

企画セッション | 総合講演・報告：総合講演・報告1「トリウム原子力システム」研究専門委員会

■ 2020年9月17日(木) 13:00 ~ 14:30 | 会場 Zoomルーム8

[2H_PL] トリウム原子力システムをめぐる状況と今後

座長:高木 直行(東京都市大)

[2H_PL01] トリウム原子力システム研究開発の世界動向

*佐々 敏信¹ (1. JAEA)

[2H_PL02] トリウム炉・熔融塩炉に関する基礎的知見の現状

*魚住 浩一¹ (1. 電中研)

[2H_PL03] トリウム原子力システムの得失と研究開発のあり方

*高木 直行¹ (1. 東京都市大)

[2H_PL04] 総合討論

総合講演・報告 1 トリウム原子力システム研究専門委員会

トリウム原子力システムをめぐる状況と今後
Current Status and Perspectives of Thorium Nuclear Energy Systems

(1) トリウム原子力システム研究開発の世界動向

(1) Global Trend of the Developments for Thorium Nuclear Energy Systems

*佐々 敏信¹¹日本原子力研究開発機構

1. はじめに

トリウム原子力システムの研究開発状況を把握するため、現在提案されているトリウム原子力システムについて、公開文献をもとに主要な性能や実現性の見通し等を調査した。

2. 調査概要

トリウム原子力システムについては、固体燃料を用いたシステムに関しては核燃料部に設置された「軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ」が、また、熔融塩燃料を用いる原子力システムは「熔融塩技術の原子力への展開」研究専門委員会が、それぞれ報告書を取りまとめている。今回はこれらの報告書との重複を避け、両報告書取りまとめ後の数年間に公開文献が刊行されたシステム概念を中心に調査を実施した。調査対象としたシステム概念を表1に、主な調査項目を表2にまとめた。

3. 調査結果

トリウム資源が豊富なインドを始め、アジア、欧州、米国と世界の原子力利用国で研究が行われている。燃料には、米国 FHR 及びインド IHTR がウラン・トリウムの球状（ペブル）を採用するほかは熔融塩を用いるシステム（うち DFR, IMSBR, MSFR, SCIFR は高速中性子体系）であった。炉心熱出力は、デモ炉やモジュラー炉級の数 100MW から発電炉で最大約 5GW までの提案がある。液体燃料炉は、燃料に関わる熱的設計制限が緩和されることもあり、大出力炉の提案が見られた。実現性については、多くの提案が概念検討段階で実現性は未知数と考えられるものの、一部に許認可を狙う概念（Thorcon-R）や国内の環境影響評価が承認された概念（TMSR）もあった。

表 1 調査対象

システム名称	燃料	開発国
FHR	Th,U 球状燃料	米国
IHTR	Th,U 球状燃料	インド
AMBIDEXTER	Th フッ化物塩	韓国
CAWB	Th フッ化物塩	デンマーク
CUBE-100	フッ化物熔融塩	デンマーク
FUJI-U3	Th フッ化物塩	日本
LFTR	Th 熔融塩	米国
SSR-Th	Th フッ化物塩	英国
Thorcon-R	LEU,Th フッ化物塩	米国
TMSR-LF2	LEU フッ化物塩	中国
DFR	U,Pu/Th 塩化物塩	ドイツ
IMSBR	Th,U フッ化物塩	インド
MSFR	Th フッ化物塩	欧州
MCSFR	TRU,Th 塩化物塩	米国

表 2 主な調査項目

提案概念	名称、開発国・開発機関 燃料・冷却材・減速材 炉心出力
炉システムの概要	炉構造・冷却系統概念 原子炉核特性 トリウム増殖性能
燃料サイクルシステムの概要	燃料サイクル概念 再処理（online 含む）概念 燃料処理 核拡散抵抗性
開発状況	開発体制・予算規模 許認可対応状況 実現性・経済性の見通し

