

シミュレーションとスケール試験の役割分担の考え方と具体例

基本的考え方

これまでの評価では、炉心出口流速などグロスな量をパラメータとして対象となる現象を評価する形式でモックアップ試験を行ってきたと考えられる。モデルスケールについては、複数の試験を重ねてその依存性の大きさを考慮している。

JSFR の評価では、対象に応じてであるが、試験の合理化あるいは説明性の向上を目的としてシミュレーションによる評価の導入を図っている。その基本的な考え方を示す。

- シミュレーションでは、現象のメカニズムを解析手法の中にモデル化することで、現象の入口と出口だけでなくその道筋を含めて評価できるようにする。これにより説明性の向上と実機評価を可能にする。
- これには現象の解明と手法の検証が不可欠である。すなわち、1) 基礎的な試験による現象のモデル化と個々のモデルの検証、2) 複合現象を含む実機での現象に沿った総合的な検証である。
- スケール試験は、以下の役割をもつ。
 - シミュレーション手法の開発と検証に必要な情報の提供
 - ◇ 基礎的な試験による現象の解明と検証データの取得。
 - 設計妥当性の実証とシミュレーション手法の総合的な検証
 - ◇ 複合現象やスケールの影響を含めて実証試験による現象の確認と総合検証データの取得
- 検証した評価手法により実証試験の結果を説明性の観点で補強し実機評価を行う。
- このようなアプローチを取ることにより、説明性の向上を図るとともに、設計の変更や実用炉へのステップアップに際してもモックアップ試験などを大きく合理化できると考える。

原子炉容器内ガス巻込み評価においてシミュレーションの果たす役割

1. 背景

ナトリウム自由液面でカバーガスを巻込む「ガス巻込み現象」は、炉心反応度擾乱を引き起こす可能性があることから、その抑制が不可欠である。JSFR では、炉容器コンパクト化の結果、流速が高く、ガス巻込みが発生しやすくなることから、設計対応を行っている。

2. 従来の評価手法とその課題

スケールの異なる水流動試験を複数行い、スケール則として流速一致条件で試験を行うことの妥当性を示した上で、プレナム部への入口流速など「代表量」でガス巻き発生の有無を整理している。また、水と Na の物性値の違いの影響について、比較試験により水で実験しておけば保守側になることを確認し、水試験で得た知見で評価可能とした。

この評価法は、特定の設計に対する保守性担保という観点ではよいが、「代表量」と渦現象の因果関係が必ずしも明確でないことから、設計が変わると適用できる保証がない。

3. シミュレーションによる評価

ガス巻込みは、自由液面に現れる渦の旋回強さ（循環）や渦領域の下降流速勾配などの「局所量」と物性（粘性、表面張力）によって決まることから、「局所量」をダイレクトに評価することで、発生予測の精度向上はもとより、形状や境界条件の影響を取り込んだ発生評価手法ができる可能性がある。そこで JSFR の評価では、数値解析技術と計算機能力の飛躍的向上を背景に、「局所量」に着目した発生判定評価手法（補足①参照）を構築し、以下のような手順で実機評価を行っている。

- 1) 小回りの効く小スケールモデル試験とシミュレーションにより（他の現象の影響も考慮しつつ）ガス巻込みを抑制できる炉上部プレナムを設計（流動適正化）。
 - 2) 実機と同等の局所量を再現できる大スケールモデル試験で、最適化された設計条件でのガス巻込み抑制効果を確認（確認）するとともに検証データを取得。
 - 3) シミュレーションにより実機条件（物性値の違いを含む）でのガス巻込み抑制確認。2)の実験的検証とあわせて説明性向上。
- （1）、3)でのガス巻込み発生の有無を JAEA で構築した発生判定評価手法によって行う。）

4. 試験と解析の役割

この評価の流れの中で、モデル試験はその意味合いが従来と大きく異なる。これまでは代表量とガス巻込みの相関を見つけるためのものだったが、ここでは、詳細計測による現象解明やシミュレーション手法開発のためのデータ取得（モデル化情報、検証データ）、発生判定クライテリアの確認、そしてシミュレーションを活用した評価結果の実証という役割となる。

ここで、シミュレーションの予測精度の確保が大きなポイントであり、検証と妥当性確認(V&V)は必須である。本手法でも各種数値実験を実施し、精度確保のために解析条件目安を設定している。シミュレーションは設計過程の合理化や設計自体の最適化に強力なツールとなるが、実機評価が外挿となる場合は、明確な外挿ロジックを提示するか、実証試験の必要がある。本評価では 1/3 スケール実証炉体系試験がこの役割を担う。手法の妥当性確認後は、実用炉に向けて実証試験を繰り返す必要はなくなる。

