

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン  
[ジェットポンプ]  
(第2版)

平成24年 3月

一般社団法人 日本原子力技術協会

## 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、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会が、(社)火力原子力発電技術協会に設置され、これまでに各種のガイドラインを発行してまいりました。平成19年より本検討会は、日本原子力技術協会に継承され、検討を継続しております。

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おります。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24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 野本敏治



## 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 24 年 3 月現在, 順不同, 敬称略) rev.1

委員長	野本 敏治	東京大学名誉教授
副委員長	関村 直人	東京大学教授
委員	安藤 柱	横浜国立大学名誉教授
委員	安藤 博	元(財)発電設備技術検査協会
委員	辻川 茂男	東京大学名誉教授
委員	西本 和俊	大阪大学教授
委員	橋爪 秀利	東北大学教授
委員	望月 正人	大阪大学教授
幹事	村井 荘太郎	東京電力(株)
幹事	平野 伸朗	関西電力(株)
幹事	堂崎 浩二	日本原子力発電(株)
委員	舟根 俊一	北海道電力(株)
委員	飯田 純	東北電力(株)
委員	松浦 英生	東京電力(株)
委員	鈴木 俊一	東京電力(株)
委員	市川 義浩	中部電力(株)
委員	手操 久吾	北陸電力(株)
委員	野村 友典	関西電力(株)
委員	谷 浦 亘	中国電力(株)
委員	黒川 肇一	四国電力(株)
委員	中牟田 康	九州電力(株)
委員	江口 藤敏	日本原子力発電(株)
委員	寺門 剛	日本原子力発電(株)
委員	鞍本 貞之	電源開発(株)
委員	伊東 敬	日立GEニュークリア・エナジー(株)
委員	元良 裕一	(株)東芝
委員	小山 幸司	三菱重工業(株)
委員	杉江 保彰	日本原子力技術協会
参加者	菊池 正明	(独)原子力安全基盤機構
参加者	小澤 正義	(独)原子力安全基盤機構
事務局	関 弘明	日本原子力技術協会

## ガイドラインの責任範囲

このガイドラインは、一般社団法人 日本原子力技術協会 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、常に最新知見が反映されるよう見直しを行うという基本方針のもとに、本ガイドラインに関する専門知識と関心を持つ委員により中立、公平、公正を原則とした運営規約に従う審議を経て、制定されたものである。また、ガイドライン検討会は、ガイドラインが許認可にも適用可能となるよう別途、透明性、公開性、公平性のある手続きに従って学協会規格に取り入れられるよう働きかける。なお、ここで「最新知見」とは、その時点で工学的に公知化されていて、ガイドライン及びその「解説」「参考資料」に示し得る範囲の知見であり、「工学的に公知化されている」とは、その分野の専門知識を有する者により認められた工学的な客観事実のことである。

本ガイドラインは各規程事項の技術的根拠を明確にしており、その示した根拠の範囲内においてガイドライン検討会はガイドラインの記載内容に対する説明責任を持つが、これ以外の本ガイドラインを使用することによって生じる問題などに対して一切の責任を持たない。また、この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。

なお、本ガイドラインの発行をもって、この規格が我が国の規制当局によって承認されたと考えてはならない。

# 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
1.2.1 適用範囲	1
1.2.2 適用時期	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	2
第3章 点検及び評価	4
3.1 点検方法	4
3.1.1 点検手法	4
3.1.2 初回点検	4
3.1.3 再点検	5
3.2 点検周期	5
3.3 評価	6
3.3.1 管の周溶接部	6
3.3.2 その他の部位	6
3.4 点検フロー	7
解 説	
解説 1-1 「ガイドライン制定の目的」	10
解説 2-1 「ジェットポンプの機能」	10
解説 2-2 「ジェットポンプに想定される経年変化事象」	13
解説 2-3 「耐応力腐食割れ性」	13
解説 2-4 「点検対象」	13
解説 3-1 「渦流探傷試験」	14
解説 3-2 「初回点検」	14

解説 3-3	「健全部の長さ と 許容残存長さ の評価」	16
解説 3-4	「点検方法」	16
解説 3-5	「き裂進展評価」	17
解説 3-6	「再点検周期の設定」	18
解説 3-7	「SCC 予防保全技術」	18
解説 3-8	「補修技術」	19

