

BWR炉内構造物点検評価ガイドライン

[ジェットポンプ]

(第3版)

平成30年7月

一般社団法人 原子力安全推進協会

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

はじめに

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

平成12年に(社)火力原子力発電技術協会に発足した「炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会」は、平成19年より日本原子力技術協会に継承され、さらに平成24年11月の日本原子力技術協会の改組に伴い、炉内構造物点検評価ガイドライン検討会は、原子力安全推進協会に発展的に継承され、活動を継続しています。また、検討会での審議を経て制定する「炉内構造物等点検評価ガイドライン」は、関係者の利便性向上を図るため、関連情報と併せ協会ホームページより公開しています。

本ガイドラインの策定にあたっては、常に最新知見を取り入れ、見直しを行っていくことを基本方針としています。この方針に則り、現行版の発行後も最新知見の調査および収集に努めることと致します。本ガイドラインが原子力産業界で活用され、原子力発電所の安全・安定運転の一助になることを期待しております。

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

平成30年7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：ジェットポンプ

改訂年月	版	改訂内容	備考
平成 14 年 3 月	初版発行		
平成 24 年 3 月	第 2 版	未点検部位の取り扱い見直し	
平成 30 年 7 月	第 3 版	付録 N 追加と全体構成見直し。	

※ 改訂の詳細は参考資料 1 参照。

ガイドラインの責任範囲

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

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

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

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 委員名簿

(平成30年7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	橋爪 秀利	東北大学
委員	水谷 義弘	東京工業大学
委員	森下 和功	京都大学
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	谷口 敦	東京電力ホールディングス (株)
幹事	日下 浩作	関西電力 (株)
幹事	小林 広幸	日本原子力発電 (株)
委員	沼田 和也	北海道電力 (株)
委員	蓑 秀寿	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	森山 泰之	中部電力 (株)
委員	新屋 和彦	北陸電力 (株)
委員	越智 文洋	関西電力 (株)
委員	荒芝 智幸	中国電力 (株)
委員	伊達 智博	四国電力 (株)
委員	田中 正和	九州電力 (株)
委員	浦辺 守	日本原子力発電 (株)
委員	高村 賢也	電源開発 (株)
委員	増田 稔	日立GEニュークリア・エナジー (株)
委員	森 敦史	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	太田 丈児	電力中央研究所
委員	杉江 保彰	原子力安全推進協会
事務局	関 弘明	原子力安全推進協会

BWR炉内構造物点検評価ガイドライン [ジェットポンプ]

目 次

第1章 目的及び適用	1
1.1 目的	1
1.2 適用	1
1.3 用語の定義	1
第2章 点検対象	1
2.1 基本的考え方	1
2.2 点検対象部位	1
第3章 点検手法(一般事項)	4
第4章 点検方法	4
4.1 ライザ管, インレットミキサ, ディフューザ	4
4.2 ジェットポンプビーム	7
4.3 ライザブレース, ブラケット	7
解 説	
解説 1-1 「ガイドライン制定の目的」	11
解説 1-2 「本ガイドラインの適用にあたって」	11
解説 2-1 「ジェットポンプの構造健全性及び機能維持の確保」	11
解説 2-2 「ジェットポンプに想定される経年変化事象」	15
解説 2-3 「材料の耐応力腐食割れ性」	15
解説 2-4 「点検の考え方」	15
解説 3-1 「渦電流探傷試験」	16
解説 4-1 「点検手法」	16
解説 4-2 「初回点検」	16
解説 4-3 「健全部の長さ許容残存長さの評価」	18
解説 4-4 「亀裂進展評価」	19
解説 4-5 「再点検周期の設定」	20
解説 4-6 「SCC 予防保全技術」	21
解説 4-7 「補修技術」	21

付 録

- 付録A ジェットポンプの機能と構造
- 付録B ジェットポンプの点検における接近性
- 付録C SCC 亀裂進展速度式
- 付録D 溶接部の残留応力
- 付録E ジェットポンプの管/管溶接部の亀裂進展評価
- 付録F ローアリング/シュラウドサポートプレート溶接部の SCC 亀裂進展評価
- 付録G ジェットポンプ溶接部の許容欠陥評価
- 付録H 管の溶接部の初回点検時期
- 付録I 炉心冷却水の漏えい量評価
- 付録J 国内プラントのジェットポンプビームの使用実績
- 付録K 想定する周方向初期亀裂の数等の検討
- 付録L 再点検周期の検討例
- 付録M 未点検範囲の欠陥想定法
- 付録N ジェットポンプの部位毎の点検の考え方

参 考 資 料

参考資料1 改訂経緯

参考資料2 炉内構造物点検評価ガイドライン [ジェットポンプ] の概要

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）

1.2 適用

本ガイドラインは、炉内構造物のうち、ジェットポンプに適用する。本ガイドラインの適用期間は、商業運転開始後の供用期間中とする。（解説 1-2）

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。

- ・点検健全部長さ：点検により異常が認められなかった溶接線の長さ
- ・健全部の長さ：「点検健全部長さ」から想定欠陥及びその進展量と検出欠陥の進展量を減じた長さ
- ・許容残存長さ：機能維持のために必要な溶接線の長さ

第2章 点検対象

2.1 基本的考え方

- (1) 点検対象の選定にあたっては、原子炉の安全性確保を基本とする。 （解説 2-1）
- (2) ジェットポンプの経年変件事象として、応力腐食割れ（SCC）及び摩耗を想定する。 （解説 2-2）
- (3) 材料としては、国内プラントで用いられている材料を対象とする。 （解説 2-3）

2.2 点検対象部位

点検対象部位は、想定される劣化事象及び安全機能に対する影響を考慮し定め、ライザ管、インレットミキサ、ディフューザの接続部の周溶接部、ジェットポンプビーム、ライザブレース、ブラケット（ウエッジ及び位置決めボルト）から定めた。代表プラントの点検対象部位を図 2.2-1 及び表 2.2-2 に示す。 （解説 2-4）

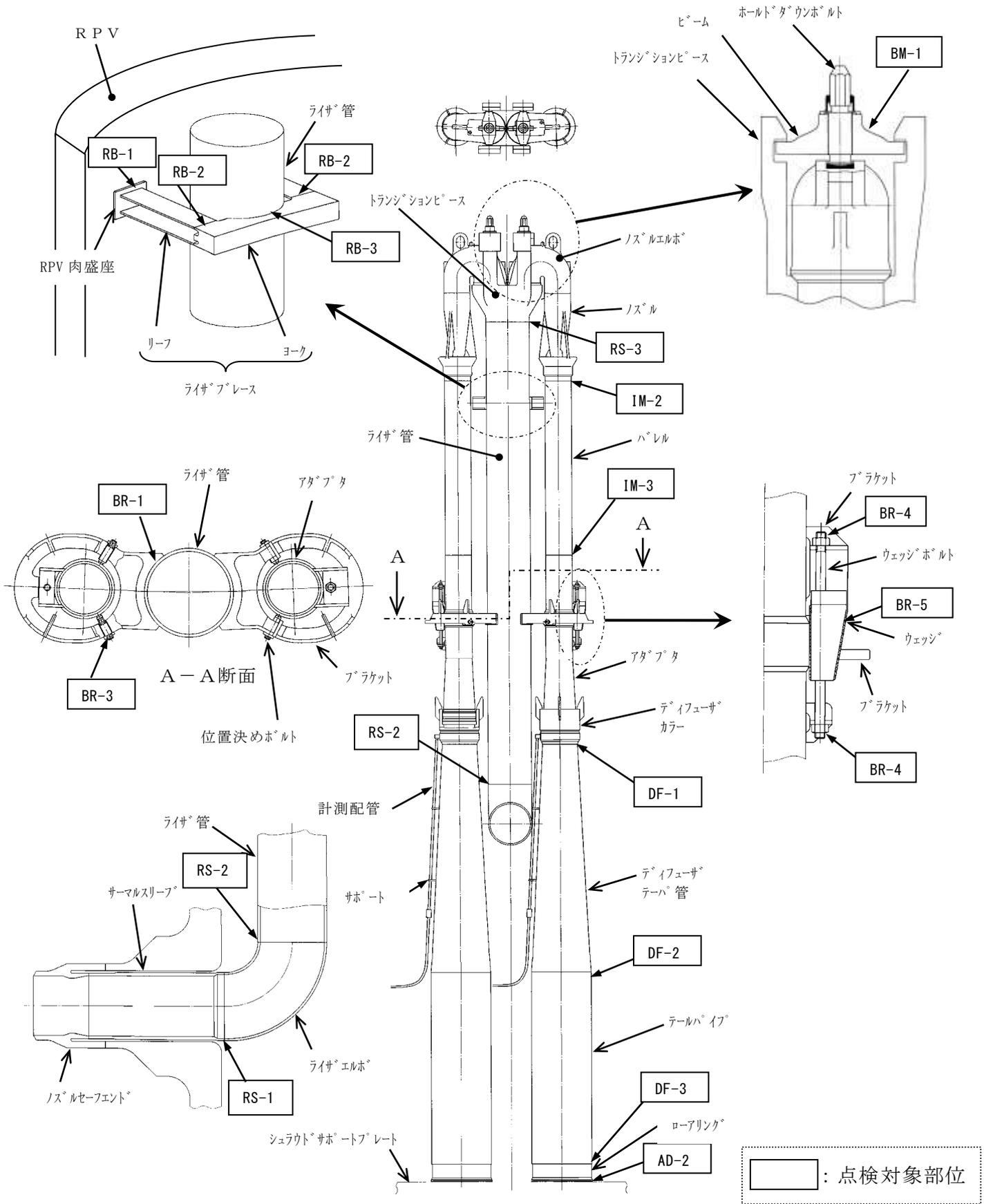


図 2.2-1 ジェットポンプの点検対象部位

表 2.2-1 ジェットポンプ点検対象部位

点検対象部位		点検対象 部位 No.
ライザ管	サーマルスリーブとエルボの溶接部	RS-1
	エルボとライザ管の溶接部	RS-2
	エルボとトランジションピースの溶接部	RS-3
インレットミキサ	ノズルとバレルの溶接部	IM-2
	バレルとアダプタの溶接部	IM-3
ディフューザ	カラーとテーパ管の溶接部	DF-1
	テーパ管とテールパイプの溶接部	DF-2
	テールパイプとローアリングの溶接部	DF-3
	ローアリングとシュラウドサポートプレートの溶接部	AD-2
ジェットポンプビーム	ジェットポンプビーム	BM-1
ライザブレース	リーフと原子炉圧力容器肉盛座の溶接部	RB-1
	リーフとヨークの溶接部	RB-2
	ライザ管とヨークの溶接部	RB-3
ブラケット	ライザ管とブラケットの溶接部	BR-1
	位置決めボルト	BR-3
	ウエッジボルト	BR-4
	ウエッジ	BR-5

第3章 点検手法(一般事項)

点検に適用する非破壊試験手法は、目視試験 (VT)、超音波探傷試験(UT)又は渦電流探傷試験 (ET) とする。

(1) 目視試験 (VT)

a. 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、酸化皮膜除去等の表面処理を行う。

b. VT-3

機器の変形、心合わせ不良、傾き、隙間の異常、ボルト締め付け部の緩み、部品の破損、脱落及び機器表面における異常を検出するために行う試験とする。

(2) 超音波探傷試験 (UT)

超音波探傷試験は、JEAC 4207「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」に準拠して実施するか、若しくはこれに類する手法等を用いて実施してもよい。

(3) 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もよい。

(解説 3-1)

第4章 点検方法

点検対象部位ごとの点検については、各点検対象に対して機能、形状及び材質、想定される劣化事象及び国内外の運転経験、安全機能への影響を考慮し設定した。点検方法を以下に示す。

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。

4.1 ライザ管、インレットミキサ、ディフューザ

ライザ管、インレットミキサ及びディフューザの点検対象部位の点検手法及び点検時期・範囲、評価の方法を以下に示す。これらの点検対象部位を表 4.1 に示す。

(解説 2-4)

表 4.1 ライザ管・インレットミキサ・ディフューザの点検対象部位

部位	点検対象部位	
ライザ管	RS-1	サーマルスリーブとエルボの溶接部
	RS-2	エルボとライザ管の溶接部
	RS-3	エルボとトランジションピースの溶接部
インレットミキサ*1	IM-2	ノズルとバレルの溶接部
	IM-3	バレルとアダプタの溶接部
ディフューザ	DF-1	カラーとテーパ管の溶接部
	DF-2	テーパ管とテールパイプの溶接部
	DF-3	テールパイプとローアリングの溶接部
	AD-2	ローアリングとシュラウドサポートプレートの溶接部

注記:点検対象部位は図 2.2-1 に示す。

注*1:バレルの材質がステンレス鋼のプラントのみ。

4.1.1 点検手法

当該点検対象部位の点検手法は、MVT-1 とする。 (解説 4-1)

なお、必要に応じて他の試験方法による点検を実施してよい。

4.1.2 点検時期及び点検範囲

(1) 初回点検

点検対象部位のうち点検範囲は接近可能な範囲とし、以下に示す時期に実施する。

- a. 炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼 (SUS304 等) の管の周溶接部

プラント供用開始時点からの実運転年数が 16 年を経過するまで。

(解説 4-2)

- b. 炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L 等) 製の管の周溶接部

プラント供用開始時点から暦年で 30 年を経過するまで。

(解説 4-2)

- c. 溶加材が 182 合金または 82 合金の管の周溶接部

プラント供用開始時点から暦年で 30 年を経過するまで。

(解説 4-2)

(2) 再点検

点検対象部位のうち点検範囲は接近可能な範囲とし、前回の点検時に安全機能上影響のある周方向に亀裂があると想定し、次回点検時までには亀裂が進展しても、健全部の長さが許容残存長さを満足するように点検周期を定める。 (解説 4-3)

なお、前回の点検において欠陥が検出された部位については、再点検において点検を実施するものとする。

a.点検周期

以下のいずれかの時期に再点検を実施する。

- ・点検健全部長さが許容残存長さ以上となるように、点検周期N年を決定する。
(解説 4-4, 4-5)
- ・前回点検で亀裂が検出されなかった場合は、以下の通り点検を実施する。
 - i) 炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼 (SUS304 等)
実運転年数が前回点検から 2.7 年経過するまで。
 - ii) 炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼 (SUS304L,SUS316L 等)
実運転年数が前回点検から 12 年経過するまで。
 - iii) 溶加材が 182 合金または 82 合金
実運転年数が前回点検から 12 年経過するまで。

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 4-6)

4.1.3 評価

点検・評価フローを図 4.1 に示す。点検結果の判定は以下によるものとする。

- (1) 健全部長さが点検必要範囲以上である場合は継続使用できる。
点検必要範囲は、許容残存長さ+次回点検までの健全部長さ減少量
- (2) 健全部長さが点検必要範囲未満である場合は
 - ① 点検範囲を拡大することにより、健全部長さが点検必要範囲以上となれば、継続使用できる。
 - ② 点検範囲を拡大しても健全部長さが点検必要範囲未満の場合は、健全部長さが許容残存長さ以上であれば、点検周期を見直すことにより継続使用できる。
 - ③ 上記②項を満足しない場合は、技術的な根拠のある詳細評価を実施し、健全部長さが許容残存長さ以上となれば、点検周期を見直すことにより、継続使用できる。
- (3) 上記(1)、(2)項に適合しない場合は補修等の措置を行う。(解説 4-7)

4.2 ジェットポンプビーム

ジェットポンプビームの点検対象部位の点検手法及び点検時期及び範囲，評価の方法を以下に示す。これらの点検対象部位を表 4.2 に示す。 (解説 2-4)

表 4.2 ジェットポンプの点検対象部位

部位	点検対象部位	
ジェットポンプ ビーム	BM-1	ジェットポンプビーム

4.2.1 点検手法

当該点検対象部位の点検手法は，MVT-1 とする。 (解説 4-1)

なお，必要に応じて他の試験方法による点検を実施してよい。

4.2.2 点検時期

(1) 初回点検

点検対象部位のうち点検範囲は接近可能な範囲とし，供用開始からの実運転年数で 10 年を経過するまでに初回点検を実施する。 (解説 4-2)

(2) 再点検(点検周期)

点検対象部位のうち点検範囲は接近可能な範囲とし，再点検は，点検後実運転年数で 10 年の期間内に実施する。 (解説 4-2)

4.2.3 評価

点検・評価フローは図 4-2 による。点検結果の判定は以下によるものとする。

- (1) 点検範囲に異常のないことが確認された場合は，継続使用できる。
- (2) 点検で異常が発見された場合に，技術的な根拠のある詳細評価を実施し，点検周期を見直すことにより，継続使用できる。
- (3) 上記(1)項，(2)項に適合しない場合には，補修等の措置を行う。(解説 4-7)

4.3 ライザブレース，ブラケット

ライザブレース，ブラケットの点検対象部位の点検手法及び点検時期，評価の方法を以下に示す。 (解説 2-4)

これらの点検対象部位を表 4.3 に示す。

表 4.3 ライザブレース，ブラケットの点検対象部位

部位	点検対象部位	
ライザブレース	RB-1	リーフと原子炉圧力容器肉盛座の溶接部
	RB-2	リーフとヨークの溶接部
	RB-3	ライザ管とヨークの溶接部
ブラケット	BR-1	ライザ管とブラケットの溶接部
	BR-3	位置決めボルト
	BR-4	ウエッジボルト
	BR-5	ウエッジ

注記:点検対象部位は図 2.2-1 に示す。

4.3.1 点検手法

当該点検対象部位の内，RB-1～RB-3，BR-1 の点検手法は，MVT-1 とする。

上記以外の対象部位は，VT-3 とする。 (解説 4-1)

なお，必要に応じて他の試験方法による点検を実施してよい。

4.3.2 点検時期

(1) 初回点検

点検対象部位のうち点検範囲は接近可能な範囲とし，供用開始からの実運転年数で 10 年を経過するまでに初回点検を実施する。 (解説 4-2)

(2) 再点検(点検周期)

点検対象部位のうち点検範囲は接近可能な範囲とし，再点検は，点検後実運転年数で 10 年の期間内に実施する。 (解説 4-2)

4.3.3 評価

ライザブレース，ブラケットの点検・評価は図 4-2 のフローによる。点検結果の判定は以下によるものとする。

- (1) 点検範囲に異常のないことが確認された場合は，継続使用できる。
- (2) 点検で異常が発見された場合に，技術的な根拠のある詳細評価を実施し，点検周期を見直すことにより，継続使用できる。
- (3) 上記(1)項，(2)項に適合しない場合には，補修等の措置を行う。(解説 4-7)

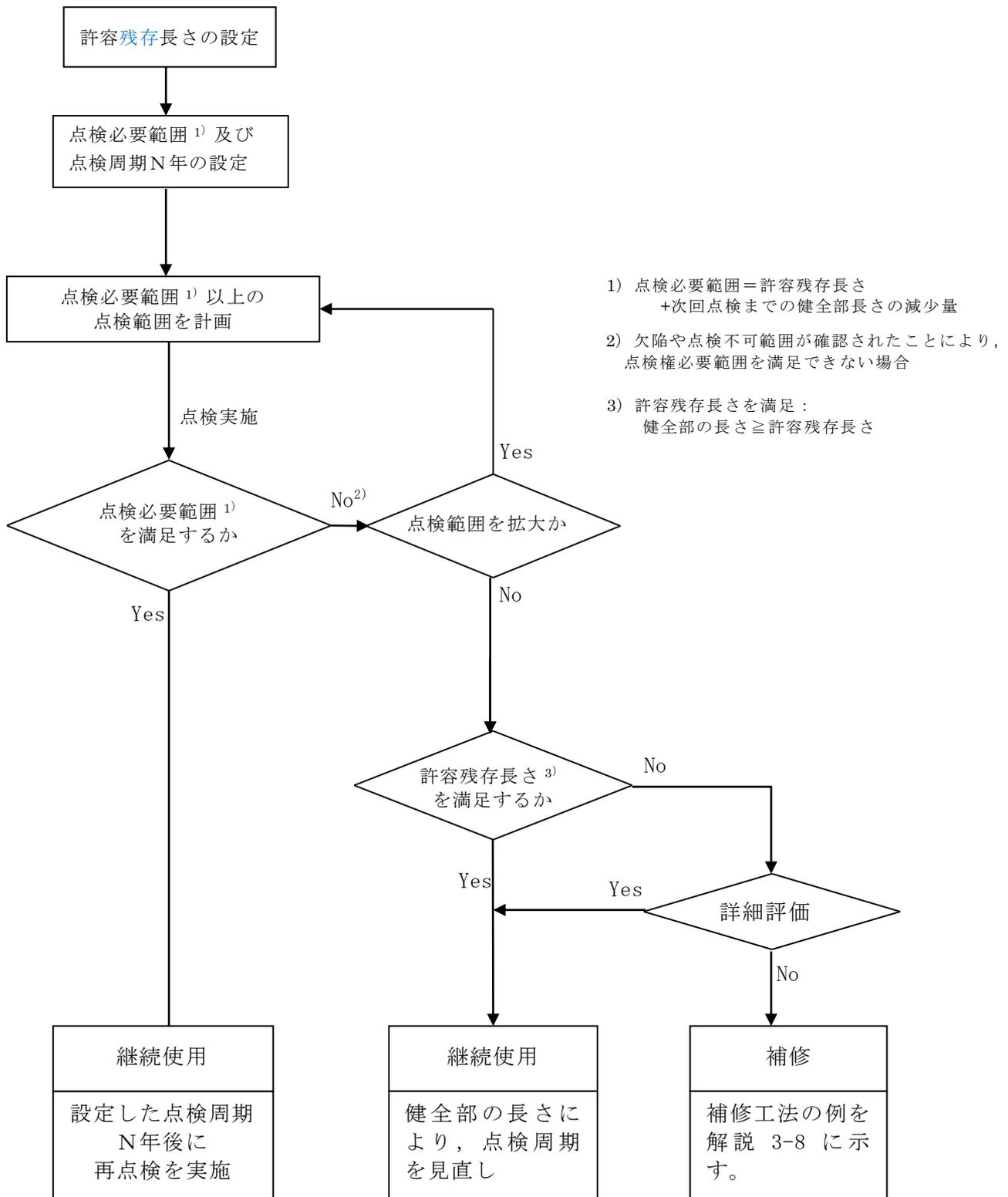


図 4-1 ライザ管，インレットミキサ，ディフューザの周溶接部の点検フロー

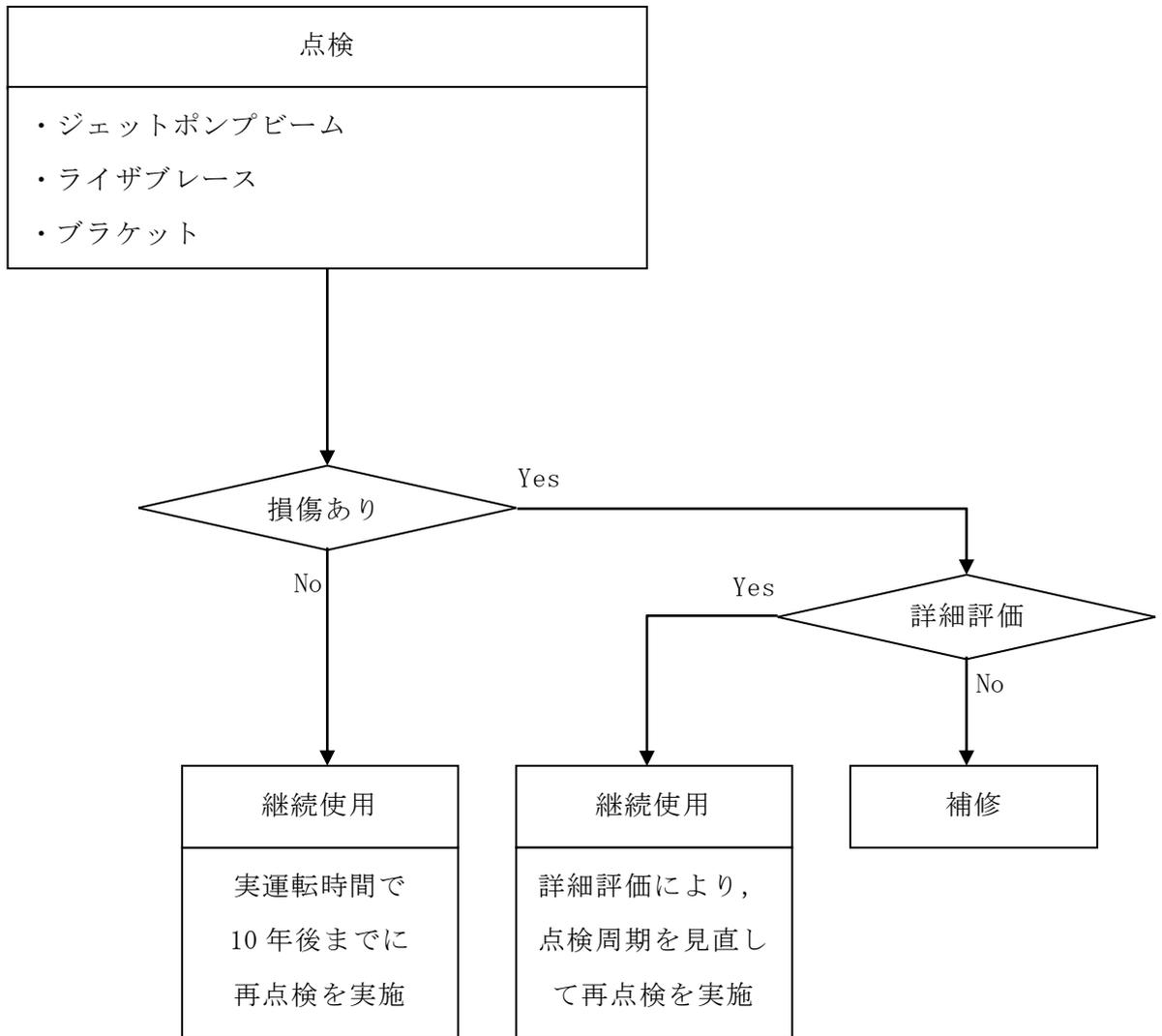


図 4-2 ジェットポンプビーム，ライザブレース，ブラケットの点検フロー

(解説 1-1) ガイドラインの目的

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。そのため、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) 本ガイドラインの適用にあたって

本ガイドラインで適用する点検及び評価は、日本電気協会の「原子力安全のためのマネジメント規程 (JEAC4111)」及び「原子力発電所の保守管理規程 (JEAC4209)」に基づき実施されることを前提としている。

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

また、本ガイドラインでは、旧耐震設計審査指針で定める基準地震動 S_2 を用いた評価結果が記載されている場合があるが、利用者は設置許可基準規則*1により定める基準地震動 S_s を用いた評価を行う必要がある。さらに、ガイドライン付録で引用した材料物性値等についても、評価に際し適切に選定判断する必要がある。

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付属設備の位置、構造及び設備の基準に関する規則」をいう。

(解説 2-1) ジェットポンプの構造健全性及び機能維持の確保

ジェットポンプの安全機能は、冷却材喪失事故 (LOCA) 時の炉心再冠水機能である。

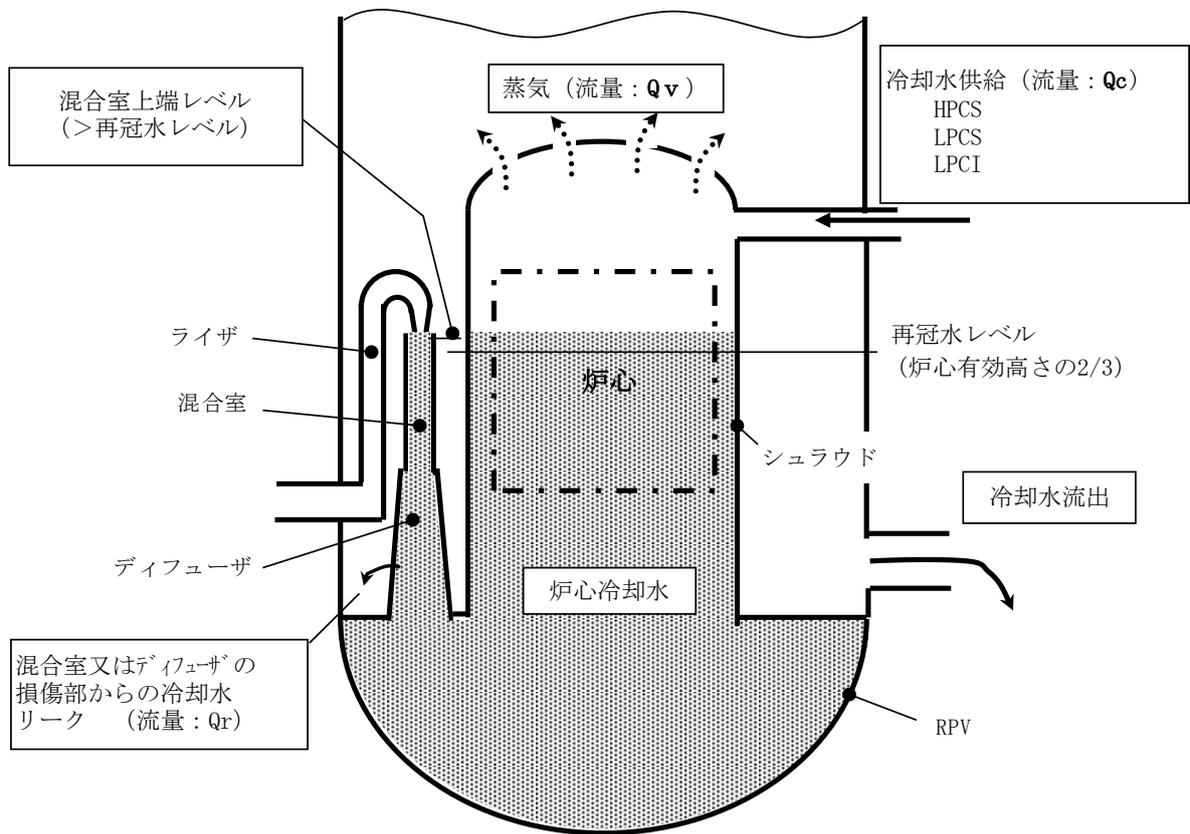
また、一部のプラントでは、炉心再冠水機能に加えて低圧注水 (LPCI) 機能を有する。

本ガイドラインでは、仮にジェットポンプに貫通亀裂が存在した状態で LOCA を想定した場合でも、炉心再冠水機能及び LPCI 機能が維持されることを評価条件とした。ジェットポンプが炉心再冠水機能のみを有するプラントの機能維持評価の考え方を図 2-1-1 に、ジェットポンプが炉心再冠水機能及び LPCI 機能を有する機能維持評価の考え方を図 2-1-2 に示す。

なお、通常運転時のジェットポンプの機能である炉心流量の供給機能及び炉心流量の計測機能については、大きな損傷がジェットポンプに生じた場合には、これらの機能に影響を及ぼす可能性があるものの、その影響は炉心流量の低下、ジェットポンプ差圧の変化等により

検知され、必要に応じて、所定の手順に従って安全にプラント停止が可能であることから、原子炉安全には影響しないため評価対象外とした。

ジェットポンプの機能と構造を付録Aに示す。

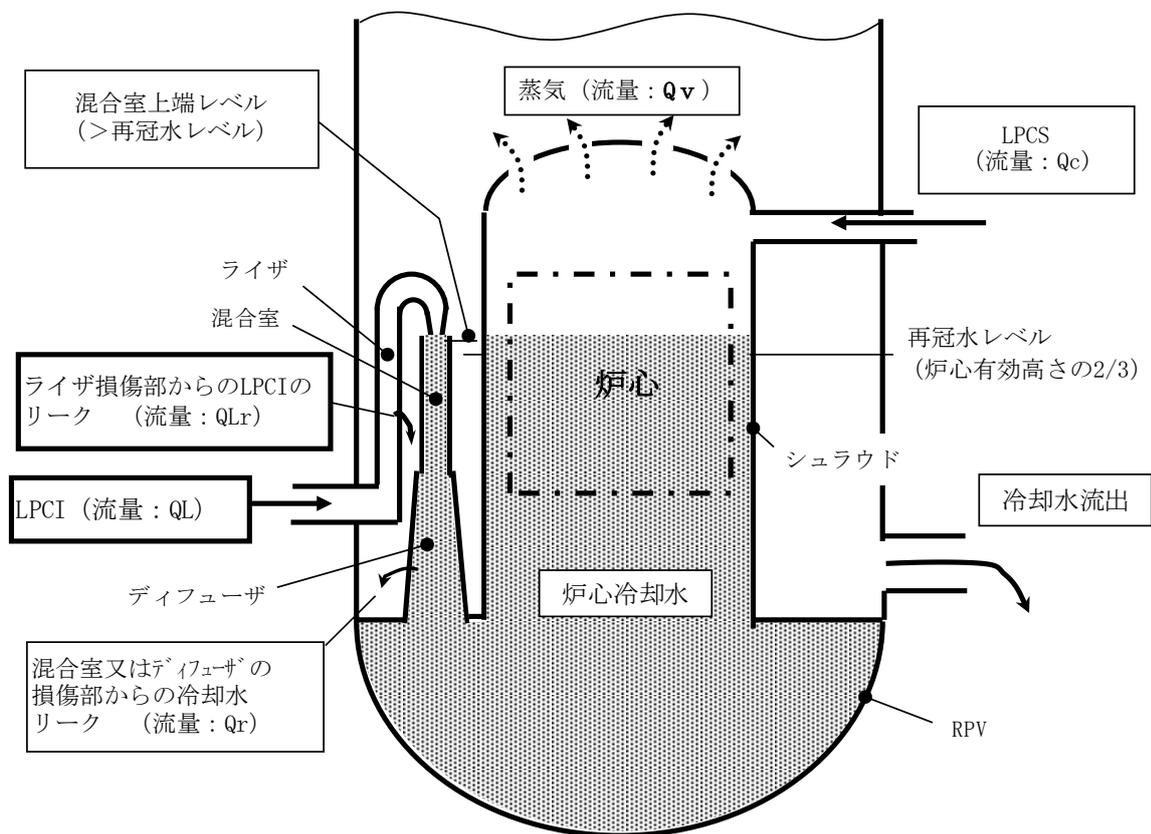


再冠水機能維持の条件：
 冷却水供給流量 (Q_c) - 蒸気流量 (Q_v) > 0 → 安全解析で確認済

冷却水供給量の設計裕度： ΔQ
 $=$ 設計値 - 安全解析適用値

損傷によるリーク (Q_r) がある場合の再冠水機能維持条件：
 冷却水供給流量の設計裕度 (ΔQ) $>$ 損傷による冷却水リーク量 (Q_r)

図 2-1-1 炉心再冠水機能と機能維持条件



1. 再冠水機能維持評価 (LPCIがPLR系以外の経路から注入されるプラントの評価と同じ)

損傷によるリーク (Q_r) がある場合の再冠水機能維持条件:

$$\text{冷却水供給流量の設計裕度 } (\Delta Q) > \text{ 損傷による冷却水リーク量 } (Q_r)$$

$$Q = Q_c + Q_L$$

$$\Delta Q = \text{設計値} - \text{安全解析適用値}$$

2 .LPCI機能維持評価

ライザ損傷部からのリーク (Q_{Lr})がある場合のLPCI機能維持条件:

$$\text{冷却水供給流量の設計裕度 } (\Delta Q) > \text{ 損傷による冷却水リーク量 } (Q_{Lr})$$

$$Q = Q_c + Q_L$$

$$\Delta Q = \text{設計値} - \text{安全解析適用値}$$

図 2-1-2 低圧注水機能と機能維持条件

(解説 2-2) ジェットポンプに想定される経年変化事象

これまでの損傷事例を考慮し、ジェットポンプの経年変化事象として、溶接部においては応力腐食割れ（SCC）を想定した。また、溶接部以外においてはジェットポンプの構造健全性上重要な部位であるジェットポンプビーム（ニッケル基合金 X750 製）の SCC，ウエッジ，位置決めボルトでの高サイクル振動による摩耗を経年変化事象として想定した。

なお、低サイクル疲労に関しては、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準に準じた設計がなされており、管の板厚が薄く起動，停止等の熱過渡時に生じる繰返し荷重は小さいこと等から，本ガイドラインでは対象外とした。

(解説 2-3) 材料の耐応力腐食割れ性

ジェットポンプの材料としては，ステンレス鋼とニッケル基合金が使用されている。

- ・ 炭素含有量が 0.030%を超えるオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304）は，溶接等による熱影響を受けた部位（溶接熱影響部）に応力腐食割れが発生する可能性がある。また，炭素含有量が 0.030%以下のオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304L，SUS316L）も，溶接熱影響部に応力腐食割れが発生する可能性があるが，前者に比べて優れた耐応力腐食割れ性を示す。
- ・ ステンレス鋳鋼（SCS13A 他）は二相ステンレス組織であり，溶接等による熱影響によって鋭敏化することがないため，応力腐食割れは発生しないものと考えられる。
- ・ ニッケル基合金 X750 は応力腐食割れが発生する可能性があるが，現在国内全プラントで使用されている改良熱処理材（改良 X750）は，従来材に比べ優れた耐応力腐食割れ性を示す。
- ・ ニッケル合金の 182 合金は，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，応力腐食割れが発生する可能性がある。これと比較して高 Cr，高 Nb 含有のニッケル合金の 82 合金及び高 Nb 含有のニッケル合金の改良 182 合金は，優れた耐応力腐食割れ性を示す。

(解説 2-4) 点検の考え方

ジェットポンプが炉心再冠水機能と LPCI 機能を有するプラントでは，ジェットポンプの全流路が機能維持に係わるため，ライザ管，インレットミキサ，ディフューザの管の周溶接部を点検対象とする。流路確保は，流路が崩壊しないことが前提となるため，流路の締結及び支持機能を有するビーム，ライザブレース，ブラケット(ウエッジ，位置決めボルト)も点検対象とした。

