ＢＷＲ炉内構造物点検評価ガイドライン

［ＣＲＤハウジング］

（第５版）

2025 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，メーカの方々等，関係各位に深く感謝いたします。

2025 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炉内構造物等点検評価ガイドライン

改訂履歴

ガイドライン名：CRD ハウジング

改訂年月	版	改訂内容	備考
2002 年 7 月	初版発行		
2004 年 1 月	第 2 版発行	周方向亀裂進展挙動の評価結果を反映	
2014 年 12 月	第 3 版発行	適用する規格基準ほか見直し	
2022 年 7 月	第 4 版発行	ABWR 点検内容の追加 点検の考え方の明確化	
2025 年 3 月	第 5 版発行	点検時期の延長に関する規定の追加，亀裂進展速度式の見直し，運転経験の更新，用語の定義の追加及び用語の統一	

※ 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

（2025 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	東京科学大学
委　員	森下　和功	京都大学
委　員	堂崎　浩二	東北大学
委　員	若井　隆純	日本原子力研究開発機構
委　員	古川　敬	発電設備技術検査協会
幹　事	今井　直人	東京電力ホールディングス（株）
幹　事	天野　洋一	関西電力（株）
幹　事	日下　純	日本原子力発電（株）
委　員	山崎　朗	北海道電力（株）
委　員	新藤　智也	東北電力（株）
委　員	中野　宏之	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	坂口　昌平	関西電力（株）
委　員	中川　純二	中国電力（株）
委　員	松原　克幸	四国電力（株）
委　員	野崎　剛	九州電力（株）
委　員	町田　栄治	日本原子力発電（株）
委　員	高村　賢也	電源開発（株）
委　員	内山　好司	日立ＧＥニュークリア・エナジー（株）
委　員	三橋　忠浩	東芝エネルギーシステムズ（株）
委　員	北条　公伸	三菱重工業（株）
委　員	新井　拓	電力中央研究所
委　員	成宮　祥介	原子力安全推進協会
参加者	小林　広幸	EPRI International, Inc.
参加者	町田　秀夫	（株）テプコシステムズ
事務局	大畑　仁史	原子力安全推進協会
事務局	佐藤　寿志	原子力安全推進協会

ＢＷＲ炉内構造物点検評価ガイドライン
［CRD ハウジング］
目　　次

第１章　目的及び適用
1.1　目的 …… 1
1.2　適用 …… 1
1.3　用語の定義 …… 1
第２章　点検の考え方 …… 1
第３章　点検対象 …… 1
第４章　点検手法 …… 3
第５章　点検範囲 …… 3
第６章　点検時期 …… 4
第７章　点検結果の評価 …… 4
第８章　まとめ …… 6

解説
解説 1-1　ガイドライン制定の目的 …… 7
解説 1-2　本ガイドラインの運用にあたって …… 7
解説 1-3　本ガイドラインでの用語の定義 …… 7
解説 2-1　CRD ハウジングに要求される安全機能 …… 8
解説 2-2　CRD ハウジングの点検対象の選定 …… 8
解説 2-3　CRD ハウジングに想定される経年劣化事象 …… 8
解説 4-1　点検手法，点検範囲及び点検時期 …… 11
解説 4-2　渦電流探傷試験 …… 12
解説 6-1　点検時期の延期 …… 13
解説 6-2　SCC 予防保全技術 …… 13
解説 7-1　補修技術 …… 14

付録

付録Ａ　CRD 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　CRD ハウジング溶接部の残留応力評価
付録Ｄ　CRD ハウジング溶接部の SCC 亀裂進展評価
付録Ｅ　CRD ハウジングの強度評価
付録Ｆ　CRD ハウジング圧力境界部からの漏えいの影響評価
付録Ｇ　SCC 予防保全技術
付録Ｈ　補修技術

参考資料

参考資料１　ＢＷＲ炉内構造物点検評価ガイドライン［CRD ハウジング］の概要
参考資料２　改訂経緯

第１章　目的及び適用

1.1　目的

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

なお，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，CRD ハウジングに適用する。ガイドラインの適用期間は，商業運転開始後の供用期間中とする。

1.3　用語の定義

本ガイドラインにおける用語の定義を以下に示す。(解説 1-3)

・きず：非破壊試験の結果から判断される不完全部又は意図しない不連続部。

・亀裂：熱的又は機械的応力のために引き起こされる局部的な破断によって生じる隙間又は不連続部。特に,破壊力学による評価のため，きずをモデル化したものについても使用する。

・欠陥：判定基準を超え，不合格となるきず又は亀裂。

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 CRD ハウジングが持つ安全機能に着目し，CRD 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ると考えられる構造体を点検対象とする。(解説 2-1，解説 2-2)

(2) CRD 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。

第３章　点検対象

CRD ハウジングの点検対象は，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。

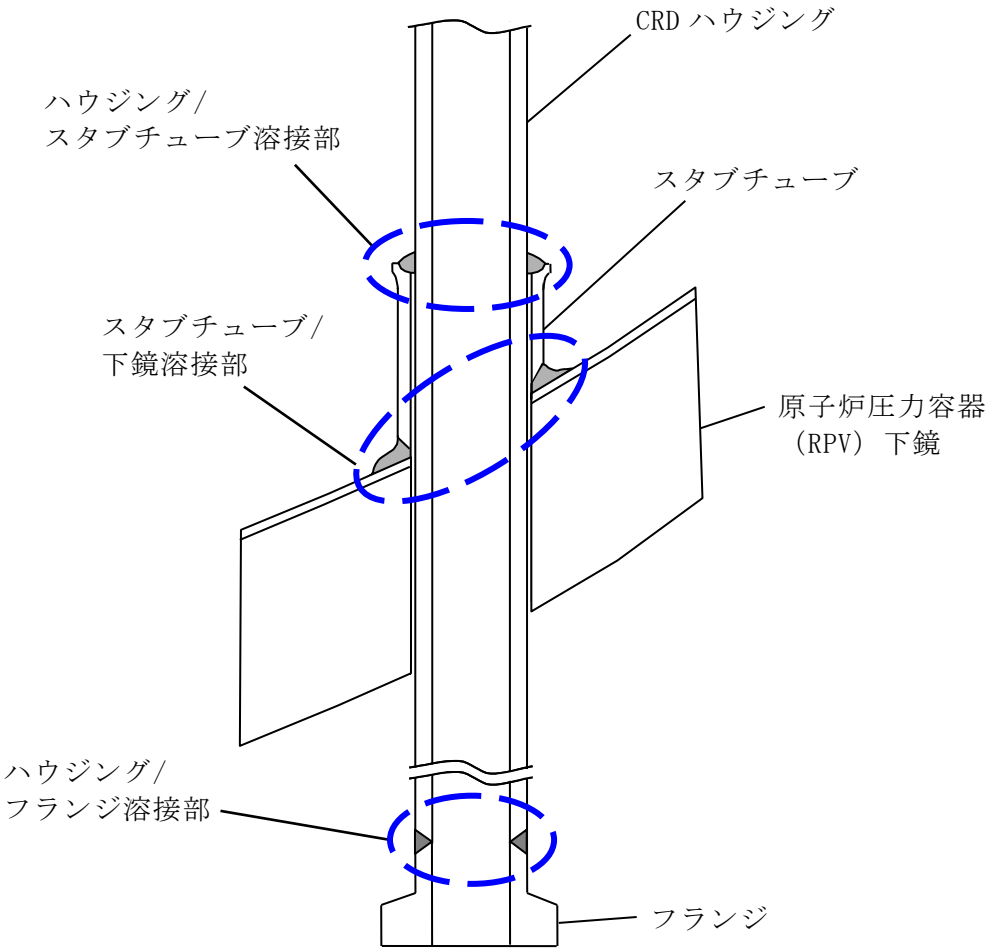


図 3-1　CRD ハウジングの点検対象部位

第４章　点検手法

CRD 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

表面のきずを検出するために行う試験であり，炉内構造物等点検評価ガイドライン［遠隔目視試験］に従い実施する。

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する。

(3) 超音波探傷試験（UT)

超音波探傷試験は，JEAC 4207「軽水型原子力発電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，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，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する。

第５章　点検範囲

CRD ハウジングの点検範囲(点検対象部位の個数)は，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，CRD 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)

なお，技術的に根拠がある場合は，別途設定することができる。

第６章　点検時期

CRD 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，技術的根拠がある場合は，別途，設定することができる。

また，点検時期を暦年で定めている点検対象においては，プラントが停止している期間分，点検時期を延期することができる。(解説 6-1)

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 6-2)

(1) ハウジング/スタブチューブ溶接部

供用開始後暦年で 25 年以降の毎定検時に点検する。

(2) スタブチューブ/下鏡溶接部

供用開始後暦年で 25 年以降の毎定検時に点検する。

(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

CRD 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。

(1) ハウジング/スタブチューブ溶接部

① 漏えいがないことが確認された場合には，継続使用できる。

② 漏えいが検出された場合は，損傷の影響を評価し，補修等の措置を行う。

(2) スタブチューブ/下鏡溶接部

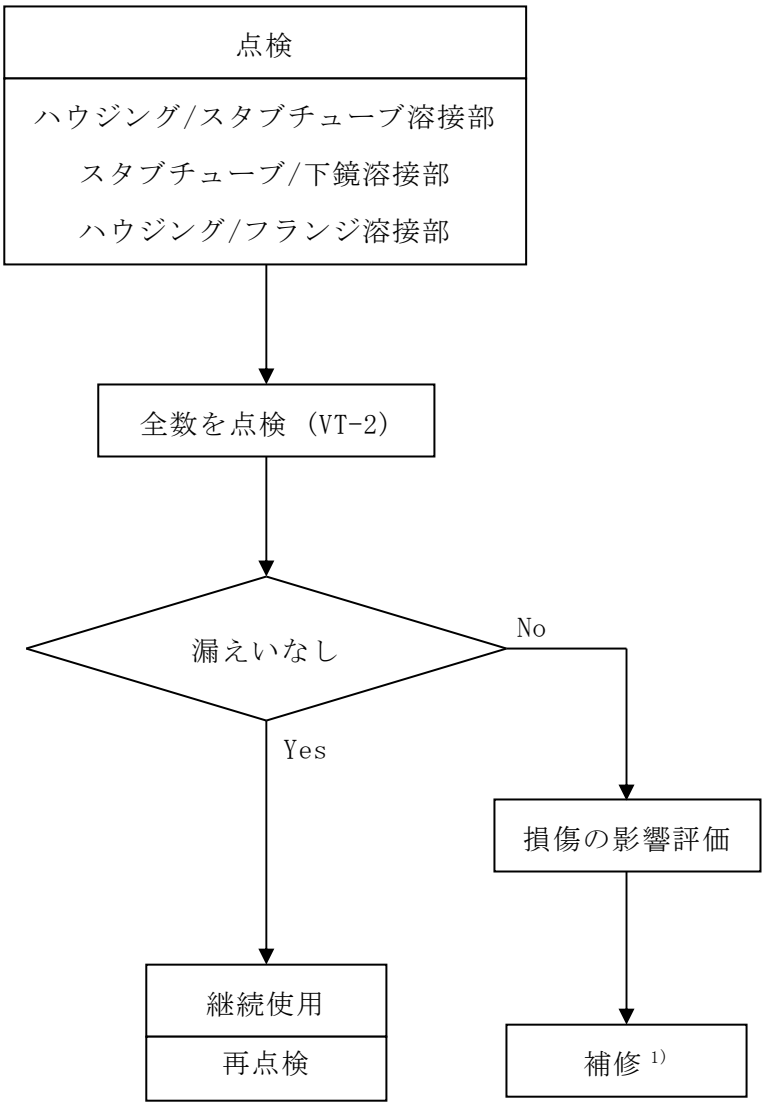
① 漏えいがないことが確認された場合には，継続使用できる。

② 漏えいが検出された場合は，損傷の影響を評価し，補修等の措置を行う。

(3) ハウジング/フランジ溶接部

① 漏えいがないことが確認された場合には，継続使用できる。

② 漏えいが検出された場合は，損傷の影響を評価し，補修等の措置を行う。



1）解説 7-1 参照

図 7-1　CRD ハウジングの点検・評価フロー

第８章　まとめ

CRD ハウジングの点検を表 8-1 に示す。

表 8-1　CRD ハウジングの点検

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 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
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 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	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，点検技術の向上と運転経験の蓄積に努めてきている。

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 Ss 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する必要がある。

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

（解説 1-3）本ガイドラインでの用語の定義

本ガイドラインに基づいた点検，評価等を実施する場合には，本ガイドラインの用語の定義が適用される。

なお，原子力規制委員会規則「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下，技術基準規則）の第 18 条第 1 項に定める「破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥」（以下，規則不適合欠陥）については，「実用発電用原子炉及びその附属施設における破

壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈」（以下，亀裂解釈）において，その解釈が示されている。

技術基準規則及び亀裂解釈では，「規則不適合欠陥」の意図以外で使用される「欠陥」に対して明確な定義を与えていないが，本ガイドラインで定義する「きず」に相当すると考えられる。

（解説 2-1）CRD ハウジングに要求される安全機能

CRD ハウジングに要求される安全機能は，BWR，ABWR 共に，炉心支持と流路確保(燃料集合体の鉛直荷重の支持)，制御棒挿入性及びバウンダリの確保(耐圧機能)である。(付録Ａ参照)

したがって，仮に CRD ハウジングに損傷が生じても，想定した地震荷重に対して，炉心支持(燃料集合体の鉛直荷重の支持)，制御棒挿入性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）CRD ハウジングの点検対象の選定

本ガイドラインでは，CRD ハウジングそのものだけでなく，スタブチューブ，制御棒案内管（以下，案内管）等の関連した部位も検討対象に含めて，点検対象を選定する。

CRD 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。

CRD 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解説図 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などを考慮し，点検方針を立案した。(付録Ａ参照)

（解説 2-3）CRD 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，CRD ハウジングの母材及び溶接部の経年劣化事象として，SCC を想定した。

CRD ハウジングの材質には，オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304，SUS304L，SUS316L，又は SUS316（原子力仕様又は遠心鋳造材）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おり，関連部位の材質としては，これらの他に高 Mn オーステナイト系ステンレス鋼の GXM1（XM-19）を使用している。

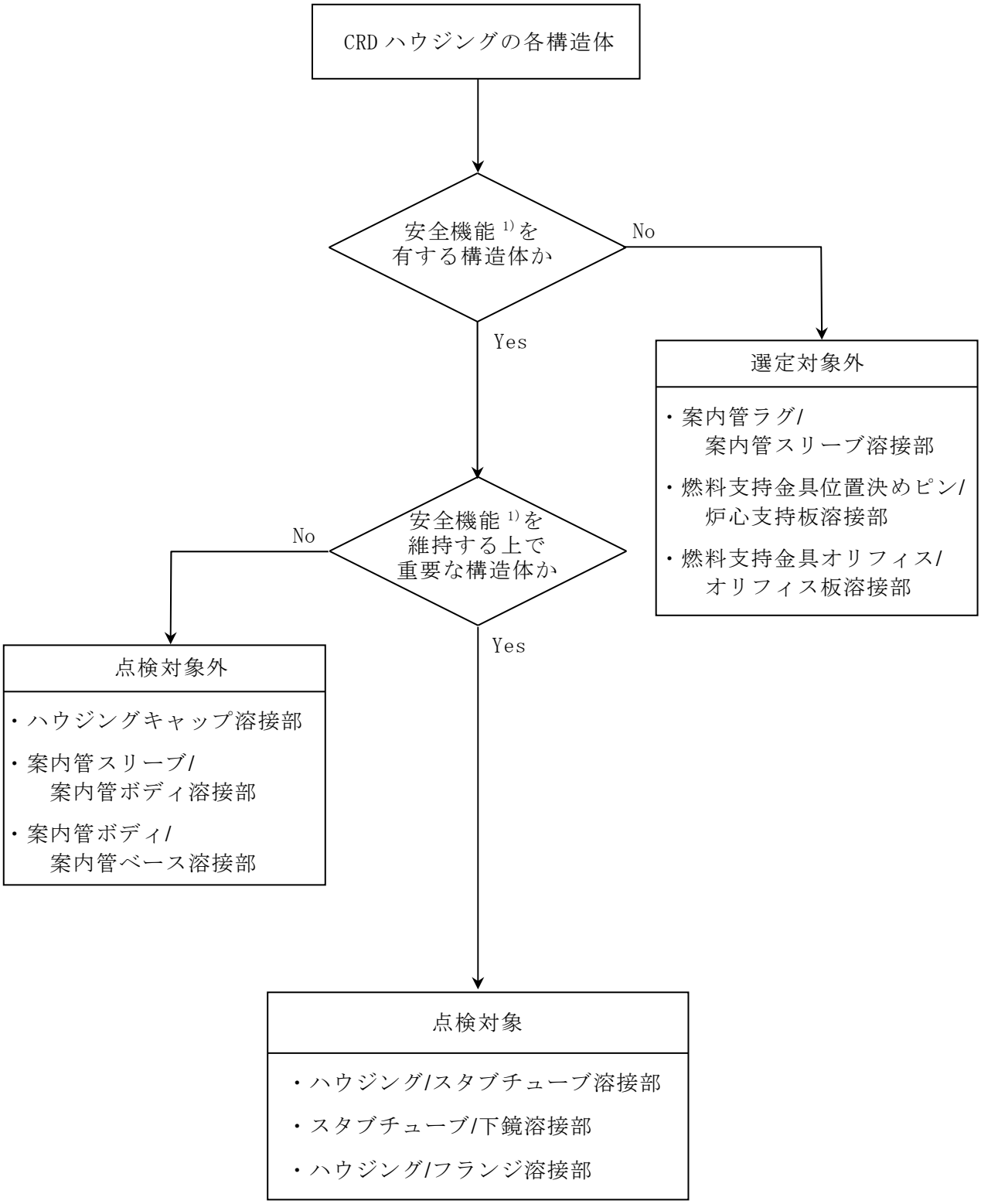
また，ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部には，ニッケル合金の 182 合金，Nb を添加した改良 182 合金，若しくは 82 合金溶接金属を使用している。

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 SCC 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（原子力仕様又は遠心鋳造材））は優れた耐 SCC 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，SCC 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 SCC 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 SCC 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よらず点検対象とする。（付録Ａ参照）



1）炉心支持と流路確保，制御棒挿入性，バウンダリの確保

解説図 2-2　CRD 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/スタブチューブ溶接部

ａ．点検手法

182 合金のハウジング/スタブチューブ溶接部において，供用開始時点で深さ 50μｍの初期亀裂を仮定した場合の亀裂進展挙動は軸方向の進展が早く，軸方向亀裂は実運転期間約 36 年で貫通するのに対して，周方向亀裂では貫通が生じない評価となる。

軸方向と周方向の亀裂進展挙動の相対的な関係は，82 合金でも同様と考えられる。（付録Ｂ，Ｃ，Ｄ参照）

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

また，軸方向亀裂が貫通した場合でも，周方向の残存断面積のため，Ss 地震を想定しても破断することがなく，炉心支持と流路確保（燃料集合体の鉛直荷重の支持），制御棒挿入性及びバウンダリの確保（耐圧機能）を維持できる。（付録Ｅ参照）

したがって，軸方向亀裂による漏えいを検知できれば，CRD ハウジングに要求される安全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 CRD 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

182 合金溶接部においては，供用開始時点で深さ 50μｍの初期亀裂を仮定した場合，軸方向亀裂の貫通に実運転期間で約 36 年（稼働率 80％の場合，供用開始後暦年で約 45 年に相当）を要し，82 合金溶接部の場合には，SCC 亀裂の進展はさらに遅くなると考えられるが，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。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。

(2) スタブチューブ/下鏡溶接部

ａ．点検手法

182 合金のスタブチューブ/下鏡溶接部において，供用開始時点で深さ 50μｍの初期亀裂を仮定した場合の亀裂進展挙動は，周方向亀裂より軸方向亀裂が速く，軸方向亀裂では実運転期間で約 53 年で貫通するのに対して，周方向亀裂では貫通が生じない評価となる。軸方向と周方向の亀裂進展挙動の相対的な関係は，82 合金及び改良 182 合金でも同様と考えられる。（付録Ｄ参照）

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

また，軸方向亀裂が貫通した場合でも，周方向の残存断面積のため，Ss 地震を想定しても破断することがなく，炉心支持と流路確保（燃料集合体の鉛直荷重の支持)，制御棒挿入性及びバウンダリの確保（耐圧機能）を維持できる。(付録Ｅ参照)

したがって，軸方向亀裂による漏えいを検知できれば，CRD ハウジングに要求される安全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 CRD 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

182 合金溶接部においては，供用開始時点で深さ 50μｍ の初期亀裂を仮定した場合，軸方向亀裂の貫通に実運転期間で約 53 年（稼働率 80%の場合，供用開始後暦年で約 66 年に相当）を要し，82 合金及び改良 182 合金溶接部の場合には，SCC 亀裂の進展はさらに遅くなると考えられるが，高経年化技術評価にも資することを踏まえ，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。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。

(3) ハウジング/フランジ溶接部

ハウジング/フランジ溶接部は，温度が低いため SCC が生じる可能性が極めて小さく，万一 SCC が生じたとしても，周方向の広い範囲にわたって亀裂が貫通することはないと推定され，安全機能に影響を与える以前に微少漏えいにより検知できると考えられるため，他の部位と同様に，漏えい試験（VT-2）を適用する。

点検範囲は CRD ハウジングの安全機能維持に必要な数として全数とし，点検時期は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 年以降の毎定検とする。

(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，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 6-1）　点検時期の延期

本ガイドラインでは，40 年超の運転を行うプラントや長期停止期間を含むプラントも対象に，CRD ハウジングに想定される経年劣化事象として，SCC を想定して点検時期を定めている。プラント停止期間の経年劣化事象については，プラントの継続的な安全性の維持・向上を促すために発行された，原子力エネルギー協議会「プラント長期停止期間中における保全ガイドライン」の長期停止期間中に想定される経年劣化事象一覧表（機械編）を参考に，停止期間中の温度が 100℃未満であり，国内プラントでは適切に水質管理が実施され，SCC が発生・進行する可能性が低いことから，プラント停止期間分，点検時期を延期することができることとした。

（解説 6-2）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解説表 6-2 に示す。（付録Ｇ参照）

解説表 6-2　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 性が優れた材質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，CRD ハウジングに適用可能なものとして，制定済みの予防保全工法ガイドラインには以下がある。

・JANTI-VIP-03「ピーニング工法」
・JANTI-VIP-10「研磨による応力改善工法」
・JANSI-VIP-18「水素注入による環境改善効果の評価方法」

（解説 7-1）補修技術

CRD ハウジングにきずが発見された場合の補修技術には，拡管，取替，補修溶接，封止溶接等がある。（付録Ｈ参照）

また，CRD ハウジングに適用可能な補修工法ガイドラインとして以下がある。

・JANTI-VIP-01「封止溶接工法」

・JANTI-VIP-16「水中レーザ肉盛溶接工法」

付録Ａ　CRD 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，CRD 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.　CRD 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，CRD 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

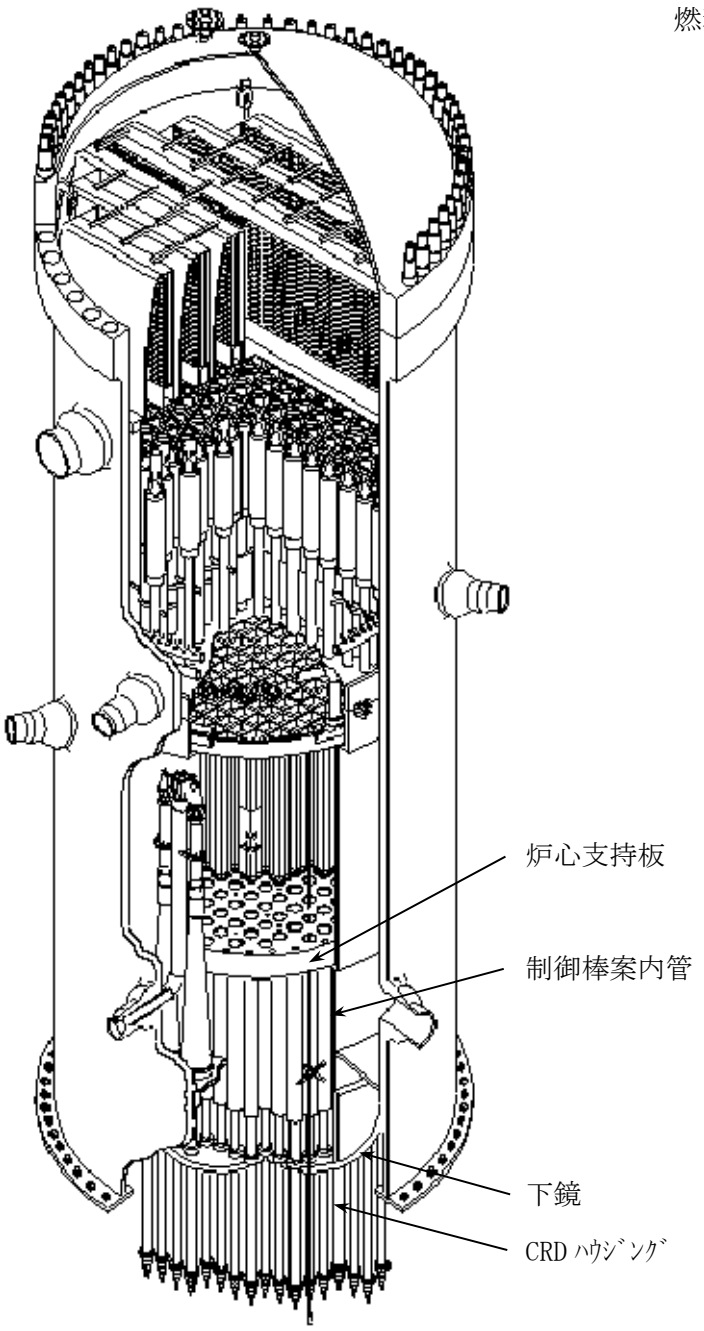
CRD ハウジングは，BWR，ABWR 共に，原子炉圧力容器（以下，RPV）下鏡にスタブチューブを介して溶接され，RPV 内に到達しており，その内部には制御棒駆動機構（以下，CRD）が据え付けられる。CRD ハウジングは，CRD，制御棒案内管（以下，案内管），燃料支持金具及び燃料集合体の荷重を支持する機能がある。よって，CRD ハウジングは「炉心支持と流路確保」，「制御棒挿入性の確保」及び「バウンダリの確保」の安全機能を有する。

