

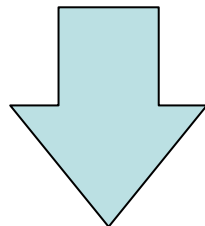
1. 発電プラントとしての信頼性実証

3) 原型炉技術評価

1. 3) 原型炉技術評価(炉心・しゃへい特性)

高速原型炉の性能試験、サイクル運転で取得したデータに基づき原型炉を建設した結果の技術評価を行う。

- ・「前回の性能試験」
- ・Amの蓄積量が多い「次回の性能試験」
- ・「それぞれの炉心のサイクル運転時」

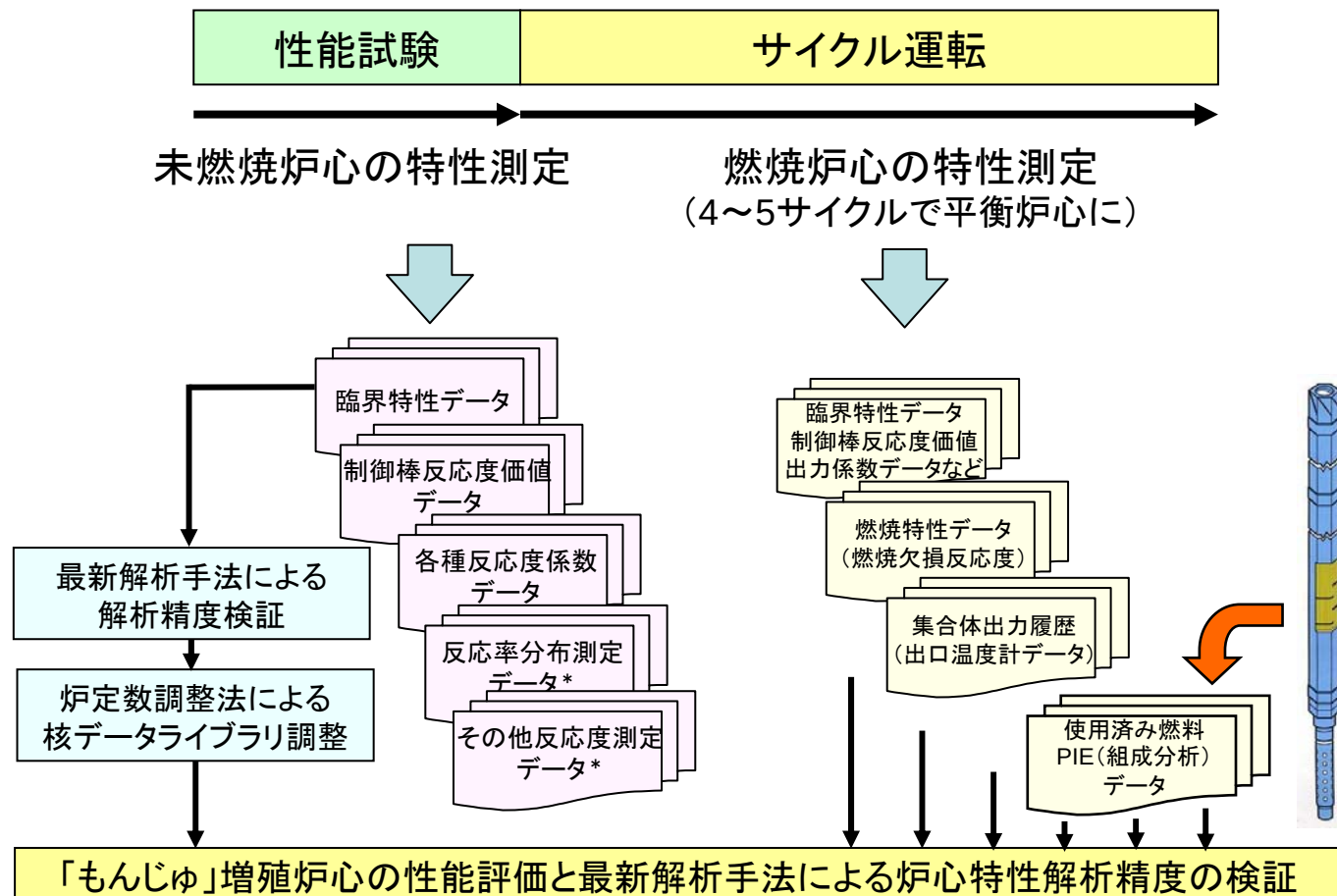


様々な炉心条件で、
取得したデータ

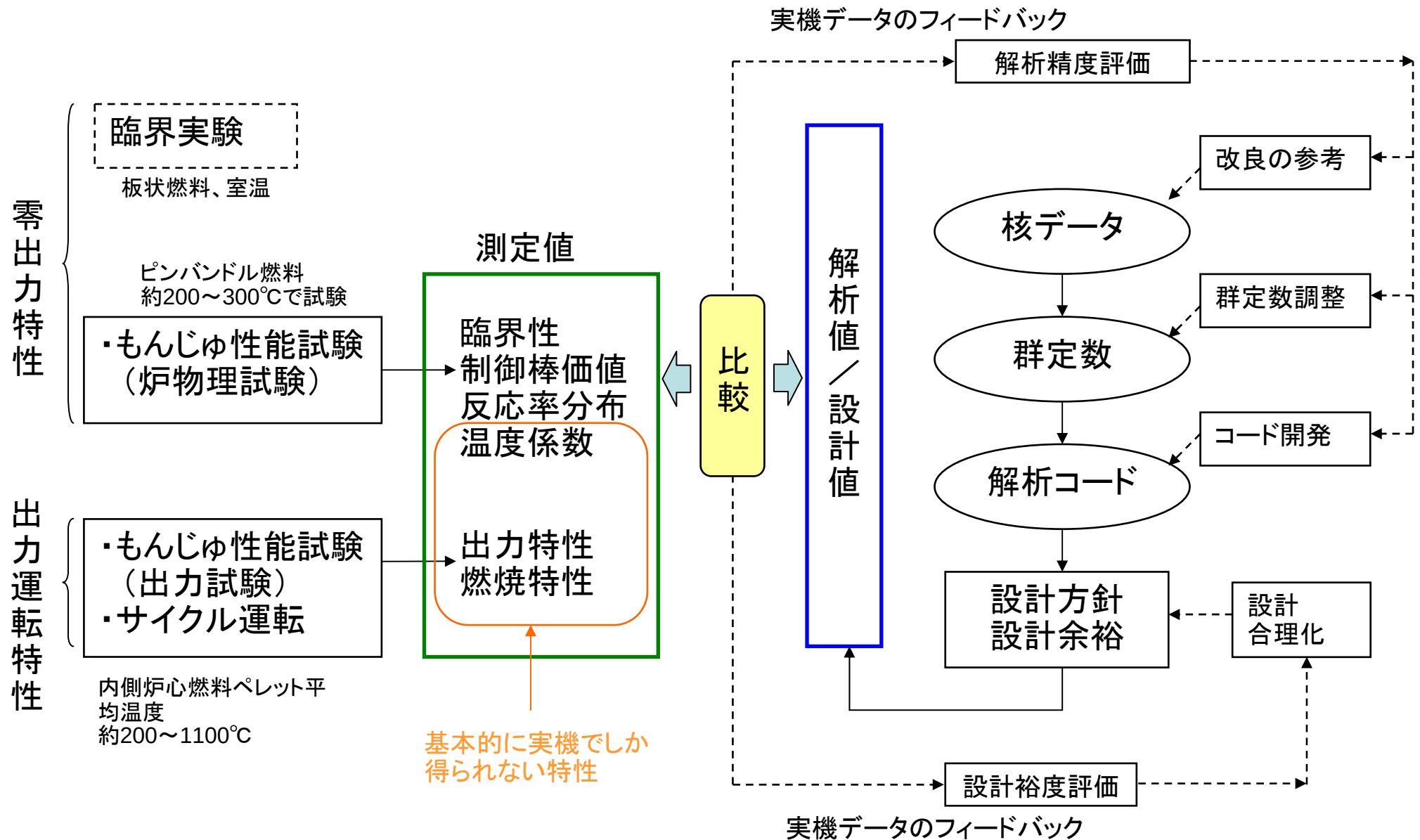
設計手法(データ、コード)の精度、妥当性を検証するとともに、設計余裕の合理化を検討し実証炉・実用炉設計に反映する。

1. 3) 原型炉技術評価(炉心・しゃへい特性)

