

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン  
[炉心シュラウド]  
(第7版)

2026年4月

一般社団法人 原子力エネルギー協議会  
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

## 本ガイドの位置づけ

本ガイドライン（以下「本ガイド」）は、従前より(一社)原子力安全推進協会(以下、JANSI)が策定・管理してきた「BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン[炉心シュラウド]（第7版）」（以下「従来のガイド」）を原文のまま原子力エネルギー協議会（以下、ATENA）の管理体制下で引き継いで使用するものである。本ガイドの内容については、ATENA 炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会を経て改訂が決定されるまでの間、変更は行わない。

### 運用時期

本ガイドの運用開始日は 2026 年 4 月とする。

### 運用上の注意

1. 本ガイドは従来のガイドを踏襲したものであり、運用上の変更はない。
2. ATENA は必要に応じて、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会を経て改訂しますが、その場合は別途改訂履歴を明示する。

本ガイドラインの情報等の取扱いについては、以下のとおりとする。

（免責）

ATENA、ATENA 従業員、会員、支援組織等本書の作成に関わる関係者（「ATENA 関係者」）は、本書の内容について、明示黙示を問わず、情報の完全性及び第三者の知的財産権の非侵害を含め、一切保証しない。ATENA 関係者は、本書の使用により使用者その他の第三者に生じた一切の損失、損害及び費用についてその責任を負わない。使用者は、自己の責任において本書を使用するものとする。

（権利帰属）

本書の著作権その他の知的財産権（「本件知的財産権」）は、ATENA に帰属する。本件知的財産権は、本書の使用者に移転せず、また、ATENA の承諾がない限り、本書の使用者には本件知的財産権に関する何らの権利も付与されない。

2026 年 4 月  
原子力エネルギー協議会

# BWR炉内構造物点検評価ガイドライン

[炉心シュラウド]

(第7版)

2023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及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、メーカーの方々等、関係各位に深く感謝いたします。

2023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

# BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン

## 改訂履歴

ガイドライン名：炉心シュラウド

改訂年月	版	改訂内容	備考
平成 13 年 11 月	初版発行		
平成 16 年 3 月	第 2 版発行	リング有を追加	
平成 19 年 4 月	第 3 版発行	支持ロッドを追加	
平成 20 年 6 月	第 4 版発行	未点検部位の取り扱い見直し	JANTI-VIP-05 第4版
平成 27 年 3 月	第 5 版発行	欠陥裕度評価法，付録全体構成，適用する規格基準ほか見直し	JANSI-VIP-06 第5版
2020 年 12 月	第 6 版発行	ABWR点検内容の追加 点検の考え方の明確化	JANSI-VIP-31 第6版
2023 年 12 月	第 7 版発行	亀裂進展速度式の見直し，運転経験の追加，用語の統一	JANSI-VIPB-06-07 JANSI-VIP-48 第7版

※ 改訂の詳細は参考資料 2 参照

### 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。

従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

(2023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	堂崎 浩二	東北大学
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	今井 直人	東京電力ホールディングス (株)
幹事	天野 洋一	関西電力 (株)
幹事	寺門 剛	日本原子力発電 (株)
委員	青木 俊祐	北海道電力 (株)
委員	新藤 智也	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	稲垣 哲彦	中部電力 (株)
委員	網谷 宏和	北陸電力 (株)
委員	今村 雄治	関西電力 (株)
委員	中川 純二	中国電力 (株)
委員	松原 克幸	四国電力 (株)
委員	野崎 剛	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GE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	北条 公伸	三菱重工業 (株)
委員	新井 拓	電力中央研究所
委員	成宮 祥介	原子力安全推進協会
参加者	小林 広幸	EPRI International, Inc.
参加者	町田 秀夫	(株) テプコシステムズ
事務局	大畑 仁史	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

# BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン

## [炉心シュラウド]

### 目 次

第1章 目的及び適用	1
1.1 目的	1
1.2 適用	1
第2章 点検の考え方	1
第3章 点検対象	2
3.1 BWR 型① (図 3-1)	2
3.2 BWR 型② (図 3-2)	2
3.3 ABWR 型 (図 3-3)	3
3.4 支持ロッド補修を行ったプラント	4
第4章 点検手法	7
第5章 点検範囲	8
第6章 点検時期	9
6.1 初回点検	9
6.2 再点検	10
第7章 点検結果の評価	11
7.1 判定基準	11
7.2 詳細評価	11
第8章 まとめ	12
解説	
解説 1-1 「ガイドライン制定の目的」	18
解説 1-2 「本ガイドラインの運用にあたって」	18
解説 2-1 「シュラウドに要求される安全機能」	19
解説 2-2 「シュラウドに想定される経年変化事象」	20
解説 2-3 「支持ロッドによる補修を実施していないシュラウドに対する点検 対象の選定」	21
解説 2-4 「支持ロッドの構造及び機能」	22
解説 2-5 「支持ロッドの点検箇所の例」	23
解説 4-1 「渦電流探傷試験」	23

解説 5-1	「初回点検」	24
解説 5-2	「溶接部の点検幅」	27
解説 6-1	「残存断面積及び許容残存断面積」	28
解説 6-2	「点検における接近性」	32
解説 6-3	「点検必要範囲及び点検周期」	32
解説 6-4	「SCC 予防保全対策」	35
解説 6-5	「シュラウドの補修技術」	35
解説 6-6	「支持ロッドの点検の考え方」	36
解説 6-7	「支持ロッド補修後のシュラウド縦方向溶接部の点検」	36

## 付録

付録A	シュラウドの各構造体に対する点検の考え方について
付録B	シュラウド溶接部の残留応力評価
付録C	シュラウドの亀裂進展評価
付録D	シュラウドの欠陥裕度評価（地震動 $S_s$ の検討）
付録E	評価方法（シュラウド評価の一連の流れ）
付録F	亀裂が検出されたときの評価
付録G	未点検範囲の欠陥想定法
付録H	シュラウドの変形による制御棒挿入性について
付録I	実機プラントでの点検及び評価結果

## 参考資料

- 参考資料-1 炉内構造物点検評価ガイドライン [炉心シュラウド] の概要
- 参考資料-2 改訂経緯

## 第1章 目的及び適用

### 1.1 目的

本ガイドラインは、沸騰水型原子力発電所（BWR）用機器のうち、原子力安全を確保する大前提のもと炉内構造物に要求される構造及び機能の健全性の維持、損傷が与える安全機能への影響を踏まえた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，解説 1-2）

なお、BWR には従来型の BWR に加え、改良型 BWR（ABWR）を含む。

### 1.2 適用

本ガイドラインは、BWR 炉内構造物のうち炉心シュラウド（以下、シュラウドと称する）及び、炉心シュラウド支持ロッド（以下、支持ロッドと称する）による補修を行ったシュラウドに適用する。本ガイドラインの適用期間は、商業運転開始後の供用期間中とする。

## 第2章 点検の考え方

点検の基本的な考え方を、以下に示す。

- (1) 原子炉に対してシュラウド及び支持ロッドが持つ安全機能に着目し、シュラウド及び支持ロッドを構成する各種の構造体の経年劣化事象による損傷が安全機能の維持に影響を与えると考えられる構造体を点検対象とする。（解説 2-1，解説 2-3，解説 2-4，解説 2-5）
- (2) シュラウド及び支持ロッドに想定される経年変化事象として、応力腐食割れ（以下、SCC と称する）を想定する。（解説 2-2）
- (3) 点検手法，点検範囲，点検時期は，点検対象の機能，形状及び材質，想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験，損傷時の安全機能維持に対する影響等を考慮し，必要な手法，範囲，時期をそれぞれ選定する。

### 第3章 点検対象

シュラウド及び支持ロッドの点検対象と点検対象部位は、点検対象の機能、形状及び材質、想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験、損傷時の安全機能維持に対する影響等を考慮し、以下のように定めた。(解説2-3)

#### 3.1 BWR型① (図3-1)

- ・ H1 溶接部 (上部リングと上部胴の周方向溶接部)
- ・ H2 溶接部 (上部胴と中間部リングの周方向溶接部)
- ・ H3 溶接部 (中間部リングと中間部胴の周方向溶接部)
- ・ H4 溶接部 (中間部胴同士の周方向溶接部)
- ・ H6a 溶接部 (中間部胴と下部リングの周方向溶接部)
- ・ H6b 溶接部 (下部リングと下部胴の周方向溶接部)
- ・ H7a 溶接部 (下部胴とシュラウドサポートリングの周方向溶接部)
- ・ H7b 溶接部 (シュラウドサポートリングとシュラウドサポートシリンダの周方向溶接部)

#### 3.2 BWR型② (図3-2)

- ・ H1 溶接部 (上部リングと上部胴の周方向溶接部)
- ・ H2 溶接部 (上部胴と中間部リングの周方向溶接部)
- ・ H3 溶接部 (中間部リングと中間部胴の周方向溶接部)
- ・ H4 溶接部 (中間部胴同士の周方向溶接部)
- ・ H6a 溶接部 (中間部胴と下部リングの周方向溶接部)
- ・ H6b 溶接部 (下部リングと下部胴の周方向溶接部)
- ・ H7 溶接部 (下部胴とシュラウドサポートシリンダの周方向溶接部)

### 3.3 ABWR 型 (図 3-3)

- H3 溶接部 (上部フランジと上部胴の周方向溶接部)
- H4 溶接部 (上部胴と中間部胴の周方向溶接部)
- H6a 溶接部 (中間部胴と下部リングの周方向溶接部)
- H6b 溶接部 (下部リングと下部胴の周方向溶接部)
- H7 溶接部 (下部胴とシュラウドサポートシリンダの周方向溶接部)

### 3.4 支持ロッド補修を行ったプラント

支持ロッド補修を行ったシュラウドに関しては、支持ロッド、縦方向溶接部及び支持ロッドによる補修後も強度を期待する周方向溶接部を点検対象とする。(解説 2-4, 2-5)

具体的な点検対象部位は、以下の通り。

(1) 支持ロッド

(2) 縦方向溶接部

(BWR 型①, ②の例) (図 3-1, 3-2)

- ・ V1 溶接部 (上部リングの縦方向溶接部)
- ・ V2 溶接部 (上部胴の縦方向溶接部)
- ・ V3 溶接部 (中間部リングの縦方向溶接部)
- ・ V4 溶接部 (中間部胴上側の縦方向溶接部)
- ・ V5 溶接部 (中間部胴下側の縦方向溶接部)
- ・ V6 溶接部 (下部リングの縦方向溶接部)
- ・ V7 溶接部 (下部胴の縦方向溶接部)

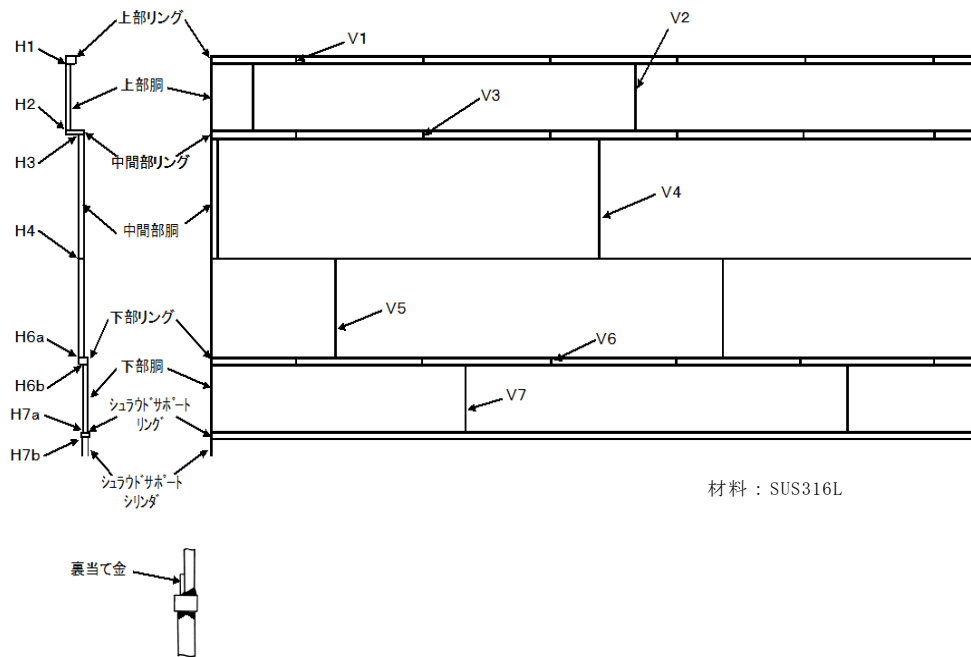


図 3-1 シュラウドの溶接部と溶接部番号<BWR 型①>

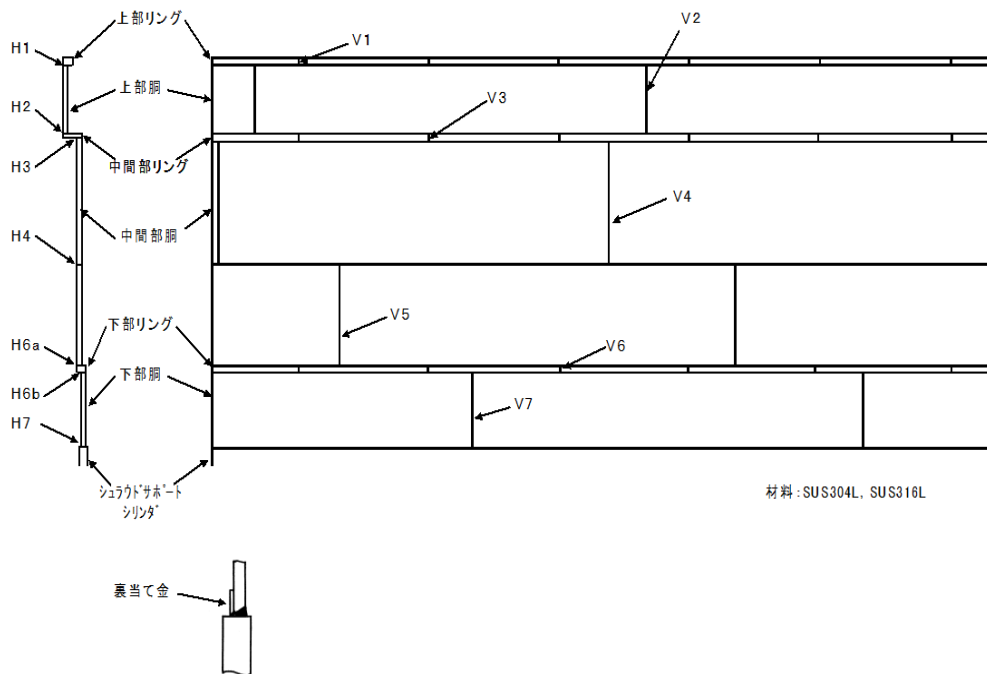


図 3-2 シュラウドの溶接部と溶接部番号<BWR 型②>

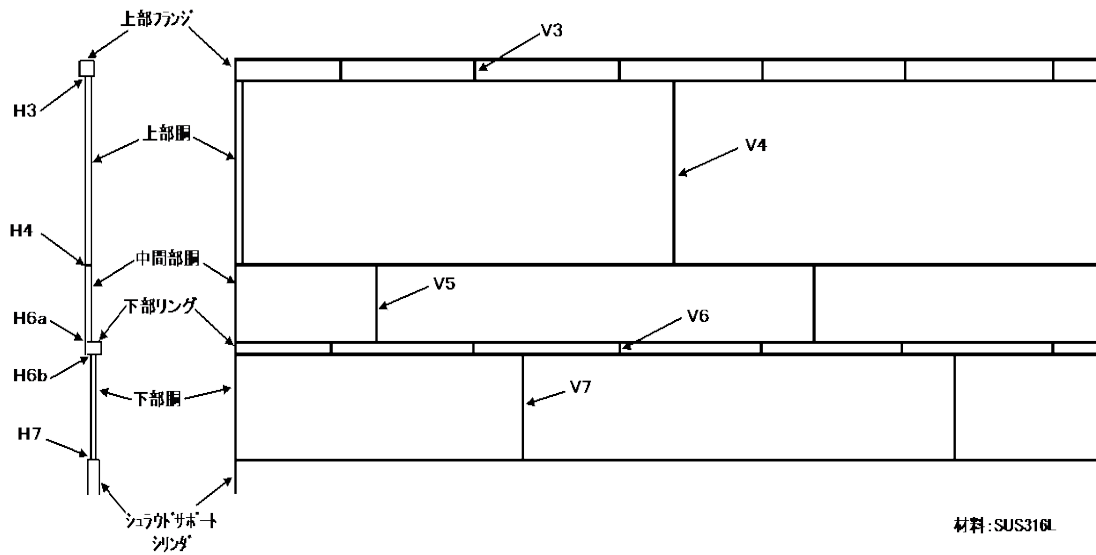


図 3-3 シュラウドの溶接部と溶接部番号<ABWR 型>

## 第4章 点検手法

シュラウドの点検手法は、点検対象の機能、形状及び材質、想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験、損傷時の安全機能維持に対する影響等を考慮し、点検対象部位ごとに必要な手法を選択する。

点検に適用する非破壊試験は、目視試験(VT)、超音波探傷試験(UT)又は渦電流探傷試験(ET)が考えられる。

### (1) 目視試験 (VT)

#### a. MVT-1

表面に開口している欠陥を検出するために行う試験であり、炉内構造物等点検評価ガイドライン[遠隔目視試験]に従い実施する。

なお、本試験手法は、シュラウドの周方向溶接部、支持ロッド補修を行ったシュラウドの縦方向溶接部並びに支持ロッドの上部ブラケット(上部サポート)取付け部付け根及びTアダプタ(トグル)取付け部の点検に適用する。

#### b. VT-3

機器の変形、芯合わせ不良、傾き、隙間の異常、ボルト締め付け部の緩み、部品の破損、脱落及び、機器表面における異常を検出するために行う試験とする。

なお、本試験手法は、支持ロッド補修を行ったシュラウドにおける支持ロッドの点検に適用する。

### (2) 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規程」にしたがって実施するか、もしくはこれに類する手法等を用いて実施してよい。

### (3) 渦電流探傷試験 (ET)

渦電流探傷試験は、JEAG4217「原子力発電所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、もしくはこれに類する手法を用いて実施してよい。

(解説 4-1)

## 第5章 点検範囲

シュラウドの点検範囲（点検対象部位の個数，長さ）は，点検対象の機能，形状及び材質，想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験，損傷時の安全機能維持に対する影響等を考慮し，点検対象部位ごとに定める。

溶接部の点検を行う場合は，溶接金属及びその両側の25mmの幅（熱影響部を含む）に対して行う。（解説5-2）

なお，技術的根拠がある場合は，別途，設定することができる。

### a. 支持ロッド補修を行っていないプラント

点検対象部位は，初回点検においては，3章に示す周方向溶接部の接近可能な全ての範囲とする。

再点検においては，点検を実施しない領域のすべてに亀裂があると想定し，その亀裂と，点検を実施した領域に存在する亀裂が次回点検までの想定期間N年分進展しても，残存断面積が許容残存断面積以上となるように，点検範囲を設定する。

（解説 5-1， 6-1， 6-3）

### b. 支持ロッド補修を行ったプラント

支持ロッド補修を行ったプラントに関しては，支持ロッド及び縦方向溶接部とする。

## 第6章 点検時期

シュラウドの初回点検と再点検は、点検対象の機能、形状及び材質、想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験、損傷時の安全機能維持に対する影響等を考慮し、以下に示す時期に実施するものとする。

なお、技術的根拠がある場合は、別途、設定することができる。

### 6.1 初回点検

#### a. BWR 型①のプラント

プラント供用開始時点からの実運転年数が5年以降で、11年経過するまでに初回点検を実施する。

#### b. BWR 型②

プラント供用開始時点からの実運転年数が10年以降で、20年経過するまでに初回点検を実施する。

#### c. ABWR 型

プラント供用開始時点からの実運転年数が10年以降で、40年経過するまでに初回点検を実施する。

#### d. 支持ロッド補修を行ったプラント

##### ① 支持ロッド

支持ロッド補修を行った後、1回目の定期検査時に補修後の初回点検を実施する。

##### ② シュラウド

縦方向溶接部は、支持ロッド補修を行う際に点検を行っている場合は補修後10年を超えない時期、それ以外の場合は支持ロッドの初回点検に合わせて点検を実施する。

## 6.2 再点検

### a. 支持ロッド補修を行っていないプラント

実施済みの点検範囲を確認し、点検未実施でかつ構造強度上影響のある部位に亀裂を想定する。点検範囲内に見つかった亀裂と、点検可能範囲外にあると想定した亀裂が、次回点検までの想定期間 N 年分進展することを考慮して算出した残存断面積が、許容残存断面積以上となるように、点検時期 N 年を設定して点検を実施する。(解説 6-1, 6-3)

初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、BWR 型①のプラントの場合、実運転年数が初回点検から 7 年を超えない時期、BWR 型②のプラントの場合、実運転年数が初回点検から 10 年を超えない時期、ABWR 型のプラントの場合、実運転年数が初回点検から 20 年を超えない時期とする。(解説 6-3)

なお、点検範囲に対して、SCC の発生又は進展を抑制する予防保全工法を適用した場合には、その有効性を考慮して、点検周期を設定できる。(解説 6-4)

また、前回の点検において欠陥指示が検出された部位については、再点検時に点検を実施するものとする。

### b. 支持ロッド補修を行ったプラント

#### ① 支持ロッド

初回点検から 10 年を超えない時期とする。ただし、10 年の期間に 1 体又は数体ずつ分割して点検することも可能とする。この場合、点検対象としない支持ロッドについても、全体の外観状況の確認は実施するものとする。(解説 6-6)

#### ② シュラウド

縦方向溶接部は初回点検から 10 年を超えない時期とする。(解説 6-7)

## 第7章 点検結果の評価

シュラウドと支持ロッドの点検・評価フロー図を図 7-1 及び図 7-2 に示す。点検結果の判定は以下によるものとする。

### 7.1 判定基準

点検の結果は、下記の判定基準により評価する。

- (1) 健全な範囲が点検必要範囲以上である場合は継続使用できる。
- (2) 健全な範囲が点検必要範囲未満である場合は、
  - ① 点検範囲を拡大することにより、健全な範囲が点検必要範囲以上となれば、継続使用できる。
  - ② 点検範囲を拡大しても健全な範囲が点検必要範囲未満の場合は、健全な範囲が許容残存断面積以上であれば、点検周期を見直すことにより、継続使用できる。
  - ③ 上記②項を満足しない場合は、7.2 項に示す詳細評価を実施し、残存断面積が許容残存断面積以上となれば、点検周期を見直すことにより、継続使用できる。
- (3) 上記(1)(2)に適合しない場合は、補修等の措置を行う。

なお、上記(1)(2)の健全な範囲は、健全部及び検出された亀裂の進展を見込んだものである。(解説 6-3)

### 7.2 詳細評価

7.1 項の判定基準において、健全な範囲が許容残存断面積以下である場合は、下記の詳細評価を実施し、継続使用の評価をすることができる。

#### (1) 残存断面積の詳細評価

検出された亀裂のサイジング結果等に基づいて亀裂をモデル化し、構造強度を詳細評価することによって、残存断面積を求めることができる。また、亀裂の進展挙動をプラント個別の残留応力解析、水質評価、亀裂進展量の実測値等に基づいて、詳細評価することができる。(解説 6-3)

#### (2) 許容残存断面積の詳細評価

点検結果及び亀裂の詳細評価結果に基づいてシュラウドをモデル化し、構造強度を詳細評価することによって、許容残存断面積を求めることができる。

付録 I に実機プラントで確認されたシュラウドの亀裂に対して実施した点検及び評価結果を示す。

## 第8章 まとめ

支持ロッド補修を行っていない BWR 型①のシュラウドの点検を表 8-1 に、支持ロッド補修を行っていない BWR 型②のシュラウドの点検を表 8-2 に、ABWR 型のシュラウドの点検を表 8-3 に、支持ロッド補修を行ったシュラウドの点検を表 8-4 に示す。

表 8-1 支持ロッド補修を行っていない BWR 型①のシュラウドの点検

点検対象	点検対象部位	点検手法	点検時期／点検範囲	点検結果の評価
H1～H7 の周方向溶接部	接近可能な内面及び外面 <sup>(2)</sup>	MVT-1 <sup>(1)</sup>	初回点検 機器の供用開始後、実運転時間で 5～11 年の間 ／接近可能な内面及び外面 <sup>(2)</sup> 再点検 実施済みの点検結果から、亀裂進展を考慮して算出された健全範囲が、許容残存面積を超えない期間 N 年以内。 ただし、初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、初回点検から実運転時間 7 年以内。／次回点検までの安全機能の維持を確認するために必要な範囲 <sup>(3) (4) (5)</sup>	次回点検時に想定される健全範囲が、許容残存面積以上であること
注： (1) 必要に応じて、UT 又は ET を実施してもよい。 (2) 必要に応じて、接近に支障となる炉内構造物を可能な範囲で取外すこと。(解説 6-2) (3) MVT-1 の場合、溶接部両面(内面及び外面)の点検範囲の重なりが、要求される点検範囲を満足すること。 UT の場合は探傷範囲が点検範囲を満足すること。ET の場合は、MVT-1 の場合と同様とする。 (4) 点検範囲は、6.2 項の点検周期 N 年に対応して設定する。 (5) 点検において欠陥指示が検出された場合は、次回点検時に想定される健全範囲が許容残存面積以上となるように、点検範囲を拡大することができる。				

表 8-2 支持ロッド補修を行っていない BWR 型②のシュラウドの点検

点検対象	点検対象部位	点検手法	点検時期／点検範囲	点検結果の評価
H1～H7 の周方向溶接部	接近可能な内面及び外面 <sup>(2)</sup>	MVT-1 <sup>(1)</sup>	初回点検 機器の供用開始後，実運転時間で 10～20 年の間／接近可能な内面及び外面 <sup>(2)</sup>	次回点検時に想定される健全範囲が，許容残存面積以上であること
			再点検 実施済みの点検結果から，亀裂進展を考慮して算出された健全範囲が，許容残存面積を超えない期間 N 年以内。ただし，初回点検で亀裂が検出されなかった場合は，初回点検から実運転時間 10 年以内。／次回点検までの安全機能の維持を確認するために必要な範囲 <sup>(3) (4) (5)</sup>	
注：				
(1) 必要に応じて，UT 又は ET を実施してもよい。				
(2) 必要に応じて，接近に支障となる炉内構造物を可能な範囲で取外すこと。（解説 6-2）				
(3) MVT-1 の場合，溶接部両面（内面及び外面）の点検範囲の重なりが，要求される点検範囲を満足すること。UT の場合は探傷範囲が点検範囲を満足すること。ET の場合は，MVT-1 の場合と同様とする。				
(4) 点検範囲は，6.2 項の点検周期 N 年に対応して設定する。				
(5) 点検において欠陥指示が検出された場合は，次回点検時に想定される健全範囲が許容残存面積以上となるように，点検範囲を拡大することができる。				

表 8-3 支持ロッド補修を行っていない ABWR 型のシュラウドの点検

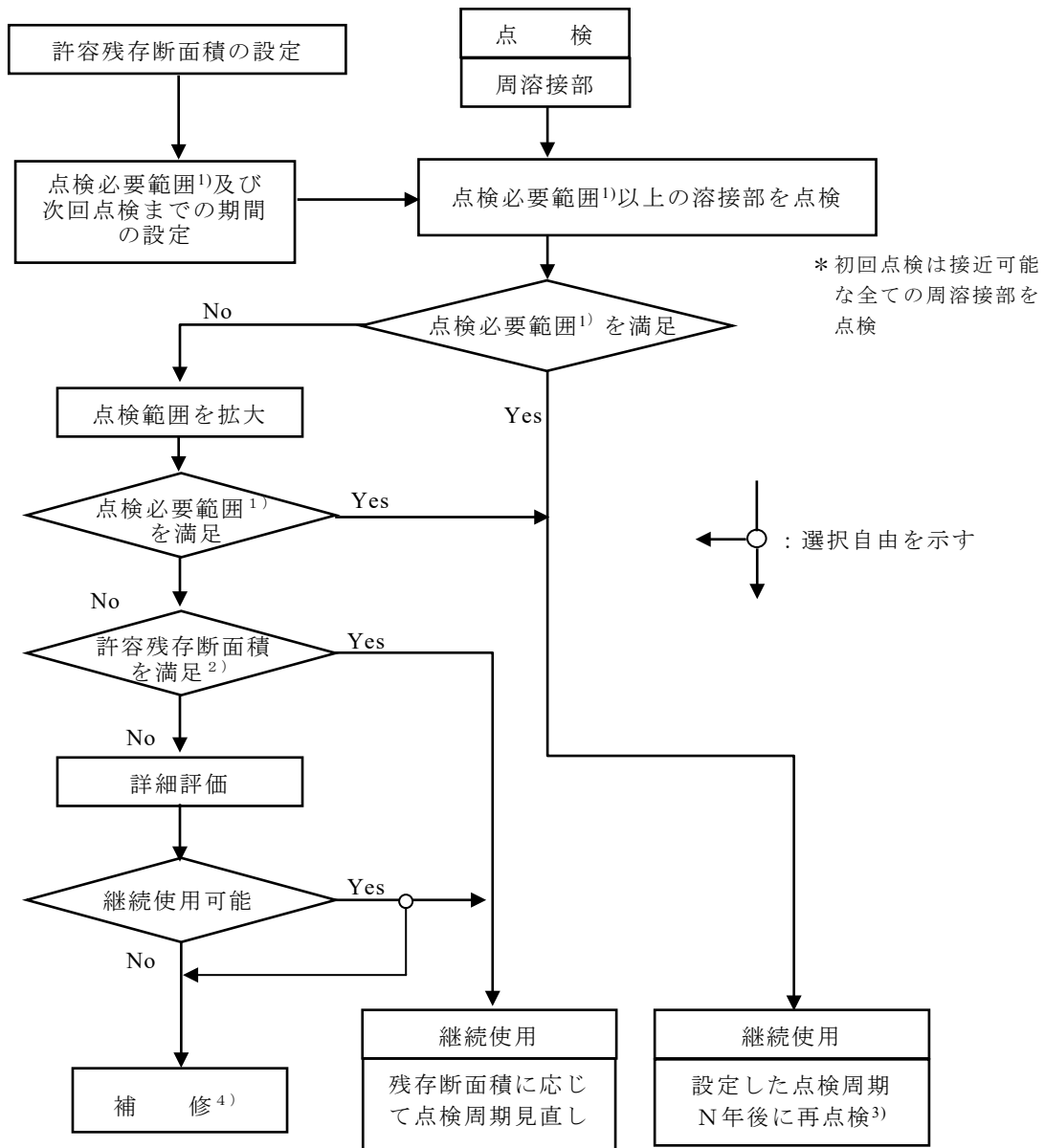
点検対象	点検対象部位	点検手法	点検時期／点検範囲	点検結果の評価
H1～H7 の周方向溶接部	接近可能な内面及び外面 <sup>(2)</sup>	MVT-1 <sup>(1)</sup>	初回点検 機器の供用開始後，実運転時間で 10～40 年の間／接近可能な内面及び外面 <sup>(2)</sup>	次回点検時に想定される健全範囲が，許容残存面積以上であること
			再点検 実施済みの点検結果から，亀裂進展を考慮して算出された健全範囲が，許容残存面積を超えない期間 N 年以内。ただし，初回点検で亀裂が検出されなかった場合は，初回点検から実運転時間 20 年以内。／次回点検までの安全機能の維持を確認するために必要な範囲 <sup>(3) (4) (5)</sup>	
注：				
(1) 必要に応じて，UT 又は ET を実施してもよい。				
(2) 必要に応じて，接近に支障となる炉内構造物を可能な範囲で取外すこと。(解説 6-2)				
(3) MVT-1 の場合，溶接部両面(内面及び外面)の点検範囲の重なりが，要求される点検範囲を満足すること。UT の場合は探傷範囲が点検範囲を満足すること。ET の場合は，MVT-1 の場合と同様とする。				
(4) 点検範囲は，6.2 項の点検周期 N 年に対応して設定する。				
(5) 点検において欠陥指示が検出された場合は，次回点検時に想定される健全範囲が許容残存面積以上となるように，点検範囲を拡大することができる。				

表 8-4 支持ロッド補修を行ったシュラウドの点検

点検対象	点検対象部位	点検手法	点検時期／点検範囲	点検結果の評価
支持ロッド	荷重伝達部	VT-3	初回点検 補修後 1 回目の定期検査時／点検可能な全範囲	荷重伝達部の取合いに異常が無いこと
			再点検 前回点検後，実運転時間で 10 年経過するまで／点検可能な全範囲	
支持ロッド	上部ブラケット取付け部付け根，Tアダプタ取付け部	MVT-1 <sup>(1)</sup>	初回点検 補修後 1 回目の定期検査時／点検可能な全範囲	SCC による亀裂が発生していないこと
			再点検 前回点検後，実運転時間で 10 年経過するまで／点検可能な全範囲	
縦方向溶接部	接近可能な内面及び外面 <sup>(2)</sup>	MVT-1 <sup>(1)</sup>	初回点検 補修後，実運転時間で 10 年経過するまで／点検可能な全範囲	溶接部全断面が破断していないこと
			再点検 前回点検後，実運転時間で 10 年経過するまで／点検可能な全範囲	

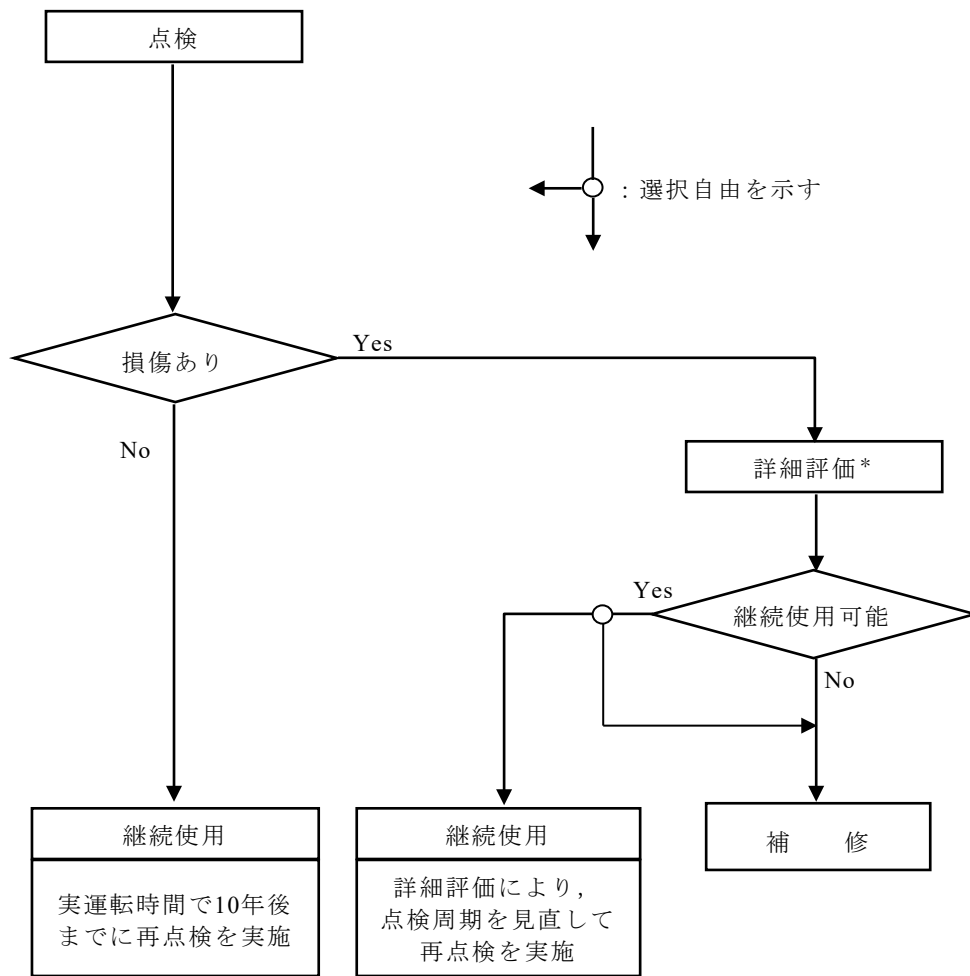
注：

- (1) 必要に応じて，UT 又は ET を実施してもよい。
- (2) 必要に応じて，接近に支障となる炉内構造物を可能な範囲で取外すこと。（解説 6-2）
- (3) MVT-1 の場合，溶接部両面（内面及び外面）の点検範囲の重なりが，要求される点検範囲を満足すること。  
UT の場合は探傷範囲が点検範囲を満足すること。ET の場合は，MVT-1 の場合と同様とする。
- (4) 点検範囲は，6.2 項の点検周期 N 年に対応して設定する。
- (5) 点検において欠陥指示が検出された場合は，次回点検時に想定される健全範囲が許容残存面積以上となるように，点検範囲を拡大することができる。



- 1) 点検必要範囲 = 許容残存断面積  
+ 次回点検までの健全部残存面積減少量  
+ 次回点検までの検出亀裂の進展量
- 2) 許容残存断面積を満足：  
健全範囲 - 検出亀裂の進展量 - 健全部残存面積減少量
- 3) 初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、表8-1~3に示す時期に再点検してもよい。
- 4) 補修技術の例については解説6-5参照

図7-1 シュラウドの点検フロー



注記 \*：損傷の状況（部位、大きさ等）に応じて健全性評価を実施する。

図7-2 支持ロッドの点検フロー

### (解説 1-1) ガイドライン制定の目的

炉内構造物の点検については、構造上、点検装置の接近を制約する範囲が大きいことから、随時、最新の知見と技術を反映し、点検技術の向上と運転経験の蓄積に努めてきている。

原子力安全確保のためには、これらの運転経験の評価と研究活動を通じて、過去の教訓を活かし我々が学ぶことにつれて発展するプロセスを構築するとともに、これを継続していくことが求められる。このため、本ガイドラインは、炉内構造物に対して、運転経験、最新知見を整理・評価し、部位毎に要求される安全上重要な機能、有意な劣化モードと、最新知見の整理に基づく、合理的な点検のあり方を示すことを目的としている。

### (解説 1-2) 本ガイドラインの運用にあたって

炉内構造物の保全活動は、確立された原子力発電所の品質保証マネジメントシステムのもとで行われる保守管理の一環として行われなければならない。よって、本ガイドラインで適用する点検及び評価は、品質保証活動全般の基本的事項を規定した日本電気協会の「原子力安全のためのマネジメント規程 (JEAC4111)」及び品質保証活動のうち、事業者が供用期間中に実施すべき保守管理の基本要件を規定した「原子力発電所の保守管理規程 (JEAC4209)」に基づき実施されることを前提としている。

本ガイドラインでは、引用する学協会規格の改訂年度を記載していない。学協会規格は新知見反映等の理由で定期改訂されるため、利用者は最新版の適用可否を確認するとともに、原子力規制委員会による技術評価等の状況を総合的に勘案して、適切に判断する必要がある。

また、本ガイドラインでは、旧耐震設計審査指針で定める基準地震動  $S_2$  を用いた評価結果が記載されている場合があるが、利用者は「設置許可基準規則<sup>\*1</sup>」により定める基準地震動  $S_s$  を用いた評価を行う必要がある。さらに、ガイドライン付録で引用した材料物性値等についても、評価に際し適切に選定判断する必要がある。

\*1: 「設置許可基準規則」とは、原子力規制委員会の「実用発電用原子炉及びその付属設備の位置、構造及び設備の基準に関する規則」をいう。

## (解説 2-1) シュラウドに要求される安全機能

シュラウド及び支持ロッドに要求される安全機能は、BWR では「炉心支持と流路確保」、「炉心冠水と長期冷却の維持」、「制御棒挿入性の確保」、「非常用炉心冷却の確保」であり、ABWR は「炉心支持と流路確保」、「制御棒挿入性の確保」、「非常用炉心冷却の確保」である。

### ① 「炉心支持と流路確保」、「炉心冠水と長期冷却の維持」

シュラウドは、燃料上端を水平方向に支持する上部格子板と、燃料下端を水平方向に支持する炉心支持板を支持することによる炉心を支持する安全機能と、炉内隔壁を構築することによる、冷却材の流路を形成する安全機能を有している。

また、冷却材喪失事故（以下、LOCA と称する）時には、シュラウドにより形成される炉内隔壁は、燃料領域の堰（ダム）として機能し、炉心冠水と長期冷却を維持する安全機能も有している。

なお、シュラウド基部の H7 溶接継手全周にわたり板厚の 50% (約 25mm) の亀裂が存在した状態で基準地震動  $S_s$  の地震荷重を想定したとしても、シュラウドは崩壊せず、冷却材流路の確保及び LOCA 時の炉水再冠水が確保されることが確認されている。（付録 D 参照）

### ② 制御棒挿入性の確保

シュラウドは、燃料上端を水平方向に支持する上部格子板と、燃料下端を水平方向に支持する炉心支持板を支持することにより、制御棒の挿入経路を構築し、制御棒の挿入性を確保するという安全機能を有している。

なお、シュラウドの H6, H7 周方向溶接継手の全周にわたり板厚の 50% (約 25mm) の亀裂が存在した状態で、基準地震動  $S_s$  の地震荷重を想定したとしても、上部格子板及び炉心支持板位置の変位量は小さく、制御棒の挿入性は確保されることが確認されている。（付録 H 参照）

### ③ 非常用炉心冷却の確保

シュラウドは、非常用炉心冷却機器である炉心スプレイスパーージャと LPCI カップリングを支持することにより、非常時の炉心冷却を確保する安全機能を有している。

## (解説 2-2) シュラウドに想定される経年変化事象

これまでの損傷事例を考慮し、シュラウド及びタイロッドの経年劣化事象として SCC、及び照射誘起型 SCC (IASCC) を想定した。

シュラウドの材料には、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304L もしくは SUS316L が用いられている。

支持ロッドには、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS316L, SUSF316L 及び耐熱ステンレス鋼の GXM-1 相当材並びにニッケル合金(NCF750 相当材)を用いている。

炭素含有量が 0.030%を超えるオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) はクロム炭化物の粒界析出による粒界近傍のクロムの欠乏に起因して SCC が発生する可能性がある。これと比較して炭素含有量を 0.030%以下に抑えたオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L) は SCC が発生する可能性は小さい。

GXM-1 は SUS304 に比べて高強度であり、Nb, Mo 等の添加により SCC が発生する可能性が小さくなっている。

ニッケル合金の 182 合金は炭素含有量が 0.03%を超えるオーステナイト系ステンレス鋼と同様に、溶接入熱によるクロム炭化物の析出に伴う Cr 欠乏に起因して SCC 感受性を有する。これと比較して高 Cr, 高 Nb 含有の 82 合金及び高 Nb 含有の改良 182 合金は SCC が発生する可能性が小さくなっている。

ニッケル合金(NCF750 相当材)は高温水中で SCC 感受性を示し、その形態は粒界割れである。ニッケル合金(NCF750 相当材)の SCC 感受性は熱処理条件に依存し、SCC 感受性を低減するための適切な溶体化条件及び熱時効処理条件が設定されている。ただし、ニッケル合金(NCF750 相当材)の SCC 感受性は応力依存性を示すため、使用時の負荷応力に留意する必要がある。

上述のとおり、材料鋼種により SCC 感受性に相違があるが、国内外での SUS304L, SUS316L 製のシュラウドにおいても損傷事例が報告されていることから、本ガイドラインでは、材料鋼種によらず全ての溶接部に着目して検討を行う。

さらに、シュラウドの中間胴は、上部胴や下部胴に対して、比較的高い中性子照射を受けることから、照射誘起型 SCC (IASCC) について評価を行う。

(解説 2-3) 支持ロッドによる補修を実施していないシュラウドに対する点検対象の選定

シュラウドは、付録Aに示すように、形状の異なる多数の部品から構成されていることから、点検対象はシュラウドに要求される安全機能維持の観点から設定する。

シュラウドの溶接部には型式毎（図 3-1～図 3-3）に、周方向溶接部、縦方向溶接部があるが、縦方向溶接部はそれらの損傷を想定してもシュラウドの機能維持に有意な影響を及ぼさないと評価されることから、構造強度上重要な周方向溶接部を点検対象とする。

具体的に点検対象外とすることができる溶接部は以下のとおりである。（付録D参照）

(1) BWR 型①及び②（図 3-1, 図 3-2）

- ・ V1 溶接部（上部リングの縦方向溶接部）
- ・ V2 溶接部（上部胴の縦方向溶接部）
- ・ V3 溶接部（中間部リングの縦方向溶接部）
- ・ V4, V5 溶接部（中間部胴の縦方向溶接部）
- ・ V6 溶接部（下部リングの縦方向溶接部）
- ・ V7 溶接部（下部胴の縦方向溶接部）

(2) ABWR 型（図 3-3）

- ・ V3 溶接部（上部フランジの縦方向溶接部）
- ・ V4 溶接部（上部胴の縦方向溶接部）
- ・ V5 溶接部（中間部胴の縦方向溶接部）
- ・ V6 溶接部（下部リングの縦方向溶接部）
- ・ V7 溶接部（下部胴の縦方向溶接部）

#### (解説 2-4) 支持ロッドの構造及び機能

支持ロッドは、シュラウドの外側に設置され、主にシュラウド上部とシュラウドサポートプレートとを連結する棒状の支持ロッドと、シュラウドから原子炉压力容器への水平方向の荷重伝達経路を形成する水平レストレント（スタビライザ）により構成される。これにより、プラント運転中のシュラウドヘッド上下差圧によるシュラウドの浮き上がり防止と、地震時のシュラウドの転倒防止及び水平荷重を支持する機能を有している。

支持ロッドの有する上記機能により、シュラウドの周方向溶接部の健全性が損なわれた場合においても、シュラウドの構造を維持することが可能となるため周方向溶接部の点検は不要である。一方で支持ロッドを設置する際に周方向溶接部の強度を期待しないという前提をおいた場合には、縦方向溶接部は完全破断せずに形状を維持する必要がある。

このため、支持ロッドを設置したシュラウドに対しては、縦方向溶接部の点検を実施する。

国内に設置されている支持ロッドは、その構造から3つの形式に分類される。（付録A参照）

#### (解説 2-5) 支持ロッドの点検箇所の例

解説 2-4 に示す支持ロッドの機能維持を確認するために、支持ロッドで荷重伝達を受け持つ部材の取合い状態の確認を実施する (VT-3)。支持ロッドの点検箇所の例を以下に示す。

(付録 A 参照)

- ・ 全体の外観状況及び脱落の確認
- ・ 支持ロッド締付け箇所の廻り止め機能の確認
- ・ 上部ブラケット (上部サポート) とシュラウド上部リングとの取合い状態の確認
- ・ Tアダプタ (トグルバー) とシュラウドサポートプレートとの取合い状態の確認
- ・ 上部ブラケット (上部サポート) とシュラウドとの取合い位置の確認
- ・ 下部レストレント (下部スタビライザ) とシュラウドとの取合い位置の確認

また、国外においてニッケル合金 (NCF750 相当材) の支持ロッド構成部品に SCC と推定される損傷事例が報告されていることや、国内シュラウドにおける低炭素ステンレス鋼の硬化層に起因する SCC 事例が報告されていることに鑑み、支持ロッドの締結機能として重要な次の部位について、目視可能な範囲の MVT-1 による詳細点検の対象とするものとした。

- ・ 上部ブラケット (上部サポート) 取付け部付け根
- ・ Tアダプタ (トグル) 取付け部 (Tアダプタ取付け部付け根又はトグルクレビス)

#### (解説 4-1) 渦電流探傷試験

渦電流探傷試験 (ET) を適用する場合には、点検対象部位と電磁気的特性が同等な材料の校正試験片により、人工欠陥に対する検出感度を確認した手法を用いるものとする。試験装置及び機具等の要求仕様、試験の実施要領、並びに、信号の解析手法については、JEAG4217「原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針」に準拠して設定する。

### (解説 5-1) 初回点検

初回点検とは、第3章で定義されたシュラウドの溶接部のうち接近可能な周方向溶接部に対して実施する最初の点検であり、適用する手法の基準となる試験条件（目視試験における照度等）の設定を行うとともに、再点検の際に参照する点検記録を取得するために実施する基準となる点検である。

BWR型①のプラントにおける点検実施時期をプラント供用開始時点からの実運転時間で11年経過するまでとした根拠は以下の通りである。

- ・国内プラントのシュラウド材料は低炭素含有量のステンレス鋼であり、SCCの発生に対する裕度があること。
- ・シュラウドH7溶接継手のシュラウドサポートリング内面側に、機械加工による硬化層を考慮して深さ0.1mmの表面全周亀裂を初期亀裂として想定し、亀裂進展挙動を評価した例を、付録A図A-3.1.2.4.1-1に示す。この評価は、国内プラントの溶接手順等の溶接条件を反映して解析した残留応力分布を用いて、実施したものである。付録A図A-3.1.2.4.1-1より、全周にわたるSCCによる亀裂が発生・進展しても、プラント供用期間開始から運転時間で11年以内ではシュラウドサポートリング厚さの50%（約35mm）に及ぶような深さに進展することはないこと。（付録A）
  - ・保守的にSCCによる亀裂の発生・進展を想定した場合でも、プラント供用期間開始から実運転時間で11年以内では、シュラウドの構造健全性が損なわれる可能性は少ないと考えられること。（注-1）

（注-1）：欠陥裕度評価から最も荷重条件が厳しいH7溶接部のシュラウド下部胴側に全周にわたり、板厚の50%（約25mm）の亀裂を想定しても構造強度が確保できる。また、シュラウド下部胴よりも板厚の厚いシュラウドサポートリングに板厚の50%（約35mm）の亀裂を想定しても構造強度が確保される。したがって、プラント供用開始時点からの実運転時間で30年程度の期間にシュラウドの構造健全性に影響を与えることはないと考えられる。

BWR 型②における点検実施時期をプラント供用開始時点からの実運転時間で 20 年経過するまでとした根拠は以下の通りである。

- ・国内プラントのシュラウド材料は低炭素含有量のステンレス鋼であり，SCC の発生に対する裕度があること。
- ・シュラウド H7 溶接継手のシュラウド下部胴内面側に深さ  $50\mu\text{m}$  / 長さ  $500\mu\text{m}$  の初期亀裂を想定した進展評価の結果を付録 A 図 A-3. 1. 2. 4. 1-2 に示す。この図に示す様に，実運転時間 30 年程度であっても亀裂深さは 18mm 程度であり，シュラウドの構造健全性に影響を及ぼすようなシュラウド下部胴厚さの 50%（約 25mm）に及ぶ深さに進展することはないため，構造健全性は確保される（注-1）こと。
- ・しかしながら，BWR 型②では，実運転時間 20 年以内に亀裂の検出事例があることから，保守的に実運転時間 20 年を初回点検時期として設定した。

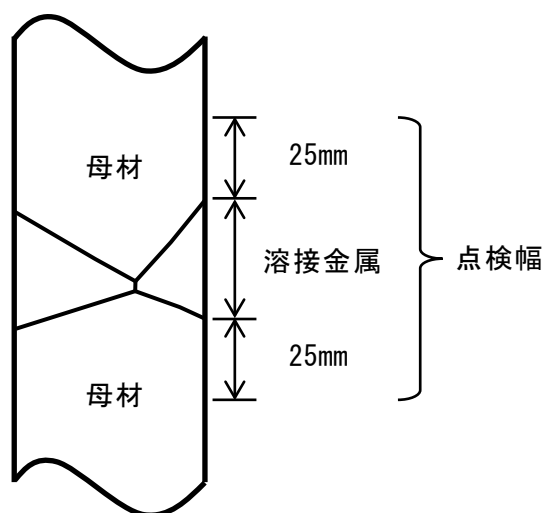
ABWRにおける点検実施時期をプラント供用開始時点からの実運転時間で40年経過するまでとした根拠は以下の通りである。

- ・国内プラントのシュラウド材料は低炭素含有量のステンレス鋼であり、SCCの発生に対する裕度があること。
- ・シュラウドH7溶接継手のシュラウド下部胴内面側に深さ $50\mu\text{m}$ ／長さ $500\mu\text{m}$ の初期亀裂を想定した進展評価の結果を付録A図A-3.1.2.4.1-3に示す。この図に示す様に、実運転時間40年程度であっても亀裂深さは27mm程度であり、シュラウドの構造健全性に影響を及ぼすようなシュラウド下部胴厚さの80%（約51mm）に及ぶ深さに進展することはないため、構造健全性が確保されること。
- ・ABWRについては、実運転時間40年であっても構造健全性が損なわれる可能性が低く、点検の必要性はないと考えられるが、運転経験の蓄積及び経年劣化事象に対する知見の拡充を目的として初回点検を実施するものとする。

なお、実運転年数が少ない時期にあつては、亀裂が存在しないか、存在しても小さいため、発生した亀裂がMVT-1試験で検出可能な大きさになる時期を考慮して、BWR型①のプラントの場合はプラント供用期間開始から運転時間で5年以降に、BWR型②及びABWR型のプラントの場合は10年以降に点検を行う。

(解説 5-2) 溶接部の点検幅

溶接部の点検は溶接金属及びその両側 25mm の幅（熱影響部を含む）について実施するが，この 25 mm の点検幅は，米国における 1990 年代の炉内構造物の詳細目視試験の実績を参考に「1 インチ」を mm に換算して定めたものである。この値は目視試験対象表面とカメラとの距離及びカメラの角度から，現実的な視野範囲として設定されたもので，国内の炉内構造物の詳細目視点検においても 1 インチ（25mm）が適用されてきた。



(解説 6-1) 残存断面積及び許容残存断面積

残存断面積とは、点検対象溶接線に沿った溶接部の断面積のうち、未点検範囲（注-2）や想定亀裂等の引張り荷重伝達を考慮しない部分を除いた面積である。

(注-2)：未点検範囲の取扱いについて

周方向溶接部において、当該溶接部のアクセス可能な範囲の点検を実施した場合で、点検実施範囲（点検割合）と未点検範囲とを比較して、SCCの発生又は進展に影響する要因に工学的に有意な相違が認められない場合には、以下により周方向溶接全体の想定欠陥割合を算定し、この範囲の引張り荷重伝達を考慮しないものとする。（付録G）

周方向溶接全体の想定欠陥割合は、図 6-1-1 に示す直線上で点検割合(X)に対応する値とする。直線は以下の通りに設定する。

- (1) 点検割合(X)50%以上：点検実施範囲での点検欠陥比率Yを点検割合50%以上の周方向溶接全体の想定欠陥割合(p)とする。
- (2) 点検割合(X)が0%から50%：点検割合が0%のとき、周方向溶接全体の想定欠陥割合(p)を100%とする。点検割合が50%のとき、周方向溶接全体の想定欠陥割合(p)は、(1)で定める通りYとする。両者を直線で結び点検割合(X)での周方向溶接全体の想定欠陥割合(p)とする。

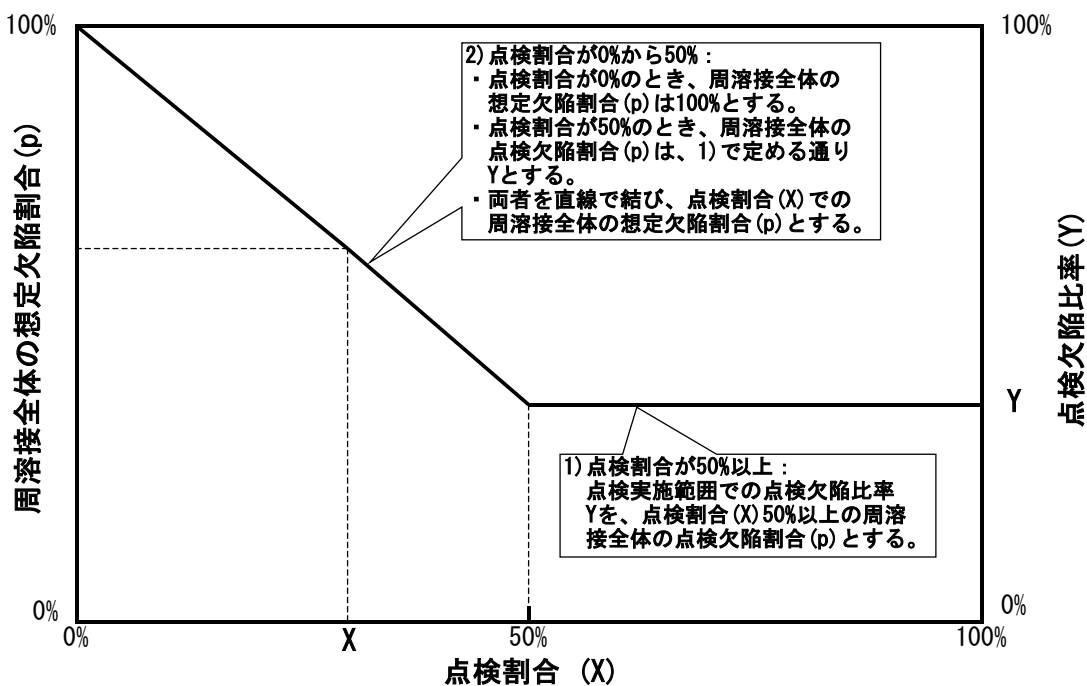


図 6-1-1 周方向溶接全体の想定欠陥割合を示す図

上記に該当しない場合は、未点検範囲全域に欠陥を想定する。なお、上記に該当する場合でも、評価の簡略化等の目的で、保守側の評価として、同様に未点検範囲全域に欠陥を想定してもよいものとする。

また、許容残存断面積とは、シュラウドの構造健全性確保のために必要な残存断面積である。本ガイドラインでは、許容残存断面積及び残存断面積を、全断面積に対する割合(%)で表す。許容残存断面積の評価方法を以下に示す。評価フローを図 6-1-2 に示す。(付録 E 参照)

(1) 解析モデル

解析モデルはシュラウド基部で取合うシュラウドサポートシリンダ及びサポートプレートを含むシュラウド全体をモデル化するものとし、シュラウドの形状、拘束条件及び対称性を考慮する。なお、下記に述べる亀裂を適切にモデル化すること。

(2) 荷重

運転時にシュラウドに作用する 1 次応力を発生させる差圧、死荷重及び地震荷重を考慮する。

(3) 座屈・崩壊荷重の算出と判断基準

座屈・崩壊荷重の算出は、日本機械学会 設計・建設規格 CSS-3160 に規定する方法に従い、差圧及び死荷重を負荷した状態で地震荷重  $S_2$  を比例倍させる手順で行うこととした。

(4) 想定する亀裂等

座屈・崩壊に対して最も厳しい荷重条件となるシュラウド基部の H7 溶接部であり、この部分に亀裂進展を想定して全周にわたり板厚を均等に減じさせる。H7 より上部の H3 から H6 溶接部では、加わる荷重が小さくなることから H7 溶接部の評価に包絡される。

なお、点検困難な部分については、未点検範囲(注-2)として取り扱い、想定欠陥範囲の荷重伝達機能は無視することとした。ただし、亀裂が存在しても圧縮荷重に関しての伝達は期待できるので、この圧縮荷重の伝達は考慮してよい。

また、H4 溶接部における中性子照射による破壊靱性の低下を考慮した破壊評価では、H7 溶接部と同様に全周亀裂を想定して板厚を均等に減じさせる。

ここでは、溶接部に対して垂直方向の縦割れは考慮していないが、これは、縦割れが構造強度に与える影響が少ないためである。(付録 D 参照)

## (5) 許容値の評価

上記手順で求めた崩壊荷重が設計荷重と安全係数を乗じた値以上になる場合の残存断面積を、許容残存断面積とすることができる。安全係数は、1.11(崩壊荷重の0.9倍を許容値)とする。(付録D参照)

シュラウド構造の場合、一般に(3)に示す方法によって算出した崩壊荷重は座屈荷重より小さく、座屈に先行して崩壊が発生する。また、上記残存断面積の条件で地震荷重が作用した場合でも炉心支持板・上部格子板位置での変位は小さく、制御棒挿入性への影響はない(付録H参照)ので、崩壊荷重との比較で許容値を評価することができる。なお、評価を実施する場合は基準地震動  $S_s$  を用いる必要がある。

1100MWe プラントの許容残存断面積の評価例を付録Dに示す。許容残存断面積は H7 溶接部で 50%である。

なお、シュラウドサポートなどの関連機器との欠陥重畳評価は以下の理由により考慮しないものとする。即ち、

- ① 欠陥裕度評価を行うことで、機器の構造・機能維持を確保するために、どの程度まで亀裂が許容できるかの目安を把握することができること。
- ② シュラウドサポート、シュラウドでは、かなり大きな亀裂まで許容でき、例えば荷重条件が厳しい部位に全周にわたり板厚の 50%程度の亀裂を想定しても構造健全性が確保できることがわかっていること。
- ③ 一方、初回点検の時期及び点検周期は、保守的に初期亀裂を想定した進展評価の結果を踏まえて、許容亀裂に比べて十分小さい亀裂が生じ得る時期までの間に点検を実施するように設定していること。

したがって、ガイドラインで設定される点検を実施することで、万一亀裂が生じていたとしても機器の強度低下を及ぼすような大きな亀裂が生じる前に検出できると考えていることから、各機器で大きな亀裂を重畳させた前提条件はあまりに保守的となるため、初回点検及び点検周期設定には考慮しない。

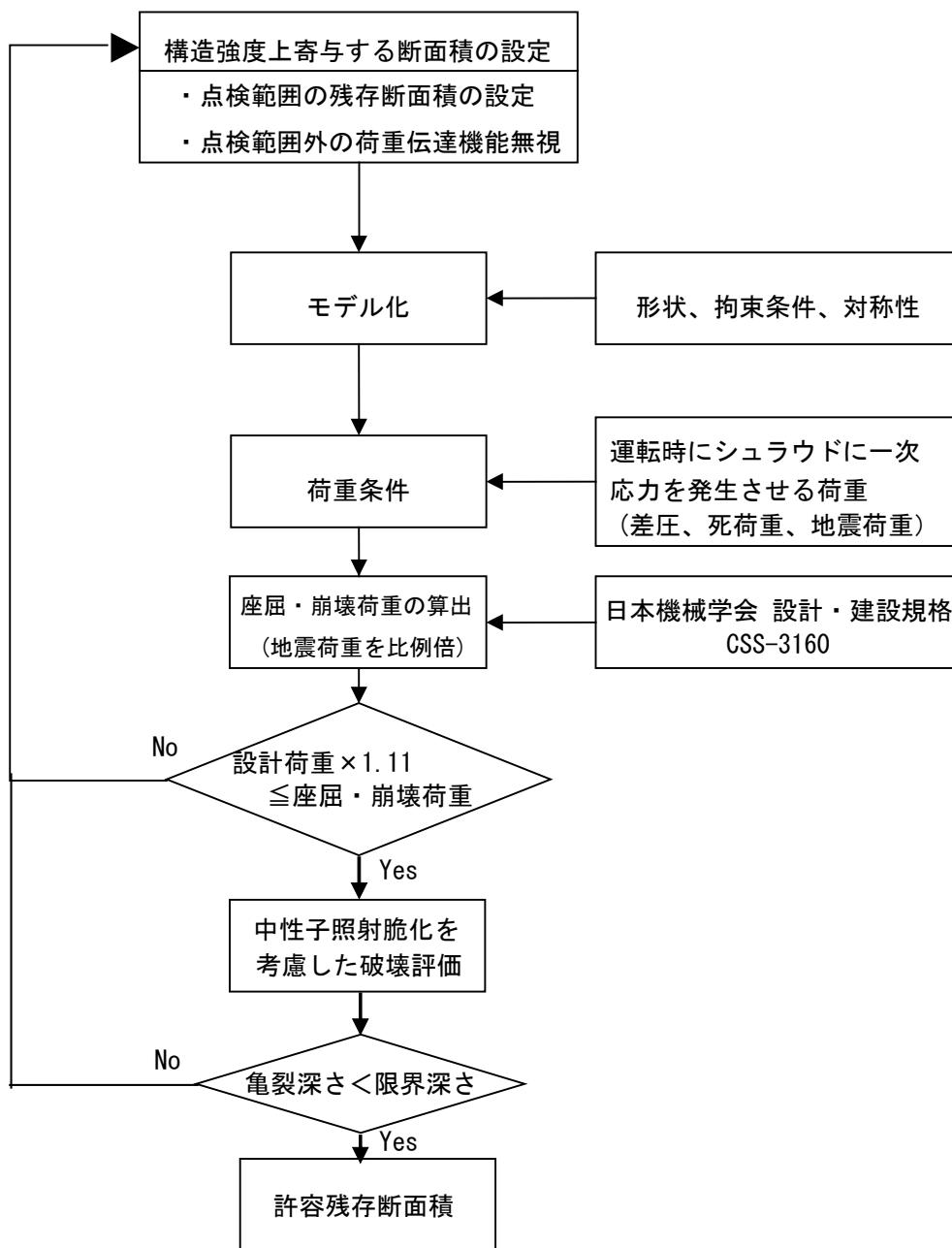


図 6-1-2 許容残存面積の設定手順

### (解説 6-2) 点検における接近性

シュラウドは他の炉内構造物などにより、点検のための接近が制限される。例えば、シュラウド上部の内面は炉心スプレイスパージャ、上部格子板により接近が制約され、シュラウド下部内面は炉心支持板、制御棒案内管などにより接近が制約される。シュラウド外面はジェットポンプなどにより接近が制約される。表 8-1～3 に要求するシュラウドの点検を実施する場合は、必要に応じて、接近に支障となる燃料や制御棒案内管などを取外すことにより点検可能範囲を広げることができる。

### (解説 6-3) 点検必要範囲及び点検周期

点検必要範囲とは、次回点検の時点において許容残存断面積以上の残存断面積を確保するために必要となる点検範囲のことで、許容残存断面積に、次回点検までの想定亀裂及び検出された亀裂の進展による断面積減少分を加えたものである。なお、健全性確認が必要な範囲の点検対象全体に対する割合 (%) で示す。

点検必要範囲 A%並びに点検周期 N 年は、次の点検までの期間における各溶接部の残存断面積の減少を下記(1)、(2)のように考慮して設定する。設定手順を図 6-3-1 に示す。(付録 E 参照)

#### (1) 健全部に想定する残存断面積減少

点検により健全性が確認された範囲について、次の点検までの期間における亀裂進展を想定する。

#### (2) 検出された亀裂部に想定する残存断面積減少

検出された亀裂については、適切にモデル化して、当該亀裂の進展による断面積減少を評価する。検出亀裂の進展評価は亀裂長さ／深さの同定により断面積として評価する。なお、亀裂深さを同定しない場合は貫通亀裂として保守的に仮定して評価するものとする。

比較的小さな亀裂が検出された場合に、点検周期を簡易に設定するひとつの方法を付録Fに示す。

なお、BWR型①のプラントにおいて、初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、実運転年数が初回点検から7年を超えない時期に再点検を実施してもよいとした根拠は以下のとおりである。

- ・2回目以降の試験においては、初回の検査により健全性を確認した試験範囲についても、保守的に、プラント起動後にSCCの発生・進展する可能性を考慮する。すなわち、想定した初期亀裂（深さが約1mm）が亀裂進展し、厚さの50%（約35mm）に及ぶような大きさに成長することはないと考えられる、運転時間で7年の期間内に試験を実施することとした。（付録A参照）

また、BWR型②のプラントにおいて、初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、実運転年数が初回点検から10年を超えない時期に再点検を実施してもよいとした根拠は以下のとおりである。

- ・初回点検で亀裂が検出されなかった場合、亀裂は存在しないと考えるのが妥当であるが、検出精度を考慮して保守的に長さ10mm深さ1mmの亀裂が存在したと仮定し、その亀裂が実運転時間10年間に進展したとしても、亀裂深さは約11mm程度であり、機器の健全性に影響を与えないと考えられること。（付録A参照）

ABWR型のプラントにおいて、初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、実運転年数が初回点検から20年を超えない時期に再点検を実施してもよいとした根拠は以下のとおりである。

- ・初回点検で亀裂が検出されなかった場合、亀裂は存在しないと考えるのが妥当であるが、検出精度を考慮して保守的に長さ10mm深さ1mmの亀裂が存在したと仮定し、その亀裂が実運転時間20年間に進展したとしても、亀裂深さは約25mm程度であり、機器の健全性に影響を与えないと考えられること。（付録A参照）

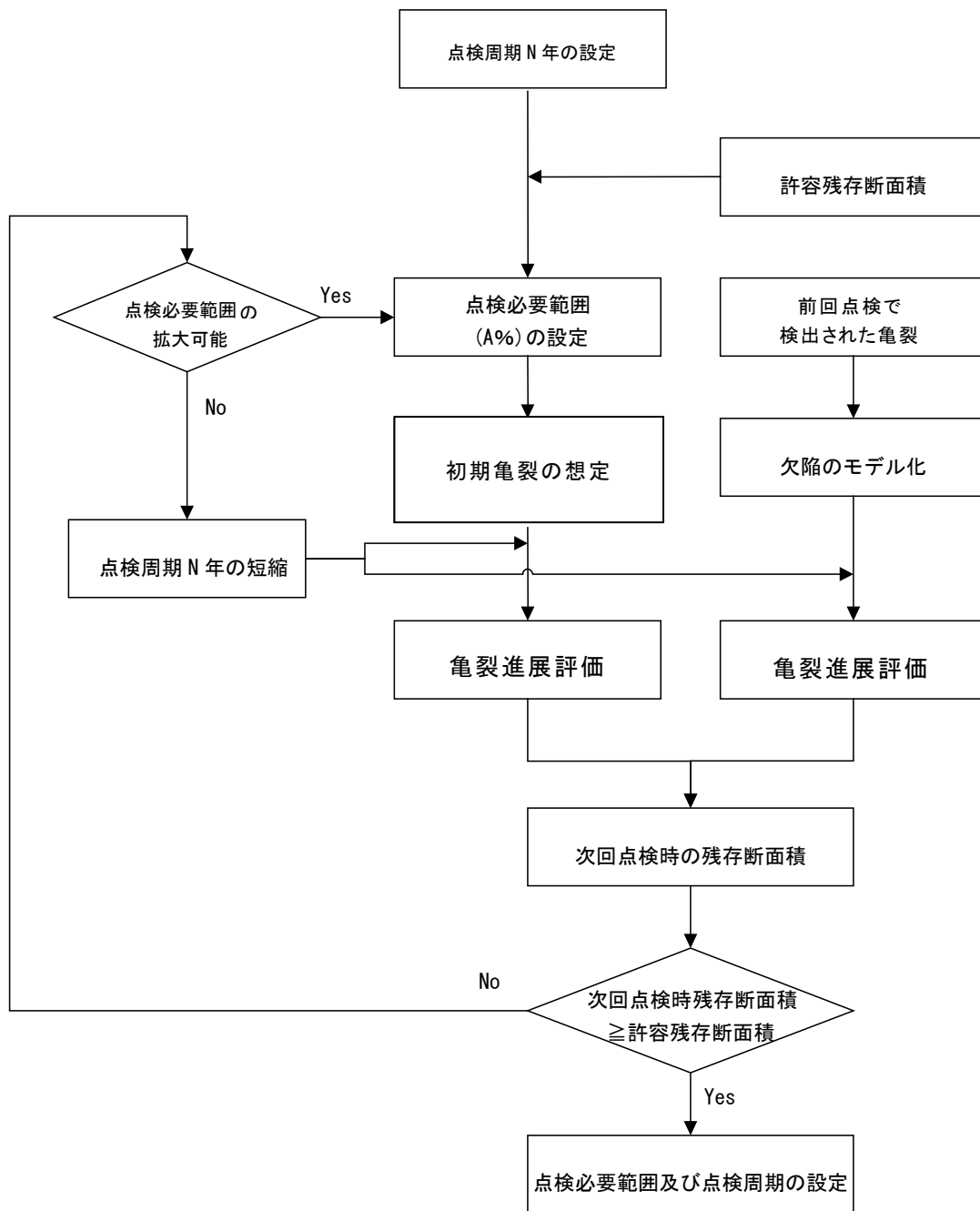


図 6-3-1 点検必要範囲 及び 点検周期の設定手順

#### (解説 6-4) SCC 予防保全対策

本ガイドラインでは、プラント毎に評価し、その効果が有効であると認められた予防保全対策が適用された部位については、適切な点検時期などを設定できるものとする。実機への予防保全対策例は以下がある。

- ・水質環境改善：水素注入，貴金属コーティング，貴金属注入等
- ・応力改善：ピーニング，磨き等
- ・材質改善：クラディング，脱鋭敏化处理等

SCC 発生を抑制するための一般的な注意事項は、JSME 設計・建設規格事例規格 NC-CC-002：発電用原子力設備における「SCC 発生の抑制に対する考慮」に纏められている。また、シュラウドに適用可能なものとして、制定済みの予防保全工法ガイドラインには以下がある。

- ・JANTI-VIP-03「ピーニング工法」
- ・JANTI-VIP-07「水中レーザークラッド溶接工法」
- ・JANTI-VIP-10「研磨による応力改善工法」
- ・JANSI-VIP-18「水素注入による環境改善効果の評価方法」

#### (解説 6-5) シュラウドの補修技術

万一シュラウド溶接部に亀裂が検出され、構造健全性に関する詳細評価の結果により補修が必要となった場合、補修が必要になる実機への適用実績のある取替・補修例は以下のとおりである。

- ・シュラウド取替
- ・機械的補修：クランプ，ブラケット工法，支持ロッド工法
- ・溶接等による補修：水中溶接（湿式），水中溶接（乾式），封止溶接等

シュラウドに適用可能な補修工法ガイドラインとして以下がある。

- ・JANTI-VIP-01「封止溶接工法」
- ・JANTI-VIP-16「水中レーザー肉盛溶接工法」

#### (解説 6-6) 支持ロッドの点検の考え方

支持ロッドは、溶接部の存在しない構造を採用しており、想定される損傷要因に対する評価を実施して、損傷ポテンシャルは十分低いと評価されている。(付録A参照)

しかしながら、国外においてニッケル合金(NCF750相当材)の支持ロッド構成部品にSCCと推定される損傷事例が報告されたことや、シュラウドにおける低炭素ステンレス鋼の硬化層に起因するSCC事例が報告されていることに鑑み、個別点検を設定した。

点検周期の設定にあたっては、国外プラントにおいて10年を越える使用実績が多数積み重ねられてきていることを考慮し、点検周期は実運転時間で10年以内とした。

今後もプラント運転実績調査を継続し、必要に応じて点検周期の見直しを行うものとする。

#### (解説 6-7) 支持ロッド補修後のシュラウド縦方向溶接部の点検

シュラウドの縦方向溶接部は、周方向溶接部が健全である場合には、解説2-3に示すとおりシュラウドの機能維持に有意な影響を及ぼさないと考えられるが、支持ロッドを設置する際に周方向溶接部の強度を期待しないという前提をおいた場合には、縦方向溶接部は完全破断せずに形状を維持する必要がある。このため、上述の前提をおいた場合には、定期的に縦方向溶接部の点検を実施する必要がある。

代表的な1100MWe級プラントの縦方向溶接部に、深さ1mm、長さ10mmの溶接部に平行な初期亀裂があったと想定した場合の亀裂進展挙動の評価例を付録C参考図C-5(1),(2)に示す。(付録C参照)

本図に示すとおり、板厚の80%(約40mm)まで亀裂が到達するのは、外表面及び内表面からの進展を考慮しても、実運転時間で20年程度以上である。一方、縦方向溶接部は板厚の80%を越える深さの亀裂を仮定しても構造強度が確保できるため、20年以内の期間で縦方向溶接部の構造健全性が損なわれる可能性はないと考えられる。

シュラウドには亀裂の検出事例があることから、支持ロッドの点検に合わせて点検を実施することとし、点検周期は実運転時間で10年以内とした。

## 付録A シュラウドの各構造体に対する点検の考え方について

### 1. 目的

本付録は、BWR 及び ABWR シュラウドを構成する構造体について、①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷を考慮した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. シュラウドの説明

#### 2.1 安全機能

シュラウドは安全機能として、炉内隔壁を構成することにより達成される「炉心支持と流路確保」及び「炉心冠水と長期冷却の維持」の機能を有する。

また、シュラウドに設置された上部格子板と炉心支持板が燃料の上下端を支持することにより「制御棒挿入性の確保」の機能を、非常時の炉心冷却機器である炉心スプレイスパージャと LPCI カップリングを支持することにより「非常時炉心冷却の確保」を間接的に有している。

#### 2.2 シュラウドを構成する各構造体（図 A-2.2.1-1, 2）

BWR のシュラウドは、上部胴、中間部胴、下部胴の 3 段の円筒を上部リング、中間部リング、下部リングを介して溶接により結合した構造物である。なお、シュラウドと溶接接続するシュラウドサポートにおいてはシュラウドサポートリングを有する構造、有しない構造がある。

上部リングには、内面に水シールを形成するための構造体であるスカート（シールドプレートとも言う）と、シュラウドヘッドとの連結するための構造体である、ガイドピンブラケット、ヘッドボルトブラケット等が付属している。

上部胴には、炉心スプレイスパージャとその支持ブラケット、LPCI カップリングからの注水を炉内に導くバッフルプレート、上部格子板を水平方向に支持するブロック、上部格子板の浮上りを防止するホールドダウンブラケットなどの構造体が付属している。

中間部リングには、上部格子板を支持する構造体である、トップガイドベース、アライナブラケットなどの構造物が付属している。

ABWR のシュラウドは、上部胴が上部格子板と一体化しているため、中間部胴以下の 2 段円筒構造になっている。

ABWR のシュラウドには、原子炉冷却材再循環ポンプ（以下、RIP と称する）の据付・取外し時の案内を行う RIP ガイドレールが付属している。

ここで、BWR、ABWR の各シュラウドの型式を以下の通り識別する。

BWR 型①：シュラウドサポートリングを有するプラントの BWR シュラウド

BWR 型②：シュラウドサポートリングが無いプラントの BWR シュラウド

ABWR 型：ABWR シュラウド（シュラウドサポートリング無し）

本書では、シュラウドを構成する構造体を以下のように分類して、点検評価を行う。

① シュラウド本体

構成部品：上部リング，上部胴，中間部リング，中間部胴，下部リング，  
下部胴，シュラウドサポートリング

② スカート

構成部品：スカート

③ シュラウドヘッド接続部材

構成部品：ガイドピンブラケット，ヘッドボルトブラケット

④ LPCI バッフルプレート

構成部品：LPCI バッフルプレート

⑤ 炉心スプレイスパージャ

構成部品：炉心スプレイスパージャ，炉心スプレイスパージャ支持ブラケット

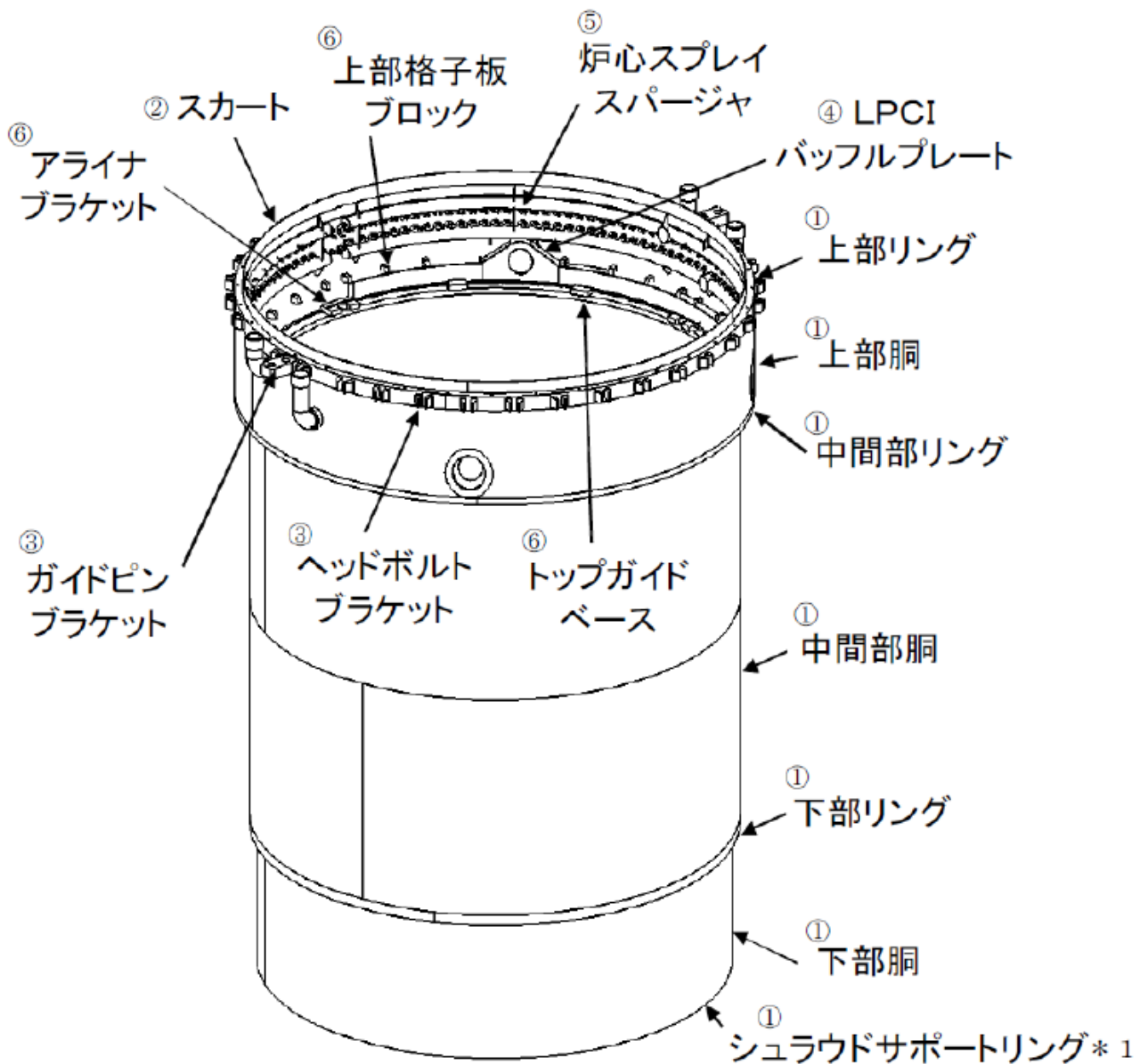
⑥ 上部格子板支持部材

構成部品：上部格子板ブロック，ホールドダウンブラケット，  
トップガイドベース，アライナブラケット

⑦ RIP ガイドレール

構成部品：RIP ガイドレール

このうち、⑤炉心スプレイスパージャ、⑥上部格子板支持部材（上部格子板の制御棒挿入機能を担う上部格子板ブロック及びホールドダウンブラケット）については、別途発行されている、「炉心スプレイ配管・スパージャ」の点検評価ガイドライン、「上部格子板」の点検評価ガイドラインの中で点検方針が論じられており、それぞれの点検評価ガイドラインにしたがって点検を行うものとする。



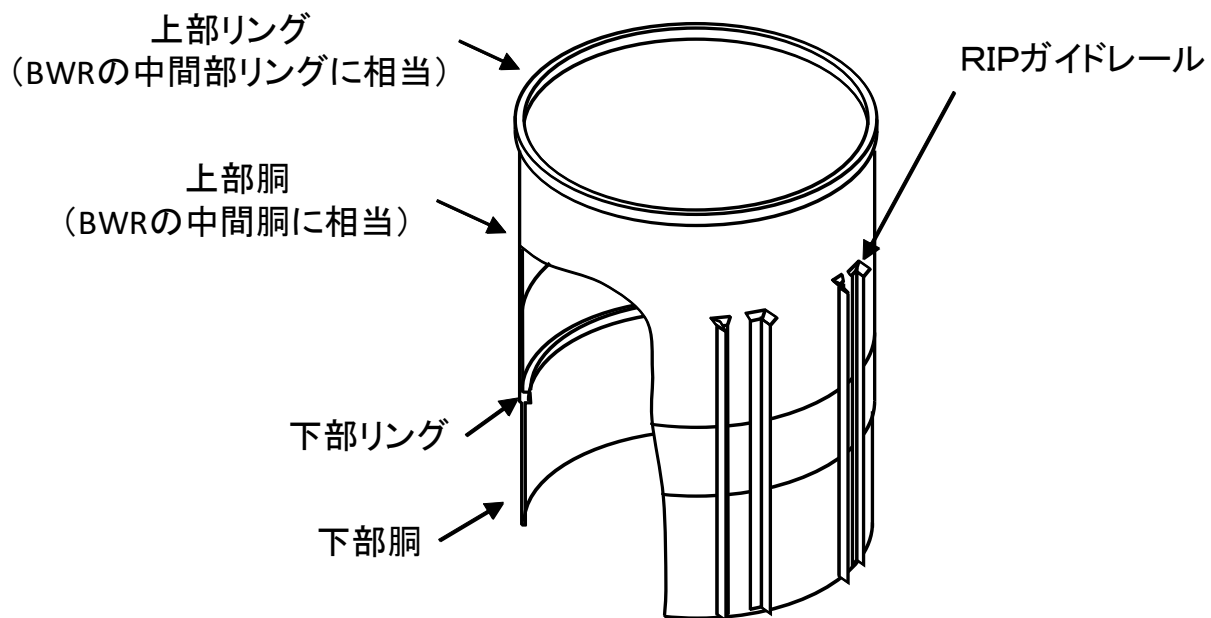
注：①～⑥は点検評価位置を示す。

\* 1 : BWR シュラウドの型式は以下の通り識別する。

BWR 型① : シュラウドサポートリングを有するプラントの BWR シュラウド

BWR 型② : シュラウドサポートリングが無いプラントの BWR シュラウド

図 A-2. 2. 1-1 シュラウド (BWR 1100MWe)



注：ABWR シュラウドの型式は，ABWR 型と識別する。

図 A-2.2.1-2 シュラウド (ABWR)

### 3. シュラウドの各構造体に対する点検方針

#### 3.1 シュラウド本体

ここでは、シュラウドの炉心隔壁を構成する、上部リング、上部胴、中間部リング、中間部胴、下部リング、下部胴、シュラウドサポートリングに対し、点検方針を記載する。

##### 3.1.1 安全機能などの整理

点検方針を策定するにあたり、シュラウド本体の①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響を以降に整理する。

