

新型炉部会セッション

第4世代原子炉の国内外の開発動向

Development progress of domestic and foreign Generation-IV reactors

(5) 溶融塩炉・トリウム炉の開発状況と計画

(5) Development status and plan of molten salt reactors and thorium reactors

*高木 直行¹¹ 東京都市大学

1. 溶融塩炉とは

第4世代原子炉の一炉型である溶融塩炉（Molten Salt Reactor, MSR）は、核燃料物質を溶融塩に溶解させた液体燃料炉である。燃料でありかつ冷却材の役目を持つ燃料塩が、原子炉で発生した熱を炉容器外にある1次系熱交換器へと運び発電等に利用する炉概念が主流であるが、最近では、燃料にペブルやピン形状の固体燃料を用い、溶融塩を冷却材目的のみに利用する炉概念も検討されている。

そもそも溶融塩とはイオン結晶を主成分とした高温で溶融した塩であり、原子炉に用いられる塩としてフッ化物と塩化物がある。原子炉の目的に応じて、ウラン、トリウムや超ウラン元素(TRU)が燃料としてこれらの塩に混合される。

燃料が液体のため、燃料の成形加工が不要であり、再処理との適合性に優れ、沸点が高いため一次系を低圧にできる。原理的にはオンライン処理で燃料の連続供給や核分裂生成物(FP)の連続除去が可能であり、運転に伴い中性子寄生吸収物質として蓄積するFPの反応度影響を軽減できる。また $\text{Th-}^{233}\text{U}$ 系燃料を用いる場合には、 Th-^{232} から U-^{233} を生成する変換パスの途中にある Pa-^{233} が27日と比較的長い半減期を持ち、熱中性子捕獲断面積も40 barnと小さくないため U-^{233} の生産を妨げるが、燃料の連続化学処理が可能な溶融塩炉ではこの影響を緩和でき、熱中性子スペクトル下で燃料増殖が成立する可能性のあることが特徴とされている。

2. 第4世代原子炉の主眼「溶融塩高速炉」

しかしながら、第4世代原子力システム国際フォーラム（GIF: Generation IV international Forum）が主な対象とする溶融塩炉は、固体燃料高速炉の代替炉としてプルトニウムまたは U-^{233} を増殖する、もしくは長寿命の TRU 元素を燃焼する高速スペクトル型の溶融塩高速炉である¹⁾。2016年時点では主に二つの炉概念があり、一つは仏 CNRS で提案された MSFR (Molten Salt Fast Reactor) でその炉心概念を図1に示した。もう一つはロシアで開発中の MOSART(Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter)である。溶融塩炉発祥国の米では FS-MSR(Fast Spectrum MSR)と表現されることが多く、基礎検討のみが行われている。

高速中性子スペクトル型溶融塩炉の研究開発は1960年代から始まり、アメリカ、スイス、チェコ、EU などから燃料塩として NaCl/KCl/PuCl_3 、 $\text{PuCl}_3/\text{NaCl}$ 、 $\text{LiF/BeF}_2/(\text{TRU})\text{F}_3$ や $\text{LiF/NaF/}(\text{TRU})\text{F}_3$ を用いる高速炉概念が提案されている²⁾。溶融塩高速炉の特徴として、1) 燃料サイクル上の自由度が大きく、増殖炉、転換炉、燃焼炉のいずれとしても設計可能、2) 燃焼炉の場合、固体燃料では課題となる発熱や線量の高い TRU 含有燃料の成形加工が不要、3) 燃料/冷却塩のボイド反応度や温度反応度が負、4) 燃料/冷却塩は透

