

革新的ナトリウム冷却高速炉におけるマルチレベル・ マルチシナリオプラントシミュレーションシステム技術の 研究開発

研究代表者 : 大島 宏之(日本原子力研究開発機構)
再委託先研究責任者 : 古賀 信吉(広島大学)
: 出口 祥啓(徳島大学)

➤ 研究開発の背景

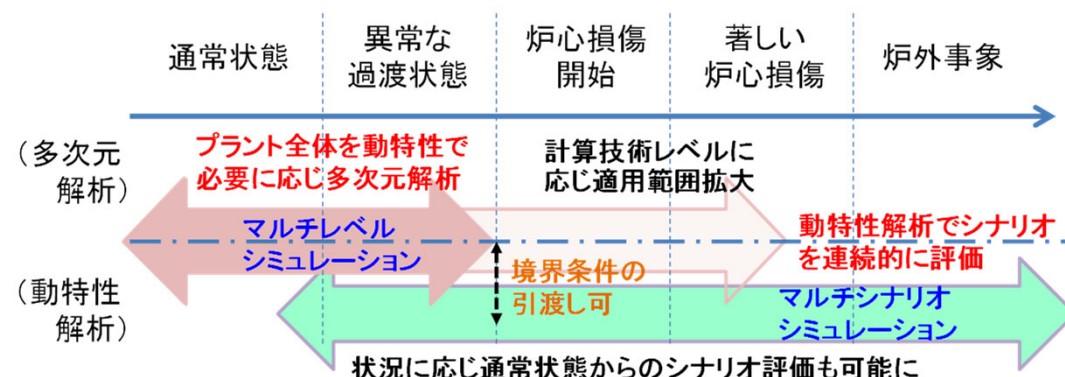
- 高速炉の実用化には、高い安全性と他電源に比肩する経済性(建設から廃炉まで)を有するシステム開発が必須
- 実証炉・実用炉の開発コスト自体のミニマム化要求
- 合理的なシビアアクシデント対策を含め継続的安全性向上の要求
- ベテランの引退、人材確保困難による技術力維持・伝承の危機

➤ 研究開発の目的

- 設計最適化、安全裕度適正化、革新技術開発を支える安全基盤技術として、数値計算科学技術を開発。コストミニマムにも資する高精度・高信頼設計支援技術(システム)を提供
- 解析モデルやデータベースという形で技術知見・ノウハウを集約、技術伝承手段として活用。システム開発(実験含む)を通して、基盤・応用技術開発や安全設計に関わる研究者やNa技術者等を育成

➤ 本研究4カ年での実施項目

- 1) マルチレベルプラントシミュレーション
システムの構築
- 2) マルチシナリオプラントシミュレーション
システムの構築
- 3) モデル化・V&Vに資する実験的知見の拡充

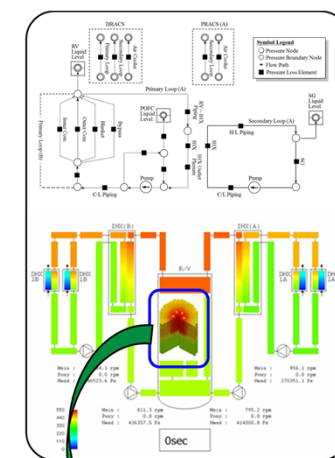


- プラントの設計オプションに柔軟に対応し、想定される運転状態、異常・事故事象に対して、高効率解析(パラメータ感度解析等)から高精度予測解析(安全裕度確認解析等)までを1つのシステム(マルチレベル)で実現

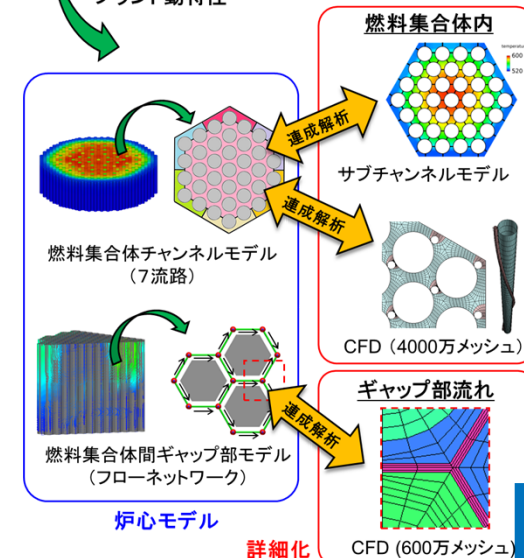
★本研究での目標: 統合プラットフォーム開発と、炉心部関連モデルのマルチレベル化

