



原子力システム研究開発事業  
成果報告会

課題No.20354598

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7年3月3日

内堀 昭寛(研究代表)

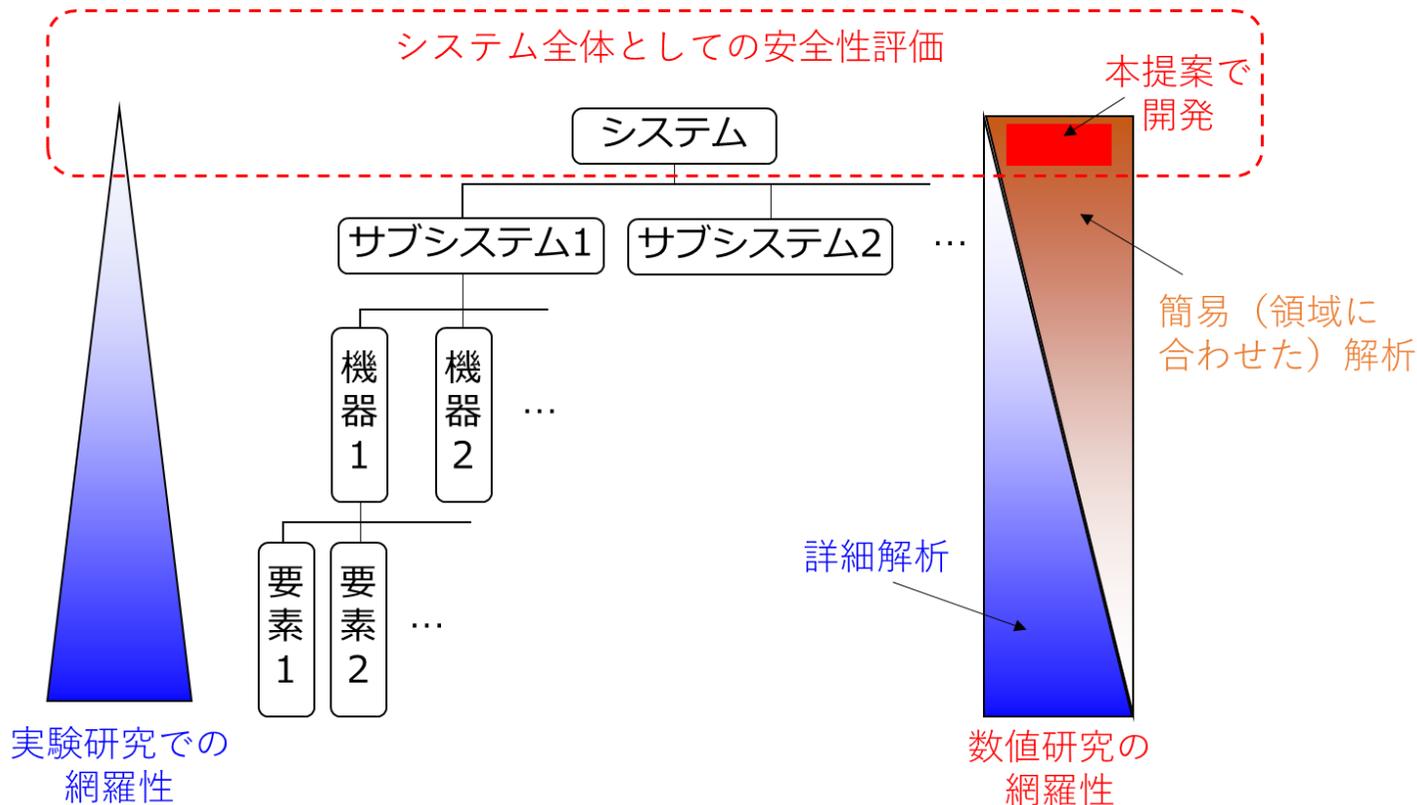
代表機関：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

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、目標
- 実施項目、体制
- 研究成果
- 成果のまとめ、研究効果



- 革新炉 (Na\*冷却高速炉) を対象に、プラント全体あるいは領域に合わせた数値解析を行う統合安全性評価シミュレーション基盤システムの構築
- 産業界へ提供する、利便性の高い解析用／設計用ツールの構築
- SA\*\*時溶融燃料物性値の不確かさ低減

対象システム：Na冷却高速炉(MOX\*<sup>1</sup>燃料、金属燃料)

