

PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン

[原子炉容器炉内計装筒]

(第3版)

2021年12月

一般社団法人 原子力安全推進協会

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

## はじめに

我が国の原子力発電所では、安全・安定運転を確保するため、炉内構造物等の健全性を確認あるいは保証することが、重要な課題となっています。本ガイドラインは、このような重要性に鑑み、損傷発生の可能性のある構造物について、点検・評価・補修等に関する要領を提案するものです。

2000 年に（社）火力原子力発電技術協会に発足した「炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会」は、2007 年より日本原子力技術協会に継承され、さらに 2012 年 11 月の日本原子力技術協会の改組に伴い、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会は、原子力安全推進協会に発展的に継承され、活動を継続しています。また、検討会での審議を経て制定する「炉内構造物等点検評価ガイドライン」は、関係者の利便性向上を図るため、関連情報と併せ協会ホームページより公開しています。

本ガイドラインの策定にあたっては、常に最新知見を取り入れ、見直しを行っていくことを基本方針としています。この方針に則り、現行版の発行後も最新知見の調査および収集に努めることといたします。検討会では、点検評価ガイドライン（個別及び一般）の改訂審議の都度、国内外の運転実績に関する情報活用と、点検評価手法の在り方について議論を重ねており、その成果をガイドラインのなかに反映しつつあります。今後も継続的な改善提案に取り組み、より効果的な保全活動への合理的な資源配分を目指すことも検討課題といたします。

原子力発電の位置づけは地球温暖化防止のためにも重要であり、その具体化施策として原子力発電所の長期的な安全・安定運転への期待は高まりつつあります。本ガイドラインが原子力産業界で活用され、原子力発電所の安全・安定運転の一助になることを期待しております。

最後に、本ガイドラインの制定にあたり、絶大なご助言を賜りました学識経験者、電力会社、メーカの方々等、関係各位に深く感謝いたします。

2021 年 12 月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会  
委員長 望月 正人

# PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン

## 改訂履歴

ガイドライン名：原子炉容器炉内計装筒

改訂年月	版	改訂内容	備考
2009年8月	初版発行	—	
2013年6月	第2版発行	付録 H（欠陥評価のための応力拡大係数算出法）を追加	
2021年12月	第3版発行	点検の考え方を明確化 ベアメタル目視試験を追加	

### ガイドラインの責任範囲

このガイドラインは、原子力安全推進協会に設置された炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会において、専門知識と関心を持つ委員と参加者による審議を経て制定されたものである。

原子力安全推進協会はガイドライン記載内容に対する説明責任を有するが、ガイドラインを使用することによって生じる問題に対して一切の責任を持たない。また、ガイドラインに従って行われた点検、評価、補修等の行為を承認・保証するものではない。

したがって、本ガイドラインの使用者は、本ガイドラインに関連した活動の結果発生する問題や第三者の知的財産権の侵害に対し補償する責任が使用者にあることを認識して、このガイドラインを使用する責任を持つ。

## 炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 委員名簿

(2021年12月現在、順不同、敬称略)

委員長	望月 正人	大阪大学
委 員	笠原 直人	東京大学
委 員	竹田 陽一	東北大学
委 員	西本 和俊	大阪大学名誉教授
委 員	水谷 義弘	東京工業大学
委 員	森下 和功	京都大学
委 員	浅山 泰	日本原子力研究開発機構
委 員	古川 敬	発電設備技術検査協会
幹 事	菊川 浩	東京電力ホールディングス（株）
幹 事	棚橋 晶	関西電力（株）
幹 事	寺門 剛	日本原子力発電（株）
委 員	清水 秀高	北海道電力（株）
委 員	豊嶋 慶徳	東北電力（株）
委 員	神長 貴幸	東京電力ホールディングス（株）
委 員	稻垣 哲彦	中部電力（株）
委 員	網谷 宏和	北陸電力（株）
委 員	越智 文洋	関西電力（株）
委 員	荒芝 智幸	中国電力（株）
委 員	滝川 雅博	四国電力（株）
委 員	木元 健悟	九州電力（株）
委 員	町田 栄治	日本原子力発電（株）
委 員	高村 賢也	電源開発（株）
委 員	内山 好司	日立G E ニュークリア・エナジー（株）
委 員	三橋 忠浩	東芝エネルギーシステムズ（株）
委 員	和地 永嗣	三菱重工業（株）
委 員	新井 拓	電力中央研究所
委 員	関 弘明	原子力安全推進協会
事務局	堂崎 浩二	原子力安全推進協会
事務局	佐藤 寿志	原子力安全推進協会

# PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン

## [原子炉容器炉内計装筒]

### 目次

第1章 目的及び適用 .....	1
1.1 目的 .....	1
1.2 適用 .....	1
1.2.1 適用範囲 .....	1
1.2.2 適用期間 .....	1
1.3 用語 .....	1
第2章 基本的考え方 .....	1
第3章 点検及び評価 .....	2
3.1 点検方法 .....	2
3.1.1 点検手法 .....	2
3.1.2 点検範囲及び点検時期 .....	3
3.2 評価（許容基準） .....	4
3.3 点検・評価のフロー .....	4
第4章 予防保全措置 .....	7

### 解説

解説 1-1 ガイドライン制定の目的 .....	9
解説 1-2 原子炉容器炉内計装筒の選定理由と対象プラント .....	9
解説 2-1 原子炉容器炉内計装筒に想定される経年変化事象 .....	9
解説 2-2 対象とする原子炉容器炉内計装筒の材料 .....	9
解説 2-3 点検評価対象部位の選定 .....	9
解説 2-4 プラントのグループ化 .....	10
解説 2-5 想定する亀裂の方向 .....	10
解説 3-1 目視試験 .....	11
解説 3-2 湧電流探傷試験 .....	11
解説 3-3 超音波探傷試験 .....	11
解説 3-4 ベアメタル目視試験 .....	11
解説 3-5 初回点検実施時期 .....	11
解説 3-6 次回点検実施時期 .....	12

解説 3-7 点検直後の亀裂の仮定 .....	12
解説 3-8 構造健全性評価 .....	12
解説 3-9 点検結果による亀裂進展予測の修正 .....	12
解説 3-10 応力改善後の次回点検時期 .....	12
解説 3-11 点検により亀裂が認められた場合の対応 .....	13
解説 3-12 補修又は取替え後の点検実施時期 .....	13
解説 4-1 原子炉容器炉内計装筒取替え .....	13
解説 4-2 内面切削補修工法 .....	13
解説 4-3 キャップ補修工法 .....	13
解説 4-4 ウォータージェットピーニング又はレーザピーニング .....	13

## 付 錄

- 付録 A 原子炉容器炉内計装筒に対する点検の考え方について
- 付録 B 原子炉容器炉内計装筒構造と評価対象プラントについて
- 付録 B-1 原子炉容器炉内計装筒の PWSCL 評価対象部位について
- 付録 B-2 原子炉容器炉内計装筒からの漏えい経路について
- 付録 B-3 原子炉容器炉内計装筒からの許容漏えい量について
- 付録 B-4 原子炉容器炉内計装筒母材の周方向亀裂の瞬時破断について
- 付録 B-5 原子炉容器炉内計装筒母材におけるプラントのグループ化
- 付録 B-6 原子炉容器炉内計装筒母材の亀裂発生評価
- 付録 C 原子炉容器炉内計装筒に適用する点検手法
- 付録 D 原子炉容器炉内計装筒の亀裂進展評価
- 付録 D-1 原子炉容器炉内計装筒母材の軸方向亀裂進展予測（代表プラントの解析例）
- 付録 D-2 原子炉容器炉内計装筒母材の周方向亀裂進展予測（代表プラントの解析例）
- 付録 D-3 原子炉容器炉内計装筒の疲労亀裂進展量
- 付録 D-4 原子炉容器炉内計装筒キャップ補修工法での J 溶接部の軸方向亀裂進展予測（代表プラントの解析例）
- 付録 E 点検時期の設定
- 付録 F 原子炉容器炉内計装筒に対する強度評価
- 付録 F-1 原子炉容器炉内計装筒母材の軸方向亀裂に対する強度評価
- 付録 F-2 原子炉容器炉内計装筒母材の周方向亀裂に対する強度評価
- 付録 F-3 原子炉容器炉内計装筒キャップ補修工法での J 溶接部の軸方向亀裂に対する強度評価
- 付録 G 点検結果に基づく点検時期の見直し
- 付録 H 原子炉容器炉内計装筒の保全技術
- 付録 I 原子炉容器炉内計装筒貫通部の欠陥評価のための有限要素法解析を用いた

応力拡大係数算出手法

付録 J 原子炉容器炉内計装筒貫通部の PWSCC 事例

参考資料 1 改訂経緯..... 参 1-1

参考資料 2 PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン

[原子炉容器炉内計装筒] の概要..... 参 2-1

## 第1章 目的及び適用

### 1. 1 目的

本ガイドラインは、加圧水型原子力発電所（PWR）用機器のうち、炉内構造物等の構造健全性が維持されることを確認するための、合理的な点検のあり方を示すことを目的とする。（解説 1-1）

### 1. 2 適用

#### 1. 2. 1 適用範囲

本ガイドラインは、PWR の原子炉容器炉内計装筒に適用する。（解説 1-2）

#### 1. 2. 2 適用期間

本ガイドラインの適用期間は、商業運転開始後の機器の供用期間中とする。

### 1. 3 用語

軸方向亀裂	: 周方向の応力によって、原子炉容器炉内計装筒（母材、J溶接部）の軸方向に生じる亀裂。
周方向亀裂	: 軸方向の応力によって、原子炉容器炉内計装筒（母材、J溶接部）の周方向に生じる亀裂。
亀裂発生予測	: PWR 一次系環境下の応力腐食割れ（PWSCC）亀裂が発生するまでに要する運転時間の予測評価。
亀裂進展予測	: 亀裂発生後の亀裂の進展の予測評価。
健全性評価	: 亀裂進展予測を実施し、評価期間中の亀裂の大きさを評価するとともに、その亀裂に対して破壊評価を行うこと。

## 第2章 基本的考え方

- (1) 本ガイドライン検討における最も重要で基本的な事項として原子炉容器炉内計装筒に要求される安全機能をあげ、これを維持することを基本とする。
- (2) 原子炉容器炉内計装筒が維持するべき安全機能は「原子炉冷却材圧力バウンダリの機能」である。
- (3) 原子炉容器炉内計装筒に想定される経年変化事象は、PWSCC 及び PWSCC による漏えいの従属事象として発生する可能性がある下部鏡のほう酸腐食とし、600 系ニッケル基合金の原子炉容器炉内計装筒（母材、J溶接部）及びその近傍の下部鏡を対象とする。（解説 2-1）（解説 2-2）
- (4) 点検評価対象部位は、応力が高く PWSCC 発生条件の厳しい原子炉容器炉内計装筒内面及びその下部鏡との溶接金属部（J溶接部）近傍とする。（解説 2-3）
- (5) 原子炉容器炉内計装筒 J溶接部における供用期間中検査としての原子炉起動前の系の漏えい試験（定期検査毎）の実施を前提とする。

- (6) 供用期間中検査の要求のない原子炉容器炉内計装筒母材については、作用する応力レベルで分類されるグループにおいて、応力レベルが高いプラントグループ1から、より応力レベルが低いプラントグループ3までのプラントのグループ別に具体的な点検及び評価を実施することができる。(解説2-4)
- (7) 原子炉容器炉内計装筒母材の点検時期を検討するための想定亀裂は、軸方向PWSCC亀裂を想定する。なお、点検等により周方向亀裂が検出された場合には、その発生原因について十分に調査した上で、発生原因に応じた評価を行なわなければならない。ただし、発生原因がPWSCCであって、本ガイドラインに基づく亀裂進展評価等が妥当と判断される場合には、応力分布を補正するなどして本ガイドラインの評価の考え方を適用することができる。(解説2-5)

### 第3章 点検及び評価

#### 3. 1 点検方法

##### 3. 1. 1 点検手法

###### (1) 一般事項

原子炉容器炉内計装筒管台母材の点検に適用する非破壊試験は、目視試験(VT)、渦電流探傷試験(ECT)、超音波探傷試験(UT)のいずれかとする。なお、J溶接部では、供用期間中検査として要求されている原子炉起動前の系の漏えい試験(VT-2)に加えて、ペアメタル目視試験(BMV)を実施する。

###### (2) 目視試験(VT)

目視試験は、日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格」JSME S NA1のMVT-1試験に準拠して実施するか、これに準じた手法を用いて実施してもよい。(解説3-1)

###### (3) 渦電流探傷試験(ECT)

渦電流探傷試験は、JEAG4217「原子力発電用機器における渦電流探傷試験指針」に準拠して実施するか、これに準じた手法を用いて実施してもよい。(解説3-2)

###### (4) 超音波探傷試験(UT)

超音波探傷試験は、JEAC4207「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針」に準拠して実施するか、これに準じた手法を用いて実施してもよい。(解説3-3)

###### (5) ペアメタル目視試験(BMV)

ペアメタル目視試験は、PWR炉内構造物等点検評価ガイドライン[ペアメタル目視試験]に規定する要領に従い実施する。(解説3-4)

### 3. 1. 2 点検範囲及び点検時期

原則として点検範囲、点検時期は以下のとおりとするが、非破壊試験等により新たな知見が得られた場合には適宜見直すことができる。

#### 3. 1. 2. 1 炉内計装筒管台母材内面

##### (1) 点検範囲

亀裂の発生が予測される炉内計装筒母材内面（下部鏡との溶接により、引張応力が付与された範囲）を点検範囲とする。

##### (2) 点検時期

原子炉容器炉内計装筒母材内面の点検時期については、以下に示す軸方向亀裂に対する PWSCL 亀裂発生予測及び PWSCL 亀裂進展予測により設定する。

###### a. 初回点検時期

軸方向亀裂が発生すると予測される時期を目処に初回点検を実施する。（解説 3-5）

###### b. 次回点検時期

PWSCL 亀裂進展予測及び構造健全性評価の結果に基づき下記の時期に次回点検を実施する。（解説 3-6）

###### I. 前回点検時に亀裂が検出されなかった場合

前回点検時に軸方向亀裂が発生していたものと仮定し、その PWSCL 亀裂進展予測を行い、亀裂深さが板厚の 75%に至ると予測される期間又は構造健全性が確保できる期間のいずれか短い期間の 1/2 の期間を経過後の直近の定期検査にて次回点検を実施する。次回点検において亀裂が検出されなかった場合は、同じ点検間隔にて点検を継続する。（解説 3-7）

###### II. 前回点検時に亀裂が検出された場合

点検結果に基づいて PWSCL 亀裂進展予測を行い、亀裂深さが板厚の 75%に至ると予測される期間又は構造健全性が確保できる期間のいずれか短い期間の 1/4 の期間を経過後の直近の定期検査にて次回点検を実施する。また、次々回点検は評価期間の 1/2 の期間を経過後の直近の定期検査にて、3 回目は評価期間末期までに点検を実施する。（解説 3-8）

なお、点検結果が予測を上回る場合、PWSCL 亀裂進展予測を見直さなければならない。（解説 3-9）

##### (3) 予防保全又は補修が施工された後の点検時期

予防保全又は補修が施工された場合は、前項で定めた点検時期を見直すことができる。

ここで、PWR 一次系環境下の 600 系ニッケル基合金使用部位が除去された場合には、600 系ニッケル基合金の PWSCL を対象とした個別点検は不要となる。

また、予防保全として工法の妥当性が確認された予防保全措置が施工された場合には、耐 PWSCL 性が向上するため、600 系ニッケル基合金の PWSCL を対象とした個別点検は不要となる。(解説 3-10)

### 3. 1. 2. 2 炉内計装筒 J 溶接部

#### (1) 点検範囲

亀裂が発生すると予測される炉内計装筒 J 溶接部（下部鏡含む）を点検範囲とする。

#### (2) 点検時期

J 溶接部は現時点で、亀裂のサイジング技術が確立されていないことから、点検時期の予測は行うことができないため、供用期間中検査における VT-2 を基本とし、検査間隔の半分（5 年）に 1 回の BMV を実施する。

#### (3) 予防保全又は補修が施工された後の点検時期

予防保全又は補修が施工された場合は、前項で定めた点検時期を見直すことができる。

ここで、PWR 一次系環境下の 600 系ニッケル基合金使用部位が除去された場合には、600 系ニッケル基合金の PWSCL を対象とした個別点検は不要となる。

また、予防保全として工法の妥当性が確認された予防保全措置が施工された場合には、耐 PWSCL 性が向上するため、600 系ニッケル基合金の PWSCL を対象とした個別点検は不要となる。(解説 3-10)

## 3. 2 評価（許容基準）

(1) 点検の結果、亀裂が認められた場合、PWSCL 亀裂進展予測及び破壊評価により構造健全性が確保されるように次回点検時期を設定することができる場合は、その時期まで継続使用できる。(解説 3-11)

(2) 上記（1）が満足されない場合は、(1) を満足できるよう補修又は取替えを行わなければならない。なお、補修又は取替え後はその仕様に基づき次回点検時期を決定することができる。(解説 3-12)

## 3. 3 点検・評価のフロー

原子炉容器炉内計装筒母材内面及び J 溶接部の点検・評価のフローを図 3.3-1, 2 に示す。

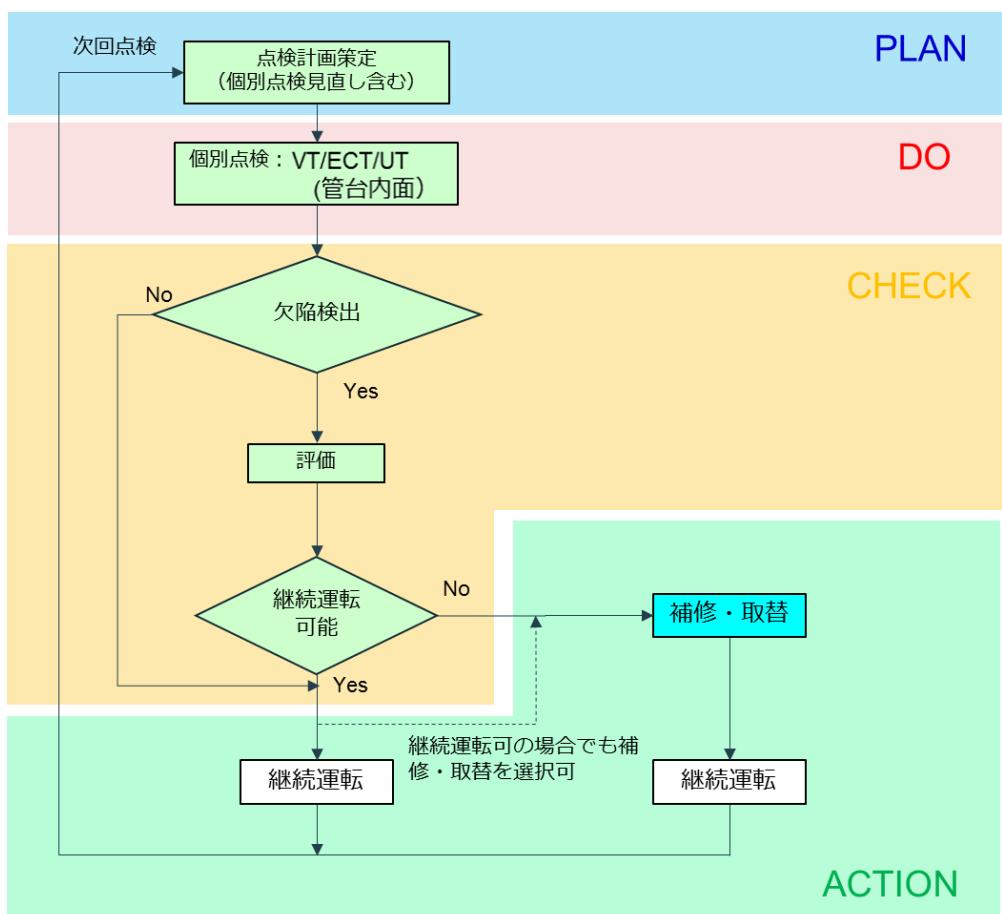


図 3.3-1 原子炉容器炉内計装筒母材内面の点検・評価フロー

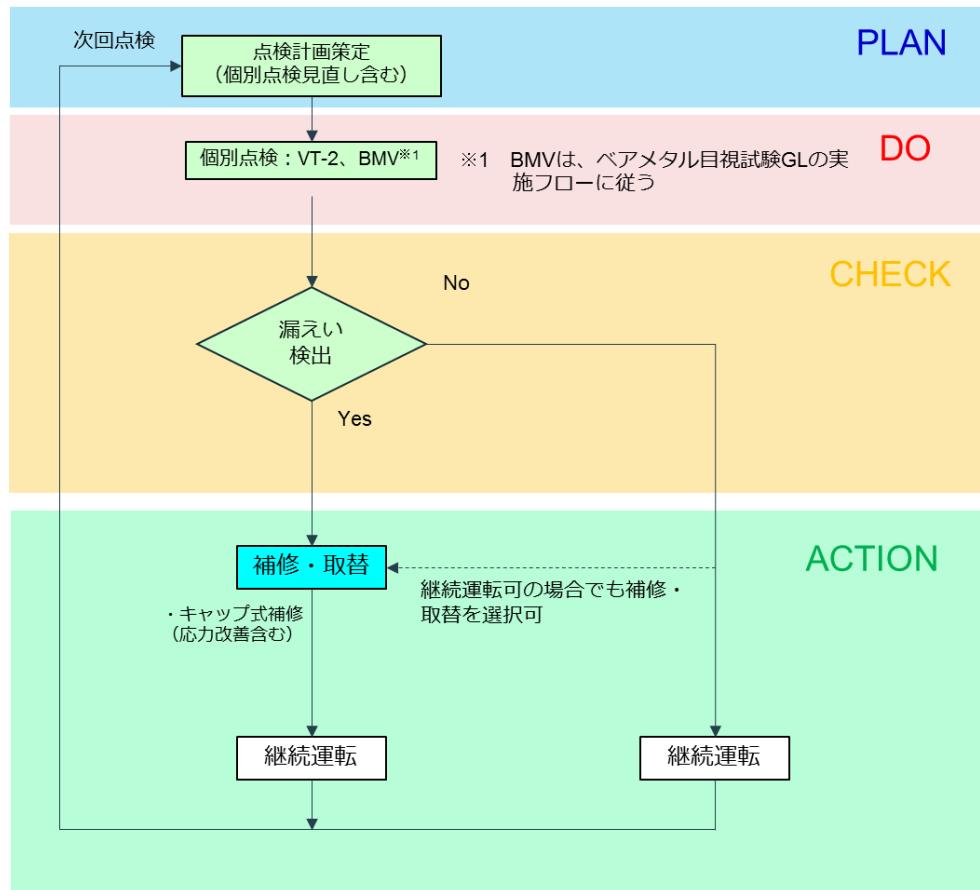


図 3.3-2 原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部の点検・評価フロー

## 第4章 予防保全措置

原子炉容器炉内計装筒の機能維持を確保するため、以下の予防保全措置又は補修を行うことができる。

### (1) 原子炉容器炉内計装筒の取替え

健全性評価により評価期間中の健全性が確認された場合は、その期間内に一部又は全数の原子炉容器炉内計装筒を取り替えることができる。

なお、耐 PWSCL 性に優れた 690 系ニッケル基合金製の炉内計装筒に取替え後、個別点検は不要となる。（解説 4-1）

### (2) 内面切削補修工法

原子炉容器炉内計装筒内面の亀裂に対して、構造健全性の確保可能な深さまで内面を切削し、亀裂を除去することができる。亀裂除去後は、ウォータージェットピーニングなどの併用により、当該箇所の点検は、耐 PWSCL 性が向上するため、個別点検は不要となる。（解説 4-2）

### (3) キャップ補修工法

原子炉容器炉内計装筒内面の亀裂に対して、原子炉容器下部外面に SUS316 製キャップを耐 PWSCL 性に優れた 690 系ニッケル基合金で取り付けることから、個別点検は不要となる。（解説 4-3）

### (4) ウォータージェットピーニング又はレーザピーニング

原子炉容器炉内計装筒の引張応力発生箇所にウォータージェットピーニング又はレーザピーニング等を実施し、PWSCL の発生原因である引張応力を圧縮応力に改善することによって亀裂発生を抑制することができる。

なお、ピーニング施工後は、耐 PWSCL 性が向上するため、個別点検は不要となる。（解説 4-4）

解 說

#### (解説 1-1) ガイドライン制定の目的

炉内構造物では、近年海外で損傷事例が散見されているが、点検時期の制約が大きい炉内構造物の健全性を確認する方法を考える上では、従来の点検技術の向上に加え、実施時期、頻度、検査方法、許容レベルなど個別の機器に適した点検のあり方を検討する必要性が高まっている。

本ガイドラインは、炉内構造物等の安全上要求される機能が維持されていることを確認するための合理的な点検のあり方を示すことを目的とする。炉内計装筒の安全機能を考慮した点検の考え方は付録 A に整理している。

#### (解説 1-2) 原子炉容器炉内計装筒の選定理由と対象プラント

原子炉容器炉内計装筒においては、同様の構造である原子炉容器蓋用管台において損傷が国内外で報告されていることから、今後損傷の発生が否定できない状況にある。したがって、技術的合理性に基づいた点検手法の確立、損傷が認められた場合の健全性評価手法の確立が急務となっている。

本ガイドラインは、原子炉容器炉内計装筒の健全性を確認する上で、合理的な点検方法、点検頻度、予防保全措置等について検討したものである。

なお、本ガイドラインを適用するプラントは、美浜 1\*, 2\*, 3 号機、高浜 1, 2, 3, 4 号機、大飯 1\*, 2\*, 3, 4 号機、玄海 1\*, 2\*, 3, 4 号機、川内 1, 2 号機、敦賀 2 号機、泊 1, 2, 3 号機、伊方 1\*, 2\*, 3 号機である。(付録 B 参照)

\* 廃止措置中

#### (解説 2-1) 原子炉容器炉内計装筒に想定される経年変化事象

本ガイドラインで扱う原子炉容器炉内計装筒の経年変化事象としては、同様の構造を有する原子炉容器蓋用管台での国内外のプラントにおける損傷を参考に、PWR 一次系環境下の応力腐食割れ (PWSCC) を想定する。(付録 B 参照)

#### (解説 2-2) 対象とする原子炉容器炉内計装筒の材料

原子炉容器炉内計装筒の材料は、600 系ニッケル基合金 (ASME SB166/ASTM B166/JIS NCF600 及び溶接金属) 及び 690 系ニッケル基合金 (GNCF690C 及び溶接金属) が使用されているが、PWSCC 感受性を有している 600 系ニッケル基合金を使用した部位を本ガイドラインの対象とする。(付録 B 参照)

#### (解説 2-3) 点検評価対象部位の選定

原子炉容器炉内計装筒母材内面における PWSCC による亀裂の発生を想定した場合、亀裂は最も応力の厳しい、下部鏡との溶接部近傍の炉内計装筒内面に加え、下部鏡との溶接金属部 (J 溶接部) とする。

原子炉容器炉内計装筒／セーフエンド溶接部については、応力レベルが低く PWSQC 発生の可能性は低いと考えられるため、本ガイドラインの対象としない。(付録 B-1 参照)

#### (解説 2-4) プラントのグループ化

PWSQC による亀裂発生は、材料、環境、応力によって評価されるため、原子炉容器炉内計装筒母材を材料、環境（温度）、応力について整理し、最も寄与度が高いと考えられる応力に着目し、取付けの際の溶接残留応力とプラント運転中の内圧及び熱による応力を考慮した上で、グループ化を実施する。グループは以下のとおりである。(付録 B-5 参照)

##### [原子炉容器炉内計装筒のグループ化]

グループ 1：美浜 2\*, 3 号機、高浜 1, 2 号機、大飯 1, 2 号機\*, 玄海 1, 2 号機\*, 伊方 1, 2 号機\*

(応力レベル：500 MPa 程度)

グループ 2：美浜 1 号機\*, 高浜 3, 4 号機、川内 1, 2 号機、敦賀 2 号機、泊 1, 2 号機

(応力レベル：450 MPa 程度)

グループ 3：大飯 3, 4 号機、玄海 3, 4 号機、伊方 3 号機、泊 3 号機

(応力レベル：380 MPa 程度)

\* 廃止措置中

なお、PWSQC による亀裂発生の予測時期については、応力の高いグループ 1 が最も早く、グループ 2, 3 の順に遅くなる。

また、本ガイドラインの解析・評価は、グループ 1 を例に実施しており、その他グループへの展開に当たっては、それぞれのグループにおける炉内計装筒の PWSQC 評価条件を用いて解析・評価を実施する。

#### (解説 2-5) 想定する亀裂の方向

溶接残留応力を考慮した応力解析結果や実機を模擬したモックアップ試験の応力測定結果より、管内面に発生する残留応力は軸方向応力よりも周方向応力が支配的である。したがって、本ガイドラインでは、PWSQC により発生する亀裂は軸方向亀裂を想定するものとする。

なお、点検等により評価上発生が想定できない周方向亀裂が検出された場合には、その発生原因について十分に検討し、発生原因に応じた評価を行わなければならない。ただし、その発生原因が PWSQC であって、本ガイドラインに基づく亀裂進展評価等が妥当と判断される場合には、応力分布を補正するなどして本ガイドラインの評価の考え方を適用することができる。(付録 D-2)

#### (解説 3-1) 目視試験

原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部表面における亀裂の有無について、目視試験（VT）により確認することができる。

#### (解説 3-2) 湧電流探傷試験

原子炉容器炉内計装筒母材内面及び J 溶接部表面における亀裂の有無について、湧電流探傷試験（ECT）により確認することができる。

#### (解説 3-3) 超音波探傷試験

原子炉容器炉内計装筒母材内面における亀裂の有無について、炉内計装筒母材に対する超音波探傷試験（UT）により確認することができる。また、超音波探傷試験は、目視試験又は湧電流探傷試験により亀裂が検出された場合に、亀裂進展予測等の評価のための亀裂深さを想定するために補助的に適用することもできる。

#### (解説 3-4) ベアメタル目視試験

ベアメタル目視試験により、下部鏡底部表面のほう酸腐食等の漏えいの痕跡を確認し、原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部からの PWSCC による漏えいを特定することができる。

#### (解説 3-5) 初回点検実施時期

初回点検時期については、亀裂が許容限界に達するまでに実施すれば問題ないが、より安全側であり、また、検査結果をその後の検査に有効利用できるという観点から、亀裂発生の予測時期付近で点検することとする。（付録 B-6 参照）

過去に実施した点検については、技術的かつ検査時期が妥当であればガイドラインの初回点検に用いることができる。

亀裂の想定による安全性への影響に関しては、以下のとおり。

- 原子炉容器炉内計装筒に発生する応力は取付け位置により異なると考えられ、応力評価上、最外周管台で応力が高くなると評価される。（付録 B-1 参照）
- 万一、炉内計装筒内面及び J 溶接部において軸方向亀裂が発生し、炉内計装筒又は溶接部の厚さを貫通した場合を想定しても、その亀裂からの漏えい経路は、炉内計装筒穴と炉内計装筒との隙間となるため、漏えい量は通常補給水に比べて、十分小さくなる。したがって、安全機能である原子炉冷却材圧力バウンダリは維持される（付録 B-2, B-3 参照）。
- 周方向亀裂に関しては、応力として周方向応力が支配的であること、当該部の温度は一次冷却材低温側温度（T-cold）であり、PWSCC 発生・進展への影響が小さいことから、発生する可能性が小さく、原子炉冷却材圧力バウンダリの維持に損傷を与える可能性は極めて低いと考えられる。

なお、J溶接部は現時点では、亀裂のサイジング技術が確立されていないことから、点検時期の予測は行うことができないが、万一、軸方向亀裂が発生した場合も通常の冷却材の補給により原子炉の安全性を確保することができる。

#### (解説 3-6) 次回点検実施時期

原子炉容器炉内計装筒母材の PWSOC 亀裂進展データについては、国プロ NiSCC にて定めた亀裂進展速度データを使用する。(付録 D, D-1, D-2, D-4 参照)

ただし、点検により評価上発生が想定できない周方向亀裂が検出された場合には、その発生原因について十分に検討し、発生原因に応じた評価に基づき次回点検時期を設定しなければならない。

なお、PWSOC による亀裂発生後の亀裂進展予測には、疲労により亀裂進展することも考えられるが、PWSOC による進展に対して疲労による進展は有意でないことが確認されている。(付録 D-3 及び付録 E 参照)

#### (解説 3-7) 点検直後の亀裂の仮定

仮定する亀裂の深さは、試験の検出限界以上の深さとし、ECT 及び UT の場合 3mm とする。ただし、検出能力が示される場合には、より小さい深さとすることができる。

#### (解説 3-8) 構造健全性評価

点検により亀裂が検出された場合は、日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格（以下、JSME 維持規格）におけるオーステナイト系ステンレス鋼管の欠陥評価の考え方を準用するものとする。構造健全性評価における強度評価手法としては、JSME 維持規格における極限荷重評価法を用いるものとする。(付録 F 参照)

なお、極限荷重評価法以外の評価手法についてもその妥当性を示すことができる場合には、その評価手法を用いてもよいものとする。

#### (解説 3-9) 点検結果による亀裂進展予測の修正

点検結果が予測を上回る場合、その後の PWSOC 亀裂進展予測が非安全側になる可能性があることから、点検結果に基づき、PWSOC 亀裂進展予測を見直す必要がある。次回点検時期については、見直された予測評価に基づき設定する。(付録 G 参照)

