

原子力システム研究開発事業
「安全基盤技術研究開発」(タイプB)

研究開発課題名

**MA含有ブランケット燃料を活用した
固有安全高速炉の開発
—成果報告会用説明資料—**

令和4年2月2日

研究代表者

国立大学法人 福井大学
再委託先機関 研究責任者

竹田 敏一

国立大学法人 大阪大学

北田 孝典

日立GEニュークリア・エナジー(株) 仁田脇 武志

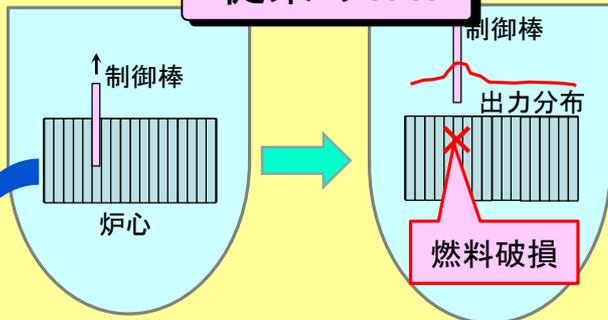
目 次

研究概要	3
1. 背景と目的	4
2. 従来研究との違い	5
3. 研究開発内容	6
3.1 福井大学担当研究	
輸送理論に基づく過渡解析手法の調査・検討(H29~R1)	
過渡計算結果に対する検討(R2)	
3.2 大阪大学担当研究	
過渡核特性解析手法の実装・検証(H29~R2)	
3.3 日立GE担当研究	
固有安全SFR炉心の概念設計(H29~R1)	
固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認(H29~R2)	
3.4 設計手法検証のための国際協力	
補足資料	32

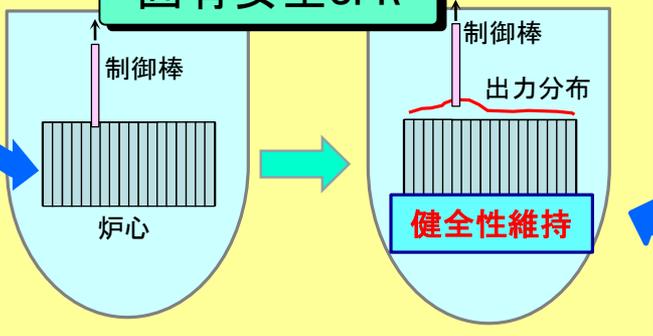
研究概要

ATWS時の挙動 (UTOP時)

従来のSFR



固有安全SFR



研究項目

- (1) 固有安全SFRの炉心概念設計
- (2) 設計に適用可能な過渡核特性解析手法の開発
- (3) 固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認
- (4) 設計手法検証のための国際協力

炉心概念設計

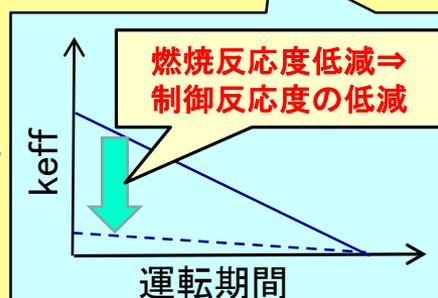
炉中心



炉心断面

■ **ポイド反応度負**の設計

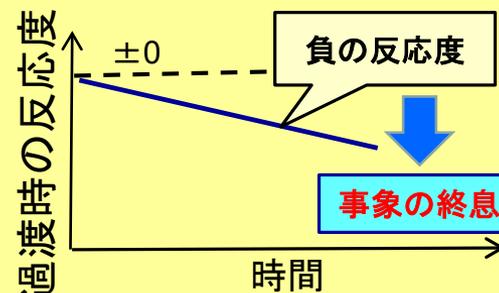
■ MAの可燃性吸収材・燃料親物質としての特長に着目



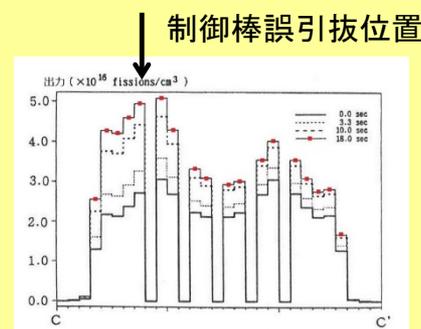
過渡核特性解析手法

ATWS時の挙動 (ULOF時)

■ 過渡時のNa密度分布を考慮した、Naプレナム、GEMの反応度評価手法



■ **世界初の六角体系輸送多次元過渡核特性解析手法の開発**
(拡散理論⇒輸送理論)



径方向出力分布の時間変化

1. 背景と目的



背景

福島原発事故以降、設計基準事象を超える厳しい条件に対しても、安全性が確保でき、国民の安心感が得られる原子炉の開発が重要となっている。

目的

- ATWSのような重大事故時にも**炉心固有の物理特性によって、炉心損傷を回避できる固有安全高速炉**を開発する。
- 輸送理論に基づく多次元過渡核特性解析手法を開発し、プラント動特性プログラムに組込んで、固有安全高速炉がULOF、UTOP時にも炉心損傷を回避できることを示す。

ATWS: Anticipated Transient Without Scram, ULOF: Unprotected Loss of Flow
UTOP: Unprotected Transient Over Power

2. 従来研究との違い

「もんじゅ」データを活用したMA核変換の研究 (H25/10~H29/3)

- 1) 「多量のMA核変換」と「ULOF時の炉出力増大回避&事象緩慢化」を両立
Naプレナム付軸非均質炉心によって、MA含有率11%で実効的ボイド反応度負
(正味のボイド反応度は正)を達成。過渡解析で出力上昇の抑制を確認
(但し、MAX(出力/流量比) > 4 → 燃料健全性確保△)
- 2) UTOP時の安全性に係る燃焼反応度 > 1.5\$ (従来研究では対象外)

課題1

- 1) ボイド反応度負でULOF時の正の反応度挿入を回避、2) 燃焼反応度 $\leq 1\$$ と
してUTOP時の制御棒御引抜き反応度低減 ⇒
●トレードオフ関係にある、**ボイド反応度と燃焼反応度の低減を両立できる
固有安全SFR炉心概念**

課題2

- 課題1克服のための、固有安全SFR炉心の安全性確認に必要な、高精度な過
渡核特性解析手法の開発 ⇒
- 軸方向ボイド分布又は冷却材密度分布を考慮した厳密摂動に基づく過渡時
の反応度評価方法の開発
 - 世界初となる設計に適用可能な六角Z体系の輸送過渡核特性解析手法**

3. 研究開発内容



取り纏め

福井大

◆ 固有安全SFR炉心の概念設計

- 燃焼反応度低減のための感度解析 (H29: 日立GE)
- 固有安全SFRの炉心概念設計 (H30~R1: 日立GE)

◆ 設計に適用可能な過渡核特性解析手法の開発

- 輸送理論に基づく過渡解析手法の調査・検討 (H29~R1: 福井大学)
- 過渡核特性解析手法の実装・検証 (H29~R2: 大阪大学)
- 過渡計算結果に対する検討 (R2: 福井大学)

過渡核特性解析と結合

◆ 固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認

- 過渡核特性解析手法とプラント動特性解析手法の結合方法の検討 (H29~R1: 日立GE)
- 解析ツールの試作 (R2: 日立GE)
- 固有安全SFRの過渡時安全性の評価 (R2: 日立GE)

◆ 設計手法検証のための国際協力 (H30~R2)

固有安全
SFRの
安全性確認

3.1 福井大学担当研究（輸送理論に基づく過渡解析手法の調査・検討、 過渡計算結果に対する検討）平成29年度



University of Fukui

・ 過渡解析手法の調査

手法	メリット	デメリット	特徴
θ法	手法そのものは非常に簡易な手法であり、適用が容易である。	θの選び方により、計算精度が異なるため、その選択方法が難しい。	中性子束の時間微分に対する重み関数がθであり、θ=0,1の場合には陽解法、陰解法となる。θの選択により、精度向上を図ることができるが、その選択方法が難しい。
周波数変換法	中性子束が指数関数状に変化する場合には有効である。	出力の時間依存性が複雑になる場合には、その有効性に問題点が残る。	この手法もθ法と同様、単純な手法であり、出力時間依存性が指数関数で近似できる場合には有効となる。
断熱近似	定常状態での中性子束分布計算コードを時間依存問題に適用できる。	中性子束分布の時間変化が時間ステップ内で大きい場合には計算誤差が大きくなる。	中性子束の時間微分をゼロとする近似であり、前の時間ステップの情報が次の時間ステップに伝わらないので断熱近似と呼ばれている。
準静近似	形状関数の解法において、その微分項をゼロとするので、定常状態の解法を適用できる。	形状関数の時間微分が大きい場合には計算誤差が大きくなる。	因子化法を用い、中性子束を振幅関数と形状関数に分解する。準静近似では形状関数の時間微分項を無視する。
改良型準静近似	形状関数の時間微分も考慮しており、計算精度は向上する。	形状関数の時間微分を取り入れた解法を用いる必要がある。	因子化法で表れる振幅関数および形状関数の時間微分項を取り入れて計算する。
マルチグリッド 振幅関数法	振幅関数の場所依存性を取り入れるため、計算精度の向上を図ることができる。	振幅関数の場所依存性を取り入れる計算が必要となり、計算方法が複雑となる。	上記、改良型準静近似では振幅関数は全炉心出力の時間依存性を示していたが、本方法では振幅関数の場所（ゾーン）依存性を取り入れている。
マルチレベル 準静近似法	フレキシブルな計算法であり、各段階の計算法を適切に選ぶと、計算精度の向上及び計算時間の短縮を図ることができる。	取り扱う問題ごとに各段階の計算法を適切に選択する必要がある。また選択した各段階での計算法の結合を図る必要がある。	全炉心の中性子束分布の時間依存性をマルチレベルで解く手法である。第1段階は厳密な解法、第2段階はその解を補正するための近似解法、第3段階は一点炉動特性方程式を用いる方法が提案された。この方法は非常にフレキシブルな解法であり、各段階の手法を適切に選択することにより過渡現象を効率よく解くことが可能である。