*Toshinobu Sasa¹¹Japan Atomic Energy Agency

総合講演・報告 1 トリウム原子力システム研究専門委員会

トリウム原子力システムをめぐる状況と今後
Current Status and Perspectives of Thorium Nuclear Energy Systems

(2) トリウム炉・溶融塩炉に関する基礎的知見の現状

(2) Fundamental Understandings on Thorium and Molten Salt Reactors

*魚住 浩一¹¹電力中央研究所

1. はじめに

トリウム原子力システムの研究開発状況把握の一環として、トリウム系酸化物燃料炉およびトリウムとの親和性が高い溶融塩炉について、核燃料、原子炉、サイクルの原理的・基礎的特性を、ウランと対比して整理することを試みた。

2. 調査概要

当該炉システムの炉設計・サイクル設計を想定し、表 1 に示す項目について、対象項目の特徴を定量的に説明できる知見の充実度を評価することで、基礎的知見の現状の明確化を図った。なお、溶融塩炉システムについては物性等が溶媒塩に支配され、「ウランとトリウムの比較」の観点としての整理が困難な場合が多いことから、フッ化物塩 4 種と塩化物塩 2 種を代表的な溶媒塩として選択し、これらの物性等についての知見の充実度を調べた。

3. 調査結果

トリウム系酸化物燃料の基礎データについては、本学会核燃料部会の「軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ」により精力的にデータが収集されたものの[1]、ウラン系と比較するとトリウム系酸化物燃料のデータは部分的にしか揃っていないものが多い。なお、トリウム系酸化物燃料を用いるシステムを志向する動きはあまり見られないものの、核データや再処理に関するデータの取得・検討例もある。

溶融塩炉に関しては体系的なデータ収集が試みられているものの[2]、そもそも炉概念により燃料塩組成や燃料塩処理方法などがまちまちであることから、十分にデータが蓄積されているとは言い難い。但し、乾式再処理との類似性により、特に塩化物溶融塩系では、バックエンド関連のデータが整備されつつある。一方で炉内挙動に関しては、MSRE などでの運転実績のあるフッ化物溶融塩系の方が知見の蓄積は多い模様である。いずれにしろ、世界的な溶融塩炉の開発志向に従い、許認可取得を目指したデータの拡充は進むと思われる。なお、溶融塩炉システムの計量管理に関しては、溶融塩組成の迅速な分析手法の拡充のみならず、炉と再処理を分けて考える従来のものとは異なる計量管理概念の構築が必要であろう。

表 1 調査項目

酸化物燃料炉	酸化物ペレット燃料の基礎物性、酸化物ペレット燃料特性、酸化物燃料炉心の核特性・安全特性、酸化物燃料のバックエンド
溶融塩炉	溶融塩燃料の基礎物性、溶融塩燃料の燃料特性、溶融塩燃料炉心の核特性・安全特性、溶融塩炉燃料のバックエンド
共通項目	Th の原子核物理的特性、資源性

[1]: 本学会核燃料部会のホームページに掲載 [2]: G. Fredrickson, et. al., INL/EXT-18-51033 (2018).

*Koichi Uozumi¹

¹Central Research Institute of Electric Power Industry

総合講演・報告 1 トリウム原子力システム研究専門委員会

トリウム原子力システムをめぐる状況と今後
Current Status and Perspectives of Thorium Nuclear Energy Systems
(3)トリウム原子力システムの得失と研究開発のあり方

(3) Pros and Cons and the Future R&D

*高木 直行¹¹東京都市大学

1. はじめに

日本原子力学会では2010年6月、原子力学会核燃料部会に「軽水炉、高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ」(主査：山中伸介)が設置され、トリウム燃料を軽水炉、高速炉で利用する方法について検討が行われた。また2013年6月には「熔融塩技術の原子力への展開」研究専門委員会(主査：山脇道夫)が活動を開始し、様々な熔融塩技術や、熔融塩を用いた原子炉概念や加速器駆動炉等の新型炉概念を調査し、熔融塩取り扱いに関する最新の知見や研究開発課題が整理された。

