

BWR炉内構造物点検評価ガイドライン

[ICMハウジング]

(第2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：ICM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26年12月	第2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

[ICM 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	2
3.1.1 試験手法	2
3.1.2 点検必要範囲及び点検実施時期	2
3.2 評価	3
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	5
解説 1-2 本ガイドラインの適用にあたって	5
解説 2-1 原子力安全の確保	5
解説 2-2 ICMハウジングに想定される経年変化事象	5
解説 2-3 点検対象の選定方針	6
解説 2-4 耐応力腐食割れ性	6
解説 2-5 点検対象	6
解説 3-1 渦流探傷試験	8
解説 3-2 点検方法	9
解説 3-3 SCC 予防保全技術	10
解説 3-4 補修技術	11
解説 3-5 ハウジング/フランジ溶接部の損傷評価	11

付録

- 付録 A ICMハウジング構造図
- 付録 B SCC亀裂進展速度式
- 付録 C ICMハウジング溶接部の残留応力評価
- 付録 D ICMハウジング溶接部の SCC亀裂進展評価
- 付録 E ICMハウジングの強度評価
- 付録 F ICM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
- 付録 I ハウジング/フランジ溶接部に欠陥が検出された場合の評価手法

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 [ICM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 [ICM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、軽水減速軽水冷却型原子力発電所用機器のうち、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、ICMハウジングに適用する。本ガイドラインの適用時期は、商業運転開始後の機器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) ICMハウジングの経年変件事象として、応力腐食割れ (SCC) を想定する。(解説 2-2)
- (3) ICMハウジングの各部位の機能を評価し、ICM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

ハウジング取付け溶接部、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)

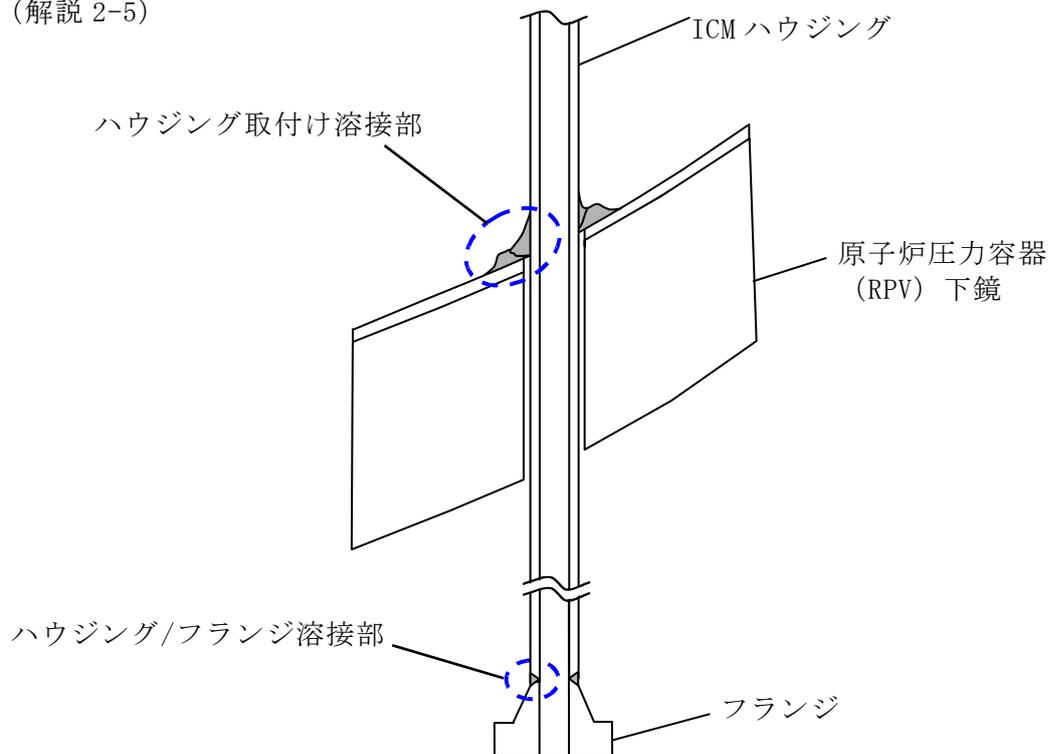


図 2.2-1 ICMハウジングの点検対象部位

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、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、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) ハウジング取付け溶接部

ニッケル合金の溶接部については、実運転時間で 13 年以降の毎定検時に、全数を VT-2 により点検する。

ステンレス鋼の溶接部については、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) ハウジング/フランジ溶接部

局部出力領域モニタ (LPRM) を装荷した SUS304 製ハウジングについては、モニタ交換時に、MVT-1 により点検する。

LPRM を装荷した SUS316 製ハウジングについては、供用開始後暦年で 20～30 年の間に MVT-1 により初回点検を行い、初回点検実施後暦年で 30 年以内に再点検を行う。

LPRM を装荷していないハウジングについては、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 3-3)

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 ¹⁾	点検部位	点検範囲
ハウジング取付け溶接部	VT-2	溶接部	全数
ハウジング/フランジ溶接部 (LPRM を装荷したハウジング)	MVT-1	溶接部	全数
ハウジング/フランジ溶接部 (LPRM を装荷していないハウジング)	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) ハウジング取付け溶接部

- 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) ハウジング/フランジ溶接部

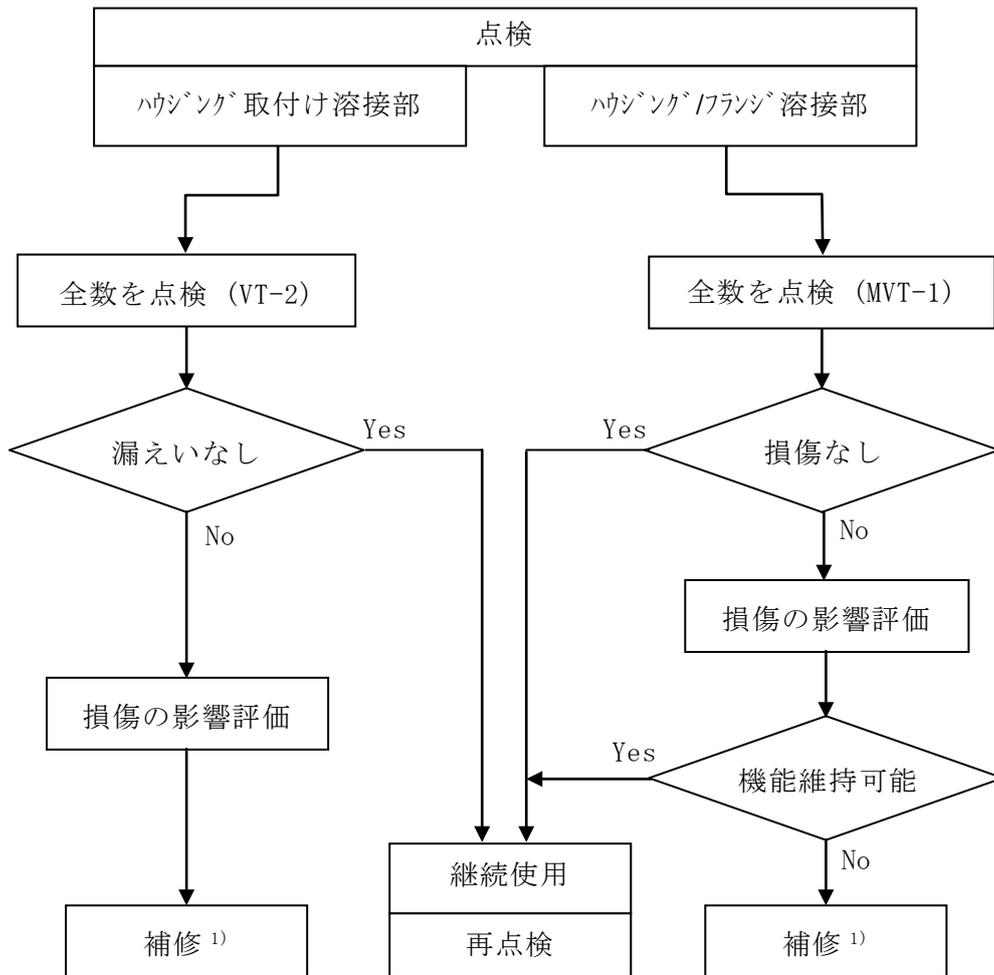
- ① 損傷がないことが確認された場合には、継続使用できる。
- ② 損傷が検出されても、機能維持できると評価された場合は、継続使用できる。

(解説 3-4)

- ③ 上記①②に適合しない場合は、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 ICM 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 ICM 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

ICMハウジングは、中性子計測モニタの炉心アクセス経路の確保及び損傷防止、並びに、冷却材圧力バウンダリ形成機能を有する。一本の中性子モニタが万一損傷しても原子炉を安全に停止できることから、仮にICM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、原子力安全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) ICMハウジングに想定される経年変化事象

これまでの損傷事例を考慮し、ICMハウジングの母材及び溶接部の経年変化事象として、応

力腐食割れ（SCC）を想定した。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，経年変化事象から除外する。

（解説 2-3）点検対象の選定方針

ICM ハウジングそのものだけでなく，ICM 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する。S₂地震を想定しても原子炉の安全性へ影響しない部位は，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

ICM 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，炭素含有量 \leq 0.03%）を使用している。また，下鏡低合金鋼に設ける肉盛座及び肉盛座とハウジングとの溶接部には，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，クロム炭化物の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，SUS316（原子力仕様））は優れた耐応力腐食割れ性を示す。

また，ニッケル合金の 182 合金は，SUS304 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 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，材料鋼種により耐応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炉の安全性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

ICM 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。

ICM ハウジングにおいては、中性子計測機能が喪失しても、原子炉の安全な炉停止に影響しないため、圧力境界部の損傷による冷却材漏えいの影響に着目し、圧力境界部であるハウジング取付け溶接部及びハウジング/フランジ溶接部を、点検対象として選定した。

表 2-5-1 ICM 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 / フランジ溶接部	・耐圧 ・ICM 支持	・内圧 ・自重 (ICM)	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	点検対象
② ハウジング / 案内管溶接部	・案内管の支持	・自重 (GT) ・流動振動 ・差圧	可能	IGSCC	・溶接部が破断するとハウジング及び案内管の振動が増大し、中性子モニタが異常を示すため、損傷を検知できる ・損傷を検知後、安全な炉停止が可能	不要
③ ハウジング / 肉盛座溶接部	・ハウジング、案内管の支持 ・耐圧	・内圧 ・熱応力 ・自重 (HS, GT) ・流動振動	可能	IGSCC	・溶接金属が損傷すると炉水が漏えいする可能性がある	点検対象
④ 肉盛座	・ハウジング、案内管の支持 ・耐圧	・内圧 ・熱応力 ・自重 (HS, GT)	可能	IGSCC	・溶接金属が損傷すると炉水が漏えいする可能性がある ・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 / スタビライザークランプ溶接部	・ハウジング、案内管の振動防止	・流動振動	可能	IGSCC	・溶接部が損傷しても、スタビライザ機能に影響しない ・ハウジング HAZ が損傷すると中性子モニタが異常を示すため、損傷を検知できる ・損傷を検知後、安全な炉停止が可能	不要
⑥ スタビライザバー / スタビライザークランプ溶接部	・ハウジング、案内管の振動防止	・流動振動	可能	IGSCC	・溶接部が損傷しても、ボルト/ナットによりスタビライザバーとクランプの接合は保持されるため、スタビライザの機能に影響しない	不要

HS : ハウジング, GT : 案内管

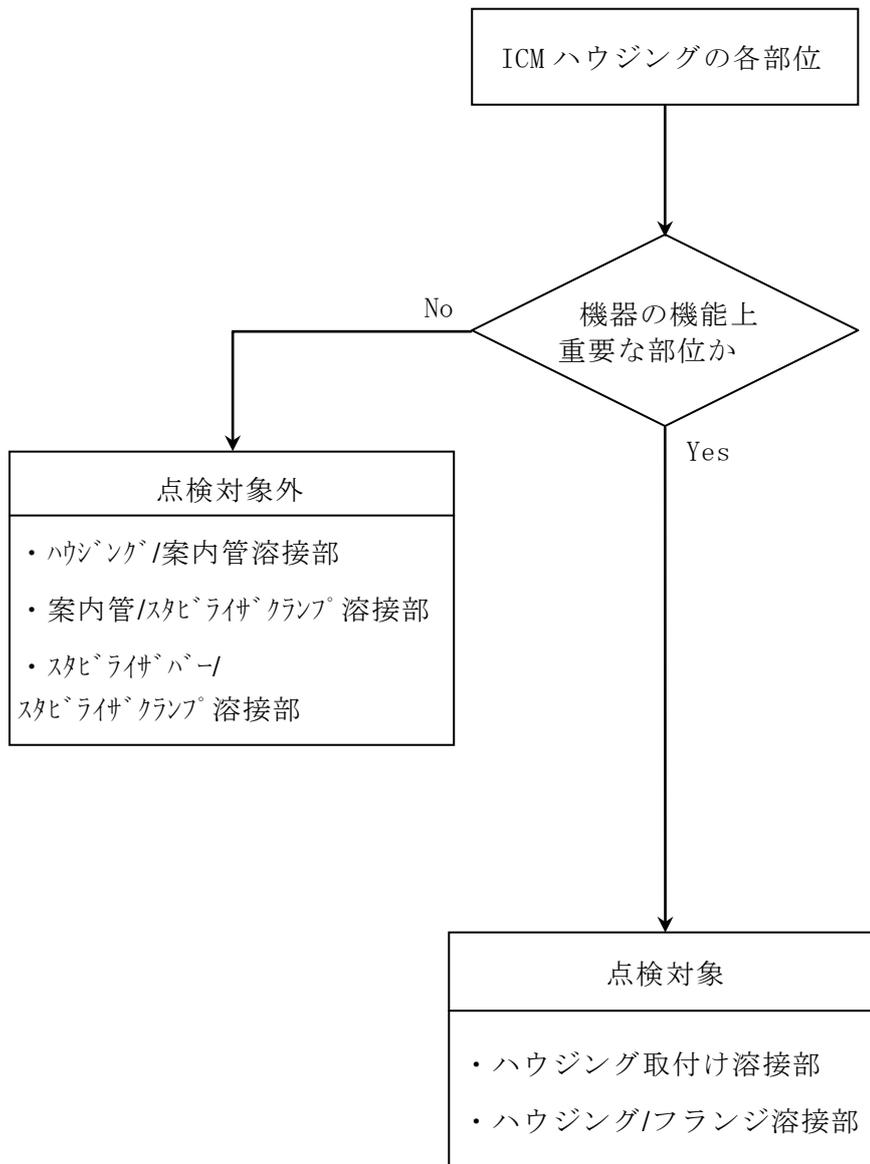


図 2-5-1 ICMハウジングの点検対象部位の選定フロー

(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) ハウジング取付け溶接部

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 合金のハウジング取付け溶接部 (肉盛座形状タイプ 1-a) 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、周方向亀裂より軸方向亀裂の進展が早く、軸方向亀裂は実運転時間で約 19 年、周方向亀裂は約 32 年で貫通する評価となる。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 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 CRD 駆動水圧系で補給可能であり、周方向の残存断面積のため、 S_2 地震を想定した場合に破断することはない。(付録 E, F 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。

また、SUS316 (原子力仕様、炭素含有量 $\leq 0.03\%$) のハウジングの場合は、ハウジング内面に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軸方向亀裂は、実運転時間で約 22 年で貫通する評価となるが、周方向亀裂の発生可能性はない。

したがって、ハウジング取付け溶接部については、軸方向亀裂による漏えいを検知できれば、耐圧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 (肉盛座形状タイプ 1-a) の軸方向亀裂は、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、実運転時間で約 18 年以降急速に進展し、約 19 年で貫通する。一方、82 合金及び改良 182 合金溶接部の場合、溶接金属自体の損傷可能性は極めて小さいが、ハウジング母材が SUS316 (原子力仕様) であり、ハウジング内面からの軸方向亀裂は、182 合金溶接部とほぼ同程度の約 22 年で貫通する評価となる。このため、182 合金溶接部と 82 合金及び改良 182 合金溶接部の点検開始時期を同一の扱いとし、182 合金溶接部の軸方向亀裂が急速に進展する実運転時間約 18 年に 5 年の余裕を取って 13 年とする。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。肉盛座形状タイプ 2-a の場合は、亀裂進展評価において貫通が生じないが、点検方法は、タイプ 1-a と同じとする。(付録 D 参照)

ステンレス鋼溶接部の場合は、溶接金属自体の損傷可能性が極めて小さく、ハウジング内面も予防保全施工済みのため、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。

(2) ハウジング/フランジ溶接部

a. 点検手法

LPRM を装荷したハウジングのハウジング/フランジ溶接部において、供用開始時点で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の進展が早く板厚を貫通する評価となる。(付録 D 参照) しかしながら、表面の応力は軸方向応力の方が高く、周方向亀裂が早く発生する可能性を否定できないため、ハウジング内面を、SCC 亀裂を検出可能な MVT-1 により点検する。

一方、LPRM を装荷していないハウジングにおいては、温度が低い (50℃程度) 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以前に微小漏えいにより検知できると考えられるため、漏えい試験 (VT-2) を適用する。

b. 点検実施時期

LPRM を装荷した SUS304 製ハウジングの周方向亀裂は、実運転時間約 10 年で、MVT-1 による検出下限 (深さ 1mm と想定される) から破断に対する許容値まで進展すると評価されるため、約 7 年周期のモニタ交換時期に MVT-1 により点検する。なお、供用開始時点で深さ 50 μm の初期亀裂を仮定すると、実運転時間約 13 年で周方向亀裂が許容値に達する評価となり、SUS304 製ハウジングを使用しているプラントの実運転時間を超えるため、点検開始時期は設定しないことにする。(付録 D, E 参照)

LPRM を装荷した SUS316 (原子力仕様) 製ハウジングについては、供用開始時点で深さ 50 μm の初期亀裂を仮定した場合に、周方向亀裂が許容値に達するのに実運転時間で約 50 年 (稼働率 80% の場合、供用開始後暦年で約 62 年に相当)、軸方向亀裂の貫通に実運転時間で約 30 年 (同 37 年) と評価されるため、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 20~30 年の間に MVT-1 による初回点検、初回点検実施後暦年で 30 年以内に再点検とする。

LPRM を装荷していないハウジングについては、SCC 損傷の可能性が非常に小さいと考えられるため、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 年以降の毎定検での VT-2 とする。(付録 D, E 参照)

(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、ICM 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

ICM ハウジングに欠陥が検出された場合の補修技術として、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ものの例には、拡管、スリーブ、封止溶接、補修溶接、取替等がある。(付録 H 参照)

また、ICM 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」

(解説 3-5) ハウジング/フランジ溶接部の損傷評価

MVT-1 により亀裂が検出された場合は、亀裂深さを体積試験により測定し、軸方向亀裂については貫通に至るまでの時間、周方向亀裂については付録 E に示す破断に対する許容値に至るまでの時間を、付録 D に示す亀裂進展評価手法に基づいて求め、機能維持可能な運転時間を評価する。評価手法を付録 I に示す。

付録A ICMハウジング構造図

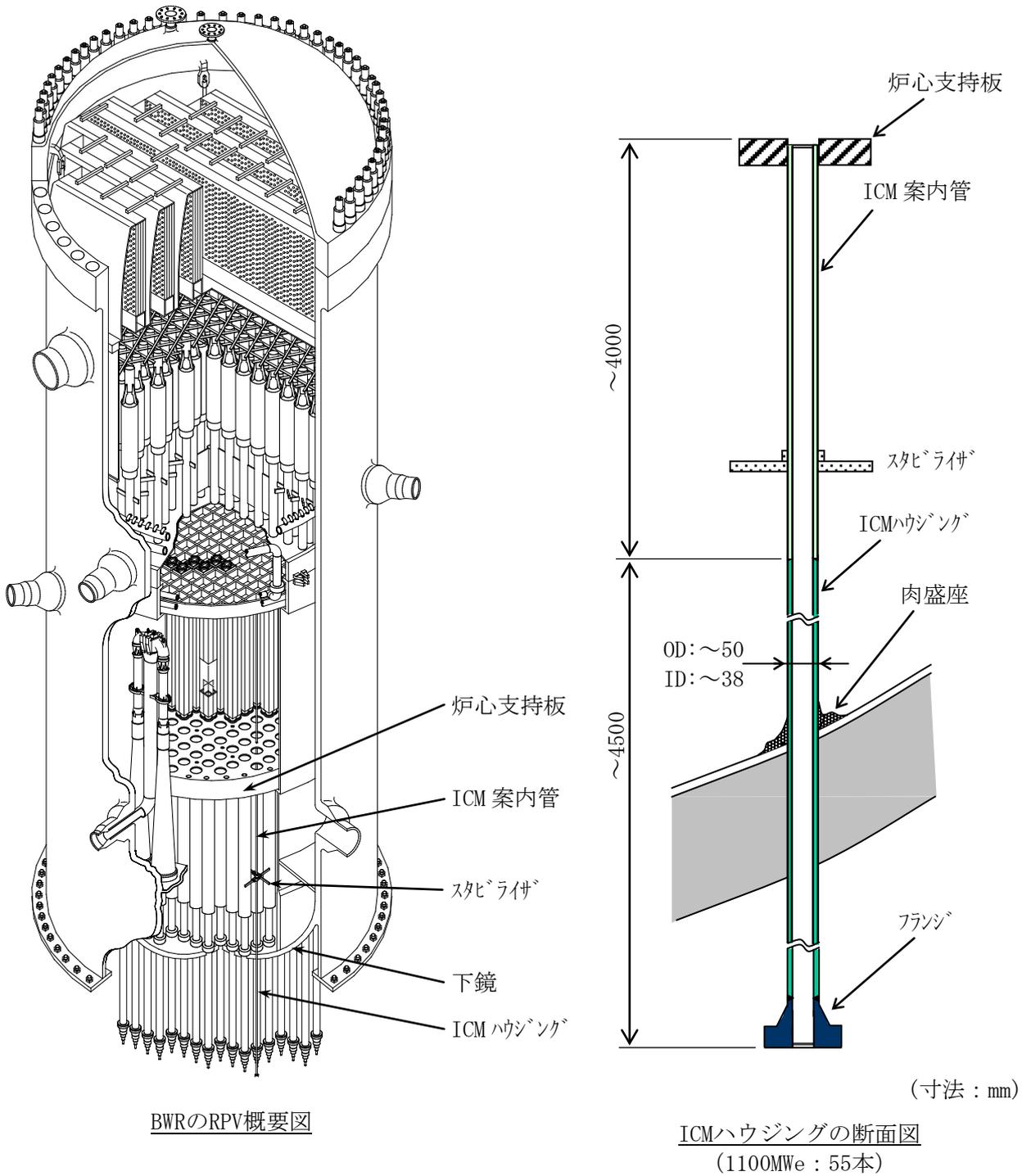


図 A-1 ICMハウジングの構造(1)

