

溶融塩原子炉（MSR）

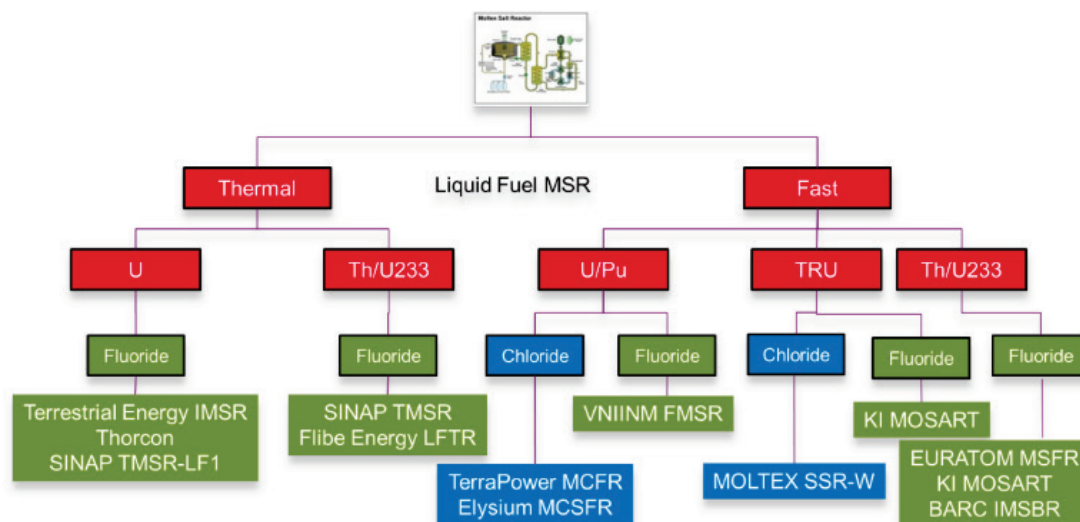
序文

溶融塩原子炉（MSR）の概念は、1950年代初頭から研究されてきたが、1960年代に ORNL で稼働された試験炉は1つだけであった。約15年間にわたる、そのような原子炉技術の利益のために、特にその認められた固有の原子炉の安全性とその柔軟性のために、現在再開されている。

MSR は、燃料および/または冷却剤として溶融塩を使用する。フッ化物塩が冷却材のみである場合、そのような概念はフッ化物塩冷却高温炉（Fluoride salt-cooled high-temperature reactor : FHR）と呼ばれる。今日、GIF pSSC MSR では、すべてではないが、研究されたほとんどの概念は、液体燃料を使用した実際の MSR である。

MSR は概念であり、テクノロジーではない。実際、MSR の総称には、U/Pu または Th/U233 燃料サイクルで、またはフッ化物やフッ化物担持塩を使用した TRU バーナーとして動作する熱増殖炉および高速炉が含まれる。最も研究されている概念の図を、図 MSR1 に示す。

図 MSR 1. 主要なプレーヤー（RTO または販売業者）とともに最も研究された MSR の概念



燃料サイクルに応じて、MSR は LWR からの核分裂性物質および燃料親物質を再利用するが、高濃縮ウラン、プルトニウム、またはマイナーアクチニドを燃焼させることができる。これらの電力変換効率は高くなる（核分裂は担持塩で直接発生し、熱交換器の冷却材塩に熱を伝達する）。MSR は、大気圧よりわずかに高い低圧で稼働する。これらは、大型の発電用原子炉または小型モジュール炉（SMR）として設置できる。その展開は、現在、高温、構造材料、腐食などの技術的課題によって制限されている。

MSR pSSC には、現在、7 のメンバー（オーストラリア、カナダ、Euratom、フランス、ロシア、スイス、米国）とオブザーバー（中国、日本、韓国）が含まれており、システムアレンジメントに向けて動いている。MSR pSSC の使命は、既

存の原子炉の概念に比べて大きな安全性と経済的改善をもたらす可能性のある将来の原子力エネルギーの概念の開発を支援することである。

R&D 目標

MSR プロジェクトの共通の目標は、炉心、再処理ユニット、廃棄物調整のために、物理的、化学的、材料的な研究から得られた最良のシステム構成を備えた概念設計を提案することである。MSR の技術的に挑戦的な技術を習得するには、以下の協調的で長期的かつ国際的な R&D 努力が必要である。

