



原子力システム研究開発事業 成果報告会

【研究開発課題名】

多様な革新的ナトリウム冷却高速炉における
統合安全性評価シミュレーション基盤システムの開発

令和4年2月2日

内堀 昭寛(研究代表)

代表機関：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

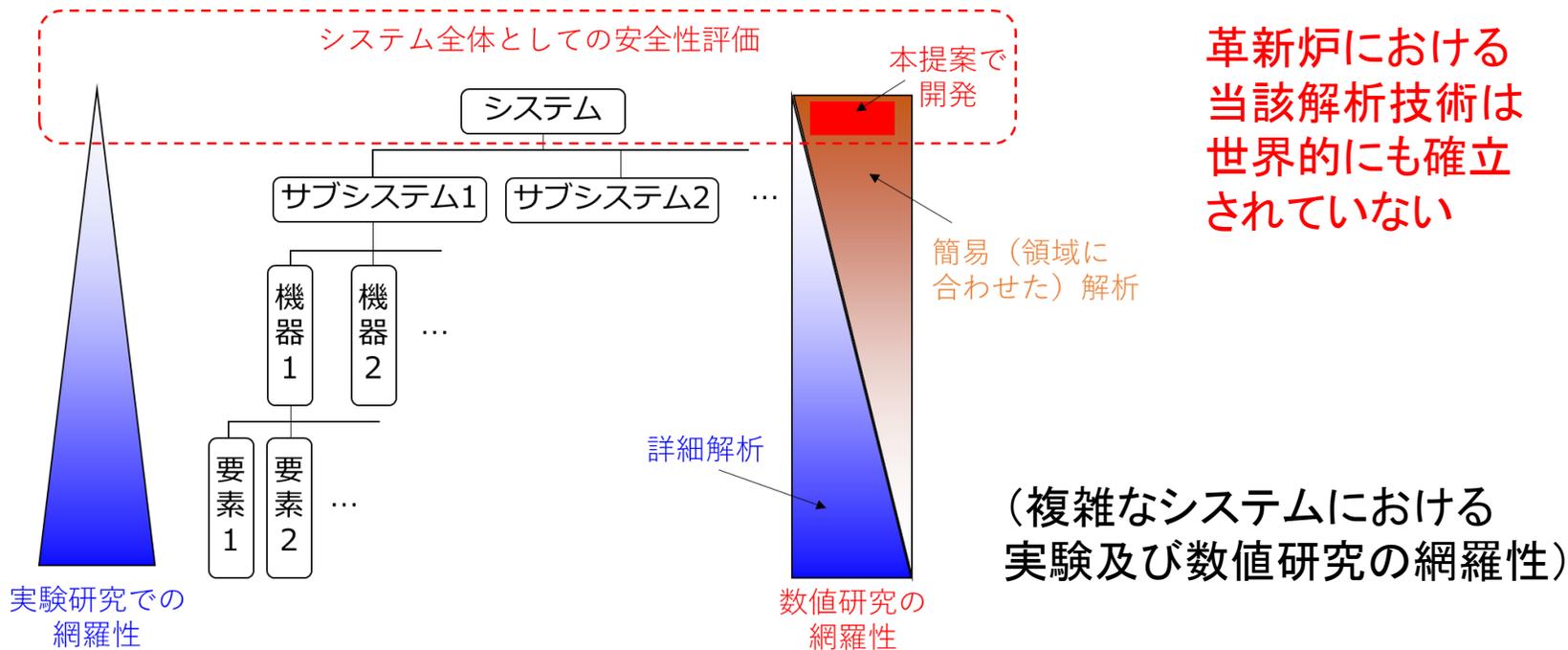
再委託先：日立GEニュークリア・エナジー株式会社

学校法人五島育英会東京都市大学

国立大学法人大阪大学

- 研究の背景
- 対象システム、開発する技術範囲
- 研究項目と体制
- 研究進捗状況
- 現状成果のまとめ及び今後の展開

- 革新炉の更なる安全性向上には、プラント全体のリスクを把握することが重要
 - プラントスケールでの実験には限界
 - 数値解析技術の援用が重要
 - ボトムアップとしての計算システム拡大は現状では困難
 - トップダウンとして目的に必要なレベルでの数値解析技術を構築



- 高速炉戦略ロードマップ、NEXIP*における役割
 - 基盤技術の効果的、効率的な産業界(民間)への提供
 - 研究者の研究のための解析技術構築からの脱却
 - 民間での利用を前提とした解析システムを構築
- 原子カイノベーション機能強化としての基盤データベース構築
 - 不確かさの大きいSA**事象における認識論的不確かさの低減
 - リスク評価では、不確かさの大きさを認識するとともに、可能な不確かさの低減が重要
 - SA解析における溶融燃料関係の物性値の不確かさに着目

* Nuclear Energy × Innovation Promotion

** Severe Accident

- 対象システム

- ナトリウム冷却高速炉(MOX*燃料、金属燃料)

