

熔融塩炉

—その可能性と未来へのステップ

東京大学名誉教授 山脇道夫

世界の熔融塩炉開発

国	開発状況
アメリカ	オークリッジ研究所で、1954年に航空機用の熔融塩炉(熱出力:2.5MWt)を建設・運転、1964年に熔融塩実験炉MSRE(7.4MWt)を建設し1969年まで順調に稼働し終了。2012年からMITの原子炉でフッ化物熔融塩の照射実験。2016年DOEの補助金でTerraPowerが中心に塩化物熔融塩高速炉の研究開始。
カナダ	テレストリアル・エナジー社が統合型熔融塩炉(IMSR)商業用初号機の2020年代建設を目指し、チョークリバー研究所敷地への設置のフェーズビリティ調査をカナダ原子力研究所と開始(2017年6月発表)。
中国	2011年科学院上海応用物理研究所が、DOEと共同研究契約を結び、熔融塩炉開発計画を開始。熔融塩冷却炉(FHR)開発を先行させるも、熔融塩燃料炉開発のためのシミュレータ(MSR-SFO)を建設中。
欧州	2002年にGIF(第4世代原子炉)の対象の一つとして熔融塩炉MSRを選定し、欧州フレームワークプログラムにより熔融塩炉の研究を実施。現在は熔融塩燃料炉と熔融塩冷却炉FHRの2案を検討。
フランス	1980年代に原子力庁CEAと電力EdFが熔融塩炉の検討を実施。1990年代以降はPuやMAの消滅処理を目的とした熔融塩炉を検討。2000年代以降は高速中性子熔融塩炉MSFRを検討。
イギリス	MOLTEXという塩化物熔融塩炉の提案が出された。
ロシア	1970年代よりフッ化物熔融塩による核燃料処理技術FREGATを実施。熔融塩炉については、MOSARTプロジェクトとしてEUとも協力して実施中。
インド	国内埋蔵量の多いトリウムの利用方策として、固体燃料+Na冷却高速炉の対案として、トリウム固体燃料+熔融塩冷却炉も検討が始まっている。

米国の溶融塩炉開発：ORNLからTerraPower

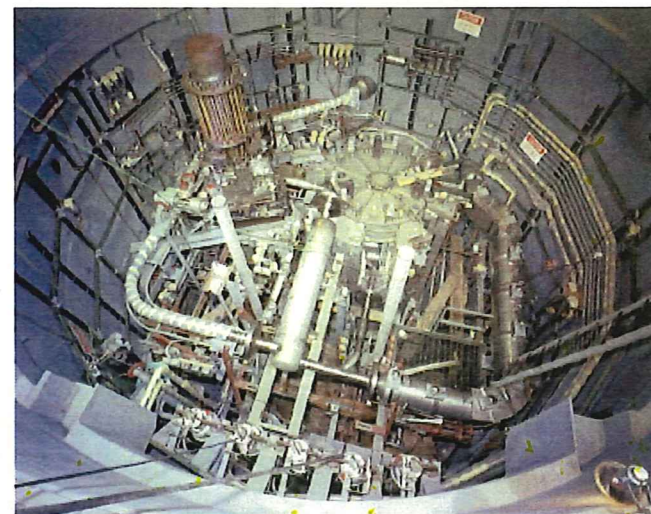
➤ 溶融塩炉実験炉 (MSRE)

開発者：オークリッジ研究所 (ORNL)

溶融塩：フッ化物

時期：1964～1969年に運転成功

(以降、溶融塩高速炉の開発が進められたが、1976年の米国政策変更等により中止)



