



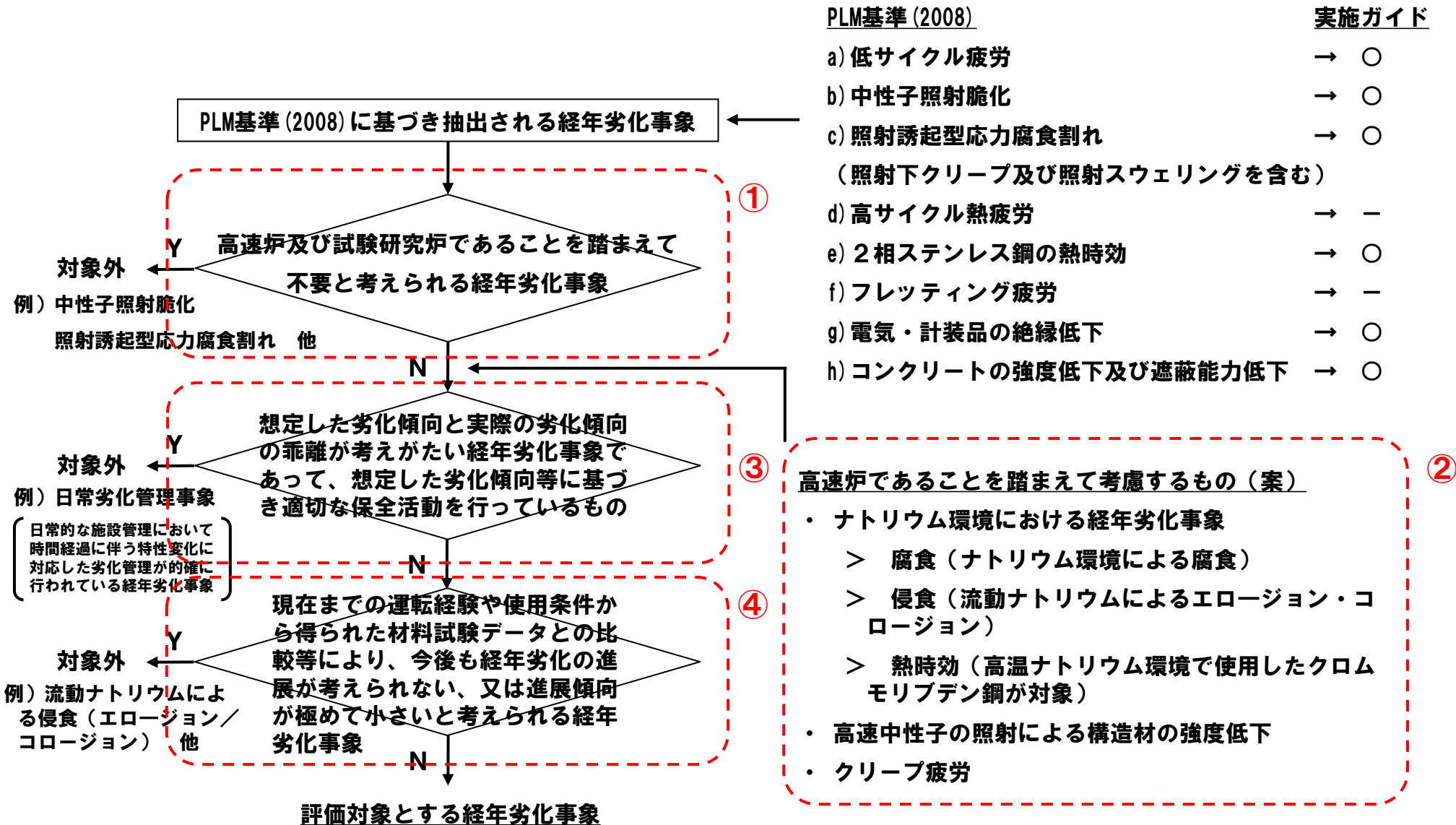
JY保-7-3

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構大洗研究所（南地区）の  
原子炉施設（高速実験炉原子炉施設）の長期施設管理方針の策定に向けた  
高経年化技術評価における評価事象の選定計画の具体化（案）**

**2023年11月16日**

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所  
高速実験炉部**

# 評価対象事象の抽出フロー



## PLM基準 (2008)

- |  |     |
|--|-----|
| a) 低サイクル疲労                               | → ○ |
| b) 中性子照射脆化                               | → ○ |
| c) 照射誘起型応力腐食割れ<br>(照射下クリープ及び照射スウェリングを含む) | → ○ |
| d) 高サイクル熱疲労                              | → - |
| e) 2相ステンレス鋼の熱時効                          | → ○ |
| f) フレッキング疲労                              | → - |
| g) 電気・計装品の絶縁低下                           | → ○ |
| h) コンクリートの強度低下及び遮蔽能力低下                   | → ○ |

