

トリウム熔融塩炉の開発の現状について

2013-5-9

NPO 法人・トリウム熔融塩国際フォーラム

吉岡律夫・木下幹康

目次：

- 1) 熔融塩炉の概念
- 2) 熔融塩炉の特徴
- 3) 米国での開発実績
- 4) 中国の開発計画
- 5) 欧州の状況
- 6) チェコの状況
- 7) フランスの状況
- 8) ロシアの状況
- 9) インドの計画
- 10) 韓国の状況
- 11) 日本の取り組み状況

1) 熔融塩炉の概念

熔融塩炉は、フリーベ($\text{LiF}-\text{BeF}_2$) と称する弗化物熔融塩に、親物質としてトリウムを ThF_4 の形で混入した混合熔融塩 (約 500°C 以上で液体) に、核分裂性物質として少量の UF_4 または PuF_3 を混合したものを燃料とする液体燃料炉で、この混合物 (燃料塩) と黒鉛減速材及び数本の制御棒を並存させて炉心を構成し、燃料塩自体を循環ポンプにより炉心外に循環させる炉である。

炉心内の減速材は黒鉛で、炉容器及び配管・機器等は改良型ハステロイ N 合金 ($\text{Ni}-\text{Mo}-\text{Cr}-\text{Fe}$ 合金) で作られ、炉寿命期間中、燃料塩との両立性が良く、十分な構造強度を維持できる見通しである。

炉心で発生した熱は、循環により炉外の熱交換器を介して、 NaBF_4-NaF 熔融塩からなる二次冷却材に伝熱し、さらにこれを熱源とする蒸気発生器によって発電用水蒸気を作る。この構成はナトリウム冷却高速炉と似ているが、熔融塩炉では高い水蒸気温度により高い熱効率 (44%) が期待できる。

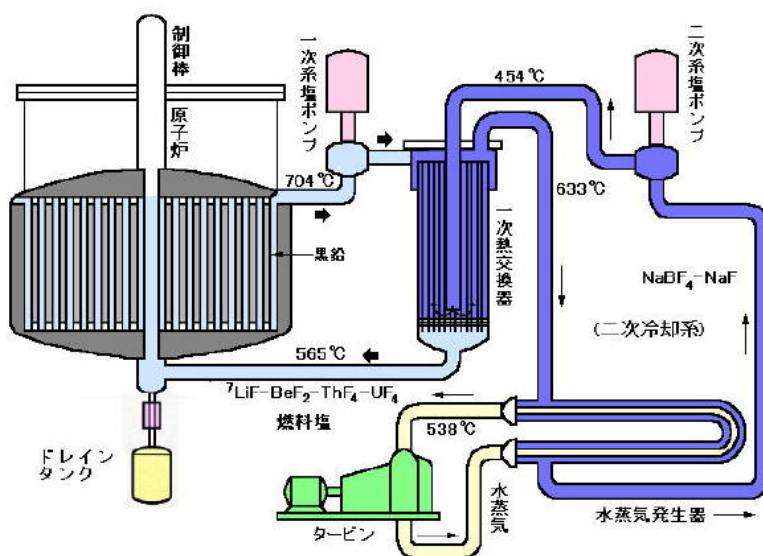


図1 熔融塩炉の概念

2) 熔融塩炉の特徴

熔融塩炉は、液体燃料炉であること、親物質として U238 でなく Th232 を用いること等により、従来の低濃縮ウラン型やプルトニウム・ウラン型の固体燃料炉とは違う優れた特長がある。

[長所]

- ① 液体燃料なので、燃料成型加工が不要であり、経済性に優れ、燃料の放射線損傷や燃料破損が起きない。
- ② 燃料交換が不要であるので、連続運転が可能で、稼働率を高くできる (FUJI 設計で 7 年)。
- ③ 燃料転換率が 1.0 近傍と自給自足でき、燃料経済性・資源利用に優れる。
- ④ 基本的に余剰反応度が不要な為、制御棒が少数で済み、核的暴走事故の危険が殆どない。
- ⑤ 燃料塩は即発性の負の大きな温度係数を有するので、安全性を高くできる。
- ⑥ $\text{U233}-\text{Th}$ サイクルなので Pu や超ウラン元素の発生量が少ない (Pu 生成量は U 燃料軽水炉の 1/1000 以下)。
- ⑦ 弗化物熔融塩は高温でも化学的に不活性であり、蒸気圧も低く、常圧で使用できる。
- ⑧ 炉心出口温度が 700°C 位なので、発電効率は 44% と、軽水炉より 3 割以上高い。
- ⑨ 万一燃料塩が炉外に流出しても自重で下方のドレインタンクに回収でき、炉心の黒鉛減速材から分離するため再臨界事故を防げる。

- ⑩ 大量の放射能流出をもたらす過酷事故の可能性を大きく減らせる。これは液体燃料の固有の特性（自重落下）を生かしたもので、長期の電源喪失事故に対応できる設計も提案されている。
- ⑪ U233 と共に生じる微量 U232 の崩壊過程での高エネルギーガンマ線（2.6MeV）により、核拡散抵抗性に優れる。
- ⑫ Th 利用により核燃料資源を U 以外に拡張でき、また軽水炉からの回収 Pu の利用・消滅にも使えるので、既存軽水炉とも共存できる。
- ⑬ 小型炉が有望であるが、大型炉も設計可能であり、さらに市場が広がる可能性が大きい。

後述のように米国で実験炉が成功し、4 年間の良好な運転実績を残したものの、大型の実用炉を開発する為に必要な開発課題が残されており、以下にその項目を列挙する。

[課題]

①黒鉛と構造材の長期にわたる健全性の確証

4 年間のデータがあるとは言え、高温の熔融塩、照射環境のもとで、数十年間の供与期間中の材料劣化メカニズム把握と対策を確立する必要がある。これらは実験炉を建設し運転する中で解決する必要がある。