簡易モデル ← → 詳細モデル

物理現象			Lv1	Lv2	Lv3	Lv4
プラント全体熱流動			フローネットワークモデル			
炉上部プレナム熱流動			完全混合モデル	フローネットワークモデル	CFD	
炉心部	燃料集合体内熱流動	上部遮蔽体部	チャンネルモデル		CFD	
		燃料ピン束部	チャンネルモデル (代表燃料集合体)	チャンネルモデル (全燃料集合体)	サブチャンネルモデル (一部の燃料集合体に適用)	CFD
	燃料集合体間ギャップ部熱流動		等価熱伝導モデル	フローネットワークモデル	CFD	
	炉物理	動特性	1点炉近似 (時間非依存-反応度マップ)	1点炉近似 (時間依存-反応度マップ)	準静的近似	厳密計算
		中性子束分布・反応度分布	拡散近似+摂動 (代表燃料集合体)	拡散近似+摂動 (全燃料集合体)	輸送計算+摂動	モンテカルロ
		炉心変形	熱膨張モデル	ビーム要素モデル	シェル要素モデル	ソリッド要素モデル



プラント動特性

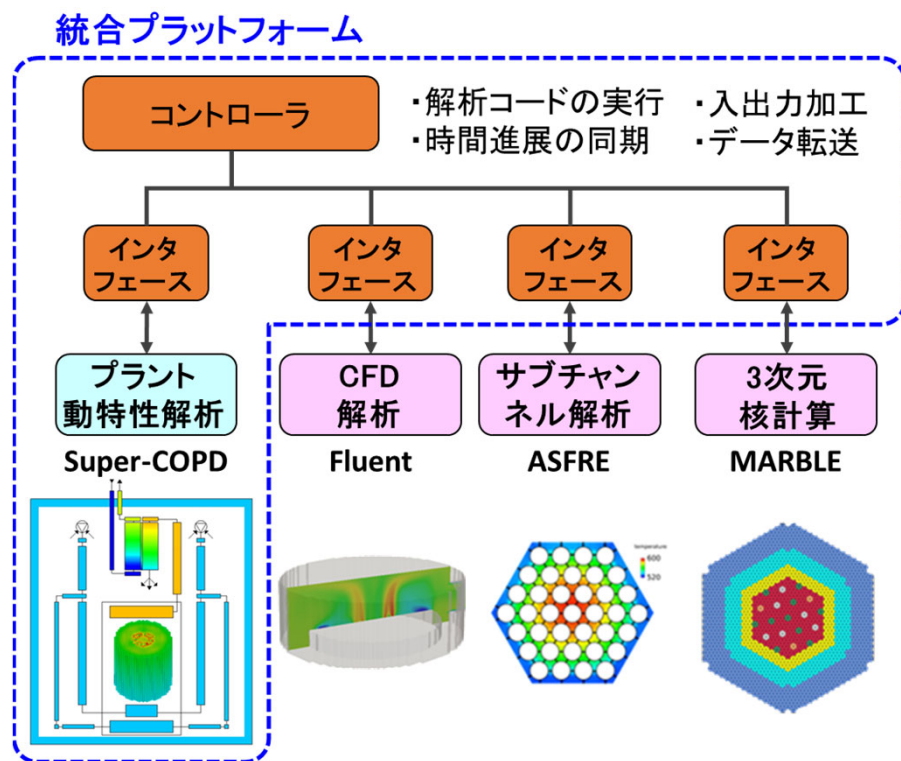


青色: 統合プラットフォームのベースとなるプラント動特性コードで選択可能なモデル

赤色: 公募研究で新たに選択可能とするモデル

● 統合プラットフォームの開発

- マルチレベルシミュレーションを可能とする基本フレームとして、統合プラットフォームを開発
- 利用目的に応じ、物理現象ごとに必要な詳細度の解析モデルを選択、連成が可能