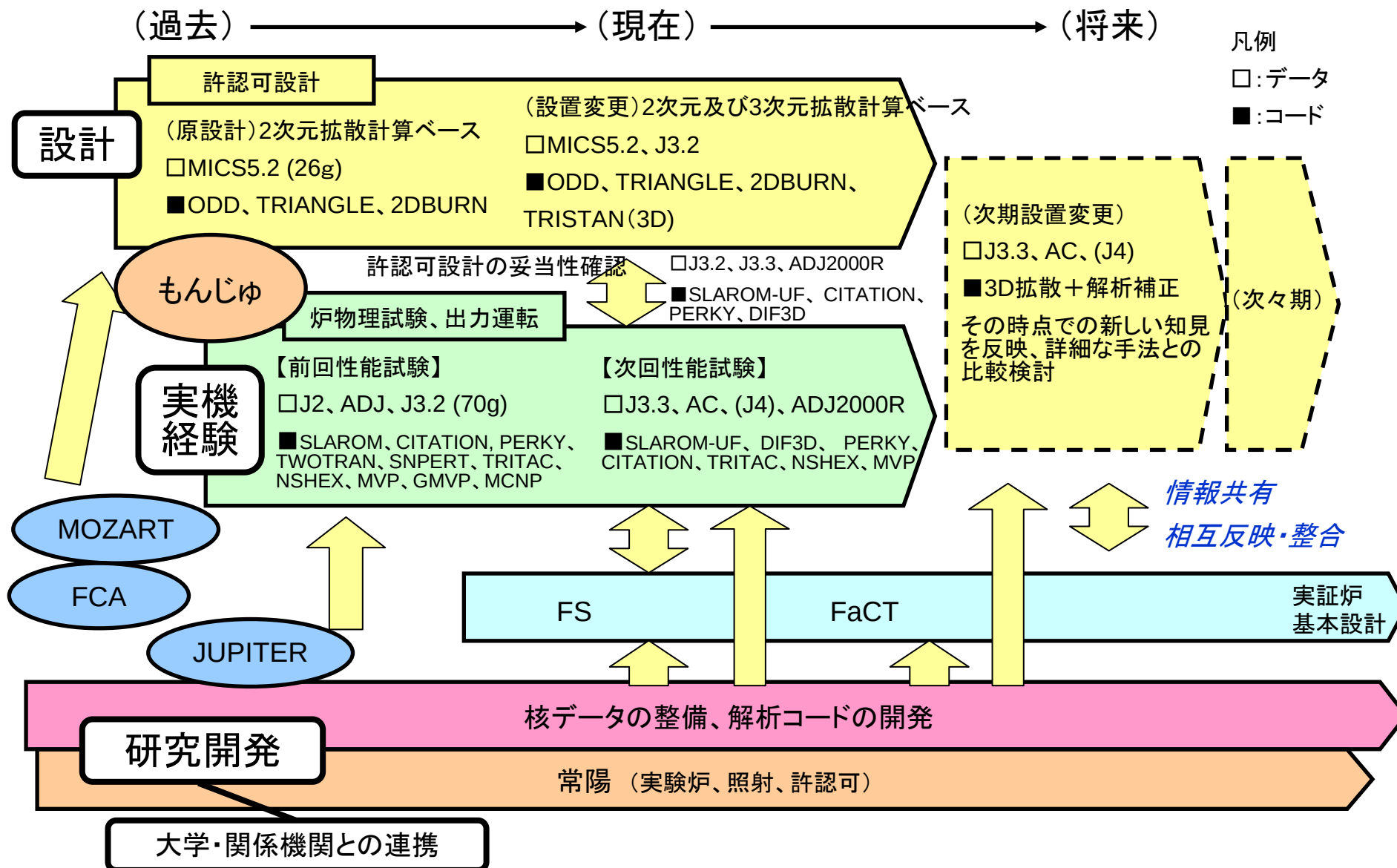
- 性能試験時の未燃焼炉心のデータに加えて、本格運転時の燃焼の進んだ「もんじゅ」増殖炉心の炉心特性データを採り、増殖炉心特性を評価する。また、炉心解析手法の精度向上に資する。
- 燃焼燃料については照射後試験(PIE)を行い燃料健全性、増殖比等を評価する。



1. 3) 原型炉技術評価(炉心・しゃへい特性)



1. 3) 原型炉技術評価(炉心・しゃへい特性)



1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

性能試験で取得されたデータにより実証炉以降に適用できる動特性評価手法を構築するとともに、設計余裕・安全余裕の合理化を行う。また、実証炉・実用炉の設計に用いる自然循環評価手法を検証する。

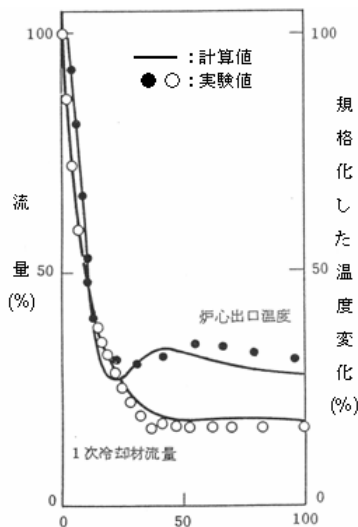
1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

1. 「もんじゅ」設計用熱過渡解析コード

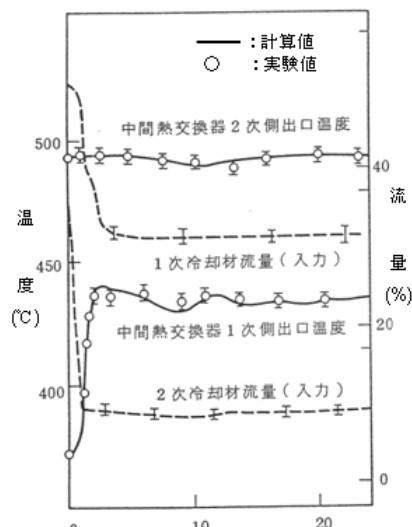
設計用解析コード

解析コード	解析対象	検証実績
COPD	約1時間までのプラント熱過渡現象	「常陽」, 50MWSG施設 1/6水流動試験, 1/10水流動試験
HYMON	約1時間以降の緩慢なプラント温度挙動	COPDの解析結果
BLOOPH	SG周り水・蒸気系の保有水ブロー現象	50MWSG施設

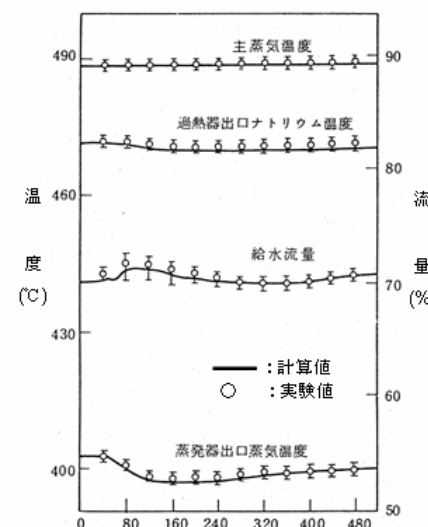
(検証例:COPD)



炉心出口温度及び1次系流量
(「常陽」, 電源喪失)



中間熱交換器温度及び流量
(50MWSG, 流量外乱)



SG温度及び流量
(50MWSG, 制御系目標値外乱)

