



# 実証試験の考え方

平成23年2月22日

日本原子力研究開発機構

次世代原子力システム研究開発部門



# 概要

2010年以降に実施する技術実証（設計成立性の実証、性能実証）のための試験計画立案のため、機器・システムの技術実証項目を抽出し、各項目の実証方策を検討した。

さらに、実証方策の中で試験が必要となる項目については、試験概念を検討した。



# FaCTプロジェクト全体工程

2010年頃

2013年頃

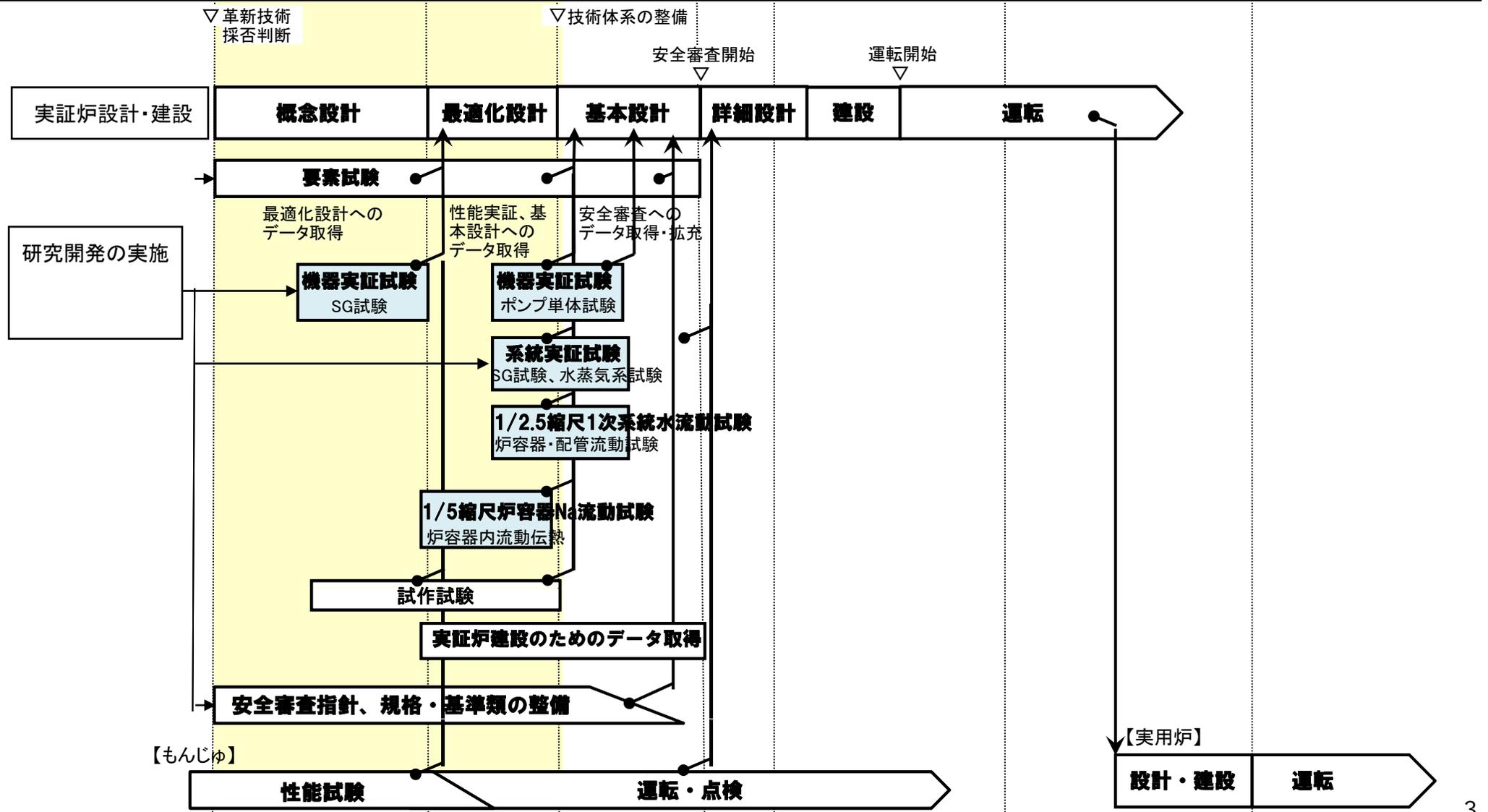
2015年頃

2018年頃

2020年頃

2030年頃

2050年頃



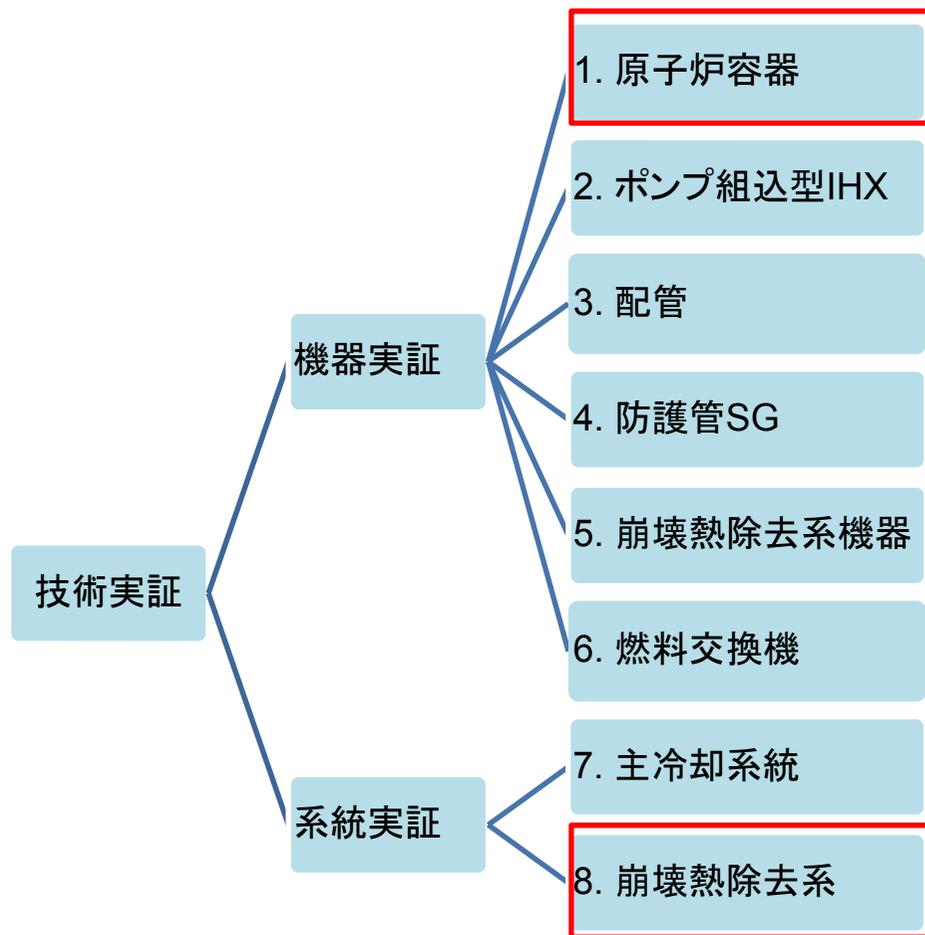


# 1. 実証試験の基本方針1

## ■ 検討範囲

- 実証炉の建設・運転に必要な技術
- ナトリウム系統・機器
- もんじゅの開発成果、一般産業技術を活用し設計・性能を実証する
  - ループ型Na炉の設計(ループ型炉のNa伝熱流動)
  - 大型Na機器設計(熱荷重が設計制限条件となる高温構造)
  - Na取扱技術・Na機器保守技術
  - ポンプ、等の一般産業技術