②熔融塩の化学状態制御

熔融塩中に溶出した不純物（Cr, Fe）や湿分（H₂O）および燃焼で生じる核分裂生成物は熔融塩の化学状態を変化させるため、運転中の酸化還元（REDOX）制御が必要となる。実験炉 MSRE ではウランの価数変化と Be 金属の添加でこれに成功したが、実用炉の開発では効率的な新技術の開発が望まれる。また軽水炉燃料の経験では放射線分解が予想外の材料問題（SCC 等）を起こすことも有り、長期間の使用環境における研究が必要である。

③熱交換器・蒸気発生器の改良と開発

温度差を生じる熱交換器などでは、熔融塩の凍結事故を防ぐ工夫と、腐食生成物の質量移行、付着を防ぐ技術（防食・析出の制御技術）が必要になる。また、蒸気発生器は実験炉 MSRE では検証されなかったが、もんじゅ等のナトリウム冷却高速炉の技術が活用できる。

④長期の保守のための設備の開発と大型機器の開発

熔融塩炉の炉心には黒鉛以外の炉内構造物がなく、制御棒も通常引き抜かれているため、一次系の動的機器は燃料塩ポンプだけである。従って、保守対象機器は少ないが、ポンプ、熱交換器などを保守する機器の開発が必要である。また、大型化に伴う各種機器、特にポンプの大型化が必要である。これらの課題の詳細については、米国 ORNL の最終報告書に示されている。

⑤液体燃料炉の安全基準と許認可手法の確立

事故シナリオが軽水炉と大きく異なる点として、蒸散しないが凍結する可能性のある弗化物熔融塩の特性やその流動挙動に基づく設計には、新概念が多く取り入れられており、新しい考え方で安全基準を策定することが必要になる。

⑥廃炉技術の検討と開発

今日、新しい概念の原子炉を一般社会に受け入れてもらうためには、原子炉設計時から廃炉までを考慮する必要がある。米国実験炉 MSRE の除染・廃炉については ORNL での検討報告書があり、これらを参考に、実用炉設計において除染・廃炉シナリオと合わせた技術開発が必要である。

なお、米国実験炉から 40 年経過し、諸般の事情も変化したため、上記の工学的課題以外に、熔融塩炉技術者の育成が必要である。

3) 米国での開発実績

米国オークリッジ国立研究所(ORNL)では、ワインバーグ所長の下、トリウム熔融塩炉の開発を推進した。そして、1954年に最初の実験炉として、航空機用原子炉 ARE を建設・運転した。ARE は熱出力 3MWt で、減速材はベリリウム酸化物、熔融塩は NaF-ZrF_4 を採用し、860℃と言う高温を達成した。

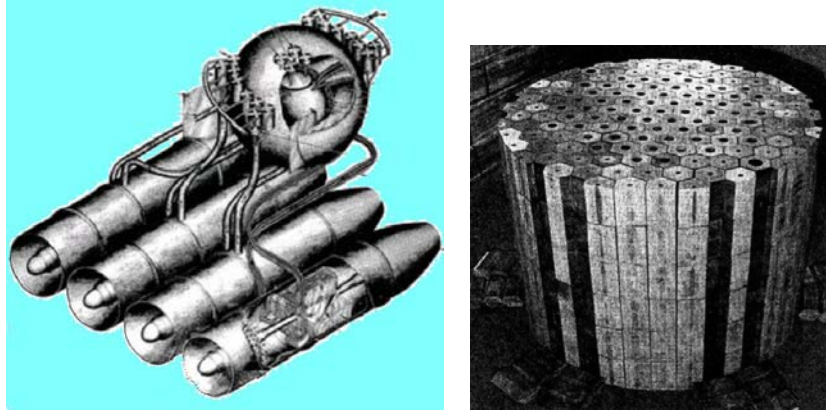


図2 ARE の搭載概念と、炉心の BeO 減速材

その後、熱出力約 8MWt の MSRE (熔融塩実験炉) を 1965 年に完成させ、冷却材塩としてフリーベが用いられた。MSRE は 4 年間にわたり、事故や大きなトラブルも無く、非常に良い運転実績を示した。但し、発電系統は設置されていなかった。

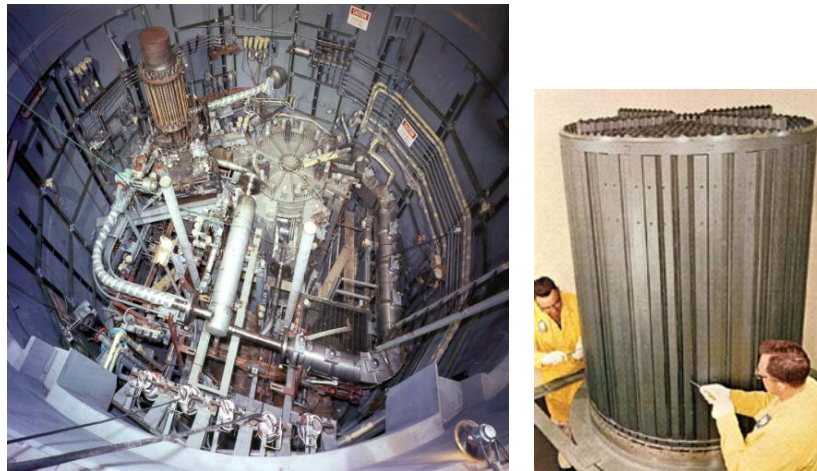


図3 MSRE の上部構造と黒鉛減速材

MSRE の成功後、ORNL は 1970 年代に 100 万 KWe の MSBR (熔融塩増殖炉) を設計した。MSBR は、出口温度約 700 度の弗化物熔融塩 ($\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$) を用い、減速材の黒鉛を 4 年毎に交換し、オンライン再処理設備を併設することにより増殖比 1.06 を達成できる、という設計であった。

