

固有安全性を備えたトリウム溶融塩炉の将来性

1.はじめに

トリウム溶融塩冷却炉は 1950 年代から米国、日本などで研究開発が進められてきたが、1970 年代以降は軽水炉全盛となって、溶融塩炉は日陰の存在となった。

しかし溶融塩炉は材料の一部の問題が解決すれば、冷却材としての溶融塩は水よりも大幅に優れた特性（高熱容量、高融解潜熱、高熱伝導、高温での低蒸気圧特性、等々）を有すると言われ、最近、固有安全性を備えた次世代原子炉として、第 4 世代原子力システムの国際的枠組み（GIF）にも取り上げられ、溶融塩炉が再び脚光を浴びるようになってきた。溶融塩炉では軽水炉のように高温高圧水を維持するための分厚い圧力容器が不要となる。原子炉の低圧パラダイムシフトが起こることで、軽水炉よりも小型化され、原子炉建設がはるかに簡素化される。このために離島や船舶用の小型原子炉から大規模発電用の大型原子炉までの柔軟な炉心設計が可能となり、原子炉立地の選択幅も大幅に増える可能性がある。溶融塩冷却炉と軽水炉との長短の比較検討を表-1 に示す。

こんな中、米国 NRC は 2023 年 12 月、溶融塩原子炉プロジェクト（フッ化物塩冷却高温炉（FHR）」の実証炉：電気出力 14 万 kW）の建設許可を出した。このプロジェクトを主導するケイロス・パワー社 1）は 2026 年の完成を目指している。

このような背景の下で、本稿で改めて溶融塩原子炉について考えてみたい。

2. トリウム溶融塩炉とは

現在の軽水炉のウラン燃料サイクルでは、天然ウランに含まれる核分裂性 U235 を 3~5% に濃縮して核燃料とするが、トリウム燃料サイクルで

は天然のトリウム 232 を核反応で核分裂性 U233 に変換して核燃料とするので燃料濃縮が不要となる。トリウム 232 が中性子を捕獲して中性子過剰核のトリウム 233 に変わり、プロトアクチニウム 233 を経てウラン 233 となる。ウラン 233 核分裂反応により中性子は平均 2.6 個放出され、これが別のウラン 233 の核分裂に寄与したりトリウム 232 をトリウム 233 に変えることで、「トリウム-ウラン系列」核反応が進行する。（ $\text{Th}232+n \rightarrow \text{Th}233 \rightarrow \beta$ 崩壊で $\text{Pa}233 \rightarrow \beta$ 崩壊で U233）

表-1 溶融塩炉の特徴と安全性（軽水炉と比較して）

	軽水炉	溶融塩炉
燃料交換	3年程度	最長40年の連続運転が可能
燃料資源	ウランは1/3以上をカザフスタンが生産。次にカナダ、オーストラリア、ナムビアなど	トリウムは花崗岩、片麻岩、砂岩等にあるモナズ石（リン酸塩鉱物）に高濃度で含まれる。ウランの3倍以上の埋蔵量。現在はレアメタルの生産過程で副産物で生産。オーストラリア、インド、ブラジル等で産出
固有安全性-I	炉内高気圧	小型で軽水炉の1/4のサイズ。炉内は大気圧。仮に配管破損で溶融塩が漏れても、冷却凝固して固体になり、放射性物質の飛散はない。水と接触してもゆっくり反応し爆発などの危険はない
固有安全性-II	崩壊熱による炉心メルトダウン事故の防止は軽水炉安全の本質	運転しながら不要な核反応生成物を分離可能。核分裂反応でできた副産物を抜き取ることで、運転停止後にも出続ける崩壊熱は非常に少なくでき、崩壊熱によるメルトダウン事故は考えにくい
放射性廃棄物処分	使用済み核燃料は半減期の長い放射性物質を含むため、10万年程度の長い保管期間	半減期が30年以内の放射性物質が大半。300年保管すれば放射能はほとんどゼロレベルに下がる。処分の安全は100~200年くらいを考えればよい
核拡散抵抗性	核兵器材料とるPu239の発生量は、100万kWの軽水炉で約230kg/年	Pu239発生は約0.5kg/年。U233も濃縮が困難で核兵器製造に向かない。IAEAはトリウム燃料サイクルが核拡散防止と放射性廃棄物問題の改善に有効であると認定

溶融塩炉(molten salt reactor: MSR)は、フッ化ベリリウム (BeF₂) とフッ化リチウム (LiF) の混合物 (フリーベ) などの溶融フッ化物塩を一次冷却材とし、その溶融塩に核燃料のトリウムや着火剤としてのプルトニウム等を混合させて原子炉に送り込むことで連鎖反応を起こさせる。減速材としては黒鉛を使用する。核分裂反応で高温になった溶融塩を炉心の外に循環させ、二次冷却系と熱交換して最終的に高温蒸気を生成して発電する (第 1 図参照)。