###### 3.1.1.1 安全機能

シュラウド本体は炉心隔壁を形成する構造物であり、「炉心支持と流路確保」の機能を有する。また、シュラウド本体のうち中間部胴以下の部材は、炉心（燃料）の高さまでの堰（ダム）となっていることから、「炉心冠水と長期冷却の維持」の機能を有している。

上部胴以下の部材は、燃料を水平方向に支持する上部格子板、炉心支持板を支持していることから、間接的に「制御棒挿入性の確保」の機能を有する。また、炉心スプレイスパージャと LPCI カップリングを支持していることから、間接的に「非常時炉心冷却の確保」も有する。

###### 3.1.1.2 形状及び材質

###### 3.1.1.2.1 形状

BWR のシュラウドは、上部胴、中間部胴、下部胴の 3 段の円筒を、上部リング、中間部リング、下部リングを介して溶接により結合した構造物である。

ABWR のシュラウドは、上部胴が上部格子板と一体化しているため、中間部胴以下の 2 段円筒構造になっている。

###### 3.1.1.2.2 材質

シュラウド本体の主な材質は、低炭素ステンレス鋼（炭素含有量が 0.03% 以下）であり、溶接により構成される構造物である。

シュラウドの各部品に使用される材質の代表例を表 A-3.1.1.2.2 に示す。

表 A-3. 1. 1. 2. 2 シュラウド本体 材質の代表例

部 位	BWR 型①	BWR 型② (SUS316L 型)	BWR 型② (SUS304L 型)	ABWR 型
上部リング	SUS316L	SUS316L	SUS304L	—
上部胴	SUS316L	SUS316L	SUS304L	—
中間部リング	SUS316L	SUS316L	SUS304L	SUS316L/SUSF316L
中間部胴	SUS316L	SUS316L	SUS304L	SUS316L/SUSF316L
下部リング	SUS316L	SUS316L	SUS304L	SUS316L/SUSF316L
下部胴	SUS316L	SUS316L	SUS304L	SUS316L/SUSF316L
シュラウドサポートリング*	SUS316L	—	—	—

注記\*：シュラウドサポートリングは、シュラウド下部胴と溶接接続するシュラウドサポートの部位である。

### 3. 1. 1. 3 想定される劣化事象

シュラウド本体はステンレス鋼製であり、溶接部に SCC が想定される。

なお、溶接部から比較的離れた母材部でも SCC が確認されている事例があるが、これは製造時の表面加工によるごく浅い表層部が硬化し引張残留応力が発生したことによると推定されており、溶接線に沿った割れに比べて、その SCC は局所的又は表面にとどまる特徴がある。

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。

### 3. 1. 1. 4 国内外の運転経験

国内においては、シュラウド本体の損傷事例として、周方向溶接部（H2，H3，H4，H6，H7），縦方向溶接部（V2，V4，V6）に、損傷が報告されている。損傷の報告時期を見ると、BWR 型①ではプラント運転開始後 10 年以内に亀裂の検出事例があり、BWR 型②ではプラント運転開始後 10 年以内に亀裂の検出事例はない。ABWR 型では周方向溶接部及び縦方向溶接部の損傷事例は報告されていない。

海外には ABWR 型はないが、SUS304L 製の BWR 型シュラウドにおいて、周方向溶接部、縦方向溶接部に複数の SCC 損傷事例がある。

### 3.1.1.5 損傷による安全機能への影響

シュラウド本体の溶接部（H1～H7b 溶接部）が損傷した場合，以下の安全機能への影響を考慮する必要がある。

なお，シュラウド本体は縦溶接を有するが，縦溶接が損傷したとしても，周方向溶接が健全であれば構造健全性は維持されることから，安全機能への影響は，周溶接（V1～V7）に比べて小さいと考えられる。

- ・炉心支持機能と流路確保

シュラウド本体の周方向溶接部（H1～H7b 溶接部）が損傷した状態で地震荷重が加わった場合，隔壁が開放されたり，位置ずれが生じたりするため，安全機能が失われる可能性があり，炉心支持機能に影響する。

一方，縦方向溶接部（V1～V7 溶接部）は，構造強度評価の結果，それらが損傷しても周方向溶接が健全であれば構造健全性は維持されることから，縦溶接部の損傷はシュラウドの安全機能維持に影響を及ぼさない。

- ・冠水維持機能（ABWR は除く）

ジェットポンプを備える BWR では，シュラウド，シュラウドサポートプレート及びジェットポンプによって，再循環系配管破断による冷却材喪失後の冠水維持機能を維持される。ジェットポンプインレットミキサ上部高さまでのシュラウドの溶接部の貫通割れは冠水維持機能に影響を与える可能性があるが，その影響は軽微と考えられる。

なお，ABWR においては，冠水維持機能を有していない。

- ・制御棒挿入機能

荷重伝達経路は炉心支持機能と同様に考えられ，周方向溶接部の損傷により制御棒挿入性に影響する。

- ・非常時炉心冷却の確保機能

荷重伝達経路は，炉心スプレイスパージャと LPCI カップリングの支持機能と同様に考えられ，周方向溶接部の損傷により非常時炉心冷却の確保機能に影響する。

### 3.1.2 シュラウド本体の点検方針

シュラウド本体の①安全機能，②形状及び材質，③想定される経年劣化事象，④国内外の運転経験，⑤損傷による安全機能への影響に基づき，シュラウド本体の点検方針として，点検対象，点検手法，点検範囲並びに点検時期を策定する。

#### 3.1.2.1. 点検対象の選定

シュラウド本体については，国内外のプラントでの運転経験において損傷事例が確認されており，損傷による安全機能に対する影響の評価結果から，その損傷が安全機能の喪失につながる周方向溶接部（H1～H7b 溶接部）を個別点検の対象とする。

上記を含めたその他の部位については，一般点検により健全性の確認を行うものとする。（表 A-3，図 A-3.1.2.1 参照）

#### 3.1.2.2. 点検手法の選定

点検対象である周方向溶接部（H1～H7b 溶接部）において，想定される経年劣化事象は，ステンレス鋼溶接部に対する SCC である。

シュラウドの点検は，SCC により表面開口している亀裂の検出を目的としていることから，目視試験の中でも検出精度の高い MVT-1 を採用する。

### 3.1.2.3. 点検範囲の選定

シュラウドの点検対象は周方向溶接部（H1～H7b 溶接部）であるが，ジェットポンプなどの干渉により点検できない場所があること，点検長さが長大であり点検毎にすべての溶接線を検査することは合理的でないことから，想定される劣化事象である SCC の進展速度を評価し，次回点検までの期間に安全機能を維持することが確認できる範囲の点検を行うものとする。

具体的に初回点検，再点検における点検範囲を以下に示す。

#### (1) 初回点検

初回点検は点検対象に対して行う最初の試験であり，点検手法である MVT-1 による点検可能範囲の確認や，再点検の際に基準となる点検記録の取得の必要があることから，初回点検における点検範囲は，接近可能なすべての周方向溶接部とする。

#### (2) 再点検

溶接部の再点検範囲は，次回点検の時点において，残存断面積が許容残存断面積を確保するために必要な範囲とする。

具体的には，点検範囲は以下のように設定される。

1. 次回点検までの想定期間  $N$  年を設定すると同時に，前回点検からの期間  $N'$  年を確認する。
2. 点検範囲を仮設定する。
3. 仮設定した点検範囲に，前回点検で発見された亀裂がある場合，前回点検から  $N'$  年進展するものとして，今回点検での亀裂長さを想定する。また，点検しない範囲には全面に亀裂があると想定する。
4. 3で想定した亀裂が，次回点検までの期間  $N$  年分進展したとして，次回点検時の残存断面積評価を実施する。
5. 4で評価した残存面積が，許容残存断面積以上であることを確認する。残存面積が許容残存断面積未満である場合は，点検範囲を拡大するか，次回点検までの期間を短縮するなどして，点検範囲を確定する。

#### 3.1.2.4. 点検時期の選定

点検時期は、シュラウドの周方向溶接部の亀裂進展評価及び亀裂が進展した際の欠陥裕度評価に基づき選定した。

##### (1) 評価対象の溶接部

シュラウドの溶接部に欠陥が発生した場合に構造健全性上考慮すべき荷重は、シュラウドより上部の構造物、炉心支持板、上部格子板等から加わる水平力、鉛直力、回転モーメントであり、これらによるシュラウドの座屈・崩壊が問題となり安全機能に影響を及ぼす。これらの荷重の影響が最も大きく表れるのはシュラウド基部 H7 溶接部である。溶接部の欠陥裕度評価の結果、縦方向溶接部に亀裂が発生しても顕著な影響がないこと等を確認し、H7 溶接部の評価が他の溶接部の評価を包絡することを確認していることから（付録D補足資料参照）、H7 溶接部を評価対象とした。

##### (2) 点検時期の選定

BWR 型①、BWR 型②、ABWR 型の各シュラウドの H7 溶接部に対して亀裂進展評価を行い、S<sub>s</sub> 地震荷重を適用した欠陥裕度評価結果に基づき点検時期を選定した。

### 3.1.2.4.1 初回点検

#### (1) BWR 型①

BWR 型①における初回点検の実施時期をプラント供用開始時点からの実運転時間で 11 年経過するまでとする。その根拠は以下の通りである。

- ・ 国内プラントのシュラウド材料は低炭素含有量のステンレス鋼であり、SCC の発生に対する裕度があること。
- ・ シュラウド H7 溶接部のシュラウドサポートリング内面側に機械加工による硬化層を考慮して深さ  $50\mu\text{m}$  の表面全周亀裂を初期亀裂として想定した場合の亀裂進展挙動の評価例を図 A-3.1.2.4.1-1 に示す。この評価結果は、国内プラントの溶接手順等の溶接条件を反映して解析した残留応力分布を用いて評価したものである。図 A-3.1.2.4.1-1 より、全周にわたる SCC による亀裂が発生・進展しても、プラント供用期間開始から運転時間で 11 年以内ではシュラウドサポートリング厚さの 50% (約 35 mm) に及ぶような深さに進展することはないこと。(付録 B, C 参照)
- ・ 保守的に SCC による亀裂の発生・進展を想定した場合でも、プラント供用期間開始から実運転時間で 11 年以内では、シュラウドの構造健全性が損なわれる可能性は少ないと考えられること。

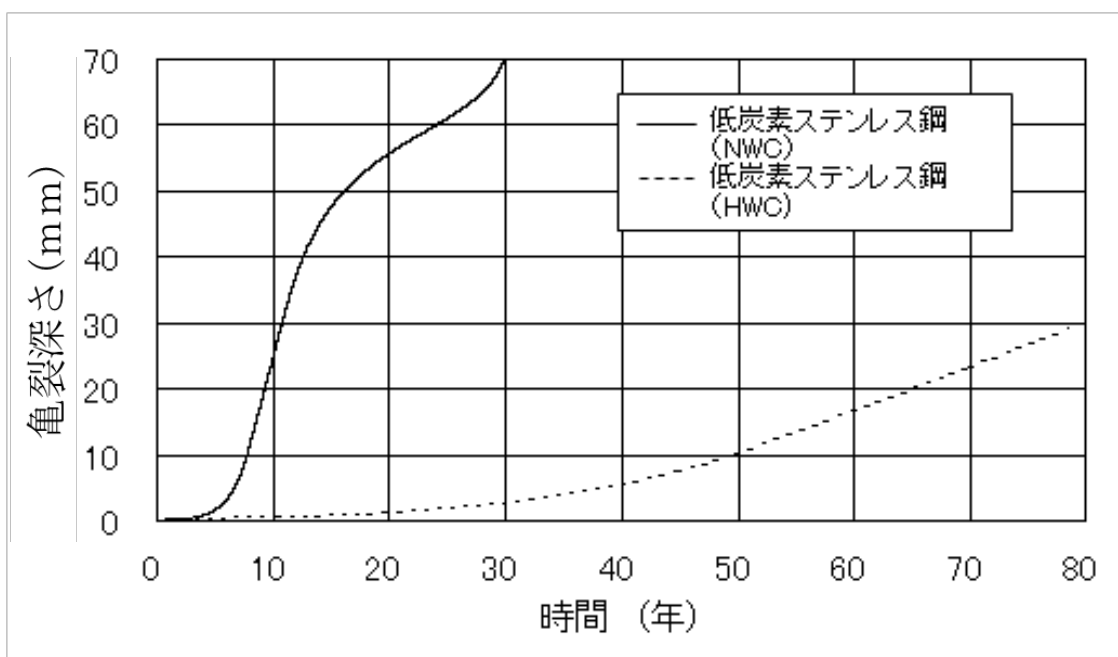


図 A-3.1.2.4.1-1 亀裂深さと時間の関係 (H7 リング有り)

(2) BWR 型②

BWR 型②における初回点検の実施時期をプラント供用開始時点からの実運転時間で 20 年経過するまでとする。その根拠は以下の通りである。

- ・ 国内プラントのシュラウド材料は低炭素含有量のステンレス鋼であり、SCC の発生に対する裕度があること。
- ・ シュラウド H7 溶接部のシュラウド下部胴内面側に深さ  $50\mu\text{m}$  / 長さ  $500\mu\text{m}$  の初期亀裂を想定した進展評価の結果を図 A-3. 1. 2. 4. 1-2 に示す。この図に示す様に、実運転時間 30 年程度であっても亀裂深さは 18mm 程度であり、シュラウドの構造健全性に影響を及ぼすようなシュラウド下部胴厚さの 50% (約 25mm) に及ぶ深さに進展することはない (付録 B, C 参照) ため、構造健全性は確保される (注-1) が、亀裂の検出事例があることから、保守的に実運転時間 20 年を初回点検時期として設定した。

(注-1) : 欠陥裕度評価から最も荷重条件が厳しい H7 溶接部のシュラウド下部胴側に全周にわたり、板厚の 50% (約 25 mm) の亀裂を想定しても構造強度が確保できる。また、シュラウド下部胴よりも板厚の厚い、シュラウドサポートリングに板厚の 50% (約 35 mm) の亀裂を想定しても構造強度が確保される。よって、この間にシュラウドの構造健全性に影響を与えることはないと考えられる。(付録 B, C 参照)

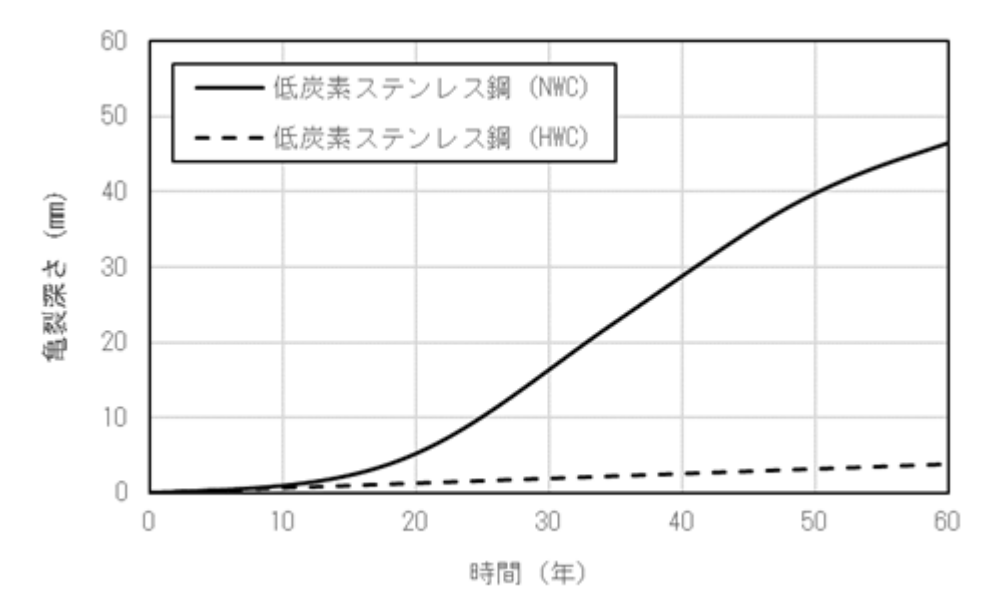


図 A-3. 1. 2. 4. 1-2 亀裂深さと時間の関係 (H7 リング無し)

### (3) ABWR 型

ABWR 型における初回点検の実施時期をプラント供用開始時点からの実運転時間で 40 年経過するまでとする。その根拠は以下の通りである。

- ・ 国内プラントのシュラウド材料は低炭素含有量のステンレス鋼であり、SCC の発生に対する裕度があること。
- ・ シュラウド H7 溶接部のシュラウド下部胴内面側に深さ  $50\mu\text{m}$  / 長さ  $500\mu\text{m}$  の初期亀裂を想定した進展評価の結果を図 A-3. 1. 2. 4. 1-3 に示す。この図に示す様に、実運転時間 40 年程度であっても亀裂深さは 27mm 程度であり、シュラウドの構造健全性に影響を及ぼすようなシュラウド下部胴厚さの 80% (約 51mm) に及ぶ深さに進展することはない (付録 B, C 参照)。
- ・ ABWR については、実運転時間 40 年であっても構造健全性が損なわれる可能性が低く、点検の必要性はないと考えられるが、運転経験の蓄積及び経年劣化事象に対する知見の拡充を目的として初回点検を実施する。

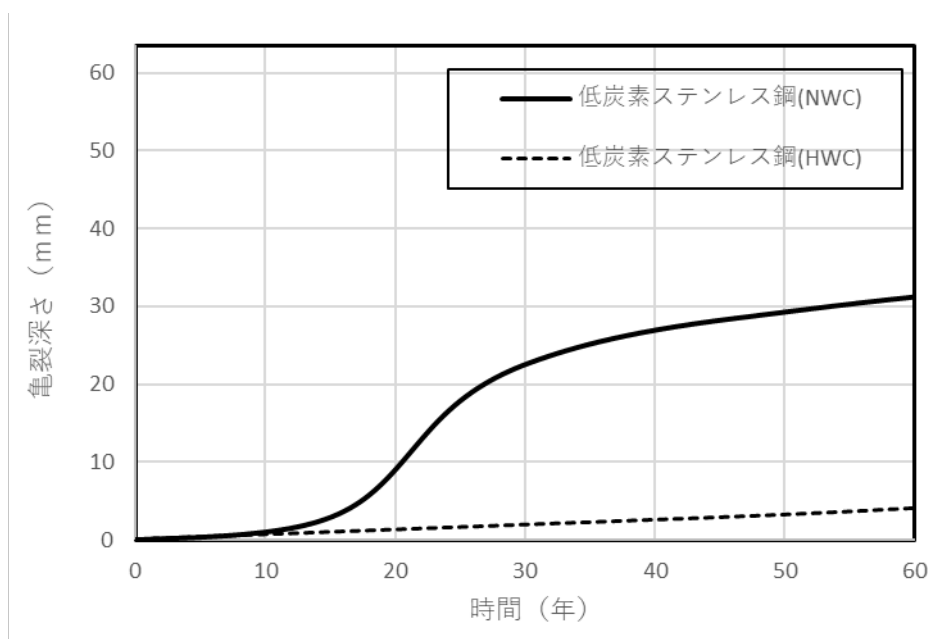


図 A-3. 1. 2. 4. 1-3 亀裂深さと時間の関係 (ABWR)

#### 3.1.2.4.2 再点検

BWR 型①，BWR 型②，ABWR 型のシュラウド溶接部の再点検時期は，実施済みの点検結果から次回点検までの亀裂の進展を想定し，次回点検時の残存断面積が許容残存断面積を確保できる期間内に設定する。

具体的には，点検時期は以下のように設定される。

1. 次回点検までの想定期間 N 年を確認する。
2. 点検範囲を確認する。
3. 点検範囲に，亀裂が確認された場合，その長さを確認する。また，点検未実施の範囲には全面に亀裂があると想定する
4. 3 で想定した亀裂が，次回点検までの期間 N 年分進展したとして，次回点検時の残存断面積評価を実施する。
5. 4 で評価した残存面積が許容残存断面積以上であることを確認する。

残存面積が許容残存断面積未満である場合は，同一点検期間内に追加点検を実施して点検範囲を拡大するか，次回点検までの期間を短縮するなどして，次回の点検時期を確定する。

なお，初回点検で亀裂が検出されなかった場合は，以下の通りとする。

(1) BWR 型①

BWR 型①のシュラウド溶接部の初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、以下の根拠により、実運転年数が初回点検から7年を超えない時期に再点検を実施してもよい。

- ・ 初回の検査により健全性を確認した試験範囲についても、保守的に深さ 1mm の初期亀裂が存在したと仮定し、その亀裂が7年間進展したとしても、厚さの 50% (約 35 mm) に及ぶような大きさに成長することはない。(図 A-3.1.2.4.2-1 参照)

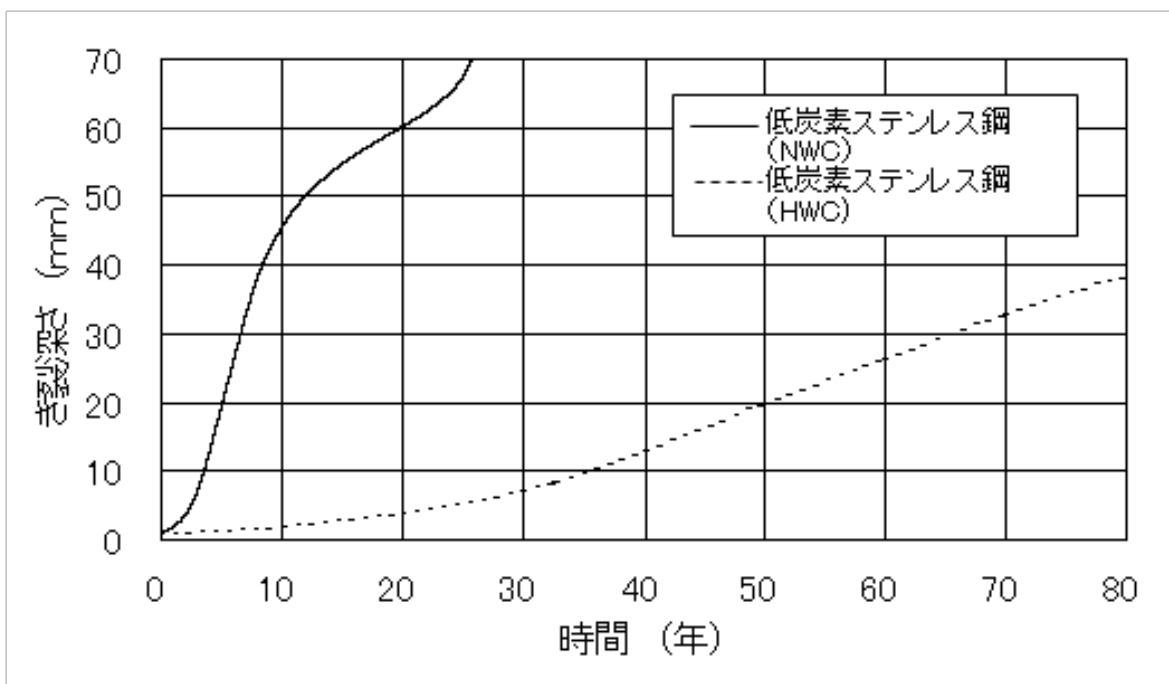


図 A-3.1.2.4.2-1 亀裂深さと時間の関係 (H7 リング有り)

(2) BWR 型②

BWR 型②のシュラウド溶接部の初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、以下の根拠により、実運転年数が初回点検から 10 年を超えない時期に再点検を実施してもよい。

- ・ 初回の検査により健全性を確認した試験範囲について、検出精度を考慮して、長さ 10mm 深さ 1mm の亀裂があると想定し、その亀裂が 10 年間進展したとしても、亀裂深さは 11mm 程度であり、機器の健全性に影響を与えない。（図 A-3.1.2.4.2-2 参照）

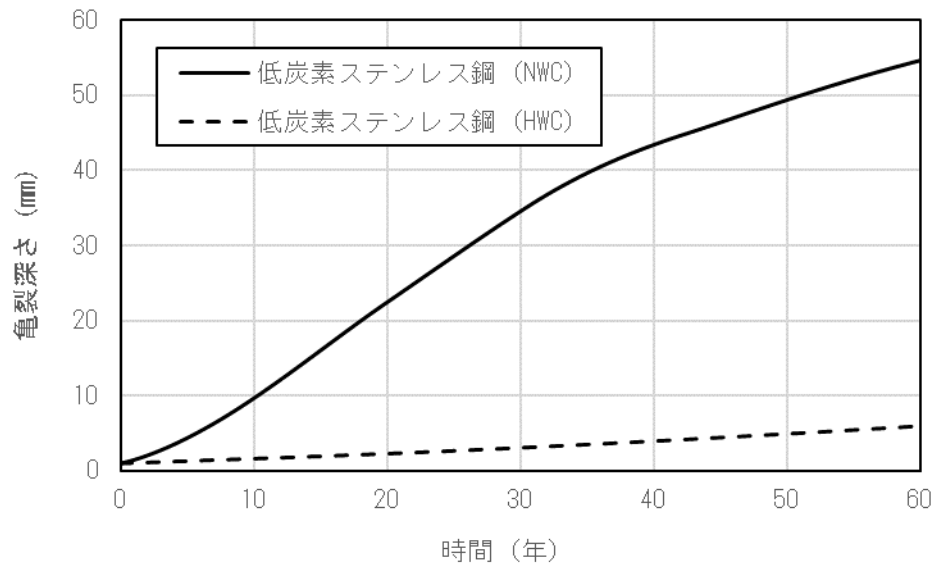


図 A-3.1.2.4.2-2 亀裂深さと時間の関係 (H7 リング無し)

### (3) ABWR 型

ABWR 型のシュラウド溶接部の初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、以下の根拠により、実運転年数が初回点検から 20 年を超えない時期に再点検を実施してもよい。

- ・ ABWR 型の亀裂進展評価及び欠陥裕度評価は BWR 型の評価に包絡される。BWR 型と同じく初回の検査により健全性を確認した試験範囲について、検出精度を考慮して、長さ 10mm 深さ 1mm の亀裂があると想定し、その亀裂が 20 年間進展したとしても、亀裂深さは 25mm 程度であり、機器の健全性に影響を与えない。（図 A-3.1.2.4.2-3 参照）
- ・ 現時点において長期の運転経験が無いことから、保守的に初回点検実施後、20 年以内に再点検する。

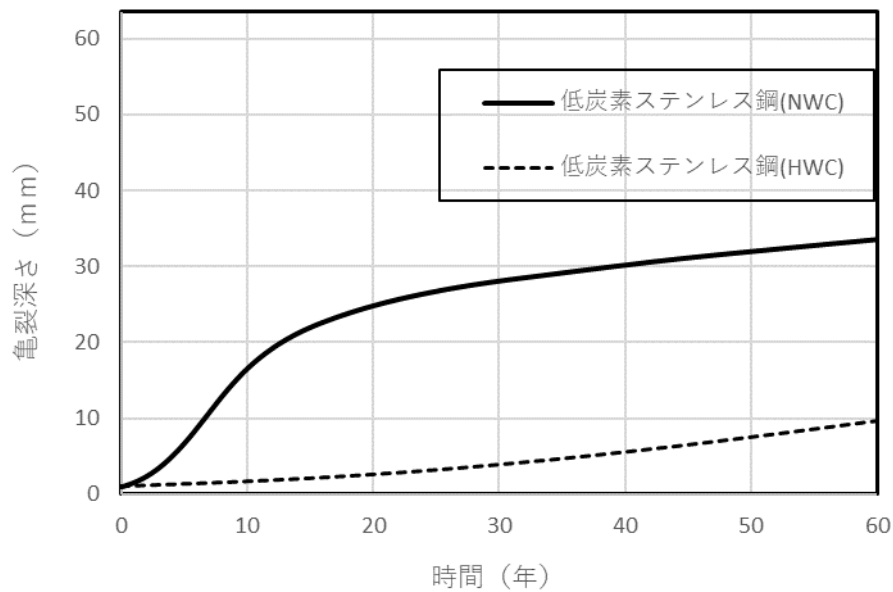


図 A-3.1.2.4.2-3 亀裂深さと時間の関係 (ABWR)

### 3.2 スカート

ここでは、シュラウドの上部リング内側に設置されるスカートに対し、点検方針を記載する。

#### 3.2.1 安全機能などの整理

点検方針を策定するにあたり、スカートの①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響を以降に整理する。

##### 3.2.1.1 安全機能

スカートはシュラウドヘッドとの間に水シールを構成することにより、シュラウドヘッドとシュラウドの締結部からの蒸気流出を防止することで、間接的に「炉心支持と流路確保」の機能を有する。

##### 3.2.1.2 形状及び材質

###### 3.2.1.2.1 形状

スカートは、上部胴の内側に溶接により接合される薄板の円筒状構造物である。

なお、ABWR のシュラウドは、上部胴以上が上部格子板と一体化しているため、ABWR のシュラウドにはスカートが存在せず、上部格子板の部品として存在する。

###### 3.2.1.2.2 材質

スカートの材質は、低炭素ステンレス鋼（炭素含有量が 0.03%以下）であり、溶接により構成される構造物である。

スカートに使用される材質の代表例を表 A-3.2.1.2.2 に示す。

表 A-3.2.1.2.2 スカート 材質の代表例

部 位	BWR 型①	BWR 型② (SUS316L 型)	BWR 型② (SUS304L 型)	ABWR 型
スカート	SUS316L	SUS316L	SUS304L	—

### 3.2.1.3 想定される劣化事象

スカートはステンレス鋼製であり、スカートのシュラウド上部リングとの隅肉溶接部に SCC が発生する可能性がある。

なお、当該の隅肉溶接部近傍のシュラウド上部リング側で SCC が確認されている事例があるが、これは上部リング製造時の表面加工によるごく浅い表層部が硬化したことによると推定されており、その SCC は表面にとどまる特徴がある。

### 3.2.1.4 国内外の運転経験

国内においては、スカートの損傷事例として、上部リングとの隅肉溶接部近傍に損傷が報告されている。

海外においては、当該の溶接部の損傷事例が報告されていることを確認していないが、国内と同等な構造であることから損傷事例があると推察される。

### 3.2.1.5 損傷による安全機能への影響

スカートは、間接的に「炉心支持と流路確保」のうち流路確保の機能を有するが、万一損傷したとしても、シュラウド内外の流路形成機能に影響を与えることはないため、安全機能維持に影響を与えることはない。

## 3.2.2 スカートの点検方針

スカートの①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響に基づき、スカートの点検方針を策定する。

### 3.2.2.1 点検対象の選定

スカートについては、国内での運転経験においてスカートの上部リングとの隅肉溶接部近傍に損傷事例が確認されているが、その損傷範囲は表面にとどまる特徴を有すること、また損傷による安全機能に対する影響の評価結果より、その損傷が安全機能に影響を与えないことから、個別点検の対象とはせず、一般点検により健全性の確認を行うものとする。(表 A-3, 図 A-3.1.2.1 参照)

### 3.3 シュラウドヘッド接続部材

ここでは、シュラウドヘッドとシュラウドを接続するガイドピンブラケットとヘッドボルトブラケットに対し、点検方針を記載する。

#### 3.3.1 安全機能などの整理

点検方針を策定するにあたり、シュラウドヘッド接続部材の①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響を以降に整理する。

##### 3.3.1.1 安全機能

シュラウドヘッド接続部材は、シュラウドヘッドとシュラウドを接続し、シュラウドヘッドとシュラウドの締結部からの蒸気流出を防止することで、間接的に「炉心支持と流路確保」の機能を有する。

##### 3.3.1.2 形状及び材質

###### 3.2.1.2.1 形状

ガイドピンブラケット、ヘッドボルトブラケットは上部リングの外側に溶接により接合されるブロック状構造物である。

なお、ABWR のシュラウドは、上部胴以上が上部格子板と一体化しているため、ABWR のシュラウドにはガイドピンブラケット、ヘッドボルトブラケットが存在せず、上部格子板の部品として存在する。

###### 3.2.1.2.2 材質

シュラウドヘッド接続部材の材質は、低炭素ステンレス鋼（炭素含有量が0.03%以下）であり、溶接により構成される構造物である。

シュラウドヘッド接続部材の各部品に使用される材質の代表例を、表 A-3.3.1.2.2 に示す。

表 A-3.3.1.2.2 シュラウドヘッド接続部材 材質の代表例

部 位	BWR 型①	BWR 型② (SUS316L 型)	BWR 型② (SUS304L 型)	ABWR 型
ガイドピンブラケット	SUS316L	SUS316L	SUS304L	—
ヘッドボルトブラケット	SUS316L	SUS316L	SUS304L	—

#### 3.3.1.3 想定される劣化事象

シュラウドヘッド接続部材はステンレス鋼製であり、シュラウド上部リングとの隅肉溶接部に SCC が発生する可能性がある。

なお、当該の隅肉溶接部近傍の上部リング側で SCC が確認されている事例があるが、これはシュラウド上部リング製造時の表面加工によるごく浅い表層部が硬化したことによると推定されており、その SCC は表面にとどまる特徴がある。

#### 3.3.1.4 国内外の運転経験

国内においては、ヘッドボルトブラケット、ガイドピンブラケットの損傷事例として、シュラウド上部リングとの溶接部近傍に、損傷が報告されている。

海外においては、当該の溶接部の損傷事例が報告されていることを確認していないが、国内と同等な構造であることから損傷事例があると推察される。

#### 3.3.1.5 損傷による安全機能への影響

シュラウドヘッド接続部材は、間接的に「炉心支持と流路確保」のうち流路確保の機能を有するが、万が一損傷したとしても、シュラウド内外の流路形成機能に影響を与えることはないため、安全機能維持に影響を与えることはない。

### 3.3.2 シュラウドヘッド接続部材の点検方針

シュラウドヘッド接続部材の①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響に基づき、シュラウドヘッド接続部材の点検方針を策定する。

#### 3.3.2.1. 点検対象の選定

シュラウドヘッド接続部材については、国内での運転経験において上部リングとの隅肉溶接部近傍に損傷事例が確認されているが、その損傷範囲は表面にとどまる特徴を有すること、また損傷による安全機能に対する影響の評価結果より、その損傷が安全機能に影響を与えないことから、個別点検の対象とはせず、一般点検により健全性の確認を行うものとする。(表 A-3, 図 A-3.1.2.1 参照)

### 3.4 LPCI バッフルプレート

ここでは、非常時に LPCI カップリングからの注水を炉内に導くバッフルプレートに対し、点検方針を記載する。

#### 3.4.1 安全機能などの整理

点検方針を策定するにあたり、LPCI バッフルプレートの①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響を以降に整理する。

##### 3.4.1.1. 安全機能

LPCI バッフルプレートは LPCI カップリングに接続し、緊急時に LPCI カップリングから供給される冷却水をシュラウド内部に分配することで、間接的に「非常時炉心冷却の確保」の機能を有する。

##### 3.4.1.2. 形状及び材質

###### 3.4.1.2.1 形状

LPCI バッフルプレートは上部胴の内側に溶接により接合される薄板状構造物である。

なお、ABWR のシュラウドには、LPCI バッフルプレートは存在しない。

###### 3.4.1.2.2 材質

LPCI バッフルプレートの材質は、低炭素ステンレス鋼（炭素含有量が 0.03% 以下）であり、溶接により構成される構造物である。

LPCI バッフルプレートに使用される材質の代表例を、表 A-3.4.1.2.2 に示す。

表 A-3.4.1.2.2 LPCI バッフルプレート 材質の代表例

部 位	BWR 型①	BWR 型② (SUS316L 型)	BWR 型② (SUS304L 型)	ABWR 型
LPCI バッフルプレート	SUS316L	SUS316L	SUS304L	—

##### 3.4.1.3. 想定される劣化事象

LPCI バッフルプレートはステンレス鋼製であり、溶接部に SCC が発生する可能性がある。

#### 3.4.1.4. 国内外の運転経験

国内においては、LPCI バッフルプレートの損傷事例は報告されていない。

海外においては、LPCI バッフルプレートの損傷事例の報告はない。

#### 3.4.1.5. 損傷による安全機能への影響

LPCI バッフルプレートは、間接的に「非常時炉心冷却の確保」の機能を有するが、万が一損傷したとしても、冷却水は炉心に注入されるため、安全機能維持に影響を与えることはない。

### 3.4.2 LPCI バッフルプレートの点検方針

LPCI バッフルプレートの①安全機能，②形状及び材質，③想定される経年劣化事象，④国内外の運転経験，⑤損傷による安全機能への影響に基づき，LPCI バッフルプレートの点検方針を策定する。

#### 3.4.2.1 点検対象の選定

LPCI バッフルプレートについては，国内外において LPCI バッフルプレートの損傷事例は無く，また損傷による安全機能に対する影響の評価結果より，その損傷が安全機能に影響を与えないことから，個別点検の対象とはせず，一般点検により健全性の確認を行うものとする。（表 A-3，図 A-3.1.2.1 参照）

### 3.5 上部格子板支持部材

ここでは、上部格子板支持部材のうち、トップガイドベース及びアライナブラケットに対し、点検方針を記載する。

なお、ABWR では、上部格子板は上部胴との一体鍛造構造物でありシュラウドにボルト締結され、トップガイドベース及びアライナブラケットは存在しない。

#### 3.5.1 安全機能などの整理

点検方針を策定するにあたり、上部格子板支持部材の①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響を以降に整理する。

##### 3.5.1.1 安全機能

トップガイドベース及びアライナブラケットは、それら上面に上部格子板が据え付く台座であり、炉心支持の機能を有する。また、アライナブラケットは上部格子板の据付け時に据付方位を調整するためのブラケットである。

##### 3.5.1.2 形状及び材質

###### 3.5.1.2.1 形状

トップガイドベース、アライナブラケットは、シュラウド中間部リングの上面に溶接により接合されるブロック状構造物である。

###### 3.5.1.2.2 材質

トップガイドベース、アライナブラケットの材質は、低炭素ステンレス鋼（炭素含有量が0.03%以下）であり、溶接により構成される構造物である。

スカートに使用される材質の代表例を表 A-3.5.1.2.2 に示す。

表 A-3.5.1.2.2 トップガイドベース、アライナブラケット 材質の代表例

部 位	BWR 型①	BWR 型② (SUS316L 型)	BWR 型② (SUS304L 型)	ABWR 型
スカート	SUS316L	SUS316L	SUS304L	SUS316L

#### 3.5.1.3 想定される劣化事象

トップガイドベース、アライナブラケットはステンレス鋼製であり、溶接部に SCC が発生する可能性がある。

#### 3.5.1.4 国内外の運転経験

国内プラントにおいては、トップガイドベース、アライナブラケットのいずれの溶接部もシュラウド中間部リング側の溶接熱影響部に損傷事例が 4 件報告されている。

海外においては、当該の溶接部の損傷事例が報告されていることを確認していないが、国内と同等な構造であることから損傷事例があると推察される。

#### 3.5.1.5 損傷による安全機能への影響

トップガイドベース及びアライナブラケットの上面には鉛直方向に上部格子板の自重が作用していること、上部格子板はレストレイント構造によって水平方向に、ホールドダウン構造によって浮き上がりを拘束されていることから、トップガイドベース及びアライナブラケットの溶接部が損傷しても、安全機能に影響を与えることはない。

### 3.5.2 上部格子板支持部材の点検方針

上部格子板支持部材の①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響に基づき、上部格子板支持部材の点検方針を策定する。

#### 3.5.2.1 点検対象の選定

トップガイドベース及びアライナブラケットについては、国内で損傷事例はあるが、損傷による安全機能に対する影響の評価結果より、その損傷が安全機能に影響を与えないことから、個別点検の対象とはせず、一般点検により健全性の確認を行うものとする。(表 A-3, 図 A-3.1.2.1 参照)

### 3.6 RIP ガイドレール

ここでは、ABWR シュラウドの外側に設置される RIP ガイドレールに対し、点検方針を記載する。

#### 3.6.1 安全機能などの整理

点検方針を策定するにあたり、RIP ガイドレールの①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響を以降に整理する。

##### 3.6.1.1 安全機能

RIP ガイドレールは、RIP の据付・取外し時の案内を行う構造物であり、破損してもシュラウドの持つ安全機能に影響を与えない。

##### 3.6.1.2 形状・材質

###### 3.6.1.2.1 形状

RIP ガイドレールは、シュラウドの外側に溶接により接合される薄板状構造物である。

なお BWR のシュラウドには、RIP が存在しないため、RIP ガイドレールは存在しない。

###### 3.6.1.2.2 材質

RIP ガイドレールの材質は、低炭素ステンレス鋼（炭素含有量が 0.03% 以下）であり、溶接により構成される構造物である。

スカートに使用される材質の代表例を、表 A-3.6.1.2.2 に示す。

表 A-3.6.1.2.2 RIP ガイドレール 材質の代表例

部 位	BWR 型①	BWR 型② (SUS316L 型)	BWR 型② (SUS304L 型)	ABWR 型
スカート	—	—	—	SUS316L

##### 3.6.1.3 想定される劣化事象

RIP ガイドレールはステンレス鋼製であり、溶接部に SCC が発生する可能性がある。

#### 3.6.1.4 国内外の運転経験

国内においては、RIP ガイドレールの損傷事例は報告されていない。  
海外においても、損傷事例は確認されなかった。

#### 3.6.1.5 損傷による安全機能への影響

RIP ガイドレールは RIP の据付・取外し時の案内を行う以外の機能を持たない構造物であり、安全機能を有していない。したがって、万一損傷したとしても、安全機能維持に影響を与えることはない。

### 3.6.2 RIP ガイドレールの点検方針

上部格子板支持部材の①安全機能，②形状及び材質，③想定される経年劣化事象，④国内外の運転経験，⑤損傷による安全機能への影響に基づき，RIP ガイドレールの点検方針を策定する。

#### 3.6.2.1 点検対象の選定

RIP ガイドレールは，国内外で損傷事例はなく，損傷による安全機能に対する影響の評価結果より，その損傷が安全機能に影響を与えないことから，個別点検の対象とはせず，一般点検により健全性の確認を行うものとする。（表 A-3，図 A-3.1.2.1 参照）

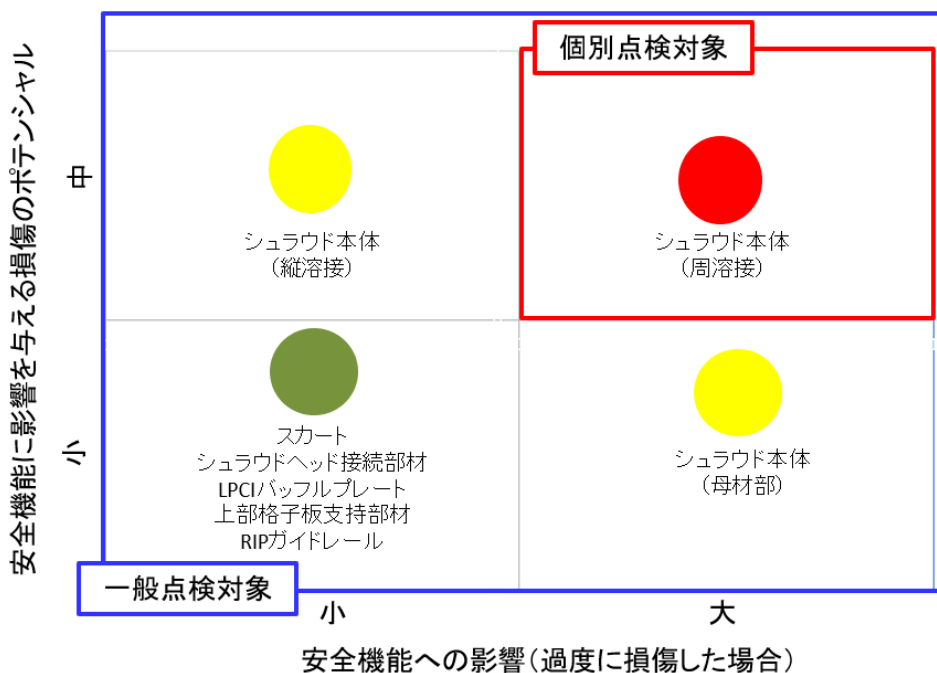


図 A-3.1.2.1 シュラウドの点検対象<sup>(注)</sup>  
 (支持ロッド取付け時は図 A-4.1.2.1 参照)

(注)

炉内構造物の多くが構造強度上の大きな裕度を持つように設計されていることから、仮に SCC 等の損傷が発生したとしても、ただちに安全機能に影響を及ぼす可能性は配管他の機器に比べても極めて小さいと考えられる。

そのため、縦軸の表記を「安全機能に影響を与える損傷のポテンシャル」と記載し、その範囲を「小～中」と表記することとした。

今後運転経験を蓄積し、将来的には縦軸の表記を「安全機能に影響する損傷の発生頻度」とすることを旨とする。

表 A-3(1) シュラウドの損傷による安全機能への影響評価

検討対象	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 シュラウド本体(BWR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内隔壁の形成</li> <li>上部格子板・炉心支持板の位置決め及び支持</li> <li>非常用炉心冷却機器の支持</li> </ul>	有 (流/冠/制/非)	IASCC SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>周方向溶接部の破損により、隔壁の開放、燃料及び非常用炉心冷却機器の位置ずれが生じ、安全機能の維持に影響がある。</li> </ul>	点検対象 (H1~7溶接部)
② シュラウド本体(ABWR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内隔壁の形成</li> <li>上部格子板・炉心支持板の位置決め及び支持</li> <li>非常用炉心冷却機器の支持</li> </ul>	有 (流/制/非)	IASCC SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>周方向溶接部の破損により、隔壁の開放、燃料及び非常用炉心冷却機器の位置ずれが生じ、安全機能の維持に影響がある。</li> </ul>	点検対象 (H3~7溶接部)
③ スカート	<ul style="list-style-type: none"> <li>水シール形成による漏えい防止</li> </ul>	有 (流)	SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>シュラウド内部の蒸気がシュラウド外に漏れないように水シールを形成するための部材であり、損傷してもシュラウドの安全機能には影響しない。</li> </ul>	不要
④ シュラウドヘッド接続部材	<ul style="list-style-type: none"> <li>シュラウドヘッドの位置調整</li> <li>シュラウドヘッドとの連結</li> </ul>	有 (流)	SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>シュラウドとシュラウドヘッドを連結するための部材であり、損傷してもシュラウドの安全機能には影響しない。</li> </ul>	不要
⑤ LPCI バックルプレート	<ul style="list-style-type: none"> <li>LPCI の流路形成</li> </ul>	有 (非)	SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内における LPCI の流路を形成する部材であるが、損傷しても注水は確保されるため、安全機能には影響しない。</li> </ul>	不要
⑥ 炉心スプレイスパージャ	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心スプレイ系配管・スパージャの点検評価ガイドライン (JANSI-VIP-25-第3版) によるため、本ガイドラインの対象外</li> </ul>				

流：炉心支持と流路確保  
冠：炉心冠水と長期冷却の維持  
制：制御棒挿入性の確保  
非：非常用炉心冷却の確保

\*：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。

表 A-3 (2) シュラウドの損傷による安全機能への影響評価

検討対象	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*
⑦ 上部格子板 支持部材： 上部格子板ブ ロック，ホー ルドダウンブ ラケット	・上部格子板の点検評価ガイドライン(JANSI-VIP-30 第3版) によるため，本ガイドラインの対象外				
上部格子板 支持部材： トップガイド ベース，アラ イナブラケッ ト	・上部格子板 の鉛直方向 の支持 ・LPCI 系の 注水の流路 形成 ・上部格子板 の据付時の 方位調整	有 (流)	SCC	・トップガイドベース及びアライナ ブラケットの溶接部が損傷しても， 安全機能に影響を与えることはな い。	不要
⑧ RIP ガイドレ ール	・RIP 据付・ 取外し時の 案内	無	SCC	・RIP 据付・取外し時にのみ使用す る構造物であり，損傷しても，安 全機能には影響しない。	不要

流：炉心支持と流路確保  
冠：炉心冠水と長期冷却の維持  
制：制御棒挿入性の確保  
非：非常用炉心冷却の確保

\*：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。

#### 4. シュラウド（支持ロッド取付時）の各構造体に対する点検方針

シュラウドの周溶接破断に対する補修又は予防保全として、支持ロッドを取付け、支持ロッドによりシュラウドの周方向溶接の機能を代替する工法がある。ここでは、支持ロッド取付時におけるシュラウドの各構造体に対する点検方針について記載する。

##### 4.1 シュラウド本体

ここでは、支持ロッド取付時におけるシュラウドの炉心隔壁を構成する、上部リング、上部胴、中間部リング、中間部胴、下部リング、下部胴、シュラウドサポートリングに対する点検方針を記載する。

###### 4.1.1 安全機能などの整理

点検方針を策定するにあたり、支持ロッド取付時におけるシュラウド本体の①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響を以降に整理する。

###### 4.1.1.1 安全機能

シュラウド本体が受け持つ安全機能は、支持ロッドの取付け前後で変わることはない。支持ロッド自体は、シュラウドの周溶接を構成する部材の機能を代替するため、全ての安全機能を受け持つ。機能毎に整理すると以下のようなになる。

「炉心支持と流路確保」：支持ロッドを含め、上部リング、上部胴、中間部リング、中間部胴、下部リング、下部胴、シュラウドサポートリングすべての部材が、直接的に機能を有する。

「炉心冠水と長期冷却の維持」：支持ロッドを含め、中間部胴、下部リング、下部胴、シュラウドサポートリングの中間部胴以下の部材が直接的に機能を有する。

「制御棒挿入性の確保」：支持ロッドを含め、上部胴、中間部リング、中間部胴、下部リング、下部胴、シュラウドサポートリングの上部胴以下の部材が間接的に機能を有する。

「非常時炉心冷却の確保」：支持ロッドを含め、上部胴、中間部リング、中間部胴、下部リング、下部胴、シュラウドサポートリングの上部胴以下の部材が間接的に機能を有する。

#### 4.1.1.2 形状及び材質

##### 4.1.1.2.1 形状

BWR のシュラウドの形状は，支持ロッド取付け前後で変わることはない。

支持ロッドは，シュラウドの外側に設置され，主にシュラウド上部とシュラウドサポートプレートとを連結する棒状のタイロッドとシュラウドから原子炉圧力容器への水平方向の荷重伝達経路を形成する水平レストレント（スタビライザ）により構成される。

国内に設置された支持ロッドは，構造の違いにより 2 つの形式に分類される。2 つの形式の構造比較を表 A-4.1.1.2.1-1 に，それぞれのタイプの構造概要を図 A-4.1.1.2.1-1～2 に示す。

##### 4.1.1.2.2 材質

国内に設置された支持ロッドの材質は，支持ロッドの形式によって異なり，低炭素ステンレス鋼（炭素含有量が 0.03%以下），耐熱ステンレス鋼（GXM1 相当）又はニッケル合金（AlloyX-750）である。2 つの形式の材質を表 A-4.1.1.2.1-1 に示す。

表 A-4.1.1.2.1-1 シュラウド支持ロッドの構造比較（国内適用事例）

		タイプ A	タイプ B
タイロッド本数		4	4
設置方位		75°, 165°, 255°, 345°	75°, 255° (タイプ 1), 165°, 345° (タイプ 2)
主 要 寸 法	タイロッド径	約 80mm	約 60mm (タイプ 1 上部) 約 80mm (タイプ 1 下部) 約 110mm (タイプ 2 上部) 約 120mm (タイプ 2 下部)
材 料	上部ブラケット ／上部サポート	SUSF316L	NCF750 相当 (X-750)
	上部レストレント ／上部ウェッジ	SUSF316L	GXM1 相当 (XM-19)
	タイロッド	GXM1 相当 (XM-19)	GXM1 相当 (XM-19) (上部タイロッド) NCF750 相当 (X-750) (下部タイロッド)
	下部レストレント ／下部スタビライザ	SUSF316L	GXM1 相当 (XM-19)
	Tアダプタ／トグル	GXM1 相当 (XM-19)	NCF750 相当 (X-750)
構 造	上部ブラケット ／上部サポート	ブロックタイプ	プレートタイプ
	Tアダプタ／トグル	Tバータイプ	トグルタイプ

<タイプ-A>

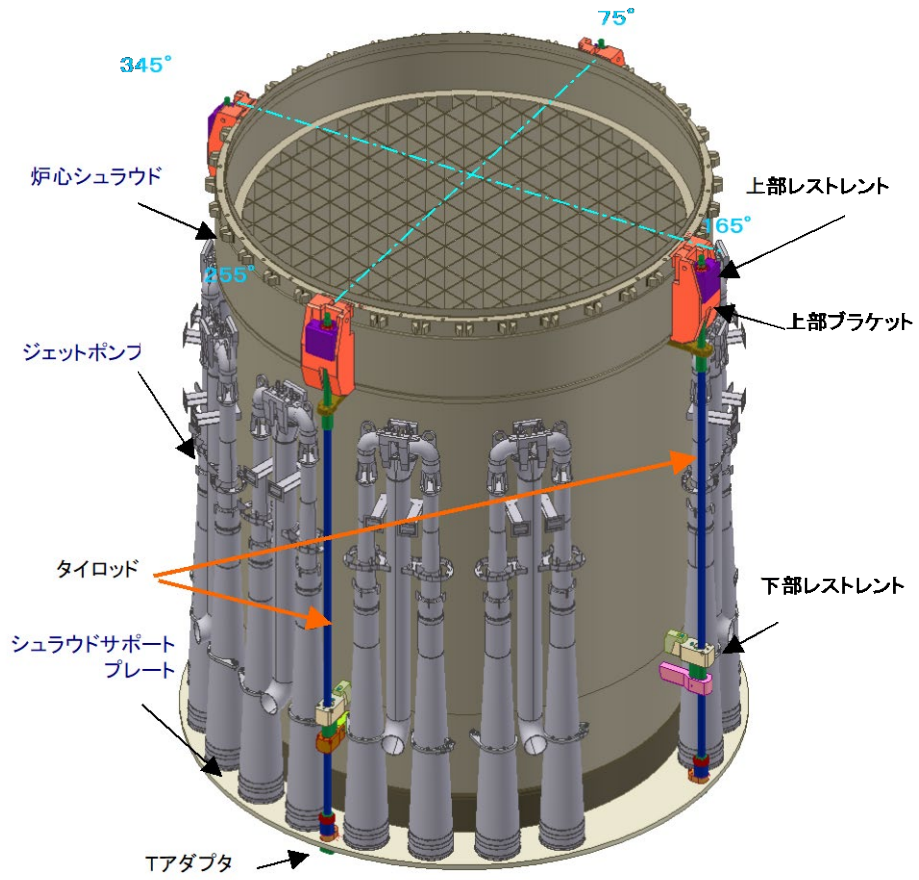


図 A-4. 1. 1. 2. 1-1 支持ロッド (タイプ-A)

<タイプ-B>

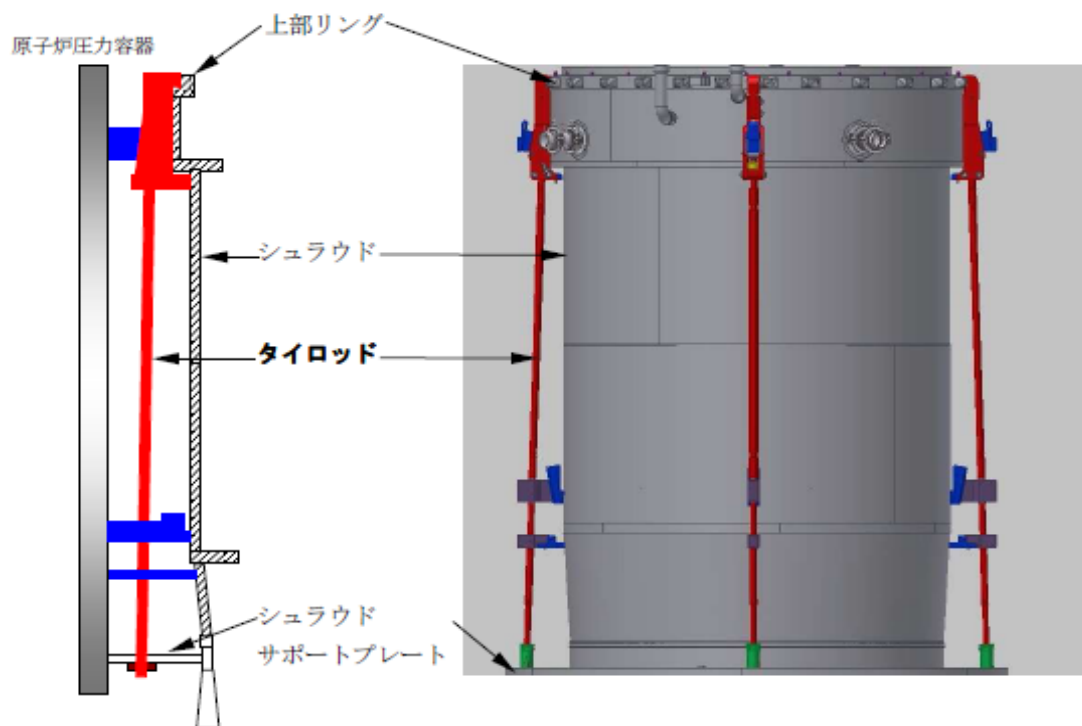


図 A-4.1.1.2.1-2 支持ロッド (タイプ-B)

#### 4.1.1.3 想定される劣化事象

BWR のシュラウドに想定される劣化事象は、支持ロッド取付け前後で変わることはない。(溶接部に対する SCC が想定される。)ただし、支持ロッドにより周方向溶接の機能が代替されたことにより、周方向溶接部の損傷が安全機能に影響しない。

また、支持ロッドの材質はステンレス鋼又はニッケル合金であり、溶接部はないものの、低炭素ステンレス鋼の硬化層に起因する SCC が想定される。

#### 4.1.1.4 国内外の運転経験

BWR のシュラウド損傷事例は、3.1.1.4 に記載されている。

支持ロッドの損傷事例については、国内では報告されていない。

国外において、ニッケル合金 (AlloyX-750) の支持ロッド構成部品に SCC と推定される損傷事例が 1 例ではあるが報告されている。

#### 4.1.1.5 損傷による安全機能への影響

支持ロッド補修を行うことにより、シュラウドの周方向溶接部の強度を期待せずにシュラウドの構造及び機能を維持することができる。支持ロッド補修を行って周方向溶接部の強度を期待しないという前提をおいた場合には、縦方向溶接部は完全破断せずに形状を維持する必要があるため、シュラウド本体の縦溶接部（V1～V7 溶接部）が損傷した場合、以下の安全機能への影響を考慮する必要がある。

- ・炉心支持機能と流路確保

縦方向溶接部が完全破断した状態で、地震荷重が加わった場合、支持ロッドが機能せずに隔壁が開放されたり、位置ずれが生じたりするため、安全機能が失われる可能性があり、炉心支持機能に影響する。

- ・冠水維持機能（ABWR は除く）

ジェットポンプを備える BWR では、シュラウド、シュラウドサポートプレート及びジェットポンプによって、再循環系配管破断による冷却材喪失後の冠水維持機能を維持されることから、ジェットポンプインレットミキサ上部高さまでのシュラウドの溶接部の貫通割れは冠水維持機能に影響を与える可能性があるが、その影響は軽微と考えられる。

なお、ABWR においては、冠水維持機能を有していない。

- ・制御棒挿入機能

荷重伝達経路は炉心支持機能と同様に考えられ、縦方向溶接部の完全破断により制御棒挿入性に影響を与える。

- ・非常時炉心冷却の確保機能

荷重伝達経路は、炉心スプレイスパーージャと LPCI カップリングの支持機能と同様に考えられ、縦方向溶接部の損傷により非常時炉心冷却の確保機能に影響する。

#### 4.1.2 シュラウド本体（支持ロッド取付時）の点検方針

支持ロッド取付け時におけるシュラウド本体の①安全機能，②形状及び材質，③想定される経年劣化事象，④国内外の運転経験，⑤損傷による安全機能への影響に基づき，支持ロッド取付け時におけるシュラウド本体の点検方針として，点検対象，点検手法，点検範囲並びに点検時期を策定する。

##### 4.1.2.1 点検対象の選定

シュラウド本体については，周方向溶接部，縦方向溶接部とも国内外のプラントでの運転経験において損傷事例が確認されている。

支持ロッドの取付けにより，周方向溶接の安全機能は代替されるが，これには縦方向溶接が完全破断せず，胴やリングの構造体の円筒構造が確保されることが前提条件である。したがって，支持ロッドを取付けたシュラウドにおいては，周方向溶接部の点検は不要であるが，縦方向溶接部の点検が必要となる。

また，支持ロッドについては，溶接部の存在しない構造を採用しており，かつその材料であるニッケル合金に対しては適切な熱処理を施し，部材に発生する運転時応力を管理していることから，支持ロッドが損傷する可能性は十分低いと考えられる。さらに，国内プラントでの運転経験において損傷事例は確認されていない。

しかしながら，支持ロッドは損傷したシュラウドの安全機能を担保する重要な構造物であること，国外においてニッケル合金（AlloyX-750）の支持ロッド構成部品に SCC と推定される損傷事例が報告されたことや，国内シュラウドにおける低炭素ステンレス鋼の硬化層に起因する SCC 事例が報告されていることを鑑み，支持ロッドに対して個別点検を実施する。

（表 A-4，図 A-4.1.2.1 参照）

#### 4.1.2.2 点検手法の選定

シュラウド本体の点検対象である縦方向溶接部（V1～V7 溶接部）において、想定される経年劣化事象は、ステンレス鋼溶接部に対する SCC である。SCC により表面開口している亀裂の検出を目的としていることから、シュラウドの縦方向溶接部の点検は、目視試験の中でも検出精度の高い MVT-1 を採用する。

支持ロッドについては、想定される劣化事象は強加工部に対する SCC であることから、荷重支持構造物のうち、強加工の可能性が想定される上部ブラケット（上部サポート）取付け部の付け根及び T アダプタ（トグル）取付け部（T アダプタ取付け部の付け根又はトグルクレビス）に対して、SCC により表面開口している亀裂の検出を目的として、目視試験の中でも検出精度の高い MVT-1 により点検する。

一方、支持ロッド全体の外観、廻り止め、シュラウド又はシュラウドサポートとの取合状態の確認においては、VT-3 により点検する。

#### 4.1.2.3 点検範囲の選定

支持ロッド補修を行ったシュラウドの点検対象は、シュラウドの縦方向溶接部（V1～V7 溶接部）及び支持ロッドである。

縦方向溶接部（V1～V7 溶接部）を点検対象とする理由は、支持ロッドを設置する際に周方向溶接部の強度を期待しないという前提をおいた場合に、縦方向溶接部は完全破断せずに形状を維持する必要があるためである。

具体的に初回点検、再点検における点検範囲を以下に示す。

##### (1) 縦方向溶接部

###### ① 初回点検

初回点検は点検対象に対して行う最初の試験であり、点検手法である MVT-1 による点検可能範囲の確認や、再点検の際に基準となる点検記録の取得の必要があることから、初回点検における点検範囲は、接近可能なすべての縦方向溶接部とする。

###### ② 再点検

溶接部の再点検範囲は、初回点検と同じく接近可能なすべての縦方向溶接部とする。

##### (2) 支持ロッド

###### ① 初回点検

支持ロッドの点検範囲は、図 A-4.1.2.3 に示す支持ロッドの機能を担保する部位であって、接近可能なすべての範囲とする。なお、支持ロッドには構造強度を担保する溶接部はない。

###### ② 再点検

初回点検と同じく、図 A-4.1.2.3 に示す支持ロッドの機能を担保する部位であって、接近可能なすべての範囲とする。

- ・全体の外観状況及び脱落の確認 (VT-3)
- ・上部ブラケット (上部サポート) 取付け部の付け根 (MVT-1)
- ・タイロッド締付け箇所の廻り止め機能の確認 (VT-3)
- ・上部ブラケット (上部サポート) とシュラウド上部リングとの取合い状態の確認 (VT-3)
- ・上部ブラケット (上部サポート) とシュラウドとの取合い位置の確認 (VT-3)
- ・下部レストレント (下部スタビライザ) とシュラウドとの取合い位置の確認 (VT-3)
- ・Tアダプタ (トグルバー) とシュラウドサポートプレートとの取合い状態の確認 (VT-3)
- ・Tアダプタ (トグル) 取付け部 (Tアダプタ取付け部の付け根又はトグルクレビス) (MVT-1)

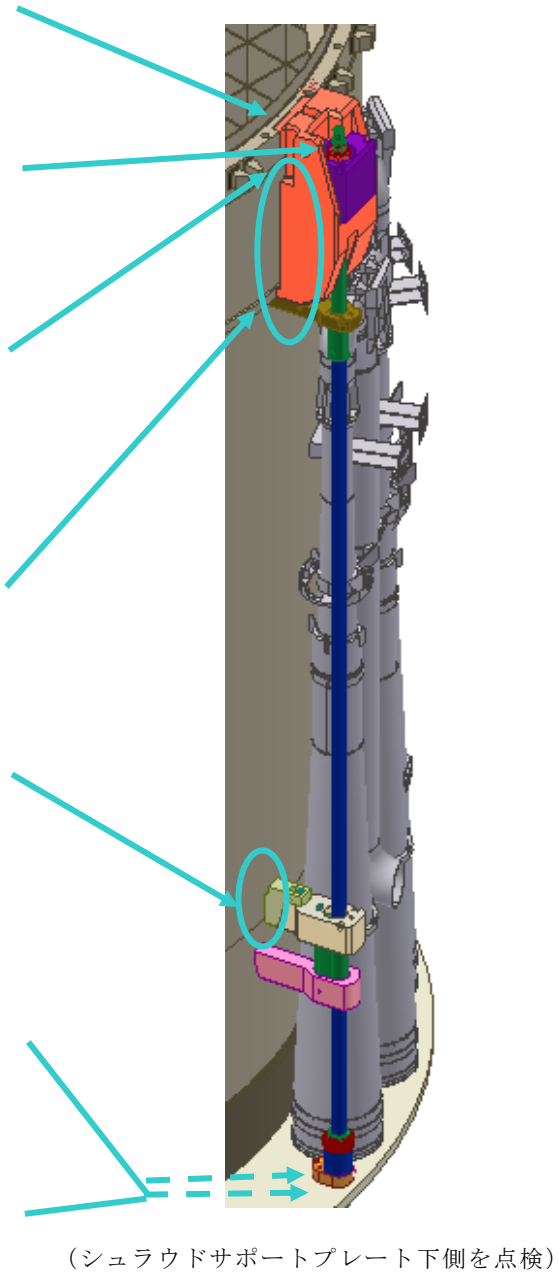


図 A-4. 1. 2. 3 支持ロッド点検箇所为例

#### 4.1.2.4 点検時期の選定

シュラウドの縦方向溶接部の点検時期は，亀裂進展評価及び亀裂が進展した際の欠陥裕度評価に基づき選定し，支持ロッドの点検時期は，試験・解析による定量的な評価によることは困難であることから，国内外の実績を基に選定する。

今後もプラント運転実績調査を継続し，必要に応じて点検周期の見直しを行うものとする。

##### 4.1.2.4.1 初回点検

###### (1) シュラウド縦方向溶接部

シュラウド縦方向溶接部の初回点検の実施時期は，支持ロッド補修を行う際に点検を行っている場合は，補修後 10 年を超えない時期とし，それ以外の場合は補修後 1 回目の定期点検時に初回点検を実施する（支持ロッドの初回点検に合わせる）ものとする。

その根拠は以下の通りである。

- ・ 縦方向溶接部の損傷の有無は支持ロッドの機能確保に重要な項目であり，補修前に点検を行っていない場合は，できるだけ早い時期に点検を行うことが必要と考えられること。
- ・ 国内プラントのシュラウド材料は低炭素含有量のステンレス鋼（0.03%）であり，SCC 発生に対する裕度があることから，欠陥が発生する可能性は低いと考えられること。
- ・ 代表的な 1100MWe 級プラントの縦方向溶接部に，深さ 1mm，長さ 10mm の溶接部に平行な初期亀裂があったと想定した場合の亀裂進展挙動の評価例を図 A-4.1.2.4.1-1,2 に示す。本図に示すとおり，亀裂が外表面都内表面の双方から進展したとしても，板厚の 80%（約 40mm）まで亀裂が到達するのは実運転時間で 20 年程度以上であることから，補修前点検で欠陥があったとしても，10 年程度では板厚の 80%まで達するような深い欠陥に進展することはないと考えられること。
- ・ 縦方向溶接部は板厚の 80%を越える深さの亀裂を仮定しても構造強度が確保できる。万一，補修前点検で見落とした欠陥があり，想定外の理由によって 10 年で板厚の 80%まで達するような深い欠陥に進展したとしても，シュラウドの構造強度は確保でき，安全機能を維持できるため。

- ・ シュラウドには、実運転時間で 10 年以内に、亀裂の検出事例があることから、新規の亀裂発生確認には 10 年以内の検査が有効と考えられること。

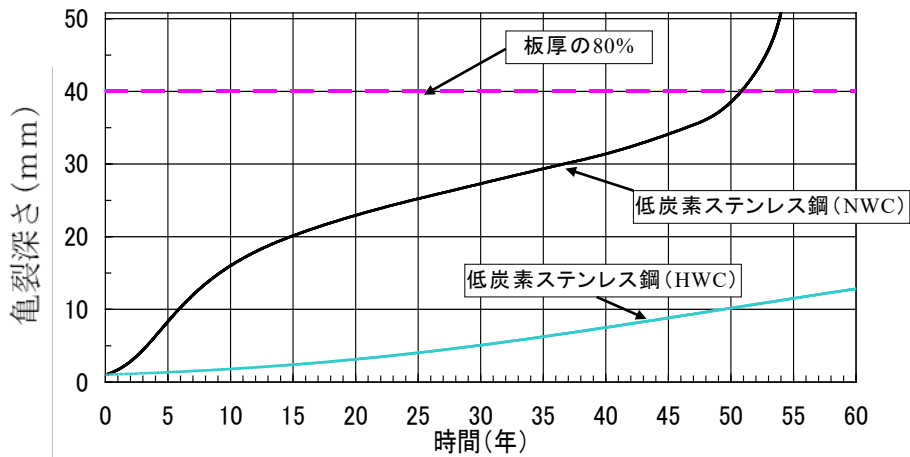


図 4.1.2.4.1-1 亀裂深さと時間の関係 (V2 溶接部)  
(外表面から板厚方向への進展)

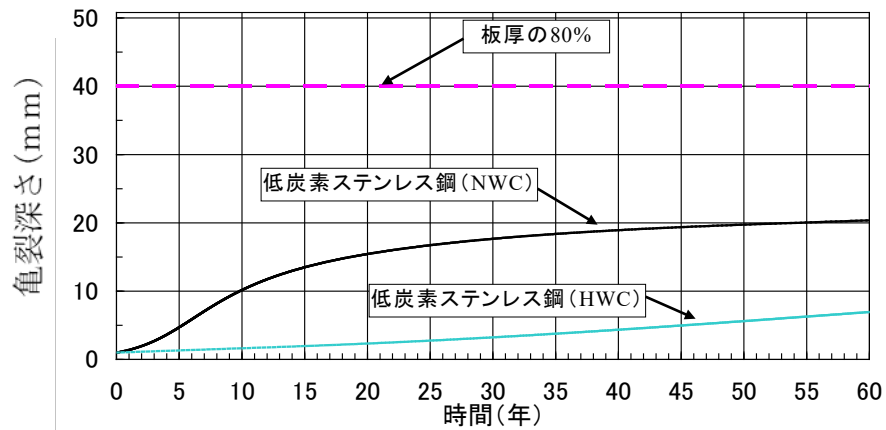


図 A-4.1.2.4.1-2 亀裂深さと時間の関係 (V2 溶接部)  
(内表面から板厚方向への進展)

## (2) 支持ロッド

支持ロッドの初回点検の実施時期は、補修後 1 回目の定期点検時とする。  
その根拠は以下の通りである。

- ・ 支持ロッドは、溶接部の存在しない構造を採用しており、亀裂が発生する可能性は低いと考えられること。
- ・ しかしながら、流体振動等によるネジのゆるみや、取合い部のずれがないことを取付け後の早い時期に確認する必要があること。

### 4.1.2.4.2 再点検

#### (1) シュラウド縦方向溶接部

初回点検でシュラウド縦方向溶接部に損傷がなかった場合の再点検時期は、初回点検から 10 年を超えない時期とする。

その根拠は以下の通りである。

- ・ 国内プラントのシュラウド材料は低炭素含有量のステンレス鋼であり、SCC 発生に対する裕度があることから、欠陥が発生する可能性は低いと考えられること。
- ・ 4.1.2.4.1(1)に示すように、初回点検時に亀裂が存在したと仮定し、それが 10 年程度分の進展をしたとしても、構造強度は確保できると考えられること。
- ・ シュラウドには実運転時間で 10 年以内に、亀裂の検出事例があることから、新規の亀裂発生確認には 10 年以内の検査が有効と考えられること。

#### (2) 支持ロッド

支持ロッドの再点検時期は、初回点検から 10 年を超えない時期とする。  
その根拠は以下の通りである。

- ・ 支持ロッドは、溶接部の存在しない構造を採用しており、亀裂が発生する可能性は低いと考えられること。
- ・ 国外プラントにおいて、10 年を超える使用実績が多数積まれてきており、10 年程度で損傷が発生する可能性は低いと考えられること。

#### 4.2 スカート

スカートの①安全機能，②形状及び材質，③想定される経年劣化事象，④国内外の運転経験，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については，支持ロッド取付け前後で変わることはない。

したがって，スカートの点検方針は，支持ロッド取付け前と同じである。（表 A-4 参照，図 A-4.1.2.1 参照）

#### 4.3 シュラウドヘッド接続部材

シュラウドヘッド支持部材の①安全機能，②形状及び材質，③想定される経年劣化事象，④国内外の運転経験，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については，支持ロッド取付け前後で変わることはない。

したがって，シュラウドヘッド支持部材の点検方針は，支持ロッド取付け前と同じである。（表 A-4 参照，図 A-4.1.2.1 参照）

#### 4.4 LPCI バッフルプレート

LPCI バッフルプレートの①安全機能，②形状及び材質，③想定される経年劣化事象，④国内外の運転経験，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については，支持ロッド取付け前後で変わることはない。

したがって，LPCI バッフルプレートの点検方針は，支持ロッド取付け前と同じである。（表 A-4 参照，図 A-4.1.2.1 参照）

#### 4.5 上部格子板支持部材

上部格子板支持部材の①安全機能，②形状及び材質，③想定される経年劣化事象，④国内外の運転経験，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については，支持ロッド取付け前後で変わることはない。

したがって，上部格子板支持部材の点検方針は，支持ロッド取付け前と同じである。（表 A-4 参照，図 A-4.1.2.1 参照）

#### 4.6 RIP ガイドレール

RIP ガイドレールの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損傷による安全機能への影響を考慮した点検の考え方については，支持ロッド取付け前後で変わることはない。

したがって，RIP ガイドレールの点検方針は，支持ロッド取付け前と同じである。  
(表 A-4 参照，図 A-4.1.2.1 参照)

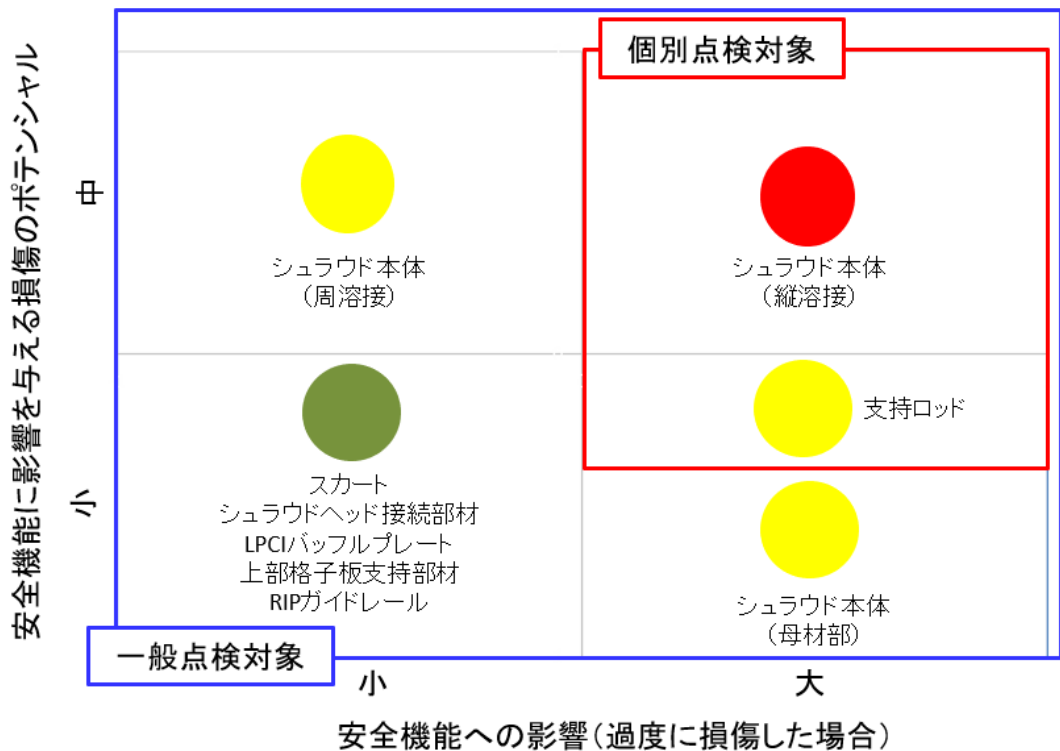


図 A-4.1.2.1 シュラウド (支持ロッド取付け時) の点検対象 (注)

(注)

炉内構造物の多くが構造強度上の大きな裕度を持つように設計されていることから，仮に SCC 等の損傷が発生したとしても，ただちに安全機能に影響を及ぼす可能性は配管他の機器に比べても極めて小さいと考えられる。

そのため，縦軸の表記を「安全機能に影響を与える損傷のポテンシャル」と記載し，その範囲を「小～中」と表記することとした。

今後運転経験を蓄積し，将来的には縦軸の表記を「安全機能に影響する損傷の発生頻度」とすることを旨とする。

表 A-4(1) シュラウドの損傷による安全機能への影響評価（支持ロッド取付け時）

検討対象		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	シュラウド本体(BWR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内隔壁の形成</li> <li>上部格子板・炉心支持板の位置決め及び支持</li> <li>非常用炉心冷却機器の支持</li> </ul>	有 (流/冠/制/非)	IASCC SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>周方向溶接線が支持ロッドと縦溶接線に代替されるため、縦方向溶接部の破損により、隔壁の開放、燃料及び非常用炉心冷却機器の位置ずれが生じ、安全機能の維持に影響がある。</li> </ul>	MVT-1 点検対象 (V1~7 溶接部)
	支持ロッド(BWR)			SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>支持ロッドを構成する部品の破損により、隔壁の開放、燃料及び非常用炉心冷却機器の位置ずれが生じ、安全機能の維持に影響がある。</li> </ul>	MVT-1 点検対象 (上部ブラケット付け根, Tアダプタ取付け部付け根) VT-3 点検対象 (全体外観, 廻り止め, 取合い)
③	シュラウド本体(ABWR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内隔壁の形成</li> <li>上部格子板・炉心支持板の位置決め及び支持</li> <li>非常用炉心冷却機器の支持</li> </ul>	有 (流/制/非)	IASCC SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>周方向溶接線が支持ロッドと縦溶接線に代替されるため、縦方向溶接部の破損により、隔壁の開放、燃料及び非常用炉心冷却機器の位置ずれが生じ、安全機能の維持に影響がある。</li> </ul>	MVT-1 点検対象 (V3~7 溶接部)
	支持ロッド(ABWR)			SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>支持ロッドを構成する部品の破損により、隔壁の開放、燃料及び非常用炉心冷却機器の位置ずれが生じ、安全機能の維持に影響がある。</li> </ul>	MVT-1 点検対象 (上部ブラケット付け根, Tアダプタ取付け部付け根) VT-3 点検対象 (全体外観, 廻り止め, 取合い)
⑤	スカート	<ul style="list-style-type: none"> <li>水シール形成による漏えい防止</li> </ul>	有 (流)	SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>シュラウド内部の蒸気がシュラウド外に漏れないように水シールを形成するための部材であり、損傷してもシュラウドの安全機能には影響しない。</li> </ul>	不要
⑥	シュラウドヘッド 接続部材	<ul style="list-style-type: none"> <li>シュラウドヘッドの位置調整</li> <li>シュラウドヘッドとの連結</li> </ul>	有 (流)	SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>シュラウドとシュラウドヘッドを連結するための部材であり、損傷してもシュラウドの安全機能には影響しない。</li> </ul>	不要
⑦	LPCI バッフルプレート	<ul style="list-style-type: none"> <li>LPCI の流路形成</li> </ul>	有 (非)	SCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内における LPCI の流路を形成する部材であるが、損傷しても注水は確保されるため、安全機能には影響しない。</li> </ul>	不要

流：炉心支持と流路確保  
 冠：炉心冠水と長期冷却の維持  
 制：制御棒挿入性の確保  
 非：非常用炉心冷却の確保

\*：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。

表 A-4(2) シュラウドの損傷による安全機能への影響評価（支持ロッド取付け時）

検討対象	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*
⑧ 炉心スプレイスパージャ	・炉心スプレイ系配管・スパージャの点検評価ガイドライン（JANSI-VIP-25-第3版）によるため、本ガイドラインの対象外				
⑨ 上部格子板支持部材： 上部格子板ブロック、ホールダウンブラケット	・上部格子板の点検評価ガイドライン（JANSI-VIP-30 第3版）によるため、本ガイドラインの対象外				
	上部格子板支持部材： トップガイドベース、アライナブラケット	・上部格子板の鉛直方向の支持 ・LPCI 系の注水の流路形成 ・上部格子板の据付時の方位調整	流	SCC	・LPCI の流路を形成する部材であるが、損傷しても注水は確保されるため、安全機能には影響しない。
⑩ RIP ガイドレール	・RIP 据付・取外し時の案内	無	SCC	・RIP 据付・取外し時にのみ使用する構造物であり、損傷しても、安全機能には影響しない。	不要

流：炉心支持と流路確保  
冠：炉心冠水と長期冷却の維持  
制：制御棒挿入性の確保  
非：非常用炉心冷却の確保

\*：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。

## 5. 引用

国内外の運転経験は、以下の情報に基づいた。

- (1) 「原子力情報施設公開ライブラリー（ニューシア）：原子力安全推進協会」
- (2) U. S. NRC IASCC 関連情報
- (3) BWR Vessel and Internals Inspection Summaries for Fall 2016 Outages, BWR-VIP2017-081, ML17187A190
- (4) BWR Vessel and Internals Inspection Summaries for Spring 2017 Outages, BWR-VIP2018-015, ML18040A464
- (5) BWR Vessel and Internals Inspection Summaries for Fall 2017 Outages, BWR-VIP2018-069, ML18170A100
- (6) BWR Vessel and Internals Inspection Summaries for 2018 Outages, BWR-VIP2019-078, ML19232A214
- (7) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2019 Outages, BWR-VIP2020-082, ML20283A472
- (8) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2020 Outages, BWR-VIP2021-092, ML21336A344
- (9) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2021 Outages, BWR-VIP2022-078, ML22321A153

## 付録B シュラウド溶接部の残留応力評価

### 1. 検討目的

亀裂進展評価を実施するために必要な溶接部の残留応力評価を実施する。評価対象は、H7 継手及び中性子照射効果の大きいH4 継手である。

また、ここで用いる解析手法に関して実測値との比較によりその適用性を示す。

### 2. 検討内容

#### 2.1 1100MWe BWR プラント

##### (1) 解析モデル

1100MWe BWR のシュラウドのうち溶接線 H4 の形状と解析モデルを図 B-1 に、H7 の形状と解析モデルを図 B-2 に示す。これらのシュラウドサポートリングと下部胴溶接部 (H7a)、シュラウドサポートリングとシュラウドサポートシリンダ溶接部 (H7b) 及び中間胴上下 (H4) について解析を実施する。H7 及び H4 溶接部は軸対称構造であるので軸対象モデルとしてモデル化する。

##### (2) 解析手順

解析手順を図 B-3 に示す。ここでは、溶接金属を実際の溶接施工手順通りに母材に成層し、そのときの非定常温度分布変化を溶接パス毎に求める。次に、溶接パス毎の溶接金属モデルに当該温度分布の時刻歴変化を与えて大変形弾塑性解析を実施することにより、溶接施工過程での発生応力を算出する。このようにして最終溶接が終了した状態での応力状態が残留応力となる。溶接パスについては、実際の溶接パスを同一施工条件ごとにグルーピングして解析する。

##### (3) 物性値

伝熱解析には溶接学会論文集(第12巻(1994)第4号563)に示す材料物性値を用い、温度分布解析では溶接金属と母材の材料特性を同一とする。また、熱応力解析には図 B-4 に示す物性値を用いた。

##### (4) 入熱の想定

単位時間当たりの入熱の想定を、図 B-5 に示す。入熱の時間変化としては、この図に示すように、入熱が増加する時間 (トーチが近づく時間)  $t_1$ 、溶接中の時間  $t_2$ 、入熱が減少する時間 (トーチが離れて行く時間)  $t_3$  の比率を実測値ベースに想定し、ビードの最高温度が  $1100 \pm 50^\circ\text{C}$  となるよう時間を決定した。除熱は母材及びビードの雰囲気と接する面から対流伝熱により生じるものとし、熱伝達率を  $11.6\text{J}/\text{m}^2\text{sec}$  とする。

##### (5) 残留応力解析結果

###### a. H4 継手

H4 継手に対する解析結果を図 B-6 に示す。ステンレス鋼溶接部で SCC 感受性のある溶接熱影響

部付近の軸方向の残留応力分布を示している。

b. H7 継手

H7 継手に対する解析結果を図 B-7 に示す。H7a ではステンレス鋼溶接部であることから SCC の感受性がある溶接熱影響部近傍を、H7b では 600 系のニッケル合金(NCF600)であることから SCC の感受性がある溶接金属部の残留応力分布を示している。

## 2.2 ABWR プラント

### (1) 解析モデル

ABWR のシュラウドの H7 の形状と解析モデルを図 B-8 に示す。H7 溶接部は軸対称構造であるので軸対象モデルとしてモデル化する。

### (2) 解析手順

解析手順は図 B-3 と同じである。ここでは、溶接金属を実際の溶接施工手順通りに母材に成層し、そのときの非定常温度分布変化を溶接パス毎に求める。次に、溶接パス毎の溶接金属モデルに当該温度分布の時刻歴変化を与えて大変形弾塑性解析を実施することにより、溶接施工過程での発生応力を算出する。このようにして最終溶接が終了した状態での応力状態が残留応力となる。溶接パスについては、実際の溶接パスを同一施工条件ごとにグルーピングして解析する。