## 実施ガイド

## 高速炉及び試験研究炉であることを踏まえて 不要と考えられる経年劣化事象の検討

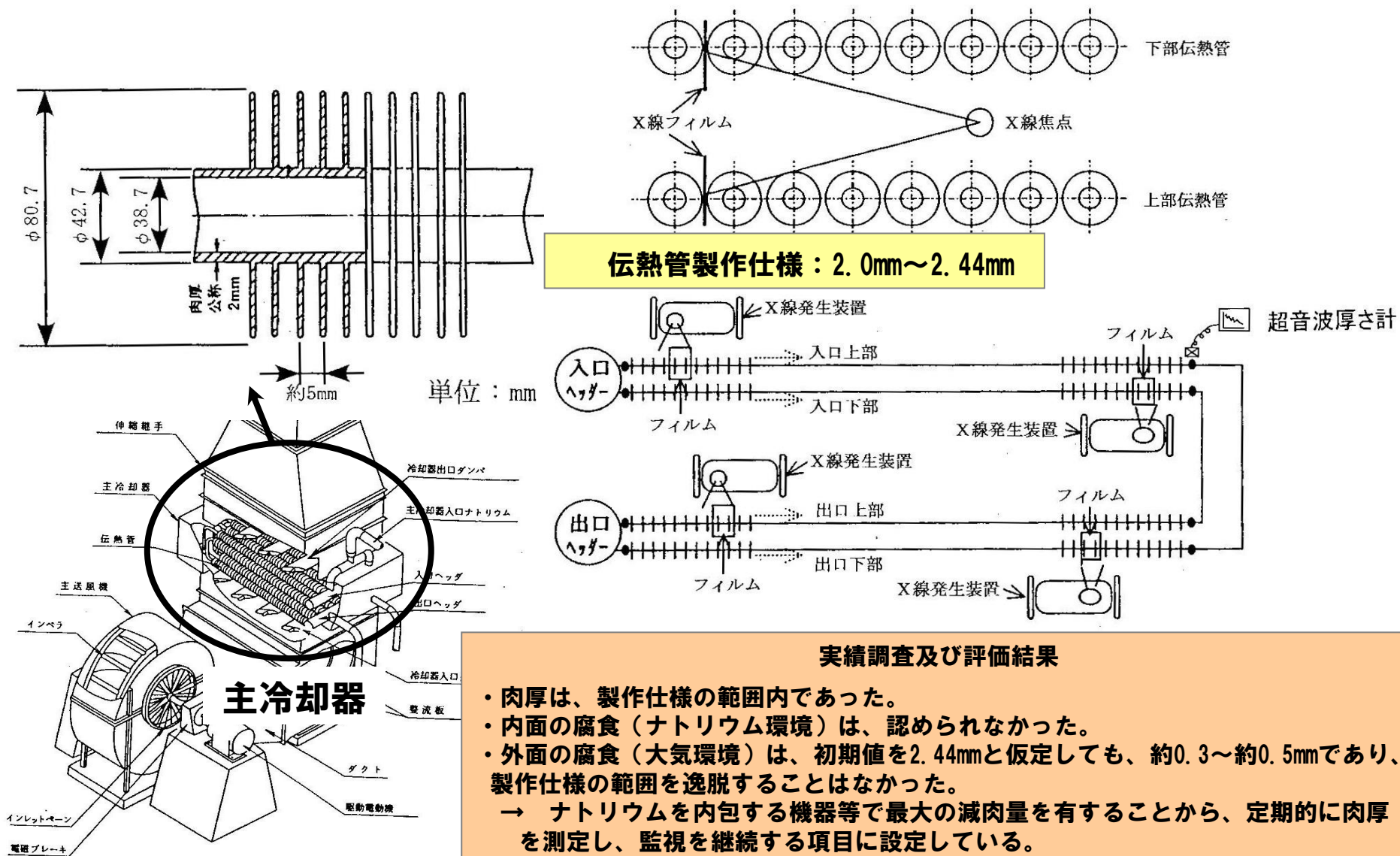
PLM基準に定める 経年劣化事象	「常陽」での考慮要否及び理由		備考
	要否	不要の理由	
低サイクル疲労	○	—	—
中性子照射脆化	×	中性子照射脆化は、炭素鋼や低合金鋼等のフェライト系材料において、中性子の照射により、強度や硬さが増加する一方で、延性や靱性が低下する事象である。「常陽」において、中性子照射の影響を考える必要のある機器（原子炉容器や配管）はオーステナイト系ステンレス鋼を使用しており、中性子照射脆化を経年劣化事象として考慮する必要はない。	高速中性子の照射による構造材の強度低下（引張、疲労、クリープ破断他）について、経年劣化事象として考慮する。なお、これまでのサーベイランス試験により、設計寿命に想定される中性子照射量を超える条件にあっても、十分な強度を有することを確認している。
照射誘起型応力腐食割れ （照射下クリープ及び 照射スウェリングを含む）	×	中性子照射の影響を考える必要のある機器（原子炉容器や配管）は、ナトリウムと接液しており、応力腐食割れが発生する環境にないため、照射誘起型応力腐食割れを経年劣化事象として考慮する必要はない。	
高サイクル熱疲労	○	—	—
2相ステンレス鋼の熱時効	×	「常陽」において、2相ステンレス鋼は使用していない。	熱時効としては、クロムモリブデン鋼（2次冷却系の配管の材料）を対象した経年劣化事象を考慮する。
フレット疲労	○	—	—
電気・計装品の絶縁低下	○	—	—
コンクリートの強度低下 及び遮蔽能力低下	○	—	—