(結果)

●「もんじゅ」に対し比較的良好な精度でプラント熱過渡評価が実施可能。(多くの実験でフローネットワークモデルの構築が可能であった。)

(課題)

●実証炉以降の設計評価手法への反映

1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

2. 詳細熱流動解析手法を用いた最適動特性解析モデルの構築

- 十分に検証された詳細熱流動解析コードにより主要機器の内部熱流動挙動を解析し、フローパターン・温度分布変化を評価することにより1次元フローネットワークモデルを構築する。

(1) 解析対象機器：

原子炉容器(上部プレナム、炉心)、IHX、AC、SG(EV, SH)

(2) 熱流動解析コードの要件：

- ・汎用性を有する解析手法であること
- ・精度の高い熱流動シミュレーションができること

(3) 熱流動解析コード：

コード		特長 / 課題
機器内部熱流動	AQUA	「もんじゅ」安全審査以降JAEAで開発。機器内部熱流動及び燃料集合体内熱流動を解析対象。「常陽」上部プレナムや各種のナトリウム及び水試験による検証実績。各種乱流モデルやアルゴリズム完備。熱交換器の熱流動解析には適用不可。直交座標系に限定されるため形状模擬性に課題。
	CFX / FLUENT	各種乱流モデルやアルゴリズムが完備され高速解析が可能。熱交換器の熱流動解析にも適用可。非構造格子系の採用により形状模擬性に優れている。商用コードであり高速炉特有の熱流動現象解析の実績が少ない。AQUAのバックアップ用として最適。
炉心熱流動	GENERAL	炉心の核熱解析評価用コード。「もんじゅ」設計にも用いられ多数の検証実績を有している。核特性解析精度は高いものの、熱流動解析精度に課題。「もんじゅ」以降では、発熱分布を計算しASFRE等の熱流動解析コードで集合体内熱流動評価を実施している。
	ACT	上部プレナム解析モジュール及び炉心詳細解析モジュールで構成され、前者はAQUA詳細モデル、後者はASFREを全集合体分結合させたモデルであり、燃料ピン毎の発熱分布やそれに伴う上部プレナム温度分布評価が可能。現在JAEAで開発中だが、部分的な炉心の計算は可能。

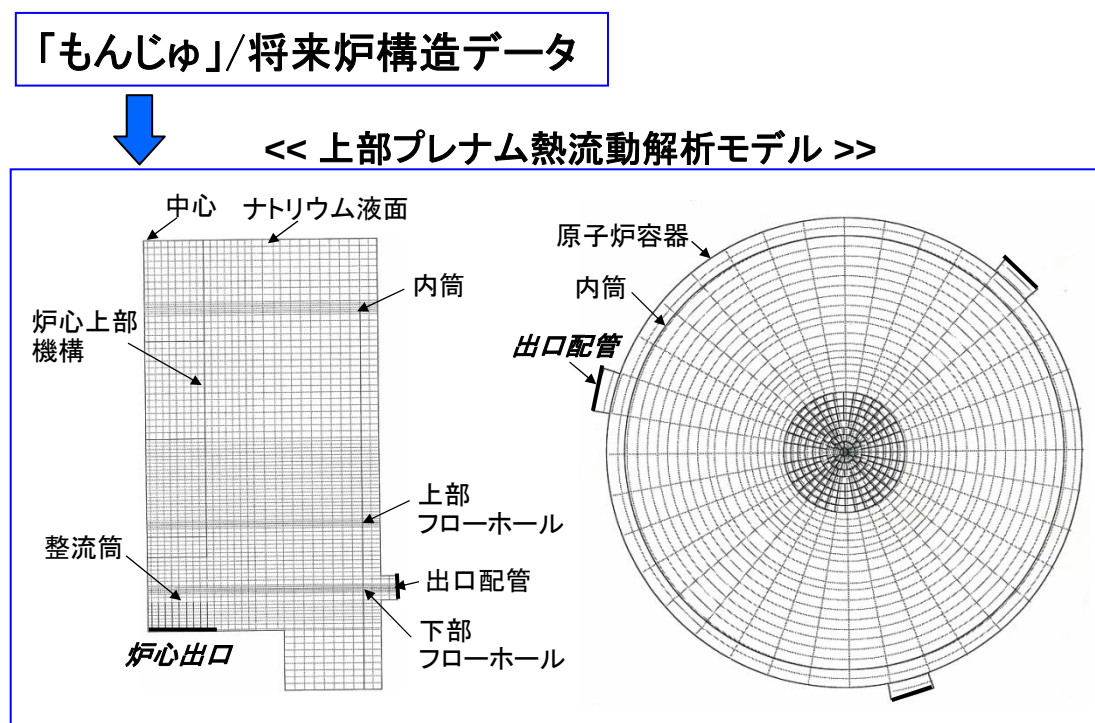
1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

最適動特性解析モデル構築の具体化

(主要機器に対する構築方法は基本的には同じ)

【具体例: 手動トリップ時の炉容器出口部熱過渡評価】

(1) 原子炉容器上部プレナム詳細熱流動解析



(1回目: $i = 1$)

・「もんじゅ」/将来炉の設計用
動特性ノミナル解析
(改良Super-COPD)

・構築したFNMによる動特性
ノミナル解析 (*)

(2回目: $i = 2$)