ジェットポンプが炉心再冠水機能だけを有するプラントでは，直接機能維持に係わるの

は、インレットミキサのジェットポンプノズル下端よりも下流側及びディフューザだけであるが、インレットミキサがライザ管及びディフューザから分離しないことが炉心再冠水機能維持の前提となるため、すべての管の溶接部及び管を締結又は支持しているビーム、ライザブレース、ブラケット(ウエッジ、位置決めボルト)も含めて構造維持の観点から点検対象とした。

以上を踏まえ、これらの各点検対象に対して機能、形状及び材質、想定される劣化事象及び国内外の運転経験、安全機能への影響を考慮し、付録Nに点検方針を定め、それに基づいた点検対象部位を、表 2.2-1 に示した。 (付録N)

また、点検対象部位の接近性（代表プラントの吊り下げ式カメラによる接近性）を付録Bに示す。

(解説 3-1) 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。試験装置及び器具等の要求仕様、試験の実施要領、並びに、信号の解析手法については、JEAG4217「原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針」に準拠して設定する。

(解説 4-1) 点検手法

各部位の点検手法は、点検の考え方(解説 2-4)に則り定めた点検方針(付録N)に基づき、個々の部位で目視点検方法を定めているが、点検手法に関する運用について以下に補足する。

- ・ライザ管、インレットミキサ、ディフューザの周溶接部及びライザブレース、ブラケットの溶接部及びビーム

SCC による亀裂が検知可能な MVT-1 により点検する。また、亀裂の深さを評価する場合等、必要に応じて、UT 又は ET を実施するものとする。

- ・ブラケットのウエッジ、位置決めボルト等

機械締結部品であり、緩み等がなく所定の位置に据え付けられていることを確認することを目的として、VT-3 により点検する。

(解説 4-2) 初回点検

初回点検とは、点検対象のうち接近可能な範囲に対して実施する最初の点検であり、適用する点検手法の基準となる条件（VTにおける照度、UTにおけるキャリブレーション等）の設定を行うとともに、再点検の際に参照する点検記録を取得するために実施する基準となる点検である。

各部位の初回点検時期は点検の考え方(解説 2-4)に則り定めた点検方針(付録N)及びの初回点検時期の設定根拠を以下に示す。

(1) ライザ管，インレットミキサ，ディフューザの周溶接部

管の内面に想定した初期亀裂が板厚方向に進展，貫通し，外面からの目視点検によって検知可能と考えられる時期で，機能維持に対して裕度が確保される時期を初回点検時期として定めた。

初回点検時期は，以下の手順により設定した。

a.管の溶接部の溶接残留応力を評価し，内面に想定した初期亀裂の進展評価を実施。

(付録C，D，E，F)

b.LOCA 時の地震に対して構造維持が可能な限界亀裂長さの評価。(付録G)

c.上記 a，b から，LOCA 時の地震に対して構造維持が可能な供用開始からの期間の評価。(付録H)

d.上記 c で評価された期間が経過した時点において LOCA の発生を想定し，亀裂開口からの炉心冷却水の漏えい量を評価し，漏えい量が炉心再冠水機能及び LPCI 機能の確保に影響を及ぼさないことの評価。(付録 I)

代表プラントについて亀裂進展評価を実施した結果，炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼製の管の周溶接部では，実運転時間で約 14 年を経過すると亀裂が貫通する可能性があると考えられること，実運転時間で 19 年を経過しても LOCA 時の機能維持が確保できることから，初回点検時期は，供用開始後実運転時間で 16 年までとした。

炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼製の管の周溶接部では，内面からの亀裂が貫通する可能性があるのは供用開始時点から実運転時間で 50 年を超えるが，健全性の確認を目的として，供用開始から暦年で 30 年までを初回点検時期として定めた。

なお，ディフューザ下端のローアリングとシュラウドサポートとのニッケル合金溶接部は，供用開始から 80 年を経過しても亀裂は板厚を貫通せず，LOCA 時の機能維持に有意な影響を及ぼさないものと考えられるが，低炭素ステンレス鋼製の管の周溶接部の初回点検時期に合わせて，供用開始から暦年で 30 年までを初回点検時期として定めた。

(2) ジェットポンプビーム

ジェットポンプビームの初回点検時期は，解析，試験による定量的な評価が困難なことから，以下に示すように，これまでのプラント運転実績，先行損傷事例対策の実施状況を調査，検討して，供用開始から実運転時間で 10 年までと設定した。また，再点検周期も，これに合わせて実運転時間で 10 年以内と設定した。

今後もプラント実績調査を継続し，適宜点検時期の見直しを行う必要があるものと考えられる。

- ・ 国内で使用されているジェットポンプビームの材料（ニッケル基合金 X750）は、すべて、過去の海外でのジェットポンプビームの SCC 損傷事例の対策として開発された改良熱処理材が採用されており、SCC 感受性が低減されている。
- ・ 改良熱処理材のジェットポンプビームの実運転時間が 10 年を超える国内プラントが増え、着実に実績が積重ねられてきている。（付録 J）
- ・ 唯一の国内での改良熱処理材の損傷事例は、ビームの据付施工不良により、実験室データで確認された SCC の発生し得る程度の高応力が発生したことが原因であり、国内プラントではこの対策として、高応力発生防止のための締め付け力の低減、適切な据付管理方法の見直しによる予防保全がなされている。

(3) ライザブレース，ブラケット

これらの部位には損傷事例は非常に少なく、国内では位置決めボルト及びウエッジの摩耗の事例が数件あるもののその程度は軽微である。しかし、ライザ、インレットミキサの支持部材であり、万一損傷が生じた場合には、他の部位の構造健全性に影響を及ぼす可能性があることから、ジェットポンプビームに合わせて、初回点検時期、再点検周期とも、実運転時間で 10 年以内とした。

(解説 4-3) 健全部の長さ と 許容残存長さ の評価

「健全部の長さ」とは、点検対象溶接部のうち、欠陥及び未点検範囲や強度評価上荷重伝達を考慮しない部分を除いた溶接部の長さである。また、「許容残存長さ」とは、機能維持確保のために必要な溶接部の長さをいう。

許容残存長さは、「発電用原子力設備規格 維持規格」(JSME S NA1-2000) の添付 8 に示される極限荷重評価法により評価した。評価条件を以下に示す。(付録 G 参照)

(1) 荷重

S_1 地震荷重を考慮する。

(2) 想定する欠陥

周方向板厚貫通亀裂を想定する。

(3) 安全率

S_1 地震荷重に対しての安全率を 1.39 とする。

ジェットポンプの周方向溶接部に亀裂がある場合には、剛性の低下による固有振動数への影響が考えられる。これを考慮して、ジェットポンプと同等な長さ、外径、板厚の配管について、欠陥がない場合と貫通欠陥が複数ある場合の固有振動解析を実施し、その影響は有意でないことが確認された。(付録 K 参照)

従って、許容残存長さの評価には、健全な状態を前提として評価された地震応答を適用した。

(解説 4-4) 亀裂進展評価

周溶接部の SCC 亀裂進展評価条件を以下に示す。

(1) 想定初期欠陥

初期欠陥として溶接部内面に周方向亀裂（深さ $50\mu\text{m}$ 、長さ $500\mu\text{m}$ の半楕円）1個を想定する。

(2) 応力分布

溶接残留応力及び差圧による応力を考慮する。

(3) 亀裂進展速度式

板厚方向の亀裂進展速度は、SCC 亀裂進展試験データから設定された亀裂進展速度式を適用する。板厚貫通亀裂の周方向への進展速度は、貫通時の内面側亀裂長さを保守的に仮定し、前記亀裂進展速度式の上限值を適用する。

（付録 C 参照）

初回点検時期等の点検時期を定める上で想定する初期欠陥として、管の溶接部内面に周方向亀裂（深さ $50\mu\text{m}$ 、長さ $500\mu\text{m}$ ）1個を設定したのは以下の理由による。

- a. SCC による軸方向亀裂は、進展範囲が溶接熱影響部に限られ、貫通に至ったとしても強度に有意な影響を及ぼさないものと考えられることから、周方向亀裂を想定した。
- b. 周方向亀裂を進展させる主要な軸方向応力は溶接残留応力であり、溶接残留応力は管の内面側で引張応力、外面側で圧縮応力となることから、管内面側に SCC が発生する可能性が高いと考えられることから、管内面側に初期亀裂を想定した。
- c. 初期亀裂の個数については、以下に示す本ガイドラインでの評価条件及び国内実機配管 SCC 事例の調査結果を総合的に検討した結果、点検周期を定める上で想定する亀裂の数は1個とした。
 - ・ 建設時の検査で有意な欠陥がないことが確認されているが、亀裂進展評価においては、供用開始時に初期亀裂（深さ $50\mu\text{m}$ 、長さ $500\mu\text{m}$ ）を想定して、亀裂の発生までの期間を無視した保守側の評価を実施している。また、板厚貫通後の亀裂の周方向進展速度は、本ガイドラインで設定した亀裂進展速度の上限值を適用している。
 - ・ 欠陥裕度評価において、評価された周方向亀裂が強度上最も不利な位置（引張応力が最大となる位置）にあるものとして評価し、また、検査が困難な範囲は荷

重伝達されないものとして評価している。

- ・ 国内の配管の SCC 事例を調査した結果、半分以上の事例で同一溶接線上に確認された SCC 亀裂は 1 個であった。

同一溶接線上に複数の SCC 亀裂が確認された事例のうち、1 例を除くいずれの事例でも、確認された複数の亀裂は比較的接近した位置にあり、本評価で想定する初期亀裂 1 個の板厚貫通時の亀裂長さに相当する範囲に含まれている。

残りの一例は、比較的離れた位置にあり、本評価で想定する初期亀裂 1 個の板厚貫通時の亀裂長さに相当する範囲に包絡されないが、本評価で想定する貫通亀裂を最も強度上不利な位置にあるものとして評価することにより、強度評価上十分に包絡される。

本ガイドラインで想定している亀裂の板厚貫通時の亀裂長さは、板厚に比べ非常に長い。亀裂長さの長い単一周方向貫通亀裂は、合計長さがこれと等しい複数の周方向貫通亀裂に比べ、強度上保守側の評価となる。 (付録K)

本ガイドラインで設定した想定初期亀裂は、現状の知見では適切であると考えられるが、配管の内面側に 1 個の初期亀裂のみを想定することは、工学的に十分な検証がなされていないことから、今後の知見を反映し、適宜見直しを行うこととする。

(解説 4-5) 再点検周期の設定

管の周溶接部の再点検時期は、図 4-1 の点検フローに従い、設定、評価する。

再点検周期の設定における健全部の長さの減少量は、以下のように考慮して評価する。

(付録L)

- (1) 検査が困難な範囲は、荷重伝達が行われない範囲として取り扱うものとするが、周方向への進展は考慮しない。
- (2) 点検（外面からの VT）で欠陥が発見されなかった場合は、板厚貫通寸前までの欠陥が存在していることを保守的に仮定して、点検終了後の運転開始時から板厚貫通直後の亀裂が周方向に進展するものとして再点検時までの亀裂進展量を評価する。
- (3) 点検で欠陥が発見された場合は、欠陥の長さ／深さを測定して亀裂進展評価を行う。
- (4) アクセス可能な全範囲を点検し、周長の 75%以上の点検範囲が確保された場合で、点検範囲に欠陥が発見されなかった場合には、未点検範囲に SCC の発生/進展に関する特異性が確認されない限り、未点検範囲を上記(1)の「検査が困難な範囲」として取り扱わず、健全部として取り扱うことができる。(付録M)

(解説 4-6) 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工法は、別冊の「予防保全工法ガイドライン」に示すとおりである。表 3-3-1 に数例を示す。

表 3-3-1 予防保全の例

予防保全の種類	点検実施時期設定への反映
耐食材肉盛	耐 SCC 性が優れた材料と同等に取り扱うことができる。
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

(解説 4-7) 補修技術

ジェットポンプに欠陥が検出された場合の補修工法として、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は、別冊の「補修工法ガイドライン」等に示すとおりである。以下に例を示す。

- ・水中溶接（乾式）
- ・水中溶接（湿式）
- ・補助ウエッジ
- ・SMA（形状記憶合金）カップリング

付録A ジェットポンプの機能と構造

(1) ジェットポンプの機能

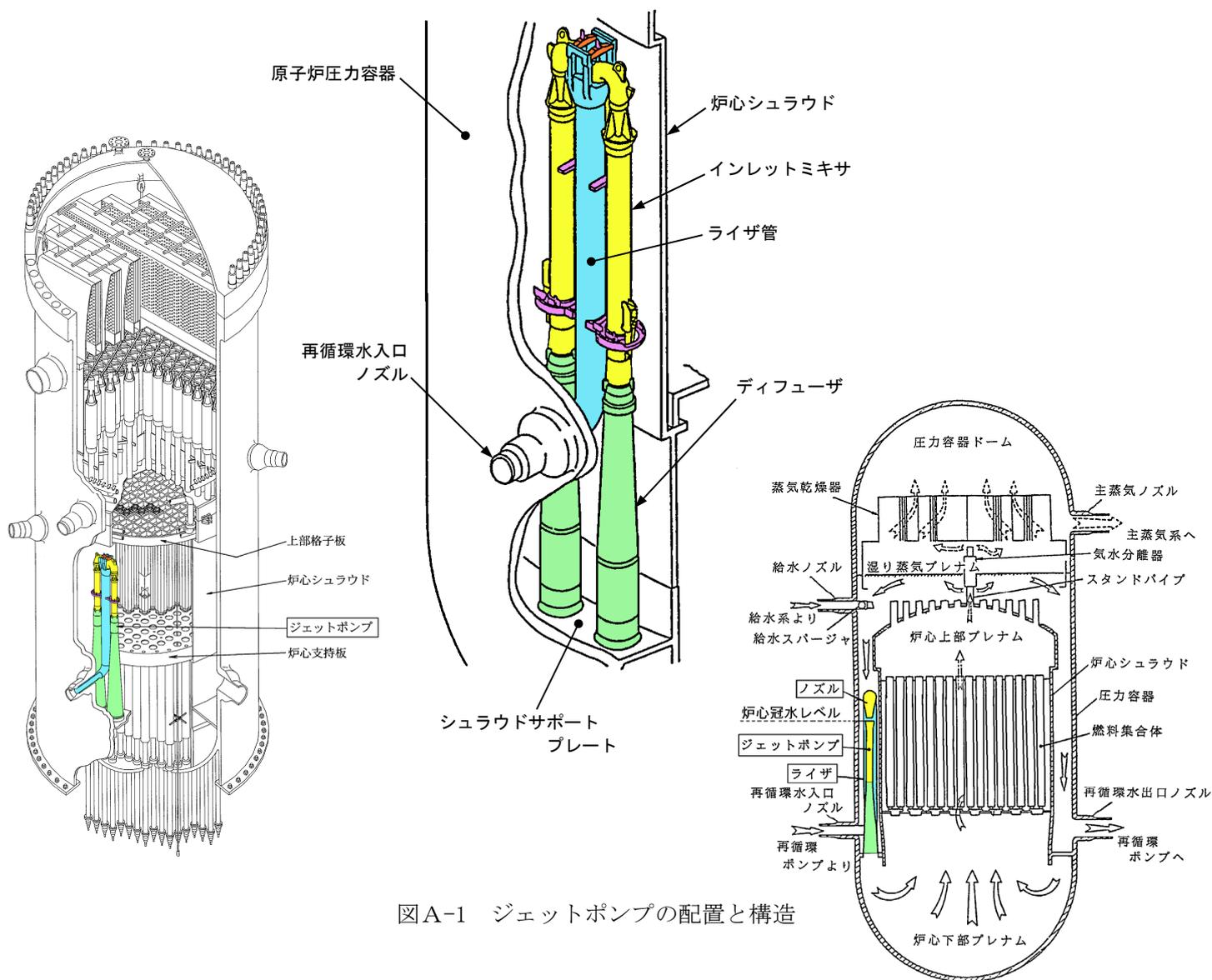
ジェットポンプは、原子炉圧力容器と炉心シュラウドとの間の環状部（アニュラス部）に設置され、再循環ポンプで昇圧された循環水をノズルから吹き出し、アニュラス部の循環水を吸引して両者を混合し、ディフューザから炉心下部プレナムへ供給するものである。

ジェットポンプの主な機能を以下に示す。

- ・原子炉の出力を調整するための炉水の供給
- ・炉心流量の計測（計測用配管）

また、安全に関して以下の機能を有する。

- ・事故発生後の炉心冠水レベルの確保
- ・事故時の低圧注入系の流路（低圧注入系が原子炉再循環系に入るプラント）



図A-1 ジェットポンプの配置と構造

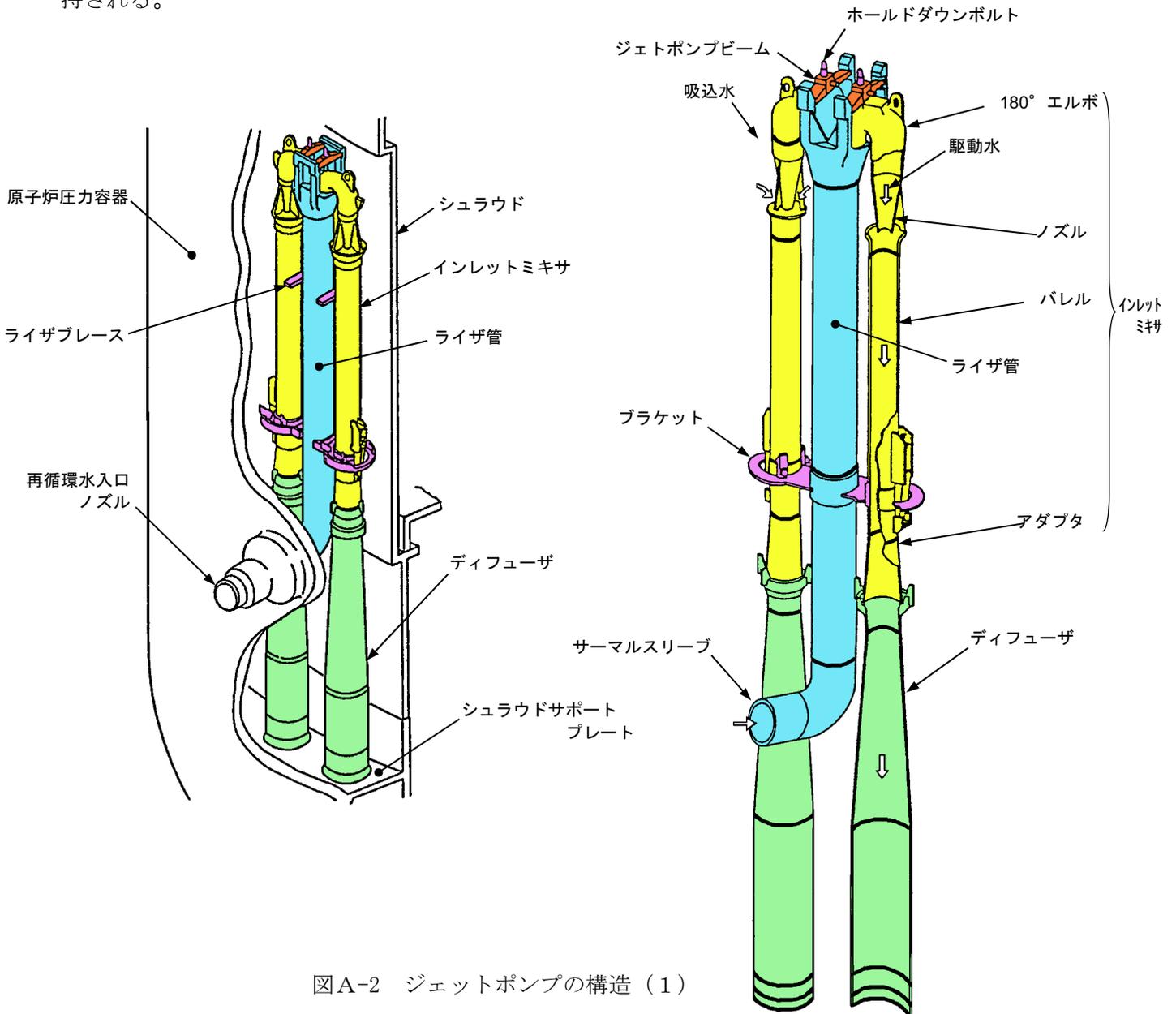
(2) ジェットポンプの構造

ジェットポンプは、炉心シュラウドと原子炉圧力容器と炉心シュラウドとの間のアニュラス部に 10 組（一部のプラントは 8 組）設置される。1 組のジェットポンプは、1 本のライザ管と、それぞれ 2 個のインレットミキサ（180° エルボ～バレル～アダプタ）及びディフューザより構成される。

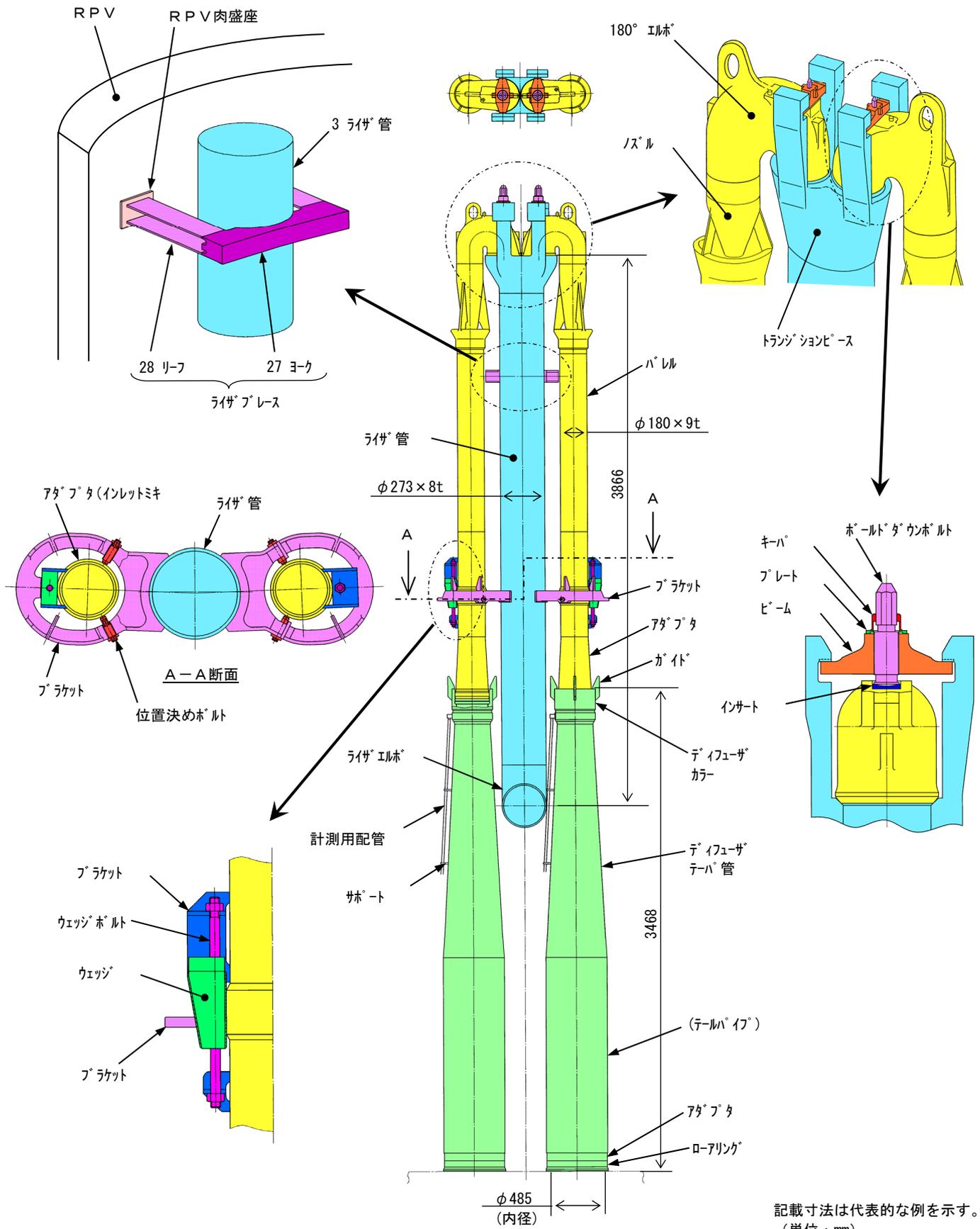
ディフューザの下端は、シュラウドサポートプレート上に溶接して組み立てられる。

ライザ管は、入口部を原子炉圧力容器の再循環水入口ノズルのサーマルスリーブに溶接され、上部をライザブレースにより原子炉圧力容器内壁に支持される。

インレットミキサは取外し可能な構造となっており、下端をディフューザ上端に差込み、上端をライザ管上端のトランジションピースの球面座にジェットポンプビームを介してホールダウンボルトにより押さえつけて固定する。インレットミキサはライザ管に固定してあるブラケットにより横方向を支持される。

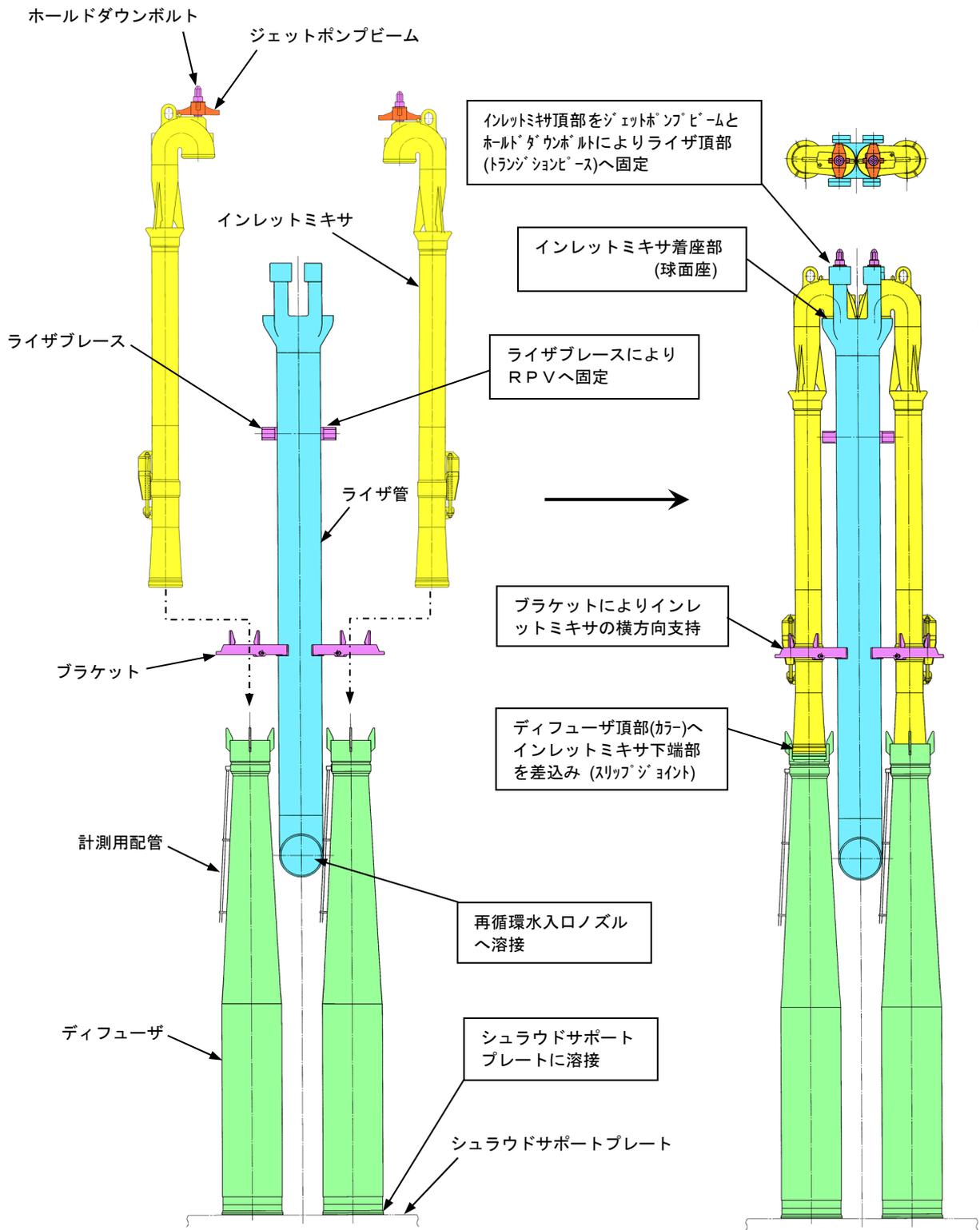


図A-2 ジェットポンプの構造 (1)



記載寸法は代表的な例を示す。
(単位: mm)

図A-3 ジェットポンプの構造(2)



図A-4 ジェットポンプの組立構造

付録B ジェットポンプの点検における接近性

表B-1 1100MWeプラントのジェットポンプ溶接線 VT(吊下式カメラ)接近可能範囲

No.	点検対象部位 (箇所数)	外面(表面)		内面(裏面)	
		接近可能範囲	理由	接近可能範囲	理由
RB-1	リーフ-RPVパッド溶接部(40箇所)	100%	—	50%	リーフと吊下式カメラの干渉のため
RB-2	ヨークリーフ溶接部(40箇所)	100%	—	25%	リーフと吊下式カメラの干渉のため
RB-3	ヨークライザ管溶接部(20箇所)	100%	—	25%	リーフと吊下式カメラの干渉のため
BM-1	ビーム	80%	キーパ及びトランジションピースに覆われているため	50%	ノズルエルボと吊下式カメラの干渉のため
RS-1	サーマルスリーブライザエルボ溶接部(10箇所)	100%	—	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可
RS-2	ライザ管ライザエルボ溶接部(10箇所)	100%	—	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可
RS-3	ライザ管トランジションピース溶接部(10箇所)	100%	—	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可
IM-2	ノズルバレル溶接部(20箇所)	100%	—	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可
IM-3	バレルアダプタ溶接部(20箇所)	90%	ライザブレースと吊下式カメラの干渉のため	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可
BR-1	ライザ管ブラケット溶接部(20箇所)	100%	—	100%	—
BR-3	位置決めボルト廻り止め溶接部(40箇所)	100%	—	—	—
BR-4	ウェッジボルト廻り止め溶接部(40箇所)	100%	—	—	—
BR-5	ウェッジ	100%	—	0%	トランジションピース側はアクセス不可
DF-1	ディフューザカラーディフューザテーパ管溶接部(20箇所)	90%	ライザ管と吊下式カメラの干渉のため	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可
DF-2	ディフューザテーパ管テールパイプ溶接部(20箇所)	90%	ライザ管と吊下式カメラの干渉のため	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可
DF-3	テールパイプローアリング又はアダプタ溶接部(20箇所)	90%	ライザ管及びシュラウドと吊下式カメラの干渉のため	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可
AD-2	ローアリングシュラウドサポートプレート溶接部(20箇所)	90%	ライザ管及びシュラウドと吊下式カメラの干渉のため	0%	インレットミキサを取り外さなければアクセス不可

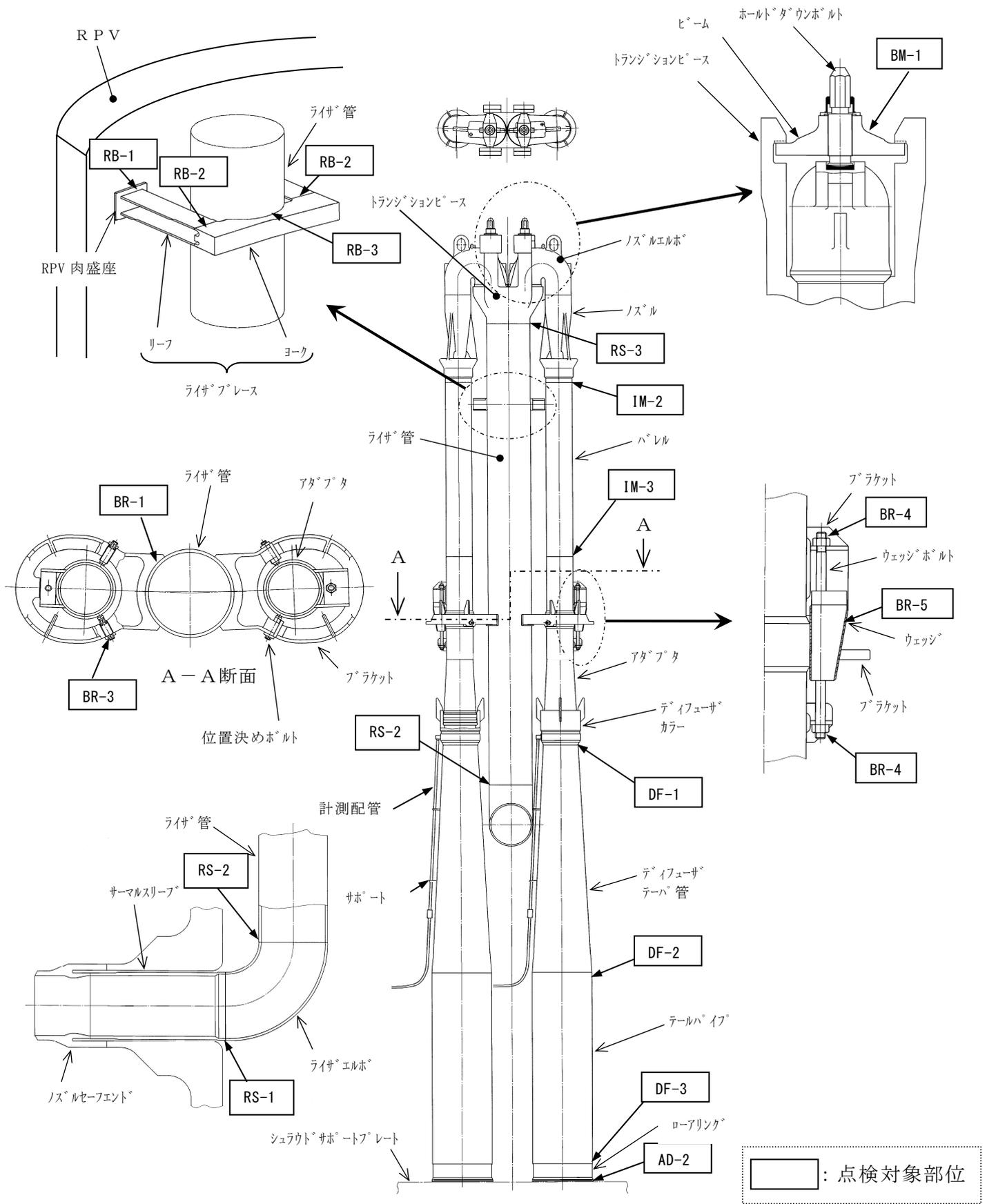


図 B-1 ジェットポンプの点検対象部位

付録C SCC 亀裂進展速度式

1. はじめに

本付録は、ジェットポンプの周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。なお、応力拡大係数 $K \leq 0$ の場合、亀裂進展速度 da/dt を=0（停留）として扱う。

2. ジェットポンプ周溶接部の使用材料

ジェットポンプの周溶接部に使用されている SUS304, SUS304L, SUS316L 及びニッケル合金の 182 合金を亀裂進展の評価対象とする。

3. SCC 亀裂進展速度式

3.1 鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展速度式

(a) 通常一次水質環境下(NWC)

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

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 3.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (1)$$

$$da/dt = 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161} \quad (3.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (2)$$

$$da/dt = 9.2 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (3)$$

上式において、亀裂進展速度 da/dt の単位は mm/s, 応力拡大係数 K の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。また、上式で表される鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性を図 C-1 に示す。

(b) 水素注入環境下(HWC)

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

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 12.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (4)$$

$$da/dt = 7.94 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (12.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (5)$$

$$da/dt = 5.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (6)$$

上式において、亀裂進展速度 da/dt の単位は mm/s, 応力拡大係数 K の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。また、上式で表される鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性を図 C-2 に示す。

3.2 低炭素ステンレス鋼の SCC 亀裂進展速度式

(a) 通常一次水質環境下 (NWC)

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

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (7)$$

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (8)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (9)$$

上式において、亀裂進展速度 da/dt の単位は mm/s、応力拡大係数 K の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。また、上式で表される低炭素ステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性を鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性と併せて、図D-1 に示した。

(b) 水素注入環境下 (HWC)

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

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

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-12} K^{2.161} \quad (19.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (11)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-8} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (12)$$

上式において、亀裂進展速度 da/dt の単位は mm/s、応力拡大係数 K の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。また、上式で表される低炭素ステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L) の SCC 亀裂進展特性を鋭敏化 SUS304 の SCC 亀裂進展特性と併せて、図C-2 に示した。

3.3 ニッケル合金の 182 合金の SCC 亀裂進展速度式

(a) 通常一次水質環境下 (NWC)

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

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (13)$$

$$da/dt = 3 \times 10^{-15} K^{5.186} \quad (13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (14)$$

$$da/dt = 2 \times 10^{-6} \quad (K > 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (15)$$

上式において、亀裂進展速度 da/dt の単位は mm/s、応力拡大係数 K の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。また、上式で表される 182 合金の SCC 亀裂進展特性を図 C-3 に示す。

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

1) $-100 < \text{ECP}$ の場合

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.70 \times 10^{-17} K^{4.50} \quad (0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K \leq 56.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (56.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K)$$

2) $-200 < \text{ECP} \leq -100$ の場合

$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 2.08 \times 10^{-16} e^{(0.0204 \cdot \text{ECP})} K^{4.50} \quad (0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K \leq 56.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 1.53 \times 10^{-8} e^{(0.0204 \cdot \text{ECP})} \quad (56.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K)$$