### (3) 物性値

解析に用いる材料物性値は、旧独立行政法人 原子力安全基盤機構の複雑形状部機器配管健全性実証(IAF)事業<sup>[1]</sup>において取得されたデータをもとに設定した。熱伝導解析及び熱応力解析に用いた材料の物性値を表 B-1 に示す。

### (4) 入熱の想定

単位時間当たりの入熱の想定は、図 B-5 と同じである。入熱の時間変化としては、この図に示すように、入熱が増加する時間（トーチが近づく時間） $t_1$ 、溶接中の時間  $t_2$ 、入熱が減少する時間（トーチが離れて行く時間） $t_3$  の比率を実測値ベースに想定し、ビードの最高温度が  $1100\pm 50^{\circ}\text{C}$  となるよう時間を決定した。除熱は母材及びビードの雰囲気と接する面から対流伝熱により生じるものとし、熱伝達率を  $11.6\text{J}/\text{m}^2\text{sec}$  とする。

### (5) 残留応力解析結果

H7 継手に対する解析結果を図 B-9 に示す。H7 は 600 系のニッケル合金(NCF600)であることから SCC の感受性がある溶接金属部の残留応力分布を示している。

### 3. 残留応力に関する実測値と解析値との比較

#### (1) 目的

残留応力に関してシュラウドのモックアップ試験体にて実測された値と、溶接手順を模擬して解析した値を比較する。

#### (2) 検討対象

検討対象とするモックアップ試験体の形状を図 B-8 に示す。一方、解析に用いた FEM モデルは図 B-9 に示すとおりである。図 B-9 には実際の溶接手順を模擬した溶接パス（実際の溶接の数パス分をグルーピングしたもの）が示してある。

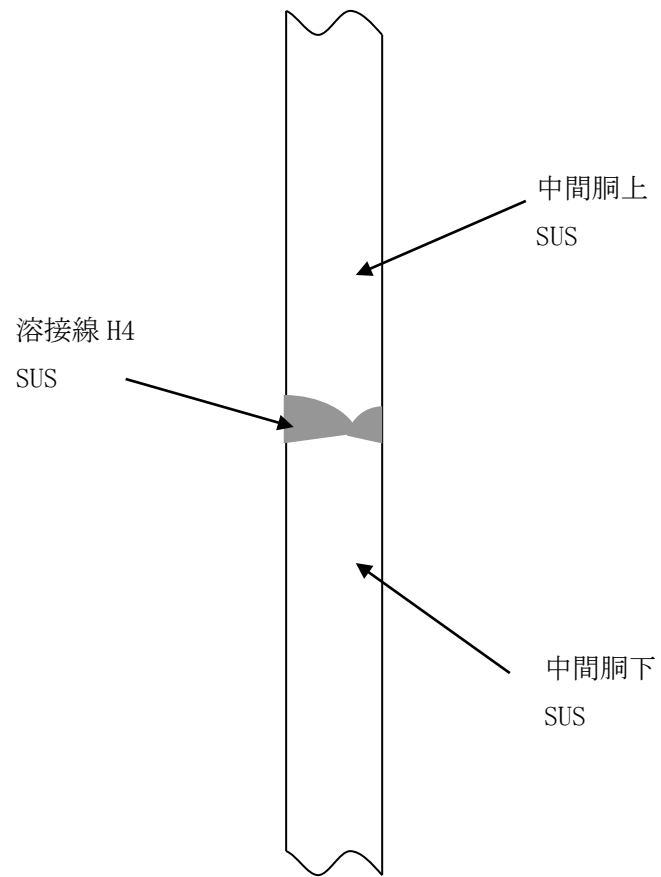
#### (3) 解析方法

解析手順を図 B-10 に示す。グルーピングした各溶接パスを成層させ、非定常温度分布変化を求める。次に、成層される溶接金属をモデル化した要素に当該温度時刻歴変化を加えて大変形弾塑性解析を実施する。物性値は、図 B-11 に示すモックアップ試験体と同一の材料、溶接条件から作成した試験片で測定した値を用いた。

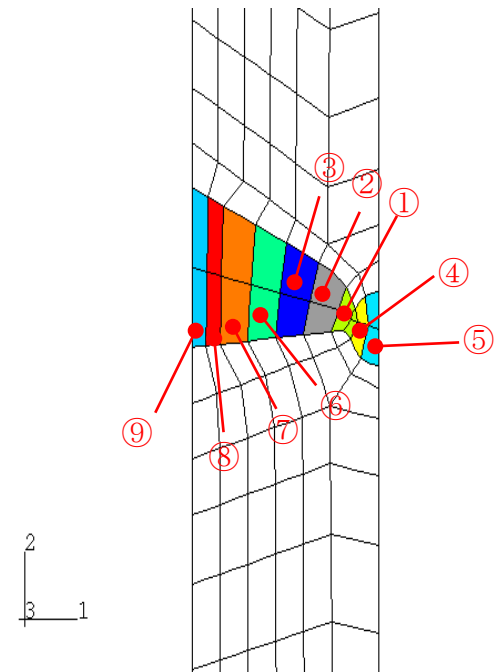
また、層ごとの単位時間あたりの入熱は、図 B-12 に示すように想定して溶接条件を考慮して内部発熱として与えた。なお、 $t_1$  及び  $(t_3-t_2)$  は  $t_2$  の 20% となるように設定した。

#### (4) 解析結果

各部の残留応力の解析結果を実測値と比較して図 B-13 に示す。この図に示すように残留応力の実測値と解析値は比較的良く一致しており、本解析手法の適用性が示された。

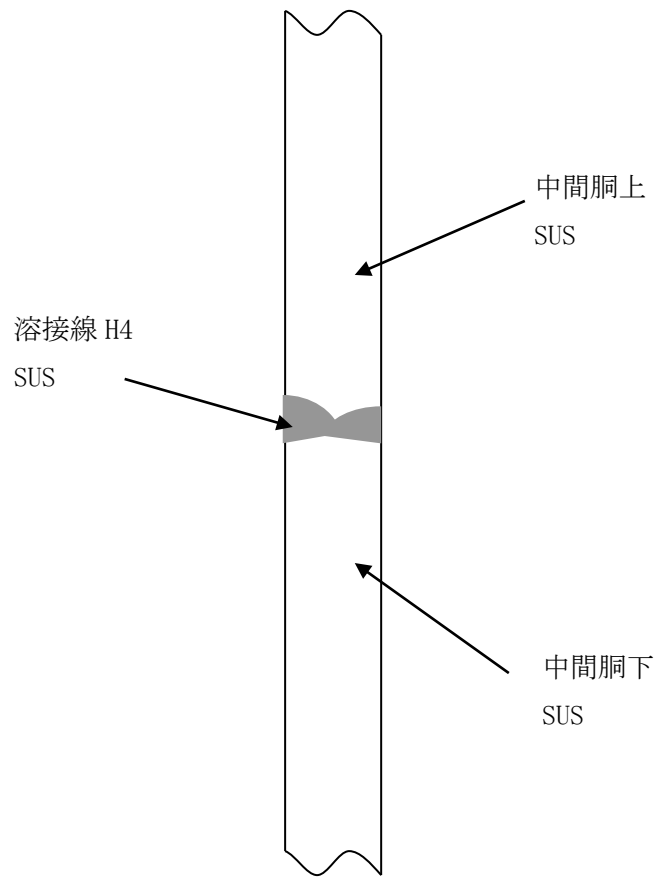


(a) 解析対象概略構造

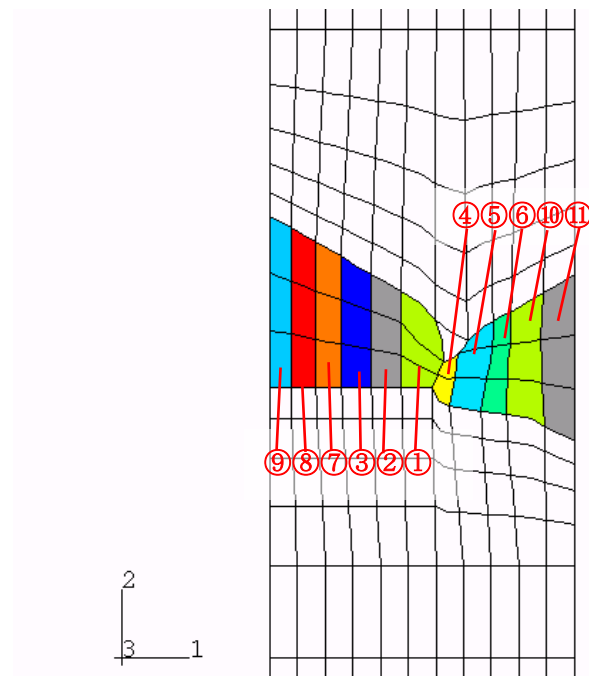


(b) 解析モデルと溶接順序

図 B-1a H4 の形状と解析モデル (片側開先の場合)

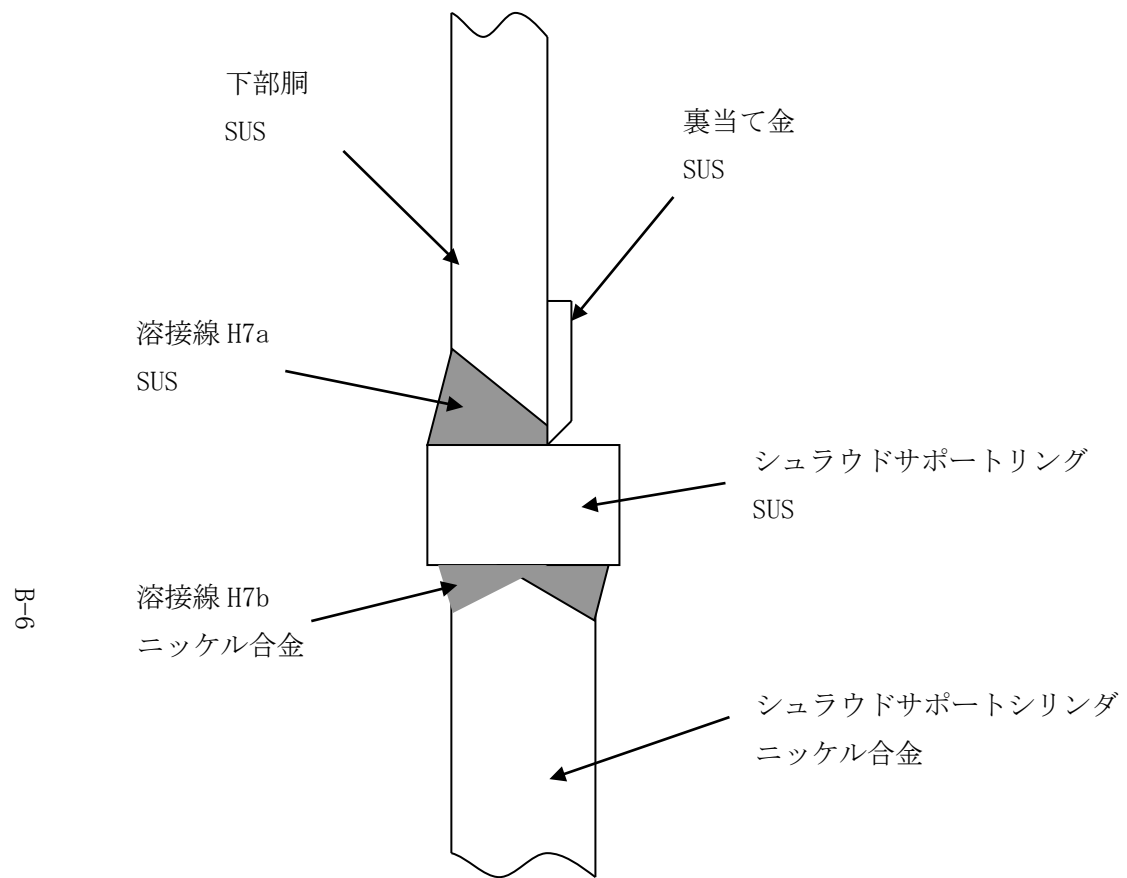


(a) 解析対象概略構造

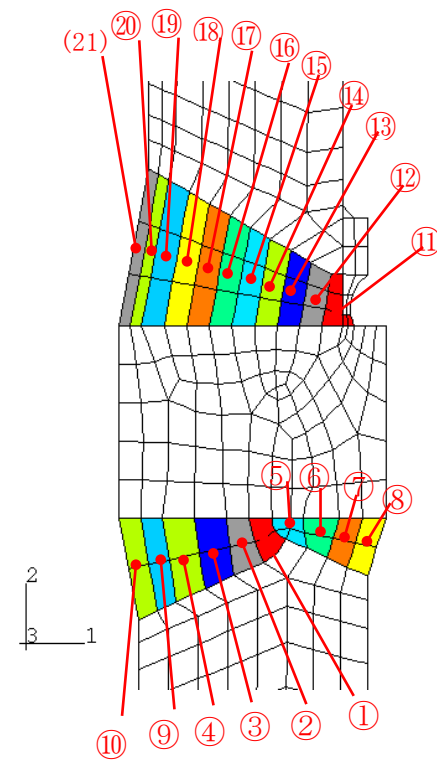


(b) 解析モデルと溶接順序

図 B-1b H4 の形状と解析モデル (両側開先の場合)

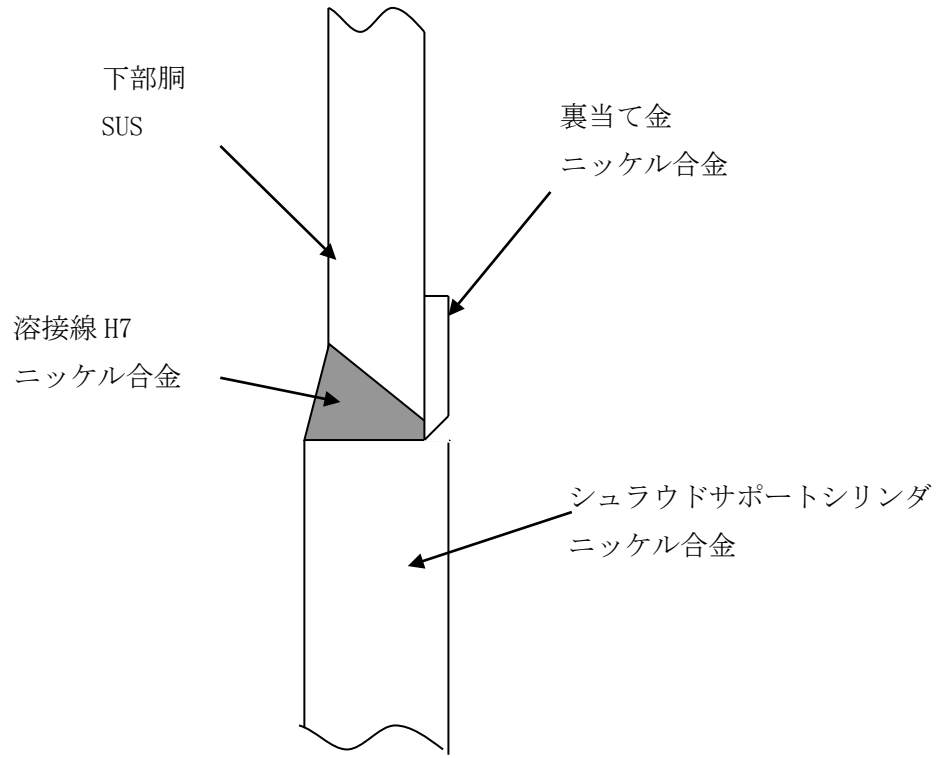


(a) 解析対象概略構造

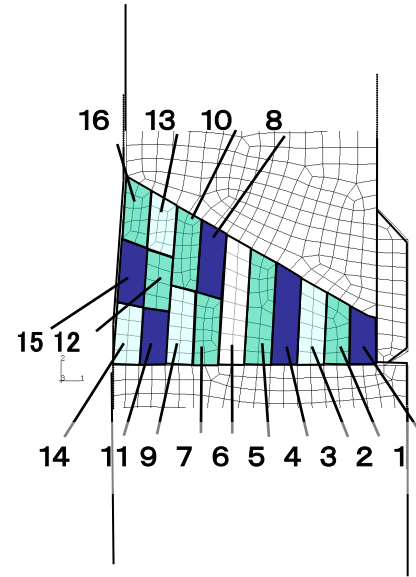


(b) 解析モデルと溶接順序

図 B-2a H7 の形状と解析モデル(シュラウドサポートリング有の場合)

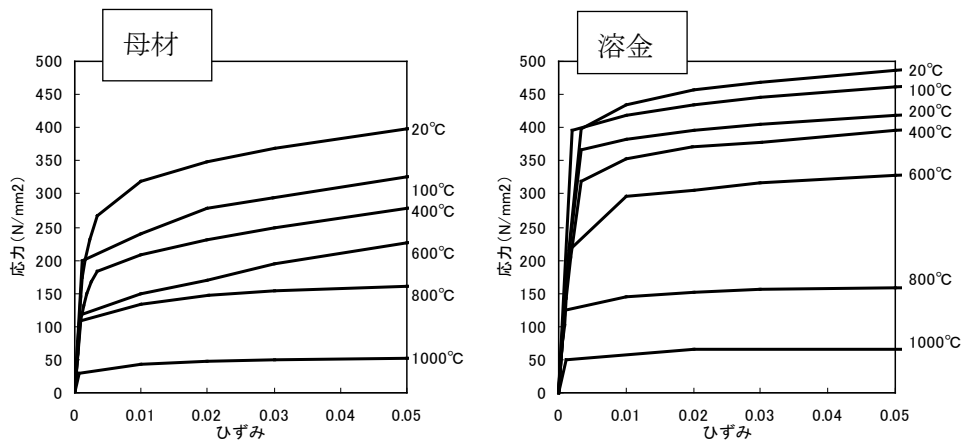
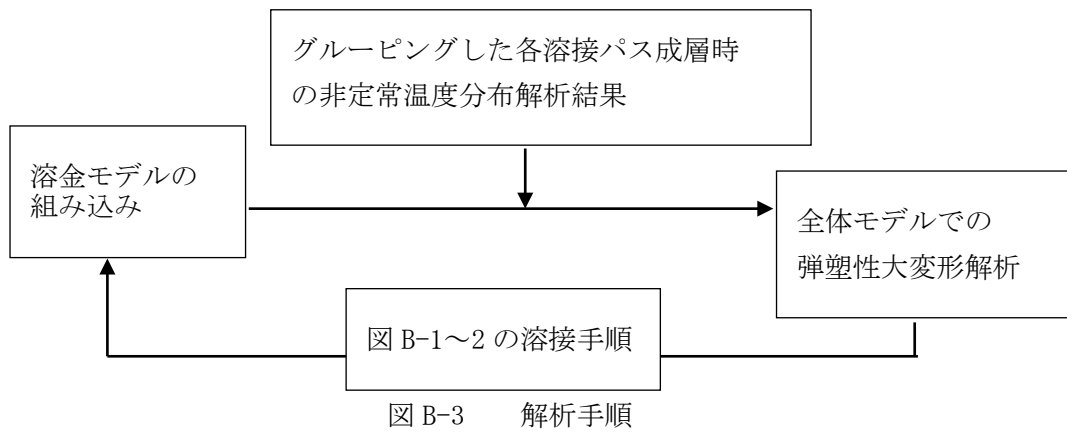


(a) 解析対象概略構造

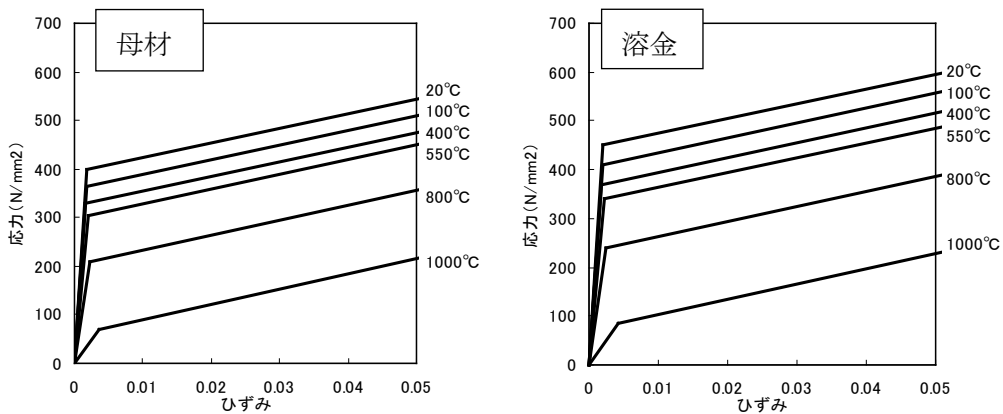


(b) 解析モデルと溶接順序

図 B-2b H7 の形状と解析モデル(シュラウドサポートリング無しの場合)



a. ステンレス鋼 (シュラウドモックアップ試験体実測値)



b. ニッケル合金 (出典：溶接学会論文集第12巻 (1994) 第4号 563)

図 B-4 解析に用いた物性値

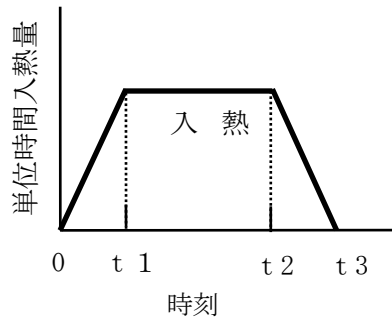


図 B-5 入熱の想定

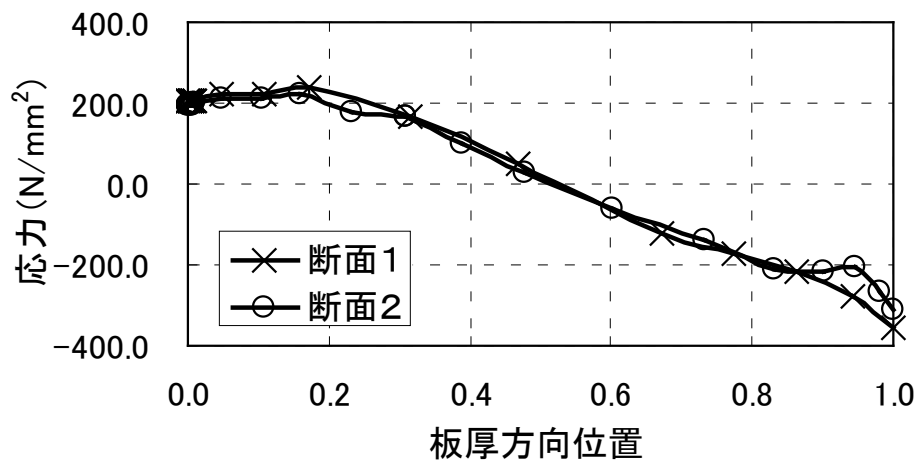
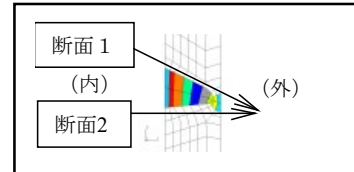


図 B-6a H4 継手の残留応力分布 (軸方向; 片側開先の場合)

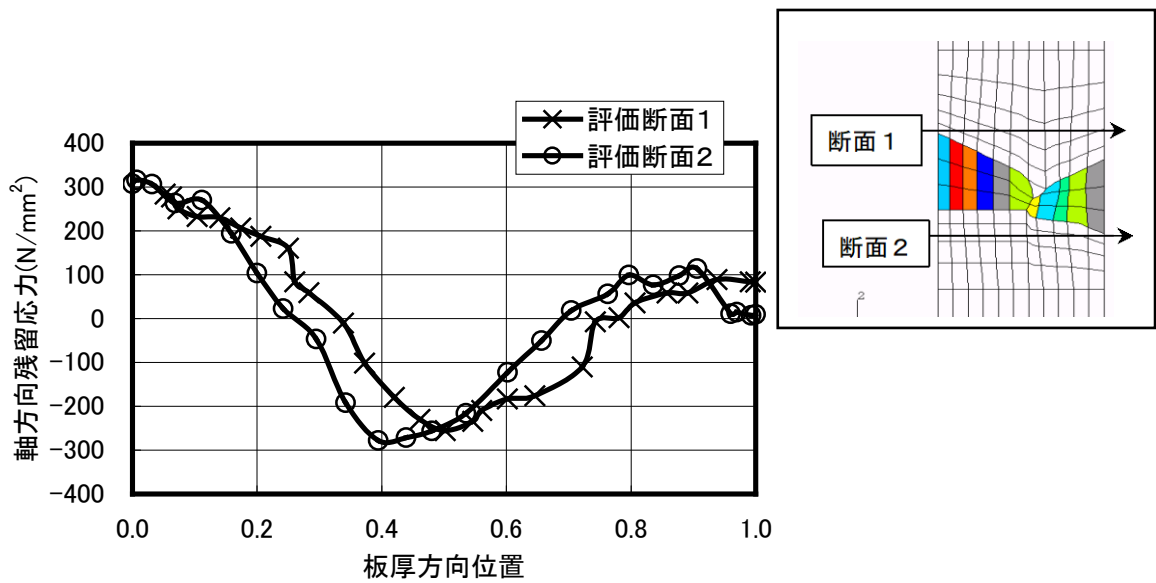


図 B-6b H4 継手の残留応力分布 (軸方向; 両側開先の場合)

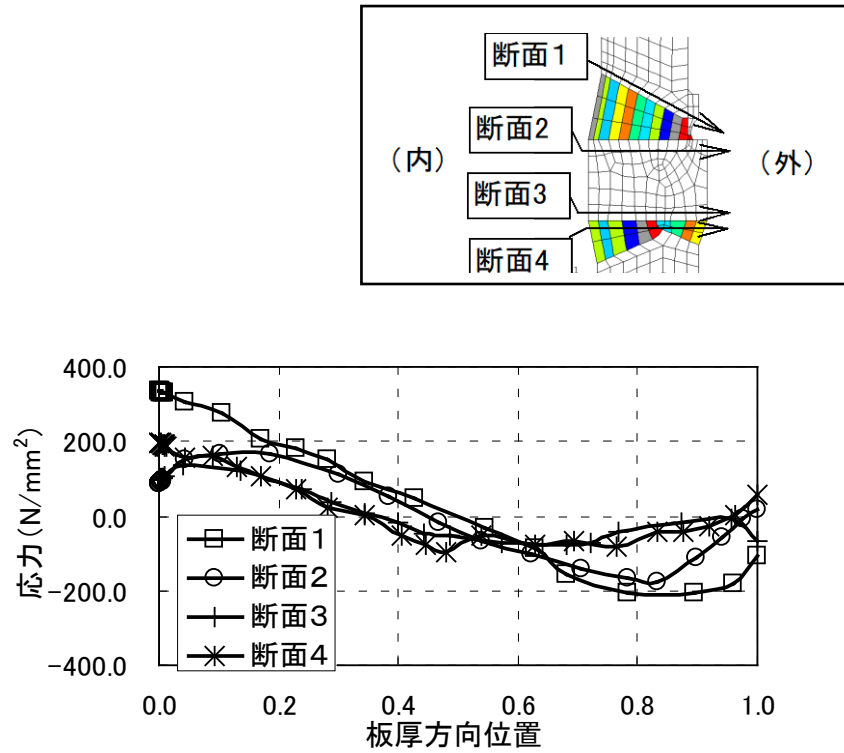
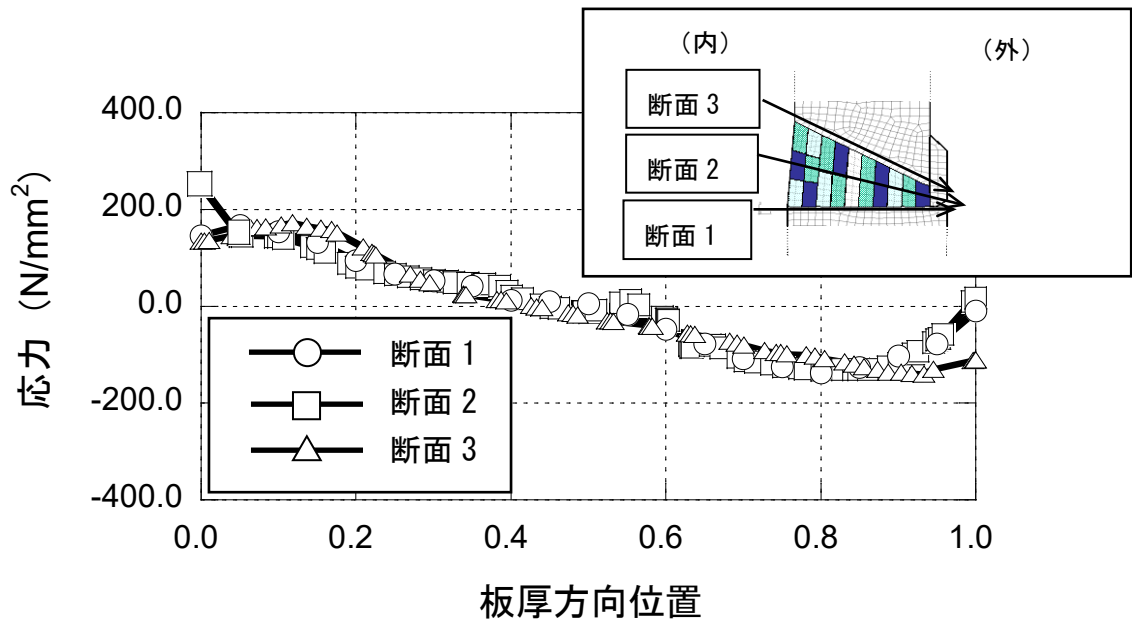


図 B-7a H7 継手の残留応力分布 (軸方向; シュラウドサポートリング有のケース)



図B-7b H7 継手の残留応力 (軸方向; シュラウドサポートリング無しのケース)

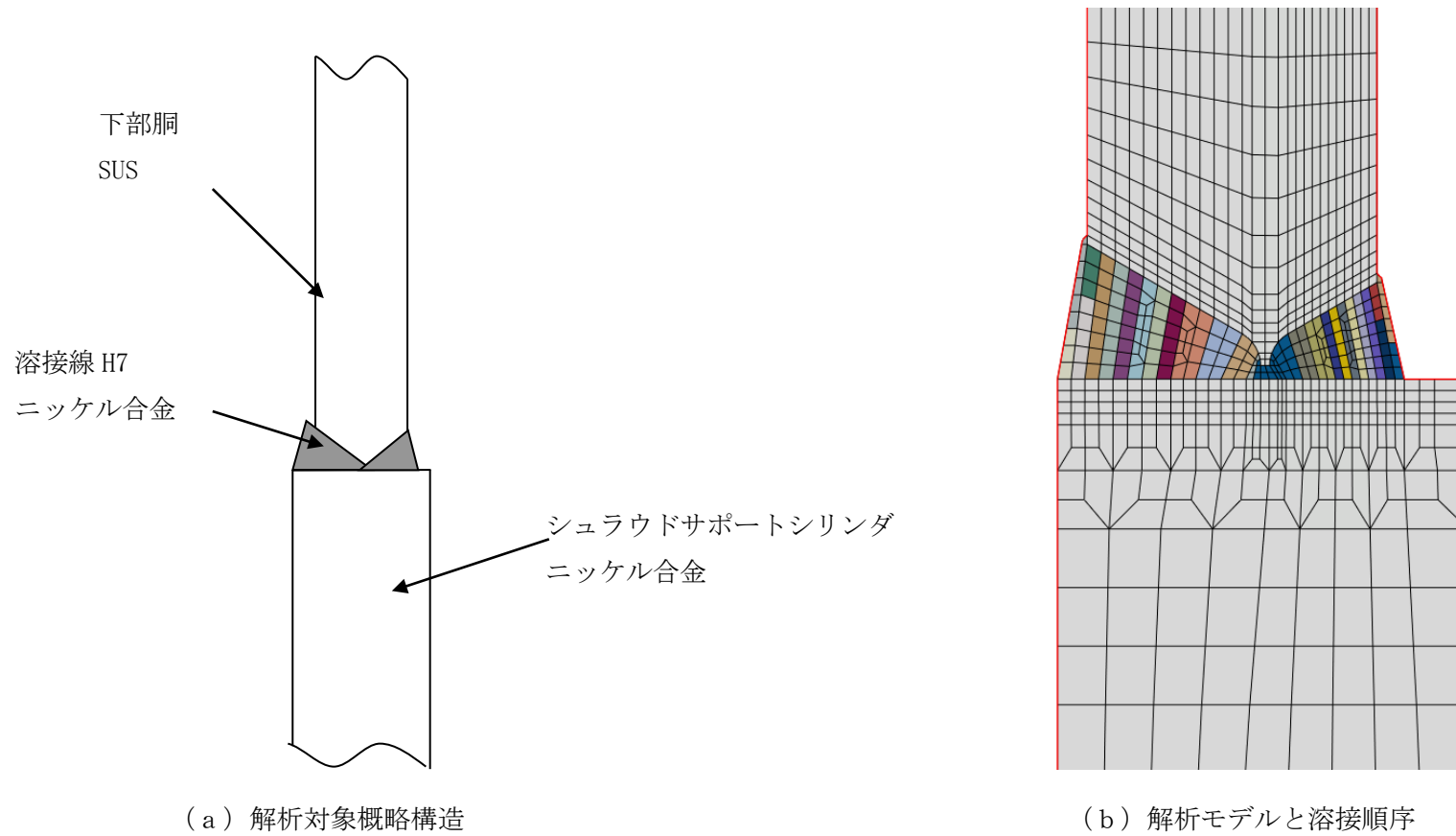


図 B-8 H7 の形状と解析モデル (ABWR)

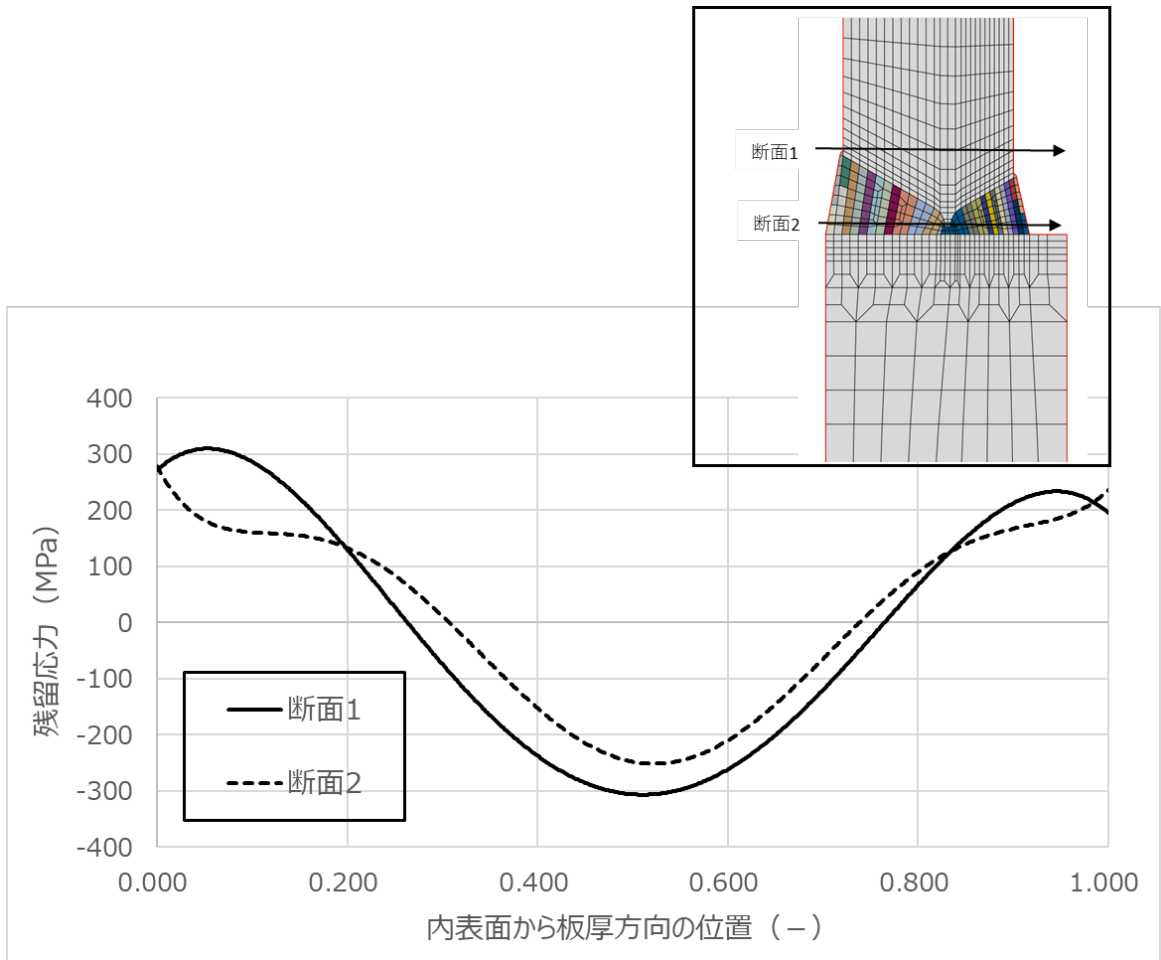


図 B-9 H7 の残留応力分布 (ABWR)

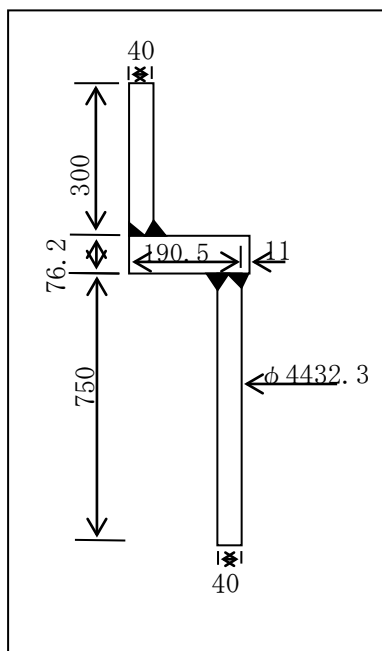


図 B-8 試験体形状

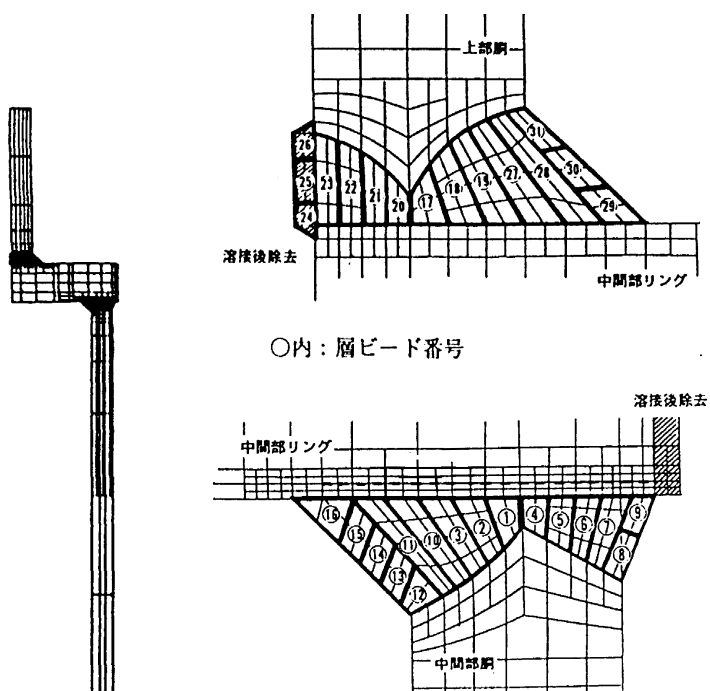
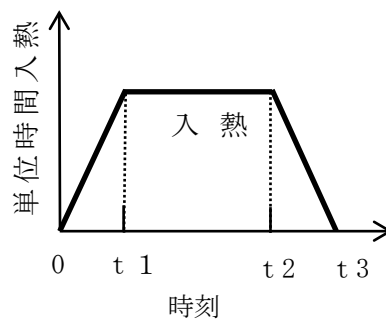
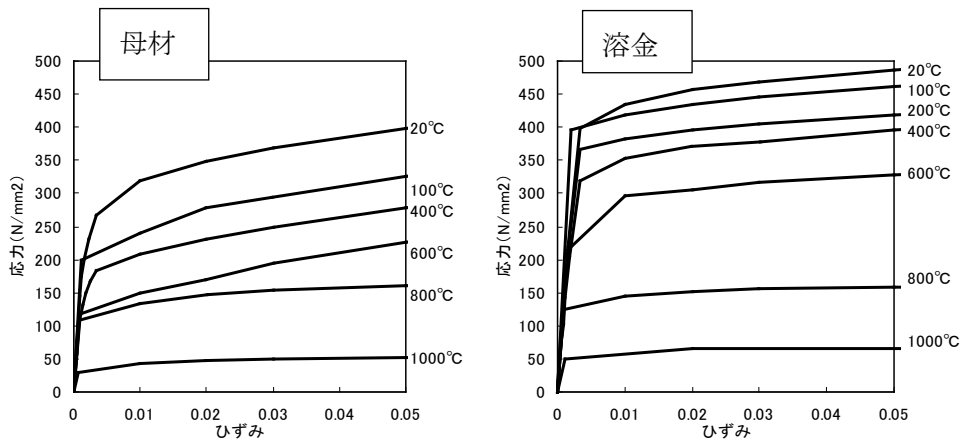
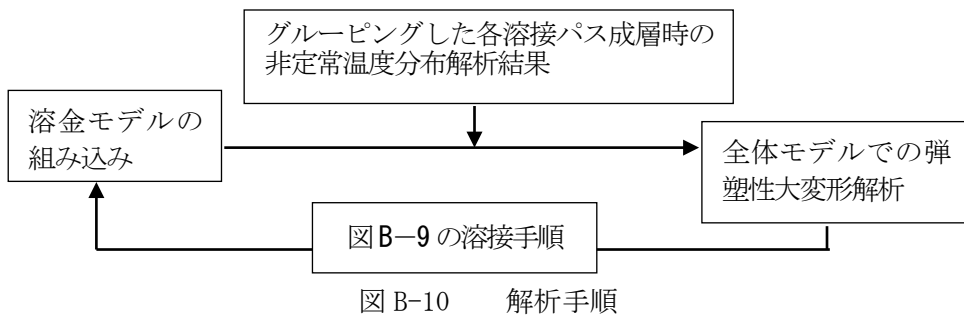


図 B-9 解析モデル



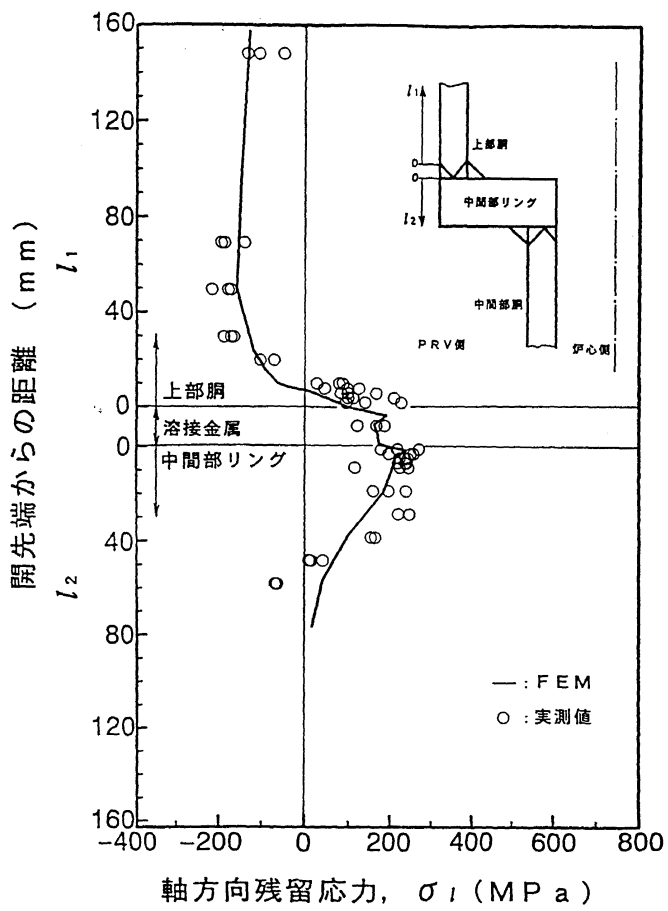
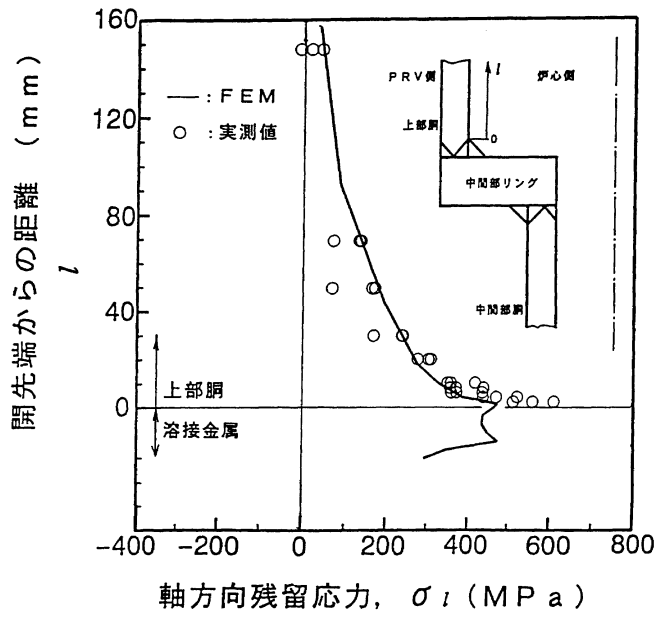


図 B-13a 解析結果 (その1)

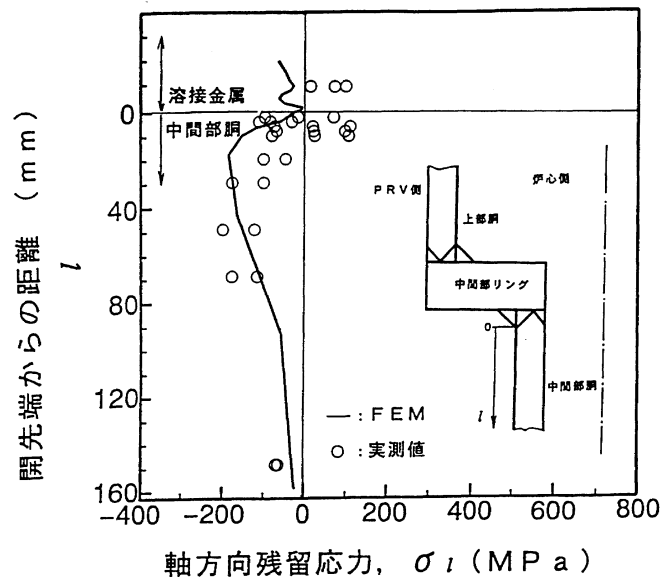
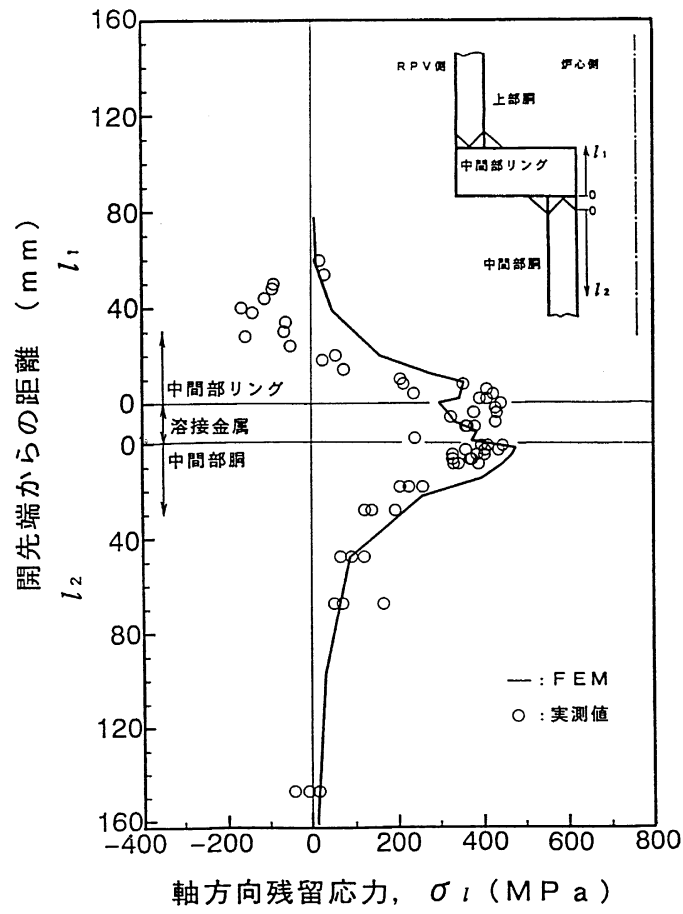


図 B-13b 解析結果 (その2)

## 付録C シュラウドの亀裂進展評価

シュラウド（ステンレス鋼，ニッケル合金）に初期亀裂を想定し，幾つかの前提条件を仮定して亀裂進展評価を行った。評価対象はBWR（1100MWeクラス）及びABWRとし，付録Dに示す検討結果からシュラウドの構造健全性に及ぼす影響が大きいH7溶接線とする。

なお，H4及びH6溶接部については，補足資料1に示し，縦方向溶接部の亀裂進展評価については，参考資料C-1，C-2，C-3に示す。

### 1. 評価方法

#### 1.1 評価モデル

シュラウドの半径(R)と板厚(t)の比(R/t)は約43~50であるので，平板に模擬できる。ここでは，BWR（1100MWeクラス）のシュラウドのH7（胴側）継手を板厚50.8mm，H7継手（シリンダ側）を板厚70mm，ABWRのシュラウドのH7（胴側）継手を板厚63.5mm，H7継手（シリンダ側）を板厚90mmの平板にそれぞれモデル化した。（図C-1）

#### 1.2 想定初期亀裂

評価では，SCC発生までの潜伏期間は無視して，供用期間開始直後に亀裂が発生するとして保守側に設定した。平板モデルには深さ50 $\mu$ mの半楕円表面亀裂（亀裂アスペクト比 $a/l=0.1$ ）を平板の表面に想定した。（図C-1）

なお，リング部の評価において，円筒にモデル化した場合には，円筒外面に深さ500 $\mu$ mの全周亀裂を想定した。（図C-2）

#### 1.3 応力条件

当該部には，残留応力及び運転応力が作用する。周方向溶接部に垂直に作用する運転応力はほぼ0であるので，ここでは運転応力は0とした。

BWR（1100MWeクラス）のシュラウドH7溶接部（リング有り，リング無し）及びABWRのシュラウドH7溶接部の残留応力は付録Bの解析結果を用いた。

##### 1.3.1 BWR（1100MWeクラス）のH7周方向溶接部

BWR（1100MWeクラス）のH7についてはリングが有るタイプと無いタイプの2タイプがある。リングが有るタイプの評価部位のH7aはステンレス鋼の共材溶接部である。評価部位は胴側及びリング側とする。この残留応力分布を図C-3及び図C-4に示す。リングが有るタイプの評価部位のH7bはステンレス鋼と600系のニッケル合金

(NCF600)の異材溶接部である。評価部位はシリンダ側（ニッケル合金溶接金属）とする。この残留応力分布を図 C-5 に示す。

一方、リングが無いタイプの H7 周方向継手はステンレス鋼と 600 系のニッケル合金 (NCF600) の異材溶接部である。評価部位は、ニッケル合金溶接金属のシリンダ側との境界部、ニッケル合金溶接金属の中央部、及びステンレス鋼側溶接熱影響部である。これらの残留応力分布を図 C-6、図 C-7 及び図 C-8 に示す。

リングが有るタイプのリング部以外の残留応力はともに、内表面で引張、外表面で圧縮（あるいはほぼ 0）の応力となっているため、ここでは内表面から外表面への SCC 亀裂進展のみを考える。また、リングがあるタイプのリング部においては、実機で割れが確認された内表面からの SCC 進展を考える。

### 1.3.2 ABWR の H7 周方向溶接部

ABWR の H7 周方向継手はステンレス鋼と 600 系のニッケル合金 (NCF600) の異材溶接部である。評価部位は、ニッケル合金溶接金属のシリンダ側との境界部、ニッケル合金溶接金属の中央部、及びステンレス鋼側溶接熱影響部である。これらの残留応力分布を図 C-9 及び図 C-10 に示す。

## 1.4 応力拡大係数

応力拡大係数 (K) の表示式は、平板状構造物の半楕円表面欠陥に対する CEA の解<sup>[1]</sup>を用いた。

$$K = \left[ (\sigma_0 + \sigma_p) G_0 + \sigma_1 G_1 \left( \frac{a}{t} \right) + \sigma_2 G_2 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + \sigma_3 G_3 \left( \frac{a}{t} \right)^3 \right] \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

$G_0 \sim G_4$  : 影響係数

$a$  : 亀裂深さ

$t$  : 板厚

ここで  $\sigma_0 \sim \sigma_4$  は下記 4 次応力分布の  $i$  次の応力分布である。

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left( \frac{x}{t} \right) + \sigma_2 \left( \frac{x}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left( \frac{x}{t} \right)^3 + \sigma_4 \left( \frac{x}{t} \right)^4 \quad (2)$$

一方、リング部を円筒にモデル化し、外周全周に亀裂を想定した場合の応力拡大係数は影響関数法に基づいた API-579<sup>[3]</sup> の下記 4 次の応力分布に対する下式を用いた。

$$K_I = [G_0 \sigma_0 + G_1 \sigma_1 (a/t) + G_2 \sigma_2 (a/t)^2 + G_3 \sigma_3 (a/t)^3 + G_4 \sigma_4 (a/t)^4] \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

$G_0 \sim G_4$  : 影響係数

a : 亀裂深さ

t : 板厚

ここで、 $\sigma_0 \sim \sigma_4$  は下記 4 次応力分布の i 次の応力成分である。

$$\sigma(X) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{X}{t}\right) + \sigma_2 \left(\frac{X}{t}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{X}{t}\right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{X}{t}\right)^4 \quad (4)$$

X : 外表面からの板厚方向距離

## 1.5 SCC 進展速度

シュラウドのステンレス鋼の SCC 進展評価の速度式として、鋭敏化 SUS304 及び低炭素ステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L, 316NG) の亀裂進展速度線図から下記 1.5.1 項に示す進展速度式を適用した。

一方、ニッケル合金溶接部の SCC 進展評価の速度式として、シュラウドサポート評価に用いた下記 1.5.2 項に示す SCC 進展速度線図を適用した。なお、溶接材料としてニッケル合金の 82 合金を使用するプラントについては、文献<sup>[6]</sup>より設定した 1.5.3 項に示す速度式による評価を行ってもよい。本速度式は、材料の規格内での化学成分変動を含む複数の材料ヒートを使用し、炉内構造物に用いられる溶接方法で国内プラントメーカーが溶接施工した試験体の SCC 進展速度データベースにより策定され、溶接ままと溶接後熱処理及び通常一次水質環境下と水素注入環境下で異なる線図を定義している。なお、本付録では、選定されたデータ群の平均線による速度式について、点検時期を評価するにあたり、亀裂進展速度に  $2.0 \times 10^{-9}$  mm/s の下限値を設けた。

### 1.5.1 鋭敏化 SUS304 及び低炭素ステンレス鋼

(1) 通常炉内水質環境中 (導電率  $< 0.2 \mu\text{S/cm}$ ,  $\text{ECP} \geq 150\text{mV}_{\text{SHE}}$ )

(i) 鋭敏化 SUS304

$$da/dt = 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161} \quad (3.4 \leq K \leq 57.9) \quad (5)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 3.4) \quad (6)$$

$$da/dt = 9.2 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9) \quad (7)$$

(ii) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \leq K \leq 57.9) \quad (8)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7) \quad (9)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9) \quad (10)$$

単位：da/dt (mm/s) , K (MPa√m)

以上，通常炉内水質環境中の SCC 進展評価線図を図 C-11 に示す。

(2) 水素注入環境中 (導電率 < 0.2 μ S/cm, ECP ≤ -200mV<sub>SHE</sub>)

(i) 鋭敏化 SUS304

$$da/dt = 7.94 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (12.9 \leq K \leq 57.9) \quad (11)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 12.9) \quad (12)$$

$$da/dt = 5.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9) \quad (13)$$

(ii) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (19.3 \leq K \leq 57.9) \quad (14)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 19.3) \quad (15)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9) \quad (16)$$

単位：da/dt (mm/s) , K (MPa√m)

以上，水素注入環境中の SCC 進展評価線図を図 C-12 に示す。

### 1.5.2 ニッケル合金溶接金属の SCC 進展速度式

参考文献<sup>[5]</sup>より設定した 182 合金の SCC 亀裂進展速度を以下に示す。なお，本付録では点検時期を評価するにあたり，亀裂進展速度に  $2.0 \times 10^{-9}$  [mm/s] の下限値を設けた。

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0)$$

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 13.9)$$

$$da/dt = 2.70 \times 10^{-14} K^{4.50} \quad (0 < K \leq 56.0)$$

$$da/dt = 2 \times 10^{-6} \quad (56.0 < K)$$

単位：da/dt [mm/s], K [MPa√m]

### 1.5.3 ニッケル合金溶接金属の SCC 進展速度式 (参考文献 5) より)

(1) 通常一次水質環境下 (NWC : Normal Water Chemistry)

(i) 溶接まま (As-Welded)

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (1)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 13.7) \quad (2)$$

$$da/dt = 1.1 \times 10^{-15} K^{5.5} \quad (13.7 \leq K \leq 22.5) \quad (3)$$

$$da/dt = 6.0 \times 10^{-11} K^{2.0} \quad (K > 22.5) \quad (4)$$

単位：da/dt [mm/s], K [MPa√m]

(ii) 溶接後熱処理 (PWHT)

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (5)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 16.7) \quad (6)$$

$$da/dt = 3.7 \times 10^{-16} K^{5.5} \quad (16.7 \leq K \leq 22.5) \quad (7)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-11} K^{2.0} \quad (K > 22.5) \quad (8)$$

単位 :  $da/dt$  [mm/s],  $K$  [MPa $\sqrt{m}$ ]

以上, 上式で表される 82 合金の SCC 亀裂進展特性を図 C-13 に示す。

(2) 水素注入環境下 (HWC : Hydrogen Water Chemistry)

(i) 溶接まま (As-Welded)

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (9)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 16.7) \quad (10)$$

$$da/dt = 1.1 \times 10^{-15} K^{5.5} \quad (16.7 \leq K \leq 22.5) \quad (11)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-11} K^{2.0} \quad (K > 22.5) \quad (12)$$

単位 :  $da/dt$  [mm/s],  $K$  [MPa $\sqrt{m}$ ]

(ii) 溶接後熱処理 (PWHT)

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (13)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 16.7) \quad (14)$$

$$da/dt = 1.2 \times 10^{-16} K^{5.5} \quad (16.7 \leq K \leq 22.5) \quad (15)$$

$$da/dt = 6.7 \times 10^{-12} K^{2.0} \quad (K > 22.5) \quad (16)$$

単位 :  $da/dt$  [mm/s],  $K$  [MPa $\sqrt{m}$ ]

以上, 上式で表される 82 合金の SCC 亀裂進展特性を図 C-14 に示す。

## 2. SCC 亀裂進展量の時間依存性の評価

### 2.1 表面亀裂を有する平板モデル（BWR（1100Mwe クラス））

計算は、初期亀裂が内表面あるいは外表面から板厚方向へ進展した場合で行った。SCC 進展速度式は、1.5.1 項及び 1.5.2 項の式を用いる。また、初期亀裂が、低 K 値領域で仮定した一定の SCC 進展速度 ( $da/dt=2.0 \times 10^{-9}$ mm/s) で進展する場合は、その亀裂がアスペクト比  $a/l=0.1$  で進展すると仮定した。

H7 継手（リング有り H7a 胴側）では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中（NWC）では、低炭素ステンレス鋼が 23 年程度で板厚の 50%まで進展することが示された。また、水素注入（HWC）により大幅に進展が抑制されることが示された。（図 C-15）

H7 継手（リング有りシリンダ側：ニッケル合金溶接部）では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中（NWC）では、60 年程度経過後で板厚の約 5%程度しか進展しないことが示された。（図 C-16）

H7 継手（リング無しステンレス側溶接熱影響部）では運転時間約 20 年で亀裂進展が大幅な増加を示し、約 38 年で板厚の 50%まで進展することが示された。（図 C-17）

### 2.2 全周亀裂を有する円筒モデル（BWR（1100Mwe クラス））

H7 継手（リング有りリング側）では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中（NWC）では、低炭素ステンレス鋼は約 7 年程度で亀裂進展量が増加し、その後も緩やかに進展することが示された。また、水素注入（HWC）により大幅に進展が抑制されることが示された。（図 C-18）

### 3.3 表面亀裂を有する平板モデル（ABWR）

H7 継手（胴側）、及び H7 継手（溶金部）では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、60 年経過後で板厚の 50%程度しか進展せず、大幅な進展はしないことが示された。（図 C-19, 図 C-20）

(参考文献)

- [1] G.S.Wang “Weight Function Estimation of SIF for Mode I Part-Elliptical Crack under Arbitrary Load,” Engineering Fracture Mechanics Vol.41, No.5, pp.659-684, (1992).
- [2] I.S.Raju and J.C.Newman Jr., NASA Technical Paper 1578(1979).
- [3] API Recommended Practice 579 First Edition, AppendixC, Jan.2000.
- [4] 発電設備技術検査協会, 「プラント長寿命化技術開発調査報告書」 (昭和60年度～平成8年度)
- [5] 長瀬博, 藤森治男, 齋藤利之, 山本豊, 高守謙郎, 堂崎浩二, 新井拓, 熊野秀樹, “BWR 環境中でのニッケル基合金溶接金属の SCC き裂進展速度線図の提案” 日本機械学会論文集(A編), 76巻 764号(2010-4)
- [6] P.L.Andresen et al., “Proposed Crack Growth Rate Disposition Curves For Stress Corrosion Cracking of ALLOY 82 in BWR Environments” , 20th Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, (2022).

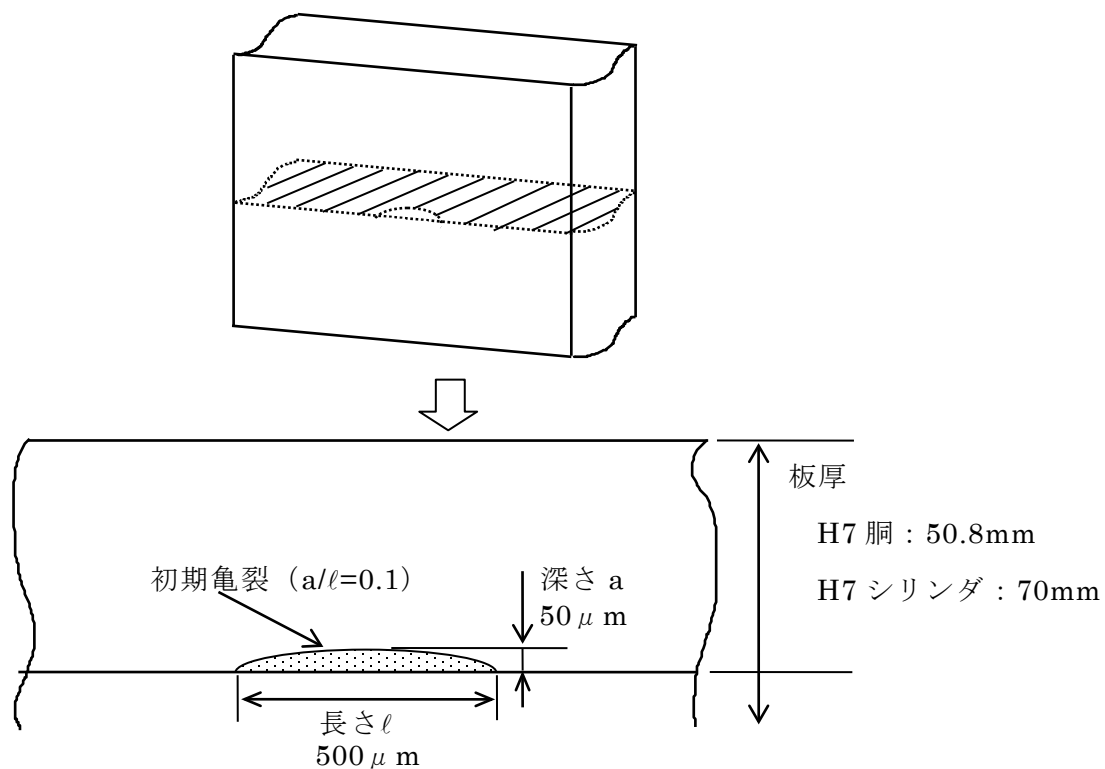
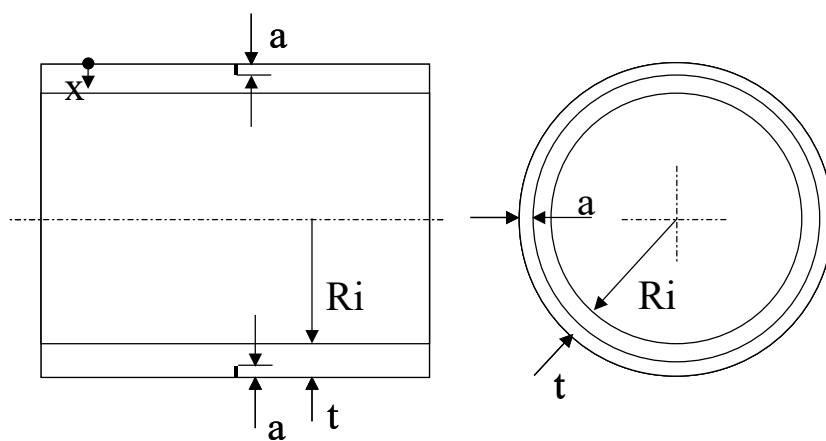


図 C-1 当該部のモデル化 (平板の表面亀裂モデル)



H6a リング :

$R_i$  = 円筒の内半径 (2554.6mm)

$t$  = 円筒の板厚 (75.8mm)

図 C-2 円筒の外表面全周亀裂モデル

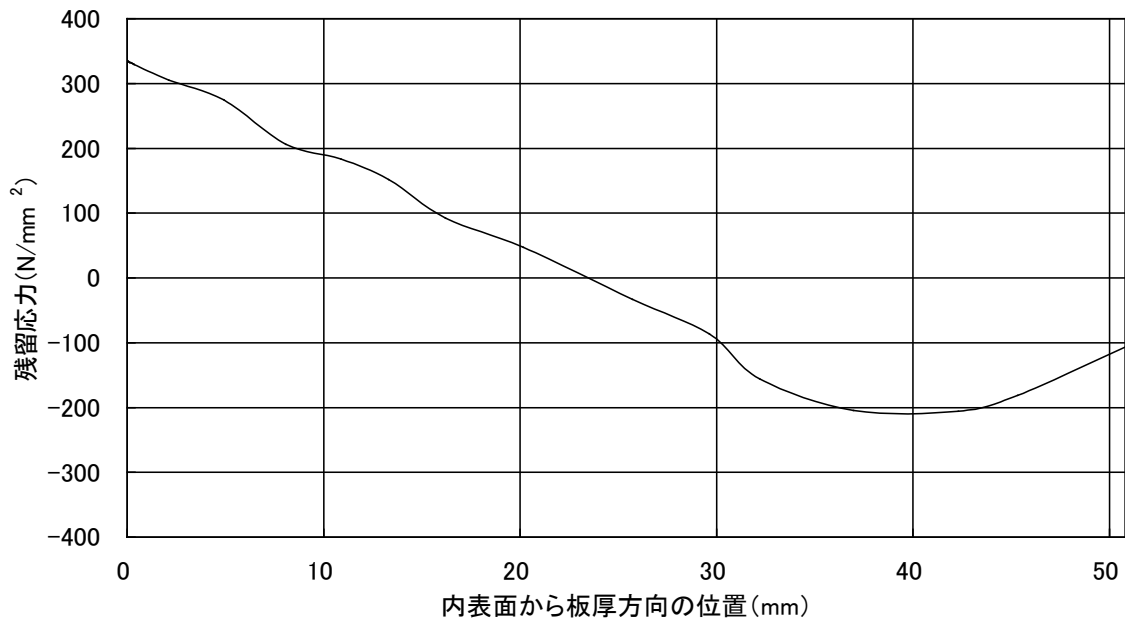


図 C-3 シュラウドの板厚方向残留応力分布（リング有り：H7a 胴側）

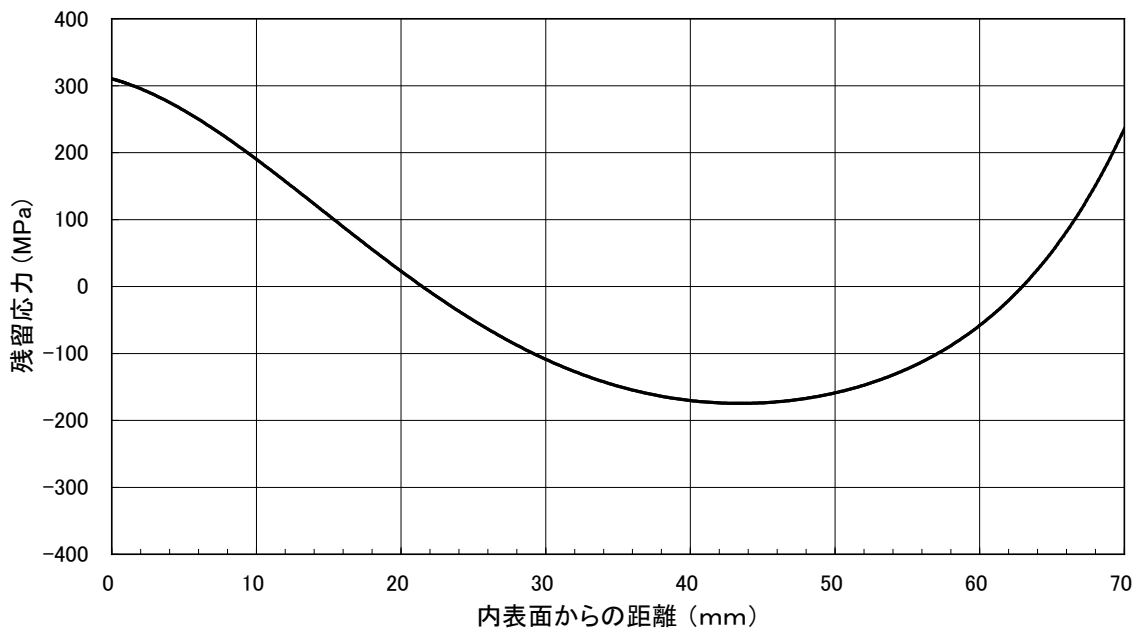


図 C-4 シュラウドの板厚方向残留応力分布（リング有り：H7a リング側）

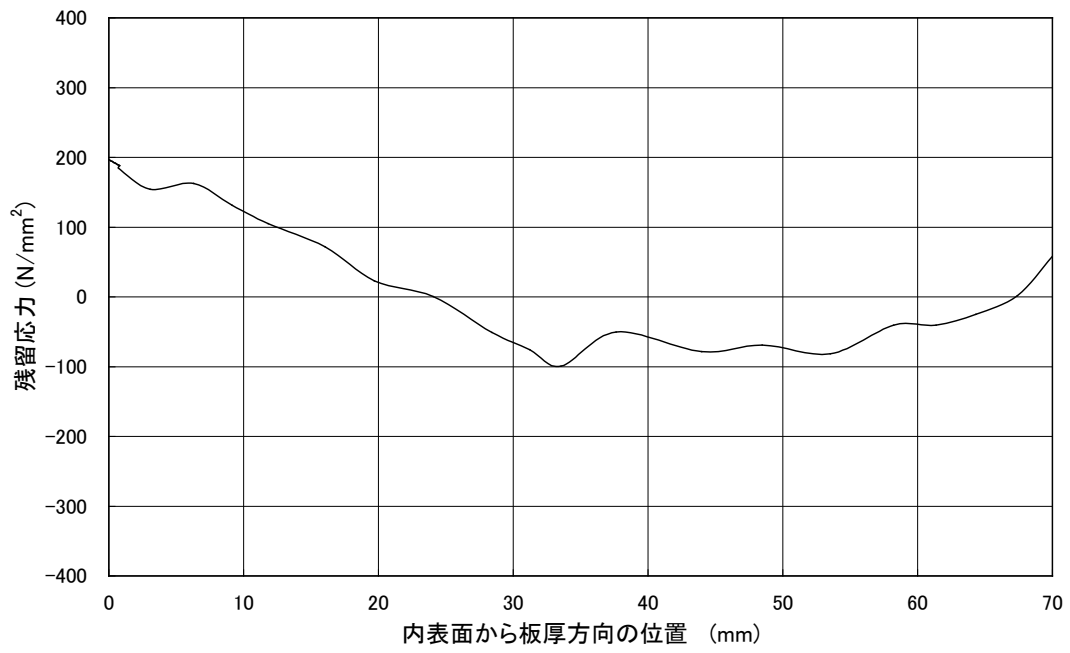


図 C-5 シュラウドの板厚方向残留応力分布（リング有り：H7b シリンダ側）

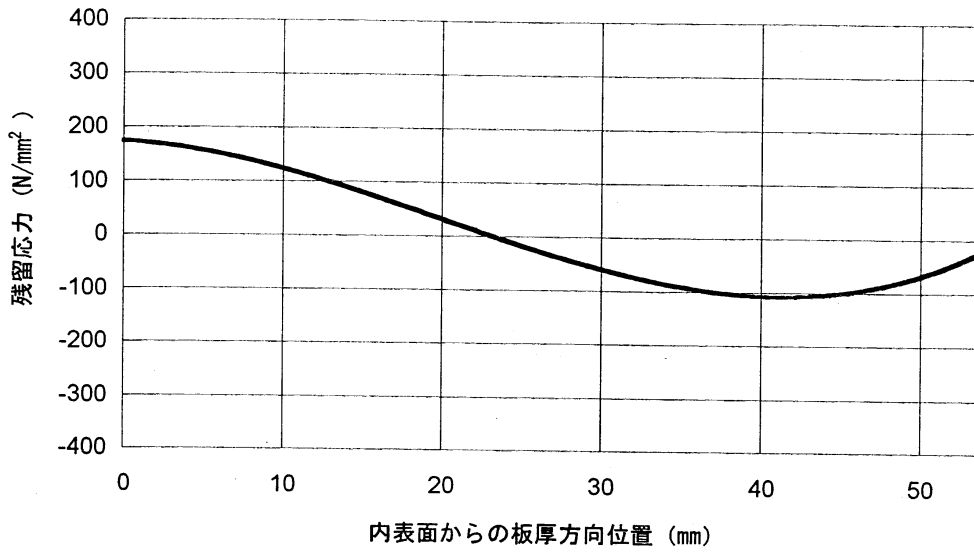


図 C-6 シュラウドの板厚方向残留応力分布 H7  
 (リング無し：ニッケル合金溶接部シリンダ側断面 1)

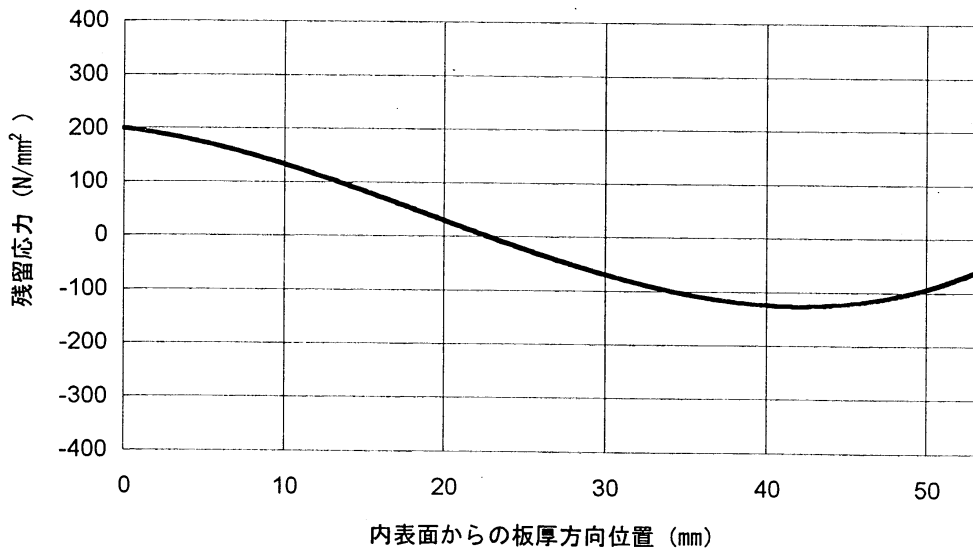


図 C-7 シュラウドの板厚方向残留応力分布 H7  
 (リング無し：ニッケル合金溶接部中央断面 2)

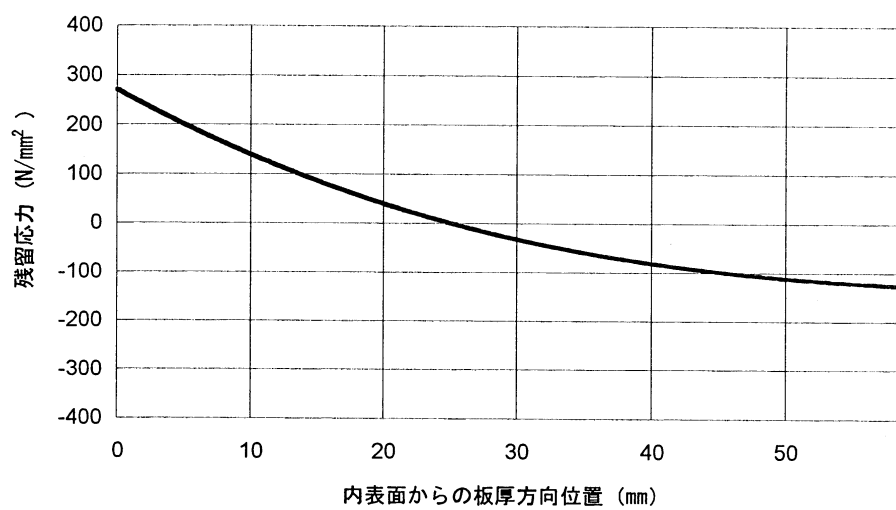


図 C-8 シュラウドの板厚方向残留応力分布 H7

(リング無し：ニッケル合金溶接部ステンレス側熱影響部断面 3)

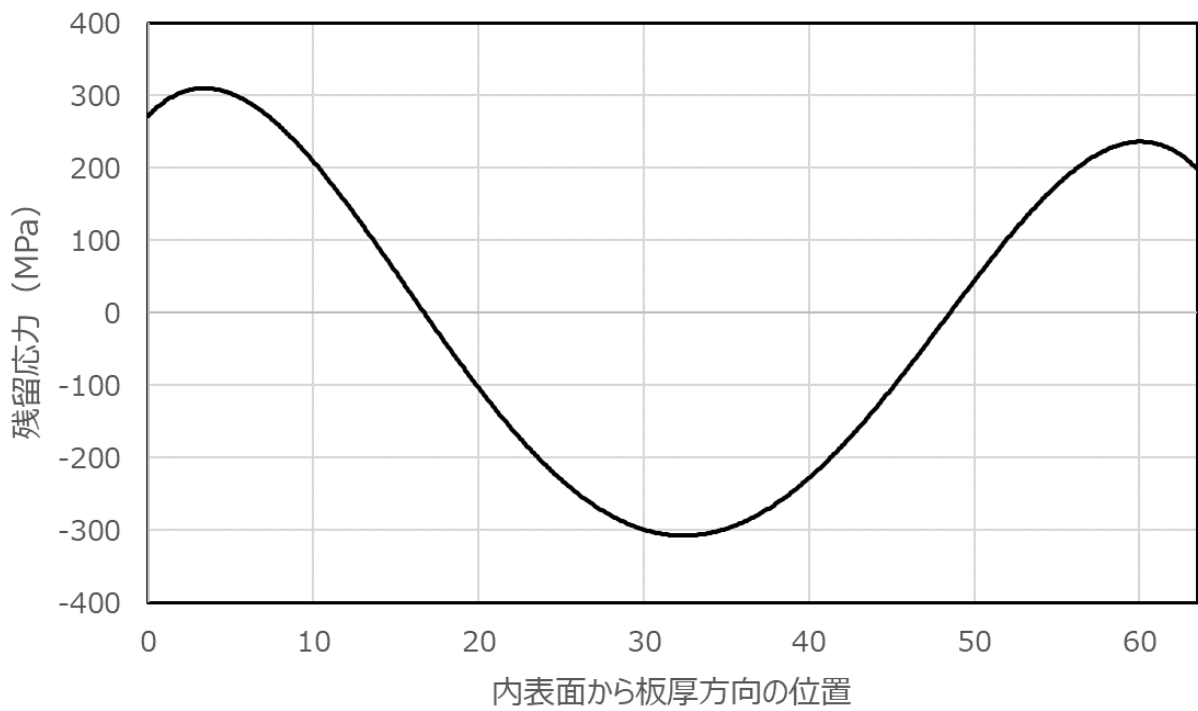


図 C-9 シュラウドの板厚方向残留応力分布 H7  
(ABWR : 胴側)

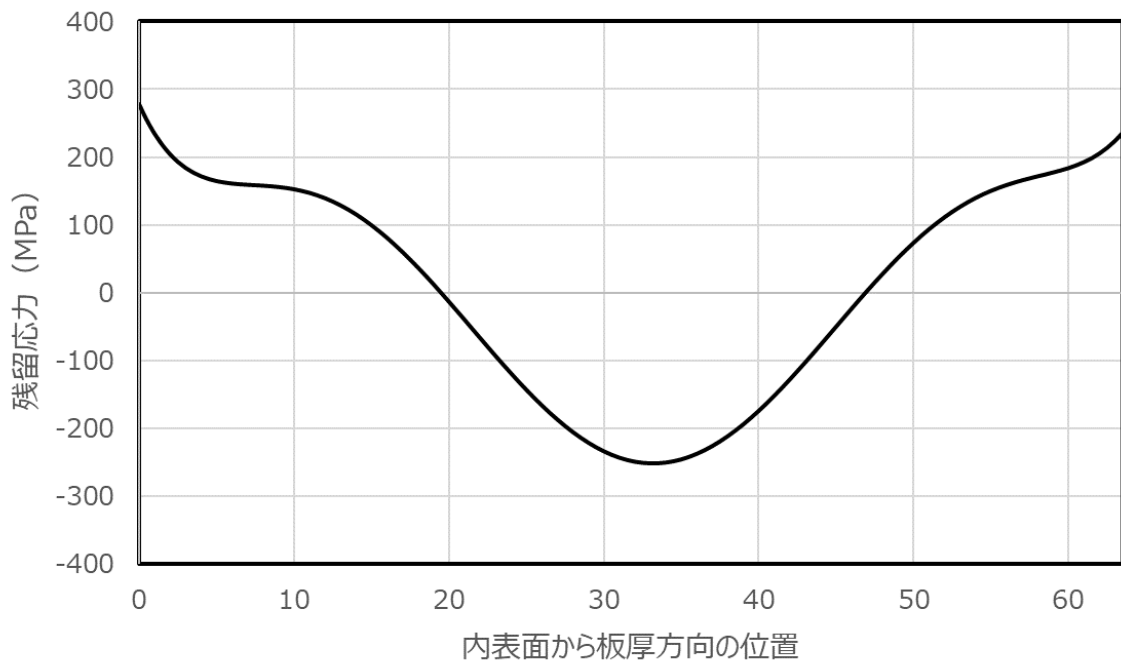


図 C-10 シュラウドの板厚方向残留応力分布 H7  
(ABWR : ニッケル合金溶接部)

通常炉内水質環境中(導電率 $<0.2 \mu\text{ S/cm}$ 、 $\text{ECP} \geq 150\text{mVSHE}$ )の  
SCC進展評価線図

(1) 鋭敏化SUS304

$$da/dt = 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161} \quad (3.4 \leq K \leq 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 3.4 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 9.2 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

(2) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \leq K \leq 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

