

# BWR炉内構造物点検評価ガイドライン

[CRDハウジング]

(第3版)

平成26年12月

一般社団法人 原子力安全推進協会

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

## はじめに

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

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26年12月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会  
委員長 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：CRDハウジング

改訂年月	版	改訂内容	備考
平成14年7月	初版発行		
平成16年1月	第2版発行	週方向亀裂進展挙動の評価結果を反映	
平成26年12月	第3版発行	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 26 年 12 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	須澤 克則	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

## [CRDハウジング]

### 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
第3章 点検及び評価	
3.1 点検方法	3
3.1.1 試験手法	3
3.1.2 点検必要範囲及び点検実施時期	3
3.2 評価	4
3.3 点検フロー	4
解説	
解説 1-1 ガイドライン制定の目的	6
解説 1-2 本ガイドラインの適用にあたって	6
解説 2-1 原子力安全の確保	6
解説 2-2 想定される経年変化事象	6
解説 2-3 点検対象の選定方針	7
解説 2-4 耐応力腐食割れ性	7
解説 2-5 点検対象	8
解説 3-1 渦流探傷試験	8
解説 3-2 点検方法	10
解説 3-3 SCC 予防保全技術	11
解説 3-4 補修技術	12
付録	
付録 A CRD ハウジング構造図	
付録 B SCC 亀裂進展速度式	
付録 C CRD ハウジング溶接部の残留応力評価	
付録 D CRD ハウジング溶接部の SCC 亀裂進展評価	
付録 E CRD ハウジングの強度評価	

付録 F CRDハウジング圧力境界部からの漏えいの影響評価

付録 G SCC 予防保全技術

付録 H 補修技術

#### 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 [CRD ハウジング] の考え方

参考資料 2 BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [CRD ハウジング] 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、炉内構造物に要求される安全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 1-1）

### 1.2 適用

本ガイドラインは、炉内構造物のうち、CRDハウジングに適用する。ガイドラインの適用時期は、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、原子炉の安全性確保を基本とする。（解説 2-1）
- (2) CRDハウジングの経年変化事象として、応力腐食割れ（SCC）を想定する。（解説 2-2）
- (3) CRDハウジングの各部位の機能を評価し、CRDハウジングの機能上重要な部位を点検対象として選定する。（解説 2-3）
- (4) 材料としては、国内プラントで用いられているすべての材料を対象とする。（解説 2-4）

### 2.2 点検対象部位

ハウジング/スタブチューブ溶接部、スタブチューブ/下鏡溶接部、及びハウジング/フランジ溶接部（図 2.2-1）を点検対象部位とする。（解説 2-5）

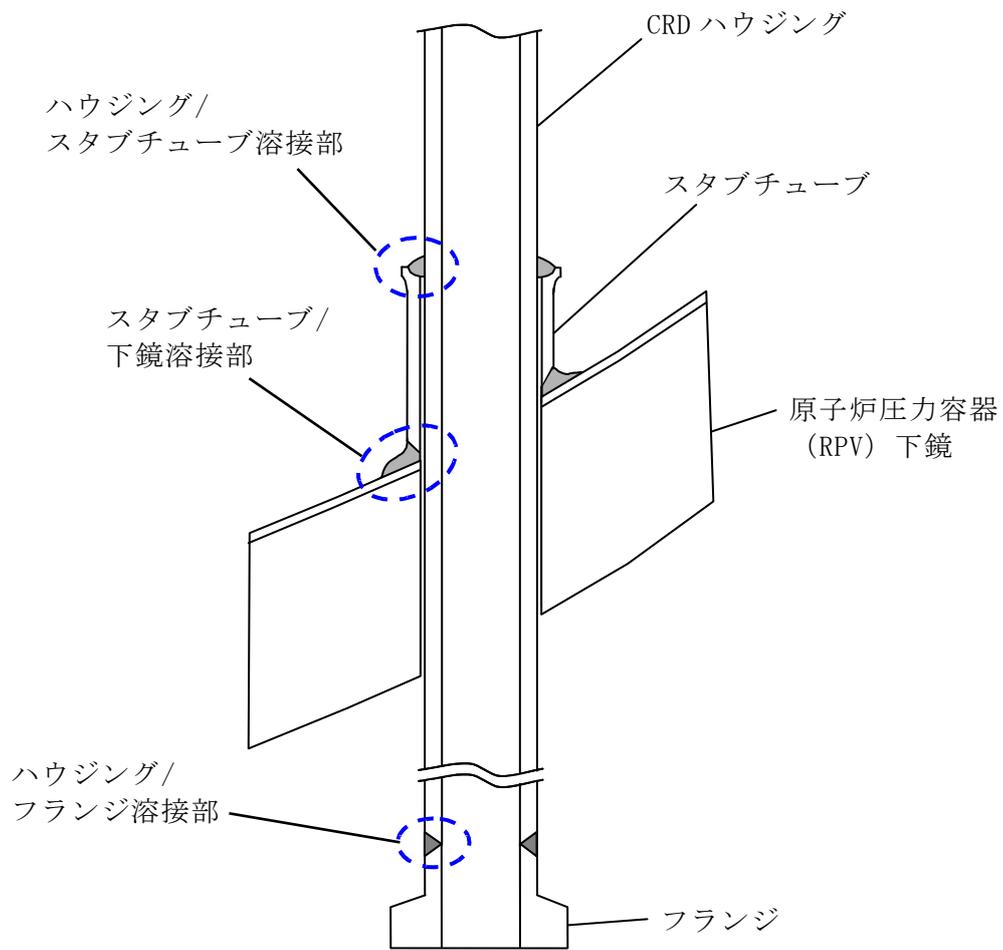


図 2.2-1 CRD ハウジングの点検対象部位

## 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

点検に適用する非破壊試験は、目視試験、浸透探傷試験、超音波探傷試験、渦流探傷試験又は放射線透過試験とする。

##### (2) 目視試験 (VT)

###### a. VT-2

漏えい試験において、耐圧部からの漏えいを検出する。

###### b. MVT-1

表面に開口している欠陥を検出するために行う試験であり、0.025mm 幅のワイヤの識別ができることを確認する。必要に応じて、クラッド除去等の表面処理を行う。

###### c. レプリカ法

表面を直接目視観察した結果と同等以上の分解能を有する表面レプリカ法は、MVT-1 試験に用いてもよい。

##### (3) 浸透探傷試験 (PT)

浸透探傷試験は、日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格に適合した手法を用いて実施してよい。

##### (4) 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、これに類する手法等を用いて実施してもよい。

##### (5) 渦流探傷試験 (ET)

渦流探傷試験は、JEAG 4217「原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針」に準拠して実施するか、若しくはこれに類する手法を用いて実施してよい。(解説 3-1)

##### (6) 放射線透過試験 (RT)

放射線透過試験は、日本機械学会 発電用原子力設備規格 溶接規格に適合した手法を用いて実施してよい。

#### 3.1.2 点検範囲及び点検実施時期

各部位に適用する点検手法及び点検範囲を、表 3.1-1 に示す。(解説 3-2)

##### (1) ハウジング/スタブチューブ溶接部

供用開始後暦年で 25 年以降の毎定検時に、全数を VT-2 により点検する。

##### (2) スタブチューブ/下鏡溶接部

供用開始後暦年で25年以降の毎定検時に、全数をVT-2により点検する。

(3) ハウジング/フランジ溶接部

供用開始後暦年で25年以降の毎定検時に、全数をVT-2により点検する。

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3-3)

表3.1-1 各部位の点検手法及び点検範囲

点検対象	点検手法 <sup>1)</sup>	点検部位	点検範囲
ハウジング/ スタブチューブ溶接部	VT-2	溶接部	全数
スタブチューブ/下鏡溶接部	VT-2	溶接部	全数
ハウジング/フランジ溶接部	VT-2	溶接部	全数
1) 必要に応じて、他の点検手法による点検を実施しても良い。			

3.2 評価

下記の判定基準により点検の結果を評価する。

(1) ハウジング/スタブチューブ溶接部

- ① 漏えいがないことが確認された場合には、継続使用できる。
- ② 漏えいが検出された場合は、損傷の影響を評価し、補修等の措置を行う。

(2) スタブチューブ/下鏡溶接部

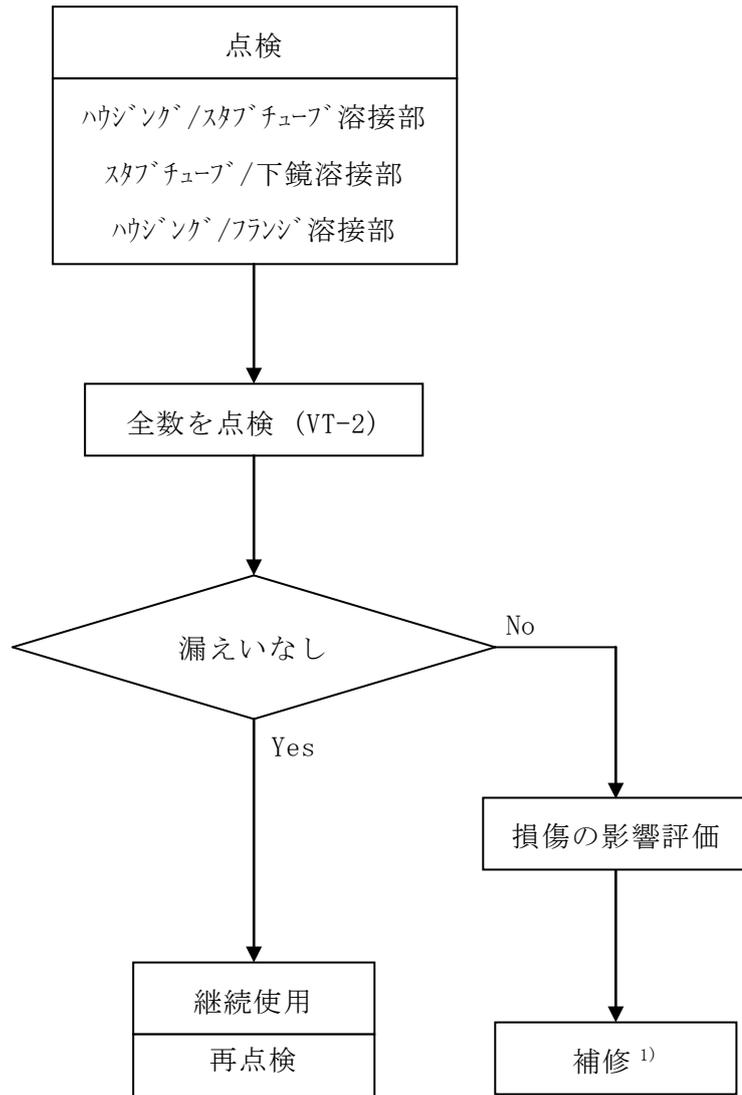
- ① 漏えいがないことが確認された場合には、継続使用できる。
- ② 漏えいが検出された場合は、損傷の影響を評価し、補修等の措置を行う。

(3) ハウジング/フランジ溶接部

- ① 漏えいがないことが確認された場合には、継続使用できる。
- ② 漏えいが検出された場合は、損傷の影響を評価し、補修等の措置を行う。

3.3 点検フロー

3.1項及び3.2項に従ったCRDハウジングの点検フローを図3.3-1に示す。



1) 解説 3-4 参照

図 3.3-1 CRD ハウジングの点検フロー

### (解説 1-1) ガイドライン制定の目的

炉内構造物の点検では、構造上、点検装置の接近を制約する範囲が大きいことから、随時、最新の知見と技術を反映し、点検技術の向上に努めてきている。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。学協会規格は新知見反映等の理由で定期改訂されるため、利用者は最新版の適用可否を確認するとともに、原子力規制庁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「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」により定める設計用基準地震動 $S_s$ 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。

### (解説 2-1) 原子力安全の確保

CRDハウジングは、原子炉の安全性に関わる機能として、炉心支持機能(燃料集合体の鉛直方向荷重の支持)、炉心停止機能(制御棒挿入性の確保)及び冷却材圧力バウンダリ形成機能を有する。したがって、仮にCRDハウジングに欠陥が存在しても、想定した地震荷重に対して、炉心支持機能、炉心停止機能及び冷却材圧力バウンダリ形成機能が維持されることを評価条件とする。

なお、2006年に改定発行された発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針では基準地震動 $S_s$ を用いた評価を行うこととなった。したがって、今後の評価では基準地震動 $S_s$ を用いた評価を実施する必要がある。

### (解説 2-2) 想定される経年変化事象

これまでの損傷事例を考慮し、CRDハウジングの母材及び溶接部の経年変件事象として、応力腐食割れ（SCC）を想定する。疲労に関しては、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（告示 501 号）又は日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格に基づく設計がなされていること、及び先行プラントでの高経年化に関する技術評価で 60 年運転を想定しても有意な事象とならないことから、経年変件事象から除外する。

### （解説 2-3）点検対象の選定方針

CRDハウジングそのものだけでなく、CRDスタブチューブ、CR案内管等の関連した部位も含めて、点検対象を選定する検討対象とする。（付録 A 参照）

これらの各部位が損傷した場合の影響を評価し、原子炉の安全性へ影響を与える可能性のある部位を点検対象とした。地震荷重を想定しても原子力安全へ影響のない部位は、点検対象より除外する。

なお、2006 年に改定発行された発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針では基準地震動  $S_s$  を用いた評価を行うこととなった。したがって、今後の評価では基準地震動  $S_s$  を用いた評価を実施する必要がある。

### （解説 2-4）耐応力腐食割れ性

CRDハウジング及び関連部位の材料には、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304、SUS304L、SUS316L、若しくは SUS316（原子力仕様又は遠心 casting 材、炭素含有量  $\leq 0.03\%$ ）、並びに、600 系のニッケル基合金（JIS NCF600）、若しくは Nb を添加した改良材を使用している。また、ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部には、ニッケル合金の 182 合金（JIS DNiCrFe-3 または ENi6182）、82 合金（JIS YNiCr-3 または SNi6082）、若しくは Nb を添加した改良 182 合金（JIS ENi61823）溶接金属を使用している。

溶接等により鋭敏化を受けた炭素含有量が  $0.03\%$  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  $0.03\%$  以下のオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304L、SUS316L、SUS316（原子力仕様又は遠心 casting 材））は優れた耐応力腐食割れ性を示す。

また、600 系のニッケル基合金は、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、特に隙間条件下において、応力腐食割れの感受性を示す。これと比較して高 Nb 含有の改良 600 系のニッケル基合金は優れた耐応力腐食割れ性を示す。

溶接金属においても、182 合金は、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 82 合金及び高 Nb 含有の改良 182 合金は優れた耐応力腐食割れ性を示す。

上述のように、材料鋼種により耐力腐食割れ性に相違があるが、損傷が発生した場合に原子力安全に影響を与える部位については、材料鋼種に依らず点検対象とする。

### (解説 2-5) 点検対象

CRDハウジング及び関連の各部位について、損傷による影響を評価し、点検の要否を検討した結果を表 2-5-1 に、点検対象部位の選定フローを図 2-5-1 に示す。

損傷を想定した場合に、原子炉の安全性に影響を与える可能性のある部位として、ハウジング/スタブチューブ溶接部、スタブチューブ/下鏡溶接部、及びハウジング/フランジ溶接部を選定した。

表 2-5-1 CRDハウジングの点検対象部位

部位	機能	外荷重条件	点検性 (VT)	劣化モード	損傷による構造、機能への影響評価	点検要否
① ハウジング/キャップ溶接部	・案内管, 燃料支持金具, 燃料集合体の支持	・自重 (GT, FS, FB)	可能	IGSCC	・溶接部が損傷しても, 燃料集合体及び案内管の自重によりキャップ位置が保持されるため, 制御棒挿入性に影響しない	不要
ハウジング/フランジ溶接部	・耐圧 ・CRD 支持	・内圧 ・自重 (CRD)	可能	IGSCC	・溶接部が損傷すると炉水が漏えいする可能性がある ・溶接部が損傷すると制御棒挿入性に影響を与える可能性がある	点検対象
ハウジング/スタブチューブ溶接部	・ハウジング, 案内管, 燃料支持金具, 燃料集合体の支持 ・耐圧	・内圧 ・熱応力 ・自重 (HS, GT, FS, FB)	可能	IGSCC	・溶接部が損傷すると炉水が漏えいする可能性がある ・溶接部が損傷した場合に地震が発生しても, 変位が微少であり, 制御棒挿入性は確保できる	点検対象
④ スタブチューブ/下鏡溶接部	・ハウジング, 案内管, 燃料支持金具, 燃料集合体の支持 ・耐圧	・内圧 ・熱応力 ・自重 (HS, GT, FS, FB)	可能	IGSCC	・溶接部が損傷すると炉水が漏えいする可能性がある ・溶接部が損傷した場合に地震が発生しても, 変位が微少であり, 制御棒挿入性は確保できる ・下鏡低合金鋼への亀裂進展速度は極めて小さい (~5mm/40年)	点検対象
⑤ 案内管ラグ/案内管スリーブ溶接部	・ラグ, 燃料支持金具の位置決め	—	可能	IGSCC	・溶接部が損傷してラグが破断しても, 案内管は回転しないため, 制御棒挿入性に影響しない	不要
⑥ 案内管スリーブ/案内管ボテイ溶接部	・案内管スリーブ, 燃料支持金具, 燃料集合体の支持	・差圧 ・自重 (GT, FS, FB)	可能	IGSCC	・溶接部が損傷した場合に地震が発生しても, 変位が微少であり, 制御棒挿入性は確保できる	不要
⑦ 案内管ボテイ/案内管ベース溶接部	・案内管スリーブ, 燃料支持金具, 燃料集合体の支持	・熱応力 ・差圧 ・自重 (GT, FS, FB)	可能	IGSCC	・溶接部が損傷した場合に地震が発生しても, ヌット構造で嵌合しているため, 制御棒挿入性は確保できる	不要
⑧ 燃料支持金具位置決めピン/炉心支持板溶接部	・燃料支持金具, 燃料集合体の位置決め	—	可能	IGSCC (タック溶接)	・溶接部が損傷しても, ピンの位置は保持されるため, 制御棒挿入性に影響しない	不要
⑨ 燃料支持金具オフィス/オフィス板溶接部	・炉心流量の調整	・差圧	可能	IGSCC	・溶接部が損傷してオフィス板が脱落しても, スリーブと燃料支持金具の隙間に留まるため, 制御棒挿入性に影響しない	不要

(HS: ハウジング, GT: 案内管, FS: 燃料支持金具, FB: 燃料集合体)

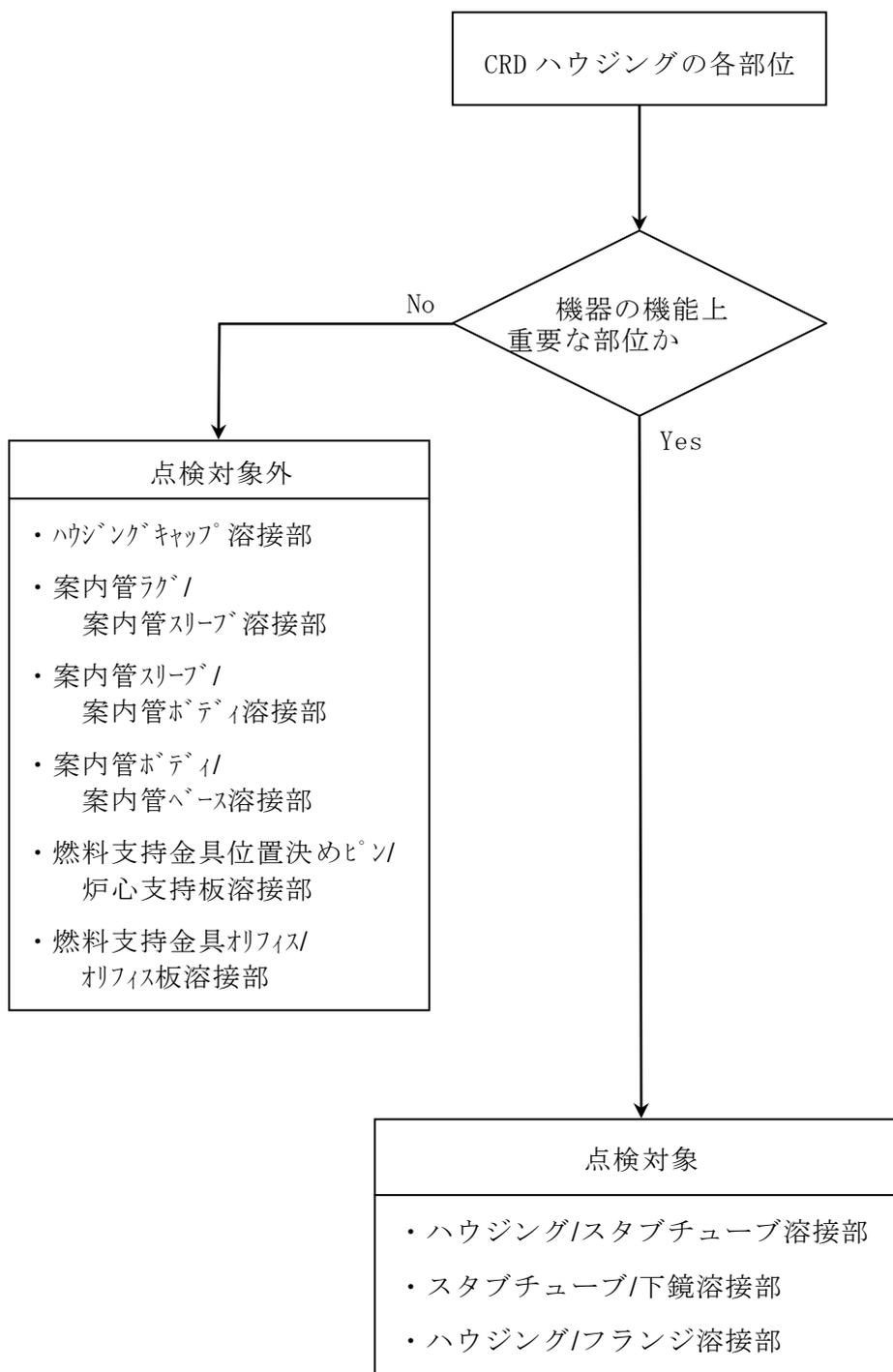


図 2-5-1 CRD ハウジングの点検対象部位の選定フロー

### (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、JEAG 4217「原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針」に準拠して設定する。

### (解説 3-2) 点検方法

#### (1) ハウジング/スタブチューブ溶接部

##### a. 点検手法

点検手法を VT-2 (漏えい試験) としたのは、下記の理由による。

ニッケル合金の 182 合金のハウジング/スタブチューブ溶接部において、供用開始時点で深さ  $50\mu\text{m}$  の初期亀裂を仮定した場合の亀裂進展挙動は軸方向の進展が早く、軸方向亀裂は実運転時間約 36 年で貫通するのに対して、周方向亀裂では貫通が生じない評価となる。軸方向と周方向の亀裂進展挙動の相対的な関係は、82 合金でも同様と考えられる。(付録 B, C, D 参照)

万一軸方向亀裂が貫通しても、漏えい量は微少であり、CRD 駆動水圧系で補給可能である。(付録 F 参照)

また、軸方向亀裂が貫通した場合でも、周方向の残存断面積のため、 $S_2$ 地震を想定しても破断することがなく、耐圧機能及び炉心支持機能 (制御棒挿入性の確保、燃料集合体の鉛直荷重支持) を維持できる。(付録 E 参照)