3) $\text{ECP} \leq -200$ の場合

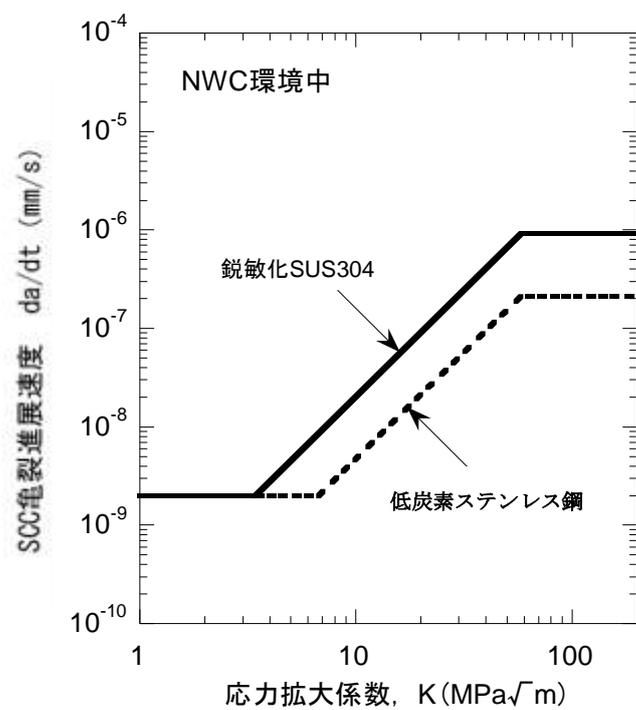
$$da/dt = 0 \quad (K \leq 0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$da/dt = 3.50 \times 10^{-18} K^{4.50} \quad (0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K \leq 56.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

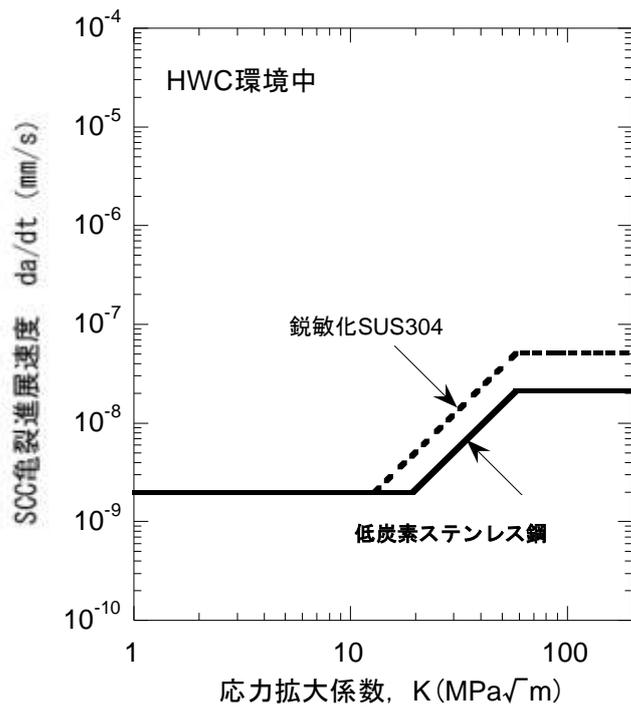
$$da/dt = 2.58 \times 10^{-10} \quad (56.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K)$$

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

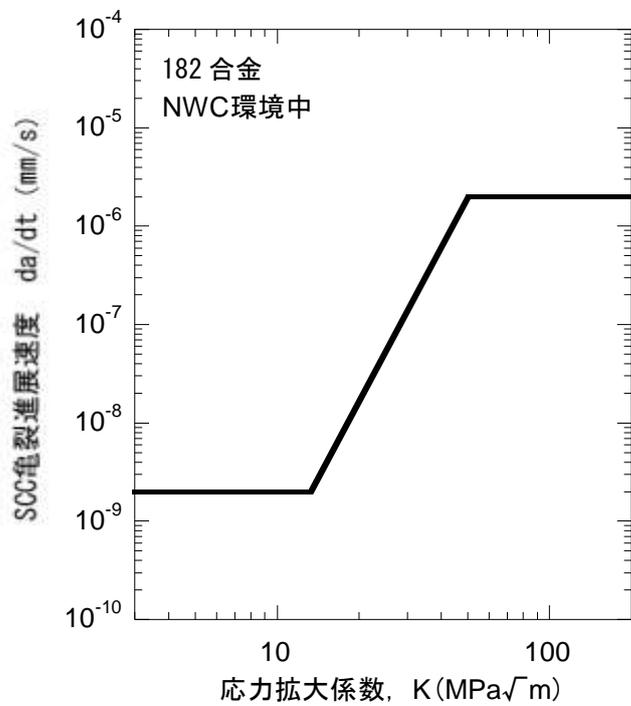
と規定しており、今後の評価に際しては本速度線図を用いる必要がある。



図C-1 NWC環境中におけるステンレス鋼のSCC亀裂進展特性



図C-2 HWC環境中におけるステンレス鋼のSCC亀裂進展特性



図C-3 NWC環境中における182合金のSCC亀裂進展特性

付録D 溶接部の残留応力

1. はじめに

本付録は、ジェットポンプ周溶接部の亀裂進展評価に必要な溶接残留応力分布の評価結果をまとめたものである。

ジェットポンプの管と管の周溶接部は、ディフューザのローアリングとシュラウドサポートの溶接部を除き、ステンレス薄肉管の外側開先周溶接となっており、同等な材料、構造の管の周溶接部の溶接残留応力測定結果から残留応力分布を評価した。

ディフューザのローアリングとシュラウドサポートの溶接部の溶接残留応力は、2次元弾塑性解析結果を用いた。

2. 外側開先周溶接部の軸方向溶接残留応力の設定方法

SUS304製の外径275mm、板厚8.5mmの配管の溶接残留応力測定結果（図D-1参照）から、内表面 216N/mm^2 の引張応力、外表面 167N/mm^2 の圧縮応力とし、板厚内の分布を直線分布として設定した。

なお、軸方向亀裂は管の強度に及ぼす影響が小さいことから軸方亀裂の進展評価は対象外とし、周方向応力については設定していない。

3. ローアリングとシュラウドサポートの溶接残留応力解析

(1) 解析モデル

テールパイプ、ローアリング、シュラウドサポートプレート及びローアリングとシュラウドサポートの溶接部を、軸対称モデル化した。

(2) 解析手順

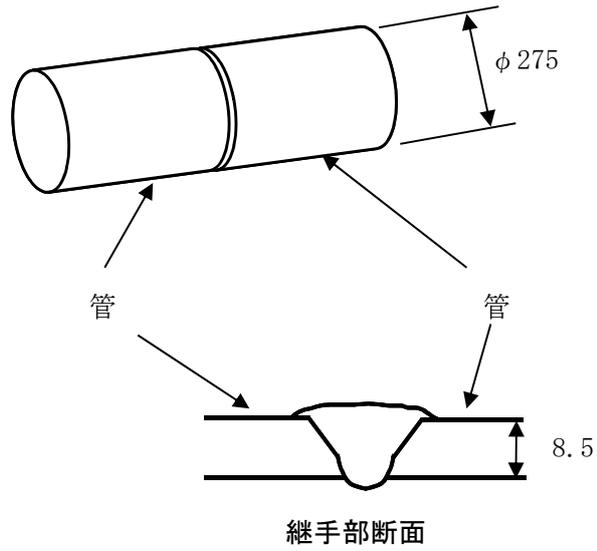
当該溶接部の溶接施工条件から、溶接パス毎に溶接入熱条件を設定して伝熱解析を実施し、得られた非定常温度分布に基づいて、大変形弾塑性応力解析を実施した。

(3) 物性値

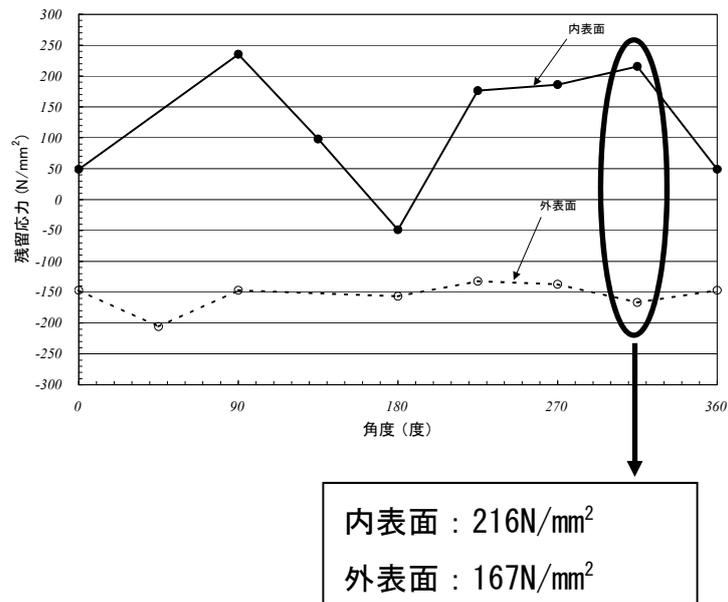
伝熱解析には、表D-1に示す物性値を用いた。また、熱応力解析には、図D-2に示す物性値を用いた。

(4) 解析結果

図D-3に軸方向及び周方向の残留応力分布の解析結果を示す。



(a) 残留応力分布を調査した管-管継手突合わせ継手形状



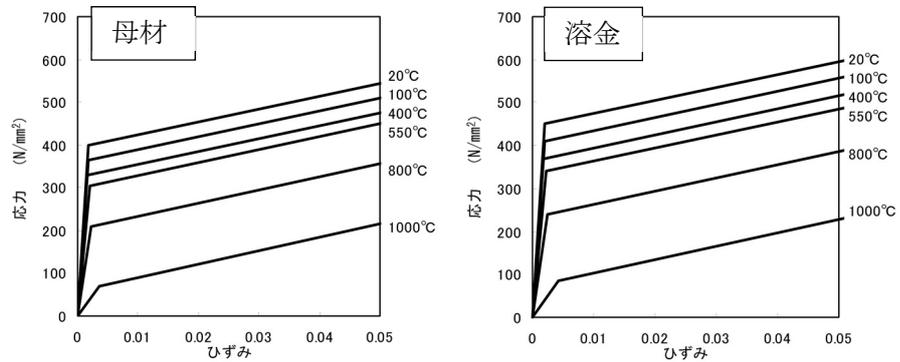
(b) 軸方向溶接残留応力分布

図D-1 管と管との溶接残留応力分布

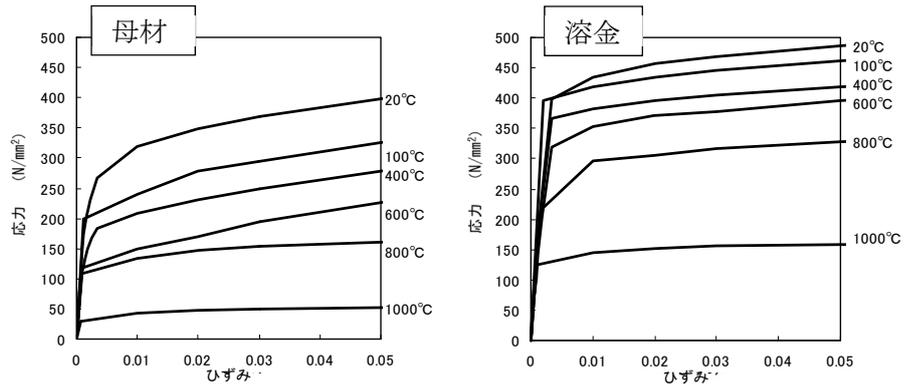
表D-1 伝熱解析に用いた物性値

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

出典：溶接学会論文集第12巻（1994） 第4号 563

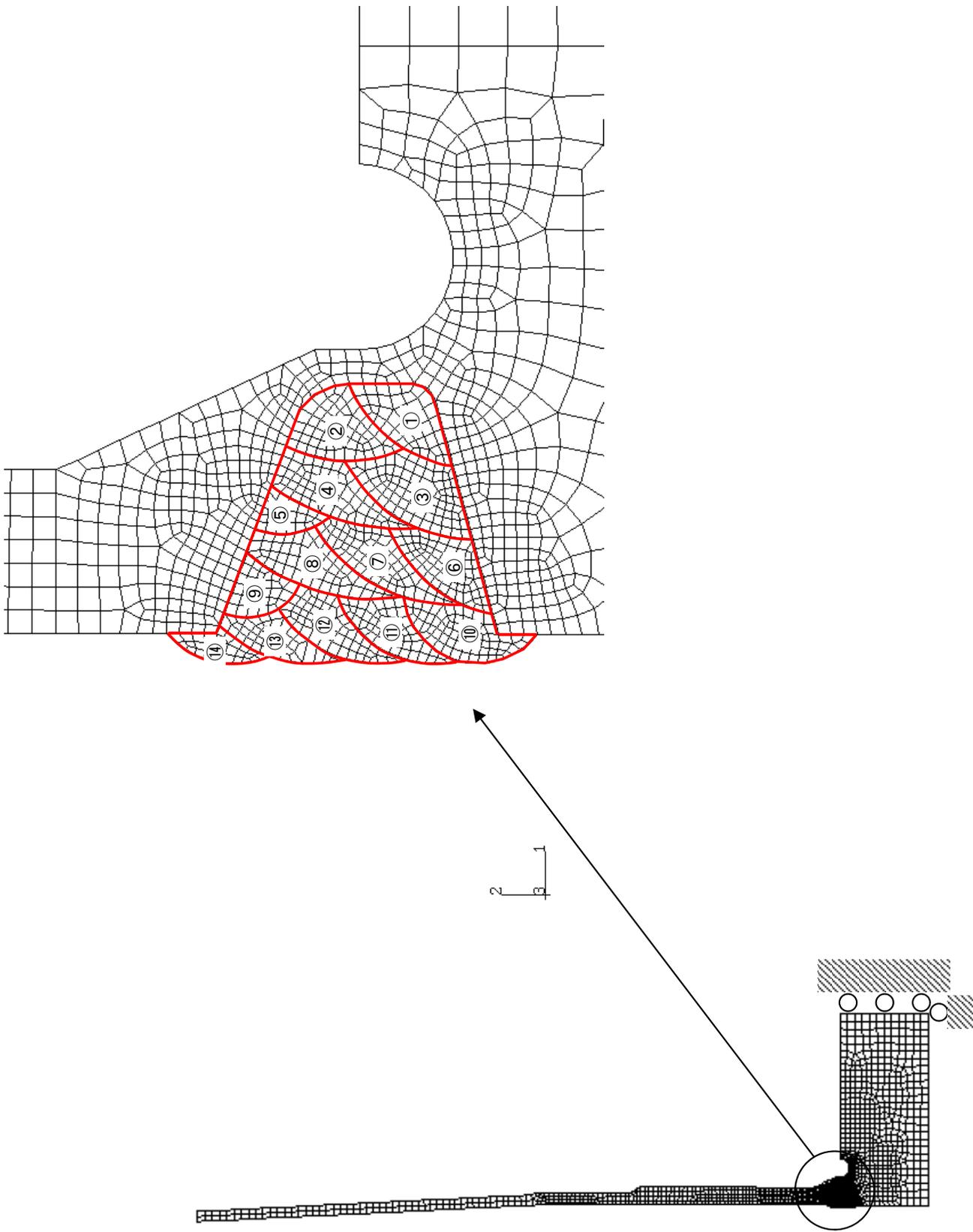


(a) ニッケル基合金

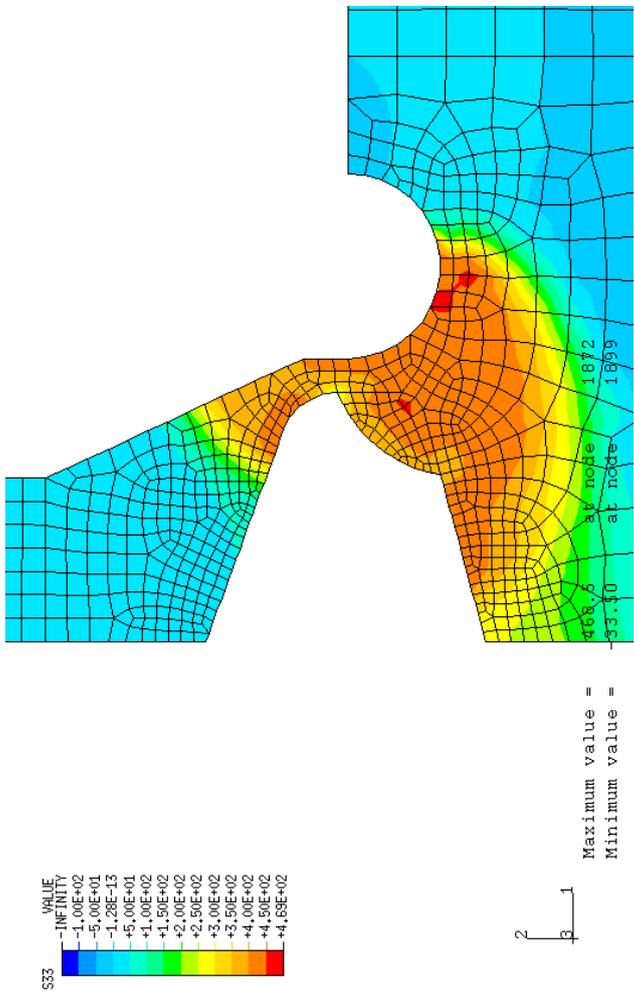


(b) ステンレス鋼

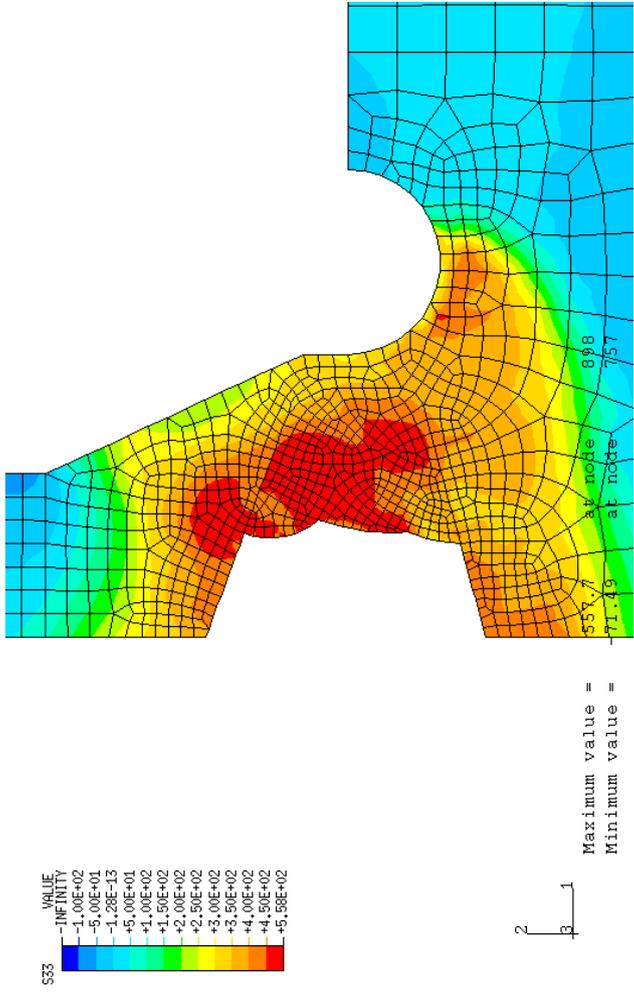
図D-2 熱応力解析に用いた物性値



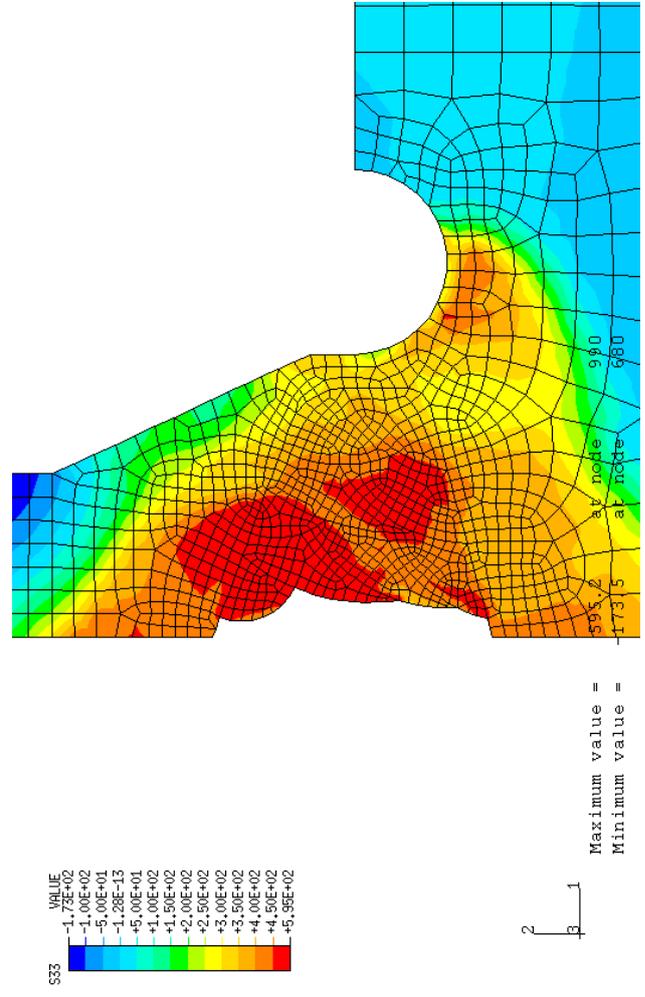
図D-3(1) 解析モデル及び拘束条件（2次元軸対称要素）



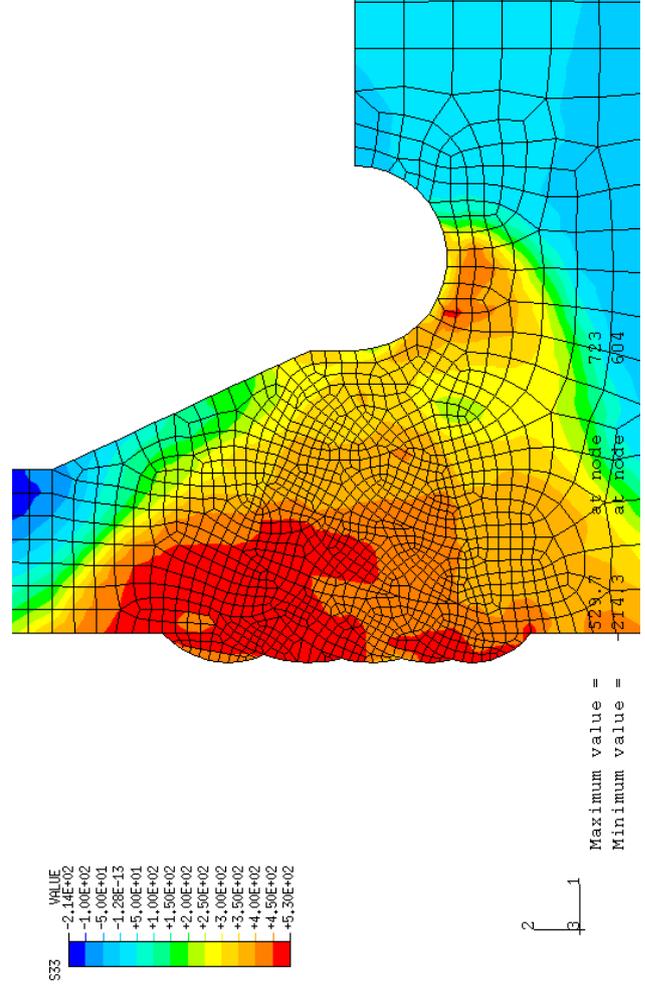
<1パス終了時>



<5パス終了時>

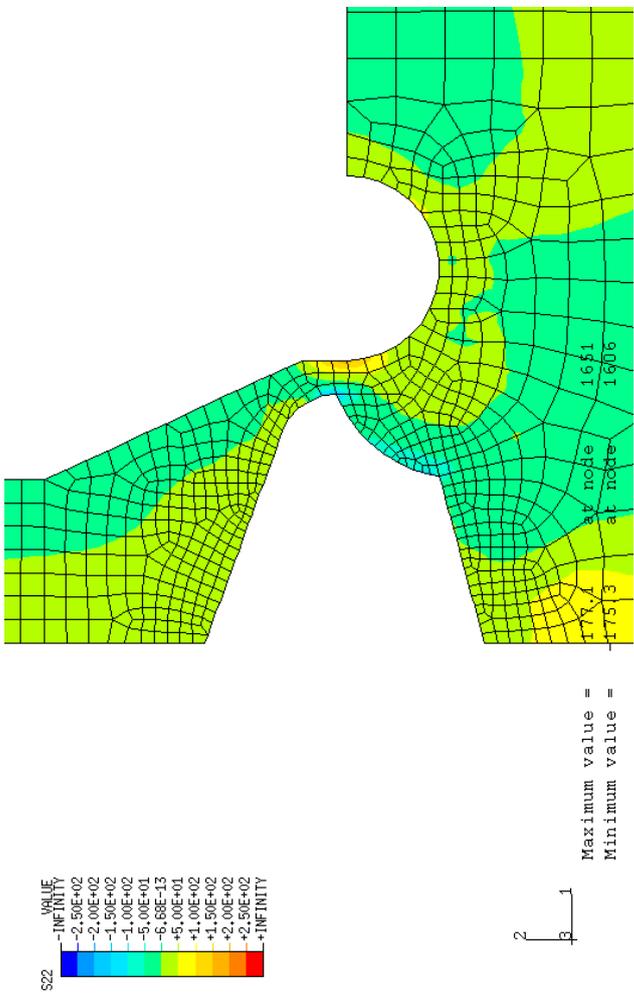


<9パス終了時>

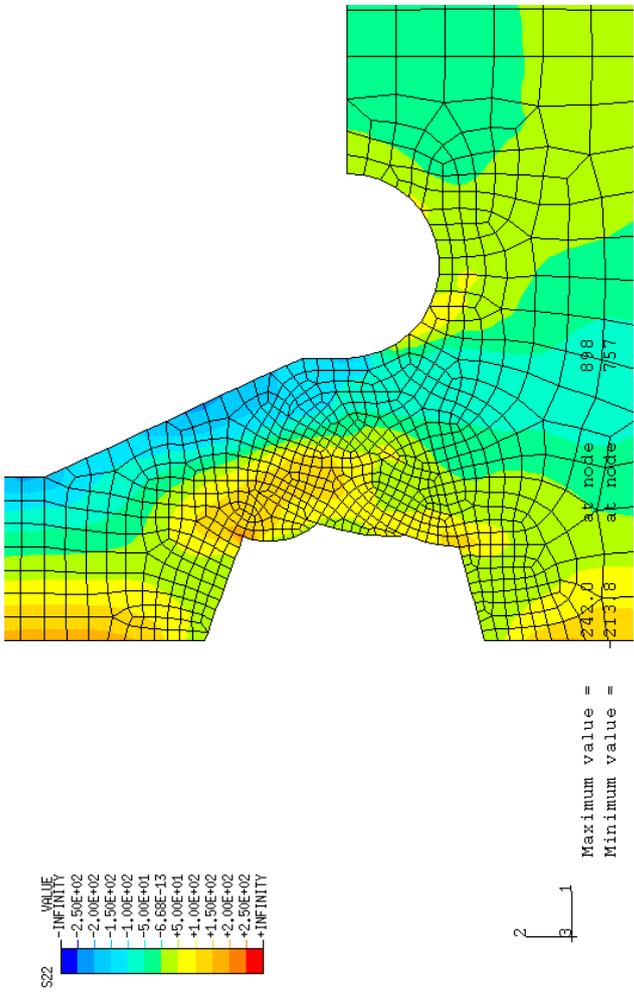


<14パス終了時:最終パス>

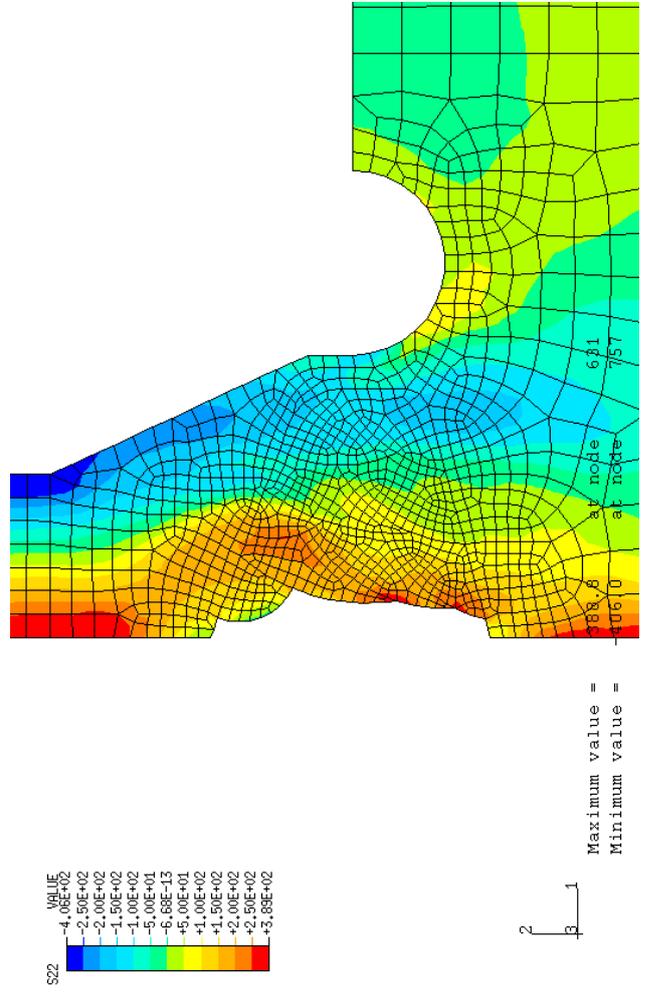
図D-3(2) 代表パスにおける周方向応力分布 (単位N/mm²)



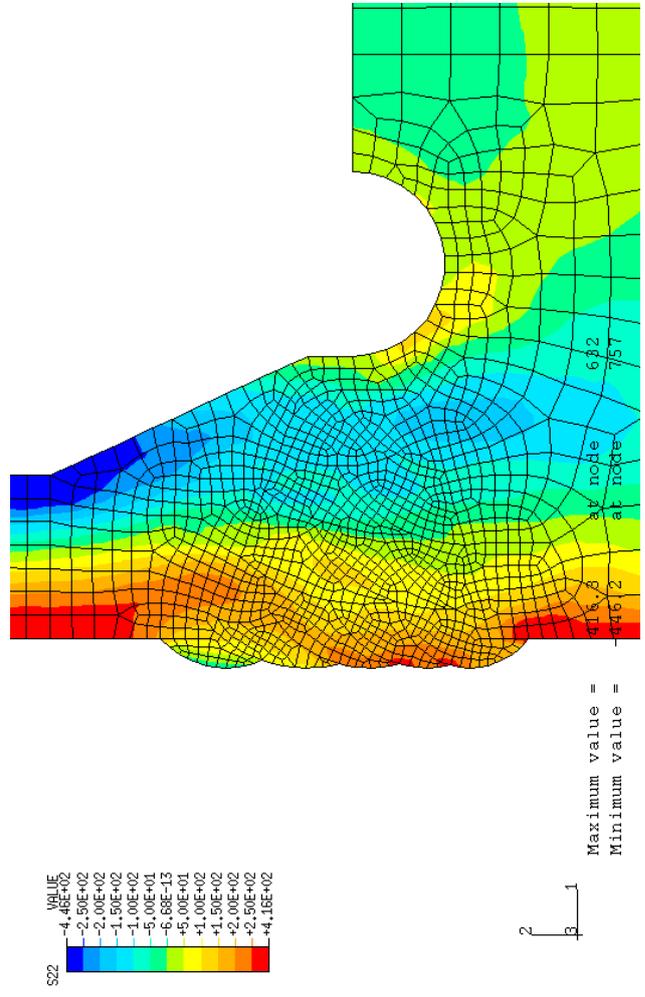
<1パス終了時>



<5パス終了時>



<9パス終了時>



<14パス終了時:最終パス>

図D-3 (3) 代表パスにおける軸方向応力分布 (単位N/mm²)

付録E ジェットポンプの管／管溶接部の SCC 亀裂進展評価

1. はじめに

ジェットポンプの管／管溶接部における周方向亀裂の亀裂進展評価を実施して、想定した亀裂の管の板厚貫通時期を評価した。

2. 評価条件

2.1 評価対象溶接継手

ジェットポンプの管／管溶接部はいずれも薄肉管の溶接であり溶接残留応力は同等と考えられることから、本ガイドラインでは、付録Dに示すとおり、薄肉配管の周溶接継手の溶接残留応力実測データをもとに外表面及び内表面の溶接残留応力を設定し板厚内の分布は直線分布に設定した。このことから、ライザ部、ミキサー部及びディフューザ部のそれぞれの部位の中から、板厚貫通までの期間が短い、即ち板厚の薄い以下の溶接継手を選定して亀裂進展評価対象とした。

- ・サーマルスリーブとエルボの溶接部
- ・インレットミキサとアダプタの溶接部
- ・テーパ管とテールパイプの溶接部

なお、評価対象とする亀裂は周方向亀裂とする。

2.2 亀裂進展評価に用いる応力

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。溶接残留応力は、前項に示すとおり薄肉配管の周溶接継手の溶接残留応力実測データをもとに設定した。また、運転応力は差圧を考慮して決定した。

2.3 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。

2.4 SCC 亀裂進展特性

当該溶接部はステンレス鋼であることから、SCC 亀裂進展試験結果をもとに設定された次式で表される通常水質環境中（NWC 環境中）における鋭敏化 SUS304 に対する SCC 亀裂進展特性及び低炭素ステンレス鋼（SUS304L, SUS316L, SUS316(炭素量 \leq 0.030%)）の SCC 亀裂進展特性を用いた。

NWC 環境中 鋭敏化 SUS304

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 3.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (1)$$

$$da/dt = 1.43 \times 10^{-10} K^{2.161} \quad (3.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (2)$$

$$da/dt = 9.2 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (3)$$

NWC 環境中 低炭素ステンレス鋼

$$da/dt = 2 \times 10^{-9} \quad (K < 6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (4)$$

$$da/dt = 3.33 \times 10^{-11} K^{2.161} \quad (6.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (5)$$

$$da/dt = 2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (6)$$

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

また、上式で表される通常水質環境中 (NWC 環境中) における鋭敏化 SUS304 に対する SCC 亀裂進展特性及び低炭素ステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性を図 E-1 に示す。

2.5 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。

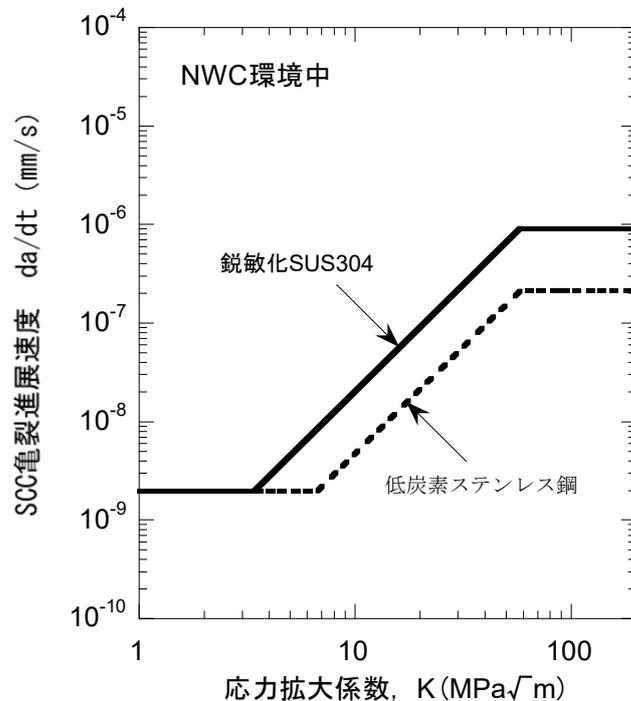


図 E-1 NWC 環境中における鋭敏化 SUS304 及び低炭素ステンレス鋼の SCC 亀裂進展特性

3. 評価結果

3.1 サーマルスリーブとエルボ溶接部

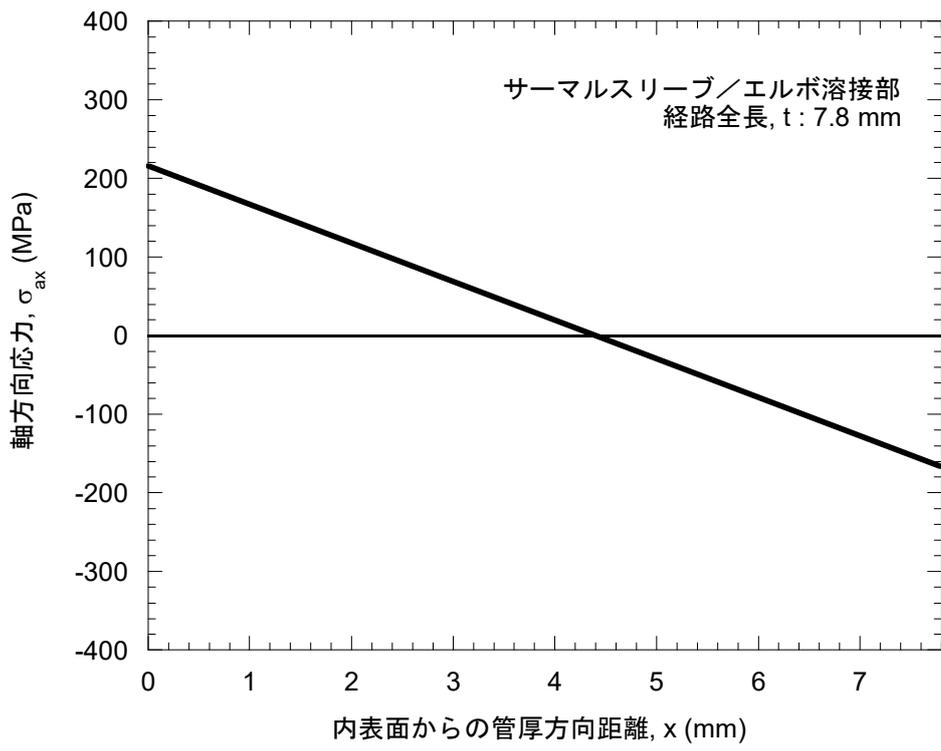
サーマルスリーブとエルボ溶接部の周方向亀裂進展評価に用いた当該部の軸方向残留応力分布を図E-2に示す。また、サーマルスリーブとエルボ溶接部の周方向亀裂進展評価結果を図E-3に示す。図E-3(a)では、亀裂の進展に伴う最深点の応力拡大係数の変化を示した。図E-3(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路全長は7.8 mmであるが、SCC亀裂進展特性としてNWC環境中における鋭敏化SUS304のSCC進展特性を用いた場合、亀裂が経路全長に達する年数は13.9年、SCC亀裂進展特性としてNWC環境中における低炭素ステンレス鋼のSCC進展特性を用いた場合、亀裂が経路全長に達する年数は51.4年である。