- 技術範囲

- SAを含めた安全性評価を、炉内／炉外を含め一貫した1つの数値解析により評価する基盤技術(民間での利用を前提)の構築

⇒ SPECTRAコード(基盤熱水プラットフォーム)をベース

- PRISM**型原子炉への適用拡張
- 燃料溶融時の融体熱物性の最新技術による計測

* Mixed OXide

** Power Reactor Innovative Small Module

(1) 統合安全性評価シミュレーション適用性拡張

(1)-① モデル開発(JAEA)

炉外冷却モデル、炉内動特性モデル、炉心溶融モデル(溶融過程)

(1)-② 炉心溶融モデル構築(東京都市大)

炉心溶融モデル(燃料移動、内部熱流動)

(1)-③ 炉型拡張検討(日立GE)

文献調査、モデル構築、適用性確認

(2) ユーザー利便性向上(JAEA)

(2)-① 最適解探索検討

AI技術の適用、ナレッジデータベースとのリンク検討

(2)-② ユーザーインターフェース整備

GUI*整備、QA**自動化

* Graphical User Interface

** Quality Assurance

*** Molten Core Concrete Interaction

(3) 融体熱物性データベース構築

(3)-① 融体物性評価試験(大阪大学)

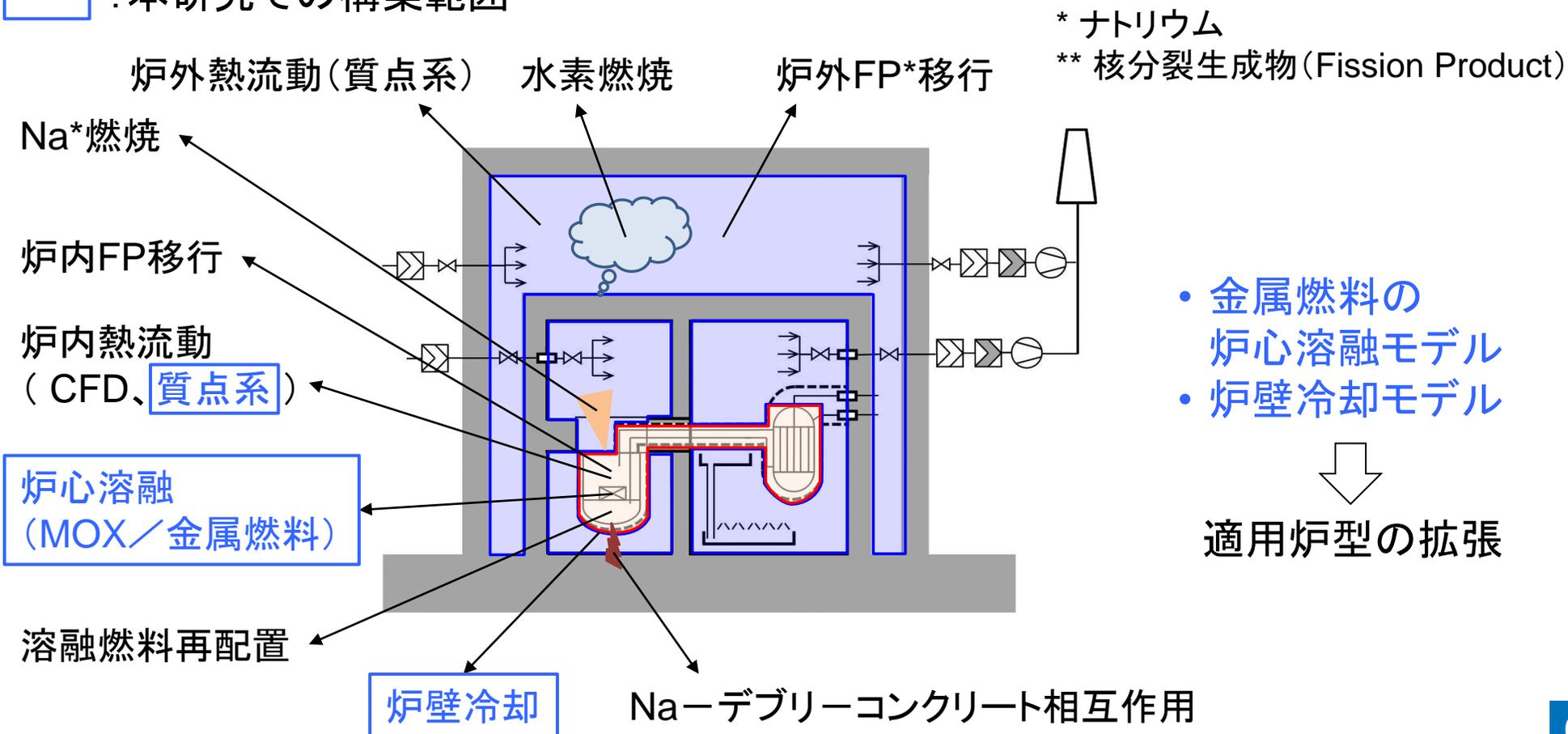
UO₂及びMCCI***生成物の融体物性評価試験

金属燃料及び共晶物やMCCI生成物の融体物性評価試験

SA統合評価解析コードSPECTRA

…炉内／炉外事象間の相互作用を考慮した一貫解析

 : 本研究での構築範囲



- SA事象の評価のため、**圧縮性を考慮した多流体モデル**を選定

例) 気相側質量・運動量保存式

$$\int_V \frac{\partial(\alpha_g \rho_g)_i}{\partial t} dV_i + \sum_j \int_S \langle \alpha_g \rho_g u_g \rangle_j |\mathbf{n}_j| dS_j = \int_V (\Gamma^e - \Gamma^c + G^{dif}) dV_i$$

$$\int_V \frac{\partial(\alpha_g \rho_g u_g)_i}{\partial t} dV_i + \sum_j \int_S \langle \alpha_g \rho_g u_g^2 \rangle_j |\mathbf{n}_j| dS_j$$

