

炉内熱流動解析モデリングの計画と現状

吉田 啓之、三沢 丈治、高瀬 和之

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

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

{yoshida.hiroyuki, misawa.takeharu, takase.kazuyuki}@jaea.go.jp

地震発生時の沸騰水型原子炉(BWR)の燃料集合体においては、地震時の振動により、沸騰を伴う二相流が過渡的に変動することが考えられる。このような二相流の変動が発生した場合、燃料棒表面温度が変化したり、構造体表面での圧力が変化したりする可能性がある。このような変化により、原子炉システムの機能限界が影響を受けることが予想されるため、地震耐力を高精度で評価するためには、地震時の振動が炉心内熱流動に与える影響を評価する必要がある。そこで本研究では、原子炉システム内二相流解析で実績のある三次元二流体モデル解析コード ACE-3D を用い、地震時の振動が炉内熱流動に与える影響を評価できる熱流動解析手法を開発する。

ACE-3D コードは、原子炉システム内に存在する、沸騰を伴う機器内の二相流挙動を評価することを目的として、日本原子力研究開発機構(JAEA)で開発中の三次元二相流解析コードである。本コードでは、現在の計算機環境で機器内の沸騰を伴う二相流を解析するため、ボイド率と呼ばれる蒸気相体積割合を用いて流体中の液相と気相を区別し二つの相に対する統計平均された基礎方程式を解く、三次元二流体モデルを採用し計算負荷の低減を図っている。さらに ACE-3D コードは、曲面壁面を有する流路を解像できる境界適合座標系(BFC)機能、及び大規模解析を可能とする並列計算機能等により、既存の二相流解析コードでは困難であった、機器内の大規模かつ詳細な二相流解析を可能としている。

ACE-3D コードを地震時の炉内熱流動解析に適用する際の課題として、地震による燃料棒等の変形により形成される複雑形状流路への対応、地震時の振動の炉内熱流動挙動に与える影響の把握、地震データの炉内熱流動解析への適用、の3点が挙げられる。本研究においては、この3点の課題に対し、ACE-3D コードの改良及び評価を行っている。以下に、各課題に対する計画や開発の現状を示す。

ACE-3D コードの複雑形状流路への対応では、地震時の振動により発生する燃料棒変形、及び燃料棒を支持するスペーサーなどの複雑形状流路に対し、ACE-3D コードが有する BFC 機能により、妥当な解析結果が得られることを確認する。また、複雑形状流路内の熱流動現象の予測精度を向上するため、高精度差分法や乱流モデルの導入により ACE-3D コードの改良を行う。現在、原子炉内で想定される複雑流路の一部を簡略模擬した体系について、BFC 機能の妥当性を確認するための解析を実施している。

地震時の振動が炉内熱流動挙動に与える影響を把握するため、ACE-3D コード内で解く、二つの相に対する運動量保存式に、過渡的に変動する地震加速度を付与することで、流体に加わる地震時の振動を表現する機能を追加する。二流体モデルにおいては、気液間に存在する界面の挙動が熱流動に与える影響の統計平均値が、実験結果から得られた二相流モデル式により表現されている。しかし、これらの二相流モデル式には、地震時の振動が与える影響は考慮されていないため、地震時の振動が二相流モデル式に与える影響を評価するため、改良界面追跡法による詳細二相流解析コード TPFIT による解析を行い、地震加速度付与時の二相流モデル式の妥当性を検討する。ACE-3D コード及び TPFIT コードに対し、過渡的に変動する地震加速度を付与するための機能追加を行い、現在、妥当性の確認などを行っている。