3.2 インレットミキサとアダプタ溶接部

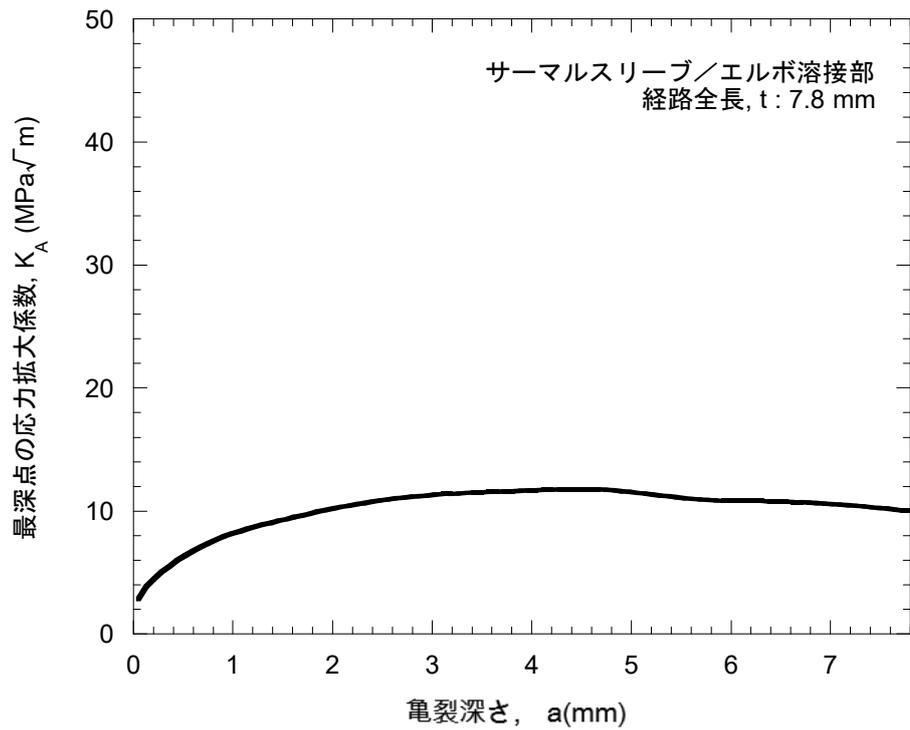
インレットミキサとアダプタ溶接部の周方向亀裂進展評価に用いた当該部の軸方向残留応力分布を図E-4に示す。また、インレットミキサとアダプタ溶接部の周方向亀裂進展評価結果を図E-5に示す。図E-5(a)では、亀裂の進展に伴う最深点の応力拡大係数の変化を示した。図E-5(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路全長は9.25 mmであるが、SCC亀裂進展特性としてNWC環境中における鋭敏化SUS304のSCC進展特性を用いた場合、亀裂が経路全長に達する年数は18.3年、SCC亀裂進展特性としてNWC環境中における低炭素ステンレス鋼のSCC進展特性を用いた場合、亀裂が経路全長に達する年数は68.0年である。

3.3 テーパ管とテールパイプ溶接部

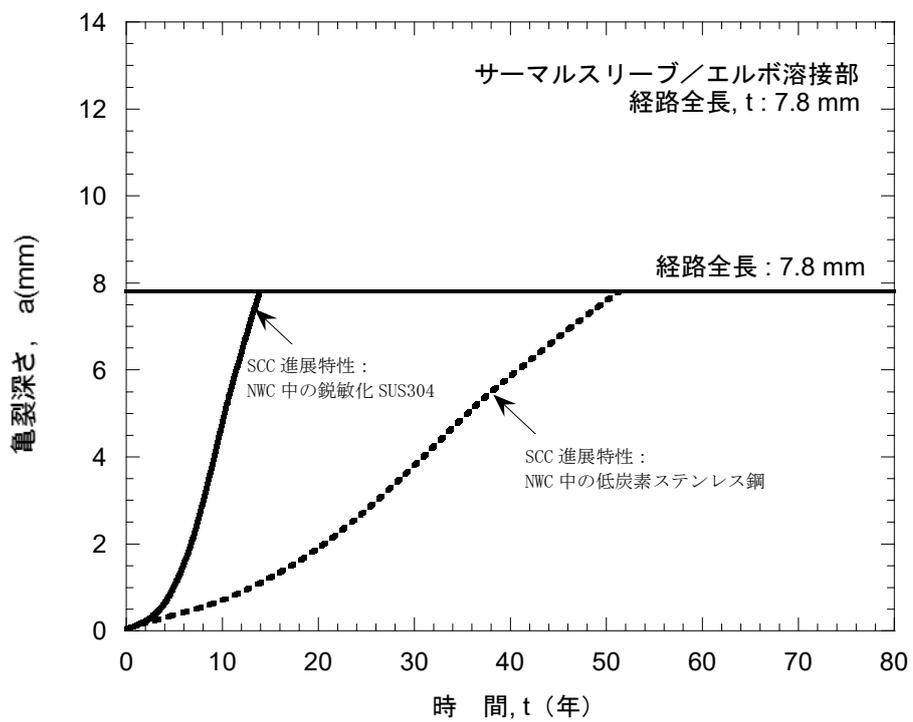
テーパ管とテールパイプ溶接部の周方向亀裂進展評価に用いた当該部の軸方向残留応力分布を図E-6に示す。また、テーパ管とテールパイプ溶接部の周方向亀裂進展評価結果を図E-7に示す。図E-7(a)では、亀裂の進展に伴う最深点の応力拡大係数の変化を示した。図E-7(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路全長は6.3 mmであるが、SCC亀裂進展特性としてNWC環境中における鋭敏化SUS304のSCC進展特性を用いた場合、亀裂が経路全長に達する年数は17.1年、SCC亀裂進展特性としてNWC環境中における低炭素ステンレス鋼のSCC進展特性を用いた場合、亀裂が経路全長に達する年数は62.6年である。



図E-2 サーマルスリーブとエルボ溶接部の周方向亀裂進展評価に用いた軸方向残留応力分布

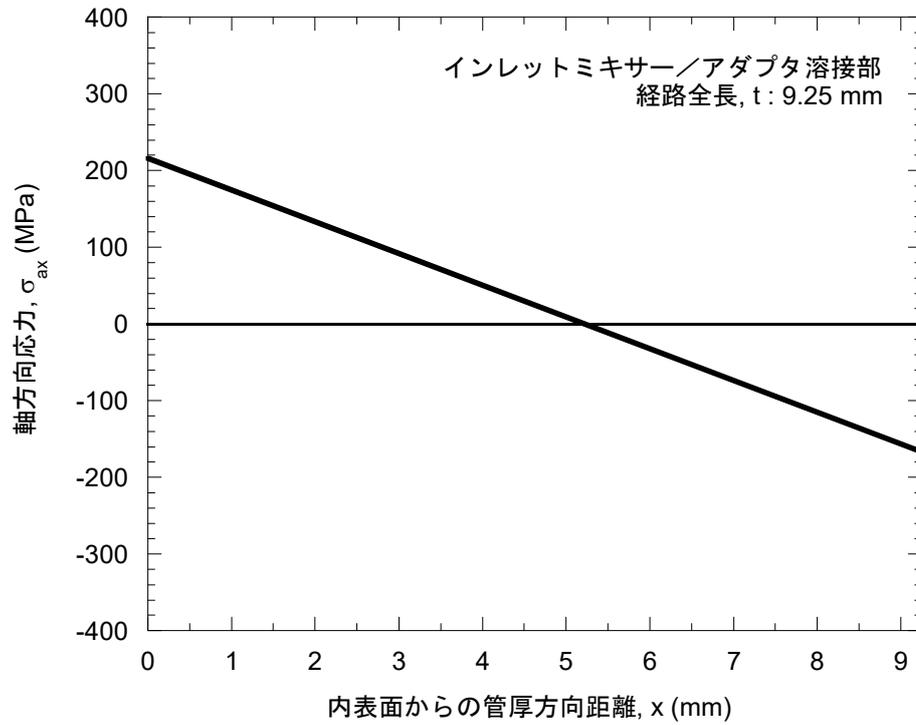


(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係

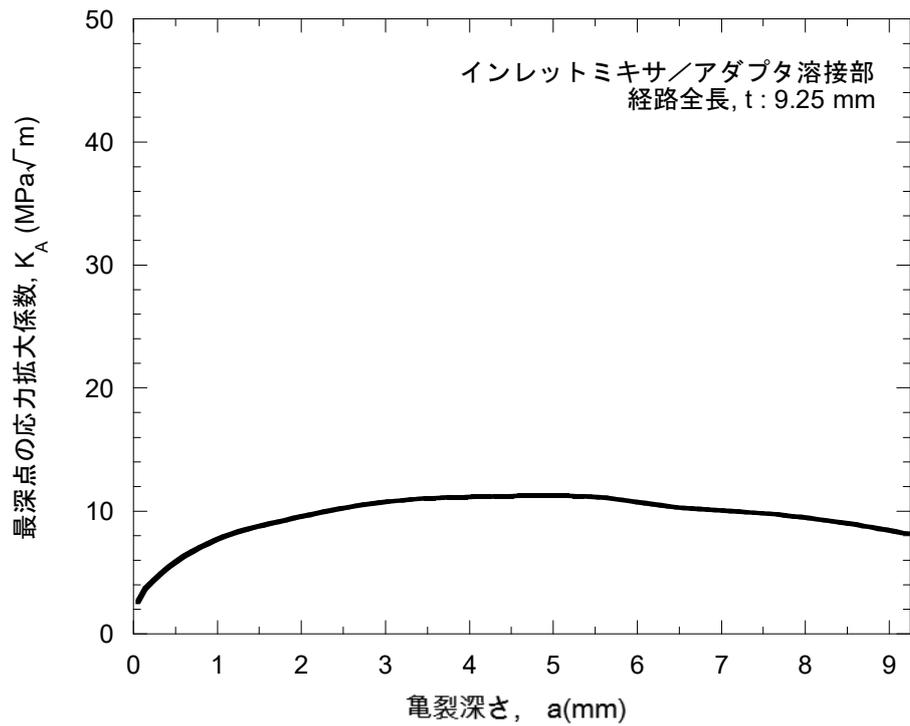


(b) 亀裂深さと時間の関係

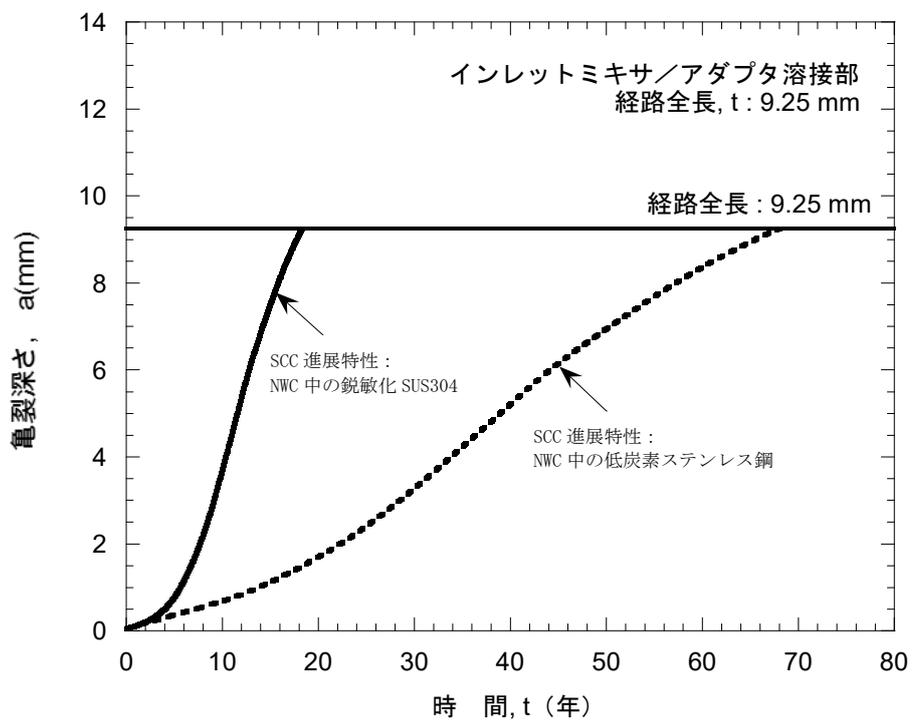
図 E-3 サーマルスリーブとエルボ溶接部の周方向亀裂進展評価結果



図E-4 インレットミキサーとアダプタ溶接部の周方向亀裂進展評価に用いた軸方向残留応力分布

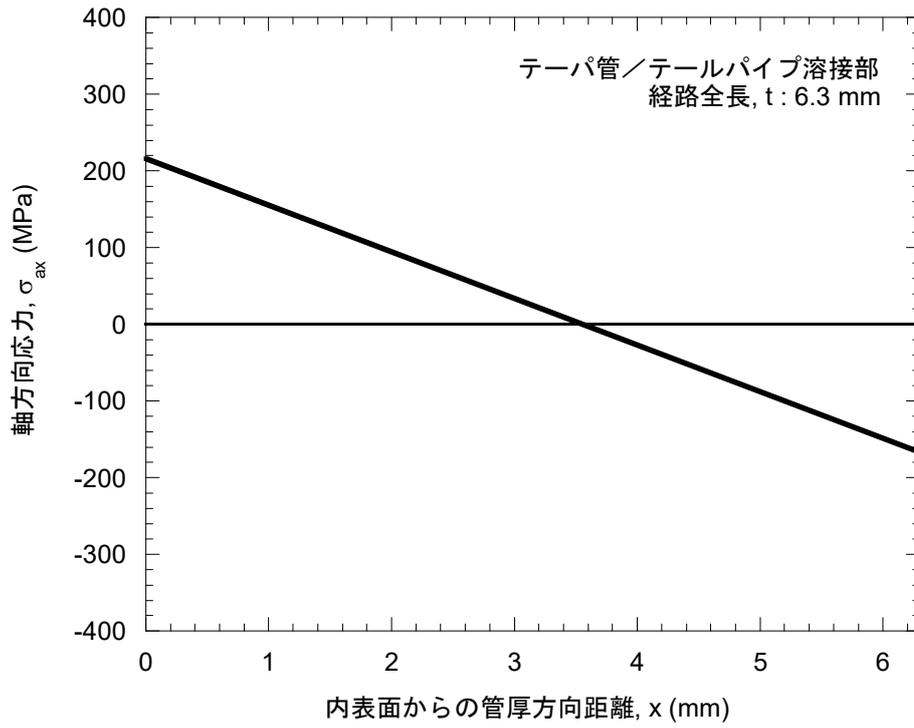


(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係

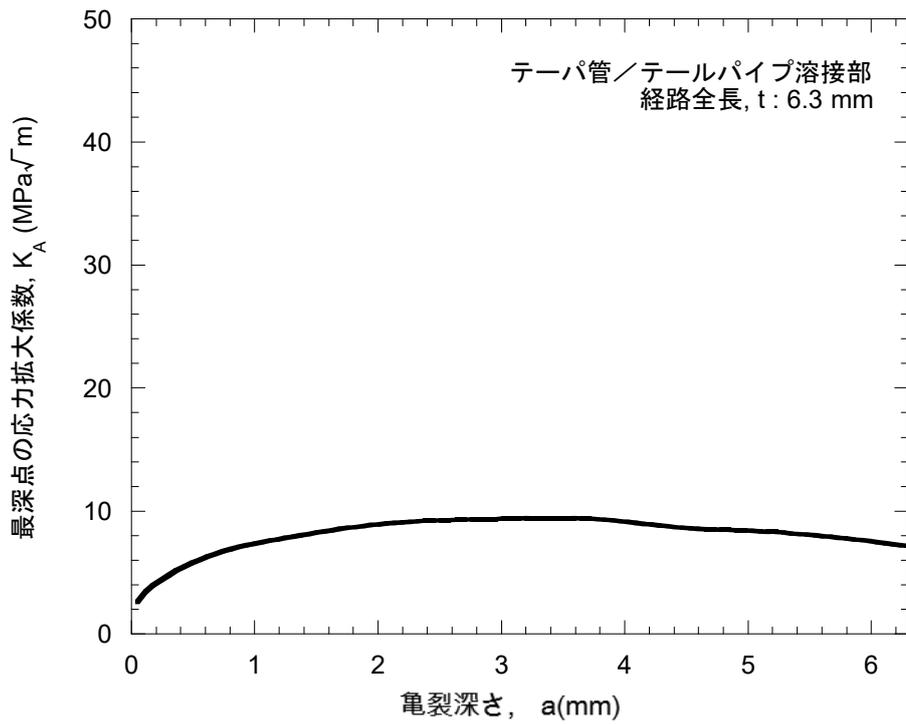


(b) 亀裂深さと時間の関係

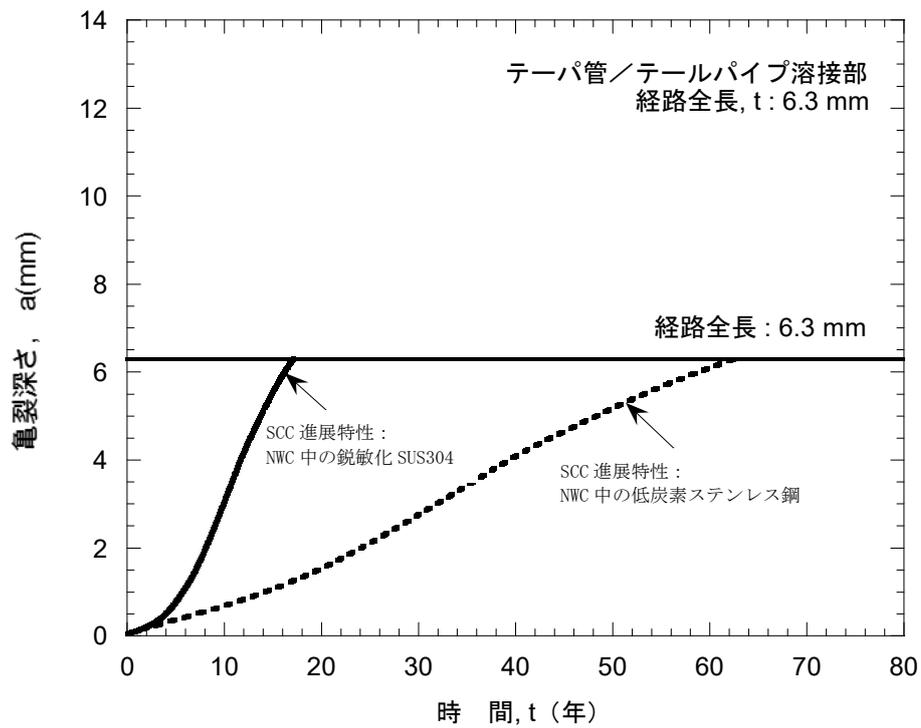
図E-5 インレットミキサとアダプタ溶接部の周方向亀裂進展評価結果



図E-6 テーパ管とテールパイプ溶接部の周方向亀裂進展評価に用いた軸方向残留応力分布



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図E-7 テーパ管とテールパイプ溶接部の周方向亀裂進展評価結果

4. まとめ

ジェットポンプにおける管／管溶接部における亀裂進展評価を実施して、亀裂の板厚貫通時期の検討を行った。亀裂の発生起点は内面であるとして、評価対象となる溶接継手として、サーマルスリーブとエルボの溶接部、インレットミキサとアダプタの溶接部及びテーパ管とテールパイプの溶接部を選定した。なお、評価対象とする亀裂は周方向亀裂を想定して、亀裂進展評価を実施した。

SCC 亀裂進展特性として通常水質環境中の鋭敏化 SUS304 を用いた場合、亀裂が板厚を貫通するまでの期間は、サーマルスリーブとエルボの溶接部で 13.9 年、インレットミキサとアダプタの溶接部で 18.3 年、テーパ管とテールパイプの溶接部では 17.1 年となった。また、SCC 亀裂進展特性として通常水質環境中の低炭素ステンレス鋼を用いた場合、亀裂が板厚を貫通するまでの期間は、サーマルスリーブとエルボの溶接部で 51.4 年、インレットミキサとアダプタの溶接部で 68.0 年、テーパ管とテールパイプの溶接部では 62.6 年となった。

付録F ローアリング/シュラウドサポートプレート溶接部の SCC 亀裂進展評価

1. はじめに

ローアリング/シュラウドサポートプレート溶接部における周方向亀裂進展評価を実施して、板厚貫通時期を評価した。

2. 評価条件

2.1 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 F-1 に示す。

内面から外面へ向かう亀裂進展経路のうち、残留応力が高い値を示す開先中央および開先面を通る経路を、それぞれ経路①および経路②として亀裂進展経路を設定した。

2.2 亀裂進展評価に用いる応力

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。溶接残留応力は、当該溶接部形状を考慮した熱弾塑性解析により評価した。(付録D参照) また、運転応力は差圧を考慮して決定した。

2.3 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。

2.4 SCC 亀裂進展特性

当該溶接部はニッケル合金の 182 合金であることから、SCC 亀裂進展試験結果をもとに設定された次式で表される通常水質環境中 (NWC 環境中) における 182 合金の SCC 亀裂進展特性を用いた。

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

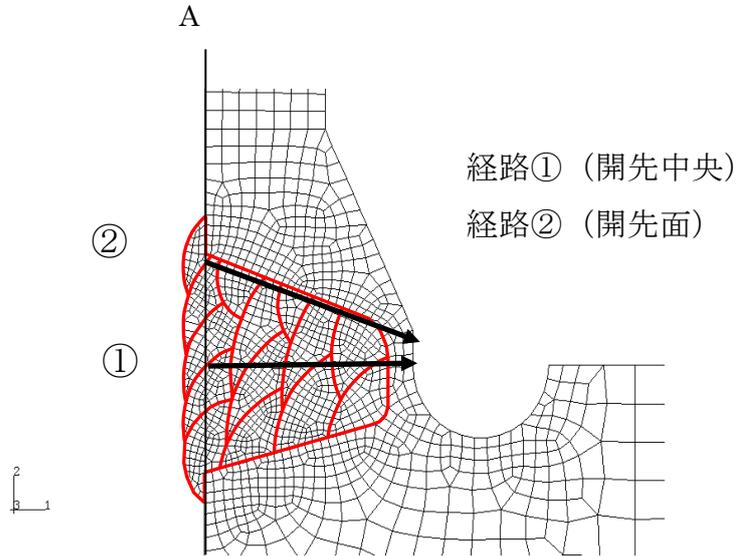
$$da/dt = 3 \times 10^{-15} K^{5.186} \quad (13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (2)$$

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

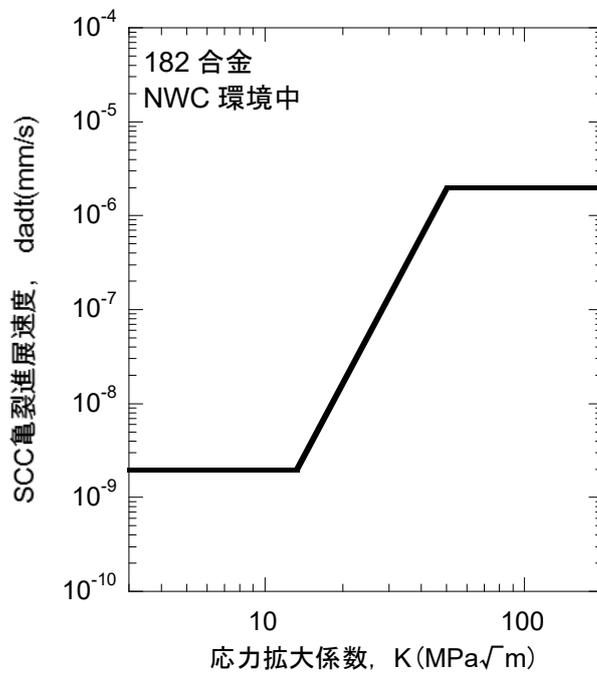
上式において、亀裂進展速度 da/dt の単位は mm/s、応力拡大係数 K の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。また、上式で表される 182 合金の SCC 亀裂進展特性を図 F-2 に示す。

2.5 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。



図F-1 ローリング/シュラウドサポートプレート溶接部に想定した亀裂進展経路



図F-2 NWC 環境中におけるニッケル合金の 182 合金の SCC 亀裂進展特性

3. 評価結果

経路①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を図F-3に示す。また、経路①の周方向亀裂進展評価結果を図F-4に示す。図F-4(a)では、亀裂の進展に伴う最深点の応力拡大係数の変化を示した。図F-4(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路①の周方向亀裂の場合、経路全長は19.5 mmであるが、80年経過しても、亀裂は経路全長に達しない。

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を図F-5に示す。また、経路②の周方向亀裂進展評価結果を図F-6に示す。図F-6(a)では、亀裂の進展に伴う最深点の応力拡大係数の変化を示した。図F-6(b)では、亀裂深さと時間の関係を示した。経路②の周方向亀裂の場合、経路全長は20.5 mmであるが、80年経過しても、亀裂は経路全長に達しない。

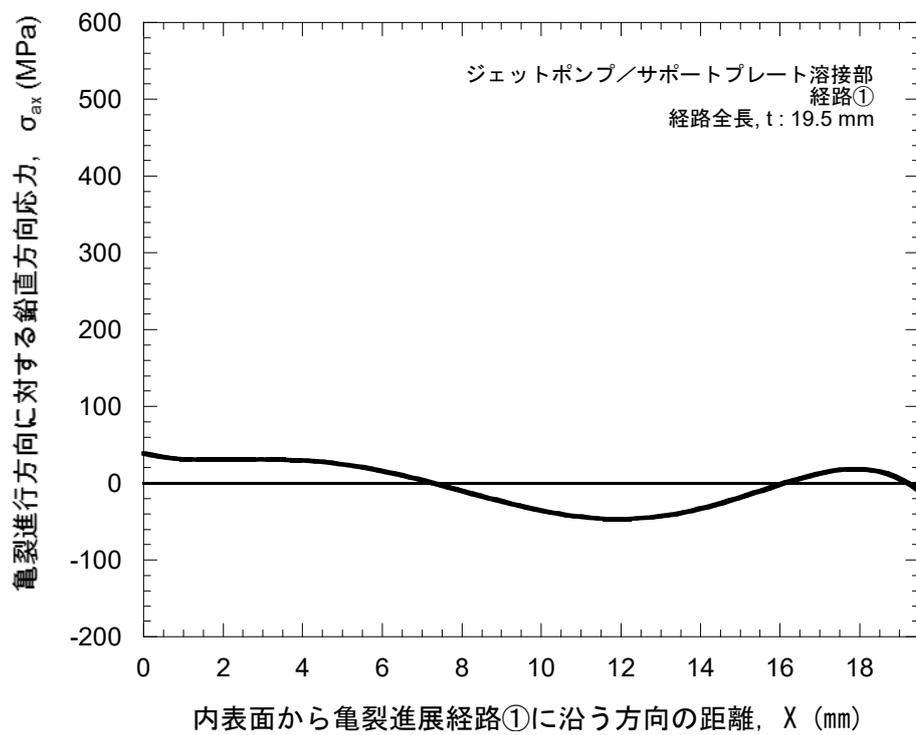
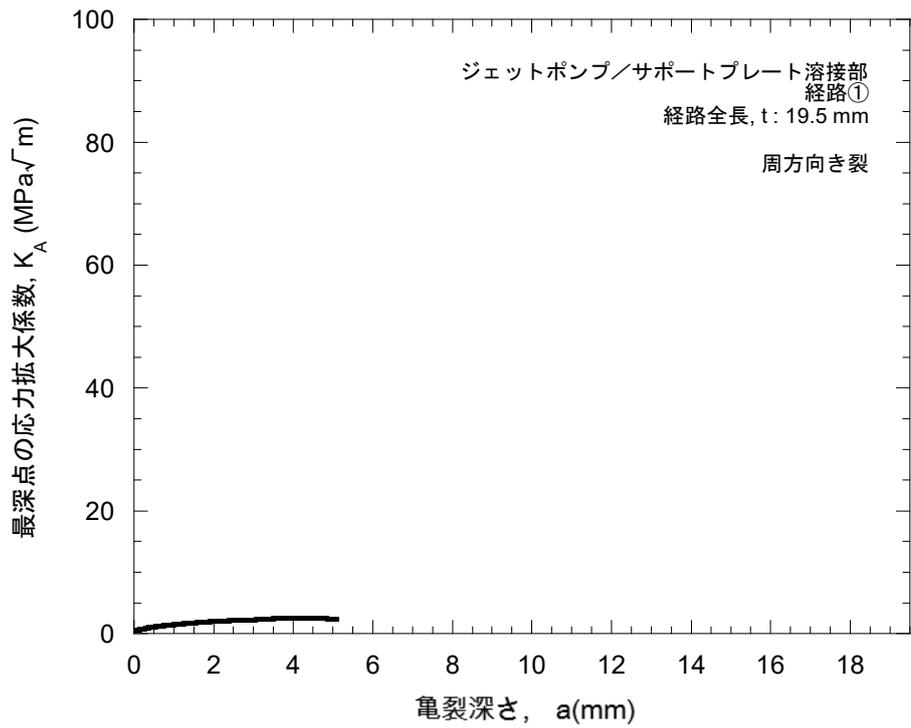
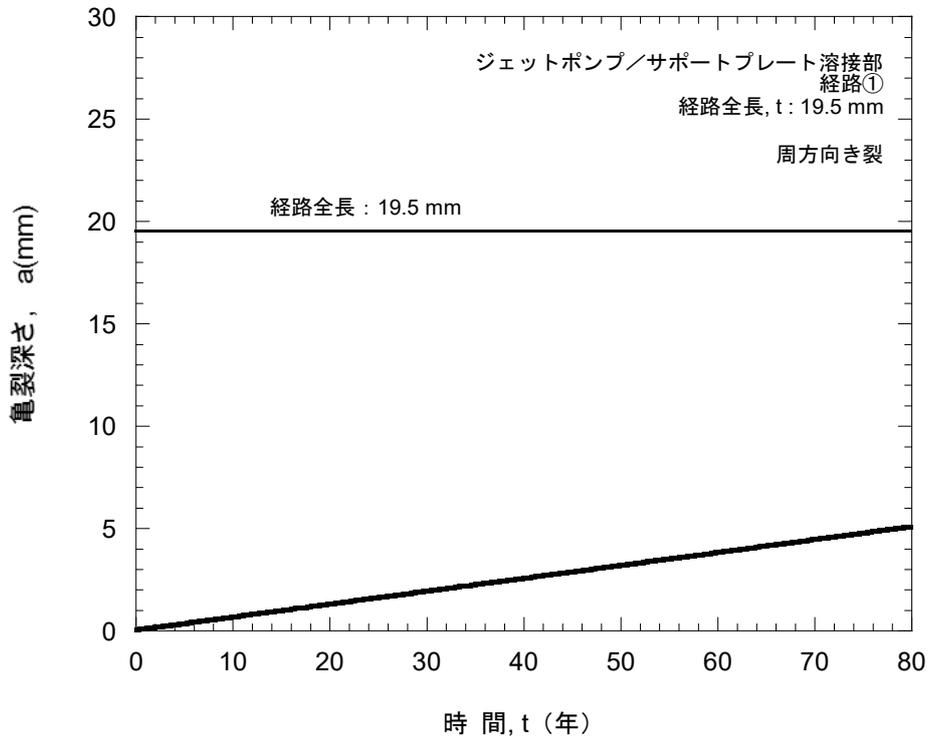


図 F-3 経路①の周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向残留応力分布



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図 F-4 経路①の周方向亀裂進展評価結果

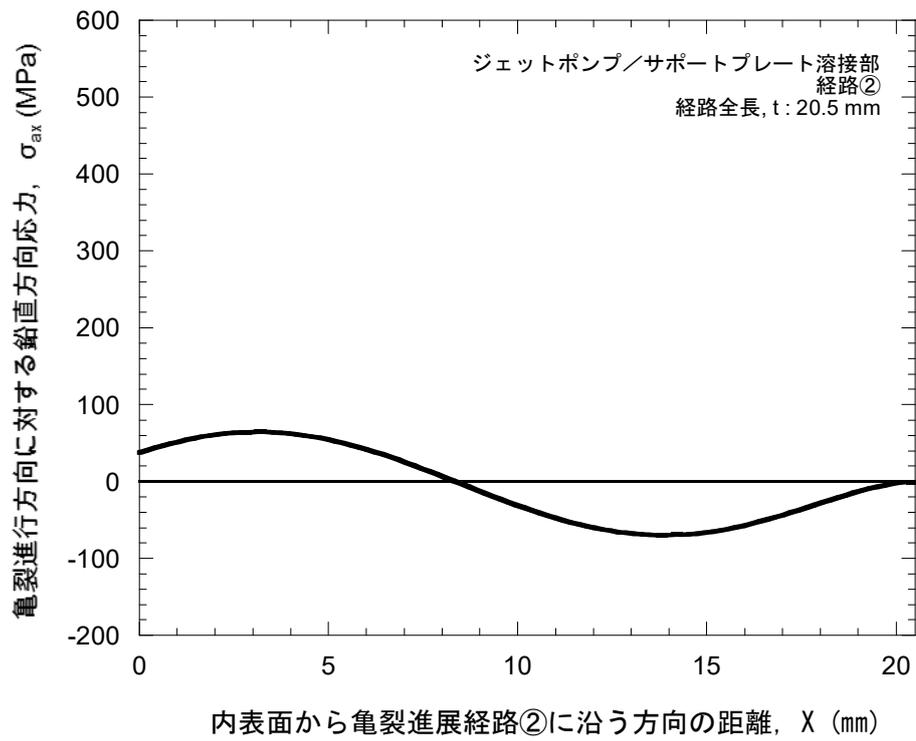
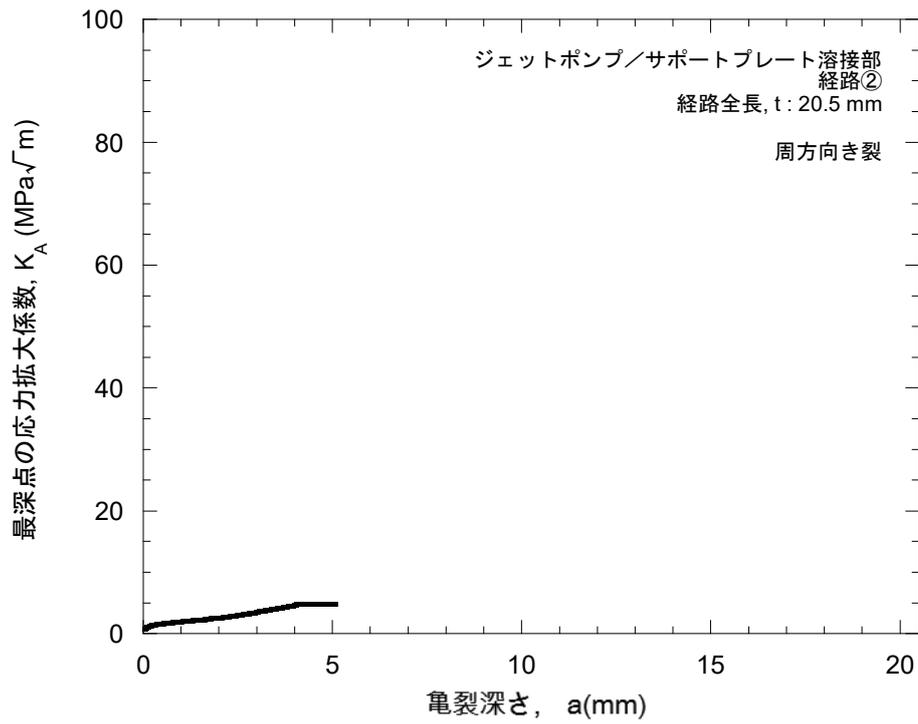
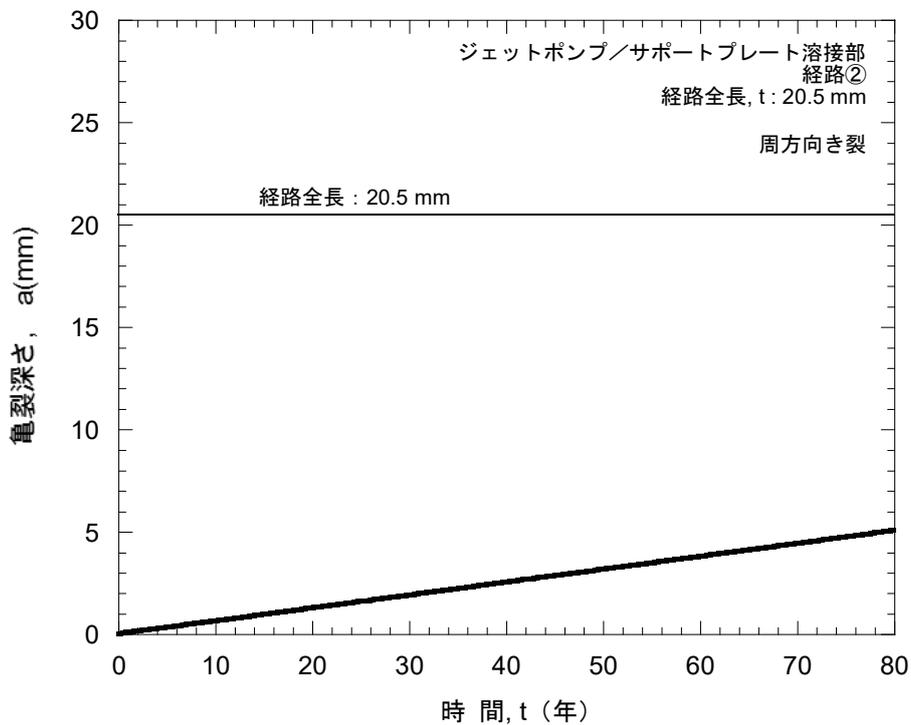


