安全性や経済性のほかに、熱利用といったエネルギーの多目的利用や再生エネルギー（以下「再エネ」と略す。）導入拡大に適応した機動性が求められている^[1]。高速炉に蓄熱システムを結合させて、不足電力時間帯に電力供給できる機動性をもった蓄熱型高速炉はこの要求に合致しており、その開発が将来必要とされる可能性がある。

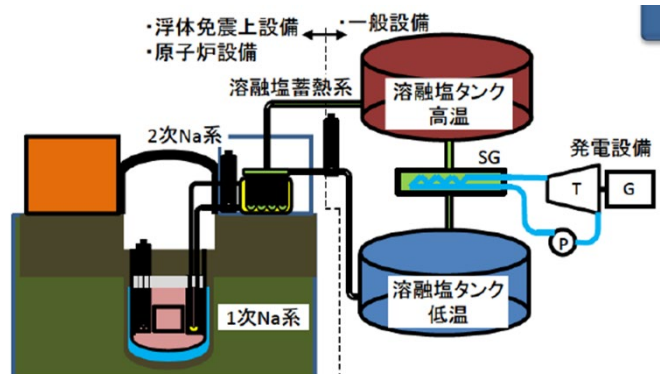
硝酸系熔融塩を熱媒体とした顕熱蓄熱技術が国外の太陽熱発電（500℃前後の温度範囲）等で既に実用化されていることから、熔融塩蓄熱型高速炉に特有の開発要素は、ナトリウムと熔融塩の熱交換器部分となり、伝熱特性を最適化する熱交換器設計、伝熱管破損時のナトリウムと熔融塩の接触に伴う反応特性の把握、伝熱管破損時の影響を踏まえたシステム構成の検討などの安全設計技術開発が必要となる。本報では、蓄熱型高速炉の特徴、安全設計方針検討及び安全設計技術開発の現状について概況する。

2. 蓄熱型高速炉の特徴

熔融塩蓄熱型高速炉の概念図を図1に示す^[2]。ナトリウム冷却高速炉の2次ナトリウム系と蒸気タービン系の間に硝酸系熔融塩を熱媒体とした蓄熱システムを結合することで、原子炉で発生した熱を蓄熱タンクに蓄え、任意に取り出すことが可能となり、発電量や時間帯を柔軟に変更できる。これにより、再エネの電力供給状況に合わせた発電を行うことが可能である他、蓄熱タンクがバッファとなり原子炉側の過渡挙動が蒸気タービン系に直ちに影響しないという過渡分離設計が可能であることも、安全性や系統安定性の観点から重要な特徴の一つである。

蓄熱型高速炉開発は米仏でも進められており、米国 Terrapower で開発が進められている高速炉「NatriumTM」は、定格出力 345MWe のナトリウム冷却高速炉に熔融塩蓄熱設備を付加することにより、最大 5.5h に渡り出力を 500MWe に増加させることを可能としている^[3]。2023 年に我が国は「NatriumTM」の機器開発試験に協力する覚書を締結している^[4]。2024 年 6 月、「NatriumTM」初号基の建設が米国ワイオミング州にて開始され、原子炉部分の着工は早くも 2026 年、運転開始は 2030 年と予定されている。仏国 Hexana でも蓄熱型高速炉開発を進めており、800MWth 規模の出力を持つナトリウム冷却高速炉から発生した熱を蓄熱設備に蓄え、それを発電や産業熱など柔軟に利用する計画である^[5]。

蓄熱設備を活用して発電量や時間帯をある程度任意にシフトできることで、再エネの電力供給状況に合わせた柔軟な発電を行えるだけでなく、一般的に太陽光発電を中心とした再エネからの電力供給が盛んとなる日中は売電単価も低くなり、反対に夜間、特に夕方は高くなることから、売電収入増加による経済性向上効果