## 高速炉であることを踏まえて考慮する経年劣化事象（前頁以外の一般事象を含む）の検討

経年劣化事象	事象の概要
<b>ナトリウム環境における経年劣化事象</b>	
腐食（ナトリウム環境による腐食）	ナトリウムを冷却材に用いるナトリウム冷却型高速炉では、軽水炉における水中の酸化膜の形成や剥離の繰り返しによる減肉の進行は発生し難く、系内の温度分布による質量移行が主要な腐食進行因子となる。質量移行は、ナトリウム中の溶存酸素濃度により加速されるが、「常陽」ではこれを抑制するため酸素濃度を十分に低く維持している（原子炉施設保安規定に定めるブラギング温度に相当する酸素濃度 1次系：10ppm以下、2次系：20ppm以下）。なお、MK-III冷却系改造工事では、配管の肉厚の測定を実施した。当該測定結果は、基準（JISにおける製作許容差の最小板厚）を上回っている。減肉量は小さく、例えば、耐震安全性評価への影響は軽微と考えられる。
侵食（流動ナトリウムによるエロージョン・コロージョン）	流動ナトリウムによる浸食には、流速、溶存酸素、溶存水素（pH）、純度、温度及び材質等が影響する。これらの因子による影響は、複雑に干渉するが、最終的には材料の保護膜となる酸化被膜（ $Fe_3O_4$ ）の形成と安定化、あるいは剥離挙動への関与に帰着する。ナトリウム冷却型高速炉の場合、溶存酸素は他の不純物元素と共に厳密に管理されており、環境は常に還元雰囲気にあることから、材料表面に酸化被膜は形成されない。このため、表面保護層の形成は期待できない半面、脆化した酸化被膜の剥離による減肉も生じない環境にあり、2次冷却系の配管材のクロムモリブデン鋼において、水環境等で観察される腐食（酸化）とエロージョンの繰り返しによる減肉進行は発生し難い。
熱時効（高温ナトリウム環境で使用したクロムモリブデン鋼が対象）	2次冷却系の配管材のクロムモリブデン鋼を、400℃以上の高温ナトリウム環境で使用した場合に、熱時効（引張強さや延性等の強度低下）が発生する。なお、これまでのサーベイランス試験により、設計寿命において十分な強度を有することを確認している。
<b>上記以外</b>	
高速中性子の照射による構造材の強度低下	主に、高速中性子照射による原子のはじき出し損傷により、構造材（オーステナイト系ステンレス鋼）の強度低下（引張、疲労、クリープ破断他）が生じるものである。なお、これまでのサーベイランス試験により、設計寿命に想定される中性子照射量を超える条件にあっても、十分な強度を有することを確認している。
クリープ疲労	クリープは、高温・応力環境下での使用による材料の塑性変形が進行するものであり、疲労と合わせて考慮する。1次冷却系に使用しているオーステナイト系ステンレス鋼及び2次冷却系に使用しているクロムモリブデン鋼を対象とする。なお、これまでのサーベイランス試験により、設計寿命において十分な強度を有することを確認している。
腐食（水、大気）	水環境については、コンクリート遮へい体冷却系の窒素ガス冷却器及び補機系冷却水配管、ディーゼル系冷却水配管等が対象となる。大気環境については、主冷却器伝熱管部等が対象となる。なお、これらについては、適宜、肉厚を測定し、健全性を確認している。
摩耗	ポンプ等において、回転軸と軸受けの間で、摺動摩耗が想定される。定期的な分解点検により消耗部品を交換する対策を講じている。