図 F-5 経路②の周方向亀裂進展評価に用いた亀裂に対する鉛直方向残留応力分布



(a) 最深点の応力拡大係数と亀裂深さの関係



(b) 亀裂深さと時間の関係

図 F-6 経路②の周方向亀裂進展評価結果

付録G ジェットポンプ溶接部の許容欠陥評価

1. はじめに

ジェットポンプのサーマルスリーブ/エルボ溶接部等の許容欠陥の大きさを、SCC により貫通亀裂が生じたときの溶接部の限界荷重と発生荷重の比較から求めた。

2. 限界荷重の評価方法

ローアリング/シュラウドサポートプレート溶接部はニッケル基合金，サーマルスリーブ/エルボ溶接部他はステンレス鋼であることから，破壊荷重は，欠陥を有する管の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した考え方の極限荷重評価法によるものとした。

評価部位は、地震の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した。部分貫通亀裂に対する管の破壊モーメント M_c は，次式により与えられる。

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

$$\beta_L = \frac{\pi - x \theta}{2} - \frac{\pi}{4} \cdot \frac{RP}{t \sigma_f}, \quad x = a/t = 1 \quad (2)$$

ここで， σ_f ：流動応力 = 2.7Sm (JSME 維持規格)

Sm：設計応力強さ (告示 501 号別表第 2)

NCF600 : 164 N/mm² (@276°C)

SUS304 : 117.9 N/mm² (@276°C)

SUS316L : 97.8 N/mm² (@276°C)

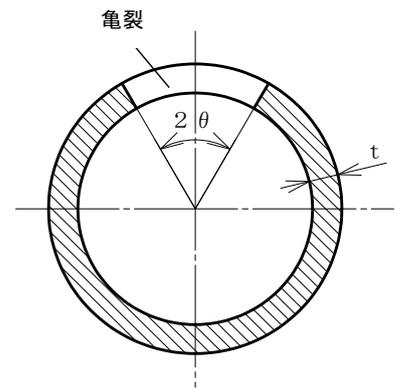
R：管の平均半径

t：管の板厚

P：内圧 (差圧)

a：亀裂の深さ

θ ：亀裂の半角 (rad)



限界モーメント $M_c(SF)$ は，(1)式で与えられる破壊モーメント M_c に，地震時の安全率を考慮して次式で与えられる。

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

ここで，SF：安全率 = 1.39 (JSME 維持規格)

3. 発生モーメント

発生モーメントは、 S_1 地震荷重により各溶接部に発生するモーメントとした。

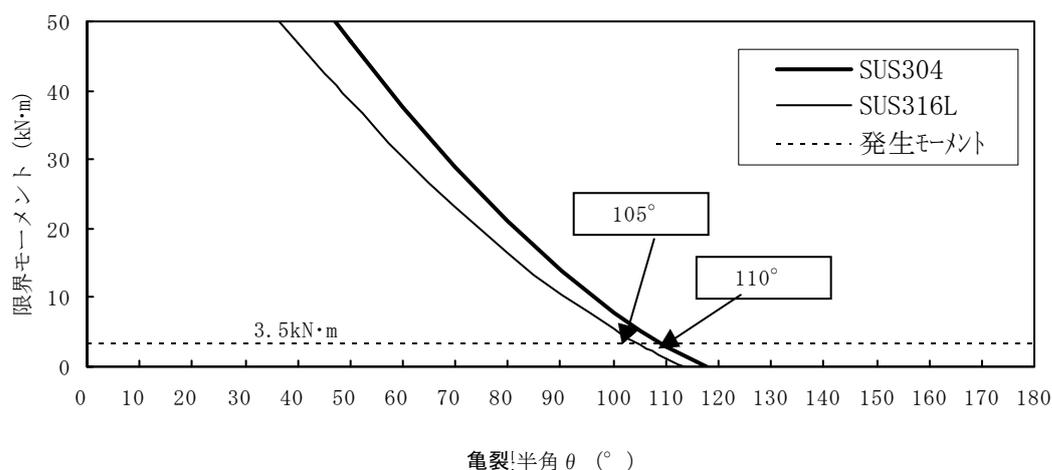
4. 許容貫通欠陥の評価結果

式(1)、(2)及び(3)から求めた限界モーメント $M_c(SF)$ と発生モーメントを、各溶接部について図G-1～4にそれぞれ示す。

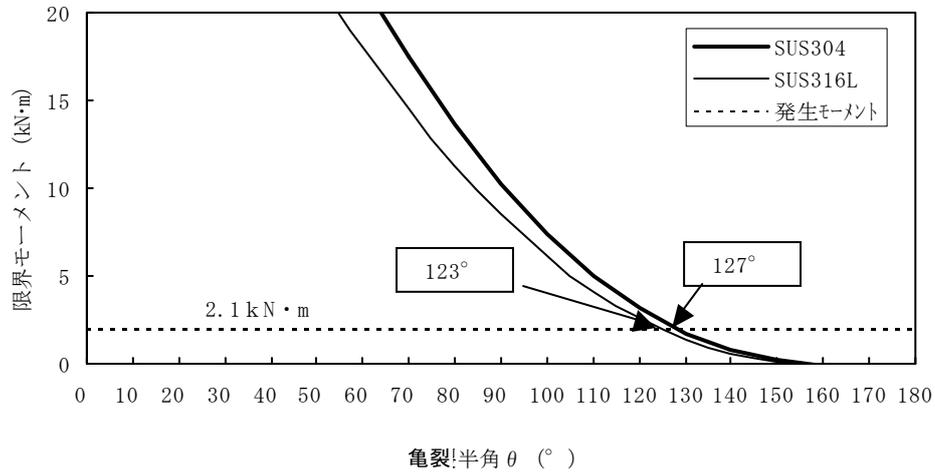
各図において、限界モーメント $M_c(SF)$ の曲線が、発生モーメントと等しくなる亀裂半角 θ を求めた。各溶接部の許容貫通欠陥（中心角 2θ ）の評価結果を表G-1にまとめて示す。

表G-1 許容貫通欠陥の評価結果

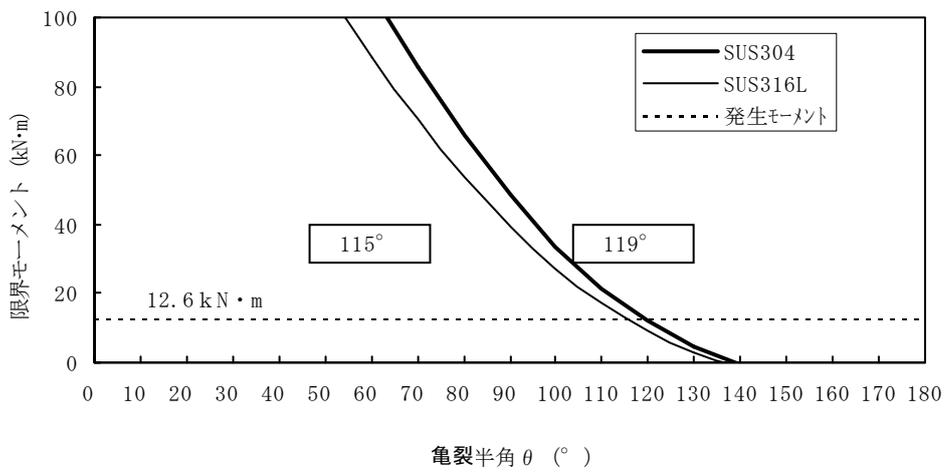
溶接部	発生モーメント	材料の種類	許容貫通欠陥の中心角
サーマルスリーブ/エルボ溶接部 (図G-1)	3.5 kN・m	SUS304	110°
		SUS316L	105°
ミキサー/アダプタ溶接部 (図G-2)	2.1 kN・m	SUS304	127°
		SUS316L	123°
テーパ管/テールパイプ溶接部 (図G-3)	12.6 kN・m	SUS304	119°
		SUS316L	115°
ローアリング/シュラウドサポートプレート溶接部 (図G-4)	12.6 kN・m	NCF600	138°



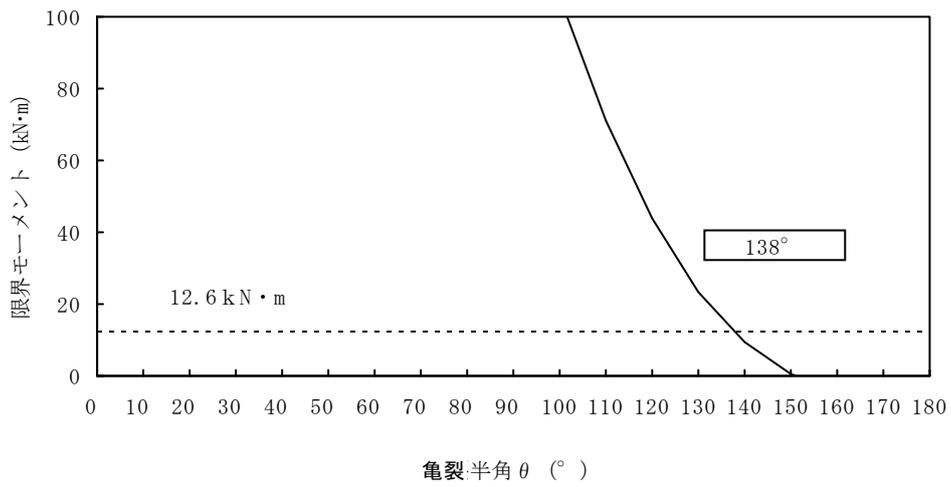
図G-1 サーマルスリーブ/エルボ溶接部の許容貫通欠陥



図G-2 ミキサー／アダプタ溶接部の許容貫通欠陥



図G-3 テーパー管／テールパイプ溶接部の許容貫通欠陥

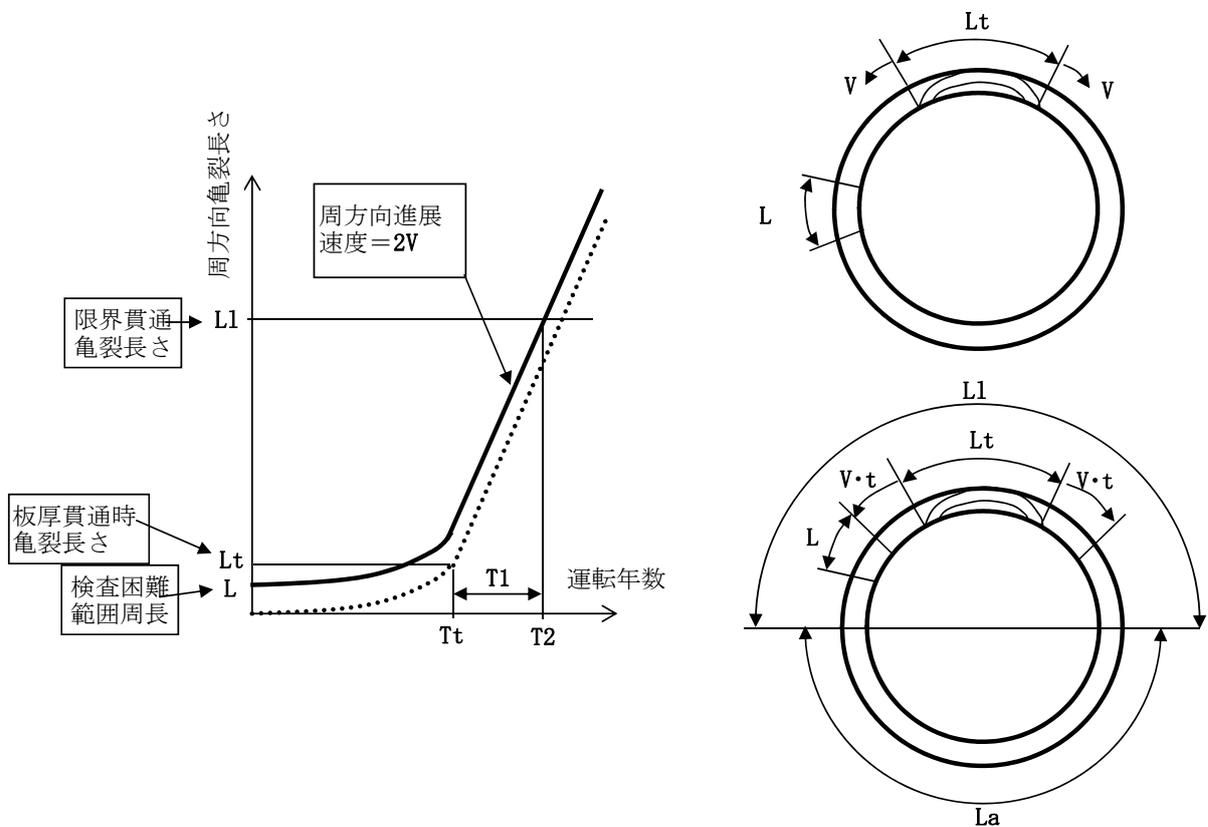


図G-4 ローアリング／シュラウドサポートプレート溶接部の許容貫通欠陥

付録H 管の溶接部の初回点検時期

部位		サーマルスリーブ /エルボ		ミキサ/アダプタ		テーパ管 /テールパイプ		備考
材質		SUS304	SUS304L SUS316L	SUS304	SUS304L SUS316L	SUS304	SUS304L SUS316L	
外径(mm)		271	271	181.1	181.1	497.2	497.2	
板厚(mm)		7.8	7.8	9.25	9.25	6.3	6.3	
板厚貫通までの期間	Tt (年)	13.9	51.4	18.3	68	17.1	62.6	付録E
板厚貫通時の周方向亀裂長さ	Lt (mm)	67	67	96	96	62	62	
検査困難範囲周方向長さ	L (mm)	0	0	51	51	153	153	付録B
周方向進展速度 (両側)	2V(mm/年)	58	13	58	13	58	13	Vは付録C の上限速度
許容残存長さ (半周)	La(mm)	401	401	255	255	761	761	注1
板厚貫通から限界亀裂長さに 達するまでの期間	T1 (年)	5.8	25.2	1.9	8.2	9.4	41.2	
供用開始から限界亀裂長さに 達するまでの期間	T2 (年)	19.7	76.6	20.2	76.2	26.5	103.8	

注1：付録Gの許容欠陥評価結果から許容貫通欠陥は半周以上であるが、貫通亀裂が半周を超えると、漏えい量の計算において急激に漏えい量が増えることから、限界貫通亀裂長さは半周とした。



付録 I 炉心冷却水の漏えい量評価

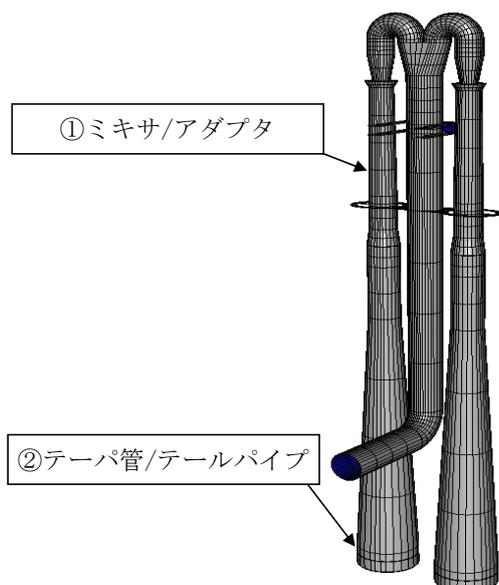
表 I-1 炉心再冠水機能評価結果

漏えい量評価部位			①ミキサ/ アダプタ 溶接部	②テーパ管/ テールパイ プ 溶接部	ジェットポンプ1組分		ジェットポン プ 全10組分
					インレットミキサの ノズル下流部	ディフューザ	
形状	外径	m	0.1811	0.4972	4箇所/1組 (溶接線の 両側考慮)	14箇所/1組 (溶接線の 両側考慮)	左記の10組 分の溶接線
	板厚	m	0.00925	0.0063			
	内半径	m	0.0813	0.2423			
	縦弾性係数 (276°C)	N/m ²	1.7696E+11	1.7696E+11			
周方向貫通亀裂角度		度	180	180			
荷重	S ₁ 地震によるモーメント	N・m	2100	12600			
応力	曲げ応力	N/mm ²	10.9	10.8			
亀裂開口面積 (注1)		mm ²	67.0	386.0			
漏えい量 (注2)		m ³ /hr	3.3	18.7	13.2	261.8	
漏えい量合計		m ³ /hr			275		2750
原子炉冷却水流量の設計裕 度 (注3)		m ³ /hr	5103				

注1：Tada-Parisの方法による曲げ開口面積に、亀裂幅0.35mmの楕円開口を考慮して算定した。

注2：インレットミキサ上端までの水頭圧による貫通亀裂開口からの漏えい量。

注3：炉心再冠水維持は、低圧炉心スプレー (LPCS) ポンプ1台分の流量で可能であり、これを必要流量とした。



評価結果

炉心再冠水機能を有するジェットポンプ全10組分のすべての溶接線に半周貫通き裂を想定しても、き裂開口からの漏えいによる炉心冷却水の設計裕度の減少量は6割未満であり、炉心再冠水機能は確保される。

表 I-2 LPCI機能評価結果

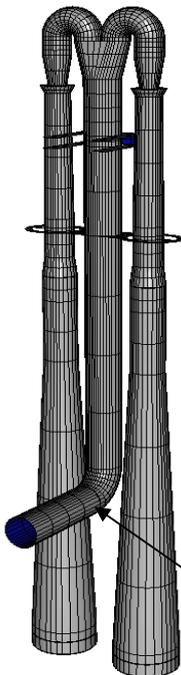
漏えい量評価部位			ライザ				
			サーマルスリーブ/エルボ				
形状	外径	m	0.271	5箇所/1組 (溶接線の 両側考慮)	10組の すべての 溶接線		
	板厚	m	0.0078				
	縦弾性係数 (276°C)	N/m ²	1.7696E+11				
周方向貫通亀裂角度		度	180				
荷重	S ₁ 地震によるモーメント	N・m	3500				
	差圧	kg/cm ²	1.4				
亀裂開口面積 (注1)		mm ²	217.0				
漏えい量 (注2)		m ³ /hr	14.9	74.5	372.5		
LPCI流量の設計裕度(注3)		m ³ /hr	2556				

注1：Tada-Parisの方法による曲げ開口面積に、亀裂幅0.35mmの楕円開口を考慮して算定した。

注2：差圧による貫通亀裂開口からの漏えい量。

注3：炉心再冠水維持は、LPCIポンプ4台のうち1台分の流量で可能であり、これを必要流量とした。

注4：外部再循環ループ2系統のうち1系統の破断が想定されており、LPCI機能を持つジェットポンプは外部再循環ループ1系統分（ジェットポンプ5組）である。



サーマルスリーブ/エルボ

評価結果

同時にLPCI機能を有するジェットポンプ5組分のライザのすべての溶接線に半周貫通き裂を想定しても、き裂開口からの漏えいによるLPCI流量の設計裕度の減少量は2割未満であり、LPCI機能は確保される。

付録J 国内プラントのジェットポンプビームの使用実績

1.概要

ジェットポンプビームの点検周期を検討するにあたり，国内プラントでの使用実績（実運転時間）を調査した。

2.調査結果

国内プラントのジェットポンプビームの使用実績を図J-1に示す。

国内プラントで現在使用されているジェットポンプビームは，すべて耐 SCC 性に優れたインコネル X750 の改良熱処理材（改良型と呼ぶ）製である。図J-1には従来型の使用実績も併せて示す。

改良型での損傷事例は，施工不良により締め付け力が過大であったために損傷に至った1例のみで，その他のプラントでは実運転時間が100,000時間を超えるプラントが増えてきている。

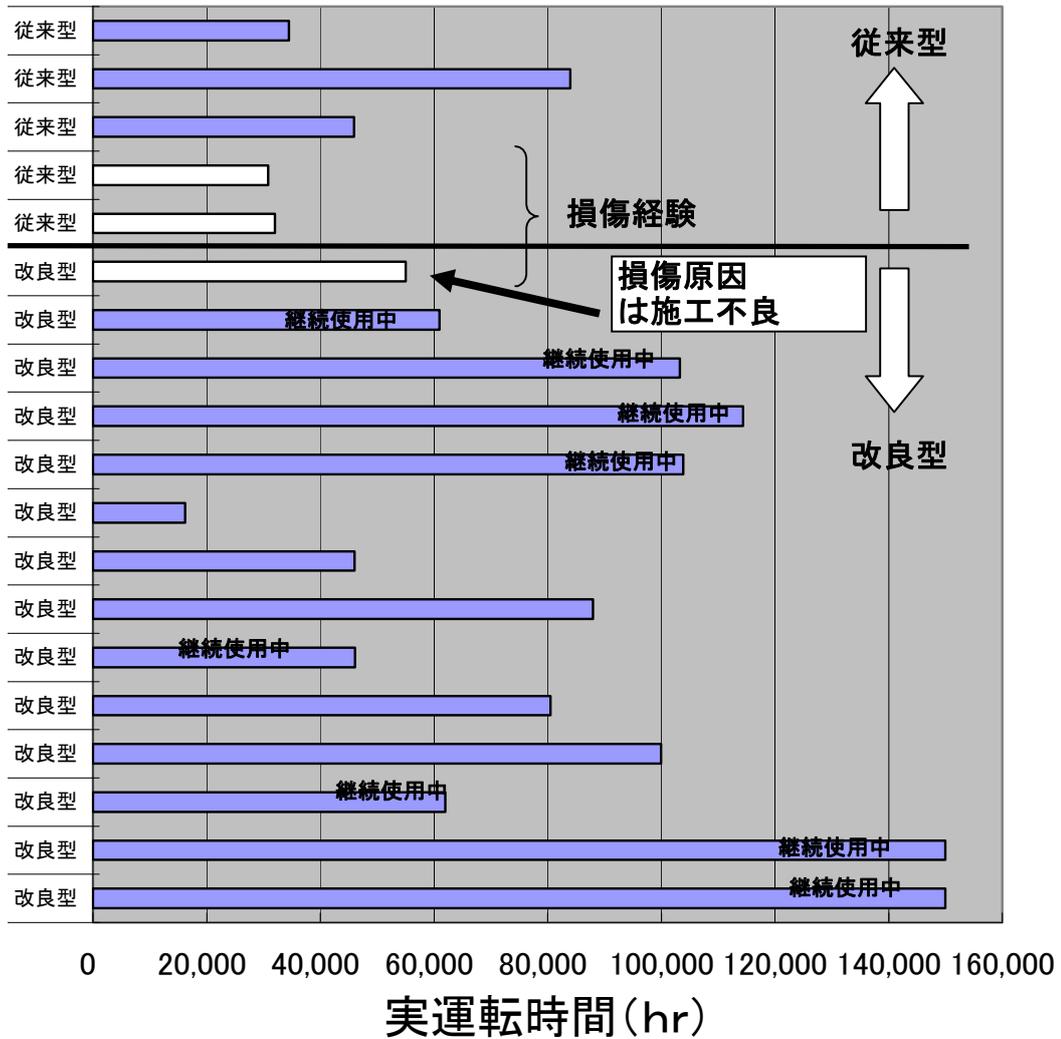


図 J-1 国内プラントのジェットポンプビームの使用実績

付録K 想定する周方向初期亀裂の数等の検討

1. 実機配管 SCC 事例における周方向亀裂の配置

実機配管 SCC 事例を調査した結果、同一溶接線上に複数の周方向亀裂が確認された例は 5 例あった。これらの事例における複数の周方向亀裂の長さ、配置と、本ガイドラインで想定される板厚貫通時の亀裂長さ（注 1）とを比較して、それぞれ図 K-1～5 に示す。

5 例のうち、実機事例 1～4 については、本ガイドラインでの想定貫通亀裂に包絡されている。実機事例 5 については、想定貫通亀裂に包絡されていないが、想定貫通亀裂を本ガイドラインの欠陥評価手法に基づき、強度上最も不利な位置（引張り応力最大位置）に想定することにより、強度評価上包絡されているものと考えられる。

（注 1）：周方向初期亀裂（深さ $50\ \mu\text{m}$ 、長さ $500\ \mu\text{m}$ ）がアスペクト比を保ったまま板厚貫通した場合の貫通亀裂（亀裂長さが板厚の 10 倍）

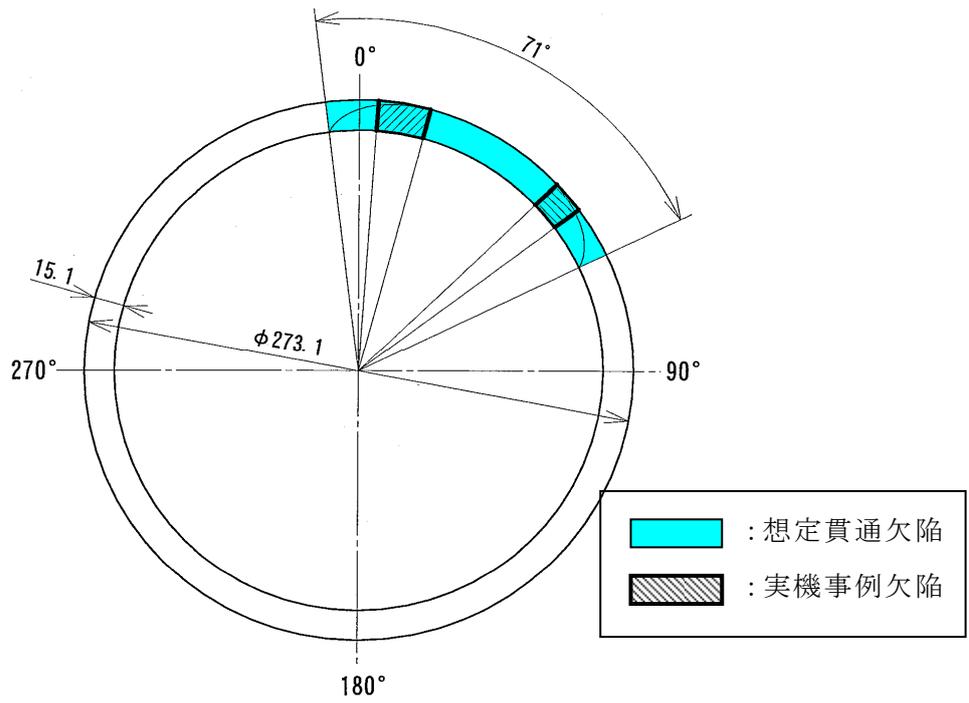


図 K-1 実機事例 1 の欠陥配置

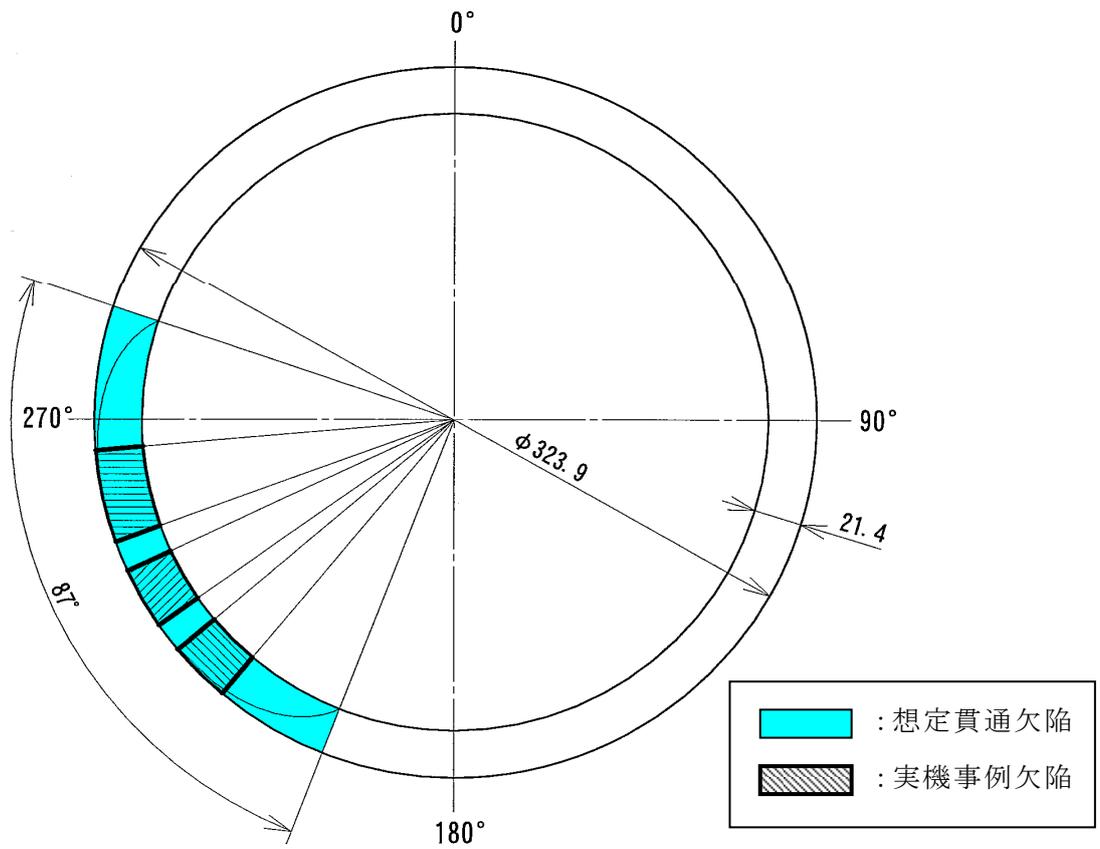


図 K-2 実機事例 2 の欠陥配置

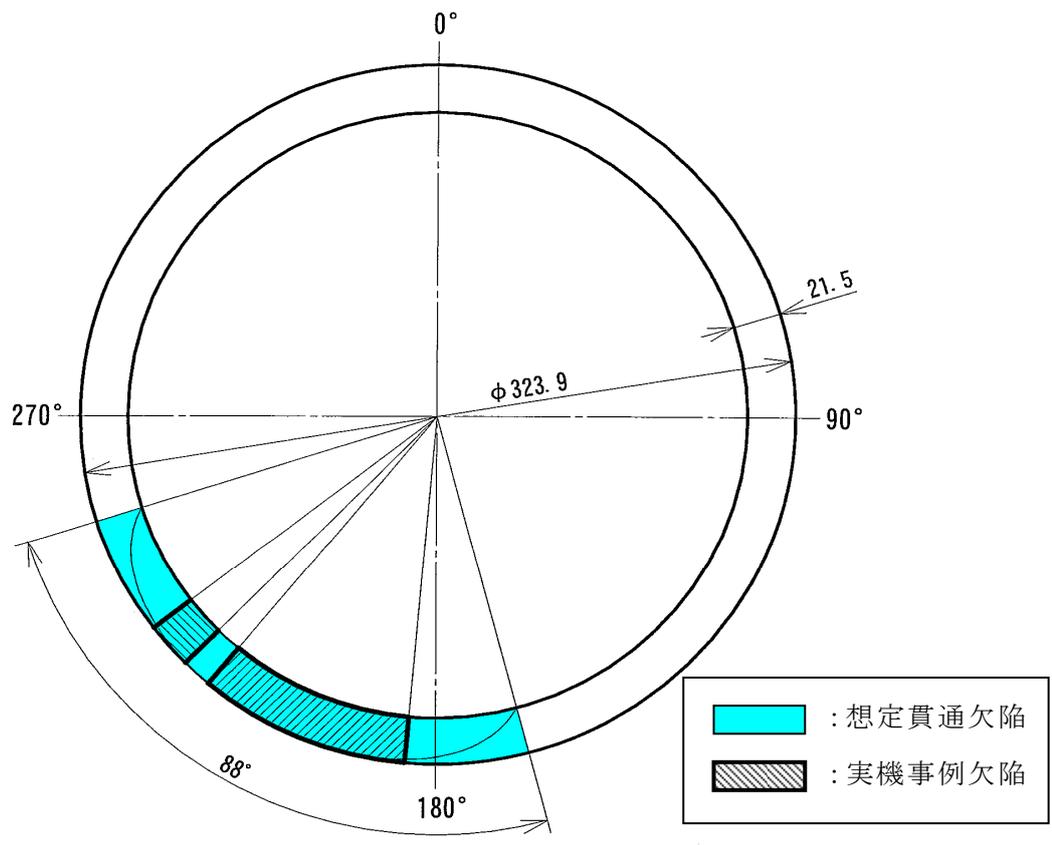


図 K-3 実機事例 3 の欠陥配置

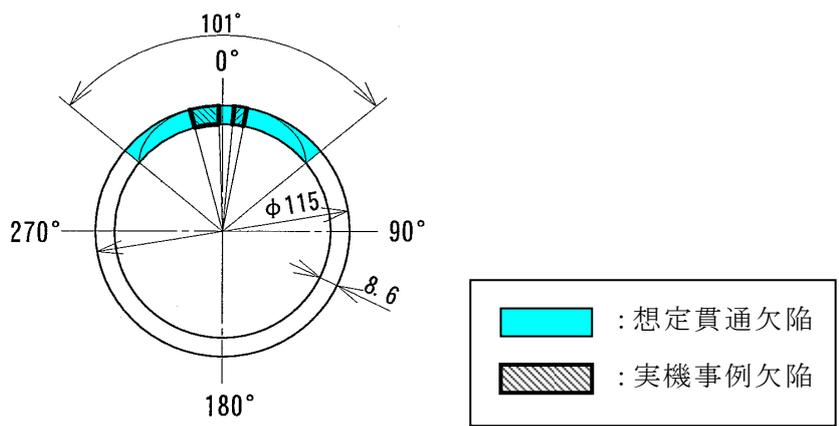


図 K-4 実機事例 4 の欠陥配置

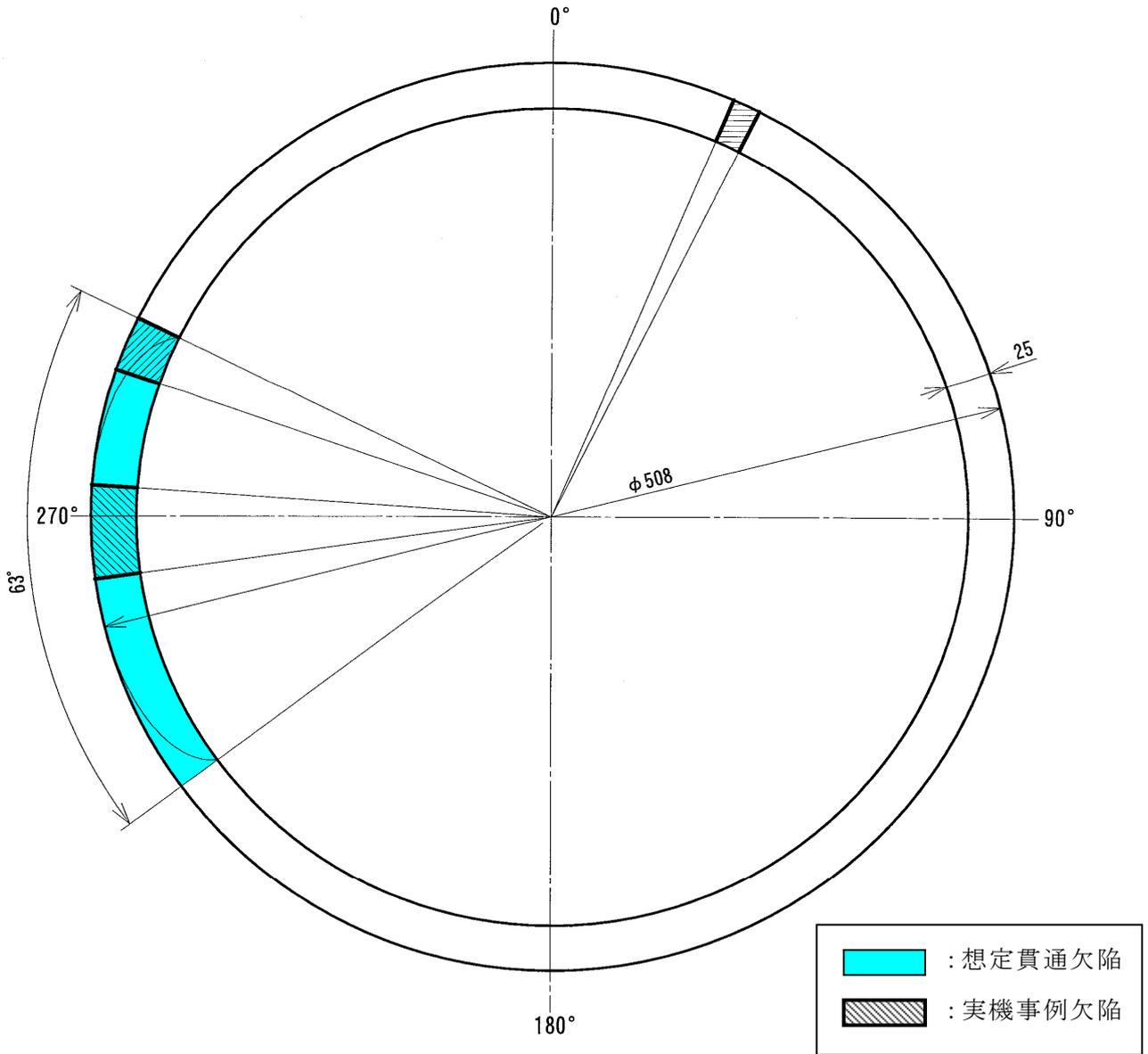


図 K-5 実機事例 5 の欠陥配置

2. 複数欠陥がある場合の配管強度の評価例

配管の断面に、比較的大きな貫通欠陥（長さ： L ）が1つある場合と、小さな貫通欠陥（合計長さ： L ）がある場合の強度の比較を行った。

(1) 軸方向荷重に対する強度

欠陥断面積が同じ、即ち配管の残存断面積が同じであるため、軸方向荷重に対する両者の強度は基本的に等しい。

(2) モーメント荷重に対する強度

比較的大きな1つの貫通欠陥（長さ： L ）と、長さが $L/3$ の3つの貫通欠陥がある場合を例にとり、モーメント荷重に対する配管の強度として断面2次モーメントの比較を行った。