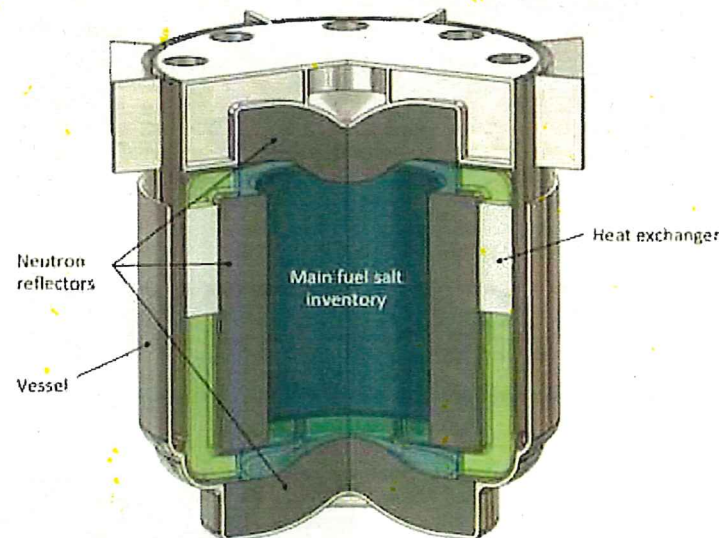
➤ 溶融塩高速炉 (MCFR)

開発者：TerraPower, ORNL, EPRI

Southern Company

溶融塩：塩化物

時期：2016年設計 (詳細未公開)



その他の国での最近の熔融塩炉開発

➤ 熔融塩炉・商業用初号機の立地検討(カナダ)

開発者: テレストリアル・エネジー社

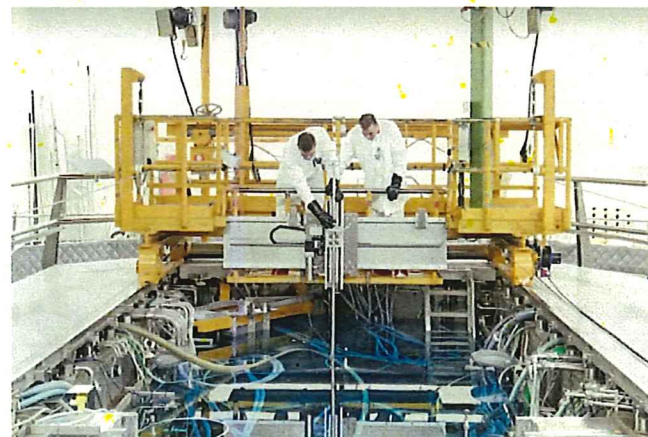
内容: 統合型熔融塩炉 (IMSR) 商業用初号機の2020年代建設を目、チョークリバー研究所敷地への設置に関わるフェージビリティ調査をカナダ原子力研究所と開始(2017年6月発表)。



➤ 熔融塩炉の耐食材料開発(オランダ)

開発者: オランダ原子力研究機構NRG、
トリウム熔融塩炉財団

内容: 2017年8月に高中性子束原子炉でフッ化リチウムとフッ化トリウム混合物が入った容器の中性子照射試験を開始。



日本の溶融塩炉開発

➤ 溶融塩炉の基礎・設計検討

開発者: 原研 / 東海大、京大等

溶融塩: フッ化物

時期: 1970~1980年代

➤ 日本原子力学会

研究専門委員会で検討(1974~1986年)