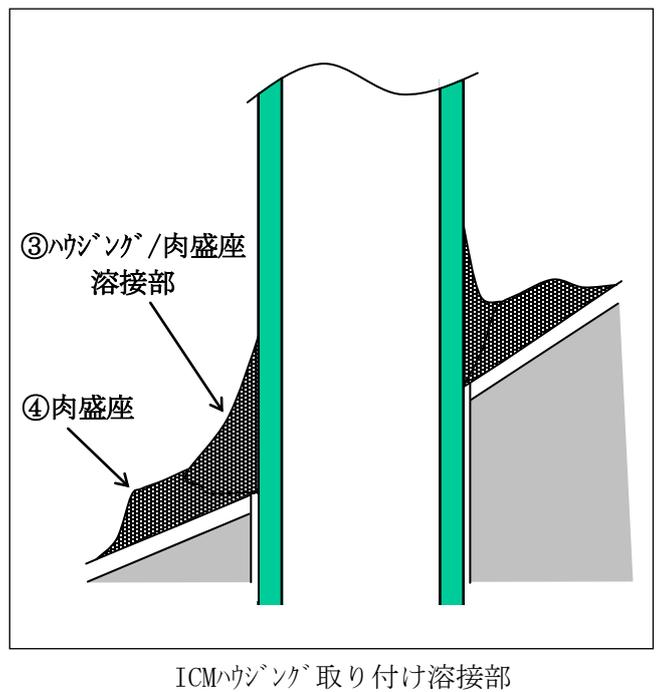
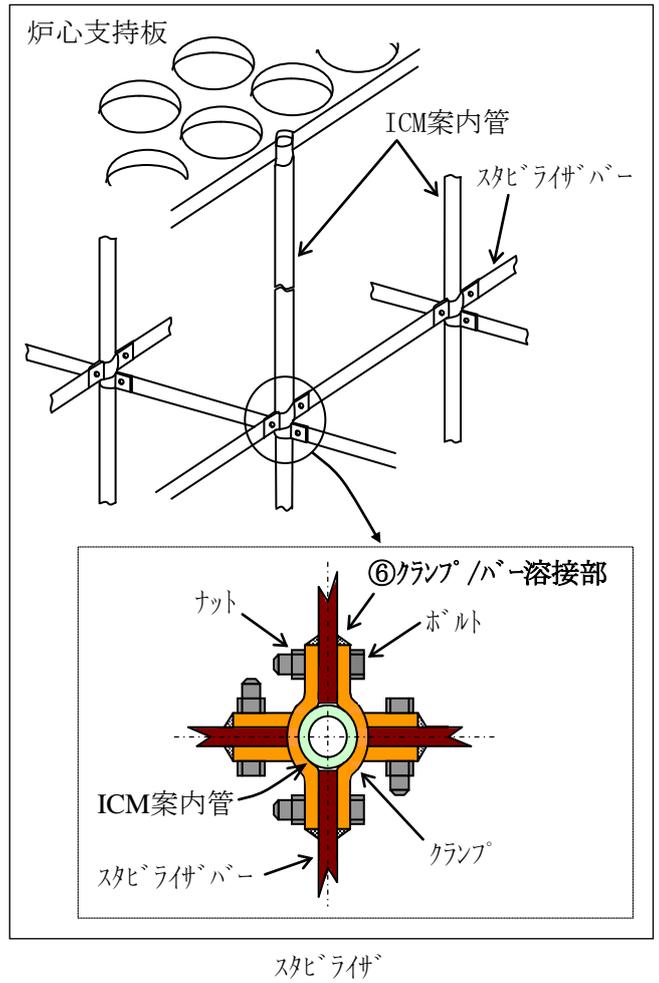
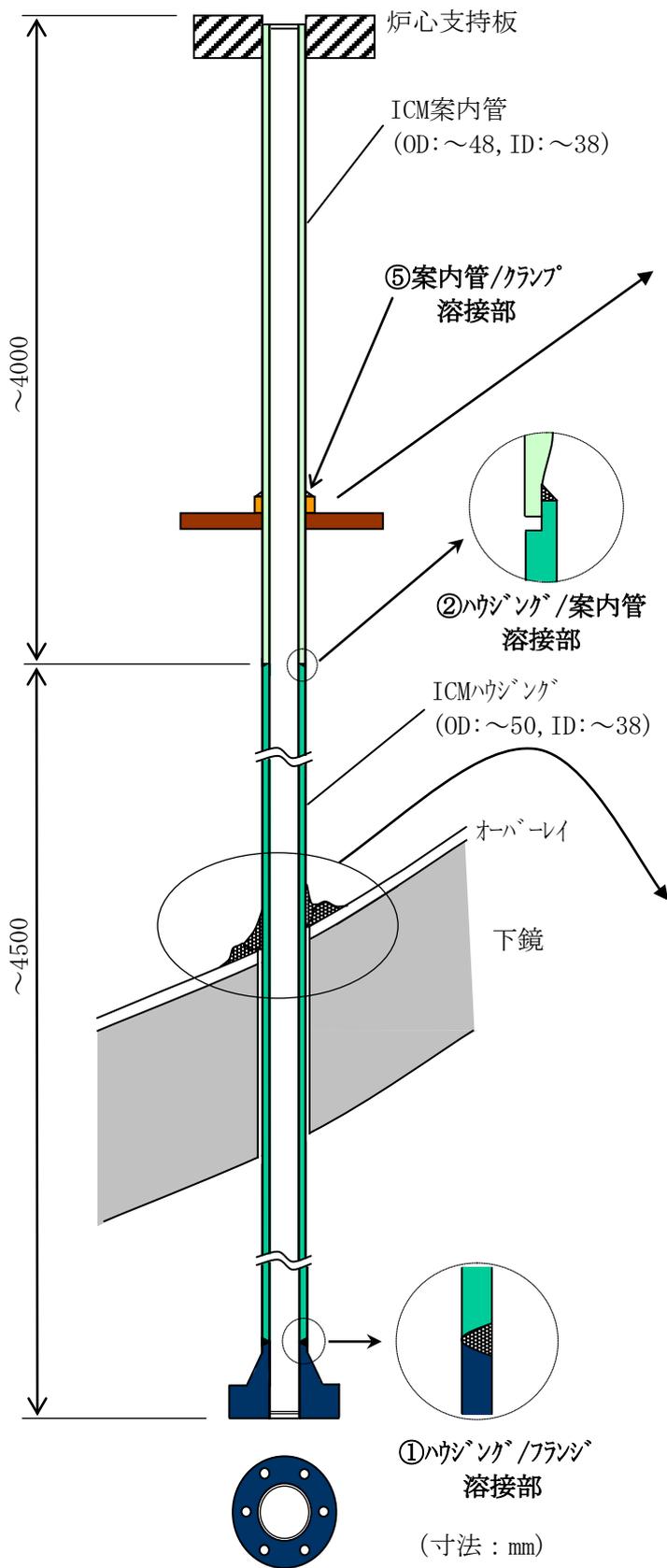


図 A-2 ICM ハウジングの構造 (2)

付録 B SCC 亀裂進展速度式

1. はじめに

本付録は、ICM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. ICMハウジング溶接部の使用材料

ICM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。ハウジング取付け溶接部 (J 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)、ハウジング及びフランジが SUS304 または SUS316 (原子力仕様, 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 におけるインコネル 182 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) が発行された。本事例規格では、ニッケル合金溶接金属の BWR 環境中の SCC 亀裂進展速度を規定しており、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 (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-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。

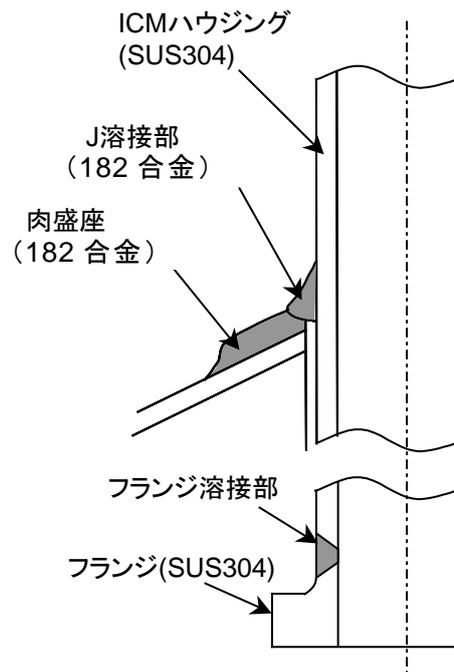


図 B-1 ICMハウジングの溶接部の例

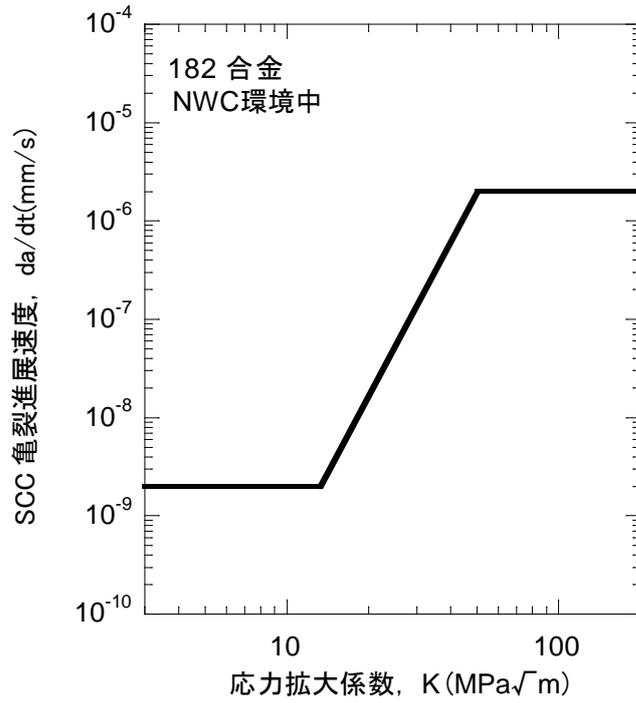


図 B-2 NWC 環境中における 182 合金の SCC 亀裂進展特性

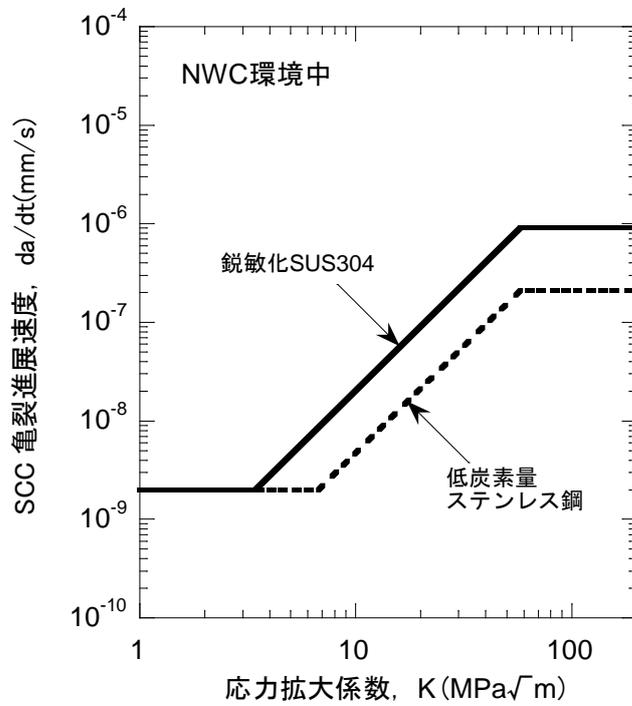


図 B-3 NWC 環境中におけるステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性

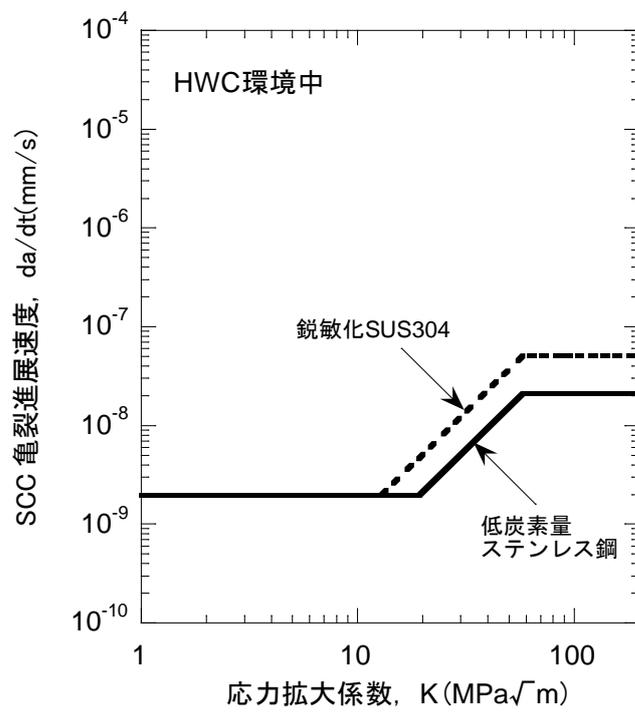


図 B-4 HWC 環境中におけるステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性

付録C ICMハウジング溶接部の残留応力評価

1. はじめに

本付録は、ICMハウジングのハウジング取付け溶接部及びハウジング/フランジ溶接部について、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

2.1 ハウジング取付け溶接部¹⁾

(1) 解析モデル

ハウジング、肉盛座及び圧力容器下鏡、並びに、ICMハウジング取付け溶接部（J溶接部）を、軸対称モデル化した。（三次元肉盛座（タイプ1-a）及び軸対称スタブ形状肉盛座（タイプ2-a）の2ケース（図C-1））

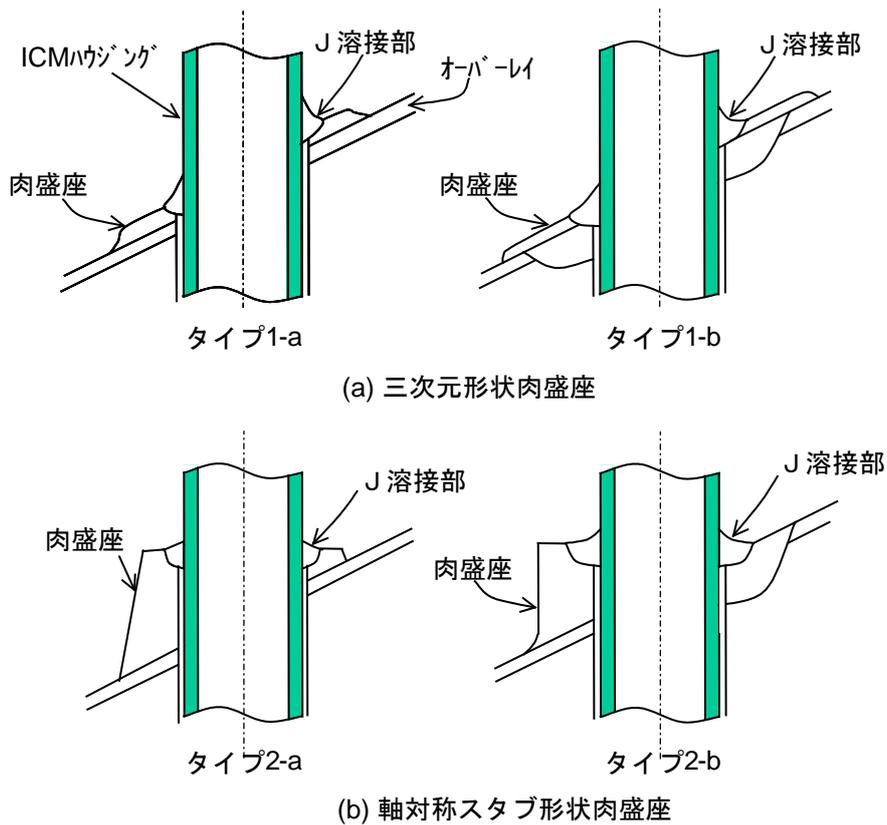


図 C-1 ICMハウジング取付け溶接部の構造

(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。

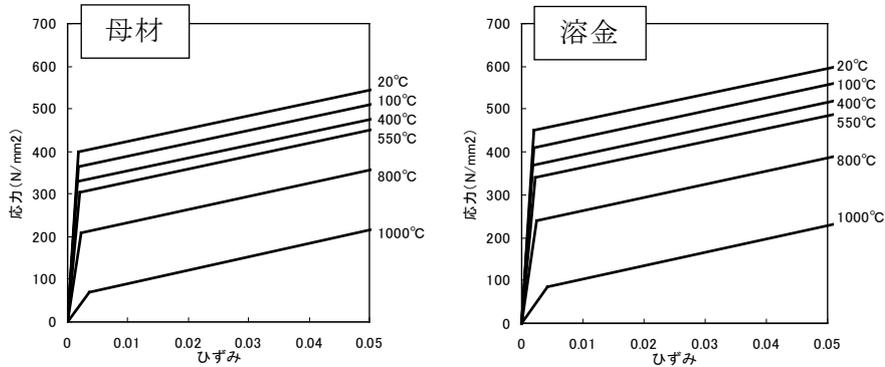
(3) 物性値

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-2 に示す物性値を用いた。

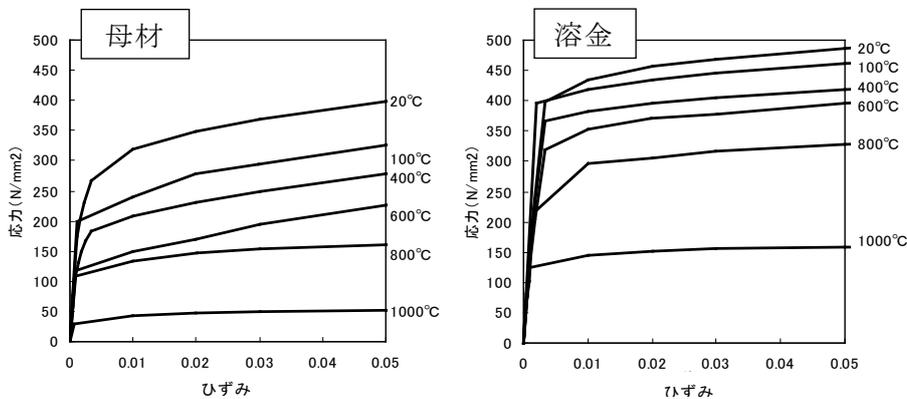
表 C-1 伝熱解析に用いた物性値

SUS304及びSUS316L		20	100	200	400	600	1000	1500	2000
温度	°C	20	100	200	400	600	1000	1500	2000
熱伝導率	$\text{kJ}/\text{mm}\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$	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}
密度	Kg/mm^3	7.86×10^{-6}							
比熱	$\text{KJ}/\text{kg}\cdot\text{°C}$	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		20	149	288	566	815	1000	1500	2000
温度	°C	20	149	288	566	815	1000	1500	2000
熱伝導率	$\text{kJ}/\text{mm}\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$	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}
密度	Kg/mm^3	8.50×10^{-6}							
比熱	$\text{KJ}/\text{kg}\cdot\text{°C}$	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-2 熱応力解析に用いた物性値

2.2 ハウジング/フランジ溶接部

(1) 解析モデル

ハウジング及びフランジを、軸対称モデル化した。(図 C-3)

(2) 解析手順

熱伝導解析により、溶接手順にしたがって想定した入熱で溶接金属を盛った場合の非定常温度分布を求め、次に、溶接手順毎のモデルに当該の温度分布を与えて、大変形弾塑性解析を実施した。なお、入熱の時間変化は、図C-4 に示すように、入熱が増加する時間(トーチが近づくことに対応) t_1 、入熱が一定の時間(溶接中に対応) t_2 及び入熱が減少する時間(トーチが離れることに対応) 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 $1100 \pm 50^\circ\text{C}$ となるように時間を決定した。除熱は、母材及びビードの雰囲気来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 $11.6 \text{ J/m}^2\text{s}$ とした。

(3) 物性値

ハウジング取付け溶接部の場合と同様に、表 C-1 及び図 C-2 の物性値を用いた。

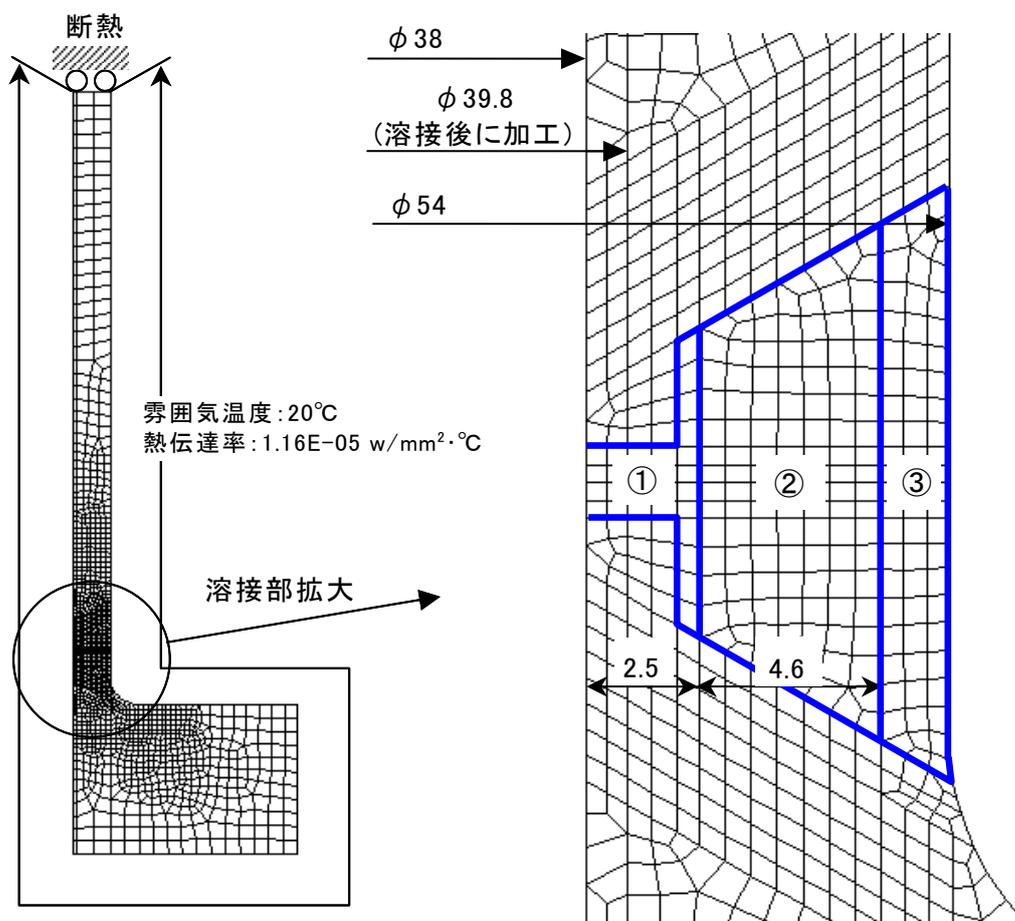


図 C-3 ハウジング/フランジ溶接部の残留応力解析モデル

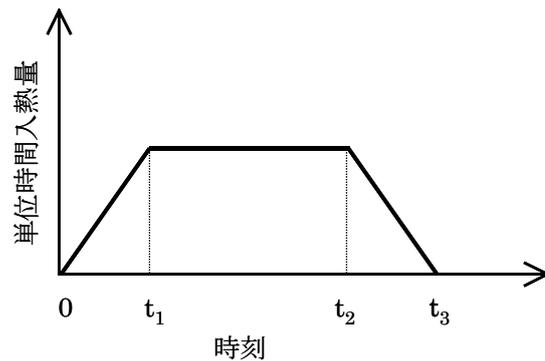


図 C-4 ハウジング/フランジ溶接部の残留応力解析における入熱の想定

3. 解析結果

3.1 ハウジング取付け溶接部¹⁾

ハウジング取付け溶接部の残留応力解析結果を、図 C-5（肉盛座形状タイプ 1-a）及び図 C-6（肉盛座形状タイプ 2-a）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。溶接部/肉盛座境界部及び肉盛座下端部近傍には、軸方向応力又は径方向応力のピーク（300～400MPa 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。

なお、ハウジング内面に比較的高い周方向応力が発生しているが、本解析では、ハウジング内面のクラディングによる予防保全施工プロセスを含んでいない。SUS304 製ハウジングに適用された内面クラッド工法の場合、ハウジング内面の熱影響部は耐 SCC 材でクラッドされ、ハウジング外面（溶接止端部近傍）は圧縮応力が付与されているため、ハウジング母材からの SCC 発生の可能性は極めて小さい。また、SUS304 製ハウジングでも、取付け溶接において内面水冷溶接を適用したものは、ハウジング内面が圧縮応力となっているため、ハウジング母材からの SCC 発生の可能性は極めて小さい。

