

もんじゅ性能試験データを用いた 高速炉技術に関する先端的研究



独立行政法人 日本原子力研究開発機構：
研究代表者：宇佐美 晋

福井大学：

(竹田 敏一、小坂 進矢、Van Rooijen、
福井 卓雄、望月 弘保)

大阪大学：

(山口 彰、高田 孝、
真鍋 勇一郎、北田 孝典)

京都大学：

(宇根崎 博信、三島 嘉一郎)

研究の背景と目的

- 高速増殖炉サイクル技術の研究開発の場の中核としての「もんじゅ」(「原子力政策大綱」より)
- 商業ベースでのFBRサイクルの段階への移行における課題の明確化のための「もんじゅ」(「原子力立国計画」より)
- 将来の商業ベースのFBR導入における高い経済性と安全性の要求に応える最も確実な研究開発手段としての「もんじゅ」の利活用
- 日本原子力学会の「もんじゅ」研究利用特別専門委員会における「もんじゅ」性能試験の研究テーマの調査



平成21年度内(22年3月頃)には「もんじゅ」を再起動して性能試験を開始する目標であり、本研究により手法検証へ。



研究の目標

(1) 新しい全炉心非均質輸送計算手法の開発:

- ・ 近似を合理的に排除した**決定論的厳密炉物理特性解析手法**の開発

(2) 自然循環に関するガイドラインの整備:

- ・ 自然循環特性の**標準解析手法と標準データベース**の整備

(3) 「もんじゅ」性能試験データの収集整理:

- ➡ **革新的手法の適用性検証**

(1) 新しい全炉心非均質輸送計算手法の開発

○ 現状の炉物理特性予測解析:

- ・ 計算資源の制約から、空間座標や中性子エネルギーを離散化し、体系を均質化近似 → 近似に起因する解析誤差が付随
- ・ 連続エネルギーモンテカルロ法 → 統計誤差が付随



○ 連続エネルギーモンテカルロ法と同等の**厳密なモデル**でありながら**統計誤差の無い**「決定論的厳密炉物理特性解析手法」を開発

[実施項目]:

① 新たな**「全炉心非均質輸送計算手法」**の開発

- ・ **キャラクタリスティックス法** (MOC) と **輸送ノード法** の組合せ
- ・ 並列計算による高速化

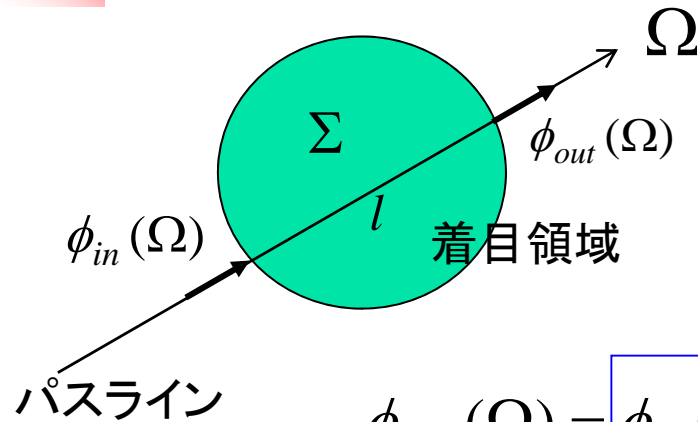


② 大規模モンテカルロ計算による**厳密解**との比較・検証

③ **「もんじゅ」性能試験の核特性測定データに基づく適用性検証**と、性能試験解析に基づく、マイナーアクチニド (MA) の蓄積効果評価

当該手法の高速炉体系への適用やMAの蓄積効果評価は世界初の試み

(1)新しい全炉心非均質輸送計算手法の開発



キャラクタリスティックス法とは？

中性子飛行方向のパスに対する積分型輸送方程式を解き、中性子束などを算出する方法。

$$\phi_{out}(\Omega) = \phi_{in}(\Omega) \exp(-\Sigma l) + \frac{Q}{\Sigma} (1 - \exp(-\Sigma l))$$

