

# 原子炉の長期運転のための 大型機器の構造力学的保全について



2023年10月10日

東京大学大学院 工学系研究科 原子力国際専攻

日本機械学会 発電用設備規格委員長

笠原直人

# 内 容

- 長期運転のための機器の構造力学的保全の方法と現状
- 構造力学的保全対策例
- 長期運転に向けた経年劣化事象と規格基準の関係について
- 今後への期待

## 1. 破損モードの把握

世界中の炉の運転経験が蓄積 (IAEA INTERNATIONAL GENERIC AGEING LESSONS LEARNED 等) されており、破損モードの種類はほぼ把握されている。

利用できる強度データは、頻度の低いものほどデータは少なく不確定性が大きい。荷重については、内部事象は、実績やモニタリングデータのほとんどは設計想定より小さいが、想定されてなかった荷重 (想定外の流力現象等) も発生している。外部事象は設計想定を超える事象 (過大地震等) が発生している。

## 2. 優先すべき破損モードの選定

リスクの高い破損モードを選定し、優先度を決めて保全活動を行うのが合理的である。一方、データの不足、確率論的評価の煩雑さから、我が国においてはリスク情報活用は初期段階にある。このため設計条件に基づき、過度に保守的な保全活動がなされる場合がある。

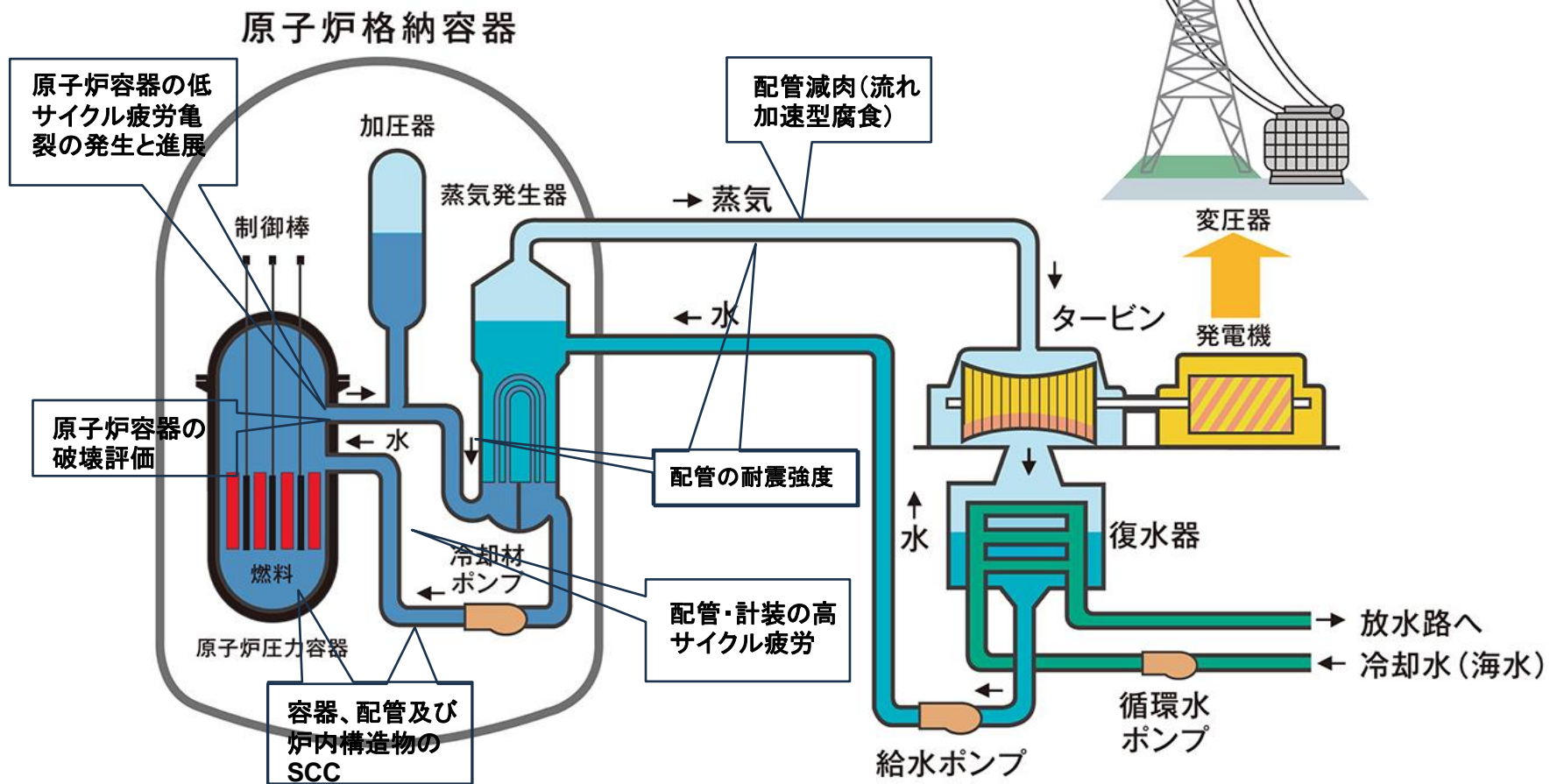
## 3. 保全対策

検査について、非破壊検査精度は向上している。一方、上記優先度が明確でないために、検査箇所と頻度が過度に保守的になる場合がある。