● 炉心部マルチレベルシミュレーション手法の開発

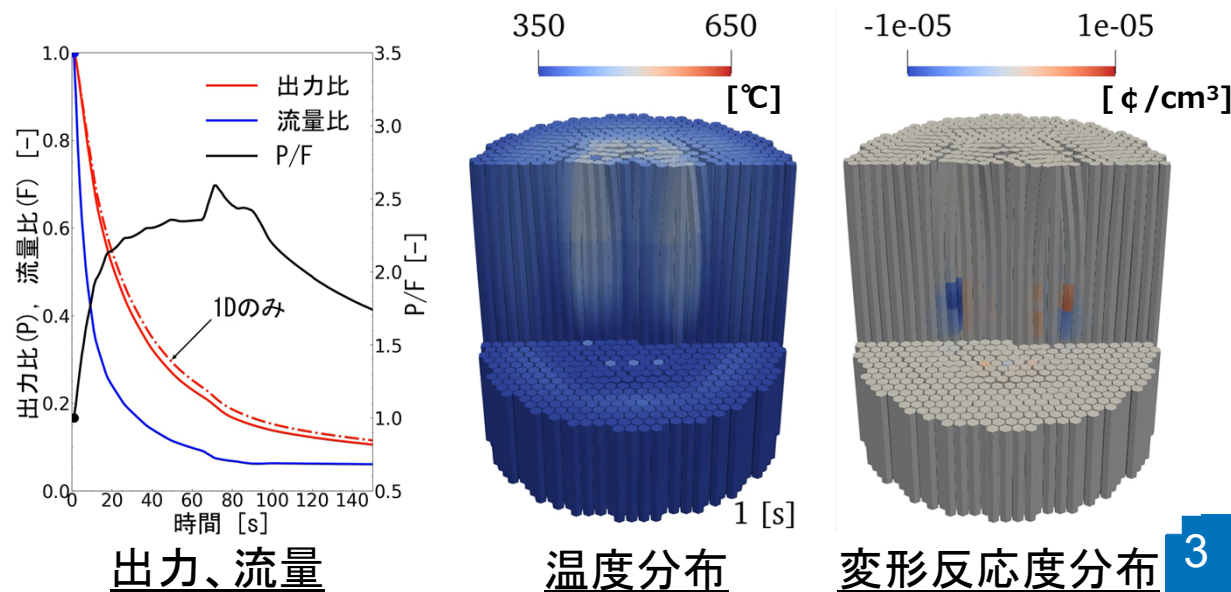
- CFDコード、サブチャンネル解析手法並びに核特性解析手法、構造変形解析手法をカップリングさせたシステムを構築
(公募研究外成果含む)

