

BWR炉内構造物点検評価ガイドライン

[炉心シュラウド]

(第5版)

平成27年3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。

平成 12 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、平成 19 年より日本原子力技術協会に継承され、さらに平成 24 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および収集に努めることと致します。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。

平成 27 年 3 月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会
委員長 野本敏治

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	
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	

※ 改訂の詳細は参考資料 3 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

(平成 27 年 3 月現在, 順不同, 敬称略)

委員長	野本 敏治	東京大学名誉教授
副委員長	関村 直人	東京大学教授
委員	安藤 博	元(財)発電設備技術検査協会
委員	辻川 茂男	東京大学名誉教授
委員	西本 和俊	大阪大学名誉教授 福井工業大学教授
委員	橋爪 秀利	東北大学教授
委員	望月 正人	大阪大学教授
幹事	村井 荘太郎	東京電力(株)
幹事	中野 守人	関西電力(株)
幹事	小林 広幸	日本原子力発電(株)
委員	勝海 和彦	北海道電力(株)
委員	清水 敬輔	東北電力(株)
委員	吉田 伸司	東京電力(株)
委員	鈴木 俊一	東京電力(株)
委員	庄司 卓	中部電力(株)
委員	新屋 和彦	北陸電力(株)
委員	桑田 賢一郎	中国電力(株)
委員	松浦 正幸	四国電力(株)
委員	大久保 康志	九州電力(株)
委員	堂崎 浩二	日本原子力発電(株)
委員	浦辺 守	日本原子力発電(株)
委員	枘 明彦	電源開発(株)
委員	増田 稔	日立GEニュークリア・エナジー(株)
委員	磯 敦夫	(株)東芝
委員	小山 幸司	三菱重工業(株)
委員	太田 丈児	電力中央研究所
委員	杉江 保彰	原子力安全推進協会
事務局	関 弘明	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 目的	1
1.2 適用	1
第2章 点検対象	
2.1 基本的考え方	1
2.2 点検対象部位	1
2.2.1 従来型① (図 2-1)	1
2.2.2 従来型② (図 2-2)	2
2.2.3 取替型① (図 2-3)	2
2.2.4 取替型② (図 2-4)	2
2.2.5 取替型③ (図 2-5)	2
2.2.6 ABWR 型 (図 2-6)	3
2.2.7 支持ロッド補修を行ったプラント	3
第3章 点検及び評価	
3.1 点検方法	7
3.1.1 点検手法	7
3.1.2 初回点検	7
3.1.3 再点検	8
3.2 点検周期	9
3.3 評価	10
3.3.1 判定基準	10
3.3.2 詳細評価	10
3.3.3 点検のフロー	10
解説	
解説 1-1 「ガイドライン制定の目的」	13
解説 1-2 「本ガイドラインの適用にあたって」	13
解説 2-1 「シュラウドの構造健全性及び機能維持の確保」	13
解説 2-2 「シュラウドに想定される経年変化事象」	14
解説 2-3 「構造強度上の重要性を考慮した点検除外」	14

解説 2-4	「支持ロッドの構造及び機能」	15
解説 2-5	「支持ロッドの点検箇所」の例	15
解説 2-6	「材料の耐応力腐食割れ性」	16
解説 3-1	「渦流探傷試験」	17
解説 3-2	「初回点検」	17
解説 3-3	「残存断面積及び許容残存断面積」	20
解説 3-4	「点検における接近性」	24
解説 3-5	「点検必要範囲及び点検周期」	24
解説 3-6	「SCC 予防保全対策」	28
解説 3-7	「シュラウドの補修技術」	28
解説 3-8	「支持ロッドの点検周期」	28
解説 3-9	「支持ロッド補修後のシュラウド縦方向溶接部の点検」	28

付録

- 付録 A シュラウド点検における接近性について
- 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
- 付録 E 評価手法 [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 実機プラントでの検査及び評価結果
- 付録 J 支持ロッドの構造・機能と補修後の点検及び損傷評価

参考資料

- 参考資料-1 BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン (シュラウド) の考え方
- 参考資料-2 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-3 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、炉内構造物の構造健全性が維持されていることを確認するための合理的な点検のあり方を示すことを目的とする。（解説 1-1）

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（以下シュラウドと略す）及び、炉心シュラウド支持ロッド（以下支持ロッドと略す）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。（解説 1-2）

第2章 点検対象

2.1 基本的考え方

- (1) 点検対象の選定にあたっては、原子力安全の確保を基本とする。（解説 2-1）
- (2) シュラウドに想定される経年変化事象としては、応力腐食割れを想定する。（解説 2-2）
- (3) シュラウドの溶接部には型式毎（図 2-1～図 2-6）に、周方向溶接部、縦方向溶接部があるが、本ガイドラインでは、構造強度上重要な周方向溶接部を点検対象とする。なお、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、点検対象外とする。（解説 2-3）
一方、支持ロッド補修を行ったシュラウドに関しては、支持ロッド及び、支持ロッドによる補修設計において強度を期待していない溶接部以外を点検対象とする。（解説 2-4, 2-5）
- (4) 材料としては、国内プラントで用いられている全ての材料を対象とする。（解説 2-6）

2.2 点検対象部位

シュラウドの型式毎に具体的な点検対象溶接部の例を以下に示す。

2.2.1 従来型①（図 2-1）

- ・ H1 溶接部（上部リングと上部胴の周溶接部）
- ・ H2 溶接部（上部胴と中間部リングの周溶接部）
- ・ H3 溶接部（中間部リングと中間部胴の周溶接部）
- ・ H4 溶接部（中間部胴同士の周溶接部）
- ・ H6a 溶接部（中間部胴と下部リングの周溶接部）

- ・ H6b 溶接部（下部リングと下部胴の周溶接部）
- ・ 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溶接部）

2.2.2 従来型②（図 2-2）

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

2.2.3 取替型①（図 2-3）

- ・ H4 溶接部（シュラウド上半とシュラウド下半の周溶接部）
- ・ H7a 溶接部（シュラウド下半と下端リングの周溶接部）
- ・ H7b 溶接部（下端リングとシュラウドサポートシリンダの周溶接部）

2.2.4 取替型②（図 2-4）

- ・ H4 溶接部（シュラウド上部とシュラウド中間部の周溶接部）
- ・ H5 溶接部（シュラウド中間部とシュラウド下部の周溶接部）
- ・ H7a 溶接部（シュラウド下部と下端リングの周溶接部）
- ・ H7b 溶接部（下端リングとシュラウドサポートシリンダの周溶接部）

2.2.5 取替型③（図 2-5）

- ・ H1 溶接部（上部リングと上部胴の周溶接部）
- ・ H2 溶接部（上部胴と中間部リングの周溶接部）
- ・ H3 溶接部（中間部リングと中間部胴の周溶接部）
- ・ H4 溶接部（中間部胴同士の間溶接部）
- ・ H6a 溶接部（中間部胴と下部リングの周溶接部）
- ・ H6b 溶接部（下部リングと下部胴の周溶接部）
- ・ H7b 溶接部（下部胴と下部リングの周溶接部）

- ・ H7b 溶接部（下部リングとシュラウドサポートシリンダの周溶接部）

2.2.6 ABWR 型（図 2-6）

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

2.2.7 支持ロッド補修を行ったプラント

- (1) 支持ロッド
- (2) 支持ロッドによる補修設計において強度を期待していない溶接部以外の周溶接部（従来型①，②の例）（図 2-1， 2-2）
 - ・ V1 溶接部（上部リングの縦溶接部）
 - ・ V2 溶接部（上部胴の縦溶接部）
 - ・ V3 溶接部（中間部リングの縦溶接部）
 - ・ V4 溶接部（中間部胴上側の縦溶接部）
 - ・ V5 溶接部（中間部胴下側の縦溶接部）
 - ・ V6 溶接部（下部リングの縦溶接部）
 - ・ V7 溶接部（下部胴の縦溶接部）

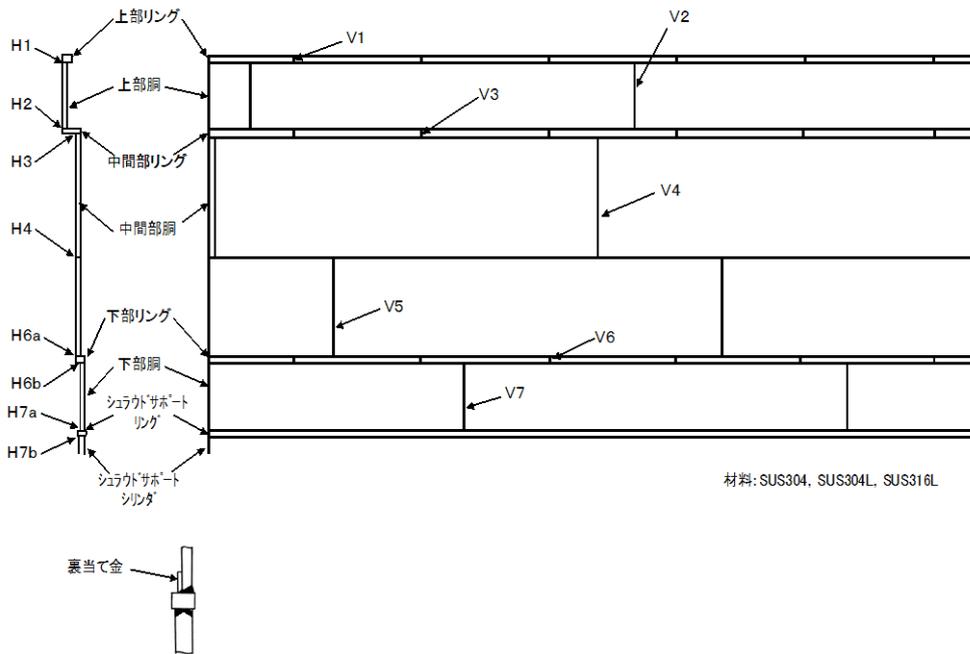


図2-1 シュラウドの溶接線と溶接線番号<従来型①>

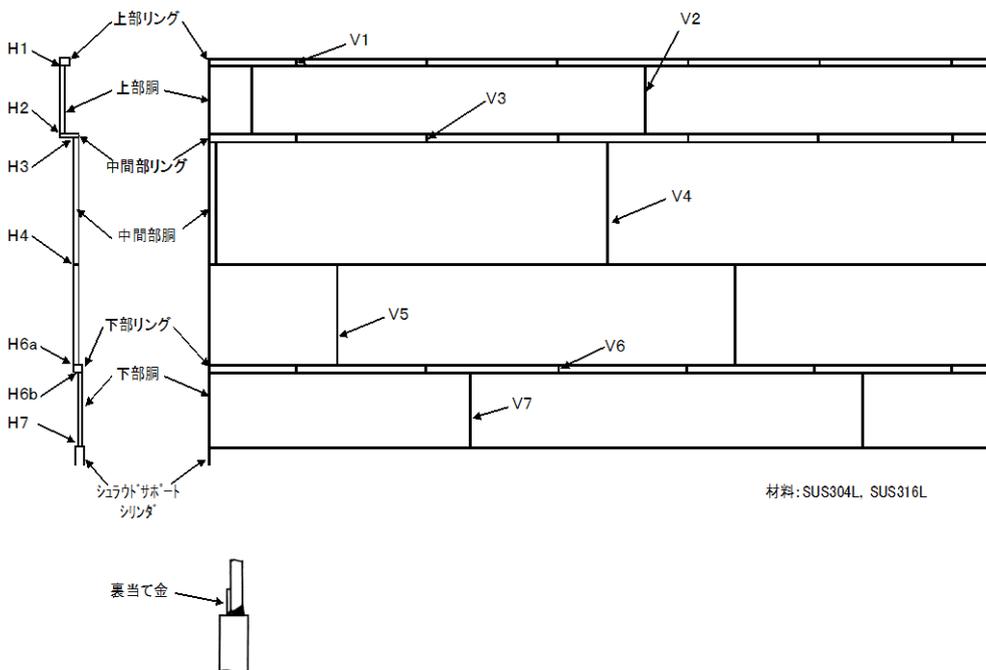


図2-2 シュラウドの溶接線と溶接線番号<従来型②>

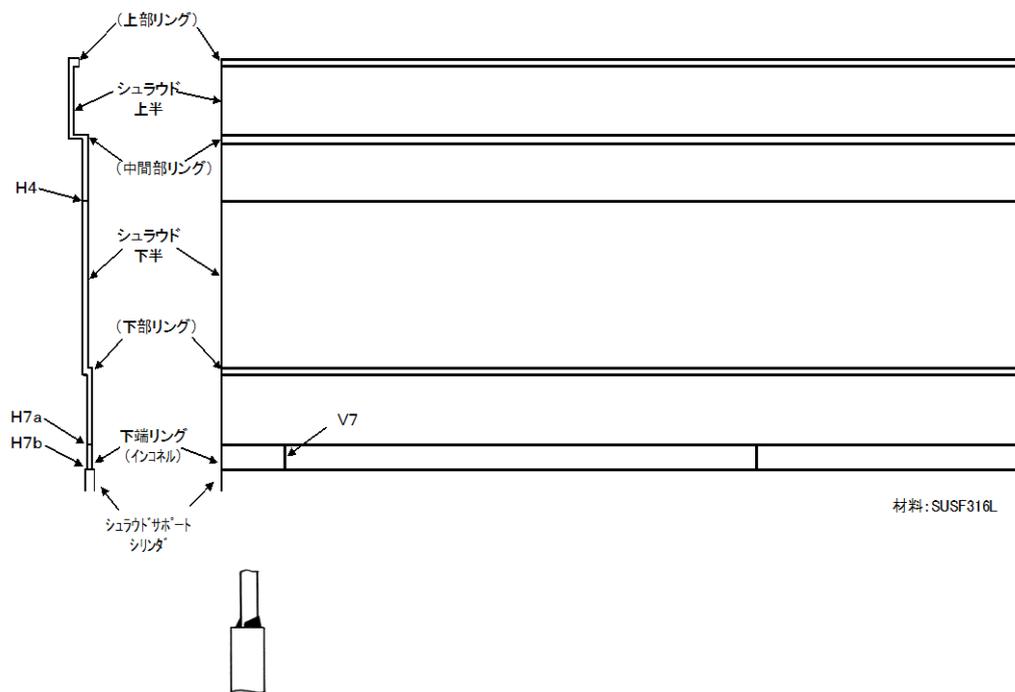


図2-3 シュラウドの溶接線と溶接線番号<取替型①>

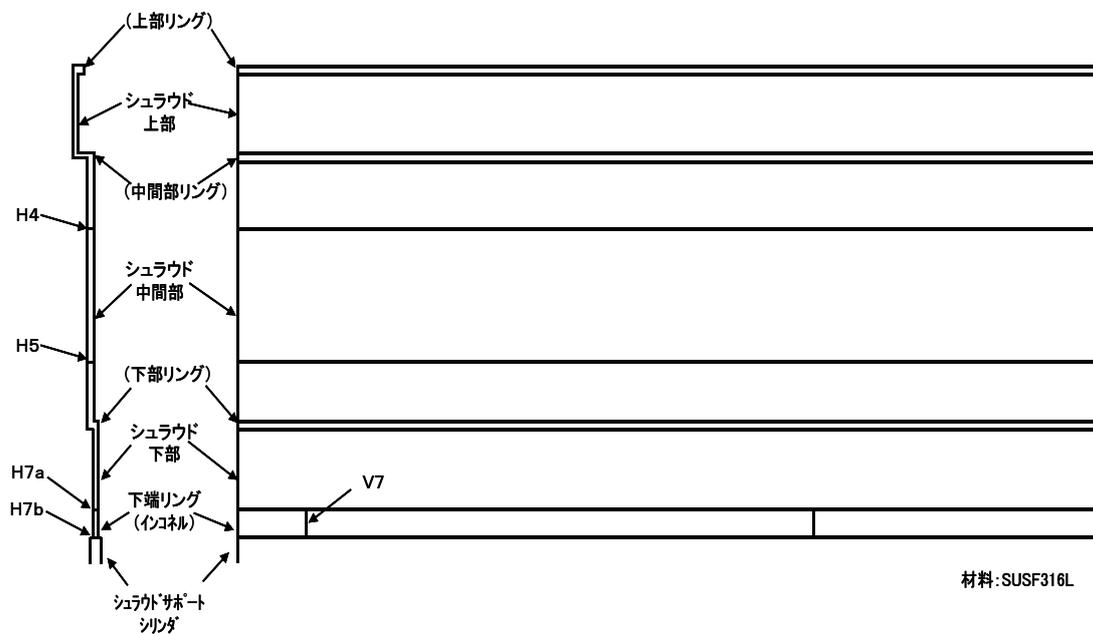


図2-4 シュラウドの溶接線と溶接線番号<取替型②>

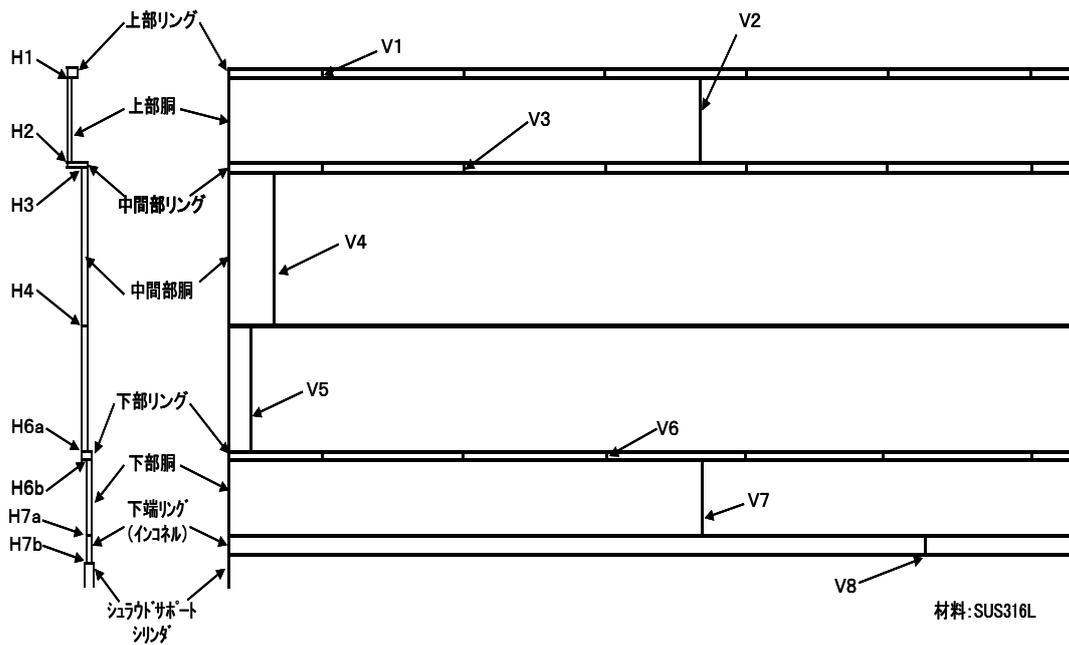


図2-5 シュラウドの溶接線と溶接線番号<取替型③>

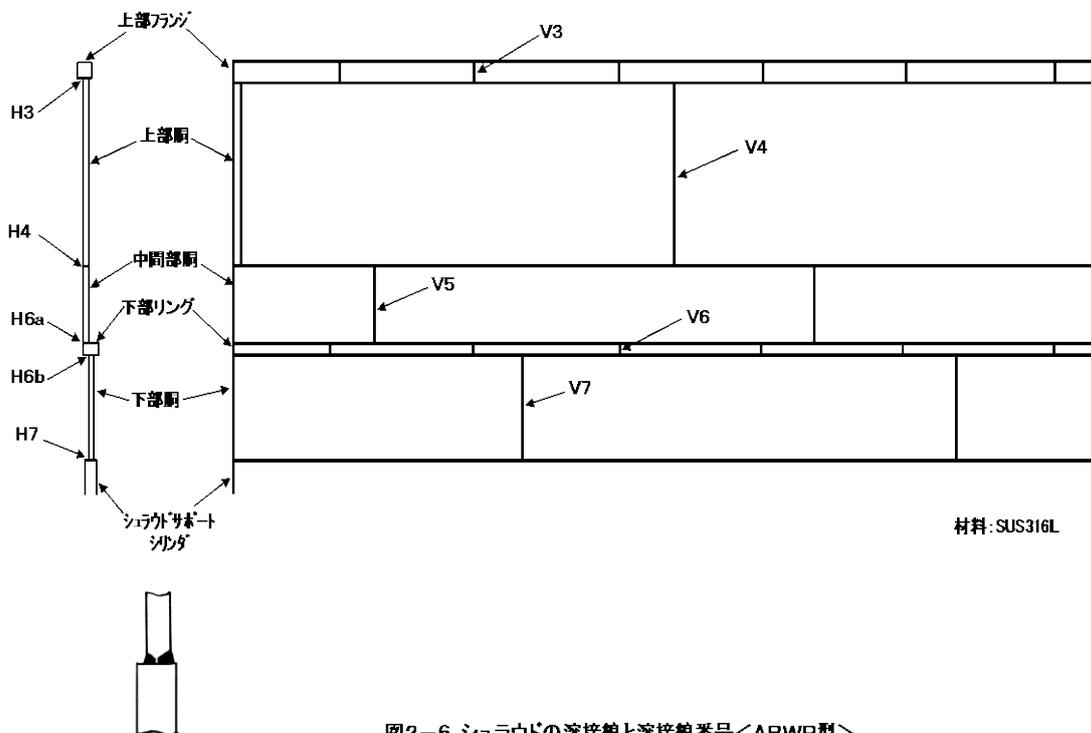


図2-6 シュラウドの溶接線と溶接線番号<ABWR型>

第3章 点検及び評価

3.1 点検方法

3.1.1 点検手法

(1) 一般事項

点検において適用する非破壊試験は、目視試験（VT）、超音波探傷試験（UT）又は渦流探傷試験（ET）とする。

(2) 目視試験（VT）

a. MVT-1

表面に開口している亀裂の検出を目的として、1 mil (=0.025mm) 幅のワイヤの識別を可能とする。必要に応じて、酸化皮膜除去等の表面処理を行う。

なお、本試験方法は、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、本試験方法は、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。

(3) 超音波探傷試験（UT）

超音波探傷試験は、JEAC 4207「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」に従って実施するか、若しくはこれに類する手法等を用いて実施してよい。

(4) 渦流探傷試験（ET）

渦流探傷試験は、点検対象部位に対する検出感度が確認された手法を用いて実施して良い。（解説 3-1）

3.1.2 初回点検

(1) 点検時期

a. 従来型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 11 年経過する迄に初回点検を実施する。

b. 従来型①以外のプラント

プラント供用開始時点からの実運転年数が 20 年経過する迄に初回点検を実施す

る。

c. 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

支持ロッドによる補修設計において強度を期待していない溶接部以外の周方向溶接部は、3.1.3項及び、3.2項に従い、支持ロッド補修を行っていないプラントの再点検時期の設定と同じ考え方で点検時期を定めること。

また、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。

(2) 点検対象部位

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2章に示す接近可能な全ての周方向溶接部とする。なお、技術的に根拠がある場合は、点検時期及び範囲を別途設定することができる。(解説3-2)

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、支持ロッドによる補修設計において強度を期待していない溶接部以外の周方向溶接部及び、縦方向溶接部とする。

3.1.3 再点検

(1) 基本的な考え方

次回点検時までの間、シュラウドの構造健全性を確保するため、構造強度上影響のある部位に亀裂を想定し、その亀裂が進展しても残存断面積が許容残存断面積を満足するように点検時期を定める。(解説3-3)

なお、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。

(2) 再点検の点検必要範囲及び点検方法

再点検における各部位の点検必要範囲及び点検方法を表3-1-1に示す。

表 3-1-1 各部位の点検必要範囲及び点検方法

点検対象	試験方法 ⁽¹⁾	点検部位 ⁽²⁾	点検必要範囲 ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾
H1～H7 の周方向溶接部	MVT-1	接近可能な 内面及び外面	溶接継手長さの A %
<p>注：</p> <p>(1) 必要に応じて、UT 又は ET を実施してもよい。</p> <p>(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 3-4)</p> <p>(3) MVT-1 の場合、溶接線両面(内面及び外面)の点検範囲の重なりが、点検必要範囲を満足すること。UT の場合は点検範囲が点検必要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。</p> <p>(4) 点検必要範囲 A % は、3.2 項の点検周期 N 年に対応して設定する。(解説 3-5)</p> <p>(5) 点検において欠陥指示が検出された場合は、健全な範囲を点検必要範囲以上とするために、点検範囲を拡大することができる。</p>			

3.2 点検周期

以下のいずれかの時期に再点検を実施する。

(1) 支持ロッド補修を行っていないプラント

構造強度上影響のある部位に亀裂を想定し、亀裂進展による残存断面積の減少を考慮し、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 年を決定して実施する。(解説 3-5)

初回点検で亀裂が検出されなかった場合は、従来型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、従来型①以外のプラントの場合、実運転年数が初回点検から 10 年を超えない時期とする。(解説 3-5)

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 3-6)

(2) 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 体また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 3-8)

② シュラウド

支持ロッドによる補修設計において強度を期待していない溶接部以外の周方向溶接部は、3.2(1)項に従い点検時期を定めること。また、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 3-9)

3.3 評価

3.3.1 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、3.3.2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 3-5)

3.3.2 詳細評価

3.3.1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 3-5)

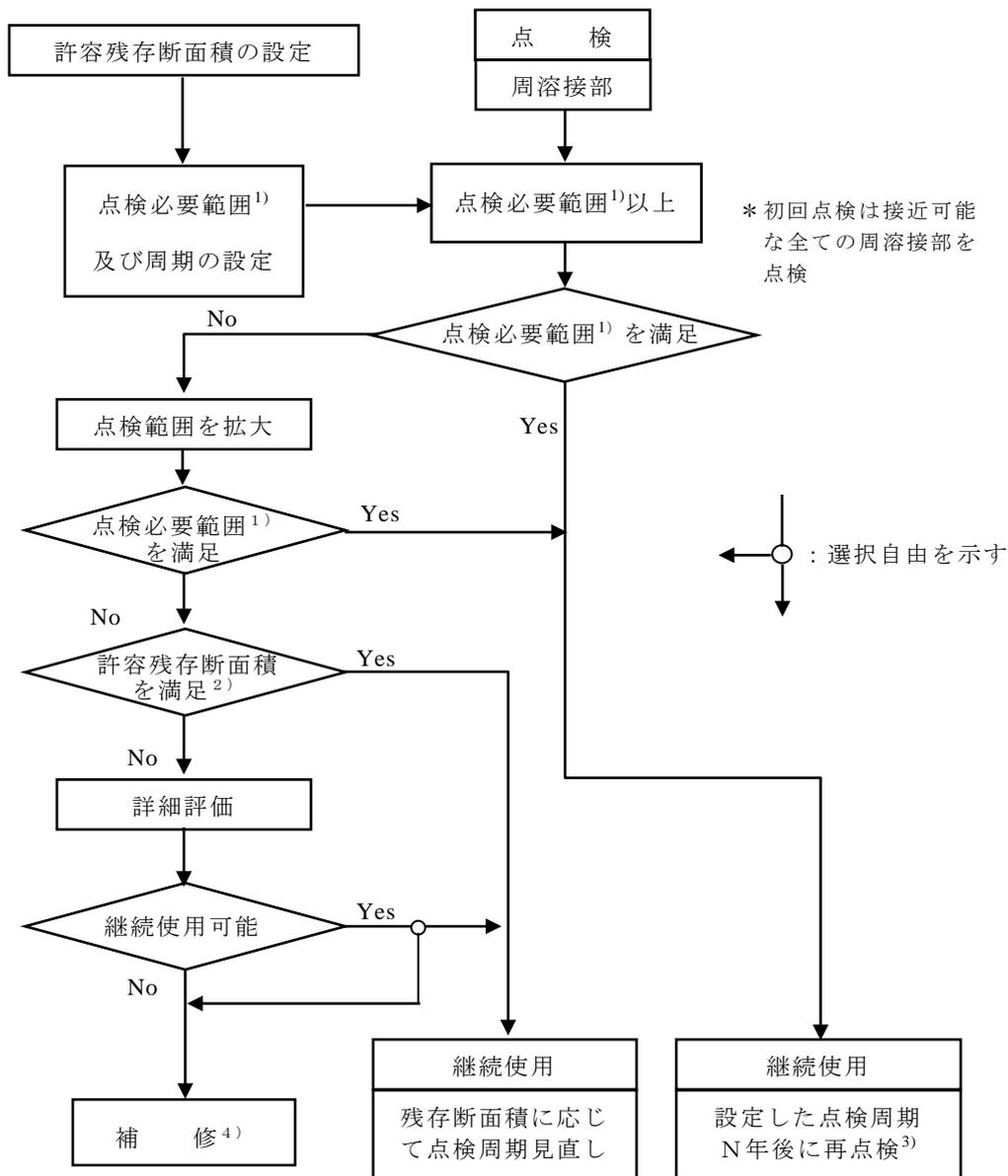
(2) 許容残存断面積の詳細評価

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炉心シュラウドのひび割れに対して実施した検査及び評価結果を示す。

3.3.3 点検のフロー

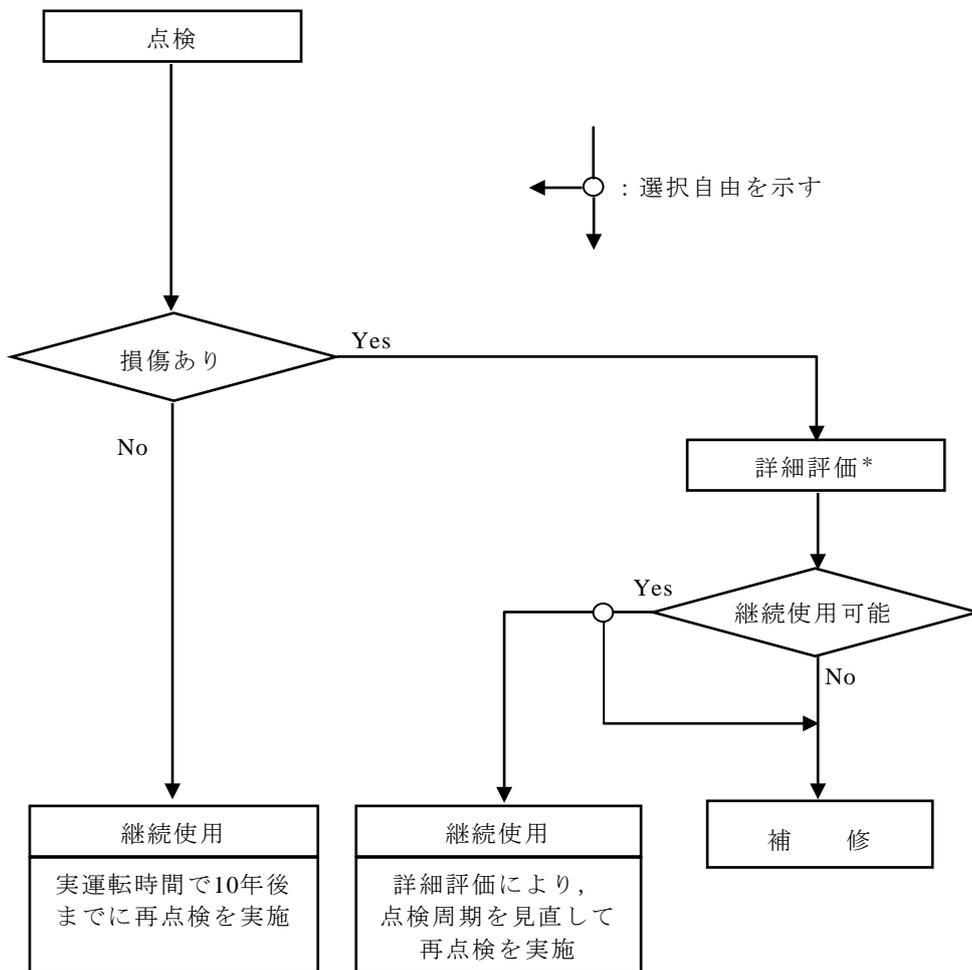
3.1.1項から3.3.2項に従ったシュラウド点検のフローを図 3-3-1 に示す。



- 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、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してもよい。
- 4) 補修技術の例については解説3-7参照

図3-3-1 シュラウド点検フロー

また、支持ロッド点検のフローを図 3-3-2 に示す。



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3-3-2 炉心シュラウド支持ロッド点検フロー

(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、点検装置の接近が制約され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、点検技術の向上に努めてきている。一方、国内において炉内構造物の溶接部に応力腐食割れに起因すると考えられるひび割れが報告されている。

このため、複雑構造ゆえに点検範囲の制約が大きい炉内構造物の健全性を確認する方法を検討するにあたっては、炉内構造物全体を視野に置いて、包括的な点検のあり方を検討する必要性が高まってきていると考えられる。

以上の状況に鑑み、本ガイドラインは、炉内構造物の安全上要求される機能が維持されていることを確認するための合理的な点検のあり方を示すことを目的とする。

(解説 1-2) 本ガイドラインの適用にあたって

本ガイドラインで適用する点検及び評価は、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「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*1」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) シュラウドの構造健全性及び機能維持の確保

本ガイドラインでは、シュラウドに要求される安全上重要な機能である「炉心の支持機能」と「炉心冷却機能」、「冷却材流路形成機能」を確保することを評価条件とする。

① 炉心の支持機能 (制御棒の挿入性)

仮にシュラウドの周方向溶接継手 (H3~H7) の全周にわたり板厚 50% (約 25mm) 破損の大きな亀裂が存在した状態で、原子力安全上の地震荷重を想定した場合に炉心が支持され、制御棒の挿入性が確保されることを確認する。(付録 H 参照)

② 炉心冷却機能 (流路の確保, 再冠水性)

仮に最も厳しい地震荷重条件となるシュラウド基部の H7 溶接継手全周にわたり板厚 50%破損の大きな亀裂が存在した状態で、原子力安全上の地震荷重を想定した場合に、構造強度上の維持により、炉心冷却機能としての冷却材流路の確保及び LOCA 時の炉水再完水が確保されること。(付録 D 参照)

(解説 2-2) シュラウドに想定される経年変化事象

本ガイドラインは、過去の損傷事例を考慮し、シュラウドの経年変化事象として応力腐食割れを想定して策定したものである。疲労については、先行プラントでの高経年化に関する技術評価より 60 年間の運転を想定しても有意な事象とはならないことから、対象外とした。

(解説 2-3) 構造強度上の重要性を考慮した点検除外

シュラウドの縦方向溶接部は、構造強度評価の結果、それらが損傷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、点検対象から除外することができる。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) 従来型①及び② (図 2-1, 図 2-2)

- ・ 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) 取替型①及び② (図 2-3, 図 2-4)

- ・ V7 溶接部 (下端リングの縦方向溶接部)

(3) 取替型③ (図 2-5)

- ・ 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)

- ・ V8 溶接部（下端リングの縦方向溶接部）

（４） ABWR 型（図 2-6）

- ・ V3 溶接部（上部フランジの縦方向溶接部）
- ・ V4 溶接部（上部胴の縦溶接部）
- ・ V5 溶接部（中間部胴の縦溶接部）
- ・ 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、炉心シュラウドの外側に設置され、主に炉心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、炉心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。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炉心シュラウドの浮き上がり防止と、地震時の炉心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。

上記の機能により、支持ロッドは、炉心シュラウドの周方向溶接部の構造強度に関係なく炉心シュラウドの構造及び機能を維持させることができる。従って、構造強度を期待していない炉心シュラウドの周方向溶接部の点検は不要である。ただし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保持する必要がある。

このため、周方向溶接部の構造強度を期待しないという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。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 J 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 J 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）と炉心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）と炉心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）と炉心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基合金（AlloyX-750）の支持ロッド構成部品に応力腐食割れ（SCC）と推定される損傷事例が報告されていることや、国内炉心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、詳細点検の対象とするものとした。（目視可能な範囲の MVT-1 による点検）

- ・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またはトグルクレビス）

（解説 2-6）材料の耐応力腐食割れ性

シュラウドの材料には、一般にオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304, SUS304L 若しくは SUS316L が用いられている。シュラウド取替プラントでは、シュラウドサポートシリンダと溶接される下端リングの材料は 600 系のニッケル基合金 (JIS NCF600) を用いている。また、シュラウドサポートシリンダなどの 600 系のニッケル基合金との溶接にはニッケル基合金の 182 合金 (JIS DNiCrFe-3 または ENi6182) またはニッケル基合金の 82 合金 (JIS YNiCr-3 または SNi6082) を使用している。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 XM-19 並びにニッケル基合金 (AlloyX-750) を用いている。

鋭敏化した炭素含有量が 0.03% を超えるオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) はクロム炭化物の粒界析出による粒界近傍の Cr 欠乏に起因して耐応力腐食割れ性が低い。これと比較して炭素含有量を 0.03% 以下に下げたオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L) は優れた耐応力腐食割れ性を示す。BWR の実プラントでは、BWR 炉水環境下でさらに耐応力腐食割れ性を高めるため、炭素含有量を 0.02% 以下に抑えた低炭素オーステナイト系ステンレス鋼を採用している場合もある。

XM-19 は、高強度かつ耐食性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼であり、BWR の炉水環境下で優れた耐応力腐食割れ性を示す。

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 欠乏に起因して応力腐食割れの感受性を有する。これと比較して高 Cr, 高 Nb 含有の Alloy82 及び高 Nb 含有の改良 Alloy182 は優れた耐応力腐食割れ性を示す。

ニッケル基合金 (AlloyX-750) は高温水中で応力腐食割れ感受性を示し、その形態は粒界割れである。ニッケル基合金 (AlloyX-750) の応力腐食割れ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。但し、ニ

ツケル基合金 (AlloyX-750) の応力腐食割れ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、材料鋼種により耐応力腐食割れ性に相違があるが、国内外での 304L、316L 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比較的高い中性子照射を受けることから、照射誘起型応力腐食割れ (IASCC) について評価を行う。

(解説 3-1) 渦流探傷試験

渦流探傷試験 (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流探傷試験指針」に準拠して設定する。

(解説 3-2) 初回点検

初回点検とは、第 2 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。(付録 A 参照)

従来型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 年経過する迄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、応力腐食割れ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 0.1 mm 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 3-2-1 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 3-2-1 より、全周にわたる応力腐食割れ (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。
- ・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)

また、従来型①以外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 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、応力腐食割れ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 μ m / 長さ 500 μ m の初期亀裂を想定した進展評価の結果を図 3-2-2 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(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)

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、従来型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、従来型①以外のプラントの場合は 10 年以降に点検を行うのが適当である。

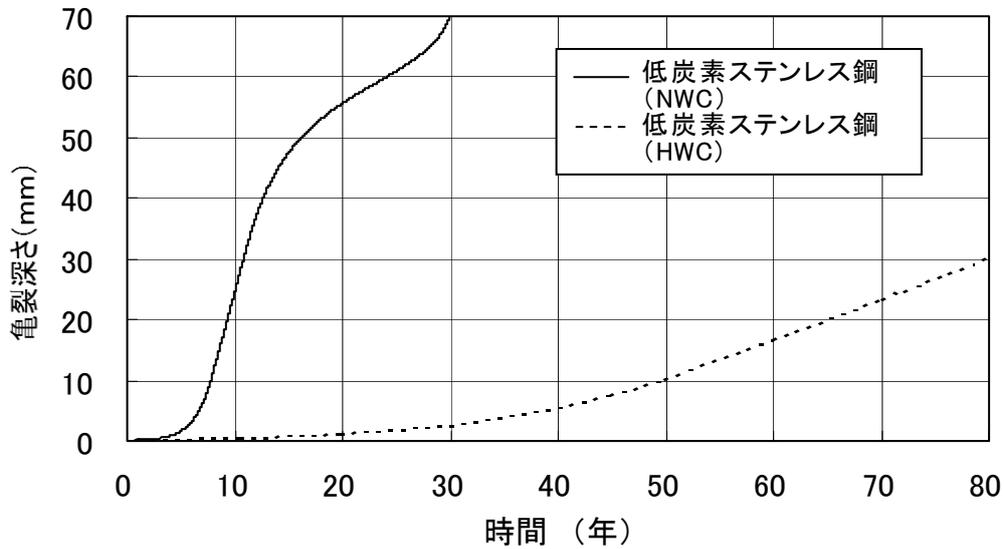


図 3-2-1 亀裂深さと時間の関係 (H 7 リング有り, リング側, 内表面全周亀裂) (内表面から厚さ方向への進展) (引用; METI 原子力安全・保安部会 原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会第 5 回資料, 平成 15 年 2 月)

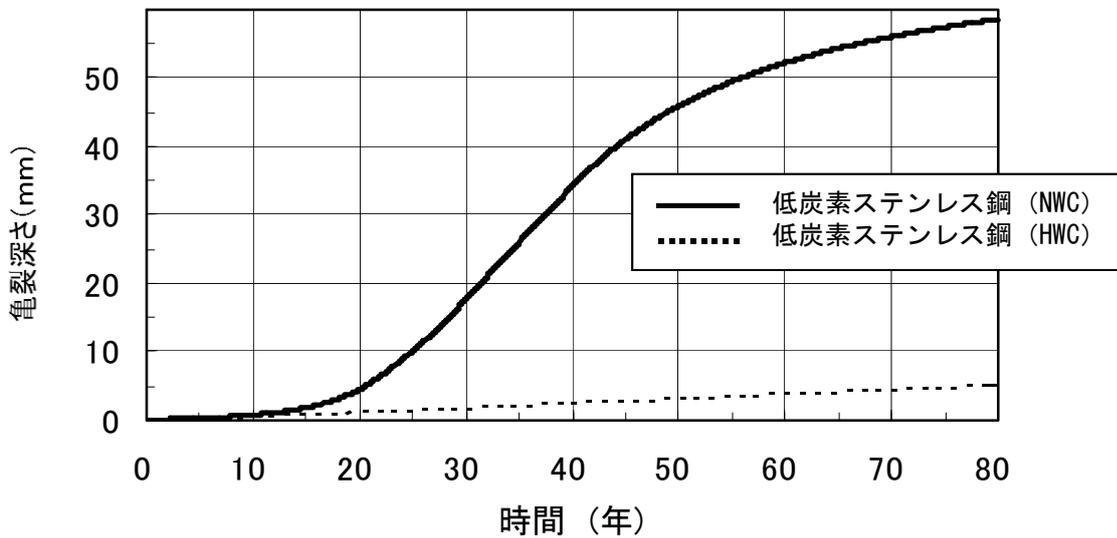


図 3-2-2 亀裂深さと時間の関係 (H7 リング無し, シュラウド下部胴側, 表面亀裂) (内表面から厚さ方向への進展)

(解説 3-3) 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（下記注-2 参照）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

周溶接線において、当該溶接線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）

周溶接全体の想定欠陥割合は、図 3-3-1 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) での周溶接全体の想定欠陥割合 (p) とする。

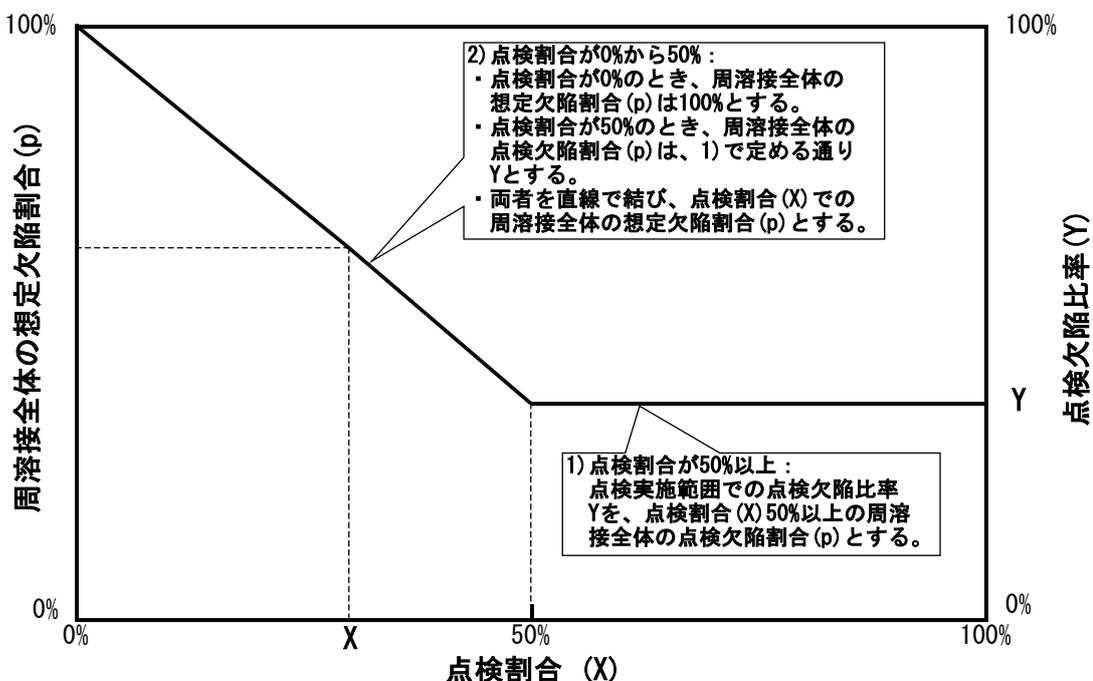


図 3-3-1 周溶接全体の想定欠陥割合を示す図

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 3-3-2 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。なお、現行規定では基準地震動 S_s を用いた評価を行う必要があるため、今後、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。

(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(付録 A 参照)については、未点検範囲(注-1)として取り扱い、想定欠陥範囲の荷重伝達機能を見捨てることとした。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、溶接線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てい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。

従って、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。

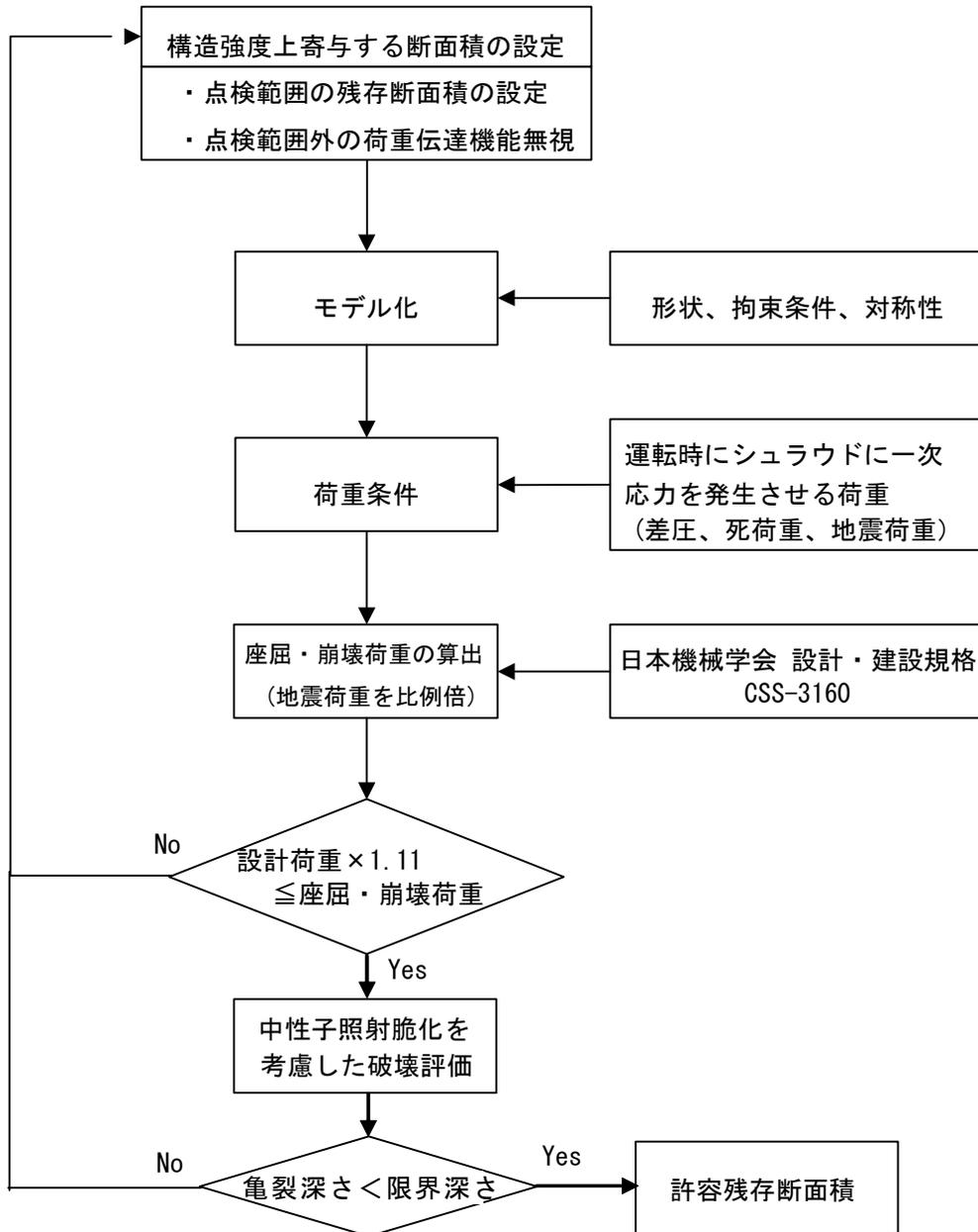


図 3-3-2 許容残存面積の設定手順

(解説 3-4) 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 3.1-1 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。

シュラウドの各部位における接近性及び検査手段の詳細を付録 A に示す。

(解説 3-5) 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、次回の点検までの期間における各溶接線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 3-5-1 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、次回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、従来型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、プラント起動後の応力腐食割れ (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 35 mm）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。（図 3-5-2 参照）

また、従来型①以外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、VT により検出される寸法は長さ 10mm 程度であり、アスペクト比を 0.1 と仮定すると、深さは 1mm となる。この検出精度を考慮して、保守的に深さ 1mm／長さ 10mm の亀裂が存在すると仮定した亀裂進展評価の結果、実運転時間 10 年後の亀裂深さは約 10mm 程度である。（図 3-5-3 参照）

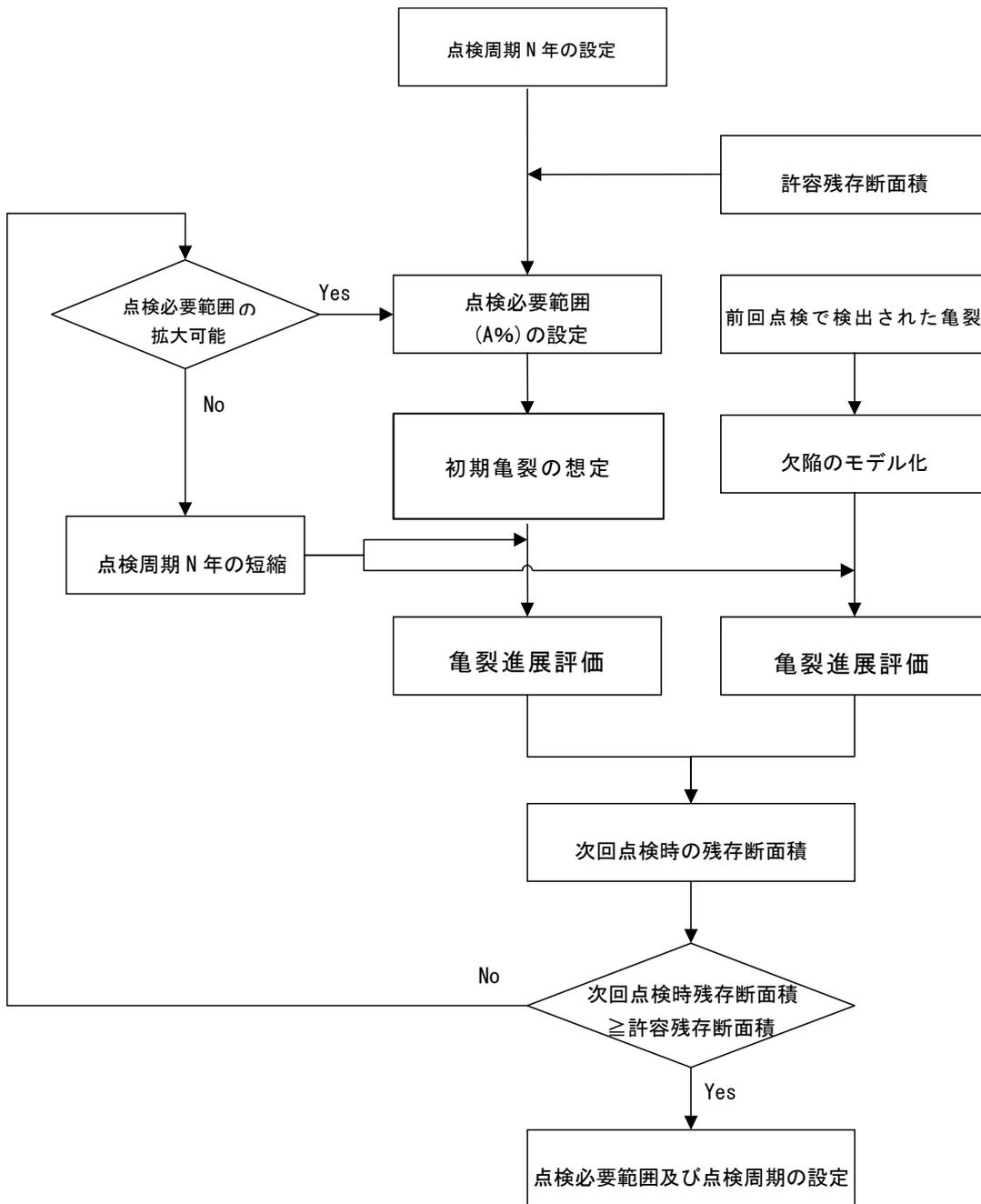


図 3-5-1 点検必要範囲及び点検周期の設定手順

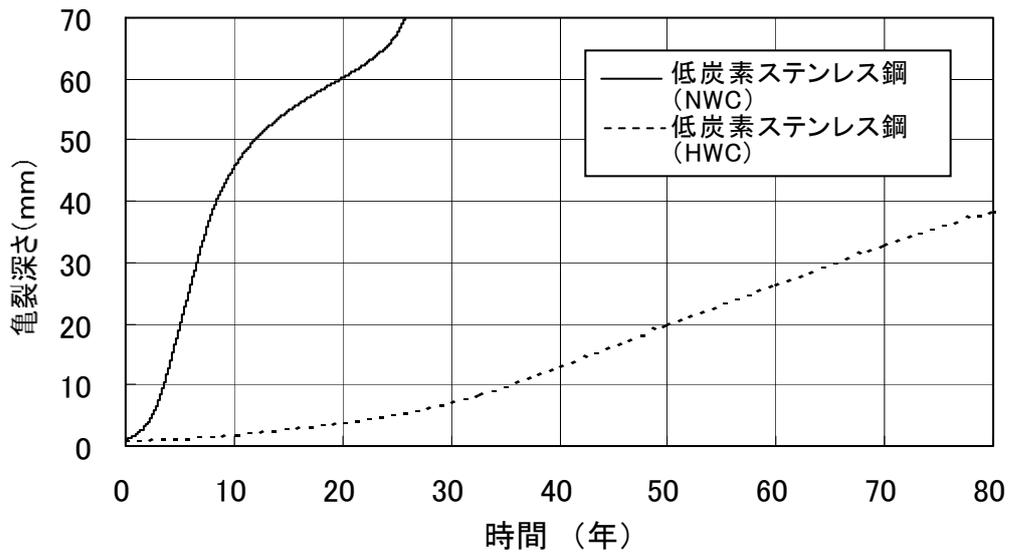


図 3-5-2 亀裂深さと時間の関係 (H7 リング有り, リング側, 初期亀裂深さ 1mm 全周)
(内表面から厚さ方向への進展)

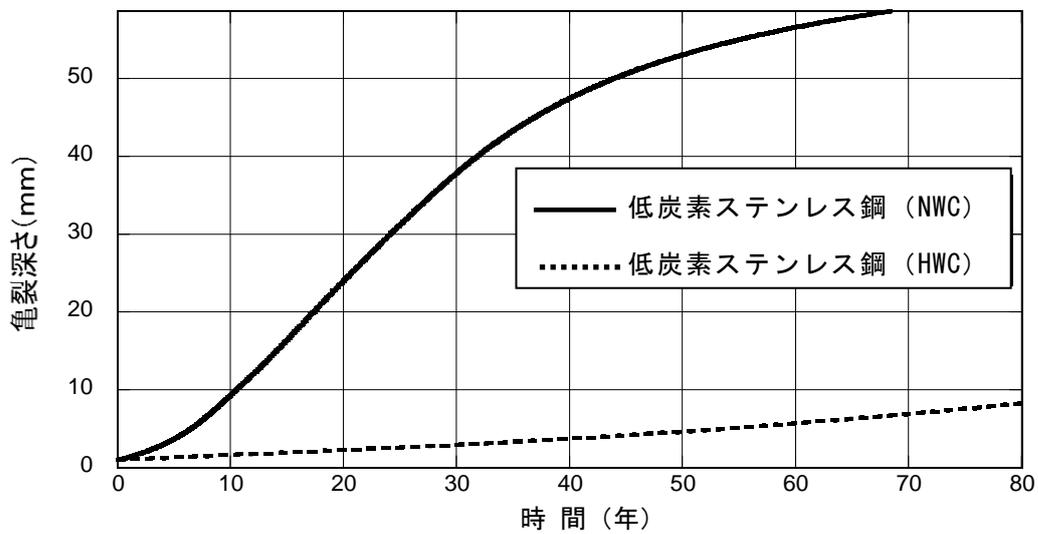


図 3-5-3 亀裂深さと時間の関係 (H7 リングなし, シュラウド下部胴側, 初期亀裂深さ 1.0 mm, アスペクト比 0.1) (内表面から厚さ方向への進展)

(解説 3-6) 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「応力腐食割れ発生の抑制に対する考慮」に纏められている。また、炉心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」
- ・JANTI-VIP-13「水素注入による環境改善効果の評価方法」

(解説 3-7) 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

炉心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 3-8) 支持ロッドの点検周期

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 J 参照）

しかしながら、国外においてニッケル基合金 (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、国内炉心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、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なっ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 3-9) 支持ロッド補修後のシュラウド縦方向溶接部の点検

炉心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 に示すとおり炉心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保持する必要がある。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図3-9-1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。

炉心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。

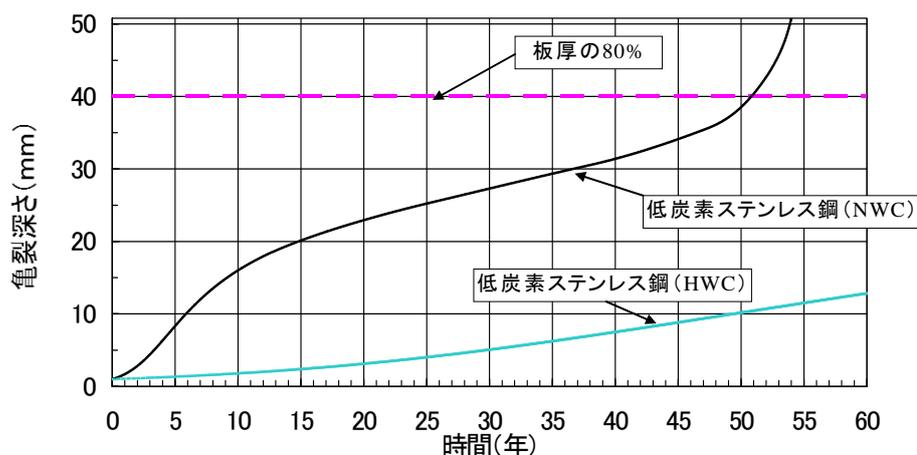


図 3-9-1(1) 亀裂深さと時間の関係 (V2 溶接部)

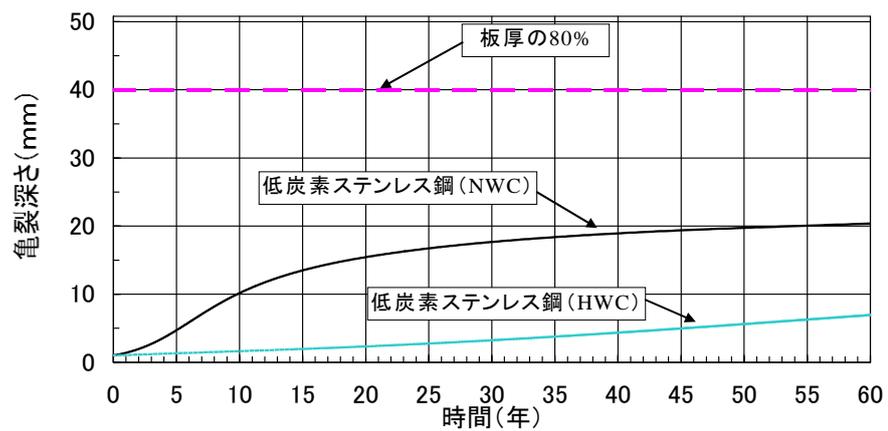


図 3-9-1(2) 亀裂深さと時間の関係 (V2 溶接部)
(内表面から板厚方向への進展)

付録A シュラウドの点検における接近性について

1. 各種検査手法の概要

シュラウドに対する検査装置として以下の装置が挙げられる。図 A-2 に VT (目視試験) および UT (超音波探傷試験) を実施する場合の概要を示す。以下にこれら装置によるシュラウドの点検に対する接近性について示す。