評価について、精度を高めると共に、破損発生後の進展拡大を予測するため、最新の非弾性解析、疲労強度解析、破壊力学解析、の活用が期待される。

補修については、新技術を活用するための、コンセンサスと実績が望まれる。

# 長期運転のための劣化評価対象となる大型機器と破損モードの例



<https://www.fepec.or.jp/enterprise/hatsuden/nuclear/keisuiro/index.html> に加筆

# 内 容

- 長期運転のための機器の構造力学的保全の方法と現状
- 構造力学的保全対策例
- 長期運転に向けた経年劣化事象と規格基準の関係について
- 今後への期待

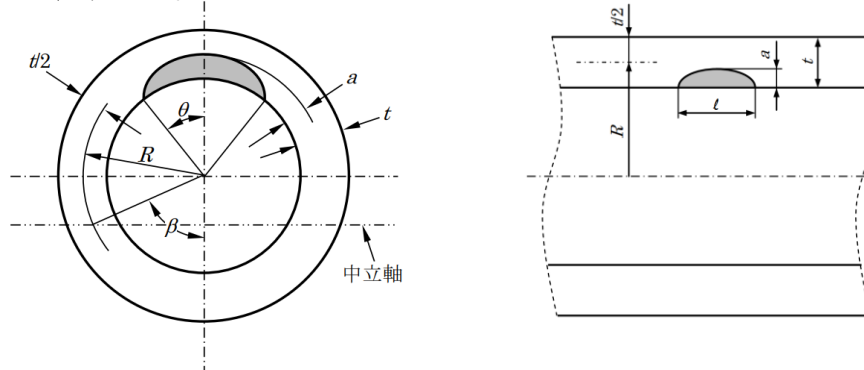
# 1. 原子炉容器の低サイクル疲労亀裂の発生と進展

亀裂発生評価: 実現象に基づく精度向上  
現象論に基づく新しい疲労曲線の整備

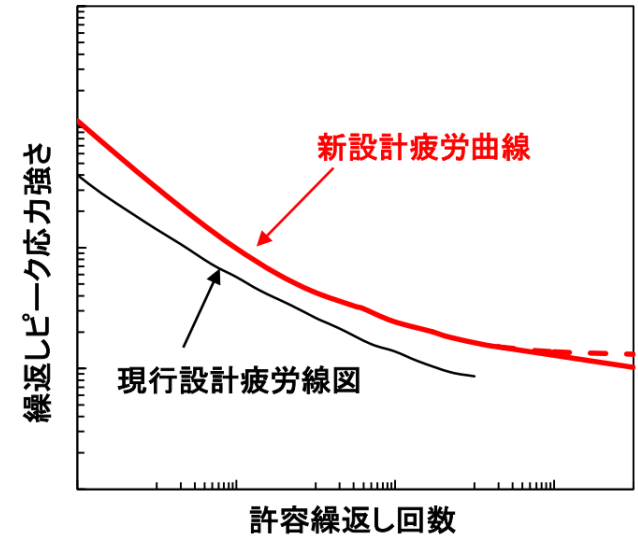
日本溶接協会 疲労ナレッジプラットフォーム:  
[https://www-it.jwes.or.jp/fatigue\\_knowledge/index.jsp](https://www-it.jwes.or.jp/fatigue_knowledge/index.jsp)

水環境による強度低減効果の定量評価  
環境疲労評価手法 (JSME S NF1)

き裂進展評価: 破壊力学的手法の高度化  
3次元き裂の考慮



維持規格 (JSME S NA1)



設計・建設規格 (JSME S NC1)