しかし、その後、1976 年に熔融塩炉研究は全て中止された。その理由については、ORNL 所長のワインバーグは自伝で、①当時の潜水艦に搭載された軽水炉が陸上の発電炉用に先行した、②原爆のために U-Pu サイクルが先行した、③Pu を使うための高速増殖炉の開発予算が付いて賛同者が多かった、④熔融塩炉は今までの原発と全く異なる概念で理解者が少なかった、⑤熔融塩炉では原爆用の Pu を生み出せないのが好まれなかった、と述べている。

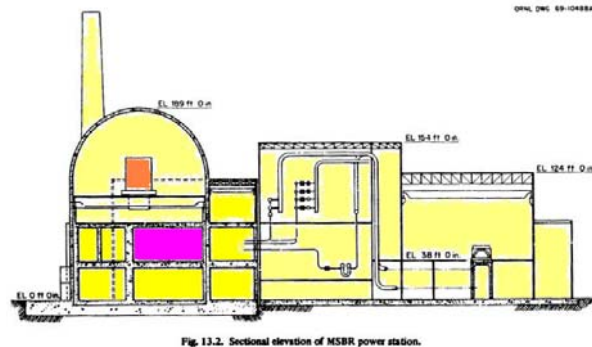
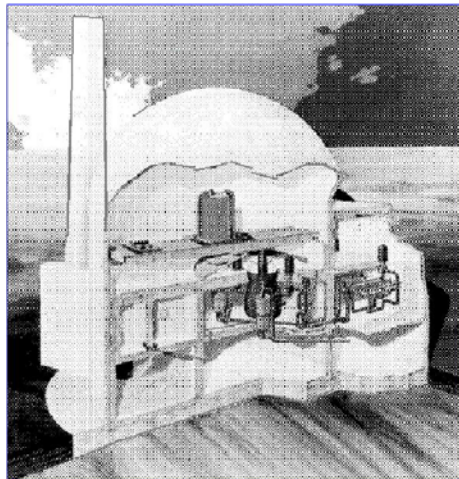


図4 MSBRの鳥瞰図と断面図

その後、米国では停滞状態が続いたが、2002年にGIF（第4世代原子炉）の6候補の1つとして選定され、米国はオブザーバーとして参加し、弗化物塩冷却高温炉 FHR（Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor）を提案している。FHRとは、高温ガス炉で開発された黒鉛被覆燃料を使用し、冷却にフリーベ熔融塩を使用する原子炉であり、2000年代中頃からORNLの概念設計をもとにMIT等の大学により個別要素研究（材料腐食、熱流動、燃料交換）が進められてきたものである。その一環として2012年末より弗化物熔融塩の照射実験がMIT原子炉で開始されている。

また、後述の中国のトリウム熔融塩炉開発計画に協力するという趣旨で、米国DOEと中国科学院との間で協力協定が締結されたとのニュースがあった。ただ、現時点では、協力範囲は、上記のFHRに限定されている。

現在、ORNLでは、上記のFHR研究の一環として、フリナック（LiF-NaF-KF）を用いたインコネル600製の熔融塩ループを製作し、熱伝達試験などを始めつつある。

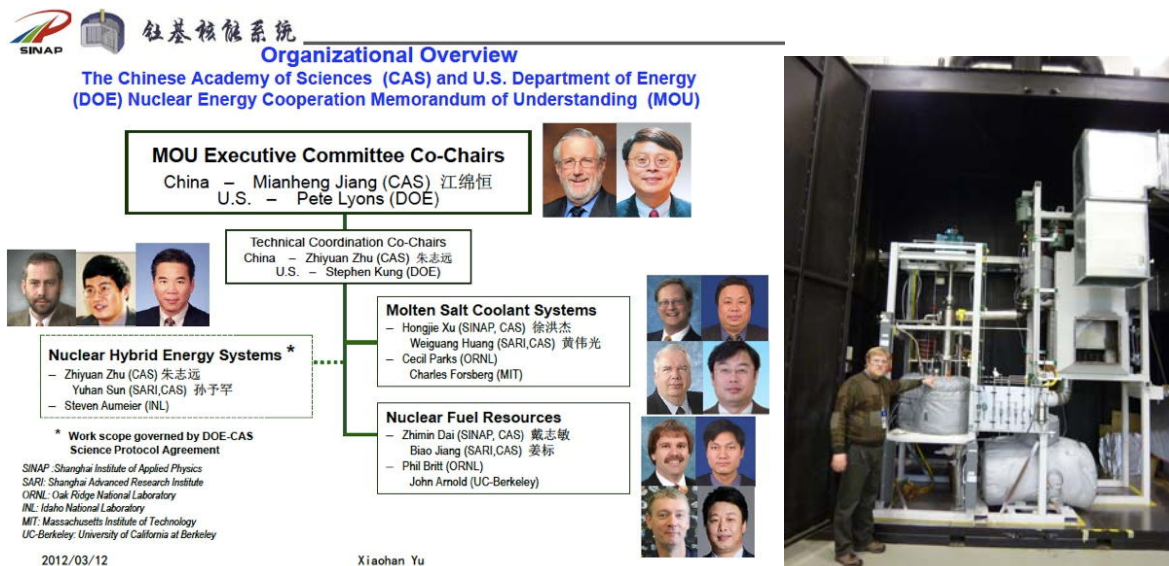


図5 米中間の協力協定の枠組みと、ORNLの熔融塩ループ

米国では、エネルギー保障の観点から、また米国発の技術である熔融塩炉を活用したいという観点から、トリウム熔融塩炉を見直そうという風潮が見られ、トリウムエネルギー連合という民間団体がトリウムエネルギー会議を2009年以降、毎年開催している。