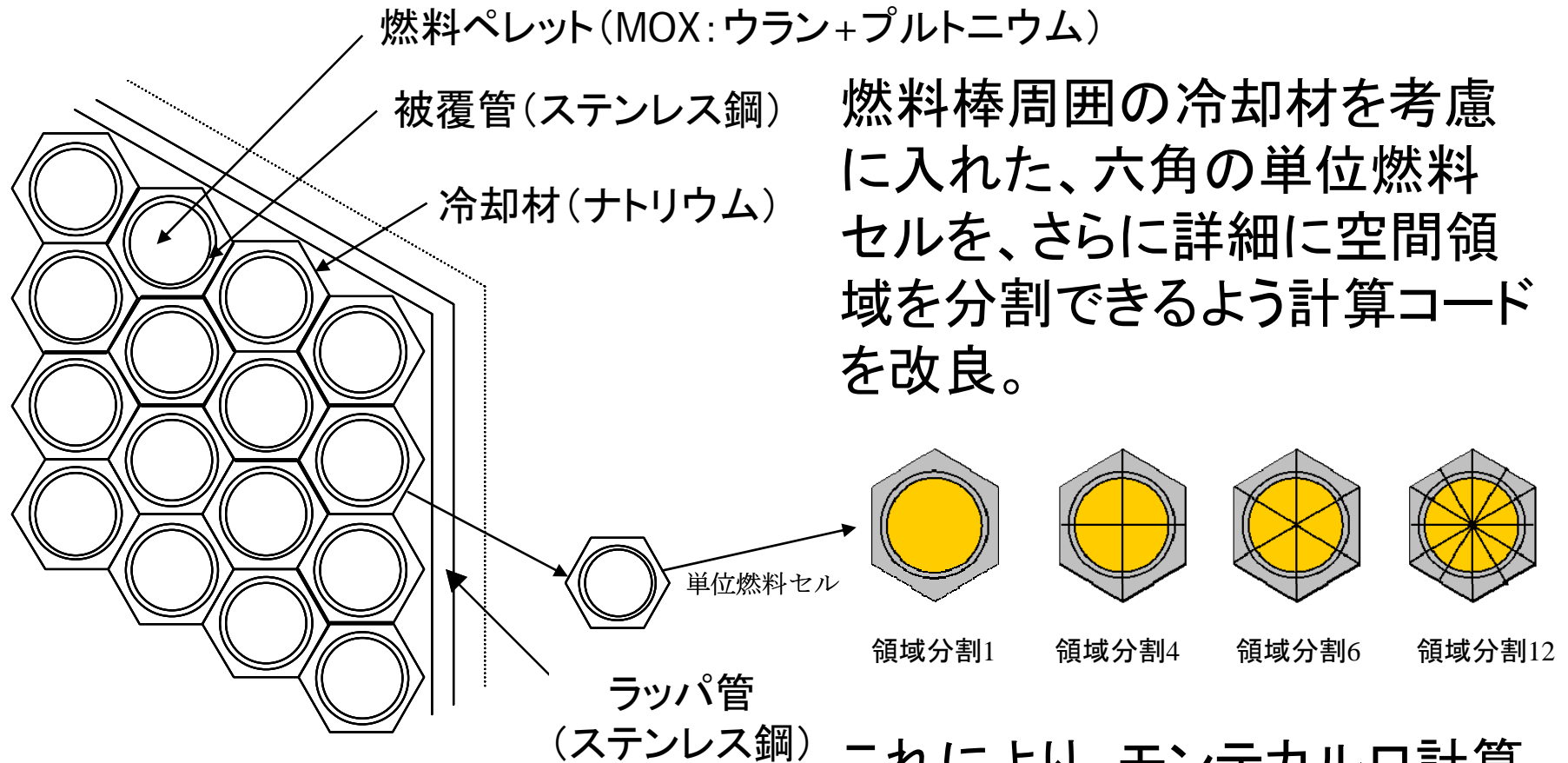
入射中性子束の減衰

領域内での発生中性子の寄与

体系内に中性子飛行方向に対応する、様々な角度のパスを引き、各角度で得られた結果を積分することで、各領域の物理量を算出

- ・ 空間分割された一つの領域内で中性子源Qなどは一定値として扱う。
- ⇒ 先ず、空間分割を詳細にすることによる影響を検討。
(2次元平面モデル)

