

# ナトリウム炉としての技術的特徴及び 研究開発段階炉としての特徴

平成28年 1月28日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

## 本日のご説明内容

「もんじゅ」がナトリウム冷却炉、研究開発段階炉であることを踏まえ、その特徴に対して設計・建設、運転、保守において対応する技術的事項についてご説明

## 目次

1. 高速炉の特徴(軽水炉との比較)
2. ナトリウムの特徴と運転上・保守上の考慮事項
3. 高速炉のシステム構成(軽水炉との違い)
4. 研究開発段階炉の役割
5. 研究開発段階炉の特徴 — 運転・保守における対応例 —
6. まとめ

- 燃料にプルトニウムを使用
- 高速中性子を使用
- 冷却材にナトリウム(液体金属)を使用

	主要項目	もんじゅ	軽水炉(PWR)
炉心	①燃料 ②中性子	ウラン・プルトニウム燃料  高速中性子	ウラン燃料 (プルサーマルでウラン・プルトニウム燃料も装荷) 熱中性子
冷却系	①冷却材 ②一次ナトリウム系 ・温度(出口/入口/温度差) ・圧力 ③二次ナトリウム系 ・温度(出口/入口) ④主蒸気系 温度/圧力	ナトリウム  529/397/Δ132 °C 約0.69MPa(ポンプ出口)(低圧)  505/325°C 483°C/約12.4MPa(127kg/cm <sup>2</sup> )	水  約325/約289/Δ約36 °C 約15.4MPa(原子炉内)(高圧)  (中間系がない) 274°C/約5.7MPa
基本仕様	①電気出力 ②炉心熱出力 ③熱効率 ④冷却系ループ数	280 MWe 714 MWt 約39% 3ループ	約1,160 MWe 約3,411 MWt 約34% 4ループ

## 2. ナトリウムの特徴と運転上・保守上の考慮事項



固体状のナトリウム



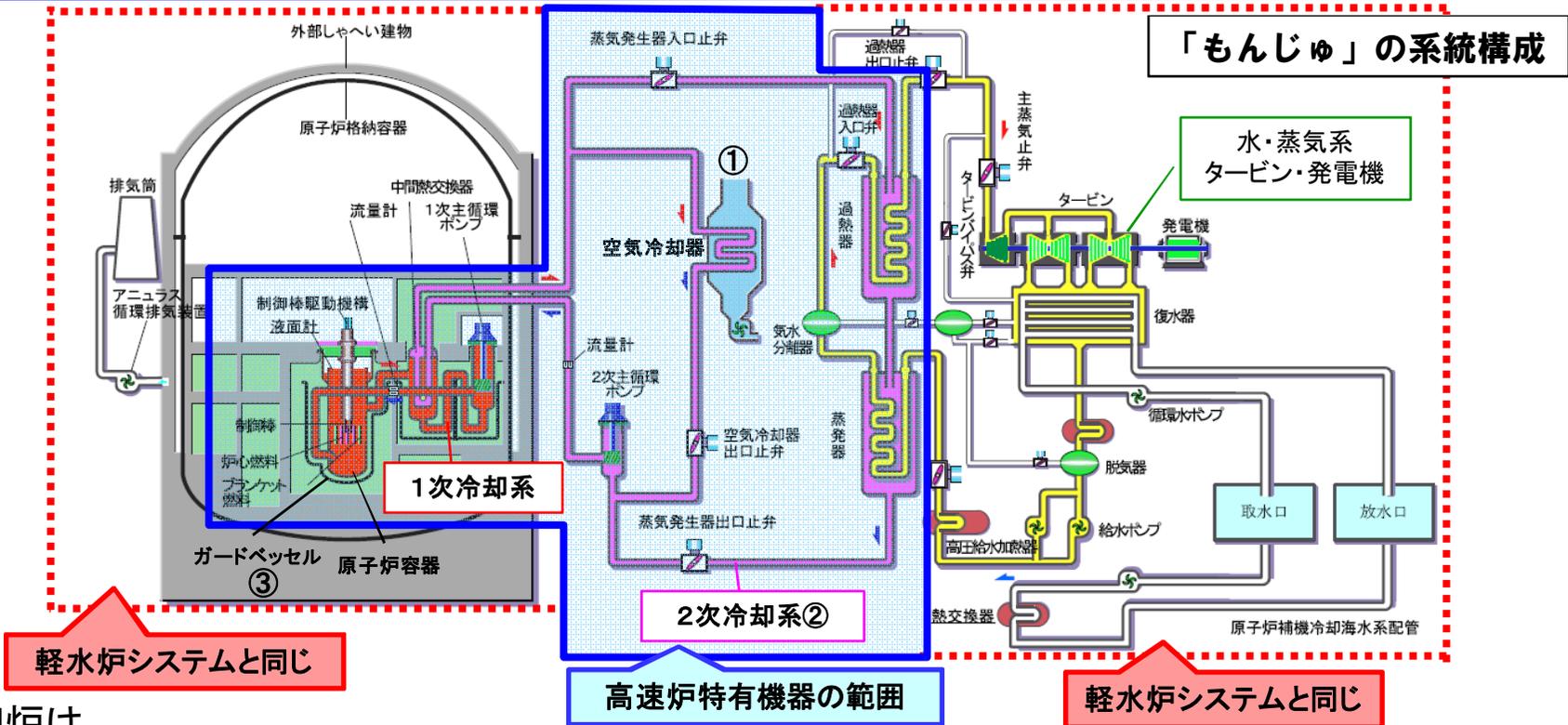
液体状のナトリウム



燃焼するナトリウム

ナトリウムの特徴	運転上・保守上の考慮事項
<b>常圧での高い沸点</b> (約 881 °C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高温になっても内圧を低く設計できるので、事故時(冷却材(ナトリウム)漏えい時)に沸騰がない(→P15, 16に詳述)</li> <li>・運転温度(529°C)でも沸騰せず、1次系の圧力制御が不要なため、原子炉の運転が容易</li> <li>・高温で使用するため設計時にクリープ変形を考慮</li> </ul>
<b>常温では固体</b> (融点:約98°C)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・運転時には配管はヒータで予熱し、保温材で覆うシステムを採用(→P17に詳述)</li> <li>・停止時にはナトリウムを凝固させ、その漏えい防止が可能</li> </ul>
<b>小さい比熱</b> (1.32kJ/(kg・K)※) <b>高い熱伝導率</b> (69.8W/(m・K)※)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・沸点と伝熱性能が高く、原子炉出入口温度差を大きく取れるため、自然循環が容易に発生、これを利用して崩壊熱除去が可能(→P18に詳述)</li> </ul>
<b>化学的に活性</b> (水、酸素と反応)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・冷却材の自由液面を不活性ガスで覆うシステムを採用</li> <li>・漏えいした際に空気と反応して発生する化合物(エアロゾル)の発生・拡散を防止するため、放射性ナトリウムを保有するシステムを収納する部屋は窒素ガスを封入(→P19, 20, 21に詳述)</li> <li>・蒸気発生器でナトリウム-水反応事故が発生した場合、1次系機器に影響を与えることにより放射性ナトリウムの施設外漏えいが起きないように、2次冷却系(中間系)を設置</li> </ul>
<b>鉄鋼材料との共存性良好</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・酸素等の不純物を低く管理することで、内面の腐食による減肉は考慮不要(→P22に詳述)</li> </ul>
<b>透明ではない</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・冷却材中の機器の目視操作等が困難ため、燃料交換作業は遠隔自動で操作(→P19に詳述)</li> </ul>
<b>電気を良く通す</b> (17.61 μΩcm※)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電磁界による電磁ポンプ、電磁流量計が使用可</li> <li>・電気式の液面計、漏えい検出器が使用可</li> </ul>

※:300°C、0.1013MPaの場合



ナトリウム冷却炉は、

- ① 原子炉停止後の崩壊熱の最終放出先は空気
- ② 1次系と水・蒸気系の間に中間冷却系(2次系)を設置
- ③ 万一の冷却材漏えい時の冷却材液位確保にガードベッセルを設置

高速炉は、

- 止めるに関し、独立した2系統の制御棒(主炉停止系と後備炉停止系)により原子炉を停止
- 冷やすに関し、3ループの冷却システムを持ち、自然循環冷却により崩壊熱の大气放出が可能であり、電源喪失があっても安定な炉心冷却が可能
- 閉じ込めるに関し、軽水炉と同様に5重の壁により放射性物質を閉じ込める