4) 中国の開発計画

2010 年 3 月に、中国はトリウム熔融塩炉プロジェクト開始を政府決定し、その後、2011 年 1 月に中国・科学院が公式発表を行なった。

中国がトリウム熔融塩炉の開発計画を決定した理由については、2012 年に上海で開催されたトリウムエネルギー会議で中国科学院幹部が「中国に豊富にあるトリウムを利用してエネルギー自給を図るため」と述べている。また「熔融塩炉は高温・低圧であり、水素製造にも活用できるため」と述べている。

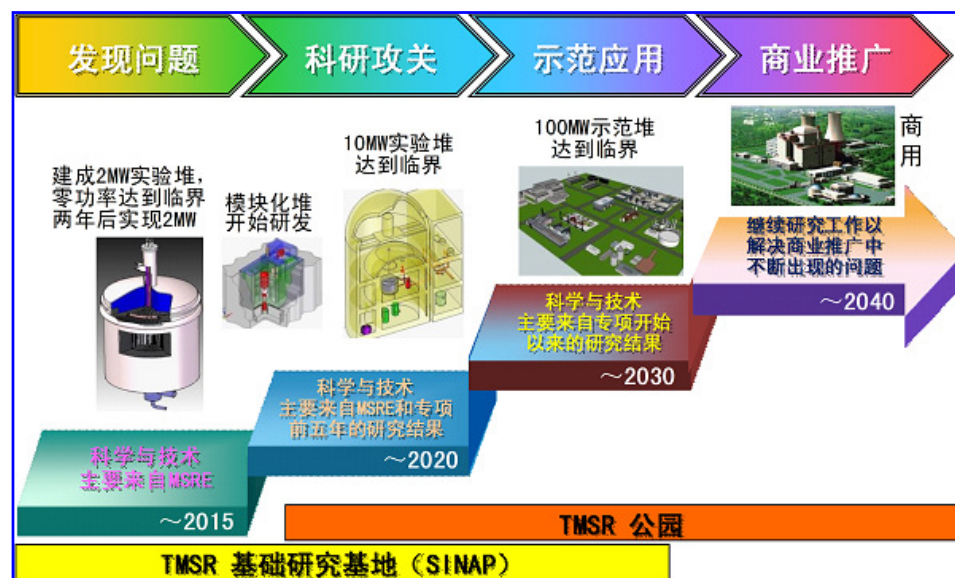


図6 中国の熔融塩炉開発計画

本プロジェクトは、中国政府の Innovation-2020（先端開発研究プロジェクト）のひとつとして選定され、中国科学院／上海応用物理研究所（以下 SINAP）が担当している。SINAP は中国で最大の科学施設と言われる SSRF（シンクロトロン放射光施設、電子線 3.8GeV）を 2009 年に建設完成させた実績があり、高い技術を持つ研究所である。SINAP がトリウム熔融塩炉研究を選択した背景には 1970 年代初めに弗化物固体塩を用いた臨界実験炉を建設・運転したことがある（図 7 左）。

2013 年 4 月時点で約 500 名の研究者（334 名が SINAP 正規職員、平均年齢 31 歳）がトリウム熔融塩炉の開発に従事しており、さらに増員する予定（2015 年に 700 名）とのことで、中国側の力の入れ方が分かる。

SINAP の最初の実験炉（熱出力 2MW）は弗化物熔融塩を冷却剤にのみ用い、球状で固体の黒鉛被覆粒子燃料による熔融塩冷却炉（FHR: Fluoride cooled High-temperature Reactor）で、2017 年に臨界の予定である。FHR の設計と安全性（許認可対応）は米国 DOE との共同研究で進めるとのことである（図 5 参照）。具体的には、米国原子力学会が委員会（ANS 20.1）を設置し、米中が共同議長となって、FHR の安全基準を策定する活動を 2013 年から始めることになっている。2013 年 5 月時点では、日本が参加できる見通しは得られていない。

平行して開発を進めているトリウム弗化物熔融塩を液体燃料として用いた実験炉（熱出力 2MW、miniFUJI 相当の設計仕様）は 2020 年頃に臨界の予定としている。SINAP では、トリウム資源利用と廃棄物最小化にはこの液体燃料熔融塩炉が本命としている。2012 年から 5 年間の開発予算として約 500 億円（500M\$）が計上されている。

引き続き 2020 年以降には電気出力 10Mwe クラスの発電実験炉を建設し、2030 年頃に電気出力 100Mwe の発電実証炉を建設するとしている。いわゆる小型炉に必要な電力は 100Mwe（10 万 KWe）なので、こ

の時点で、小型炉市場に参入できる製品化が完了することになる。その後、大型化を目指しているように思われ、SINAP 関係者からの話では、2040 年までの約 30 年間に、3000 億円の開発予算をかける、という構想があるとのことである。

中国政府レベルのトリウム原子力計画では、黒鉛減速・オンライン再処理なしの熔融塩炉を主眼とし、初期燃料の U233 は、平行して開発する ADS（陽子加速器による原子核破砕中性子を用いトリウムから U233 を製造するシステム）で大量製造する。ADS については中国科学院・近代物理研究所が SINAP と同額の約 500 億円相当の予算で研究を始めている。これらの全体構想は明示されていないが、日本の小型熔融塩炉 FUJI 計画と燃料サイクルの概念 THORIMS-NES（トリウム熔融塩核エネルギー協働システム：参考文献 2）と類似の計画と考えられる。

実験施設として、2011 年末に、全ての部品を中国国内で製造した熔融塩ループを完成させている。このループは硝酸塩を用いたもので、配管やポンプはステンレスである。2013 年 4 月時点では、第 2 の熔融塩ループが完成し試運転が行われている。ここでは、フリナック（FLiNaK）と呼ばれる弗化物塩（LiF-NaF-KF）を使用し、ニッケル系高温材料（ハステロイ C276）を配管などに用いており、その仕様は、熔融塩冷却炉 FHR の基本設計条件を満たしている。2013 年からフリーベ（FLiBe）とハステロイ N を用いた実験炉模擬ループを設計・製作する計画としている。