2次元キャラクタースティックス法計算コードの改良



「もんじゅ」燃料集合体構造

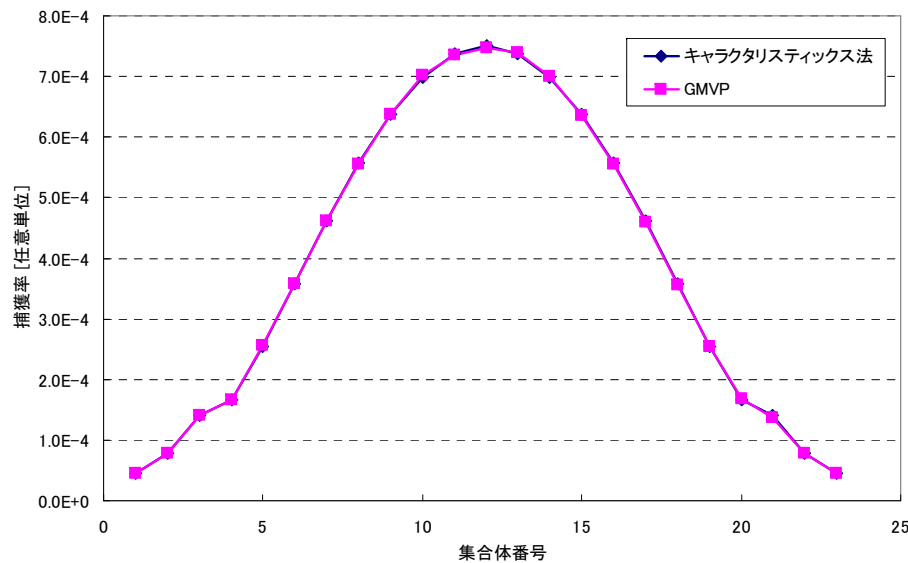
燃料棒周囲の冷却材を考慮に入れた、六角の単位燃料セルを、さらに詳細に空間領域を分割できるように計算コードを改良。

これにより、モンテカルロ計算結果(厳密参照解)との良好な一致を確認。

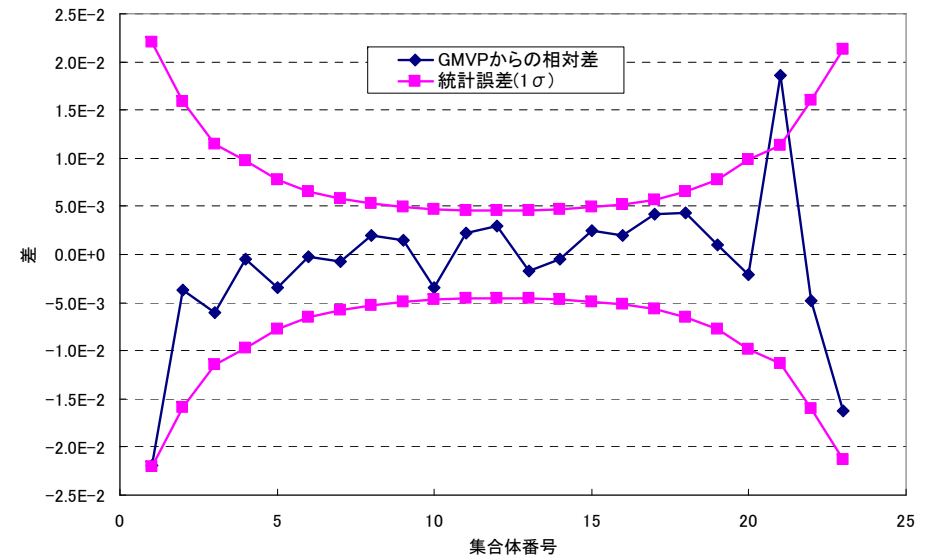
2次元実炉心規模体系への適用性検討

計算結果の妥当性検討:

GMVP (モンテカルロ法: 厳密解) 計算結果との比較



集合体平均捕獲率分布

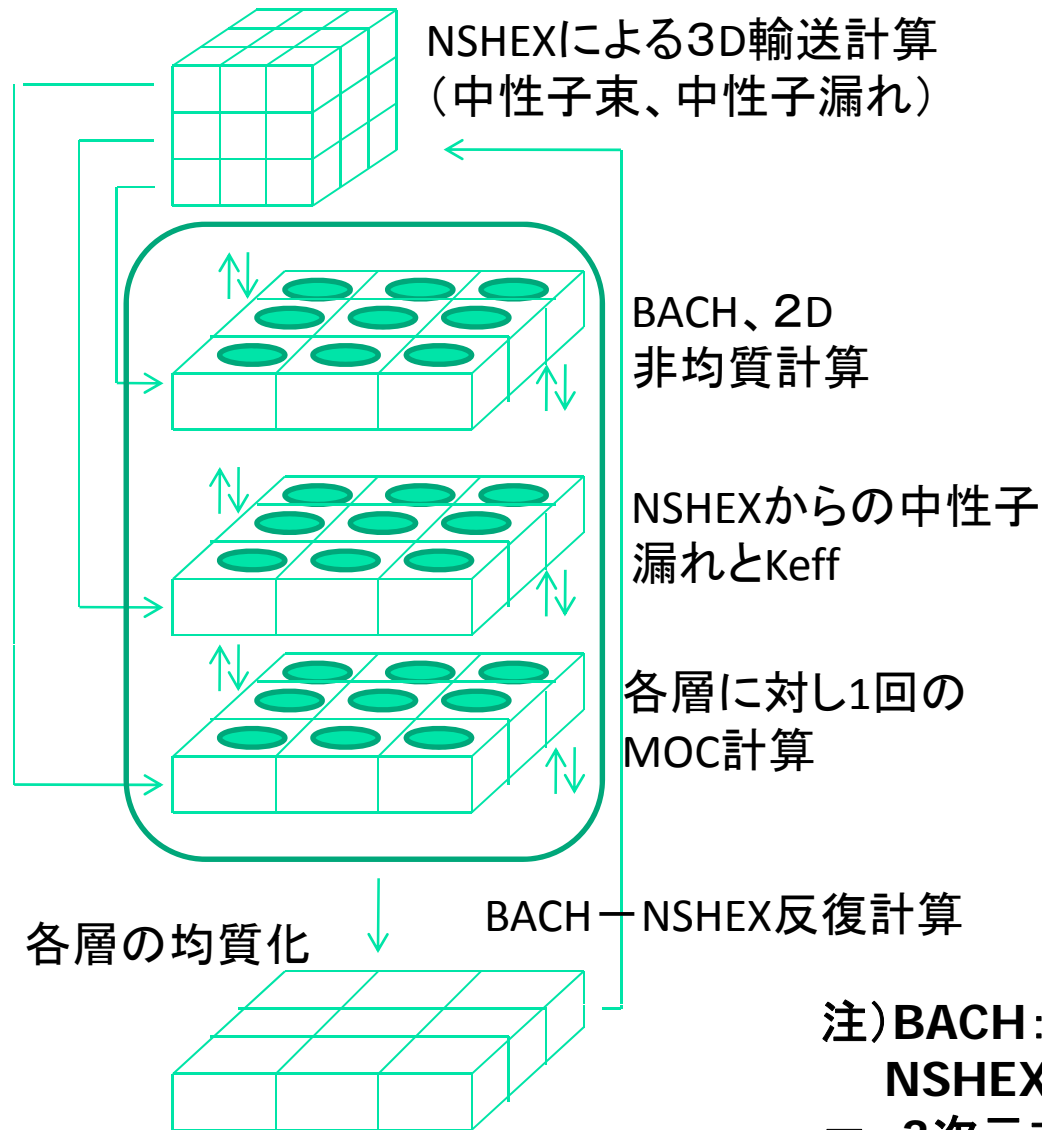


集合体平均捕獲率分布の相対差、統計誤差

GMVPの結果と非常に良く一致。

⇒ キャラクタースティックス法の2次元実炉心規模体系への適用性を確認。また、統計的変動の無い点で優位性を確認。

3次元全炉心非均質輸送計算のための BACH-NSHEX結合(システム化): 実施中



- NSHEX計算(均質断面積を使用)
- ↓
- NSHEXによる中性子漏れを計算し、BACHに入力
- ↓
- BACHでの中性子バランスを取るための補正因子
- ↓
- 軸方向の各層を対象とした2D BACH計算
- ↓
- BACHの結果による均質化断面積の作成
- ↓
- 全体の収束性を確認

注) BACH: 2次元非均質MOC計算コード +
NSHEX: 3次元均質ノード法輸送計算コード
= 3次元非均質輸送計算コード

(1) 新しい全炉心非均質輸送計算手法の開発

以下の検討を併行して実施中：

- **モンテカルロ法による「もんじゅ」性能試験の解析**
(キャラクタースティックス法との比較検討用の厳密参照解準備)
- **キャラクタースティックス法の並列計算化検討**
(キャラクタースティックス法計算時間の短縮)
- **共鳴非均質自己遮蔽効果の取扱検討**
(キャラクタースティックス法での共鳴吸収等の厳密な扱い)