# 4. 研究開発段階炉の役割

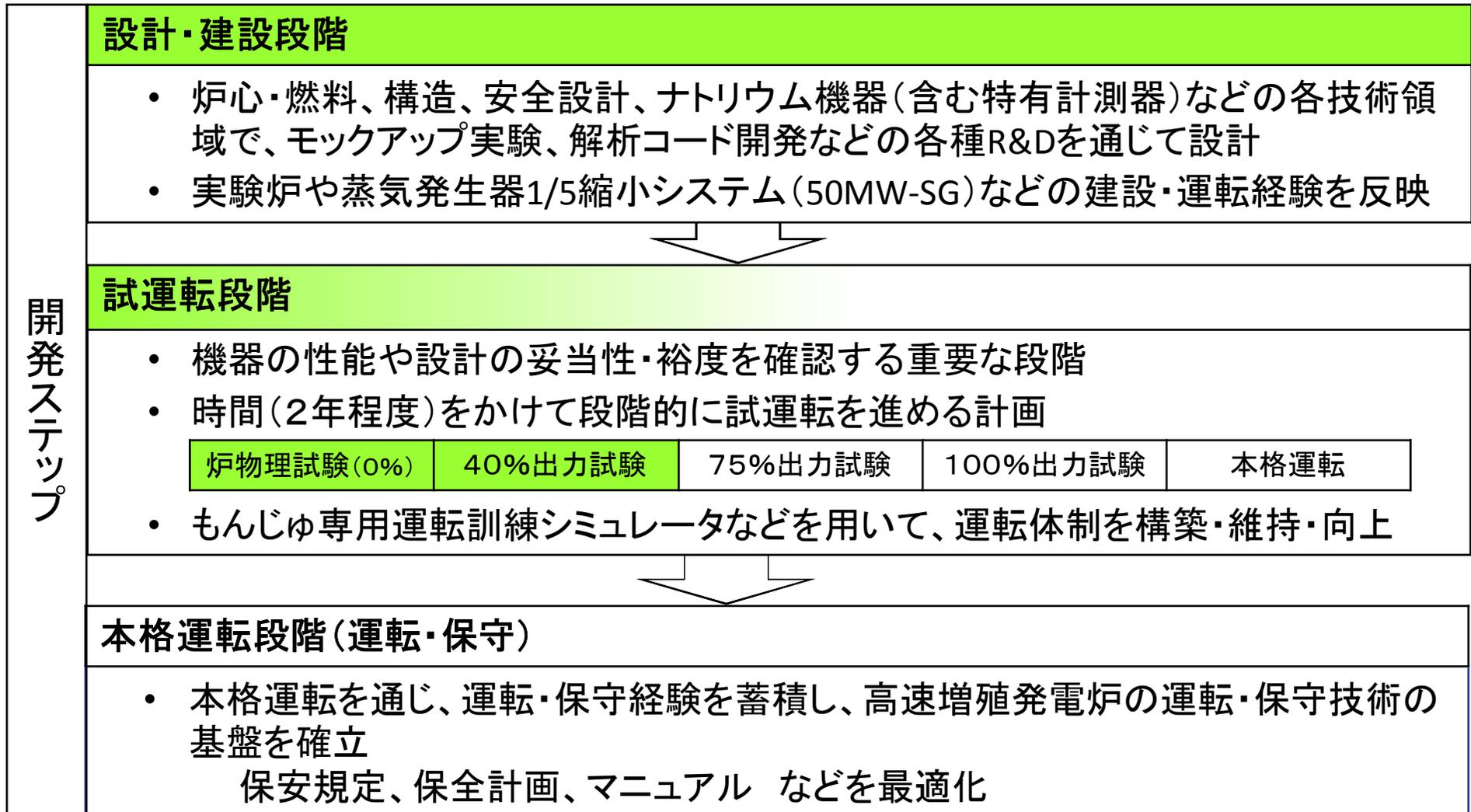
- ①実験炉→②原型炉→③実証炉→④実用炉と段階的に開発
- 「もんじゅ」は、国産技術で開発したナトリウム冷却型高速増殖炉の②原型炉であり、研究開発段階炉  
 裕度を持たせた設計について妥当性や裕度を確認し、発電炉としてのシステム化を実証し、運転を通じた安全性・信頼性の実証や運転・保守技術の基盤を確立
- 規制の法律体系は ①「試験研究炉」、②「研究開発段階発電用原子炉」、③「実用発電用原子炉」で区分

「もんじゅ」成果と革新技術投入により、**大型化、経済性、高効率性**を実証



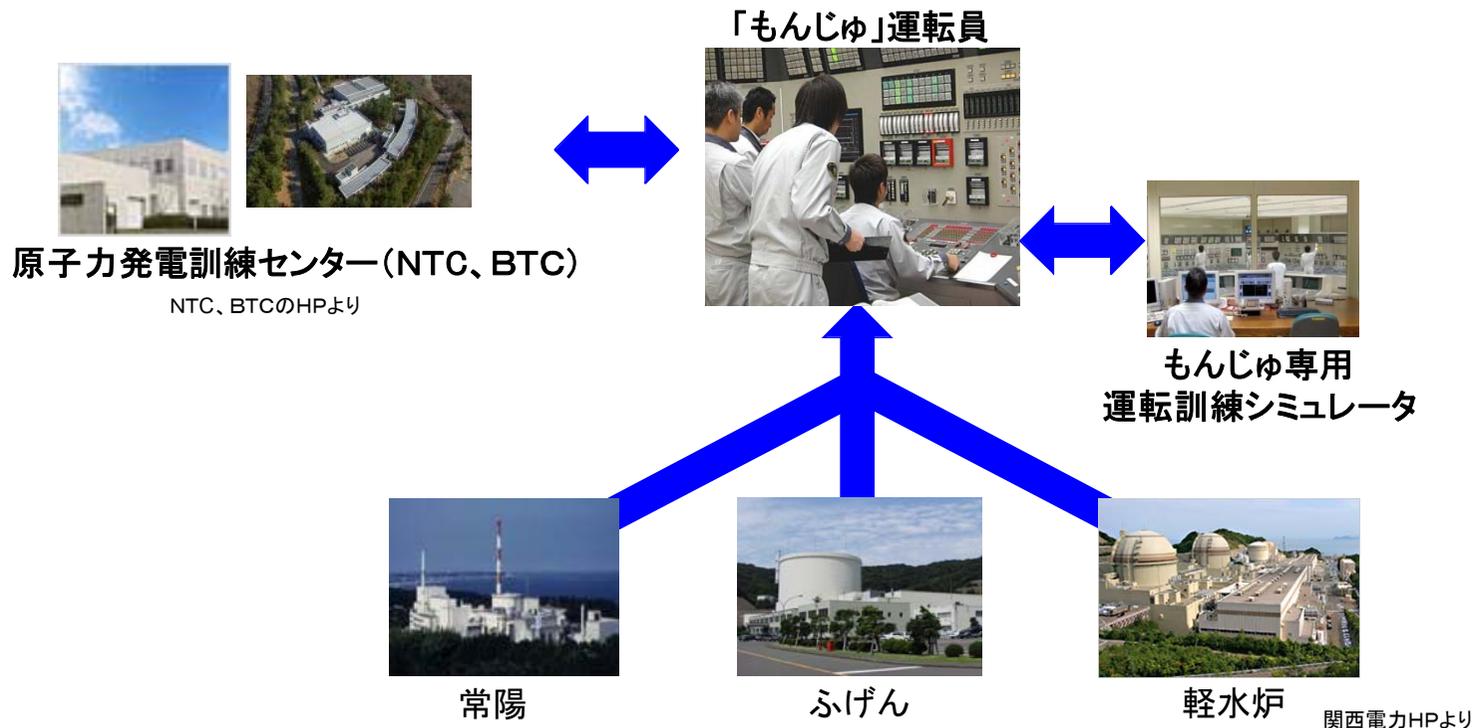
- 「もんじゅ」は、設計・建設～試運転～本格運転の各段階で研究開発を行いながら、プロジェクトを進める計画