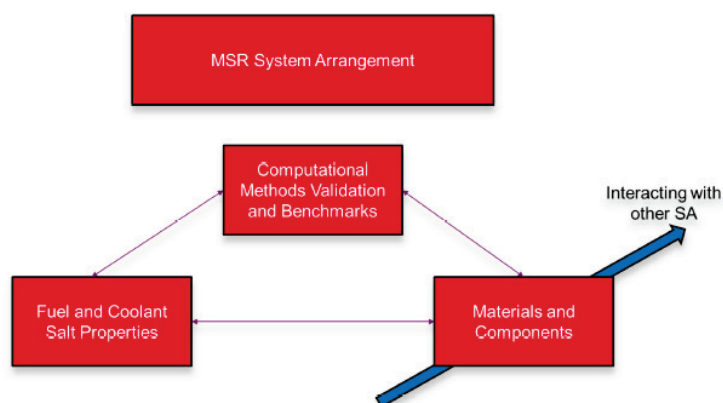
- 塩の化学的および熱力学的特性の研究
- システム設計：高度な中性子および熱油圧カップリングモデルの開発
- 溶融塩との材料の適合性の研究
- 原子炉容器の腐食をマスターするためのソルトレドックス制御技術
- He バブリングによる冷却材からのガス状核分裂生成物抽出の効率的な技術の開発
- 塩の再処理：還元抽出試験（アクチニド-ランタニド分離）
- 液体燃料原子炉に特化した安全アプローチの開発

主な活動と成果

MSR pSSC 活動

2019 年の主な活動は、コミュニティが広く貢献できるようにする 3 つの潜在的なプロジェクトアレンジメントを定義したシステムアレンジメントの準備であった。したがって、これらの PA は非常に横断的であり、概念に依存しないが、あらゆる概念の開発をサポートできる（図 MSR 2 参照）。これらは、塩の挙動、材料特性、およびシステム統合を扱っている。SA は 2021 年に発効されるはずである。

図 MSR 2. 3 つの Pa を含む MSR SA の予測される構造



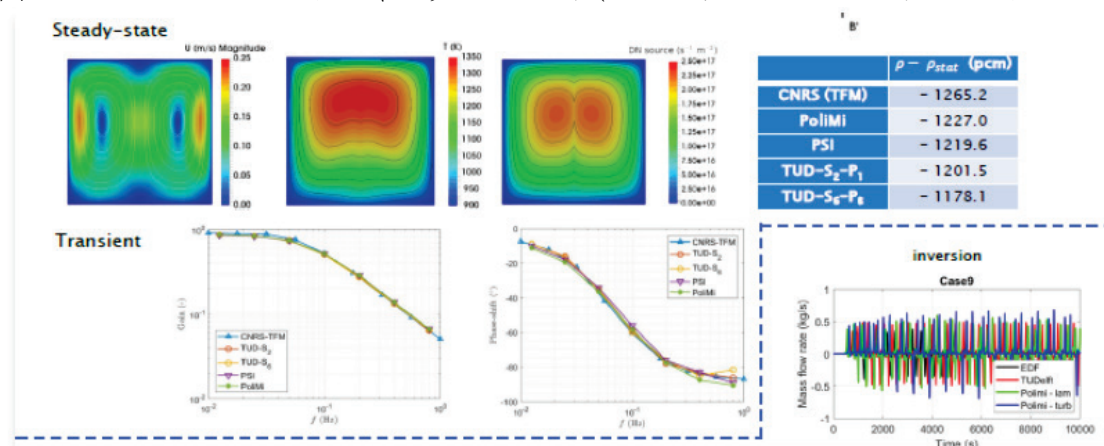
Euratom

欧州プロジェクト SAMOFAR/SAMOSAFER：欧州連合では、SAMOFAR プロジェクトの実施は、2015 年から 2019 年までの 4 年間、デルフト工科大学の調整の下で成功を収め、