解析例：米国高速実験炉EBR-II

炉心流量喪失時炉停止失敗試験

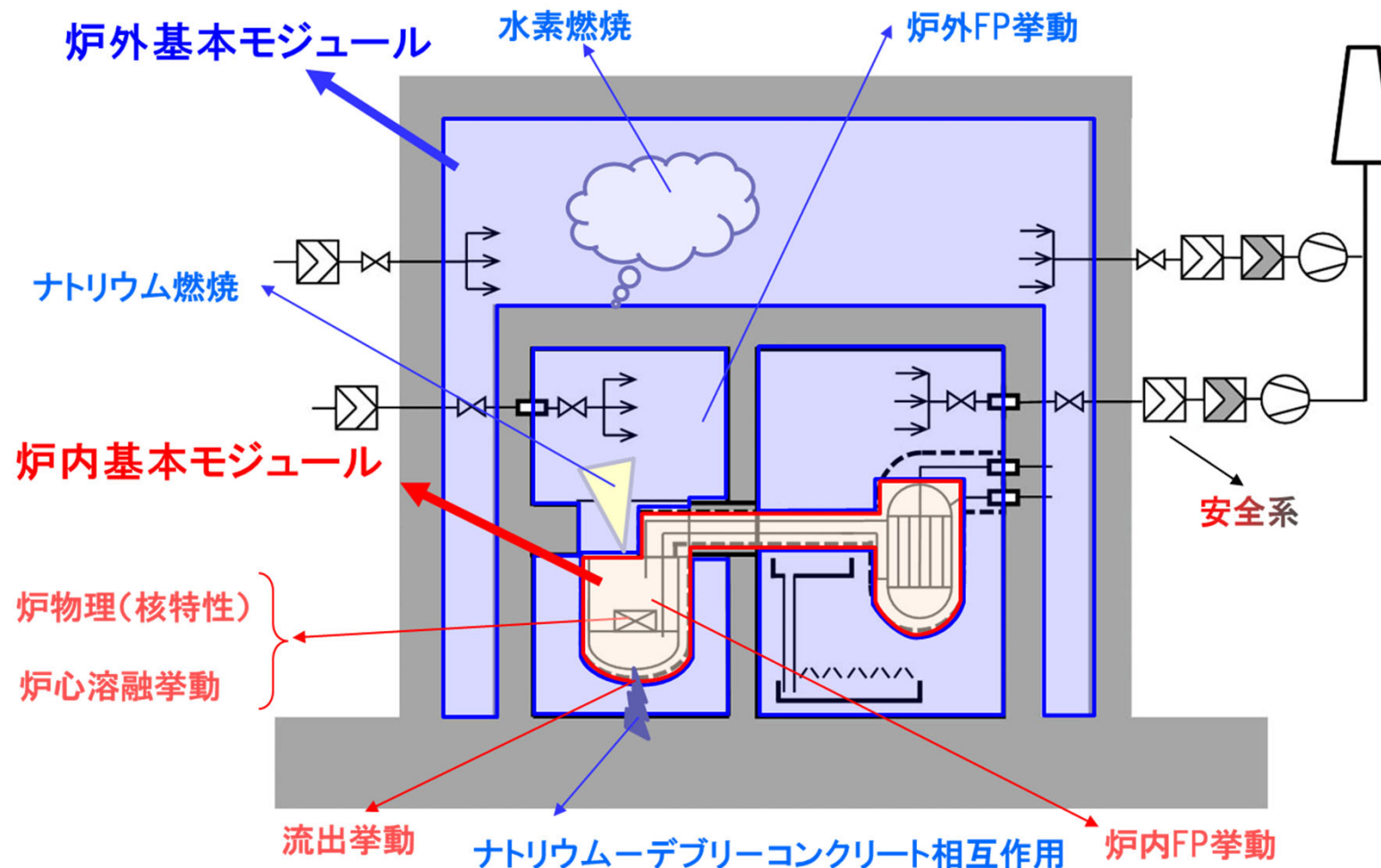
核-熱-構造連成解析により、炉心部の挙動を精緻に評価

※変形量を20倍で表示



- SA事象に至る炉内事象および炉外事象の物理モデルを整備し、これらを統合するアルゴリズムを構築、炉心溶融から炉外事象までを一貫して統一的に解析可能（マルチシナリオ）とするシステムを構築

★ 本研究での目標：ベースモジュール(共通熱流動、物性値)、及び代表的な炉内・炉外事象モデル(炉内燃料溶融挙動、Na燃焼等)の開発



● SA統合評価解析コードSPECTRAの開発

- 熱流動モジュール(炉内側:CFD、炉外側:質点系)や個別物理モデル(炉内側:溶融炉心、炉外側:Na燃焼、Na-デブリーコンクリート相互作用)を連成
- 炉内/炉外同時進行の複雑な熱水力現象を評価可能