本資料で例示



検討範囲



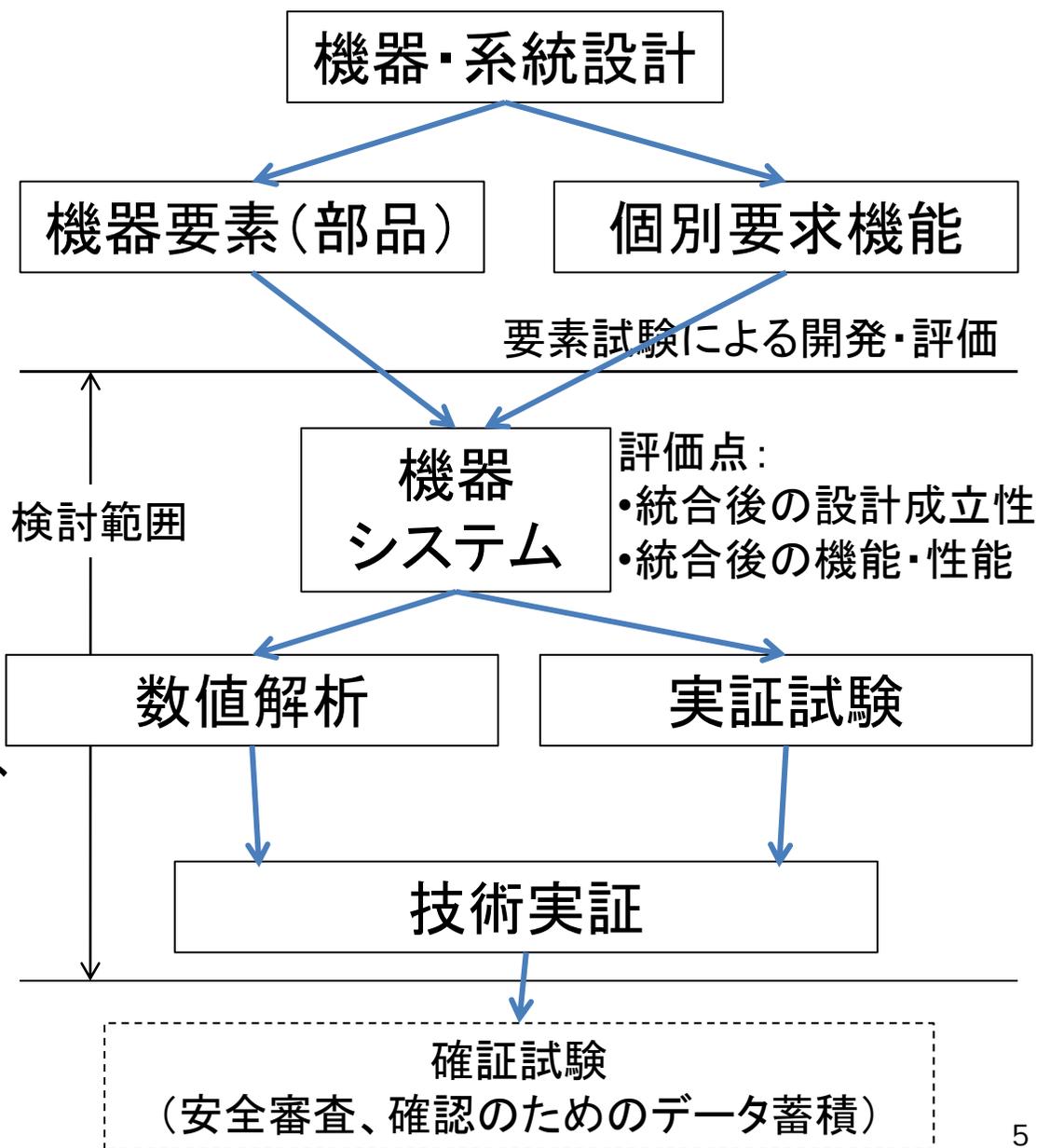
# 1. 実証試験の基本方針2

## ■ 解析技術を活用し設計成立性・性能を評価し、実証とする

- 要素試験等で検証された解析コードによる評価
- 他の要素と相互作用が無い現象は個別に解析で評価

## ■ 実証試験が必要な場合は、以下を考慮して合理的な試験計画を立案する

- 実証対象とすべき現象を絞り込み、適切な模擬範囲、作動流体、試験スケール、とする





## 2. 実証試験の考え方

### ①実証項目の抽出： 機器実証、系統実証の別に網羅的に実証項目を抽出する

機器	<ul style="list-style-type: none"><li>•性能</li><li>•安全性</li><li>•設計成立性</li><li>•構造健全性</li><li>•流動安定性</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• ナトリウム中動的機器の設計評価に必要なデータ取得</li><li>• 機器の基本的な伝熱流動性能評価に必要なデータ取得</li><li>• 熱(高温)と流動が複合して生じる現象に対する、伝熱性能、高温構造の健全性評価に必要なデータ取得</li></ul>
系統	<ul style="list-style-type: none"><li>•系統伝熱性能</li><li>•運転性</li><li>•過渡特性</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• <u>系統の運転性実証</u></li><li>• <u>系統の過渡特性実証</u></li></ul>



### ②実証方針の設定

(次葉にて説明)



### ③実証試験計画立案

- 現象の確認が可能な試験方法を考慮
- 試験の合理化のため以下を考慮
  - 試験の集約による試験数の削減
  - Na試験施設の集約による合理的な施設計画



## 2. 実証試験の考え方：実証方針の設定

基本方針に準じ各実証項目を以下の順に検討：

1. 先行炉・一般産業技術での設計成立性・性能評価可能性
2. 解析での設計成立性・性能評価可能性
3. 試験が必要な範囲・方法の検討

実証試験が必要となった項目：

- 解析評価の精度が十分に検証されていない現象

例：直管SGの伝熱性能・構造健全性、等

- 流動と伝熱、又は構造の振動が重畳した現象

例：SG伝熱流動、原子炉容器流動、配管流動、主循環ポンプ、等

- 機器間の流動に相互作用が生じる現象

例：1次系ホットレグの流動、原子炉容器上部プレナム、等



## 2. 実証試験の考え方：機器実証

### 機器実証試験計画

- 「もんじゅ」成果、検証済みの解析手法を活用し、性能実証すべき項目、試験範囲を合理化
- 実証すべき現象を定め、それに合わせた必要十分な試験スケール、作動流体を設定  
実証方法の検討例

対象機器	実証項目	実証方法	考え方
原子炉容器	ガス巻込防止	1/2.5縮尺水流動試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去のR&amp;Dで実流速条件である程度の規模(Fr歪みが小さくなる)の水試験により評価できるとする知見が得られている。</li> <li>ナトリウム/水の物性の影響について、基礎的な比較試験の結果により水試験が保守性をもって評価できると評価した。</li> <li>これまで、実用炉の1/10フルセクター及び1/1.8部分モデルによりFr歪み(実流速では縮尺の平方根に相当)の小さい条件まで確認した。これから、フルセクターを1/2.5で評価することで実証できると判断。</li> </ul>
	液中渦防止		<ul style="list-style-type: none"> <li>ターボ機械指針によりある程度以上大きな体系であればスケール依存性は小さいとの知見。</li> <li>ナトリウム/水の物性の影響については、水の粘性、圧力を変化させた試験により発生クライテリアを保守的に設定。</li> <li>その上で、スケール、上部プレナム内流れの影響を確認するために1/2.5試験を設定。</li> </ul>
ポンプ組込型 IHX	軸回転安定性	実寸ポンプNa試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>回転安定性は流体物性と構造が重畳した現象のため、実液・実構造での試験が必要</li> </ul>
	ポンプ内流動		<ul style="list-style-type: none"> <li>Na・ガスの流動・構造伝熱が重畳した現象のため、実液・実構造での試験が必要</li> </ul>
	水力部性能	縮尺水流動試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>比速度を一致させた縮尺水流動試験で性能実証可能(一般産業技術)</li> </ul>
	IHX伝熱性能	実寸Na伝熱流動部分試験 +縮尺水流動試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>伝熱管-Na流のマイクロな熱伝達現象はNa試験によりデータ取得</li> <li>機器内のマクロなNa流れは水流動試験によりデータ取得</li> <li>2つの試験結果を反映した解析により性能評価</li> </ul>