## 2. 容器、配管のSCC

応力腐食割れ(SCC)は、材料・応力・環境の三因子が重畳することにより発生。割れ破面の形態により、粒界型応力腐食割れ(IGSCC)と粒内型応力腐食割れ(TGSCC)に分類される。原子力機器では、高温水環境中のオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金に発生。

### <発生抑制>

材料・応力・環境の三因子がSCC発生条件を形成しないように抑制することが基本。構造力学的観点では、応力因子に大きく関与する溶接残留応力の予測、低減技術の高度化が望まれる。

### <進展評価>

進展評価には亀裂のモデル化、負荷条件の設定、亀裂進展速度等が必要。このため、SCC発生懸念材料に対する環境中の亀裂進展データを整備。

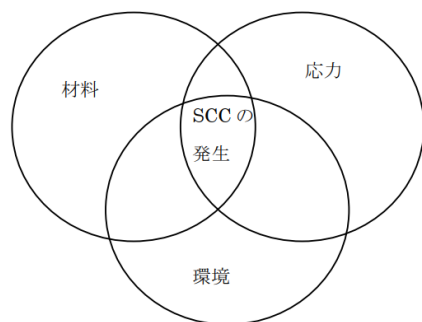


図 XX-2100-1 SCCの発生因子

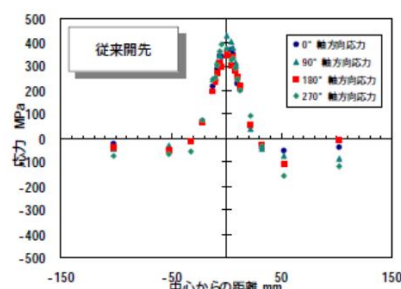


図1 AS WELDED 内面軸方向残留応力  
600A×38.9t SUS316 LC通常開先)

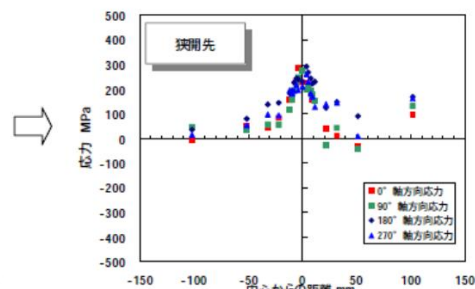


図4 AS WELD 内面軸方向残留応力  
600A×38.9t SUS316 LC 狭開先)

図42 狭開先による残留応力の低減効果

解説図 XX-2221-1 狭開先溶接による残留応力の低減効果の例

応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮(JSME S NC-CC-002)

### 3. 炉内構造物のSCC

前頁とは別に、中性子照射によりオーステナイト系ステンレス鋼の照射損傷が蓄積することにより発生する照射誘起応力腐食割れ(IASCC)がある。

#### <発生抑制>

IASCCは中性子照射量と発生応力の関係で発生を予測。構造力学的観点では、発生応力を算出するための強度評価手法の高度化が望まれる。

#### <進展評価>

IASCCについては主にPWRのバッフルフォーマボルトが対象であり、亀裂発生後の進展寿命が短いことから損傷本数の予測と監視で対応。

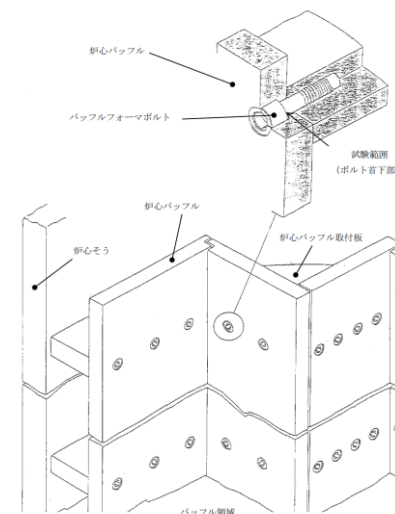
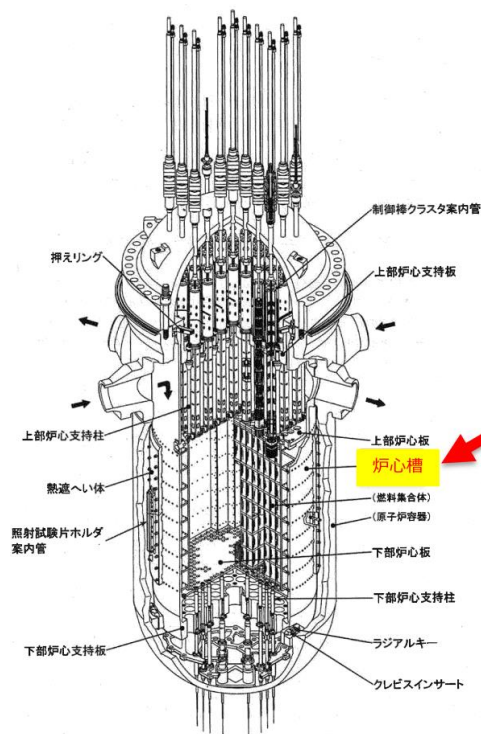