#### (解説 3-10) 応力改善後の次回点検時期

妥当性が確認されている工法・条件で施工し、また施工影響因子が予め定められた許容範囲内であったことが記録等により確認できる場合には、応力改善が確実に行われたものと判断できるため、以降の個別点検は不要となる。

#### (解説 3-11) 点検により亀裂が認められた場合の対応

点検により亀裂が認められた場合は、亀裂進展予測及び破壊評価に基づき、構造健全性並びに継続運転の可否を判定することができる。ただし、原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部については、現時点で亀裂のサイジング技術が確立されていないことから、亀裂又は漏えいが認められた場合には、補修を行う必要がある。

#### (解説 3-12) 補修又は取替え後の点検実施時期

原子炉容器炉内計装筒の補修は亀裂を完全に除去する方法や、一部の亀裂を残したままキャップを設ける補修等が考えられる。また、取替えでは材料の仕様や構造に変更が加えられ得る可能性がある。これら措置方法の違いに応じて補修又は取替え後の点検実施時期を決定する必要がある。

#### (解説 4-1) 原子炉容器炉内計装筒取替え

原子炉容器炉内計装筒取替えは、原子炉容器炉内計装筒の機能維持を損なうことを抑制するための予防保全措置である。(付録 H 参照)

#### (解説 4-2) 内面切削補修工法

原子炉容器炉内計装筒内面の亀裂に対して、構造健全性の確保が可能な深さを検討した上で、その深さまで管台内径を拡大するように内面を切削加工することにより亀裂を除去する工法である。なお、亀裂除去後においても炉内計装筒内面は PWSOC 感受性を有しているが、劣化緩和策としてウォータージェットピーニングなどの予防保全対策を併用すれば、応力改善を行なうことができるので、当該箇所に対する個別点検を省略することができる。(付録 H 参照)

#### (解説 4-3) キャップ補修工法

炉内計装筒内面に亀裂が検出された場合又は漏えいが検知された場合に、JSME 維持規格 JSME S NA1 の RB-2800 に準拠して原子炉容器下部外面に SUS316 製キャップを設ける(原子炉容器下部鏡座には 690 系ニッケル基合金にて溶接、炉内計装筒には SUS316 にて溶接することで取付け)ことで、新たな耐圧バウンダリを形成し、漏えいを抑制する補修工法である。(付録 H 参照)

#### (解説 4-4) ウォータージェットピーニング又はレーザピーニング

ウォータージェットピーニング又はレーザピーニングは、原子炉容器炉内計装筒における PWSOC 発生を抑制するための予防保全措置である。予防保全工法ガイドライン「ピーニング工法」に従って、ウォータージェットピーニング又はレーザピーニングを施工することで、耐 PWSOC 性は向上する。(付録 H 参照)

## 付 錄

## 付録 A 原子炉容器炉内計装筒に対する点検の考え方について

### 1. 目的

本付録は、原子炉容器炉内計装筒について、①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験、④経年劣化に対する予防保全実績とその有効性、⑤損傷による安全機能への影響を考慮した点検の考え方を示したものである。

### 2. 炉内計装筒に対する点検方針

#### 2.1 安全機能

原子炉容器炉内計装筒は安全機能として、クラス1容器の耐圧部として「原子炉冷却材圧力バウンダリの機能」を有している。

#### 2.2 形状及び材質

##### 2.2.1 形状

原子炉容器炉内計装筒は、管台と下部鏡とを下部鏡内面側において、溶接金属（J溶接）で接続した形状である。炉内計装筒の形状を図2-1に示す。

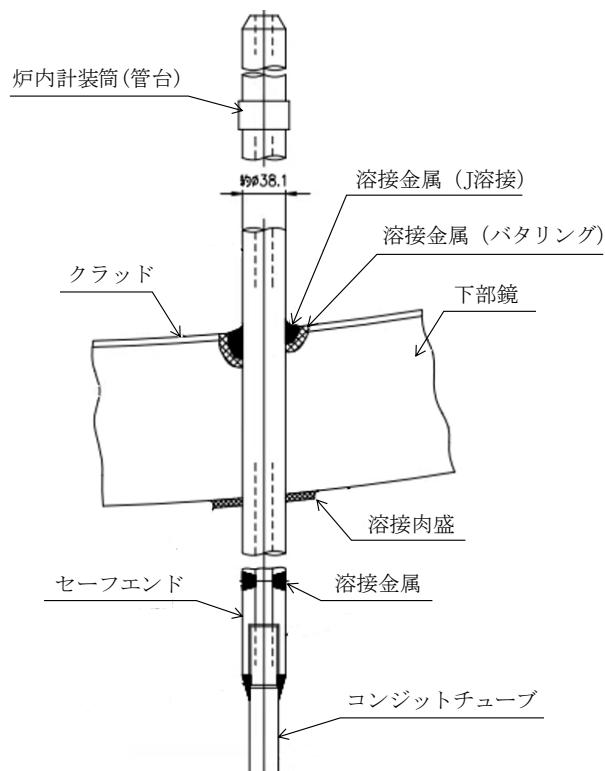


図 2-1 原子炉容器炉内計装筒の構造

## 2.2.2 材質

原子炉容器炉内計装筒の主要な材質は 600 系又は 690 系ニッケル基合金である。炉内計装筒に使用される材質を表 2-1 に示す。

表 2-1 炉内計装筒及びその近傍の部位の材質

部位	材質
炉内計装筒（管台）	600 系ニッケル基合金 ／690 系ニッケル基合金
下部鏡	低合金鋼 (SQV2A 等)
クラッド	ステンレス鋼 (SUS304 系)
溶接金属	600 系ニッケル基合金 ／690 系ニッケル基合金
セーフエンド	ステンレス鋼 (SUSF316 等)

## 2.3 想定される経年劣化事象

600 系ニッケル基合金が使用される炉内計装筒（管台）及び溶接金属には、PWSCC が発生する可能性がある。ただし、炉内計装筒近傍の温度は T-cold であり、出口管台や蓋用管台等の一次冷却材高温側温度 (T-hot) 部位に比べて、PWSCC 感受性は低い。

管台母材又は溶接金属に PWSCC が発生し、漏えいが放置された場合は、その従属事象として、下部鏡（低合金鋼）にほう酸腐食が発生する可能性がある。

なお、疲労に関しては、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（告示 501 号）又は日本機械学会発電用原子力設備規格 設計・建設規格に基づく設計がなされていること、及び国内外で疲労による損傷事例がないことから対象外とする。

## 2.4 国内外の運転経験

国内では、原子炉容器炉内計装筒での PWSCC 事例は報告されていない。

海外では、600 系ニッケル基合金を使用している原子炉容器炉内計装筒における PWSCC 事例として、溶接金属 (J 溶接) からの PWSCC 事例が 2 例報告されている。ただし、PWSCC の従属事象である下部鏡のほう酸腐食については、国内、海外のいずれにおいても報告されていない。

なお、690 系ニッケル基合金を使用する原子炉容器炉内計装筒では PWSCC 事例は報告されていない。

PWSCC 事例の詳細は、付録 J にて紹介する。

## 2.5 経年劣化に対する予防保全実績とその有効性

国内では、炉内計装筒管台母材及び溶接金属 (J 溶接) に対する PWSCC 対策として、ウォータージェットピーニングを施工し、PWSCC の発生原因である引張応力を圧

縮応力に改善している。2.4 項で述べたように、国内では炉内計装筒での PWSCL 事例は報告されておらず、当該部に施工したウォータージェットピーニングが有効に作用していることが運転実績からも示されている。

## 2.6 構造体の損傷による安全機能への影響

原子炉容器炉内計装筒の 600 系ニッケル基合金を使用する管台母材、溶接金属には、PWSCL による損傷を考慮する必要がある。安全機能への影響を以下に示す。

### (1) 炉内計装筒（管台母材）の軸方向亀裂

炉内計装筒管台母材の軸方向に沿って PWSCL による亀裂が発生した場合、周方向応力により、PWSCL が進展する可能性が考えられる。

軸方向欠陥が進展し、万一亀裂が貫通した場合でも、初期の冷却材の流出量は制限されることから、安全機能への影響は小さいと考えられる（付録 B-3）。

### (2) 炉内計装筒（管台母材）の周方向亀裂

炉内計装筒管台母材の周方向に沿って PWSCL による亀裂が発生した場合、軸方向応力により、PWSCL が進展する可能性が考えられる。

周方向の亀裂が、全周にわたって進展し貫通に至った場合、炉内計装筒管台の破断により冷却材の流出量は制限されず、安全機能上の問題となる可能性が考えられる。ただし、管台に発生する応力は周方向応力（軸方向亀裂に作用）が支配的であることに加え、温度環境も PWSCL が多数報告されている原子炉容器出口管台や蓋用管台等に比べて低いことから、周方向亀裂が発生する可能性は低い。また、周方向亀裂があった場合においても、全周に渡って同時に亀裂進展して、瞬時に破断に至る可能性は低い（付録 B-4）。

### (3) 溶接金属の軸方向亀裂

溶接金属の軸方向に沿って PWSCL による亀裂が発生した場合、周方向応力により、PWSCL が進展する可能性が考えられる。

当該部の PWSCL 進展は、600 系ニッケル基合金の範囲にしか生じないため、軸方向欠陥の最大サイズは溶接金属の断面に限られる。万一亀裂が貫通した場合でも、冷却材の流出量は制限されることから、安全機能への影響は小さいと考えられる（付録 B-3）。

### (4) 溶接金属の周方向亀裂

溶接金属の周方向に沿って PWSCL による亀裂が発生した場合、軸方向応力により、PWSCL が進展する可能性が考えられる。

周方向の亀裂が、全周にわたって進展し貫通に至った場合、炉内計装筒が抜け出し、冷却材の流出量は制限されず、安全機能上の問題となる可能性が考えられる。ただし、管台に発生する応力は周方向応力（軸方向亀裂に作用）が支配的であることに加え、温度環境も PWSCL が多数報告されている原子炉容器出口管台や蓋用管台等に比べて低いことから、周方向亀裂が発生する可能性は低い。また、周方向亀裂があった場合においても、全周に渡って同時に亀裂進展して、瞬時に破断に至る可能性は低い（付録 B-4）。

#### (5) 下部鏡のほう酸腐食

管台又は溶接金属の PWSCL が貫通したことによる漏えいを放置すると、ほう酸腐食による下部鏡の減肉が進み、必要板厚を下回ると、鏡部が破壊し、大規模漏えいに至るため、安全機能上の問題となる可能性が考えられる。

### 2.7 点検対象の選定

原子炉容器炉内計装筒の各部位の損傷による安全機能に対する影響の評価結果を表 2-2 に示す。

上記の評価結果から、PWSCL が想定され、その損傷が安全機能の喪失につながる可能性のある溶接金属及び炉内計装筒管台母材及び、PWSCL による漏えいを放置することではう酸腐食が想定され、その損傷が安全機能の喪失につながる可能性のある下部鏡を個別点検対象に選定した。

想定される劣化モードのないその他の部位は、一般点検により点検を行うこととする。

### 2.8 点検手法の選定

点検対象である溶接金属及び炉内計装筒管台母材において、想定される経年劣化事象は、600 系ニッケル基合金に対する PWSCL である。また、下部鏡において想定される劣化事象は、低合金鋼のほう酸腐食である。

PWSCL は 600 系ニッケル基合金の一次冷却水と接液する部位、つまり炉内計装筒管台母材と溶接金属の内表面において発生することから、PWSCL の亀裂を直接確認するためには内表面からの目視試験（VT）、渦電流探傷試験（ECT）又は超音波探傷試験（UT）が有効である。

ただし、溶接金属については、亀裂のサイジング技術が確立されておらず、VT、ECT、UT 等による点検時期の予測を行うことができないことから、供用期間中検査（毎定検での VT-2）を基本とし、ペアメタル目視試験（BMV）により下部鏡底部表面のほう酸腐食等の漏えいの痕跡を確認することで溶接金属からの PWSCL による漏えいを特定する。

## 2.9 点検範囲の選定

点検範囲を図 2-2 に示す。原子炉容器炉内計装筒管台母材の VT, ECT 又は UT による点検範囲は、亀裂の発生が予測される炉内計装筒内面（下部鏡との溶接により、引張応力が付与された範囲）とする。

BMV の点検範囲は、下部鏡貫通部（管台と下部鏡の隙間部）からの漏えいの痕跡を確認するため、最外周管台から 25mm を包絡する範囲とする。

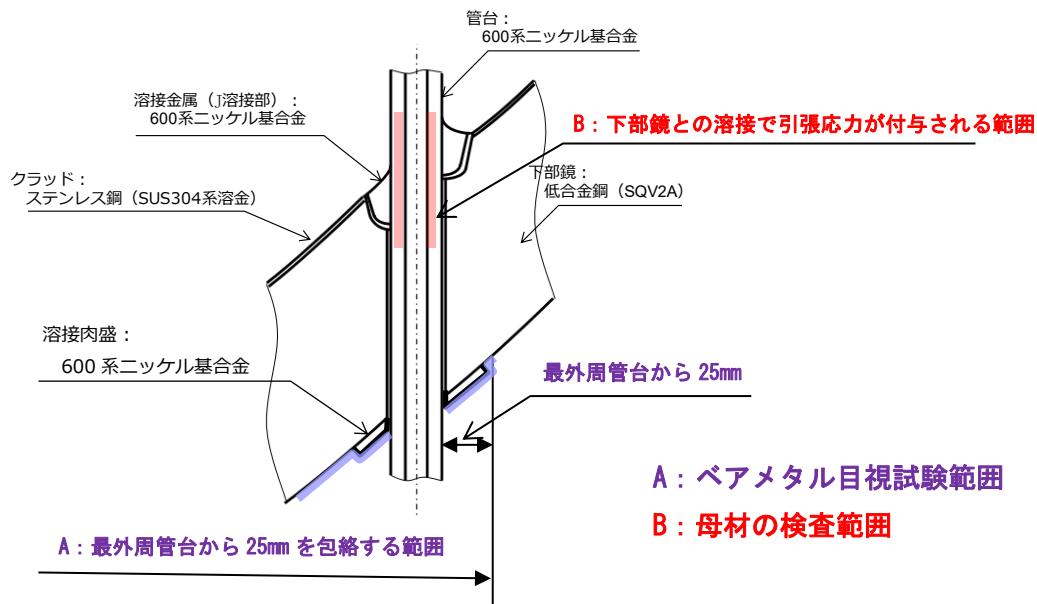


図 2-2 炉内計装筒の点検範囲

## 2.10 点検時期の選定

管台母材の VT, ECT 又は UT については、管台の破断・抜け出しに至る前に検知する必要があるため、付録 E の考え方に基づき点検時期を決定する。

BMV については、炉内計装筒は、T-cold 部位であり、T-hot 部位に比べて PWSCC 進展速度も遅い（約 10 分の 1）ことから、検査間隔の半分（5 年）で実施する。

表 2-2 原子炉容器炉内計装筒の損傷による安全機能への影響評価

検討対象	安全機能	安全機能との関連	想定される劣化モード	損傷による安全機能への影響	個別点検要否*
① 溶接金属 (PWSCC 対策未実施の 600 系ニッケル基合金)	・原子炉冷却材圧力バウンダリ	有	PWSCC	損傷によりバウンダリ機能が喪失するが、亀裂の方向により可能性は異なる。 ・軸方向：亀裂長さは溶接金属の範囲に限られ、漏えいは限定的であり影響は小さい ・周方向：亀裂は全周にわたって進展するため、管台抜け出しの可能性があり、影響が大きいが、発生応力は周方向が支配的であり、可能性は低い。	点検対象
② 炉内計装筒(管台) (PWSCC 対策未実施の 600 系ニッケル基合金)		有	PWSCC	同上	点検対象
③ 溶接金属 (PWSCC 対策未実施の 690 系ニッケル基合金)		有	—	—	不要
④ 炉内計装筒(管台) (690 系ニッケル基合金)		有	—	—	不要
⑤ 溶接金属 (PWSCC 対策済みの 600 系ニッケル基合金)		有	—	—	不要
⑥ 炉内計装筒(管台) (PWSCC 対策済みの 600 系ニッケル基合金)		有	—	—	不要
⑦ 下部鏡 (低合金鋼) ※ PWSCC 対策未実施の 600 系ニッケル基合金製管台又は溶接金属を使用している場合に限る。		有	ほう酸腐食	管台又は溶接金属の PWSCC による漏えいを放置すると、ほう酸腐食による下部鏡の減肉が進み、下部鏡が破壊すると、バウンダリ機能が喪失する。	点検対象
⑧ 下部鏡 (低合金鋼) ※ ⑦以外の場合		有	—	—	不要
⑨ クラッド (ステンレス鋼)		無	—	—	不要

\* : 個別点検を不要とする対象は、一般点検により健全性の確認を行う。

## 付録B 原子炉容器炉内計装筒構造と評価対象プラントについて

### 1. 原子炉容器炉内計装筒構造

原子炉容器炉内計装筒構造を図 1-1 に示す。原子炉容器炉内計装筒構造は、プラントのループ数により、内径、板厚、本数が異なる。材料としては、600 系ニッケル基合金 (ASME SB166, ASTM B166 及び JIS NCF600) が主に使用されており、一部プラントで、690 系ニッケル基合金 (GNCF690C (相当材含む)) が使用されている (表 1-1)。

本付録では、それぞれの材料の耐 PWSCL 性を明らかにし、評価対象プラントを選定する。

### 2. PWSCL 感受性について

600 系ニッケル基合金及び 690 系ニッケル基合金の PWSCL 感受性については、定荷重 SCC 試験にて評価されている。定荷重 SCC 試験の試験条件は以下となっている。

#### [定荷重 SCC 試験条件]

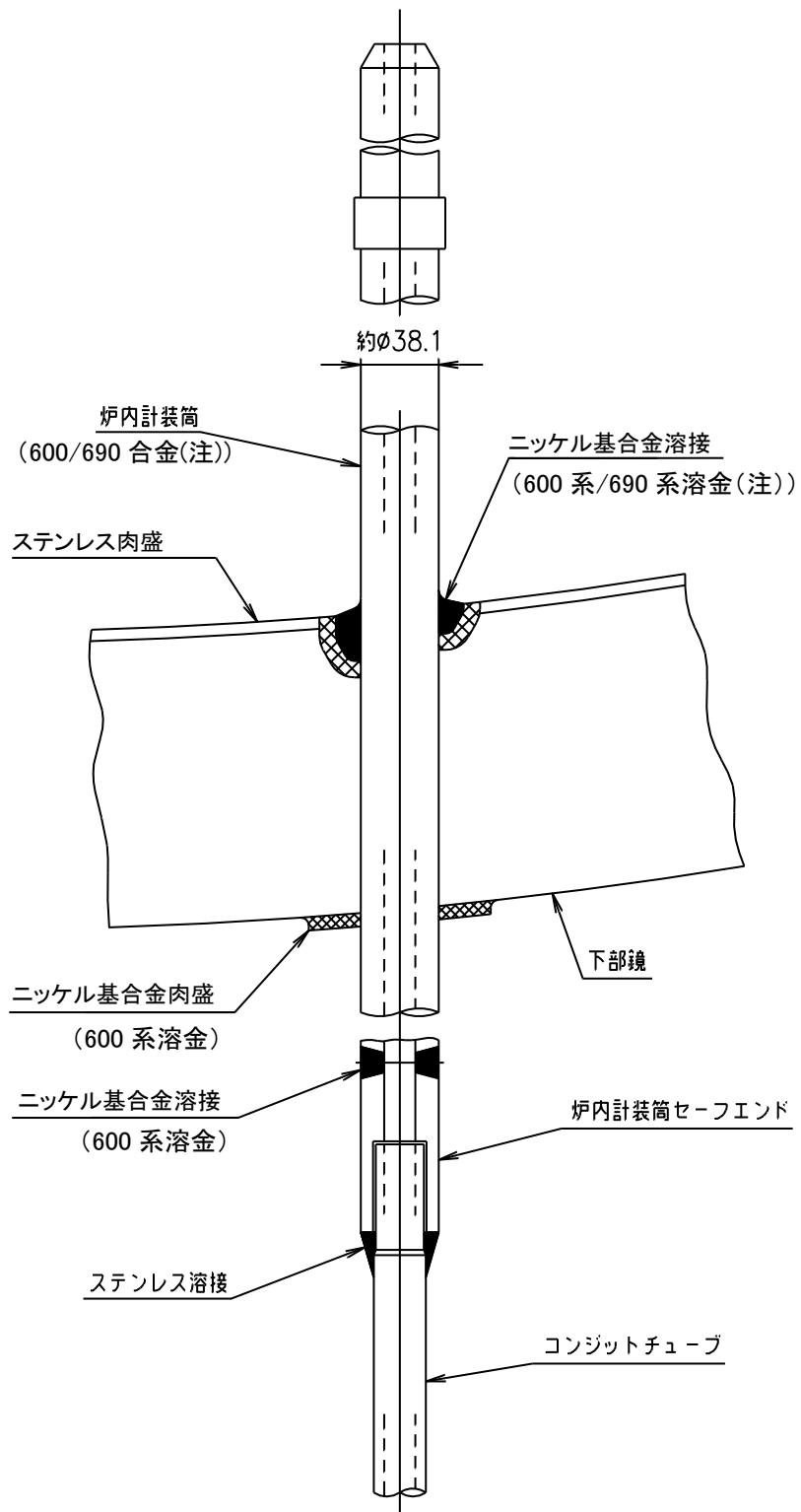
水質：PWR 一次系模擬水中

温度：360°C (温度加速)

応力：300～600MPa

600 系ニッケル基合金及び 690 系ニッケル基合金の定荷重 SCC 試験結果を図 2-1 及び図 2-2 に示す。600 系ニッケル基合金においては PWSCL が発生しているが、690 系ニッケル基合金においては、現在までに PWSCL は発生していない。

したがって、本ガイドラインの対象は、PWSCL 発生が懸念される 600 系ニッケル基合金適用プラントとなる。



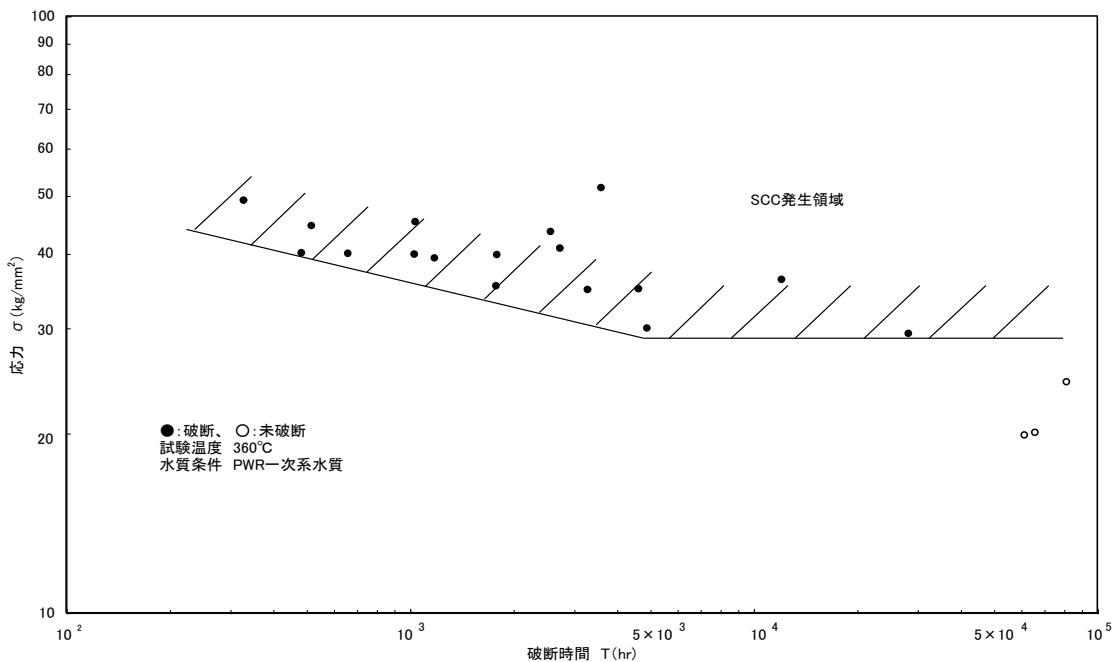
(注)690 系ニッケル基合金は、玄海 4 号機、泊 3 号機に適用

図 1-1 炉内計装筒構造図

表 1-1 原子炉容器炉内計装筒母材の形状寸法・材料

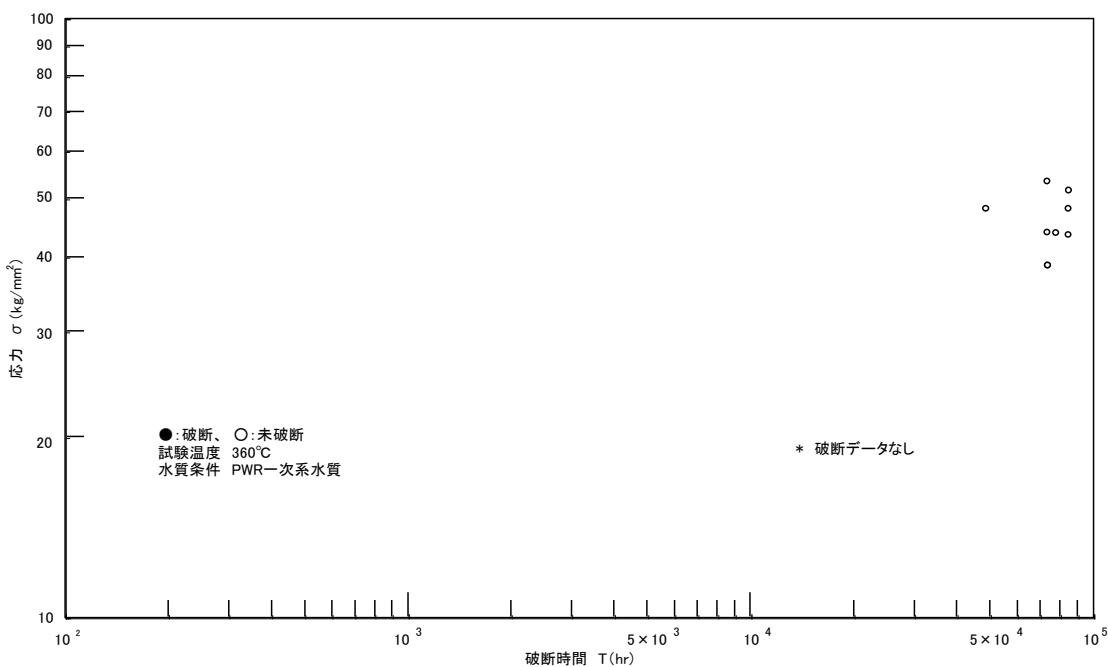
プラント名	炉内計装筒 [mm]			材料	設備数
	内径	板厚	外径		
美浜 1 号機*	φ約 9.5	約 14.3	φ約 38.1	ASME SB166	30
美浜 2 号機*	φ約 9.5	約 14.3	φ約 38.1	ASTM B166	36
美浜 3 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	ASME SB166	50
高浜 1 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	ASME SB166	50
高浜 2 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	ASME SB166	50
高浜 3 号機	φ約 10.2	約 14.0	φ約 38.1	ASME SB166	50
高浜 4 号機	φ約 10.2	約 14.0	φ約 38.1	ASME SB166	50
大飯 1 号機*	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	ASME SB166	58
大飯 2 号機*	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	ASME SB166	58
大飯 3 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	NCF600	58
大飯 4 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	NCF600	58
玄海 1 号機*	φ約 9.5	約 14.3	φ約 38.1	ASME SB166	36
玄海 2 号機*	φ約 9.5	約 14.3	φ約 38.1	ASME SB166	36
玄海 3 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	NCF600	58
玄海 4 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	GNCF690C 相当材	58
川内 1 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	ASME SB166	50
川内 2 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	ASME SB166	50
敦賀 2 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	ASME SB166	58
泊 1 号機	φ約 9.5	約 14.3	φ約 38.1	NCF600	36
泊 2 号機	φ約 9.5	約 14.3	φ約 38.1	NCF600	36
泊 3 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	GNCF690C	50
伊方 1 号機*	φ約 9.5	約 14.3	φ約 38.1	ASME SB166	36
伊方 2 号機*	φ約 9.5	約 14.3	φ約 38.1	ASME SB166	36
伊方 3 号機	φ約 15.2	約 11.5	φ約 38.1	NCF600	50

\* 廃止措置中



出典：大飯発電所 1号機 容器の技術評価報告書

図 2-1 600 系ニッケル基合金の定荷重 SCC 試験結果



出典：大飯発電所 1号機 容器の技術評価報告書

図 2-2 690 系ニッケル基合金の定荷重 SCC 試験結果

## 付録 B-1 原子炉容器炉内計装筒の PWSCC 評価対象部位について

### 1. はじめに

本付録は、PWSCC 評価対象プラントの原子炉容器炉内計装筒における PWSCC 評価対象部位について検討した結果をまとめ、炉内計装筒を構成する部位のうち、炉内計装筒（母材）、炉内計装筒／下部鏡との J 溶接部（溶接金属）、炉内計装筒／セーフエンド溶接部（溶接金属）から炉内計装筒（母材）を評価対象として選定した根拠を説明する。

### 2. 原子炉容器炉内計装筒構造

原子炉容器炉内計装筒構造を図 2-1 に示す。炉内計装筒における 600 系ニッケル基合金使用部位は、溶接部を含め、以下の 3 種類となっている。

- ① 原子炉容器炉内計装筒（母材）
- ② 原子炉容器炉内計装筒／下部鏡との J 溶接部（溶接部）
- ③ 原子炉容器炉内計装筒／セーフエンド溶接部（溶接部）

炉内計装筒における PWSCC 発生時間については、応力レベルが大きく影響すると評価されている。炉内計装筒の各部位における応力評価結果を表 2-1 に示す。表 2-1 に示すように、炉内計装筒（母材）内面で最大応力値を示し、PWSCC 発生時間が最も早くなることを示している。また、原子炉容器炉内計装筒に発生する応力は取付け位置により異なると考えられ、応力評価上、最外周部で応力が高くなると評価される。その他の部位については、応力レベルは低いために、PWSCC 発生の可能性は低いと評価されているものの、J 溶接部については、表面仕上げが不十分であった場合には、引張残留応力が生じている可能性があり、PWSCC 発生の可能性は否定できない状況にある。

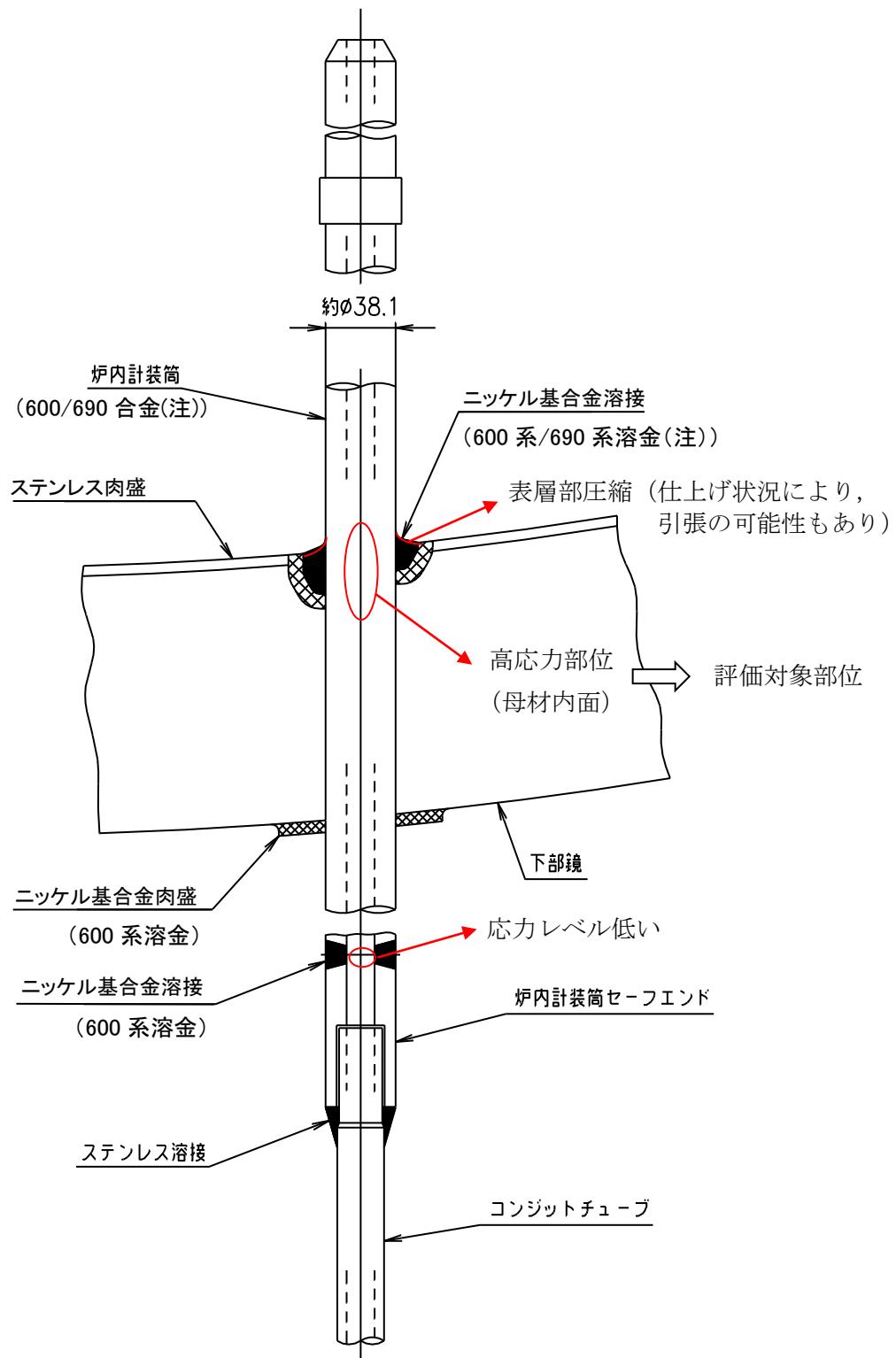
したがって、ガイドラインにおいては、炉内計装筒内面を点検・評価対象とし、J 溶接部は、亀裂が発見された場合の評価の考え方を示すこととする。