1.1 VT 装置

- (1) 吊下式水中テレビカメラ (吊下式カメラ) およびマイクロスコープ
- (2) 隔移動機構に搭載した水中テレビカメラ (遠隔式カメラ) (水中遊泳ロボット, 自走式吸着ロボット等)

1.2 UT 装置

- (1) 遠隔移動機構に超音波探触子を搭載した装置 (遠隔式 UT 装置)

2. VT 装置におけるシュラウドへの接近性

2.1 吊下式水中テレビカメラ (吊下式カメラ) およびマイクロスコープによる VT

吊下式カメラで VT を実施する場合, ロープ等を装着して所定の位置まで吊り降ろし, 燃料取扱機もしくは作業台車から操作することにより検査を実施する。図 A-1 に吊下式カメラシステムの概要を示す。本手法は炉内の供用期間中検査 (以下, ISI) 作業において一般的に用いられている手法である。以下にシュラウド内外からの接近性について記述する。なお, 吊下式カメラによる接近性を表 A-1, 図 A-3 および図 A-4 に示す。

(1) シュラウド外部からのアクセス

シュラウド外側からの周方向溶接線への接近性については, シュラウド上部溶接線 (H1 および H2) については, ラグやコアスプレイ配管等との干渉のない部分については接近可能である。H3 溶接線については, 干渉がなく全範囲接近可能である。また中間部溶接線 (H4) および下部溶接線 (H6a, H6b, H7a および H7b) については, ジェットポンプ等との干渉により接近可能な範囲が限定される。

一方, 縦方向溶接線では, シュラウド上部溶接線 (V1, V2 および V3) および中間部の V4 溶接線については, 干渉がなく全範囲接近可能である。また中間部の V5 溶接線および下部の V7 溶接線はジェットポンプとの干渉により接近が困難であり, V6 溶接線については, ジェットポンプとの干渉により一部接近が困難である。

(2) シュラウド内部からのアクセス

シュラウド内部からでは, 上部溶接線のうち H1 および H2 溶接線はコアスプレイスパーチャ, 上部格子板および LPCI フローバッフルとの干渉により接近が困難であるが, 上部溶接線の H3 溶

接線および中間部溶接線（H4）周辺は最外周の燃料取り出しにより全範囲検査可能となる。下部溶接線のうちH6a溶接線は通常の吊下式水中テレビカメラでは炉心支持板との干渉により接近困難であるが、他の溶接線（H6b, H7a および H7b）では、炉心支持板のスタッドボルトや差圧検出ほう酸水注入配管との干渉部分を除き接近可能である。ただし、燃料や制御棒案内管の一部取り出しが必要となる。

一方、シュラウド内側からの縦方向の溶接線検査では、シュラウド上部溶接線のうち V1 溶接線はスカートにより、V2 溶接線はコアスプレイスパージャにより、上部格子板および LPCI フローバッフルにより接近が一部制限される。また上部の V3 溶接線および中間部の V4 溶接線は、周辺の燃料を取り出すことにより全範囲接近可能となる。中間部の V5 溶接線については吊下式水中テレビカメラでは炉心支持板により一部接近困難であるが、V6 溶接線および V7 溶接線については、燃料や制御棒案内管の一部取り出しにより接近可能となる。

なお、炉心支持板とシュラウド間にアクセス可能な専用治具を用いることにより、吊下式水中カメラで接近が困難な狭隘部位（シュラウド内側からの検査：H6a 溶接線および V5 溶接線の一部接近が困難な部分）に対しても接近が可能となる。

2.2 遠隔移動機構に搭載した水中テレビカメラ（遠隔式カメラ）による VT

遠隔移動機構としては、水中遊泳式ロボットや水中吸着自走式ロボットなどが開発されており、これら移動機構に水中テレビカメラ（遠隔式カメラ）を搭載し、検査を実施することができる。以下にシュラウド内外からの接近性について記述する。なお、遠隔式カメラによる接近性を表 A-2、図 A-5 および図 A-6 に示す。

(1) シュラウド外部からのアクセス

シュラウド外側からの周方向溶接線への接近性については、シュラウド上部溶接線（H1 および H2）については、ラグやコアスプレイ配管等との干渉のない部分については接近可能である。H3 溶接線では、干渉がなく全範囲接近可能である。また中間部溶接線（H4）については、吊下式カメラで接近が困難な範囲まで遠隔式カメラ（自走式移動機構）により接近可能となる。下部溶接線（H6a, H6b, H7a および H7b）については、ジェットポンプ等との干渉により接近可能な範囲が限定されるが、干渉を避けることで接近範囲が広がる可能性がある。

一方、軸方向の溶接線検査では、シュラウド上部溶接線（V1, V2 および V3）および中間部の V4 溶接線については、干渉がなく全範囲接近可能である。また、中間部の V5 溶接線については、遠隔式カメラ（自走式移動機構）により接近可能となる。下部の V7 溶接線はジェットポンプとの干渉により接近困難であるが、V6 溶接線については、ジェットポンプとの干渉を避けることで吊下式水中カメラより範囲を拡大できる可能性がある。

(2) シュラウド内部からのアクセス

シュラウド内部では、吊下式カメラと同様に、上部溶接線のうち H1 および H2 溶接線はコアスプレイスパージャ、上部格子板および LPCI フローバッフルとの干渉により接近困難であるが、上部溶接線の H3 溶接線および中間部溶接線 (H4) 周辺は最外周の燃料取り出しにより全範囲検査可能となる。下部溶接線のうち H6a 溶接線は炉心支持板との干渉により接近困難であるが、他の溶接線 (H6b, H7a および H7b) では、炉心支持板のスタッドボルトや差圧検出ほう酸水注入配管との干渉部分を除き接近可能である。ただし、制御棒案内管の一部取り出しが必要となる。

一方、シュラウド内側からの軸方向の溶接線検査では、シュラウド上部溶接線のうち V1 溶接線はスカートにより、V2 溶接線はコアスプレイスパージャ、上部格子板および LPCI フローバッフルにより接近が一部制限される。上部の V3 溶接線は上部格子板により移動機構の接近が困難となる。中間部の V4 溶接線は燃料取り出しにより全範囲接近可能となる。中間部の V5 溶接線は炉心支持板により一部接近困難であるが、V6 溶接線および V7 溶接線については、制御棒案内管の一部取り出しにより接近可能となる。

3. UT 装置におけるシュラウドへの接近性

遠隔移動機構に超音波探傷器を搭載した装置 (遠隔式 UT 装置) による接近性および検査性を示す。2.2 項で上述した遠隔移動する水中吸着自走式ロボットなどに超音波探触子を搭載して検査を実施することができる。なお遠隔式 UT 装置による接近性および検査性を表 A-2 および図 A-7 に示す。

3.1 シュラウド内外からの接近性および検査性

遠隔移動機構に超音波探傷器を搭載した装置 (遠隔式 UT 装置) によるシュラウドへの接近性については、2.2 項で上述した遠隔式カメラの接近性 (表 A-2) とほぼ同等となる。

しかし、実際に検査を行う場合、溶接部の開先形状や干渉物等の制限から、内面または外面の一方からの検査となる場合がある。この場合、例えば内面側の亀裂を外面側から検出することとなる。ここで表 A-3 および図 A-7 に各溶接線に対する検査可能範囲を示す。

周方向溶接線に関して、まずシュラウド上部溶接線 (H1 および H2) については、内部側にラグやコアスプレイスパージャ等との干渉物があるため、外面側からの検査となる。H4 溶接線は外側のジェットポンプとの干渉を回避できれば、内外面からの検査が可能である。H3 溶接線、H6 溶接線および H7 溶接線では、溶接部の開先形状から内外面からの検査を効率的に行う必要がある。

軸方向の溶接線検査では、シュラウド上部溶接線 (V1, V2 および V3) および下部の V6 溶接線では、干渉物により検査が一部制限される。中間部の V4 溶接線については、干渉物がなく内外面からの検査が可能である。また、中間部の V5 溶接線については、ジェットポンプとの干渉を回避することで接近が可能になる。下部の V7 溶接線は内面からの検査が容易である。

表 A-1 吊下式水中カメラシステム（吊下式カメラ）によるシュラウドへの接近性

(1,100MWe BWR の場合)

溶接番号 (溶接線長)	シュラウド外側		シュラウド内側	
	接近可能 範囲	接近困難理由	接近可能 範囲	接近困難理由
H1 (約 17.5m)	70%	ラグ, CS 配管により 一部困難	0%	CS スパージャにより困難
H2 (約 17.5m)	90%	LPCI カップリング (3 箇所) により一部困難	0%	上部格子板, LPCI フロー バップルにより困難
H3 (約 16.5m)	100%	—	100%	燃料取出要
H4 (約 16.5m)	35%	JP により一部困難	100%	燃料取出要
H6a (約 16.5m)	35%	JP により一部困難	0%	燃料取出要 専用治具使用の場合： 100%
H6b (約 16.0m)	35%	JP により一部困難	95%	スタッドボルトにより一 部困難, CRGT 取出要
H7a (約 16.0m)	30~50%	JP により一部困難	95%	DPLC (1 箇所) により一 部困難, CRGT 取出要
H7b (約 16.0m)	30~50%	JP により一部困難	95%	DPLC (1 箇所) により一 部困難, CRGT 取出要
V1 (約 0.9m)	100%	—	60%	スカートにより一部困難
V2 (約 1.8m)	100%	—	20%	CS スパージャ, LPCI フロ ーバップルにより一部困 難, 下部は上部格子板で アクセス困難
V3 (約 0.4m)	100%	—	100%	燃料取出要
V4 (約 4.4.m)	100%	—	100%	燃料取出要
V5 (約 4.4m)	0%	JP により困難	80%	燃料取出要 専用治具使用の場合： 100%
V6 (約 0.6m)	80%	JP により一部困難	100%	CRGT 取出要
V7 (約 2.3m)	0%	JP により困難	100%	CRGT 取出要

表 A-2 遠隔移動機構によるシュラウドへの接近性 (注 1, 2)

(1, 100MWe BWR の場合)

溶接番号 (溶接線長)	シュラウド外側		シュラウド内側	
	接近可能 範囲	接近困難理由	接近可能 範囲	接近困難理由
H1 (約 17.5m)	70%	ラグ, CS 配管により 一部困難	0%	CS スパージャにより困難
H2 (約 17.5m)	90%	LPCI カップリング (3 箇所) により一部困難	0%	上部格子板, LPCI フロー バッフルにより困難
H3 (約 16.5m)	100%	—	100%	燃料取出要
H4 (約 16.5m)	100%	—	100%	燃料取出要
H6a (約 16.5m)	80%	JP により一部困難 (LPCI の下)	0%	炉心支持板により困難
H6b (約 16.0m)	60%	JP により一部困難 (LPCI の下)	95%	スタッドボルトにより一 部困難, CRGT 取出要
H7a (約 16.0m)	30~50%	JP により一部困難	95%	DPLC (1 箇所) により一 部困難, CRGT 取出要
H7b (約 16.0m)	30~50%	JP により一部困難	95%	DPLC (1 箇所) により一 部困難, CRGT 取出要
V1 (約 0.9m)	100%	—	60%	スカートにより一部困難
V2 (約 1.8m)	100%	—	20%	CS スパージャ, LPCI フロ ーバッフルにより一部困 難, 下部は上部格子板で アクセス困難
V3 (約 0.4m)	100%	—	0%	上部格子板で困難
V4 (約 4.4. m)	100%	—	100%	燃料取出要
V5 (約 4.4m)	100%	—	80%	炉心支持板により一部困 難
V6 (約 0.6m)	30%	JP により一部困難	100%	CRGT 取出要
V7 (約 2.3m)	0%	JP により一部困難	100%	CRGT 取出要

(注 1) 遠隔移動機構に搭載した水中テレビカメラ (遠隔式カメラ) および超音波探触子 (遠隔式 UT 装置) の接近性はほぼ同等

(注 2) 遠隔移動機構: 水中遊泳 ROV, 水中吸着式, 吊下式移動式など

表 A-3 遠隔移動機構に搭載した超音波探触子(遠隔式 UT 装置)による UT 可能範囲

溶接線	溶接線長 (m)	シュラウド内側/外側 (%)
		遠隔式
H1	17.5	90
H2	17.5	90
H3	16.5	100
H4	16.5	100
H6a	16.5	80
H6a	16.0	60
H7a	16.0	90
H7b	16.0	90
V1	0.9	60
V2	1.8	90
V3	0.4	60
V4	4.4	80
V5	4.4	80
V6	0.6	30
V7	2.3	100

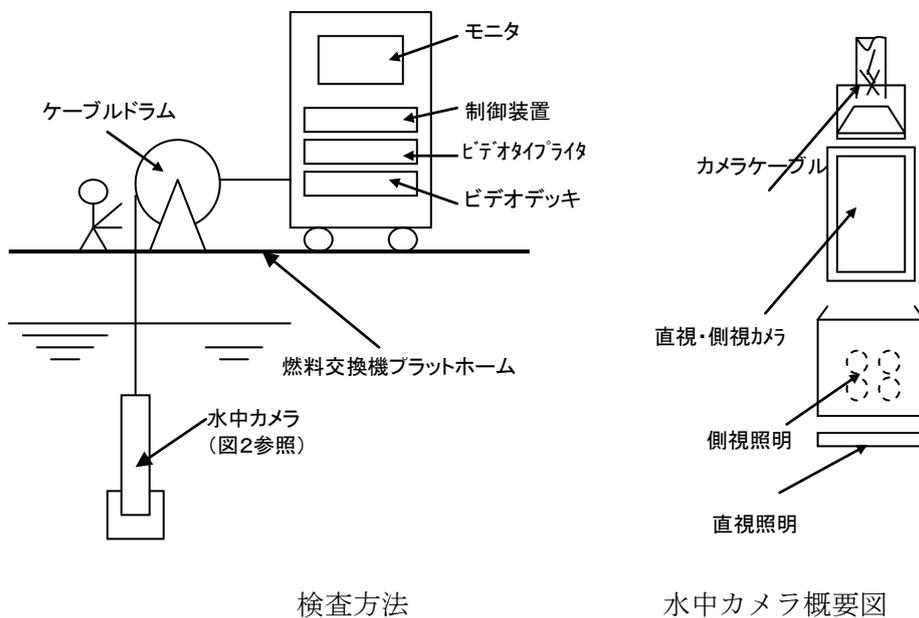


図 A-1 吊下式水中カメラシステムの概要

シュラウドへのアクセスの状況 (VT/UT)

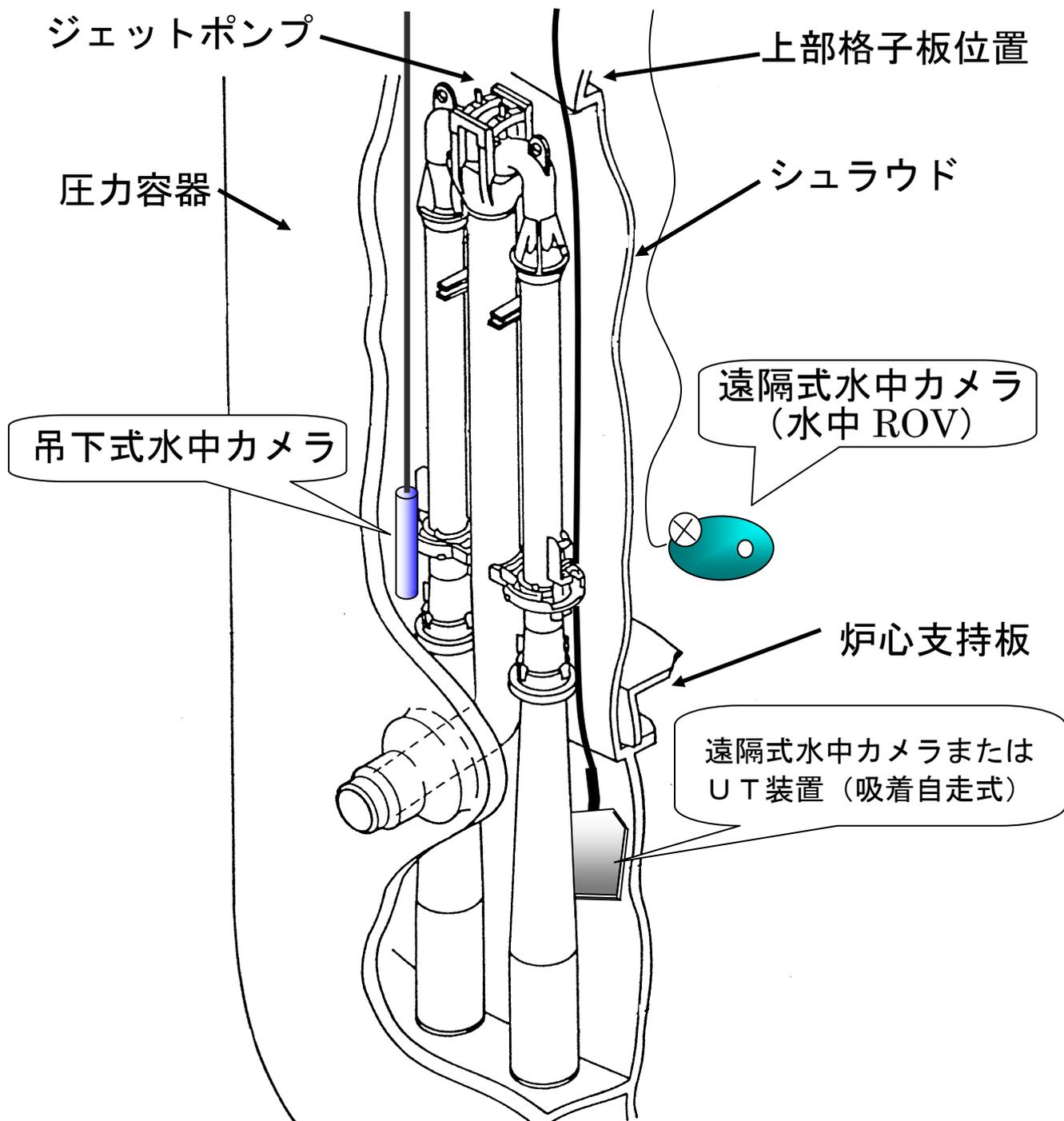


図 A-2 シュラウド内外からの検査概要

吊下式水中カメラ

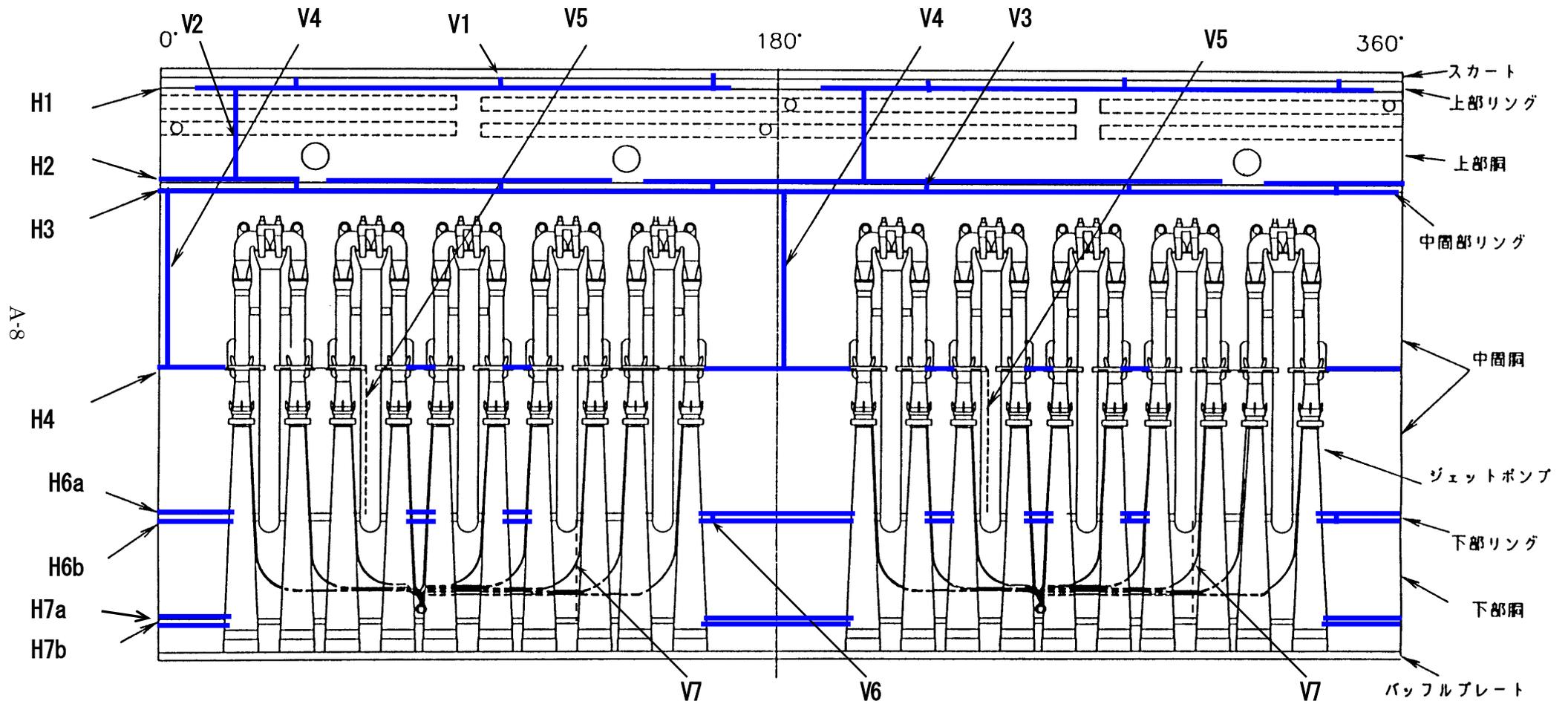


図 A-3 シュラウド外面 VT 可能範囲 (1, 100MWe BWR)

吊下式水中カメラ

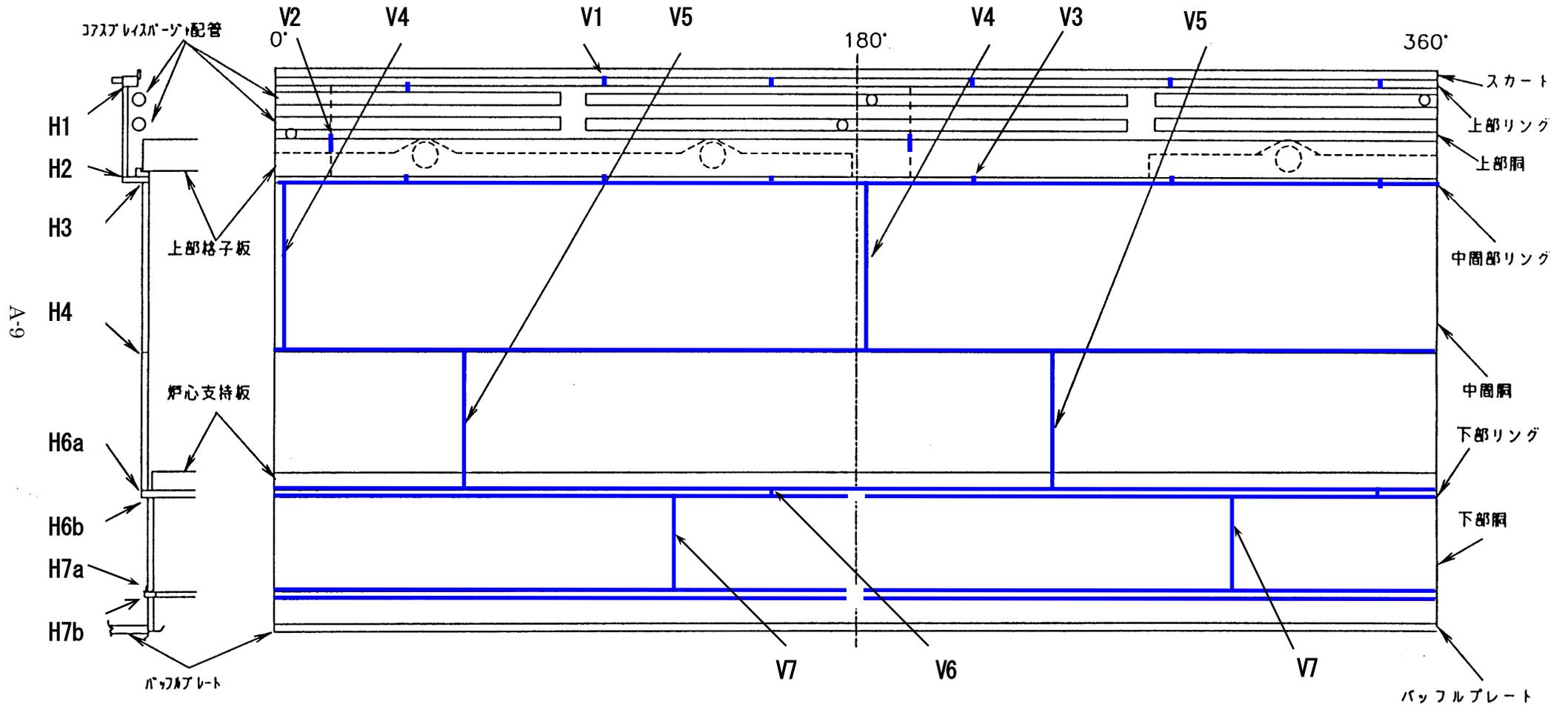


図 A-4 シュラウド内面 VT 可能範囲 (1, 100MWe BWR)

遠隔式水中カメラ

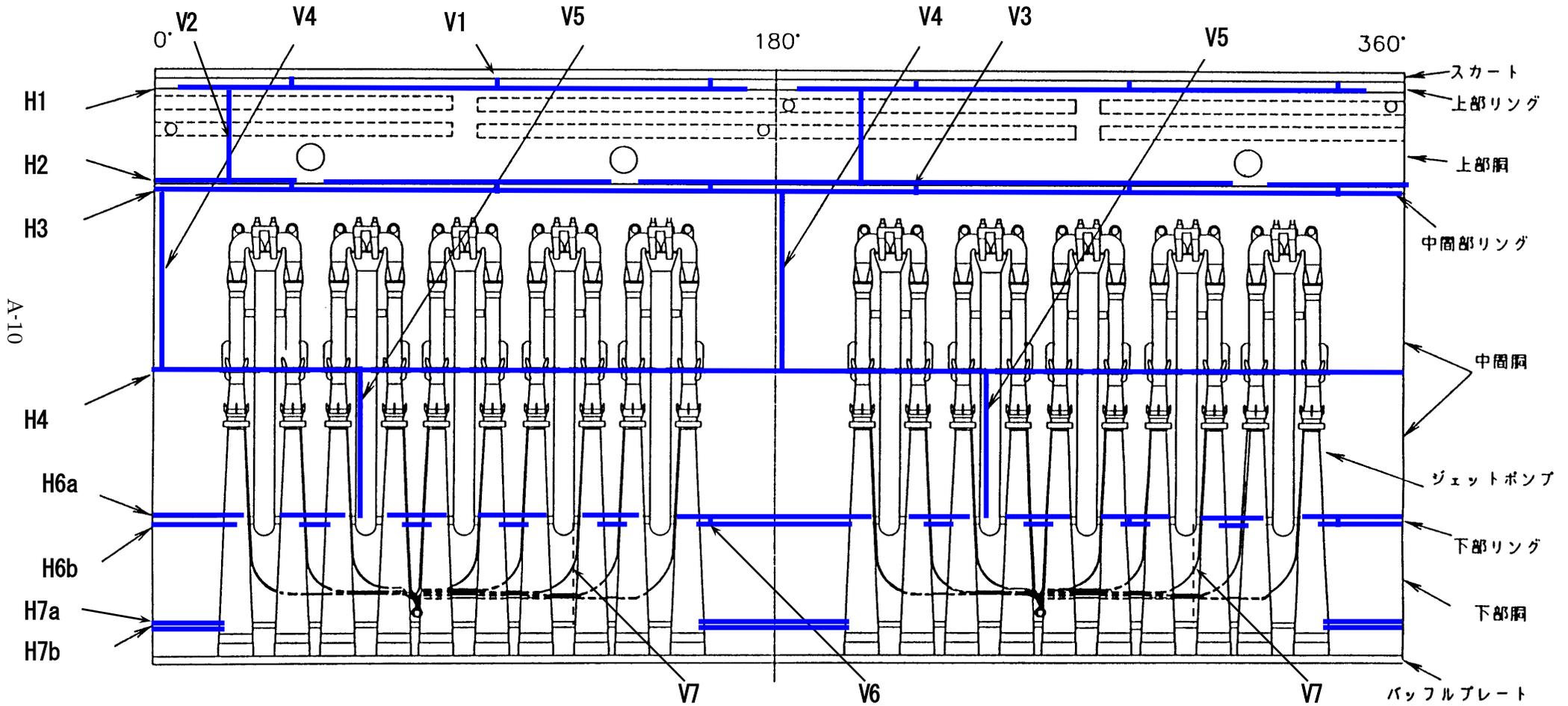


図 A-5 シュラウド外面 VT 可能範囲 (1, 100MWe BWR)

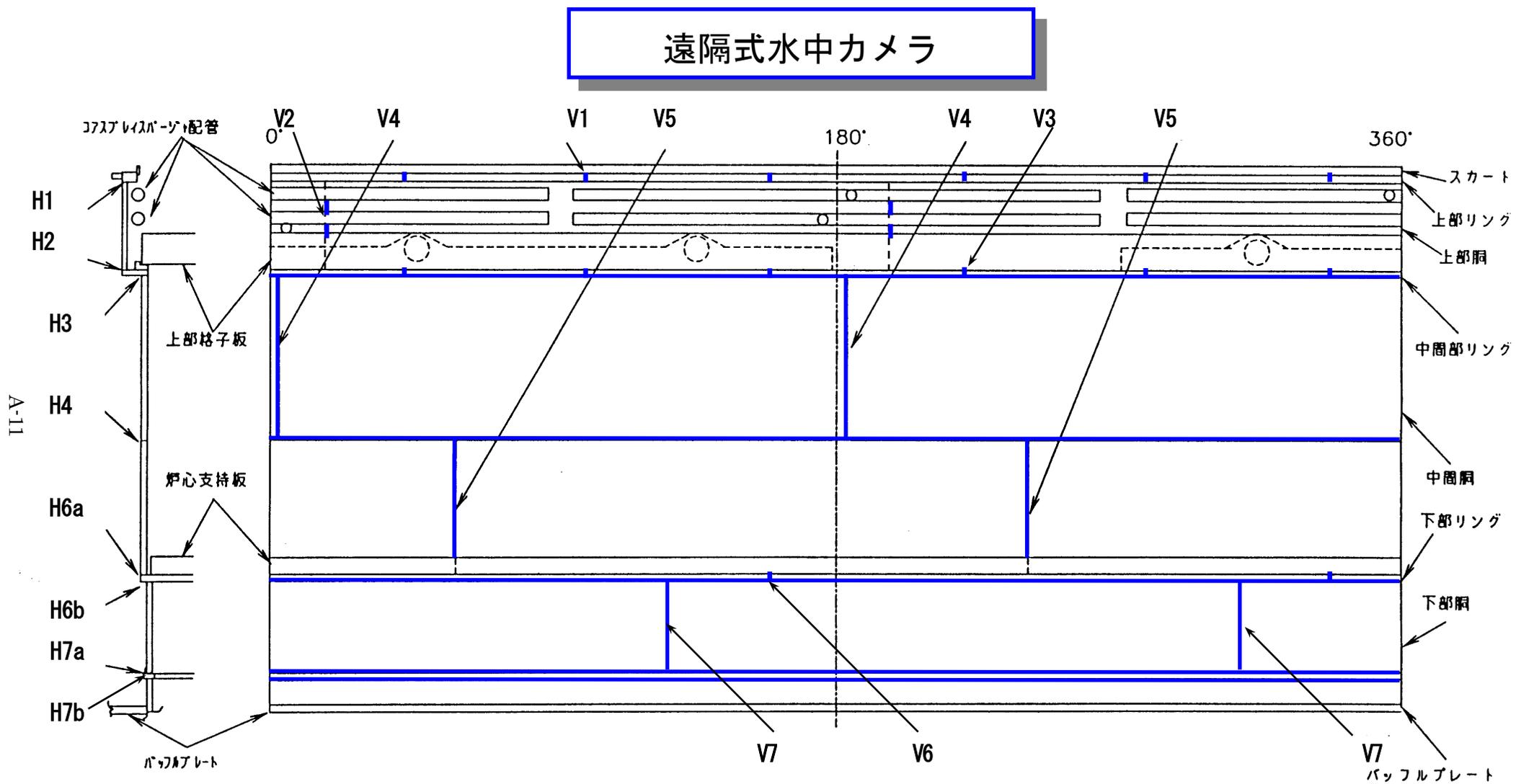


図 A-6 シュラウド内面 VT 可能範囲 (1, 100MWe BWR)

遠隔式 UT 装置

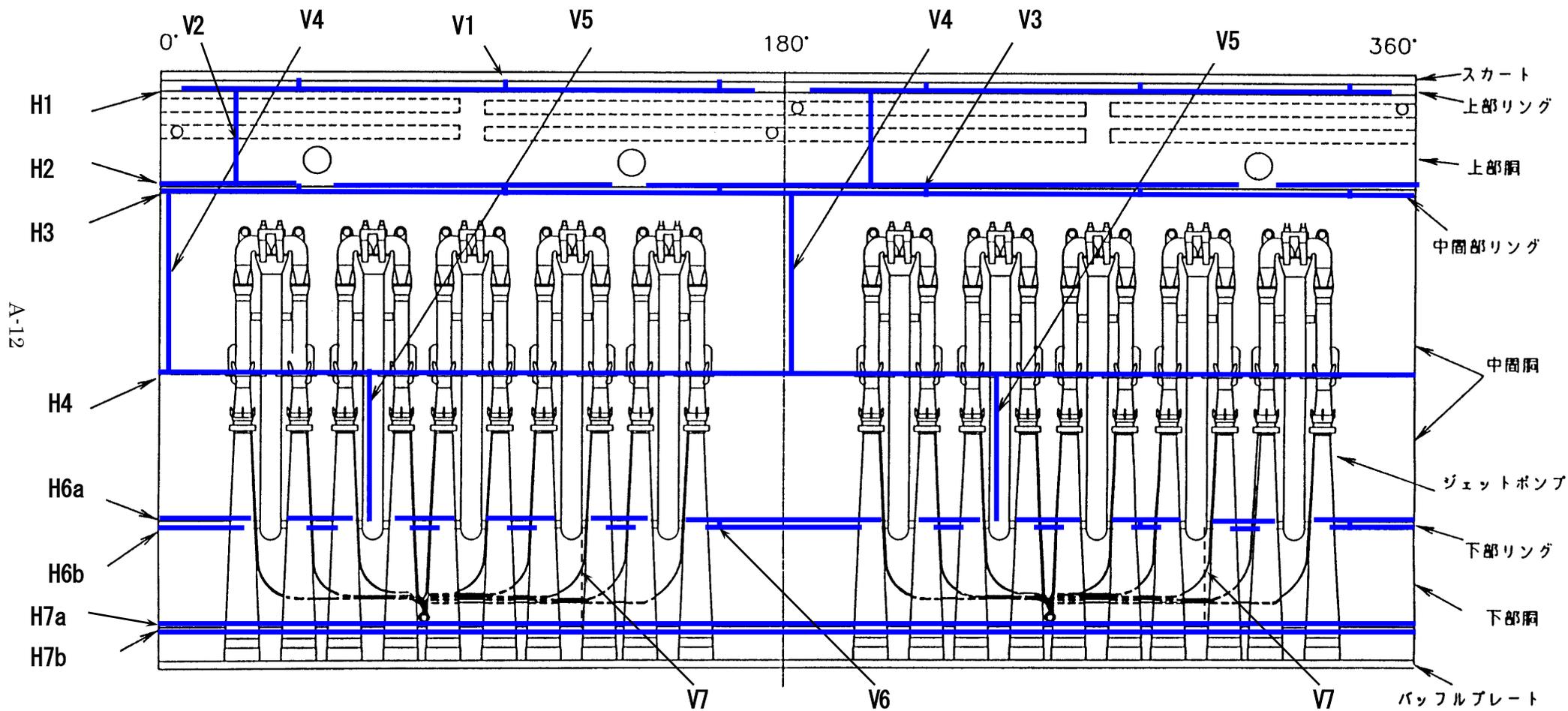


図 A-7 シュラウド内/外面 UT アクセス可能範囲 (1100MWe BWR)

付録B シュラウド溶接部の残留応力評価

1. 検討目的

き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 継手およ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

(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) および、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、実測値をベースに想定し、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 が課題とな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 に関しては、ステンレス鋼溶接部で SCC が課題となる溶接熱影響部近傍の軸方向の残留応力分布を示しており、H7b では 600 系のニッケル基合金 (JIS NCF600) で SCC が課題となる溶金部を示している。

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。

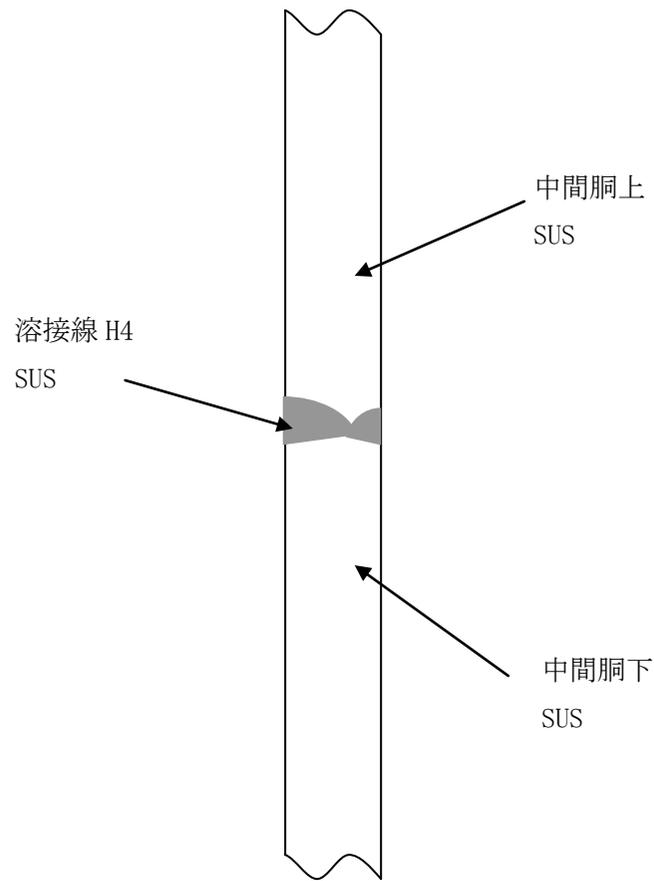
(3) 解析方法

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。

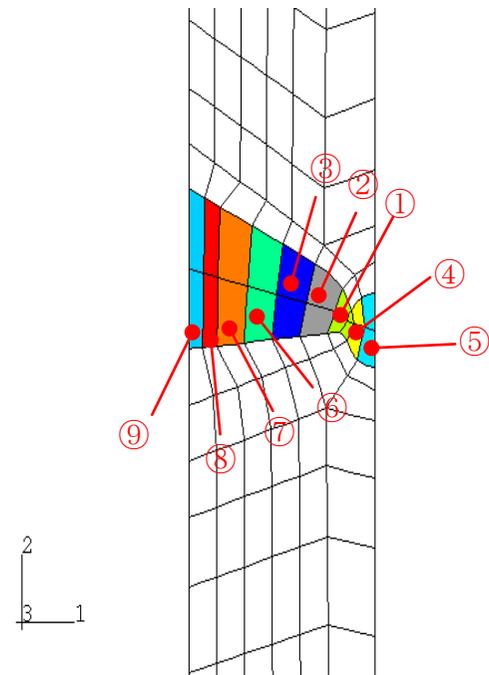
また、層ごとの単位時間あたりの入熱は、図 B-12 に示すように想定して溶接条件を考慮して内部発熱として与えた。なお、 t_1 及び (t_3-t_2) は t_2 の 20% となるように設定した。

(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。

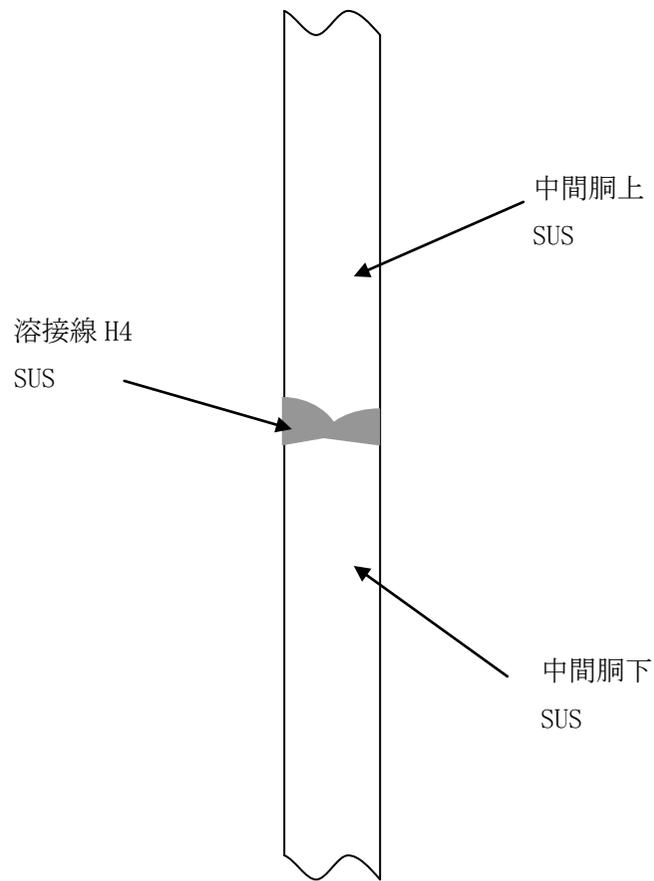


(a) 解析対象概略構造

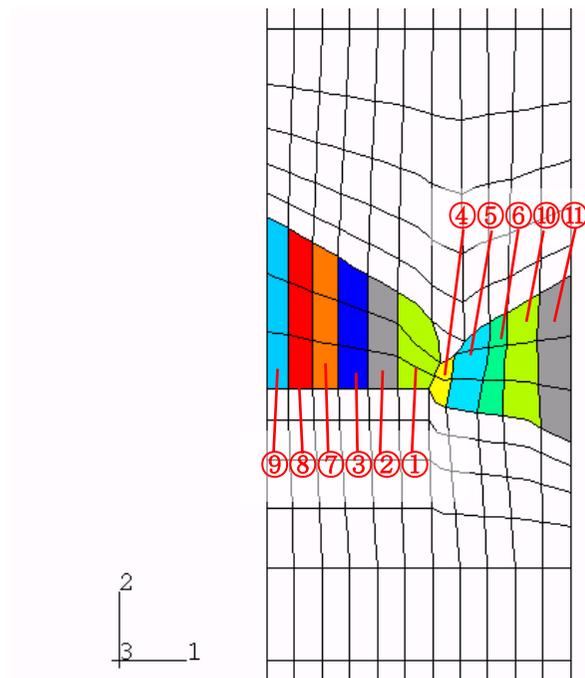


(b) 解析モデルと溶接順序

図 B-1a H4 の形状と解析モデル (片側開先の場合)

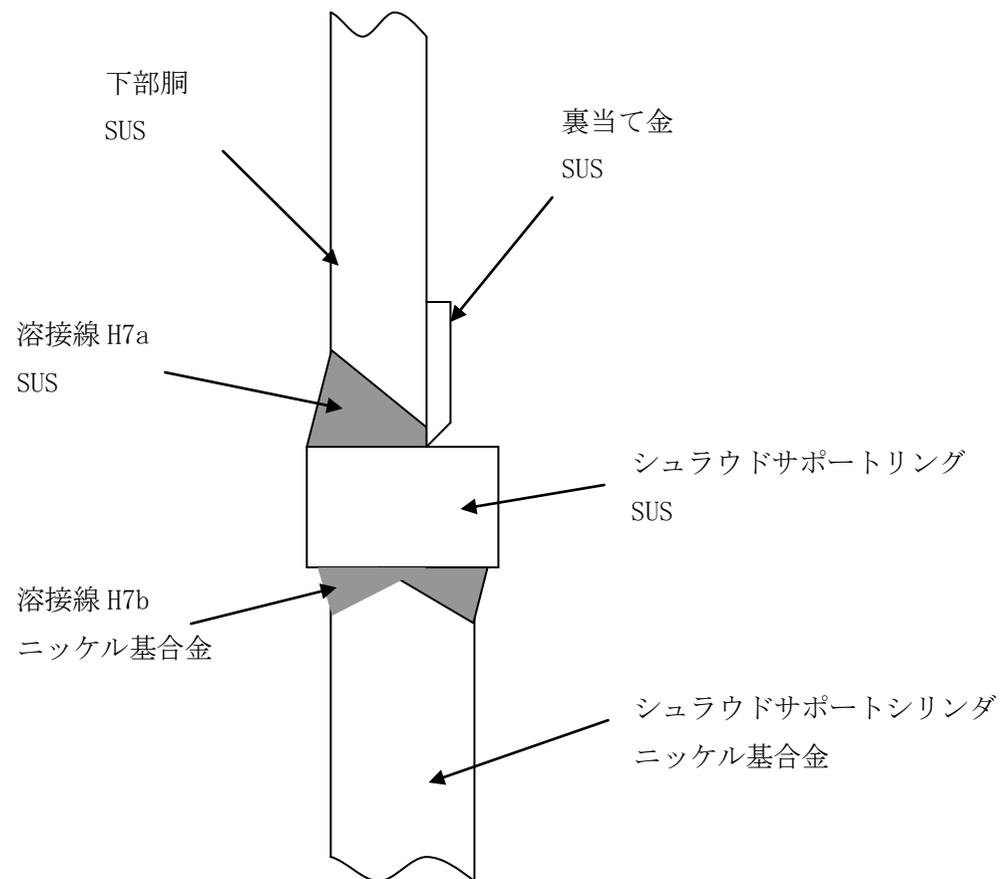


(a) 解析対象概略構造

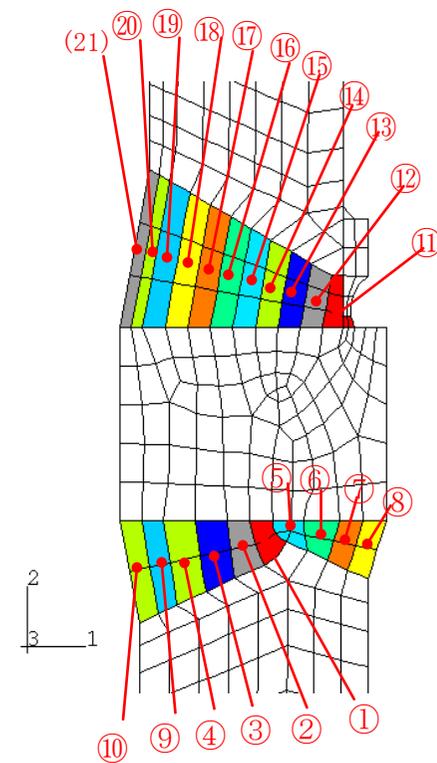


(b) 解析モデルと溶接順序

図 B-1b H4 の形状と解析モデル (両側開先の場合)

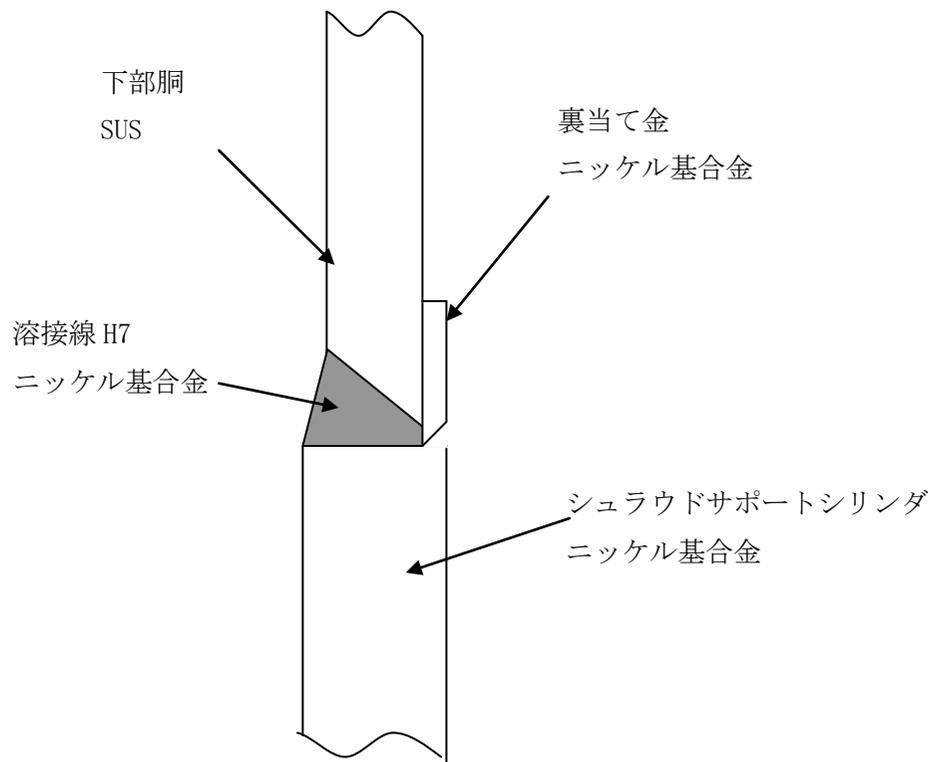


(a) 解析対象概略構造

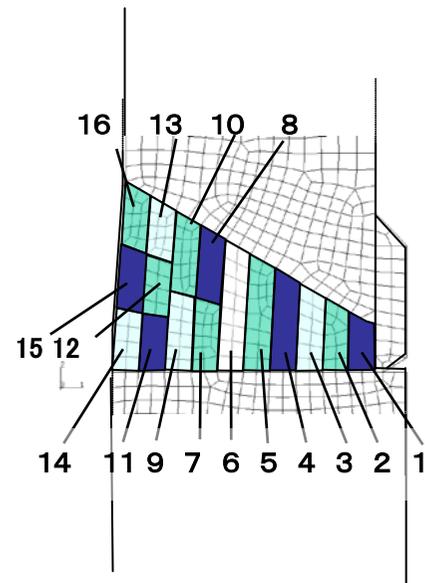


(b) 解析モデルと溶接順序

図 B-2a H7 の形状と解析モデル(シユラウドサポートリング有の場合)

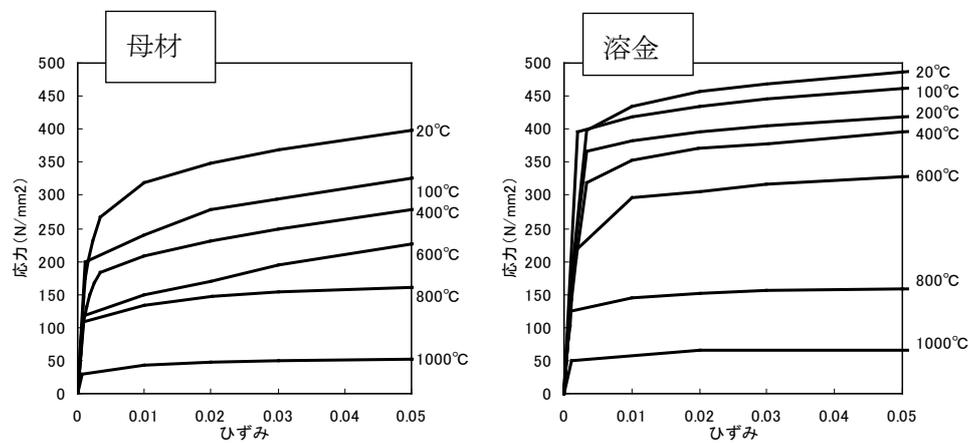
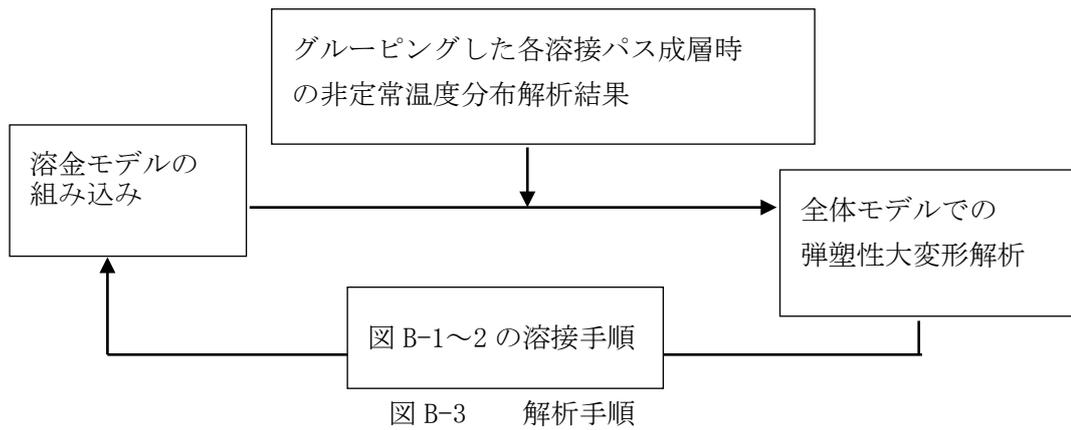


(a) 解析対象概略構造

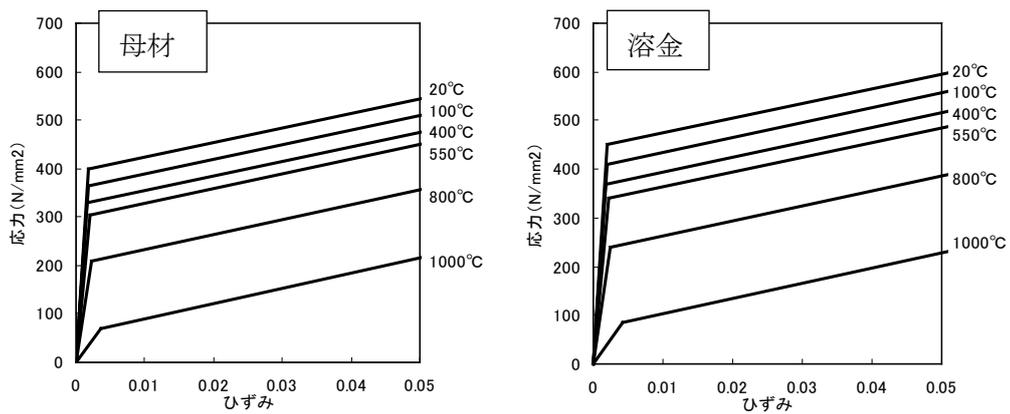


(b) 解析モデルと溶接順序

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

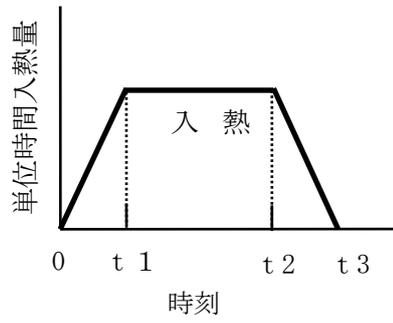


図 B-5 入熱の想定

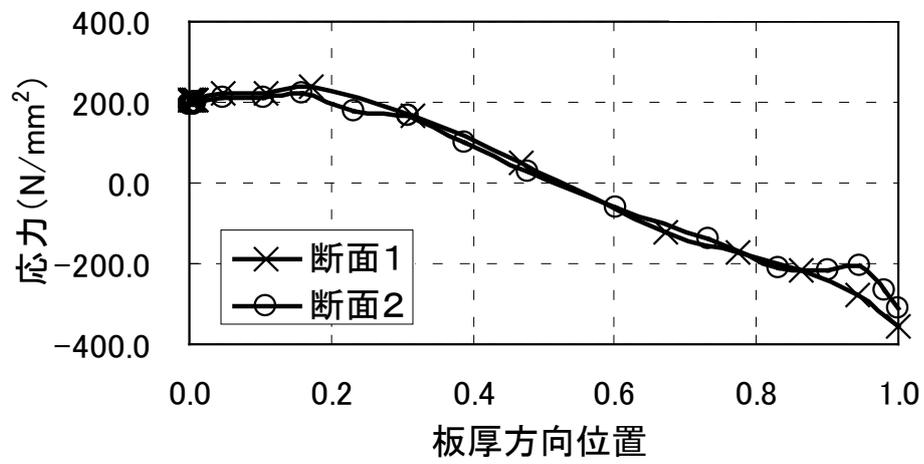
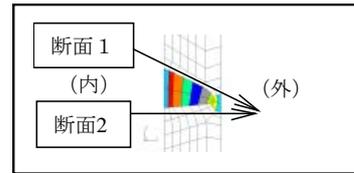


図 B-6a H4 継手の残留応力分布 (軸方向; 片側開先の場合)

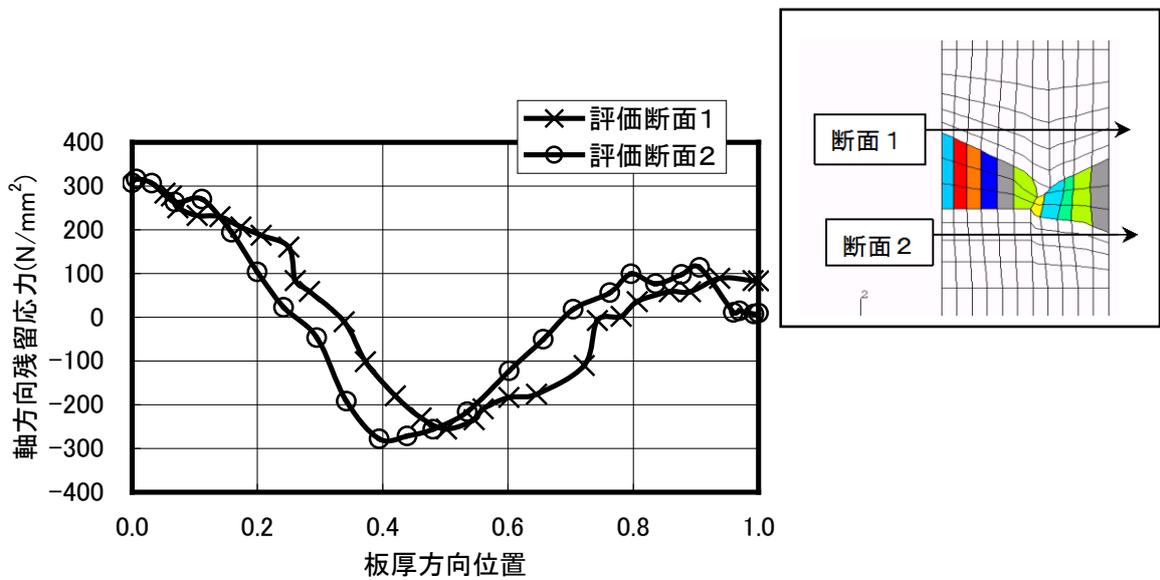


図 B-6b H4 継手の残留応力分布 (軸方向; 両側開先の場合)