図1 蓄熱型高速炉の概念図^[2]*Kazuya Takano¹,¹Japan Atomic Energy Agency

果も期待できる。定格電気出力 300MWe の小型ナトリウム冷却高速炉に対して原子炉定格出力の 50%相当を 5.5h に渡り出力可能な規模の溶融塩蓄熱設備を付加する想定で、高速炉と蓄熱設備のシステム全体による発電時間帯を高売電価格帯へシフトすることによる売電収入増加を試算したところ、蓄熱設備の導入により+10～12%程度の売電収入増加効果が得られるとの結果が得られている^[6]。蓄熱型高速炉は経済合理性を有すると言える。

3. 安全設計方針検討

3-1) 溶融塩ループでの構造材の選定指針

蓄熱型高速炉では、生産コストが安価である等の理由により太陽熱発電等で多くの実績がある硝酸系溶融塩 Solar Salt ($\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$: 60-40wt%) を蓄熱材の候補としている。Solar Salt 環境での構造材の劣化に関して、蓄熱式高速炉で想定する温度領域であれば、構造材としてオーステナイト系ステンレスを使用することは問題ないと考えられるが、溶接部での腐食速度の加速に注意する必要がある^[7]。また、溶融塩に不純物として塩素が含まれる場合、液中であれば応力腐食割れ (SCC) は問題ないと考えられるが、液面変動のないタンクなどでガス化した塩化物と水分が溶融塩界面上に膜を形成し、そこに塩化物が濃縮して SCC が発生する懸念がある^[8]。これらの知見を踏まえた、蓄熱型高速炉の構造材の選定指針を今後検討していく必要がある。

3-2) ナトリウム-溶融塩伝熱管破損の影響検討

溶融塩蓄熱式高速炉のプラントシステム構成を検討するため、ナトリウム-溶融塩伝熱管破損の影響について「安全性」、「運転保守性」及び「経済性」の観点で定性的なリスク評価が行われた^[9]。検討対象となるプラントシステム構成として、1次ナトリウム主冷却系、2次ナトリウム主冷却系、溶融塩蓄熱系、水・蒸気系を直列に設置する系統構成 (米国「Natrium™」と同様の構成) をリファレンス設計概念とし、リファレンス設計概念の2次ナトリウム主冷却系を削除して合理化を図った概念 (以下「設計オプション概念 1」という) と比較対象として検討した。検討対象としたプラントシステム設計概念を図 2 に示す。

設計オプション概念 1 は建設費が安くなるものの、伝熱管破損の影響が 1 次ナトリウム主冷却系に及ぶ点で許認可リスクが高く、また伝熱管破損からの復旧も大規模かつ長期間に渡る可能性があり、現実的ではない。「安全性」、「運転保守性」及び「経済性」の観点から総合的に考えた場合、リファレンス設計概念が現実的な概念と言える。このように、伝熱管破損の影響を最小に留めるよう 2 次ナトリウム主冷却系を備える構成とすることを含め、蓄熱型高速炉の安全設計方針を今後まとめる必要がある。