図 1.30-2500-P-1 バッフルフォーマボルト

維持規格(JSME S NA1)



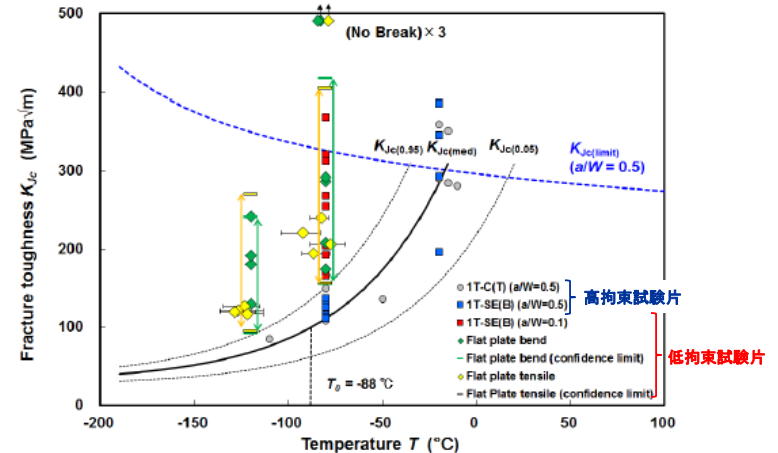
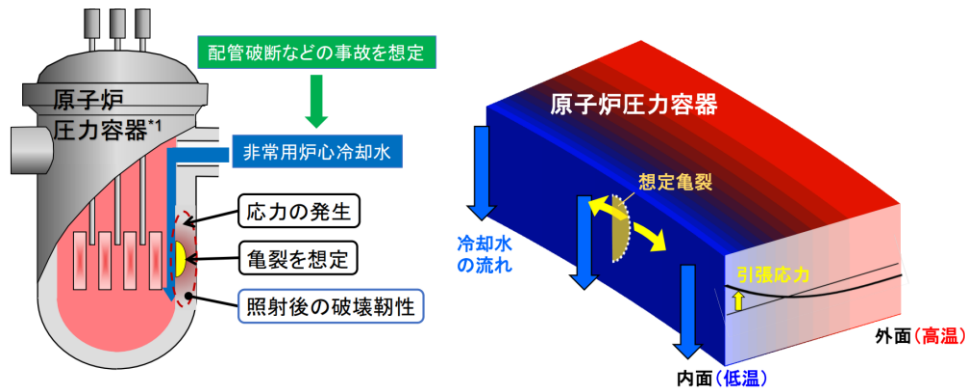
# 4. 原子炉容器の破壊評価

LOCA時の熱過渡荷重の評価:CFD等に基づく精度向上

亀裂が入った容器壁の破壊評価:破壊力学的手法の高度化

延性－脆性遷移温度領域における破壊挙動に及ぼす拘束の影響  
確率論的破壊力学評価法の導入

維持規格(JSME S NA1)



第19回原子力委員会資料第1号(2023)

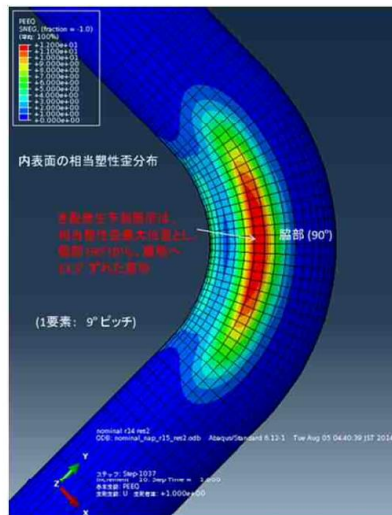
高拘束試験片(1TC(T), 1TSE(B)(a/W=0.5))と低拘束試験片(1TSE(B)(a/W=0.1),表面亀裂付平板)の破壊靱性の比較 (PVP2022-84186より)

