

## GIF-MSR 運営委員会(2017年9月28-29日)の報告

2017/12/22

トリウム熔融塩国際フォーラム

木下幹康、吉岡律夫

島津洋一郎（出席者）

### (1) 概要

2017年9月28-29日に、ウィーンのIAEA本部会議室を借用してGIF-MSRの運営委員会が開催された。この会議の前に、熔融塩炉に関する技術報告書を発行するための検討会がIAEAで開催され、出席者が殆ど同一であったためである。

GIF(第4世代原子炉国際フォーラム)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(Provisional System Steering Committee for MSR)が2005年から活動している。なお、GIF-MSRの正式加盟国は当初はユーラトム(欧州原子力共同体)とフランスのみであったが、2013年にロシアが、2017年に米国とオーストラリアがオブザーバーから正式メンバーとなった。なお、日本(トリウム熔融塩国際フォーラム)は当初から不定期オブザーバーとして参加している。

今回の会議には、欧米から、仏、チェコ、オランダ、スイス、ロシア、米国、カナダ、アジアから中国、日本(島津洋一郎)の合計17名が出席した(オーストラリアと韓国は欠席)。

今回からカナダの熔融塩炉ベンチャーのルブラン社長がオブザーバーとして参加した。筆者が同氏にGIFへの出席を勧めたのがきっかけだが、今までこの会議には企業の参加者がおらず、「自機関の研究成果にタダ乗りするのか？」という懸念を持つ研究者もいたが、元々、GIFの最終目標は実用化なので、良い方向に向かったと言える。

各国からの最新状況(後述)が報告された後、事務局より「研究計画(System Research Plan)を策定する為に、System Arrangement process という段階に正式に移行したい」旨の提案があった。会議終了後にメンバーに問い合わせがあり、日本側より「研究計画策定は既に2006~2007年に実施され、2008年のレビュー会議に島津が参加している。従って、既に賛同している」旨の回答を送った。前回は正式ではなかった模様で、正式移行には2ヶ国以上の政府機関又は国立研究所の署名が必要だが、その後、他国から申し出があり、日本からの手続きは不要となった。

次回は、2018年4月9~12日に、中国SINAPで開催されることとなった。なお、日本からは、熔融塩炉に関する英語版教科書への貢献などの最近の状況を説明したが、後述のように、各国とも国家機関が着々と研究開発を進めているのに比べると、遅れを取っているのは残念である。

### GIF-MSRの運営委員会の会議風景

2017年9月28-29日、ウィーンのIAEA会議室にて島津が撮影。



### (2) 米国の状況

2015年末に、米国エネルギー省(DOE)は、新型炉の商業化を促進するために「Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN)」というプロジェクトを開始し、2016年1月にDOEは、熔融塩炉と高温ガス炉に各々\$40M(約40億円)の政府資金を出すことを決定した(2016年度は各々約6億円)。資金の受け皿が全米4位の電力会社で、EPRI(米国電力中央研究所)やORNL(オークリッジ国立研究

所)、ビルゲーツ子会社(TerraPower社)も参加している。但し、従来研究されてきた弗化物熔融塩ではなく、塩化物熔融塩を使用している。

2017年に更に下記の熔融塩炉ベンチャー7社を支援することが決定した(Elysium Industries、Kairos Power、MicroNuclear、Muons Inc.、NuVision Engineering、Terrestrial Energy USA、Transatomic Power)

ORNLは、熔融塩炉に関する12件の技術セミナーを開催し、約100名のNRC職員が参加した。また、DOEの国家核安全保障局は、熔融塩炉の保障措置に関する評価を始めた。一方、ANS(米国原子力学会)は、4件の安全指針策定委員会を進めている(最初のANS20.1委員会のみ、当NPOも参加)。

### (3) 中国の開発計画

2010年に、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年に中国・科学院が公式発表を行なった。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)の一つとして選定され、中国科学院・上海応用物理研究所(以下SINAP)が担当している。現在、SINAPを中心に7機関の研究員を統合して、Advanced Nuclear Energy Institute(ANEI)というMSRに特化した組織で開発を進めている。その陣容は、2016年時点で、SINAP内のMSR研究員400名と学生が200名、他機関研究員が100名の合計700名である。本プロジェクトの予算は、2011年から2018年までで2.17B RMB(約350億円(16円/RMB換算))である。

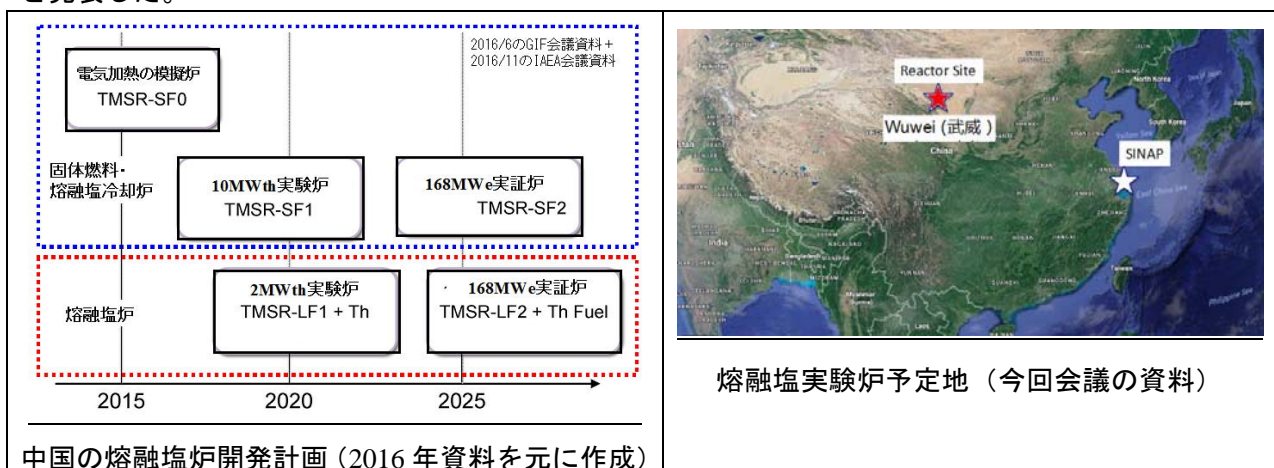
この1年の進捗としては、プロジェクトの最初から進めていたトリチウムの分離・吸着があるが、今の所、水素での実験の様相である。また<sup>7</sup>Liの99.99%濃縮にも成功したとのことである。

