

炉内熱流動解析モデリング &
シミュレーションの現状と課題

三澤 丈治

日本原子力研究開発機構
機構論的熱設計手法開発グループ

炉内熱流動解析モデリング&シミュレーションの現状と課題

三澤丈治 吉田啓之 高瀬和之

日本原子力研究開発機構・熱流動研究グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

[\[misawa.takeharu,yoshida.hiroyuki,takase.kazuyuki\]@jaea.go.jp](mailto:misawa.takeharu,yoshida.hiroyuki,takase.kazuyuki@jaea.go.jp)

沸騰水型原子炉(BWR)が地震にさらされた場合、地震動により燃料集合体内等の沸騰二相流が 3 次元的に変動する事が考えられる。このような変動は、燃料棒被覆管表面温度の局所的な変化につながるため、燃料健全性に対する地震動の影響を評価する手法の開発が必要と考えられる。このような評価手法を開発するためには、構造体の振動等が 3 次元沸騰二相流挙動に与える影響を評価できる解析手法が必要である。

日本原子力研究開発機構 (JAEA) では、燃料集合体内沸騰二相流挙動を評価するため、3 次元二流体モデル解析コード ACE-3D を開発している。これまでに、定常時の BWR 燃料集合体内沸騰二相流に対して検証が行われており、本研究では、ACE-3D を拡張して地震時の燃料集合体内沸騰二相流評価手法を開発する事にした。

燃料集合体に対する地震の影響としては、構造物の振動による影響に加え、地震加速度に対するシステム全体の応答による流量や圧力などの流動条件の時間的な変動が考えられる。地震時に観測される地震加速度と構造物の振動は異なるため、観測された地震加速度を入力とする事は適切ではない。そこで、この影響を考慮するためには、原子炉機器構造解析から得られる構造物の振動データを入力条件として計算を行う事を可能とする必要がある。また、システム全体の応答を反映するため、核熱連成解析の結果を入力条件とする必要もある。本評価手法においては、これらを各解析コード間のデータ連携解析機能により実現する。

データ連携解析機能により与えられる入力条件を ACE-3D に適切に反映させるため、昨年度までに、地震加速度を運動方程式の外力項に付加する事で構造物の振動が与える影響を解析する機能、及び時間的に変化する流動条件などを考慮できる非定常境界条件付加機能を追加した。さらに現行 BWR の炉心燃料集合体を模擬した体系で地震加速度を付加した沸騰二相流解析を行い、3 次元的な沸騰二相流の変動を解析できる事を確認した。

本年度は、短周期及び長周期の振動に対する沸騰二相流の応答性を明らかにするため、地震加速度周期をパラメータとした沸騰二相流解析を実施した。その結果、0.01s 以下の短周期の振動加速度に対しては沸騰二相流は応答しないことが分かった。これにより、原子炉機器構造解析より得られる地震加速度データの出力間隔(0.01s)が適切であることが確認された。また、1s 以上の長周期の振動加速度に対しては、沸騰二相流挙動が完全に応答することが分かった。これにより、長周期の振動を含む長時間の地震に対する評価を行う場合でも、1 秒程度の計算時間で十分な解析が可能であることが明らかとなった。

また、原子炉機器構造解析より得られる地震加速度データを実地震観測より得られた地震加速度データで模擬し、同データを基にした核熱連成解析の結果を入力条件として、データ連携解析機能を用いた沸騰二相流解析を実施し評価手法を総合的に評価した。解析では、現行 BWR を対象とした、地震発生時に原子炉緊急停止 (スクラム) 信号による制御棒の炉内緊急挿入が作動しないシナリオを想定した核熱連成解析とのデータ連携解析を行った。なお本解析では、上述の評価結果から、計算時間を 2 秒と設定した。また原子炉機器構造解析より得られる地震加速度データを、Imperial Valley 地震の El Centro 波で模擬した。その結果、非定常境界条件の影響により、地震加速度のみを付加した場合と異なるボイド率分布が得られた。また、ボイド率の時間変化を調べた結果、地震加速度と非定常境界条件を同時に与えることで、非定常境界条件のみを与えた場合と比較して、相対的に二相流挙動の変化が大きくなることが分かった。これらの結果より、地震加速度に加えて、非定常境界条件の影響を反映したボイド率を含む 3 次元二相流挙動の変動を解析できる事を確認した。今回実施した解析に、原子炉機器構造解析とのデータ連携を追加する事で、地震時における炉内構造物の振動や核熱相互作用の影響を考慮した燃料集合体内沸騰二相流挙動の予測が可能となる。


