

炉内核熱連成振動解析モデリングの計画と現状

佐藤 聡, 丸山 結, 渡辺 正, 中村 秀夫

日本原子力研究開発機構・熱水力安全評価研究グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

{satou.akira, maruyama.yu, watanabe.tadashi66, nakamura.hideo}@jaea.go.jp

原子力プラントが地震動にさらされた場合、原子炉建屋が加震され、その振動は格納容器や原子炉容器を経て炉内構造物に伝播し、その内部に流れる原子炉冷却水を加振する。通常、冷却水には重力加速度のみが外力として働いているが、巨大地震発生時には、構造物の振動により冷却水に与えられる加速度が、重力加速度に対して無視できない大きさの変動加速度として加わる恐れがある。特に沸騰水型原子炉（BWR）の場合、変動加速度場においては、冷却水の流量変動やそれに伴う炉心ポイド率の変動などが生じ、炉心付近の流動状況が通常時と比べ大きく変化することが予想される。その結果、ポイド-反応度フィードバックを通じて炉心出力の変動が引き起こされることが考えられ、炉心の安定性が損なわれる可能性がある。従って、地震加速度付加時における冷却水の熱流動現象を把握し、さらに炉心の安定性を適切に評価することは、地震時における原子炉の健全性を評価する観点から重要である。このため当グループでは、炉内核熱水力連成解析コード TRAC-BF1/SKETCH-INS をベースに、地震動による流体への加速度の付加が炉心安定性に及ぼす影響を評価する手法の構築を目的とした研究を進めており、地震時解析のためのコード改造、及び実機原子炉を対象とした炉心安定性解析を実施する予定である。

TRAC-BF1/SKETCH-INS は、非均質非平衡モデルに基づく熱水力解析コード TRAC-BF1 と近代ノード法に基づく核動特性解析コード SKETCH-INS を PVM (Parallel Virtual Machine) で結合した 3 次元核熱水力連成解析コードであり、これまでに熱水力基礎実験を通じて BWR 安定性解析のために改良されてきた。本コードの適用性・妥当性については、OECD/NEA ベンチマーク問題等の解析を通じ、これまでに十分に検証されている。地震時の核熱水力連成解析を実施するためには、本コードに時間変動する加速度を付加可能なように改造を施す必要がある。付加された加速度は主に熱水力現象に影響を与えるため、熱水力解析を担当する TRAC-BF1 コード内で、

- (1) 流体の運動方程式における外力項(重力項)
- (2) 二相流、沸騰及び伝熱等の相関式に関する部分
- (3) その他、流体に働く加速度の影響を受ける部分

について、段階的に改造を実施する予定である。本年度はこれらに関する調査、および運動方程式部分の改造を行い、実機原子炉を対象に予備的な解析を実施する。

上記改造コードを用いて実施する予備解析では、米国ピーチボトム 2 号炉を対象とした炉心安定性解析を行う。本原子炉は BWR4 形式で、再循環ループおよびジェットポンプを備えている。解析領域は、再循環ループを含む原子炉压力容器内とし、压力容器の入口及び出口で境界条件を与える。定格運転中に地震が発生する事象を想定し、地震発生後における原子炉スクラムの有無及び再循環ポンプの運転状態が異なる 3 種類のシナリオについて解析する。入力する地震波には、第一段階として単純な波形の模擬地震波を用い、振幅、振動数等に関して感度解析を実施する。また本解析のアウトプットから、核燃料集合体ごとの炉心入口流速・温度、出口圧力、及び炉心発熱分布を、ACE-3D を用いた燃料集合体内熱流動解析のインプットデータとして提供する。

次年度以降は、解析コードのさらなる改造の実施、炉心安定性解析に適した核計算用インプットデータの整備を実施する。またデータ連携により、機器解析グループより実際の地震動による炉内構造物の各位置における 3 次元振動加速度データを入手する。このデータを座標のフィッティング、加速度データの内外挿等を行うことで地震時核熱水力連成解析に必要な流体への付加加速度に変換し、地震時炉心安定性解析を実施する予定である。

炉内核熱連成振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

熱水力安全評価研究Gr.