## 付 録

付録 A	ジェットポンプの機能と構造
付録 B	オーステナイト系ステンレス鋼，インコネル溶接金属及びインコネル X750 の SCC 関連データ
付録 C	ジェットポンプの点検における接近性
付録 D	SCC き裂進展速度式
付録 E	溶接部の残留応力
付録 F	ジェットポンプの管/管溶接部のき裂進展評価
付録 G	ローアリング/シュラウドサポートプレート溶接部の SCC き裂進展評価
付録 H	ジェットポンプ溶接部の許容欠陥評価
付録 I	管の溶接部の初回点検時期
付録 J	炉心冷却水の漏えい量評価
付録 K	国内プラントのジェットポンプビームの使用実績
付録 L	想定する周方向初期き裂の数等の検討
付録 M	再点検周期の検討例
付録 N	未点検範囲の欠陥想定法

## 参 考 資 料

- 参考資料 1 用語一覧表
- 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」の考え方
- 参考資料 3 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、炉内構造物に要求される安全機能が維持されていることを確認するための、合理的な点検のあり方を示すことを目的とする。（解説 1-1）

### 1. 2 適用

#### 1. 2. 1 適用範囲

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。

#### 1. 2. 2 適用時期

本ガイドラインの適用時期は、商業運転開始後の供用期間中とする。

### 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「健全部の長さ」

## 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) ジェットポンプの機能のうち、原子炉の安全性に係わる機能を維持する上で重要な部位を点検対象として選定する。

(4) 材料としては、国内プラントで用いられているステンレス鋳鋼以外のすべての材料を対象とする。

(解説 2-3)

## 2. 2 点検対象部位

ステンレス鋳鋼同士の溶接部を除くすべての管の周溶接部，ジェットポンプベーム，ライザブレース，ウェッジ及び位置決めボルト他，図 2.2-1 の代表プラントの例に示す部位を点検対象とする。(解説 2-4)