また、評価例として代表部位の評価等を実施する場合は、基本的に最も応力が厳しい最外周部に位置する炉内計装筒の条件を用いることとする。なお、炉内計装筒における発生応力は、プラント毎でグループ化されるため、PWSCC 亀裂の発生予測には、グループ毎の応力を適用するが、亀裂進展予測については、安全側の評価となるように、最も応力が高いグループ 1 の応力で全プラントを評価することとする。(付録 B-5 参照)

表 2-1 原子炉容器炉内計装筒における PWSCC 発生懸念部位

部 位		応力 [MPa]	PWSCC 発生評価	応力評価
炉内計装筒 (母材)	最外周管台	約 380～500	可能性有り	弾塑性解析結果 (下部鏡溶接部の内面で最大応力)
	中央管台	約 310	可能性低い	弾塑性解析結果 (下部鏡溶接部の内面で最大応力)
炉内計装筒／ 下部鏡との J 溶接部		表層部圧縮	可能性あり (*1)	計測結果 (*1)
炉内計装筒／ セーフエンド溶接部		100～200	可能性低い	弾性解析結果

(\*1) 炉内計装筒／下部鏡溶接部 (J 溶接) は、溶接後のバフ仕上げにより表層部は圧縮残留応力となると考えられるものの、建設当時はバフ仕上げによる応力緩和に対する知見はなく、バフ仕上げは管理されていないことから、仕上げが不十分な場合には、表層部に引張残留応力が生じている可能性は否定できない。



(注)690系ニッケル基合金は、玄海4号機、泊3号機に適用

図 2-1 炉内計装筒構造図

## 付録 B-2 原子炉容器炉内計装筒からの漏えい経路について

### 1. はじめに

本ガイドラインでは、安全性の確保を大前提に検討されている。原子炉容器炉内計装筒は圧力バウンダリを構成しているが、万一貫通亀裂が発生した場合でも、その漏えい経路によって冷却材の流出量が制限されれば安全上の問題にならない。

本付録は、原子炉容器炉内計装筒に対して、PWSCLによる亀裂が発生し、万一貫通亀裂となった場合の漏えい経路について検討した結果をまとめたものである。

### 2. 原子炉容器炉内計装筒からの漏えい経路について

#### (1) 原子炉容器炉内計装筒の亀裂について

原子炉容器炉内計装筒においてPWSCLによる亀裂発生については、高応力部位である炉内計装筒／下部鏡溶接部（J溶接部）近傍の炉内計装筒内面での可能性が考えられ、周方向応力が支配的であることから軸方向亀裂が想定される。

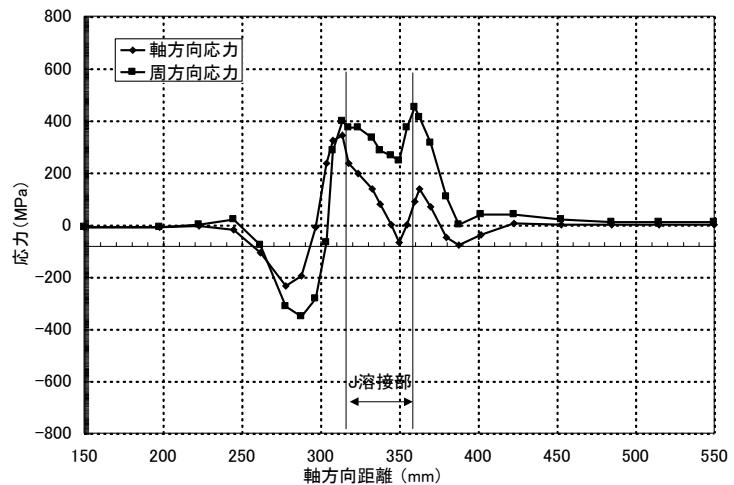
なお、周方向欠陥については、軸方向応力が全周に渡って高応力状態となっていないことから（図2-1参照），その可能性は低いと考えられる。また、万一、周方向亀裂が発生した場合については高応力が全周に渡っていないため、方向によって亀裂の進展速度に差が生じ、瞬時に全周破断する可能性は極めて低いと考えられる。（付録B-4 参照）。

#### (2) 原子炉容器炉内計装筒からの漏えい経路について

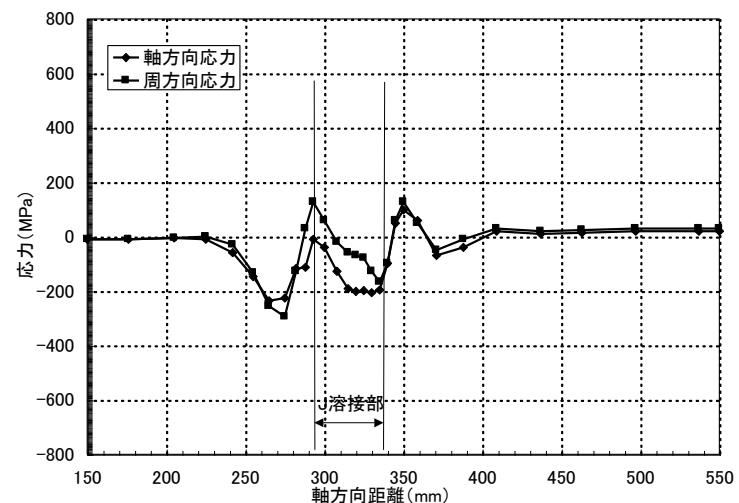
原子炉容器炉内計装筒におけるPWSCLによる想定亀裂としては、炉内計装筒内面の軸方向亀裂が考えられる。その場合、漏えい経路については、炉内計装筒と下部鏡貫通穴との隙間となる。（図2-2 参照）

なお、原子炉容器炉内計装筒／下部鏡溶接部（J溶接部）に亀裂を想定した場合においても、漏えい経路は、炉内計装筒と下部鏡穴との隙間となる。また、仮にJ溶接部全周に貫通亀裂が生じたとしても、その亀裂が完全に炉内計装筒に沿って進展することは考えにくく、下部鏡穴から炉内計装筒が抜け落ちることは考えにくい。また、炉内計装筒の上端は抜け落ちることを防止するために、上端部の径は、炉内計装筒穴よりも大きくなっている（美浜1, 2号機除く）。

[0° 断面]



[90° 断面]



[180° 断面]

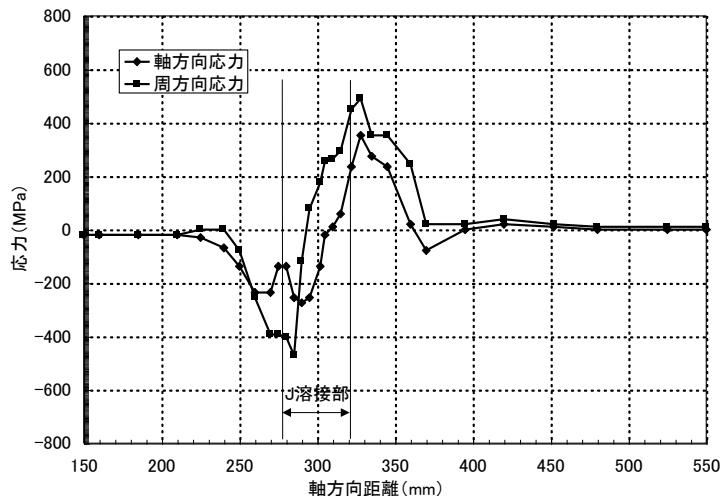


図 2-1 プラント運転中の炉内計装筒内面の長手方向応力分布

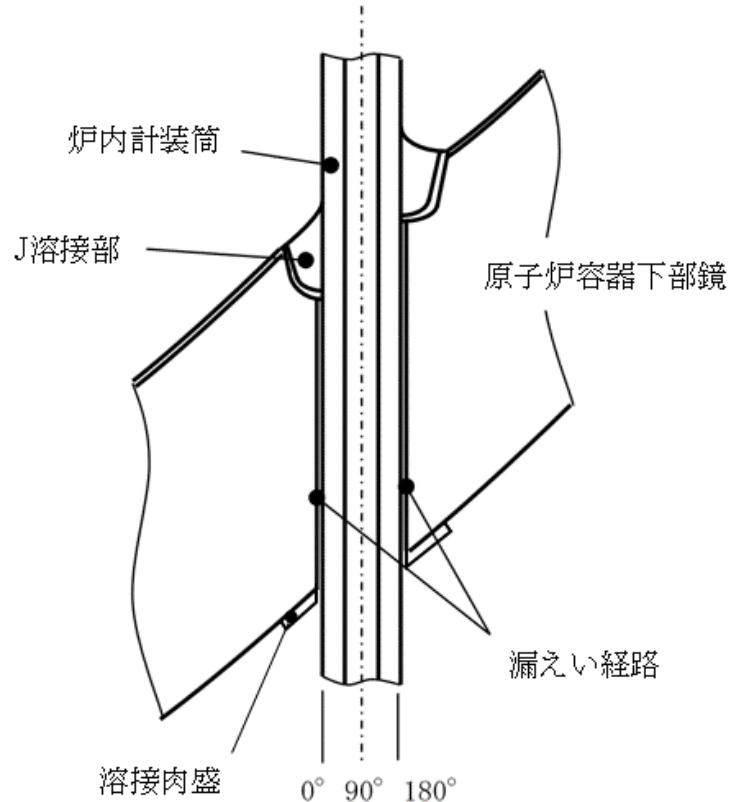


図 2-2 炉内計装筒母材及び J 溶接部における貫通亀裂が発生した場合の漏えい経路

## 付録 B-3 原子炉容器炉内計装筒からの許容漏えい量について

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒に対して貫通欠陥を想定し、漏えいした場合の原子炉の安全性を確保するための許容漏えい量についてまとめたものである。

### 2. 原子炉の安全性を確保するための許容漏えい量について

原子炉容器炉内計装筒における貫通欠陥が発生し漏えいが生じた場合に、原子炉の安全性を確保するためには、冷却材の補給により対応する。冷却材の補給により安全機能を維持することが可能な漏えいについては、漏えいの流量断面積にて評価され、それはプラントのループ数により異なる。各ループにおける許容される漏えい量となる流量断面積を以下に示す。

#### (許容漏えい量)

2 ループプラント :  $\phi 7\text{mm}$  以下の断面積（約  $38\text{mm}^2$ ）からの漏えい

3/4 ループプラント :  $\phi 9.5\text{mm}$  以下の断面積（約  $70\text{mm}^2$ ）からの漏えい

なお、現状想定される漏えい経路としては、原子炉容器炉内計装筒と下部鏡穴の隙間となり、その隙間における断面積は約  $7\text{mm}^2$  程度であり、冷却材の補給可能な断面積の 10~20%程度である。したがって、万一、原子炉容器炉内計装筒貫通欠陥が生じた場合においても、冷却材の補給は可能であり、原子炉の安全性を確保できることになる。

## 付録 B-4 原子炉容器炉内計装筒母材の周方向亀裂の瞬時破断について

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒に対して、PWSCC による周方向亀裂が発生した場合の瞬時破断に至る可能性について検討した結果をまとめたものである。

### 2. 検討条件

原子炉容器炉内計装筒内面に PWSCC による周方向亀裂が発生した場合に、瞬時に全周破断に至る可能性を確認するため、以下の条件に基づき検討を実施した。

- ・全周亀裂が生じたと想定する。
- ・この想定亀裂に対して、応力が高い断面（方向）と応力が低い断面（方向）のそれぞれの板厚内応力分布（軸方向）を用い、亀裂進展評価を実施する。
- ・亀裂進展評価の結果、応力が高い断面（方向）と低い断面（方向）とで、板厚貫通に至るまでの時間の差があることを示し、全周に瞬時破断が生じることはないことを示す。
- ・なお、全周亀裂に対する  $K_I$  値評価としては、Ductile Fracture Handbook “Full Circumference Part-throughwall Flaw” における次式を採用する。

$$K_I = (\pi a)^{0.5} \cdot \left[ \sum_{i=0}^3 \sigma_i G_i \right]$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 (z/t) + \sigma_2 (z/t)^2 + \sigma_3 (z/t)^3$$

$\sigma$  : 板厚内の応力分布

$\sigma_1 \sim \sigma_3$  : 板厚内応力分布を 3 次式で表わした場合の係数

$z$  : 円筒内面からの距離

$t$  : 板厚

$$G_i = A_0 + A_1 X + A_2 X^2 + A_3 X^3 + (A_4 X + A_5 X^2 + A_6 X^3 + A_7 X^4) / [0.324 (R_i/t) - 0.296]^{0.5}$$

$R_i$  : 内半径

$X : a/t$

$a$  : 欠陥深さ

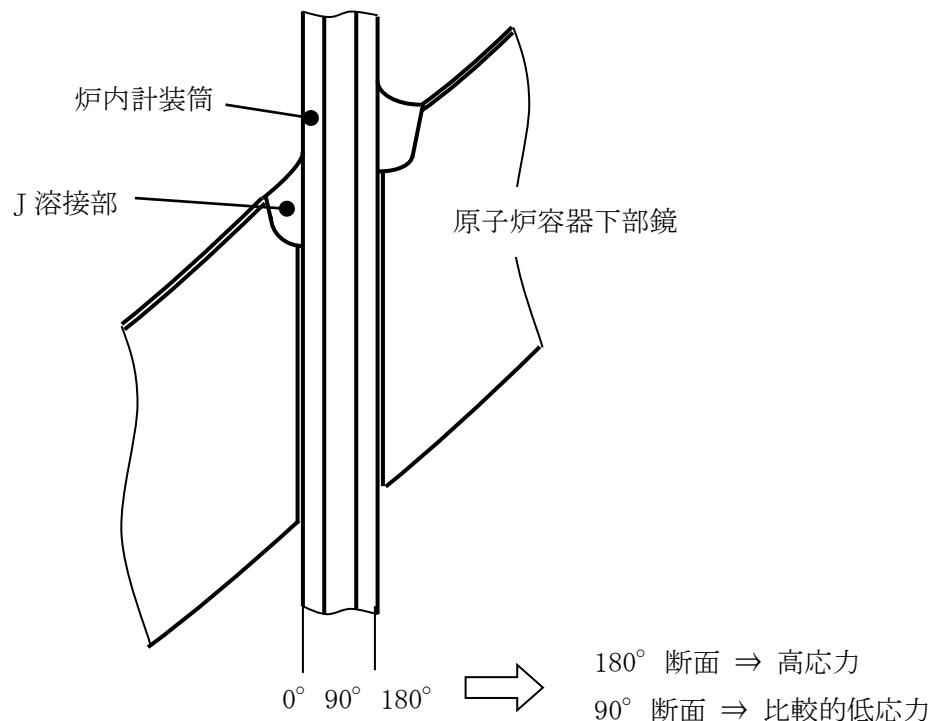
$A_0 \sim A_7$  : 定数

(\*) 本評価式は、 $1 \leq R_i/t \leq 4$  が適用範囲であるが、炉内計装筒では、 $R_i/t \leq 1$  となる。したがって、ここでは、応力分布による影響について相対評価することが目的であることから、 $R_i/t=1$  として評価する。

### 3. 検討結果

初期亀裂として、3mm 深さの全周欠陥を想定し、応力が高い  $180^\circ$  断面（方向）と応力が低い  $90^\circ$  断面（方向）のそれぞれの板厚内応力分布（軸方向）を用い（図 3-1），亀裂進展評価を実施した時の相対比較評価を図 3-2 に示す。図 3-2 に示されるように、亀裂進展解析結果において、応力が高い  $180^\circ$  断面の応力分布での板厚貫通に至る時間においても、 $90^\circ$  断面では、ほとんど亀裂は進展していない状況であることが確認できる。

したがって、 $90^\circ$  断面における応力分布での亀裂進展は  $180^\circ$  断面での亀裂進展に比べ、非常に遅く、全周亀裂が瞬時破断を起こす可能性が極めて低いことが確認できる。



原子炉容器炉内計装筒の残留応力の状態

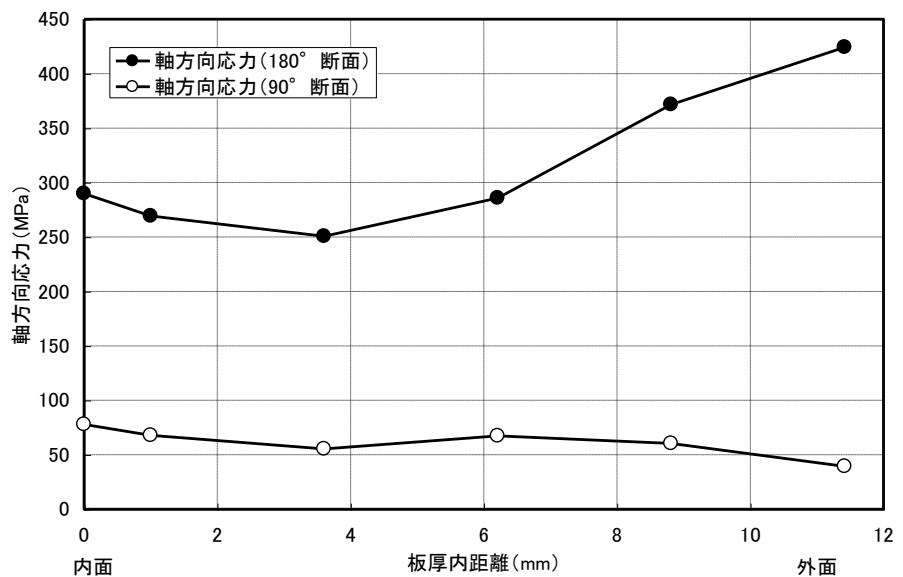


図 3-1 炉内計装筒の板厚内応力分布（軸方向）

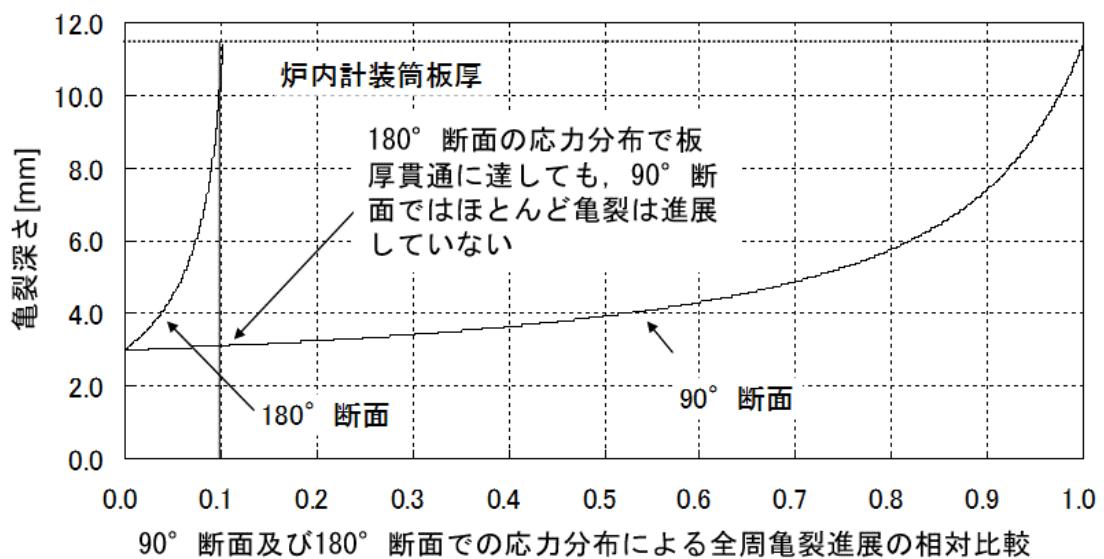


図 3-2 全周亀裂に対する亀裂進展解析結果

## 付録 B-5 原子炉容器炉内計装筒母材におけるプラントのグループ化

### 1. はじめに

原子炉容器炉内計装筒については、プラントのループ数によりその構造が異なるなどのことから、溶接残留応力を含めたプラント運転中応力にも差が生じている。

本付録は、PWSCC 発生評価のための発生応力に基づき、国内 PWR プラントの原子炉容器炉内計装筒をグループ化した結果をまとめたものである。

### 2. 原子炉容器炉内計装筒のグループ化

原子炉容器炉内計装筒においては、プラントによって構造が異なる場合があり、溶接残留応力を含めたプラント運転中応力に差が生じてくる。国内 PWR プラントの原子炉容器炉内計装筒に対して、発生する応力によりグループ化した結果を表 2-1 に示す。グループ化の結果、国内 PWR プラントの原子炉容器炉内計装筒は 3 グループに分類される。

ここで、原子炉容器炉内計装筒に対する PWSCC 評価応力は、原子炉容器下部鏡へ取付けの際の溶接残留応力とプラント運転中の内圧及び熱による応力を考慮する必要がある。これらの応力評価については、FEM による弾塑性解析により実施している。解析例として、グループ 1 の原子炉容器炉内計装筒に対する FEM による解析モデルを図 2-1 に示す。また、その解析結果を図 2-2 に示す。FEM 解析により、原子炉容器炉内計装筒に発生する最大応力は 500MPa 程度と評価され、炉内計装筒内面で表れている。

なお、FEM 解析による応力評価の妥当性については、モックアップ供試体による歪みゲージによる応力測定結果との比較により検証されている。

表 2-1 PWSCC 評価応力によるグループ化

	プラント名	PWSCC 評価応力
グループ 1	美浜 2*, 3 号機, 高浜 1, 2 号機 大飯 1, 2 号機*, 玄海 1, 2 号機* 伊方 1, 2 号機*	500 MPa 程度
グループ 2	美浜 1 号機*, 高浜 3, 4 号機 川内 1, 2 号機, 敦賀 2 号機 泊 1, 2 号機	450 MPa 程度
グループ 3	大飯 3, 4 号機, 玄海 3, 4 号機 伊方 3 号機, 泊 3 号機	380 MPa 程度

\* 廃止措置中

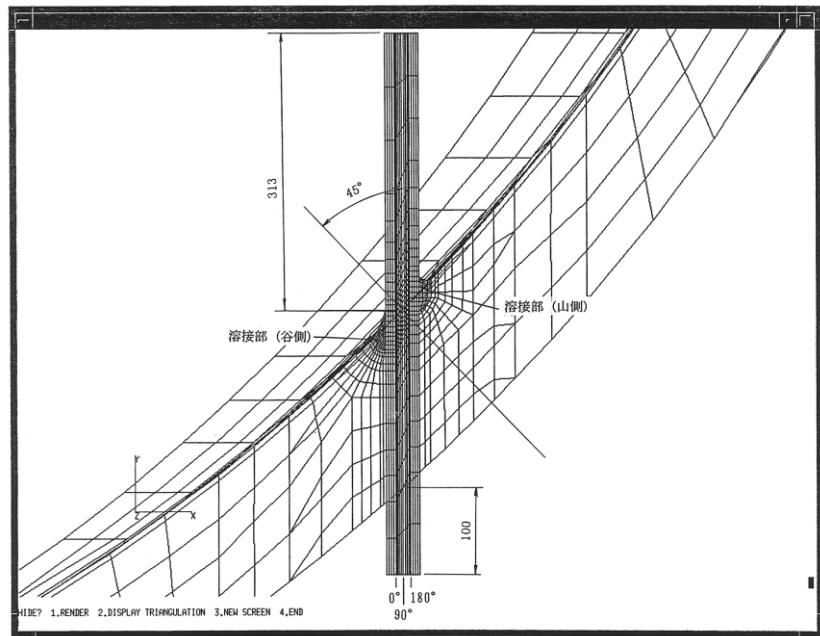


図 2-1 原子炉容器炉内計装筒の FEM 解析モデル

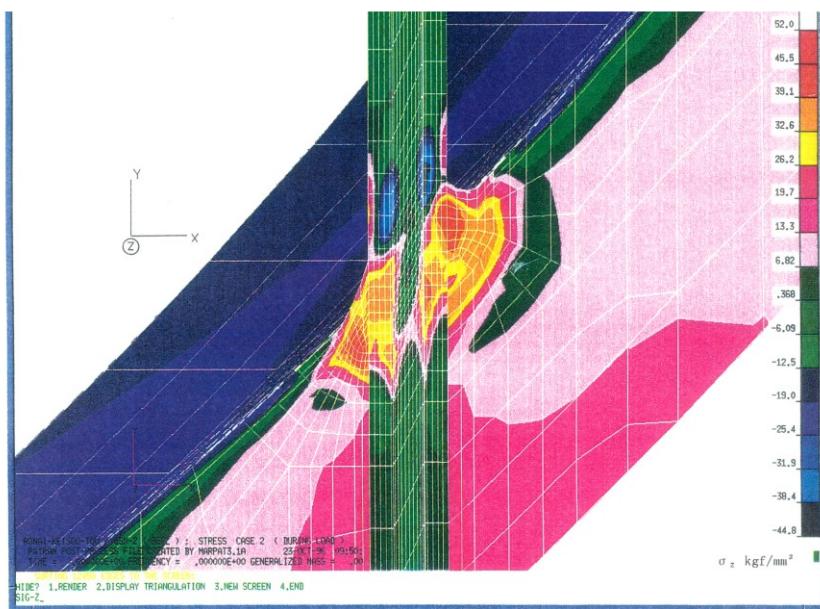


図 2-2 プラント運転中の応力コンタ図（周方向応力）

## 付録 B-6 原子炉容器炉内計装筒母材の亀裂発生評価

### 1. はじめに

本付録は原子炉容器炉内計装筒の PWSCL 亀裂発生評価について、その評価方法をまとめたものである。

### 2. PWSCL 発生予測評価手法

PWSCL の発生予測評価に影響するパラメータとして、温度、応力、定荷重 SCC データが挙げられる。発生予測における各パラメータの考え方を以下のとおりまとめる。

#### (1) 評価温度

原子炉容器炉内計装筒の評価温度として、原子炉容器入口温度を用いて評価する。

#### (2) 評価応力

評価応力は、溶接残留応力、耐圧試験、運転中応力の一連の流れを 3 次元 FEM 弾塑性解析にて算出した応力値を用いて評価する。なお、炉内計装筒の取付位置により応力値に差が生じるが、ここでは、炉内計装筒内表面に最も厳しい応力が発生する最外周管台の応力値を用いて評価する。また、炉内計装筒の場合、プラントのループ数により構造が異なることから、応力値には「付録 B-5 原子炉容器炉内計装筒におけるプラントのグループ化」に基づき設定するものとする。

なお、3 次元 FEM 弾塑性解析による応力値は、実寸大モックアップを製作し応力値を計測することで、妥当性を検証している。

#### (3) 定荷重 SCC 試験データ

炉内計装筒材料の定荷重 SCC 試験データの下限線を用いて評価する。(図 2-1 参照)

以上のパラメータから次の手順で PWSCL 発生予測評価を行なう。

- ① 評価応力における定荷重 SCC 試験データの破断時間を求める。
- ② 定荷重 SCC 試験データの試験温度と評価温度が異なる場合、活性化エネルギーを用いて以下のアレニウス式に従い温度補正係数を求める。

$$\text{温度補正係数} = \exp\left[\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right]$$

ここで、

- Q : 活性化エネルギー (=40kcal/mol)  
R : 気体定数 (=1.986 × 10<sup>-3</sup>kcal/mol・K)  
T : 評価温度 (K)  
T<sub>ref</sub> : 定荷重試験温度 (K)

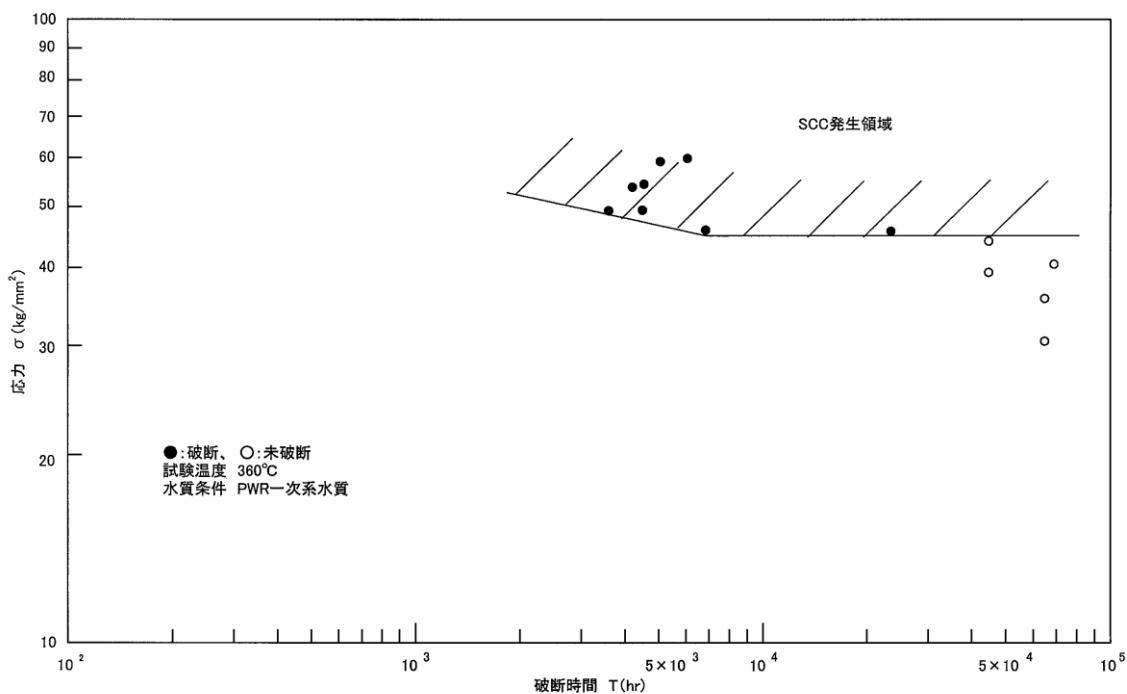
- ③ ②で求まった温度補正係数を①で求まった破断時間に乗じることで PWSCL 発生

評価を計算する。

### 3. PWSCC 発生予測評価例

ここでは、T-cold 化後の国内プラント炉内計装筒の温度を包絡する以下の条件で PWSCC 発生予測評価を行なうと約 19 万時間となる。

- (1) 評価温度 : 289°C
- (2) 評価応力 : 500MPa (弾塑性 FEM 応力解析結果)



出典：大飯発電所 1号機 容器の技術評価報告書

図 2-1 炉内計装筒材料の定荷重 SCC 試験データ

## 付録 C 原子炉容器炉内計装筒に適用する点検手法

### 1. 点検手法

原子炉容器炉内計装筒の点検に適用する非破壊試験は、構造及び周辺環境の制約を勘案して、表 1-1 の内容とする。

### 2. 亀裂が確認された場合の亀裂のサイジング

非破壊試験により亀裂が確認された場合の亀裂のサイジングには、超音波探傷試験(UT)を行う必要がある。

亀裂深さの設定には、UT にてサイジングされた亀裂の深さに、当該手法のサイジング精度を適切に考慮する必要がある。なお、亀裂長さは補足試験の結果により設定してもよい。

また、UT にて亀裂が検出されずに、他の試験により亀裂が確認された場合は、UT 及び他の試験での検出能力に基づき、亀裂のサイジングを行うことができる。

非破壊試験の精度は、今後の国プロや民間研究の成果より、適切に設定すること。

表 1-1 原子炉容器炉内計装筒に適用可能な非破壊試験

部位		点検周期を定めるための体積試験	供用期間中検査 (ISI)	応力改善法施工前確認	その他 亀裂確認後に可能な補足試験
原子炉容器 炉内計装筒	母材内面	内面 UT	漏えい確認	内面 ECT	内面 UT
	J 溶接部	—	漏えい確認	VT 又は ECT	—

## 付録 D 原子炉容器炉内計装筒の亀裂進展評価

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒の点検時期設定及び亀裂が検出された場合の健全性評価を実施する際に用いる軸方向、周方向亀裂それぞれに対する PWSQC 亀裂進展予測評価及び疲労亀裂進展について、その評価方法における扱い方をまとめたものである。

### 2. 炉内計装筒母材 PWSQC 亀裂進展

モックアップ供試体での応力測定結果や解析による応力評価の結果、軸方向応力に比べて周方向応力が大きいことが確認されていることから、軸方向亀裂が先行して発生すると考えられる。

しかしながら、周方向亀裂の発生を完全には否定できないことから、点検により万一、周方向亀裂が検出された場合のために、軸方向亀裂の進展評価（付録 D-1）だけでなく、周方向亀裂の進展評価（付録 D-2）についても参考として検討する。ただし、実際に周方向亀裂が検出された場合、現状のガイドラインで想定できていない要因により亀裂が発生したと考えられるため、その要因を究明した上で、再評価を行なうものとする。

### 3. 炉内計装筒母材の疲労亀裂進展

PWSQC 亀裂発生後の亀裂進展予測については、PWSQC による進展だけでなく、疲労による進展も考えられるが、PWSQC による進展に対して疲労による進展は非常に小さいことが解析により確認されている。（付録 D-3 参照）