想定した貫通欠陥の配置と各欠陥配置の断面2次モーメントの比較を表K-1に示す。

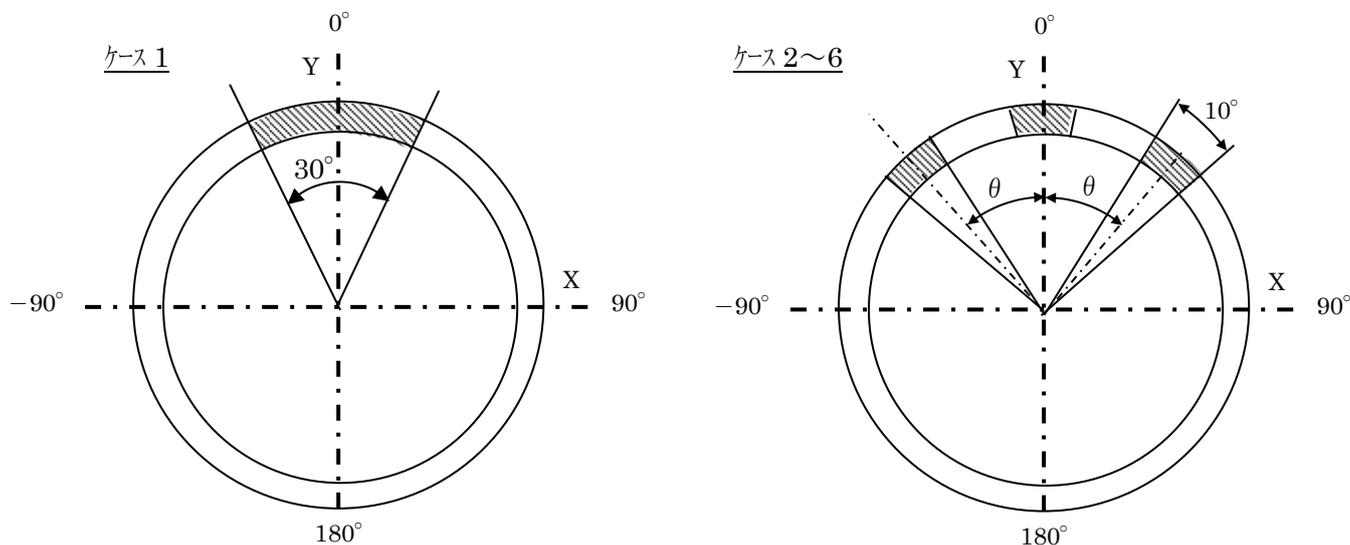
表K-1から、比較的大きな1つの貫通欠陥がある場合の断面2次モーメントの最小値は、3つの小さな欠陥がいずれの配置となった場合の断面2次モーメントよりも小さくなっていることが分かる。

上記(1)、(2)より、配管の同一断面に複数の貫通欠陥がある場合には、これらの欠陥の長さの総和に等しい1つの貫通欠陥を最も不利な方向に想定すれば、保守側の強度評価となる。

表K-1 貫通欠陥の配置による断面2次モーメントの比較

		貫通欠陥配置 [各貫通欠陥（欠陥幅10°）の中心線の角度方向位置] （下図参照）	X軸と平行な軸 に対する断面2次モーメント： I_x （注1参照）	Y軸と平行な軸に に対する断面2次モーメント： I_y （注1参照）	断面2次モーメントの最小値： $\text{Min}(I_x, I_y)$
ケース0		（欠陥なし）	1	1	1
ケース1 （1つの貫通欠陥）		-15° ~ 15° （欠陥幅30°）	0.82	0.99	0.82
3つの貫通欠陥	ケース2	-30°	0.85	0.97	0.85
		0°			
		30°			
	ケース3	-60°	0.97	0.92	0.92
		0°			
		60°			
	ケース4	-90°	0.94	0.89	0.89
		0°			
		90°			
	ケース5	-120°	0.91	0.92	0.91
		0°			
		120°			
ケース6	-170°	0.86	0.99	0.86	
	0°				
	170°				

注1. 断面2次モーメントは薄肉円筒として計算し、ケース0（欠陥なし）の断面2次モーメントに対しての比率を示す。



3. 欠陥がある場合の固有振動数への影響の検討

3.1 目的

ジェットポンプの周溶接部に貫通亀裂がある場合の固有振動数への影響を検討するために、3次元弾性ソリッドモデルによる配管の固有値解析を実施した。

3.2 解析条件

(1) 配管形状及び材料

- ・ 外径：300mm
- ・ 板厚：10mm
- ・ 長さ：5m
- ・ 材料：SUS316L

質量密度： $7.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，縦弾性係数： 195000 N/mm^2 （常温）

(2) 欠陥の有無

ケース1：欠陥なし

ケース2：長さを4等分する位置3箇所の同一方位に1/4周貫通欠陥を想定

（図K-6参照）

(3) 境界条件：両端固定

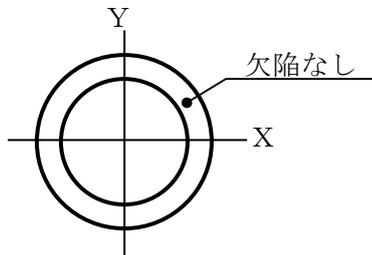
3.3 解析結果

貫通欠陥の影響が大きくなる振動モード（図K-6のX軸面内の振動モード）のケース1とケース2の固有値の比較を表K-2に示す。

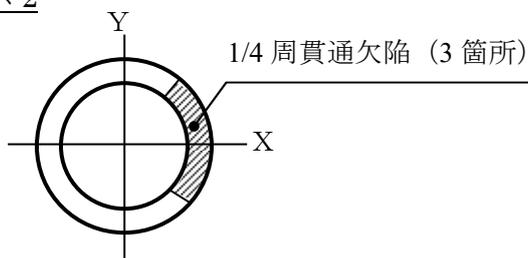
3.4 まとめ

配管の全長を4等分する位置に同時に1/4周の貫通亀裂を仮定して固有振動解析を実施し、振動モードは健全な配管の場合と同じであり、固有振動数への影響も健全な配管の10%未満と小さく有意でないことを確認した。

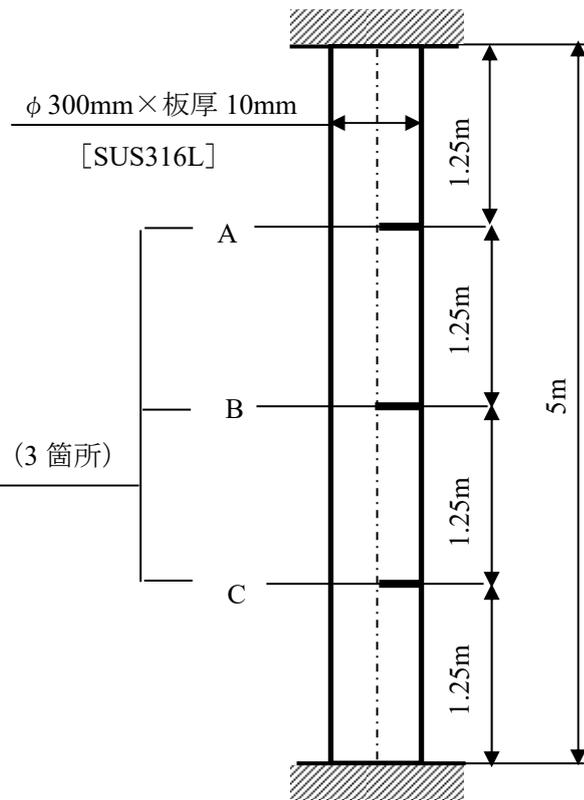
ケース 1



ケース 2



断面 A, B, C



図K-6 固有値解析モデル

表K-2 欠陥の有無による固有振動数の比較

	固有振動数 (1次) [Hz]	固有振動数 (2次) [Hz]
ケース 1 (欠陥なし)	69.22	180.18
ケース 2 (1/4 周欠陥 : 図K-6)	66.56	168.25

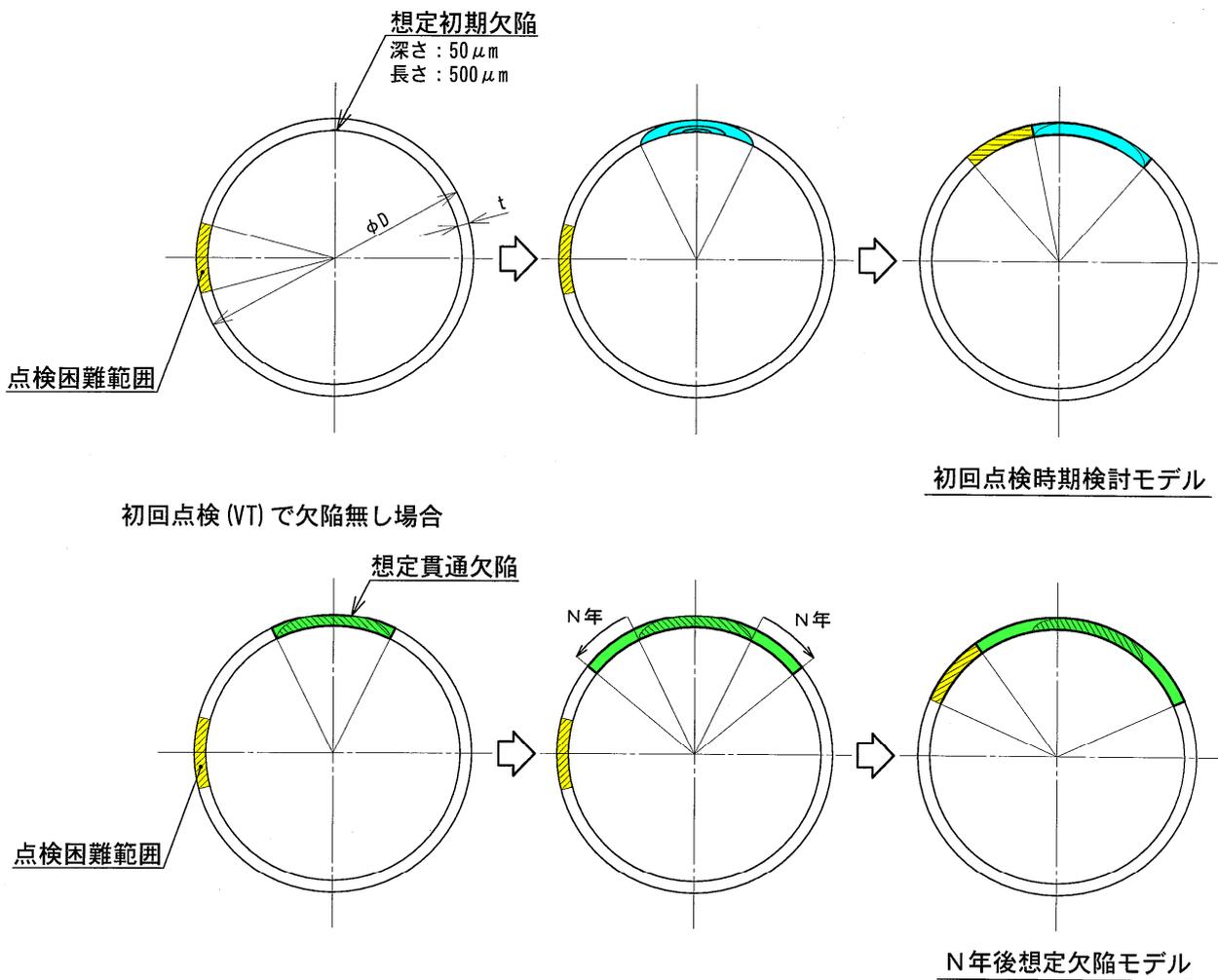
注: 図K-6のX軸を含む面内の振動モードのうち, 低次のものからそれぞれ1次~2次とした。

付録L 再点検周期の検討例

初回点検において外面からのVTで欠陥が発見されない場合に、再点検周期設定のために想定する欠陥を、初回点検時期設定のために想定する欠陥と併せて図L-1に示す。

また、再点検周期の検討例を表L-1に示す。

なお、初回点検で欠陥が発見された場合には、UTにより欠陥の深さ、長さを同定して、再点検周期を検討、評価する。

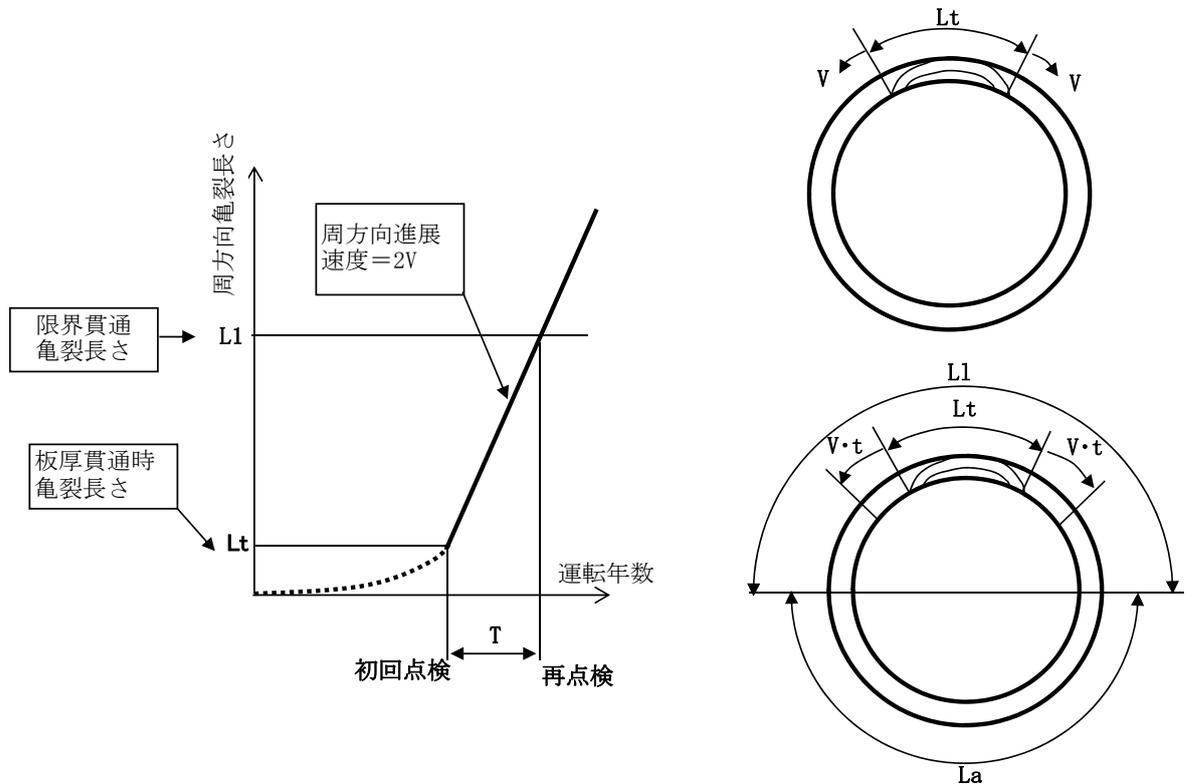


図L-1 点検周期を設定する上での想定欠陥の考え方

表 L-1 初回点検において溶接線の全周の外表面VTを実施し、欠陥が確認されなかった場合の

部位		サーマルスリーブ /エルボ		ミキサ/アダプタ		テーパ管 /テールパイプ		備考
材質		SUS304	SUS304L SUS316L	SUS304	SUS304L SUS316L	SUS304	SUS304L SUS316L	
外径(mm)		271	271	181.1	181.1	497.2	497.2	
板厚(mm)		7.8	7.8	9.25	9.25	6.3	6.3	
板厚貫通までの期間	Tt (年)	13.9	51.4	18.3	68	17.1	62.6	付録E
板厚貫通時の周方向亀裂長さ	Lt (mm)	67	67	96	96	62	62	
周方向進展速度 (両側)	2V(mm/年)	58	13	58	13	58	13	Vは付録C の上限速度
許容残存長さ (半周)	La (mm)	401	401	255	255	761	761	注1
板厚貫通から限界亀裂長さに 達するまでの期間	T (年)	5.8	25.2	2.7	12.0	12.1	52.7	再点検は、 左記期間内に 実施

注1: 付録Gの許容欠陥評価結果から許容欠陥は半周以上であるが、貫通亀裂が半周を超えると、漏えい量の計算において急激に漏えい量が増えることから、限界貫通亀裂長さは半周とした。



付録M 未点検範囲の欠陥想定法

1. 概要

点検を実施しない範囲（未点検範囲）を残存断面積に含めない、すなわち未点検範囲は欠陥と同等に扱って構造健全性評価を行うことは、最も保守的な取り扱いとなるが、工学的には未点検範囲には点検範囲での欠陥比率を想定するのが合理的であることから、適切な保守性を有した未点検範囲の欠陥想定法を検討した。

2. 未点検範囲の欠陥想定法の検討

炉内配管（炉心スプレイ配管（以下CS配管）及びジェットポンプ）の周溶接線を対象に、点検実施範囲で確認された欠陥の割合から、未点検範囲を含めた全体の欠陥割合を確率計算による95%信頼上限として設定することを検討した。以下に検討内容を示す。

具体的計算方法を図M-1に示す。

図M-1において、

$$\begin{aligned} \text{周溶接線の点検割合} &= [\text{周溶接線の点検長さ}] / [\text{周溶接線全周}] \\ &= N / M \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{点検範囲の欠陥割合} &= [\text{点検範囲の欠陥長さの合計}] / [\text{周溶接線の点検長さ}] \\ &= m / N \end{aligned}$$

と表されるが、周溶接線の点検割合（ N/M ）及び点検範囲の欠陥割合（ m/N ）が同じであっても、 M の値、即ち母数の大きさの取り方によって、周溶接線全周の欠陥割合の信頼上限 $m/N + \Delta p$ の値は異なる。 M の値は、周溶接線の点検最小単位をどのように考えるかによって決められる。炉心シュラウドの目視点検実績で、数mm～十数mmのひびが数多く確認されていることから、炉心シュラウドのガイドラインで、目視点検によって検知可能なSCCによるひび割れを、長さ10mm（深さ1mm）としていることは保守側の適切な設定と考えられる。このことから、周溶接線の点検最小単位を10mmとし、炉内配管の内で最も直径の小さいCS配管の全周がおよそ500mmであることから、周溶接線全周の母数 M を、 $500\text{mm} / 10\text{mm} = 50$ とすることとした。

$M=50$ とし、点検割合（ X ）と全周の想定欠陥割合（ p ）の信頼上限の関係を、点検範囲での欠陥比率をパラメータ（ $=0.01, 0.1, 0.5$ ）にして、図M-2に示す。なお、図M-2には、参考として未点検範囲をすべて欠陥とみなす場合の全周の想定欠陥割合を併せて示す。

図M-2から以下のことが判る。

- ① 点検範囲における欠陥比率が高い、あるいは点検割合（ X ）が小さい場合には、全周の想定欠陥割合（ p ）の95%信頼上限は点検範囲での欠陥比率に比べ有意に高くなる。
- ② しかし、点検割合（ X ）が0.5に至ると、点検範囲での欠陥比率が0.01程度に小さい場合には、点検範囲での欠陥比率と同等とみなせる。

3. 炉内配管の点検可能範囲

ジェットポンプの周溶接線については、吊下式カメラを用いて概ね 90%の範囲が点検可能（ジェットポンプガイドライン 付録B）であり、CS配管の周溶接線については吊下式カメラの点検可能範囲が一部 50%に留まると推定される部位もある（炉心スプレイ配管／スパージャガイドライン 付録E）が小型 CCD カメラ等の適用により、いずれの溶接線とも 75%程度の範囲が点検可能と思われる。

炉内配管（ジェットポンプ及び炉心スプレイ配管）の推定点検範囲（0.75～0.9）を図 M-2 に併せて記す。

4. 未点検範囲の欠陥想定方法

2 項の②及び 3 項の検討結果から、炉内配管（ジェットポンプ及び炉心スプレイ配管）の周溶接線の点検で、アクセス可能な全域の点検を実施し、点検実施範囲で欠陥が発見されなかった場合には、未点検範囲には欠陥を想定しないこととする。但し、点検実施範囲と未点検範囲とを比較して、SCC の発生又は進展に影響する要因について工学的な有意差がある場合は除外する。

- M : 母集団の大きさ
- p : 母集団のうち欠陥のある比率
- 1-p : 母集団のうち健全な比率
- N : 標本の大きさ
- m : 標本Nのうち欠陥のあるものの個数

母比率pの $100(1-\alpha)\%$ 信頼区間は、

$$\left(\frac{m}{N} - Z(\alpha/2) \times \text{SQRT}\left(\frac{(M-N)}{(M-1)} \times \frac{m}{N} \times \frac{(1-m/N)}{N}\right) \right) \leq p \leq \left(\frac{m}{N} + Z(\alpha/2) \times \text{SQRT}\left(\frac{(M-N)}{(M-1)} \times \frac{m}{N} \times \frac{(1-m/N)}{N}\right) \right)$$

95%信頼性区間 : $100(1-\alpha) = 95$ $\alpha = 0.05$ $Z(\alpha/2) = Z(0.025) = 1.96$

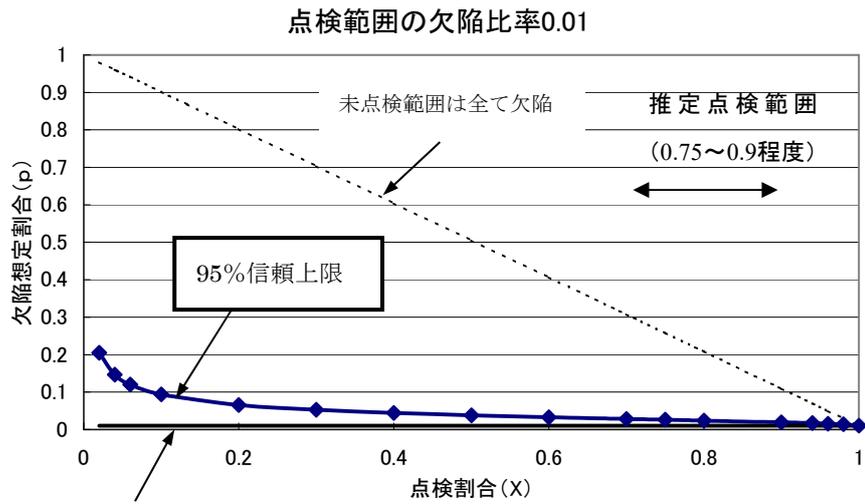


炉内配管全周の欠陥割合の95%信頼上限推定

N/M	炉内配管の点検割合 = X
m/N	点検範囲における欠陥割合 = Y
$m/N + \Delta p$	炉内配管全周の欠陥割合の上限
$m/N - \Delta p$	炉内配管全周の欠陥割合の下限
Δp	$Z(\alpha/2) \times \text{SQRT}\left(\frac{(M-N)}{(M-1)} \times \frac{m}{N} \times \frac{(1-m/N)}{N}\right)$

95%信頼性区間 : $100(1-\alpha) = 95$
 $Z(\alpha/2) = Z(0.025) = 1.96$

図 M-1 炉内配管の想定欠陥割合の具体的計算方法



点検範囲の欠陥比率

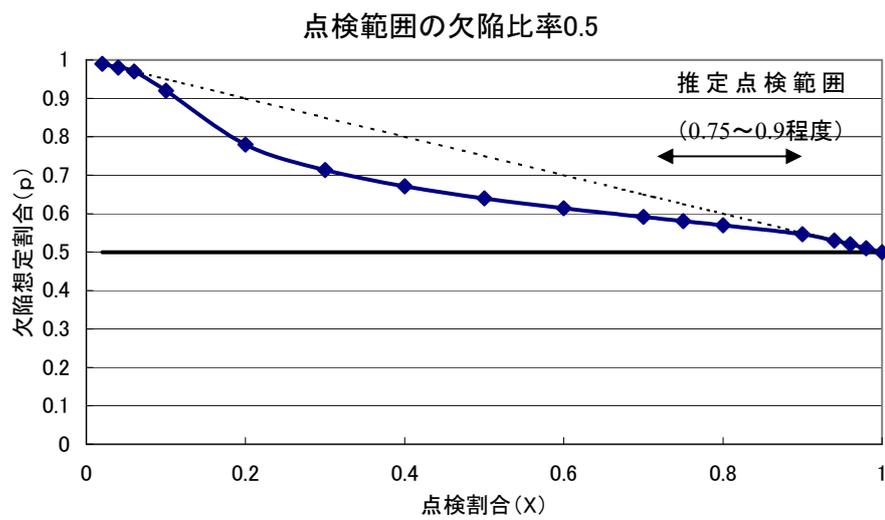
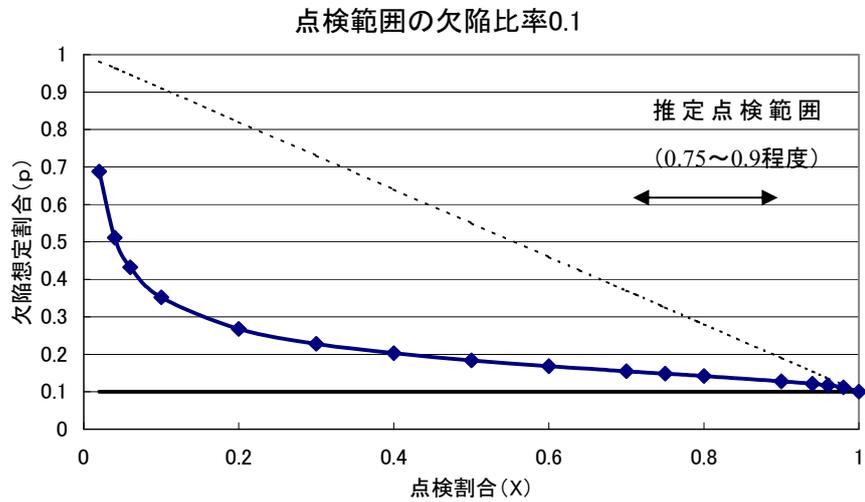


図 M-2 全周の想定欠陥割合 (p) の信頼上限計算結果

付録N ジェットポンプの部位毎の点検の考え方

1. 目的

本付録は、ジェットポンプの各部位について、①機能、②形状及び材質、③想定される劣化事象及び国内外の運転経験、④安全機能への影響等を考慮した点検の考え方を示したものである。

2. 各部位毎の点検方針

2.1 ライザ管 : RS-1~RS-3

2.1.1 機能

ライザ管はサーマルスリーブとトランジションピースを連結している。ライザ管は再循環ポンプで昇圧されたジェットポンプ駆動水をジェットポンプインレットミキサに導く流路を構成する。

2.1.2 形状・材質

ライザ管・エルボの材質はステンレス鋼である。ライザ管の下部はエルボを介してサーマルスリーブを介して原子炉圧力容器ノズル部のサーマルスリーブに溶接で接合されていると共に上部のライザブレースにより原子炉圧力容器に溶接で連結されている。

ライザ管は、サーマルスリーブとエルボの溶接部 (RS-1)、エルボとライザ管との溶接部 (RS-2)、ライザとトランジションピースとの溶接部 (RS-3) で接続されている。

ライザ管の形状を図 2.1.1 に示す。ライザ管の材質を表 2.1.1 に示す。

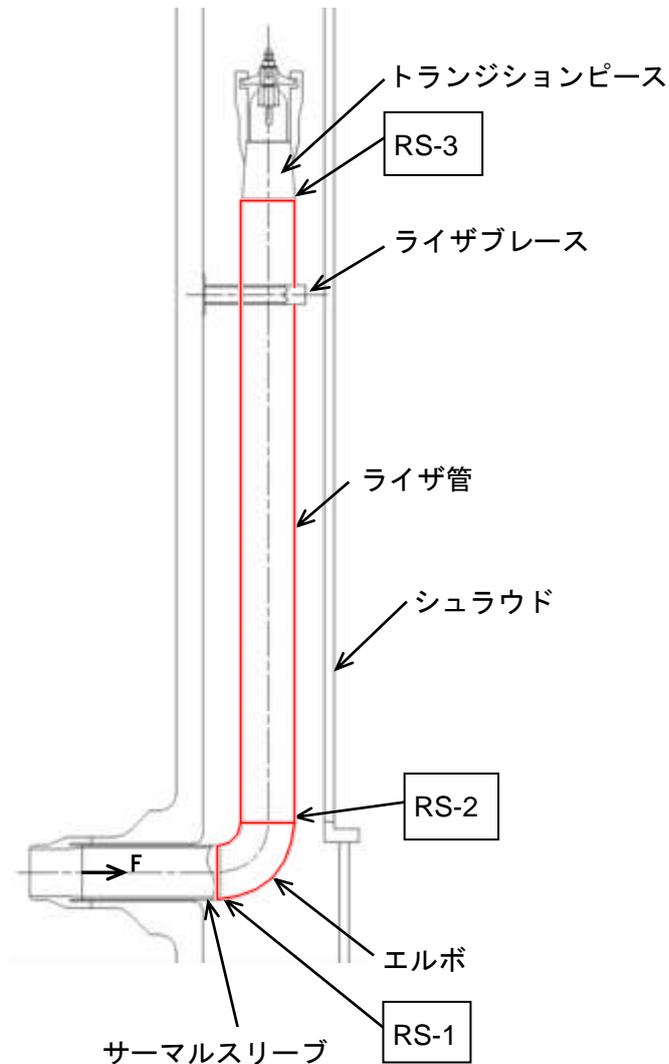


図 2.1.1 ライザ管の形状

表 2.1.1 ライザ管の材質

形状	部品	材質
図 2.1.1	エルボ	ステンレス鋼
	ライザ管	ステンレス鋼

2.1.3 想定される劣化事象

ライザ管の材質はステンレス鋼であり、応力腐食割れ（以下、SCC と称す。）発生の可能性がある。また、溶接部（RS-3）については、トランジションピース側の材質がステンレス鋳鋼（耐食性にすぐれた二相ステンレス組織）であることからライザ管側にのみ SCC 発生の可能性がある。

なお、炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼（SUS304：以下、「SUS304」と称する。）に比べて、炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼（SUS304L,SUS316L 等：以下、「低炭素ステンレス鋼」と称する。）では、SCC 発生の可能性は低い。なお、国内プラントでは低炭素ステンレス鋼が多用されている。

2.1.4 国内外の運転経験

国内では、1996年に SUS304 を用いた比較的初期のプラントにおいて溶接部（RS-1）に 1 件（2カ所/10本）の損傷事例があり、低炭素ステンレス鋼に交換された。その他の損傷事例は報告されていない。

米国では過去の点検で、溶接部（RS-1）でのべ約 300 の点検で 6%の割合で亀裂が確認されている。また、溶接部（RS-2）でのべ約 300 の点検で 0.3%の割合で亀裂が確認されている。溶接部（RS-3）のライザ管側でのべ約 300 の点検で亀裂は確認されていない。なお、米国では比較的 SUS304 が多用されている。

2.1.5 損傷による安全機能への影響

事故後の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能に影響を与える事象として、エルボ両端の溶接部（RS-1 または RS-2）での全周破断を仮定した場合には、破断部から下流側のライザ管～インレットミキサを圧力容器に固定する構造物は上下方向に柔軟性のあるライザブレースのみとなり、インレットミキサが上昇しディフューザから分離する可能性は否定できない。また、ライザ管とトランジションピースとの溶接部（RS-3）のライザ管側での全周破断を仮定した場合、破断部から下流側のトランジションピース～インレットミキサを圧力容器に固定する構造物はなく、インレットミキサが上昇しディフューザから分離する可能性がある。これらの溶接部（RS-1～RS-3）の破断によるインレットミキサのディフューザからの分離は、事故後の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能に影響を与える。

なお、通常運転時に上記のライザ管の溶接部（RS-1～RS-3）に破断が起りインレットミキサがディフューザから分離したとしても、ジェットポンプの流量、炉心流量、炉出力に変化が現れ検知が可能であり、炉を安全に停止することは十分可能である。

2.1.6 点検方針

通常運転時にライザ管の溶接部(RS-1～RS-3)が破断すると、検知可能で炉を安全に停止できるが、事故時においてライザ管が全周破断している状態の場合は、インレットミキサとディフューザが分離する可能性は否定できないため、炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能に影響がある。

想定される劣化事象としては、溶接部(RS-1～RS-3)はいずれもステンレス鋼の溶接部であり、SCCが発生する可能性がある。運転経験から SUS304 が多い米国で、複数の溶接部(RS-1～RS-3)で亀裂が確認されており、国内プラントで SUS304 製のプラントで溶接部(RS-1)に損傷事例があるが、その発生頻度は高くはない。国内プラントで低炭素ステンレス鋼の溶接部の発生事例は無く発生頻度はさらに低いと見られる。低炭素ステンレス鋼の運転年数が米国の SUS304 に比べて少ないことも含め、低炭素ステンレス鋼が多い国内プラントでの SCC の発生頻度は高くはないと考えられる。

以上より、溶接部 (RS-1～RS-3) については、SCC の発生頻度は高くはないが発生する可能性があると考え、SCC の検出に適した MVT-1 を点検手法とし、全周破断を仮定した場合には、事故時の安全機能へ影響があることの重要性を考慮して、初期亀裂を想定した亀裂進展評価方法を用い、全周破断に至る前の貫通亀裂からの漏えいの制限を基準とした点検間隔とすることとする。

ライザ管の点検部位 RS-1～RS-3 に適用する点検間隔・手法を表 2.1.2 に示す。

表 2.1.2 ライザ管の点検間隔・手法

点検部位		点検手法	上段：初回点検時期／個所 下段：再点検時の点検周期／個所
RS-1	サーマルスリーブとエルボの溶接部	MVT-1	<炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 運転年数 25.2 年に 1 回／全箇所
			<炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼の場合> 運転開始後運転年数 16 年以内／全箇所 運転年数 5.8 年に 1 回／全箇所
RS-2	エルボとライザ管の溶接部	MVT-1	<炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 運転年数 25.2 年に 1 回／全箇所 (L 材)
			<炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼の場合> 運転開始後運転年数 16 年以内／全箇所 運転年数 5.8 年に 1 回／全箇所
RS-3	エルボとトランジションピースの溶接部	MVT-1	<炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 運転年数 25.2 年に 1 回／全箇所
			<炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼の場合> 運転開始後運転年数 16 年以内／全箇所 運転年数 5.8 年に 1 回／全箇所

注記：下段の点検周期は，初回点検で全周 VT を実施し，亀裂が無かった場合。

2.2 トランジションピース：－

2.2.1 機能

トランジションピースはライザ管の上端に接合されたインレットミキサとの接続用の部品であり、ライザ管からの上昇流を、トランジションピースで二つに分岐し、インレットミキサに導く機能を持つ。

2.2.2 形状・材質

トランジションピースの材質はステンレス鋳鋼であり、ライザ管の上端に溶接部（RS-3）で接続されている。

また、トランジションピースの支柱の溝に取り付けられたジェットポンプビーム及びホールダウンボルトにより、インレットミキサをトランジションピースの球面座に押し付けることでトランジションピースに機械的に接合する構造になっている。

トランジションピースの形状を図 2.2.1 に示す。トランジションピースの材質を表 2.2.1 に示す。

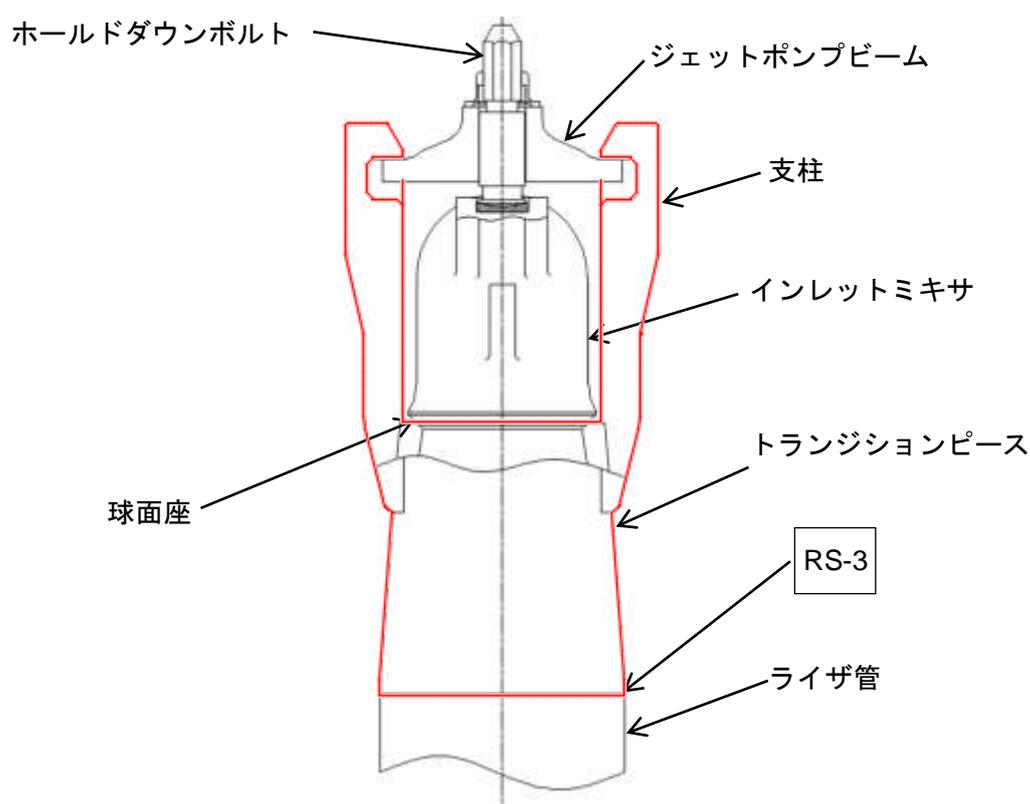


図 2.2.1 トランジションピースの形状

表 2.2.1 トランジションピースの材質

形状	部品	材質
図 2.2.1	トランジションピース	ステンレス鋳鋼

2.2.3 想定される劣化事象

トランジションピースの材質であるステンレス鋼は耐食性にすぐれた二相ステンレス組織になっているため、トランジションピースとライザ管との溶接部（RS-3）のトランジションピース側にSCCが発生する可能性は無いと考えられる。なお、ライザ管側については2.1.3項に示す。

