

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3版)

2023 年 3 月

一般社団法人 原子力安全推進協会

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

はじめに

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

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

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

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

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

2023年3月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会
委員長 望月正人

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン

改訂履歴

ガイドライン名：ICM ハウジング

改訂年月	版	改訂内容	備考
2002 年 7 月	初版発行		
2014 年 12 月	第 2 版発行	適用する規格基準ほか見直し	
2023 年 3 月	第 3 版発行	ABWR 点検内容の追加 点検の考え方の明確化	

※ 改訂の詳細は参考資料 2 参照

ガイドラインの責任範囲

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

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

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

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 委員名簿

(2023 年 3 月現在, 順不同, 敬称略)

委員長	望月 正人	大阪大学
委員	笠原 直人	東京大学
委員	竹田 陽一	東北大学
委員	西本 和俊	大阪大学名誉教授
委員	水谷 義弘	東京工業大学
委員	森下 和功	京都大学
委員	堂崎 浩二	東北大学
委員	浅山 泰	日本原子力研究開発機構
委員	古川 敬	発電設備技術検査協会
幹事	今井 直人	東京電力ホールディングス (株)
幹事	棚橋 晶	関西電力 (株)
幹事	寺門 剛	日本原子力発電 (株)
委員	渡辺 健介	北海道電力 (株)
委員	新藤 智也	東北電力 (株)
委員	神長 貴幸	東京電力ホールディングス (株)
委員	稲垣 哲彦	中部電力 (株)
委員	網谷 宏和	北陸電力 (株)
委員	天野 洋一	関西電力 (株)
委員	荒芝 智幸	中国電力 (株)
委員	松原 克幸	四国電力 (株)
委員	木元 健悟	九州電力 (株)
委員	町田 栄治	日本原子力発電 (株)
委員	高村 賢也	電源開発 (株)
委員	内山 好司	日立GEニュークリア・エナジー (株)
委員	三橋 忠浩	東芝エネルギーシステムズ (株)
委員	和地 永嗣	三菱重工業 (株)
委員	新井 拓	電力中央研究所
委員	関 弘明	原子力安全推進協会
委員	成宮 祥介	原子力安全推進協会
参加者	小林 広幸	EPRI International, Inc.
参加者	町田 秀夫	(株) テプコシステムズ
事務局	大畑 仁史	原子力安全推進協会
事務局	佐藤 寿志	原子力安全推進協会

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン
[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 点検の考え方	1
第 3 章 点検対象	
3.1 BWR	1
3.2 ABWR	1
第 4 章 点検手法	3
第 5 章 点検範囲	4
第 6 章 点検時期	
6.1 BWR	4
6.2 ABWR	5
第 7 章 点検結果の評価	
7.1 BWR	5
7.2 ABWR	5
第 8 章 まとめ	7
解説	
解説 1-1 ガイドライン制定の目的	8
解説 1-2 本ガイドラインの運用にあたって	8
解説 2-1 ICM ハウジングに要求される安全機能	8
解説 2-2 ICM ハウジングの点検対象の選定	9
解説 2-3 ICM ハウジングに想定される経年劣化事象	9
解説 4-1 点検手法, 点検範囲及び点検時期	10
解説 4-2 渦電流探傷試験	14
解説 5-1 溶接部の点検幅	14
解説 6-1 SCC 予防保全技術	15
解説 7-1 ハウジング/フランジ溶接部の損傷評価	15
解説 7-2 補修技術	16

付録

- 付録 A ICMハウジングの各構造体に対する点検の考え方について
- 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] の概要
- 参考資料 2 改訂経緯

第1章 目的及び適用

1.1 目的

本ガイドラインは、軽水減速軽水冷却型原子力発電所用機器のうち、原子力安全を確保する大前提のもと、炉内構造物に要求される構造及び機能の健全性の維持、損傷が与える安全機能への影響を踏まえた合理的な点検のあり方を示すことを目的とする。(解説 1-1, 解説 1-2)

なお、本ガイドラインでは従来型の BWR に加え、改良型 BWR (ABWR) を対象とする。

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。

第2章 点検の考え方

点検の基本的な考え方を、以下に示す。

- (1) 原子炉に対して ICM ハウジングが持つ安全機能に着目し、ICM ハウジングを構成する各種の構造体の経年劣化事象による損傷が、安全機能の維持に影響を与えと考えられる構造物を点検対象とする。(解説 2-1, 解説 2-2)
- (2) ICM ハウジングの経年劣化事象として、応力腐食割れ（以下、SCC）を想定する。(解説 2-3)
- (3) 点検手法、点検範囲、点検時期は、点検対象の機能、形状及び材質、想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験、損傷時の安全機能維持に対する影響等を考慮し、必要な手法、範囲、時期をそれぞれ選定する。(解説 2-3)

第3章 点検対象

ICM ハウジングの点検対象と点検対象部位は、以下のように定めた。

3.1 BWR

ハウジング取付け溶接部、ハウジング/フランジ溶接部を点検対象とした。(解説 2-2)

具体的な点検対象部位を、代表プラントを例にして図 3-1 に示す。

3.2 ABWR

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、ハウジング/フランジ溶接部を点検対象とした。(解説 2-2)

具体的な点検対象部位を、代表プラントを例にして図 3-2 に示す。

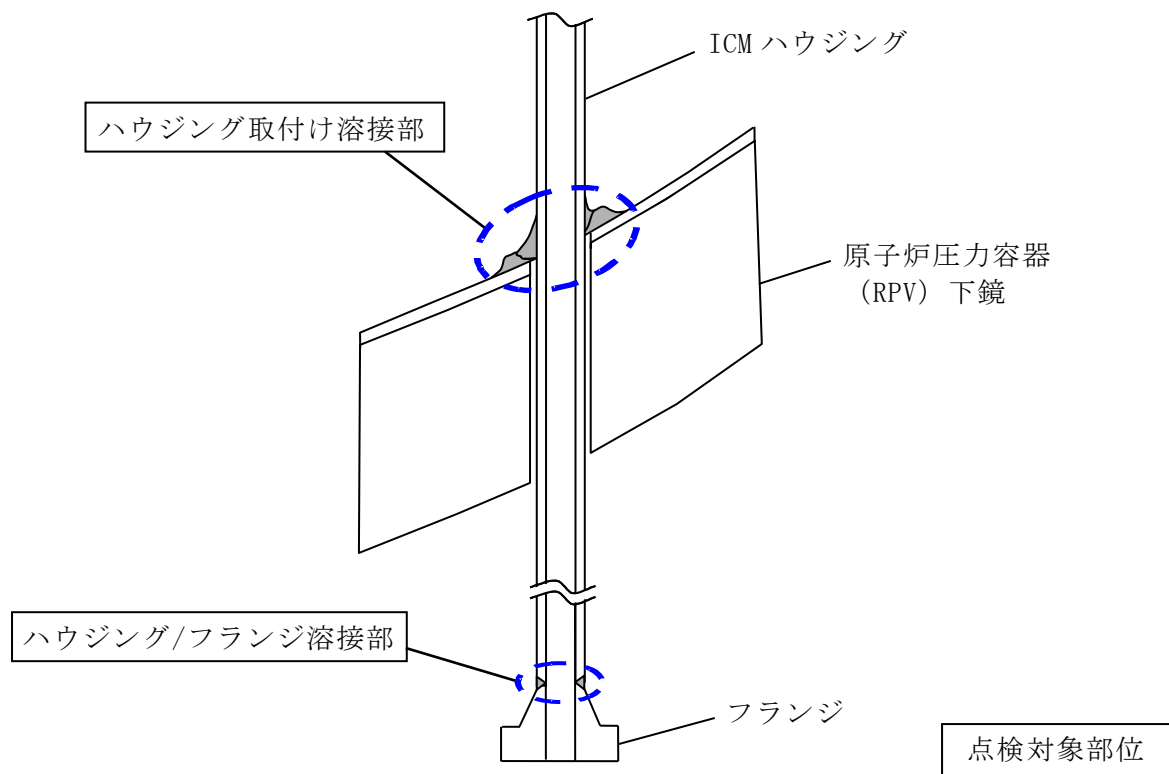


図 3-1 ICM ハウジングの点検対象部位 (BWR)

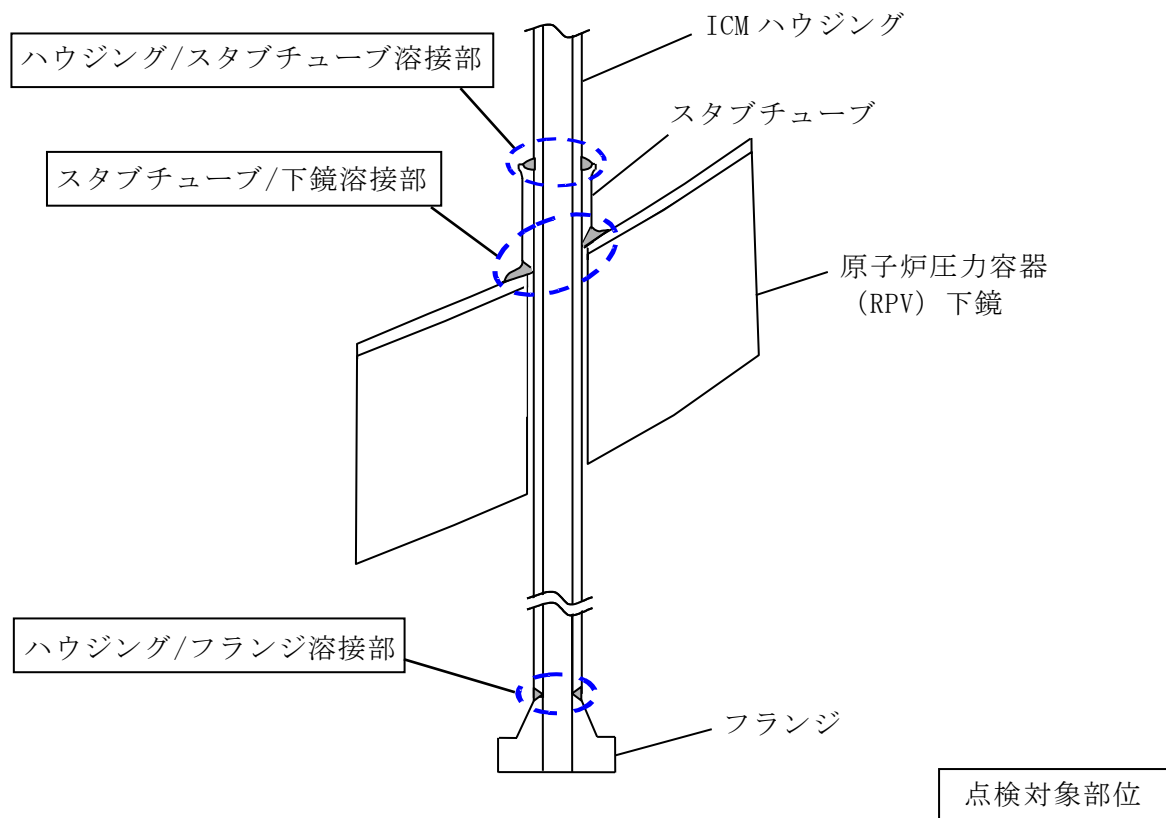


図 3-2 ICM ハウジングの点検対象部位 (ABWR)

第4章 点検手法

ICMハウジングの点検手法は、点検対象部位毎に必要な手法を選択する。(解説 4-1)

点検に適用する非破壊試験は、目視試験 (VT)、浸透探傷試験 (PT)、超音波探傷試験 (UT)、渦電流探傷試験 (ET) 又は放射線透過試験 (RT) が考えられる。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 超音波探傷試験 (UT)

超音波探傷試験は、JEAC 4207「軽水型原子力発電用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」に従って実施するか、若しくはこれに類する手法を用いて実施してよい。

(4) 渦電流探傷試験 (ET)

渦電流探傷試験は、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 4-2)

(5) 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。

第5章 点検範囲

ICMハウジングの点検範囲（点検対象部位の個数）は，点検対象部位ごとに定める。

溶接部の点検を行う場合は，溶接金属及びその両側の 25mm の幅（熱影響部を含む）に対して行う。（解説 5-1）

なお，技術的根拠がある場合は，別途，設定することができる。

5.1 BWR

ハウジング取付け溶接部，ハウジング/フランジ溶接部を点検対象部位とし，ICM ハウジングの安全機能維持を確認するために十分な個数を点検範囲とした。（解説 4-1）

5.2 ABWR

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，ハウジング/フランジ溶接部を点検対象部位とし，ICM ハウジングの安全機能維持を確認するために十分な個数を点検範囲とした。（解説 4-1）

第6章 点検時期

ICM ハウジングの点検は，点検対象の機能，形状及び材質，想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験，損傷時の安全機能維持に対する影響等を考慮し，以下に示す時期に実施するものとする。（解説 4-1）

なお，点検範囲に対して，SCC の発生又は進展を抑制する予防保全工法を適用した場合には，その有効性を考慮して，点検周期を設定できる。（解説 6-1）

6.1 BWR

(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点検する。

6.2 ABWR

(1) ハウジング/スタブチューブ溶接部

実運転時間で 13 年以降の毎定検時に点検する。

(2) スタブチューブ/下鏡溶接部

実運転時間で 13 年以降の毎定検時に点検する。

(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点検する。

第 7 章 点検結果の評価

ICM ハウジングの点検・評価フローを図 7-1 に示す。点検結果の判定は以下によるものとする。

7.1 BWR

(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、安全機能が維持可能と評価された場合は、継続使用できる。

(解説 7-1)

- ③ 上記①②に適合しない場合は、補修等の措置を行う。

7.2 ABWR

(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

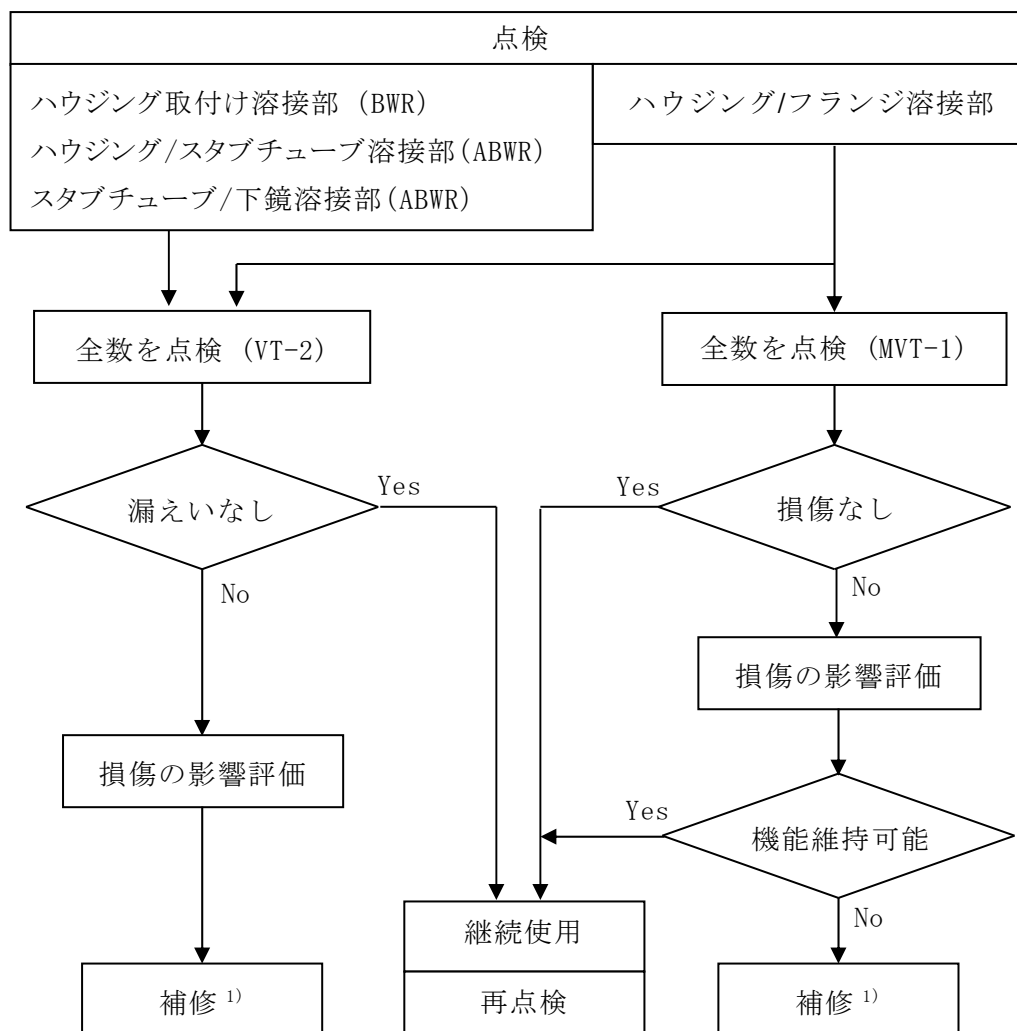
- ① 漏えいがないことが確認された場合には、継続使用できる。
- ② 漏えいが検出された場合は、損傷の影響を評価し、補修等の措置を行う。

(3) ハウジング/フランジ溶接部

- ① 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、安全機能が維持可能と評価された場合は、継続使用できる。

(解説 7-1)

- ③ 上記①②に適合しない場合は、補修等の措置を行う。



1) 解説 7-2 参照

図 7-1 ICM ハウジングの点検・評価フロー

第8章 まとめ

ICMハウジングの点検を表8-1及び表8-2に示す。

表 8-1 ICMハウジングの点検（BWR）

点検対象部位		点検手法 ¹⁾	点検時期	点検範囲	点検結果の評価
ハウジング取付け 溶接部	ニッケル合金	VT-2	機器の供用開始後 実運転時間で13年 以降の毎定検時	全数	安全機能維持に 必要な範囲が 健全であること
	ステンレス鋼	VT-2	機器の供用開始後 暦年で25年以降の 毎定検時	全数	安全機能維持に 必要な範囲が 健全であること
ハウジング/ フランジ溶接部 (LPRMを装荷した ハウジング)	SUS304	MVT-1	モニタ交換時	全数	安全機能維持に 必要な範囲が 健全であること
	SUS316	MVT-1	初回点検 機器の供用開始後 暦年で20～30年 の間 再点検 初回点検実施後 暦年で30年以内	全数	安全機能維持に 必要な範囲が 健全であること
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	機器の供用開始後 暦年で25年以降の 毎定検時	全数	安全機能維持に 必要な範囲が 健全であること
1) 必要に応じて、他の点検手法による点検を実施してもよい。					

表 8-2 ICMハウジングの点検（ABWR）

点検対象部位	点検手法 ¹⁾	点検時期	点検範囲	点検結果の評価
ハウジング/ スタブチューブ溶接部	VT-2	機器の供用開始後 実運転時間で13年 以降の毎定検時	全数	安全機能維持に 必要な範囲が 健全であること
スタブチューブ/ 下鏡溶接部	VT-2	機器の供用開始後 暦年で13年以降の 毎定検時	全数	安全機能維持に 必要な範囲が 健全であること
ハウジング/ フランジ溶接部	VT-2	機器の供用開始後 暦年で25年以降の 毎定検時	全数	安全機能維持に 必要な範囲が 健全であること
1) 必要に応じて、他の点検手法による点検を実施してもよい。				

(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。

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

(解説 1-2) 本ガイドラインの運用にあたって

炉内構造物の保全活動は、確立された原子力発電所の品質保証マネジメントシステムのもとで行われる保守管理の一環として行われなければならない。よって、本ガイドラインで適用する点検及び評価は、品質保証活動全般の基本的事項を規定した日本電気協会の JEAC 4111「原子力安全のためのマネジメント規程」及び品質保証活動のうち、事業者が供用期間中に実施すべき保守管理の基本要件を規定した JEAC 4209「原子力発電所の保守管理規程」に基づき実施されることを前提としている。

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

また本ガイドラインでは、旧耐震設計審査指針で定める基準地震動 S_2 を用いた評価結果が記載されている場合があるが、利用者は設置許可基準規則*1 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。

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

(解説 2-1) ICM ハウジングに要求される安全機能

ICM ハウジングに要求される安全機能は、BWR, ABWR 共に、炉心計測及びバウンダリの確保(耐圧機能)である。(付録 A 参照)

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 ハウジングに損傷が生じて、想定した地震荷重に対して、炉心計測及びバウンダリの確保(耐圧機能)が維持されることを評価条件とする。

(解説 2-2) ICM ハウジングの点検対象の選定

本ガイドラインでは、ICM ハウジングそのものだけでなく、ICM 案内管（以下、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。

ICM ハウジング及び関連の各部位は、付録Aに示すように、形状の異なる多数の部品から構成されていることから、点検対象は各部位に要求される安全機能維持の観点から設定する。

ICM ハウジング及び関連の各部位について、点検対象の選定フローを図 2-2 に示す。

これらの各部位が損傷した場合の影響を評価して、安全機能に影響を与える可能性のある部位を点検対象とし、地震荷重を想定しても安全機能に影響のない部位は点検対象より除外する。

以上を踏まえ、点検対象の機能、形状及び材質、想定される経年劣化事象、国内外の運転経験及び安全機能への影響等を考慮し、点検方針を立案した。（付録A参照）

(解説 2-3) ICM ハウジングに想定される経年劣化事象

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。

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、又は SUS316（原子力仕様、炭素含有量 $\leq 0.03\%$ ）及び 600 系のニッケル合金、又は Nb を添加した改良材を使用している。

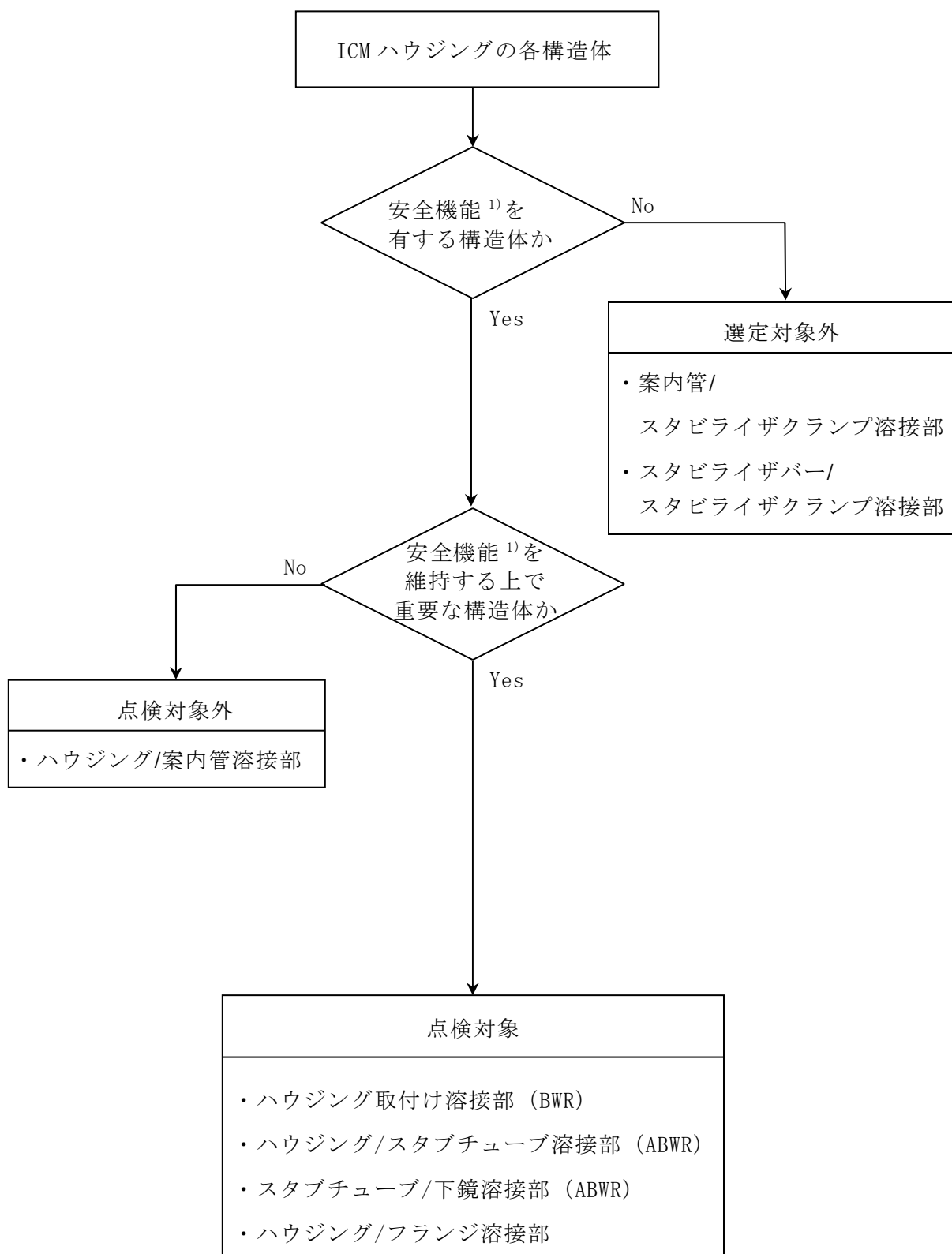
また、BWR における下鏡低合金鋼の肉盛座及び肉盛座とハウジングとの溶接部や、ABWR におけるハウジングとスタブチューブの溶接部及びスタブチューブと下鏡溶接部には、ニッケル合金の 182 合金、82 合金、又は Nb を添加した改良 182 合金溶接金属を使用している。

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が 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））は優れた耐応力腐食割れ性を示す。

また、600 系のニッケル合金は、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、材料鋼種により耐応力腐食割れ性に相違があるが、本ガイドラインでは材料鋼種に依らず点検対象とする。（付録A参照）



1) 炉心計測，バウンダリの確保

図 2-2 ICM ハウジングの点検対象部位の選定フロー

(解説 4-1) 点検手法、点検範囲及び点検時期

(1) ハウジング取付け溶接部 (BWR)

a. 点検手法

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、Ss 地震を想定しても破断することもない。(付録 E, F 参照)

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、バウンダリの確保(耐圧機能)を維持できるため、VT-2 による点検とする。

b. 点検範囲

点検範囲は ICM ハウジングの安全機能維持に必要な数として、全数とする。

c. 点検時期

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。ここで、VT-2 は亀裂の大きさを特定できる点検手法ではないため、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、ハウジング内面を予防保全施工済みであり、溶接金属自体の損傷可能性も極めて小さいが、将来起こりうる経年劣化事象に対する運転経験を蓄積するだけでなく、保守管理の妥当性等の確認や評価を行う高経年化技術評価にも資することを踏まえ、点検開始を供用開始後暦年で 25 年以降の最初の定検とする。

(2) ハウジング/スタブチューブ溶接部 (ABWR)

a. 点検手法

82 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、周方向亀裂より軸方向亀裂の進展が早く、周方向亀裂は実運転時間で 80 年経過時点でも貫通することはないが、軸方向亀裂は実運転時間で約 21 年で貫通する評価となる。(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、Ss 地震を想定しても破断することもない。(付録 E, F 参照)

したがって、ハウジング/スタブチューブ溶接部については、軸方向亀裂による漏えいを検知できれば、バウンダリの確保(耐圧機能)を維持できるため、VT-2 による点検とする。

b. 点検範囲

点検範囲は ICM ハウジングの安全機能維持に必要な数として、全数とする。

c. 点検時期

82 合金のハウジング/スタブチューブ溶接部の軸方向亀裂は、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 21 年で貫通する。このため、82 合金溶接部の軸方向亀裂が急速に進展する実運転時間 18 年に 5 年の余裕を取って点検開始を 13 年以降の最初の定検とする。ここで、VT-2 は亀裂の大きさを特定できる点検手法ではないため、点検開始以降は毎定検での点検とする。(付録 D 参照)

(3) スタブチューブ/下鏡溶接部 (ABWR)

a. 点検手法

82 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 $50\mu\text{m}$ 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、周方向亀裂は実運転時間で 80 年経過時点でも貫通することはないが、軸方向亀裂は実運転時間で約 73 年で貫通する評価となる。(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、Ss 地震を想定しても破断することもない。(付録 E, F 参照)

したがって、スタブチューブ/下鏡溶接部については、軸方向亀裂による漏えいを検知できれば、バウンダリの確保(耐圧機能)を維持できるため、VT-2 による点検とする。

b. 点検範囲

点検範囲は ICM ハウジングの安全機能維持に必要な数として、全数とする。

c. 点検時期

82 合金のスタブチューブ/下鏡溶接部の軸方向亀裂は、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、約 73 年で貫通すると評価され、ハウジング/スタブチューブ溶接部の点検実施時期を超える。ただし、VT-2 での点検の合理性の観点から、点検実施時期はハウジング/スタブチューブ溶接部と同一の扱いとし、点検開始を実運転時間 13 年以降の最初の定検とする。ここで、VT-2 は亀裂の大きさを特定できる点検手法ではないため、点検開始以降は毎定検での点検とする。(付録D 参照)

(4) ハウジング/フランジ溶接部 (BWR, ABWR)

a. 点検手法

LPRM を装荷した BWR の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°C 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。

また、ABWR のハウジング/フランジ溶接部についても、温度が低いいため 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. 点検範囲

点検範囲は ICM ハウジングの安全機能維持に必要な数として、全数とする。

c. 点検時期

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 $50\mu\text{m}$ 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 BWR の 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 $50\mu\text{m}$ 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、高経年化技術評価にも資することを踏まえ、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。

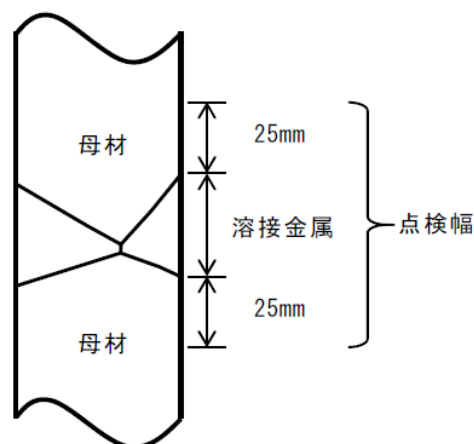
LPRM を装荷していない BWR のハウジング及び ABWR のハウジングについては、SCC 損傷の可能性が非常に小さいと考えられるが、高経年化技術評価にも資することを踏まえ、供用開始後暦年で 25 年以降の毎定検での VT-2 とする。（付録 D，E 参照）

（解説 4-2）渦電流探傷試験

渦電流探傷試験（ET）を適用する場合には、点検対象部位と電磁気的特性が同等な材料の校正試験片により、人工欠陥に対する検出感度を確認した手法を用いるものとする。試験装置及び機具等の要求仕様、試験の実施要領、並びに信号の解析手法については、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 5-1）溶接部の点検幅

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



(解説 6-1) 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 6-1 に示す。(付録 G 参照)

表 6-1 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、日本機械学会 発電用原子力設備規格 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 7-1) 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、安全機能維持が可能な運転時間を評価する。評価手法を付録 I に示す。

(解説 7-2) 補修技術

ICM ハウジングに損傷が発見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、拡張、スリーブ、取替、補修溶接、封止溶接等がある。(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」

付録A ICMハウジングの各構造体に対する点検の考え方について

1. 目的

本付録は、ICMハウジングを構成する構造体について、①安全機能、②形状及び材質、③想定される経年劣化事象、④国内外の運転経験、⑤損傷による安全機能への影響を考慮した点検の考え方を示したものである。

2. ICMハウジングの各構造体に対する点検方針

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

2.1 安全機能

ICMハウジングは、BWR、ABWR共に、原子炉压力容器（以下、RPV）下鏡の貫通部に鉛直に据え付けられてRPV内に到達しており、その内部には起動領域モニタ（SRNM）や局部出力領域モニタ（LPRM）等の炉心中性子モニタ（ICM）が据え付けられる。また、ICMハウジングには、中性子計測案内管（以下、ICM案内管）の荷重を支持する機能がある。したがって、ICMハウジングは「炉心計測」及び「バウンダリの確保」の安全機能を有する。

2.2 形状及び材質

BWRのICMハウジングは、ニッケル合金のクラッドを施したRPV下鏡に、ニッケル合金の溶接による肉盛座を設け、オーステナイト系ステンレス鋼のハウジングをニッケル合金の溶接によって取り付ける構造となっている。一方、ABWRでは、RPV下鏡にニッケル合金のスタブチューブを取り付け、そのスタブチューブにニッケル合金の溶接により取り付ける構造となっている。なお、BWRとABWRではICMハウジングの取り付け方法や寸法の違いの他に、流体振動を防止するスタビライザの段数が異なるが、その他の構造には大きな違いは無い。

ICMハウジング及び関連部位の材質は、炭素含有量が0.03%を超えるステンレス鋼（SUS304、SUS316等）又は炭素含有量が0.03%以下のステンレス鋼（SUS316L等の低炭素ステンレス鋼）及び600系のニッケル合金である。

ICMハウジング及び関連部位の形状及び材質について、代表例を図A-2.2及び表A-2.2に示す。なお、図中の①～⑧は、損傷による安全機能への影響を検討したICMハウジングの部位を示している。