<補足>

- ①ガス巻き込み発生判定評価手法(P 5 の左図) : 1)自由液面モデルなし+比較的粗めの解析体系で流動数値シミュレーションを実施 (パラメータ解析 (解析数が多い) に対応するため計算負荷を軽減)、2)解析結果から自由液面近傍での渦を抽出し、渦に関する「局所量」(評価パラメータ) を計算、3)ガス巻き込み発生条件と評価パラメータを比較し、ガス巻き込み発生を判定、という評価手順となる。

- ②高精度解析手法 (P 5 の右図) : ガス巻き込み発生判定評価手法とは別に、ガス巻き込み現象そのものを再現できる高精度気液二相流解析手法の開発も実施。詳細計測実験の限界を超えてのガス巻き込みメカニズム解明、発生判定手法に使用しているモデル化根拠の提示、さらにはガス巻き込みをある程度許す設計オプションに対してもガス巻き込み量の定量評価に寄与することが本手法開発の目的。

炉容器コンパクト化:カバースガス巻込みの防止

ガス巻込み現象:原子炉容器内自由液面の揺動や渦によって1次冷却材中に気泡が巻込まれる現象
 反応度擾乱・IHX伝熱劣化を引き起こす可能性があるためガス巻込みの抑制が重要

従来のガス巻込み発生防止評価

- 原電実証炉設計研究(1986-1997)
 1/10, 1/6, 1/3, 1/1.6スケールモデル水流動試験 (IHX)
 => スケール則の導出
 (代表量(入口流速)による発生条件整理)
 +
 物性値影響確認試験(水試験の保守性確認)

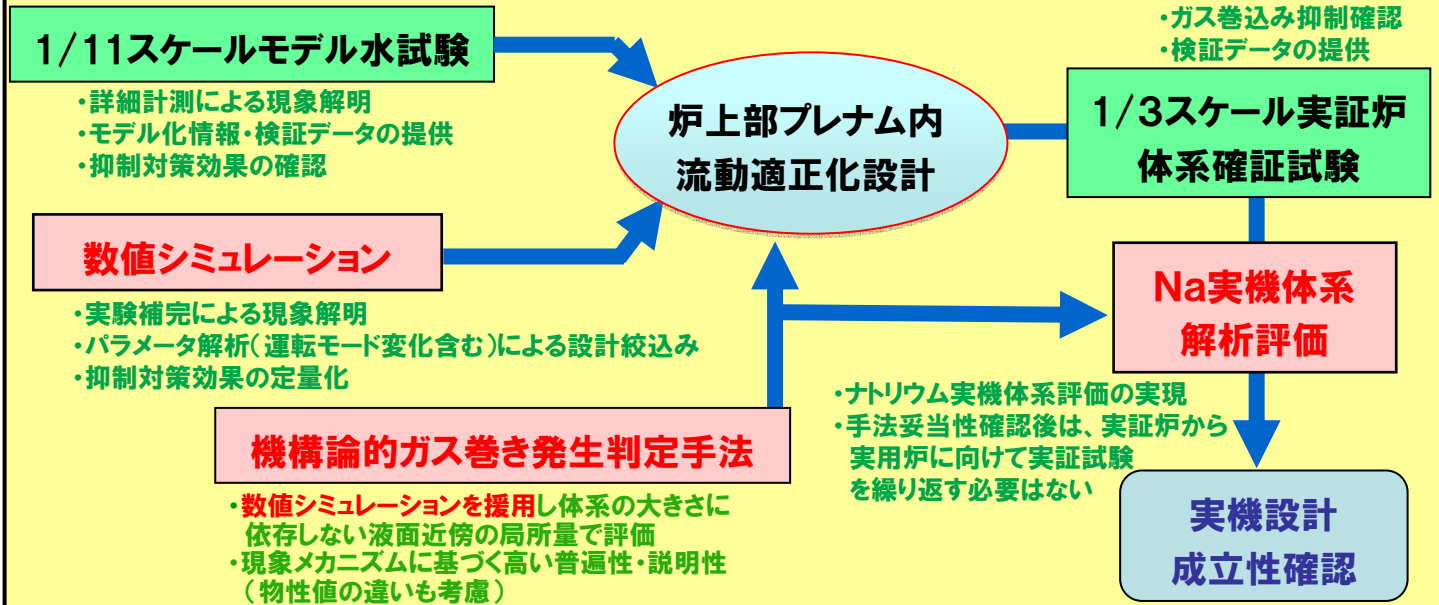
実機予測
 (保守性の確保)