地震データの炉内熱流動解析への適用においては、米国で実際に運転しているピーチボトム二号炉の7×7燃料集合体を対象として、本プロジェクトで実施される機器解析及び核熱連成解析との解析結果を基に、地震時における炉内沸騰流の解析を実施し、ACE-3D コードにより、地震時の炉内沸騰二相流解析が行えることを示す。流体に加わる地震加速度及び地震の振動により発生する燃料棒変位は、ADVENTURE コードによる炉内機器解析の解析結果を用いて模擬し、燃料集合体の入口流量、入口流体温度、出口圧力、及び燃料棒発熱分布の、地震時の振動に起因する過渡変化については、TRAC-SKETCH コードによる核熱連成解析の解析結果を用いて模擬する。現在、7×7燃料集合体の一部を模擬した体系について、解析の妥当性を検討するための解析を実施している。

炉内熱流動解析 モデリングの計画と現状

日本原子力研究開発機構
吉田啓之

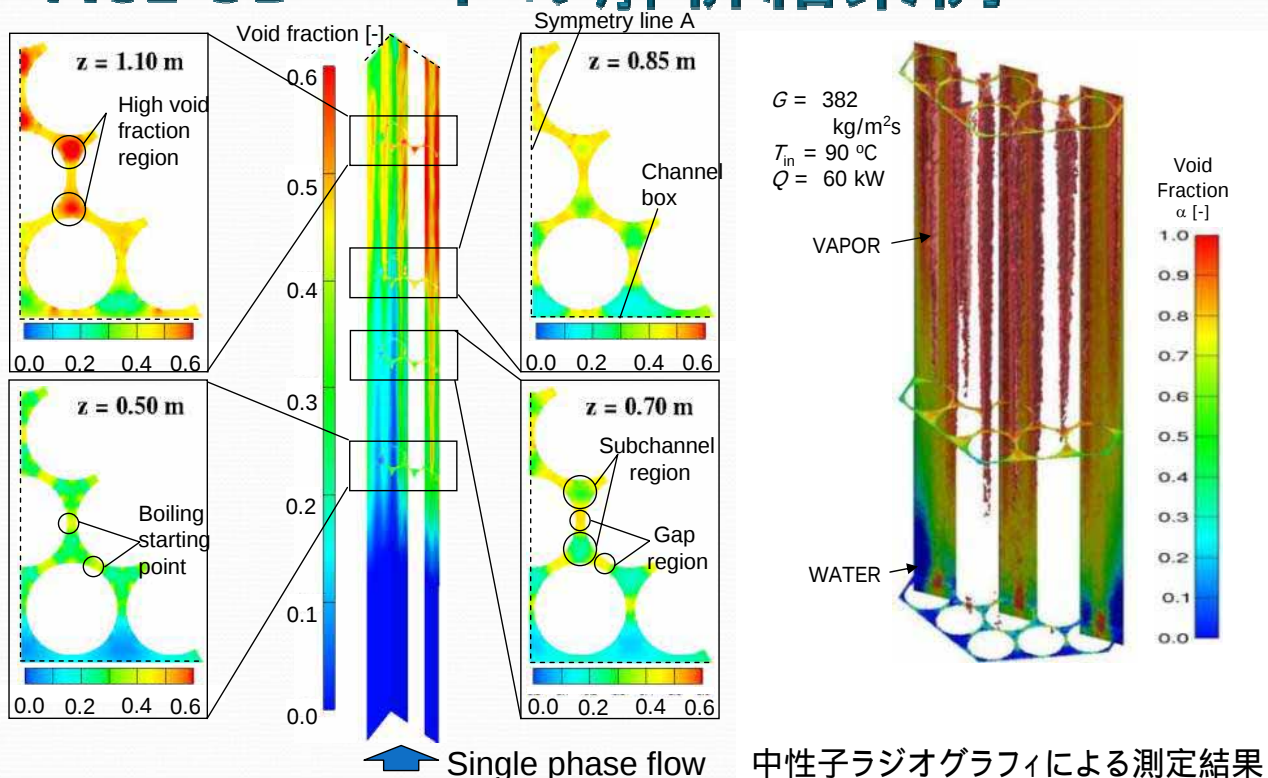
目的

- 地震時の揺れにより熱流動挙動が変化
- 
- 原子炉システムへの影響を高精度に評価するためには、地震時の揺れが炉内熱流動挙動が与える影響を評価する必要
- 
- 原子炉内二相流解析で実績のある三次元二流体モデル解析コードACE-3Dを用いて炉内熱流動挙動に対する地震時の揺れの影響を評価できる三次元熱流動解析手法を開発