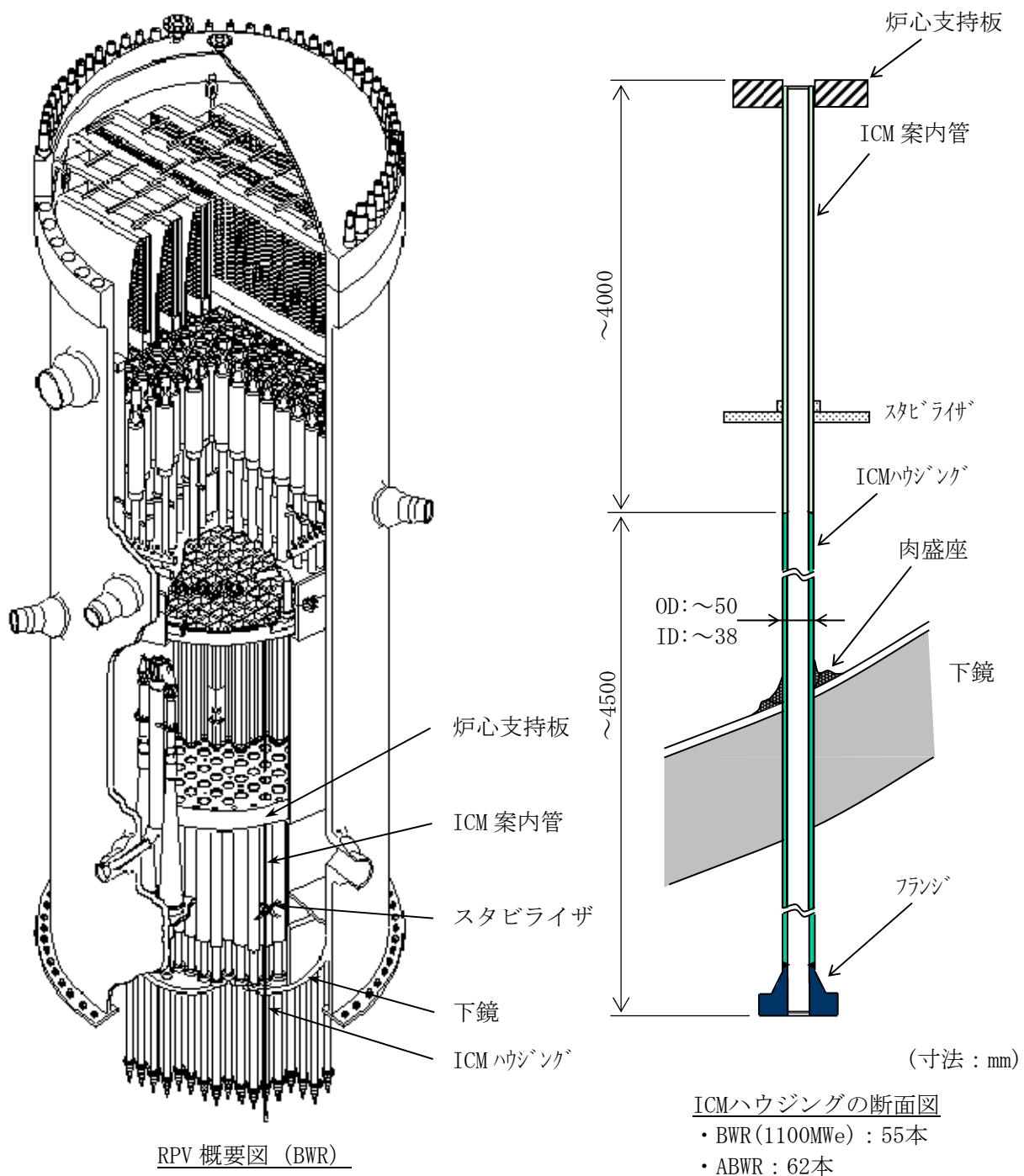


図 A-2. 2(1) ICM ハウジング及び関連部位の構造

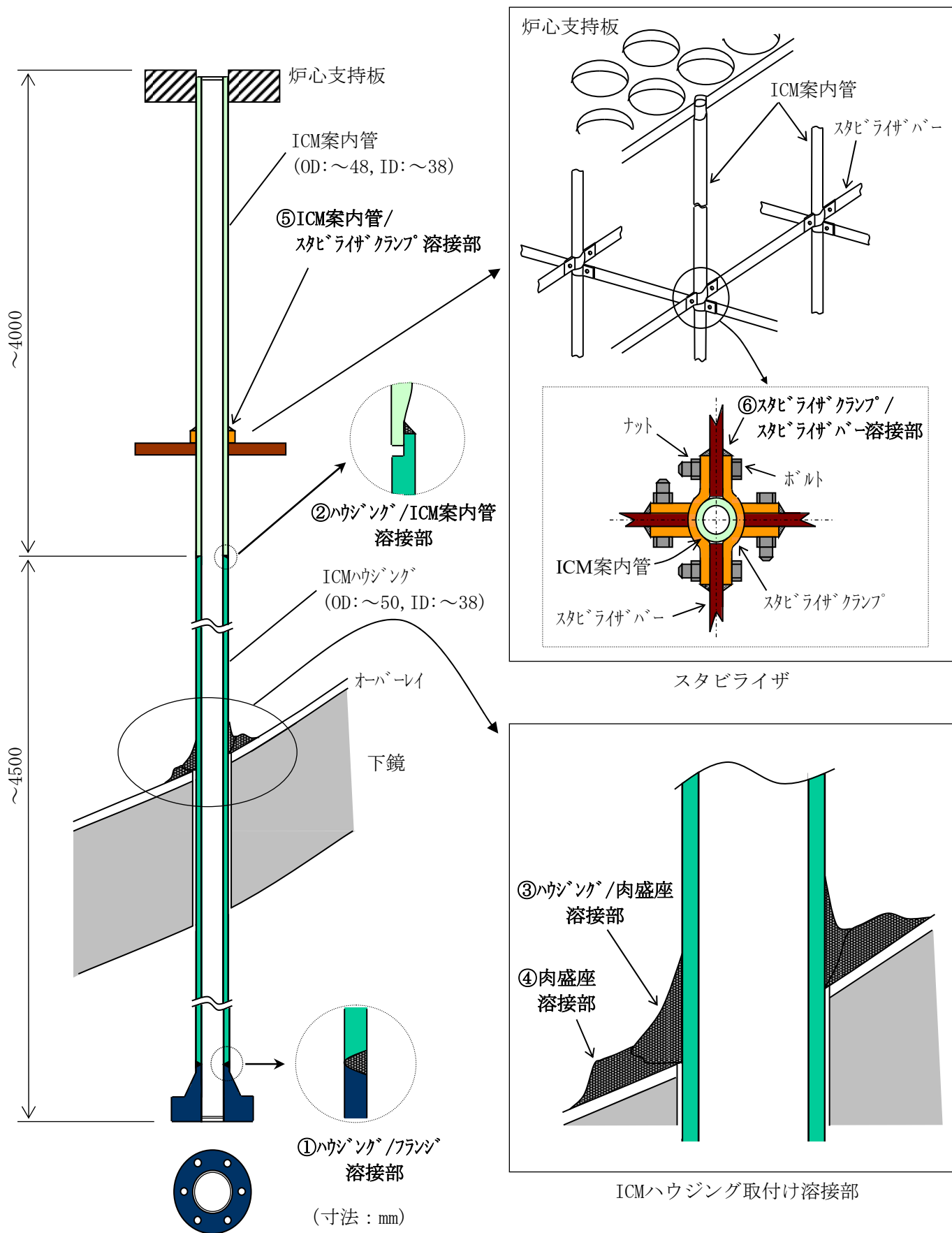


図 A-2. 2(2) ICM ハウジング及び関連部位の構造 (BWR)

表 A-2.2 ICM ハウジング及び関連部位の材質の代表例

部 位		材 質
ICM ハウジング	ハウジング	ステンレス鋼
	フランジ	ステンレス鋼，又はハウジング一体構造
	スタブチューブ	ニッケル合金
ICM 案内管		ステンレス鋼
スタビライザ	バー	ステンレス鋼，又はニッケル合金
	クランプ	ステンレス鋼，又はニッケル合金

2.3 想定される経年劣化事象

ICM ハウジングはステンレス鋼製であり，溶接部に SCC が発生する可能性がある。なお，疲労に関しては，発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（告示 501 号）又は日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格に基づく設計がなされていること及び国内外で疲労による損傷事例がないことから対象外とする。

2.4 国内外の運転経験

国内では，ICM ハウジングのスタブチューブと下鏡の取付溶接部 SCC による損傷事例が 4 件報告されている。

米国においては，溶接欠陥による損傷事例が 1 件報告されているが，国内では同様の損傷事例はない。

2.5 各構造体の損傷による安全機能への影響

ICM ハウジングの各構造体に対し，損傷による安全機能への影響について検討した結果を以下に示す。（①～⑧は図 A-2.2 に示す番号）

2.5.1 ①ハウジング/フランジ溶接部 (図 A-2.5.1)

ハウジング/フランジの溶接部は、ICM の荷重の支持を担っており、損傷した場合の ICM ハウジングが持つ以下の安全機能への影響を考慮する必要がある。

- ・炉心計測

ハウジング/フランジ溶接部が損傷した場合は、ICM の荷重の支持の役割の喪失により、当該安全機能に影響する。

- ・バウンダリの確保

ハウジング/フランジ溶接部が損傷した場合は、炉水が漏えいする可能性があり、バウンダリの確保（耐圧機能）に影響がある。

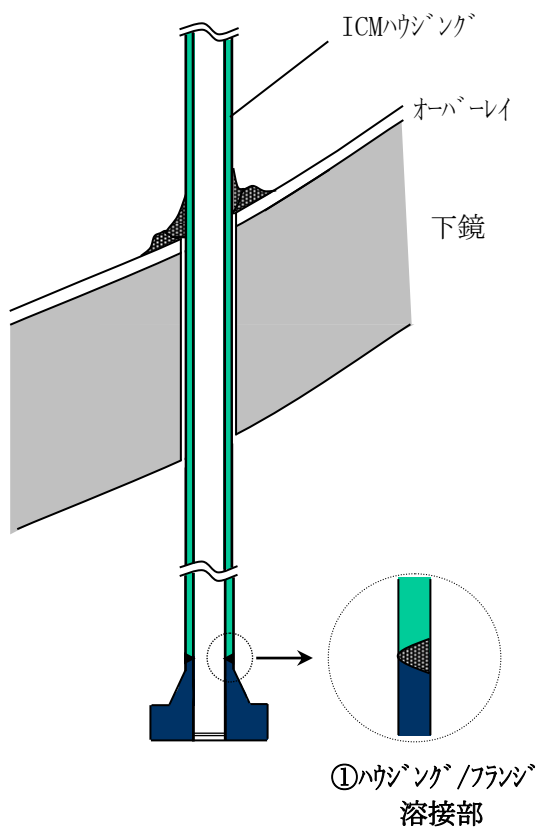


図 A-2.5.1 ①ハウジング/フランジ溶接部

2.5.2 ②ハウジング/ICM 案内管溶接部 (図 A-2.5.2)

ハウジング/ICM 案内管の溶接部は、ICM 案内管の荷重の支持を担っており、損傷した場合の ICM ハウジングが持つ以下の安全機能への影響を考慮する必要がある。

- ・ 炉心計測

ハウジング/ICM 案内管溶接部が破断した場合は、ハウジング及び ICM 案内管の振動が増大するため、当該安全機能に影響がある。ただし、この場合は中性子モニタが異常を示すため、損傷を検知でき、安全な原子炉の停止が可能である。

- ・ バウンダリの確保

ハウジング/ICM 案内管溶接部が損傷した場合でも、当該安全機能に影響を与えない。

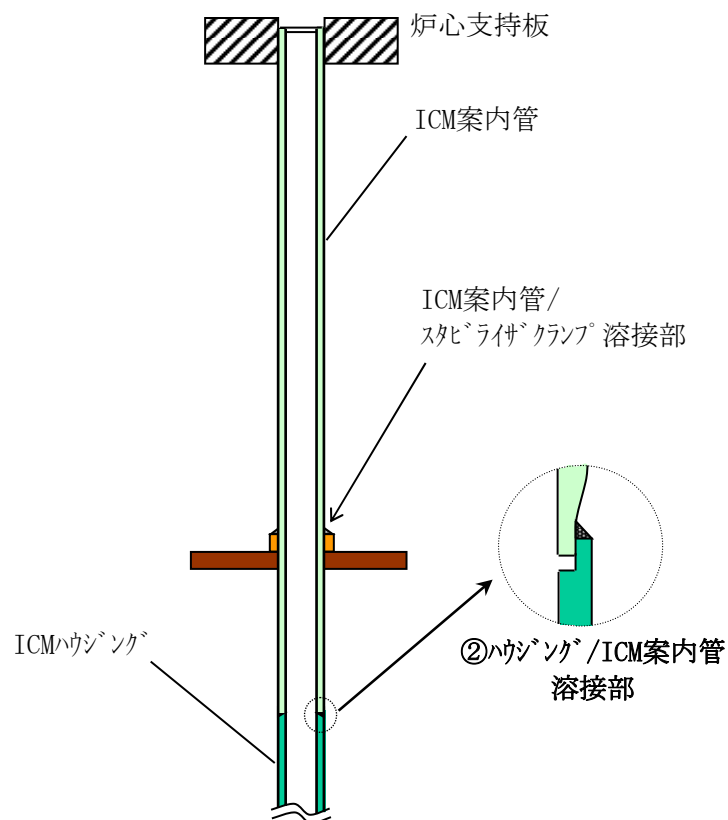


図 A-2.5.2 ②ハウジング/ICM 案内管溶接部

2.5.3 ③ハウジング/肉盛座溶接部（図 A-2.5.3）

ハウジング/肉盛座の溶接部は、ハウジング及び ICM 案内管の荷重の支持を担っており、溶接部が損傷した場合の ICM ハウジングが持つ以下の安全機能への影響を考慮する必要がある。

- ・炉心計測

スタブチューブ/ハウジング溶接部が損傷した場合は、ハウジング及び ICM 案内管の荷重の支持の役割の喪失により、当該安全機能に影響する。

- ・バウンダリの確保

スタブチューブ/ハウジング溶接部が損傷した場合は、炉水が漏えいする可能性があり、バウンダリの確保（耐圧機能）に影響がある。

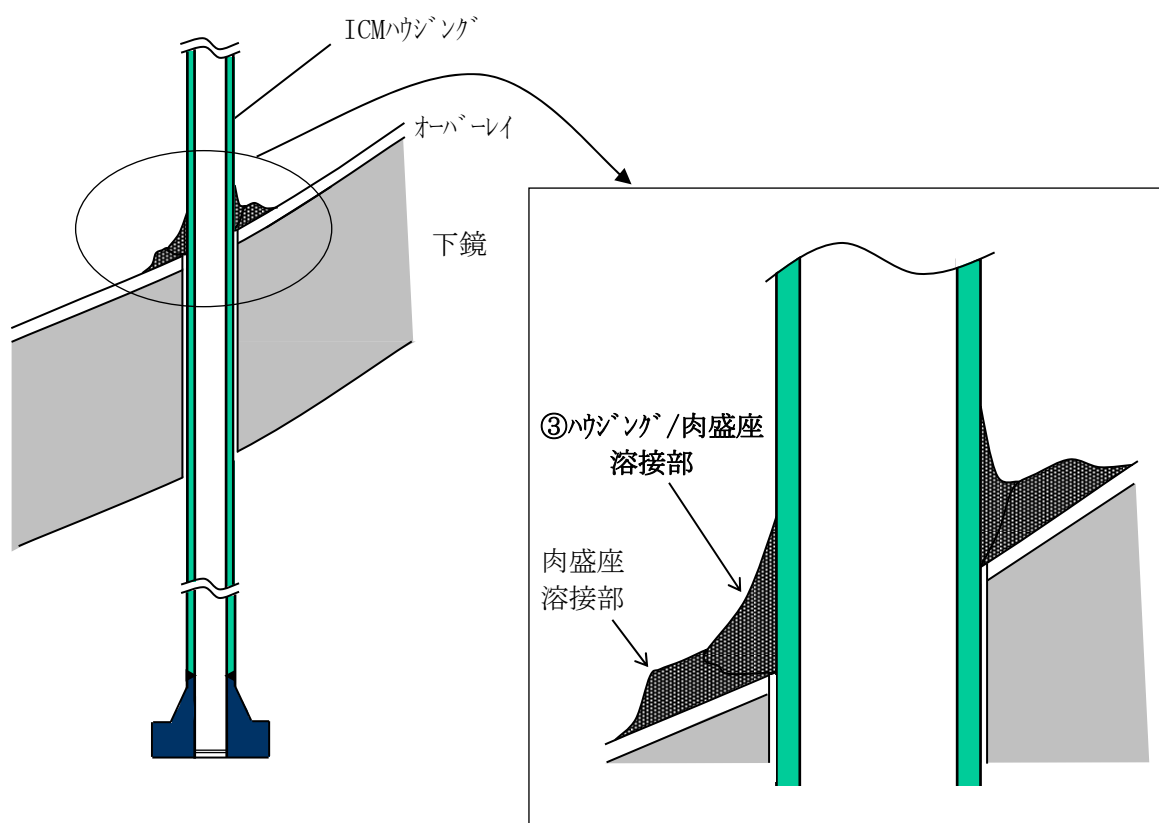


図 A-2.5.3 ③ハウジング/肉盛座溶接部

2.5.4 ④肉盛座溶接部（図 A-2.5.4）

肉盛座溶接部は、ハウジング及び ICM 案内管の荷重の支持を担っており、溶接部が損傷した場合の ICM ハウジングが持つ以下の安全機能への影響を考慮する必要がある。

- ・炉心計測

肉盛座溶接部が損傷した場合は、ハウジング及び ICM 案内管の荷重の支持の役割の喪失により、当該安全機能に影響する。

- ・バウンダリの確保

肉盛座溶接部が損傷した場合は、炉水が漏えいする可能性があり、バウンダリの確保（耐圧機能）に影響がある。

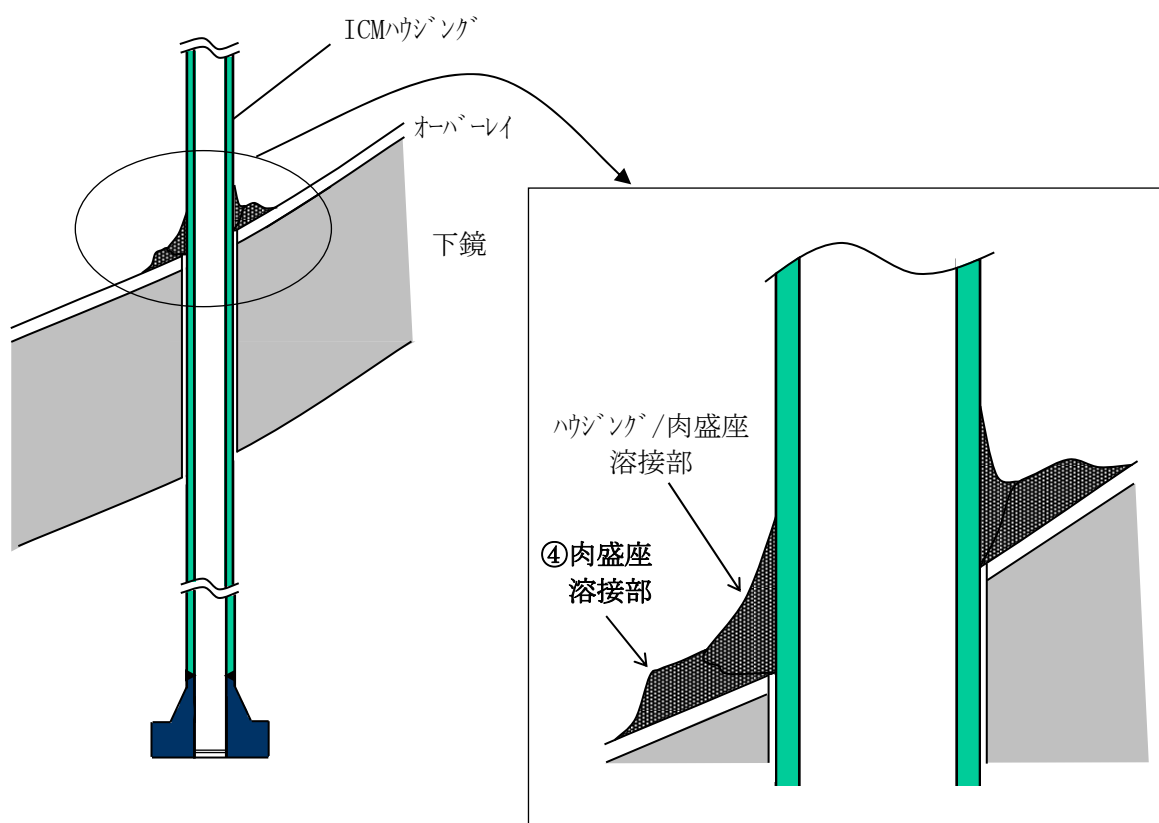


図 A-2.5.4 ④肉盛座溶接部

2.5.5 ⑤ICM 案内管/スタビライザクランプ溶接部 (図 A-2.5.5)

ICM 案内管/スタビライザクランプの溶接部は、ハウジング及び ICM 案内管の流体振動防止の役割を担うが、これらの溶接部が損傷した場合でも ICM ハウジングが持つ以下の安全機能に影響を与えることはない。

・炉心計測

ICM 案内管/スタビライザクランプ溶接部が損傷した場合でも、当該安全機能に影響を与えない。

・バウンダリの確保

ICM 案内管/スタビライザクランプ溶接部が損傷した場合でも、当該安全機能に影響を与えない。

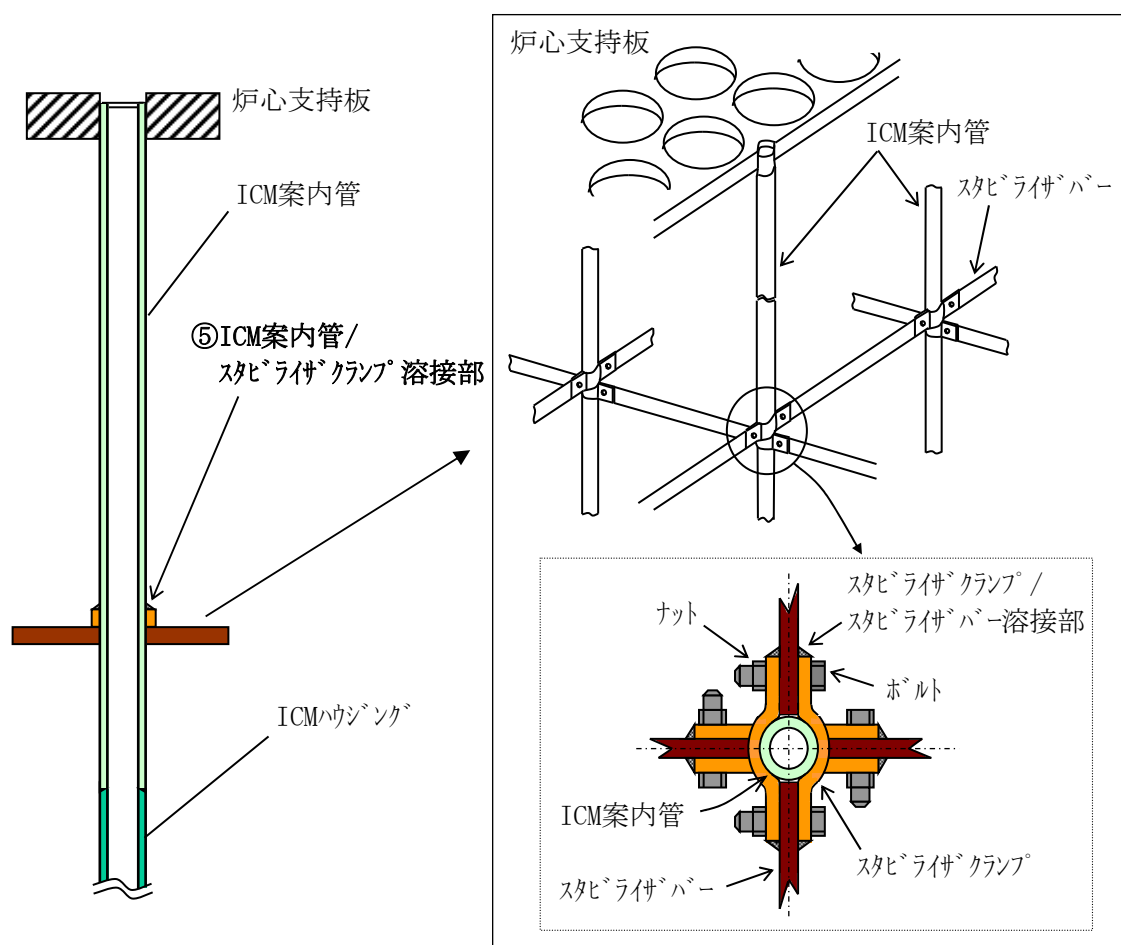


図 A-2.5.5 ⑤ICM 案内管/スタビライザクランプ溶接部

2.5.6 ⑥スタビライザクランプ/スタビライザバー溶接部 (図 A-2.5.6)

スタビライザクランプ/スタビライザバーの溶接部は、ハウジング及び ICM 案内管の流体振動防止の役割を担うが、これらの溶接部が損傷した場合でも ICM ハウジングが持つ以下の安全機能に影響を与えることはない。

・炉心計測

スタビライザクランプ/スタビライザバー溶接部が損傷した場合でも、当該安全機能に影響を与えない。

・バウンダリの確保

スタビライザクランプ/スタビライザバー溶接部が損傷した場合でも、当該安全機能に影響を与えない。

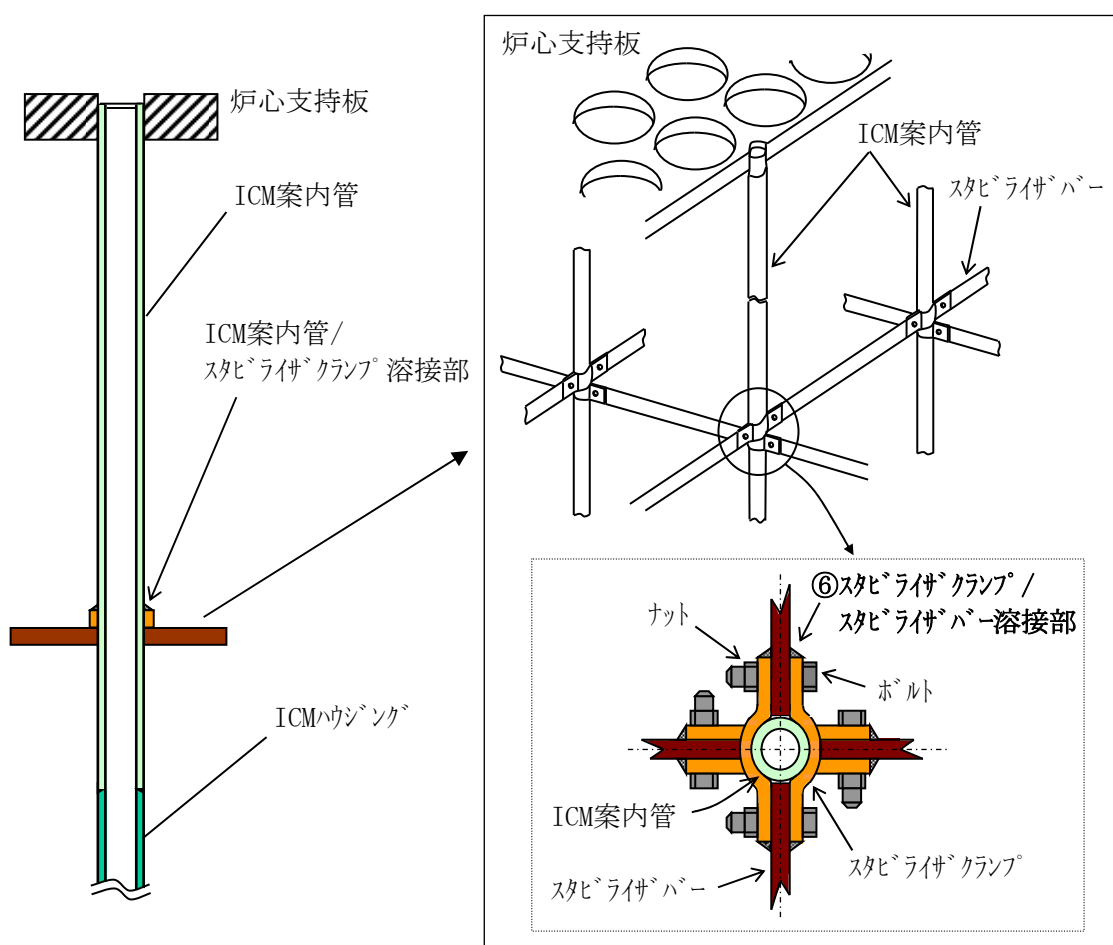


図 A-2.5.6 ⑥スタビライザクランプ/スタビライザバー溶接部

2.5.7 ⑦ハウジング/スタブチューブ溶接部 (図 A-2.5.7)

ハウジング/スタブチューブの溶接部は、ハウジング及び ICM 案内管の荷重の支持を担っており、溶接部が損傷した場合の ICM ハウジングが持つ以下の安全機能への影響を考慮する必要がある。

- ・炉心計測

ハウジング/スタブチューブ溶接部が損傷した場合は、ハウジング及び ICM 案内管の荷重の支持の役割の喪失により、当該安全機能に影響する。

- ・バウンダリの確保

ハウジング/スタブチューブ溶接部が損傷した場合は、炉水が漏えいする可能性があり、バウンダリの確保（耐圧機能）に影響がある。

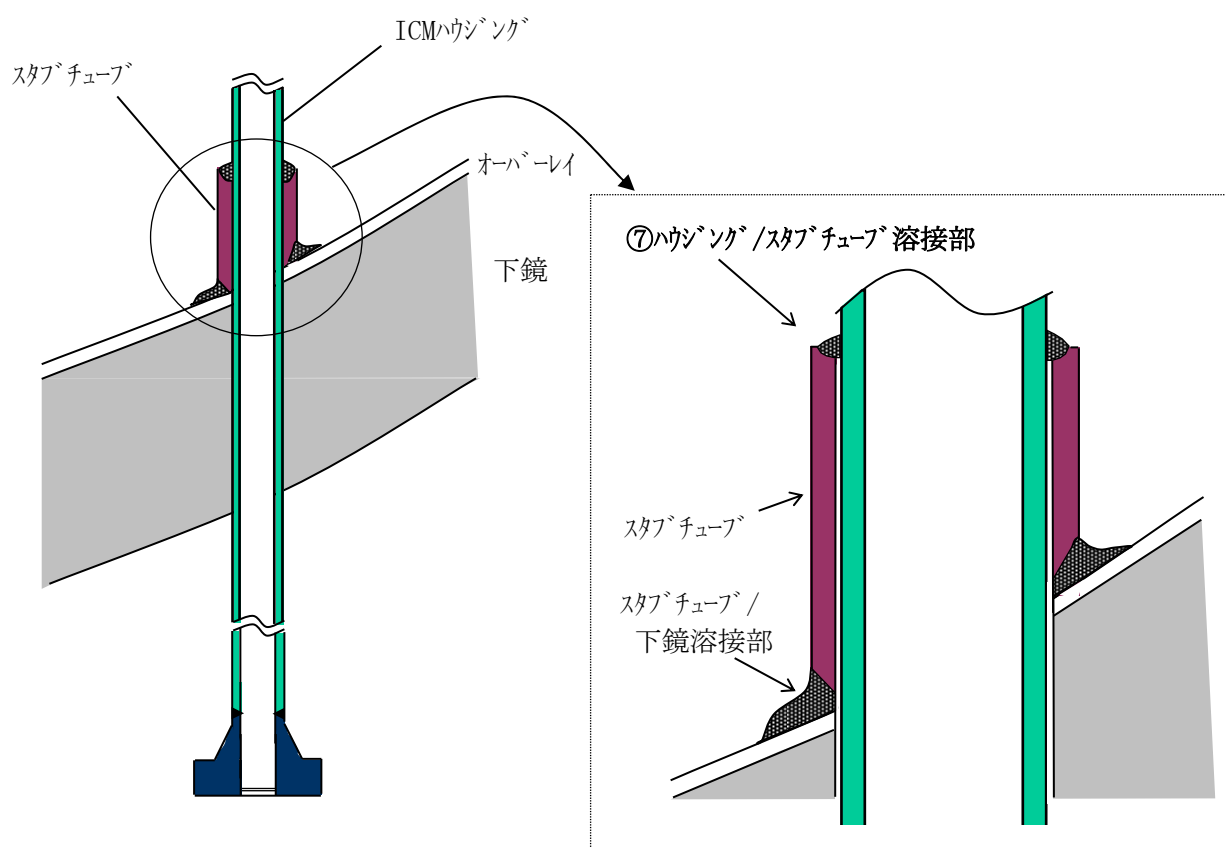


図 A-2.5.7 ⑦ハウジング/スタブチューブ溶接部

2.5.8 ⑧スタブチューブ/下鏡溶接部 (図 A-2.5.8)

スタブチューブ/下鏡の溶接部は、ハウジング及び ICM 案内管の荷重の支持を担っており、溶接部が損傷した場合の ICM ハウジングが持つ以下の安全機能への影響を考慮する必要がある。

- ・炉心計測

スタブチューブ/下鏡溶接部が損傷した場合は、ハウジング及び ICM 案内管の荷重の支持の役割の喪失により、当該安全機能に影響する。

- ・バウンダリの確保

スタブチューブ/下鏡溶接部が損傷した場合は、炉水が漏えいする可能性があり、バウンダリの確保（耐圧機能）に影響がある。

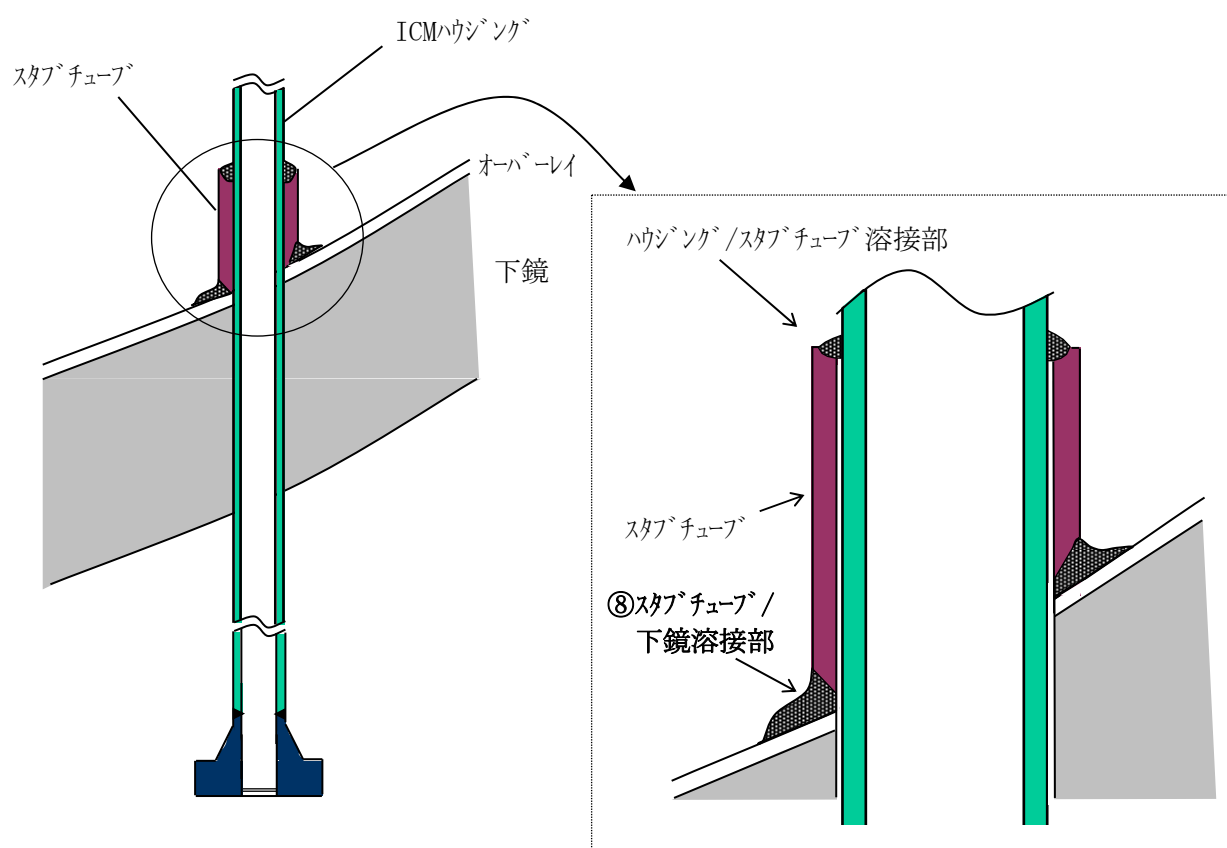


図 A-2.5.8 ⑧スタブチューブ/下鏡溶接部

2.6 ICMハウジングの点検方針

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

2.6.1 点検対象の選定

ICM ハウジングの点検対象を図 A-2.6 に，ICM ハウジングの各構造体の損傷による安全機能への影響評価を表 A-2.6 にそれぞれ示す。なお，図 A-2.6 は，国内外の運転実績に関する情報活用と，リスク情報を活用した点検評価手法の在り方について検討を行った結果の一例として，ICM ハウジングの各構造体における個別点検と一般点検の整理結果をマトリックス表示し，定性的に可視化したものである。

BWR の ICM ハウジングでは，国内外のプラントでの運転経験において溶接部に対する損傷事例が確認されており，溶接部には損傷のポテンシャルがあると考えられる。また，損傷による安全機能に対する影響の評価結果から，ICM ハウジングの母材，ハウジング/フランジ溶接部，ハウジング/肉盛座溶接部，肉盛座が損傷した場合に，安全機能への影響が生じると考えられる。

これらのことから，BWR の ICM ハウジングでは，ハウジング/フランジ溶接部，ハウジング/肉盛座溶接部，肉盛座溶接部を個別点検の対象とする。

同様に，ABWR の ICM ハウジングでは，ハウジング/フランジ溶接部，ハウジング/スタブチューブ溶接部，スタブチューブ/下鏡溶接部を個別点検の対象とする。

その他の部位については，一般点検により健全性の確認を行うものとする。

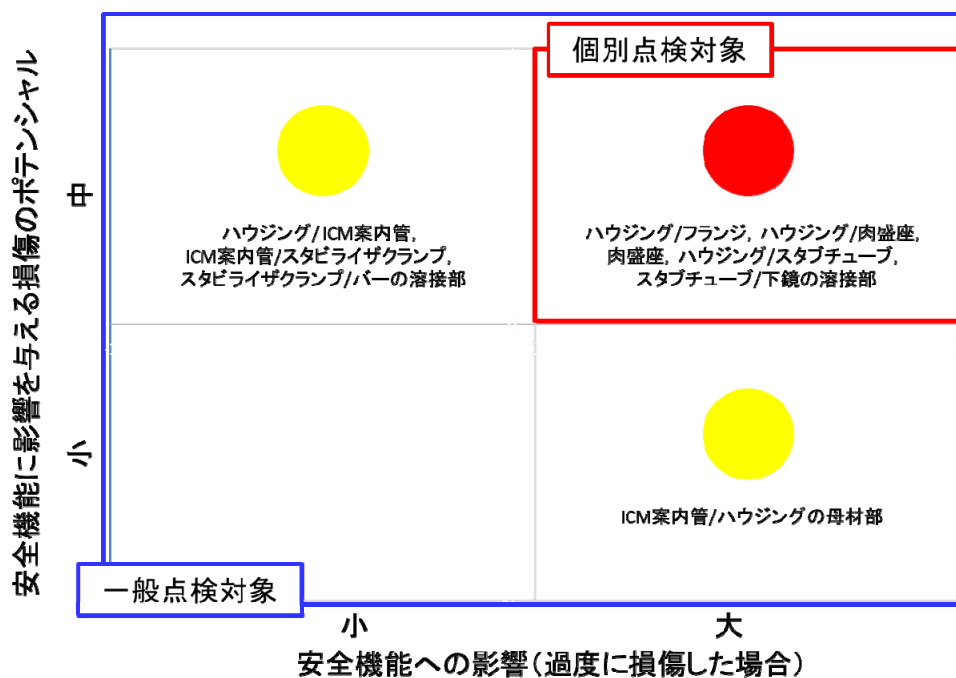


図 A-2.6 ICM ハウジングの点検対象^(注)