### 4. 炉内計装筒 J 溶接部に割れが確認された場合の亀裂進展評価

炉内計装筒 J 溶接部に割れが確認された場合、現時点で J 溶接部の体積試験技術が確認されていないことから、割れの貫通の有無に係らず、キャップ補修工法（付録 H）を適用して復旧することとなる。ここで、J 溶接部の割れは、管台母材及び下部鏡母材側に進展する可能性が否定できることから、代表プラントにて管台母材及び下部鏡への亀裂進展量の確認を行った。（付録 D-4 参照）

## 付録 D-1 原子炉容器炉内計装筒母材の軸方向亀裂進展予測 (代表プラントの解析例)

### 1. はじめに

本付録は、600系ニッケル基合金を使用している原子炉容器炉内計装筒に対するPWSQCによる軸方向亀裂進展挙動の評価結果についてまとめたものである。

ここでは、代表プラントとして、PWSQC評価上厳しくなる、炉内計装筒内面の応力が最も高いグループ1を選定して評価した。

### 2. 亀裂進展解析における評価条件

PWSQCによる軸方向亀裂の発生を想定した場合の亀裂進展解析評価については、以下の条件にて評価した。

#### (1) 亀裂進展速度

PWR一次系水中の600系ニッケル基合金の亀裂進展速度については、「平成17年度Ni基合金応力腐食割れ(SCC)進展評価技術調査(定荷重試験)に関する報告書(独立行政法人原子力安全基盤機構)」(以降、国プロNiSCCとする)の中のニッケル基合金母材(MA600)に対するPWSQC亀裂進展速度を適用する。

この中のPWSQC亀裂進展速度は式2-1で表される。

$$\frac{da}{dt} = \exp\left[-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \alpha (K - K_{th})^\beta \quad (\text{式2-1})$$

da/dt	: 亀裂進展速度 (m/s)
Q	: 活性化エネルギー (=130kJ/mol)
R	: 気体定数 (=8.314×10 <sup>-3</sup> kJ/mol·K)
T	: 評価温度 (K)
T <sub>ref</sub>	: 参照温度 (K) (=598.15K=325°C)
α	: 亀裂進展時の定数 平均線 = 2.53×10 <sup>-13</sup> @325°C
K	: 応力拡大係数 (MPa√m)
K <sub>th</sub>	: 応力拡大係数のしきい値 (=9MPa√m)
β	: 指数=1.16

式2-1は、325°Cをベースとして設定されたものであり、国内PWRプラントの炉内計装筒条件への換算は、PWSQC発生評価と同様にアレニウス式により実施する。亀裂進展時の定数はデータ平均線を用いた場合、2.53×10<sup>-13</sup>となる。

ここでは、国内プラントの炉内計装筒の温度条件を包絡する温度(290°C)及びデー

タ平均線を用いて、亀裂進展速度の換算を行って、式2-2で表される亀裂進展速度にて評価した。

$$\frac{da}{dt} = 4.98 \times 10^{-14} (K - 9)^{1.16} \quad (\text{式2-2})$$

#### (2) 板厚内応力分布

板厚内の応力分布については、応力評価上最も厳しい最外周管台におけるFEM弾塑性解析による応力評価結果を用いる。この応力評価には、溶接残留応力及び耐圧試験、プラント運転中の内圧及び熱による作用応力の履歴が含まれている。亀裂進展評価に使用する板厚内の応力分布を図2-1に示す。

#### (3) 初期亀裂サイズ

初期亀裂サイズについては、初期亀裂深さ $a_0$ が0.5mm、初期亀裂長さ $L_0$ が3mmの半だ円形状の亀裂を想定した。アスペクト比は $a_0/L_0=1/6$ とした(図2-2)。

#### (4) 応力拡大係数(K値)

平板亀裂のC. B. Buchaletの考え方に基づき、下部鏡の影響などを補正係数で評価し、一次応力(荷重制御)と二次応力(変位制御)で区別した蓋用管台と同様のYamashitaらのK値式を使用した。

$$K = K_L \text{ (荷重制御)} + K_D \text{ (変位制御)}$$

$$K_L, K_D = K_p \cdot F_c \cdot F_r \cdot F_h$$

$K_p$  : 平板の2次元亀裂に対する応力拡大係数

(C. B. Buchalet式)

$F_c$  : 円筒への曲率補正係数 (FEM解析評価)

$F_r$  : 3次元形状への補正係数 (C. B. Buchalet式)

$F_h$  : 下部鏡の剛性補正係数 (FEM解析評価)

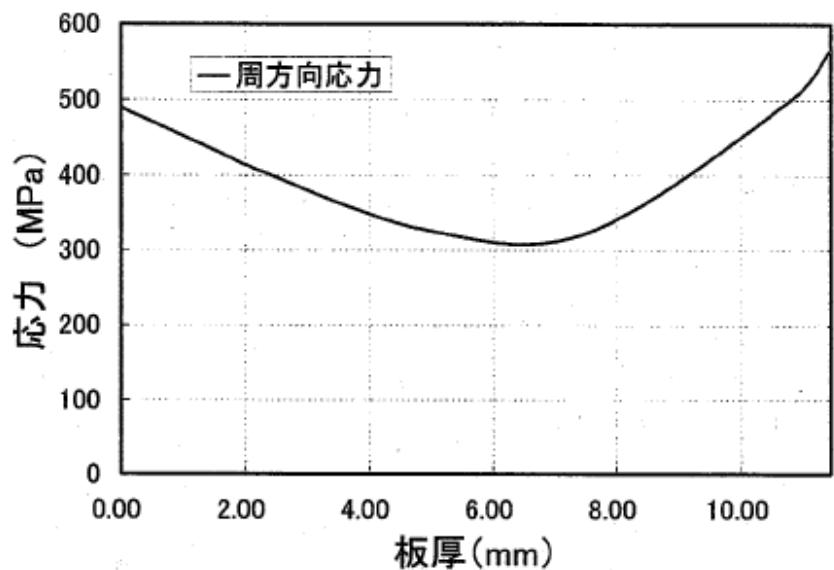


図2-1 原子炉容器炉内計装筒の板厚内応力分布

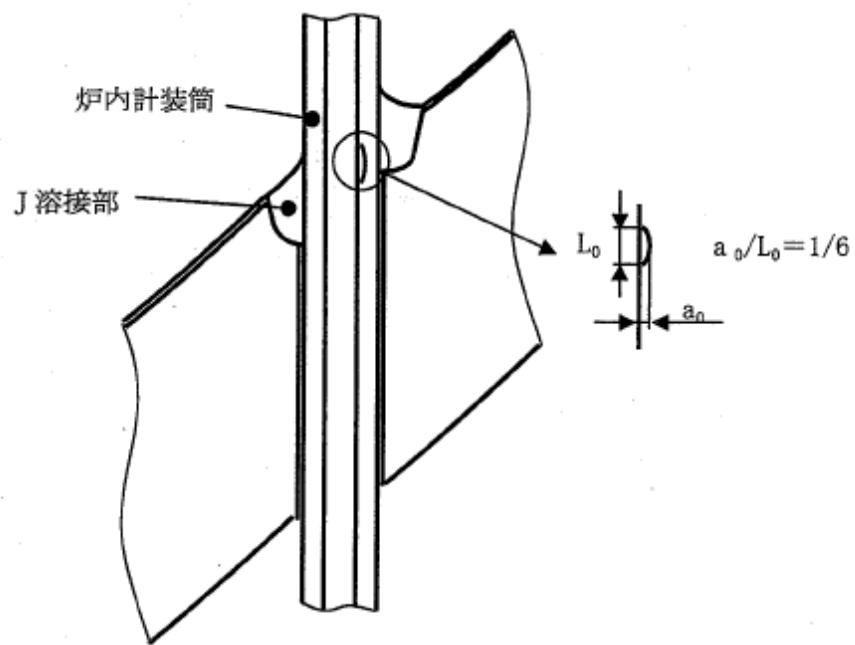


図2-2 亀裂進展評価における想定亀裂

### 3. 亀裂進展評価結果

上記条件により亀裂進展評価を実施した結果を図3-1に示す。PWSCCによる亀裂発生後、データ平均線の亀裂進展速度を用いて0.5mm深さから40万時間後には約1.3mmの亀裂深さになる。したがって、PWSCC発生までの予測時間（約19万時間<sup>\*1</sup>）を考慮すると、供用開始後約50万時間経過しても、75%板厚に至らないと予想される。

\*1 : PWSCC発生時間の予測評価は蓋用管台材料の定荷重SCC試験データに基づき、以下の条件で評価した(付録B-6参照)。

応力：500MPa (弾塑性FEM応力解析結果)

温度：289°C (国内プラントの包絡条件)

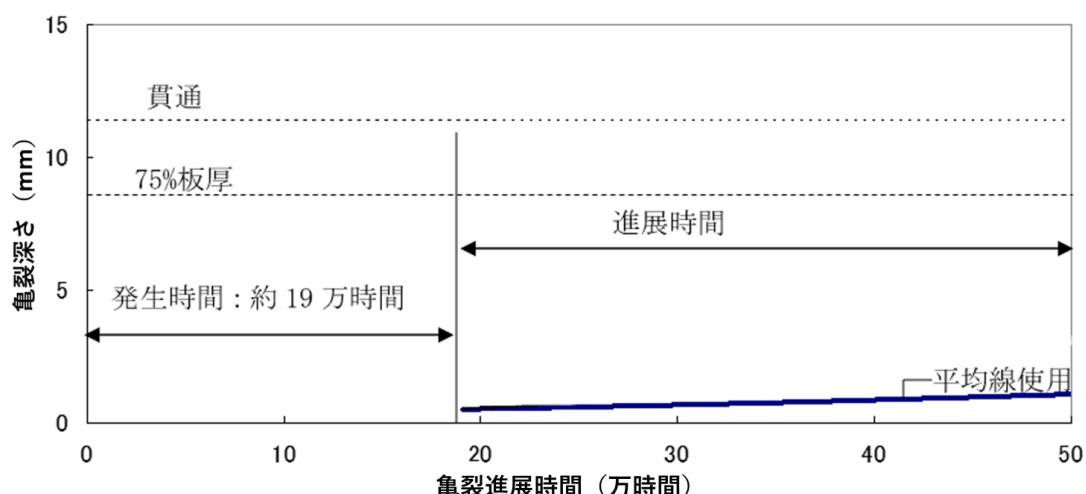


図3-1 原子炉容器炉内計装筒の亀裂進展解析結果  
(代表プラントの解析例)

## 付録 D-2 原子炉容器炉内計装筒母材の周方向亀裂進展予測 (代表プラントの解析例)

### 1. はじめに

本付録は、600系ニッケル基合金を使用している原子炉容器炉内計装筒に対するPWSCCによる周方向亀裂進展挙動の評価結果についてまとめたものである。

ここでは、代表プラントとして、PWSCC評価上厳しくなる、炉内計装筒内面の応力が最も高いグループ1を選定して評価した。

### 2. 亀裂進展解析における評価条件

PWSCCによる周方向亀裂の発生を想定した場合の亀裂進展解析評価については、以下の条件にて評価した。

#### (1) 亀裂進展速度

PWR一次系水中の600系ニッケル基合金の亀裂進展速度については、国プロNiSCCの中のニッケル基合金母材(MA600)に対するPWSCC亀裂進展速度を適用する。

この中のPWSCC亀裂進展速度は式2-1で表される。

$$\frac{da}{dt} = \exp\left[-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \alpha(K - K_{th})^\beta \quad (\text{式2-1})$$

da/dt : 亀裂進展速度(m/s)

Q : 活性化エネルギー (=130kJ/mol)

R : 気体定数 (=8.314 × 10<sup>-3</sup>kJ/mol・K)

T : 評価温度 (K)

T<sub>ref</sub> : 参照温度 (K) (=598.15K=325°C)

α : 亀裂進展時の定数 平均時 = 2.53 × 10<sup>-13</sup> @325°C

K : 応力拡大係数 (MPa $\sqrt{m}$ )

K<sub>th</sub> : 応力拡大係数のしきい値 (=9MPa $\sqrt{m}$ )

β : 指数=1.16

式2-1は、325°Cをベースとして設定されたものであり、国内PWRプラントの炉内計装筒条件への換算は、PWSCC発生評価と同様にアレニウス式により実施する。

亀裂進展時の定数はデータ平均線を用いた場合、2.53 × 10<sup>-13</sup>となる。

ここでは、国内プラントの炉内計装筒の温度条件を包絡する温度(290°C)及びデータ平均線を用いて、亀裂進展速度の換算を行って、式2-2で表される亀裂進展速度にて評価した。

$$\frac{da}{dt} = 4.98 \times 10^{-14} (K - 9)^{1.16} \quad (\text{式2-2})$$

## (2) 板厚内応力分布

板厚内の応力分布については、応力評価上最も厳しい最外周管台におけるFEM弾塑性解析による応力評価結果を用いる。この応力評価には、溶接残留応力及び耐圧試験、プラント運転中の内圧及び熱による作用応力の履歴が含まれている。亀裂進展評価に使用する板厚内の応力分布を図2-1に示す。

なお、応力分布はJ溶接部から外れると応力レベルが小さくなり、亀裂が進展しなくなると予想されるが、ここでは、炉内計装筒全周に一様に高応力が作用すると仮定し、安全側の評価を行うこととした（図2-2参照）。

## (3) 初期亀裂サイズ

初期亀裂サイズについては、初期亀裂深さ $a_0$ が0.5mm、初期亀裂長さ $L_0$ が3mmの半だ円形状の亀裂を想定した。アスペクト比は $a_0/L_0=1/6$ とした（図2-2）。

## (4) 応力拡大係数（K値）

平板亀裂のC. B. Buchaletの考え方に基づき、下部鏡の影響などを補正係数で評価し、一次応力（荷重制御）と二次応力（変位制御）で区別したK値式を使用した。

$$K = K_L \text{ (荷重制御)} + K_D \text{ (変位制御)}$$

$$K_L, K_D = K_p \cdot F_C \cdot F_P \cdot F_R \cdot F_S$$

$K_p$  : 平板の2次元亀裂に対する応力拡大係数

(C. B. Buchalet式)

$F_C$  : 曲率補正係数

$F_P$  : 位置補正係数 (亀裂最深部のK値)

$F_R$  : 局面補正係数 (亀裂周りのK値)

$F_S$  : 管台補正係数

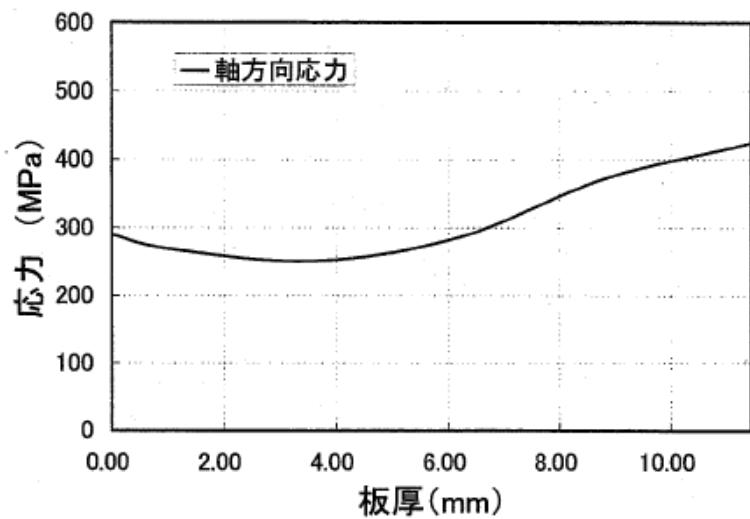


図2-1 原子炉容器炉内計装筒の板厚内応力分布

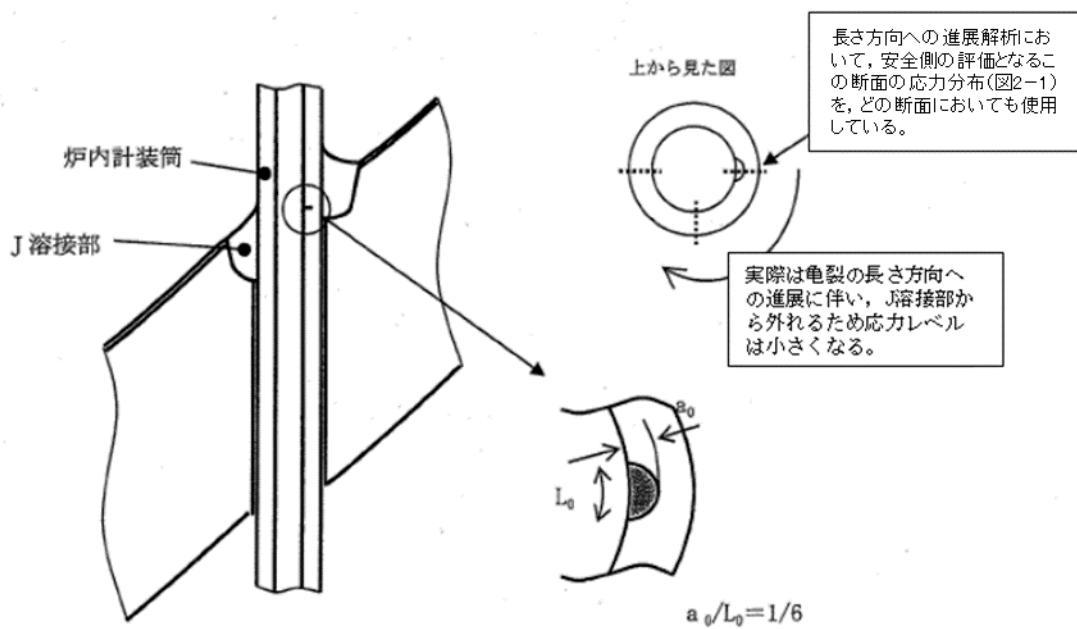


図2-2 亀裂進展評価における想定亀裂

### 3. 亀裂進展評価結果

上記条件により亀裂進展評価を実施した結果を図3-1に示す。データ平均線の亀裂進展速度を用いて0.5mm深さから40万時間後には約1.3mmの亀裂深さになる。したがって、供用開始後約40万時間経過しても、75%板厚までに至らないと予想される。

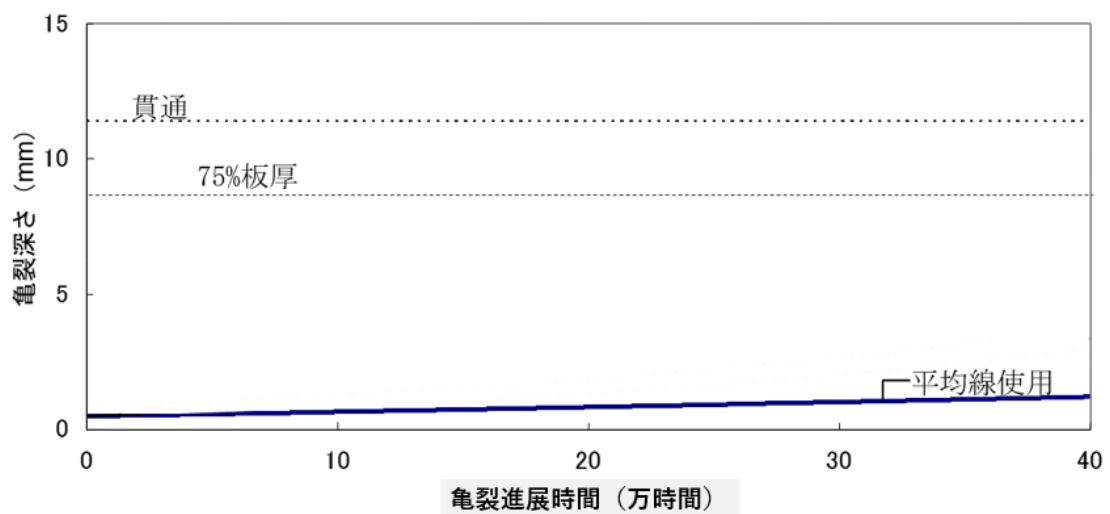


図3-1 原子炉容器炉内計装筒の周方向亀裂の亀裂進展解析結果  
(代表プラントの解析例)

## 付録 D-3 原子炉容器炉内計装筒の疲労亀裂進展量

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒のPWSCCによる亀裂が発生した場合に、その亀裂に対して、運転中の過渡による疲労亀裂進展の影響についてまとめたものである。亀裂進展の対象は、先行して発生及び進展すると考えられる軸方向亀裂を対象とした。

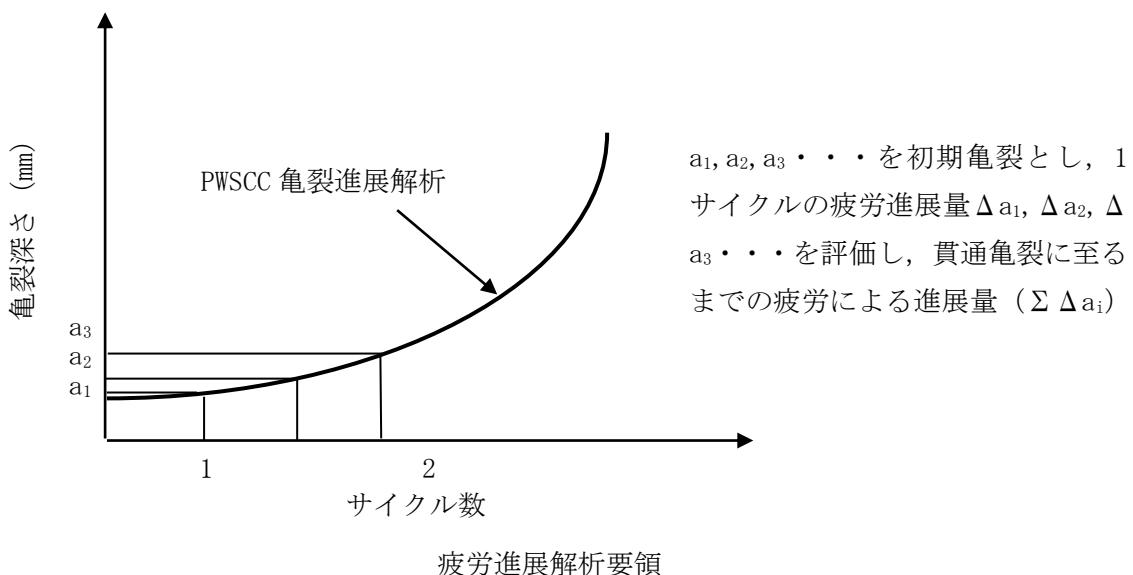
なお、本検討では、国内プラントの炉内計装筒の温度条件を包絡するように評価した。

### 2. 疲労亀裂進展解析

#### (1) 初期亀裂

亀裂進展解析については、PWSCCによる進展と疲労による進展を組み合わせて評価する必要がある。したがって、1サイクル運転後のPWSCC亀裂進展解析後の亀裂形状で、1サイクルでの疲労進展解析を実施し、それにより、1サイクル運転後の亀裂進展形状を評価することになる。次サイクル以降も、その前のサイクルでの進展評価結果を初期亀裂としてPWSCCによる1サイクル運転後の進展量を評価し、その形状にて疲労進展を繰り返す必要がある。

しかしながら、ここでは、PWSCC進展解析結果から、各サイクルの亀裂形状にて、1サイクルの疲労進展解析を実施し、PWSCC亀裂の貫通までの時間で疲労による亀裂進展量がどの程度となるかを評価した。



## (2) 亀裂進展速度

疲労による進展速度については、米国にて 2003 年 6 月に発行された ASME Section XI Code Case N-694 Appendix A (以下 Case N-694) の蓋用管台に対する疲労亀裂進展速度を使用する。

$$da/dN = CS_R S_{ENV} \Delta K^n \text{ m/cycle}$$

$$C = 4.835 \times 10^{-14} + 1.622 \times 10^{-16}T - 1.490 \times 10^{-18}T^2 + 4.355 \times 10^{-21}T^3$$

$$S_R = (1 - 0.82R)^{-2.2}, \quad S_{ENV} = 1 + A (CS_R \Delta K^n)^{m-1} T_R^{1-m}$$

$$A = 4.4 \times 10^{-7}, \quad m = 0.33, \quad n = 4.1$$

$\Delta K$  : 応力拡大係数Kの変動範囲 (MPa $\sqrt{m}$ )

T : 温度, R : 応力比 (=最小K値/最大K値),

TR : 負荷上昇時間 (sec) (=30秒)

## (3) $K_I$ 値式

$K_I$  値式については、PWSCC による進展解析と同様の手法で評価する。

## (4) 過渡条件

厳密な評価としては、各過渡条件に対する時刻暦の運転中応力を、平均応力として残留応力を加味（線形和で評価）して評価する必要がある。しかしながら、ここでは簡易的に、PWSCC による亀裂進展に対する疲労進展の影響を評価するために、100%定常時の応力と停止時の応力（残留応力のみ）で  $\Delta K$  を評価して亀裂進展評価を実施することとする。

したがって、過渡回数としては、代表的な過渡条件として、起動／停止及び漏えい試験を選定し、1 サイクルの過渡回数としては、保守的に合計 10 回として評価する。

## (5) 亀裂進展解析結果

亀裂進展解析結果を表 2-1 に示す。PWSCC 亀裂進展解析から貫通までの時間は 20 サイクルと評価され、各サイクルの疲労進展量について評価した結果、貫通亀裂に至るまでの疲労による亀裂進展量としては、深さとして約 0.1mm 程度の結果となり、現状の評価では、亀裂進展量としては、PWSCC 亀裂の進展が支配的であることが確認された。

## 3. まとめ

PWSCC により発生した亀裂に対する、運転中の過渡による疲労亀裂進展の影響は、PWSCC による亀裂進展と比較して有意ではないことから、亀裂進展評価において疲労の影響を考慮する必要はないものと判断できる。

表 2-1 疲労亀裂進展解析結果

サイクル数	初期亀裂形状		1回当たりの進展量 (da/dN) [mm]		10回での進展量 (da/dN×10) [mm]	
	深さ	長さ	深さ	長さ (*)	深さ	長さ (*)
1	0.65	3.02	0.00001	0.00000	0.00006	0.00003
2	0.84	3.14	0.00001	0.00000	0.00007	0.00004
3	1.07	3.38	0.00001	0.00001	0.00008	0.00006
4	1.33	3.74	0.00001	0.00001	0.00009	0.00008
5	1.62	4.21	0.00001	0.00001	0.0001	0.0001
6	1.97	4.83	0.00001	0.00001	0.00012	0.00012
7	2.40	5.60	0.00002	0.00002	0.00017	0.00017
8	2.90	6.53	0.00002	0.00002	0.00022	0.00022
9	3.47	7.62	0.00003	0.00003	0.00028	0.0003
10	4.11	8.88	0.00004	0.00004	0.00037	0.0004
11	4.80	10.36	0.00005	0.00008	0.00047	0.00079
12	5.58	12.51	0.00006	0.00011	0.00062	0.00108
13	6.42	14.90	0.00007	0.00014	0.00072	0.00137
14	7.25	17.38	0.00008	0.00016	0.0008	0.0016
15	8.06	19.79	0.00009	0.00018	0.00089	0.00182
16	8.80	21.72	0.00009	0.00016	0.00091	0.00158
17	9.44	23.39	0.00009	0.00015	0.00085	0.00149
18	10.06	25.07	0.00006	0.00011	0.0006	0.00105
19	10.58	26.66	0.00003	0.00005	0.00028	0.0005
20	11.02	28.33	0.00003	0.00006	0.00034	0.00064
				合計進展量	0.00804	0.01344

(\*) 亀裂長さの進展量は、半長の進展量。

付録 D-4 原子炉容器炉内計装筒キャップ補修工法での J 溶接部の軸方向  
亀裂進展予測  
(代表プラントの解析例)

1. はじめに

600系ニッケル基合金を使用している原子炉容器炉内計装筒に、PWSCLによる欠陥が発生した場合に、原子炉容器下部外面にキャップを設け新たな耐圧バウンダリを形成するキャップ補修工法を行う。本付録は、このときに、原子炉容器炉内計装筒の軸方向J溶接部欠陥に対する健全性評価の中で、PWSCLによる軸方向亀裂進展挙動の評価結果についてまとめたものである。

2. 亀裂進展解析における評価条件

(1) 初期欠陥

J溶接部にPWSCLによる欠陥が発生した場合、周方向欠陥か軸方向欠陥かの欠陥の方向を確認する。このとき、周方向欠陥のときはJ溶接部を全周貫通欠陥としたキャップ構造の工認強度計算で構造健全性を証明することより、欠陥の健全性評価は行わない。一方、軸方向欠陥のときには、J溶接部の欠陥のサイジングは困難と考えられるこより、J溶接、バターリング全体を欠陥と設定した。管台部は、J溶接隣接部からPWSCLが進展し、早い時期で貫通すると考えられるため、J溶接範囲の貫通欠陥としてモデル化した。

このときの初期亀裂モデルを図2-1に示す。

(2) 亀裂進展速度

欠陥の進展方向としては、下部鏡の低合金鋼と管台の600系ニッケル基合金が対象となり、それぞれ以下の式を適用する。

a. 下部鏡

低合金鋼ではPWSCLによる進展は発生しないので、下部鏡については、JSME維持規格<sup>[1]</sup>に記載のPWR環境中のフェライト鋼の疲労亀裂進展速度式を用いて、進展量を評価する。この進展速度式は式2-1で表される。

$R \leq 0.25$  の場合

$$\Delta K \leq 19.48 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{ の場合 } da/dN = 1.48 \times 10^{-14} \Delta K^{5.95}$$

$$\Delta K > 19.48 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{ の場合 } da/dN = 2.13 \times 10^{-9} \Delta K^{1.95}$$

$0.25 < R < 0.65$  の場合

$$\Delta K_a = 19.49 \left[ \frac{3.75R + 0.06}{26.9R - 5.725} \right]^{0.25}$$

$$\Delta K \leq \Delta K_a \text{ の場合 } da/dN = 1.48 \times 10^{-14} \quad (26.9R - 5.725) \quad \Delta K^{5.95}$$

$$\Delta K > \Delta K_a \text{ の場合 } da/dN = 2.13 \times 10^{-9} \quad (3.75R + 0.06) \quad \Delta K^{1.95}$$

$0.65 \leq R < 1.05$  の場合

$$\Delta K \leq 13.23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{ の場合 } da/dN = 1.74 \times 10^{-13} \Delta K^{5.95}$$

$$\Delta K > 13.23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{ の場合 } da/dN = 5.33 \times 10^{-9} \Delta K^{1.95}$$

(式 2-1)

ただし、 $da/dN$  : 疲労亀裂進展速度(m/cycle),  
 $\Delta K$  : 応力拡大係数の振幅 (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )  
 $R$  : 応力比 =  $K_{\min}/K_{\max}$   
 $K_{\min}$  : 最小の応力拡大係数  
 $K_{\max}$  : 最大の応力拡大係数

#### b. 管台母材 (600系ニッケル基合金)

管台母材の 600 系ニッケル基合金に対しては、PWSCC 進展速度式及び PWR 環境中の疲労亀裂進展速度式を適用する必要がある。

##### 1) 管台の疲労亀裂進展速度式

PWR環境中の600系ニッケル基合金の疲労亀裂進展速度については、JSME維持規格には記載がないので、米国にて2003年6月に発行されたASME Section XI Code N-694 Appendix A<sup>[2]</sup>の疲労亀裂進展速度式を適用する。

このCode N-694の中のPWR環境中の疲労亀裂進展速度は式2-2で表される。

$$da/dN = CS_R S_{ENV} \Delta K^n \quad (\text{式 2-2})$$

$$C = 4.835 \times 10^{-14} + 1.622 \times 10^{-16}T - 1.490 \times 10^{-18}T^2 + 4.355 \times 10^{-21}T^3$$

$$SR = [1 - 0.82R]^{-2.2}$$

$$SENV = 1 + A [CS_R \Delta K^n]^{m-1} T_R^{1-m}$$

$$A = 4.4 \times 10^{-7}, \quad m = 0.33, \quad n = 4.1$$

ただし、 $da/dN$  : 疲労亀裂進展速度(m/cycle)

$\Delta K$  : 応力拡大係数の振幅 (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )

$T$  : 温度(°C)

$R$  : 応力比 =  $K_{\min}/K_{\max}$

$T_R$  : 負荷上昇時間 (30秒とする)

##### 2) 管台のPWSCC進展速度式

PWR環境中の600系ニッケル基合金のPWSCC亀裂進展速度については、国プロNiSCC の中のニッケル基合金母材 (MA600) に対するPWSCC亀裂進展速度を適用する。

この中のPWSCC亀裂進展速度は式2-3で表される。

$$\frac{da}{dt} = \exp\left[-\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right] \alpha (K - K_{th})^\beta \quad (\text{式2-3})$$

da/dt	: 亀裂進展速度 (m/s)
Q	: 活性化エネルギー (=130kJ/mol)
R	: 気体定数 (=8.314×10 <sup>-3</sup> kJ/mol·K)
T	: 評価温度 (K)
T <sub>ref</sub>	: 参照温度 (K) (=598.15K=325°C)
α	: 亀裂進展時の定数 平均線 = 2.53×10 <sup>-13</sup> @325°C
K	: 応力拡大係数 (MPa $\sqrt{m}$ )
K <sub>th</sub>	: 応力拡大係数のしきい値 (=9MPa $\sqrt{m}$ )
β	: 指数=1.16