炉内熱流動解析モデリング& シミュレーションの現状と課題

三澤丈治

日本原子力研究開発機構

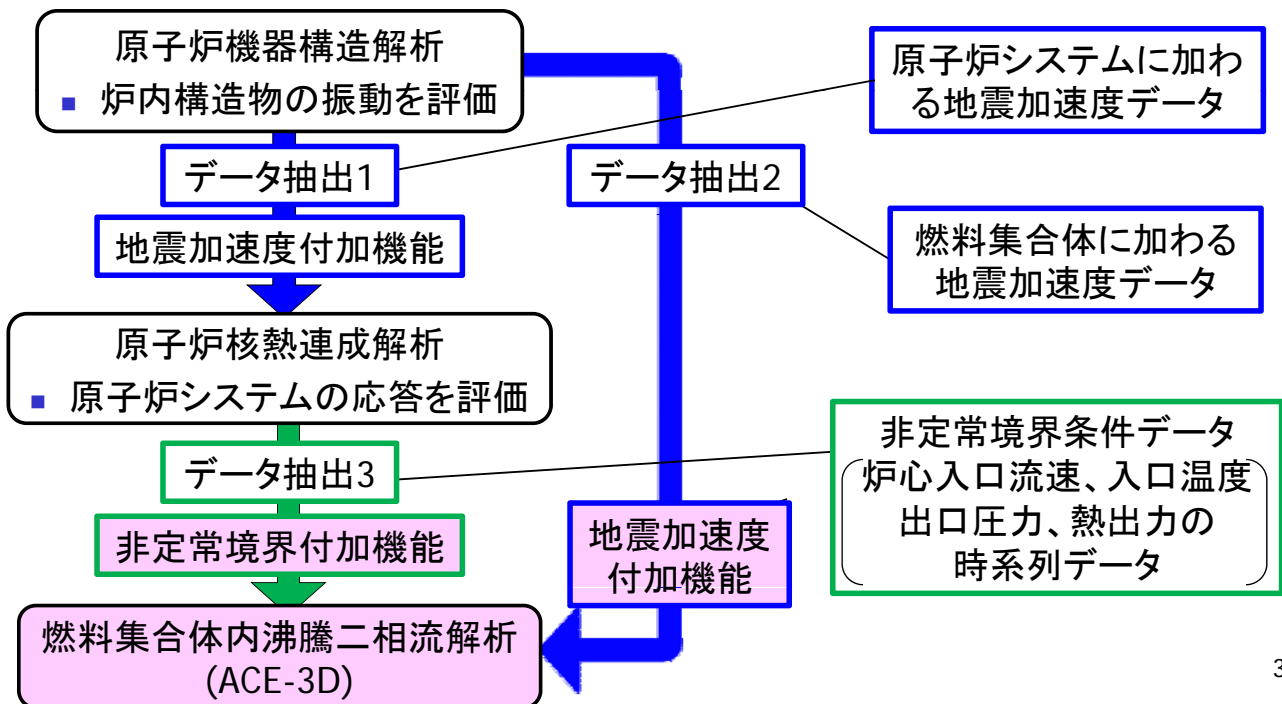
熱流動研究Gr

研究開発の背景

- 地震時の燃料集合体の健全性評価
 - 地震動に起因する沸騰流の三次元的変動の評価が必要
 - CMFD(Computational Multi-Fluid Dynamics)によるアプローチが効率的かつ現実的
- 
- 地震時燃料集合体内沸騰二相流解析手法開発
 - CMFDコードACE-3Dを拡張