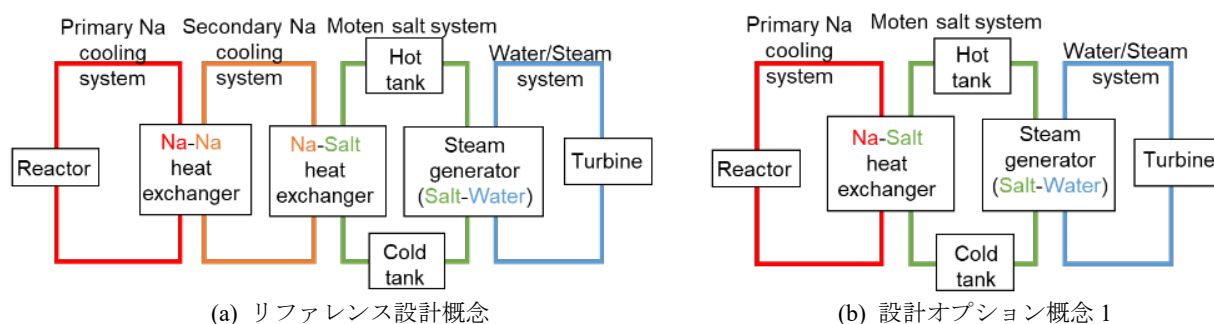


図 2 ナトリウム-溶融塩伝熱管破損の影響検討対象となる設計概念

4. 安全設計技術開発

4-1) 熱交換器伝熱性能向上策に関する検討

蓄熱型高速炉の蓄熱材候補である Solar Salt の物性について、500℃の場合、ナトリウムに比べて Solar Salt の比重は約 2.1 倍、比熱は約 1.2 倍、熱伝達率は約 1/125 である。Solar Salt の融点は約 238℃と高く、凍結防止にも注意する必要がある。Solar Salt は蓄熱媒体として優れているが、熱伝達率は熱伝導率に比例することから熱交換器の伝熱設計では不利となり、熱交換器の大型化に伴うコスト増大が課題となる。そこで、ナトリウムと溶融塩の熱交換性能評価及び熱交換性能を向上させる伝熱向上方策について検討がなされた^[10]。

高速炉の特徴やこれまでの実績を考慮し、直管型シェル&チューブ式熱交換器を伝熱性能向上方策検討対象の熱交換器形式とし、基準ケースとして常陽 MK-III 中間熱交換器をベースとした。基準ケースにおける管内を熔融塩、管外をナトリウムに単純に置き換えた場合（ケース 1）の必要伝熱面積を伝熱工学資料^[11]に示す熱伝達率簡易式を用いた簡易評価により評価した結果を表 1 に示す^[10]。基準ケースに比べて、伝熱面積が 5.5 倍も必要となり、伝熱性能の悪い熔融塩の特徴が表れた。次に、伝熱性能向上方策として、管内をナトリウム、管外を熔融塩とした上でクロスフロー化し、バッフル板間隔を 300mm とした場合（ケース 2）ではケース 1 に比べて、必要伝熱面積を約 70% 低減可能な結果を得て、熱交換性能を向上させる見通しを得た。

表 1 伝熱性能向上方策の確認評価^[10]

検討ケース	必要伝熱面積(m ²) (基準ケース比)
ケース 1 (管内：熔融塩、管外：ナトリウム)	1801 (5.47)
ケース 2 (1 次／2 次入替クロスフロー化、バッフル板間隔：300mm)	563 (1.71)

4-2) ナトリウム-熔融塩の化学反応性に関する検討

熔融塩とナトリウムとの熱交換器部位におけるバウンダリ破損に起因したナトリウムと熔融塩との接触反応について、化学反応性を把握することは重要である。ナトリウムと硝酸系熔融塩の反応性を直接検討した事例は非常に限られていることから、ナトリウムと熔融塩との反応メカニズムを解明することを最終的な目標とし、その第一段階として NaNO₃、KNO₃、Solar Salt (NaNO₃ と KNO₃ を 6:4 の質量比で配合) について、試薬単体での加熱試験（～400℃）を行い示差走査熱量計（DSC）曲線及びエンタルピーを取得し、熱力学データベース等の既往知見との比較を行い、既往知見と整合する結果が得られている^[12]。また、ナトリウムと熔融塩との反応性予備試験として、NaNO₃、KNO₃ のそれぞれの試薬と少量のナトリウムを接触させた際の熱分析試験も合わせて進められている。今後、Solar Salt とナトリウムを接触させた際の反応データを取得し、試験後分析から反応生成物を同定するとともに利用可能な熱力学平衡計算による推定を行うことで、ナトリウムと熔融塩の化学反応性が明らかになると期待される。

また、上記の基礎試験に加えて、ナトリウム-熔融塩の化学反応性について、熱交換特性試験、ナトリウム-熔融塩化学反応特性試験、反応生成物回収試験などの各種要素試験を行うための試験装置設計が進められている。試験装置は、ナトリウム-熔融塩熱交換器（図 3）、ナトリウムループ、熔融塩ループ、付属物から構成され、熱流動解析を用いた熱流動特性や熱交換特性の確認を含め、概念設計が進められており、今後数年かけて試験装置を製作し、各種要素試験を順次実施する計画となっている。