式2-3は、325°Cをベースとして設定されたものであり、国内PWRプラントの炉内計装筒条件への換算は、PWSCC発生評価と同様にアレニウス式により実施する。

ここでは、国内プラントの炉内計装筒の温度条件を包絡する温度(289°C)及びデータ平均線を用いて、亀裂進展速度の換算を行ない、式2-4で表される亀裂進展速度にて評価した。

$$\frac{da}{dt} = 4.74 \times 10^{-14} (K - 9)^{1.16} \quad (\text{式2-4})$$

### (3) 応力拡大係数 (K値)

#### a. 下部鏡

内圧や代表過渡条件での欠陥を設定したFEM解析での応力拡大係数と整合性がよかつたので、Raju & Newman<sup>[3]</sup>の膜曲げ応力に対する平板の半だ円表面欠陥でのK値の簡易式を用いた。なお、FEM解析で詳細に応力拡大係数を算出する場合は、付録Iを参照すること。

#### b. 管台母材 (600系ニッケル基合金)

##### 1) 疲労亀裂進展評価用の応力拡大係数

欠陥を設定したFEM解析で応力拡大係数を求めた。応力拡大係数の変動幅  $\Delta K$  は、内圧の変動による応力拡大係数の変動幅  $\Delta K_p$  と各過渡条件での熱応力による応力拡大係数の変動幅  $\Delta K_h$  値との線形和とした。ただし、各過渡条件の熱応力による応力拡大係数の変動幅  $\Delta K_h$  値は、100%からの原子炉トリップ（不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ2D3）を代表過渡として応力拡大係数の変動幅をFEM解析で求め、各過渡条件の熱応力の変動幅に比例させた。

## 2) PWSCC亀裂進展用の応力拡大係数

欠陥を設定したFEM解析で、残留応力と運転時応力を負荷して、管台の軸方向欠陥の長さに対する応力拡大係数の分布を求めた。

### (4) 過渡条件

設計過渡とその回数を設定した。これらの設計過渡を表2-1に示す。

## 3. 亀裂進展評価結果

上記条件により下部鏡及び管台で亀裂進展評価を実施した結果を、それぞれ図3-1に、図3-2に示す。1年間の運転時間を7500hとした。

下部鏡は5年間で0° 断面では約0.5mm、180° 断面では約0.2mmの進展量となった。

管台での進展量評価では、残留応力と100%運転時の亀裂長さに対するK値分布よりPWSCC進展量を算出し、1年ごとに疲労亀裂進展量を加算した。180° 断面において、平均速度式を用いたときには、5年間で管台上部側に約1.6mm、下部側に約1.4mm進展した。

### (参考文献)

- [1] 発電用原子力設備規格 維持規格, JSME
- [2] Code N-694-1, Evaluation Procedure and Acceptance Criteria for PWR Reactor Vessel Head Penetration Nozzles Section XI, Division 1, ASME
- [3] Newman and Raju, Stress Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Load, NASA Technical Memorandum 85793, NASA, 1984
- [4] 「平成17年度Ni基合金応力腐食割れ(SCC)進展評価技術調査(定荷重試験)に関する報告書」，独立行政法人原子力安全基盤機構，2006

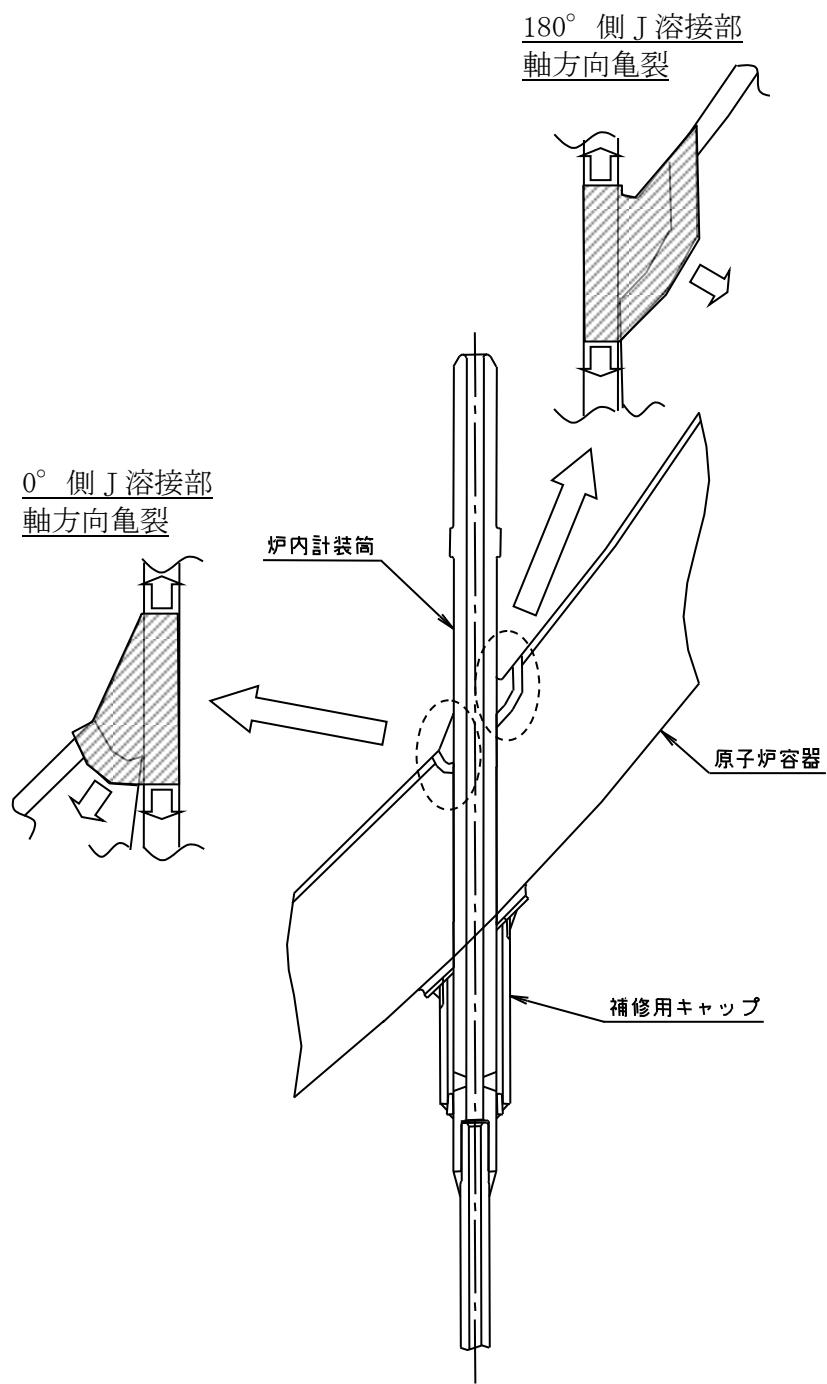


図 2-1 初期亀裂モデル

表 2-1 炉内計装筒管台キャップ工法 設計過渡条件及び地震条件

運転状態 I (許容状態A)		
記号	過渡条件	回 数*
1A1	起動	15
1B1	停止	15
1C1	負荷上昇 (15%から100%出力)	1,650
1D1	負荷減少 (100%から15%出力)	1,650
1E1	90%から100%へのステップ状負荷上昇	250
1F1	100%から90%へのステップ状負荷減少	250
1G1	100%からの大きいステップ状負荷減少	25
1H1	定常負荷運転時の変動	125,000
1I1	燃料交換	10
1J1	0%から15%への負荷上昇	175
1K1	15%から0%への負荷減少	175
1L1	1 ループ停止／1 ループ起動 i ) 停止	10
1L2	ii ) 起動	10
運転状態 II (許容状態B)		
2A1	負荷の喪失	10
2B1	外部電源喪失	5
2C1	1 次冷却材流量の部分喪失	10
2D1	100%からの原子炉トリップ i ) 不注意な冷却を伴わないトリップ	30
2D2	ii ) 不注意な冷却を伴うトリップ	20
2D3	iii) 不注意な冷却と安全注入を伴うトリップ°	5
2E1	1 次冷却系の異常な減圧	5
2F1	制御棒クラスタの落下	10
2G1	出力運転中の非常用炉心冷却系の誤起動	5
2H1	1 次冷却系停止ループの誤起動	5
2I1	タービン回転試験	5
2J1	1 次系漏えい試験	10
地震荷重		
S <sub>1</sub>	S <sub>1</sub> 地震(疲労亀裂進展評価においては荷重を1/3として評価する)	300

(\*) 5年ベースの過渡回数とする。

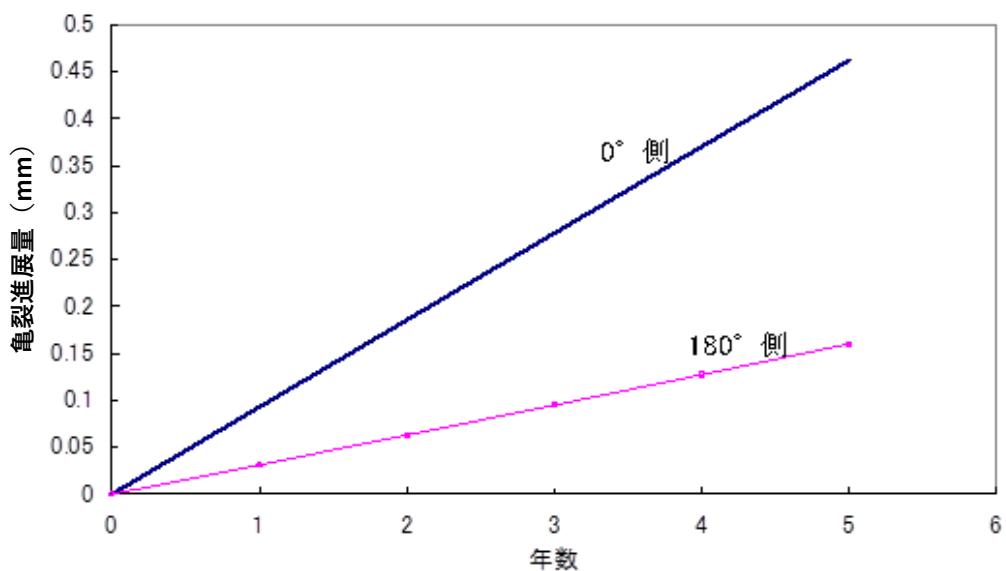


図 3-1 下部鏡の PWR 環境中の疲労亀裂進展量

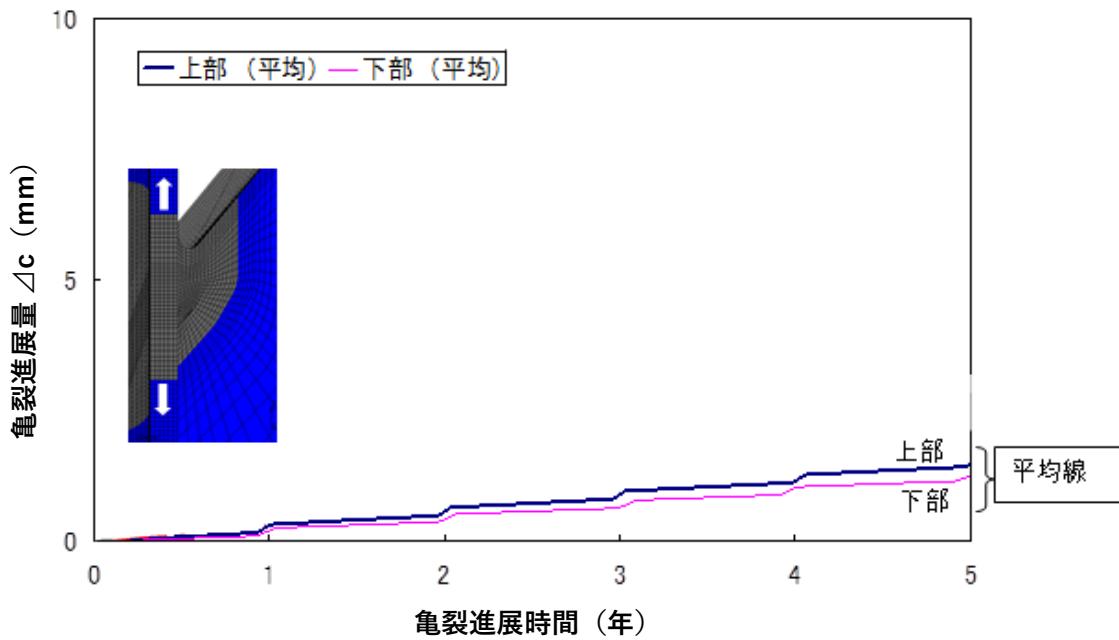


図 3-2 管台での亀裂進展量(180° 断面)

## 付録 E 点検時期の設定

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒に対する原子炉の安全機能を維持するための健全性を確認するための、点検時期の設定の考え方についてまとめたものである。

### 2. 点検時期の基本的な考え方

#### [初回の点検実施時期]

亀裂が発生すると予測される時期に初回点検時期を設定する。(図1参照)

亀裂発生予測時間（たとえば、付録B-6の評価例から約19万時間）は、定荷重SCC試験データ、応力、活性化エネルギーに依存するが、これらは、電力共通研究などで得られたデータに基づいている。

亀裂発生後の亀裂予測においては、亀裂深さがJSME維持規格の許容深さである板厚の75%に至るまで十分な時間（付録D-1）を要することから、亀裂が発生しても直ちに安全上問題となる可能性は低いと考えられる。

以上より、PWSCLC亀裂が発生すると予測される時期を目途に初回点検を実施しておけば、その点検で、万一亀裂が検出されたとしても、直ちに安全上の問題となる可能性は低いことから、初回点検時期は妥当であると判断した。

なお、PWSCLC亀裂が発生すると予測される時期に対して十分な時間的余裕をもって点検を実施した場合、技術的妥当性があれば初回点検として扱う、又は初回点検時期の設定等に活用することができる。

#### [次回以降の点検実施時期]

##### 1) 亀裂が検出されなかった場合

前回点検で亀裂が発見されなかった場合は、点検時に亀裂が発生していたものと仮定して亀裂進展予測を実施し、亀裂が板厚の75%に至ると予測される期間の1/2の期間を経過後の直近の定期検査を次回点検時期として設定する。ここで、点検時期の設定に当たっては、安全側の評価として、検査精度も考慮し、亀裂深さ0.5mmから75%板厚までの時間を評価することとする。(図2参照)

次回点検にて亀裂が発見されなかった場合には、同じ間隔にて点検を継続する。

現知見では、亀裂の発生及び進展はいずれも軸方向亀裂が周方向亀裂よりも先行すると考えられる。そこで、初回点検時期、及び亀裂が検出されなかった場合の次回点検時期については、軸方向亀裂の評価に基づき検討することとする。

ここで、亀裂進展速度データは、国プロNiSCCにて平均線、平均線+バラツキ $\sigma$ 、平均線+バラツキ $2\sigma$ の3種の速度式が設定されているが、平均線を使用してもよい。

ただし、実際の点検結果が予測結果を上回る場合は、亀裂進展予測を見直す必要がある（付録 G 参照）。

なお、疲労亀裂進展については付録 D-3 に示すように PWSCL に比べて非常に進展量が小さいため、PWSCL 亀裂進展のみで亀裂進展予測を実施しても、問題となることはないと判断される。

## 2) 点検時に亀裂が発見された場合

点検により亀裂が検出された場合は、亀裂の方向、深さ、長さの情報が得られるところから、それに応じた、評価期間中の健全性評価（亀裂進展予測、強度評価）を行い、評価期間内で次回点検時期を設定する。許容基準は、JSME 維持規格におけるオーステナイト系ステンレス鋼配管の許容深さを、同様の延性材料であるニッケル基合金の炉内計装筒にも準用し、板厚の 75% を上限とする。維持規格の欠陥指示を有する機器における継続検査のプログラムの考え方を導入し、亀裂進展により亀裂が許容亀裂深さに至ると予測される評価期間の 1/4 の期間を経過後の直近の定期検査に次回点検時期を設定する。

ここで、亀裂進展速度データは、国プロ NiSCC にて平均線、平均線+バラツキ  $\sigma$ 、平均線+バラツキ  $2\sigma$  の 3 種の速度式が設定されているが、亀裂進展速度データの平均線を使用してよい。これは次回点検時期を亀裂が許容亀裂に至る評価期間の 1/4 の期間と設定することにより、平均線+バラツキ  $2\sigma$  の亀裂進展速度での評価と同等となるため、機器の健全性確保の観点から、十分な保守性を有している。

次々回点検は平均線の速度式による評価期間の 1/2 の期間を経過後の直近の定期検査に設定する。また、3 回目の点検は平均線の速度式による評価期間末期を点検時期として設定する。（図 3 参照）

なお、疲労亀裂進展については付録 D-3 に示すように PWSCL に比べて非常に進展量が小さいため、PWSCL 亀裂進展のみで亀裂進展予測を実施しても、問題となることはないと判断される。

## 3. 点検実施時期の設定例

付録 B-6, D-1 の評価例から PWSCL 亀裂発生評価及び進展評価は以下のとおりとなる。

PWSCL 発生時間：プラント運転から約 19 万時間経過後

0.5mm 深さから板厚の 75% に至るまでの時間：約 40 万時間以上

点検時期設定の考え方から、初回点検は約 19 万時間を目途に実施、初回点検にて亀裂が検出されなかった場合の次回点検は、安全側に初回点検時に 0.5mm の亀裂が発生していたと仮定しても、プラント寿命中に割れに至ることないと推定される。

なお、発生時期や進展時間については、実験結果等より新たな知見が得られた場合

や PWSCC 発生を抑制するピーニングなどの予防保全措置を実施した場合など、技術的に妥当と判断される場合には適宜評価の見直しを行うことができる。

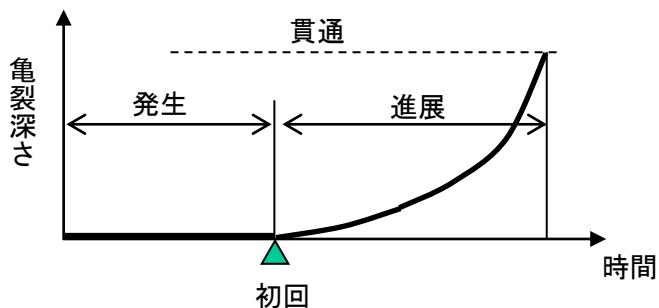


図 1 初回点検時期の考え方

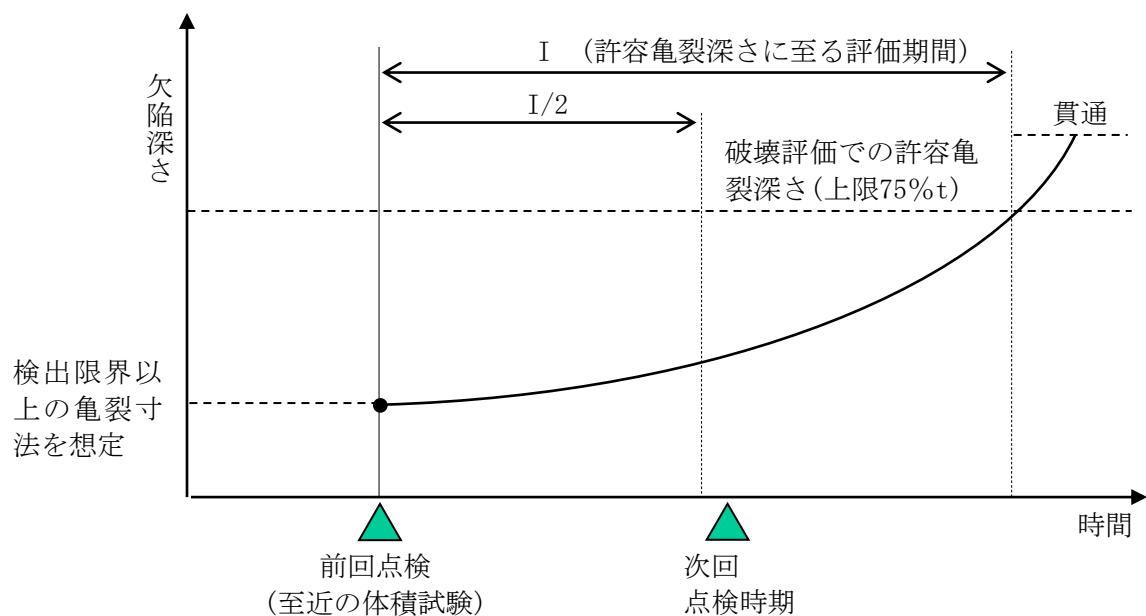


図 2 次回点検時期の考え方  
(前回点検にて亀裂が発見されなかった場合)

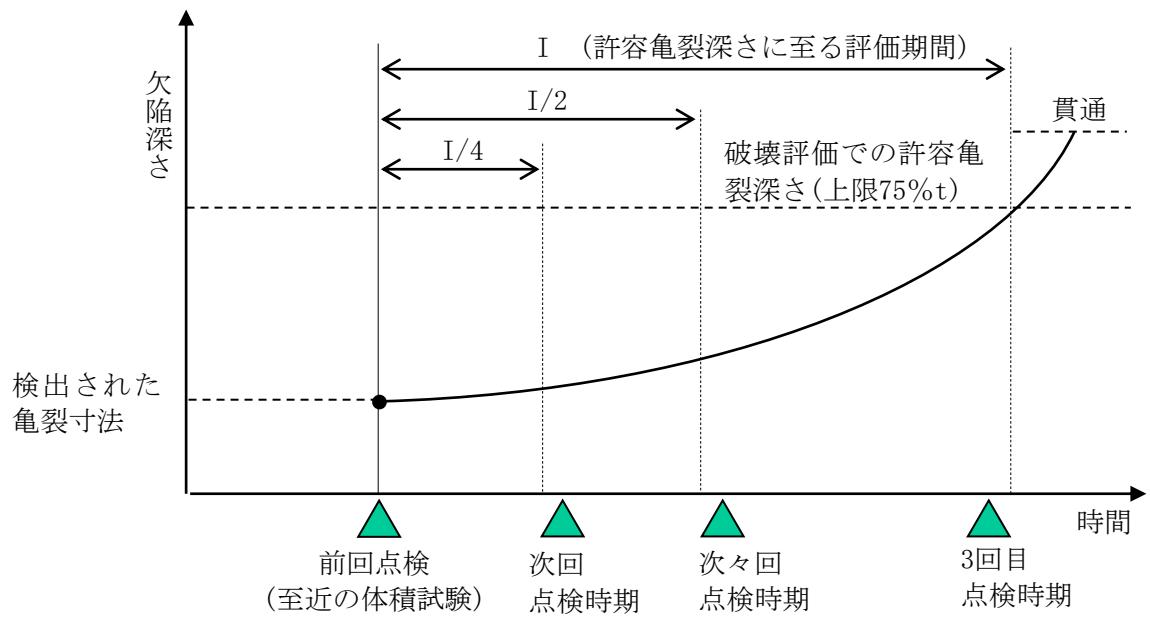


図3 次回点検時期の考え方  
(前回点検にて亀裂が発見された場合)

## 付録 F 原子炉容器炉内計装筒に対する強度評価

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒において検出された亀裂に対する強度評価について、その手法をまとめたものである。

### 2. 強度評価の考え方

非破壊試験により、亀裂が検出された場合、日本機械学会「発電用原子力設備規格維持規格（JSME S NA1）」（以降、JSME 維持規格）におけるオーステナイト系ステンレス鋼管の欠陥評価の考え方を準用するものとする。

その根拠として、原子炉容器炉内計装筒の形状については、配管と同等であるとみなすことができ、材料については、オーステナイト系ステンレス鋼と同じく、韌性の高い600系ニッケル基合金であることから、維持規格におけるオーステナイト系ステンレス鋼管の欠陥評価の考え方を用いることで妥当であると判断した。また、強度評価において用いられる流動応力については、オーステナイト系ステンレス鋼と同じく  $2.7S_m$  ( $S_m$ : 設計応力強さ) とすることで問題ないものと判断した。

また、周方向亀裂の発生を完全には否定できないことから、軸方向亀裂の強度評価（付録F-1）だけでなく、周方向亀裂の強度評価（付録F-2）についても参考として検討する。ただし、実際に周方向亀裂が検出された場合、現状のガイドラインで想定できていない要因により亀裂が発生したと考えられるため、その要因を究明した上で、再評価を行なうものとする。

### 3. 強度評価手法

強度評価手法として、JSME 維持規格における極限荷重評価法を用いる。なお、極限荷重評価法以外の評価手法についてもその妥当性を示すことができる場合には、その評価手法を用いてもよいものとする。

### 4.まとめ

原子炉容器炉内計装筒において検出された亀裂の継続使用期間中に対する強度評価については、JSME 維持規格におけるオーステナイト系ステンレス鋼管の欠陥評価の考え方を準用するものとする。評価の結果、許容基準を満足すれば、その評価期間中は、検出された亀裂があっても構造健全性が確保できる。破壊評価が許容基準を満足しない場合は、評価期間を見直すか、又は、補修・取替えにより構造上健全な状態にする必要がある。

[補足]

J溶接部の下部鏡側に進展した際の破壊評価の例を付録F-3に示す。

## 付録 F-1 原子炉容器炉内計装筒母材の軸方向亀裂に対する強度評価

### 1. はじめに

本付録は、炉内計装筒の板厚の 75%まで進展した軸方向亀裂に対する強度評価結果についてまとめたものである。

### 2. 軸方向亀裂に対する強度評価結果

軸方向亀裂に対する強度評価手法として、JSME 維持規格における極限荷重評価法を用いるものとする。具体的には、PWSQCにより板厚の 75%までの亀裂が進展したときの亀裂深さとそのときの亀裂長さから軸方向亀裂に対する周方向許容応力を算出し、周方向負荷応力と比較することで健全性評価を行なう。

軸方向亀裂を有する管の周方向許容応力  $S_a$  は下式で示される。

$$S_a = \frac{\sigma_f}{(SF)} \left( \frac{t/a - 1}{t/a - 1/M_2} \right)$$

ここで

$\sigma_f$ =流動応力=2.7Sm=442.8MPa (Sm: 設計応力強さ 164MPa)

$M_2 = [1 + (1.16/4Rt) \ell^2]^{-1/2}$

p=内圧

D=管の外径=38.1mm

$\ell$ =亀裂長さ=21.3mm

a=亀裂深さ=8.63mm

R=管平均半径=26.7mm

t=管の厚さ=11.5mm

SF=安全率 3.0 (許容状態 A 及び B)

1.5 (許容状態 C 及び D)

一方、周方向負荷応力は

$$\sigma_h = pD/2t$$

で表される。

ここで内圧 p について、許容状態 A 及び B の場合、負荷の喪失時に最大の内圧 17.76MPa を用いて評価する。許容状態 C 及び D の場合、1 次冷却材ポンプ軸固着事故時に発生する 17.77MPa となるが、安全側に建設時工事認可申請の強度計算書でも使用している運転状態 III, IV(許容状態 C, D 相当)で発生する圧力を包絡する 18.88MPa(安全弁設定値)を用いることとする。

よって、周方向の許容応力及び作用応力は、

許容状態 A 及び B: 許容応力 90.9MPa, 作用応力 29.4MPa

許容状態 C 及び D : 許容応力 181.8MPa , 作用応力 31.3MPa  
となることから、いずれの場合も周方向の負荷応力は許容応力を下回り、健全性評  
価上問題ないことが確認された。

## 付録 F-2 原子炉容器炉内計装筒母材の周方向亀裂に対する強度評価

### 1. はじめに

本付録は、亀裂深さが板厚の 75%まで進展した周方向亀裂に対する強度評価結果についてまとめたものである。

### 2. 周方向亀裂に対する強度評価結果

周方向亀裂に対する強度評価手法として、JSME 維持規格における極限荷重評価法を用いるものとする。具体的には、PWSCC により板厚の 75%までの亀裂が進展したときの亀裂深さとそのときの亀裂長さから周方向亀裂に対する許容曲げ応力を算出し、蓋用管台に作用する曲げ応力と比較することで健全性評価を行なう。

許容曲げ応力  $S_c$  は下式で示される。

$$S_c = \frac{P_b' - P_e}{(SF)} - P_m \left( 1 - \frac{1}{(SF)} \right) = 195.3 \text{ MPa}$$

ここで

$$P_b' = \text{塑性崩壊時の曲げ応力 } P_b' = \frac{2\sigma_f}{\pi} \left( 2 \sin \beta - \frac{a}{t} \sin \theta \right)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \pi - \frac{a}{t} \theta - \pi \frac{P_m}{\sigma_f} \right)$$

$P_m$ =一次一般膜応力

$P_e$ =熱膨張応力

$\theta$ =亀裂角度=79.9° (亀裂長さから算出)

$\sigma_f$ =流動応力=2.7Sm=442.8MPa (Sm: 設計応力強さ 164MPa)

p=内圧

D=管の外径=38.1mm

$\ell$ =亀裂長さ=21.2mm

a=亀裂深さ=8.63mm

t=管の厚さ=11.5mm

SF=安全率 1.39 (許容状態 C 及び D)

一方、地震荷重により発生する曲げ応力  $P_b$  は、

$$P_b = 24.7 \text{ MPa}$$

となり、曲げ応力は許容応力を下回ることから健全性評価上問題ないことが確認された。

## 付録 F-3 原子炉容器炉内計装筒キャップ補修工法での J 溶接部の軸方向 亀裂に対する強度評価

### 1. はじめに

600系ニッケル基合金を使用している原子炉容器炉内計装筒に、PWSCLによる亀裂が発生した場合に、原子炉容器下部外面にキャップを設け新たな耐圧バウンダリを形成するキャップ補修工法を行う。本付録は、このときに、原子炉容器炉内計装筒の軸方向J溶接部の亀裂に対する健全性評価の中で、PWSCLによる亀裂進展後の軸方向亀裂の破壊評価結果についてまとめたものである。

### 2. 軸方向亀裂における評価条件

強度評価は、評価対象とする材料の破壊挙動に対応した手法を用いる必要がある。原子炉容器炉内計装筒のキャップ補修工法では、低合金鋼の下部鏡の強度評価が重要である。管台母材は、亀裂の貫通後は、内外面の圧力差がなくなるため、管台母材の破壊評価は不要と考えられることから、ここでは下部鏡について脆性破壊評価と一次応力限界に対する許容基準を示す。

#### (1) 亀裂形状

軸方向J溶接部の亀裂としてのJ溶接全体とJ溶接範囲の管台の貫通欠陥を初期欠陥として、5年後の形状に対して破壊評価を実施する。

付録D-4で下部鏡への5年間の進展量は、最大で約0.5mmと予想された。また、管台母材の貫通欠陥の上下方向の進展量は最大で約3mmと予想された。そこで、下部鏡はJ溶接境界から一律に0.5mm、管台母材は上下に10mm進展したと仮定した欠陥モデルにおいて、強度評価を検討する。これらは板厚に対する亀裂深さの比 $a/t$ が0.184に対応する。

#### (2) 破壊評価法

下部鏡の低合金鋼が対象であり、以下の式を適用する。

##### a. 応力拡大係数に基づく許容基準

ここでは、脆性破壊を生じる温度域を含む過渡条件が対象となる。平面ひずみ亀裂伝ば停止破壊靱性  $K_{Ia}$  及び静的平面ひずみ破壊靱性  $K_{Ic}$  が JSME 維持規格で定められている最大値の  $220\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  以下となるのは、 $T$ （温度）- $RT_{NDT}$ （材料の関連温度）が 100°C を下回る場合となる。ここで、 $RT_{NDT}$  に設計値の -12°C を使用すると温度  $T$  が 88°C を下回る温度域を有する過渡が対象となる。したがって、許容状態 A, B では起動、停止及び漏えい試験、許容状態 C, D では大破断 LOCA が対象となる。このときの許容基準は以下となる。

a. 許容状態 A 及び B の許容基準

$$K < K_{Ia} / \sqrt{10} \quad (\text{式 2-1})$$

b. 許容状態 C 及び D の許容基準

$$K < K_{Ic} / \sqrt{2} \quad (\text{式 2-2})$$

ただし,  $K$  : 応力拡大係数 (MPa $\sqrt{m}$ )

$K_{Ia}$  : 平面ひずみ亀裂伝ば停止破壊革性 (MPa $\sqrt{m}$ )

$K_{Ic}$  : 静的平面ひずみ破壊革性 (MPa $\sqrt{m}$ )

b. 一次応力限界に対する許容基準

一次応力の限界荷重に対する許容基準を満たしておく必要がある。評価対象となるのは鏡の断面になり、内圧により鏡の断面に発生する一次応力については曲げ応力を生じないので、一次局部膜応力  $P_L$ のみが評価対象となる。したがって、以下の許容基準になる。

[供用状態 C]

$$P_L \leq 1.5 \text{ MIN}[S_y, (2/3)S_u] \quad (\text{式 2-3})$$

[供用状態 D]

$$P_L \leq 1.5 \cdot (2/3)S_u \quad (\text{式 2-4})$$

ただし,  $P_L$  : 一次局部膜応力 (MPa)

$S_y$  : 降伏応力 (MPa)

$S_u$  : 引張強度 (MPa)

(3) 応力拡大係数 (K値) の算出

下部鏡、管台に亀裂を設定したFEM 解析を実施して、低合金鋼の範囲の応力拡大係数の最大値を算出した（付録I参照）。

許容破壊革性値は、JSME維持規格に記載の2パスビード法による落重試験により関連温度を求めた場合の次式を用いて、過渡の温度に対応した許容値を算出した。

$$\begin{aligned} K_{Ia} &= 29.43 + 13.68 \cdot \exp(0.0261(T - RT_{NDT})) \\ K_{Ic} &= 32.91 + 43.40 \cdot \exp(0.0343(T - RT_{NDT})) \end{aligned} \quad (\text{式 2-5})$$