# 5. 配管の耐震強度

基準地震動Ssが引き上げられた(ある意味での設計の古さ)ことから、補強工事が実施されている。

実挙動に基づく応答予測:弾塑性解析

実際の破損モードに基づく評価法:低サイクル疲労

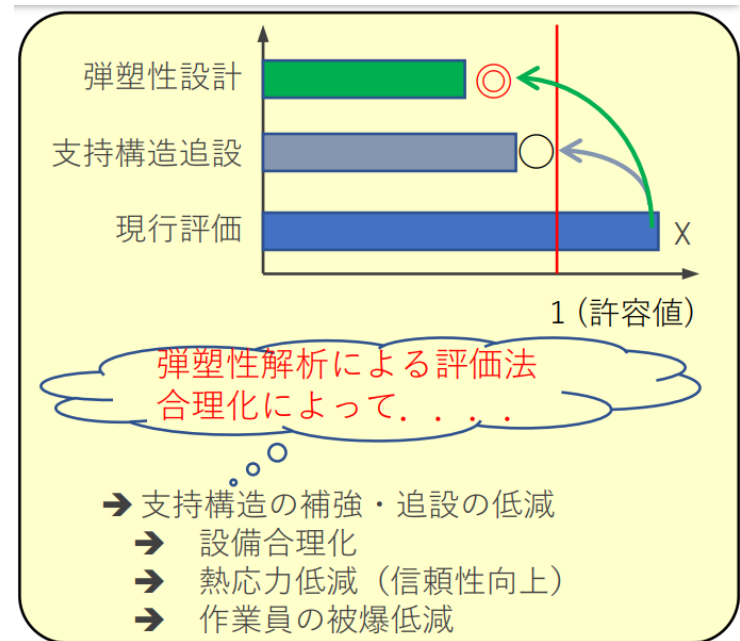


(a) 解析における損傷予測位置 (グループ B)



(b) 実験結果

図 B-3-5 解析における損傷予測位置の事例と実験結果



弾塑性応答解析に基づく耐震 S クラス配管の耐震設計に関する代替規定(JSME S NC-CC-008)

# 6. 配管減肉(流れ加速型腐食)

## 合理的検査

流れが速い配管のエルボ部など、流体が壁に早い速度で衝突する部位で起こり易い。超音波パルス反射法(JIS Z 2355)による厚さ測定及び減肉予測手法により減肉の兆候を把握する。自主検査として配管溶接部の健全性確認などを目的に放射線透過検査が行われたこともある。

加圧水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格(JSME S NG1)  
 沸騰水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格(JSME S NH1)