研究目標：産業界への提供を前提として、SAを含めた安全性評価を、炉内～炉外で一貫した1つの数値解析により評価する基盤技術を構築する

実施期間：2020～2023年度

## (1) 統合安全性評価シミュレーション適用性拡張

- SAを含む事象進展評価に必要なモデルを構築する
- PRISM\*<sup>2</sup>型原子炉へ適用性を拡張する

JAEA、東京都市大  
日立GE

## (2) ユーザー利便性向上

- 最適な設計条件を探索する手法を構築する
- 入力を作成し、品質保証を自動化するGUI\*<sup>3</sup>を構築する

JAEA

JAEA

## (3) 融体熱物性データベース構築

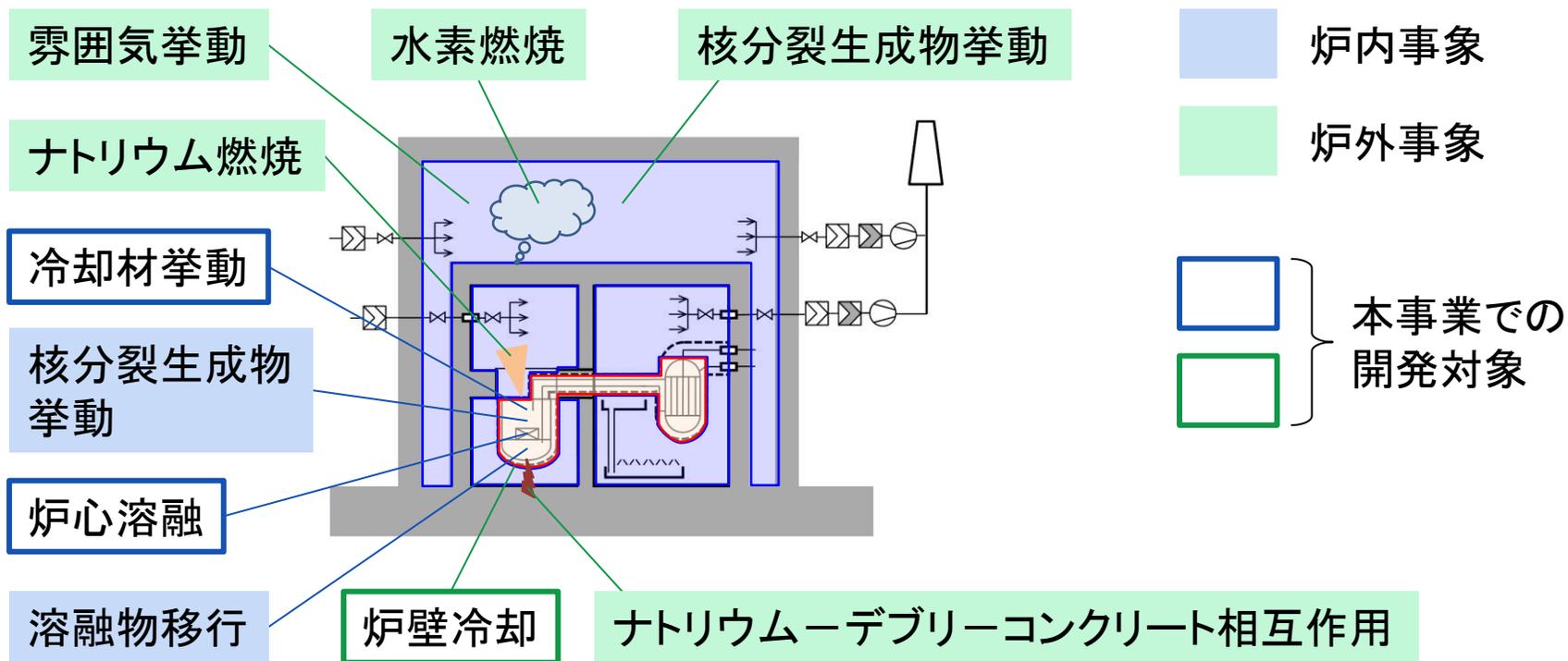
- 熔融燃料の熱物性値を最新技術により計測する

大阪大

\*<sup>1</sup> Mixed Oxide, \*<sup>2</sup> Power Reactor Innovative Small Module, \*<sup>3</sup> Graphical User Interface

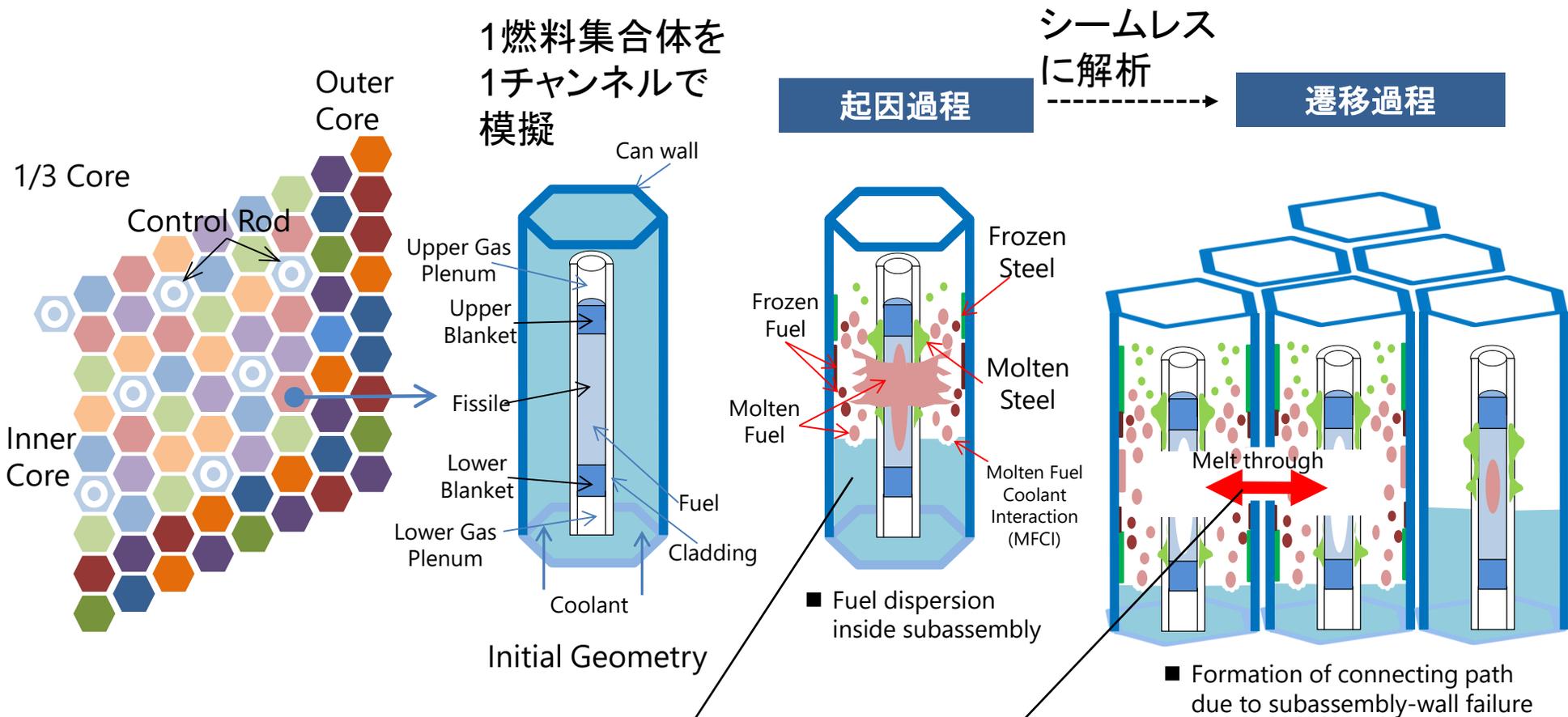
## SPECTRA\*コードの評価事象 (Na冷却高速炉対象)