地震時燃料集合体内沸騰流解析手法

- 原子炉機器構造解析及び核熱連成解析コードと連携
⇒ 炉内構造物の振動と、地震動に起因する炉心入口流量、熱出力等の変動の影響を考慮



3

開発の課題

- 地震加速度付加機能
 - 原子炉機器構造解析との整合性評価
- 非定常境界条件付加機能
- 必要な計算時間の把握・効率的な解析の実施
- 解析機能妥当性評価及び予測性能評価

4

振動周期の影響評価解析

■ 原子炉機器構造解析との整合性評価



- 入力すべき最大周波数の把握
- 必要な計算時間の把握・効率的な解析の実施
 - 燃料集合体沸騰二相流解析: 計算負荷大
 - 地震発生から終了までの計算は非現実的
 - 効率的な解析の検討が必要
 - 長周期の地震加速度に対し沸騰流の変動が追随すれば準定常的な(地震の任意の時刻を取り出した)評価が可能

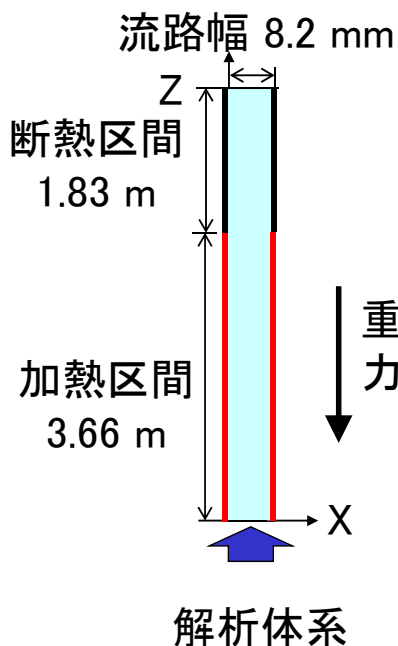


- 準定常的な評価が可能な最低の周波数の把握

5

計算体系

- 現行BWR燃料集合体の一部を二次元両面加熱平板で簡略模擬流動条件

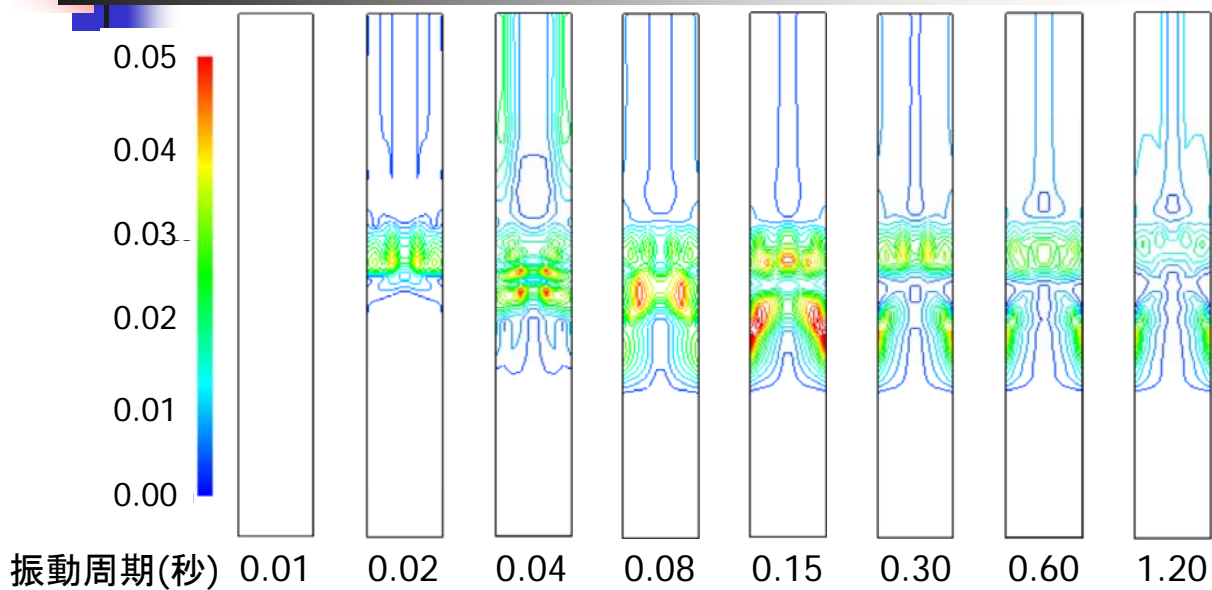


流動条件	
作動流体	水