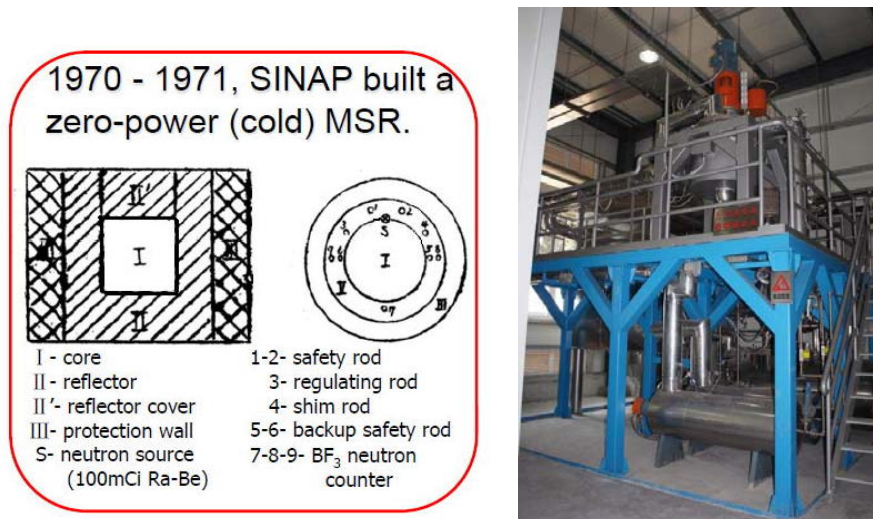


図 7 中国 SINAP のトリウム固体塩の臨界実験炉と、熔融塩ループ

5) 欧州の状況

GIF（第 4 世代原子炉）は 2002 年に熔融塩炉（MSR）を含む 6 炉型を選定し、GIF-MSR の運営委員会が 2005 年から活動している。なお、GIF-MSR の正式加盟国はユーラトム（欧州原子力共同体）とフランスのみで、ロシアと米国はオブザーバーである。日本（トリウム熔融塩国際フォーラム）も不定期にオブザーバーとして参加している。

現在、GIF-MSR では、下記 2 案が出ており、熔融塩技術のような共通要素については協力する可能性はあるが、炉型が異なるので、検討は別個に進められている模様である。

- ① 欧州提案の、燃料も冷却材も熔融塩の炉：MSFR（Molten Salt Fast Reactor）
- ② 米国提案の、固体燃料・熔融塩冷却炉：FHR（Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactor）

一方、欧州での国際協力に関しては、下記のように、欧州各国はユーラトムの枠組で国際協力し、これにロシアも参加している。

- ① MOST プロジェクト (review of Molten Salt reactor Technology, 2001-2004)

- ② ALISIA プロジェクト (Assessment of LIiquid Salts for Innovative Applications, 2007–2008)
- ③ EVOL (Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System, 2010–2013)
- ④ ACSEPT (ACtinide recycling by SEParation & Transmutation, 2008–2012)

また、EU関係機関で作成された資料では、2030 年に 20–50MW の実験炉を建設し、2040 年に原型炉建設と、かなり長期の計画となっている。

		2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
		scoping & screening		viability	performance	demonstration			
Basic R&D (liquid salts)		salt selection & phenomena identification		assessment of technologies					
MSFR (breeder, burner)	viability, performance	innovation		viability	performance				
	optimization					optimisation			
	MSFR demo (20-50 MW)					construction	demonstration		
	MSFR prototype (with fuel processing unit)							construction	operation
MSFR fuel cycle	reference scheme	innovation		viability					
	integration				fuel cycle performance				
	fuel processing pilot					pilot demo			
	coupled pilot and demo						coupling demonstration		

図 8 欧州における MSFR 開発計画

6) チェコの状況

チェコの国立研究所 NRI (Nuclear Research Institute Rez plc。現在民営化) において、主に弗化物熔融塩による核燃料再処理技術 (FREGAT) を研究している。元々、これらの研究は、軽水炉や高速炉の固体燃料を再処理する乾式再処理法の一つであるが、今までの乾式再処理法が塩化物塩を使用しているのに対し、FREGAT は弗化物塩を使用しているのが特徴である。再処理した Pu や MA (超ウラン元素) を熔融塩炉で消滅処理することを最終目的としているので、燃料塩と同じ弗化物塩の方が好都合なためである。また、弗化物塩は塩化物より扱い易いとされている。

その他、実験炉を使用した実験としては、NRI の軽水炉型の臨界実験集合体 LR-0 での炉物理実験や、LVR-15 炉での照射実験がある。

また、2000 年頃に、チェコの重工メーカー SKODA 社で弗化物熔融塩ループ ADETTE (下図) を建設したが、実験結果などは公表されていない。



図 9 チェコの FREGAT 実験装置と、熔融塩ループ

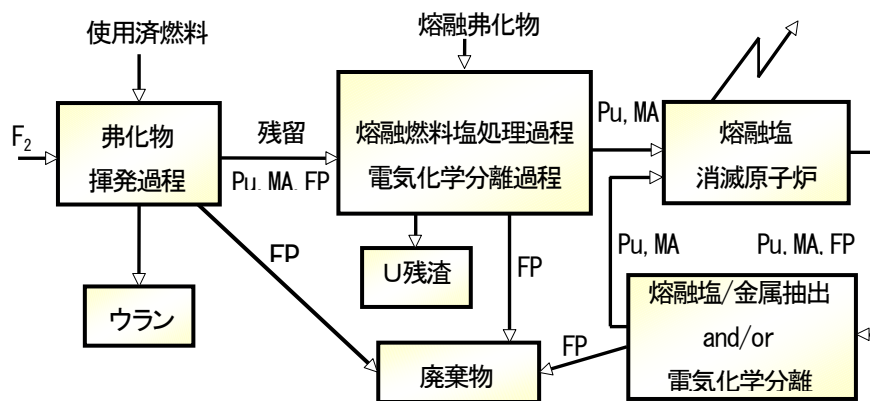


図 10 FREGAT フロー図

7) フランスの状況

1980 年代に仏原子力庁 CEA と仏電力会社 EdF とは熔融塩炉を検討し、1990 年代に、Pu や MA の消滅処理の目的で、**AMSTER** (Actinide Molten Salt TransmutER) プロジェクトを実施した。当初は米国 MSBR と同様に黒鉛減速で、LiF-BeF₂ 熔融塩を採用していた。

