

熔融塩炉開発—日本の戦略

資源・エネルギー戦略調査会

新型エネルギー検討委員会

2018年6月14日

東京大学名誉教授、福井大学参与

山脇道夫

はじめに

- 原子力エネルギーは我が国にとって長期にわたり重要なエネルギー源

何故なら:

- ★再生可能エネルギー(主力電源として期待)には限界;
 - ・太陽光、風力は時間的に変動し、制御困難
 - ➡ バックアップ電源、ベースロード電源が必要
 - ・再生可能エネルギーは環境破壊のため使用に制限
- ★化石燃料発電は温室効果ガス放出のため削減すべき
 - ➡ ゼロ炭素社会への移行が目標



再生可能エネルギー化とゼロ炭素社会化を支える
バックアップ電源、ベースロード電源として原子力は重要

はじめに（続き）

- ▶ 原子力の最大欠点を改良する焦眉の目標：
 - ★ 高度に安全なシステムを構築：
過酷事故フリーを目指す
 - ★ 信頼されるバックエンド処理を実現：
高レベル廃棄物の核変換処理、即ち減容、短寿命化
- ▶ 熔融塩炉はこれらの改良の担い手として潜在能力が高い
 - ➡ 原子カイノベーションの旗手として期待される

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)。
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

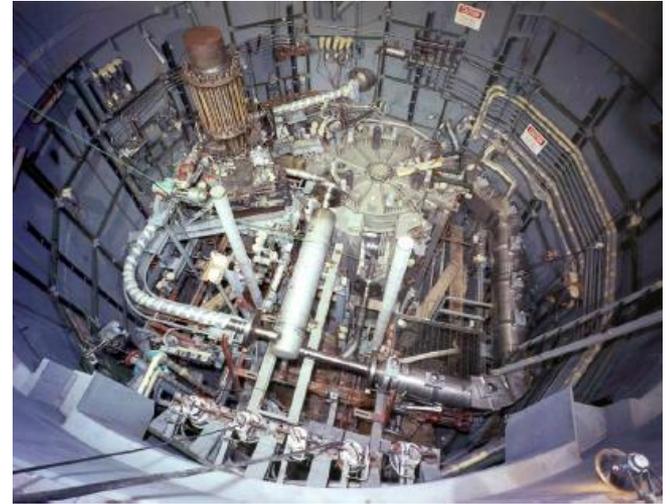
➤ 溶融塩炉実験炉 (MSRE)

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、溶融塩増殖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)



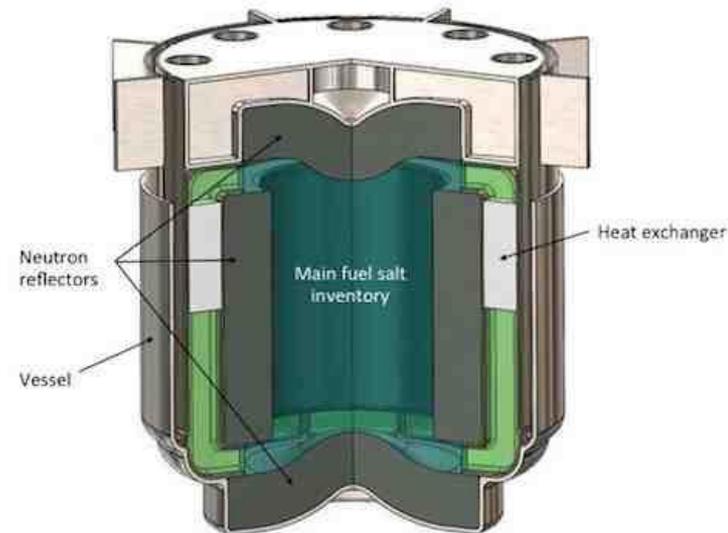
➤ 溶融塩高速炉 (MCFR)

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)



中国での熔融塩炉開発

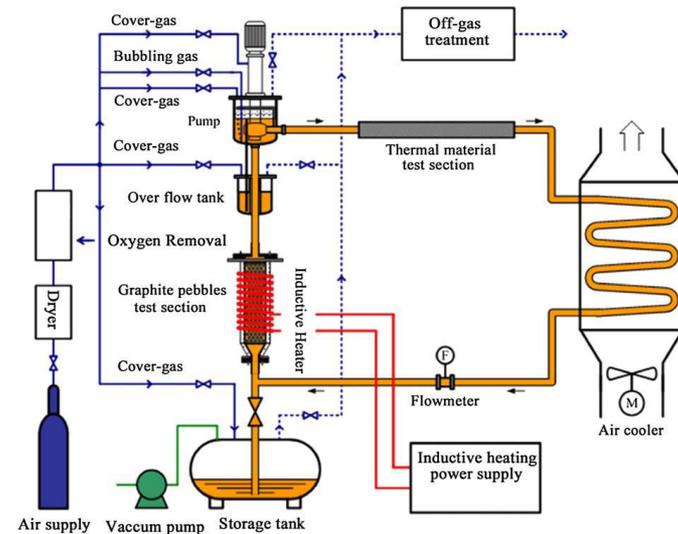
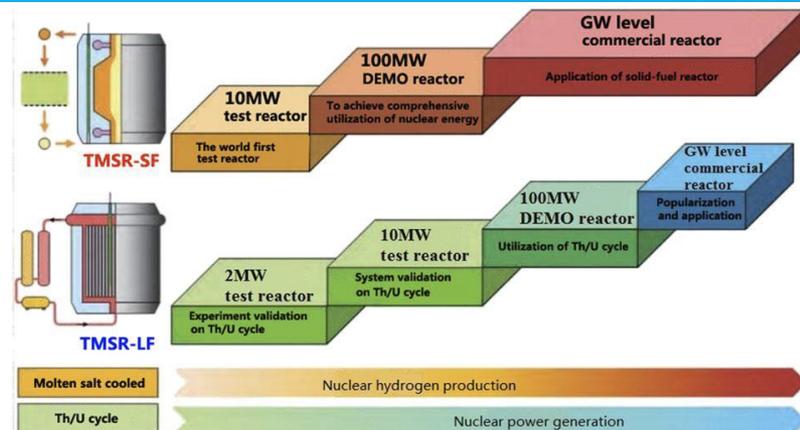
上海応用物理研究所(SINAP)を中心に多くの大学が研究を実施:

➤ Th熔融塩炉の開発計画

- 固体燃料炉(TMSR-SF)から液体燃料炉(TMSR-LF)に進める開発計画。
- 2025年までに、10MW固体燃料炉と2MW液体燃料炉の試験炉を建設。

➤ 熔融塩炉基礎研究の推進

- 熔融塩(硝酸塩、フッ化物(FLINAK))ループによる自然循環・伝熱や材料データ取得。
- 受動的崩壊熱除去系の設計・試験。
- 固体燃料熔融塩炉は米国の安全規準構築(ANSI/ANS-20.1)に参画。
- 今後の研究課題: 材料、再処理、Th-Uサイクル、熱流動、要素技術開発。



500~700人の若い研究者が参画!