2.2　形状及び材質

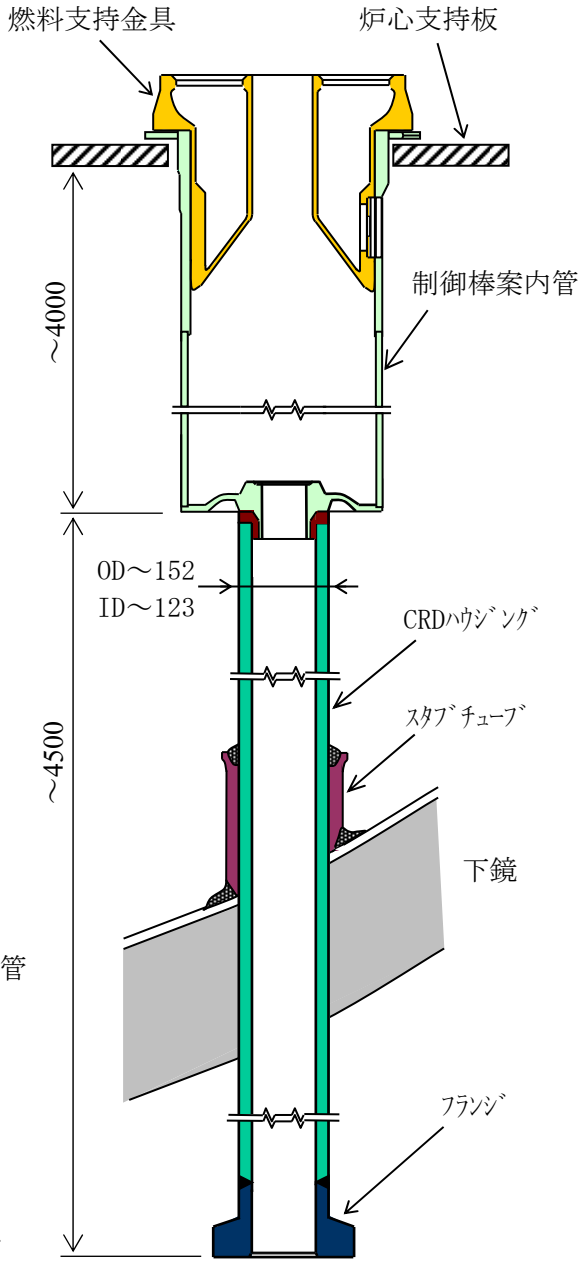
CRD ハウジングは，BWR，ABWR 共に，RPV 下鏡の貫通部に鉛直に据付けられ，RPV 内のスタブチューブに溶接される。CRD ハウジングは，ニッケル合金のクラッドを施した下鏡に，ニッケル合金のスタブチューブを取り付け，そのスタブチューブにオーステナイト系ステンレス鋼のハウジングをニッケル合金の溶接により取付ける構造となっている。なお，BWR と ABWR で構造に大きな違いはない。

CRD ハウジングの材質は，炭素含有量が 0.03％を超えるステンレス鋼（SUS304）若しくは炭素含有量が 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。また，関連部位の材質としては，これらの他に耐熱ステンレス鋼（高 Mn オーステナイト系ステンレス鋼の GXM1）を使用している。

上述の通り，BWR と ABWR で CRD ハウジングの構造に大きな違いがないことから，BWR を代表として，CRD ハウジング及び関連部位の形状及び材質を図 A-2.2 及び表 A-2.2 に示す。なお，図中の①～⑨は，損傷による安全機能への影響を検討した CRD ハウジングの部位を示している。



RPV 概要図（BWR）



CRDハウジングの断面図
・BWR(1100MWe)：185本
・ABWR：205本

図 A-2.2(1)　CRD ハウジング及び関連部位の構造

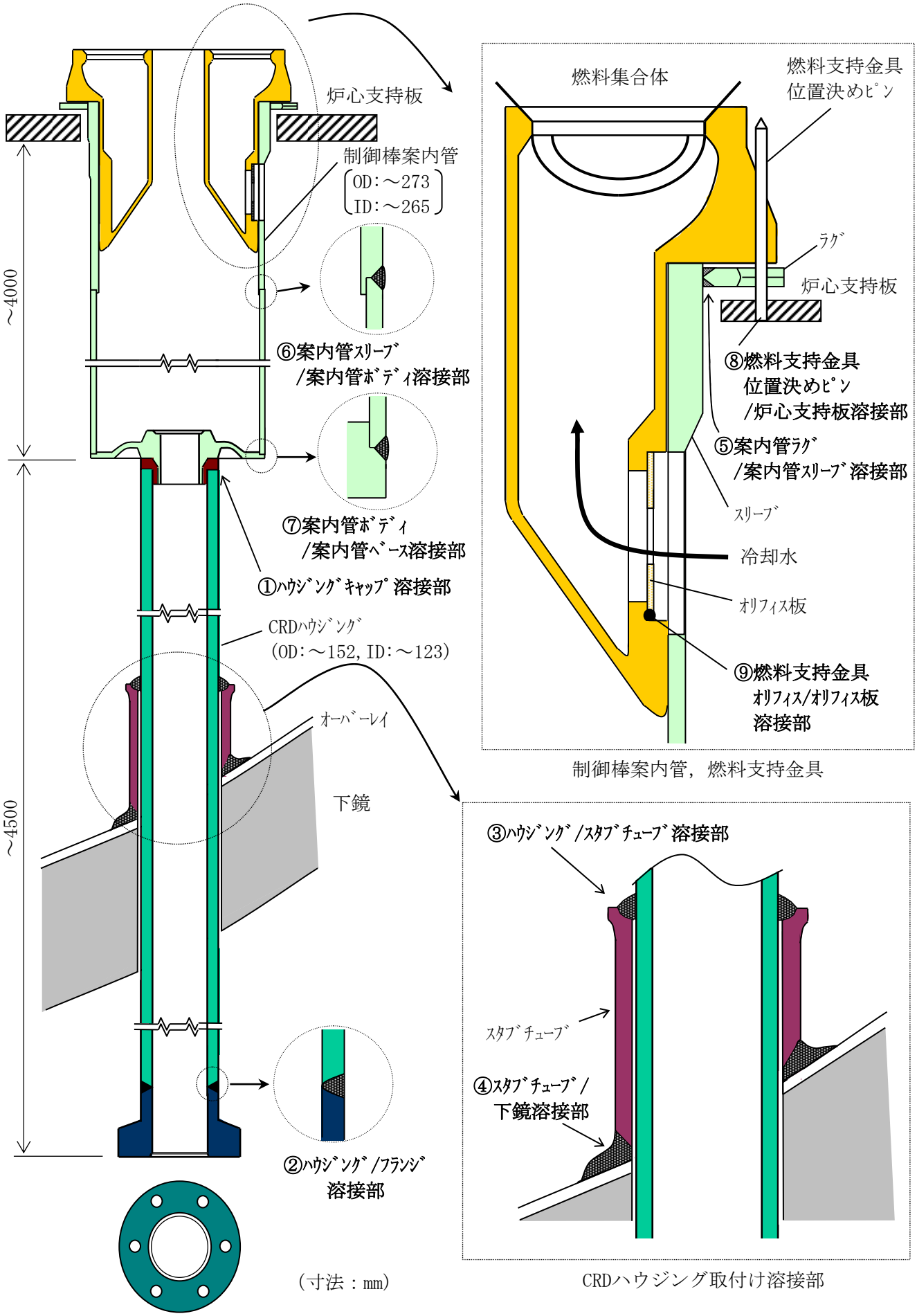


図 A-2.2(2)　CRD ハウジング及び関連部位の構造

表 A-2.2　CRD ハウジング及び関連部位の材質の代表例

部　位		材　質
CRD ハウジング	ハウジング	ステンレス鋼
	ハウジングフランジ	ステンレス鋼，又はハウジング一体構造
	ハウジングキャップ	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
制御棒案内管	案内管ボディ	ステンレス鋼
	案内管スリーブ	ステンレス鋼，又は耐熱ステンレス鋼
	案内管ラグ	ステンレス鋼
	案内管ベース	ステンレス鋼，ステンレス鋳鋼，又は耐熱ステンレス鋼
燃料支持金具		ステンレス鋳鋼
燃料支持金具位置決めピン		ステンレス鋼
オリフィス板		ステンレス鋼，又は燃料支持金具一体構造

2.3　想定される経年劣化事象

CRD ハウジングはステンレス鋼製であり，溶接部に SCC が生じる可能性がある。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，CRD 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 1 件報告されている。

米国では，SUS304 製のスタブチューブと下鏡の溶接後熱処理（SR）による鋭敏化に起因する損傷事例が 3 件報告されている。なお，国内では SUS304 製のスタブチューブが導入されたプラントがないため，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

CRD 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。なお，BWR と ABWR で CRD ハウジングの構造に大きな違いがないことから，以下，BWR の CRD ハウジング構造を代表として示す。（①～⑨は図 A-2.2(2)に示す番号）

2.5.1　①ハウジングキャップ溶接部（図 A-2.5.1）

ハウジングキャップの溶接部は，ハウジング，案内管，燃料支持金具及び燃料集合体の荷重の支持を担うが，溶接部が損傷した場合でも CRD 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。

・炉心支持と流路確保

ハウジングキャップ溶接部が損傷した場合でも，燃料集合体及び案内管の自重によりハウジングキャップ位置が保持され，炉心支持の機能は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

制御棒挿入性は炉心支持と同様に考えられ，ハウジングキャップ溶接部が損傷した場合でも制御棒挿入性は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・バウンダリの確保

ハウジングキャップ溶接部はバウンダリの確保の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

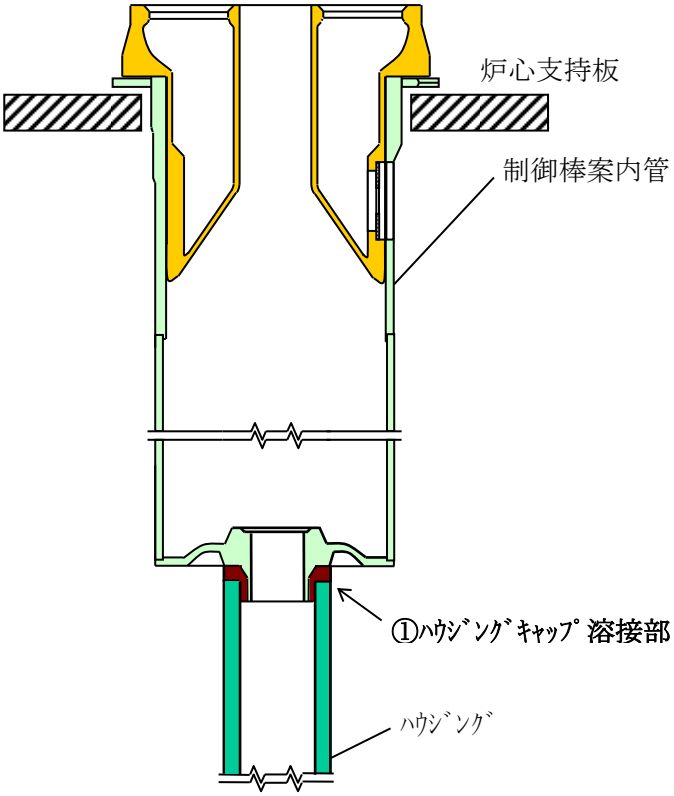


図 A-2.5.1　①ハウジングキャップ溶接部

2.5.2　②ハウジング/フランジ溶接部（図 A-2.5.2）

ハウジング/フランジの溶接部は，CRD の荷重の支持を担っており，損傷した場合の CRD 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。

・炉心支持と流路確保

ハウジング/フランジ溶接部は炉心支持の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

ハウジング/フランジ溶接部が損傷した場合に地震が発生すると，ハウジングが変形する可能性があり，制御棒挿入性に影響がある。

・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。

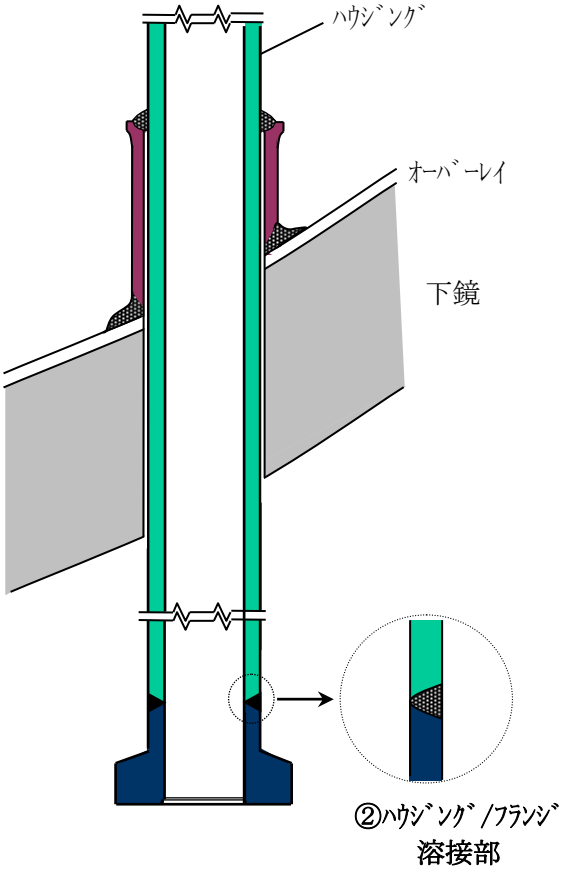


図 A-2.5.2　②ハウジング/フランジ溶接部

2.5.3　③ハウジング/スタブチューブ溶接部（図 A-2.5.3）

ハウジング/スタブチューブの溶接部は，ハウジング，案内管，燃料支持金具及び燃料集合体の支持を担っており，溶接部が損傷した場合の CRD 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。

・炉心支持と流路確保

ハウジング/スタブチューブ溶接部が損傷した場合でも，その他の溶接部によって炉心支持の機能は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

ハウジング/スタブチューブ溶接部が損傷した場合に地震が発生しても，変位が微少であり，制御棒挿入性は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・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。

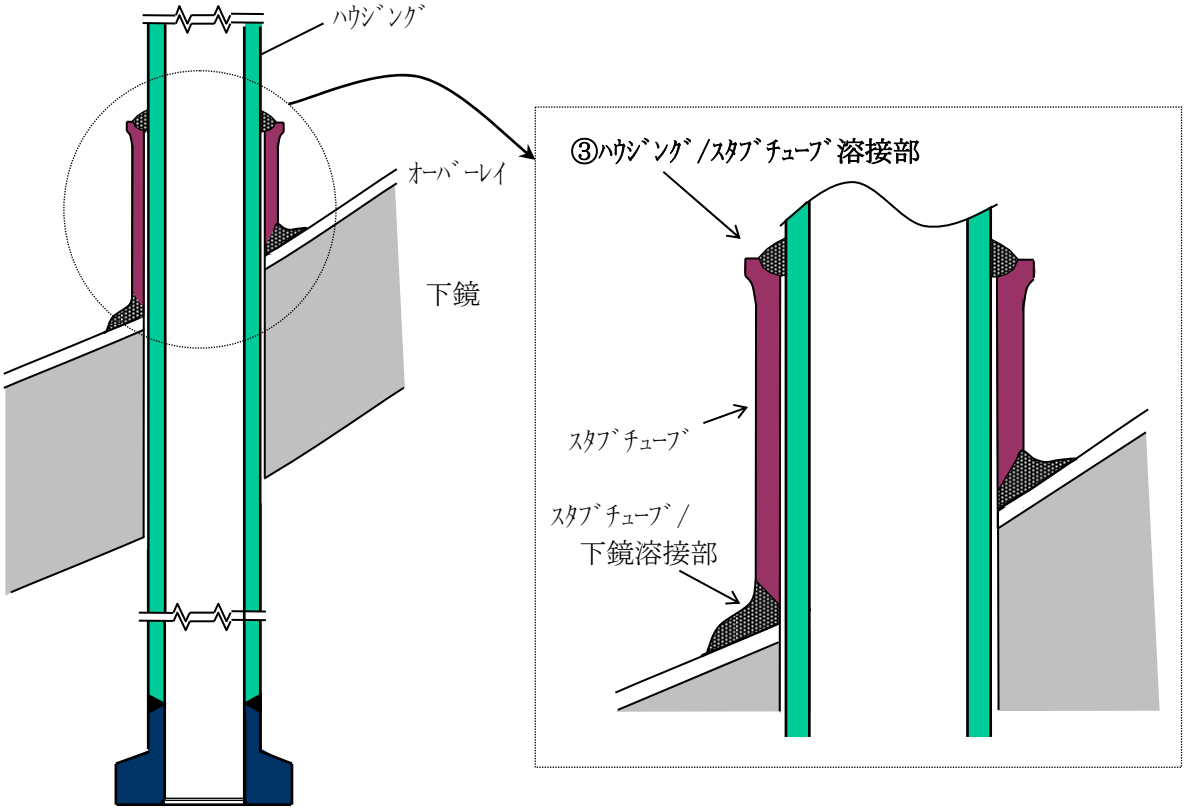


図 A-2.5.3　③ハウジング/スタブチューブ溶接部

2.5.4　④スタブチューブ/下鏡溶接部（図 A-2.5.4）

スタブチューブ/下鏡の溶接部は，ハウジング，案内管，燃料支持金具及び燃料集合体の支持を担っており，溶接部が損傷した場合の CRD 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。

・炉心支持と流路確保

スタブチューブ/下鏡溶接部が損傷した場合でも，その他の溶接部によって炉心支持の機能は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

スタブチューブ/下鏡溶接部が損傷した場合に地震が発生しても，変位が微少であり，制御棒挿入性は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・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。

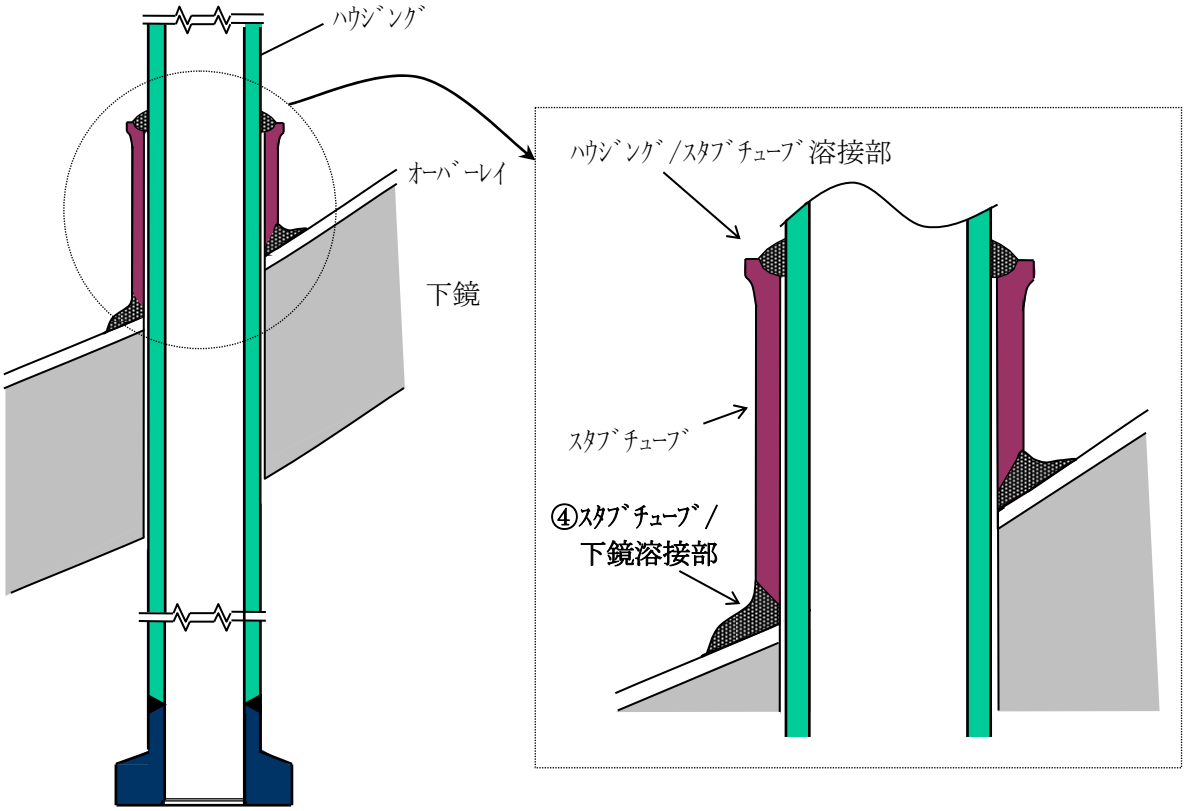


図 A-2.5.4　④スタブチューブ/下鏡溶接部

2.5.5　⑤案内管ラグ/案内管スリーブ溶接部（図 A-2.5.5）

案内管ラグ/案内管スリーブの溶接部は，燃料支持金具の位置決めを担うが，溶接部が損傷した場合でも CRD 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。

・炉心支持と流路確保

案内管ラグ/案内管スリーブ溶接部は炉心支持の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

案内管ラグ/案内管スリーブ溶接部が損傷した場合でも，案内管は回転しないため，制御棒挿入性に影響しない。

・バウンダリの確保

案内管ラグ/案内管スリーブ溶接部はバウンダリの確保の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

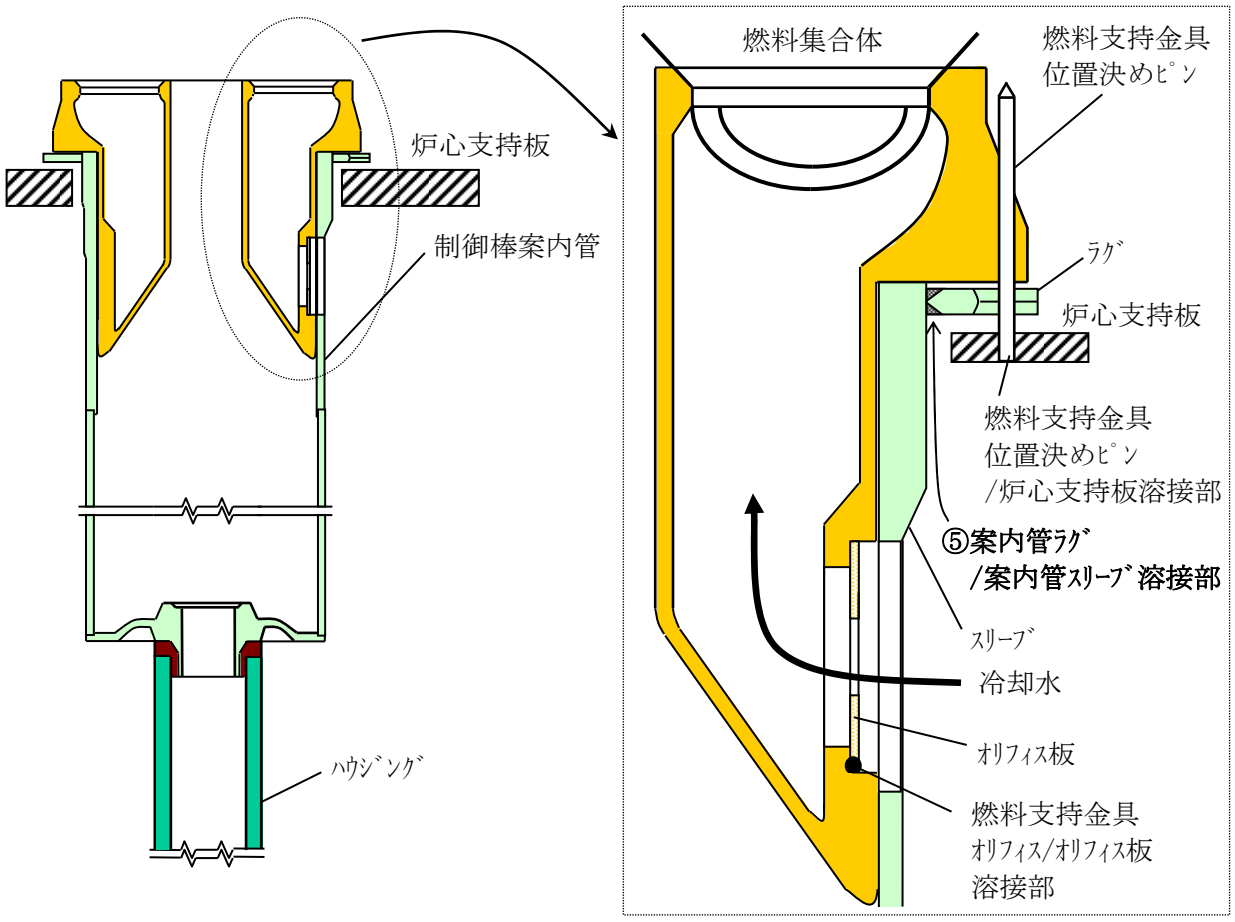


図 A-2.5.5　⑤案内管ラグ/案内管スリーブ溶接部

2.5.6　⑥案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部（図 A-2.5.6）

案内管スリーブ/案内管ボディの溶接部は，案内管，燃料支持金具及び燃料集合体の荷重の支持を担うが，溶接部が損傷した場合でも CRD 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。

・炉心支持と流路確保

案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部が損傷した場合に地震が発生しても，変位が微少であり，炉心支持の機能は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

制御棒挿入性は炉心支持と同様に考えられ，案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部が損傷しても，制御棒挿入性は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・バウンダリの確保

案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部はバウンダリの確保の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