$$= -\sum_j \int_S \langle \alpha_g p \rangle_j dS_j + \int_V (\alpha_g \rho_g \mathbf{g} + f(u_l - u_g) + \Gamma^e u_l - \Gamma^c u_g - G^{dif} u_g)_i dV_i - \int_V \frac{1}{2} K_{g,i}^* (\alpha_g \rho_g)_i |u_{g,i}| u_{g,i} dV_i$$

α : ボイド率, ρ : 密度, u : 速度, Γ, G : 質量生成速度,
 p : 圧力, \mathbf{g} : 重力加速度ベクトル, f : 相間抗力係数
 上添字) e : 蒸発, c : 凝縮, dif : 拡散,
 下添字) i : コントロールボリューム(CV), j : CV接続部,
 g : 気相, l : 液相

- 完全陰解法**を採用、**混相流発散**から**圧力方程式**を導出

$$D = -\sum_m \frac{\partial \alpha_m}{\partial t} \Rightarrow \left\{ \sum_m \frac{\alpha_{m,i}^k}{\rho_{m,i}^n} \frac{\partial \rho_{m,i}^k}{\partial p} \frac{1}{\Delta t} + \sum_m \left(\frac{\Delta t}{\rho_{m,i}^n V_i} \sum_j \langle \alpha_m \rho_m B_m \rangle_j^k \frac{1}{\Delta L_j} S_j \right) \right\} \delta p_i - \sum_m \left(\frac{\Delta t}{\rho_{m,i}^n V_i} \sum_j \langle \alpha_m \rho_m B_m \rangle_j^k \frac{\delta p_j}{\Delta L_j} S_j \right)$$

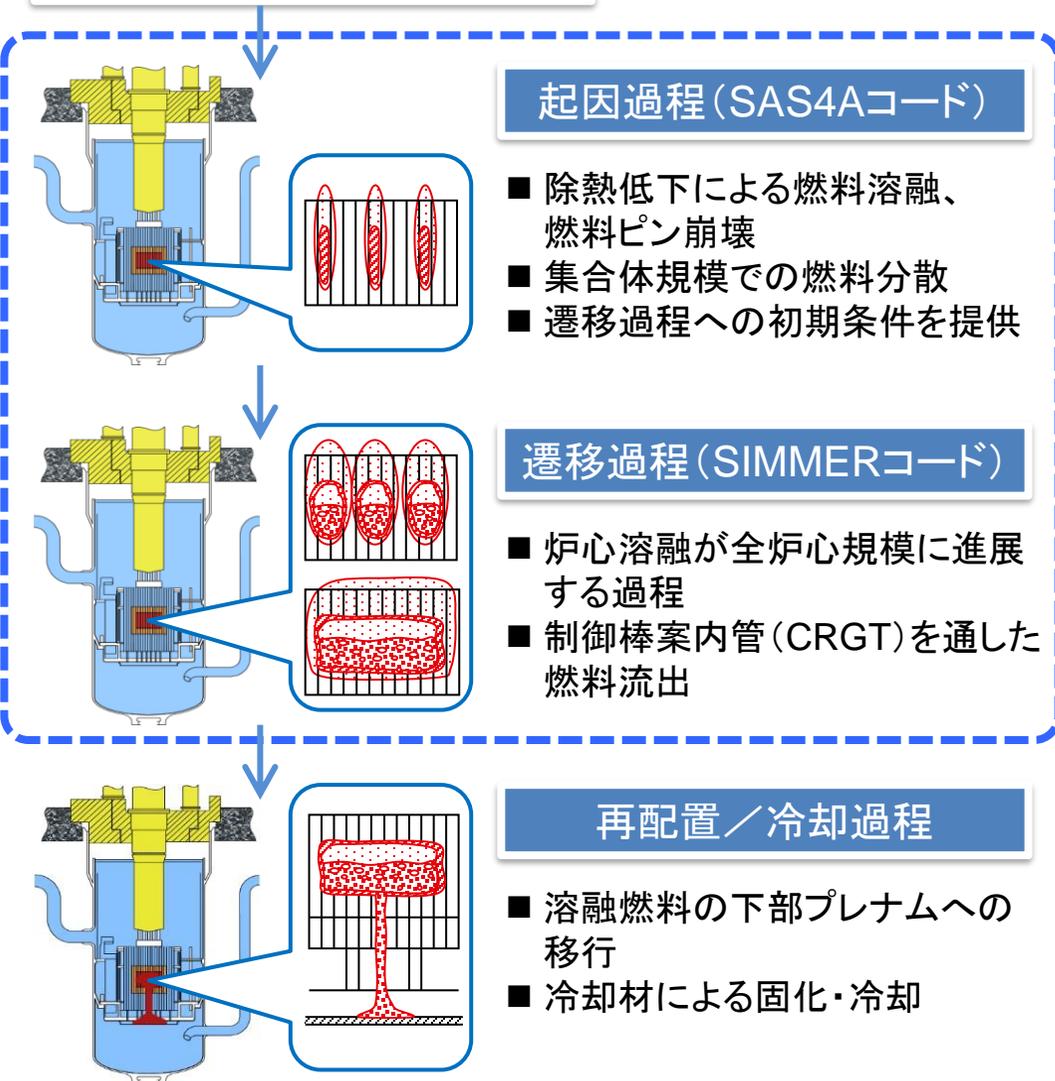
$$= -\left(D^k + \sum_m \frac{\alpha_{m,i}^k}{\rho_{m,i}^n} \frac{\partial \rho_{m,i}^k}{\partial T_m} \frac{\delta T_{m,i}}{\Delta t} + \sum_m \frac{\alpha_{m,i}^k}{\rho_{m,i}^n} \frac{\partial \rho_{m,i}^k}{\partial M_{W,m}} \frac{\delta M_{W,m,i}}{\Delta t} \right)$$