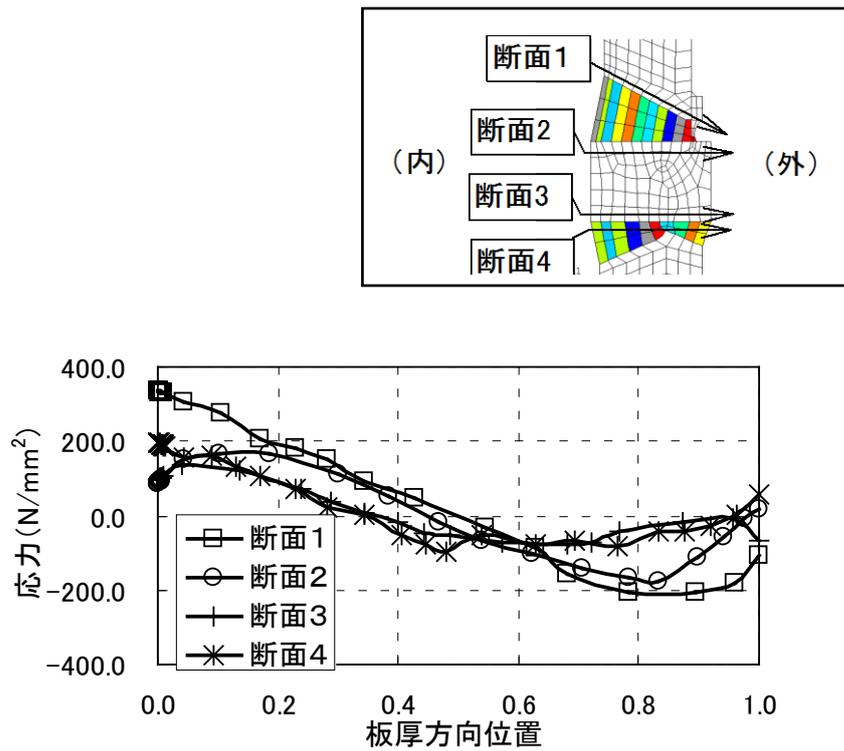
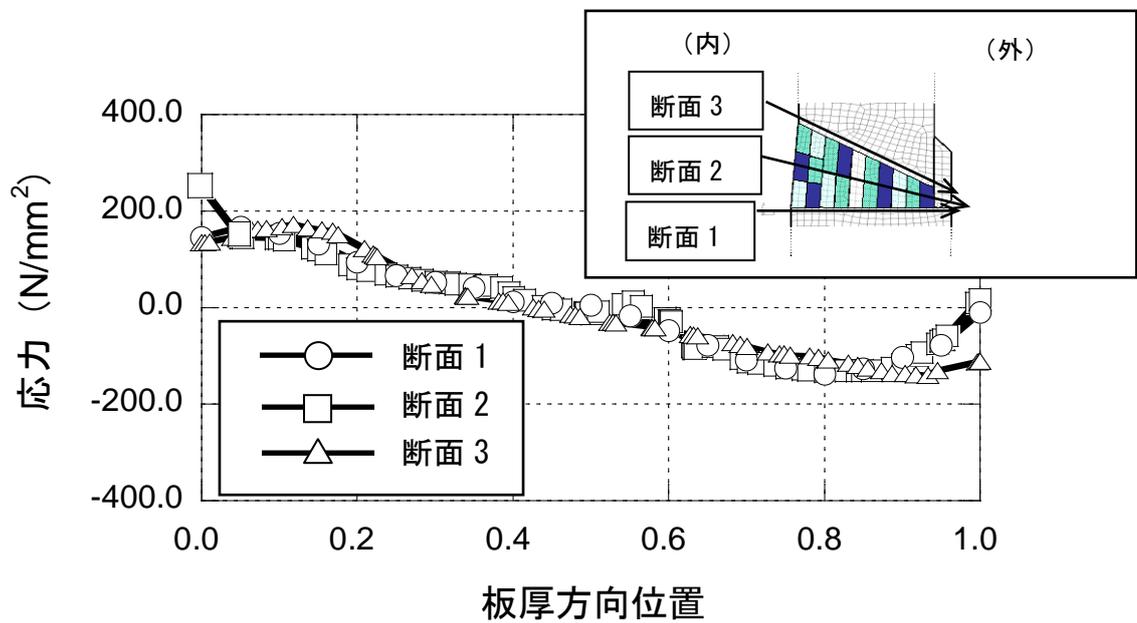


図 B-7a H7 継手の残留応力分布 (軸方向; シュラウドサポートリング有のケース)



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)

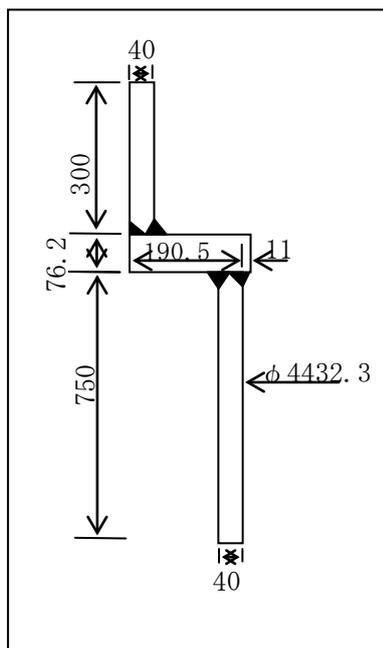


図 B-8 試験体形状

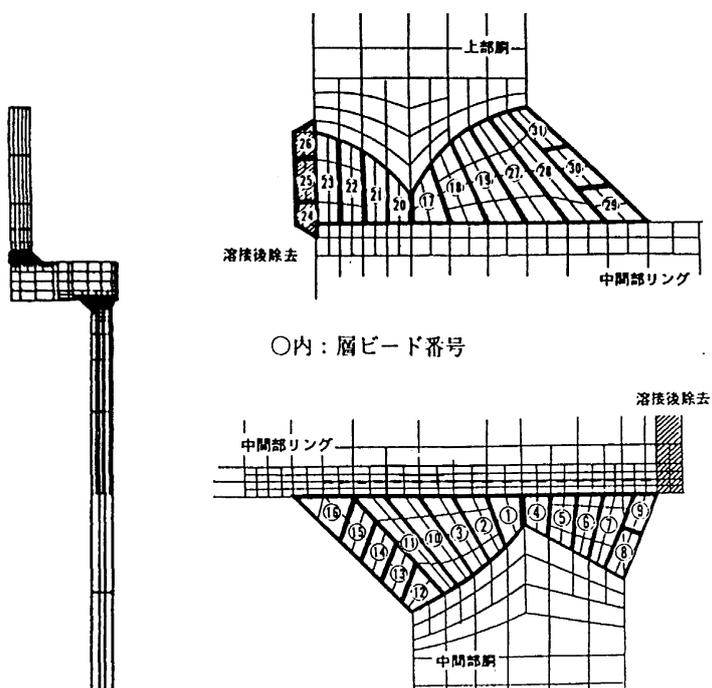
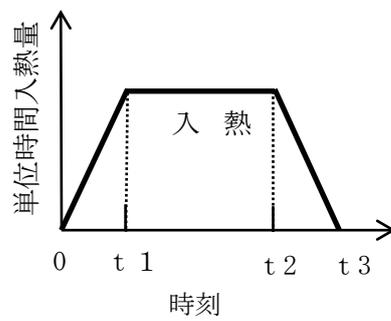
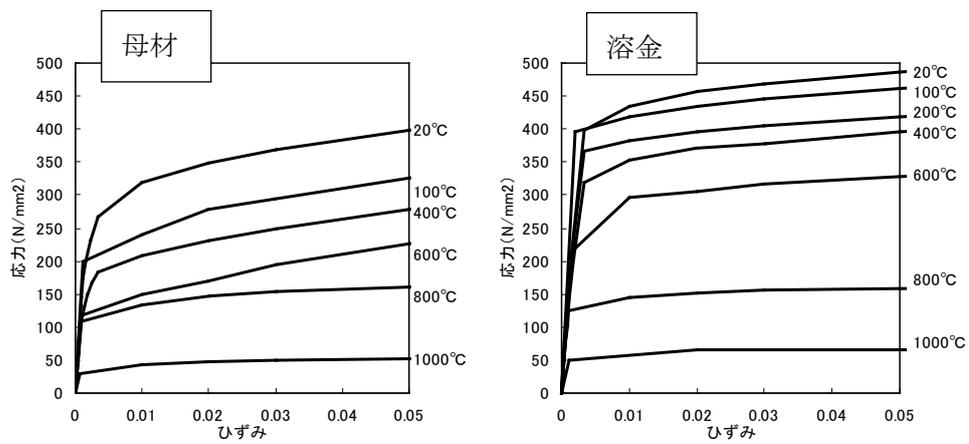
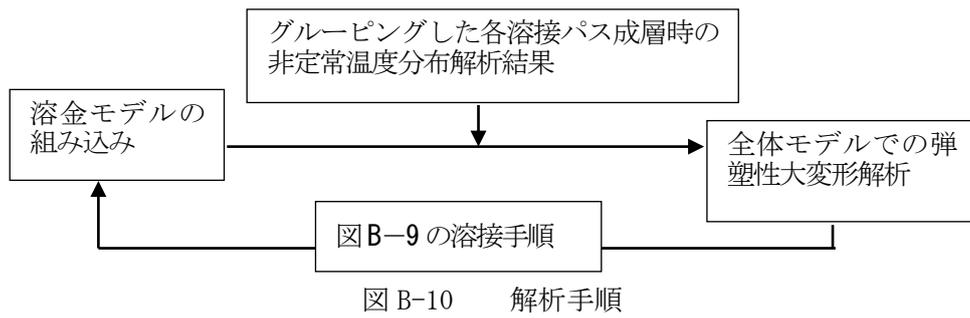


図 B-9 解析モデル



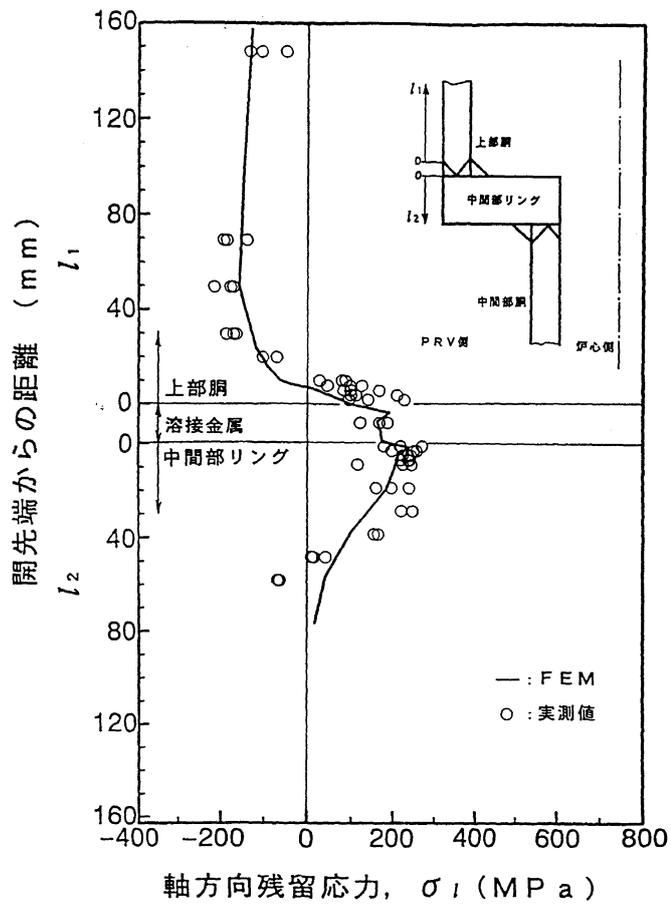
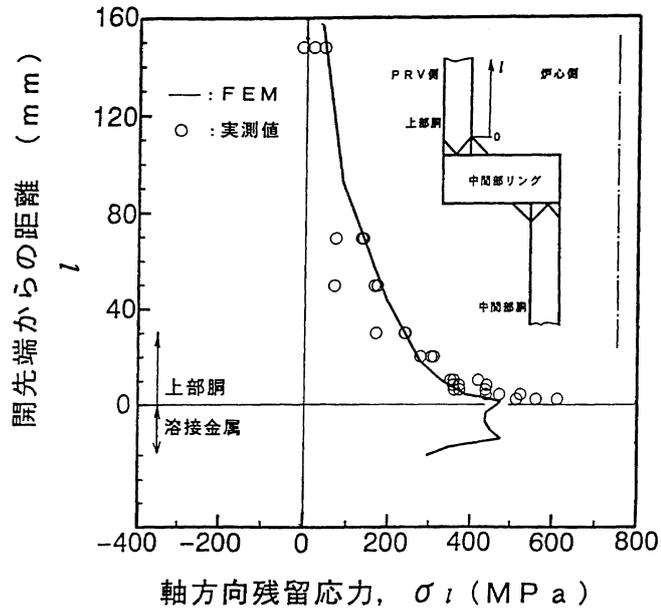


図 B-13a 解析結果 (その1)

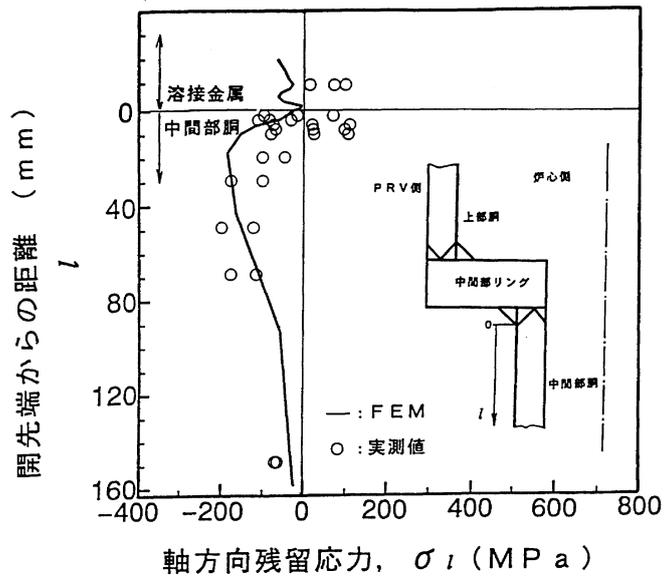
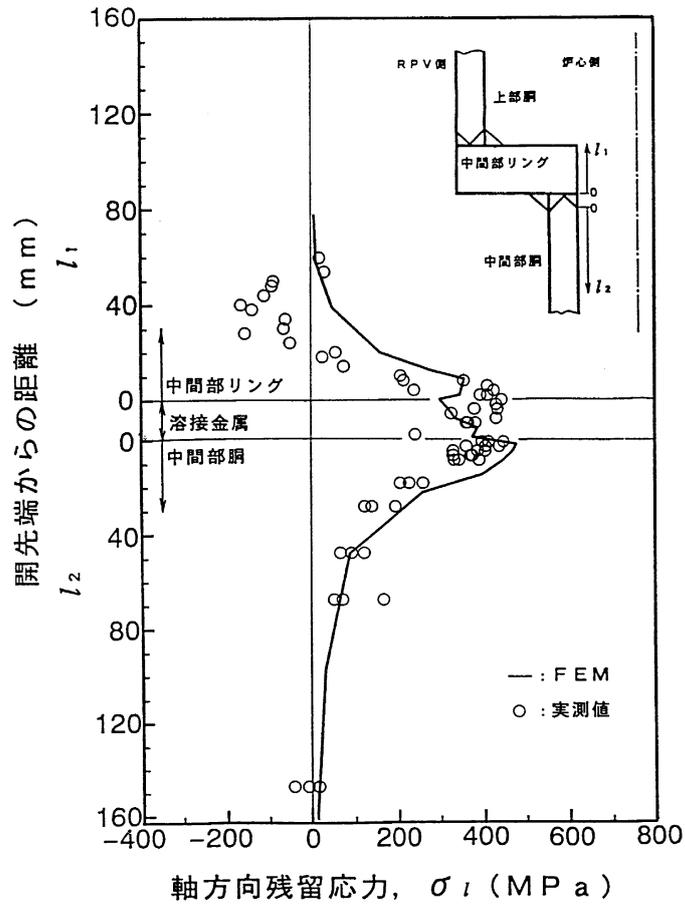


図 B-13b 解析結果 (その2)

付録C シュラウドの亀裂進展評価

炉心シュラウド（ステンレス鋼，ニッケル基合金）に初期亀裂を想定し，いくつかの前提条件を仮定して亀裂進展評価を行った。なお，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

炉心シュラウドの半径 (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，炉心シュラウドの H4，H7（胴側），H6a（胴側）継手を板厚 50.8 mm，H7 継手（シリンダ側）を板厚 70 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。（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。（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 μ m の半楕円亀裂（亀裂アスペクト比 a/\sqrt{b} ）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，円筒外周に深さ 500 μ m 深さ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。

炉心シュラウド継手（H4（継手形状 2 種類），H7（リング有り，リング無し）及び H6a）の残留応力は付録 C-1 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図 C-3 及び図 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 H7 周方向溶接部

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。評価部位は胴側およびリング側とする。この残留応力分布を図 C-5 および図 C-6 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 系のニッケル基合金(JIS 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-7 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 系のニッケル基合金の異材溶接部である。評価部位は、ニッケル基合金溶接金属のシリンダ側との境界部、ニッケル基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-8、図 C-9 及び図 C-10 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 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。

1.3.3 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図 C-11 及び図 C-12 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、Wang¹⁾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。Sin 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²⁾ 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-579³⁾ 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

炉心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。

一方、ニッケル基合金溶接部の 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 1.5.3 項に示す SCC 進展速度線図を適用した。

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 $< 0.2 \mu \text{S/cm}$, ECP $\geq 150 \text{mVSHE}$)

(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 (MPa $\sqrt{\text{m}}$))

以上、通常炉内水質環境中の SCC 進展評価線図を図 C-13 に示す。

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

(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 進展評価線図を図 C-14 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⁴⁾

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

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 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$))

1.5.3 ニッケル基合金溶接金属の SCC 進展速度式

$$da/dt = 3 \times 10^{-15} K^{5.186} \quad (13.3 \leq K \leq 50.3) \quad (20)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (K < 13.3) \quad (21)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-6} \quad (K > 50.3) \quad (22)$$

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

ニッケル基合金溶接金属の SCC 進展評価線図を図 C-15 に示す。

ここで、JSME 維持規格 (S NA1-2008) の事例規格として、2012 年 12 月に、腐食電位 (ECP) の影響を考慮したニッケル基合金溶接金属の BWR 環境中の SCC 亀裂進展速度 (CC-009) が発行された。本事例規格では、ニッケル基合金溶接金属の BWR 環境中の SCC 亀裂進展速度として、

1) $-100 < \text{ECP}$ の場合

$$\begin{aligned} da/dt &= 0 & (K \leq 0) \\ da/dt &= 2.70 \times 10^{-17} K^{4.50} & (0 < K \leq 56.0) \\ da/dt &= 2 \times 10^{-9} & (56.0 < K) \end{aligned}$$

2) $-200 < \text{ECP} \leq -100$ の場合

$$\begin{aligned} da/dt &= 0 & (K \leq 0) \\ da/dt &= 2.08 \times 10^{-16} e^{(0.0204 \cdot \text{ECP})} K^{4.50} & (0 < K \leq 56.0) \\ da/dt &= 1.53 \times 10^{-8} e^{(0.0204 \cdot \text{ECP})} & (56.0 < K) \end{aligned}$$

3) $\text{ECP} \leq -200$ の場合

$$\begin{aligned} da/dt &= 0 & (K \leq 0) \\ da/dt &= 3.50 \times 10^{-18} K^{4.50} & (0 < K \leq 56.0) \\ da/dt &= 2.58 \times 10^{-10} & (56.0 < K) \end{aligned}$$

と規定しており、今後の評価に際しては本速度線図を用いる必要がある。

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 $31\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 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。(図 C-16)

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 $28\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 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。(図 C-17(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 $9\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ で、内表面から板厚方向 18 mm 深さで K 値は 0 となる。(図 C-17(2))

H7 継手 (リング有り H7a 胴側) では、内表面側から外表面側への K 値分布は、内表面から 12mm 程度の位置で最大 $33\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度となる山型の分布を示している。板厚全体にわたって K 値は 0 にならない。(図 C-18)

H7 継手 (リング有り H7b シリンダ側) では、内表面側から外表面側への K 値分布は、内表面から 19mm 程度の位置で最大 $24\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度となる山型の分布を示している。板厚全体に

わかって K 値は 0 にならない。(図 C-19)

H7 継手(リング無し溶接部シリンダ側)では内表面から 8mm 程度の位置で $18\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度となる分布を示している。(図 C-20)

H7 継手(リング無し溶接部中央部)では内表面から 30mm 程度の位置で最大 $30\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度となる山形の分布を示している。(図 C-21)

H7 継手(リング無し溶接部ステンレス側溶接熱影響部)では内表面から約 20mm 程度の位置で最大 $28\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度となる山形の分布を示している。(図 C-22)

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 $41\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度となり、外表面側で $K=21\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の分布を示している。(図 C-23)

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 $27\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 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 23mm の位置で K 値は 0 となる。(図 C-24)

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。(図 C-25)

H7 継手(リング有りリング側)では、内表面側から外表面側への K 値分布は、内表面から徐々に増加し 20mm 程度の位置で最大 $63\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度となり、さらに深くなるにつれ徐々に低下するが、外表面付近で再び増加する分布を示している。板厚全体にわたって K 値は 0 にならない。(図 C-26)

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 項及び 1.5.3 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 ($da/dt=2.0\times 10^{-9}\text{m/s}$) 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。(図

C-27(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。(図 C-27(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。(図 C-28(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。(図 C-28(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。(図 C-28(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。(図 C-28(4))

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で 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-29)

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-30)

H7 継手(リング無し溶接部シリンダ側)、及び H7 継手(リング無し溶接部中央部)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 8%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-31, 図 c-32)

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-33)

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。(図 C-34)

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。(図 C-35)

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。(図 C-36)

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-37)

(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)
- 5) 日本機械学会 維持規格(JSME S NA1-2008)【事例規格】ニッケル合金溶接金属の BWR 環境中の SCC 亀裂進展速度(2012 年 12 月)

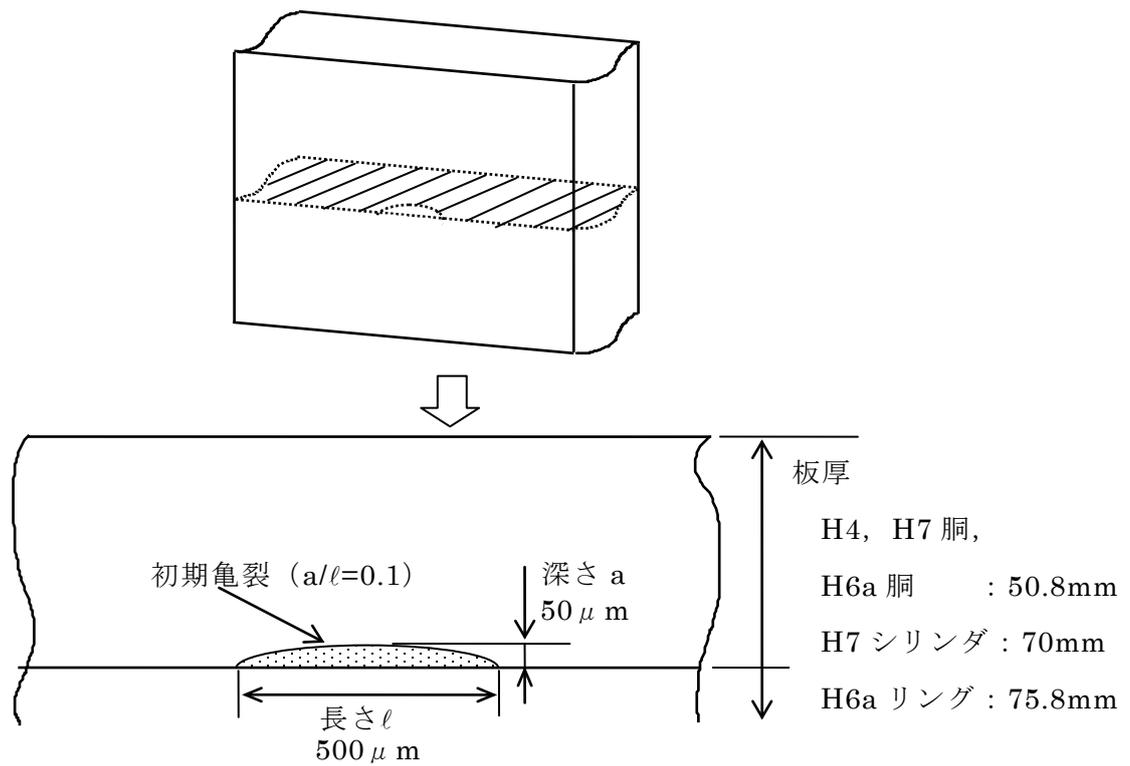
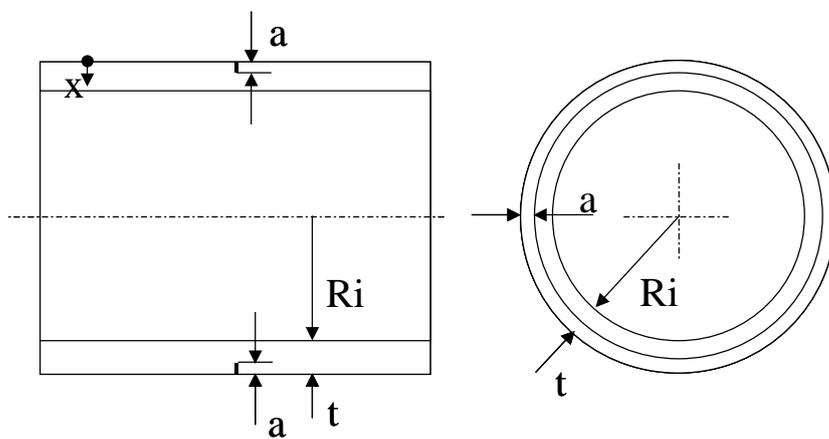


図 C-1 当該部のモデル化 (平板の表面亀裂モデル)



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

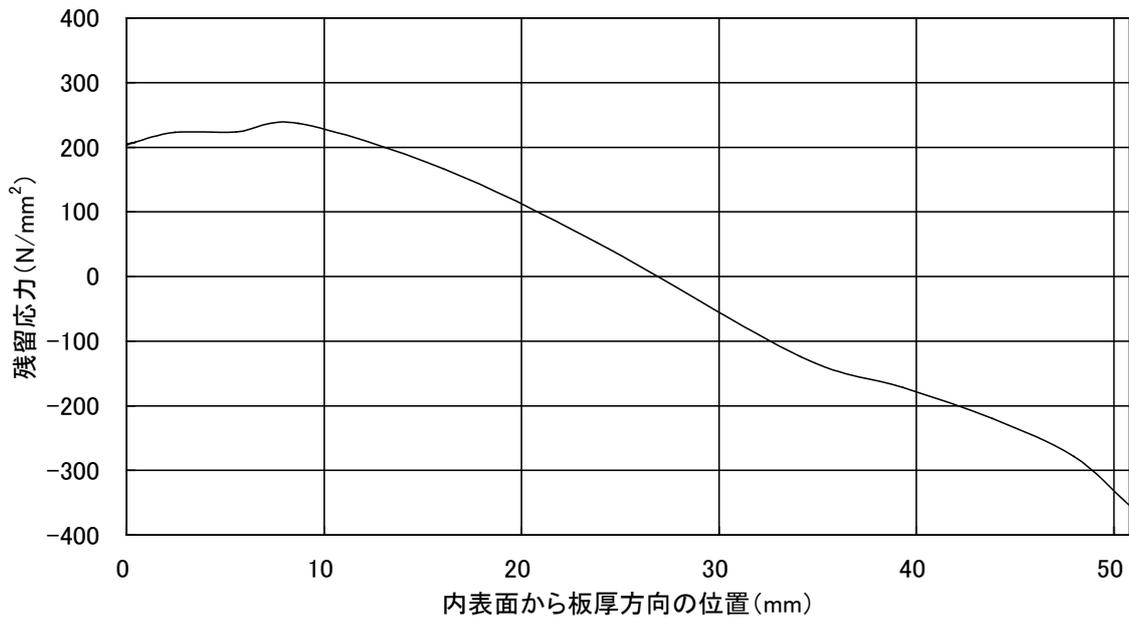


図 C-3 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H4: 継手形状 1)

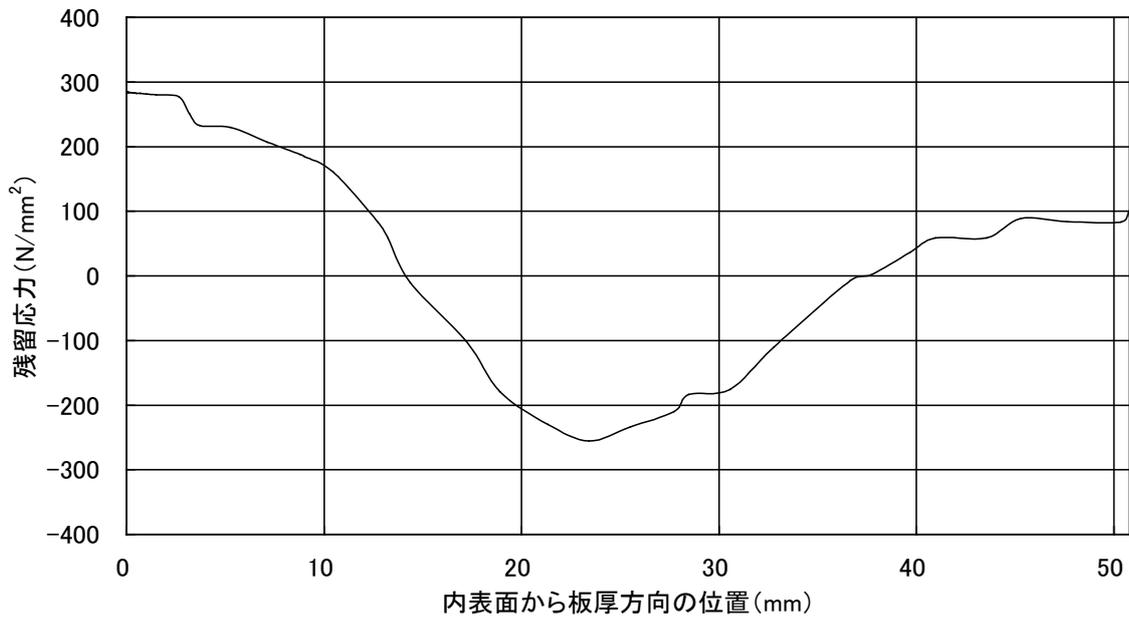


図 C-4 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H4: 継手形状 2)

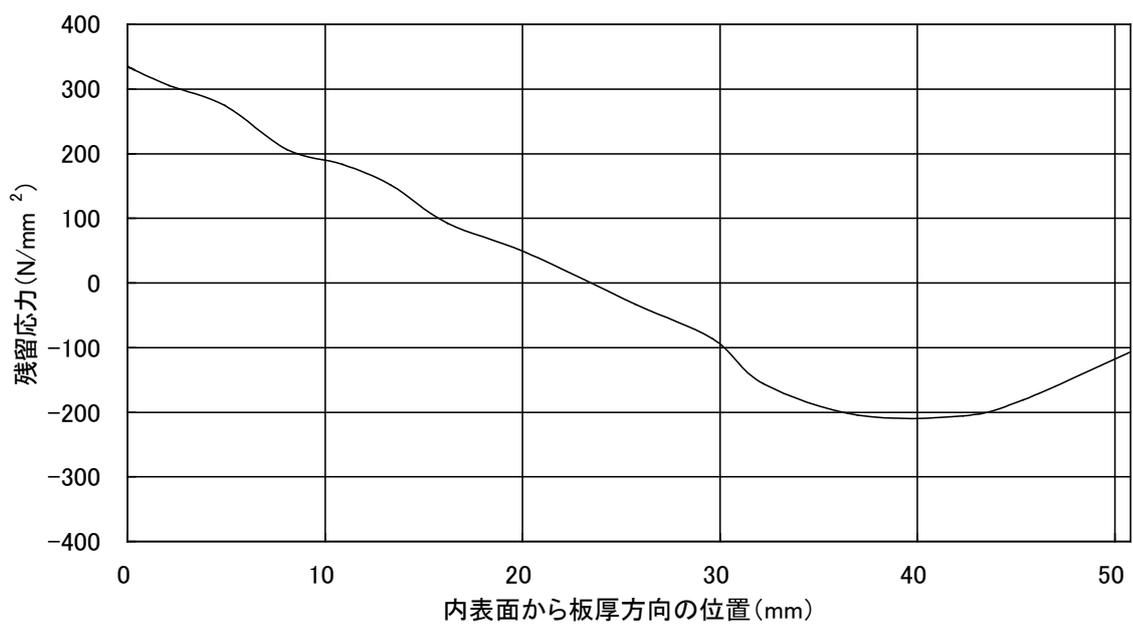


図 C-5 シュラウドの板厚方向残留応力分布（リング有り：H7a 胴側）

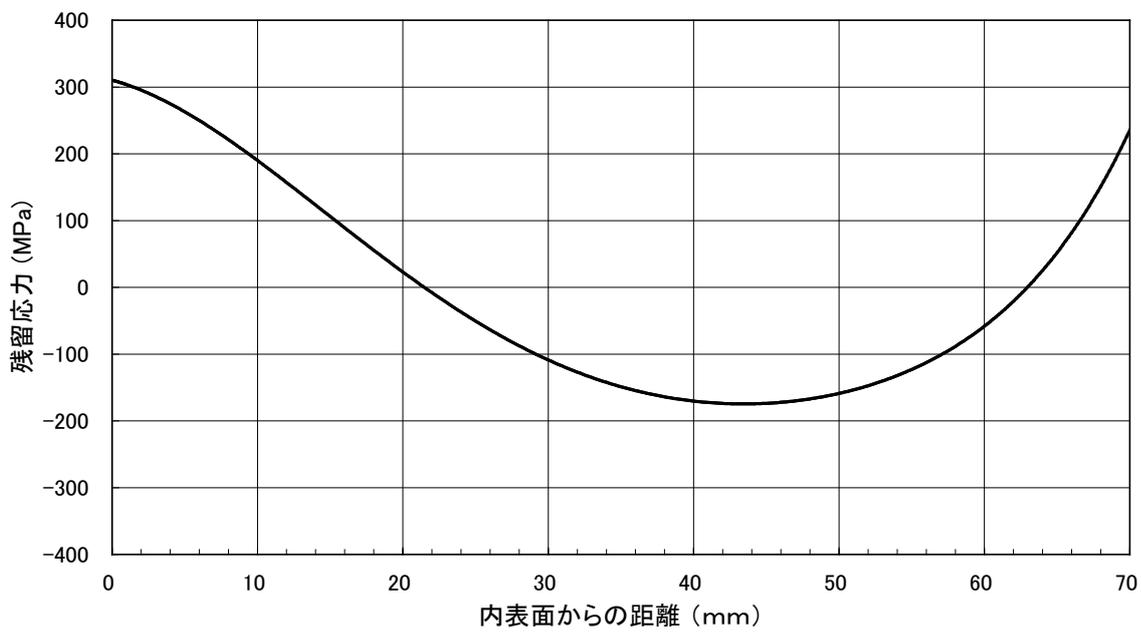


図 C-6 シュラウドの板厚方向残留応力分布（リング有り：H7a リング側）

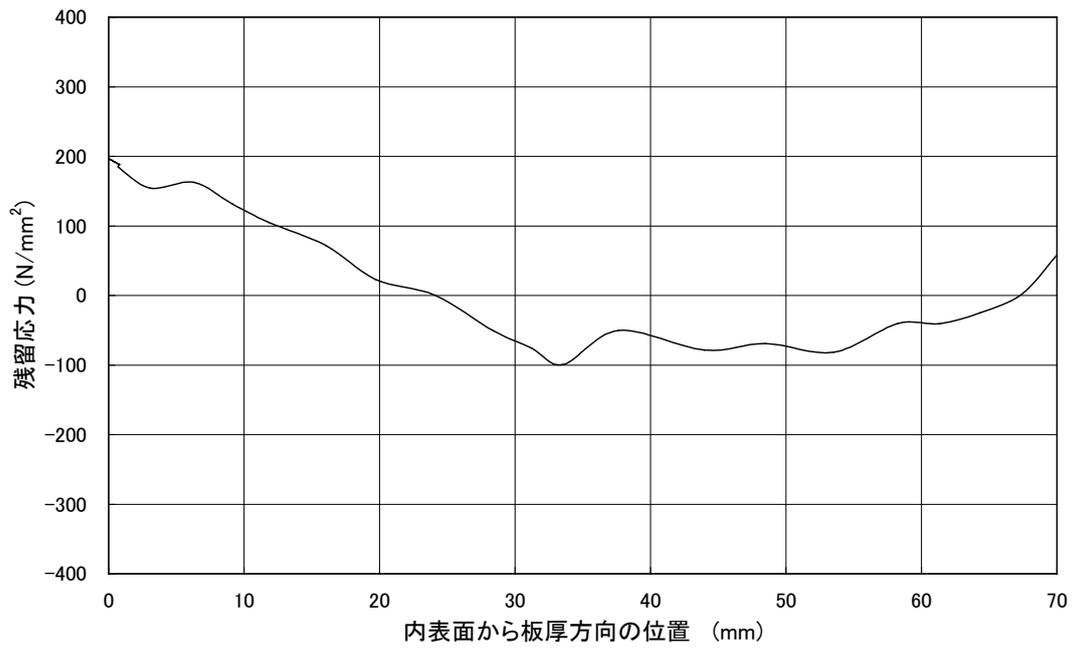


図 C-7 シュラウドの板厚方向残留応力分布（リング有り：H7b シリンダ側）

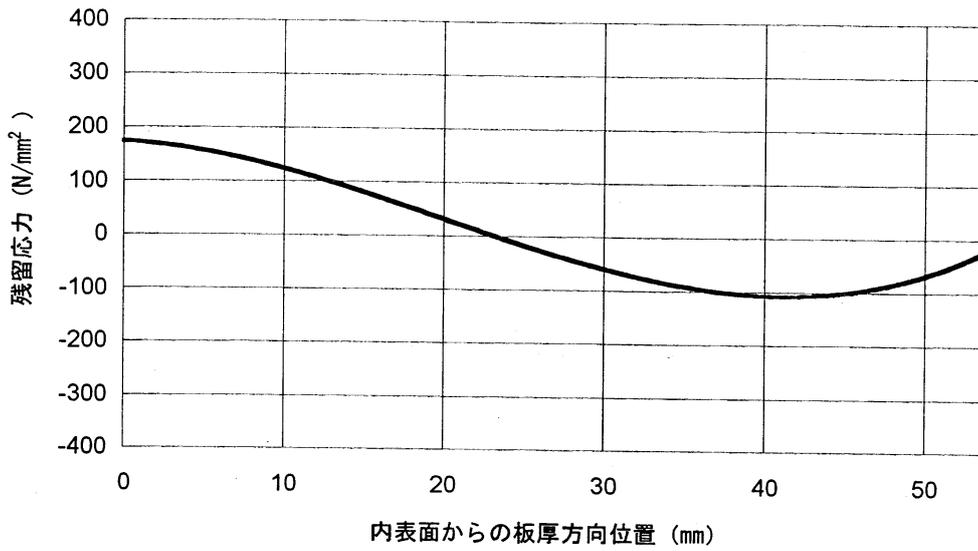


図 C-8 シュラウドの板厚方向残留応力分布 H7

(リング無し：ニッケル合金溶接部シリンダ側断面 1)

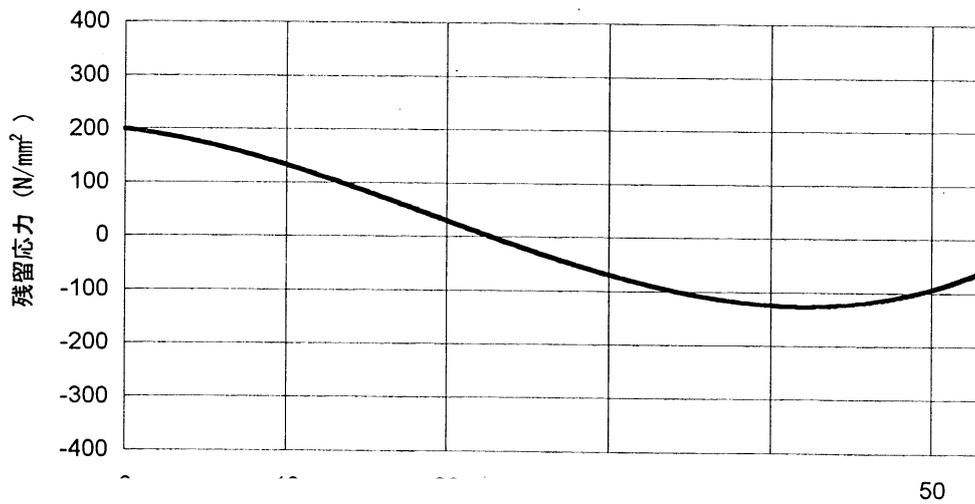


図 C-9 シュラウドの板厚方向残留応力分布 H7

(リング無し：ニッケル合金溶接部中央断面 2)

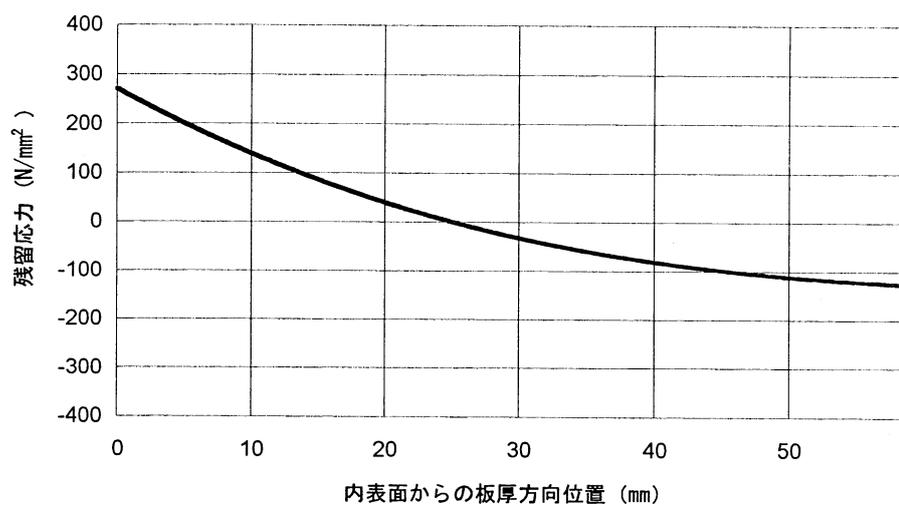


図 C-10 シュラウドの板厚方向残留応力分布 H7
 (リング無し：ニッケル合金溶接部ステンレス側熱影響部断面 3)

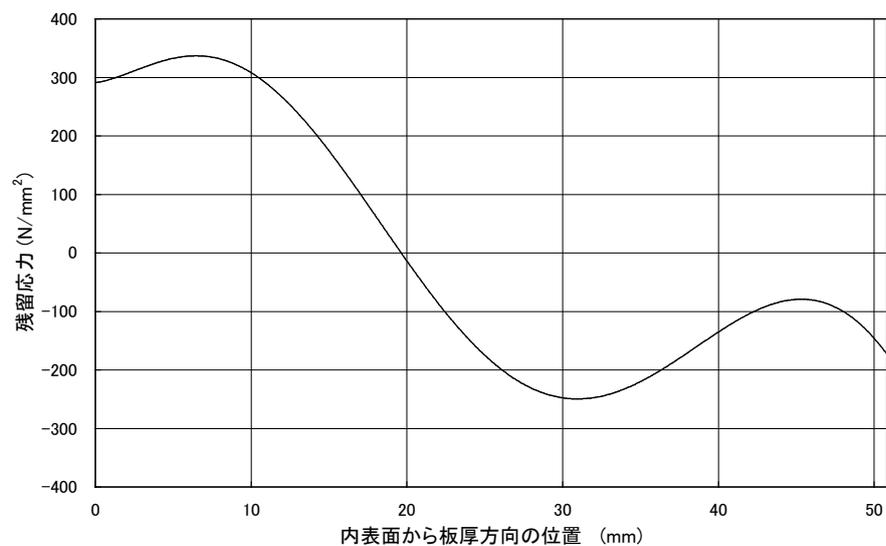


図 C-11 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H6a : 胴側)

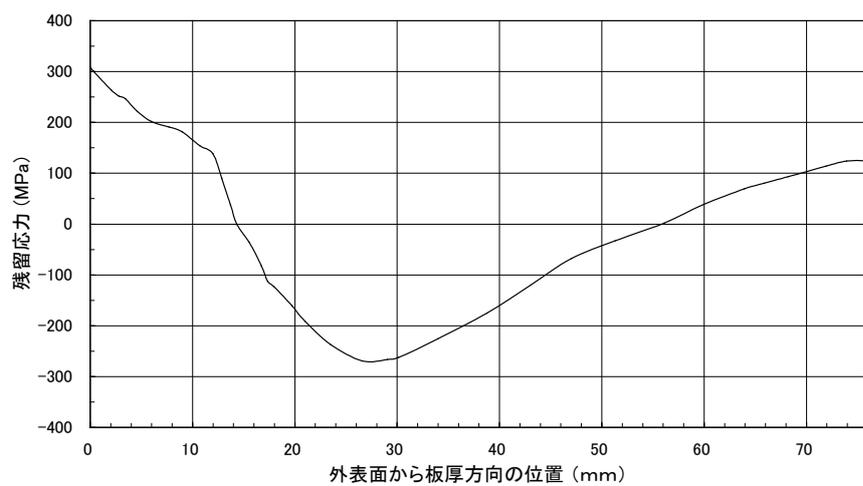


図 C-12 シュラウドの板厚方向残留応力分布 (H6a : リング側)

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 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

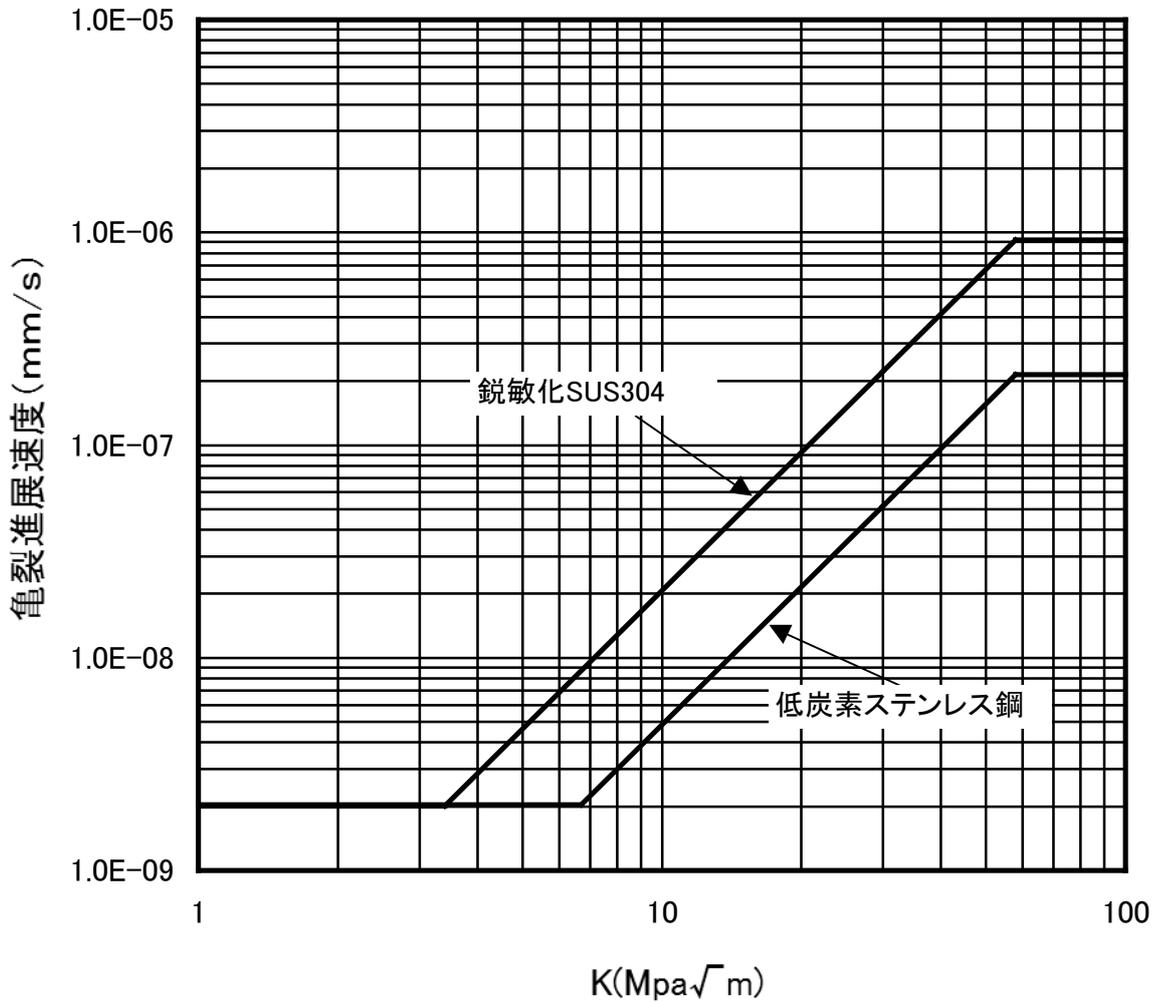


図 C-13 オーステナイト系ステンレス鋼の通常炉内水質環境中の
SCC 進展評価線図

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 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

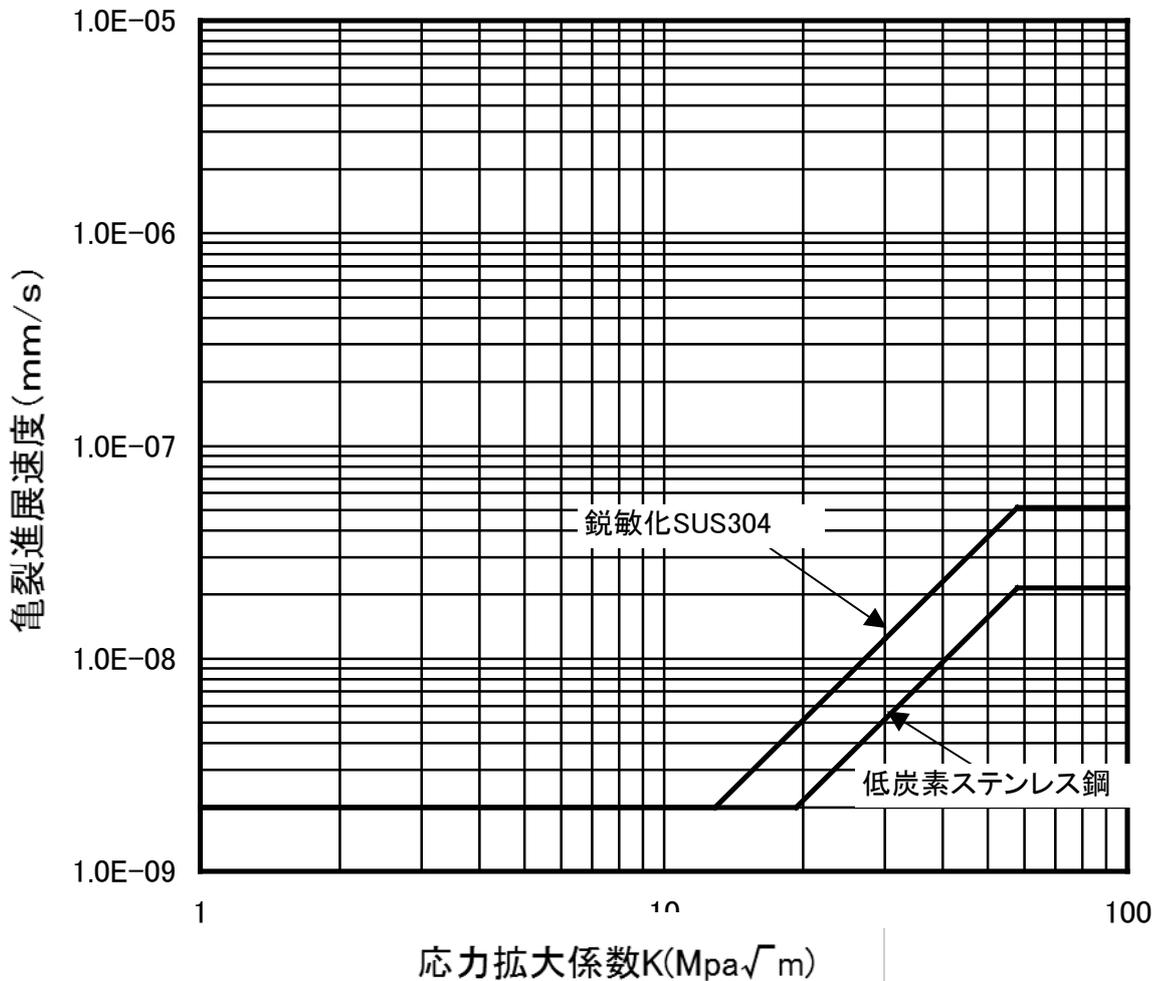


図 C-14 オーステナイト系ステンレス鋼の水素注入環境中の
SCC 進展評価線図

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 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

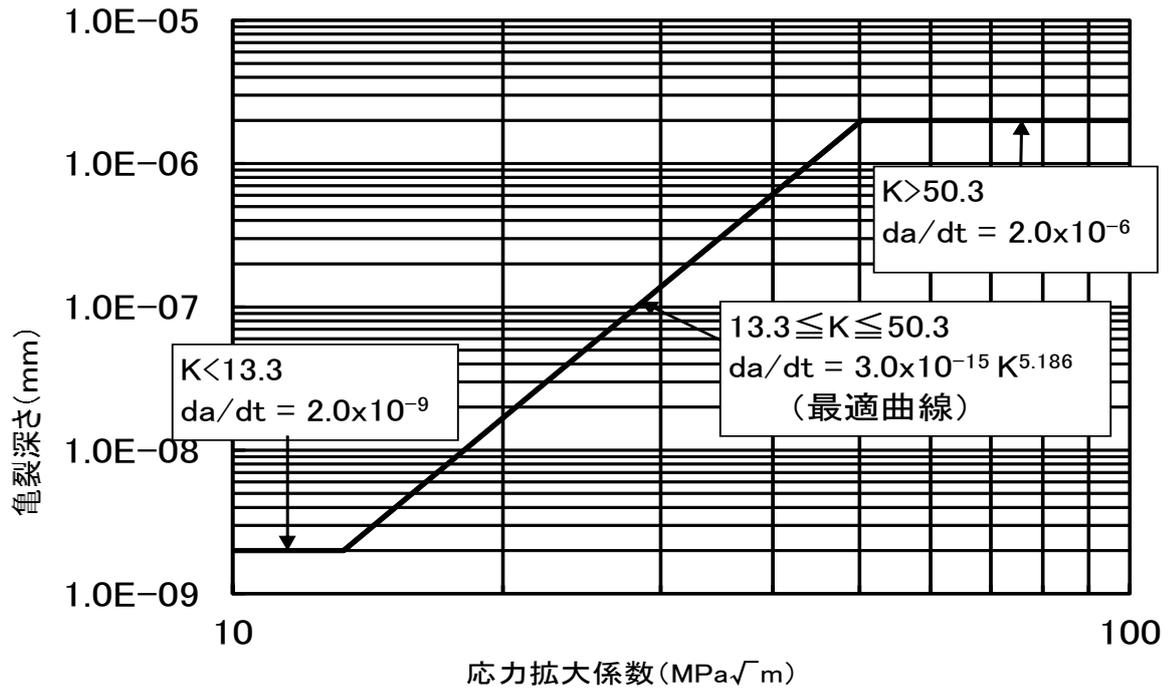


図 C-15 ニッケル合金溶接金属の通常炉内水質環境中の SCC 進展評価線図

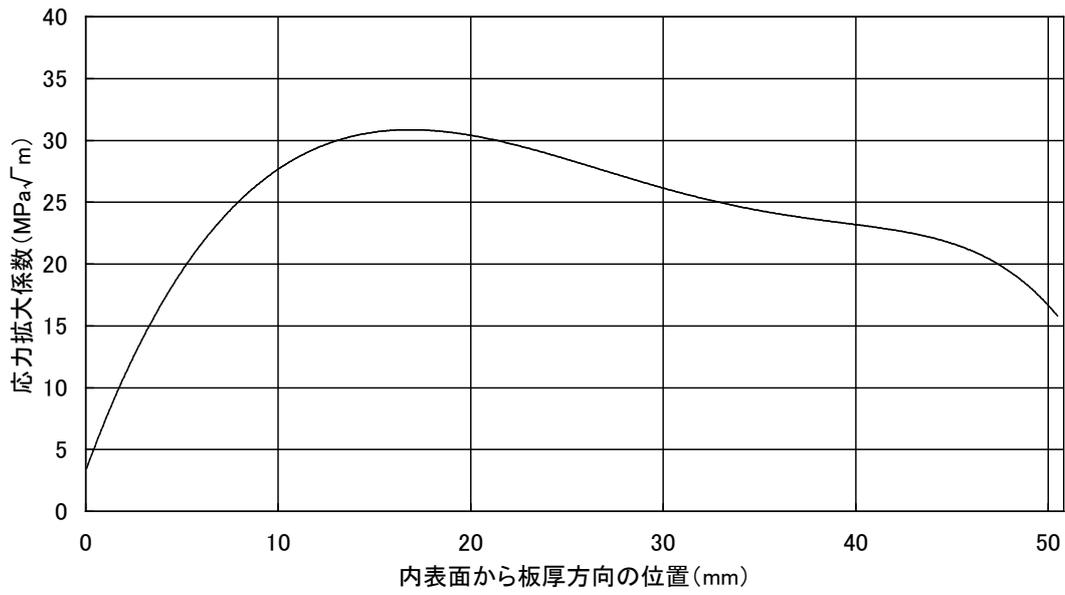
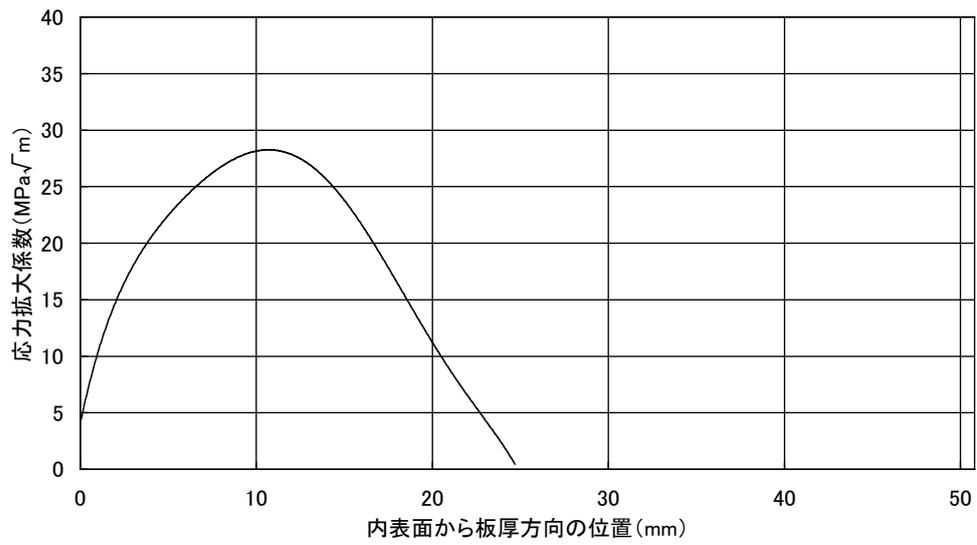
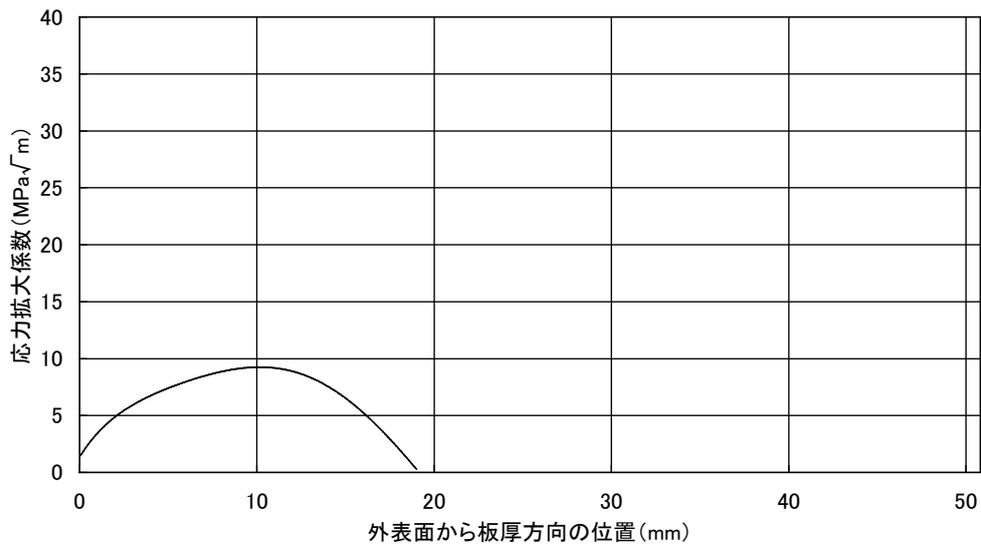


図 C-16 応力拡大係数分布 (H4 : 継手形状 1)



(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

図 C-17 応力拡大係数分布 (H4: 継手形状 2)

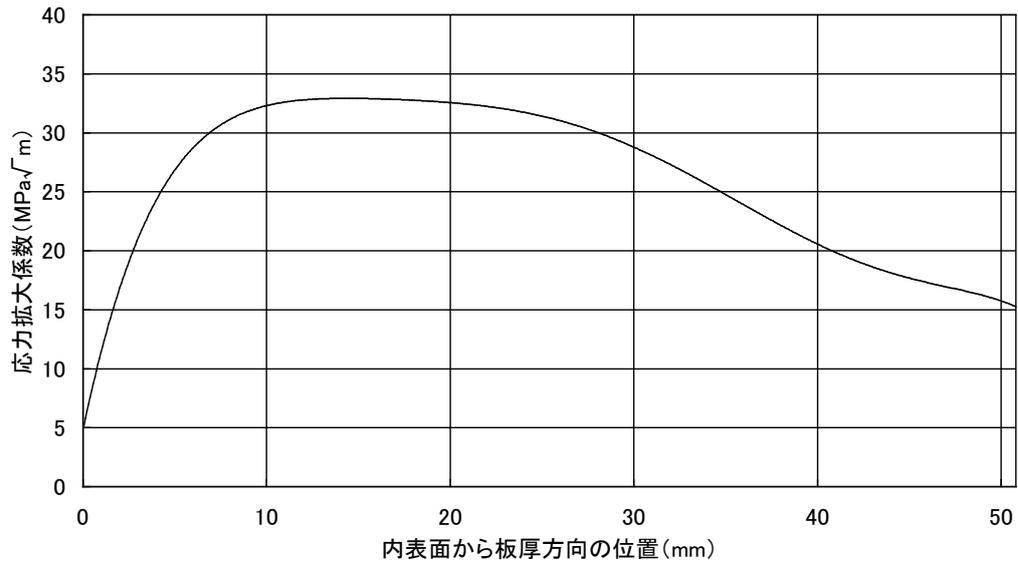


図 C-18 応力拡大係数分布 (H7 リング有り, H7a 胴側)