(2) 自然循環に関する評価ガイドラインの整備

○ 世界標準炉としての実用次世代炉の開発

受動的安全性を採用した高速炉の技術的合理性の追求
安全設計、安全評価における品質保証



試験データの体系的蓄積

実験データ、実機データに基づく解析評価技術のV&V

高速炉の世界資産 「もんじゅ」の活用

【実施項目】:

- ① 自然循環評価技術の現状の調査分析
- ② 自然循環試験の事前予測解析 (試験条件、測定量・測定点の検討)
- ③ 自然循環特性の事象同定の検討 (重要事象の抽出と重要度ランキング)
- ④ 45%熱出力からの自然循環試験の検証解析と解析手法標準化
(「もんじゅ」性能試験でのプラント・トリップ試験データに基づく手法の検証)



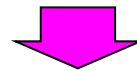
- ⑤ 自然循環ガイドライン試案の作成 (標準解析手法と解析条件の整備)
高速炉の受動的な安全評価用標準データベース構築

自然循環ガイドラインは高速炉の標準的安全評価手法となり得る基盤的研究

自然循環解析技術と評価の不確定性及び精度分析

■ 軽水炉分野での統計的安全評価手法の発展

CSAU (Code Scaling Applicability and Uncertainty)
PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table)
学会標準 (AESJ-SC-S001, 2008)



■ 高速炉分野への統計的安全評価手法の適用

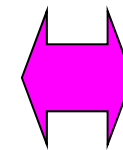
サンプル方法 : ラテン超方格法

非線形性の考慮 : Pearsonの相関比による重み付け
(機械学会2006)

■ 評価の不確定性を確率論的に定量化

■ 95%信頼水準/95%累積確率値の
サンプル方法による影響評価

(少ないサンプリング回数で高精度予測の可能性追求)



Full-scope解析
との比較

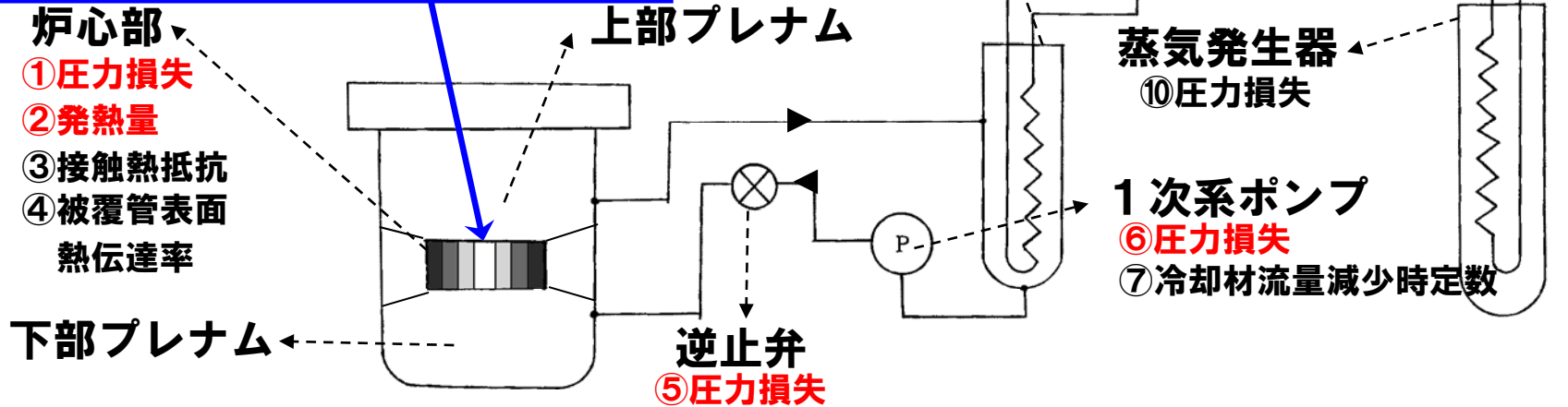
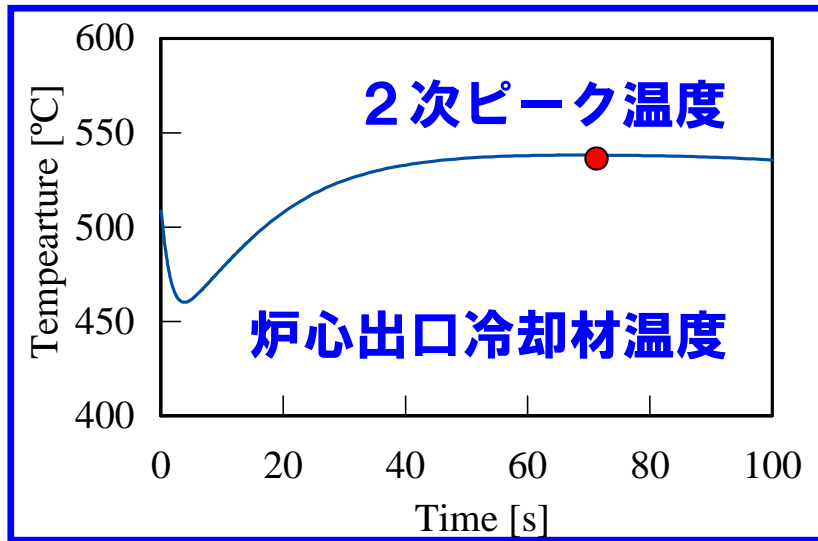
(10万ケースの計算)