溶融塩炉の基本的特性を評価



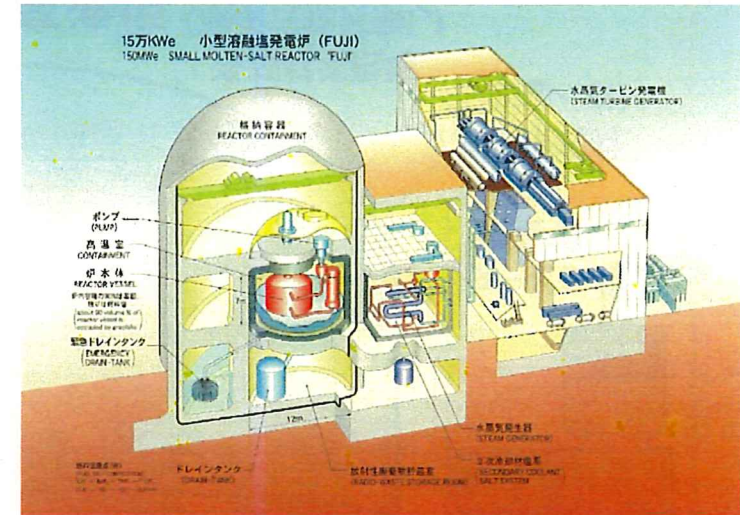
➤ 日本原子力学会

研究専門委員会(主査: 山脇)が世界の研究動向を整理し、溶融塩炉を再検討。

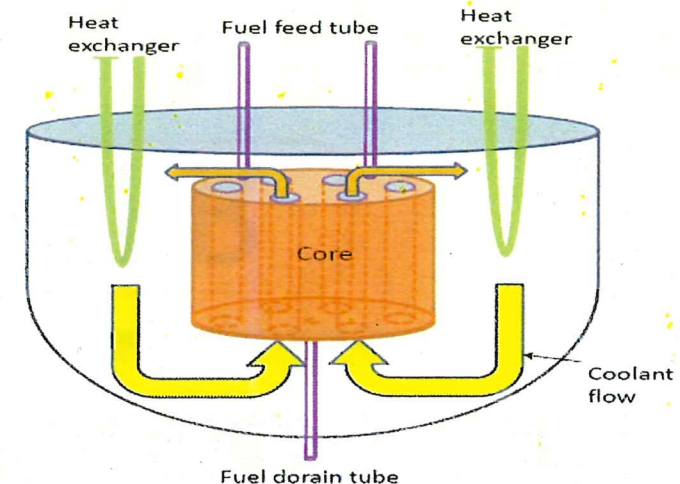
(2012~2015年報告書作成中)