(注)

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

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

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

表 A-2.6 ICM ハウジングの損傷による安全機能への影響評価

検討対象		機 能	安全機能との関連	想定される劣化モード	損傷による安全機能への影響	個別点検要否*
①	ハウジング / フランジ 溶接部	・ICM の支持 ・耐圧	有 (計/バ)	SCC	・溶接部が損傷すると荷重の支持が失われ、炉心計測に影響する可能性がある。 ・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 / ICM 案内管 溶接部	・ICM 案内管の支持	有 (計)	SCC	・溶接部が損傷するとハウジング 及び ICM 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 (BWR)	・ハウジング、 ICM 案内管の支持 ・耐圧	有 (計/バ)	SCC	・溶接部が損傷すると荷重の支持が失われ、炉心計測に影響する可能性がある。 ・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
④	肉盛座溶接部 (BWR)	・ハウジング、 ICM 案内管の支持 ・耐圧	有 (計/バ)	SCC	・溶接部が損傷すると荷重の支持が失われ、炉心計測に影響する可能性がある。 ・溶接部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	ICM 案内管 / スタビライザークランプ 溶接部	・ハウジング、 ICM 案内管の 流体振動防止	—	SCC	・溶接部が損傷しても、スタビライザの機能に影響しない。 ・溶接部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	スタビライザークランプ / スタビライザバー 溶接部	・ハウジング、 ICM 案内管の 流体振動防止	—	SCC	・溶接部が損傷しても、ボルト/ナットによりスタビライザークランプ とバー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
⑦	ハウジング / スタブチューブ 溶接部 (ABWR)	・ハウジング、 ICM 案内管の支持 ・耐圧	有 (計/バ)	SCC	・溶接部が損傷すると荷重の支持が失われ、炉心計測に影響する可能性がある。 ・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
⑧	スタブチューブ / 下鏡溶接部 (ABWR)	・ハウジング、 ICM 案内管の支持 ・耐圧	有 (計/バ)	SCC	・溶接部が損傷すると荷重の支持が失われ、炉心計測に影響する可能性がある。 ・溶接部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

計：炉心計測

バ：バウンダリの確保

*：個別点検を不要とする対象は、一般点検により健全性の確認を行う。

2.6.2 点検手法の選定

点検対象である BWR のハウジング/フランジ溶接部，ハウジング/肉盛座溶接部，肉盛座溶接部と ABWR のハウジング/フランジ溶接部，ハウジング/スタブチューブ溶接部，スタブチューブ/下鏡溶接部に想定される経年劣化事象は，ニッケル合金及びステンレス鋼の溶接部に対する SCC である。したがって，LPRM を装荷した BWR のハウジング/フランジ溶接部については SCC の検出に適した MVT-1 により，亀裂等がないこと等を確認する。

一方，LPRM を装荷していない BWR のハウジング/フランジ溶接部及び ABWR のハウジング/フランジ溶接部については，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，微小漏えいにより検知できる。また，BWR のハウジング/肉盛座溶接部，肉盛座溶接部及び ABWR のハウジング/スタブチューブ溶接部，スタブチューブ/下鏡溶接部については，付録Dに示すように周方向亀裂より軸方向亀裂の進展が早く，微小漏えいを検知できれば ICM ハウジングに要求される安全機能を維持できる。このため，これらの点検対象については，VT-2 により炉水の漏えいがないことを確認するものとする。

2.6.3 点検範囲の選定

ICM ハウジングの点検範囲（個数）は，ICM ハウジングの安全機能維持を確認するために必要な個数として，全数を点検範囲とする。

2.6.4 点検時期の選定

(1) ハウジング/フランジ溶接部（BWR，ABWR）

付録Dに示すように，LPRM を装荷した BWR の 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）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点検する。なお，供用開始時点で深さ $50\mu\text{m}$ 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。

LPRM を装荷した BWR の SUS316 製ハウジングについては，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，軸方向亀裂の貫通に実運転時間で約 30 年と評価されるため，将来起こりうる経年劣化事象に対する運転経験を蓄積するだけでなく，保守管理の妥当性等の確認や評価を行う高経年化技術評価にも資することを踏まえ，供用開始後暦年で 20～30 年の間に初回点検，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 BWR のハウジング/フランジ溶接部及び ABWR のハウジング/フランジ溶接部については、SCC 損傷の可能性が非常に小さいと考えられるため、高経年化技術評価にも資することを踏まえ、供用開始後暦年で 25 年以降の毎定検での点検とする。

(2) ハウジング/肉盛座溶接部及び肉盛座溶接部 (BWR)

付録Dに示すように、BWR のハウジング取付け溶接部の軸方向亀裂は、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、ステンレス鋼の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、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 年以降の毎定検での点検とする。

ステンレス鋼溶接部の場合は、ハウジング内面を予防保全施工済みであり、溶接金属自体の損傷可能性も極めて小さいが、高経年化技術評価にも資することを踏まえ、点検開始を供用開始後暦年で 25 年以降の最初の定検とする。

(3) 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 (ABWR)

付録Dに示すように、ABWR のハウジング/スタブチューブ溶接部の軸方向亀裂は、実運転時間で約 18 年以降急速に進展し、約 21 年で貫通する。一方、スタブチューブ/下鏡溶接部の軸方向亀裂は、実運転時間約 73 年で貫通する評価となる。

上記のように、スタブチューブ/下鏡溶接部の亀裂進展は、ハウジング/スタブチューブ溶接部に比べて大幅に遅いという特徴があるものの、炉水の漏えいがないことを確認する VT-2 での点検の合理性の観点より、これらの点検開始時期は同一の扱いとし、ハウジング/スタブチューブ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 年以降の毎定検での点検とする。

3. 引用

国内外の運転経験は、以下の情報に基づいた。

- (1) 原子力施設情報公開ライブラリ (ニューシア) , 原子力安全推進協会
- (2) BWR Vessel and Internals Inspection Summaries for Fall 2016 Outages,
BWR-VIP2017-081, ML17187A190
- (3) BWR Vessel and Internals Inspection Summaries for Spring 2017 Outages,
BWR-VIP2018-015, ML18040A464
- (4) BWR Vessel and Internals Inspection Summaries for 2018 Outages,
BWR-VIP2019-078, ML19232A214

- (5) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2019 Outages, BWR-VIP2020-082, ML20283A472
- (6) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2020 Outages, BWR-VIP2021-092, ML21336A344

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。BWR はハウジング取付け溶接部の溶接金属がニッケル合金の 182 合金，ハウジング及びフランジが SUS304 又は 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し，ABWR はハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部の溶接金属がニッケル合金の 82 合金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 82 合金の SCC 亀裂進展速度式

参考文献^{1,2)}より設定した 82 合金の SCC 亀裂進展特性を以下に示す。本速度式は，材料の規格内での化学成分変動を含む複数の材料ヒートを使用し，炉内構造物に用いられる溶接方法で国内プラントメーカーが溶接施工した試験体の SCC 進展速度データベースより策定され，溶接ままと溶接後熱処理及び通常一次水質環境下と水素注入環境下で異なる線図を定義している。なお，本付録では，選定されたデータ群の平均線による速度式について，点検時期を評価するにあたり，亀裂進展速度に 2.0×10^{-9} mm/s の下限値を設けた。

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

(a) 溶接まま（As-Welded）

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

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

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

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

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 82 合金の SCC 亀裂進展特性を図 B-2 に示す。

(b) 溶接後熱処理（PWHT）

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

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

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

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

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 82 合金の SCC 亀裂進展特性を図 B-2 に示す。

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

(a) 溶接まま (As-Welded)

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

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

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

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

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 82 合金の SCC 亀裂進展特性を図 B-3 に示す。

(b) 溶接後熱処理 (PWHT)

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

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

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

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

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 82 合金の SCC 亀裂進展特性を図 B-3 に示す。

3.2 182 合金の SCC 亀裂進展速度式

(1) 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。

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (17)$$

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 13.3) \quad (18)$$

$$da/dt = 3 \times 10^{-15} K^{5.186} \quad (13.3 \leq K \leq 50.3) \quad (19)$$

$$da/dt = 2 \times 10^{-6} \quad (K > 50.3) \quad (20)$$

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-4 に示す。

ここで，日本機械学会 維持規格では，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てもよい。

3.3 鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展速度式

(1) 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。

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (21)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 3.4) \quad (22)$$

$$da/dt = 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161} \quad (3.4 \leq K \leq 57.9) \quad (23)$$

$$da/dt = 9.2 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9) \quad (24)$$

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-5 に示す。

(2) 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。

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (25)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 12.9) \quad (26)$$

$$da/dt = 7.94 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (12.9 \leq K \leq 57.9) \quad (27)$$

$$da/dt = 5.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9) \quad (28)$$

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-6 に示す。

3.4 低炭素量ステンレス鋼の SCC 亀裂進展速度式

(1) 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。

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (29)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 6.7) \quad (30)$$

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \leq K \leq 57.9) \quad (31)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9) \quad (32)$$

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、図 B-5 に示す。

(2) 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。

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0) \quad (33)$$

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 19.3) \quad (34)$$

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (19.3 \leq K \leq 57.9) \quad (35)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9) \quad (36)$$

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，図 B-6 に示す。

参考文献

- 1) BWRVIP-358: BWR Vessel and Internals Project, “Stress Corrosion Crack Growth Rate Behavior of Alloy 82 Weld Metal in Boiling Water Reactor Environments”, 2023.
- 2) P.L.Andresen et al., “Proposed Crack Growth Rate Disposition Curves For Stress Corrosion Cracking of ALLOY 82 in BWR Environments”, 20th Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, 2022.

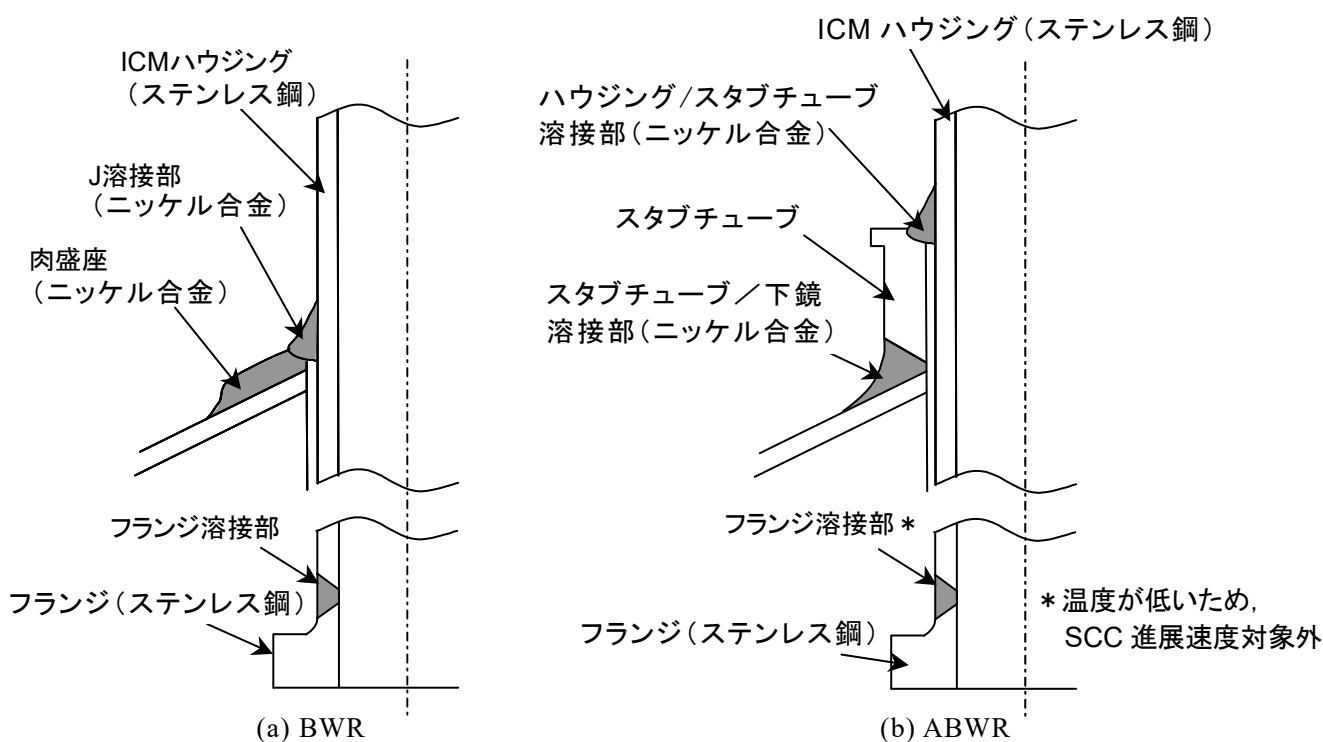


図 B-1 ICM ハウジングの溶接部の例

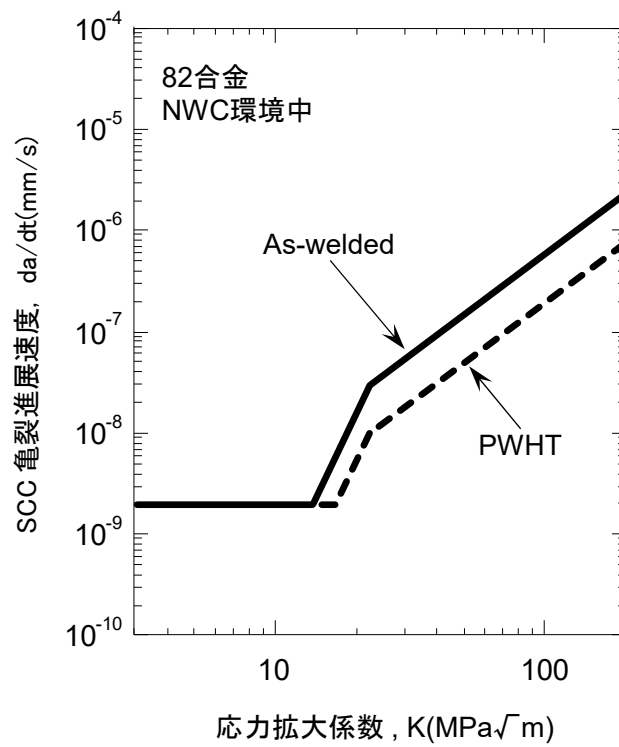


図 B-2 NWC 環境中における 82 合金の SCC 亀裂進展特性

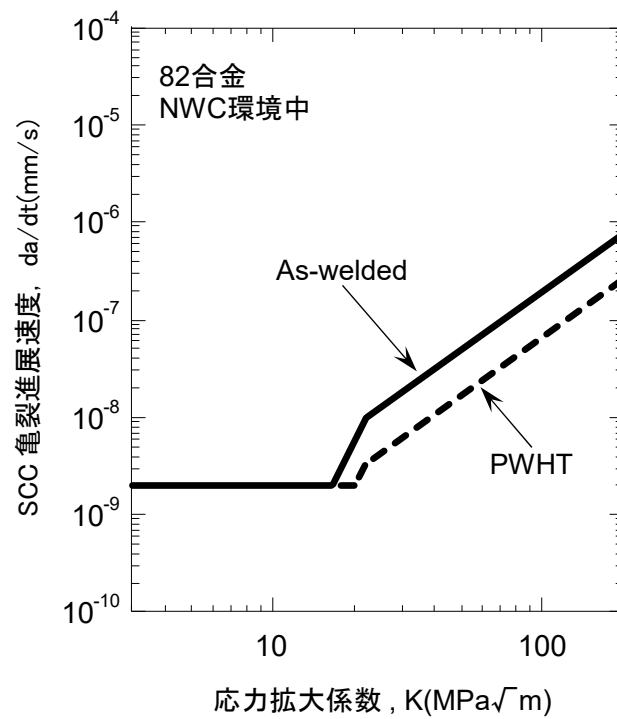


図 B-3 HWC 環境中における 82 合金の SCC 亀裂進展特性

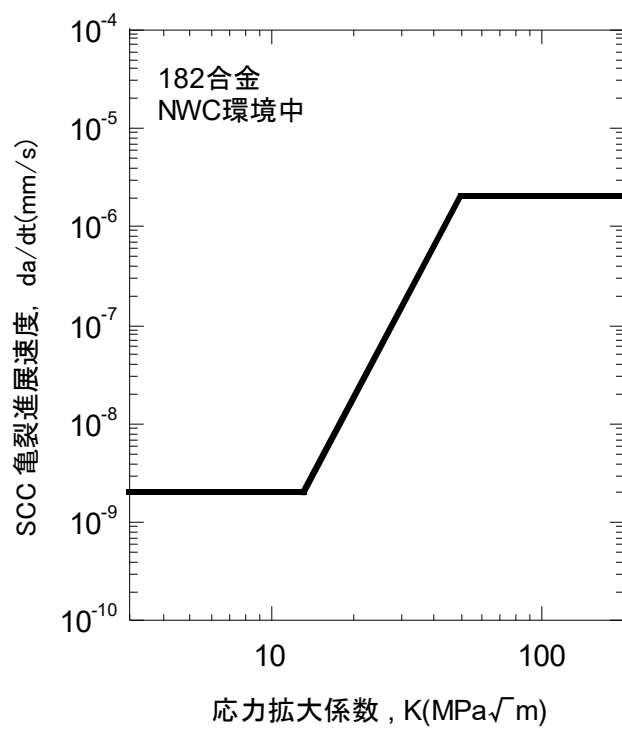


図 B-4 NWC 環境中における 182 合金の SCC 亀裂進展特性

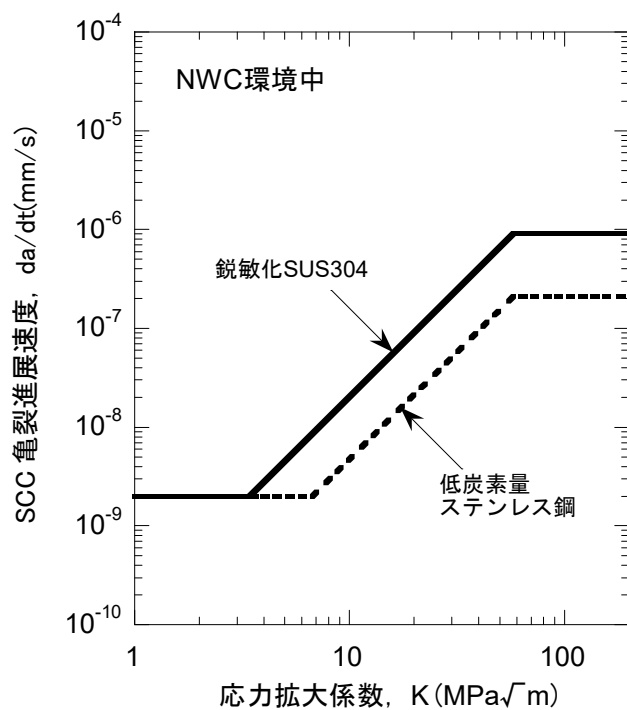


図 B-5 NWC 環境中におけるステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性

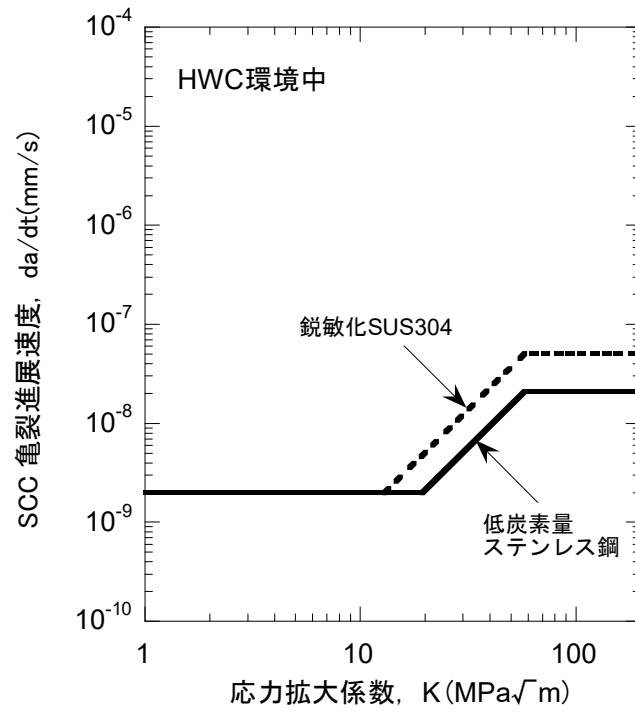


図 B-6 HWC 環境中におけるステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性

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. BWRハウジング溶接部残留応力解析手法

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））

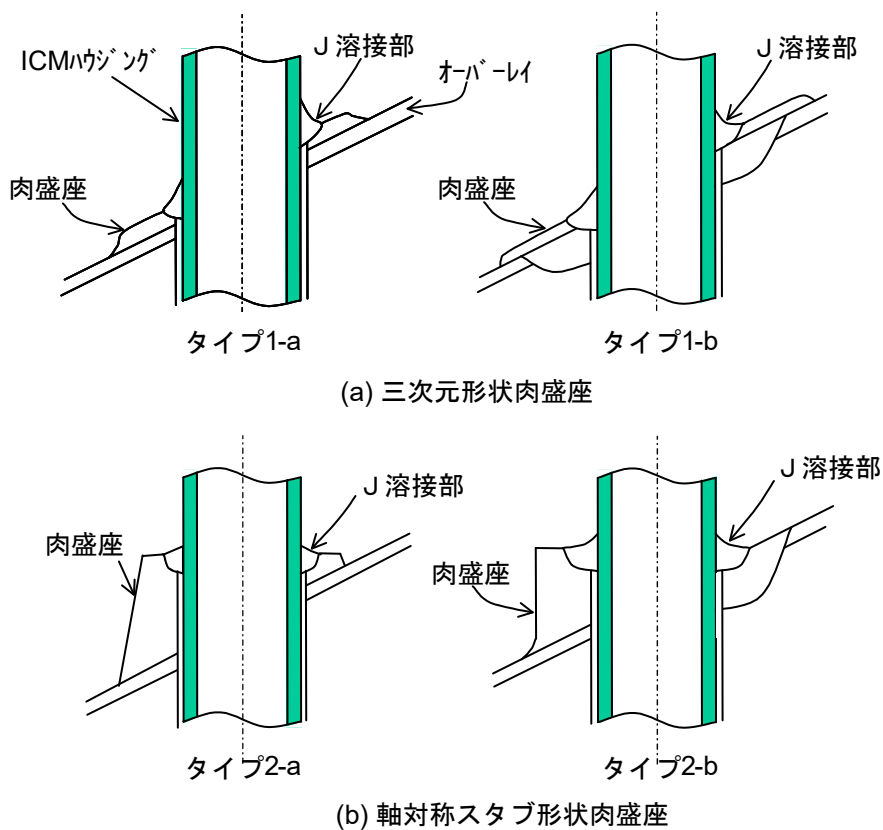


図 C-1 ハウジング取付け溶接部（BWR）の構造

(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。

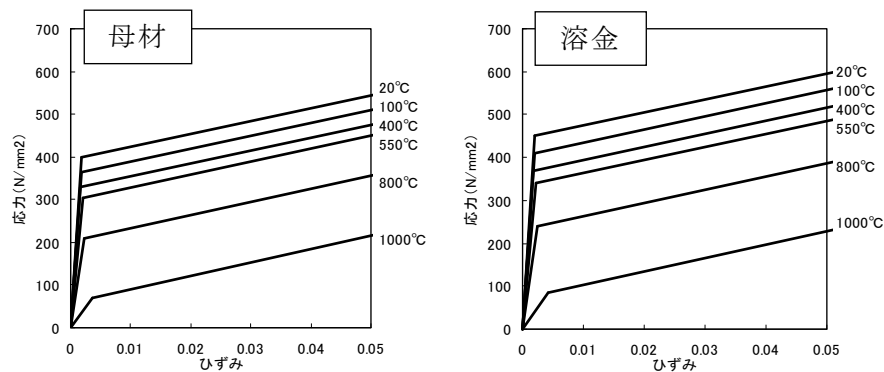
(3) 物性値

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。

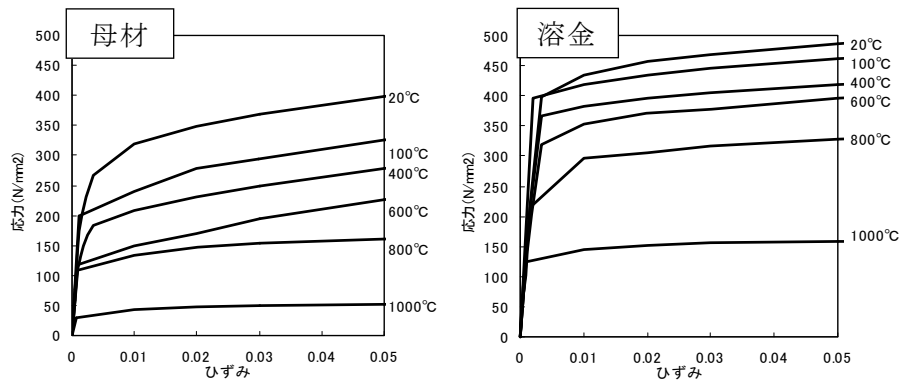
表 C-1 伝熱解析に用いた物性値

SUS304及びSUS316L		20	100	200	400	600	1000	1500	2000
温度	°C								
熱伝導率	$\text{kJ/mm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$	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}	7.86×10^{-6}	7.86×10^{-6}	7.86×10^{-6}	7.86×10^{-6}	7.86×10^{-6}	7.86×10^{-6}	7.86×10^{-6}
比熱	$\text{KJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$	0.452	0.493	0.523	0.553	0.578	0.620	0.678	0.737
600系ニッケル合金		20	149	288	566	815	1000	1500	2000
温度	°C								
熱伝導率	$\text{kJ/mm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$	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}	8.50×10^{-6}	8.50×10^{-6}	8.50×10^{-6}	8.50×10^{-6}	8.50×10^{-6}	8.50×10^{-6}	8.50×10^{-6}
比熱	$\text{KJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$	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に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。

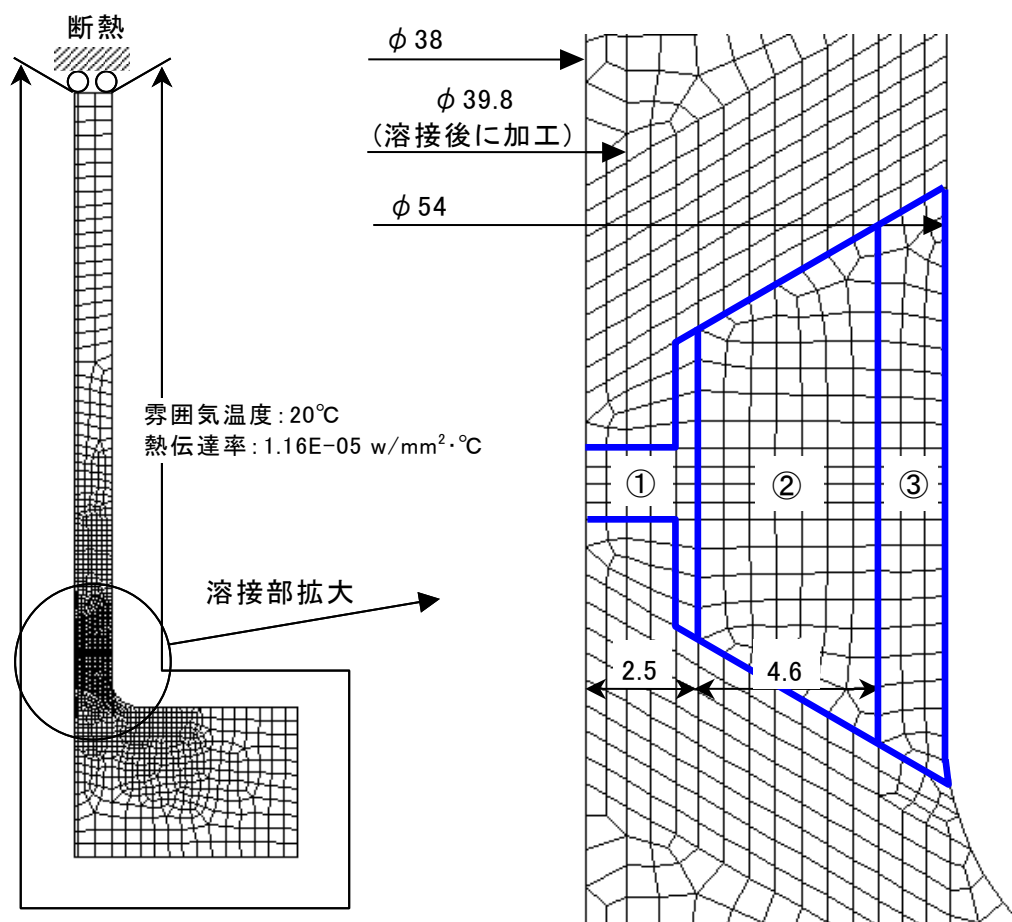


図 C-3 ハウジング/フランジ溶接部（BWR）の残留応力解析モデル

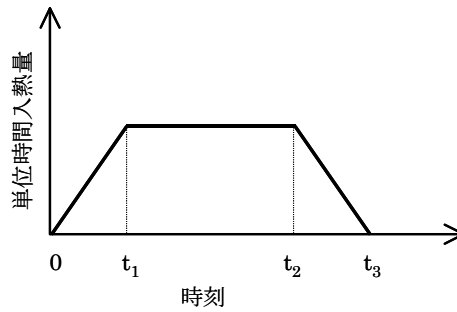


図 C-4 ハウジング/フランジ溶接部の残留応力解析における入熱の想定

3. BWR ハウジング溶接部解析結果

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，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。

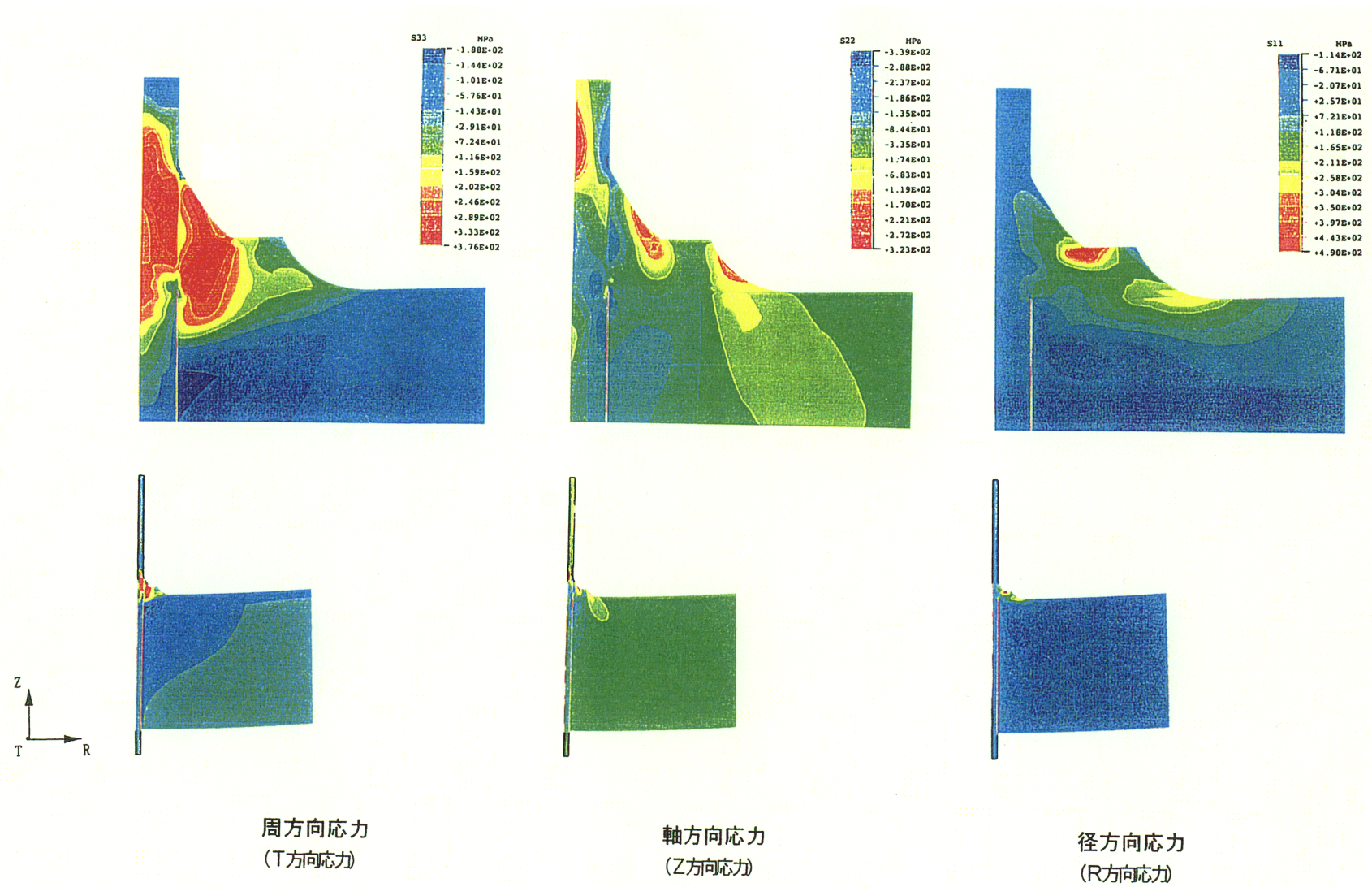


図 C-5 ハウジング取付け溶接部 (BWR) の残留応力解析結果 (タイプ 1-a) ¹⁾

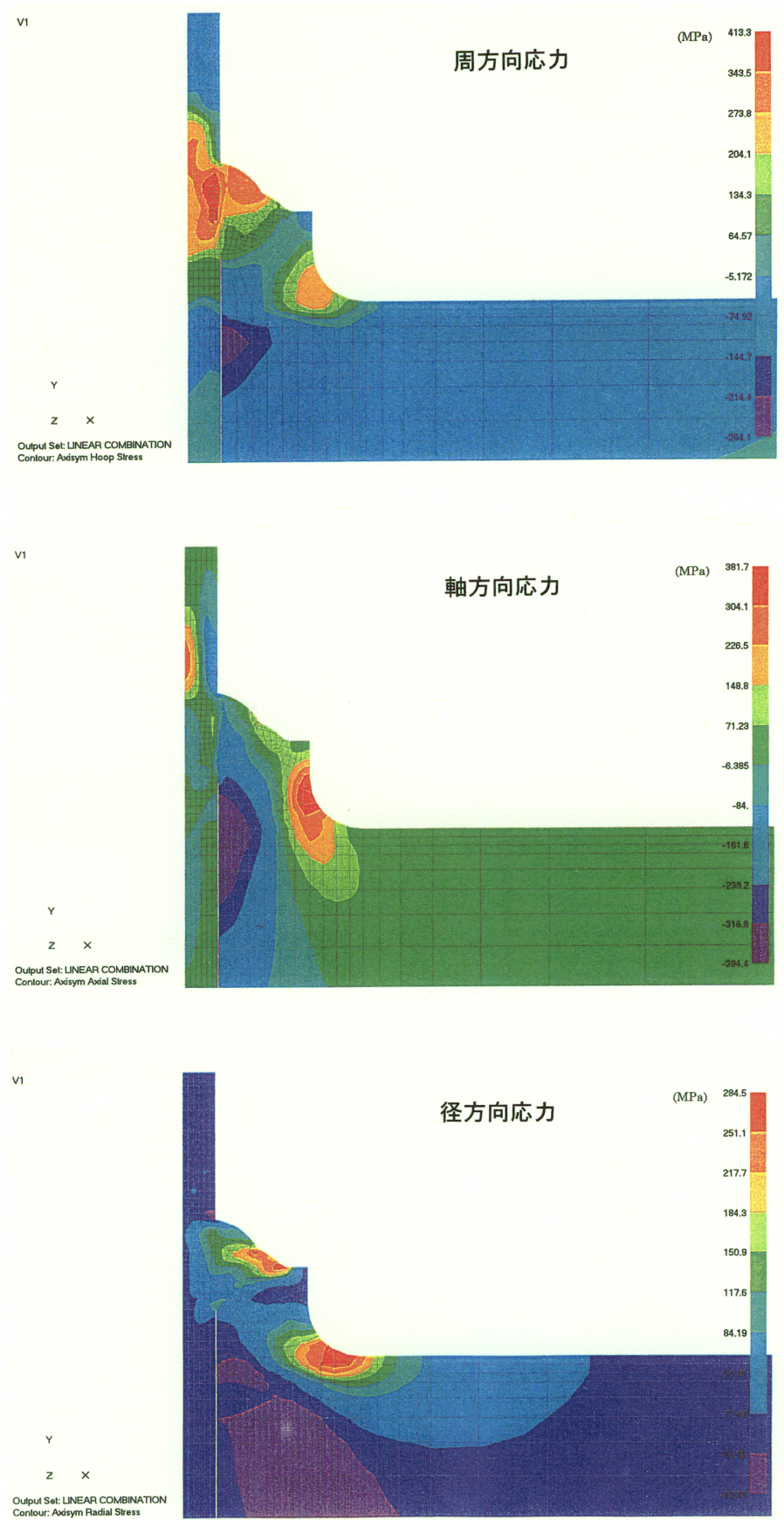
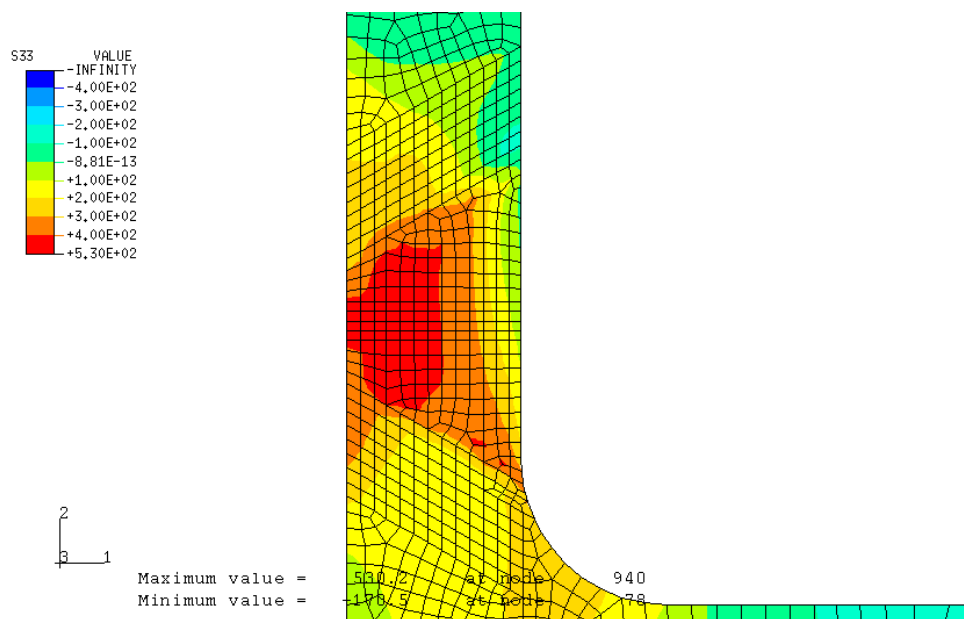
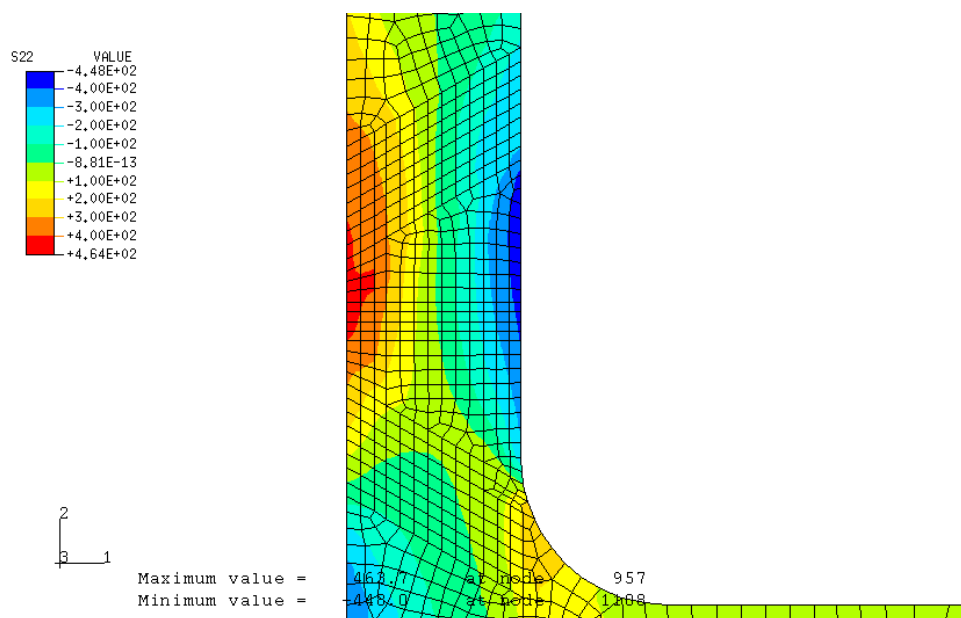