ACE-3Dコードの概要

- 種々の流体を対象
 - 水・空気, ナトリウム
 - 超臨界圧状態を含む, 水(蒸気)及びフロン
- 三次元二流体モデル
- k- ε 乱流モデル(標準型, Launder-Sharmaモデル)
- 境界適合座標系(BFC)が使用可能
- マルチブロック解析機能
- 並列計算機への対応
 - 大規模解析が可能(1000万格子以上)

ACE-3Dコードの解析結果例



課題

- 燃料棒の変形などによる複雑形状流路に対する検証
 - BFC (境界適合座標系) 機能の妥当性確認
 - 高次精度有限差分法の検証
 - 乱流モデルの検証
- 地震による振動の炉内熱流動挙動に与える影響の把握
 - 流体への地震加速度の付与
 - 二相流モデルに与える地震加速度の影響
- 地震データの炉内熱流動解析への適用
 - 機器及び核熱水力解析とのデータ連携

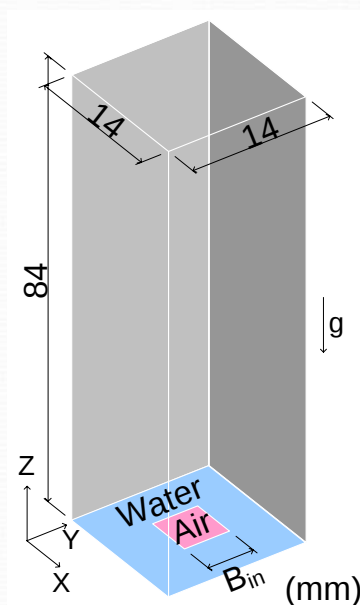
複雑形状流路に対する検証

- BFC (境界適合座標系) 機能の妥当性確認
 - 主流方向に流路形状が変化する体系
 - 流路中に存在する障害物への適用性
- 高次精度有限差分法の検証
 - 複雑形状を有する炉内構造物内の熱流動現象の予測精度の向上できる高次精度有限差分法
- 乱流モデルの検証
 - 燃料集合体形状および燃料棒曲がりなどの複雑形状流路に対応した高精度乱流モデル

地震による振動の影響の把握

- 流体への地震加速度の付与
 - 地震による流体に作用する加速度の変化を重力加速度を変化させることで模擬
 - 二相流モデルに与える地震加速度の影響
 - 二相流モデル: 気液間に存在する界面の移動や変形が, 熱流動挙動に与える影響の平均値を, 実験結果を元にモデル化
- ↓
- 地震加速度がモデルに与える影響について検討する必要
- ↓
- 原子力機構で開発中の詳細二相流解析コードTPFITを用いて地震により加速度が負荷された状況でのモデルの妥当性について検討