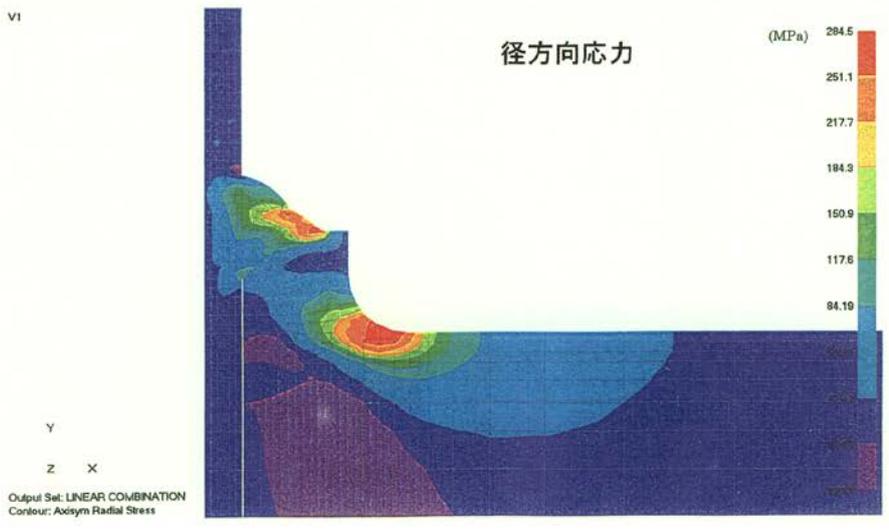
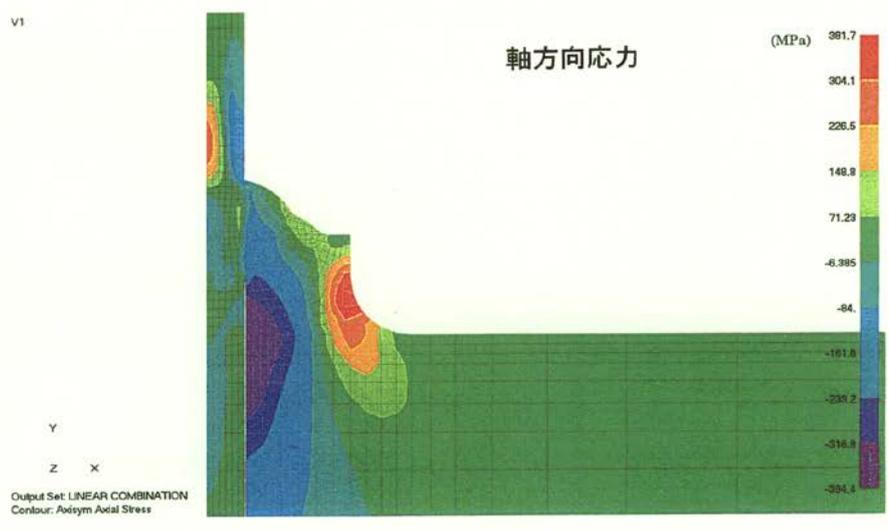
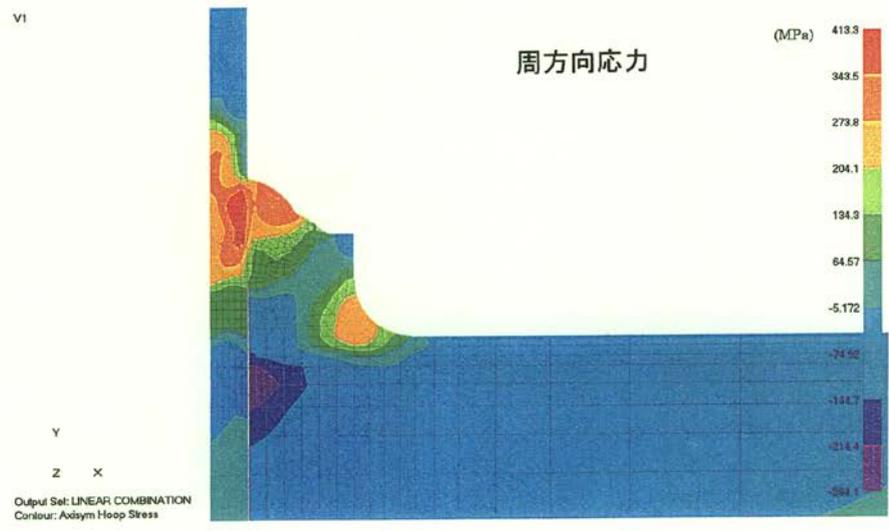
3.2 ハウジング/フランジ溶接部

ハウジング/フランジ溶接部の残留応力解析結果を、図 C-7 に示す。

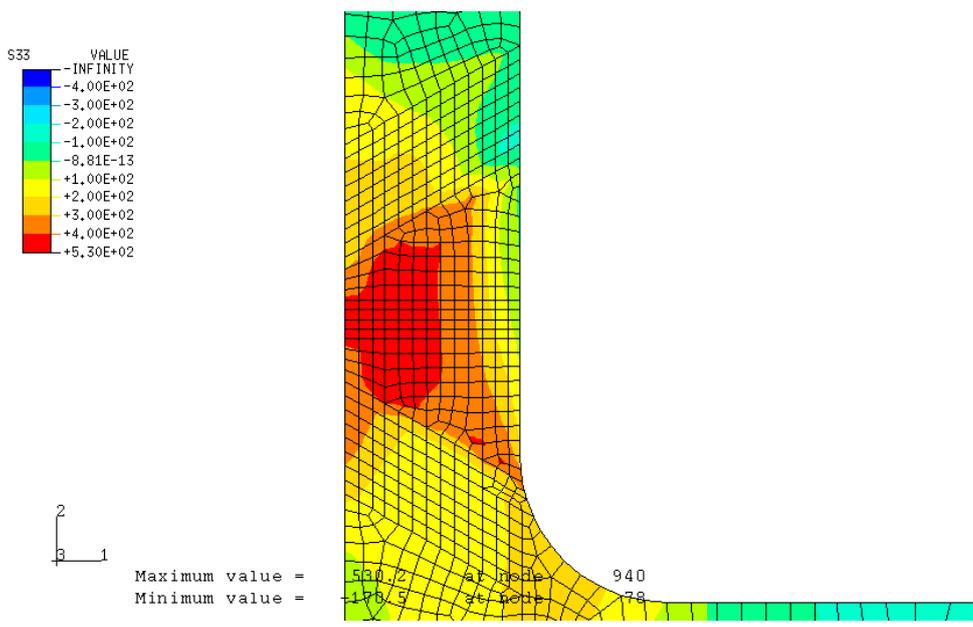
内表面の熱鋭敏化領域（溶接開先面から数 mm 離れている）では、周方向及び軸方向応力ともに、300MPa 程度の引張りとなっている。周方向応力は、内表面から板厚の 2/3 程度まで引張りとなっているのに対して、軸方向応力が引張りの領域は、板厚の 1/2 程度までとなっている。

参考文献

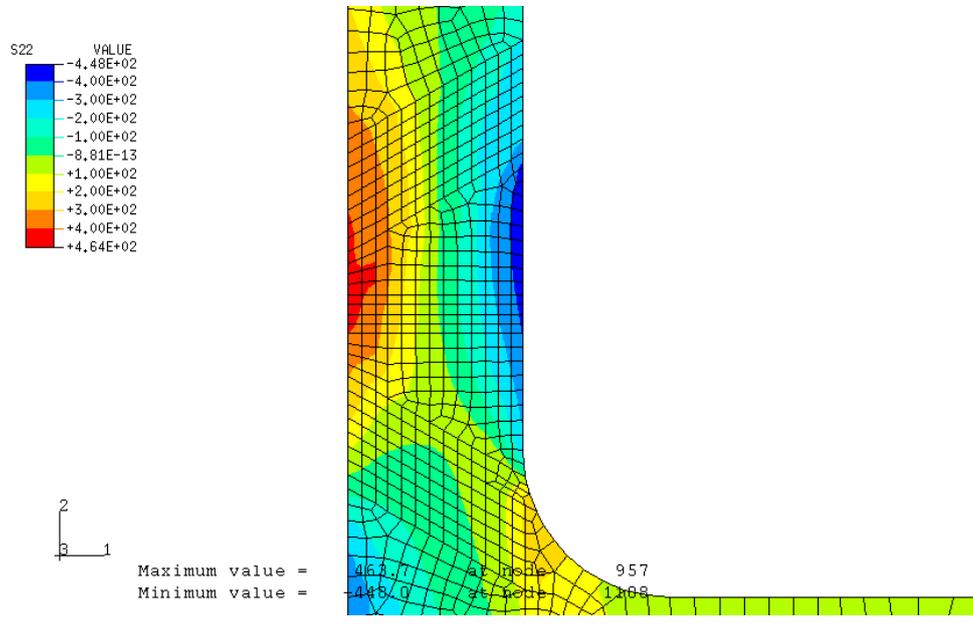
- 1) 電力共同研究報告書「インコネル溶接部の亀裂進展評価研究」（平成 10 年度 3 月）



図C-6 ICMハウジング取付け溶接部の残留応力解析結果 (タイプ 2-a) ¹⁾



(a) 周方向応力



(b) 軸方向応力

図 C-7 ICMハウジングフランジ溶接部の残留応力解析結果

付録 D ICM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、ICMハウジングのハウジング取付け溶接部及び局部出力領域モニタ(LPRM)を装荷しているハウジングのハウジング/フランジ溶接部における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。

2. ハウジング取付け溶接部における評価

2.1 評価条件

a. 評価対象

ハウジング取付け溶接部(J溶接部)の構造を概要図として図D-1に示す。ニッケル合金の182合金(JIS DNiCrFe-3またはENi6182)溶接金属を用いたハウジング取付け溶接部は、大別して、肉盛座が三次元形状のタイプと軸対称形状のタイプに分類される。溶接条件に大きな差異はないため、三次元形状肉盛座はタイプ1-a、軸対称形状肉盛座はタイプ2-aに対して、亀裂進展評価を行う。

なお、ニッケル合金の82合金(JIS YNiCr-3またはSNI6082)、改良182合金及びステンレス溶接金属部は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

ハウジング取付け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-2に示す。ICMハウジングには耐圧機能が要求されるため、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(経路①, ②, ④, ⑤)、及び、SUS316(原子力仕様、炭素含有量 $\leq 0.03\%$)製ハウジングのJ溶接部ルート位置高さにおいてハウジング内面から外面へ向かう直線経路(経路③)を、亀裂進展経路として想定した。ハウジング内面からの経路における亀裂進展については、肉盛座形状による相違は大きくないと考えられるため、タイプ1-aについて評価する。

なお、SUS304製ハウジングについては、内面水冷溶接による圧縮応力付与、又は内面耐食材クラッド施工による対策が実施されているため、ハウジング内面を起点とする亀裂進展評価は実施しない。

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、当該 182 合金溶接金属部の場合、プラント起動・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 0.3mm 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。また、ハウジング内面から外面への想定亀裂進展経路においては、通常運転時の応力がプラント起動・停止時より厳しい条件となっているため、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 合金溶接部及び SUS316（原子力仕様）製ハウジングの亀裂進展評価に用いる 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 合金及び低炭素量ステンレス鋼の亀裂進展特性を用いた。

182 合金：

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

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

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

低炭素量ステンレス鋼：

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

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

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

前式において、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。

2.2 評価結果

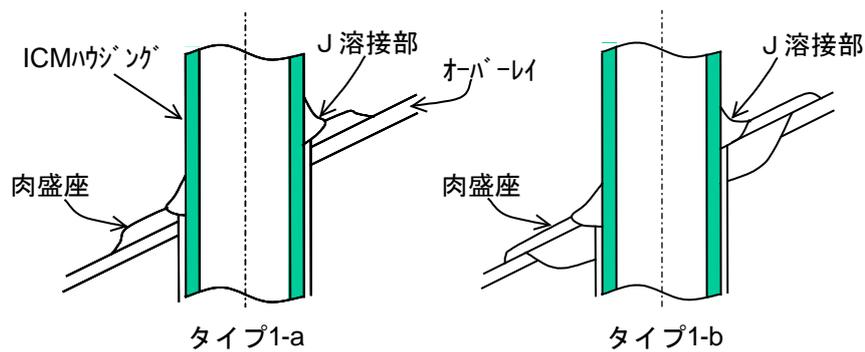
ハウジング取付け溶接部タイプ 1-a に想定した経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた当該部の周方向応力分布（残留応力+運転応力）を図 D-3 に示す。経路①の軸方向亀裂進展評価結果を図 D-4 に示す。図 D-4(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-4(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路①（経路全長：16.0 mm）の場合、亀裂が経路全長に達する年数は 19.4 年である。

タイプ 1-a に想定した経路②の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-5 に示す。経路②の周方向亀裂進展評価結果を図 D-6 に示す。図 D-6(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-6(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路②（経路全長：12.9 mm）の場合、亀裂が経路全長に達する年数は 32.6 年である。

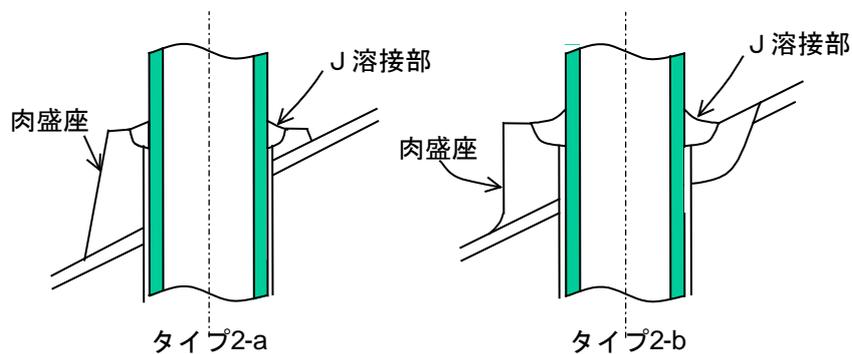
タイプ 1-a、経路③の軸方向亀裂進展評価に用いた当該部の周方向応力分布（残留応力+運転応力）を図 D-7 に示す。前述したように経路③はハウジング内面を亀裂の起点と想定した経路である。経路③の軸方向亀裂進展評価結果を図 D-8 に示す。図 D-8(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-8(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路③（経路全長：6.2 mm）の場合、亀裂が経路全長に達する年数は 21.9 年である。なお、経路③においては、内表面の軸方向応力が圧縮（約 -90MPa ）のため、周方向亀裂は発生しない。

ハウジング取付け溶接部タイプ 2-a に想定した経路④の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。経路④の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。経路④（経路全長：20.0 mm）の場合、80 年経過しても、亀裂は経路全長に達しない。

タイプ 2-a に想定した経路⑤の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。経路⑤の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。経路⑤（経路全長：23.0 mm）の場合、80 年経過しても、亀裂は経路全長には達しない。



(a) 三次元形状肉盛座



(b) 軸対称スタブ形状肉盛座

図 D-1 ICM ハウジング取付け溶接部の構造

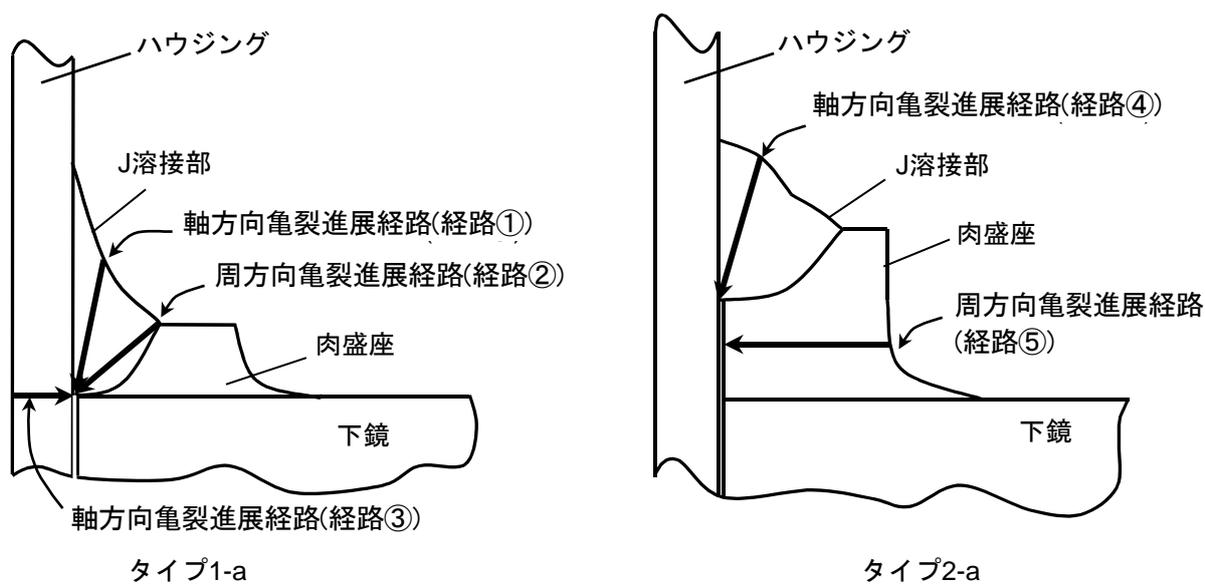


図 D-2 ICM ハウジング取付け溶接部に想定した亀裂進展経路

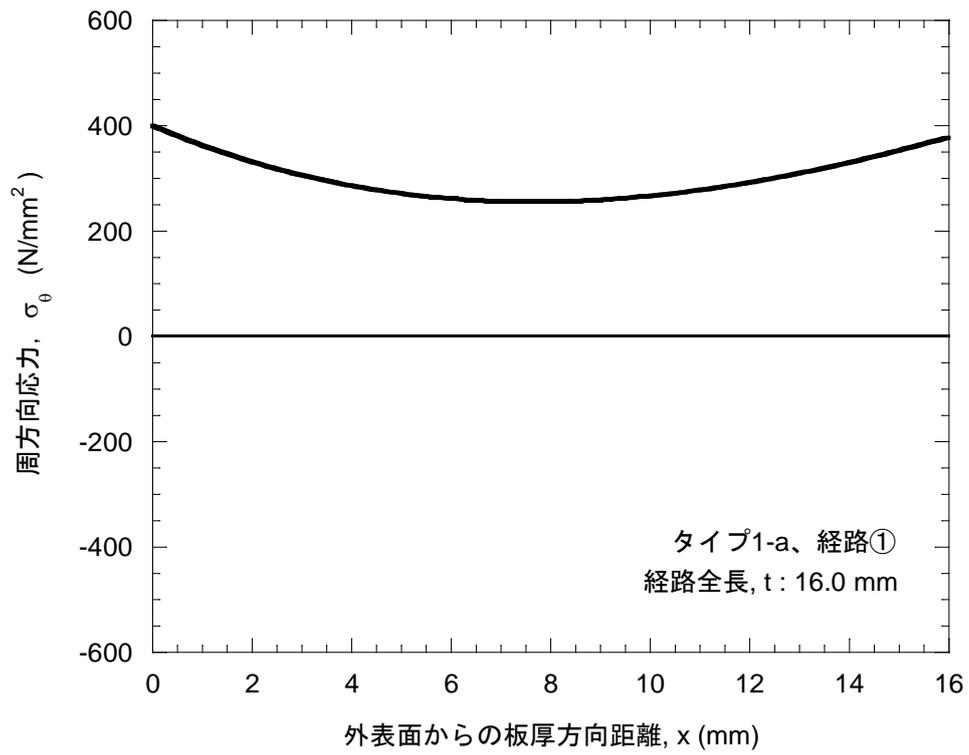
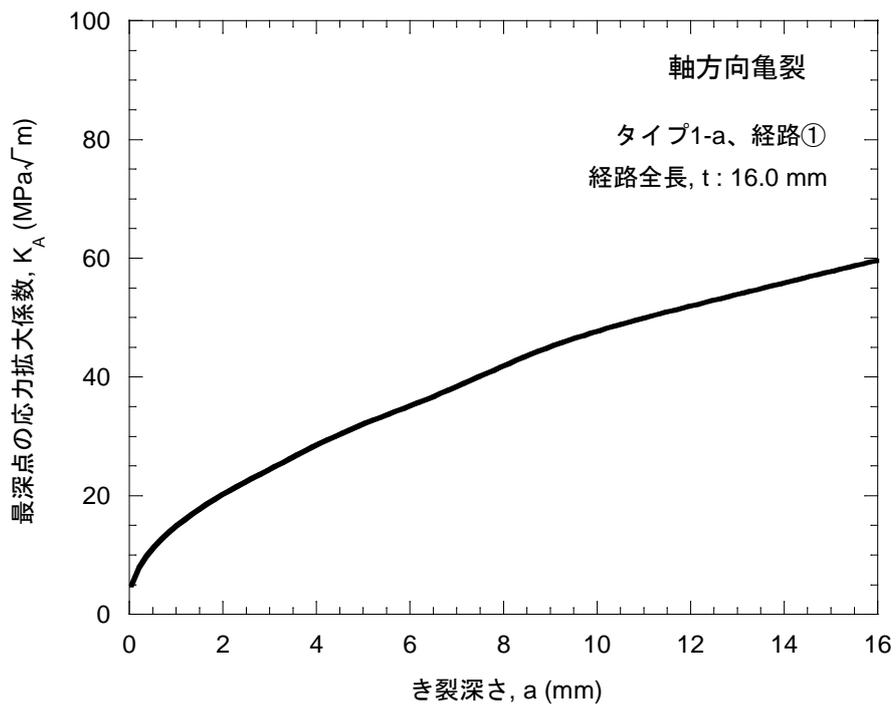
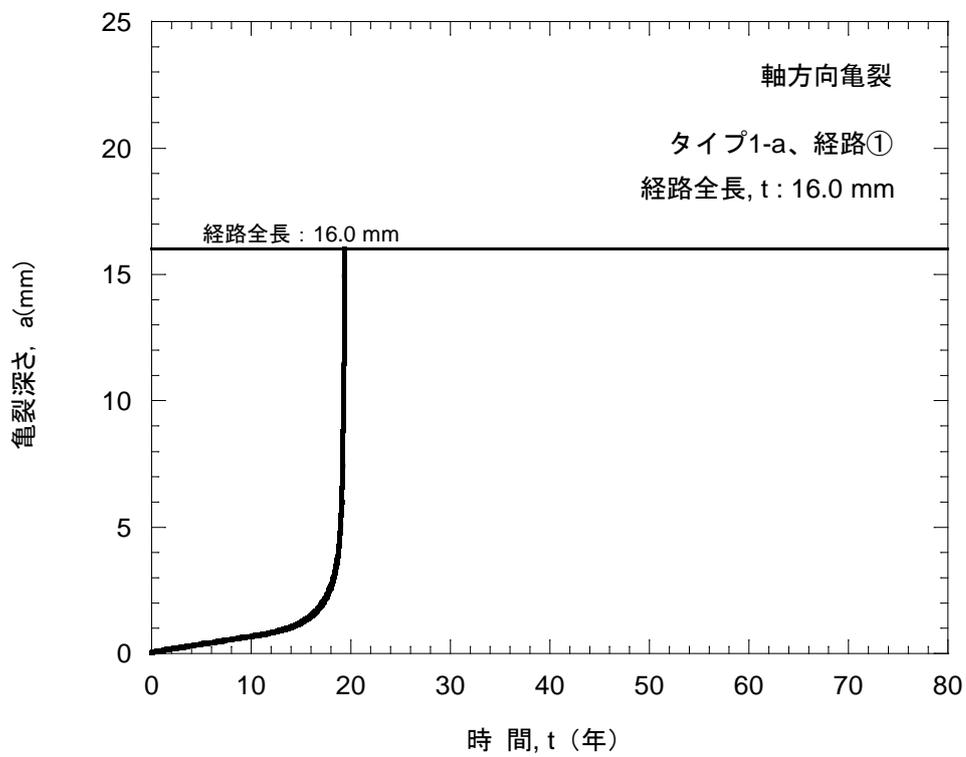


図 D-3 タイプ 1-a, 経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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-4 タイプ 1-a, 経路①の軸方向亀裂進展評価結果

