

# 最新の妥当性立証手法に基づく FBR 流動設計手法の検証方法の研究

(受託者) 三菱重工業株式会社

(研究代表者) 笠間貴寛 熱水力・炉構造技術課

(再委託先) 国立大学法人京都大学、国立大学法人大阪大学、財団法人電力中央研究所

(研究開発期間) 平成 21 年度～24 年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

本事業では、設計経験の蓄積が少ない FBR 流動設計手法の検証に要する費用や期間を低減するために、最新の妥当性立証手法に基づいて FBR 流動設計手法の検証方法を作成する。背景として、「もんじゅ」流動設計手法の検証では計算結果を検証するために多数の模擬流動実験を実機規模で実施していたが、現時点では下記の技術の進歩がある。

- ・「もんじゅ」流動設計手法検証実施時に比べ、近年、計算機の性能が格段に向上しており、基本的な情報がそろえば実機条件の流動現象が計算により予測可能となっている。
- ・高温高流速状態でのナトリウム流動挙動について、近年では国内外で知見が蓄積されており、その知見を使用すれば今後の模擬流動実験を実施する範囲等を限定できる。

これらの進歩を踏まえることにより、不足部分のみを対象にして模擬流動実験を行えば設計結果の妥当性を立証できる状態となっている。

そこで、模擬流動実験の実施内容の適正化、即ち実験実施費用を適正に低減することを目的に、最新の妥当性立証手法に基づいて設計手法の検証を最小限かつ適正に行う方法を研究する。

最新の妥当性立証手法の一つに CSAU 手法 (Code Scaling, Applicability and Uncertainty evaluation method<sup>1</sup>) があり、下記のように妥当性立証上の着目点が充実している。

- ・流動設計手法の検証に有効な「解析コードによる感度解析」等の実施項目が複数備わっており、かつ、検証実施に適用できる具体的な作業手順書の例が整備されている。
- ・設計手法に大きな影響を与える現象を客観的に特定する手段が備わっている。

本研究では最新の妥当性立証手法として CSAU 手法に基づいて FBR 流動設計手法の検証方法を研究する。

## 2. 研究開発成果

平成 21 年度においては、FBR 流動設計の特徴を把握するために、「もんじゅ」流動設計手法構築と検証のために実施された模擬流動実験に関する日本原子力研究開発機構 (以下「JAEA」という。) の公開報告書を参照して調査し、本研究で参照する既存の実験結果のデータベース (以下「既存実験結果のデータベース」という。) としてまとめた。平成 22 年度においては、最新の妥当性立証手法の実施内容を分析して FBR 流動設計手法を検証するための実施項目を抽出するとともに、最新の妥当性立証手法に適合した FBR 流動設計手法の検証方法の手順を作成した。平成 23 年度は平成 22 年度に作成した手順のうち、FBR 流動設計手法を検証するために必要となる模擬流動実験を具体的に計画する手順を検討するとともに、比較的単純な体系を対象にした模擬流動実験を計画して手順の妥当性を確認している。以下に平成 23 年度途中までの成果の内容をまとめる。

### (1) 既存実験結果のデータベースの作成

JAEA の公開報告書から、「もんじゅ」流動設計手法を検証するため実施された全 38 種類の模擬流動実験で使用された試験体の形状及び測定データ項目等をまとめ、既存実験結果

のデータベースを作成した。

(2) 最新の妥当性立証手法に適合した FBR 流動設計手法の検証方法の手順の作成

最新の妥当性立証手法の実施内容を分析し、FBR 流動設計手法を検証するために実施する必要がある項目を下記のとおり明らかにした。

- ・検証する FBR 流動設計手法に関して解析事象を選定した後、その解析事象に対する「重要度ランク表」(\*1)を作成し、当該の解析事象で着目している物理量に重要な流動現象を抽出する。さらに、抽出した流動現象に大きく影響する燃料要素等の寸法の因子を抽出する。
- ・抽出した流動現象に関係する運動量保存則等の基礎式を選定し、この基礎式から着目する流動現象の物理的特徴を表す無次元数を導出する。FBR 流動設計手法の検証において、従来は経験則に基づいて無次元数を選定していたが、最新の妥当性立証手法に基づけば解析事象に対して重要な流動現象の物理的特徴を表す無次元数を客観的に抽出することができる。
- ・既存実験結果のデータベースを参照し、流動現象を表す計算式の作成に用いられた模擬流動実験の実験条件等を確認し、その計算式の実機設計への適用性を評価する。