3. トリウム溶融塩炉開発の歴史 2)、3)

トリウム溶融塩炉は1950年代から米国ORNLで開発が進められた。溶融塩実験炉MSRE (熱出力7.4MWtで、炉心温度650℃) 4) は1965年に臨界に達し、1969年までに2.6万時間の無事故運転を達成した。この結果をベースにして1971年には溶融塩増殖実験炉MSBRの設計が完了してトリウム溶融塩炉の技術基盤が確立された。しかし当時の米国内において軽水炉との開発競争に敗れ、米国では1976年にMSRの開発が中止された。

その後、2001年7月に発足した第4世代原子力システムの研究開発に関する国際的枠組み (GIF: Generation-IV International Forum) 5) では、2030年までに実現する可能性がある6つの炉型を取り上げ、この中の一つとして溶融塩炉が含まれている。また民間ベンチャー企業のテラパワー社 6) もORNLのMSR技術を継承して溶融塩高速炉の開発を進めてきた。その他にもSouthern Company社 7) など、10社近くの民間ベンチャー企業や団体が溶融塩高速炉や溶融塩熱中性子炉の開発を進めている。

日本でも原研 (現 JAEA) の古川和夫氏ら 8) が中心になって 50 年以上前から開発が進められてきたが、当時からの有益性が認識されながらも実現に向けての動きはほとんどなかった。その理由は Na 冷却高速炉、新型転換炉、多目的高温ガス炉 (後の HTTR)、核融合炉、等々の開発が優先されたためであろう。しかし溶融塩炉に関する研究開発は日本でも研究機関やベンチャー企業を中心に脈々と引き継がれてきている。

そのほか、カナダ、英国などでも盛んに開発が行なわれ、中国では溶融塩炉の R&D や設計が開始され 9)、2030 年までに熱出力 373MW の溶融塩実験炉の建設を計画している。

また溶融塩炉ではないが、トリウムを燃料とした改良型重水炉の開発がインドで進められている。トリウム 232 を燃料とするために同位体の濃縮分離が不要であることが大きなメリットとなっている。

4. トリウム溶融塩炉の利点と課題 2),3,10)

トリウム-ウラン系列核反応を利用するトリウム溶融塩炉の特徴として以下があげられている。

4.1 トリウム溶融塩炉の特徴

1) 核セキュリティに関する特徴

① 核拡散抵抗性が高い; 核兵器材料のプルトニウム 239 の生成量は、100 万 kW 軽水炉で約 230kg/年に対して、トリウム溶融塩炉では約 0.5kg/年である。また生成されるウラン 233 (半減期 68.9 年) からできる娘核種: タリウム 208 (半減期 3 分) が強力なガンマ線を放出するため、ウラン 233 を濃縮して核兵器に転用するのは困難である。IAEA ではトリウム燃料サイクルは核拡散防止と放射性廃棄物問題の改善に有効としている。

② プルトニウム消費が可能；軽水炉運転で生成されたプルトニウムをトリウム溶融塩炉で燃料として消費できる。

2) 過酷事故に対する抵抗性が高い

① 燃料である 700℃に溶けた溶融塩の液体トリウムの崩壊熱は、空気の自然循環による対流冷却が可能であるため、冷却機能喪失時も受動的安全性を持っている。

② 更に例え過酷事故が発生した場合、燃料の溶融塩を一次冷却系下部に設置されたドレーンタンクへ自然落下によって排出させる安全装置がある。ドレーンタンクとは凝固弁によって繋がれ、冷却機能喪失等による燃料の過熱が起きるとこのバルブが熱によって溶融し、溶融塩は下のドレーンタンクに落下する。ドレーンタンクに落下した溶融塩は 450℃以下に自然冷却されてガラス状に凝固し、放射性物質の外部への飛散を防止する。ドレーンタンク内に減速材がないため再臨界も起こらない。