圧力	7.1 MPa
入口流速	2.2 m/s
入口温度	549.15 K
壁面熱流束	270 kW/m ²

振動加速度	
波形	正弦波
振動方向	水平方向
振動振幅	400Gal
振動周期	0.01s ~ 1.20 s

6

ボイド率変動(標準偏差)分布



- 振動周期0.01秒以下の加速度に対して変動が見られない
- 振動周期0.6秒以上の加速度に追従して(準定常的な)変動

7

振動周期の影響評価解析結果のまとめ

- 振動周期0.01秒以下の振動加速度に対して変動が見られない
- ↓
- 原子炉機器構造解析から周期0.01秒以上の加速度を入力すればよい

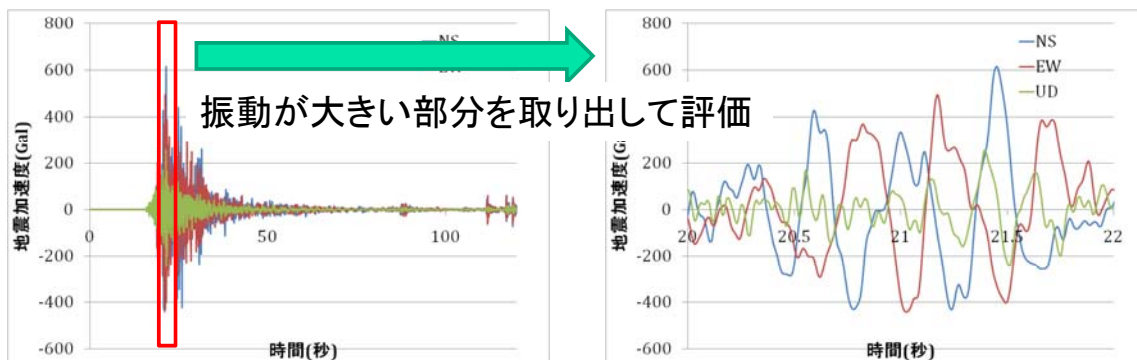
8

振動周期の影響評価解析結果のまとめ

- 振動周期0.6秒以上の加速度に対し準定常的な変動



- 地震継続時間の中から1秒程度を取りだして評価することが可能→効率的な評価の実現



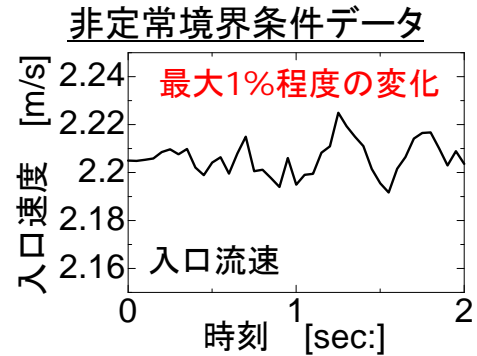
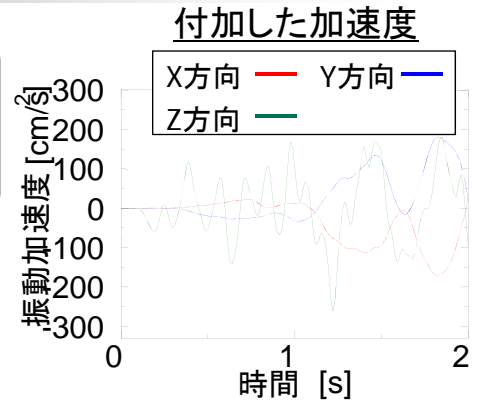
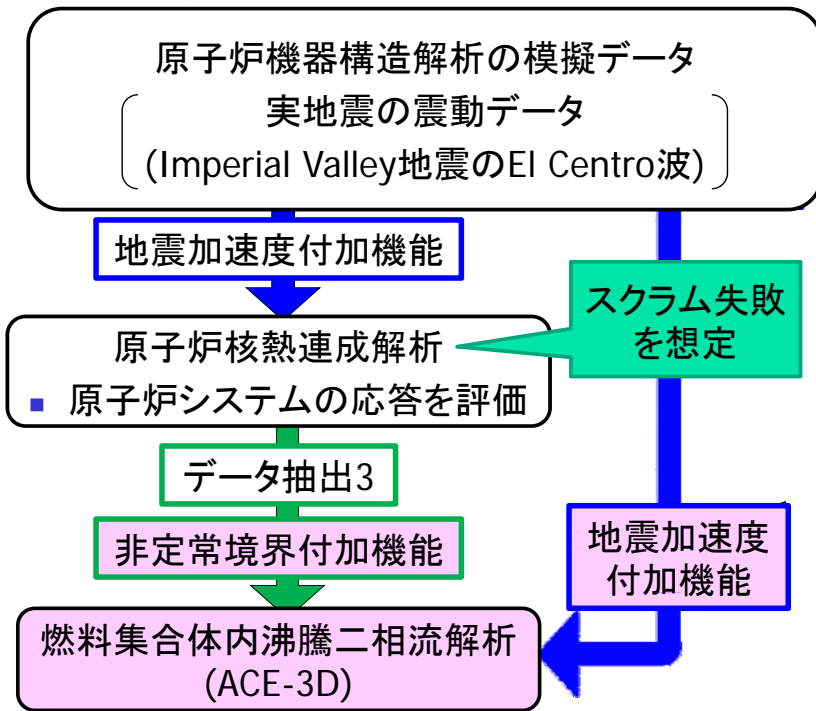
9