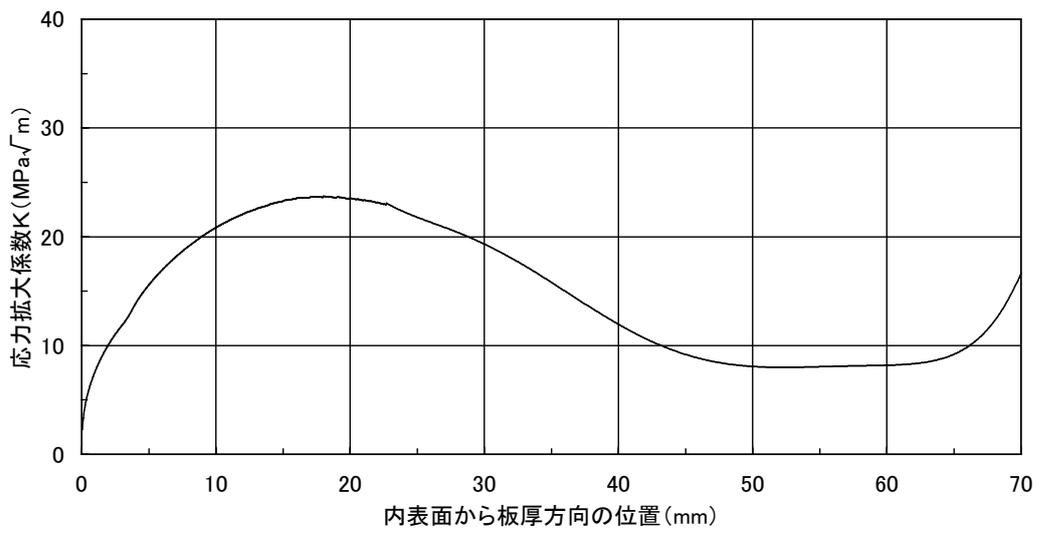


図 C-19 応力拡大係数分布 (H7 リング有り, H7b シリンダ側)

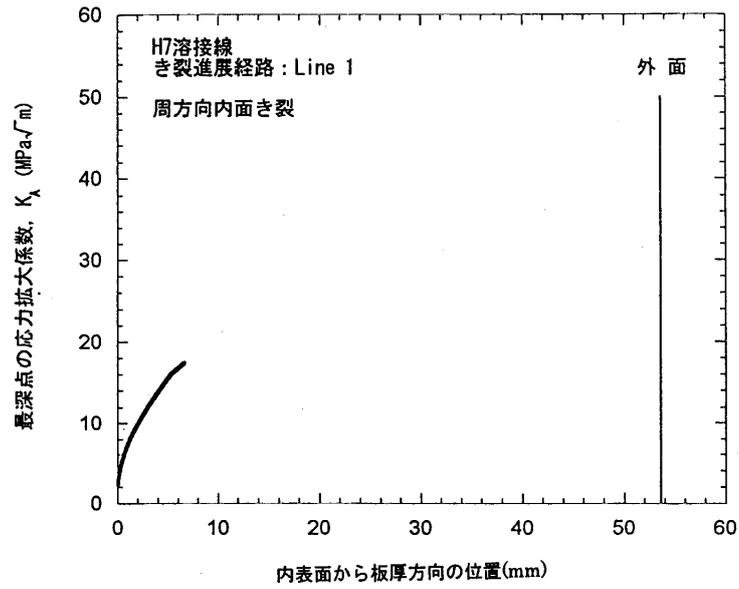


図 C-20 応力拡大係数分布

(H7 リング無し, ニッケル合金溶接部シリンダ側断面 1)

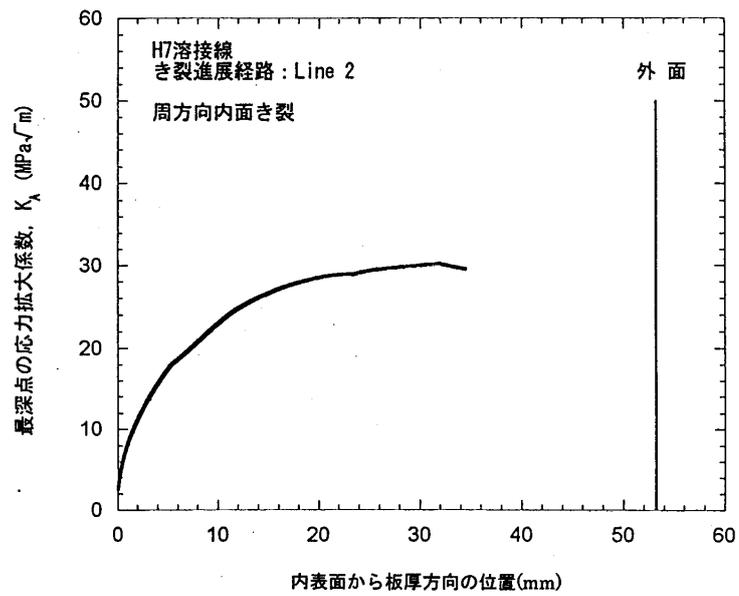


図 C-21 応力拡大係数分布

(H7 リング無し, ニッケル合金溶接部中央断面 2)

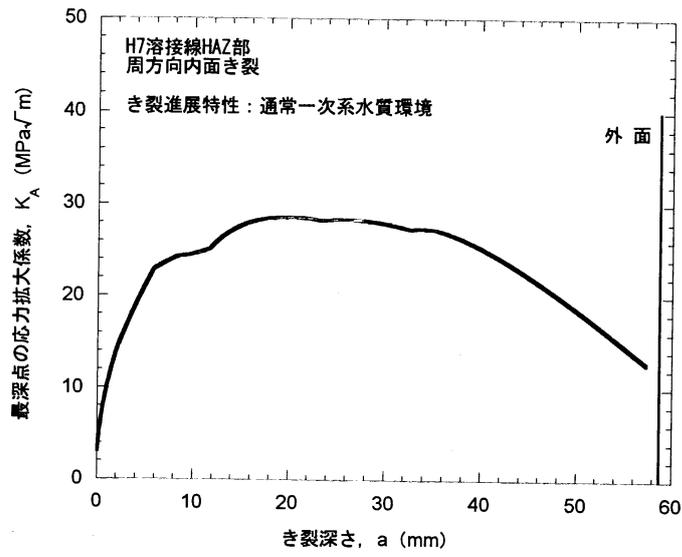


図 C-22 応力拡大係数分布 (H7 リング無し, ニッケル合金溶接部ステンレス側溶接熱影響部断面 3)

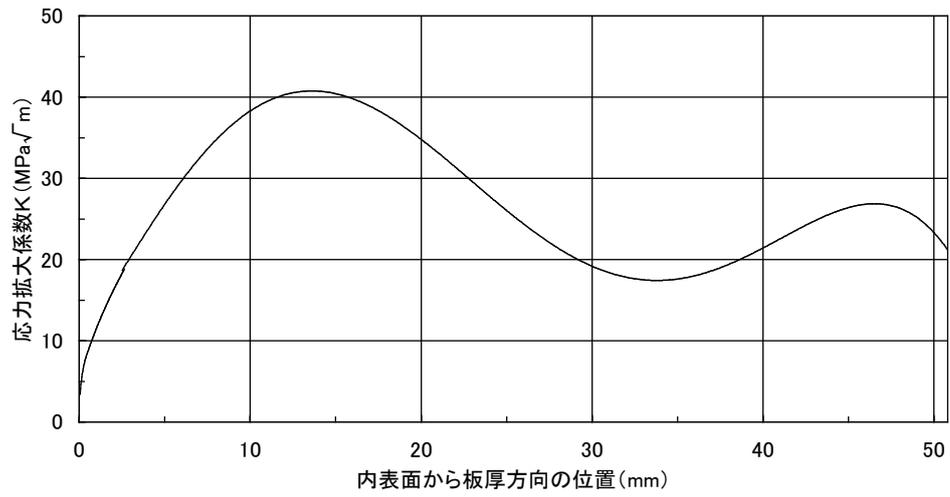


図 C-23 応力拡大係数分布 (H6a 胴側)

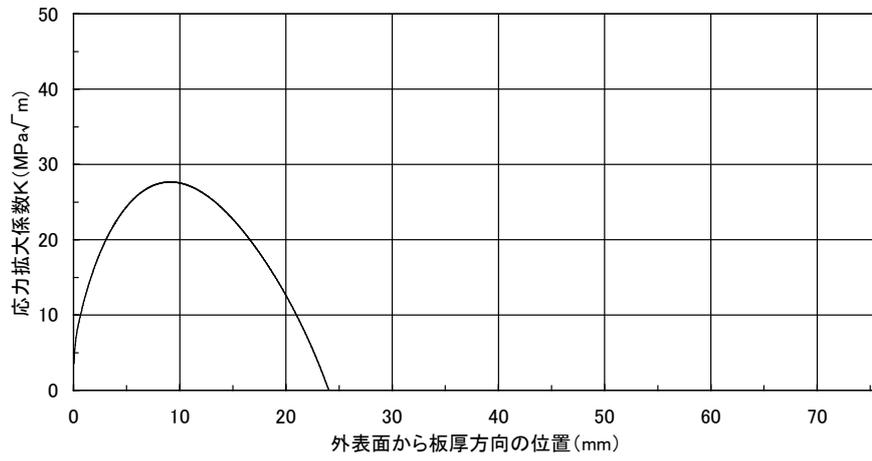


図 C-24 応力拡大係数分布 (H6a リング側)

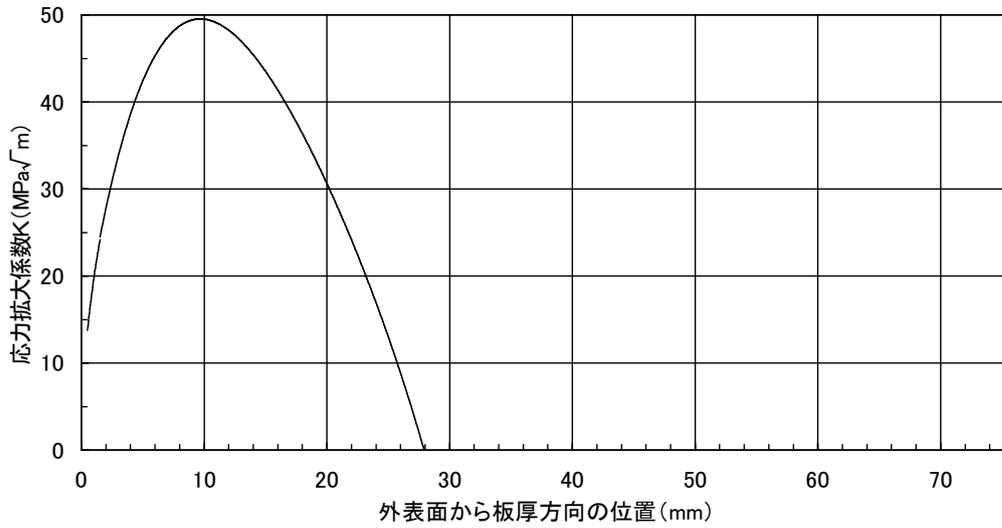


図 C-25 応力拡大係数分布 (H6a リング側, 外表面全周亀裂)

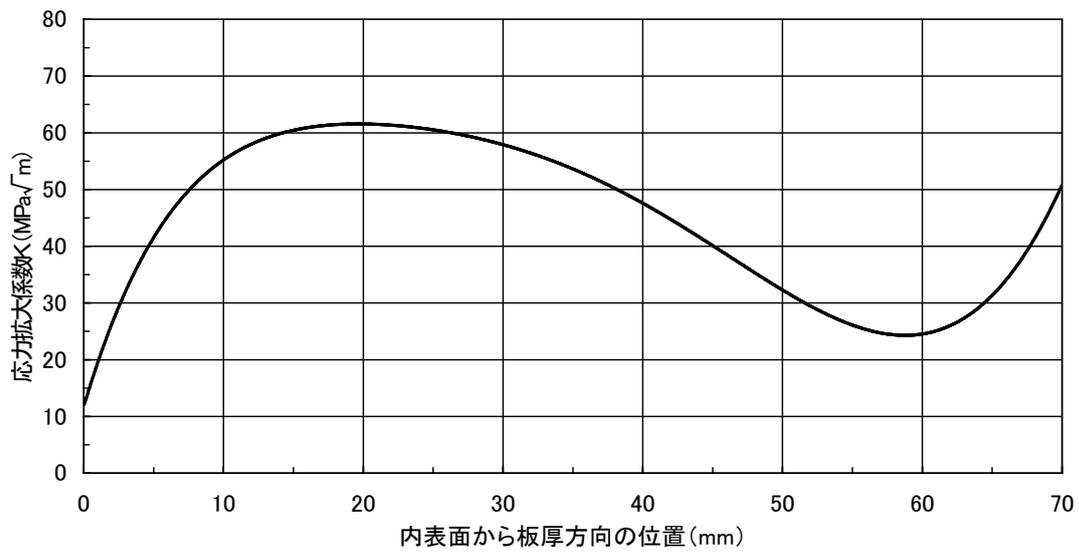


図 C-26 応力拡大係数分布 (H7 リング有り, H7a リング側, 外表面全周亀裂)

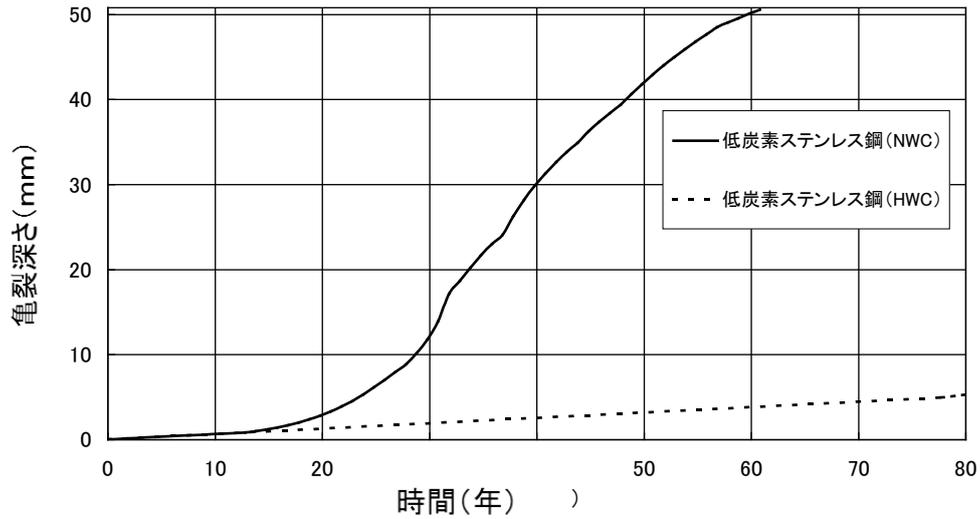


図 C-27(1) 亀裂深さと時間の関係(H4 継手形状 1, 低中性子照射領域)
(内表面から板厚方向への進展)

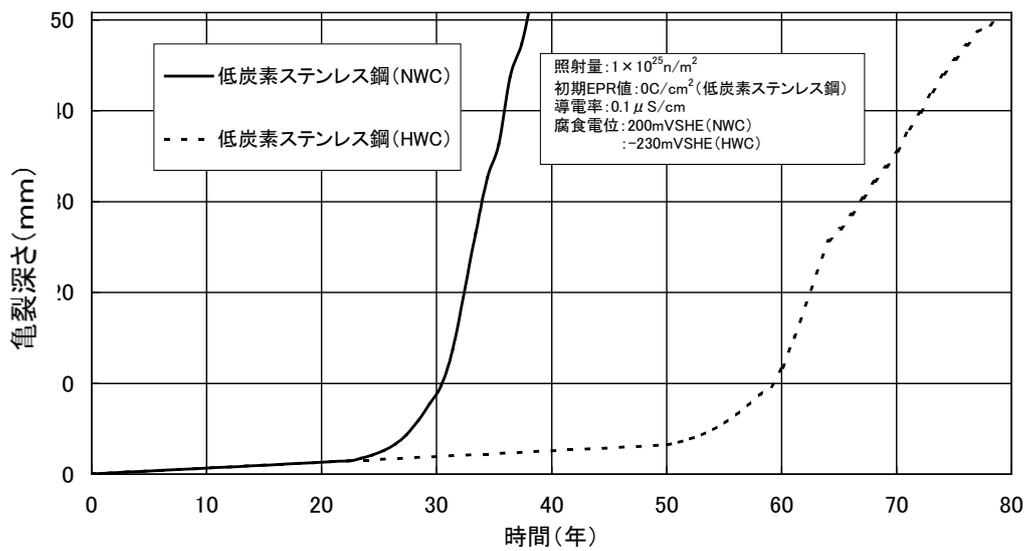


図 C-27(2) 亀裂深さと時間の関係(H4 継手形状 1, 高中性子照射領域)
(内表面から板厚方向への進展)

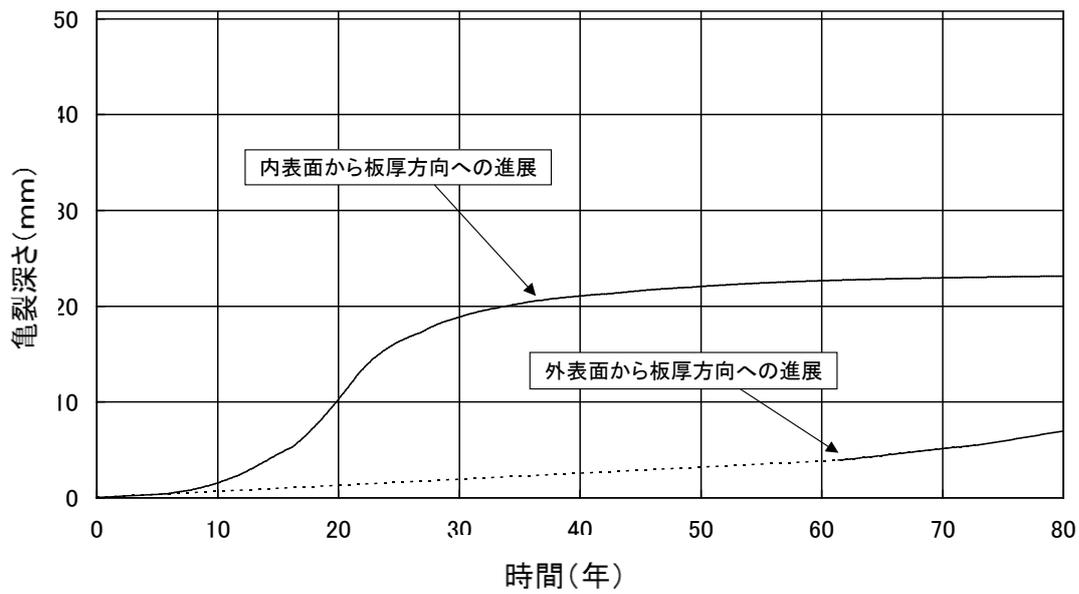


図 C-28(1) 亀裂深さと時間の関係 (H4 継手形状 2)
 (通常炉内水質環境中, 低炭素ステンレス鋼, 低中性子照射領域)

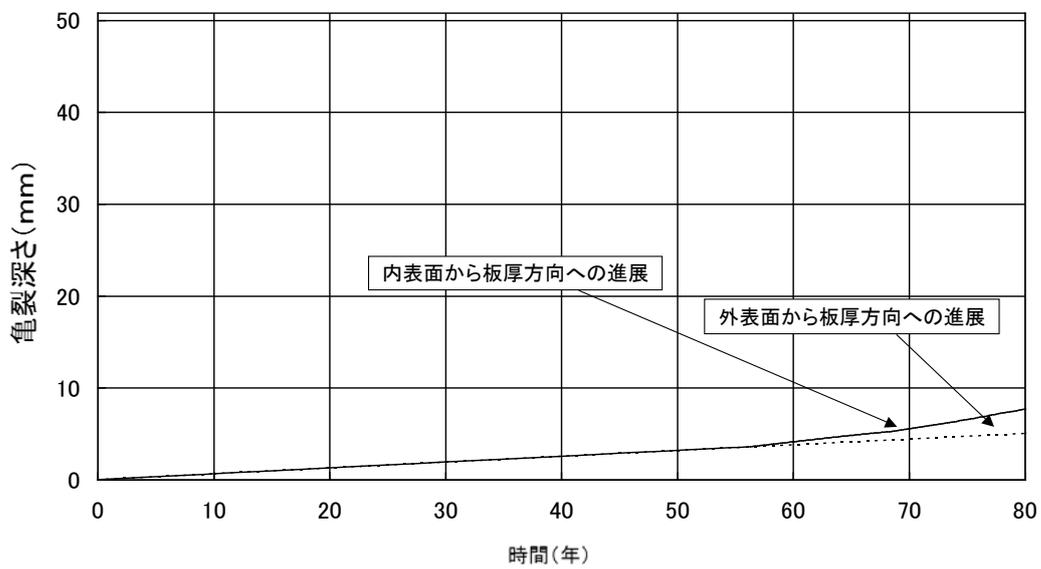


図 C-28(2) 亀裂深さと時間の関係 (H4 継手形状 2)
 (水素注入環境中, 低炭素ステンレス鋼, 低中性子照射領域)

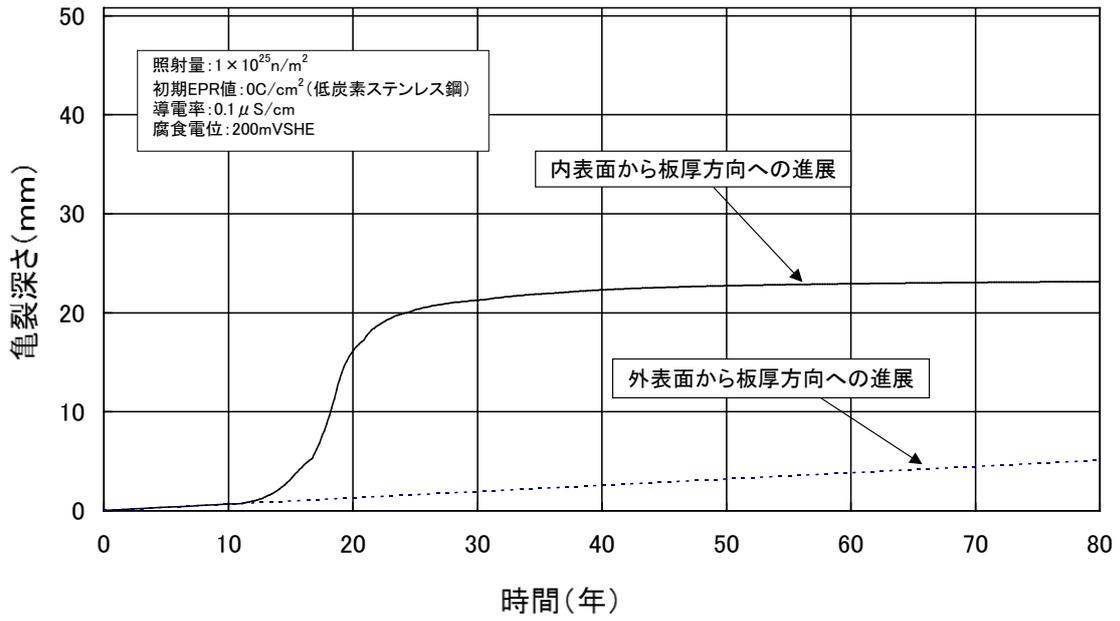


図 C-28 (3) 亀裂深さと時間の関係 (H4 継手形状 2)
 (通常炉内水質環境中, 高中性子照射領域)

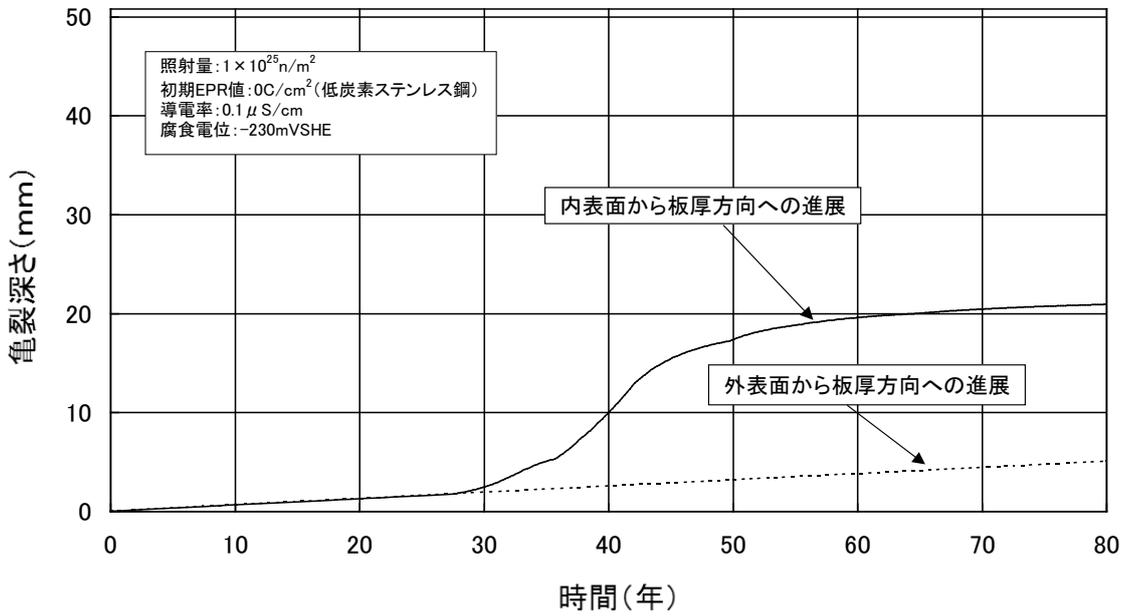


図 C-28 (4) 亀裂深さと時間の関係 (H4 継手形状 2)
 (水素注入環境中, 高中性子照射領域)

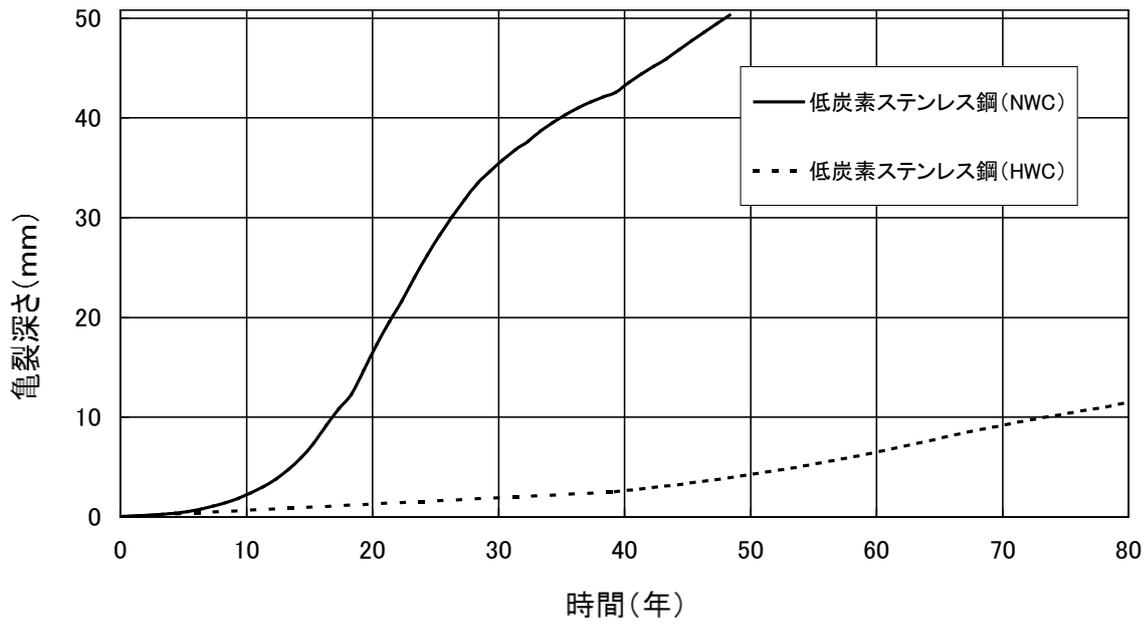


図 C-29 亀裂深さと時間の関係(H7 リング有り, H7a 胴側)
(内表面から板厚方向への進展)

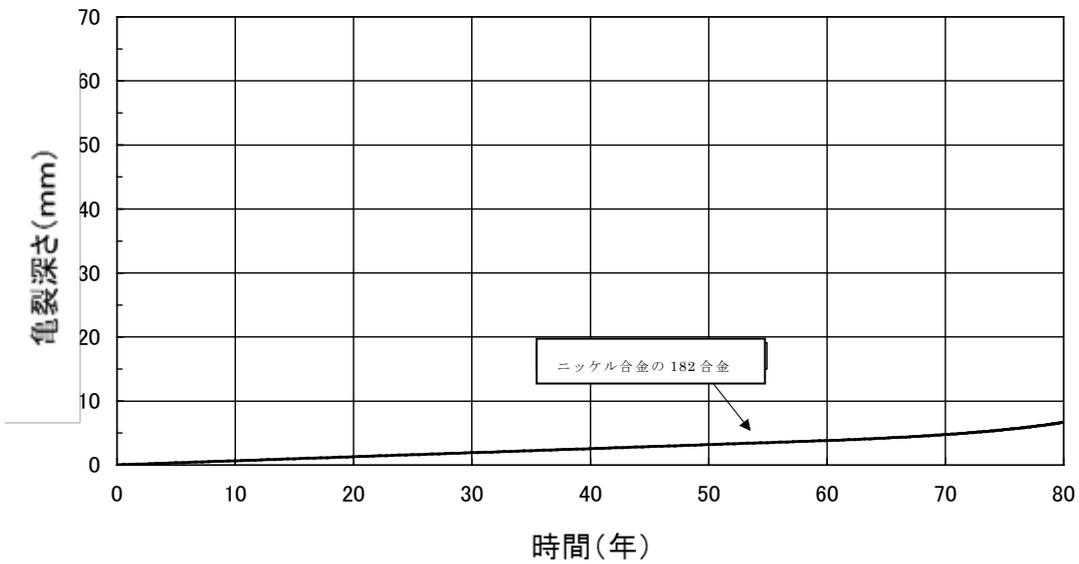


図 C-30 亀裂深さと時間の関係(H7 リング有り, H7b シリンダ側)
(内表面から板厚方向への進展)

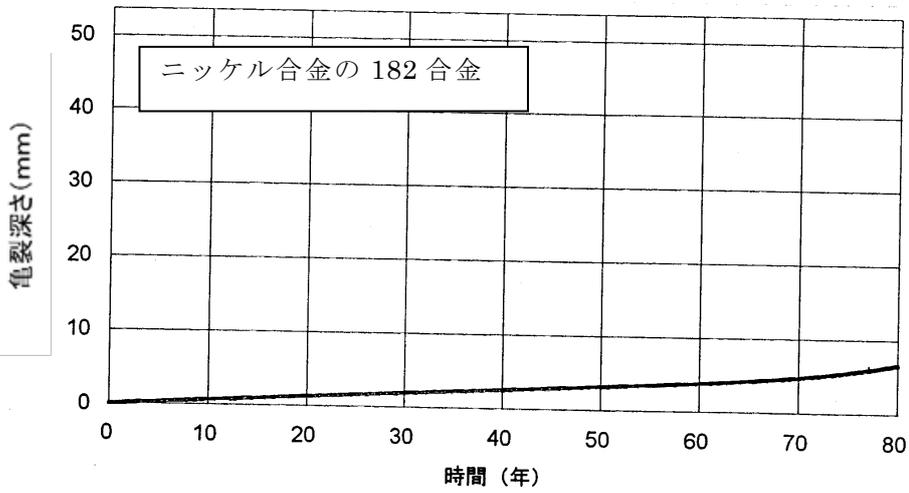


図 C-31 亀裂深さと時間の関係 (内表面から板厚方向への進展)
(H7 リング無し, ニッケル合金溶接部シリンダ側断面 1)

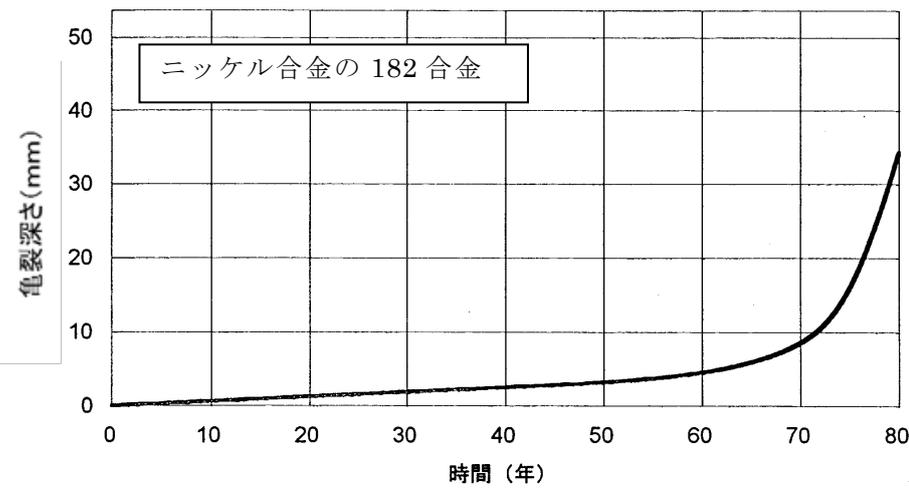


図 C-32 亀裂深さと時間の関係 (内表面から板厚方向への進展)
(H7 リング無し, ニッケル合金溶接部中央断面 2)

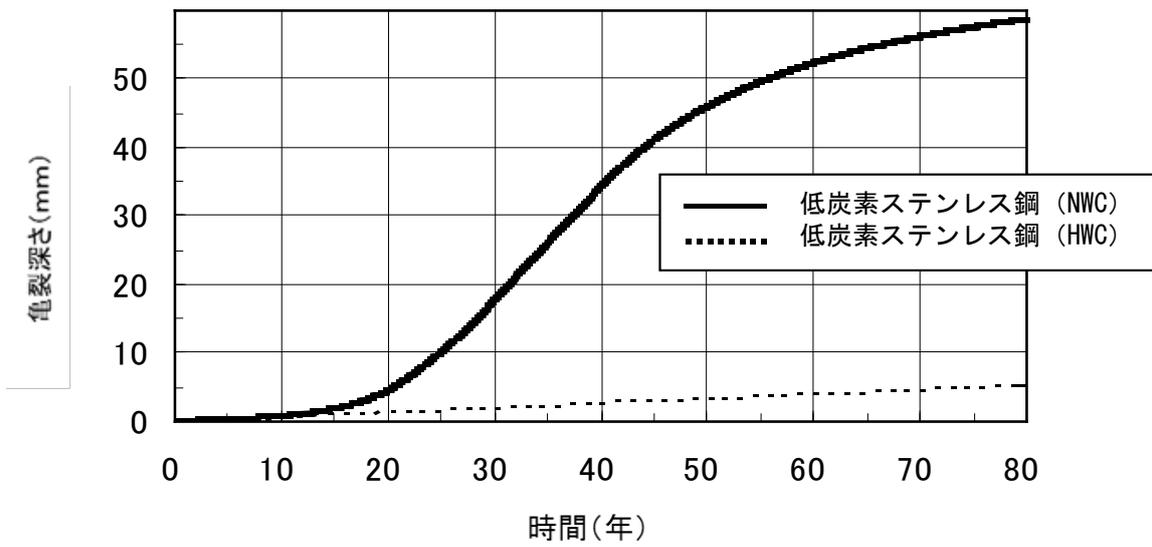


図 C-33 亀裂深さと時間の関係(内表面から板厚方向への進展)
 (H7 リング無し, ニッケル合金溶接部ステンレス側溶接熱影響部断面 3)

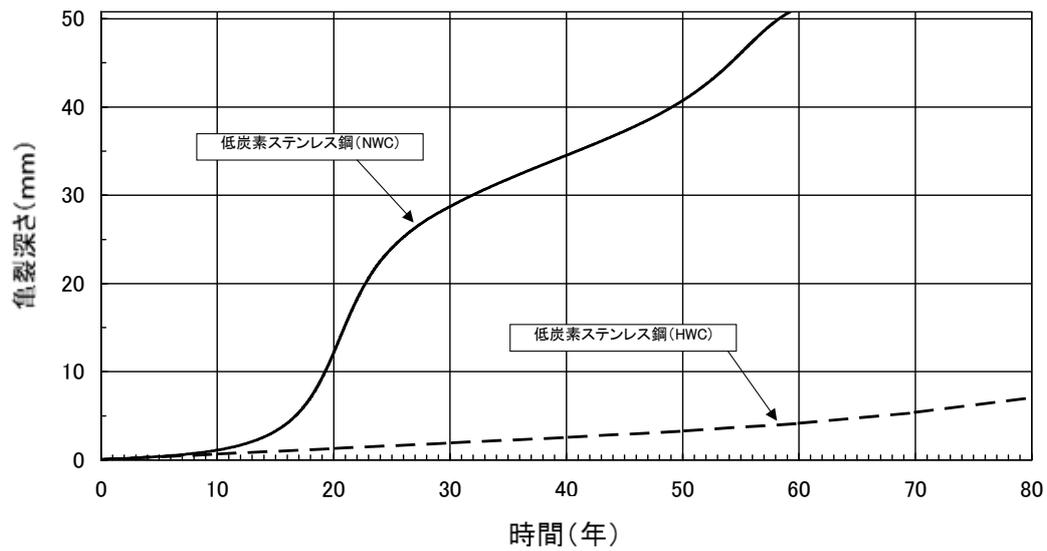


図 C-34 亀裂深さと時間の関係 (H6a 胴側) (内表面から板厚方向への進展)

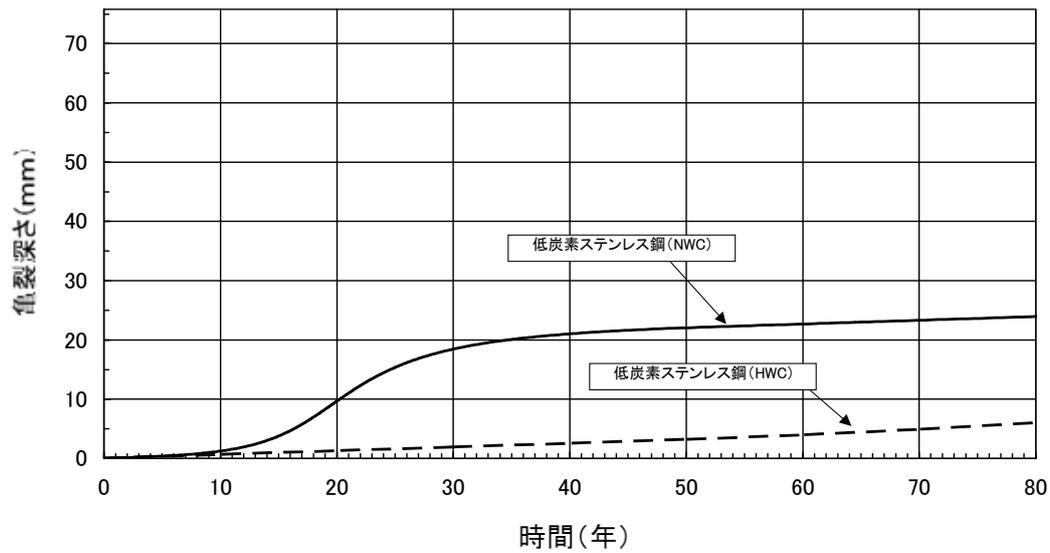


図 C-35 亀裂深さと時間の関係 (H6a リング側) (外表面から板厚方向への進展)

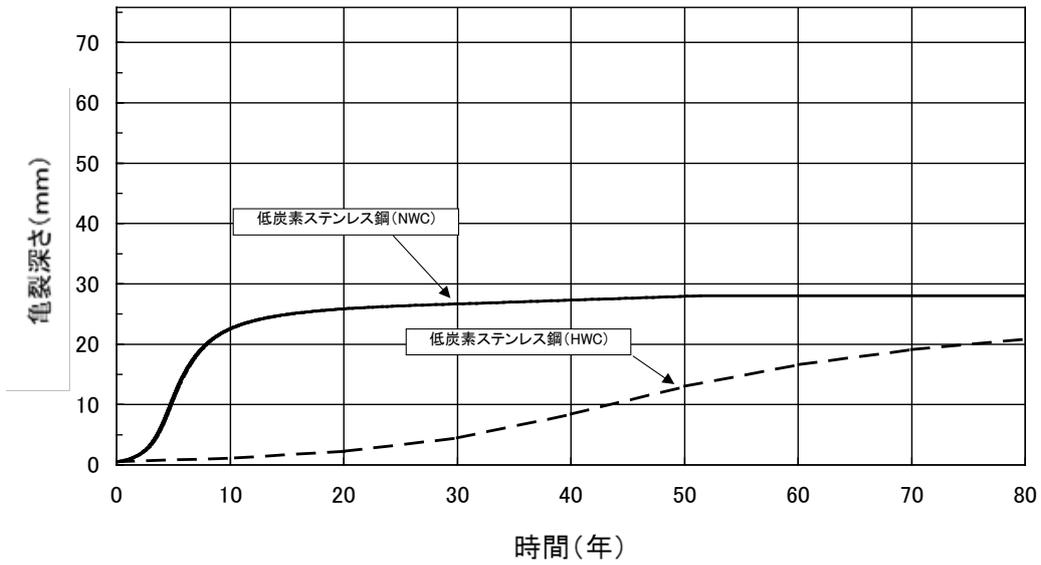


図 C-36 亀裂深さと時間の関係 (H6a リング側, 外表面全周亀裂)

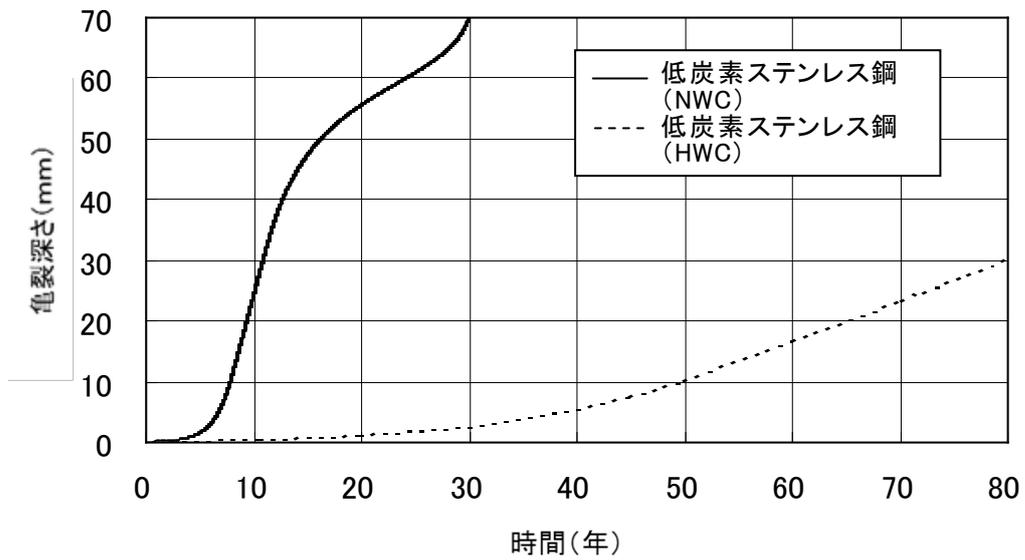


図 C-37 亀裂深さと時間の関係 (H7a リング有り, H7a リング側内表面全周亀裂)

参考資料 C-1 シュラウド縦方向溶接部の亀裂進展評価

炉心シュラウド縦方向溶接部に初期亀裂を想定し、いく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

炉心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 $a/l=0.1$) 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 に示す炉心シュラウド 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¹⁾ 添付E-5 の 5.3(1)項に記載の下式を用いた。

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

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 : 亀裂深さおよ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)

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

1.5 SCC 進展速度

炉心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、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))

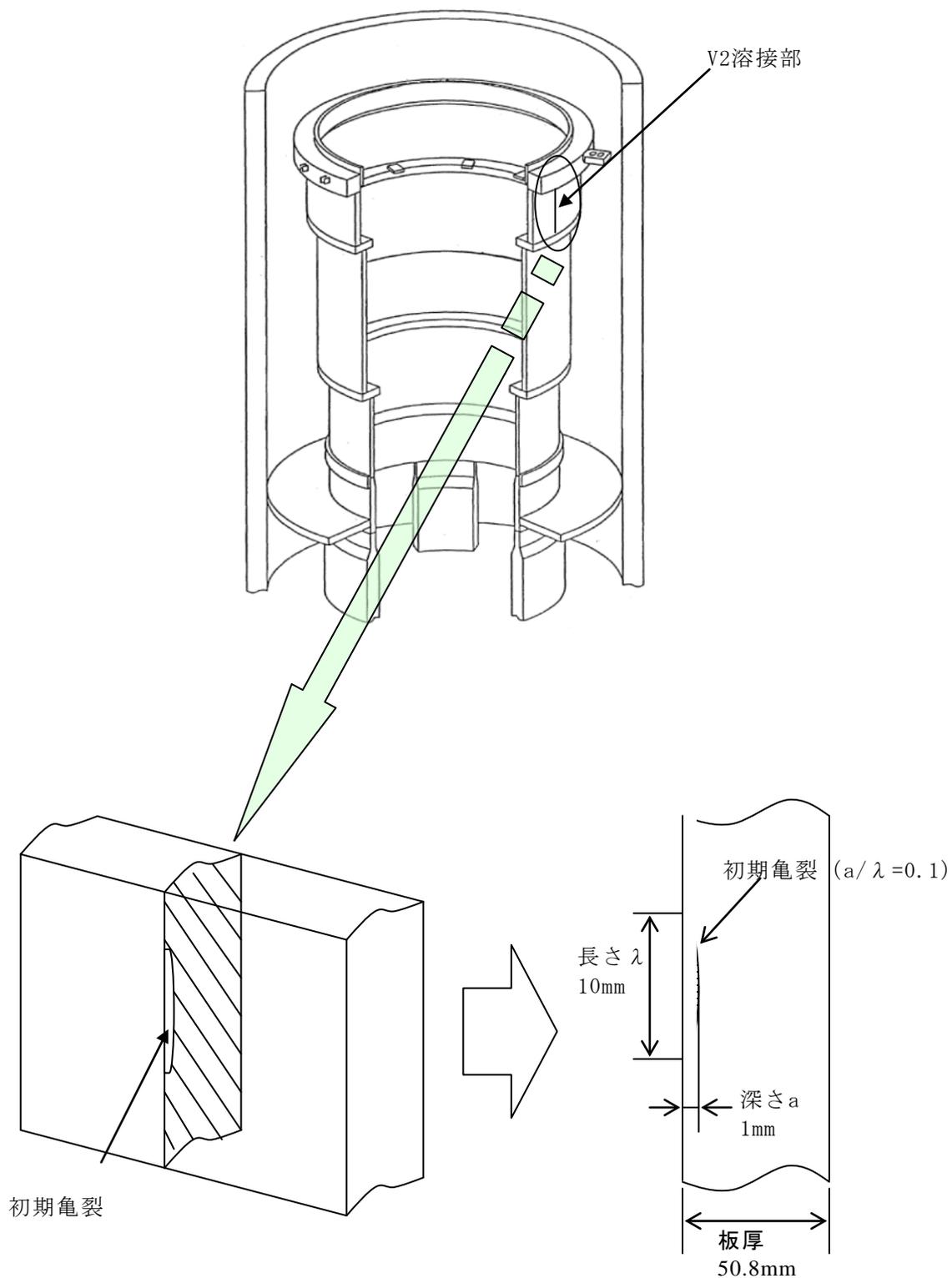
さらに、内表面及び外表面の同じ位置に同時に亀裂が発生したと仮定した場合でも、板厚の 80% (約 40mm) に達するのは 20 年程度以上であることが示された。

4. まとめ

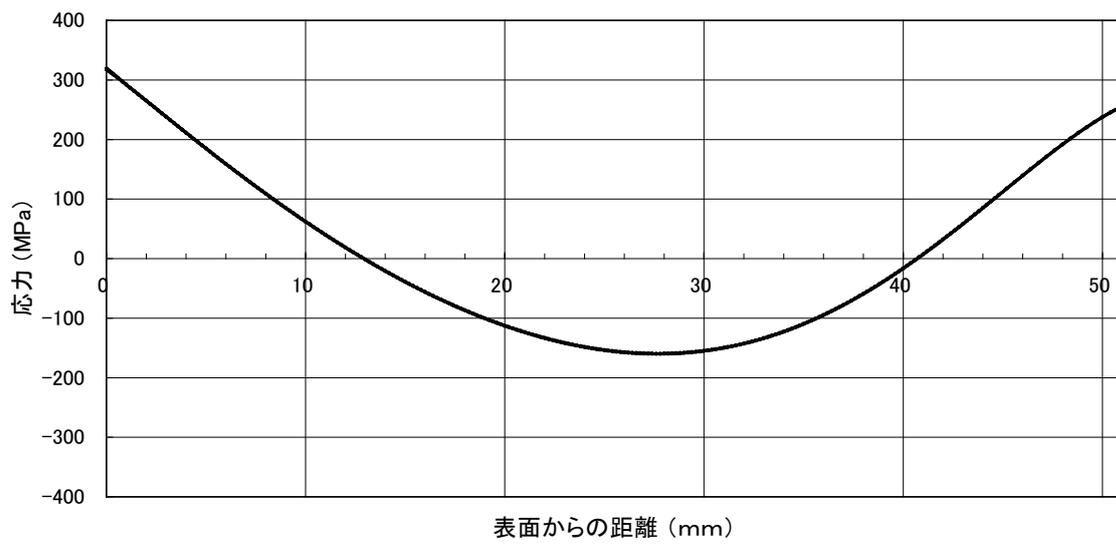
V2 溶接部に全長にわたり一様深さの亀裂があると仮定した場合の許容亀裂深さは、添付 B-6-2 に示すとおり 47mm 程度であり、板厚の 80%より大きい。

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

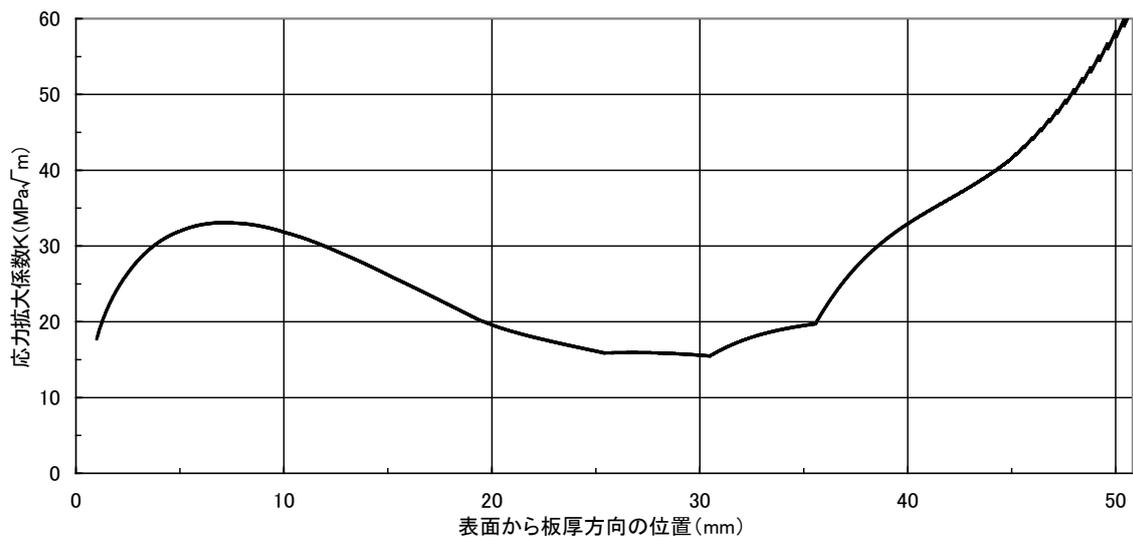
度以上であるため、点検周期を 10 年以内とすれば、縦方向溶接部の構造健全性は確保できると考えられる。



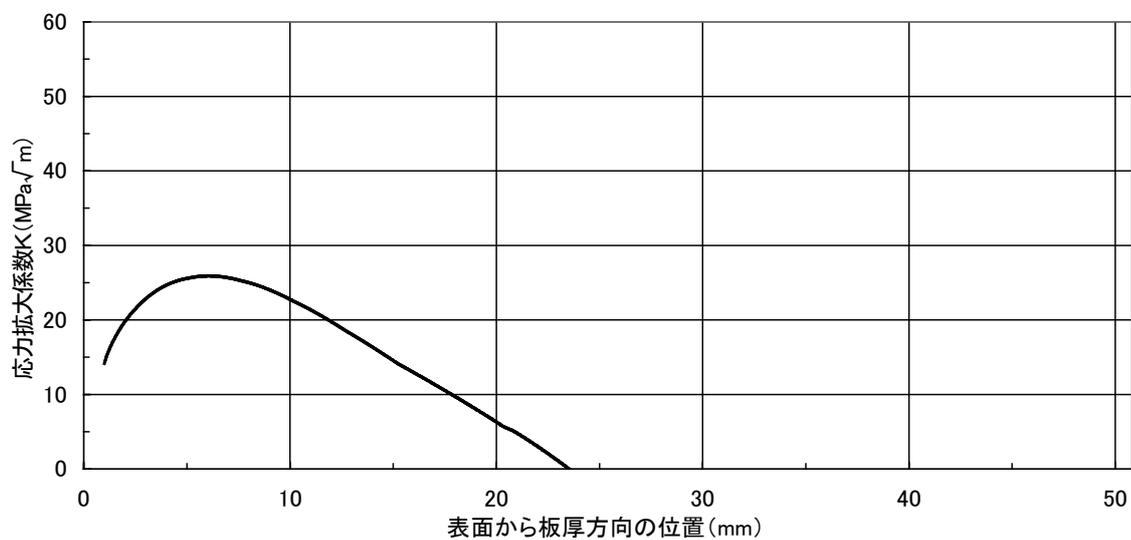
参考図 C-1 亀裂のモデル化(平板の表面亀裂モデル)



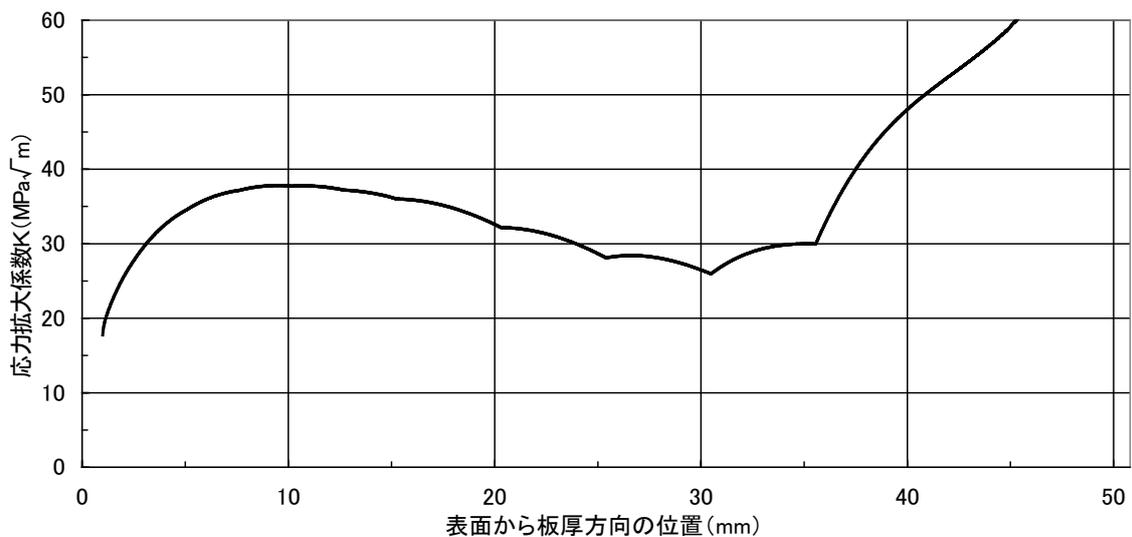
参考図 C-2 V2 溶接部の板厚方向残留応力+運転応力分布



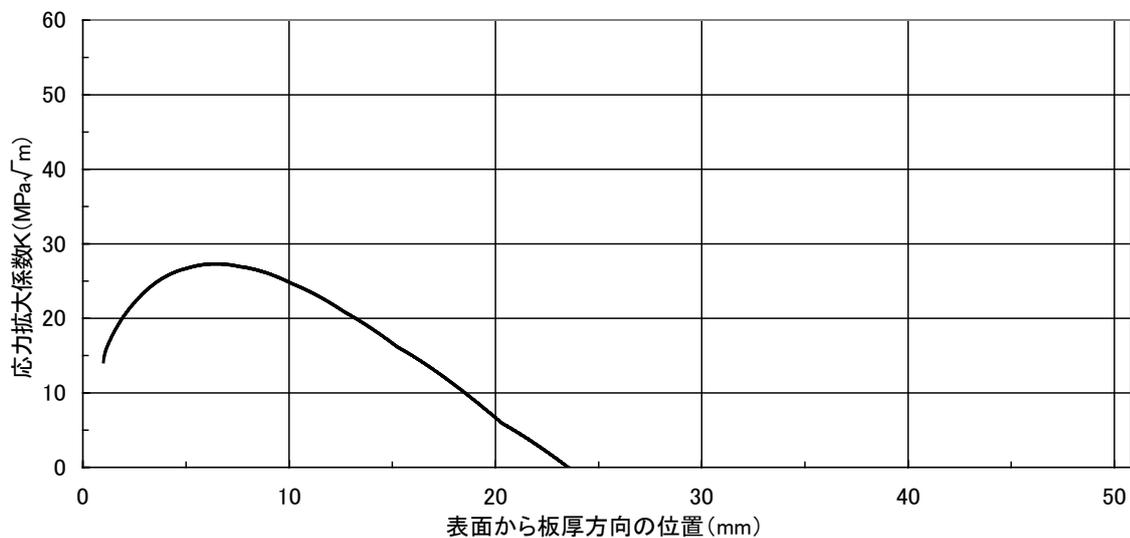
参考図 C-3(1) 応力拡大係数分布 (V2 溶接部, NWC 条件)
(外表面から板厚方向への進展)



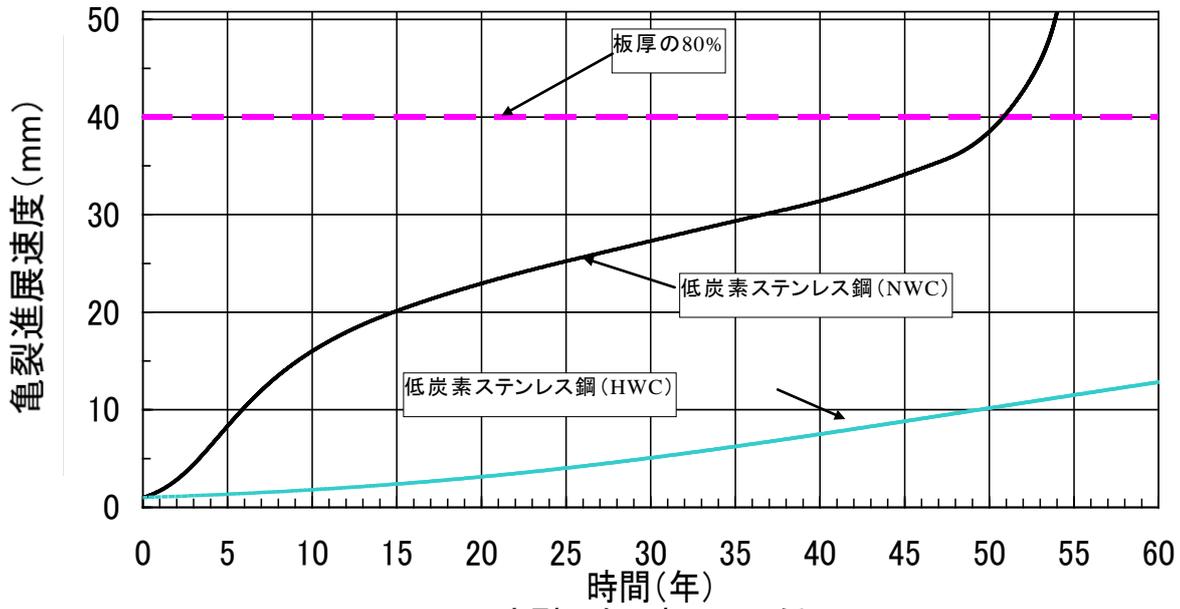
参考図 C-3(2) 応力拡大係数分布 (V2 溶接部, NWC 条件)
(内表面から板厚方向への進展)