# 過去の評価結果（腐食（ナトリウム環境及び大気環境））

旧主冷却器伝熱管（原子炉運転時間：約60,725時間）のケース

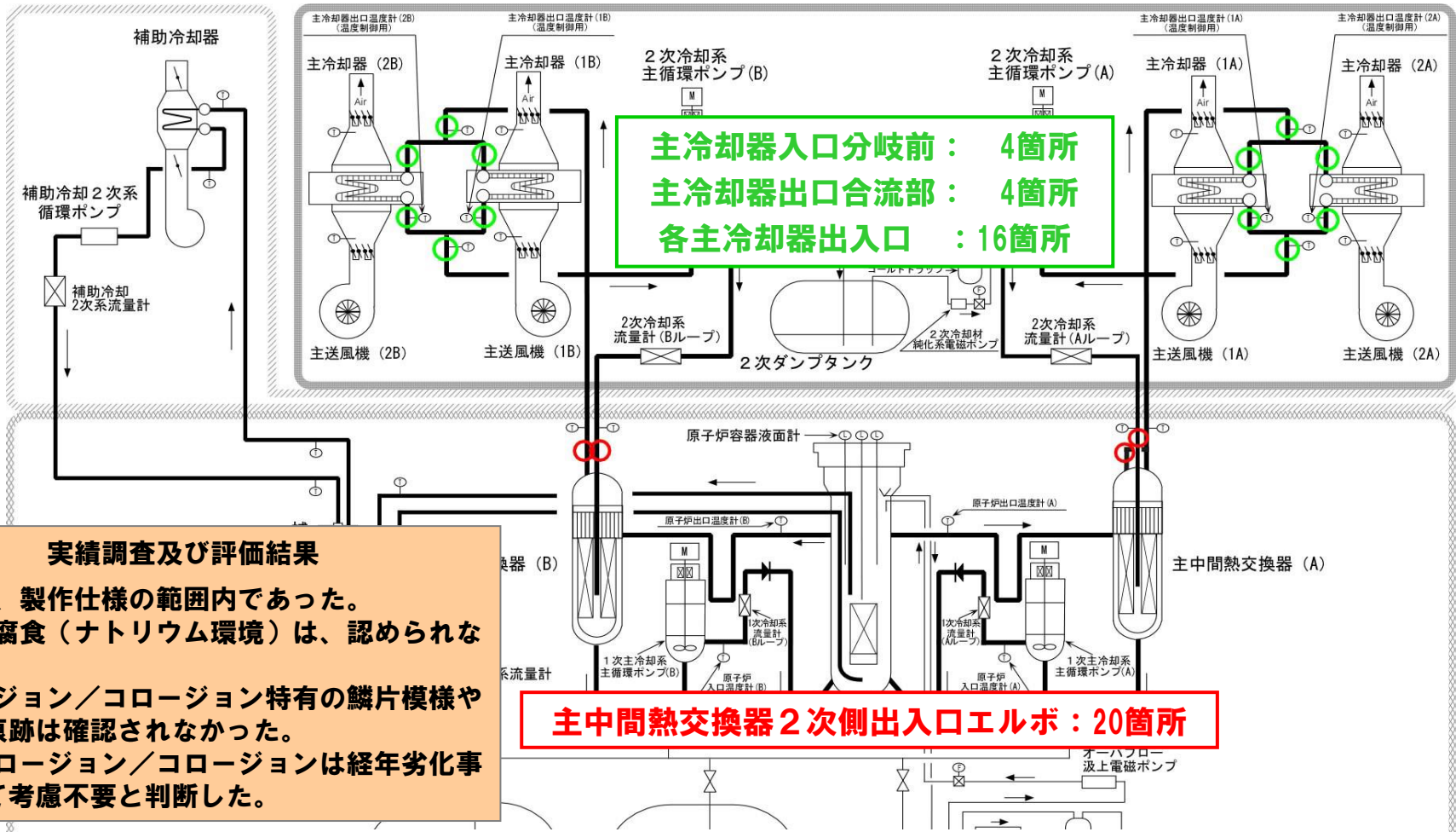


## 参考：現在の主冷却器伝熱管の状況



# 過去の評価結果（腐食（ナトリウム環境）、侵食（エロージョン／コーロージョン））

## 2次冷却系配管（原子炉運転時間：約60,725時間）のケース



○：MK-III改造工事における肉厚測定箇所

○：美浜3号機2次系配管破損事故後において肉厚測定を実施した箇所

## 参考：2次冷却系配管の肉厚測定結果

MK-III冷却系改造工事では、配管（2次冷却系の配管のうち、外面が金属製の内装板で覆われ、内装板の上に保温材が設置された部分）について、24箇所×4点（合計96点）の肉厚の測定を実施した。以下に示すように、当該測定結果は、基準（JISにおける配管製作許容差（公称値±10%）の最小板厚）を上回る。

12B配管：10.4～11.1mm

※ 基準：9.27mm

10B配管：8.8～9.5mm

※ 基準：8.37mm

また、偏流が生じて流速が増加するエルボ部については、主中間熱交換器出入口配管の4箇所×20点（合計80点）を測定対象とした。以下に示すように、当該測定結果は、基準（JISにおけるエルボ製作許容差（公称値-12.5%以上）の最小板厚）を上回る。

12Bエルボ：10.9～14.9mm

※ 基準：9.01mm

10Bエルボ：9.5～12.8mm

※ 基準：8.14mm

主中間熱交換器入口配管エルボ（12B）



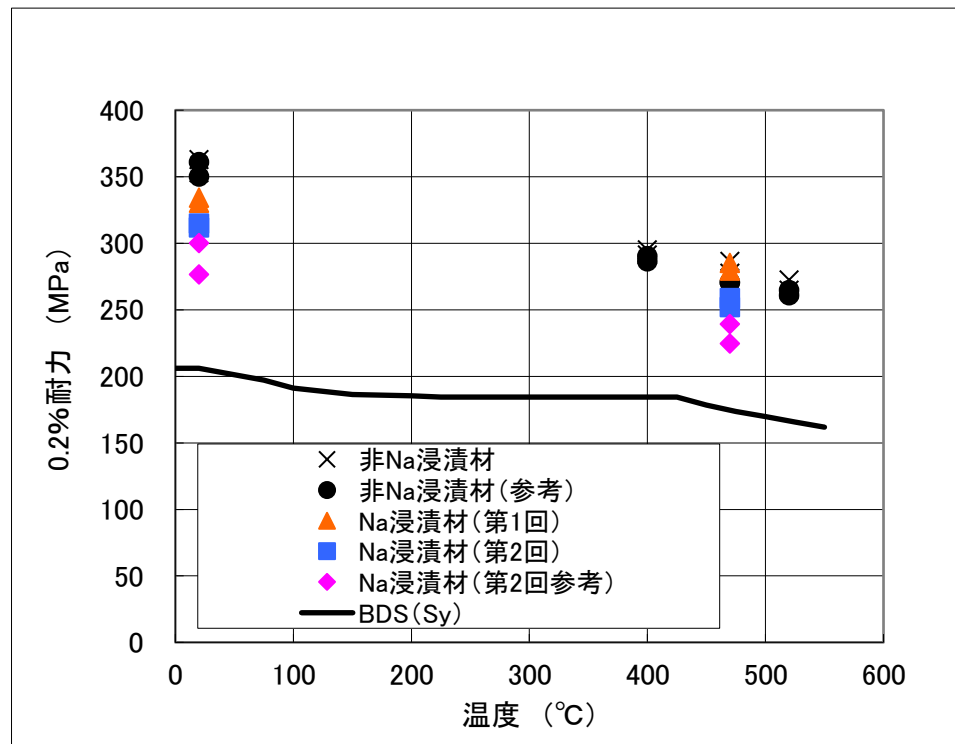
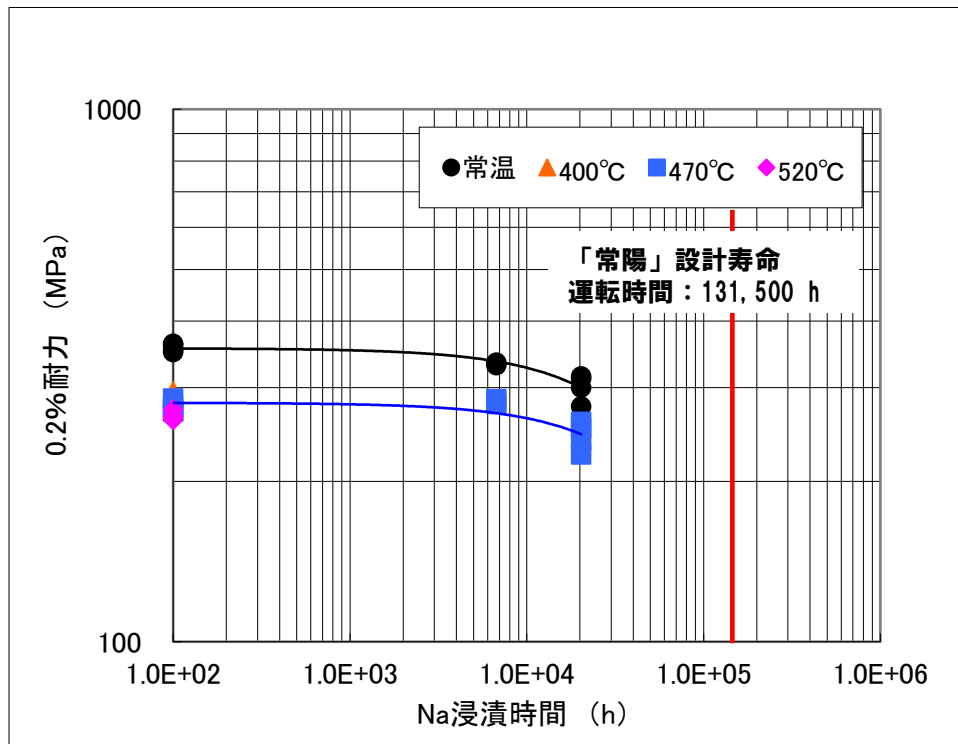
主中間熱交換器出口配管エルボ（12B）