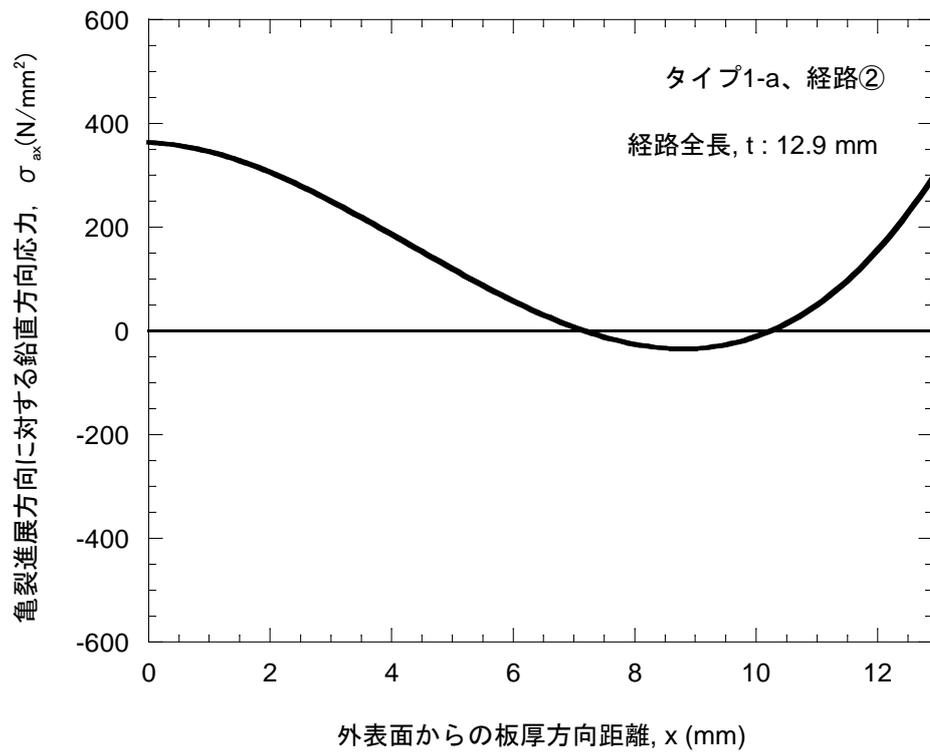
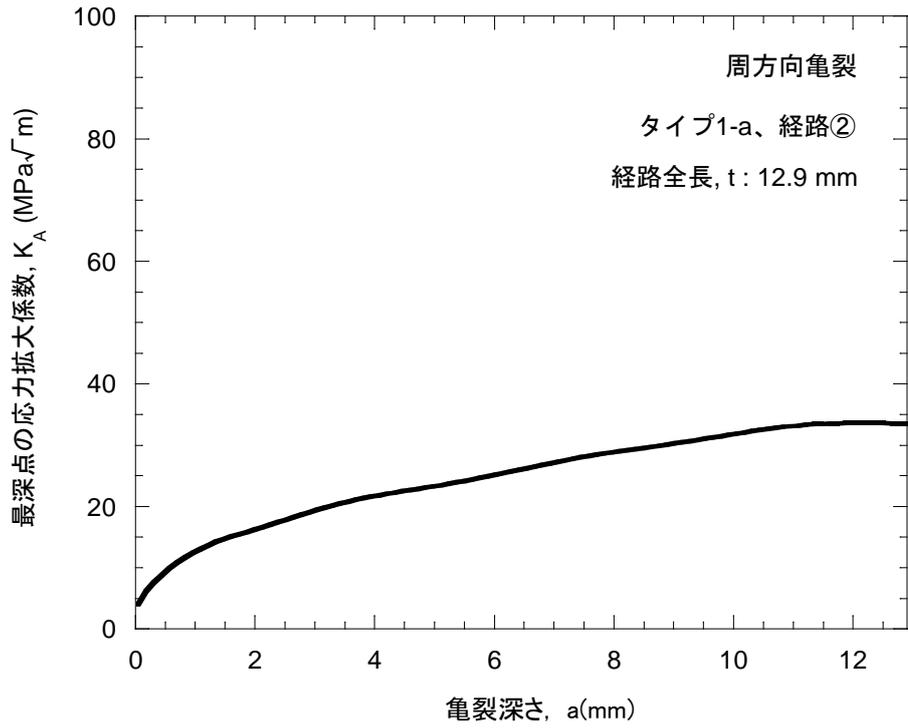
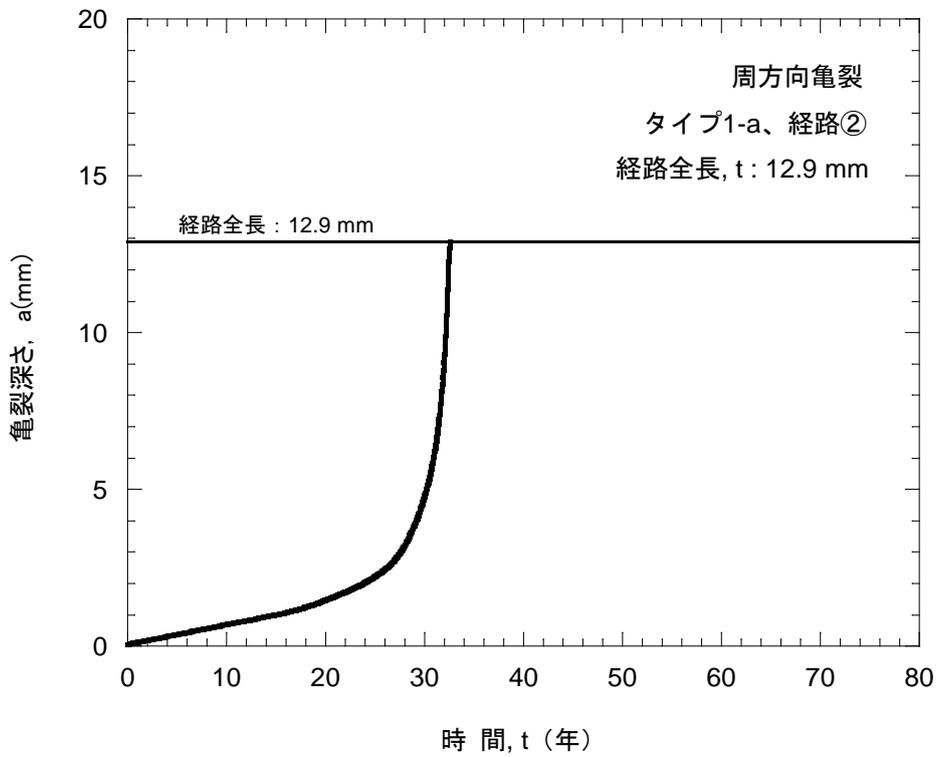


図 D-5 タイプ 1-a, 経路②の周方向亀裂進展評価に用いた軸方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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-6 タイプ 1-a, 経路②の周方向亀裂進展評価結果

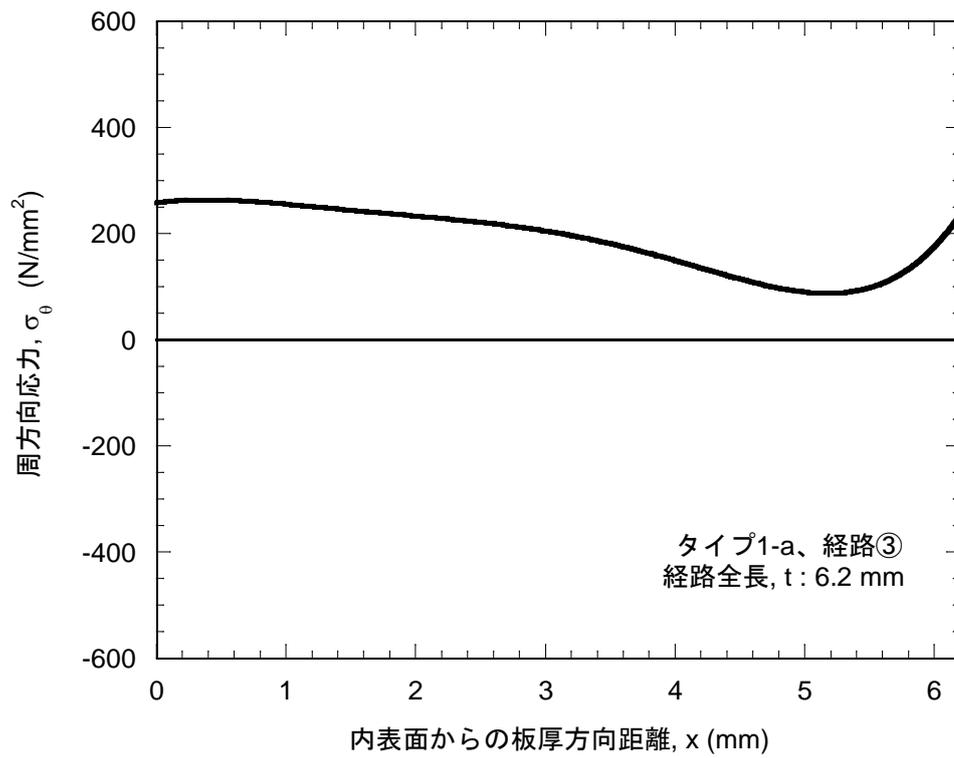
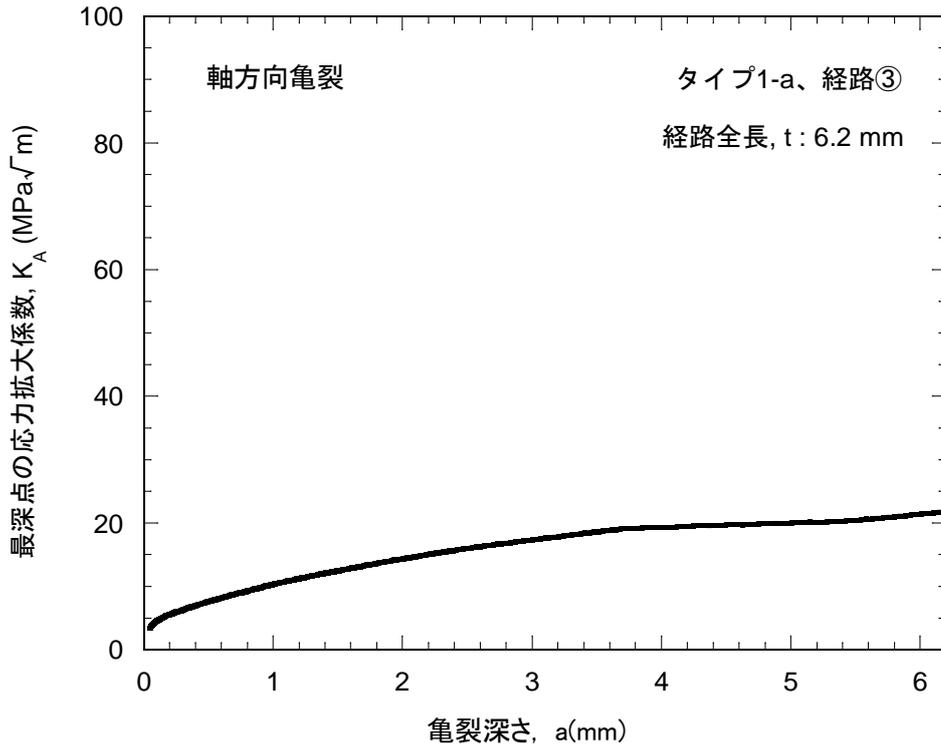
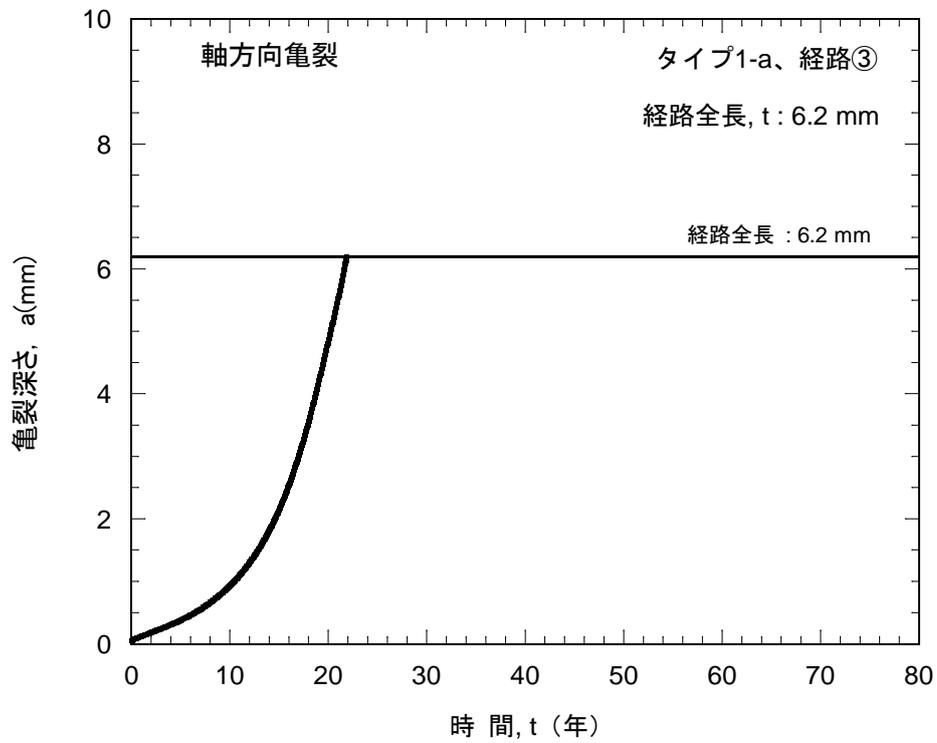


図 D-7 タイプ 1-a、経路③の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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-8 タイプ 1-a、経路③の軸方向亀裂進展評価結果

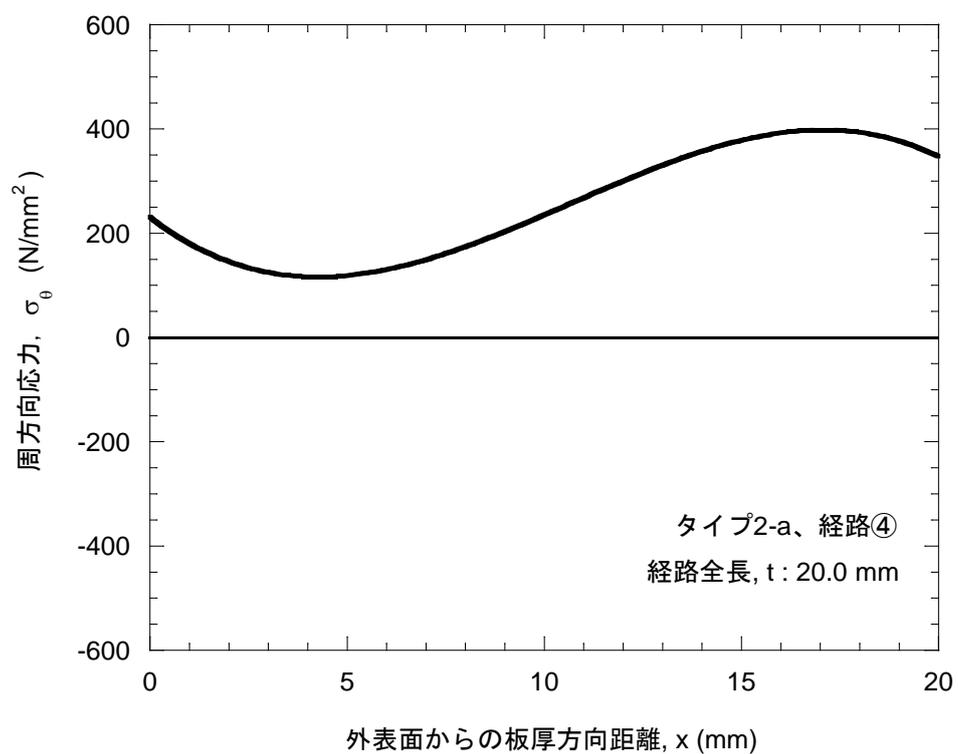
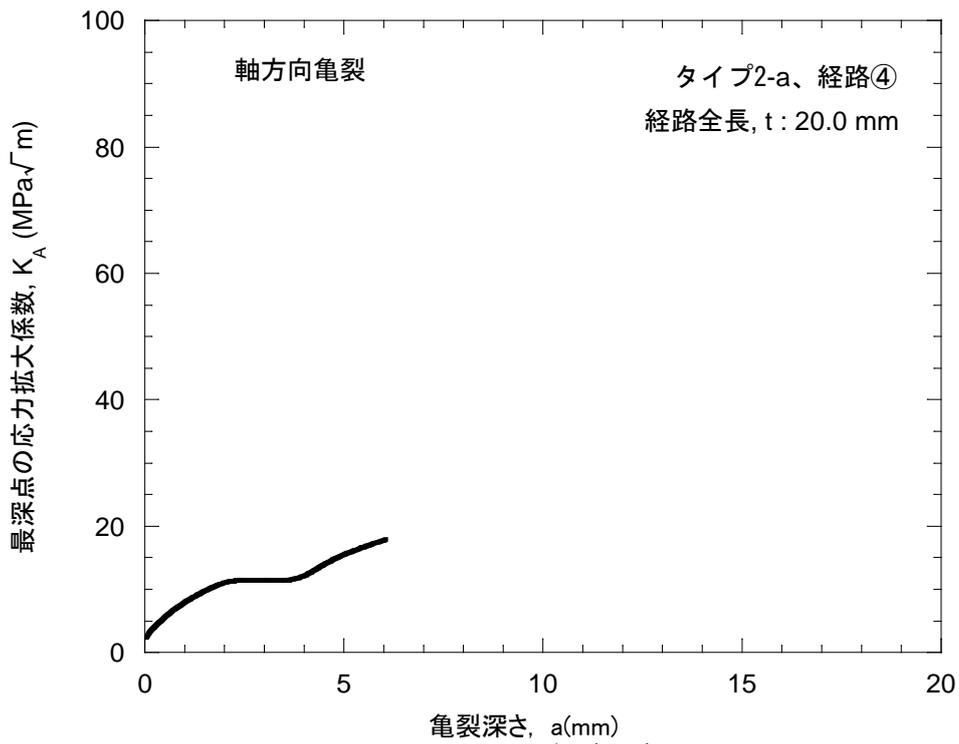
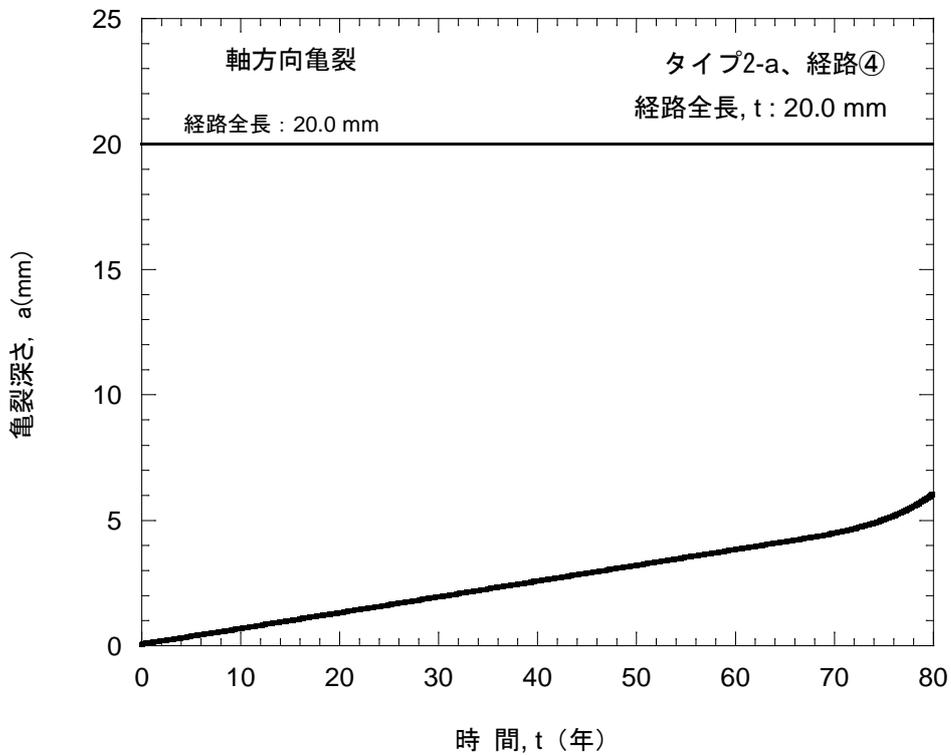


図 D-9 タイプ 2-a、経路④の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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 タイプ 2-a、経路④の軸方向亀裂進展評価結果

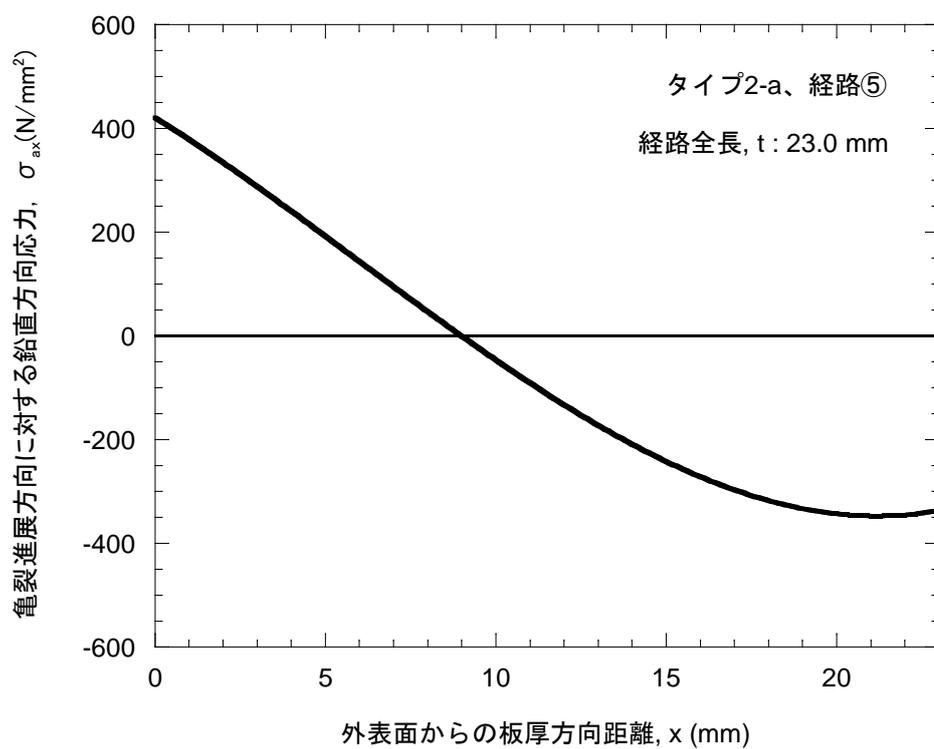
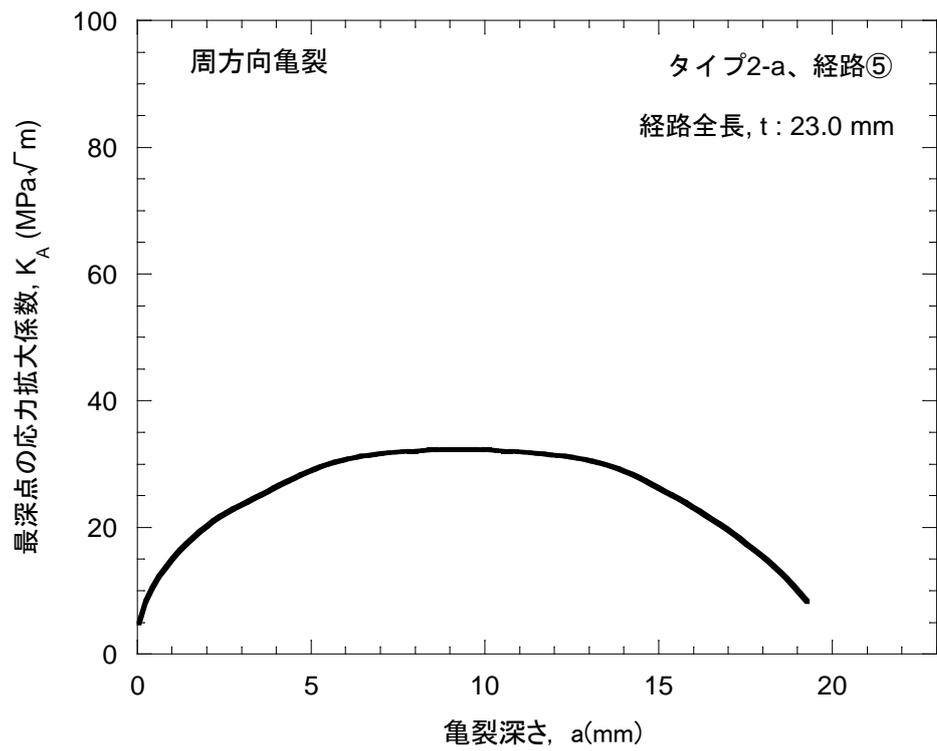
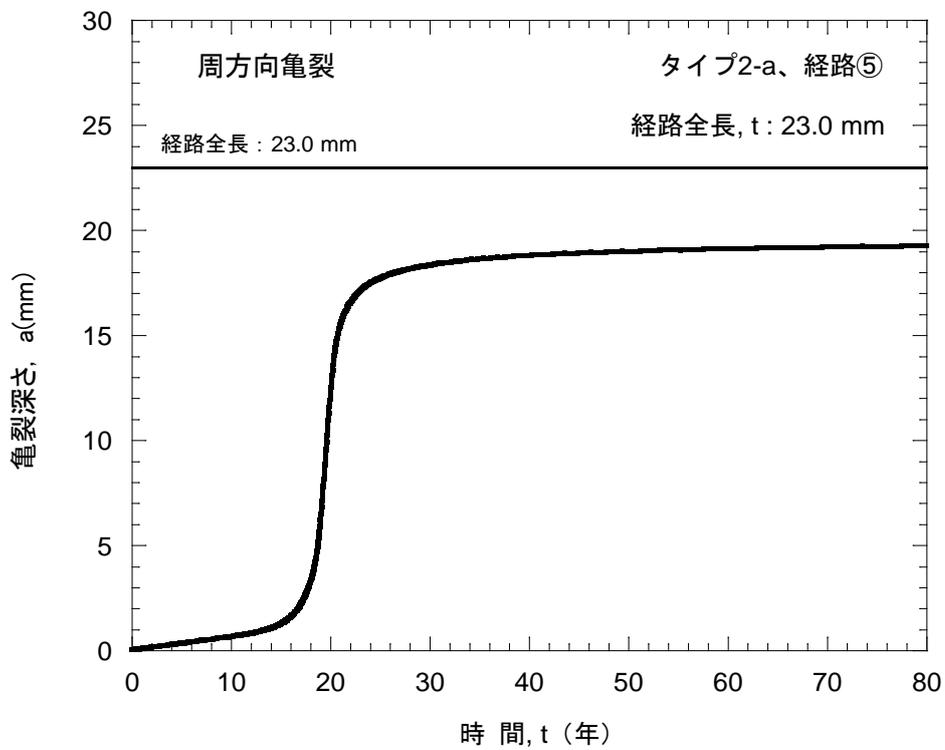