したがって、軸方向亀裂による漏えいを検知できれば、CRD ハウジングに要求される原子炉の安全性に関わる機能を維持できるため、VT-2 による点検とする。

##### b. 点検実施時期

ニッケル合金の 182 合金溶接部においては、供用開始時点で深さ  $50\mu\text{m}$  の初期亀裂を仮定した場合、軸方向亀裂の貫通に実運転時間で 38 年 (稼働率 80% の場合、供用開始後暦年で約 47 年に相当) を要する。82 合金溶接部の場合には、SCC 亀裂進展はさらに遅くなると考えられる。このため、高経年化に関する技術評価時期を念頭に、点検開始を供用開始後暦年で 25 年とする。

ここで、VT-2 は体積試験ではないため、点検開始以降は、毎定検での点検とする。

#### (2) スタブチューブ/下鏡溶接部

##### a. 点検手法

点検手法を VT-2 (漏えい試験) としたのは、下記の理由による。

ニッケル合金の 182 合金のスタブチューブ/下鏡溶接部において、供用開始時点で深さ

50  $\mu$  m の初期亀裂を仮定した場合の亀裂進展挙動は、周方向亀裂より軸方向亀裂が速く、軸方向亀裂は実運転時間で約 53 年で貫通するのに対して、周方向亀裂では貫通が生じない評価となる。軸方向と周方向の亀裂進展挙動の相対的な関係は、82 合金及び改良 182 合金でも同様と考えられる。(付録 D 参照)

万一軸方向亀裂が貫通しても、漏えい量は微少であり、CRD 駆動水圧系で補給可能である。(付録 F 参照)

また、軸方向亀裂が貫通した場合でも、周方向の残存断面積のため、 $S_2$ 地震を想定しても破断することがなく、耐圧機能及び炉心支持機能（制御棒挿入性の確保、燃料集合体の鉛直荷重支持）を維持できる。(付録 E 参照)

なお、2006 年に改定発行された発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針では基準地震動  $S_s$  を用いた評価を行うこととなった。したがって、今後の評価では基準地震動  $S_s$  を用いた評価を実施する必要がある。

したがって、軸方向亀裂による漏えいを検知できれば、CRDハウジングに要求される原子炉の安全性に関わる機能を維持できるため、VT-2 による点検とする。

#### b. 点検実施時期

ニッケル合金の 182 合金溶接部においては、供用開始時点で深さ 50  $\mu$  m の初期亀裂を仮定した場合、軸方向亀裂の貫通に実運転時間で約 53 年（稼働率 80% の場合、供用開始後暦年で約 66 年に相当）を要する。82 合金及び改良 182 合金溶接部の場合には、SCC 亀裂進展はさらに遅くなると考えられる。このため、高経年化に関する技術評価時期を念頭に、点検開始を供用開始後暦年で 25 年以降とする。また、VT-2 は体積試験ではないため、点検開始以降は、毎定検での点検とする。

#### (3)ハウジング/フランジ溶接部

ハウジング/フランジ溶接部は、温度が低いため SCC 損傷が生じる可能性が極めて小さく、万一損傷が生じるとしても、周方向の広い範囲にわたって貫通欠陥が生じることはないと推定され、原子炉の安全性に影響を与える以前に微少漏えいにより検知できると考えられるため、他の部位と同様に、漏えい試験 (VT-2) を適用する。点検実施時期は、高経年化に関する技術評価時期を念頭に、供用開始後暦年で 25 年以降の毎定検とする。

#### (解説 3-3) SCC 予防保全技術

SCC は、SCC 感受性を有する材質、引張残留応力及び腐食環境の三因子が重畳して発生するため、三因子の一つ以上の因子を改善することにより、SCC の発生又は進展を抑制できる。予防保全工法を適用した場合は、その有効性を考慮して、点検実施時期を設定できる。実機への

適用実績があるか，又は将来適用が可能と考えられる予防保全技術の例を，表 3-3-1 に示す。

(付録 G 参照)

表 3-3-1 予防保全の例

予防保全の種類	点検実施時期設定への反映
耐食材肉盛	耐 SCC 性が優れた材料と同等に取り扱うことができる。
ピーニング	同上
研磨	同上
水素注入	点検部位の腐食電位の評価結果に基づいて亀裂進展速度を求め、点検実施時期を設定することができる。
貴金属表面処理	同上

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，CRDハウジング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-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 3-4) 補修技術

CRDハウジングに欠陥が検出された場合の補修技術には，拡管，封止溶接，補修溶接，取替等がある。(付録 H 参照)

また，CRDハウジング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」

付録A CRDハウジング構造図

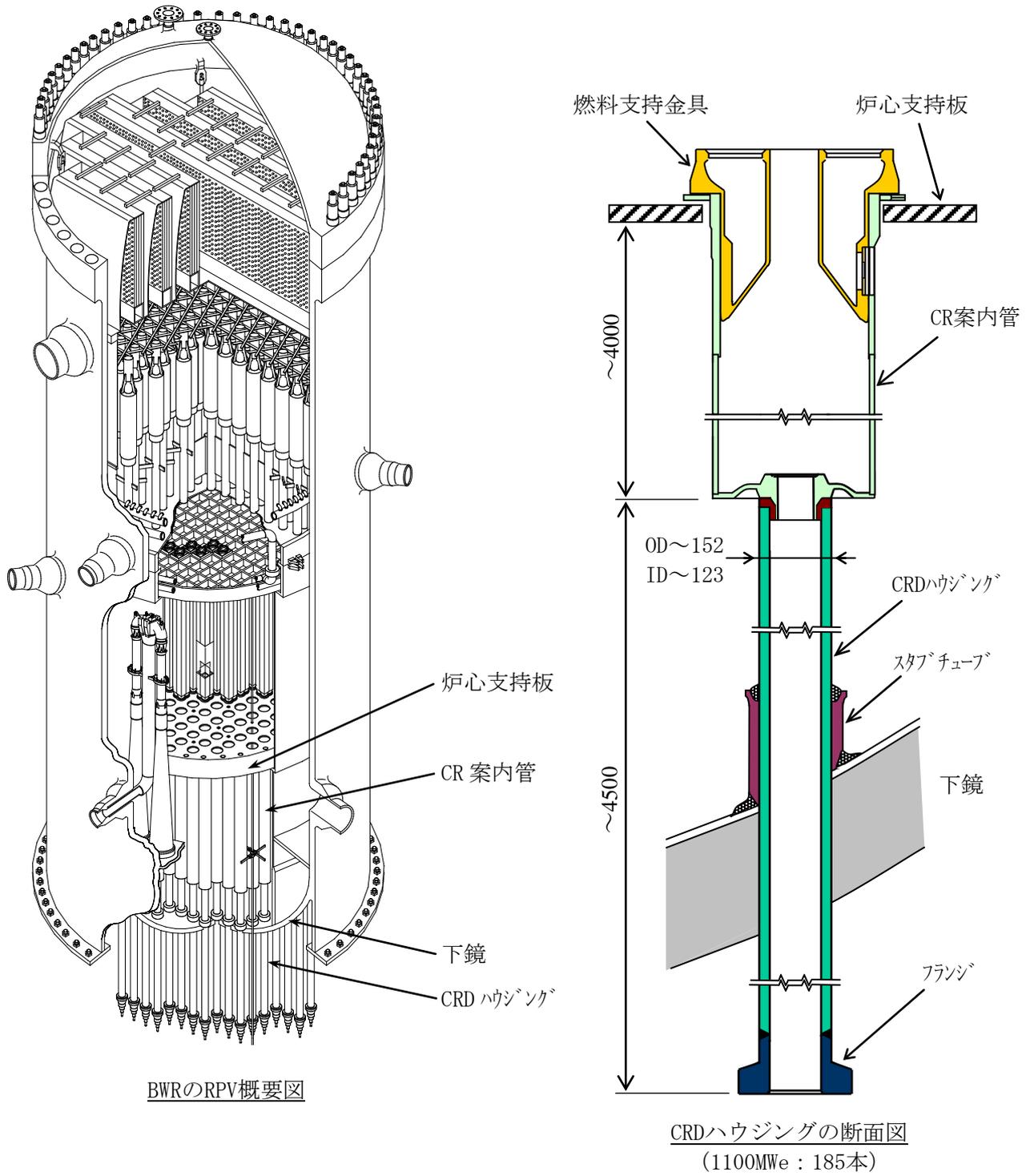


図 A-1 CRDハウジングの構造(1)

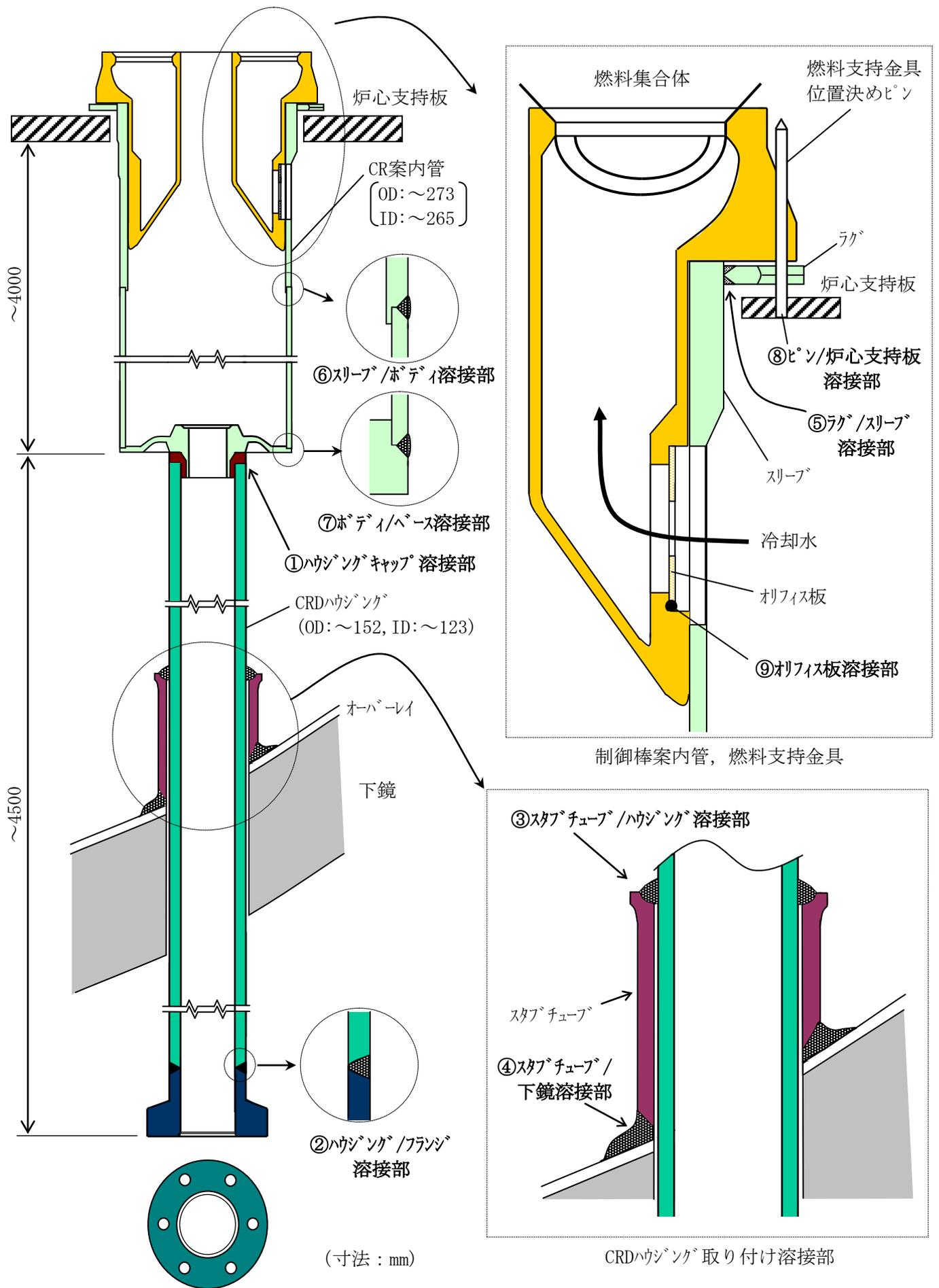


図 A-2 CRD ハウジングの構造(2)

## 付録B SCC 亀裂進展速度式

### 1. はじめに

本付録は、CRDハウジングにおける溶接部を対象とした亀裂進展評価に適用するSCC亀裂進展速度式を示すものである。

### 2. CRDハウジング溶接部の使用材料

CRDハウジングの溶接部で使用される材料の例を図B-1に示す。ハウジング/スタブチューブ溶接部(J溶接部)及びスタブチューブ/下鏡溶接部の溶接金属がニッケル合金の182合金(JIS DNiCrFe-3 または ENi6182)、ハウジングが SUS304 又は SUS316 (原子力仕様又は遠心 casting 材、炭素量 $\leq 0.03\%$ )の場合を、亀裂進展の評価対象とする。(付録D参照)

### 3. SCC 亀裂進展速度式

#### 3.1 182合金のSCC亀裂進展速度式

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

SCC亀裂進展速度の試験結果をもとに設定された、NWCにおける182合金のSCC亀裂進展特性を次式に示す。

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (1)$$

$$da/dt = 3 \times 10^{-15} K^{5.186} \quad (13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (2)$$

$$da/dt = 2 \times 10^{-6} \quad (K > 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (3)$$

上式において、亀裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。また、上式で表される182合金のSCC亀裂進展特性を図B-2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合金溶接金属のBWR環境中のSCC亀裂進展速度(CC-009)を規定しており、今後の評価に際しては本速度線図を用いる必要がある。

#### 3.2 鋭敏化SUS304のSCC亀裂進展速度

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

SCC亀裂進展試験結果をもとに設定された、NWCにおける鋭敏化SUS304に対するSCC亀裂進展特性を次式に示す。

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 3.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (4)$$

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

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

上式において、亀裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

である。また、上式で表される鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性を図 B-3 に示す。

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

SCC 亀裂進展試験結果をもとに設定された、HWC における鋭敏化 SUS304 に対する SCC 亀裂進展特性を次式に示す。

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 12.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (7)$$

$$da/dt = 7.94 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (12.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (8)$$

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

上式において、亀裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。また、上式で表される鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性を図 B-4 に示す。

### 3.3 低炭素量ステンレス鋼の SCC 亀裂進展速度式

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

SCC 亀裂進展試験結果をもとに設定された、NWC における低炭素量ステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L, SUS316 (原子力仕様)) の SCC 亀裂進展特性を次式に示す。

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (10)$$

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

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (12)$$

上式において、亀裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。また、上式で表される低炭素量ステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性を鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性と併せて、図 B-3 に示した。

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

SCC 亀裂進展試験結果をもとに設定された、HWC における低炭素量ステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L, SUS316 (原子力仕様)) の SCC 亀裂進展特性を次式に示す。

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 19.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (13)$$

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

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

上式において、亀裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。また、上式で表される低炭素量ステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L, SUS316 (原子力仕様)) の SCC 亀裂進展特性を鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性と併せて、図 B-4 に示した。

(7)~(15)式の亀裂進展特性は、SUS304L, SUS316L 及び SUS316 (原子力仕様) に対して設定されたものであるが、遠心鑄造の SUS316 (炭素含有量  $\leq 0.03\%$ ) の耐 SCC 性はこれらと同等以上であるため、上記の亀裂進展特性を適用可能と考えられる。

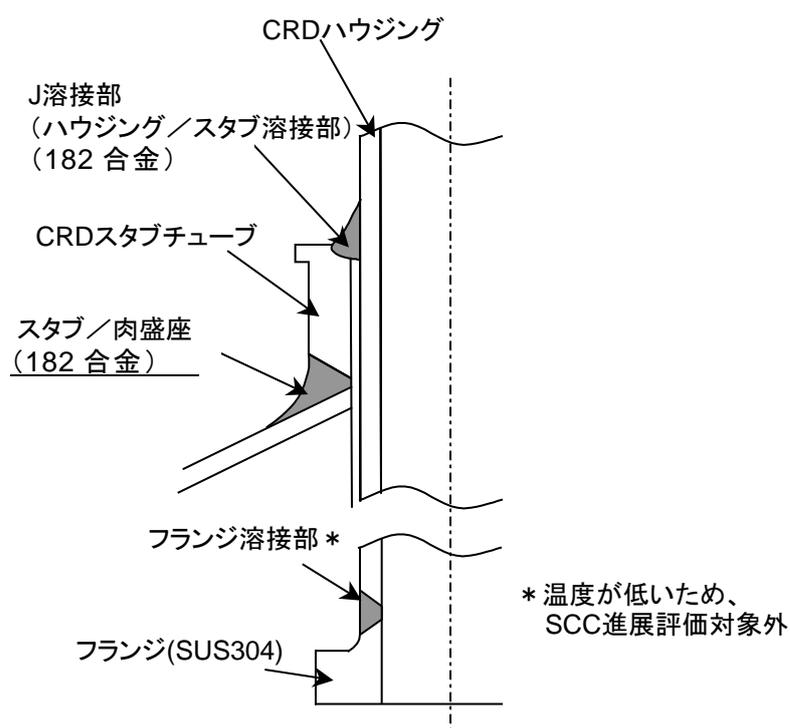


図 B-1 CRD ハウジングの溶接部の例

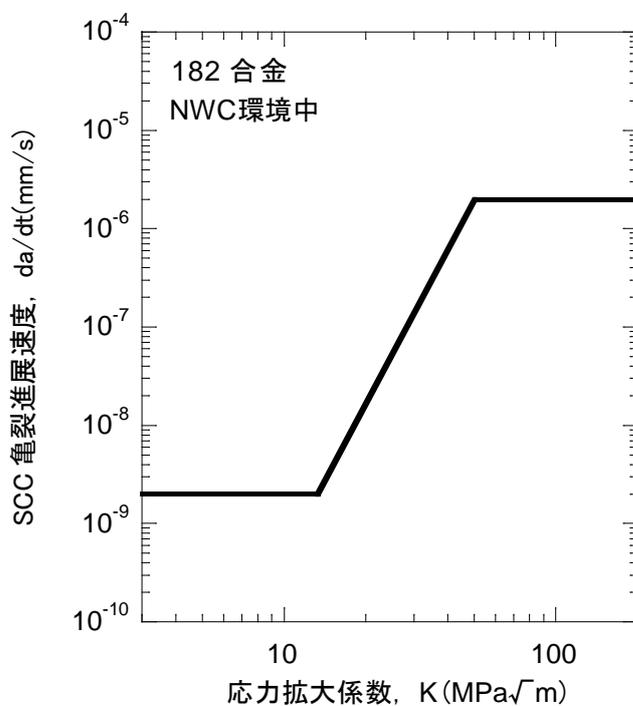


図 B-2 NWC 環境中における 182 合金の SCC 亀裂進展特性

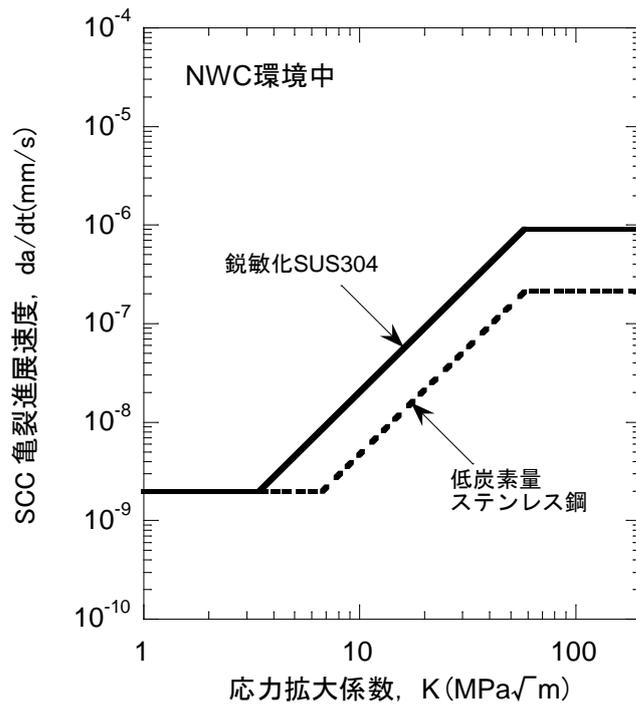


図 B-3 NWC 環境中におけるステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性

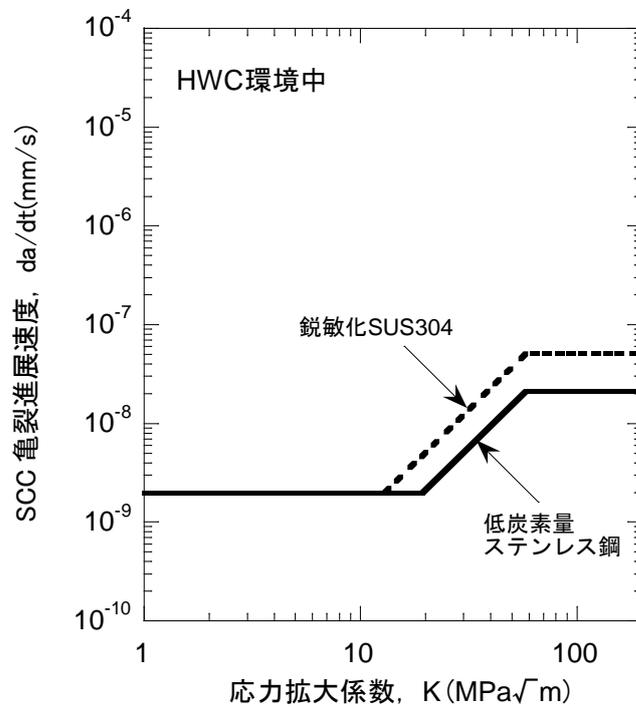


図 B-4 HWC 環境中におけるステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性

## 付録C CRDハウジング溶接部の残留応力評価

### 1. はじめに

本付録は、CRDハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部について、亀裂進展評価に必要な溶接残留応力分布の解析結果をまとめたものである。

### 2. 残留応力解析手法<sup>1)</sup>

#### (1) 解析モデル

ハウジング、スタブチューブ、肉盛座及び圧力容器下鏡、ハウジング/スタブチューブ溶接部（J溶接部）、並びに、スタブチューブ/下鏡溶接部を、軸対称モデル化した。

#### (2) 解析手順

熱伝導解析により、モックアップ試験体作成時の温度測定結果に一致するように、溶接入熱条件を設定し、得られた非定常温度分布に基づいて、大変形弾塑性応力解析を実施した。

#### (3) 物性値

伝熱解析には、表C-1に示す物性値を用いた。また、熱応力解析には、図C-1に示す物性値を用いた。

### 3. 解析結果

#### 3.1 ハウジング/スタブチューブ溶接部

ハウジング/スタブチューブ溶接部の残留応力解析結果を、図C-2に示す。

溶接金属上部は、表面及び内部にわたって、周方向応力が比較的高く、最300MPaを超える引張りとなっている。

溶接金属下部は、表面で局所的に軸方向応力又は径方向応力のピーク（300MPa未満）があるが、内部は、概ね100MPa以下の比較的小さな引張りとなっている。

溶接金属上部側のハウジング熱影響部表面（接水部）の残留応力は圧縮、溶接金属下部側のハウジング熱影響部（非接水部）の残留応力は、圧縮となっている。

#### 3.2 スタブチューブ/下鏡溶接部<sup>1)</sup>

スタブチューブ/下鏡溶接部の残留応力解析結果を、図C-3に示す。

溶接金属部は、表面及び内部にわたって、周方向応力が比較的高く、表面では、最大で300MPaを超える引張りとなっている。

溶接金属の中央部表面には軸方向応力のピーク（300MPa未満）、下端部表面には径方向応力のピーク（350MPa程度）があるが、周方向応力と比較して、溶接金属内部の応力が低い。