佐藤 聡*、丸山 結、渡辺 正、中村 秀夫

1

発表内容

- 目的
- 地震時の原子炉压力容器内核熱連成振動
- TRAC-BF1/SKETCH-Nコードの概要及び適用例
- 地震時解析のためのTRAC/SKETCHコードの改造方針
- 解析対象・シナリオ
- データ連携
- 実施状況及びスケジュール

2

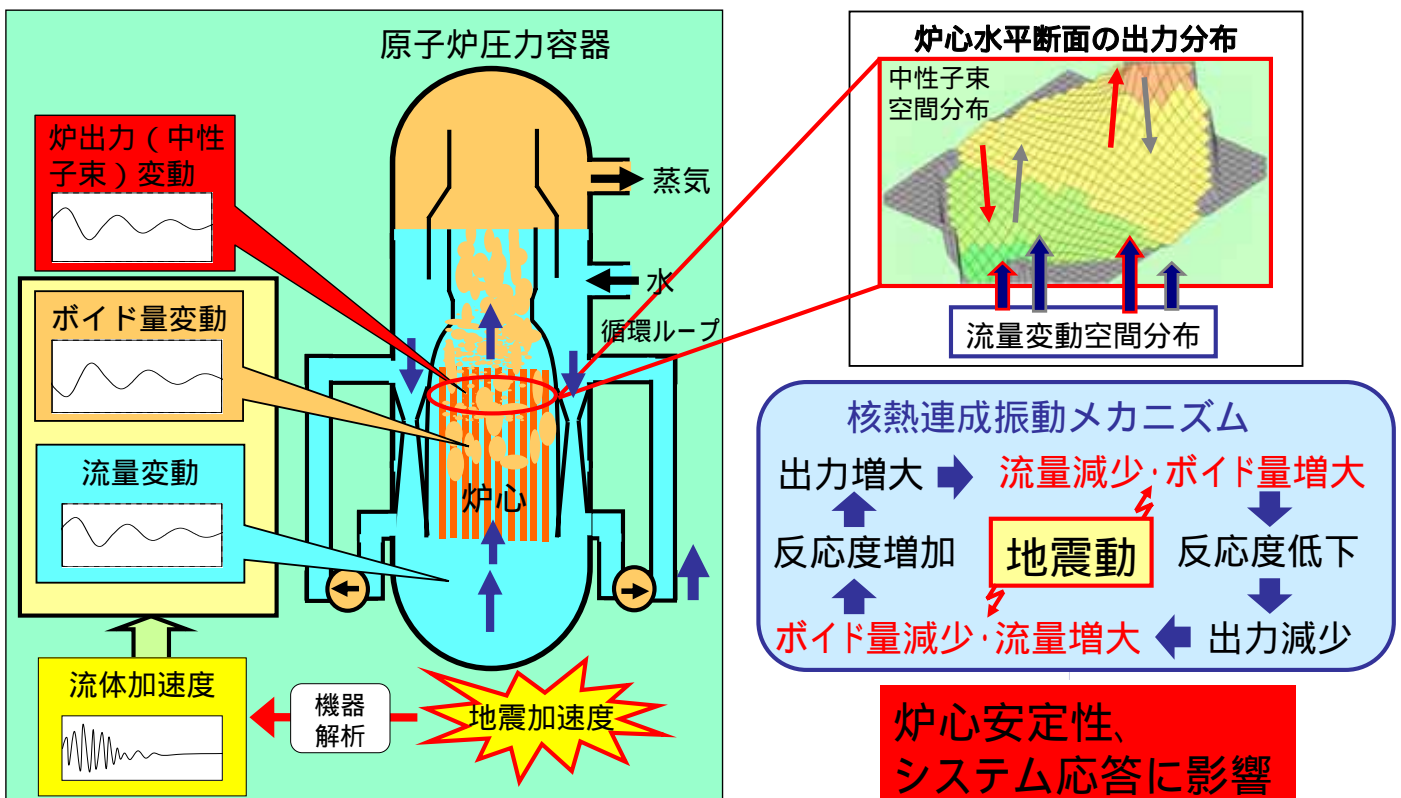
目的

原子炉压力容器内核熱水力連成振動解析コード
TRAC-BF1/SKETCH-INSをベースに、地震時の流体への
加速度付加が、BWRの炉心安定性に及ぼす影響を
評価する手法の構築