上添字) k : 1反復前の値, n : old値
 下添字) m : 気相及び液相

- 炉内多次元CFDモデルとの連成 (**圧力方程式でのカップリング**)を予定

事象進展と対応する既存コード

炉心損傷事故(CDA)の開始



既存解析技術

- SAS4Aは適用範囲に制約あり
- SAS4Aは30年以上の開発過程を経て内部が複雑化
- SAS4A→SIMMERの接続(データ授受)が必要

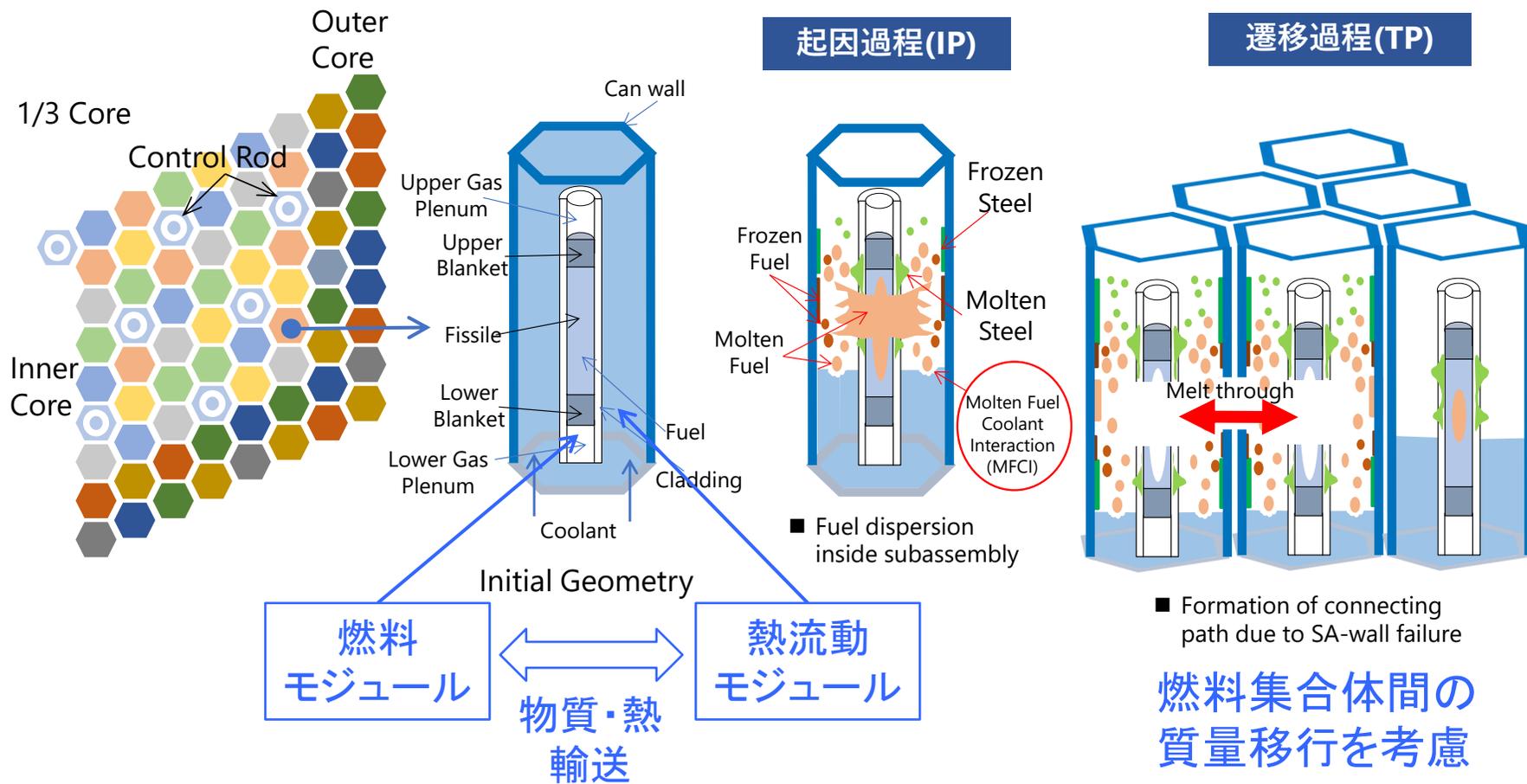
新規炉心溶融モデル

- 起因～遷移過程の一貫解析が可能
- MOX / 金属燃料の溶融過程に対応

炉心溶融モデル(成果)

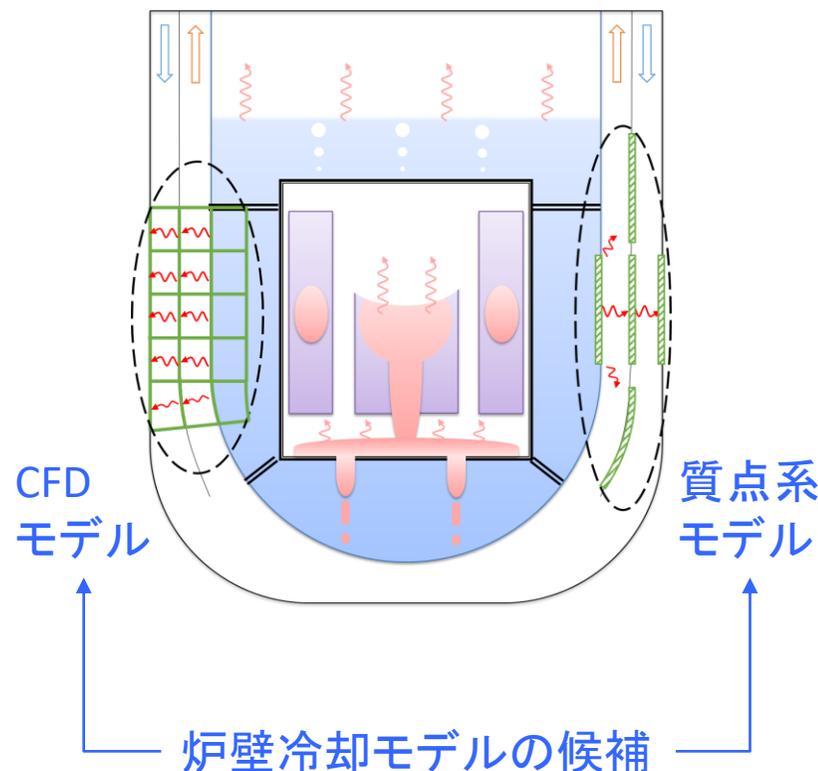