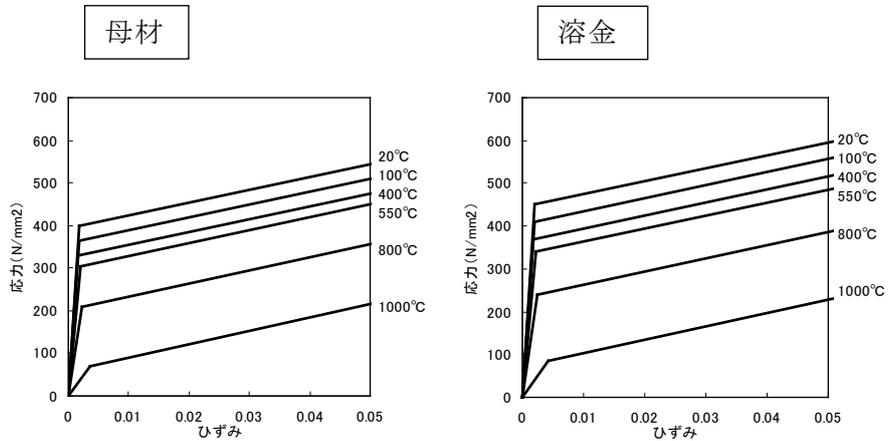
### 参考文献

- 1) 電力共同研究報告書「インコネル溶接部の亀裂進展評価研究」（平成10年度3月）

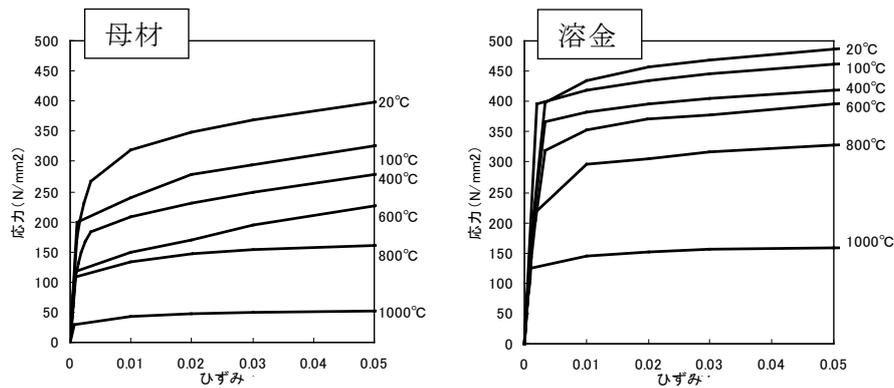
表 C-1 伝熱解析に用いた物性値

SUS304及びSUS316L									
温度	℃	20	100	200	400	600	1000	1500	2000
熱伝導率	$\text{kJ}/\text{mm}\cdot\text{s}\cdot\text{℃}$	$1.46\times 10^{-5}$	$1.56\times 10^{-5}$	$1.70\times 10^{-5}$	$1.97\times 10^{-5}$	$2.24\times 10^{-5}$	$2.76\times 10^{-5}$	$3.43\times 10^{-5}$	$4.12\times 10^{-5}$
密度	$\text{Kg}/\text{mm}^3$	$7.86\times 10^{-6}$							
比熱	$\text{KJ}/\text{kg}\cdot\text{℃}$	0.452	0.493	0.523	0.553	0.578	0.620	0.678	0.737
600系ニッケル其合金									
温度	℃	20	149	288	566	815	1000	1500	2000
熱伝導率	$\text{kJ}/\text{mm}\cdot\text{s}\cdot\text{℃}$	$1.49\times 10^{-5}$	$1.66\times 10^{-5}$	$1.87\times 10^{-5}$	$2.34\times 10^{-5}$	$2.77\times 10^{-5}$	$3.10\times 10^{-5}$	$3.98\times 10^{-5}$	$4.89\times 10^{-5}$
密度	$\text{Kg}/\text{mm}^3$	$8.50\times 10^{-6}$							
比熱	$\text{KJ}/\text{kg}\cdot\text{℃}$	0.645	0.670	0.720	0.800	0.871	0.913	1.05	1.17

出典：溶接学会論文集第12巻（1994） 第4号 563

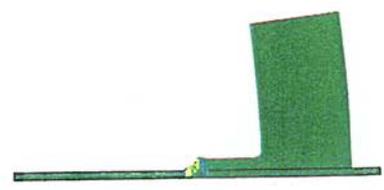
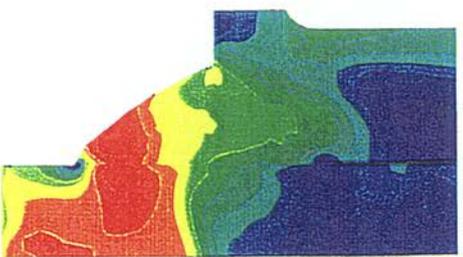
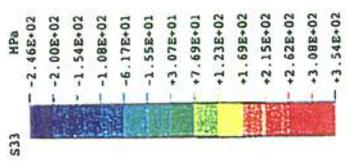
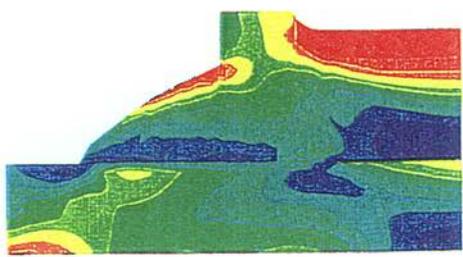
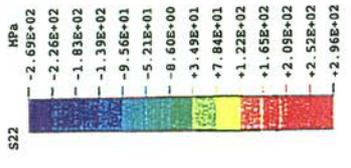
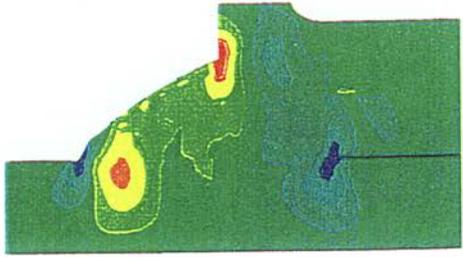
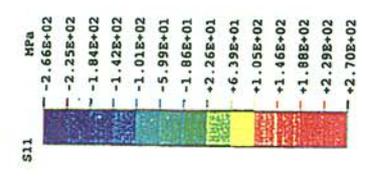


(a) 600系ニッケル其合金

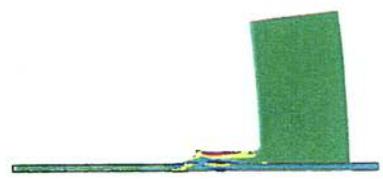


(b) ステンレス鋼

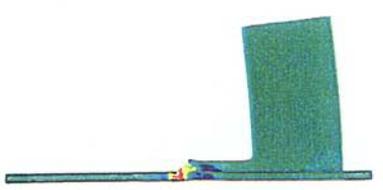
図 C-1 熱応力解析に用いた物性値



径方向応力  
(R方向応力)



軸方向応力  
(Z方向応力)



周方向応力  
(T方向応力)

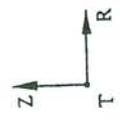
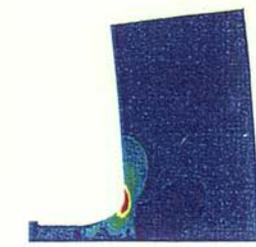
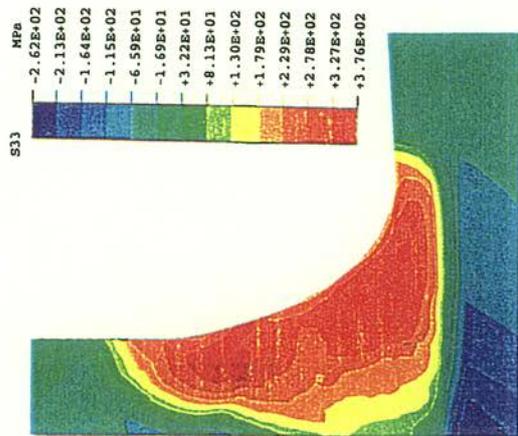
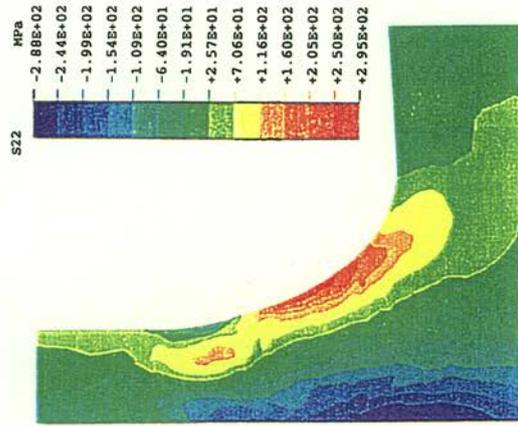
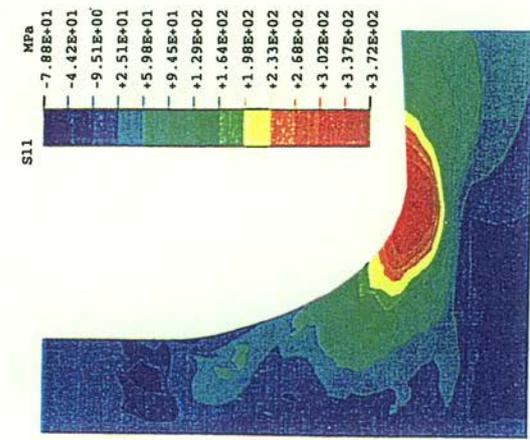
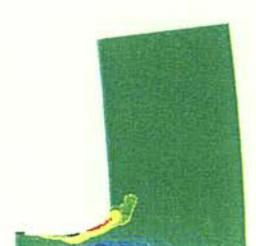


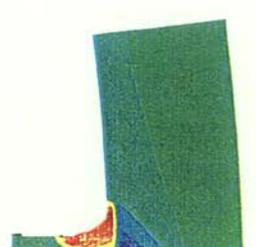
図 C-2 CRD ハウジング/スタブチューブ溶接部の残留応力解析結果<sup>1)</sup>



径方向応力  
(R方向応力)



軸方向応力  
(Z方向応力)



周方向応力  
(T方向応力)

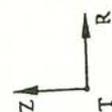


図 C-3 CRD スタブチューブ/下鏡溶接部の残留応力解析結果<sup>1)</sup>

## 付録 D CRDハウジング溶接部の SCC 亀裂進展評価

### 1. はじめに

本付録は、CRDハウジングのハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/肉盛座溶接部における SCC による亀裂進展挙動の評価結果をまとめたものである。ハウジング/フランジ溶接部は、温度が低いため SCC 損傷可能性が極めて小さいので、亀裂進展評価対象としない。

### 2. CRDハウジング/スタブチューブ溶接部における評価

#### 2.1 評価条件

##### a. 評価対象

ニッケル合金の 182 合金(JIS DNiCrFe-3 または ENi6182)の溶接部について、亀裂進展評価を行う。ニッケル合金の 82 合金(JIS YNiCr-3 または SNi6082)及び改良 182 合金は SCC 損傷可能性が極めて小さいため、亀裂進展評価対象としない。

##### b. 想定する亀裂進展経路

ハウジング/スタブチューブ溶接部の亀裂進展評価において、想定する亀裂進展経路を図 D-1 に示す。182 合金溶接金属部の中で応力的に最も厳しい炉内側から炉外側に向かう直線経路を、亀裂進展経路①、②として想定した。これは、CRDハウジングに要求される炉心支持機能（燃料集合体の鉛直荷重支持、制御棒挿入性の確保）及び耐圧機能のうち、炉心支持機能は、耐圧部の全周貫通亀裂を想定しても維持され、評価上クリティカルとならないためである。（付録 E 参照）

一方、ハウジング/スタブチューブ溶接部を起点にハウジング母材が損傷すると、耐圧機能に影響を与えないが、炉心支持機能へ影響を与える可能性があるため、ハウジング板厚を貫通する方向で応力的に最も厳しい直線経路を、周方向亀裂の進展経路③として想定した。

##### c. 亀裂進展評価に用いる応力

溶接残留応力は、当該溶接部形状を考慮した熱弾塑性解析により評価した。（付録 C 参照）

また、当該溶接部における運転応力として、通常運転時の内圧及び熱により生じる応力を弾性解析により評価し、溶接残留応力と運転応力の和を、亀裂進展評価に用いる応力とした。

なお、起動・停止時には、想定亀裂進展経路における運転応力が通常運転時より

最大で 50MPa 程度大きくなるが、起動・停止に要する時間がプラントの運転年数に比較して短時間であり、運転条件に対する亀裂進展速度式（付録 B）で評価した亀裂進展量が 40 年で最大 0.2mm 程度と見積もられること、実際は起動・停止時の大部分は比較的溫度が低いため亀裂進展が抑制されると考えられることから、通常運転時の応力を用いる。

#### d. 応力拡大係数解

応力拡大係数解には、任意応力場における表面亀裂の表面点及び最深点の応力拡大係数を評価することが可能な影響関数法を用いた。

#### e. SCC 亀裂進展特性

182 合金溶接部の SCC 亀裂進展特性として、付録 B で設定した、通常一次水質環境下における 182 合金の SCC 亀裂進展特性を用いた。

$$\begin{aligned} da/dt &= 2 \times 10^{-9} && (K < 13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \\ da/dt &= 3 \times 10^{-15} K^{5.186} && (13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \\ da/dt &= 2 \times 10^{-6} && (K > 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \end{aligned}$$

上式において、亀裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。

なお、後述のように、ハウジング板厚方向への進展経路③において、亀裂が溶接金属内で停留したため、ハウジング母材の SCC 亀裂進展特性は設定しない。

#### f. 初期亀裂形状

初期亀裂形状として、初期亀裂深さ  $a_0$  が 0.05 mm、初期亀裂長さ  $l_0$  が 0.5 mm の半楕円形状の表面亀裂を想定した。初期アスペクト比  $a_0/l_0$  は 0.1 とした。

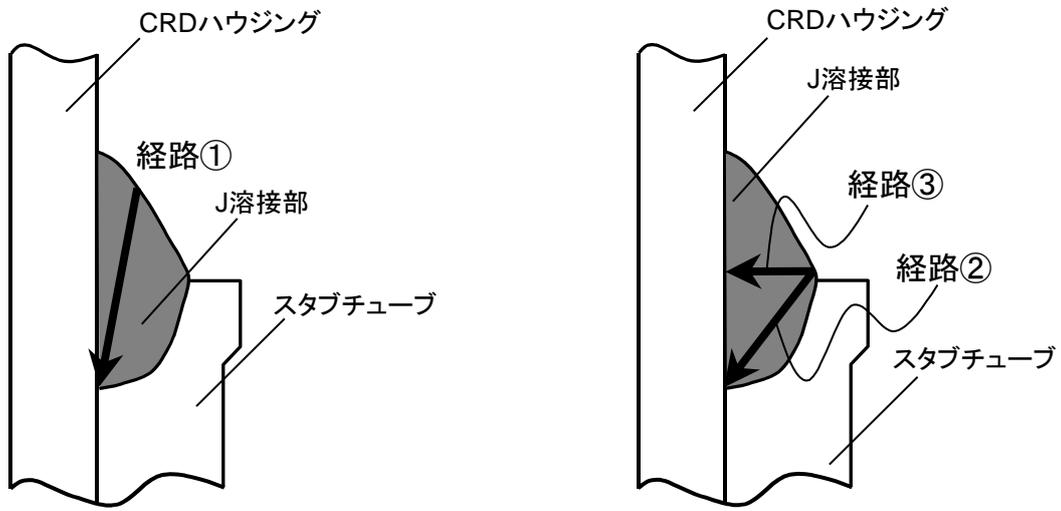
## 2. 2 評価結果

図 D-1 に示した経路①に対する軸方向亀裂進展評価に用いた当該部の周方向応力分布（残留応力+運転応力）を図 D-2 に示す。また、軸方向亀裂進展評価結果を図 D-3 に示す。図 D-3(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-3(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。軸方向亀裂進展評価における経路全長は 34.0 mm であるが、軸方向亀裂が経路全長に達する年数は 36.8 年である。

図 D-1 に示した経路②に対する周方向亀裂進展評価に用いた当該部の亀裂進展方向に対する鉛直方向応力分布（残留応力+運転応力）を図 D-4 に示す。また、経路②に対する周

方向亀裂進展評価結果を図 D-5 に示す。図 D-5(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-5(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。周方向亀裂進展評価における経路全長は 24.1 mm であるが、80 年経過しても、周方向亀裂は経路全長に達しない。

図 D-1 に示した経路③に対する周方向亀裂進展評価に用いた当該部の亀裂進展方向に対する鉛直方向応力分布（残留応力+運転応力）を図 D-6 に示す。また、経路③に対する周方向亀裂進展評価結果を図 D-7 に示す。図 D-7(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。亀裂深さが 4.5 mm で応力拡大係数が 0 になる。図 D-7(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。前述したように、亀裂深さが溶接金属内の 4.5 mm において応力拡大係数が 0 になることから、亀裂は 4.5 mm で停留挙動を示す。すなわち、周方向亀裂は、80 年経過しても、ハウジング母材に達しない。



(a)経路①(軸方向亀裂評価用経路)

(b)経路②、③(周方向亀裂評価用経路)

図 D-1 ハウジング/スタブチューブ溶接部に想定した亀裂進展経路

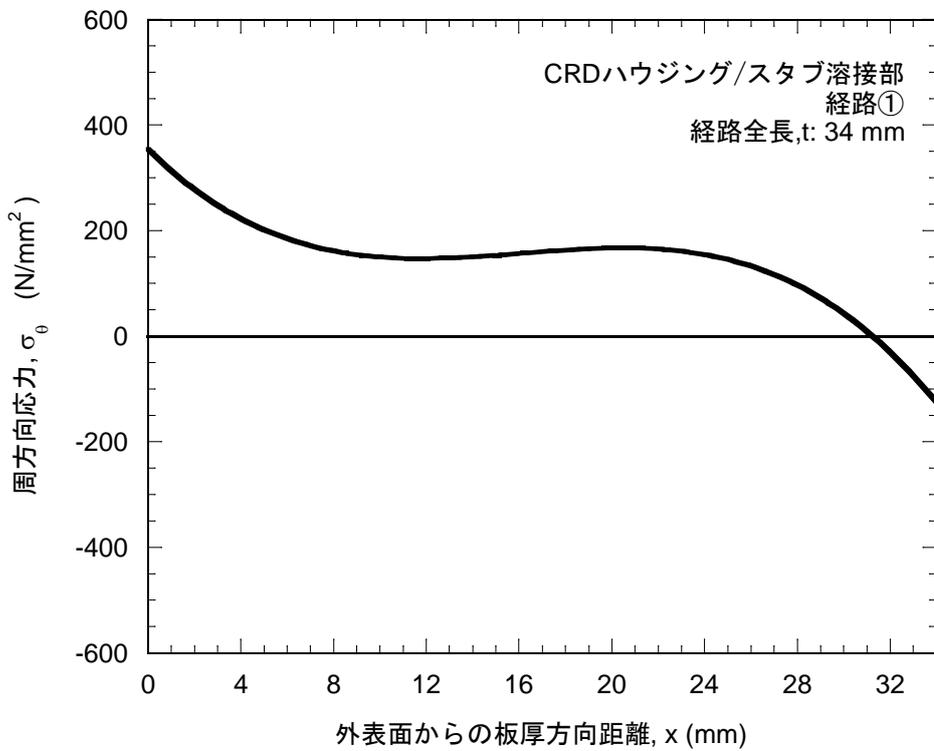
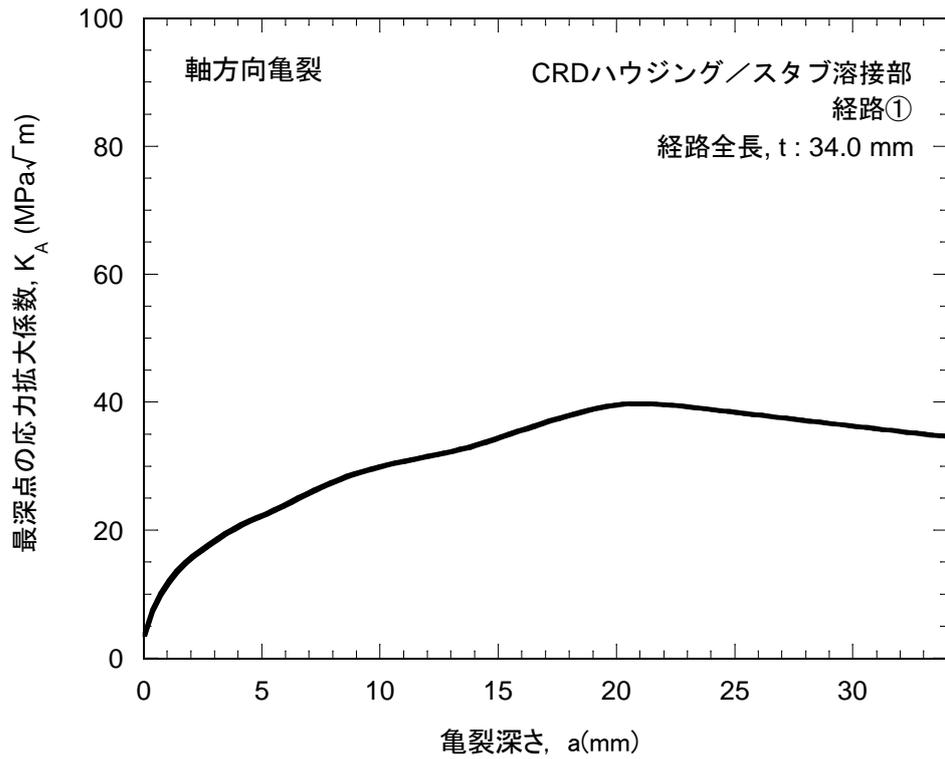
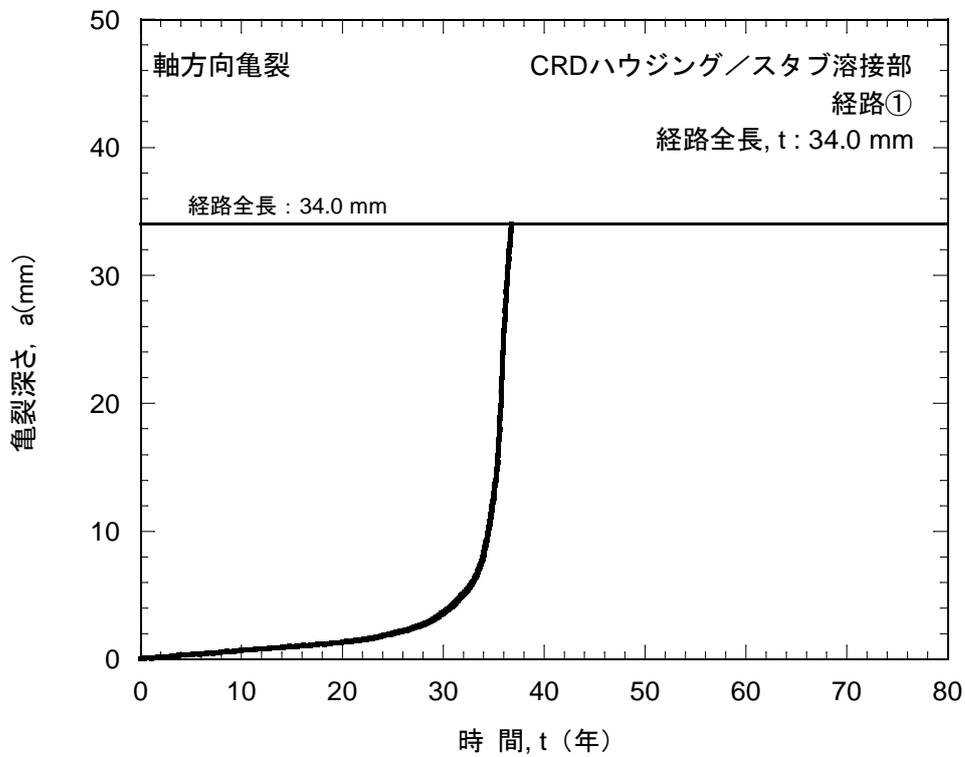


