



日本原子力学会 新型炉部会 部会・連絡会セッション13

「研究開発段階発電用原子炉の保守管理の在り方」

- (2) 現状の保守管理における技術課題
- (3) 研究開発段階炉の保守管理の在り方

ナトリウム冷却高速炉に適合させた具体例

2016年9月8日

小竹庄司 (日本原子力発電(株))



はじめに

ナトリウム冷却高速炉に適合した保全の在り方とは？

「ナトリウム冷却の高速炉」

「研究開発段階」

基本認識：

■炉型に適した保全プログラムの構築

- 炉型特有のリスク特性の考慮
- 炉型特有の劣化メカニズムの考慮

■運転経験の蓄積による保全プログラムの段階的構築

- 運転開始後の初期段階における不具合の早期検知
- 知見の標準化
- 新知見反映手順の明確化

本報告では、研究開発段階にある原型炉「もんじゅ」での保全計画の現状を参照し、炉型の特徴を反映した実用炉の保全計画構築に向けた検討の方向性について紹介する。



ナトリウム冷却高速炉に適合した保全の在り方とは？

■ 炉型に適した保全プログラムの構築(事例)

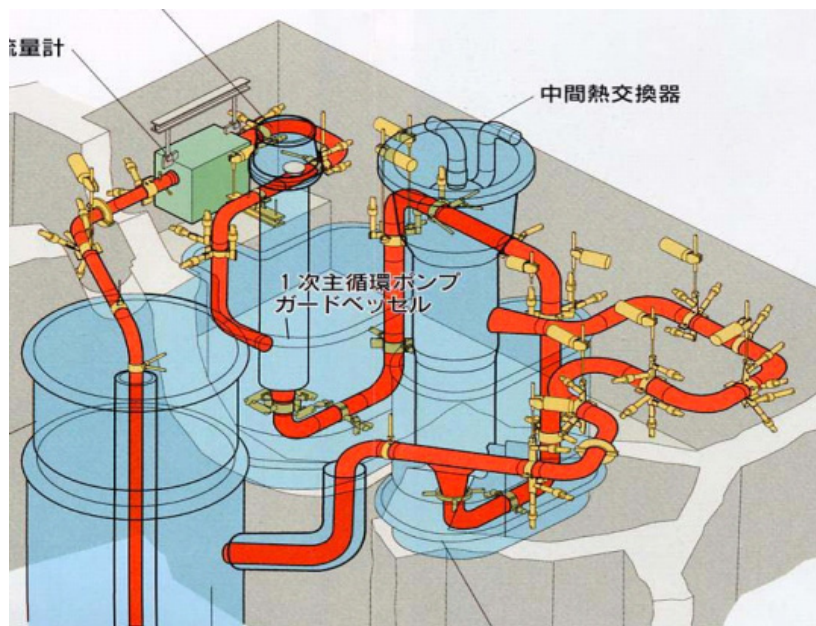
- 事例1(配管): 冷却材バウンダリは漏えい監視(低圧系、劣化小)
- 事例2(配管支持): 配管支持は配管変位監視(熱膨張変位が大きく監視が容易)
- 事例3(弁): 弁は漏えい監視+作動試験(低圧系、劣化小)

■ 運転経験の蓄積による保全プログラムの段階的構築

- 事例1(配管): 当初は代表部位でデータ取得 → 漏えい監視のみに移行
- 事例2(配管支持): 当初は目視検査 → 配管変位監視に移行
- 事例4(予熱ヒータ): 当初は全数検査 → BDMを基本とし少数サンプル検査



事例1(「もんじゅ」の1次系主配管の場合)