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年代建設を目指し、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

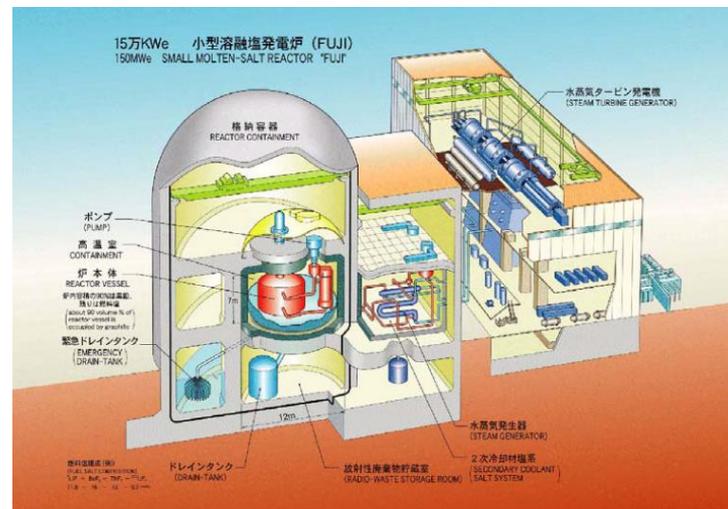
溶融塩：フッ化物

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



古川らによる溶融塩熱中性子炉FUJI設計案



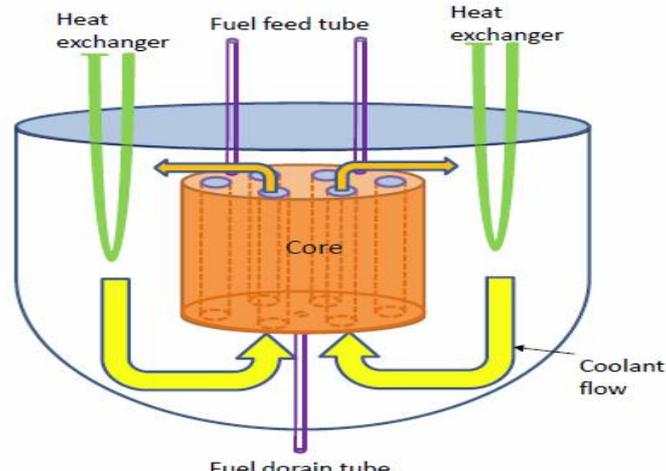
➤ 日本原子力学会

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。

(2013～2017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



福井大の静止燃料型溶融塩高速炉

日本原子力学会—熔融塩技術 研究専門委員会の活動

- ・主査： 山脇道夫(東大名誉教授)
- ・期間： 2013～2017年
- ・約50名のメンバー： 学、産、官から
- ・世界と国内の調査、国際的協力(ANS20.1, インドネシア)
- ・熔融塩炉の再検討、
開発の方向性を議論
- ・報告書作成中



溶融塩からの放射能放出

(有田 裕二、山脇 道夫 (福井大学))

M.Taira, et al. (Univ. of Fukui), Global 2015, September, 2015 - Paris

・ 溶融塩炉からの事故時放射能放出を測定 (クヌーセン質量分析器)

・ 検出された蒸気種;

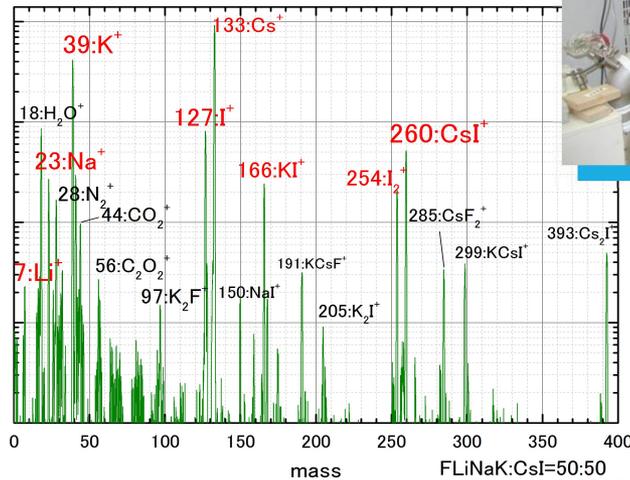
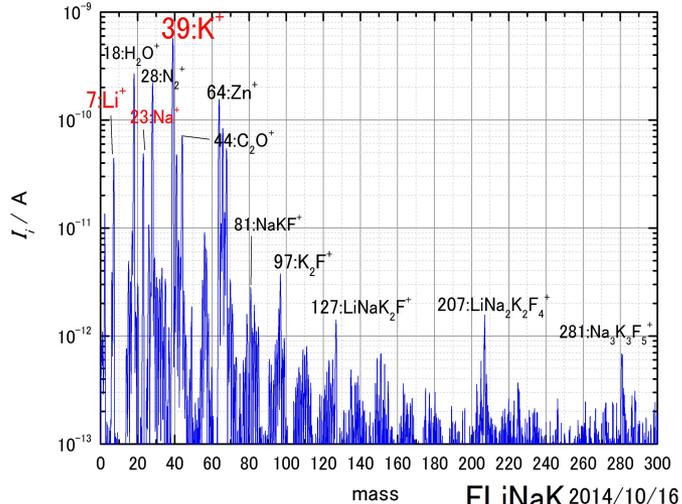
FLiNaK \rightarrow KF, LiF, NaF

CsI 添加FLiNaK \rightarrow KF, (KF)₂, CsI, (CsI)₂, KI

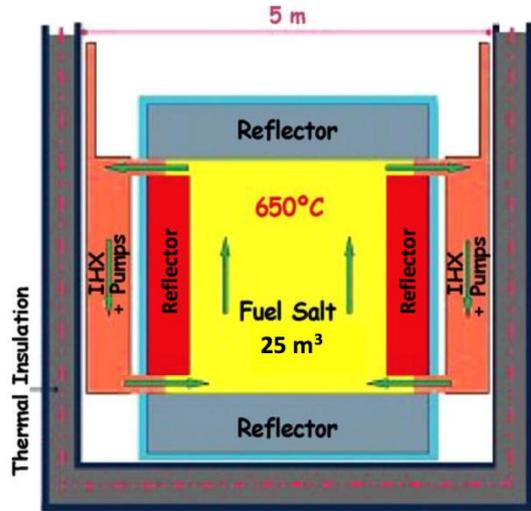
・ 軽水炉に比べ、過酷事故時の放射能放出量は

1/100以下

・ さらに水素爆発フリー \rightarrow 安全炉



溶融塩炉によるPu/MA 核変換シナリオ (三田地紘史)