自然循環解析評価の不確かさ評価

(影響の大きい上位5因子の絞込み)

■ ループ型高速炉における崩壊熱除去

(プラント・トリップ後の自然循環除熱)



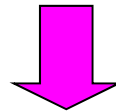
自然循環解析技術と評価の不確定性及び精度分析

■ 高速炉分野への統計的安全評価手法の適用

手法: ラテン超方格法 (MLHD)、Pearson 相関比

- プラント・トリップ後の自然循環による崩壊熱除去を対象に、手法の適用性を検討・確認。
- 解析計算の不確かさを確率統計理論に基づく信頼水準の下に定量化 (前記検討例における95%信頼水準での冷却材最高温度は約550°C以下)。

■ 併行して自然循環多次元特性につき炉上部プレナム部の詳細解析を実施中。

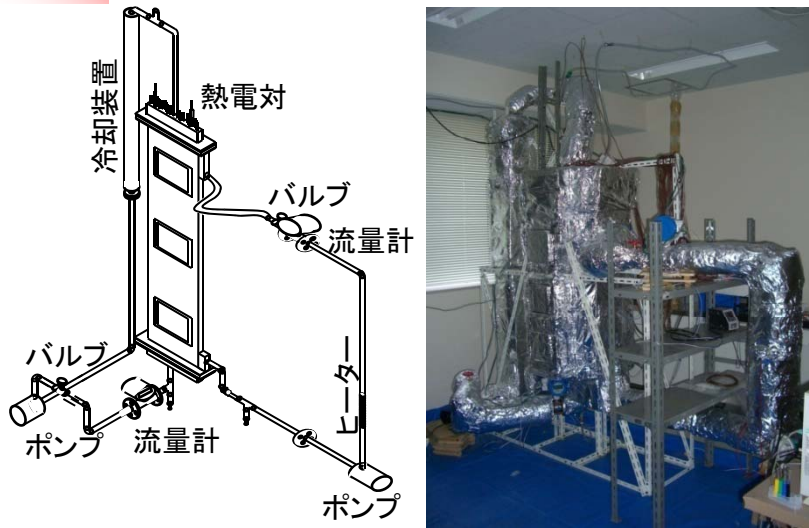


自然循環を必要十分な精度にて解析するための条件を明確化へ。

(2) 自然循環に関する評価ガイドラインの整備

- **自然循環現象の分析(重要事象の抽出)**
 - 自然循環除熱に関するシステム分析、及び各システム要素に影響を及ぼす現象を抽出。
 - 前記の重要パラメータ同定結果に基づき分析中。
- **重要度ランク表の構築**
 - 高速炉の自然循環において着目すべき判断基準は、燃料が溶融することなく被覆管が健全であること、一次冷却材バウンダリが健全であることを明確化。
 - これより重要度判断指標(FoM: Figure of Merit)としては、燃料中心温度、被覆管肉厚中心温度、ホットレグ温度を想定し検討中。
- **中間熱交換器(IHX)縮小実験装置による詳細実験**
 - ナトリウム実験で観測されたIHX内の見かけの熱伝達率低下現象を、縮小実験装置による水流動実験で解明中。
 - 自然循環時のIHX内温度分布には内部不均一性は観測されず、継続して原因を分析中。