- TRAC-BF1/SKETCH-INSコードの改造およびモデル
の評価
- 地震時における実機原子炉の解析

3

地震時の原子炉压力容器内核熱連成振動



4

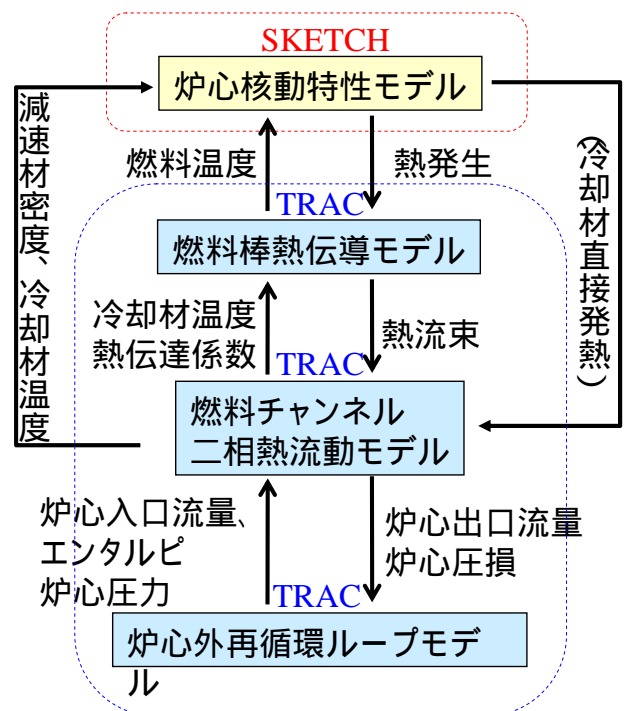
TRAC / SKETCHコードの概要

近代ノード法を取り入れた核動特性解析コード**SKETCH-INS**と非均質非平衡モデルに基づく熱水力解析コード**TRAC-BF1**をPVMで結合

<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">SKETCH-INS</div> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">PVMで結合</div> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">TRAC-BF1</div>	核動特性	空間次元	三次元
		基礎式	時間依存拡散方程式
		空間積分	近代ノード法
		時間積分	完全陰解法
		エネルギー群数	2群
		遅発中性子グループ数	6グループ
		核定数	多項式フィッティング
燃料棒熱伝導	空間次元	径方向一次元	
	ギャップコンダクタンス	定数	
炉心熱水力	空間次元	軸方向一次元(並列チャンネル)	
	基礎方程式	6方程式、気相、液相 質量保存式	
	サブクール沸騰モデル	沸騰開始:Saha-Zuber、熱の配分:Lahey	
	空間離散化手法	スタガードメッシュ法	
	時間積分	半陰解法	
再循環ループ	機器モデル	圧力容器、気水分離器、再循環ポンプ	