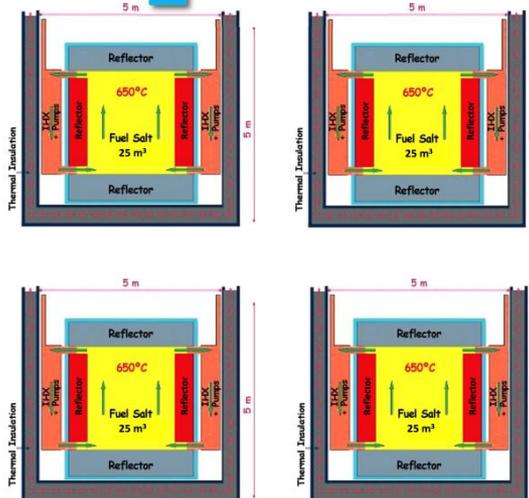
炉心径; 2.8m, 高さ; 2.7m, 溶融塩容積; 25m³ (炉心容積; 16m³)
 燃料塩組成; LiF-NaF-KF (FLiNaK) + MA
 Pu/MA は 25日毎に供給 (プラント利用率; 0.9)
 再処理サイクル; 2年, FPを抽出

FP は除去し、全 TRU はMSR炉心へ戻される

Pu/MAの同位体比は、
 6年燃焼後の使用済み
 燃料 (60GWd/t (PWR))

188 tons
 TRU (Pu)
 を装荷

Mitachi, AESJ mtg. (Kyoto,
 2014)

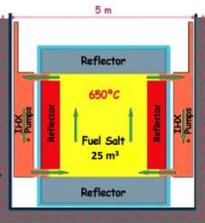


各ユニット; 2.5GWth,
 4 ユニット 各 40年運転

残余 TRU

TRUは 炉心中に
 7.2 ton 残留
 TRU消滅率96.2%

FPのみ
 除去



2.5GWth

1 ユニット 40年運転

除去FP中の
 残余 TRU;
 0.103%

塩化物化、連続再処理で効率UP

過酷事故フリーな溶融塩炉(S-MSR) を提案

- ・静止燃料型溶融塩炉 (S-MSR)

M.Yamawaki & Y.Arita (Univ. of Fukui)

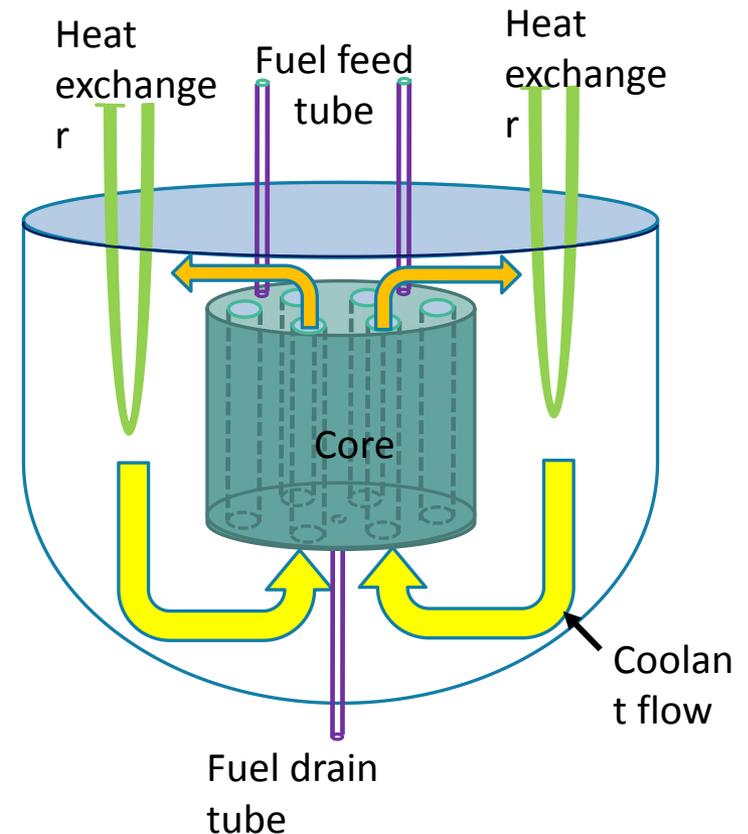
ICONE23, May, 2015

- ・燃料塩は炉心内にとどまる

➡ 過酷事故フリーを目指す

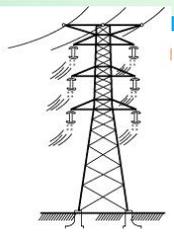
- ・燃料再処理系との一体化

➡ 統合型溶融塩高速炉
(IMSFR)

