

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。

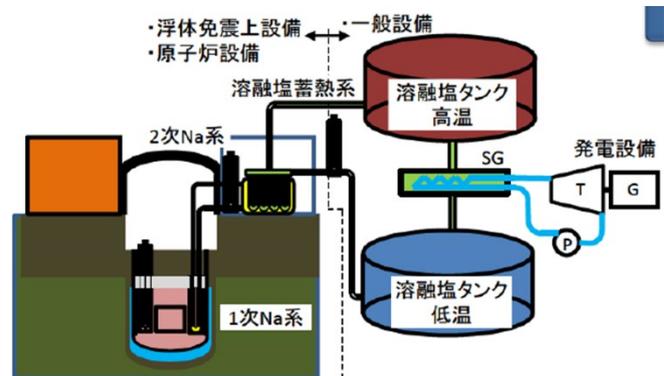
硝酸系熔融塩を熱媒体とした顕熱蓄熱技術が国外の太陽熱発電（500℃前後の温度範囲）等で既に実用化されていることから、熔融塩蓄熱型高速炉に特有の開発要素は、ナトリウムと熔融塩の熱交換器部分となり、伝熱特性を最適化する熱交換器設計、伝熱管破損時のナトリウムと熔融塩の接触に伴う反応特性の把握、伝熱管破損時の影響を踏まえたシステム構成の検討などの安全設計技術開発が必要となる。本報では、蓄熱型高速炉の特徴、安全設計方針検討及び安全設計技術開発の現状について概況する。

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と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、800MWh 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することで、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

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熔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) 熔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熔融塩 Solar Salt (NaNO₃-KNO₃: 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、熔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熔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) ナトリウムー熔融塩伝熱管破損の影響検討

熔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、ナトリウムー熔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、熔融塩蓄熱系、水・蒸気系を直列に設置するシステム構成 (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。

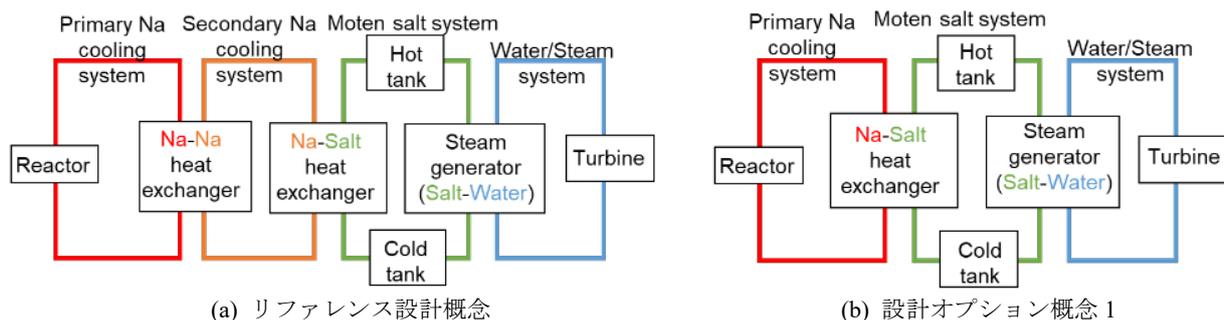


図 2 ナトリウムー熔融塩伝熱管破損の影響検討対象となる設計概念

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°C 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°C 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、ナトリウムと熔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^[1]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。

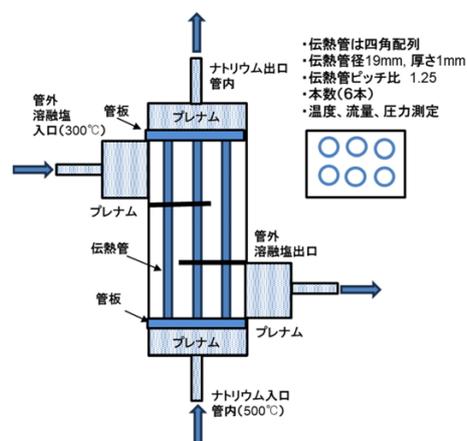


図 3 ナトリウム-熔融塩伝熱試験体

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/natrium/>
- [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)