## 過去の評価結果（熱時効（高温ナトリウム環境で使用したクロモリブデン鋼が対象））

### 2次系ホットレグ配管材（母材）のサーベイランス試験のケース （ナトリウム浸漬＋高温による影響を評価）



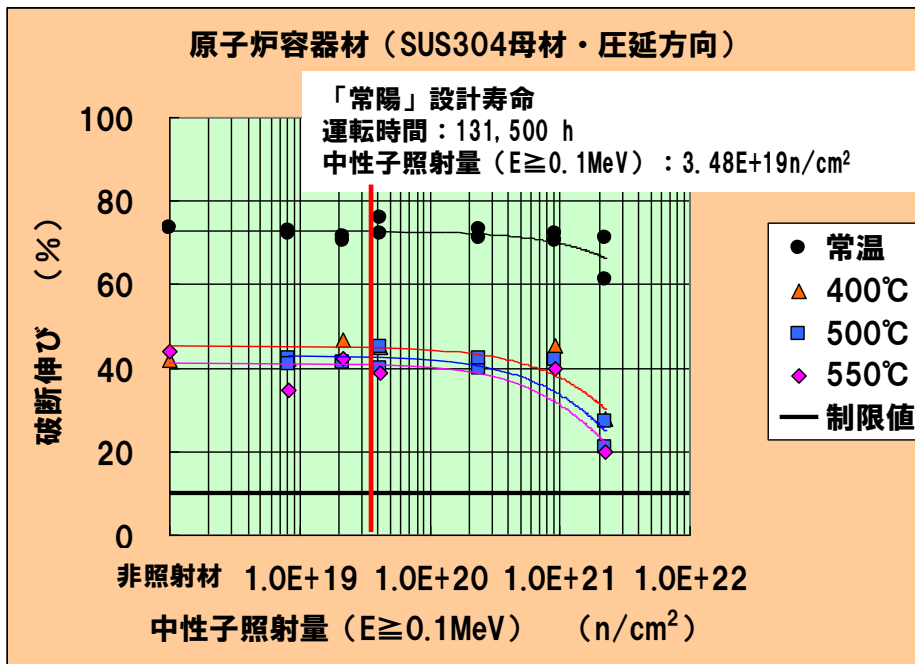
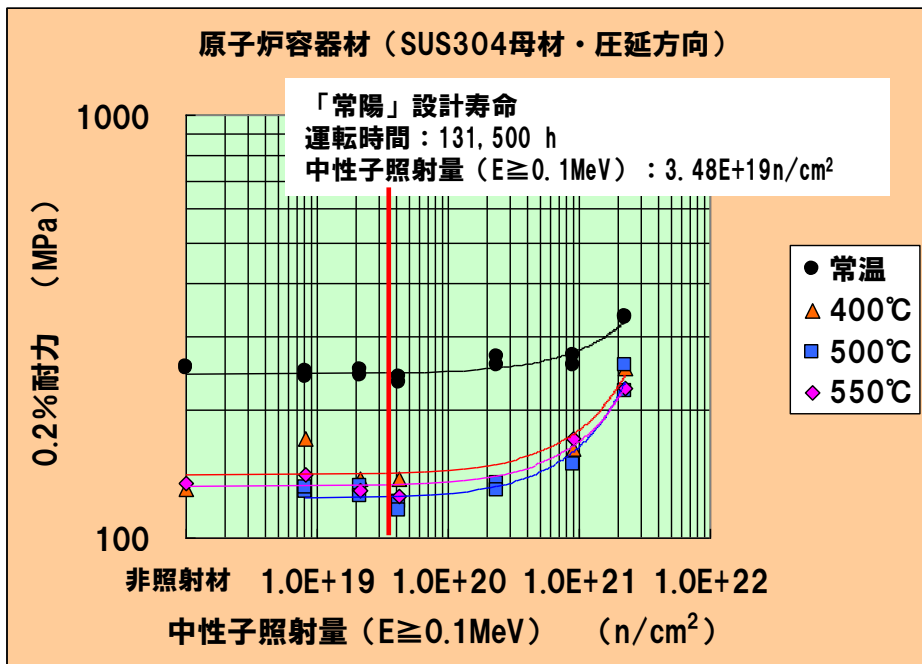
Na浸漬時間 第1回:6,733hr 第2回:20,313hr