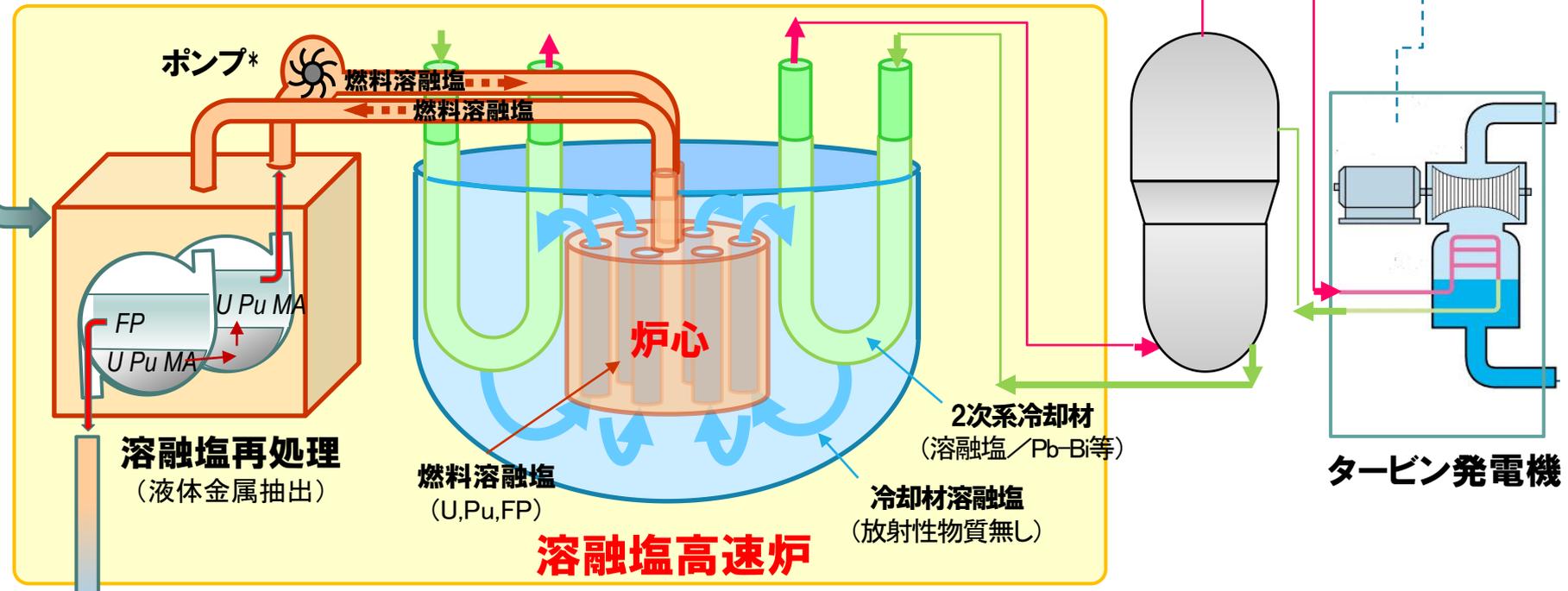


IMSFR（再処理と一体になった熔融塩高速炉）の概念

IMSFR



- ◆ 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



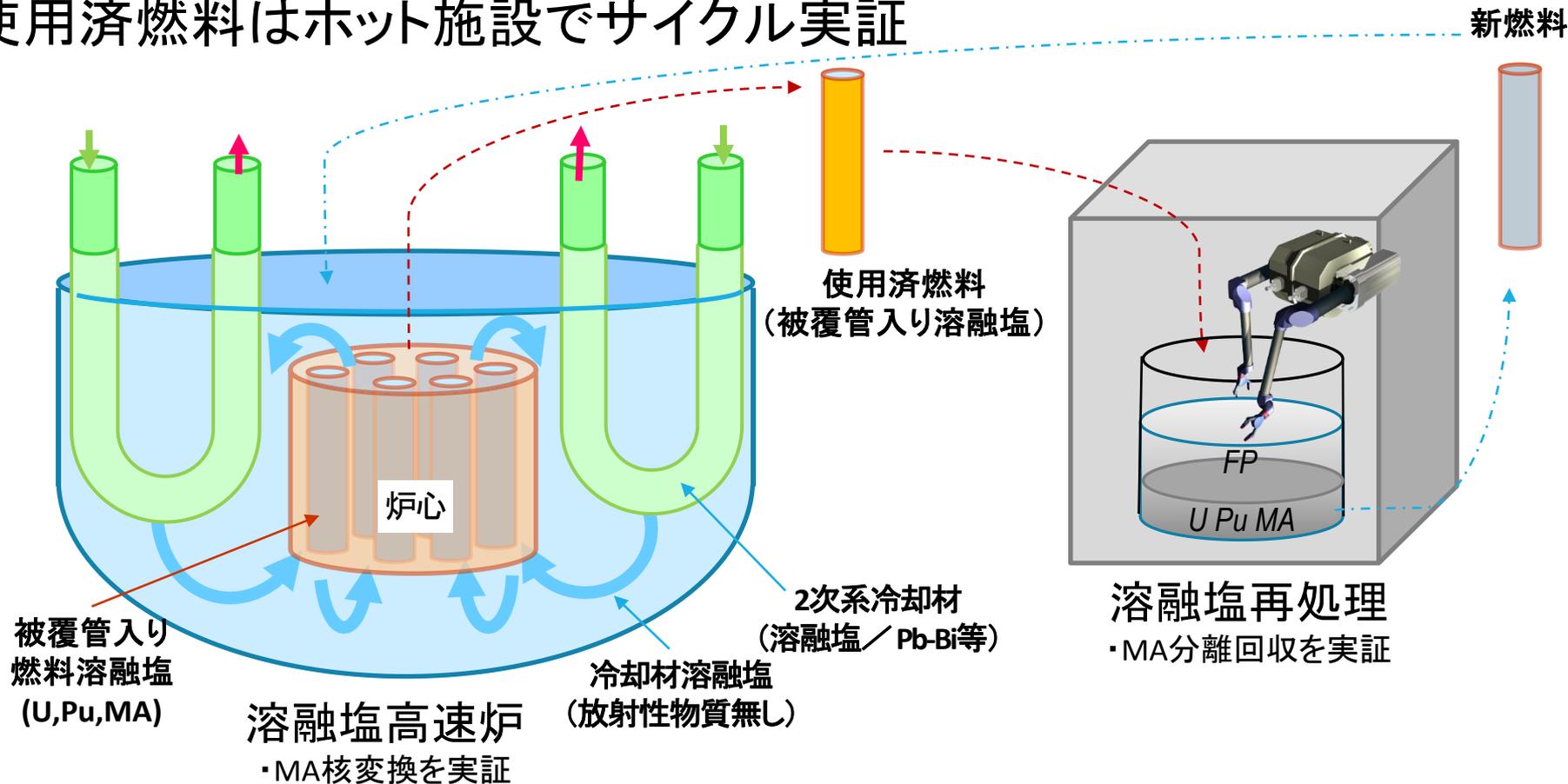
廃棄物 (FP) 400年管理期間