図 C-6 ハウジング取付け溶接部（BWR）の残留応力解析結果（タイプ 2-a）¹⁾



(a) 周方向応力



(b) 軸方向応力

図 C-7 ハウジング/フランジ溶接部 (BWR) の残留応力解析結果

4. ABWR ハウジング溶接部残留応力解析手法

4.1 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

(1) 解析モデル

ハウジング，スタブチューブ及び圧力容器下鏡，並びにハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部を軸対称モデル化した。（図 C-8）

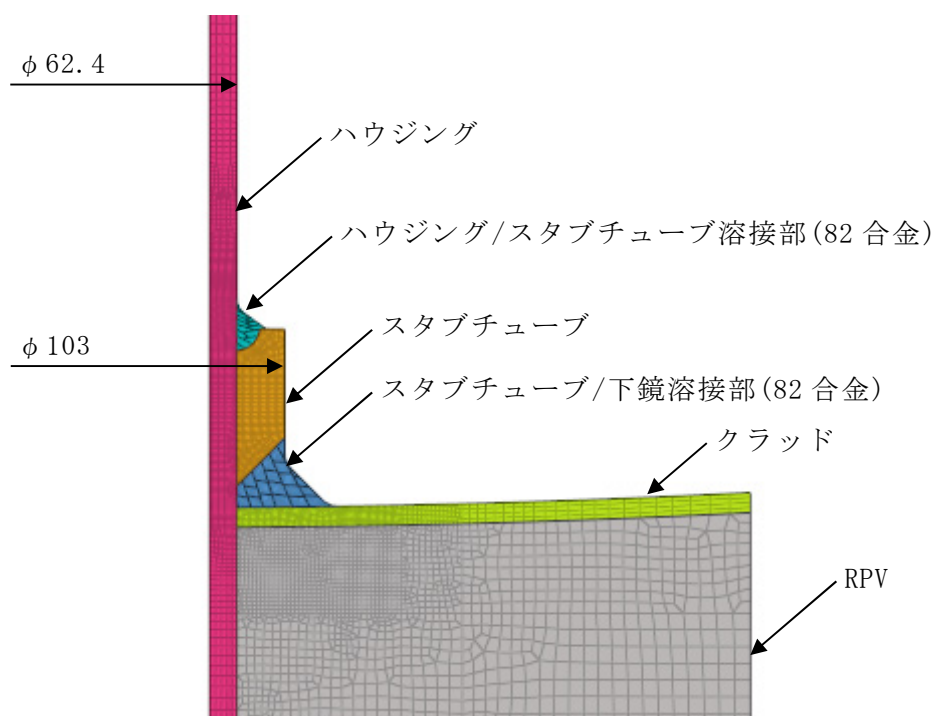


図 C-8 ハウジング/スタブチューブ溶接部（ABWR）及び
スタブチューブ/下鏡溶接部（ABWR）の残留応力解析モデル

(2) 解析手順

BWR ハウジング溶接部の場合と同様に，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。

(3) 物性値

解析に用いる材料物性値は，旧独立行政法人 原子力安全基盤機構の複雑形状部機器配管健全性実証(IAF)事業²⁾において取得されたデータをもとに設定した。

5. ABWRハウジング溶接部解析結果

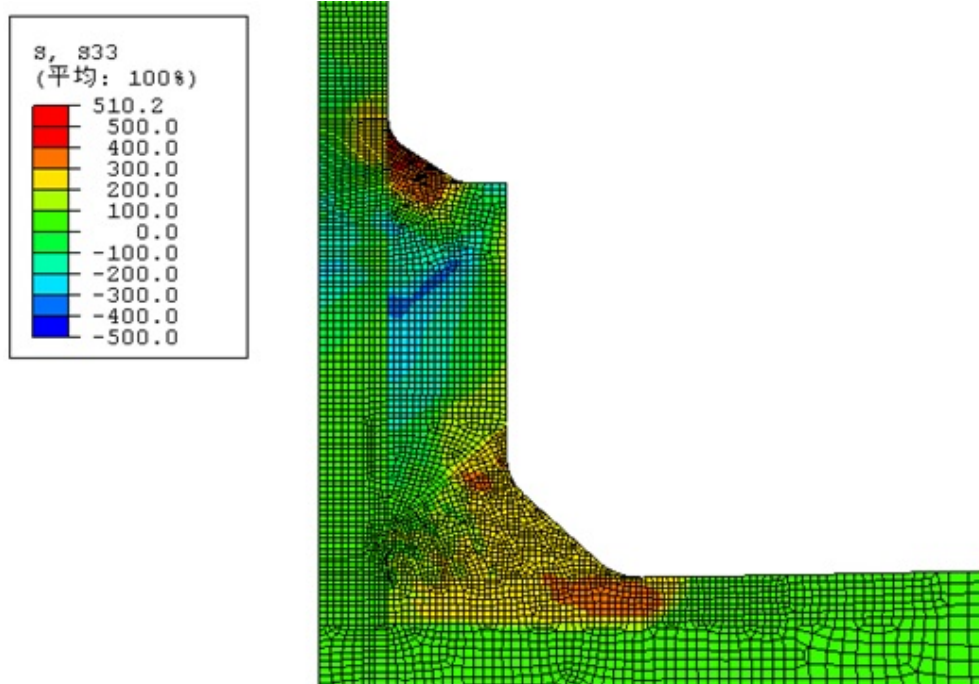
5.1 ハウジング/スタブチューブ溶接部

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-9 に示す。

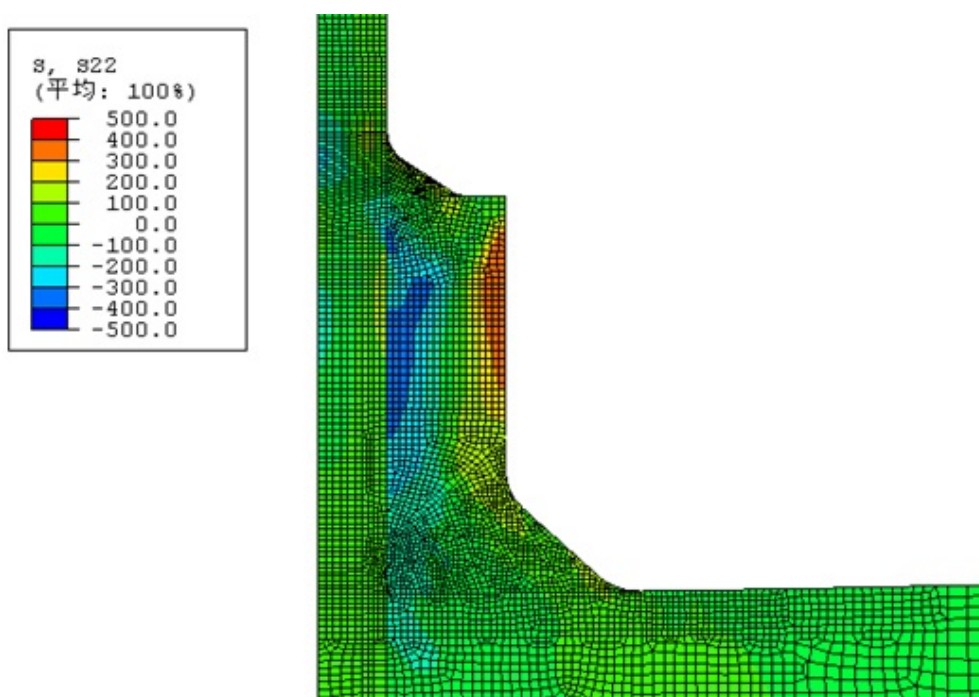
溶接金属部は、表面及び内部にわたって周方向応力が高く、表面では最大で 500MPa を超える引張りとなっている。母材部については、スタブチューブ表面で軸方向応力が高く、最大で 400～500MPa の引張りとなっている。

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 3 月)
- 2) 独立行政法人 原子力安全基盤機構「複雑形状部機器配管健全性実証(IAF)事業 原子炉圧力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集」(平成 25 年 6 月), JNES-RE-2012-0024



(a) 周方向応力



(b) 軸方向応力

図 C-9 ハウジング/スタブチューブ溶接部 (ABWR) 及び
スタブチューブ/下鏡溶接部 (ABWR) 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（BWR）、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（BWR）、ハウジング/スタブチューブ溶接部（ABWR）及びスタブチューブ/下鏡溶接部（ABWR）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。

なお、本付録においては、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せず、BWR の ICM ハウジングにおけるニッケル合金の 82 合金及び改良 182 合金については 182 合金溶接金属の評価に代表させているが、実機の状況に合わせて、付録 B に示す使用材料及び使用環境の SCC 亀裂進展速度式を用いて評価を実施しても良い。

2. BWR の ICM ハウジング溶接部の SCC 亀裂進展評価

2.1 ハウジング取付け溶接部における評価

2.1.1 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。

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（付録C参照）により評価した。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くいため亀裂進展が抑制されることが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：

$$\begin{aligned} da/dt &= 0 & (K \leq 0) \\ da/dt &= 2 \times 10^{-9} & (0 < K < 13.3) \\ da/dt &= 3 \times 10^{-15} K^{5.186} & (13.3 \leq K \leq 50.3) \\ da/dt &= 2 \times 10^{-6} & (K > 50.3) \end{aligned}$$

低炭素量ステンレス鋼：

$$\begin{aligned} da/dt &= 0 & (K \leq 0) \\ da/dt &= 2.0 \times 10^{-9} & (0 < K < 6.7) \\ da/dt &= 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} & (6.7 \leq K \leq 57.9) \\ da/dt &= 2.1 \times 10^{-7} & (K > 57.9) \end{aligned}$$

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。

2.1.2 評価結果

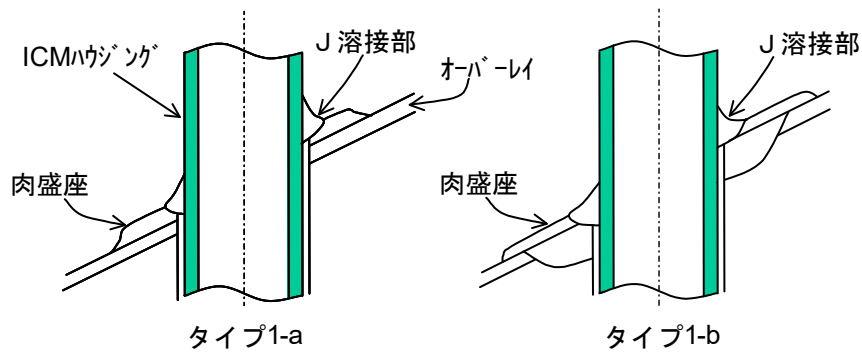
ハウジング取付け溶接部タイプ 1-a に想定した経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた当該部の周方向応力分布（残留応力＋運転応力）を図 D-3 に示す。経路①の軸方向亀裂進展評価結果を図 D-4 に示す。図 D-4(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-4(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路①（経路全長：16.0 mm）の場合、亀裂が経路全長に達する年数は 19.4 年である。

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。

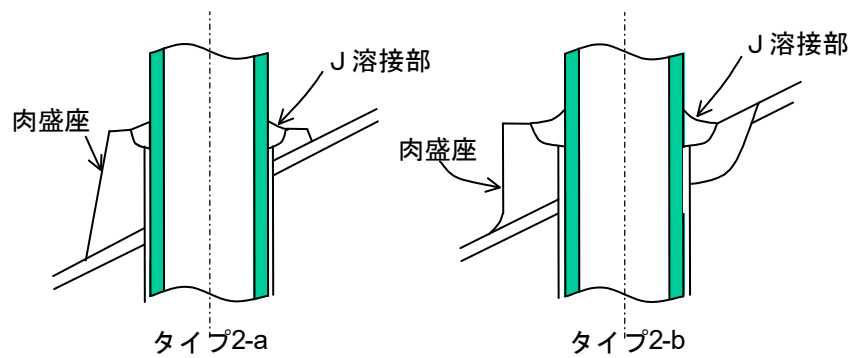
タイプ 1-a、経路③の軸方向亀裂進展評価に用いた当該部の周方向応力分布（残留応力＋運転応力）を図 D-7 に示す。前述したように経路③はハウジング内面を亀裂の起点と想定した経路である。経路③の軸方向亀裂進展評価結果を図 D-8 に示す。図 D-8(a)では、亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-8(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路③（経路全長：6.2 mm）の場合、亀裂が経路全長に達する年数は 21.9 年である。なお、経路③においては、内表面の軸方向応力が圧縮（約－90MPa）のため、周方向亀裂は発生しない。

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 ハウジング取付け溶接部の構造

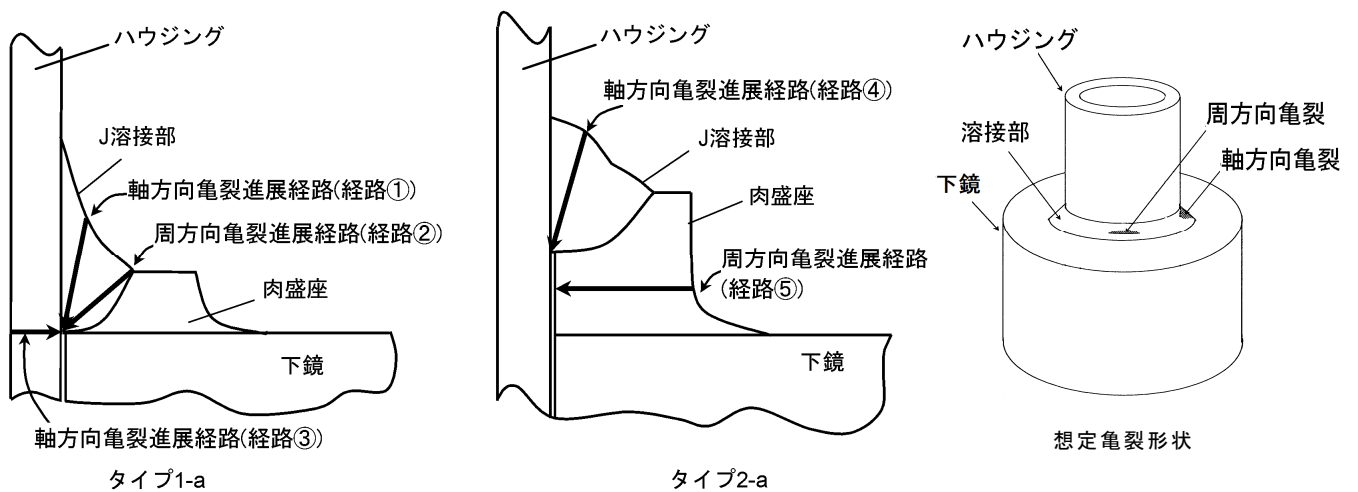


図 D-2 ハウジング取付け溶接部に想定した亀裂進展経路

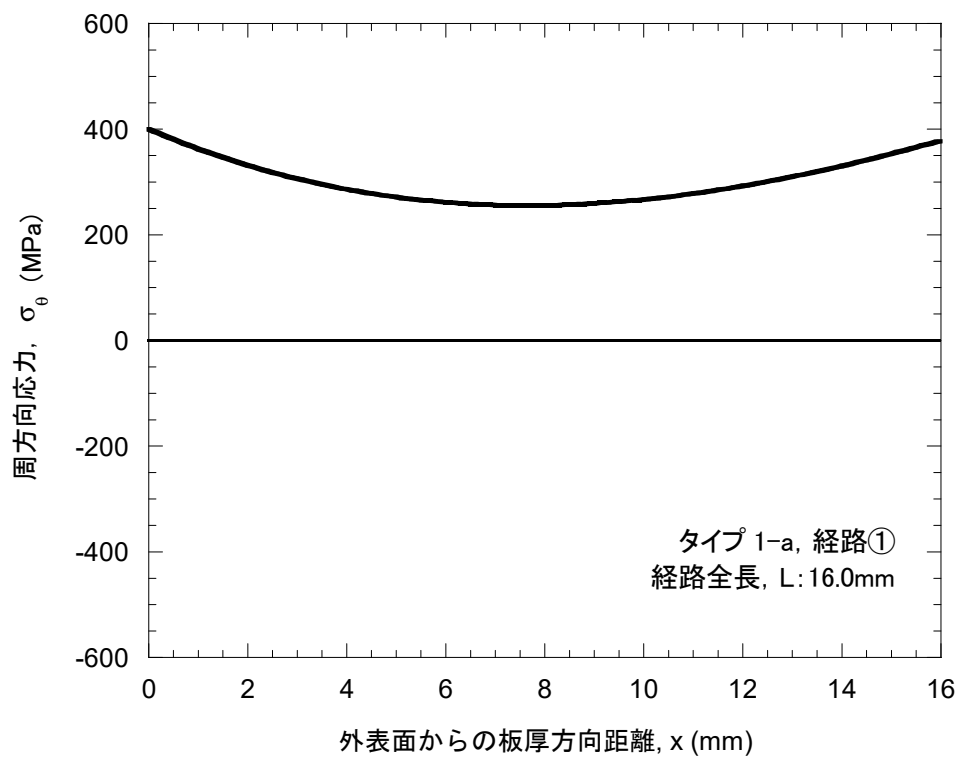
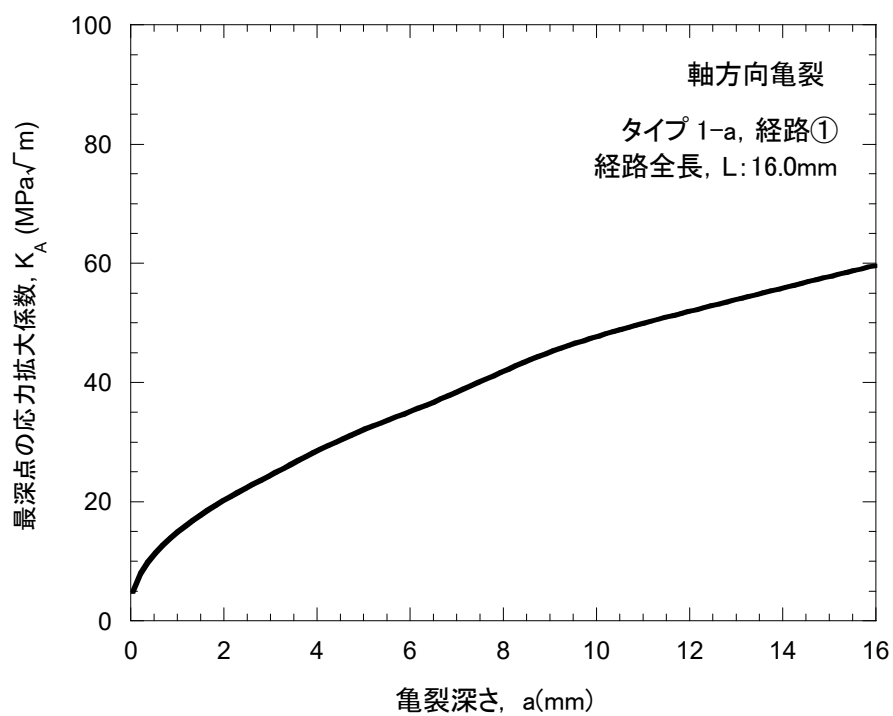
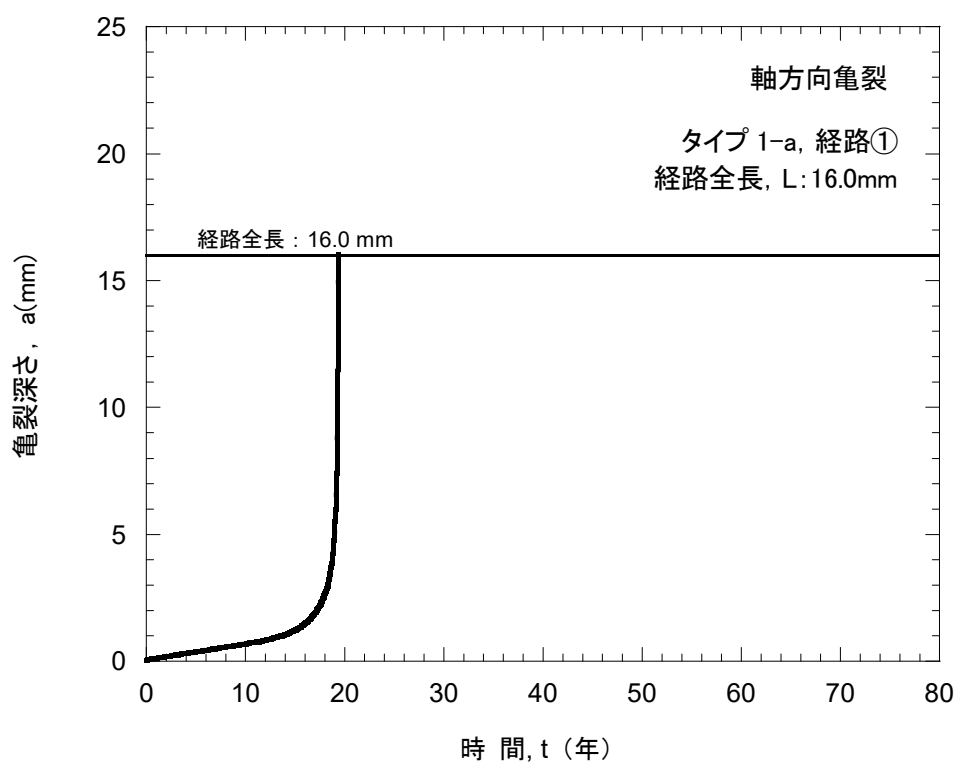


図 D-3 タイプ 1-a, 経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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

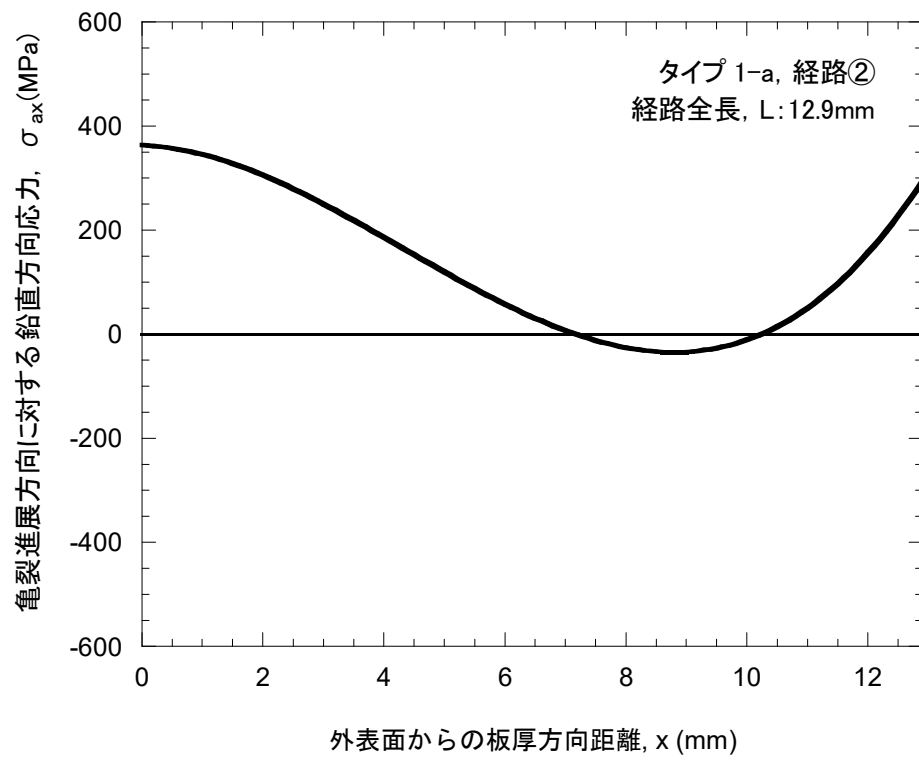
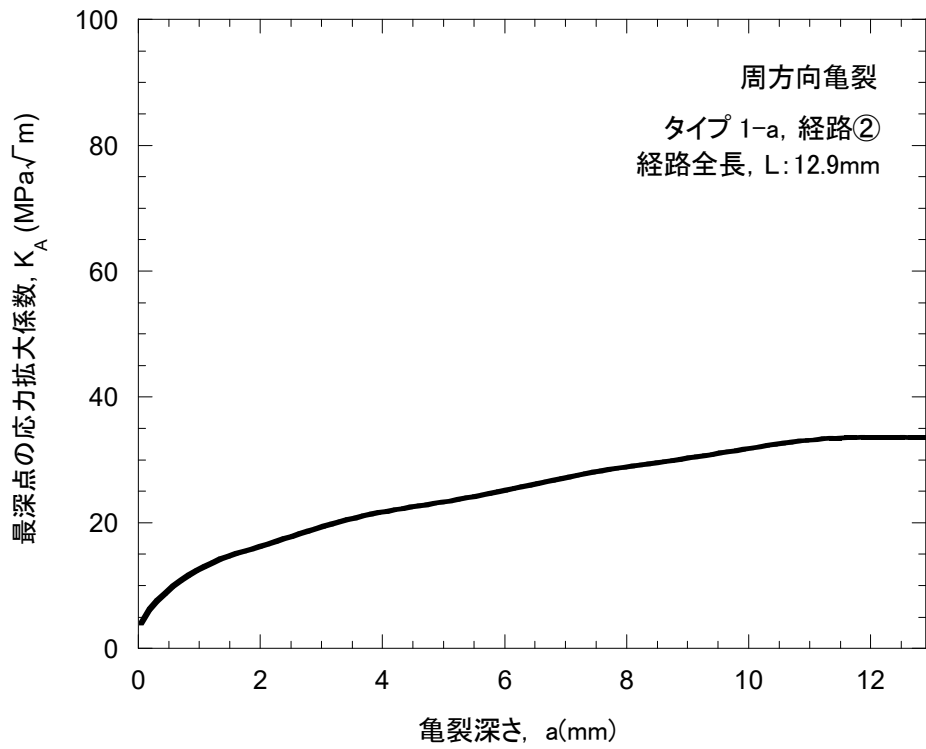
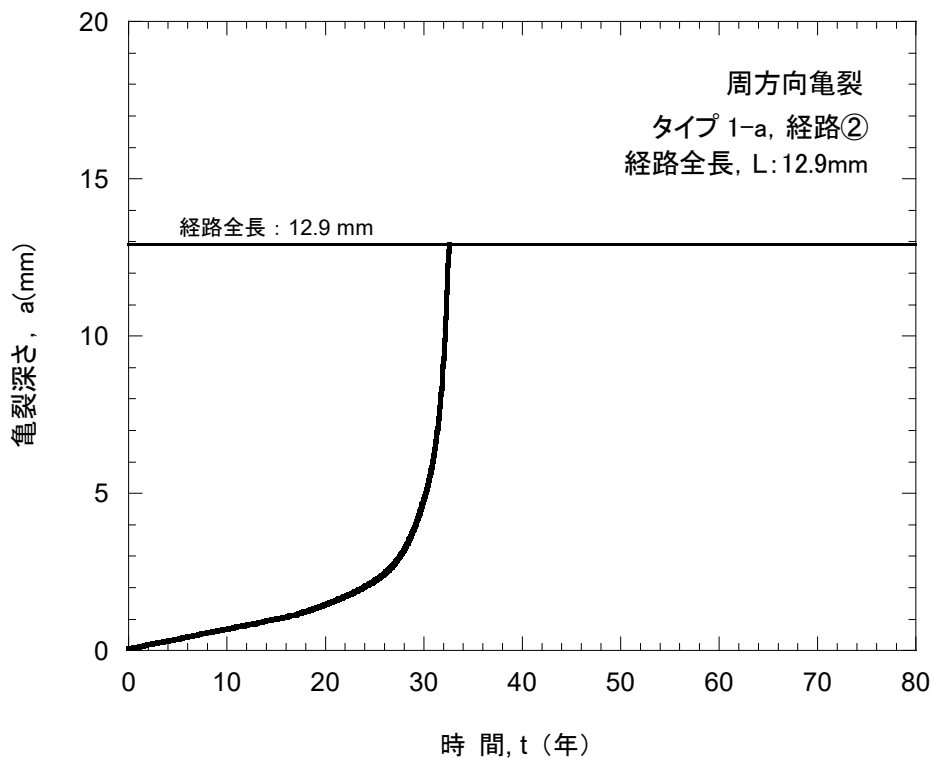


図 D-5 タイプ 1-a, 経路②の周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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