IHX縮小実験装置による詳細実験結果(速報)

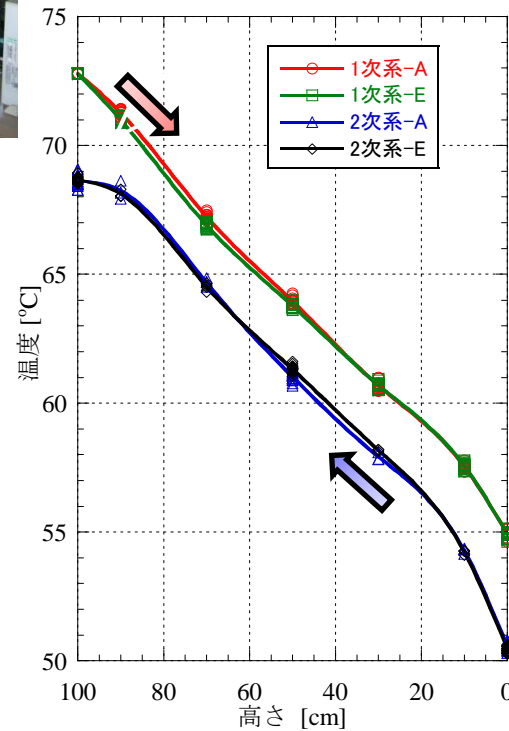


- 自然循環時のIHX内温度分布は、時間が経過しても分布形はほとんど変化せず、冷却に伴って温度が低下するだけ。
- 自然循環時にIHX内部の外側(A列)と内側(E列)に温度差が出るようなことはない。
- IHX内は**ほぼ均一な流れ**と**なっている**ことが予測される。

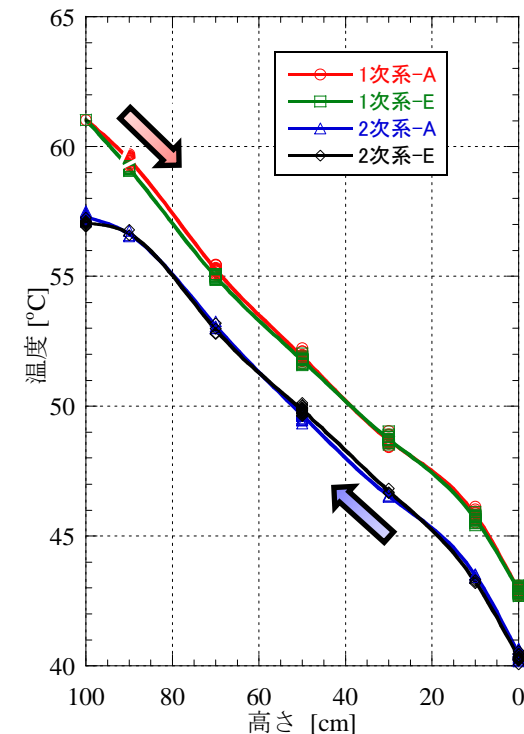
自然循環時の同一高さ温度分布

⇒ 1次系流れ方向
⇒ 2次系流れ方向

A: 1次系の入口側の列、E: 反対側



1500秒後



5500秒後



まとめ

- 「もんじゅ」の今日的な存在意義を再確認：
 - 「もんじゅ」は高速増殖炉サイクル技術の研究開発の場の中核。
 - 運転再開後の性能試験で得られる貴重な実機実測データは、最先端の革新的手法の検証にも有効利用できる。
- 外部有識者の期待を具体的な研究プロジェクトに：
 - 日本原子力学会「もんじゅ」研究利用特別専門委員会にて、候補となり得る研究テーマを議論し摘出。
 - 提案されたテーマ(の一部)を、関係大学が連携したひとつの研究プロジェクトとして具現化できた。
- 最先端の革新的手法開発に貢献：
 - 大学の先生方(専門家)の叡智を結集した最先端の研究を実施。
 - 原子力機構単独では経営資源的にも困難な革新的研究を、外部有識者の協力により進めることができた。