*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。

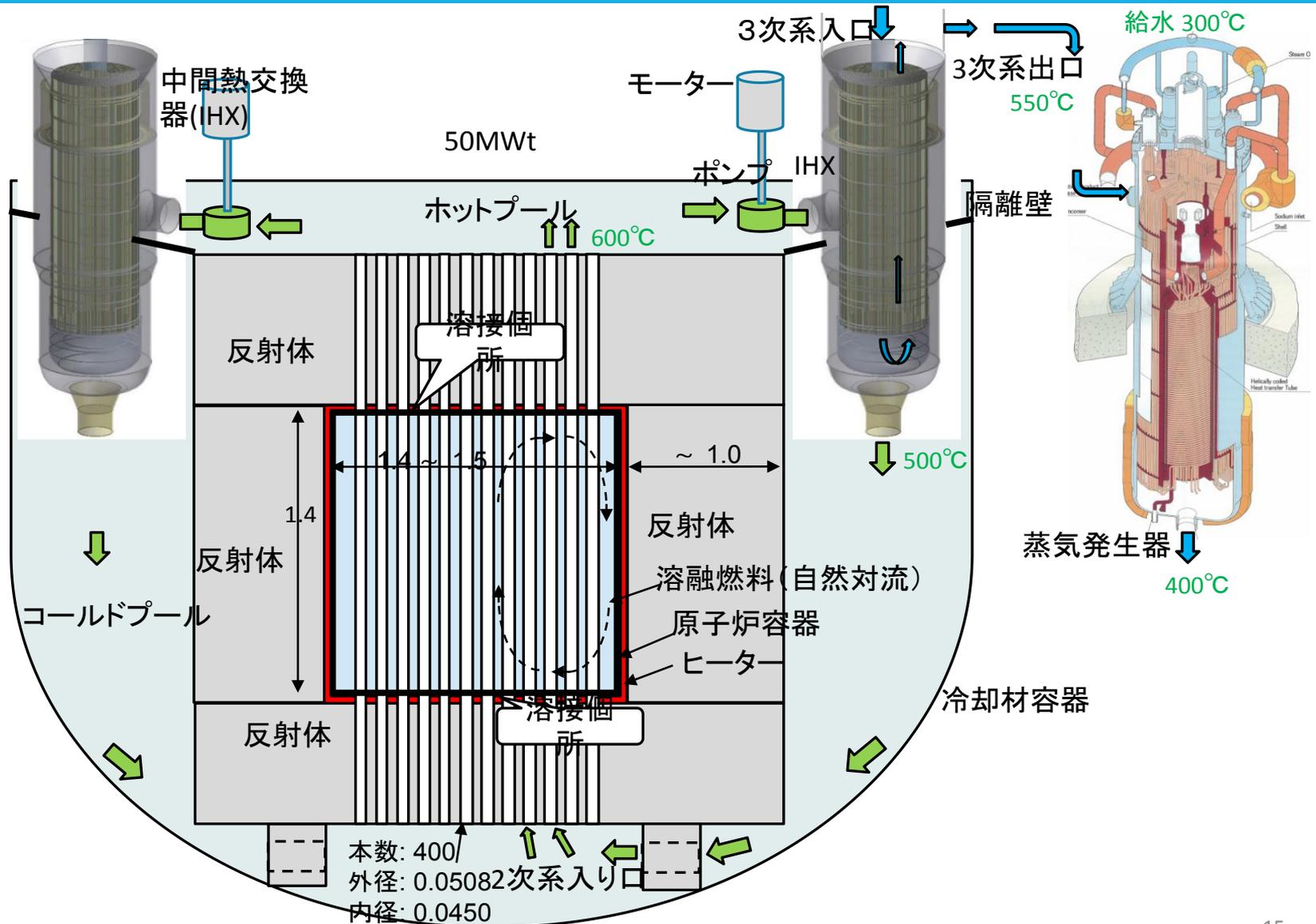
IMSFR 実験炉（概念図）

➤ 熔融塩高速炉の基本概念の実証

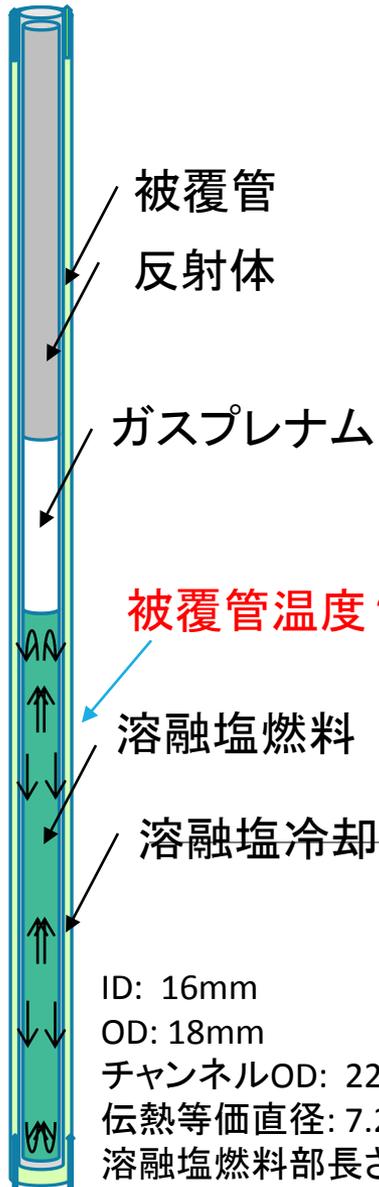
- ・熔融塩燃料は被覆管入り
- ・熔融塩冷却材は核物質を含まない
- ・使用済燃料はホット施設でサイクル実証