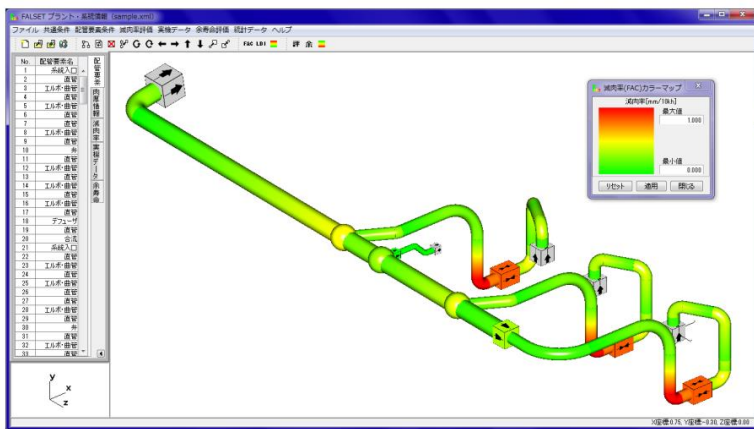


図1 配管系統の各配管要素に対する最大減肉率の予測例

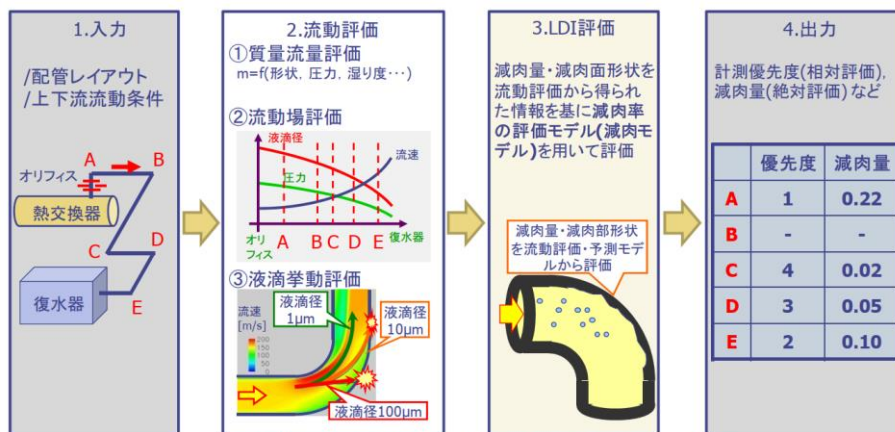


図4.2.1 LDIによる配管系統の減肉率の評価システムの概要

配管減肉予測ソフトウェアFALSETの開発 電力中央研究所 研究報告L11007 平成24年

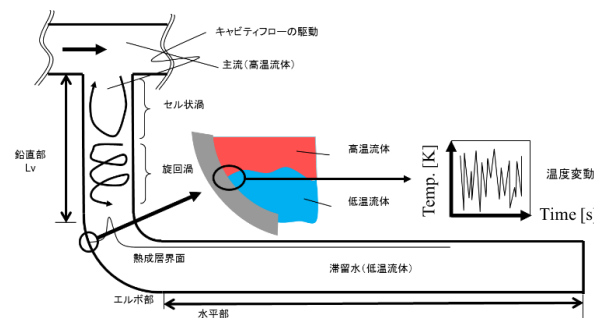
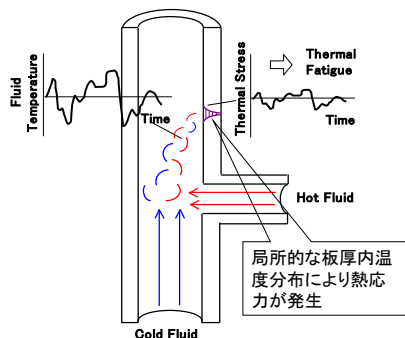
# 7. 配管・計装の高サイクル疲労

## 高サイクル熱疲労

熱疲労が起こりやすい箇所と破損モードの提示(高低温配管合流部、滞留部、等)

疲労損傷クライテリアの提示

配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針(JSME S 017)



高低温配管合流部温度ゆらぎによる熱疲労

滞留部における温度成層界面ゆらぎによる熱疲労

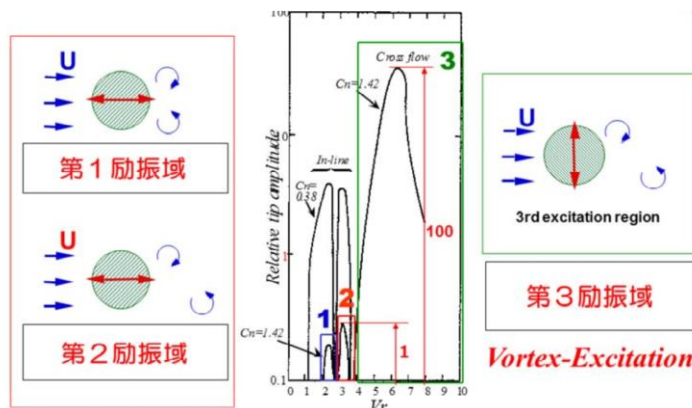
P-SCC II-7 熱疲労評価技術の高度化と知識基盤拡充構築に関する研究分科会 成果報告書, JSME (2019)

## 流力振動

流力振動が起こりやすい箇所と振動モードの提示(交互渦、双子渦、等)

振動発生クライテリアの提示

配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(JSME S 012)



Response Amplitude of a Circular Cylinder in In-line and Cross-flow Directions after R. King

9. King, R., Prosser, M.J. and Johns, D. J.: On Vortex Excitation of Model Piles in Water, J. Sound and Vibration., vol.292, 1973, pp.169-188.

# 内 容

- 長期運転のための機器の構造力学的保全の方法と現状
- 構造力学的保全対策例
- 長期運転に向けた経年劣化事象と規格基準の関係について
- 今後への期待

# 民間規格を提供する主要学協会

具体的仕様規定は、学協会が定める民間規格が活用されている。民間規格を提供する主要な学協会と規格の例を以下に示す。

## ○日本原子力学会(標準委員会) ⇒ AESJ Code

原子力施設の立地から、基本設計、システム詳細設計、保守、廃炉、核廃棄物の再処理・処分・処置、放射線利用 など広範な技術分野をカバー

### 【規格の例】

「原子力発電所の高経年化対策実施基準」、「原子力発電所の安全性向上のための定期的な評価に関する指針」、「原子炉施設の廃止措置の計画／実施」等

※日本原子力学会は上記以外にも、IAEAを参考に上位規格である目標や性能要求に関するレポートを発行している。

## ○日本機械学会(発電用設備規格委員会) ⇒ JSME Code

主に機械関係設備の構造・機能の健全性維持にかかわる材料、設計、建設、試験・検査、維持・保守及び廃止までをカバー

### 【規格の例】

「材料規格」、「設計建設規格」、「溶接規格」、「維持規格」、「配管減肉管理に関する規格」、「環境疲労評価手法」、「配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針」等