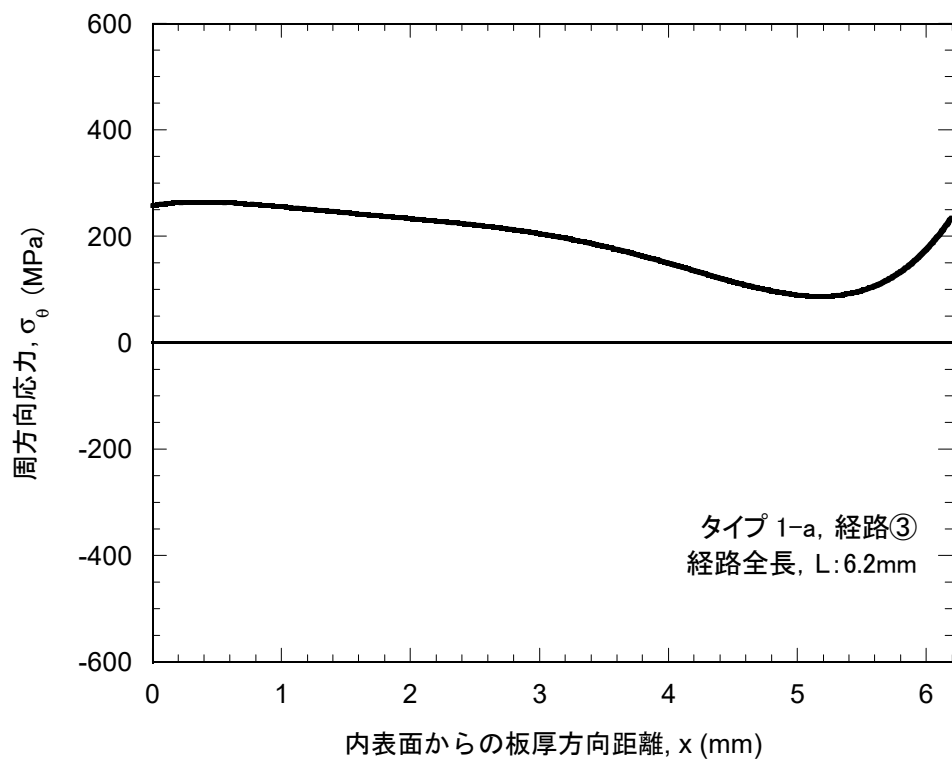
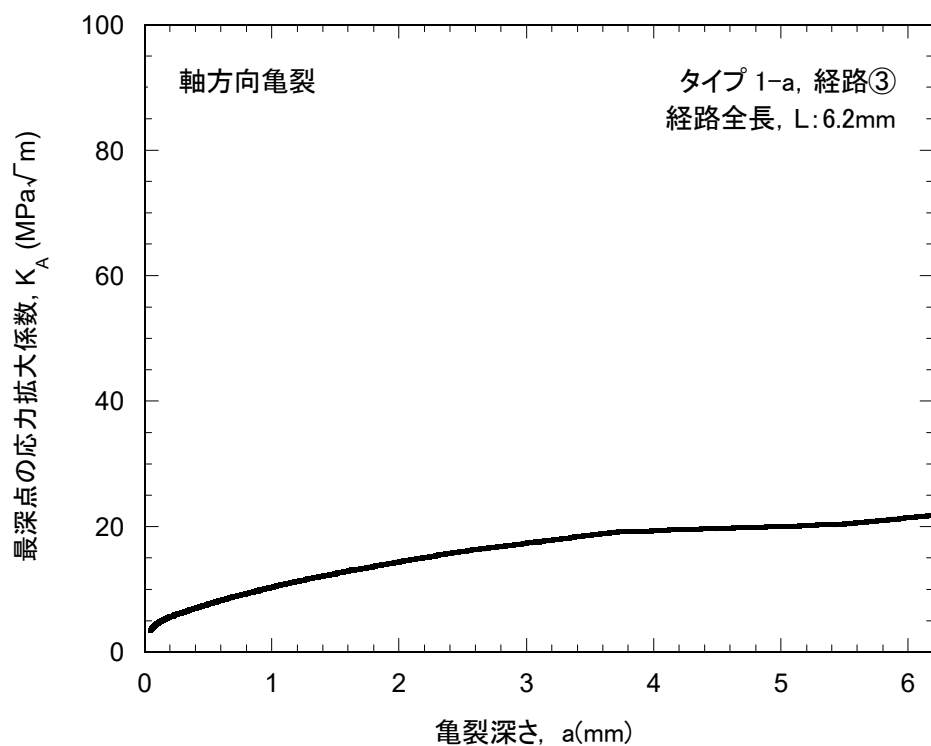
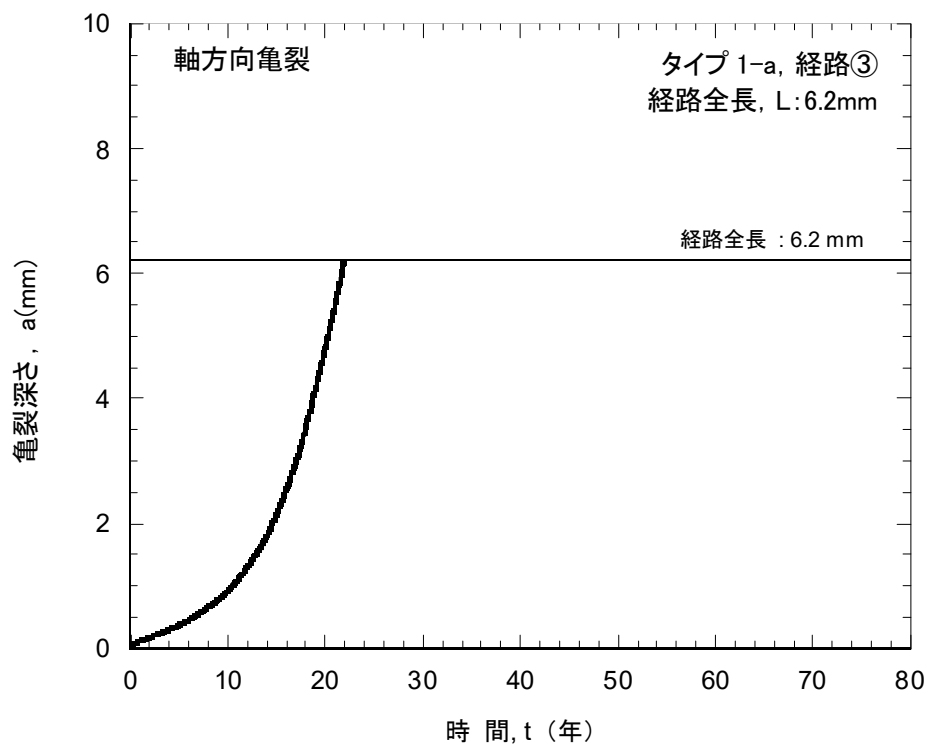


図 D-7 タイプ 1-a, 経路③の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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

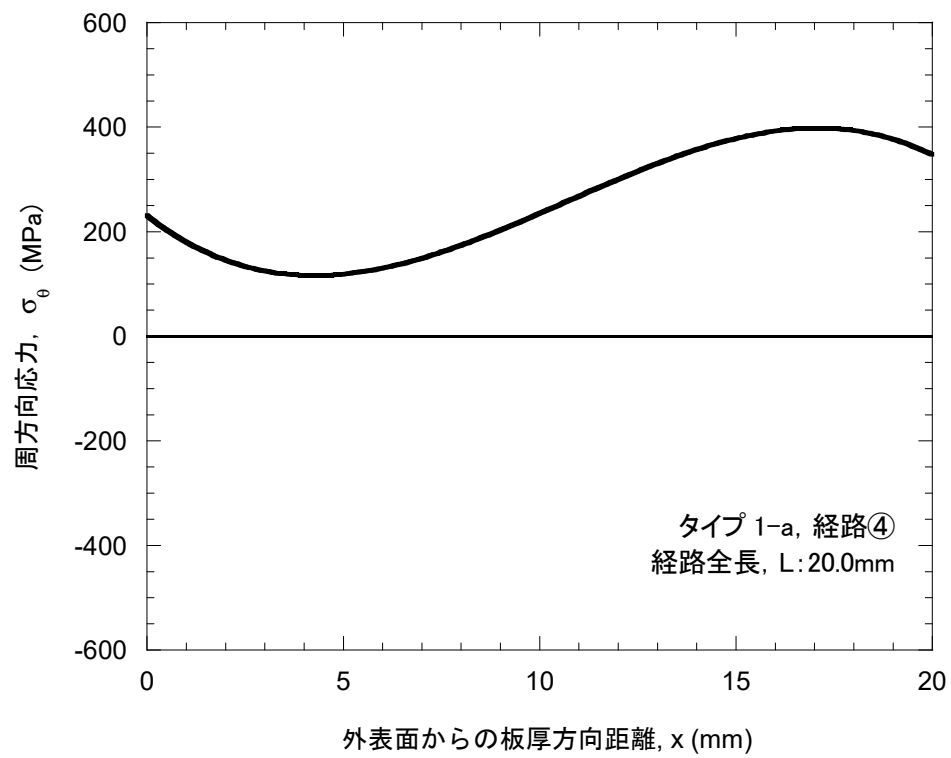
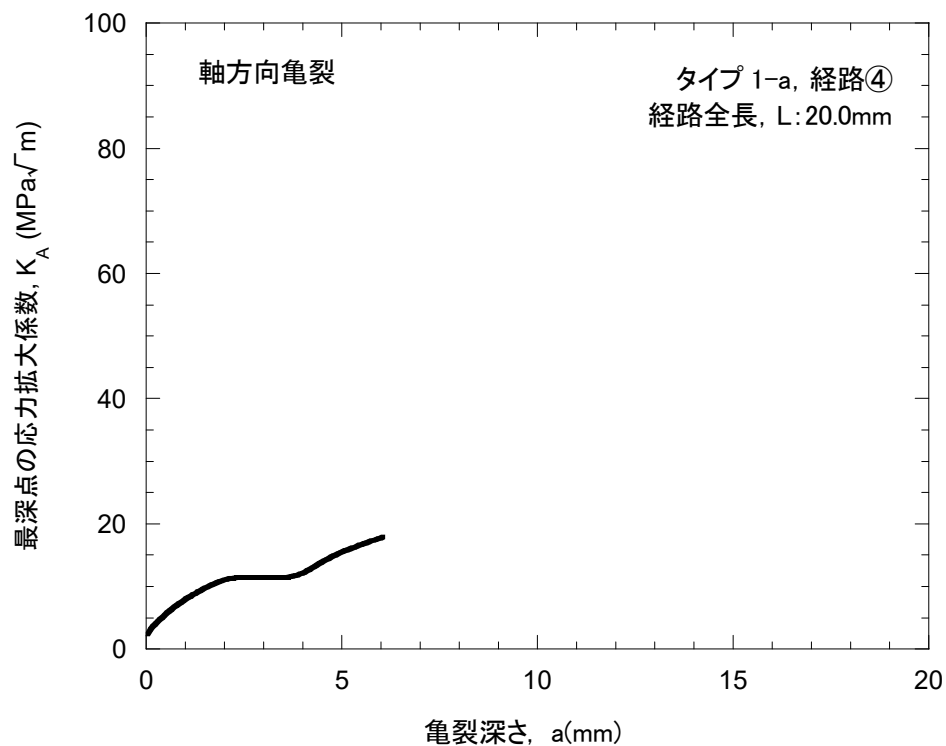
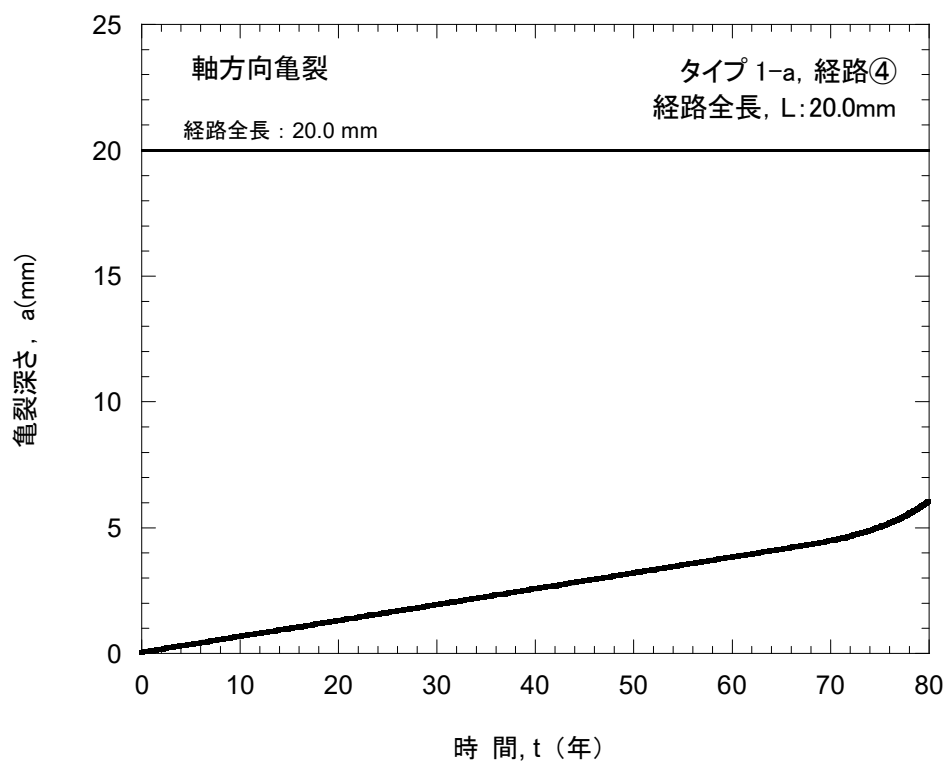


図 D-9 タイプ 2-a, 経路④の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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

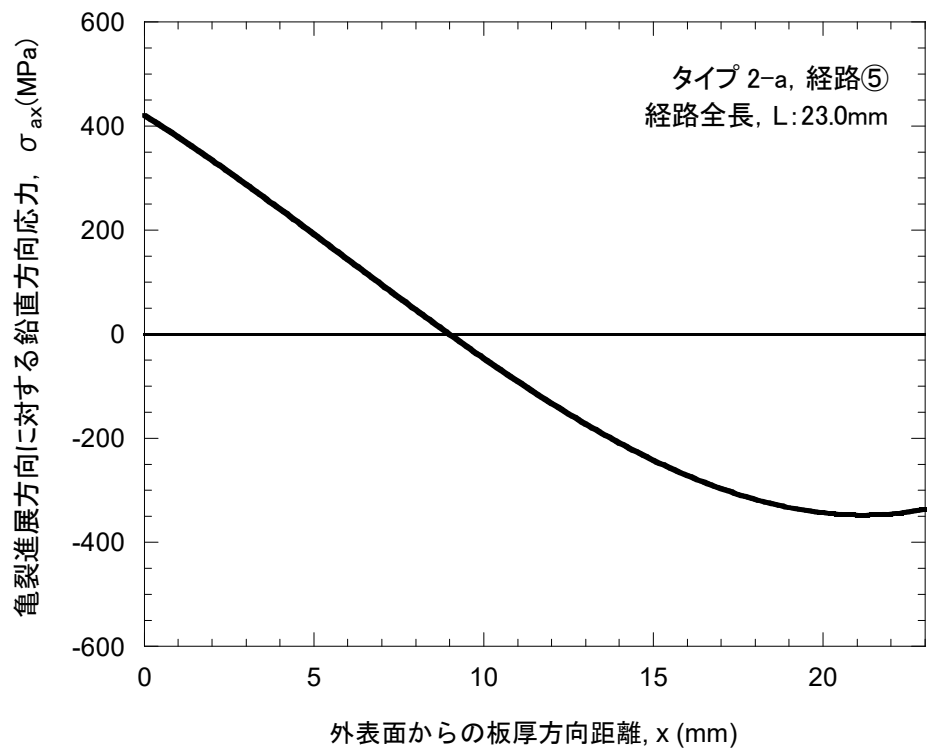
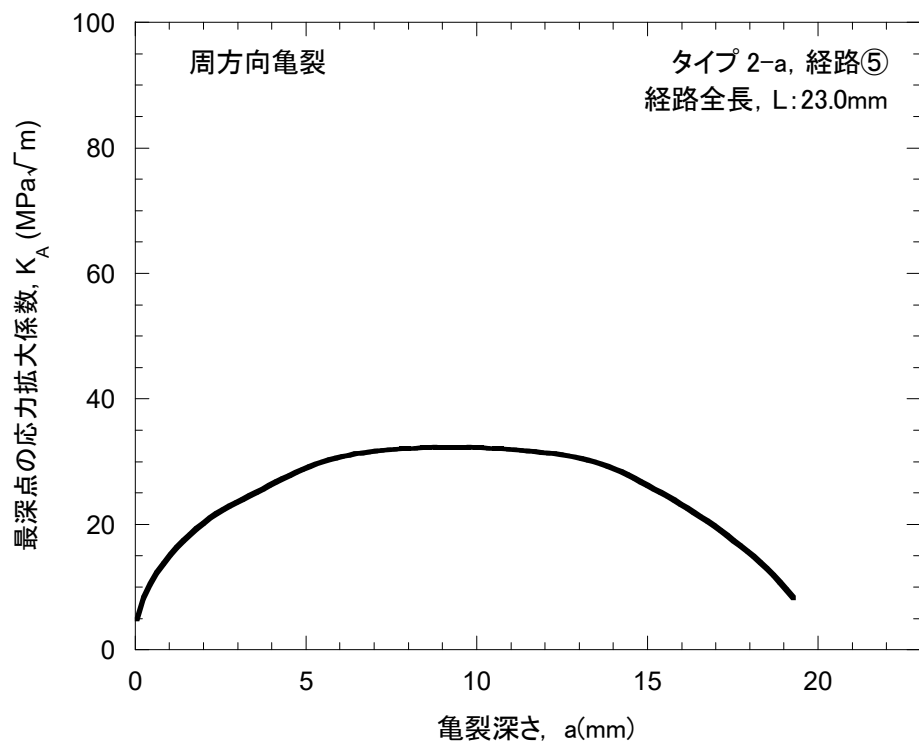
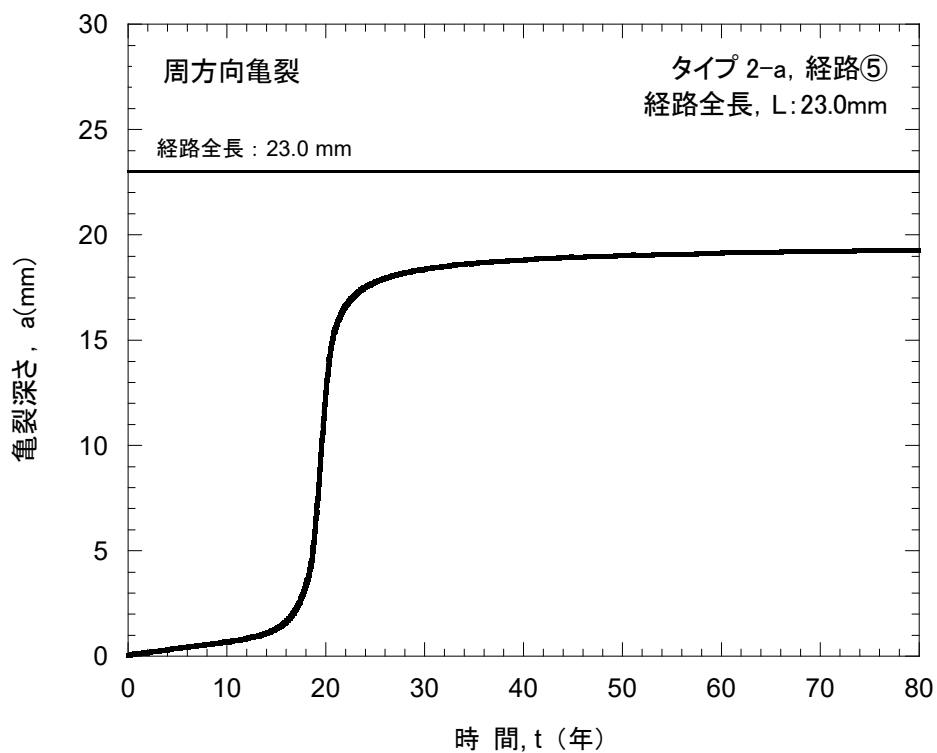


図 D-11 タイプ 2-a, 経路⑤の周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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

2.2 ハウジング/フランジ溶接部における評価

2.2.1 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（付録 C 参照）により評価した。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 :

$$\begin{aligned} da/dt &= 0 & (K \leq 0) \\ da/dt &= 2.0 \times 10^{-9} & (0 < K < 3.4) \\ da/dt &= 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161} & (3.4 \leq K \leq 57.9) \\ da/dt &= 9.2 \times 10^{-7} & (K > 57.9) \end{aligned}$$

低炭素量ステンレス鋼 :

$$\begin{aligned} da/dt &= 0 & (K \leq 0) \\ da/dt &= 2.0 \times 10^{-9} & (0 < K < 6.7) \\ da/dt &= 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} & (6.7 \leq K \leq 57.9) \\ da/dt &= 2.1 \times 10^{-7} & (K > 57.9) \end{aligned}$$

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。

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。

2.2.2 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-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。

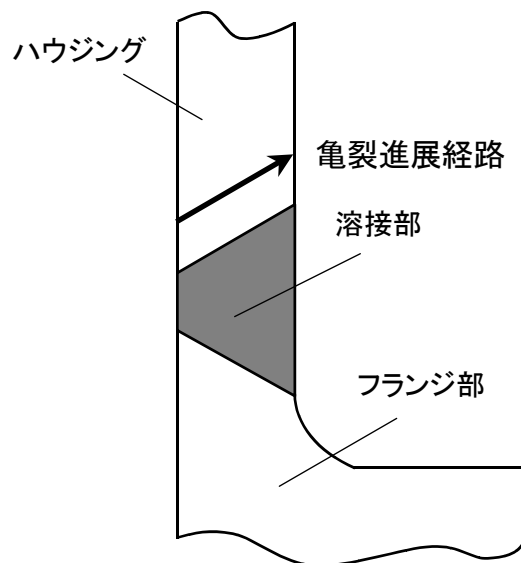


図 D-13 ハウジング/フランジ溶接部に想定した亀裂進展経路

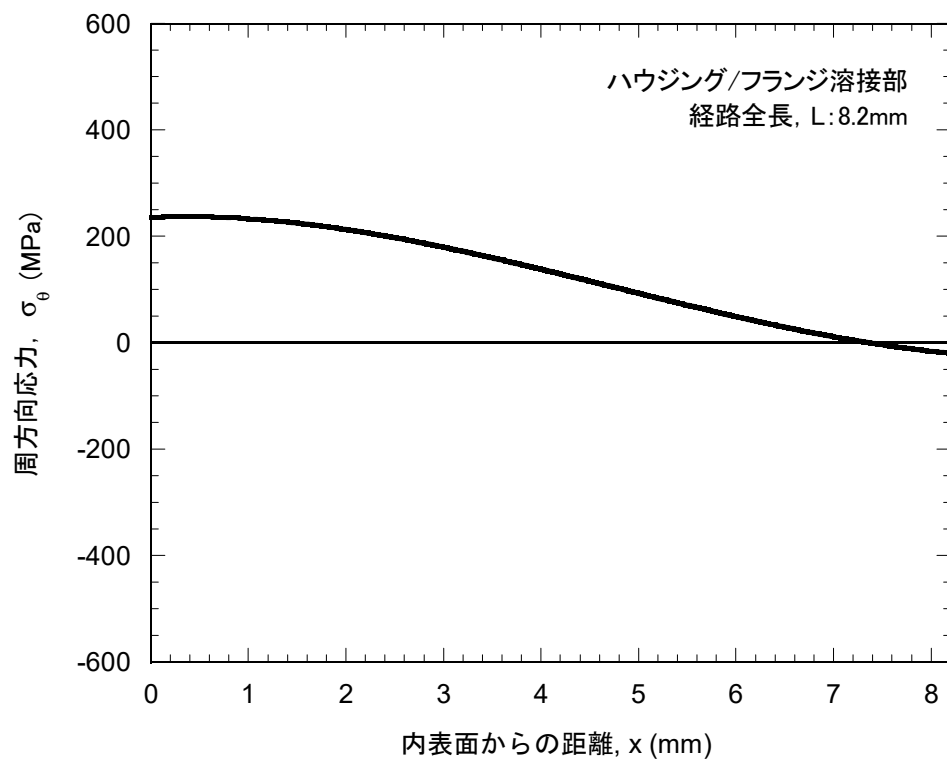
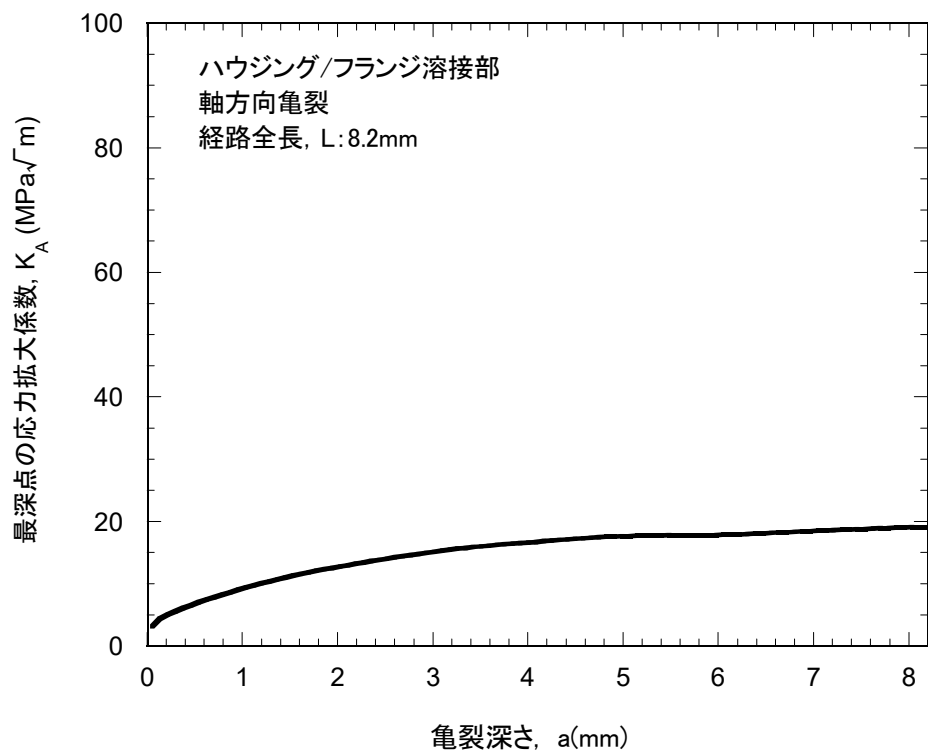
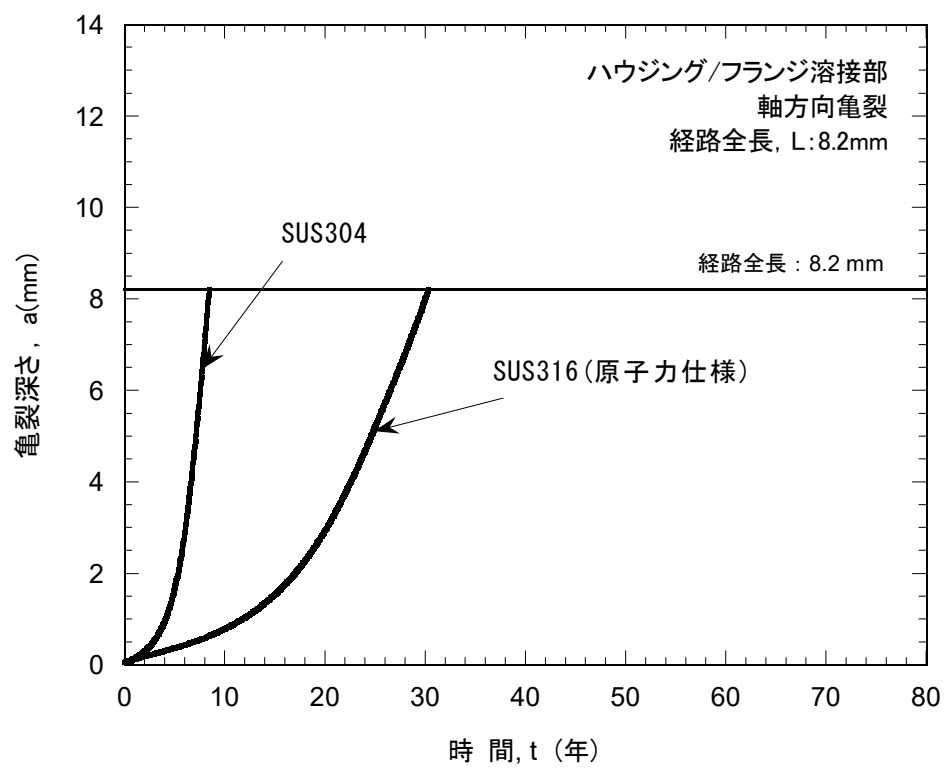


図 D-14 軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布（残留応力＋運転応力）



(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

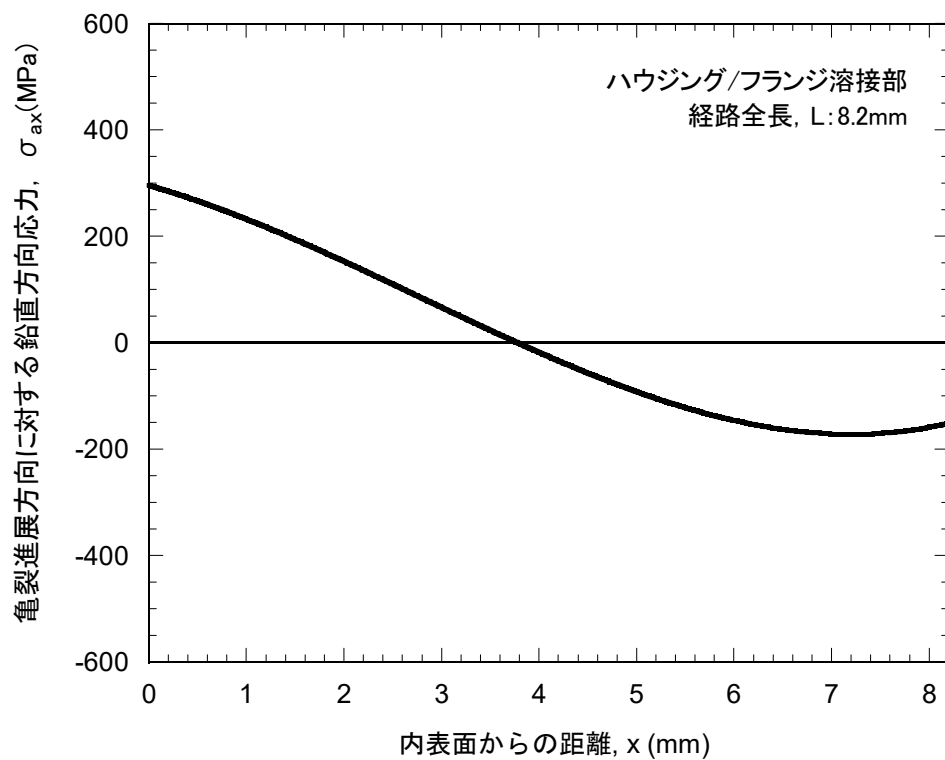
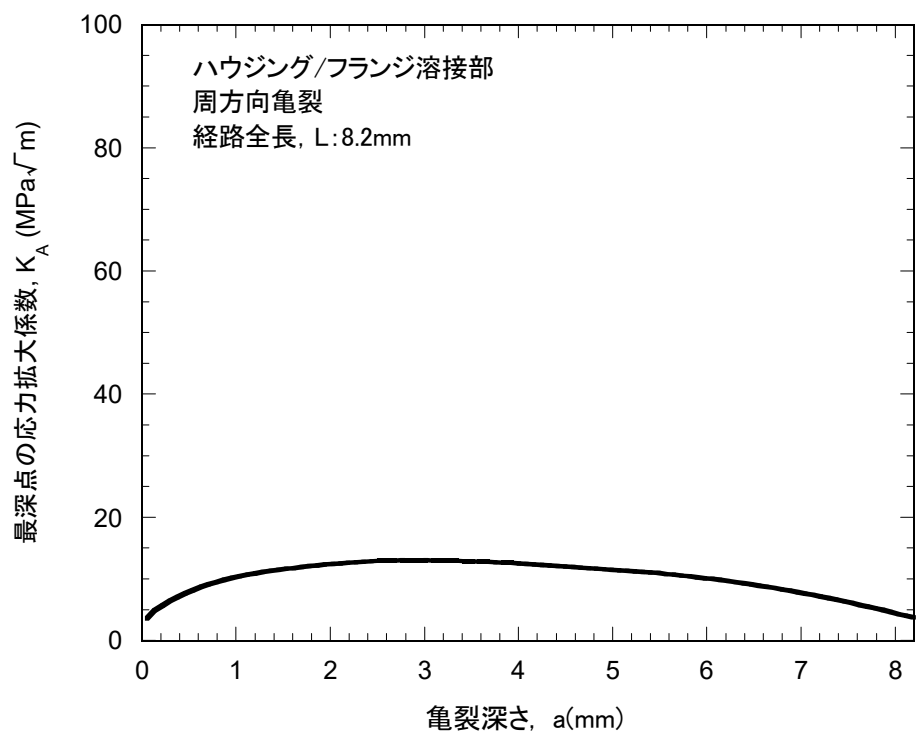
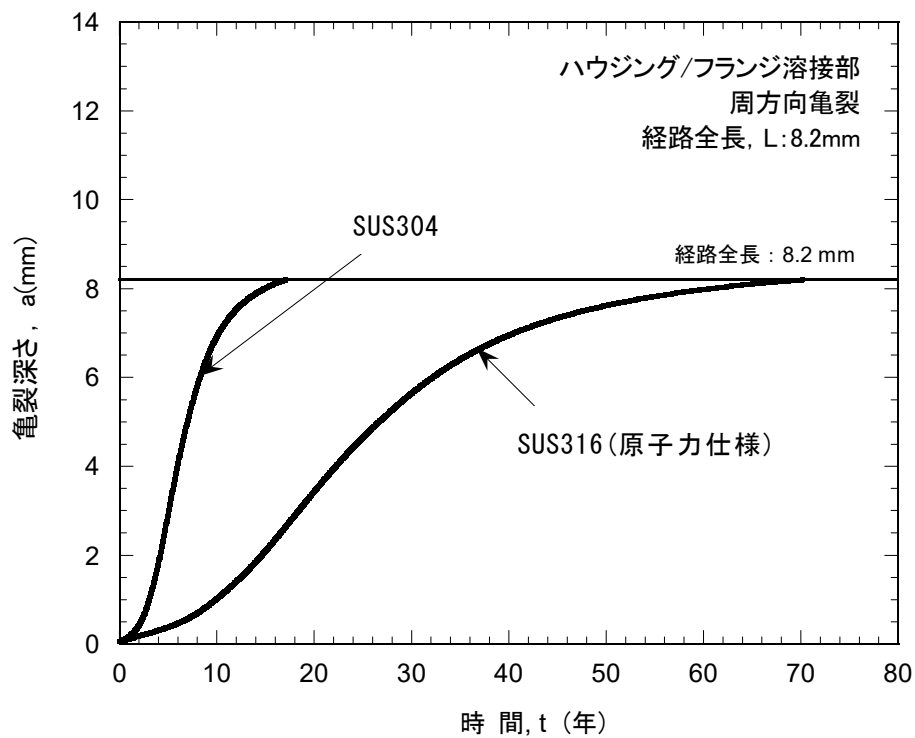


図 D-16 周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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-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

3. ABWR の ICMハウジング溶接部の SCC 亀裂進展評価

3.1 ハウジング/スタブチューブ溶接部における評価

3.1.1 評価条件

a. 評価対象

ハウジング/スタブチューブ溶接部の構造を概要図として図 D-18 に示す。ニッケル合金の 82 合金溶接金属を用いたハウジング/スタブチューブ溶接部は、軸対称形状に対して亀裂進展評価を行う。

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-18 に示す。

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（付録 C 参照）により評価した。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。

d. 応力拡大係数解

応力拡大係数の表示式は、円筒の半楕円表面亀裂に対する CEA の解¹⁾を用いた。

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

$G_0 \sim G_3$: 影響係数

a : 亀裂深さ

L : 経路全長

ここで、 $\sigma_0 \sim \sigma_3$ は下記 3 次応力分布の i 次の応力分布である。

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

e. SCC 亀裂進展特性

82 合金溶接部及び SUSF316（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 82 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。

なお、本付録においては、点検時期を評価するにあたり、82 合金の進展速度には 2.0×10^{-9} mm/s の下限値を設けた。

82 合金：溶接まま (As-Welded)

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

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

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

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

低炭素量ステンレス鋼：

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

$$da/dt = 2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 6.7)$$

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

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

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。

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。

3.1.2 評価結果

ハウジング/スタブチューブ溶接部に想定した経路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-19 に示す。経路①の軸方向亀裂進展評価結果を図 D-20 に示す。図 D-20(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-20(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路①（経路全長：21.0 mm）の場合、亀裂が経路全長に達する年数は 21.5 年である。

ハウジング/スタブチューブ溶接部に想定した経路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-21 に示す。経路②の周方向亀裂進展評価結果を図 D-22 に示す。図 D-22(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-22(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路②（経路全長：21.0 mm）の場合、80 年経過しても、亀裂は経路全長に達しない。

ハウジング/スタブチューブ溶接部に想定した経路③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-23 に示す。

経路③の周方向亀裂進展評価結果を図 D-24 に示す。図 D-24(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-24(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路③（経路全長：11.8 mm）の場合、80 年経過しても、亀裂は経路全長には達しない。