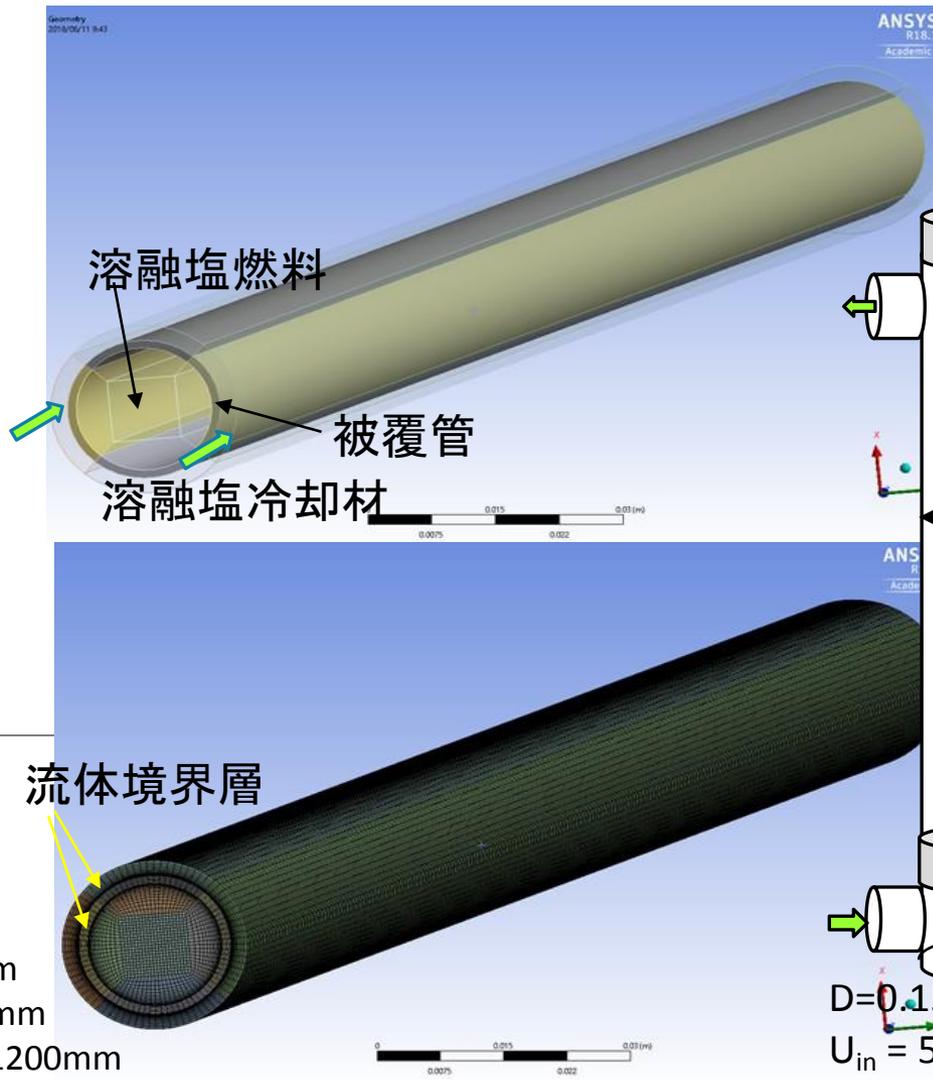
IMSFR実験炉（詳細模式図）



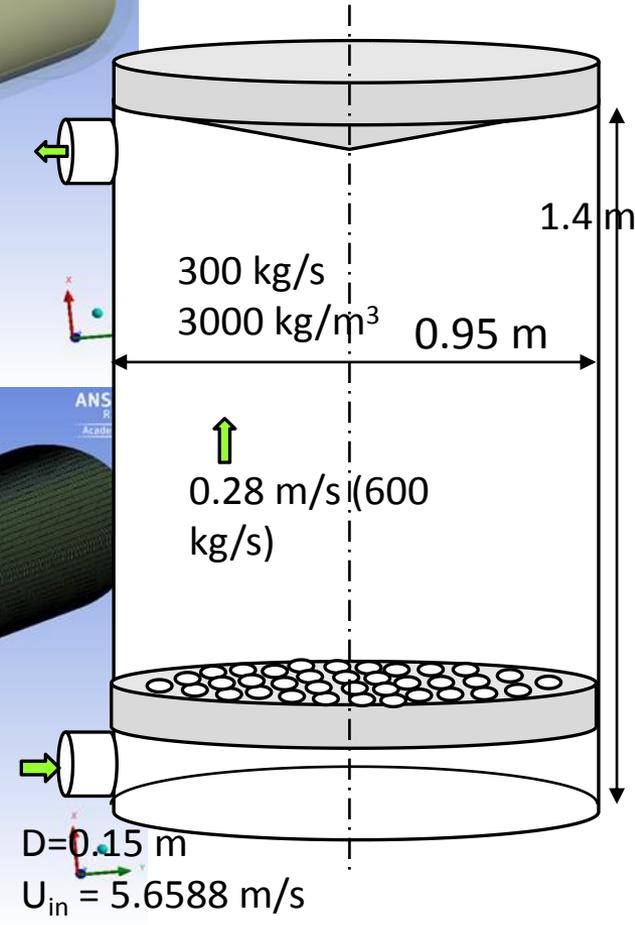
炉心の成立性を判断するFLUENT 解析モデル



ID: 16mm
OD: 18mm
チャンネルOD: 22mm
伝熱等価直径: 7.27mm
溶融塩燃料部長さ: 1200mm
ピン出力: 24 kW

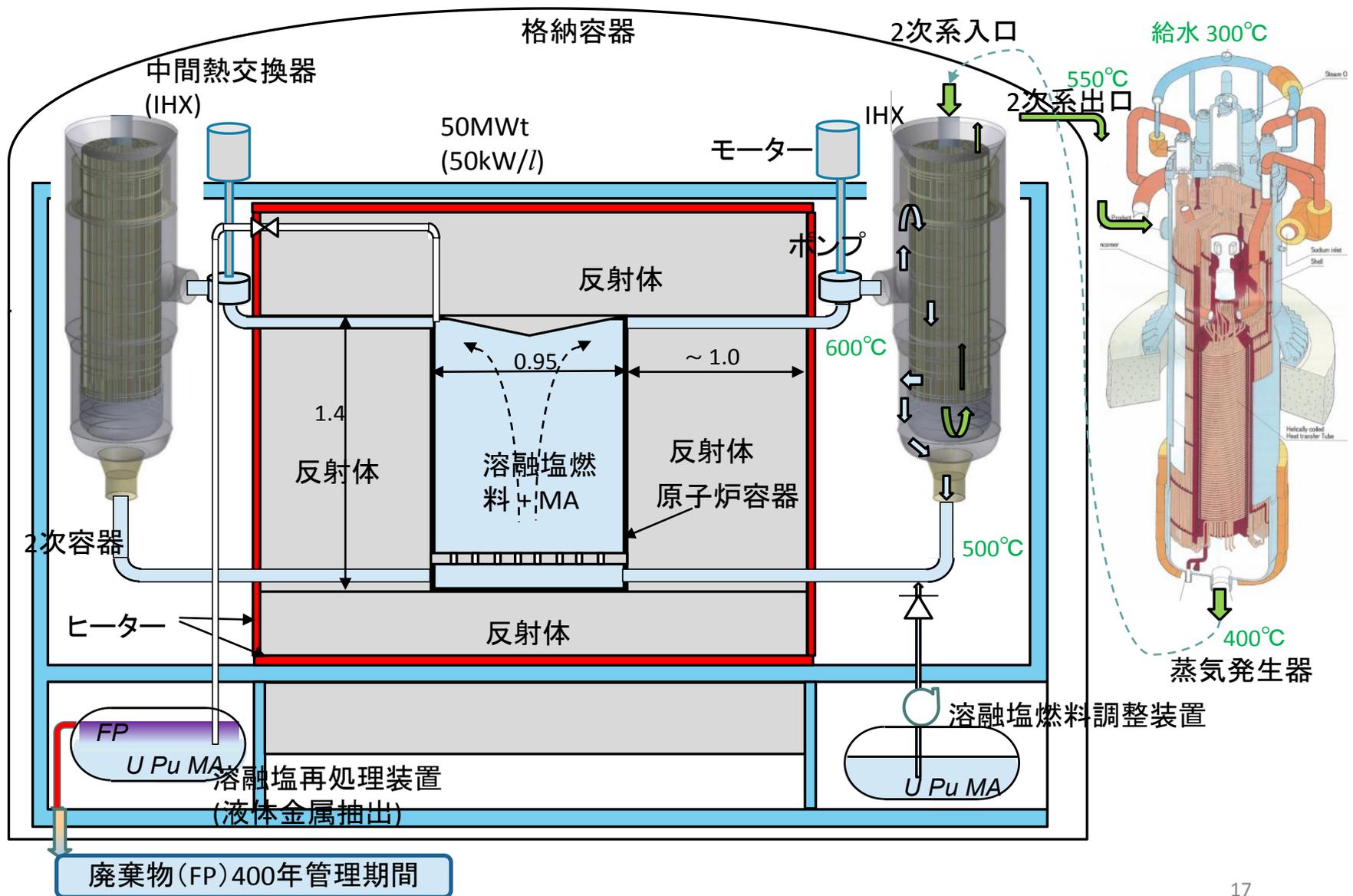


集合体モデル