オランダのデルフトシアターでの祝賀会で幕を閉じた。このミーティングは、米国のプロジェクト NuStem と EU のプロジェクト SAMOFAR が主催するデルフト工科大学での学生のブートキャンプから成り、その後、SAMOFAR の最終結果を発表し、カナダ、中国、EU、ロシアおよび米国の代表者がそれぞれの国の研究プログラムの進展についてプレゼンテーションを行う 2 日間のミーティングが行われた。ブートキャンプには世界から約 40 人の学生が参加し、最終ミーティングには約 100 人が参加した。

2019 年 10 月 1 日、新しい SAMOSAFER プロジェクトが、新しいシミュレーションモデルとツール、および熔融塩原子炉の新しい安全バリアを目指して開始された。この新しいプロジェクトの目標は、実験で検証された新しいシミュレーションモデルとツールに基づいて、重大な事故における熔融塩原子炉のより制御された動作のための新しい安全バリアを開発および実証することである。その主な目的は、MSR が 30 年以内に予想されるすべての規制に準拠できるようにすることである。このプロジェクトが正常に完了した後、シミュレーションモデルとツールが原子力産業で使用できるようになり、革新的な安全バリアを新しい MSR 設計に実装できる。それにより、将来の第 4 世代熔融塩原子炉の安全マージンが増加し、最新および将来の安全基準に確実に準拠できるようになる。SAMOSAFER はデルフト工科大学によって調整され、2023 年まで実施される。

図 MSR 3. V&V のマルチフィジックスコード (PoliMi および PSI コードのベンチマーク)



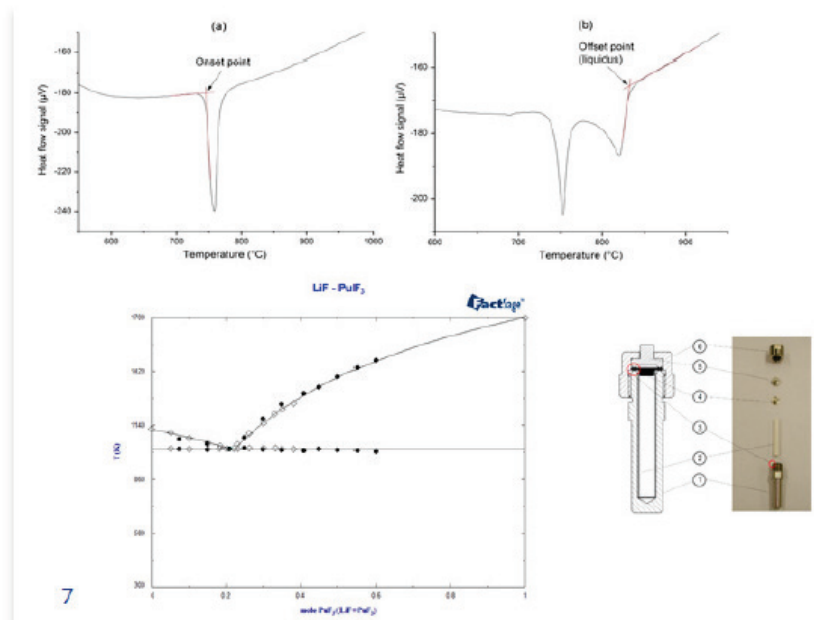
熔融塩を使用した原子炉の科学技術の進歩に関する特別セッションが、European Physical Journal、Nuclear Sciences & Technologies と共同で開催された。ゲストエディターは、Jan Leen Kloosterman (TU Delft)、Elsa Merle (CNRS)、Jean Ragusa (Texas A&M) であった。

オランダでは、Petten High Flux Reactor での Salient-01 照射が終了した。サンプルは現在、NRG および J JRC Karlsruhe の研究所で SAMOSAFER のフレームワークで調査されている。フォローアップ照射が進行中である。

JRC Karlsruhe : JRC Karlsruhe で HF フッ素化ラインを使用して高純度のアクチニド変フッ化塩を合成する方法の確立に成功した後は、同じ高純度のアクチニド塩化物塩を合成するための塩素化技術の開発に焦点が当てられていた。最初の試験は、Cl₂ ガスと CCl₄ ガスの混合物 (UO₂ を UCl₄ に変換するための炭素塩素化) と H₂ による連続還元 (UCl₄ を UCl₃ に変換するため) を利用して、酸化ウランからウラン塩化物塩を革新的に合成する