図 D-11 タイプ 2-a、経路⑤の周方向亀裂進展評価に用いた軸方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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-12 タイプ 2-a、経路⑤の周方向亀裂進展評価結果

3. ハウジング/フランジ溶接部における評価

3.1 評価条件

a. 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-13 に示す。LPRM 装荷ハウジングのハウジング/フランジ溶接部における炉内側から炉外側に向かう経路のうち、鋭敏化度の強さ及び残留応力が厳しいと考えられる直線経路を亀裂進展経路として想定した。

b. 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、弾性解析により、内圧により生じる応力を運転応力として評価し、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。

c. 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。

d. SCC 亀裂進展特性

SUS304 及び SUS316 (原子力仕様) 製ハウジングの亀裂進展評価に用いる 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鋭敏化 SUS304 及び低炭素量ステンレス鋼の亀裂進展特性を用いた。

鋭敏化 SUS304 :

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

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

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

低炭素量ステンレス鋼 :

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

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

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

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。

e. 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

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-14 に示す。また、軸方向亀裂進展評価結果を図 D-15 に示す。図 D-15(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-15(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。ICM フランジ部を対象とした亀裂進展評価における経路全長は 8.2 mm であるが、鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性を用いて評価した結果では、軸方向亀裂が経路全長に達する年数は 8.5 年、低炭素量ステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性を用いて評価した結果では、軸方向亀裂が経路全長に達する年数は 30.4 年である。

周方向亀裂進展評価に用いた当該部の軸方向応力分布（残留応力＋運転応力）を図 D-16 に示す。また、周方向亀裂進展評価結果を図 D-17 に示す。図 D-17(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-17(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。前述したように、亀裂進展評価における経路全長は 8.2 mm であるが、鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性を用いて評価した結果では、周方向亀裂が経路全長に達する年数は 17.1 年、低炭素量ステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性を用いて評価した結果では、周方向亀裂が経路全長に達する年数は 70.2 年である。

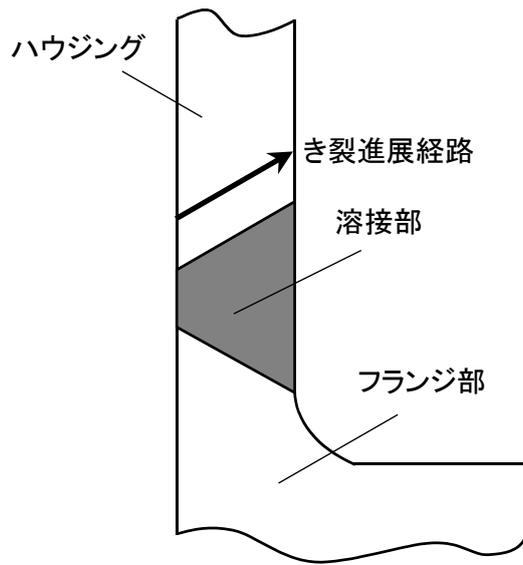


図 D-13 ハウジング/フランジ溶接部に想定した亀裂進展経路

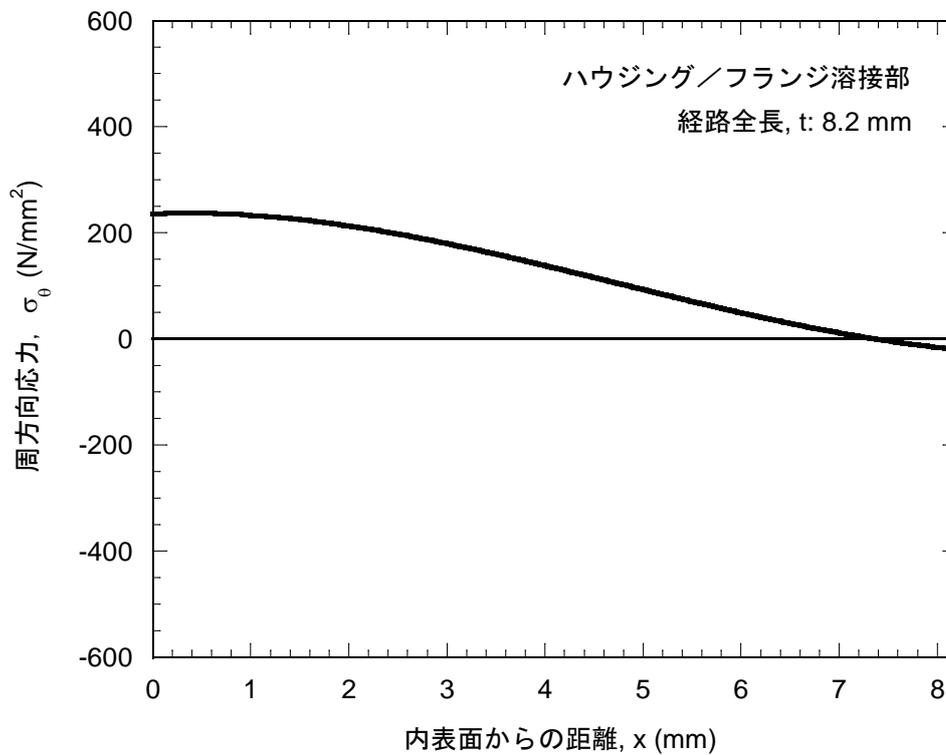
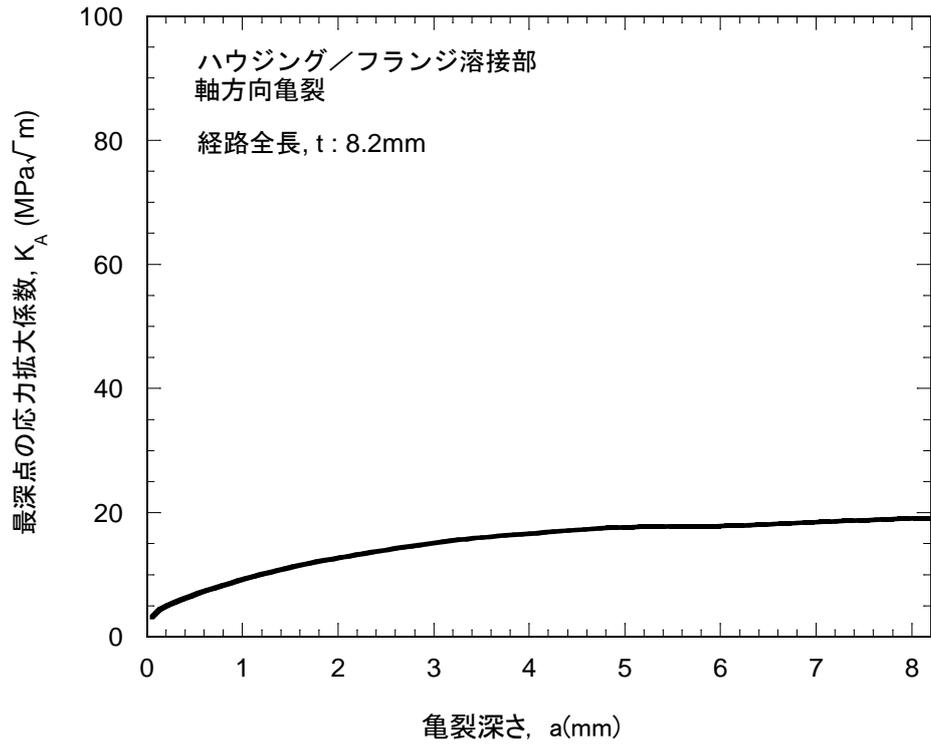
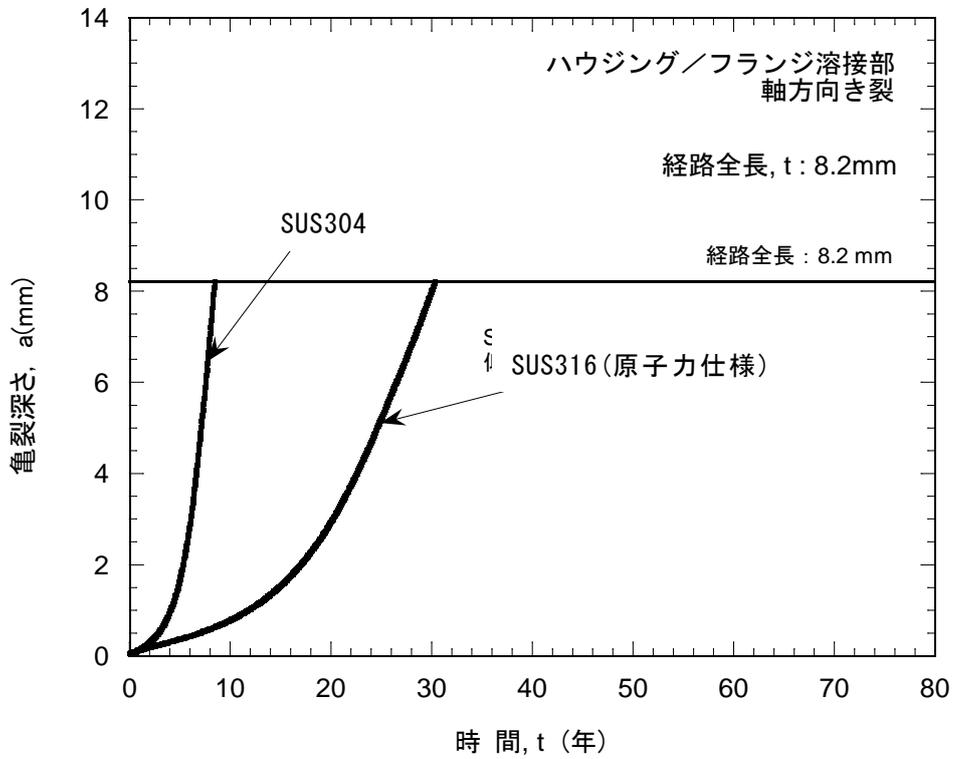


図 D-14 軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布（残留応力+運転応力）



(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-15 ハウジング/フランジ部の軸方向亀裂進展解析結果

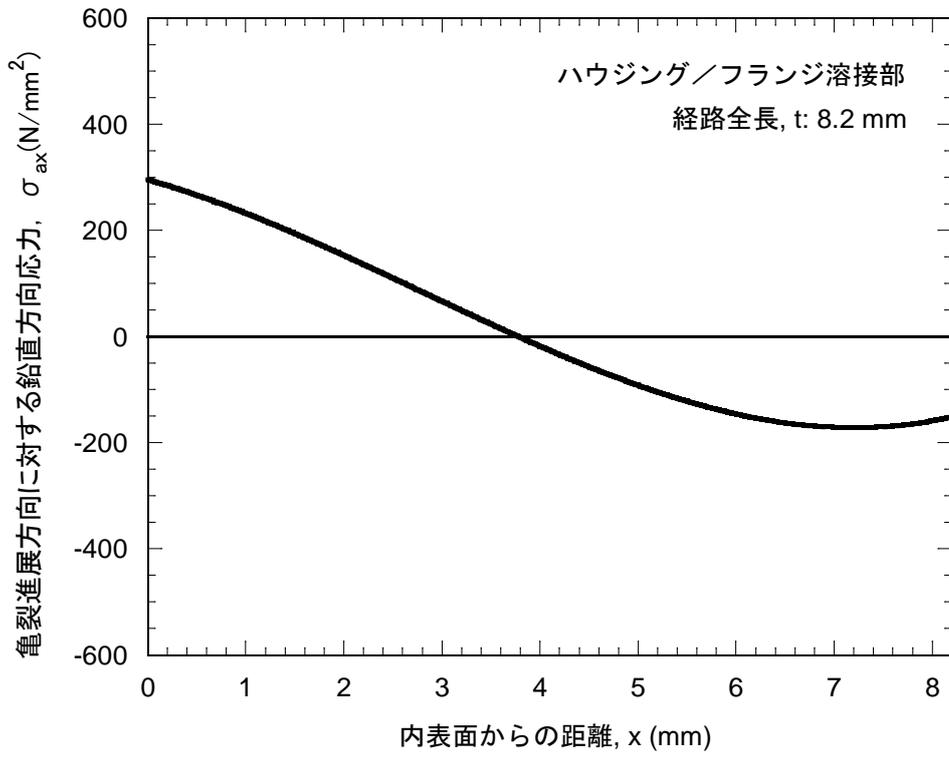
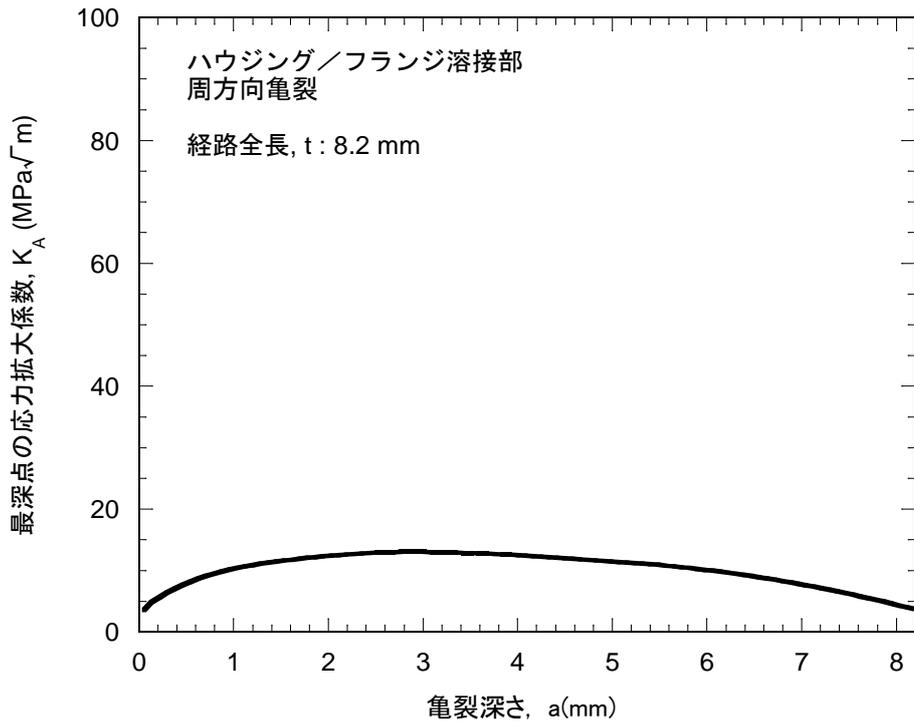
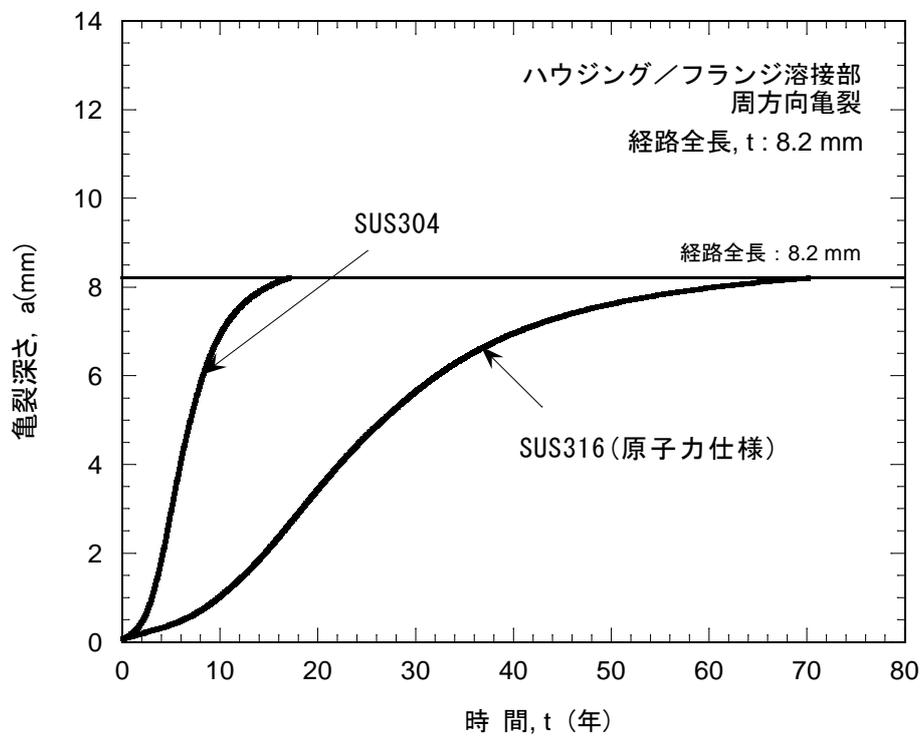


図 D-16 周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向残留応力分布



(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-17 ハウジング/フランジ溶接部の周方向亀裂進展解析結果

4. まとめ

ハウジング取付け溶接部及びハウジング/フランジ溶接部の亀裂進展評価結果を、表 D-1 に示す。

タイプ 1-a のハウジング取付け溶接部（182 合金）の場合、軸方向亀裂は約 19 年、周方向亀裂は約 32 年で貫通する評価となる。また、表面の周方向応力の方が約 40MPa 高いため、発生も軸方向亀裂が早いと考えられる。

タイプ 2-a のハウジング取付け溶接部（182 合金）の場合、軸方向及び周方向亀裂ともに、想定される亀裂進展開始時期から 80 年経過しても、亀裂は貫通しない。

SUS316（原子力仕様）製のハウジング内面からの軸方向亀裂は、約 21 年で貫通する。ハウジング内面から、耐圧機能を損なう方向への周方向亀裂の発生は生じない。

SUS304 製のハウジング/フランジ溶接部の場合、軸方向亀裂は約 8.5 年、周方向亀裂は約 17 年で貫通する評価となる。ただし、表面の軸方向応力の方が約 60MPa 高く、周方向亀裂の発生が早いと考えられるため、周方向亀裂が先に貫通する事象の可能性がある。SUS316（原子力仕様）製のハウジング/フランジ溶接部の場合、軸方向亀裂は約 30 年、周方向亀裂は約 70 年で貫通する評価となる。

表 D-1 ICM ハウジング溶接部における亀裂進展評価結果

評価対象位置	亀裂進展経路	SCC 亀裂進展特性	評価対象	経路全長, t	経路全長に達する時間
ハウジング取付け溶接部 タイプ 1-a	経路①	182 合金	軸方向亀裂	16.0 mm	19.4 年
	経路②		周方向亀裂	12.9 mm	32.6 年
	経路③*	低炭素量 ステンレス鋼	軸方向亀裂	6.2 mm	21.9 年
ハウジング取付け溶接部 タイプ 2-a	経路④	182 合金	軸方向亀裂	20.0 mm	80 年以上
	経路⑤		周方向亀裂	23.0 mm	80 年以上
ハウジング/フランジ 溶接部	—	鋭敏化 SUS304	軸方向亀裂	8.2 mm	8.5 年
			周方向亀裂		17.1 年
		低炭素量 ステンレス鋼	軸方向亀裂		30.4 年
			周方向亀裂		70.2 年

* 経路③における亀裂発生想定部の軸方向応力は圧縮応力であるため、周方向亀裂に対する SCC 亀裂は発生、進展しない。

付録E ICMハウジングの強度評価

1. はじめに

本付録は、ICMハウジングに地震荷重が作用した場合の耐圧機能維持に必要なハウジング取付け溶接部及びハウジング/フランジ溶接部の厚さ（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

ICMハウジングのハウジング取付け溶接部及びハウジング/フランジ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 破壊評価手法

ハウジング取付け溶接部及びハウジング/フランジ溶接部は、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。なお、ハウジング取付け溶接部の肉盛座形状には、三次元形状のものと軸対称スタブ形状のものがあるが、前者ではJ溶接の外周部起点、後者では肉盛座スタブの外周部起点の周方向亀裂進展が最も速く進展すると評価されるため、ハウジング取付け溶接部についてはJ溶接と肉盛座スタブを評価対象部とする。（付録D参照）

地震のモーメントによる応力が支配的なハウジング取付け溶接部については、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¹⁾により与えられる。

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

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

ここで、 σ_f ：流動応力 $=2.7Sm$ ²⁾

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 ：亀裂の深さ

θ ：亀裂の半角（すなわち π (rad)）

また、地震のモーメントが作用しないハウジング/フランジ溶接部については、内圧及

び地震荷重の鉛直力による軸力に対する評価を行なう。

管の破壊軸力 P_c は次式により与えられる。

$$P_c = \sigma_f \pi \{ R_o^2 - (R_i + a)^2 \} \quad (3)$$

ここで、 σ_f ：流動応力=2.7Sm (JSME維持規格²⁾に示される流動応力)

Sm ：設計応力強さ=115 N/mm² (告示 501 号別表第 2, SUS304)

R_o ：モデル化された管の外半径

R_i ：モデル化された管の内半径

2.2 限界荷重

限界モーメント M_c (SF)及び限界軸力 P_c (SF)は、式(1)で与えられる破壊モーメント M_c 及び式(3)で与えられる破壊軸力 P_c に安全率 SF を考慮して、次式により与えられる。

$$M_c(SF) = M_c / SF \quad (4)$$

$$P_c(SF) = P_c / SF \quad (5)$$

ここで、 SF ：安全率=1.39

(JSME維持規格²⁾に示される許容状態Ⅲ_{AS}及びⅣ_{AS}の安全率)

ハウジング取付け溶接部 (J 溶接, 肉盛座スタブ) とハウジング/フランジ溶接部の周方向亀裂深さに対する限界荷重の関係を、図 E-2～図 E-4 に示す。

2.3 許容残存厚さ

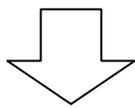
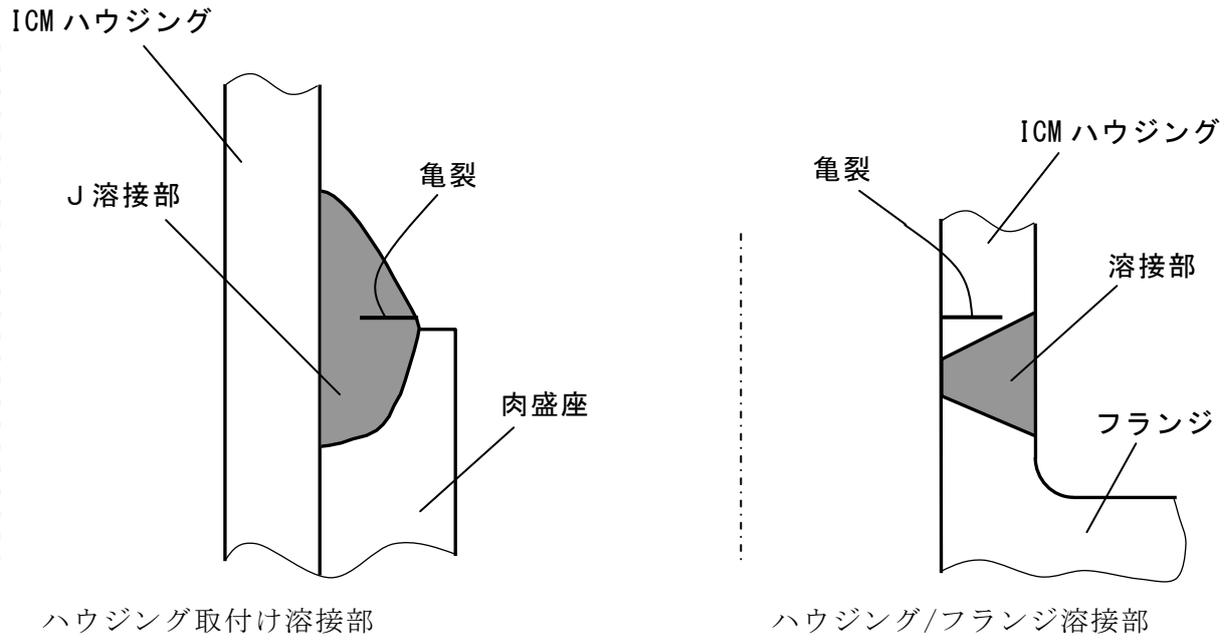
図 E-2～図 E-4 に示す破壊評価による亀裂深さと限界荷重の関係から許容残存厚さを求める。