RV入口流量変化・温度変化

・「もんじゅ」/将来炉の炉心
設計データ

・集合体構造データ
・集合体発熱量
・集合体発熱分布

・炉心解析コードによる集合体
出口流量変化, 温度変化
(GENERAL / ACT)

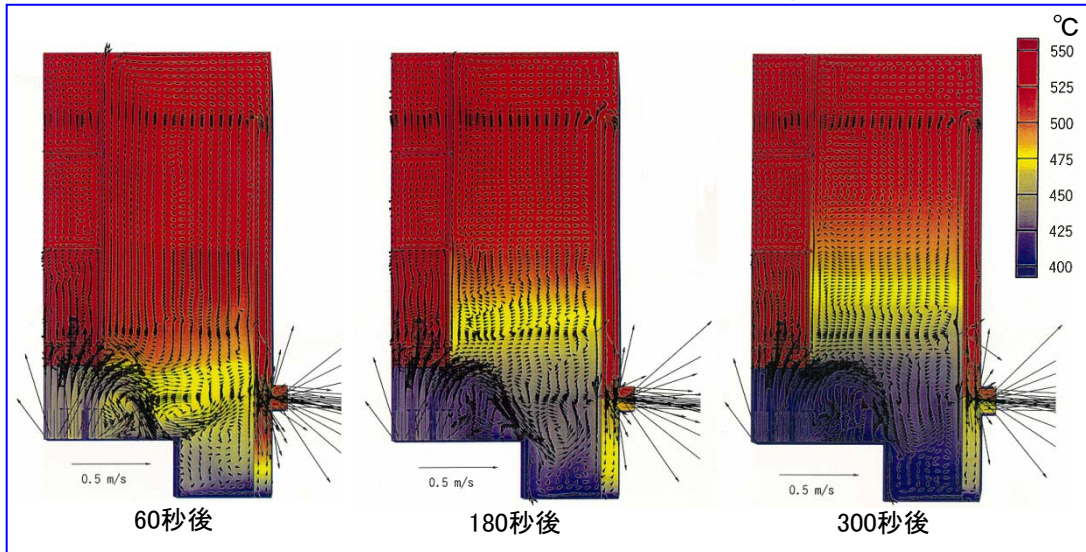
境界条件

・炉心出口流量変化
・炉心出口温度変化
・出口配管圧力(固定)

1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

(2) 詳細熱流動解析結果からフローネットワークモデル(FNM)の構築

<< 上部プレナム熱流動解析結果 >>



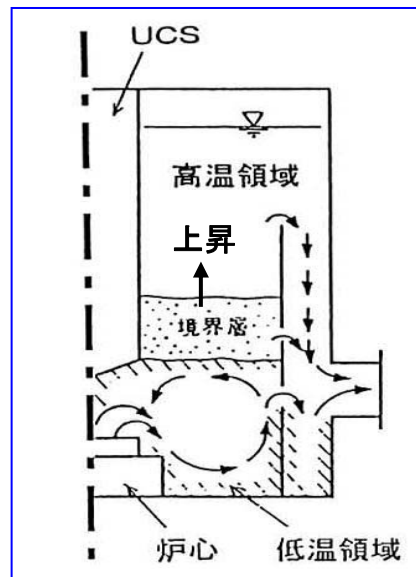
詳細解析手法

- ・乱流モデル
($k-\varepsilon$ / RANS / ASM)
- ・空間離散化
(QUICK-FRAM / 2nd-CENTRAL)
- ・時間積分
(Euler implicit / Leap-Frog)
- ・圧力Poisson解法
(ICCG)

もんじゅの場合

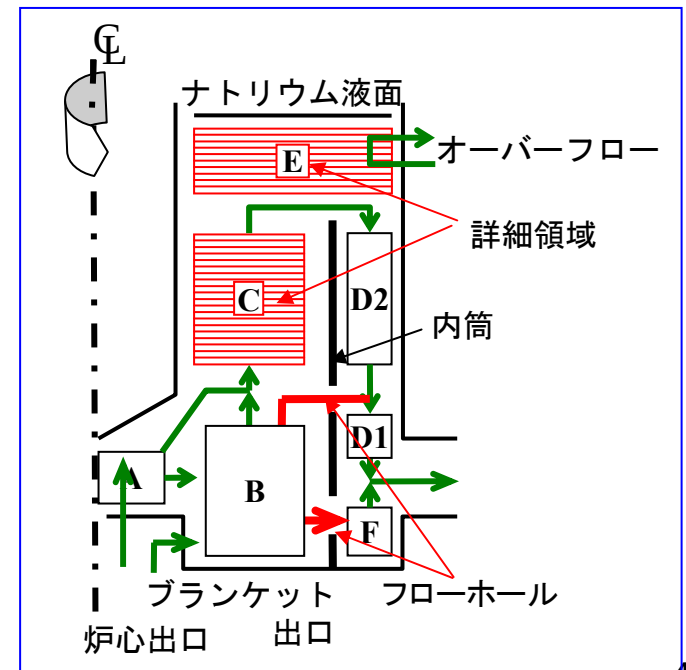
- ・流速分布よりフローパス設定
- ・温度分布の把握

・「もんじゅ」性能試験による検証
(上部プレナム温度分布、炉心出口流量・温度、RV出口流量・温度、温度境界層上昇速度)