- 局所条件に影響される渦挙動を代表量で包絡
 → 過度な保守性
 - 汎用性に乏しい
 → 設計変更に対する柔軟性や設計最適化への適用は困難
- JSFRのニーズ充足不可

JSFRにおけるガス巻込み発生防止評価

目標:他の熱流動現象とのトレードオフ関係までも考慮した設計最適化・合理的な保守性の担保を可能とする評価手法 → 炉容器コンパクト化の実現

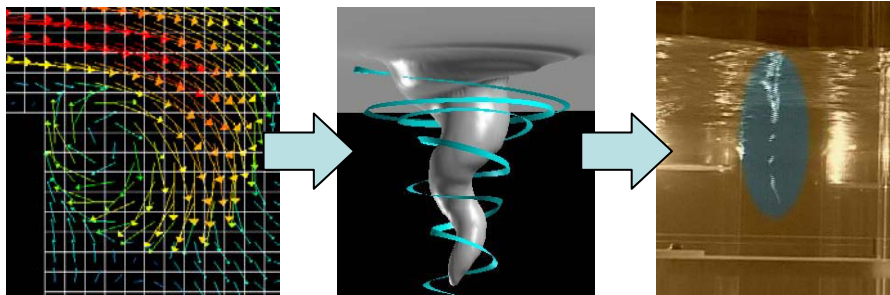
- 数値解析手法発展(複雑流れの再現性向上)
- 計算機処理能力向上(大規模解析の実現)
- 実験計測技術進歩(現象解明・高精度検証用データ整備)



数値シミュレーションの活用

数値解析を援用したガス巻き込み発生評価手法

JAEA+外部専門家による指針案

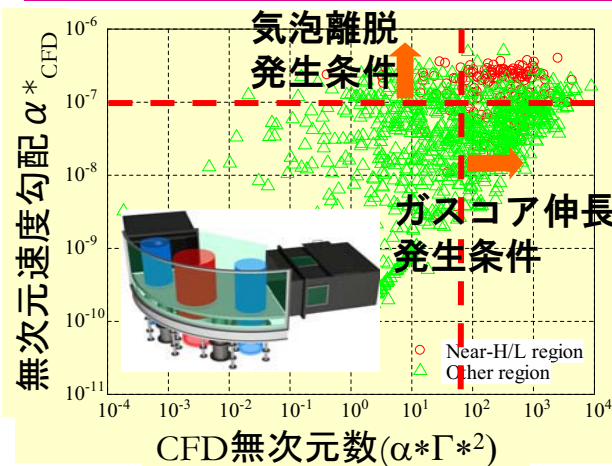


比較的粗い格子を用いた数値解析による局所渦流れの抽出

渦モデルによるガス巻き込み評価パラメーター(循環等)の計算

発生形態毎のガス巻き込み発生評価(ガスコア伸長、気泡離脱)

CFD無次元数マップによるガス巻き込み発生判定



緑:解析で捉えた渦
赤:ガス巻き観測

⇒試験におけるガス巻き込み発生挙動(発生位置・発生条件)を再現

高精度気液二相流数値解析手法

気液界面複雑変形挙動の再現

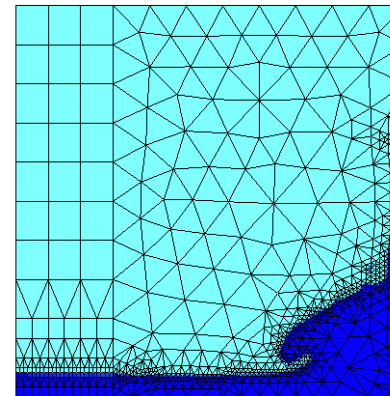
⇒ 高精度界面追跡法による厳密な界面物理モデル

渦流れの再現に必要な体系形状模擬

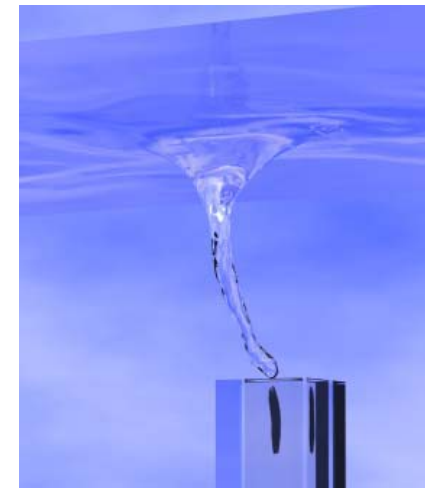
⇒ 非構造(解適合)格子による高精度解析

ガス巻き込み現象の直接再現

⇒ 基礎実験の検証解析

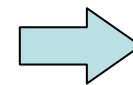


非構造解適合格子による液面の解像



基礎実験の解析結果

ガス巻き込み現象のダイレクトシミュレーション (実機スケール適用も可能)