- MOX/金属燃料の炉心損傷事象推移を整理、物理現象を抽出
- PIRTからモデル機能を選定し、解析モジュールを設計

燃料集合体内部を1チャンネルでモデル化



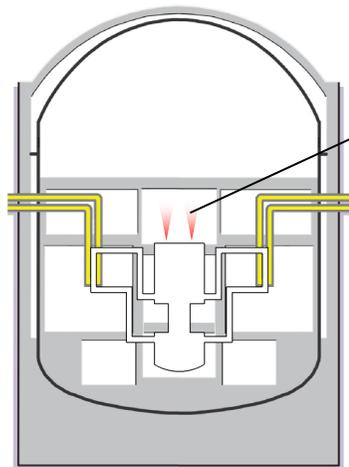
- PRISM型原子炉の概要
 - 小型モジュール、タンク型構造のNa冷却高速炉
 - 静的機器による受動的崩壊熱除去系RVACS*(空冷・自然循環)
 - 設計オプション: Mod-A、Mod-B、S-PRISM

- SPECTRAコードの適用に関する調査・検討結果
 - 設計データが公開され、事前安全性評価(NUREG-1368, 1994)も実施されているMod-Aを解析対象プラントに選定
 - 構築する炉壁冷却モデルのベンチマーク対象として、Mod-Aを対象としたCFD詳細解析を選定