## 2. 実証試験の考え方：系統実証

### 系統実証試験計画

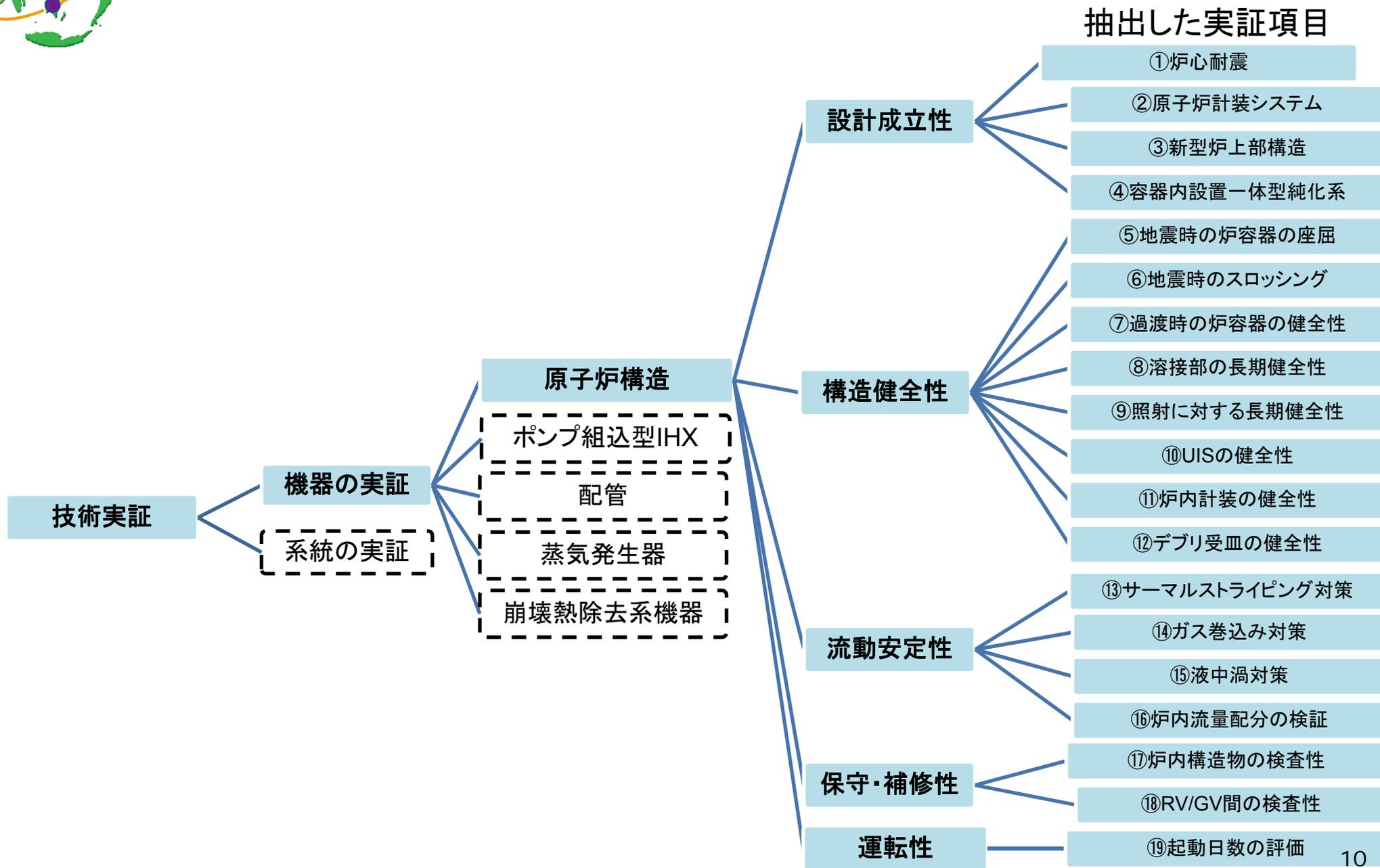
- 必要十分な範囲で機器同士を配管接続してシステムとして実証する
- 実証すべき現象を定め、それに合わせた必要十分な試験スケール、作動流体を設定
- 炉心、IHX伝熱管、長い配管等で機器同士の相互干渉が生じない部分は、単体で実証試験を実施する

#### 実証方法の検討例

対象機器	実証項目	実証方法	考え方
RV上部プレナム～ ホットレグ配管～ IHX上部プレナム	流動安定性	1/2.5縮尺水流動試験	<ul style="list-style-type: none"><li>• 上流の影響を含めた流動安定性を実証する</li><li>• 縮流部である炉心とIHX伝熱管の間を接続し水流動試験</li><li>• 原子炉容器の水流動と同時に実施するため、1/2.5縮尺とした</li></ul>
ポンプ出口～ コールドレグ配管	液中渦防止 流動安定性	1/3縮尺水流動試験	<ul style="list-style-type: none"><li>• 上流の影響を含めた流動安定性を実証する</li><li>• 縮流部であるポンプ出口とコールド配管出口の間を接続し水流動試験</li><li>• 液中渦発生を観測可能な1/3縮尺を設定</li></ul>
蒸気発生器～ 水・蒸気系統	伝熱性能 動特性	実寸、20～40MW Na・ 蒸気流動伝熱試験	<ul style="list-style-type: none"><li>• Na流動、構造伝熱、水・蒸気流動が重畳する現象のため、Na系・水系をSGで接続した実寸試験が必要</li><li>• SG内部の空間温度分布を模擬可能な管束規模(=出力)として20～40MW出力を検討中</li></ul>



### 3. コンパクト化原子炉構造の検討例： 実証項目の抽出





### 3. コンパクト化原子炉構造の検討例： 実証方針と実証方法の検討

項目	実証方針	実証方法	
設計成立性	①炉心耐震	• 解析コードで設計成立性・性能評価	
	②原子炉計装システム	• 安全保護系計装は安全審査向け確認試験を実施	(2016年以降に確認試験を実施)
	③新型炉上部構造	• 先行炉の知見で成立性・性能評価	(2016年以降にNa確認試験を実施)
	④容器内設置一体型純化系	• 先行炉の知見で成立性・性能評価	(2016年以降にNa確認試験を実施)
構造健全性	⑤地震時の炉容器の座屈	• 解析で設計成立性・性能評価	
	⑥地震時のスロッシング	• 解析で設計成立性・性能評価	
	⑦過渡時の炉容器の健全性	• 解析で設計成立性・性能評価	
	⑧溶接部の長期健全性	• 高温設計基準として要素試験で実証	
	⑨照射に対する長期健全性	• 高温設計基準として要素試験で実証	
	⑩UISの健全性	• 制御棒挿入性は先行炉の知見で評価 • UIS流力振動は解析で設計成立性・性能評価	• (2016年以降にCR挿入性Na確認試験、地震時確認試験を実施) • (UIS流力振動は2016年以降にNa確認試験を実施)
	⑪炉内計装の健全性	• 実流速を模擬した縮尺水流動試験で性能を実証	(1)縮尺水流動試験で実証
流動安定性	⑫デブリ受皿の健全性	• 流動解析及び構造解析により成立性評価	
	⑬サーマルストラッピング対策	• 要素試験で検証した解析コードで成立性評価	
	⑭ガス巻込み対策	• 1/3以上の縮尺+実流速の水試験で性能を実証	(2)縮尺水流動試験で実証
	⑮液中渦対策	• 実流速を模擬した縮尺水流動試験で性能を実証	(3)縮尺水流動試験で実証
保守・補修性	⑯炉内流量配分の検証	• 定格時の炉内流動を水流動試験で実証 • 自然循環時のPRACS+DRACS運転条件での炉内流動をNa試験で実証。1/5以上のスケールが必要	定格時は(4)縮尺水流動試験で実証 自然循環時は(5)縮尺炉内Na熱流動試験で実証
	⑰炉内構造物の検査性	• 検査機器開発成果で設計成立性・性能を評価	(2016年以降にNa確認試験を実施)
運転性	⑱RV/GV間の検査性	• 検査機器開発成果で設計成立性・性能を評価	(2016年以降にNa確認試験を実施)
	⑲起動日数の評価	• 解析で設計成立性・性能評価	