\* Severe-accident PhEnomenological Computational tool for TRansient Assessment



- 事象間、領域間のフィードバックを考慮した評価
- SA時の多様なシナリオを網羅的に評価

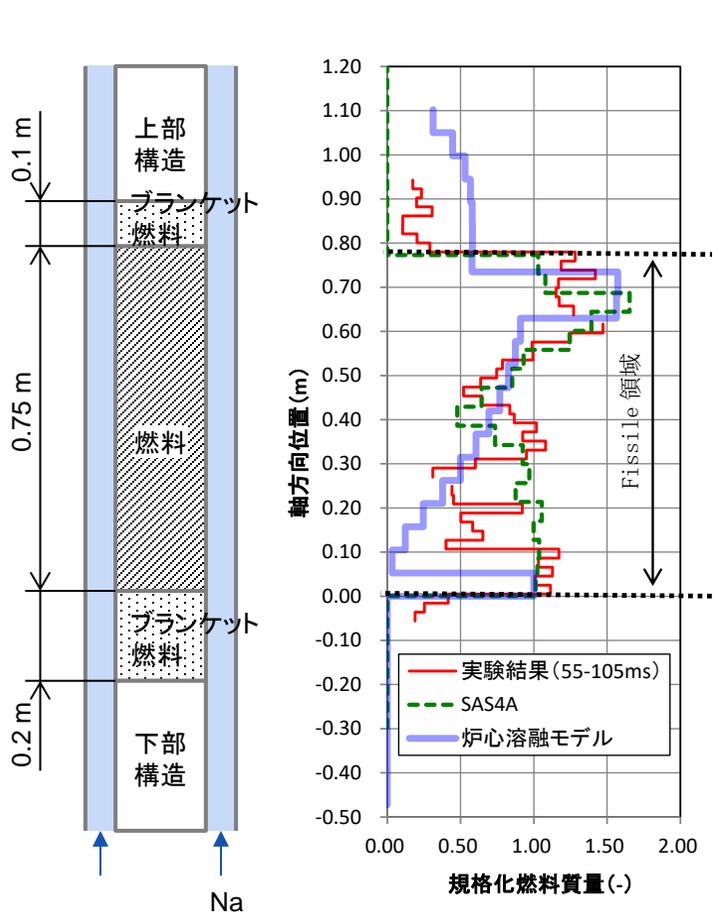
# (1)適用性拡張 炉心溶融モデル



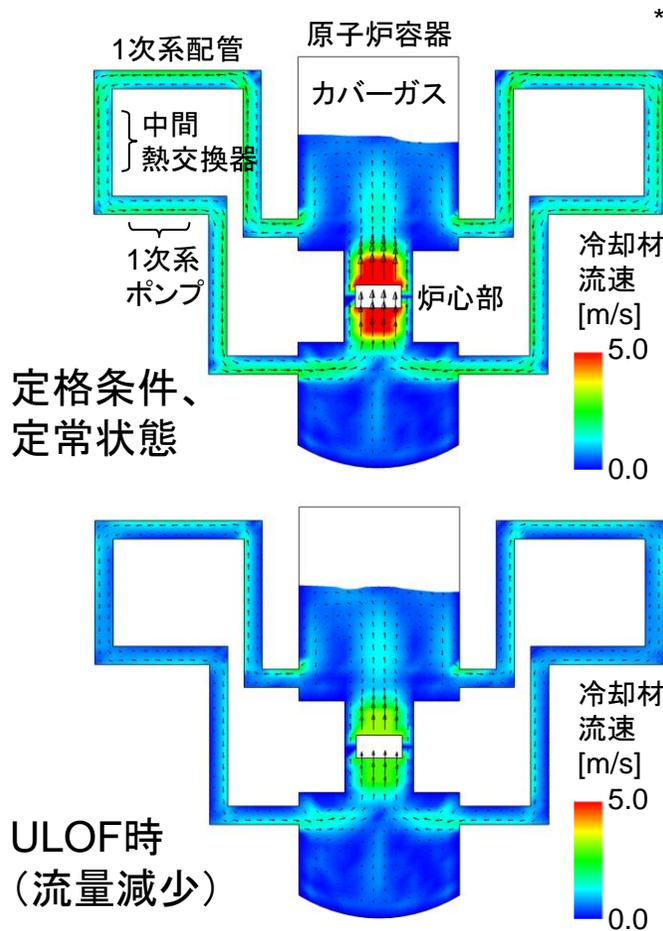
- 熱流動／燃料／反応度の3モジュールを最終整備
- 試験解析による妥当性確認
- 集合体間連通プログラミング
- 全炉心試解析 (起因過程→遷移過程のシームレスな移行に着目)