緑色の部分は既に終了したもの



## 運転体制の確立

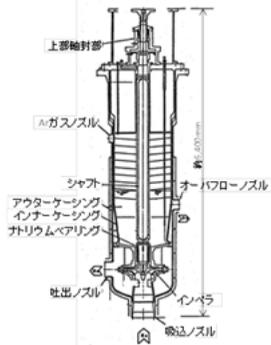
- 大洗ナトリウム機器運転経験者(「常陽」、50MW-SG)、ふげん運転経験者(研究開発段階の重水炉)、軽水炉運転経験者(電気事業者殿から出向、現在も継続)が参集し、初期立上げ
- フル規格のもんじゅ専用運転訓練シミュレータでの訓練、原子力発電訓練センター(NTC、BTC)での研修、高速実験炉「常陽」への派遣による実機運転操作を通じ運転技能の維持・向上を図っている。



## ナトリウム機器の運転方法・保守方法の確立

- ナトリウムポンプ・蒸気発生器などのナトリウム機器や水漏えい検出器などのナトリウム炉特有な計測設備を開発し、運転方法・保守方法を確立することが必要
- ループ型炉特有な検査技術を開発し、実機で適用し、更に信頼性や確実性向上を目指した開発を実施(原子炉容器廻り検査装置、1次主冷系配管検査装置等)

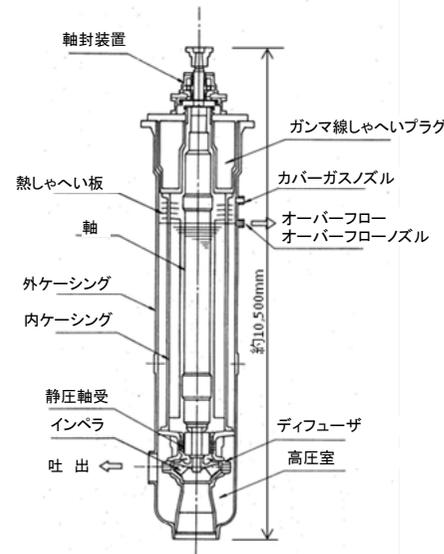
ナトリウム炉に特徴的な長尺の機械式ポンプの開発



常陽



実寸大モデルによる確認試験

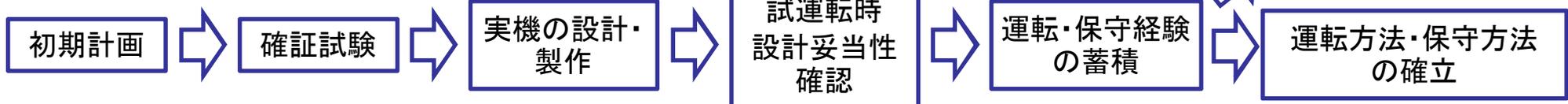


もんじゅ



原子炉容器廻り検査装置 (検査ロボット)

後継炉の設計に反映



- 保安規定とは、原子炉等規制法に基づき、原子炉施設の保安のために必要な措置や災害の防止を定めたもので、原子力規制委員会の認可を受ける  
うち、保守管理の章で、保全計画等から成る保全プログラムを策定し、保守管理することを定めている

## 高速増殖原型炉もんじゅ原子炉施設保安規定

- 品質保証
- 運転管理  
(運転上の制限、運転上の留意事項、異常時の措置 等)

ナトリウム漏えい監視の運転上の制限

項目	運転上の制限	
ナトリウム漏えい監視	ナトリウム漏えいがないこと	
	ナトリウムの漏えい監視装置	ナトリウムの漏えい監視装置が動作可能であること

- 燃料管理
- 放射性廃棄物管理
- 放射線管理
- 保守管理  
供用期間中の保守管理計画  
建設段階における保守管理計画
- 非常時の措置  
など



## 保全プログラム

- 保全計画
  - 点検計画
  - 補修、取替え及び改造計画
  - 特別な保全計画  
(地震、事故等で長期停止を伴う際に追加する計画)

## 保安規定の見直し・整備

- 実際の運用経験を踏まえ、保安規定の見直しを行ってきた
  - 今後も、発電炉としての実際の運用経験を積み、それを踏まえた保安規定や関連要領の見直し・整備を進め、より適正化していくことが必要
- ⇒我が国のナトリウム冷却型高速増殖発電炉の運転管理技術のベースの確立

### ナトリウム漏えい監視に関する見直し

- ナトリウム漏えい検出器は、微小な漏えいから大規模まで監視・検出するため、数種類の検出器がある。微小な漏えいの検出のための検出器は感度が良く、周囲の塵・揮発成分等にも反応する
- これまでの経験(「誤警報発報」)を踏まえ、保安規定や下部マニュアルの見直しを行った

### 保安規定

#### ナトリウム漏えい監視の運転上の制限

項目	運転上の制限	
ナトリウム漏えい監視	ナトリウム漏えいがないこと	
	ナトリウムの漏えい監視装置	ナトリウムの漏えい監視装置が動作可能であること*

\* :ナトリウムの漏えい監視装置のいずれか1種類が動作不能である場合において、監視対象部位が同一で、かつ、同程度以上の漏えいを検知できるあらかじめ定める設備による監視が可能であれば、運転上の制限を満足しているものとみなす。  
など

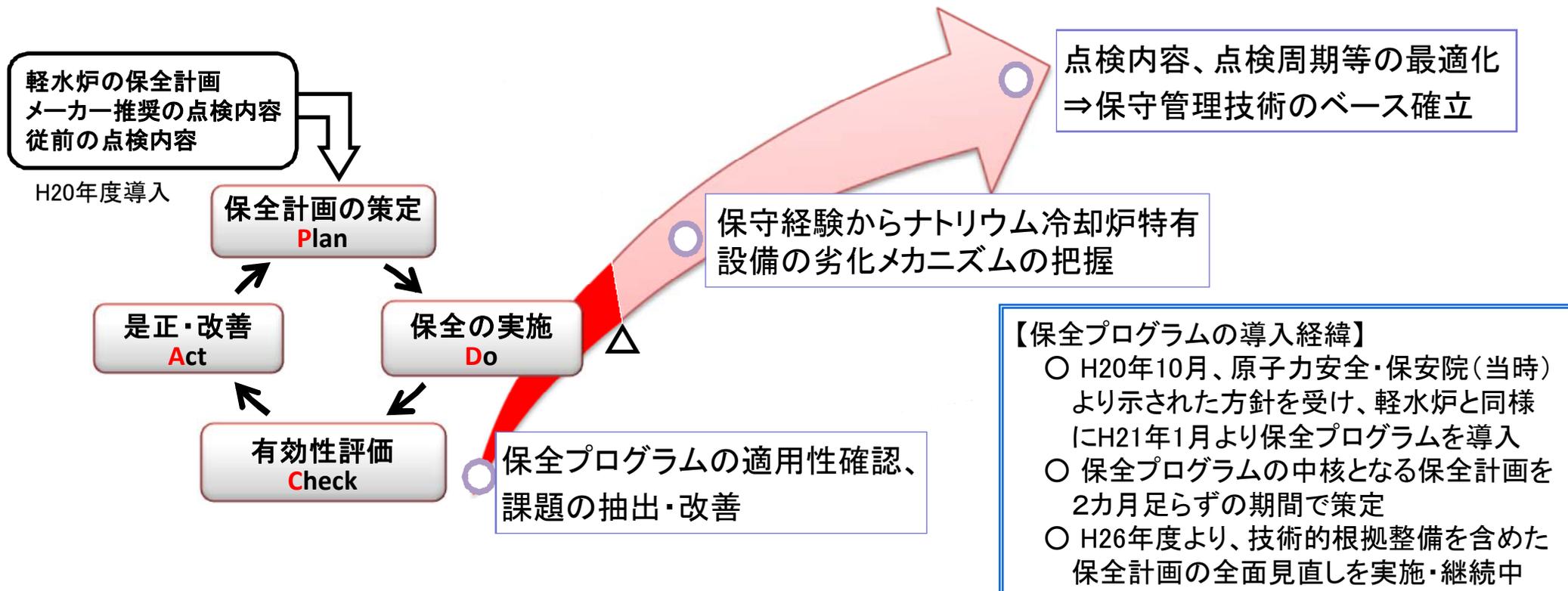
下部マニュアル(ナトリウム漏えい監視装置管理要領)で、もんじゅの全ての監視装置について種類、系統、対象部位別に、多重性の有無、代替装置の有無を整理し、漏えい監視装置の動作不能に関する運転上の制限逸脱の判断をサポート

ナトリウムの漏えい監視装置の代替監視整理表(2次系・2次メンテナンス冷却系)(抜粋)