## ○日本電気協会(原子力規格委員会) ⇒ JEAC/JEAG

原子力発電関係電気工作物の保守管理及び安全管理等の規程を制定  
発電所の運用や耐震など広い技術分野をカバー

### 【規格の例】

「原子力発電所耐震設計技術規定」、「原子力発電所耐津波設計技術規程」、「原子炉構造材の監視試験方法」、「原子力安全のためのマネジメントシステム規定」、「原子力発電所の保守管理規定」等



# 主な民間規格基準の概要

		設計・建設段階	供用段階	廃止措置段階
マネジメントシステム		原子力発電所の継続的な安全性向上のためのリスク情報を活用した統合的意思決定に関する実施基準(IRIDM)		
人的要因		原子力安全のためのマネジメントシステム規程(JEAC4111)		
		保守管理規程(JEAC4209)		
系統 ／ 機器 ／ 構築物	設計	安全設計関係基準・指針類（自然災害、溢水・火災等各種の防護設計指針等）		
		材料規格(JSME S NJ-1)		
	製造	設計・建設規格(JSME S NC-1)		
		・配管の高サイクル熱疲労、配管内構造物の流力振動等の個別設計評価基準 等		
		耐震設計技術規程(JEAC4601)、耐津波設計技術規程(JEAG4629)		
	溶接規格(JSME S NB-1)			
	・検査 ・評価 ・補修		維持規格(JSME S NA-1)	安全評価ガイドラインを廃止措置計画に基づき開発中
			・ISI規程、CV-LRT、ET指針、UT規程 等 ・環境疲労評価手法	
	劣化 監視 /評価	個別機器(例) 原子炉容器: 炉内構造物: 配管:	RV照射脆化管理・評価の技術規程(JEAC4201, JEAG4206)	
			・炉内構造物点検評価ガイドライン[JANSI] ・配管減肉管理に関する規格 等	
定期安全レビュー			PSR+基準	
高経年化対策				高経年化対策実施基準(PLM)

# 主要劣化事象※に係る規格基準との関係(1/2)

※:PLMガイドにおいて定めている「高経年化対策上着目すべき経年劣化事象」

- 低サイクル疲労(規格・基準参照先)
  - 「原子力発電所の高経年化対策実施基準:2021」附属書F.1 低サイクル疲労
  - 設計・建設規格(JSME S NC1)
  - 発電用原子力設備規格 環境疲労評価手法(JSME S NF1)
  - 材料規格(JSME S NJ1)
- 中性子照射脆化(規格・基準参照先)
  - 「原子力発電所の高経年化対策実施基準」附属書F.2 中性子照射脆化
  - JEAC 4201 原子炉構造材の監視試験方法
  - JEAC 4206 仮想欠陥の評価手法:維持規格(JSME S NA1)
  - 要求関連温度:設計・建設規格(JSME S NC1)
  - 原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法

# 主要劣化事象※に係る規格基準との関係(2/2)

※:PLMガイドにおいて定めている「高経年化対策上着目すべき経年劣化事象」

- 照射誘起型応力腐食割れ(規格・基準参照先)
  - 「原子力発電所の高経年化対策実施基準:2021」F.3 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)
  - 維持規格(JSME S NA1)
  - 応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮(JSME S NC-CC-002)
- ステンレス鋳鋼熱時効(規格・基準参照先)
  - 「原子力発電所の高経年化対策実施基準」F.5 ステンレス鋼鋳鋼の熱時効
  - フェライト量の算出
    - Standard Practice for Steel Casting, Austenitic Alloy, Estimating Ferrite Content Thereof(ASTM A800/A800M)
    - Estimation of Fracture Toughness of Cast Stainless Steels during Thermal Aging in LWR System(Nb, Nの参照先)
  - 初期欠陥: 発電用原子力設備規格 配管破損防護設計規格(JSME SNDI)
  - 維持規格(JSME S NA1)