2017年中に完成予定としていた電気加熱の模擬炉は、現状、架台ができた段階で、2018年の中旬に主要機器搬入とのことなので、1年程度、遅れそうである。



SINAPの最初の実験炉TMSR-SF1(熱出力10MW)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、2020年頃に臨界の予定で、山東省・海陽市に建設するとしていた。

一方、平行して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熔融塩実験炉TMSR-LF1(熱出力2MW)は2020年代初頭に臨界の予定で、今回「本炉を甘肅省・武威市(Wuwei)に建設する」と発表した。



#### (4) フランスの状況

黒鉛減速材を用いない高速中性子型熔融塩炉 (MSFR) を検討対象にし、燃料塩は  $\text{LiF-ThF}_4\text{-}^{233}\text{UF}_4$  または  $\text{LiF-ThF}_4\text{-低濃縮 UF}_4\text{-(Pu-MA)F}_3$  を想定している。主に国立研究所 CNRS が研究しているが、EU 全体のプロジェクトとなっており、実質的にはロシアも参加している。この 1 年の新規項目としては、従来の大型 100 万 KWe 熔融塩炉だけでなく、オンライン化学再処理なしで済む 5-10 万 KWe の小型炉の研究も始めたことである。

なお、安全関係については、SAMOFAR プロジェクトが進行している。SAMOFAR (Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor) は、ユーラトムの「Horizon 2020」という開発計画の一環で、参加国は、オランダ、フランス、EU、イタリアなどである。

#### (5) ロシアの状況

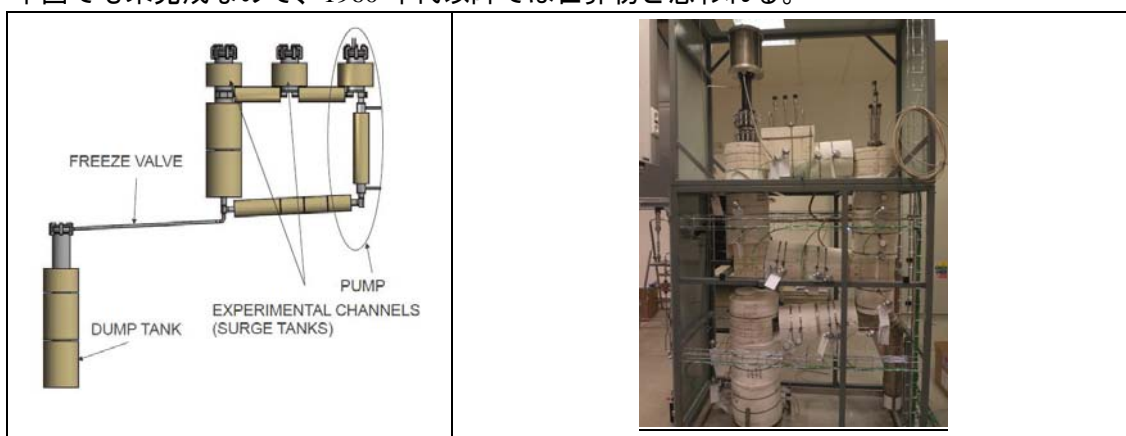
ロシアは、EU と協力し、高速中性子型熔融塩炉 (MSFR) について、Pu や MA の消滅炉として、また増殖炉として研究している。熔融塩の基礎研究として、この 3 年間、 $\text{LiF-NaF-KF-UF}_4$ 、 $\text{LiF-NaF-UF}_4$ 、 $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-CeF}_3$  の特性評価や、金属材料研究をしている。

#### (6) チェコの状況

チェコの国立研究所 NRI (Nuclear Research Institute Rez plc、現在は民営化) 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。使用済みの燃料塩から U や Th などを出出する実験を行なっている。

また、米国実験炉 MSRE で使用された冷却塩フリーベを輸入し、軽水炉型の臨界実験集合体 LR-0 で反応度測定実験を始めるとのことであった。

2017 年から、フリーベを使用したループの運転を開始した。熔融塩量 6L、25KW の小型ループで、米国実験炉 MSRE の熔融塩量 (約 2000L) と比べようもないが、フリーベを使用した熔融塩炉用のループは、中国でも未完成なので、1960 年代以降では世界初と思われる。



#### (7) オランダの照射実験

オランダの照射実験炉 (Petten) で、熔融塩を入れたキャプセルを照射する計画 SALIENT (SALT Irradiation Experiment) が EU プロジェクトとして提案され、2017 年から実際の照射が開始された。熔融塩は  $\text{LiF-ThF}_4$  などの弗化物塩である。

## 熔融塩炉の海外動向

2017/11/26

トリウム熔融塩国際フォーラム

木下幹康、吉岡律夫

### (1) IAEA

国際原子力機関（IAEA）は、2016年10月31日からの4日間に、トリウムを用いた熔融塩炉に関する国際会議「Technical Meeting on the Status of Molten Salt Reactor Technology」をウィーンの本部で開催し、研究開発の加速に向けた議論を始めた。IAEAは今までトリウム利用炉や小型炉の会合を開いたことはあるが、熔融塩炉に特化した国際会議の開催は初めてである。欧州各国や米国などの先進国と、中国、インドなどのアジア諸国など、約20の国と国際機関から、熔融塩炉専門家約40名が参加した。参加国は下記の通りである。

（欧州ほか）フランス、英国、チェコ、ドイツ、イタリア、オランダ、スイス、トルコ、デンマーク、ロシア、（北米ほか）米国、カナダ、ベネズエラ、（アジアほか）中国、インド、インドネシア、オーストラリア、日本、（国際機関）EU、IAEA

合計28の講演がなされ、講演スライドはIAEAサイトで公開されている[1]。日本からは吉岡律夫が参加し、寺井隆幸、山脇道夫、木下幹康との連名で、熔融塩炉FUJIの設計と、日本の各機関の活動を紹介した。