➤ 溶融塩炉の基礎・設計検討

開発者: 福井大、東大他



古川らによる溶融塩炉FUJI設計案

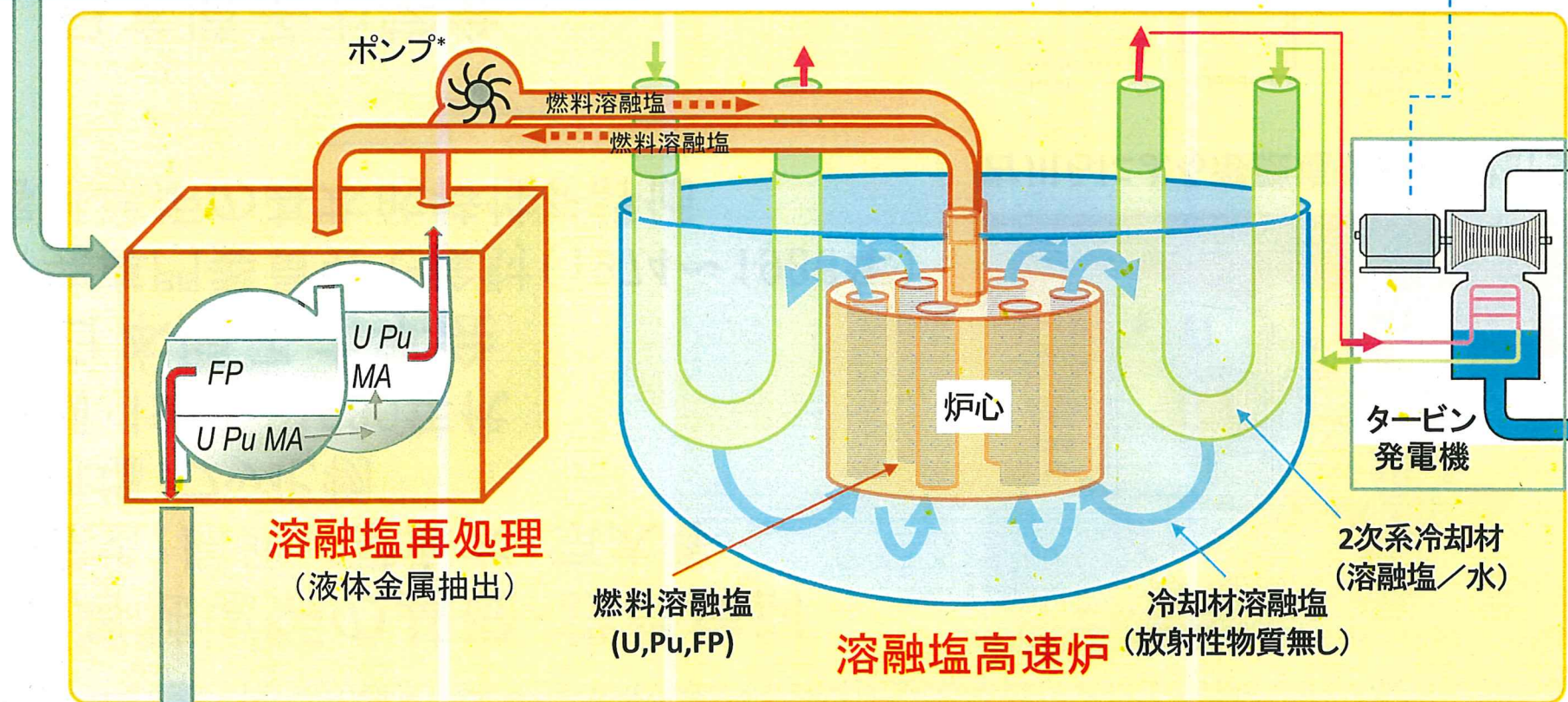
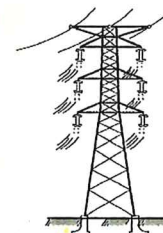