単位:  $da/dt$ (mm/s)、 $K$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

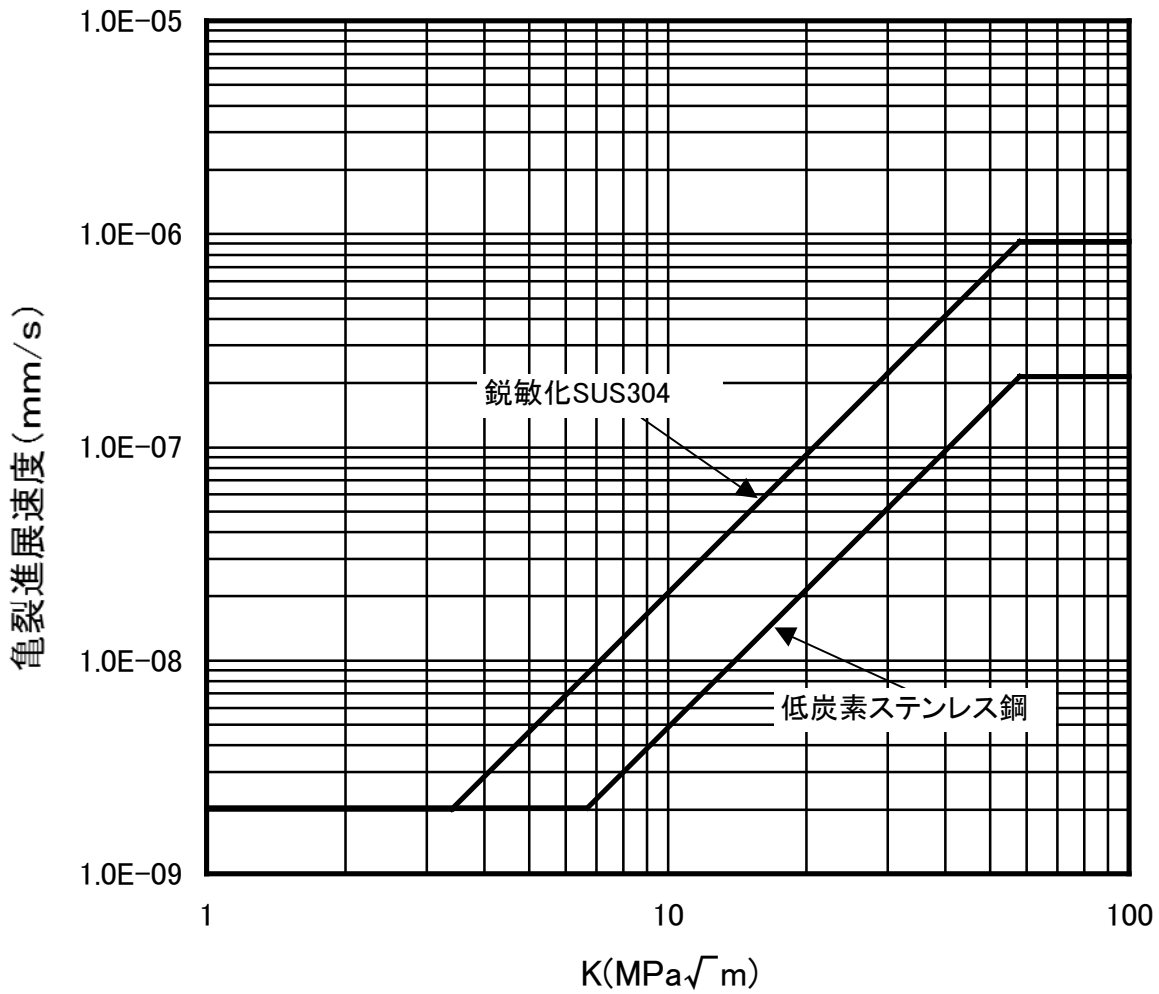


図 C-11 オーステナイト系ステンレス鋼の通常炉内水質環境中の  
SCC 進展評価線図

水素注入環境中(導電率 $<0.2 \mu\text{ S/cm}$ 、 $\text{ECP} \leq -200\text{mVSHE}$ )の  
SCC進展評価線図

(1) 鋭敏化SUS304

$$da/dt = 7.94 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (12.9 \leq K \leq 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 12.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 5.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

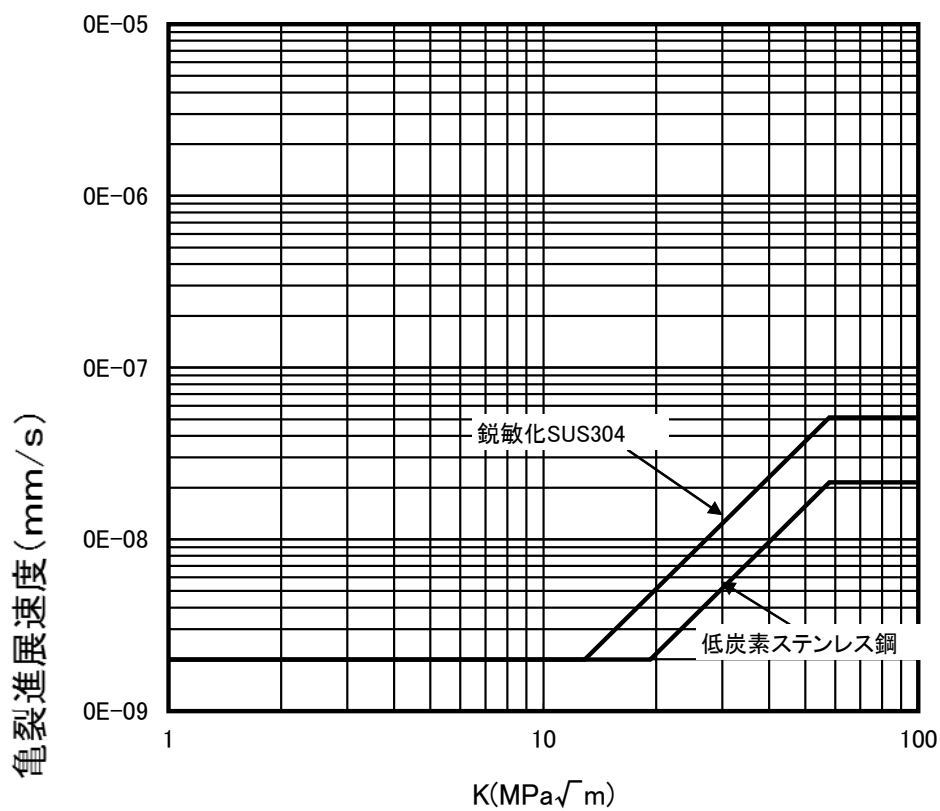
(2) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (19.3 \leq K \leq 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 19.3 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

単位:  $da/dt$ ( $\text{mm/s}$ )、 $K$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )



図D-12 水素注入環境中における鋭敏化SUS304及び低炭素ステンレス鋼のSCC進展評価線図

図 C-12 オーステナイト系ステンレス鋼の水素注入環境中の  
SCC 進展評価線図

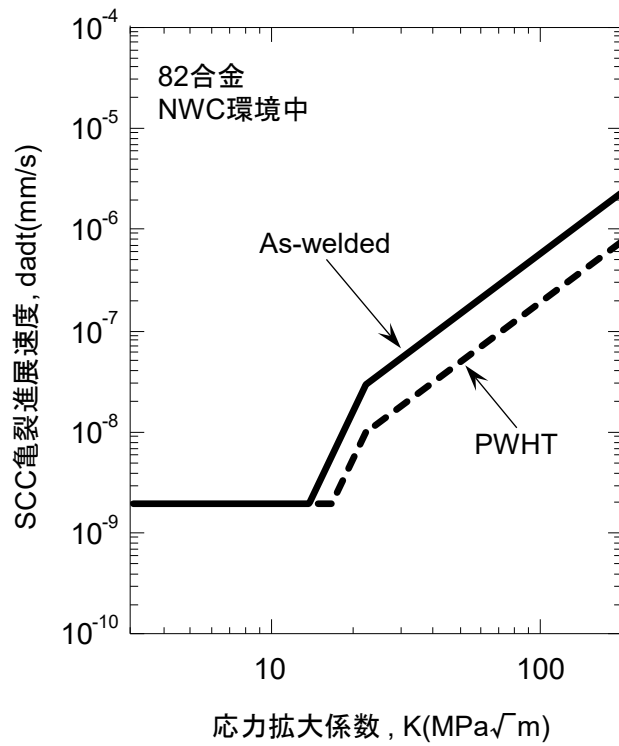


図 C-13 NWC 環境中における 82 合金の SCC 進展評価線図

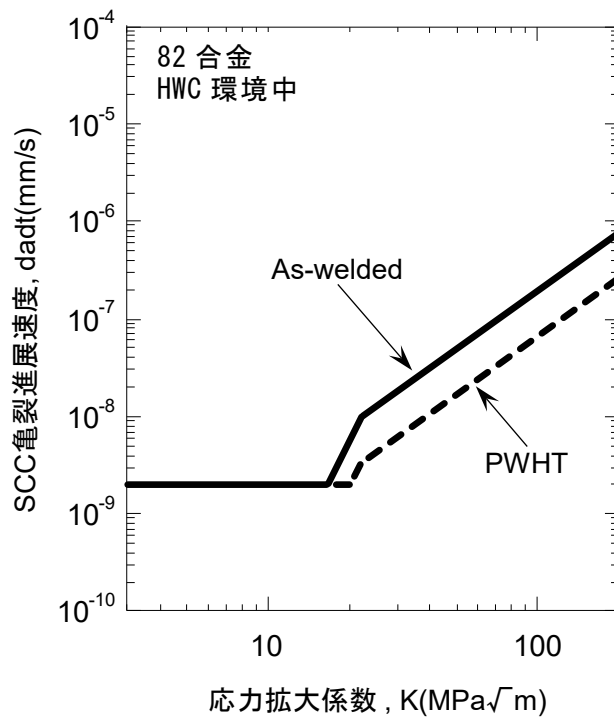


図 C-14 HWC 環境中における 82 合金の SCC 進展評価線図

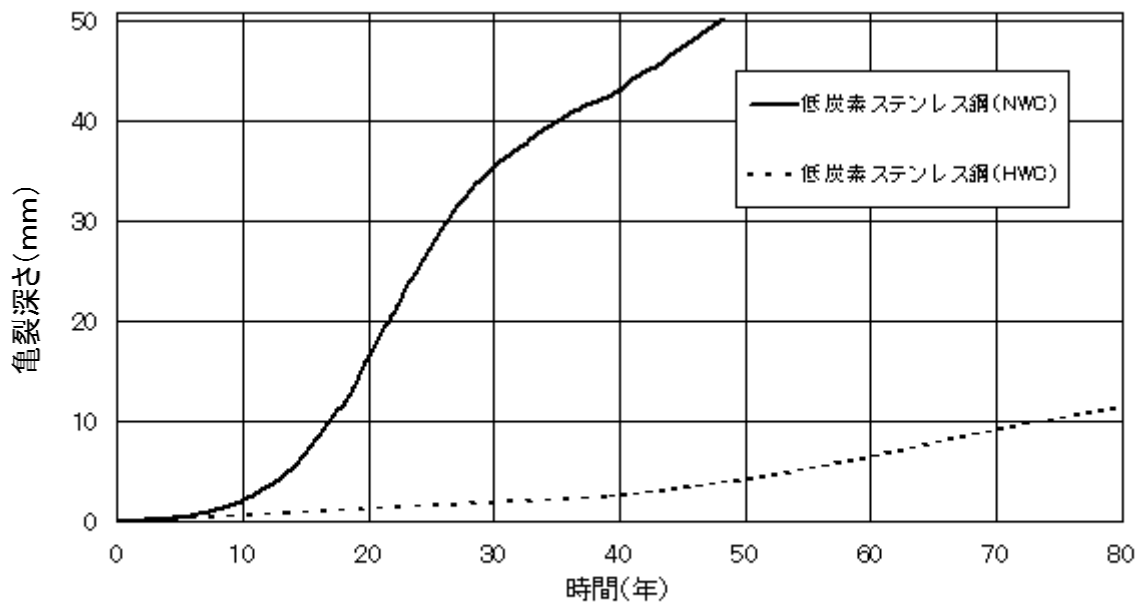


図 C-15 亀裂深さと時間の関係(H7 リング有り, H7a 胴側)  
(内表面から板厚方向への進展)

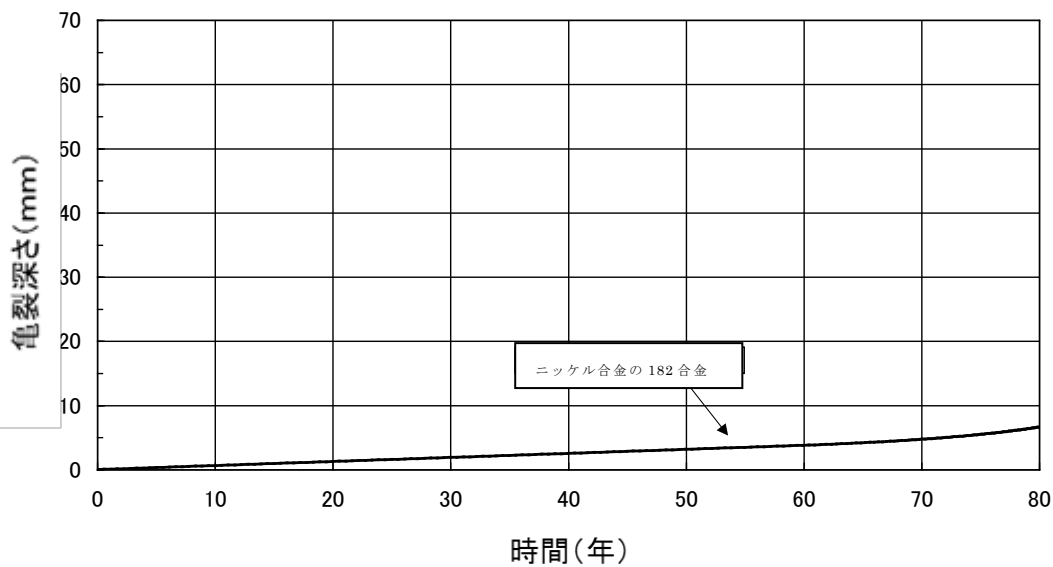


図 C-16 亀裂深さと時間の関係(H7 リング有り, H7b シリンダ側)  
(内表面から板厚方向への進展)

注：付録 E 図 E-12 に示す 182 合金の SCC 進展評価線図を用いた評価結果

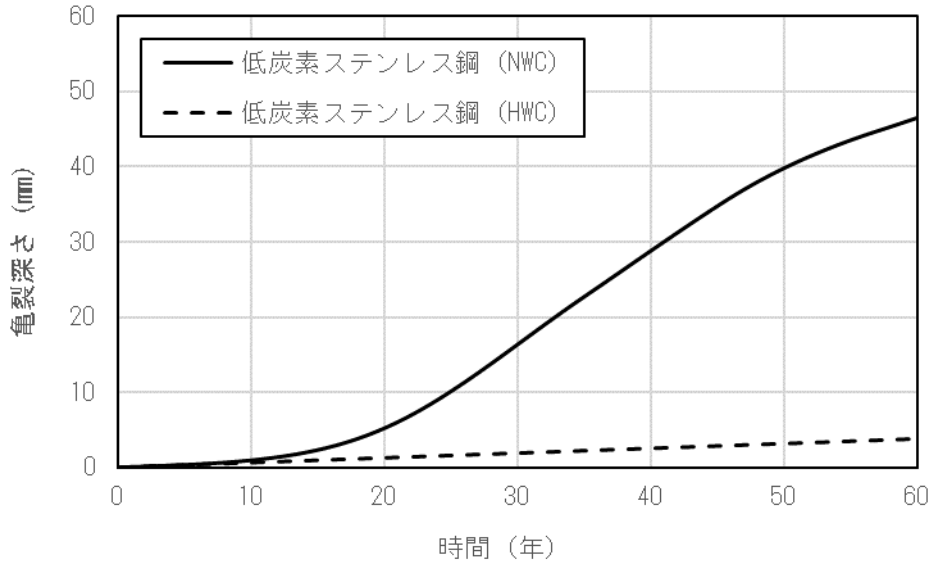


図 C-17 亀裂深さと時間の関係(内表面から板厚方向への進展)  
(H7 リング無し, ニッケル合金溶接部ステンレス側溶接熱影響部断面 3)

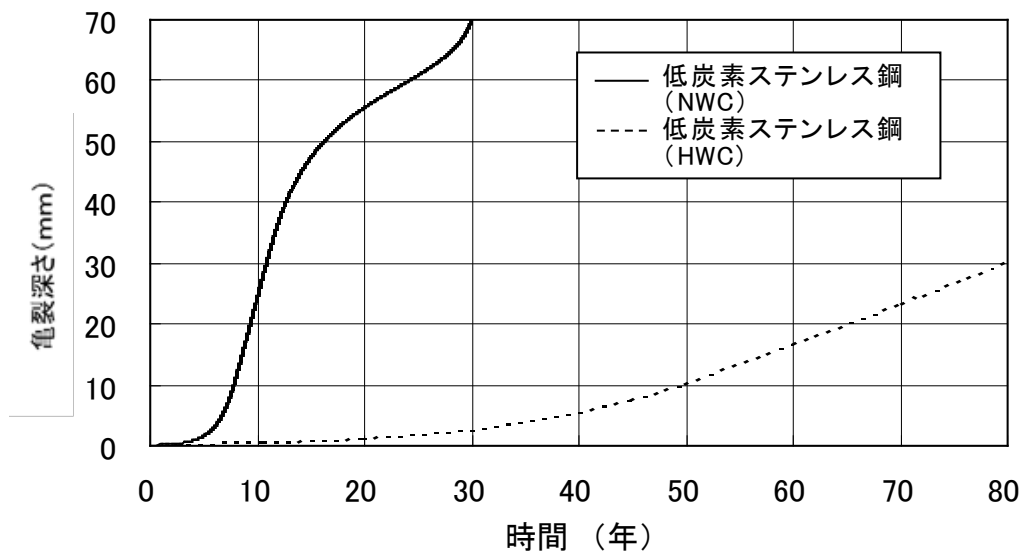


図 C-18 亀裂深さと時間の関係(H7a リング有り, H7a リング側内表面全周亀裂)

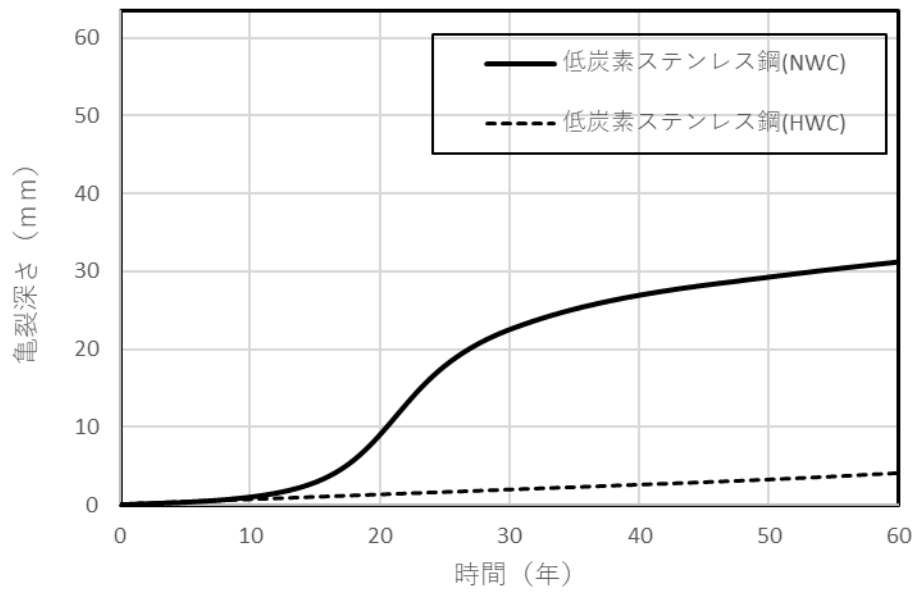


図 C-19 亀裂深さと時間の関係(内表面から板厚方向への進展)  
(ABWR, H7 胴側)

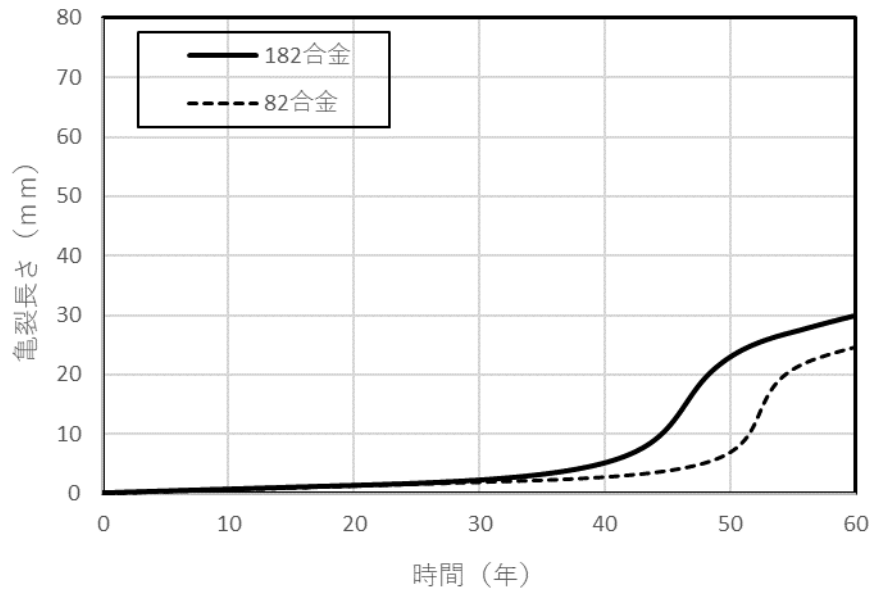


図 C-20 亀裂深さと時間の関係(内表面から板厚方向への進展)  
(ABWR, H7 溶接部)

## シュラウドの H4 溶接部及び H6 溶接部の亀裂進展評価

シュラウド周方向 H4 溶接部及び H6 溶接部に初期亀裂を想定し、幾つかの前提条件を仮定して亀裂進展評価を行った。

## 1. 評価方法

## 1.1 評価モデル

シュラウドの半径 (R) と板厚 (t) の比 (R/t) は約 50 であるので、平板に模擬できる。ここでは、シュラウドの H4、H6a (胴側) 継手を板厚 50.8 mm、H6a 継手 (リング側) を板厚 75.8 mm の平板にそれぞれモデル化した。(補図 C-1)

また、H6a 継手 (リング側) の評価については、円筒にモデル化した評価も行った。(補図 C-2)

## 1.2 想定初期亀裂

以下の評価において、SCC 発生までの潜伏期間は無視して、初期から亀裂が存在するとして保守側に想定した。

想定した亀裂は深さ  $50\ \mu\text{m}$  の半楕円亀裂 (亀裂アスペクト比  $a/l=0.1$ ) を平板の表面に想定した。(補図 C-1)

なお、リング部の評価において、円筒にモデル化した場合には、円筒外周に深さ  $500\ \mu\text{m}$  深さの全周亀裂を想定した。(補図 C-2)

## 1.3 応力条件

当該部には、残留応力及び運転応力が作用している。周方向溶接部に垂直に作用する運転応力はほぼ 0 であるので、ここでは運転応力は 0 とした。

シュラウド継手 (H4 (継手形状 2 種類) 及び H6a) の残留応力は付録 B の解析結果を用いた。

## 1.3.1 H4 周方向溶接部

H4 周方向溶接部は溶接継手形状が 2 種類 (継手形状 1, 継手形状 2) ある。これらの残留応力分布を補図 C-3 及び補図 C-4 に示す。継手形状 1 の場合、残留応力は、内表面で引張、外表面で圧縮応力となっているため、ここでは内表面から外表面への SCC 進展のみを考える。

一方、継手形状 2 の場合、残留応力は内外表面で引張り、板厚中央部で圧縮となって

いるので、内外両表面からの SCC 進展を考慮する。

### 1.3.2 H6a 周方向溶接部

H6a の胴側及びリング側の残留応力分布を補図 C-5 及び補図 C-6 に示す。H6a の胴側の残留応力は内表面で引張り、外表面で圧縮となっているので内表面から SCC 進展を考慮する。

H6a リング側の残留応力は、胴板厚を基準にすると、外表面が引張り、板厚中央部及び内表面側が圧縮となっており、外表面側からの SCC 進展を考慮する。

### 1.4 応力拡大係数

平板の表面亀裂の応力拡大係数 (K) の表示式としては、Wang<sup>1)</sup> の影響関数法に基づく下式を用いた。

$$K = \left( \sum_{n=1}^4 S_n S_{in} \right) \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここで、 $S_n$  は亀裂面位置に深さ方向に  $n$  次の応力分布 ( $\sigma(x) = (x/a)^n$ ) が作用する場合の無次元化応力拡大係数である。 $S_{in}$  は亀裂面に垂直に作用する応力を多項式分解したときの  $n$  次の値である。

なお、 $n=0$  は一様引張り応力が、 $n=1$  は曲げ応力が作用する場合であり、式(1)で計算される応力拡大係数は Raju-Newman の解<sup>2)</sup> にほぼ等しいことを確認している。

一方、リング部を円筒にモデル化し、外周全周に亀裂を想定した場合の応力拡大係数は影響関数法に基づいた API-579<sup>3)</sup> の下記 4 次の応力分布に対する下式を用いた。

$$K_I = [G_0 \sigma_0 + G_1 \sigma_1 (a/t) + G_2 \sigma_2 (a/t)^2 + G_3 \sigma_3 (a/t)^3 + G_4 \sigma_4 (a/t)^4] \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$G_0 \sim G_4$  : 影響係数

$a$  : 亀裂深さ

$t$  : 板厚

ここで、 $\sigma_0 \sim \sigma_4$  は下記 4 次応力分布の  $i$  次の応力成分である。

$$\sigma(X) = \sigma_0 + \sigma_1 \left( \frac{X}{t} \right) + \sigma_2 \left( \frac{X}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left( \frac{X}{t} \right)^3 + \sigma_4 \left( \frac{X}{t} \right)^4 \quad (3)$$

$X$  : 外表面からの板厚方向距離

## 1.5 SCC 進展速度

シュラウドのステンレス鋼の SCC 進展評価の速度式として、鋭敏化 SUS304 及び低炭素ステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L, 316NG) の低照射領域及び高照射領域の亀裂進展速度線図から下記 1.5.1, 1.5.2 項に示す進展速度式を適用した。

### 1.5.1 低照射量領域 (中性子照射量 $< 5 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ )

#### (1) 通常炉内水質環境中 (導電率 $< 0.2 \mu \text{S/cm}$ , $\text{ECP} \geq 150 \text{mV}_{\text{SHE}}$ )

##### (i) 鋭敏化 SUS304

$$da/dt = 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161} \quad (3.4 \leq K \leq 57.9) \quad (4)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 3.4) \quad (5)$$

$$da/dt = 9.2 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9) \quad (6)$$

##### (ii) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \leq K \leq 57.9) \quad (7)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7) \quad (8)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9) \quad (9)$$

(単位 :  $da/dt$  (mm/s) ,  $K$  ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) )

以上、通常炉内水質環境中の SCC 進展評価線図を補図 C-7 に示す。

#### (2) 水素注入環境中 (導電率 $< 0.2 \mu \text{S/cm}$ , $\text{ECP} \leq -200 \text{mV}_{\text{SHE}}$ )

##### (i) 鋭敏化 SUS304

$$da/dt = 7.94 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (12.9 \leq K \leq 57.9) \quad (10)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 12.9) \quad (11)$$

$$da/dt = 5.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9) \quad (12)$$

##### (ii) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (19.3 \leq K \leq 57.9) \quad (13)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 19.3) \quad (14)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9) \quad (15)$$

(単位 :  $da/dt$  (mm/s) ,  $K$  ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) )

以上、水素注入環境中の SCC 進展評価線図を補図 C-8 に示す。

### 1.5.2 高照射量領域（中性子照射量 $\geq 5 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ）

SUS304 及び低炭素ステンレス鋼<sup>4)</sup>

$$da/dt = 7.8 \times 10^{-2} n^{3.6} (CK^4)^n \quad (16)$$

ここに、 $a$  は亀裂の深さ、 $n$  は、腐食電位、導電率、鋭敏化度及び中性子照射量をパラメータとする亀裂先端電流密度変化に対する定数、 $C$  は、亀裂先端ひずみ速度補正係数で以下の通りである。

(i) 中性子照射量が  $1.4 \times 10^{23} \text{n/m}^2$  以下の場合

$$C = 4.1 \times 10^{-14} \quad (17)$$

(ii) 中性子照射量が  $1.4 \times 10^{23} \text{n/m}^2$  を超え、 $3 \times 10^{25} \text{n/m}^2$  以下の場合

$$C = 1.14 \times 10^{-13} \ln(\text{中性子照射量}) - 4.98 \times 10^{-12} \quad (18)$$

(iii) 中性子照射量が  $3 \times 10^{25} \text{n/m}^2$  を超える場合

$$C = 6.59 \times 10^{-13} \quad (19)$$

(単位： $da/dt$  (mm/s) ,  $K$  (MPa $\sqrt{\text{m}}$ ) )

## 2. K 値分布の評価

### 2.1 表面亀裂の板厚方向の K 値分布

H4 継手(継手形状 1)では、内表面側から外表面側への K 値分布は、内表面から 17mm 程度の位置で最大 31MPa $\sqrt{\text{m}}$  程度となる山型の分布を示している。板厚全体にわたり、K 値は 0 にならない。(補図 C-9)

H4 継手(継手形状 2)では、内表面側から外表面側へ亀裂が進展するとした場合の K 値は、内表面から 10mm 程度の位置で最大 28 MPa $\sqrt{\text{m}}$  程度となる山型の分布を示している。内表面から板厚方向 25mm の位置で K 値は 0 となる。(補図 C-10(1))

一方、外表面側から内表面側へ亀裂が進展するとした場合の K 値は最大 9MPa $\sqrt{\text{m}}$  で、内表面から板厚方向 18 mm 深さで K 値は 0 となる。(補図 C-10(2))

H6a 継手胴側では内表面側から外表面側へ亀裂が進展するとした場合の K 値は、内表面から 14mm 程度の位置で最大 41MPa $\sqrt{\text{m}}$  程度となり、外表面側で K=21MPa $\sqrt{\text{m}}$  の分布を示している。(補図 C-11)

H6a 継手リング側では外表面側から内表面側へ亀裂が進展するとした場合の K 値は、外表面から 8mm 程度の位置で最大 27MPa $\sqrt{\text{m}}$  程度となる山形の分布を示している。外表面から板厚方向 23mm の位置で K 値は 0 となる。(補図 C-12)

### 2.2 円筒モデルの全周亀裂の板厚方向の K 値分布

H6a リング部において、深さ 500  $\mu\text{m}$  の全周亀裂が進展するとした場合の K 値は外表面か

ら 9mm 程度の位置で K 値が最大  $49\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  程度となる山形の分布を示している。外表面から板厚方向約 28mm の位置で K 値は 0 となる。(補図 C-13)

### 3. SCC 亀裂進展量の時間依存性の評価

#### 3.1 表面亀裂を有する平板モデル

計算は、初期亀裂が内表面あるいは外表面から板厚方向へ進展した場合で行った。SCC 進展速度式は、1.5.1 項の式を用いる。ただし、IASCC を考慮する必要があると考えられる H4 継手については、照射を考慮した 1.5.2 項の式を用いて評価を行った。また、初期亀裂が、低 K 値領域で仮定した一定の SCC 進展速度 ( $da/dt=2.0\times 10^{-9}\text{mm/s}$ ) で進展する場合は、その亀裂がアスペクト比  $a/l=0.1$  で進展すると仮定した。

H4 継手(継手形状 1)では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中 (NWC) では、低炭素ステンレス鋼で 38 年程度で板厚の 50%まで進展することが示された。また、水素注入 (HWC) により大幅に進展が抑制されることが示された。(補図 C-14(1))

照射を考慮した場合の H4 継手(継手形状 1)では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中 (NWC) では、低炭素ステンレス鋼で 33 年程度で板厚の 50%まで進展することが示された。また、水素注入 (HWC) により大幅に進展が抑制されている。(補図 C-14(2))

H4 継手(継手形状 2)では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中 (NWC) の低炭素ステンレス鋼では運転時間約 10 年から亀裂進展が大幅に増加開始し、約 40 年以降緩やかに停留する傾向にある。外表面から板厚方向の進展は小さい。運転時間 60 年とした場合では、内表面及び外表面からの進展深さの和は板厚の 50%程度である。(補図 C-15(1))

また、水素注入 (HWC) 環境中では、亀裂の大幅な進展が無く、進展が抑制されていることが示された。(補図 C-15(2))

照射を考慮した場合の H4 継手(継手形状 2)では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中 (NWC) の低炭素ステンレス鋼では運転時間約 15 年から亀裂進展が大幅に増加し、約 25 年以降緩やかに停留する傾向にある。外表面から板厚方向の進展は小さい。運転時間 60 年とした場合内外面からの進展深さの和は板厚の約 50%である。(補図 C-15(3))

水素注入 (HWC) 環境中では、内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、大幅に亀裂進展量が増加を開始するのは運転時間が 30 年以降となり、進展が抑制されることが示された。(補図 C-15(4))

H6 継手 (H6a 胴側) では内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、25 年程度で板厚の 50%程度の進展となることが示された。また、水素注入 (HWC) により大幅に進展が抑制されることが示された。(補図 C-16)

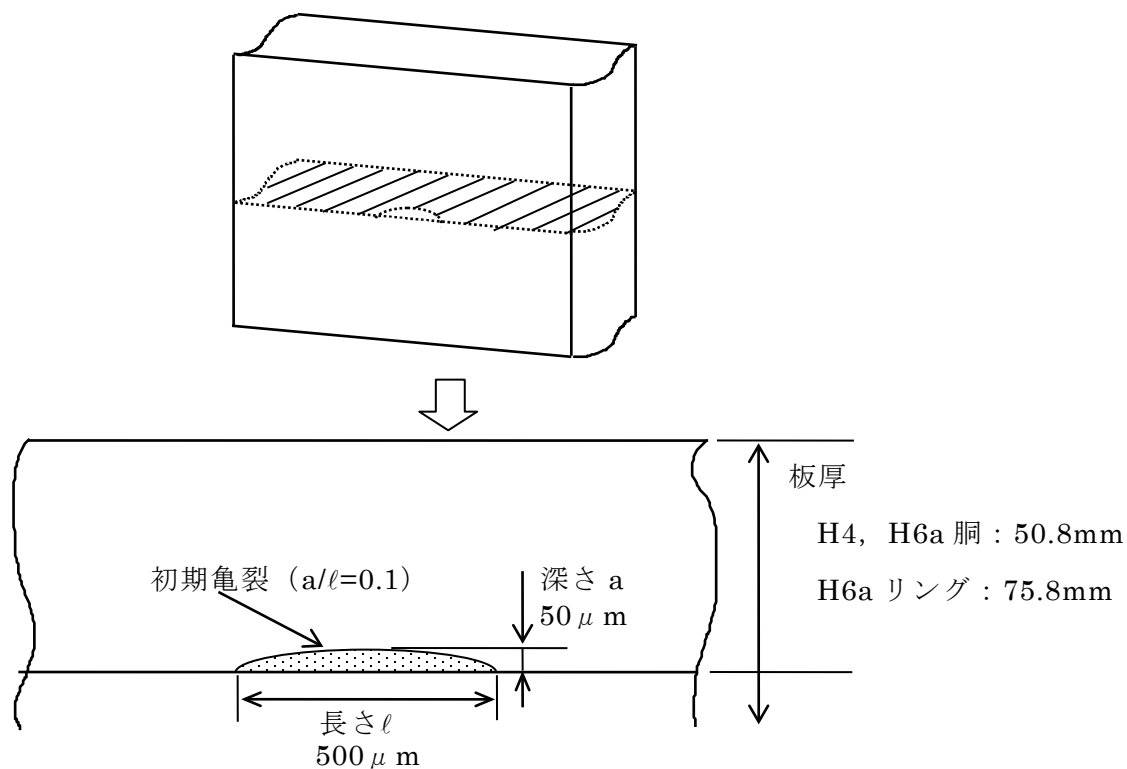
H6 継手 (H6a リング側) では外表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中 (NWC) では、低炭素ステンレス鋼で運転時間約 15 年から大幅に進展量が増加し、約 40 年以降緩やかに停留する傾向にある。また、水素注入 (HWC) により大幅に進展が抑制されることが示された。(補図 C-17)

### 3.2 全周亀裂を有する円筒モデル

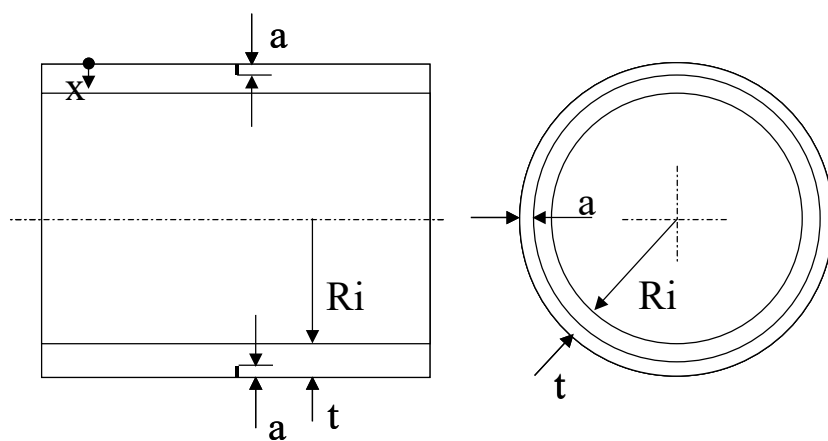
H6 継手 (H6a リング側) では、外表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中 (NWC) では、低炭素ステンレス鋼は約 5 年程度で大幅に亀裂進展量が増加し、20 年程度以降緩やかに停留傾向になることが示された。また、水素注入 (HWC) により大幅に進展が抑制されることが示された。(補図 C-18)

(参考文献)

- 1) G. S. Wang “Weight Function Estimation of SIF for Mode I Part-Elliptical Crack under Arbitrary Load,” Engineering Fracture Mechanics Vol. 41, No. 5, pp. 659-684, (1992).
- 2) I. S. Raju and J. C. Newman Jr., NASA Technical Paper 1578 (1979).
- 3) API Recommended Practice 579 First Edition, Appendix C, Jan. 2000.
- 4) 発電設備技術検査協会, 「プラント長寿命化技術開発調査報告書」 (昭和 60 年度～平成 8 年度)



補図 C-1 当該部のモデル化 (平板の表面亀裂モデル)

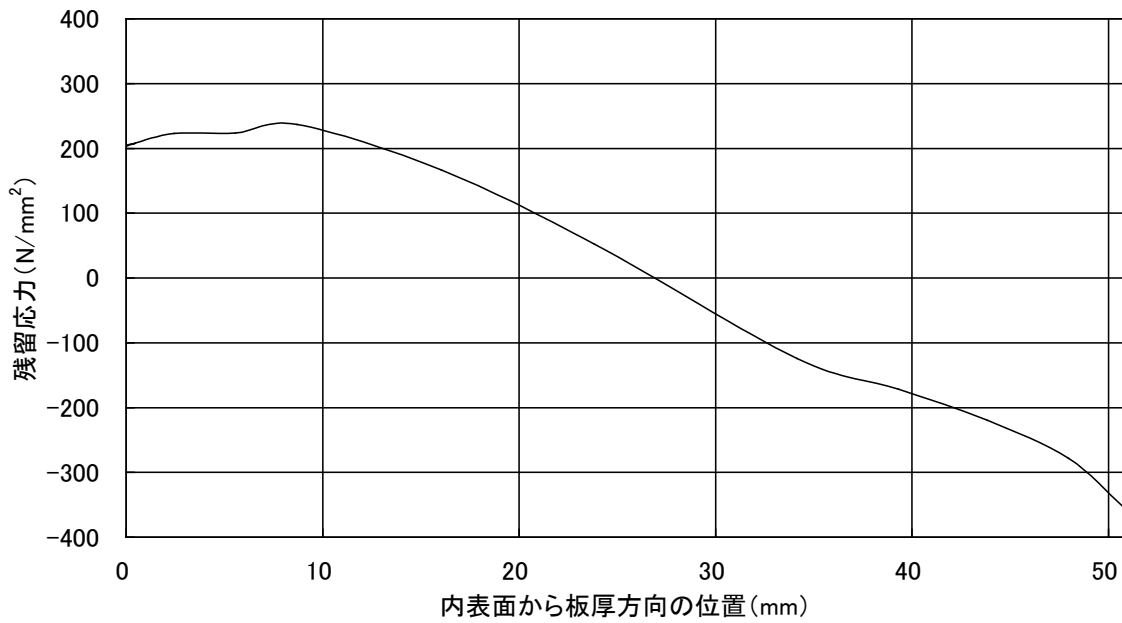


H6a リング :

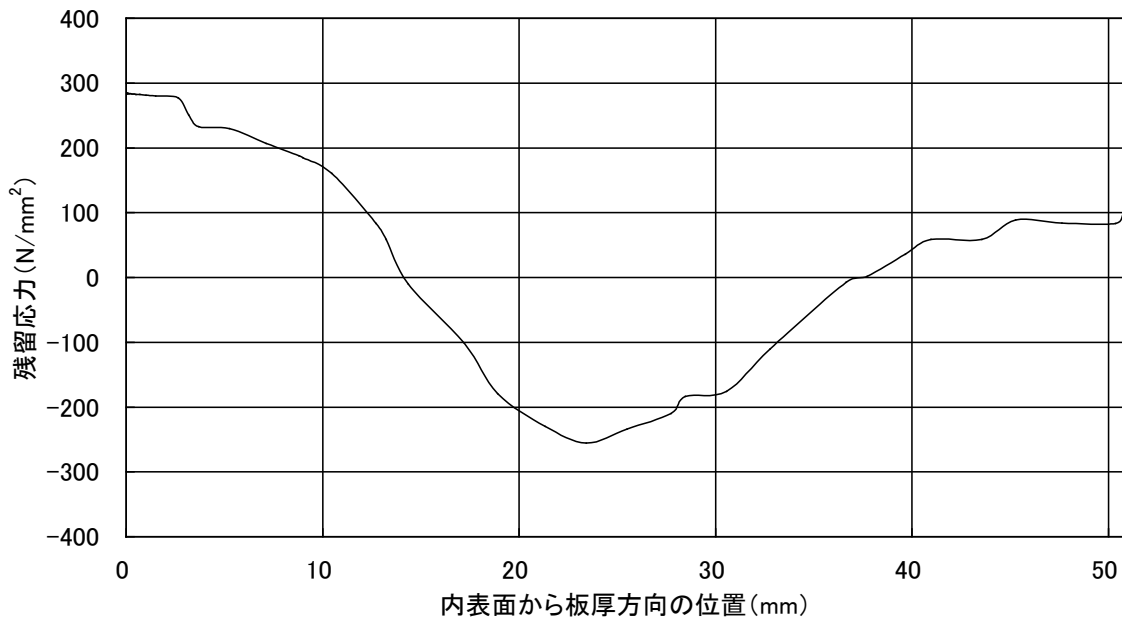
$R_i$  = 円筒の内半径 ( $2554.6\text{mm}$ )

$t$  = 円筒の板厚 ( $75.8\text{mm}$ )

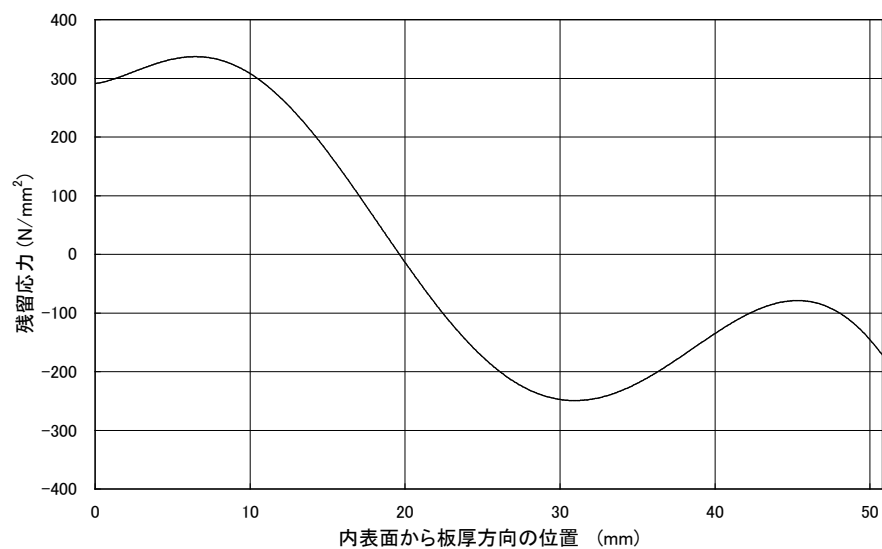
補図 C-2 円筒の外表面全周亀裂モデル



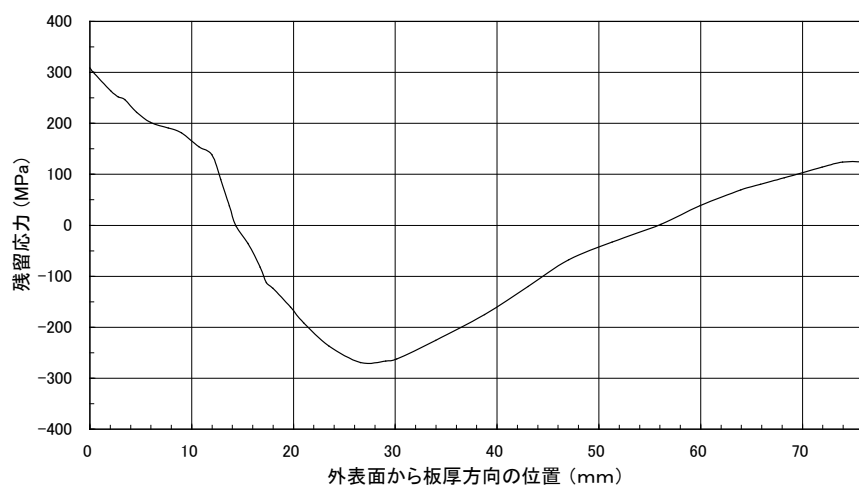
補図 C-3 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H4: 継手形状 1)



補図 C-4 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H4: 継手形状 2)



補図 C-5 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H6a : 胴側)



補図 C-6 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H6a : リング側)

通常炉内水質環境中(導電率 $<0.2\mu\text{S/cm}$ 、 $\text{ECP}\geq 150\text{mVSHE}$ )の  
SCC進展評価線図

(1) 鋭敏化SUS304

$$da/dt = 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161} \quad (3.4 \leq K \leq 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 3.4 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 9.2 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

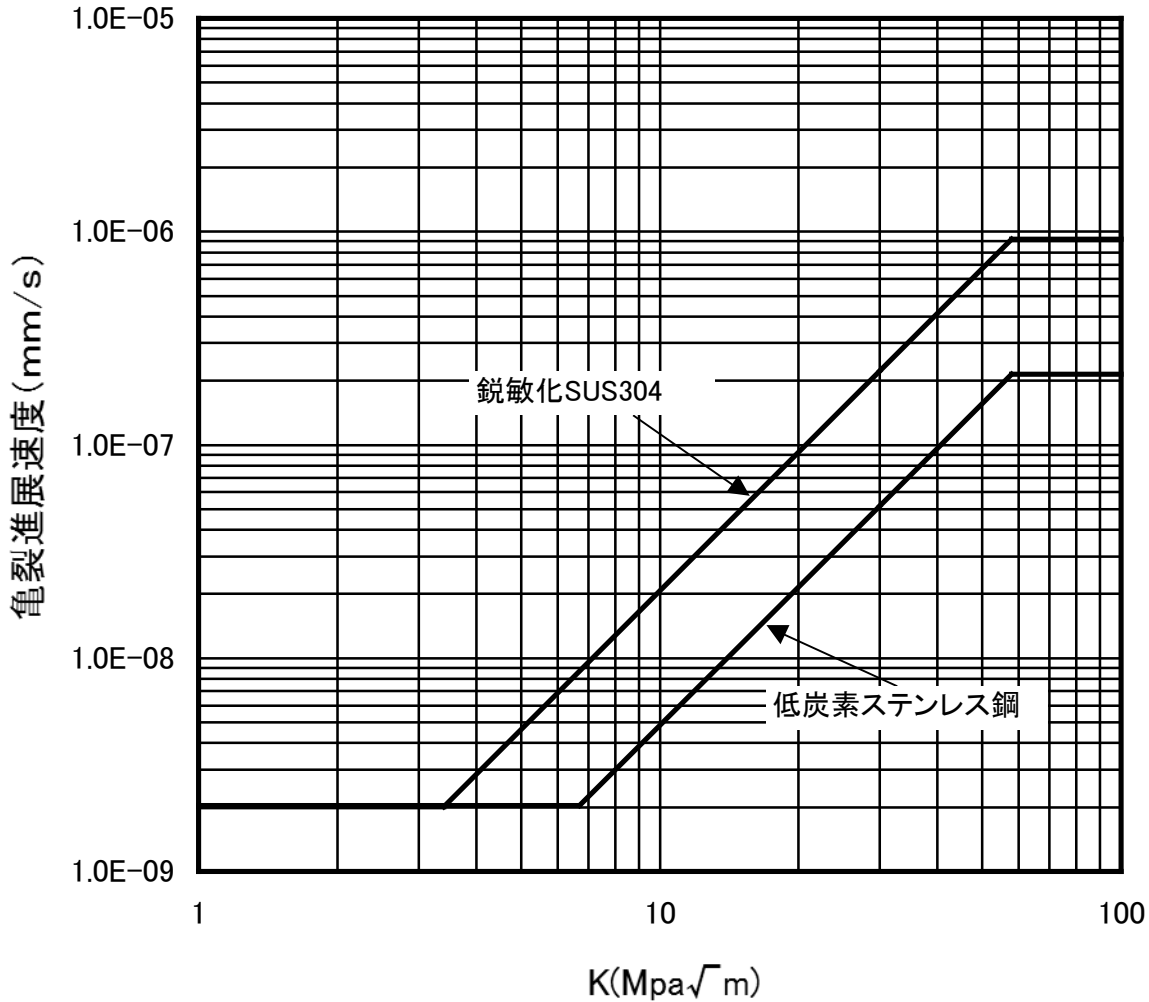
(2) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \leq K \leq 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

単位:  $da/dt$ (mm/s)、 $K$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )



補図 C-7 オーステナイト系ステンレス鋼の通常炉内水質環境中の  
SCC 進展評価線図

水素注入環境中(導電率 $<0.2 \mu\text{S/cm}$ 、 $\text{ECP} \leq -200\text{mVSHE}$ )の  
SCC進展評価線図

(1) 鋭敏化SUS304

$$da/dt = 7.94 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (12.9 \leq K \leq 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 12.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 5.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

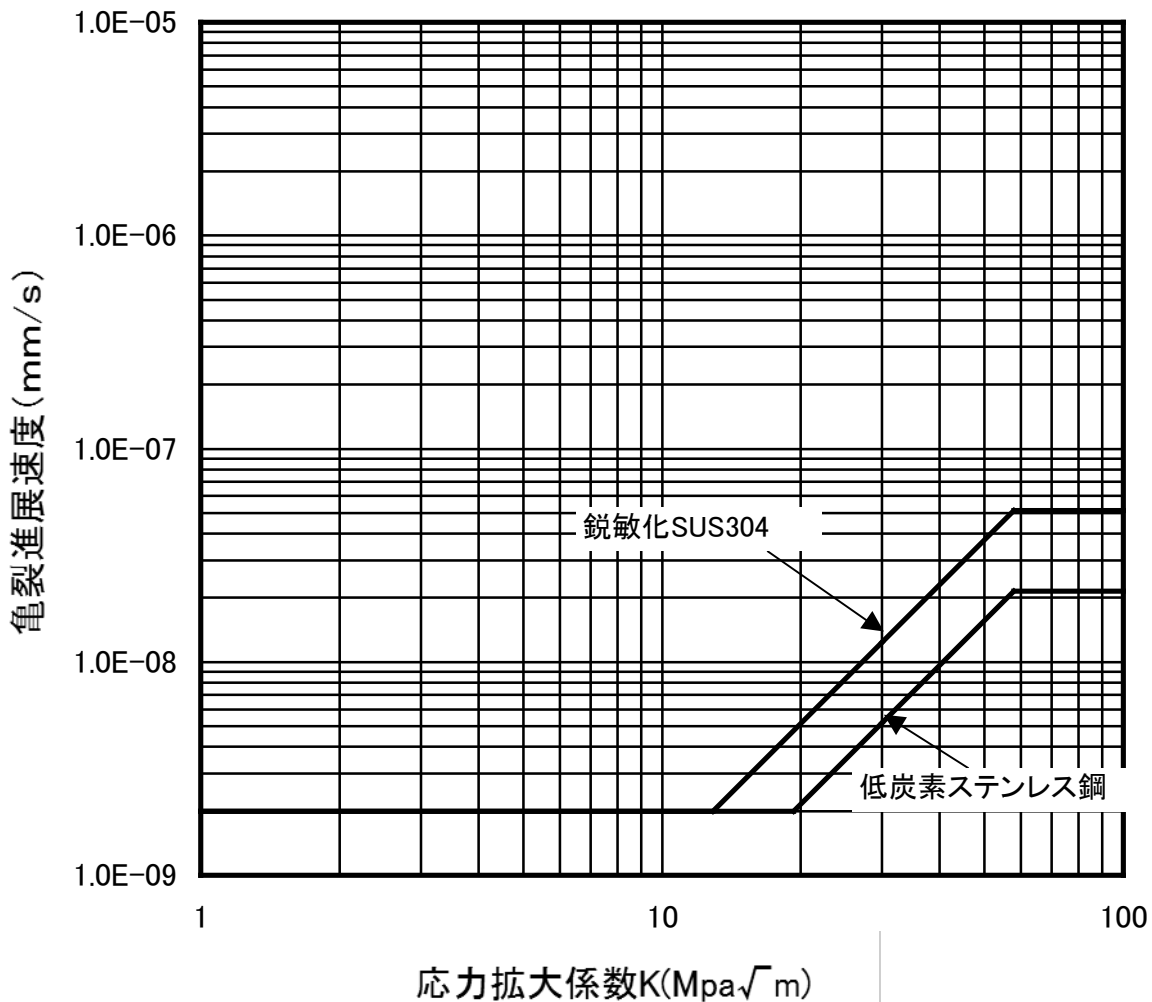
(2) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (19.3 \leq K \leq 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

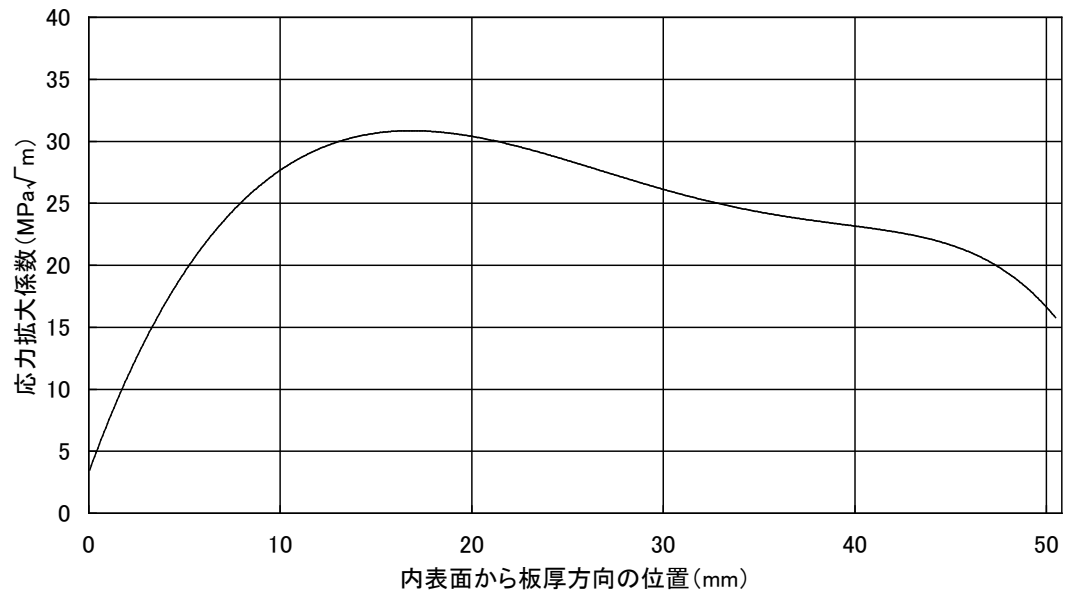
$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 19.3 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

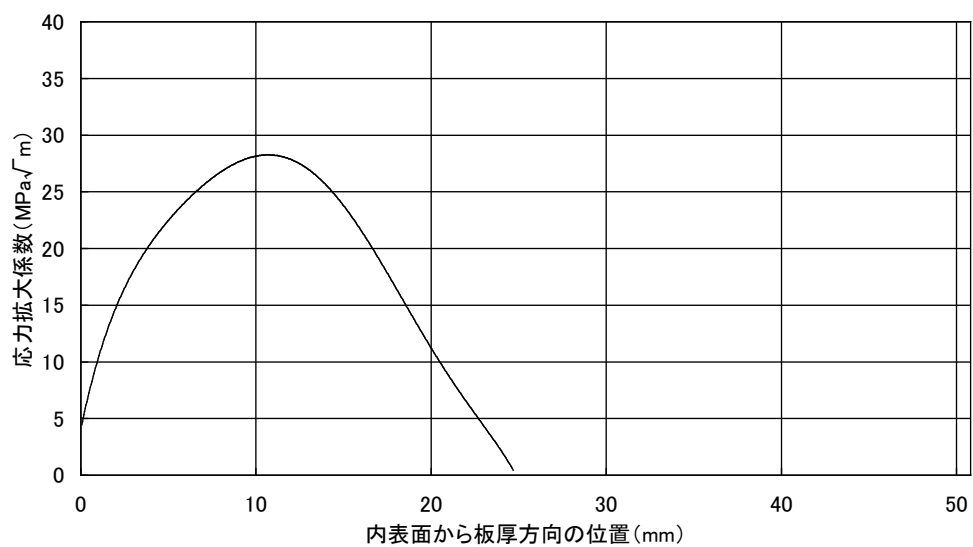
単位:  $da/dt$ (mm/s)、 $K$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )



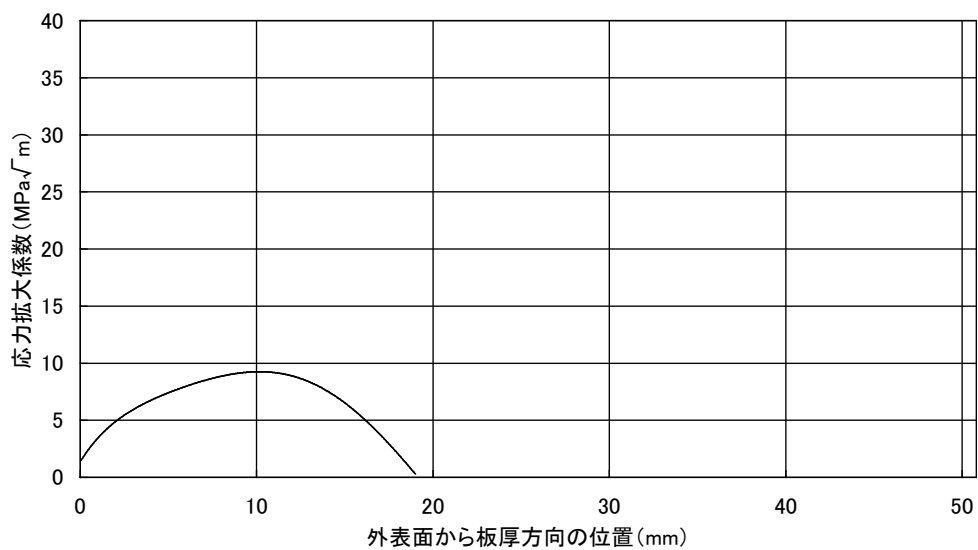
補図 C-8 オーステナイト系ステンレス鋼の水素注入環境中の  
SCC 進展評価線図



補図 C-9 応力拡大係数分布 (H4 : 継手形状 1)

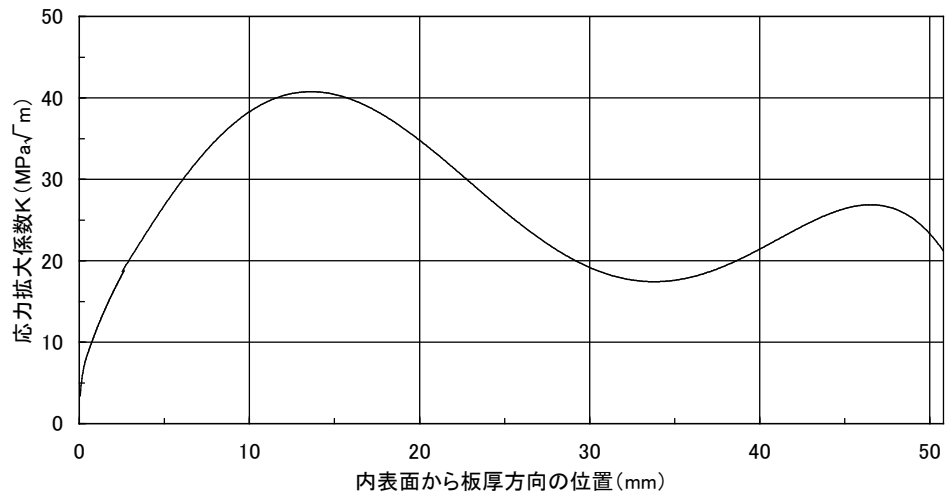


(1) 内表面から板厚方向の K 値分布

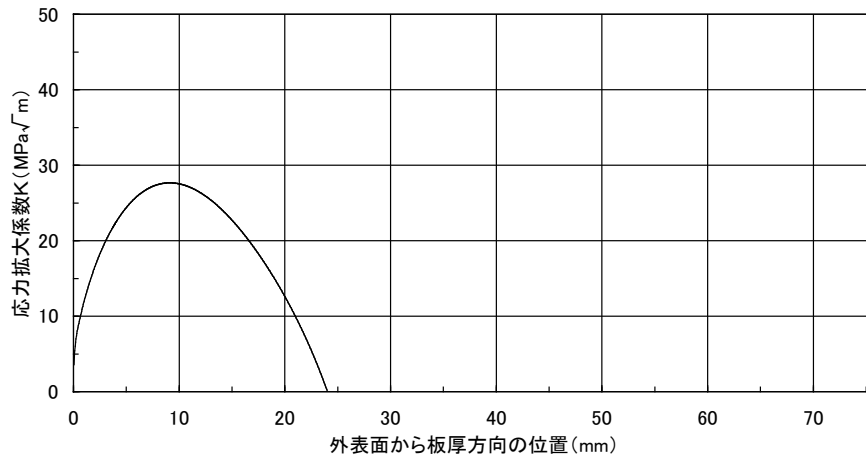


(2) 外表面から板厚方向の K 値分布

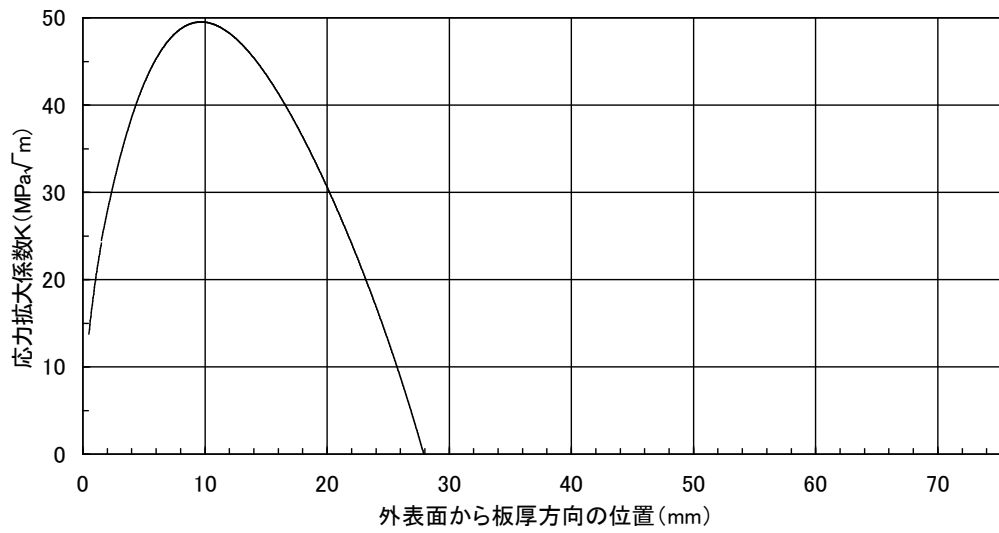
補図 C-10 応力拡大係数分布 (H4: 継手形状 2)



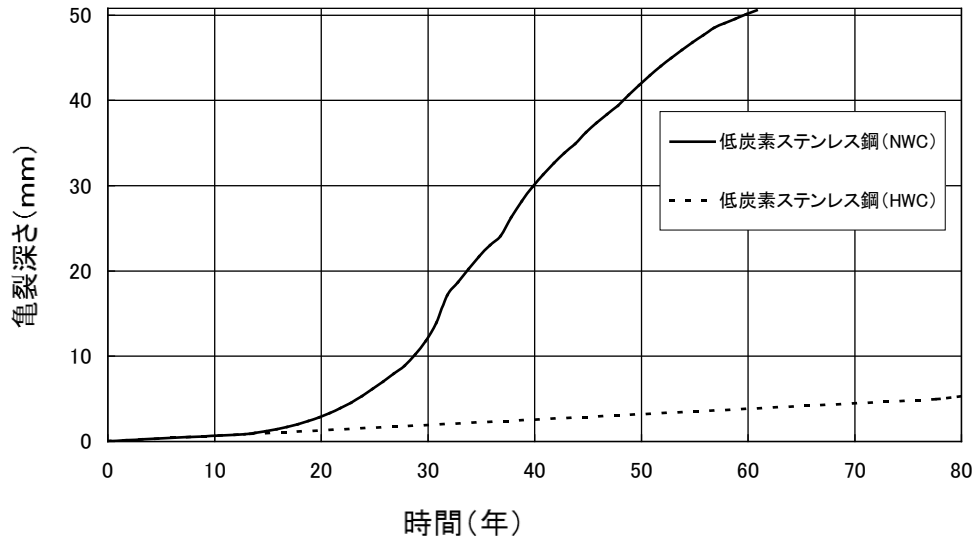
補図 C-11 応力拡大係数分布 (H6a 胴側)



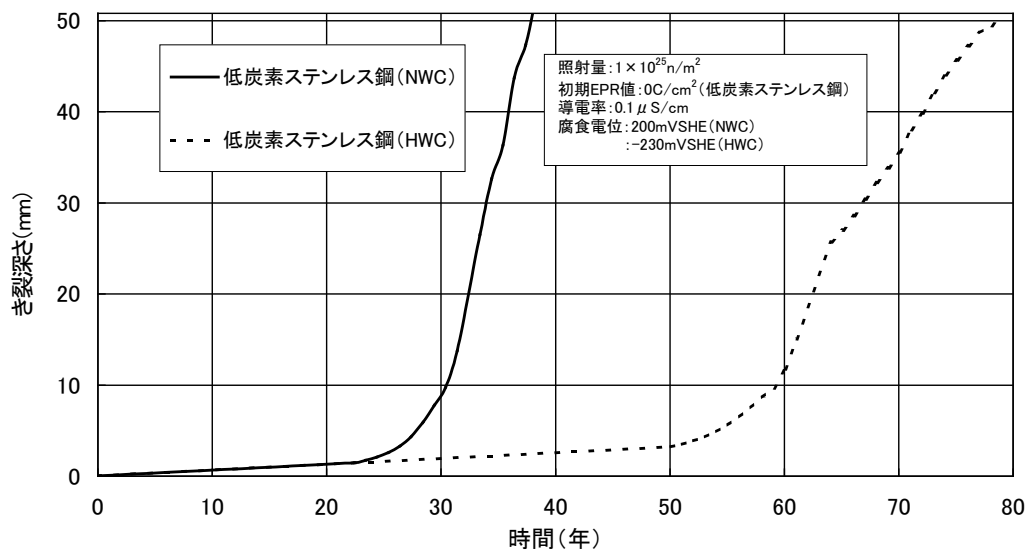
補図 C-12 応力拡大係数分布 (H6a リング側)



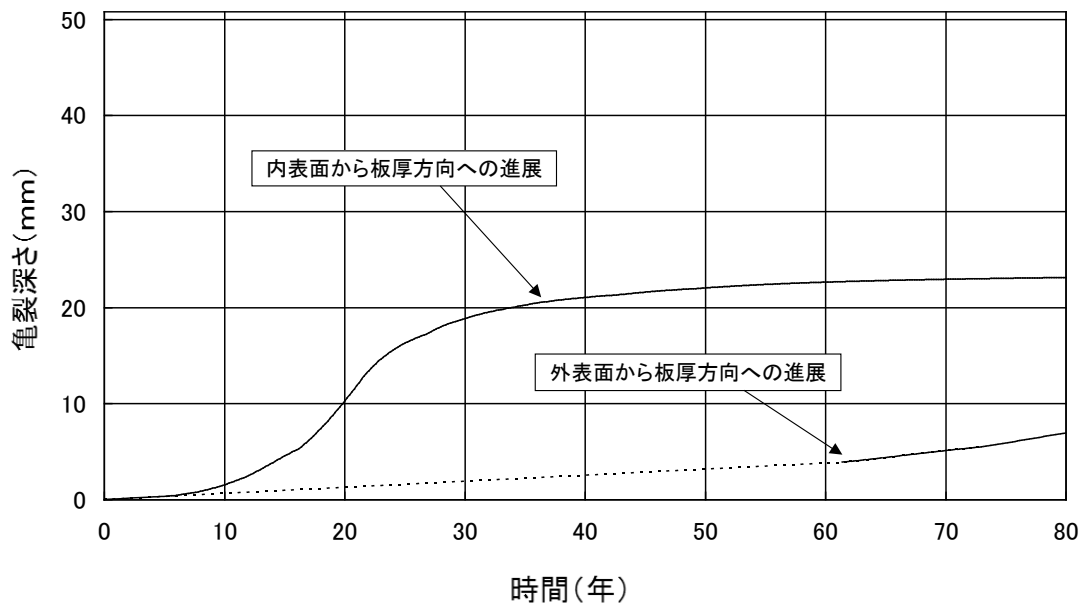
補図 C-13 応力拡大係数分布 (H6a リング側, 外表面全周亀裂)



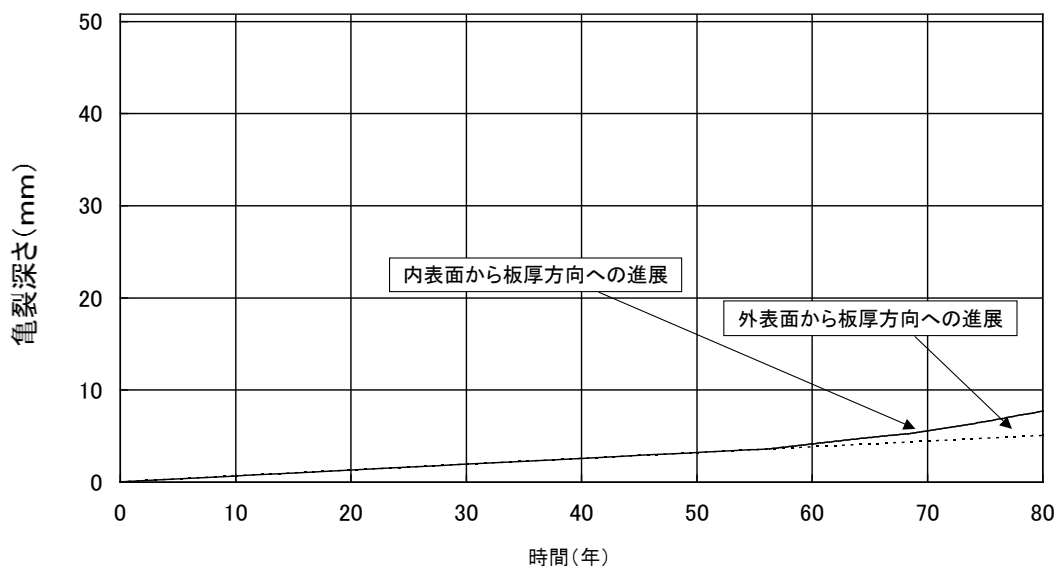
補図 C-14(1) 亀裂深さと時間の関係 (H4 継手形状 1, 低中性子照射領域)  
(内表面から板厚方向への進展)



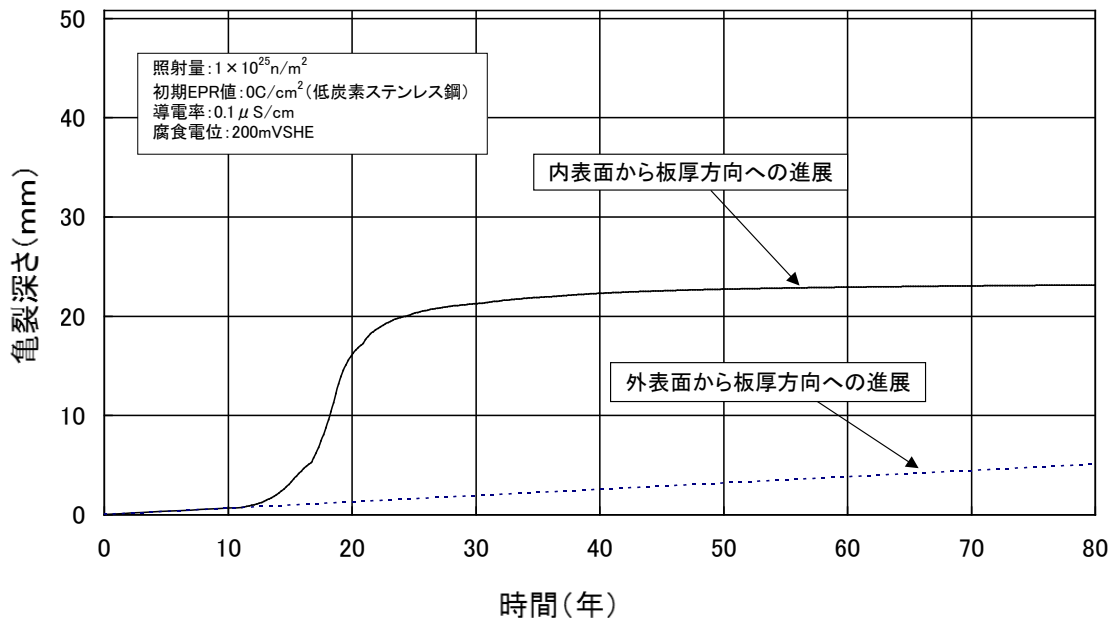
補図 C-14(2) 亀裂深さと時間の関係 (H4 継手形状 1, 高中性子照射領域)  
(内表面から板厚方向への進展)



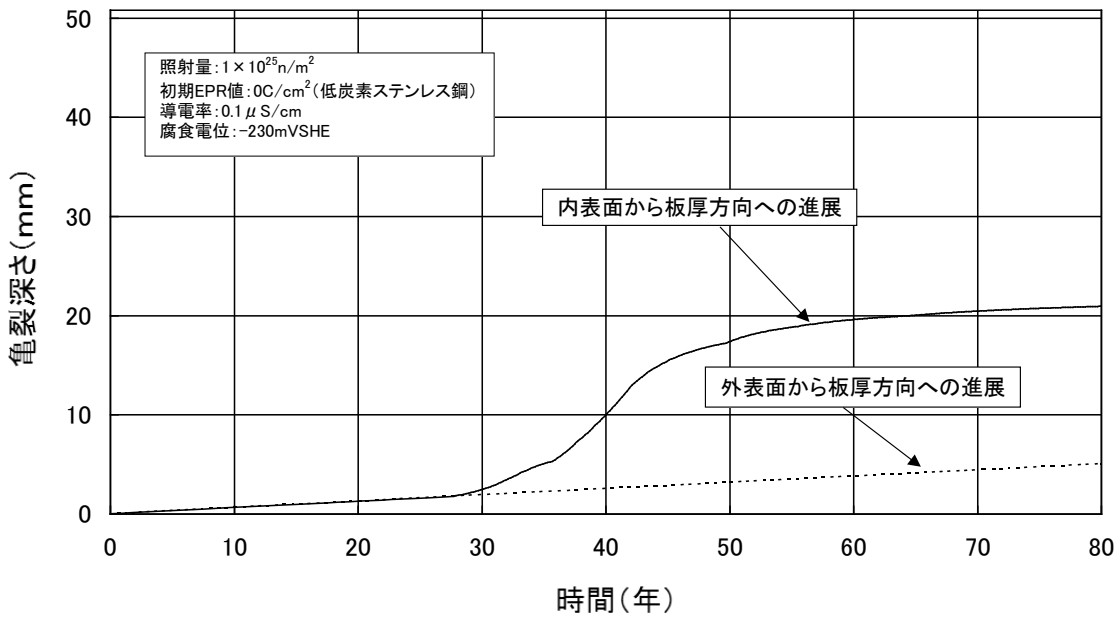
補図 C-15(1) 亀裂深さと時間の関係 (H4 継手形状 2)  
 (通常炉内水質環境中, 低炭素ステンレス鋼, 低中性子照射領域)



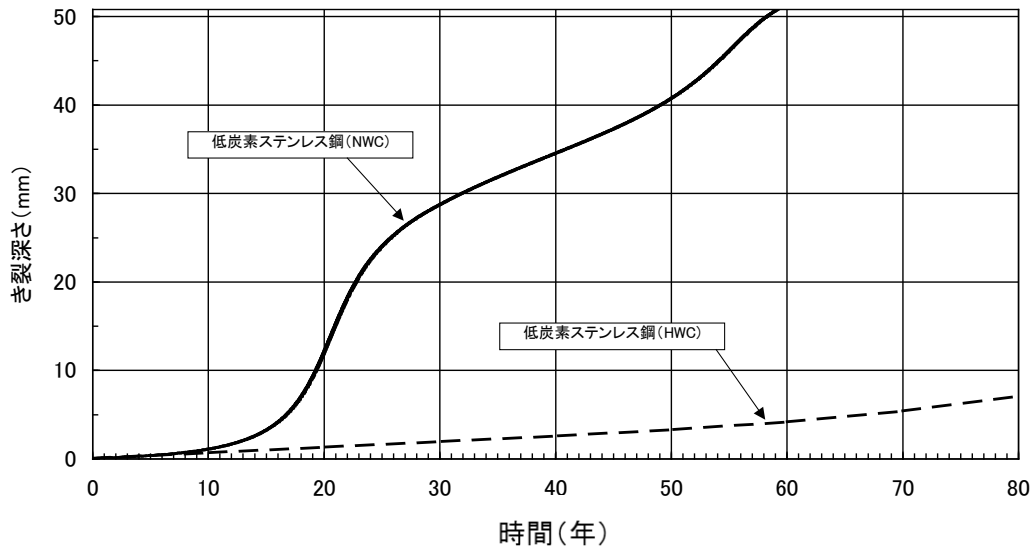
補図 C-15(2) 亀裂深さと時間の関係 (H4 継手形状 2)  
 (水素注入環境中, 低炭素ステンレス鋼, 低中性子照射領域)



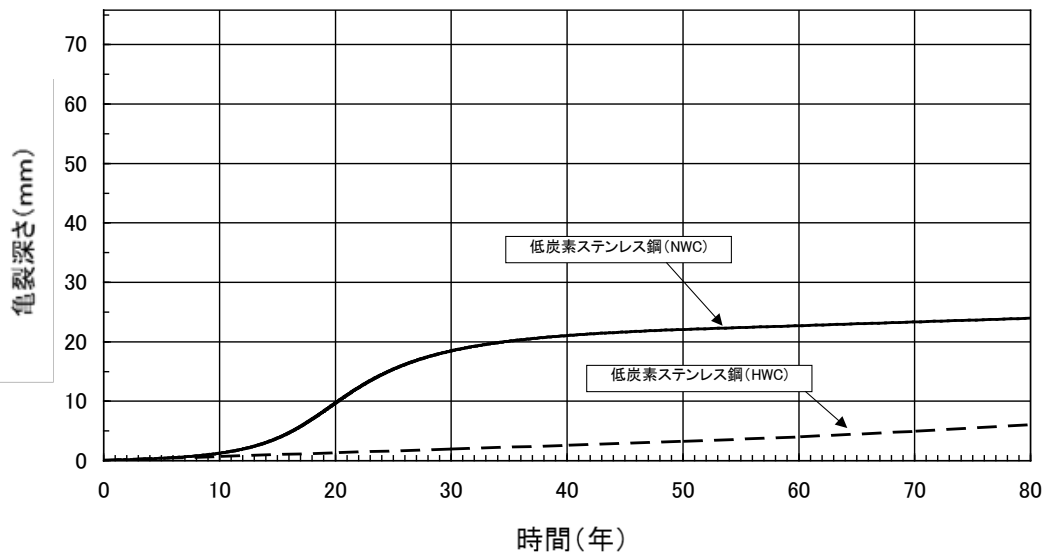
補図 C-15(3) 亀裂深さと時間の関係(H4 継手形状 2)  
(通常炉内水質環境中, 高中性子照射領域)



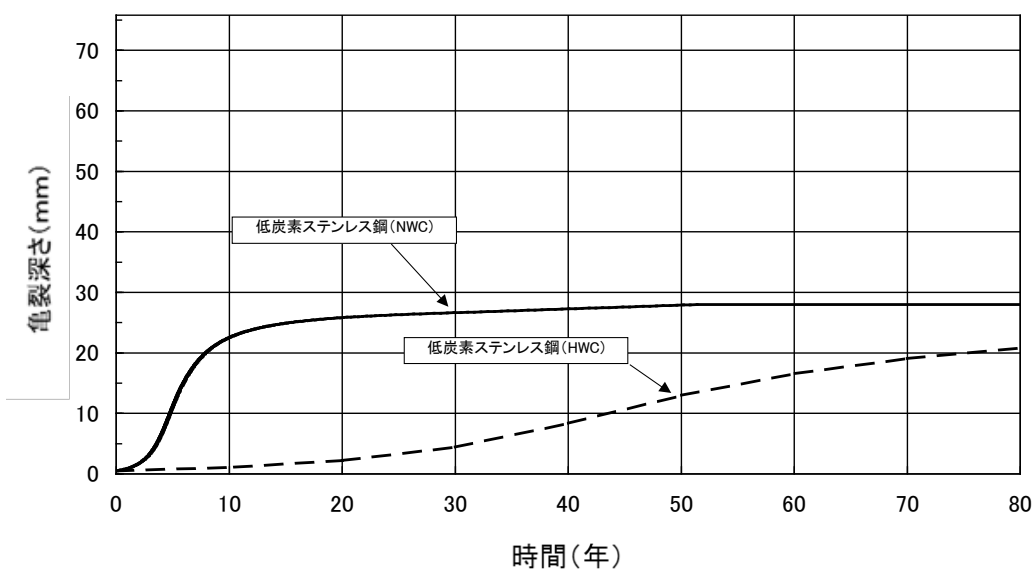
補図 C-15(4) 亀裂深さと時間の関係(H4 継手形状 2)  
(水素注入環境中, 高中性子照射領域)



補図 C-16 亀裂深さと時間の関係 (H6a 胴側) (内表面から板厚方向への進展)



補図 C-17 亀裂深さと時間の関係 (H6a リング側) (外表面から板厚方向への進展)



補図 C-18 亀裂深さと時間の関係 (H6a リング側, 外表面全周亀裂)

## 参考資料 C-1 シュラウド縦方向溶接部の亀裂進展評価

シュラウド縦方向溶接部に初期亀裂を想定し、幾つかの前提条件を仮定して亀裂進展評価を行った。

### 1. 評価方法

#### 1.1 評価モデル

シュラウド縦方向溶接部の代表例として、1100MWe BWR の V2 溶接部を、板厚 50.8 mm の平板にモデル化した。(参考図 C-1)

#### 1.2 想定初期亀裂

平板の外表面に 1mm 深さの半楕円亀裂(アスペクト比  $a/\ell=0.1$ ) を想定した。(参考図 C-1)

#### 1.3 応力条件

当該部には、溶接残留応力及び運転応力が作用している。

残留応力は、添付 C-1 に示すシュラウド V2 継手の残留応力解析結果を用いた。運転応力は、実機計算値から内面-30MPa、外面 45MPa とし、残留応力に加算した。

V2 継手の応力(残留応力+運転応力)分布を参考図 C-2 に示す。V2 継手の残留応力は内外表面で引張りとなっているので、内表面及び外表面の両方からの SCC 進展を考慮する。

#### 1.4 応力拡大係数

応力拡大係数(K)の表示式として、非線形応力分布に対する平板の表面亀裂の式である、日本機械学会 維持規格 添付 E-5 の 5.3(1)項に記載の下式を用いた。

$$K = \left[ (A_0 + A_p)G_0 + A_1G_1 + A_2G_2 + A_3G_3 \right] (\pi a / Q)^{1/2} \quad (1)$$

ただし、(1)式において、

$A_0, A_1, A_2, A_3, A_p$  : 亀裂深さ ( $0 \leq x/a \leq 1$ ,  $x$  は亀裂の存在する表面からの距離) にわたる応力分布を表現する(2)式より計算される応力に関する係数。亀裂深さの関数として  $K$  を計算する場合、各亀裂深さに対して係数  $A_0$  から  $A_3$  までを決定しなければならない。また、 $A_p$  は、内圧が容器内表面の亀裂に働く場合  $A_p=p$ , それ以外は  $A_p=0$  とする。

$$\sigma = A_0 + A_1(x/a) + A_2(x/a)^2 + A_3(x/a)^3 \quad (2)$$

$G_0, G_1, G_2, G_3$  : 亀裂深さ及びアスペクト比から決定される補正係数。(維持規格 表添付 E-5-1 及び表添付 E-5-2 参照)

$$Q = 1 + 4.593 (a/\ell)^{1.65} \quad (3)$$

#### 1.5 SCC 進展速度

シュラウドのステンレス鋼の SCC 進展評価の速度式として維持規格 JSME S NA1-2004 低炭素ステンレス鋼の亀裂進展速度線図に示された進展速度式を適用した。

## 2. K 値分布の評価

### (1) 通常炉内水質環境中

通常水質環境中における V2 溶接部の外表面側から内表面側への最深点の K 値分布は、外表面から 7mm 程度の位置で最大  $33\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  程度となり、さらに深くなるにつれ徐々に低下するが、内表面付近で再び増加する分布を示している。(参考図 C-3(1))

通常水質環境中における V2 溶接部の内表面側から外表面側への最深点の K 値分布は、内表面から 6mm 程度の位置で最大  $26\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  程度となり、さらに深くなるにつれ徐々に低下し、内表面から 24mm 程度の位置で 0 になる分布を示している。(参考図 C-3(2))

### (2) 水素注入環境中

水素注入環境中における V2 溶接部の外表面側から内表面側への最深点の K 値分布は、外表面から 11mm 程度の位置で最大  $38\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  程度となり、さらに深くなるにつれ徐々に低下するが、内表面付近で再び増加する分布を示している。(参考図 C-4(1))

水素注入環境中における V2 溶接部の内表面側から外表面側への最深点の K 値分布は、内表面から 7mm 程度の位置で最大  $27\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  程度となり、さらに深くなるにつれ徐々に低下し、内表面から 24mm 程度の位置で 0 になる分布を示している。(参考図 C-4(2))

## 3. SCC 亀裂進展量の時間依存性の評価

計算は、初期亀裂が外表面から板厚方向へ進展した場合で行った。SCC 進展速度式は、1.5 項の式を用いる。

V2 溶接部では、外表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中(NWC)では、50 年程度で板厚の 80% (約 40mm) まで進展することが示された。また、水素注入 (HWC) により大幅に進展が抑制されることが示された。(参考図 C-5(1))