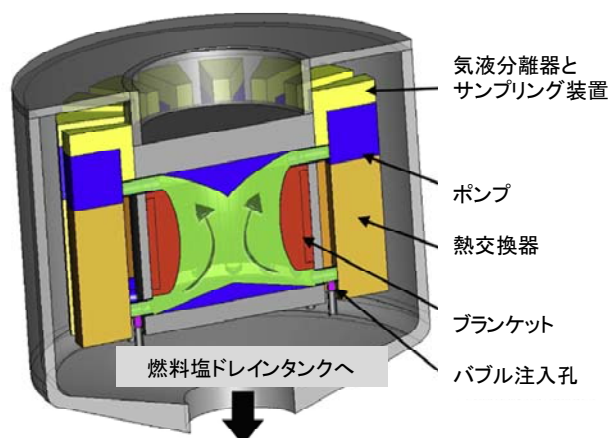


図1 溶融塩高速炉(MSFR)の炉心概念図

明であり可視光での点検が可能、5)炉心は減速材が不要であり除熱可能な臨界形状であれば良いため設計の自由度が高いことなどが挙げられている。

3. 溶融塩炉開発に取り組む各国の動向

OECD は、2001 年に米国が Gen IV の国際共同開発を提唱して以来、GIF の事務局を務め、溶融塩炉委員会を主催している。この GIF 溶融塩炉委員会で研究に義務を負う MOU (Memorandum of Understanding) に署名している国 (連合) は、署名順でユーラトム、フランス、ロシア、スイス、アメリカ、オーストラリアである。

IAEA は近年まで溶融塩炉に関する特別な活動を行っていなかったが、2015 年末、世界的に関心の高まる本炉概念について技術開発状況を把握するための準備会合を開催し、その特性把握と必要な技術の研究開発項目の把握を行った。その結果、溶融塩炉の利点として、1) 高い冷却材温度による熱効率の改善、2) 低い冷却材圧力、3) 高レベル放射性廃棄物の減量化とその半減期の短縮、4) 高い固有安全性、5) 固体燃料棒で生じる燃料ペレットの膨張や被覆管損傷などの工学的課題の解消、そして 6) ウラン、プルトニウム、トリウムを利用し得る燃料サイクルの柔軟性などを特定した。これを受け IAEA は 2016 年末に初の溶融塩炉技術会議を開催している。本会議には、上記の MOU 署名国以外にイギリス、中国、インド、インドネシア、日本を含めた 16 ヶ国 35 名の溶融塩炉専門家が参加した。

EU では 11 のパートナーが協力して 3GWt の大型溶融塩高速炉の安全研究プロジェクト SAMOFAR を推進している。中国上海応用物理研究所(SINAP)は 2011 年から TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) プロジェクトを実施している。TMSR には、被覆粒子燃料を塩で冷却する固体燃料型の TMSR-SF と液体燃料の TMSR-LF の二種類がある。両炉型とも 2MW の試験炉、10MW の実証炉を経て 1GW の商業炉へと発展させる計画であるが、実験炉(2MW)の建設に先立ち溶融塩試験ループを建設し、オンライン再処理技術開発を伴う TMSR-LF は TMSR-SF より 10 年程度遅い展開としている。近年は実験データベースの充実を理由として計画全体がスローダウンしている。

溶融塩炉を取り巻く状況として特筆すべきは、政府の支援を受けずに独自の溶融塩炉概念を追求するベンチャー企業が米国を中心として数多く存在することである。ベンチャー企業には、米に Flibe Energy, Martingale, Transatomic Power, Thoreact、米/加に Terrestrial Energy、英に Moltex Energy、デンマークに Seaborg Technologies, Copenhagen Atomics などがある。各原子炉の特徴を表 1 に整理した。

表 1 Gen-IVの枠組み以外で開発されている溶融塩炉³⁾

原子炉名称	国	設計者	熱出力 (MWt)	電気出力 (MWe)	ユニット数	中性子スペクトル	減速材構造物	燃料	冷却材	進捗段階
IMSR	カナダ	Terrestrial Energy	400	185-192	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
MSTW	デンマーク	Seaborg Technologies	270	100-115	1	熱/熱外	金属被覆黒鉛	フッ化物塩		概念設計
ThorCon	国際コンソーシアム	Martingale	557	250	4	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
TMSR-SF TMSR-LF	中国	上海応用物理研究所(SINAP)	395	168	1	熱	黒鉛	被覆粒子/ フッ化物塩	フッ化物塩	試験炉開発
FUJI 200	日本	トリウム溶融塩国際フォーラム(ITMSF)	450	200	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計完了
Stable (Static) Salt Reactor	イギリス	Moltex Energy	94	37.5	8	高速	N/A	塩化物塩	フッ化物塩	概念設計
SmAHTR ¹⁾	アメリカ	ORNL	125	NA	1	熱	黒鉛	被覆粒子	フッ化物塩	予備的概念設計
LFTR ²⁾	アメリカ	Flibe Energy	600	250	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
Mk1 PB-FHR ³⁾	アメリカ	University of California, Berkeley	236	100	1	熱	黒鉛	被覆粒子	フッ化物塩	予備的概念設計