#### 実績調査及び評価結果

- Na浸漬材（サーベイランス材）及び非Na浸漬材を用いて、常温及び高温（400℃以上）で引張試験を実施。
- 0.2%耐力で、高速原型炉高温構造設計方針(BDS)の設計基準を超える耐力を有することを確認。

# 過去の評価結果（高速中性子の照射による構造材の強度低下）

原子炉容器材のサーベイランス試験のケース  
 （高速中性子の照射＋腐食（ナトリウム環境）による影響を評価）



項目		サーベイランス試験結果		
		中性子照射量 ( $E \geq 0.1\text{MeV}$ )	一様伸び (%)	破断伸び (%)
原子炉 容器材	SUS304母材	II-02 $9.14\text{E}+20\text{n/cm}^2$	24.9	34.6
	溶接継手	設計寿命の約30倍	13.2	16.2
炉心支持板材 (SUS316母材)		TTJT02 $5.95\text{E}+21\text{n/cm}^2$ 設計寿命の約2倍	20.0	30.0

# 過去の評価結果（腐食（水環境））

## 非常用ディーゼル発電機冷却水槽等の点検のケース

水槽内部の状況（点検後、防錆処理等を実施）



点検時の様子（酸欠防止措置を実施）



# 過去の評価結果（腐食（水環境））

## 補機冷却系の配管の点検のケース

必要に応じて、配管を更新

配管の肉厚測定の様子

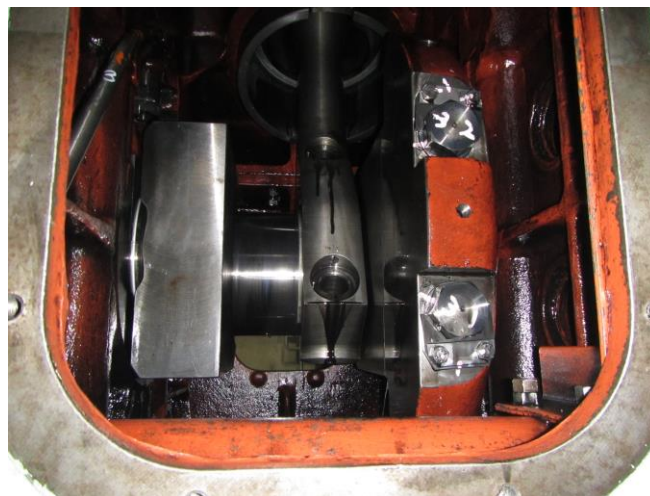


## 過去の評価結果（摩耗）

### 非常用ディーゼル発電機のディーゼル機関部分の分解点検のケース

- クランクシャフト、シリンダー、燃料関係、潤滑油関係、空気関係、過給器、補機設備等の点検を実施している。摩耗の観点では、シリンダーやクランクシャフトの摺動部に着目することが必要である。
- ディーゼル機関部分は、機関本体のシリンダーブロック部以外について、ほぼ部品交換が可能であり、磨耗が著しい場合は分解点検時に対象部品を交換することで健全性を確保できる。