福井大の静止燃料型溶融塩高速炉

IMSFR（再処理と一体になった溶融塩高速炉）の概念

- ◆ 劣化ウラン、六ヶ所再処理製品 (U,Pu)
- ◆ 使用済MOX、高レベル廃棄物、燃料デブリからのMAなど

IMSFR



廃棄物 (FP) 400年管理期間

*)MAが十分燃焼したら(核変換が行われたら)ポンプを稼働して燃料溶融塩を入れ替える。

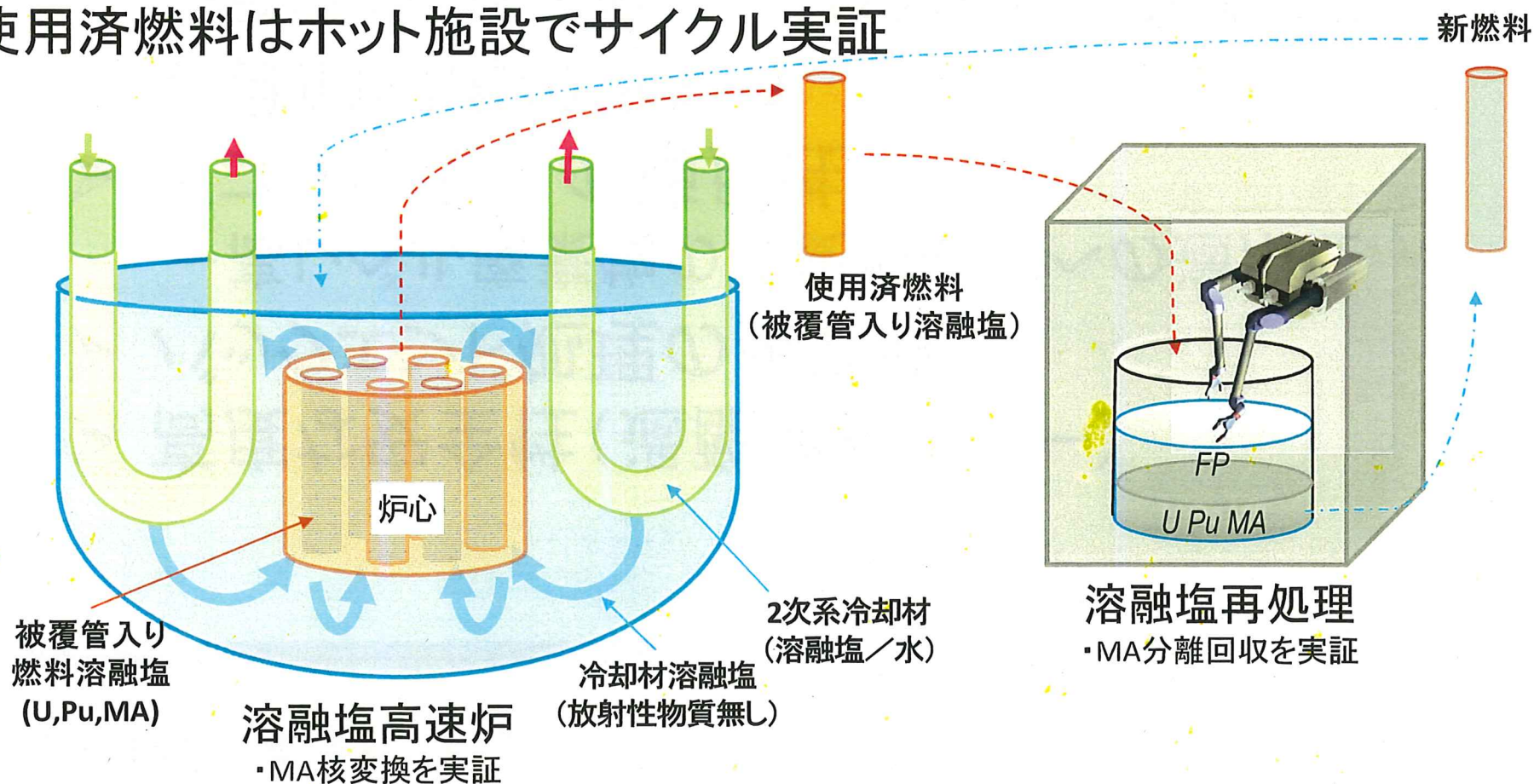
IMSFRのメリット

- 高度な安全性(過酷事故フリー)
- バックエンド処理の柔軟性
 - 高レベル廃棄物の核変換処理への適用性
- デブリ処理への適用性
- 多目的利用の可能性
 - 発電炉、核変換炉、熱供給炉、水素製造炉、
淡水化炉
- 経済性