図 E-2～図 E-4 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、評価部に作用する荷重は、ハウジング取付け溶接部は地震荷重の曲げモーメント (M)、ハウジング/フランジ溶接部は地震荷重の鉛直力及び内圧による鉛直力 (P)である。

表 E-1 ICM ハウジング溶接部の許容残存厚さ

評価位置	作用荷重	許容残存厚さ
ハウジング取付け溶接部 (J 溶接)	$M = 1.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$	1.1 mm
ハウジング取付け溶接部 (肉盛座スタブ)	$M = 1.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$	0.8 mm
ハウジング/フランジ 溶接部	$P = 13 \text{ kN}$	0.4 mm



破壊評価のためのモデル化

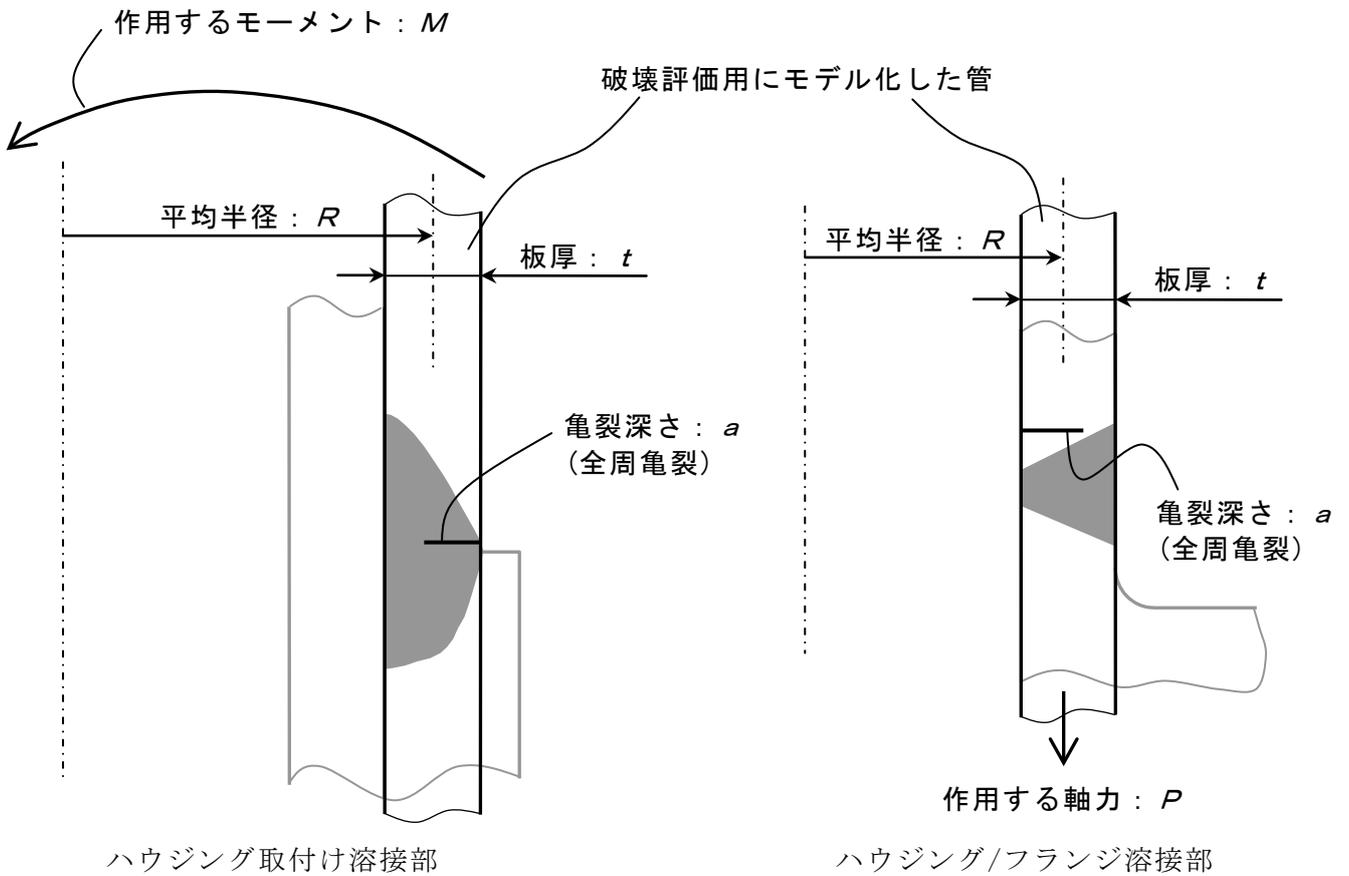
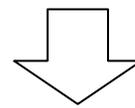


図 E-1 破壊評価に用いる溶接部のモデル化の概念図

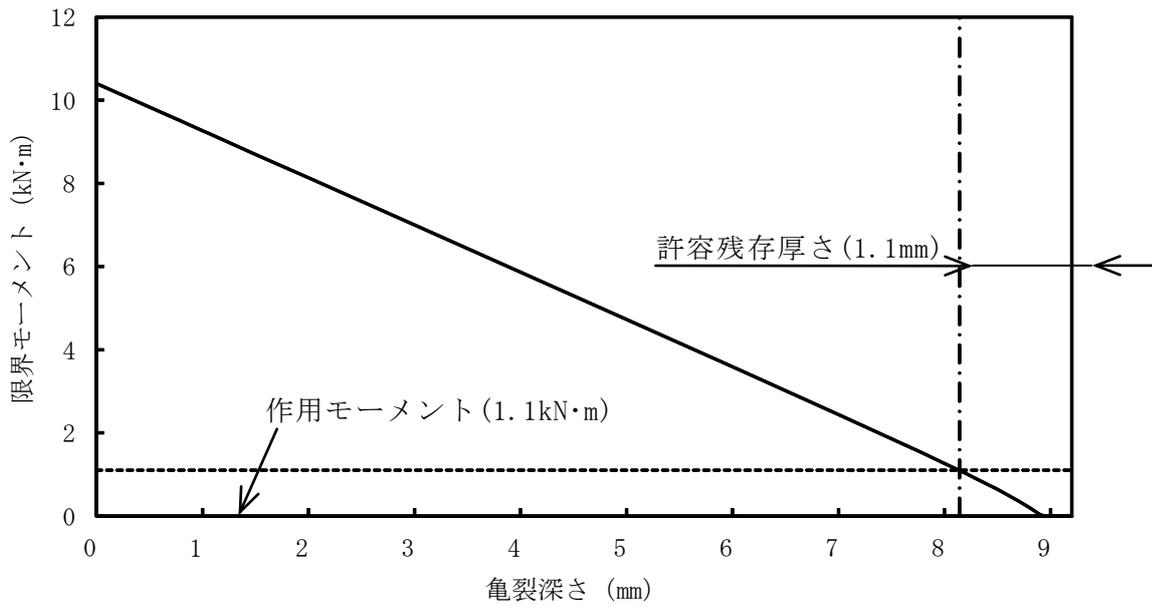


図 E-2 亀裂深さと限界荷重の関係
(ハウジング取付け溶接部(J溶接))

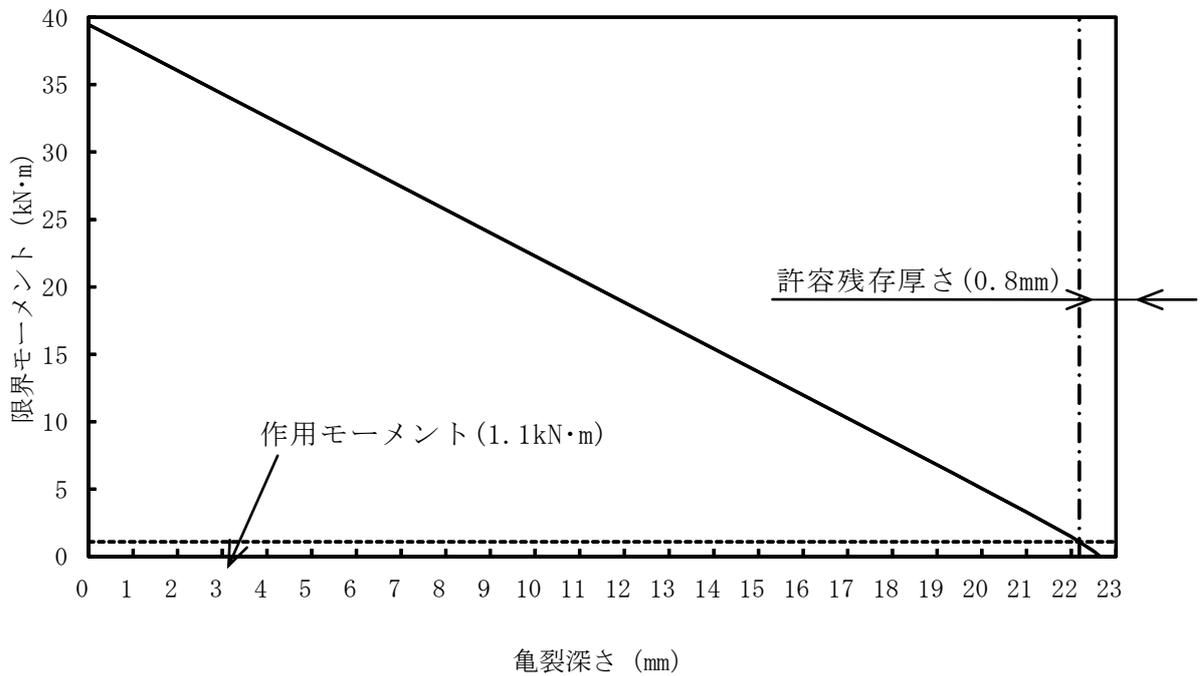


図 E-3 亀裂深さと限界荷重の関係
(ハウジング取付け溶接部(肉盛座スタブ))

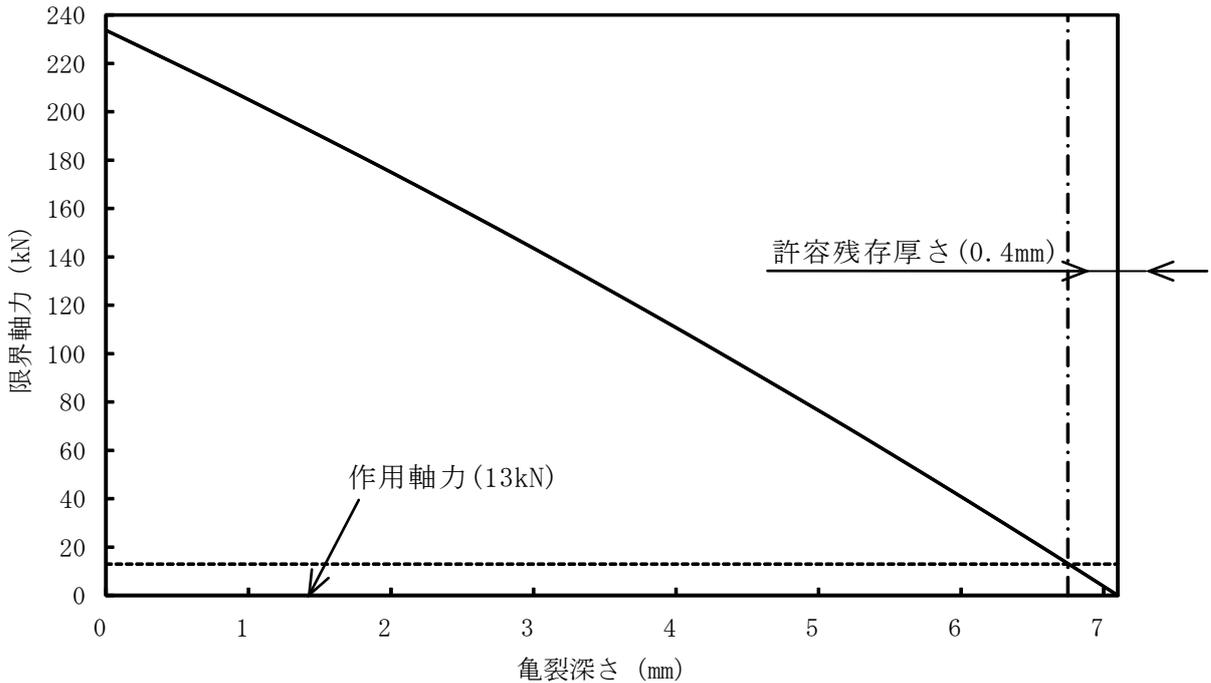


図 E-4 亀裂深さと限界荷重の関係
(ハウジング/フランジ溶接部)

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。

ハウジング取付け溶接部及びハウジング/フランジ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)

ハウジング取付け溶接部（三次元形状肉盛座）の J 溶接については、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 年経過した時点での値を用いる。軸対称スタブ形状肉盛座については、周方向亀裂が軸方向亀裂より先に発生・進展する可能性があるが、周方向亀裂は貫通せず、実運転時間で約 30 年以降に停留するため、そのときの亀裂深さを用いる。

ハウジング/フランジ溶接部については、MVT-1 による検出限界（深さ約 1mm と想定される）からモニタの交換周期である 7 年が経過した時点での周方向亀裂深さを用いる。

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-2 に示す。

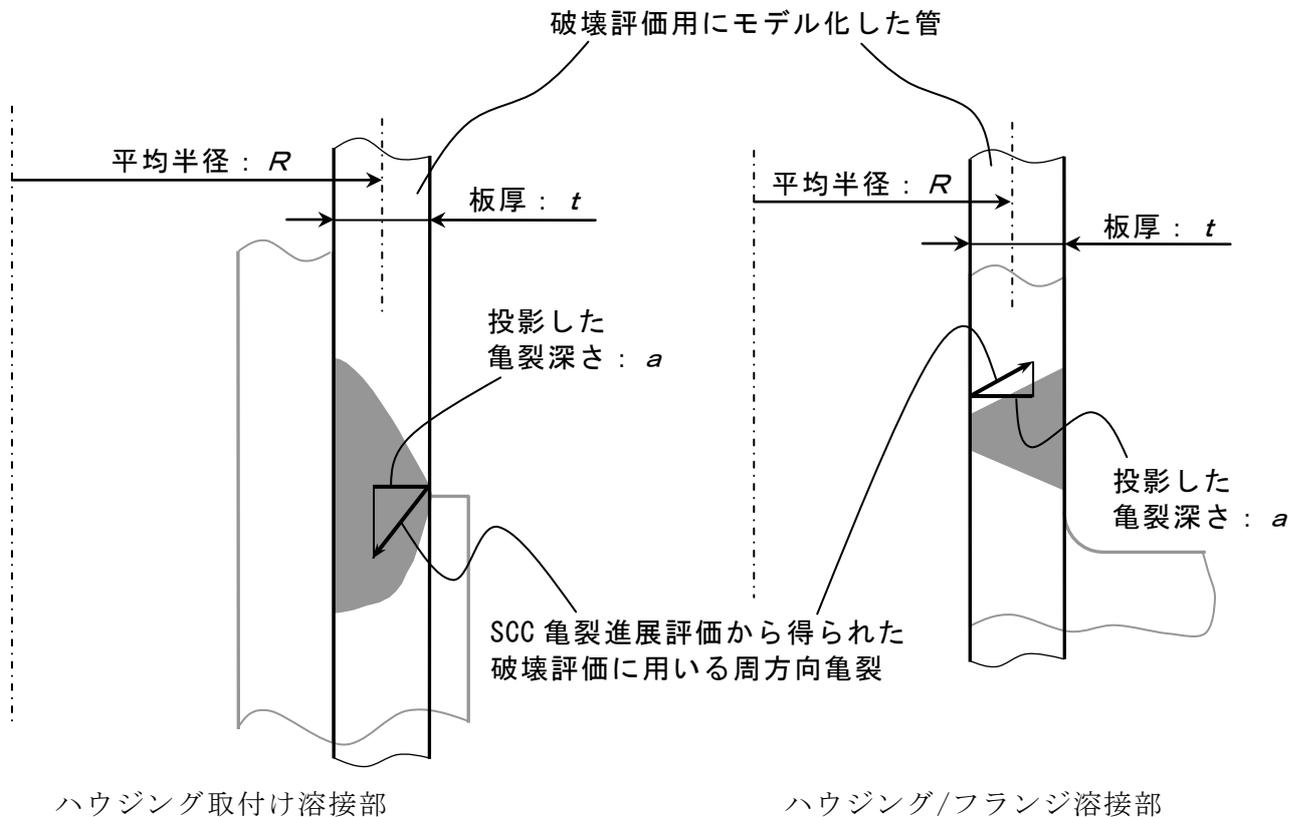


図 E-6 破壊評価に用いる投影亀裂深さ

表 E-3 ICM 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	限界荷重 (a)	作用荷重 (b)	比率 (a/b)
ハウジング取付け溶接部 (J 溶接)	1.1 mm	$M_c (SF) = 9.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M = 1.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$	8.3
ハウジング取付け溶接部 (肉盛座スタブ)	19.3 mm	$M_c (SF) = 6.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M = 1.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$	5.8
ハウジング/フランジ溶接部	6.0 mm	$P_c (SF) = 40.8 \text{ kN}$	$P = 13 \text{ kN}$	3.1

4. まとめ

- (1) ICM ハウジングの溶接部の許容残存厚さは、ハウジング取付け溶接部の三次元形状 J 溶接で 1.1mm、軸対称スタブ形状肉盛座で 0.8mm、ハウジング/フランジ溶接部で 0.4mm である。
- (2) VT-2 により漏洩が認められなかったハウジング取付け溶接部の三次元形状 J 溶接に想

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 1.1mm（残存厚さ 8.1mm）であり，許容残存厚さに対して約 7 倍の裕度を有する。また，軸対称スタブ形状肉盛座で停留する周方向亀裂深さ（板厚方向に投影した深さ）は 19.3mm（残存厚さ 3.3mm）であり，許容残存厚さに対して約 4 倍の裕度を有する。

(3) MVT-1 により欠陥が認められなかったハウジング/フランジ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 6.0mm（残存厚さ 1.1mm）であり，許容残存厚さに対して 2.7 倍の裕度を有する。

(4) したがって，点検により健全性を確認したハウジング取付け溶接部及びハウジング/フランジ溶接部は， S_2 地震の場合でも不安定破壊を起こすことがなく，耐圧機能が維持される。

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 ICMハウジング圧力境界部からの漏えいの影響評価

1. はじめに

本付録は、ICM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

ICMハウジングでは、ニッケル合金溶接金属部とステンレス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)

内圧による荷重は 26N/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)ハウジング取付け溶接部 (ニッケル合金溶接金属、ハウジング熱影響部)、及び (b)ハウジング/フランジ溶接部 (ハウジング熱影響部) の寸法に基づいて評価すると、約 10mm 以下である。

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 10mm 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 0.02 l/s と評価される。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、ICMハウジングの構造強度へ影響しない。

3. まとめ

ICMハウジングの圧力境界の溶接部で想定される長さ 10mm 程度の軸方向亀裂の貫通が生じて、原子炉安全への影響はない。

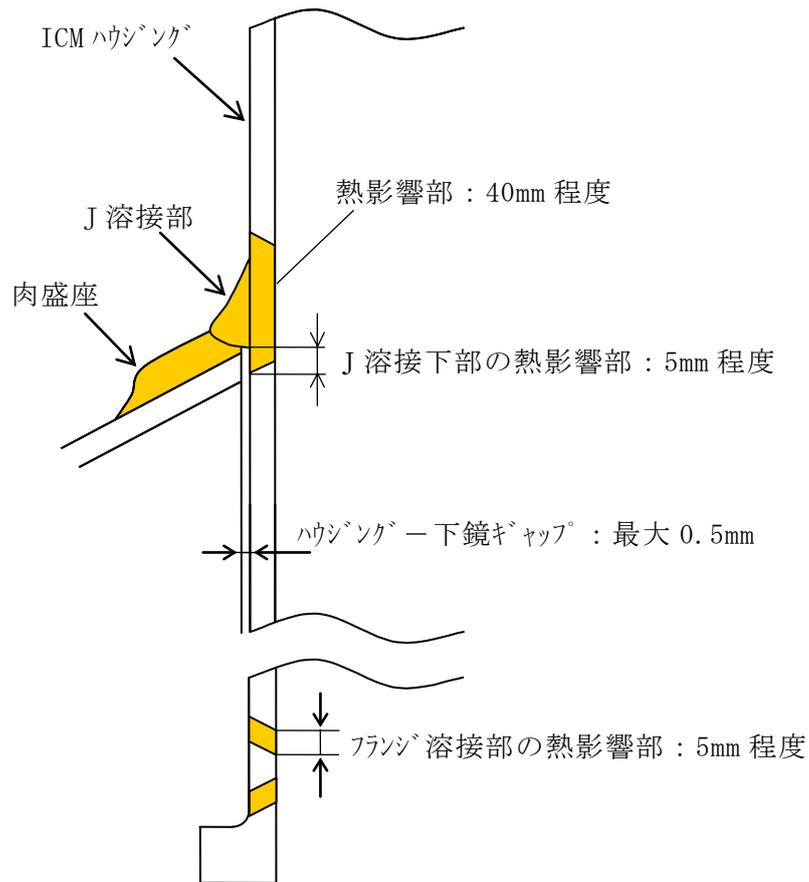


図 F-1 ICMハウジングに想定される SCC領域

付録 G SCC 予防保全技術

1. はじめに

本付録は、ICM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。ICM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. 工法概要

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。

なお、ICMハウジングの場合、LPRMを装荷したハウジングでは、炉水の循環があるため、ハウジング取付け溶接部内面及びハウジング/フランジ溶接部内面についても、水素注入による水質改善を期待できる。

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（後者は炉心シュラウドへ適用）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。ICM ハウジングの場合，水素注入と同様に，LPRM を装荷したハウジングの取付け溶接部内面及びハウジング/フランジ溶接部内面へも有効と考えられる。

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 $50\mu\text{m}$ 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²⁾