クランクシャフト摺動部



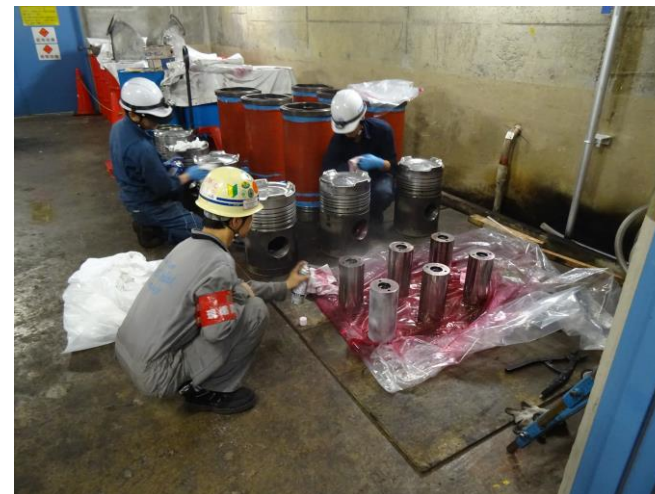
クランクピンメタル摺動面



ピストン爆発面浸透探傷



ピストンピン浸透探傷



## 日常劣化管理事象に分類できる経年劣化事象の検討

PLM基準に定める 経年劣化事象のうち 高速炉及び試験研究炉 であることを踏まえても 考慮が必要と考えられる 経年劣化事象	「常陽」での考慮要否及び理由		備考
	要否	不要の理由	
低サイクル疲労	○	—	—
高サイクル熱疲労	○	—	—
フレット疲労	×	ポンプ等において、回転軸と軸受けの間で、フレット疲労による割れが想定される。巡視点検時において、異常な振動がないこと等を確認しており、日常劣化管理事象として取り扱われるため、経年劣化事象として考慮しない。	発電炉の高経年化対策実施ガイドにおいても、必須項目とされていない。
電気・計装品の絶縁低下	○	—	—
コンクリートの強度低下	○	—	—
コンクリートの遮蔽能力低下	×	原子炉施設保安規定に基づき、定期的に線量率測定を実施し、遮蔽能力の低下がないことを確認しており、日常劣化管理事象として取り扱われるため、経年劣化事象として考慮しない。	
上記以外	「常陽」での考慮要否及び理由		備考
	要否	不要の理由	
腐食（ナトリウム環境）	○	—	—
侵食（流動ナトリウムによるエロージョン・コロージョン）	○	—	—
熱時効（高温ナトリウム環境で使用したクロムモリブデン鋼が対象）	○	—	—
高速中性子の照射による構造材の強度低下	○	—	—
クリープ疲労	○	—	—
腐食（水環境、大気環境）	○	—	—
摩耗	×	ポンプ等において、回転軸と軸受けの間で、摺動摩耗が想定される。定期的な分解点検により消耗部品を交換する対策を講じており、日常劣化管理事象として取り扱われるため、経年劣化事象として考慮しない。	

現在までの運転経験や使用条件から得られた材料試験データとの比較等により、  
 今後も経年劣化の進展が考えられない、又は進展傾向が極めて小さいと考えられる経年劣化事象の検討

PLM基準に定める 経年劣化事象のうち 高速炉及び試験研究炉 であることを踏まえても 考慮が必要と考えられる 経年劣化事象	「常陽」での考慮要否及び理由		備考
	要否	不要の理由	
低サイクル疲労	○	—	—
高サイクル熱疲労	×	2次冷却系の配管合流部（プラグング計）の高サイクル熱疲労（サーマルストライビング）に関する検討において、温度の揺らぎによる金属疲労は、設計疲労限度を十分下回ることを確認している。また、MK-III冷却系改造工事時に当該部分を交換しており、その際に、当該合流部配管にき裂はなく、健全であることを確認している。	発電炉の高経年化対策実施ガイドにおいても、必須項目とされていない。
電気・計装品の絶縁低下	○	—	—
コンクリートの強度低下	○	—	—
上記以外	「常陽」での考慮要否及び理由		備考
	要否	不要の理由	
腐食（ナトリウム環境）	○	—	—
侵食（流動ナトリウムによるエロージョン・コロージョン）	×	流動ナトリウムによる浸食には、流速、溶存酸素、溶存水素（pH）、純度、温度及び材質等が影響する。これらの因子による影響は、複雑に干渉するが、最終的には材料の保護膜となる酸化被膜（ $Fe_3O_4$ ）の形成と安定化、あるいは剥離挙動への関与に帰着する。ナトリウム冷却型高速炉の場合、溶存酸素は他の不純物元素と共に厳密に管理されており、環境は常に還元雰囲気にあることから、材料表面に酸化被膜は形成されない。このため、表面保護層の形成は期待できない半面、脆化した酸化被膜の剥離による減肉も生じない環境にあり、2次冷却系の配管材のクロムモリブデン鋼において、水環境等で観察される腐食（酸化）とエロージョンの繰り返しによる減肉進行は発生し難い。また、MK-III冷却系改造工事で切断した配管において、エロージョン/コロージョン特有の鱗片模様や減肉の痕跡は確認されなかった。	—
熱時効（高温ナトリウム環境で使用したクロムモリブデン鋼が対象）	○	—	—
高速中性子の照射による構造材の強度低下	○	—	—
クリープ疲労	○	—	—
腐食（水環境、大気環境）	○	—	—