3.1 福井大学担当研究（**輸送理論に基づく過渡解析手法の調査・検討、過渡計算結果に対する検討**）平成29年度

3次元詳細輸送計算手法の比較検討

手法	集合体	メリット	デメリット	計算コードの特徴
輸送ノード法	均質	ノード法の採用により、空間メッシュ効果は詳細に取り入れられる	Sn計算の収束性が悪い	NSHEX 国内開発コード (公開)
応答行列法	非均質	あらかじめ集合体ごとの応答行列を計算すれば後の炉心計算は容易	集合体のボイド分布等が計算前には解からないので数多くのボイド分布を持つパターンを計算しておかねばならない	COMET 米国所ジョージア工科大学 (非公開)
Pn法 (SPn法)	均質	特にSPn法は計算時間が短い	Pn (SPn) 法は集合体が工学的に厚い場合は精度がよいが、ボイドのようになると精度が悪い	拡散コード (CITATION) を拡張すれば計算可 (公開)

2.2 設計に適用可能な過渡核特性解析手法の開発

①輸送理論に基づく過渡解析手法の調査・検討



University of Fukui

・ノード平均角度中性子束

$$\bar{\psi}^m = \frac{\bar{S}^m + \frac{2}{3hr} \sum_{s=x,u,v} \frac{\mu_s^m}{\alpha_s^m} (\beta_s^m \psi_{s-}^{m,in} + \delta_s^m) + \frac{\xi^m}{hz\alpha_z^m} (\beta_z^m \psi_{z-}^{m,in} + \delta_z^m)}{\frac{2}{3hr} \sum_{s=x,u,v} \frac{\mu_s^m}{\alpha_s^m} + \frac{\xi^m}{hz\alpha_z^m} + \sum'_t}$$

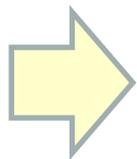
ただし

$$S^m = \sum_s^{g \rightarrow g} \varphi_g + Q'_g{}^m$$

☆改善すべき点

→ソース項が角度依存性を持ち、
記憶容量が膨大になる

・断面積としては以下の修正断面積を用いると、ソース項は Q_0 のみを考慮すればよい



$$\sum''_{tg} = \sum_{tg} + \frac{1}{v} \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{v\Delta t} \left(1 - \frac{\psi_{n-1}^0}{\psi_n^0} \right)$$

☆ソース項の角度依存性はなくなる

輸送計算手法のまとめ

- 改良型準静近似に基づき、中性子束の時間依存性を振幅関数と形状関数の積で表す。
- 振幅関数に表される反応度は輸送理論で計算。
- 形状関数は S_n ノード法に基づく計算方式を開発。

3.1 福井大学担当研究 (輸送理論に基づく過渡解析手法の調査・検討、 過渡計算結果に対する検討) 令和元年度



University of Fukui

◆ フィードバック反応度 ☆考慮すべきフィードバック反応度の種類

冷却材 (ナトリウム) ボイド反応度、ドップラー反応度、密度係数、
膨張反応度係数、制御棒・GEM反応度

◆ 冷却材 (ナトリウム) ボイド反応度の計算方法

・ 各燃料集合体の軸方向ノードのNa密度をプラント動特性解析より取得



各集合体の軸方向ノードの均質断面積の計算



定常状態からの均質断面積の変化 $\delta \Sigma$ の計算
(全断面積、吸収断面積、散乱断面積、生成断面積)

$$\rho = \frac{1}{\Sigma_g \int_v d\vec{r} \chi^g \psi^{*g}(\vec{r}) \Sigma_{g'} v \Sigma_f^{g'}(\vec{r}) \phi_0^{g'}(\vec{r})} \times \left[-\Sigma_g \int_v d\vec{r} \int_{4\pi} d\vec{\Omega} \delta \Sigma_t^g \{4\pi \phi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}, t) - \phi_0^g(\vec{r}, t)\} \Psi^{*g}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \right. \\ \left. - \sum_g \int_v d\vec{r} \delta \Sigma_a^g(\vec{r}) \phi_0^g(\vec{r}, t) \psi_0^{*g}(\vec{r}) + \sum_g \int_v d\vec{r} \phi_0^g(\vec{r}, t) \sum_{g'} \delta \Sigma_s^{g \rightarrow g'} (\psi_0^{*g'} - \psi_0^{*g}) \right. \\ \left. + \frac{1}{k_{eff}} \sum_g \int d\vec{r} \chi^g \psi_0^{*g}(\vec{r}) \sum_{g'} \delta v \Sigma_f^{g'} \phi_0^{g'}(\vec{r}, t) \right]$$

3.1 福井大学担当研究（輸送理論に基づく過渡解析手法の調査・検討、 過渡計算結果に対する検討）令和2年度

◆ ULOF時での温度変化・反応度予測式

←漸近近似を適用

・ 冷却材温度上昇

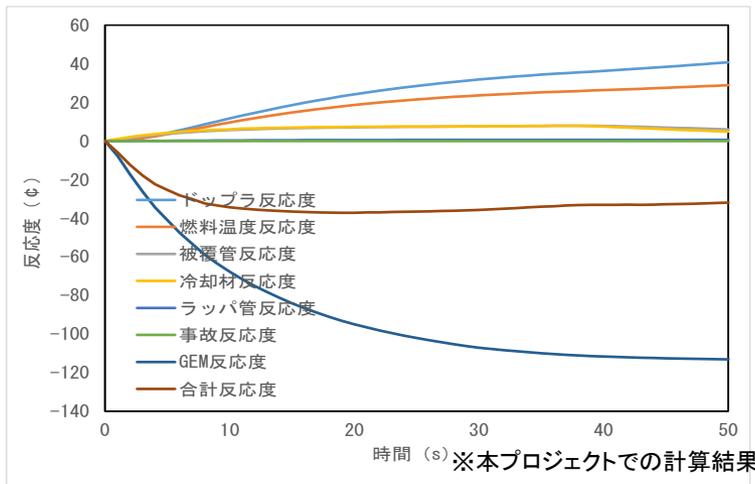
$$\bar{T}_f(T) - \bar{T}_f(0_-) = \{R(T) - 1\} \cdot \{T_f(0_-) - T_{in}\}$$

・ 燃料温度上昇

$$\begin{aligned} \Delta T_m(T) &\equiv \bar{T}_m(T) - \bar{T}_m(0_-) \\ &= \{P(T) - 1\} \{T_m(0_-) - T_{in}\} + \{R(T) - P(T)\} \{T_f(0_-) - T_{in}\} \end{aligned}$$

◆ ULOF時での反応度の比較

表 反応度の予測推定値(単位：\$)



	ドップラ 反応度	膨張反応度
内側炉心	0.316	0.266
外側炉心	0.05	0.044
漸近近似による 反応度	0.366	0.310
本プロジェクト での反応度	0.38	0.260

☆以上のUTOP・ULOF時の過渡解析結果の比較により、本プロジェクトで開発した
計算コードにおいて、反応度フィードバックが妥当に考慮されていることが分かった。

3.1 福井大学担当研究 (輸送理論に基づく過渡解析手法の調査・検討、
過渡計算結果に対する検討) 令和2年度



University of Fukui

フィードバック反応度に対する制限条件の導出 (UTOPの場合)

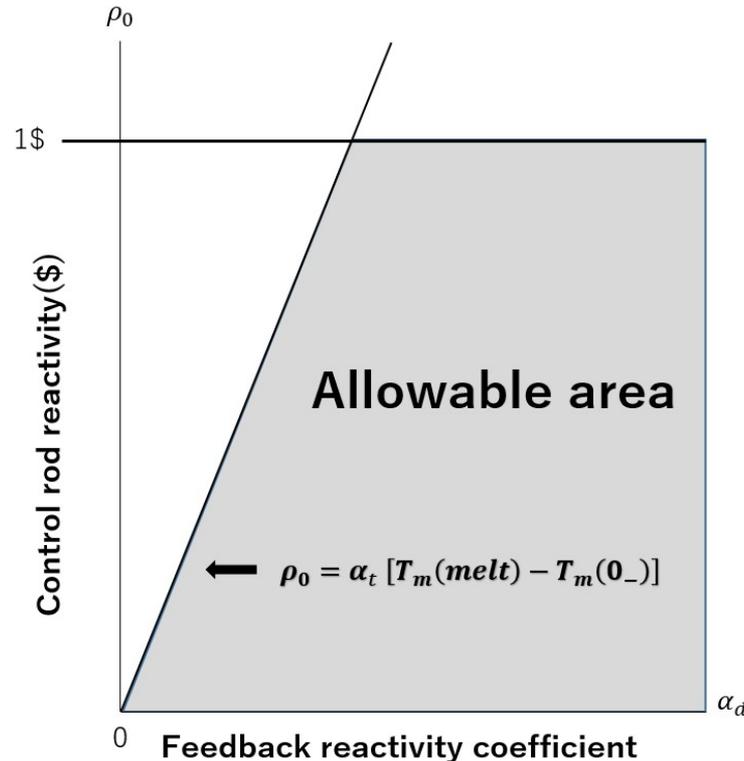


Figure Allowable area for the control rod reactivity and feedback reactivity coefficient

参考文献 T.Takeda, K Fujimata, S Fuchita, S. Takeda , "Estimation of Reactivity Feedback and Determination of Safety Criteria of Inherent-Safety Fast Reactors in Unprotected Transients based on the Asymptotic Approximation", Annals of Nuclear Energy,164 (2021) 108597.