* Reactor Vessel Auxiliary Cooling System

最適解探索検討



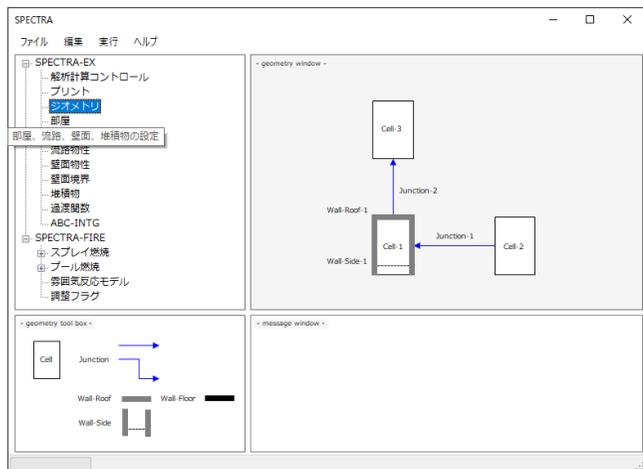
Na噴出、Na燃焼
⇒温度・圧力上昇

SA事象を踏まえた
格納容器最適化設計

開発する技術(ツール)

- 安全性と経済性を両立させる最適設計を自動探索
- 探索工程を合理化

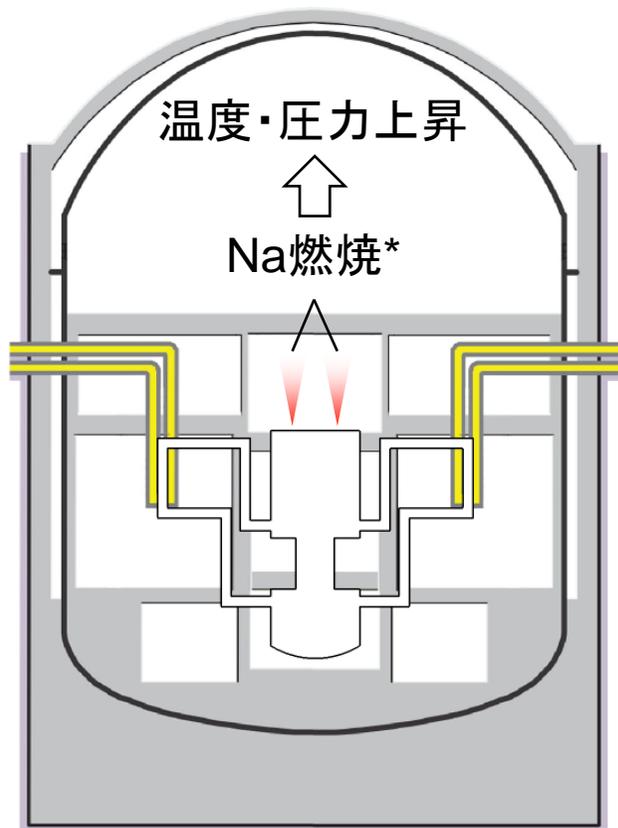
ユーザーインターフェース整備



開発する技術(ツール)

- GUIによりSPECTRAの入力を構築
- 解析作業の品質保証を自動化

- 具体的検討事例、設計パラメータ、目的関数を設定



適用問題: Na燃焼を踏まえた格納容器設計最適化
 設計パラメータ: 格納容器サイズ及びNa燃焼対策
 目的関数: 安全性要素関数と経済性要素関数の和

格納容器 サイズ	Na燃焼 対策
サイズA	対策1
サイズB	対策2
...	...