内表面から亀裂が板厚方向に進展を開始した場合、通常炉内水質環境中 (NWC) では、60 年で板厚の 40% (約 20mm) 程度まで進展することが示された。また、水素注入 (HWC) により進展が抑制されることが示された。(参考図 C-5(2))

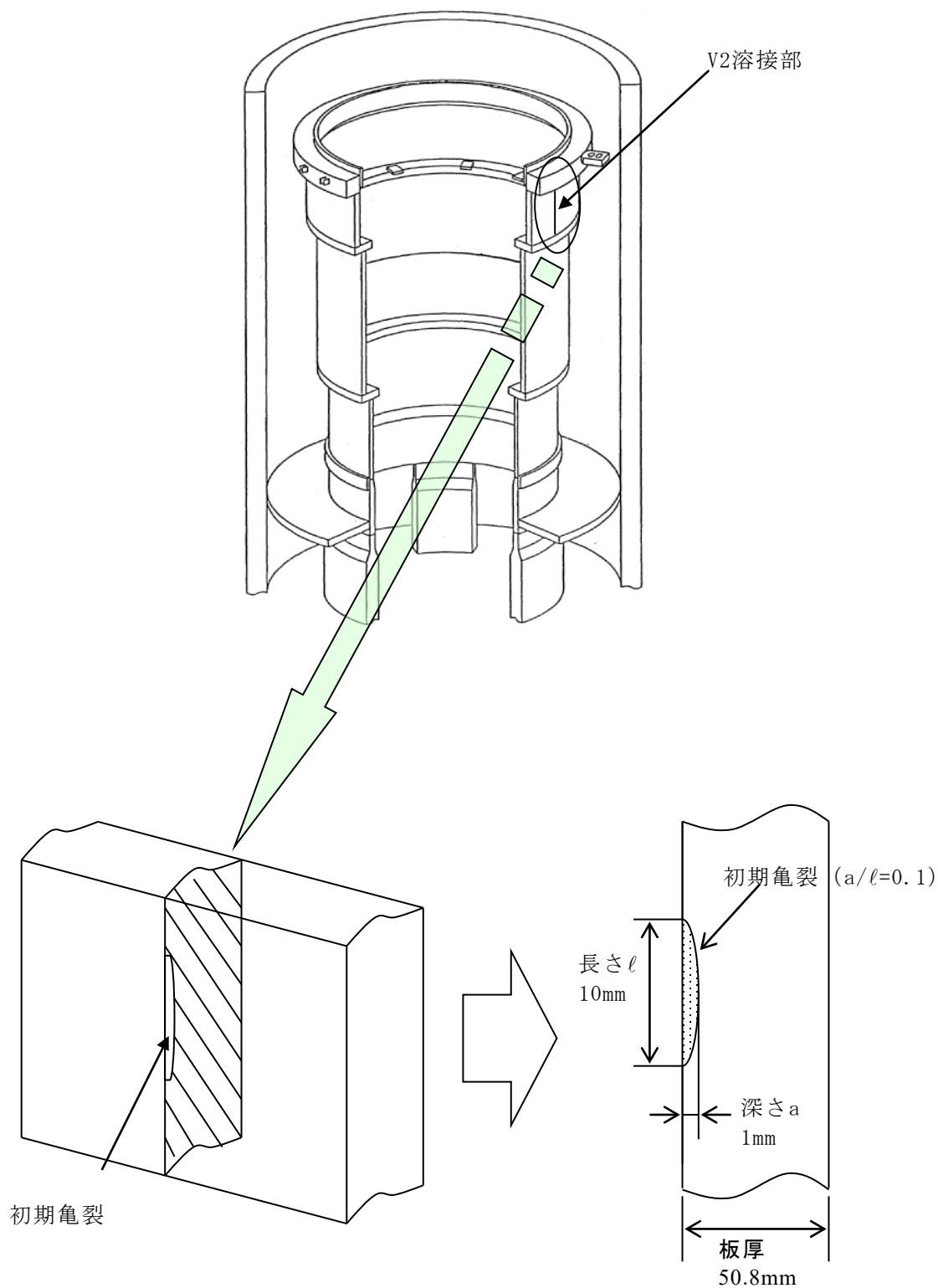
さらに、内表面及び外表面の同じ位置に同時に亀裂が発生したと仮定した場合でも、板厚の 80% (約 40mm) に達するのは 20 年程度以上であることが示された。

## 4. まとめ

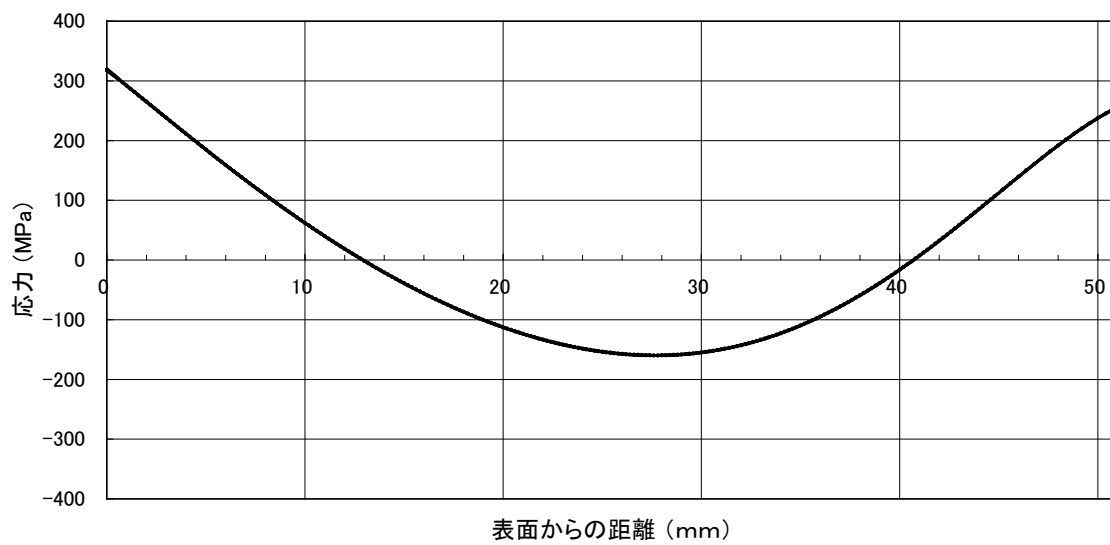
V2 溶接部に全長にわたり一様深さの亀裂があると仮定した場合の許容亀裂深さは、参考資料 C-3 の参考表 C-2 に示すとおり 47mm 程度であり、板厚の 80%より大きい。

板厚の 80%に達するのは、内表面及び外表面から進展を考慮しても、実運転時間で 20 年程

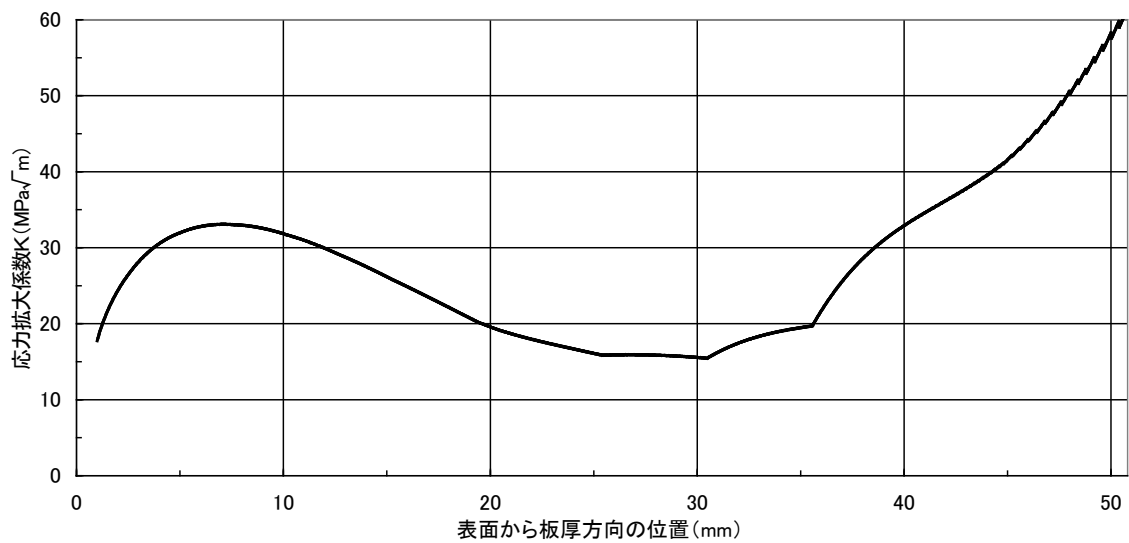
度以上であるため、点検周期を 10 年以内とすれば、縦方向溶接部の構造健全性は確保できると考えられる。



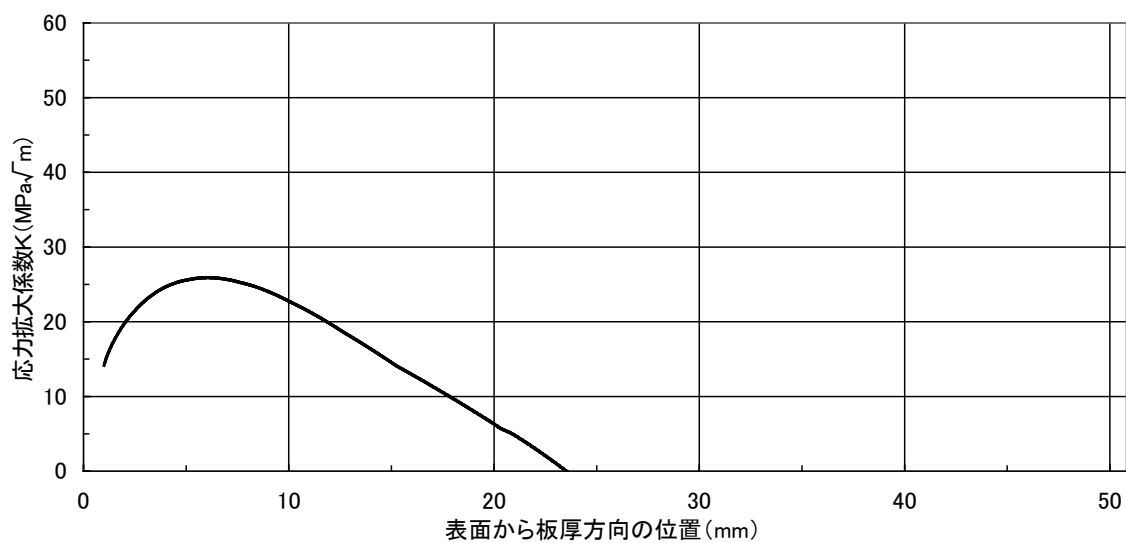
参考図 C-1 亀裂のモデル化(平板の表面亀裂モデル)



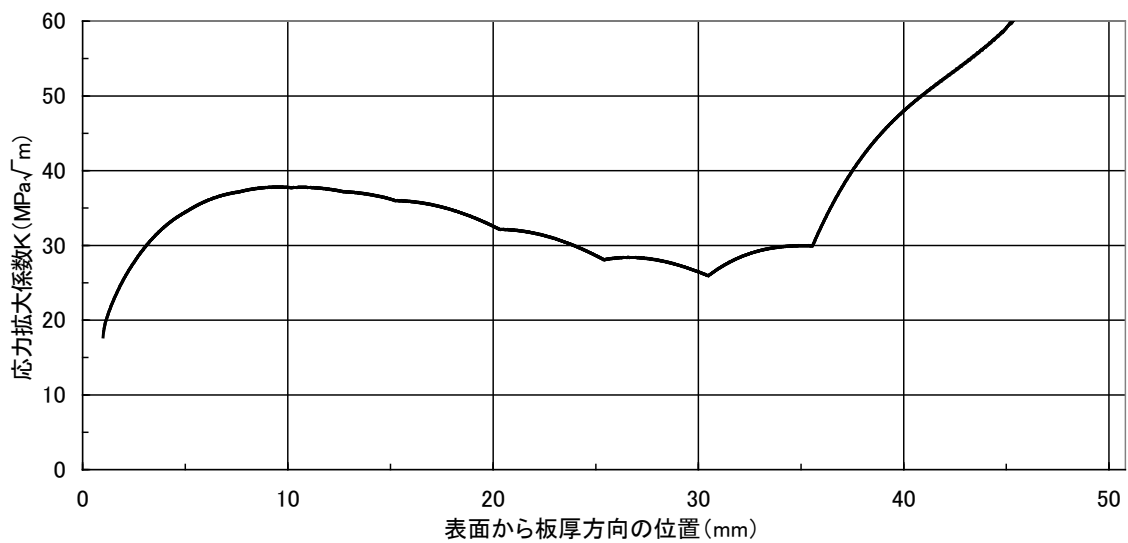
参考図 C-2 V2 溶接部の板厚方向残留応力+運転応力分布



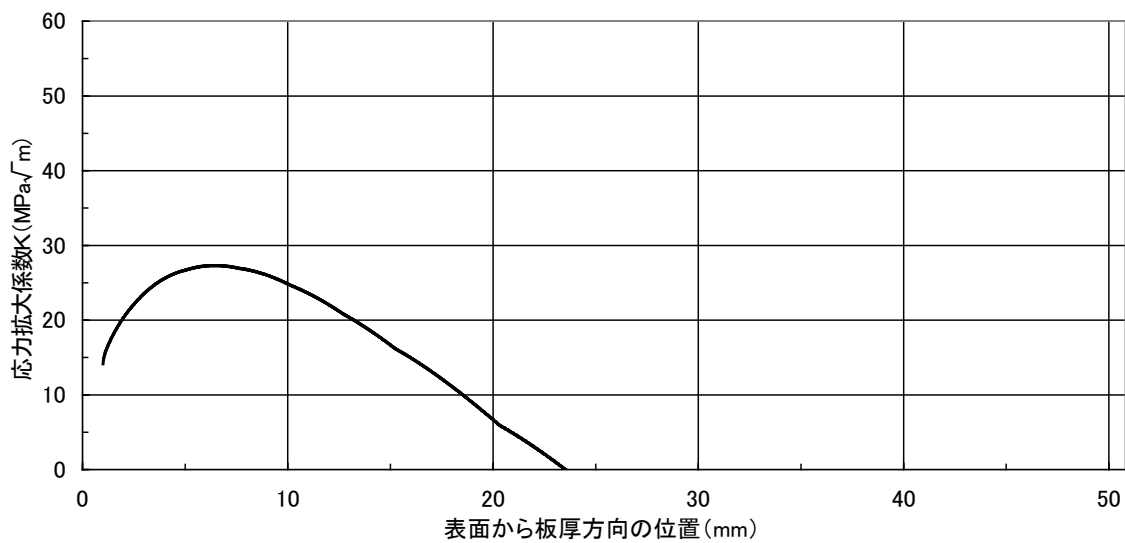
参考図 C-3(1) 応力拡大係数分布 (V2 溶接部, NWC 条件)  
(外表面から板厚方向への進展)



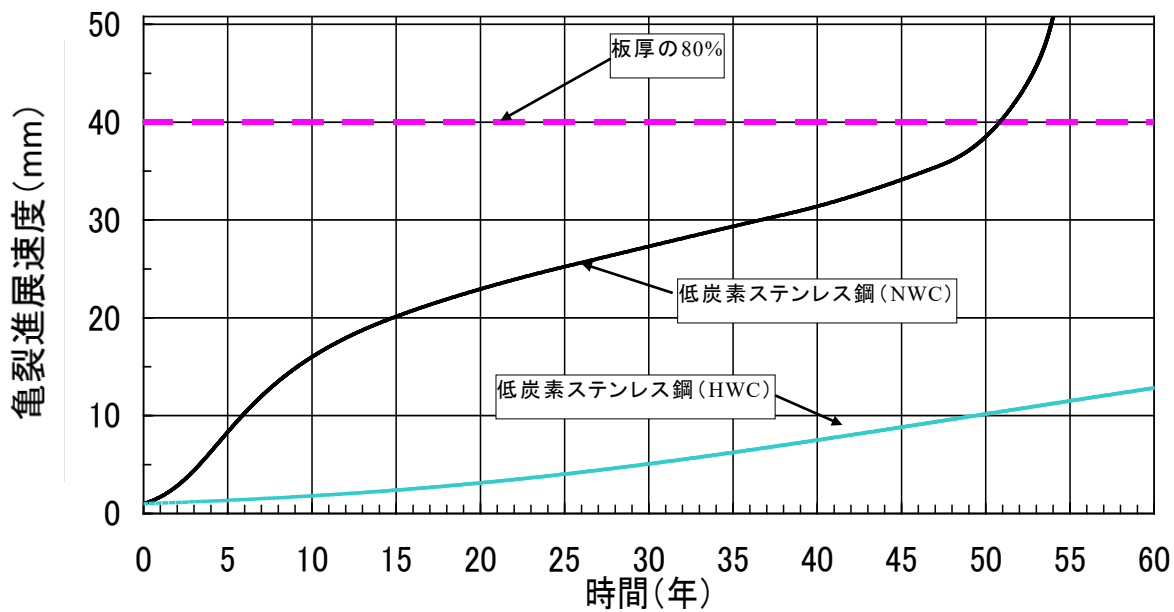
参考図 C-3(2) 応力拡大係数分布 (V2 溶接部, NWC 条件)  
(内表面から板厚方向への進展)



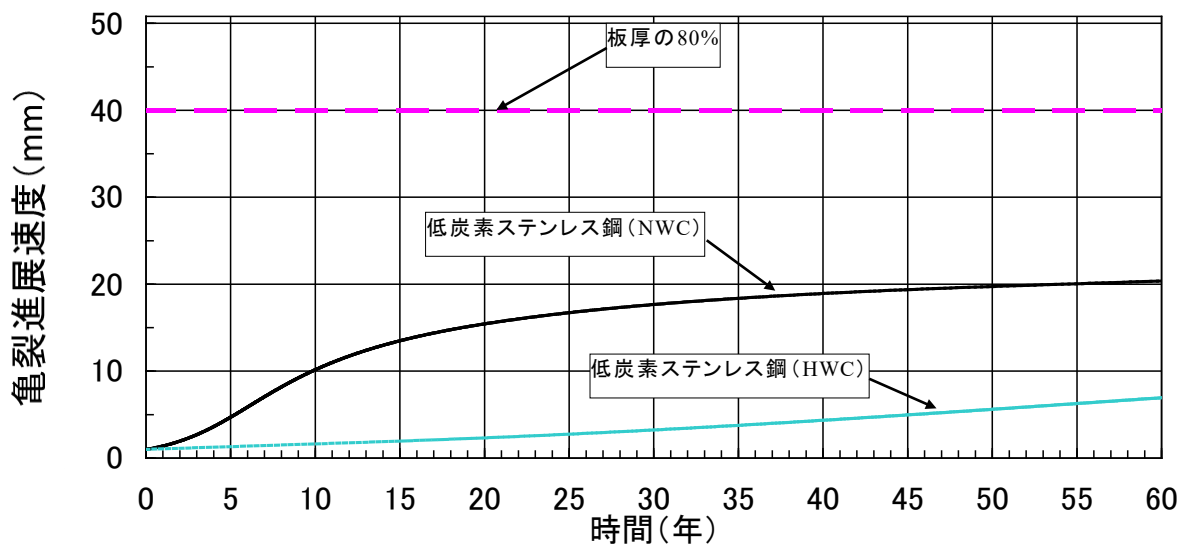
参考図 C-4(1) 応力拡大係数分布 (V2 溶接部, HWC 条件)  
 (外表面から板厚方向への進展)



参考図 C-4(2) 応力拡大係数分布 (V2 溶接部, HWC 条件)  
 (内表面から板厚方向への進展)



参考図 C-5(1) 亀裂深さと時間の関係 (V2 溶接部)  
(外表面から板厚方向への進展)



参考図 C-5(2) 亀裂深さと時間の関係 (V2 溶接部)  
(内表面から板厚方向への進展)

## 参考資料 C-2 シュラウド V2 溶接部の残留応力の推定

### 1. はじめに

付録 B と同様な手法を用いて、V2 溶接部の亀裂進展評価を実施するために必要な溶接部の残留応力評価を実施する。

### 2. 評価内容

#### (1) 解析モデル

1100MWe BWR のシュラウドの V2 溶接部の形状と解析モデルを参考図 C-6 に示す。このシュラウド上部胴縦方向溶接部 (V2) について解析を実施する。V2 溶接部は平面 2 次元モデルとしてモデル化する。

#### (2) 解析手順

解析手順を参考図 C-7 に示す。すなわち、溶接金属を実際の溶接施工手順通りに母材に成層し、そのときの非定常温度分布変化を溶接パス毎に求める。次に、パス毎の溶接金属モデルに当該温度分布の時刻歴変化を与えて大変形弾塑性解析を実施することにより、溶接施工過程での発生応力を算出する。このようにして最終溶接が終了した状態での応力状態が残留応力となる。溶接パスについては、実際の溶接パスを同一施工条件ごとにグルーピングして解析する。

#### (3) 物性値

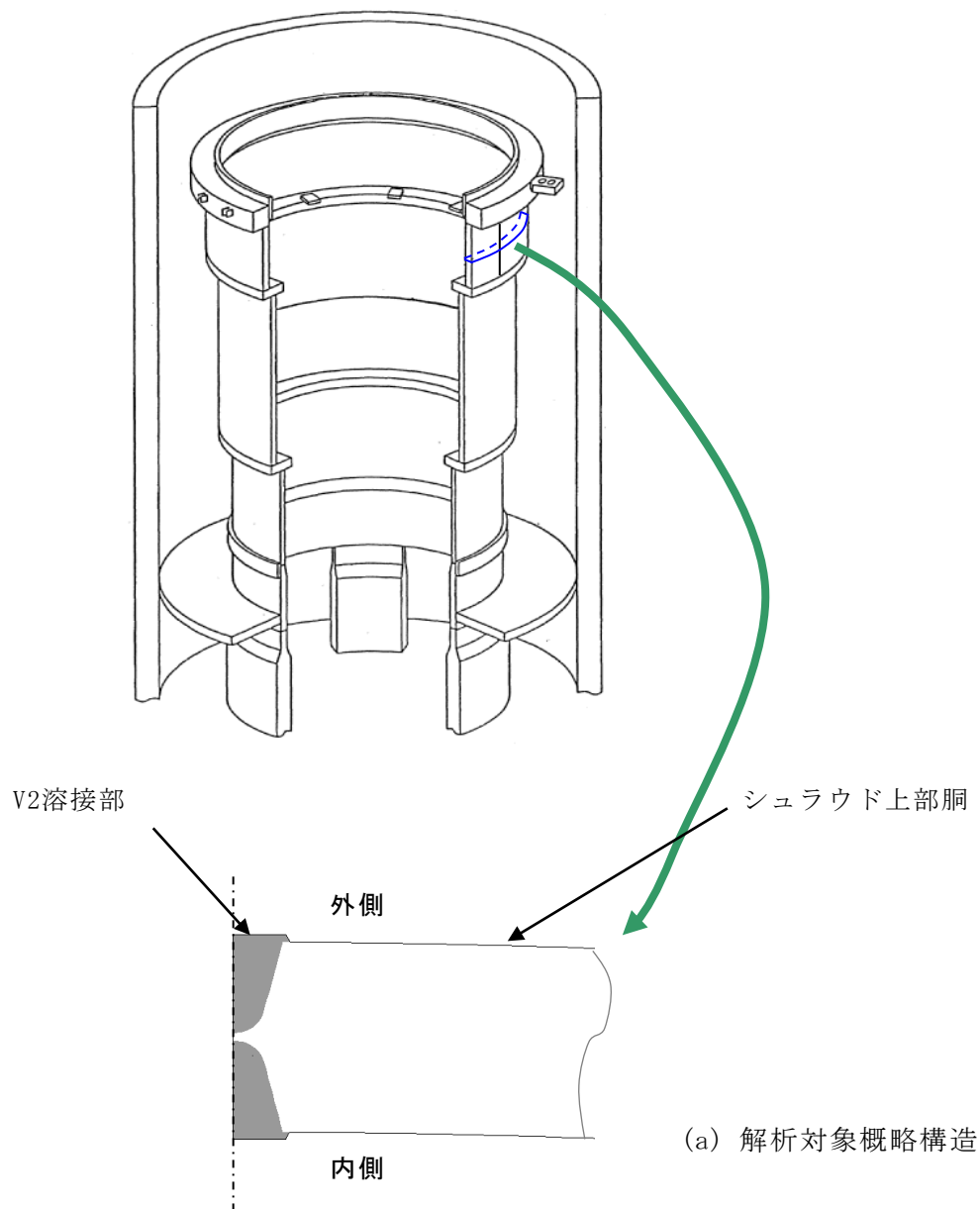
伝熱解析には付録 B に示す材料物性値を用い、温度分布解析では溶接金属と母材の材料特性を同一とする。

#### (4) 入熱の想定

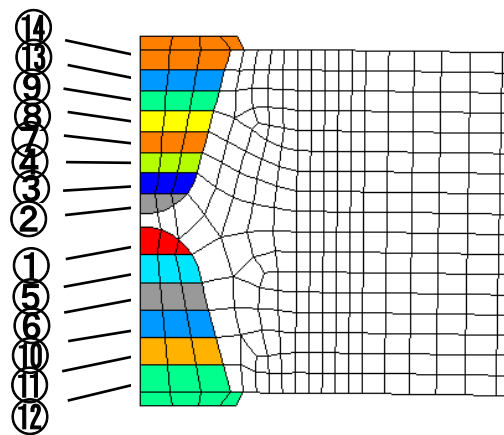
単位時間当たりの入熱の想定を参考図 C-8 に示す。入熱の時間変化としては、この図に示すように、入熱が増加する時間 (トーチが近づく時間)  $t_1$ 、溶接中の時間  $t_2$ 、入熱が減少する時間 (トーチが離れて行く時間)  $t_3$  の比率を実測値ベースに想定し、ビードの最高温度が  $1100 \pm 50^\circ\text{C}$  となるよう時間を決定した。除熱は母材及びビードの雰囲気と接する面から対流伝熱により生じるものとし、熱伝達率を  $11.6\text{J}/\text{m}^2\text{sec}$  とする。

#### (5) 残留応力解析結果

V2 溶接部に対する解析結果を参考図 C-9 に示す。ステンレス鋼溶接部で SCC が課題となる溶接熱影響部付近の周方向の残留応力分布を示している。

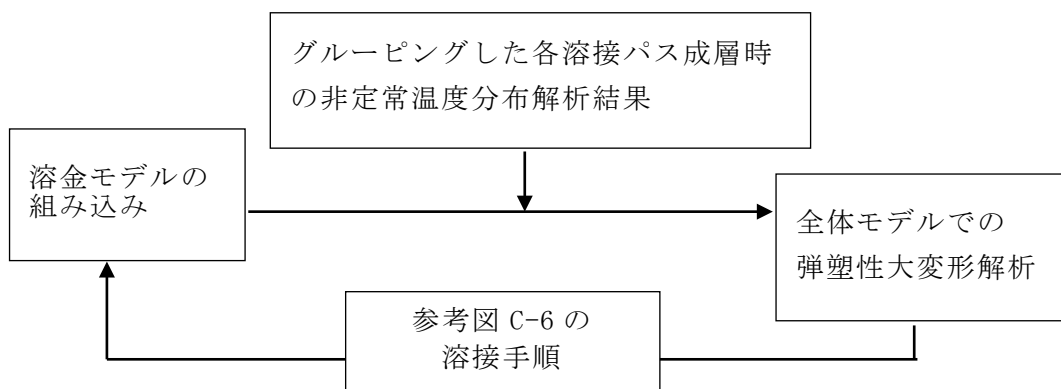


(a) 解析対象概略構造

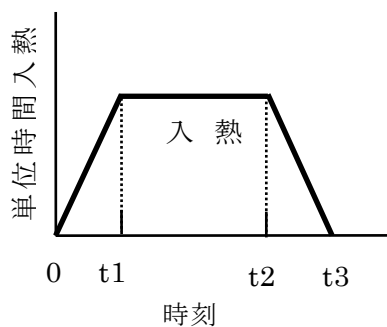


(b) 解析モデルと溶接順序

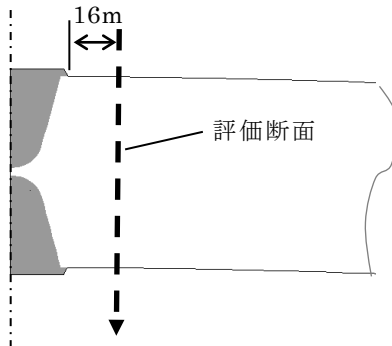
参考図 C-6 V2 溶接部の形状と解析モデル



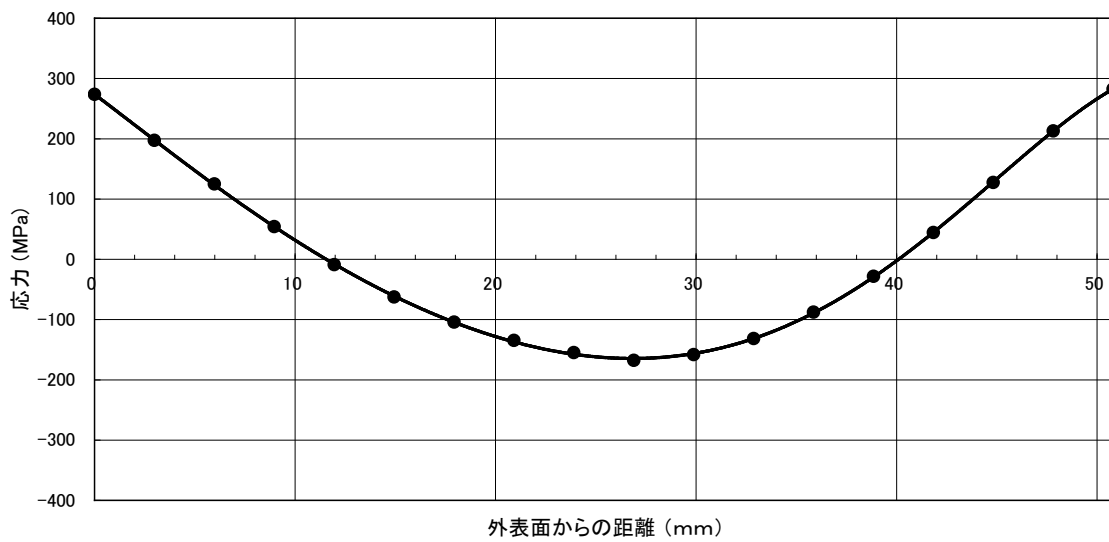
参考図 C-7 解析手順



参考図 C-8 入熱の想定



評価断面：溶接止端部より 16mm 離れた位置



参考図 C-9 V2 溶接部残留応力分布（周方向応力，板厚方向分布）

参考資料 C-3 シュラウド V2 溶接部及び V7 溶接部の許容亀裂評価

1. はじめに

V2 溶接部に想定した亀裂の許容深さを，極限荷重評価法の考え方にに基づき，亀裂が生じたときの当該部の許容応力と発生応力との比較により求めた。また，シュラウド内外差圧が厳しくなる V7 溶接部についても同様に算出した。

2. 評価手法

(1) 評価手法概要

シュラウド外表面から亀裂が進展した場合のリガメント部に発生する周方向応力が許容応力に達したときの亀裂深さを許容亀裂深さとして算出する。

(2) 荷重条件

シュラウドに周方向応力を発生させる荷重として，シュラウド内外差圧を考慮する。各供用状態におけるシュラウドの内外差圧を参考表 C-1 に示す。

参考表 C-1 シュラウド内外差圧

供用状態	差圧 [MPa]	
	上部胴 (V2)	下部胴 (V7)
供用状態 A, B	0.1	0.25
供用状態 C	0.12	0.27
供用状態 D	0.22	0.39

(3) 許容応力

許容応力は日本機械学会 維持規格に記載された流動応力 ( $\sigma_f$ ) とする。流動応力として，維持規格に従い  $2.7S_m$  を用いる。ここで， $S_m$  は日本機械学会 設計・建設規格に規定された設計応力強さのことである。

また，維持規格の考え方にに基づき，安全率 SF を次のように考慮する。

供用状態 A, B : SF=3.0

供用状態 C, D : SF=1.5

(4) 評価モデル

V2 及び V7 溶接部全長にわたって均一深さの亀裂があるものと想定した。評価モデルを参考図 C-10 に示す。

(5) 計算方法

差圧による周方向応力は次式で求める。

$$\sigma_t = \frac{\Delta P}{Y-1}$$

ここで、

$\Delta P$  : シュラウド内外差圧

$Y$  : 外径内径比 (=  $R_o/R_i$ )

$R_o$  : 外半径

$R_i$  : 内半径

亀裂深さを  $a$  とすると、亀裂部では外半径が  $R_o - a$  となる。

$$\sigma_t = \frac{\Delta P}{Y-1} = \frac{\Delta P}{\frac{R_o-a}{R_i}-1} \leq \frac{\sigma_f}{SF}$$

$$a \leq R_o - R_i - \frac{\Delta P}{\sigma_f} \cdot SF \cdot R_i$$

したがって、許容亀裂深さ  $a_c$  は次式で求まる。

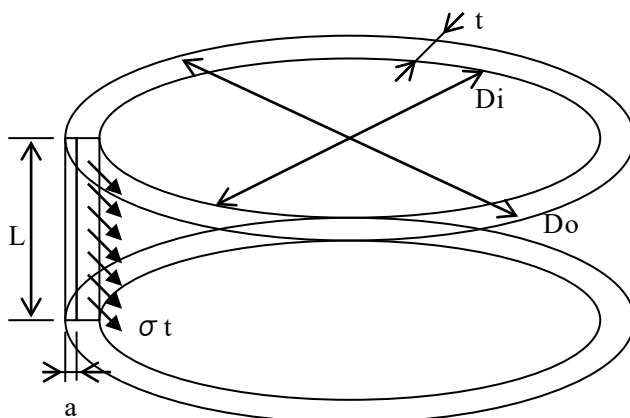
$$a_c = R_o - R_i - \frac{\Delta P}{\sigma_f} \cdot SF \cdot R_i$$

### 3. 評価結果

各供用状態における許容亀裂深さを計算した結果を参考表 C-2 に示す。いずれの場合も、シュラウドの板厚の 80% (約 40mm) を越える結果となり、V2 溶接部及び V7 溶接部は板厚の 80% まで亀裂があっても構造健全性を確保できると評価された。

参考表 C-2 許容亀裂深さ

供用状態	許容亀裂深さ [mm]	
	上部胴 (V2)	下部胴 (V7)
供用状態 A, B	47	43
供用状態 C	48	46
供用状態 D	47	45



- $L$  : 上部胴長さ
- $t$  : 上部胴厚さ
- $Do$  : 上部胴外径
- $Di$  : 上部胴内径
- $a$  : 亀裂深さ
- $\sigma_t$  : 周方向応力

参考図 C-10 評価モデル

## I. シュラウドにおける各溶接線の亀裂の影響評価

### 1. 目的

シュラウドにおける各溶接線の破損の影響を評価し、シュラウドの欠陥に対する裕度を評価する。なお、シュラウドの各溶接線の破損の影響については、補足資料 1 に示す検討から以下の結果を得ている。

- ・H7 より上部の H3 から H6 部では、加わる荷重が小さくなることから H7 溶接線の評価に包絡される。
- ・シュラウド 2 カ所の周継手（H7a, H6b）に亀裂が同時発生した場合、単独の場合と比べ限界荷重の低下が見られるが大きな影響はない。

このことから、シュラウドの欠陥裕度については、H7 溶接線における残存板厚により評価する。

### 2. 評価内容

#### 2.1 検討対象プラント

対象とする代表プラントは、BWR（1100Mwe クラス）及び ABWR とする。対象プラントのシュラウドの構造概念図を図 D-1 に示す。

#### 2.2 解析モデル

シュラウド構造は、シュラウドサポートの上部に設置される円筒型の胴及びリングを溶接した構造である。BWR（1100Mwe クラス）では、シュラウドとの接合部にシュラウドサポートリングがある構造と無い構造があるが、補足資料 1 と同様に両者を包絡するシュラウドサポートリング有りのモデルを用いる。シュラウドサポートリングの無い構造は、シュラウドサポートリング下部の溶接線 H7b を結合した場合として包絡される。解析は、3次元シェル要素により 180 度部分をモデル化し、亀裂想定箇所の板厚を残存板厚とすることでモデル化し、荷重伝達を無視する場合は要素の結合を切り離すことにより欠陥をモデル化して実施した。解析モデルを図 D-2 に示す。

なお、解析コードは汎用有限要素法解析コード ABAQUS を用い、弾塑性大変形解析を実施した。

#### 2.3 想定した破損箇所

想定した破損箇所を表 D-1 に示す。H7 溶接線の破損の影響を見るため、板厚方向の亀裂を想定し、亀裂の深さをパラメータに評価を実施する。

## 2.4 荷重条件

シュラウドに作用する最大荷重は地震荷重であることから、自重、運転時差圧に加え地震荷重を負荷する。地震荷重は、水平、上下及びモーメントをそれぞれ上部格子板、炉心支持板の位置で負荷し、これを比例倍することで弾塑性解析を実施した。解析に用いた荷重を表 D-2 に示す。

## 2.5 物性値

材料物性は、JSME 設計・建設規格 2005（2007 追補）より算出した 302℃の値を使用する。これら物性値を表 D-3 に示す。

## 3. 評価結果

### 3.1 H7 溶接線が健全な場合の崩壊荷重

H11 溶接線が健全な場合の崩壊荷重の算出結果を図 D-4 に示す。この場合、崩壊荷重は BWR において  $S_s$  地震荷重の 2.381 倍となり、ABWR では  $S_s$  地震荷重の 7.580 倍となる。

### 3.2 H7 溶接線の破損の影響評価

シュラウドに周方向溶接線 H7 に全周亀裂が入った場合の影響評価を行う。

ここでは、板厚の 50%の深さの亀裂が存在する場合（50%残存）、板厚の 75%の深さの亀裂が存在する場合（25%残存）及び板厚の 80%の深さの亀裂が存在する場合（20%残存）を考えた。

上記を組み合わせた解析ケース及び解析結果を表 D-4 に示す。また、図 D-5 及び図 D-6 にこれらの荷重変位曲線を示す。評価の結果、BWR における崩壊荷重の  $S_s$  地震荷重に対する比率は、H11 溶接線に板厚の 50%の深さの亀裂が存在する場合（25%残存）で 2.091 であるのに対し、ABWR では板厚の 80%深さの亀裂が存在する場合（10%残存）であっても 6.838 であった。

これは、BWR と ABWR の代表プラントの  $S_s$  地震荷重が異なることに加え、ABWR の耐震構造上の優位性によるものと考えられる。

## 4. まとめ

以上の検討の結果、安全率 1.5 を確保することを前提とした場合、ABWR では H7 溶接線の板厚が母材部板厚の 20%以上残っていれば、シュラウドサポートの健全性を確保できると考える。

一方、補足資料 1 に示すように、シュラウドの構造健全性に及ぼす影響は大きくないが、H6 溶接線に同時に亀裂が生じる可能性を考慮し、BWR については、H7 溶接線の板厚が母材部板厚の 50%以上残っていれば、シュラウドの健全性を確保できると考える。

表 D-1 解析パラメータ

解析ケース		H7 周溶接	H6b 周溶接
		全周残存面積	全周残存面積
(i)	H7	100%	—
(ii)	同上	50%	—
(iii)	同上	20%~25%	—
(iv)	H7, H6b 同時亀裂発生の影響	50%	50%

表 D-2 (a) 荷重条件 (BWR)

荷重作用位置	想定する荷重	鉛直力 V (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)	圧力 P (MPa)
上部格子板	死荷重	820	—	—	—
	差圧	—	—	—	0.1
	地震荷重 S <sub>s</sub>	2000	8500	23000	—
炉心支持板	死荷重	1300	—	—	—
	差圧	—	—	—	0.25
	地震荷重 S <sub>s</sub>	3000	15000	81000	—

表 D-2 (b) 荷重条件 (ABWR)

荷重作用位置	想定する荷重	鉛直力 V (kN)	水平力 H (kN)	モーメント M (kN・m)	圧力 P (MPa)
上部格子板	死荷重	1500	—	—	—
	差圧	—	—	—	0.1
	地震荷重 S <sub>s</sub>	1800	5100	7900	—
炉心支持板	死荷重	2800	—	—	—
	差圧	—	—	—	0.28
	地震荷重 S <sub>s</sub>	3300	8100	32000	—

表 D-3 解析に用いる物性値

機器	材料	温度 (°C)	設計応力強さ Sm (MPa)	弾完全塑性体に おける弾性限界*1 (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	加工硬化係数 h*2 (MPa)
シュラウド	SUS316L	300	95	218	176000	176
		325	92	211	174000	174
シュラウド サポート	NCF600	300	164	377	198000	198
		325	164	377	197000	197

\*1 :  $2.3 \times S_m$  で算出される値 (下図参照)

\*2 :  $E/1000$  で算出される値 (下図参照)

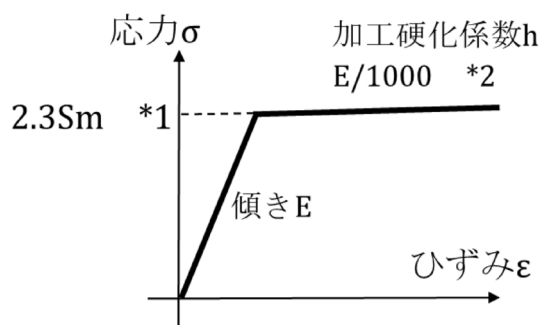
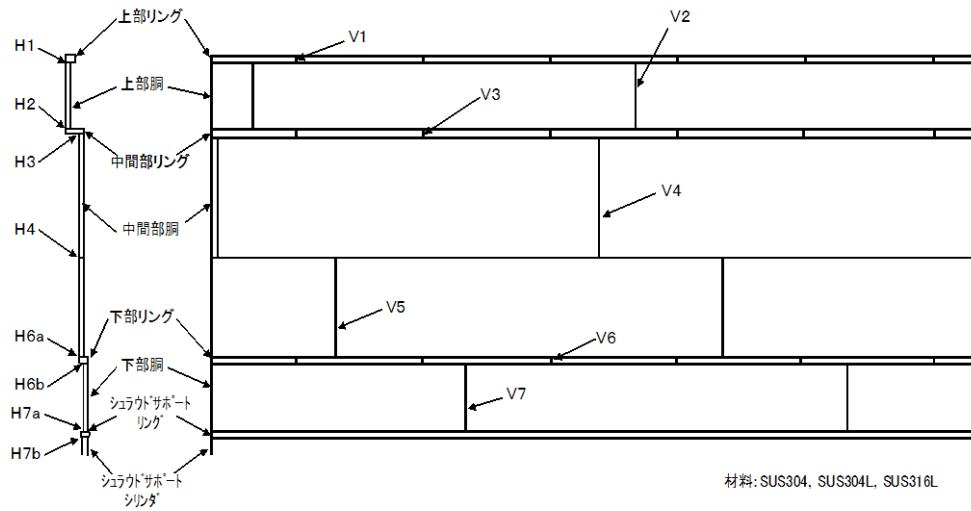


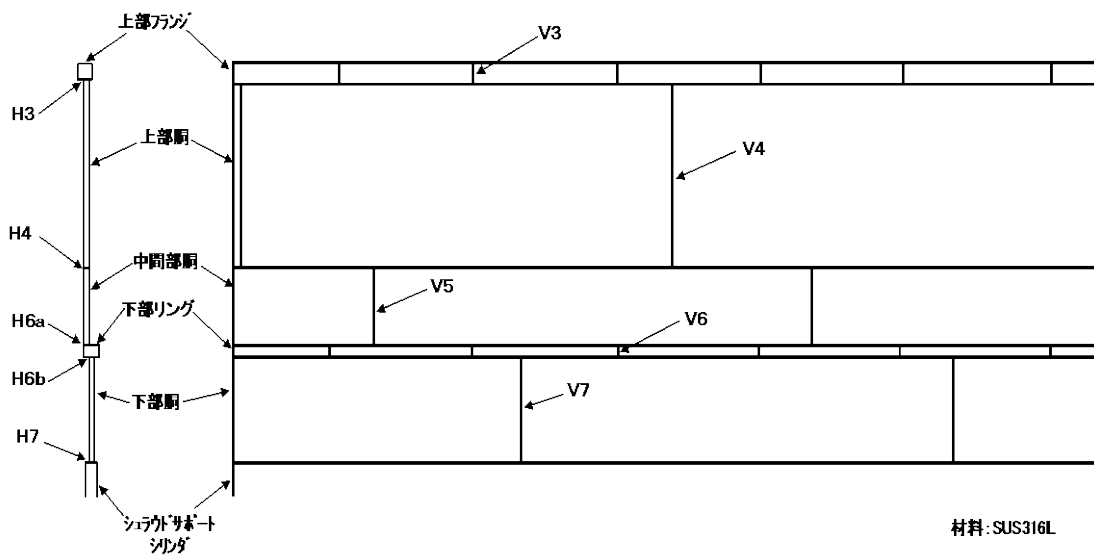
表 D-4 周方向亀裂の想定と解析ケース及び弾塑性解析の結果

	健全	H7 溶接部全周 50%残存	H7 溶接部 全周 25%残存	H7 溶接部 全周 20%残存
BWR-5	2.381	2.091	0.930	—
ABWR	7.580	7.560	—	6.838

注記：表中の数値は、崩壊荷重の地震荷重に対する比率を示す。

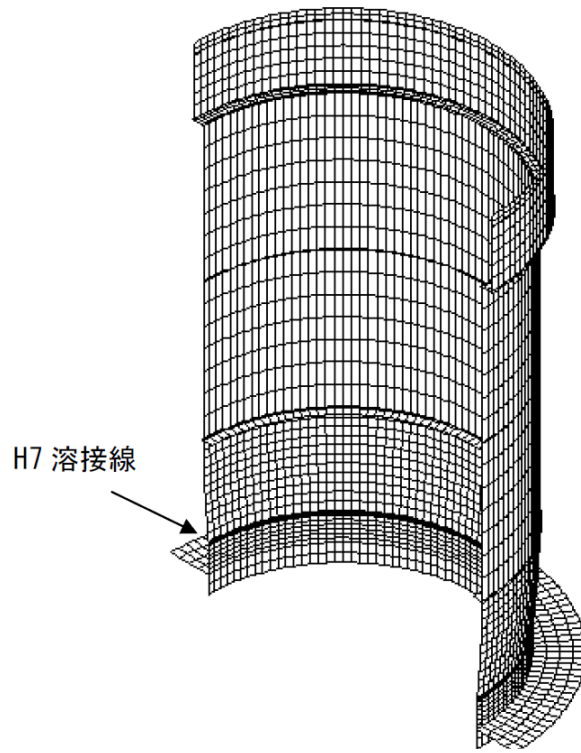


(a) BWR

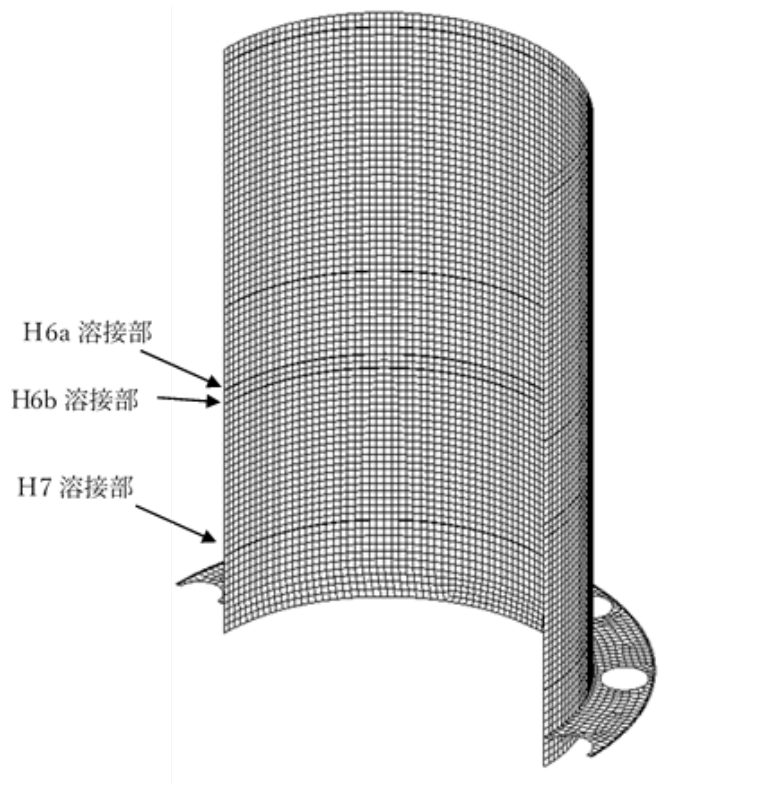


(b) ABWR

図 D-1 シュラウド構造及び溶接線位置

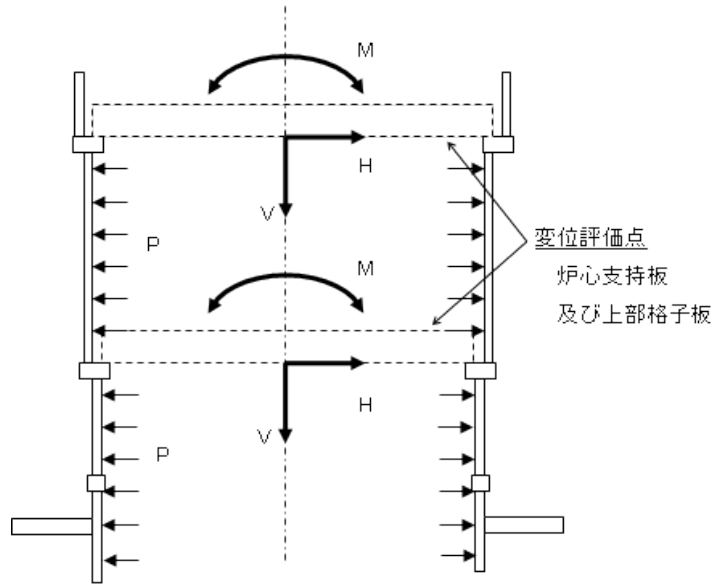


(a) BWR

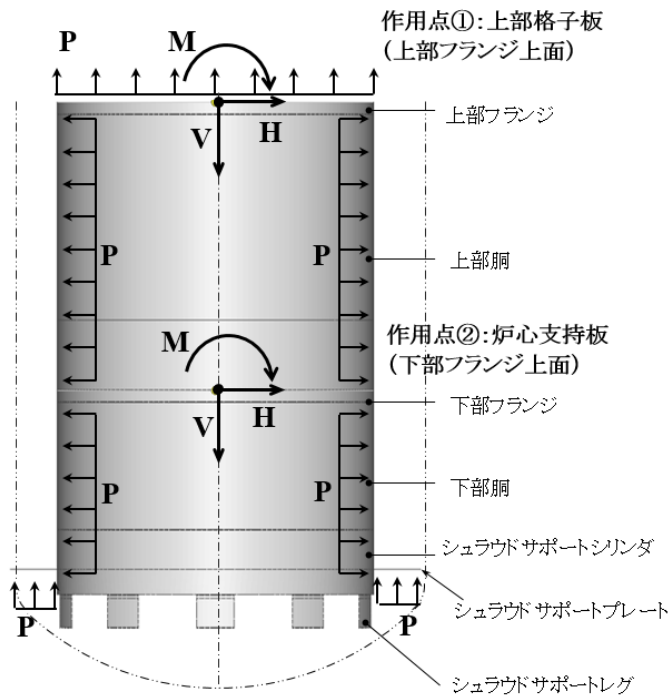


(b) ABWR

図 D-2 解析モデル

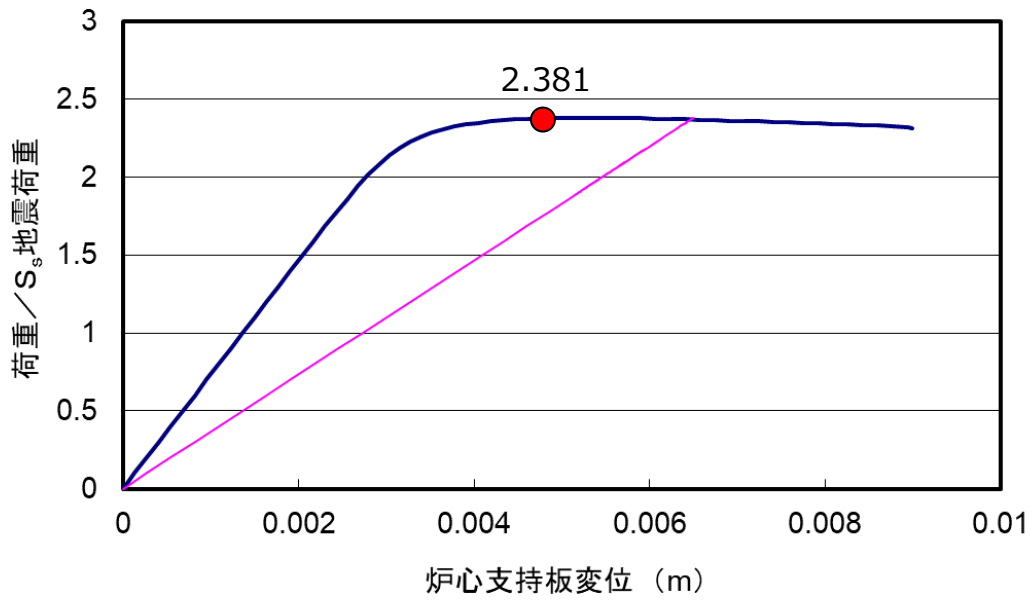


(a) BWR

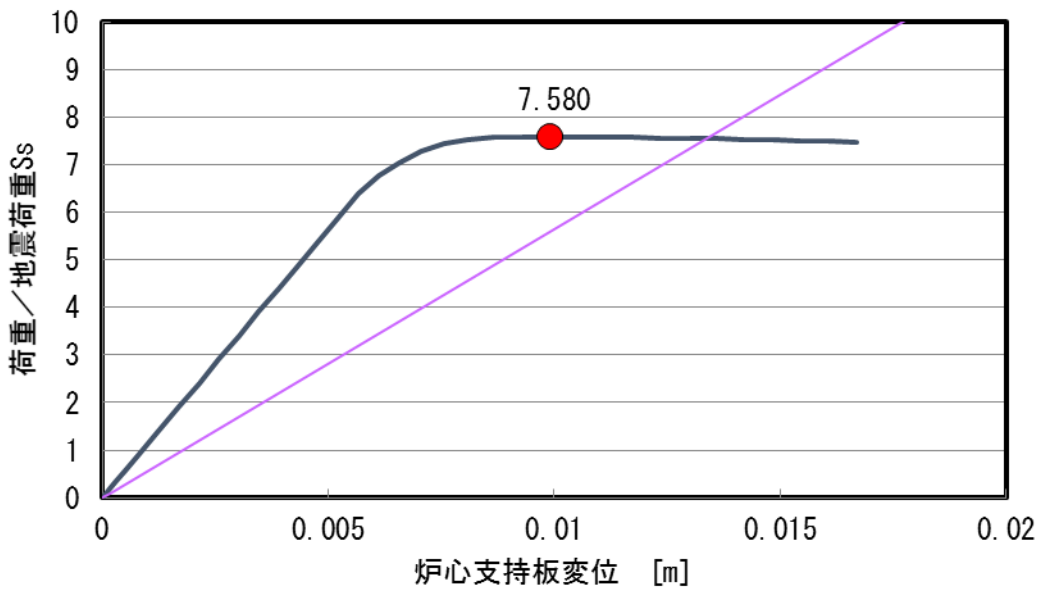


(b) ABWR

図 D-3 荷重負荷位置

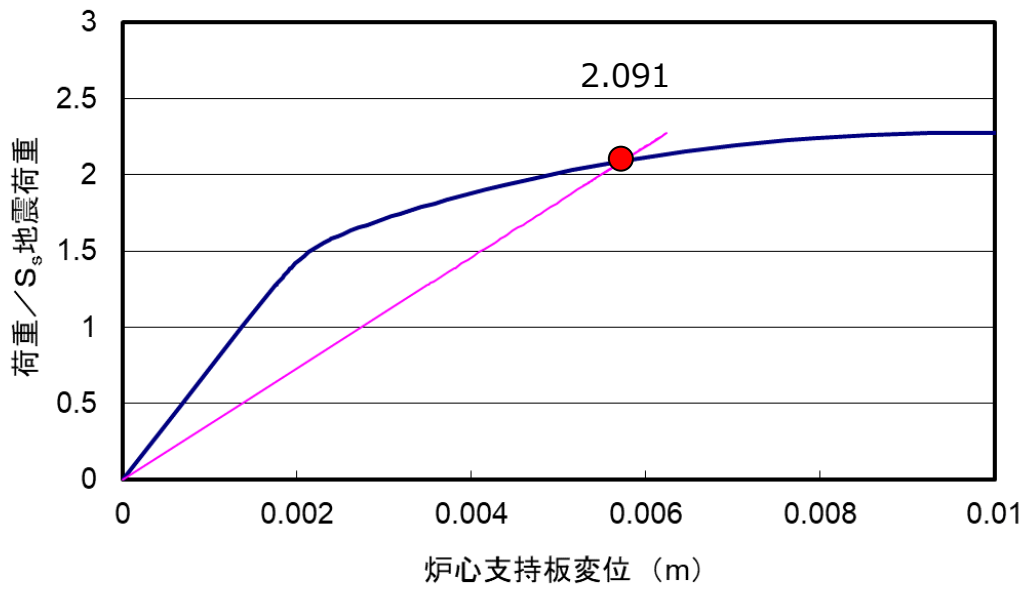


(a) BWR

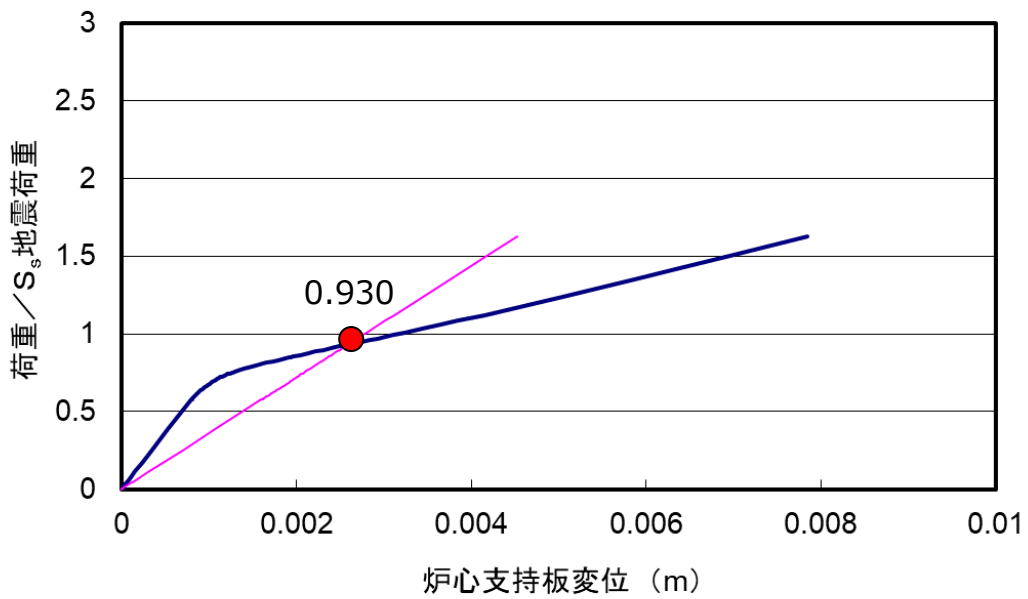


(b) ABWR

図 D-4 H7 溶接線が健全な場合 (残存 100%) の弾塑性解析結果

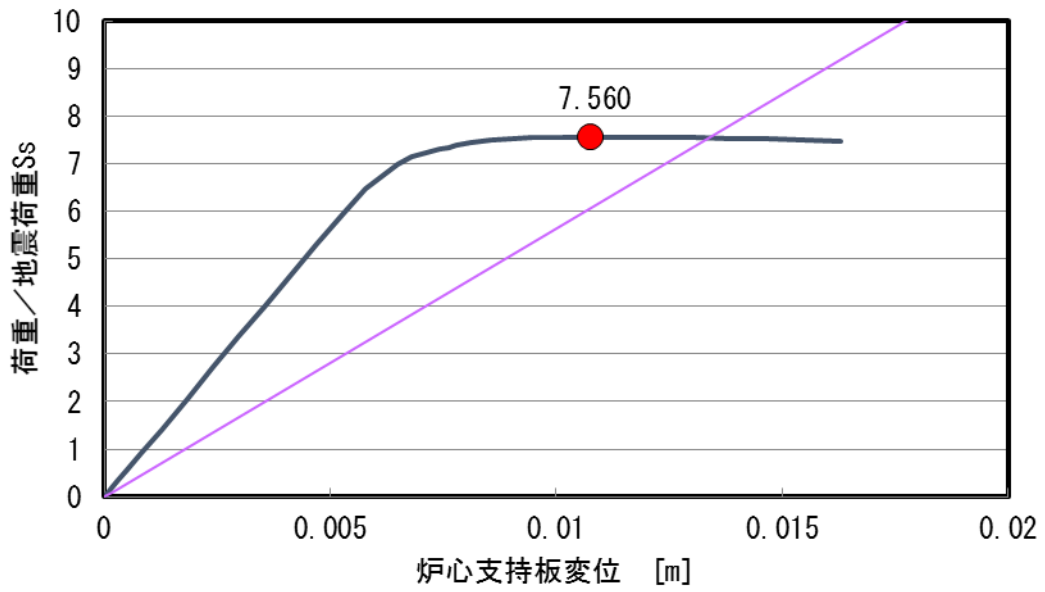


(a) 50%の深さの亀裂が存在する場合 (50%残存)

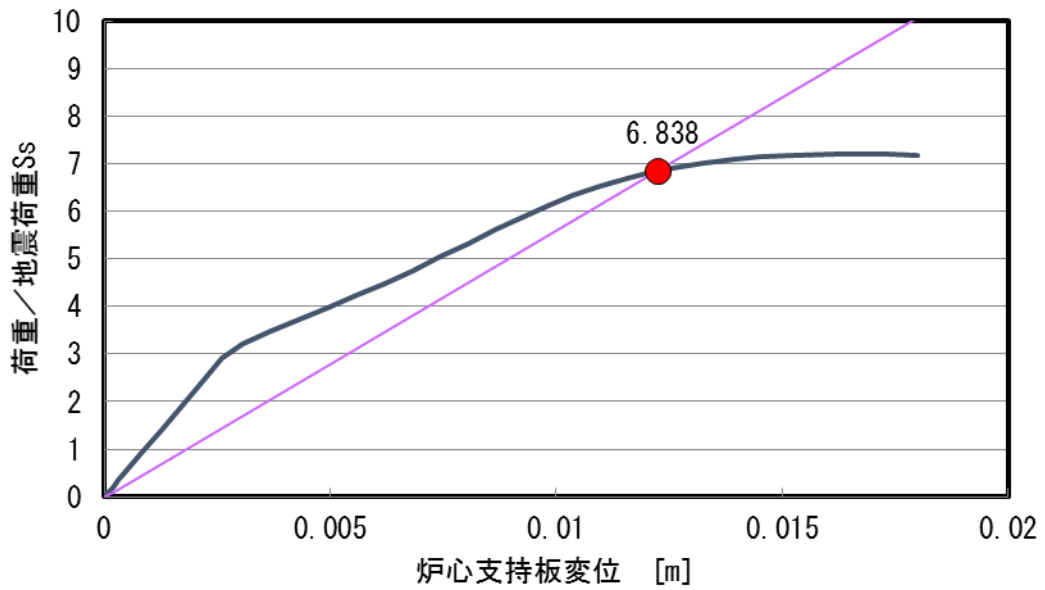


(b) 75%の深さの亀裂が存在する場合 (25%残存)

図 D-5 H7 溶接線の破損を想定した弾塑性解析結果 (BWR の場合)



(a) 50%の深さの亀裂が存在する場合 (50%残存)



(b) 80%の深さの亀裂が存在する場合 (20%残存)

図 D-6 H7 溶接線の破損を想定した弾塑性解析結果 (ABWR の場合)

## シュラウドの欠陥裕度評価（地震動 S2 の検討）

## I. シュラウドにおける各溶接線の亀裂の影響評価

## 1. 目的

シュラウドにおける各溶接線の亀裂の影響を評価する。すなわち、シュラウド胴部の周方向溶接線 (H4, H6b, H7a, H7b) 及び軸方向溶接線 (V7) の亀裂の影響を評価し、シュラウドの欠陥に対する裕度を評価する。H4 継手は中性子照射の影響を受け、破壊靱性が低下する可能性があるため、中性子照射の影響を考慮した許容欠陥寸法の評価を行う。

次に、この結果を受けて、シュラウドの周方向溶接線 H3 から H7 及び軸方向溶接線 V3 から V7 の亀裂が制御棒挿入性に与える影響を評価する。

本評価にあたり、未点検範囲の取扱いについては、未点検範囲全域に欠陥を想定しこの範囲の引張り荷重伝達を考慮せずに行った。実際の点検を行った後に亀裂の影響を評価する場合は、点検実施範囲と未点検範囲を比較して想定欠陥割合を算定し、この範囲の引張り荷重伝達を考慮することを原則とする。

## 2. 座屈・崩壊に対する限界荷重

## 2.1 解析の内容

## (1) 検討対象プラント

対象とする代表プラントは 1100MWe BWR とする。

## (2) 解析モデル

1100MWe BWR のシュラウドの構造概念を補図 D-1 に示す。シュラウド構造は、シュラウドサポートの上部に設置される円筒型の胴及びリングを溶接した構造である。シュラウドとの接合部にシュラウドサポートリングがある構造と無い構造があるが、両者を包絡するシュラウドサポートリング有りのモデルを用いる。シュラウドサポートリングの無い構造は、シュラウドサポートリング下部の溶接線 H7b を結合した場合として包絡される。

解析は、補図 D-2 に示す 3 次元シェル要素により 180 度部分をモデル化し、亀裂想定箇所の板厚を残存板厚とすることでモデル化し、荷重伝達を無視する場合は要素の結合を切り離すことにより欠陥をモデル化して実施した。

なお、解析コードは汎用有限要素法解析コード ABAQUS を用い、弾塑性大変形解析を実施した。

## (3) 想定した破損箇所

欠陥を想定した箇所を補表 D-1 に示す。

(a) 溶接部に欠陥が発生した場合に構造健全性上考慮すべき荷重は、シュラウドより上部の構造

物、炉心支持板、上部格子板等から加わる水平力、鉛直力、回転モーメントであり、これらによるシュラウドの座屈・崩壊が問題となる。これらの荷重の影響が最も大きく表れるのはシュラウド基部 H7 部であり、この部分に全周亀裂を想定する。剛性の低いシュラウドサポートリング上側の溶接線 H7a を考慮することによりシュラウドサポートリングの無い場合も包絡される。H7 より上部の H3 から H6 部では、加わる荷重が小さくなることから H7 溶接線の評価に包絡される。

(b) 点検困難範囲における荷重伝達の考え方は以下のように設定した。

a. 点検可能な範囲については、板厚方向の亀裂を模擬する。

b. 点検が困難な範囲に関しては荷重伝達を無視する。

荷重伝達を無視する場合の考え方を補図 D-3 に示す。

点検可能範囲を補表 D-2 に示す。H7a では、内面から亀裂が進展すると想定されるため、内面の検査困難範囲の最大想定値として 10% の範囲に荷重伝達無視部分を想定した。荷重伝達無視範囲の位置は荷重の加わる方向に存在すると仮定した。また、点検困難範囲が最大となる周方向溶接部 H6b についても検討を実施した。H6b 部の荷重伝達無視範囲として、H7a の最大荷重無視範囲相当の 10% までを想定する場合は H7a でのモーメントが大きいため H7a の結果に包絡されるが、荷重伝達無視範囲がそれ以上となる場合の影響について確認する必要があるためである。H6b の点検困難範囲として最大 40% の荷重伝達無視範囲を想定した（補図 D-3 参照）。

(c) 軸方向の亀裂の影響を評価するため、荷重条件の最も厳しいシュラウド基部近傍の V7 溶接線に亀裂を想定する。想定する亀裂長さは H7 と H6 の間のシュラウド下部胴全長にわたる長さとした。想定した亀裂を補図 D-4 に示す。解析ケースを補表 D-3 に示す。

#### (4) 荷重条件

シュラウドに作用する最大荷重は地震荷重であることから、自重、運転時差圧に加え地震荷重を負荷する。地震荷重は、水平、上下及びモーメントをそれぞれ上部格子板、炉心支持板の位置で負荷し、これを比例倍することで弾塑性解析を実施した。解析に用いた荷重を補表 D-4 に示す。荷重は、1100MWe BWR 全プラントの設計荷重を包絡するもっとも大きな値を採用した。荷重の負荷位置及び変位評価点を補図 D-5 に示す。なお、現状、基準地震動  $S_s$  が決定していないプラントがあるため、本書では、以前に実施した設計用限界地震動  $S_2$  を用いた評価結果を記載しているが、今後、基準地震動  $S_s$  が確定次第、影響評価を実施することとする。

## (5) 物性値

材料物性は JSME 設計・建設規格 2005 (2007 追補) より算出した 302℃の値を使用する。

これらの物性値を補表 D-5 に示す。

## 2.2 解析結果

すべてが健全の場合のシュラウドの座屈モードを補図 D-6 に示す。補図 D-6 は座屈後に荷重がさらに加わった状態での変形モードを示しているが、円筒構造物の典型的な曲げ座屈モードである象足形のモードとなっている。荷重－変位関係を補図 D-7 に示す。弾塑性の荷重－変位曲線における最大荷重支持点を座屈点、弾塑性の荷重－変位曲線と弾性勾配の 2 倍の直線が交わる点を崩壊点 (2 倍角法) と呼ぶことにすると、ここでは両者はほぼ一致している。

### (1) シュラウド周継手部の全周亀裂深さの影響

シュラウドに周方向溶接線 H7a に全周亀裂が入った場合の影響として荷重－変位関係を補図 D-8 に、補図 D-8 から求められる座屈荷重及び崩壊荷重の変化を補図 D-9 に示す。ここでは、全周亀裂の深さが板厚の 25% (75%残存)、50% (50%残存)、75% (25%残存)、90% (10%残存) の場合について示す。

75%残存の場合は、亀裂の内健全な場合とほとんど変化はないが、50%残存になると座屈荷重、崩壊荷重が低下することがわかる。この場合、座屈点より崩壊点が低くなり、この傾向は残存断面積が 25%、10%と少なくなるに従い顕著になる。残存断面積 50%では、設計時の  $S_2$  地震荷重に対する崩壊二重は 1.96 倍程度あり構造健全性に有意な影響を与えることはないが、残存断面積が 25%では設計時の  $S_2$  地震荷重に対する崩壊荷重は 0.98 程度と 1 を下回り、地震時に健全性を確保することが困難となる。

### (2) 検査困難範囲の破損影響

H7a の検査困難範囲 10%の荷重伝達を無視した場合の影響を補図 D-10 に示す。補図 D-11 に残存断面積と座屈・崩壊荷重の関係を、補図 D-12 に荷重伝達無視範囲を考慮しない場合との比較を示す。

荷重伝達無視範囲 (貫通亀裂) がある場合は、荷重伝達無視範囲が無い場合に比べて若干座屈・崩壊荷重が低下することがわかるが、全周亀裂の残存断面積 50%では構造健全性上有意な影響を与えることは無い。

(3) 縦継手 V7 に亀裂が存在する場合の影響

補図 D-13 及び補図 D-14 に V7 部の軸方向亀裂の影響を示す。V7 亀裂深さは板厚の 25% (75%残存), 50% (50%残存), 75% (25%残存), 90% (10%残存) を考慮しているが, 亀裂の影響はほとんど無いことがわかる。

(4) 多数の軸方向亀裂の影響

周方向継手部には, 周方向の残留応力が発生することから, 溶接線近傍に軸方向の亀裂が多数発生する可能性が考えられる。ニッケル合金の溶接継手である H7b 部を代表とし多数の軸方向亀裂が発生する場合の健全性について解析を実施した。補図 D-15 に考慮した軸方向亀裂を示す。亀裂長さは溶接部の高さ程度とし, 貫通亀裂とした。

解析結果を補図 D-16 に健全な場合と比較して示す。軸方向の亀裂が多数存在しても座屈・崩壊強度にほとんど影響を与えないことがわかる。

(5) 周継手部の亀裂と縦継手部の亀裂が同時発生した場合の影響

周継手の亀裂として地震時の許容残存面積を与える 50%深さの全周亀裂と, 荷重伝達無視範囲 10%を周継手 H7a に考慮する。これに縦継手 V7 の亀裂が同時に発生した場合について解析を実施した。縦継手の亀裂深さとしては十分保守側に残存面積が 10%になる場合とした。解析結果を補図 D-17 に示す。縦継手の亀裂を同時に想定しても, 座屈・崩壊強度にほとんど影響が無いことがわかる。

(6) 周継手部 H7a と H7b に亀裂が同時発生した場合の影響

シュラウドとの接合部にシュラウドサポートリングがある構造と無い構造がある。シュラウドサポートリングのある場合に, シュラウドサポートリング下部の周継手 H7b に亀裂が発生した場合の影響を検討する。周継手 H7a, 及び H7b の両社に残存断面積 50%深さの全周亀裂と, 検査困難範囲として 10%の荷重伝達を無視する範囲を設定し, H7a と H7b の両者に同時に亀裂が発生する場合の影響を検討した。解析結果を補図 D-18 に示す。亀裂同時発生が無い場合 (H7a のみに亀裂を考慮) と, 両者に同時に発生した場合の影響はほとんどないことが確認できる。

(7) H6b 周継手部に亀裂が発生した場合の影響

地震時の荷重の影響が大きい周継手の亀裂に対し, 荷重が最も厳しくなる部位はシュラウド基

部の H7 部であり、検査困難範囲が 10% までなら他の周継手もこれに包絡されると考えられる。しかしながら、補表 D-2 からわかるように、検査困難範囲が最も大きいのは H6b 部である。ここでは、H7a 周継手の検査困難範囲を越える H6b 周継手の検査困難範囲の影響を確認するため、H6b 部に亀裂が発生した場合について解析した。考慮した亀裂は、補図 D-3 に示す全周亀裂に検査困難範囲として 40% の荷重伝達無視範囲である。解析結果を補図 D-19 に示す。解析結果から、本ケースにおいても、全周亀裂深さ 50% の場合、地震荷重の座屈・崩壊に対し 1.5 倍の裕度が確保されていることが確認できる。他の周継手は、H6b より検査困難範囲が小さく、加わる荷重も H7 部及び H6 部に比べ小さいため、これまでの H7 及び H6 部の亀裂想定に包絡される。したがって、シュラウドのすべての周継手について、検査困難範囲を考慮しても全周亀裂による残存断面積が 50% であれば S<sub>2</sub> 地震時の健全性は確保されるといえる。

(8) H7a 部の検査範囲を削減した場合の影響 (H6b 検査困難範囲と同程度を削減)

H7a 部の検査困難範囲は最大 10% であるが、検査効率を考慮する場合検査範囲が少ない方が望ましい。ここでは、H7a の検査範囲を削減した場合の影響を検討する。検査を削減する場合のモデルとしては、H7a 部の検査困難範囲として想定した 2 カ所ではなく、H6b 相当の全周 10 カ所の範囲を検査せず、この部分の荷重伝達を無視する場合について検討した。解析結果を検査困難範囲 10% の場合とあわせて、検査範囲を横軸に補図 D-20 にプロットした。全周亀裂の残存面積 50% で地震時の崩壊に対する健全性を確保するためには、70% 以上の範囲の検査が必要となることがわかる。

(9) 周継手 H7a 及び H6b に同時に亀裂が発生した場合の影響

荷重条件がもっとも厳しい周継手 H7a と検査困難範囲も含めて欠陥想定範囲が最大となる H6b の両者に、上記(7)項までに検討した許容残存断面積相当の亀裂が同時に発生した場合の影響を検討する。解析結果を補図 D-21 に示す。両者を組み合わせると単独の場合より崩壊荷重が低下するが、S<sub>2</sub> 地震荷重の 1.5 倍程度の強度は期待できる。

(10) 制御棒挿入性に対する亀裂の影響

制御棒挿入性に対する継手部の亀裂の影響を検討する。前項までで縦継手の亀裂が構造健全性に及ぼす影響は小さいこと、周継手について全周亀裂として 50% の残存断面積が確保されていれば良いことが判明している。そこで、補表 D-6 に示すように荷重伝達経路にある H3 から H7 周継手については 50% 残存の全周亀裂を、V3 から V7 の縦継手については 10% 残存の亀裂 (長さは溶

接部全長)を考慮し、検査困難範囲として H6a 及び H6b 部は 40%、H7a 及び H7b 部は 10%の荷重伝達無視範囲を設け、S<sub>2</sub>地震荷重に対し炉心支持板及び上部格子板の変位を解析した。補図 D-22 に考慮した亀裂を示す。

補図 D-23 に解析結果として炉心支持板及び上部格子板の水平方向変位を示す。付録Hで示すように試験及び解析で確認されている炉心支持板の水平方向変位及び炉心支持板と上部格子板の相対変位に対し、十分余裕のある変形量となっていることが確認された。このとき、上部支持板位置での変位と荷重の関係をを用い、亀裂のない状態からの剛性の低下を求めると剛性は 20%程度低下しているが、固有振動数にして 11%程度の変動であり大きな問題にはならないと想定される。

### 3. 中性子照射による破壊靱性の低下を考慮した破壊の評価

#### 3.1 評価の前提条件

評価にあたっては以下の前提条件を考慮した。

##### (1) 対象部位及び亀裂の形状の想定

- (a) H4 継手に全周の亀裂があると想定する。点検困難な部位については考慮しない。
- (b) シュラウド半径(R)と板厚(t)の比(R/t)が約 50 であるので、平板として扱い板厚 50mm の平板に片側亀裂があるモデルとする。

##### (2) 評価対象部の応力拡大係数

上記(1)の評価部位及び欠陥のモデル化により、評価に用いる応力拡大係数は Brown 及び Slowley<sup>(1)</sup>の平板に片側亀裂がある場合の下式を適用した。

$$K=\sigma\sqrt{\pi a} \cdot F_I(\alpha)$$

ここに  $\alpha=a/W$

$$F_I(\alpha)=1.12-0.231\alpha+10.55\alpha^2-21.72\alpha^3+30.39\alpha^4$$

##### (3) 作用応力の想定

- (a) 荷重は S<sub>2</sub>地震により発生する応力を考慮する。
- (b) S<sub>2</sub>地震により発生する応力は付録Dにより求めた値とする。
- (c) 地震による応力はシュラウド軸方向に作用する膜応力として考慮する。
- (d) なお、以下の(4)の「評価対象部位の破壊靱性」で発電技検 PLEX の破壊靱性 K<sub>IC</sub> を用いる場合は照射量が 1.5×10<sup>25</sup>n/m<sup>2</sup> で照射量に依存しない破壊靱性を用いている。このような高照射領域では残留応力は緩和するので負荷応力には考慮しないことにした。

#### (4) 評価対象部位の破壊靱性

評価対象部位の破壊靱性は、高経年化評価で用いた維持規格の破壊靱性  $K_{IC}=43.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  (照射量  $2.7\times 10^{25}\text{n/m}^2$ ) を下限値として用いた。

### 3.2 評価結果

補図 D-24 に応力拡大係数と高経年化評価に用いた破壊靱性  $K_{IC}=43.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  との比較を示す。照射の影響を考慮する場合、 $S_2$  地震による荷重の 1.5 倍の荷重により発生する応力を考慮した場合、板厚の 45% 程度 (約 23mm) の深さの亀裂が許容できる。

なお、破壊靱性に及ぼす照射の影響が現れる照射量は  $5\times 10^{24}\text{n/m}^2$  以降である。この照射量に対応する時期は H4 継手では運転開始から約 20 年以降となる。

## 4. まとめ

- ・周継手部に亀裂が発生・進展した場合、周方向の亀裂の深さに応じて限界荷重の低下が生ずるが、全周亀裂として残存断面積 50% までは地震時においても構造健全性が確保される。
- ・縦継手部に亀裂が発生した場合でも限界荷重に顕著な低下は見られない。
- ・周継手部の亀裂と縦継手部の亀裂が重畳して発生した場合でも、顕著な限界荷重の低下は生じない。
- ・周継手部に多数の軸方向亀裂が発生しても限界荷重にほとんど影響はない。
- ・検査困難範囲が最も大きい H6b の検査困難範囲として 40% の荷重伝達無視範囲を考慮しても、全周亀裂として残存断面積 50% までは地震時においても構造健全性が確保される。
- ・H7a 部の検査範囲の削減は検査実施範囲が 70% 程度となるまで削減可能と推定される。
- ・シュラウド 2 カ所の周継手 (H7a, H6b) に亀裂が同時発生した場合、単独の場合と比べ限界荷重の低下が見られるが大きな影響はない。
- ・設計で想定される地震荷重においては、発生変位に対する亀裂の影響が小さく制御棒挿入性への影響は少ない。
- ・H4 継手については照射の効果を考慮する場合、 $S_2$  地震による荷重の 1.5 倍の荷重により発生する応力と残留応力を考慮すれば 23mm 程度の深さの亀裂が許容できる。  
なお、破壊靱性に及ぼす照射の影響が現れる照射量は  $5\times 10^{24}\text{n/m}^2$  以降である。この照射量に対応する時期は H4 継手では運転開始から約 20 年以降となる。
- ・照射に対する影響評価を精度よく行うためには対象とする部位から取得したデータに基づくことが必要である。現在、民間研究で照射材の破壊靱性のデータを取得中である。今後、民間研究の照射

に関する新たなデータが取得された場合には、データの適用性を検討し、照射材の破壊靱性を適時に見直して行くこととする。

(参考文献)

- (1) W. R. Brown, Jr. and J. E. Slawley, Plane Strain Fracture Toughness Testing of High Strength Metallic Materials, ASTM STP 410 , 1966, p. 12.
- (2) 発電設備技術検査協会編, 平成 6 年度プラント長寿命化技術開発に関する調査報告書, 平成 7 年 3 月.