地震の二相流挙動に及ぼす影響(1) 解析体系



地震により流体に働く加速度を, 重力加速度を変化させることにより模擬

$$g_x = g \sin\left(\frac{2\pi}{f}t\right)$$

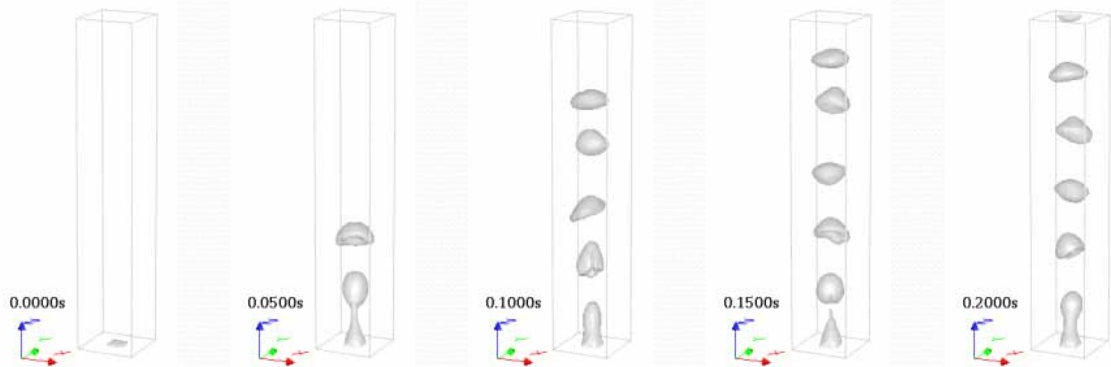
$$g_y = 0$$

$$g_z = g$$

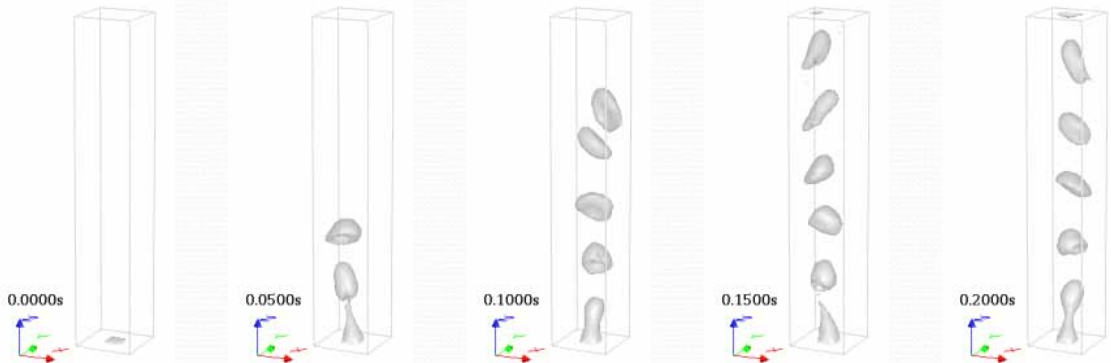
解析体系

地震の二相流挙動に及ぼす影響(2) 気泡流に対する影響

振動なし



振動あり

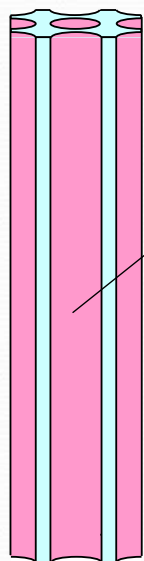


第19回CCSEワークショップ

9

機器及び核熱水力解析とのデータ連携

流出条件
(流路出口圧力)



燃料棒表面
燃料集合体内発熱
分布から求めた熱流束
を与える

流入条件
(流路入口流速
流路入口温度)

データの連携

連携先	入手データ
機器解析 (ADVENTURE)	最大変形時の燃料棒変位 流体の加速度
炉内核熱流動 連成振動解析 (TRAC-SKETCH)	流路入口流速 流路入口温度 流路出口圧力 燃料集合体内発熱分布

- 機器解析は地震発生から10秒～15秒を計算
- ACE-3Dは、1秒～2秒が計算可能

- 機器解析および核熱水力解析の結果から、熱的に最も厳しい流動条件を選択して解析を実施する予定

第19回CCSEワークショップ

10

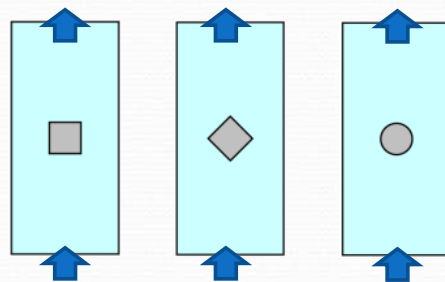
マスタープラン

	H20年度	H21年度	H22年度
解析機能の検証	BFC機能の妥当性確認	高次精度有限差分法の検証	高精度乱流モデルの検証
地震発生時の炉内熱流動解析への適用	炉内熱流動予備解析	機器解析、核熱水力解析との連携による炉内熱流動解析	