1)Small Modular Advanced High Temperature Reactor, 2)Liquid Fluoride Thorium Reactor, 3)Pebble-Bed Fluoride- salt-cooled, High-temperature Reactor

4. トリウム燃料原子炉

トリウム燃料は溶融塩炉に限らずあらゆる型式の原子炉で利用可能である。直近 10 年の間には、ハイテク製品に必要不可欠なレアアース資源生産の副産物として生じるトリウムの使途に関心が高まったこともあり、軽水炉、重水炉、溶融塩炉、ガス炉などでのトリウム利用が各国で検討されている。

ノルウェーのハルデン炉では(Th,Pu)O₂燃料の軽水炉利用の許認可取得を目的とした照射研究が実施されており、重水炉(CANDU or PHWR)を有するインド、カナダ、中国では燃料バンドル内の一部もしくは全ての燃料ピンを ThO₂燃料として利用する方策を検討している。特にインドでは、本バンドルを出力分布平坦化に活用したり、取出後に U-233 生成量の実測を行うなど、国策としてトリウムサイクルの実現に向けた歩みを進めている。著者らの都市大/東工大の研究グループでは、PWR の一次冷却材を重水とした稠密炉心 ($V_m/V_f=1.0$) でナトリウム冷却高速炉に比肩する燃焼度と増殖性能を達成する重水冷却トリウム増殖炉の概念を提示している。

5. 今後の展望

上述の通り、第 4 世代原子炉としては溶融塩高速炉が主対象とされているが、数値解析で検討される概念検討レベルにあり、現時点の技術成熟度 (Technology Readiness Level) は低い段階に留まっている。一方、中国や多くのベンチャー企業が取り組むのは熱中性子スペクトル型の溶融塩炉である。その基本的炉心構成は、1965 年に ORNL に建設され 13,000 時間の全出力運転を行った 8MWt の実験炉(MSRE)をベースとしているため、溶融塩熱中性子炉開発は既に一定の TRL および製造技術成熟度レベル (Manufacturing Readiness Level) にあるとの見方もある。

その技術実証に向けた取り組み例として、カナダの Terrestrial Energy が提案する統合型溶融塩炉 IMSR(Integral Molten Salt Reactor)がある。2019 年後半にも設計認証 (DC) 審査を NRC に申請する計画で、IMSR 商業用初号機を 2020 年代に建設することを目標としている。2017 年の夏には、オンタリオ州にあるカナダ原子力研究所 CNL のチョークリバー研究所所有のサイト内で建設に適した地点を特定するためのフィージビリティ・スタディ (FS) を開始している。また、一定のトリウム資源を有するインドネシアは、国際コンソーシアム Martingale が開発する ThorCon 炉開発で MOU 締結し、国内の許認可体制の整備を検討している。

1970 年頃に一旦開発中断となった溶融塩炉開発はやや姿を変え復調の兆しがある。原子力に向けられる目は厳しさを増す一方、世界的には、エネルギー確保と環境保全を両立し得る原子力のポテンシャルを再認識する向きがその原動力となっているようだ。原子力を”rebrand”したいとの思いが溶融塩炉開発を活性化させ、原子力界に新潮流を生み出している状況を注視したい。

参考文献

- 1) M. Allibert et.al, “Handbook of Generation IV Nuclear Reactors”, Pages 157-188 (2016)
- 2) D. E. Holcomb et.al., “FAST SPECTRUM MOLTEN SALT REACTOR OPTIONS”, ORNL/TM-2011/105 (2011)
- 3) IAEA Publication, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)" 2016 Edition

* Naoyuki Takaki¹

¹ Tokyo City University