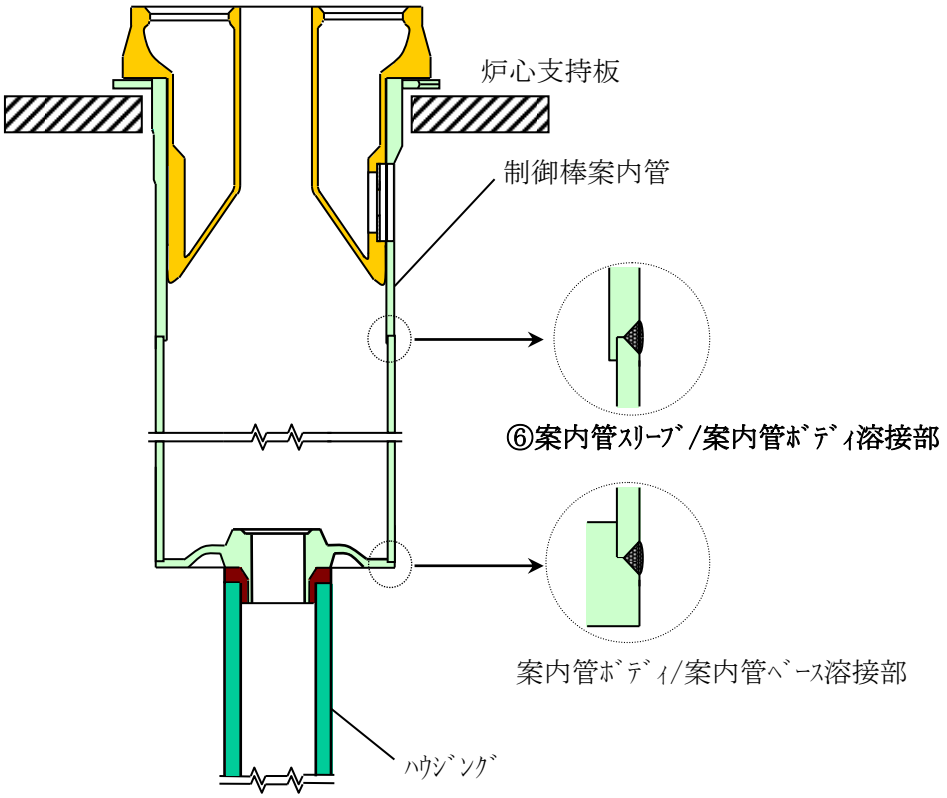


図 A-2.5.6　⑥案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部

2.5.7　⑦案内管ボディ/案内管ベース溶接部（図 A-2.5.7）

案内管ボディ/案内管ベースの溶接部は，案内管，燃料支持金具及び燃料集合体の荷重の支持を担うが，溶接部が損傷した場合でも CRD 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。

・炉心支持と流路確保

案内管ボディ/案内管ベース溶接部が損傷した場合に地震が発生しても，変位が微少であり，炉心支持の機能は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

制御棒挿入性は炉心支持と同様に考えられ，案内管ボディ/案内管ベース溶接部が損傷しても，制御棒挿入性は確保されることから，当該安全機能に影響を与えない。

・バウンダリの確保

案内管ボディ/案内管ベース溶接部はバウンダリの確保の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

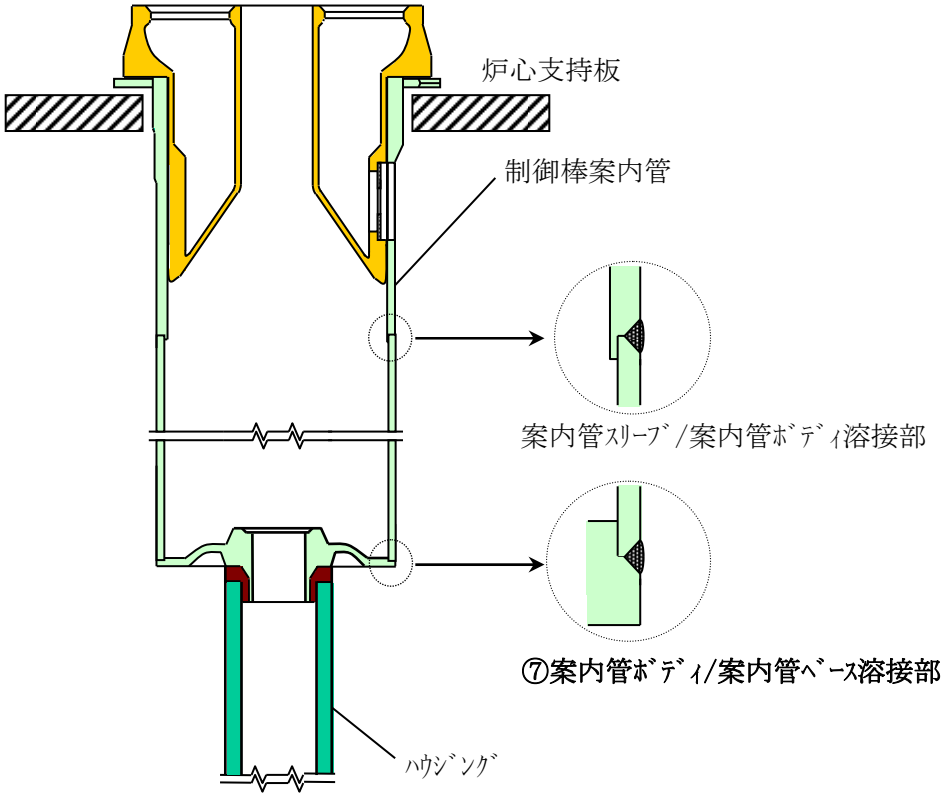


図 A-2.5.7　⑦案内管ボディ/案内管ベース溶接部

2.5.8　⑧燃料支持金具位置決めピン/炉心支持板溶接部（図 A-2.5.8）

燃料支持金具位置決めピン/炉心支持板の溶接部は，燃料支持金具の位置決めを担うが，溶接部が損傷した場合でも CRD 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。

・炉心支持と流路確保

燃料支持金具位置決めピン/炉心支持板溶接部は炉心支持に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

燃料支持金具位置決めピン/炉心支持板溶接部が損傷した場合でも，ピンの位置は保持されるため，制御棒挿入性に影響しない。

・バウンダリの確保

燃料支持金具位置決めピン/炉心支持板溶接部はバウンダリの確保の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

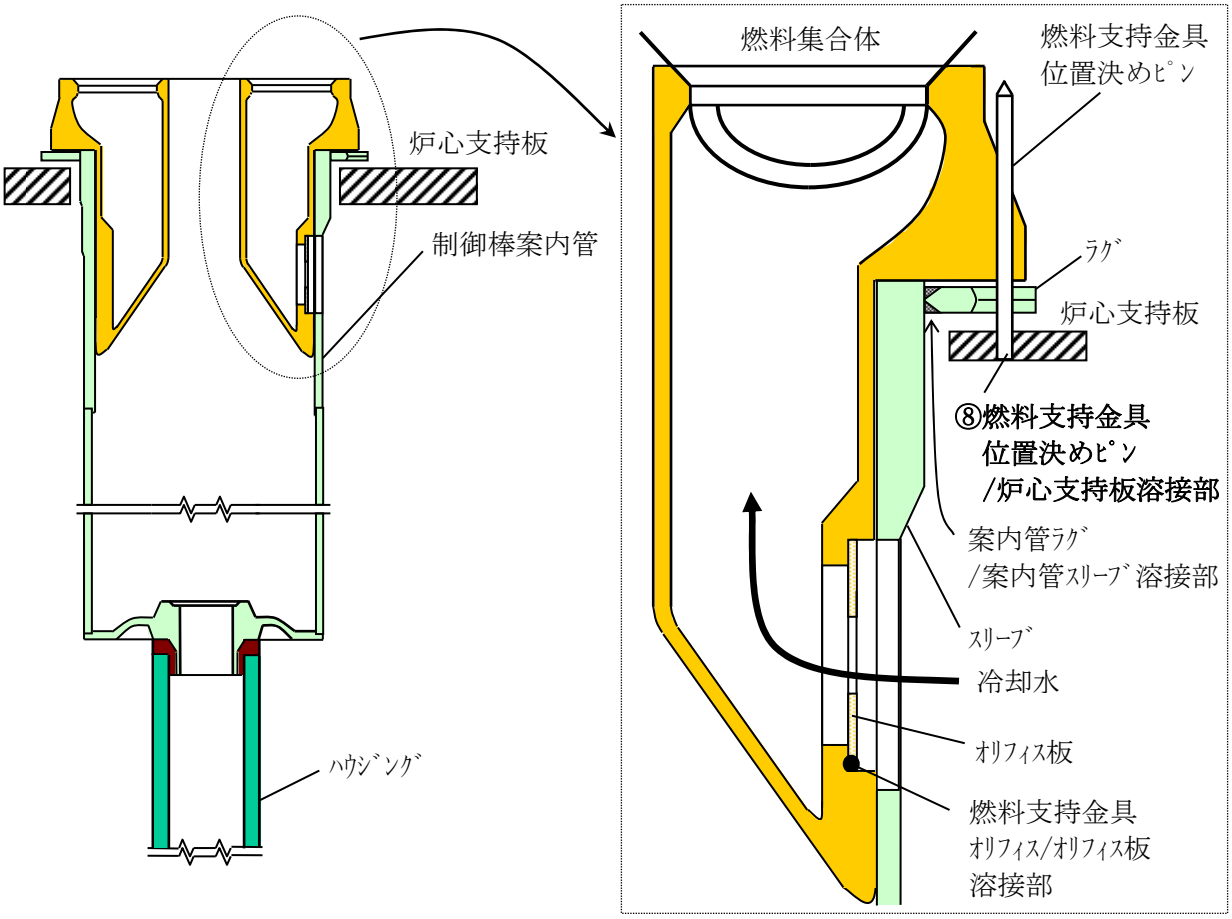


図 A-2.5.8　⑧燃料支持金具位置決めピン/炉心支持板溶接部

2.5.9　⑨燃料支持金具オリフィス/オリフィス板溶接部（図 A-2.5.9）

燃料支持金具オリフィス/オリフィス板の溶接部は，炉心流量の調整を担うが，溶接部が損傷した場合でも CRD 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。

・炉心支持と流路確保

燃料支持金具オリフィス/オリフィス板溶接部は炉心支持の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

・制御棒挿入性

燃料支持金具オリフィス/オリフィス板溶接部が損傷し，オリフィス板が脱落した場合でも，スリーブと燃料支持金具のすき間に留まるため，制御棒挿入性に影響しない。

・バウンダリの確保

燃料支持金具オリフィス/オリフィス板溶接部はバウンダリの確保の機能に影響せず，当該安全機能に影響を与えない。

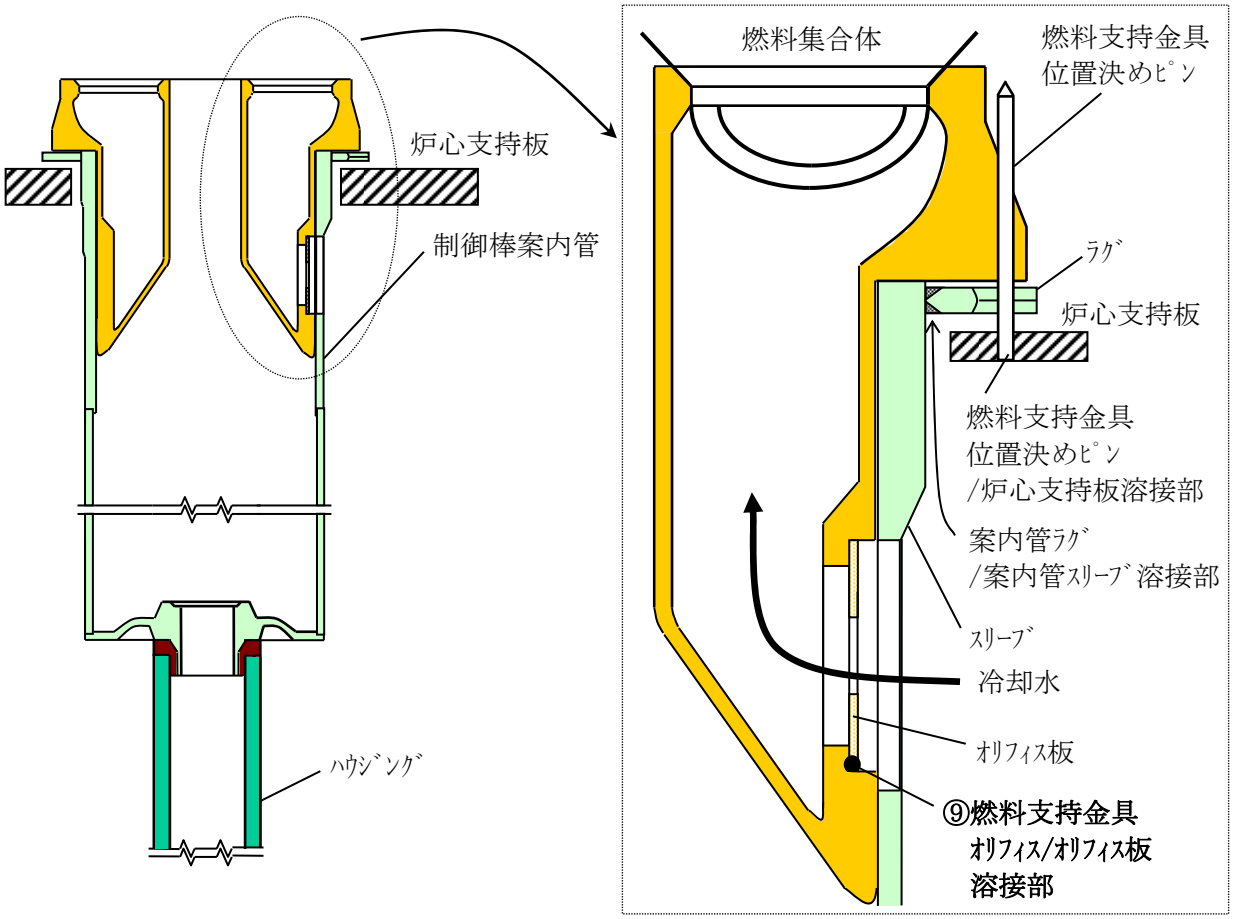


図 A-2.5.9　⑨燃料支持金具オリフィス/オリフィス板溶接部

2.6　CRD ハウジングの点検方針

CRD 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，CRD 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

CRD ハウジングの点検対象を図 A-2.6 に，CRD 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，CRD 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。

CRD ハウジングについては，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，CRD 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/スタブチューブ溶接部，スタブチューブ/下鏡溶接部が損傷した場合に，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，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。

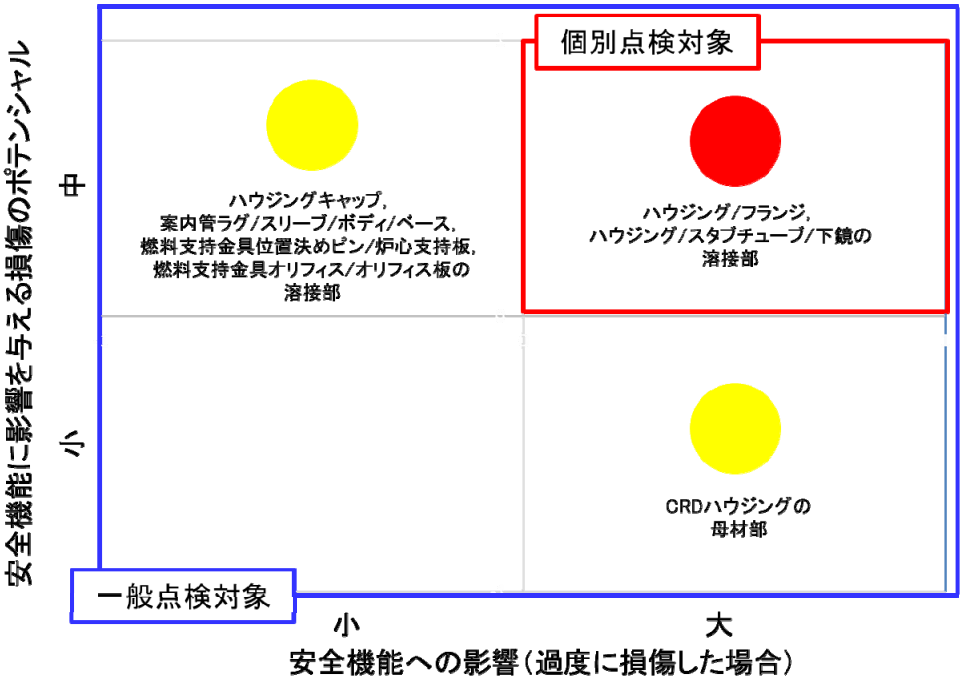


図 A-2.6　CRD ハウジングの点検対象 (注)

（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　CRD 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ﾄﾞ	損傷による安全機能への影響	個別点検要否*
①	ﾊｳｼﾞﾝｸﾞｷｬｯﾌﾟ溶接部	・案内管， 燃料支持金具， 燃料集合体の支持	有 (炉/制)	SCC	・溶接部が損傷しても，燃料集合体及び案内管の自重によりｷﾞｬｯﾌﾟ位置が保持されるため，制御棒挿入性に影響しない。	不要
②	ﾊｳｼﾞﾝｸﾞ/ﾌﾗﾝｼﾞ溶接部	・CRD の支持 ・耐圧	有 (炉/制/ﾊﾞ)	SCC	・溶接部が損傷すると炉水が漏えいする可能性がある。 ・溶接部が損傷すると制御棒挿入性に影響を与える可能性がある。	点検対象
③	ﾊｳｼﾞﾝｸﾞ/ｽﾀﾌﾞﾁｭｰﾌﾞ溶接部	・ﾊｳｼﾞﾝｸﾞ，案内管， 燃料支持金具， 燃料集合体の支持 ・耐圧	有 (炉/制/ﾊﾞ)	SCC	・溶接部が損傷すると炉水が漏えいする可能性がある。 ・溶接部が損傷した場合に地震が発生しても，変位が微少であり，制御棒挿入性は確保できる。	点検対象
④	ｽﾀﾌﾞﾁｭｰﾌﾞ/下鏡溶接部	・ﾊｳｼﾞﾝｸﾞ，案内管， 燃料支持金具， 燃料集合体の支持 ・耐圧	有 (炉/制/ﾊﾞ)	SCC	・溶接部が損傷すると炉水が漏えいする可能性がある。 ・溶接部が損傷した場合に地震が発生しても，変位が微少であり，制御棒挿入性は確保できる。 ・下鏡低合金鋼への亀裂進展速度は極めて小さい。 (～5mm/40 年)	点検対象
⑤	案内管ﾗｸﾞ/案内管ｽﾘｰﾌﾞ溶接部	・案内管ﾗｸﾞ， 燃料支持金具の位置決め	—	SCC	・溶接部が損傷して案内管ﾗｸﾞが破断しても，案内管は回転しないため，制御棒挿入性へ影響しない。	不要
⑥	案内管ｽﾘｰﾌﾞ/案内管ﾎﾞﾃﾞｨ溶接部	・案内管ｽﾘｰﾌﾞ， 燃料支持金具， 燃料集合体の支持	有 (炉/制)	SCC	・溶接部が損傷した場合に地震が発生しても，変位が微少であり，制御棒挿入性は確保できる。	不要
⑦	案内管ﾎﾞﾃﾞｨ/案内管ﾍﾞｰｽ溶接部	・案内管ｽﾘｰﾌﾞ， 燃料支持金具， 燃料集合体の支持	有 (炉/制)	SCC	・溶接部が損傷した場合に地震が発生しても，変位が微少であり，制御棒挿入性は確保できる。	不要
⑧	燃料支持金具位置決めﾋﾟﾝ/炉心支持板溶接部	・燃料支持金具， 燃料集合体の位置決め	—	SCC (ﾀｯｸ溶接)	・溶接部が損傷しても，ﾋﾟﾝの位置は保持されるため，制御棒挿入性に影響しない。	不要
⑨	燃料支持金具ｵﾘﾌｨｽ/ｵﾘﾌｨｽ板溶接部	・炉心流量の調整	—	SCC	・溶接部が損傷してｵﾘﾌｨｽ板が脱落しても，ｽﾘｰﾌﾞと燃料支持金具のすき間に留まるため，制御棒挿入性に影響しない。	不要

炉：炉心支持と流路確保
制：制御棒挿入性
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。ここで，SCC による亀裂からの炉水の漏えい量は微少であり，CRD 駆動水圧系で補給可能と考えられることから， CRD 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，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

CRD ハウジングの点検範囲（個数）は，CRD 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

付録Ｄに示すように，ハウジング/スタブチューブ溶接部の軸方向亀裂は，実運転期間約 36 年で貫通し，スタブチューブ/下鏡溶接部の軸方向亀裂は，実運転期間約 53 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遅いという特徴があるが，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て，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，機器の供用開始後 25 年以降の毎定検に点検を実施するものとする。

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 2018 Outages, BWR-VIP2019-078, ML19232A214

(4) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2019 Outages, BWR-VIP2020-082, ML20283A472

(5) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2020 Outages, BWR-VIP2021-092, ML21336A344

(6) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2021 Outages, BWR-VIP2022-078, ML22321A153

(7) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2022 Outages, BWR-VIP2023-085, ML23335A047

(8) BWR Vessel and Internals Project Vessel Internals Inspection Summaries for 2023 Outages, BWR-VIP2024-049, ML24297A566

付録Ｂ　SCC 亀裂進展速度式

1. はじめに

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

2. CRD ハウジング溶接部の使用材料

CRD ハウジングの溶接部で使用される材料の例を図 B-1 に示す。ハウジング/スタブチューブ溶接部（J 溶接部）及びスタブチューブ/下鏡溶接部の溶接金属がニッケル合金の 182 合金，82 合金，ハウジングが SUS304 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）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 亀裂進展速度を次式に示す。

$$da/dt = 0 \qquad (K \leqq 0) \qquad (1)$$

$$da/dt = 2\times10^{-9} \qquad (0 < K < 13.3) \qquad (2)$$

$$da/dt = 3\times10^{-15}\,K^{5.186} \qquad (13.3 \leqq K \leqq 50.3) \qquad (3)$$

$$da/dt = 2\times10^{-6} \qquad (K > 50.3) \qquad (4)$$

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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。また，上式で表される 182 合金の SCC 亀裂進展速度線図を図 B-2 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。

3.2 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 亀裂進展速度を以下に示す。本亀裂進展速度は，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 亀裂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。

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

・溶接まま（As-Welded）

$da/dt = 0$ $(K \leqq 0)$ (5)

$da/dt = 2.0 \times 10^{-9}$ $(0 < K < 13.7)$ (6)

$da/dt = 1.1 \times 10^{-15} K^{5.5}$ $(13.7 \leqq K \leqq 22.5)$ (7)

$da/dt = 6.0 \times 10^{-11} K^{2.0}$ $(K > 22.5)$ (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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。また，上式で表される 82 合金の SCC 亀裂進展速度線図を図 B-3 に示す。

・溶接後熱処理（PWHT）

$da/dt = 0$ $(K \leqq 0)$ (9)

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

$da/dt = 3.7 \times 10^{-16} K^{5.5}$ $(16.7 \leqq K \leqq 22.5)$ (11)

$da/dt = 2.0 \times 10^{-11} K^{2.0}$ $(K > 22.5)$ (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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。また，上式で表される 82 合金の SCC 亀裂進展速度線図を図 B-3 に示す。

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

・溶接まま（As-Welded）

$da/dt = 0$ $(K \leqq 0)$ (13)

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

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

$da/dt = 2.0 \times 10^{-11} K^{2.0}$ $(K > 22.5)$ (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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。また，上式で表される 82 合金の SCC 亀裂進展速度線図を図 B-4 に示す。

・溶接後熱処理（PWHT）

$da/dt = 0$ $(K \leqq 0)$ (17)

$da/dt = 2.0 \times 10^{-9}$ $(0 < K < 20.5)$ (18)

$da/dt = 1.2 \times 10^{-16} K^{5.5}$ $(20.5 \leqq K \leqq 22.5)$ (19)

$da/dt = 6.7 \times 10^{-12} K^{2.0}$ $(K > 22.5)$ (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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。また，上式で表される 82 合金の SCC 亀裂進展速度線図を図 B-4 に示す。

3.3 鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展速度

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

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

$$da/dt = 0 \qquad (K \leqq 0) \qquad (21)$$

$$da/dt = 2.0\times10^{-9} \qquad (0 < K < 3.4) \qquad (22)$$

$$da/dt = 1.43\times10^{-10}K^{2.161} \qquad (3.4 \leqq K \leqq 57.9) \qquad (23)$$

$$da/dt = 9.2\times10^{-7} \qquad (K > 57.9) \qquad (24)$$

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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。また，上式で表される鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展速度線図を図 B-5 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 亀裂進展速度を次式に示す。

$$da/dt = 0 \qquad (K \leqq 0) \qquad (25)$$

$$da/dt = 2.0\times10^{-9} \qquad (0 < K < 12.9) \qquad (26)$$

$$da/dt = 7.94\times10^{-12}K^{2.161} \qquad (12.9 \leqq K \leqq 57.9) \qquad (27)$$

$$da/dt = 5.1\times10^{-8} \qquad (K > 57.9) \qquad (28)$$

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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。また，上式で表される鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展速度線図を図 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

(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 亀裂進展速度を次式に示す。

$$da/dt = 0 \qquad (K \leqq 0) \qquad (29)$$

$$da/dt = 2.0\times10^{-9} \qquad (0 < K < 6.7) \qquad (30)$$

$$da/dt = 3.33\times10^{-11}K^{2.161} \qquad (6.7 \leqq K \leqq 57.9) \qquad (31)$$

$$da/dt = 2.1\times10^{-7} \qquad (K > 57.9) \qquad (32)$$

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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。また，上式で表される低炭素量ステンレス鋼の SCC 亀裂進展速度線図を鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展速度線図と併せて，図 B-5 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 における低炭素量ステンレス鋼（SUS304L，SUS316L，SUS316（原子力仕様））の SCC 亀裂進展速度を次式に示す。

$$da/dt = 0 \qquad (K \leqq 0) \qquad (33)$$

$$da/dt = 2.0\times10^{-9} \qquad (0 < K < 19.3) \qquad (34)$$

$$da/dt = 3.33\times10^{-12}K^{2.161} \qquad (19.3 \leqq K \leqq 57.9) \qquad (35)$$

$$da/dt = 2.1\times10^{-8} \qquad (K > 57.9) \qquad (36)$$

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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ 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 亀裂進展速度線図を鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展速度線図と併せて，図 B-6 に示す。

(25)～(36)式の亀裂進展速度は，SUS304L，SUS316L 及び SUS316（原子力仕様）に対して設定されたものであるが，遠心鋳造の SUS316（炭素含有量≦0.03%）の耐 SCC 性はこれらと同等以上であるため，上記の亀裂進展速度を適用可能と考えられる。

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.