\*1 設計評価項目と、流動上の各基本単位で発生する現象を表形式で組み合わせ、評価結果への影響の大きさ等の観点でランク付けすることで、発生現象の重要度を考慮して実験での確認が必要な流動現象を抽出できる表作成の手法および表の作成結果。PIRT (Phenomena Identification Ranking Table) と称される。

また、これら抽出した項目を踏まえて最新の妥当性立証手法に適合した FBR 流動設計手法の検証方法の手順を平成 22 年度に作成した。作成した手順の流れ図を図-1 に示す。なお、図中の模擬流動実験を計画する手順は平成 23 年度に作成する。

(3) 最新の妥当性立証手法に適合した「もんじゅ」流動設計手法の検証方法の作成

(2)で作成した図-1 の手順を適用し、最新の妥当性立証手法に基づいて「もんじゅ」流動設計手法を検証する。燃料要素被覆管温度の解析に対し、最新の妥当性立証手法に基づいて検証した事例を表-1 に示す。検討した結果、現在の燃料要素設計に対して新たな模擬流動実験を実施する必要がないことを確認した。ただし、将来、「もんじゅ」に装荷する燃料集合体の仕様を変更し、既存実験結果のデータベースの範囲外となる場合、その仕様に対する新たな模擬流動実験を実施する必要があることを明確にした。

(4) 最新の妥当性立証手法に適合した実験計画手順の検討

平成 23 年度では最新の妥当性立証手法に基づき、模擬流動実験を計画する手順及び実験結果を分析する手順を作成している。作成中の実験計画の手順を図-1 の右下側囲み部に示す。検討内容を以下に示す。

A 模擬流動実験の実験装置と実験条件の設計

- ・1次系ループ等の巨視的な流動挙動を対象とする場合及び局所的な流動挙動を対象とする場合のそれぞれについて物理法則を表す保存則等の基礎式を使用して、着目する流動現象の物理的特徴を表す無次元数を抽出する。
- ・実験装置の概略の形状を決定した後、実験装置のスケール比を仮定して着目する流動現象の物理的特徴を表す無次元数の範囲を確認し、その範囲が実機条件の無次元

数をすべて模擬するスケール比を実験装置のスケール比とする。

- ・選定したスケール比の実験装置における計測誤差等を実機条件での誤差に換算する。  
この実機条件に換算した誤差が実機条件の温度等の物理量の評価の誤差に比べて妥当な値かを判断して実験装置のスケール比の妥当性を確認する。

#### B 実験結果と誤差の分析

- ・実験結果を分析し、着目する流動現象の物理的特徴を表すA項で抽出した無次元数を主要な変数として当該の流動現象を表す計算式を作成する。
- ・実験結果から作成した流動現象を表す計算式の誤差について、下記に例示する各項目に起因する誤差を検討する。

模擬流動実験の計測誤差、

実験結果と流動現象を表す計算式から計算した結果との間に生じている誤差、

実機の微少な段差等の形状を実験装置が精密に模擬していないことにより生ずる誤差

- ・実験結果から作成した流動現象を表す計算式の誤差は、これらの項目の誤差を合成したものとする。

### 3. 今後の展望

平成 24 年度では、4 年間の最終年度として下記の作業を実施する。

- ・平成 23 年度に作成する模擬流動実験を計画する手順を使用して、比較的複雑な体系である流動現象に対する模擬流動実験を計画する。
- ・比較的複雑な体系に対する模擬流動実験の計画を通じて判明する項目等を追加し、平成 23 年度に作成した実験計画手順を完成させる。

以上により、最新の妥当性立証手法に基づいた FBR 流動設計手法の検証方法を構築する。

### 4. 参考文献

- 1 N. Zuber, et al., “An integrated structure and scaling methodology for severe accident technical issue resolution: Development of methodology,” Nuclear Engineering and Design 186(1998)1-21.

表-1 新たに実施する必要がある模擬流動実験を抽出する手順とその事例

手順番号	作業項目名	検討内容	検討結果の例
①	解析事象の選定	「もんじゅ」流動設計手法を分析し、検証する解析事象を選定する。	燃料要素被覆管温度の解析を選定した。
②	解析事象に対して重要な流動現象の抽出	解析事象で着目している物理量に重要な流動現象を抽出する。さらに、機器の寸法等、抽出した流動現象に大きく影響する因子を抽出する。	燃料要素被覆管温度の解析に関する流動現象を分析し、燃料集合体の圧力損失等が重要な流動現象であることを抽出した。さらに、圧力損失の流動現象に大きく影響する因子として、燃料要素被覆管外径の寸法等を抽出した。
③	流動現象を表す計算式の作成情報の確認	既存実験結果のデータベースを参照して、流動現象を表す計算式の適用範囲等を確認する。	燃料集合体圧力損失を評価するための計算式は、「もんじゅ」の燃料要素被覆管外径までの範囲に対して行われた実験結果に基づいて検証されていること等を確認した。
④	流動現象を表す計算式の適用性の評価	②で抽出された流動現象について、③の確認結果と照らし合わせ、流動現象を表す計算式の適用範囲が実機条件の計算に対して問題ないか確認する。	流動現象を表す計算式は現行の燃料要素被覆管外径を適用範囲としており、「もんじゅ」の実機条件に対して問題ないこと等を確認した。
⑤	実験要否	流動現象を表す計算式の検証のために新たな模擬流動実験を実施する必要があるか判断する。	必要ないと判断された。なお、将来、燃料要素被覆管の外径を拡大する設計変更が行われる場合はその形状での圧力損失を確認する必要がある。