ことで行われた。2019年の終わりまでに、変換の最初の段階が成功し、少量の高純度 UC14 が得られた。

図 MSR 4. LiF-PuF₃ システムの状態図の研究



JRC Karlsruhe では、フッ化物塩システムの高熱特性調査に関する作業が継続されており、以下が注目すべき事項である。

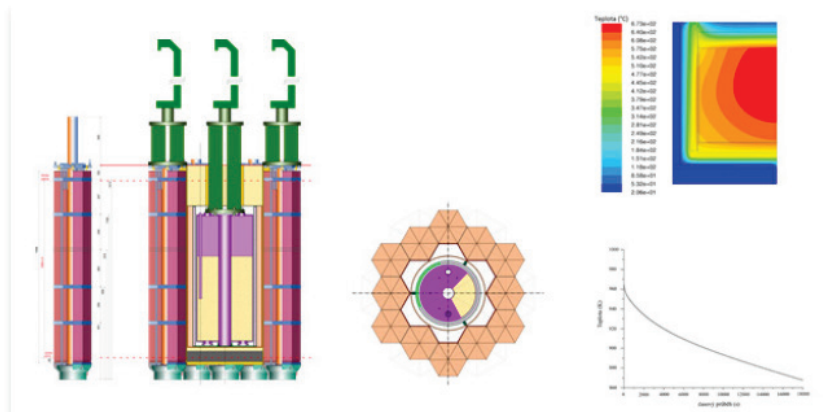
- 純 PuF₃ の融点の最初の測定が行われた。この研究にはまだ最適化が必要であるが、標準的なカプセル化技術を使用した限界である 1,250° C 以上で融解するフッ化アクチノイドの融点を決定するための実験装置が確立されている。
- 原子炉容器表面の沈殿物をシミュレートする固体塩の熱伝導率を測定する方法が改善され、レーザーフラッシュ技術を使用して成功した信頼性の高い測定を実現した。一連のフッ化アルカリの熱伝導率、および UF₄ と ThF₄ 成分を含む固化した複雑な燃料混合物が測定された。
- 熔融塩のガスの溶解度を決定する方法を試験する最初の試行は、定量的質量分析と組み合わせた噴流拡散セルを使用した溶解ガスの連続的な定量的決定を伴う高温注入設備を利用して行われた。

基本的な熱化学的性質に関する実験的研究の中で、JRC は NRG との主な協力の下、Petten の高中性子束炉 (HFR) で計画された照射実験 SALIENT-03 のフッ化物燃料塩の合成と製造に大きく関わっている。

Centre Research Řež : MSR 技術の研究開発は、産業貿易省とチェコ共和国の技術庁 (Technology Agency) が支援する国家 MSR プロジェクトの一環として、チェコ共和国でも継続された。主な取り組みは、Centre Research Řež の実験炉 LR-0 にあるいわゆる「ホットインサート FLIBE ゾーン」を使用した中性子測定の準備であった。これは、MSR システムの動作温度範囲 (500-750°C) での FLIBE 熔融物の反応温度フィードバック係数を決定することを目的とした、新しい要求の厳しい実験プログラムである。2019 年末までに、

ホットインサート FLIBE ゾーンすべての主要コンポーネントが製造された。アクティブな実験プログラムが 2020 年に開始される。

図 MSR 5. FLIBE 塩の加熱ゾーンの設計



さらに、MONICR 合金溶接技術最適化プログラムおよび長期 MONICR 合金腐食試験プログラムで、熔融フッ化物媒体用のインペラーポンプの開発と試験が行われた。熔融フッ化物媒体からの電気化学的分離法の開発の分野でも研究が続けられ、実験的研究と熔融塩揮発法による MSR 揮発性燃料成分抽出の検証に焦点を当てた新しい活動が 2019 年後半に開始された。

フランス

SAMOFAR と SAMOSAFER で実施された作業に加えて、フランスのパートナー (CNRS、CEA、FRAMATOME など) が、熔融フッ化物中の U/Pu 燃料サイクルを使用する高速炉の概念を開発するために、中性子とそのモデリング、燃料塩の選択、材料、腐食などの共通のロードマップに基づいて MSR コミュニティを構築した。特に、CEA では、現場での活動を調整するための新しいプロジェクトが作られた。