# その他劣化事象に係るJSME規格との関係(1/2)

- ポンプ主軸のフレットイング割れ
  - 金属材料疲れ強さの設計資料
- 高サイクル疲労
  - 配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針(JSME S 017)
  - 配管内円柱状構造物の流力振動評価指針(JSME S 012)
- 流れ加速型腐食
  - 加圧水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格(JSME S NG1)
  - 沸騰水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格(JSME S NH1)
  - 設計建設規格(JSME S NC1)
- 摩耗
  - 維持規格(JSME S NA1)
  - 設計・建設規格(JSME S NC1)
  - 機械工学便覧(日本機械学会編)β4編 「機械要素・トライボロジー」

# その他劣化事象に係るJSME規格との関係(2/2)

- 中性子照射による靱性低下
  - 維持規格(JSME S NA1)
  - 設計・建設規格(JSME S NC1)
- 廃液蒸発装置蒸発器胴板の応力腐食割れ
  - 維持規格(JSME S NA1)
  - 配管破損防護設計規格(JSME S ND1)
- 異材継手部のSCC(PWSCC)
  - 維持規格
- ボルト等原子炉容器炉心近傍部材の中性子および $\gamma$ 線照射脆化
  - 設計・建設規格(JSME S NC1)
- 伸縮継手の疲労割れ
  - 設計・建設規格(JSME S NC1)
- 基礎ボルトの腐食減肉
  - 設計建設規格(JSME S NC1)

# 内 容

- 長期運転のための機器の構造力学的保全の方法と現状
- 構造力学的保全対策例
- 長期運転に向けた経年劣化事象と規格基準の関係について
- 今後への期待



## 1. 福島第一原子力発電所事故の教訓

重大事故、外的事象に対する対策の強化(新規制基準)

事故を起こさない努力に加え、事故が起こった場合のレジリエンスを考慮

構造力学分野での努力の方向性

従来は設計想定事象に対する破損防止が原子炉構造力学の目的であった。

今後は、破損発生後の安全性能への影響の緩和を目標とした、システム安全との協働が望まれる。

## 2. 教訓を活かすための方針

リスク情報活用とパフォーマンスベース(新たな原子力規制検査)

構造力学分野での努力の方向性

リスクは、破損頻度と影響度の掛算で表されるが、これまで頻度の議論が主であったため、影響度の評価を充実させる必要がある。具体的には、破損後のシーケンス予測と安全性能への影響度評価が必要である。

構造に求められるパフォーマンスとは何かを追求する。設計想定事象に対しては、安全性と供用性が求められることから、影響する全ての破損モードを防止する必要がある。これに対し、設計想定を超える事象に対しては、安全性能への影響の大きい破局的破損モードを防止する。

### 3. プロアクティブな予測と対策

運転経験の共有と水平展開に基づくリアクティブな対策は十分に行われるようになってきている。

想定を超える事象を含むプロアクティブな予測と対策が今後の課題である。

### 4. 上記を実現するために必要なこと

最新知見に基づいた評価技術などを適宜導入できる環境整備

技術者育成、技術検討に必要な資源投入

規制、産業界、学会などのステークホルダー間の意見交換活性化

(参考)

ASMEでは各ステークホルダーが活発に議論、最新知見を取り入れ

例) NRC, 事業者, EPRI, ベンダーの迅速な意見交換により早期運転再開

- 米国 H. B. ロビンソン 2 号機 (WH 3 ループ、1971 年 運 開) に お っ て、2022 年 1 月、供 用 期 間 中 検 査 と し て、炉 心 槽 内 面 の 目 視 点 検 (VT-3) を 実 施 し て い た と こ ろ、上 部 周 溶 接 線 近 傍 に 亀 裂 が 確 認 さ れ た。
- こ れ を 受 け、炉 心 槽 内 外 両 面 に お っ て、詳 細 な 検 査 を 実 施 し た と こ ろ、亀 裂 は、合 計 5 か 所、い ず れ も 内 面 で あり、長 さ は 2.8 ~ 45.1 cm、深 さ は 37 ~ 92 %。
- 当 該 箇 所 の う ち、無 補 修 で は 1 サ イ ク ル の 健 全 性 が 確 認 で き な い と 評 価 さ れ た 1 か 所 の 割 れ に 対 し て 補 修 を 行 っ た 上、プ ラ ン ト は 2022 年 1 月 2 月 に 運 転 再 開 済 み。