その後、2000 年代になって、高速炉型の熔融塩炉は Pu や MA 消滅に向いているのではないかと期待から、減速材の黒鉛を用いない高速中性子型熔融塩炉 (MSFR) を検討対象にし、主にアクチナイド消滅炉として国立研究所 **CNRS** が研究している。

今の所、概念設計の段階で、一部、基礎的な実験を開始した模様である。例えば 2012 年には、熔融塩ループを製作し、フリナック (LiF-NaF-KF) 熔融塩を使用し、今後、気体状 FP の分離実験を行なう予定である。

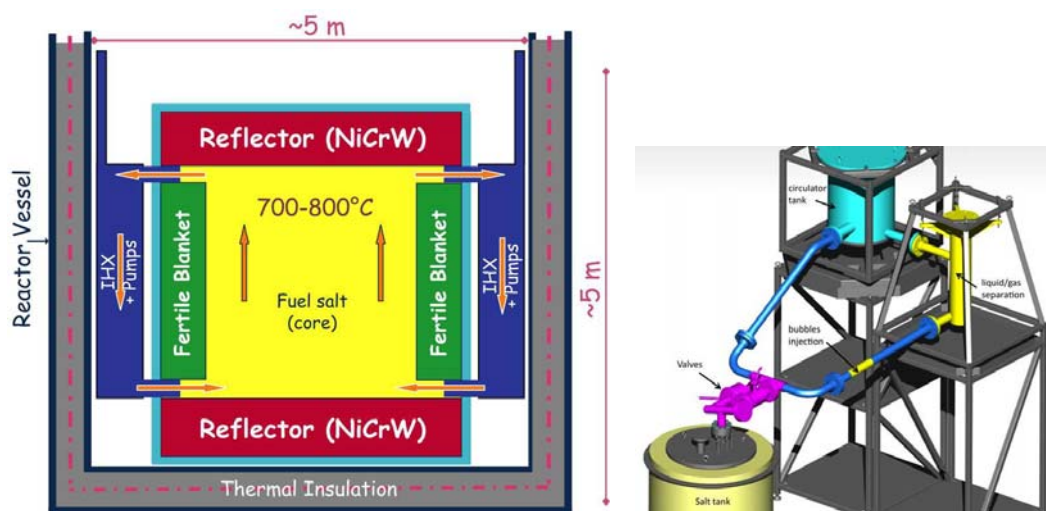


図 11 フランスの MSFR 炉の概念図と、熔融塩ループ

8) ロシアの状況

ロシア (旧ソ連) は、1970 年代にフランスが開発を始めた弗化物熔融塩による核燃料処理技術を引き取って FREGAT 法と命名し、チェコと共同で FREGAT-2 として開発を進めた。また、1980 年代からは原子炉についても、Pu や MA の消滅炉として研究している。ロシア内のプロジェクト名は **MOSART** (MOlten Salt Actinide Recycler & Transmuter) である。ロシア国内の研究機関は、クルチャトフ研、RIAR 研、ITP (別名 VNIITF) 研などである。

Голова шнека

Уровень топливной соли

Патрубок отвода

Охлаждение турбокомпрессора

Кольцо опорное

Плита перфорированная

Крышка

Защитный кожух

Опорный стержень

Защитная плита

Опорный стержень

Корпус

Отверстие

1 м

図 12 ロシアの熔融塩炉 MOSART 概念図

9) インドの計画

インドは2012年から熔融塩炉研究プログラムを開始した。インドは、中国同様、国内にウラン資源が殆ど無いが、トリウムは豊富に取れるので、エネルギー自給の為、トリウム固体燃料炉の研究を永年続けてきたことで知られている。

2013 年 1 月にインド原子力庁が国際会議「トリウム熔融塩会議 (CMSNT2013)」を BARC (バーバ原子力研究所) で開催し、150 名が参加した。会議の論文集には講演論文の他に、過去のインドにおける熔融塩炉や乾式再処理技術の論文 25 件も収録されており、熔融塩炉についても以前から水面下で研究していたことが分かる。例えば、フリナック (LiF-NaF-KF) を使用した熔融塩自然循環ループを用いた材料試験結果などが収録されていた。

今後も、従来の固体トリウム燃料炉の路線は維持する模様だが、2012 年に熔融塩炉研究計画を開始したとのことである。例えば、黒鉛被覆固体燃料・鉛ビスマス冷却炉を建設する計画だったが、これを熔融塩冷却炉（FHR）に変更する検討が始まっているとのことである。燃料も熔融塩と言う本命の熔融塩炉については、政府決定が出ていないが、その方向に進む可能性は高いと思われる。

インドが熔融塩炉の研究プログラムを開始した理由は明確ではないが、固体トリウム燃料の再処理が困難とされていることと、上記会議に中国 SINAP 幹部を 2 名招待していたことから、中国の開発計画に影響されたものと推測される。



図 13 インドのトリウム熔融塩会議 2013 の風景と、BARC の熔融塩ループ

10) 韓国の状況

2012 年 11 月 10 日の中国新聞記事によると、韓国は、米韓原子力協定の改定に関連して、今後、乾式再処理の研究を米韓共同で進めるとのことである。これと関連するかは明確ではないが、韓国の蔚山科学技術大学が、2013 年 1 月に熔融塩炉国際ワークショップを開催し、今後、熔融塩炉の研究を進めるとのことであった。今後の韓国の動向が注目される。