いずれの委員会も2017年で終了したが、世界的なトリウム燃料やトリウム燃料原子炉への関心の高まりや、これらの開発が勢いを増している状況を鑑みると、原子力学会として各国のトリウム原子力開発の動向調査を継続する意義は大きいと考え、2018年8月より「トリウム原子力システム」研究専門委員会(主査：高木直行)を設置した。以前の委員会では、トリウム燃料の形態を固体もしくは液体に限定していたが、新たな委員会ではこれらを区別せず、また本来不可分である原子炉と燃料サイクル全体の俯瞰的な調査・検討を目的とし、諸外国・国内で進められているトリウムを用いる革新的原子炉・サイクル概念の最新動向の調査(Task 1)、トリウム原子力システムの特徴や開発意義、ウラン原子力システムとの得失比較の検討(task 2)、そして我が国でのトリウム原子力研究のあり方に関する検討(Task 3)を活動項目に掲げ、1.5年で計8回の委員会活動を実施してきた。以下では、この内Task 3の活動成果について報告する。

2. トリウム炉・熔融塩炉への関心増大の背景

トリウム研究の歴史は古い。原子力黎明期の1950年代後半から1970年代の間に米、独、英、オランダ、インド、ブラジルの国々で(規模の違いはあるものの)原子炉へトリウム燃料を装荷した実験が行われている¹⁾。最も熱心に取り組んだのはアメリカであり、1960年代にはオークリッジ国立研究所に熱出力7.4MWの熔融塩実験炉MSRE(Molten Salt Reactor Experiment)を建設しU-233を用いた実験を実施、1970年代後半には SHIPPINGPORTにて燃料集合体や制御方式を工夫して中性子経済を向上させたPWRでU-233増殖が可能であることを実証している。しかしながら同時に進行したウラン燃料炉開発と比較して、核分裂性核種の調達、燃料サイクル確立、原子炉材料開発等の課題が多く、商業技術として日の目を見ることはなかった。

ところが今から10年少々前より、再びトリウム燃料や熔融塩原子炉への関心が世界的に高まってきた。それには国毎に異なる様々な背景が考えられるが、ここではその要因として1)レアアース生産に伴う副産物対策、2)地球温暖化対策としての原子力再評価、3)中国のTMSR(Thorium Molten Salt Reactor)計画始動、4)福島第一原子力発電所事故(1F事故)の影響、5)放射性廃棄物処分への懸念、6)余剰Puへの懸念、そして7)トリウム・熔融塩炉に関する情報発信増加、の7つの項目に着目して分析した。

2-1. レアアース生産に伴う副産物対策

電気自動車やデジタル機器等、先進技術分野で原材料として用いられるレアアースの需給拡大に伴い、レアアースに随伴するトリウムが副産物として大量に発生するようになった。レアアース抽出後に残る放射性元素トリウムの廃棄物処理は、資源開発の意思決定を左右する程の重要な問題である。モナザイトに比べトリウムの含有量が格段に低いバストネサイトを産するカリフォルニア州のマウンテンパス鉱山は、かつてレアアース生産の拠点であったが、州の環境規制強化や中国でのレアアース生産増の影響を受け価格競争力を失い1998年に操業を停止した²⁾。アメリカに代わる生産拠点となった中国はその後レアアースの生産・輸出を政策的に規制するなどし、世界のレアアース供給体制やその価格に大きな影響を与えている。

随伴トリウムは、鉱山の廃棄物処理問題を起こす一方、核分裂資源でもある。トリウムを核燃料として利用する途が一旦開かれれば、エネルギー・環境問題に大きく寄与する物質になり得ることから、鉱山、資源