- ・ ガス巻き込み現象のメカニズム解明支援
- ・ 発生評価手法のモデル化支援
- ・ ガス巻き込み量のモデル化

Na-水反応現象評価においてシミュレーションの果たす役割

1. 背景

Na 冷却炉の特有の課題として、蒸気発生器 (SG) 内の伝熱管破損時に発生する Na-水反応現象がある。SG の設計においては、小規模漏えいの段階で早期に検知し進展を防止するとともに、仮に規模が拡大しても事故影響が局限化できることが求められる。実証炉・実用炉の場合は、安全の観点だけでなく財産保護、稼働率向上の観点からもその評価が重要である。

2. 従来の評価方法とその課題

原型炉の SG 設計では、当時の技術では現象の詳細な解明が困難であったことから、過度に保守的な想定条件に対して、実証的な実規模 (モックアップ) 試験を積み上げるとともに、原型炉体系に特化した相関式ベースの簡易解析手法を用いて安全審査に対応した。

この評価アプローチは、設計が固まったものに対する実証という意味では精度が高いといえるが、現象メカニズムが必ずしも明確でないことから、設計変更や運転条件変更に対して汎用性に乏しく、変更のたびに高価な実証ベースの試験を繰り返す必要がある。(実証炉・実用炉では伝熱管タイプが変わるだけでなく、原型炉に比べての運転温度・圧力ともに高くなる)

3. シミュレーションの活用

JSFR の評価では、数値解析技術と計算機処理能力の向上、実験技術の進歩を背景に、現象メカニズムの解明とそのモデル化により、実験代替を可能とする汎用性の高い機構論に基づく複雑現象 (多次元+マルチフィジックス) シミュレーションシステム(補足①参照)を構築、評価に適用する。また、安全審査には単純明快な説明が求められること、大量のパラメータ解析が必要となることから、マルチフィジックス解析システムをデフォルトすることで簡易評価手法も整備する (従来アプローチでの簡易評価法は、もんじゅに特化した相関式モデルベースであるのに対して、JSFR のそれはマルチフィジックス解析システムとの組み合わせで汎用性を持つ簡易評価法となる)。さらに従来アプローチでは評価上考慮しなかったセルフウェステージ現象についてもシミュレーション手法を整備し、破損時の合理的な漏えい量設定に資する。

4. シミュレーションと試験の役割

このシミュレーションシステムの活用で、大規模且つ高価な試験が大幅に削減できる。但し、数値シミュレーションの予測精度を担保するために、検証と妥当性確認(V&V)はやはり必須であり、そのための試験は必要である。分離効果試験(補足②参照)で各種モデルの妥当性を確認するとともに、実機条件を模擬した試験 (実機そのものを丸々模擬するわけではなく、メカニズム的に同等となる条件を再現できるもの) を総合検証試験として、また実証試験として最低限実施する必要がある。従来の評価アプローチに比べて大型試験のケース数は大幅に削減できる。さらに、設計変更等に対して柔軟な対応が可能であるとともに、従来の手法では困難であった影響領域の極限化など設計の最適化も可能となる。

<補足>

①マルチフィジックス解析評価システム：隣接伝熱管の破損要因は、 Na と水が反応して形成される反応ジェットによる損耗（ウェステージ）と、高温による伝熱管材料強度低下と内圧が引き起こす破裂（高温ラプチャ）の2つである。このため破損伝播可能性の評価には、反応ジェット領域と伝熱管温度を精度良く再現することが不可欠となる。そこで a)反応ジェット領域、b)伝熱管領域、c)伝熱管内水・蒸気領域の3領域に対して、それぞれ可能な限り機構論に基づく解析手法を整備、これらを組み合わせた解析システムを構築する。これにより、運転条件や伝熱管管径や配列ピッチなど SG 内構造の変更に対しても十分対応できる汎用性を有し、且つ高精度な予測を可能とする評価手法を確立、コストの大きな実験や実施困難な実験を代替できる数値実験ツールを実現する。

②マルチフィジックス解析評価システム構築に必要な試験例：現象解明やモデル化、モデル検証のための分離効果実験と、システムの総合検証に必要なデータ取得と設計成立実証を兼ねた試験を実施し、過去の試験データと併せて知見データベースを構築。