解析手法の総合評価

- 地震加速度と非定常境界条件を付加した燃料集合体内沸騰二相流解析が可能な事を確認する

10

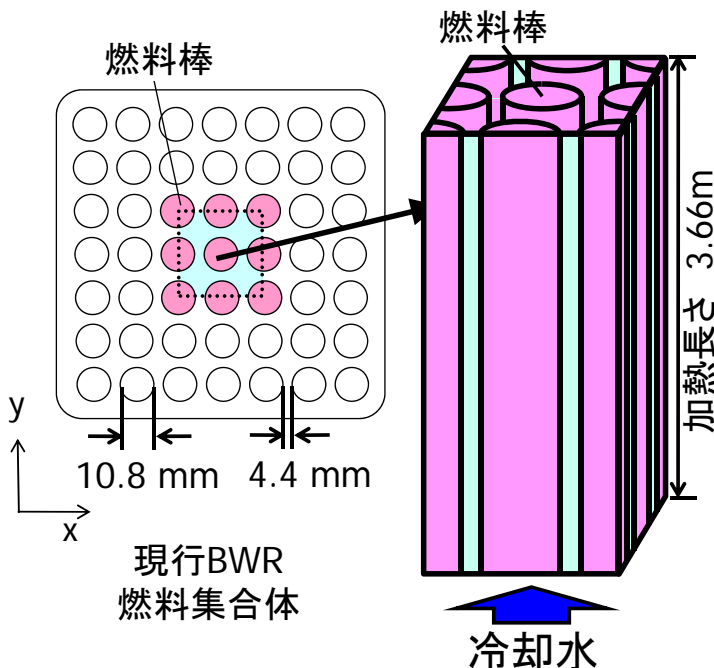
実施した解析の概要



- 小さな境界条件の変化が解析に反映されることを確認する

解析体系及び条件

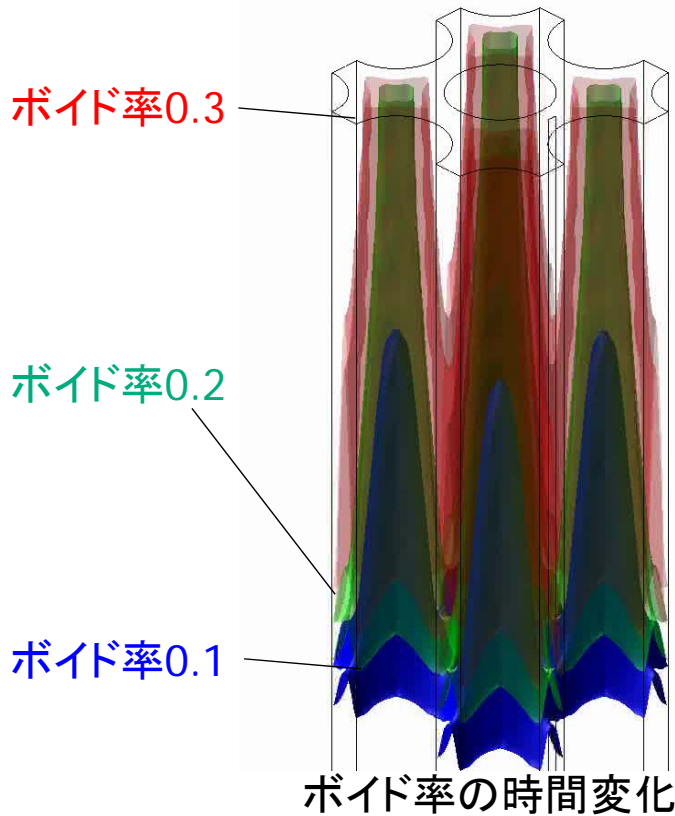
- 三次元的な沸騰流の変動を表現できる最小体系を選択
- 定常沸騰流に対し地震加速度と非常境界条件を同時に付加
 - 地震加速度、非常境界条件の有無を解析パラメータとする



定常時の熱流動条件

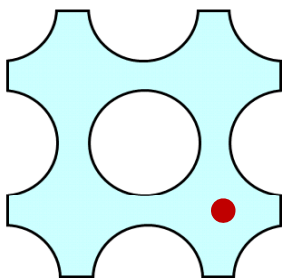
圧力	7.136 MPa
入口速度	2.2 m/s
入口温度	549.15 K
熱出力	351.9 kW

三次元ボイド率分布

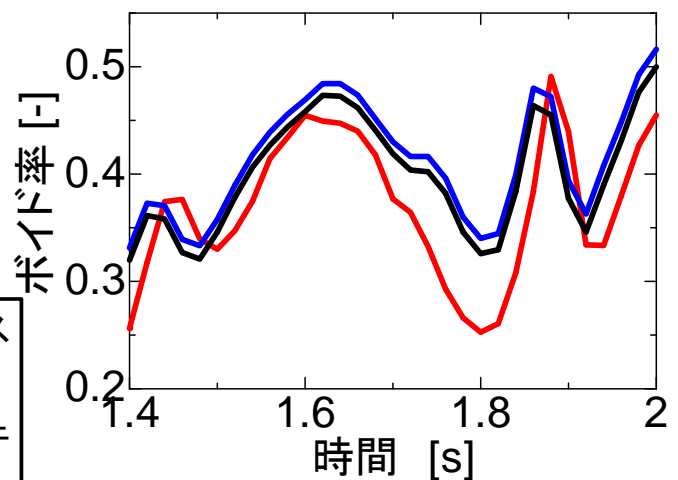


13

非定常境界条件の影響



- 地震加速度+非定常境界条件ケース
- 地震加速度ケース
- 地震加速度ケース+非定常境界条件ケースの変化分



ボイド率の時間変化 (Z=3.6 m)

- 地震加速度と非定常境界条件による影響は線形和では評価できない
- 小さな非定常境界条件の影響が解析結果に反映された

14




解析手法総合評価のまとめ

- 地震加速度と非定常境界条件による影響は線形和では評価できないため、地震加速度と非定常境界条件の両方を同時に考慮する必要がある
- 非定常境界条件の影響が解析に反映されており解析手法の妥当性が確認された

15



まとめ

- 原子炉機器構造解析結果と整合したデータ連携が可能
 - 地震継続時間の中から1秒程度を取りだして評価することが可能
 - 地震加速度に加えて、非定常境界条件を反映した燃料集合体内沸騰二相流解析が可能
- 
- 地震時における炉内構造物の振動や核熱相互作用の影響を考慮した燃料集合体内沸騰二相流評価手法を構築

16



今後の課題

- チャンネルボックスを含めた燃料集合体内沸騰流解析の実施
- 地震動付加条件における二相流モデルの適用性検証
- 実験との比較による予測性能検証