補表 D-1 座屈・崩壊評価における溶接線に対する亀裂の想定

想定した亀裂		座屈・崩壊にとって最も厳しい荷重条件となる基部：H7a, H7b, V7 を対象とする。 また、点検困難範囲が大きい H6b を対象とする。	
点検困難範囲における荷重伝達の考え方		a. 点検可能な範囲については、板厚方向の亀裂を模擬する。 b. 点検困難な範囲に関しては荷重伝達を無視する。	
各亀裂の影響度合いの把握	H7a, H6b 周継手部の亀裂の影響	全周亀裂	全周亀裂を想定し亀裂深さをパラメータに影響を検討する。点検困難な範囲に、荷重伝達を無視する部分を想定する。(補図 D-3 参照)
	V7 縦継手部の亀裂の影響	深さの影響	亀裂深さをパラメータとする。荷重方向は 0 度 - 180 度方向とし、亀裂が同時に 2 カ所存在すると仮定する。
	H7a と V7 の同時亀裂発生		H7a と V7 に同時に亀裂が発生した場合の影響を検討する。

補表 D-2 シュラウドの検査可能範囲 (1100MWe BWR)

(1) VT

	シュラウド外側 (%)		シュラウド内側 (%)	
	吊下式	遠隔式	吊下式/マイクカメラ	遠隔式
H1	70	70	0	0
H2	90 以上	90 以上	0	0
H3	100	100	100	100
H4	35	100	100	100
H6a	35	80	100	0
H6b	35	60	90 以上	90 以上
H7a	30~50	30~50	90 以上	90 以上
H7b	30~50	30~50	90 以上	90 以上
V1	100	100	60	60
V2	100	100	20	20
V3	100	100	100	0
V4	100	100	100	100
V5	0	100	100	80
V6	80	30	100	100
V7	0	0	100	100

(2) UT

	シュラウド内側/外側 (%)
	遠隔式
H1	90 以上
H2	90 以上
H3	100
H4	100
H6a	60
H6b	60
H7a	90 以上
H7b	90 以上
V1	60
V2	90
V3	60
V4	100
V5	80
V6	30
V7	100

補表 D-3 解析パラメータ

解析ケース	H7a 周継手の亀裂		H7b 周継手の亀裂	V7 縦継手の残存面積
	全周（亀裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	軸方向亀裂長さ及び深さ	
1. H7 全周亀裂深さの影響	100%, 75%, 50%, 25%, 10%	—	—	100%
2. H7 検査困難範囲の影響	100%, 75%, 50%, 25%, 10%	全周の 10%	—	100%
3. V7 亀裂深さの影響	100%	—	—	100%, 75%, 50%, 25%, 10%, 0%
4. H7b 多数軸方向亀裂の影響	100%	—	長さ 40mm, 貫通	100%
5. H7a, v7 同時亀裂の影響	50%	全周の 10%	—	10%
6. H7a, H7b 同時亀裂の影響	50%	全周の 10%	H7a に同じ	100%

解析ケース	H6b 周継手の亀裂		H7 周継手の亀裂	V7 縦継手の残存面積
	全周（亀裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ		
7. H6b 亀裂の影響	100%, 75%, 50%, 25%, 10%	全周の 40%	—	100%

解析ケース	H7a 周継手の亀裂		H7b 周継手の亀裂	V7 縦継手の残存面積
	全周（亀裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	軸方向亀裂長さ及び深さ	
8. H7a 検査範囲削減の影響	100%, 75%, 50%	全周の 10%, 40% (図 B-3 相当)	—	100%

解析ケース	H7a, H6b 周継手の亀裂		V7 縦継手の残存面積
	全周（亀裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
9. H7a, H6b 同時亀裂発生の影響	50%	全周の 10%, 40% (図 B-3)	100%

補表 D-4 荷重条件 (荷重合計)

想定する荷重		鉛直力	水平力	モーメント	圧力
		V (kN)	H (kN)	M(kN・m)	P (Pa)
通常運転時の荷重	死荷重	1880	—	—	—
	差圧	—	—	—	0.068 <sup>(1)</sup> 0.245 <sup>(2)</sup>
地震時の荷重	地震荷重 S <sub>2</sub>	745	14711	102974	—

(1) 上部格子板と炉心支持板の間

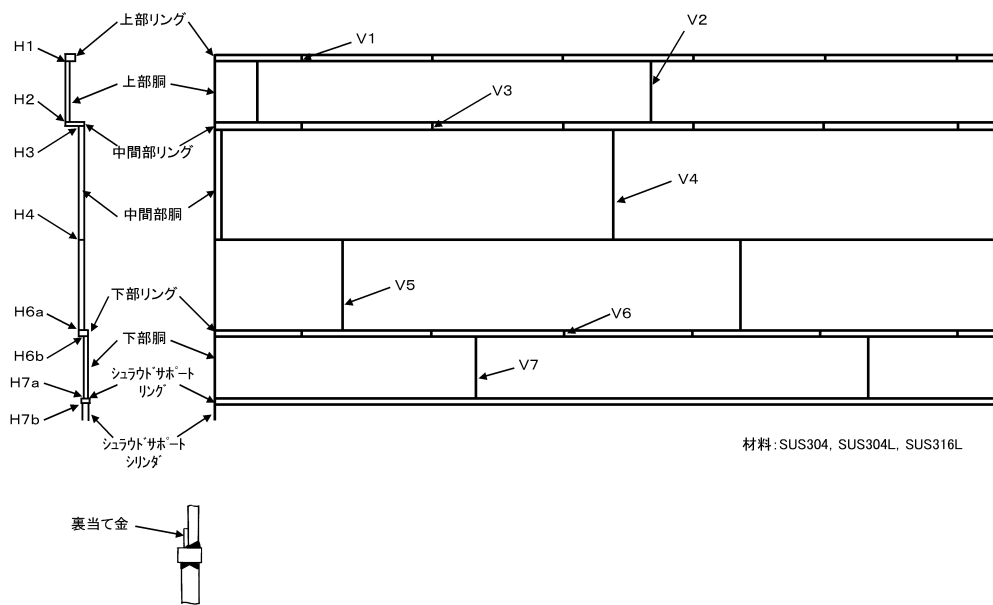
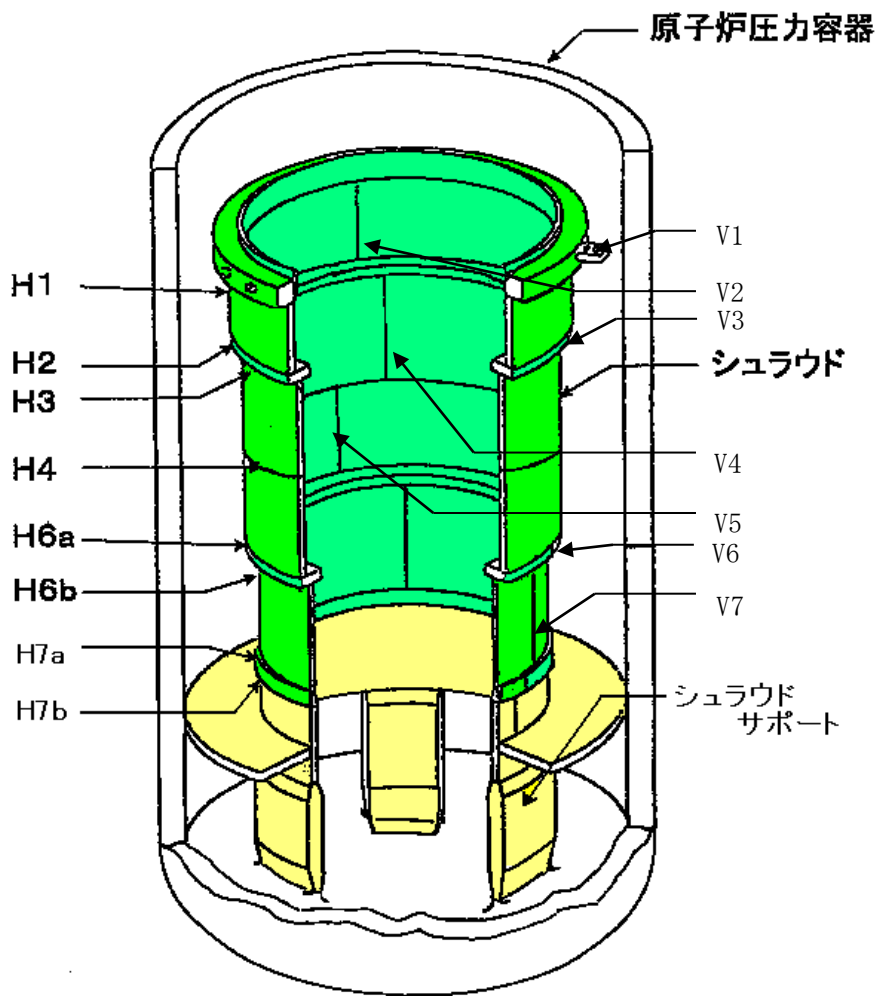
(2) 炉心支持板より下部

補表 D-5 構造強度解析に用いる物性値

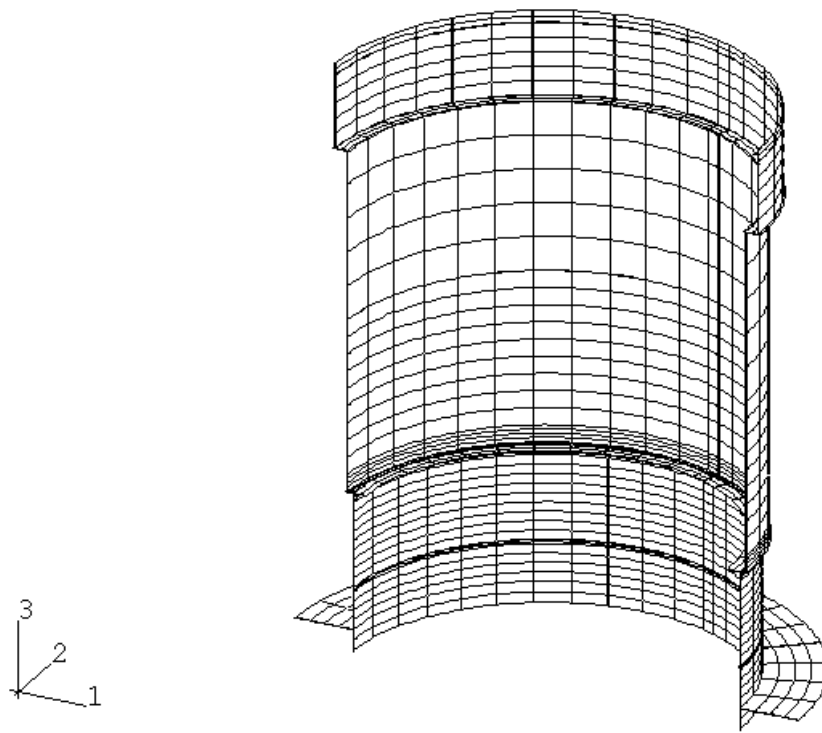
材質	温度 (°C)	Sm (MPa)	完全弾塑性 における 弾性限界 (=2.3Sm) (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	加工硬化係 数 h' (MPa) E/1000
SUS316L	20	118	271.4	195000	195
	75	115	264.5	191000	191
	100	115	264.5	190000	190
	150	115	264.5	186000	186
	200	108	248.4	183000	183
	225	104	239.2	180000	180
	250	101	232.3	178000	178
	275	98	225.4	177000	177
	300	95	218.5	176000	176
	325	92	211.6	174000	174
	350	90	207.0	173000	173
	375	88	202.4	171000	171
	400	87	200.1	169000	169
	425	85	195.5	167000	167

補表 D-6 制御棒挿入性について考慮した亀裂

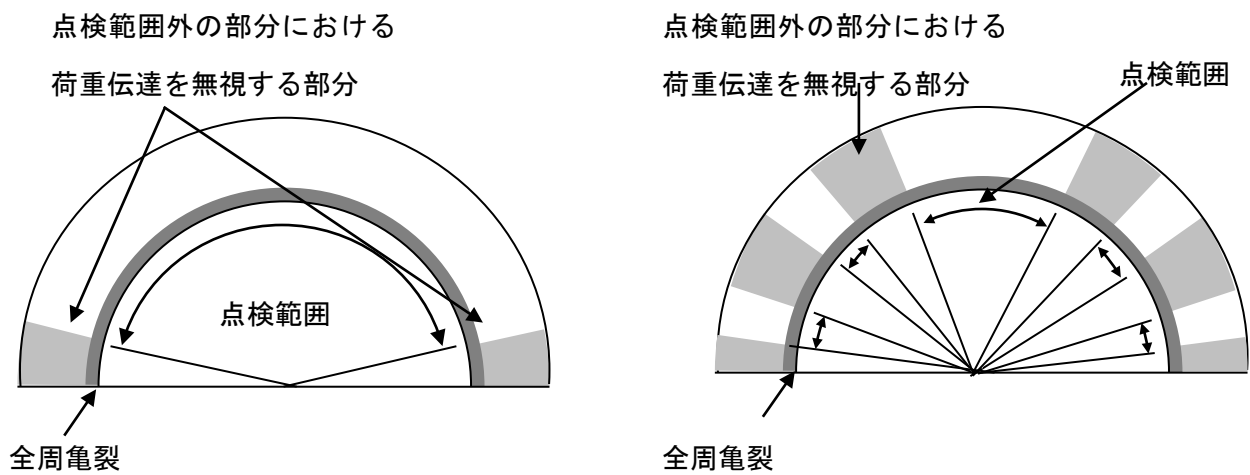
周継手部			縦継手部	
位置	想定亀裂		位置	想定亀裂
H3	全周亀裂	亀裂深さ 50%	V3	溶接線全長に渡る亀裂 亀裂深さ 90% =10%残存
H4	=50%残存		V4	
H6a	全周亀裂	亀裂深さ 50%	V5	
H6b	荷重伝達無視 40%		V6	
H7a	全周亀裂	亀裂深さ 50%	V7	
H7b	荷重伝達無視 10%			



補図 D-1 シュラウド構造及び溶接線位置



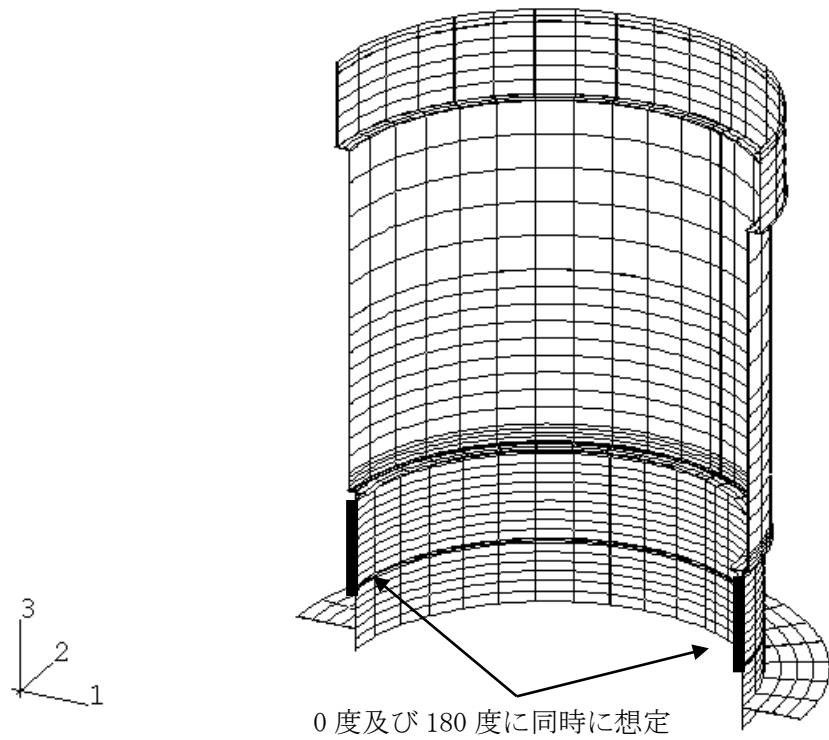
補図 D-2 解析モデル



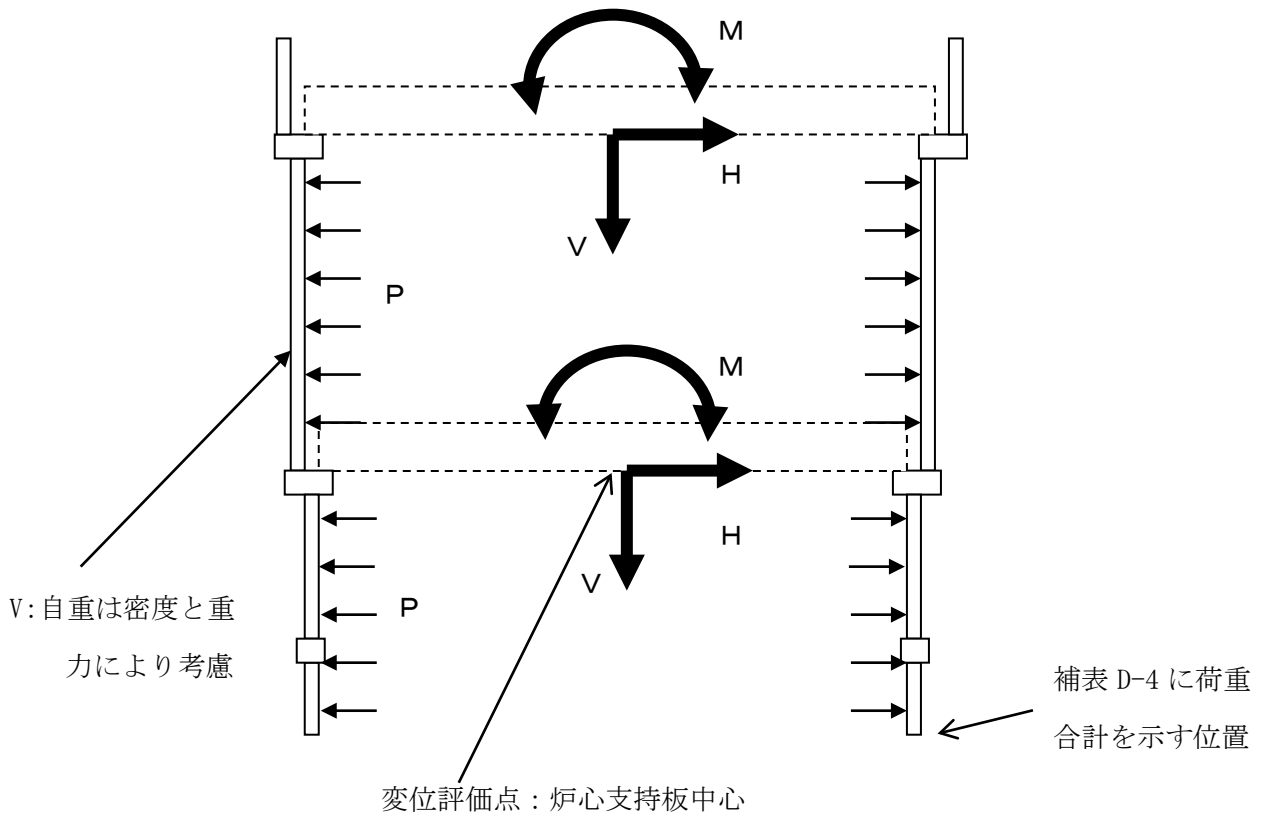
(a) H7a 部周方向亀裂の考え方

(b) H6b 部周方向亀裂の考え方

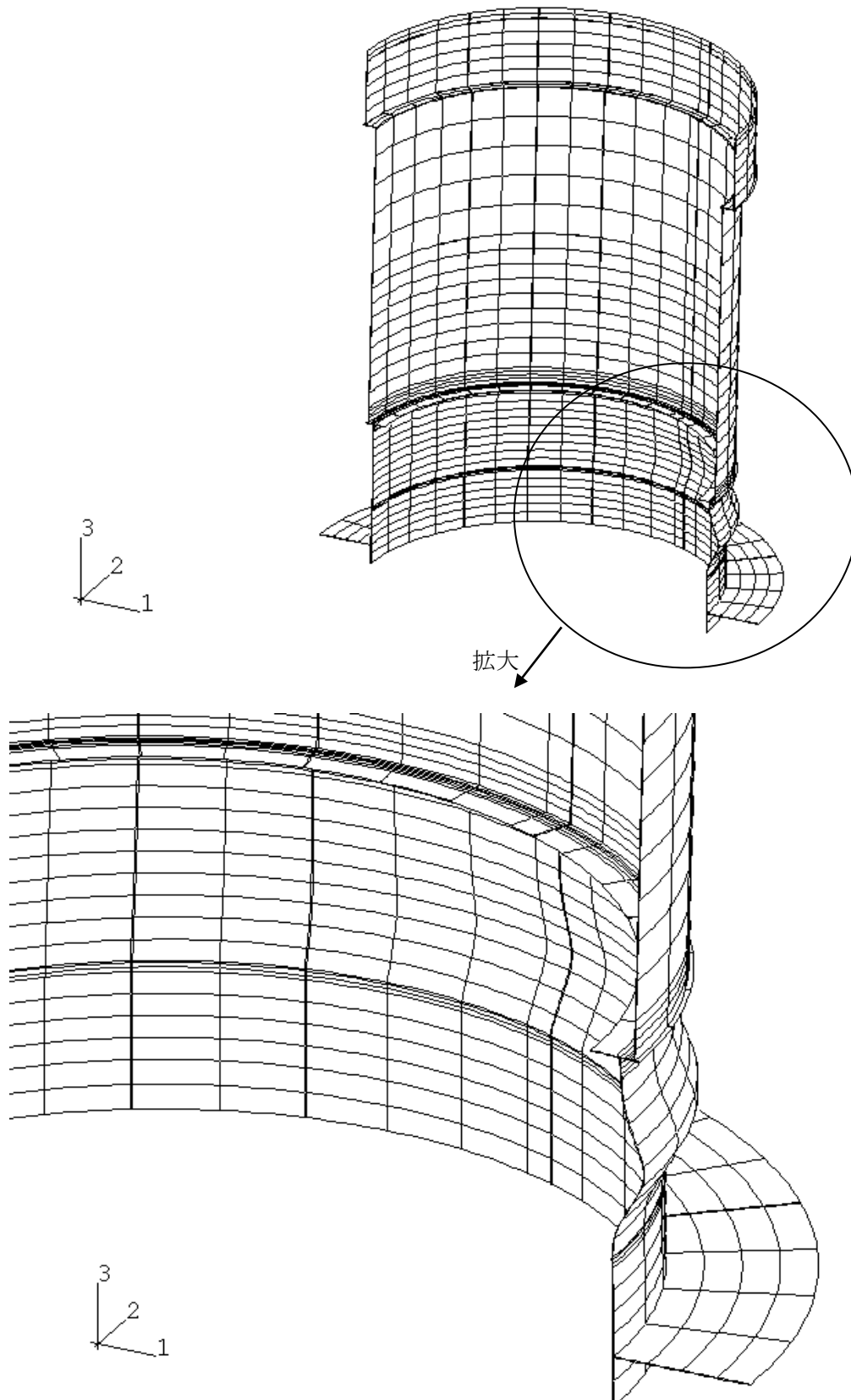
補図 D-3 点検困難範囲のモデル化 (H7a 及び H6b 周方向)



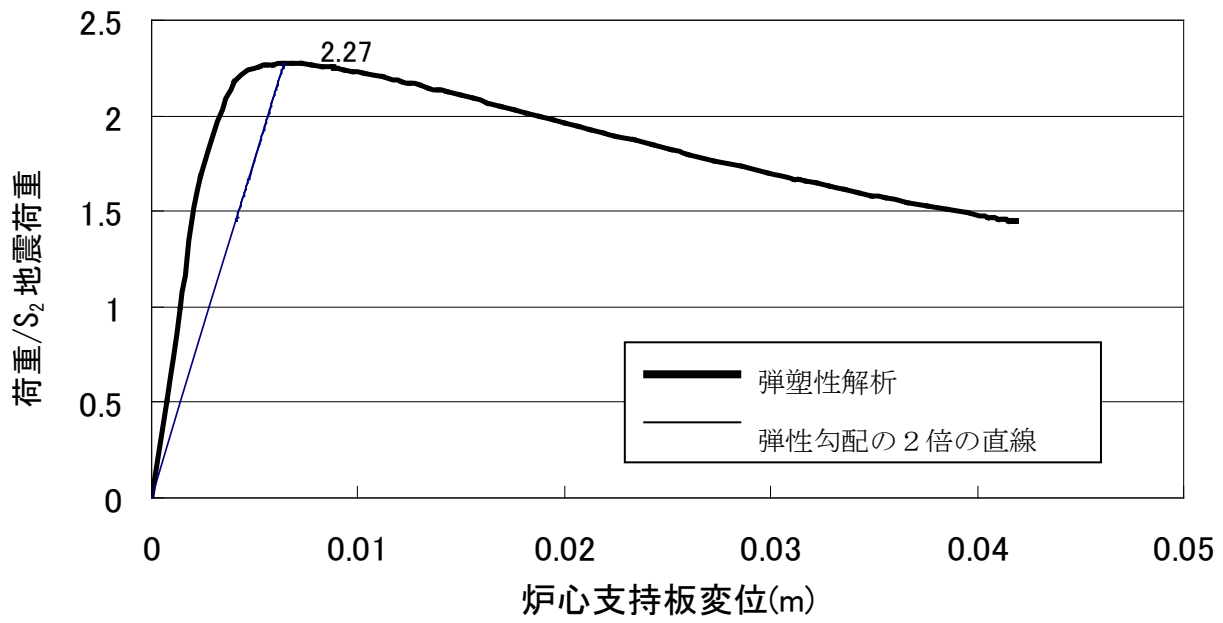
補図 D-4 軸方向亀裂の想定位置



補図 D-5 荷重負荷位置及び変位評価点

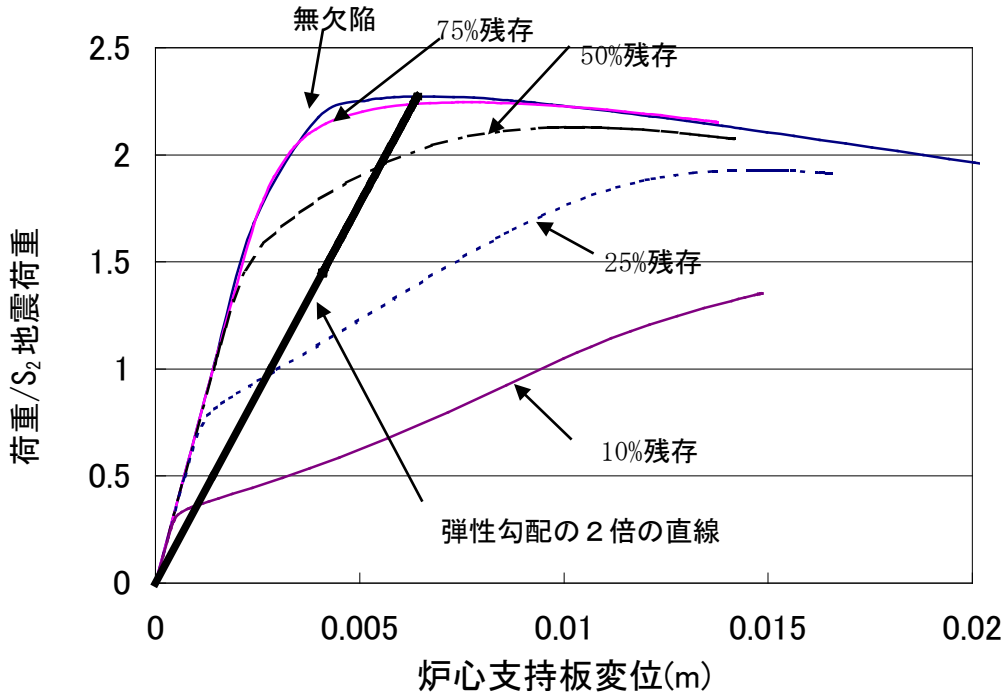


補図 D-6 シュラウドの座屈モード（全ての溶接線が健全な場合の座屈後変形）

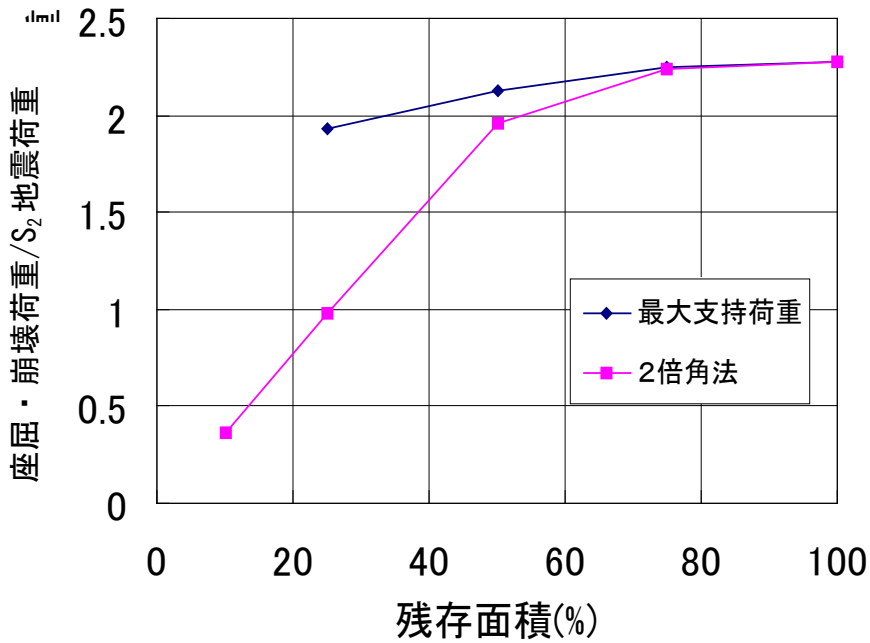


補図 D-7 全ての溶接線が健全な場合の荷重－変位関係

解析ケース	H7a 周継手の亀裂		V7 縦継手の亀裂残存面積
	全周 (亀裂) 残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
1. H7 全周亀裂 深さの影響	100%, 75%, 50%, 25%, 10%	—	100%

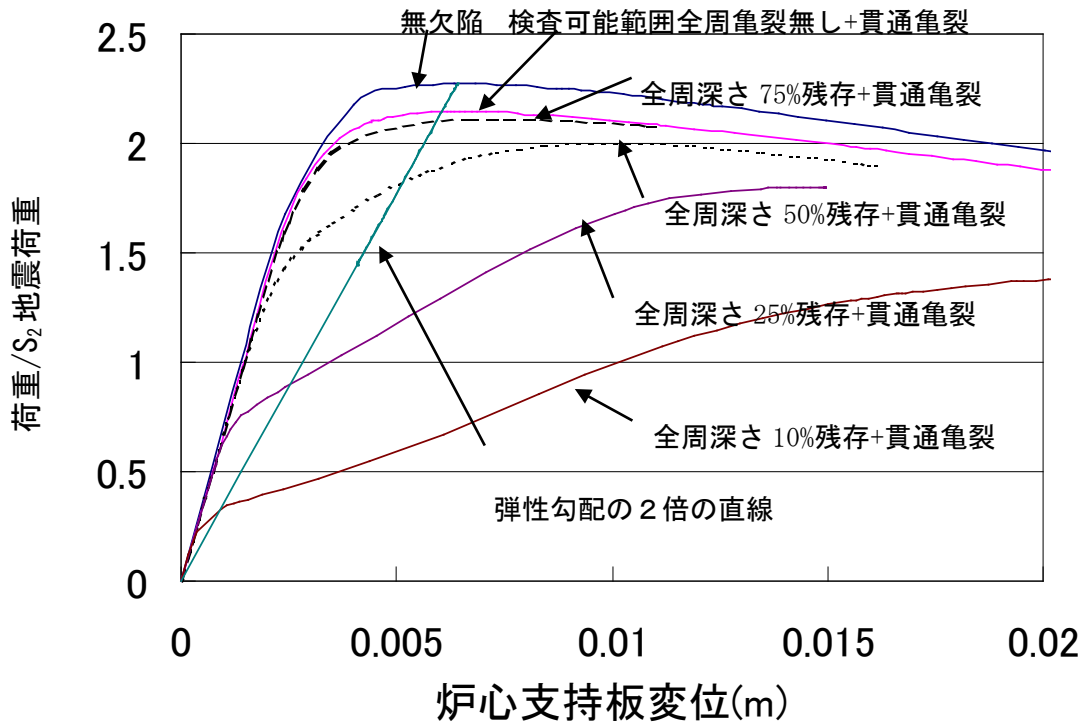


補図 D-8 シュラウド周方向溶接線の全周亀裂深さの影響 (荷重-変位関係)

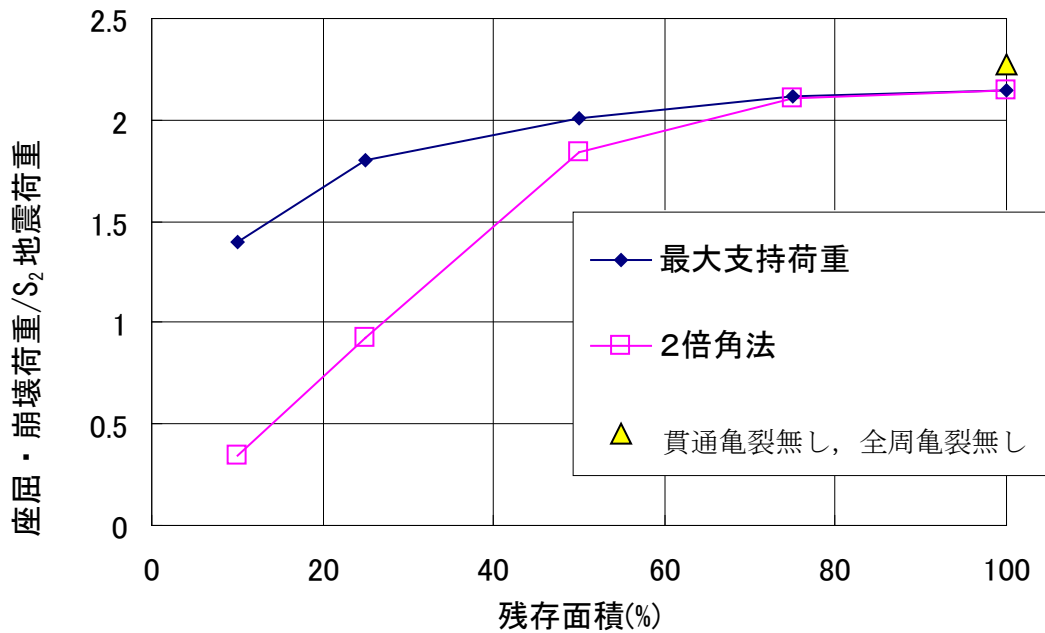


補図 D-9 シュラウド周方向溶接線の全周亀裂深さの影響

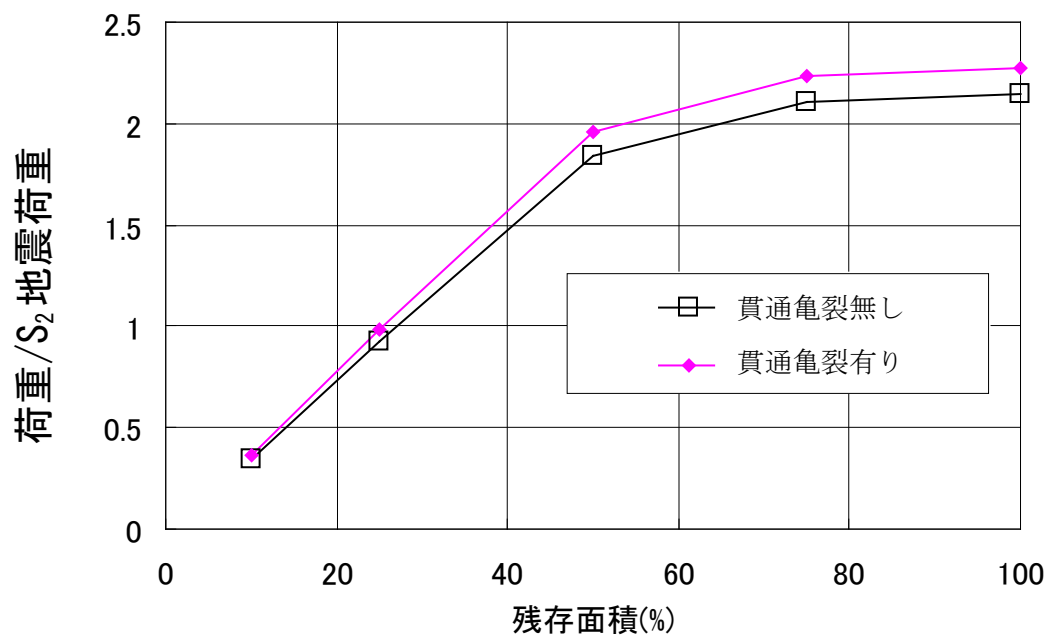
解析ケース	H7a 周継手の亀裂		V7 縦継手の亀裂残存面積
	全周 (亀裂) 残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
2. H7 検査困難範囲の影響	100%, 75%, 50%, 25%, 10%	全周の10%	100%



補図 D-10 H7a 検査困難範囲を貫通亀裂とした場合の影響 (荷重変位関係)

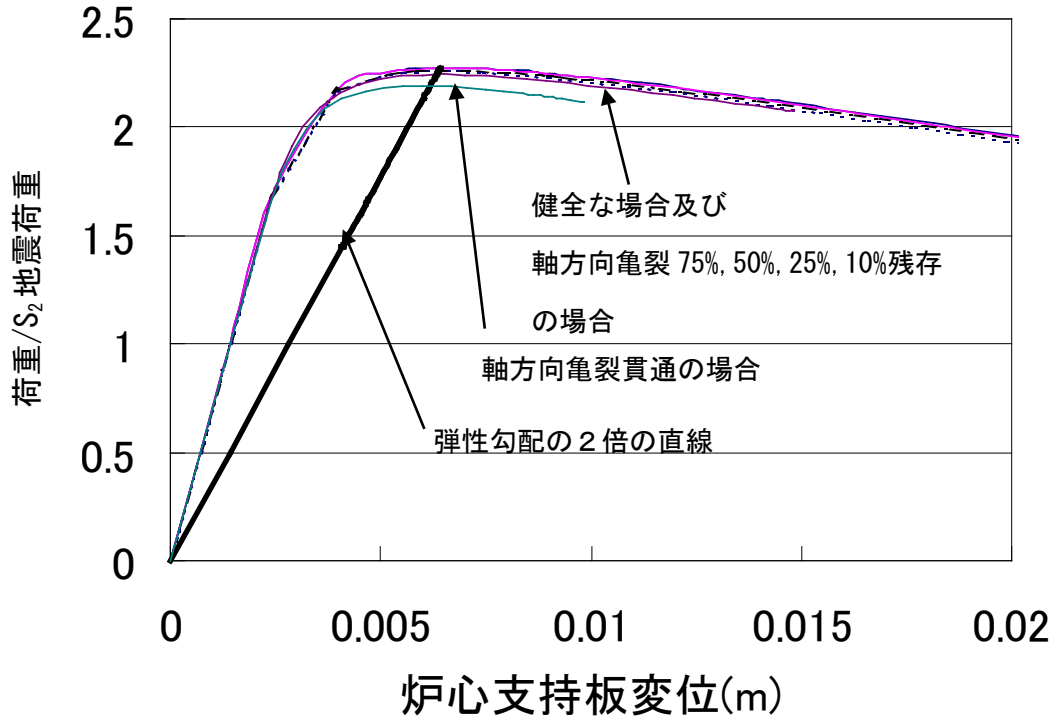


補図 D-11 H7a の検査困難範囲を貫通亀裂とした場合の影響

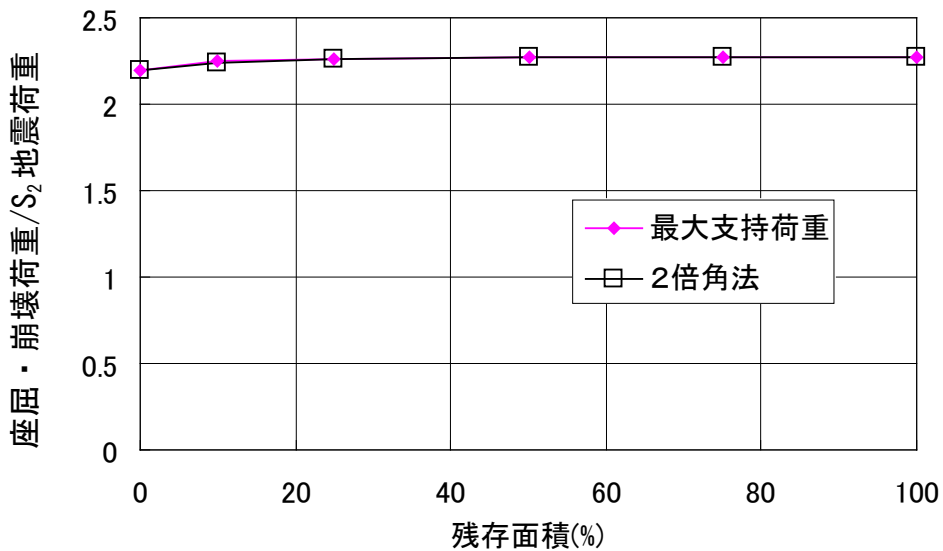


補図 D-12 H7a の検査困難範囲を貫通亀裂とした場合と貫通亀裂を考慮しない場合の比較

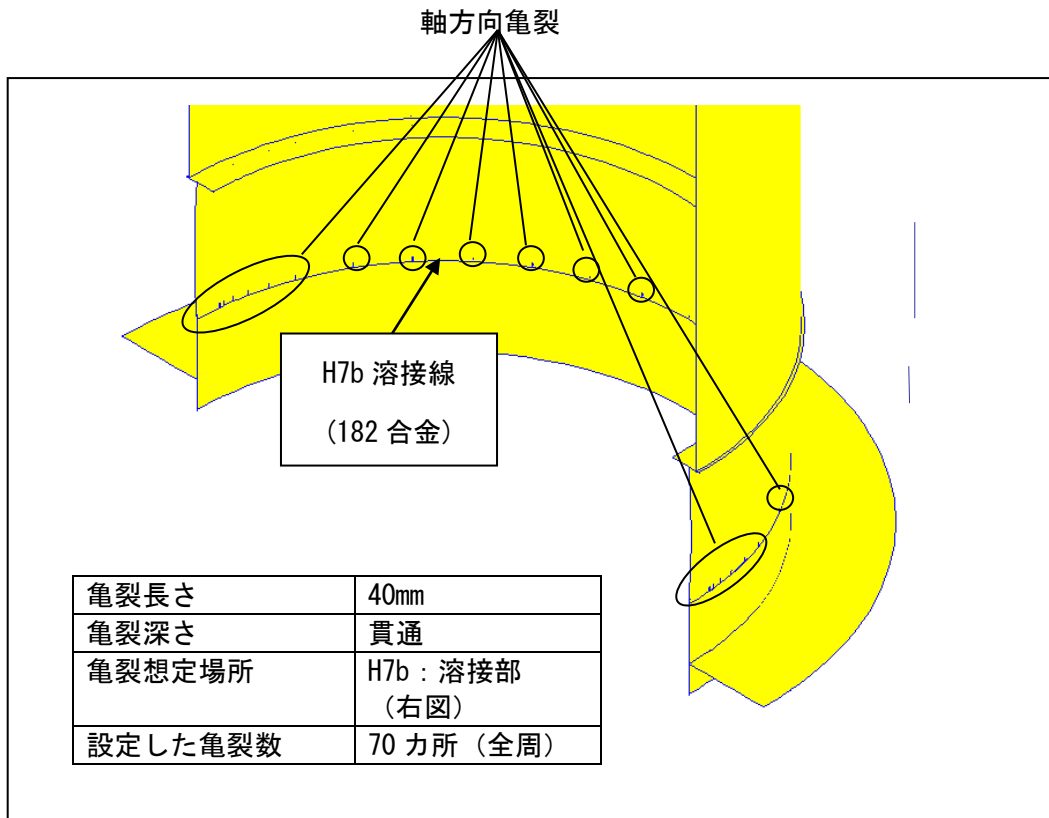
解析ケース	H7a 周継手の亀裂		V7 縦継手の亀裂残存面積
	全周(亀裂)残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
3. V7 亀裂深さの影響	100%	—	100%, 75%, 50%, 25%, 10%, 0%



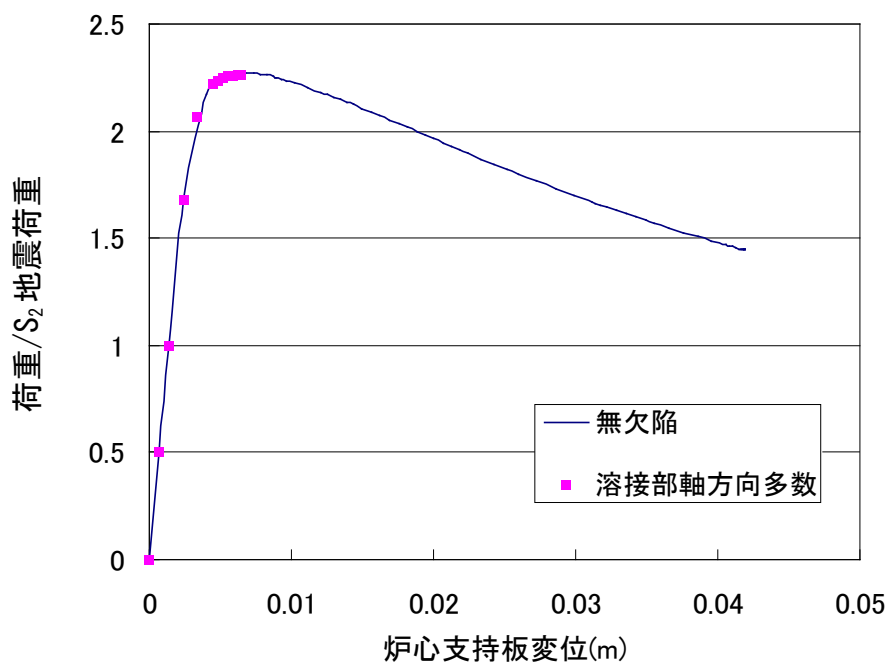
補図 D-13 縦継手の亀裂深さの影響 (荷重変位関係)



補図 D-14 縦継手の亀裂深さの影響

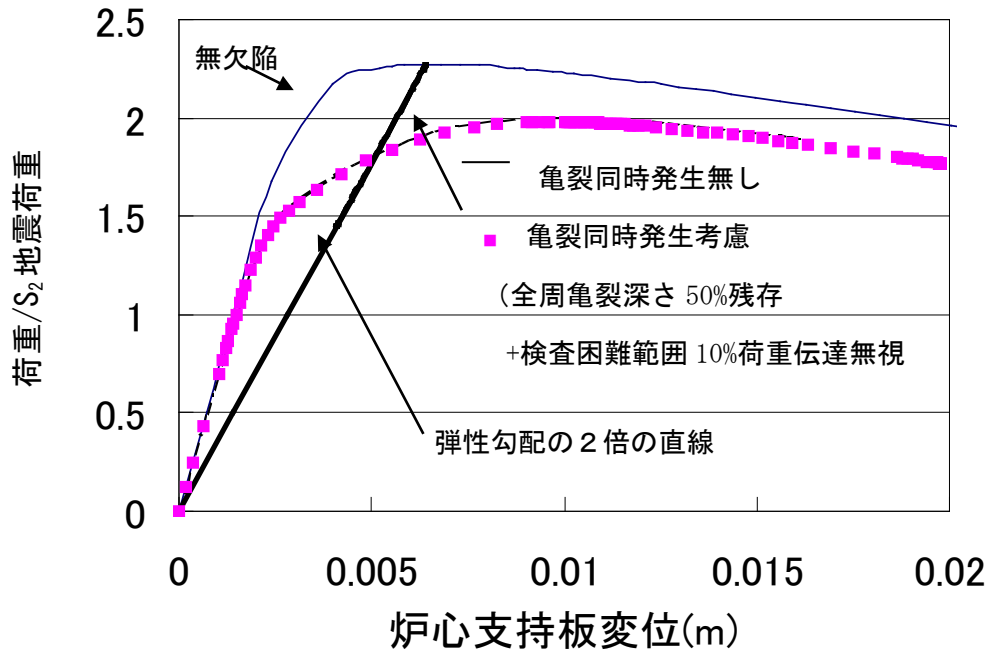


補図 D-15 考慮した軸方向多数亀裂



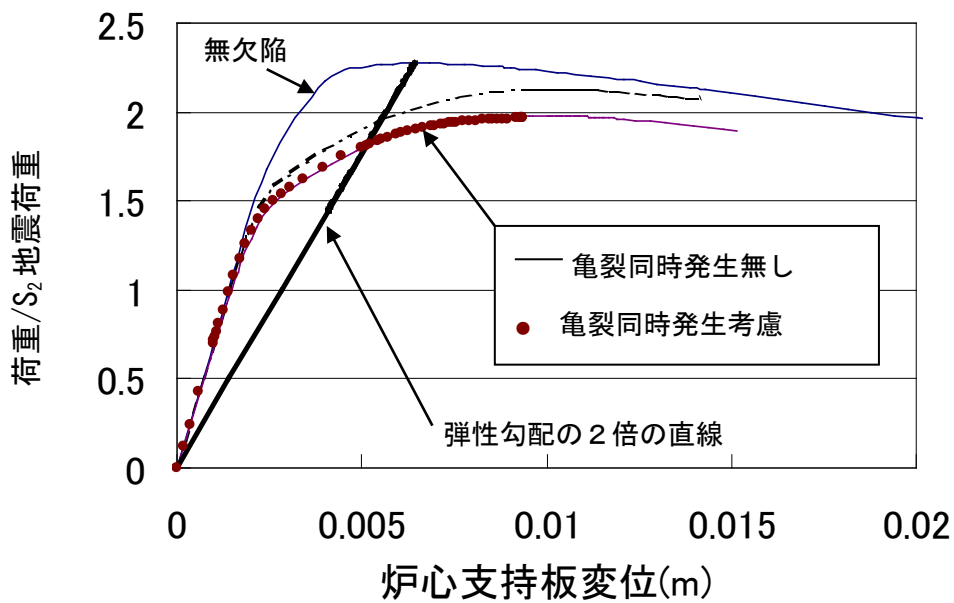
補図 D-16 軸方向多数亀裂を考慮した場合の影響

解析ケース	H7a 周継手の亀裂		V7 縦継手の亀裂残存面積
	全周（亀裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
5. H7a, v7 同時亀裂の影響	50%	全周の 10%	10%



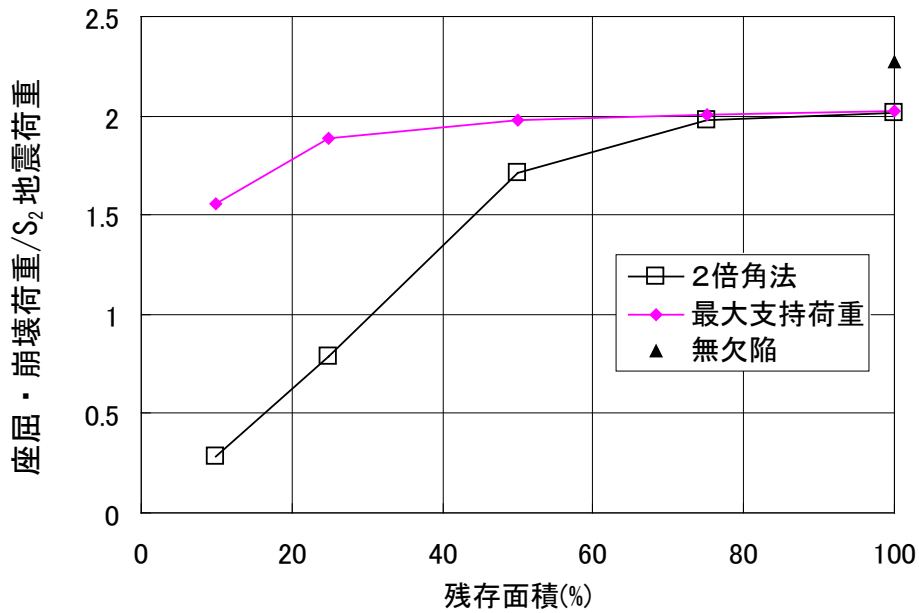
補図 D-17 H7a, V7 同時亀裂の場合の影響

解析ケース	H7a, H7b 周継手の亀裂		V7 縦継手の残存面積
	全周（亀裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
6. H7a, H7b 同時亀裂の影響	50%	全周の 10%	10%



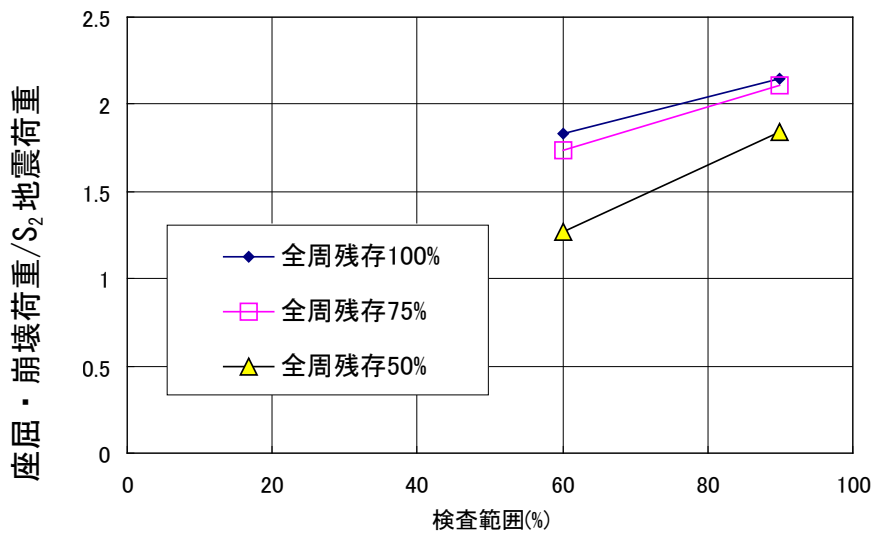
補図 D-18 H7a, H7b 同時亀裂の場合の影響

解析ケース	H6b 周継手の亀裂		V7 縦継手の残存面積
	全周（亀裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
7. H6b 亀裂の影響	100%, 75%, 50%, 25%, 10%	全周の 40%	100%



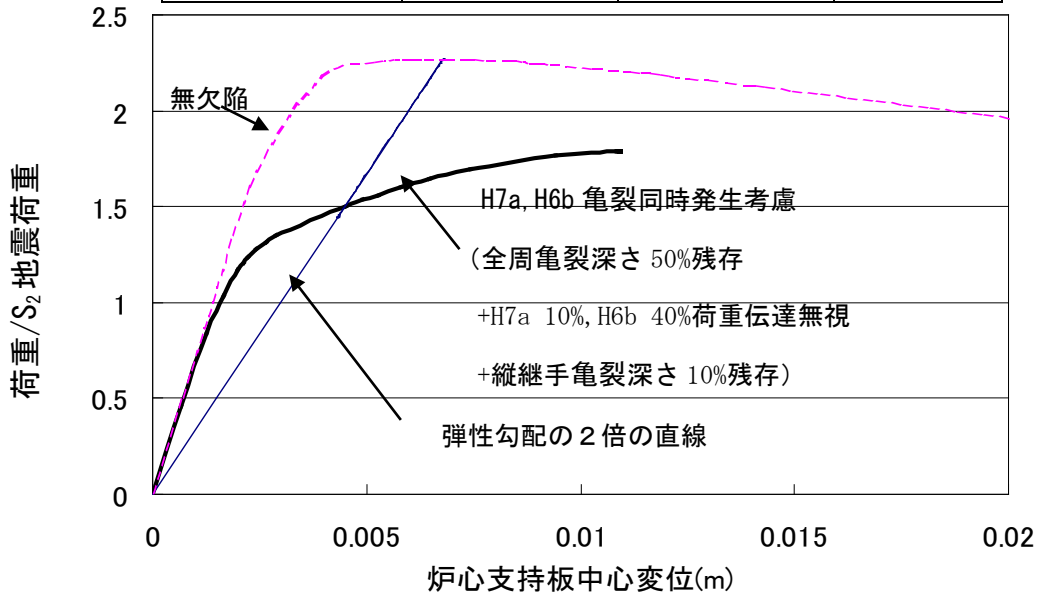
補図 D-19 H6b 周方向溶接部の亀裂の影響

解析ケース	H7a 周継手の亀裂		V7 縦継手の残存面積
	全周（亀裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
8. H7a 検査範囲削減の影響	100%, 75%, 50%	全周の 10%, 40%	100%

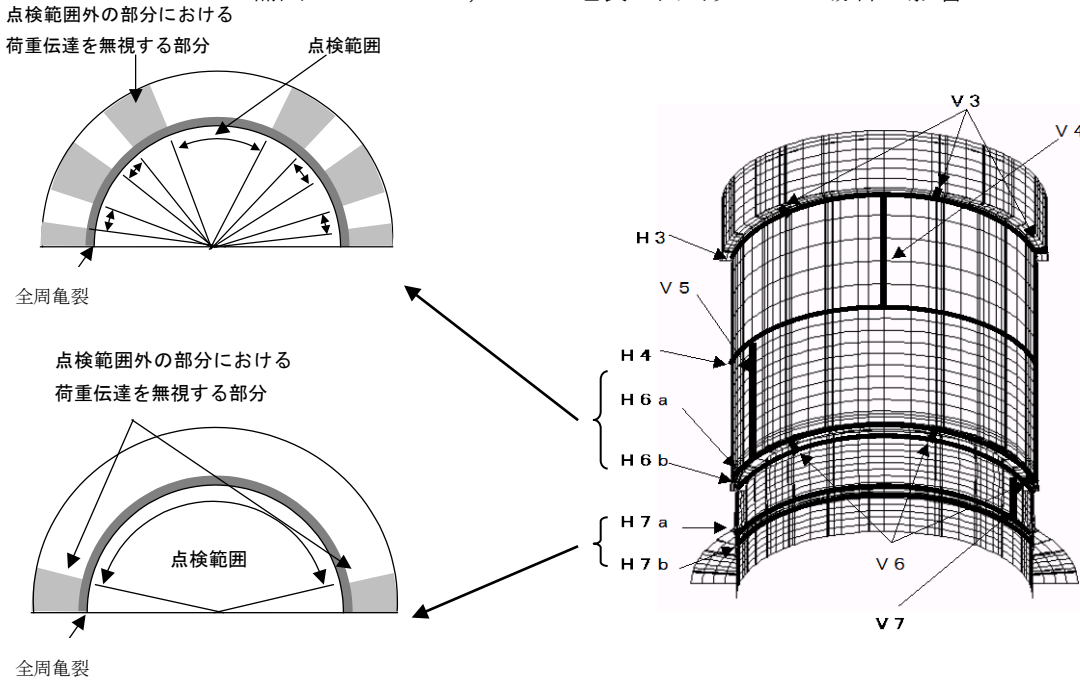


補図 D-20 H7a 周方向溶接部の検査範囲を削減した場合の影響

解析ケース	H7a, H6b 周継手の亀裂		V7 縦継手の残存面積
	全周 (亀裂) 残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
9. H7a, H6b 同時亀裂発生の影響	50%	全周の 10%, 40%	10%



補図 D-21 H7a, H6b に亀裂が同時発生した場合の影響



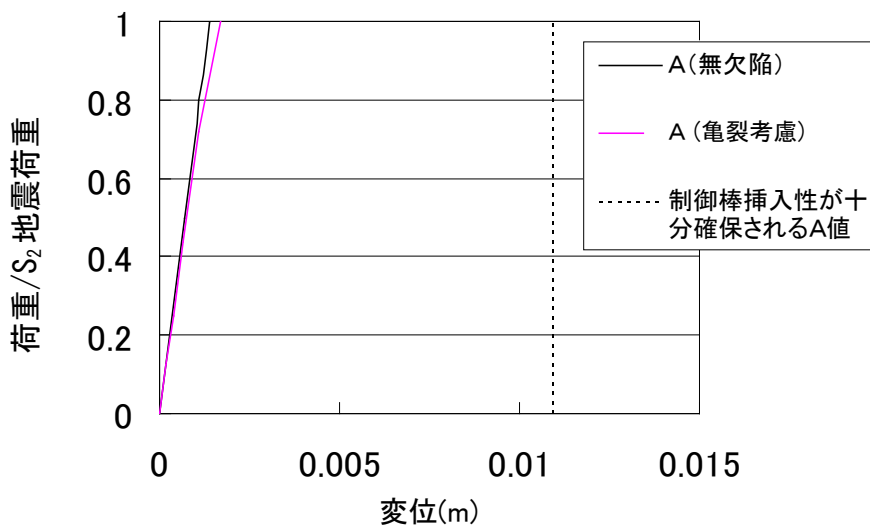
周継手部				縦継手部	
位置	想定亀裂			位置	想定亀裂
H3	全周亀裂	亀裂深さ	50%	V3	溶接線全長に渡る亀裂 亀裂深さ 90% =10%残存
H4	荷重伝達無視			V4	
H6a	全周亀裂	亀裂深さ	50%	V5	
H6b	荷重伝達無視			V6	
H7a	全周亀裂	亀裂深さ	50%	V7	
H7b	荷重伝達無視				

補図 D-22 制御棒挿入性に対し想定した亀裂

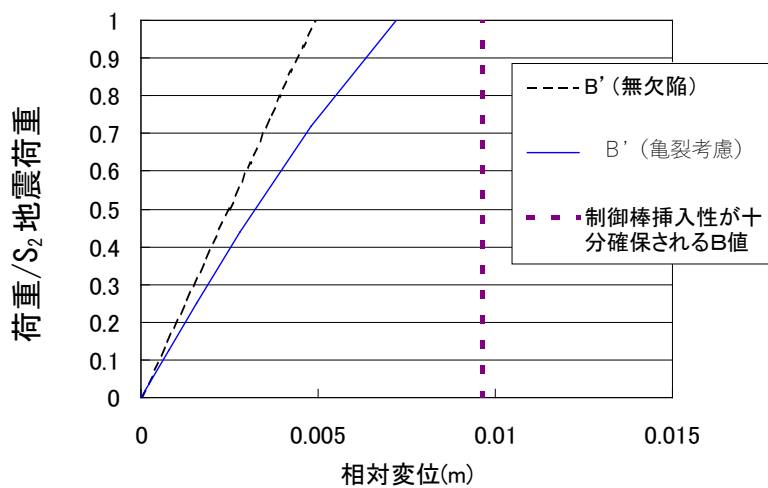


解析・試験により制御棒挿入性を  
確認したミスアライメント

シュラウドの想定亀裂による地震時の  
ミスアライメント

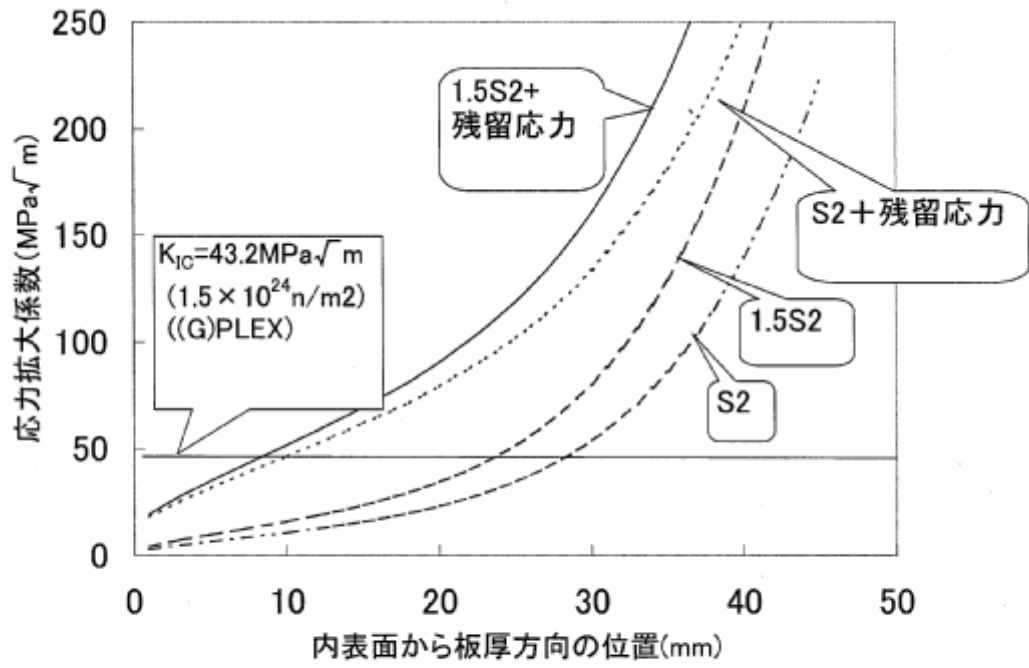


(a) 炉心支持板の変位



(b) 炉心支持板と上部格子板の相対変位

補図 D-23 制御棒挿入性に対する亀裂の影響



補図 D-24 応力拡大係数 K と破壊靱性  $K_{IC}$  の比較

## 参考資料 D-1 残留応力が座屈・崩壊荷重に与える影響

### 1. 目的

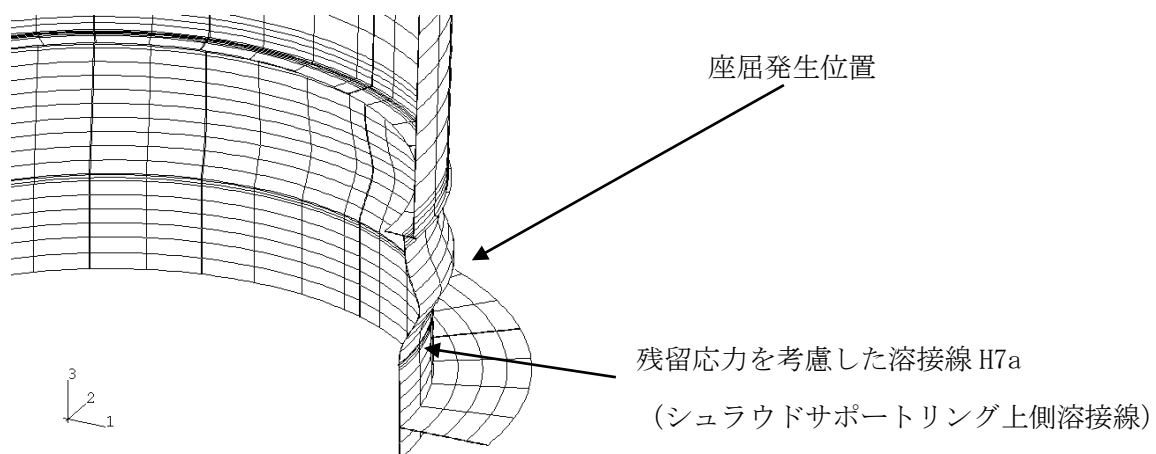
シュラウド溶接部の残留応力が座屈・崩壊荷重に与える影響を検討する。

### 2. 検討方法

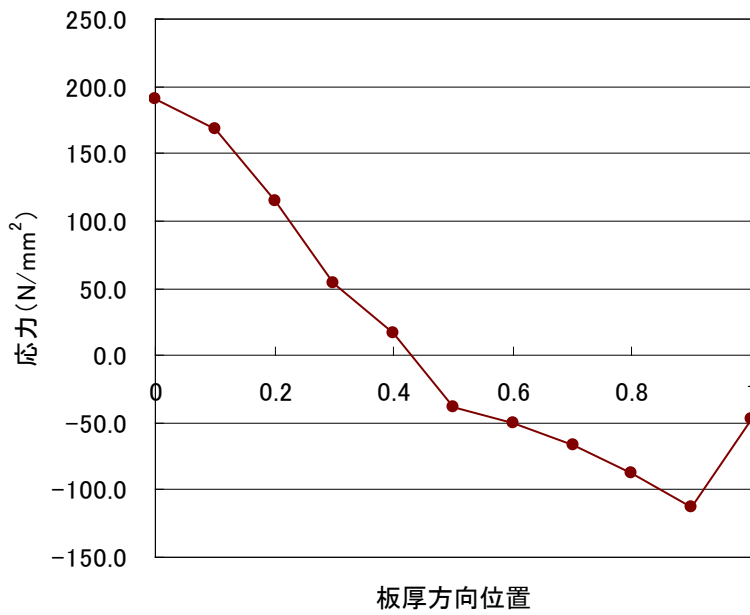
シュラウド解析モデルの溶接線 H7a (参考図 D-1-1 参照) に溶接残留応力相当の応力が発生した状態で、座屈・崩壊解析を実施し、座屈・崩壊荷重の低下を比較した。残留応力は、仮想的な温度分布と線膨張係数を溶接線に与えることにより発生させた。座屈・崩壊解析は保守側に  $2.3S_m$  を弾性限界とした完全弾塑性モデルで実施しており、本解析においても加工硬化による座屈・崩壊荷重の増加が無いよう同一の応力ひずみ関係を用いている。比較は残留応力の効果が最も大きくなると考えられるシュラウドに亀裂が無い状態で実施した。

### 3. 検討結果

溶接線 H7a 部に与えた軸方向残留応力分布を参考図 D-1-2 に示す。残留応力解析から得られた分布形状とほぼ相似形となっている。この残留応力分布が存在する状態で、自重、差圧、 $S_2$  地震荷重が加わった場合の座屈崩壊解析を実施した。解析結果を参考図 D-1-3 に残留応力を考慮しない場合と比較して示す。残留応力が存在する場合、座屈後の荷重低下は影響を受けるが、座屈・崩壊荷重にはほとんど影響が無いことが確認された。

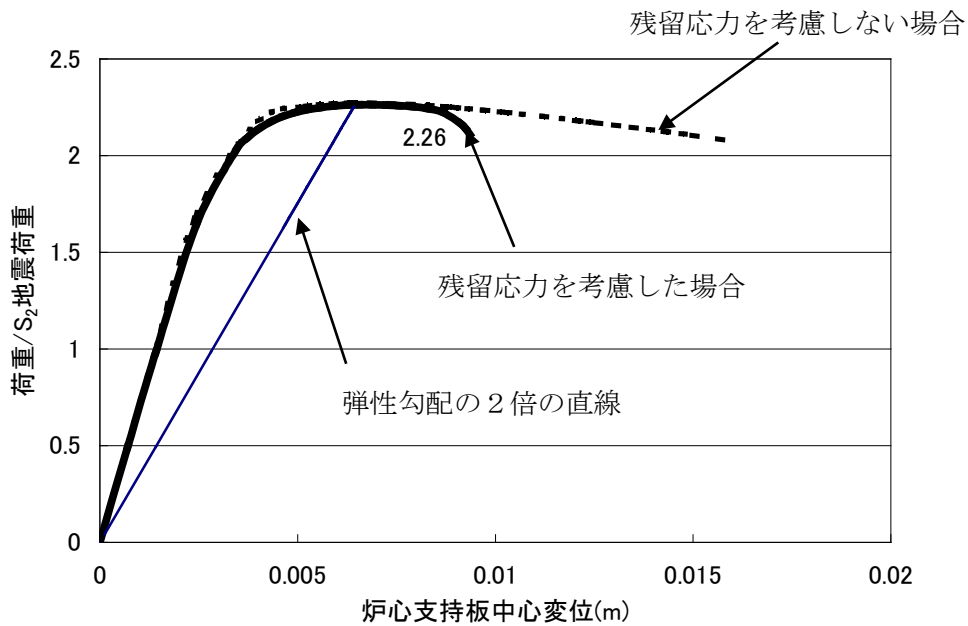


参考図 D-1-1 残留応力を考慮した溶接線 H7a



評価温度 (°C)	完全弾塑性における弾性限界 (N/mm <sup>2</sup> )
302	218.0

参考図 D-1-2 溶接線 H7a に考慮した軸方向残留応力の板厚内分布



	座屈・荷重崩壊 (荷重/S <sub>2</sub> 地震荷重)
残留応力を考慮しない場合	2.27
残留応力を考慮した場合	2.26

参考図 D-1-3 残留応力の有無による座屈・崩壊荷重の比較

## II. シュラウドの崩壊評価法の裕度の定量的評価

### 1. 概 要

シュラウドは設計時に CSS-3160（日本機械学会 設計・建設規格）に準拠し崩壊荷重を算出し、その 0.9 倍を許容応力としている。一方、従来の炉内構造物点検評価ガイドラインにおいては、設計時と同様の極限解析により崩壊荷重を算出し、安全率 1.5 を考慮し許容応力を算出している。

安全係数を 1.5 とした理由は、当時破壊に至るまでの亀裂部の挙動が不明であったためであるが、現在では、シュラウドはオーステナイト系ステンレス鋼製であり延性が高いこと、延性材料では亀裂は進展せずに大きく塑性変形して破断する（塑性崩壊）ことが知られている。さらに、過去に実施した研究により、亀裂が存在した場合においても、亀裂部の急速な進展による破壊は発生せず、大きく塑性変形した後に破断することが確認され、残存面積に対する崩壊荷重で上述の挙動が評価できることを確認されている。

上述のことから、シュラウドの評価では、設計・建設規格と同等に崩壊荷重の 0.9 倍を許容値（安全率  $1/0.9=1.11$ ）とすることとした。

### 2. シュラウドの崩壊評価法の裕度の定量的評価方法

ガイドラインにおいては、亀裂を有するシュラウドの崩壊荷重の許容値は、大変形弾塑性解析により荷重－変位関係を求め、初期弾性勾配の二倍の傾きを持つ直線との交点を崩壊荷重とし、規格上の許容値は求めた崩壊荷重に安全係数 1.5 を見込んで定められる。図 D-25 に荷重変位関係と裕度の関係を示す。図 D-25 から分かるように、現行評価法の裕度は、2 倍勾配法の裕度、材料のモデル化の裕度、安全係数 1.5 が含まれたものと推定できる。

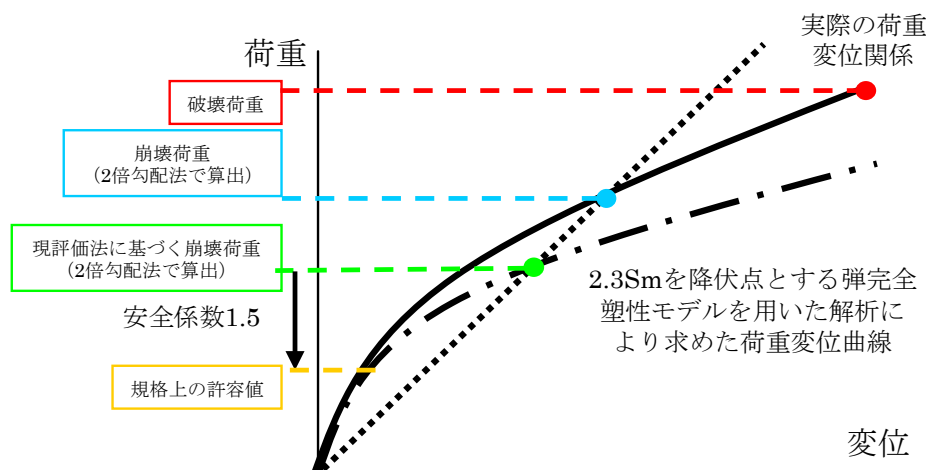


図 D-25 荷重変位関係と裕度の関係

### 3. 試験体と試験条件

シュラウドを模擬した 3 体の試験体に深さの異なる亀裂を導入し、水平方向荷重を負荷する静的荷重試験を実施した。表 D-7 の通り、3 体の試験体には模擬亀裂として深さ 75% (残存面積 25%), 67% (残存面積 33%), 50% (残存面積 50%) の EDM スリットを外周全周に付与した。試験装置を図 D-26 に、試験体を図 D-27 に示す。試験体は SUS316L 製で、シュラウドを模擬し  $R/t=50$  とした。各試験体には、対板厚比で示した深さの亀裂を、固定端フランジから 20mm の位置の外面に全周にわたって放電加工により導入した。

また、同一の亀裂が与えられた場合における荷重変位曲線のばらつきを比較するため、表 D-8 に示したように、同一形状、同一な亀裂を付与したシュラウド模擬試験体を 4 体準備し破壊試験を実施した。さらに、このばらつきの影響を検討するため、表 D-8 に示す模擬亀裂と同様の亀裂深さ 67%を有する試験体を対象とした実際の応力ひずみ関係を用いた再現解析を実施することとした。

表 D-7 試験条件

試験 No.	試験種別	亀裂深さ (外側全周亀裂)	荷 重
A	静的曲げ試験	板厚の 75%	座屈・崩壊が発生するまで負荷
B		板厚の 67%	
C		板厚の 50%	

表 D-8 試験条件

試験体 No.	試験種別	亀裂深さ (外周全周亀裂)	荷 重
1	静的曲げ試験	板厚の 67%	崩壊が発生するまで負荷
2			
3			
4			

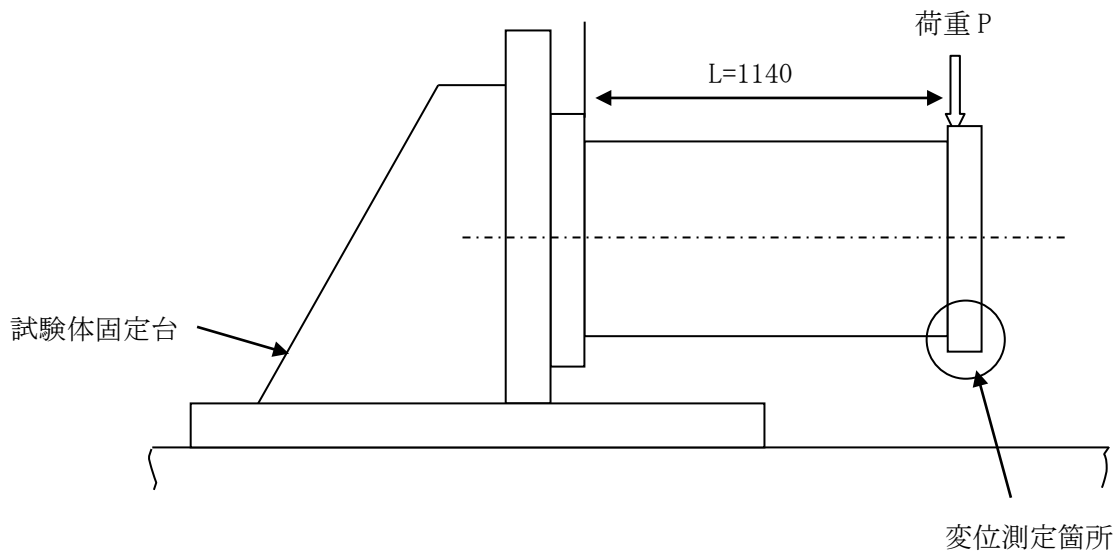


図 D-26 試験装置

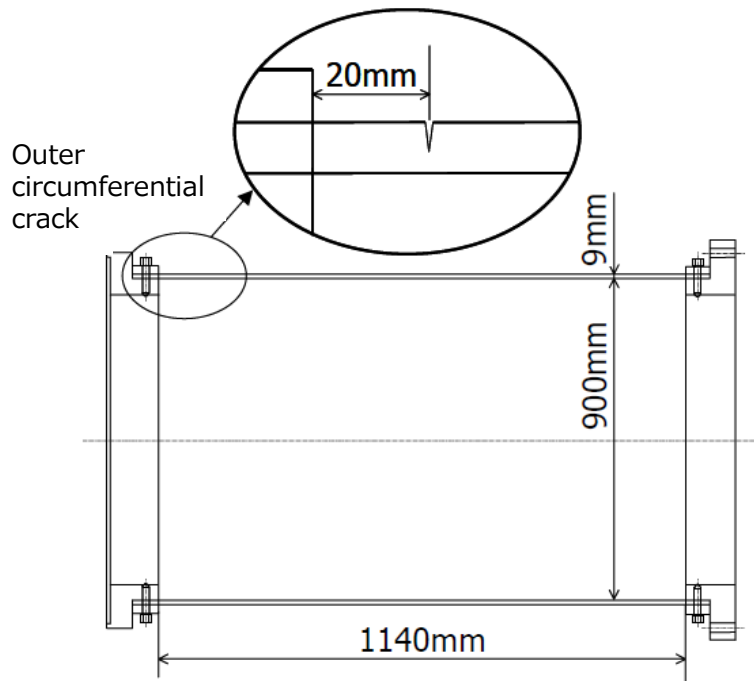


図 D-27 試験体

#### 4. 試験結果及び評価

図 D-28 に試験で得られた荷重－変位関係を示す。いずれの亀裂深さにおいても、亀裂部の急速な進展による破壊ではなく、大きく塑性変形した後に破断することが確認された。

図 D-29 に同一の亀裂を与えた試験体 4 体に対して実施した試験結果と再現解析の結果を、表 D-9 に試験で得た破壊荷重及び崩壊荷重と解析結果より得られた崩壊荷重を示す。同様の亀裂を与えた 4 体の試験体に対して実施した試験の結果得られた崩壊荷重は、試験体毎のばらつきが小さいことが確認された。また、4 体の荷重－変形曲線と今回の解析モデルにより得られた荷重－変形曲線の変位挙動が一致していることが確認された。このことから、実際の応力ひずみ関係を用いた FEM 解析により破壊試験で得られた荷重変位挙動を評価でき、残存断面積に対する崩壊荷重で評価できることが確認された。したがって、シュラウドの評価においては、設計・建設規格と同等の崩壊荷重の 0.9 倍を許容値（安全係数としては、 $1/0.9=1.11$ ）とすることとした。

#### 5. まとめ

シュラウドの評価では、設計・建設規格と同等の崩壊荷重の 0.9 倍を許容値（安全係数としては、 $1/0.9=1.11$ ）とし、評価が可能であることを示した。

#### （参考文献）

- (1) Mitsuhashi, T., et al., “Rational Evaluation Method of Structural Integrity for Core Shroud with Cracks (1. Fracture testing of small scale mock-ups)”, M&M2013-OS1412, JSME, (2013)
- (2) Ebato, S., et al., “Development of The Rational Evaluation for Core Shroud with Cracks (2. Development of Statistical Structural Reliability Evaluation Method Combined with DOE and Monte Carlo Method)”, M&M2013-OS1413, JSME, (2013)
- (3) Fujino, T., et al., “Development of The Rational Evaluation for Core Shroud with Cracks (3. Criteria for Integrity Evaluation Based on Quantification of Margin Included in the Present Evaluation Method)”, M&M2013-OS1414, JSME, (2013)
- (4) Dozaki, K., et al., “Evaluation Method of Structural Integrity for Cylindrical Internal Structure with Cracks”, pp 380-384 summary of 3rd Annual Conference, Japan Society of Maintenology

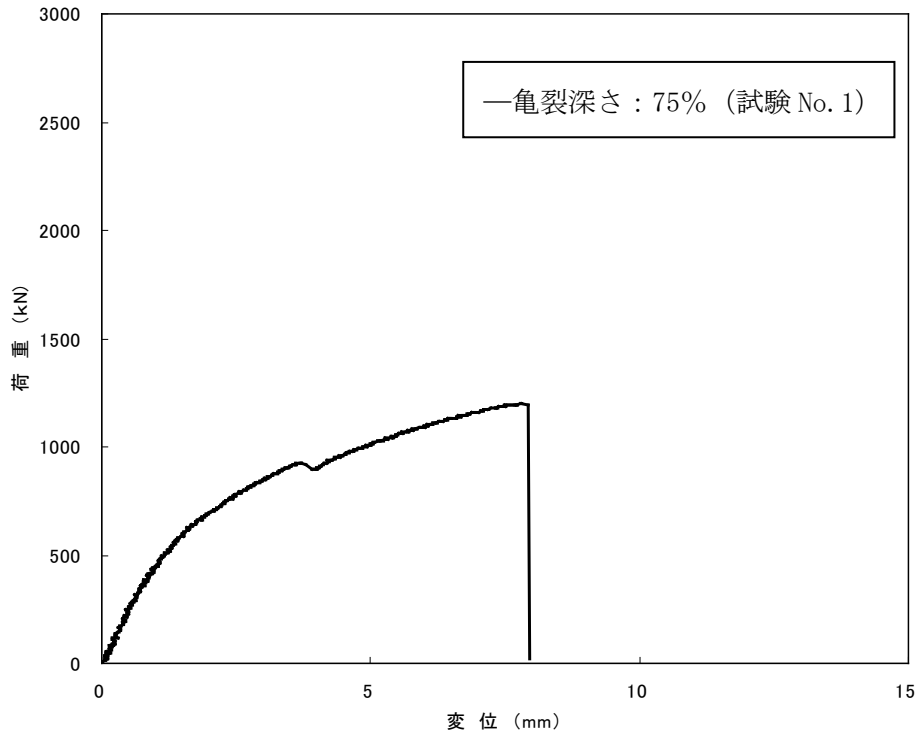


図 D-28 (1/3) 亀裂深さ 75%における荷重変位関係

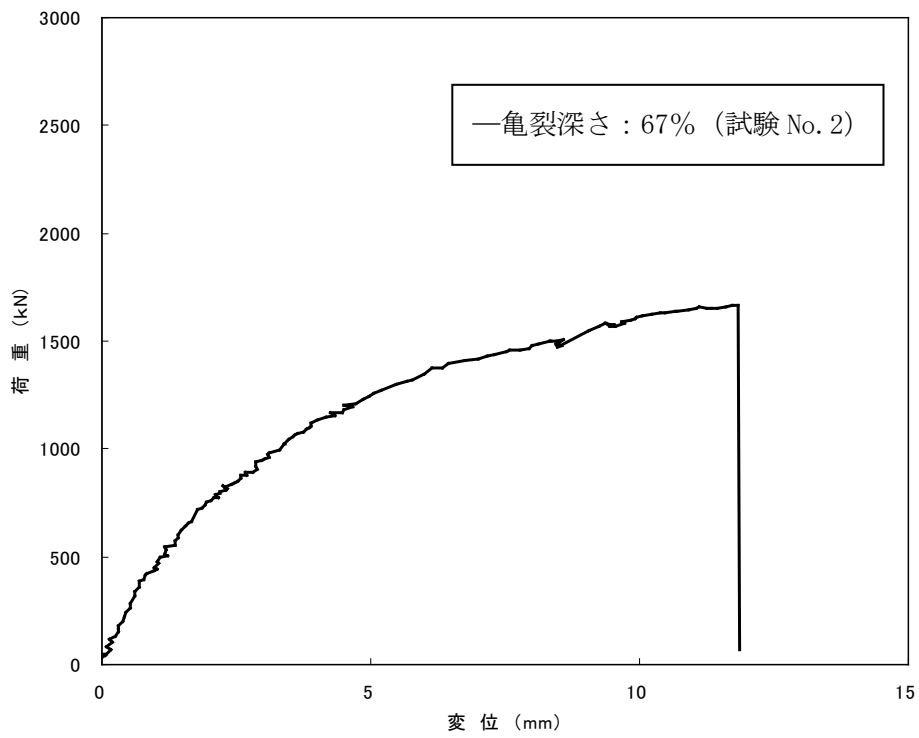


図 D-28 (2/3) 亀裂深さ 67%における荷重変位関係

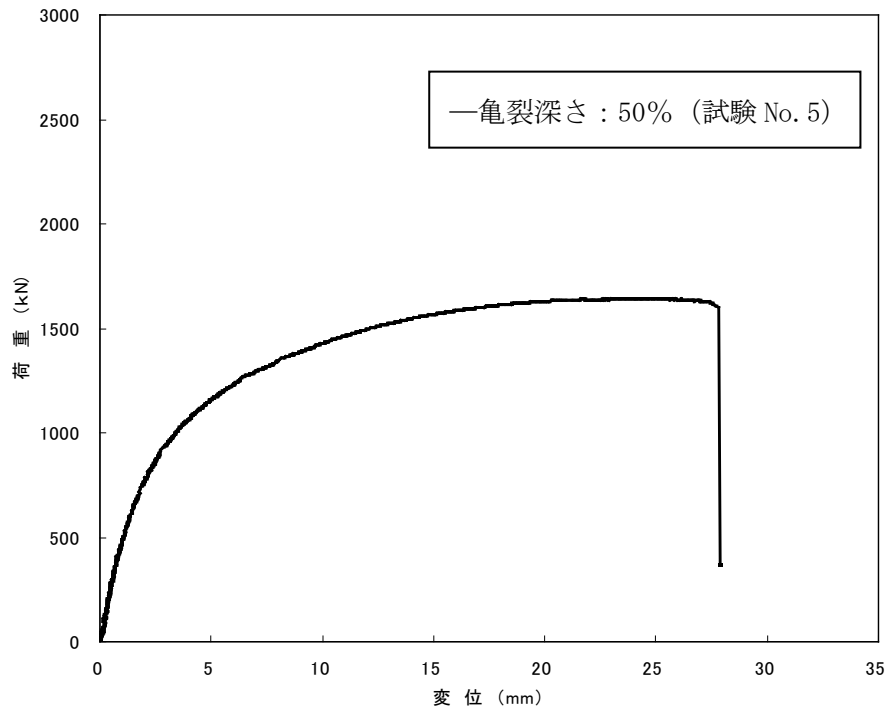


図 D-28 (3/3) 亀裂深さ 50%における荷重変位関係

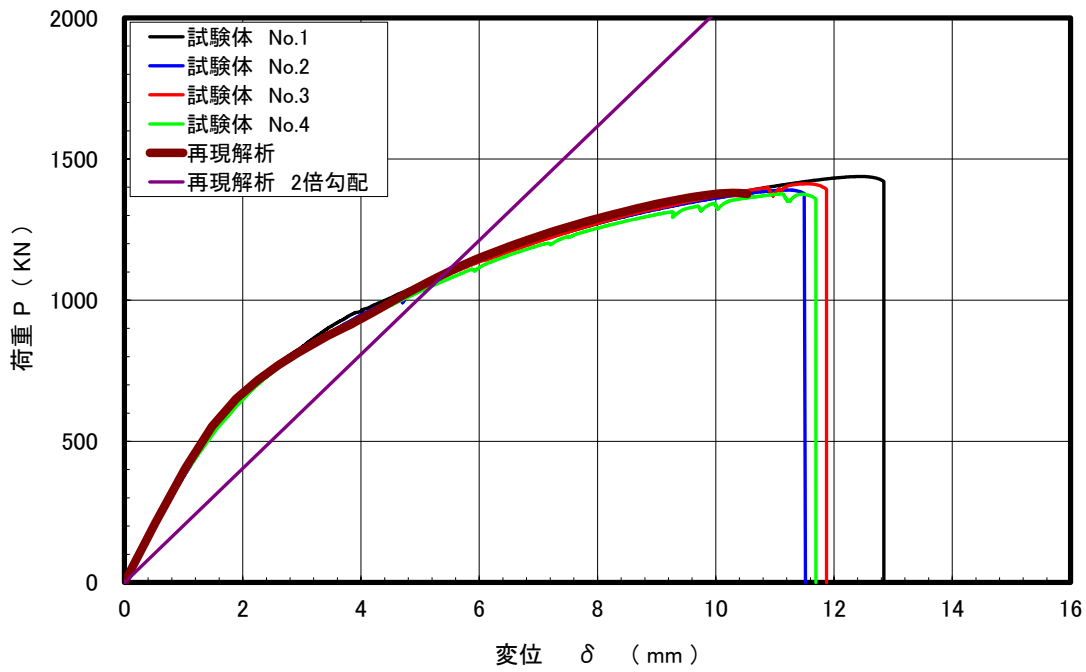


図 D-29 試験及び再現解析により得られた荷重変位関係

表 D-9 試験で得た破壊荷重及び崩壊荷重と解析結果より得られた崩壊荷重

	破壊荷重 (kN)	崩壊荷重 (kN)
試験体 No.1	1438	1085
試験体 No.2	1391	1084
試験体 No.3	1413	1076
試験体 No.4	1377	1049
再現解析	—	1094