BFC機能の妥当性確認(1/2)

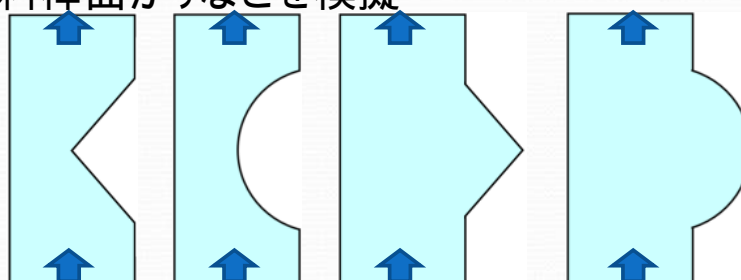
- 流路中に障害物を配置した流路

- スペーサや流路閉塞を模擬

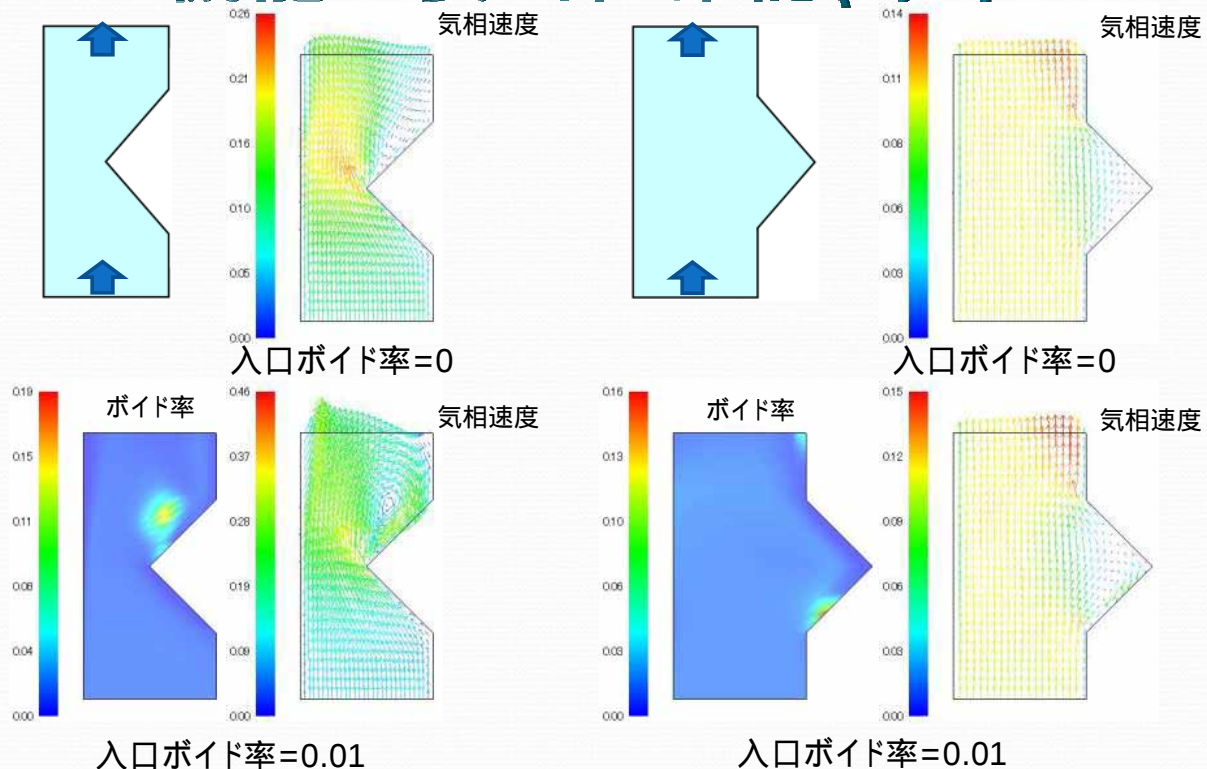


- 主流方向で形状が変化する流路

- 燃料棒曲がりなどを模擬



BFC機能の妥当性確認(2/2)