会議の冒頭に、IAEA原子力開発課のモンティ（Stefano Monti）課長より「熔融塩炉は、高温で高効率であること、低圧で安全性も高いこと、高レベル廃棄物低減が見込めること、液体燃料なので燃焼制限がないこと、核燃料サイクルの融通性が高いこと、などの多くの利点がある。IAEA加盟国での関心も高まって来ており、今回、初めて熔融塩炉に特化した会議を開催できたのは喜ばしい。今回の会議では、研究開発の先進国から情報を提供して貰い、開発課題を共有すると共に、今後、実用化を進めようとする国々との対話の場を提供したい」との趣旨説明があった。

それに引き続き、各国の代表者が自国の活動を紹介する講演があった。それらの内容は、既にGIF(第4世代原子炉国際フォーラム)の熔融塩炉運営委員会などで聞いていたものが多かったが、最大のニュースは、インドネシアが熔融塩炉プロジェクトを開始し、2020年代の建設を目指す、という同国ワリス（Abdul Waris）教授の講演であろう。インターネット上には、インドネシアのコンソーシアムが、米国の熔融塩炉ベンチャーのThorCon Power社と提携したというニュースが流れていたが、本会議にはインドネシア規制委員会・副委員長を含め、6名もの参加があり、IAEAへの期待が大きかった模様である。

その他に注目される講演ピックアップとしては、米国政府が熔融塩炉ベンチャーに予算支出した決定を受けて、オークリッジ国立研究所（ORNL）のホロコム（David Holcomb）氏が、同所の発明である熔融塩炉開発を正式に進められることになり、既に、米国原子力学会（ANS）に新規に3件の標準委員会を設立したとのことである。

さらに、中国・上海応用物理研究所（SINAP）副所長の戴志敏氏が、熔融塩実験炉2基の建設予定地を山東省の海陽市に変更したことなどを述べた。

なお、IAEAは今回の会議開催に当り、FHR（黒鉛被覆燃料の熔融塩冷却炉）も対象としていたが、該当する講演は米国カリフォルニア大学の1件のみで、他は全て熔融塩燃料炉であった。

その他、会場では、IAEAが2016年9月に小型モジュール炉（SMR）の特集本[2]を発行し、今回初めて日本の熔融塩炉設計FUJIを含め数件の熔融塩炉を紹介しており、9月のIAEA総会で各国に配布したとの案内があった。

会議の最後に、原子力部のハン（Dohee Hahn）理事より「熔融塩炉は高温が可能で高効率である。更に安全性も高いので、今後の原子力として向いている。IAEAは、今後、予算化を図り、熔融塩炉に関する国際プロジェクトを開始する」と宣言した。なお、これらの方針は、9月のIAEA総会で加盟各国に説明されたとのことである。そして、担当者が、各種データベースの作成や、安全指針策定、核拡散抵抗性やベンチマーク計算など10件程のテーマを提示した。これに対し、米仏露などの研究先進国は、既にGIFの場で情報交換をしているものの、国際的に認知されればありがたいというスタンスである。一方、上記のインドネシアと中国・インドは「IAEAの支援を歓迎する」との意見を述べた。

以上のように、今後 IAEA として、研究先進国間の情報交換は勿論、アジア諸国の支援を行なうという方向が決まり、世界の熔融塩炉開発に更なる拍車がかかったと言える。



図 1. IAEA での熔融塩炉国際会議（吉岡撮影）と、SMR 紹介本[2]

## (2) 米国の状況

米国オークリッジ国立研究所(ORNL)では、ワインバーグ(Alvin Weinberg)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(Aircraft Reactor Experiment)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 ( $\text{BeO}$ ) であり、またフッ化物熔融塩 ( $\text{NaF-ZrF}_4\text{-UF}_4$ ) を採用し、860 度と言う高温を達成した。2 番目に、PWAR-1 (Pratt and Whitney Aircraft Reactor) という  $\text{BeO}$  反射材・減速材、ハステロイ X、フッ化物熔融塩 ( $\text{NaF-ZrF}_4\text{-}^{235}\text{UF}_4$ ) のゼロ出力炉 (外部ヒーターで 677 度を維持) を建設し、1957 年に臨界に到達した。3 番目の実験炉として、熱出力約 8Mwt の熔融塩実験炉 MSRE (Molten Salt Reactor Experiment) を 1965 年に完成させ、フッ化物熔融塩 ( $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$  または  $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-PuF}_3$ ) 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。

MSRE の成功後、ORNL は 1970 年代初めに 100 万 KWe の大型熔融塩増殖炉 MSBR (Molten Salt Breeder Reactor) を設計した。MSBR は、出口温度約 700 度のフッ化物熔融塩 ( $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-}^{233}\text{UF}_4$ ) 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、倍增時間 22 年 (80% 負荷率時) を達成できる、という設計であった。しかし、1976 年に熔融塩炉研究は全て中止された。

その後、米国では停滞状態が永く続いたが、2002 年に GIF (第 4 世代原子炉国際フォーラム) の 6 候補の一つとして選定され、米国はオブザーバーとして参加し、フッ化物塩冷却高温炉 FHR (Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor) を提案している[3]。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 ( $\text{LiF-BeF}_2$ ) 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 年末よりフッ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。ただし現時点の協力範囲は、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 ( $\text{LiF-NaF-KF}$ ) 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 2 参照)。

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。

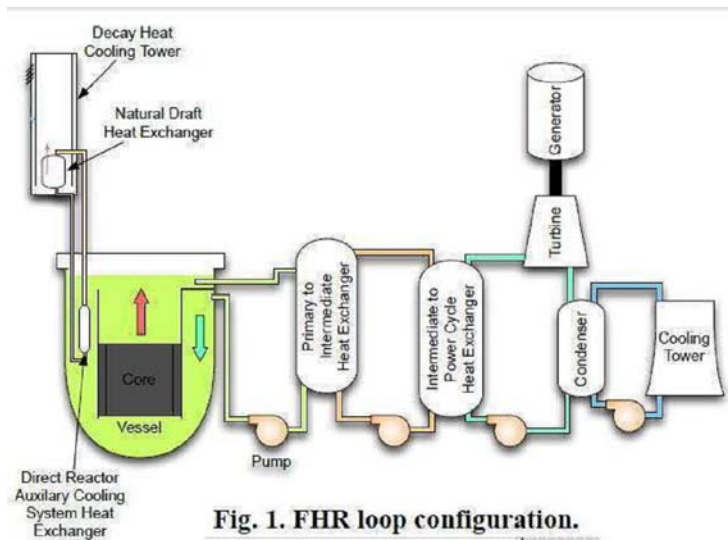


Fig. 1. FHR loop configuration.