炉内モジュール

基本モジュール: 冷却材(気/液)挙動評価

↑
カップリング
↓

溶融燃料(固/液)挙動評価モジュール

炉外モジュール

基本モジュール: 多成分ガス・エアロゾル挙動評価

↑
カップリング
↓

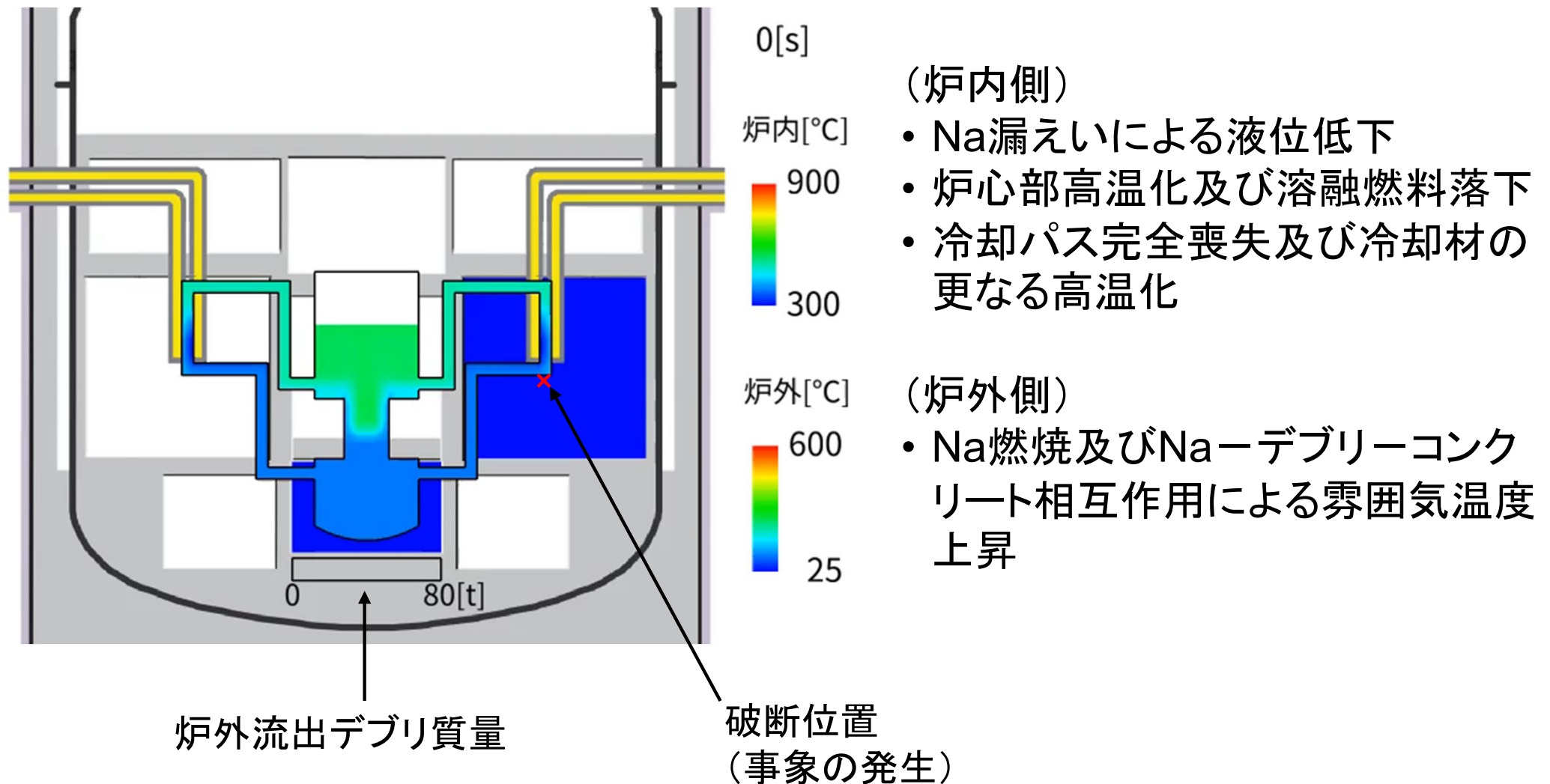
個別物理モデル:

Na燃焼、Na-コンクリート相互作用、デブリーコンクリート相互作用

炉内外の圧力差による
冷却材、デブリー漏えい量

● SA統合評価解析コードSPECTRAの開発

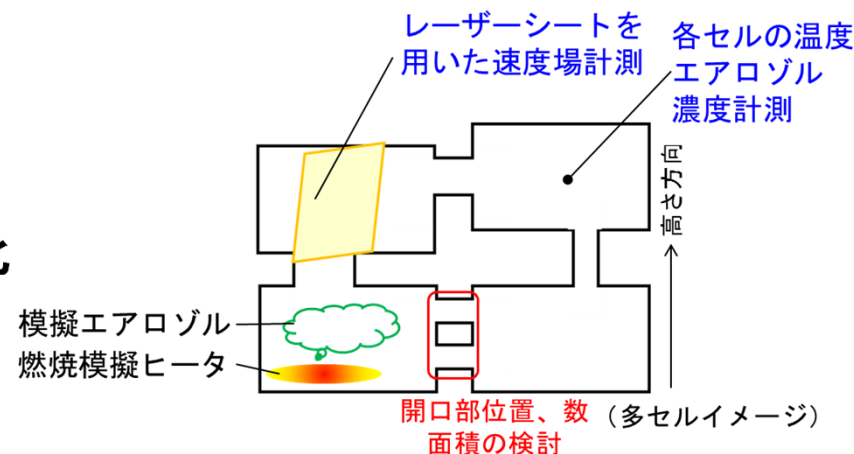
解析例：原子炉液位低下事象 (LORL: Loss Of Reactor Level) 評価



- Na冷却高速炉に特有で安全上重要となる現象に関して、モデル開発とV&Vに必要な実験を実施し、データベースを拡充(知見不足、重要度、実施期間／予算制約を勘案し、本公募研究では以下の基礎実験を選定)

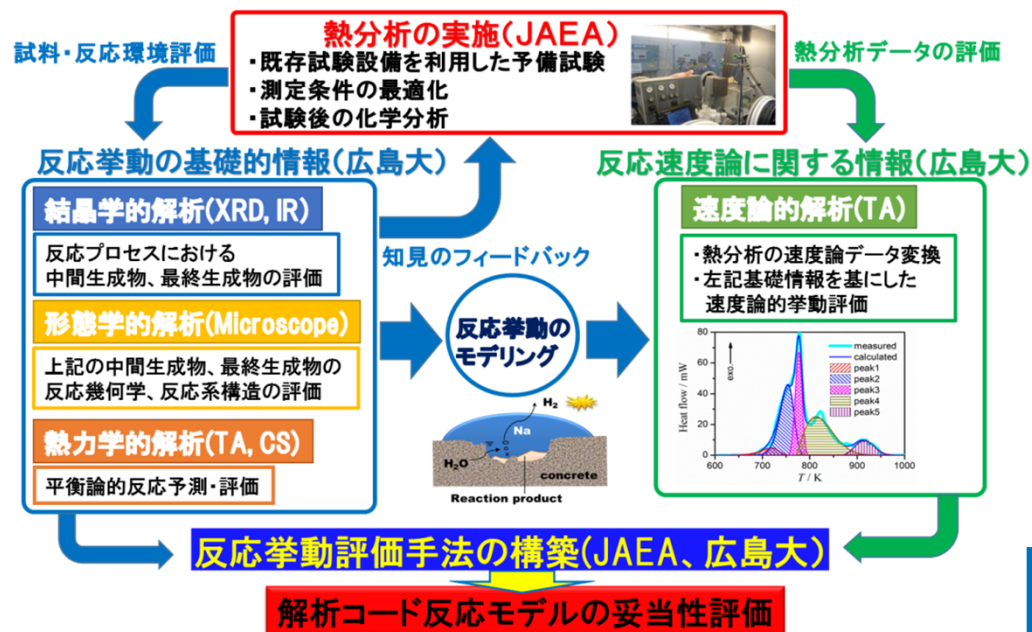
➤ Na燃焼に係る基礎実験

- ✓ 多セル間の熱・物質移行実験
 - ⇒ 浮力起因の対流通気に伴う熱・物質輸送定量化
- ✓ 燃焼生成エアロゾル性状計測実験 **【徳島大】**
 - ⇒ 初期粒径定量化、輻射物性定量化



➤ Naと構造物コンクリートとの反応性に係る基礎実験

- ✓ 熱分析データ取得実験
 - ⇒ 化学反応式、反応速度の推定
- ✓ ミクロ分析等(結晶学的解析、速度論的解析など) **【広島大】**
 - ⇒ 推定の裏付け