# (1)適用性拡張 SA事象解析

- 炉心溶融モデル単体による実験解析を実施、燃料分布の再現性を確認
- ULOF事象\*を解析、炉内全体領域での熱流動—炉心溶融連成機能を確認

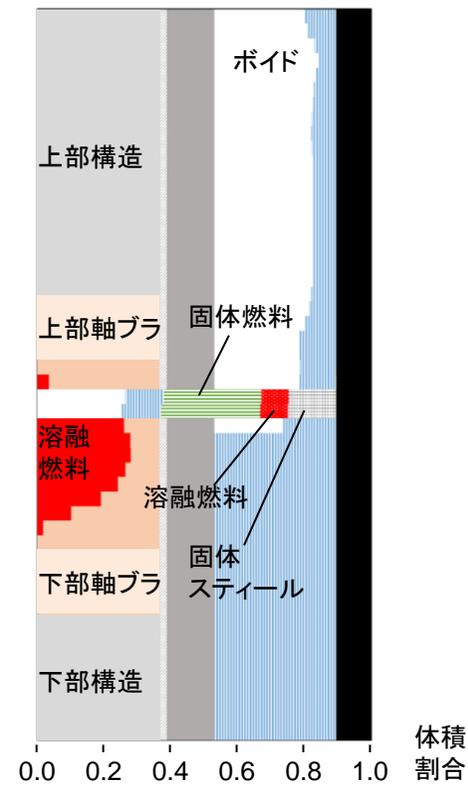


炉心溶融模擬実験CABRIの解析結果



実在プラントを模擬した2次元体系

\* Unprotected Loss Of Flow:  
炉心流量喪失時原子炉停止機能喪失



燃料破損後物質配位

- プラント全体評価への適用性拡張として、質点系モデルを構築
- 既構築の多次元系モデルと接続(圧力方程式でカップリング)

例) 気相側質量・運動量保存式

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

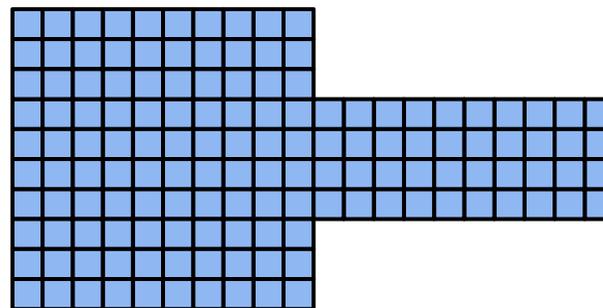
$$\int_V \frac{\partial(\alpha_g \rho_g u_g)_i}{\partial t} dV_i + \sum_j \int_S \langle \alpha_g \rho_g u_g^2 \rangle_j |\mathbf{n}_j| dS_j$$

$$= - \sum_j \int_S \langle \alpha_g p \rangle_j dS_j$$

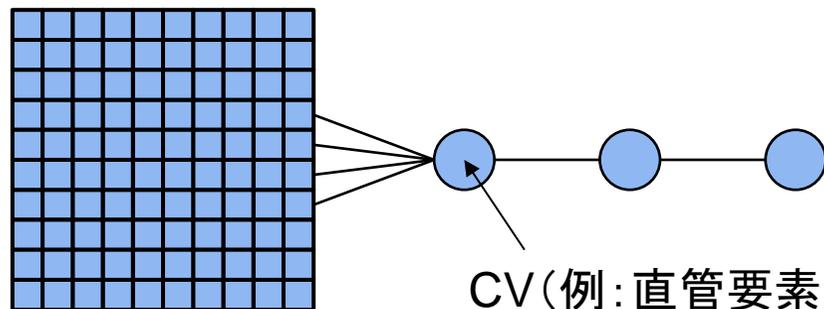
$$+ \int_V (\alpha_g \rho_g \mathbf{g} + f(u_l - u_g) + \Gamma^e u_l - \Gamma^c u_g - G^{dif} u_g)_i dV_i$$

$$- \int_V \frac{1}{2} K_{g,i}^* (\alpha_g \rho_g)_i |u_{g,i}| u_{g,i} dV_i$$

$\alpha$ : ボイド率,  $\rho$ : 密度,  $u$ : 速度,  $\Gamma, G$ : 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,  
 $K$ : 摩擦損失係数  
 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