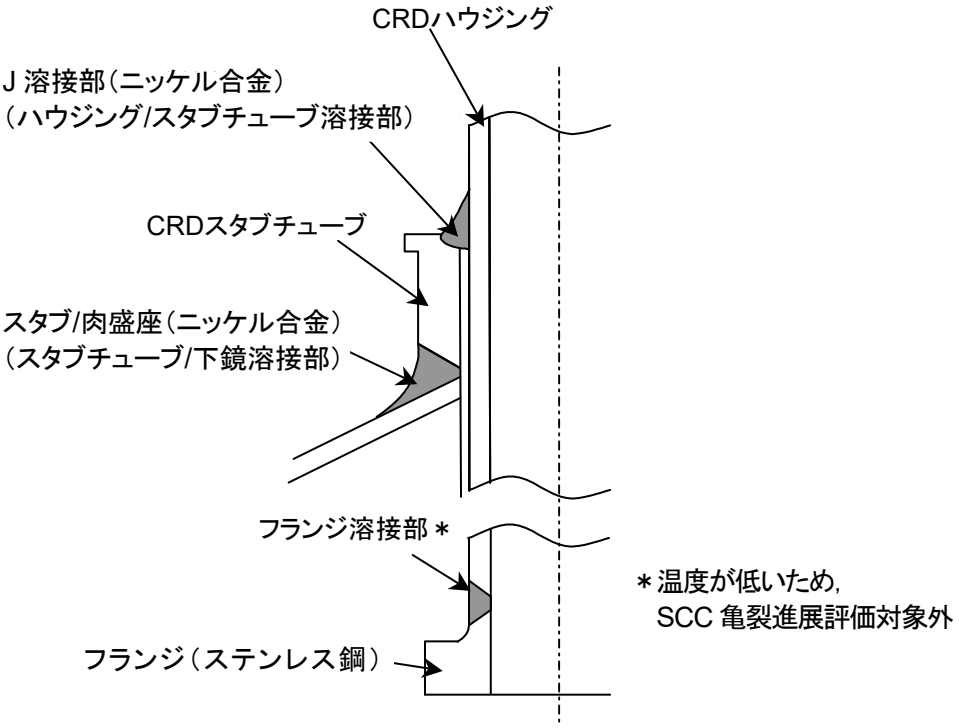


図 B-1　CRD ハウジングの溶接部の例

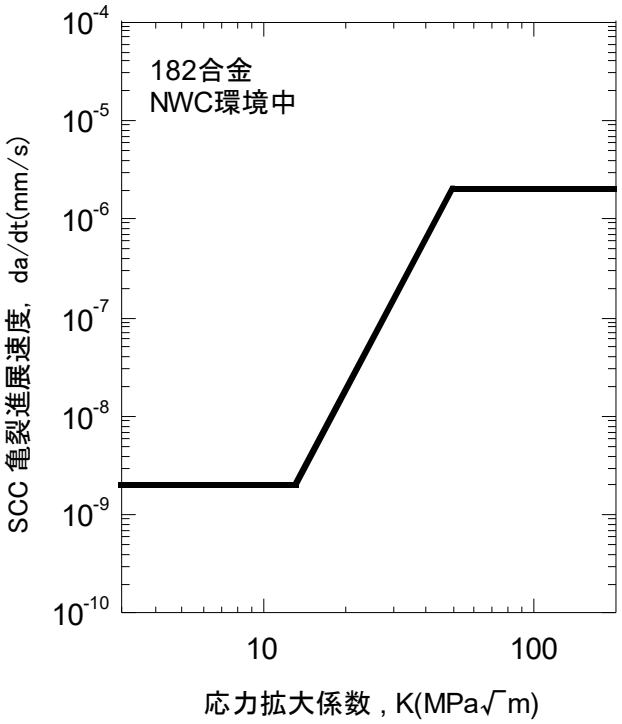


図 B-2　NWC 環境中における 182 合金の SCC 亀裂進展速度線図

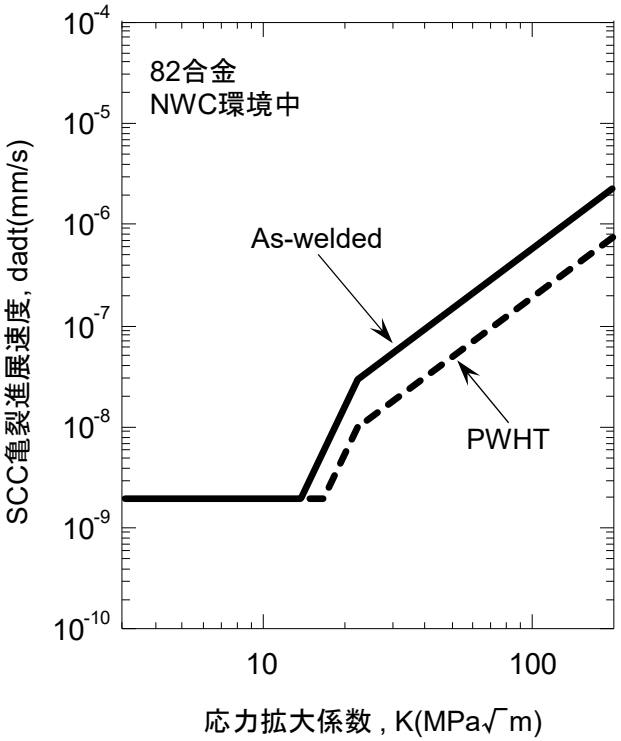


図 B-3　NWC 環境中における 82 合金の SCC 亀裂進展速度線図

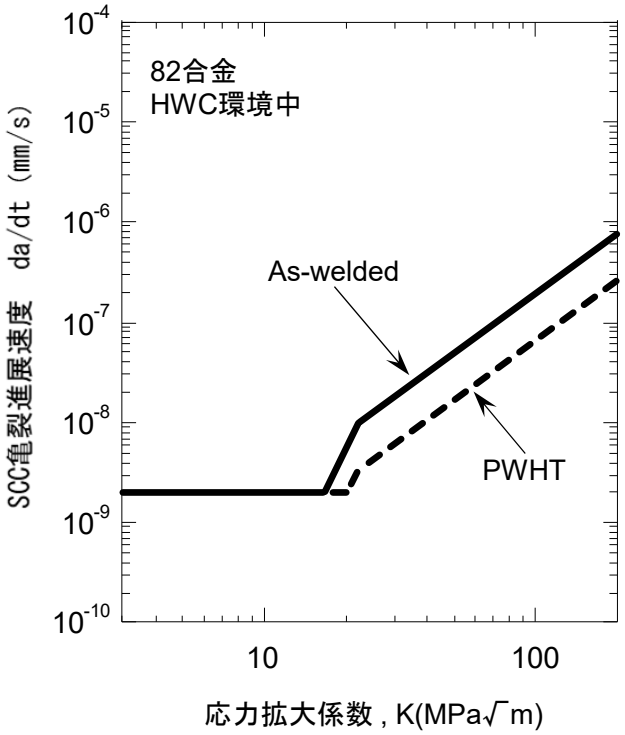


図 B-4　HWC 環境中における 82 合金の SCC 亀裂進展速度線図

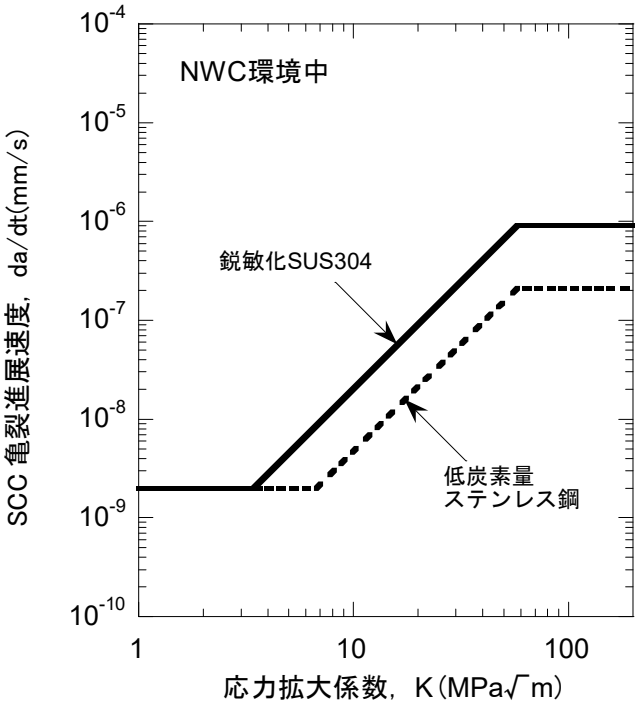


図 B-5　NWC 環境中におけるステンレス鋼の SCC 亀裂進展速度線図

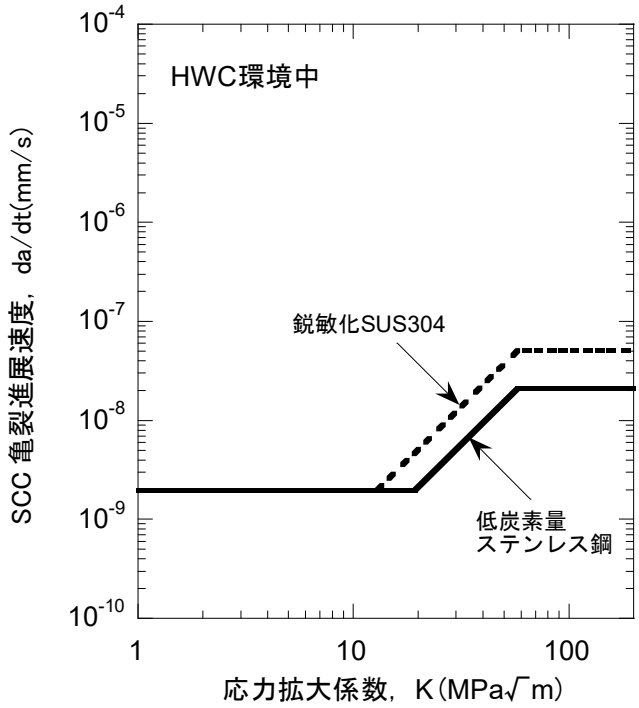


図 B-6　HWC 環境中におけるステンレス鋼の SCC 亀裂進展速度線図

付録Ｃ　CRD ハウジング溶接部の残留応力評価

1. はじめに

本付録は，CRD ハウジングのハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部について，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[1)]

(1) 解析モデル

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

(2) 解析手順

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

(3) 物性値

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

3. 解析結果

3.1 ハウジング/スタブチューブ溶接部[1)]

ハウジング/スタブチューブ溶接部の残留応力解析結果を図 C-2 に示す。

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

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

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

3.2 スタブチューブ/下鏡溶接部[1)]

スタブチューブ/下鏡溶接部の残留応力解析結果を，図 C-3 に示す。

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

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

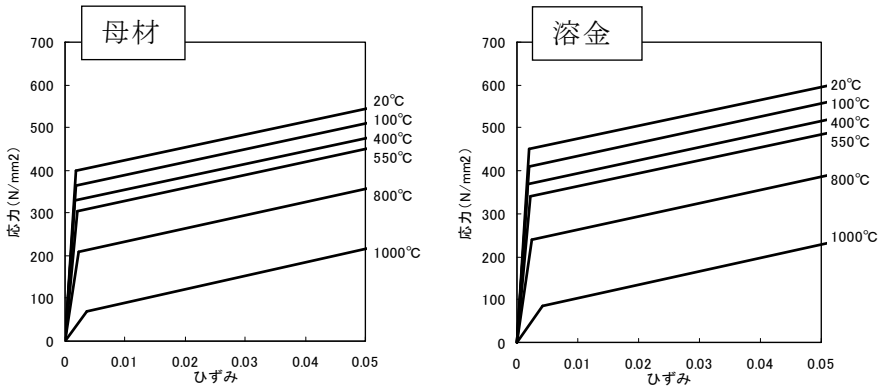
参考文献

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

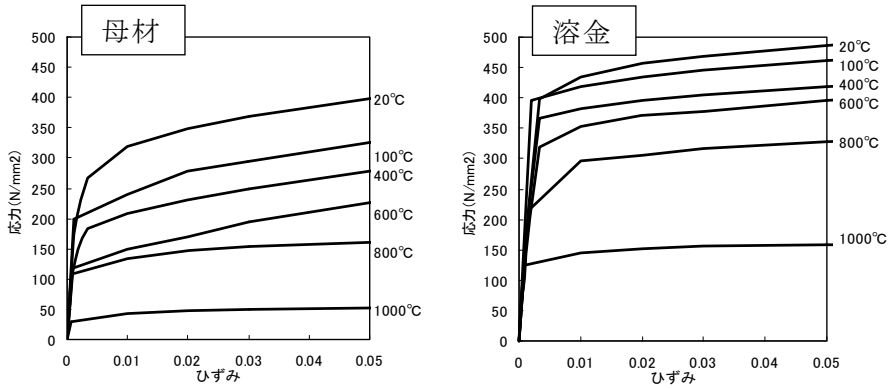
表 C-1　伝熱解析に用いた物性値

SUS304及びSUS316L								
温度	℃	20	100	200	400	600	1000	1500	2000
熱伝導率	kJ/mm・s・℃	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	KJ/kg・℃	0.452	0.493	0.523	0.553	0.578	0.620	0.678	0.737
600系ニッケル合金									
温度	℃	20	149	288	566	815	1000	1500	2000
熱伝導率	kJ/mm・s・℃	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	KJ/kg・℃	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-1　熱応力解析に用いた物性値

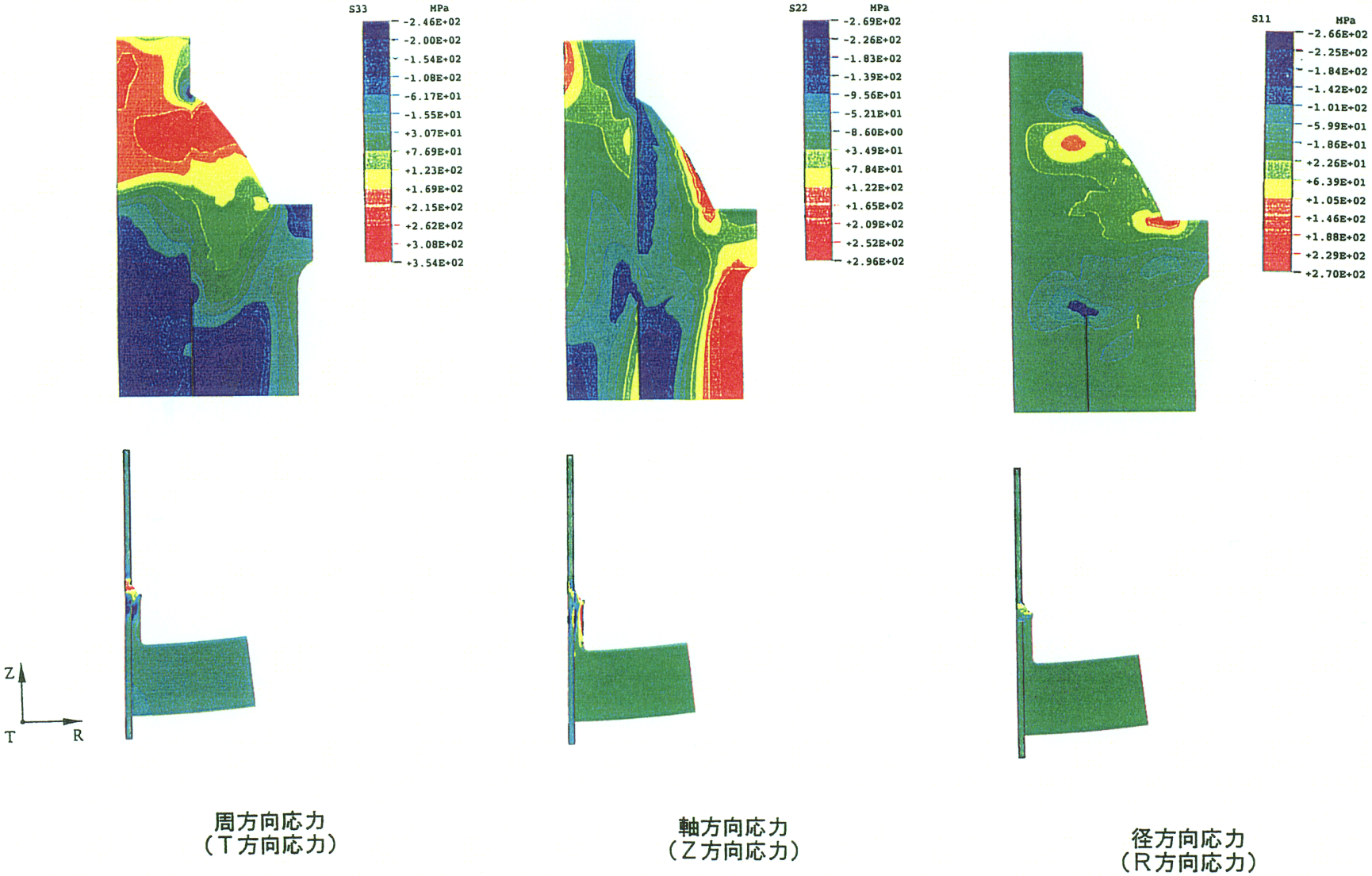
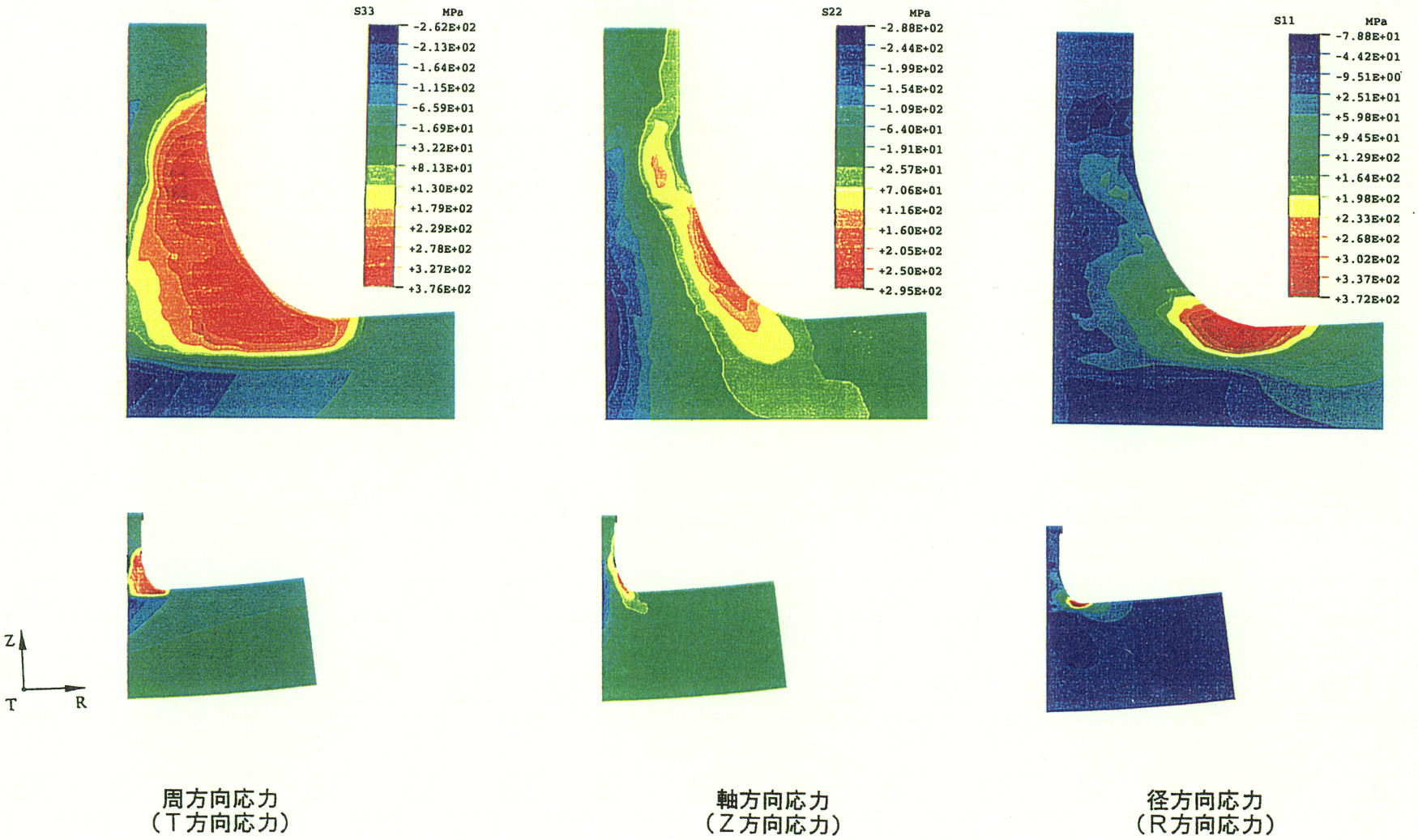


図 C-2　ハウジング/スタブチューブ溶接部の残留応力解析結果 [1)]



周方向応力
（T方向応力）

軸方向応力
（Z方向応力）

径方向応力
（R方向応力）

図 C-3　スタブチューブ/下鏡溶接部の残留応力解析結果 [1)]

付録Ｄ　CRD ハウジング溶接部の SCC 亀裂進展評価

1. はじめに

本付録は，CRD ハウジングのハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部における 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。

なお，ハウジング/フランジ溶接部は温度が低く，SCC が生じる可能性が極めて小さいため，亀裂進展評価対象としない。

2. ハウジング/スタブチューブ溶接部における評価

2.1 評価条件

ａ．評価対象

ニッケル合金の 182 合金の溶接部について，亀裂進展評価を行う。

なお，本付録においては，ニッケル合金の 82 合金及び改良 182 合金は 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よい。

ｂ．想定する亀裂進展経路

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

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

ｃ．亀裂進展評価に用いる応力

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

ｄ．応力拡大係数解

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

ｅ．SCC 亀裂進展速度

182 合金溶接部の SCC 亀裂進展速度として，付録Ｂで設定した，通常一次水質環境下における 182 合金の SCC 亀裂進展速度を用いた。

$da/dt = 0$ $(K \leqq 0)$ (1)

$da/dt = 2\times10^{-9}$ $(0 < K < 13.3)$ (2)

$da/dt = 3\times10^{-15} K^{5.186}$ $(13.3 \leqq K \leqq 50.3)$ (3)

$da/dt = 2\times10^{-6}$ $(K > 50.3)$ (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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。

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

ｆ．初期亀裂形状

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

2.2 評価結果

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

図 D-1 に示した経路②に対する周方向亀裂進展評価に用いた当該部の亀裂進展方向に対する鉛直方向応力分布（残留応力＋運転応力）を図 D-4 に示す。また，経路②に対する周方向亀裂進展評価結果を図 D-5 に示す。図 D-5(a)では，亀裂の進展に伴う表面亀裂の最深点の応力拡大係数の変化を示した。図 D-5(b)では，亀裂深さと時間の関係を示した。周方向亀裂進展評価における経路全長は 24.1 mm であるが，80 年経過しても，周方向亀裂は経路全長に達しない。