設置区画	ナトリウム漏えい監視装置の種類	監視対象部位	設置個数	監視対象漏えい量	多重性の有無	代替装置の有無 (代替装置名)
2次主冷却系区画 タンク室区画 A/C室区画 (A~Cループ)	放射線イオン化式検出器(RID)	機器・配管	26	微小漏えい以上	無	無
	空気雰囲気セルモニタ(煙感知型)	機器・配管・弁(雰囲気)	304	小漏えい以上	有	有 (火災感知器、セルモニタ熱感知型)
	空気雰囲気セルモニタ(熱感知型)	機器・配管・弁(雰囲気)	208	小漏えい以上	有	有 (火災感知器、セルモニタ煙感知型)

## 保全計画の見直し・整備

- 十分な技術的根拠や点検・補修の実績データがなく、H20年度に作った保全計画は問題を内包
- 技術的根拠に基づく科学的・合理的な保全計画への抜本的な見直しを実施中  
保守管理プロセスについて「原点に帰った自主的なプロセス総合チェック」を行い、潜在する課題の洗出しと改善を実施中
- 軽水炉の経験を参考に、自らの運転・保守経験を積み重ねながら、保守管理業務のPDCAを継続  
⇒我が国のナトリウム冷却型高速増殖発電炉の保守管理技術のベースを確立



- 「もんじゅ」は、ナトリウムを冷却材に用いる原子炉であり、研究開発段階の原子炉である
- ナトリウムの特徴を踏まえ、軽水炉とは異なった技術的な対応を必要とするシステムや機器の設計において、運転上・保守上の考慮を行っている
- 研究開発段階炉であることから、設計・建設～試運転～本格運転の各段階で研究開発を行いながら、プロジェクトを進める計画である
  - 今後、試運転段階では、段階的に出力を上昇させながら、安全かつ着実に試運転を進め、機器の性能や設計の妥当性・裕度を確認するなど確実に成果を得る
  - 更に、本格運転段階では、運転・保守経験を蓄積し、高速増殖発電炉の運転・保守技術の基盤を確立する

# 参考資料

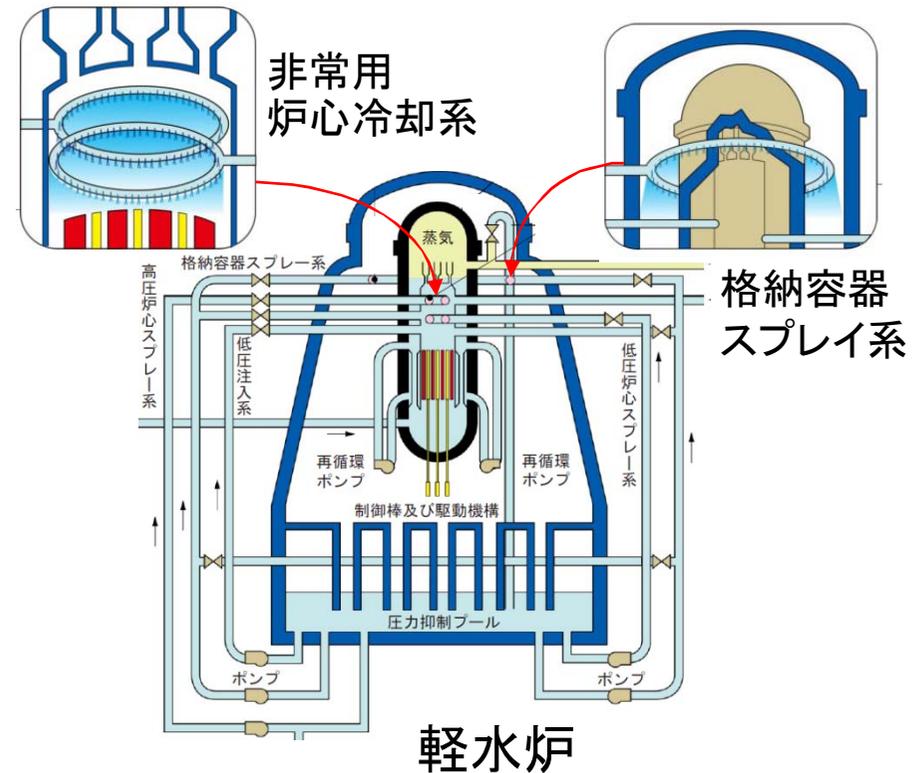
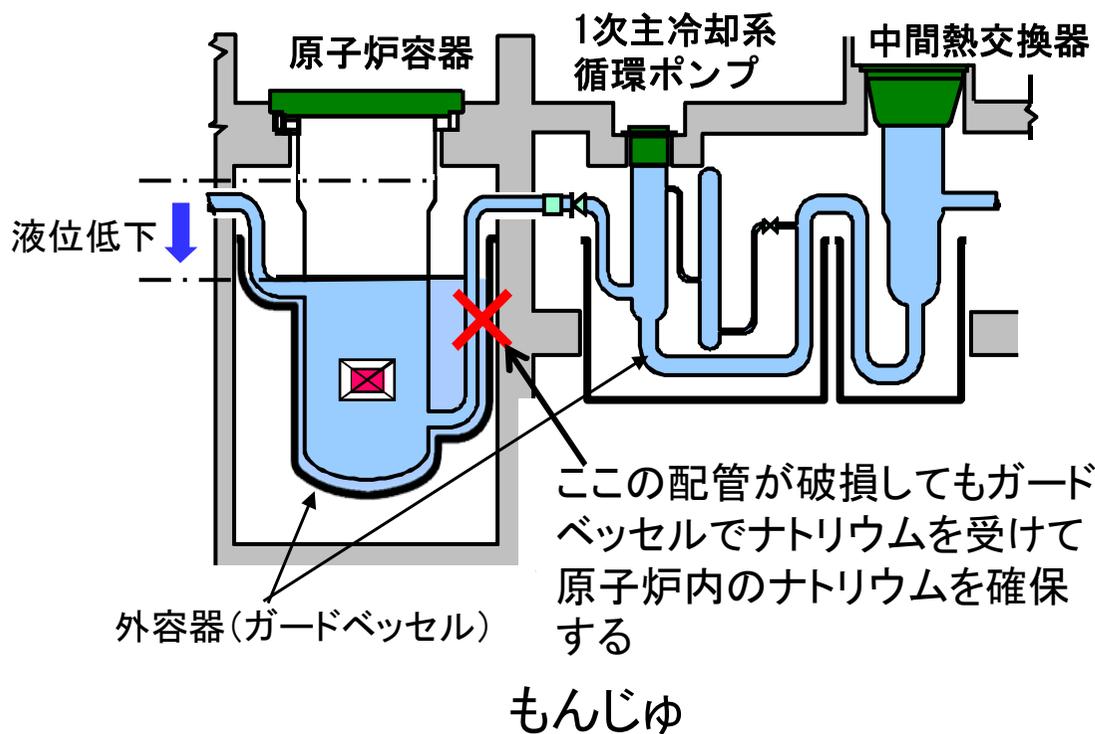
	ナトリウム	水	備考
沸点	881°C	100°C	ナトリウムは常圧で運転温度以上の高温域まで液体
融点	98°C	0°C	ナトリウムを液体とするため加熱が必要
中性子の減速	小	大	ナトリウムは高速炉の冷却材に適している※
熱伝導率	69.8W/(m・K) (300°C、0.101MPaの場合)	0.340W/(m・K) (300°C、8.87MPaの場合)	
比熱	1.32(kJ/kg・K) (300°C、0.101MPaの場合)	5.69kJ/(kg・K) (300°C、8.87MPaの場合)	原子炉出入口温度差が大きくなり、定常時の熱応力が大きい
化学的活性	大	小	空気や水としゃ断する
鉄鋼材料との共存性	良好	腐食を考慮	—
光透過性	透明ではない	透明	—
比重	約0.97	1	ポンプ駆動動力が軽水炉と同程度で可

※ ナトリウムが高速炉に適してる理由

- 中性子を減速しにくい（そのため核分裂反応時に中性子を2以上発生し、増殖が可能）
- 熱を伝えやすく、効率がよい
- 比較的安価

— 常圧での高い沸点の特徴を踏まえた対応例 —

- 1次冷却材は運転範囲で大気圧にて使用できるため、万一配管などに破損が生じても、冷却材が噴出して急激に失われることはない。炉心崩壊熱の冷却は、外容器(ガードベッセル)で冷却材の液位を確保するシステムを採用
- 軽水炉は水系の圧力が高く、万一配管などが破損すると急激に水が流出等することから、冷却水を注入する設備を用いて炉心崩壊熱の冷却を行う