トランジションピースとインレットミキサのジェットポンプビームによる機械的な接合部（トランジションピースの支柱とジェットポンプビームとの接触部、ホールドダウンボルトとインレットミキサとの接触部、インレットミキサとトランジションピースとの接触部（球面座）等の接触）については、ジェットポンプの振動に伴い摩耗の可能性はある。

2.2.4 国内外の運転経験

溶接部（RS-3）についての国内外での損傷事例はない。なお、米国においては、トランジションピース側は点検対象ではない。

(2.1.4項参照。)

2.2.5 損傷による安全機能への影響

溶接部（RS-3）のトランジションピース側での安全機能についての影響は2.1.4項に示すライザ管側と同じであり、全周破断を仮定すれば安全機能に影響がある。

トランジションピースとインレットミキサのジェットポンプビームによる機械的な接合部については、インレットミキサの振動に伴って生じる摩耗の程度が大きくなった場合には、インレットミキサの振動も大きくなり、最終的にはジェットポンプビームが外れる等の安全機能に影響を与える可能性は否定できない。ただし、摩耗は振動に伴いゆるやかに進行する事象であり、摩耗を適切に管理することで、炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能に影響を及ぼすことを防止できる。

2.2.6 点検方針

溶接部（RS-3）は、2.1.3項と同じである。

トランジションピースの機械的接合部の摩耗に関しては、トランジションピースとインレットミキサのジェットポンプビームによる機械的な接合部等にジェットポンプの振動の兆候として観測されると考えられるが、摩耗は緩やかに進行する現象であること及び、2.8項に記載の、より接触面積が小さいブラケットの位置決めボルト（BR-3）及びウエッジ（BR-5）とインレットミキサ（アダプタ部）の接触部に顕著に現れることから、摩耗に対しての個別点検としては、この部分（BR-3, BR-5）で点検・監視するものとする。

2.3 インレットミキサ：IM-1,IM-2,IM-3

2.3.1 機能

インレットミキサは、インレット部とミキサ部に大別され、インレット部で再循環ポンプによって昇圧された循環水をノズルから吹き出しアニュラス部の循環水を吸引し、ミキサ部で混合する機能を持っている。

2.3.2 形状・材質

インレットミキサは、インレット部（180°エルボ、スリーブ、ノズル）とミキサ部（バレルとアダプタ）で構成されており、その構成部品は溶接で接合されている。インレットミキサの形状を図 2.3.1 (1) 及び図 2.3.1 (2) に、材質インレットミキサの材質を表 2.3.1 に示す。ノズルとバレルの境界の上流側をインレット部、下流側をミキサ部と呼ぶ。

インレットミキサの上流端の 180°エルボはライザ管上端のトランジションピースの球面座でジェットポンプビーム及びホールドダウンボルトにより押し付けられて機械的に接合されている。

下流端のアダプタはディフューザの上端でスリップジョイントにより連結されている。スリップジョイントは、原子炉圧力容器に取り付けられているライザ管側とシュラウドサポートプレートに取り付けられているディフューザ側の鉛直方向の熱膨張差を吸収するために設置されている。

インレット部の 180°エルボとノズルは、ステンレス鋳鋼であり、これらをつなぐスリーブの材質は、ステンレス鋼またはステンレス鋳鋼で、180°エルボとスリーブ、スリーブとノズルは溶接部（IM-1）により接合されている。インレット部のノズル下端はバレル上端と溶接部（IM-2）で接合されている。ノズル部下端の溶接部（IM-2）は、図 2.3.1 (2) に示すように、ノズルの穴が 1 つのタイプでは、ノズルには 3 本の支柱と支柱下端でそれらを連結するように形成されたリング部が一体となっている。一方、ノズルの穴が 5 つのタイプでは、ノズルには 5 本の支柱が一体となっており、1 穴タイプのリング部に相当する部分はバレル側に形成されている。このため、溶接部（IM-2）の位置はノズルのタイプで異なる。

ミキサ部は、バレルとアダプタは溶接部（IM-3）で接合されている。バレルの材質は 5 穴ノズルのプラントはステンレス鋳鋼であるが、1 穴ノズルのプラントではステンレス鋼とステンレス鋳鋼が用いられているものがある。また、ノズルとアダプタの材質はすべてステンレス鋳鋼である。

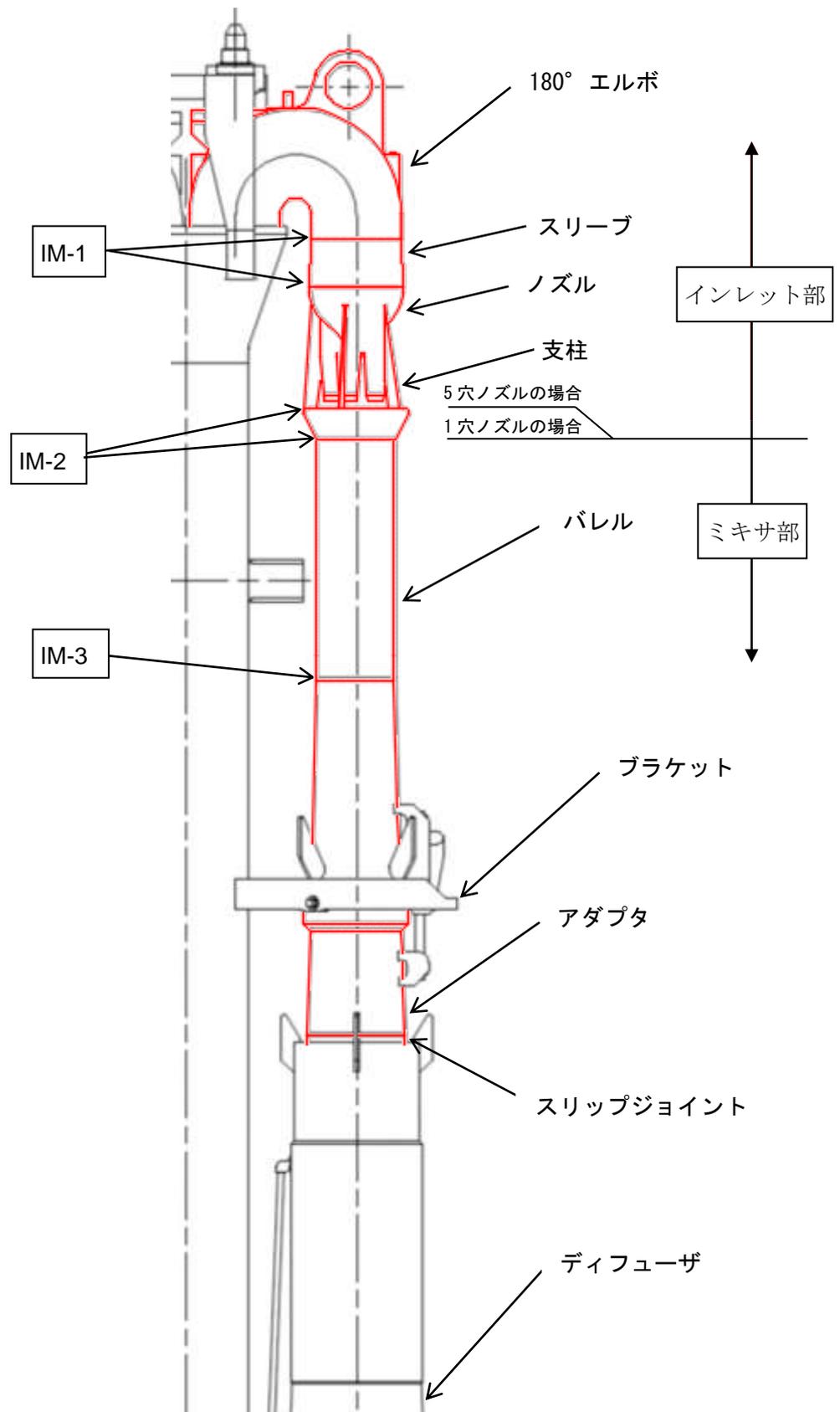


図 2.3.1 (1) インレットミキサの形状

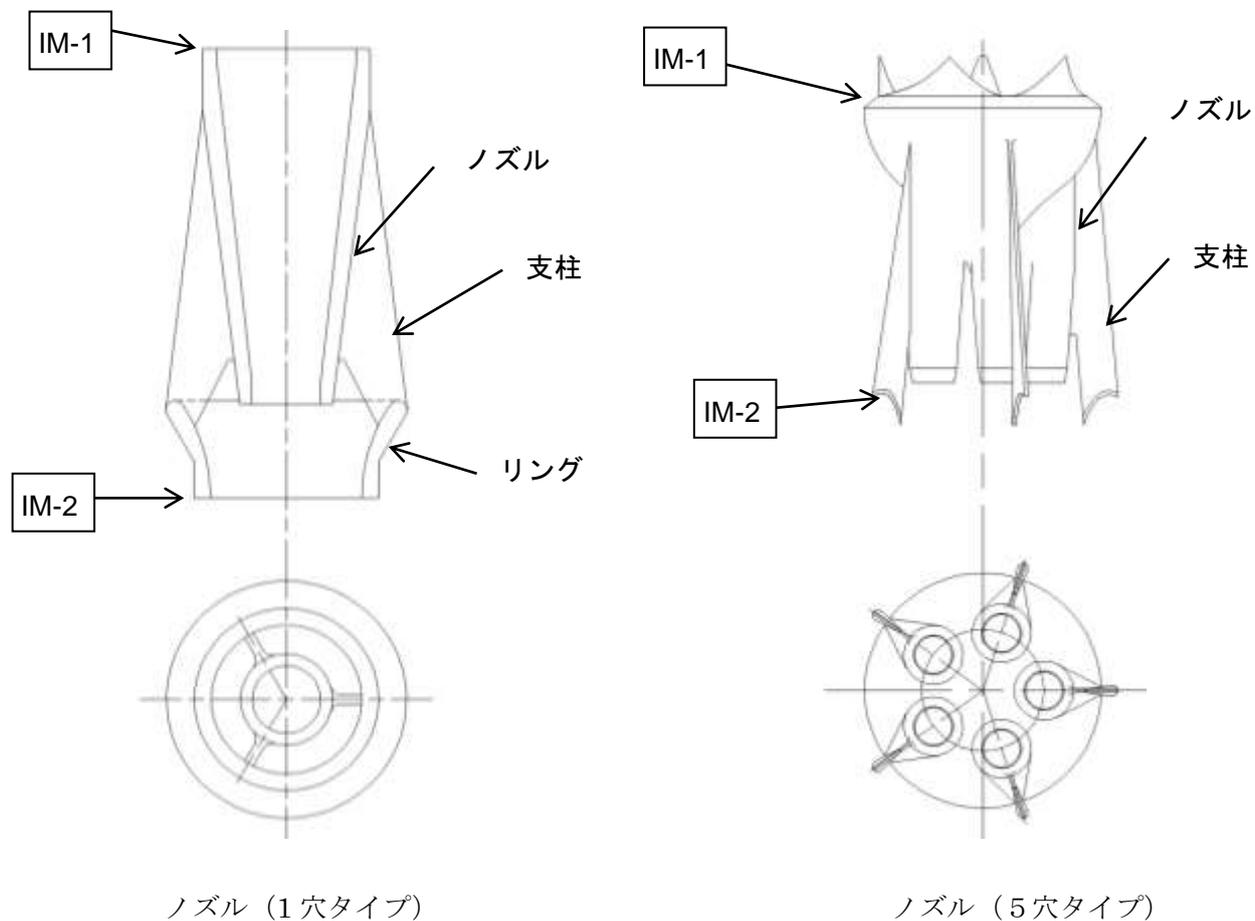


図 2.3.1 (2) ノズルの詳細形状

表 2.3.1 インレットミキサの材質

形状	部品	材質
図 2.3.1 (1) 図 2.3.1 (2)	180° エルボ	ステンレス 鋳鋼
	スリーブ	ステンレス 鋳鋼
		ステンレス 鋼
	ノズル	ステンレス 鋳鋼
	バレル	ステンレス 鋳鋼
		ステンレス 鋼
アダプタ	ステンレス 鋳鋼	

2.3.3 想定される劣化事象

インレットミキサの 180° エルボ、ノズル、アダプタはすべてのプラントでステンレス鋳鋼を用いている。

スリーブにステンレス鋳鋼を用いているプラントの溶接部 (IM-1) は鋳鋼同士の溶接部になり、想定劣化事象として SCC が発生する可能性は無いと考えられる。一方、スリーブにステンレス鋼を用いているプラントの溶接部 (IM-1) では、スリーブ側は想定劣化事象として SCC が発生する可能性がある。

バレルにステンレス鋳鋼を用いているプラントの溶接部 (IM-2)、溶接部 (IM-3) は鋳鋼同士の溶接部になり、想定劣化事象として SCC が発生する可能性は無いと考えられる。一方、バレルにステンレス鋼を用いているプラントの溶接部 (IM-2)、溶接部 (IM-3) ではバレル側に SCC が発生する可能性がある。なお、ステンレス鋼の SCC については、SUS304 に比べて、低炭素のステンレス鋼では、発生の可能性は低い。国内プラントでは低炭素のステンレス鋼が多用されている。

2.3.4 国内外の運転経験

国内では、溶接部 (IM-1)、溶接部 (IM-2)、溶接部 (IM-3) 共に、損傷事例の報告はない。

米国では、溶接部 (IM-1) でのべ約 150、溶接部 (IM-2) でのべ約 350、溶接部 (IM-3) でのべ約 200 の点検で亀裂は確認されていない。なお、米国プラントでは比較的 SUS304 が多用されている。

2.3.5 損傷による安全機能への影響

溶接部 (IM-1) での全周破断を仮定した場合、上流側の 180° エルボはライザ管に固定されており、破断部から下流側が上昇することを妨げることから、ミキサ部がディフューザから分離することは無い。また、水平方向については、インレットミキサ部がスリップジョイント部とライザブラケットの高さが異なる 2 か所で拘束されており、インレットミキサが傾いて破断部が大きく横ずれすることはない。また、事故時の炉心冠水と長期冷却の維持機能については、溶接部 (IM-1) が炉心域の 2/3 のレベルより上方にありその破断による冠水レベルへの影響は無い。事故時の低圧での注水機能をジェットポンプに持たせているプラントでは溶接部 (IM-1) は注水流路となり低圧での注水機能に影響を及ぼすと考えられるが、横ずれは制限されており、その影響は小さいと考えられる。

溶接部 (IM-2)、溶接部 (IM-3) での全周破断を仮定した場合、上流側の 180° エルボはライザ管に固定されており、破断部から下流側が上昇することを妨げることから、ディフューザから分離することは無い。また、水平方向については、インレットミキサ部はスリップジョイント部とレストレントブラケットの高さが異なる二か所で拘束されており、インレットミキサが傾いて破断部が大きく横ずれすることはない。事故時の炉心冠水と長期冷却の維持機能については、溶接部 (IM-2、IM-3) が炉心域の 2/3 のレベルより同等または下方にありその破断による冠水レベルへの影響をおよぼすと考えられるが、横ずれは制限されており、その影響は小さいと考えられる。

事故後の低圧での注水機能をジェットポンプに持たせているプラントでは溶接部 (IM-2、IM-3) は注水流路となり低圧での注水機能に影響を及ぼすと考えられるが、横ずれは制限されており、そ

の影響は小さいと考えられる。

2.3.6 点検方針

溶接部 (IM-1) は炉心域の 2/3 のレベルより上方にあり、事故後の炉心冠水機能に影響はないものと考えられる。一方、溶接部 (IM-2, IM-3) は炉心域の 2/3 のレベルより下方にあり事故後の炉心冠水機能に影響する可能性は否定できない。また、事故後の低圧での注水機能をジェットポンプに持たせているプラントの溶接部 (IM-1), (IM-2), (IM-3) は、共に長期冷却の維持機能に影響する可能性は否定できない。

想定される劣化事象としては、スリーブにステンレス鋼を用いているプラントでは溶接部 (IM-1) に SCC が発生する可能性があり、バレルにステンレス鋼を用いているプラントでは溶接部 (IM-2, IM-3) に SCC が発生する可能性がある。運転経験からは、低炭素ステンレス鋼を多用している国内で溶接部 (IM-1, IM-2, IM-3) に損傷事例の経験はなく、SUS304 を多用している米国においても点検で亀裂が確認された事例は報告されていない。

以上より、溶接部 (IM-1) については、事故後の低圧での注水機能をジェットポンプに持たせ、かつ、スリーブにステンレス鋼を用いているプラントで点検が必要と考えられるが、国内プラントでは、この組み合わせのプラントは無く、個別点検としての点検は不要と考えられることから、一般点検のみの点検とする。

(IM-2, IM-3) については、溶接部バレルにステンレス鋼を用いているプラントを点検対象に点検するものとする。SCC の発生頻度は低いと考えられるが発生する可能性はあり、SCC の検出に適した、MVT-1 を点検手法とし、全周破断を仮定した場合には、事故時の安全機能へ影響があることの重要性を考慮して、初期亀裂を想定した亀裂進展評価方法を用い、全周破断に至る前の貫通亀裂からの漏えいの制限を基準とした点検間隔とすることとする。

インレットミキサの点検部位 IM-2~IM-3 に適用する点検間隔・手法を表 2.3.2 に示す。

表 2.3.2 インレットミキサの点検間隔・手法

点検部位		点検手法	上段：初回点検時期／個所 下段：再点検時の点検周期／個所
IM-2	ノズルとバレルの溶接部	MVT-1	<炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 運転年数 25.2 年に 1 回／全箇所
			<炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼の場合> 運転開始後運転年数 16 年以内／全箇所 運転年数 5.8 年に 1 回／全箇所
IM-3	バレルとアダプタの溶接部	MVT-1	<炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 運転年数 25.2 年に 1 回／全箇所
			<炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼の場合> 運転開始後運転年数 16 年以内／全箇所 運転年数 5.8 年に 1 回／全箇所

注記 1：表 2.3.2 は，バレルの材質がステンレス鋼のプラントに適用する。

注記 2：下段の点検周期は，初回点検で全周 VT を実施し，亀裂が無かった場合。

2.4 ディフューザカラー

2.4.1 機能

ディフューザカラーは、ディフューザの上部に位置し、インレットミキサとスリップジョイントで連結する部品である。また、ディフューザカラーには、ジェットポンプの流量測定を行うための圧力の取り出し口が設置されている。

2.4.2 形状・材質

ディフューザカラーは、ディフューザの上端に溶接により取り付けられている。ディフューザカラーには、インレットミキサをスリップジョイント部に差し込むためのガイドが溶接されている。また、ディフューザカラー外周には、圧力検出用の溝が全周に設けられており、溝の底に圧力検出用の貫通穴が複数個開いている。溝にはバンドを被せて覆うように溶接されており、内部の空間が各穴からの圧力の均一化を図り、このバンドに接続されたジェットポンプ計測用配管を通して原子炉圧力容器外に取り出し、圧力を計測する。

ディフューザカラーの形状を図 2.4.1 に示す。ディフューザカラーの材質を表 2.4.1 に示す。

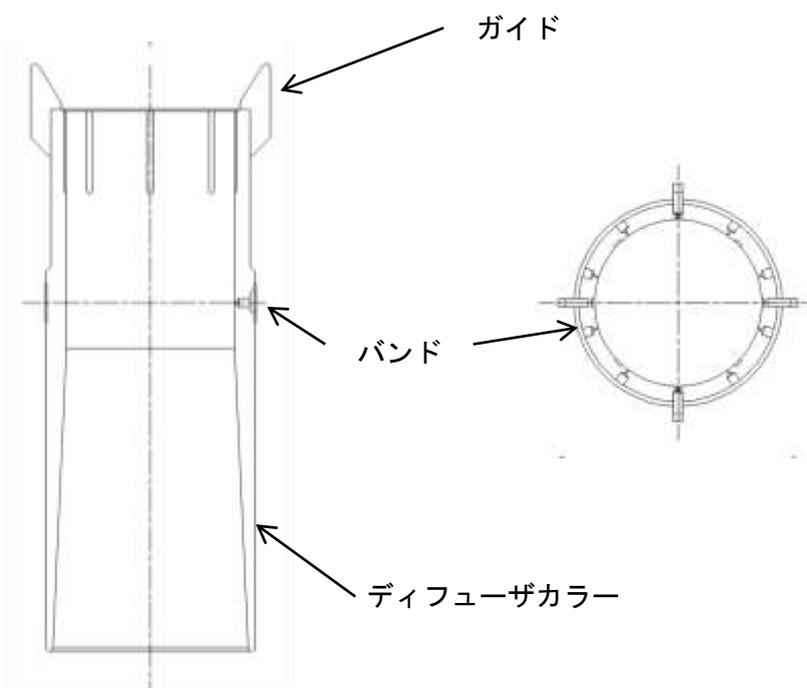


図 2.4.1 ディフューザカラーの形状

表 2.4.1 ディフューザカラーの材質

形状	部品	材質
図 2.4.1	ディフューザカラー	ステンレス鋳鋼
	ガイド	ステンレス鋳鋼
	バンド	ステンレス鋼

2.4.3 想定される劣化事象

ディフューザカラーはステンレス鋳鋼である。それに溶接されるガイドもステンレス鋳鋼であり溶接部の SCC 発生の可能性は無いと考えられる。一方、バンドの材質はステンレス鋼であり、取付け溶接部のバンド側に SCC 発生の可能性がある。

2.4.4 国内外の運転経験

ディフューザカラーとディフューザの溶接部（DF-1）については 2.5.4 項に示す。
バンドの取付け溶接部については、国内、米国共に点検対象部位ではない。

2.4.5 損傷による安全機能への影響

バンドの取付け溶接部に亀裂があっても、ディフューザカラー自身は鋳鋼でありジェットポンプの破断には至らず、ジェットポンプの安全機能である事故後の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能の安全機能には影響を及ぼさない。

バンドは、ジェットポンプの流量を計測する計測配管の取付け部でもあり、2.9.5 項に記載の計測用配管と同じで、安全機能への影響はない。

2.4.6 点検方針

バンドの取付け溶接部は、SCC 発生の可能性があるが、安全機能に影響を及ぼさない。また、損傷があった場合には、検出差圧に変動が生じるため、運転中の検知が可能であり、安全な停止は十分にできるものとする。以上より、個別点検としての点検は不要と考えられ、一般点検のみとする。

2.5 ディフューザ：DF-1, DF-2, DF-3, AD-2

2.5.1 機能

ディフューザは、再循環水の経路を形成し、冷却材を下部プレナムに導く機能がある。底部がシュラウドサポートプレートに直接溶接される。

2.5.2 形状・材質

ディフューザテーパ管は、上部でディフューザカラーと溶接部（DF-1）で接合されており、テールパイプと溶接部（DF-2）で接合されている。テールパイプの下端は、ローアリングに溶接部（DF-3）で接合され、ローアリング下端は、シュラウドサポートプレートに溶接部（AD-2）で接合されている。ディフューザテーパ管及びテールパイプの材質はステンレス鋼であり、ローアリングの材質はシュラウドサポートプレートと同材のニッケル基合金である。

ディフューザの形状を図 2.5.1 に示す。ディフューザの材質を表 2.5.1 に示す。

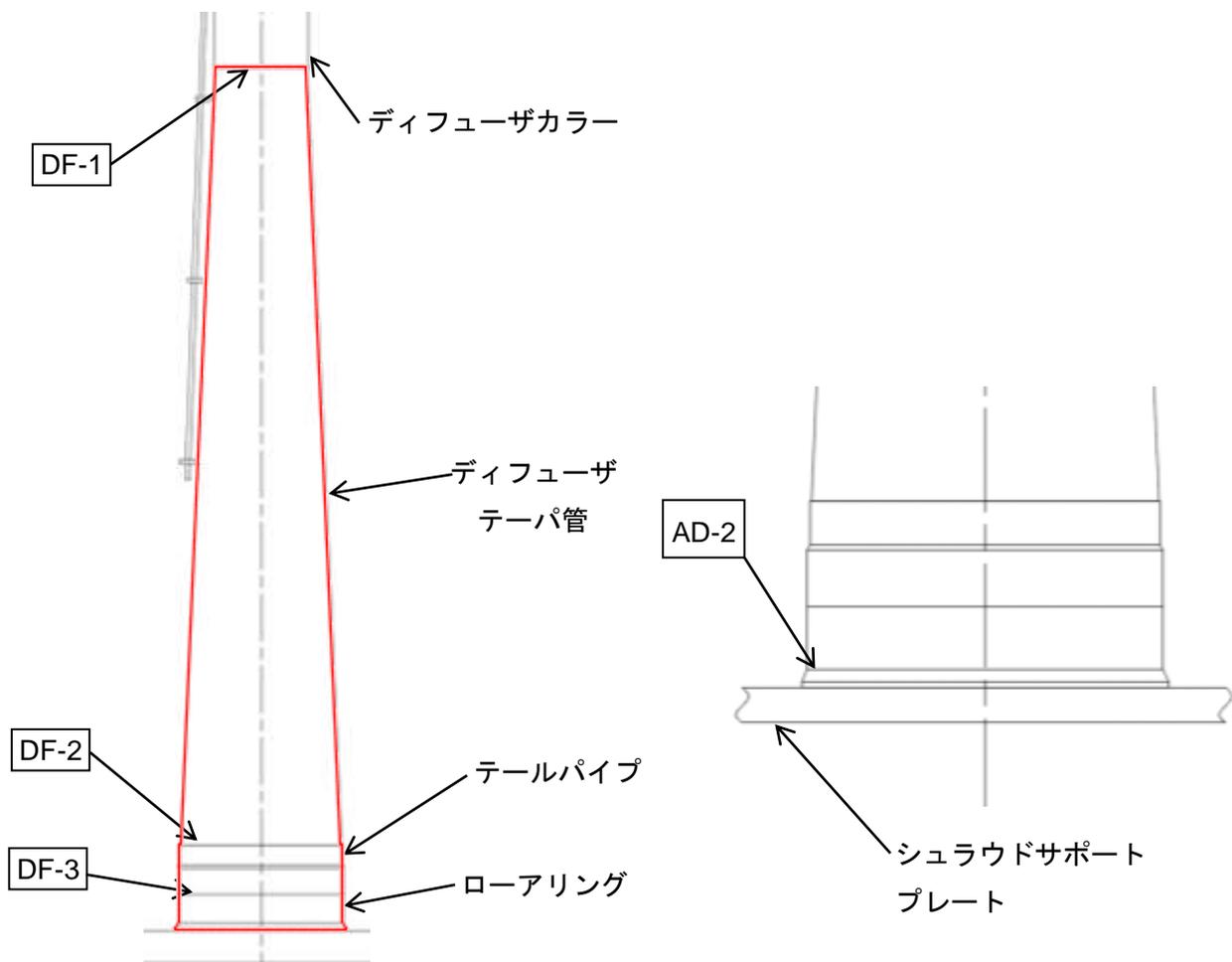


図 2.5.1 ディフューザの形状

表 2.5.1 ディフューザの材質

形状	部品	材質
図 2.5.1	ディフューザテーパ管	ステンレス鋼
	テールパイプ	ステンレス鋼
	ローアリング	ニッケル基合金

2.5.3 想定される劣化事象

ディフューザカラーとディフューザテーパ管の溶接部 (DF-1)、ディフューザテーパ管とテールパイプの溶接部 (DF-2)、テールパイプとローアリングの溶接部 (DF-3) は、いずれも、ステンレス鋼とステンレス鋼あるいは、ステンレス鋼とニッケル基合金の溶接部であり、SCC 発生の可能性がある。

ローアリング及びシュラウドサポートプレートの材質は共にニッケル基合金鋼であり、溶着金属も含めた溶接部 AD-2 に SCC 発生の可能性がある。

なお、ステンレス鋼の SCC については、SUS304 に比べて、低炭素ステンレス鋼では、発生の可能性は低い。国内プラントでは低炭素のステンレス鋼が多用されている。

2.5.4 国内外の運転経験

国内では、溶接部 (DF-1~DF-3) に、損傷事例の報告はない。溶接部 (AD-2) で 2004 年に比較的初期のプラントにおいてに 1 件 (2 カ所/10 本) の損傷事例がある。

米国では溶接部 (DF-1) でのべ約 600 の点検で 0.15% の割合で亀裂が確認されている。溶接部 (DF-2) でのべ 600 の点検で 0.6%、溶接部 (DF-3) でのべ約 300 の点検で 0.9% の割合で亀裂が確認されている。溶接部 (AD-2) についてはのべ約 600 の点検で亀裂は確認されていない。なお、米国プラントでは、比較的 SUS304 が多用されている。

2.5.5 損傷による安全機能への影響

ディフューザの溶接部 (DF-1, DF-2, DF-3, AD-2) での全周破断を仮定した場合、破断部から上方のスリップジョイント間は上下方向にフリーの状態になり、下部プレナムとアニュラスの差圧により上昇する可能性は否定できない。水平方向に関しても、上方のスリップジョイント部で拘束されているが、破断部の上下でずれる可能性は否定できない。

全周破断部の上下で大きくずれが生じる場合は破断部からの漏えいは大きくなる。これら溶接部の位置が、炉心域の 2/3 までの再冠水レベルより下方であることから、事故後の炉心冠水と長期冷却の維持機能に影響すると考えられる。また事故後の低圧での注水機能を持たせているプラントでは注水経路からの漏えいで低圧での注水機能に影響することが考えられる。

また、これらの溶接部が万が一全周破断した場合には、ジェットポンプの振動に影響を与え、他の部位の疲労破壊のポテンシャルに影響を与えると考えられる。しかしながら、全周破断が起こった場合、ディフューザカラーから接続されているジェットポンプ計測用配管も同時に損傷することが考えられ、この場合、検知が可能であり、安全な停止は十分にできるものとする。

2.5.6 点検方針

溶接部（DF-1～DF-3, AD-2）の全周破断は事故後の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び事故時の低圧での注水機能をジェットポンプに持たせているプラントでは低圧での注水機能に影響がある。

想定される劣化事象としては、溶接部（DF-1～DF-3, AD-2）はステンレス鋼またはニッケル基合金の溶接部であり SCC の可能性はある。運転経験からも、SUS304 が比較的多い米国の運転経験で、溶接線(DF-1～DF-3)に極低い割合ではあるが亀裂が確認されているが溶接線（AD-2）には亀裂が確認された報告はない。低炭素ステンレス鋼が多い国内プラントでは初期のプラント溶接線（DF-1～DF-3）損傷事例は無く溶接部（AD-2）に 1 例損傷事例の報告がある。国内プラントで低炭素ステンレス鋼の溶接部の発生事例は無く発生頻度はさらに低いと見られる。低炭素ステンレス鋼の運転年数が米国の SUS304 に比べて少ないことも含め、低炭素ステンレス鋼が多い国内プラントでの SCC の発生頻度は高くはないと考えられる。

以上より、溶接部（DF-1, DF-2, DF-3, AD-2）については SCC の発生頻度は低いと考えられるが、発生する可能性はあり、SCC の検出に適した MVT-1 を点検手法とし、全周破断を仮定した場合には、事故時の安全機能へ影響があることの重要性を考慮して、初期亀裂を想定した亀裂進展評価方法を用い、全周破断に至る前の貫通亀裂からの漏えいの制限を基準とした点検間隔とすることとする。

ディフューザの点検部位 DF-1～DF-3, AD-2 に適用する点検間隔・手法を表 2.5.2 に示す。

表 2.5.2 ディフューザの点検間隔・手法

点検部位		点検手法	上段：初回点検時期／個所 下段：再点検時の点検周期／個所
DF-1	ディフューザカラー とディフューザテー パ管の溶接部	MVT-1	<炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 実運転年数 12.0 年に 1 回／全箇所
			<炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼の場合> 運転開始後実運転年数 16 年以内／全箇所 実運転年数 2.7 年に 1 回／全箇所
DF-2	ディフューザテーパ 管とテールパイプと の溶接部	MVT-1	<炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 実運転年数 12.0 年に 1 回／全箇所
			<炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼の場合> 運転開始後 16 年以内／全箇所 2.7 年に 1 回／全箇所
DF-3	テールパイプとロー アリングの溶接部	MVT-1	<炭素含有量が 0.030%以下のステンレス鋼の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 実運転年数 12.0 年に 1 回／全箇所
			<炭素含有量が 0.030%を超えるステンレス鋼の場合> 運転開始後実運転年数 16 年以内／全箇所 実運転年数 2.7 年に 1 回／全箇所
AD-2	ローアリングとシュ ラウドサポートプレ ートの溶接部	MVT-1	<溶加材が 182 合金の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 実運転年数 12.0 年に 1 回／全箇所
			<溶加材が 82 合金の場合> 運転開始後暦年 30 年以内／全箇所 実運転年数 12.0 年に 1 回／全箇所

注記：下段の点検周期は、初回点検で全周 VT を実施し、亀裂が無かった場合。

2.6 ジェットポンプビーム

2.6.1 機能

ジェットポンプビームとボルトアセンブリはインレットミキサをトランジションピースに固定するための部品である。ビームは定められたトルクで締め付けられたボルトで固定されており、インレットミキサとトランジションピースに密着させることで、ジェットポンプの再循環水の経路を維持している。

2.6.2 形状・材質

それぞれのジェットポンプのインレットミキサは、本文の図 1-1 のように入り口から 180° 曲げられてディフューザのスリップジョイントに繋がっている。インレットミキサは、X-750 ニッケル基合金製のビームとステンレス製のボルトアセンブリによりトランジションピースに固定されている。ビーム先端はトランジションピースの支柱の溝に挿入されている。

ジェットポンプビームの形状を図 2.6.1 に示す。ジェットポンプビームの材質を表 2.6.1 に示す。

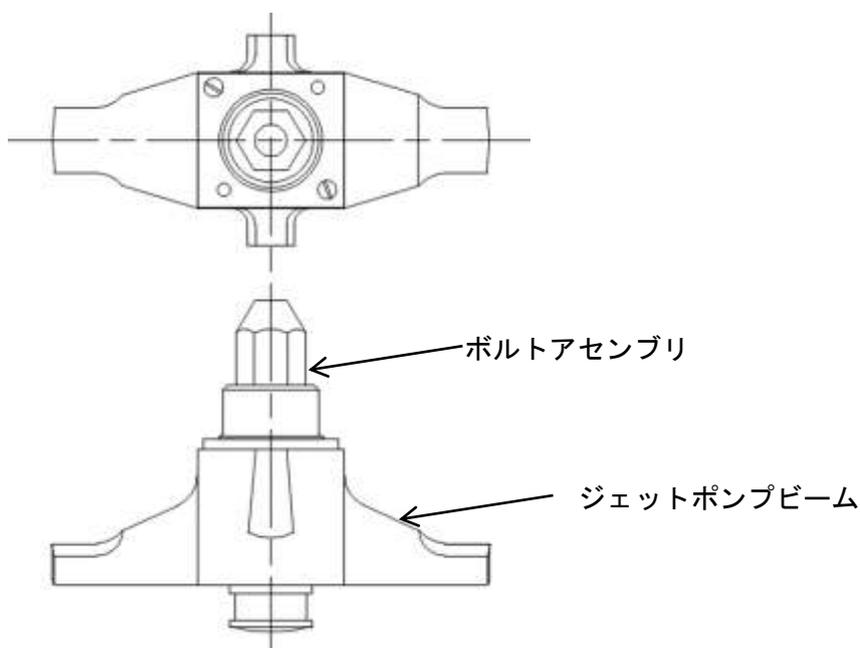


図 2.6.1 ジェットポンプビームの形状

表 2.6.1 ジェットポンプビームの材質

形状	部品	材質
図 2.6.1	ジェットポンプビーム	ニッケル基合金鋼 (改良型 X-750)

2.6.3 想定される劣化事象

X-750 ニッケル基合金は、ステンレス鋼の HAZ 部と異なり、母材に関して SCC を経験しており、想定される劣化事象として考慮する必要がある。

2.6.4 国内外の運転経験

ジェットポンプビームに関しては、米国プラントで 1979 年に折損事例があり、調査の結果、X750 ニッケル基合金母材部の SCC と特定された。その後、材料製作時の熱処理仕様を変更し、耐 SCC 性を向上させたものに交換されており、交換後のジェットポンプビームには、SCC に関し良好な成績を収めている。更なる改善として、ビーム形状の最適化を行い、初期締め付けによる応力集中の低減を図ったビームへ順次交換が進められている。国内においては、上記海外事例の水平展開として点検を実施し 2 例損傷事例が報告されているが上記の損傷事例から、熱処理改善を行った改良型 X750 に、現行プラントではすべて交換されており、その後の 10 年を超える運転で不具合は報告されていない。

なお、交換後の点検で、ビームの据付不良（ビームボルトの過大な締め付け）に起因した SCC の損傷事例が一件報告されているものの、その知見反映として初期締め付け力の低減が図られ、その後の不具合事例は報告されていない。

2.6.5 損傷による安全機能への影響

ジェットポンプビームの全断面折損を仮定した場合には、インレットミキサは上昇しディフューザ及びトランジションピースから分離する。インレットミキサとディフューザのスリップジョイント部は炉心域の 2/3 の再冠水レベルより下方にあり、事故時の炉心冠水と長期冷却の維持機能に影響する。また、低圧での注水機能をジェットポンプに持たせているプラントではインレットミキサのディフューザからの分離は注水流路が失われ低圧での注水機能に影響を及ぼす。