会社の後押しもあって 2000 年代初頭よりトリウム資源を擁するノルウェーや中国他でトリウム原子炉の研究が活発化してきた。

2-2. 地球温暖化対策としての原子力再評価

1997 年の気候変動枠組条約会議(COP3)で先進国の温室効果ガス排出の削減目的を定めた京都議定書が採択されて以降、地球温暖化の深刻化がより強く叫ばれ、その対策として原子力の有効性を評価する声も高まった。2000 年代中盤には、自国の軽水炉が好調な稼働率を記録するアメリカでブッシュ政権が開始した原子力新設計画などが後押しをし、世界的な「原子力ルネッサンス」の動きにもなった。

一方で、2011 年の 1F 原発事故により原子力の社会受容性は大きく低下した。温暖化対策の重要な切り札として原子力の重要性を認識する肯定派の中にも、福島事故をおこした同型の軽水炉を敬遠し、新型炉へ期待を抱く風潮が拡大した。その中でトリウム燃料、熔融塩炉という一見目新しいキーワードが魅力的な技術と捉えられ、その支持層の拡大につながったと考えられる。トリウム、熔融塩炉には一定の実績がありつつも未開発であったことが、早期に低炭素電源を確立できるとの期待を増幅させたのかもしれない。

2-3. 中国の TMSR 計画始動

中国は、経済拡大のためのエネルギー源の強化、大気汚染や温暖化対策としての原子力開発もさることながら、国内のレアアース生産の副産物として生じる豊富なトリウムを資源として活用すること、持続可能な増殖システムとしてのトリウム炉を開発すること、さらに中国独自の原子炉型として世界に先駆けて商用熔融塩炉を開発することを目的に、1F 事故直前の 2011 年 1 月に TMSR 計画を発表・開始した。

TMSR 計画は年間予算数百億円、人員数 500 名以上の大規模プロジェクトであり、その始動は世界の熔融塩炉への関心を高め(再燃させ)、数々の熔融塩炉ベンチャー設立やいくつかの国に公的予算を投じさせるきっかけとなった。

2-4. 福島第一原子力発電所事故の影響

2011 年の 1F 事故は、全世界に軽水炉の安全性への疑念や原子力への不信を拡大させた。技術的な真偽は別として、具体的には、1)軽水炉の様に一次系が高圧、燃料ピン内側も高圧の炉は、2)電源喪失し除熱不足になると崩壊熱により炉心が熔融し、3)水素ガスを発生させ爆発の恐れがあり、4)放射性物質を環境へ放散させる、5)事故後にも再臨界の可能性を持つ、との印象を全世界へ与えた。

これに対し熔融塩炉は、1)低圧システムであり、2)燃料は元々熔融状態、3)炉心部に水が無いので水素ガス発生無し、4)FP 元素はある程度塩中にトラップされ放散を軽減、5)事故時には炉底部のドレインプラグで燃料塩を排出し未臨界達成、と定性的には上記の懸念に応える炉概念としてアピールされている。

2-5. 放射性廃棄物処分への懸念

原子力発電所から発生する使用済燃料の最終処分は、原子力利用国が抱える共通課題である。トリウム炉は、燃料の主成分が原子番号 90 の Th-232 でありウラン燃料炉に比べて質量数が 6 ほど小さいため、原理的に Pu や Np, Am, Cm といった高次 MA の生成は少なく、必要に応じて軽水炉で生じたそれらの元素を効率的に燃焼可能であること、かつ熔融塩炉であれば高発熱・高線量の固体燃料の加工プロセスを排除でき、こうした多種元素のリサイクルに適する、との期待がある。

2-6. 余剰 Pu への懸念

前節で述べた理由により、トリウム炉では発電量当たりの Pu 生成量が少ない。非核兵器保有国の日本が所有する使用済燃料中の Pu がしばしば国際批判の的になることから、Pu を生産しないトリウム燃料・炉は核不拡散という観点から、一定の魅力を有する原子炉概念と捉えられる傾向がある。