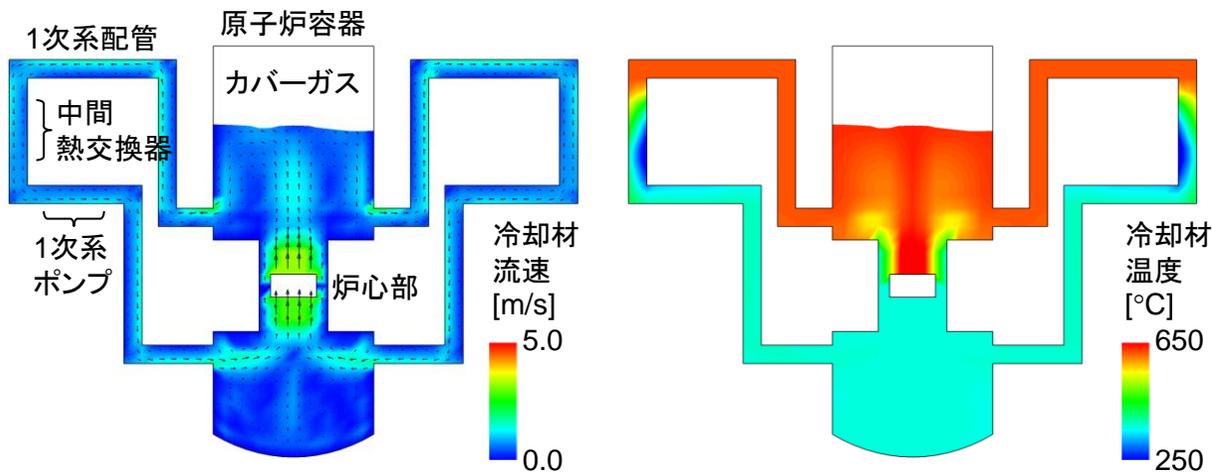


多次元系

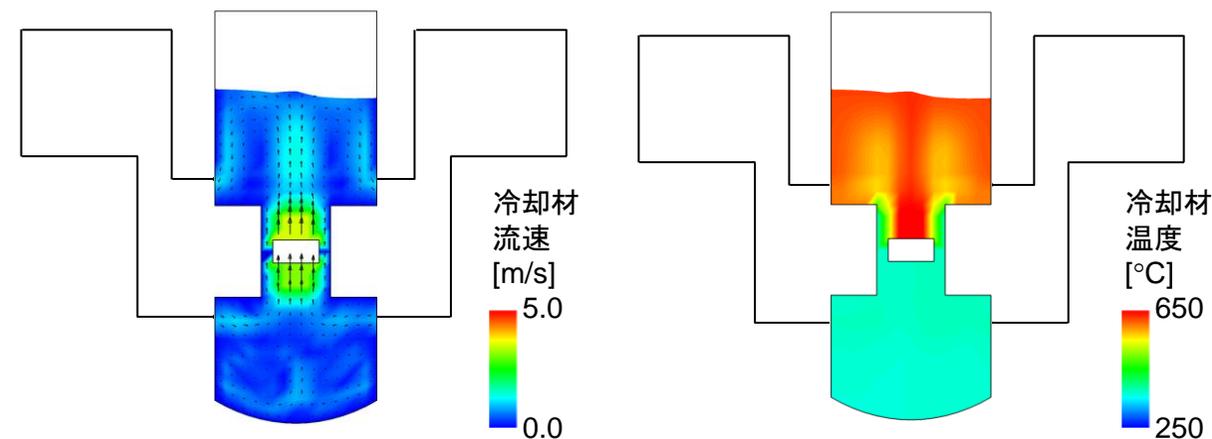


多次元系一質点系接続イメージ

- 計算高速化にも寄与し、プラント全体評価を容易とする多次元系一質点系接続解析機能を確認

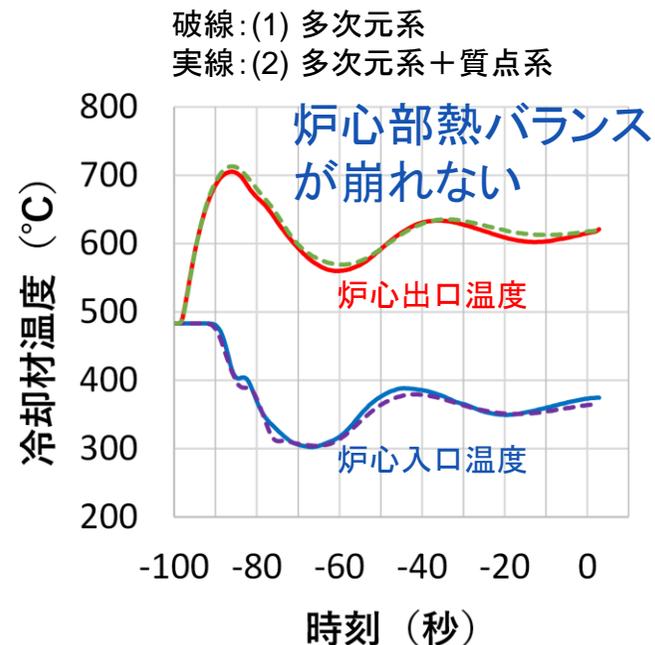


(1) 多次元系



(2) 多次元系+質点系(原子炉容器のみ表示)