オーストラリア

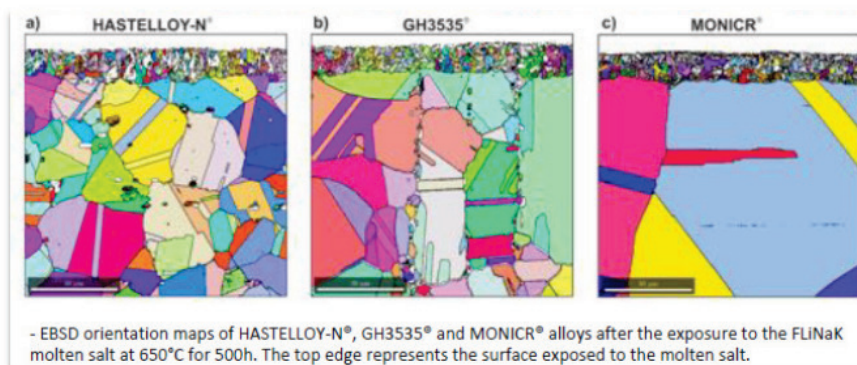
熔融塩原子炉を含む熔融塩ベースのエネルギーシステムの広範な展開には、困難な稼働条件に耐えることができる材料とコンポーネントの開発と認定が必要である。したがって、オーストラリアでは、MSR 低排出エネルギー生成システムの導入までの時間を短縮する目的で、適切な構造材料と被覆の開発、製造、および試験に取り組んでいる。特に ANSTO の大規模インフラ (OPAL 原子炉、Australian Synchrotron、および Centre for Accelerator Science) を使用して、候補のステンレス鋼およびニッケル基合金の FLiNaK の腐食を調査および理解するために、ANSTO は引き続き GIF パートナーと協力している。

2019 年、オーストラリアは GIF 内の分野横断的な材料関連の研究を増やすためのイニシアチブを継続した。GIF 先進製造・材料工学タスクフォース (Advanced Manufacturing and Materials Engineering Task Force : AMMETF) の議長を務めたことに加え、共通の研究対象分野を特定するために設けられた 2019 年 9 月に Avignon での MSR pSSC と VHTR PMB との会合で、VHTR/MSR 材料およびコンポーネントの合同 R&D ワークショップが開催された。

ワークショップは大成功し、以下の考えられる共同 R&D の領域が特定された。

- 先進製造
- イオン/中性子線損傷の設計方法の比較
- クリープおよびクリープ疲労モデルの開発
- 黒鉛、C/C、SiC/SiC の高温性能と放射線損傷
- 少量のサンプル試験、および高度な監視方法
- 溶接と接合