図 2. FHR のループ構成[3]と、ORNL 熔融塩ループ（木下撮影）

2015 年末に、米国エネルギー省（DOE）は、新型炉の商業化を促進するために「Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN)」というプロジェクトを開始し、熔融塩炉、高温ガス炉、高速炉の 3 炉型を選定した。そして、DOE 傘下の国立研究所施設を提供し、電力会社と協同して、熔融塩炉ベンチャーの支援を開始した。

上記 GAIN プロジェクトの一環として、2016 年 1 月に DOE は、熔融塩炉と高温ガス炉に各々 \$40M（約 40 億円）の政府資金を出すことを決定した（2016 年度は各々約 6 億円）。資金の受け皿が全米 4 位の電力会社で、EPRI（米国電力中央研究所）や ORNL（オークリッジ国立研究所）、ビルゲーツ子会社（TerraPower 社）も参加している。これにより、1970 年代に停止していた熔融塩炉開発が再開された。但し、従来研究されてきた弗化物熔融塩ではなく、塩化物熔融塩を使用している。

また、GAIN を推進する為に、2017 年 1 月に米国下院は超党派で民生用の先進的な原子炉技術の研究開発およびその許認可と商業化促進を目的とする法案（新型原子炉技術の研究開発促進法案：H.R.590）を可決している。

なお、米国には熔融塩炉ベンチャーが 8 社あり、いずれも早期の実現を目指している。殆どの会社が、知的財産権保護と称して設計を開示していないので、進捗状況は不明である。その中で、ThorCon Power 社のみがプラント概念を公開している。同社はインドネシアと協同しており、インドネシアの項目で解説する。また、カナダの Terrestrial Energy 社も米国に会社を設立し、米国内での初号機建設を狙っている。

TerraPower（塩化物熔融塩を使用した高速炉型熔融塩炉）（上述）	Transatomic Power（減速材に水素化ジルコニウムを使用）
ThorCon Power（後述）	Hatch（詳細不明）
Terrestrial Energy USA（後述）	THOREACT（詳細不明）
FLiBe Energy（ORNL の 2 流体型熔融塩炉）	Elysium Industries（塩化物熔融塩炉）

図 3. TerraPower 社の熔融塩炉用試験設備（2016 年）



### (3) 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であり、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。

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）の一つとして選定され、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シンクロトン放射光施設（SSRF）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年代初めにフッ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。

現在、SINAPを中心に7機関の研究員を統合して、Advanced Nuclear Energy Institute（ANEI）というMSRに特化した組織で開発を進めている。その陣容は、2016年時点で、SINAP内のMSR研究員が400名、他機関研究員が100名、学生が200名の合計700名である。

本プロジェクトの予算は、2011年から2018年までで2.17B RMB（約350億円（16円/RMB換算））であり、さらに2015年からの3年間に、上海市より約18億円の支援も受けている。

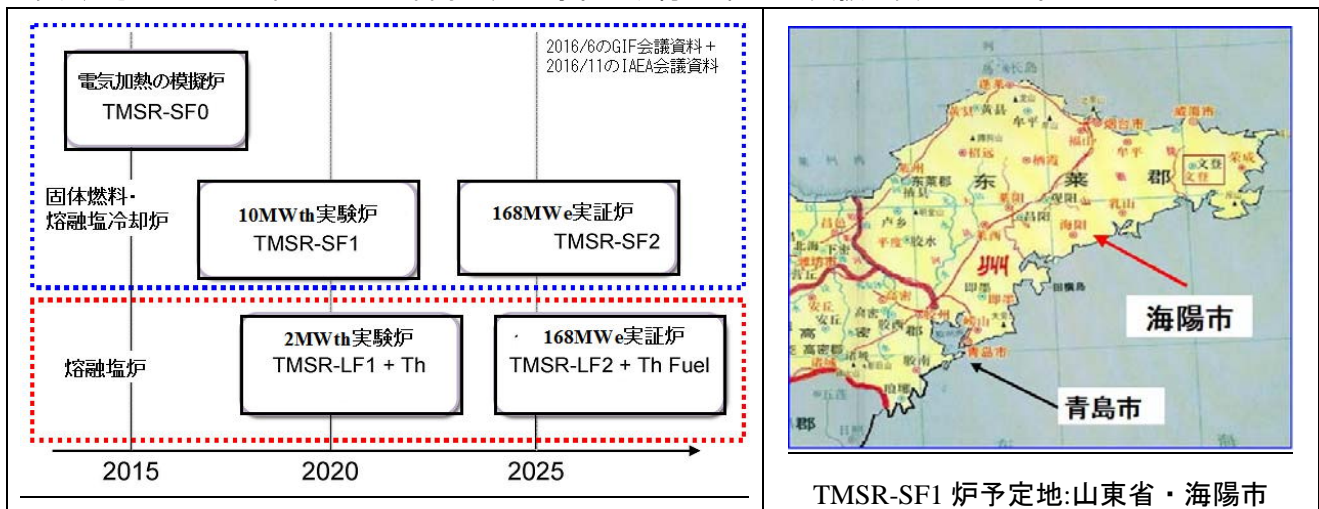
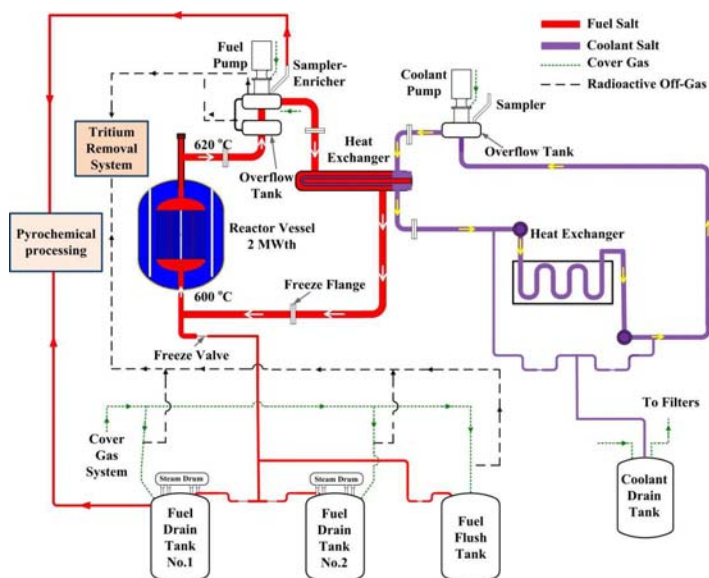