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

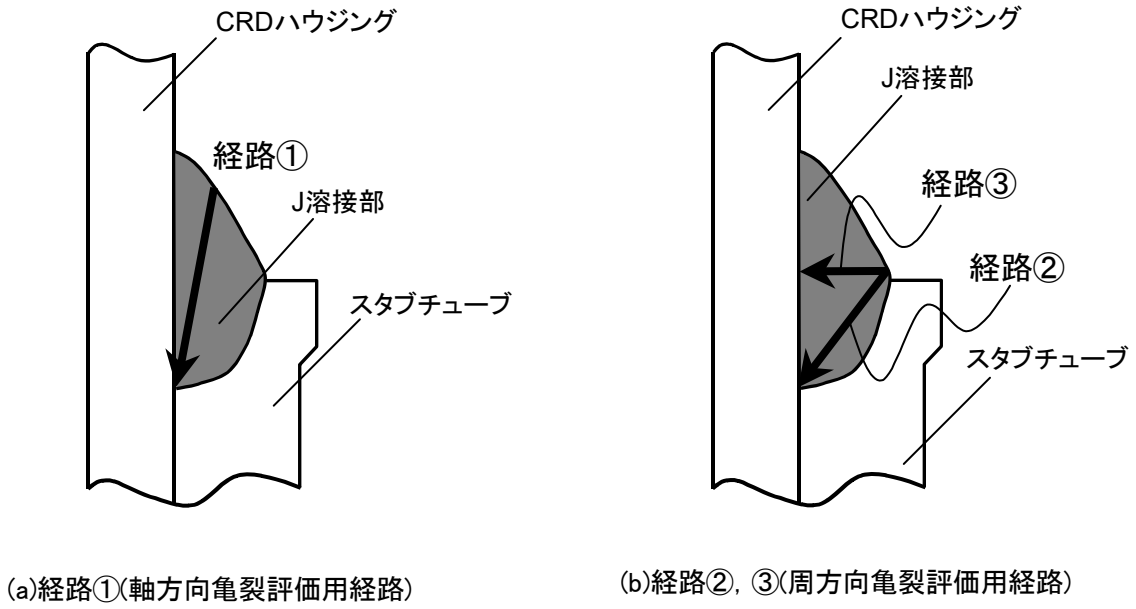


図 D-1　ハウジング/スタブチューブ溶接部に想定した亀裂進展経路

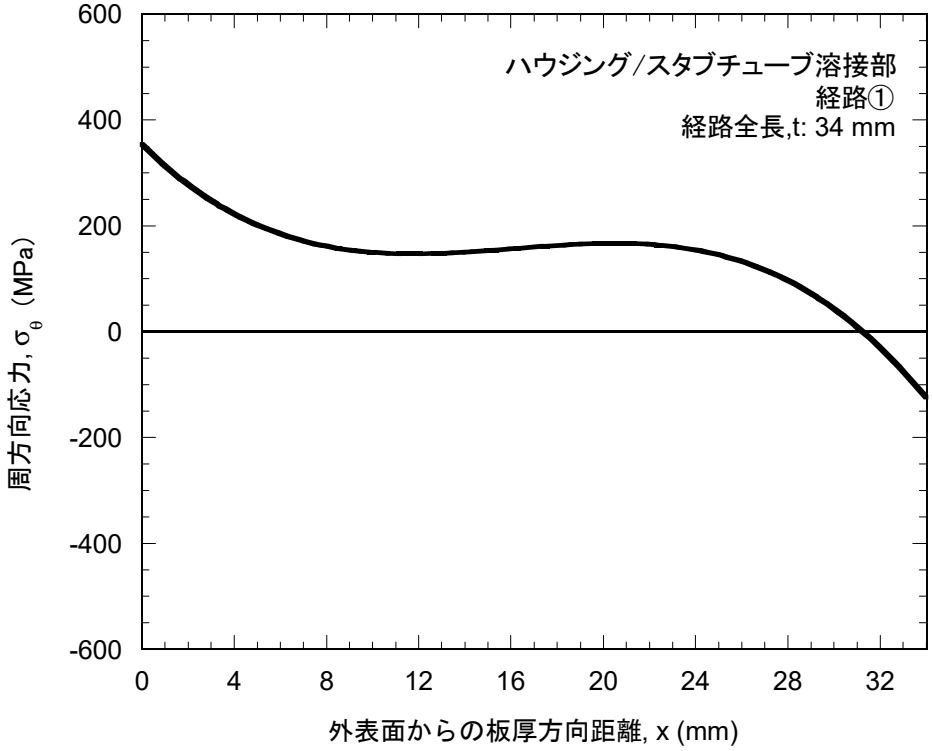
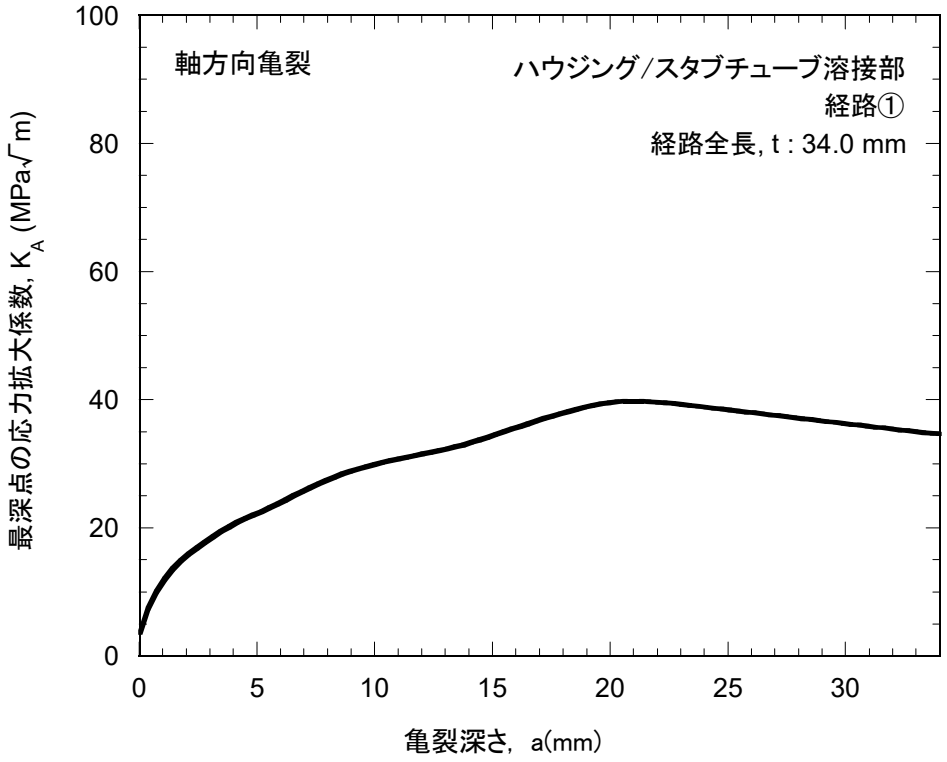
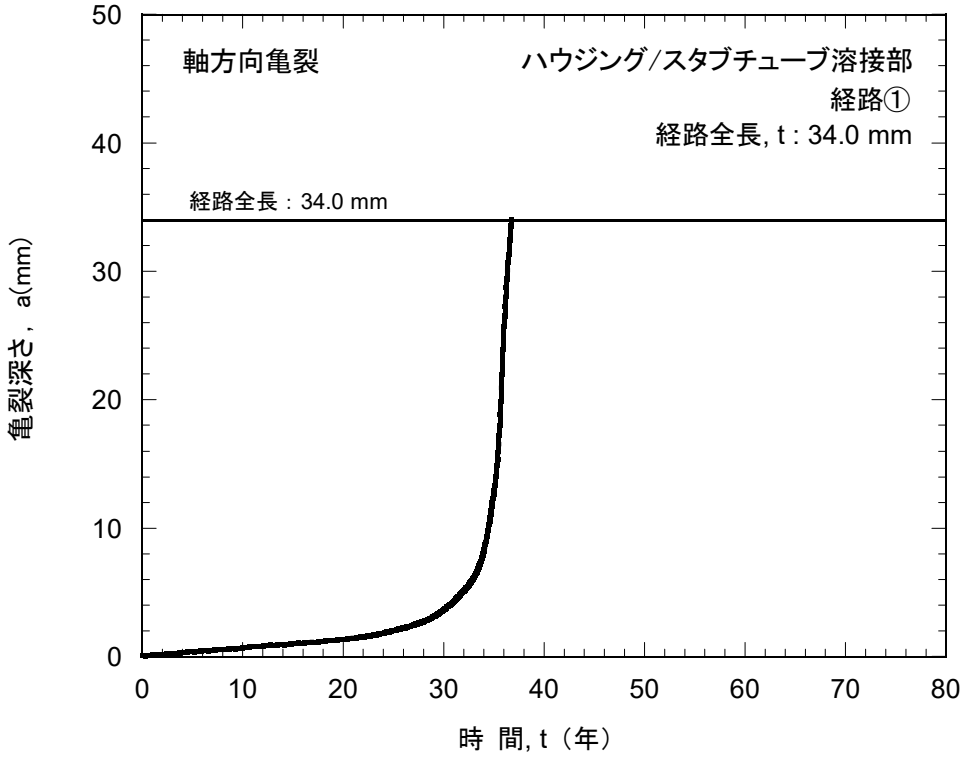


図 D-2　ハウジング/スタブチューブ溶接部，経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた周方向応力分布（残留応力＋運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

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

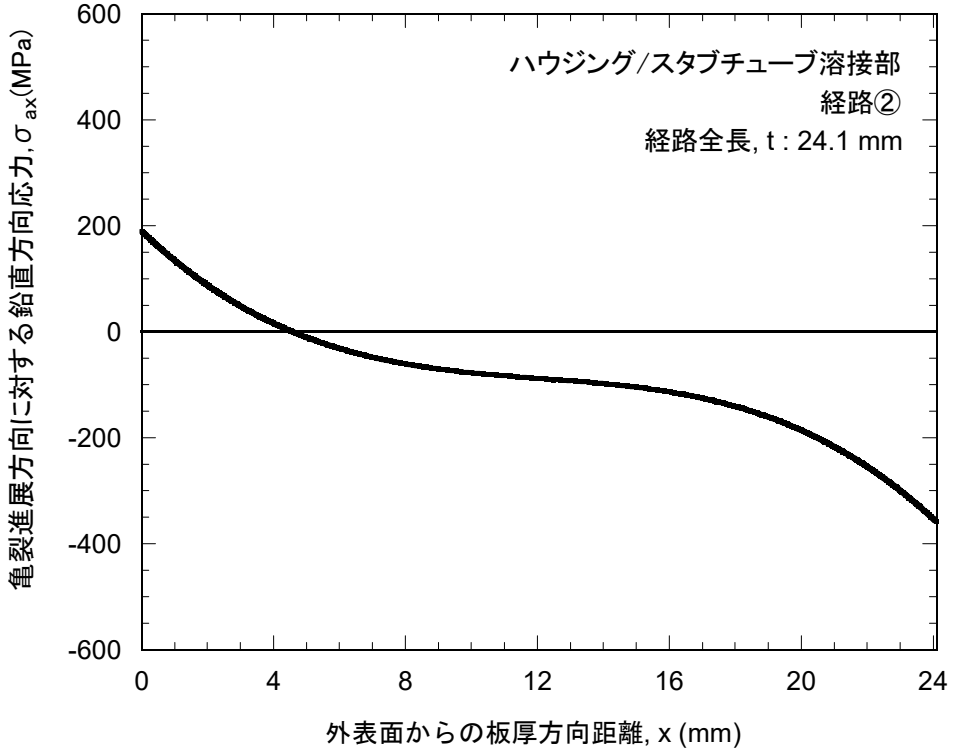
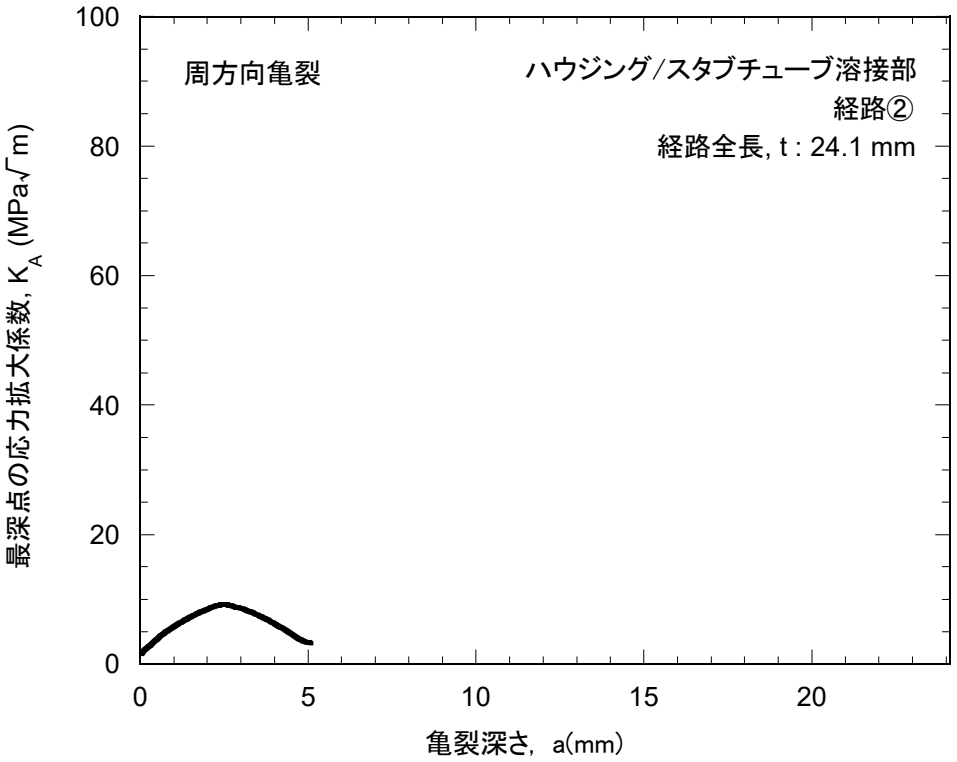
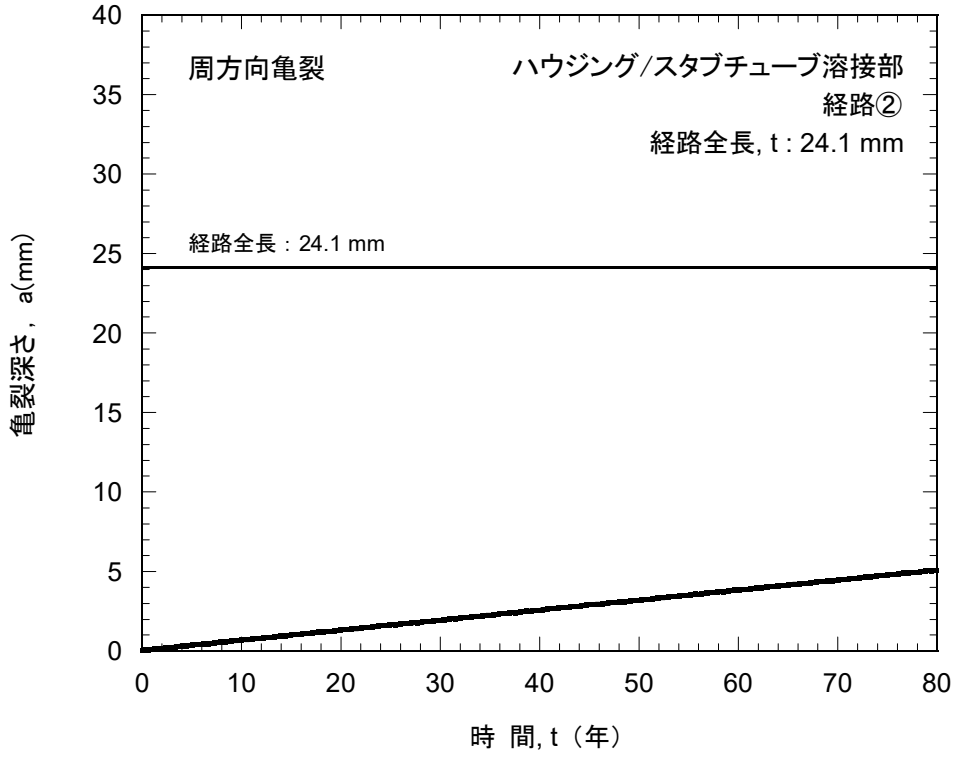


図 D-4　ハウジング/スタブチューブ溶接部，経路②の周方向亀裂進展評価に用いた経路に鉛直方向の応力分布（残留応力＋運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

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

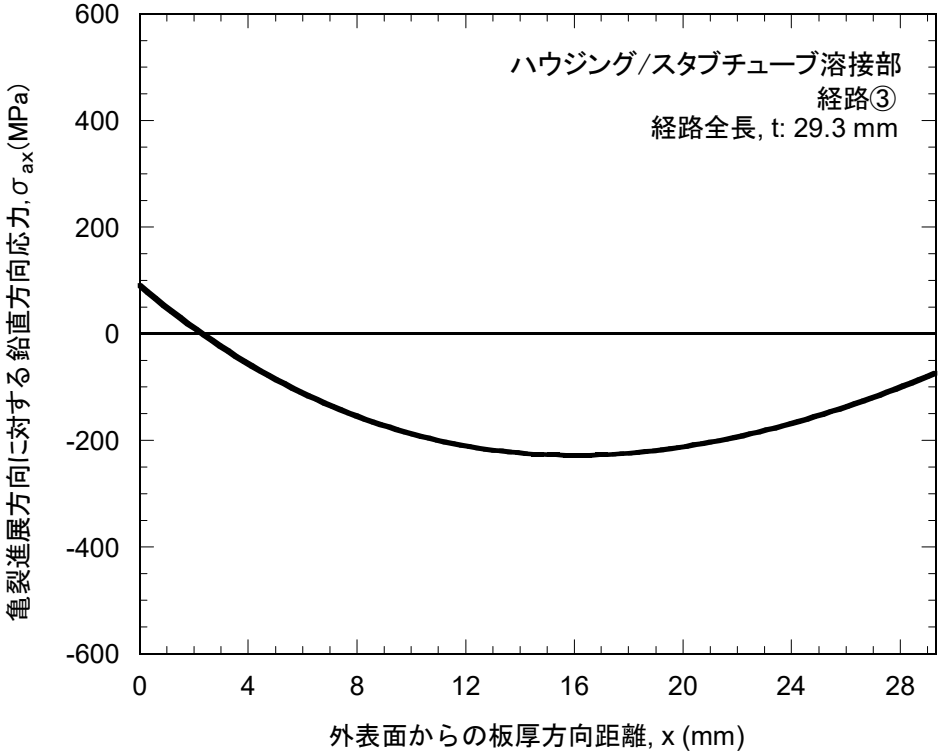
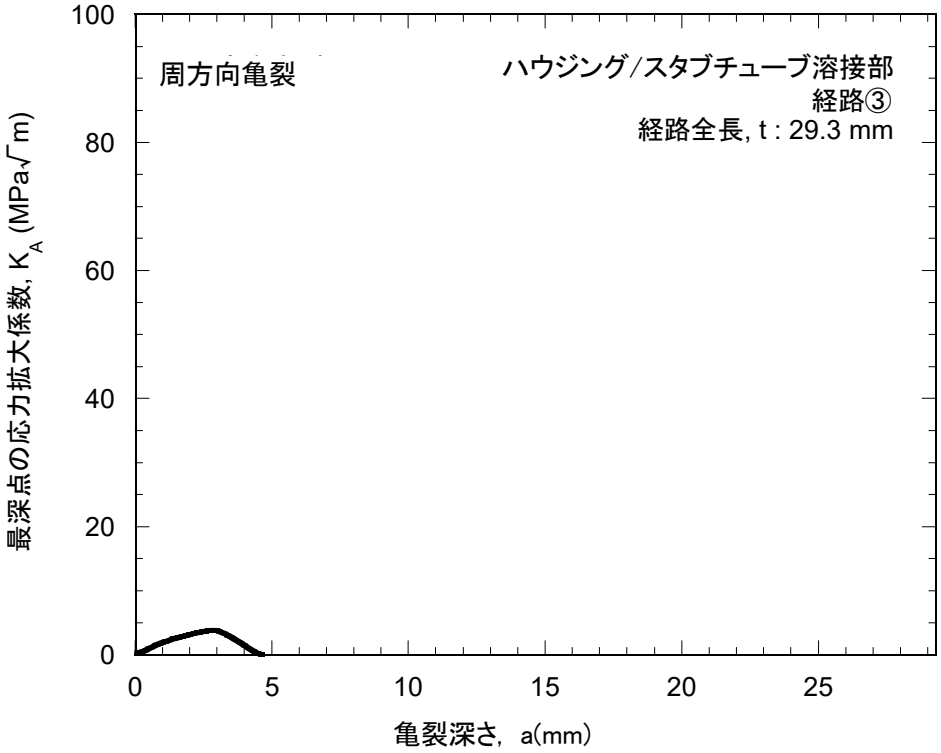
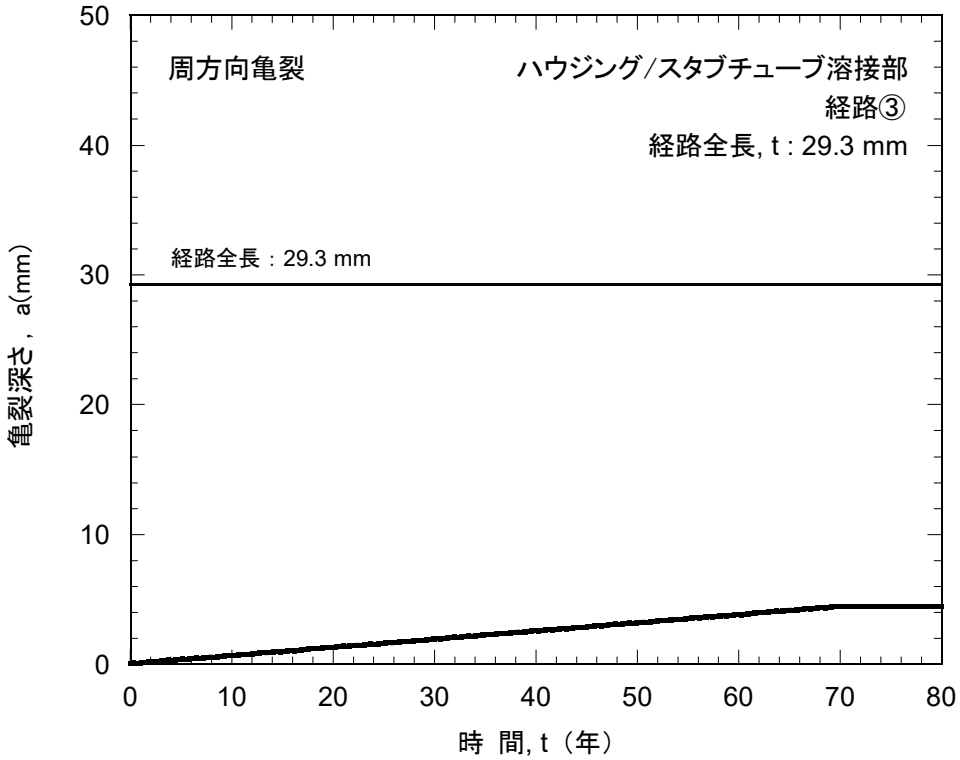


図 D-6　ハウジング/スタブチューブ溶接部，経路③の周方向亀裂進展評価に用いた経路に鉛直方向の応力分布（残留応力＋運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

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

3. スタブチューブ/下鏡溶接部における評価

3.1 評価条件

a．評価対象

182 合金の溶接部について，亀裂進展評価を行う。

なお，82 合金及び改良 182 合金は 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よい。

b．想定する亀裂進展経路

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

c．亀裂進展評価に用いる応力

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

d．応力拡大係数解

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

e．SCC 亀裂進展速度

182 合金溶接部の SCC 亀裂進展速度として，付録Ｂで設定した，通常一次水質環境下における 182 合金の SCC 亀裂進展速度を用いた。

$da/dt = 0$ $(K \leqq 0)$ (1)

$da/dt = 2\times10^{-9}$ $(0 < K < 13.3)$ (2)

$da/dt = 3\times10^{-15} K^{5.186}$ $(13.3 \leqq K \leqq 50.3)$ (3)

$da/dt = 2\times10^{-6}$ $(K > 50.3)$ (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 $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$ である。