図 MSR 6. GH3535、ハステロイ N および MoNiCr 合金の FLiNaK 熔融塩腐食

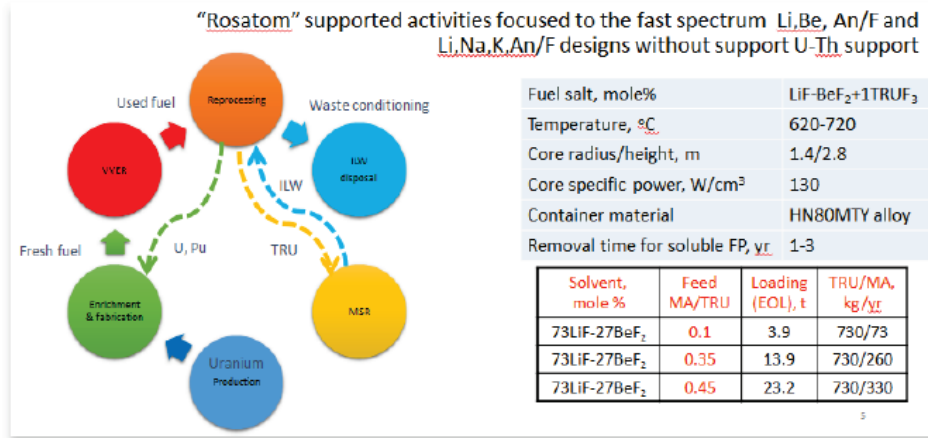


ロシア

2019年、RFでは、熔融塩原子炉の開発に多大な努力が払われた。国営企業 Rosatom は、多数の R&D プログラムを通じて、使用済み VVER-1000/1200 燃料のマイナーアクチニドとプルトニウムを液体フッ化物塩で溶解する単一流体の熔融塩アクチニドリサイクル転換炉 (MOSART) システムのサポートを続けている。MOSART 設計に関する最後の開発は、Np、Pu、Am、Cm を含むすべてのアクチニドの核燃料サイクルを閉じることを主な目的とする、高度な大出力 Li、Be、An/F および Li、Na、K、An/F ユニットのものではあった。原子炉の制御、および始動、平衡状態への移行、排出、停止などのためのさまざまな TRU 負荷による燃料塩管理を実証するために、鉍山化学コンビナート (Zheleznogorsk) のサイトで燃料塩クリーンアップユニットと組み合わせた試験 10 MWt Li、Be、An/F MOSART 設計の開発も継続された。現在進行中の MOSART 技術開発の範囲は次のとおりである。

- 燃料 Li、Be、An/F および Li、Na、K、An/F 塩混合物の高中性子フルエンスおよび耐塩性合金の設計特性評価
- 高いおよび低い忠実度の計算モデリングとツール開発
- 燃料 Li、Be、An/F および Li、Na、K、An/F 塩の物理的および化学的特性の評価
- 熔融塩ポンプと熱交換器の設計とその実証
- 計装開発
- 高度に自動化されたリモート操作および保守技術の開発と実証
- 燃料塩のクリーンアップの実証と、固体およびガス状の廃棄物の流れの評価

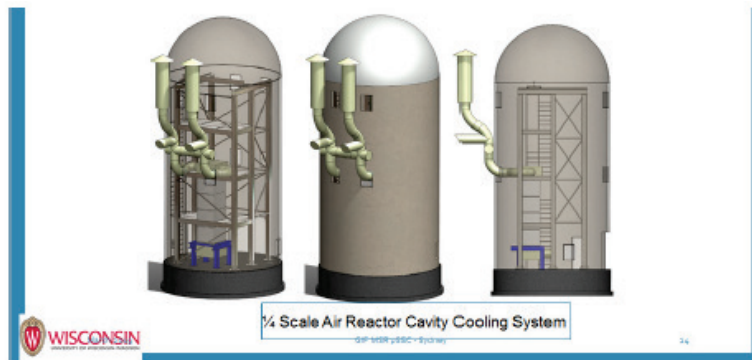
図 MSR 7. 長寿命アクチニドの問題を解決するのに役立つ不可欠な要素としての MOSART 概念



米国

2019年、米国では溶融塩原子炉と冷却炉の両方の原子炉活動が幅広く実施された。特に、Kairos Power Inc.は、ライセンス申請の準備として、米国原子力規制委員会（NRC）にトピックレポートを提出し続けた。また、カナダ原子力安全委員会とNRCは、先進原子炉とSMRのレビューの協力に関する覚書に従い、先進非軽水炉の最初の共同技術レビューにTerrestrial Energyの統合型溶融塩炉を選択したと発表した。米国政府は、費用分担した多くのR&Dプログラムを通じて、新興の米国MSR業界に支援を提供し続けている。NRCは、先進原子炉の安全特性をより適切に反映するために、ライセンス要件を最新化するプロセスを継続している。米国エネルギー省（DOE）は、MSR展開の残りの技術的ハードルを乗り越えるために、限定的な規模で大学と国立研究所の活動を引き続き支援している。米国政府は、セーフガード分析のためのMSRモデルと関連ツールの開発にも引き続き取り組んでいる。現在進行中のMSR技術開発の範囲には、高中性子フルエンスおよび耐塩性合金の設計と特性評価、高いおよび低い忠実度の計算モデリングとツール開発、黒鉛試験、燃料塩の熱物理的および熱化学的特性評価、燃料塩の熱力学的データベースの開発、溶融塩ポンプの設計と実証、計装開発、高度に自動化されたりモート操作と保守技術の開発と実証、および固体およびガス状の廃棄物の流れの評価が含まれる。オークリッジ国立研究所は、年に1回のDOE-Gateway for Innovation in NuclearがサポートするMSRワークショップを主催し、産業界、国立研究所、政府機関、国際機関、および学界から約250人が参加した。