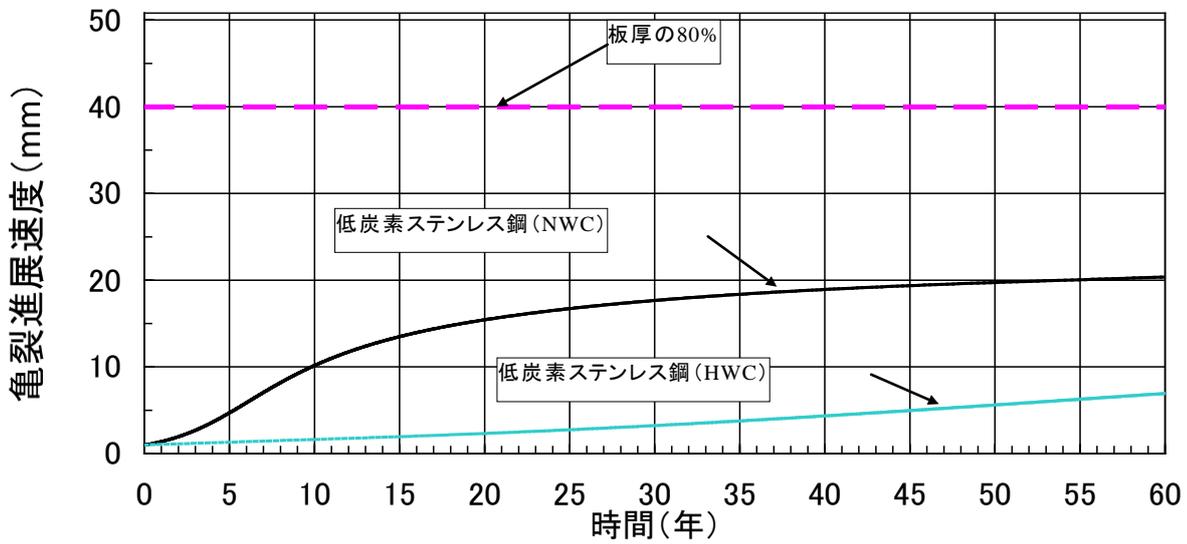
参考図 C-4(1) 応力拡大係数分布 (V2 溶接部, HWC 条件)
 (外表面から板厚方向への進展)



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 炉心シュラウド 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 の炉心シュラウドの V2 溶接部の形状と解析モデルを参考図 C-6 に示す。この炉心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各溶接パス毎に求める。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

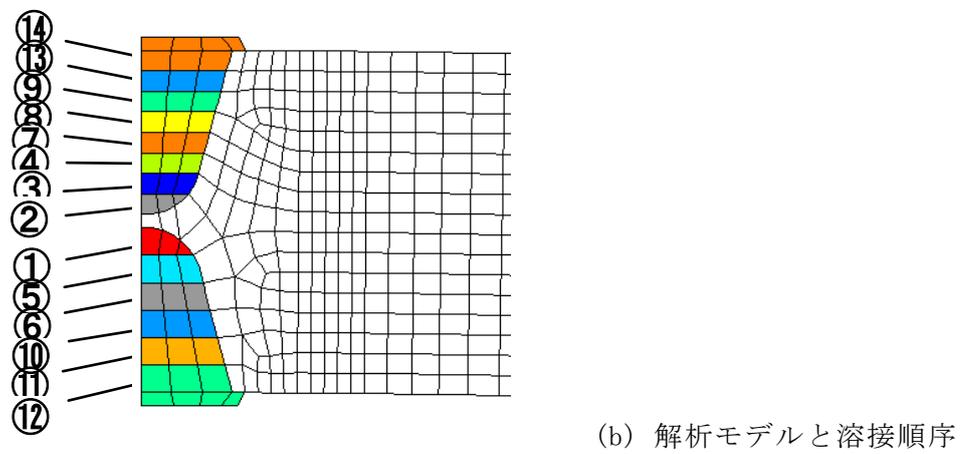
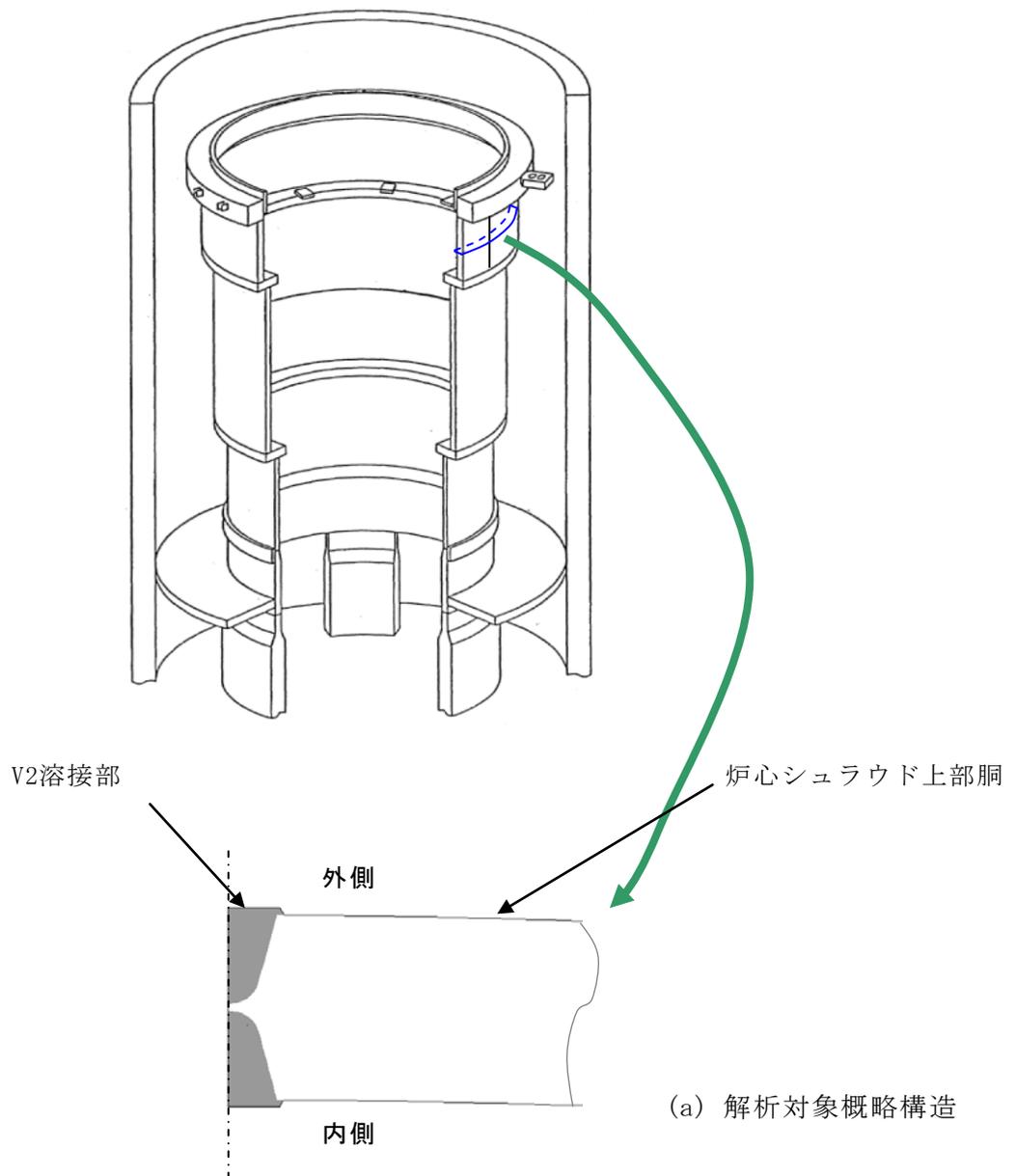
伝熱解析には付録 B に示す材料物性値を用い、温度分布解析では溶接金属と母材の材料特性を同一とする。

(4) 入熱の想定

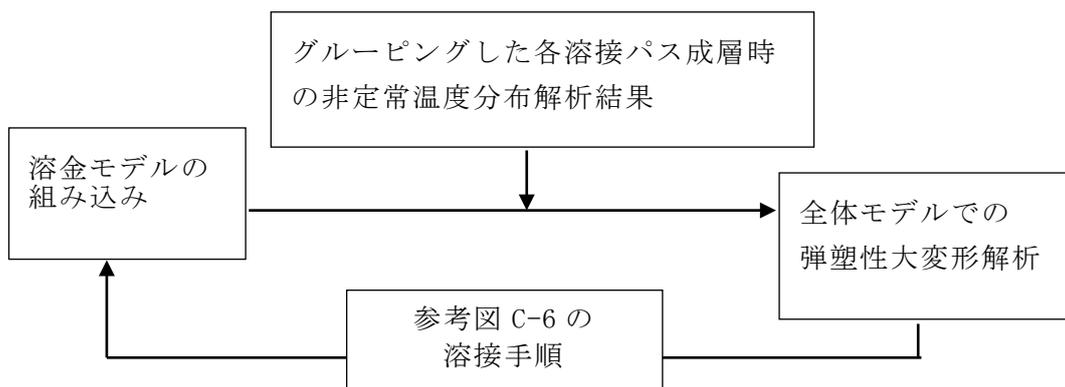
単位時間当たりの入熱の想定を、参考図 C-8 に示す。入熱の時間変化としては、この図に示すように、入熱が増加する時間 (トーチが近づく時間) t_1 、溶接中の時間 t_2 、入熱が減少する時間 (トーチが離れて行く時間) t_3 の比率を実測値をベースに想定し、ビードの最高温度が $1100 \pm 50^\circ\text{C}$ となるよう時間を決定した。除熱は、母材及びビードの雰囲気と接する面から対流伝熱により生じるものとし、熱伝達率を $11.6\text{J}/\text{m}^2\text{sec}$ とする。

(5) 残留応力解析結果

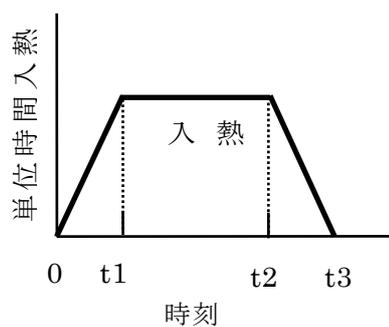
V2 溶接部に対する解析結果を参考図 C-9 に示す。ステンレス鋼溶接部で SCC が課題となる溶接熱影響部付近の周方向の残留応力分布を示している。



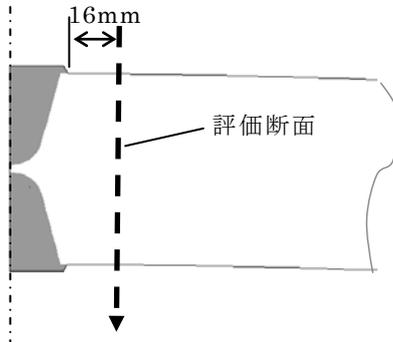
参考図 C-6 V2 溶接部の形状と解析モデル



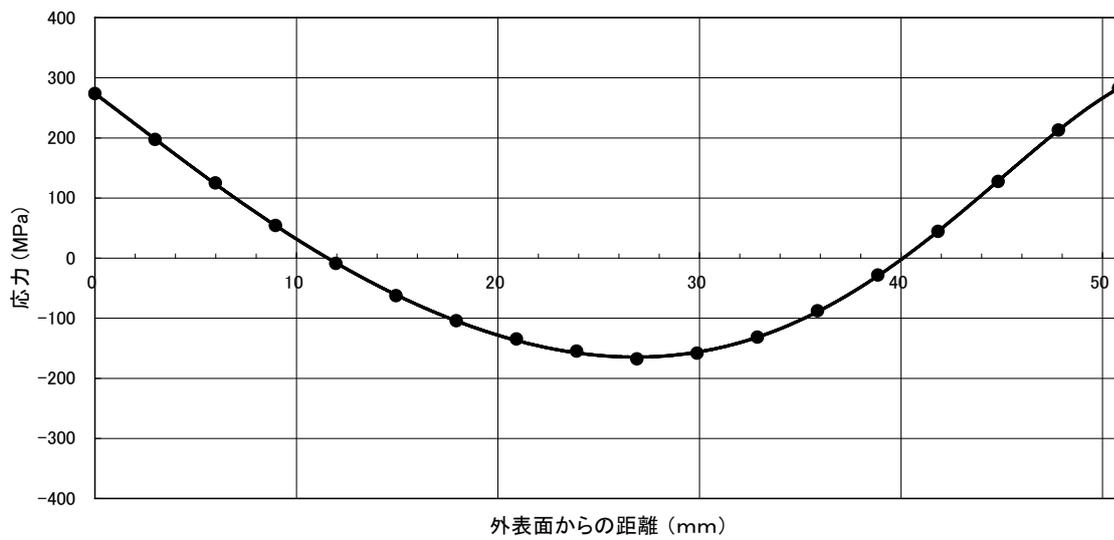
参考図 C-7 解析手順



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 炉心シュラウド 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，炉心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

炉心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

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

参考表 C-1 炉心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 (σ_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、

ΔP : 炉心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。

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

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

従って、許容亀裂深さ a_c は次式で求まる。

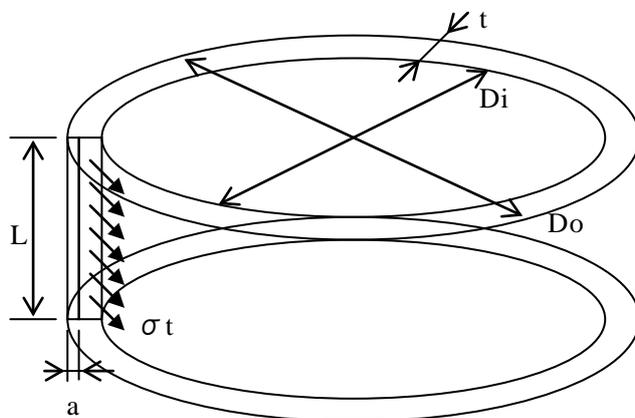
$$a_c = R_o - R_i - \frac{\Delta P}{\sigma_f} \cdot SF \cdot R_i$$

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、炉心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
- σ_t : 周方向応力

参考図 C-10 評価モデル

付録D シュラウドの欠陥裕度評価

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、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図 D-3 に示す。

点検可能範囲を表 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 部の荷重伝達虫範囲として、H7a の最大荷重虫範囲相当の 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（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。想定した亀裂を図 D-4 に示す。解析ケースを表 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表 D-4 に示す。荷重は、1100MWeBWR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。荷重の負荷位置および変位評価点を図 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

材料物性は告示 501 号より算出した値を使用する。これらの物性値を表 D-5 に示す。解析温度は 302°C とした。

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図 D-6 に示す。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-変位関係を図 D-8 に、図 D-8 から求められる座屈荷重及び崩壊荷重の変化を図 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図 D-10 に示す。図 D-11 に残存面積と座屈・崩壊荷重の関係を、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

図 D-13 および図 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。ニッケル基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。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, および 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される。

(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、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、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。従って、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 S2 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 と検査困難範囲もふく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、S2 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、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、S2 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。図 D-22 に考慮した亀裂を示す。

図 D-23 に解析結果として炉心支持板およ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⁽¹⁾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 S2 地震により発生する応力を考慮する。
- (b) S2 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 KIC を用いる場合は照射量が $1.5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ 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 $2.7\times 10^{25}\text{n/m}^2$)を下限值として用いた。

3.2 評価結果

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、S2 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。
- ・H 7 a 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。
- ・H 4 継手については照射の効果を考慮する場合、S2 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H-4 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.

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。(図 B-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。

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/マイクロカメラ	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

表 D-3 解析パラメータ

解析ケース	H7a 周継手のき裂		H7b 周継手のき裂	V7 縦継手の残存面積
	全周（き裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	軸方向き裂長さ及び深さ	
1. H7 全周き裂深さの影響	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 き裂深さの影響	100%	—	—	100%, 75%, 50%, 25%, 10%, 0%
4. H7b 多数軸方向き裂の影響	100%	—	長さ 40mm, 貫通	100%
5. H7a, v7 同時き裂の影響	50%	全周の 10%	—	10%
6. H7a, H7b 同時き裂の影響	50%	全周の 10%	H7a に同じ	100%

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

解析ケース	H7a 周継手のき裂		H7b 周継手のき裂	V7 縦継手の残存面積
	全周（き裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	軸方向き裂長さ及び深さ	
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 周継手のき裂		V7 縦継手の残存面積
	全周（き裂）残存面積	荷重伝達を無視する長さ	
9. H7a, H6b 同時き裂発生の影響	50%	全周の 10%, 40% (図 B-3)	100%

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 ⁽¹⁾ 0.245 ⁽²⁾
地震時の荷重	地震荷重 S ₂	745	14711	102974	—

(1) 上部格子板と炉心支持板の間

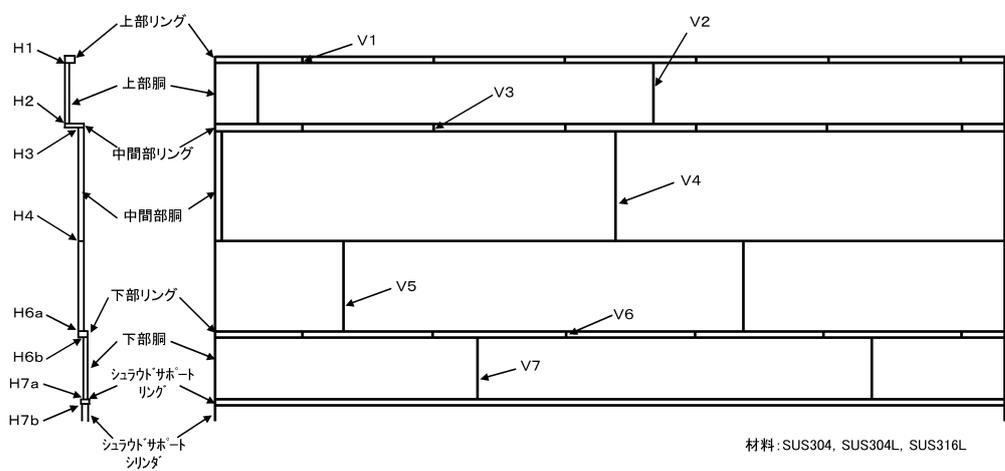
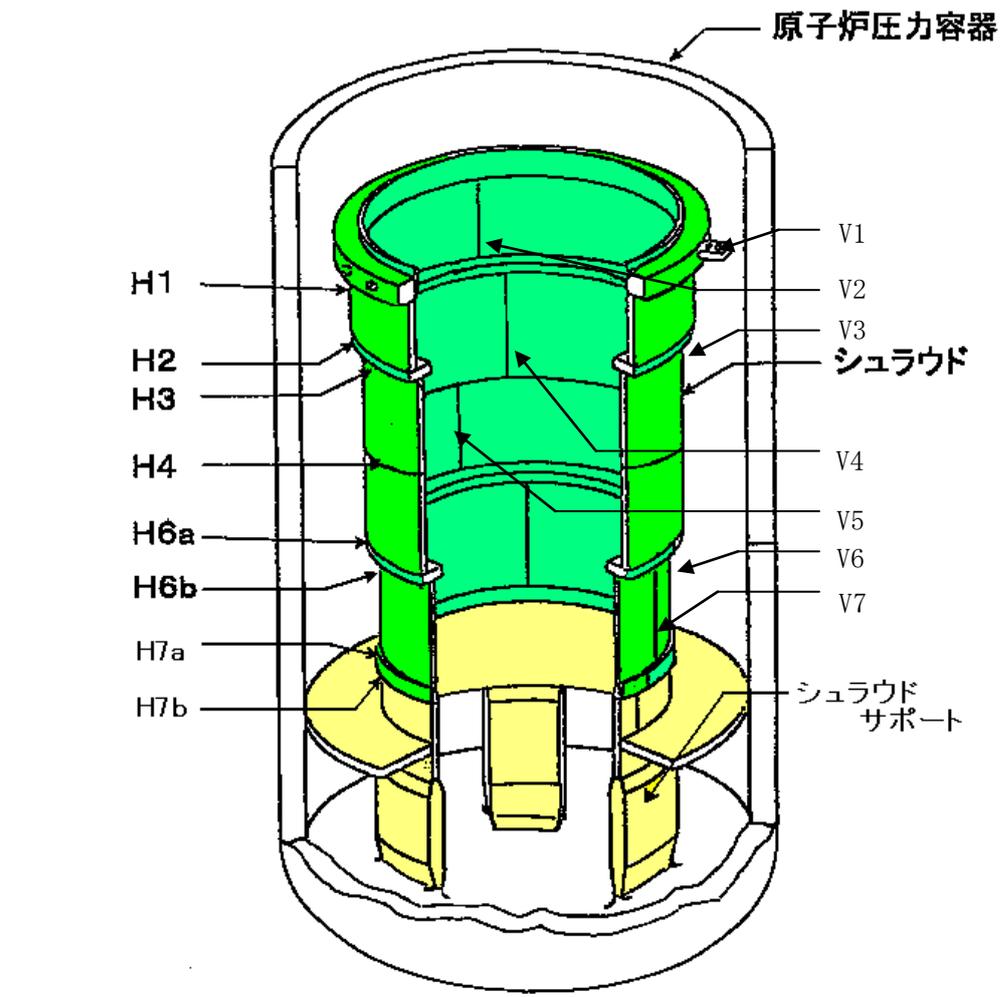
(2) 炉心支持板より下部

表 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

表 D-6 制御棒挿入性について考慮したき裂

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



材料:SUS304, SUS304L, SUS316L

シュラウドの溶接線と溶接線番号(1) 従来型:その1

図 D-1 シュラウド構造および溶接線位置

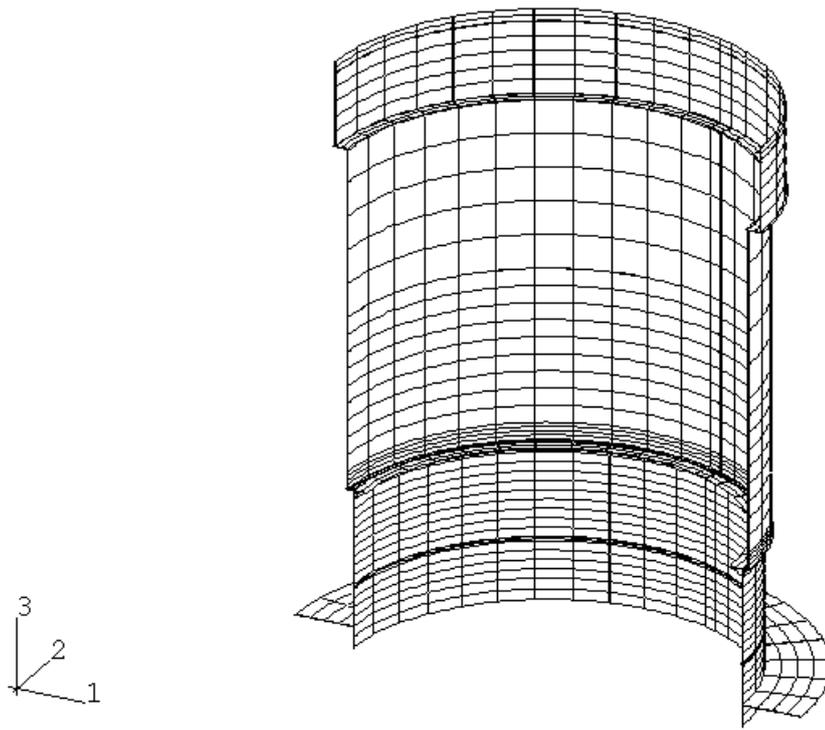
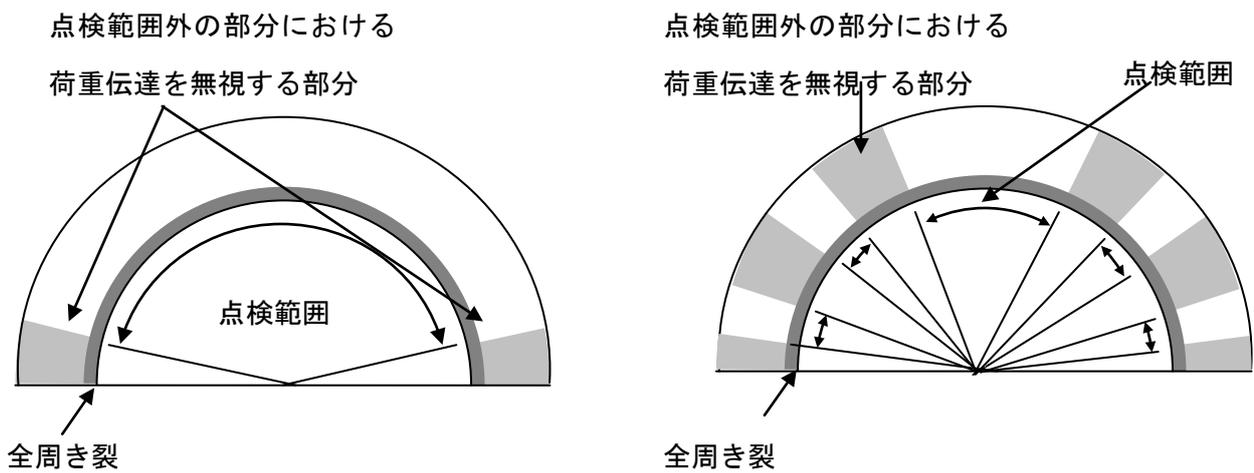


図 D-2 解析モデル



(a) H7a 部周方向き裂の考え方

(b) H6b 部周方向き裂の考え方

図 D-3 点検困難範囲のモデル化 (H7a 及び H6b 周方向)

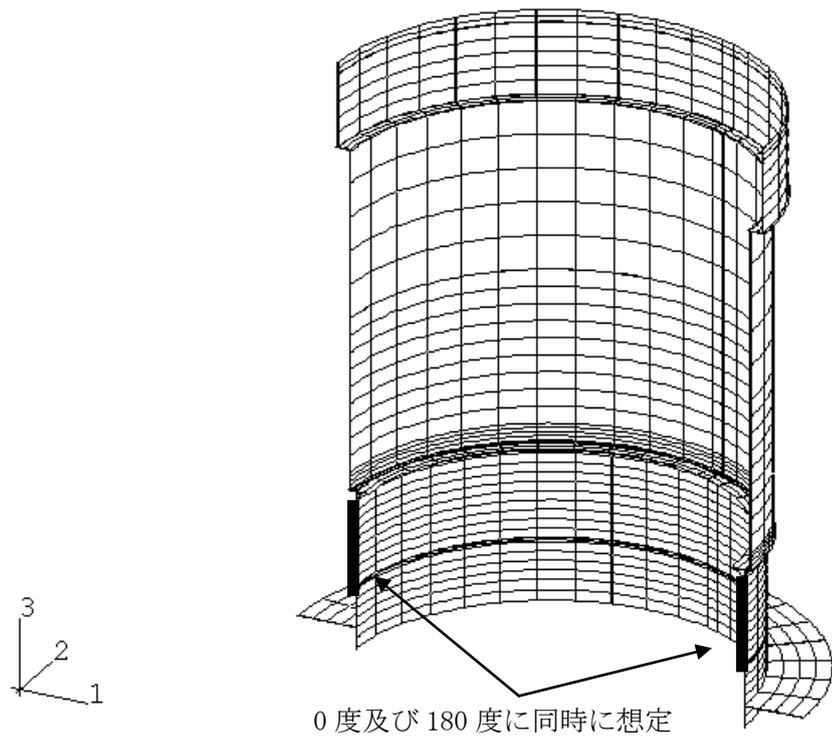


図 D-4 軸方向き裂の想定位置

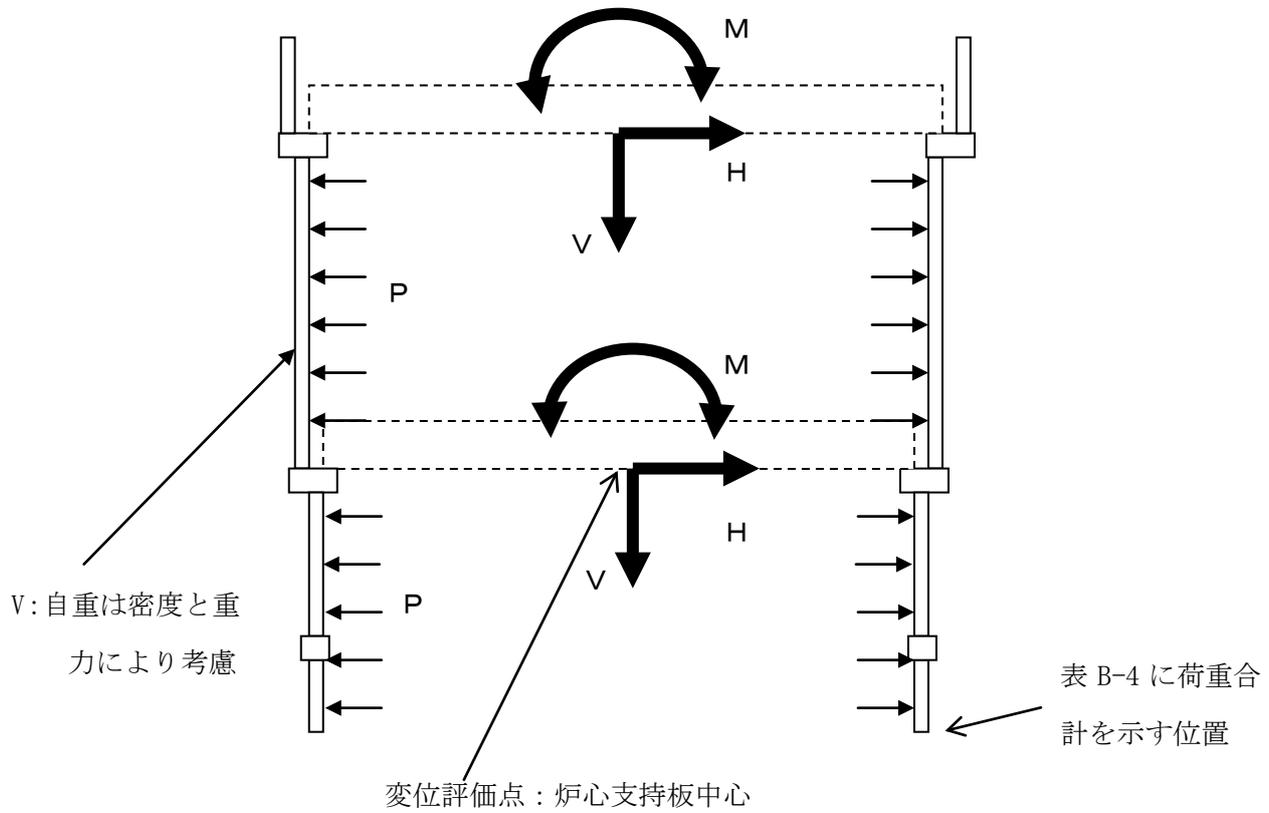


図 D-5 荷重負荷位置及び変位評価点

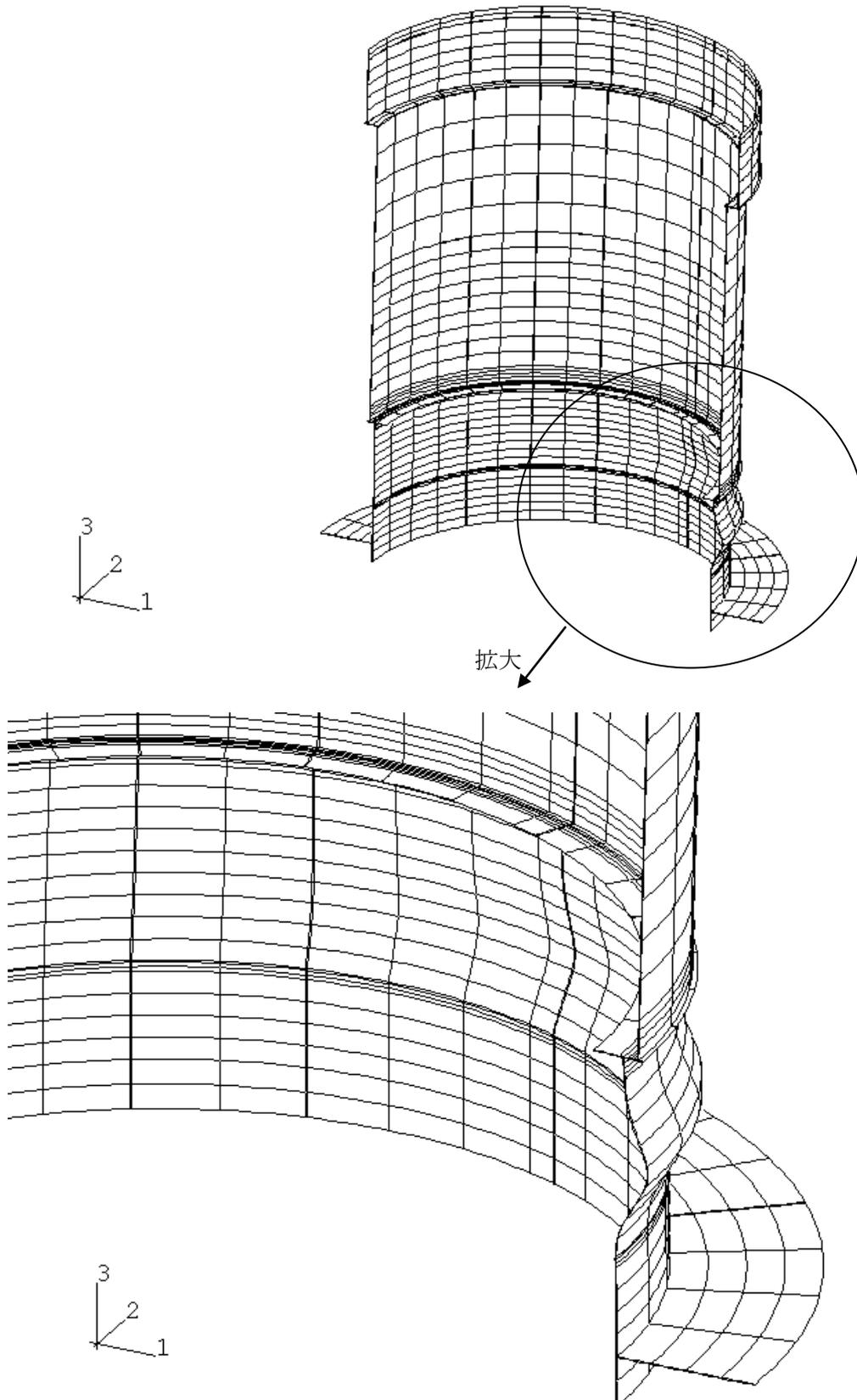


図 D-6 シュラウドの座屈モード (全ての溶接線が健全な場合の座屈後変形)

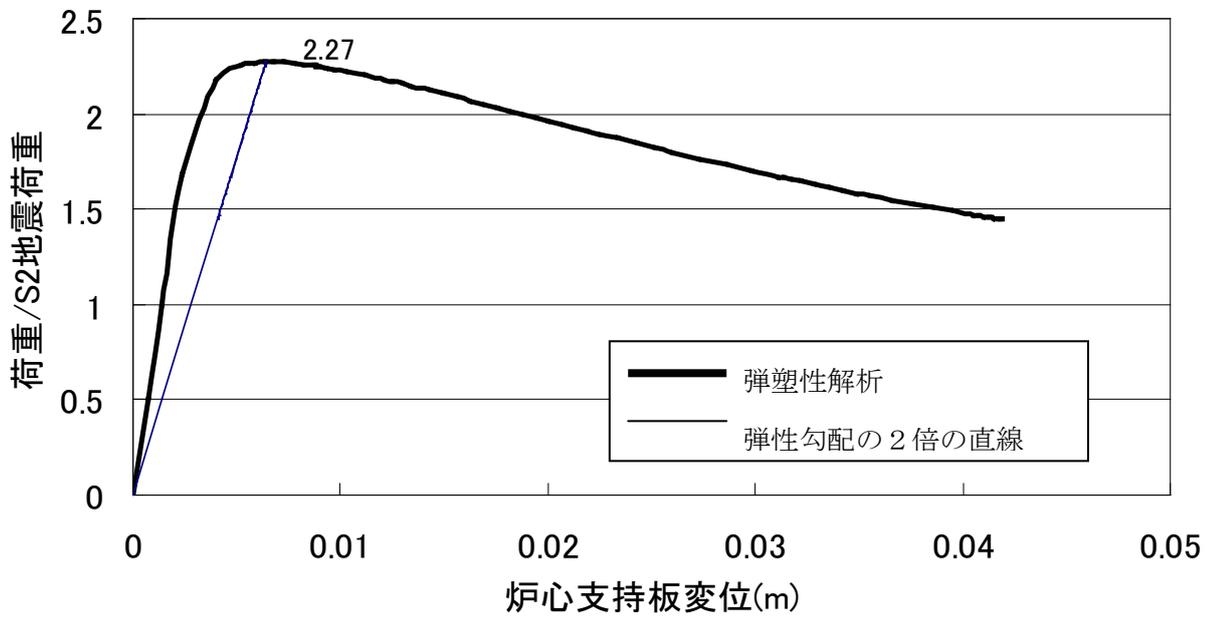


図 D-7 全ての溶接線が健全な場合の荷重-変位関係

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%

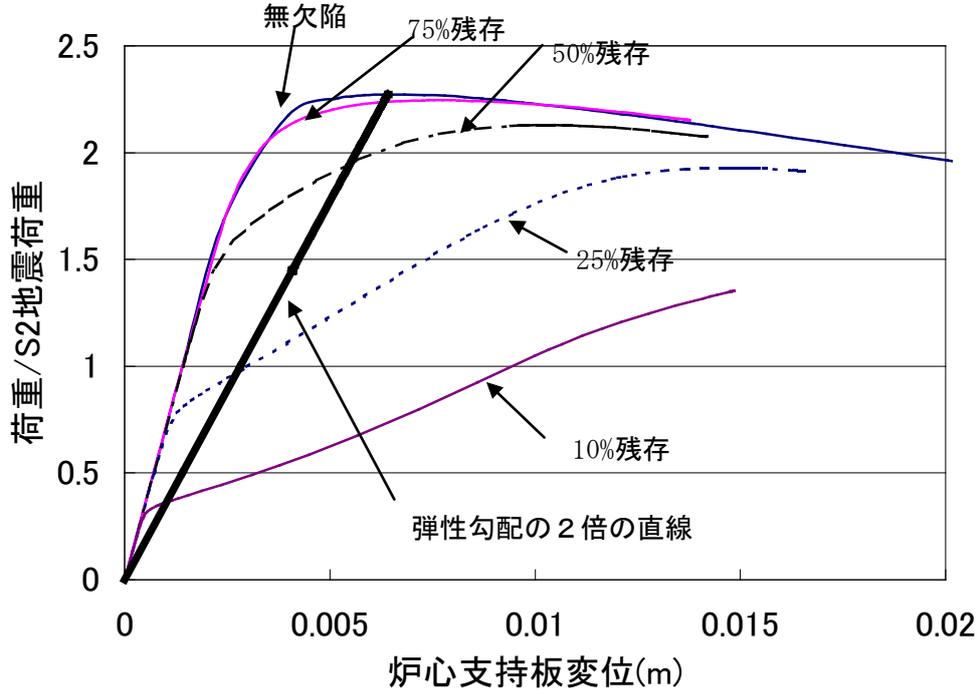


図 D-8 シュラウド周方向溶接線の全周亀裂深さの影響 (荷重-変位関係)

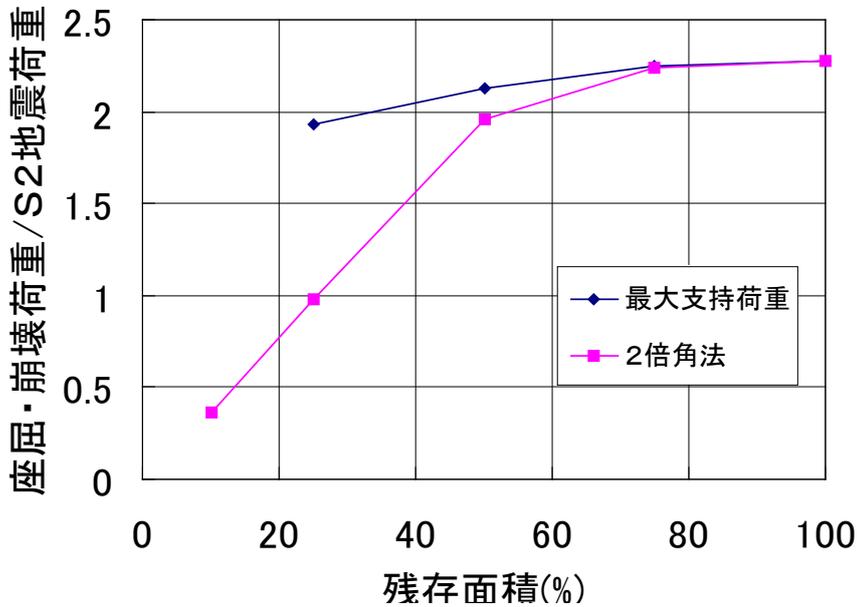


図 D-9 シュラウド周方向溶接線の全周亀裂深さの影響

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%

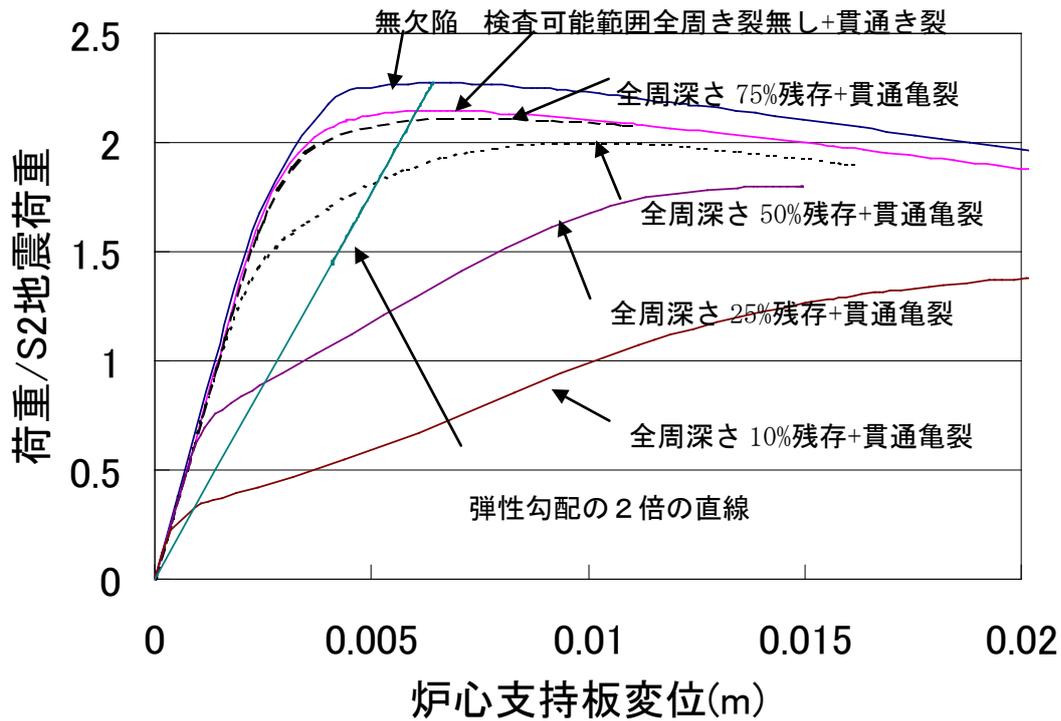


図 B-10 H7a 検査困難範囲を貫通亀裂とした場合の影響 (荷重変位関係)

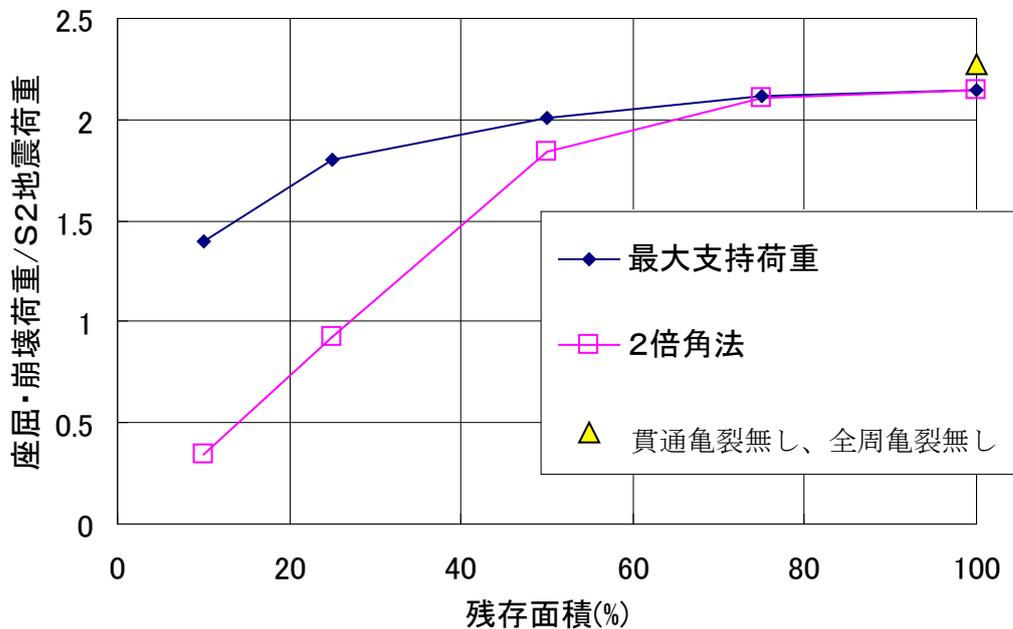


図 D-11 H7a の検査困難範囲を貫通亀裂とした場合の影響

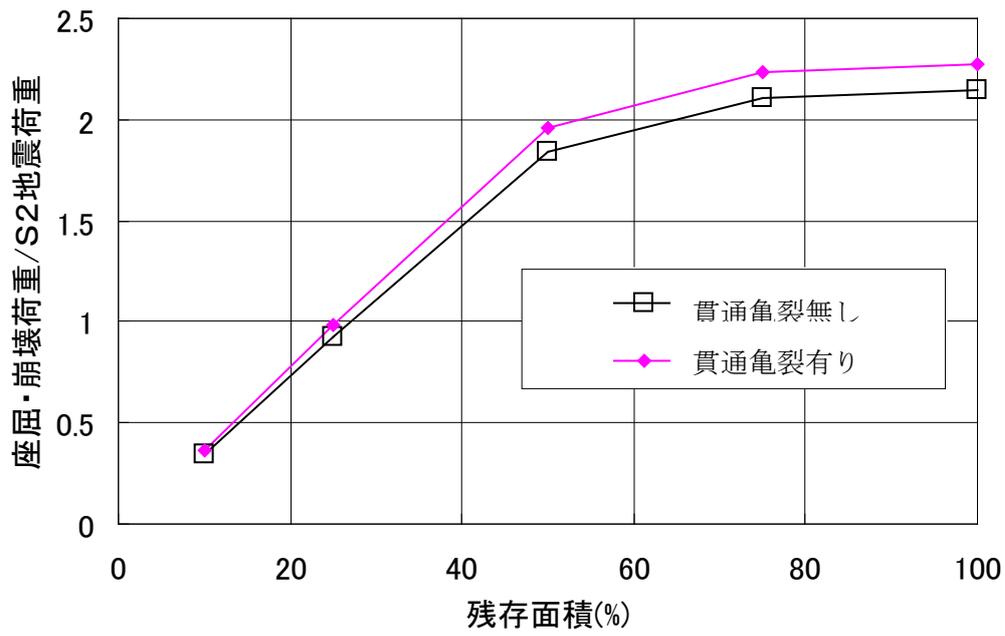


図 D-12 H7a の検査困難範囲を貫通き裂とした場合と貫通亀裂を考慮しない場合の比較

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%

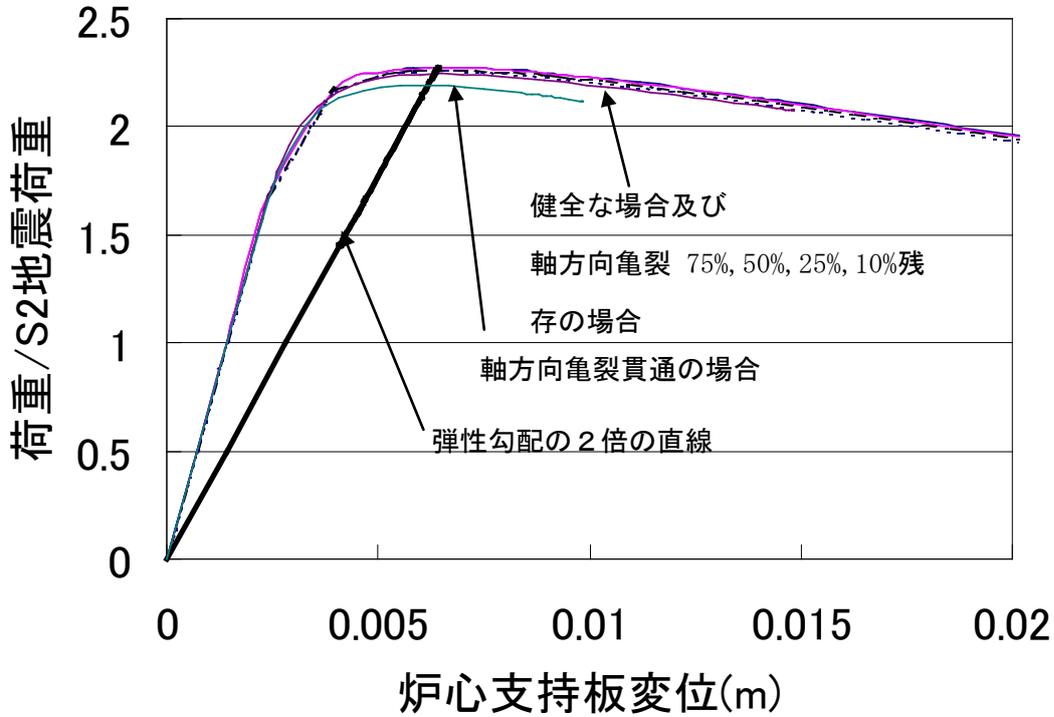


図 D-13 縦継手のき裂深さの影響 (荷重変位関係)

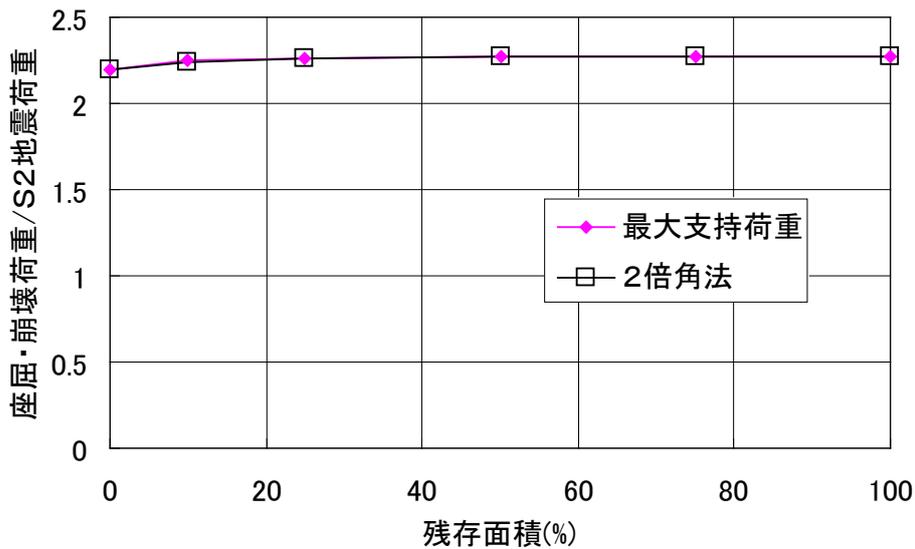


図 D-14 縦継手の亀裂深さの影響

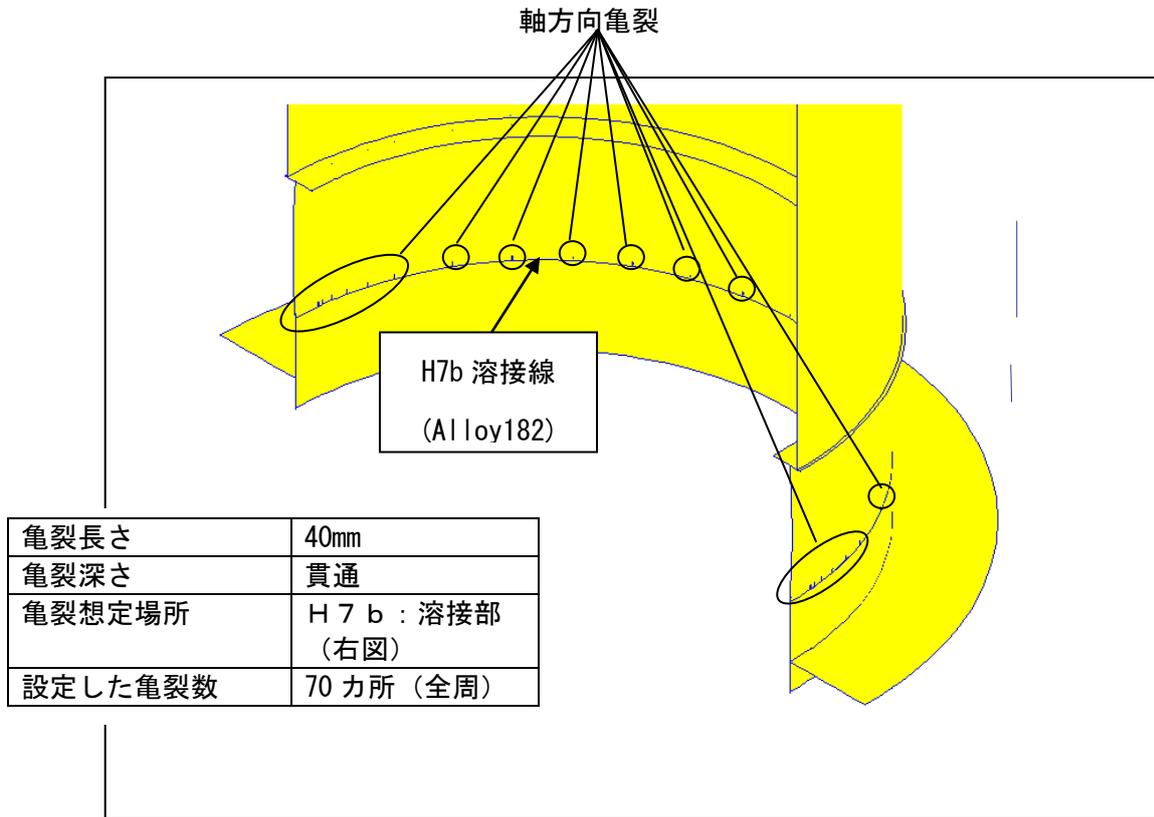


図 D-15 考慮した軸方向多数亀裂

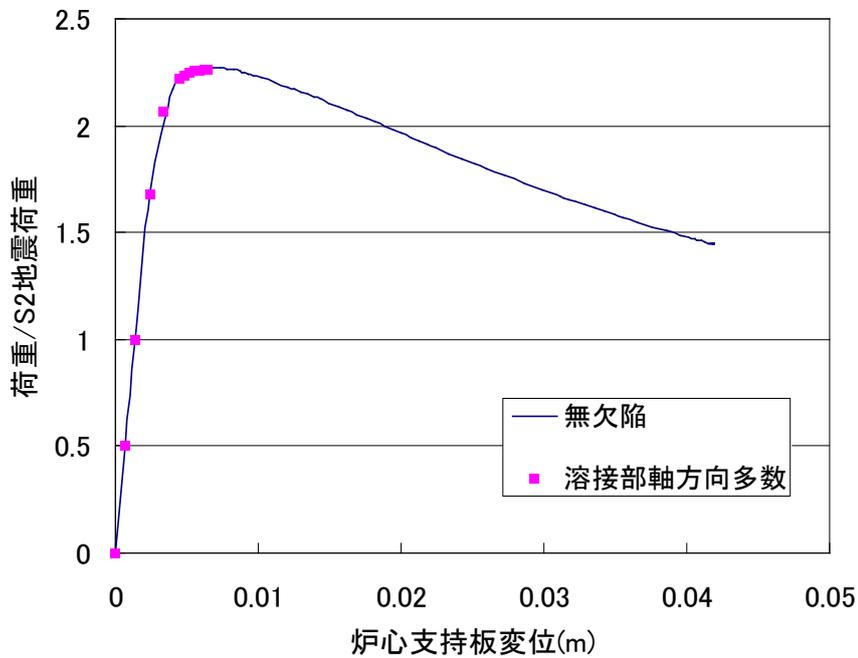


図 D-16 軸方向多数亀裂を考慮した場合の影響

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%

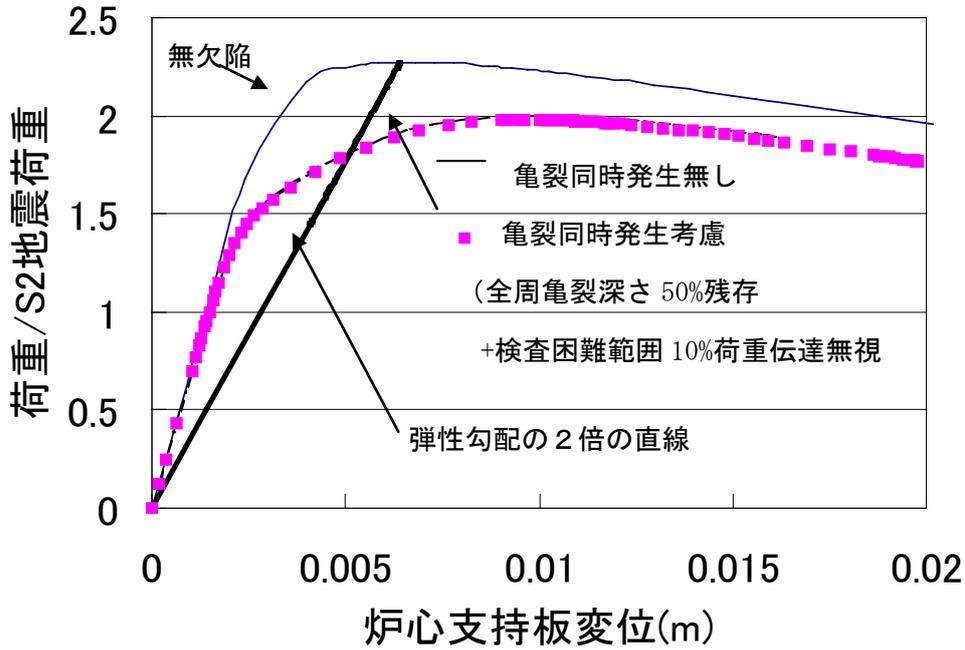


図 D-17 H7a, V7 同時亀裂の場合の影響

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%

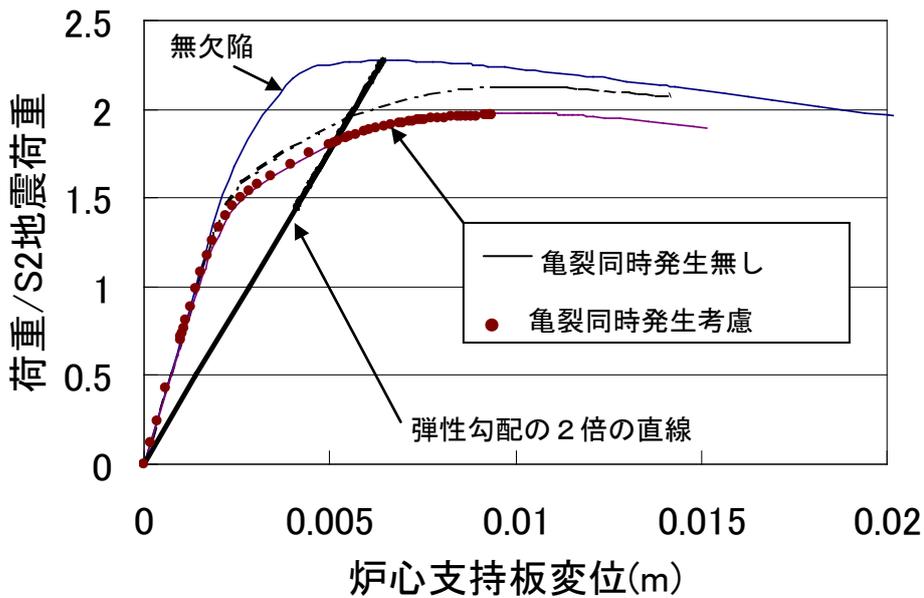


図 D-18 H7a, H7b 同時亀裂の場合の影響

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%

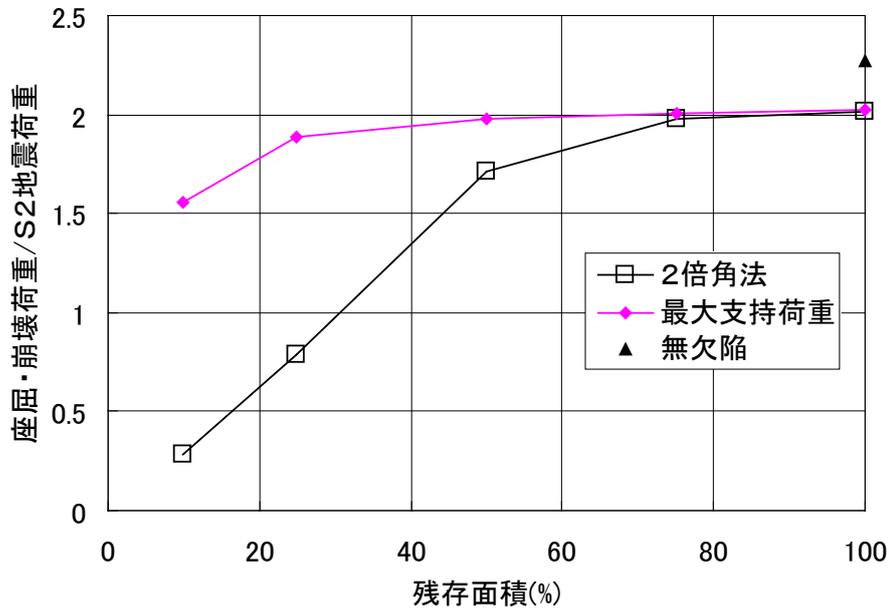


図 D-19 H6b 周方向溶接部の亀裂の影響

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%

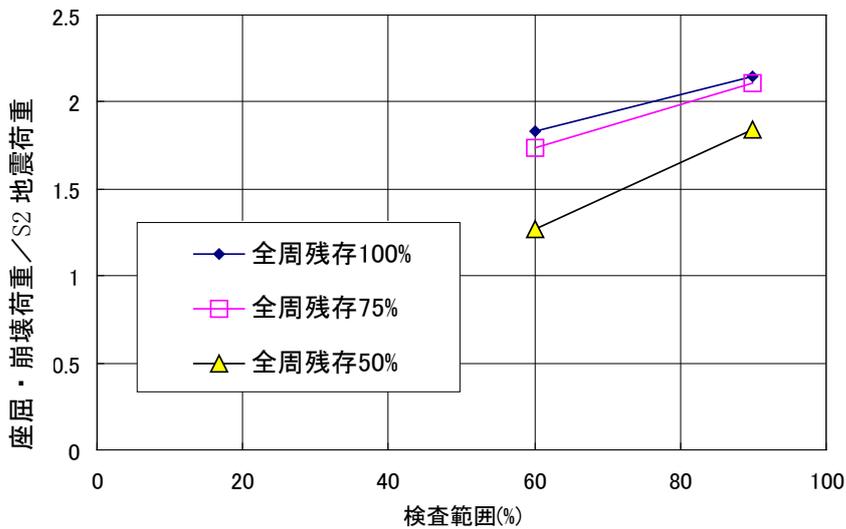


図 D-20 H7a 周方向溶接部の検査範囲を削減した場合の影響

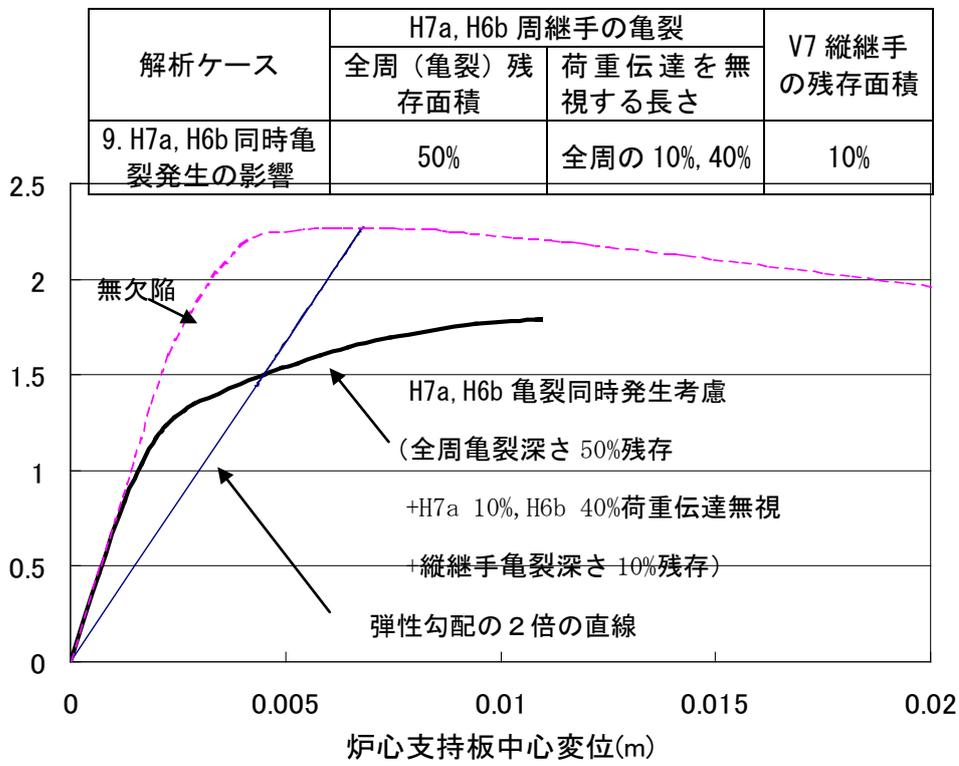
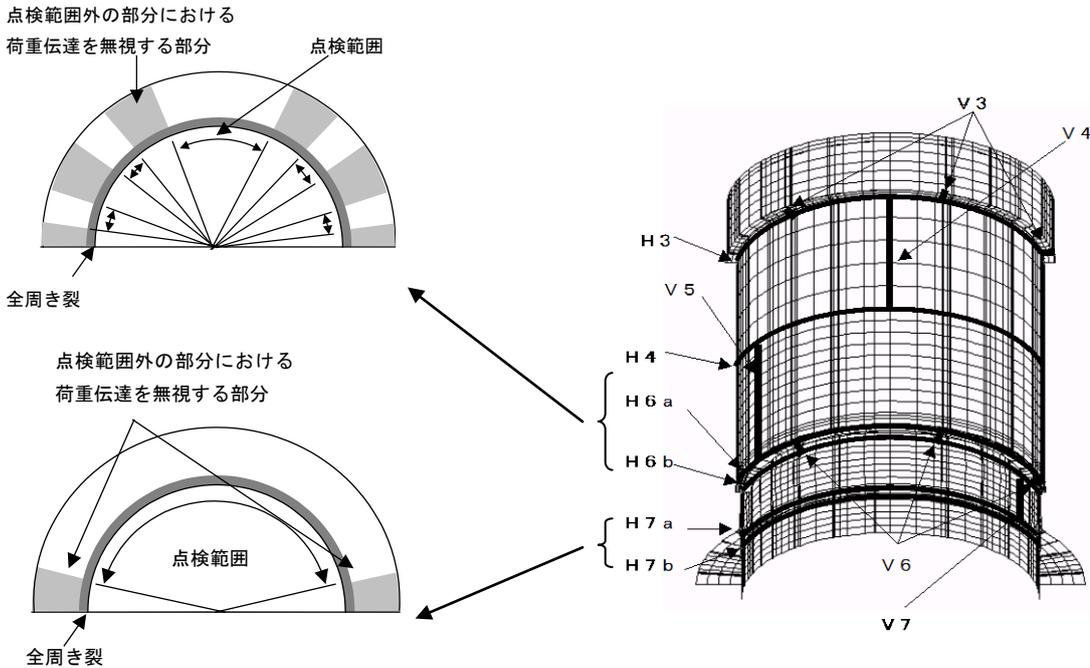