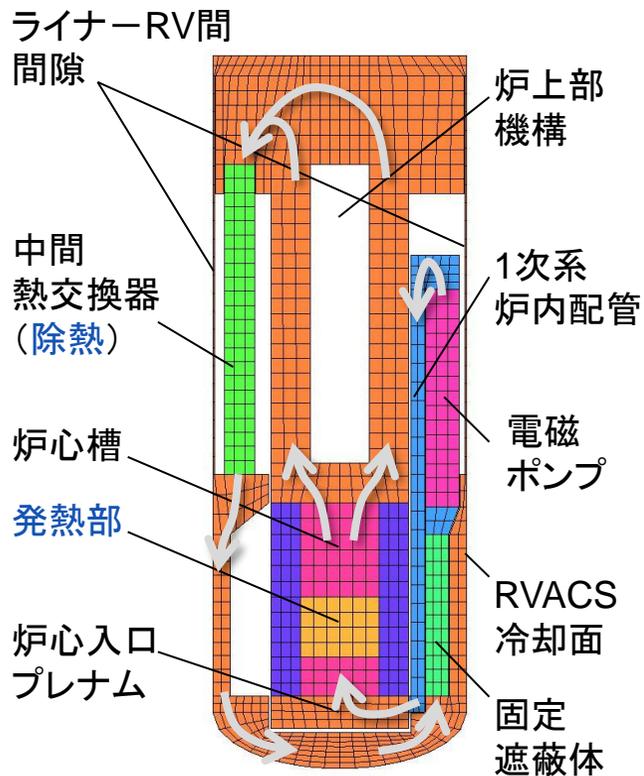
-100~0秒: 一様温度分布から開始した定常状態の解析  
 0~2.8秒: 冷却材流量を減少させた過渡状態の解析



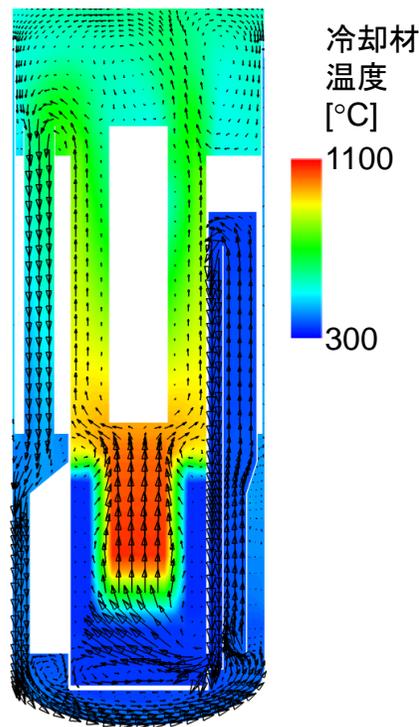
# (1)適用性拡張 炉型拡張

- 小型モジュール高速炉の評価に必要なRVACS除熱特性モデルを構築、炉内冷却材モデルと連成
- UTOP\*、ULOF事象を解析、汎用CFDコードとの比較から妥当性を確認

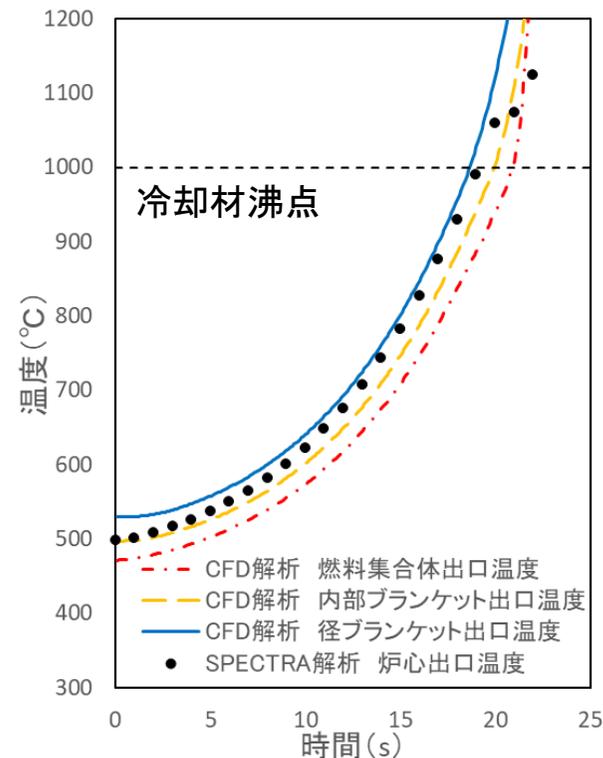
\* Unprotected Transient Over Power: 過出力時原子炉停止機能喪失



PRISM型原子炉解析体系

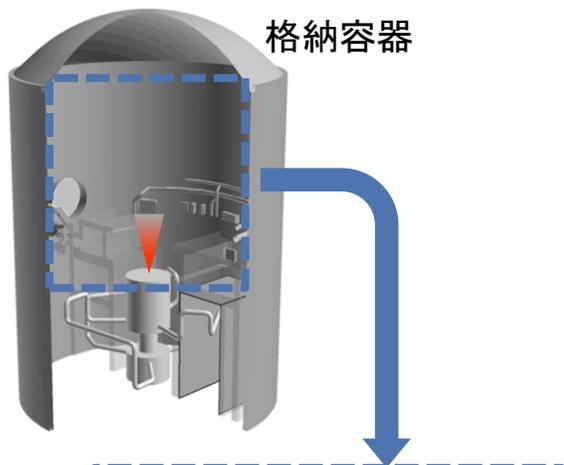


解析結果(UTOP開始後20秒)