### 3. コンパクト化原子炉構造の検討例： 実証試験計画

#### ⑪ 炉内計装の健全性

- 実流速を模擬した上部プレナム縮尺水流動試験

#### ⑭ ガス巻き込み対策

- 1/3縮尺以上で上部プレナムを縮尺模擬した水流動試験
- 実流速までの流動可能

#### ⑮ 液中渦対策

- 上部プレナムを模擬した縮尺水流動試験
- 実流速までの流動可能

#### ⑯ 炉内流量配分の検証

- 上部プレナムを模擬した縮尺水流動試験

#### (他項目) ホットレグ配管流動安定性

- 上部プレナムの乱れを含む試験条件での水流動試験

#### ⑰ 炉内流量配分の検証

- 1/5縮尺(直径2m)以上の容器径でのNa伝熱流動試験

#### (他項目) 自然循環時の除熱特性

- PRACS、DRACSの除熱特性をNa環境で確認

#### 1/2.5縮尺1次系統水流動試験

- 1次系ホットレグの水流動試験項目を集約して合理的に実施
- 試験項目の集約による設備の有効活用

#### 1/5縮尺プレナムNa熱流動試験

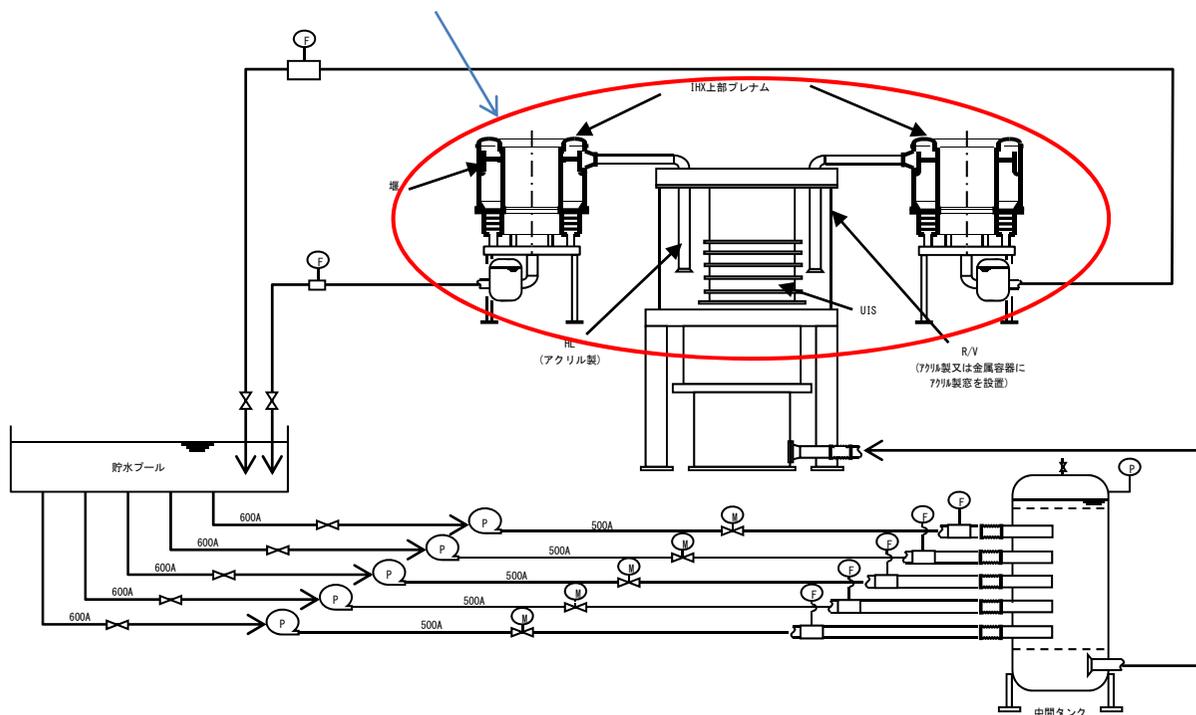
- 自然循環時のRV上部プレナム内Na伝熱流動試験項目を集約して合理的に実施
- 試験項目の集約による設備の有効活用
- 既設設備の改造による合理化



### 3. コンパクト化原子炉構造の検討例： 試験装置検討例

#### 1/2.5縮尺1次系統水流動試験

1/2.5スケール1次主冷却系模擬部：  
炉容器上部プレナム、ホットレグ、IHX入口プレナム



1次系水流動試験装置 概念図

#### 試験の狙い：

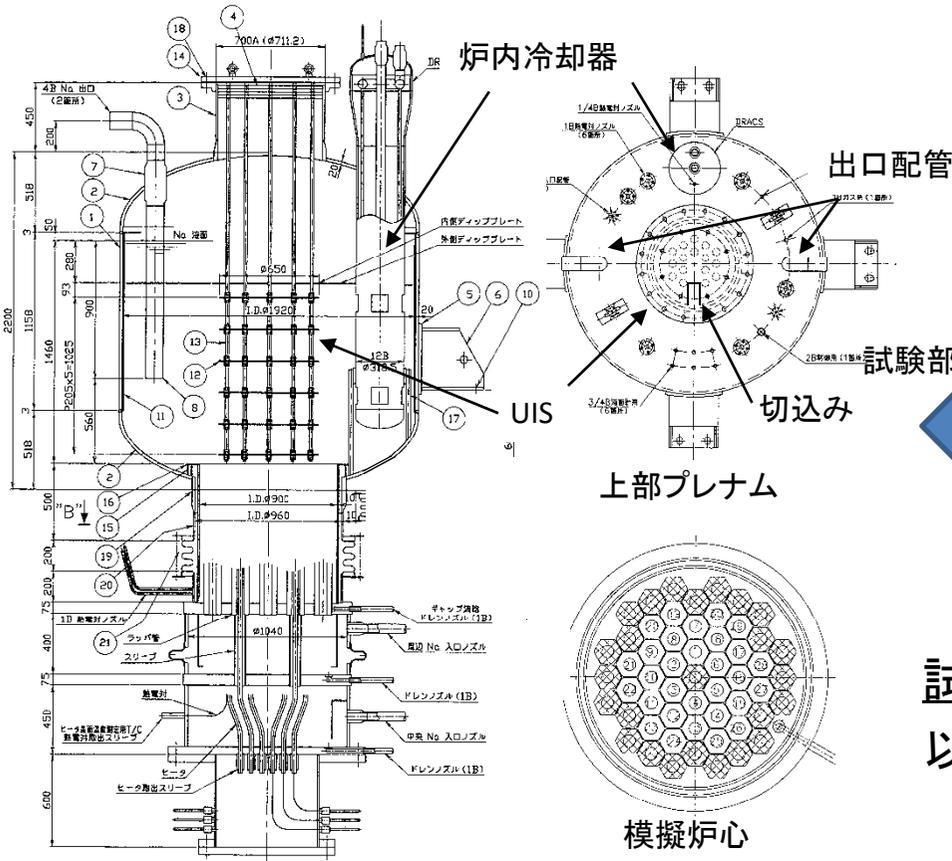
1次主冷却系内の以下の現象に関して、  
1/2.5スケールの水流動試験を実施  
し技術実証する。