f．初期亀裂形状

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

3.2 評価結果

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

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

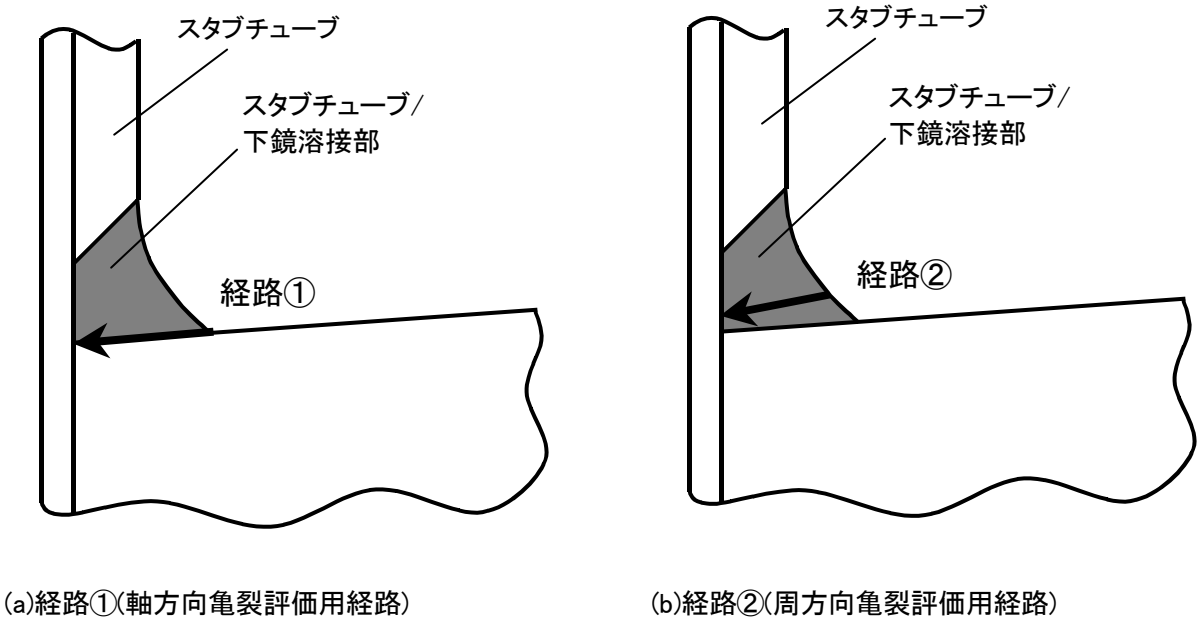


図 D-8　スタブチューブ/下鏡溶接部に想定した亀裂進展経路

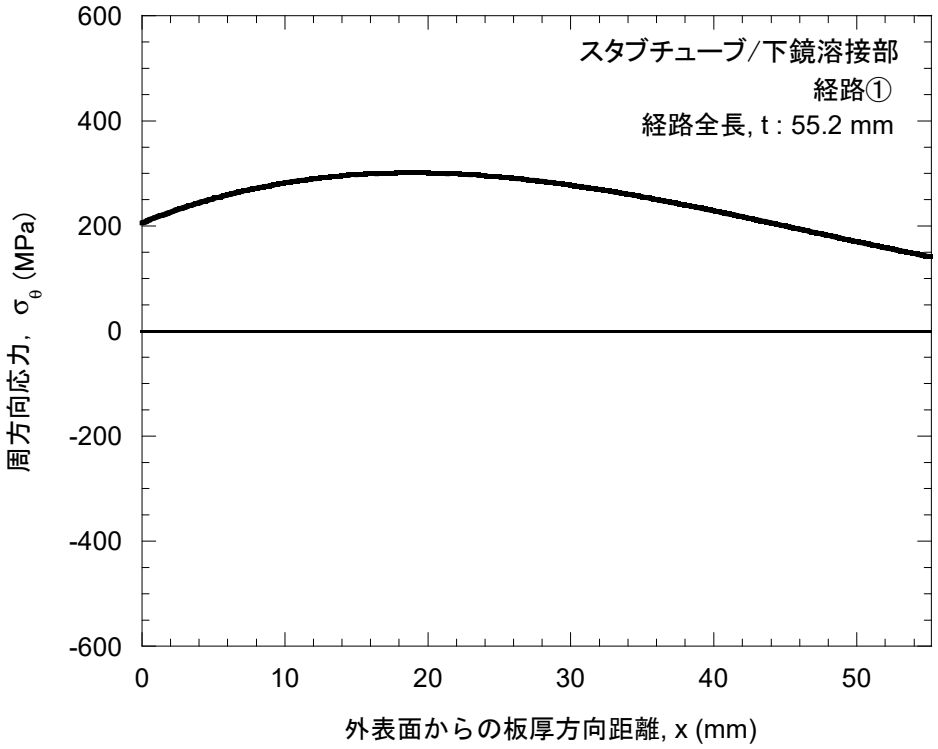
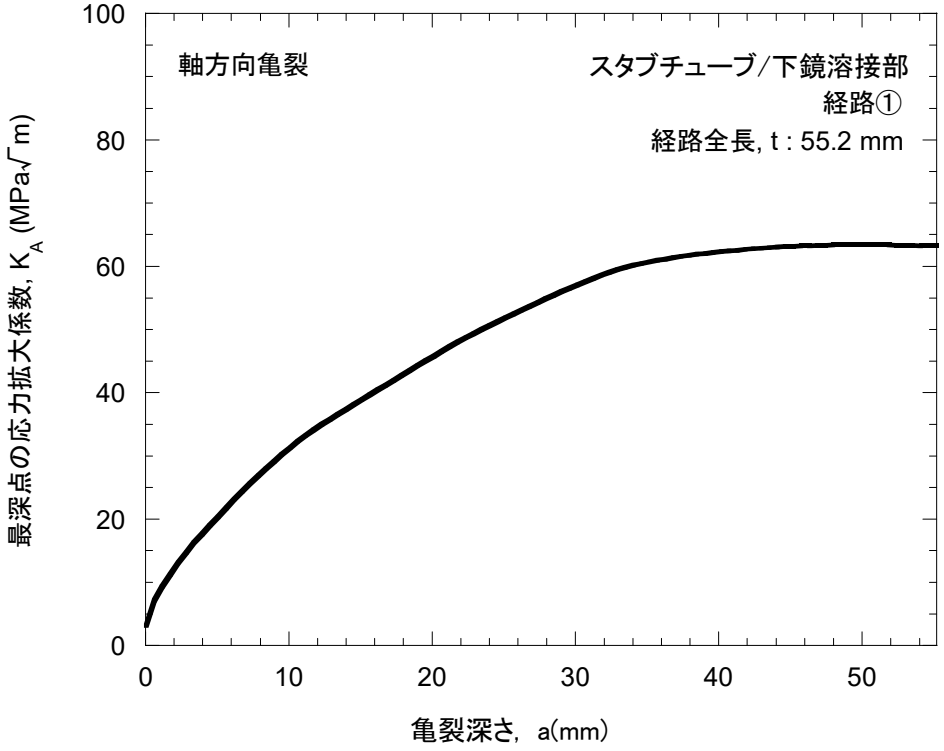
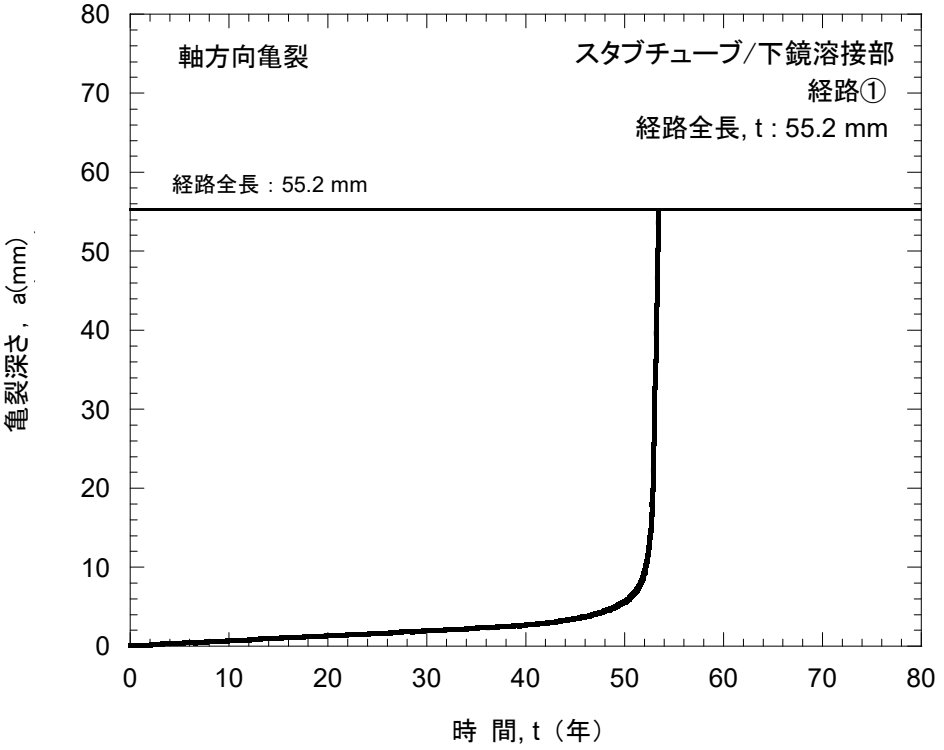


図 D-9　スタブチューブ/下鏡溶接部，経路①の軸方向亀裂進展評価に用いた
周方向応力分布（残留応力＋運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図 D-10　スタブチューブ/下鏡溶接部，経路①の軸方向亀裂進展評価結果

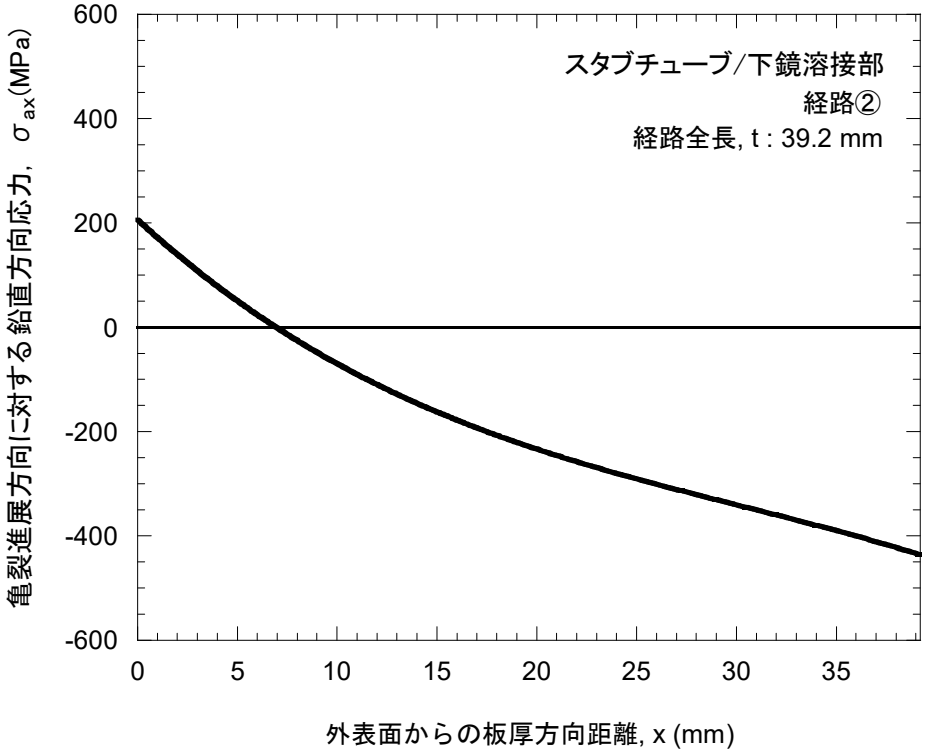
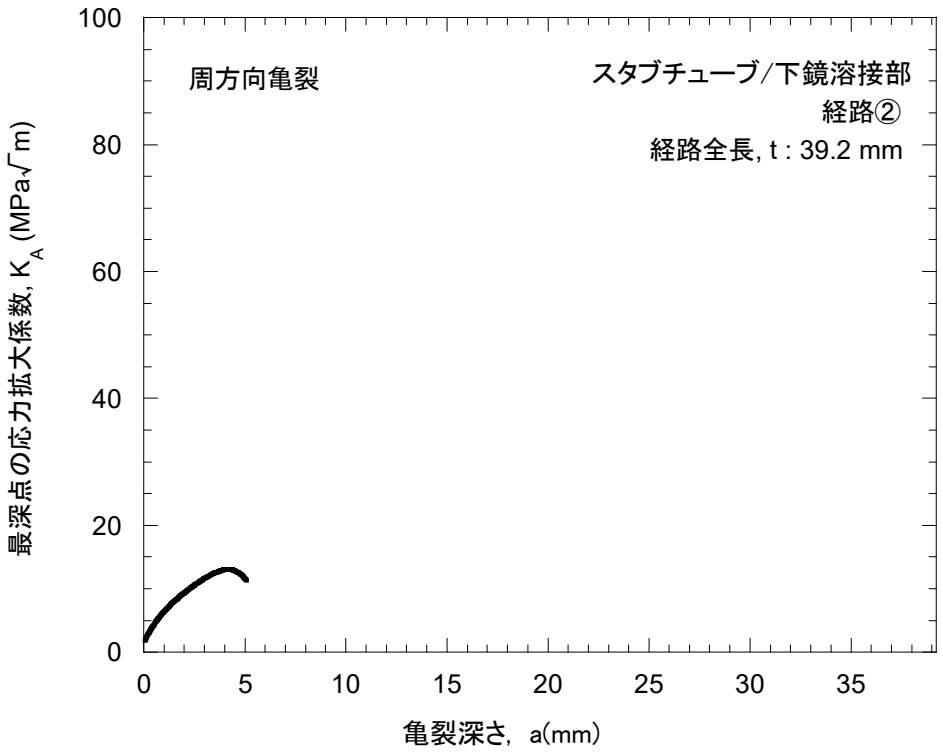
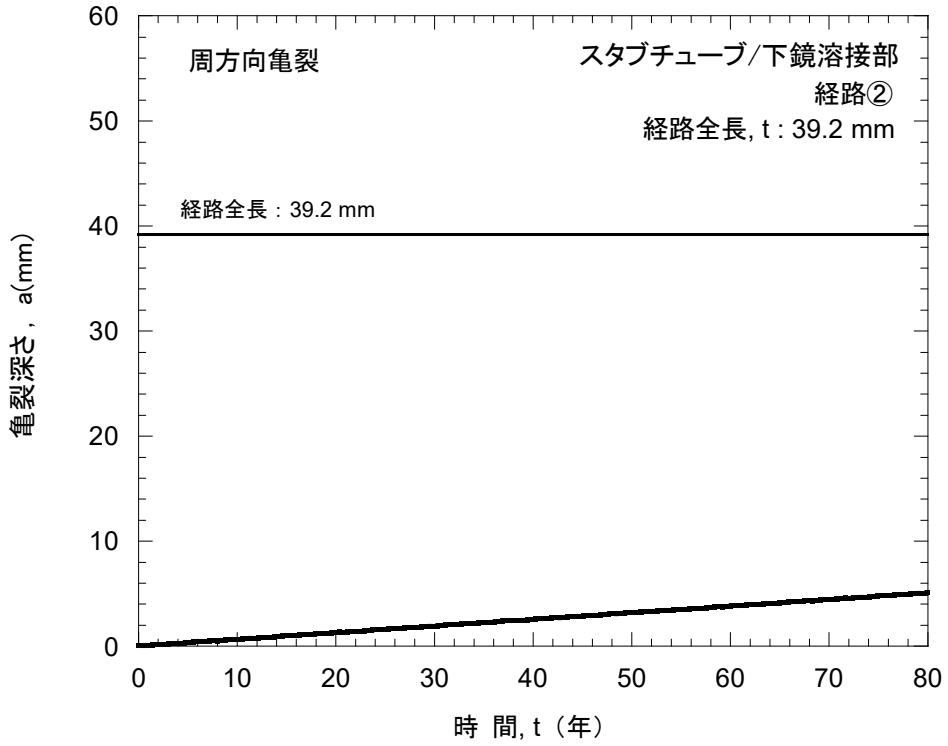


図 D-11　スタブチューブ/下鏡溶接部，経路②の周方向亀裂進展評価に用いた経路に鉛直方向の応力分布（残留応力＋運転応力）



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

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

4. まとめ

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

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

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

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

表 D-1　CRD ハウジング溶接部の亀裂進展評価結果

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

付録Ｅ　CRD ハウジングの強度評価

1. はじめに

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

2. 許容残存厚さ

2.1 破壊評価

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

2.1.1 評価手法

ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部は，材料が 600 系のニッケル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。

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

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

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

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

ここで，σ_f：流動応力＝$2.7Sm$（日本機械学会　維持規格）

Sm：設計応力強さ＝164 MPa（日本機械学会　設計・建設規格：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）

a：亀裂の投影深さ

θ：亀裂の半角（すなわち π (rad)）

2.1.2 限界荷重

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

$$M_c(SF) = M_c / SF \tag{3}$$

ここで，SF：安全率＝1.39（日本機械学会　維持規格）

各評価部の亀裂深さに対する限界荷重の関係を図 E-2～図 E-3 に示す。

2.1.3 許容残存厚さ

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

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

表 E-1　破壊評価結果

評価位置	曲げモーメント M	許容残存厚さ
ハウジング/スタブチューブ 溶接部	35.3 kN･m	4.2 mm
スタブチューブ/下鏡 溶接部	36.5 kN･m	3.5 mm

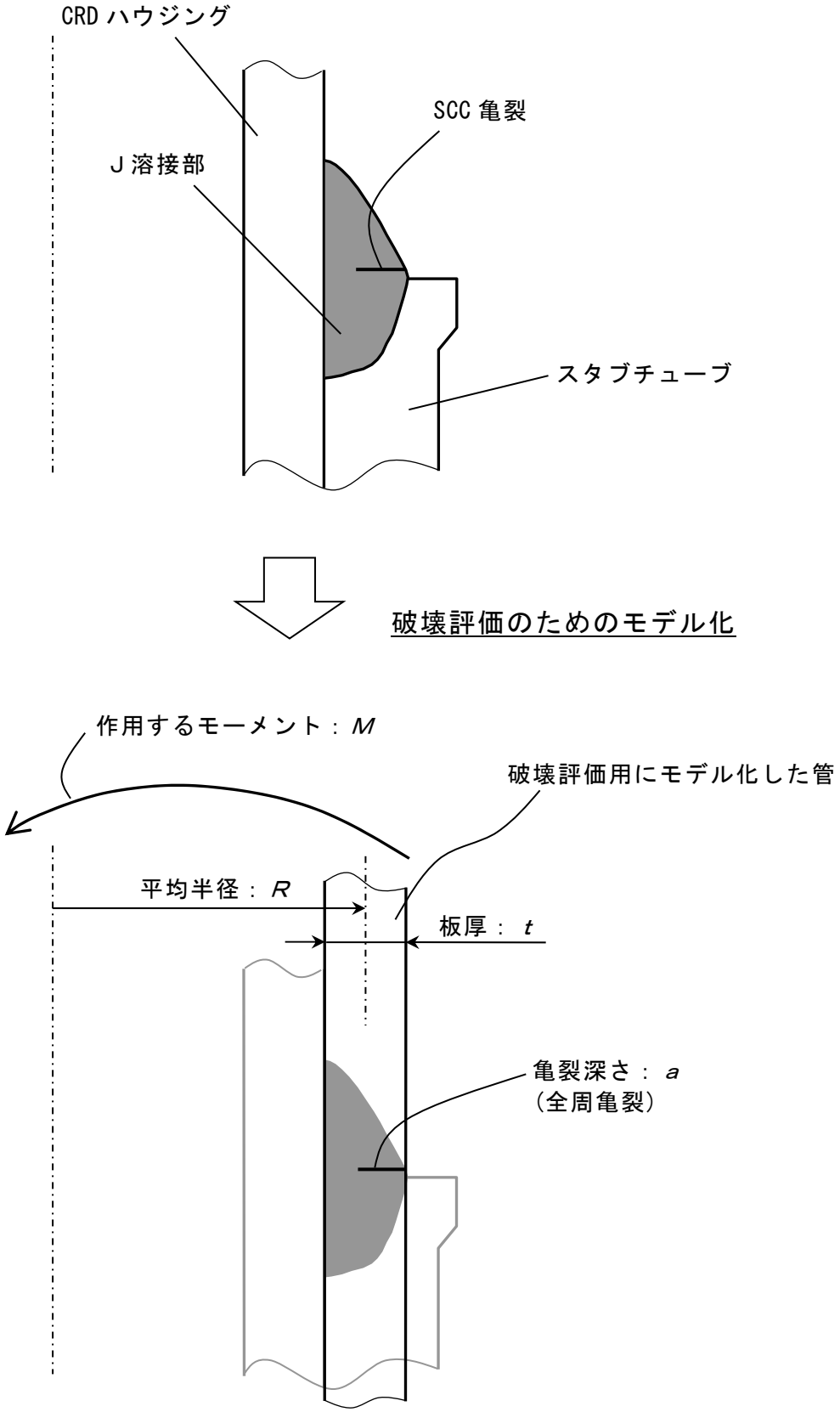


図 E-1　破壊評価に用いる溶接部のモデル化の概念図

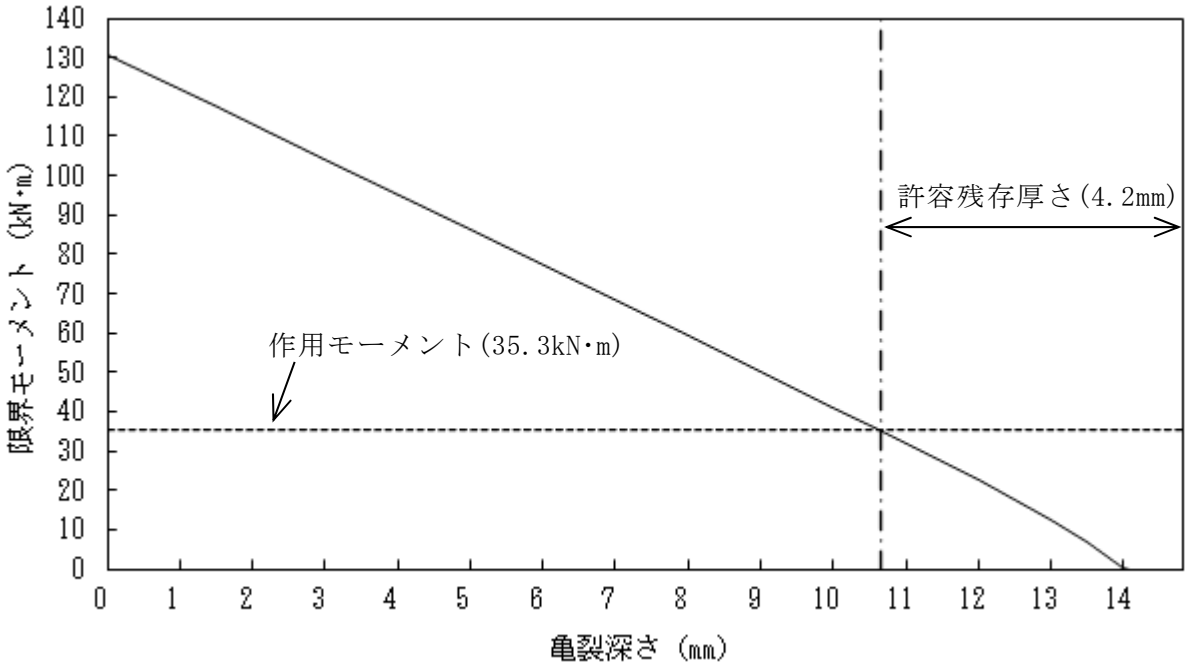


図 E-2　亀裂深さと限界モーメントの関係

（ハウジング/スタブチューブ溶接部）

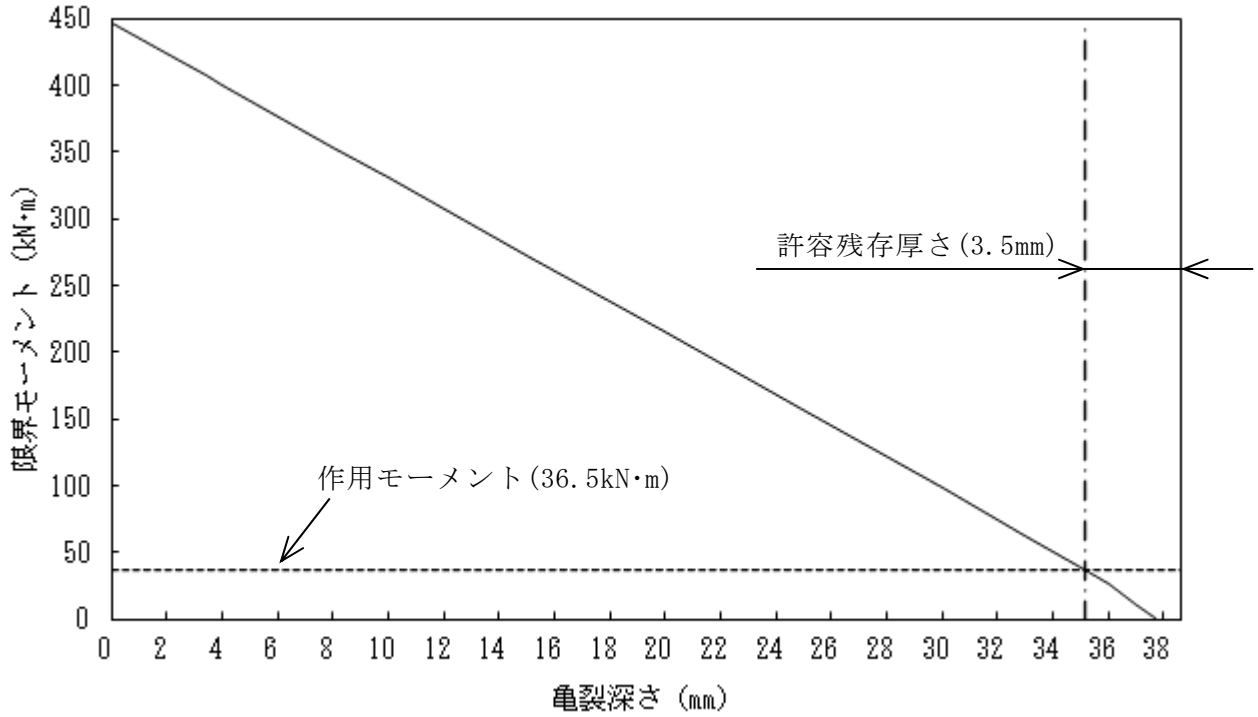


図 E-3　亀裂深さと限界モーメントの関係

（スタブチューブ/下鏡溶接部）

3. 点検により健全性が確認された部位の強度評価

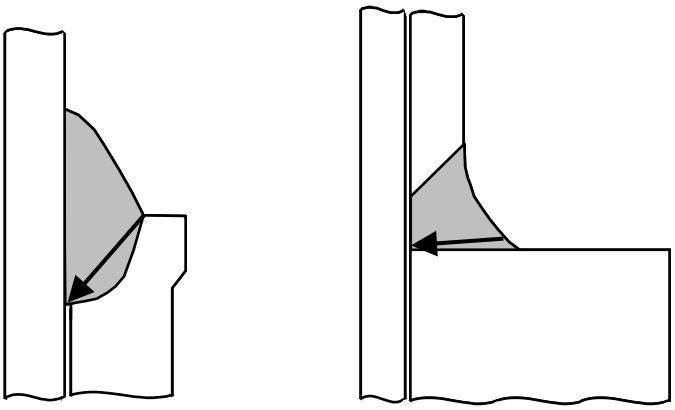
3.1 想定する亀裂深さ

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

ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部に想定する周方向亀裂進展経路を図 E-4 に示す。（付録Ｄ参照）

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

付録Ｄに示す手法により求めた各部位の破壊評価に用いる周方向亀裂深さを表 E-2 に示す。



(a) ハウジング/
スタブチューブ溶接部

(b) スタブチューブ/
下鏡溶接部

図 E-4　CRD ハウジングに想定する周方向亀裂進展経路

表 E-2　CRD ハウジング溶接部の破壊評価に用いる周方向亀裂深さ

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

3.2 破壊評価

破壊評価は 2.1.1 項及び 2.1.2 項に示す手法にて行う。

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とする。(図 E-5 参照)

なお，亀裂は，保守的な評価を得ることを目的に，全周亀裂を仮定する。

各評価部位の限界荷重は，式(1)～(3)により求める。評価位置に作用する荷重と限界荷重を比較して表 E-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 は，限界モーメント $M_c(SF)$ より小さく，SCC により亀裂が生じても，地震時に不安定破壊を起こすことはない。

表 E-3　CRD ハウジング溶接部の破壊評価結果

評価位置	投影した亀裂深さ a	限界モーメント $M_c(SF)$	曲げモーメント M	比率 ($M_c(SF)$/ M)
ハウジング/スタブチューブ溶接部	1.5 mm	118 kN･m	35.3 kN･m	3.3
スタブチューブ/下鏡溶接部	3.4 mm	407 kN･m	36.5 kN･m	11.1

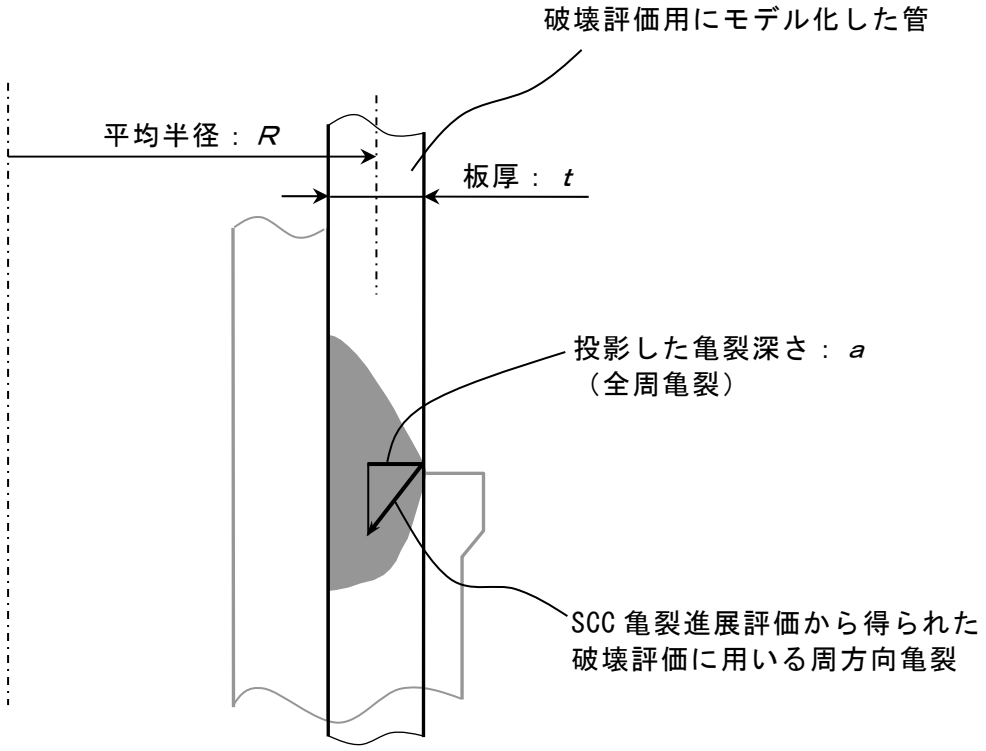


図 E-5　破壊評価に用いる投影亀裂深さ

3.3 制御棒挿入性に及ぼす影響評価

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

3.3.1 想定亀裂

想定亀裂を表 E-4 に示す。

なお，想定亀裂深さについては，案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部は板厚貫通とし，ハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部は，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とする。（図 E-5 参照）