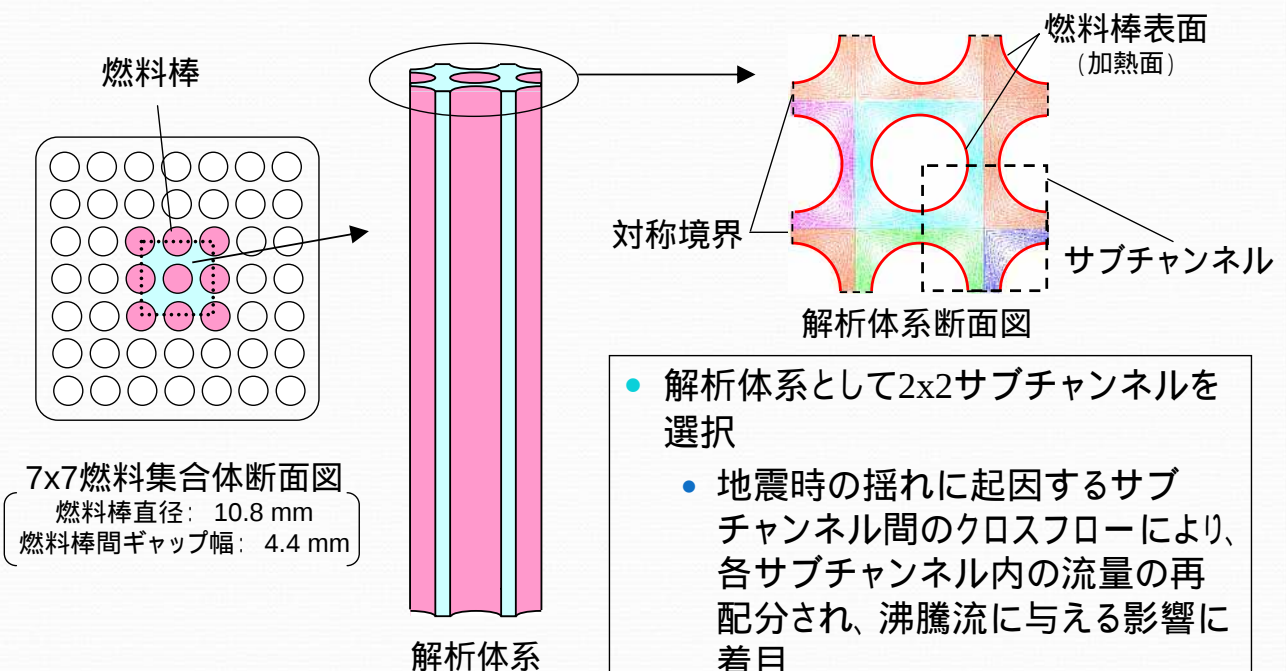


第19回CCSEワークショップ

13

炉内熱流動予備解析(1)解析体系

解析対象は、Peach Bottom2号炉7x7燃料集合体

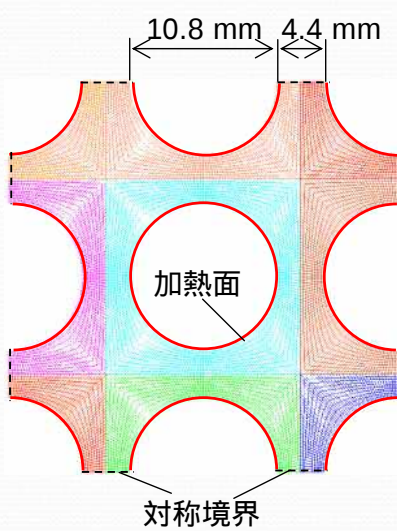


第19回CCSEワークショップ

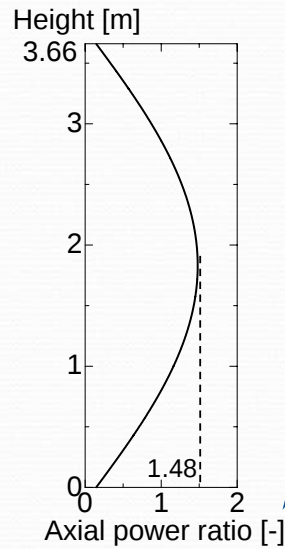
14

炉内熱流動予備解析(2)解析条件

- 地震加速度を付加する前の定常時の沸騰流の解析を実施中



断面内メッシュ図
および境界条件



軸方向出力分布

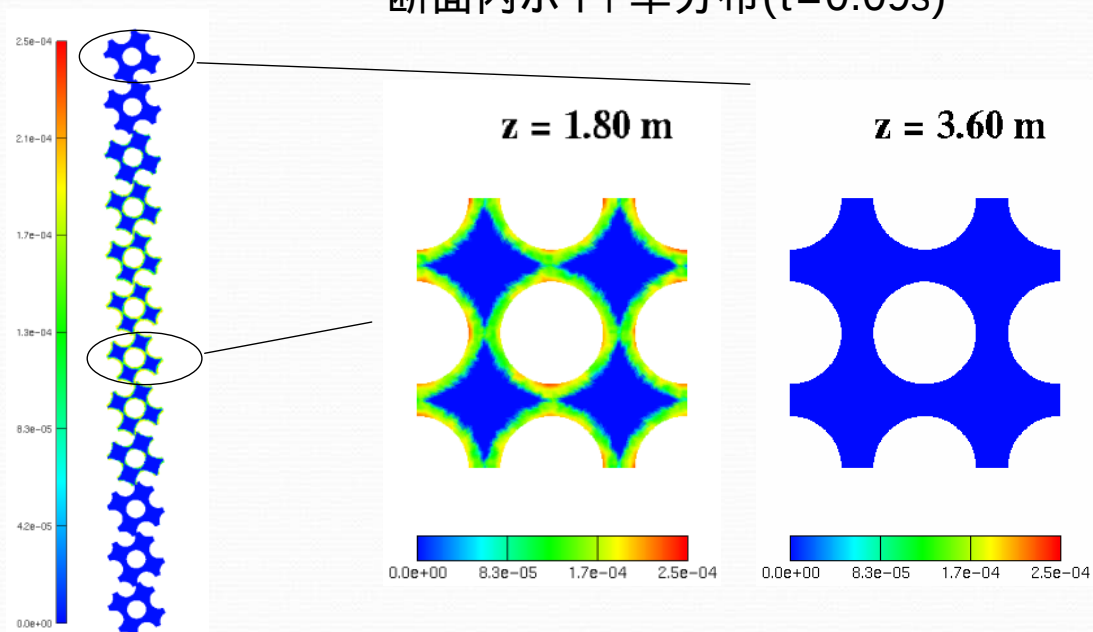
解析条件

圧力	7.1 MPa
入口質量速度	1673 kg/m ² s
加熱量	351.9 kW
入口エンタルピー	1212 kJ/kg

Peach Bottom2号炉の
定格運転状態を模擬

炉内熱流動予備解析(3)解析の現状

断面内ボイド率分布(t=0.09s)



- 現在、沸騰流解析を実施中。

まとめ

- 原子炉内二相流解析で実績のある三次元二流体モデル解析コードACE-3Dを用いて炉内熱流動挙動に対する地震時の揺れの影響を評価できる三次元熱流動解析手法を開発
- 開発の課題として以下を選択し作業中
 - 燃料棒の変形などによる複雑形状流路に対する検証
 - 地震による振動の炉内熱流動挙動に与える影響の把握
 - 地震データの炉内熱流動解析への適用