3. 強度評価結果

a. 応力拡大係数に基づく評価

0° 断面において、亀裂深さを板厚の 1/4 としたときの破壊評価結果を図 3-1 に示す。使用温度が低い過渡が含まれる供用状態 A 及び B の起動、停止、漏えい試験及びの供用状態 C 及び D の大破断 LOCA の過渡条件において許容値を満足する。

5 年後の進展欠陥形状は  $a/t=0.184$  に対応するので許容値を満足する  $a/t=0.25$

(=1/4) のときより欠陥形状は小さい。したがって、下部鏡において、脆性破壊が発生する可能性は低いと考えられる。

### b. 一次局部応力評価結果

鏡のリガメント部に対する  $P_L$  は、内圧による発生応力に対して、管台穴及び想定亀裂に対する面積の欠損分を考慮して割増すことで評価できる。

穴がないとした場合の周方向応力  $\sigma_\theta$  は次式で求められる。

$$\sigma_\theta = P_{CD} \cdot R_s / (2T_s) \quad (\text{式 2-6})$$

ただし、 $R_s$ ：鏡の内径（2037.5mm）

$T_s$ ：鏡の最小板厚（126mm）

$P_{CD}$ ：内圧（供用状態 C, D に対して各事象を包絡する内圧は  
18.88MPa）

図 3-2 より、穴部及び亀裂進展後の亀裂の面積欠損分、上記周方向応力が増加することになるので、これらの欠損部を考慮した場合の周方向応力  $\sigma_\theta'$  は次式で求められる。

$$\sigma_\theta' = \frac{P_{CD} \cdot R_s (A + B + C1 + C2)}{2T_s A} = 193 \quad (\text{MPa}) \quad (\text{式 2-7})$$

ただし  $A$ ,  $B$ ,  $C1$ ,  $C2$  は図 3-2 を参照のこと。

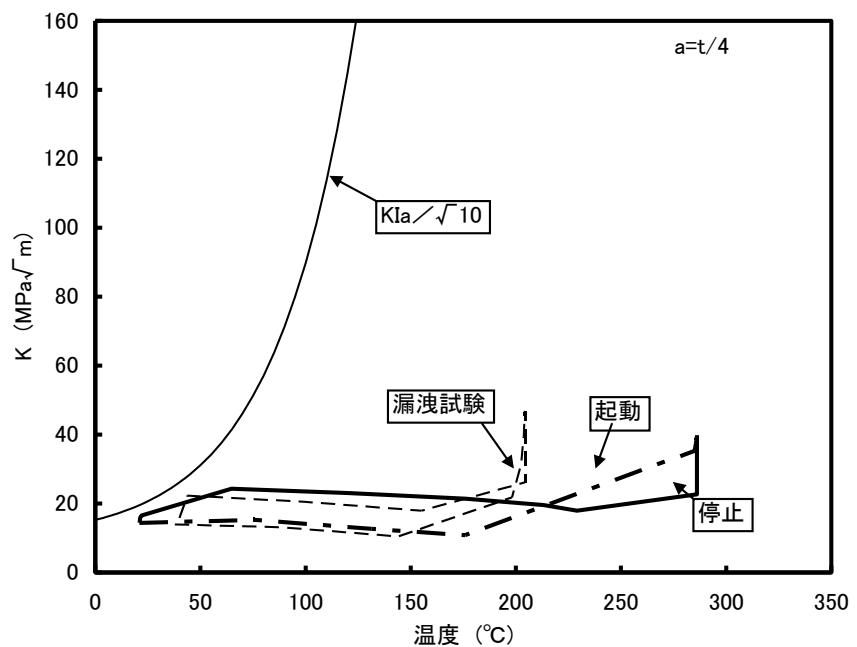
ここで、当該部の主応力  $\sigma_1$  と  $\sigma_2$  は球形のため周方向応力  $\sigma_\theta'$  と半径方向応力  $\sigma_r$  となるので、応力強さは両者の差で求められる。したがって、 $P_L$  は次式で得られる。

$$P_L = \sigma_\theta' - \sigma_r = \sigma_\theta' - (-P_{CD}/2) = 203 < 445 \quad (\text{MPa}) \quad (\text{式 2-8})$$

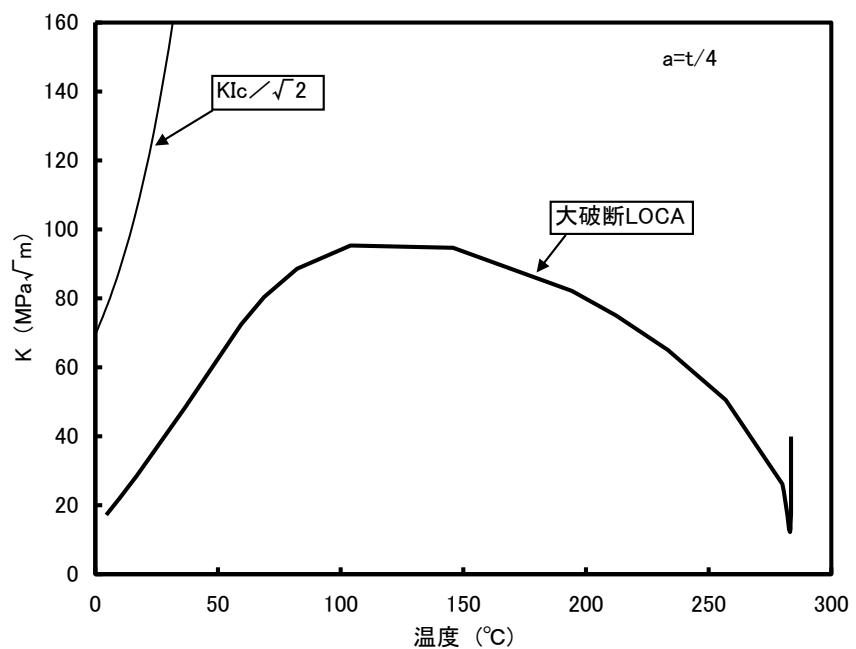
以上より、亀裂進展後の面積欠損も考慮した一次応力強さは許容値を満足することを確認した。

### （参考文献）

- [1] 発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1)
- [2] 発電用原子力設備規格 建設・設計規格 (JSME S NC1)

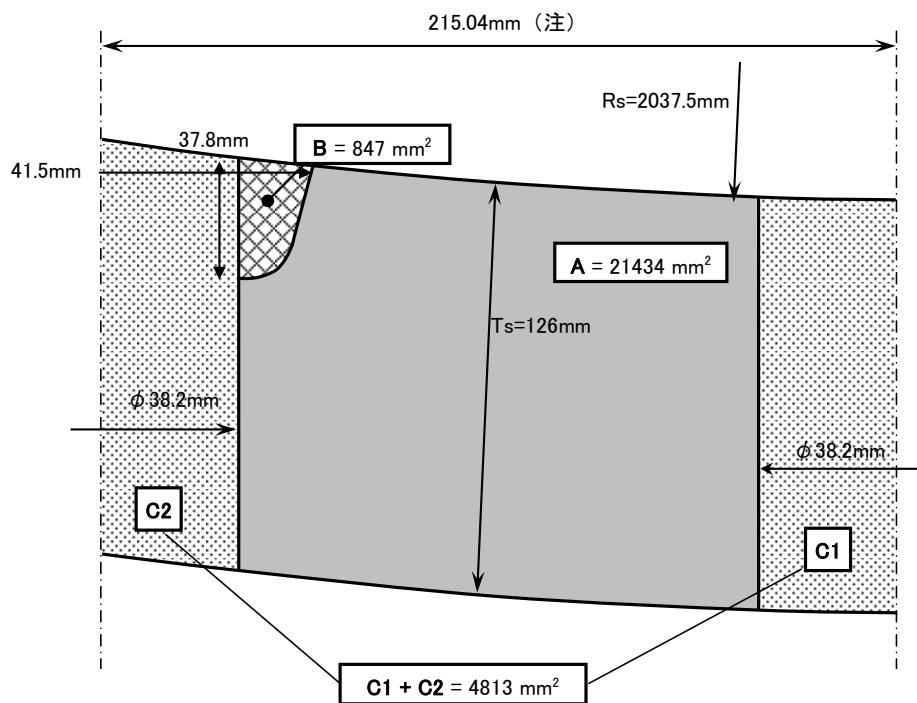


(a) 供用状態 A 及び B



(b) 供用状態 C 及び D

図 3-1 0° 断面での脆性破壊評価 ( $a/t=0.25$ )



(記号の説明) A : 鏡のリガメントの面積  $=126 \times (215.04 - 38.2) - B = 21434$   
 B : 亀裂進展後の亀裂部の面積  $= 37.8 \times (41.5 - 19.1) = 847$   
 C<sub>1</sub>+C<sub>2</sub> : 管台穴部の面積  $= 38.2 \times 126 = 4813$ , (注) 管台間の最短距離

図 3-2 一次局部応力の評価モデル

## 付録 G 点検結果に基づく点検時期の見直し

### 1. はじめに

本付録は、亀裂進展予測結果に比べ、亀裂が早く進展したりすることが点検により確認された場合の、点検時期の考え方についてまとめたものである。

### 2. 亀裂進展予測評価と実機事象が異なる場合の対応

亀裂進展予測結果と、実機における点検結果が一致しない場合は、予測評価における評価条件と実機条件が異なることが要因となると考えられる。具体的には、評価条件においては、材料特性等によるバラツキなどが考えられる。

次回点検の結果、亀裂進展予測よりも早く進展していることが確認された場合には、次回点検時の亀裂寸法を基準に亀裂が許容亀裂深さに至ると予測される期間を再評価し、次々回の点検時期を見直す（図1参照）。ただし、亀裂進展速度データは国プロ NiSCC にて平均線、平均線+バラツキ  $\sigma$ 、平均線+バラツキ  $2\sigma$  の3種の速度式が設定されているが、再評価を行なう際には、点検間隔を評価期間の  $1/4$  とすることで保守性を確保されていることから、平均線を使用してよい。

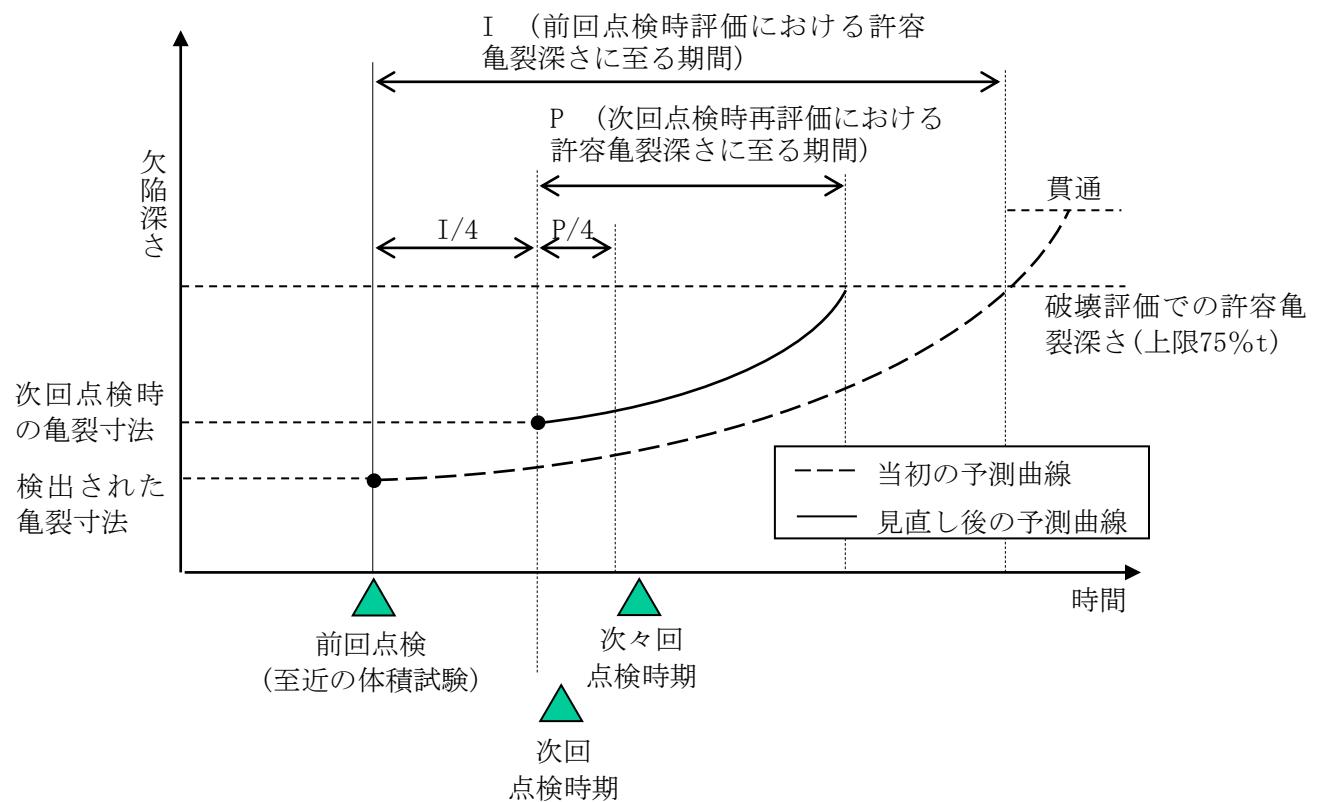


図1 点検結果に基づく亀裂進展予測の修正

## 付録 H 原子炉容器炉内計装筒の保全技術

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒のPWSCCによる亀裂の発生を抑制するための保全技術、及びPWSCCによる亀裂からの漏えいを抑制するための保全技術の例をまとめたものである。

### 2. 保全技術

#### 2.1 PWSCCによる亀裂発生に対する予防保全技術

##### (1) ウオータージェットピーニング (WJP)

ウォータージェットピーニングは、原子炉容器炉内計装筒内面の高応力部位に対してキャビテーション気泡消滅の際に発生する衝撃圧により施工対象面に塑性ひずみを付与することにより残留応力場を圧縮応力場に改善することにより、PWSCCによる亀裂の発生を抑制するものである(図1)。ウォータージェットピーニングの施工に当たっては、施工対象面に割れなどの有害な欠陥がないことを確認しておく必要がある。

ウォータージェットピーニングについては、予防保全工法ガイドライン[ピーニング]に基づき、実機施工を行ってよい。

ウォータージェットピーニングの施工により、PWSCCの発生因子の一つである応力が低減されることにより、施工以降の個別点検は不要となる。

##### (2) レーザピーニング (LP)

レーザピーニングは、材料内面の高応力部位に対してパルス発振のレーザを照射し、アブレーション作用による高圧プラズマの衝撃圧力により施工対象面に塑性ひずみを付与することにより残留応力場を圧縮応力場に改善することにより、PWSCCによる亀裂の発生を抑制するものである(図2)。レーザピーニングの施工に当たっては、施工対象面に割れなどの有害な欠陥がないことを確認しておく必要がある。

レーザピーニングについては、予防保全工法ガイドライン[ピーニング]に基づき、実機施工を行うことができる。

レーザピーニングの施工により、PWSCCの発生因子の一つである応力が低減されることにより、施工以降の個別点検は不要となる。

#### 2.2 PWSCCによる亀裂からの漏えいに対する予防保全技術

##### (1) 炉内計装筒取替え工法

原子炉容器炉内計装筒内面にPWSCCによる亀裂が発生した場合に、J溶接部の一部を含む炉内計装筒母材全体を、耐PWSCC性に優れた690系ニッケル基合金製の新規構造に取替える工法である(図3)。原子炉容器炉内計装筒取替え工法により、炉内計装筒母材

は耐 PWSOC 性に優れた 690 系ニッケル基合金となるため、施工以降の個別点検は不要となる。

## (2) キャップ補修工法

原子炉容器炉内計装筒に PWSOC による亀裂が発生した場合に、原子炉容器下部外面にキャップを設け、新たな耐圧バウンダリを形成する工法である。

キャップ上端は既設 600 系ニッケル基合金肉盛座に溶接することで、現地での溶接後熱処理を省略でき、またキャップ下端は炉内計装筒セーフエンド（ステンレス鋼）に溶接する。既存の 600 系ニッケル基合金肉盛座に 690 系ニッケル基合金を肉盛溶接することで、キャップ取付け部の耐 PWSOC 性を確保している。（図 4）

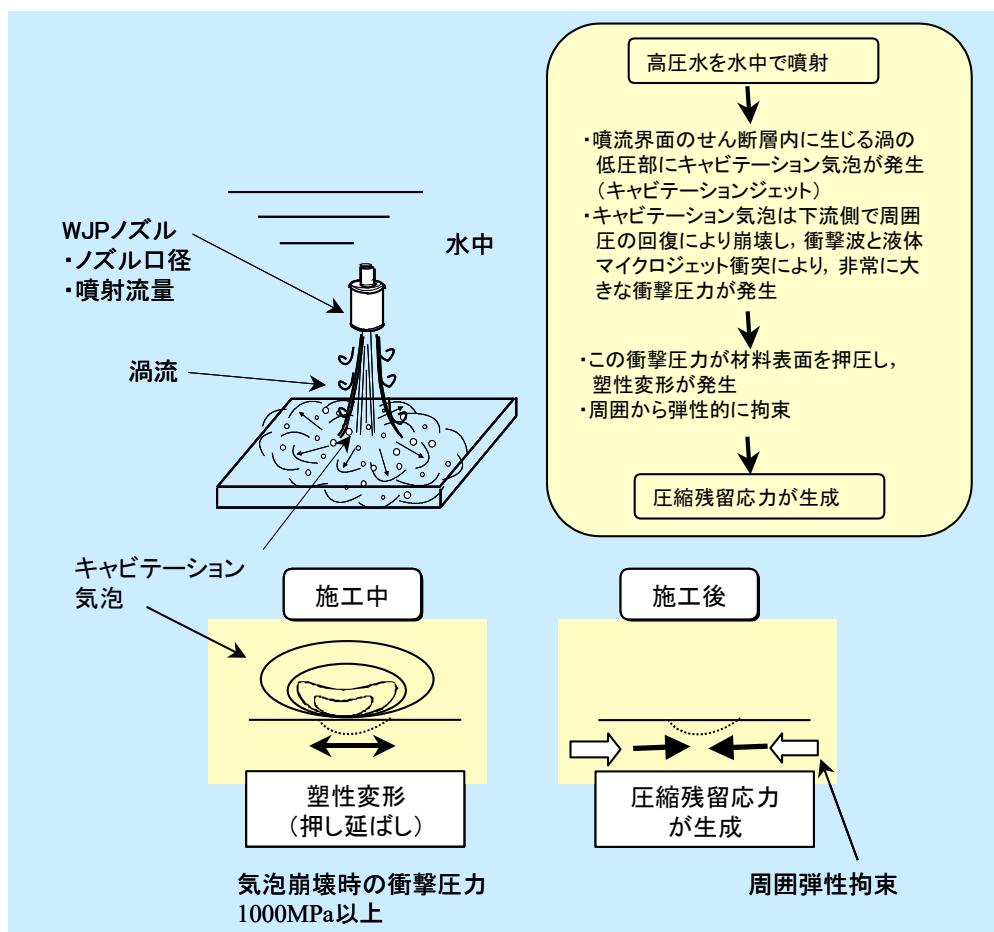


図1 ウォータージェットピーニング概念

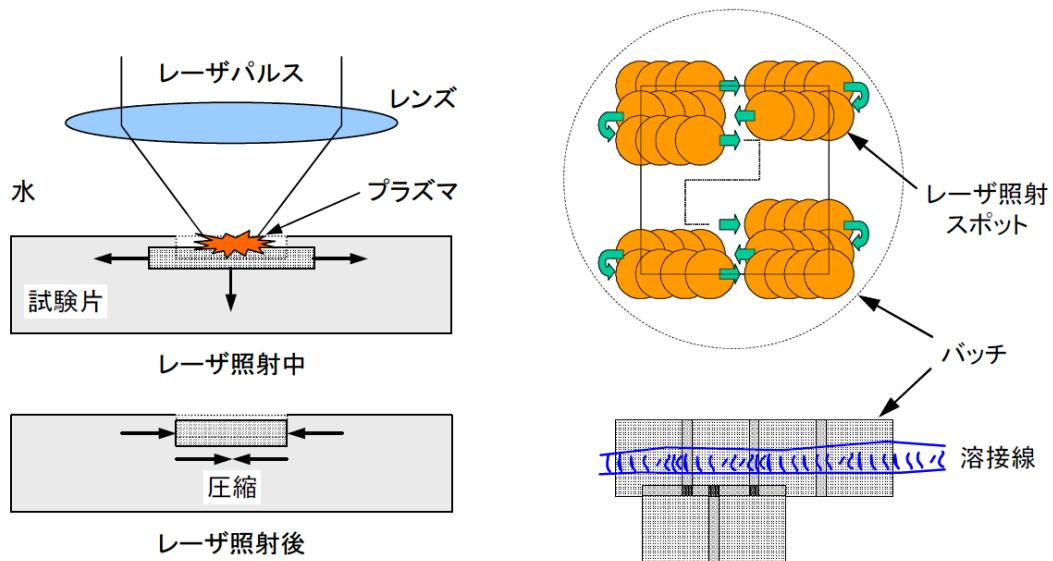


図2 レーザピーニング概念

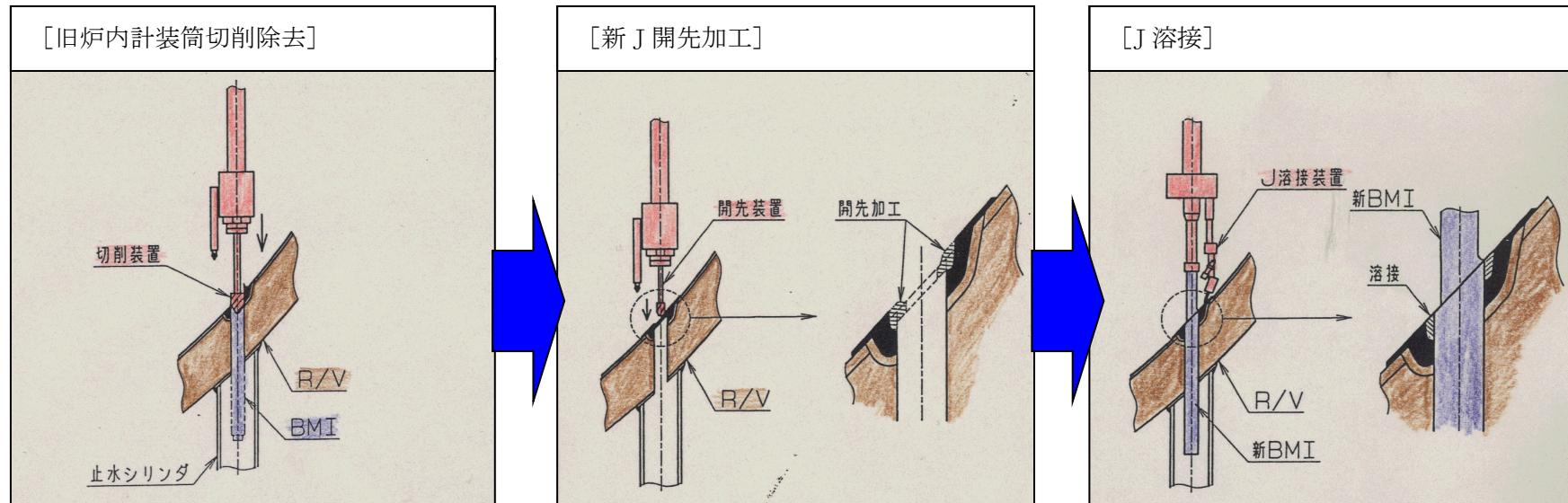


図3 炉内計装筒取替え工法の概要

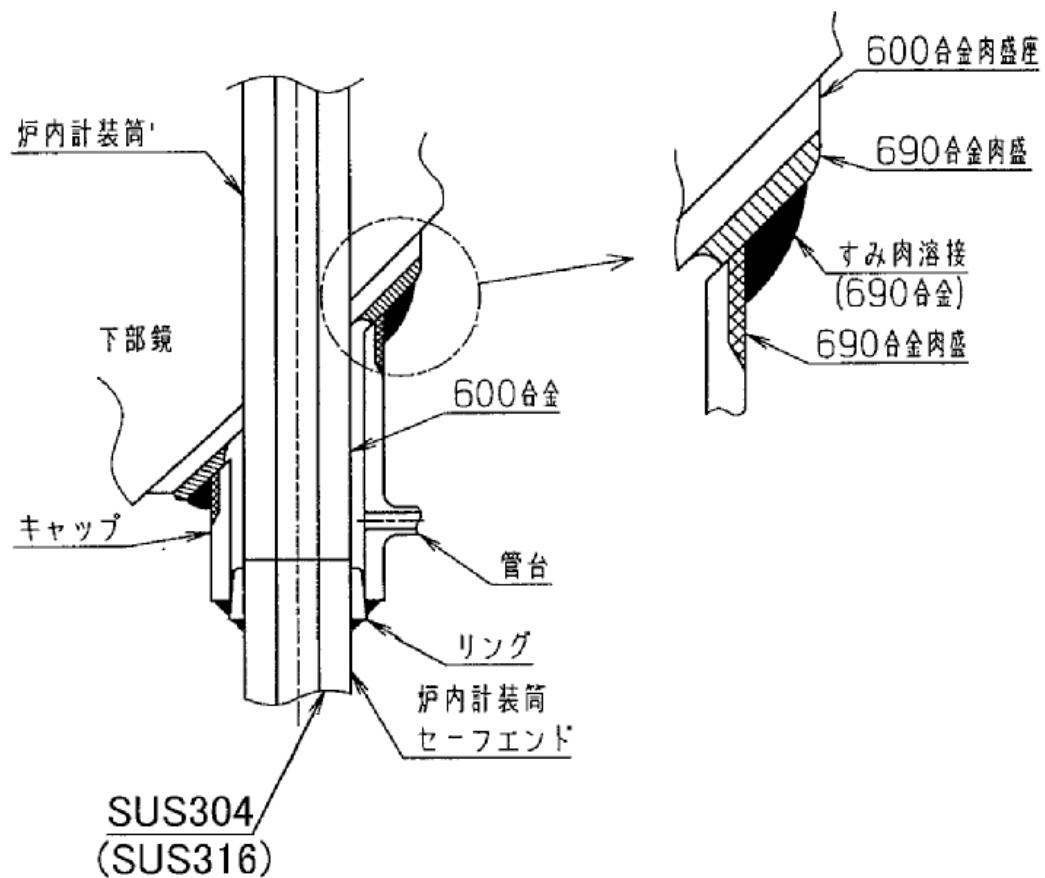


図4 キャップ補修工法外略図

## 付録 I 原子炉容器炉内計装筒貫通部の欠陥評価のための 有限要素法解析を用いた応力拡大係数算出手法

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒貫通部の J 溶接部の欠陥評価のために、有限要素法解析を用いて、軸方向欠陥の応力拡大係数を算出する方法を示すものである。炉内計装筒貫通部は、複雑な形状であるため、現状の JSME 維持規格のモデル化方法や評価方法が直接的に適用できない。本付録は、簡便な手法で保守的な結果を得るため、モデル化法も含めた解析法の具体的推奨法を規定するものである。算出した応力拡大係数は、構造健全性評価における亀裂進展評価、原子炉容器の破壊評価に用いる。

### 2. 用語

J 溶接部	: 原子炉容器と炉内計装筒の溶接部
軸方向欠陥	: 炉内計装筒の円筒座標系における軸方向の欠陥
閉曲線積分経路	: J 積分を計算する際の閉曲線積分の閉曲線の通る線

### 3. 適用範囲

#### 3. 1 対象欠陥

対象は、図 3-1 に示す原子炉容器炉内計装筒貫通部の J 溶接部及び炉内計装筒の軸方向欠陥とする。

この欠陥の方向は、炉内計装筒の中心軸を座標軸とする円筒座標系の軸方向に限定する（解説 3-1）。

#### 3. 2 対象評価手法

本付録で規定する応力拡大係数 K の算出手法は、有限要素法解析コードの破壊力学パラメータの J 積分算出機能を用いる方法を指す（解説 3-2）。

#### 3. 3 想定破壊モード

本付録は、下部鏡の疲労亀裂進展評価及び破壊評価、炉内計装筒及び J 溶接部の疲労亀裂進展評価に適用する。なお、キャップ工法適用時は、炉内計装筒及び J 溶接部は圧力バウンダリでなくなることから、下部鏡の疲労亀裂進展を考慮した健全性評価が対象となる。また、封止溶接時は、炉内計装筒は PWR 環境より隔離され、PWSCL 亀裂進展は考慮不要であることから、下部鏡及び炉内計装筒の疲労亀裂進展を考慮した健全性評価が対象となる。

#### 4. 応力拡大係数算出の基本的流れ

有限要素法解析を用いて、対象欠陥の応力拡大係数Kを算出するときの基本的な流れを図4-1に示す。主な手順は以下のとおりである。

- (1) 解析に必要な条件データを整備する。
  - a. 評価部の選定
  - b. 構成部材の形状寸法
  - c. 荷重条件
  - d. 使用温度に対応した材料定数
- (2) 検出された欠陥について、その形状、位置及び寸法をモデル化する。
- (3) 有限要素モデルの作成を行う。モデル作成には以下のものが含まれる。
  - a. 解析コード
  - b. 解析範囲形状
  - c. 要素タイプ
  - d. J積分の閉曲線積分経路
  - e. 欠陥形状を考慮した要素分割
  - f. 境界条件（荷重、拘束条件）
  - g. 材料データ
- (4) 有限要素解析を実行する。
- (5) 応力拡大係数Kを算出する。
- (6) 有限要素法解析コードによるJ積分の算出結果の妥当性を確認し、不適切であれば、(3)に戻り要素分割等を見直す

詳細は5章に示す。

#### 5. 応力拡大係数算出方法

##### 5.1 解析条件の整備

###### a. 評価部位の選定

原子炉容器炉内計装筒貫通部は、原子炉容器下部鏡、炉内計装筒、J溶接・バタリング、クラッド等から構成される。J溶接及びバタリング部は、原子炉容器下部鏡の球形の底部に、鉛直方向に炉内計装筒を配して、原子炉容器下部鏡と炉内計装筒を溶接したものである。このため、J溶接及びバタリング部は原子炉容器の底部位置によって形状が異なる。

原子炉容器の底部位置は、原子炉容器の最底部を中心として、中央より最も遠い側を最外周と呼ぶ。また、炉内計装筒周りの欠陥設定断面は、図3-1に示すように、原子炉容器の底部球面の中心軸を通る断面上の中央側を $0^\circ$ 、外周側を $180^\circ$ 断面とする。

最外周の炉内計装筒の0°断面の欠陥の $\Delta K_{max}$ ,  $K_{max}$ は、他の位置の欠陥の $\Delta K_{max}$ ,  $K_{max}$ に対して、同等又は大きくなり代表性がある（解説5-1）。

#### b. 構成部材の形状寸法

原子炉容器下部鏡、炉内計装筒、J溶接及びバタリング部、クラッド等の構成部材の径、厚さの形状寸法を準備する。

炉内計装筒の長さは、評価部の原子炉容器の底部位置によって異なるが、炉内計装筒端部が欠陥部の応力分布に影響を及ぼさないよう、J溶接部の欠陥上下端から十分な長さ（例えば、欠陥部分から3D（Dは炉内計装筒の外径）以上）をとる。

なお、補修工法ガイドライン[封止溶接工法]（JANT1-VIP-01 第1版）（以下、封止溶接）等の補修工法を適用し、評価において補修に用いられた部材の熱伝達の影響等を考慮する必要がある場合は、形状寸法を準備する。なお、付録Hのキャップ補修工法を適用する場合、キャップはJ溶接部の応力拡大係数の評価にその存在を考慮する必要が無い（解説5-2）。

#### c. 荷重条件

評価する過渡の圧力、温度と熱伝達率の時刻歴、機械荷重、地震荷重、残留応力分布を準備する（解説5-3）。

ここで考慮する出力時や供用状態A～Dに対する圧力及び温度（熱）過渡、機械荷重、地震荷重、溶接残留応力は、適切な荷重を考慮する（例えば、JSME発電用原子力設備規格 維持規格<sup>[1]</sup>添付E-7 欠陥評価に用いる荷重）。亀裂進展評価、破壊評価それぞれにおける荷重とその組合せも同様である。

#### d. 使用温度に対応した材料定数

熱過渡条件の使用温度に対応した各部材の材料定数を準備する。

各部材の材料より、評価する条件の温度に応じた材料定数を、JSME発電用原子力設備規格 設計・建設規格<sup>[2]</sup>、発電用原子力設備規格 材料規格<sup>[3]</sup>やASME Sec. II<sup>[4]</sup>又は出典が明らかな材料定数を設定する。

圧力荷重による評価時には、縦弾性係数、ポアソン比が必要となる。熱荷重評価時には、伝熱解析のために、熱伝導率、熱拡散率（又は比熱と密度）、熱応力解析のために熱膨張係数、縦弾性係数、ポアソン比を準備する。このときに温度依存性を考慮する代わりに、高温側温度一定の材料定数としてもよい（解説5-4）。