一方、軽水炉使用済燃料中の重元素を燃料原料とする熔融塩炉や、軽水炉で生成された Pu を初期燃料に用いる Th-Pu 混合酸化物燃料軽水炉では、サイクル中の Pu インベントリはウランサイクルと大差なくなる。さらに、純粋なトリウムブランケットで生成された U-233 は化学分離のみで抽出可能であり、U-235 の様に同位体濃縮を必要としない。また U は Pu の様に自発核分裂同位体を持たないため、爆縮技術を要さないなど、トリウム燃料にもそれ特有の核拡散上の懸念があることに留意しなければならない。

2-7. トリウム・熔融塩炉に関する情報発信増加

以上のような背景の中、2010 年頃からはトリウム・熔融塩炉に関する情報発信が増加し、一般の関心を高めることに寄与している。情報の媒体は専門家のレビューを受ける学術論文よりむしろ、書籍、解説記事(雑誌・ネット)、You tube、SNS などであり、発信者は科学ライターや熔融塩炉を開発するベンチャー企業等が多い。

ここで懸念すべきは、その少なくない割合がトリウム燃料や溶融塩炉のメリットや優位性をやや楽観的に述べている点である。例えば、トリウム炉は安全性が高く、経済性に優れ、廃棄物は少なく、核拡散懸念も小、資源有効利用性に優れ持続可能で、技術成熟度も高く、早期導入可能といった主張である。

2000年代後半からは、トリウムをテーマとした国際会議も多く開催されるようになった。中国内モンゴル自治区包頭で開催されたトリウム利用会議 TU2009、2010年のロンドンを皮切りにニューヨーク、上海、ジュネーブ、ムンバイ、ブリュッセルで約2年毎に開催されているトリウムエネルギー国際会議 ThEC、2009年のワシントン DC での第一回会議以降、米国内で毎年実施されているトリウムエネルギー同盟会議 TEAC などがある。米国 ORNL は2015年以降、毎年、公開の溶融塩炉ワークショップを開催し、米国研究者や政府機関、更に海外も含め、多くの参加者がある。ThEC や TEAC では、ほぼすべての研究発表が主催者によって撮影・編集され、会議終了後いつでも誰でも You tube で研究発表を聴講できるよう整備されている。インターネットを通じた、動画を含む情報発信は強力な宣伝ツールである。

3. トリウム・溶融塩炉の分類と得失

トリウムを用いる炉型と言えば「トリウム溶融塩炉」の印象が強いが、本委員会 Task1 の報告にもあり、トリウム酸化物ペレットを用いたトリウム軽水炉や、溶融塩中に低濃縮ウランを溶解したウラン溶融塩炉もあり、「トリウム＝液体燃料」もしくは「溶融塩炉＝トリウム」ではない。燃料、冷却材、減速材、サイクルには様々な組み合わせがあり、多様な概念が提案されているため、整理して議論する必要がある。

3-1. 燃料形態

固体と液体に分類される。固体トリウム燃料炉の開発の歴史は長い、昨今は液体燃料炉に比べ検討例は少数である。ノルウェーの Thor Energy はトリウム酸化物ペレットを軽水炉で使用するを目的に、許認可取得のためのデータを蓄積している。カリフォルニア大バークレー校では被覆粒子の中心核にトリウム酸化物を用いるペブルベッド型溶融塩炉冷却炉(FHR)を検討している。液体燃料としてはフッ化物塩、塩化物塩が殆どであるが、液体金属燃料増殖炉の研究も少数ある。

3-2. 冷却材形態

固体燃料を用いる場合、軽水や重水などを冷却材とする既存炉にて、ウラン燃料をトリウムに置き換えた通常炉概念と、前述の FHR の様に固体燃料を塩で冷却する溶融塩炉冷却炉に分類される。