TRAC / SKETCHの核熱結合計算の概要

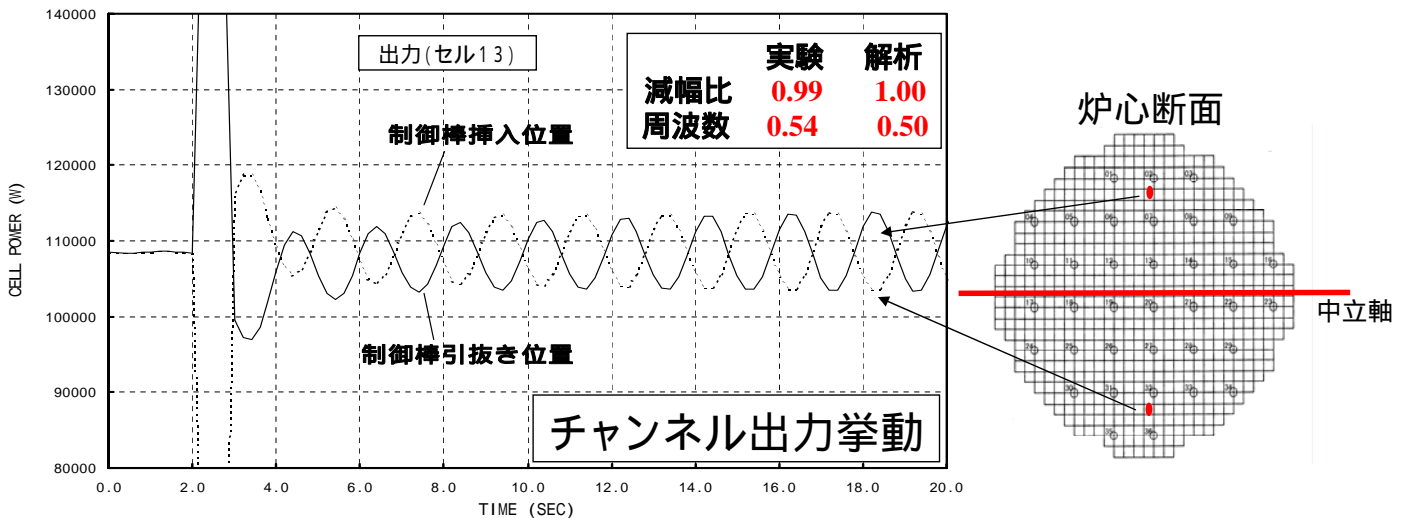
プログラム結合方法	PVM (Parallel Virtual Machine)
通信パラメータ	SKETCH TRAC : 熱発生率 TRAC SKETCH : 燃料温度、冷却材温度、冷却材密度(ボイド率)
空間メッシュ対応	マッピングマトリクス(核計算、熱伝導計算及び流動計算の各メッシュが共有する領域を定めるためのマトリクス)
タイムステップサイズ	自動制御 (TRAC と SKETCH のタイムステップサイズの小さい方を採用)



TRAC / SKETCHの適用例

Ringhals1号炉安定性解析モデル(OECD/NEAベンチマーク問題)

初期外乱として、定常時50%挿入の制御棒2本を1秒間に、一方を29.4cm引抜、他方を59.4cm挿入し元に戻す(全反応度 = 0)



実験で観測された持続振動現象を再現

7

地震時解析のためのTRAC / SKETCHコード改造の方針

- ◆TRAC-BF1(熱水力解析部分)を改造
- ◆構造物の振動により流体に働く加速度を、重力項の3次元時間変動として表現
- ◆任意のノードに、任意の振動加速度を付加可能とする
- ◆コード内の以下の部分を段階的に調査・改造
 - 流体の運動方程式に関する部分
 - 二相流、沸騰、伝熱等の相関式に関する部分
 - その他、流体に働く重力加速度が係わる部分
- ◆TRAC-BF1の想定外の状況(流体に働く実質的な重力加速度が0以下)における解析への影響を考慮

8

実機解析対象

- ピーチボトム2号炉
 - BWR4(再循環ループ、ジェットポンプ)
 - 燃料集合体数:764体(サイクル2では7×7と8×8の混合炉心)
 - 定格時出力3293MWt、炉心流量12915kg/s、原子炉圧力7.033MPa
 - OECD/NEAベンチマーク問題で解析実績あり