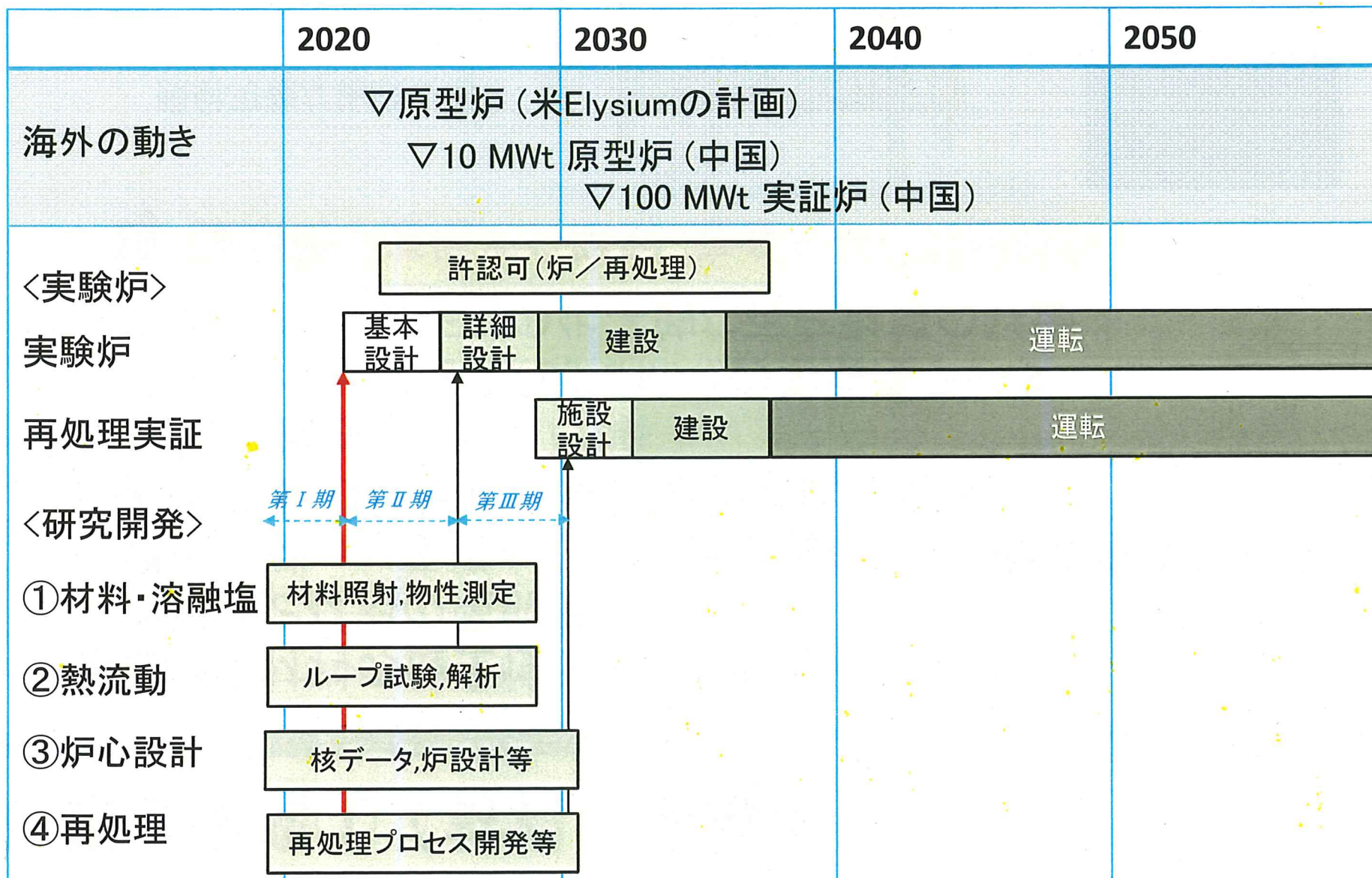
IMSFR実験炉（概念図）

➤ 熔融塩高速炉の基本概念の実証

- ・熔融塩燃料は被覆管入り
- ・熔融塩冷却材は核物質を含まない
- ・使用済燃料はホット施設でサイクル実証



IMSFR実験炉の開発計画（案）



必要な研究①（材料・熔融塩）

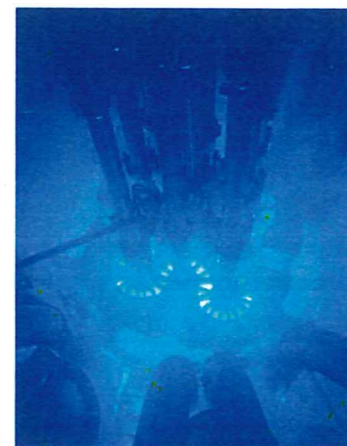
- ◆ 熔融塩と材料の健全性データの取得
 - 熔融塩と材料の照射データ
 - 燃焼に伴って蓄積する核分裂生成物による材料腐食データ
 - 耐用年数の評価が経済性の評価には重要
- ◆ 熔融塩の物性データの取得
 - 熔融塩への核物質(U,Pu,MA)の溶解度データ
 - 核分裂生成物(FP)の化学的な存在形態の評価