使用環境及び設置環境

設計的知見及び科学的知見



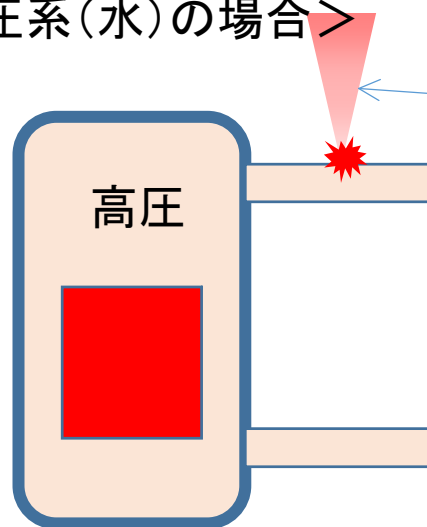
- ① 低圧系のため減圧沸騰、急速な破損の進展がない。
- ② 配管内側からの腐食等の劣化は無視できる(外側も窒素雰囲気なので劣化は無視できる)。
- ③ 熱過渡による劣化寿命期間に対し十分な裕度がある。

項目	ホットレグ	クロスオーバーレグ	コールドレグ
冷却材	ナトリウム		
ループ数	3		
熱輸送量	約238MW/ループ		
冷却材流量(定格出力時)	約5120 ton/h/ループ		
材質	SUS304		
呼び径	32B	32B	24B
外径(mm)	812.8	812.8	609.6
板厚(mm)	11.1	11.1	9.5
最高使用温度(℃)	550	420	420
最高使用圧力(kg/cm ²)	2	2	10
運転温度(℃)	529	397	397
運転圧力(kg/cm ²)	1.3	1.3	8.5



設計的・科学的知見①(低圧力、高い沸点)

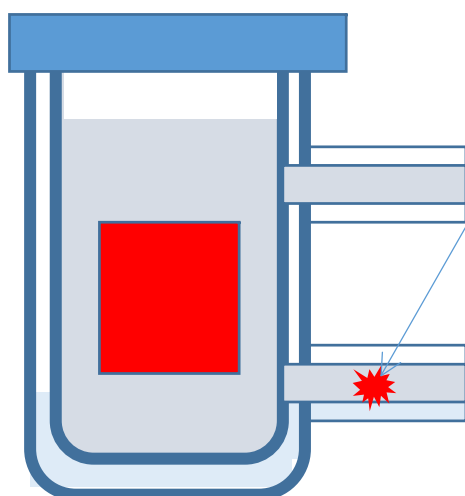
大気圧と同程度の低圧力、沸点からはるかに低い温度での運転
＜高圧系(水)の場合＞



高圧のため、一か所でのバウンダリ破損から、冷却材の急速な流出と減圧沸騰に至る

- 配管破損の規模により、**短時間で炉心冷却材喪失**に至り、ECCSの多重故障によって炉心損傷に至る可能性がある。

＜低圧系(液体金属)の場合＞



低圧のため、バウンダリの破損規模が小さく、冷却材の流出は単相流出となる

- 配管の上方引回しや外容器等で漏えいを抑制でき、**炉心冷却材液位確保が容易ができ、炉心燃料等への影響は少ない。**
- 小さな破損があっても急速な破損の進展はない。
- 過渡的な流量低下の影響は安全評価で確認されている。



設計的・科学的知見②(ナトリウムと材料の共存性)

ナトリウム中は還元雰囲気であり、水環境で見られる酸化被膜の形成による腐食の進行は生じない。

◆ ナトリウム中の腐食機構:

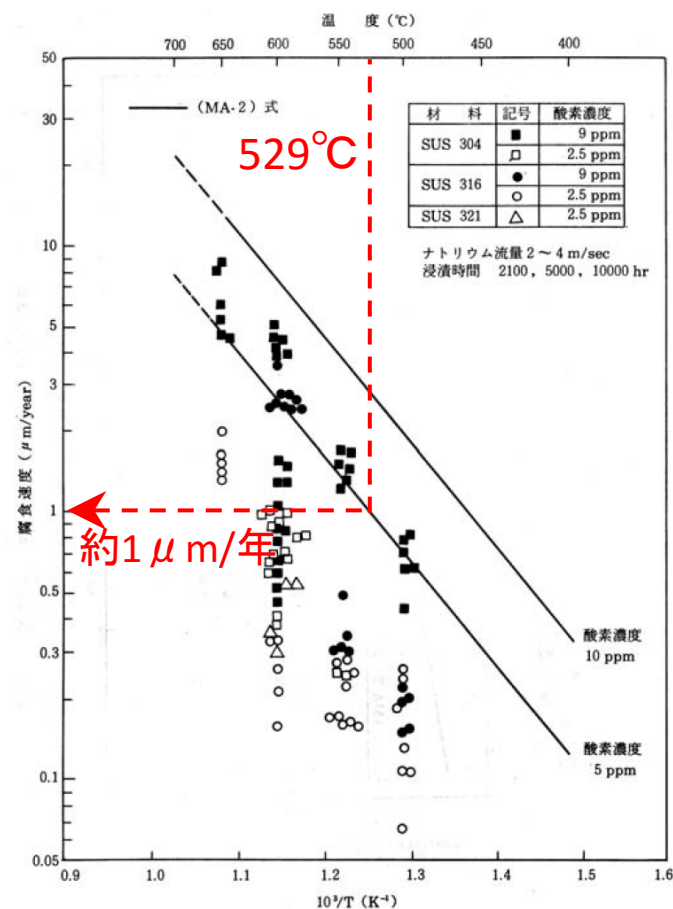
① ナトリウム中への元素の溶出

高温領域で溶出した合金元素が輸送され
低温領域で析出する質量移行現象により高
温領域での溶出が継続

② ナトリウム中の不純物との相互作用

ナトリウム中の酸素の存在により、
合金元素がナトリウムとの複合酸化物を形
成し、見かけの溶解度が増大

純度管理されたナトリウムは材料との共存
性が高く、腐食による劣化は極めて小さい。
(30年でも0.03mm程度)



ナトリウム中腐食速度評価式
(JSME設計・建設規格(高速炉))



設計的・科学的知見③(熱過渡による劣化)

高温構造設計(JSME設計・建設規格(高速炉))

① 一次応力の制限

一次応力による延性・クリープ破断、過大な塑性・クリープ変形を防止

② ひずみの制限

熱過渡の繰返しによる累積非弾性ひずみを制限し、過大な塑性・クリープ変形を防止

③ クリープ疲労損傷の制限

熱過渡の繰返しによるクリープ疲労損傷を制限し、クリープ疲労破損を防止

熱過渡の想定が前提

- ◆ ナトリウム冷却高速炉はクリープ温度域で使用することから、クリープ疲労損傷が代表的な劣化事象として想定される。ただし、設計評価法に大きな裕度(約100倍)が含まれている*。
- ◆ 仮にクリープ疲労損傷により貫通き裂が発生したとしても、低圧系であるため急速な破損拡大が生じる恐れはない。

* : 石崎公人、渡士克己、高橋伸友、岩田耕司：“SUS304鋼の熱疲労試験”，PNC-TN9410-86-101 (1989).



1次系主配管の保全計画(案)

<ナトリウム冷却高速炉>

- 特徴①: 低圧系のためバウンダリ損傷時の炉心冷却への影響は小さい
- 特徴②: 純度管理されたナトリウム環境では内面の腐食等の劣化は無視できる。
- 特徴③: クリープ疲労等の熱過渡による劣化に対し裕度が大きい。

科学的・設計的知見の反映

<軽水炉>

- バウンダリ破損時はLOCAの発生となる。
- 酸化被膜のはく離による腐食減肉、応力腐食割れ等の劣化がある。
- 溶接線の体積検査および肉厚検査等で定期的な確認を行う。

- ナトリウム純度、熱過渡等の劣化の前提となる環境を管理する。
- 実機の配管の代表部位(最も応力が高い部位)において劣化データを確認することにより、上記知見が正しいことを確認する(実験炉ですでに実証済みだが発電炉として改めて確認する)。
- 漏えい監視により万が一の時にも小規模の漏えいのうちに早期に検知