通常運転中のジェットポンプビームの全断面折損が生じた場合には、インレットミキサがディフューザ及びトランジションピースから分離し、事故時の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能をジェットポンプに持たせているプラントでの低圧での注水機能に影響を与えるが、ジェットポンプ流量の変化として検知することができ、安全に炉を停止することができる。

2.6.6 点検方針

事故時においてビームが破損した状態の場合、インレットミキサとディフューザが分離する可能性があり、炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能に影響がある。

想定される劣化事象及び運転経験からは、過去の不具合事例を反映し熱処理改善を行った改良型 X750 にすでに交換済みであり、その後の 10 年を超える運転で不具合は報告されていない。

また、ジェットポンプビームの SCC に関しては、不具合事例の経験からジェットポンプビームの取付けボルトに付加される初期締め付け力が、運転中も常時維持されている影響が大きく、初期締め付け力を適正に管理することが SCC の発生を抑制する上で重要である。

以上より、改良型 X750 での SCC 発生事例はないものの SCC が発生する可能性があると考え、SCC の検出に適した MVT-1 を点検手法とし、全破断した場合の事故時の安全機能へ影響があるこ

との重要性を考慮して、点検間隔は、改良型 X750 の運転経験から、初回 10 年、点検間隔は 10 年
 間隔で一般点検に併せて点検を継続することとし、取得した点検実績データの蓄積を継続し、対策
 効果の検証も含めて点検の最適化に資するものとする。

ジェットポンプビームの点検部位 BM-1 に適用する点検間隔・手法を表 2.6.2 に示す。

表 2.6.2 ジェットポンプビームの点検間隔・手法

点検部位		点検手法	上段：初回点検時期／個所 下段：再点検時の点検周期／個所
BM-1	ジェットポンプビー ム	MVT-1	運転開始後実運転年数 10 年以内／全箇所 実運転年数 10 年に 1 回／全箇所

2.7 ライザブレース : RB-1~RB-3

2.7.1 機能

ライザブレースはライザ管を原子炉圧力容器に溶接された肉盛座に連結させ、ライザ管の水平方向変位を拘束することによりジェットポンプ全体の振動を抑制し、その構造健全性を維持する機能がある。ライザブレースのリーフは、ステンレス製のライザ管と低合金製の圧力容器の間の運転時の熱膨張差を吸収するように上下方向に対して柔軟性を持たせた設計がされている。

2.7.2 形状・材質

ライザブレースは、ライザ管に溶接されているヨークと原子炉圧力容器の壁面を連結させる水平のリーフで構成されている。

リーフの材質はステンレス鋼で、リーフの端部は原子炉圧力容器の壁面と溶接部（RB-1）で接合され、もう一方の端部はヨークと溶接部（RB-2）で接合されている。リーフは柔軟性を持たせるために上下2枚のダブルリーフで構成されている。RB-1、RB-2はそれぞれジェットポンプ1台あたり4箇所の溶接部がある。

ヨークの材質はステンレス鋼で、ヨークはライザ管に溶接部（RB-3）で接合されている。RB-3は、ヨークが取りつくライザ管の外面のシュラウド側の位置に周方向に約60°の範囲で上下2か所で接合されている。

ライザブレースの形状を図2.7.1に示す。ライザブレースの材質を表2.7.1に示す。

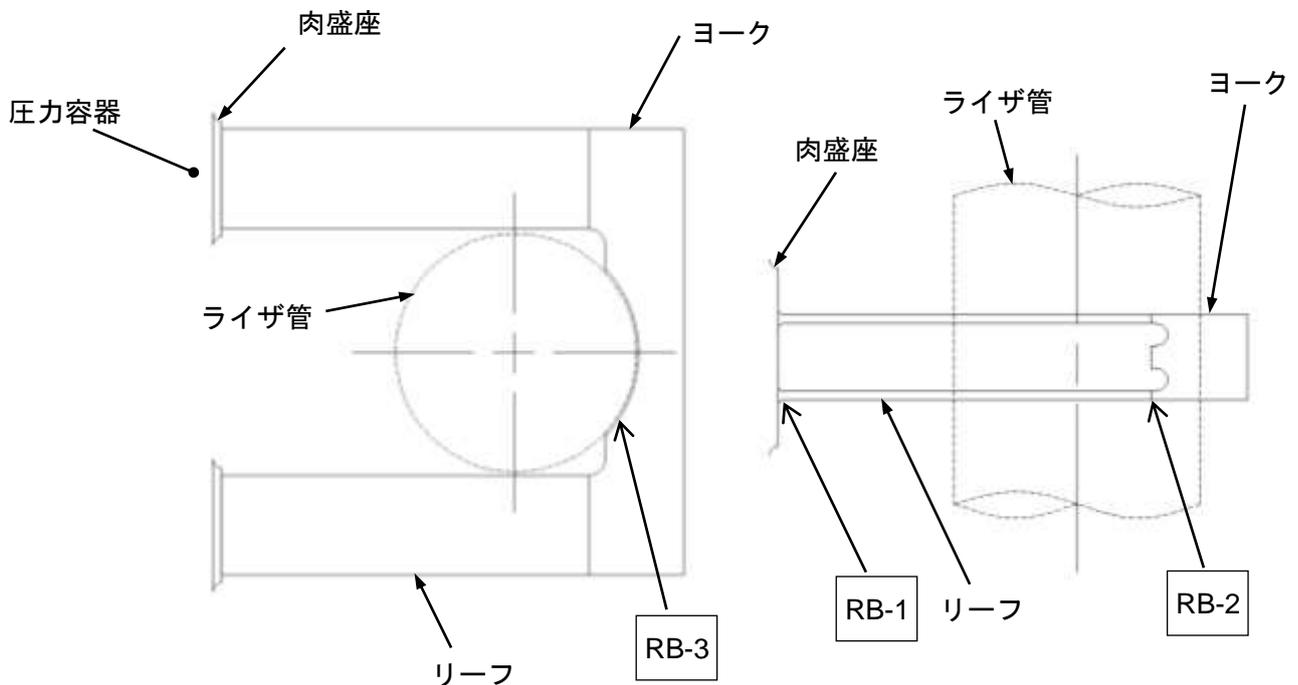


図 2.7.1 ライザブレースの形状

表 2.7.1 ライザブレースの材質

形状	部品	材質
図 2.7.1	ヨーク	ステンレス鋼
	リーフ	ステンレス鋼

2.7.3 想定される劣化事象

ライザブレースの材質は、ステンレス鋼であり溶接部（RB-1～RB-3）は SCC 発生の可能性がある。なお、SUS304 に比べて、低炭素ステンレス鋼では、SCC 発生の可能性は低い。なお、国内プラントでは低炭素のステンレス鋼が多用されている。

また、ライザブレースは、ジェットポンプの振動を拘束する機能を持つことから、疲労損傷は、ライザブレースにとって考慮すべき劣化事象である。疲労損傷の振動源としては、流動振動荷重（Flow Induced Vibration）や再循環ポンプの圧力脈動が考えられ、これらとの共振により引き起こされる高サイクル疲労は、劣化の原因の一つとなる可能性があると考えられる。その劣化の程度は、ジェットポンプの固有振動数、再循環ポンプの羽切り周波数（VPPF）、ハードウェアの形状や剛性に依存するが、これらの損傷は、いずれもリーフの両端である溶接部近傍で発生すると考えられる。

2.7.4 国内外の運転経験

国内の運転経験において、溶接部（RB-1～RB-3）についての損傷事例の報告はない。

米国では、溶接部（RB-1,RB-2）で、それぞれのべ約 1000 の点検で亀裂は確認されていない。溶接部（RB-3）でのべ約 600 の点検で 2%の割合で亀裂が確認されている。なお、米国プラントでは、比較的 SUS304 が多用されている。

2.7.5 損傷による安全機能への影響

ライザブレースの溶接部（RB-1～RB-3）が完全に破断したと仮定しても、破断によって即座にジェットポンプ全体の崩壊に至ることはなく、事故時の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能をジェットポンプに持たせているプラントでの低圧での注水機能の安全機能への影響はない。しかしながら、破断によって振動を拘束する機能は失われるとジェットポンプ全体の流動振動等に対する応答に変化をもたらすと考えられる。この振動応答の変化は、ジェットポンプ全体の振動を増大させ、ライザ管、インレットミキサ、ディフューザの経路を支持するブラケット等の部品の疲労損傷へ波及する可能性は否定できない。

2.7.6 点検方針

溶接部 (BR-1, BR-2) について、溶接部の損傷は即座に事故時の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能に影響しない。しかしながら、著しい損傷は、ジェットポンプの振動を増加させ、間接的に他の重要な部位の損傷を引き起こす可能性がある。

想定される劣化事象としては、ライザブレースを構成しているリーフ、ヨーク及び、ヨークが取り付くライザ管はステンレス鋼であり、これらの溶接部 (RB-1~RB-3) には SCC の可能性がある。また、疲労損傷の可能性も否定できない。運転経験からは、SUS304 製が多い米国でも溶接部 (RB-3) にわずかに亀裂が確認されているが、国内では損傷事例は報告されておらずその発生頻度は低い。低炭素ステンレスが多い国内では溶接部 (RB-1~RB-3) については損傷事例の報告は無く、発生頻度はさらに低いと見られる。低炭素ステンレス鋼の運転年数が米国の SUS304 に比べて少ないことも含め、低炭素ステンレス鋼が多い国内プラントでの SCC の発生頻度は低いと考えられる。

以上より、SCC の発生頻度は低いと考えられるが SCC 及び疲労亀裂が発生する可能性は否定できないことから、SCC の検出に適した MVT-1 を点検手法とした。溶接部 (RB-1~RB-3) については、溶接部の破断により即座に安全機能への影響はないものの、振動増加で他の部位での疲労損傷へと波及する可能性は否定できないことを考慮し、点検間隔については、ジェットポンプビームの点検に合わせて、初回 10 年、点検間隔は 10 年間隔で点検するものとし、取得した点検実績データの蓄積を継続し、SCC 及び疲労に対する知見の拡充を図るものとする。

なお、溶接部 (RB-1, RB-2) は、それぞれ 4 か所あることから、破断のような顕著な損傷の仮定としてライザブレースの支持機能が完全に喪失するような 4 か所同時破断は非常に考えにくい。

ライザブレース点検部位 RB-1~RB-3 に適用する点検間隔・手法を表 2.7.2 に示す。

表 2.7.2 ライザブレースの点検間隔・手法

点検部位		点検手法	上段：初回点検時期／個所 下段：再点検時の点検周期／個所
RB-1	リーフと原子炉圧力容器肉盛座の溶接部	MVT-1	運転開始後実運転年数 10 年以内／全箇所 実運転年数 10 年に 1 回／全箇所
RB-2	リーフとヨークの溶接部	MVT-1	運転開始後実運転年数 10 年以内／全箇所 実運転年数 10 年に 1 回／全箇所
RB-3	ライザ管とヨークの溶接部	MVT-1	運転開始後実運転年数 10 年以内／全箇所 実運転年数 10 年に 1 回／全箇所

2.8 ブラケット : BR-1~BR-5

2.8.1 機能

ブラケットは、ライザ管とインレットミキサを連結することにより、水平方向の相対変位を拘束し、ジェットポンプ全体の振動を抑制する機能がある。

2.8.2 形状・材質

ブラケットは、ブラケット、位置決めボルト、ウエッジの大きく3つの部品で構成されている。

ブラケットの材質は、ステンレス鋳鋼である。ブラケットは溶接部 (BR-1) でライザ管に取り付けられ、さらに位置決めボルトがブラケットに取り付けられている。溶接部 (BR-1) は、ライザ管の外面周方向に約 120° の範囲でライザ管の左右に2か所溶接されており、全周 360° の範囲に対し部分的である。

ウエッジはブラケットとインレットミキサ (アダプタ部) との間に挟み込まれる楔で、他の周方向2か所の位置決めボルトと合わせインレットミキサの外周3点で水平方向変位を拘束している。ウエッジはブラケットとアダプタに接触部 (BR-5) を介して挟み込まれている。

位置決めボルト (BR-3) は、ブラケットに取り付けられ、インレットミキサ据付時に調整した位置に周り止め溶接されている。ウエッジは、ウエッジを上下に貫通したウエッジボルト (BR-4) に沿って上下に移動することができる。ウエッジボルトはウエッジブラケットに取り付けられており、周り止め溶接されている。ウエッジは上に引き抜くことにより緩められ、インレットミキサの取付け・取り外しの際に、インレットミキサの水平方向支持を解除することができる。

また、ブラケットに取り付くガイドは、インレットミキサ据付時、ブラケット部を通過させるために設けられており、ブラケットに溶接により取り付けられている。

ウエッジブラケットの材質はステンレス鋳鋼であり、インレットミキサのアダプタに溶接部 (BR-2) により取り付けられている。ウエッジブラケットはブラケットを挟んで上下2カ所に取り付けられている。溶接部 (BR-2) はインレットミキサのウエッジがある位置に取り付けられており、全周 360° の範囲に対し約 90° と部分的である。

ブラケットの形状を図 2.8.1 に示す。ブラケットの材質を表 2.8.1 に示す。

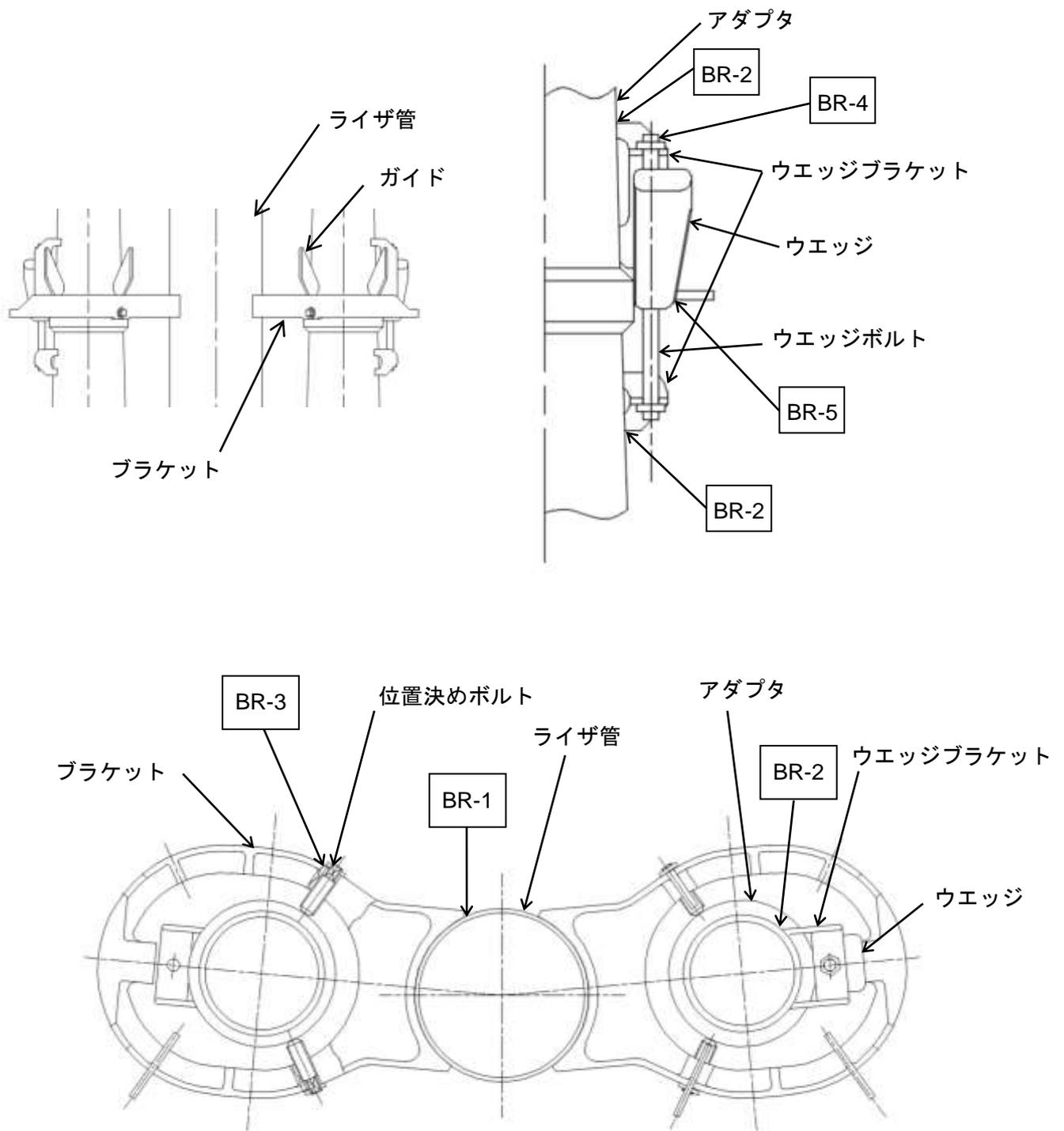


図 2.8.1 ブラケットの形状

表 2.8.1 ブラケットの材質

形状	部品	材質
図 2.8.1	ブラケット	ステンレス鋳鋼
	位置決めボルト	ステンレス鋼
	ウエッジブラケット	ステンレス鋳鋼
	ウエッジボルト	ステンレス鋼
	ウエッジ	ステンレス鋳鋼
750系ニッケル基合金		

2.8.3 想定される劣化事象

ブラケットの材質はステンレス鋳鋼であり、ライザ管との溶接部 (BR-1) ではステンレス鋼のライザ管側に、SCC が発生する可能性がある。

ウエッジブラケットの材質はステンレス鋳鋼であり、インレットミキサ (アダプタ) との溶接部 (BR-2) ではアダプタ側もステンレス鋳鋼であり、SCC 発生可能性は無いと考えられる。

溶接部 (BR-1, BR-2) はジェットポンプ振動を抑える水平方向拘束の荷重伝達経路であり、その経路を構成する以下の点検箇所 (BR-3~BR-5) では振動に伴う摩耗が生じる可能性がある。

位置決めボルト及びウエッジボルト (BR-3, BR-4) は、位置決めボルト及びウエッジボルトで振動荷重を受けるパスであり疲労による周り止め溶接部の割れ、ボルトの摩耗の可能性はある。

ウエッジの接触部 (BR-5) は、ウエッジの接触面での摩耗の可能性はある。

2.8.4 国内外の運転経験

国内では、溶接部 (BR-1~BR-2) についての損傷事例の報告はない。

米国では、ほとんどのプラントがライザ管に SUS304 を用いている溶接部 (BR-1) でのべ約 500 の点検で亀裂は確認されていない。BR-2 については、米国でも点検不要とされており、損傷事例もない。

位置決めボルト、ウエッジボルト、ウエッジの点検部位 (BR-3, BR-4, BR-5) については、米国での点検結果を踏まえた国内での点検で、ジェットポンプの健全性には影響しない程度の位置決めボルト及びウエッジとミキサ (アダプタ) の間に摩耗によるごくわずかな隙間が 9 プラントで報告されており、継続して点検監視することとしている。

上記とは別に国内で 1984 年に位置決めボルトの周り止め溶接の施工不良による振動に伴いボルトが緩んだ不具合が報告されている。

2.8.5 損傷による安全機能への影響

ブラケットのライザ管への溶接部 (BR-1) の破断を仮定すると、ライザ管とアダプタ間の水平方向支持の機能に剛性低下の影響が現れジェットポンプ全体の振動を増大させ、ライザブレース等のほかのジェットポンプ部品の振動に伴う損傷をもたらす可能性は否定できない。しかしながら、溶接部 (BR-1) はライザ管の全周に亘る溶接ではなく SCC がライザ管の全周破断に結びつくことは無

いため、後流のライザ管～インレットミキサが上昇しディフューザから分離することはなく、安全機能への影響は少ないと考えられる。

同様にウエッジブラケットのアダプタとの溶接部（BR-2）の破断を仮定するとウエッジの据付位置が不安定になりウエッジが外れるとライザ管とアダプタ間の水平方向支持の機能が阻害され、ジェットポンプ全体の振動を増大させ、ライザブレース等のほかのジェットポンプ部品の振動による損傷をもたらす可能性は否定できない。しかしながら、溶接部（BR-2）についても、アダプタの全周に亘る溶接ではなく SCC がアダプタの全周破断に結びつくことは無いため、安全機能への影響は少ないと考えられる。

また、ジェットポンプの振動に伴い生じる位置決めボルト、ウエッジボルト、ウエッジの点検部位（BR-3, BR-4, BR-5）の摩耗により、ライザ管とアダプタ間の水平方向支持部に隙間が生じ振動防止機能を低下させ、ジェットポンプ全体の振動を増大させ、ライザブレース等のほかのジェットポンプ部品の振動による損傷をもたらす可能性は否定できない。

一方、ガイドは、インレットミキサ取付け時にのみブラケットの開口部にアダプタ部を通しやすくするためのガイドであり、通常時において荷重もなく、安全機能にも影響しない。

2.8.6 点検方針

溶接部（BR-1, BR-2）について、溶接部の破断はジェットポンプの振動を増大させ、最終的に事故後の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能に影響を与える部品へ波及する可能性は否定できない。

想定される劣化事象として溶接部（BR-1, BR-2）については、溶接部（BR-1）のライザ管側がステンレス鋼であり SCC 発生の可能性がある。溶接部（BR-2）はステンレス鋼同士であり SCC 発生の可能性はない。また、運転経験からは、溶接部（BR-1, BR-2）共に国内及び米国の損傷事例の報告は無く、損傷の可能性は極めて低いと考えられる。

以上より、溶接部（BR-1）については、損傷の可能性は極めて低いと考えられるが SCC が発生する可能性は有ると考え、SCC の検出に適した MVT-1 を点検手法とした。溶接部（BR-1）の SCC はライザ管の全周破断に至ることはないと考えられるが、破断に振動増加で他の部位での疲労損傷への波及の可能性は否定できないことから、点検間隔は、ジェットポンプビームの点検に合わせて、初回 10 年、点検間隔は 10 年間隔で実施するのとし、取得した点検実績データの蓄積を継続し、損傷に対する知見の拡充を図るものとする。

一方、溶接部（BR-2）については、双方の材質はステンレス鋼であり、SCC が発生する可能性は無いものと考えられることから、個別点検としての点検は不要と考え、一般点検のみとする。

位置決めボルト及びウエッジボルトの BR-3, BR-4 については、ジェットポンプの振動が周り止め溶接部の割れ及びボルトの緩み、ボルトの摩耗として観察されることから、点検手法を VT-3 とする。同様にウエッジの BR-5 は楔の接触面の摩耗に着目し、点検手法は VT-3 とする。

BR-3～BR-5 に関しては、過去の点検結果から摩耗の進行は遅く安全機能に影響する損傷に至るには時間を要すると判断できることから、ジェットポンプビームの点検に合わせて、初回 10 年、点検間隔は 10 年間隔で点検するものとし、摩耗の進行の監視を継続するものとする。

点検部位 BR-1～BR-5 に適用する点検間隔・手法を表 2.9.2 に示す。

表 2.9.2 ブラケットの点検間隔・手法

点検部位		点検手法	上段：初回点検時期／個所 下段：再点検時の点検周期／個所
BR-1	ライザ管とブラケットの溶接部	MVT-1	運転開始後実運転年数 10 年以内／全箇所 実運転年数 10 年に 1 回／全箇所
BR-3	位置決めボルト	VT-3	運転開始後実運転年数 10 年以内／全箇所 実運転年数 10 年に 1 回／全箇所
BR-4	ウエッジボルト	VT-3	運転開始後実運転年数 10 年以内／全箇所 実運転年数 10 年に 1 回／全箇所
BR-5	ウエッジ	VT-3	運転開始後実運転年数 10 年以内／全箇所 実運転年数 10 年に 1 回／全箇所

2.9 ジェットポンプ計測用配管

2.9.1 機能

ジェットポンプ計測用配管は、ジェットポンプのディフューザ内の差圧を測定するため、ジェットポンプから、炉外に接続された管であり、ジェットポンプの流量を計測する機能を持つ。

計測用配管は、すべてのジェットポンプに設置されている。

2.9.2 形状・材質

計測用配管は小計管で構成されており、ディフューザにサポートにより取り付けられている。これらの材質はいずれもステンレス鋼である。

ジェットポンプ計測用配管の形状を図 2.9.1 に示す。ジェットポンプ計測用配管の材質を表 2.9.1 に示す。

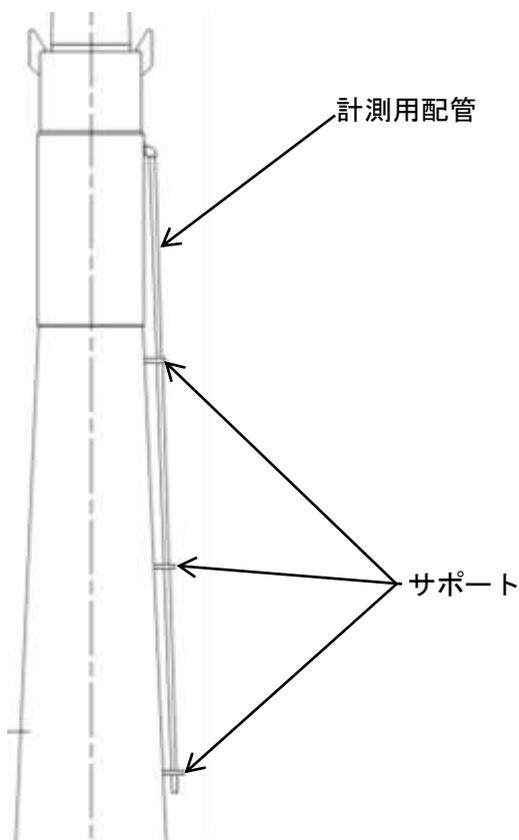


図 2.9.1 ジェットポンプ計測用配管の形状

表 2.9.1 ジェットポンプ計測用配管材質

形状	部品	材質
図 2.9.1	計測用配管	ステンレス鋼
	サポート	ステンレス鋼

2.9.3 想定される劣化事象

計測用配管の想定される劣化事象としては、振動による疲労破壊が想定される。また、材質がステンレス鋼であることから SCC 発生の可能性がある。

2.9.4 国内外の運転経験

計測用配管の損傷は、国内外で多数経験している。国内では、損傷事例が 6 例報告されている。これらの経験から、計測用配管の固有振動数と、加震源となる特定の周波数成分を持っている再循環ポンプのベーンパッシング周波数の共振が主な原因の一つであると考えられており、追加のクランプを設置し、共振周波数をシフトする等の対策が講じられている。

2.9.5 損傷による安全機能への影響

計測用配管の故障は、通常運転時のジェットポンプ内の流速の測定に直接影響する。しかしながら、計測用配管の故障は、事故後の水位モニタリングの圧力測定に影響を与えない。通常運転中の故障は、影響を受けたジェットポンプの流量の喪失によって直ちに検出可能であり、安全な停止は十分にできる。以上より、事故時の炉心冠水と長期冷却の維持機能及び低圧での注水機能の安全機能への影響はない。

2.9.6 点検方針

計測用配管溶接部は、SCC 発生及び疲労破壊の可能性があるが、安全機能に影響を及ぼさない。また、損傷があった場合には、検出差圧に変動が生じるため、運転中の検知が可能であり、安全な停止は十分にできるものとする。以上より、個別点検としての点検は不要と考えられ、一般点検のみとする。

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) 「BWRVIP-266:BWR Vessel and Internals Project Technical Bases for Revision of the BWRVIP-41 Jet Pump Inspection Program」

改訂経緯

- 平成 14 年 3 月 初版発行
- 平成 24 年 3 月 第 2 版改訂発行
未点検範囲の欠陥想定法の検討を加えた結果を付録 N として追加し，解説 3-5 の未点検範囲の取扱いに関する記述を見直した。
- 平成 30 年 7 月 第 3 版改訂発行
- ・ 廃炉となる比較的初期のプラントの情報削除を反映し，全体を見直した。
 - ・ 解説 1-2 にガイドライン適用にあたっての留意事項を記載した。
 - ・ 有意な劣化モード，運転経験，最新知見に基づいた点検方針を示した付録 N を追加した。これに伴い，本文の構成を見直した。

炉内構造物点検評価ガイドライン [ジェットポンプ] の概要

1. 基本的考え方

原子炉安全性の確保を大前提として、ジェットポンプに要求される機能を維持できるような合理的な点検範囲、点検周期を規定する。

- ① 経年変化事象：応力腐食割れ及び摩耗
- ② ジェットポンプに要求される安全機能：
炉心再冠水機能及び低圧注水機能（一部のプラント）
- ③ 対象材料：
オーステナイト系ステンレス鋼溶接部、182 合金・82 合金溶接部及び
ニッケル基合金 X750

2. 点検対象部位 (図 1)

- ・ライザ管・インレットミキサ、ディフューザの溶接部
- ・ジェットポンプビーム①
- ・ライザブレース、ブラケット②位置決めボルト、③ウエッジ、④ライザブレースのヨークとリーフの溶接部、⑤ヨークとライザ管の溶接部、⑥ライザブレースと RPV パッドの溶接部、⑦ブラケットとライザ管の溶接部

3. 点検方法

- (1) 目視試験を主体として、必要に応じて超音波探傷試験、渦流探傷試験を実施する。
- (2) 溶接部に対する目視試験は、1 mil (0.025mm) 幅のワイヤの識別が可能な条件 (MVT-1) で実施する。ジェットポンプビーム他の機械締結部品に対する目視試験は、VT-3 を実施する。
- (3) 超音波探傷試験は、JEAC 4207 に準拠して実施する。
- (4) 渦流探傷試験は、JEAG 4217 を準拠して実施する。

4. 点検範囲及び点検周期の考え方

- (1) ライザ管・インレットミキサ、ディフューザの溶接部
 - ・ 許容残存長さ（安全機能を維持するために必要な健全な溶接部の長さ）を評価する。(図 2)
 - ・ 欠陥がある場合にはその欠陥の進展を、欠陥がない場合には初期欠陥とその進展を仮定し、次回点検時における健全な溶接部の長さを評価する。(図 3)

これが許容残存長さよりも大きくなるように次回点検時期及び点検必要範囲を設定して、点検を実施する。許容残存長さを確保できない場合は、補修等の措置を講じる。(図 4)

(2) ジェットポンプビーム

点検可能な範囲の目視点検(①:MVT-1)を実施し、異常がない場合には、実運転時間で 10 年までに次回点検を実施する。異常が発見された場合には、技術的根拠のある詳細評価を実施して点検周期を設定するか、補修等の措置を講じる。(図 5)

(3) ライザブレース、ブラケット

点検可能な範囲の目視点検 (②,③:VT-3、④~⑦:MVT-1) を実施し、異常がない場合には、実運転時間で 10 年までに次回点検を実施する。異常が発見された場合には、技術的根拠のある詳細評価を実施して点検周期を設定するか、補修等の措置を講じる。(図 5)

5. 初回点検時期

- (1) ライザ管・インレットミキサ、ディフューザの溶接部
SUS304 溶接部は供用開始後実運転時間で 16 年を経過するまでに、SUS316L 溶接部は暦年で 30 年を経過するまでに実施する。
- (2) ジェットポンプビーム、ライザブレース、ブラケット
供用開始後実運転時間で 10 年を経過するまでに実施する。

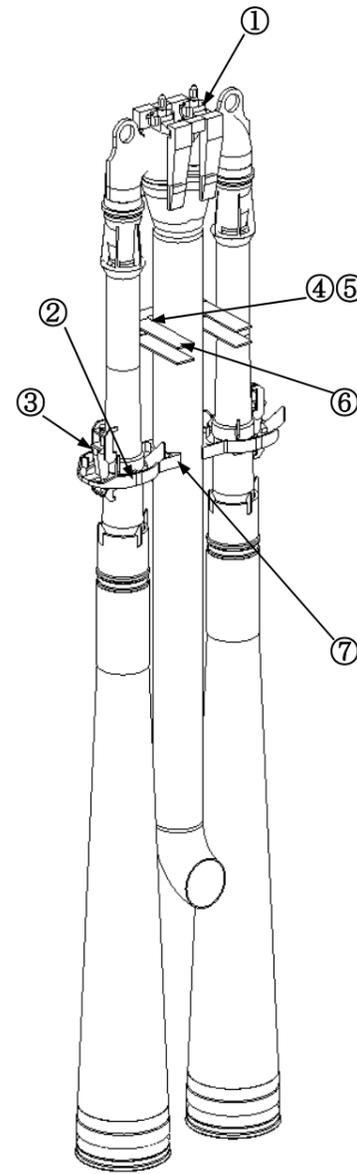


図 1 点検対象部位

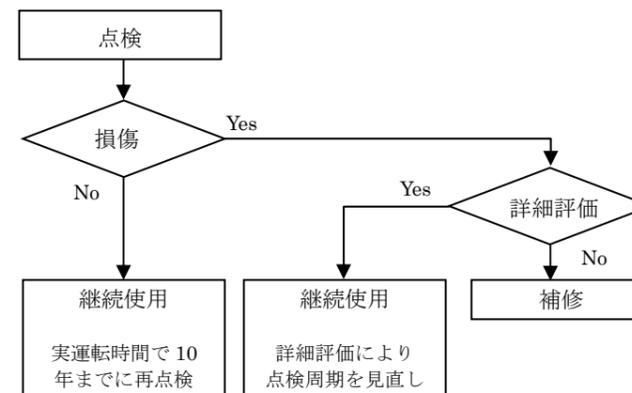


図 5 ジェットポンプビーム、ライザブレース、ブラケットの点検フロー

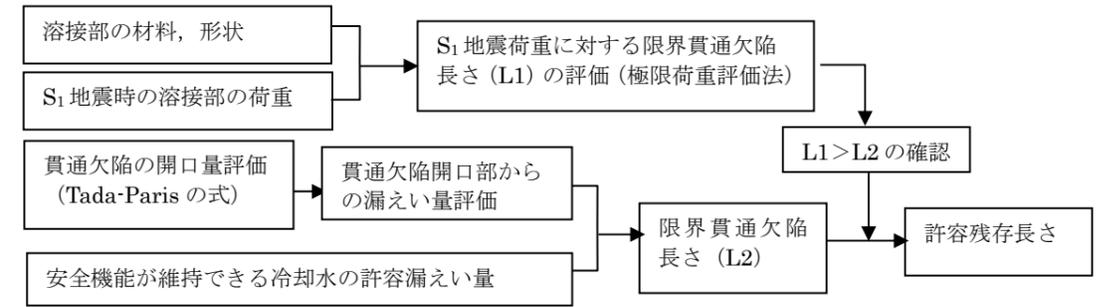


図 2 周方向溶接部の許容残存長さの評価フロー

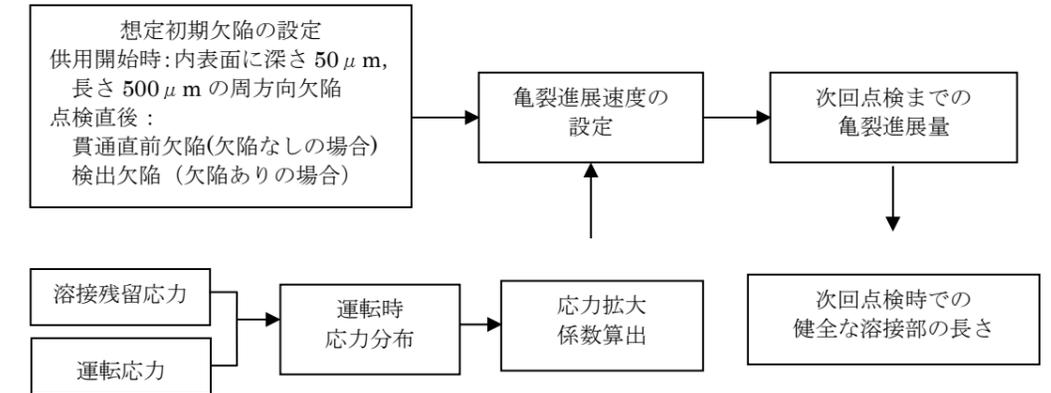


図 3 亀裂進展評価フロー

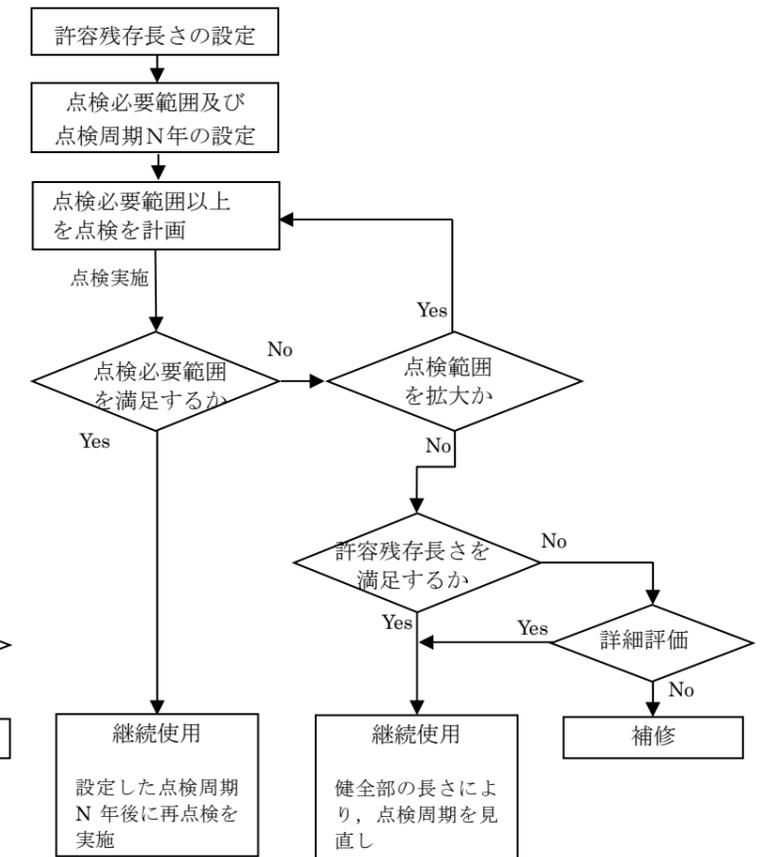


図 4 ライザ管・インレットミキサ、ディフューザ溶接部の点検フロー

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン
[ジェットポンプ]
(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，2018

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。