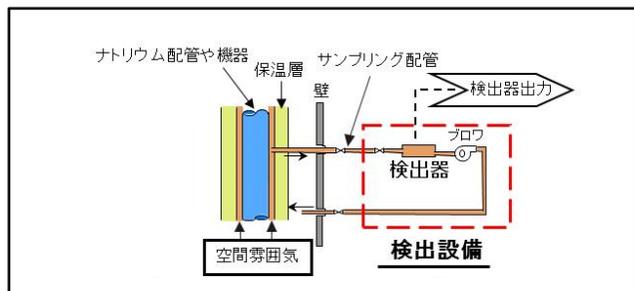
— 常圧での高い沸点の特徴を踏まえた対応例 —

- ナトリウムは沸点が高く、運転温度においても常圧でよいいため、配管等を低圧で設計可能
- 延性に富んだ材料(ステンレス鋼)をナトリウム系機器の材料に使用
  - ⇒ 容器や配管に亀裂が生じた場合でも、亀裂の急激な拡大(急速な伝播破断)はないことが、種々の試験及び解析により確かめられている(漏えい先行型破損が成立する)
  - ⇒ ナトリウムの漏えいを早期に検出すること、微小な漏えいを検出することで、短時間での冷却材の大量漏えいを想定する必要はなく、配管等が破断する前に原子炉を安全に停止できる
  - ⇒ ナトリウムの微小漏えいの連続監視は、ナトリウム機器の健全性監視・確認であり、安全裕度向上に資する

微小漏えい検出のためのナトリウム漏えい検出器

検出器の種類・測定原理・使用場所

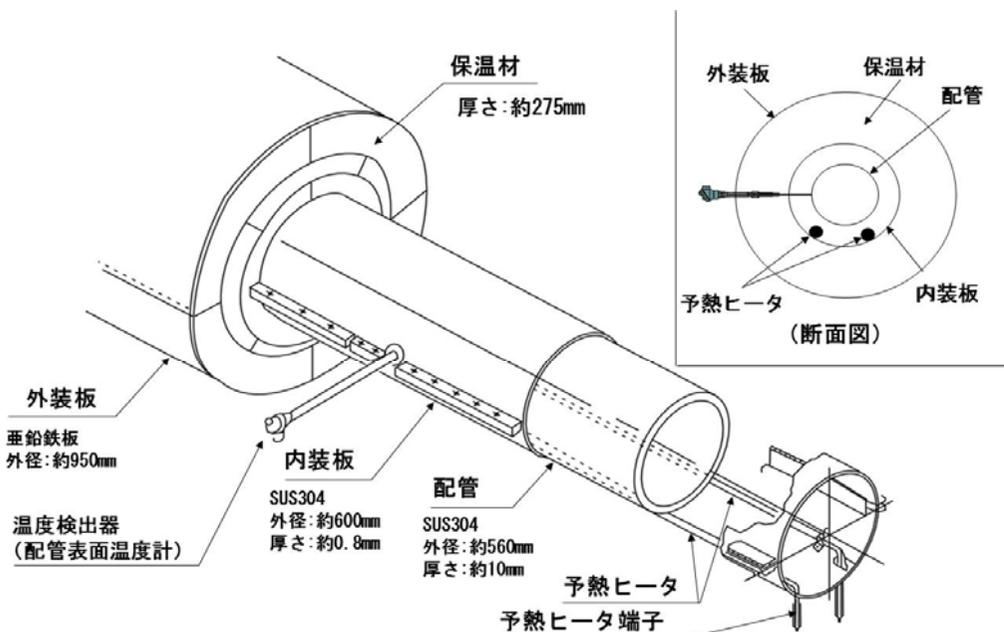
ガスサンプリング型ナトリウム漏えい検出器システム構成



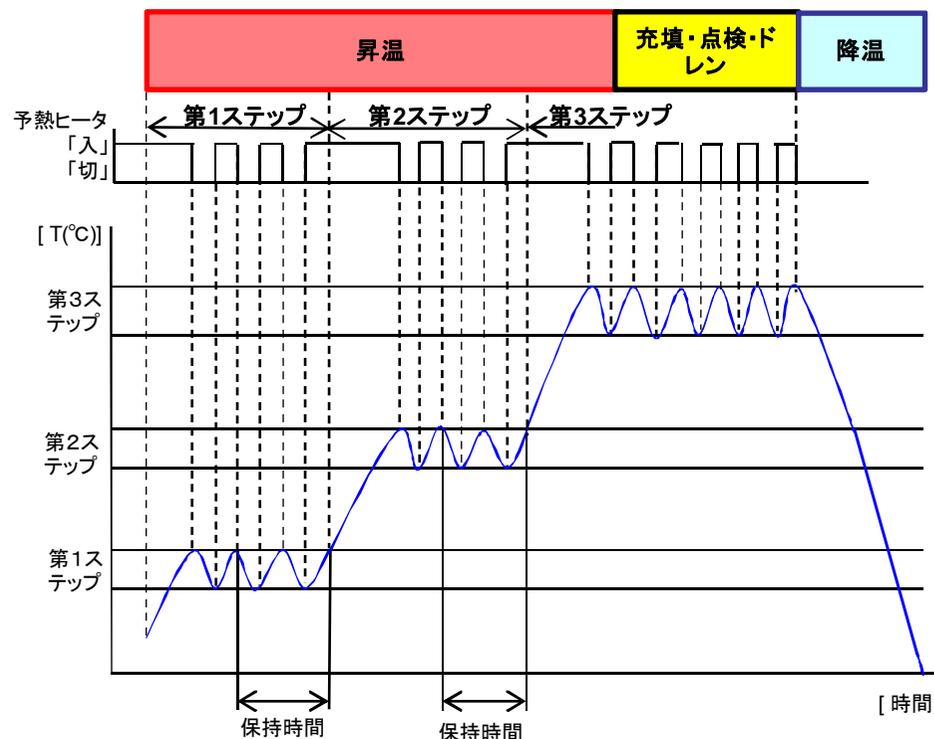
ナトリウムイオン化式検出器 (SID: Sodium Ionization Detector)	差圧式検出器 (DPD: Differential Pressure Detector)	放射線イオン化式検出器 (RID: Radiative Ionization Detector)
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ サンプルングガスに含まれるナトリウムエアロゾルを高温で電離し、このイオン電流を検知する。</li> <li>○ 1次主冷却系などの不活性ガス雰囲気で使用。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ サンプルングガスに含まれるナトリウムエアロゾルがフィルタ部に捕集され、この差圧の変化を検知する。</li> <li>○ 不活性ガス雰囲気、空気雰囲気のいずれでも使用。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Am241線源によりイオン化されている検出部に、サンプルングガスに含まれるナトリウムエアロゾルが入ると電流の流れが阻害されることを利用し、標準室と比較して検知する。</li> <li>○ 2次主冷却系などの空気雰囲気で使用</li> </ul>

— 常温では固体の特徴を踏まえた対応例 —

- ナトリウムは常温で固体のため、原子炉停止時はヒータにより予熱するとともに、保温材を配管のまわりに施工、また予熱制御のため配管に温度検出器を設置
  - 点検のため、ナトリウムの抜取(ドレン)、充填作業に合わせて、ヒータによる機器・配管の昇温、降温操作を実施
- ⇒大洗工学研究センター及び「もんじゅ」でのナトリウム機器の取扱経験