3.2 大阪大学担当研究

(過渡核特性解析手法の実装・検証)



University of Fukui

計画

輸送効果を妥当な計算時間で取り入れる手法の実装を行う。反応度等が輸送効果を考慮できる既存の計算コードの結果との比較により適切に評価されていること及び妥当な計算時間で評価されていることを検証する。



- ✓ 高度化を図る過渡核解析コードとして、拡散理論に基づくKICOMコードを調査・導入した。
- ✓ 輸送効果を取り入れる方法の適用による過渡解析コードの高度化として、Sn法に基づくコードであるNSHEXを参考にしつつ、KICOMにSn法に基づく輸送計算機能を導入した。
- ✓ 改良準静近似に基づく解析をSn法で実施するための機能を実装した。
- ✓ 輸送効果を考慮できる既存の計算コードの結果との比較により、反応度等が適切に評価されていること、設計に適用できる計算時間で評価されていることを確認した。断熱近似を用いた反応度の検証も実施した。

3.2 大阪大学担当研究

(過渡核特性解析手法の実装・検証)



University of Fukui

過渡核解析コードの調査結果

KICOMは過渡解析に必要な基本的な性能を有することを確認した。KICOMに対し、NSHEXのSn法の計算機能を追加する方針とした。

KICOMの仕様

取扱形状		3次元六角Z炉心体系
炉心計算	理論	拡散ノード法(多項式展開法)
	外部反復	Chebyshev
	内側反復	Wielandt (定常計算のみ)
動特性方程式の解法		SOR
		BiCGSTAB
		一点炉近似
		断熱近似
		改良準静近似(IQS, AQS)
		直接法

NSHEXの仕様

取扱形状		3次元六角Z炉心体系
炉心計算	理論	輸送計算 (Sn法、多項式展開法)
	外部反復	リバランス加速法

3.2 大阪大学担当研究

(過渡核特性解析手法の実装・検証)



University of Fukui

①で検討された、前ステップの中性子源項については、方向依存性を固定するという仮定を用いた。

$$\frac{\varphi(\mathbf{r}, \Omega, E, t)}{\varphi(\mathbf{r}, E, t)} = \frac{\varphi(\mathbf{r}, \Omega, E, t + \Delta t)}{\varphi(\mathbf{r}, E, t + \Delta t)}$$

この近似を用いることで、前ステップの中性子源項を左辺に移動させ、コードに導入した。

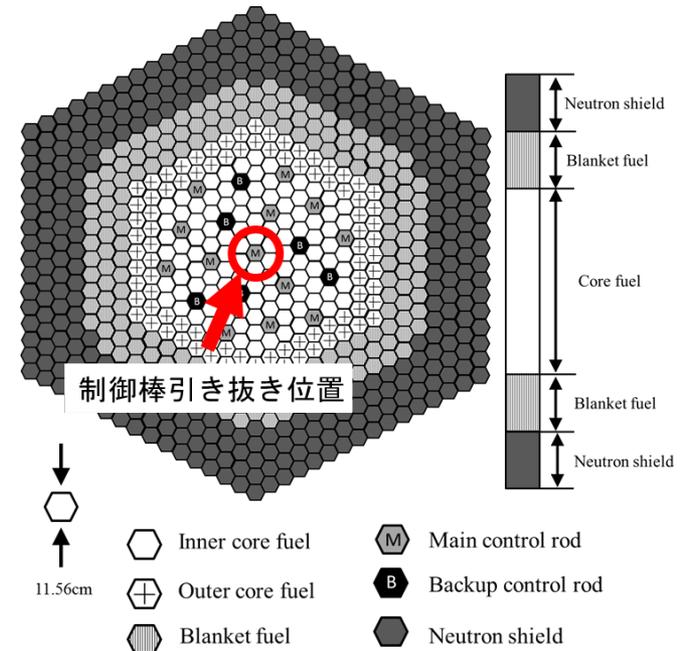
$$\begin{aligned} & \Omega \cdot \text{grad} \varphi^g(\mathbf{r}, \Omega, t + \Delta t) + \left(\Sigma_t^g(\mathbf{r}) + \frac{1}{v\Delta t} + \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{P(t + \Delta t)v\Delta t} \right) \varphi^g(\mathbf{r}, \Omega, t + \Delta t) \\ &= \int d\Omega' \sum_{g'} \Sigma_s^{g' \rightarrow g}(\Omega' \rightarrow \Omega) \varphi^{g'}(\mathbf{r}, \Omega', t + \Delta t) + \frac{\chi_p^g}{4\pi k_{eff}} \int d\Omega' \sum_{g'} (1 - \beta) v_p \Sigma_f^{g'}(\mathbf{r}) \varphi^{g'}(\mathbf{r}, \Omega', t + \Delta t) \\ &+ \frac{1}{4\pi P(t + \Delta t)} \sum_m \chi_d^g(m) \lambda(m) C(m, t) + \frac{\varphi^g(\mathbf{r}, \Omega, t)}{v\Delta t} \\ & \quad \Downarrow \\ & \Omega \cdot \text{grad} \varphi(\mathbf{r}, \Omega, E, t + \Delta t) + \left(\Sigma_t(\mathbf{r}, E) + \frac{1}{v\Delta t} \left(1 - \frac{\varphi(\mathbf{r}, E, t)}{\varphi(\mathbf{r}, E, t + \Delta t)} \right) + \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{P(t + \Delta t)v\Delta t} \right) \varphi(\mathbf{r}, \Omega, E, t + \Delta t) \\ &= \int d\Omega' \int dE' \Sigma_s(\Omega' \rightarrow \Omega, E' \rightarrow E) \varphi(\mathbf{r}, \Omega', E', t + \Delta t) \\ &+ \frac{\chi_p(E)}{4\pi k_{eff}} \int d\Omega' \int dE' (1 - \beta) v_p \Sigma_f(\mathbf{r}, E') \varphi(\mathbf{r}, \Omega', E', t + \Delta t) + \frac{1}{4\pi P(t + \Delta t)} \sum_m \chi_d(m, E) \lambda(m) C(m, t) \end{aligned}$$

3.2 大阪大学担当研究 (過渡核特性解析手法の実装・検証)

摂動論に基づく反応度計算の検証のための計算を、断熱近似を用いて実施した。
 ✓ もんじゅ炉心の中央位置の制御棒について、制御棒下端を炉心上部より100cmの位置とする初期条件から、2 cm/secの速度で6秒間引き抜いた解析

計算条件

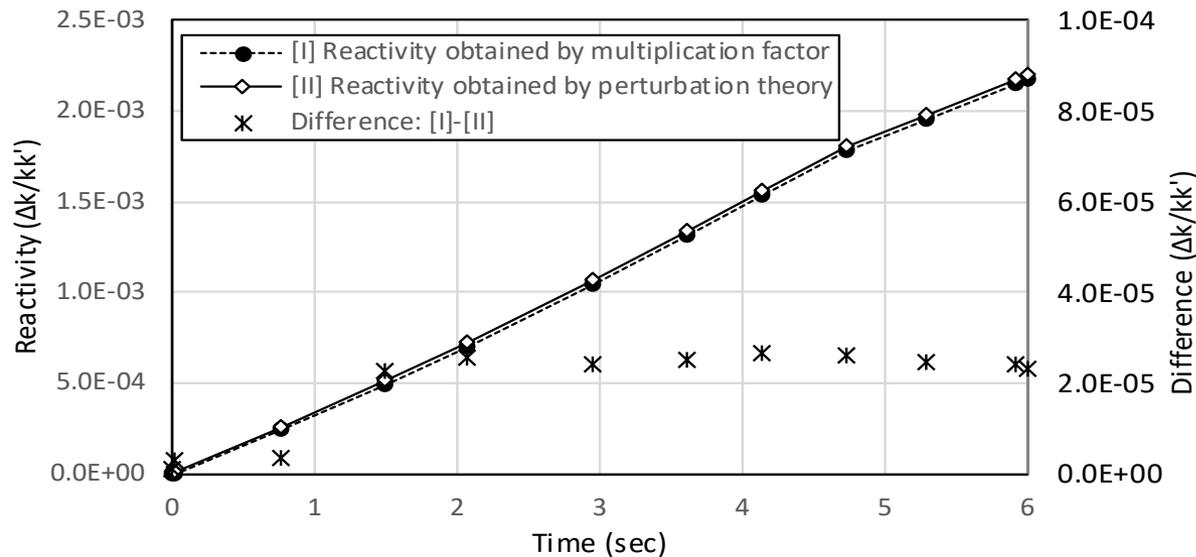
Sn quadrature	4
Polynomial expansion order of internode flux	2
Convergence criterion of node-wise fission source	5×10^{-5}
Convergence criterion of multiplication factor	1×10^{-5}
Division number of regions in axial direction	20*
Number of energy groups	7
Evaluated nuclear data	JENDL-4.0
Boundary condition in radial direction	Vacuum
Boundary condition in axial direction	Vacuum