液体燃料の場合は、「燃料・冷却材同一型」と「燃料・冷却材分離型」の二種類がある。主流は同一型であり、炉心で核反応を生じ高温となった塩が冷却材として炉心から熱交換器へ循環する。分離型としては、被覆管内にある塩化物燃料塩を被覆管外側のフッ化物塩が冷却する英 Moltex Energy の SSR(Stable Salt Reactor) や、燃料管内の塩化物燃料塩を冷却材である液体金属(鉛)が冷却する独 DFR(Dual Fluid Reactor)、仏 Aristos power の HSR(Hard Spectrum Reactor)などが提案されている。

3-3. 中性子スペクトル

熱中性子炉と高速炉に分類されるが、塩の種類や塩中の HM 含有割合によっては中速スペクトル炉もある。主流は ORNL の MSRE と同じ黒鉛減速材を用いた熱中性子炉だが、第四世代炉の代表炉型は上記に加えて、炉心内に減速材や構造材を配置しない塩化物高速炉を主対象としている。

高温の溶融塩中に置かれる黒鉛の材料的課題を回避するため、重水(Copenhagen Atomics)、水素化ジルコニウム(Transatomic Power)、水酸化ナトリウム(Seaborg Technologies)などを減速材に用いた溶融塩熱中性子炉も提案されている。燃料塩高速炉としては液体鉛を冷却材に用いることで硬スペクトル化し増殖性能を改善させる仏 HSR や独 DFR が提案されている。

3-4. 燃料サイクル

開サイクル(Open cycle)と閉サイクル(Closed cycle)がある。溶融塩炉の早期建設を目指し、当面はリサイクルを考えていないグループ(例: ThorCon, Elysium Industries, Terrestrial Energy)と、燃料増殖のために燃料塩や fertile 塩からの fissile 回収(マルチリサイクル)を想定するグループ(Flibe Energy, 仏 MSFR)に分かれる。但しいずれも、揮発性の FP の連続除去は想定している。

3-5. トリウム炉・溶融塩炉の様々な炉概念

上述の通り、近年検討されているトリウム炉・溶融塩炉には、用いる燃料元素、燃料形態、冷却材、燃料/冷却材の別、中性子スペクトルに組み合わせにより多様な概念が存在する³⁾。その特徴を既存炉と比較して Table 1 にまとめた。ここで注目すべきは、トリウムを社名に掲げるベンチャーや、トリウム主題とする国際

会議 ThEC などでは提案/検討されている溶融塩炉概念のいくつかは、トリウム燃料の利用を(当面は)考えていないことである。溶融塩炉の商業炉としての導入を考えると、当面は軽水炉使用済燃料を燃料塩の原料とし、含まれる Pu を火種として炉を臨界にするのが得策で現実的という判断と考えられる。

Table 1 Various types of thorium-fueled nuclear reactors

	Major Fuel Element		Fuel Form		Coolant			Neutron Spectrum		Fuel Cycle	
	U	Th	Solid	Liquid	Identical to the fuel	Separated	Pressure [MPa]	T	F	O	C
LWR	○ LEU+Th	○ Th+Pu	○			○ H ₂ O	7~16	○		○	
CANDU, PHWR	○ Nat.U/LEU+Th										
FBR	○ MOX+Th in Bl.		○			○ Sodium	Ambient		○		○
ThorCon, IMSR (ThorCon, Terres.)	○			○ F-Salt	○ ←		Ambient	○		○	
LFTR (Flibe E.)		○ Th+U3		○ F-Salt	○ ←		Ambient	○			○
SSR (Moltex E.)	○	○ Th+U3		○ F-Salt		○ Cl-Salt	Ambient	<----> ?		○?	
MCSR (Elysium I.)	○			○ Cl-Salt	○ ←		Ambient		○		○?
DFR, HSR (IFK, ARISTOS P.)	○?			○ Cl-Salt /Metal		○ Lead	Ambient		○		○?