図4. 中国の熔融塩炉開発計画（2016年資料を元に吉岡が作成）

SINAPの最初の実験炉 TMSR-SF1（熱出力10MW）はフッ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、2020年頃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。米国原子力学会が専門委員会（ANS 20.1）を設置し、FHRの安全基準を策定する活動を2013年から2016年まで実施した。本活動には、日本からも適宜参加した。

平行して開発を進めているトリウムフッ化物熔融塩を液体燃料として用いた熔融塩実験炉 TMSR-LF1（熱出力2MW）は2020年頃に臨界の予定としている。本炉は、米国の熔融塩実験炉 MSRE とほぼ同一設計で、発電設備は有していない。燃料塩は  $\text{LiF}\text{-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$  で、出口温度は650度である。



TMSR-LF1 炉予定地:甘肅省・武威市  
(2017 年 GIF 会議資料より)

図 5. 中国の最初の熔融塩実験炉 TMSR-LF1 [1]

引き続き 2025 年頃に電気出力 168MWe の発電実証炉 2 基を建設することとしている。1 基は FHR (TMSR-SF2) で、もう 1 基は熔融塩炉 TMSR-LF2 である。いわゆる小型炉に必要な電力は 100-200MWe (10-20 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。TMSR-LF2 の概念図と設計仕様を下記に示す。

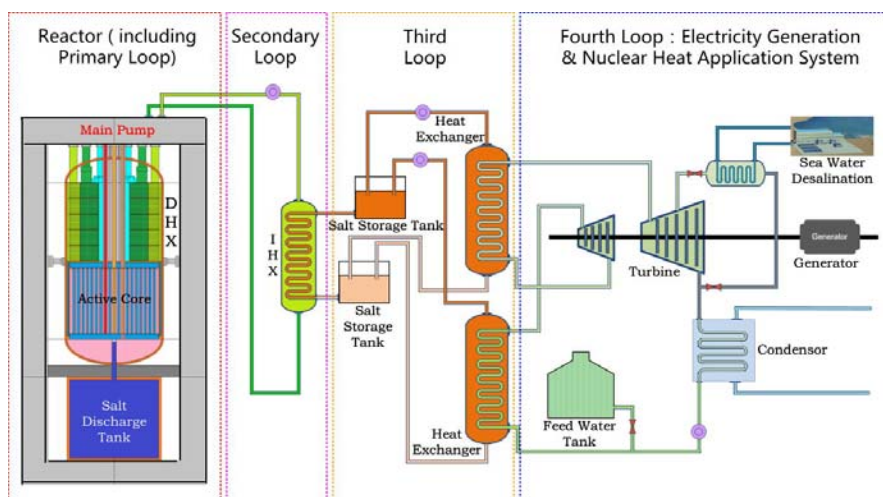


図 6. 中国の熔融塩実証炉 TMSR-LF2 [1]

表 1. TMSR-LF2 の設計仕様 (2016 年 11 月時点) [1]

原子炉タイプ	小型モジュール型熔融塩炉
熱出力／電気出力	373MWth / 168 MWe (★)
入口温度／出口温度	600度 / 700度
発電設備	大気開放型ブレイトンサイクル及び超臨界CO <sub>2</sub> サイクル等
燃料塩	LiF-BeF <sub>2</sub> -ThF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> (19.75 % <sup>235</sup> U)
減速材	黒鉛
構造材	ニッケル基合金、ステンレス
化学処理設備	オンライン気体除去設備 (Xe, Kr, T) オフライン固体FP除去設備
残留熱除去系 (RHR)	受動的RHR

(★ : 2016 年 6 月 GIF 資料の 10MWe から大幅に拡大している)



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て試運転が行われていた。このループはフリナック（FLiNaK）と呼ばれるフッ化物塩（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。2015 年頃からは、フリーベとハステロイ 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。その他、制御棒落下試験装置、気液分離装置、ウラン回収装置、ホットラボ、燃料塩蒸留装置、金属材料腐食試験装置など多数の実験設備がある。また、2016 年から、核燃料を用いないで 400KW の電気加熱による模擬炉（モックアップ）の TMSR-SF0 の設計・製作を始め、2018 年に完成させる予定である。

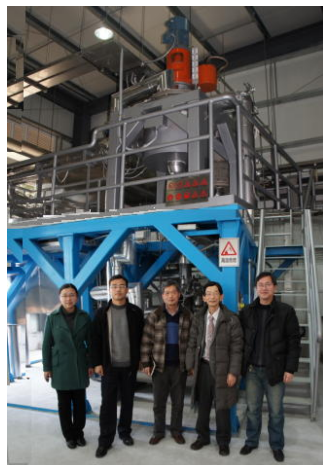


図 7. 硝酸塩ループと、フリナック・ループ（いずれも吉岡撮影）

#### (4) 欧州の状況及び GIF の活動

GIF(第 4 世代原子炉国際フォーラム)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(Provisional System Steering Committee for MSR)が 2005 年から活動している。なお、GIF-MSR の正式加盟国は当初はユーラトム（欧州原子力共同体）とフランスのみであったが、2013 年にロシアが、2017 年に米国が各々オブザーバーから正式メンバーとなった。なお、日本（トリウム熔融塩国際フォーラム）も不定期オブザーバーとして参加している。

現在、GIF-MSR では、欧州側は燃料も冷却材も熔融塩の高速炉型熔融塩炉 MSFR (Molten Salt Fast Reactor)を提案し、米国側は、固体燃料・熔融塩冷却炉 FHR (Fluoride-salt-cooled High-temperature Reactor)を提案しており、熔融塩技術や金属材料開発のような共通要素についての情報交換がなされている[4]。

図 8. 上海 SINAP での GIF 会議風景  
(2014 年開催)

日本からは木下と吉岡が出席し、吉岡が講演を実施。



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)