図 D-2 ハウジング/スタブチューブ溶接部，経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布（残留応力+運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図 D-3 ハウジング/スタブチューブ溶接部, 経路①の軸方向亀裂進展評価結果

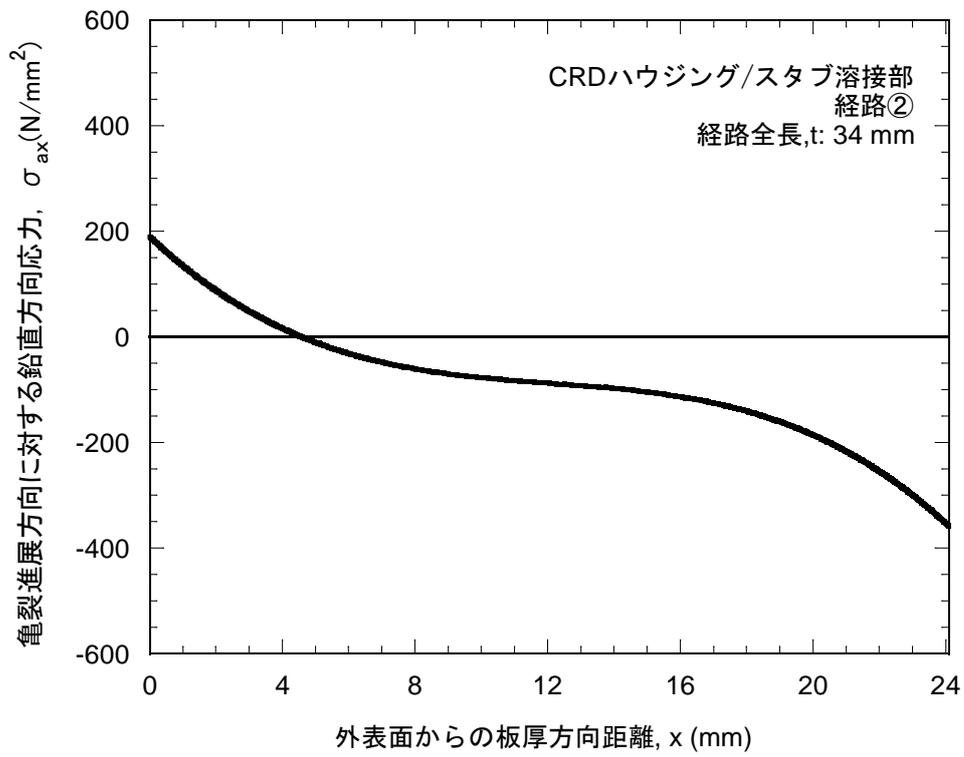
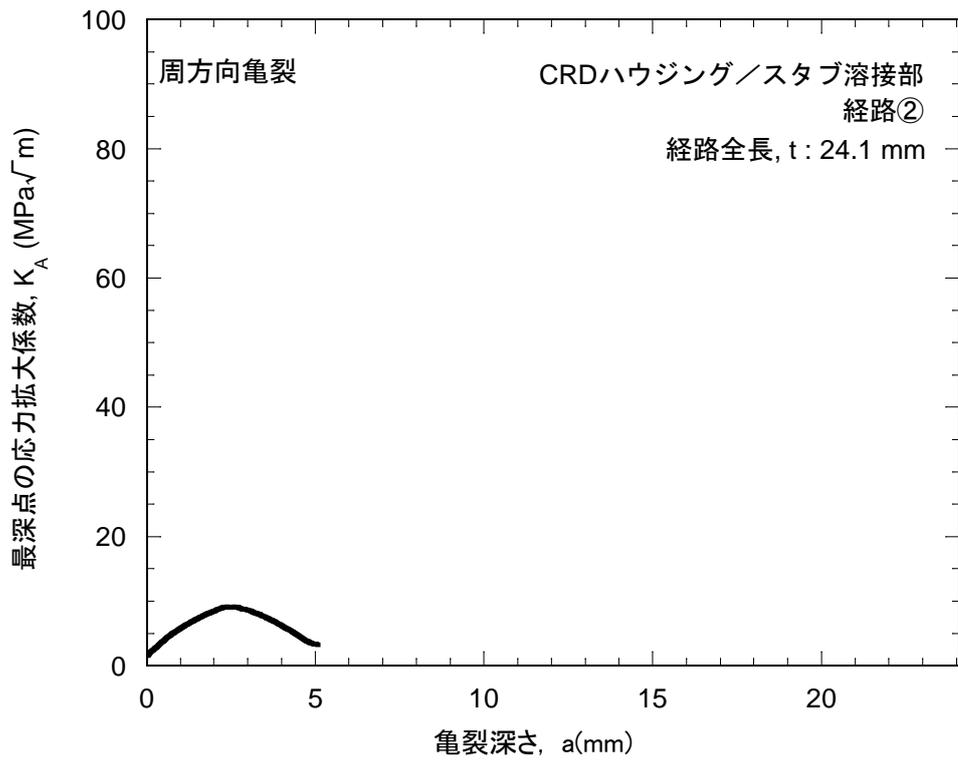
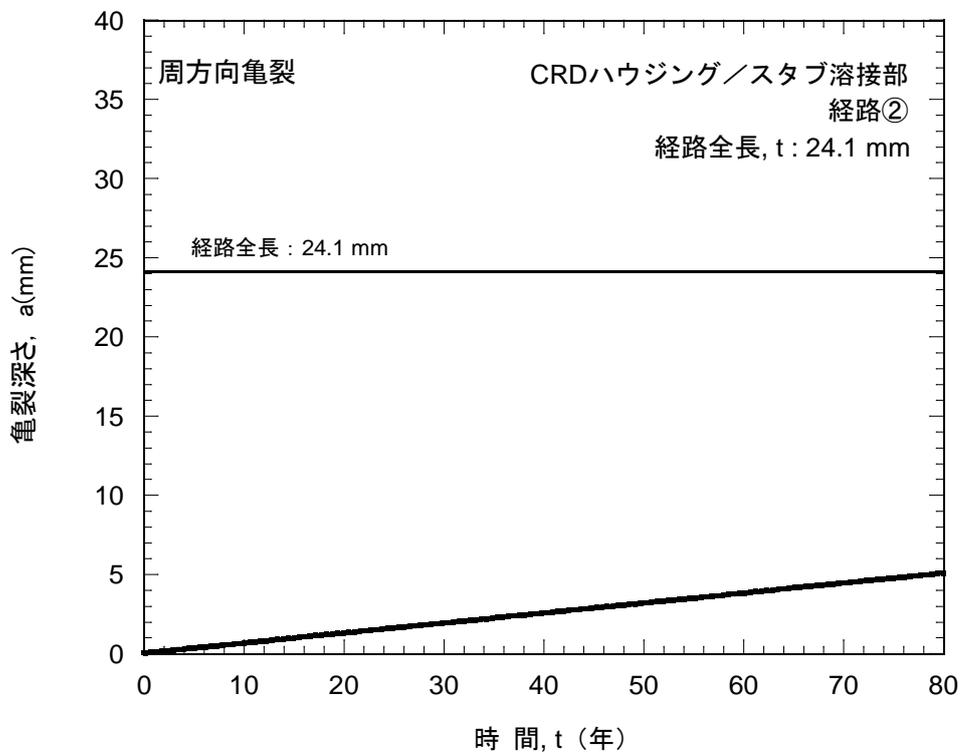


図 D-4 ハウジング/スタブチューブ溶接部，経路②の周方向亀裂進展評価に用いた経路に鉛直方向の応力分布（残留応力+運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図 D-5 ハウジング/スタブチューブ溶接部, 経路②の周方向亀裂進展解析結果

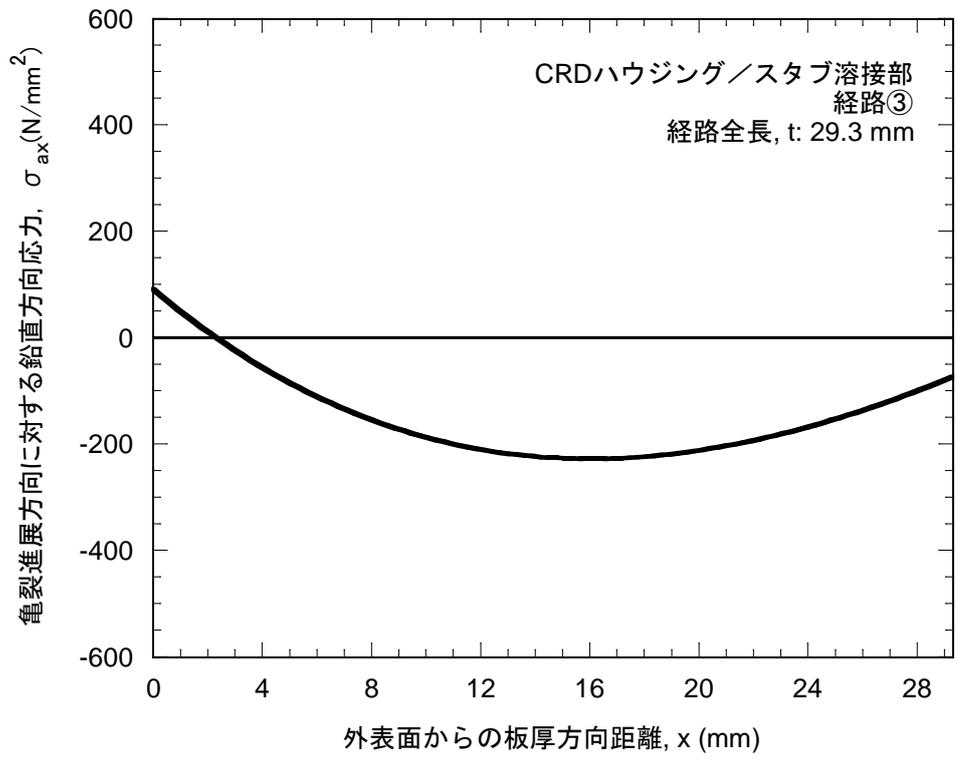
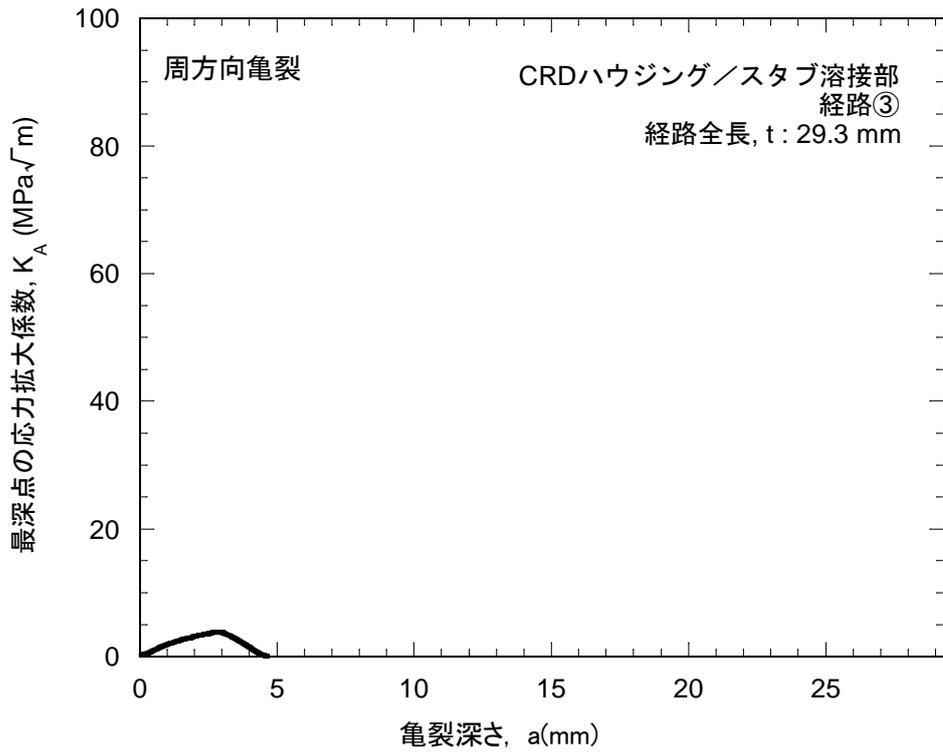
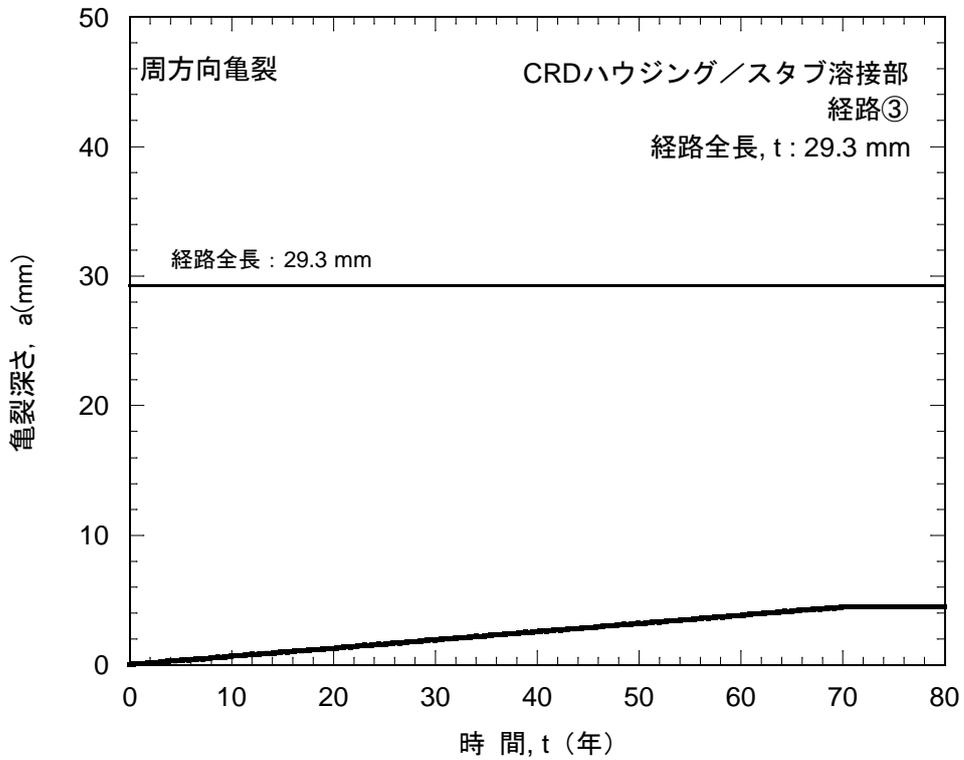


図 D-6 ハウジング/スタブチューブ溶接部，経路③の周方向亀裂進展評価に用いた経路に鉛直方向の応力分布（残留応力+運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図 D-7 ハウジング/スタブチューブ溶接部, 経路③の周方向亀裂進展解析結果

### 3. スタブチューブ/下鏡溶接部における評価

#### 3.1 評価条件

##### a. 評価対象

182 合金の溶接部について、亀裂進展評価を行う。82 合金及び改良 182 合金は SCC 損傷可能性が極めて小さいため、亀裂進展評価対象としない。

##### b. 想定する亀裂進展経路

亀裂進展評価において、想定する亀裂進展経路を図 D-8 に示す。182 合金溶接金属部の中で炉内側から炉外側に向かう経路のうち、応力的に最も厳しい直線経路を亀裂進展経路として想定した。これは、CRD ハウジングに要求される炉心支持機能（燃料集合体の鉛直荷重支持、制御棒挿入性の確保）及び耐圧機能のうち、炉心支持機能は、耐圧部の全周貫通亀裂を想定しても維持され、評価上クリティカルとならないためである。（付録 E 参照）

##### c. 亀裂進展評価に用いる応力

溶接残留応力は溶接部形状を考慮した熱弾塑性解析により評価した。（付録 C 参照）

また、当該溶接部における運転応力として、通常運転時の内圧及び熱により生じる応力を弾性解析により評価し、溶接残留応力と運転応力の和を、亀裂進展評価に用いる応力とした。

なお、起動・停止時には、想定亀裂進展経路における運転応力が通常運転時より最大で 50MPa 程度大きくなるが、起動・停止に要する時間がプラントの運転年数に比較して短時間であり、運転条件に対する亀裂進展速度式（付録 B）で評価した亀裂進展量が 40 年で最大 0.2mm 程度と見積もられること、実際は起動・停止時の大部分は比較的溫度が低いため亀裂進展が抑制されると考えられることから、通常運転時の応力を用いる。

##### d. 応力拡大係数解

応力拡大係数解には、任意応力場における表面亀裂の表面点及び最深点の応力拡大係数を評価することが可能な影響関数法を用いた。

e. SCC 亀裂進展特性

182 合金溶接部の SCC 亀裂進展特性として、付録 B で設定した、通常一次水質環境下における 182 合金の SCC 亀裂進展特性を用いた。

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

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

$$da/dt = 2 \times 10^{-6} \quad (K > 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

上式において、亀裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。

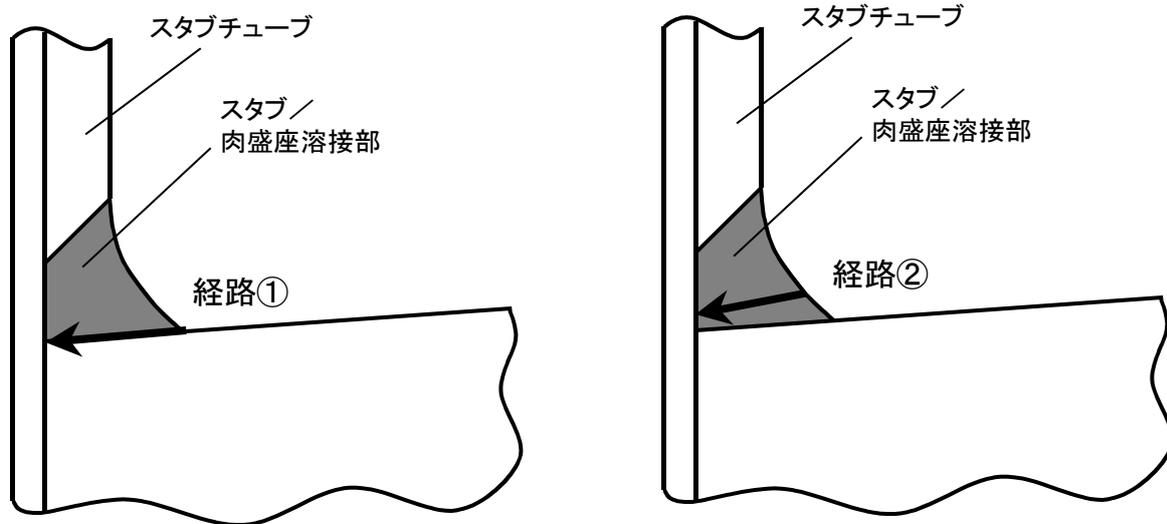
f. 初期亀裂形状

初期亀裂形状として、初期亀裂深さ  $a_0$  が 0.05 mm、初期亀裂長さ  $l_0$  が 0.5 mm の半楕円形状の表面亀裂を想定した。初期アスペクト比  $a_0/l_0$  は 0.1 とした。

### 3.2 評価結果

図 D-8 に示した経路①に対する軸方向亀裂進展評価に用いた当該部の周方向応力分布（残留応力+運転応力）を図 D-9 に示す。また、軸方向亀裂進展評価結果を図 D-10 に示す。図 D-10(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-10(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。軸方向亀裂進展評価における経路全長は 55.2 mm であるが、軸方向亀裂が経路全長に達する年数は 53.5 年である。

図 D-8 に示した経路②に対する周方向亀裂進展評価に用いた当該部の亀裂進展方向に対する鉛直方向応力分布（残留応力+運転応力）を図 D-11 に示す。また、周方向亀裂進展評価結果を図 D-12 に示す。図 D-12(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-12(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。周方向亀裂進展評価における経路全長は 39.2 mm であるが、80 年経過しても、周方向亀裂は経路全長に達しない。



(a)経路①(軸方向亀裂評価用経路)

(b)経路②(周方向亀裂評価用経路)