表 E-4　想定亀裂

記号	亀裂想定部位	想定亀裂	想定亀裂寸法
A	案内管スリーブ/ 案内管ボディ溶接部	周方向全周 均等亀裂	亀裂開口幅：0.1mm 亀裂深さ：板厚貫通
B	ハウジング/ スタブチューブ溶接部	周方向全周 均等亀裂	亀裂開口幅：0.1mm 亀裂深さ：1.5mm
C	スタブチューブ/ 下鏡溶接部	周方向全周 均等亀裂	亀裂開口幅：0.1mm 亀裂深さ：3.4mm

3.3.2 評価方法

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

(1) 変位量の算定

a．解析モデル

3 次元 FEM 弾性解析によるものとし，解析モデルの考え方を図 E-6 に示す。

b．荷重条件

自重及び Ss 地震を考慮する。

(2) 変位量の許容値

表 E-5 に示す地震時の制御棒挿入性に影響を及ぼさない炉心支持板位置と CRD ハウジング上端のオフセット量[2)]を，変位量の許容値とする。

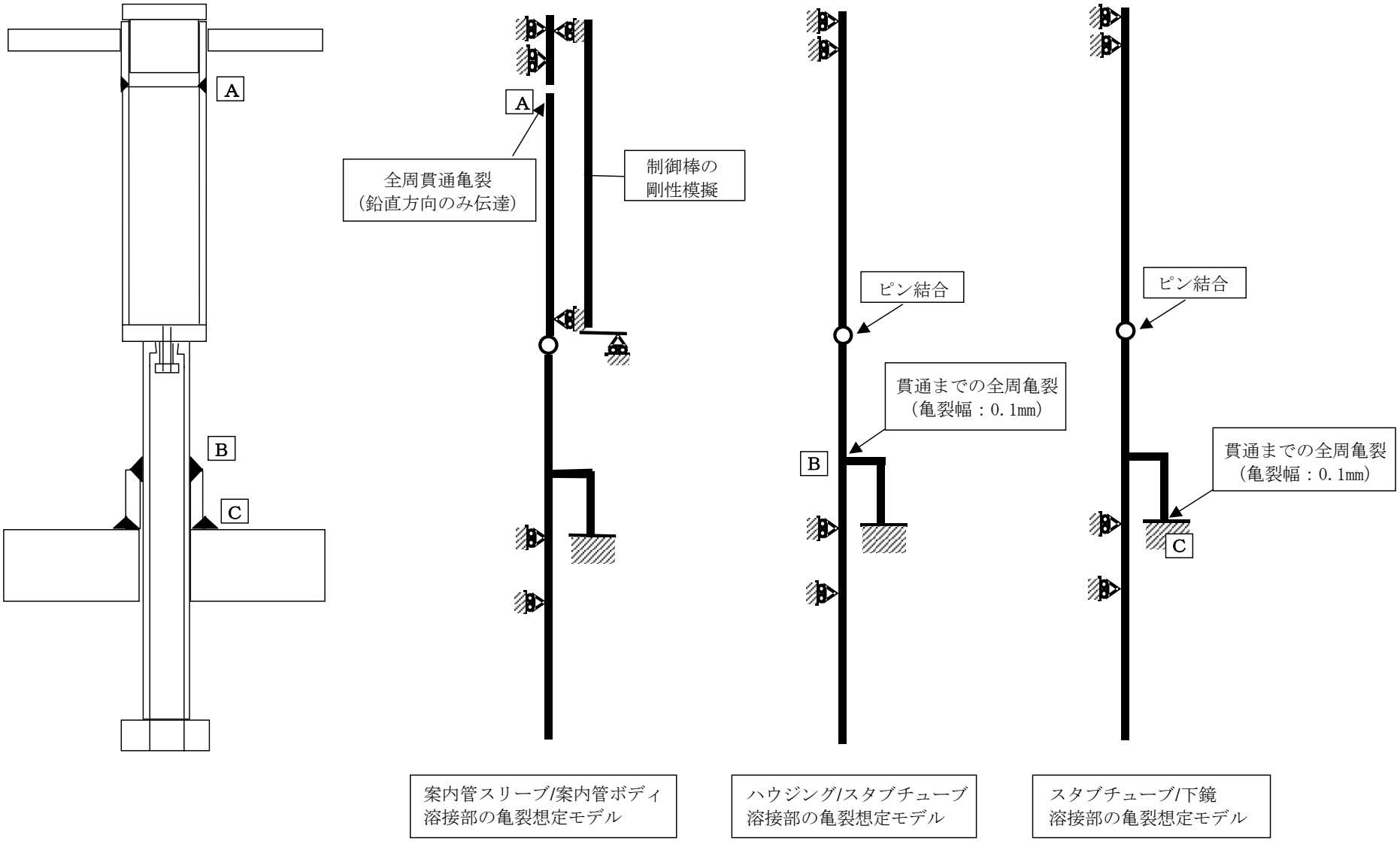
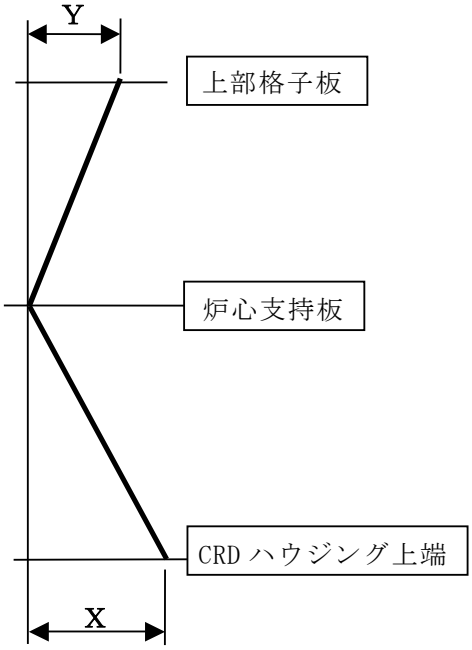


図 E-6　解析モデルの考え方

表 E-5　CRD ハウジング上端の許容変位量

		X	Y
①	建設時の最大公差	3.64mm	2.38mm
②	制御棒挿入性に問題ないことが確認されている偏差	10.86mm	9.60mm
建設時の裕度（②－①）		7.22mm	

CRD ハウジング上端の許容変位量



3.3.3 評価結果

評価結果を表 E-6 に示す。

各想定亀裂に対する CRD ハウジング上端の変位量は，いずれも許容値未満であり，制御棒挿入性への影響はない。

表 E-6　CRD ハウジング上端の変位量評価結果

記号	亀裂想定部位	CRD ハウジング上端の変位量	
		発生亀裂深さに対する変位量	許容値
A	案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部	4.3 mm	7.22 mm
B	ハウジング/スタブチューブ溶接部	3.0 mm	
C	スタブチューブ/下鏡溶接部	3.0 mm	

4. まとめ

(1) ハウジング/スタブチューブ溶接部の許容残存厚さは 4.2mm，スタブチューブ/下鏡溶接部の許容残存厚さは 3.5mm である。

(2) VT-2 により漏えいが認められなかったハウジング/スタブチューブ溶接部に想定される周方向亀裂深さ（板厚方向に投影した深さ）は最大 1.5mm（残存厚さ 13.3mm）であり，許容残存厚さに対して 3.3 倍の裕度を有する。

(3) VT-2 により漏えいが認められなかったスタブチューブ/下鏡溶接部に想定される周方向亀裂深さ（板厚方向に投影した深さ）は最大 3.4mm（残存厚さ 35.2mm）であり，許容残存厚さに対して 11.1 倍の裕度を有する。

(4) 案内管スリーブ/案内管ボディ溶接部が全周破断しても制御棒挿入性が維持される。

(5) したがって,点検により健全性を確認したハウジング/スタブチューブ溶接部及びスタブチューブ/下鏡溶接部は，Ss 地震の場合でも不安定破壊を起こすことがなく，制御棒挿入性及びバウンダリの確保（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.

2) 平成 8 年度 溶接部等熱影響部信頼性実証試験等（原子力プラント保全技術信頼性実証試験（機器保全実証試験））成果報告書，財団法人 原子力発電技術機構，平成 9 年 3 月

付録Ｆ　CRD ハウジング圧力境界部からの漏えいの影響評価

1. 目的

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

2. 評価

2.1 想定される軸方向亀裂の大きさ

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

内圧による応力は 33MPa 程度であるため，プラントの起動/停止による疲労亀裂進展量は微小（100 回の起動/停止で 0.1mm 未満）である。

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

2.2 漏えい量

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

2.3 構造強度への影響

40mm 程度の軸方向表面亀裂は，CRD ハウジングの構造強度，制御棒挿入性，炉心支持と流路確保（燃料集合体の鉛直荷重の支持）へ影響しない。

3. まとめ

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

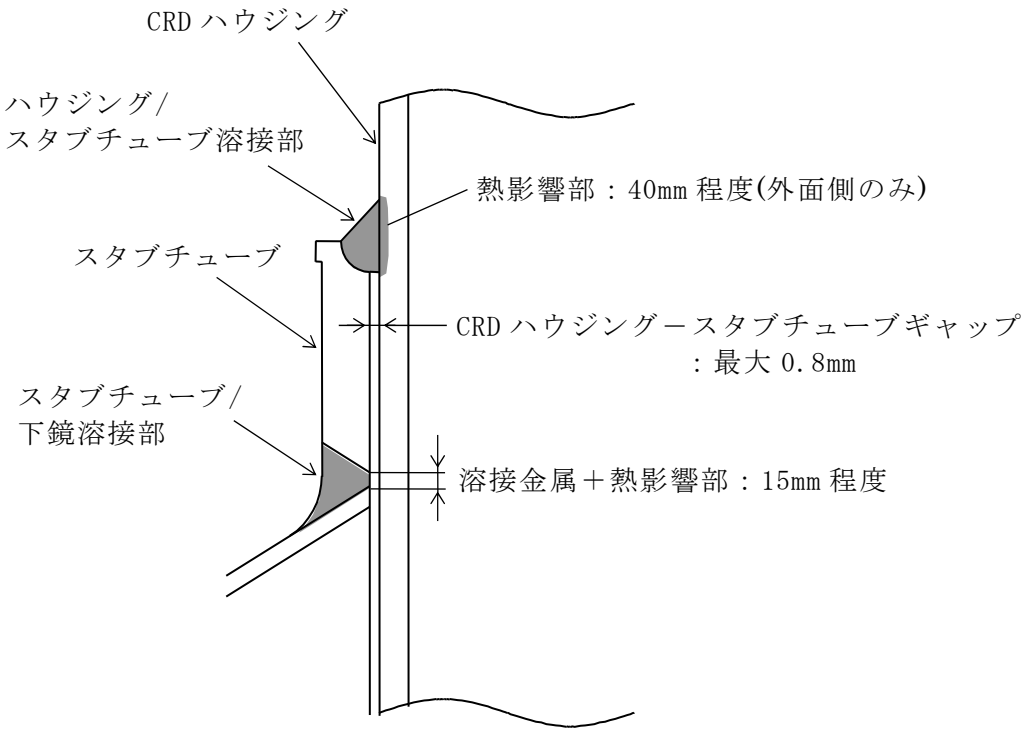


図 F-1　CRD ハウジングに想定される SCC 領域

付録G　SCC 予防保全技術

1. はじめに

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

2. 予防保全技術

SCC は，SCC 感受性を有する材質，引張残留応力及び腐食環境の三因子が重畳して発生するため，三因子の一つ以上の因子を改善する予防保全工法を適用した場合は，その有効性を考慮して，点検対象部位及び点検周期を設定できる。CRD ハウジングの溶接部への適用実績がある，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を行う場合は，(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 合金及び改良 182 合金の 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．手法概要

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

b．有効性

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

水素注入量と腐食電位の関係の測定例を図 G-6 に示す。

c．点検周期

水素注入量に対応する当該部位の腐食電位を水質解析結果等から評価し，腐食電位と亀裂進展速度との相関に基づいて，想定亀裂又は検出されたきず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，両者共に実機へ適用（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，想定亀裂又は検出されたきず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 溶接部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 50μm 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：1μS/cm 浸漬時間：500 時間

鋼　種	ｼｮｯﾄﾋﾟｰﾆﾝｸﾞ未施工材*	ｼｮｯﾄﾋﾟｰﾆﾝｸﾞ施工材*
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：1μS/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

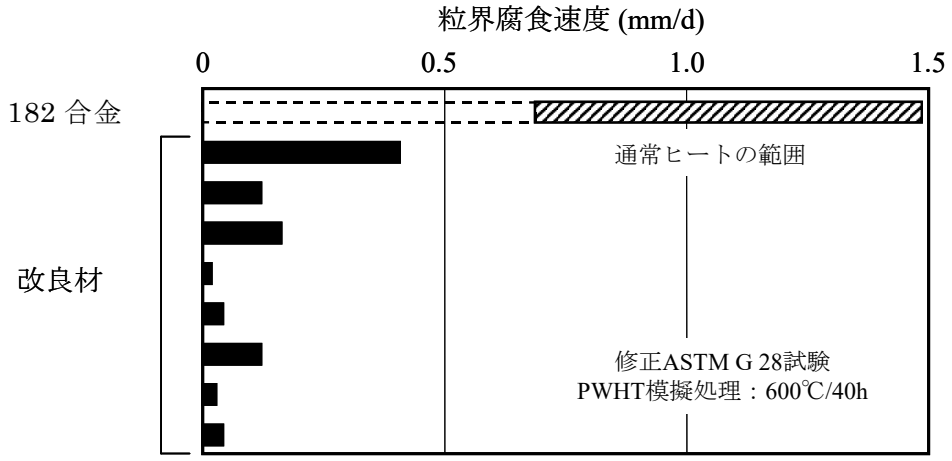


図 G-1　改良 182 合金の耐 SCC 性評価（粒界腐食試験結果）[1)]

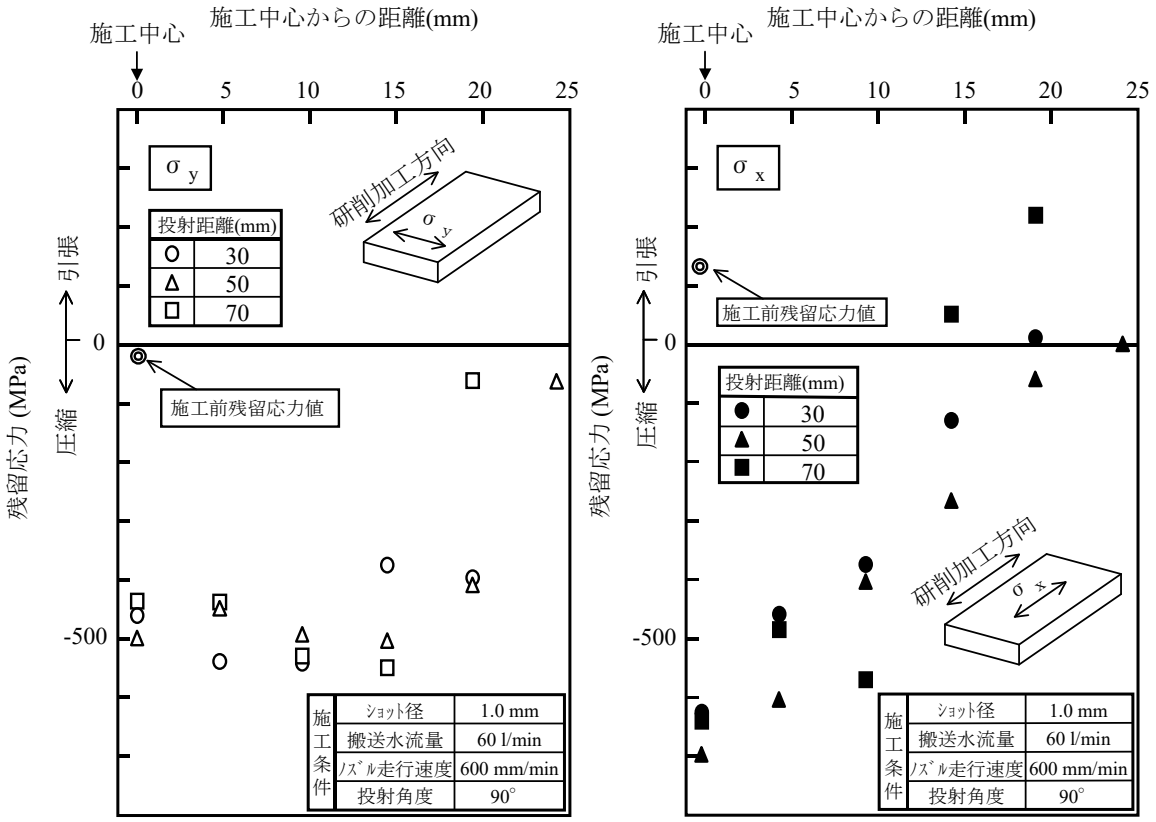


図 G-2　182 合金のショットピーニングによる応力改善効果 [2)]

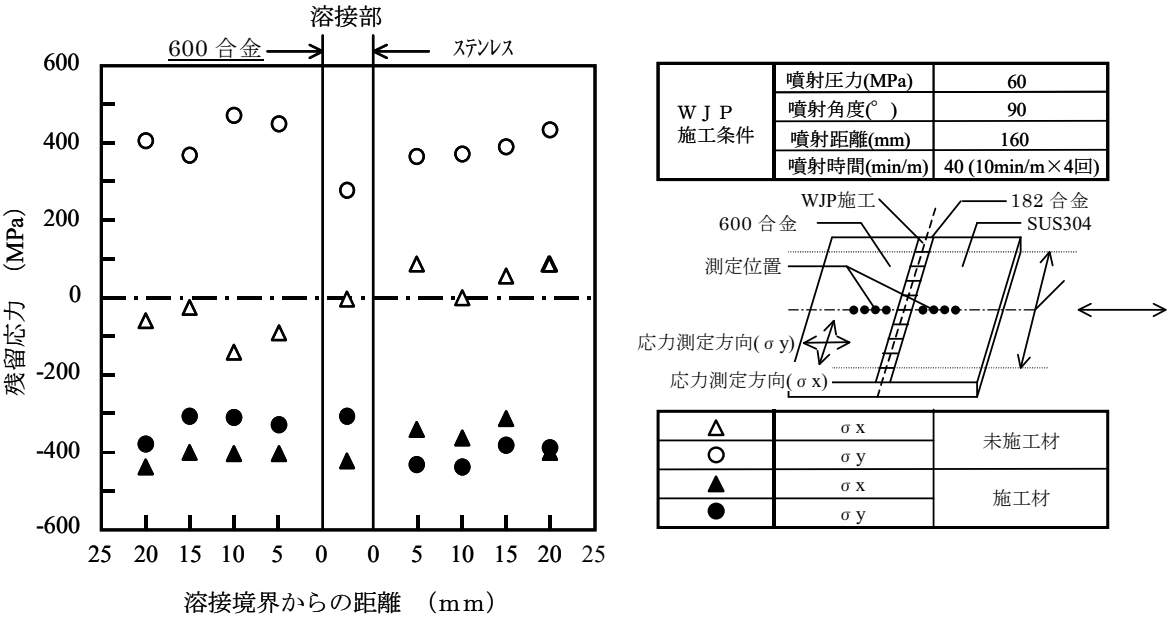


図 G-3　ウォータジェットピーニングによる応力改善効果 [2)]

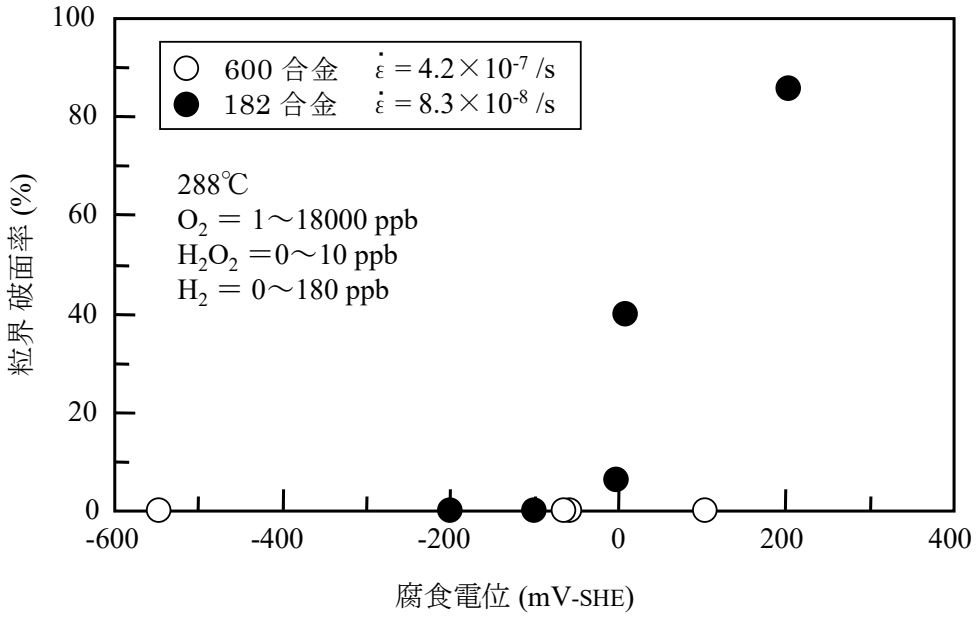


図 G-4　粒界破面率の腐食電位依存性測定結果 [3)]

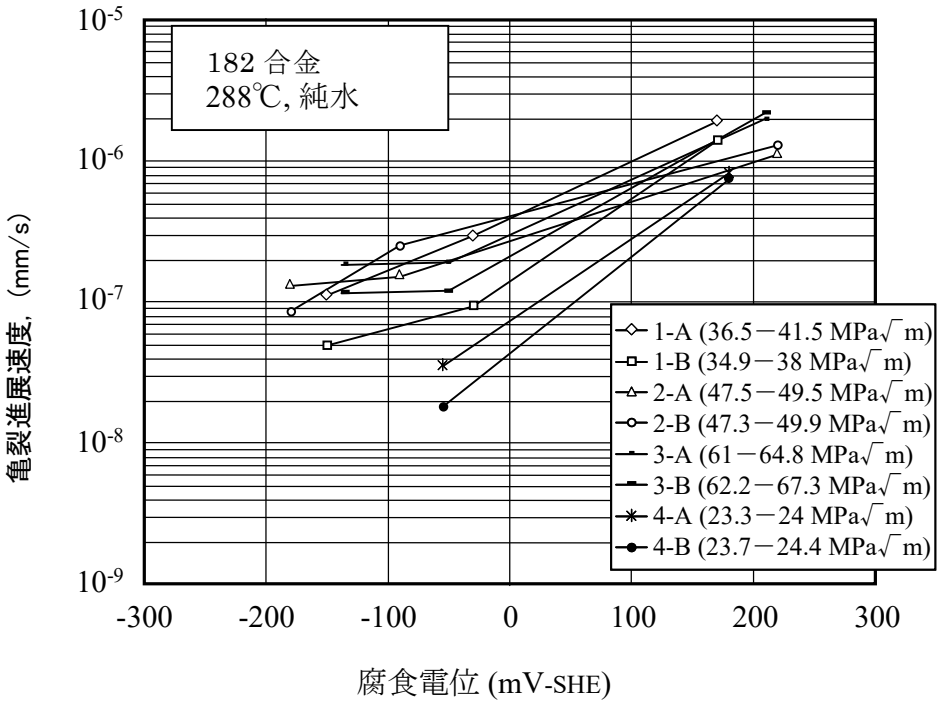


図 G-5　182 合金の亀裂進展速度の腐食電位依存性測定結果 [4)]

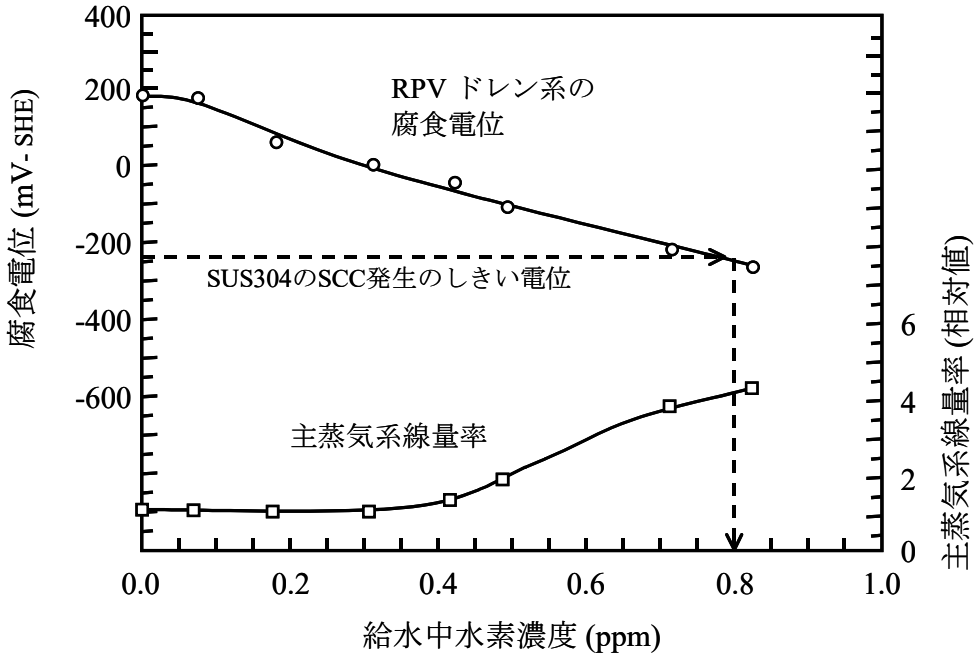


図 G-6　国内 BWR プラントのボトムドレン系で測定した腐食電位の水素注入量依存性 [5)]