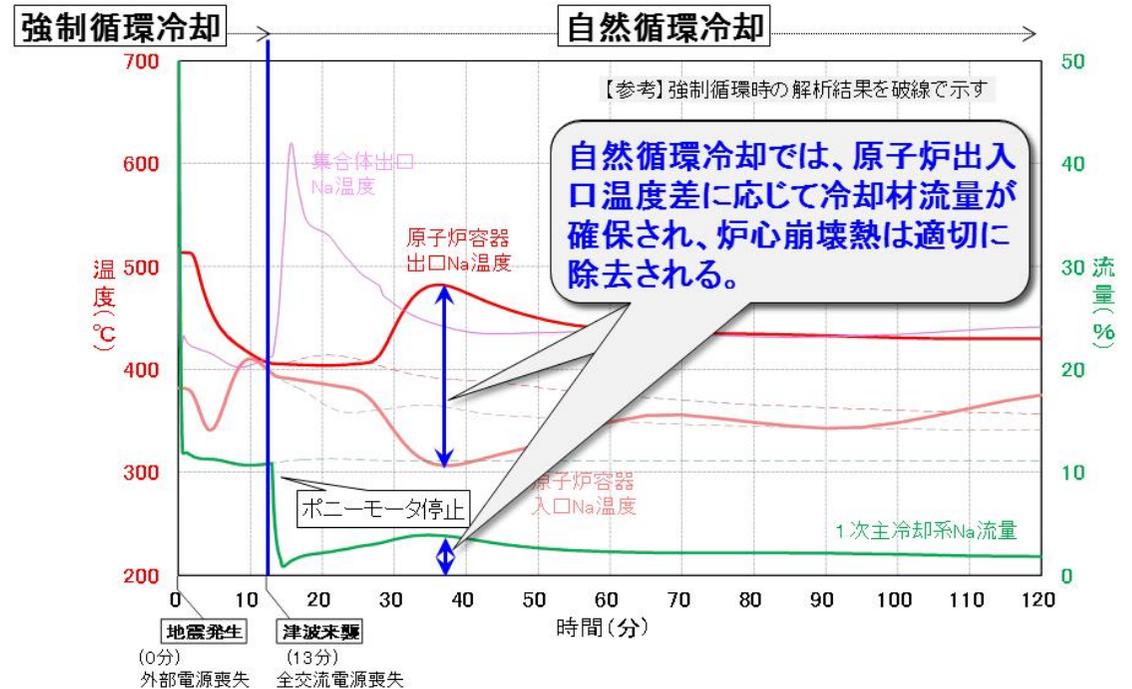
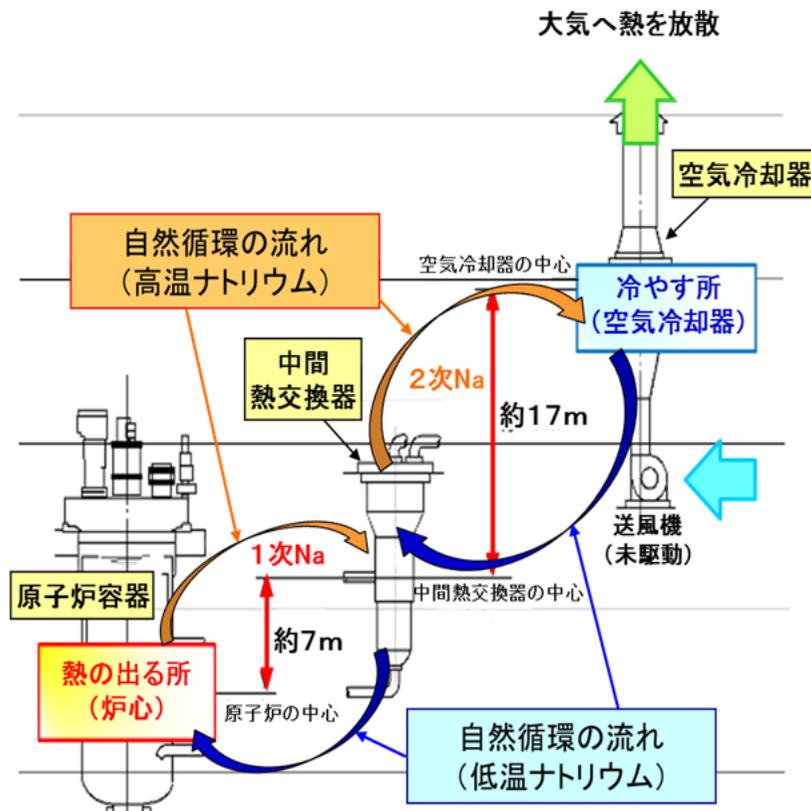
予熱ヒータ、保温材、温度検出器の配管への施工 (2次主冷却系主配管の例)



1次系予熱ヒータの昇温・降温のパターン(中間熱交換器の例)

— 小さい比熱、高い熱伝導率の特徴を踏まえた対応例 —

- ナトリウムは沸点と伝熱性能が高く、原子炉出入口温度差が大きく取れるので、崩壊熱の最終ヒートシンクを空気とした自然循環による崩壊熱除去システム構成が容易
- 下流側の熱交換器をより高く配置することで、ポンプ駆動が無くても循環冷却が可能
- 自然循環による崩壊熱除去システムは、動的機器が少ないため信頼性が高くなる



自然循環による崩壊熱除熱の状況(解析結果)

— 化学的に活性、不透明の特徴を踏まえた対応例 —

- ナトリウムは化学的に活性なため、不活性ガスで液面をカバー
- 燃料交換等の通常作業は、バウンダリを解放せず実施するよう設計(専用キャスク等を用いた作業)
- ナトリウムは不透明なため直接目視しながらの作業ではなく、遠隔自動運転で、炉内の任意の場所を位置決めできるシステムを採用