なお、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。

2017 年時点では、上記は全て終了しているが、現在は下記の SAMOFAR プロジェクトが進行している。SAMOFAR (Safety Assessment of the Molten Salt Fast Reactor)は、ユーラトムの「Horizon 2020」という開発計画の一環で、高速炉型の熔融塩炉の安全性評価に重点を置いている。参加機関は下記の 11 機関で、所在国は、オランダ、フランス、EU、イタリア、メキシコ、スイス、ドイツである。詳細は SAMOFAR のサイトを参照のこと[5]。

Technische Universiteit Delft (TU Delft)

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)

Joint Research Centre- European Commission (JRC)

Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Ricerca Tecnologica Nucleare (CIRTEN)

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN)

Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del Instituto Politecnico Nacional (CINVESTAV),

AREVA NP SAS (AREVA)

Commissariat a l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA)

Electricité de France S.A. (EDF)

Paul Scherrer Institute (PSI)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

#### (5) 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-BeF<sub>2</sub> 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が Pu や MA 消滅に向いているのではないかという期待から、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設計である。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、気体状 FP の分離実験を行なっている。

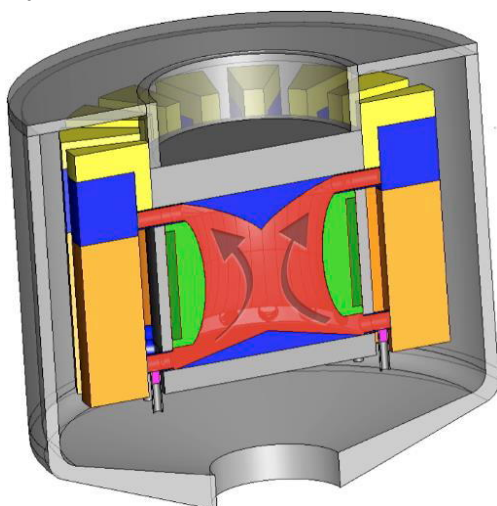


図 9. フランスの MSFR 概念図と、フリナック・ループ[1]

#### (6) 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フッ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。MOSART プロジェクトでの設計は、黒鉛なしの高速中性子炉型で、燃料塩は当初[LiF-BeF<sub>2</sub>-Pu-MA]としており、Th だけのブランケット配置で増殖比を向上させる案も検討している。

**(7) チェコの状況**

チェコの国立研究所 NRI (Nuclear Research Institute Rez plc、現在は民営化)において、主にフッ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 はフッ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、燃料塩と同じフッ化物塩の方が都合なためである。その他、実験炉を使用した試験としては、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。また最近、米国実験炉 MSRE で使用された冷却塩フリーベを輸入して照射実験を始めた模様で、その他に 2017 年からフリーベ・ループの運転を始めたとのことである (右下写真)。

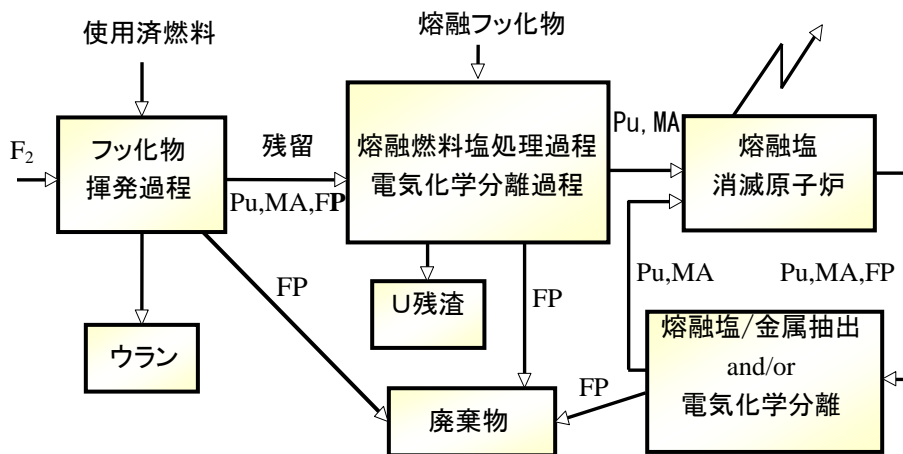


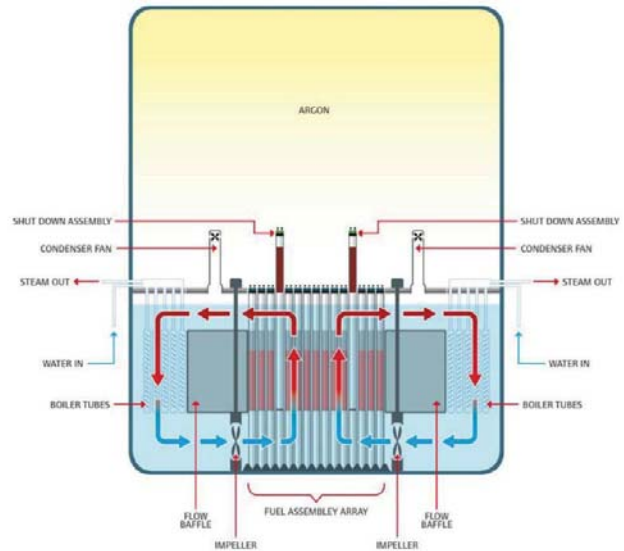
図 10. FREGAT フロー図 (NRI 資料を元に吉岡が作成) と、フリーベ・ループ

**(8) 英国の状況**

英国原子力公社は 1970 年代に、黒鉛を使わない高速炉型の塩化物熔融塩炉を研究していたが、その後は停滞していた。2012 年にトリウム熔融塩炉推進の超党派議員連盟が発足した。なお Weinberg Foundation という民間団体が推進活動をしていたが、2017 年に解散し、下記の事業化に重点を移した。2014 年頃に、英国の熔融塩炉ベンチャーの Moltex Energy 社が「Stable Salt Reactor」という新概念の熔融塩炉を提案した[6]。この炉は、燃料塩を被覆管に封入し、燃料棒を別の熔融塩で冷却するという概念であり、当時の ORNL の解析技術では実現性がないとされていたが、評価しなおして有望との評価を得たとのことである。