→ 国際的な連携での照射・腐食データの拡充

照射可能な施設の例:



NRG(オランダ)



ATR(米国)

必要な研究②（溶融塩の熱流動）

- ◆プラント設計に必要な溶融塩の熱流動特性の評価
 - 粘度や熱伝導率、熱容量等の熱物性の温度依存性データ整備
 - 計算コード検証用工学規模のループによる溶融塩の熱流動試験
 - 異なる溶融塩組成での熱流動の評価手法の構築



国内での独自データの取得



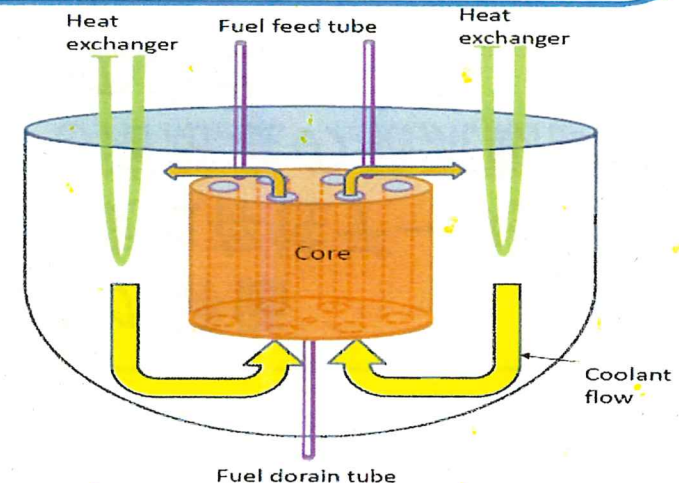
国内にある溶融塩ループの例
（核融合科学研究所施設*）

*)核融合炉の溶融塩、液体金属ブランケット研究開発用の試験装置。ただし、広範な溶融塩の基礎研究などにも活用。

必要な研究③（炉心設計研究）

- ◆炉心・プラント設計に必要な炉心設計技術の構築
 - マイナーアクチノイド(MA)や熔融塩構成核種の核データの充実
 - 炉心内出力分布、核特性の評価
 - 発熱しながら流動する液体燃料の計算手法の確立
 - システムコード、CFDコードを利用した炉心、熱交換器等を結合した体系の解析手法の確立
 - 最適な炉心、プラント概念の検討

→ 国内での実験炉仕様での
最適な炉心、プラント概念
の構築



検討例(福井大の静止燃料型
熔融塩高速炉)

必要な研究④（再処理データ）

- ◆使用済み溶融塩燃料の再処理と廃棄物処理
運転しながら燃料処理を連続的に実施でき、軽水炉燃料のようにいちいち入れ替える必要が無いとされているが、プロセスの検討は不十分。
 - 最適な乾式再処理プロセスの構築
 - 廃棄物の安定貯蔵／処分方法
 - 高レベル廃棄物と二次廃棄物の発生量と特性評価

➔ 溶融塩燃料の再処理
プロセス試験の実施



溶融塩の乾式再処理試験が実施できる国内施設例
（日本原子力研究開発機構）

その他必要な研究（安全研究など）

溶融塩炉～再処理のシステム全体に亘る安全性・健全性の向上に向けた検討の継続が不可欠

◆溶融塩の取り扱い技術の成熟

→循環ポンプや弁等の機材

→温度・流量計測技術や燃料物質濃度測定技術など

◆規制・基準の確立

→アメリカでは議論が始まっているが、発電所建設に向けた取り決めを整備する必要がある

→世界的にはないプラントなので前例がない



- ・安全性を示す根拠を整備し、
- ・プラントの成立性を示し、
- ・安心を担保する体系を整える