図 14 韓国のトリウム熔融塩炉ワークショップ

11) 日本の取り組み状況

古川和男らのグループが提案した 10-30 万 kWe の小型熔融塩炉 FUJI は、設計の工夫により、ORNL が提案した連続再処理設備を削除し、さらに黒鉛取替をせずとも 30 年間の運転が可能であり、燃料も自給自足できることを示した。また、Pu の生成量は軽水炉の 1/1000 以下であり、超ウラン元素の生成も軽水炉の 1/25 であることを示した。彼らが小型炉をメインにした理由は世界のエネルギー問題を解決する為に、世界市場への展開を容易にするためである。但し、100 万 Kwe の大型熔融塩炉の概念設計も実施している。

さらに、軽水炉からの Pu を初期核分裂性物質として利用する設計を提示し、原爆材料となる Pu を殆ど生産しない点と、軽水炉からの Pu をエネルギーに変換しつつ効率よく消滅処理できる点が評価され、2006 年の論文「核拡散防止への実効ある提言」が佐藤栄作賞・最優秀賞を受賞した。

その他、超ウラン元素の生成が非常に少ないこともあって、超ウラン元素消滅炉として利用する設計についても提示している。なお、半減期の短い放射性廃棄物については、数百年の保管で減衰し、安定な状態となる。また、これらの概念について、下図に示す。

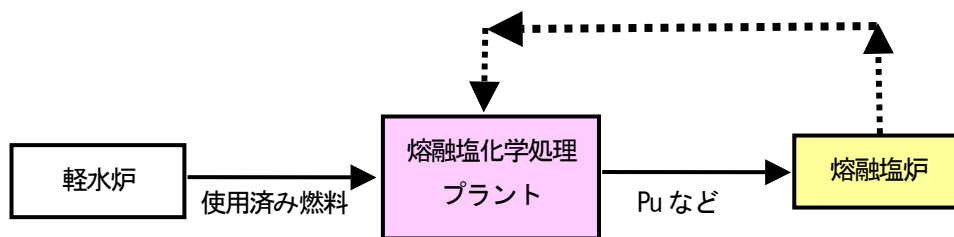


図 15 軽水炉と熔融塩炉との関連図

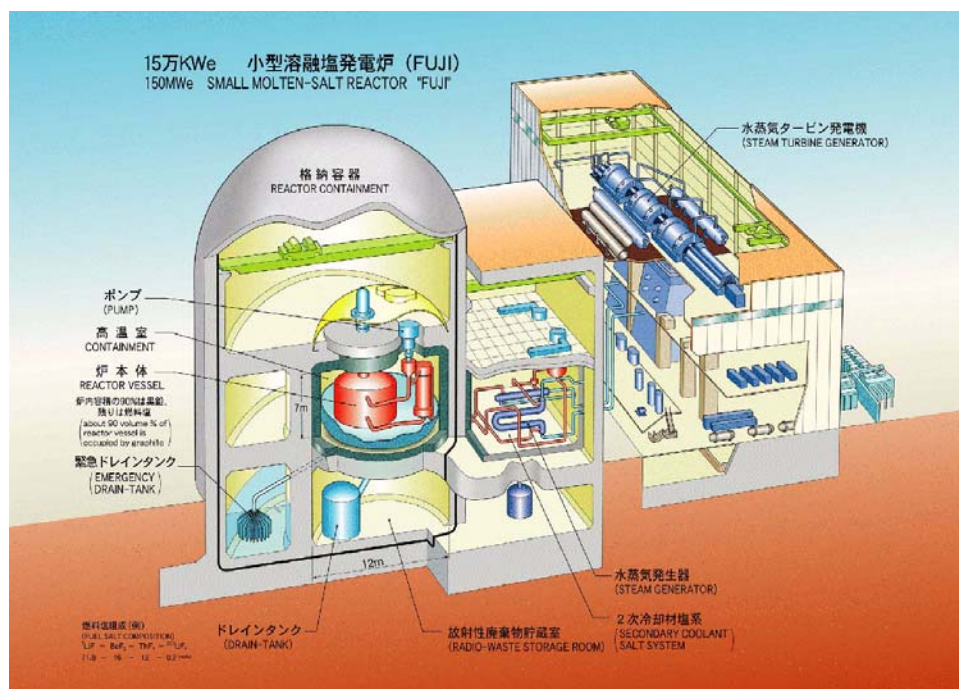


図 16 FUJI (小型熔融塩発電炉「不二」) (参考文献 1)

また、当面は、軽水炉から取り出される Pu を初期燃料として熔融塩炉を起動するが、大規模な熔融塩炉導入が必要な場合は、今後開発する ADS (陽子加速器による燃料増殖施設) を用いて、トリウムから大量の U233 を製造することとし、これらを統合したシステム「THORIMS-NES (トリウム熔融塩核エネルギー協働システム)」が提示されている。なお、本章で述べた各種設計の結果や安全解析の結果については、参考文献 2 に示されている。

その後、2008 年に NPO 法人トリウム熔融塩国際フォーラムが設立され、世界 13 カ国の熔融塩炉研究者を結集し、教育・研究・広報活動を実施している。本 NPO は、2013 年 5 月までに 11 回の講演会・研究会を開催し、その他、海外での講演も実施している。特に、中国 SINAP とは約 10 回の会合をもち、上海でワークショップも開催している。また、本 NPO は、2005 年に GIF-MSR グループが設立されて以来の不定期オブザーバーとして、海外と情報交換を行なっている。

その他、国内では、電力会社の公募研究により、大学と共同して、熔融塩炉の安全性基礎研究が行われるとのことである。



図 17 上海でのワークショップ参加者一同

ところで、熔融塩炉のキー技術は、①熔融塩技術、②炉内黒鉛製造技術、③炉容器材料製造技術（ハステロイN合金）、④高温融体技術、の4つであるが、幸いにも我が国はこれら全てを持っており、世界的にも優位な立場にある。また、このことは、上記諸外国との国際協力を進める際にも有利な点である。以下にこれらのキー技術についての国内状況を示す。