なお、英国では政府資金により、将来の小型炉の候補としての熔融塩炉に関する調査報告書が 2015 年に出されており、各国の熔融塩炉が紹介されている[7]。

図 11.  
Moltex Energy 社の「Stable Salt Reactor」概念 [2]



欧州の熔融塩炉ベンチャーとしては、Copenhagen Atomics 社（デンマーク）、Seaborg Technologies 社（同上）、があるが、活動実態は不明である。

### (9) オランダの照射実験

オランダの照射実験炉（Petten）で、熔融塩を入れたキャプセルを照射する計画 SALIENT（SALT Irradiation Experiment）が EU プロジェクトとして提案され、2017 年から実際の照射が開始された。熔融塩はフリーベなどの弗化物塩で、一部のキャプセルにはトリウム、または U233 を入れるとのことである[8]。

図 12.  
熔融塩照射キャプセルの例

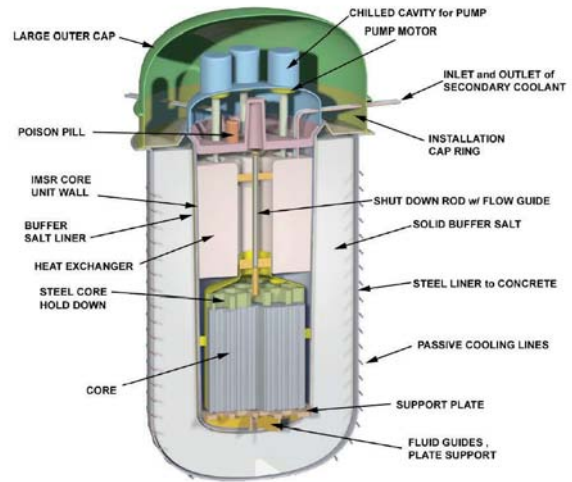


### (10) カナダの状況

カナダの熔融塩炉開発ベンチャー Terrestrial Energy 社は、出資を募り、2015 年末に CAD\$10M（8 億円）を獲得し、カナダ原子力安全委員会に、概念設計のレビューを依頼した。安全審査ではないが、カナダ国内での方向を示している。また、2016 年 3 月には、カナダ政府の資金 CAD\$5.7M（約 5 億円）を獲得し、この資金で、電気加熱の模擬原子炉を作ることを発表した。また、2016 年に Terrestrial Energy USA を設立し、米国内での初号機建設を狙っている。

カナダの設計は、米国の熔融塩実験炉 MSRE に近いが、ポンプと熱交換器を炉内に配置する一体型熔融塩炉である点と、低濃縮ウランを使う点が同社の特許のようである[9]。

図 13. Terrestrial Energy 社の一体型熔融塩炉概念 [2]



(11) インドネシアの状況

2015 年に、米国の熔融塩炉ベンチャーThorcon Power 社（正式会社名は Martingale Inc）と、インドネシアのコンソーシアムとが、インドネシアに熔融塩炉を導入するプロジェクトの覚書を結んだ。インドネシア側は、Industry Nuklir Indonesia (INUKI)、PLN（国有電力会社）、Pertamina などである。Thorcon Power 社の概念設計資料は同社のサイトに示されているが、フッ化物熔融塩を使用した黒鉛減速型の熔融塩炉である[10]。

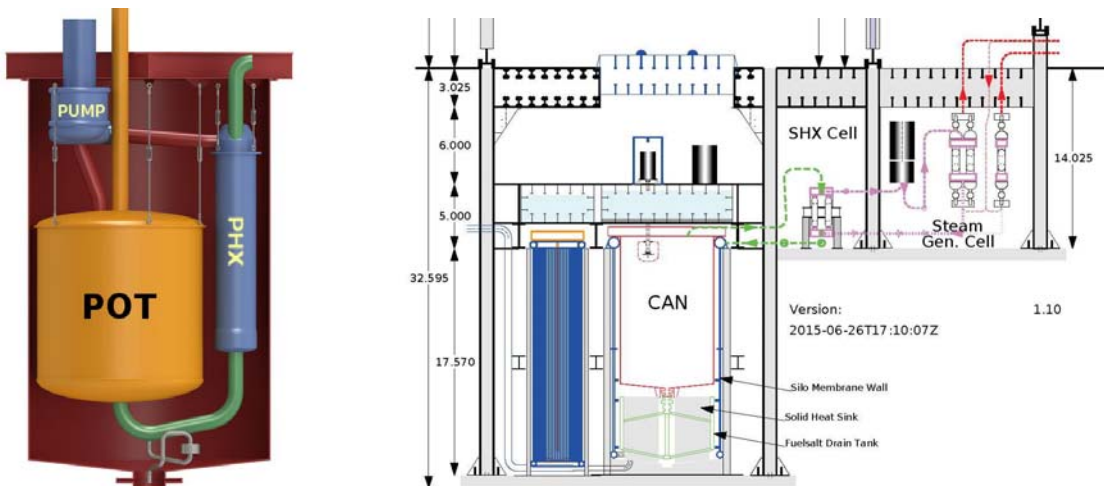


図 14. Thorcon Power 社の熔融塩炉概念 [2]

図 15. インドネシアでのセミナー風景

2016 年、インドネシア・バンドンでのセミナーで、木下が基調講演を実施。



(12) インドの状況

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）」をバーバ原子力研究所（BARC）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。

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、熔融塩炉研究計画も進めている模様である。

図 16. インドでのトリウム熔融塩会議風景

2013年、木下が講演を実施。



### (13) 韓国の状況

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、それ以降、熔融塩炉の研究を進めている。

図 17. 韓国での熔融塩炉国際ワークショップ風景

2013年に吉岡が講演し、翌年に木下が講演を実施。



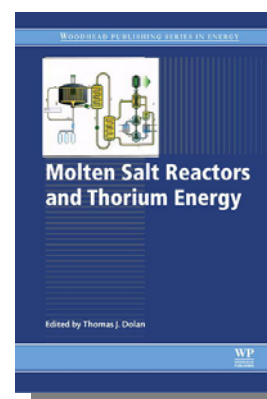
### (14) トリウム熔融塩炉の世界初の教科書の出版

2017年7月に、トリウム熔融塩炉に関する世界初の教科書（英語）が出版された。当NPOからも、吉岡・木下などが連名著者として、熔融塩炉FUJIの設計を紹介するなど、約200頁を寄稿した[11]。