UTOP時冷却材温度推移

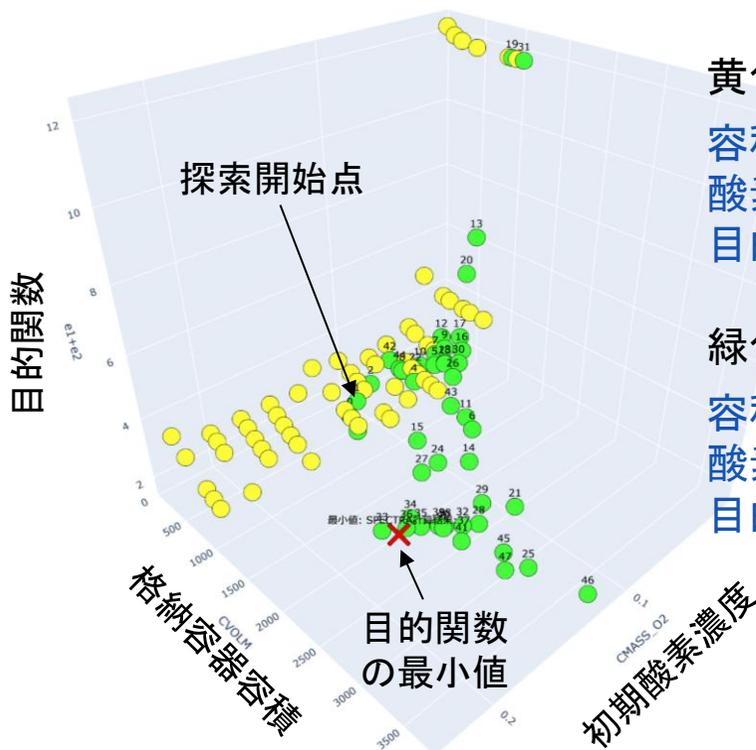
- 設計最適解の探索を合理化するためのツールを構築
- 格納容器を最適化する例題(2変数問題)において最適解へ向かうことを確認(勾配の小さい領域での評価精度向上が課題)



容積:  $V$  [m<sup>3</sup>]  
 酸素濃度:  $Y_{O_2}$  [wt%]  
 Na  
 スプレイ 100 [kg/s]  
 燃焼 2.0 [s]

解析体系(質点系)及び条件

目的関数 = 安全性指標 + 経済性指標



黄色点: 初期学習データ  
 容積: 100 ~ 1000 [m<sup>3</sup>]  
 酸素濃度: 1 ~ 21 [wt%]  
 目的関数: 2.46 ~ 12.2