3.2 大阪大学担当研究 (過渡核特性解析手法の実装・検証)

University of Fukui

- ✓ 輸送計算で得られる実効増倍率に基づく反応度($1/k-1/k'$)と、摂動論から求まる反応度を比較した。
- ✓ 誤差は収束条件のオーダーとなり、**摂動論に基づく反応度が適切に求まっていることを確認した。**



反応度の比較

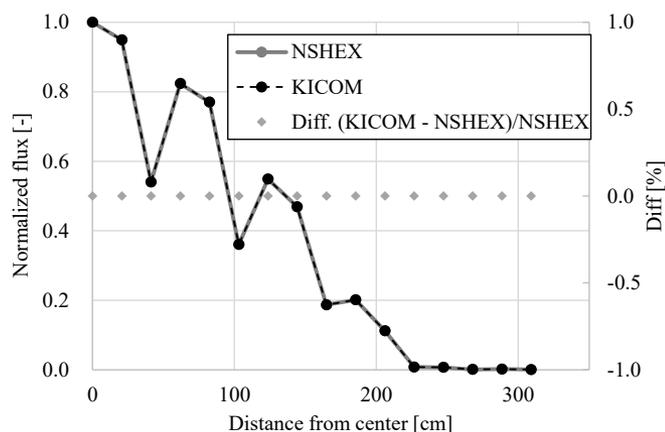
3.2 大阪大学担当研究

(過渡核特性解析手法の実装・検証)

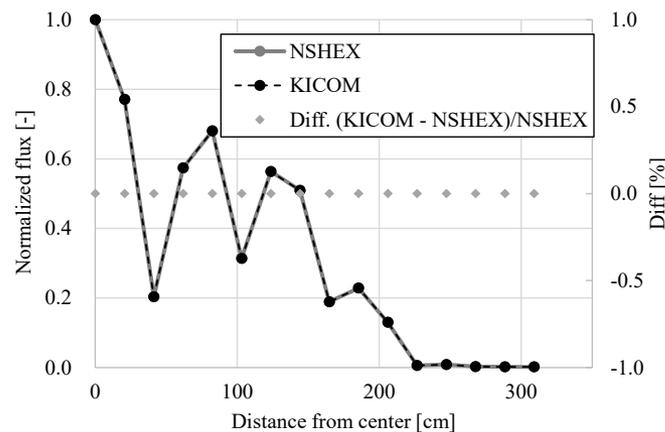
固有安全炉体系を対象として、KICOMとNSHEXの結果を比較した。結果として、実効増倍率および中性子束分布について有意な差異はなく、反応度等が適切に評価されていることを検証した。また、計算時間は制御棒未挿入の体系では18.7分、制御棒挿入の体系では24.6分であり、設計に適用できる計算時間であることを確認した。

実効増倍率及び反応度の比較

	KICOM (Sn法)	NSHEX
引き抜き前 (k)	1.45561	1.45561
引き抜き後 (k')	1.44500	1.44500
反応度 ($\Delta k/kk'$)	-0.00504	-0.00504



(a) 制御棒なし



(b) 制御棒あり

中性子束分布(1群)の比較

3.3 日立GE担当研究（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）



固有安全SFR炉心の概念設計・検討概要

- ① 燃焼反応度低減のための感度解析（H29）
 - ・ **マイナーアクチニド**（MA）の燃料親物質としての特長を活用して燃焼反応度低減を達成する有望な装荷方法を選定した。
- ② 固有安全SFRの炉心概念設計（H30～R1）
 - ・ ①で抽出したMA装荷方法に対し、炉心仕様を設定し、燃焼反応度とボイド反応度を評価した。（H30）
 - ・ H30年度に設定した**上部ナトリウムプレナム**と**GEM**を設置した炉心でULOF時の**ボイド反応度が負で燃焼反応度が1\$以下**となる様に、炉心仕様を最適化した。（R1）

固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認・検討概要

- ① 過渡核特性解析手法とプラント動特性解析手法の結合方法の検討（H29～R1）
 - ・ 開発する**核特性計算**(*1)と既存の**温度計算**(*2)を結合する手法を検討した。（H29）
 - ・ **核特性計算**と**温度計算**の結合方法を見直し、必要な準備を実施した。（H30）
 - ・ **核特性計算**に対して、**温度計算**とのデータ授受機能を整備・確認した。（R1）
- ② 解析ツールの試作（R2）
 - ・ **核特性計算**と**温度計算**を結合した**プラント動特性解析ツール**を試作した。
- ③ 固有安全SFRの過渡時安全性の評価（R2）
 - ・ ②で試作した**解析ツール**を用いて、**固有安全SFRの炉心概念のULOF、UTOPの過渡解析**を実施し、炉心損傷を回避できる炉心概念であることを確認した。

(*1) **核特性計算**：過渡核特性解析手法（輸送理論に基づく詳細な炉心部の出力分布計算の過渡解析手法）

(*2) **温度計算**：既存のSFR向けのプラント動特性解析手法

3.3 日立GE担当研究（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

種々の炉心概念の得失整理を行い、固有安全性の目標達成を念頭に、燃焼反応度低減を達成する候補炉心を選定する。

炉心概念	MA装荷位置(*)	燃焼反応度(注)	ボイド反応度(注)	備考	まとめ
 <p>均質炉心</p>	炉心	小	大	中性子スペクトル:硬	燃焼反応度とボイド反応度の目標の同時達成は困難
	AB	大	小	中性子インポートランス:小	
	RB	大	小		
 <p>軸方向非均質炉心 (Na プレナム付き)</p>	炉心	小	大	中性子スペクトル:硬	IBにMAを装荷するケースで、燃焼反応度とボイド反応度の目標を同時達成できる可能性
	IB	小	小	有望な候補	
	AB	大	小	中性子インポートランス:小	
	RB	大	小		
 <p>径方向非均質炉心</p>	炉心	小	大	中性子スペクトル:硬	燃焼反応度とボイド反応度の目標を同時達成できる可能性はあるが、下記の課題有: ・炉心サイズ:大 ・IBと炉心燃料の冷却材出口温度差:大→サーマルストラッピング
	IB	小	小	有望な候補だが課題あり	
	AB	大	小	中性子インポートランス:小	
	RB	大	小		
円環状炉心	炉心	大	小	—	燃焼反応度の目標達成困難

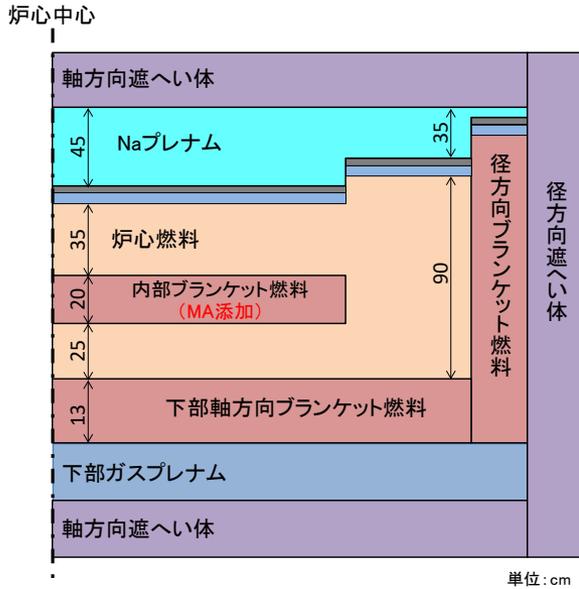
(*) AB: 軸方向ブランケット、RB: 径方向ブランケット、IB: 内部ブランケット

(注) 燃焼反応度、ボイド反応度とも”小”が優れる

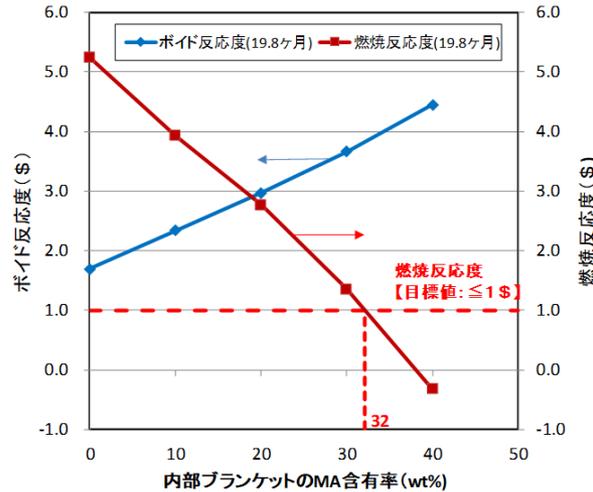
燃焼反応度を低減しつつ、ボイド反応度も同時に低減できる可能性があり、技術的な課題も少ない「ナトリウムプレナム付き軸非均質炉心」を選定した。