F-Salt: Fluoride Salt
Cl-salt: Chloride Salt

T: Thermal
F: Fast
O: Open
C: Closed

4. 我が国の研究開発の在り方

日本はウラン・プルトニウム酸化物を基本とする燃料サイクル基盤を整備してきた。トリウム燃料や液体燃料に目を向け何らかの研究資源を投じる判断をするには、当然ながら大きな **incentive** が必要である。そもそも我が国は原子力黎明期にトリウム燃料をどう捉えていたか、日本の原子力政策の歴史を振り返ってみた。

4-1. 原子力黎明期のトリウムの位置づけ

1955 年に制定されたわが国の原子力基本法"第一章 三条"には『核燃料物質』とは、ウラン、トリウム等原子核分裂の過程において高エネルギーを放出する物質であつて、政令で定めるものをいう。「核原料物質」とは、ウラン鉱、トリウム鉱その他核燃料物質の原料となる物質であつて、政令で定めるものをいう』とされている。1956 年 9 月 6 日の原子力長期計画の"4 方針(18)"には「原子燃料の有効利用等の見地からウラン、トリウムおよびプルトニウムについて十分な基礎研究を行うこととする」と明記され、さらに同"(4)日本原子力研究所の業務計画 (ホ)製錬"では「粗製ウラン塩を精練しウラン金属を製造する。(中略)トリウムについては、その将来性にかんがみ、トリウム精練技術の確立を図るものとする」と記載されている。1958 年 12 月 24 日の原子力委員会資料「核燃料開発に対する考え方」の"[3]核燃料有効利用のための技術開発"では「核燃料物質としてのトリウムについては、今後におけるトリウムを使用する原子炉の開発と関連せしめつつ、その利用技術を開発すべきである。当面は日本原子力研究所に置いて進行中の熱中性子増殖試験炉の研究に必要なトリウム系燃料の製造、加工等の研究を行う他、トリウムの合金及びセラミック型燃料等に関する基礎的な研究を合わせて進めるものとする」とあり、1960 年頃までは国内でもウランと並行してトリウムも検討対象とされていた。日本初の研究炉 JRR-1 が 1957 年に臨界となり、原電東海発電所の天然ウラン・炭酸ガス炉が 1966 年に初の商業炉として運開するにつれ、ウラン燃料への開発資源集中が進んだ。

4-2. トリウム炉・溶融塩炉の展望

それから半世紀以上を経て、1F 事故を経験した現在、世界的にはトリウム炉・溶融塩炉への関心が再燃し、研究開発が活発化していることは事実である。トリウム溶融塩炉の開発は日進月歩で進んでおり、我が国の知見は豊富ではないが、本委員会での調査検討を経て、溶融塩炉がそもそも原理的に抱える課題、設計が進むにつれ顕在化してきた主要課題として以下を抽出した。

既存の固体燃料炉では燃料被覆管が放射性物質の主要な隔離境界であるが、燃料・冷却材同一型の溶融塩

炉では燃料物質やFPを含む塩が循環する一次系境界にまで拡大する。これにより熱交換器、配管、ポンプなどプラントの主要機器、そして広範な領域が(定検中にも)高線量となり、運転・点検・保守・補修が桁違いに困難となる可能性がある。廃炉時の放射性廃棄物も増大する。また定常運転時の環境放出放射能が固体燃料炉に比べて格段に多いため、環境影響評価を行うと立地がより限定され、地元受容性も悪化することが懸念される。国際政治的に深刻なのは、熔融塩炉は塩から脱離したXeガスを定期的に環境中へ放出するため、その世界的な普及は、包括的核実験禁止条約機関(CTBTO)の国際監視制度(IMS)施設に影響を与え、刷新を強いる可能性すらあることである⁴⁾。発電システムは必ず塩処理システム(簡易再処理施設)を伴うことになるため、経済性の悪化、保障措置の難化、核物質処理施設の分散化・増加による核セキュリティ上の問題が懸念される。