●Na燃焼に係る熱移行、燃焼生成エアロゾル物質移行模擬実験

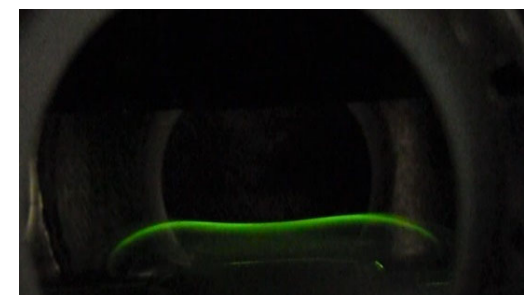
- Na燃焼時の多区画(多セル)への熱移行、燃焼生成エアロゾル物質移行を模擬した実験装置(多セル区画実験装置)を新たに設計・製作し、水平及び垂直に接続された2セル間の模擬粒子の移行挙動に関する実験データを取得。



試験装置外観

●Na燃焼に係る燃焼生成エアロゾル性状計測(徳島大)

- Na燃焼過程と生成するエアロゾルの光学計測系を構築、Na燃焼形態及びエアロゾルの生成状況を把握。Na-酸素反応で生成するエアロゾル粒径は、平均で約 $1\mu\text{m}$ ($0.2\text{-}1.3\mu\text{m}$ の分布)となることを確認。
- Naと酸素の素反応解析を行い、Na燃焼における主反応経路を同定。



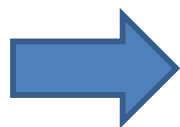
燃焼面可視化例

●Naとコンクリートとの反応の熱分析、挙動解析(JAEA・広島大)

- パーライトコンクリートの主成分であるCa化合物とNaの総括反応について、熱分析とそれに基づく速度論評価を実施し、Na-コンクリート反応評価に必要な知見を取得。
- 今までに得られた高速炉構造コンクリートの主要な構成成分とNaもしくはNa化合物との反応性と反応挙動について分析し、各反応系を単一の温度軸上で整理し、Na-構造コンクリート反応挙動モデルの構築に反映。

本研究開発により得られた成果は以下のとおり:

- マルチレベルシミュレーションシステム: 基本フレームとなる統合プラットフォームと、CFDコード、サブチャンネル解析手法、核特性解析手法、構造変形解析手法をカップリングさせた炉心部マルチシミュレーション手法を構築
- マルチシナリオシミュレーションシステム: ユーザーが任意にシナリオを選択し、炉心溶融から炉外事象までを一貫して統一的に解析できるSA統合評価解析ベースシステムを開発
- モデル化・V&Vに資する実験的知見の拡充: 既存知見の整理からNa燃焼とNa-コンクリート反応に注目、Na燃焼時のエアロゾルの開口部を通じた区画間移行挙動、燃焼エアロゾルの性状把握、Naとコンクリートとの反応過程評価に関する実験を実施し、モデル開発・V&Vに資するデータベースを構築



- 本研究開発により、革新的高速炉の設計・運用時における俯瞰的・統一的な数値解析評価の基盤技術を確立
- 本成果は、JAEAで開発を開始した統合的な設計評価・支援システム(AI支援型革新炉ライフサイクル最適化手法: ARKADIA)の基幹解析技術として発展予定

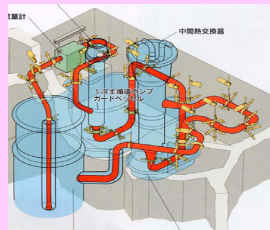
高速炉開発戦略ロードマップを受けた取り組み ナレッジベースと解析評価技術を統合した先進的・設計評価・支援システムを整備