3.3 日立GE担当研究（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

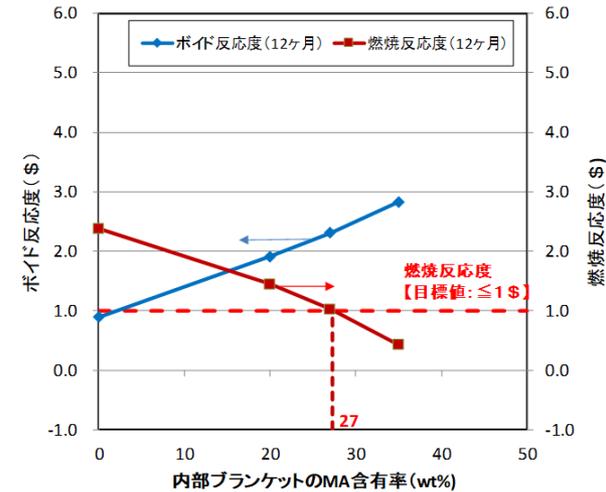
b) 基準炉心を対象に、内部ブランケットに添加するMAの含有率と運転期間をパラメータとして、**燃焼反応度1\$以下**を目標に感度解析を実施する。



感度解析を実施した炉心の垂直断面図



(a) ケース1
(運転期間19.8ヶ月)



(b) ケース2
(運転期間12.0ヶ月)

- ・目標の**燃焼反応度1\$以下**を達成できる**内部ブランケットのMA含有率**:
 - [ケース1] 運転期間19.8ヶ月の時には32wt%
 - [ケース2] 運転期間12.0ヶ月の時には27wt%
- ・固有安全SFRの設計目標である燃焼反応度1\$以下と**ボイド反応度負**を達成する観点より、ボイド反応度が2\$程度の[ケース2]を装荷方法として選定した。

3.3 日立GE担当研究（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

炉心部の必要な計算機能と分担／核特性計算と温度計算のデータ授受

区分	核特性計算（本研究で開発）	温度計算（既存の解析手法）
計算機能	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外乱条件（制御棒位置）設定 ・ 遅発中性子先行核密度の計算 ・ フィードバック反応度計算（ドップラ、燃料膨張、被覆管冷却材、GEM etc） ・ 炉心平均出力計算（1点炉近似動特性） ・ 炉心中性子束分布の計算（3次元詳細輸送計算、輸送計算の時間的補間） ・ 集合体毎/高さ方向の出力計算 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外乱条件（流量、温度等）設定 ・ GEM集合体の温度、液位計算 ・ 集合体間/内冷却材流量の設定 ・ 熱移行量の計算 ・ 集合体内の冷却材温度(*1)計算 ・ 燃料ピン温度(*1)計算 ・ ラッパ管温度(*1)計算 ・ 集合体間の冷却材温度(*1)計算 ・ 燃料、構造材、冷却材の平均温度(*1)計算 <p>(*1)分布を考慮</p>
温度計算→核特性計算	<ul style="list-style-type: none"> ・ 集合体毎及び高さ方向分割毎(*2)の冷却材密度 ・ 集合体毎及び高さ方向分割毎の各構成要素(*2)の平均温度[°C] <p>(*2)燃料、構造材、冷却材（集合体内と集合体間を分離）</p>	
核特性計算→温度計算	<ul style="list-style-type: none"> ・ 集合体毎及び高さ方向分割毎の炉心出力 [W] 	

核特性計算：過渡核特性解析手法（輸送理論に基づく詳細な炉心部の出力分布計算の過渡解析手法）

温度計算：既存のSFR向けのプラント動特性解析手法

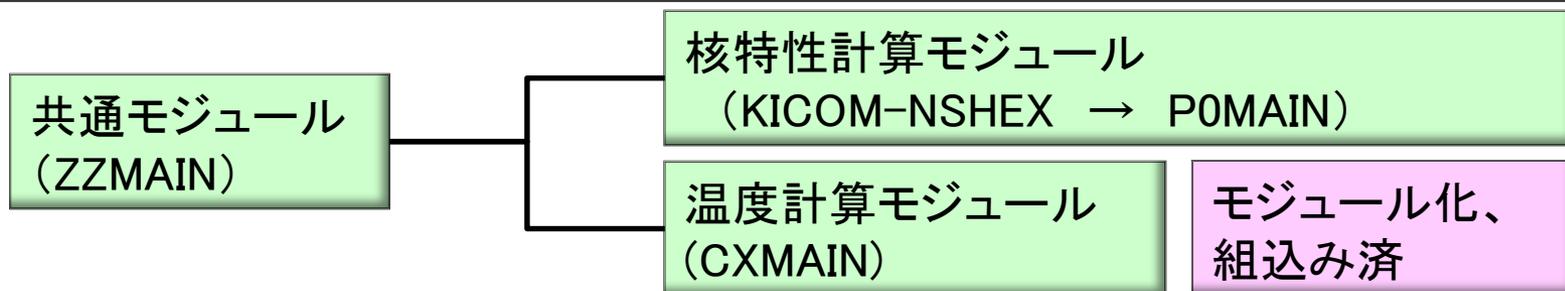
3.3 日立GE担当研究（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）



University of Fukui

②解析ツールの試作

- 試作準備（本研究で開発した過渡時核特性解析手法の分析）
- 過渡時核特性解析手法のモジュール化作業（核特性計算モジュール）
- 解析ツールの試作（共通モジュール、温度計算モジュールとの結合）

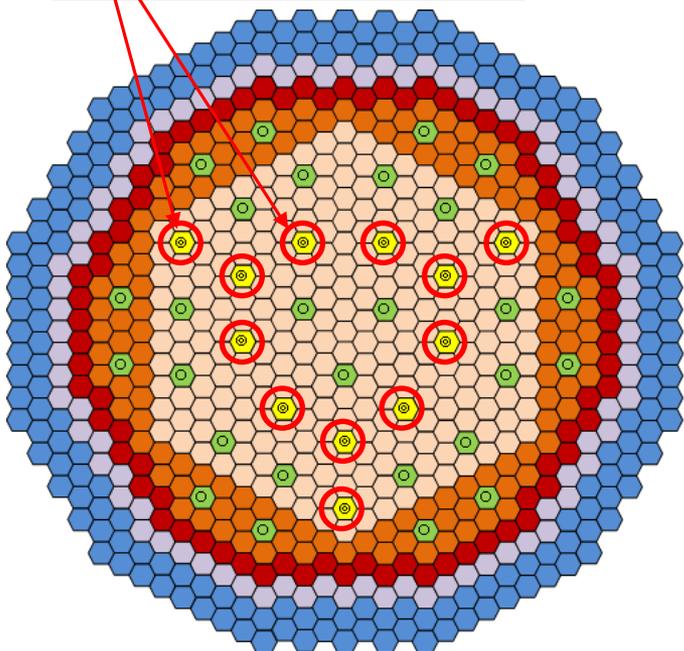


③固有安全SFRの過渡時安全性の評価

- ULOF、UTOPの想定と解析条件
 - 解析対象炉心：固有安全SFRの炉心概念（次スライド参照）
 - ULOF：外部電源喪失時のスクラム失敗（流量半減時間 6.5 s、最低流量定格流量の 15 %）
 - UTOP：制御棒1本の誤引き抜き時のスクラム失敗（誤引き抜き時間 4 s、挿入反応度 12 ϕ [予備解析]）
- 既存のプラント動特性解析手法を用いた予備解析（ベンチマーク条件）
- 試作した解析ツールによる過渡解析（option：Sn法-輸送計算、拡散法）
- 予備解析結果との比較による開発した解析手法の有効性を評価

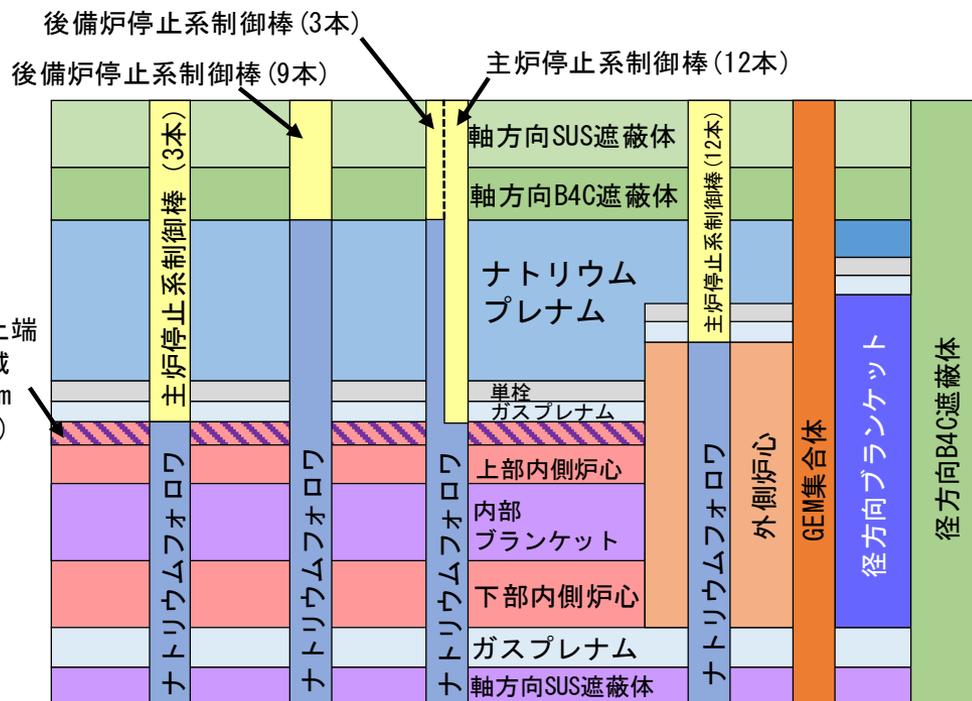
3.3 日立GE担当分（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