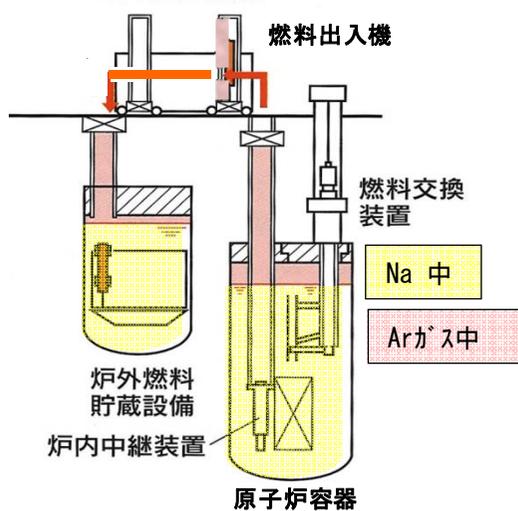
⇒「もんじゅ」で117体の炉心燃料の交換経験

もんじゅ

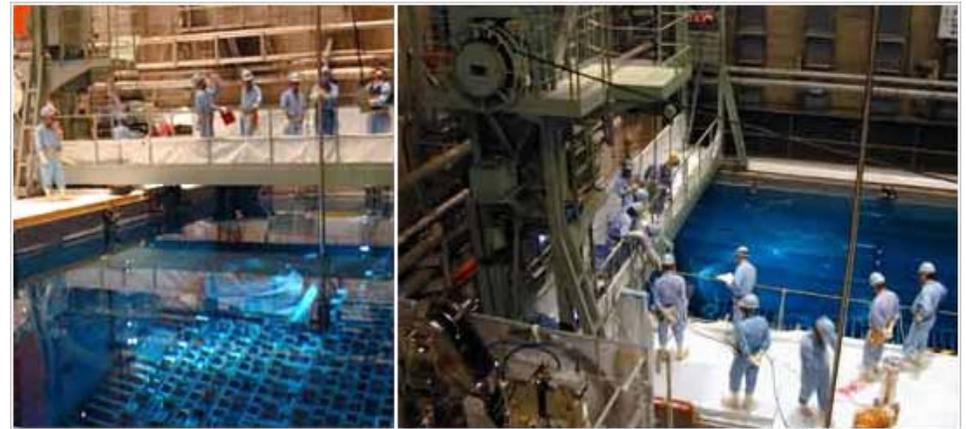
軽水炉

原子炉容器の蓋を開けずに気密を保持したまま、遠隔操作で燃料を交換  
炉心からずれた位置(炉内中継装置)で燃料を受入後、交換

原子炉容器の蓋を開け、直接目視で、炉心上部から燃料取替クレーンを使用し水中で燃料交換を実施



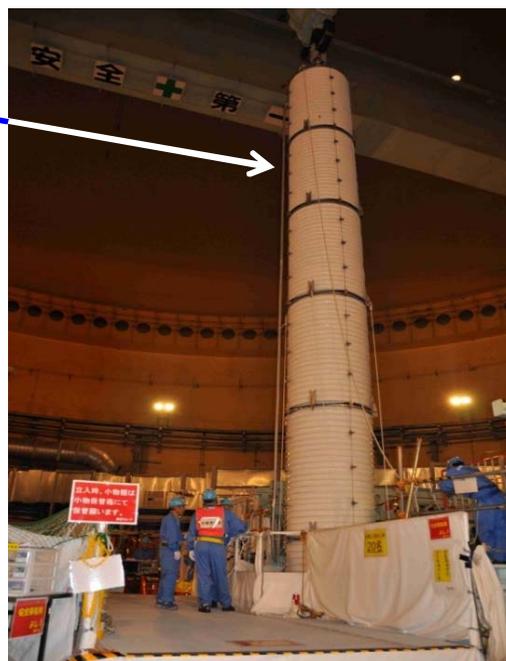
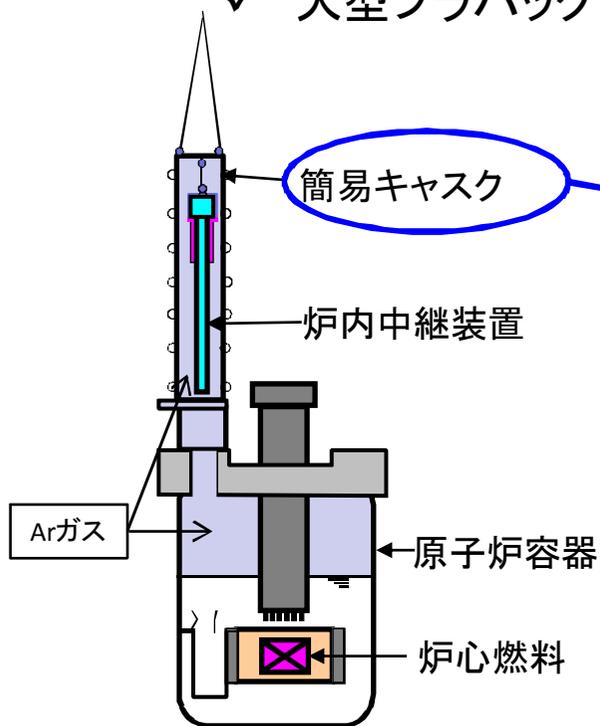
燃料交換装置と燃料出入機



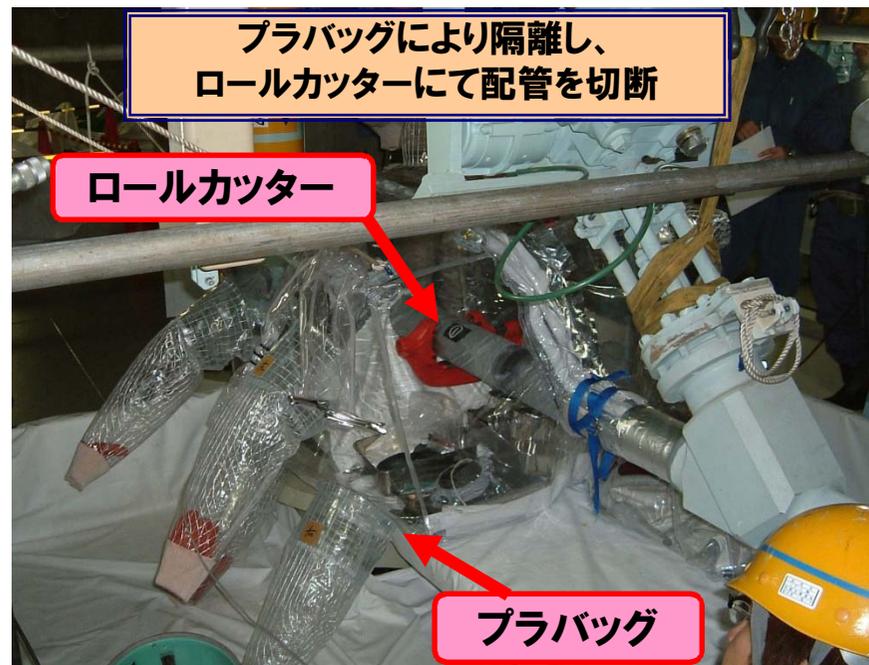
関西電力HPより

— 化学的に活性な特徴を踏まえた対応例 —

- ナトリウムは化学的に活性なため、通常想定していないバウンダリを開放する作業の場合、空気の混入を防止する仮設バウンダリを構成し、作業実施  
(通常の想定した作業は、バウンダリを解放せずに作業できるよう設備を準備して対応)
- ⇒ 炉内中継装置落下トラブル対応やナトリウム漏えい対策で経験蓄積
  - ✓ 炉内の目視観察技術
  - ✓ 仮設制御装置による原子炉カバーガス圧力制御技術
  - ✓ 大型プラバグのアルゴンガス置換技術



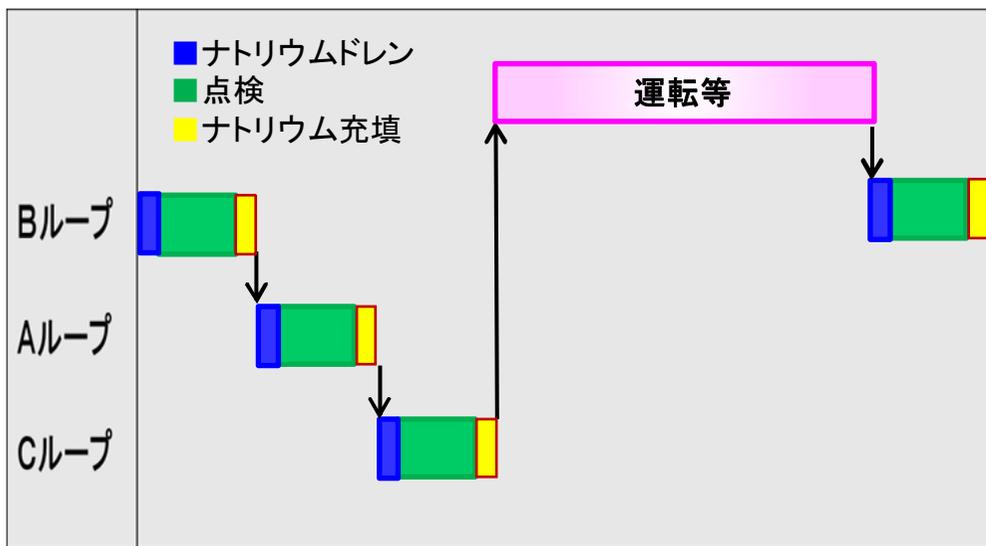
炉内中継装置引抜作業



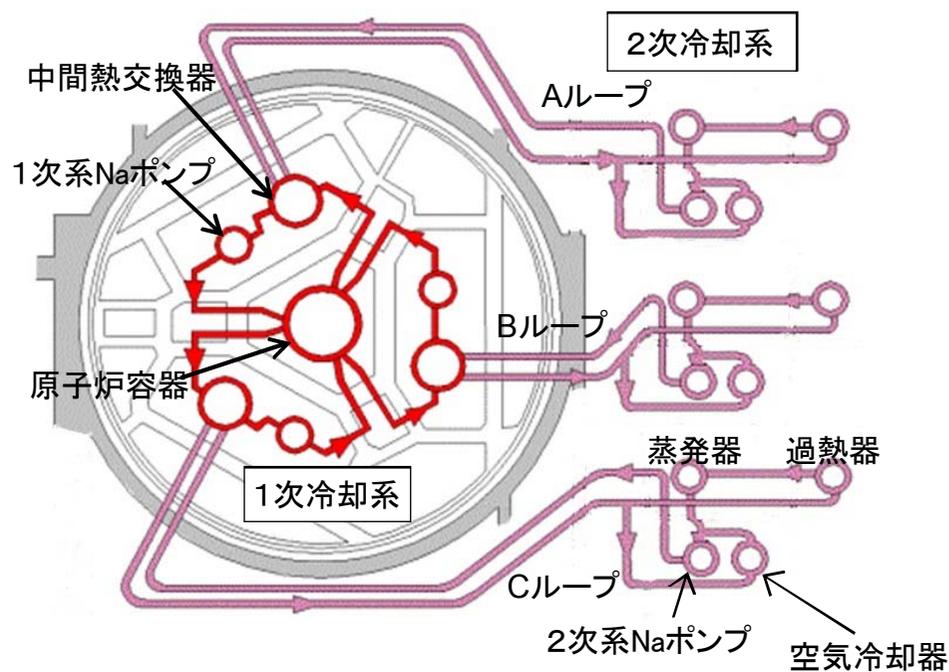
2次冷却系設備のドレン機能強化作業  
(弁の追加設置作業)