①熔融塩技術

熔融塩（弗化物塩）は発電用技術としては、商用化原子炉である軽水炉や重水炉などの「湿式」とは異質であり、馴染みが少ない。しかし再処理では、先進的な核種分離技術として、塩化物の熔融塩を利用した「乾式」の研究が電力中央研究所などで開発が進められてきた。また、フリーベ熔融塩（ LiF-BeF_2 ）は核融合炉ブランケットにも使用されることから、核融合技術の一環として核融合研究所を中心に各大学で研究されている。その他、希土類抽出技術などの研究者もあり、国内の熔融塩研究者は海外よりも多く、日本に優位性がある分野である。また、原子炉用の熔融塩ポンプは、通常の遠心ポンプであり、既に国内企業が一般産業用に製造している。過去に国内で製作された原子力関連での数件の熔融塩ループは、全て同社のポンプを使用している。

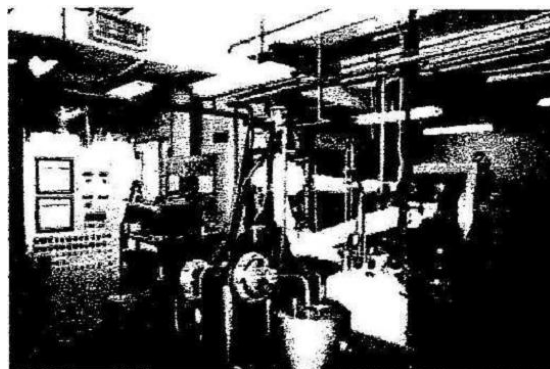


図 18 原研の熔融塩ループ

②黒鉛製造技術

黒鉛は熔融塩炉の唯一の炉内構造物であり、稠密性・耐照射性などが要求される。世界的には、原子炉級黒鉛の製造は、黒鉛原子炉を多数製造してきたロシアが先行していると思われるが、近年の高温ガス炉の減速材として、国内企業も製造して国内外に供給しており、日本のモノ造り技術を活かせる分野である。

③炉容器材料製造技術（ハステロイN合金）

ハステロイには多くの種類があるが、熔融塩炉の炉容器や配管等で使用する金属はハステロイN合金であり、フリーベとの共存性が良いことが分かっている。現在、世界でハステロイNを商業的に供

給しているのは、開発した米国メーカー 1 社と、国内 1 社のみと言われている。

④高温融体技術

熔融塩は化学的に不活性であり、熱衝撃も液体金属に比べ小さい。従って、もんじゅ等の高温融体の取扱い技術が活用できると考えられる。

また、米国実験炉で実証されなかった蒸気発生器に関しては、シェル（容器胴体）内に蒸気発生用の細管を置く直管型の過熱型蒸気発生器なので、製作は比較的容易と思われるが、ハステロイ N を使用する予定なので、新規開発が必要である。

上記の要素技術を統合したトリウム熔融塩炉の開発を仮に単独で行なう場合の開発費用と期間を試算すると、小型実験炉 miniFUJI（500 億円）、FUJI 開発（900 億円）、熔融塩化学処理研究施設（300 億円）、熔融塩化学処理小型プラント（500 億円）で、合計 15 年間で約 2200 億円と推定されている。従って、費用的な面からも、欧米諸国のように国際共同研究プロジェクトに参加するか、または主体的に運営するという選択肢がありえる。例えば、前記チェコで実施されている熔融塩（FLiBe）炉物理試験や、ノルウェーのハルデン炉を利用したトリウム固体燃料の計装集合体照射試験（実施中、下図）や炉内計装付きの熔融塩照射試験（予備検討中）は、国際的にも関心もたれている。

上記の研究に加えて、弗化物熔融塩につながる技術として、軽水炉の使用済み燃料からウランを弗素により揮発回収する技術開発がある。この部分は前出のチェコ・ロシアの熔融塩再処理技術（FREGAT）の最上流過程であり、日本でも JAEA 等の国内研究機関で実証されている。

また、上記の熔融塩化学処理研究施設に関しては、弗化物熔融塩という独自性を活かして、福島事故の熔融燃料の処理や、ガラス固化体の更なる減容に展開できる可能性がある。現在、国内でも弗化物熔融塩の可能性に注目が集まりつつあり、原子力学会では国内の関係専門家を結集した検討に向けて「熔融塩技術の原子力への展開」研究専門委員会の設立準備が進められている。

日本の優れたモノ造り技術を生かし、上記の要素技術を統合したトリウム熔融塩炉を開発することは、世界展開が可能で魅力ある技術目標を提示するものであり、日本の原子力産業の活性化と人材育成のためにも極めて有効と思われる。

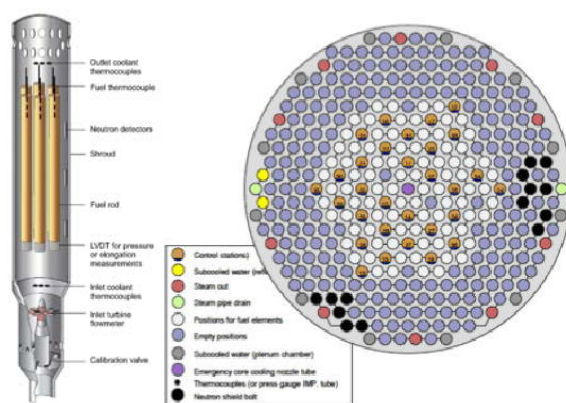


図 19 ハルデン炉のトリウム燃料照射リグ

参考文献 1) 古川和男「原発安全革命」文芸春秋社、2011 年

2) R. Yoshioka, K. Mitachi, “Thorium Molten Salt Nuclear Energy Synergetic System (THORIMS-NES)”, CMSNT-2013, Mumbai, 2013