図 D-8 スタブチューブ/下鏡溶接部に想定した亀裂進展経路

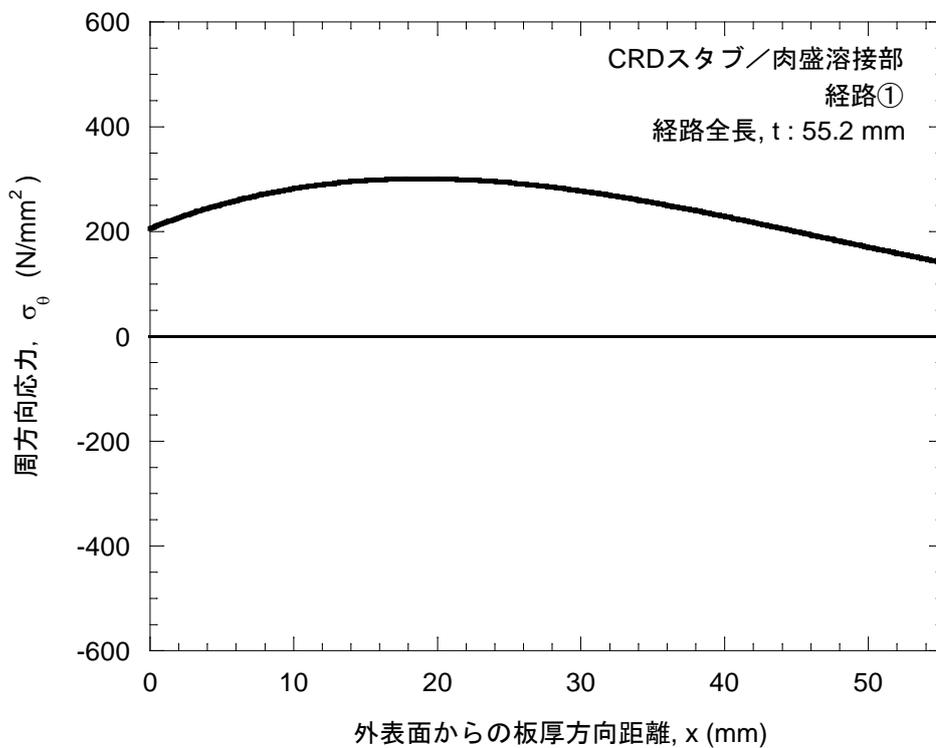
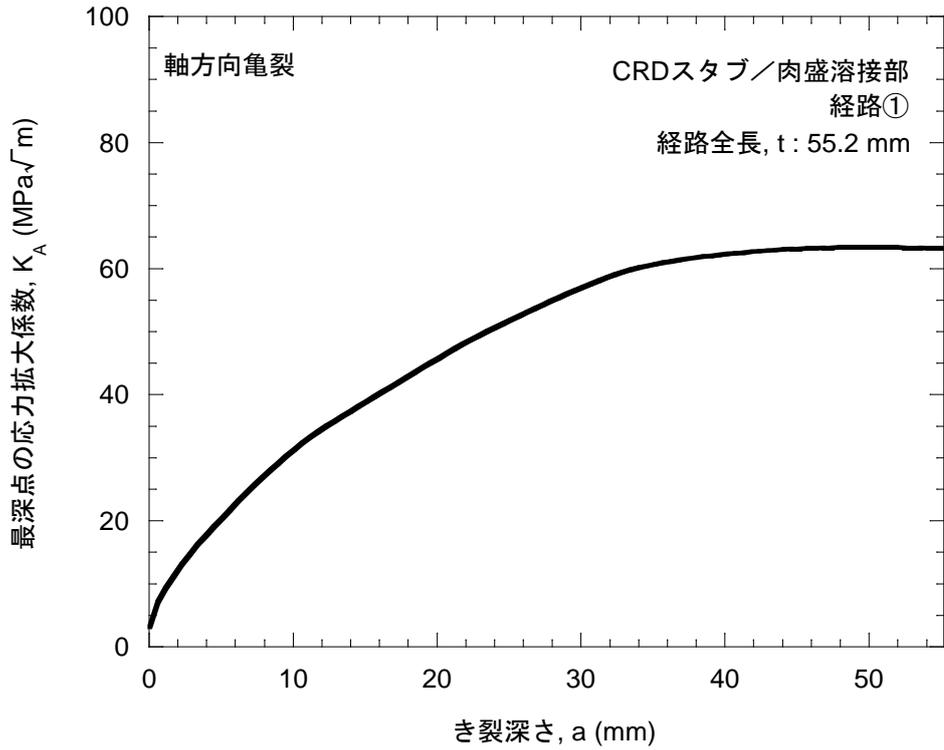
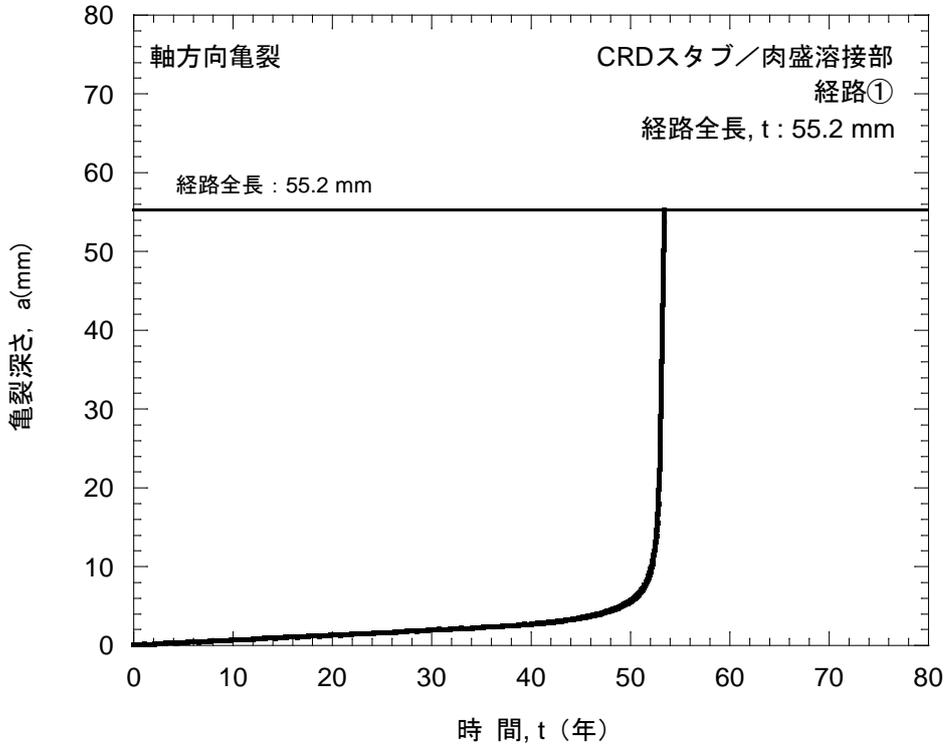


図 D-9 スタブチューブ/下鏡溶接部，経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布（残留応力+運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図 D-10 スタブチューブ/下鏡溶接部, 経路①の軸方向亀裂進展評価結果

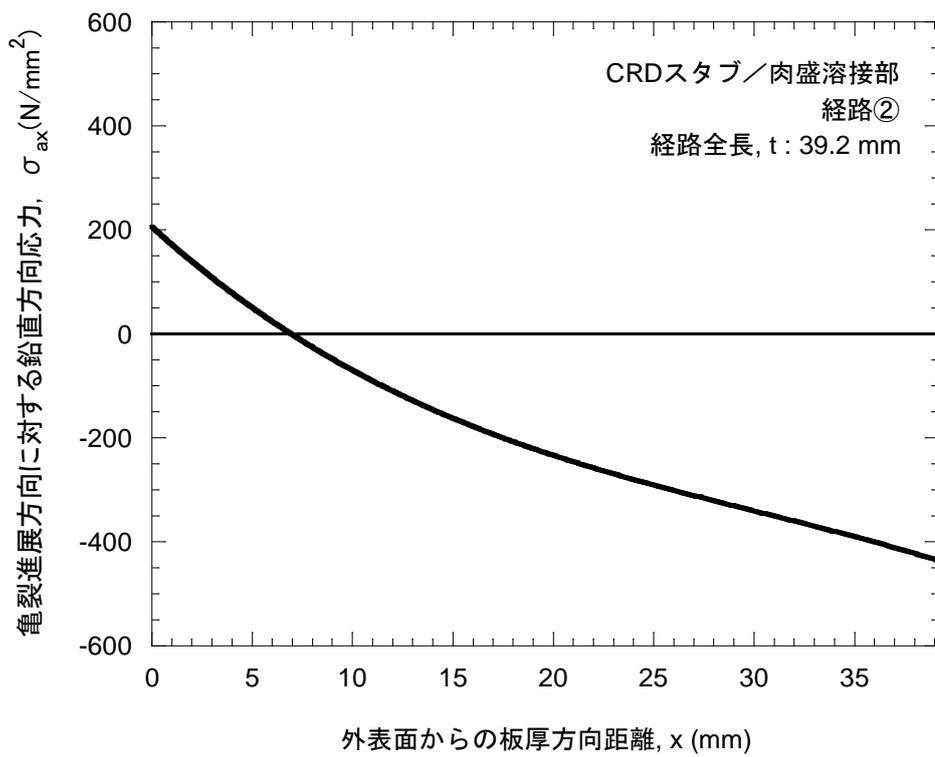
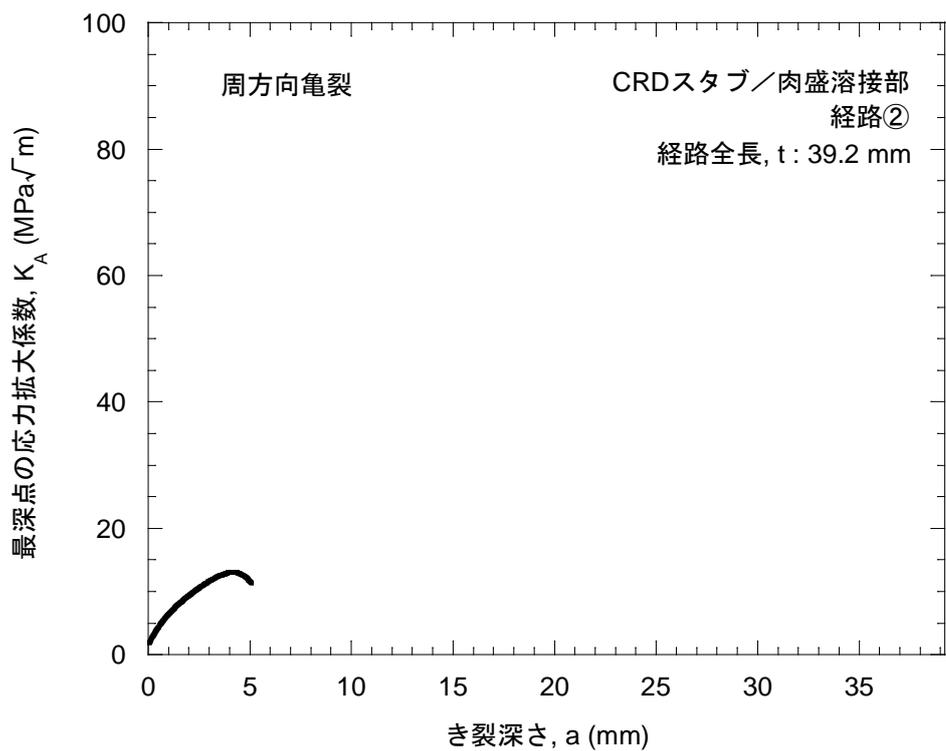
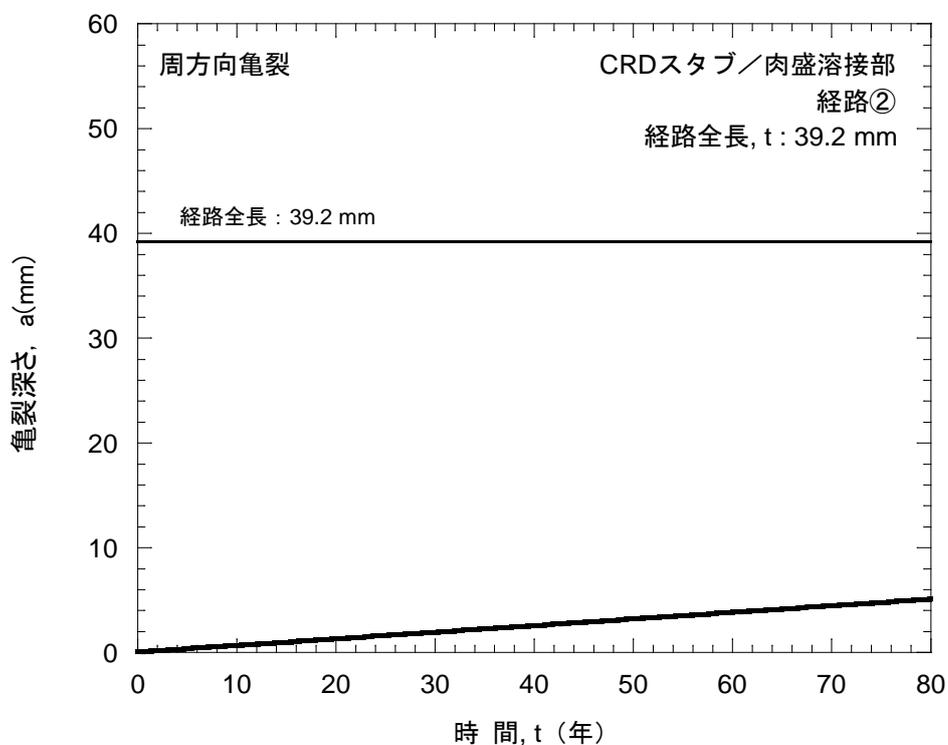


図 D-11 スタブチューブ/下鏡溶接部，経路②の周方向亀裂進展評価に用いた経路に鉛直方向の応力分布（残留応力+運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図 D-12 スタブチューブ/下鏡溶接部, 経路②に対する周方向亀裂進展解析結果

#### 4. まとめ

ハウジング/スタブチューブ溶接部，及びスタブチューブ/下鏡溶接部の亀裂進展評価結果を，表 D-1 に示す。

ハウジング/スタブチューブ溶接部（182 合金）の耐圧部を進展する経路の場合，軸方向亀裂は約 36 年で耐圧部を貫通するが，周方向亀裂は 80 年経過後も貫通しない評価となる。また，表面の周方向応力の方が約 170MPa 高いため，発生も軸方向亀裂が早いと考えられる。

ハウジング/スタブチューブ溶接部（182 合金）のハウジング板厚方向へ進展する経路の場合，溶接金属内で亀裂が停留し，ハウジングへは到達しない評価となる。

スタブチューブ/下鏡溶接部（182 合金）の場合，軸方向亀裂は約 53 年で耐圧部を貫通するが，周方向亀裂は 80 年経過後も貫通しない評価となる。表面の応力は周方向と軸方向で同程度のため，発生時期には大きな差異はないと考えられる。

表 D-1 CRD ハウジング溶接部の亀裂進展評価結果

評価対象位置	亀裂進展経路	評価対象	経路全長, t	経路全長に達する時間
ハウジング/ スタブチューブ溶接部	経路①	軸方向亀裂	34.0 mm	36.8年
	経路②	周方向亀裂	24.1 mm	80年以上
	経路③	周方向亀裂	23.9 mm	80年以上
スタブチューブ/ 下鏡溶接部	経路①	軸方向亀裂	55.2 mm	53.5年
	経路②	周方向亀裂	39.2 mm	80年以上

## 付録E CRDハウジングの強度評価

### 1. はじめに

本付録は、CRDハウジングに地震荷重が作用した場合の制御棒挿入性及び耐圧機能の維持に必要なハウジング/スタブチューブ溶接部、スタブチューブ/下鏡溶接部及び制御棒案内管スリーブ/ボディ溶接部の厚さ（以下、許容残存厚さ）と、これらの溶接部にSCC損傷を想定した場合の裕度についての評価結果をまとめたものである

### 2. 許容残存厚さ

#### 2.1 破壊評価

CRDハウジングのハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部に地震荷重が作用したときの許容残存厚さを、破壊評価により求める。

##### 2.1.1 評価手法

ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部は、材料が600系のニッケル基合金またはステンレス鋼であることから、破壊荷重は、正味断面に作用する応力が流動応力に達したときに破壊すると考える極限荷重評価法によるものとする。評価対象部は、図E-1に示すように、溶接部の厚さを板厚とする管としてモデル化する。

ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部については、地震の曲げモーメントによる応力が支配的であるため、破壊モーメントにより評価する。

全周亀裂に対する管の破壊モーメント $M_c$ は次式<sup>1)</sup>により与えられる。

$$M_c = 2\sigma_f R^2 t \left\{ 2(1-x)\sin\beta_L + x\sin\theta \right\} \quad (1)$$

$$\beta_L = \pi + \frac{1}{1-x} \left( \frac{x\theta - \pi}{2} - \frac{\pi R p_r}{4 t \sigma_f} \right), \quad x = a/t \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_f$ ：流動応力 $=2.7Sm$ <sup>2)</sup>

$Sm$ ：設計応力強さ $=164 \text{ N/mm}^2$ （告示501号別表第2 NCF600）

$R$ ：モデル化された管の平均半径

$t$ ：モデル化された管の板厚

$p_r$ ：内圧（保守的に内圧として評価する。）

$a$ ：亀裂の投影深さ

$\theta$ ：亀裂の半角（すなわち $\pi$  (rad)）

##### 2.1.1 限界荷重

限界モーメント $M_c(SF)$ は、式(1)で与えられる破壊モーメント $M_c$ に安全率 $SF$ を考慮して、次式により与えられる。

$$M_c(SF) = M_c / SF \quad (3)$$

ここで、 $SF$ : 安全率=1.39

(JSME維持規格<sup>2)</sup> に示される許容状態Ⅲ<sub>AS</sub>及びⅣ<sub>AS</sub>の安全率)

各評価部の亀裂深さに対する限界荷重の関係を図 E-2～図 E-3 に示す。

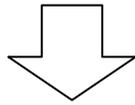
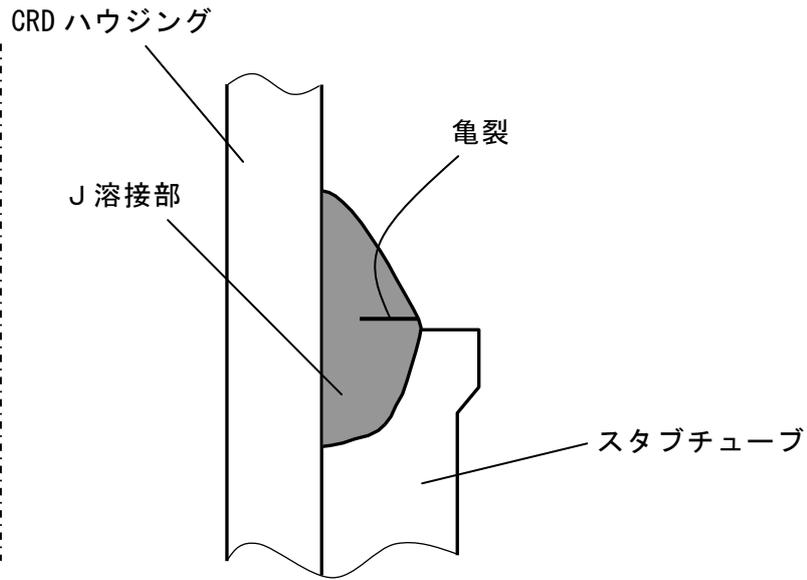
### 2.1.3 許容残存厚さ

図 E-2～図 E-3 に示す破壊評価による亀裂深さと限界荷重の関係から許容残存厚さを求める。

図 E-2～図 E-3 において、評価部に作用する荷重に対する亀裂深さを、板厚から差し引いた値を許容残存厚さとする。作用荷重に対する許容残存厚さを表 E-1 に示す。ここで、評価部に作用する曲げモーメント( $M$ )は、地震荷重による曲げモーメントである。

表 E-1 破壊評価結果

評価位置	作用曲げモーメント $M$	許容残存厚さ
ハウジング/スタブチューブ 溶接部	29.7 kN・m	3.6 mm
スタブチューブ/下鏡 溶接部	30.3 kN・m	3.0 mm



破壊評価のためのモデル化

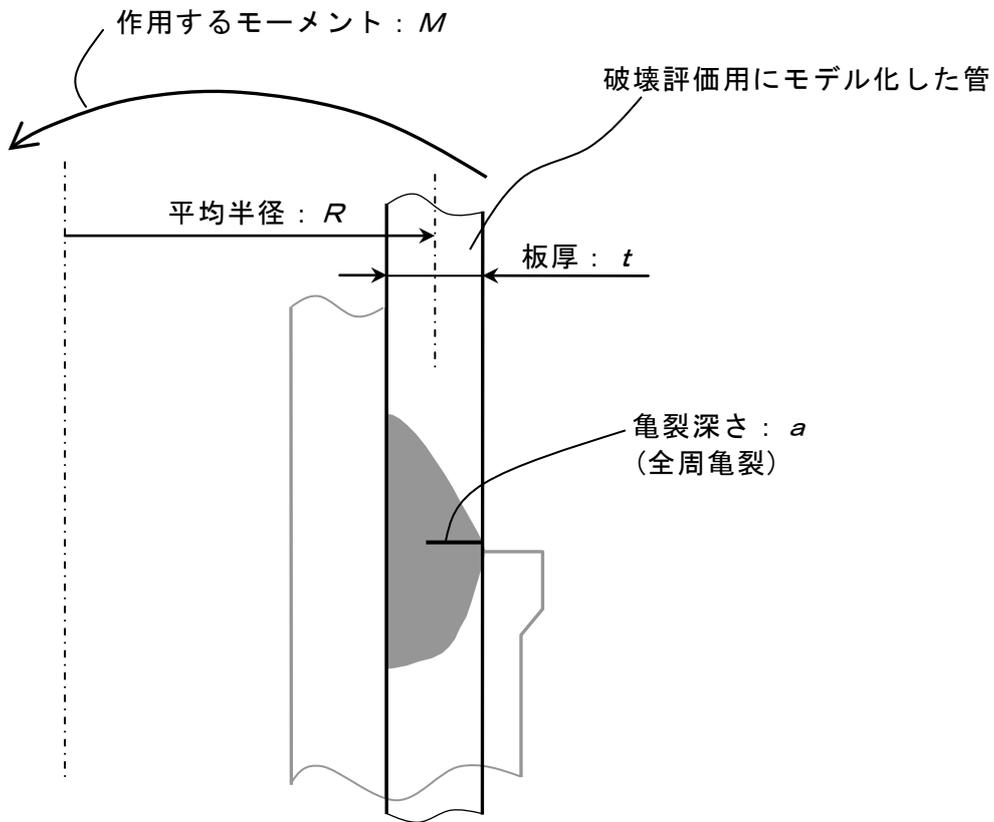


図 E-1 破壊評価に用いる溶接部のモデル化の概念図

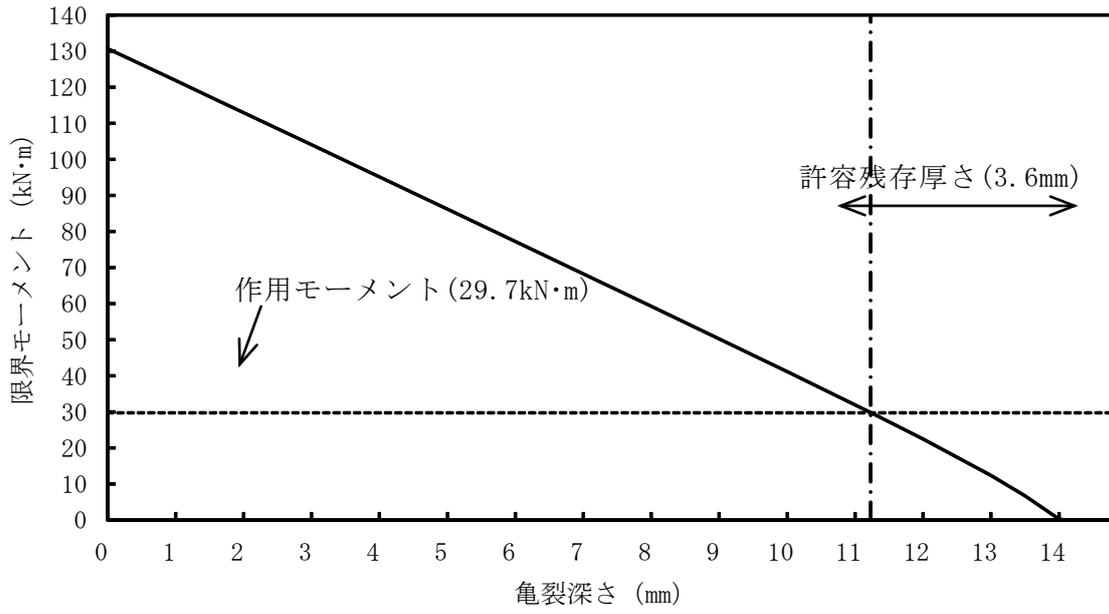


図 E-2 亀裂深さと限界モーメントの関係  
(ハウジング/スタブチューブ溶接部)