— 化学的に活性な特徴を踏まえた対応例 —

- 炉心を冷却している1次系ナトリウムは放射化するため、万一のナトリウム漏えい時にも、燃焼に伴う化合物の発生を防止
- 空気と漏えいナトリウムの接触により燃焼させないため、1次系室内は窒素を封入
- 1次系機器の点検時は、室内へ入出するため、窒素から空気への置換操作と、ナトリウム漏えい防止と被ばく低減のため、放射化しているナトリウムドレン操作を実施
- 原子炉停止時、崩壊熱除去のため、全ループ同時ドレンできないことから、ループごとに、「ナトリウムドレン→点検→ナトリウム充填」を実施



もんじゅの工程イメージ



もんじゅ冷却系(上面図)

— 鉄鋼材料との共存性良好の特徴を踏まえた対応例 —

- 構造材には、ナトリウムとの共存性に優れたステンレス鋼や低合金鋼を使用
  - 適切な純度管理(ナトリウム中の酸素濃度管理)を行うことにより、応力腐食割れを含む腐食は生じ難い
  - ナトリウム系は単相で運転でき、もんじゅの流速範囲で、ナトリウム系機器には水・蒸気系で問題となるエロージョン※は生じ難い
- ⇒ナトリウムを内包する機器の内面側は腐食・浸食による劣化は考慮不要

※浸食: 流体が材料に繰り返し衝突することにより面が機械的に損傷を受け、その一部が剥離していく現象



「もんじゅ」改造工事で切断した  
2次主冷却系配管

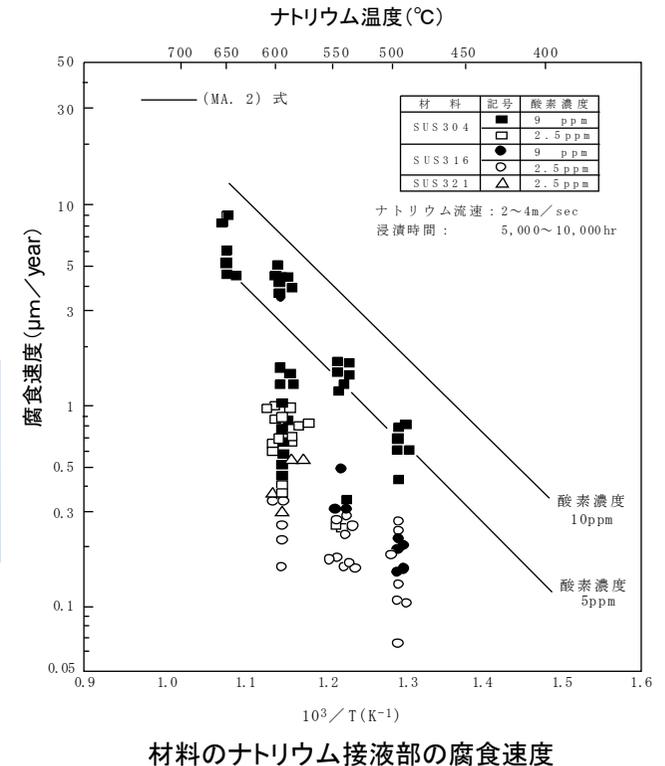


「常陽」MK-III改造工事で切断した主中間熱交換器2次側出口エルボ

ナトリウム中の酸素濃度を低く管理  
(10ppm以下)

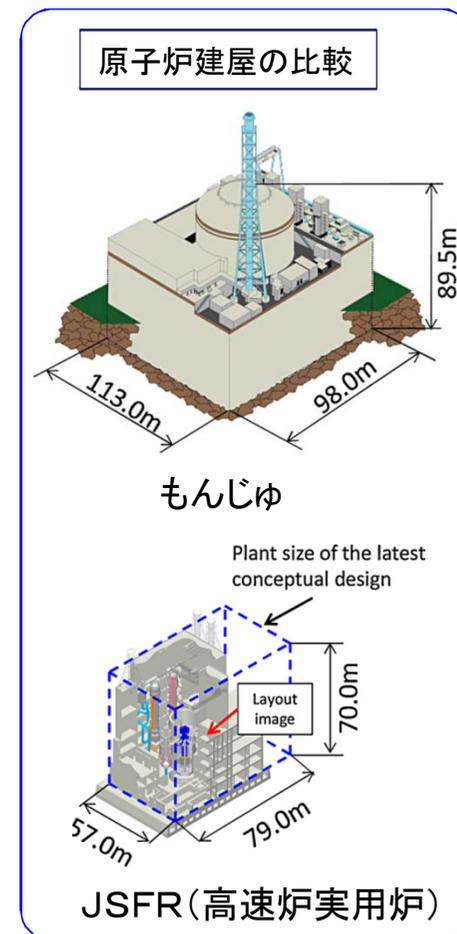
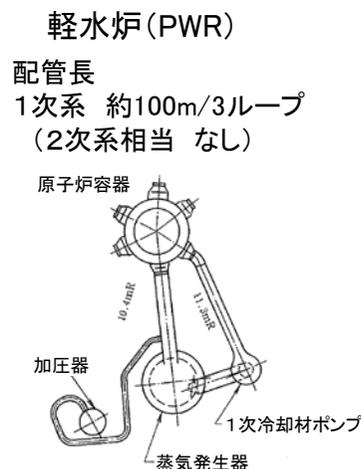
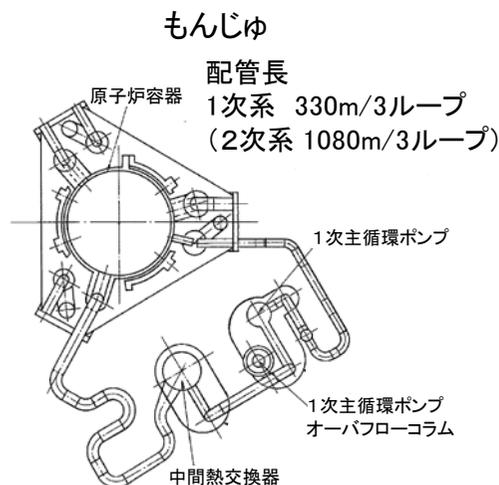


500~400°Cで、腐食速度は  
2~0.4 μm/年程度  
⇒腐食の考慮不要



- 「もんじゅ」は研究開発段階炉であり、高速炉実用炉としての大型化・経済性・高効率性の追求・確認は未実施
  - 軽水炉等の実用段階炉と比較すると
    - 原子炉出力に比して配管が長い等、点検物量が多い
    - 保守的な設計、原子炉建物が大きい等、建築資材が多い
    - 計装などの機器数が多い
    - ナトリウム炉特有の計測機器は開発品でコストがかかる
- ⇒ 設計・建設・運転・保守の経験・検証を通し、実用段階炉の合理化に反映

1次冷却系配管長の比較



項目	もんじゅ	軽水炉	JSFRの設計値
電気出力	280MWe	1100MWe	1500MWe

- 「もんじゅ」は、ナトリウム冷却高速増殖炉の運転実績が僅少であることに鑑み、安全設計で「技術的には起こるとは考えられない事象」を選定(下記)し、先取的に重大事故が評価※された。その結果、重大事故の発生確率は十分に低く抑えられていることが確認されている

➤ 「反応度抑制機能喪失事象」

原子炉出力運転中に、

- ① 外部電源喪失により炉心流量が減少することにより、又
- ② 制御棒が連続して引抜かれることにより

炉心に異常な反応度が挿入され、安全保護系の動作により原子炉の自動停止が必要とされる時点で、原子炉停止機能喪失が重なる事象

➤ 「局所的燃料破損事象」

- ① 燃料要素中に予期せぬ高富化度の燃料ペレットが存在して局所的に過熱される事象
- ② 燃料要素中に予期せぬ異物が存在して局所的に燃料集合体中の冷却材流路が閉塞される事象

➤ 「1次主冷却系配管大口径破損事象」

- ① 原子炉出力運転中に1次主冷却系配管の大口径破損が生じ、1次冷却材が流出する事象

その後も、最新の評価手法や海外の試験結果も踏まえ、より精度の高い評価がなされている。

※ 「高速増殖炉の安全性の評価の考え方(旧原子力安全委員会決定)」の(5)

『事故より更に発生頻度は低い結果が重大であると想定される事象については、液体金属FBRの運転実績が僅少であることに鑑み、その起因となる事象とこれに続く事象経過に対する防止対策との関連において十分に評価を行い、放射性物質の放散が適切に抑制されることを確認する。』