- 1) 原子炉容器上部プレナム内の流動
  - 自由液面からのガス巻込の抑制
  - 液中渦の抑制
  - 炉内計装、ディッププレート、DHX、CT、CL配管、等の流力振動の抑制
- 2) ホットレグ配管の流力振動
  - 上部プレナム内の乱れ、偏流の影響確認
  - 上部プレナム内流動による配管外部流の影響確認
  - 配管出口のIHX堰の影響確認
- 3) IHX入口プレナム内の流況・流動安定性
  - 堰の効果による周方向流量均一性の確認
  - 堰の流力振動抑制
  - PRACS伝熱管の流力振動抑制

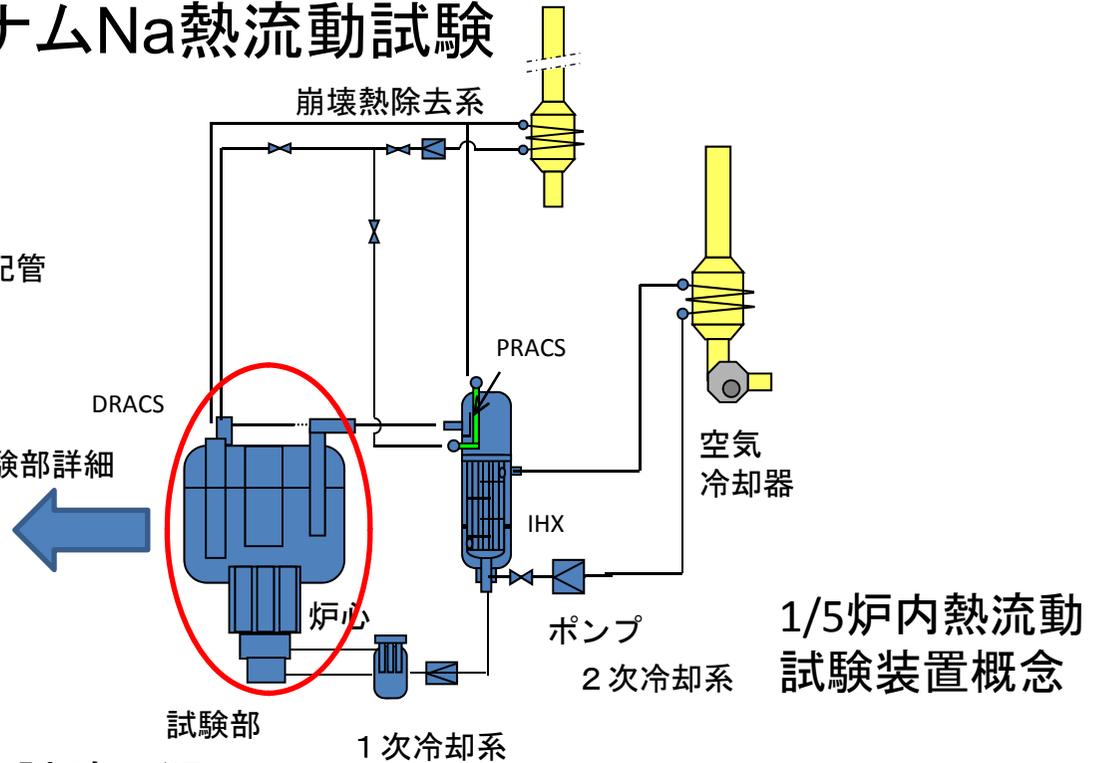


### 3. コンパクト化原子炉構造の検討例： 試験装置検討例

#### 1/5縮尺プレナムNa熱流動試験



試験部詳細図  
PLANDTLを改造



1/5炉内熱流動  
試験装置概念

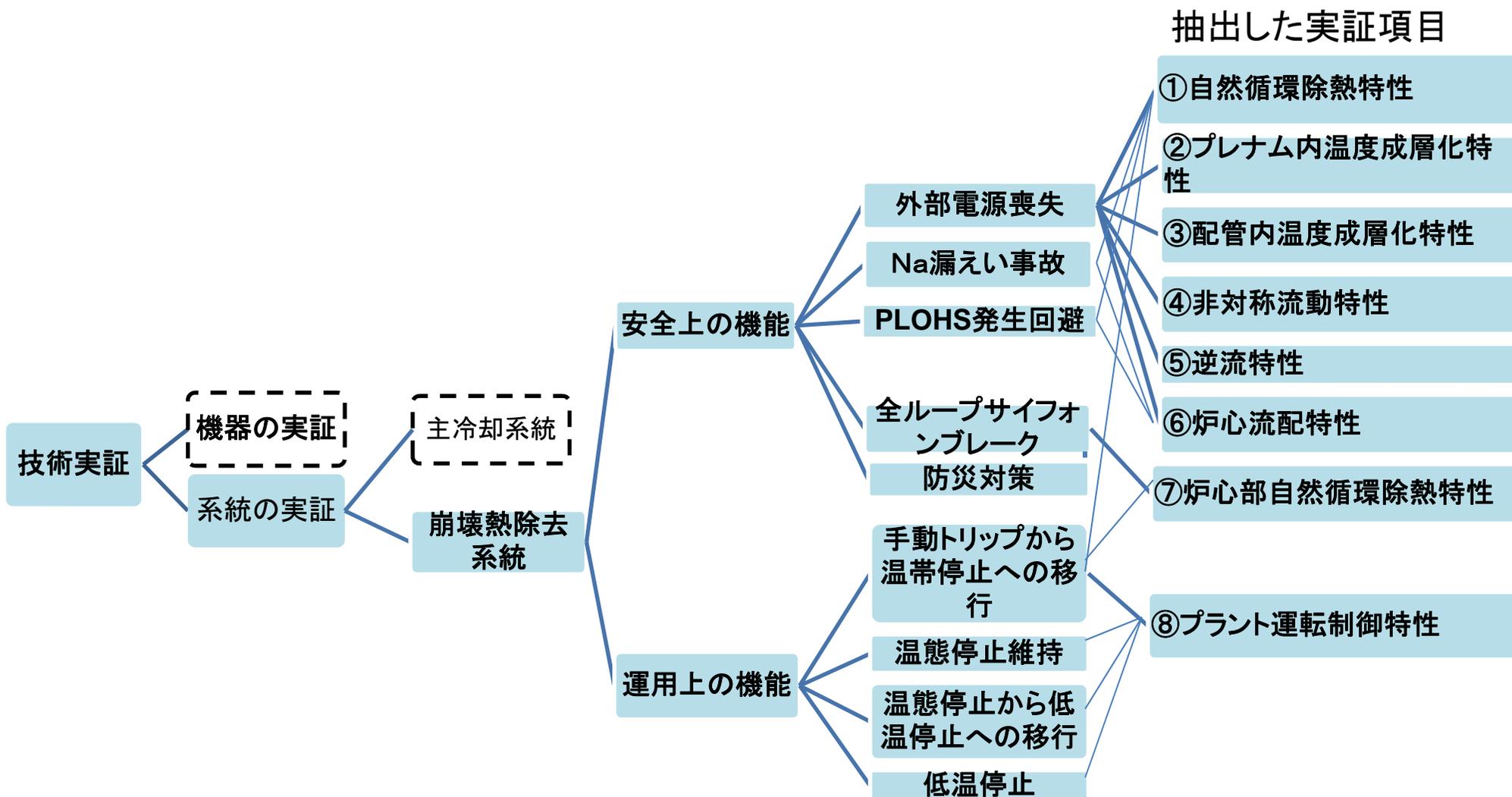
#### 試験の狙い:

以下の現象に関して、原子炉容器を模擬したΦ2m程度の試験体を用いてナトリウム試験を実施する。

- 1) PRACS及びDRACSが運転されたときの自然循環時の炉心部を含む炉内自然対流、UIS内部の温度変動、温度成層化、1次系自然循環への影響
- 2) スクラム後の温度成層化 等



## 4. 崩壊熱除去系の検討例： 実証項目の抽出





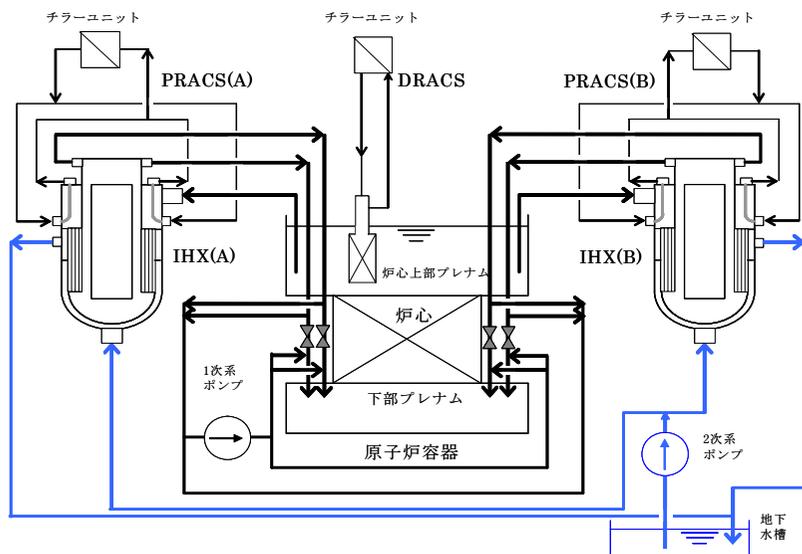
## 4. 崩壊熱除去系の検討例： 実証方針と実証方法の検討

実証項目	実証方針	実証方法
① 自然循環除熱特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元熱流動解析コードを以下のデータで検証する               <ul style="list-style-type: none"> <li>-1次系の全体流動挙動は伝熱流動場の模擬性が高い</li> <li>1/9縮尺水伝熱流動試験(Ri数=一致、Pe数=実機×1/4程度、Re数=乱流域)で検証</li> <li>-RV上部プレナム内流動は、部分Na試験で検証</li> <li>-集合体-プレナムの相互作用は既存試験データで検証</li> <li>-スケール効果に関してはもんじゅ自然循環試験データで検証</li> </ul> </li> <li>解析により除熱性能を評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1)1/9縮尺水伝熱流動試験を実施</li> <li>(2)1/5炉内熱流動試験を実施</li> <li>(3)もんじゅ自然循環試験を性能試験の中で実施</li> </ul>
② プレナム内温度成層化特性		
③ 配管内温度成層化特性		
④ 非対称流動特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>解析及び1次系全体を模擬した水流動試験で評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1)1/9縮尺水伝熱流動試験を実施</li> </ul>
⑤ 逆流特性		
⑥ 炉心流配特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元熱流動解析コードを以下のデータで検証する               <ul style="list-style-type: none"> <li>-既存Na試験による集合体内流動伝熱特性データ</li> <li>-炉心と系統及びプレナムの相互作用を試験で検証</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(2)1/5炉内熱流動試験を実施</li> </ul>
⑦ 炉心部自然循環特性		
⑧ プラント運転制御特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>検証済みの3次元熱流動解析コード、及び1次元動特性解析コードにより評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1/5Na試験により、動特性解析コードに関する制御性を確認</li> </ul>