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²⁾

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

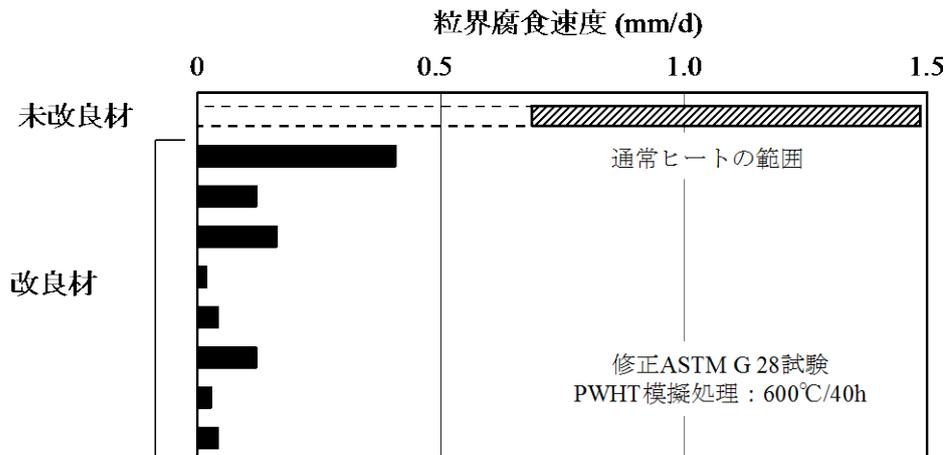


図 G-1 182 合金改良材の耐 SCC 性評価 (粒界腐食試験結果) ¹⁾

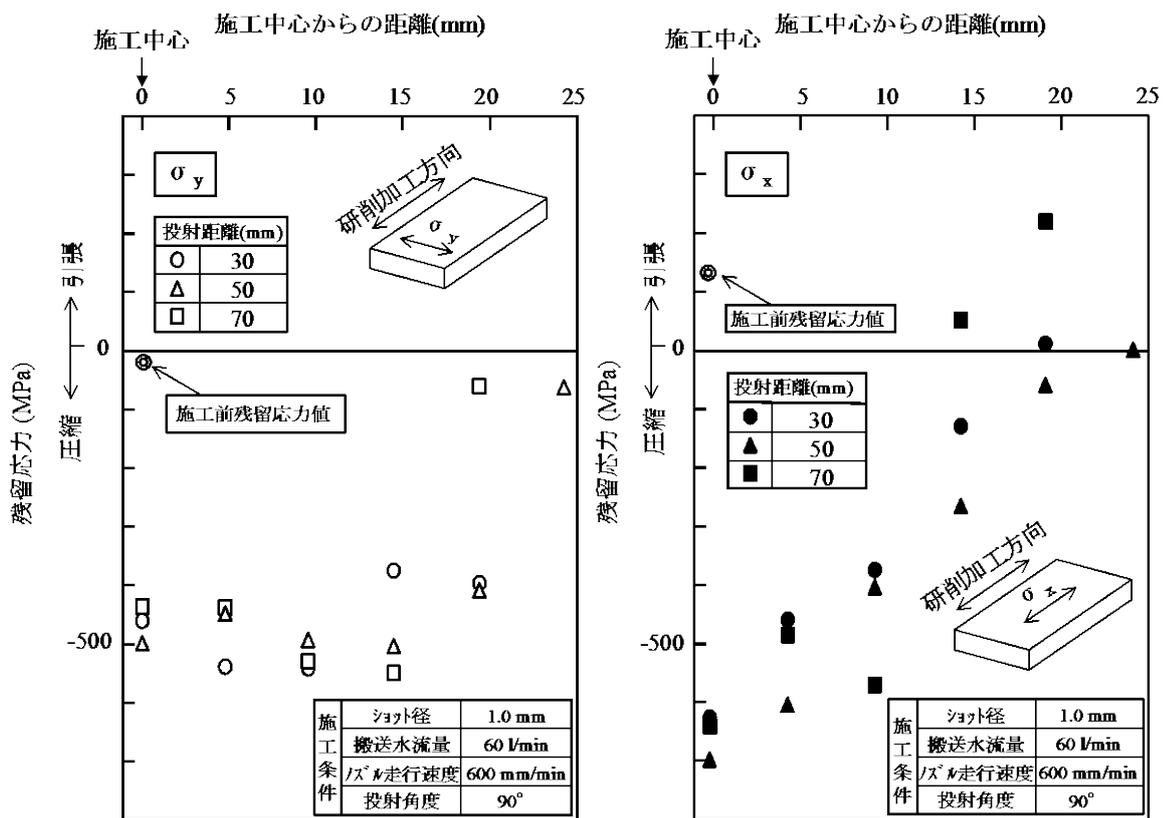


図 G-2 182 合金のショットピーニングによる応力改善効果 ²⁾

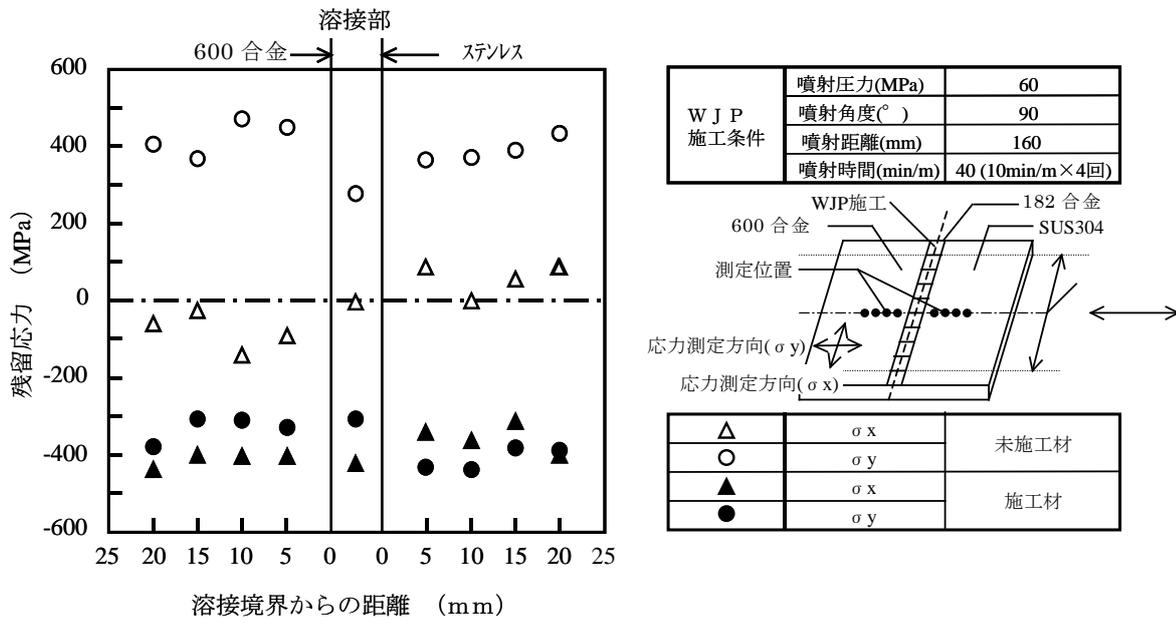


図 G-3 ウォータジェットピーニングによる応力改善効果²⁾

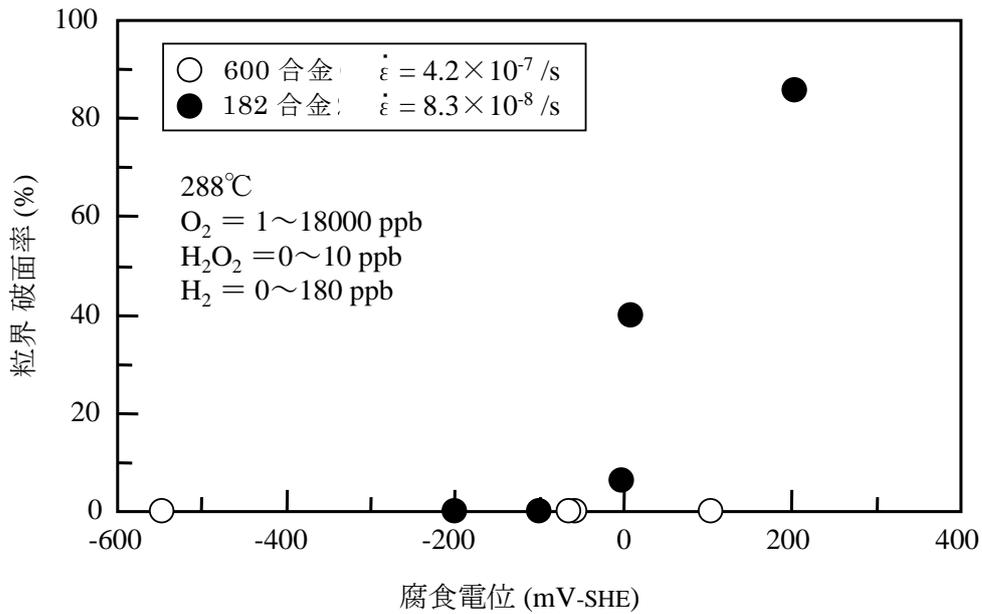


図 G-4 粒界破面率の腐食電位依存性測定結果³⁾

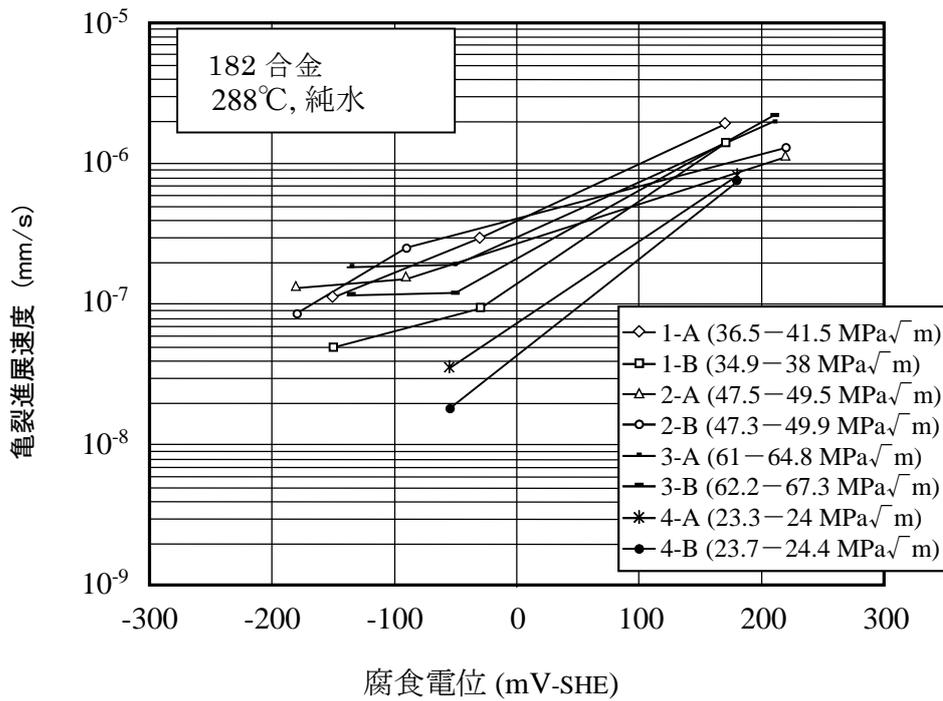


図 G-5 182 合金の亀裂進展速度の腐食電位依存性測定結果⁴⁾

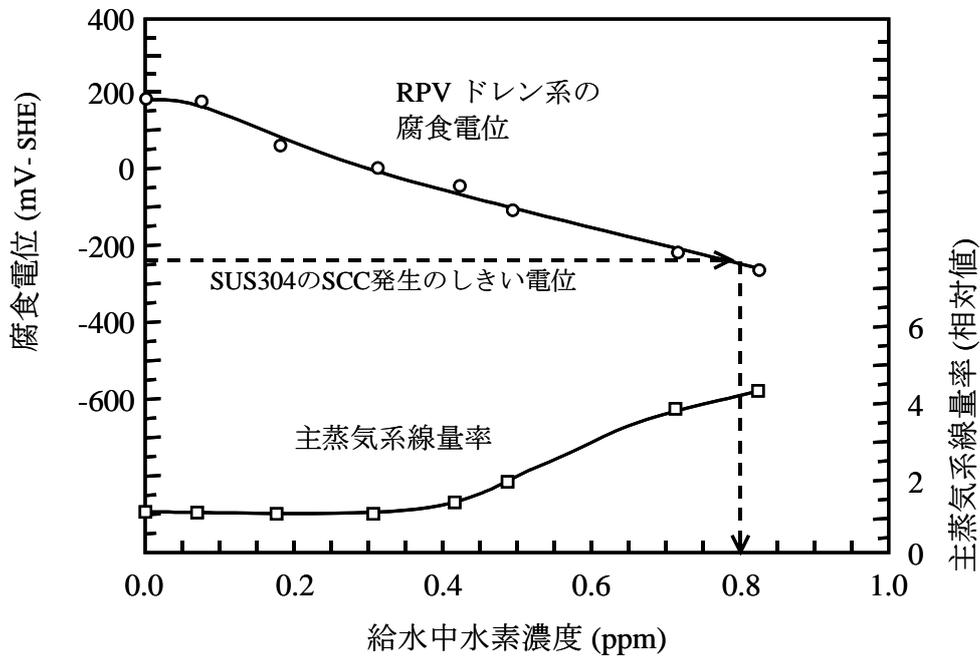


図 G-6 国内 BWR プラントのボトムドレン系で測定した腐食電位の
水素注入量依存性⁵⁾

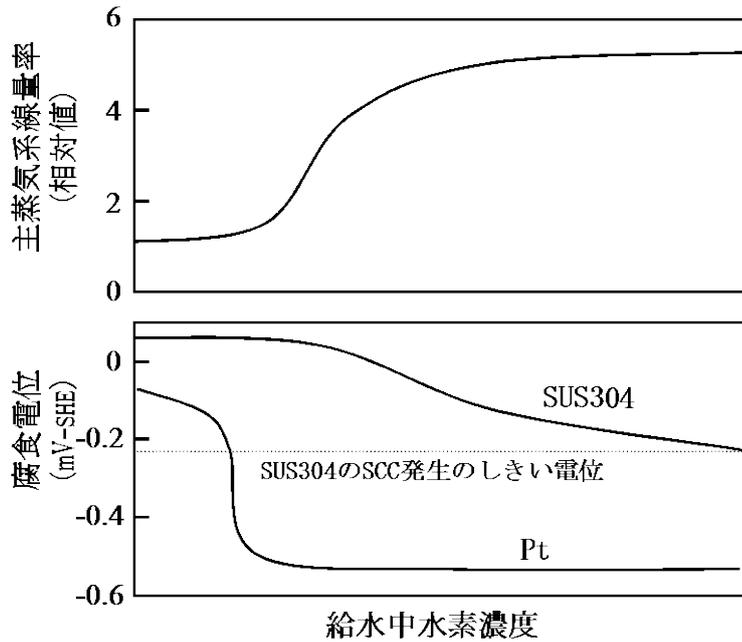


図 G-7 貴金属注入概念図

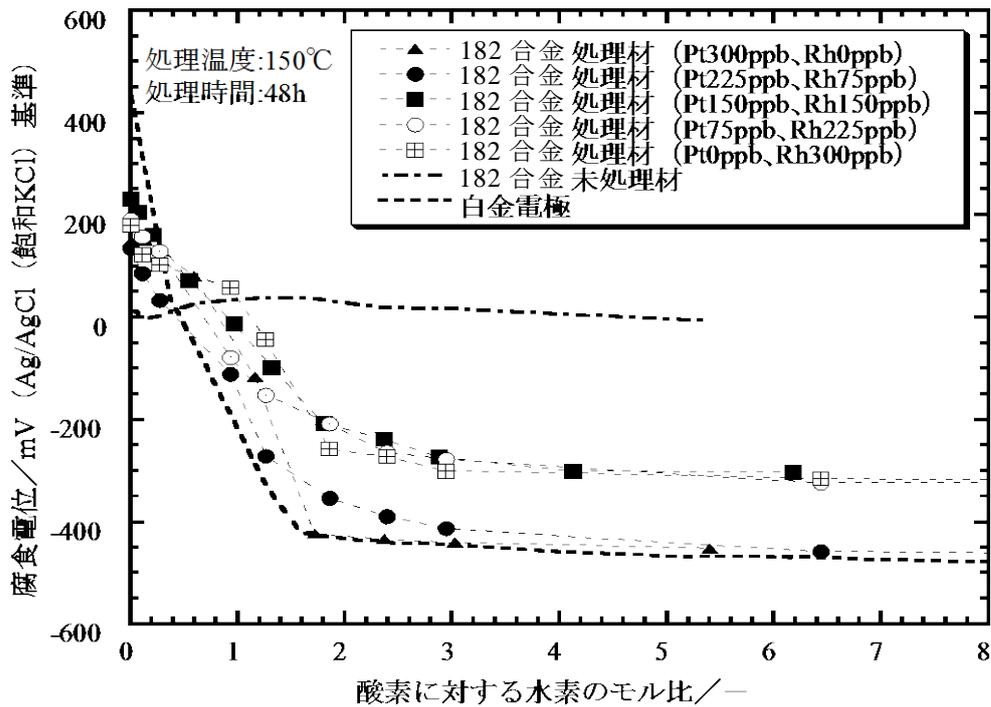
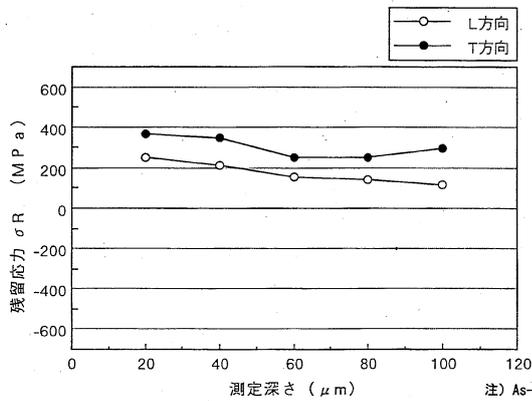
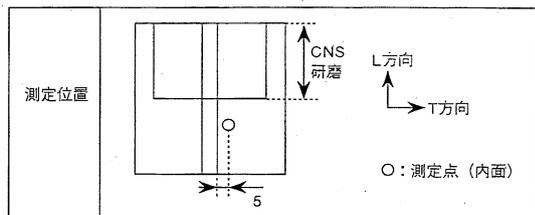
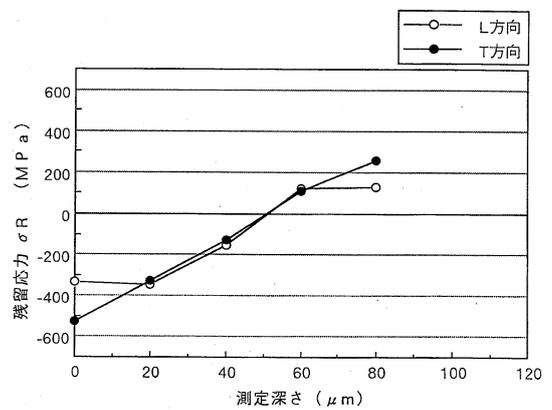
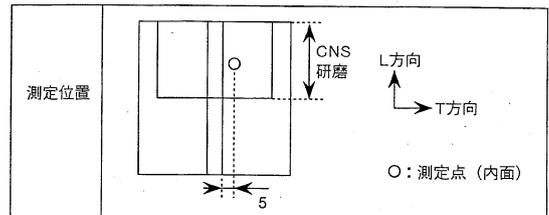


図 G-8 貴金属表面処理した 182 合金の腐食電位の水素濃度依存性⁷⁾
 [処理温度：150℃，処理時間：48 時間]



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) 「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)」報告書 (平成11年9月)

付録 H 補修技術

1. はじめに

本付録は、ICM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

ICM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。国内外のプラントで適用実績がある。

(2) スリーブ

亀裂部分を高耐食性のスリーブ材で覆い、亀裂進展を防止する工法である。工法の概要を図 H-2 に示す。国内プラントで適用実績がある。

(3) 取替

ICMハウジング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-3 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。国内プラントで適用実績がある。

(4) 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。

(5) 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-4 (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-4 (b)）がある。

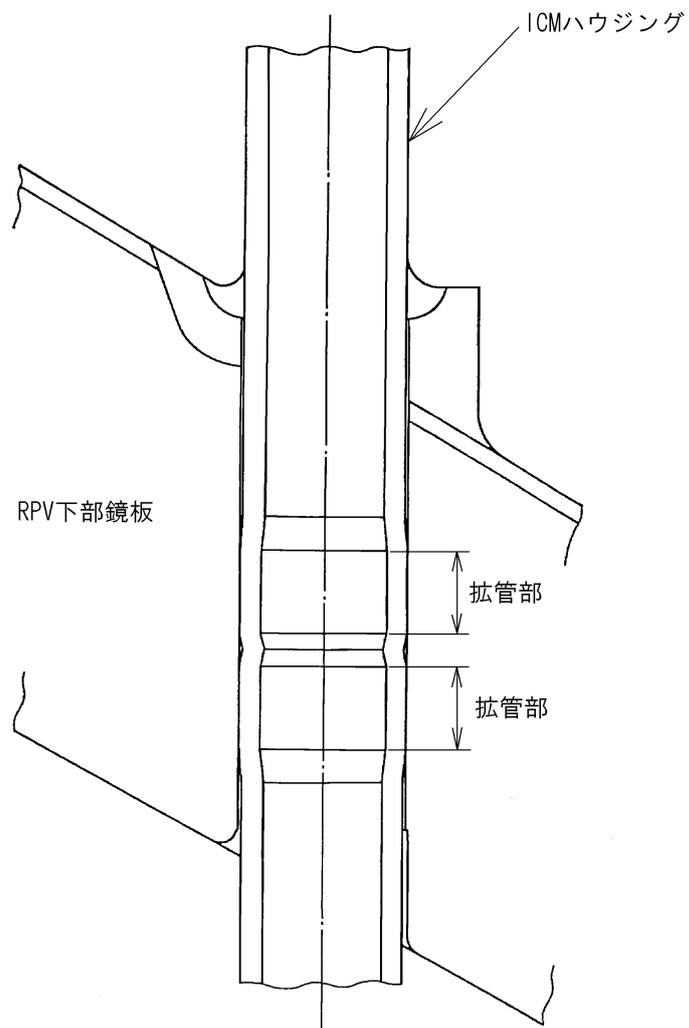
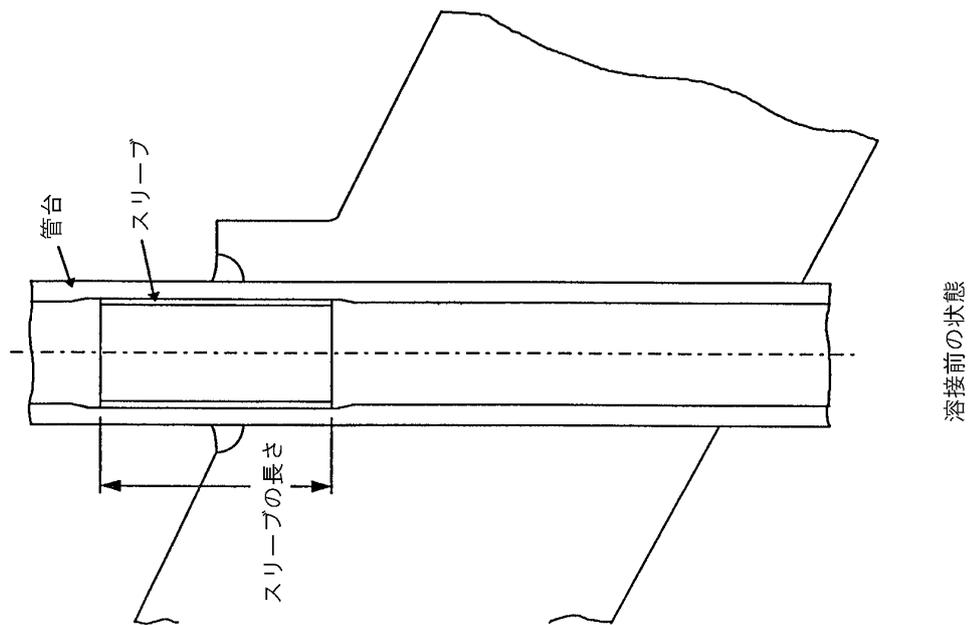
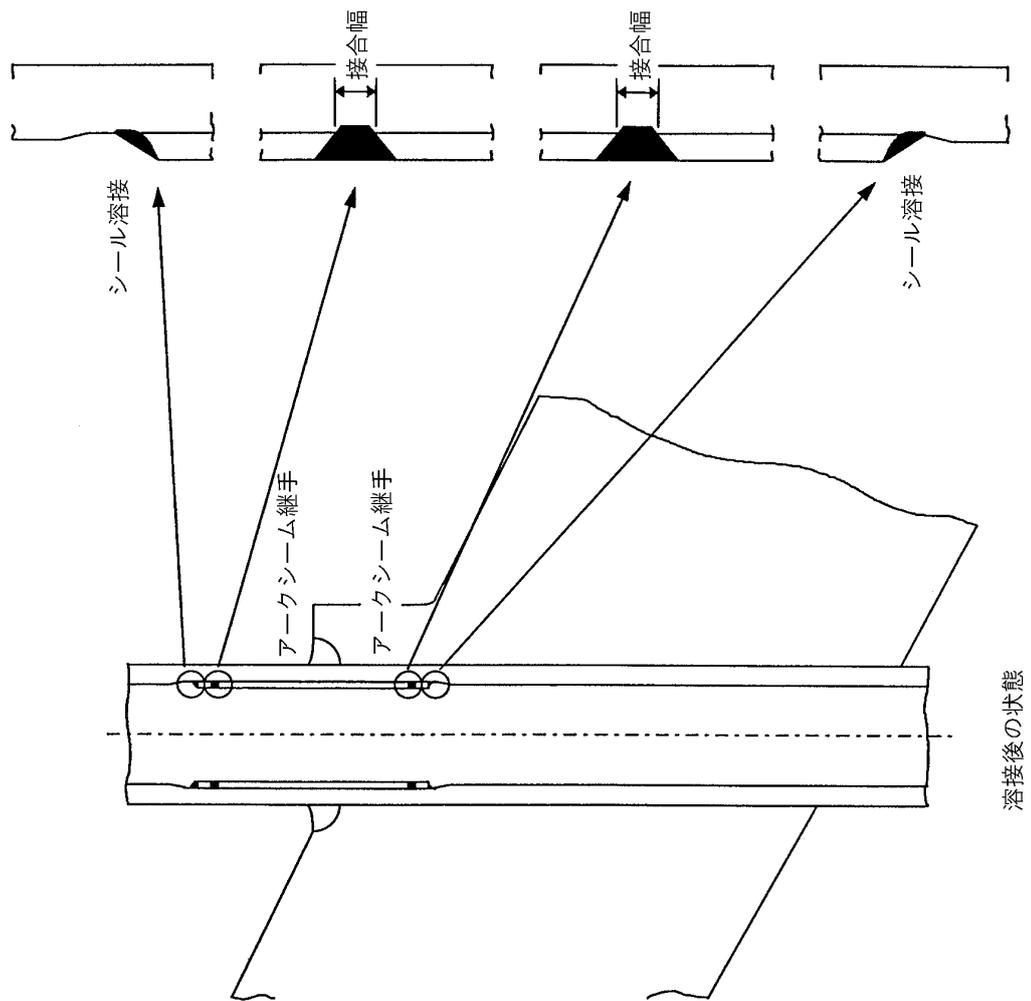
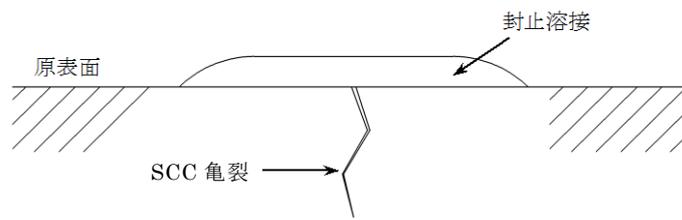