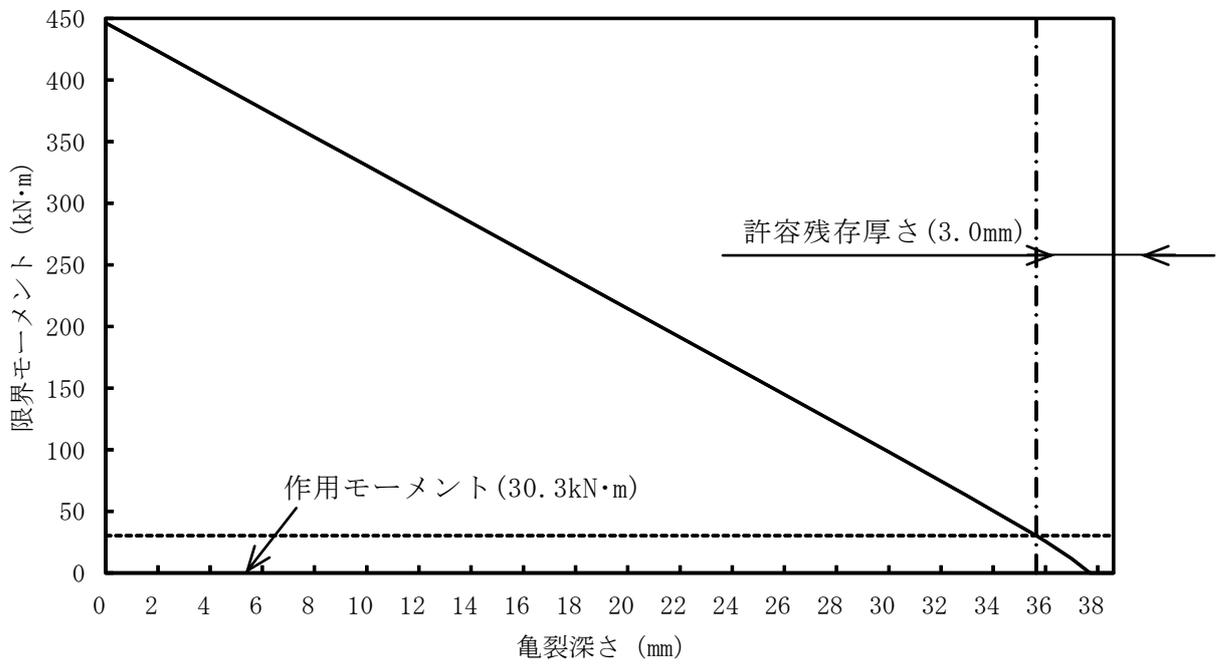


図 E-3 亀裂深さと限界モーメントの関係  
(スタブチューブ/下鏡溶接部)

## 2.2 制御棒挿入性に及ぼす影響評価

IGSCC の亀裂進展に伴い、地震時の変形が大きくなった場合の制御棒挿入性への影響を評価する。

### 2.2.1 想定亀裂

想定亀裂を表 E-2 に示す。なお、ハウジング/スタブチューブ溶接部の溶接金属の亀裂による変形の影響は、スタブチューブ/下鏡溶接部の亀裂による影響と同等なため、これに代表させた。

表 E-2 想定亀裂

記号	亀裂想定部位	想定亀裂	想定亀裂寸法
A	案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部	周方向全周均等亀裂	亀裂開口幅：0.1mm 亀裂深さ：板厚貫通
B	ハウジング/スタブチューブ溶接部	周方向全周均等亀裂	亀裂開口幅：0.1mm 亀裂深さ：板厚貫通
C	スタブチューブ/下鏡溶接部	周方向全周均等亀裂	亀裂開口幅：0.1mm 亀裂深さ：板厚貫通

### 2.2.2 評価方法

地震時のハウジングと案内管取合部の変位量を FEM 解析で求め、炉心支持板位置とのオフセット量が、制御棒挿入性に影響を及ぼさない範囲内であるか否かを判定する。

#### (1) 変位量の算定

##### a. 解析モデル

3次元 FEM 弾性解析。解析モデルの考え方を図 E-4 に示す。

##### b. 荷重条件

自重及び S2 地震を考慮する。

#### (2) 変位量の許容値

表 E-3 に示す電力共通研究「シュラウド取替工法に関する研究」で確認された、地震時の制御棒挿入性に影響を及ぼさない炉心支持板位置と CRD ハウジング上端のオフセット量を、変位量の許容値とする。

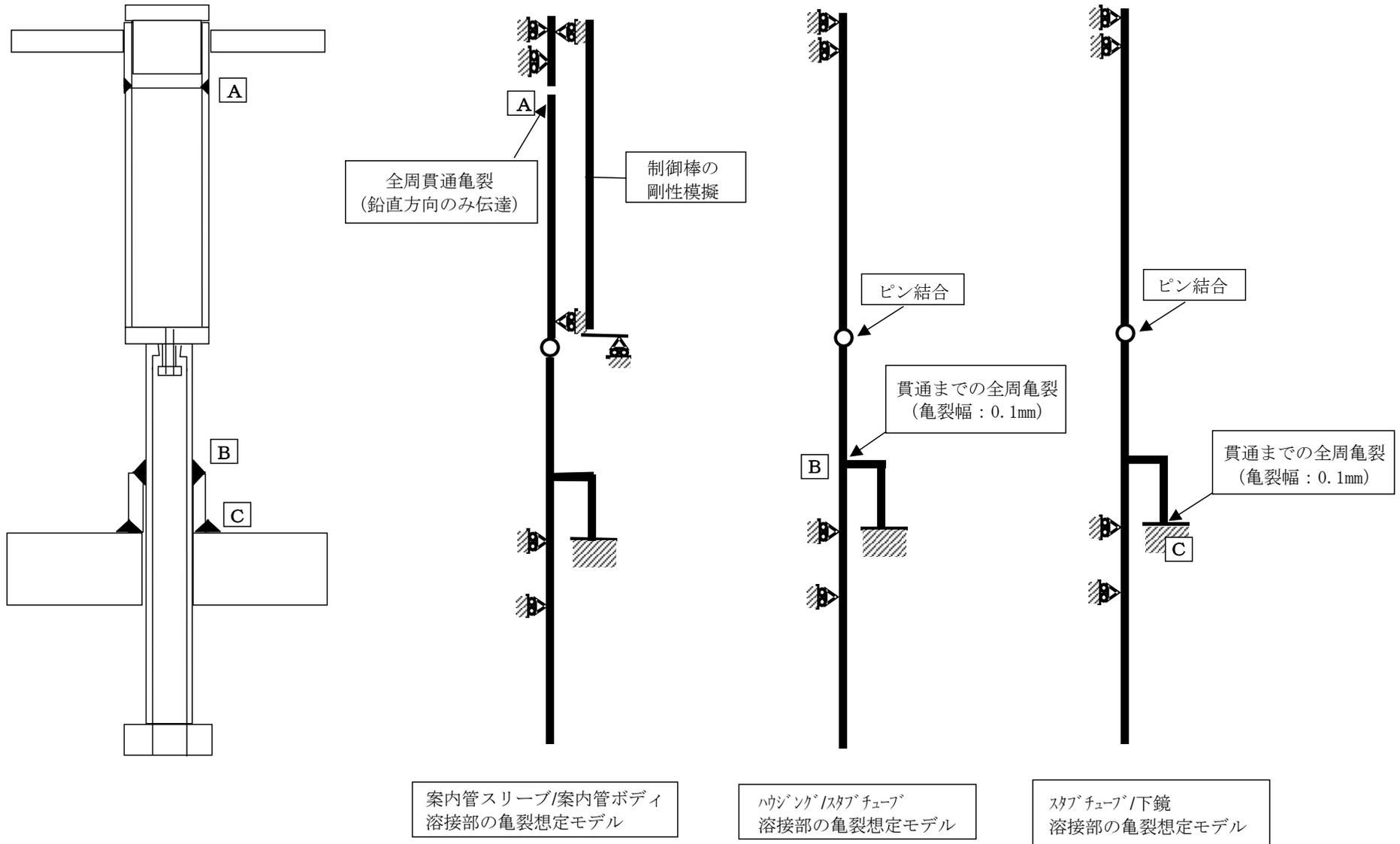
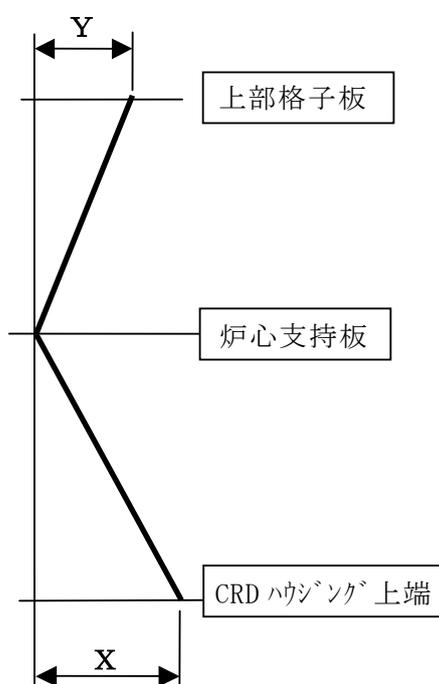


図 E-4 解析モデルの考え方

表 E-3 CRDハウジング上端の許容変位量

		X	Y
①	建設時の最大公差	3.64mm	2.38mm
②	制御棒挿入性に問題ないことが確認されている偏差	10.86mm	9.60mm
建設時の裕度 (②-①)		7.22mm ← CRDハウジング上端の許容変位量	



### 2.2.3 評価結果

評価結果を表 E-4 に示す。各想定亀裂（貫通亀裂）に対するハウジング上端の変位量は、いずれも許容値未満であり、制御棒挿入性への影響はない。

表 E-4 ハウジング上端の変位量評価結果

記号	亀裂想定部位	ハウジング上端の変位量	
		発生亀裂深さに対する変位量	許容値
A	案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部（貫通亀裂）	3.8mm	7.22mm
B	ハウジング/スタブチューブ溶接部（貫通亀裂）	2.7mm	
C	スタブチューブ/下鏡溶接部（貫通亀裂）	2.7mm	

### 3. 点検により健全性が確認された部位の強度評価

#### 3.1 想定する亀裂深さ

破壊評価に用いる周方向亀裂の深さは、点検により健全性が確認された場合に、次回の点検までに想定される最大の亀裂深さとし、以下により設定した。

ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部に想定する周方向亀裂進展経路を、図 E-5 に示す。（付録 D 参照）

ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部において、軸方向亀裂が貫通する直前に漏えい試験を実施した場合を想定すると、運転中に軸方向亀裂の貫通が生じ、次回定検まで運転が継続される可能性があることから、破壊評価に用いる周方向亀裂深さは、軸方向亀裂貫通後 1 年経過した時点の値を用いる。

付録 D に示す手法により求めた各部位の破壊評価に用いる周方向亀裂深さを、表 E-5 に示す。

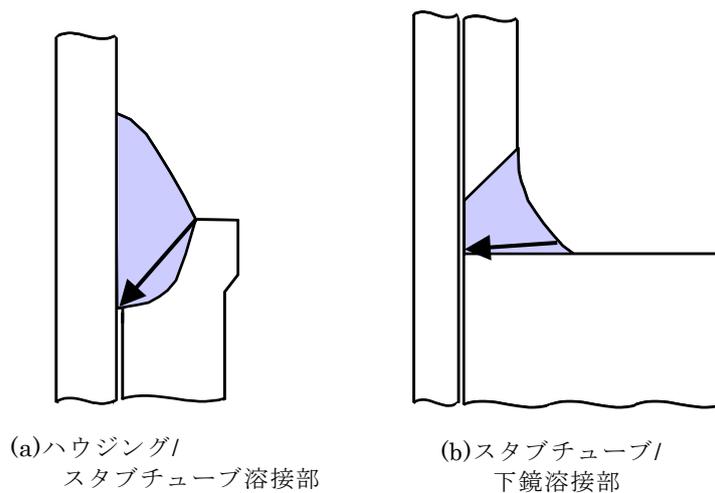


図 E-5 CRD ハウジングに想定する周方向亀裂進展経路

表 E-5 CRD ハウジング溶接部の破壊評価に用いる周方向亀裂深さ

評価位置	破壊評価に用いる周方向亀裂深さ	備考
ハウジング/スタブチューブ溶接部	2.4 mm	亀裂進展開始 80 年後も周方向亀裂は貫通しない。
スタブチューブ/下鏡溶接部	3.5 mm	

### 3.2 破壊評価

破壊評価は 2.1.1 項及び 2.1.2 項に示す手法にて行なう。

評価モデルでの亀裂深さは、表 E-5 に示す SCC 亀裂進展評価から得られた亀裂深さを、モデル化した管の板厚方向に投影した深さとする。(図 E-6 参照)

なお、亀裂は、保守的な評価を得ることを目的に、全周亀裂を仮定する。

各評価部位の限界荷重は、式(1)～(3)により求める。評価位置に作用する荷重と限界荷重を比較して表 E-6 に示す。

表E-6 に示すように、評価位置に作用するモーメント $M$ は、限界モーメント $M_c$  ( $SF$ )より小さく、SCCにより亀裂が生じても、地震時に不安定破壊を起こすことはない。

表 E-6 CRD ハウジング溶接部の破壊評価結果

評価位置	投影した 亀裂深さ： $a$	限界 モーメント $M_c$ ( $SF$ )	作用曲げ モーメント $M$	比率
ハウジング/スタブチューブ 溶接部	1.5 mm	118 kN・m	29.7 kN・m	0.25
スタブチューブ/下鏡 溶接部	3.4 mm	407 kN・m	30.3 kN・m	0.07

### 4. まとめ

- (1) ハウジング/スタブチューブ溶接部の許容残存厚さは 3.6mm、スタブチューブ/下鏡溶接部の許容残存厚さは 3.0mm である。
- (2) 制御棒案内管スリーブ/ボディ溶接部が全周破断しても制御棒挿入性が維持される。
- (3) VT-2 により漏洩が認められなかったハウジング/スタブチューブ溶接部に想定される周方向亀裂深さ（板厚方向に投影した深さ）は最大 1.5mm（残存厚さ 13.3mm）であり、許容残存厚さに対して 3.7 倍の裕度を有する。
- (4) VT-2 により漏洩が認められなかったスタブチューブ/下鏡溶接部に想定される周方向亀裂深さ（板厚方向に投影した深さ）は最大 3.4mm（残存厚さ 35.2mm）であり、許容残存厚さに対して 11.7 倍の裕度を有する。
- (5) したがって、点検により健全性を確認したハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部は、 $S_2$ 地震の場合でも不安定破壊を起こすことなく、制御棒挿入性及び耐圧機能が維持される。

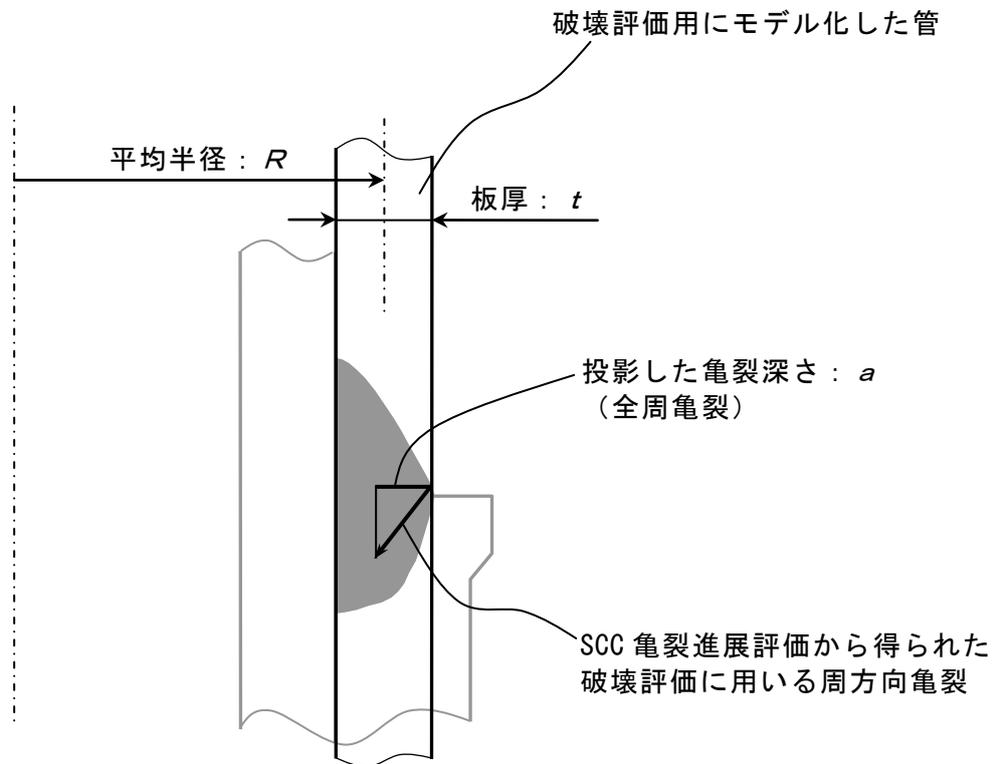


図 E-6 破壊評価に用いる投影亀裂深さ

参考文献

- 1) M. F. Kanninen, D. Broek, C. W. Marschall, E. F. Rybicki, S. G. Sampath, F. A. Simonen, G. M. Wilkowski, " MECHANICAL FRACTURE PREDICTIONS FOR SENSITIZED STAINLESS STEEL PIPING WITH CIRCUMFERENTIAL CRACKS" , EPRI NP-192, September 1976.
- 2) 発電用原子力設備規格 維持規格 JSME S NA1-2000, 日本機械学会, 2000年5月

## 付録F CRDハウジング圧力境界部からの漏えいの影響評価

### 1. 目的

本付録は、CRDハウジングの圧力境界の溶接部において、万一軸方向亀裂が貫通した場合の冷却材漏えいの影響を評価したものである。

### 2. 評価

#### 2.1 想定される軸方向亀裂の大きさ

CRDハウジングでは、ニッケル合金溶接金属部とステンレス及びニッケル基合金母材の溶接による熱影響部にSCC亀裂が想定され、その領域の大きさは最大でも40mm程度であるため、軸方向の表面亀裂長さは40mmと仮定する。(図F-1参照)

内圧による応力は $33\text{N/mm}^2$ 程度であるため、プラントの起動/停止による疲労亀裂進展量は微小(100回の起動/停止で0.1mm未満)である。

したがって、漏えいの影響評価に用いる軸方向貫通亀裂の長さは、圧力境界部において材質的にSCC亀裂が進展可能な領域である(a)ハウジング/スタブチューブ溶接部(ニッケル合金溶接金属、ハウジング及びスタブチューブ熱影響部)、及び(b)スタブチューブ/下鏡溶接部(ニッケル合金溶接金属、スタブチューブ熱影響部)の寸法に基づいて評価すると、約15mm以下である。なお、温度が低いためSCC損傷可能性が極めて小さいハウジング/フランジ溶接部は評価対象外とした。

#### 2.2 漏えい量

SCCによる亀裂開口を0.1mmと仮定すると、長さ15mmの貫通亀裂からの漏えい量は、安全解析において想定されている配管破断開口面積と当該開口部からの冷却材の流出量(ブローダウン流量)から、破断面積換算により約 $0.03\text{ l/s}$ となる。これは、常時流れているCRD冷却水により補給可能な量の数%以下である。したがって、万一軸方向亀裂が貫通しても、CRD冷却水により補給可能である。

#### 2.3 構造強度への影響

40mm程度の軸方向表面亀裂は、CRDハウジングの構造強度、制御棒挿入性、及び燃料集合体の支持機能へ影響しない。

### 3. まとめ

CRDハウジングの圧力境界の溶接部で想定される長さ15mm程度の軸方向の貫通亀裂が生じてても、原子炉安全への影響はない。

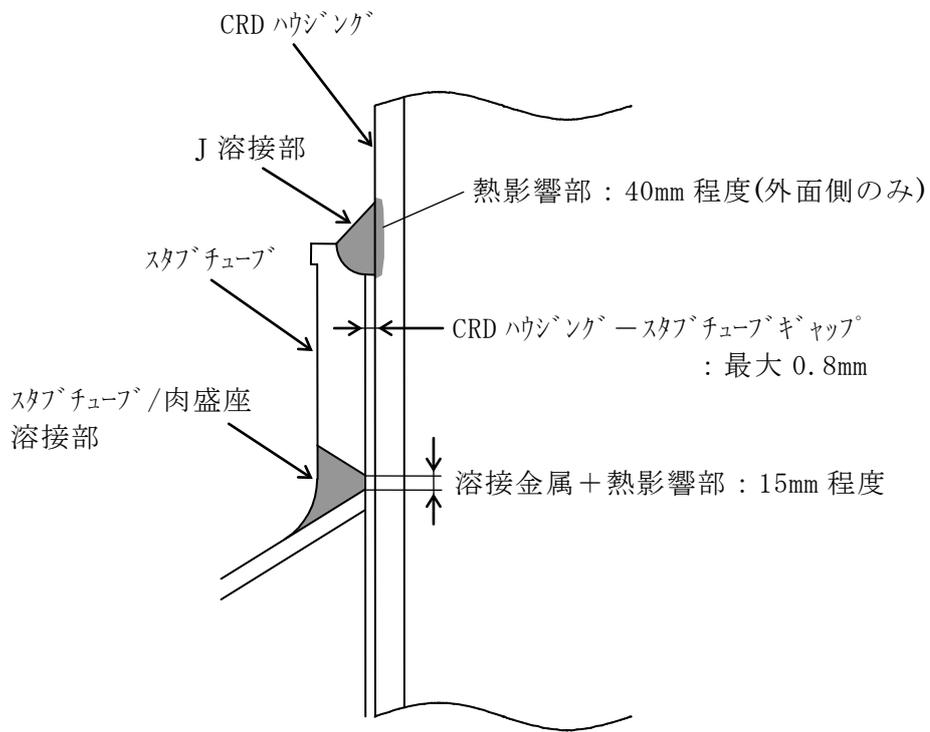


図 F-1 CRDハウジングに想定される SCC領域

## 付録 G SCC 予防保全技術

### 1. はじめに

本付録は、CRDハウジングの溶接部の SCC 予防保全技術の例をまとめたものである。

### 2. 予防保全技術

SCC は、SCC 感受性を有する材質、引張残留応力及び腐食環境の三因子が重畳して発生するため、三因子の一つ以上の因子を改善する予防保全工法を適用した場合は、その有効性を考慮して、点検対象部位及び点検周期を設定できる。CRDハウジングの溶接部への適用実績があるか、又は将来適用が可能と考えられる予防保全技術の例を以下に示す。

#### (1) 耐食材肉盛

##### a. 工法概要

ニッケル合金の 82 合金 (JIS YNiCr-3 または SNi6082)、SUS316L 等の耐 SCC 性の高い材料で、施工対象面を肉盛溶接する。ICMハウジング取付け溶接部内面等へ適用されている。

##### b. 有効性

表面が耐 SCC 性の高い肉盛材で覆われるため、耐 SCC 性材料と同様に、SCC の発生を抑制できる。貴金属を添加した材料で肉盛る場合は、(4) 項の貴金属表面処理と同様の水質改善効果も期待できる。図 G-1 に、ニッケル合金の 182 合金 (JIS DNiCrFe-3 または ENi6182) 及び 182 合金改良材の、SCC 感受性試験結果の比較を示す。

##### c. 点検実施時期

耐 SCC 性が優れた材料と同等に扱うことができる。

#### (2) ピーニング

##### a. 工法概要

施工対象面に衝撃圧を付与することにより、表面層を圧縮応力とする。衝撃圧の付与方法により、ショットピーニング、ウォータージェットピーニング、レーザピーニング等があり、シュラウド、シュラウドサポート等へ適用されている。

##### b. 有効性

図 G-2、図 G-3 及び表 G-1、表 G-2 に、ショットピーニング及びウォータージェットピーニング施工した 182 合金の圧縮応力分布測定結果及び SCC 感受性試験結果の例を示す。ピーニングにより表面層が圧縮応力となり、SCC 発生が抑制される。

##### c. 点検周期

耐 SCC 性が優れた材料と同等に扱うことができる。

#### (3) 水素注入

##### a. 手法概要

炉水に水素を注入し、酸化性成分との再結合を促進して水質を改善するもので、国内外の多くのプラントで適用されている。水素注入による水質改善効果と、副次影響である主蒸気線量率の上昇を考慮して、注入量を設定する。

b. 有効性

水素注入により、炉水の腐食環境の指標となる腐食電位を低減できるため、SCCの発生及び進展を抑制できる。腐食電位と182合金のSCC感受性及び亀裂進展速度の関係の測定例を図G-4及び図G-5に示す。腐食電位低下に伴いSCC破面率（SCC感受性の指標）及び亀裂進展速度が減少する。約-50mV以下では、SCC感受性が認められず、これがしきい値と考えられる。（図G-4） 水素注入量と腐食電位の関係の測定例を図G-6に示す。

c. 点検周期

水素注入量に対応する当該部位の腐食電位を水質解析結果等から評価し、腐食電位と亀裂進展速度との相関に基づいて、想定欠陥又は検出された欠陥からの亀裂進展量を求めることにより、点検実施時期を設定することができる。亀裂進展速度式は付録Bによる。