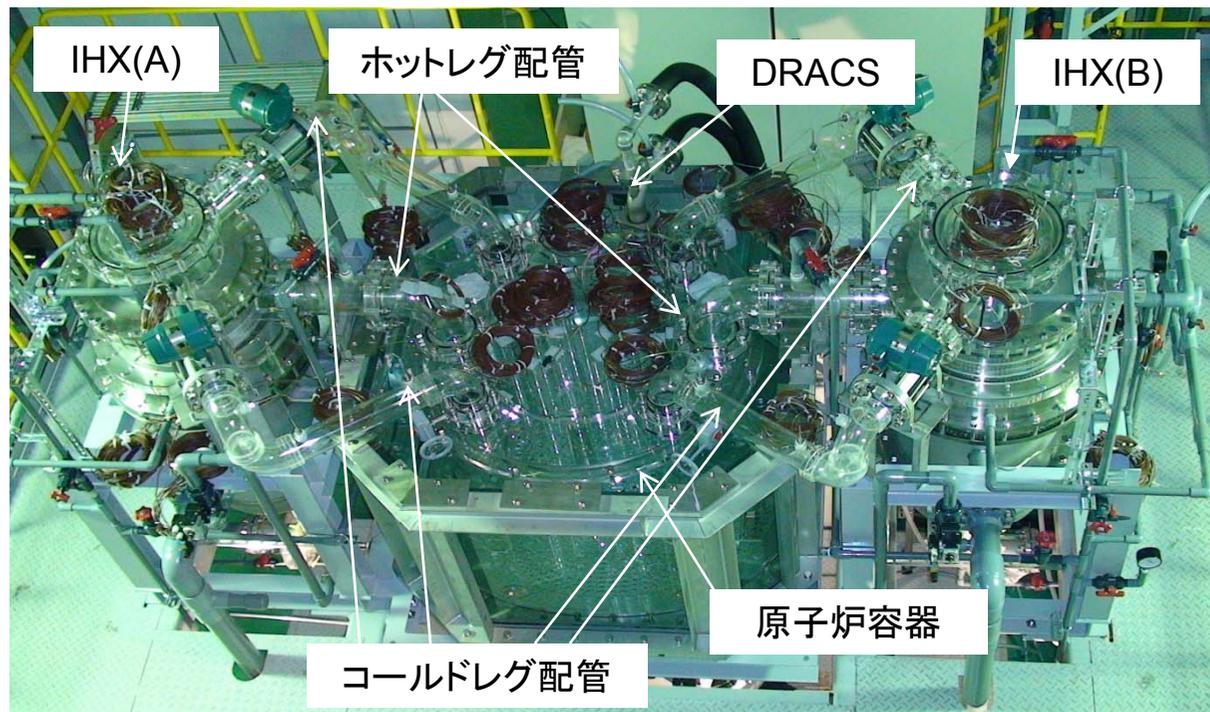


## 4. 崩壊熱除去系の検討例：試験装置の検討例

### 1/9縮尺水伝熱流動試験



システム水試験装置基本系統構成



システム水試験装置鳥瞰図

#### モデルの相似条件

Ri数（流動抵抗係数とその分布）一致

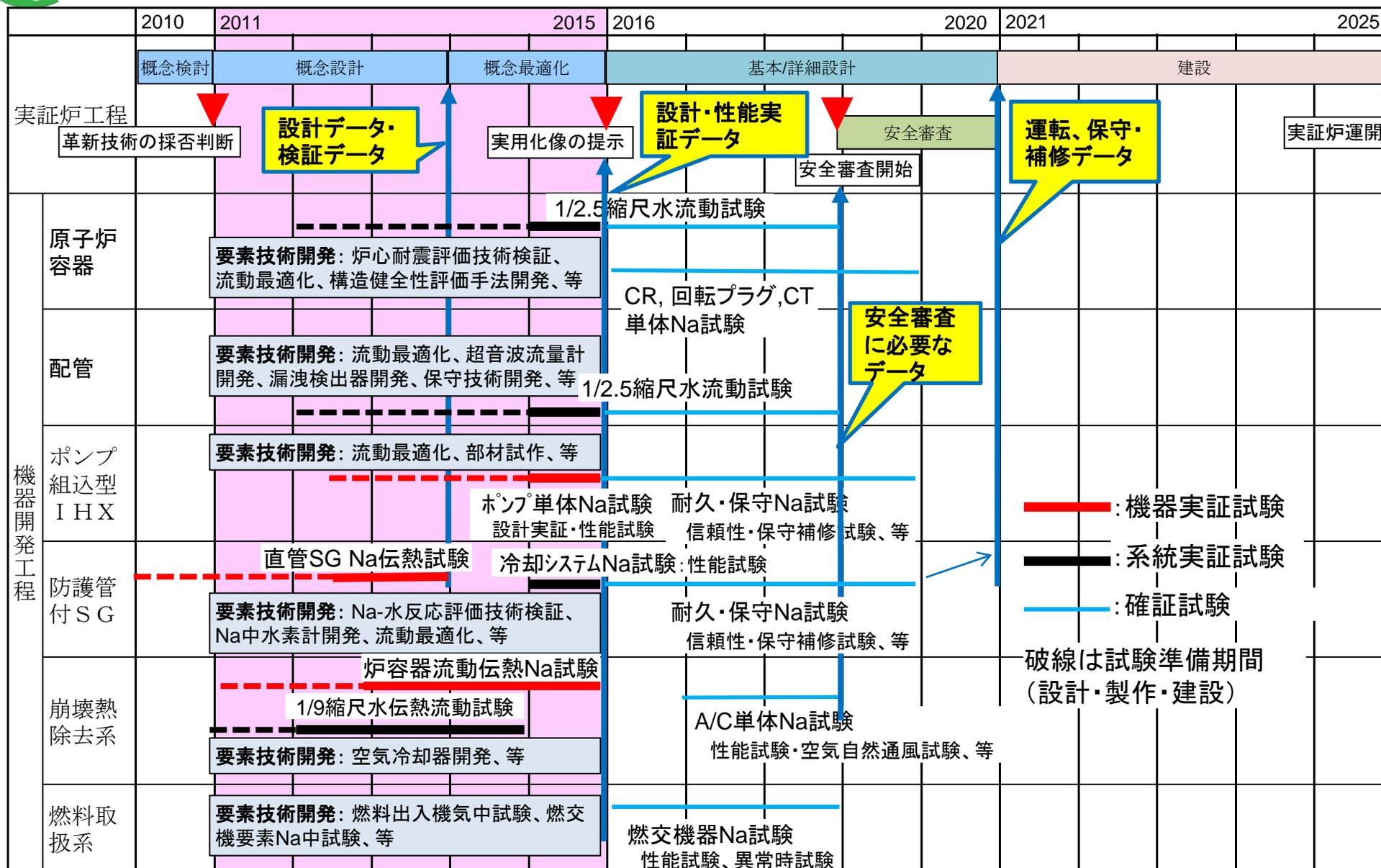
発熱の空間分布 一致

Pe数：熱伝導と対流熱輸送の比  $\sim 1/4$

Re数：慣性力と粘性力の比  $\sim 1/300$ (乱流域)



# 5. 実証試験計画



— : 機器実証試験  
— : 系統実証試験  
— : 確証試験  
 破線は試験準備期間 (設計・製作・建設)



# まとめ

- 実証試験の基本方針を設定した
  - もんじゅの成果と一般産業技術を踏まえた方針
  - 解析技術を活用した方針
- 実証炉を構成する機器・系統の実証項目を網羅的に摘出し、実証方針に基づき2015年までの試験計画を立案した
  - 解析で設計成立性・性能評価を行う
  - 水またはナトリウムで実証試験を行う



# 実証試験の考え方

2011年2月22日

独) 日本原子力研究開発機構  
次世代原子力システム研究開発部門

実証試験による設計成立性・性能の確認が必要な実証項目を抽出した上、FaCT フェーズ II (2011～2015 年) での合理的な試験計画を立案する考え方について述べる。

## 1. 概要

FaCT プロジェクトのフェーズ I 研究開発では、種々の要素試験を重ね技術採否判断を行った。JSFR に採用した革新技術では、先行炉である常陽・もんじゅ開発・運用で蓄積した知見や一般産業技術の知見で評価できる部分もあるが、これらの外挿範囲を越える部分や新たな技術を導入した部分もある。それらの外挿範囲を超える部分、新技術の設計成立性・性能については、これまで開発してきた解析技術で評価できる項目と、実証試験によってそれを確認する項目がある。

ここでは、実証炉の設計でその設計成立性・性能の確認が必要な項目を網羅的に抽出し、実証項目それぞれについて、先行炉知見で実証する項目、解析で評価する項目、実証試験を実施する項目を分別した上、合理的な試験計画を立案する考え方について述べる。

## 2. 機器・システムの技術実証の考え方

### 2.1 検討対象とする機器・システム

JSFR の実用炉へ至る開発計画では、次のステップは実証炉の建設・運転となる。そこで、技術実証の対象とするプラントは JSFR 実証炉とする。また、ナトリウム系統以外の機器・システムは、軽水炉を含む先行炉の経験と一般産業技術により評価可能であることから、ここではナトリウム系統を検討対象とする。

その結果、技術実証の検討対象とする機器・システムは図 1 に示すとおりとした。

### 2.2 基本方針

技術実証計画を検討する上で、基本的な方針を以下のとおり設定した。

#### (1) もんじゅの開発成果・一般産業技術による技術実証

以下の既存技術を活用して、設計成立性・性能を実証する

- ・ ループ型 Na 炉の設計  
もんじゅの成果として得られた、ループ型炉の Na 伝熱流動評価技術を活用する。
- ・ 大型 Na 機器設計

もんじゅ開発を通して蓄積された、高温構造設計技術（熱荷重が設計制限条件となる高温構造）を活用する。

- ・ Na 取扱技術・Na 機器保守技術  
もんじゅの設計・運用実績として蓄積された Na 取扱技術と保守技術を活用する。
- ・ ポンプ、等の一般産業技術  
大流量ポンプ等の一般産業で蓄積された技術を利用する。

### (2) 解析技術を活用して設計成立性・性能を評価し、実証とする

要素試験成果等により十分に検証された解析手法は、設計成立性や性能を精度良く評価可能であり、その場合には解析により技術を実証することが可能である。

### (3)合理的な試験計画

実証試験が必要と判断する実証項目に関しては、実証項目を集約して試験装置を構成し、合理的な試験計画とする。

## 2.3 検討のステップ

以下の検討ステップで技術実証の計画を立案した。

### (1) 実証項目の抽出

前項で検討対象とした機器及び系統について、実証すべき実証項目を抽出した。機器の実証項目の抽出では、採否評価での評価項目に安全性、構造健全性、流動安定性、の観点を加えて、網羅的に検討した。系統の実証項目の抽出では、機器同士を配管接続した系統での機能と、安全上の機能が設計成立性評価項目であることから、系統構成での熱流動現象、運転制御性、及び全ての事故事象を検討の視点として実証項目を抽出した。

検討の結果、機器及び系統の実証項目抽出の視点として以下を設定した。

<機器実証の実証項目抽出の視点>

- 設計成立性
- 構造健全性
- 流動安定性
- 保守・補修性
- 運転性

<系統実証の実証項目抽出の視点>

- 安全上の機能
- 運用上の機能

### (3) 実証内容の検討

(1)項で抽出した実証項目に対して、それぞれ実証方針を検討した。それぞれの項目に対して以下の視点で検討し、合理的な実証内容とした。

<前提>

- もんじゅ成果の活用

もんじゅ成果により設計成立性及び性能を評価可能な項目については、それらの従来技術を適用する。

- 解析による設計成立性・性能評価

これまで及び2015年までのR&Dにより設計評価技術が十分に検証され、性能評価に適用可能な見通しを有する項目は、解析で実証する。

<機器実証>

- 試験実証すべき現象・機能の絞り込み

試験範囲・規模を合理的に設定するため、実証すべき現象を絞り込んだ。具体的には、流動、伝熱、構造、で発生する現象が複合的に発生する現象に関しては実現象を模擬して試験実証する。一方、独立した現象に関しては、可能な限り詳細計測が容易な単独の要素試験として試験実証する。