- 開発指標群を高い次元で満たすプラント設計の実現
- 将来炉開発プロセスの大幅な合理化・効率化
- 知見・経験の集約、ナレッジベース化+AI

- 競争力のある3E+S適合プラント像の提示
- 開発期間短縮・コスト削減
- 技術散逸防止・伝承・発展、人材育成

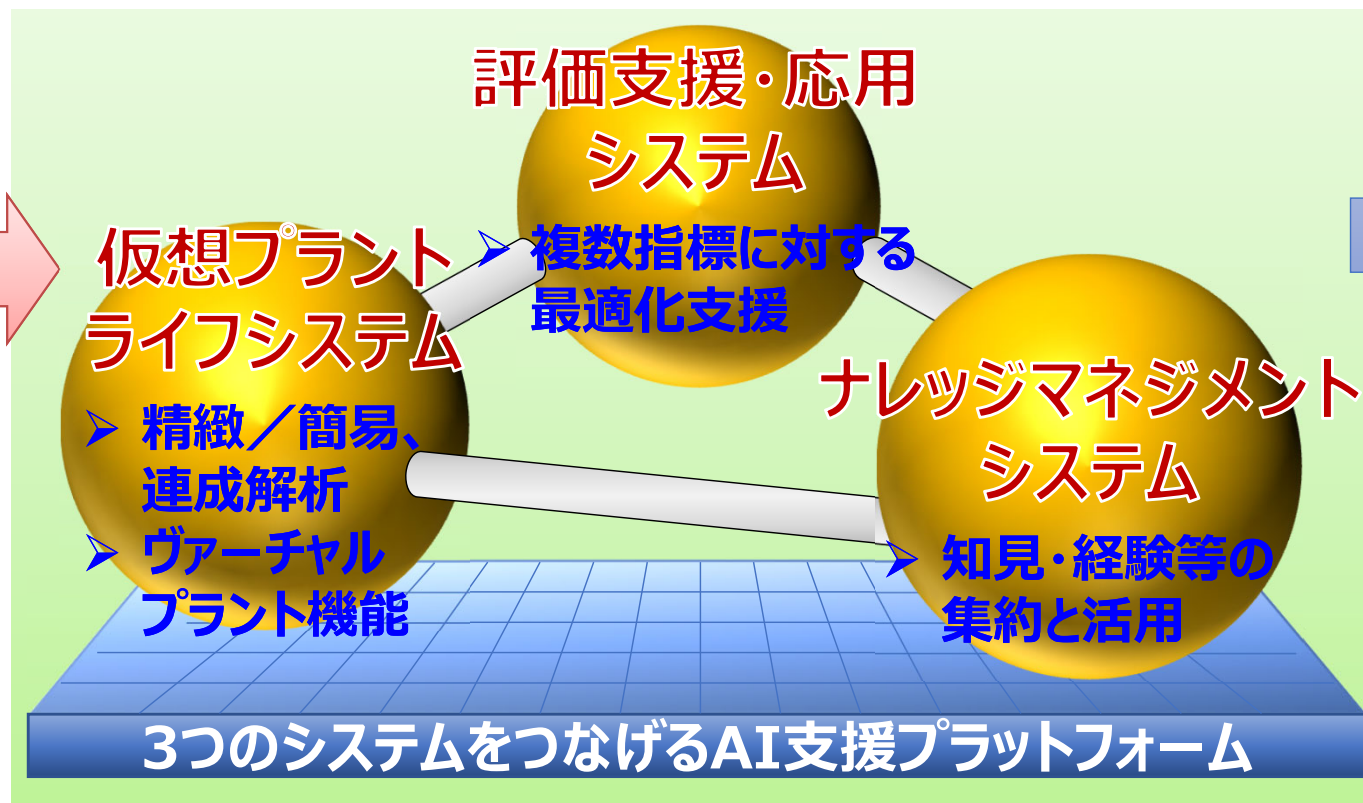
INPUT

● プラント設計例



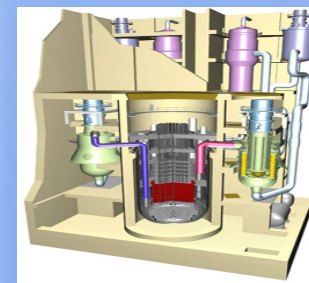
● 評価指標

- 開発目標
- 設計要求



OUTPUT

● 最適化オプションの提示



- 評価指標充足性
 - 安全性
 - 信頼性
 - 経済性
 - ...

※AI支援型革新炉ライフサイクル最適化手法 (Advanced Reactor Knowledge- and AI-aided Design Integration Approach through the whole plant lifecycle)