緑色点: 探索中の評価結果  
 容積: 2075 [m<sup>3</sup>]  
 酸素濃度: 16.21 [wt%]  
 目的関数: 1.70

- 解析コードの入力データをGUI画面上で設定するツールを構築
- 品質保証作業の自動化機能(入力値と変数格納値の整合性確認)を実装

**本ツールからのSPECTRAコード実行**

**階層化入力データ**

**マウสดラッグによる炉外側(質点系)体系構築**

**誤入力防止**

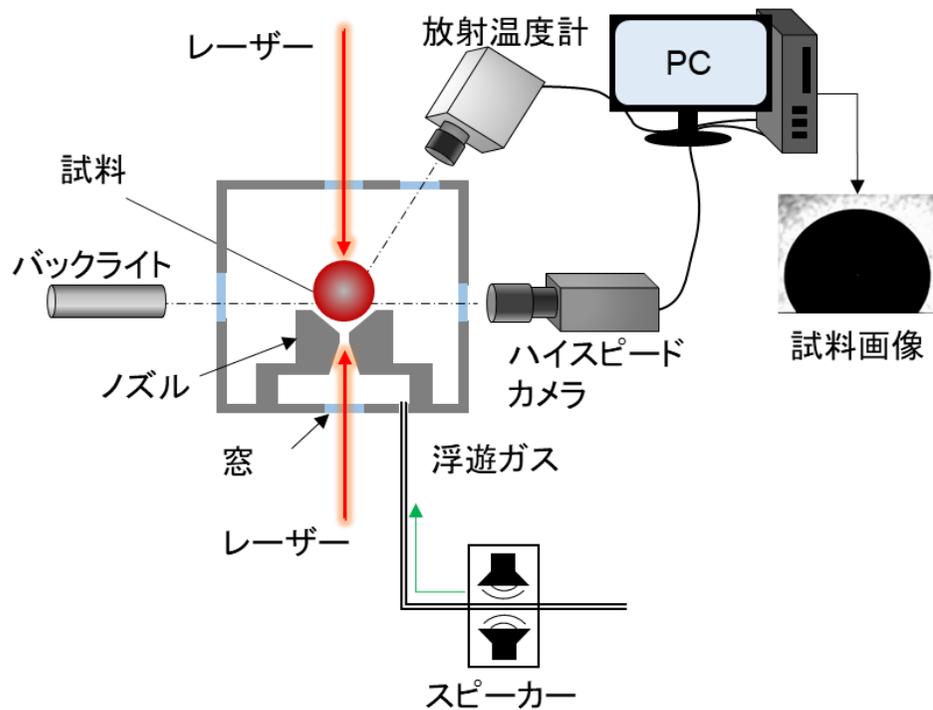
**変数値説明**

**エコーバックとの照合**

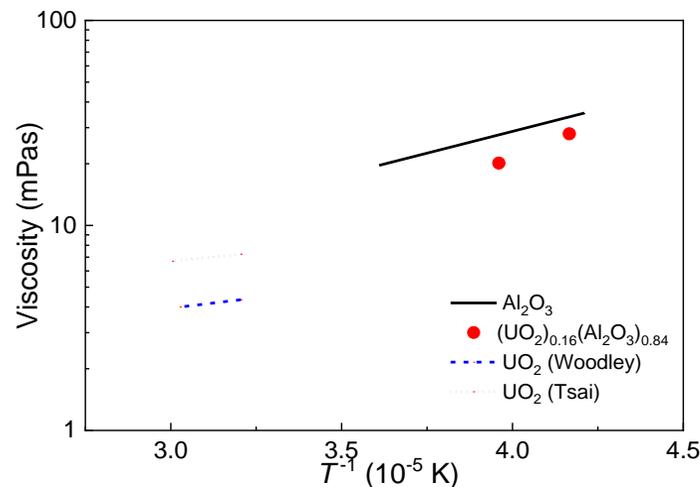
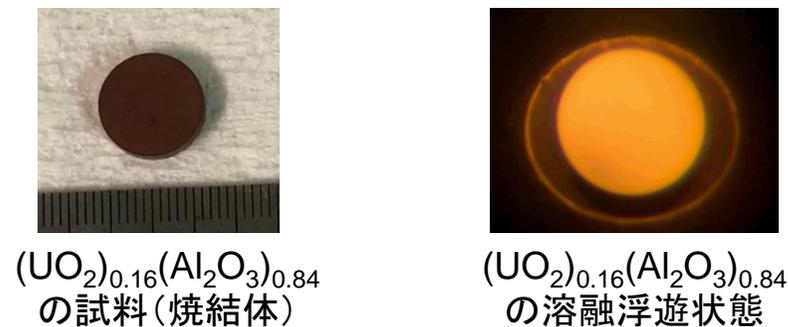
変数名	N.	M.	L.	RESULT.	GUI.	ECHOBACK.
NOCELL	1	1	1	0.	3.	3.
NPATH	2	2	1	0.	2.	2.
NBOUN	3	3	1	0.	0.	0.
NWALL	4	4	1	0.	2.	2.
NWMT	5	5	1	0.	1.	1.
NWMSH	6	6	1	0.	3.	3.
NWEND	7	7	1	0.	1.	1.
NSEDW	8	8	1	0.	0.	0.
NSTEP	9	9	1	0.	4000.	4000.
NTIM	10	10	1	1.000000000E+000	1.000000000E+000	1.000000000E+000
NTMAX	11	11	1	4.000000000E+003	4.000000000E+003	4.000000000E+003
NTSOR	12	12	1	0.	100.	100.
NTOUT	13	13	1	0.	100.	100.
NEPSSOR	14	14	1	1.000000000E-010	1.000000000E-010	1.000000000E-010
NEPSSUT	15	15	1	1.000000000E-010	1.000000000E-010	1.000000000E-010
ONG	16	16	1	1.000000000E+000	1.000000000E+000	1.000000000E+000
IFENER	17	17	1	0.	1.	1.
IFCOMP	18	18	1	0.	1.	1.
IFAERO	19	19	1	0.	1.	1.
IFCONV	20	20	1	0.	0.	0.
IFEXP	21	21	1	0.	0.	0.
IFSTRC	22	22	1	0.	1.	1.
IFZCEF	23	23	1	0.	0.	0.
IFRCS	24	24	1	0.	0.	0.
ITRSET	25	25	1	0.	0.	0.
IFIRE	26	26	1	0.	1.	1.
IPSSP	27	27	1	0.	1.	1.
IDABC	28	28	1	0.	1.	1.
NTPRINT	29	31	1	1.	-20.	-10.
IFSTR	30	29	1	0.	0.	0.
NTSMRY	31	30	1	0.	10.	10.

# (3)融体熱物性データベース構築

- ガス噴出により試料を浮遊させ、レーザー加熱により溶融状態にして物性値を測定する新手法を確立(装置、試料作成法、測定条件、分析法)
- 溶融二酸化ウラン( $\text{UO}_2$ )及び溶融ウラン(U)を含む融体熱物性値を取得



ガス浮遊法試験装置概略



測定結果の一例:  $(\text{UO}_2)_{0.16}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.84}$  の粘性

- 成果のまとめ

- モデル構築により、統合安全性評価シミュレーションの適用性を拡張（プラント全体評価、SA事象進展評価、小型モジュール炉評価）
- 設計最適解探索、入力作成、品証自動化ツールの構築により利便性を向上
- SA評価精度を向上させる、軽水炉分野にも応用可能な融体熱物性値を取得

- 研究効果

- 多様なシナリオを網羅的に評価、事象の発生割合を踏まえてリスクを定量化
- 必要な物性と炉型依存のモデルを追加することで対象範囲を拡大可能
- 熟練者への依存度を低減、設計や安全性評価に必要な時間を大幅に短縮
- 仮想空間で実機を模擬する数値実験装置として本システムを活用することで、技術伝承や原子力分野の新規人材確保にも貢献