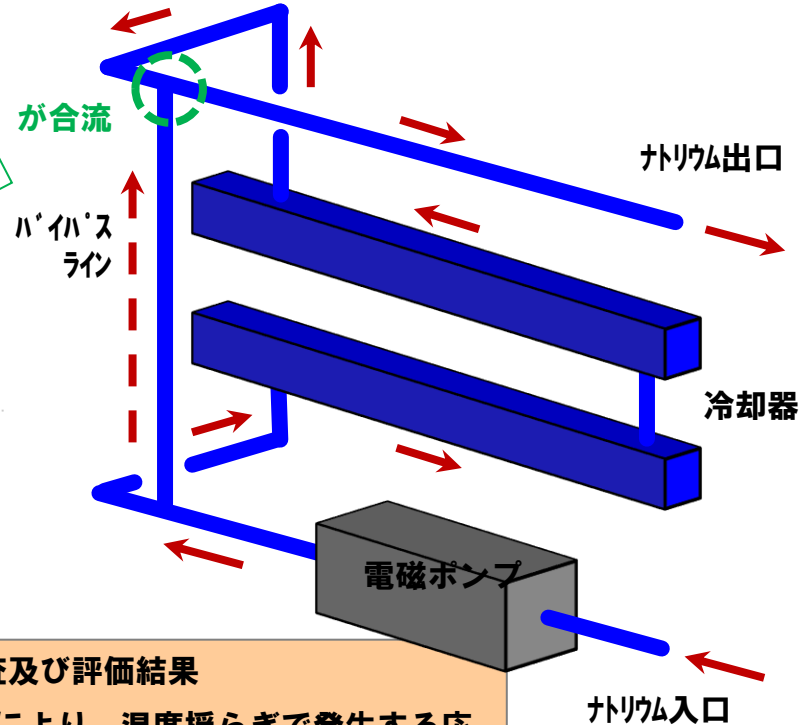
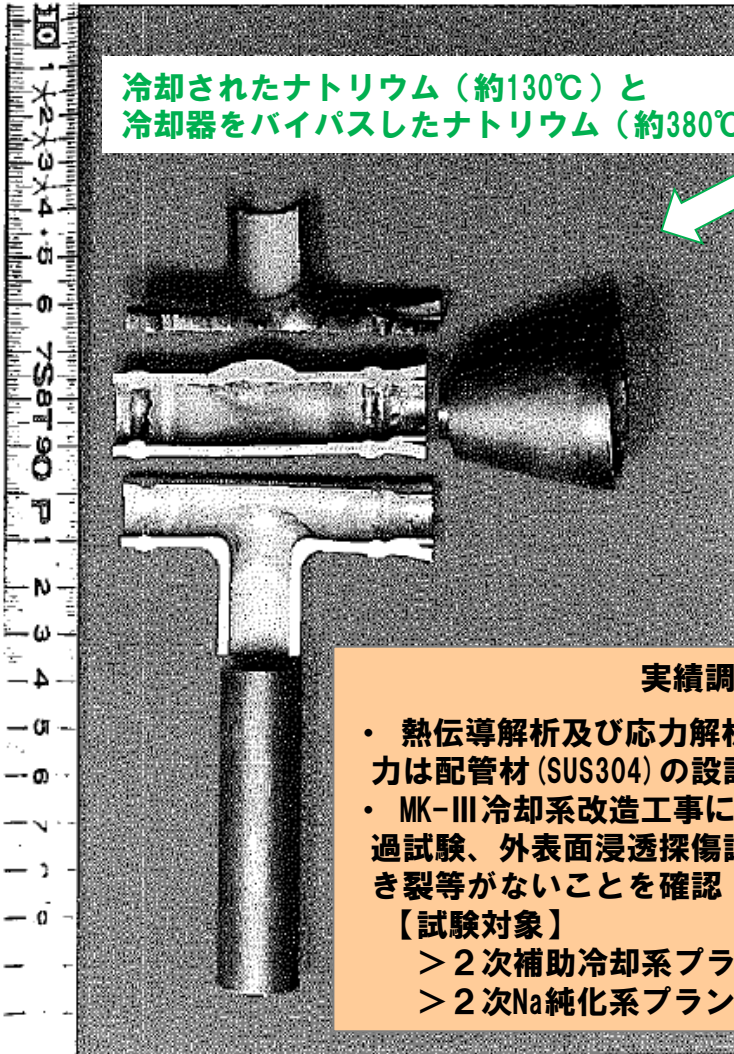
# 過去の評価結果（高サイクル熱疲労）

## 2次冷却系の配管合流部（プラグング計）の高サイクル熱疲労（サーマルストライクング）に関する検討

プラグング計における配管合流部（例：2次Na純化系）

プラグング計の概略構造

参考：プラグング計の概要



### 実績調査及び評価結果

- ・ 熱伝導解析及び応力解析により、温度揺らぎで発生する応力は配管材（SUS304）の設計疲労限を十分下回ることを確認。
- ・ MK-III冷却系改造工事において、当該配管を交換。放射線透過試験、外表面浸透探傷試験、内表面浸透探傷試験を実施し、き裂等がないことを確認

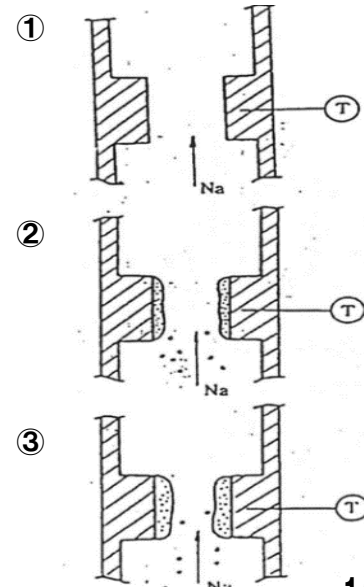
#### 【試験対象】

- > 2次補助冷却系プラグング計の配管（約28,977時間）
- > 2次Na純化系プラグング計の配管（約48,971時間）

- ・ ナトリウムの純度を測定するための装置であり、温度を低下させると不純物が析出する原理を利用。

- ・ 配管中のオリフィスに不純物がない状態（①）に対して、温度を下げることで、不純物が析出（②）し、流量が減少。

- ・ 流量比一定となるよう温度を調整・測定し、ナトリウムの純度を監視（③）。





## 高経年化技術評価における対象事象の抽出結果（案）

- 1) 低サイクル疲労
- 2) 高速中性子の照射による構造材の強度低下
- 3) クリープ疲労
- 4) 熱時効
- 5) 腐食（ナトリウム環境、水環境、大気環境）
- 6) 電気・計装品の絶縁低下
- 7) コンクリートの強度低下