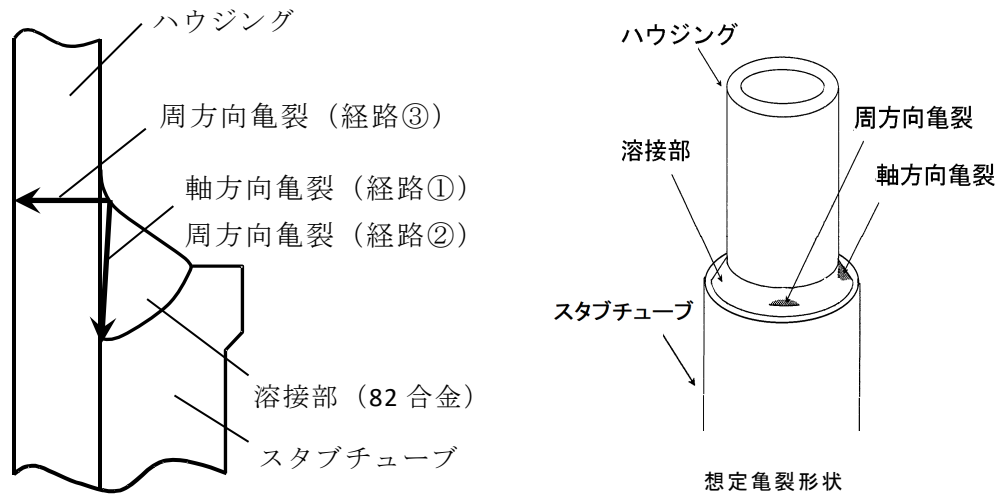


図 D-18 ハウジング/スタブチューブ溶接部に想定した亀裂進展経路

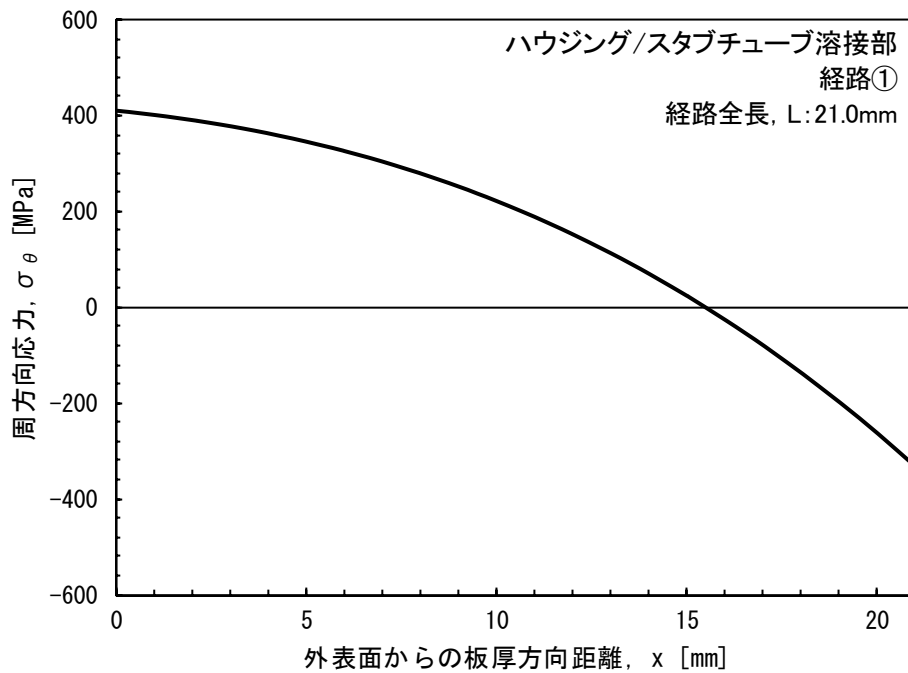
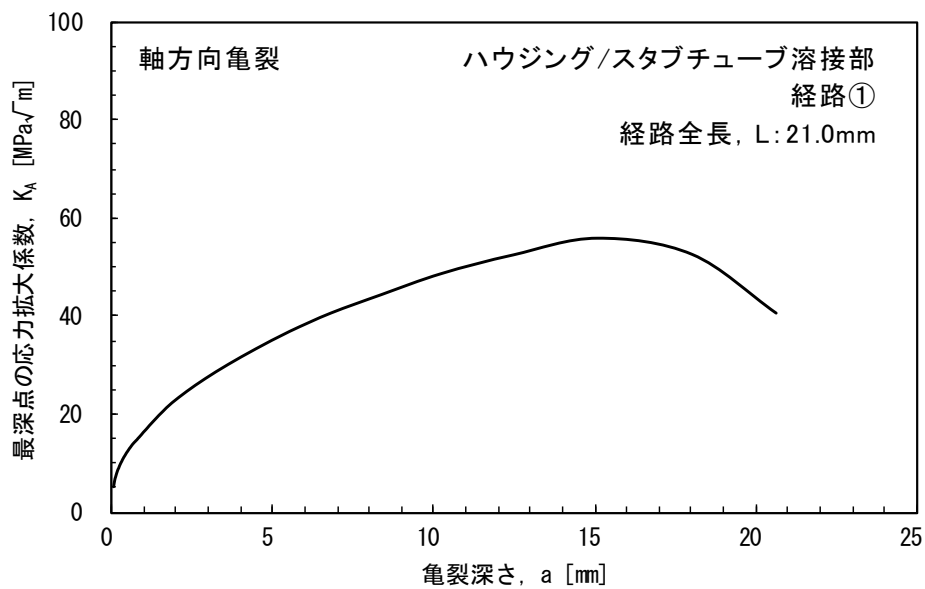
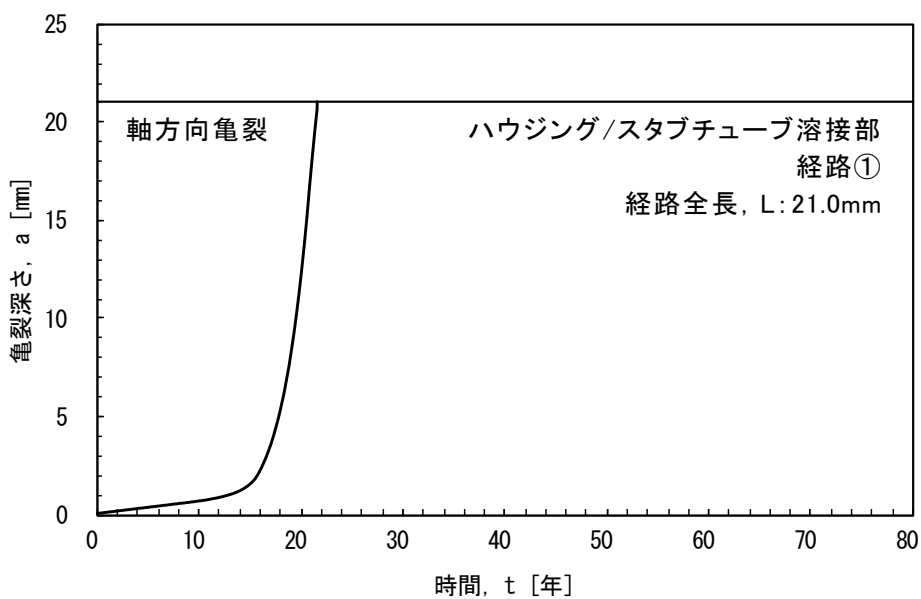


図 D-19 経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布（残留応力＋運転応力）



(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-20 経路①の軸方向亀裂進展評価結果

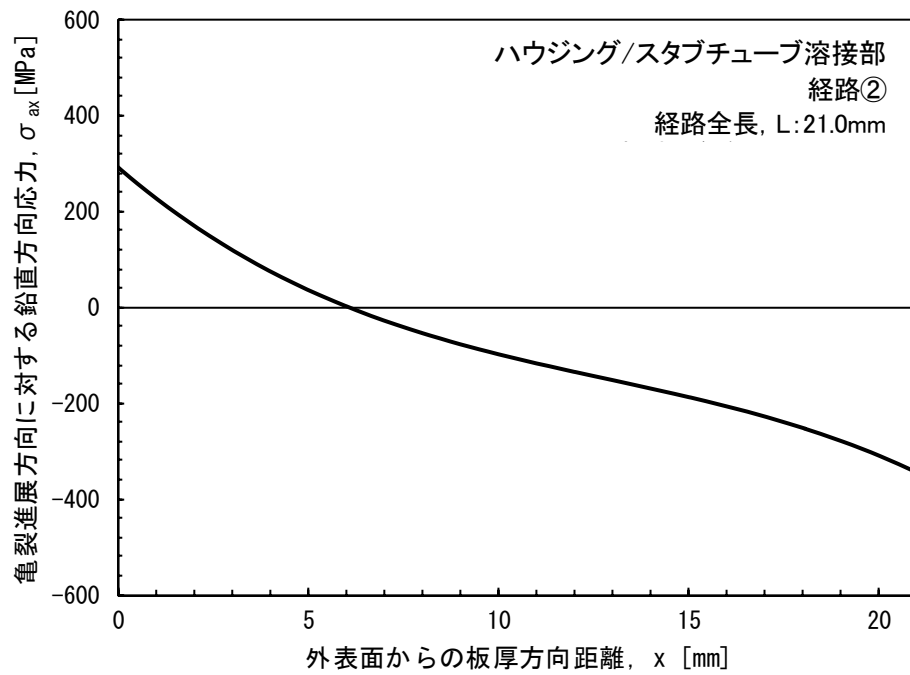
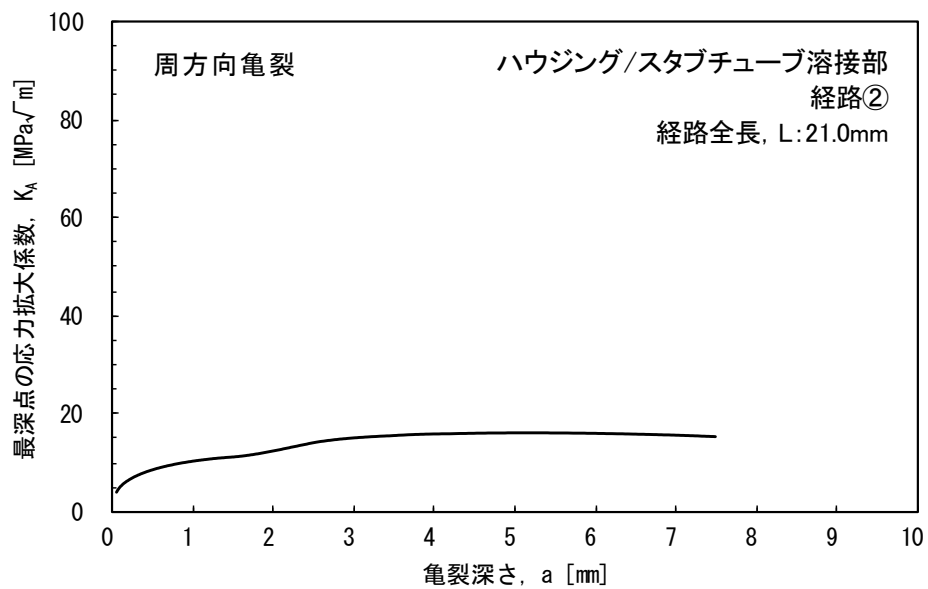
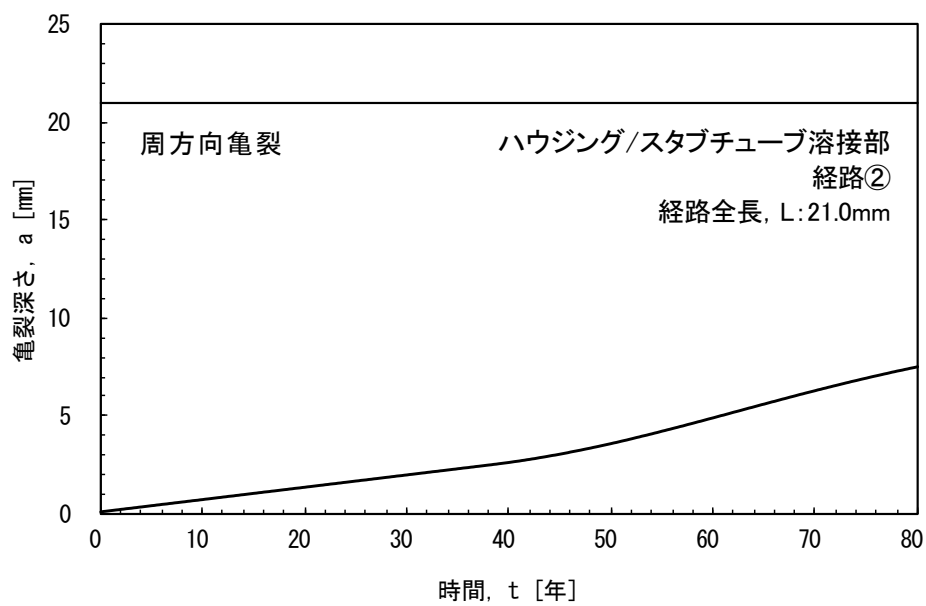


図 D-21 経路②の周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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-22 経路②の周方向亀裂進展評価結果

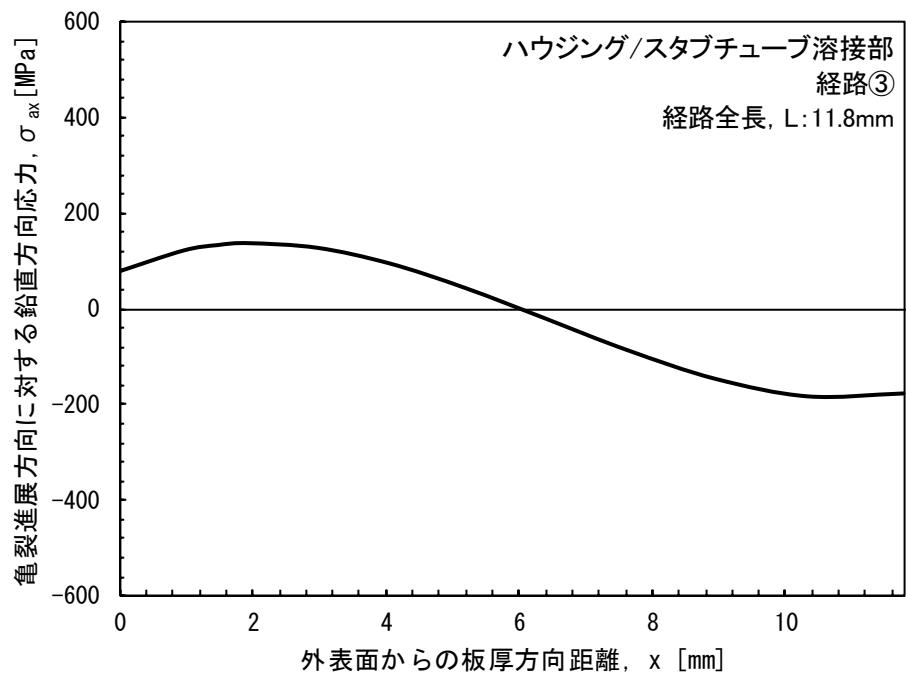
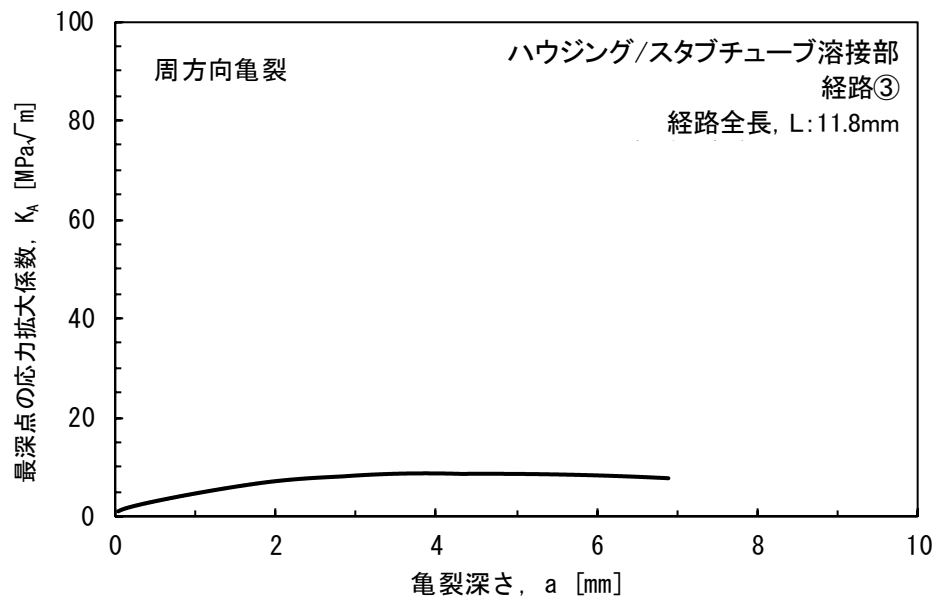
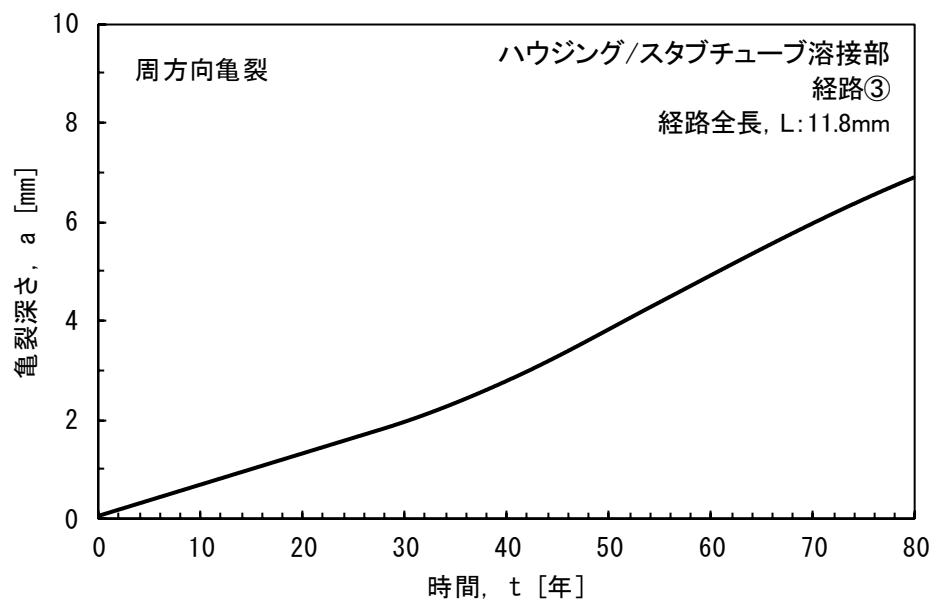


図 D-23 経路③の周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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-24 経路③の周方向亀裂進展評価結果

3.2 スタブチューブ/下鏡溶接部における評価

3.2.1 評価条件

a. 評価対象

スタブチューブ/下鏡溶接部の構造を概要図として図 D-25 に示す。ニッケル合金の 82 合金溶接金属を用いたスタブチューブ/下鏡溶接部は、軸対称形状に対して亀裂進展評価を行う。

b. 想定する亀裂進展経路

スタブチューブ/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-21 に示す。

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（付録 C 参照）により評価した。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。

d. 応力拡大係数解

応力拡大係数の表示式は、円筒の半楕円表面亀裂に対する CEA の解¹⁾を用いた。

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

$G_0 \sim G_3$: 影響係数

a : 亀裂深さ

L : 経路全長

ここで、 $\sigma_0 \sim \sigma_3$ は下記 3 次応力分布の i 次の応力分布である。

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

e. SCC 亀裂進展特性

82 合金溶接部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 82 合金の亀裂進展特性を用いた。

なお、本付録においては、点検時期を評価するにあたり、82 合金の進展速度には 2.0×10^{-9} mm/s の下限値を設けた。

82 合金：溶接後熱処理（PWHT）

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

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

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

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

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。

3.1.2 評価結果

スタブチューブ/下鏡溶接部に想定した経路④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-26 に示す。経路④の周方向亀裂進展評価結果を図 D-27 に示す。図 D-27(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-27(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路④（経路全長：23.5 mm）の場合、80 年経過しても、亀裂は経路全長には達しない。

スタブチューブ/下鏡溶接部に想定した経路⑤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-28 に示す。経路⑤の軸方向亀裂進展評価結果を図 D-29 に示す。図 D-29(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-29(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路⑤（経路全長（スタブチューブ外表面位置まで）：23.1 mm）の場合、亀裂が経路全長に達する年数は 73.5 年である。

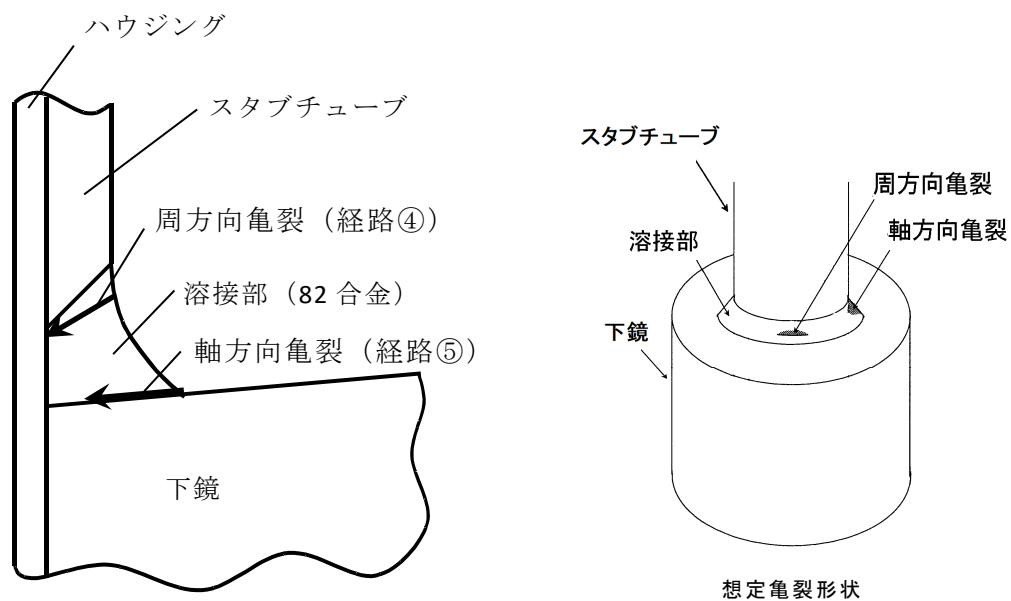


図 D-25 スタブチューブ/下鏡溶接部に想定した亀裂進展経路

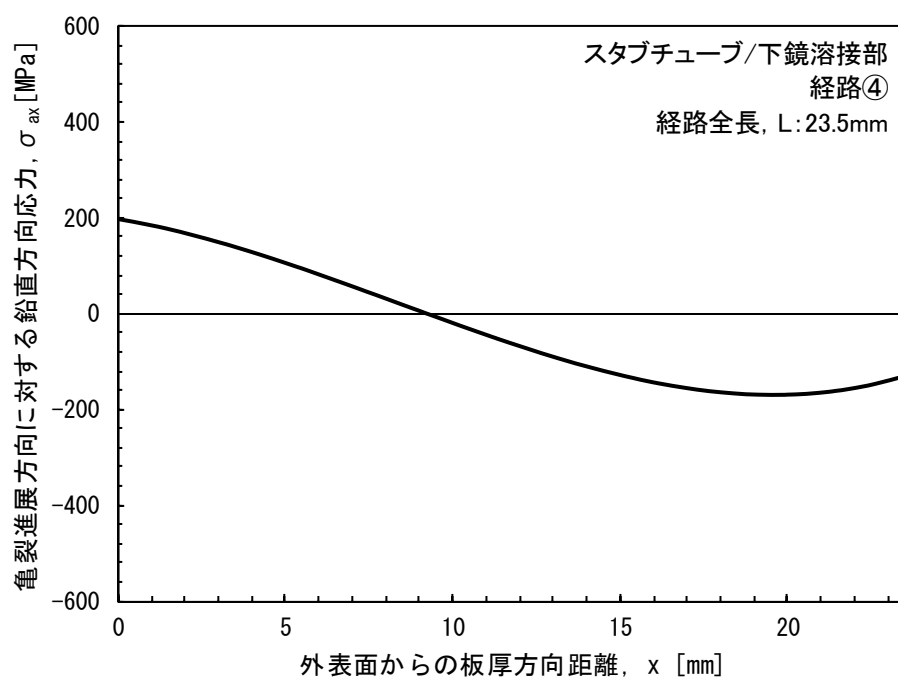
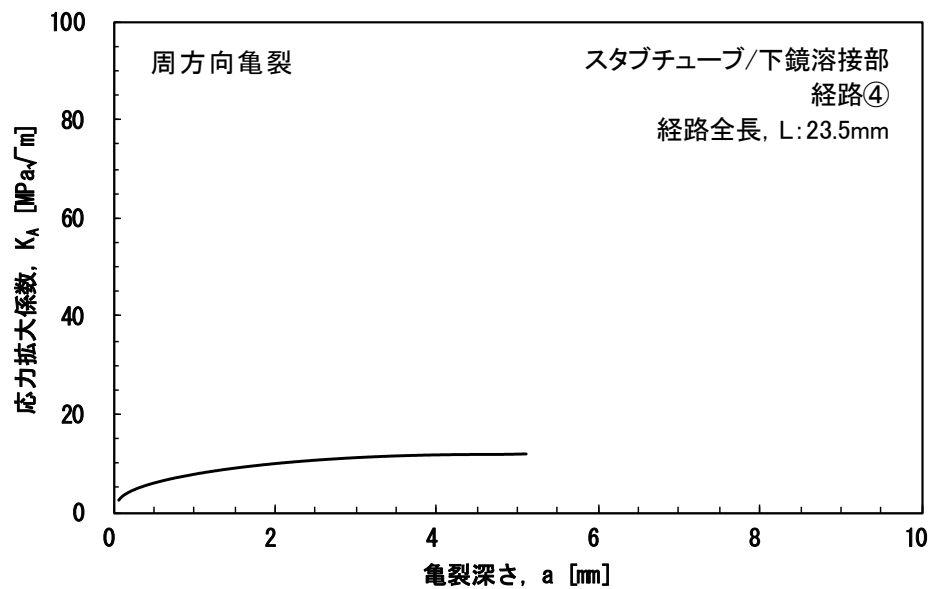
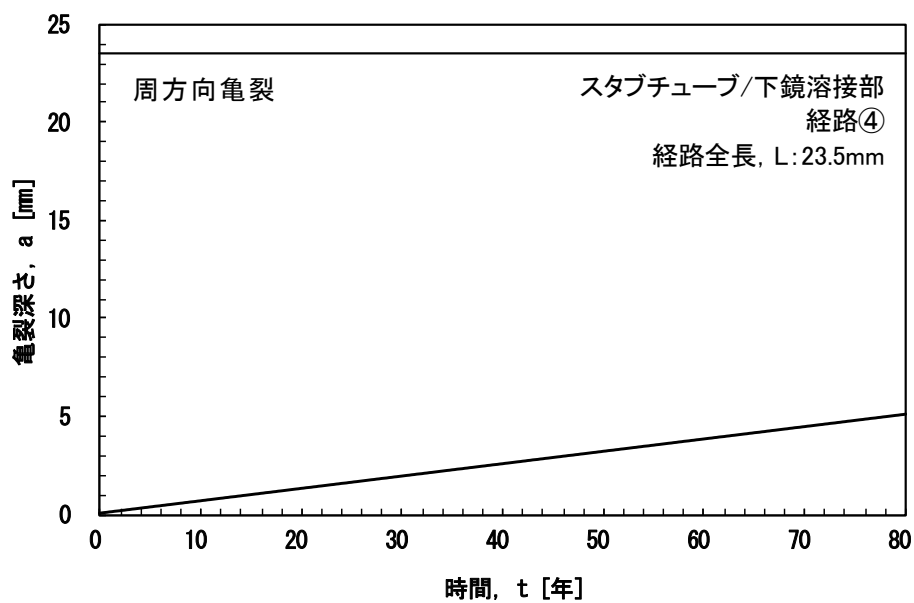


図 D-26 経路④の周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向応力分布
(残留応力+運転応力)



(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-27 経路④の周方向亀裂進展評価結果

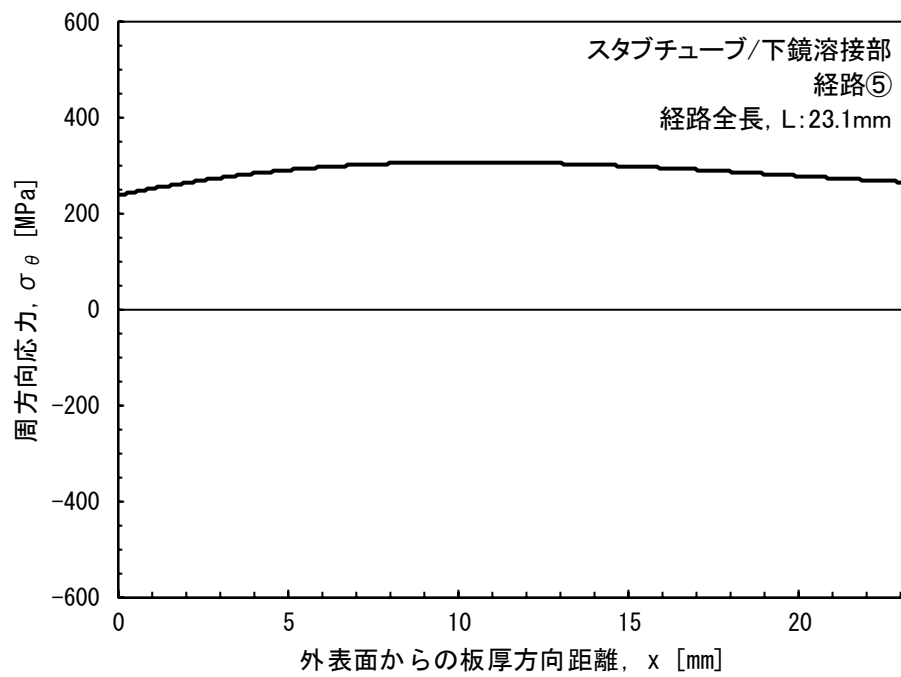
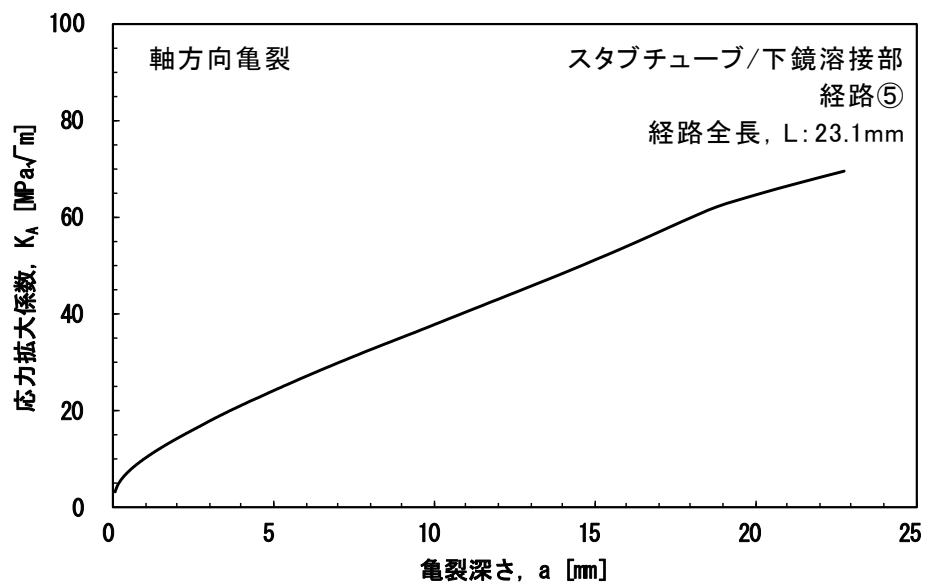
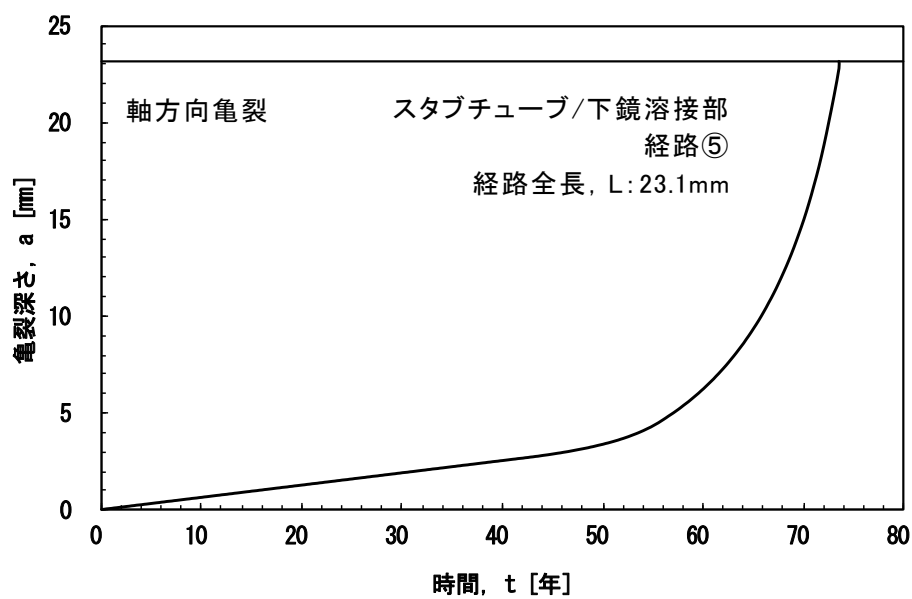


図 D-28 経路⑤の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布（残留応力＋運転応力）



(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-29 経路⑤の軸方向亀裂進展評価結果

4. まとめ

4.1 BWR の ICM ハウジング溶接部

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 年で経路全長に達する評価となる。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、経路全長に達しない。

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 年で経路全長に達する。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 年で経路全長に達する評価となる。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、周方向亀裂が先に経路全長に達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 年で経路全長に達する評価となる。

4.2 ABWR の ICM ハウジング溶接部

ハウジング/スタブチューブ溶接部及びハウジング/下鏡溶接部の亀裂進展評価結果を、表 D-2 に示す。

ハウジング/スタブチューブ溶接部（82 合金及び低炭素量ステンレス鋼）の場合、軸方向亀裂は約 21 年で経路全長に達し、周方向亀裂は 80 年経過しても経路全長に達しない評価となる。

スタブチューブ/下鏡溶接部（82 合金）の場合、軸方向亀裂は約 73 年で経路全長に達し、周方向亀裂は 80 年経過しても経路全長に達しない評価となる。

表 D-1 ICM ハウジング溶接部における亀裂進展評価結果（BWR）

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, L	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。

表 D-2 ICM ハウジング溶接部における亀裂進展評価結果（ABWR）

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, L	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	82 合金 (As-Welded)	軸方向亀裂	21.0 mm	21.5 年
	経路②		周方向亀裂	21.0 mm	80 年以上
	経路③*	低炭素量 ステンレス鋼	周方向亀裂	11.8 mm	80 年以上
スタブチューブ/ 下鏡溶接部	経路④	82 合金 (PWHT)	周方向亀裂	23.5 mm	80 年以上
	経路⑤		軸方向亀裂	23.1 mm	73.5 年

* 強度評価の観点から、経路③における周方向 SCC 亀裂を想定。

参考文献

- 1) Chapuliot, S., “Formulaire de KI pour les tubes comportant un defect de surface semi-elliptique longitudinal ou circonferentiel, inteme ou exteme, ”Rapport CEA-R-5900, (2000).