## 参考資料 D-2 シュラウド欠陥裕度評価の妥当性検証

### 1. 概 要

シュラウドのように比較的単純な円筒形状に近い構造であっても配管に比べて半径/板厚比(R/t)が大きい場合に、亀裂を有する構造物への2倍勾配法の適用性を試験により検証するため、実機条件を模擬した試験を行った。

### 2. 崩壊荷重の評価方法

ガイドラインにおいては、亀裂を有するシュラウドの崩壊荷重の許容値は、大変形弾塑性解析(H7 溶接継手に亀裂を想定)により荷重-変位関係を求め、初期弾性勾配の二倍の傾きを持つ直線との交点を崩壊荷重とする。なお、規格上の許容値は、上記で求めた崩壊荷重に安全係数1.5を見込んで定めた。

### 3. 試験体と試験条件

実機シュラウドのおよそ1/5スケールの大きさの円筒形試験体を用いて、一端を固定し、他端に横荷重を負荷し、荷重-変位関係を求める単調負荷試験(3体)を実施した。試験装置を参考図D-2-1に、試験条件を参考表D-2-1にそれぞれ示す。参考図D-2-2に示すように、試験体はSUS316L製で、シュラウドを模擬しR/t=50とした。各試験体には参考表D-2-1に対板厚比で示した深さの亀裂を、固定端フランジから20mmの位置の外面に全周にわたって放電加工により導入した。

参考表 D-2-1 試験条件

試験 No.	試験種別	亀裂深さ (外側全周亀裂)	荷 重
1	静的曲げ試験	板厚の 75%	座屈・崩壊が発生するまで負荷
2		板厚の 67%	
3		板厚の 50%	

#### 4. 試験結果及び評価

参考図 D-2-3 に、亀裂深さ 67% の場合 (試験体 No. 2) について、試験で得られた荷重－変位関係を示すとともに、2 項で述べた崩壊荷重の評価方法にしたがって求めた荷重－変位曲線及び評価上の崩壊荷重 (2 倍勾配線との交点) を合わせて示した。試験で得られた最大荷重が約 1600kN であったのに対し崩壊荷重の評価値は 821kN であったことから、崩壊荷重の評価方法は試験結果に対して保守的な評価を与えることがわかった。

#### 5. まとめ

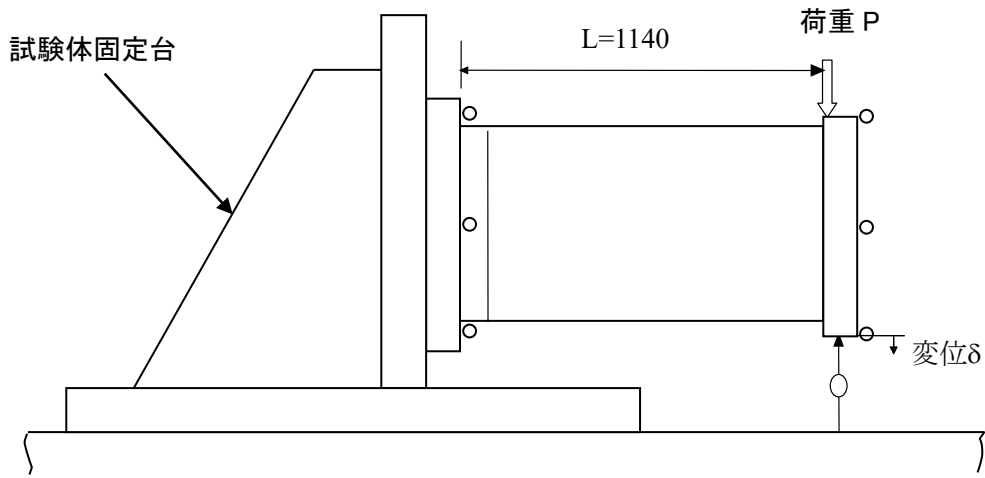
シュラウドを模擬した亀裂を有する円筒の座屈・崩壊挙動は、ガイドラインの評価方法 (2 倍勾配法) で保守的に推定できることを試験により確認した。

なお、独立行政法人原子力安全機構 (JNES) は、経年設備の耐震安全性評価手法の整備の一環として、高経年化に伴う亀裂を想定したシュラウドの振動試験等を行って、維持規格適用下での耐震安全裕度を確認するとともに、亀裂を有するシュラウドに対する耐震強度評価手法の整備を実施している。この中で、H7 溶接線位置のリング側全周に 80% 深さの模擬欠陥を有するシュラウド胴部試験体を用いた静的負荷試験を実施し、解析結果に基づいた 2 倍勾配法による許容荷重との比較を行い、評価方法は十分保守的な結果を与えることを確認している。

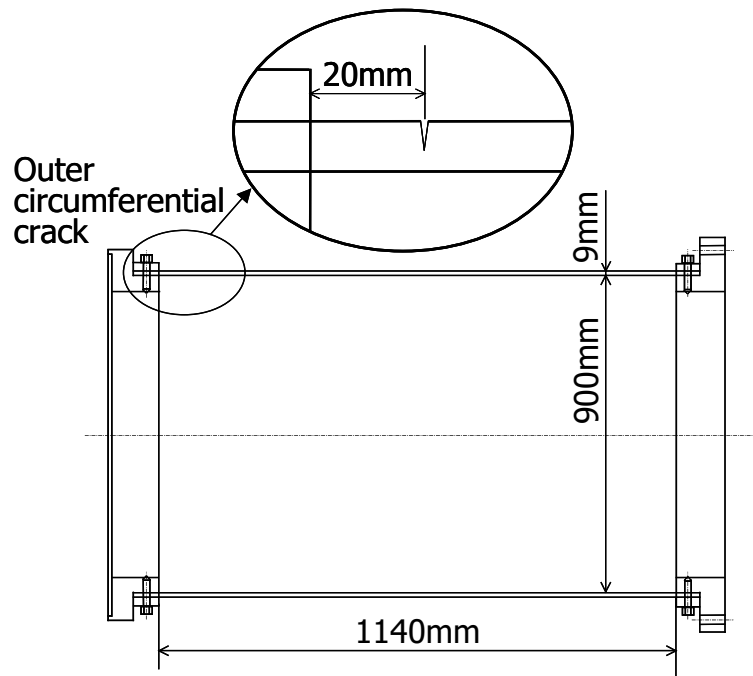
#### (参考文献)

- (1) 堂崎浩二“、亀裂を有する円筒形炉内構造物に対する構造健全性評価方法について”、日本保全学会第 3 回学術講演会要旨集、2006、pp380-pp384
- (2) K. Dozaki, ”Comparison of Design Margin for Core Shroud in between Design and Construction Code and Fitness-for-Service Code”, ICONE15-10809, Nagoya, Japan, April 2007
- (3) 07 基構報-0011 「平成 18 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 経年設備耐震 その 1 (炉内構造物) に係る報告書、平成 19 年 3 月、独立行政法人原子力安全基盤機構

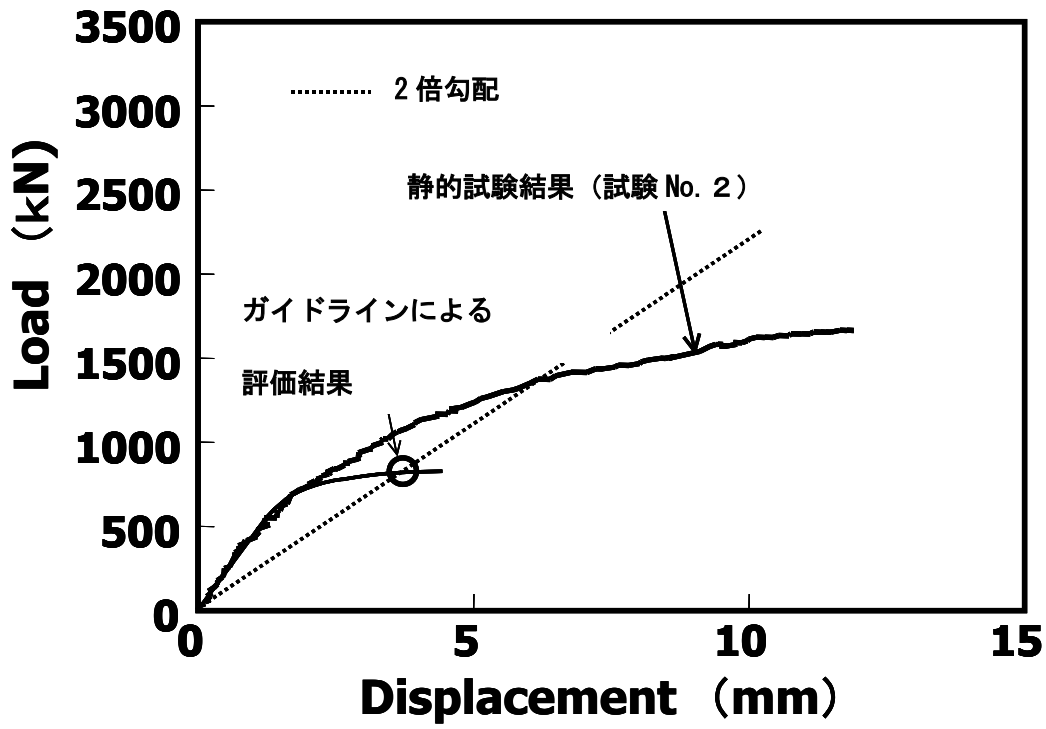
○ : 変位測定位置



参考図 D-2-1 試験装置



参考図 D-2-2 試験体



参考図 D-2-3 静的曲げ試験結果

### 参考資料 D-3 繰り返し荷重試験に対するシュラウドの裕度確認（実力評価）

シュラウド欠陥裕度評価の妥当性検証に記載した試験条件（参考資料 D-2）において，参考表 D-3-1 に示す試験体を製作し，地震時の繰り返し荷重の影響を調べるために繰り返し荷重試験を実施した。

参考表 D-3-1 試験条件

試験 No.	試験種別	亀裂深さ (外側全周亀裂)	荷 重
1	繰り返し荷重試験	板厚の 67%	安全率を考慮した許容荷重*の 1.5 倍の荷重
2		板厚の 67%	安全率を考慮した許容荷重*の 0.8 倍の荷重

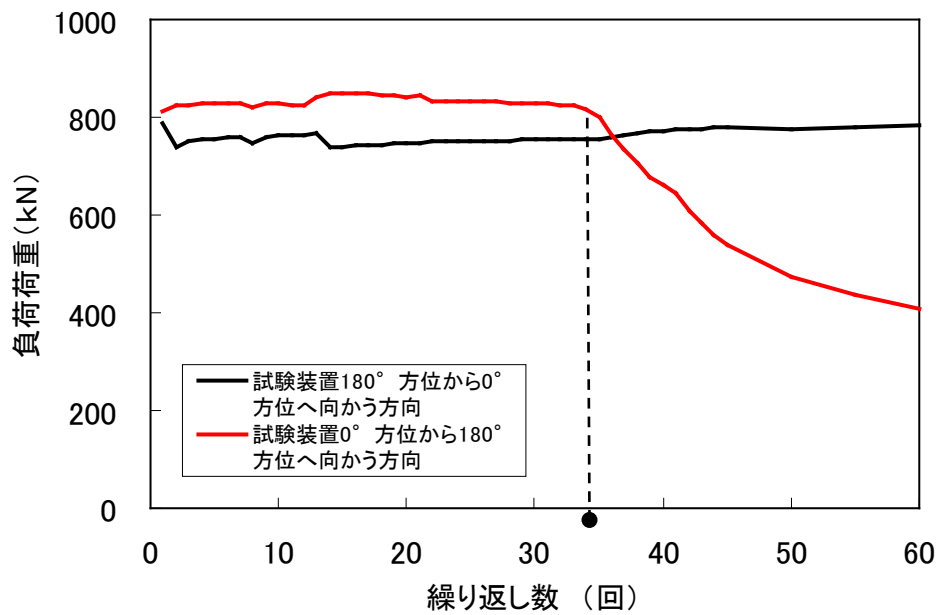
\*）設計・建設規格記載  $S_m$  値の 2.3 倍の値を降伏点とする弾完全塑性モデルにより求めた座屈・崩壊荷重に安全率（1.5）を考慮した許容荷重

#### ・試験結果及び評価

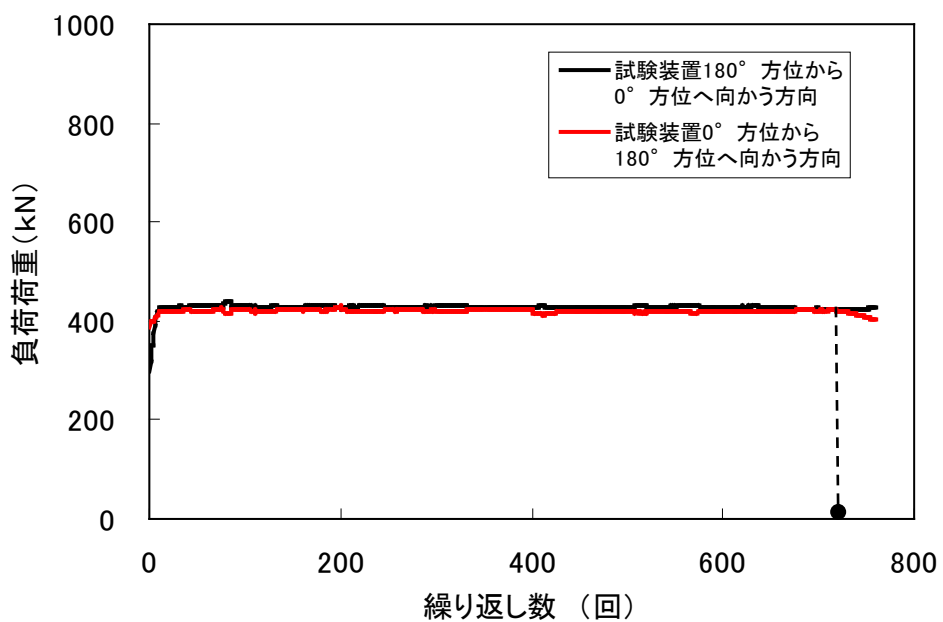
繰り返し試験においては，亀裂深さ 67%の試験体を 2 体用いて，異なる荷重範囲をねらいとして変位制御により繰り返し負荷し，荷重低下が生じ始めたサイクルを限界サイクル数とした。ねらいとする荷重範囲の設定に当たっては，崩壊荷重の評価方法に基づいて得られた評価値（821kN，許容値の 1.5 倍），及び，荷重範囲と限界サイクル数の関係がわかるように許容値の 0.8 倍（評価値の 0.53 倍）に設定した。

参考図 D-3-1 及び参考図 D-3-2 にそれぞれの条件における繰り返し負荷試験結果を示す。試験体 No. 1 では，荷重範囲は平均で 832kN であり，限界サイクル数は 34 であった。試験体 No. 2 では，荷重範囲は平均で 429kN であり，限界サイクル数は 730 であった。

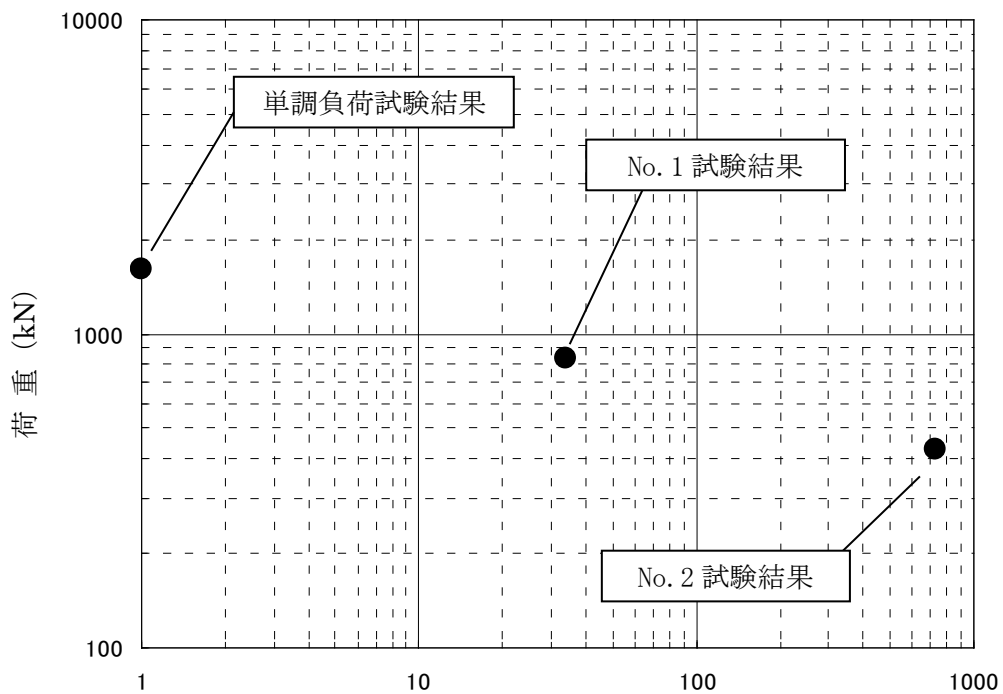
これらの繰り返し負荷試験結果を，限界サイクル数と荷重範囲の關係に整理すると参考図 D-3-3 のようになった。図中には，繰り返し負荷試験結果とともに，（参考資料 D-2）シュラウド欠陥裕度評価の妥当性検証に記載した同じ亀裂深さ条件の単調負荷試験における最大荷重を，サイクル数 = 1 としてプロットしてある。



参考図 D-3-1 繰返し負荷試験結果 (試験 No. 1)



参考図 D-3-2 繰返し負荷試験結果 (試験 No. 2.)



荷重低下までの繰り返し回数

参考図 D-3-3 荷重と荷重低下までの繰り返し回数の関係  
(外側全周亀裂, 亀裂深さ: 板厚の 67%)

## 付録E 評価方法（シュラウド評価の一連の流れ）

### 1. 欠陥裕度評価

#### 1.1 解析モデル

解析には ABAQUS 等の弾塑性大変形解析が実施可能な汎用有限要素法解析コードを用いる。シュラウド構造は、シュラウドサポートの上部に設置される円筒型の胴及びリングを溶接した構造であるため、これを 3 次元シェル要素を用いてモデル化する。形状及び荷重が対称性を有する場合、モデル化は対称性を考慮して 180 度の部分でも良い。シュラウド構造の概要を図 E-1 に、解析モデルの例を図 E-2 に示す。基本的に胴部は鉛直のシェル、リング部は水平のシェルとする。モデル化の範囲は、適正な拘束条件を与えるためシュラウドサポートのシリンダ及びプレートまでモデル化しプレートの外周（原子炉容器との接合部）とシリンダの下部（シュラウドサポートレグ付け根）を固定点とする。

シュラウド基部の象足形座屈を解析するため、メッシュ分割数は表 E-1 に示す目安以上とする。

#### 1.2 解析手順

シュラウドサポートに作用する最大荷重は地震荷重であることから、自重、運転時差圧に加え地震荷重を負荷する。地震荷重は、水平、上下及びモーメントをそれぞれ上部格子板、炉心支持板の位置で負荷し、これを比例倍することで弾塑性解析を実施する。運転時差圧は、シュラウドの内面に圧力荷重としてモデル化する。また、自重は比重と重力加速度を与えることにより、シュラウドへ分布荷重としてモデル化する。

解析に用いた荷重を表 E-2 に示す。荷重は、1100MWe BWR 全プラントの設計荷重を包絡するもっとも大きな値を採用した。荷重の負荷位置を図 E-3 に示す。

解析は上記荷重を負荷した荷重制御の大変形弾塑性解析を行う。座屈後の荷重低下が得られよう、修正 Riks 法（弧長増分法）等を用いる。

#### 1.3 物性値

材料物性は JSME 設計・建設規格 2005（2007 追補）より算出した値を使用し、2 直線の完全弾塑性近似モデルとする。これらの物性値を表 E-3 示す。解析温度は運転温度とする。

#### 1.4 亀裂の想定

点検困難範囲における荷重伝達の考え方を以下のように設定する。

- a. 点検可能な範囲については、板厚方向の亀裂を模擬する。

b. 点検が困難な範囲に関しては荷重伝達を無視する。

点検可能な範囲の亀裂のモデル化は亀裂想定箇所の要素の板厚を薄くすることでモデル化し、荷重伝達を無視する場合は要素の結合を切り離すことによりモデル化する。

周継手における荷重伝達を無視する場合の範囲を図 E-4 に示す。荷重伝達無視範囲の位置は地震荷重の加わる方向に存在すると仮定する ( $0^\circ$  方向及び  $180^\circ$  方向の両方に同時に存在すると仮定する)。

縦継手については、胴部の軸方向溶接線全長に渡る亀裂を想定し、周継手の荷重伝達無視範囲を考慮の上荷重を保守側に算出する方位となるようモデル化する。なお、荷重伝達を無視する範囲及び縦継手の位置に関しては上記に代えて評価対象に応じて保守側モデル化となるよう適切に設定しても良い。

#### 1.5 座屈及び崩壊の定義

解析結果による弾塑性の荷重－変位曲線における最大荷重支持点を座屈点、弾塑性の荷重－変位曲線と弾性勾配の 2 倍の直線が交わる点を崩壊点 (2 倍勾配法) とし、そのいずれか小さい変位を制限値とする。座屈点及び崩壊荷重の定義を図 E-5 に示す。

図 E-6 に上記解析の手順を示す。

表 E-1 要素分割の目安

	要素分割の目安	備考
軸方向分割	2 次要素を用いる場合は、固定端部の象足形座屈変形が発生する円筒の軸方向範囲に対して 5 要素以上の分割とする。	象足形の座屈変形は円筒下部から $3.0\sqrt{Rt}$ $R$ : 円筒半径 $t$ : 板厚 程度の領域に生じる。
周方向分割	要素の形状比が悪くならない程度に分割する。	—

表 E-2 荷重条件 (荷重合計)

想定する荷重		鉛直力	水平力	モーメント	圧力
		V (kN)	H (kN)	M(kN・m)	P (Pa)
通常運転時の荷重	死荷重	1880	—	—	—
	差圧	—	—	—	0.068 <sup>(1)</sup> 0.245 <sup>(2)</sup>
地震時の荷重	地震荷重 S <sub>2</sub>	745	14711	102974	—

(1) 上部格子板と炉心支持板の間

(2) 炉心支持板より下部

表 E-3 構造強度解析に用いる物性値

材 質	温度 (°C)	Sm (MPa)	完全弾塑性 における 弾性限界 (=2.3Sm) (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	加工硬化係 数 h' (MPa) E/1000
SUS316L	20	118	271.4	195000	195
	75	115	264.5	191000	191
	100	115	264.5	190000	190
	150	115	264.5	186000	186
	200	108	248.4	183000	183
	225	104	239.2	180000	180
	250	101	232.3	178000	178
	275	98	225.4	177000	177
	300	95	218.5	176000	176
	325	92	211.6	174000	174
	350	90	207.0	173000	173
	375	88	202.4	171000	171
	400	87	200.1	169000	169
	425	85	195.5	167000	167

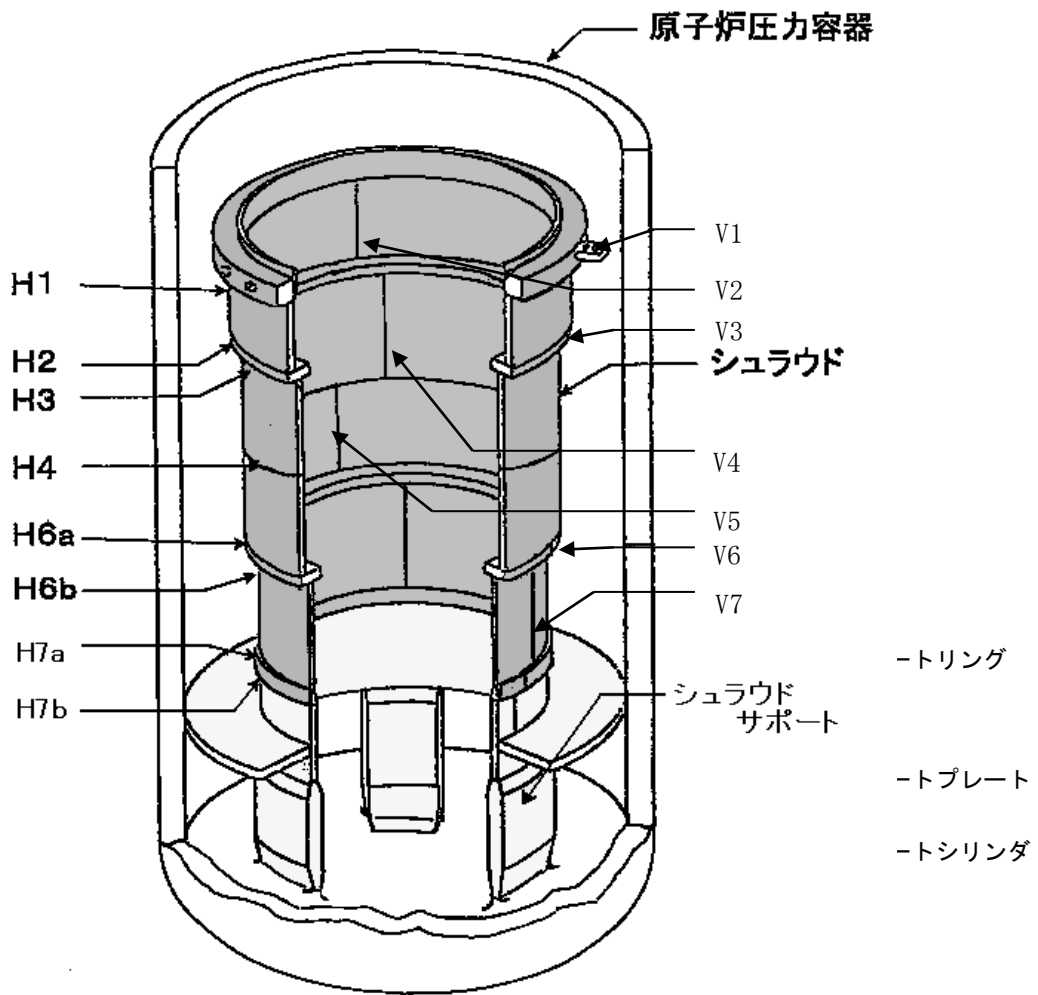


図 E-1 シュラウド構造の概要

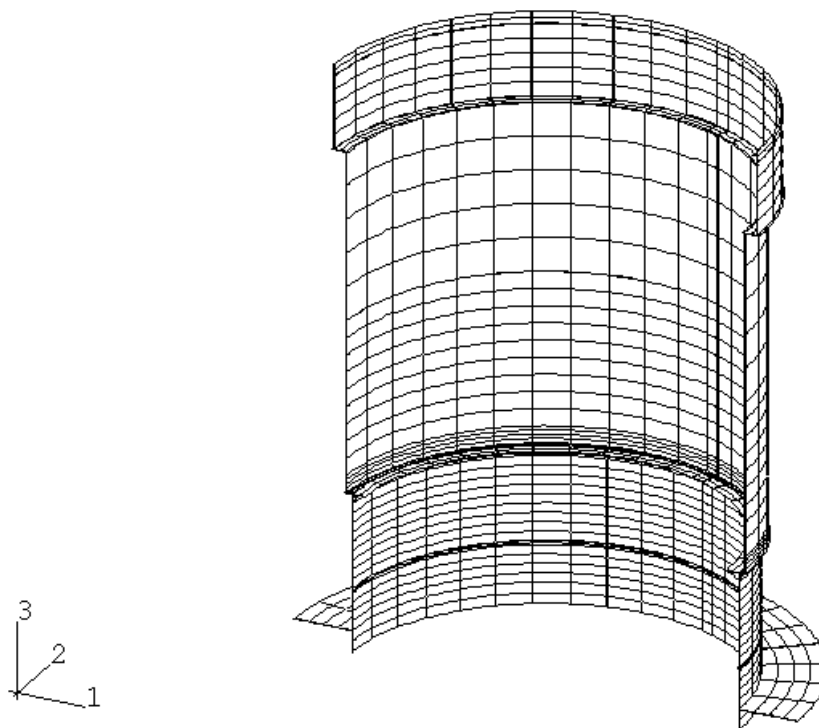


図 E-2 解析メッシュの例

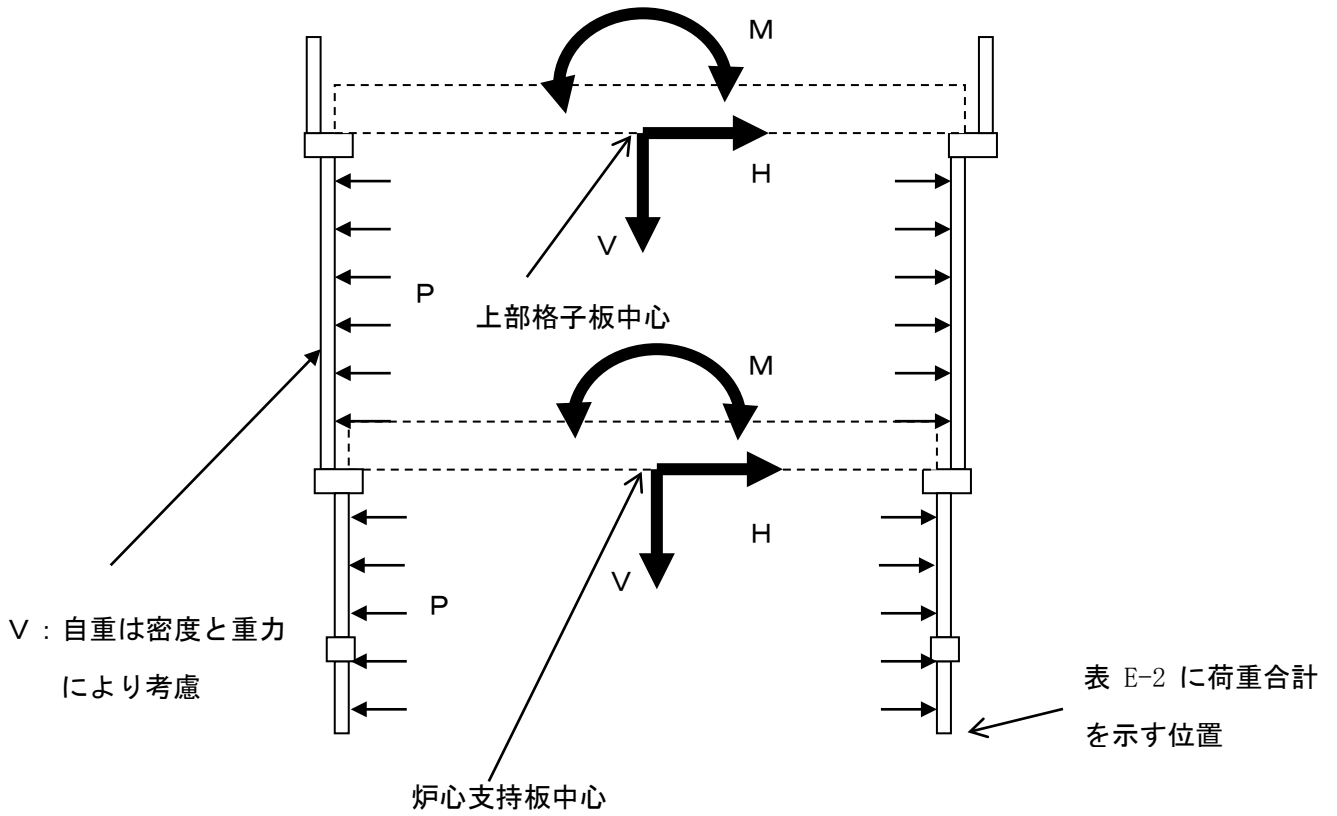


図 E-3 荷重負荷位置

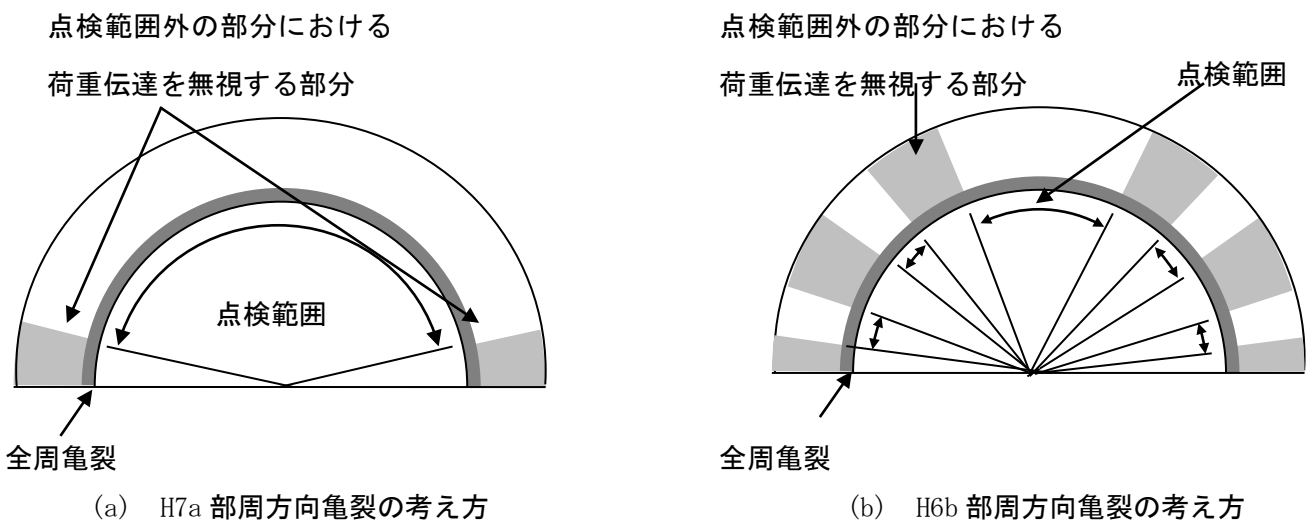


図 E-4 点検困難範囲のモデル化 (H7a 及び H6b 周方向)

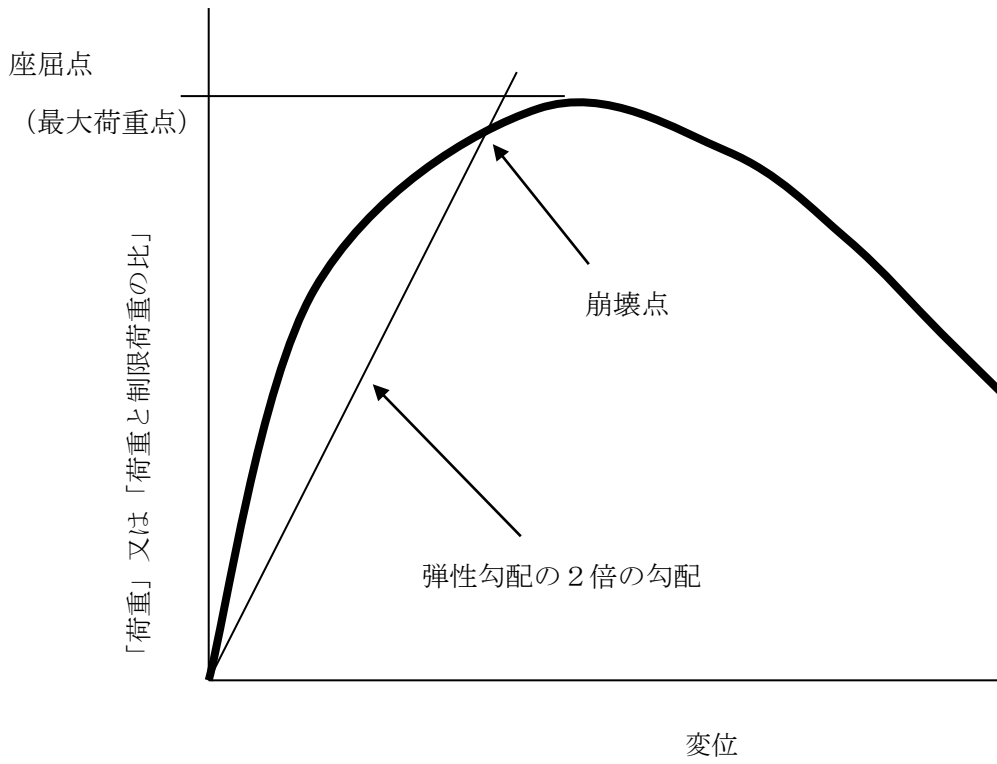


図 E-5 座屈・崩壊の定義

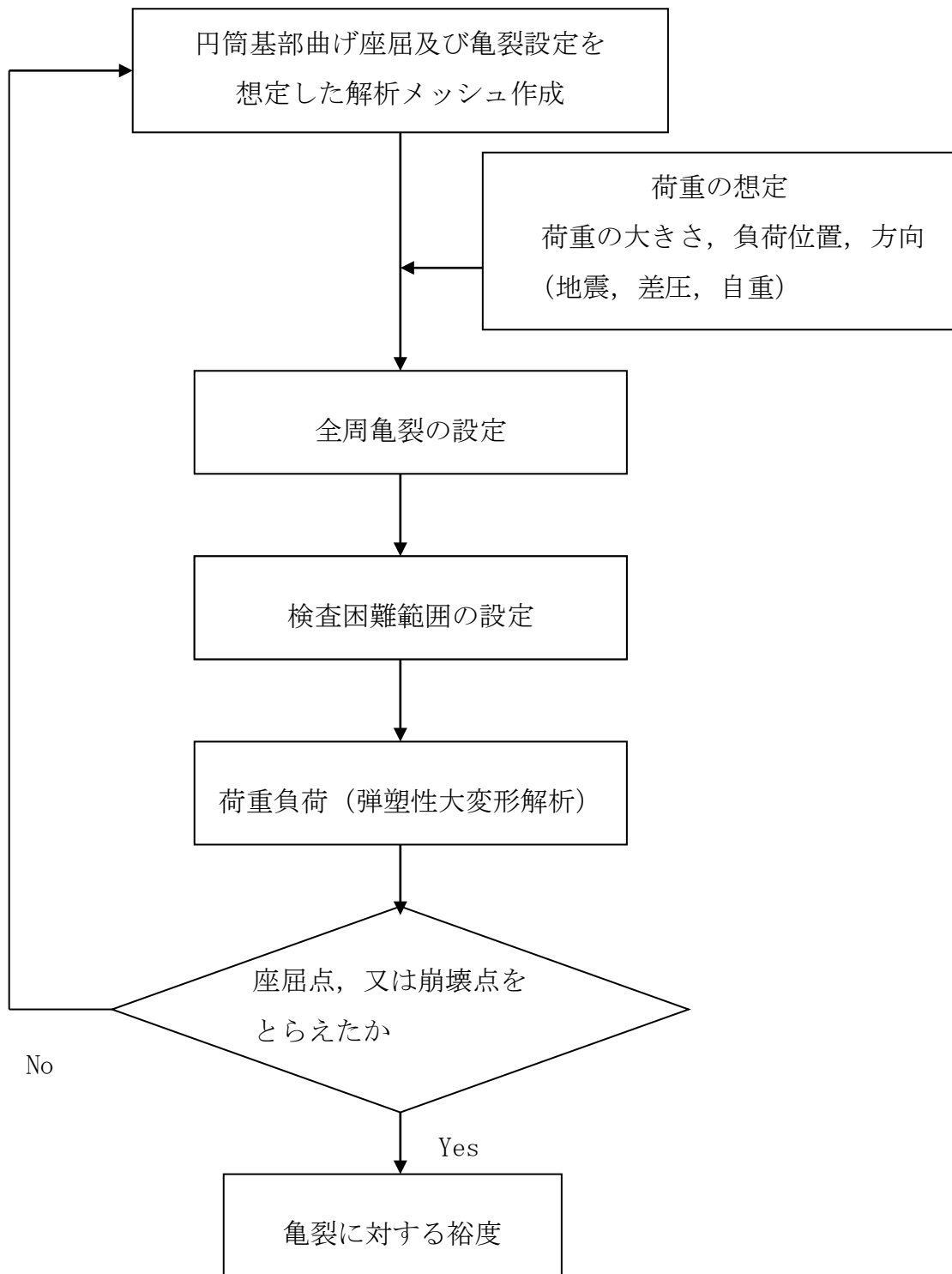


図 E-6 欠陥裕度評価解析の手順

## 2. 溶接残留応力評価

### 2.1 解析モデル

溶接残留応力の解析には、ABAQUS 等の非定常弾塑性熱応力解析を実施可能な汎用有限要素法コードを用い、解析対象とする溶接継手部を軸対象要素（4 節点要素又は 8 節点要素）を用いてモデル化する。このとき、溶金の成層の過程を模擬するように分割すること。なお、溶接のパスを同一施工条件ごとにグルーピングしても良い。また、3 次元モデルなどより詳細なモデルを用いても良い。

### 2.2 解析手順

解析手順を図 E-7 に示す。すなわち、溶接金属を実際の溶接施工手順通りに母材に成層し、そのときの非定常温度分布変化を各溶接パス毎に求める。1 つの溶接パスが終了し、次のパスに移る際は各部の温度が常温になるまで十分長い時間解析を継続する。次に、各パス毎の溶接金属モデルに当該温度分布の時刻歴変化を与えて大変形弾塑性解析を実施することにより、溶接施工課程での発生応力を算出する。このようにして最終溶接が終了した状態での応力状態が残留応力分布となる。

### 2.3 物性値

非定常熱伝導解析には表 E-4 に示す材料物性値を用い、温度分布解析では溶接金属と母材の材料特性を同一とする。また、弾塑性解析に関しては、図 E-8 に示す値を用いる。なお、これらに代えて妥当な根拠のある物性値を用いても良い。

### 2.4 入熱の想定

単位時間当たりの入熱の想定は、図 E-9 に示すように行う。すなわち、入熱の時間変化としては、この図に示すように、入熱が増加する時間（トーチが近づく時間） $t_1$ 、溶接中の時間  $t_2$ 、入熱が減少する時間（トーチが離れて行く時間） $t_3$  の比率を施工記録などをベースに想定し、当該溶接金属の最高温度が  $1100 \pm 50^\circ\text{C}$  となるようそれぞれの時間を決定すること。除熱は母材及び溶接金属の雰囲気と接する面から対流伝熱により生じるものとし、熱伝達率を  $11.6\text{J/m}^2\text{sec}$  と想定する。なお、モックアップ試験などを実施し、実際の温度分布の時間的变化が入手可能な場合には、これに基づき入熱の時間変化を想定しても良い。

### 2.5 残留応力を評価する部位

ニッケル合金の場合は溶接金属の部分及びオーステナイトステンレス鋼の場合は熱影響部相当部分の残留応力を評価する。残留応力としては、溶接線に垂直な方向の応力成分とする。

表E-4 伝熱解析用物性値.

<u>Inconel</u>									
Temperature	°C	20	149	288	566	815	1000	1500	2000
Thermal conductivity	kJ/mm·s·°C	$1.49 \times 10^{-5}$	$1.66 \times 10^{-5}$	$1.87 \times 10^{-5}$	$2.34 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-5}$	$3.10 \times 10^{-5}$	$3.98 \times 10^{-5}$	$4.89 \times 10^{-5}$
Specific gravity R	kg/mm <sup>3</sup>	$8.50 \times 10^{-6}$	$8.50 \times 10^{-6}$	$8.50 \times 10^{-6}$	$8.50 \times 10^{-6}$	$8.50 \times 10^{-6}$	$8.50 \times 10^{-6}$	$8.50 \times 10^{-6}$	$8.50 \times 10^{-6}$
Specific heat C	kJ/kg·°C	0.645	0.670	0.720	0.800	0.871	0.913	1.05	1.17
<u>304 and 316L stainless steel</u>									
Temperature	°C	20	100	200	400	600	1000	1500	2000
Thermal conductivity	kJ/mm·s·°C	$1.46 \times 10^{-5}$	$1.56 \times 10^{-5}$	$1.70 \times 10^{-5}$	$1.97 \times 10^{-5}$	$2.24 \times 10^{-5}$	$2.76 \times 10^{-5}$	$3.43 \times 10^{-5}$	$4.12 \times 10^{-5}$
Specific gravity R	kg/mm <sup>3</sup>	$7.86 \times 10^{-6}$	$7.86 \times 10^{-6}$	$7.86 \times 10^{-6}$	$7.86 \times 10^{-6}$	$7.86 \times 10^{-6}$	$7.86 \times 10^{-6}$	$7.86 \times 10^{-6}$	$7.86 \times 10^{-6}$
Specific heat C	kJ/kg·°C	0.452	0.493	0.523	0.553	0.578	0.620	0.678	0.737
Coefficient of heat transfer	kJ/mm <sup>2</sup> ·s·°C	<u>Air</u>	<u>Water</u>	$6.66 \times 10^{-5}$					
		$1.16 \times 10^{-8}$							

出典：溶接学会論文集第12巻（1994）第4号 563

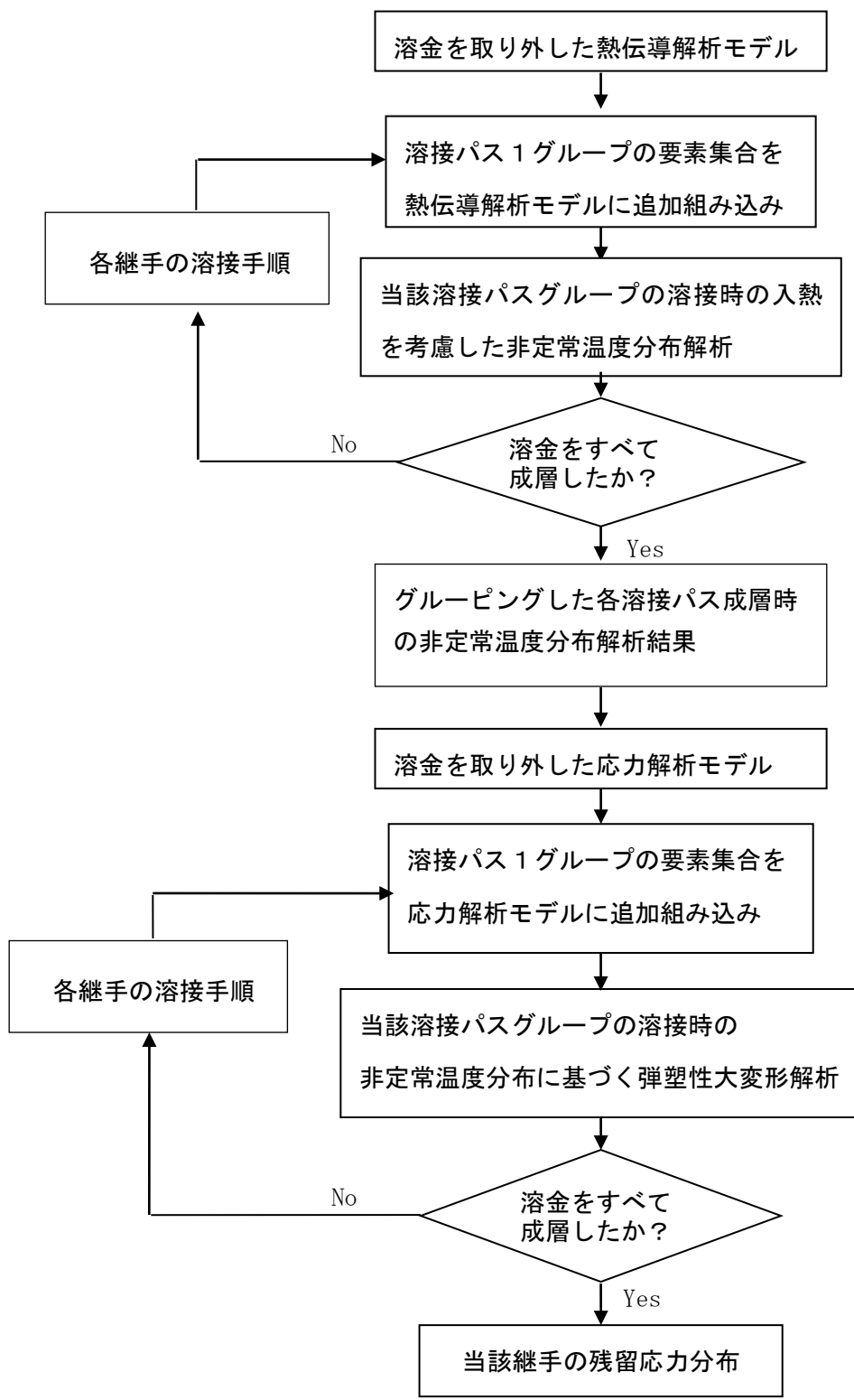
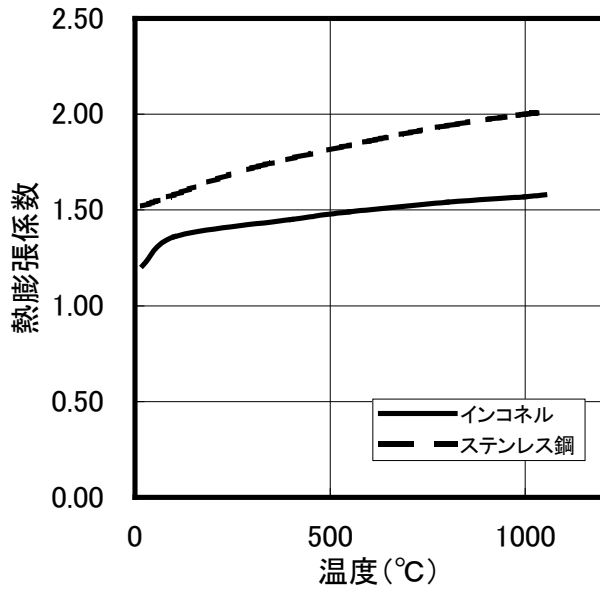
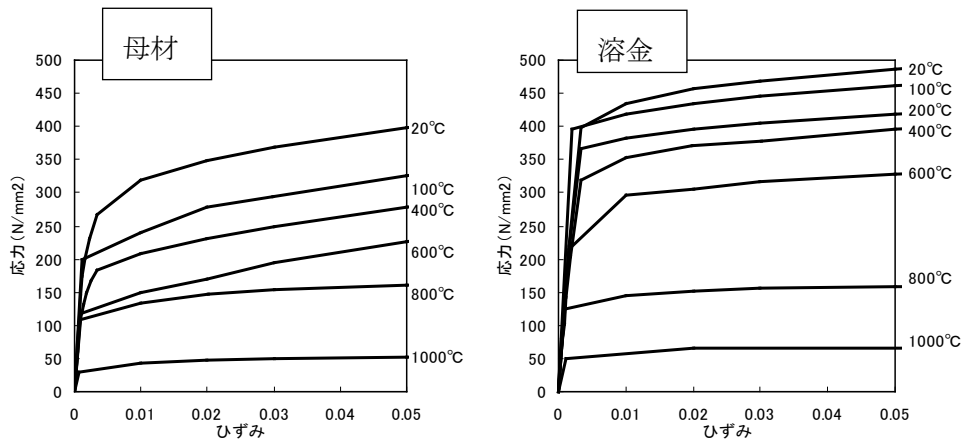


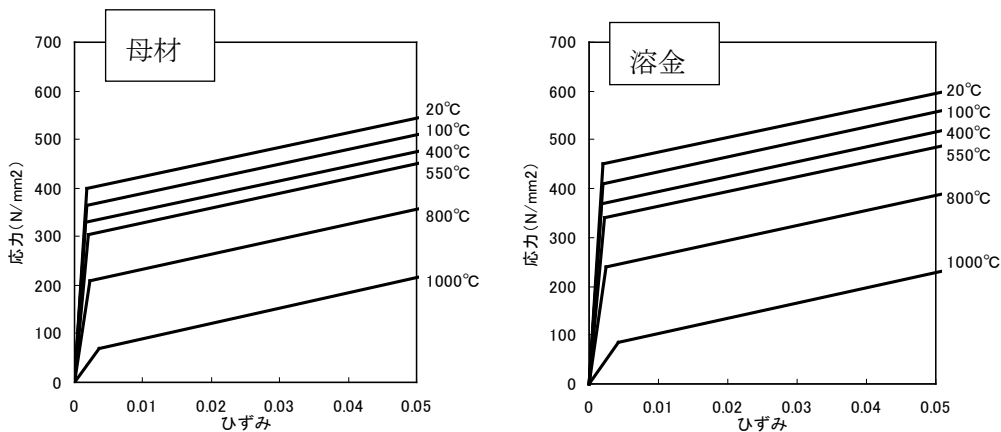
図 E-7 解析手順



a. 線膨張係数



b. ステンレス鋼の応力・ひずみ関係 (シュラウドモックアップ試験体実測値)



c. ニッケル合金の応力・ひずみ関係 (出典：溶接学会論文集第12巻(1994) 第4号 563)

図 E-8 残留応力解析に用いる物性値

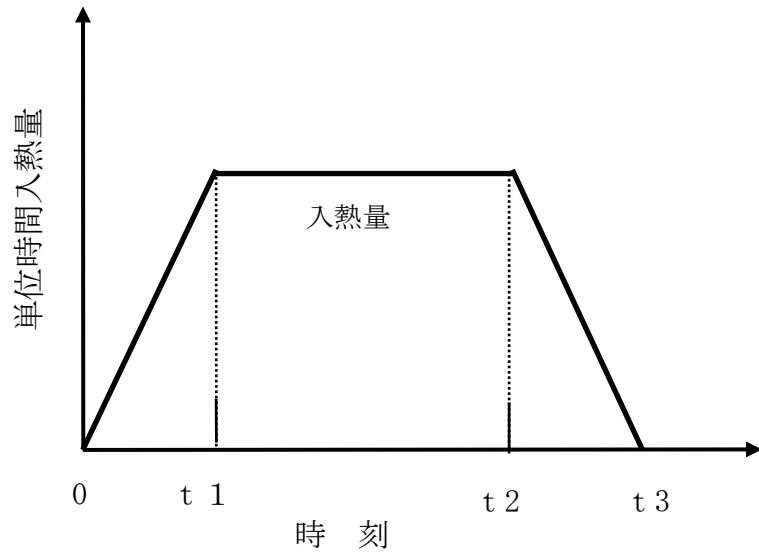


図 E-9 入熱の想定

### 3. 亀裂進展評価

#### 3.1 評価期間

評価期間は、所有者が設定すること。

#### 3.2 初期亀裂のモデル化

- (1) 亀裂が検出されない部位に亀裂を想定する場合は非破壊検査の検出限界の寸法を用いること。
- (2) 検出亀裂をモデル化する場合は検出された亀裂を機械学会 維持規格の規定にしたがってモデル化すること。

#### 3.3 負荷応力

対象部位に作用する温度及び圧力による荷重，機械的荷重及び残留応力を考慮すること。溶接残留応力は前項の溶接残留応力評価に基づいて解析すること。

#### 3.4 亀裂進展速度

SCC 亀裂進展速度線図は評価対象部位の中性子照射量の領域及び炉内水質を考慮し，以下のいずれかから選択すること。

##### (1) 低照射量領域（照射量 $<5\times 10^{24}\text{n/m}^2$ ）

(a) 通常一次系水質環境下（導電率 $<0.2\ \mu\text{S/cm}$ ， $\text{ECP}\geq 150\text{mV}_{\text{SHE}}$ ）

##### (i) 鋭敏化 SUS304

$$da/dt=1.43\times 10^{-10}K^{2.161}\quad (3.4\leq K\leq 57.9)\quad (1)$$

$$da/dt=2.0\times 10^{-9}\quad (K<3.4)\quad (2)$$

$$da/dt=9.2\times 10^{-7}\quad (K>57.9)\quad (3)$$

##### (ii) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt=3.33\times 10^{-11}K^{2.161}\quad (6.7\leq K\leq 57.9)\quad (4)$$

$$da/dt=2.0\times 10^{-9}\quad (K<6.7)\quad (5)$$

$$da/dt=2.1\times 10^{-7}\quad (K>57.9)\quad (6)$$

（単位： $da/dt$  (mm/s)， $K$  (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )）

以上，通常一次系水質環境下の SCC 亀裂進展評価線図を図 E-10 に示す。

(b) 水素注入環境下（導電率 $<0.2\ \mu\text{S/cm}$ ， $\text{ECP}\leq -200\text{mV}_{\text{SHE}}$ ）

##### (i) 鋭敏化 SUS304

$$da/dt=7.94\times 10^{-12}K^{2.161}\quad (12.9\leq K\leq 57.9)\quad (7)$$

$$da/dt=2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 12.9) \quad (8)$$

$$da/dt=5.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9) \quad (9)$$

(ii) 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt=3.33 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (19.3 \leq K \leq 57.9) \quad (10)$$

$$da/dt=2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 19.3) \quad (11)$$

$$da/dt=2.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9) \quad (12)$$

(単位 : da/dt (mm/s), K (MPa√m))

以上, 水素注入環境下の SCC 亀裂進展評価線図を図 E-11 に示す。

(2) 高照射量領域 (照射量  $\geq 5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ )

SUS304 及び低炭素ステンレス鋼

$$da/dt=7.8 \times 10^{-2} n^{3.6} (CK^4)^n \quad (13)$$

ここに, a は亀裂の深さ

n は, 腐食電位, 導電率, 鋭敏化度及び中性子照射量をパラメータとする亀裂先端電流密度変化に対する定数

C は, 亀裂先端ひずみ速度補正係数で以下の通りである。

(i) 中性子照射量が  $1.4 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$  以下の場合

$$C=4.1 \times 10^{-14}$$

(ii) 中性子照射量が  $1.4 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$  を超え,  $3 \times 10^{25} \text{ (n/m}^2)$  以下の場合

$$C=1.14 \times 10^{-13} \ln(\text{中性子照射量}) - 4.98 \times 10^{-12}$$

(iii) 中性子照射量が  $3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  を超える場合

$$C=6.59 \times 10^{-13}$$

(単位 : da/dt (mm/s), K (MPa√m))

(3) ニッケル合金の 182 合金 (DNiCrFe-3 又は ENi6182) の SCC 亀裂進展速度式 (通常炉内水質環境中)

$$da/dt=3 \times 10^{-15} K^{5.186} \quad (13.3 \leq K \leq 50.3) \quad (14)$$

$$da/dt=2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 13.3) \quad (15)$$

$$da/dt=2.0 \times 10^{-6} \quad (K > 50.3) \quad (16)$$

(単位 : da/dt (mm/s), K (MPa√m))

なお, 通常炉内水質及び水素注入水質環境が一定の期間毎に変わる場合は, その都度, 亀裂進展速度線図は対応する環境の線図を使用すること。

以上, ニッケル合金の 182 合金の SCC 亀裂進展評価線図を図 E-12 に示す。

### 3.5 応力拡大係数

- (1) 応力拡大係数は、対象位置での応力分布から求めること。
- (2) 応力拡大係数は構造形状、亀裂形状・寸法、及び応力分布に適合する式を維持規格から求めてもよい。

### 3.6 亀裂進展計算

亀裂進展計算のフローを図 E-13 に示す。以下の手順で亀裂進展計算を行うこと。

- (1) 3.2 項に従い形状のモデル化を行った亀裂(深さ  $a$ 、長さ  $l$ )について 3.3 項の負荷応力に対応する応力拡大係数  $K$  を 3.5 項の規定を用いて求める。
- (2) 3.4 項の SCC 亀裂進展速度から、応力拡大係数  $K$  と一定時間  $\Delta t$  に対応する亀裂深さ方向及び長さ方向の亀裂進展量増分  $\Delta a$  及び  $\Delta l$  をそれぞれ求め、進展後の亀裂深さ及び亀裂長さを  $a+\Delta a$  及び  $l+\Delta l$  とする(ここで  $a$  及び  $l$  は進展前の亀裂深さ及び長さ)。
- (3) 亀裂が複数個あって互いに接近している場合、接近している亀裂は、機械学会維持規格添付-4 に示す合体条件に従い評価し、合体条件を満足する場合は、合体後の亀裂深さ及び亀裂長さをそれぞれ  $a+\Delta a$  及び  $l+\Delta l$  とする。
- (4)  $a+\Delta a$  を  $a$ 、 $l+\Delta l$  を  $l$  に置き換え、次の進展量評価に進む。

上記の方法を繰り返して、3.3 項の荷重条件に対して亀裂進展評価を行い、SCC による亀裂深さ  $a$  と時間の関係を求める。

通常炉内水質環境中(導電率 $<0.2 \mu\text{S/cm}$ 、ECP $\geq 150\text{mVSHE}$ )の  
SCC 亀裂進展評価線図

(1) 鋭敏化SUS304  
 $da/dt = 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161}$  ( $3.4 \leq K \leq 57.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 2.0 \times 10^{-9}$  ( $K < 3.4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 9.2 \times 10^{-7}$  ( $K > 57.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

(2) 低炭素ステンレス鋼  
 $da/dt = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161}$  ( $6.7 \leq K \leq 57.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 2.0 \times 10^{-9}$  ( $K < 6.7\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 2.1 \times 10^{-7}$  ( $K > 57.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

単位:  $da/dt$ (mm/s)、 $K$ ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

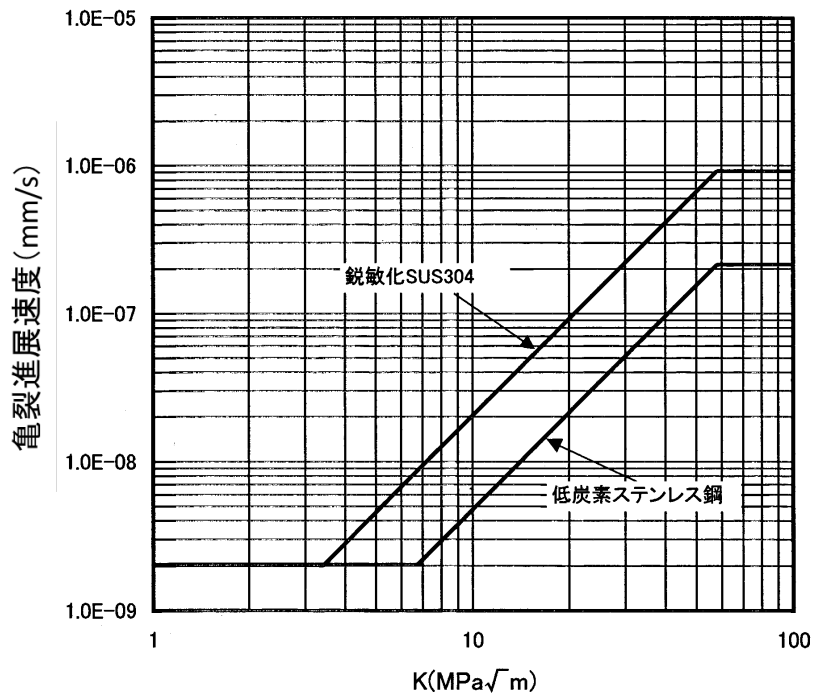


図 E-10 ステンレス鋼の通常炉内水質環境中の SCC 進展速度線図

水素注入環境中(導電率 $<0.2\mu\text{S/cm}$ 、 $\text{ECP}\leq-200\text{mVSHE}$ )の  
SCC 亀裂進展評価線図

(1) 鋭敏化SUS304  
 $da/dt = 7.94 \times 10^{-12} K^{2.161}$  ( $12.9 \leq K \leq 57.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 2.0 \times 10^{-9}$  ( $K < 12.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 5.1 \times 10^{-8}$  ( $K > 57.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

(2) 低炭素ステンレス鋼  
 $da/dt = 3.33 \times 10^{-12} K^{2.161}$  ( $19.3 \leq K \leq 57.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 2.0 \times 10^{-9}$  ( $K < 19.3\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 2.1 \times 10^{-8}$  ( $K > 57.9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

単位:  $da/dt(\text{mm/s})$ 、 $K(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$

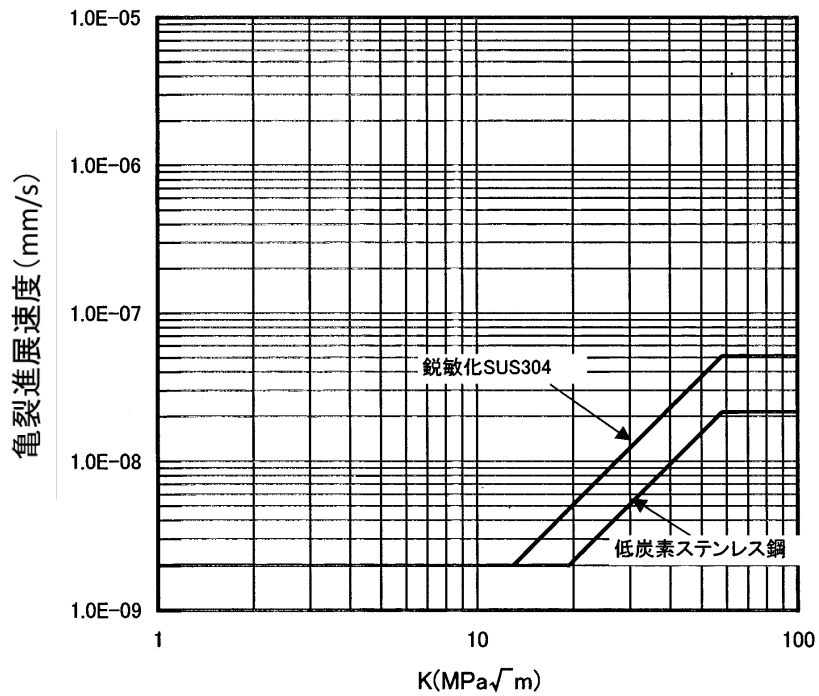


図 E-11 ステンレス鋼の水素注入水質環境中の SCC 進展速度線図

ニッケル合金の 182 合金の通常炉内水質環境中 SCC 進展評価線図

$da/dt = 3.0 \times 10^{-15} K^{5.186}$  ( $13.3 \leq K \leq 50.3 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 2.0 \times 10^{-9}$  ( $K < 13.3 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )  
 $da/dt = 2.0 \times 10^{-6}$  ( $K > 50.3 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

単位:  $da/dt$  (mm/s)、 $K$  ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )

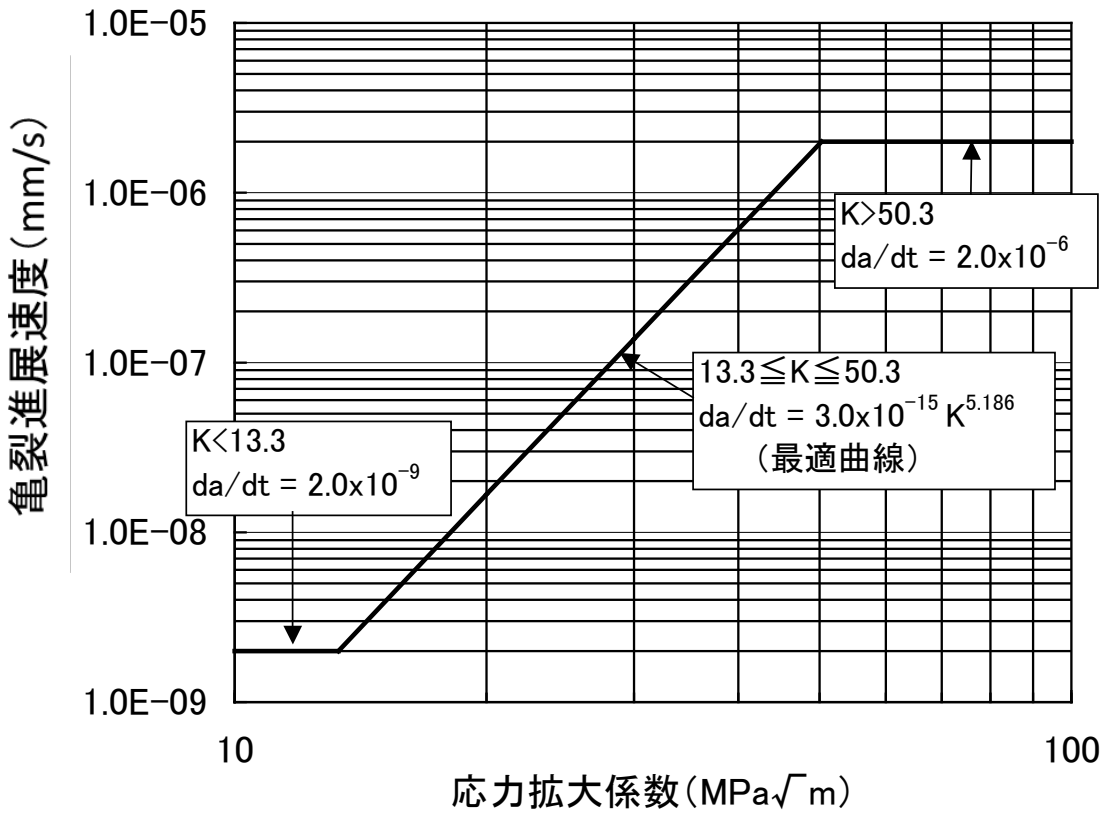


図 E-12 ニッケル合金の 182 合金の通常炉内水質環境中の SCC 進展評価線図

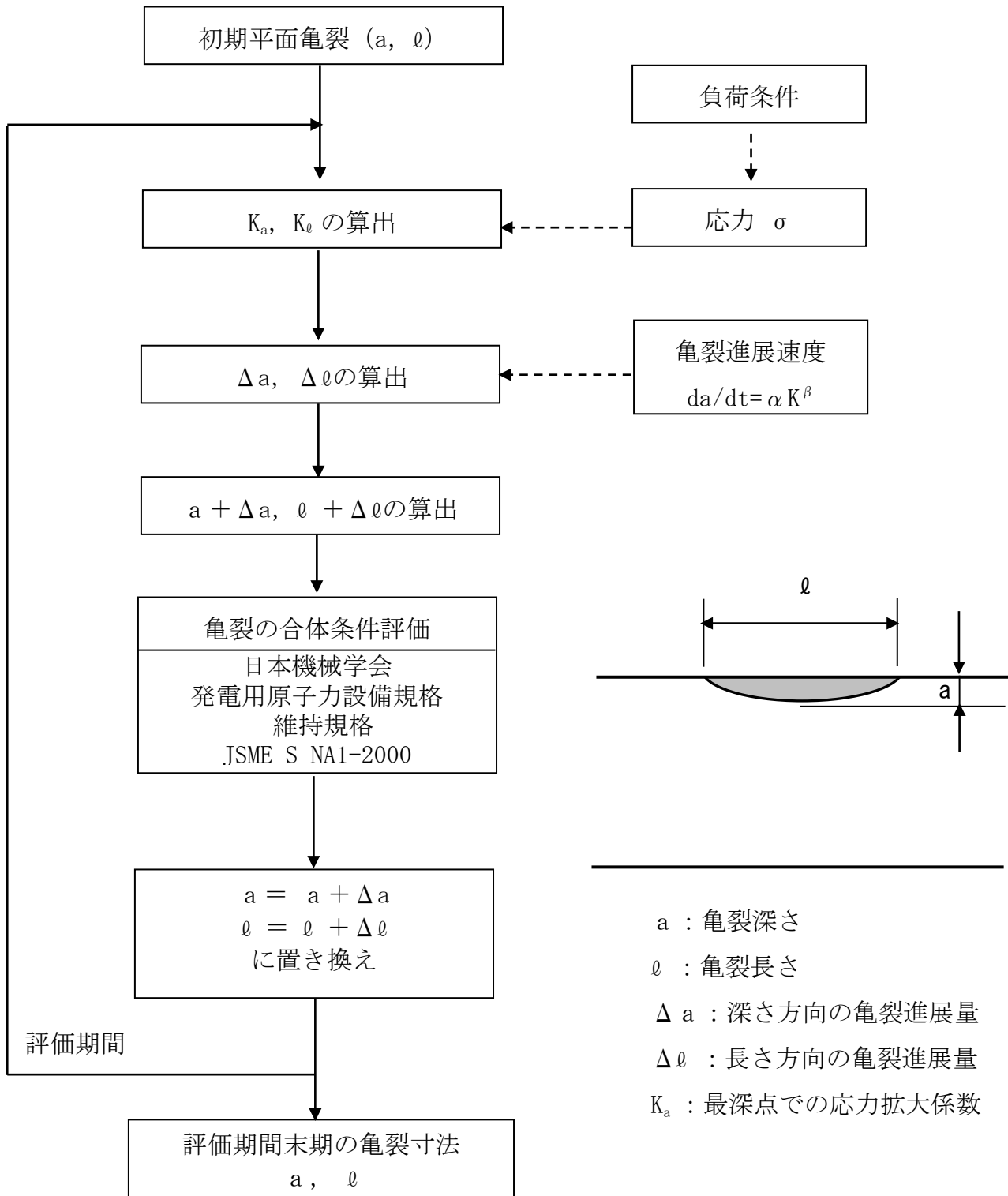


図 E-13 SCC 亀裂進展計算のフロー

## 付録F 亀裂が検出されたときの評価

### 1. 目的

シュラウド溶接部に発見された亀裂が十分小さいと判断される場合、次回点検時期を簡易に設定する方法を提示する。

本方法の提示にあたり、未点検範囲の取扱いについては、未点検範囲全域に欠陥を想定しこの範囲の引張り荷重伝達を考慮せずに行った。実際の点検を行った後に亀裂の影響を評価する場合は、解説6-1に記載の通り点検実施範囲と未点検範囲を比較して想定欠陥割合を算定し、この範囲の引張り荷重伝達を考慮することを原則とする。

### 2. 点検時期簡易設定法

設定法の流れを図 F-1 に示す。発見されたすべての亀裂を一カ所に総計し、これを貫通亀裂と見なす。検査困難範囲がある場合は検査困難範囲（荷重伝達無視）と連続して、荷重が伝達されない範囲を想定する。

次回点検までの時期を仮定し、現状 1 mm の全周欠陥から全周亀裂が進展すると仮定して残存断面積を決定する。周方向の亀裂進展量（亀裂長さの総和）を想定する。周方向への亀裂進展量は 1 亀裂あたり年間 6 mm とする。

図 F-2 から、全周の残存断面積と周方向の亀裂進展量が存在した場合に地震荷重等に対する裕度を評価し、1.5 倍の裕度が確保されない場合は当初仮定した次回点検時期を再設定する。

なお、図 F-2 にプロットがない条件については図を内挿して使用する。

### 3. 欠陥が発見された場合の裕度評価の図（図 F-2）の算定方法

#### (a) H7 亀裂の場合

図 F-3 に H7a に亀裂が発見された場合の亀裂想定例を示す。発見された亀裂がすべて点検困難範囲に連続して貫通欠陥として存在すると仮定し、その部分の荷重伝達を無視する。亀裂は、荷重を負荷した場合に引張側と圧縮側の両方に同時に存在するとしてモデル化して保守性を確保する。例えば発見された亀裂の総和が 1m の場合、0 度側に 1m、180 度側に 1m の亀裂を付加することを意味する。

H7a 以外の亀裂の想定は以下としている。

縦継手 V3～V7	板厚の 10% 残存とする。
周継手 H3～H6 及び H7b	深さ方向に H7a と同一の残存断面積とする。 検査困難範囲の荷重伝達を無視する。

上記に対し弾塑性大変形解析を実施し、座屈点（最大荷重支持点）又は 2 倍勾配法による崩壊点から図 F-2(a) を計算する。

図 F-2(a)は H7a に対して算定された図であるが、地震による当該部への荷重が H7 の荷重に包絡され、かつ点検困難範囲が H7 より小さい H3 及び H4 の評価は H7 に包絡されると想定される。したがって H3 及び H4 を評価する場合においても図 F-2(a)を用いて評価を実施しても良い。また、H3、H4、H7 の複数の箇所に亀裂が発見された場合、その総和を H7 に亀裂が発見されたと想定して評価を実施しても良い。検査困難範囲が大きい H6 については図 F-2(b)を使用する。

なお、H4 継手については中性子照射量が  $5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  以上の場合は照射による延性低下を考慮した欠陥裕度評価を実施すること。

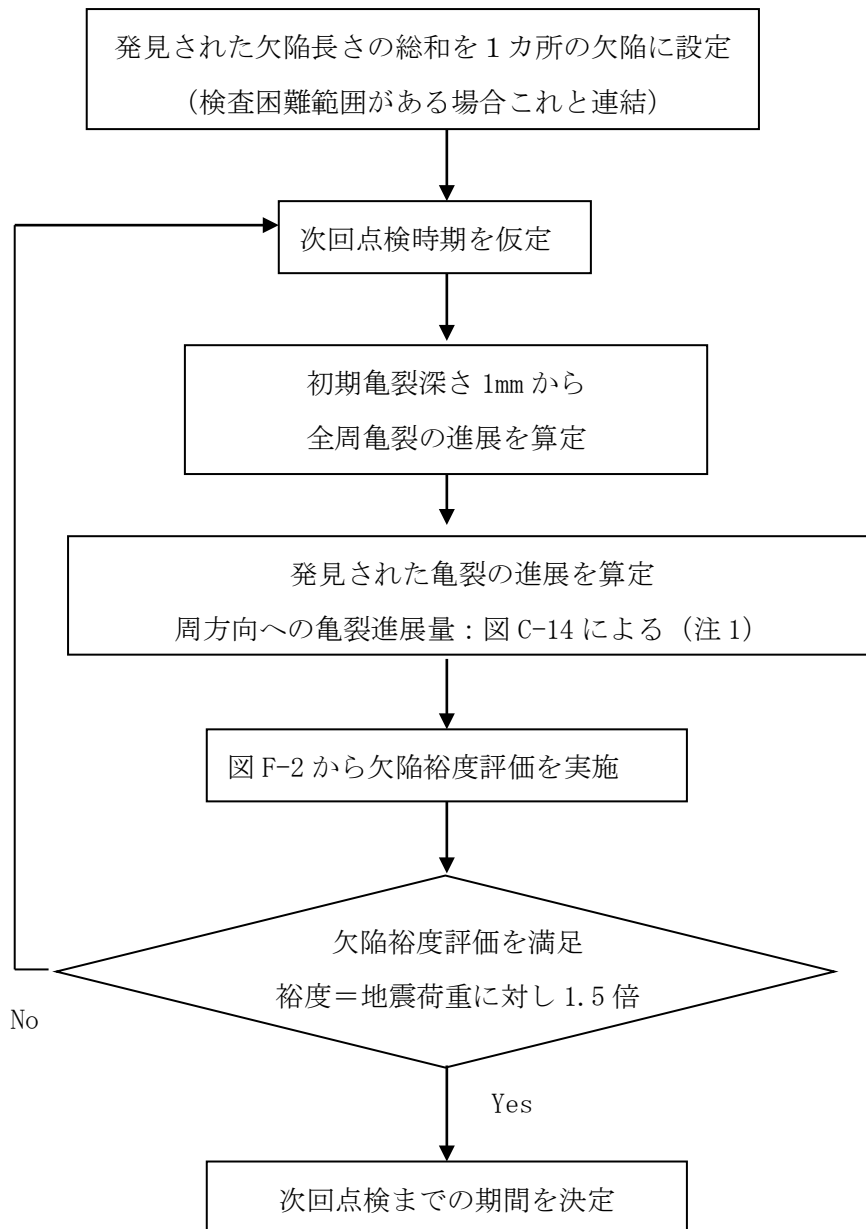
#### (b) H6 亀裂の場合

H6 のように点検困難範囲が多数に分割される場合は、荷重に対し 0 度、180 度方向の点検困難範囲に発見された亀裂すべてを連結する。亀裂は、荷重を負荷した場合に引張側と圧縮側の両方に同時に存在するとしてモデル化して保守性を確保する。例えば発見された亀裂の総和が 1m の場合、0 度側に 1m、180 度側に 1m の亀裂を付加することを意味する。

H6b 以外の亀裂の想定は以下としている。

縦継手 V3～V7	板厚の 10% 残存とする。
周継手 H3～H4 及び H7	深さ方向に H6 と同一の残存断面積とする。 検査困難範囲の荷重伝達を無視する。

上記に対し弾塑性大変形解析を実施し、座屈点（最大荷重支持点）又は 2 倍勾配法による崩壊点から図 F-2(b)を計算する。



注 1) 図 C-14 において低炭素ステンレス鋼の  $K > 57.9 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  の値を用いること。