熔融塩炉推進派は時に、熔融塩炉のメリットについて、「ワンスルーの軽水炉」と「閉じたサイクルの熔融塩炉」を比較して説明することがある。例えば、熔融塩炉では資源利用効率が軽水炉の100倍となる、長寿命放射廃棄物を出さない、といった主張である。これは、非増殖炉か増殖炉かの違い、もしくは開サイクルか閉サイクルかの違いであり、燃料がウランかトリウムか、固体か液体かの別とは直結しない話である。こうしたやや飛躍した論法がトリウム熔融塩炉への公衆の過度な期待を助長する要因となっていることは否めない。これは安全性の説明についても同様である。

一方で、陽イオンと陰イオンから成り立つ熔融塩は化学的に活性な元素と結合しやすく、加圧の必要がないことと相俟って、事故時の揮発性FPの環境放出を抑制する効果が期待できること、今後Pu燃焼やMA核変換などリサイクルの高度化が要求される場合、高発熱・高線量の燃料を液体のまま取り扱えることなど、熔融塩炉固有のメリットも認められる。

4-3. おわりに

熔融塩炉開発ベンチャーの主要人物には、元々軽水炉や高速炉の開発に携わっていた原子力の専門家が少なくない。彼らは、既存炉の技術を熟知し、地球環境保全や持続的なエネルギー供給における原子力の重要性を十二分に理解しており、同時に現在の社会情勢を分析し、現状を打破する方策として、トリウム・熔融塩炉を提唱している。「1F事故等で社会一般に染み付いた原子力のマイナスイメージ脱却には、これまでとは抜本的に異なる原子力概念が必要」という主張である。

原子力をrebrandする「何か」として、1)固体→液体、2)ウラン→トリウムを選択し、ベンチャー組織によつては、2)のトリウムは重視せず、a)高い経済性、b)非加圧システム、c)軽水炉使用済燃料を供給燃料とし易いこと、を目指し売りとする戦略である。これであれば、新規に原子力を導入する国も議論のテーブルに着いてくれるとの感触を彼らは得ている。特に「現実問題として(安全性は大前提とし)火力に勝る経済性こそ重要。それが全てを決める」との明確なスタンスを示している。現在世界中でみられるトリウム・熔融塩炉開発の動きは、原子力の未来を真摯に考え、自ら具体的な取り組みを先駆け実践している活動の具体例とも捉えられる。ここに我が国の原子力の未来を考えるヒントがあるのかも知れない。

1F事故以降、原子力を学ぼうとする若者の人口は明らかに減少している。このままでは産業の高い技術力維持はおろか、2030年時点の原子力発電比率20%達成や炭酸ガス排出抑制の政策目標達成はままならないという危機感がある。常に基礎科学の裾野を広げること、新たな何かに挑戦することには一定の意義があり、原子力先進国の役割でもあろう。基礎的知見や研究資源なしにはトリウム・熔融塩関係の技術詳細をフォローすることすら困難である。我が国としては、各国の動向を常時ウォッチし専門的知見から分析・評価を行う体制を強化することがまずは望まれる。

<参考文献>

- (1) 日本原子力学会「トリウムサイクル調査」研究専門委員会、トリウムサイクル—研究開発の現状と発展の道—、日本原子力学会(1980年10月)
- (2) 渡辺 寧、レアアースから見た鉱物資源供給の将来像、資源地質, 66(1), 27~34, 2016.
- (3) 高木 直行、今なぜトリウムか? 炉物理・炉設計の観点から、原子力 eye 日刊工業出版プロダクション Vol.57 No.4 p4-p25, 2011.
- (4) Edwin Lyman (UCS), Proliferation and Terrorism Issues Related to Noble Gas Management at Molten Salt Reactors, Proc. of Global2019 (Seattle).

*Naoyuki Takaki¹

¹Tokyo City University

企画セッション | 総合講演・報告 | 総合講演・報告1 「トリウム原子力システム」研究専門委員会

[2H_PL] トリウム原子力システムをめぐる状況と今後

座長:高木 直行(東京都市大)

2020年9月17日(木) 13:00 ~ 14:30 H会場 (Zoomルーム8)

[2H_PL04]総合討論