Figure 2.2.1. Reactor core cross-sectional view

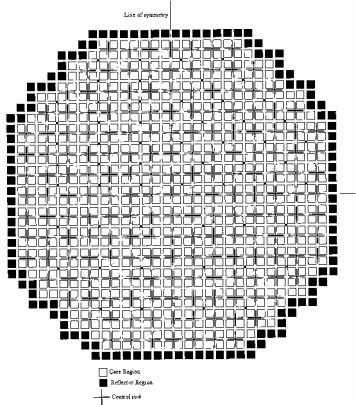
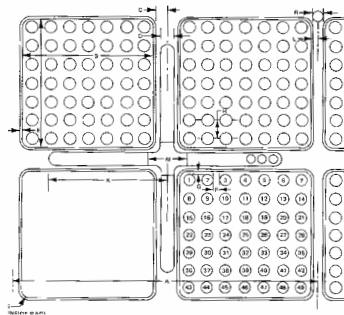
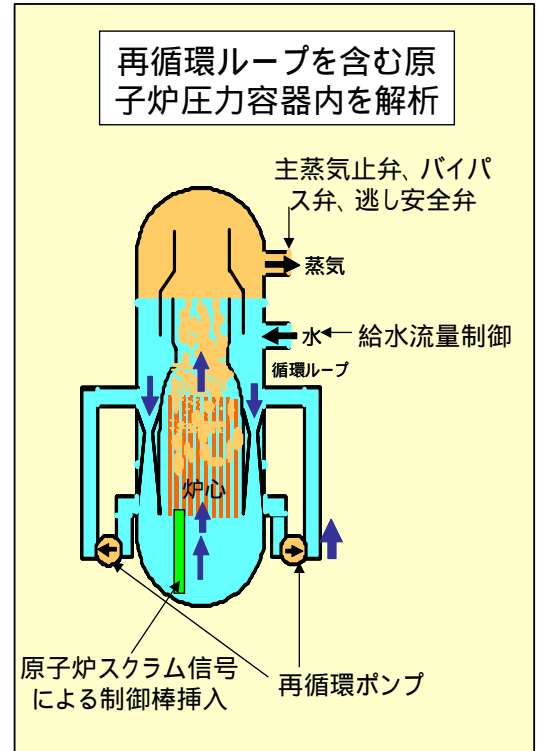


Figure 2.2.2. PB2 initial fuel assembly lattice



Dim. ID	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Dim. (m)	13.0	5.278	0.375	0.080	0.175	0.1435	0.738			
Dim. (cm)	33.08	13.4032	9.525	2.032	4.425	36.419	18.7452			
Dim. ID	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
Dim. (m)	0.187								0.38	
Dim. (cm)	4.7478								9.652	

ピーチボトム炉の炉心配置と集合体(7×7)



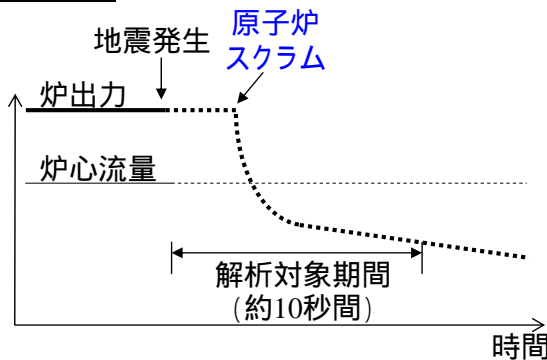
解析シナリオ

- 定格運転中の地震発生に対し、3シナリオを想定
 - スクラム**作動**、再循環ポンプ**運転継続**
 - スクラム**不作動**、再循環ポンプ**運転継続**
 - スクラム**不作動**、再循環ポンプ**トリップ**