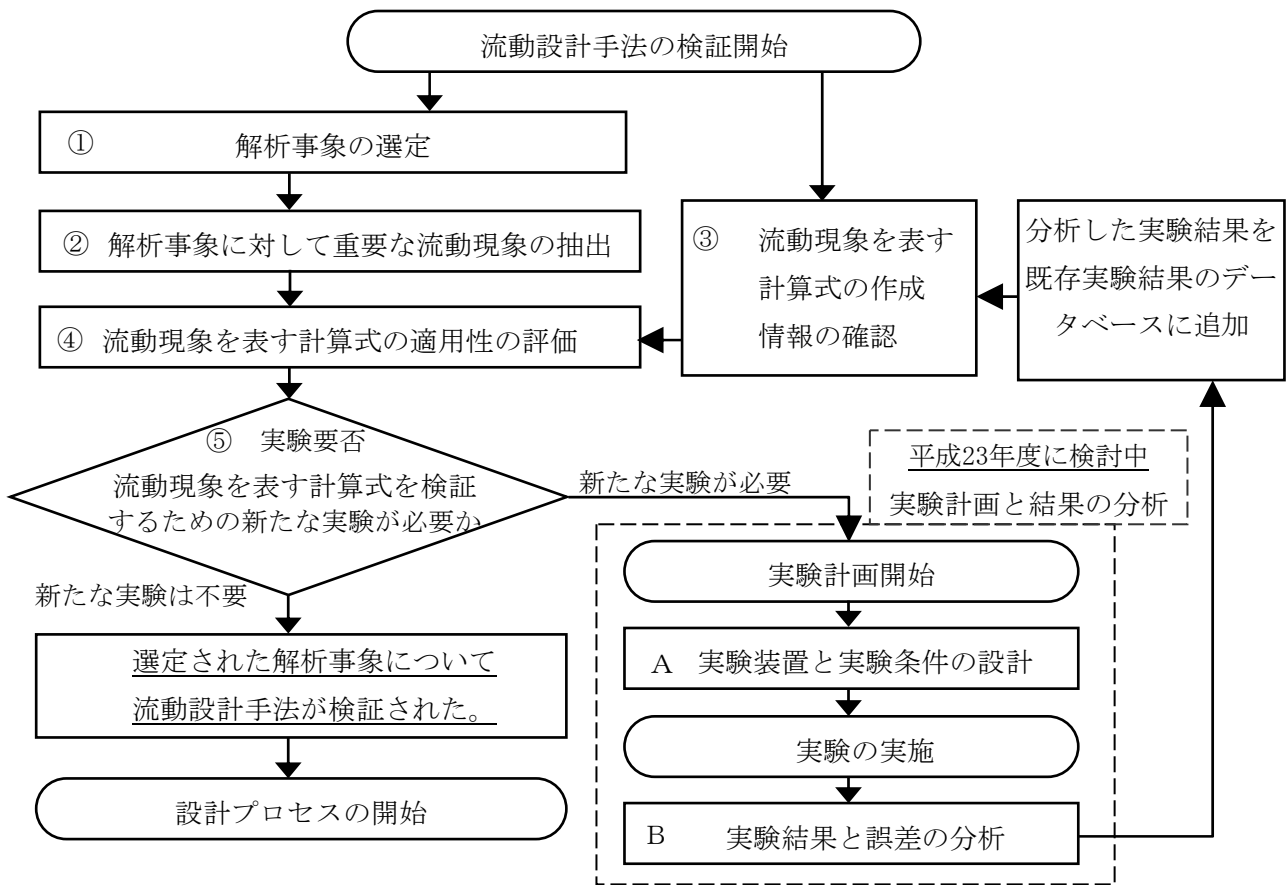


図-1 最新の妥当性立証手法に基づくFBR流動設計手法の検証方法の手順