タンクモデル

在来型熔融塩高速炉（模式図）



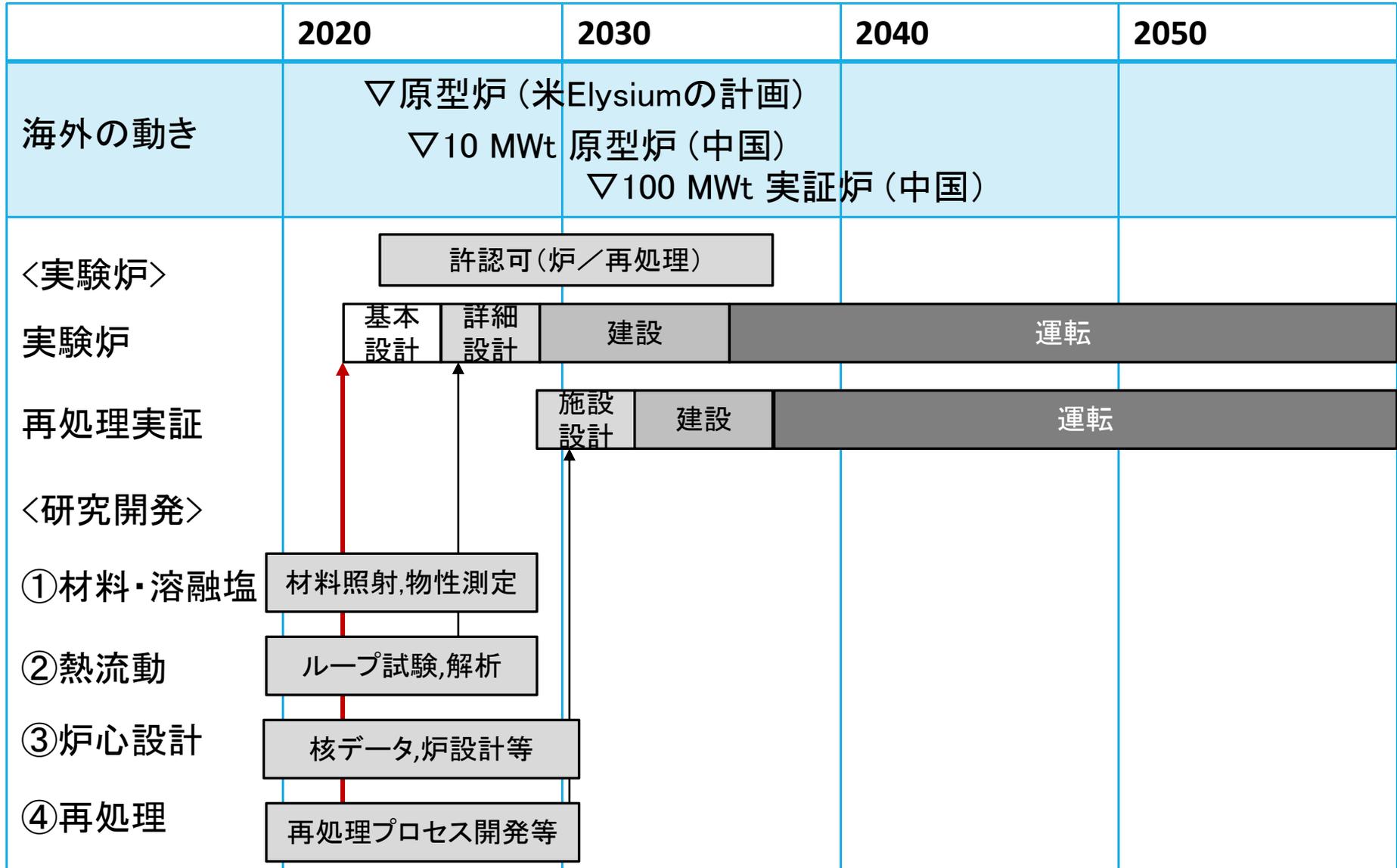
IMSFRのメリット

- 高度な安全性（過酷事故フリーを目指す）
- バックエンド処理の柔軟性
 - 高レベル廃棄物の高効率な核変換処理
- （デブリ処理への適用も可能性）

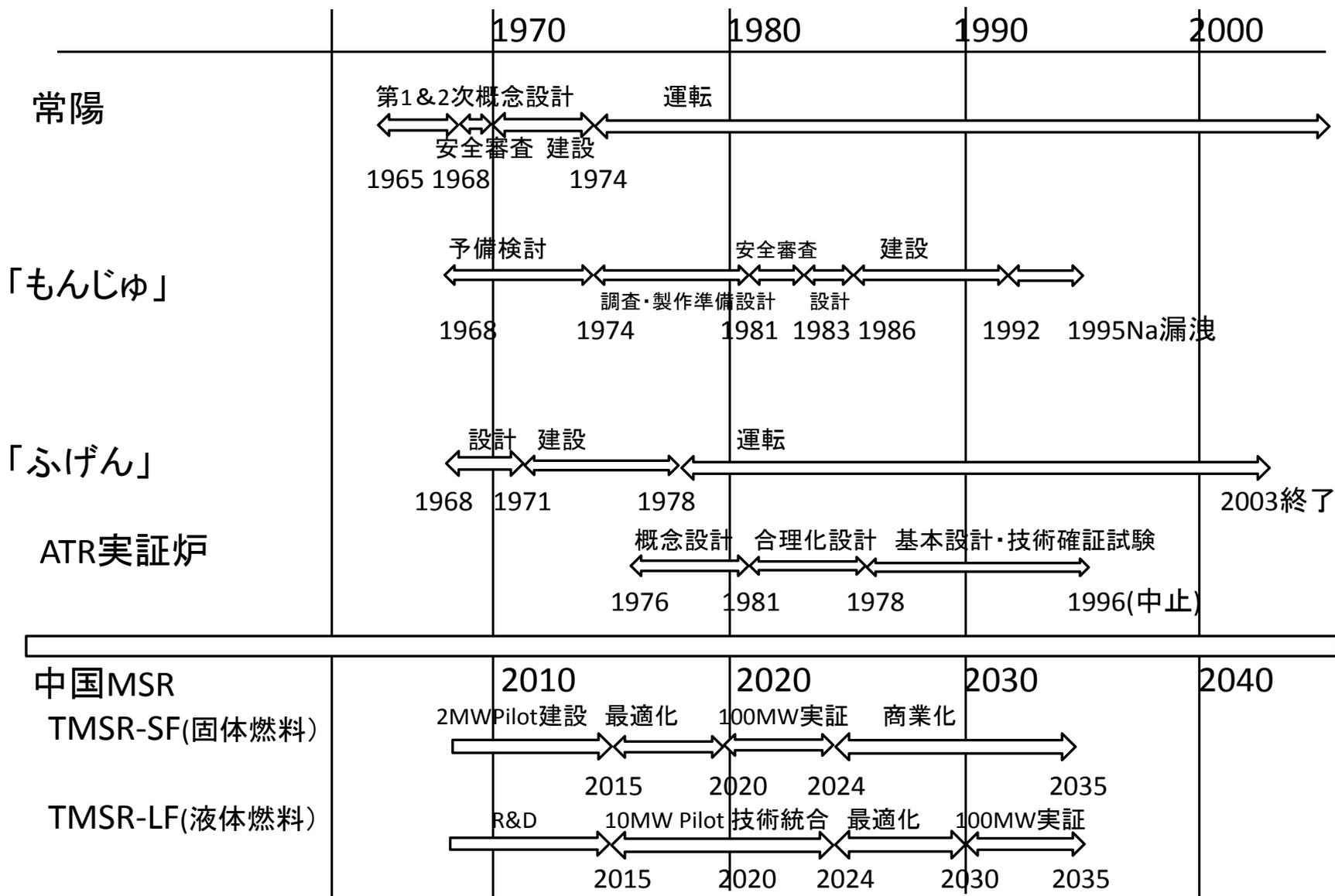
- 多目的利用への期待
 - 発電炉、核変換炉、再エネバックアップ電源、熱供給炉、水素製造炉、淡水化炉