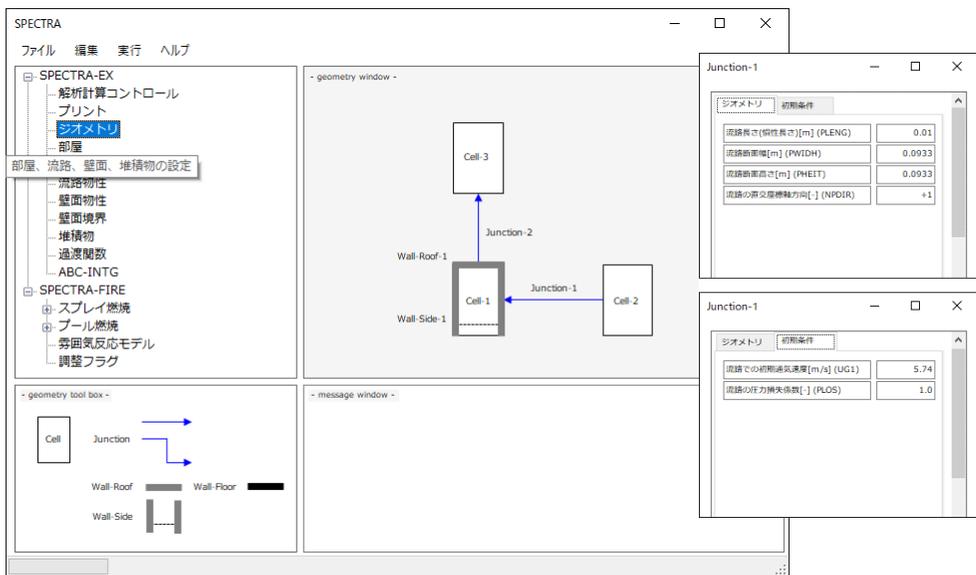
⇒ パラメータ

⇒ 安全性と経済性の要求
 (制約条件)を満たし、
 その中で最適な設計を
 見出す(目的関数最小化)

* 漏えいしたNaが雰囲気中の酸素や湿分と反応する現象。

AI等を活用した
 最適解探索ツール
 を構築予定

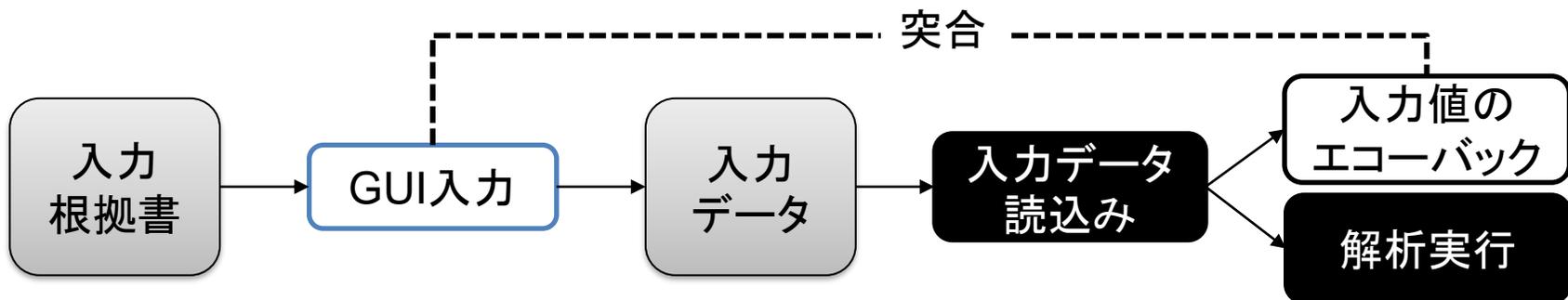
- SPECTRAコードの入力GUI基本機能を整理し、画面構成案を策定



機能の一例

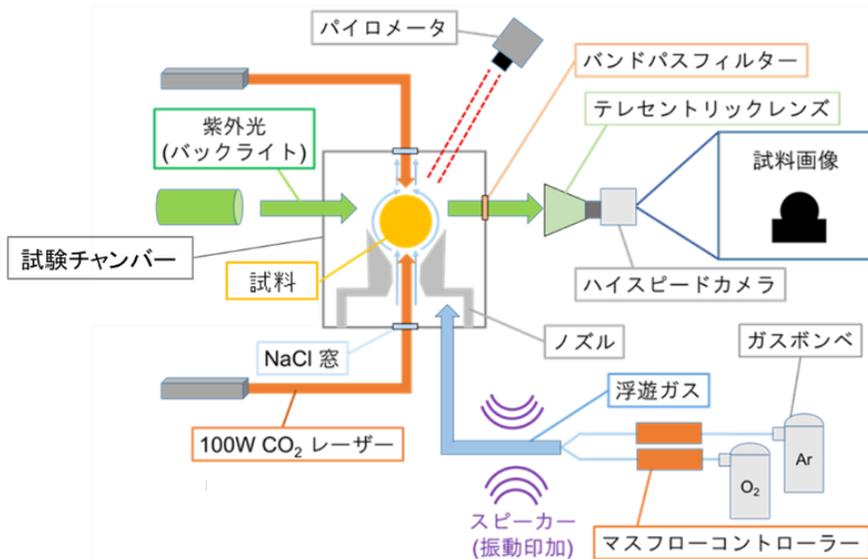
- 入力変数の簡易／詳細説明表示
- デフォルト値入力の強調表示
- 入力値の制限
(例: 1.0超のガス組成分率を禁止)
- マウス操作によるジオメトリ作成
- セル／ジャンクションのクリックによる入力ボックスポップアップ
- 英語版への切り替え