-  内側炉心燃料集合体(244体)
 -  外側炉心燃料集合体(126体)
 -  ガス膨張機構(GEM)集合体(78体)
 -  径方向ブランケット燃料集合体(84体)
 -  遮へい体(186体)
 -  主炉停止系制御棒(27体)
 -  後備炉停止系制御棒(12体)
- 炉心構成要素数: 757体



炉心水平断面図

炉心核特性	
Pu富化度 (Pu/HM) (内側/外側)	27.2/23.8wt%
内部ブランケットのMA含有率	23.1wt%
燃焼反応度	0.95\$
最大線出力	363.7W/cm
取出平均燃焼度	96.7Gwd/t
増殖比	1.03
ポイド反応度 (GEMを含む)	-0.08\$

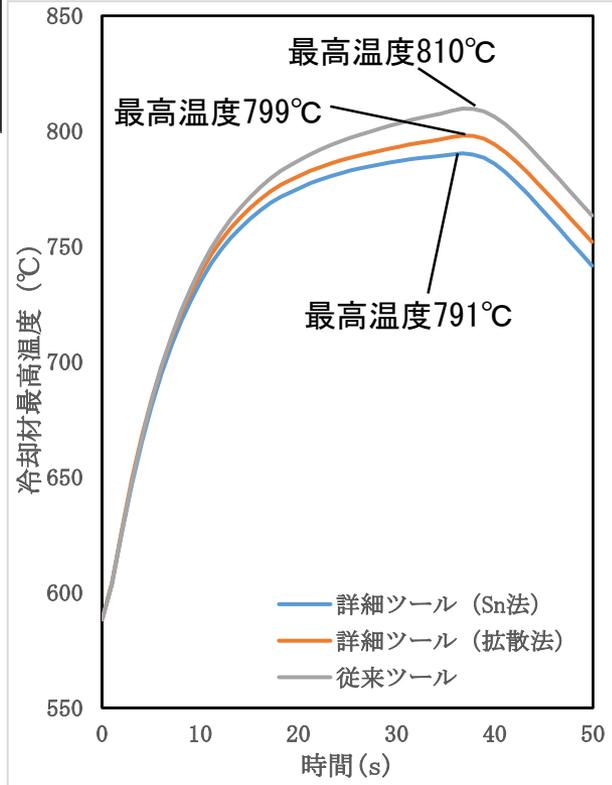


炉心垂直断面図

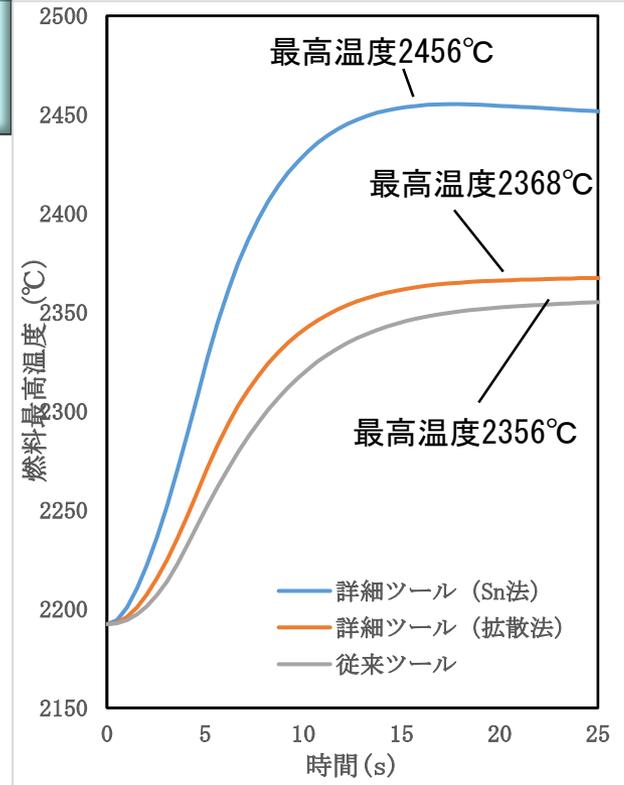
固有安全SFRの炉心概念

3.3 日立GE担当研究（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

ULOF 解析結果



UTOP 解析結果



Sn法-
輸送理論に
基づく手法

流量減少に伴い負のGEM反応度が挿入され炉心出力が低下。冷却材の沸騰は回避でき、**燃料ピンの健全性は維持**できる。
核特性計算を詳細化した影響：冷却材最高温度を約20°C低下。

制御棒誤引き抜きに伴う炉心出力上昇、燃料最高温度は約2460°Cまで上昇。2750°Cの燃料溶解温度以下で**燃料ピンの健全性は維持**できる。
核特性計算を詳細化した影響：特定の制御棒の誤引き抜きを詳細に評価することが可能。

炉心損傷を回避できる固有安全高速炉の炉心概念を確認。
核特性計算を詳細化した効果：現実的な評価が可能となった。

3.4 設計手法検証のための国際協力

①高速炉安全性向上のための国際協力の推進・検討

成果目標

概念設計案の妥当性、設計手法の妥当性を国際的に議論し、そのメリット・デメリットを検討する。国際協力としてはフランスCEAとする。

主要な検討・成果

日本からの発表・・・

「輸送ノード法に基づく3次元過渡解析法」

「過渡解析法コード開発」

- ・ 理論式での角度依存ソース項の取り扱い方法についてCEAから質問があった。・ ソース項が負になる場合がないかとのコメント
- ・ 今後急激な反応度添加があった場合での解析により、改良準静近似の精度が示せるのではないかとのコメント
- ・ ボイド発生によるスペクトル変化が大きい場合、動特性パラメータの変化を考慮すべきとのコメント



当日の様子(福井大学にて)

3.4 設計手法検証のための国際協力 ②炉心損傷回避を目指す高速炉の提案



成果目標

【平成30年度】

3.1節で設定した固有安全SFRの設計案に対して、海外を含む他の設計案との比較・検討を行い、それぞれの得失を整理する。

【令和元年度】

ULOF、UTOPを想定しても炉心損傷を回避できる固有安全高速炉の炉心概念開発に資するため、安全性の面から炉心設計を議論・検討する。

【令和2年度】

令和元年度の比較・検討結果を踏まえて、国際ベンチマークを提案するための準備を行う。

主要な検討・成果

【平成30年度～令和元年度】

3.1節の検討結果を基に固有安全SFRの炉心概念の考え方を、仏CEA技術者と議論・検討（平成30年度は仏海外出張、令和元年度はWeb会議）した。

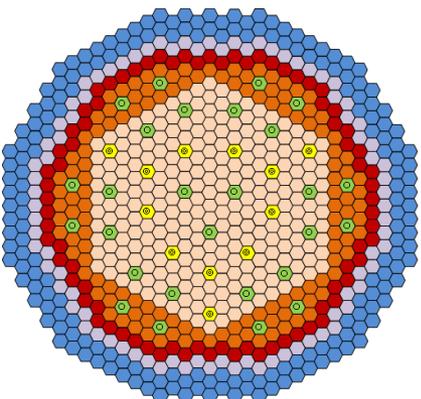
【令和2年度】

令和元年度までの仏CEA技術者との比較・検討結果を踏まえて、次ページに示す国際ベンチマーク案を提案するための準備を行い、仏CEA技術者と議論・検討（Web会議）を実施した。

3.4 設計手法検証のための国際協力

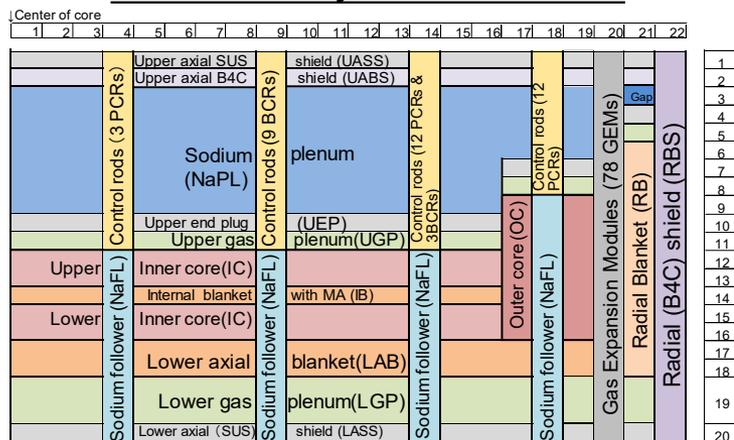
②炉心損傷回避を目指す高速炉の提案

国際ベンチマークの案



	Inner core fuel assembly (IC)	: 244
	Outer core fuel assembly (OC)	: 126
	Gas Expansion Module (GEM)	: 78
	Radial Blanket (RB)	: 84
	Radial B4C Shield (RSB)	: 186
	Primary Control Rod (PCR)	: 27
	Backup Control Rod (BCR)	: 12
	Number of total components	: 757

Horizontal layout of the core



Vertical section of the half core

■ベンチマーク体系(固有安全SFR炉心)

■炉心の仕様

Item	uit	value
Thermal power	MWt	1765
Electric power	MWe	750
Burnup period	EFPD	603
×batch factor		(19.8months)×6
Assembly pitch	cm	20.6
Height of IC(Upper/Lower) /IB/OC	cm	60(35/25)/20/90
Sodium plenum height (at IC/OC)	cm	45/35
Upper gas plenum height	cm	5
Lower axial blanket height	cm	13
Pin diameter (IC,IB,OC/Radial blanket)	mm	10.4/11.7
Fissile Pu ratio (Puf/Pu) in IC,OC	wt%	57
MA content in IB	wt%	27
B-10 enrichment of upper axial B ₄ C shield	at%	19.9
Standby position of the control rods (lower end position of neutron absorber)	-	<ul style="list-style-type: none"> • PCRs : Top of the IC/OC • BCRs : Top of the sodium-plenum