図 D-21 H7a, H6b に亀裂が同時発生した場合の影響



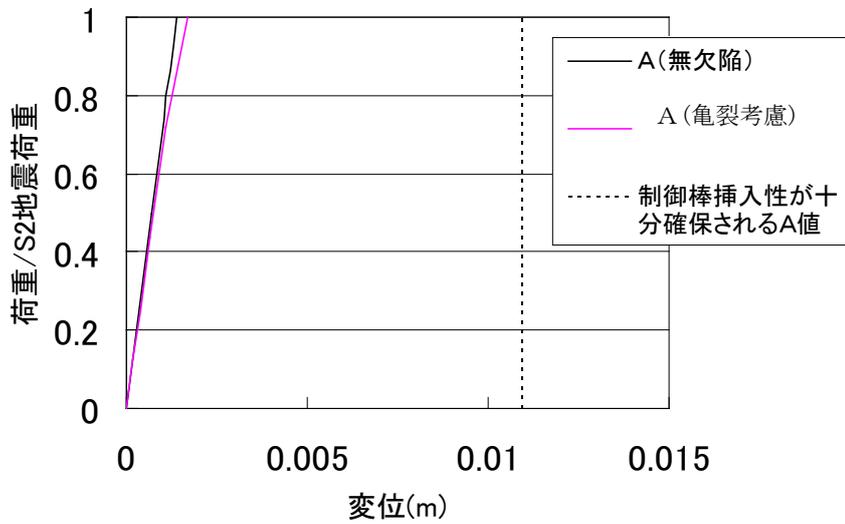
周継手部				縦継手部	
位置	想定亀裂			位置	想定亀裂
H 3	全周き裂	亀裂深さ	50%	V 3	溶接線全長に渡る亀裂 亀裂深さ 90% = 10%残存
H 4	荷重伝達無視			V 4	
H 6 a	全周き裂	亀裂深さ	50%	V 5	
H 6 b	荷重伝達無視			V 6	
H 7 a	全周き裂	亀裂深さ	50%	V 7	
H 7 b	荷重伝達無視				

図 D-22 制御棒挿入性に対し想定した亀裂

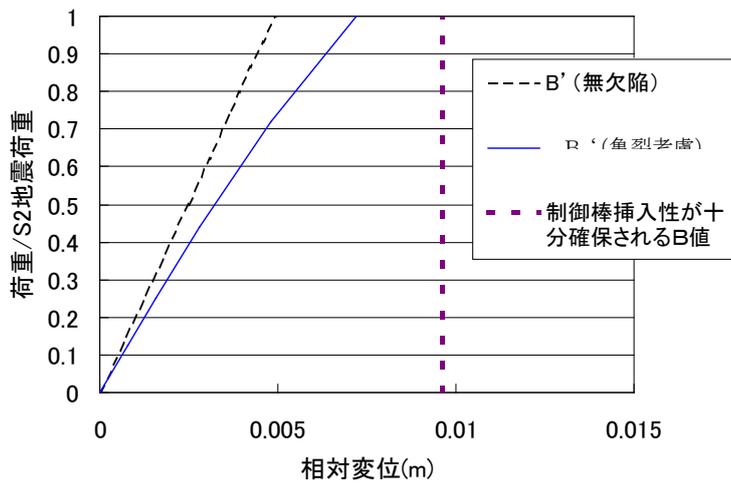


解析・試験により制御棒挿入性を
確認したミスアラインメント

シュラウドの想定亀裂による地震時の
ミスアラインメント



(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

図 D-23 制御棒挿入性に対する亀裂の影響

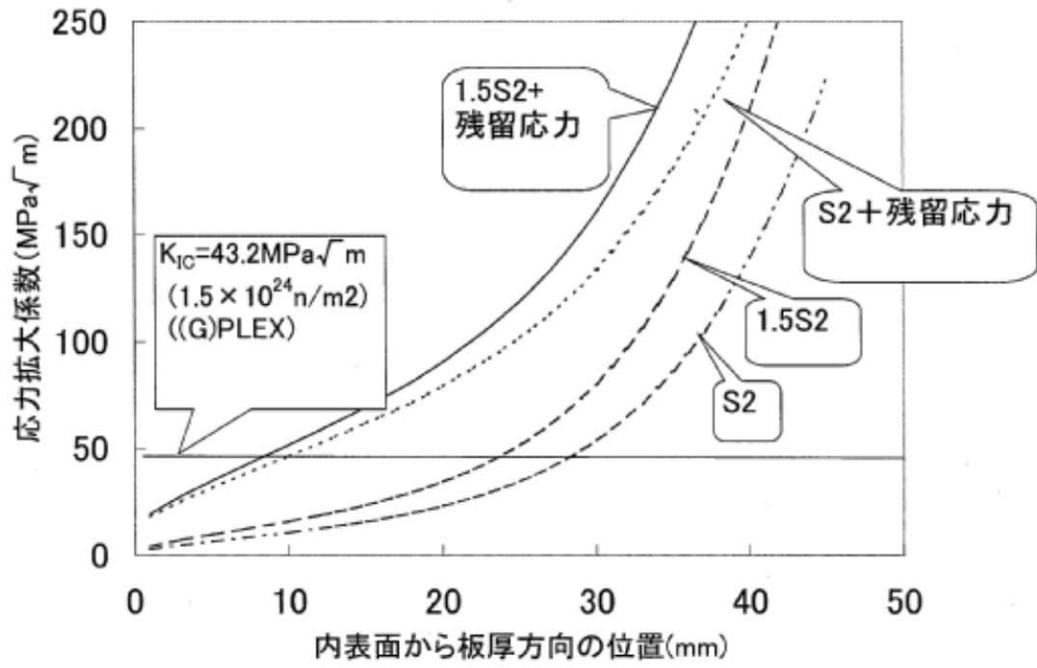


図 D-24 応力拡大係数 K と破壊靱性 K_{IC} の比較

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

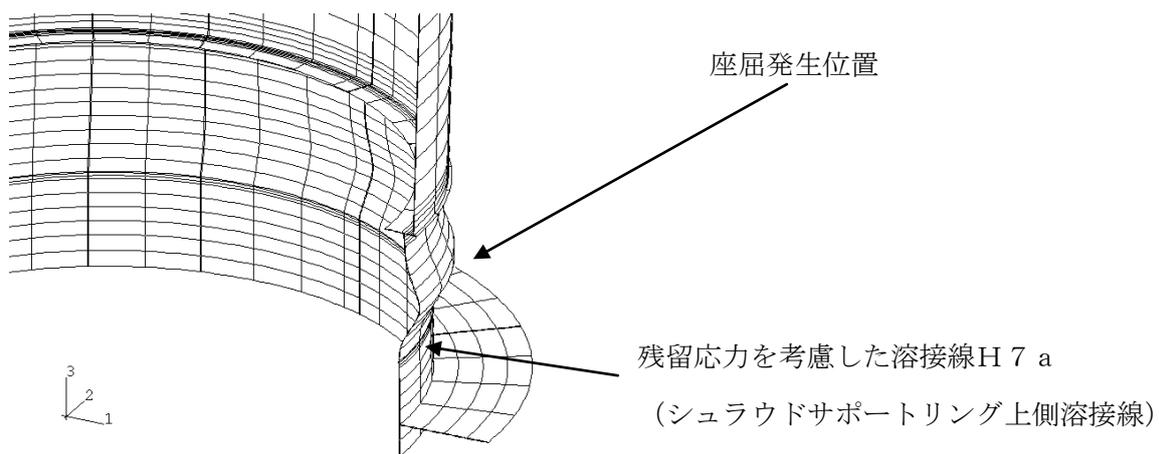
シュラウド溶接部の残留応力が座屈・崩壊荷重に与える影響を検討する。

2. 検討方法

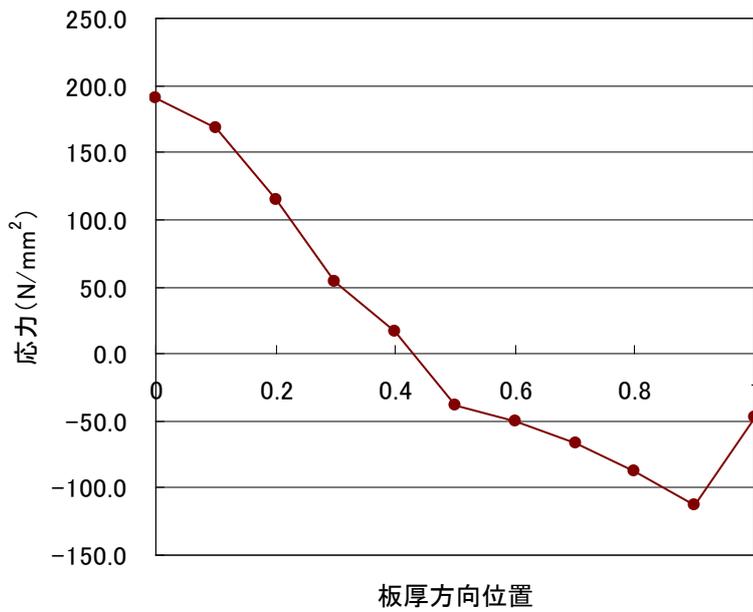
シュラウド解析モデルの溶接線 H7a (参考図 D-1-1 参照) に溶接残留応力相当の応力が発生した状態で、座屈・崩壊解析を実施し、座屈・崩壊荷重の低下を比較した。残留応力は、仮想的な温度分布と線膨張係数を溶接線に与えることにより発生させた。座屈・崩壊解析は保守側に $2.3S_m$ を弾性限界とした完全弾塑性モデルで実施しており、本解析においても加工硬化による座屈・崩壊荷重の増加が無いよう同一の応力ひずみ関係を用いている。比較は残留応力の効果が最も大きくなると考えられるシュラウドに亀裂が無い状態で実施した。

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-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。

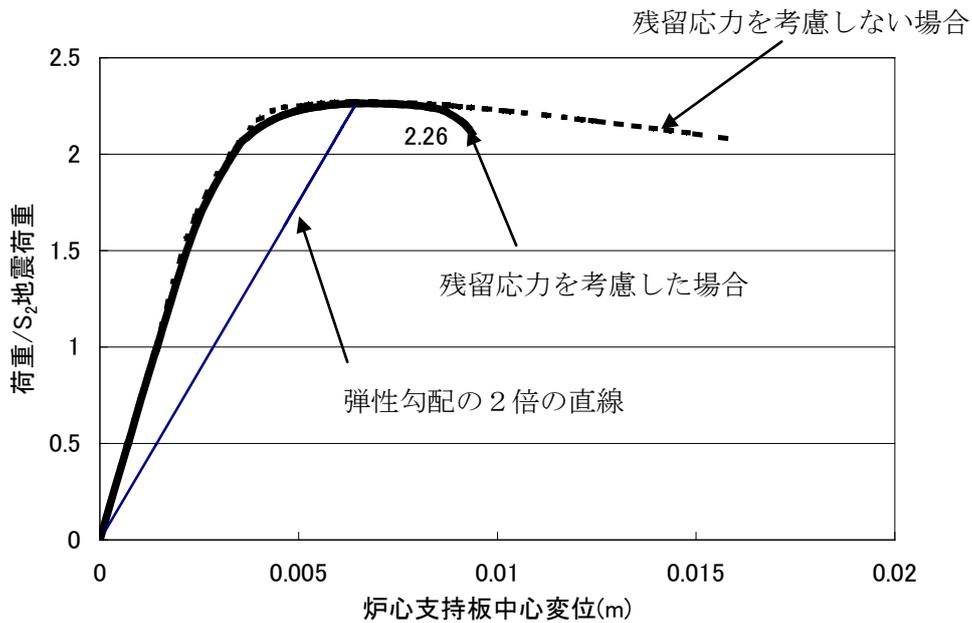


参考図 D-1-1 残留応力を考慮した溶接線 H7a



評価温度 (°C)	完全弾塑性における弾性限界 (N/mm ²)
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 ₂ 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

炉心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、炉心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、過去に実施した電共研により、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、炉心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、亀裂を有する炉心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どの関係を示す。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。

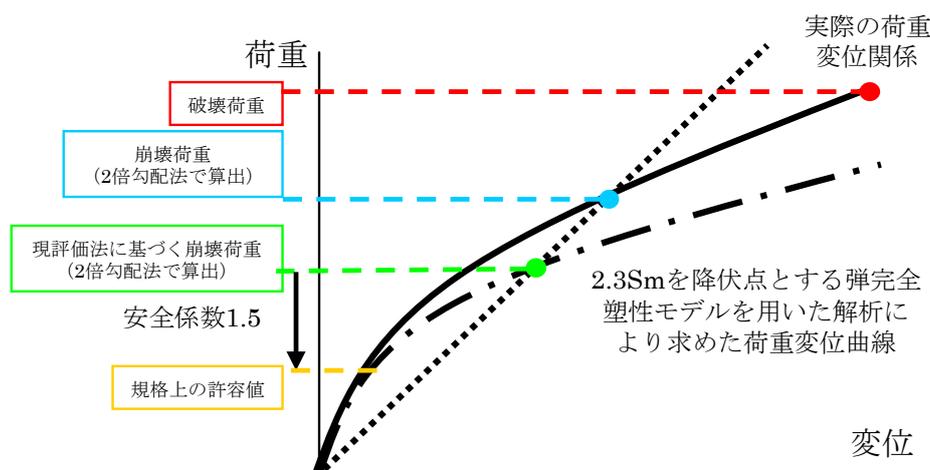


図 D-25 荷重変位関係と裕度の関係

3. 試験体と試験条件

炉心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 B-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 B-26 に、試験体を図 B-27 に示す。試験体は SUS316L 製で、炉心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 B-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 B-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			

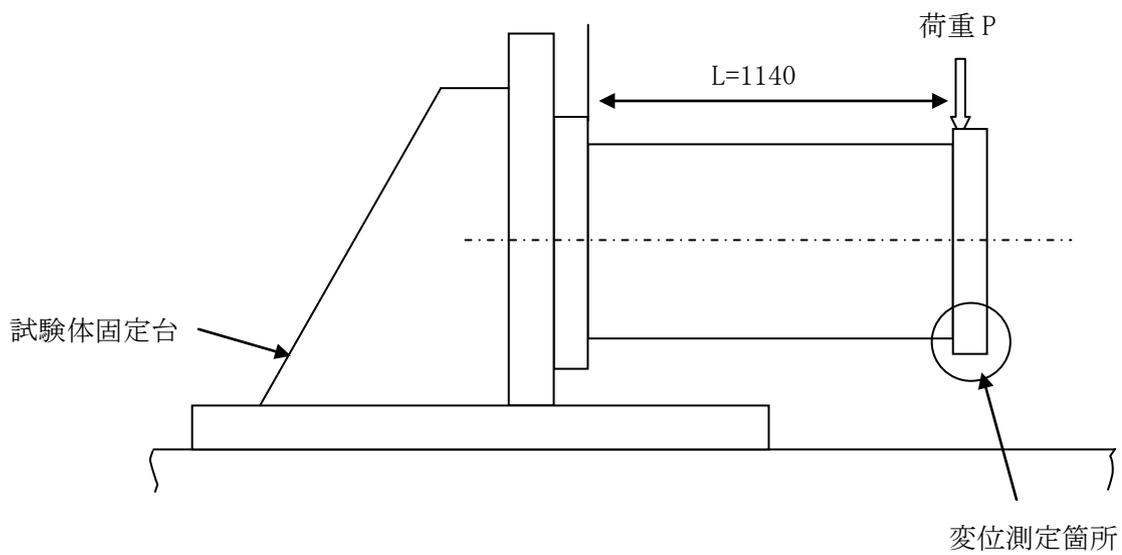


図 D-26 試験装置

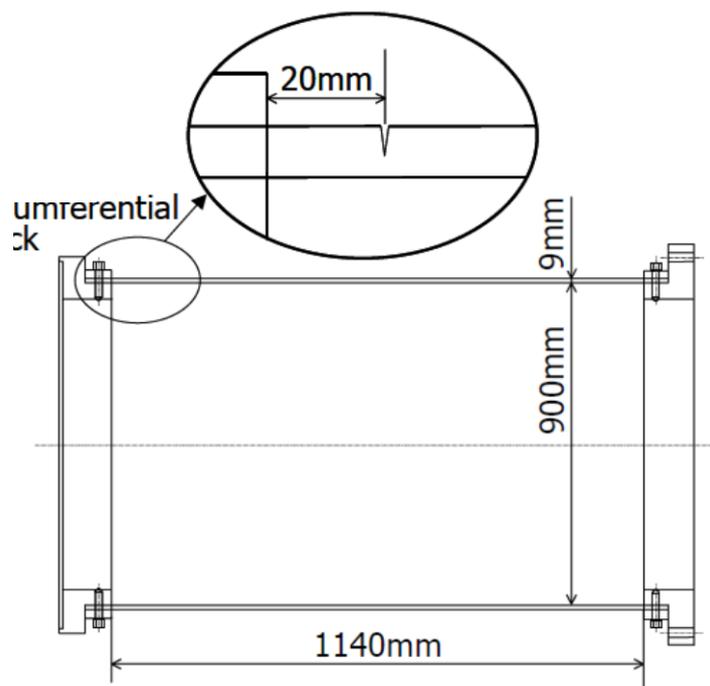


図 D-27 試験体

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-8 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、炉心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

炉心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

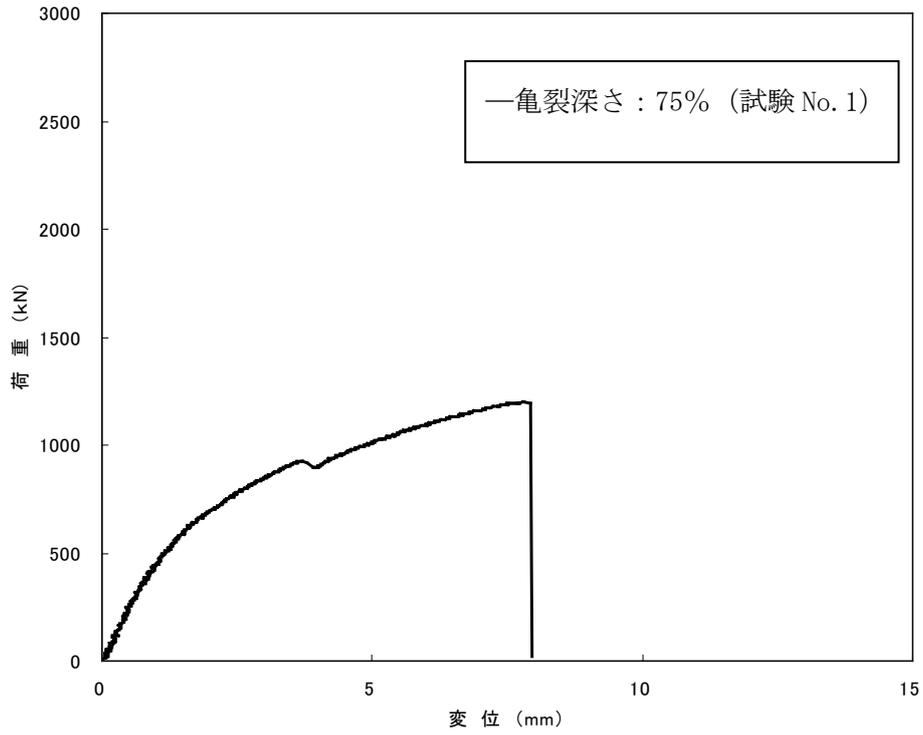


図 D-28 (1/3) 亀裂深さ 75%における荷重変位関係

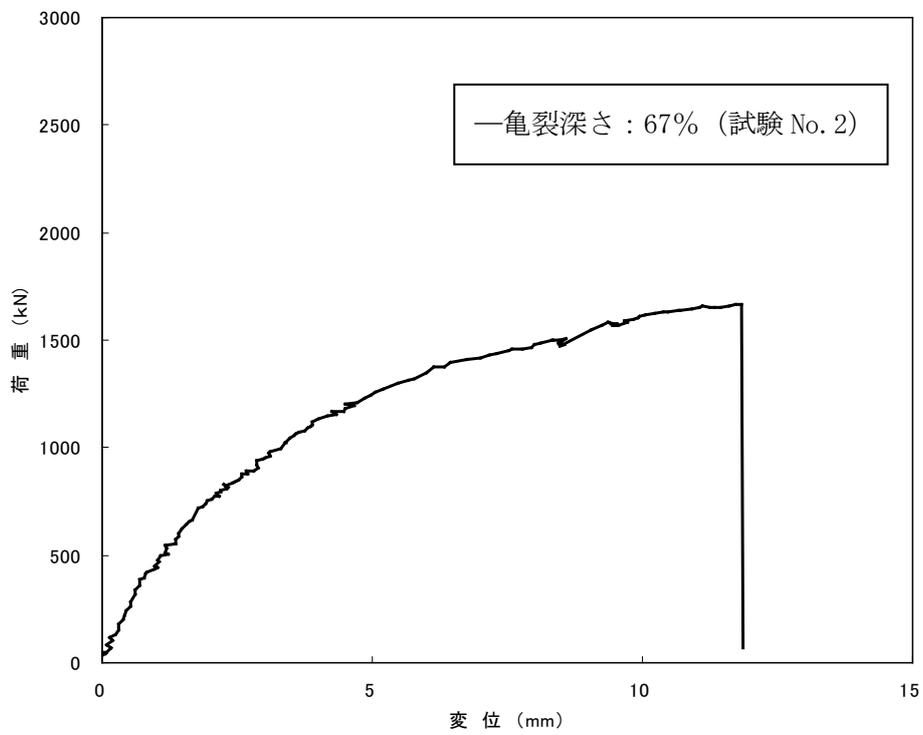


図 D-28 (2/3) 亀裂深さ 67%における荷重変位関係

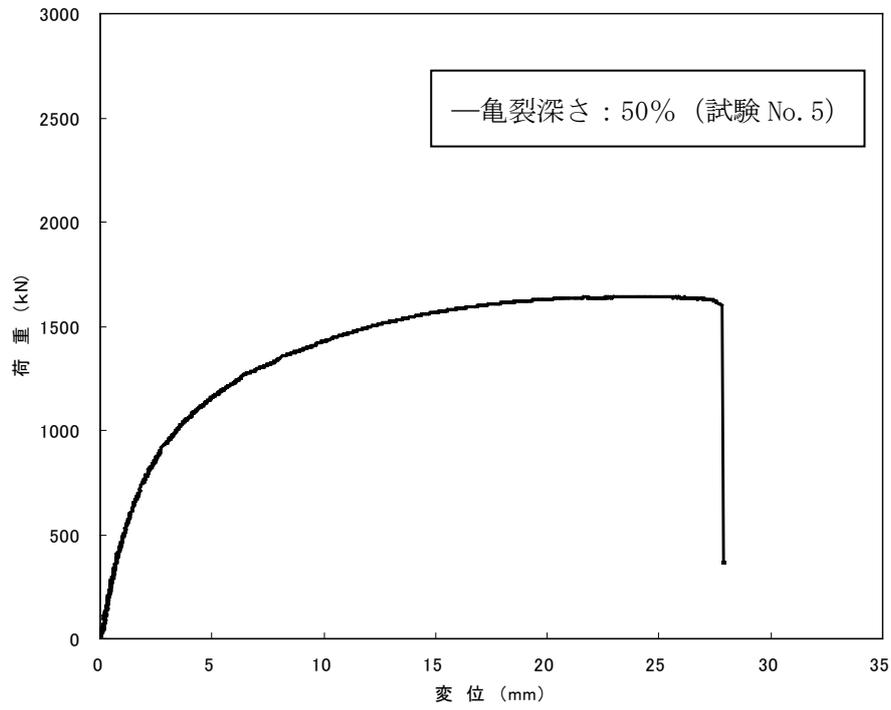


図 D-28 (3/3) 亀裂深さ 50%における荷重変位関係

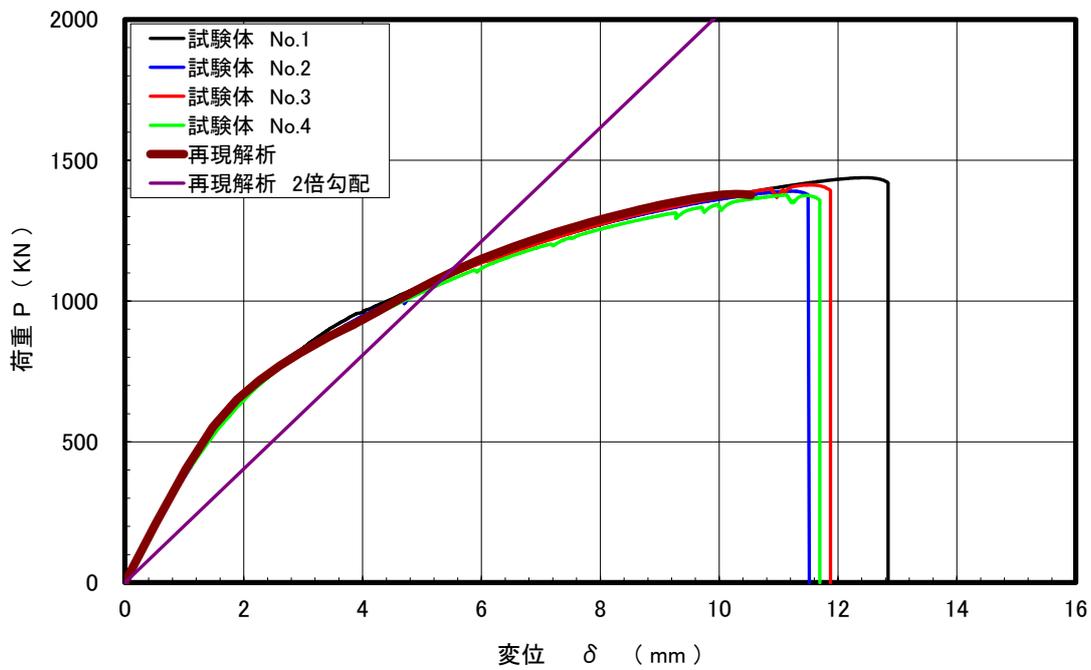


図 D-29 試験及び再現解析により得られた荷重変位関係

表 D-8 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

炉心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二倍勾配法の適用性を試験により検証するため、BWR 電力・メーカー共同で、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、亀裂を有する炉心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、炉心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%	

*) 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

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従って求めた荷重－変位曲線及び評価上の崩壊荷重 (二倍勾配線との交点) 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

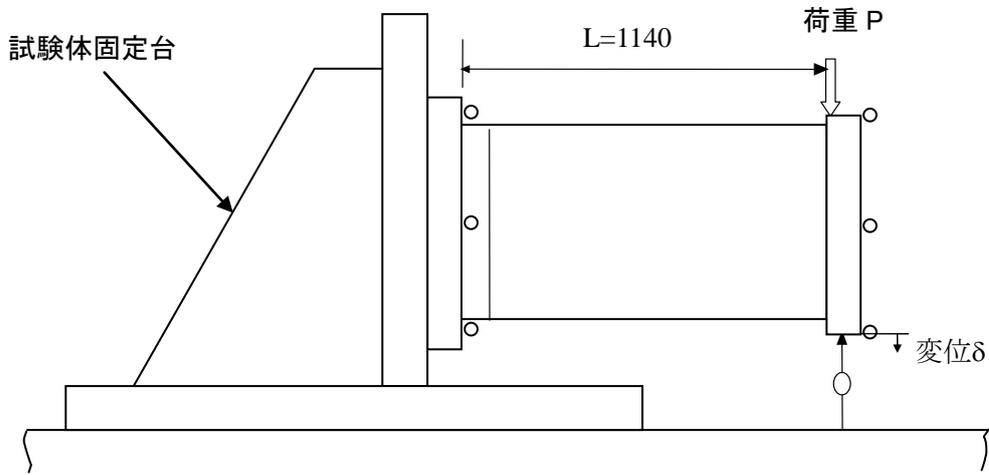
炉心シュラウドを模擬した亀裂を有する円筒の座屈・崩壊挙動は、ガイドラインの評価方法 (二倍勾配法) で保守的に推定できることを試験により確認した。

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二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。

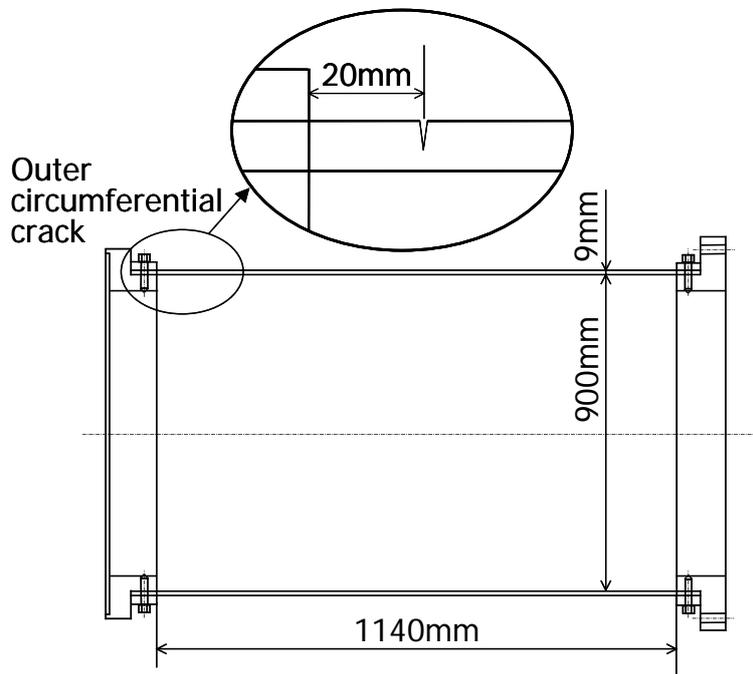
(参考文献)

- (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

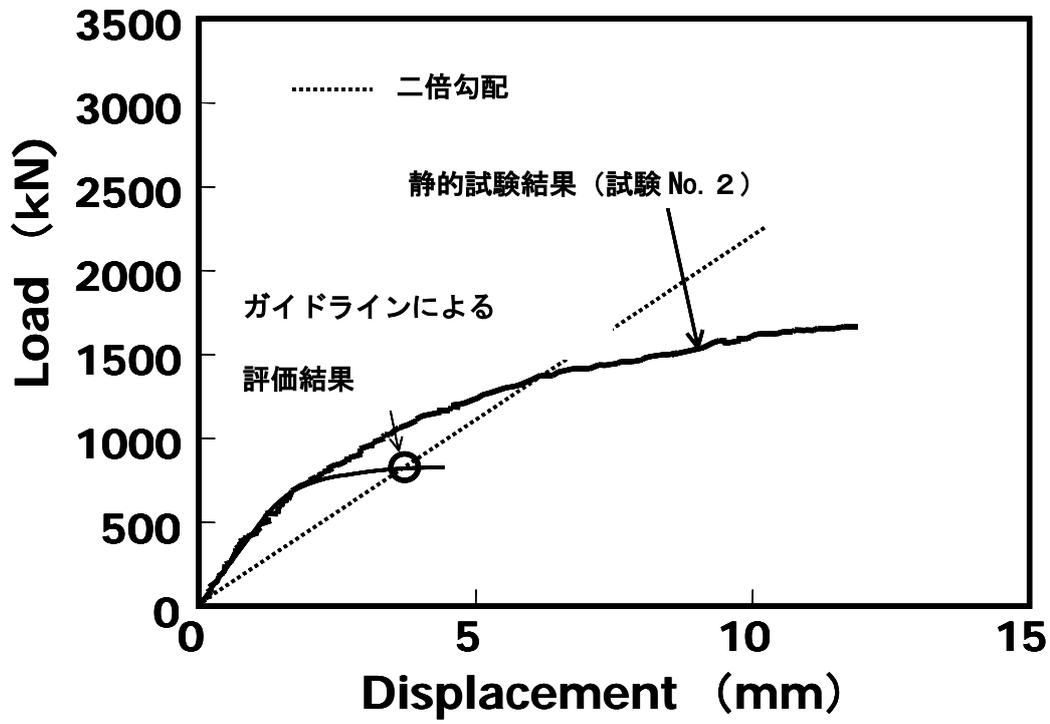
○ : 変位測定位置



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

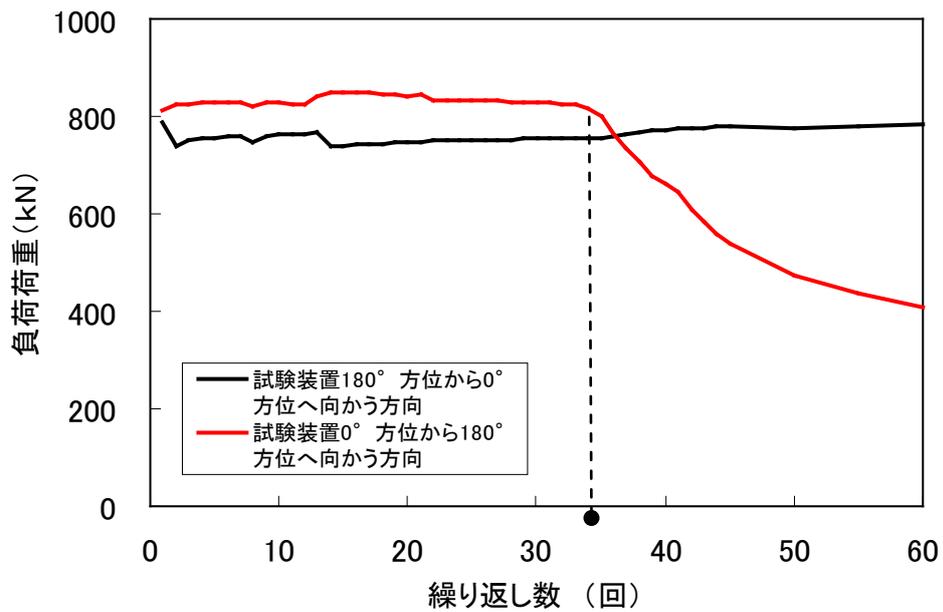
*）設計・建設規格記載 S_m 値の 2.3 倍の値を降伏点とする弾完全塑性モデルにより求めた座屈・崩壊荷重に安全率（1.5）を考慮した許容荷重

・試験結果及び評価

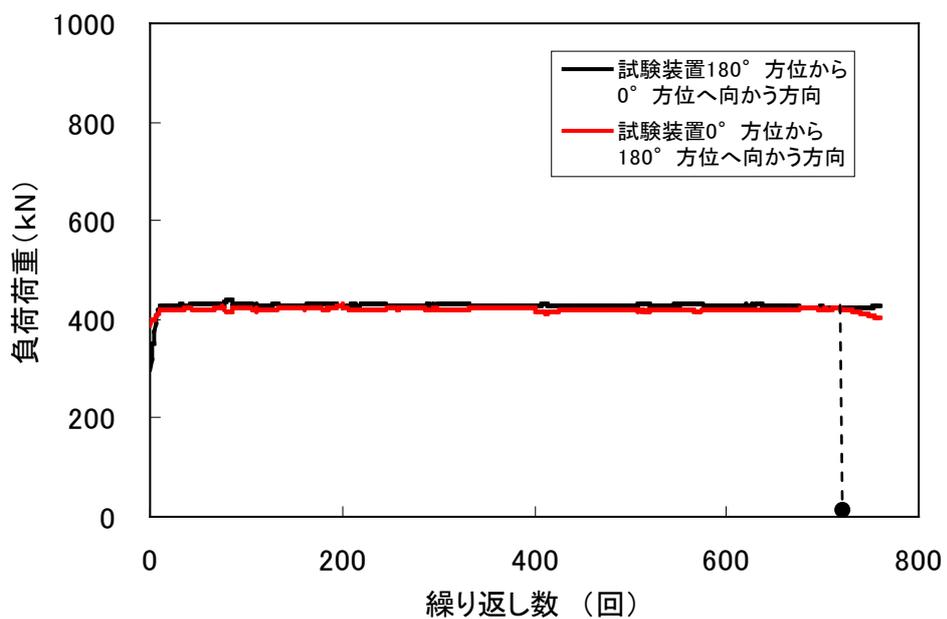
繰り返し試験においては，亀裂深さ 67%の試験体を 2 体用いて，異なる荷重範囲をねらいとして変位制御により繰り返し負荷し，荷重低下が生じ始めたサイクルを限界サイクル数とした。ねらいとする荷重範囲の設定に当たっては，崩壊荷重の評価方法に基づいて得られた評価値（821kN，許容値の 1.5 倍），及び，荷重範囲と限界サイクル数の関係がわかるように許容値の 0.8 倍（評価値の 0.53 倍）に設定した。

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。

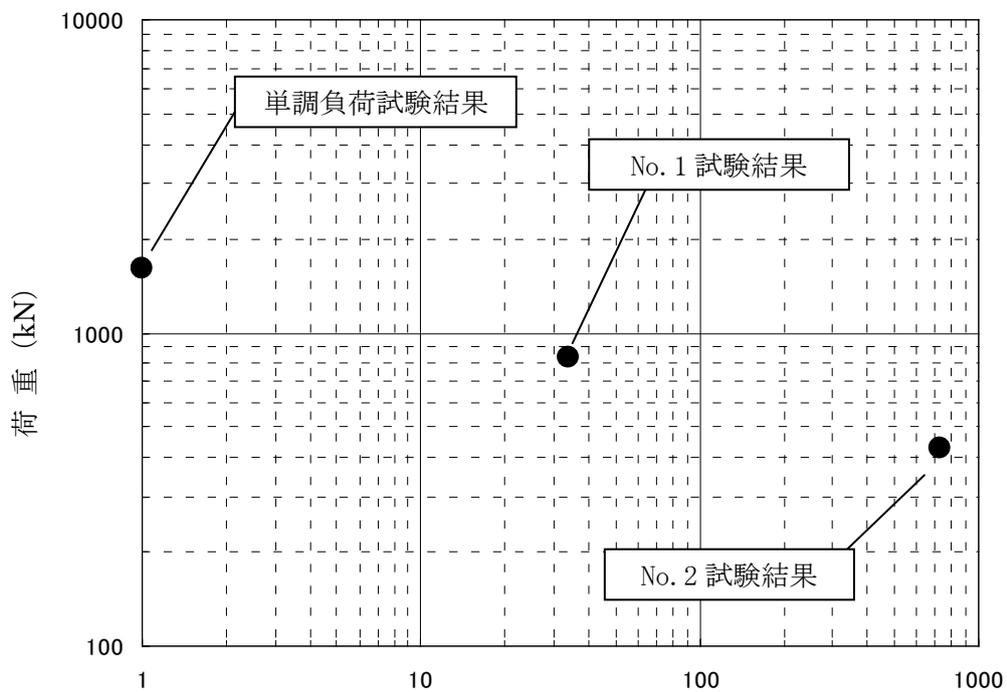
これらの繰り返し負荷試験結果を，限界サイクル数と荷重範囲の關係に整理すると参考図-3 のようになった。図中には，繰り返し負荷試験結果とともに，（参考資料 D-2）シュラウド欠陥裕度評価の妥当性検証に記載した同じ亀裂深さ条件の単調負荷試験における最大荷重を，サイクル数 = 1 としてプロットしてある。



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
(外側全周き裂, き裂深さ: 板厚の 67%)

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

材料物性は告示 501 号より算出した値を使用し、2 直線の弾完全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° 方向及び 180° 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 ⁽¹⁾ 0.245 ⁽²⁾
地震時の荷重	地震荷重 S_2	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

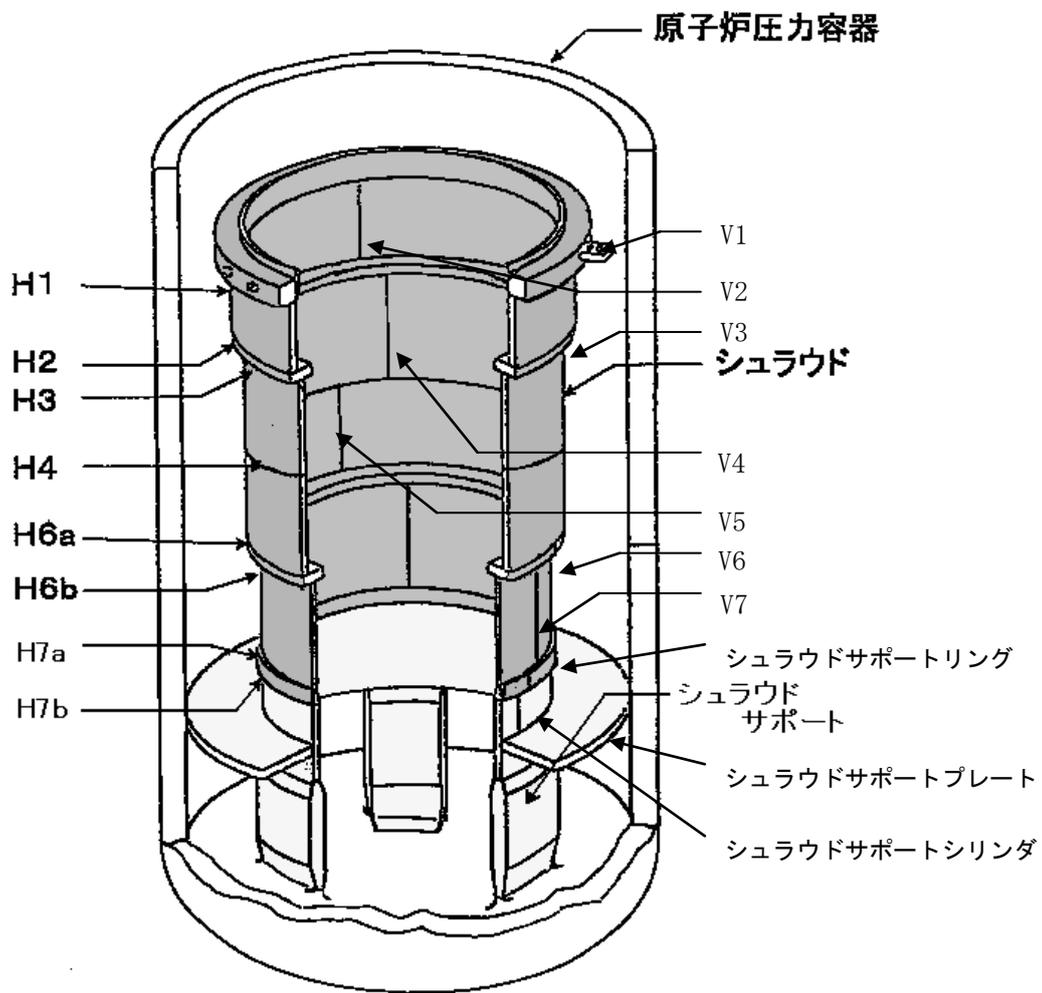


図 E-1 シュラウド構造の概要

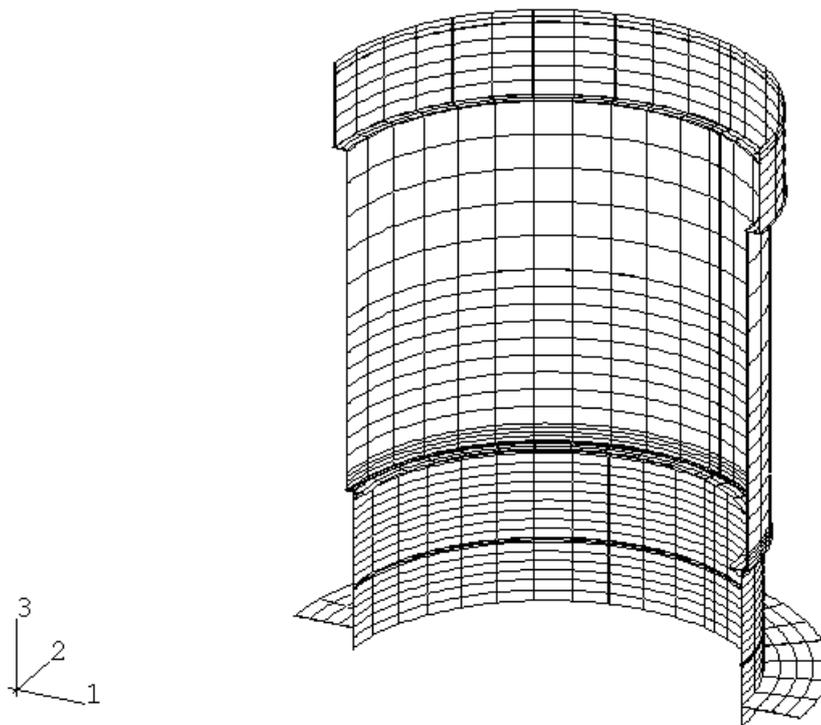


図 E-2 解析メッシュの例

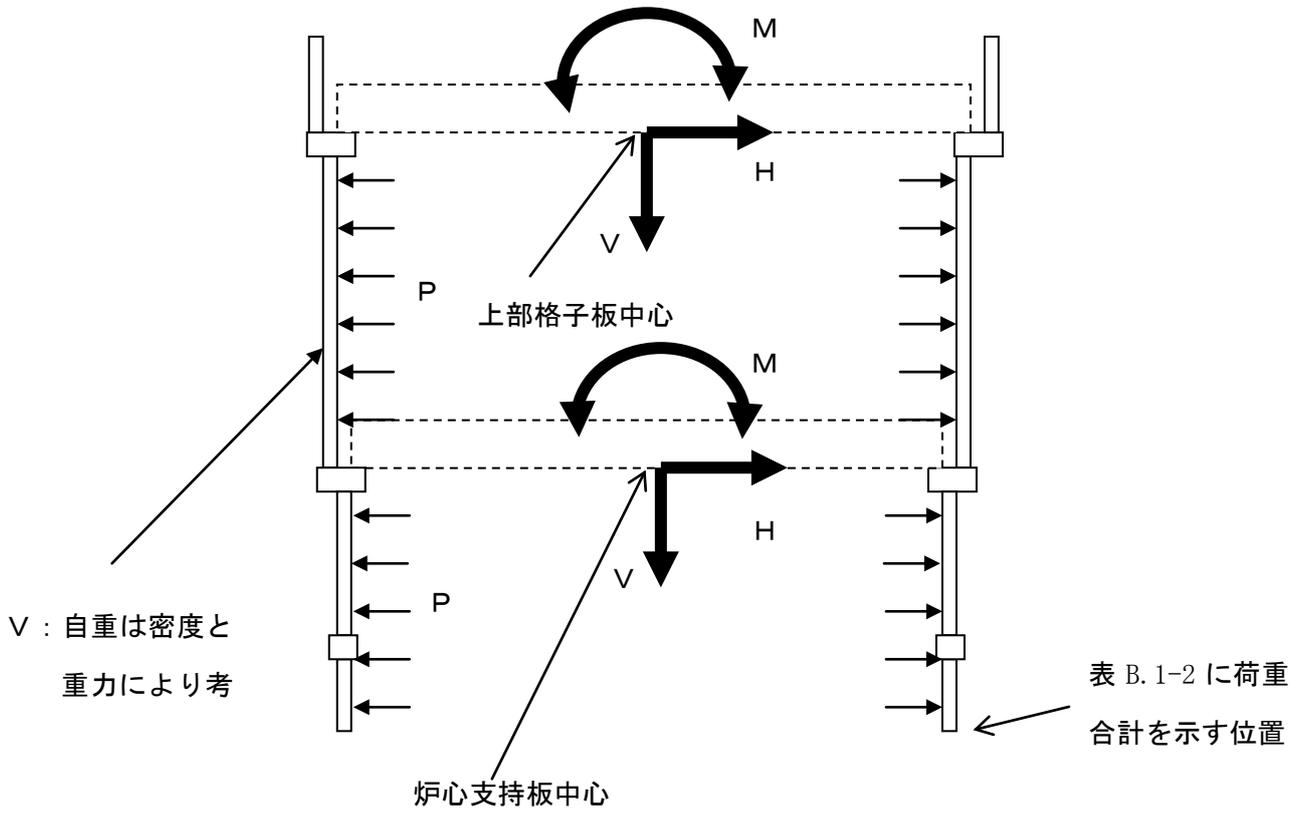


図 E-3 荷重負荷位置

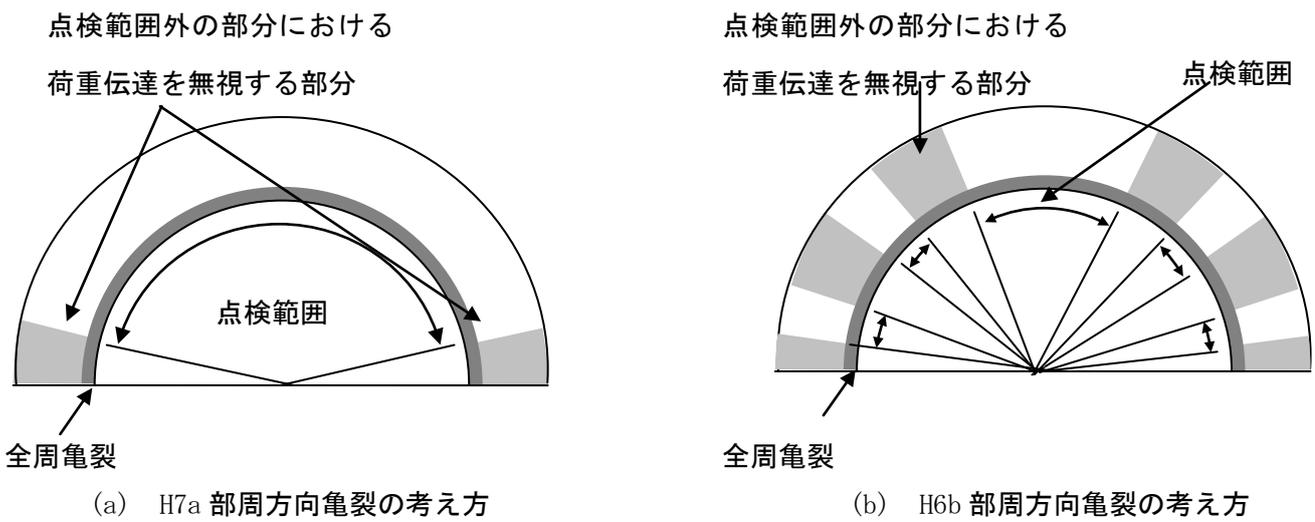


図 E-4 点検困難範囲のモデル化 (H7a 及び H6b 周方向)

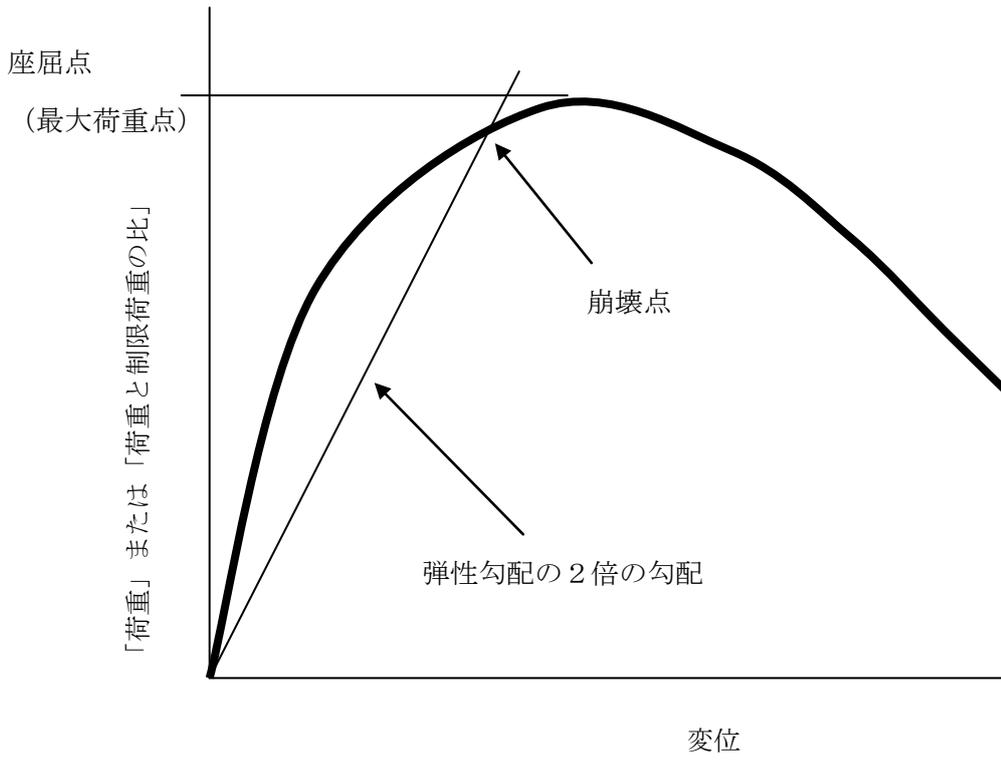


図 E-5 座屈・崩壊の定義

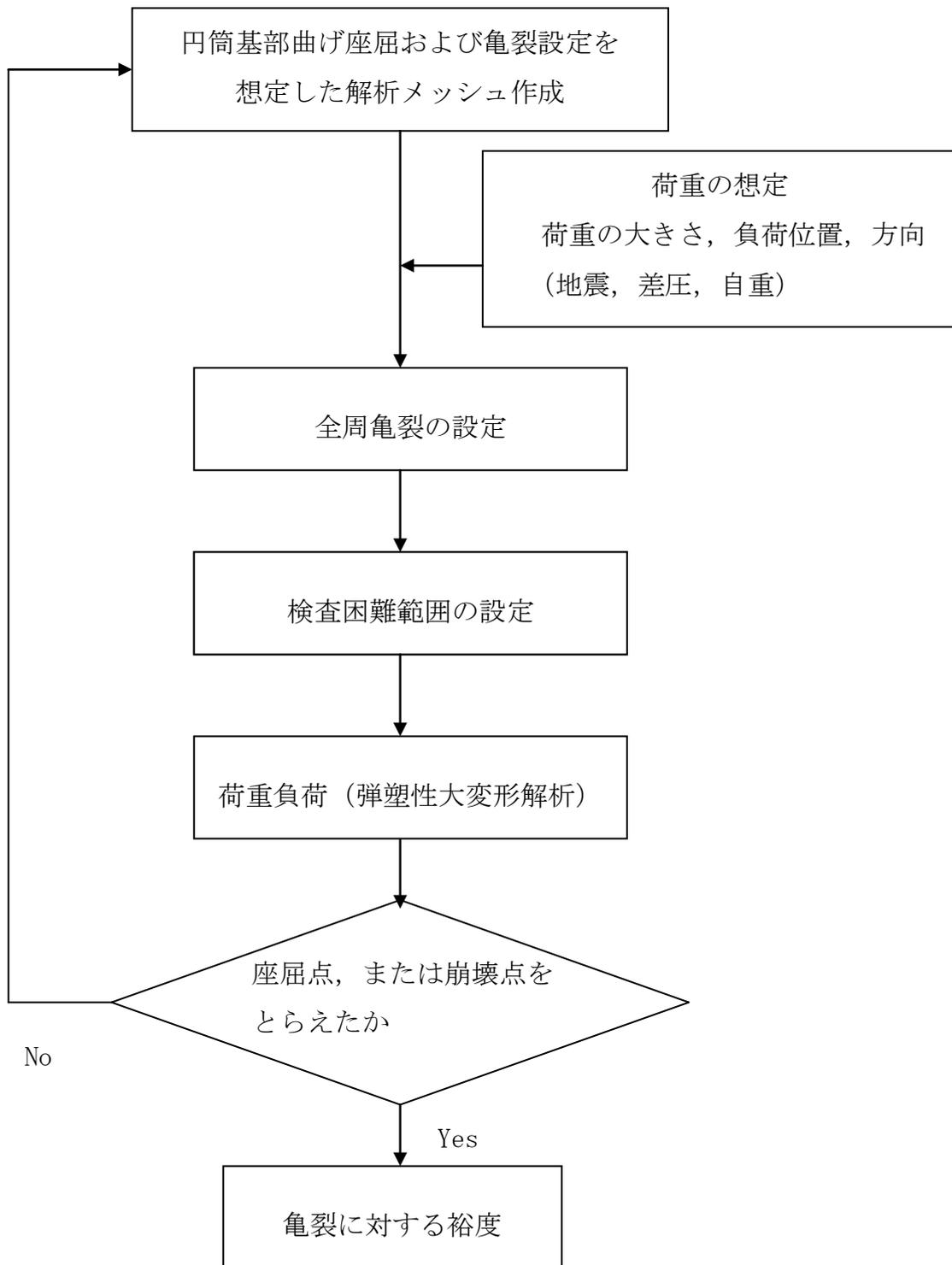


図 E-6 欠陥裕度評価解析の手順

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 節点要素または 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、これらに代えて正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変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