### 5.2 欠陥のモデル化

検出された欠陥は適切に形状、位置及び寸法をモデル化する。

複数の欠陥が検出された場合は、それぞれの形状、位置及び寸法に対して、適切な欠陥の合体条件（例えば、JSME維持規格添付E-1 欠陥形状のモデル化）を用いて合体させ、その後に欠陥形状の位置及び寸法を定める。なお、欠陥寸法は、実測非破壊試験等

から推定される欠陥形状を包絡して定めること。

本付録では、単体の欠陥又は合体後の欠陥を包絡する保守的な初期欠陥として、図 5-1 に示すように、J 溶接部、バターリング部全体、及び炉内計装筒は J 溶接部の最深部範囲の欠陥とする。

また、欠陥を原子炉容器の底部球面の中心軸を通る断面（0~180° 断面）上に想定すると、保守的である（解説 5-1, 5-5）。

### 5.3 解析モデルの作成

#### a. 解析コード

本付録では、J 積分の算出機能を有する有限要素の構造解析コードを用いた場合を対象としているので、この算出機能を有する信頼できる解析コードを使用すること。

#### b. 解析範囲形状

5.1 b で準備した形状寸法と 5.2 で設定した欠陥のモデル化を考慮して、解析範囲を設定する。

有限要素解析範囲は、全体的な応力・ひずみ分布挙動を把握でき、解析範囲や拘束条件が欠陥に対して影響を及ぼさないように十分に大きい範囲を設定する。当該部については、図 5-2 の例に示すように、原子炉容器、炉内計装筒、J 溶接部、バターリング部を含むようにするとよい。封止溶接の場合は、熱伝達の影響等を考慮する必要があるので、解析範囲に含める。また、解析範囲形状による影響及び欠陥形状の対称性によって、1/2 の部分モデルとしてもよい。

#### c. 要素タイプ

要素タイプは 3 次元ソリッドの 8 節点六面体要素、20 節点六面体要素のいずれを用いてもよい。その際、解析コードとその機能に対応した要素タイプとすること（解説 5-6）。

#### d. J 積分の閉曲線積分経路

J 積分の計算には、欠陥の先端を囲む積分経路が必要である（解説 5-7）。この設定方法は解析コードによるが、多数の経路を指定して、その中から積分値のばらつきの少ない経路を複数選択し平均値とする。一般に 5 ~ 7 の経路を指定して、精度が悪いとされる亀裂先端に近い 1 番目、2 番目の経路を除いた 3 経路以上の積分値が数% の誤差範囲にあれば、確からしい値と言える。所定の精度が得られない場合、要素分割が粗い可能性があるため、細かい要素分割を検討する。

#### e. 欠陥形状を考慮した要素分割

J 積分を算出する欠陥前縁周囲については、十分に細かく要素分割を行う必要が

ある。本評価対象の保守的な初期欠陥では、少なくとも欠陥前縁は 2mm 長さの要素とする（解説 5-8）。評価対象とする過渡条件で亀裂面内に急激な応力分布が発生したときや J 積分の経路のばらつきが大きいときには、更に細かい要素分割にする方がよい。

J 積分の閉曲線内部の要素は均質な寸法の要素が望ましいので、アスペクト比は極端に大きくならないように、欠陥前縁の欠陥局所座標系の 3 方向に、少なくとも閉曲線積分の経路数だけ層状に分割する。

欠陥前縁以外の箇所も、変形挙動を適切に模擬できるように要素分割を行う。J 溶接部は原子炉容器の厚さの 10~20% の小さい範囲ではあるが、欠陥前縁の閉曲線積分範囲以外の亀裂面も、荷重による変形を模擬できる必要がある。また、原子炉容器も同様の考え方のもと、適切な要素分割を行う。

#### f. 境界条件（荷重、拘束条件）

5. 1 c で準備した過渡の圧力、温度と熱伝達率の時刻歴を原子炉容器内面、炉内計装筒内面に負荷する。外面及びキャップの温度（熱）過渡条件は、保温材の有無等を考慮して適切に設定する。

圧力については、単位圧力に対する応力拡大係数 K を算出しておいて、過渡の圧力の履歴に応じて比例倍としてもよい。なお、亀裂面にも圧力を負荷すること。

弾性解析の重ね合わせの原理に則って、残留応力は亀裂面に表面力として負荷すればよい。（解説 5-9）。

また、欠陥から十分に離れた位置において、適切な拘束条件を設定する。

#### g. 材料データ

各部材に、5. 1 d で準備した材料定数を設定する。

### 5. 4 解析の実行

作成したモデルで有限要素の弾性解析を実行する。温度（熱）過渡のある場合は熱伝導解析後、熱応力解析を実施する。

### 5. 5 応力拡大係数 K の算出

有限要素解析で算出した J 積分より応力拡大係数 K を算出する。

5. 3 d で示したように、有限要素解析の近似誤差より閉曲線積分の経路依存性が発生するため、複数の閉曲線積分の経路を設定し、ばらつきの少ない経路間の平均をとるのが望ましい。

また、J 積分では、欠陥前縁の端部、フェライト鋼とクラッドとの材料境界点では、経路間のばらつきが大きくなってしまって、3 経路以上の計算値が数% 以内に収まらないことがある。この場合、要素分割を更に細かくして解析を実施するか、経路間のばらつきの小

さい前縁において J 積分から換算した応力拡大係数 K を用いて、ばらつきの大きい前縁の応力拡大係数 K を内挿又は外挿するとよい。

J 積分は、次式で応力拡大係数 K に換算する。

$$K = \sqrt{E' J}$$

$$\text{ただし, } E' = E / (1 - \nu^2)$$

E : 代表部材の綫弾性係数,  $\nu$  : ポアソン比

なお、本来、J 積分は 3 種の破壊モードの応力拡大係数 K の重ね合わせであるので、上記の J 積分の換算は 1 つの応力拡大係数 K で代表させた値になっている。したがって、開口の変形状態を確認したときに、想定する破壊モードと異なる場合は、変位法や応力法で 3 種の開口モードの応力拡大係数 K のオーダを算出して、対象以外の破壊モードの影響を確認する方がよい。

また、J 積分は正の値となるので、圧縮場においても正になることから、平均応力がある場合の疲労亀裂進展評価時に応力拡大係数の変動幅  $\Delta K$  が過少に評価されることを避けるべく応力拡大係数 K の換算には注意が必要である。応力拡大係数 K は荷重に対し線形に比例するので、過渡条件での応力拡大係数 K は、残留応力を考慮した後、過渡の内圧、温度（熱）過渡条件を全て設定した解析で応力拡大係数 K を求めてもよいし、残留応力、単位内圧、温度（熱）過渡それぞれで応力拡大係数 K を算出した後に加算してもよい。

## 5.6 妥当性確認

有限要素解析で算出した応力拡大係数 K について、端部以外の欠陥前縁において、有限要素解析で算出した J 積分の経路間のばらつきが大きかったり、欠陥前縁に沿った応力拡大係数 K の分布に不連続性がある場合、類似形状での同等の荷重で評価した応力拡大係数 K や同等の面積の簡易式の応力拡大係数 K と比較して、大きくオーダが異なる場合は、算出した応力拡大係数 K の信頼性は低く適切と判断すべきではない。これらの場合は、有限要素モデル作成から再検討する必要がある。

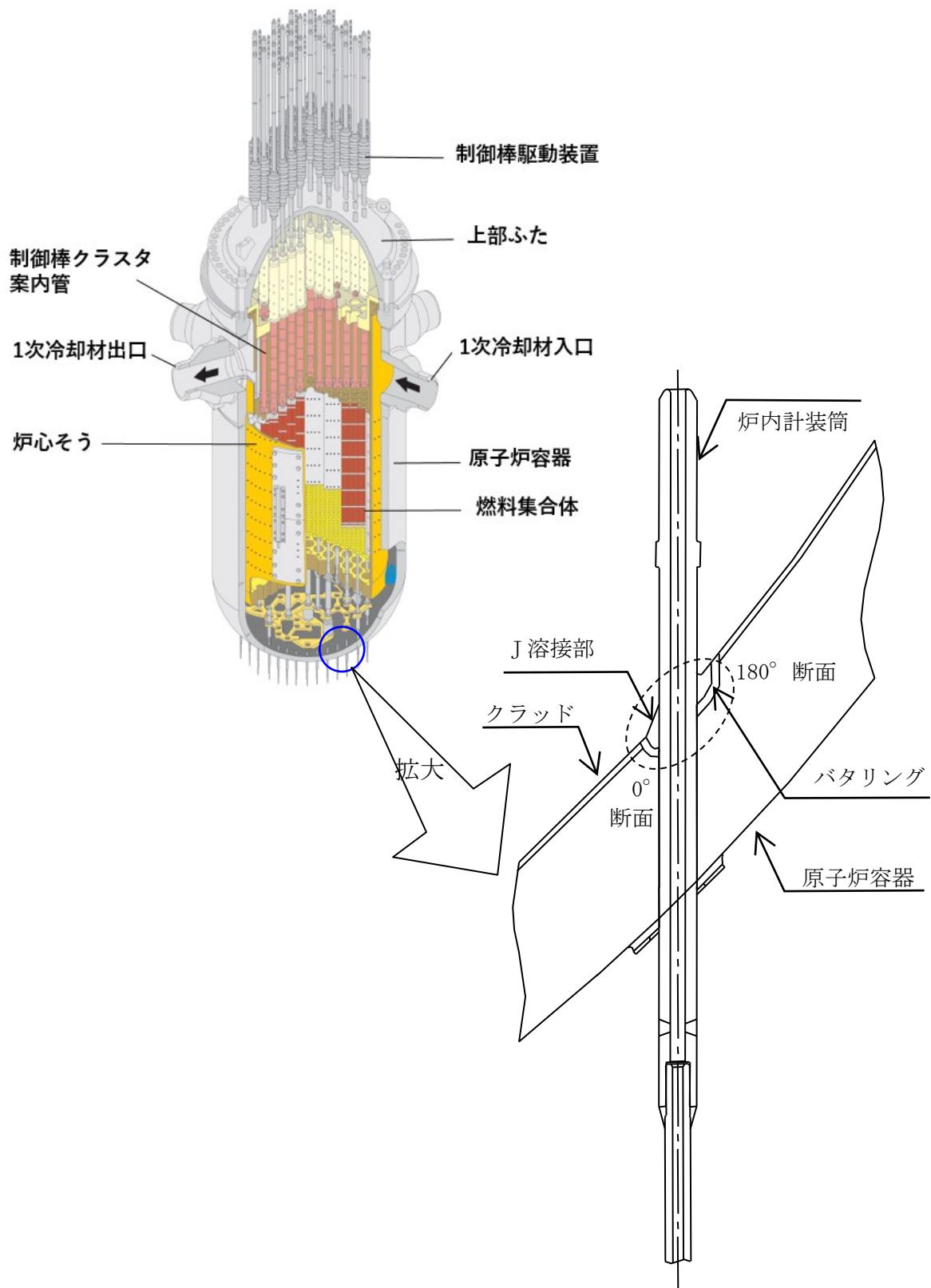


図 3-1 原子炉容器炉内計装筒評価対象構造の例

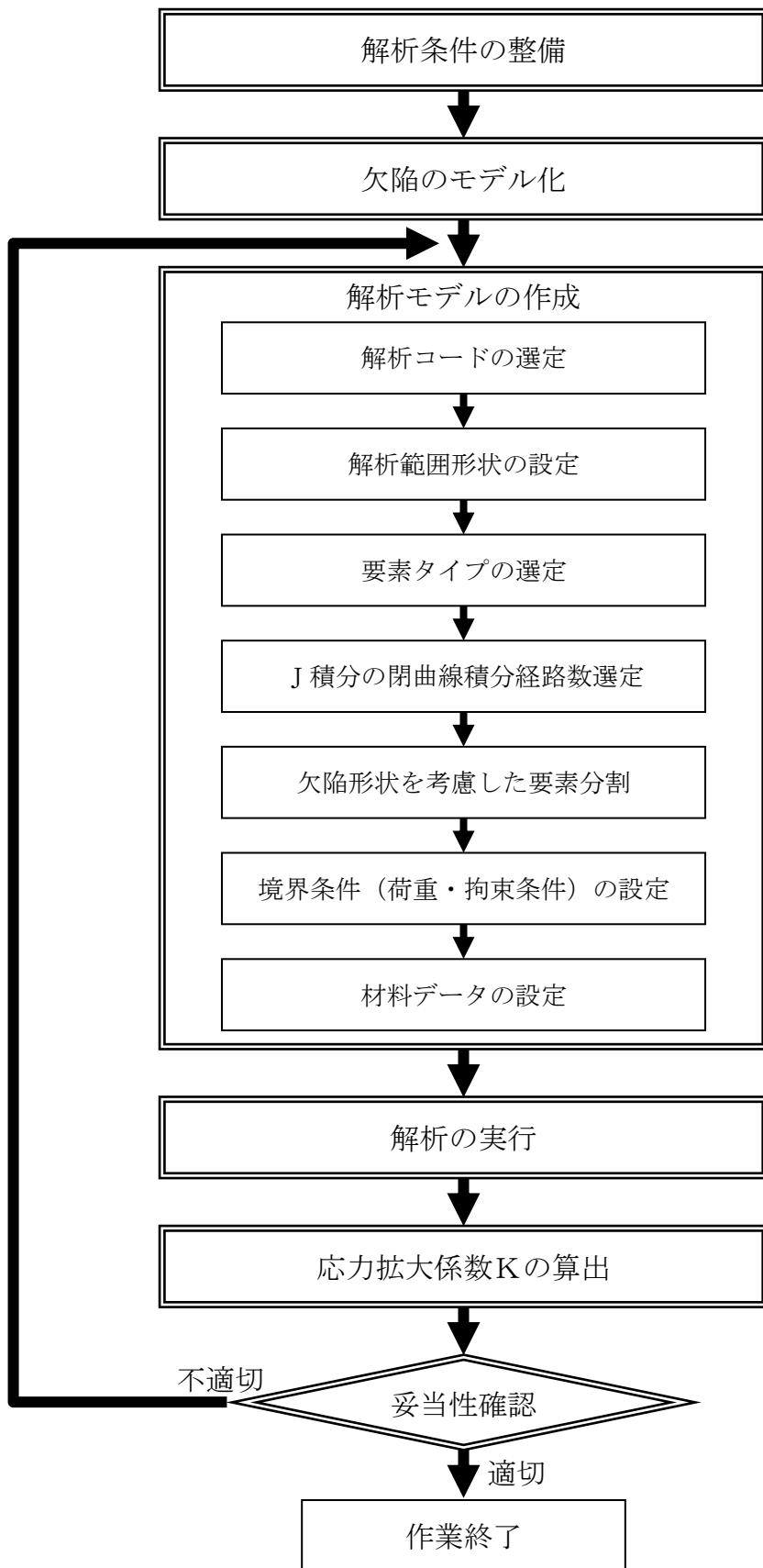


図 4-1 評価の流れ

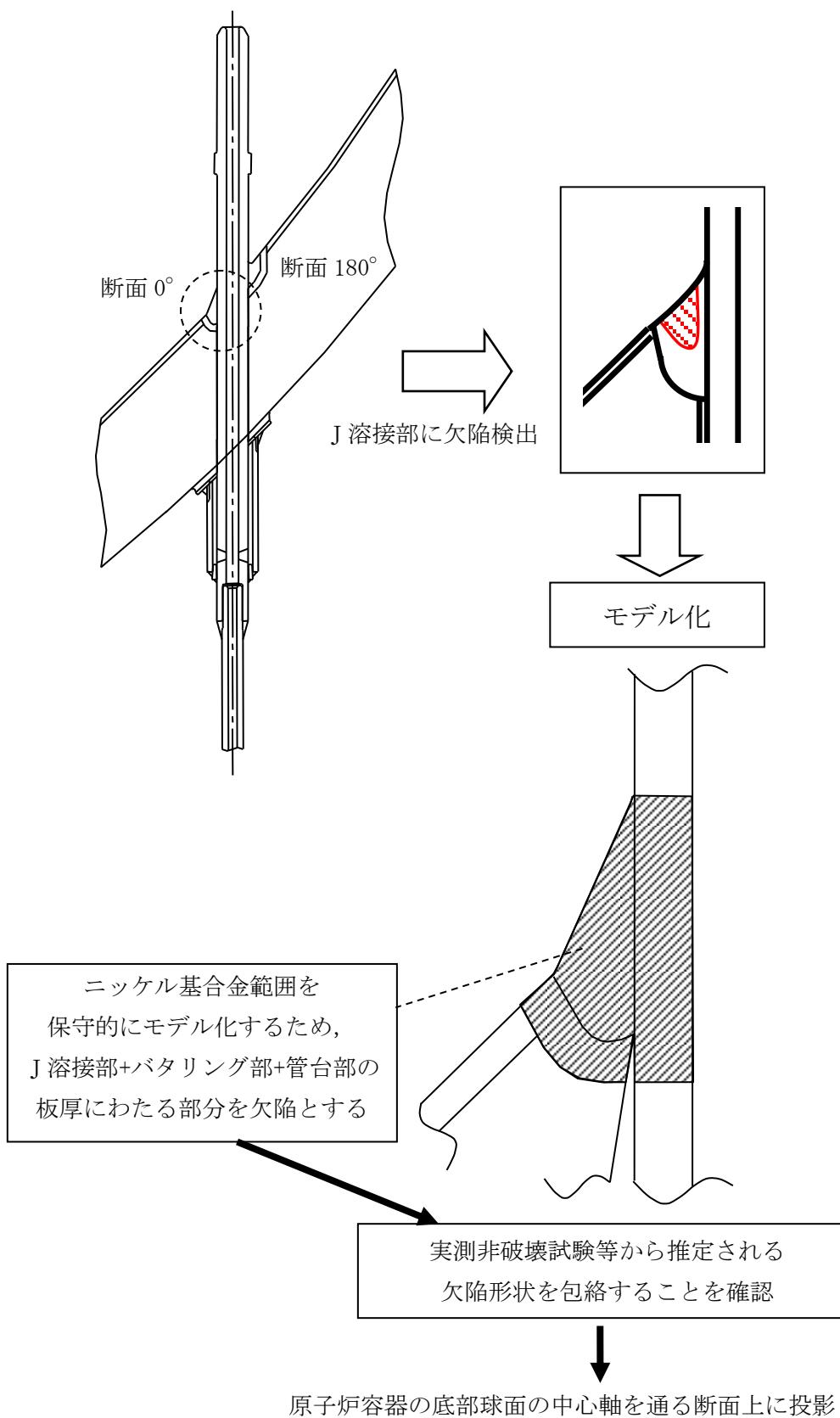


図 5-1 軸方向欠陥のモデル化の例

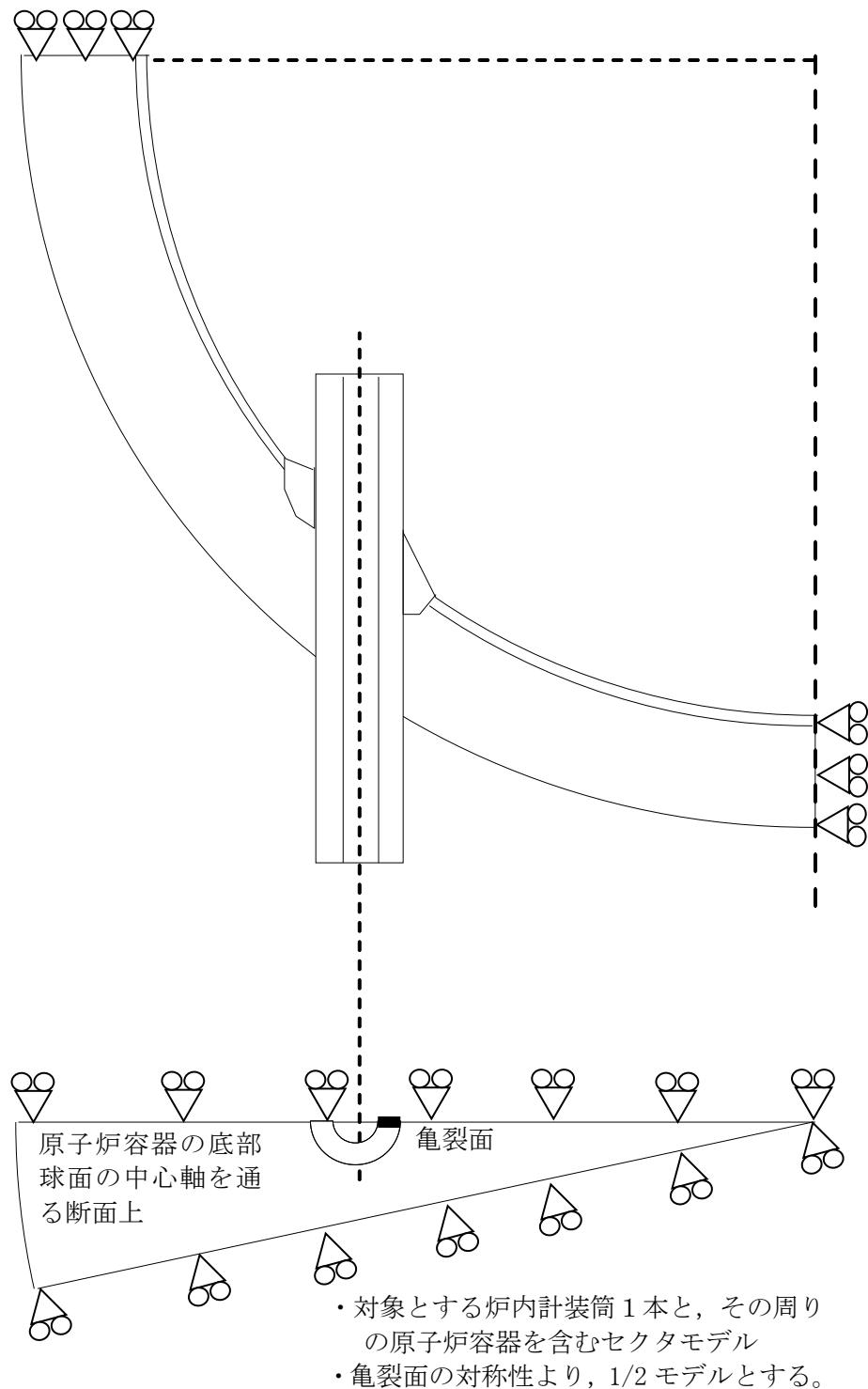


図 5-2 解析範囲形状の例

解 說

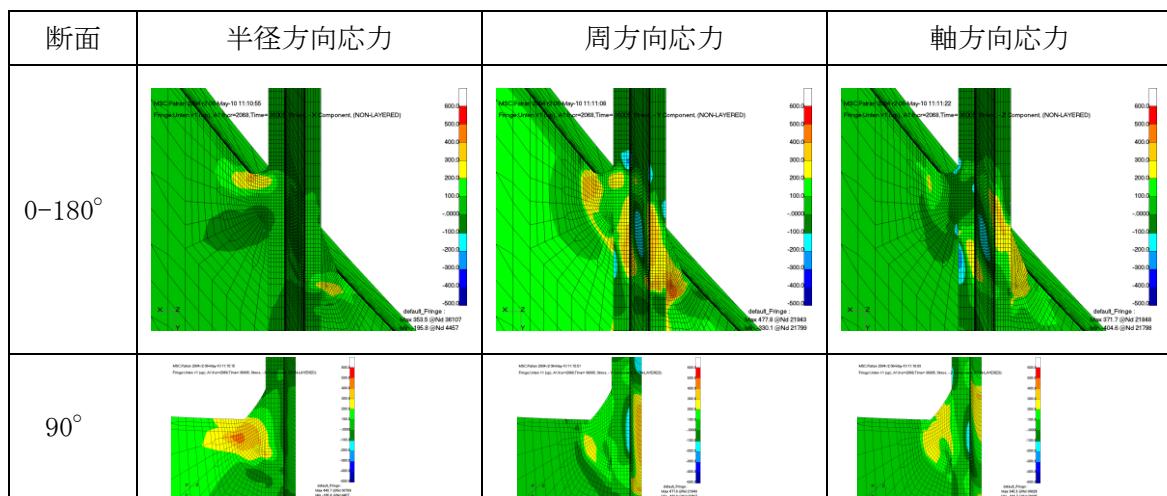
### (解説 3-1) 対象を軸方向欠陥に限定

600系ニッケル基合金製の原子炉容器炉内計装筒及びJ溶接及びバタリング部にPWSCCが発生した場合、当該部に対して健全性評価が求められる。

本付録の対象は炉内計装筒の中心軸を座標軸とする円筒座標系の軸方向欠陥に限定した。これは、溶接残留応力に運転時の圧力、熱による応力を重畠させたとき、周方向応力成分が最も大きく、応力腐食割れによる亀裂が軸方向に進展しやすいことによる。

溶接残留応力を含む100%定常運転時の応力分布において、解説図3-1の最外周の炉内計装筒の応力分布(応力レベル、形状倍率も全て同一)に示すように、J溶接部及びその近傍0-180°断面谷側での周方向応力が他の応力より大きい。90°断面の半径方向応力も大きいが、その最大値は0°と180°断面の最大値と比較して小さく、バタリングのノッチ部では圧縮応力になることから、亀裂の進展への寄与が大きい応力は0-180°断面の周方向応力と考えられる。これらは解説図5-1-1において、半径方向応力に対する周方向欠陥(炉内計装筒周りの全周欠陥)の $\Delta K_{max}$ 、 $K_{max}$ とも、0°や180°断面の軸方向欠陥のものより小さいことからも確認できる。また、これまで海外で指示のあった欠陥は軸方向であった。

なお、応力拡大係数の計算にあたって用いる手法は欠陥の方向によらず同一であることから、モデルの妥当性が示せれば、周方向欠陥にも適用可能なものである。



解説図3-1 最外周部の溶接残留応力を含む100%定常運転時の応力分布<sup>[5]</sup>

### (解説 3-2) 評価手法について

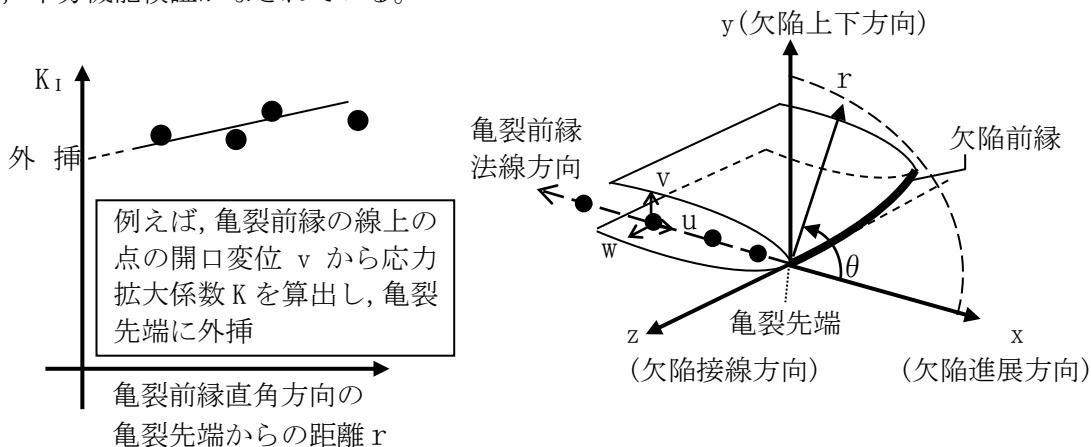
有限要素解析により応力拡大係数Kを算出する方法には、その解析コードの機能として準備されている応力拡大係数KやJ積分の算出機能を使用する方法と、応力解析結果から得られる変位や応力情報から算出する方法がある。

亀裂先端の変位や応力から算出する方法は、J積分の算出より更に詳細な要素分割が必要である。また、応力拡大係数Kの算出にあたっては、算出したい亀裂先端において、解

説図 3-2 に示すように、亀裂前縁の直角方向の線上の多数の点の応力又は変位を抽出する必要があり、煩雑であるため、多数の亀裂前縁の点の応力拡大係数  $K$  の算出には向かない。

また、最近では直接、応力拡大係数  $K$  を算出可能なコードもある。欠陥の進展方向より破壊モードごとの応力拡大係数  $K$  を算出可能であるが、異材部近傍では積分経路によるばらつきが大きく、当該部については  $J$  積分を推奨する。

$J$  積分を用いる方法は簡便であり、旧来の解析コードには 20 年以上前から組込まれており、十分機能検証がなされている。

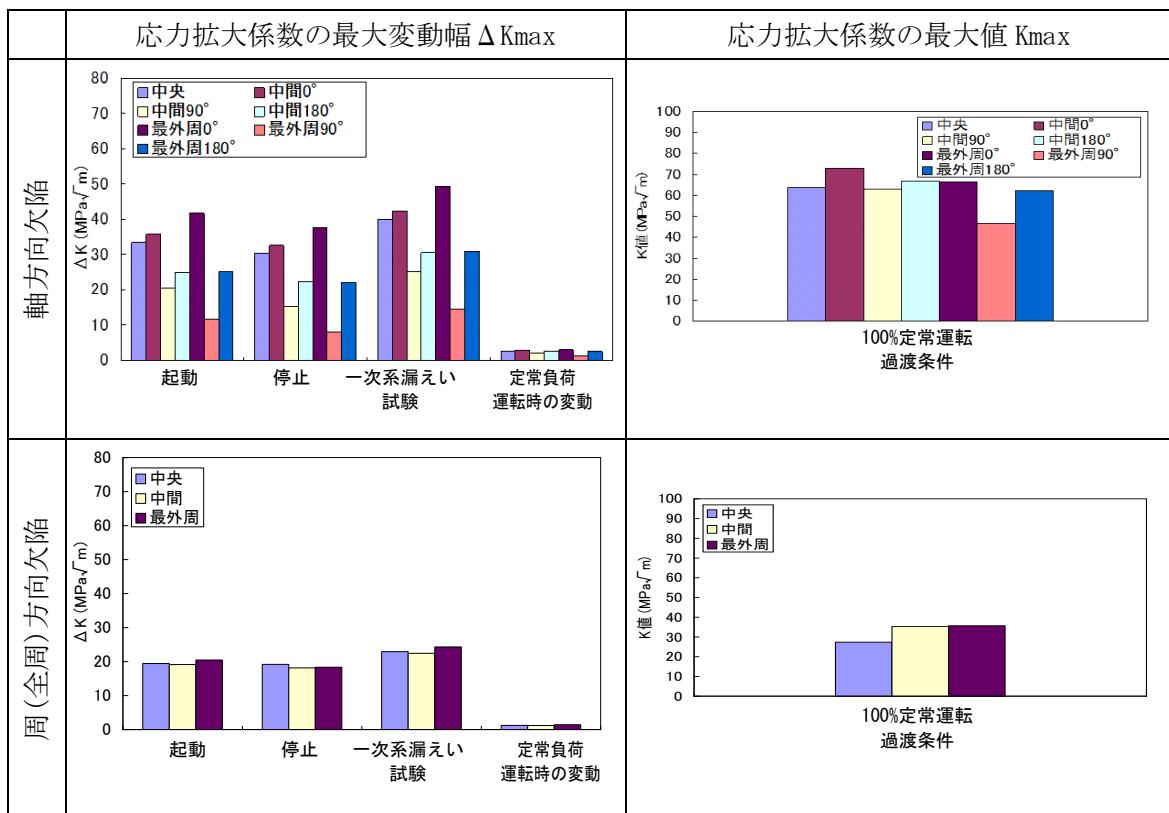


解説図 3-2 変位法による応力拡大係数  $K$  の算出

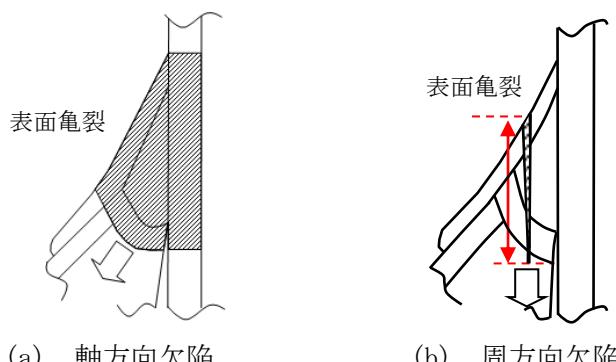
#### (解説 5-1) 炉内計装筒位置と断面の代表性

文献[5]では、封止溶接の時に下部鏡の中央位置にある炉内計装筒（中央位置）、中央位置と最外周位置の中間に位置する炉内計装筒（中間位置）、及び最外周位置の炉内計装筒（最外周位置）の 3 タイプの解析モデルを作成し、炉内計装筒の位置による下部鏡の応力拡大係数への影響を確認した。代表過渡に対して疲労亀裂進展評価に用いる応力拡大係数の最大変動幅  $\Delta K_{max}$ 、原子炉容器に対する脆性破壊評価に用いる応力拡大係数の最大  $K_{max}$  を比較した結果を解説図 5-1 に示す。この評価に用いた欠陥イメージを解説図 5-1-2 に示す。

これより、最外周の炉内計装筒 J 溶接部の  $0^\circ$  断面の欠陥の  $\Delta K_{max}$ 、 $K_{max}$  は、他の位置の欠陥の  $\Delta K_{max}$ 、 $K_{max}$  に対して、同等又は大きくなり代表性がある。また、炉内計装筒の位置を固定した時の炉内計装筒周りの J 溶接部  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  断面では、 $0^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $90^\circ$  断面の順に、 $\Delta K_{max}$ 、 $K_{max}$  とも大きく、原子炉容器の底部球面の中心軸を通る断面上に欠陥を投影した方が保守的な評価となることが確認できる。