図 MSR 8. ウィスコンシン大学で設計および建設された空冷 RCCS



カナダ

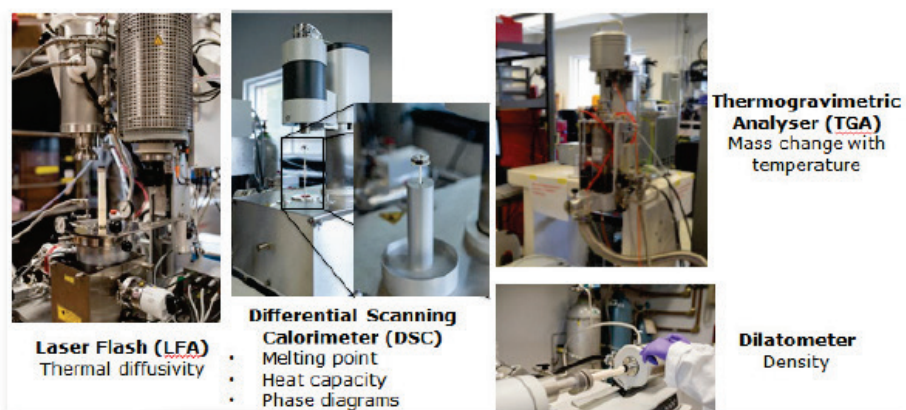
2019年、カナダ原子力研究所（CNL）は、SMRをサポートする専門知識と機能の開発を続け、カナダ原子力研究イニシアティブ（Canadian Nuclear Research Initiative: CNRI）と呼ばれる新しい費用分担のR&Dプログラムを開始した。CNLは、研究開発を可能にし、SMR業界をカナダの国立原子力研究所内の施設や専門知識と結び付けることで、カナダでのSMRの展開を加速するために、CNRIプログラムを設けた。プログラムの多くの利点の中でも特に、参加者はリソースを最適化し、技術的知識を共有し、CNLの専門知識にアクセスして、SMR技術の商業化を促進することができる。この新しいプログラムへの最初に取り込みでは、3つの熔融塩原子炉販売業者が、電気化学的分離方法、トリチウム管理、原子炉物理学、熱水力学、およびセーフガード研究を含むさまざまな作業プログラムを盛り込んだ提案書を提出した。

カナダ連邦原子力科学技術プログラムの後援の下、CNLは、以下を含む幅広い分野で熔融塩能力の開発を続けた。

- アクチノイド熔融塩燃料合成の開発。
- 熔融塩実験における核分裂生成物の保持。水と熔融塩ループ間の連結した自然循環熱伝達の実験を用いたステーション停電中のパッシブ冷却の評価と事故状態での熔融塩プラグの融解の評価。
- 構造材料の腐食を測定するための腐食ループの開発。
- ORNLMSRE に対する先進原子炉の結合した過渡シミュレーションツールセットのコードの評価を含む熔融塩原子炉設計のモデリングとシミュレーション：物理学（SERPENT、Rattlesnake）、TH（RELAP5-3D、ARIANT）、熔融塩の特性を予測するためのCFD（STAR-CCM+）および原子論的シミュレーション。