ニッケル基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	1.49×10 ⁻⁵	1.66×10 ⁻⁵	1.87×10 ⁻⁵	2.34×10 ⁻⁵	2.77×10 ⁻⁵	3.10×10 ⁻⁵	3.98×10 ⁻⁵	4.89×10 ⁻⁵
Specific gravity R	kg/mm ³	8.50×10 ⁻⁶	8.50×10 ⁻⁶	8.50×10 ⁻⁶	8.50×10 ⁻⁶	8.50×10 ⁻⁶	8.50×10 ⁻⁶	8.50×10 ⁻⁶	8.50×10 ⁻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	1.46×10 ⁻⁵	1.56×10 ⁻⁵	1.70×10 ⁻⁵	1.97×10 ⁻⁵	2.24×10 ⁻⁵	2.76×10 ⁻⁵	3.43×10 ⁻⁵	4.12×10 ⁻⁵
Specific gravity R	kg/mm ³	7.86×10 ⁻⁶	7.86×10 ⁻⁶	7.86×10 ⁻⁶	7.86×10 ⁻⁶	7.86×10 ⁻⁶	7.86×10 ⁻⁶	7.86×10 ⁻⁶	7.86×10 ⁻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 ² ·s·°C	<u>Air</u> 1.16×10 ⁻⁸	<u>Water</u> 6.66×10 ⁻⁵						

出典：溶接学会論文集第12巻（1994）第4号 563

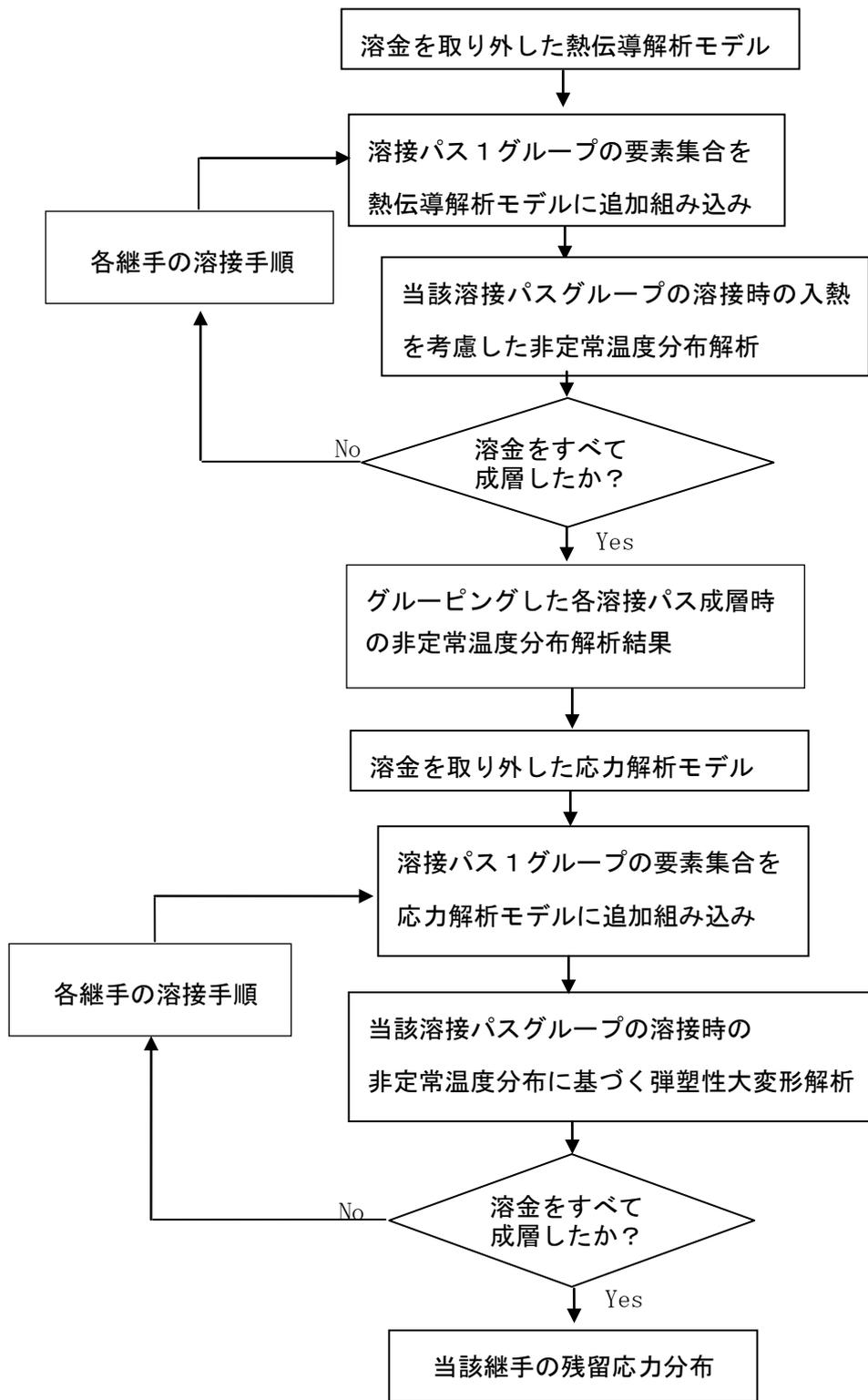
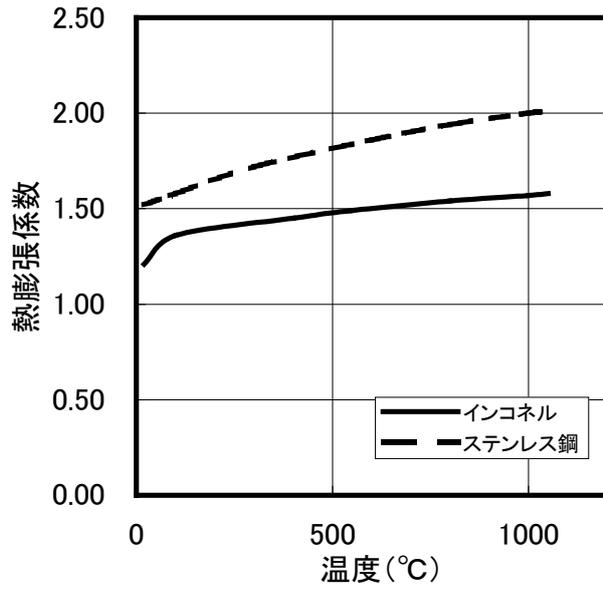
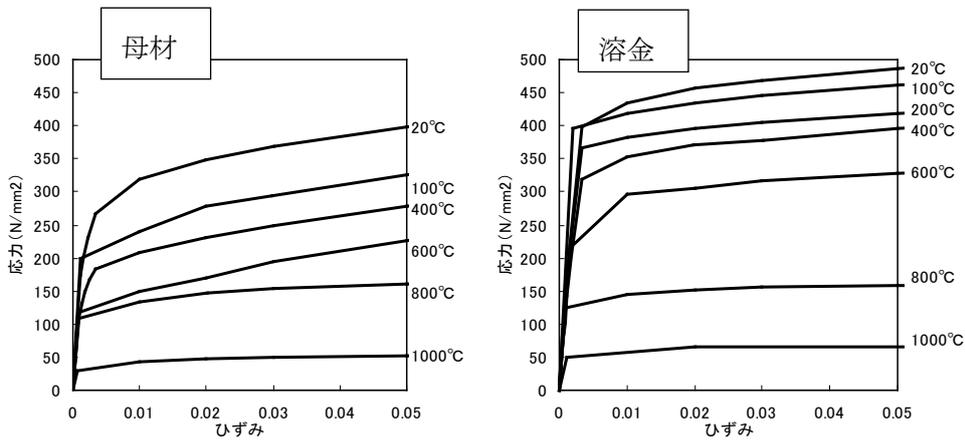


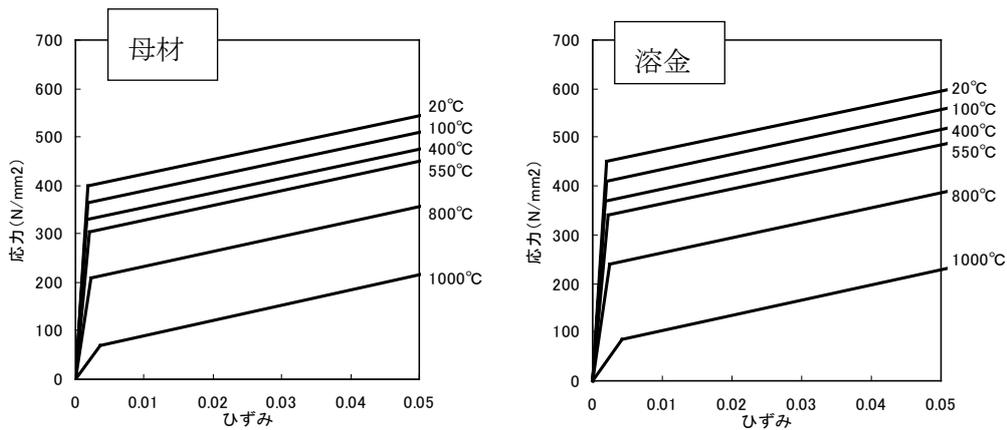
図 E-7 解析手順



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. ニッケル基合金の応力・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

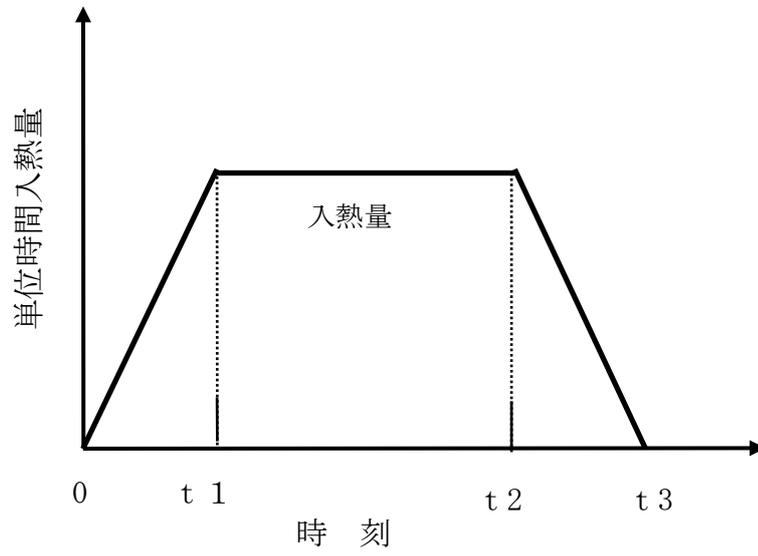


図 E-9 入熱の想定

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⁽¹⁾の規定に従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およ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 $<0.2\mu\text{S/cm}$ ， $\text{ECP}\geq 150\text{mVSHE}$ ）

(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 $<0.2\mu\text{S/cm}$ ， $\text{ECP}\leq -200\text{mVSHE}$ ）

(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) ニッケル基合金の 182 合金 (JIS DNiCrFe-3 または 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、ニッケル基合金の 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 JSME 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 Δt 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 Δa および Δl をそれぞれ求め、進展後の亀裂深さおよび亀裂長さを $a+\Delta a$ および $l+\Delta l$ とする(ここで a および l は進展前の亀裂深さおよび長さ)。
- (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、合体後の亀裂深さおよび亀裂長さをそれぞれ $a+\Delta a$ および $l+\Delta l$ 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 $<0.2 \mu\text{S/cm}$ 、 $\text{ECP} \geq 150\text{mVSHE}$)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 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

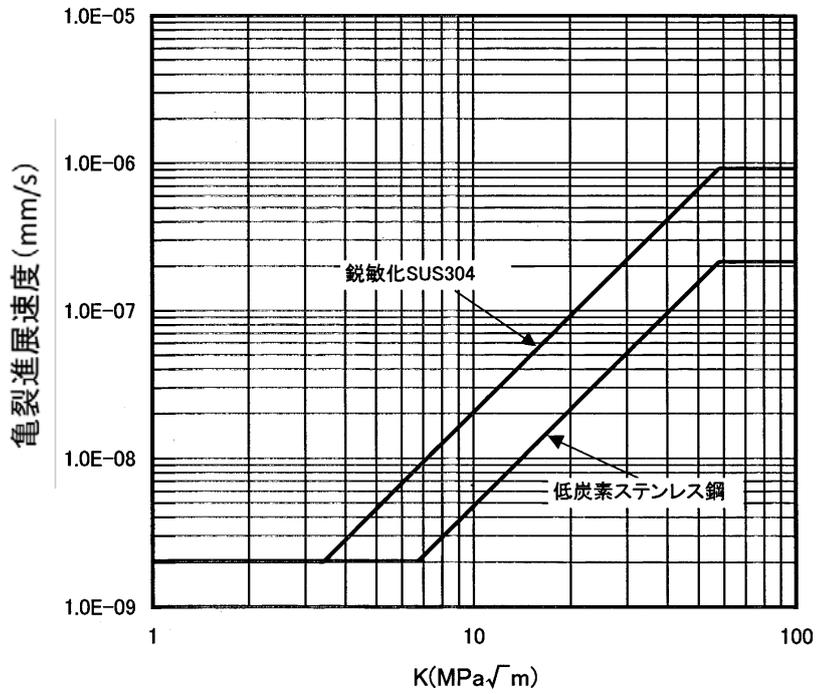


図 E-10 ステンレス鋼の通常炉内水質環境中の SCC 進展速度線図

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

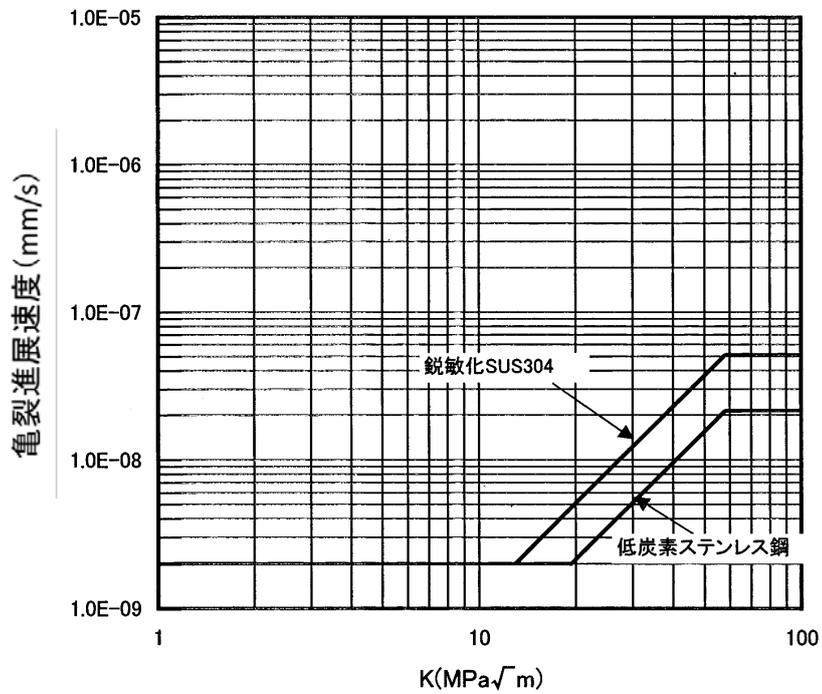


図 E-11 ステンレス鋼の水素注入水質環境中の SCC 進展速度線図

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 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

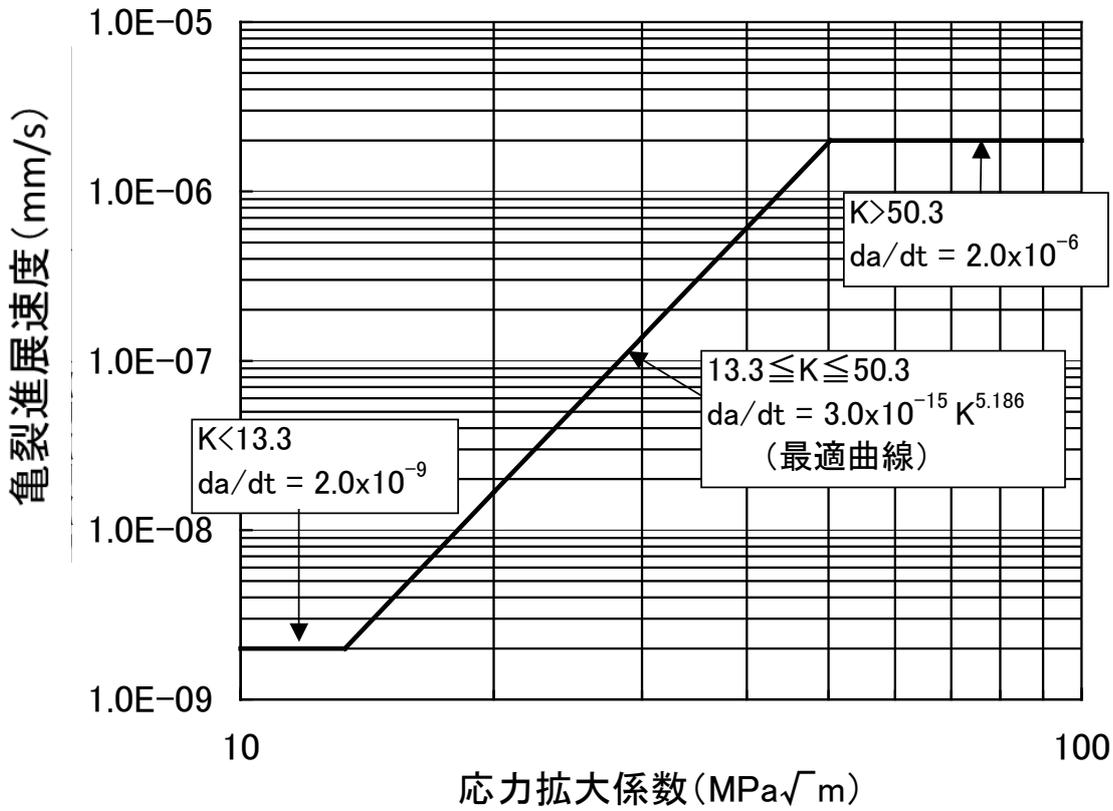


図 E-12 ニッケル基合金の 182 合金の通常炉内水質環境中の SCC 進展評価線図

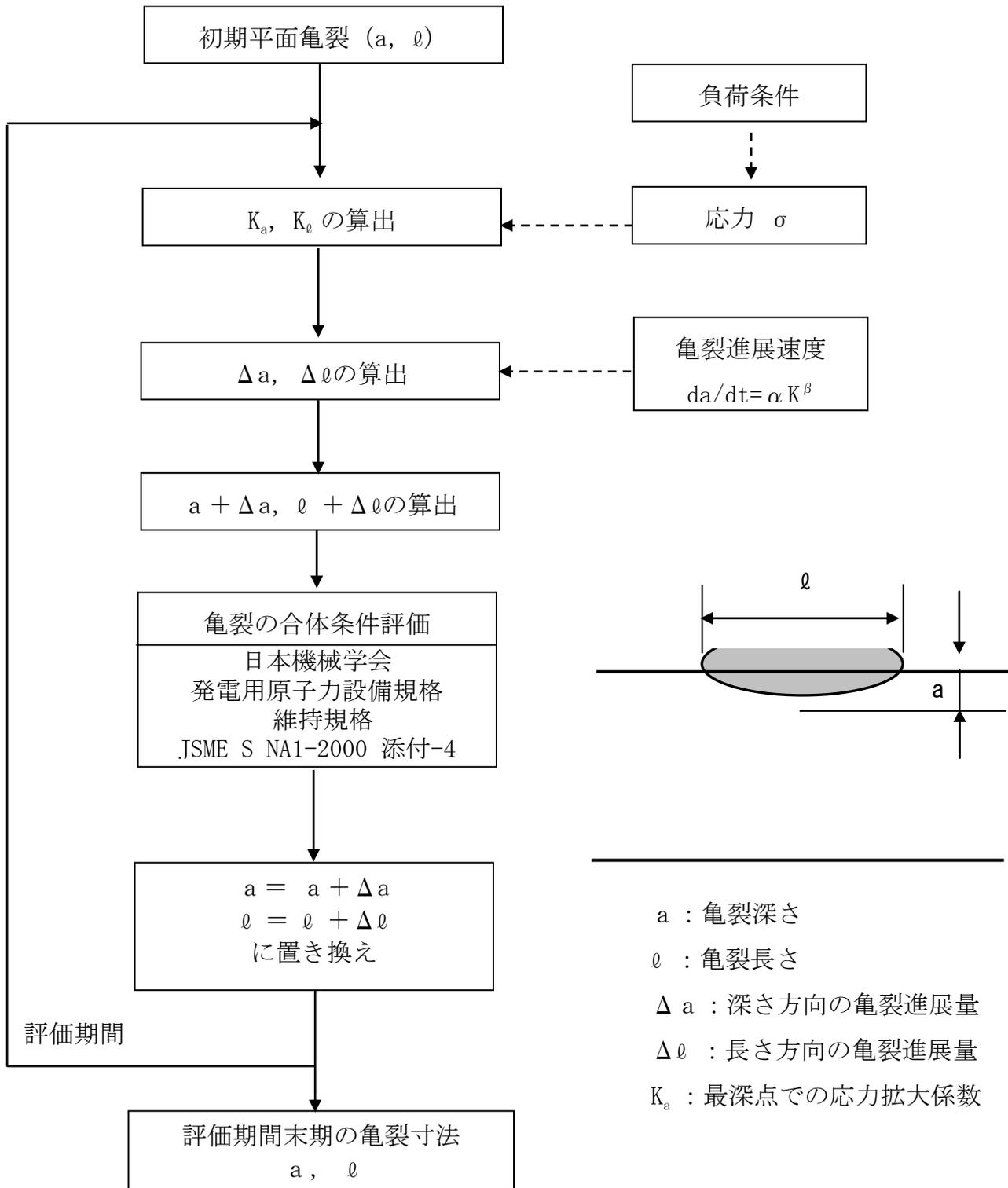


図 E-13 SCC 亀裂進展計算のフロー

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 3-3 注 1 A 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 1mm 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 6mm 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 B-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）または 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。従って 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。

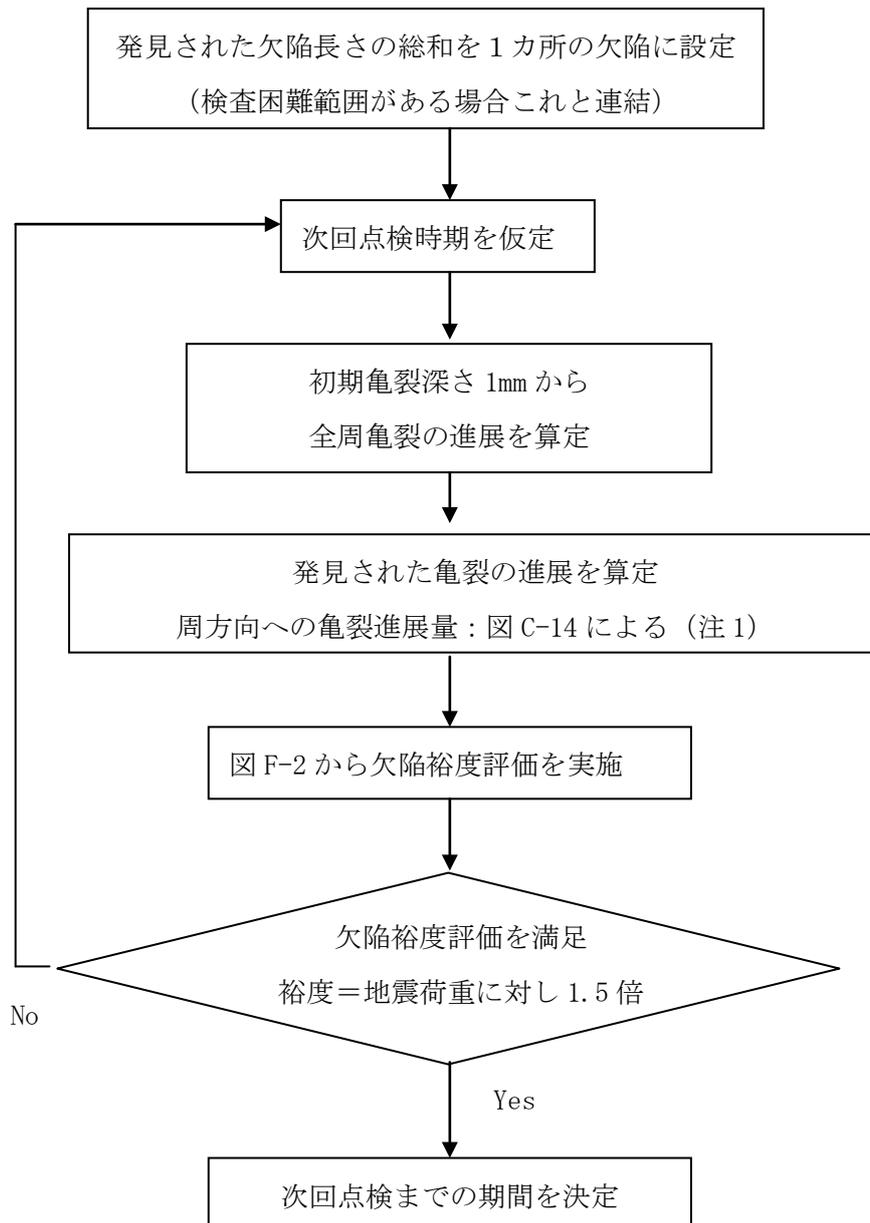
(b) H6 亀裂の場合

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）または 2 倍角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

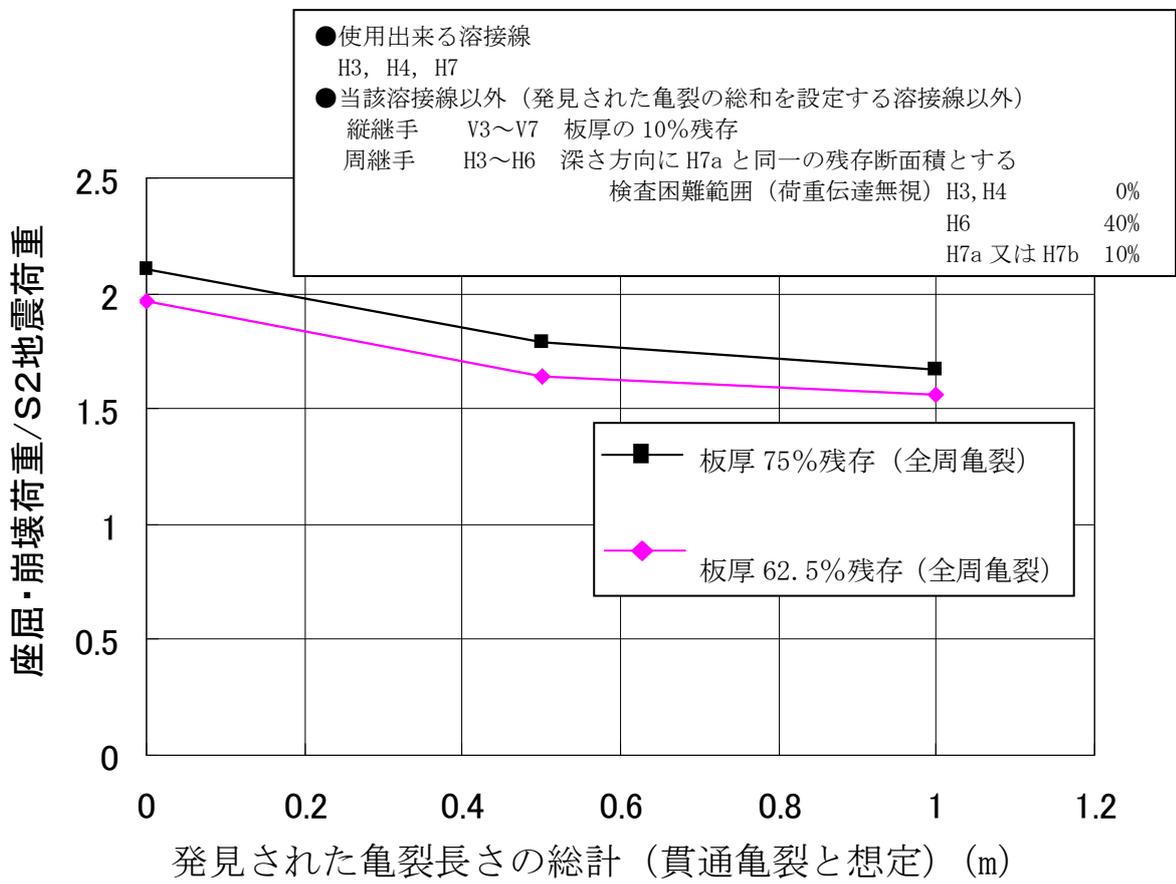


図 F-2(a) H7 に亀裂が発見された場合の欠陥裕度評価

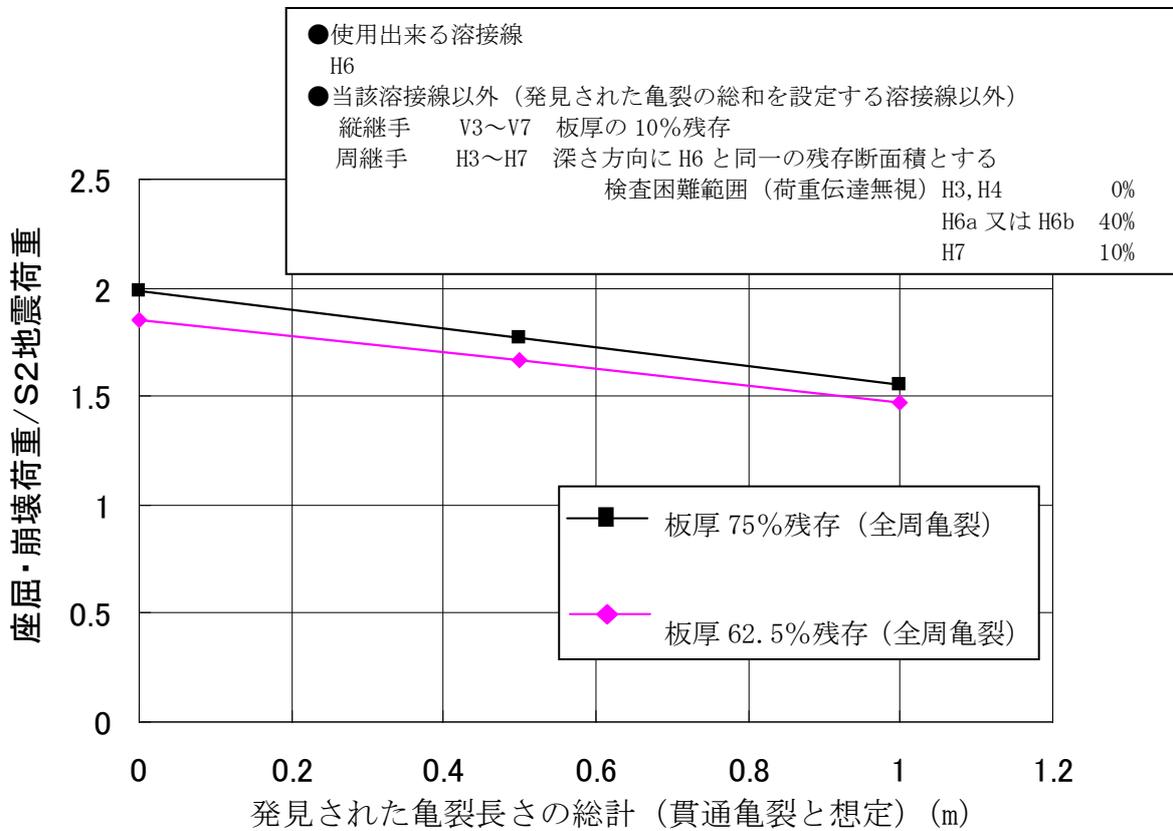


図 F-2(b) H6 に亀裂が発見された場合の欠陥裕度評価

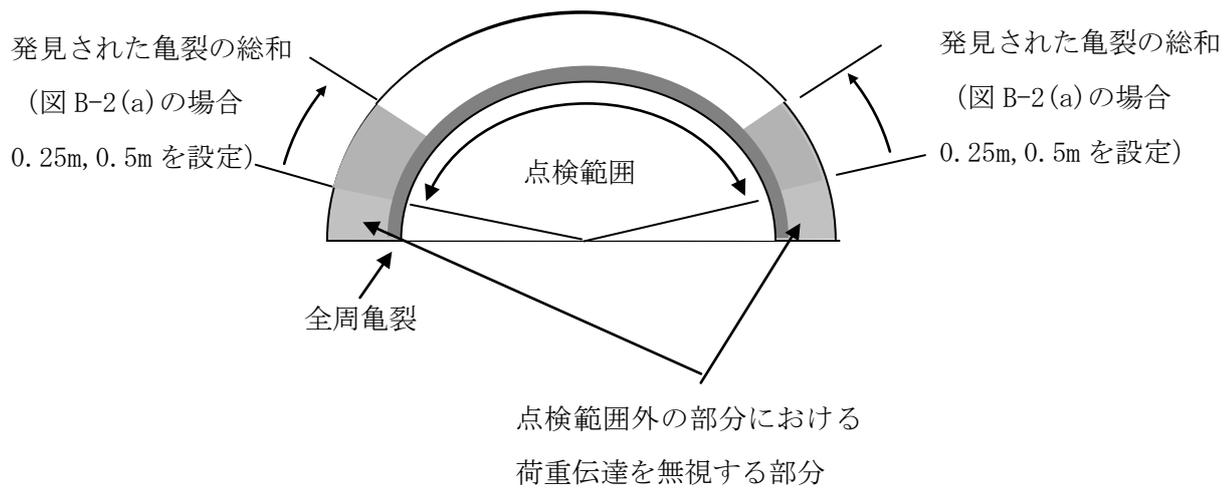


図 F-3 H7 に亀裂が発見された場合の欠陥の想定法

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方

構造健全性評価における未点検範囲の取り扱いの考え方としては、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 B-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。炉心シュラウドの目視点検実績で、数 mm～十数 mm のひびが数多く確認されていることから、炉心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 によるひび割れを、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、 $(10000\sim 15000\text{mm}) / 10\text{mm} \doteq 1000$ 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。

但し、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。

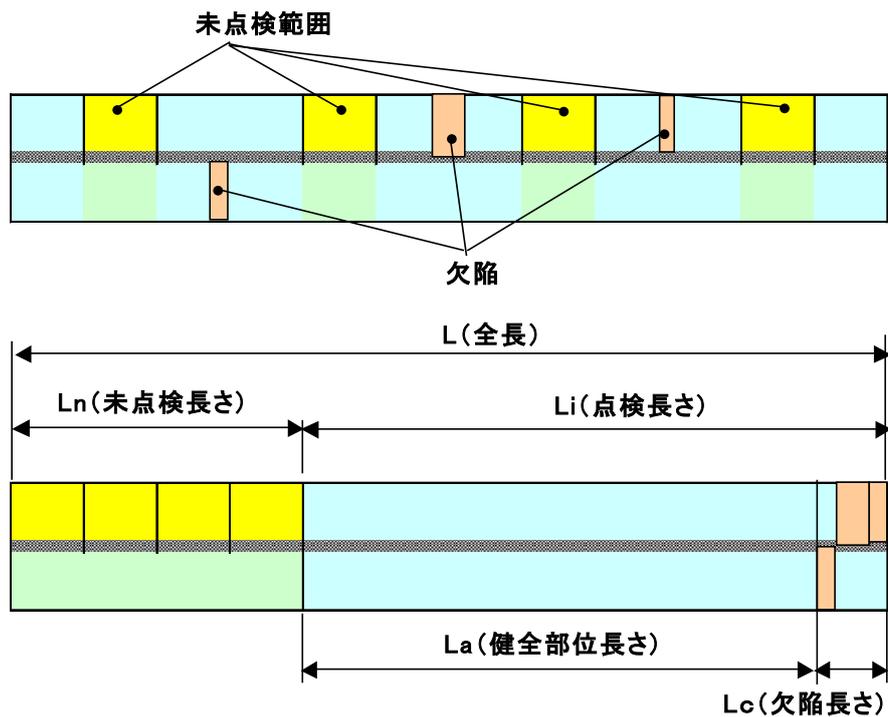
- (2) 点検割合 (X) が 0%から 50% :

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 $P = (L - (L_a + L_n \times (L_a / L))) / L$
 $= (1-Y) \cdot X^2 - 2 \cdot (1-Y) \cdot X + 1$

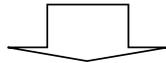
図 G-1 欠陥想定方法 (ケース A~C) の具体的計算方法

- 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

シュラウド点検	
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

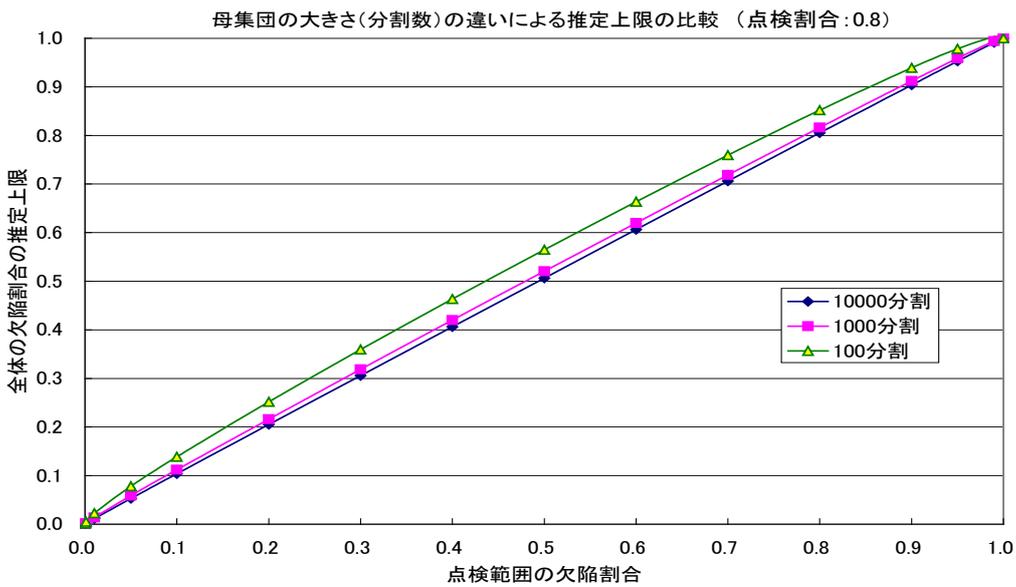
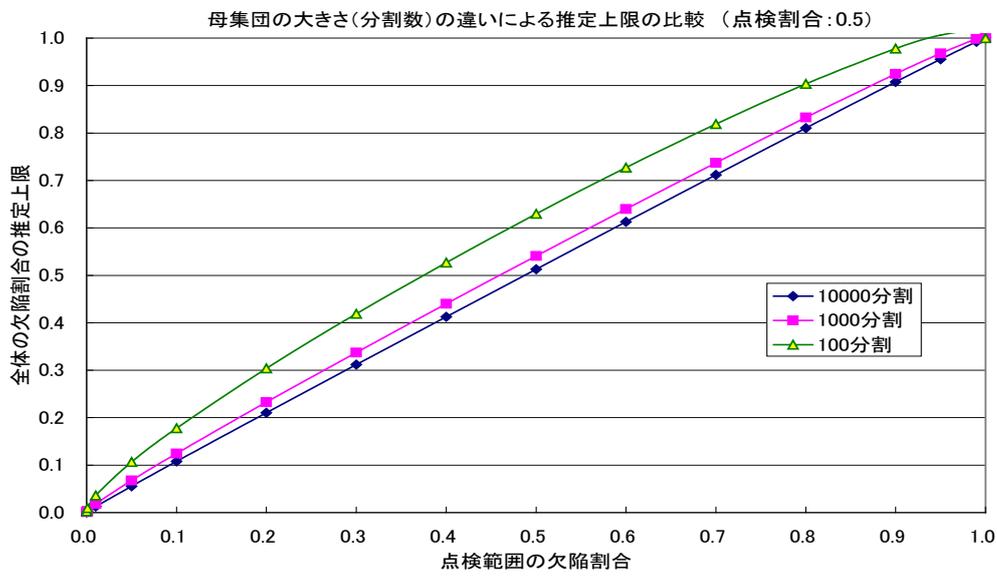
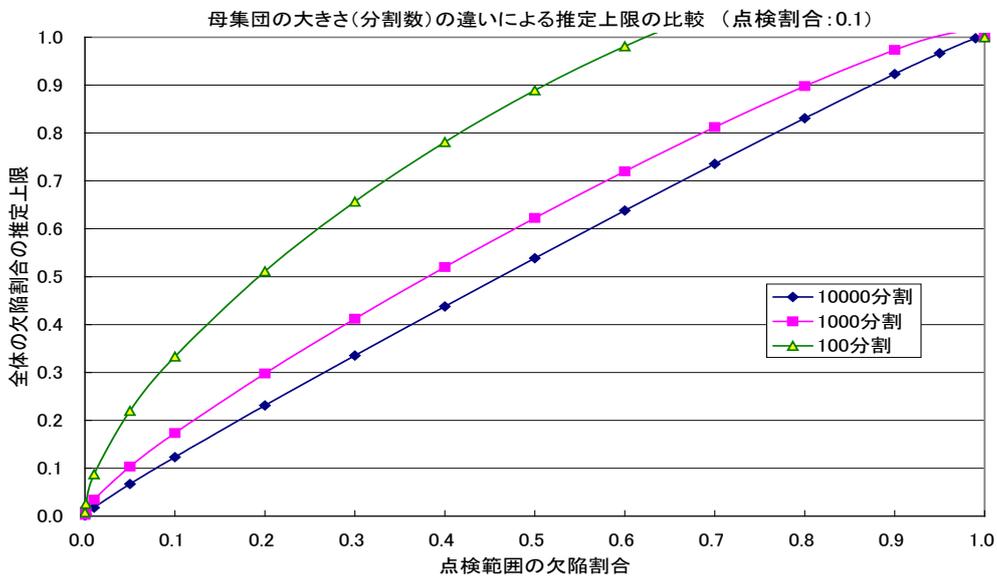


図 G-3 母数の大きさと信頼上限の比較

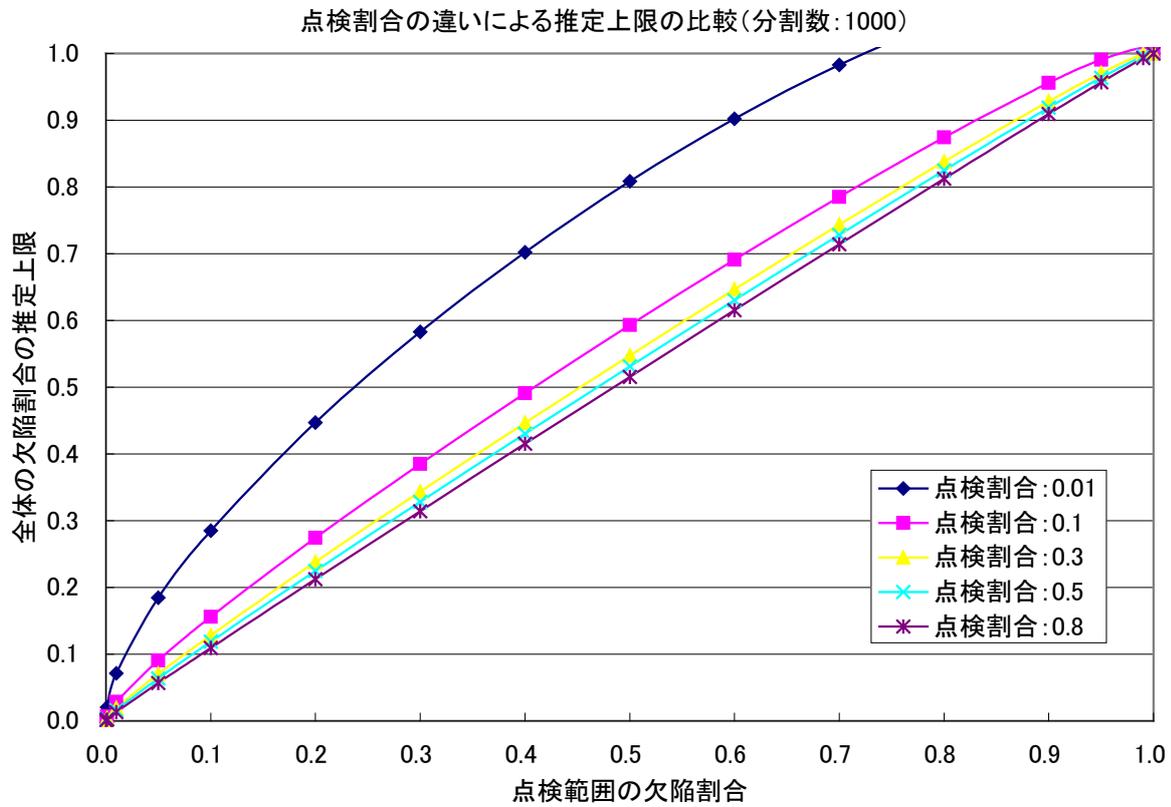


図 G-4 シュラウド全周を 1000 分割した場合の推定上限

想定欠陥割合 (点検欠陥比率 $Y=0.1$)

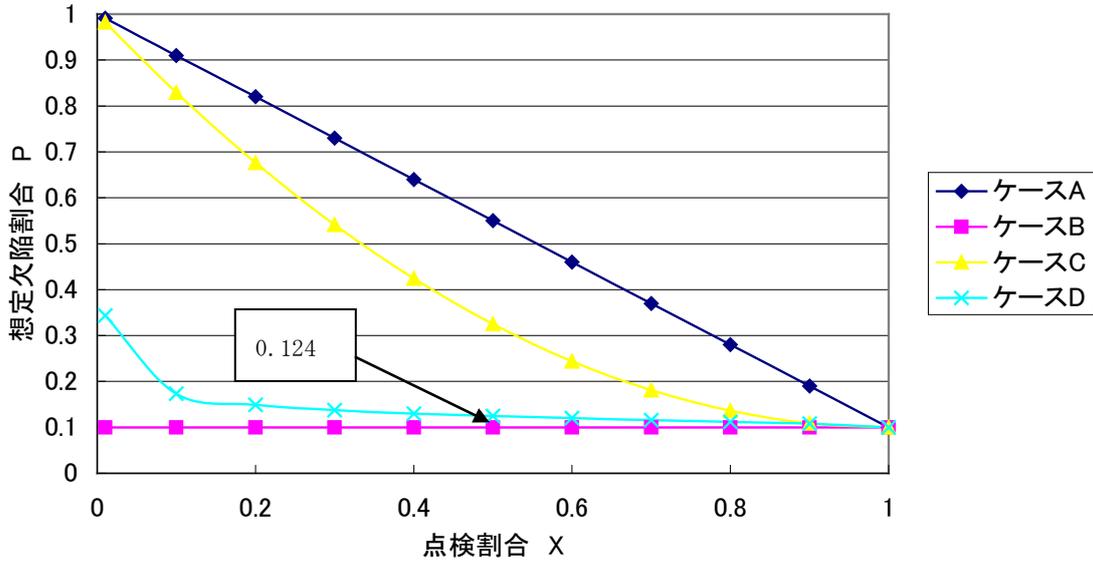


図 G-5 (1) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.1)

想定欠陥割合 (点検欠陥比率 $Y=0.2$)

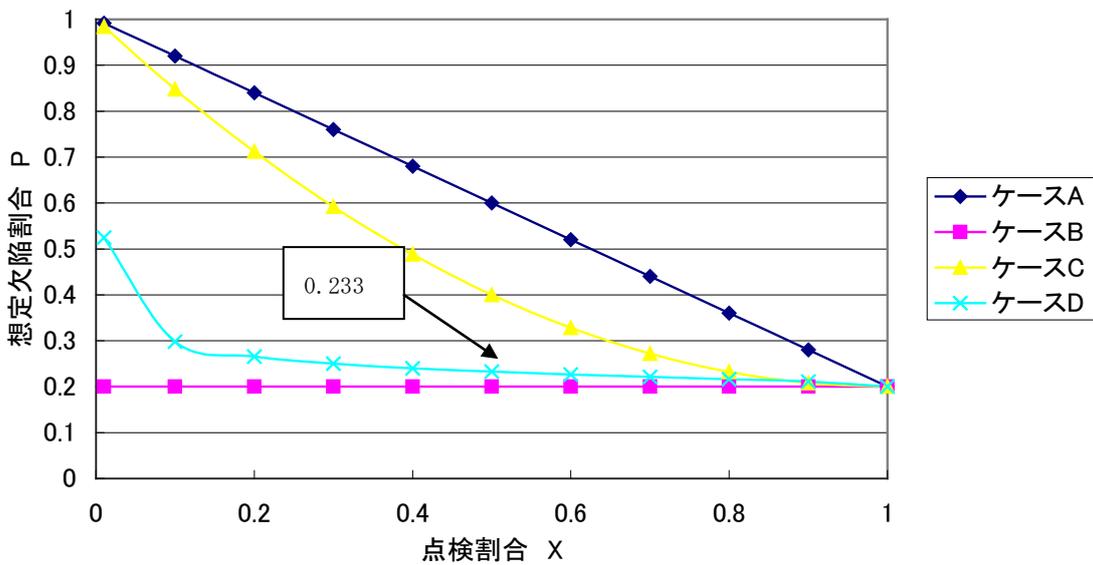


図 G-5 (2) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.2)

想定欠陥割合(点検欠陥比率 $\gamma=0.5$)

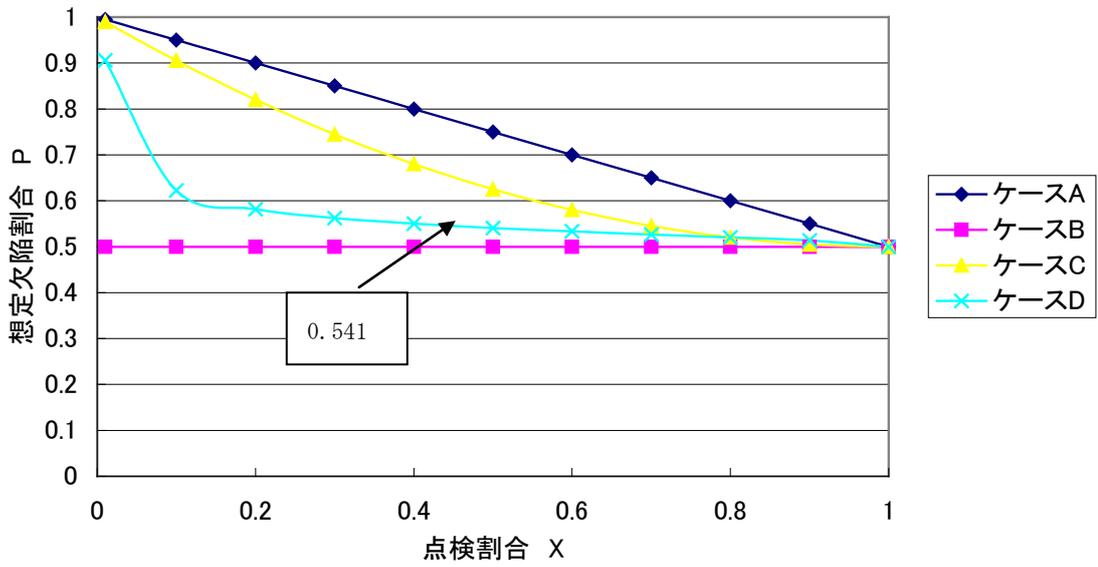


図 G-5 (3) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.5)

想定欠陥割合(点検欠陥比率 $\gamma=0.8$)

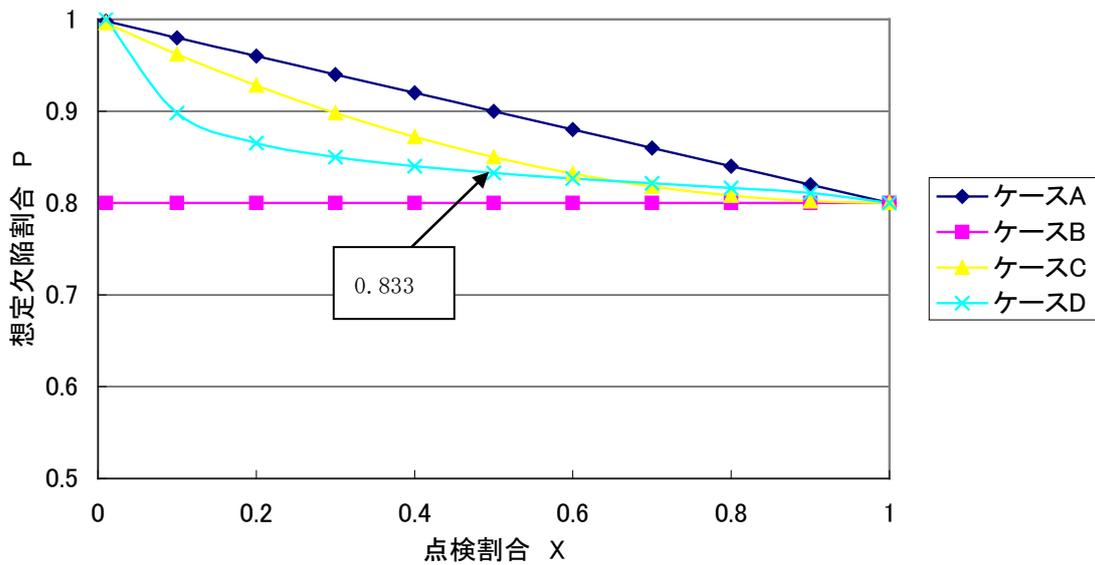


図 G-5 (4) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.8)

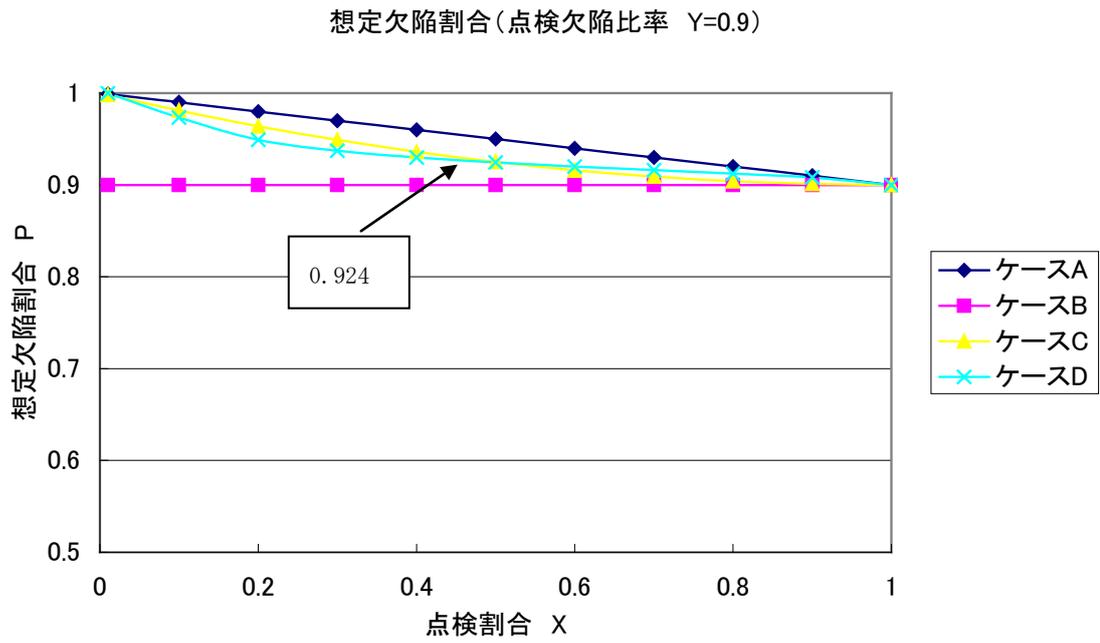
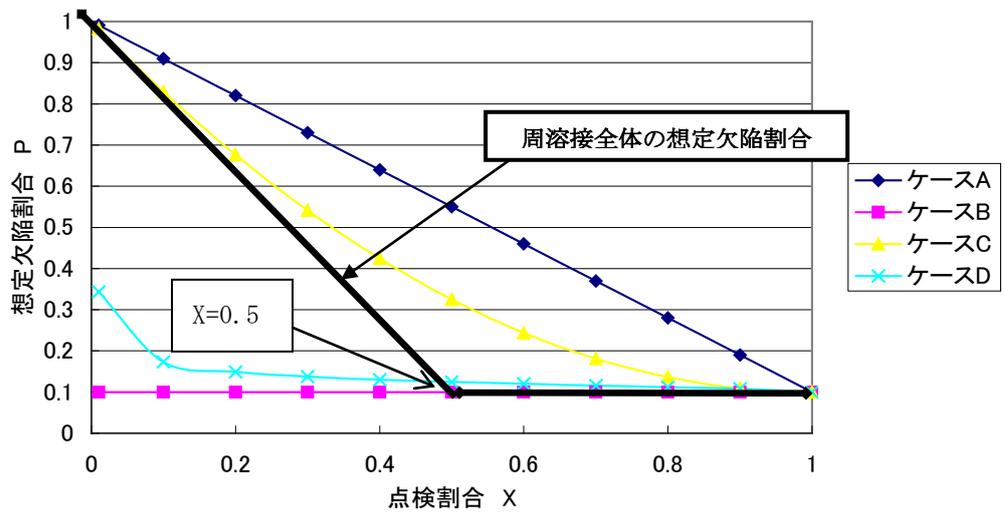
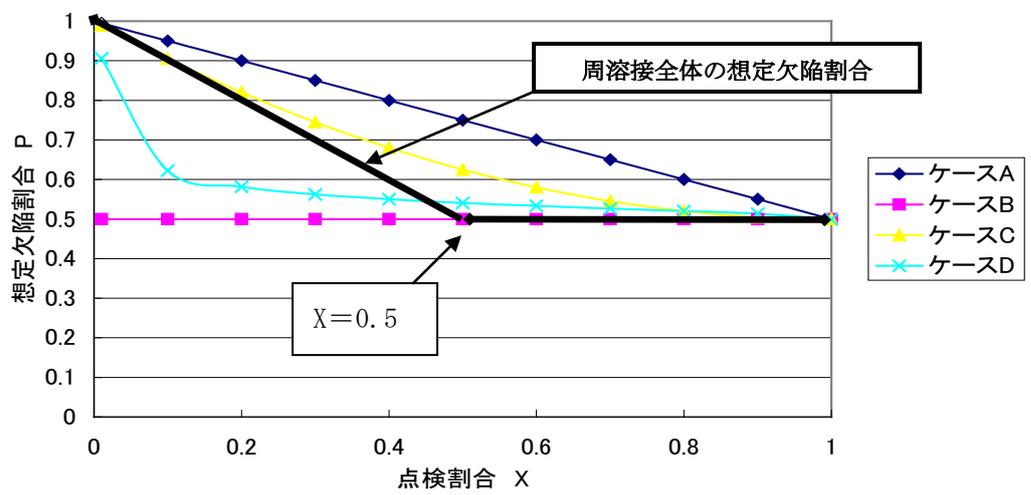


図 G-5 (5) 周溶接全体の想定欠陥割合の比較 (点検欠陥比率 0.9)