- （経済性）

IMSFR実験炉の開発計画（案）



原子炉設計・建設工程の例



必要な研究①（材料・溶融塩）

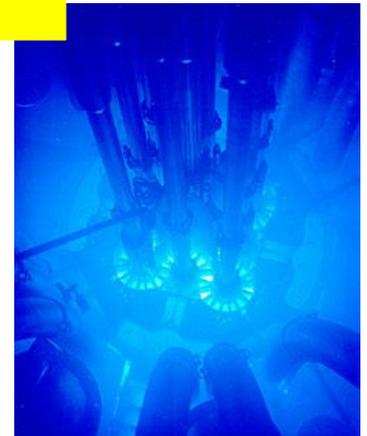
- ◆ 溶融塩と材料の健全性データの取得
 - 溶融塩と材料の照射データ
 - 燃焼に伴って蓄積する核分裂生成物による材料腐食データ
 - 耐用年数の評価が経済性の評価には重要
- ◆ 溶融塩の物性データの取得
 - 溶融塩への核物質 (U, Pu, MA) の溶解度データ
 - 核分裂生成物 (FP) の化学的な存在形態の評価

➡ 国際的な連携での照射・腐食データの拡充、
および国内での独自データの取得

照射可能な施設の例：



NRG(オランダ)



ATR(米国)

必要な研究②（熔融塩の熱流動）

◆プラント設計に必要な熔融塩の熱流動特性の評価

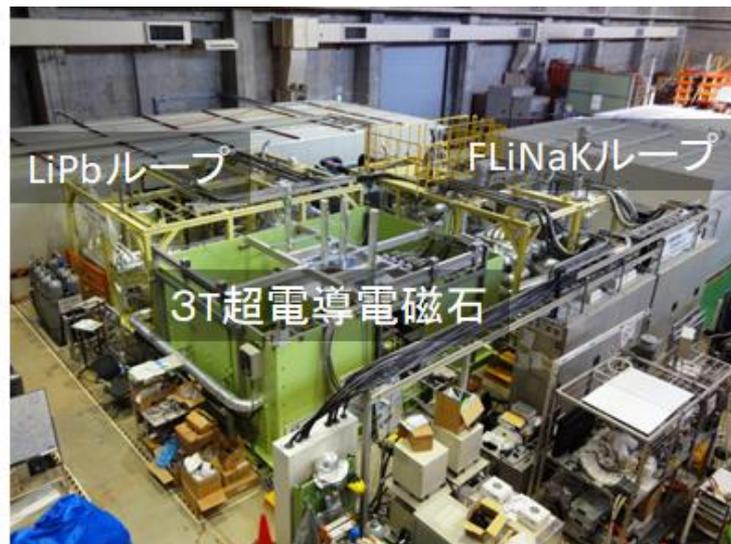
→粘度や熱伝導率、熱容量等の熱物性の温度依存性データ整備

→計算コード検証用工学規模のループによる熔融塩の熱流動試験

→異なる熔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



国内にある熔融塩ループの例
(核融合科学研究所施設*)

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

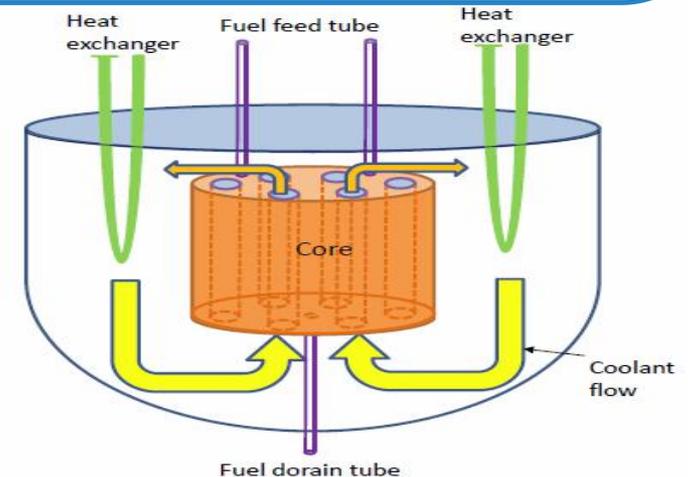
必要な研究③（炉心設計研究）

◆ 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)や溶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

* 数値流体力学コード

・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
溶融塩高速炉)

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

総括

◆原子カイノベーションとして溶融塩炉の開発を国家プロジェクトとして進めるよう提案:

- バックエンド対策用溶融塩炉を先行開発する、即ち統合型溶融塩高速炉(IMSFR)を目指す
- 過酷事故フリーに限りなく近い安全性を目標とする
- 放射性廃棄物の高効率な核変換処理を目指す
- IMSFR開発以後、再エネバックアップなどの用途に向けた開発を進める
- 経済性の高い設計を目指す
- IMSFRの当面の研究課題を提示した
- 多くの若者、学生に夢を持って取り組んでもらう