- QA自動化の優先的な検討項目としてエコーバック自動突合機能を選定

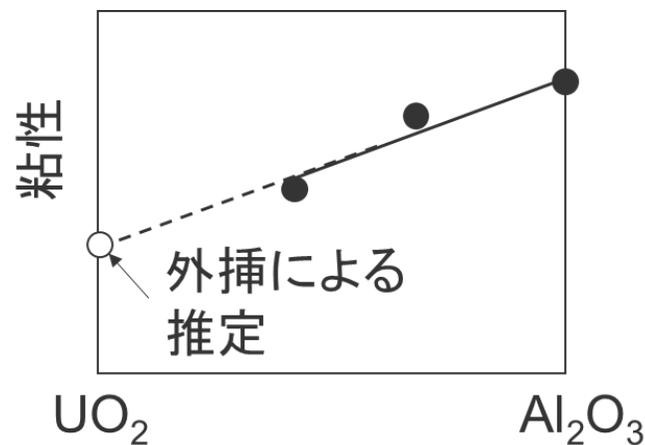


(3) 融体熱物性データベース構築(概要)

- SA解析には、溶融燃料もしくは溶融燃料とコンクリートの相互作用(MCCI)で生じる混合酸化物の融体物性が必要
- 非接触で測定する浮遊法を、放射性物質を含むホット試験に拡張
- 酸化物燃料、金属燃料を対象
- 特に融点が高い UO_2 については外挿により推定
- 軽水炉分野への利用も可能な融体熱物性データベースを構築



ガス浮遊法試験装置概略(音波励起の液滴振動法)



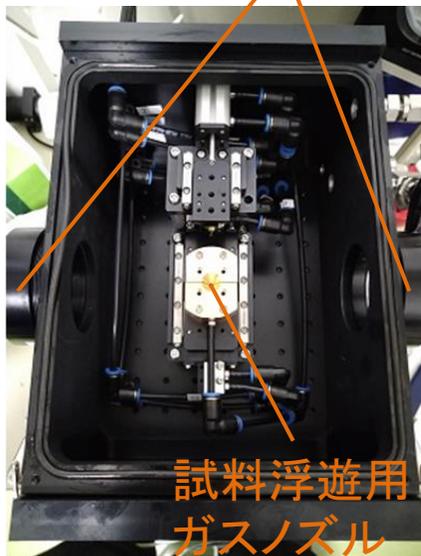
物性値推定のイメージ

融体物性評価(成果)

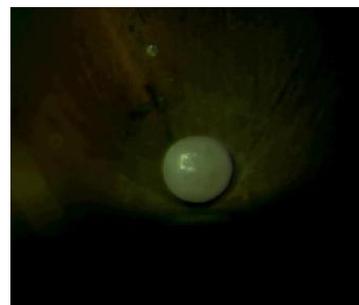
- 機能確認を目的とし、ガス浮遊法のコールド試験用チャンバーを試作、 Al_2O_3 液滴を問題なく浮遊できることを確認
- 酸化物燃料関連として $\text{UO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{UO}_2\text{-CaO}$ 、金属燃料関連としてU-Fe、U-Zrを優先的な測定対象として選定

加熱用レーザー導入窓

測定用窓



試料浮遊用
ガスノズル



溶融前



溶融時

Al_2O_3 浮遊の様子

コールド試験用チャンバー

(1) 統合安全性評価シミュレーション適用性拡張

• 炉内質点系冷却材モデル

- 圧縮性考慮多流体モデルを採用し、基礎方程式、数値解法を選定した。
- 単体モジュールを構築後にSPECTRAへ組み込み、既構築の多次元CFDモデルと連成予定(圧力方程式としてのカップリング)。

• 炉心溶融モデル

- MOX/金属燃料の炉心損傷事象推移を整理し、物理現象を抽出した。PIRTからモデル機能を選定し、解析モジュールを設計した。
- 定常照射解析機能、燃料ピン破損前後の解析機能と、段階的にプログラムを構築した後、SPECTRAへ組み込み予定。

• 炉壁冷却モデル、炉型拡張検討

- 炉壁冷却モデルに関する調査、基本検討を実施した。SPECTRAへモデルを組み込み後、CFD詳細解析を比較対象としてベンチマーク解析実施予定。
- 文献調査に基づき、PRISM型原子炉の設計オプションMod-Aを解析対象に選定した。最終的に、モデルを統合したSPECTRAにより解析評価を実施予定。

(2) ユーザー利便性向上

• 最適解探索検討

- 具体的検討事例として、Na燃焼を踏まえた格納容器設計最適化問題を選定、設計パラメータと目的関数を設定した。
- AI等を活用した最適解探索ツール(探索工程合理化)を構築予定。

• ユーザーインターフェース整備

- SPECTRAコードの入力GUI基本機能を整理し、画面構成案を策定した。
- QA自動化の優先的な検討項目としてエコーバック自動突合機能を選定した。
- 炉内／炉外入力機能及びQA自動化機能を含むGUIツールを構築予定。

(3) 融体熱物性データベース構築

- ガス浮遊法のコールド試験用チャンバーを試作、溶融液滴の浮遊機能を確認した。
- 酸化物燃料関連、金属燃料関連それぞれの優先的な測定対象物を選定した。
- 測定対象物の試料作製性を確認するとともに、コールド試験の結果に基づきホット試験用装置を作製した後、測定結果をデータベースとして整理予定。