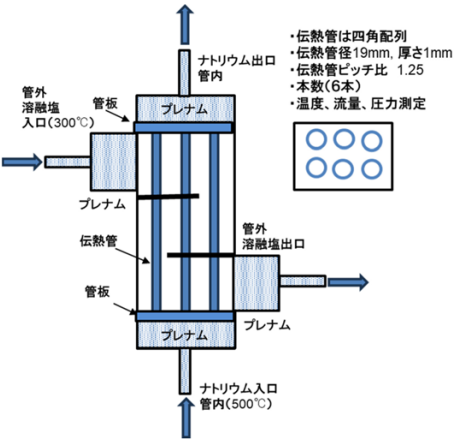


図 3 ナトリウム-熔融塩伝熱試験体

5. 結言

熔融塩蓄熱システムを接続したナトリウム冷却高速炉は日米欧で開発が進められている。原子炉は一定出力で運転しながら再生可能エネルギーの変動性に対応できる調整力を持ったエネルギーシステムであり、柔軟性に優れ、経済合理性を有している。蓄熱システムは太陽熱発電プラントで実用化済みの技術であり、技術開発課題は唯一ナトリウムと熔融塩の熱交換器部分だけであり、熔融塩環境での構造材選定指針やナトリウム-熔融塩伝熱管破損の影響評価を踏まえた蓄熱型高速炉の安全設計方針を今後整備していく必要がある。また、蓄熱型高速炉のナトリウム-熔融塩熱交換器として、管内ナトリウム、管外熔融塩の直管型シェル&チューブ式熱交換器を対象とし、今後熱流動解析により熱交換性能を向上させる必要がある。熱交換器の伝熱管破損に起因した、ナトリウムと熔融塩 Solar Salt との化学反応試験を行い、試験後分析と熱力学平衡計算等により、反応メカニズムを解明していく必要がある。今後、要素試験やモックアップ試験に拡張し、技術開発が進展され、蓄熱式高速炉が実用化されることが期待される。

(本研究の一部は文部科学省原子力システム研究開発事業 JPMXD0222682675 の助成を受けたものです。)

(参考文献)

- [1] METI, Agency for natural resources and energy, Ongoing nuclear innovation.,
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/smr_01.html
- [2] JAEA, “原子力機構の SMR 開発”, (<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/faq/files/material0601.pdf>)
- [3] Terrapower, <https://www.terrapower.com/sodium/>
- [4] JAEA プレスリリース, “カーボンニュートラル実現に貢献するナトリウム冷却高速炉技術に関する日米協力の推進について (米国テラパワー社との覚書拡大について) ”,
(<https://www.jaea.go.jp/02/press2023/p23103101/>)
- [5] Hexana, <https://www.hexana.fr/>
- [6] 高野他, “蓄熱式高速炉の売電収入増加効果評価”, 日本原子力学会 2024 年秋の大会 (2024)
- [7] F. Vilchez, et al, “The effect of laser surface melting of stainless steel grade AISI 316L welded joint on its corrosion performance in molten Solar Salt”, Solar Energy Materials and Solar Cells, 213 (2020), 110576
- [8] H. Li, et al., “Corrosion and electrochemical investigations for stainless steels in molten Solar Salt: The influence of chloride impurity”, Journal of Energy Storage, 39 (2021), 102675
- [9] 山野他, “ナトリウム-溶融塩熱交換器を有する蓄熱式高速炉の安全設計技術開発 (1)全体概要及び伝熱管破損の影響検討”, 第 28 回動エネシンポ (2024)
- [10] 林他, “ナトリウム-溶融塩熱交換器を有する蓄熱式高速炉の安全設計技術開発 (2) ナトリウム-溶融塩熱交換器伝熱性能評価”, 第 28 回動エネシンポ (2024)
- [11] 日本機械学会, “伝熱工学資料 (第 5 版) ”, (2009)
- [12] 菊地他, “ナトリウム-溶融塩熱交換器を有する蓄熱式高速炉の安全設計技術開発 (3) 硝酸系溶融塩とナトリウムの化学反応”, 第 28 回動エネシンポ (2024)