(4) 貴金属表面処理

a. 工法概要

水素注入と併用する。施工対象面をPt、Pd等の貴金属で表面処理することにより、水素注入による水質改善効果を高めるものであり、比較的少ない水素注入量で腐食電位を低減できる。貴金属錯体の薬液を炉水に注入する手法（貴金属注入）、及び貴金属を含む材料を溶射する手法（貴金属コーティング）があり、両者ともに実機へ適用（後者はシュラウドへ適用）されている。

b. 有効性

貴金属表面処理による腐食電位低減の概念図を図G-7に示す。少ない水素注入量で、腐食電位を大幅に低減できる。図G-8に、貴金属表面処理を施した182合金の腐食電位の測定例を示す。

c. 点検周期

水素注入量に対応する当該部位の腐食電位を水質解析結果等から評価し、腐食電位と亀裂進展速度との相関に基づいて、想定欠陥又は検出された欠陥からの亀裂進展量を求めることにより、点検実施時期を設定することができる。亀裂進展速度式は付録Bによる。

(5) 研磨

a. 工法概要

研磨施工表面に塑性変形を付与することにより、圧縮残留応力を生成する技術である。研磨は、回転駆動ヘッドに取り付けた研磨砥石を材料表面に軽く押し付けることにより施工する。シュラウド等へ適用されている。

b. 有効性

図 G-9 に炉心シュラウド H4 溶接を模擬した試験材の研磨による応力改善例を示す。研磨並進方向（図中 L 方向），直交方向（図中 T 方向）とも，溶接による引張残留応力（左側の図）が，研磨施工により，表面から 50 μm 程度の深さまで圧縮応力に改善（右側の図）されている。

c. 点検周期

耐 SCC 性が優れた材料と同等に扱うことができる。

表G-1 182合金のショットピーニングによるSCC発生抑制効果<sup>2)</sup>

CBB 試験条件	試験温度：288℃ 溶存酸素濃度：8ppm	導電率：1 μ S/cm 浸漬時間：500 時間
----------	--------------------------	-----------------------------

鋼 種	ショットピーニング未施工材	ショットピーニング施工材
182 合金	5/5	0/5

\*SCC発生試験片数/総試験片数

表G-2 ウォータージェットピーニング（WJP）によるSCC発生抑制効果<sup>2)</sup>

WJP 試験条件	圧力：60MPa 噴射角度：90°	噴射距離：160mm 噴射時間：40min/m (10min/m×4回)
CBB 試験条件	試験温度：288℃ 溶存酸素濃度：8ppm	導電率：1 μ S/cm 浸漬時間：500 時間

PWHT 模擬処理：621℃/24h，LTS 模擬処理：500℃/24h

鋼 種	WJP 未施工材	WJP 施工材
600 系のニッケル基合金/182 合金 /SUS304 PWHT+溶接+LTS	4/4	0/4

\*SCC発生試験片数/総試験片数

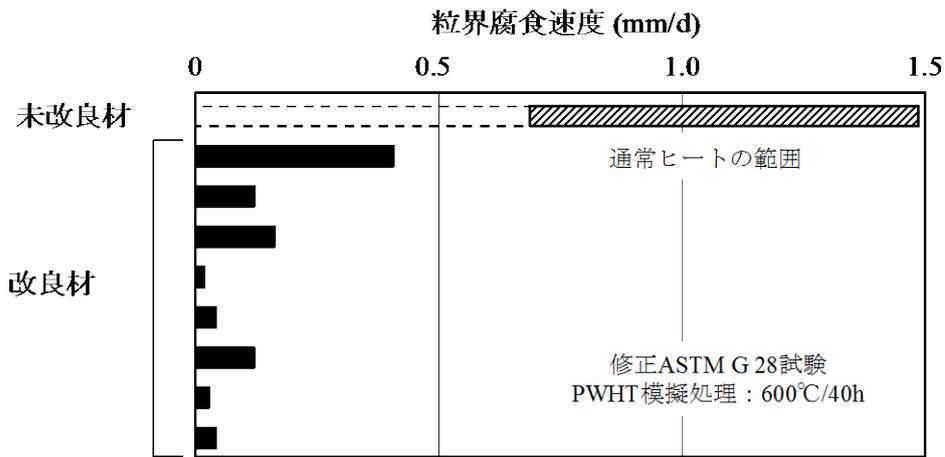


図 G-1 182 合金改良材の耐 SCC 性評価 (粒界腐食試験結果) <sup>1)</sup>

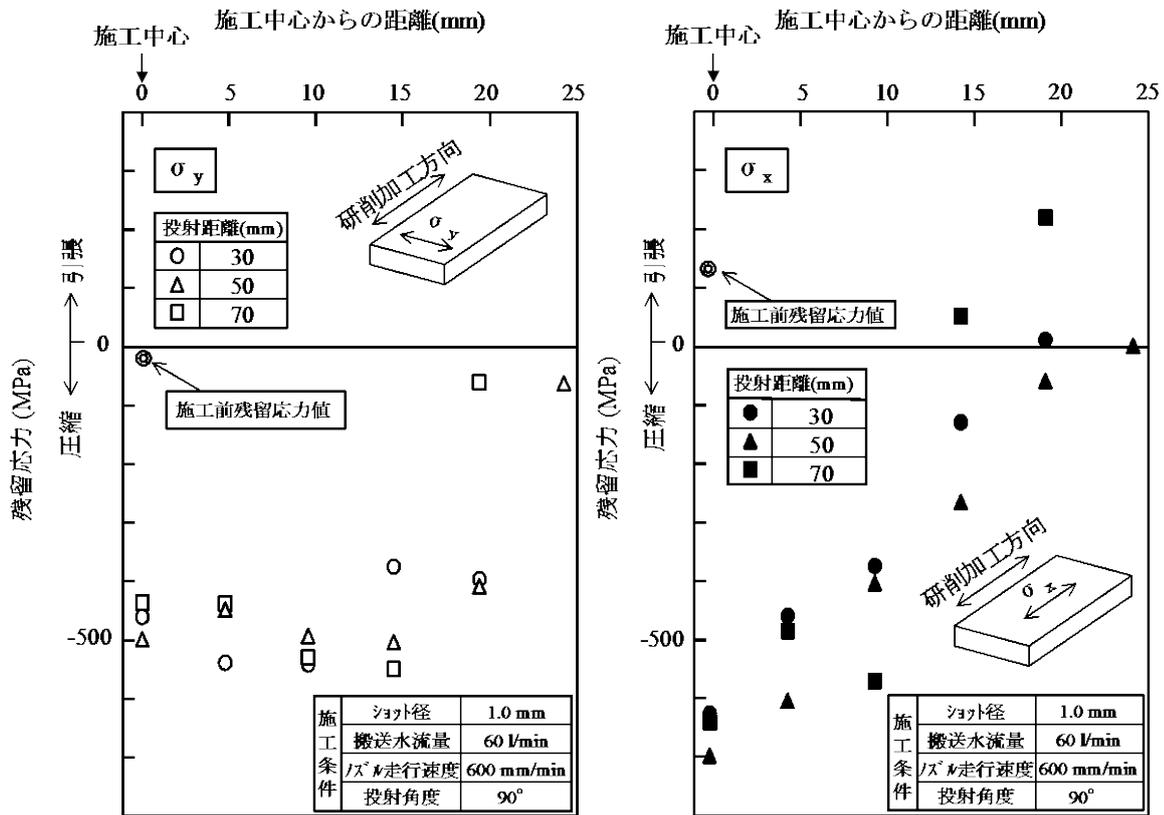


図 G-2 182 合金のショットピーニングによる応力改善効果 <sup>2)</sup>

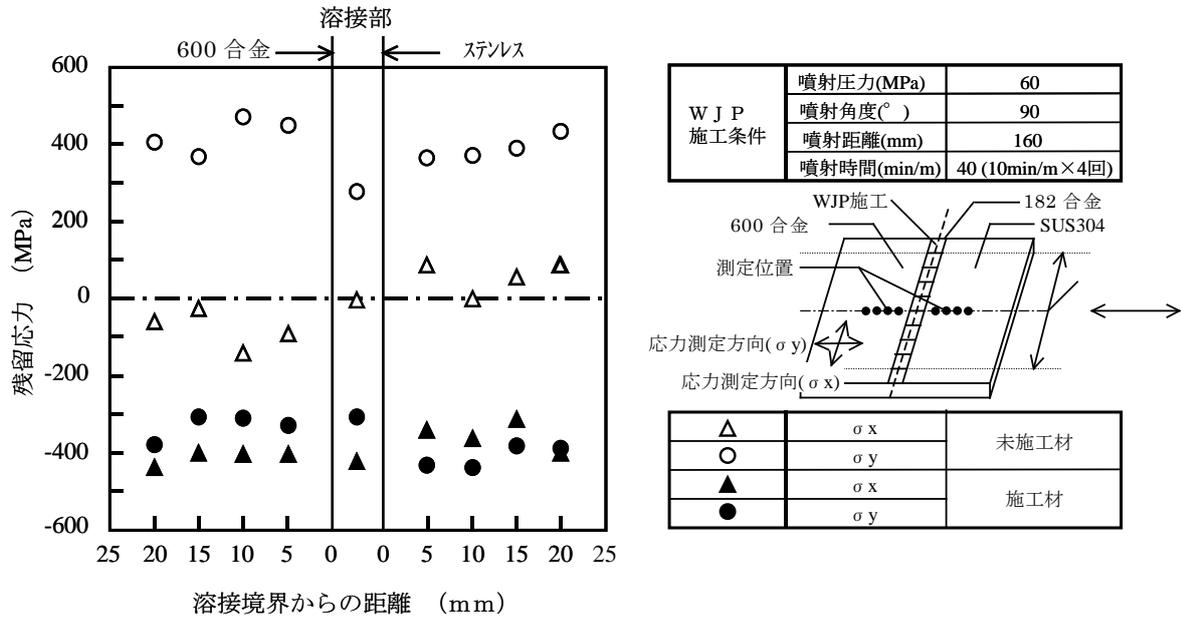


図 G-3 ウォータージェットピーニングによる応力改善効果<sup>2)</sup>

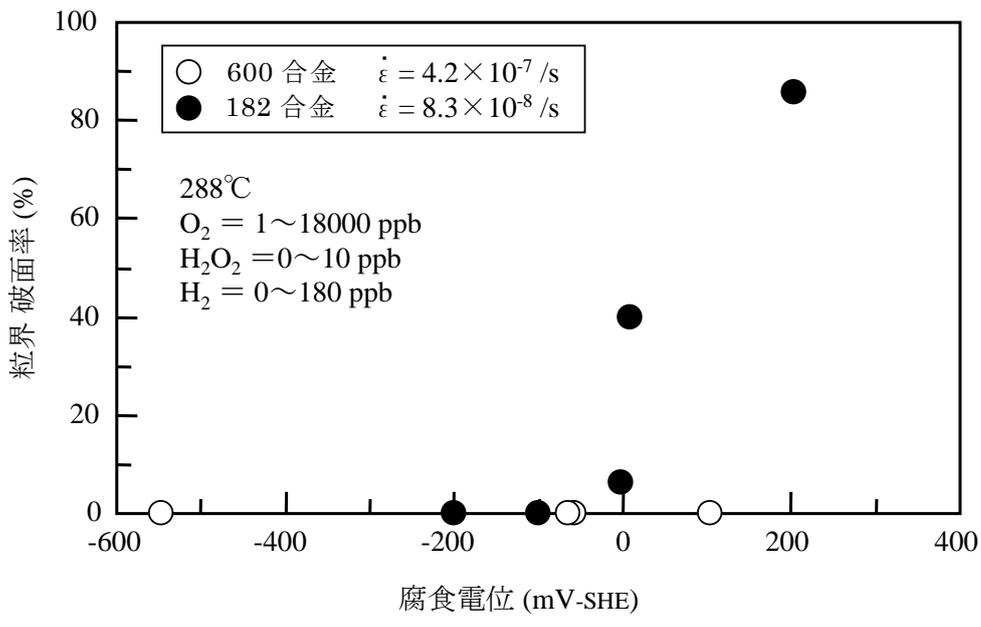


図 G-4 粒界破面率の腐食電位依存性測定結果<sup>3)</sup>

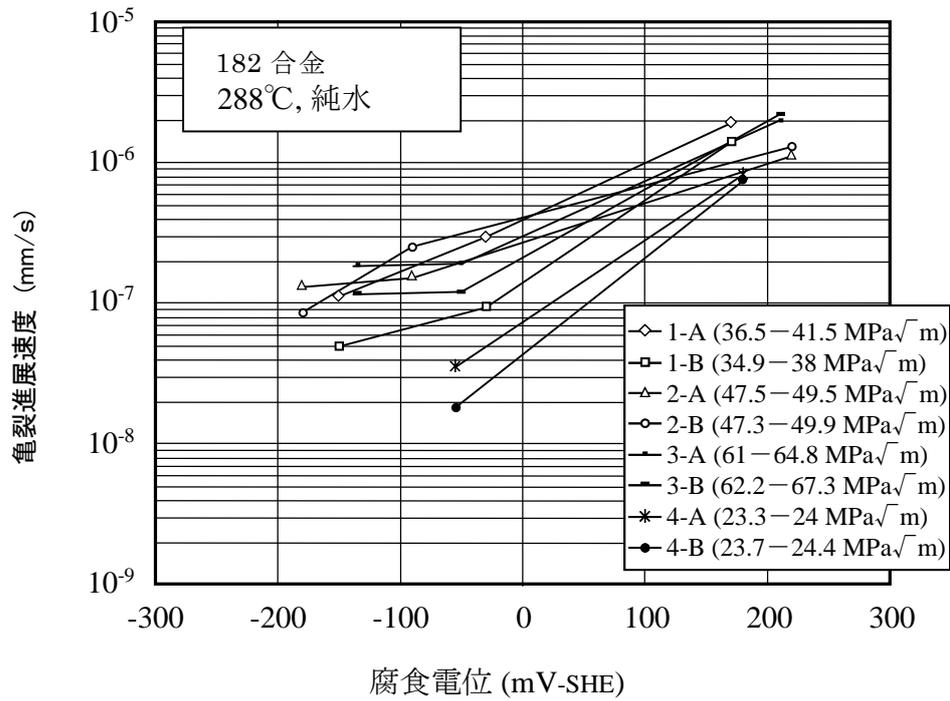


図 G-5 182 合金の亀裂進展速度の腐食電位依存性測定結果<sup>4)</sup>

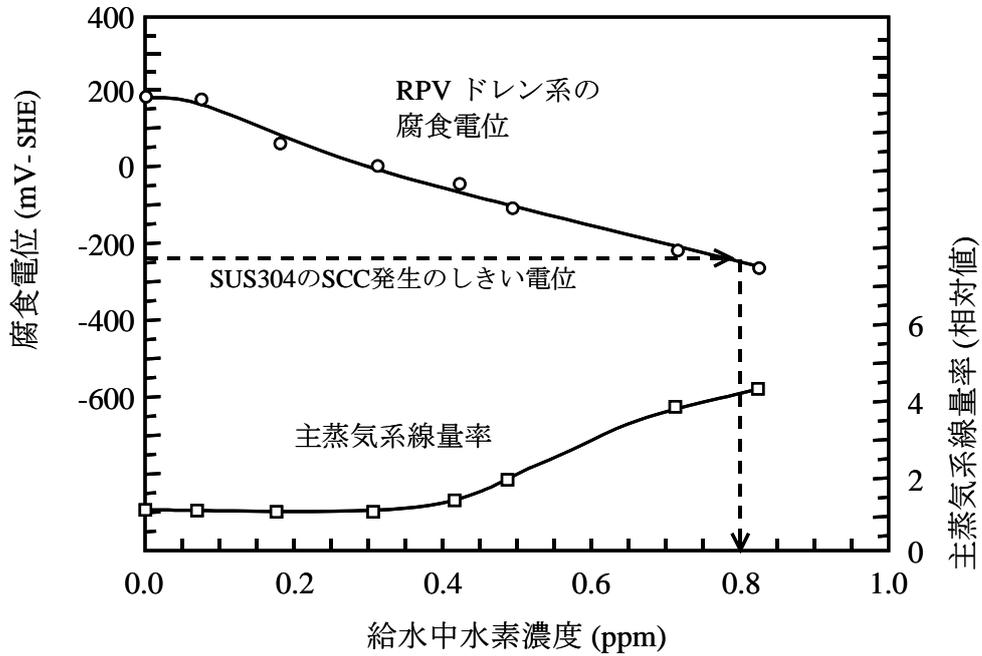


図 G-6 国内 BWR プラントのボトムドレン系で測定した腐食電位の  
水素注入量依存性<sup>5)</sup>

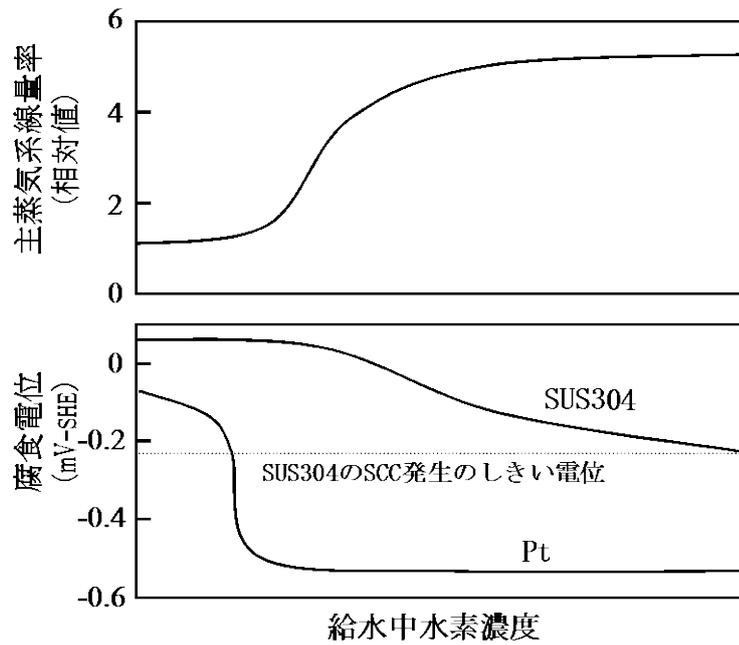


図 G-7 貴金属注入概念図

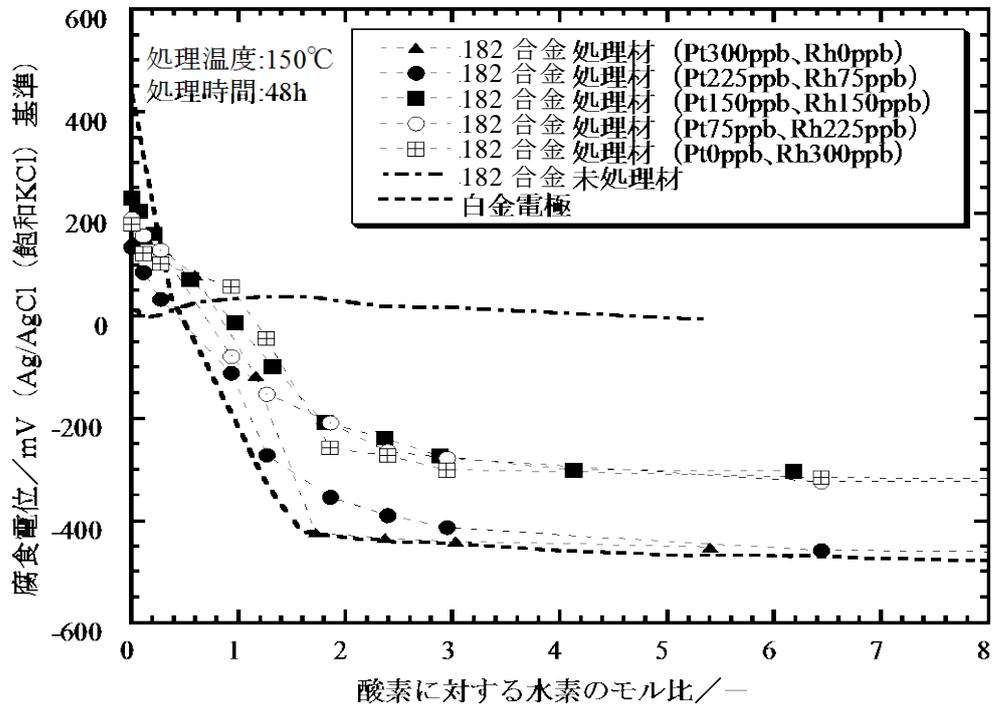
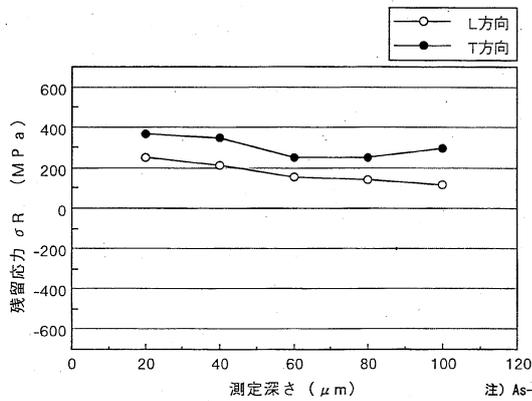
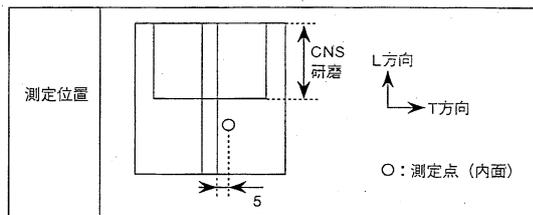
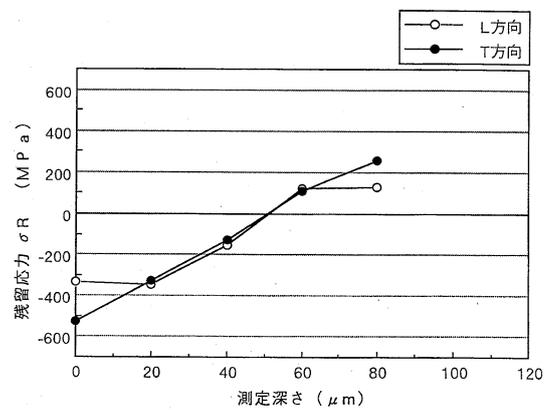
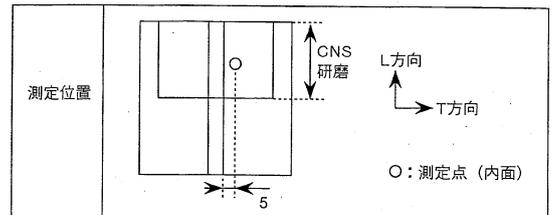


図 G-8 貴金属表面処理した 182 合金の腐食電位の水素濃度依存性<sup>7)</sup>  
 [処理温度：150℃，処理時間：48 時間]



内面As-Bead部深さ方向残留応力分布



内面側CNS研磨部深さ方向残留応力分布

### 研磨非施工部

### 研磨施工部

図 G-9 研磨施工による応力改善例 (炉心シュラウド H4 溶接模擬)