④ 固形の燃料棒がないため、冷却機能喪失時の燃料棒溶解、燃料棒と冷却水との反応による水素発生、等の事象は起こらない。

3) 核燃料に関する利点

① トリウム資源量が豊富；トリウムは、花崗岩、片麻岩、砂岩などに含まれるモナズ石（リン酸塩鉱物の一種）に高濃度で含まれ、ウランの 3 倍以上の埋蔵量がある。

② 熱中性子で容易に燃料増殖；トリウム-ウラン系列は熱中性子により反応が始まり、トリウム 232 から核燃料のウラン 233 に容易に転換できる

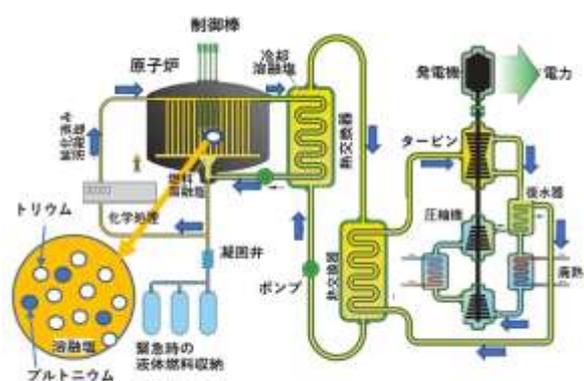
③ 燃料交換なしに長期間の運転が可能；燃料溶融塩に含まれるトリウム 232 は熱中性子で容易に核燃料 U233 に変換できるため、初期装荷燃料の濃縮度が低くても低燃焼度で 40 年程度の長期間に渡って燃焼させる事が可能。軽水炉では燃料の転換係数が小さいため、3 年程度で燃料交換が必要になるが、トリウム炉では燃料交換の頻度が減らすことができる。

④ 溶融塩原子炉では、キセノン 135 などの気体核分裂生成物を運転しながら容易に除去でき、反応度が持続できる。

4.2 実現に向けた技術的課題

トリウム溶融塩炉の課題としては溶融塩の溶融塩が接する個所での構造材料に対する腐食の問題、加えて使用済み燃料の再処理や最終処分場に関する問題がある。

① 溶融塩の材料浸食性；溶融塩は金属材料に対して侵食性が高く、配管の腐食による脆化対策が軽水に比べて困難である。米国 ORNL でのトリウム溶融塩炉 MSRE では Hastelloy N によりある程度の長時間運転を達成している。しかし腐食問題を根本的に解決するには、更なる研究開発が必要とされている。



第1図 トリウム溶融塩炉の概念図

② 燃料の再処理や最終処分技術が未開発；トリウム燃料サイクルの再処理方法はまだ研究段階にある。またトリウム 232 から変換されたウラン 232 は半減期が 68.9 年と長く、生成される娘核種タリウム 208(半減期 3 分)が強烈な放射線を放出するため再処理工程が複雑になる。このため現時点の技術レベルで熔融塩炉を実現させた場合、30 年程度運転後に原子炉から燃料熔融塩を取り出し、そのまま埋設処分する方法（ワンス・スルー方式）が最適であろう。

5. 今後の展望

米国ケイロス・パワー社によると、2023 年 12 月に米国 NRC によって認可された熔融フッ化物塩冷却材原子炉「ヘルメス」が、2027 年までにテネシー州オークリッジに建設され、更に後継の「ヘルメス 2」では 2028 年までに発電を目指すとしている。

MSR は固有安全性を備えた原子炉として将来的には非常に有望とされ、更に小型 MSR を利用して、遠隔地や離島などの電力インフラ整備も想定され、米国以外にも中国、インド、ロシアなど盛んに実験炉・実証炉ベースの開発が進展している。しかし MSR の建設、安全性、バックエンド等に関する技術体系は、既存の軽水型原子炉で培ってきた技術基盤に加えて、熔融塩特有の技術体系、つまり、熔融塩取り扱い技術や耐食性材料の開発、核燃料供給システムや使用済み核燃料の処理の問題等、新たな技術基盤が必要となる。これらの技術基盤の構築に関しては、我が国はスタートラインでの出遅れ感があるので、研究協力を視野に、情報の収集分析に努めつつ、我が国としての取組み方針を見定めていく必要がある。

参考文献

- 1) Governor Lee, Commissioner Rolfe Announce Kairos Power to Establish Low-Power Demonstration Reactor in Oak Ridge - Kairos Power
- 2) 高木、第 4 世代原子炉の開発動向、日本原子力学会誌, Vol.60, No.8 (2018) 493
- 3) 菅野ら、熔融塩炉開発の現状と将来、日本原子力学会誌、Vol.16, No5 (1974) 249
- 4) A Review of M.S.R. Technology, Nucl. Appl Technol., 8, 105 (1970).
- 5) GEN -IV International Forum ; <https://gif.jaea.go.jp/>
- 6) TerraPower : <https://www.terrapower.com/>
- 7) Southern Company 社 ; <https://www.southerncompany.com>
- 8) 古川和夫、熔融塩の原子力利用における問題点と将来の展望、日本金属学会会報 第 16 巻 第 10 号(1977) p 675
- 9) China Startup – a Thorium-powered Molten-salt Reactor | Neutron Bytes
- 10) 山脇道夫 ; 013_02_00.pdf (meti.go.jp) (経産省資料)

(栗山正明記)