FNMの構築

- ①フローパス設定
- ②温度境界層の上昇速度を評価する詳細領域設定



1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

(3) その他主要機器のフローネットワークモデル(FNM)の構築

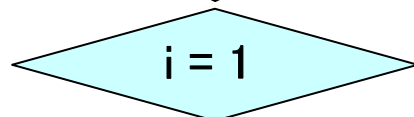
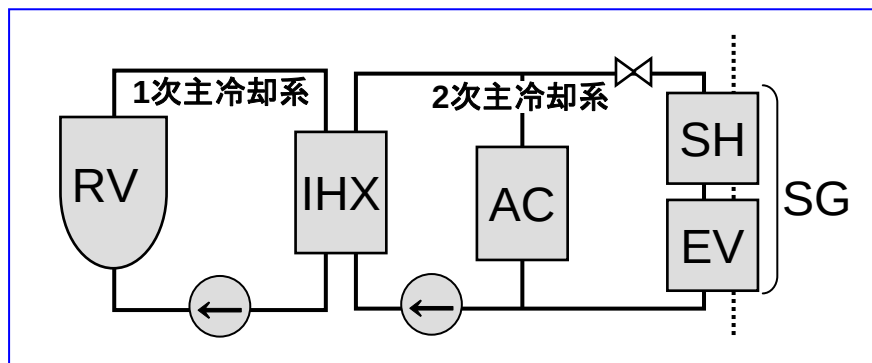
- ・IHX, AC, SG (EV, SH)についても、詳細熱流動解析を実施しFNMを構築する。



(4) プラント全系動特性解析

- ・構築したフローネットワークモデルを用いて、プラント全系の動特性解析を実施。
- ・「もんじゅ」性能試験により検証(主要機器の出入口温度変化・流量化)。

<< プラント全系動特性解析モデル >>

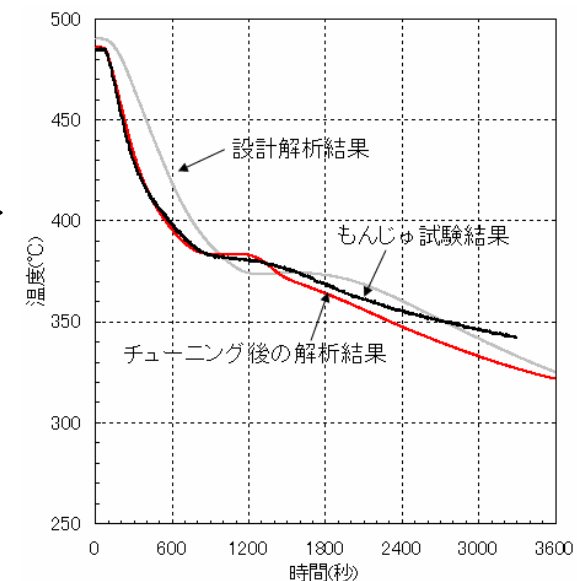
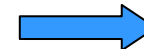


Yes

$i = i+1$
(1)の(*)へ(再解析)

No

流速分布と温度分布が前回と大きく変化していないことを確認し、ノミナル結果とする。



手動トリップ時のRV出口温度変化

- 原型炉と異なる仕様の実証炉以降に対して、「もんじゅ」の成果を反映して、精度の高いプラント動特性評価が可能となる。

1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

3. 「もんじゅ」熱過渡条件の設定及び構造健全性評価

例：手動トリップ事象における炉容器
出口部の熱過渡評価

(1) 熱過渡条件の設定

① 熱過渡解析(ノミナル条件)

② 影響パラメータ抽出(最大値, 最小値),
パラメータ解析：最大温度幅条件
：最大温度勾配条件

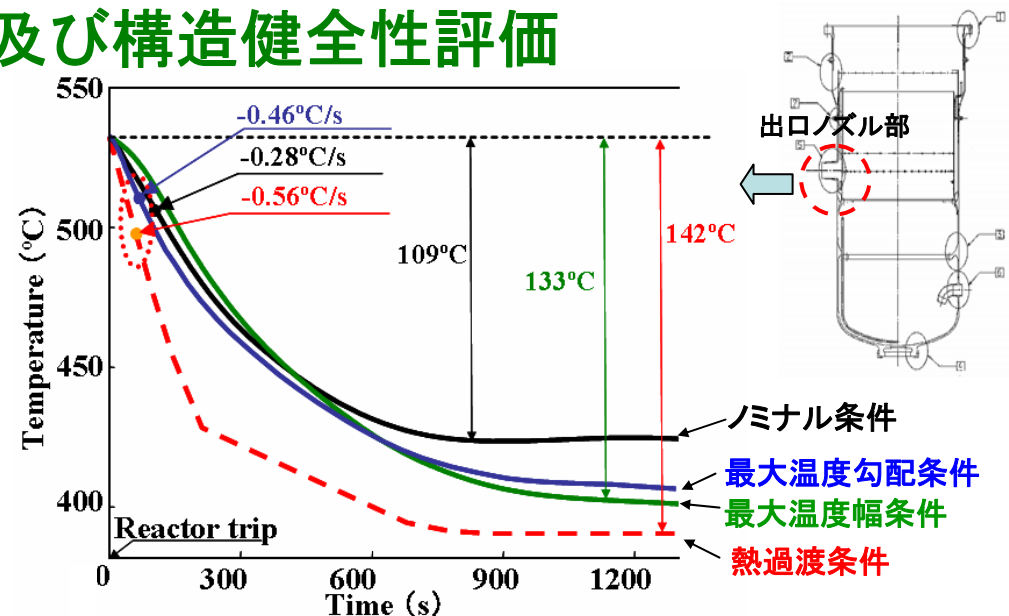
③ 工学的余裕係数：
(計算値) $\alpha=1.22$, $\beta=1.65$