知見の反映

漏えい監視は運転初期の不具合検知にも有効

知見の反映手順の明確化

- データ蓄積による実証等により信頼性を確認するとリスクはさらに小さくなる。
- 最終的には漏えい監視のみで対応できると考えられる。



実機での確認データの収集方法(例)

1次系主配管検査装置



- 劣化メカニズムからは最も応力が高い部位でもき裂は発生しないと考えられるが、き裂が発生しないことを確認する。
- 超音波によりき裂を発見することが可能(基本性能は総合機能試験で確認済み)。
- 肉厚検査にも適用可能(減肉がほとんどないことを確認する)。

- ・配管屈曲部(エルボ)の自動走行/検査
- ・高放射線環境(配管への取付時間:目標5分以内)
- ・カプラント(接触媒質)不要のタイヤ型超音波探触子

など



漏えい監視による「健全であること」の確認

- 安全系の漏えい監視は微小漏えい監視とは別に設置されている。
- 微小漏えい監視によりごく小規模の配管破損を検知できる。
- ナトリウムの化学反応により保温材の表面が変化するため停止時の漏えい痕の確認は保温材の外から行う。
- 小規模の破損があっても低圧系のため破損の進展はごく緩やか。



- 微小漏えい監視により早期に検知可能
- 微小漏えい監視が運転中に停止したとしても、運転中の漏えいの有無を停止後の漏えい痕の確認により補完することが可能。



事例2:1次系主配管の支持構造物の保全

- 軽水炉は10年25%確認(40年間で全数)
- 「もんじゅ」の現状はアクセス可能範囲の全数目視検査



- 熱膨張が大きいので配管変位で支持構造物の状態を確認できる。
- 窒素雰囲気なので腐食等はない。
- 40年間の耐久性について問題がない(試験で確認済み)。

科学的・設計的知見の反映

知見の反映手順の明確化



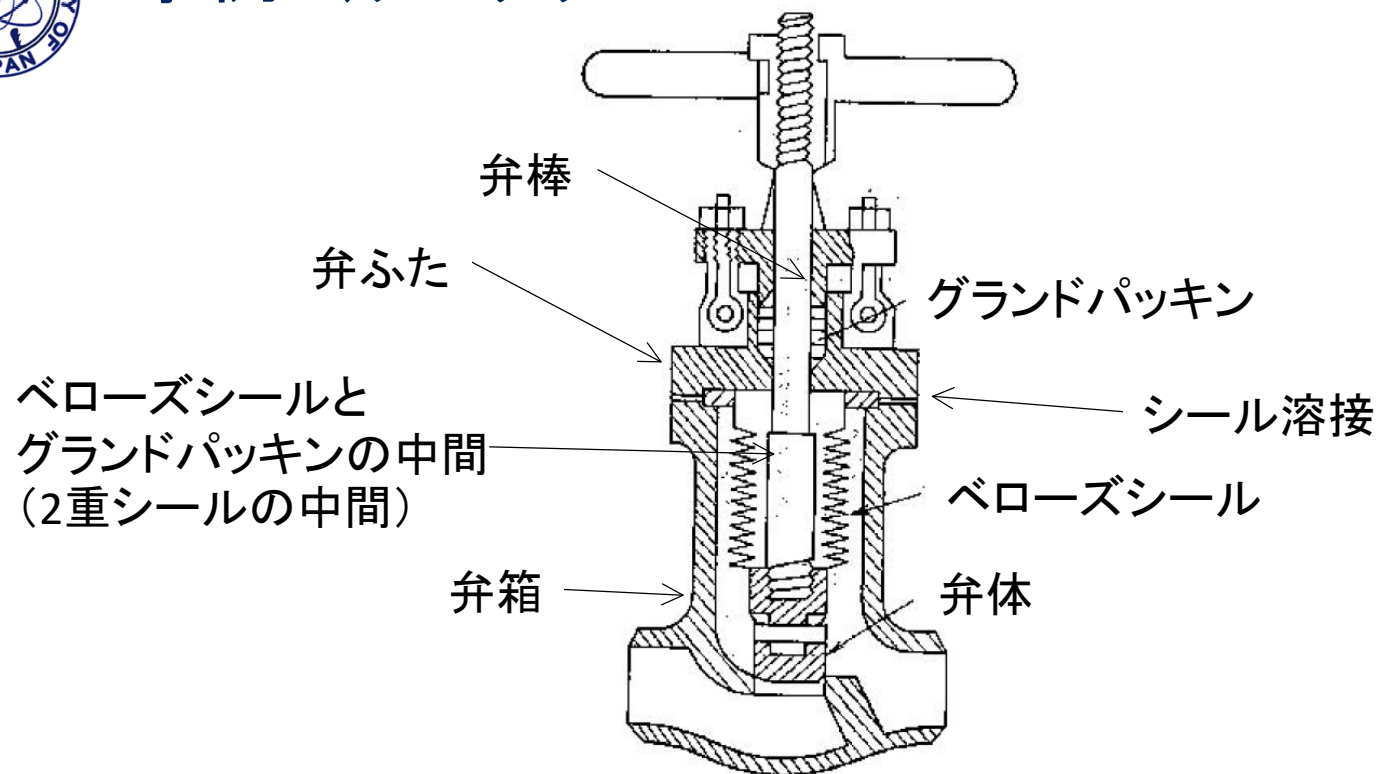
- 配管の変位を監視し支持に異常がないことを確認する。

運転初期の不具合検知にも有効

- 少数の代表機器の検査により劣化メカニズムの知見を実機で確認する。
 - 代表機器の目視検査(取付状態、インジケータの目視))
 - サーベイランス試験体の低速走行試験