最後に、熔融塩の熱物理の原子力適確測定技術をさらに開発するために、多大な努力が続けられている。

図 MSR9. CNL でのサンプルのカプセル化と測定技術の開発



スイス

スイスの MSR 研究は、Paul Scherrer Institute (Paul Scherrer Institute : PSI) によ

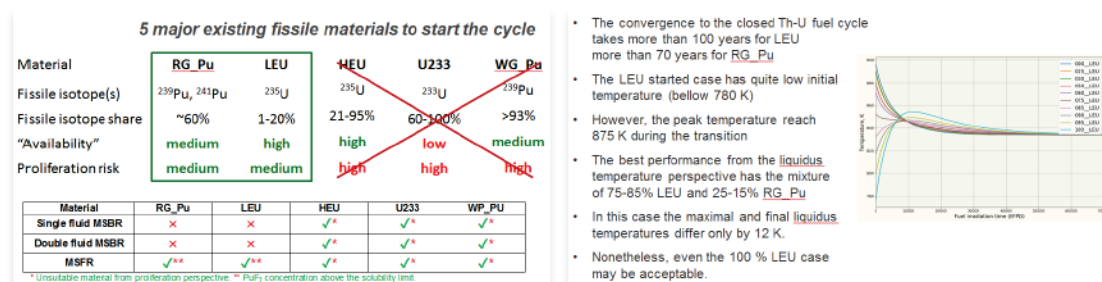
って調整されている。2019年、PSIは、燃料サイクル、システム挙動、溶融塩の熱力学という3つの選択された領域で専門知識と能力を開発し続けた。これらのシミュレーション活動の主な目的は、MSRの安全性と持続可能性の評価である。PSIはSAMOFARおよびSAMOSAFERプロジェクトのメンバーであるため、PSI活動の一部はEU進捗レポートに貢献している。

燃料サイクル評価の分野では、2019年にいくつかの過去の研究が発表された。4つのMSRタイプを含む平衡燃料サイクルにおける16基の異なる原子炉の比較の結果が発表された。U-PuおよびTh-Uサイクルの両方のパフォーマンスが比較された。EPJ Nuclear Sciences & Technologies ジャーナルのMSR特別版を利用して、B. Hombourger博士の論文のブリードアンドバーン燃料サイクルの研究が発表された。ブリードアンドバーン燃料サイクル研究は、科学修士論文内のパラメトリック研究によってさらに拡張され、その結果はPhysor 2020カンファレンスで発表される。

Open-FOAMベースの解法を使用したシステム動作の調査は、H2020プロジェクトのSAMOFARの貢献として、MSFR炉心に関して2019年も継続された。プロジェクトが終了した後も活動は継続中であり、プロジェクト内で開発されたそれぞれの凍結モデルにはまだ検証が必要である。Open-FOAMベースの解法は、独自のブリードアンドバーン炉心の熱水力レイアウトの概念設計にも適用された。その結果もPhysor2020カンファレンスで発表される。

溶融塩の熱力学シミュレーションは、フッ化物ベースの塩に焦点を当てたGEMS TMコードを用いて継続されていた。初期から平衡までの燃料サイクルへの移行中の液相温度とその変化がシミュレートされ、その結果がICAPP 2019カンファレンスで発表された。シビアアクシデントにおける燃料塩からの化合物の気化のシミュレーションを向上させるために、熱力学コードがシビアアクシデントコードMELCOREとも結合された。年末に向けて、塩化物塩のGEMSデータベースの準備が開始された。

図 MSR 10. 初期サイクルから平衡サイクルへの移行



中国

2019年、中国科学院の上海応用物理研究所（Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences : SINAP-CAS）は、TMSRの関連作業を着実に促進している。

2 MWthの溶融塩試験炉（TMSR-LF1）の設計が完了し、SINAPは、国家核安全局に予備安全解析報告書（Preliminary Safety Analysis Report : PSAR）を提出し、その審査に合格して承認を得た。また、主要コンポーネントの準備が基本的に整い、TMSR-LF1の建

設が開始された。

図 MSR 11. TMSF-LF1 の進展状況

- ❑ Complete the preliminary design and pass the expert review organized by the Bureau of Major Tasks in Jun. 2018.
- ❑ Start up the processing and manufacturing of key materials and equipment, and determine the manufacturer.
- ❑ Design of equipment construction drawings was completed jointly with manufacturers in Feb. 2019.



Expert review meeting



equipment construction drawings

スケーリングされた実験装置 (TMSR-SF0) の建設が完了し、一次および二次回路の熔融塩の充填やメインポンプの操作などの主要な試運転活動が正常に完了した。実験プログラムは 2020 年に開始される。

TMSR 燃料のフローシートの概念設計は進行中であり、いくつかの重要な技術の検証が完了している。熔融塩中のアクチニドと核分裂生成物の化学に関する基礎研究が開始された。数種類の原子炉用黒鉛の PIE 実験が完了し、イオンビーム照射による原子炉用黒鉛の照射寿命の評価方法が確立された。さらに、高温 (750-850°C) MSR に使用される合金が開発されている。



MSR SSC の Stéphane Bourg 議長とすべての貢献者