(出典) BWR 電力共通研究データ

#### [出典]

- 1) 山内 清 他:「安定化パラメータのコントロールによるニッケル基溶接金属の耐粒界腐食性並びに耐粒界型応力腐食割れ性の向上」, 防食技術, 35 (1986) 605.
- 2) 共同研究報告書「CRD スタブチューブの予防保全に関する研究」最終報告書 (平成 9 年 3 月)
- 3) 斎藤 宣久 他:「BWR 構造材料の SCC 発生特性に及ぼす水の放射線分解生成物の影響」, 第 40 回腐食防食討論会講演集, (1993) 171.
- 4) M. Itow et al.:“The Effect of Corrosion Potential on Alloy 182 Crack Growth Rate in High Temperature Water”, Proc. 8th Int. Symp. on Environmental Degradation of Mater. in Nuclear Power Systems- Water Reactors, NACE, (1997) 712.
- 5) J. Takagi et al.:“Long Term Verification Program on Hydrogen Water Chemistry at Japanese BWR”, Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7, BNES (1996).
- 6) S. Hettiarachchi et al.:“The concept of Noble Metal Chemical Addition Technology for IGSCC Mitigation of Structural Materials”, Proc. 7th Int. Symp. on Environmental Degradation of Mater. in Nuclear Power Systems- Water Reactors, NACE, (1995) 735.
- 7) 共同研究報告書「原子炉貴金属注入による腐食環境改善技術評価研究 (Phase-1)」 (平成 11 年 9 月)

## 付録 H 補修技術

### 1. はじめに

本付録は、CRDハウジングの溶接部に SCC による損傷が検出された場合の補修技術の例をまとめたものである。

### 2. 補修技術

CRDハウジングへの適用実績があるか、又は将来適用が可能と考えられる補修技術の例を以下に示す。

#### (1) 拡管

RPV 貫通孔の領域でハウジングを拡管して RPV 側へ密着させ、圧力境界部を形成する工法である。工法の概要を図 H-1 に示す。海外のプラントで適用実績がある。

#### (2) 取替

CRDハウジング及びスタブチューブ構造全体を新規構造と取り替える工法である。工法の概要を図 H-2 に示す。比較的規模の大きな工事となるが、損傷の発生部位によらず適用でき、抜本的な SCC 対策となる利点を有する。(財)原子力発電技術機構で実施された「原子力プラント保全技術信頼性実証試験」において、工法信頼性が確認されている。

#### (3) 補修溶接

取替工法の一部を適用して、気中環境での補修溶接が適用可能と考えられる。

また、局所的な補修溶接技術として、局部ガスシールドを利用した水中 TIG 溶接技術、水中レーザ溶接技術、水中プラズマ溶接技術等の開発が進められており、ICMハウジングへの適用可能性が考えられる。

#### (4) 封止溶接

封止溶接工法は、SCC による亀裂の開口を肉盛溶接で覆うことによって、亀裂を炉水環境から遮断し、SCC による亀裂進展阻止、炉水の漏えい防止を図り、機器の構造健全性を確保・維持する補修工法である。封止溶接工法としては、亀裂の開口が確認された原表面に直接肉盛溶接を施工する場合（図 H-3 (a)）と、原表面に追い込み加工を施した後に肉盛溶接を施工する場合（図 H-3 (b)）がある。

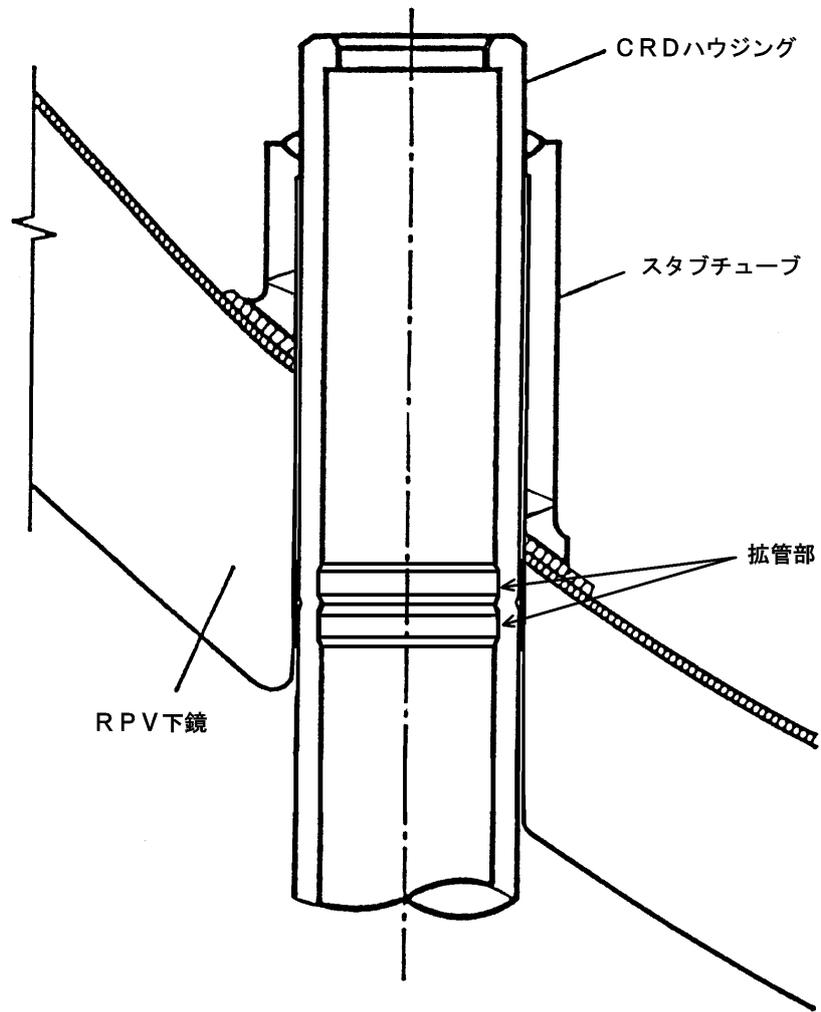


図 H-1 拡管工法

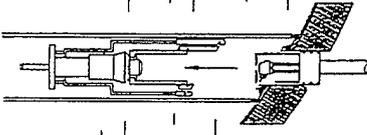
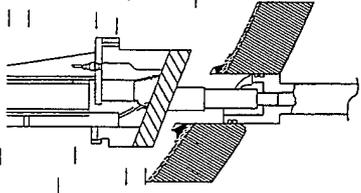
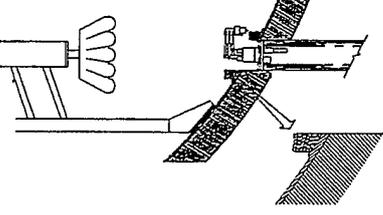
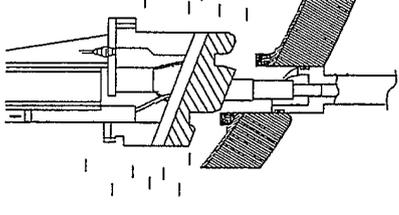
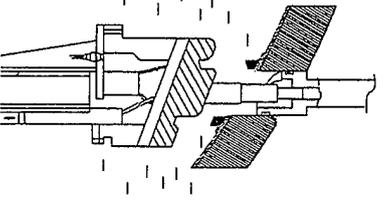
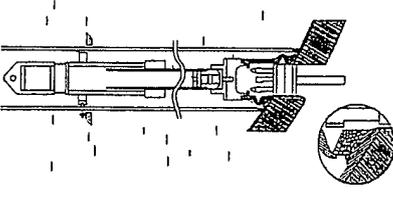
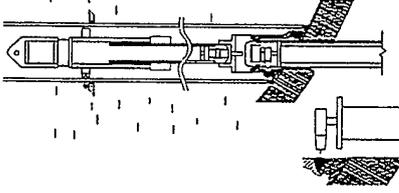
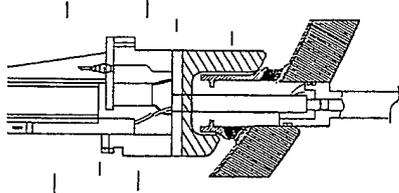
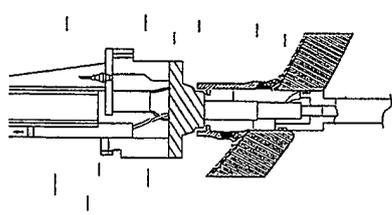
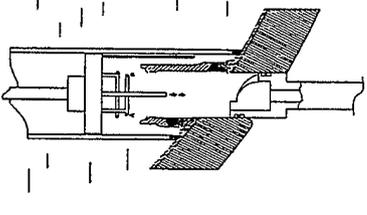
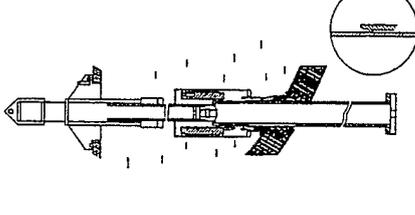
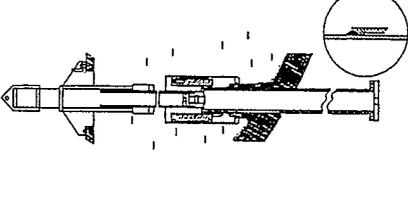
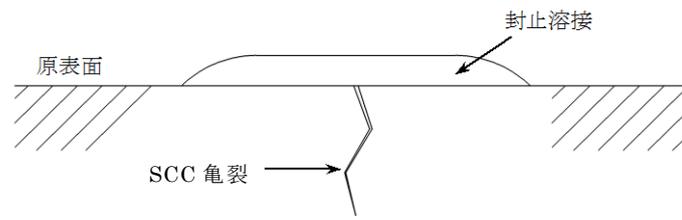
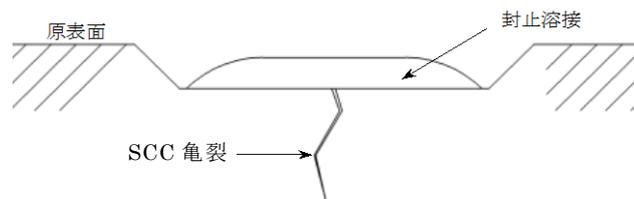
項目	ステップ1	ステップ2	ステップ3	ステップ4	ステップ5	ステップ6
作業概要	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・シールパイプの設置</li> <li>・ハウジング切斷 (UHP)</li> <li>・スタブフェーブ切斷 (UHP)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設肉盛座平坦化加工 (EDM)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・既設肉盛座肉厚測定</li> <li>・既設肉盛座平坦面表面検</li> <li>・肉盛溶接</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・肉盛部UT用成形加工</li> <li>・肉盛部UT</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・肉盛部開先加工 (EDM)</li> <li>・シールパイプの設置</li> <li>・開先加工部表面検査</li> <li>・開先加工部寸法検査</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・新スタブフェーブのフライト7割</li> </ul>
	項目	ステップ7	ステップ8	ステップ9	ステップ10	ステップ11
作業概要	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・スタブフェーブ3次元溶接</li> <li>・溶接部内面仕上げ加工</li> <li>・溶接部内面表面検査</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・スタブフェーブ外形加工 (EDM)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・J溶接開先加工 (EDM)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・スタブフェーブ溶接部UT</li> <li>・シールパイプの設置</li> <li>・外面の表面検査</li> <li>・J溶接開先の表面検査</li> <li>・J溶接開先の寸法検査</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・新ハウジングのフライト7割</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ハウジングJ溶接</li> <li>・J溶接部のUT</li> <li>・シールパイプの設置</li> <li>・J溶接部表面検査</li> <li>・J溶接部寸法検査</li> </ul>

図 H-2 取替工法

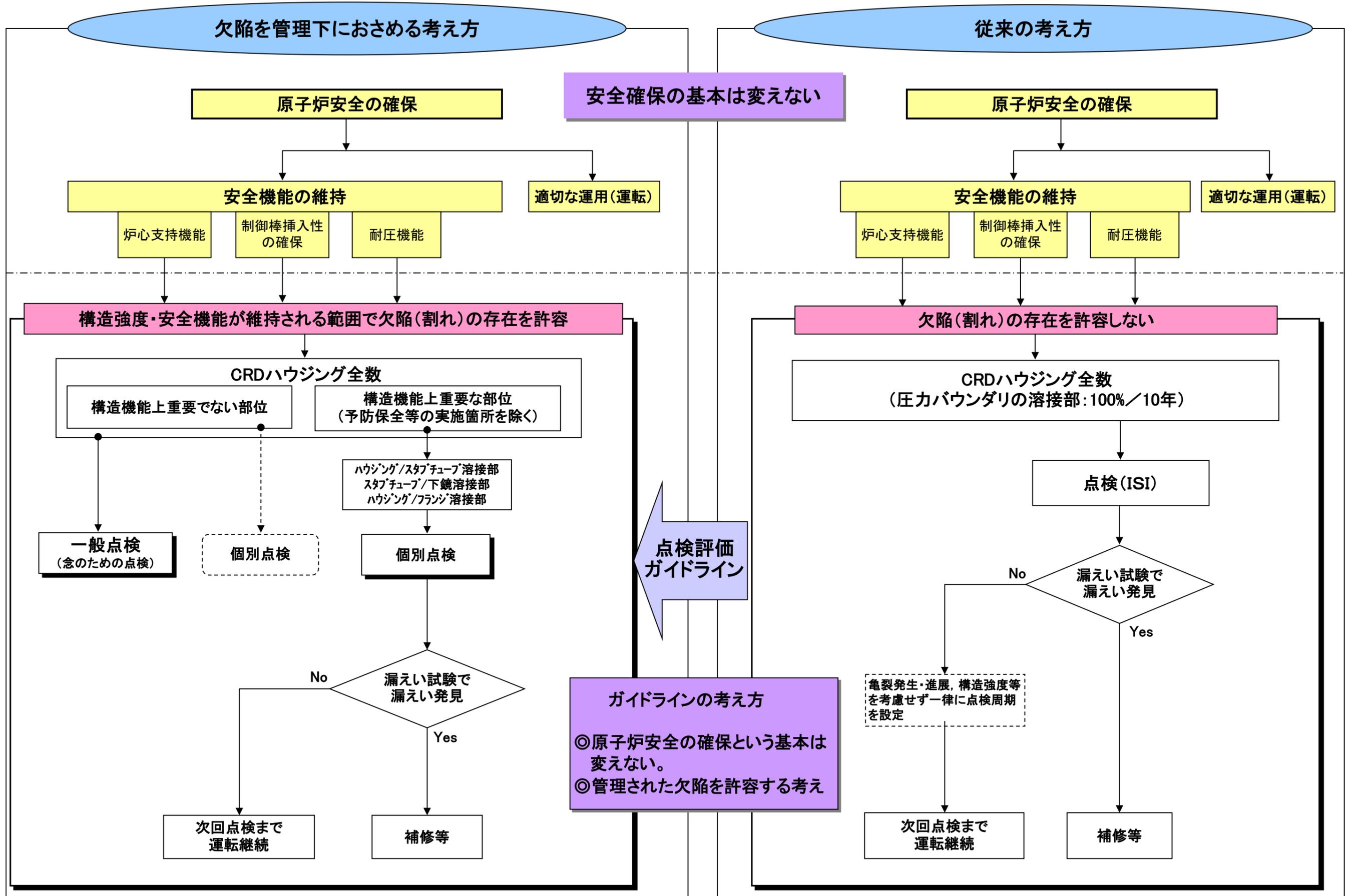


(a) 原表面に直接封止溶接を行う場合



(b) 追い込み加工後に封止溶接を行う場合

図 H-3 封止溶接工法



## BWR炉内構造物点検評価ガイドライン [CRDハウジング] 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、CRDハウジング（図-1）に要求される機能を維持できるように合理的な点検範囲、点検実施時期を規定する。
  - (1) 原子炉安全機能：炉心の支持機能（燃料集合体の鉛直荷重支持、制御棒挿入性確保）及び耐圧機能を維持する。
  - (2) 経年変化事象：応力腐食割れ（SCC）を想定する。
  - (3) 点検対象部位：構造強度評価、安全機能維持の評価結果から、重要な部位を選定する。

### 2. 点検対象部位

- 炉心支持及び耐圧機能の維持に必要な下記の部位を点検対象とする。（図-1）
  - ① ハウジング/スタブチューブ溶接部
  - ② スタブチューブ/下鏡溶接部
  - ③ ハウジング/フランジ溶接部

### 3. 点検方法

- ハウジング/スタブチューブ溶接部、及びスタブチューブ/下鏡溶接部  
VT-2（漏えい試験）により、軸方向亀裂の貫通がないことを確認する。
  - (1) 点検対象部位の亀裂進展速度は、  
軸方向亀裂 > 周方向亀裂
  - (2) 万一軸方向亀裂が貫通しても、
    - (a) 漏えい量が微少で、CRD冷却水で補給可能
    - (b) 周方向の残存断面積のため破断せず、機能維持可能
- ハウジング/フランジ溶接部  
想定される損傷モードはなく、万一損傷したとしても、周方向の広範囲に欠陥が生じる可能性は極めて小さいため、VT-2により漏えいがないことを確認する。

### 4. 点検範囲及び点検実施時期の考え方

- ハウジング毎に機能を果たしているため、すべてのハウジングの点検対象部位を点検範囲とする。
- 点検部位は全て、亀裂進展が遅いか、又は、損傷可能性が極めて小さいため、点検実施時期を供用開始後 25 年以降の毎定検とする。
- 点検により漏えいが認められない場合は、継続使用できる。  
漏えいが認められた場合は、損傷の影響を評価し、補修等の対策を行なう。（図-2）

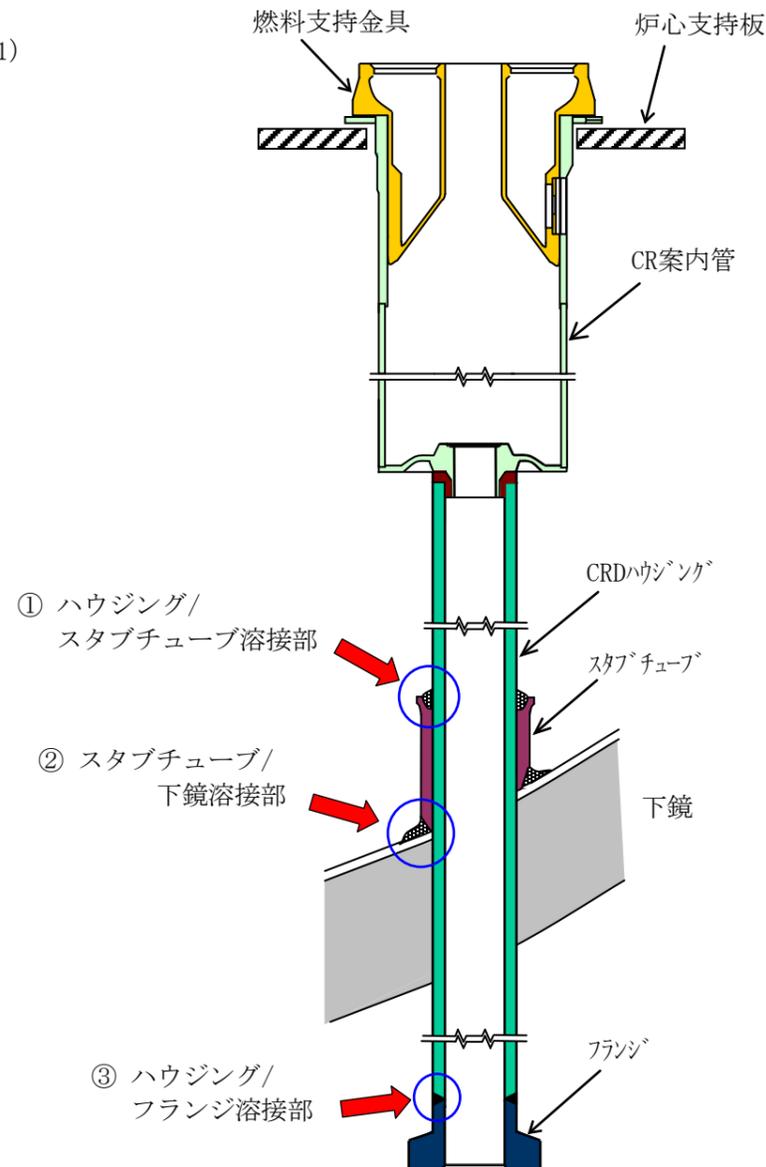


図-1 CRDハウジングの構造と点検対象部位

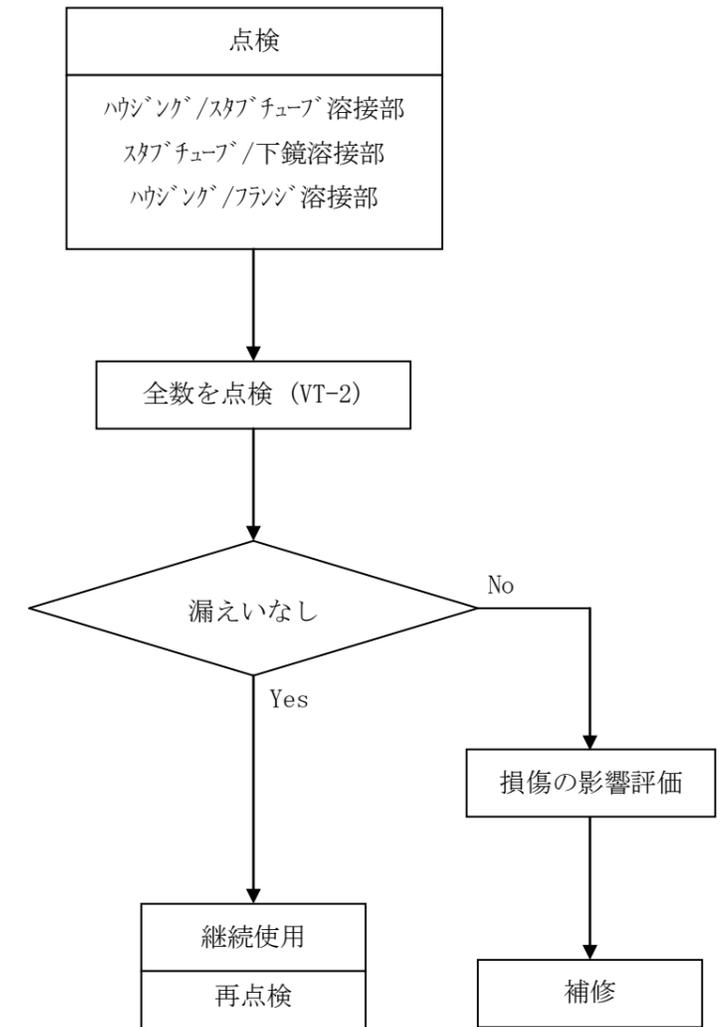


図-2 CRDハウジングの点検フロー

改訂経緯

平成 14 年 7 月 初版発行

平成 16 年 1 月 第 2 版発行

付録 D に、ブロック溶接で施工されたスタブチューブ／下鏡溶接部の周方向亀裂進展挙動の評価結果を示す図（図 D-15 および D-16）を追記した。

平成 26 年 月 第 3 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、適用する規格基準を見直すとともに、新たに適用可能となった予防保全および補修方法を付録 G、付録 H に追記した。

---

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン  
[CRDハウジング]  
(第3版)

編集者 一般社団法人 原子力安全推進協会

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

発行者 一般社団法人 原子力安全推進協会

〒108-0014 東京都港区芝 5-36-7 三田ベルジュビル 13～15 階

TEL 03-5418-9312 FAX 03-5440-3606

---

©原子力安全推進協会，2014

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。