事例3(ナトリウム弁)



- バウンダリー一般部(弁箱、弁ふた、シール溶接)
 - 配管と同じ考えで漏えい監視が基本
- ベローズシール、グランドパッキン(バックアップシール)
 - 2重シールの中間部で漏えい監視(ベローズの耐久性は確認済み)
- 弁の機能: 弁棒、弁体の摺動
 - 安全上の機能は定期的な作動試験により確認



事例4(予熱ヒータおよび予熱温度計)

- 予熱ヒータおよび予熱温度計はナトリウムの凍結を防止する。
- 予熱ヒータ(約3000本)、予熱温度計(約3500本)ともに**全数検査**。

故障時のリスクを適切に考量



<現状のもんじゅ>

- 予熱ヒータは40Mで導通確認。
- 予熱温度計は16～40Mで外観点検、40Mで絶縁抵抗測定／導通試験

- 系統ごとに多数あるため単体の故障はかならずしも安全性に影響を及ぼさない。

リスクに応じたグレーデッドアプローチを適用



知見の反映手順の明確化

- 予熱ヒータおよび予熱温度計いずれも**事後保全が基本**であると考えられる。
- 多数のヒータの同時的な破損を防止するため**少数の代表機器の定期的な検査**を行う。

- 計装弁(アクチュエータ)、検出器、指示計等も研究開発用のものも含め多数存在し整理する必要がある。



まとめ

1. ナトリウム冷却型高速炉は、冷却材ナトリウムが低圧系であり、構造材料との共存性に優れていることと、漏えい影響を検出し易い等の特徴を踏まえた保全を導入する必要がある。
2. 運転経験を蓄積することにより段階的に保全を改良することにより最終的には実用炉に適合する保全とする必要がある。

	炉型に適した保全プログラムの構築	運転経験蓄積による段階的構築
冷却材バウンダリ	漏えい監視 (低圧系、劣化小)	代表部位におけるデータ取得 ↓ (熱過渡、共存性) 漏えい監視のみ
配管支持構造物	配管変位の監視 (熱膨張大、劣化小)	全数目視(アクセス可能範囲) ↓ 配管の変位を監視 (少数サンプルは検査)
ナトリウム弁	漏えい監視+作動試験 (低圧系、劣化小)	配管部で共存性についてデータ取得
予熱ヒータ 予熱温度計		全数検査 ↓ 事後保全 (少数サンプルは検査)