図 F-1 次回点検時期設定の手順

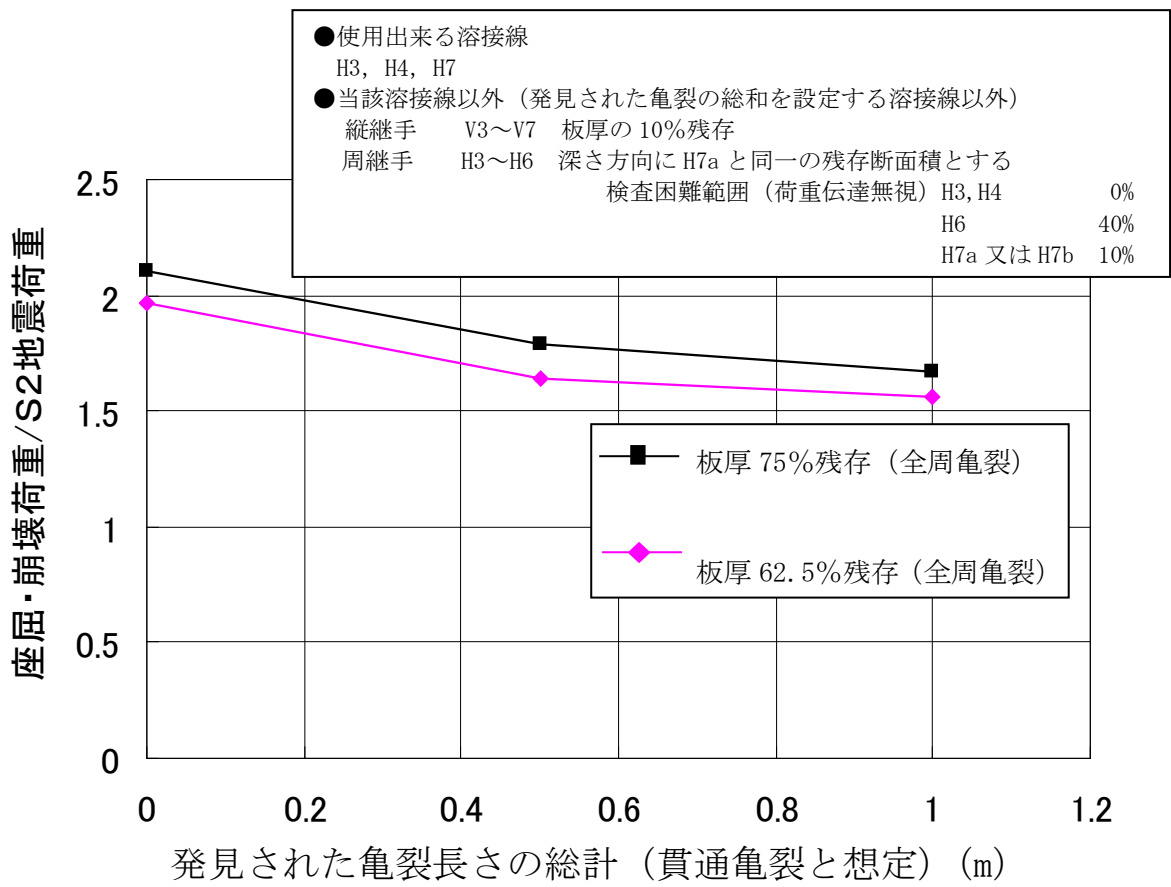


図 F-2(a) H7 に亀裂が発見された場合の欠陥裕度評価

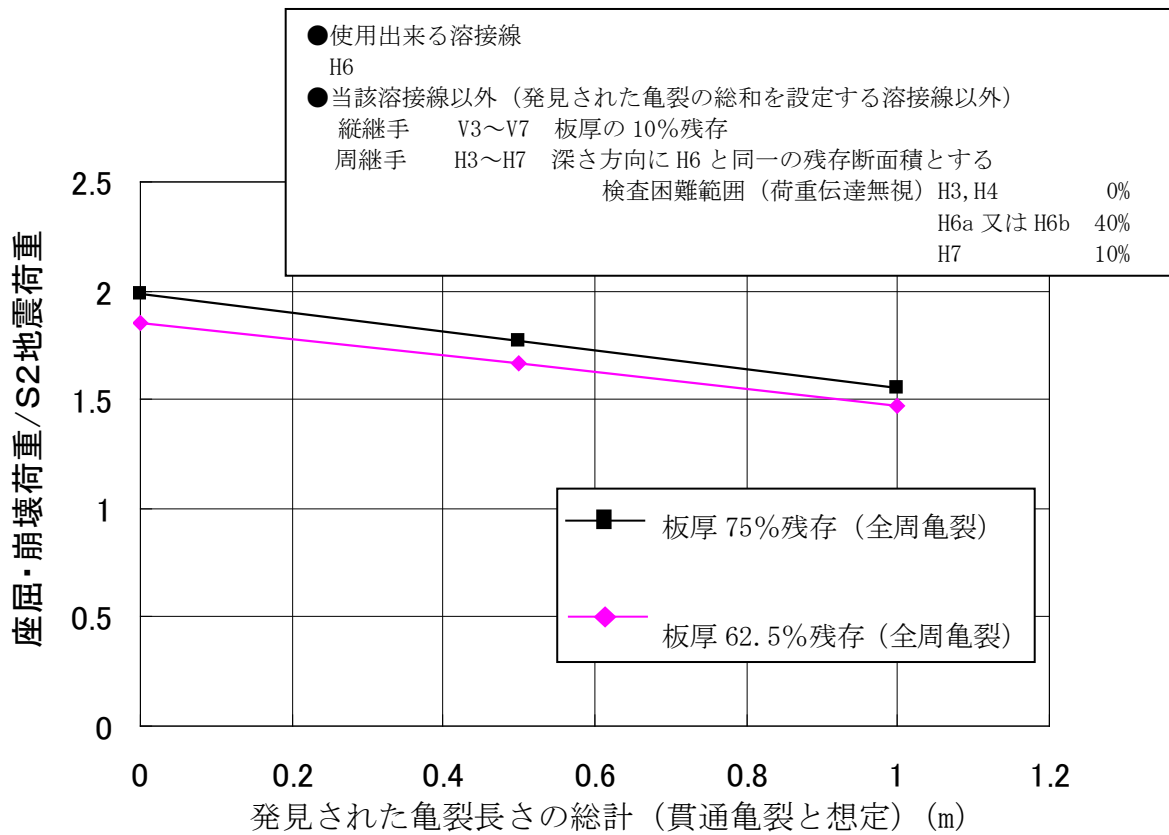


図 F-2(b) H6 に亀裂が発見された場合の欠陥裕度評価

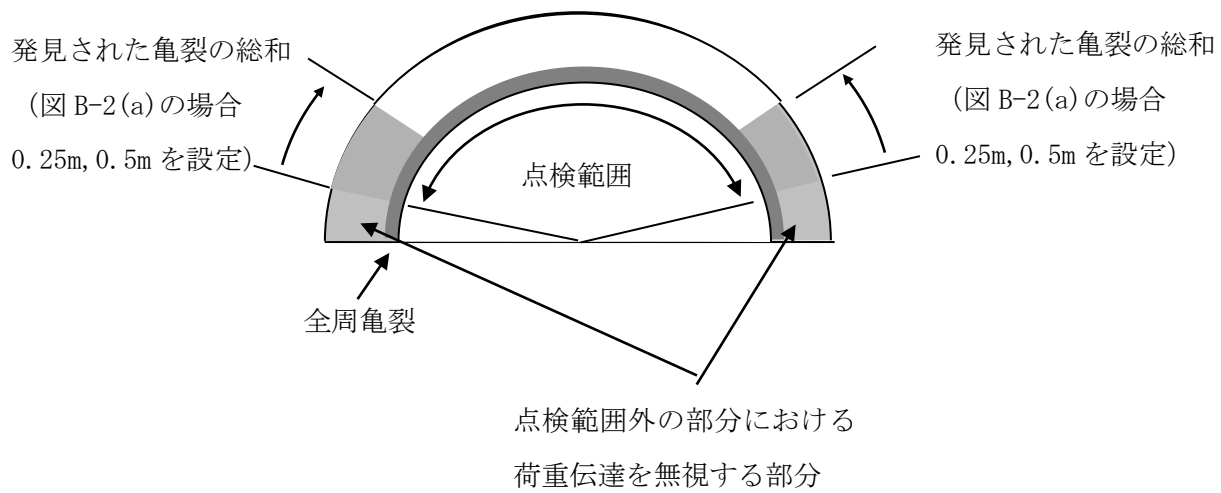


図 F-3 H7 に亀裂が発見された場合の欠陥の想定法

## 付録G 未点検範囲の欠陥想定法

### 1. 概 要

点検を実施しない範囲（未点検範囲）を残存断面積に含めない、すなわち未点検範囲は欠陥と同等に扱って構造健全性評価を行うことは、最も保守的な取り扱いとなるが、工学的には未点検範囲には点検範囲での欠陥比率を想定するのが合理的であることから、適切な保守性を有した未点検範囲の欠陥想定法を検討した。

### 2. 未点検範囲の欠陥想定法の検討

#### 2.1 未点検範囲の欠陥想定のお考え方

構造健全性評価における未点検範囲の取り扱いのお考え方としては、以下の案を検討した。

ケース A：点検未実施範囲は、全て欠陥とみなす。

ケース B：点検実施範囲での欠陥割合と同じ割合で、未点検範囲に欠陥を想定する。

ケース C：未点検範囲のうち健全な部位の割合は、点検実施範囲での健全な部位の全範囲に対する割合に等しい。

ケース D：点検実施範囲での欠陥割合から、全体の欠陥割合を確率計算による信頼上限と置いて設定する。

ケース A～C の具体的計算方法を図 G-1 に示す。

ケース D の具体的計算方法を図 G-2 に示す。

図 G-2 において、

$$\begin{aligned}\text{シュラウドの点検割合} &= [\text{シュラウドの点検長さ}] / [\text{シュラウド全周}] \\ &= N/M\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{点検範囲の欠陥割合} &= [\text{点検範囲の欠陥長さの合計}] / [\text{シュラウド点検長さ}] \\ &= m/N\end{aligned}$$

と表されるが、 $N/M$  及び  $m/N$  が一定であっても、 $M$  の値、即ち母数の大きさの取り方によって、シュラウド全周の欠陥割合の信頼上限  $m/N + \Delta p$  の値は異なる。 $M=100, 1000, 10000$  の場合の信頼上限の比較を図 G-3 に示す。図 G-3 から、 $M$  の値が小さい程、信頼上限は高くなり、点検範囲が狭い程、その差が顕著となることが判る。

$M$  の値は、シュラウド周溶接の点検最小単位をどのように考えるかによって決められる。シュラウドの目視点検実績で、数 mm～十数 mm の亀裂が数多く確認されていることから、シュラウドのガイドラインで、目視点検によって検知可能な SCC による亀裂を、長さ 10mm（深さ 1mm）としていることは保守側の適切な設定と考えられる。このことから、ケース D において、周溶接線の点検最小単位を 10mm とし、シュラウド周溶接線の全周がおおよそ 10～15m（=10000～15000mm）であること

から、シュラウド全周の母数 M を (10000~15000mm) / 10mm  $\doteq$  1000 とすることとした。

M=1000 とし、点検範囲での欠陥割合と全周の欠陥割合の信頼上限の関係を点検割合をパラメータにして、図 G-4 に示す。図 G-4 から、点検割合が 0.1 (=10%) 程度以上であれば信頼上限は、点検範囲での欠陥割合に近い、即ちケース B に近いことが判る。

## 2.2 欠陥想定ケースの比較，検討

点検実施範囲の欠陥割合毎にケース A~D の周溶接全体の想定欠陥割合の比較を図 G-5 に示す。

図 G-5 から以下のことが判る。

- ① 周溶接全体の想定欠陥割合 (P) の大きさは、点検実施範囲の欠陥割合 (Y) によらず、

$$\text{ケース A} > \text{ケース C} > \text{ケース D} > \text{ケース B}$$

となっており、工学的に妥当と考えられるケース D に比べて、現状のガイドラインの欠陥想定法 (ケース A) は、非常に保守側である。

- ② ケース B は、点検欠陥比率 (Y) に依らず、点検割合 (X) が 0.1 (=10%) 以上の範囲では、ケース D を若干下回る程度でその差は大きくない。例えば、点検範囲 0.5 (=50%) において、ケース B とケース D の周溶接全体の想定欠陥割合 (P) の差は、最大でも 0.041 (=4.1%，Y=0.5 のとき) である。

ただし、点検割合 (X) が 0.1 (=10%) 以下の範囲では、ケース B の周溶接全体の想定欠陥割合 (P) はケース D の値に比べ有意に小さくなっており、保守側の補正が望ましい。

## 3. 未点検範囲の欠陥想定方法

2.2 項の①，②の状況から、未点検範囲の欠陥想定方法として周溶接全体の想定欠陥割合を以下のとおり設定した。本欠陥想定方法で算定される周溶接全体の想定欠陥割合の例を図 G-6 に示す。

- (1) 点検割合 (X) 50%以上：

点検実施範囲での点検欠陥比率 Y を周溶接全体の想定欠陥割合 (p) とする。

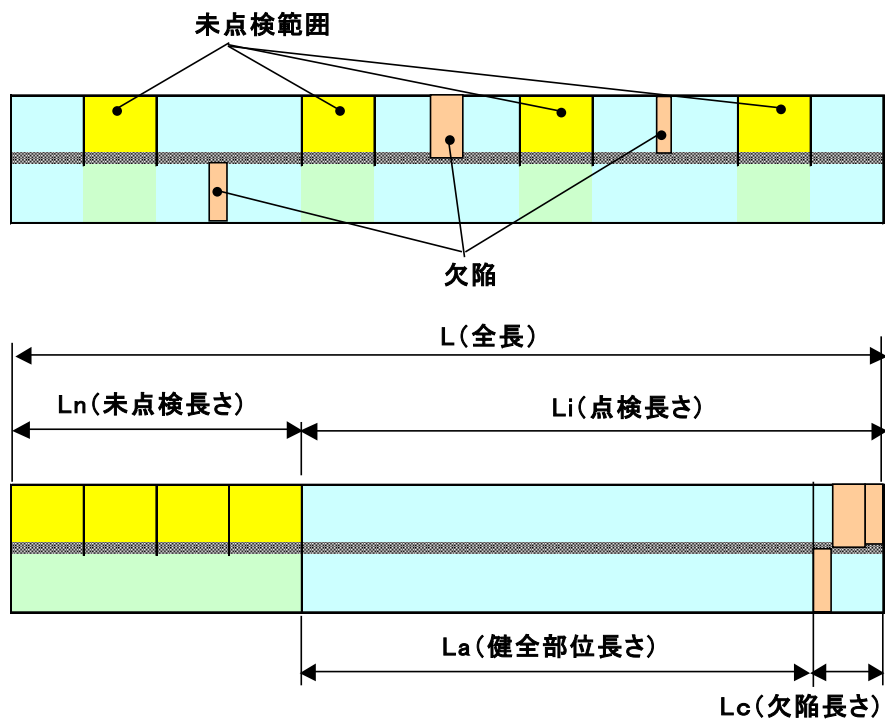
- (2) 点検割合 (X) が 0%から 50%：

点検割合が 0% のとき、周溶接全体の想定欠陥割合 (p) を 100% とする。点検割合が 50% のとき、周溶接全体の点検欠陥割合 (p) は 1) で定める通り Y とする。両者を直線で結び、点検割合 (X) での周溶接全体の想定欠陥割合 (p) とする。

#### 4. 未点検範囲の欠陥想定方法の適用条件

3項に示す未点検範囲の欠陥想定方法は、以下の(1)～(3)を同時に満たす場合に適用可能とする。

- (1) 対象溶接線は周溶接線
- (2) アクセス可能な全域の点検を実施
- (3) 点検実施範囲と未点検範囲とを比較して、SCC の発生又は進展に影響する要因について工学的な有意差が認められない



想定欠陥割合:P

ケースA  $P = (L_c + L_n) / L$

ケースB  $P = (L_c + L_n \times (L_n / L_c)) / L$

ケースC  $P = (L - (L_a + L_n \times (L_a / L))) / L$

点検割合 =  $X = L_i / L$

点検範囲での欠陥割合 =  $Y = L_c / L_i$

ケースA  $P = (L_c + L_n) / L$   
 $= (Y-1) \cdot X + 1$

ケースB  $P = (L_c + L_c \times (L_n / L_i)) / L$   
 $= Y$

ケースC  $P = (L - (L_a + L_n \times (L_a / L))) / L$   
 $= (1-Y) \cdot X^2 - 2 \cdot (1-Y) \cdot X + 1$

図 G-1 欠陥想定方法 (ケース A~C) の具体的計算方法

- M : 母集団の大きさ
- p : 母集団のうち欠陥のある比率
- 1-p : 母集団のうち健全な比率
- N : 標本の大きさ
- m : 標本Nのうち欠陥のあるものの個数

母比率pの 100(1-α)%信頼区間は、

$$\begin{aligned} & (m/N) - Z(\alpha/2) \times \text{SQRT}((M-N)/(M-1) \times (m/N) \times (1-m/N)/N) \\ & \leq p \leq \\ & (m/N) + Z(\alpha/2) \times \text{SQRT}((M-N)/(M-1) \times (m/N) \times (1-m/N)/N) \end{aligned}$$

99%信頼性区間 : 100(1-α)=99     α = 0.01     Z(α/2)=Z(0.005)= 2.58



### シュラウド全周の欠陥割合の99%信頼上限推定

<b>シュラウド点検</b>	
N/M	シュラウド点検割合=X
m/N	点検範囲における欠陥割合=Y
m/N + Δp	シュラウド全周の欠陥割合の上限
m/N - Δp	シュラウド全周の欠陥割合の下限
Δp	Z(α/2) × SQRT((M-N)/(M-1) × (m/N) × (1-m/N)/N)

99%信頼性区間 : 100(1-α)=99  
 Z(α/2)=Z(0.005)= 2.58

図 G-2 ケース D の計算方法

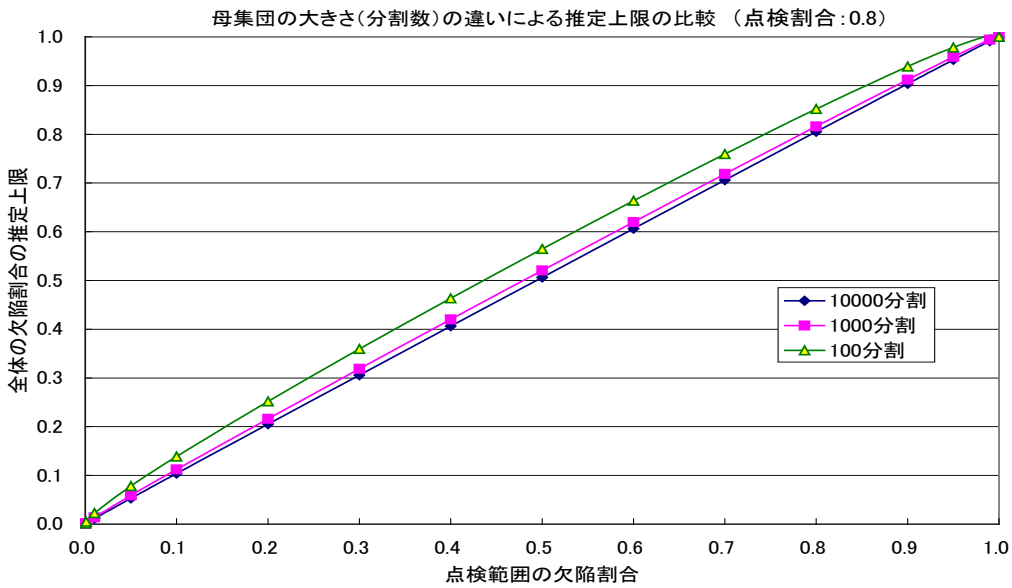
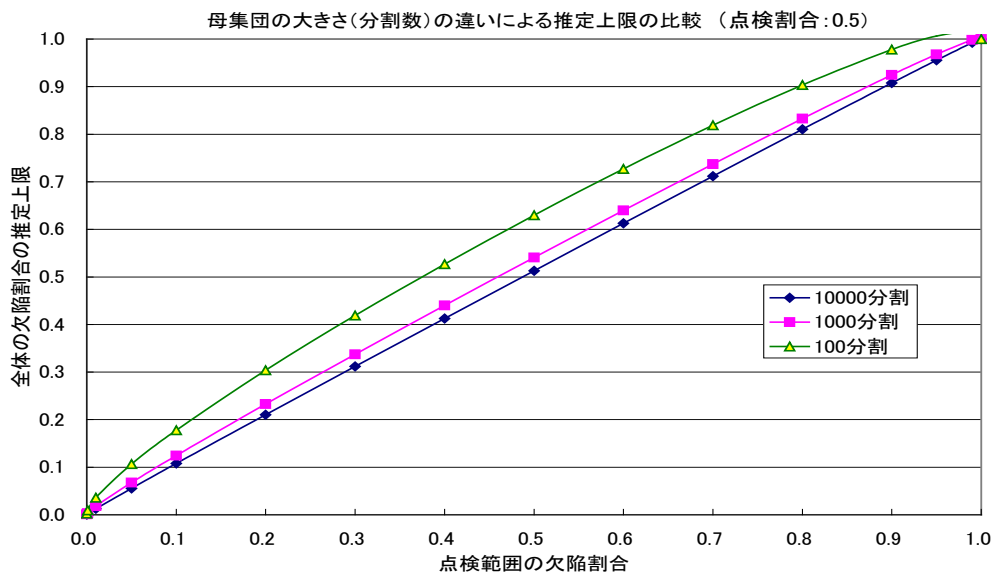
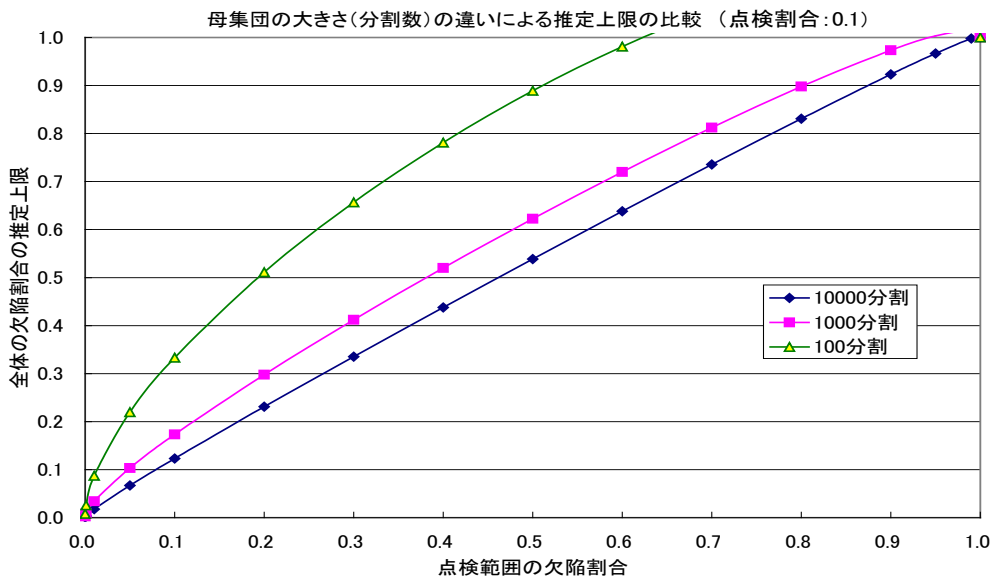


図 G-3 母数の大きさと信頼上限の比較

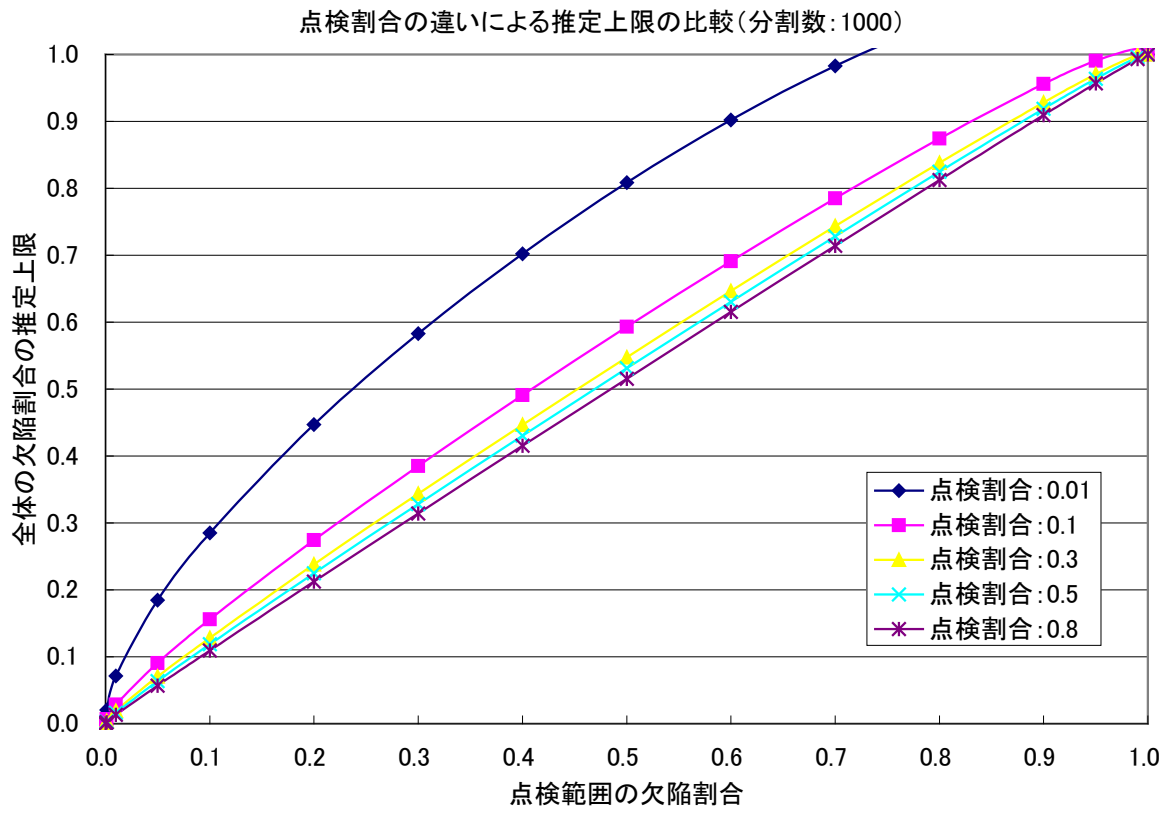


図 G-4 シュラウド全周を 1000 分割した場合の推定上限

想定欠陥割合 (点検欠陥比率  $Y=0.1$ )

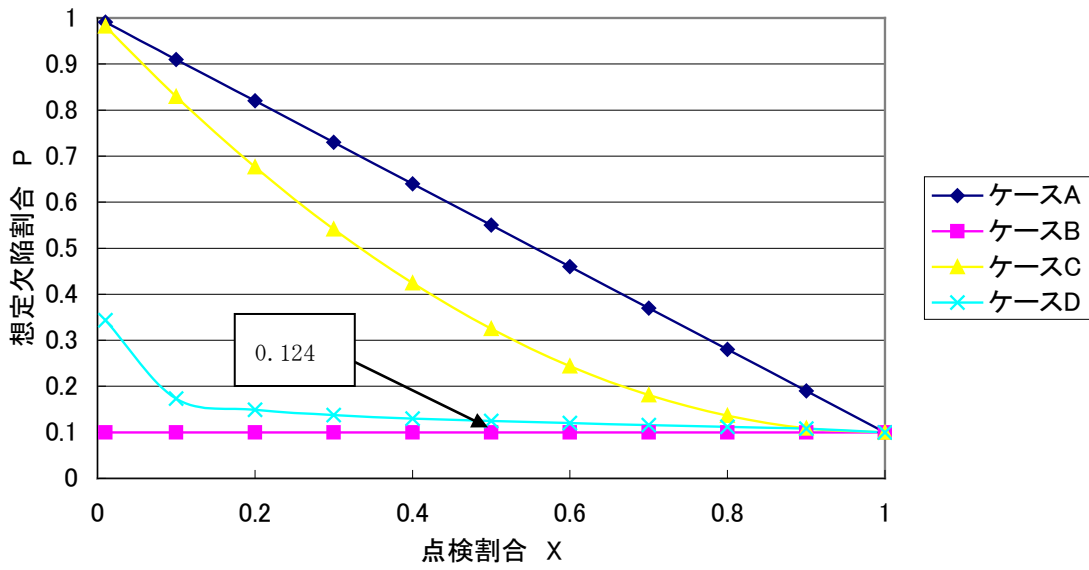


図 G-5 (1) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.1)

想定欠陥割合 (点検欠陥比率  $Y=0.2$ )

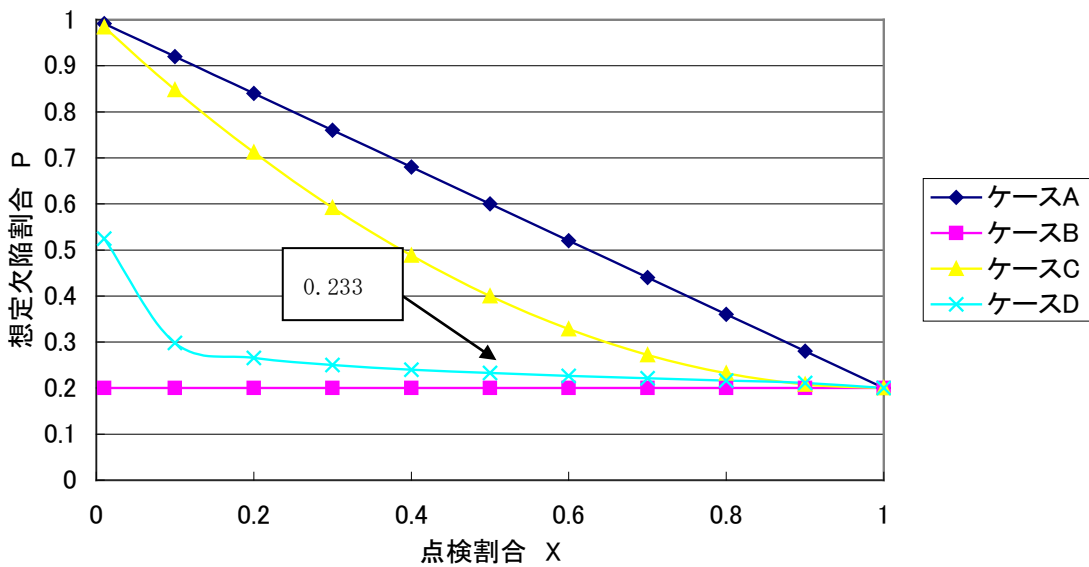


図 G-5 (2) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.2)

想定欠陥割合(点検欠陥比率  $\gamma=0.5$ )

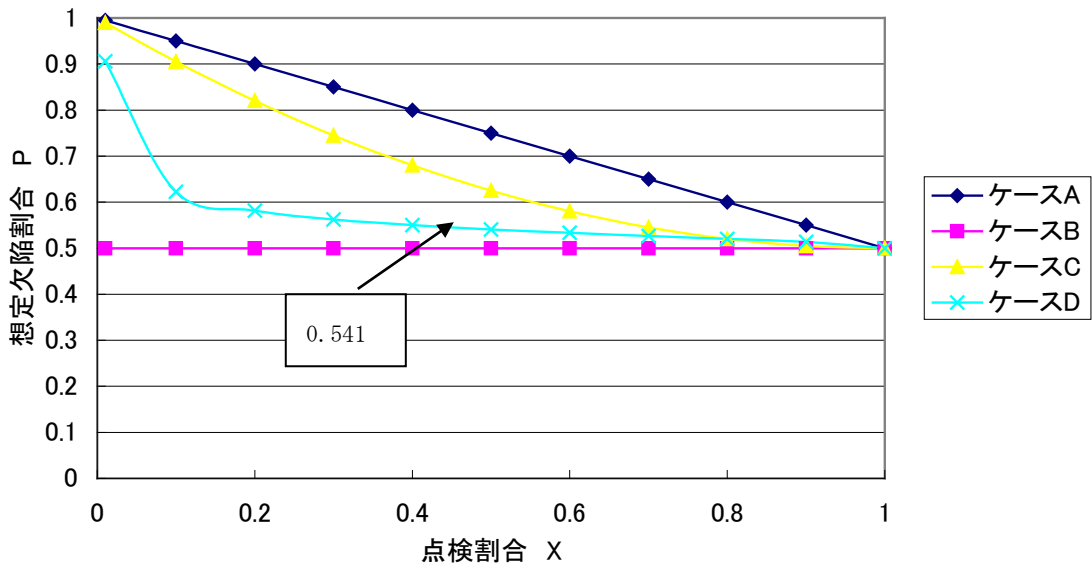


図 G-5 (3) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.5)

想定欠陥割合(点検欠陥比率  $\gamma=0.8$ )

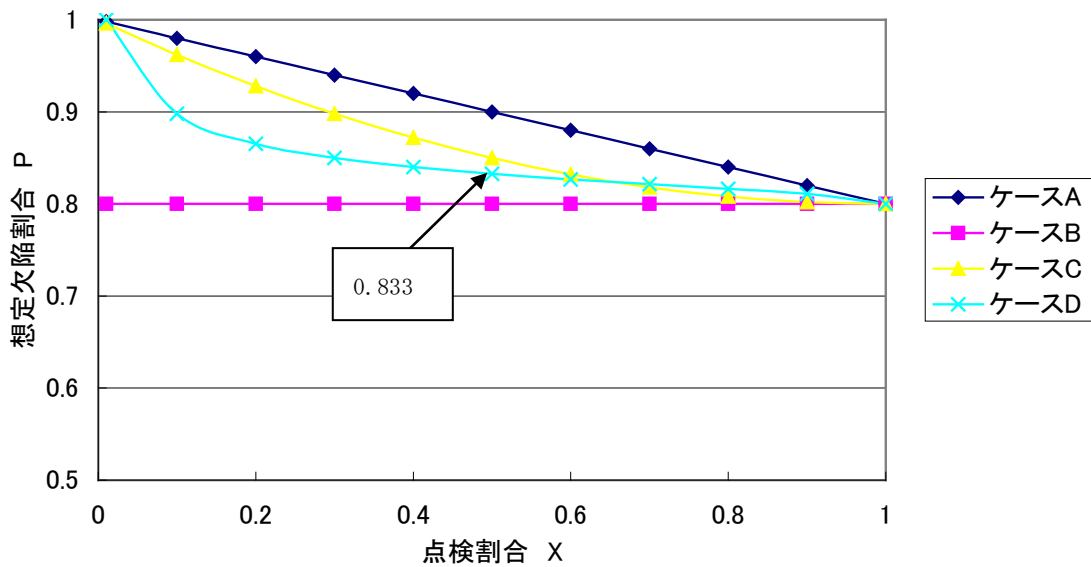


図 G-5 (4) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.8)

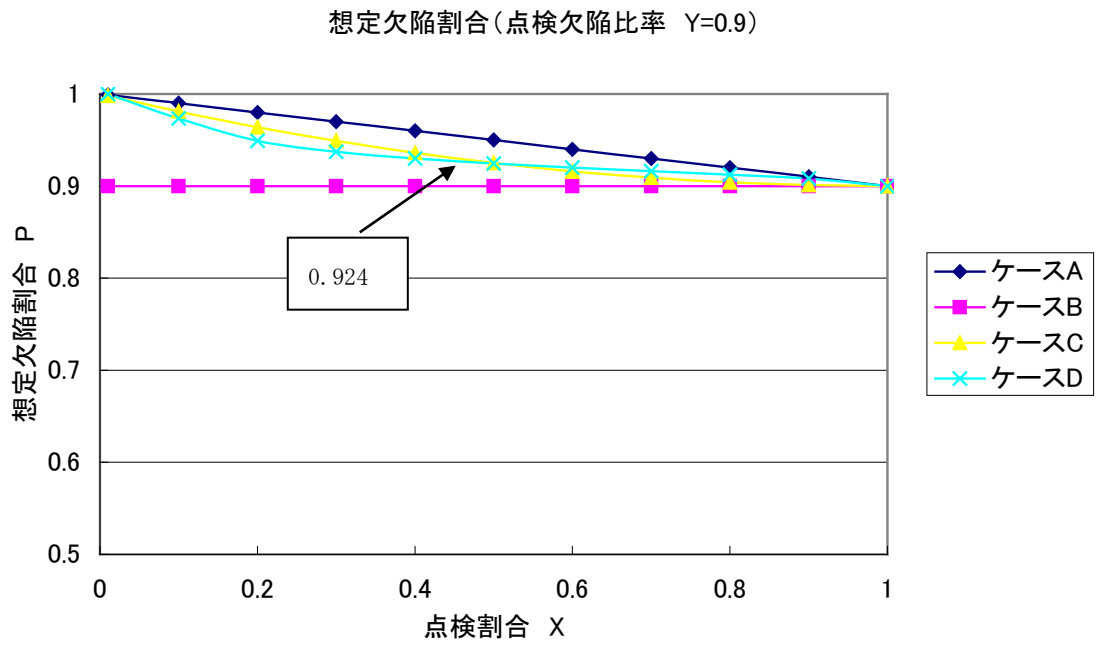
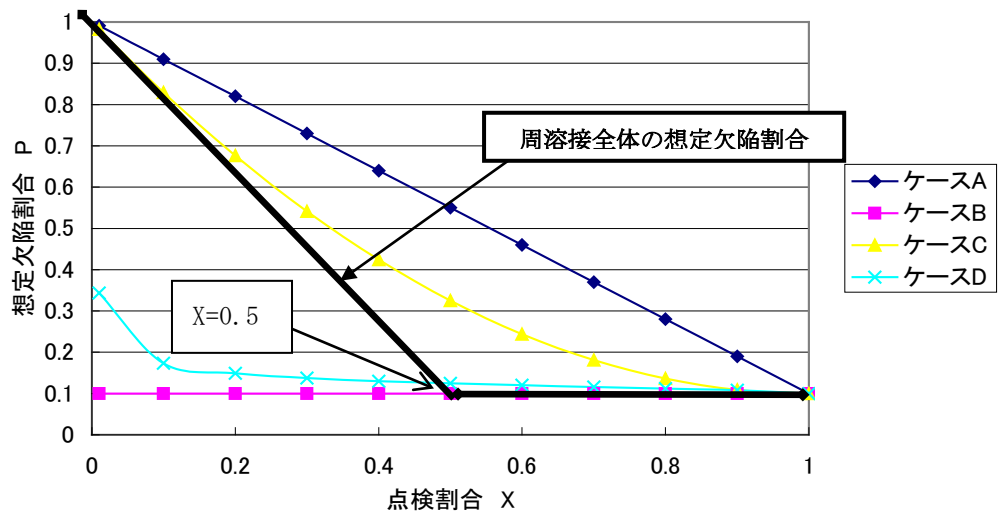
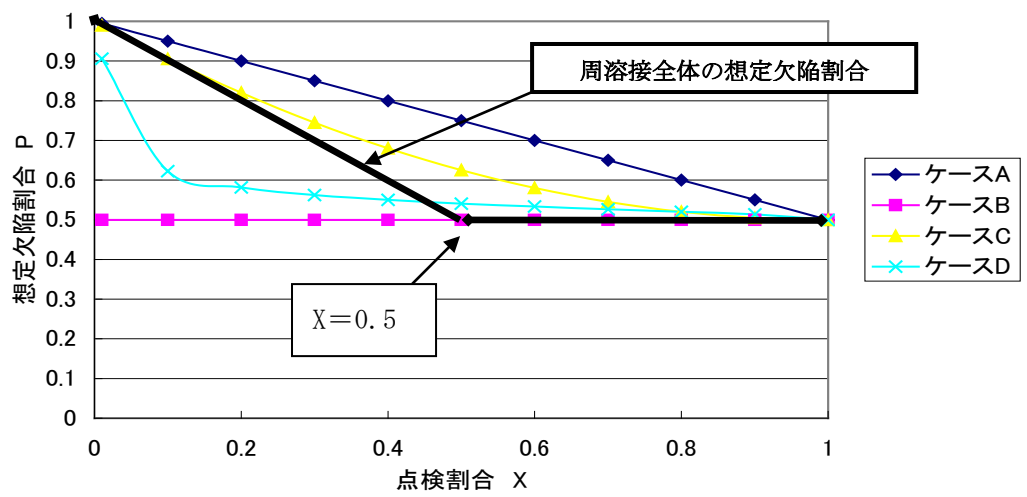


図 G-5 (5) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.9)

想定欠陥割合 (点検欠陥比率  $Y=0.1$ )



想定欠陥割合 (点検欠陥比率  $Y=0.5$ )



想定欠陥割合 (点検欠陥比率  $Y=0.8$ )

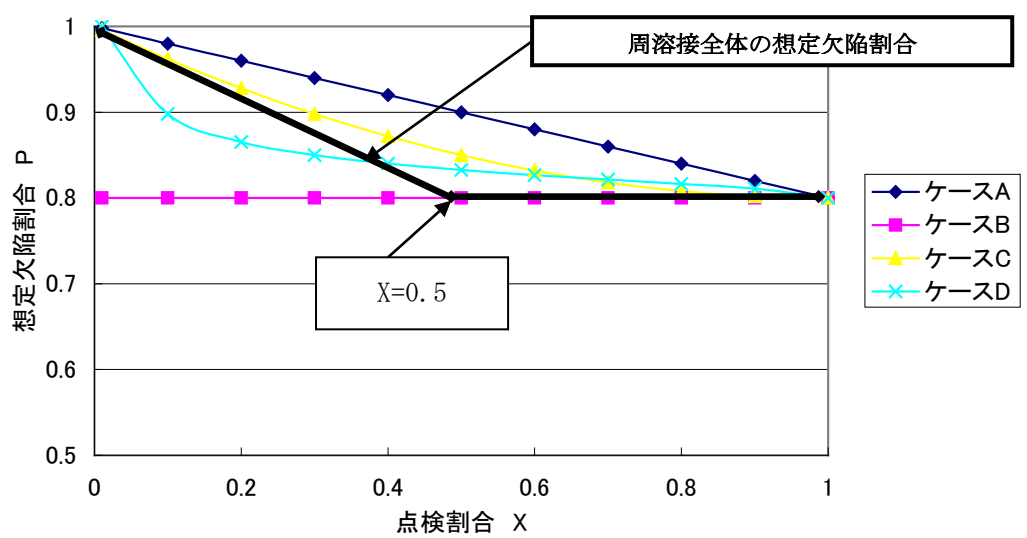


図 G-6 点検割合に応じた周溶接全体の想定欠陥割合

## 付録H シュラウドの変形による制御棒挿入性について

### 1. 目的

シュラウドの溶接部に亀裂を想定した場合の地震時におけるシュラウドの変形による制御棒の挿入性について評価を行う。

### 2. 検討条件

検討条件は以下に示すとおりである。

#### (1) 対象プラント

1100MWe BWR とする。

#### (2) 想定亀裂

シュラウドに想定した亀裂は下記のとおりである。

- ・ シュラウド H7 周溶接線 板厚の 50% 深さの亀裂
- ・ シュラウド H6 周溶接線 板厚の 50% 深さの亀裂

#### (3) Ss 地震時における炉心支持板での水平方向変位

上記 (2) の想定亀裂状態での Ss 地震時において、シュラウドの傾きにより炉心支持板位置で 1.4mm の水平方向変位、上部格子板と炉心支持板の水平方向相対変位 4.7mm が生じることから、この変位量を、炉心支持板位置及び炉心支持板と上部格子板のミスアライメントとして考慮する。

### 3. 検 討

#### (1) 地震時における制御棒挿入性

BWR プラントに対する制御棒の地震時挿入性を確認するために、下記のようなミスアライメントを付与し、燃料振幅 40mm まで加振させた制御棒の挿入性解析及び試験評価を行っている。

その結果、燃料振幅 40mm まで通常運転時のスクラム仕様値である 3.5 秒を十分満足することを確認している。(図 H-3, 4 参照)

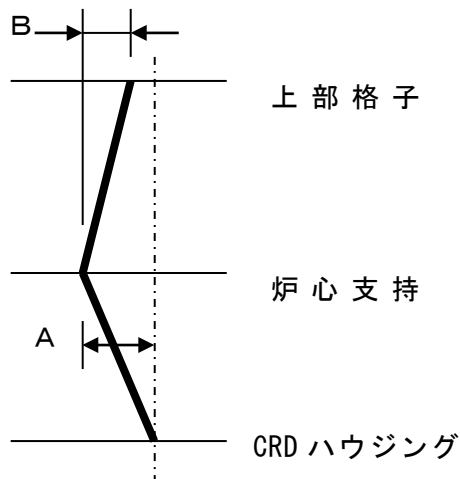


図 H-1 く字形の  
ミスアライメント

表 H-1 解析のケース (単位: mm)

	ケース 1	ケース 2	ケース 3
A	3.6	7.1	10.9
B	2.4	5.8	9.6

表 H-2 試験のケース (単位: mm)

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
A	3.64	5.16	7.06	8.0
B	2.38	3.00	5.80	5.80

(2) シュラウドの変形による地震時挿入性

シュラウドの想定亀裂による炉心支持板位置でのミスアライメント量は 1.4mm, 炉心支持板と上部格子板のミスアライメント量は 4.7mm であり, (1)で確認しているミスアライメント量 10.9mm 及び 9.6mm に比べて小さく, かつ下記に示すように CRDハウジング～炉心支持板～上部格子板において直線的なミスアライメント(くの字形状のミスアライメントがより厳しい)となることから, S<sub>s</sub>地震時における制御棒挿入性は十分確保できるといえる。

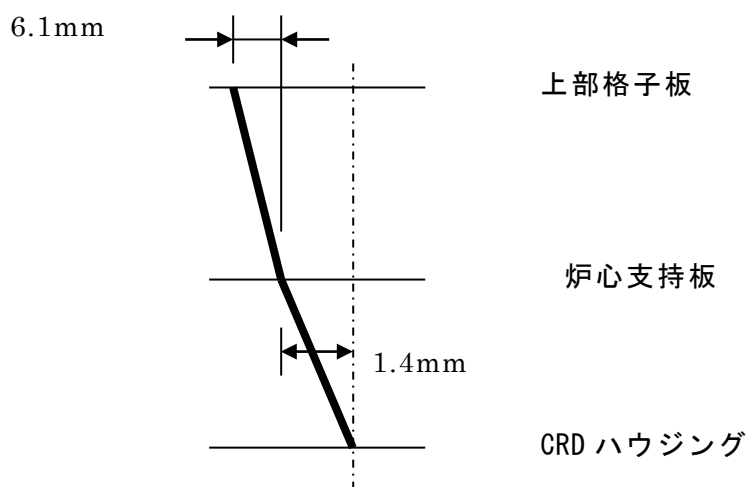


図 H-2 直線的なミスアライメント

(3) ABWR シュラウドの変形による地震時挿入性

ABWR シュラウドに対し, H7 溶接線に深さ 80%の亀裂を想定した場合の, S<sub>s</sub>地震に対する炉心支持板位置でのミスアライメント量は 0.9mm, 炉心支持板と上部格子板のミスアライメント量は 2.0mm であり, (1)(2)で確認しているミスアライメント量に比べて小さいことから, ABWR プラントにおいても S<sub>s</sub>地震時における制御棒挿入性は十分確保できるといえる。

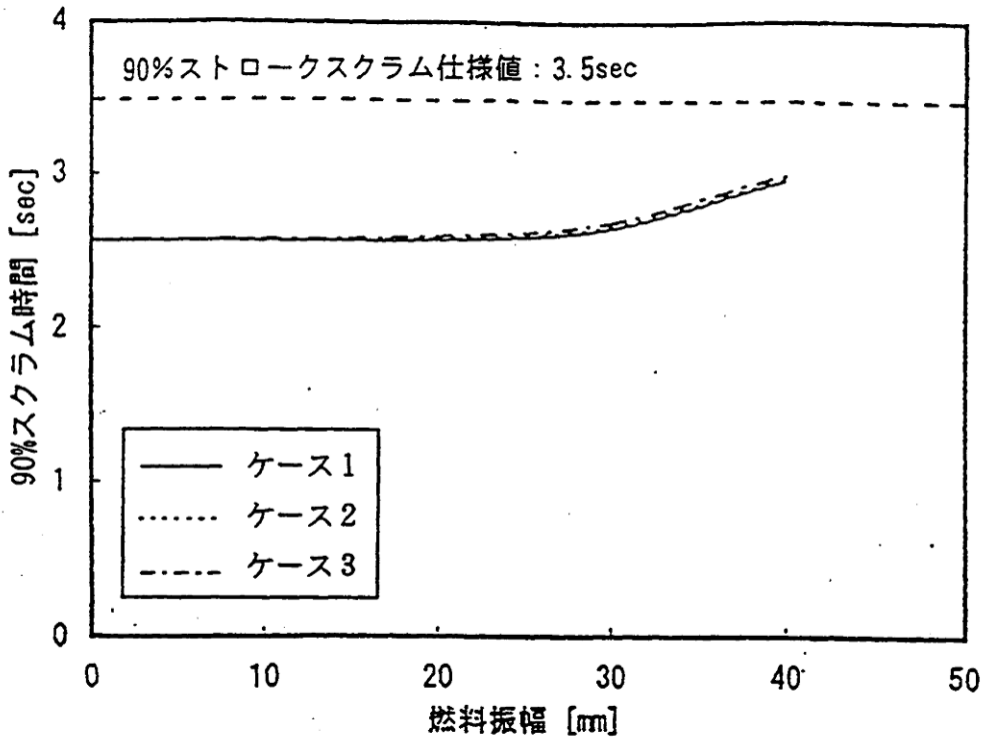


図 H-3 地震時挿入性解析結果

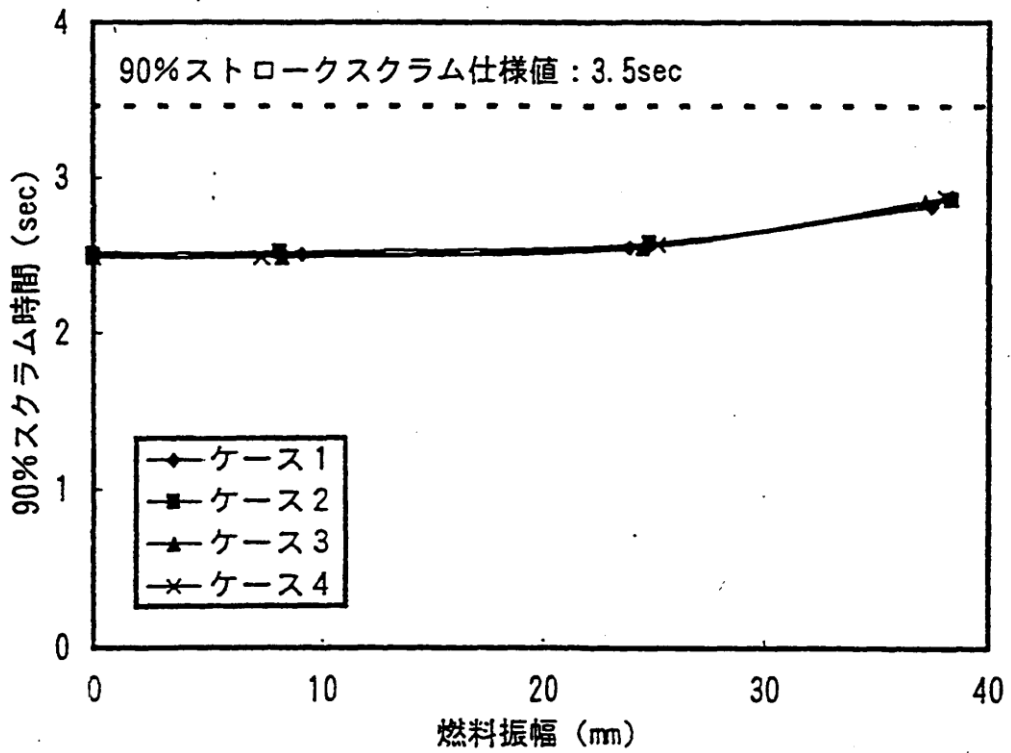


図 H-4 地震時挿入性試験結果

## 付録 I 実機プラントでの点検及び評価結果

### 1. 概 要

現在、シュラウドに関しては、点検で見つかったひび割れに対し、健全性評価を実施し、継続使用の可否を判断し、プラントの運転が継続されている。ひび割れを残したまま運転を継続したプラントにおいては、1 サイクル運転後に、当該部の点検を行い、本ガイドラインにしたがった評価結果との比較を実施している。また、その後さらに運転を継続し、点検及び評価を実施しているプラントもある。本付録では、これらの点検実績及び評価をまとめた。

### 2. 周方向溶接継手にひび割れが確認されたシュラウドの亀裂進展評価と点検実績

シュラウドの周方向溶接継手近傍で確認された周方向のひび割れに対し、評価を実施したプラントを表 I-1 に示す。また、これらのプラントにおける亀裂進展評価と点検実績を図 I-1～10 に示す。なお、各図に記載されている必要残存断面積は、各プラントの評価時の条件を用いて算出されたものである。

点検結果とガイドラインに基づき実施した亀裂進展評価を比較した結果、点検時の平均亀裂深さ及び5年後の残存断面積（平均亀裂深さ）が、必要残存断面積を下回っていることを確認した。また、ひび割れが確認された後の点検においても亀裂の進展評価に対して保守的な結果が確認されている。したがって、亀裂進展評価に基づき、必要残存断面積に到達するまでに十分な余裕をもって点検時期を設定し点検を行い、亀裂を管理するという本ガイドラインの目的が果たしていることが確認できた。

今後も引き続き点検結果等に基づき、本ガイドラインの妥当性を確認するとともに、国内外の損傷事例、研究事例等により新たな知見が得られた場合には、その知見に基づきガイドラインの内容を検討することとする。

[参考文献]

- 1) 炉内構造物等点検評価ガイドラインの適用実績について（保全学会第5回学術講演会）
- 2) 東北電力株式会社女川原子力発電所第1号機における炉心シュラウドの亀裂に関する健全性評価の妥当性確認の結果について
- 3) 柏崎刈羽原子力発電所2号機 炉心シュラウドのひび部の点検結果について（平成20年7月31日）
- 4) 柏崎刈羽原子力発電所3号機 炉心シュラウドのひび部の点検結果について（平成20年7月10日）
- 5) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会（第8回）資料8-1
- 6) METI 原子力安全・保安部会 原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会（第9回）資料9-2

表 I-1 シュラウドの周方向溶接継手のひび割れの点検実績及び評価例

プラント名	ひび割れが確認された箇所	亀裂進展評価と点検実績
女川原子力発電所 第 1 号機	H2 溶接部	図 I-1
	H6a 溶接部	図 I-2
女川原子力発電所 第 2 号機	H7a 溶接部	図 I-3
柏崎刈羽原子力発電所 第 2 号機	H6a 溶接部	図 I-4
柏崎刈羽原子力発電所 第 3 号機	H6a 溶接部	図 I-5
浜岡原子力発電所 第 3 号機	H6a 溶接部	図 I-6
	H7a 溶接部	図 I-7
浜岡原子力発電所 第 4 号機	H6a 溶接部	図 I-8
	H7a 内側溶接部	図 I-9
島根原子力発電所 第 2 号機	H4 溶接部	図 I-10

\*1：参考文献 1)， 2)， 3)， 4) に基づき整理を実施した。

\*2：図 I-1， 図 I-2， 図 I-4， 図 I-5 では， ひび割れが確認された後， 2 回点検を実施している。いずれの点検においても， 亀裂進展評価に対して保守的な結果が確認されている。

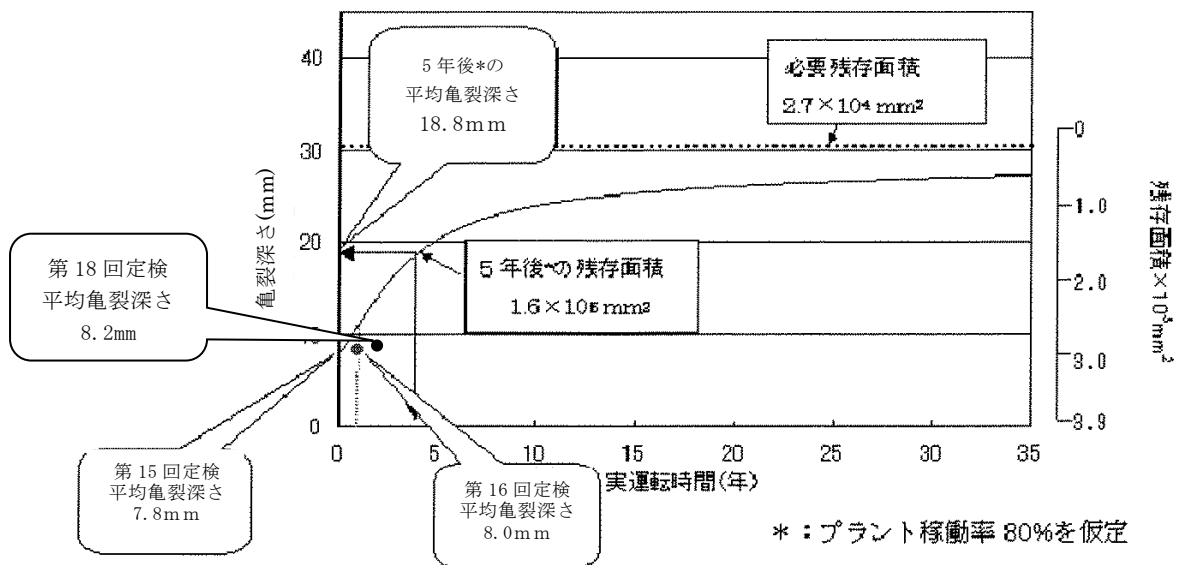


図 I-1 女川原子力発電所第1号機 H2 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

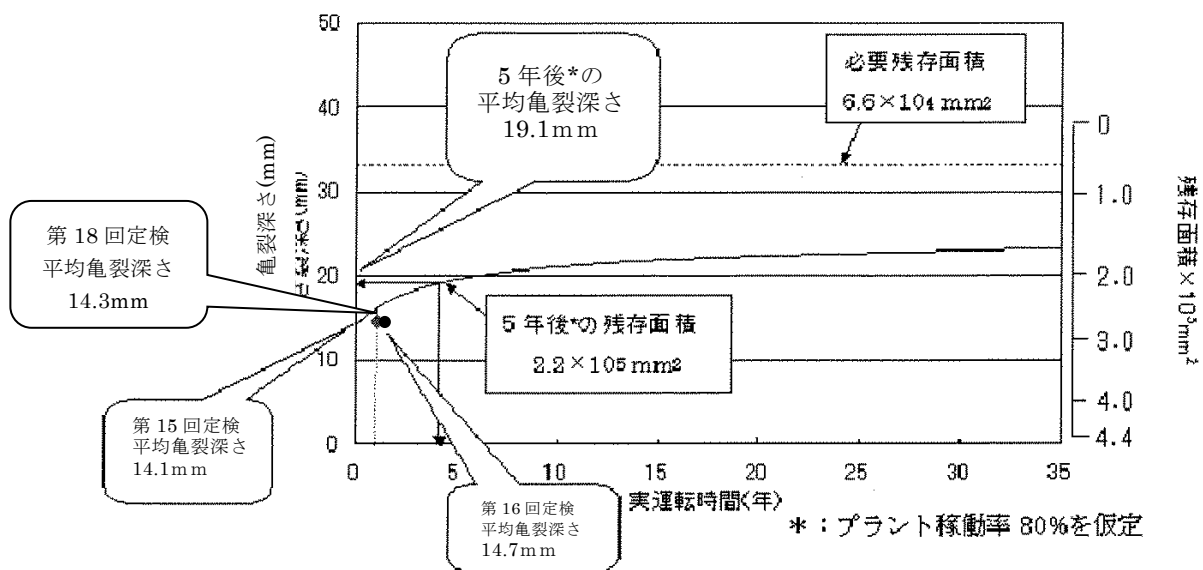


図 I-2 女川原子力発電所第1号機 H6a 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

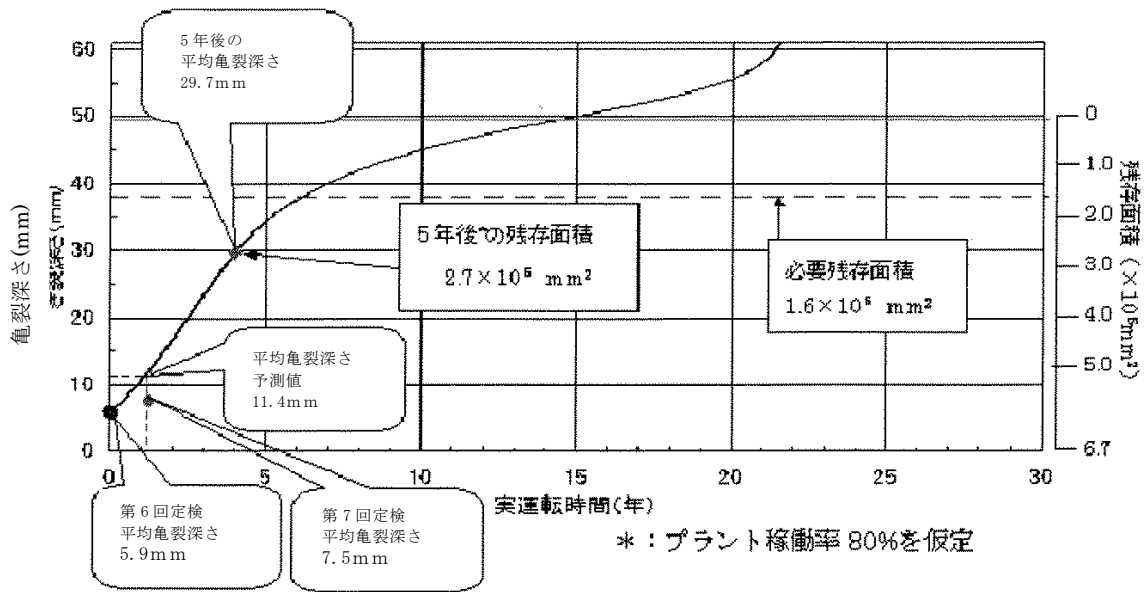


図 I-3 女川原子力発電所第2号機 H7a 内側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

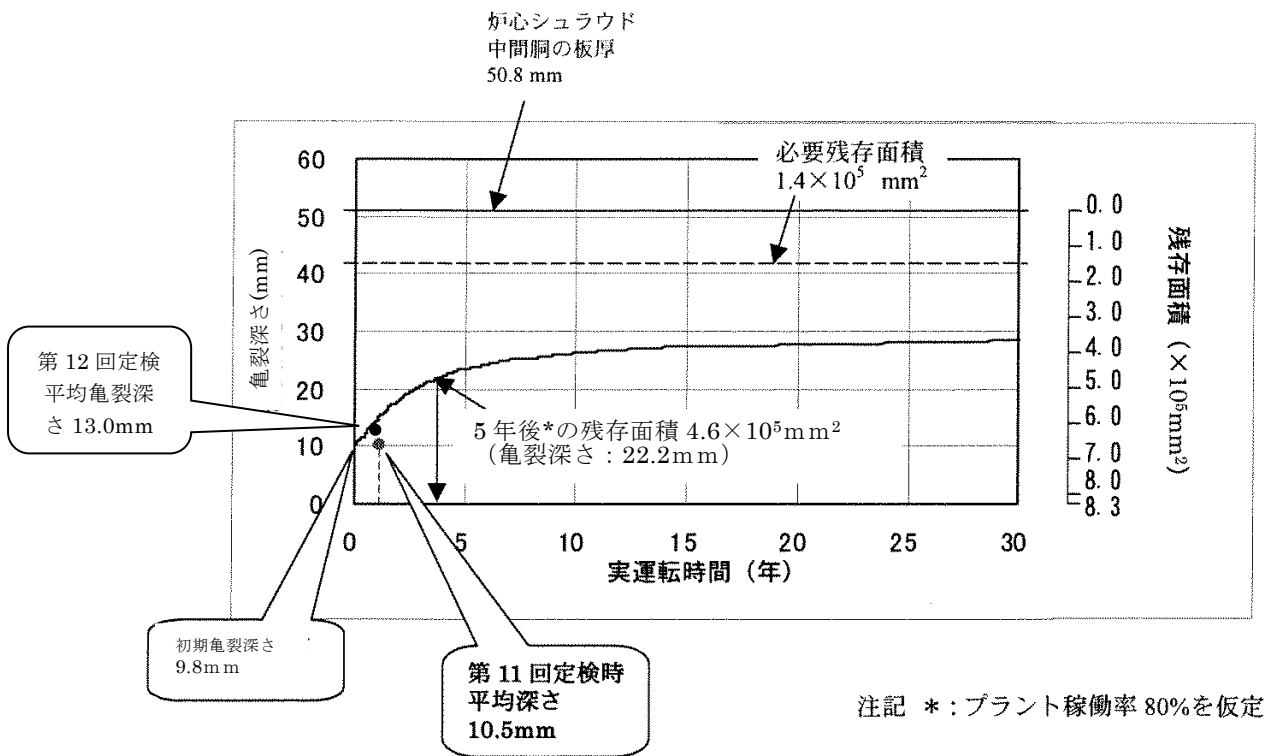


図 I-4 柏崎刈羽原子力発電所第2号機 H6a 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

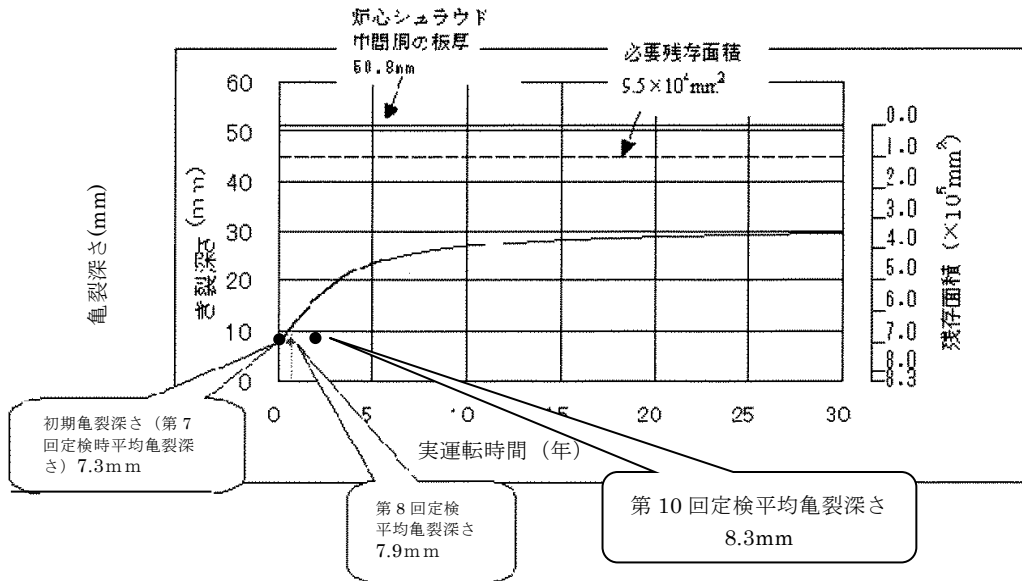


図 I-5 柏崎刈羽原子力発電所 第3号機 H6a 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

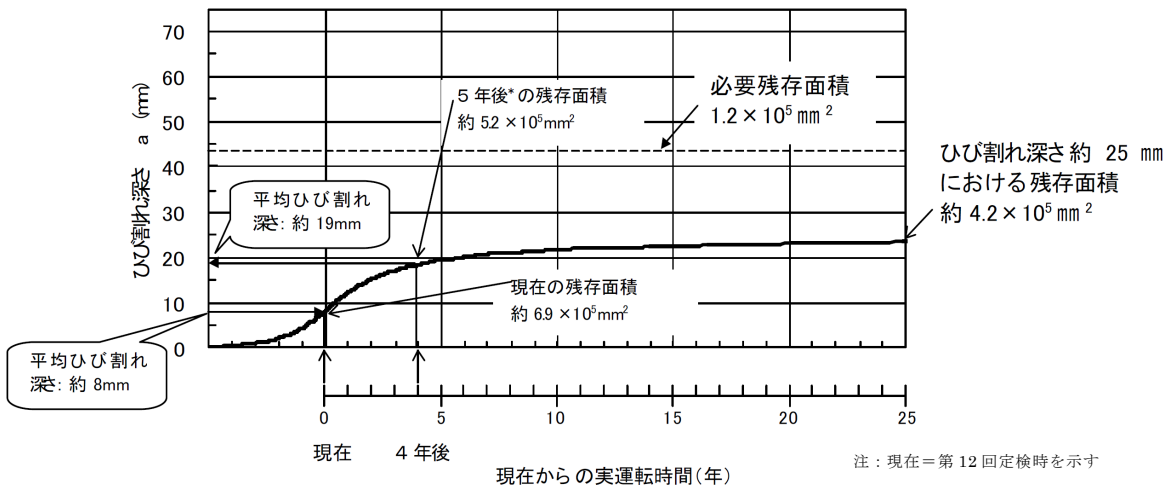
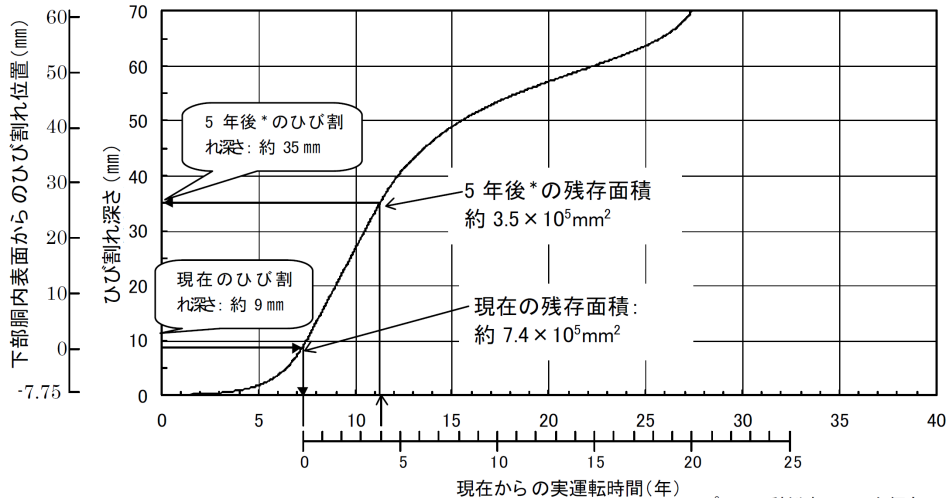
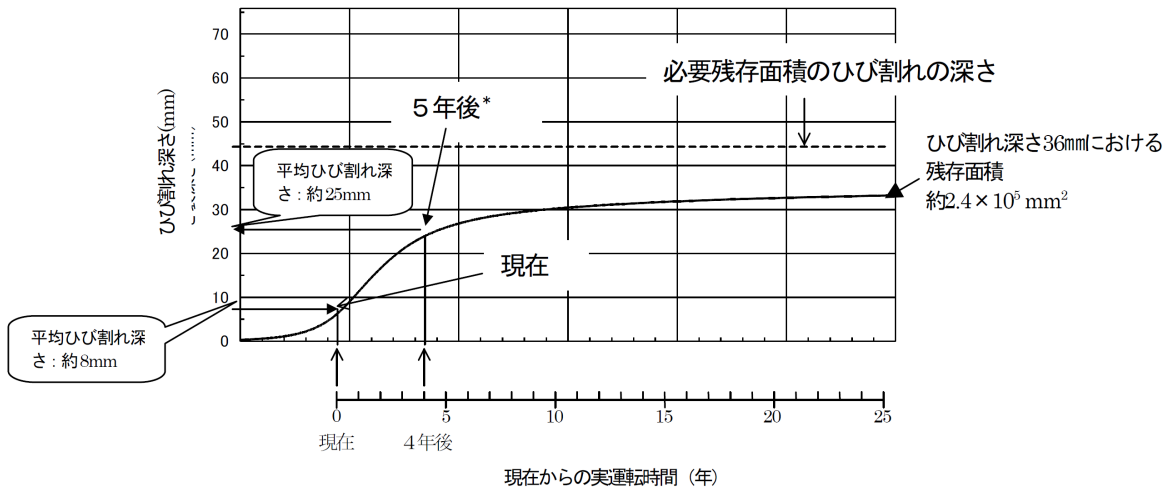


図 I-6 浜岡原子力発電所第3号機 H6a 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)



注：現在＝第12回定検時を示す

図 I-7 浜岡原子力発電所第3号機 H7a 内側（リング）の亀裂進展（評価と実績）



注：現在＝第7回定検時を示す

図 I-8 浜岡原子力発電所第4号機 H6a 外側（リング）の亀裂進展（評価と実績）

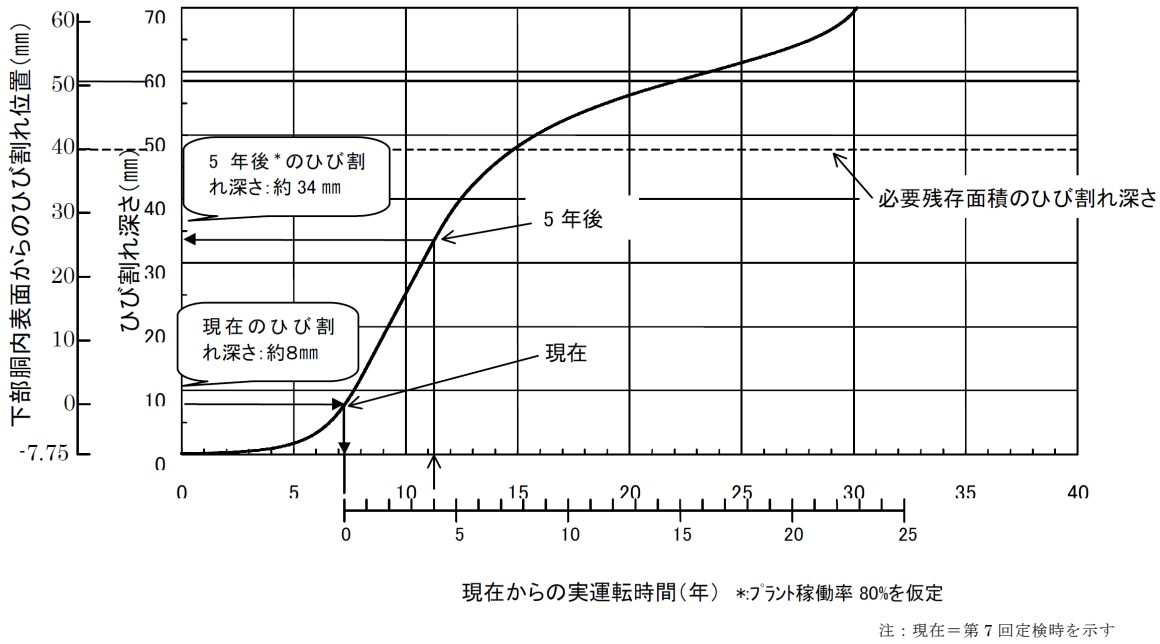
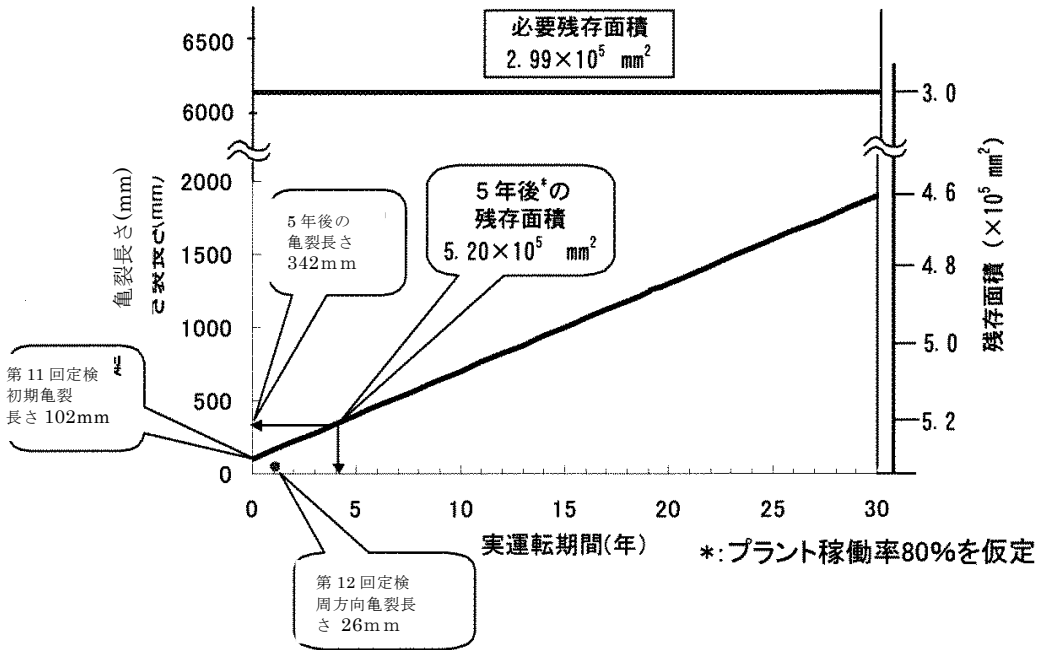


図 I-9 浜岡原子力発電所第 4 号機 H7a 内側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)



注) 初期亀裂は保守性を確保できるように目視点検結果で確認されている亀裂長さ (26mm) の両端にそれぞれ中間胴板厚に相当する長さ (38mm) を加算した周方向長さ (102mm) と仮定した。

図 I-10 島根原子力発電所 第 2 号機 H4 内側の亀裂進展 (評価と実績)

# 炉内構造物点検評価ガイドライン [炉心シュラウド] の概要

## 1. 基本的考え方

●原子炉安全性の確保を大前提とし、シュラウドに要求される機能を維持できるよう合理的な点検範囲、点検周期を規定する。

- ① 経年変化事象：応力腐食割れ
- ② シュラウドに要求される安全機能：炉心支持、制御棒挿入性、炉心冷却材流路の確保、事故時炉心再冠水機能
- ③ 対象材料：オーステナイトステンレス鋼溶接部
- ④ 具体的な点検対象溶接部：構造強度評価、安全機能維持の評価結果から重要な周方向溶接部

なお、個別プラントの具体的な対象選定にあつては、予防保全対策（ピーニング、水素注入及び貴金属コーティング等）についても考慮する。

## 2. 基本的な点検対象箇所

図1及び表1に示すシュラウドの点検可能な溶接線のうち周方向溶接線（H3、H4、H6及びH7）を対象とする。

## 3. 点検方法

- 目視試験又は適切な超音波探傷試験、渦電流探傷試験にて実施する。
- 目視試験（MVT-1）は炉内構造物等点検評価ガイドライン[遠隔目視試験]に従い実施する。
- 超音波探傷試験はJEAG4207に準拠するか、同等な手法で実施する。
- 渦電流探傷試験は、対象に対する検出感度が確認された手法を用いて実施する。

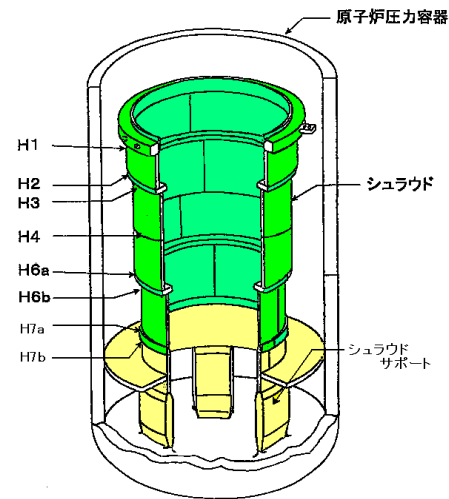


図1 シュラウドの構造

表-1 シュラウドの検査可能範囲（1100MWe BWR）

	VT		UT
	シュラウド外側(%)	シュラウド内側(%)	シュラウド内側/外側(%)
	吊下式/遠隔式	吊下式/遠隔式/マイクロカメラ	遠隔式
H3	100	100	100
H4	100	100	100
H6a	80	100	80
H6b	60	90以上	60
H7a	30~50	90以上	90以上
H7b	30~50	90以上	90以上
V3	100	100	60
V4	100	100	100
V5	100	100	80
V6	80	100	30
V7	0	100	100

## 4. 点検範囲及び点検周期の考え方

●個別プラントの荷重条件等を考慮し、点検不可範囲については、点検実施範囲とその欠陥の割合から所定の荷重伝達がないものと仮定し、構造強度と安全機能を維持するために必要な溶接部の断面積（許容残存断面積）を算出する。（図-2）

●欠陥がある場合は、その欠陥の進展を、欠陥がない場合についても初期欠陥とその進展を仮定して評価することにより、次回点検時における健全な断面積が許容残存断面積より大きくなるように次回点検時期及び点検（必要）範囲を設定する。（図-3）

以上より、次回点検までの亀裂進展を想定しても、必ず許容残存断面積以上の健全部が確保されるように点検を行い、確保できない場合には補修等の対策を実施する。（図-4）

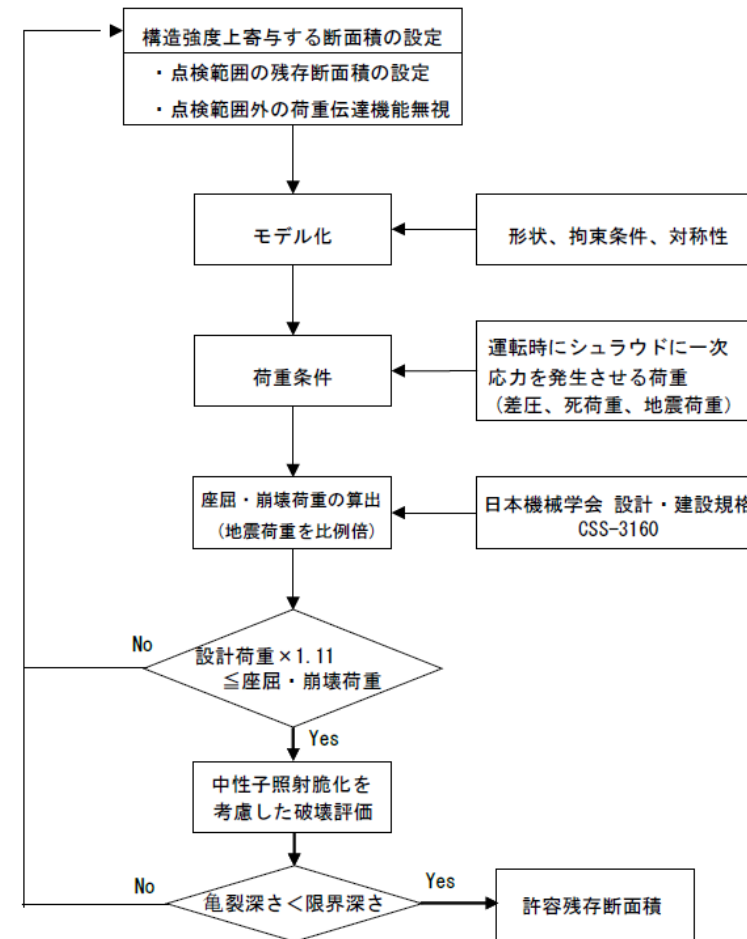


図2 許容残存断面積の算出フロー

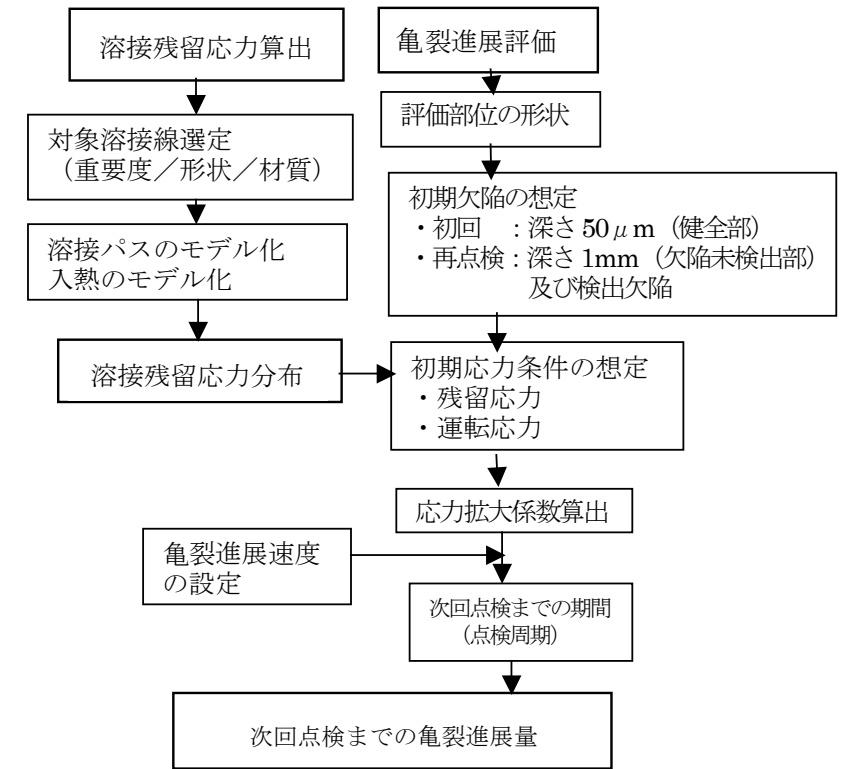
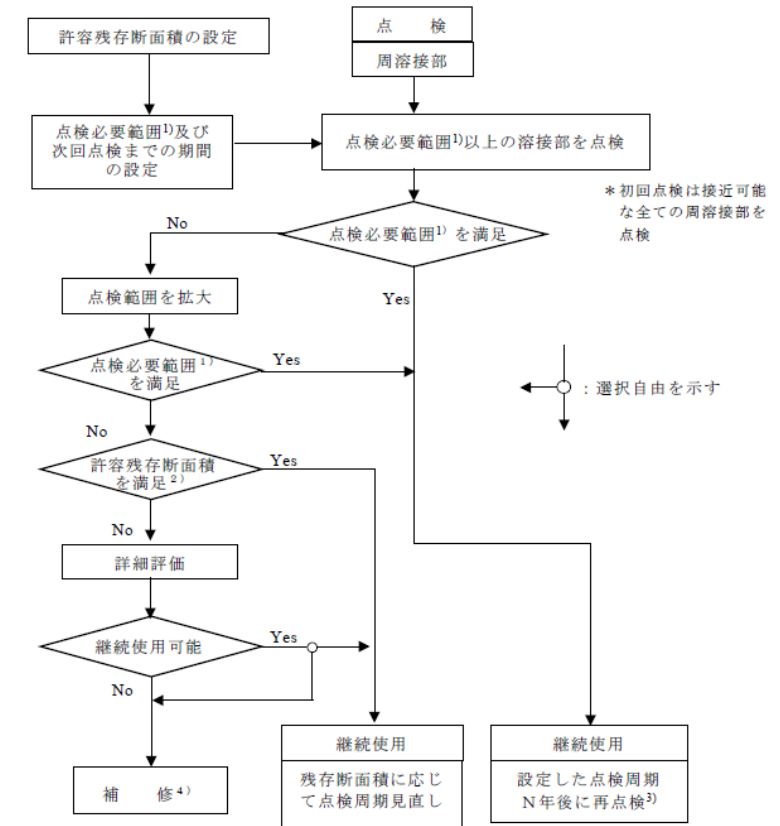


図3 亀裂進展量算定の手順



1) 点検必要範囲=許容残存断面積+次回点検までの健全部残存面積減少量+次回点検までの検出亀裂の進展量  
 2) 許容残存断面積を満足：健全範囲-検出亀裂の進展量-健全部残存面積減少量

図4 シュラウドの点検の考え方

## 改訂経緯

- 平成 13 年 11 月 初版発行
- 平成 16 年 9 月 第 2 版発行
- 点検周期の設定根拠を、炉心シュラウドの形状（リングの有無）毎の亀裂進展評価結果を用いることとし、解説 3-2 に記載の根拠を改訂するとともに、図 3-2-2 及び、図 3-5-3 を改訂した。
- 平成 19 年 4 月 第 3 版発行
- 炉心シュラウド支持ロッド（支持ロッド）による補修を行った場合の補修後の点検範囲、点検周期及びその設定根拠を追加した。合わせて付録 A に支持ロッド使用材料の SCC 関連データを追加するとともに、最新知見の反映も行った。また、全体を通して表現の適切化の見直しを行った。
- 平成 20 年 6 月 第 4 版発行
- これまでの炉心シュラウド点検状況を踏まえて、未点検範囲の欠陥想定法の検討を加えた結果を付録 Q として追加し、解説 3-3 の未点検範囲の取扱いに関する記述を見直した。解説 3-6 の応力改善対策として磨きを追記。また、全体を通して表現適切化の見直しを行った。
- 平成 27 年 3 月 第 5 版発行
- ・解説 1-2 にガイドライン適用にあたっての留意事項を記載した。
  - ・炉心シュラウドの模擬試験体による破壊試験の結果を踏まえて、シュラウドの欠陥裕度の評価及び崩壊評価法の裕度の定量評価を見直し付録 D にシュラウドの欠陥裕度評価を纏めるとともにこの評価をもとに解説 3-3 の安全係数の考え方を見直した。
  - ・旧版付録のうち、旧知の SCC 関連データ等について削除するとともに、参照すべき規格等の新たな知見を加味して全体構成を見直すとともに、文章表現適正化の見直しを実施した。なお第 4 版は原技協 HP よりアーカイブ参照できる。

2020年12月

第6版発行

- ・ 廃炉となる比較的初期のプラントの情報削除を反映し、全体を見直した。
- ・ 改良型 BWR (ABWR) のシュラウドの情報を追加した。
- ・ 付録 A にシュラウドを構成する各構造体について、形状・材質、経年劣化事象、運転経験、安全機能への影響に基づいた点検の考え方を記載した。
- ・ 基準地震動  $S_s$  による欠陥評価に基づく亀裂進展評価を記載した。
- ・ その他全体を通して文章・図の適正化を図った。

2023年12月

第7版発行

- ・ 付録 A の各構造体の運転経験を更新し、個別点検と一般点検の整理結果を定性的に可視化した点検対象マトリクスを見直した。
- ・ 82合金の亀裂進展速度式の変更に伴い、記載を追加した。
- ・ その他全体を通して文章の適正化を図った。

---

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン  
[炉心シュラウド]  
(第7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

---

©原子力安全推進協会，2023

本書に掲載されたすべての記事内容は、原子力安全推進協会の許可なく、  
転載・複写することはできません。