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バウンダリの確保（耐圧機能）の維持に必要なハウジング溶接部の厚さ（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

BWR の ICM ハウジングのハウジング取付け溶接部、ハウジング/フランジ溶接部及び ABWR のハウジング/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

ハウジング溶接部は、材料が 600 系のニッケル合金又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、BWR の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、前者は J 溶接の外周部起点、後者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、BWR の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 BWR のハウジング取付け溶接部及び ABWR のハウジング/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。

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

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

ここで、 σ_f ：流動応力 = $2.7Sm$ （日本機械学会 維持規格に示される流動応力）

Sm ：設計応力強さ（日本機械学会 設計・建設規格）

NCF600：164 MPa

SUS316：119 MPa

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)
 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 BWR のハウジング/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 = 2.75 σ_m (日本機械学会 維持規格に示される流動応力)

σ_m : 設計応力強さ = 115 MPa (日本機械学会 設計・建設規格 : 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 (日本機械学会 維持規格)

BWR のハウジング取付け溶接部 (J 溶接, 肉盛座スタブ) , ハウジング/フランジ溶接部及び ABWR のハウジング/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-6 に示す。

2.3 許容残存厚さ

図 E-2～図 E-6 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-6 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 BWR のハウジング取付け溶接部及び ABWR のハウジング/スタブチューブ溶接部, スタブチューブ/下鏡溶接部は地震荷重の曲げモーメント (M) , BWR のハウジング/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。

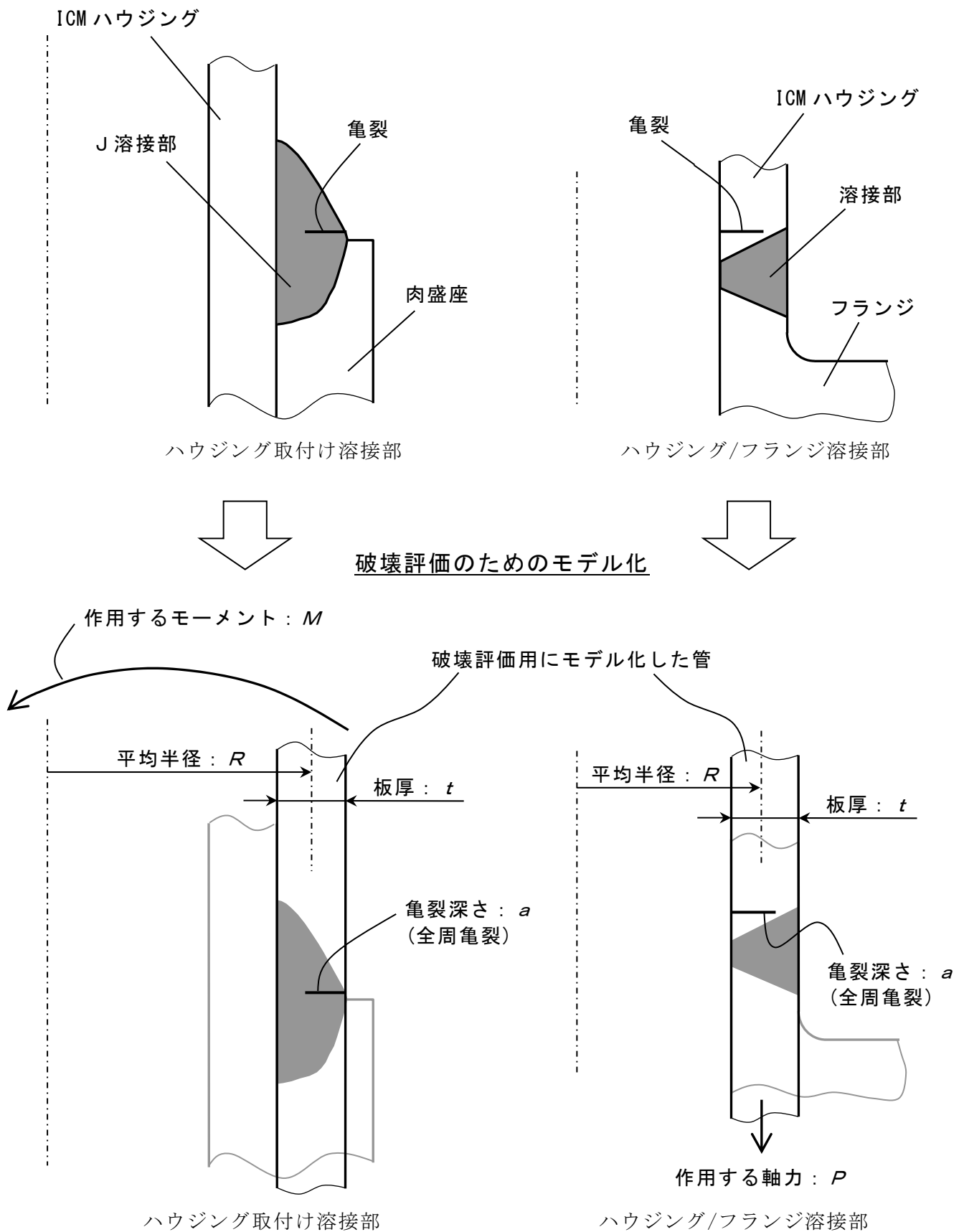


図 E-1 破壊評価に用いる溶接部のモデル化の概念図

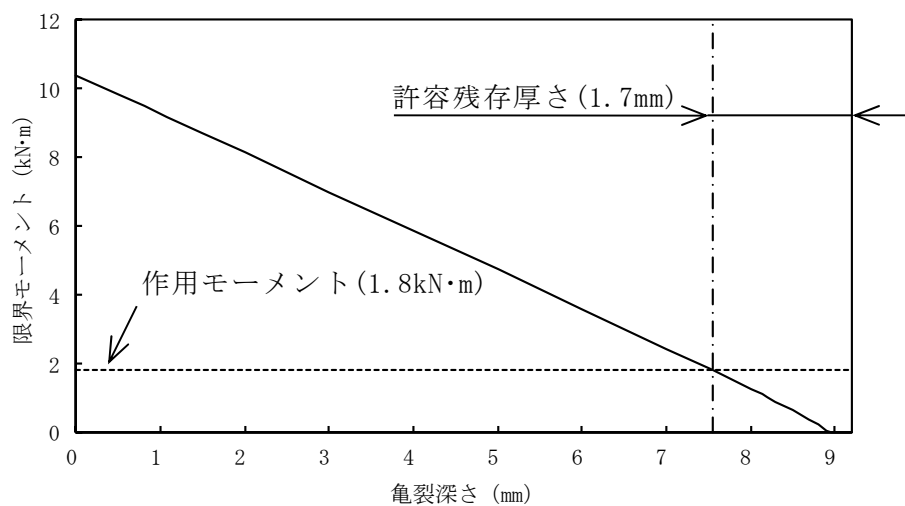


図 E-2 BWR のハウジング取付け溶接部(J 溶接)の亀裂深さと限界荷重の関係

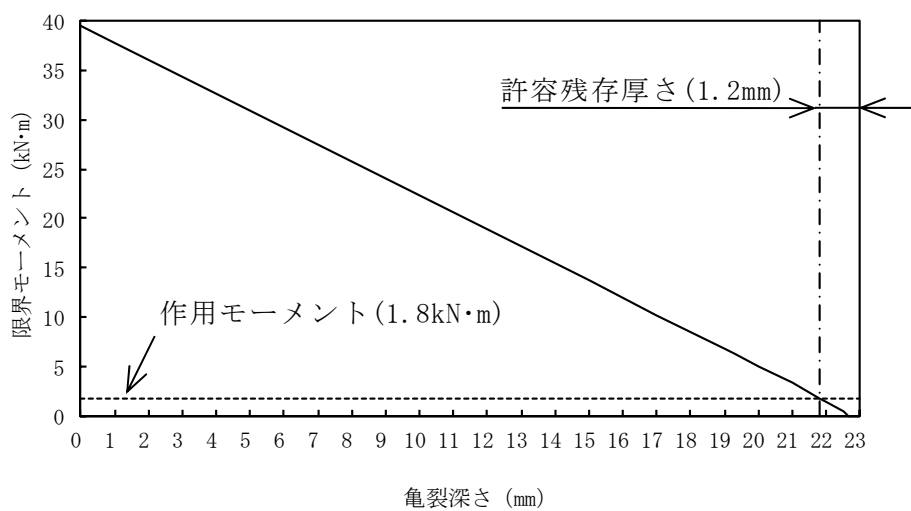


図 E-3 BWR のハウジング取付け溶接部(肉盛座スタブ)の亀裂深さと限界荷重の関係

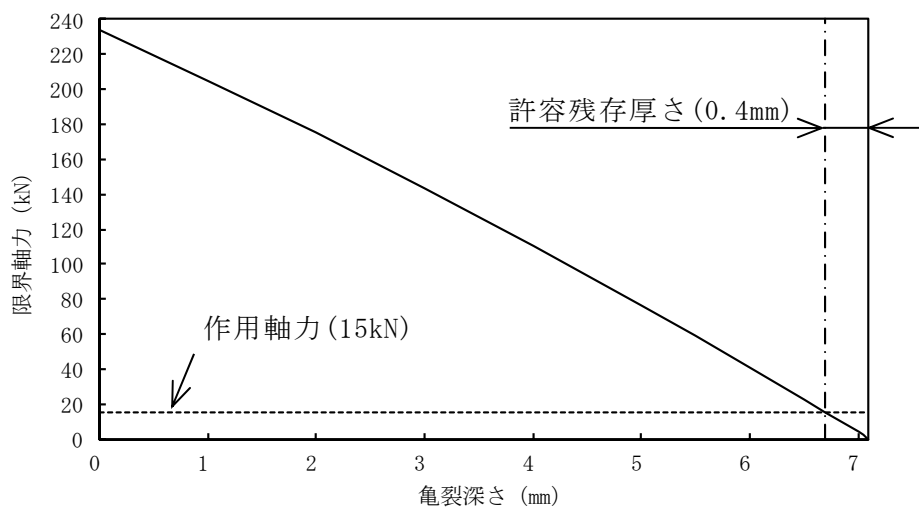


図 E-4 BWR のハウジング/フランジ溶接部の亀裂深さと限界荷重の関係

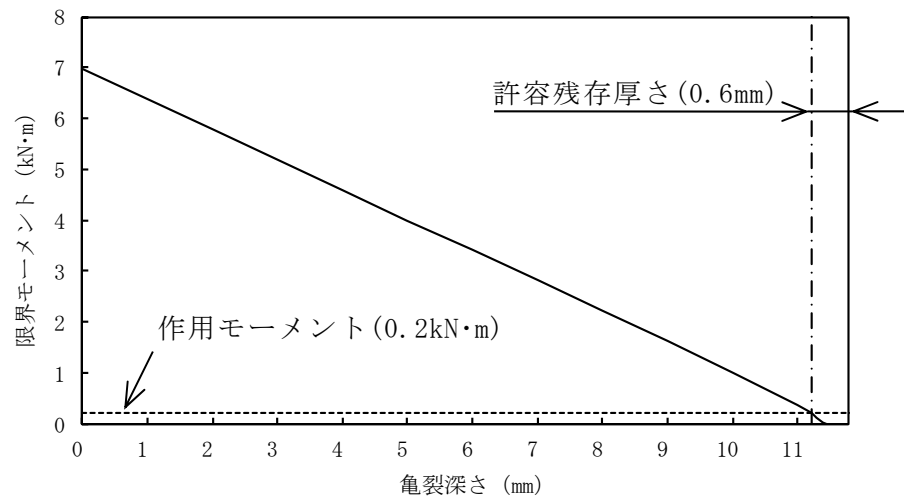


図 E-5 ABWR のハウジング/スタブチューブ溶接部の亀裂深さと限界荷重の関係

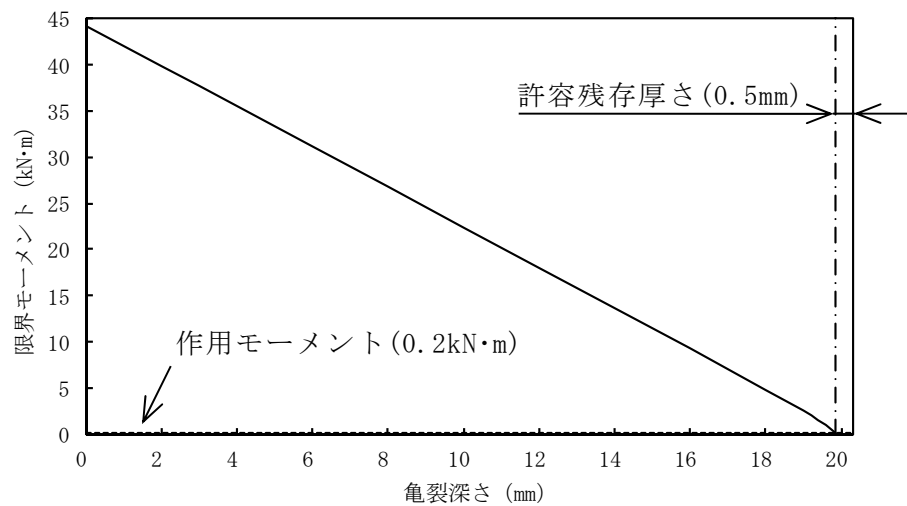


図 E-6 ABWR のスタブチューブ/下鏡溶接部の亀裂深さと限界荷重の関係

表 E-1 ICM ハウジング溶接部の許容残存厚さ

プラント	評価位置	作用荷重	許容残存厚さ
BWR	ハウジング取付け溶接部 (J 溶接)	$M = 1.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$	1.7 mm
	ハウジング取付け溶接部 (肉盛座スタブ)	$M = 1.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$	1.2 mm
	ハウジング/フランジ溶接部	$P = 15 \text{ kN}$	0.4 mm
ABWR	ハウジング/スタブチューブ溶接部	$M = 0.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$	0.6 mm
	スタブチューブ/下鏡溶接部	$M = 0.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$	0.5 mm

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。

各溶接部に想定する周方向亀裂進展経路を、図 E-7 に示す。（付録 D 参照）

BWR のハウジング取付け溶接部の J 溶接及び ABWR のハウジング/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。BWR の肉盛座スタブは、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。

BWR のハウジング/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 に示す手法で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。

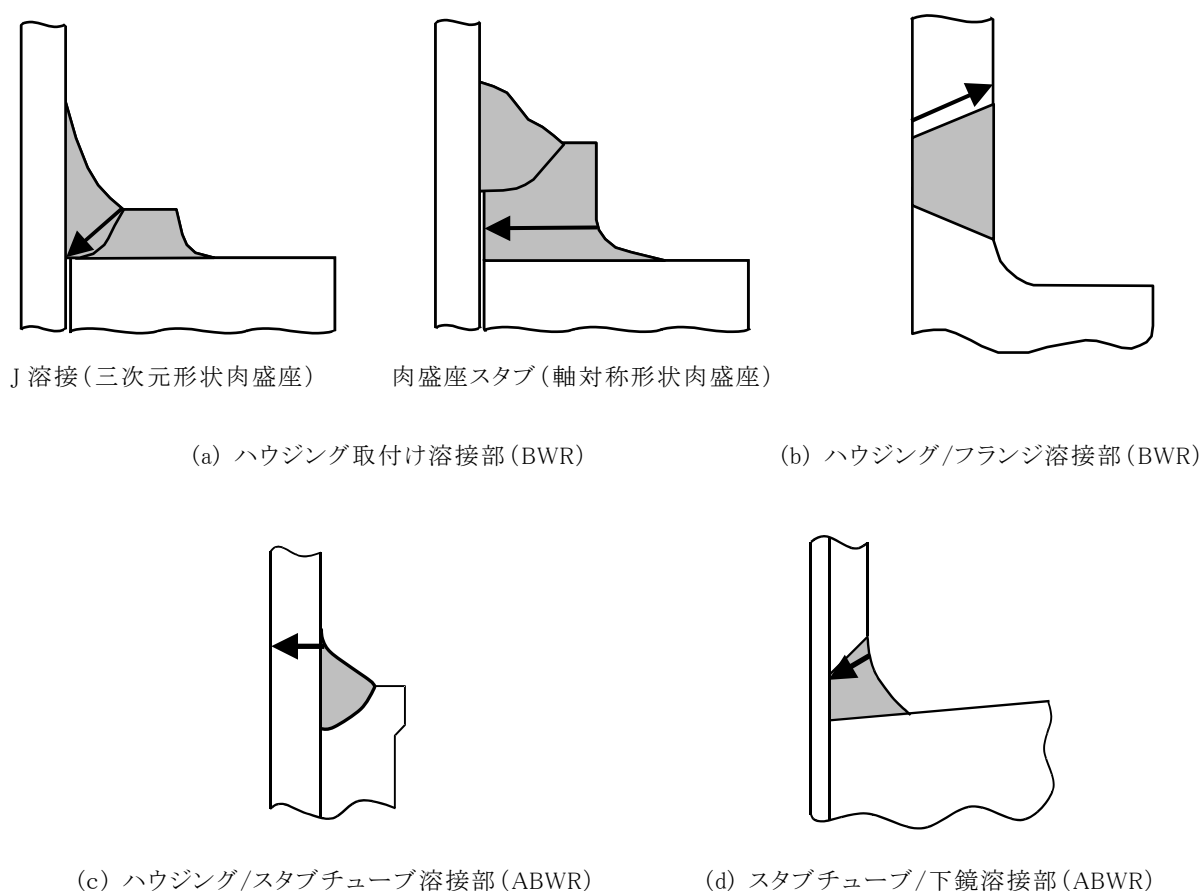


図 E-7 ICM ハウジングに想定する周方向亀裂進展経路

表 E-2 ICM ハウジング溶接部の破壊評価に用いる周方向亀裂深さ

プラント	評価位置	破壊評価に用いる 周方向亀裂深さ	備 考
BWR	ハウジング取付け溶接部 (J 溶接部)	1.5 mm	軸方向亀裂貫通 1 年後の亀裂深さ
	ハウジング取付け溶接部 (肉盛座スタブ)	19.3 mm	停留する亀裂深さ
	ハウジング/フランジ 溶接部	6.9 mm	1mm 到達から 7 年 後の亀裂深さ
ABWR	ハウジング/スタブチューブ溶接部	1.5 mm	軸方向亀裂貫通 1 年後の亀裂深さ
	スタブチューブ/下鏡溶接部	3.2 mm	軸方向亀裂貫通 1 年後の亀裂深さ

3.2 破壊評価

破壊評価は 2.1 項及び 2.2 項に示す手法により行う。

評価モデルでの亀裂深さは、表 E-2 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（図 E-8 参照）とする。なお、保守的に全周亀裂を仮定する。各評価部位の限界荷重は、式(1)～(5)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-3 に示す。

表 E-3 に示すように、評価位置に作用するモーメント M 及び軸力 P は、限界モーメント $M_c(SF)$ 及び限界軸力 $P_c(SF)$ より小さく、SCC により亀裂が生じて、地震時に不安定破壊を起こすことはない。

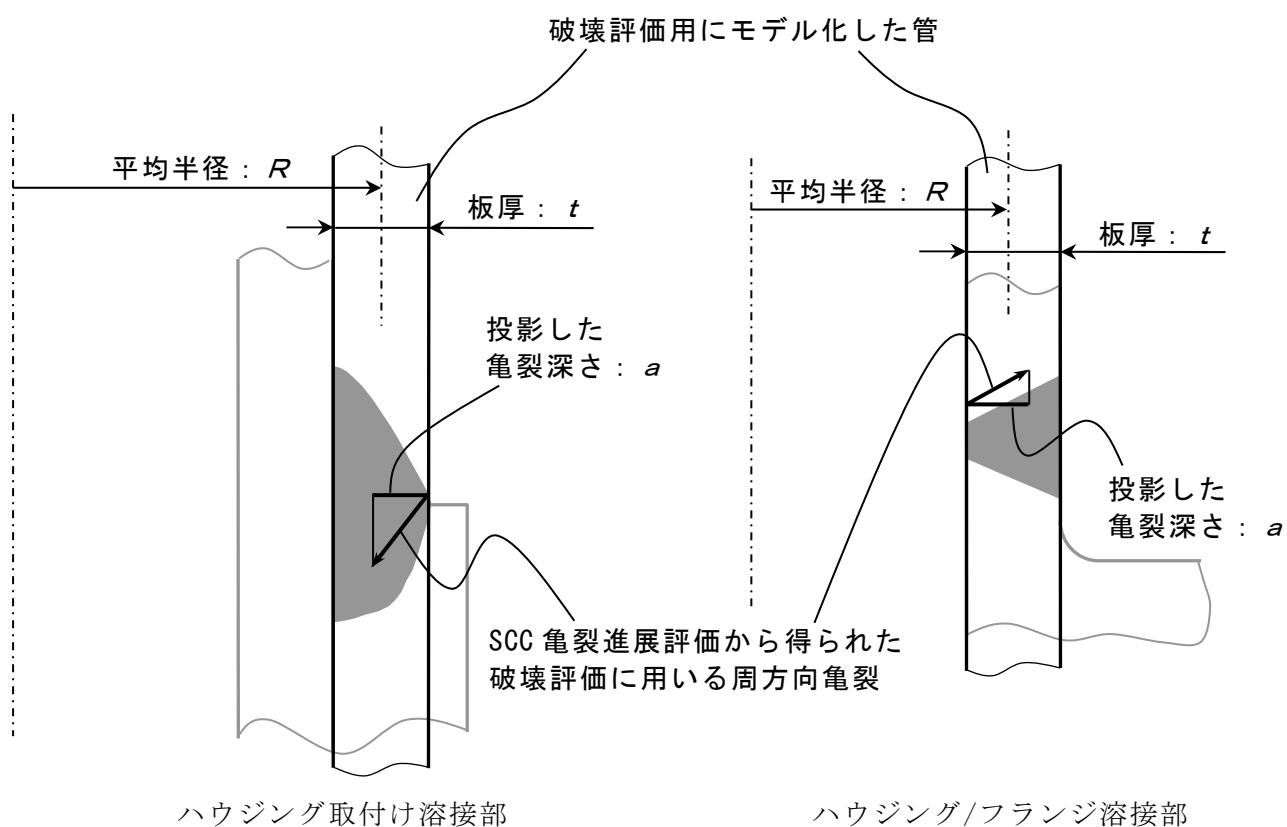


図 E-8 破壊評価に用いる投影亀裂深さ

表 E-3 ICM ハウジング溶接部の破壊評価結果

プラント	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)
BWR	ハウジング取付け溶接部 (J 溶接)	1.1 mm	$M_c(SF)=9.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M = 1.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$	5.1
	ハウジング取付け溶接部 (肉盛座スタブ)	19.3 mm	$M_c(SF)=6.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M = 1.8 \text{ kN}\cdot\text{m}$	3.5
	ハウジング/フランジ 溶接部	6.0 mm	$P_c(SF)=40.8 \text{ kN}$	$P = 15 \text{ kN}$	2.7
ABWR	ハウジング/ スタブチューブ溶接部	1.5 mm	$M_c(SF)=6.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M = 0.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$	30.5
	スタブチューブ/ 下鏡溶接部	2.8 mm	$M_c(SF)=38.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$	$M = 0.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$	191.0

4. まとめ

- (1) ICM ハウジングの溶接部の許容残存厚さは、BWR の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 であり, ABWR のハウジング/スタブチューブ溶接部で 0.6mm, スタブチューブ/下鏡溶接部で 0.5mm である。
- (2) VT-2 により漏えいが認められなかった BWR の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 5 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 3 倍の裕度を有する。
- (4) VT-2 により漏えいが認められなかった ABWR のハウジング/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 10.4mm) であり, 許容残存厚さに対して約 30 倍の裕度を有する。また, 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 2.8mm (残存厚さ 17.6mm) であり, 許容残存厚さに対して約 190 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溶接部は, Ss 地震の場合でも不安定破壊を起こすことがなく, バウンダリの確保 (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.

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、BWR（1100MWe）のICMハウジングを対象として、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26MPa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も、安全機能への影響はない。

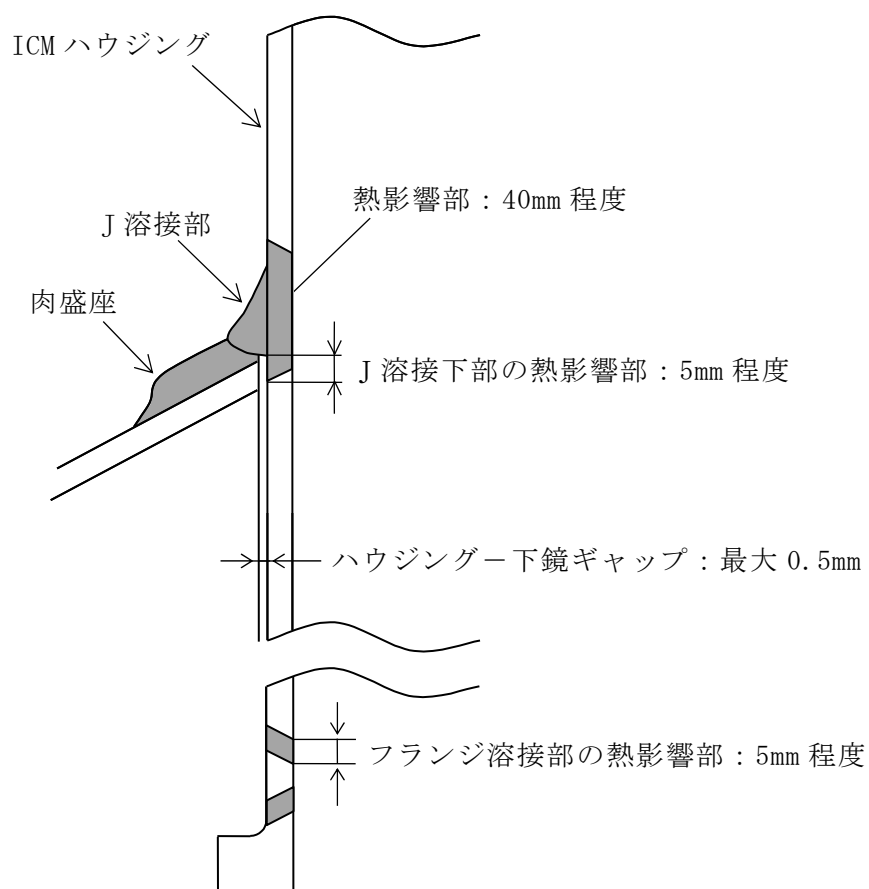


図 F-1 ICM ハウジングに想定される SCC 領域

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，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。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 μ 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⁾

<u>CBB 試験条件</u>	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⁾

<u>WJP 試験条件</u>	圧力：60MPa 噴射角度：90°	噴射距離：160mm 噴射時間：40min/m (10min/m×4 回)
<u>CBB 試験条件</u>	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