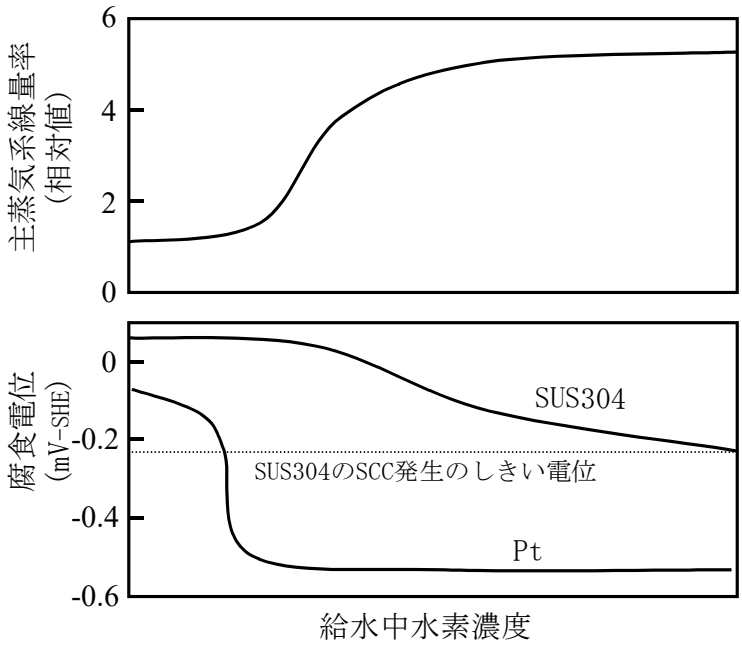


図 G-7　貴金属注入概念図 [6)]

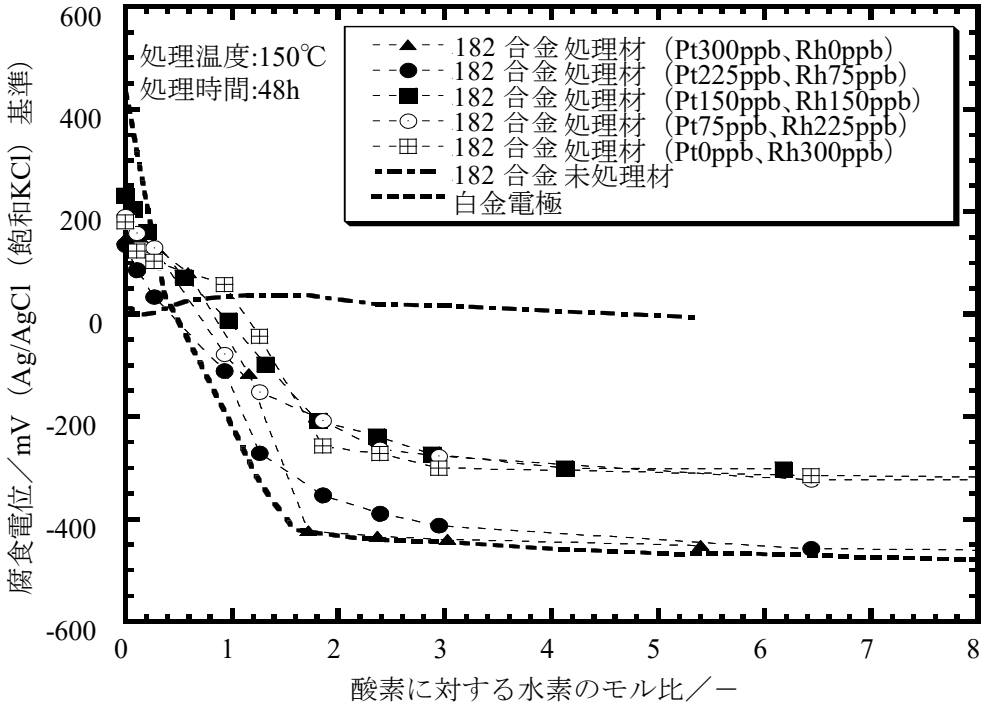
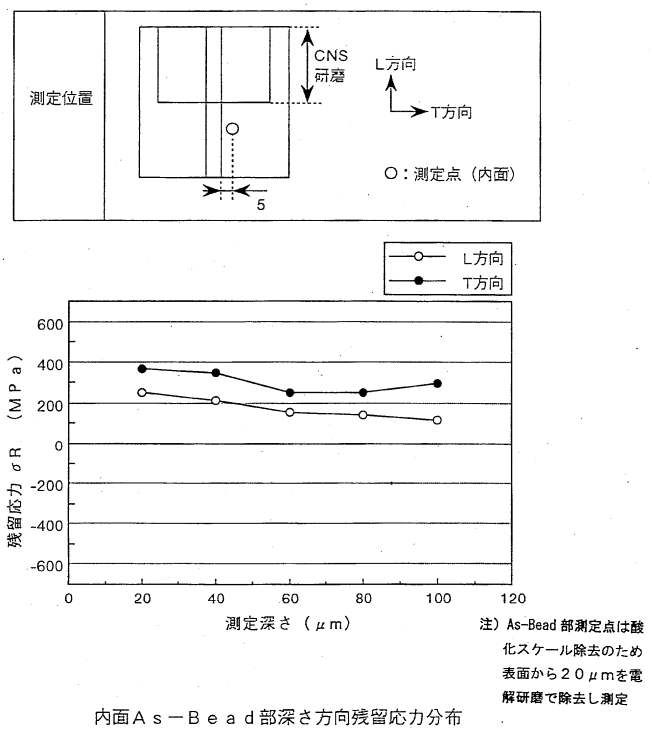
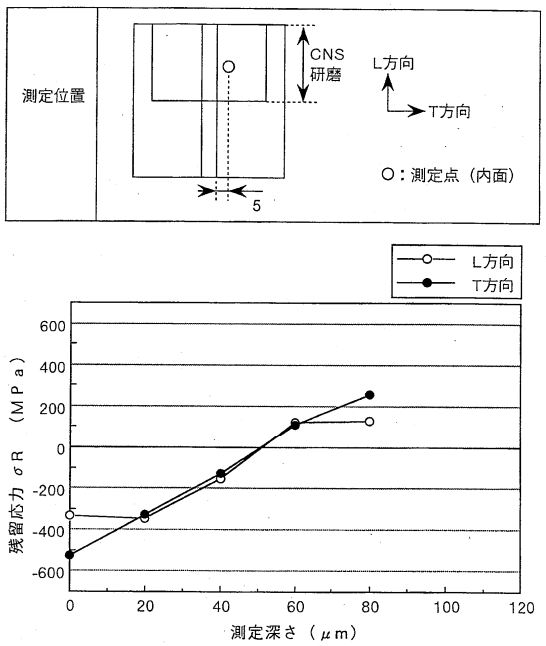


図 G-8　貴金属表面処理した 182 合金の腐食電位の水素濃度依存性 [7)]
［処理温度：150℃，処理時間：48 時間］



内面Ａｓ－Ｂｅａｄ部深さ方向残留応力分布

研磨非施工部



内面側ＣＮＳ研磨部深さ方向残留応力分布

研磨施工部

図G-9　研磨施工による応力改善例（炉心シュラウドH4溶接模擬）
（出典）BWR電力共通研究データ

［出典］

1) 山内 清 他：「安定化パラメータのコントロールによるニッケル基溶接金属の耐粒界腐食性並びに耐粒界型応力腐食割れ性の向上」，防食技術，35（1986）605.

2) 共同研究報告書「CRDスタブチューブの予防保全に関する研究」最終報告書（平成9年3月）

3) 斎藤 宣久 他：「BWR構造材料のSCC発生特性に及ぼす水の放射線分解生成物の影響」，第40回腐食防食討論会講演集，（1993）171.

4) M.Itow et al.:“The Effect of Corrosion Potential on Alloy 182 Crack Growth Rate in High Temperature Water”, Proc. 8th Int. Symp. on Environmental Degradation of Mater. in Nuclear Power Systems- Water Reactors, NACE, (1997) 712.

5) J.Takagi et al.:“Long Term Verification Program on Hydrogen Water Chemistry at Japanese BWR”, Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7, BNES (1996).

6) S.Hettiarachchi et al.:“The concept of Noble Metal Chemical Addition Technology for IGSCC Mitigation of Structural Materials”, Proc. 7th Int. Symp. on Environmental Degradation of Mater. in Nuclear Power Systems- Water Reactors, NACE, (1995) 735.

7) 共同研究報告書「原子炉貴金属注入による腐食環境改善技術評価研究（Phase-1)」（平成11年9月）

付録H　補修技術

1. はじめに

本付録は，CRD ハウジングの溶接部にきずが検出された場合の補修技術の例をまとめたものである。

2. 補修技術

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

(1) 拡管

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

(2) 取替

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

(3) 補修溶接

取替工法の一部を適用して，気中環境での補修溶接が適用可能と考えられる。

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

(4) 封止溶接

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

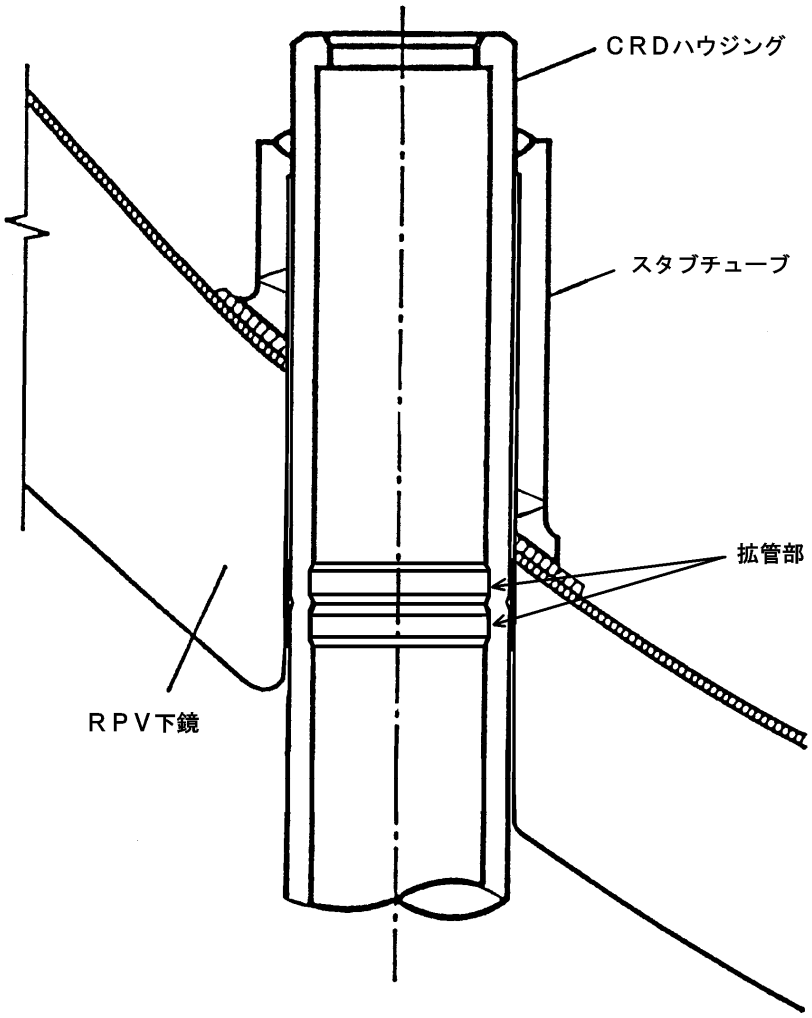
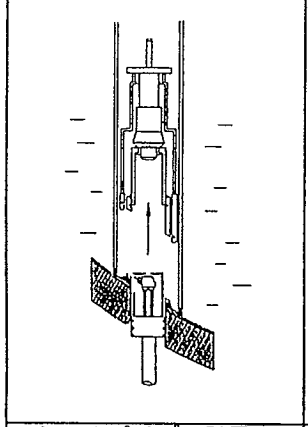
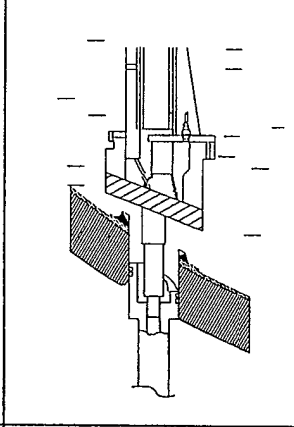
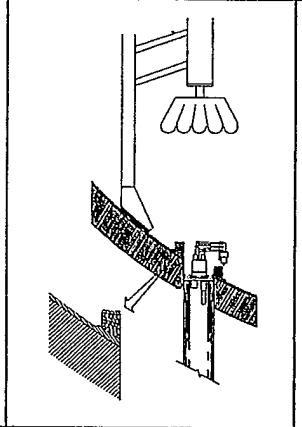
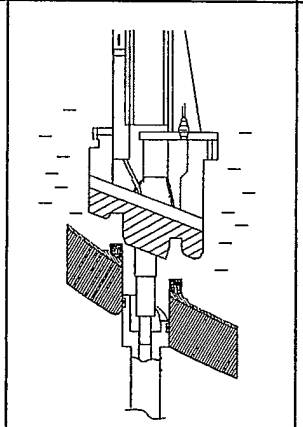
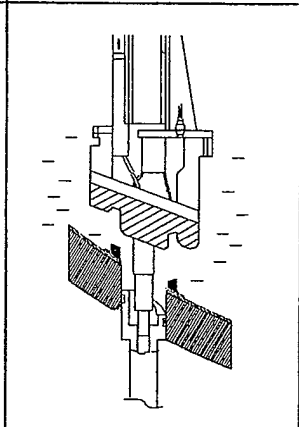
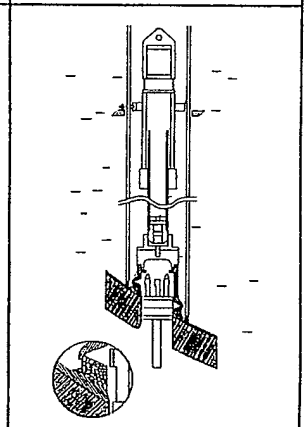


図 H-1　拡管工法

項目	ステップ1	ステップ2	ステップ3	ステップ4	ステップ5	ステップ6
作業概要						
	・シールパイプの設置 ・ハウジング切断（UHP） ・ｽﾀﾌﾞﾁｭｰﾌﾞ切断（UHP）	・既設肉盛座平坦化加工（EDM）	・既設肉盛座肉厚測定 ・既設肉盛座平坦面表面検 ・肉盛溶接	・肉盛部UT用成形加工 ・肉盛部ＵＴ	・肉盛部開先加工（EDM） ・シールパイプの設置 ・開先加工部表面検査 ・開先加工部寸法検査	・新ｽﾀﾌﾞﾁｭｰﾌﾞのﾌｨｯﾄｱｯﾌﾟ

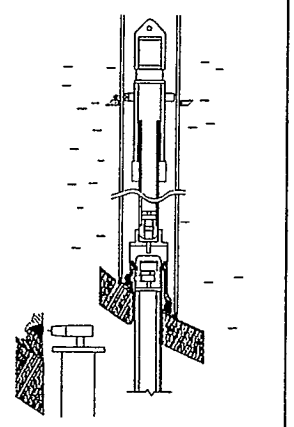
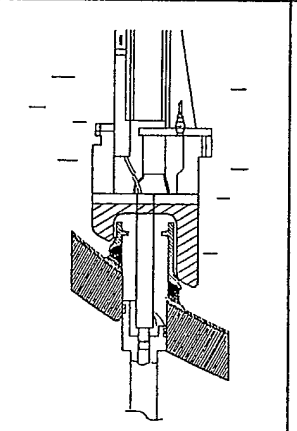
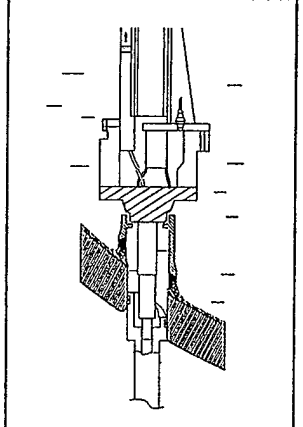
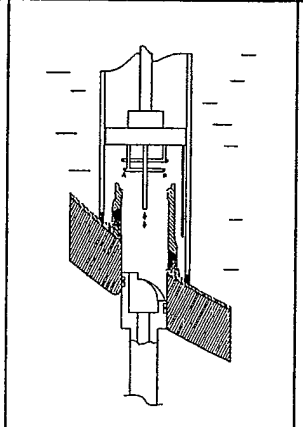
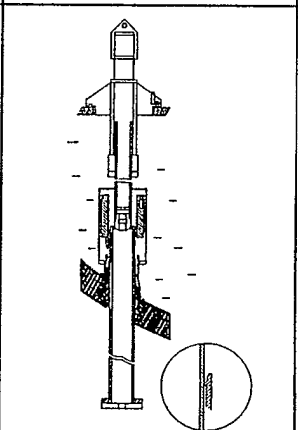
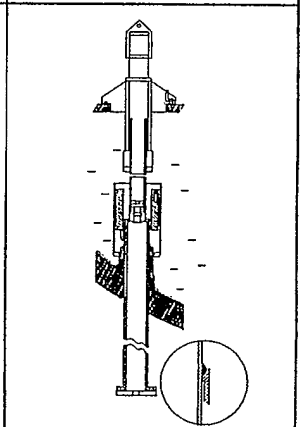
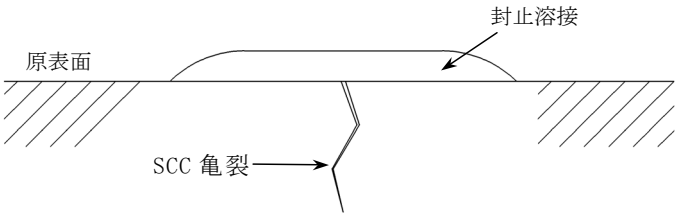
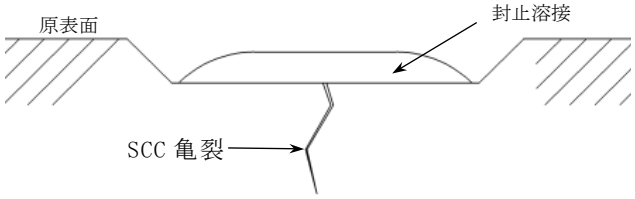
項目	ステップ7	ステップ8	ステップ9	ステップ１０	ステップ１１	ステップ１２
作業概要						
	・ｽﾀﾌﾞﾁｭｰﾌﾞ３次元溶接 ・溶接部内面仕上げ加工 ・溶接部内面表面検査	・ｽﾀﾌﾞﾁｭｰﾌﾞ外形加工（EDM）	・Ｊ溶接開先加工（EDM）	・ｽﾀﾌﾞﾁｭｰﾌﾞ溶接部ＵＴ ・シールパイプの設置 ・外面の表面検査 ・Ｊ溶接開先の表面検査 ・Ｊ溶接開先の寸法検査	・新ハウジングのﾌｨｯﾄｱｯﾌﾟ	・ハウジングＪ溶接 ・Ｊ溶接部のＵＴ ・シールパイプの設置 ・Ｊ溶接部表面検査 ・Ｊ溶接部寸法検査

図 H-2　取替工法



(a) 原表面に直接封止溶接を行う場合



(b) 追い込み加工後に封止溶接を行う場合

図 H-3　封止溶接工法

ＢＷＲ炉内構造物点検評価ガイドライン［CRD ハウジング］の概要

１．点検の考え方

- 原子炉に対して CRD ハウジングが持つ安全機能に着目し，CRD ハウジングを構成する各種の構造体（図-1）の経年劣化事象による損傷が，安全機能の維持に影響を与えると考えられる構造体を点検対象とする。
- CRD 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。

２．点検対象

- 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

３．点検手法

- ハウジング/スタブチューブ溶接部，及びスタブチューブ/下鏡溶接部
  VT-2（漏えい試験）により，軸方向亀裂の貫通がないことを確認する。
  (1) 点検対象部位の亀裂進展速度は，
  軸方向亀裂 ＞ 周方向亀裂
  (2) 万一軸方向亀裂が貫通しても，
  (a) 漏えい量が微少で，CRD 冷却水で補給可能
  (b) 周方向の残存断面積のため破断せず，機能維持可能

- ハウジング/フランジ溶接部
  SCC が生じる可能性が極めて小さく，万一 SCC が生じたとしても，周方向の広範囲にわたって亀裂が貫通する可能性は極めて小さいため，VT-2 により，漏えいがないことを確認する。

４．点検範囲，点検時期及び点検結果の評価

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

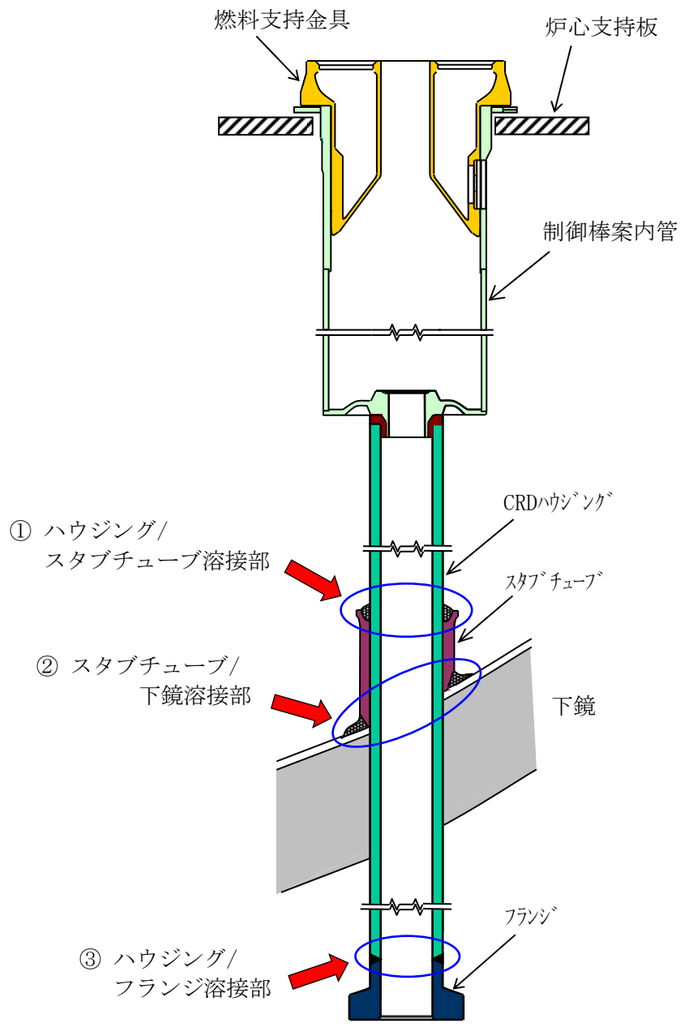


図-1　CRDハウジングの構造と点検対象部位

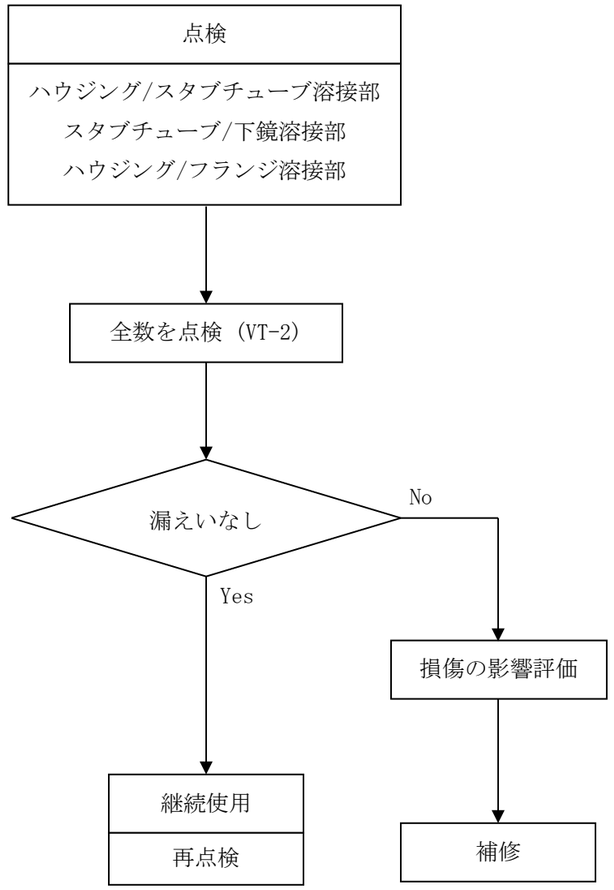


図-2　CRDハウジングの点検・評価フロー

参考資料２

改訂経緯

2002 年 7 月　　初版発行

2004 年 1 月　　第 2 版発行

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

2014 年 12 月　　第 3 版発行

（定期改訂）

点検に適用する規格を最新のものに見直した。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。

2022 年 7 月　　第 4 版発行

・改良型 BWR（ABWR）の CRD ハウジングの情報を追加した。

・付録Ａに，CRD 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 Ss 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。

2025 年 3 月　　第 5 版発行

・用語の定義を追加した。

・プラント停止期間の点検時期の延期に関する規定を追加した。

・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
［ＣＲＤハウジング］
（第 5 版）

編集者　一般社団法人　原子力安全推進協会
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会
発行者　一般社団法人　原子力安全推進協会
〒108-0014 東京都港区芝 5-36-7 三田ベルジュビル 13，14 階
TEL 03-5418-9312　　FAX 03-5440-3606

©原子力安全推進協会，2025　　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。