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 $Y=0.8$)

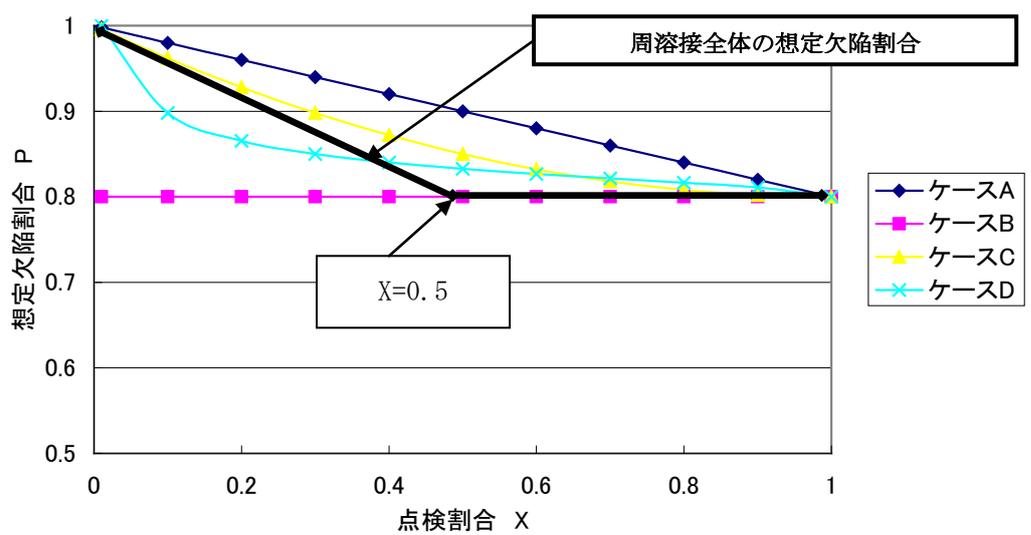


図 G-6 点検割合に応じた周溶接全体の想定欠陥割合

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。

- ・ シュラウド周継手 板厚の 50% 深さの亀裂
- ・ シュラウド縦継手 板厚の 90% 深さの亀裂

(3) S2 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 S2 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 1.7mm 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 7.2mm が生じることから、この変位量を、炉心支持板位置およ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-1, 2参照)

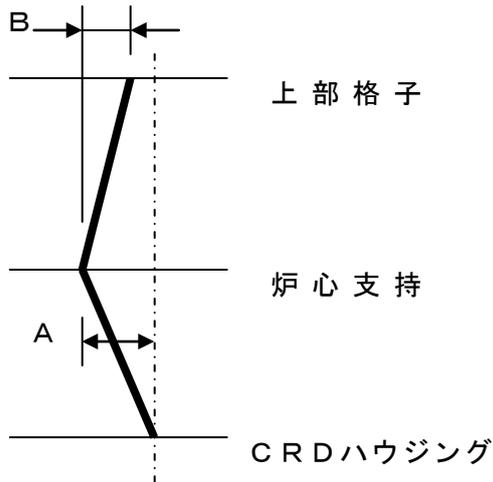


表 H-1 解析のケース (単位: mm)

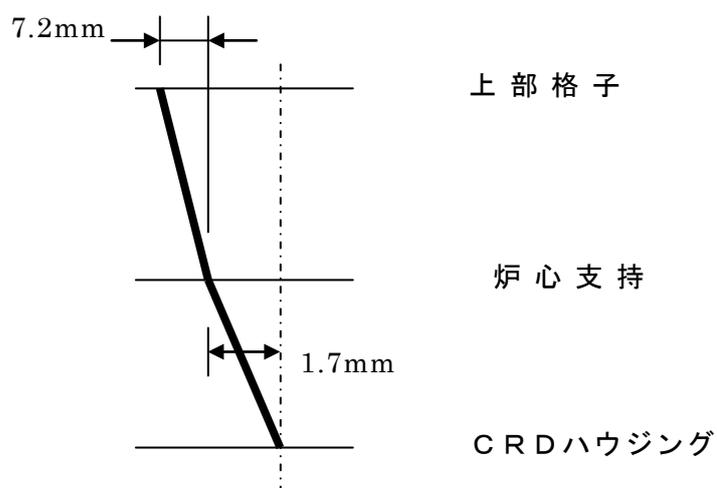
	ケース 1	ケース 2	ケース 3
A	3.6	7.1	10.9
B	2.4	5.8	9.6

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

(1) 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1.7mm、炉心支持板と上部格子板のミスアライメント量は7.2mm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、S2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。



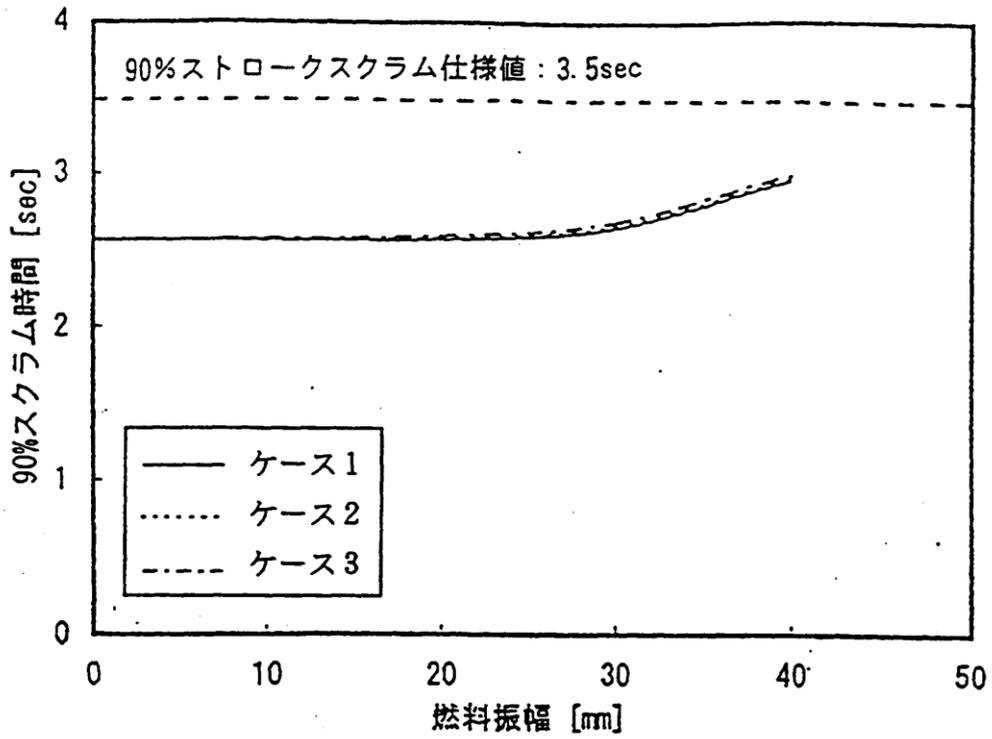


図 H-1 地震時挿入性解析結果

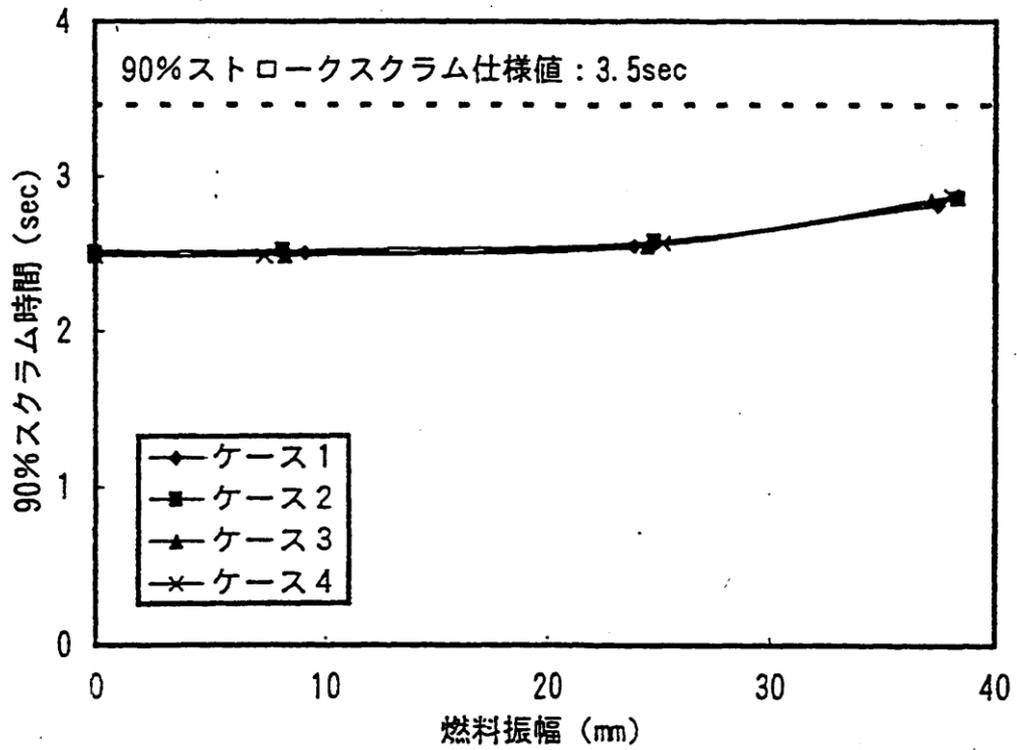


図 H-2 地震時挿入性試験結果

付録 I 実機プラントでの点検及び評価結果

1. 概 要

現在、炉心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炉心シュラウドの亀裂進展評価と点検実績

炉心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-1～12 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され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 炉心シュラウドの周方向溶接継手のひび割れの点検実績および評価例

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	H7 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
	H7 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
	H7 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。

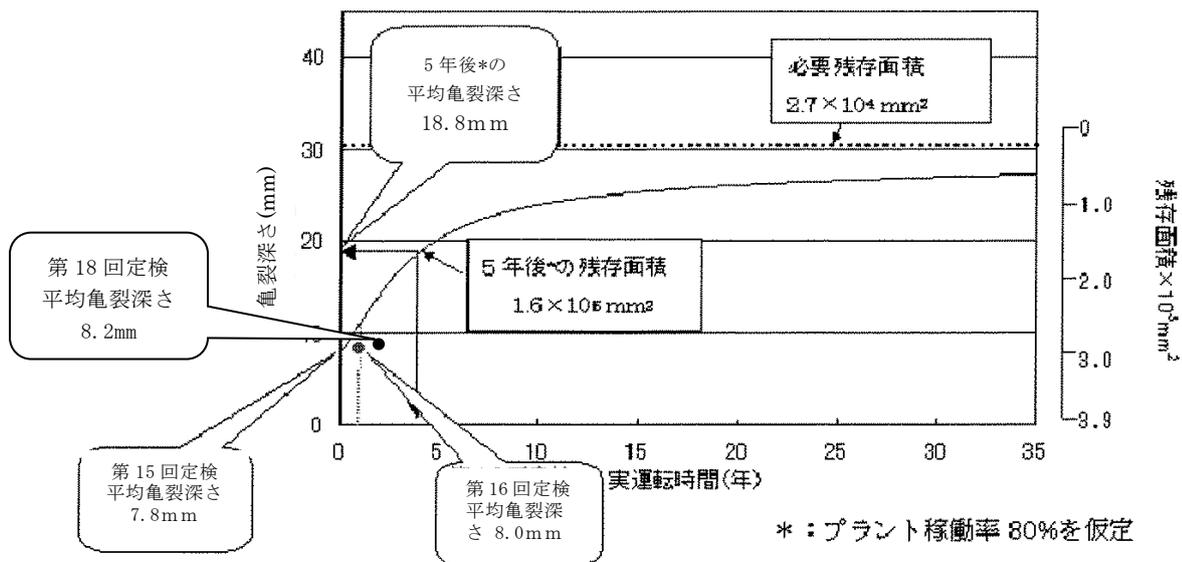


図 I-1 女川原子力発電所第 1 号機 H2 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

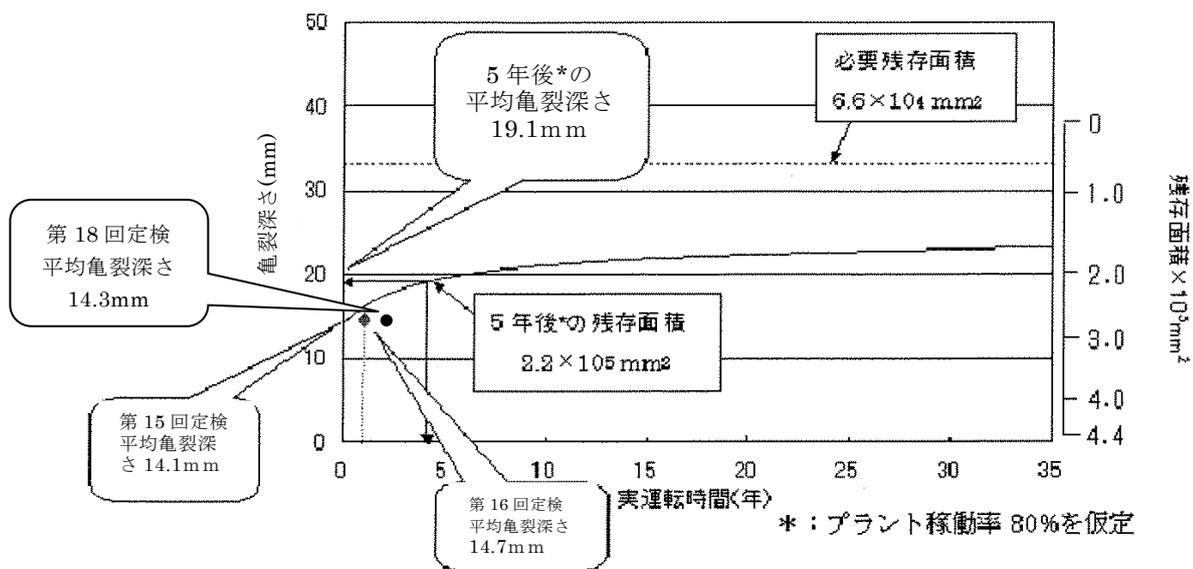


図 I-2 女川原子力発電所第 1 号機 H6a 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

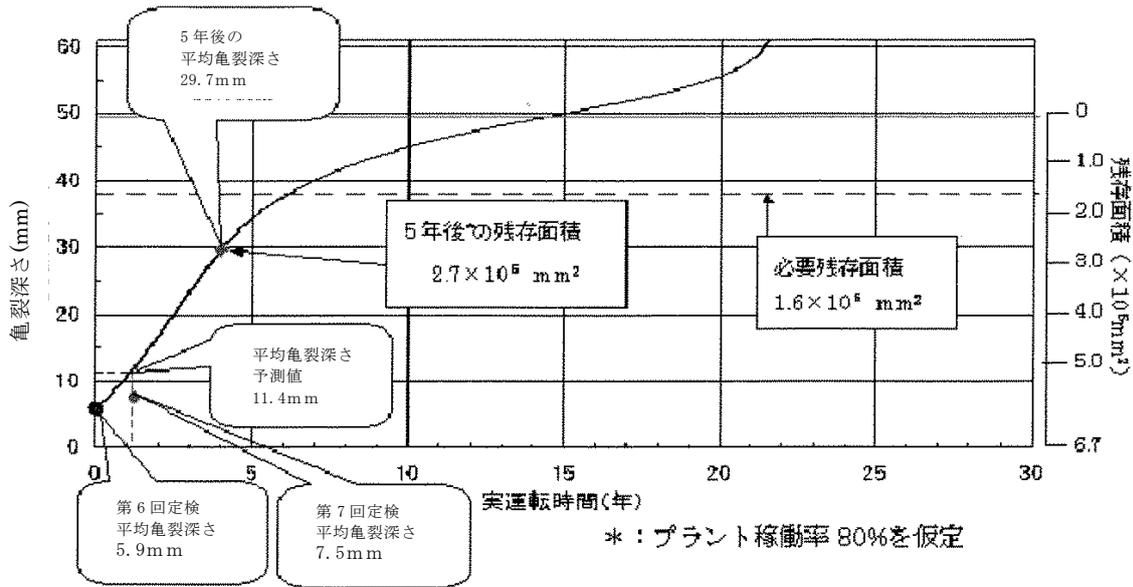


図 I-3 女川原子力発電所第2号機 H7a 内側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

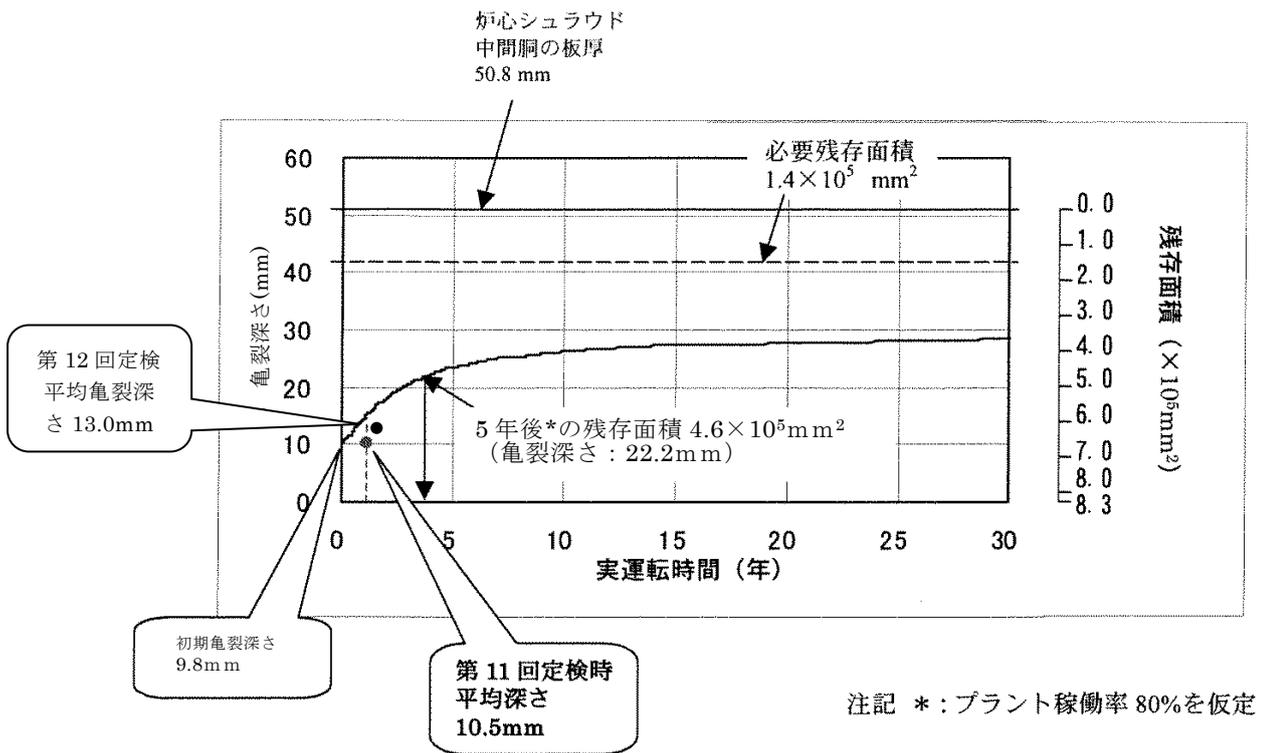


図 I-4 柏崎刈羽原子力発電所第2号機 H6a 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

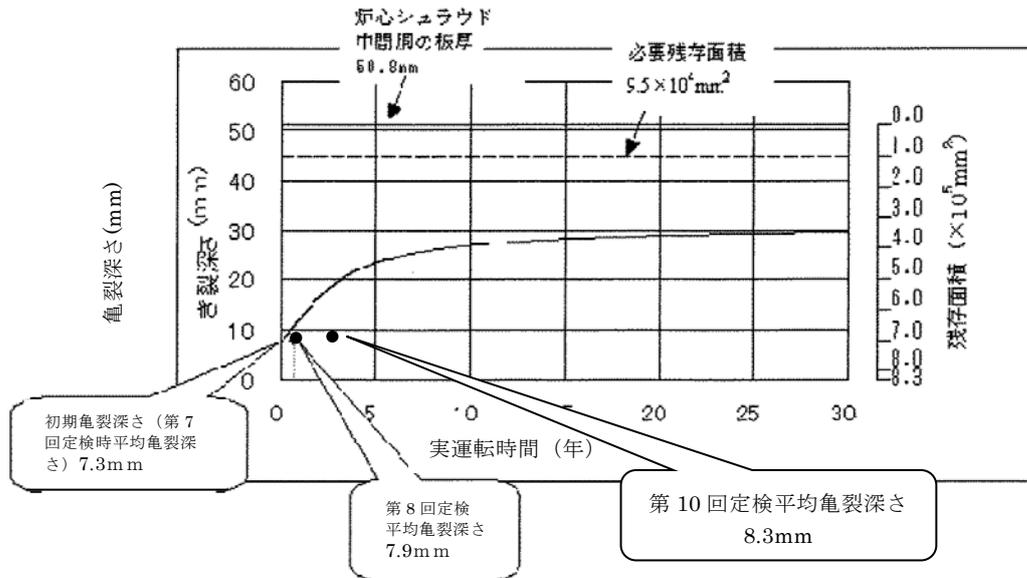


図 I-5 柏崎刈羽原子力発電所 第3号機 H6a 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)

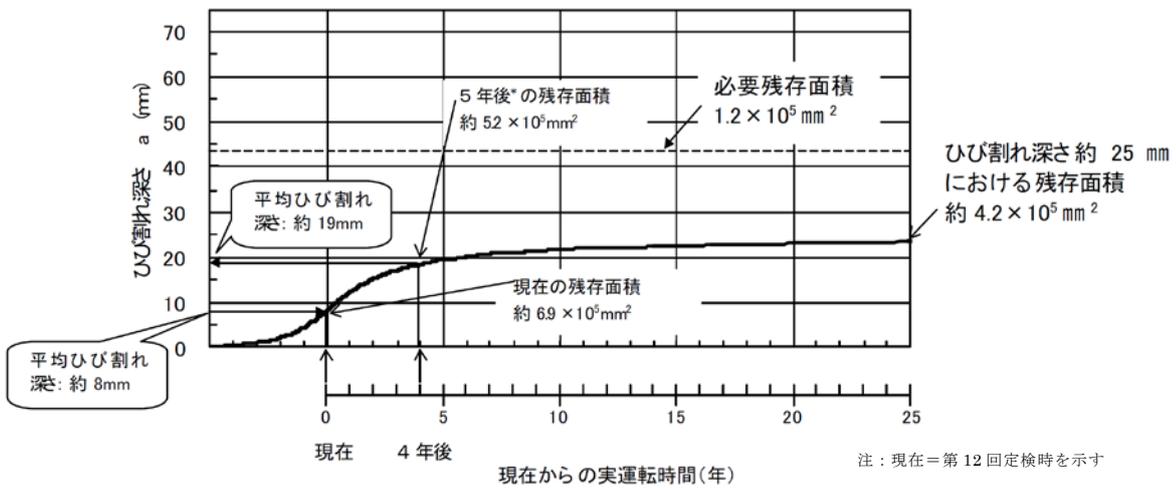
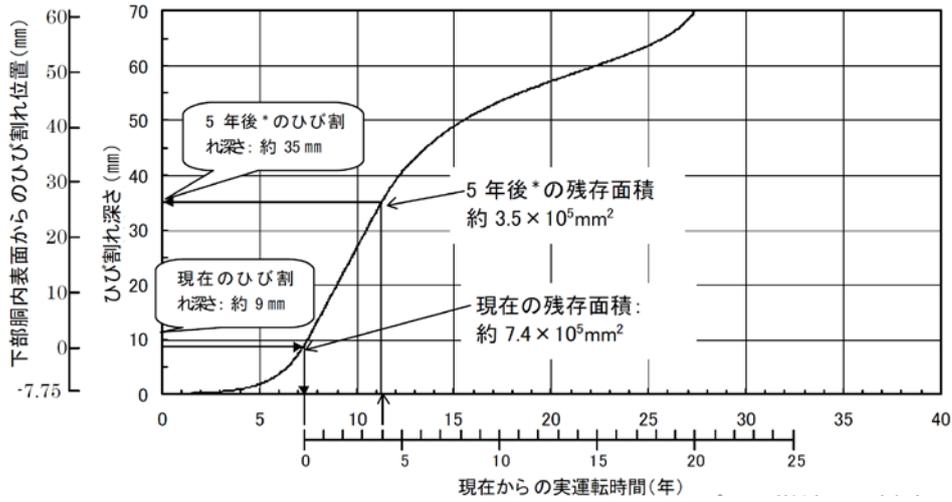
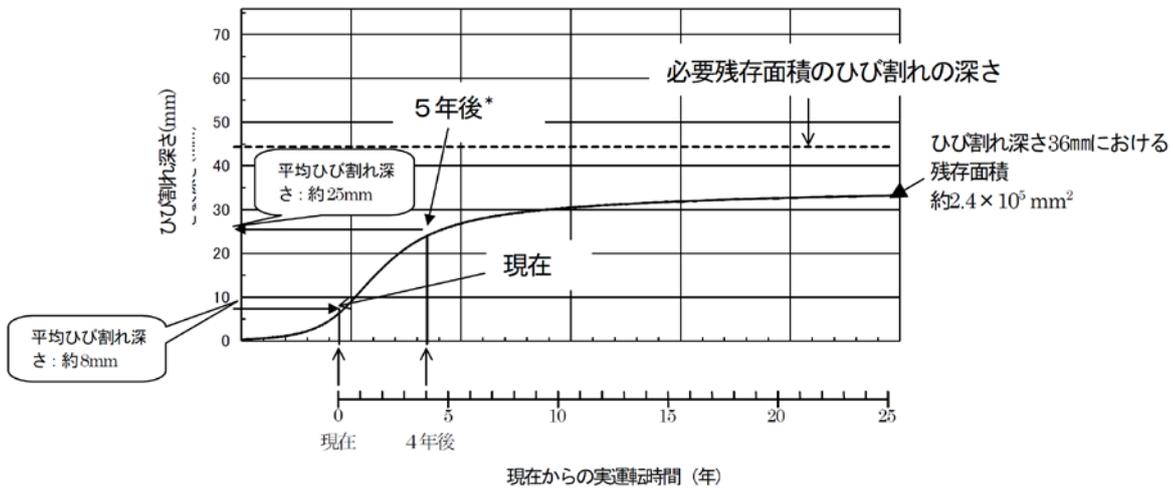


図 I-6 浜岡原子力発電所第3号機 H6a 外側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)



注：現在＝第12回定検時を示す

図 B-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 B-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）

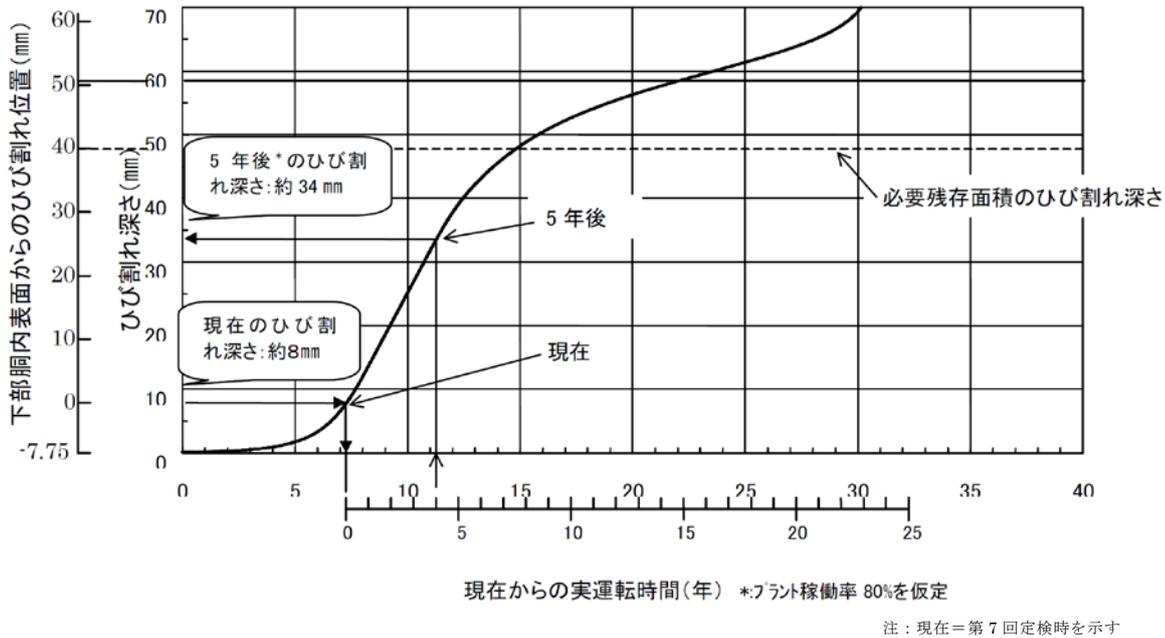
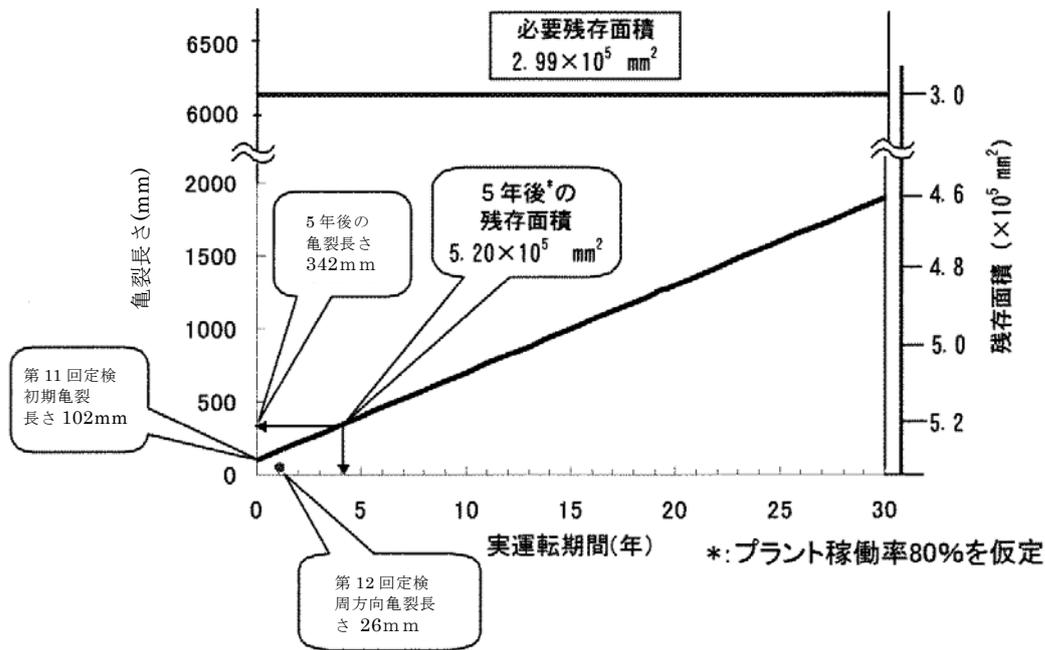


図 B-9 浜岡原子力発電所第 4 号機 H7a 内側 (リング) の亀裂進展 (評価と実績)



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)

付録 J 支持ロッドの構造・機能と補修後の点検及び損傷評価

1. はじめに

万一、シュラウド溶接部に亀裂が検出され補修が必要と判断された場合、実機適用実績のある機械的補修技術には、ブラケット工法と支持ロッド工法等がある。

ブラケット工法は、シュラウド周溶接部をはさむ上下の胴部を、ブラケットを介してボルト締結する工法で、海外で適用実績のほか 1F-2 号機で適用実績がある。

また、支持ロッド工法は、海外プラントで多くの適用実績があり、国内においても 5 プラントの適用実績がある。ここでは支持ロッドの機能と点検及び評価についてまとめた。

2. 炉心シュラウド支持ロッドの機能

炉心シュラウド支持ロッド（以下支持ロッドと略す）は、炉心シュラウドの周方向溶接線の構造強度に関係なく炉心シュラウドの機能を維持することを目的として設置する構造物である。

支持ロッドは、炉心シュラウドの外側に設置され、主に炉心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、炉心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。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炉心シュラウドの浮き上がり防止と、地震時の炉心シュラウドの転倒防止及び水平荷重の支持をする機能を有している。

日本国内に設置された支持ロッドは、構造の違いにより 3 つの形式に分類される。3 つの形式の構造比較を表 J-1 に、それぞれのタイプの構造概要を図 J-1～3 に示す。

表 J-1 炉心シュラウド支持ロッドの構造比較（日本国内用）

		タイプ-A	タイプ-B	タイプ-C
タイロッド本数		4	4	4
設置方位		75°, 165°, 255°, 345°	45°, 135°, 225°, 315°	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 70mm	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)
	上部ブラケット ／上部サポート	SUSF316L	GXM1 相当 (XM-19)	NCF750 相当 (X-750)
材 料	上部レストレント ／上部ウェッジ	SUSF316L	GXM1 相当 (XM-19)	GXM1 相当 (XM-19)
	タイロッド	GXM1 相当 (XM-19)	NCF750 相当 (X-750)	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	SUSF316 相当 (F316)	GXM1 相当 (XM-19)
	Tアダプタ／トグル	GXM1 相当 (XM-19)	NCF750 相当 (X-750)	NCF750 相当 (X-750)
	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 (クロスビームで 結合)	プレートタイプ
構造	Tアダプタ／トグル	Tバータイプ	トグルタイプ	トグルタイプ

<タイプ-A>

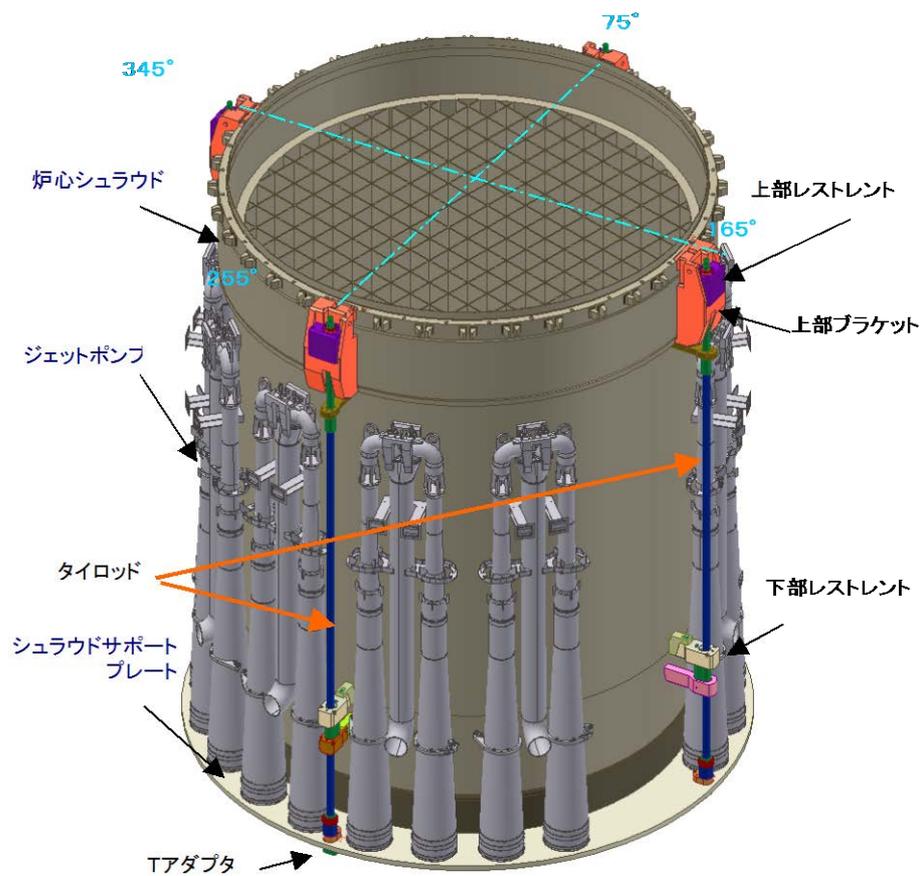


図 J-1 支持ロッド (タイプ-A) ¹⁾

<タイプ-B>

[シュラウド方位 45°、135°、225°、315° の4箇所を設置]

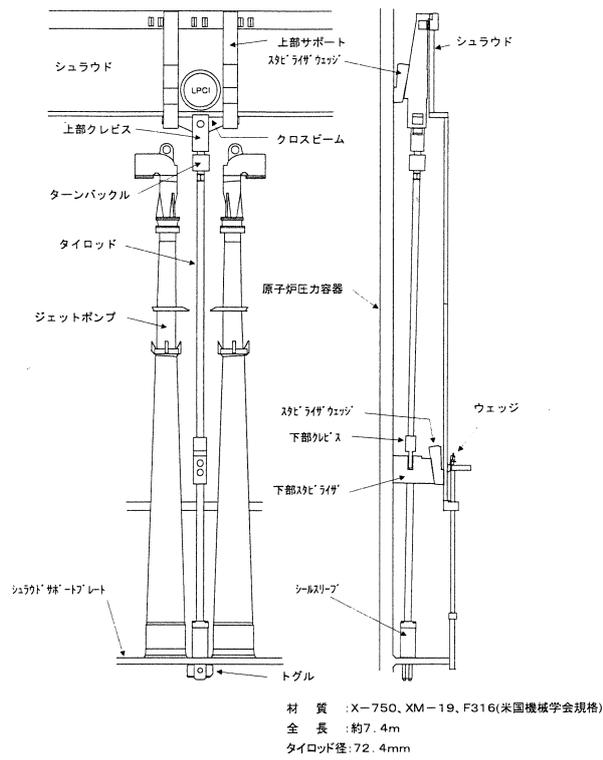


図 J-2 支持ロッド (タイプ-B) ²⁾

<タイプ-C>

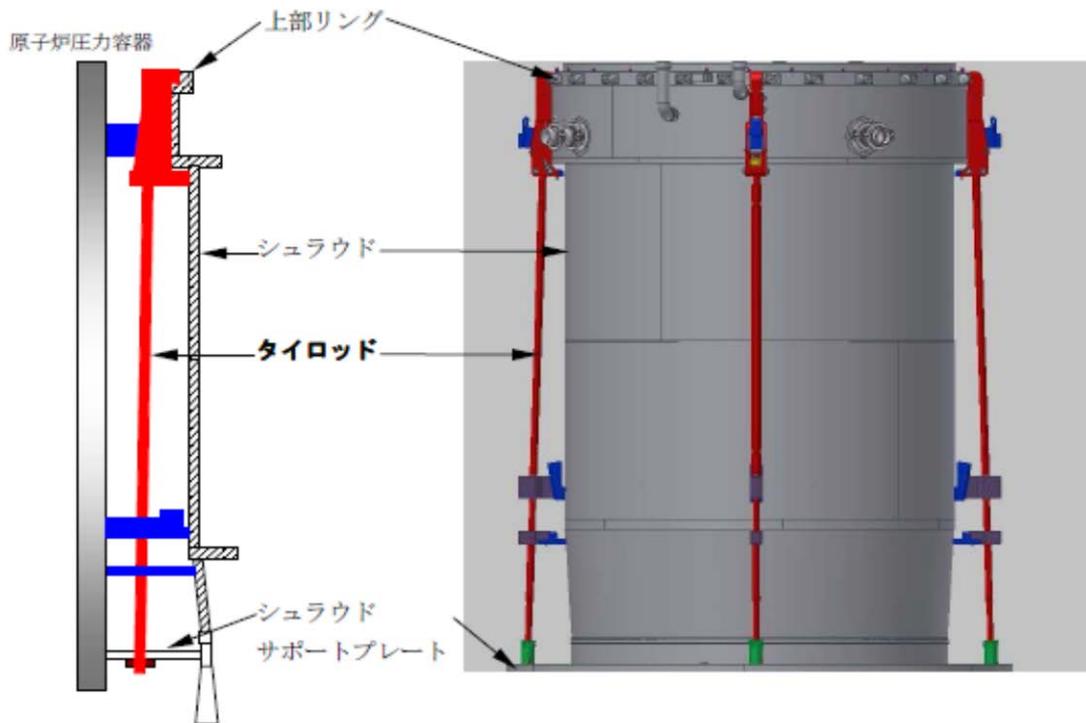


図 J-3 支持ロッド (タイプ-C) ³⁾

2. 支持ロッドの点検箇所为例

支持ロッドの機能維持を確認するための点検箇所の例を図 J-4 に示す。(特記以外は VT-3)

- ・ 上部ブラケット (上部サポート) 取付け部
付け根 (MVT-1)
- ・ 全体の外観状況及び脱落の確認
- ・ タイ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) と炉心シ
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) と炉心シ
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
炉心シュラウドとの取合い位置の確認
- ・ Tアダプタ (トグル) 取付け部 (Tアダプタ
取付け部付け根またはトグルクレビス)
(MVT-1)

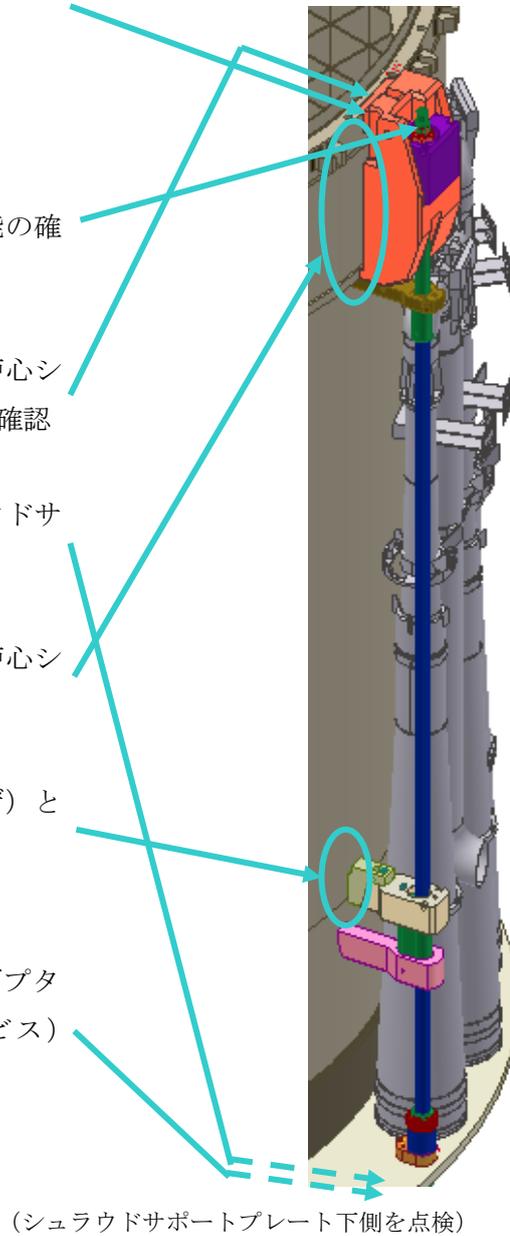


図 J-4 支持ロッド点検箇所の例

3. 支持ロッドの損傷ポテンシャル

支持ロッドの損傷ポテンシャル分析結果を図 J-5 に示す。

支持ロッドは、溶接部の存在しない構造を採用しており、図 J-5 に示すように、想定される損傷要因に対する評価により、損傷ポテンシャルは十分低いと評価される。

しかしながら、国外においてニッケル基合金(A1loyX-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ことや、国内炉心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、定期的に個別点検を実施する。

炉心シュラウド支持ロッドの損傷ポテンシャル		評価方法	評価結果	判定	備考
材料欠陥	材料不良	・材料証明書の確認	・炉心シュラウド支持ロッドで使用している材料は、材料不良が無いこと(熱処理含む)を材料証明書で確認しており、材料欠陥の問題はない。	○	
溶接欠陥		—	・炉心シュラウド支持ロッドには溶接部は存在しない。	○	
腐食		—	・炉心シュラウド支持ロッドで使用している材料は、SUS316L、SUSF316L、XM-19(GXM1相当)、X-750(NCF750相当)であり、豊富な使用実績があるため、BWR炉水環境中で全面腐食が問題となることはない。	○	
疲労	プラント運転事象による低サイクル疲労	・告示501号/設計・建設規格に基づく評価	・炉心シュラウド支持ロッドは、著しい温度変動及び機械的荷重変動にさらされないことから、疲労評価不要の規定を適用して評価を実施した結果、運転事象による低サイクル疲労は問題ない。	○	添付0-1
	流体振動による高サイクル疲労	・機械学会基準による評価	・機械学会基準「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」に基づき、同期振動及び流れの乱れによるランダム振動に対する評価を実施した結果、流体振動による高サイクル疲労は問題ない。	○	添付0-2
応力腐食割れ		・IGSCCに対する評価	・SUS316L、SUSF316L及びXM-19は、耐IGSCC性に優れた材料であり、支持ロッドには溶接部が無いことから、IGSCCの発生する可能性は低い。 ・X-750は、BWR炉水環境中において高応力下でSCC感受性を示すが、適切な熱処理を施し、応力管理することにより、優れたSCC性を示す。 ・しかし、国外でX-750製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ことや国内で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から、定期的に個別点検を実施する。	△	付録A
		・IASCCに対する評価	・炉心シュラウド支持ロッド近傍の中性子照射量を評価した結果、60年でIASCCのしきい値となる照射量に達しないことから、IASCCの考慮は不要である。	○	添付0-3

○:ポテンシャルなし
△:要検討(定期的に点検)
×:ポテンシャルあり

図 J-5 支持ロッド損傷ポテンシャル分析表

参考資料 J-1 支持ロッドのプラント運転事象による低サイクル疲労評価

支持ロッドの設計においては、日本機械学会 設計・建設規格等に基づき、プラント運転事象による低サイクル疲労に対する評価を実施する。以下に、国内 1100MWe BWR に設置された支持ロッドにおけるプラント運転事象による低サイクル疲労に対する評価例を示す。

支持ロッドは炉心シュラウド外周部の同一の温度領域内に設置されていることから、構成部品内に生じる温度勾配は小さく、温度差による発生応力は無視しうる程度に小さいため、支持ロッドのプラント運転事象による低サイクル疲労評価においては、機械的荷重変動による評価を実施する。

当該プラントの支持ロッド構成部品に対応する疲労限である 93.7MPa（設計疲労線図*の 10^{11} 回に対応するピーク応力強さ）を越える機械的荷重変動の設計上の想定回数は、起動－停止及びスクラムを合わせた 310 回であり、これに対応する許容変動応力は設計疲労線図より 1190MPaとなる。一方、支持ロッドに発生する機械的荷重変動による応力は 120MPa程度であり、上記 1190MPaより小さい。

以上より、支持ロッドがプラント運転事象による低サイクル疲労で破損することは無いと評価されている。

注記 *：設計段階の評価であるため、設計疲労線図を用いる。

参考資料 J-2 支持ロッドの流体振動による高サイクル疲労

支持ロッドに原子炉圧力容器と炉心シュラウド間のアニュラス部の流れにより励起される振動が発生しないことを確認するために、1100MWe BWR を例に、日本機械学会基準「配管内円柱状構造物の流力振動評価指針」に基づいて同期振動の可能性と流れの乱れによるランダム振動に対する評価を実施した結果を以下に示す。また、国内外におけるジェットポンプセンシングラインの損傷事象の原因と推定されている PLR ポンプ羽切り脈動との共振による疲労破損に対する検討した結果も合わせて示す。

1. 同期振動の可能性

対称渦を伴う自励振動および交互渦（カルマン渦）によるロックイン振動の発生の有無を評価する。すなわち、タイロッドの1次固有振動数 f_0 は約 7Hz でありタイロッドが設置されるアニュラス部の平均流速 \bar{V} は 0.5m/sec 以下であると想定されるため、換算流速 V_r は、タイロッドの直径 d_0 = 約 80mm から下記のように 1 以下となり、同期振動は発生しない。

$$V_r = \frac{\bar{V}}{f_0 \cdot d_0} = 0.9 < 1$$

2. 流れの乱れによるランダム振動による応力

機械学会基準に従い、流れの乱れによるランダム振動による応力を算出すると、約 2 MPa であり、タイロッドの疲労限（147 Mpa 程度）に比較して十分小さくランダム振動によってタイロッドが破損することはない。

3. 圧力脈動との共振による疲労

タイロッドの固有振動数と原子炉再循環ポンプの羽切り圧力脈動の周波数とを比較して、共振の可能性を検討した。

定格運転範囲の圧力脈動周波数は約 100～約 140Hz であることから、下表に示すようにタイロッドは一般的に発生応力の高くなる低次モードにおいて、通常運転中に原子炉再循環ポンプの圧力脈動と共振することはない。

	1次	2次	3次	4次
タイロッドの固有振動数 [Hz]	約 7	約 20	約 45	約 73

以上より、支持ロッドが流体振動による高サイクル疲労で破損することは無いと考えられる。

参考資料 J-3 支持ロッドの IASCC の可能性について

支持ロッドの IASCC の可能性について検討した結果を以下に示す。

1100MWe BWR を対象に、2次元輸送計算コード (DOT 3.5) により、炉内近傍の高速中性子束分布 ($E > 1\text{MeV}$) を評価した。評価結果を表 J-3-1 に示す。

供用期間を 60 年と仮定した場合の支持ロッド各部の中性子照射量は、SUS304 の IASCC 発生のしきい値とされる $5 \times 10^{24} (\text{n}/\text{m}^2)$ に比べて十分に小さいことから、IASCC の考慮は不要である。

表 J-3-1 支持ロッドの IASCC 評価

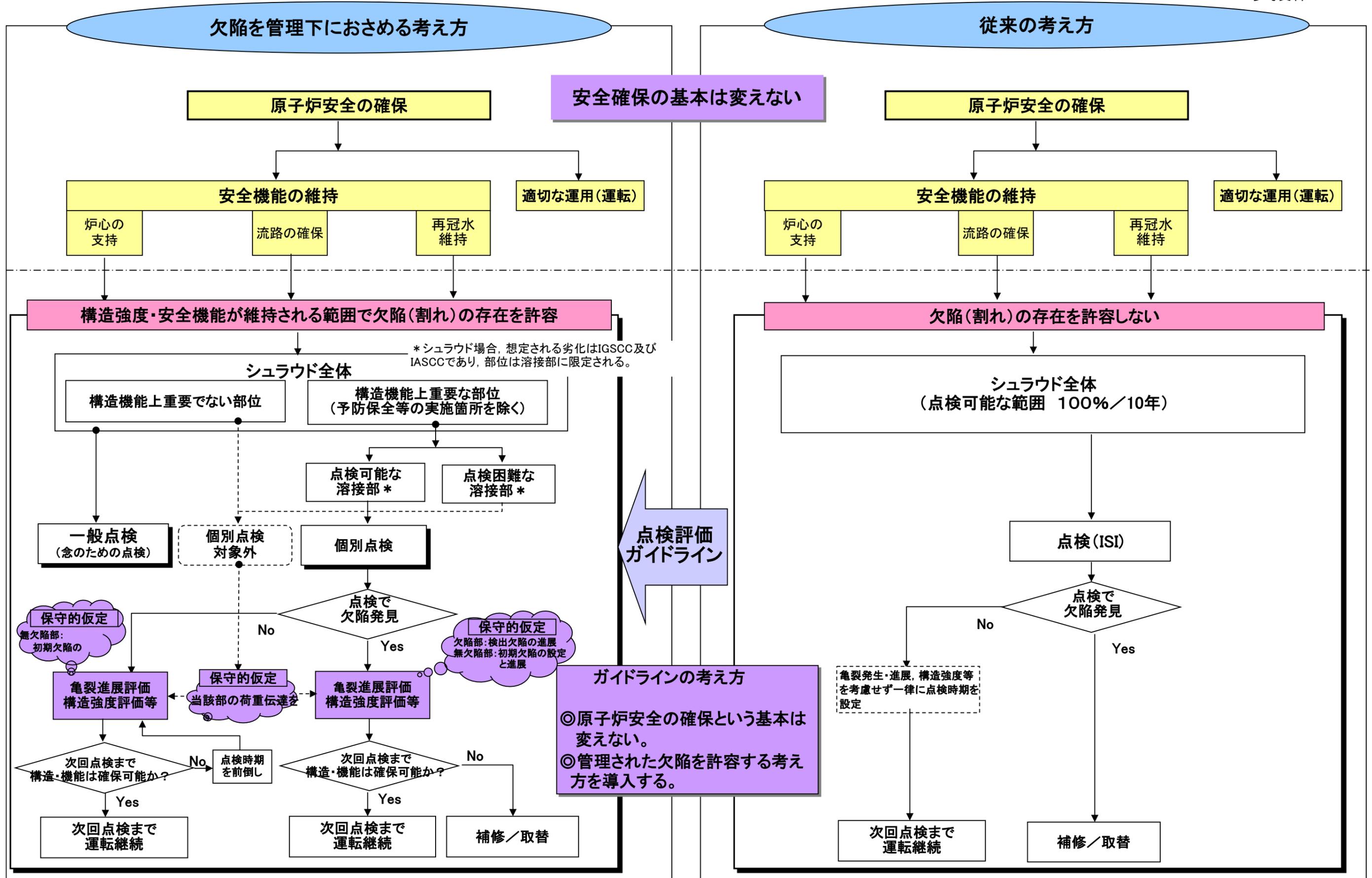
部 位	中性子束 ($\text{n}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	中性子照射量 $5 \times 10^{24} (\text{n}/\text{m}^2)$ となる年数*	供用 60 年* の 照射量 (n/m^2)	IASCC 考慮 必要性の有無
支持ロッド上部 (H2 溶接部近傍)	約 3×10^{14}	約 7×10^2	約 5×10^{23}	無
支持ロッド中央部 (炉心中央高さ)	約 4×10^{14}	約 5×10^2	約 6×10^{23}	無
支持ロッド下部 (H6a 溶接部近傍)	約 3×10^{13}	約 7×10^3	約 5×10^{22}	無

注記 * : プラント稼働率 80% と仮定

(参考文献)

- 1) 東芝型シュラウドタイロッドによる炉心シュラウド修理工事について (松永他, 平成 17 年度 火力原子力発電大会研究発表要旨集, 平成 17 年 10 月)
- 2) 東北電力ホームページ 女川原子力発電所第 2 号機第 7 回定期検査報告書の公開について (平成 17 年 7 月 13 日)

BWR炉内構造物点検評価ガイドライン(シュラウド)の考え方



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、制御棒挿入製、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、渦流探傷試験にて実施する。
- 目視検査では1mil (0.025mm) 幅のワイヤの識別が可能な条件で実施する。
- 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。

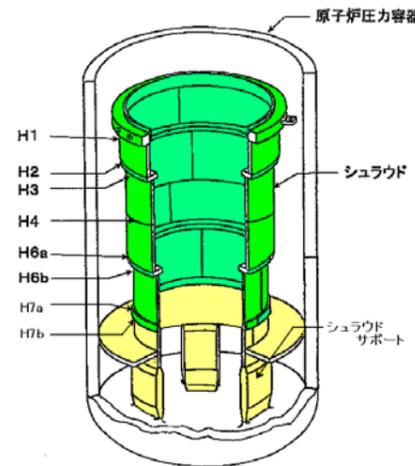


図1 シュラウドの構造

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）

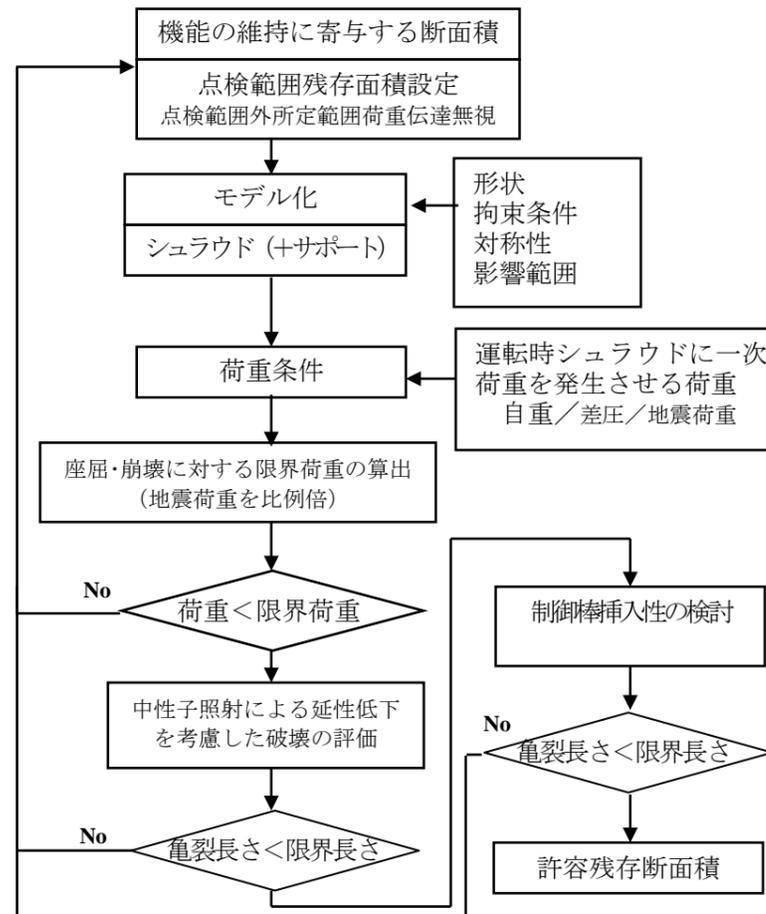


図2 許容残存断面積の算出フロー

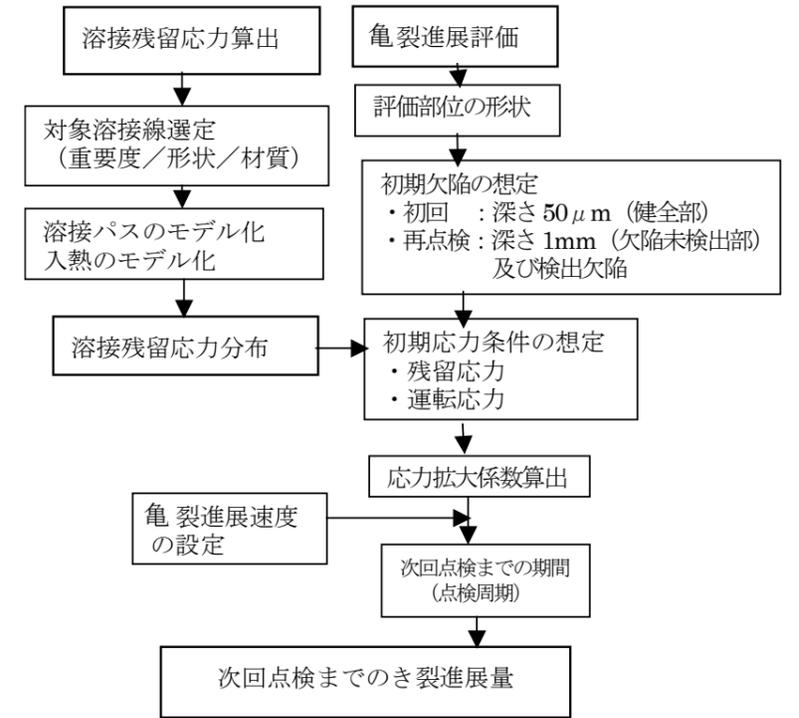


図3 亀裂進展量算定の手順

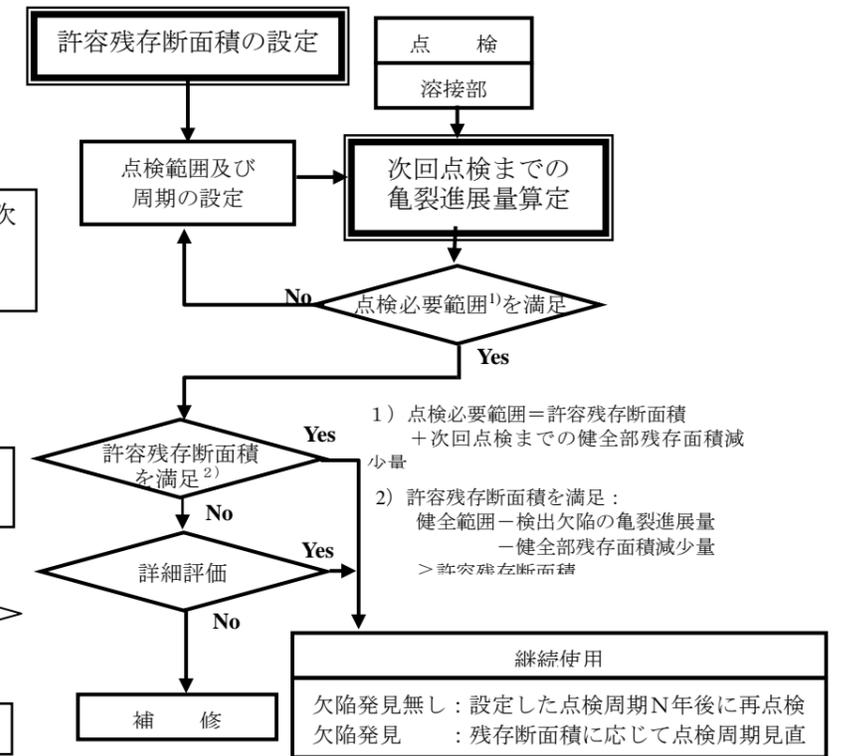


図4 シュラウドの点検の考え方

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。

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン
[炉心シュラウド]
(第5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，2015

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。