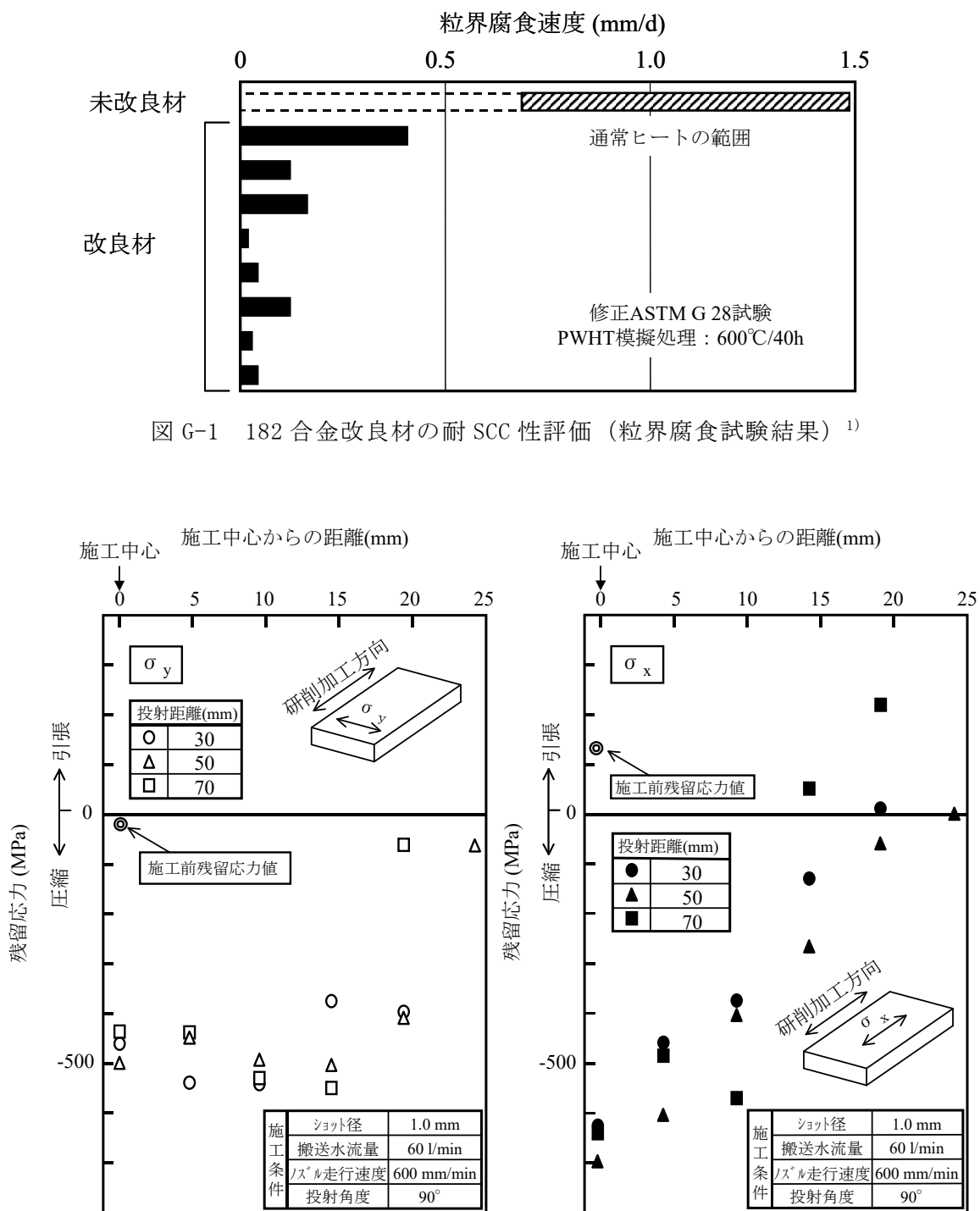


図 G-2 182 合金のショットピーニングによる応力改善効果²⁾

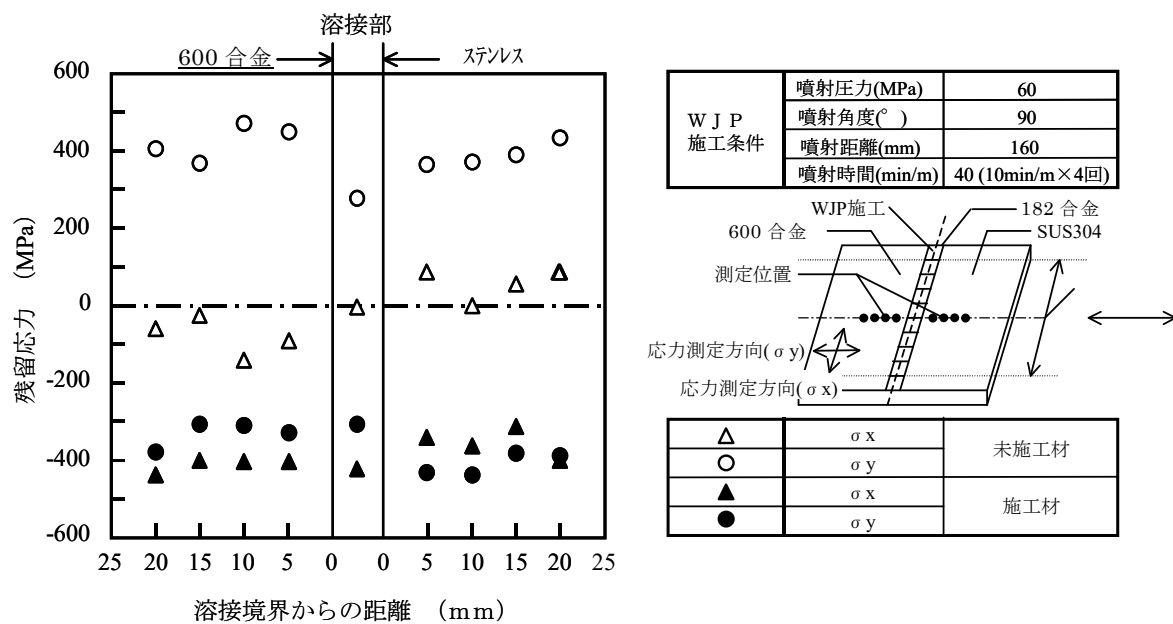


図 G-3 ウォータジェットピーニングによる応力改善効果²⁾

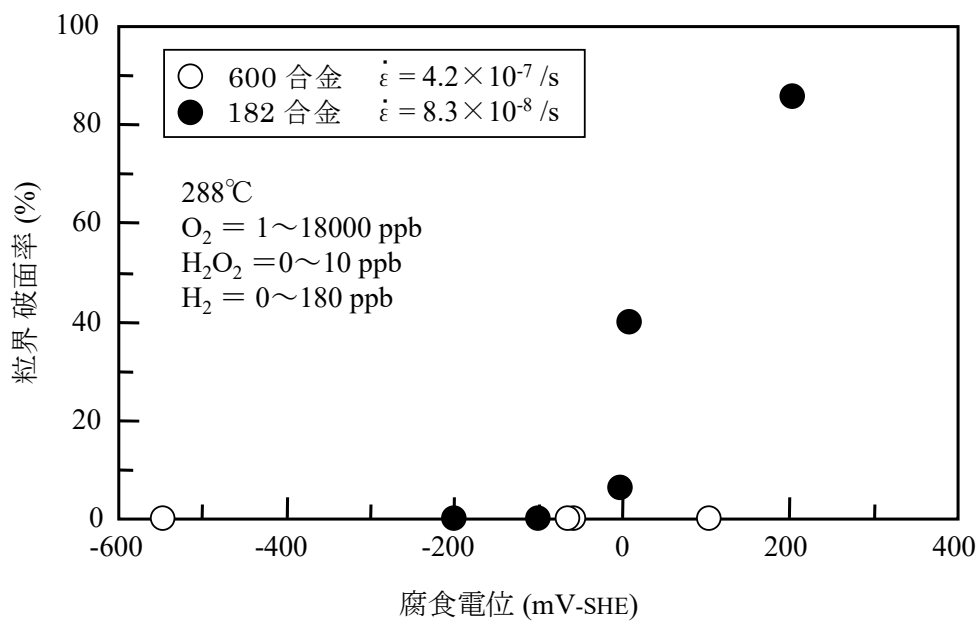


図 G-4 粒界破面率の腐食電位依存性測定結果³⁾

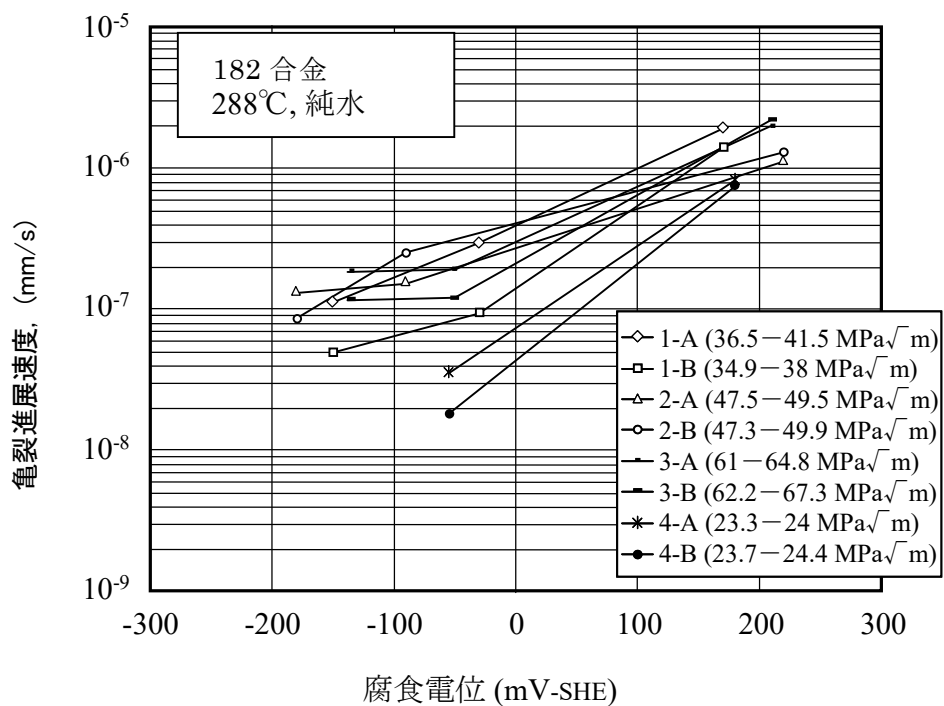


図 G-5 182 合金の亀裂進展速度の腐食電位依存性測定結果 ⁴⁾

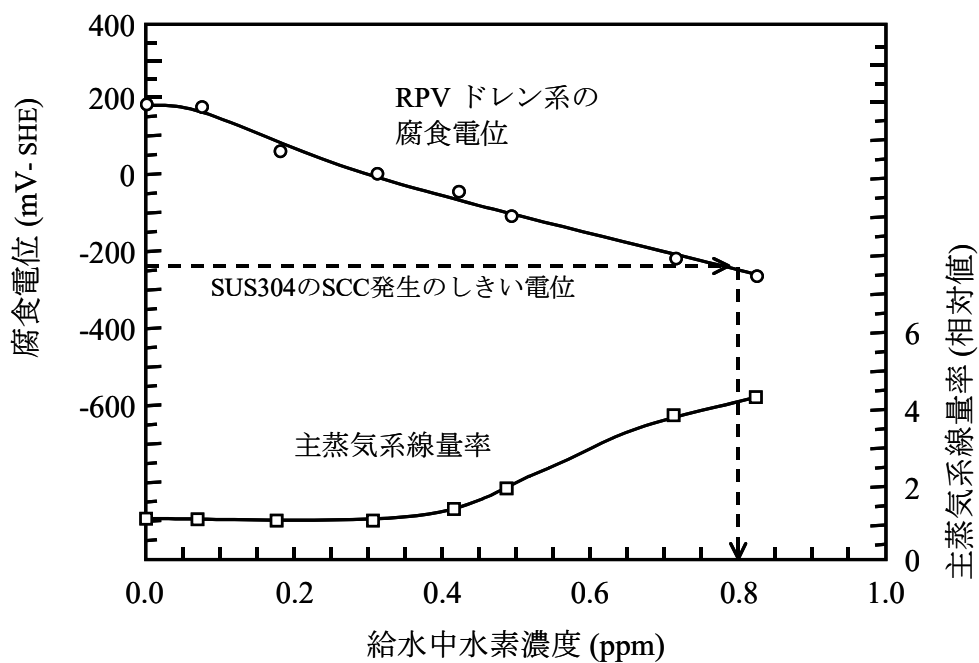


図 G-6 国内 BWR プラントのボトムドレン系で測定した腐食電位の
水素注入量依存性 ⁵⁾

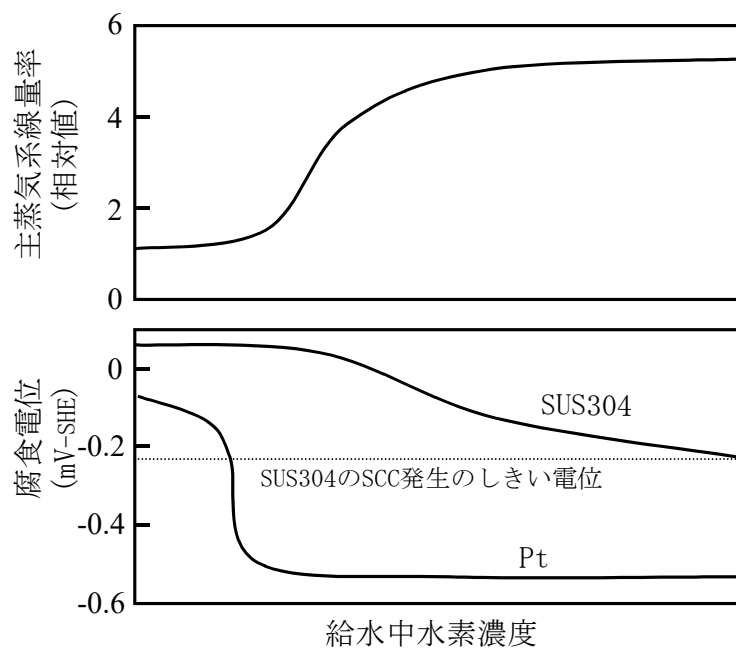


図 G-7 貴金属注入概念図 ⁶⁾

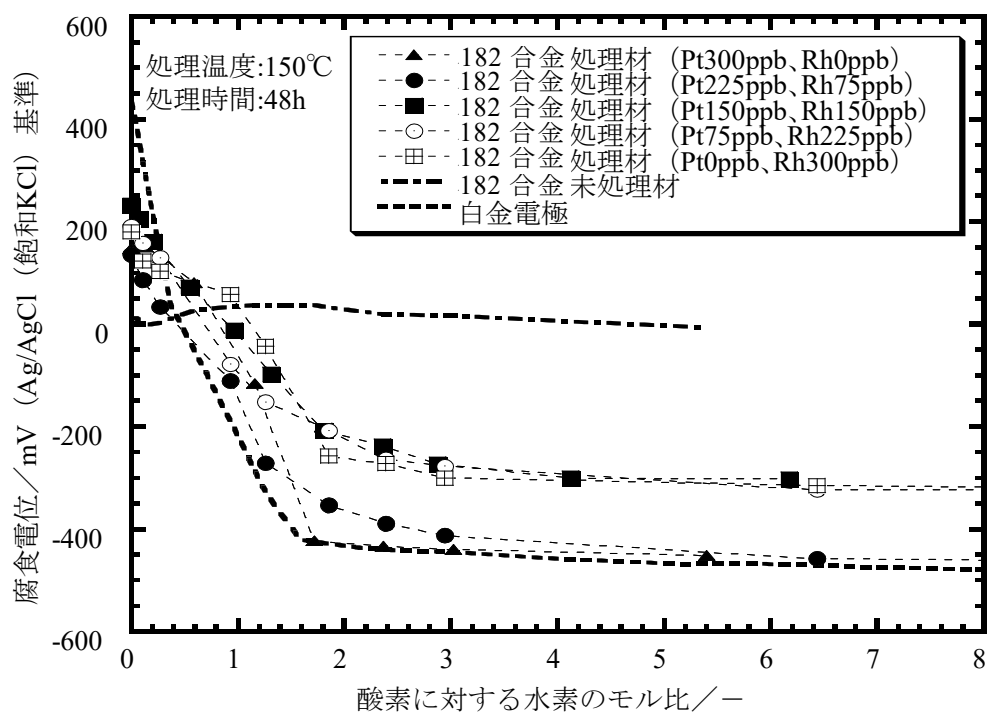
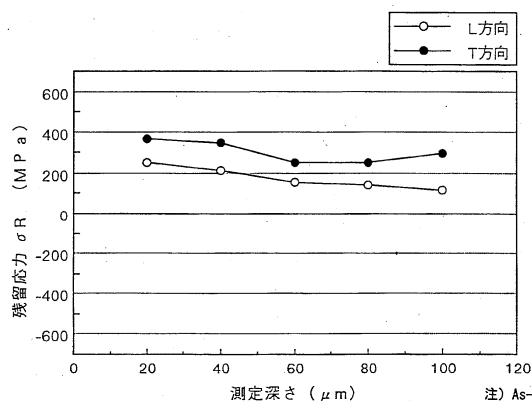
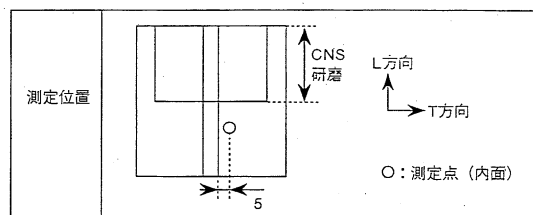
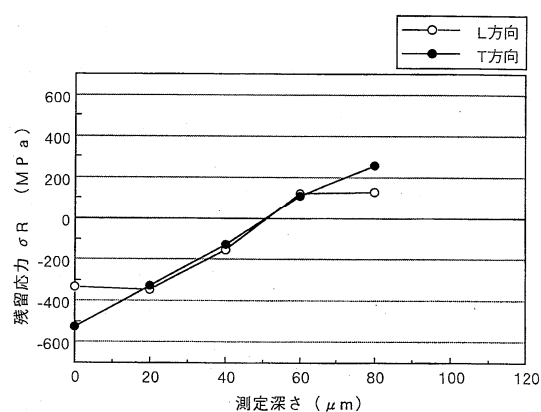
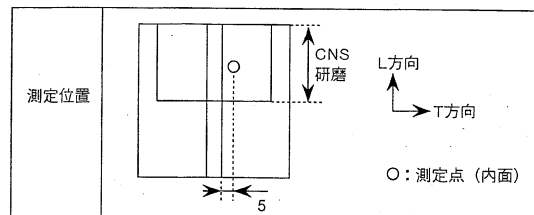


図 G-8 貴金属表面処理した 182 合金の腐食電位の水素濃度依存性 ⁷⁾
 [処理温度:150℃, 処理時間:48 時間]



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) 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、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。

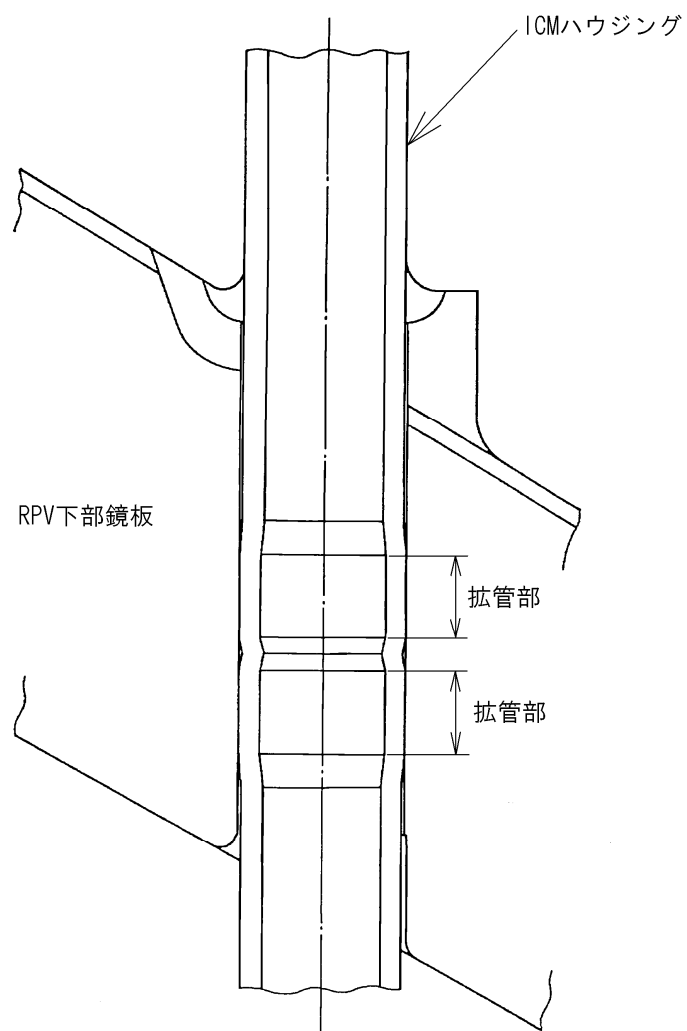


図 H-1 拡張工法

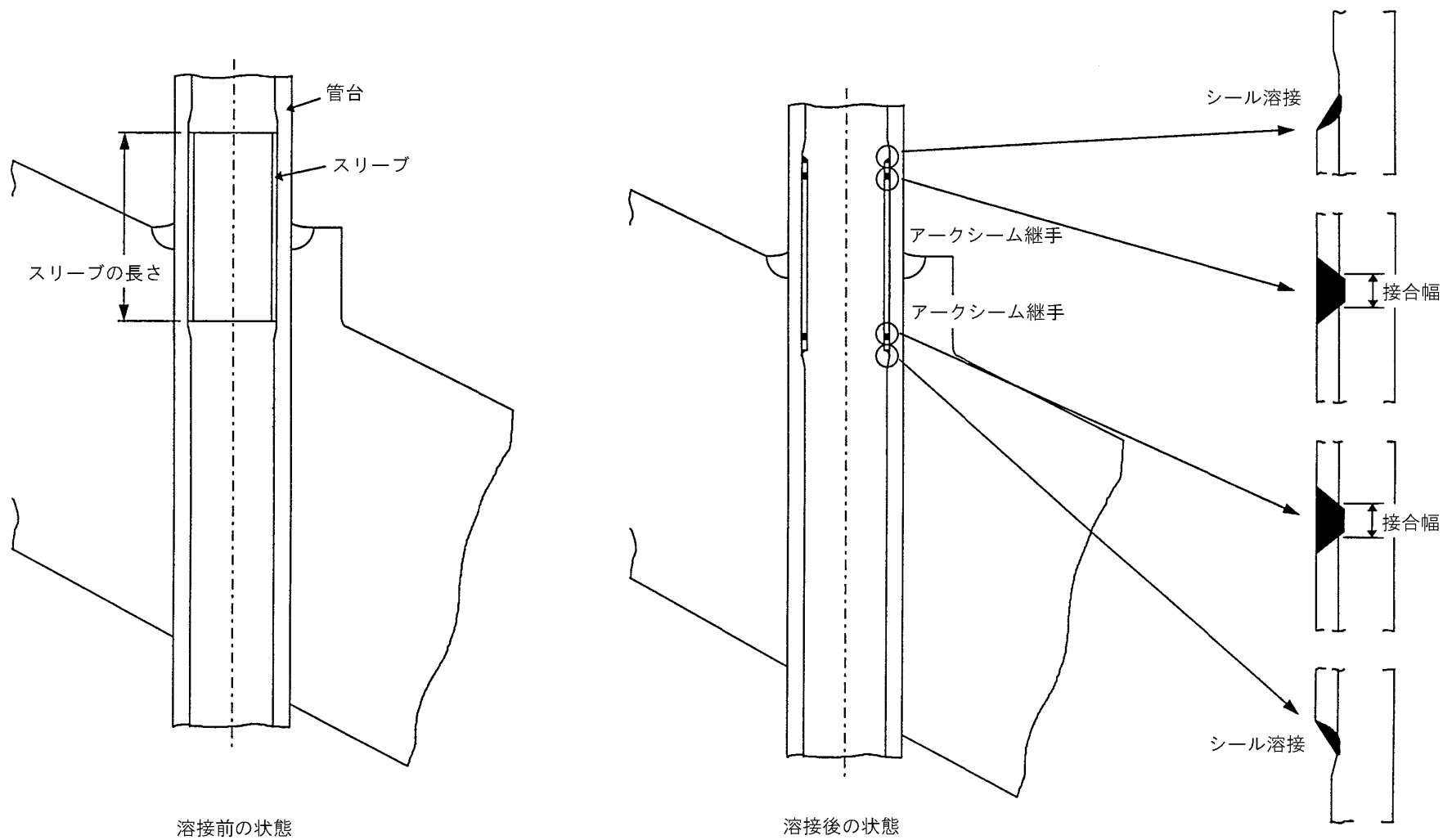


図 H-2 スリーブ工法

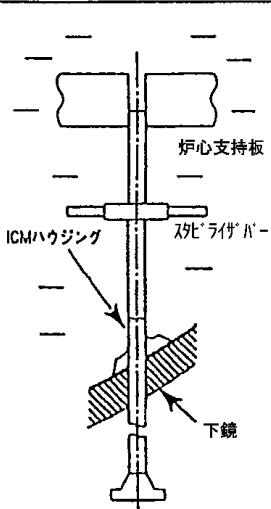
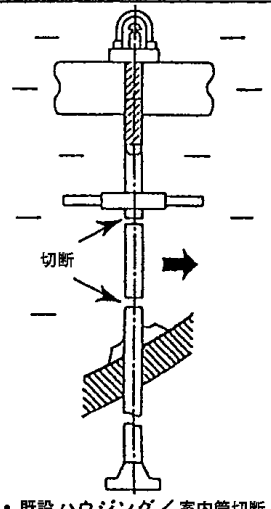
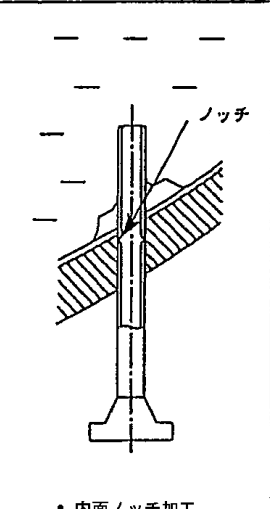
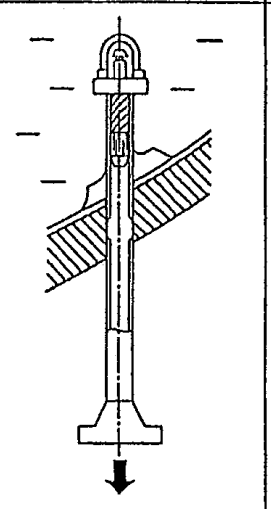
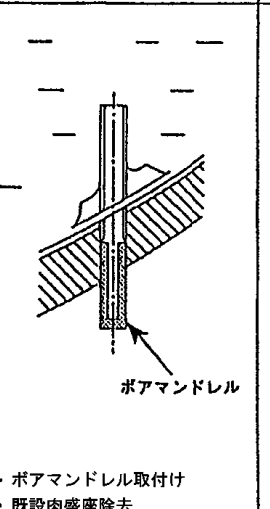
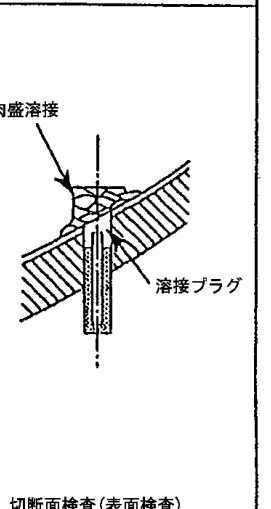
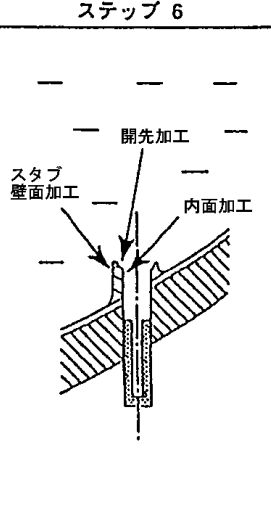
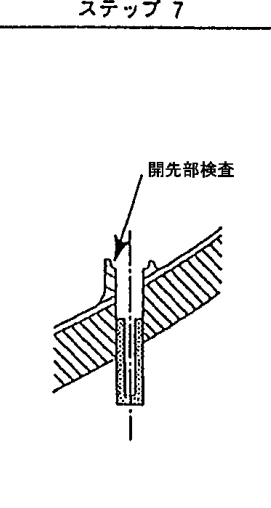
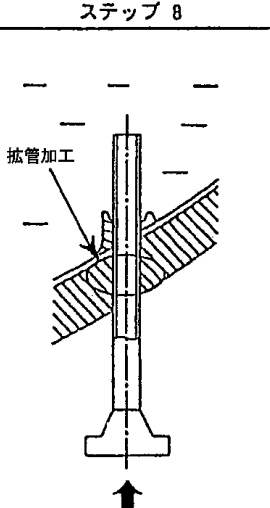
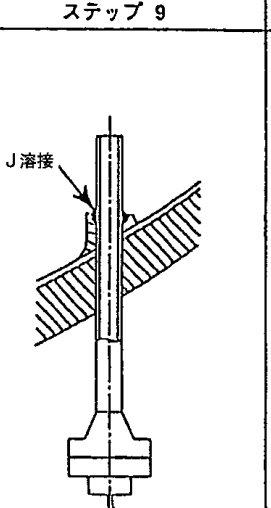
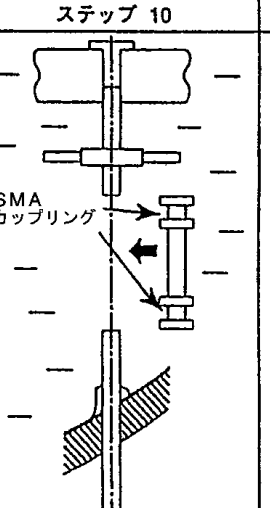
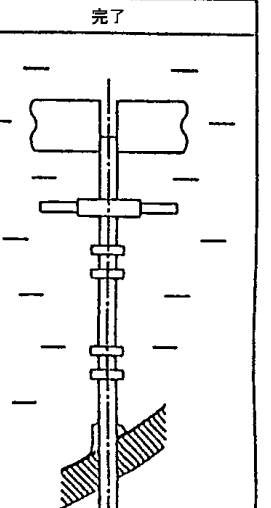
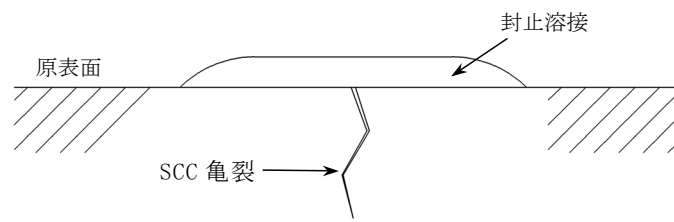
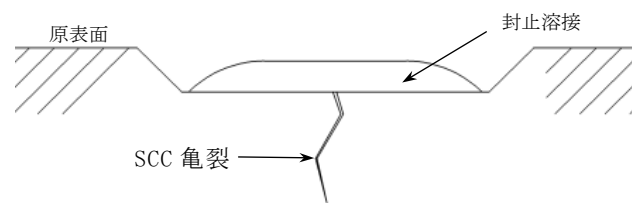
項目	作業着手前	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4	ステップ 5
作業概要		 <ul style="list-style-type: none"> 既設ハウジング／案内管切断 (EDM) 	 <ul style="list-style-type: none"> 内面ノッチ加工 (EDM) 	 <ul style="list-style-type: none"> 既設ハウジング取外し 	 <ul style="list-style-type: none"> ボアマンドレル取付け 既設肉盛座除去 (EDM) 	 <ul style="list-style-type: none"> 切断面検査 (表面検査) 肉盛溶接
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	 <ul style="list-style-type: none"> 肉盛座整形 (EDM) 肉盛座検査 (UT) 開先加工 (EDM) 	 <ul style="list-style-type: none"> 開先部検査 (表面検査) 	 <ul style="list-style-type: none"> 新規ハウジング挿入 拡管 	 <ul style="list-style-type: none"> 新規ハウジング取付溶接 溶接部検査 (表面検査, UT) 	 <ul style="list-style-type: none"> 新規案内管取付 (形状記憶合金) 	

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、BWR（1100MWe）の ICM ハウジングを対象として、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。

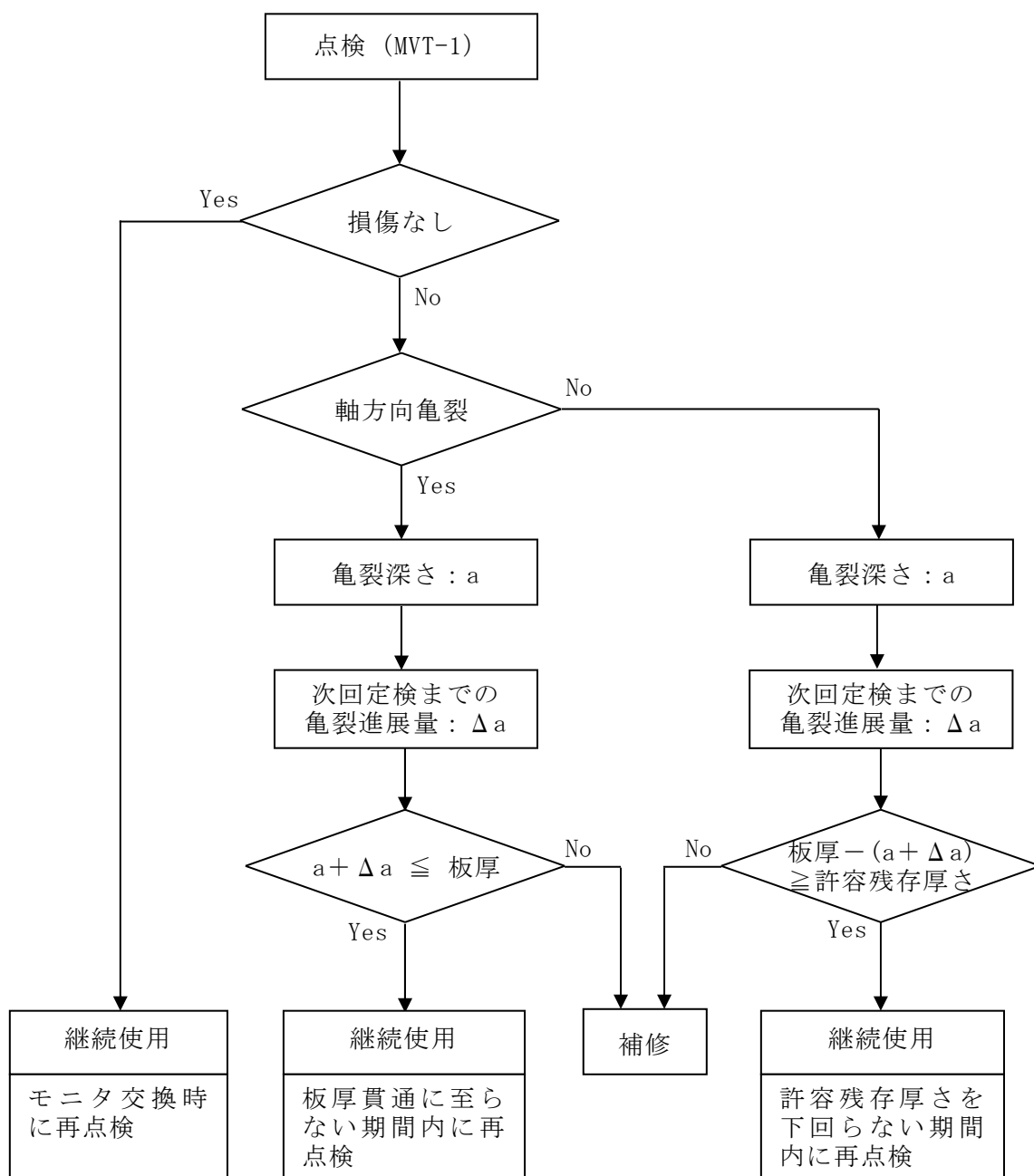


図 I-1 ハウジング/フランジ溶接部の損傷評価フロー

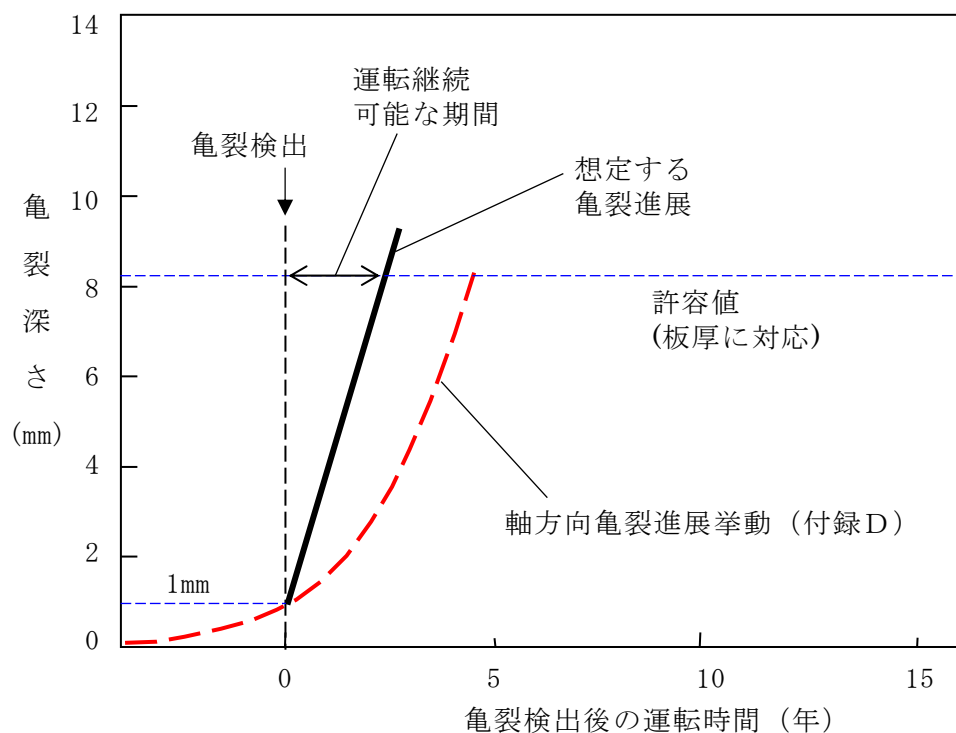


図 I-2 軸方向亀裂が検出された場合の評価例

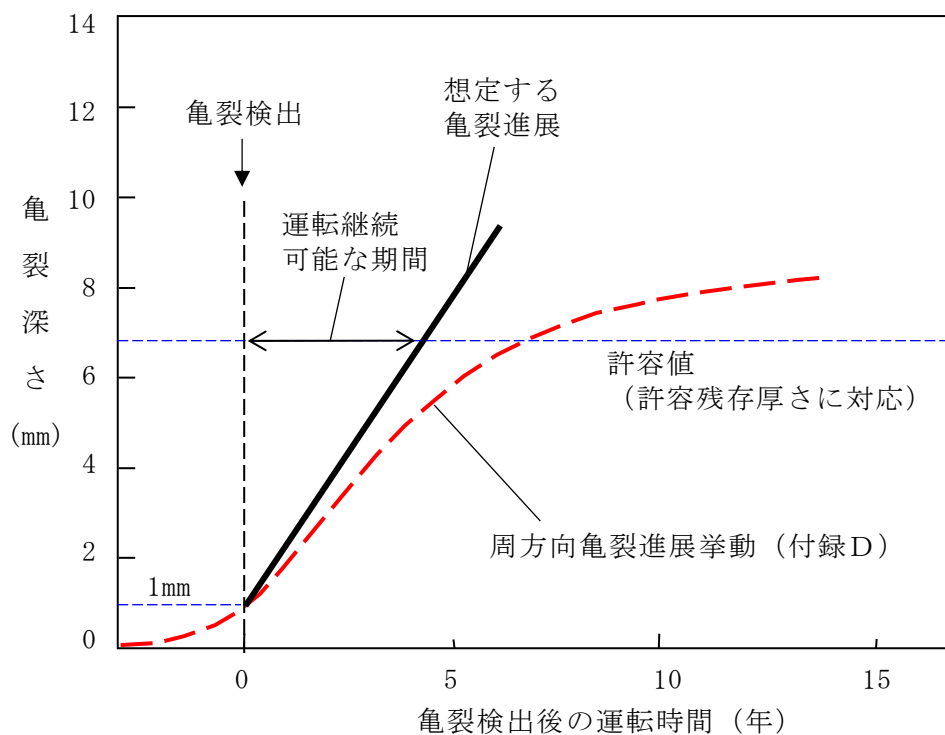


図 I-3 周方向亀裂が検出された場合の評価例

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. 点検の考え方

- 原子炉に対して ICM ハウジングが持つ安全機能に着目し、ICM ハウジングを構成する各種の構造物（図-1）の経年劣化事象による損傷が、安全機能の維持点検範囲に影響を与えられとされる構造物を点検対象とする。
- ICM ハウジングの経年劣化事象として、応力腐食割れ（SCC）を想定する。
- 点検手法、点検範囲、点検時期は、点検対象の機能、形状及び材質、想定される経年劣化事象及び国内外の運転経験、損傷時の安全機能に対する影響等を考慮し、必要な手法、範囲、時期をそれぞれ選定する。

2. 点検対象

- ハウジング取付け溶接部（BWR）
- ハウジング/スタブチューブ溶接部（ABWR）
- スタブチューブ/下鏡溶接部（ABWR）
- ハウジング/フランジ溶接部（BWR, ABWR）

3. 点検手法

- ハウジング取付け溶接部（BWR）
- ハウジング/スタブチューブ溶接部（ABWR）
- スタブチューブ/下鏡溶接部（ABWR）

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（BWR, ABWR）

- (1) BWR の 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) BWR の LPRM を装荷していないハウジング及び ABWR
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

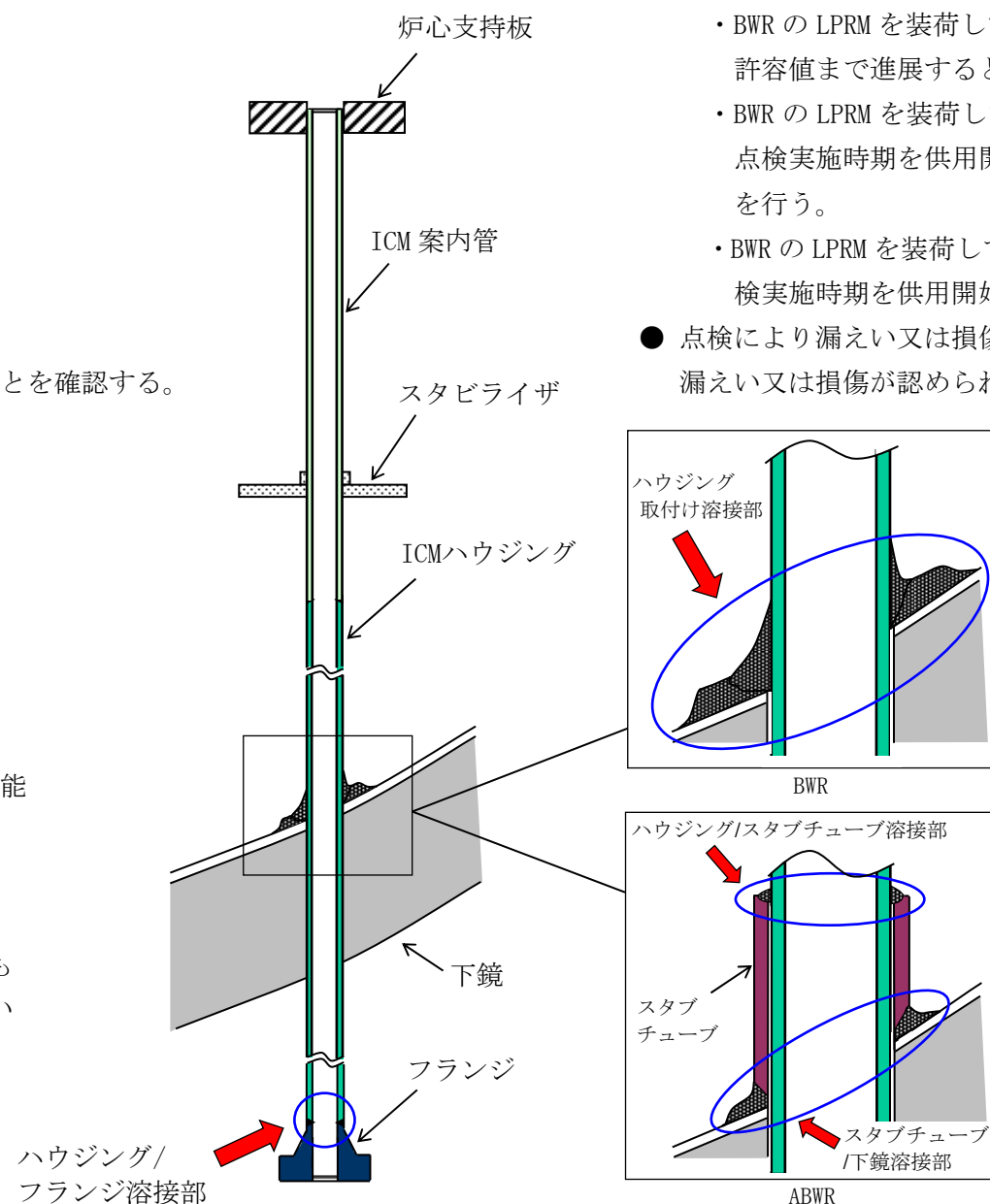


図-1 ICMハウジングの構造と点検対象部位

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。
- ハウジング取付け溶接部（BWR）
 - ・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/スタブチューブ溶接部（ABWR）、スタブチューブ/下鏡溶接部（ABWR）
 - ・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、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。
- ハウジング/フランジ溶接部（BWR, ABWR）
 - ・BWR の 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。
 - ・BWR の 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。
 - ・BWR の LPRM を装荷していないハウジング及び ABWR 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、補修等の対策を行う。（図-2）

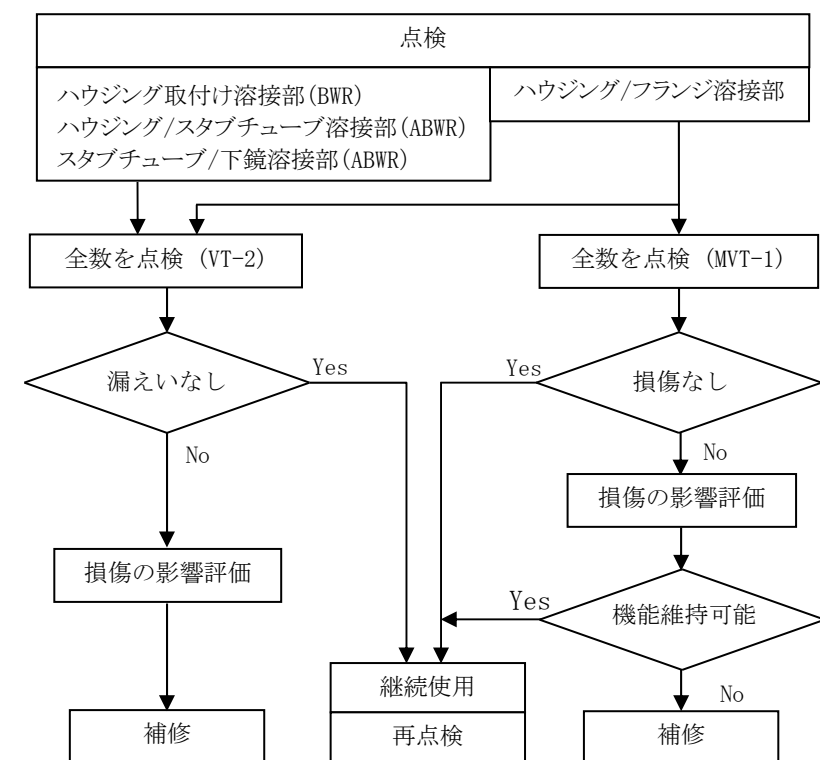


図-2 ICMハウジングの点検・評価フロー

改訂経緯

- | | |
|-------------|--|
| 2002 年 7 月 | 初版発行 |
| 2014 年 12 月 | 第 2 版発行
(定期改訂)
点検に適用する規格を最新のものと見直した。また、新たに適用可能となった
予防保全及び補修方法を、それぞれ付録 G, 付録 H に追記した。 |
| 2023 年 3 月 | 第 3 版発行
<ul style="list-style-type: none">・改良型 BWR (ABWR) の ICM ハウジングの情報を追加した。・付録 A に, ICM ハウジングを構成する各構造体について, 有意な劣化モード,
運転経験, 安全機能への影響に基づいた点検の考え方を記載した。・基準地震動 S_s による強度評価結果を記載した。・その他, 全体を通して文章・図の適正化を図った。 |

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 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，2023

本書に掲載されたすべての記事内容は、原子力安全推進協会の許可なく、
転載・複写することはできません。