図 H-1 拡管工法

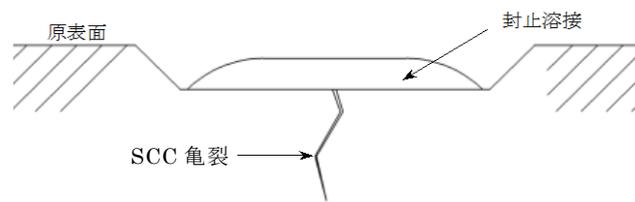


項目	作業前	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4	ステップ 5	
作業概要	<p>炉心支持板 ICハウジング 炉心支持板 ICハウジング 下鏡</p>	<p>切断</p>	<p>ノッチ</p>		<p>ポアマンドレル</p>	<p>肉盛溶接 溶接プラグ</p>	
	項目	ステップ 6	ステップ 7	ステップ 8	ステップ 9	ステップ 10	完了
	作業概要	<p>スタブ 壁面加工 開先加工 内面加工</p>	<p>開先部検査</p>	<p>拡管加工</p>	<p>J溶接</p>	<p>SMA カッピング</p>	
		肉盛座整形 (EDM)	開先部検査 (表面検査)	新規ハウジング挿入 拡管	新規ハウジング取付溶接 溶接部検査 (表面検査, UT)	新規案内管取付 (形状記憶合金)	
		肉盛座検査 (UT)					
		開先加工 (EDM)					
		内面加工 (EDM)					
既設ハウジングノコリ/案内管切断 (EDM)							
既設ハウジング取付 既設肉盛座除去 (EDM)							

図 H-3 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-4 封止溶接工法

付録 I ハウジング/フランジ溶接部に欠陥が検出された場合の評価手法

1. はじめに

本付録は、ICM ハウジングのハウジング/フランジ溶接部に欠陥が検出された場合の評価手法の例を示すものである。

2. 評価手法

2.1 基本的な考え方

ハウジング/フランジ溶接部の内面に SCC による亀裂が検出された場合は、亀裂深さの測定結果に基づいて亀裂進展量を保守的に評価し、軸方向亀裂の場合は板厚貫通に至らない期間内、周方向亀裂の場合は許容残存厚さ（付録 E 参照）を下回らない期間内について継続使用できるものとする。評価フローを、図 I-1 に示す。

2.2 軸方向亀裂の評価

軸方向亀裂が検出された場合は、以下の手順で評価する。

- (1) 体積試験により亀裂深さを測定し、亀裂深さの最大値を求める。
- (2) 軸方向亀裂の応力拡大係数 K は、亀裂深さと共に単調増加し、板厚貫通時において最大値約 $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ になると評価されるため、 $K=20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ における SCC 亀裂進展速度（通常一次系水質環境下の鋭敏化 SUS304 の場合、 $9.3\times 10^{-8}\text{mm/s}$ ）を用いて、次回定検までの亀裂進展量を評価する。（付録 B. D 参照）
- (3) 検出された亀裂深さの最大値と、(2)で評価した運転中の亀裂進展量から、次回定検時の板厚の最小値を評価する。
- (4) 次回定検時までに板厚を貫通しない場合は、継続使用可能であり、板厚貫通に至らない期間内に再点検を実施する。
- (5) 上記手順により次回定検時までに板厚を貫通する評価となる場合は、2.4 項に示す詳細評価を適用することができる。

詳細評価を実施しても板厚を貫通すると評価される場合は、補修を行う。

2.3 周方向亀裂の評価

周方向亀裂が検出された場合は、以下の手順で評価する。

- (1) 体積試験により亀裂深さを測定し、亀裂深さの最大値を求める。
- (2) 周方向亀裂の応力拡大係数 K は、板厚内部の内面側において最大値約 $14\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ をとると評価されるため、 $K=14\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ における SCC 亀裂進展速度（通常一次系水質環境下の鋭敏化 SUS304 の場合、 $4.3\times 10^{-8}\text{mm/s}$ ）を用いて、次回定検までの亀裂進展量を評価する。（付録 B. D 参照）
- (3) 検出された亀裂深さの最大値と、(2)で評価した運転中の亀裂進展量から、次回定検時の

板厚の最小値を評価する。

- (4) 次回定検時の板厚の最小値が、付録Eに示す手法で求めた許容残存厚さ以上の場合は、継続使用可能とする。(付録E参照)

再点検は、板厚の最小値が許容残存厚さを下回らない期間内に実施する。

- (5) 上記手順により次回定検時に許容残存厚さを確保できない評価となる場合は、2.4項に示す詳細評価を適用することができる。詳細評価を実施しても許容残存厚さを確保できない場合は、補修を行う。

2.4 詳細評価

下記の手法等を用いて、ハウジング/フランジ溶接部の板厚を詳細評価することができる。

- (1) 検出された亀裂の形状を、体積試験のサイジング結果に基づいてモデル化し、当該部位の残留応力分布を用いて、応力拡大係数を評価する。
- (2) 検出された亀裂の進展速度を、実測値（亀裂深さの測定値の変化量）、水質の評価結果等に基づいて評価する。

3. 評価例

SUS304 製ハウジングのフランジ溶接部に、最大深さ 1mm の軸方向亀裂及び周方向亀裂が検出された場合の評価例を、それぞれ図 I-2 及び I-3 に示す。通常一次水質環境の亀裂進展特性を適用すると、最大深さ 1mm の軸方向亀裂が検出された場合は約 2 年、最大深さ 1mm の周方向亀裂が検出された場合は約 4 年の運転継続が可能と評価される。

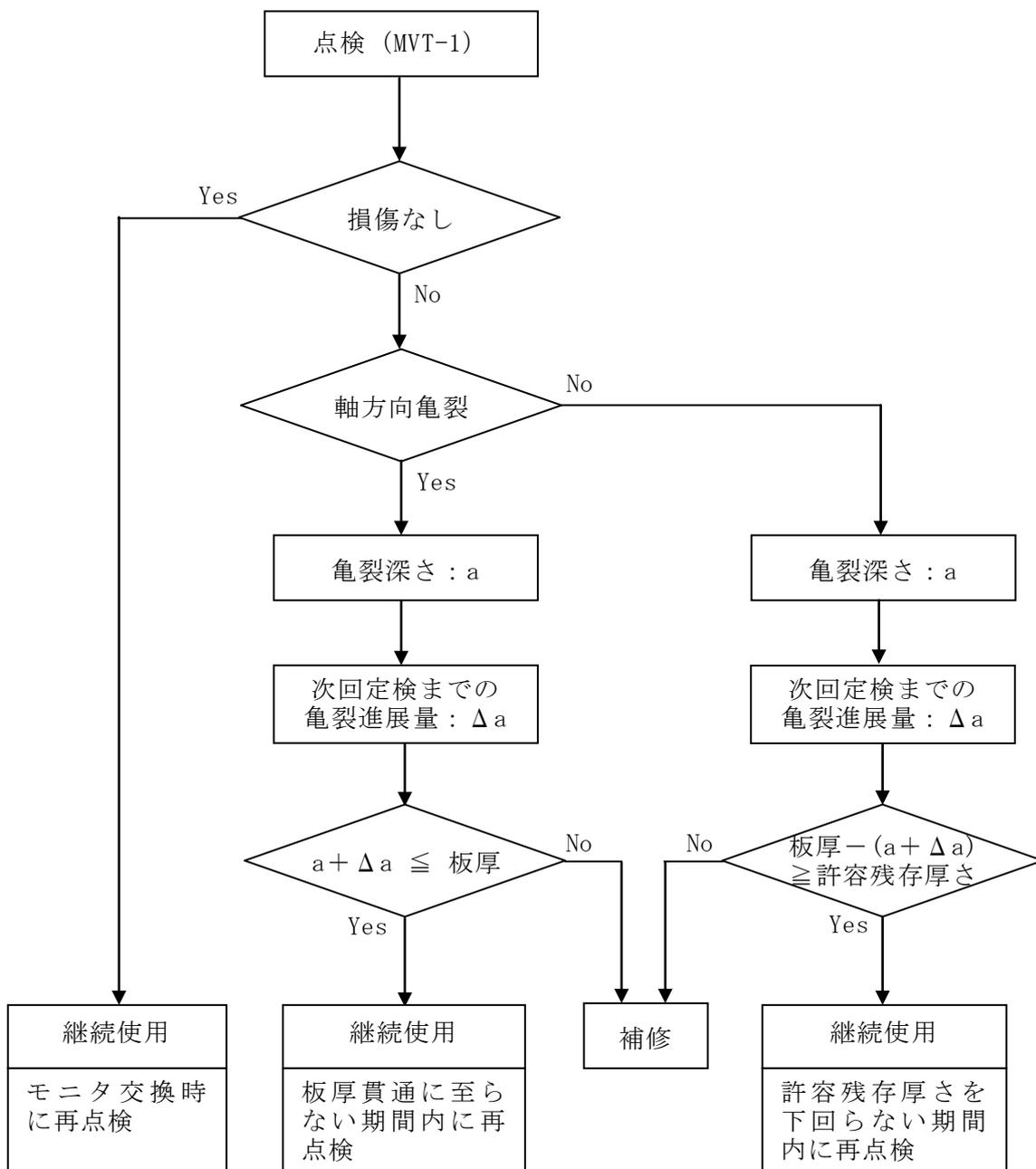


図 I-1 ICMハウジング/フランジ溶接部の損傷評価フロー

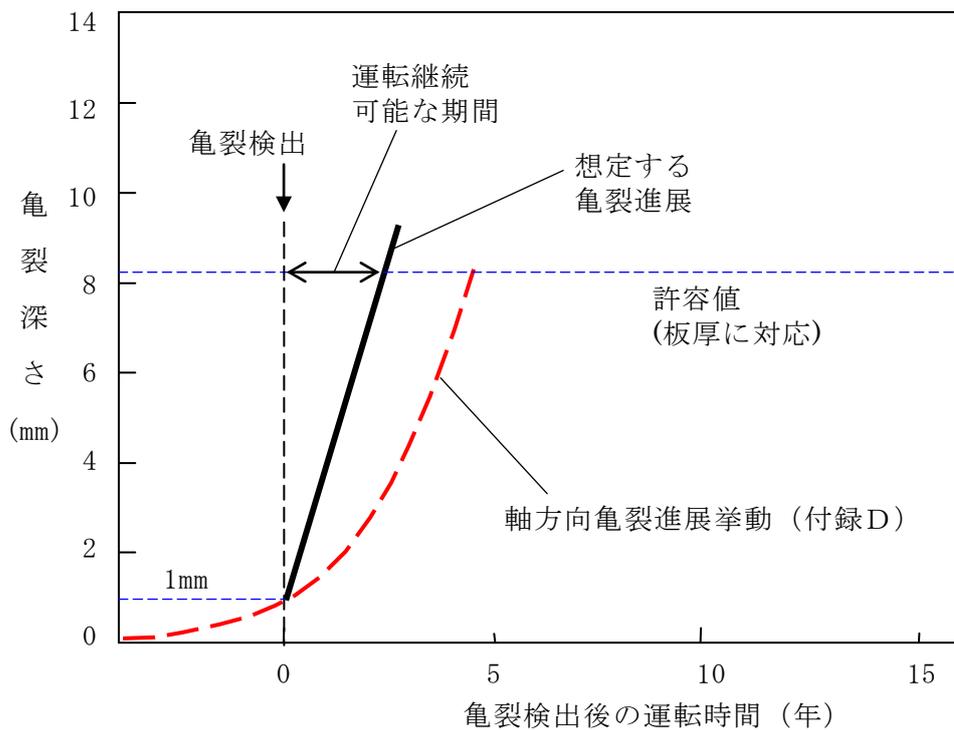


図 I-2 軸方向亀裂が検出された場合の評価例

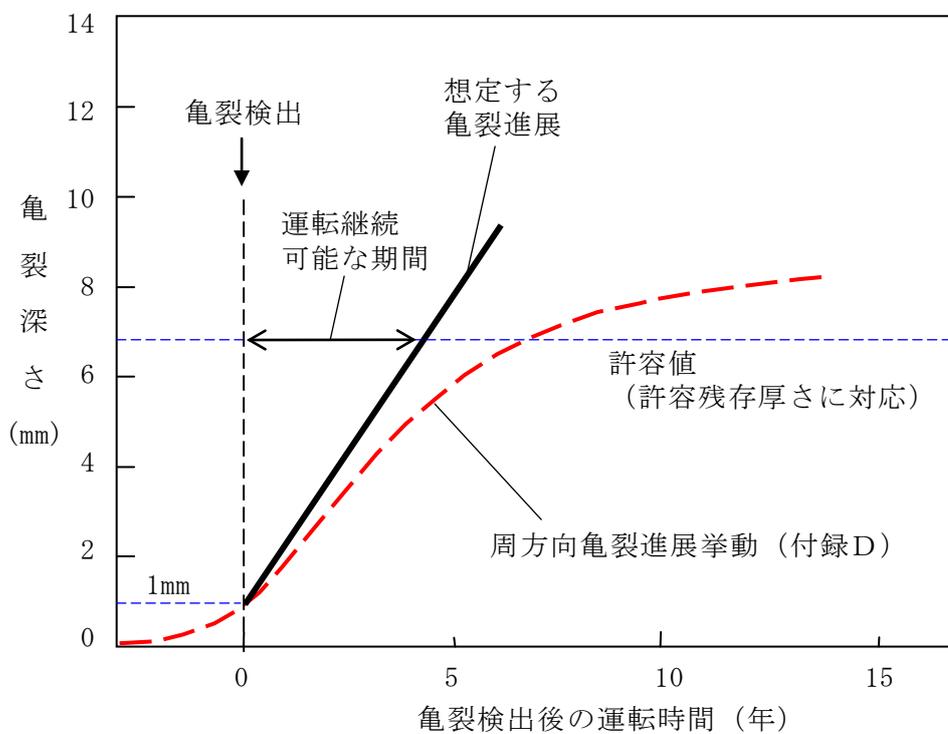
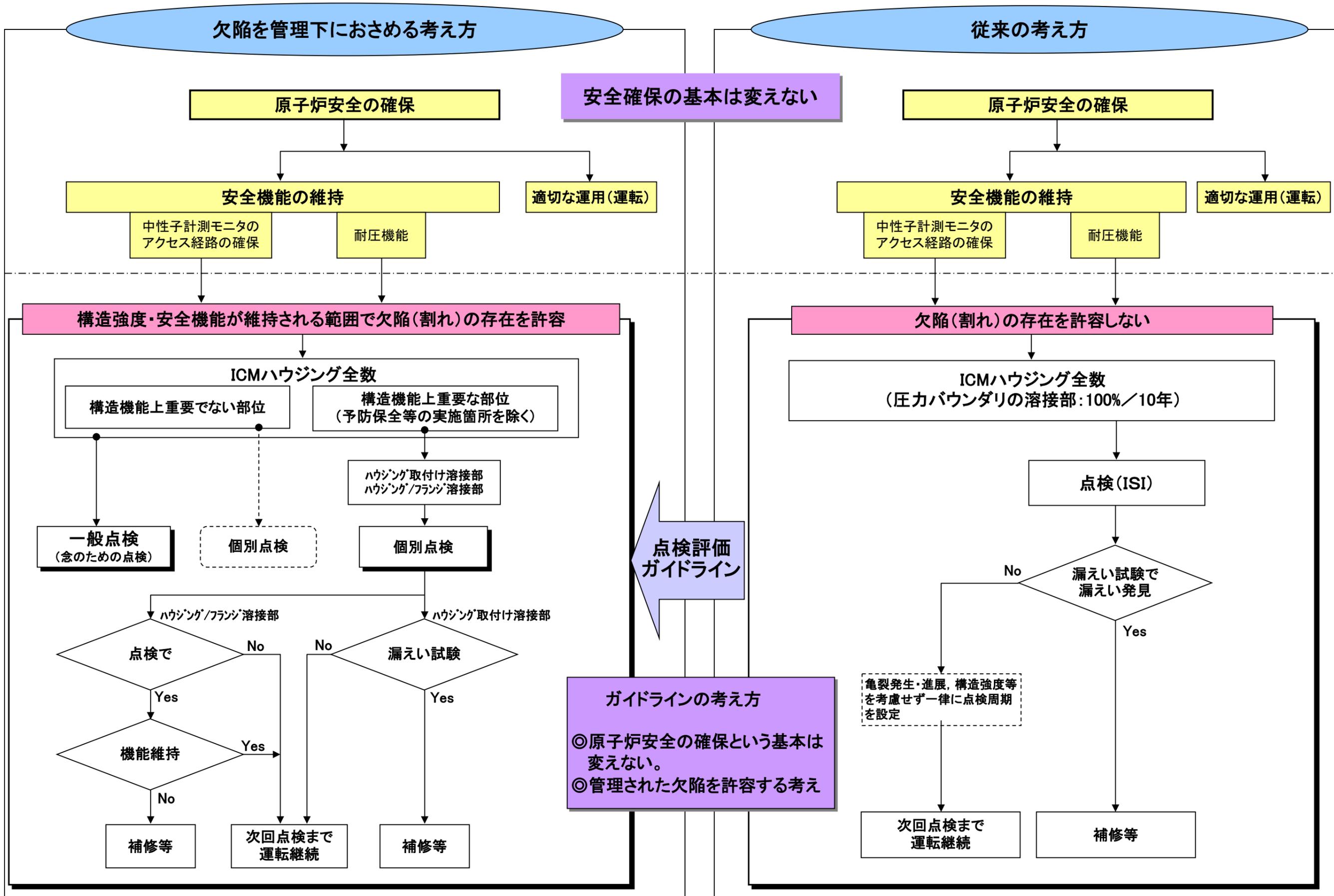


図 I-3 周方向亀裂が検出された場合の評価例



BWR炉内構造物点検評価ガイドライン [ICM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、ICM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：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

- 耐圧機能の維持に必要な、圧力境界の溶接部を点検対象とする。（図-1）
 - ① ハウジング取り付け溶接部
 - ② ハウジング/フランジ溶接部

3. 点検方法

- ハウジング取り付け溶接部

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しない
- ハウジング/フランジ溶接部
 - (1) LPRMを装荷したハウジング
周方向亀裂が、軸方向亀裂より先に発生・進展する可能性があるため、MVT-1（0.025mmワイヤ識別）により、内面に亀裂がないことを確認する。
 - (2) LPRMを装荷していないハウジング
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。

ICM：炉心中性子モニタ
LPRM：局部出力領域モニタ

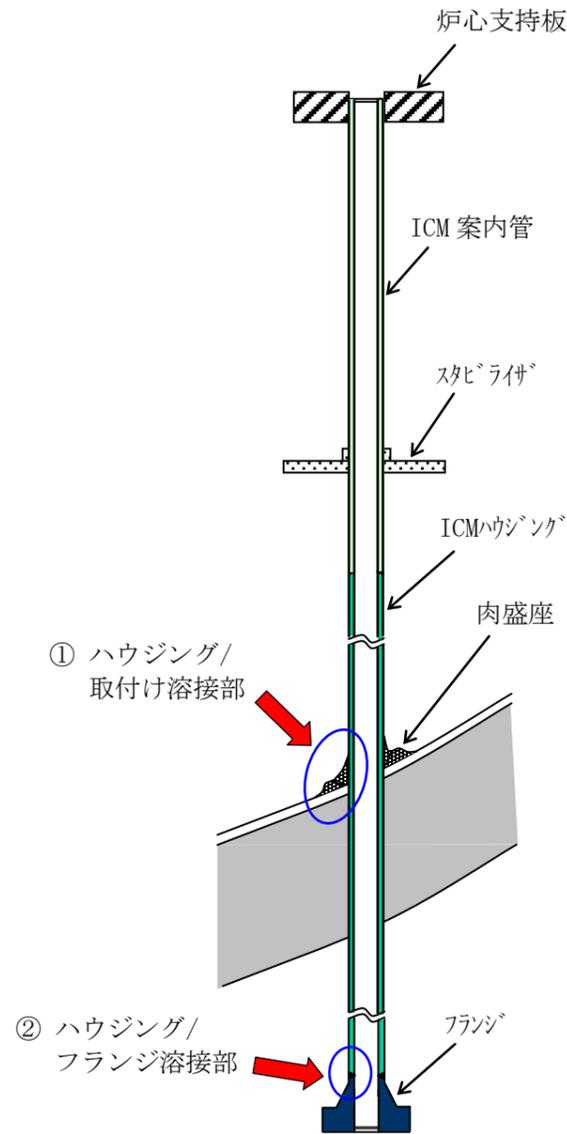


図-1 ICMハウジングの構造と点検対象部位

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。
- ハウジング取り付け溶接部
 - ・ニッケル合金溶接部の点検実施時期は、亀裂進展評価において亀裂が急速に立上がる以前の、実運転時間13年以降の毎定検とする。
 - ・ステンレス鋼溶接部は、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暦年で25年以降の毎定検とする。
- ハウジング/フランジ溶接部
 - ・LPRMを装荷したSUS304製ハウジングでは、周方向亀裂が実運転時間約10年で検出下限から許容値まで進展すると評価されるため、点検実施時期をモニタ交換時（約7年周期）とする。
 - ・LPRMを装荷したSUS316製（原子力仕様）ハウジングでは、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暦年で20～30年の間に初回点検、初回点検後暦年で30年以内に再点検を行う。
 - ・LPRMを装荷していないハウジングについては、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暦年で25年以降の毎定検とする。
- 点検により漏えい又は損傷が認められない場合は、継続使用できる。
漏えい又は損傷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）

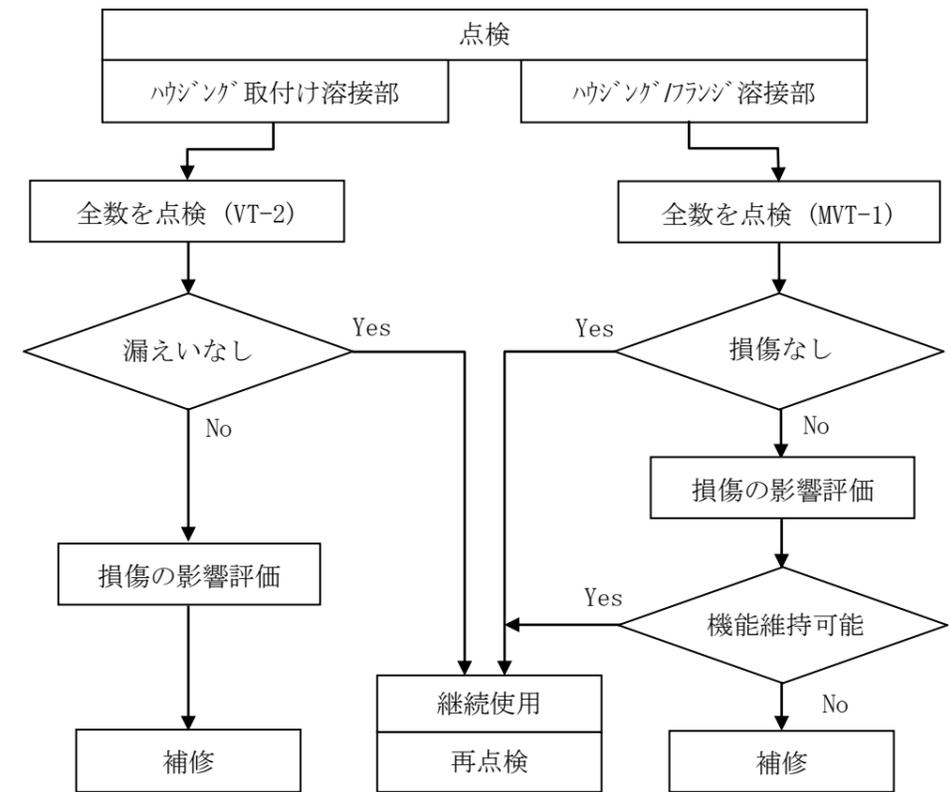


図-2 ICMハウジングの点検フロー

改訂経緯

平成 14 年 7 月 初版発行

平成 26 年 12 月 第 2 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
[I C Mハウジング]
(第 2 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。