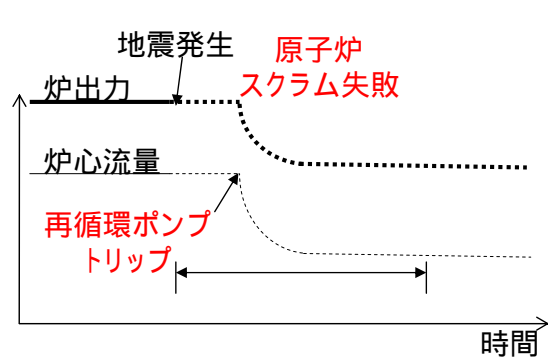


炉心安定性解析

シナリオ

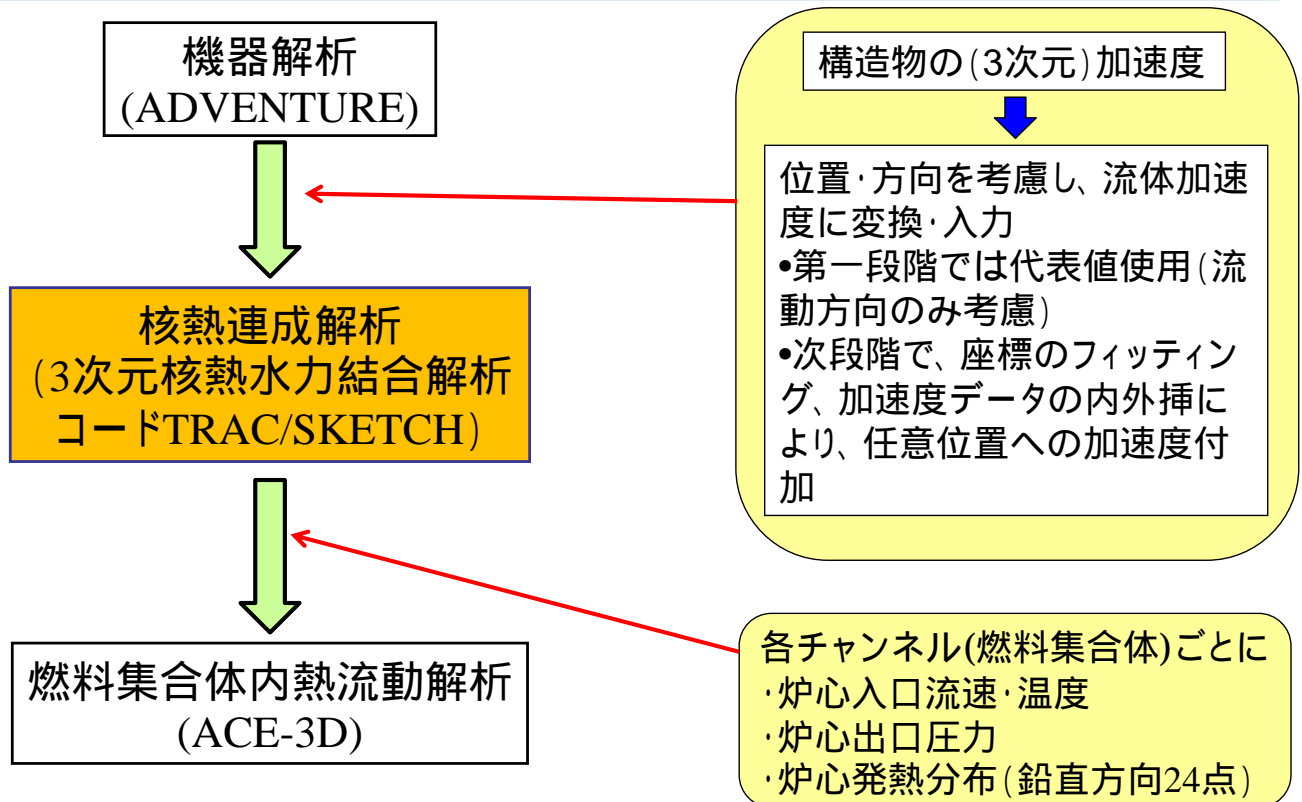


シナリオ



模擬地震加速度を入力し、振幅、振動数等に関して感度解析

データ連携



11

実施状況およびスケジュール

◆平成20年度

- 計算機環境整備
- コード調査及び改造
 - 外部加速度を付加する部分及び手法の調査・検討
 - 加速度が負の値になる場合の解析への影響調査
 - 流体の運動方程式に関する部分のコード改造
- 予備解析
 - ピーチボトム炉タービントリップベンチマーク(OECD/NEA)のインプットデータ
 - 模擬的な地震動データ

◆平成21年度

- コード調査の継続及び必要に応じた改造(相関式等)
- 炉心安定性解析用インプットデータ作成(核計算用データの適正化)
- データ連携による地震加速度データを用いた解析

12