④ 計算値の丸め：
 $\alpha=1.22 \rightarrow 1.3$, $\beta=1.65 \rightarrow 2.0$

⑤ 折れ線化
→ 熱過渡条件の設定

(課題)

- 1) 最大温度変化条件(温度変化幅、温度変化率)の評価精度向上
- 2) 熱過渡条件の必要十分性
 - ・丸め余裕($\alpha=1.22 \rightarrow 1.3$, $\beta=1.65 \rightarrow 2.0$)
 - ・折れ線化



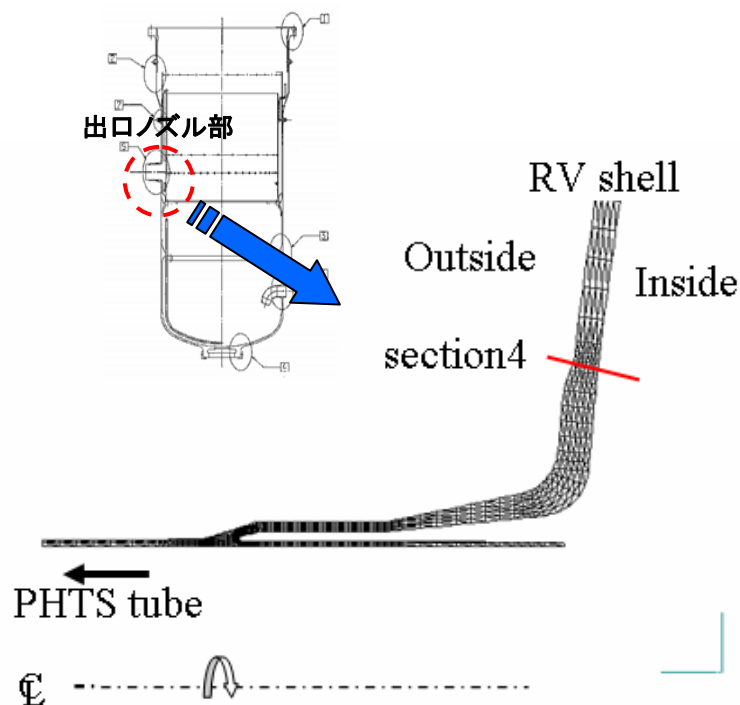
	温度変化幅 (0~1200秒)	温度変化率
ノミナル条件	109°C	-0.28°C/s
最大温度変化条件	133°C	-0.46°C/s
工学的余裕係数 (計算値)	1.22	1.65
工学的余裕係数 (設定値)	$\alpha=1.3$	$\beta=2.0$
プラント熱過渡条件	142°C	-0.56°C/s

①
②
③
④
⑤

1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

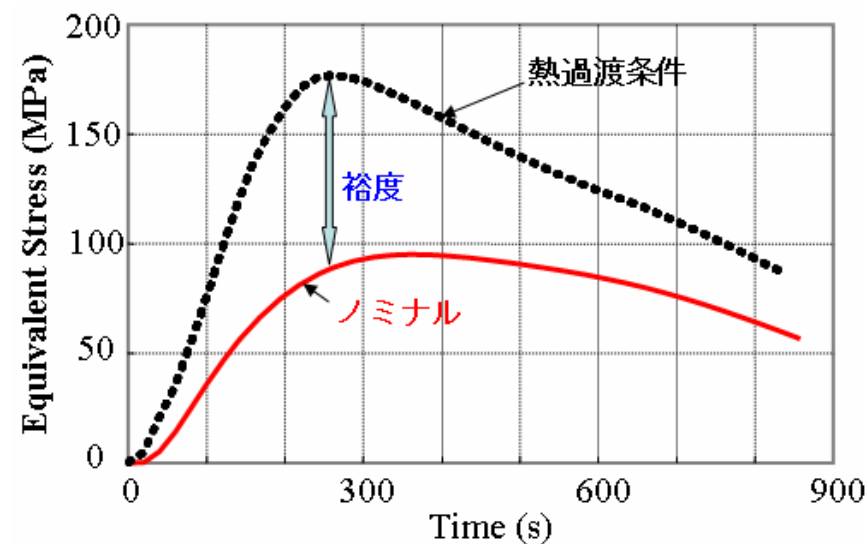
(2) 熱過渡条件を用いた構造健全性評価

折れ線化した熱過渡条件を入力条件とし熱応力解析を実施



出口配管部の熱応力解析モデル(FEM)

解析



熱応力解析結果(Inside)

(結果)

- ・ノミナル条件の結果と比較して十分な余裕を有する熱過渡条件を設定
- ・「もんじゅ」性能試験でも同様の余裕を有することを確認
- ・実証炉以降のより合理的な設計検討に反映