■核特性

ボイド反応度、燃焼反応度、動特性パラメータ、ドップラ係数、GEM反応度(←CEAコメントで追加)

3.4 設計手法検証のための国際協力

③過渡解析手法に対する議論・検討



成果目標

本提案の重大事故の過渡解析手法に対する議論・検討を行い、手法の有効性を明らかにする。

主要な検討・成果

本検討で開発したコードの詳細を説明し、手法の有効性について議論した。

- ✓ 手法の有効性に関して、動特性パラメータの時間変化をコードとしてどのように取り扱っているかについて質問があった。調査した結果、遅発中性子などの動特性パラメータは各時間ステップにおいて適切に更新されていることを確認した。
- ✓ 時間ステップ幅を決めるための振幅関数の条件設定に関して質問を受けたため、振幅関数による時間ステップ幅の条件設定が適切であるかどうか検討した。検討の結果、より細かく時間ステップ幅を設定した場合の炉心出力の変化が小さいことがわかった。過渡解析手法の標準入力値を用いたときに十分な精度が得られることから、過渡解析手法が有効であることを確認した。

補足資料

過渡解析結果の不確かさ

- ・計算手法として輸送理論に基づく過渡解析を実施したので、拡散理論の過渡解析にくらべ計算手法の不確かさは少ない
- ・しかし、断面積の不確かさに基づく解析結果の不確かさ評価が必要



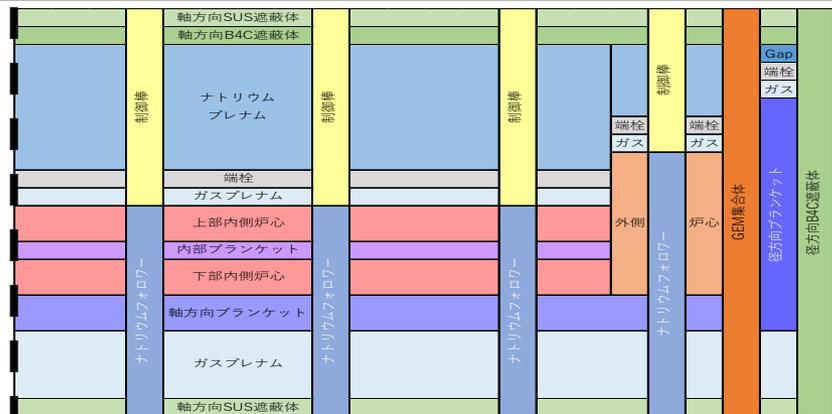
- ✓ 最近の論文で通常のコ分散データの使用による不確かさ評価は誤りがあることを指摘

T.Takeda, S.Takeda, H.Koike, T. Kitada, D. Sato, “An Estimation of Cross-Section Covariance Data Suitable for Predicting Neutronics Parameters Uncertainty”, Annals of Nuclear Energy, 145 (2020) 107534.

- ✓ 不確かさ評価用のコ分散データの開発が必要

3-3 日立GE担当分（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

上部ナトリウムプレナム付きの750MWe クラスSFR について、①で抽出したマイナーアクチニド(MA)装荷方法を適用して、炉心の仕様を設定し、ボイド反応度を評価。



炉心中心 H30年度検討炉心の2次元RZ体系モデル

ボイド反応度低減のための感度解析の結果

内側炉心(IC)高さ	60cm		55cm	
上部遮へい体 ¹⁰ B濃度	19.9%	90%	19.9%	90%
Pu富化度(内側/外側)	27.0/24.6wt%		27.9/24.2wt%	
燃焼反応度	0.58\$	0.57\$	0.86\$	0.85\$
ULOF時のボイド反応度	1.67\$	1.44\$	1.08\$	0.85\$

さらなるボイド反応度低減方策	効果
燃焼反応度の余裕分を活用して内部ブランケットのMA添加率を低減	ボイド反応度 -0.16\$
下部軸方向ブランケットにMAを添加	効果なし
内側炉心上部にMAを添加してNaプレナム領域のボイド反応度低減効果を増大	ボイド反応度 -0.07\$
上部軸方向遮へい体下端に中性子減速材(ZrH1.6)を装荷	ボイド反応度 -0.6\$ (水素分離の課題あり)

・①で選定した炉心をベースに、種々のボイド反応度低減方策の感度解析を実施し、燃焼反応度とGEMを考慮したボイド反応度1\$以下となる炉心を構築した。
 ・燃焼反応度1\$以下及びULOF時のボイド反応度負を両立する固有安全SFR炉心の構築に資する目的でさらなるボイド反応度低減方策を4つ検討した。

3-3 日立GE担当分（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

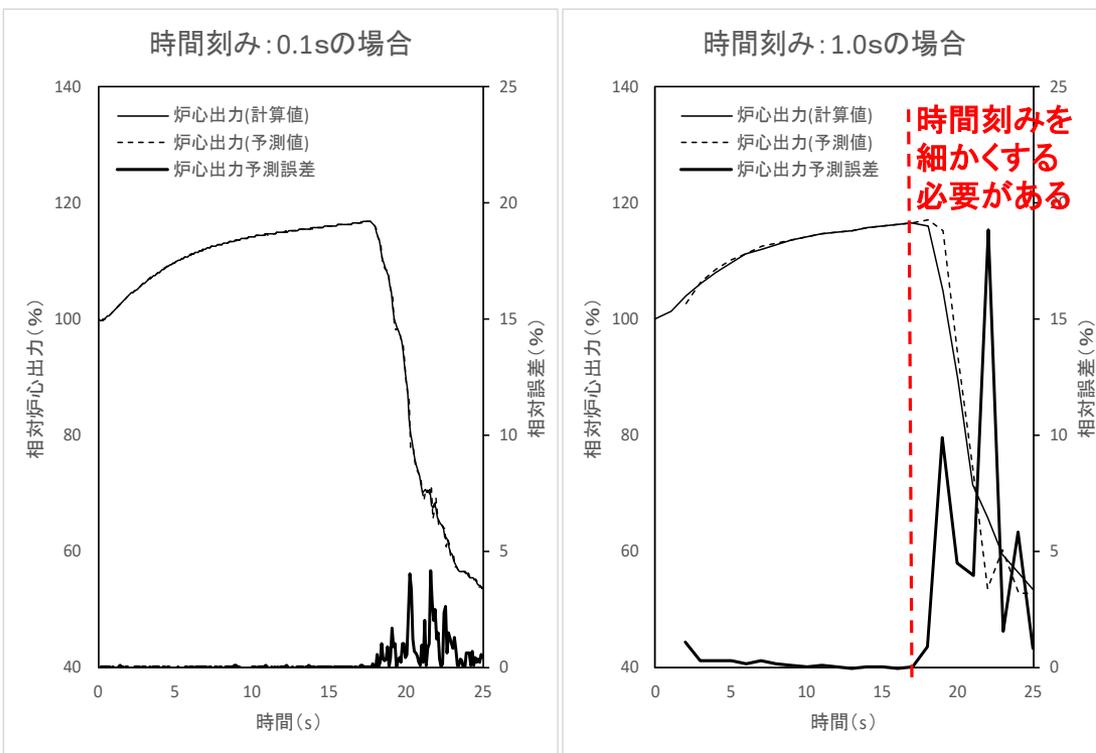
データ授受間隔と予測誤差

予測誤差評価の考え方

- ・ 温度計算結果（各部温度、冷却材密度）は分布を有するため、予測誤差評価が複雑。
- ・ 計算結果の炉心出力で予測誤差を求め、温度計算の予測誤差は1次遅れで間接評価。

対象炉心

- ・ 平成28年度「もんじゅ」データを活用したマイナーアクチニド核変換の研究



燃料ピン温度は1次遅れ (τ : 約8s) を有するため、炉心出力よりも予測誤差 (Δ) は小さい。
 評価式: $\Delta_{(温度)} = \Delta_{(炉心出力)} \times (1 - e^{-dt/\tau})$
 データ授受間隔と予測誤差の関係

データ授受間隔 (s)	最大炉心出力予測誤差 (%)	最大温度計算予測誤差 (%)
0.1	4.2	0.052
0.2	4.3	0.11
0.5	9.8	0.59
1.0	19	2.3