- 試験実証での作動流体・試験スケールの吟味

現象計測及び合理的な試験とするため、試験の作動流体と試験スケールを適切に設定した。具体的には、流動試験は現象計測が容易な水流動試験、ナトリウムの物性・伝熱流動を含む現象に関してはナトリウム試験とする。更に、試験スケール・熱出力スケールの設定では、前項の試験実証すべき現象を考慮して、必要最小限のスケールとする。

作動流体や試験スケールの設定では、個々の現象の特性を考慮して検討するが、例えば、原子炉容器上部プレナム内での自由液面からのガス巻き込み防止に関する実証試験では、以下の検討により1/2.5縮尺の水流動試験を実証方策として設定した。

- ・ 過去のR&Dで実流速条件である程度の規模( $Fr$ 歪みが小さくなる)の水試験により評価できるとする知見が得られている。
- ・ ナトリウム/水の物性の影響について、基礎的な比較試験の結果により水試験が保守性をもって評価できると評価した。
- ・ これまで1/10フルセクター、1/1.8部分モデルにより $Fr$ 歪み(実流速では縮尺の平方根に相当)の小さい条件まで確認した。これから、フルセクターを1/2.5で評価することで実証できると判断。

また、1次系主循環ポンプに関しては、構造を1/1で模擬、吐出流量は1/10とする試験体仕様を選択したが、これは以下の検討の結果である。

- ・ ポンプ軸の回転安定性は流体物性(静圧軸受部での $Na$ 粘性)とポンプ構造の振動特性が重畳した現象のため、実液・実寸での試験が必要
- ・ 機内の熱流動挙動に関しては、 $Na$ ・ガスの流動・構造伝熱が重畳した現象のため、実液・実構造での試験が必要
- ・ ポンプ水力部については、比速度を一致させた縮尺水流動試験で性能実証可能(一般産業技術)であり、構造の試験とは別に実施することが可能。

### <系統実証>

- 系統接続範囲の絞り込み

試験規模を合理的に設定するため、系統として機器を接続しループ構成する範囲を絞り込んだ。具体的には、機器接続範囲を流動を中心とした機器間の相互干渉が生じる可能性がある範囲に限定した。

ループ接続する範囲に関しては、個々の部位の特性を考慮して検討するが、例えば、1次冷却系では、RV 上部プレナム～ホットレグ配管～IHX 上部プレナムの範囲の水流動試験については、以下の検討による。

- ・ 上流の乱れの影響を含めた流動安定性を実証する。
- ・ 縮流部である炉心と IHX 伝熱管の間を接続し流れの乱れを詳細に観測可能な水流動試験とする。
- ・ 原子炉容器の水流動と同時に実施するため、1/2.5 縮尺とした。

#### (4) 試験方法の検討

(3)項で設定した試験実証内容を具体的な試験計画に展開するにあたり、合理的な試験計画とするために、以下の点を考慮した。

- 既設試験装置の活用

既設試験装置での試験実施をまず検討し、それが不可能な場合のみ試験装置を新設する。

- 複数の実証内容の集約実施

複数の実証内容を集約して実施した方が合理的な場合は、試験成果に影響を与えない範囲で試験を集約実施する。

- 新規 Na 施設の集約

Na 試験ループ装置はユーティリティ設備（充填・ドレン系、純化系、ガス系、等）、運転員、等を複数の試験設備で共有化することが合理的である。そのため、新規の Na 試験施設はインフラが整った地点に集約する。

### 3. 実証試験計画

前節の考え方に基づいて実証試験計画を立案した。その概要を図 2 に示す。

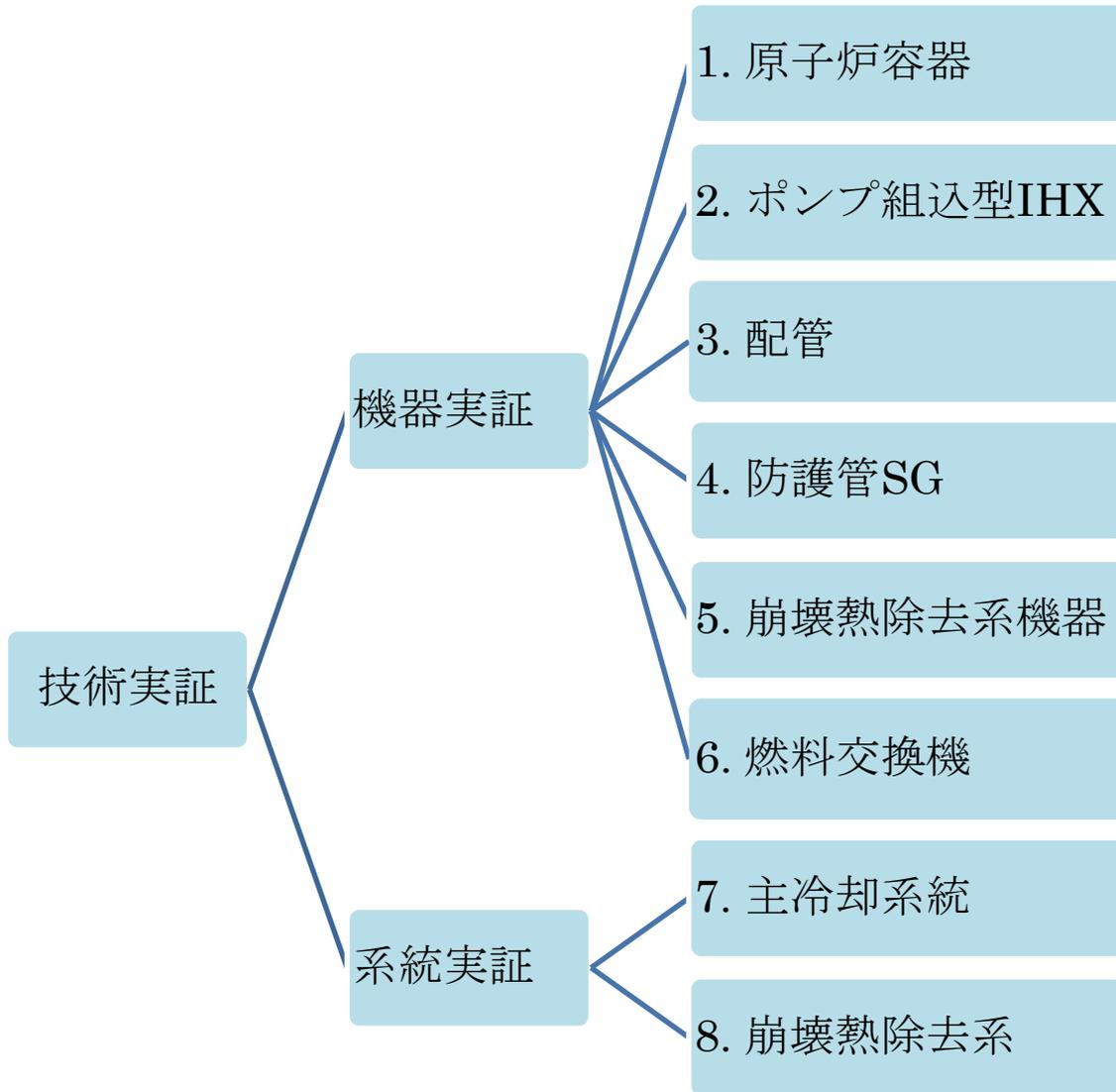


図1 技術実証の検討対象とする機器・系統

図2 実証試験計画