1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

4. 設計余裕・安全余裕の最適化

(1) 最大温度変化条件(温度変化幅、温度変化率)の評価精度向上

・最適化フローネットワーク解析結果により精度の高い評価が可能となる。

(2) 熱過渡条件の評価

((例: 手動トリップ事象))

影響パラメータ

- ① 崩壊熱
- ② 炉容器内筒フローホール流量
- ③ 1次流量コストダウン特性
- ④ ポニーモータ流量
- ⑤ 2次流量コストダウン特性
- ・
- ・
- ・



「もんじゅ」設計

影響パラメータの最大値及び最小値の組合せで、最大温度変化幅、最大温度変化率を設定

必要性の担保

- ・計算値の丸め
- ・折れ線化



妥当性確認



実証炉以降への反映

最大値-最小値の中間領域の値も取込んだパラメータの組合せで、最大温度変化幅、最大温度変化率を設定



・設計余裕の最適化

・「丸め」及び「折れ線化」の合理化

1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

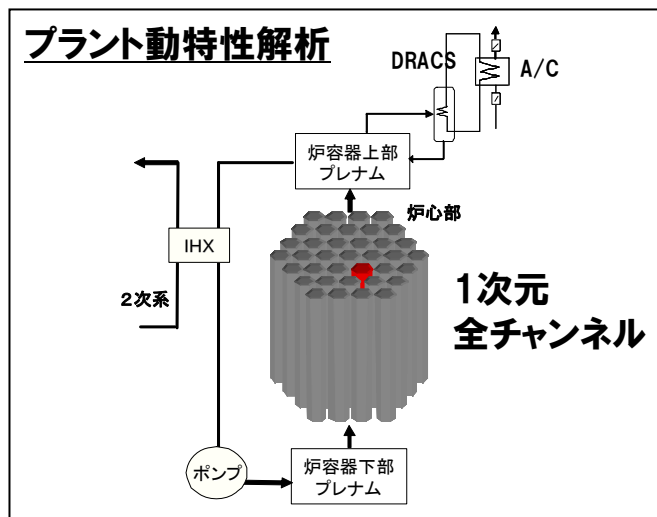
5. 自然循環による崩壊熱除去機能を評価する手法の検証

- ・基本方針 : FaCTで検討されている自然循環評価手法を取り込んだフローネットワーク解析手法を、「もんじゅ」性能試験により検証する。

FaCT自然循環評価手法

○従来の自然循環評価

プラント全体の熱流動は炉心平均チャンネルで評価、その結果に保守側な工学的安全係数(定格運転時と過渡時で共通)を乗ずることで仮想的なホットチャンネルの値を求め、燃料被覆管の高温点を評価



自然循環特性の取り込み

- ・浮力による燃料集合体間／内流量再配分効果
- ・燃料集合体間／内径方向熱移行効果



- ・炉心は集合体単位でモデル化
- ・仮想的なホットチャンネルではなくプラント全体にリンクしたホットテスト集合体(多次元)として動特性解析の炉心モデルに組み込む

自然循環特性に応じた不確かさ要因の適用

- ・強制循環時と異なり、流量が不定。強制循環時に考慮している不確かさ要因に加えて、過渡・自然循環時の出力要因、流動要因を評価することが必要

堂田,等,「過渡時の自然循環による除熱特性解析手法の開発 (2)炉心高温点評価手法の開発(第二報)」,日本原子力学会(2009年春の大会),発表スライドより

1. 3) 原型炉技術評価(プラント関係)

炉心内HSFに着目した評価方法

不確かさ要因

- ①炉心全体要因
- ②炉心局所要因
- ③集合体内要因

運転中の炉心状態の分類

初期条件

STEP1: プラント動特性解析

- ・ホットテストチャンネル候補の同定
- ・**炉心全体**に影響する不確かさ要因を境界条件として加味
(崩壊熱誤差, フローコーストダウン誤差, 等)

STEP2: プラント動特性解析

- ・ホットテストチャンネルを炉心モデルに組み込む
- ・**炉心局所**に影響する不確かさ要因を境界条件に加味
(集合体間: 圧損係数誤差, 出力分布誤差(制御棒位置偏差など), 等)

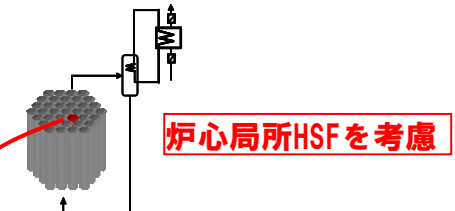
STEP3: ホットテスト集合体内多次元熱流動解析

- ・集合体内の熱流動を解析し、最高温度点を評価
- ・**集合体内**に影響する不確かさ要因を境界条件に加味
(集合体内: ペレット製作公差, ワイヤコンタクト効果, 等)

ステップ1: プラント動特性解析



ステップ2: プラント動特性解析



ステップ3: 集合体内熱流動解析



堂田,等,「過渡時の自然循環による除熱特性解析手法の開発
(2)炉心高温点評価手法の開発(第二報)」,日本原子力学会
(2009年春の大会),発表スライドより

- 本手法を取入れた最適動特性解析コードを「もんじゅ」性能試験(自然循環試験)で検証
(燃料集合体出口温度変化、燃料集合体出口(代表)流量変化、炉容器出入口温度・流量、炉上部プレナム温度分布)
- 自然循環時の炉心内HSFの評価