解説図 5-1-1 炉内計装筒の位置による下部鏡での応力拡大係数の変動幅  $\Delta K$ , 応力拡大係数Kの最大値<sup>[5]</sup>



解説図 5-1-2 応力拡大係数の評価に用いた欠陥

(解説 5-2)

本付録は、炉内計装筒を下部鏡に取り付けるための溶接部に注目するが、付録 H のキャップ補修工法に用いられるキャップは、板厚 200mm を越える原子炉容器下部鏡の外面に取り付けられることから、キャップ自体の有無によって熱容量の変化や拘束による J 溶接部近傍への影響はないものと判断できる。

### (解説 5-3)

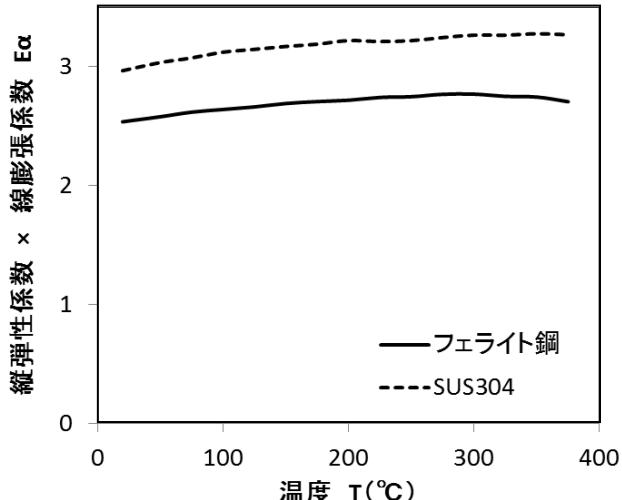
残留応力分布については、代表となる最外周の炉内計装筒を対象とした解析結果が報告されており<sup>[6]</sup>、モックアップによりその精度は確認されている<sup>[7]</sup>ことから適用可能である。

### (解説 5-4) 材料定数の温度の代表性

縦弾性係数  $E$ 、線膨張係数  $\alpha$ 、温度差  $\Delta T$  としたとき、熱応力は  $E\alpha \Delta T$  に比例して発生する。したがって、材料定数  $E\alpha$  が大きいほど、大きな応力となり、応力拡大係数は応力に比例するので、応力拡大係数も大きくなる。

設計・建設規格<sup>[2]</sup>に記載の縦弾性係数、線膨張係数を用いて、解説図 5-4 に温度に対応した  $E\alpha$  の例を示す。フェライト鋼は 2.6、SUS304 は 3.2 でほぼ一定であるが、いずれも 300°C までは単調増加する。300°C と 375°Cとの差は、フェライト鋼で 3%以下、SUS304 で 1%以下である。

よって、軽水炉の過渡範囲においては、温度依存性の材料定数の代わりに、高温の材料定数一定に設定することで代表できる。



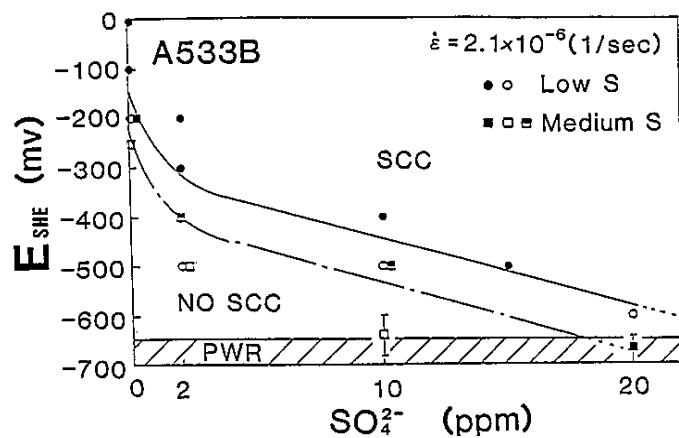
解説図 5-4 温度に依存した  $E\alpha$  の例

### (解説 5-5) ニッケル基合金範囲のみのモデル化

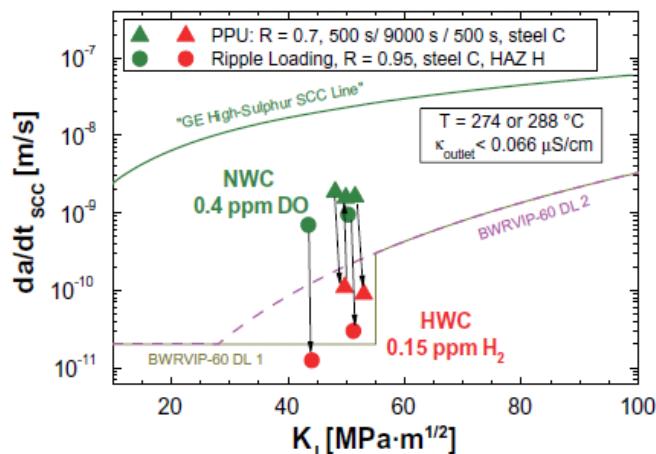
モデル化に際しては、亀裂はニッケル基合金の範囲のみとし、低合金鋼には PWSCC が進展しないとした。

これは、PWR 環境の電位 (ESHE<-650mv) 領域において通常の不純物濃度条件であれば低合金鋼に PWSCC は発生しないこと (解説図 5-5-1)<sup>[8]</sup>、PWR 環境より溶存酸素濃度が高い BWR 環境で normal water chemistry (NWC) から hydrogen water chemistry (HWC) へ水質の変更、すなわち環境中の溶存酸素濃度の低下、溶存水素濃度の上昇に伴い、低合金鋼の PWSCC 進展速度は著しく低下すること (解説図 5-5-2)<sup>[9]</sup>による。

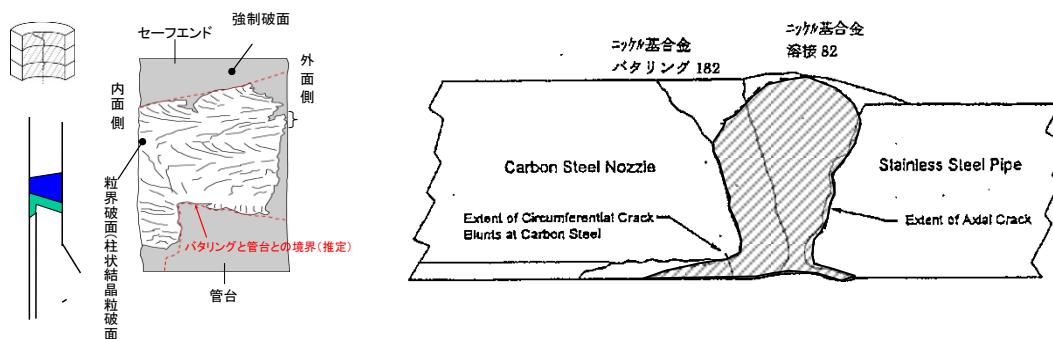
また、これまでの運転経験でも PWSCC の低合金鋼への進展は確認されていない (解説図 5-5-3)<sup>[10] [11]</sup>。



解説図 5-5-1 PWR 水質条件で試験片に強制的に電位を与えて実施した SSRT 試験結果



解説図 5-5-2 溶存酸素濃度及び溶存水素濃度の変化に伴う低合金鋼の PWSCC 進展速度の低下



(加圧器管台溶接部の例)

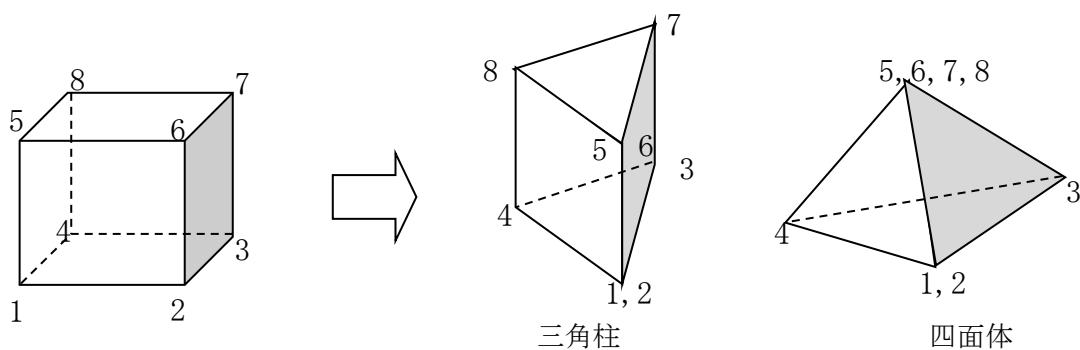
(原子炉容器管台溶接部の例)

解説図 5-5-3 PWSCC が低合金鋼に進展していない状況 (PWR)

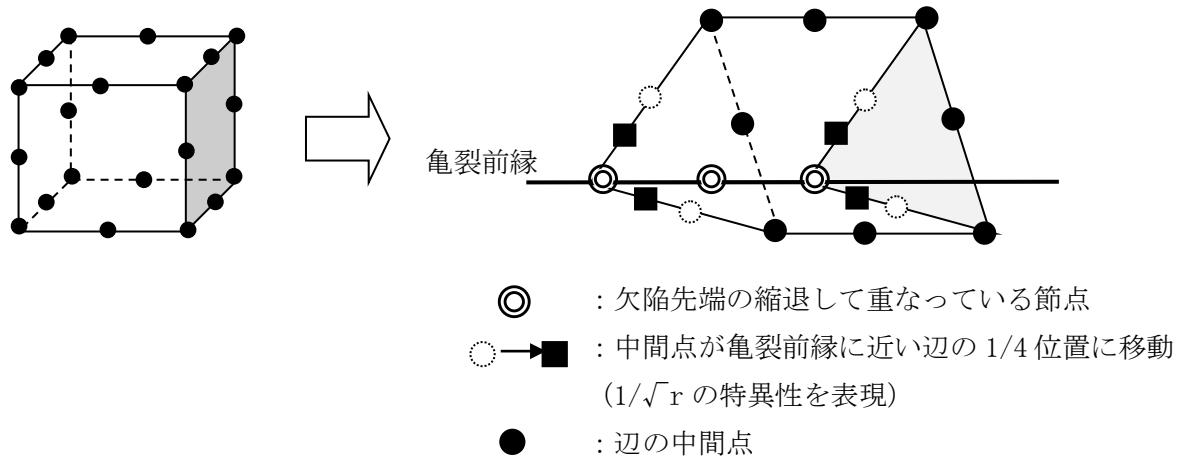
(解説 5-6) Abaqus で応力拡大係数の計算に用いる要素タイプ

Abaqus (Ver. 6.8)<sup>[12]</sup> の J 積分計算には、閉曲線範囲に四面体、三角柱要素を用いることはできず、六面体要素のみ使用可能である。この場合、要素の四面体、三角柱形状は六面体要素の縮退で表す。六面体要素の縮退とは、解説図 5-6-1 に示すように、要素を構成する節点番号を二重に設定するもので、六面体要素を用いて四面体、五面体（三角柱、ピラミッド）形状を表すことができる。この四面体、五面体の形状内部は、六面体要素と同様の補間関数（形状関数）を用いる。

また、Abaqus の J 積分計算時の高次要素は、解説図 5-6-2 に示すような、欠陥先端の特異性を考慮して、欠陥先端を縮退させ、欠陥先端を共有する辺の中間節点を辺の 1/4 位置に持ってくる 1/4 点要素を対象としており、通常の中間位置にある高次要素での精度は確認されていない（サポートの回答）。したがって、必ずしも高次要素の精度が良いとは限らないので注意が必要である。なお、閉曲線積分の場合は十分に細かく要素分割を行えば、低次要素で十分であることが多い。



解説図 5-6-1 六面体要素の縮退の例



解説図 5-6-2 1/4 点要素

### (解説 5-7) 閉曲線積分経路

閉曲線積分による J 積分算出には、欠陥前縁を構成する節点番号の組合せ、閉曲線積分経路数、解析コードによっては欠陥進展方向（欠陥面）の入力が必要である。

J 積分は、欠陥の一方の表面から反対側の表面まで欠陥前縁を囲む閉曲線（積分経路）経路上で、欠陥が進むことによるエネルギーの変化量を計算するもので、同じ欠陥先端周りであれば、理論的にはどのような経路をとっても積分値が変わらない経路不変性が示されている。しかし、実際には解析の近似誤差のために完全に一致した値にはならない。

J 積分算出のために設定される閉曲線（積分経路）は、解説図 5-7 で示すように、欠陥の一方の表面から反対側の表面まで欠陥前縁を囲む要素層で構成され、欠陥前縁を囲む閉曲線（積分経路）で、欠陥が進むことによるエネルギーの変化量を計算するものである。Abaqus では、仮想亀裂進展法によって J 積分が計算されているが、精度を向上させるために、経路積分を閉曲線内の領域積分に置き換えて J 積分が算出される。通常、解説図 5-7 のように、経路は亀裂先端に近い方から 1 番目、2 番目と番号が設定される。一般には、亀裂先端に近い 1 番目、2 番目の経路は精度が悪いとされているので、ばらつきで精度を確認するためには少なくとも 5 経路以上の設定がよく、このうちの 3 経路以上のはらつきが小さいことが望ましい。

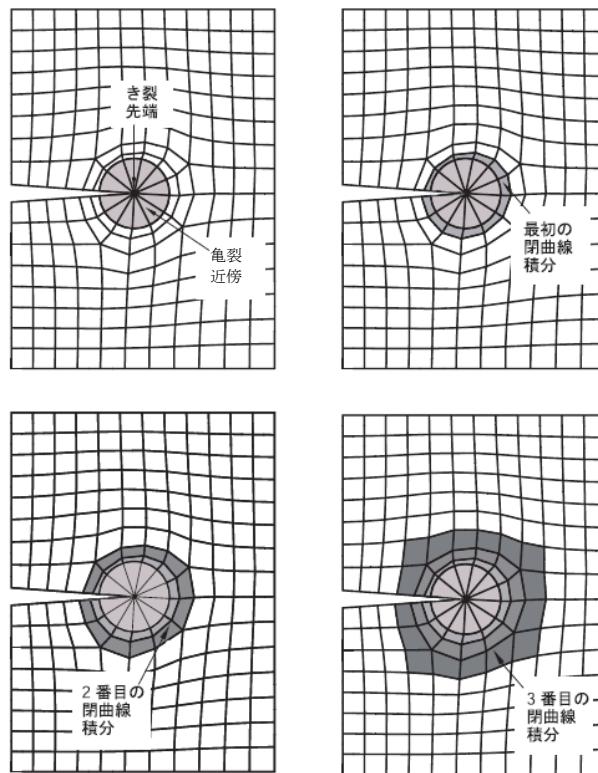


図 29-4 要素層が追加されることで、閉曲線積分が順に計算される

解説図 5-7 Abaqus /CAE<sup>[12]</sup>のマニュアルより 2 次元の閉曲線積分範囲の例

#### (解説 5-8) メッシュ分割による精度比較

閉曲線積分による  $J$  積分の算出で示したように、閉曲線は欠陥前縁を囲む要素層で構成され、解析コードによってはこの内部で領域積分されるため、この閉曲線内部の要素は均質な寸法の要素で構成している方が、応力の精度がその方向も同等になるので精度がよい。長さ 30mm～50mm の  $J$  溶接とバタリングの範囲に対して、約 2mm の要素長さで分割すれば、応力拡大係数  $K$  がメッシュの影響がなくなることをこれまでの知見で得ている。

#### (解説 5-9) 残留応力の負荷の妥当性

残留応力による応力拡大係数を算出するために、重ね合わせの原理<sup>[13]</sup>を用いて、亀裂面に表面力を負荷した解析を実施する。

文献[14]では、残留応力分布のある円筒モデルにおいて、弾塑性解析と弾性解析で、亀裂が進展したときの残留応力の再配分及び応力拡大係数  $K$  の分布を確認している。弾塑性解析、弾性解析とも、亀裂の進展とともに、亀裂面の応力が解放され、リガメント部に再配分され、亀裂先端で高い応力が発生していることや、先端の応力は弾性解析の方が大きくなることが確認されている。また、応力拡大係数  $K$  は弾性解析の方が保守的に算出でき、弾性解析の時には、節点解放法と節点荷重法による応力拡大係数  $K$  が一致することを確認している。

## (参考文献)

- [1] 発電用原子力設備規格 維持規格, JSME S NA1, 日本機械学会
- [2] 発電用原子力設備規格 設計・建設規格, JSME S NC1, 日本機械学会
- [3] 発電用原子力設備規格 材料規格, JSME S NJ1, 日本機械学会
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. II Materials
- [5] 水中封止溶接技術の確証に関する研究(平成23年度), 平成23年5月, PWR電力共同研究
- [6] (独)原子力安全基盤機構, "ニッケル基合金異材溶接部のき裂進展評価技術検証(FDM) 平成22年度報告書" (2012. 3)
- [7] N. Ogawa, K. Hojo, H. Shirako, T. Sera, " RESIDUAL STRESS EVALUATION OF DISSIMILAR WELD JOINT USING MOCK-UP MODELS OF BOTTOM MOUNTED INSTRUMENT NOZZLE ", PVP2013-97866, Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels & Piping Division Conference PVP2013, July 14-18, 2013, Paris, France
- [8] T. Shoji, H. Takahashi, S. Aizawa and M. Saito, "Effect of Sulfate Contamination, Sulfur in Steel and Strain Rate on Critical Cracking Potential for SCC of Pressure Vessel Steels in Pressurized High Temperature Waters, Proceeding of the 3rd International Symposium on Environmental Degradations of Materials in Nuclear Power Systems Water-Reactors, TMS, 1988.
- [9] Seifert, Ritter, Stress corrosion cracking of low-alloy reactor pressure vessel steels under boiling water conditions, Journals of Nuclear Materials 372 (2008) 114-131
- [10] 第65回原子力安全委員会臨時会議資料, 日本原子力発電(株)敦賀発電所2号機における加圧器逃がしライン管台部等のひび割れの原因と対策に係る日本原子力発電(株)からの報告及び検討結果について(平成15年10月16日)(2003)
- [11] G. Rao, G. Moffatt, and A. McIlree, Metallurgical Investigation of Cracking in the Reactor Vessel Alpha Loop Hot Leg Nozzle to Pipe Weld at the V. C. Summer Station, Westinghouse Non-Proprietary Class 3 Report, WCAP-15616, Rev. 0, January 2001
- [12] Abaqus Manual :Analysis User's Manual, Abaqus/CAE User's Manual
- [13] 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 培風館
- [14] 柴田ら, き裂進展に伴う残留応力の再分布と破壊力学パラメータの弾塑性解析, 日本機械学会M&M2005材料力学カンファレンス講演論文集, p. 299 - 300, 2005

## 付録 J 原子炉容器炉内計装筒貫通部の PWSCC 事例

### 1. はじめに

本付録は、原子炉容器炉内計装筒による亀裂の発生事例を示す。

### 2. 原子炉容器炉内計装筒の PWSCC 事例

国内は炉内計装筒の PWSCC 事例がないことから、海外事例のみ整理した。

#### (1) 海外事例

部位	時期	プラント	概要	添付
J溶接部	2003	South Texas Project-1 (米国)	ベアメタル目視試験により下部鏡にほう酸の析出を確認。管台とJ溶接部の融合不良部に一次冷却材が侵入し、PWSCCが発生したと推定。	海-1
J溶接部	2013	Palo Verde-3 (米国)	ベアメタル目視試験により下部鏡にほう酸の析出を確認。溶接欠陥に起因してJ溶接部でPWSCCが発生したと推定。	海-2

添付番号	海 1
発生年	2003 年 4 月 12 日
プラント	South Texas Project-1 (米国)
部位	原子炉容器炉内計装筒
<b>事象発生の状況</b>	
炉内計装筒貫通部のベアメタル目視試験を実施中に、漏えいの痕跡を 2箇所確認。これらは炉内計装筒 #1, #46 管台に関連するものであった。炉内計装筒貫通部は、毎定期検ベアメタル目視試験を実施することになっており、前回の定期検では漏えいの痕跡は確認されなかった。	
漏えい量は少々であり、#1 管台：約 150mg, #46 管台：約 3mg であった。	
 <span style="float: right;">#1 管台外観</span>  <span style="float: right;">#46 管台外観</span>	
<b>原因調査</b>	
漏えい箇所調査として、以下を実施した。#1 管台に 3 つの軸方向亀裂、#46 管台に 2 つの軸方向亀裂が確認された（貫通亀裂は各管台 1 つ）。それ以外の管台に亀裂は確認されなかった。化学成分分析（セシウム同位体分析）の結果、堆積物は漏えい後 3 年（#1 管台）及び 5 年（#46 管台）経過していると推定されており、数年かけて漏えいに至ったと推定された。また、ポートサンプルを実施した結果、管台母材と溶接部の境界に溶接溶け込み不良が確認され、この溶け込み不良と溶接部表面のリガメント部を貫通する亀裂が確認された。以上の結果から、製造時の J 溶接部の溶け込み不良部分に一次冷却材が侵入したことにより、PWSCL が発生し、リークパスを形成したことが原因と推定された。	
<ol style="list-style-type: none"> <li>超音波探傷試験 (UT)</li> <li>渦電流探傷試験 (ECT)</li> <li>目視試験 (VT)</li> <li>堆積物の化学成分分析</li> <li>ポートサンプル</li> </ol>	
<b>処置</b>	
ハーフノズル補修により、炉内計装筒下半分を新しい管台に取り換えた（新管台は、下部鏡外面から溶接による取り付け）。	

(出典)

- LEAKAGE FOUND ON BOTTOM-MOUNTED INSTRUMENTATION NOZZLES, NRC INFORMATION NOTICE 2003-11
- LEAKAGE FOUND ON BOTTOM-MOUNTED INSTRUMENTATION NOZZLES, NRC INFORMATION NOTICE 2003-11, SUPPLEMENT 1
- Inspection and Evaluation Guidelines for Reactor Vessel Bottom-Mounted Nozzles in U.S. PWR Plants, MRP-206, EPRI

添付番号	海 2
発生年	2013 年 10 月 6 日
プラント	Palo Verde-3 (米国)
部位	原子炉容器炉内計装筒
<b>事象発生の状況</b>	
炉内計装筒貫通部のベアメタル目視試験を実施中に、#3 管台において少量の漏えいの痕跡を確認。調査の結果、ほう酸であることが確認された。	
	
#3 管台外観	
<b>原因調査</b>	
<p>漏えい箇所調査として、以下を実施した。母材内面に ECT を実施した結果、内表面には指示は確認されなかった。また、母材内面から UT を実施した結果、最大深さ 0.378 インチ（約 9.6mm）、最大長さ 1.88 インチ（約 47.8mm）の指示が確認された。He リーク試験を実施した結果、J 溶接部 42° 方向からバブルが確認された。</p> <p>ポートサンプルを実施した結果、表面近傍の製造時の溶接欠陥が起因となった PWSCC と推定された。</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>a. 超音波探傷試験 (UT)</li> <li>b. 湧電流探傷試験 (ECT)</li> <li>c. He リーク試験</li> <li>d. ポートサンプル</li> </ul>	
<b>処置</b>	
ハーフノズル補修により、炉内計装筒下半分を新しい管台に取り換えた（新管台は、下部鏡外面から溶接による取り付け）。	

(出典) Palo Verde Unit 3 Bottom-Mounted Instrument (BMI) Nozzle #3 Leak, ML13308B332, NRC

## 改訂経緯

### 第1版（平成21年8月）制定

クラス1容器の管台異材継手部のPWSMCによる損傷事例が国内外で発生したことから、PWSMCに対する適切な点検が必要であった。一方で、当該部は点検時期の制約が大きいことから、健全性を確認する方法を考える上では、従来の点検技術の向上に加え、実施時期、頻度、検査方法、許容レベルなど部位毎に適した点検のあり方を検討する必要性が高まってきており、そのニーズに応えるべく原子炉容器炉内計装筒の点検評価ガイドラインは平成20年度に検討された。

600系ニッケル基合金のPWSMC進展速度データから、炉内計装筒の進展評価を実施する基盤ができており、PWSMCの進展評価に基づき点検頻度を設定するなど、部位ごとに合理的な点検を設定した。

### 第2版（平成25年6月）改訂

炉内計装筒貫通部は、複雑な形状であるため、維持規格のモデル化方法や評価方法が直接的に適用できないという課題があった。そこで、簡便な手法で保守的な結果を得るために、モデル化方法も含めた解析法の具体的推奨法を付録として追加して改訂した。

### 第3版（2021年12月）改訂

第3版では、安全機能、国内外の運転経験に基づく点検の考え方、点検範囲、点検結果の評価の規定の見直し及び充実化を図った。

また、点検の考え方の詳細、PWSMC事例集を付録として追加し、技術伝承面も含めて、ガイドラインとしての利便性の向上を図った。

# PWR 炉内構造物等点検評価ガイドライン[原子炉容器炉内計装筒]の概要

## 1. 適用範囲および基本的考え方

- PWR の原子炉容器炉内計装筒（図 1）に適用するガイドラインであり、基本的な考え方は以下のとおり。
- (1) 想定する劣化事象は、PWSCC 及び PWSCC による漏えいの従属事象として発生する可能性がある下部鏡のほう酸腐食とする。
  - (2) 点検評価対象部位は、応力が高く PWSCC 発生条件の厳しい、下部鏡との溶接部近傍の炉内計装筒内面および下部鏡との溶接金属部（以下、J 溶接）近傍とする。
  - (3) J 溶接部における供用期間中検査としての原子炉起動前の漏えい試験の実施を前提とする。
  - (4) 点検時期を評価するための PWSCC 亀裂は、軸方向亀裂を想定する。

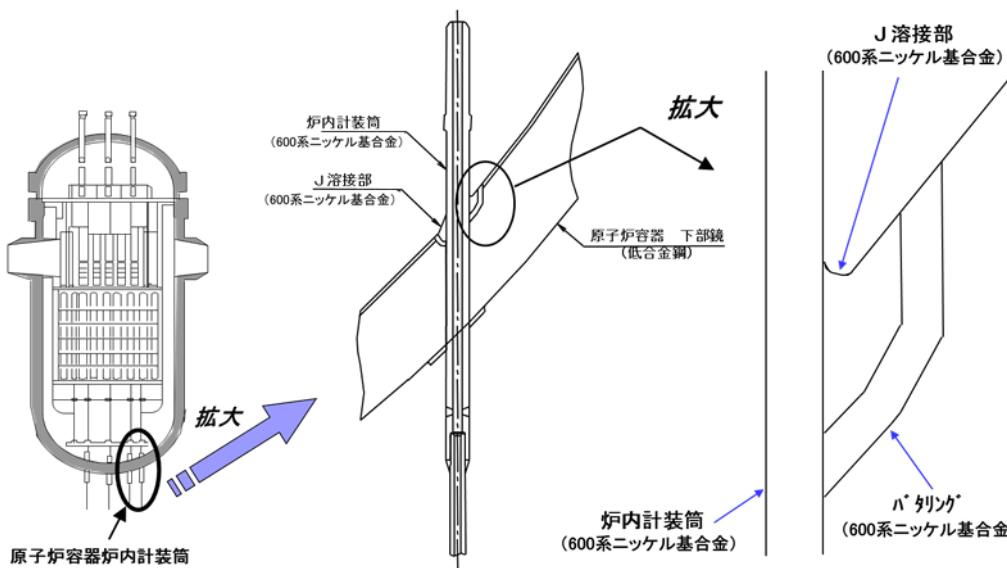


図 1 適用部位 (原子炉容器炉内計装筒)

## 2. 点検および評価

点検及び評価手法は以下のように規定されている。

- (1) 点検手法  
非破壊試験手法は、目視試験 (VT)、渦流探傷試験 (ECT)、超音波探傷試験 (UT) とする。
- (2) 点検時期

点検時期の考え方を図 2 に示す。ここで、初回点検時期は、亀裂が発生すると予測される時期とする。ただし、J 溶接部はサイジング技術が確立されていないことから、点検時期の予測ができないため、供用期間中検査のみ実施する。

### a. 前回点検時に亀裂が検出されなかった場合

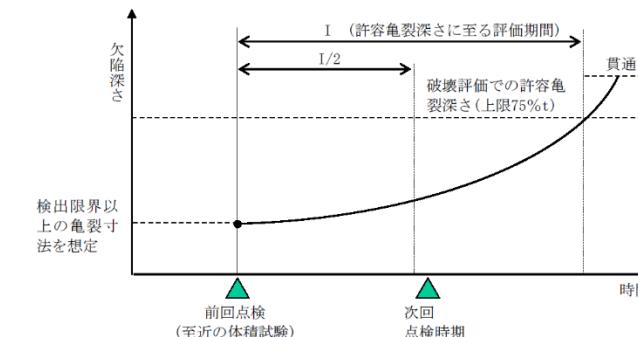
前回点検時に亀裂が発生していたものと仮定し、亀裂深さが板厚の 75% に至ると予測される期間または構造健全性が確保できる期間のいずれか短い期間の 1/2 の期間を経過後の直近の定期検査で実施する。

### b. 前回点検時に亀裂が検出された場合

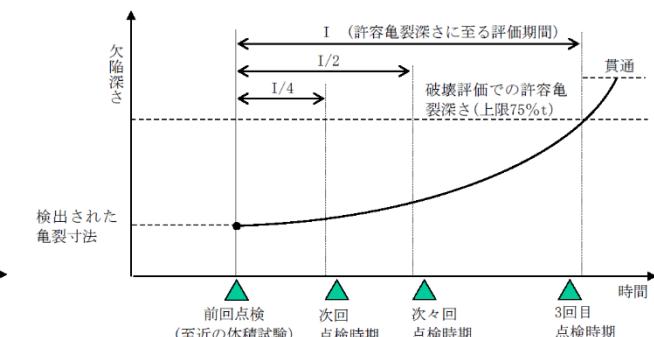
亀裂深さが板厚の 75% に至ると予測される期間または構造健全性が確保できる期間のいずれか

短い期間の 1/4 の期間を経過後の直近の定期検査で実施する。次々回点検は評価期間の 1/2、3 回目は評価期間末期までに点検を実施する。

- (3) 予防保全または補修が施工された後の点検時期  
600系ニッケル基合金が除去、又は予防保全としての工法の妥当性が確認された予防保全措置が施工された場合、個別点検は不要となる。
- (4) 評価（許容基準）  
点検の結果、亀裂が認められた場合、PWSCC 亀裂進展予測および破壊評価により構造健全性が確保されるように次回点検時期を設定することができる場合は、その時期まで継続使用できる。ただし、満足できない場合は、補修または取替えを行わなければならない。
- (5) 点検・評価フロー  
炉内計装筒母材内面及び J 溶接部の点検・評価フローを図 3 に示す。



a. 前回点検時に亀裂が検出されなかった場合



b. 前回点検時に亀裂が検出された場合

図 2 点検時期の考え方

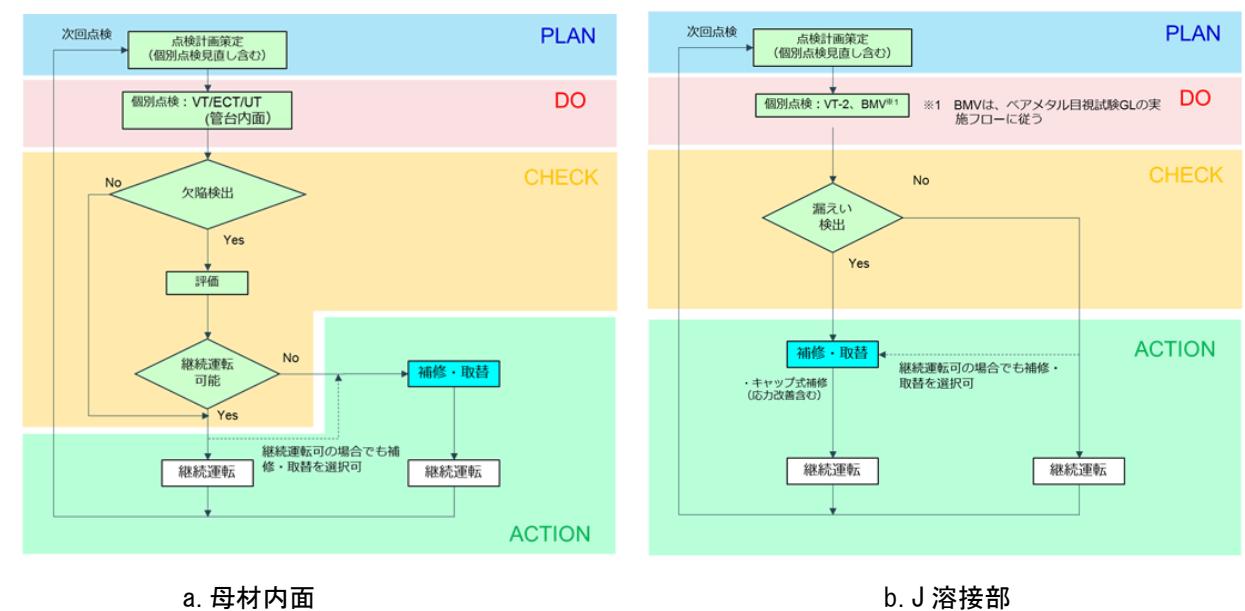


図 3 炉内計装筒の点検・評価フロー

---

P W R 炉内構造物等点検評価ガイドライン  
[原子炉容器炉内計装筒]  
(第3版)

編集者 一般社団法人 原子力安全推進協会  
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会  
発行者 一般社団法人 原子力安全推進協会  
〒108-0014 東京都港区芝5-36-7 三田ベルジュビル13~15階  
TEL 03-5418-9312 FAX 03-5440-3606

---