題名「Molten Salt Reactors and Thorium Energy」

2017年7月出版。840頁

出版社: Woodhead Publishing (Elsevier)



### 参考文献：

[1] IAEA: <https://www.iaea.org/NuclearPower/Meetings/2016/2016-10-31-11-03-NPTDS.html>

[2] IAEA 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2016」 2016

[3] D. E. Holcomb 「Fluoride Salt-Cooled High-Temperature Reactor Technology Development and Demonstration Roadmap」 *ORNL/TM-2013/401*, 2013

[4] J. Serp et al. 「The Molten Salt Reactor (MSR) in Generation IV: Overview and Perspectives」 *Progress in Nuclear Energy*, vol.77, p.308-319, 2014

[5] SAMOFAR: <http://samofar.eu/>

[6] Moltex Energy: <http://www.moltexenergy.com/>

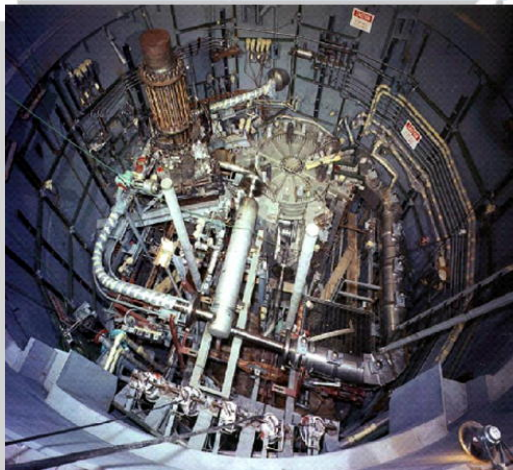
- [7] Energy Process Developments 「Feasibility of Developing a Pilot Scale Molten Salt Reactor in the UK」、2015
- [8] Ralph Hania 「The SALIENT Fluoride Fuel Salt Irradiations」 Molten Salt Reactor Workshop 2016, 2016
- [9] Terrestrial Energy: <http://terrestrialenergy.com/>
- [10] Thorcon Power: <http://thorconpower.com/library/documents>
- [11] T. J. Dolan 「Molten Salt Reactors and Thorium Energy」  
<https://www.amazon.co.jp/Molten-Salt-Reactors-Thorium-Energy/dp/0081011261/ref>

IAEA 国際会議の件は、地方の約 10 紙が記事を掲載した。

東奥日報2016/10/12

溶融塩炉を巡る世界の主な動き

<p><b>中国</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>国際原子力機関(IAEA)がウイーンで国際会合を初開催 [10月31日～11月3日]</li> <li>山東省・海陽市に実験炉の建設を表明。2020年代の臨界を目指す</li> </ul>	<p><b>日本</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>実験炉運転</li> <li>オークリッジ国立研究所、1965～69年</li> <li>企業への資金援助を再開</li> </ul>
--	---



米国が1960年代に運転した溶融塩実験炉の原子炉容器上部(トリウム溶融塩国際フォーラム提供)

トリウム溶融塩炉

放射性物質のトリウム232に中性子が衝突して変わるウラン233の核分裂エネルギーを利用する原子炉。燃料は、トリウムと少量のウランまたはプルトニウムを混ぜた液体。冷却材には、塩を高温で溶かして液体にした「溶融塩」を使う。ウラン燃料による通常の軽水炉に比べプルトニウムの生成量が少なく、核不拡散上有効とされる。一方、液体燃料に溶け出した不純物が配管などに与える影響が明らかになっていないなどの課題もある。

温で溶かして液体にした「溶融塩」を使う。ウラン燃料による通常の軽水炉に比べプルトニウムの生成量が少なく、核不拡散上有効とされる。一方、液体燃料に溶け出した不純物が配管などに与える影響が明らかになっていないなどの課題もある。

国際原子力機関(IAEA)が、燃料にウランでなくトリウムを用いる「溶融塩炉」に関する国際会合を今月末、初めて開く。日本の高速増殖炉「もんじゅ」の頓挫を横目に、世界の次世代炉の開発レースで溶融塩炉への関心が高まっている。

「約700人の研究者が上海に集結している。溶融塩炉の開発に長年取り組むNPO法人「トリウム溶融塩国際フォーラム」(横浜市)の吉岡律夫名誉理事長が中国の状況を興奮気味に話す。

次世代原子炉レース

「溶融塩炉」高まる関心

燃料に廃棄物のトリウム

上海応用物理研究所は今年3月、山東省・海陽市に出力1万kwと2千kwの実験炉を2基建設すると表明した。2020年代の臨界到達を目指し、30年までに2千億円を追加投資する計画だ。

中国が溶融塩炉の研究推進を決めたのは10年。スマートフォンなどのハイテク機器や自動車部品に使われるレアアース(希土類)の生産過程で出る廃棄物にトリウムが多く含まれることが分かった。自国でウランが取れないことからトリウムを燃料とする溶融塩炉に目を付けた。「中国は、経済がピークに達する30年代に間に合わせるため開かれた。米政府が燃料にウランを使う軽水炉に軸足を移したためだ。

溶融塩炉は、軽水炉に比べプルトニウムの生成量が千分の1以下。「われわれの本当の目的が原発用のプルトニウムを製造することにあつた気がつかなかった」。この時期に同研究所長を務めたアルビン・ワインバー博士は自伝にこう書き残している。東西冷戦期の86年、世界の核弾頭数は7万発を超えてピークに達した。(16年は約1万5千発)

米エネルギー省は今年1月、溶融塩炉の開発に取り組み企業2社に計約80億円を資金援助すると発表した。このうちの1社は、米マイクログラフ社、米マイクログラフ社創業者のビル・ゲイツ氏が出資するベンチャーと共同研究する。木下幹康東京大客員研究員は「核兵器廃絶を訴えるオバマ政権がプルトニウムの削減手段として予算を付けた」と指摘する。

次世代炉を巡っては、もんじゅに代表されるトリウム冷却高速炉、溶融塩炉、高温ガス炉など六つが検討されており、溶融塩炉にはロシアやインド、英国なども関心を示す。日本原子力学会の専門委員会が主査を務める山脇道夫東京大名誉教授は「溶融塩炉はダイクホース的存在。ほかの方式をすっくと追い越す可能性がある」と話している。