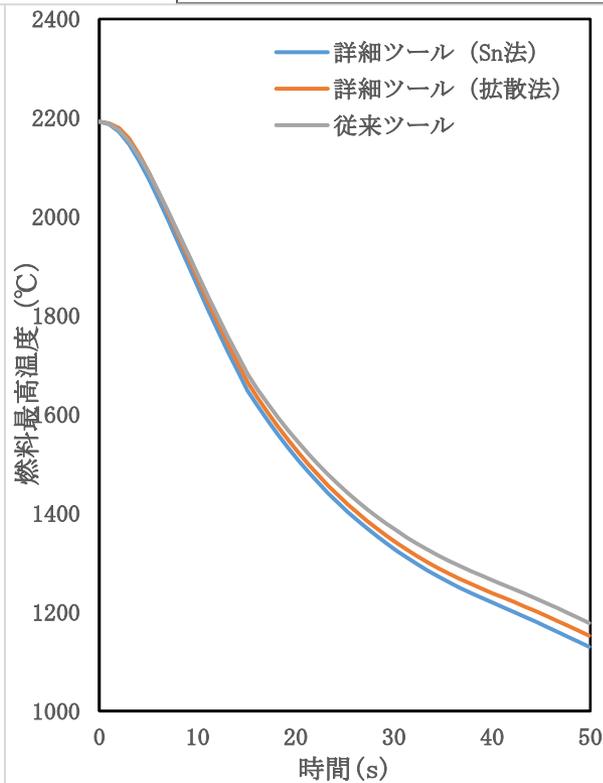
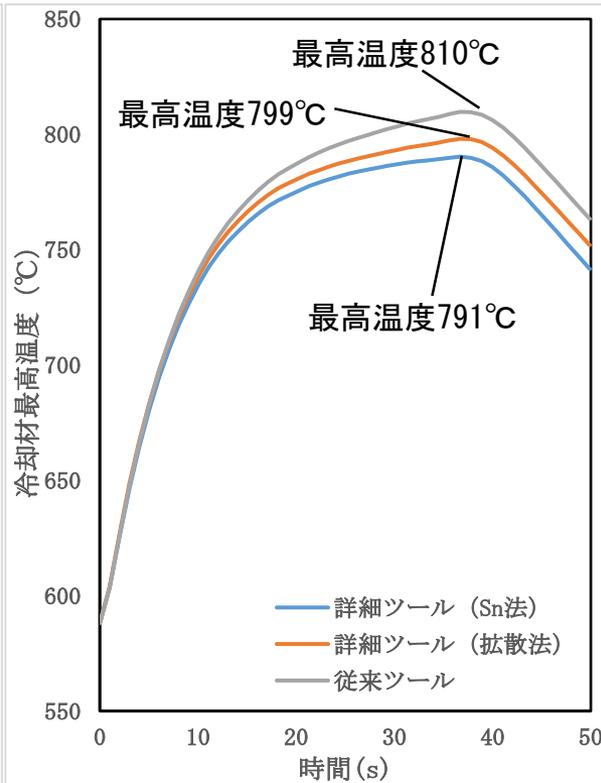
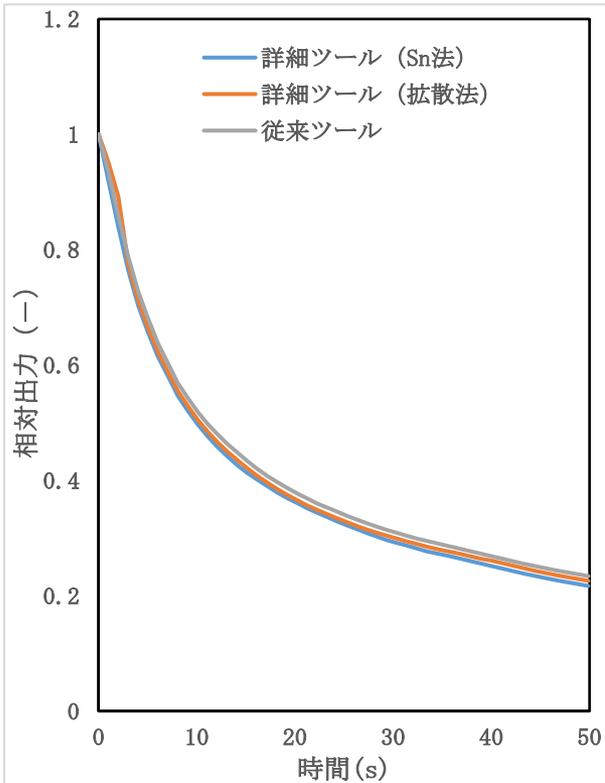
(注) 予測誤差 = (予測値/計算値 - 1) × 100

各ステップの炉心出力の予測誤差（計算値）と温度計算の予測誤差（間接）を出力する機能を追加。

3-3 日立GE担当分（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

試作した解析ツールによるULOF挙動解析

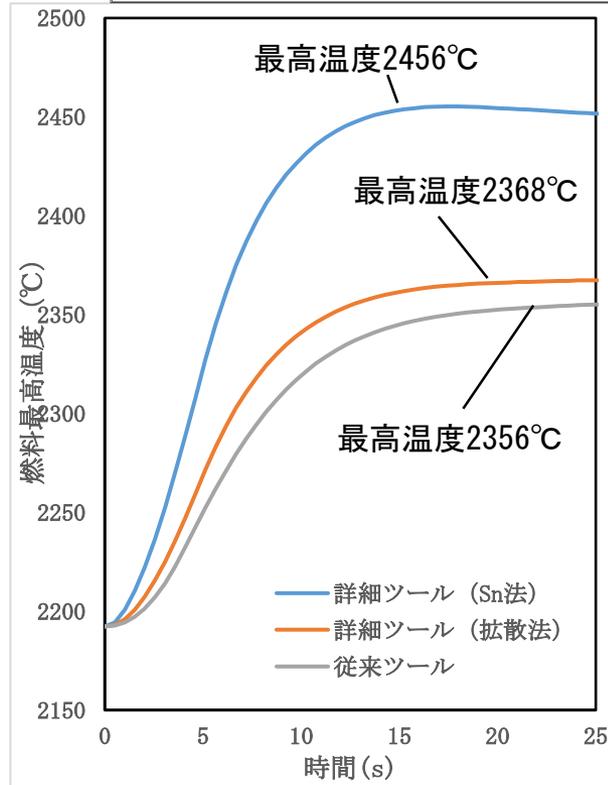
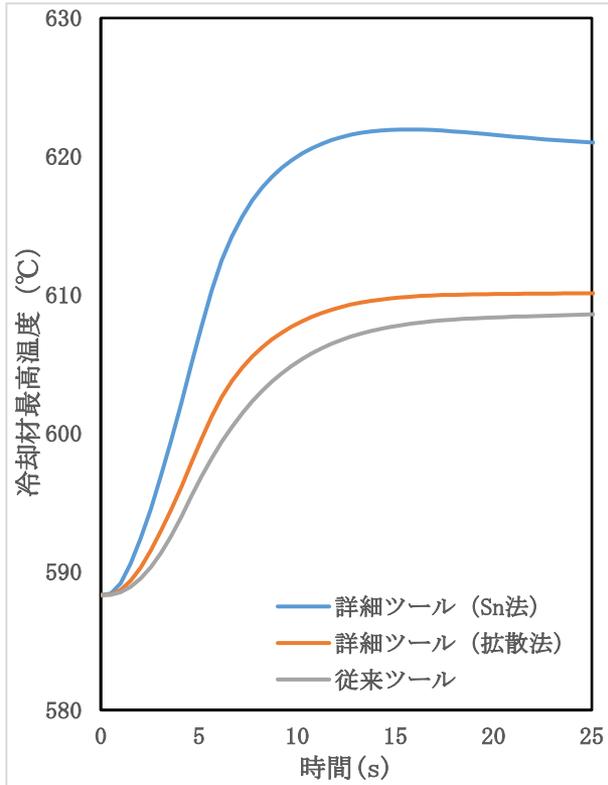
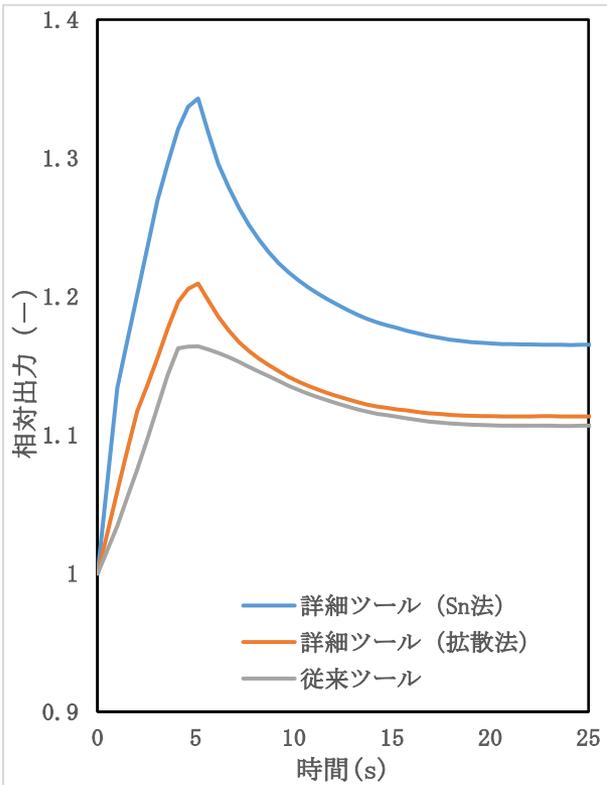
流量半減時間：6.5s
最低流量：定格流量の15%



流量減少に伴い負のGEM反応度が挿入されて炉心出力が低下。これにより、冷却材の沸騰は回避でき、燃料ピンの健全性は維持できる。

3-3 日立GE担当分（固有安全SFR炉心の概念設計・固有安全SFRのULOF、UTOPに対する安全性確認）

試作した解析ツールによるUTOP挙動解析



制御棒1本の誤引き抜き
予備解析の反応度：3¢/s × 4s

制御棒誤引き抜きに伴う炉心出力上昇で、燃料最高温度は約2460°Cまで上昇するが、燃料溶融温度(2750°C)までには余裕があり、燃料ピンの健全性は維持される。