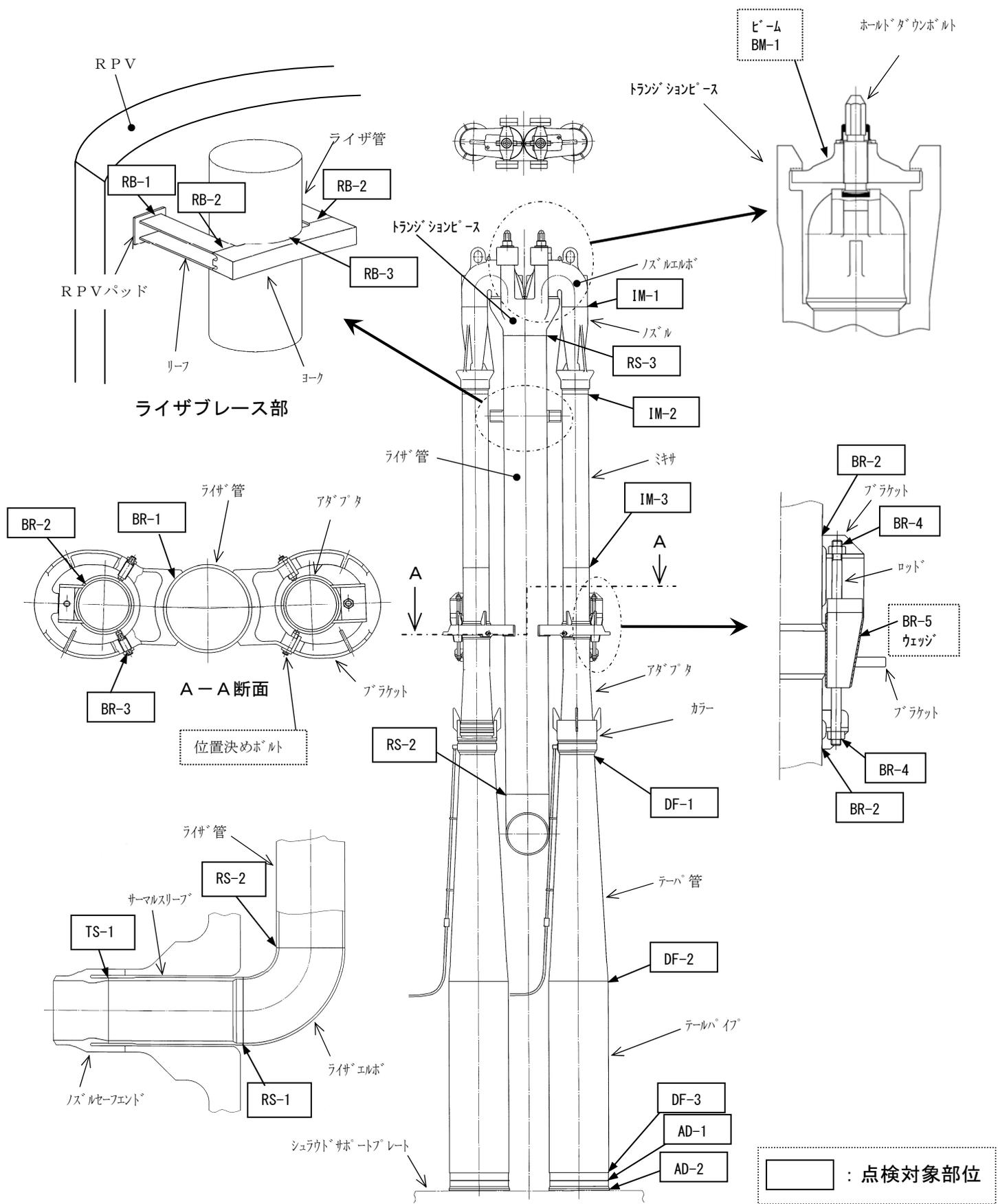


図 2.2-1 ジェットポンプの点検対象部位

## 第3章 点検及び評価

### 3. 1 点検方法

#### 3. 1. 1 点検手法

##### (1) 一般事項

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

##### (2) 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、芯合わせ不良、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。

##### (3) 超音波探傷試験 (UT)

超音波探傷試験は、JEAG 4207-2000「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指針」に従って実施するか、これに類する手法等を用いて実施してもよい。

##### (4) 渦流探傷試験 (ET)

渦流探傷試験は、JEAG 4208-1996「軽水型原子力発電所蒸気発生器伝熱管の供用期間中検査における渦流探傷試験指針」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)

#### 3. 1. 2 初回点検

初回点検は、以下に示す時期に実施する。点検範囲は、第2章に示す点検対象範囲のうち接近可能な範囲とする。

なお、技術的に根拠がある場合は、点検時期及び範囲を別途設定することができる。

##### (1) SUS304 製の管の周溶接部

SUS304 製の管の周溶接部は、供用開始後実運転時間で 16 年を経過するまでに初回点検を実施する。(解説 3-2)

##### (2) 低炭素ステンレス鋼製の管の周溶接部

低炭素ステンレス鋼製の管の周溶接部は、供用開始後暦年で 30 年を経過するまでに初回点検を実施する。(解説 3-2)

### (3) ジェットポンプビーム他

ジェットポンプビーム、ウエッジ、位置決めボルト、ライザブレースのヨークとリーフの溶接部、ヨークとライザ管の溶接部、ライザブレースと RPV パッドの溶接部、ブラケットとライザ管の溶接部は、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 3-2)

## 3. 1. 3 再点検

### (1) 基本的考え方

機能上影響のある部位に欠陥を想定し、き裂進展による健全部の長さの減少を考慮した次回点検時の健全部の長さが許容残存長さを満足し、次回点検までの間に万一 LOCA が発生した場合にも必要な機能が確保できるように、点検時期を定める。(解説 3-3)

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。

### (2) 点検必要範囲及び点検方法

各部位の点検方法及び点検必要範囲を表 3.1-1 に示す。(解説 3-4)

表 3.1-1 各部位の点検方法及び点検必要範囲

点検対象部位	試験方法	点検必要範囲
・管の周溶接部（ステンレス鋳鋼同士の溶接部を除く）	MVT-1 <sup>(1)</sup>	各周溶接線長の A% <sup>(2)</sup>
・ライザブレースと RPV パッドの溶接部 ・ライザブレースのヨークとリーフの溶接部 ・ライザブレースのヨークとライザ管の溶接部 ・ブラケットとライザ管の溶接部	MVT-1 <sup>(1)</sup>	接近可能な範囲
・ジェットポンプビーム ・ウエッジ ・位置決めボルト	VT-3 <sup>(1)</sup>	接近可能な範囲

注：(1)必要に応じて他の試験方法による点検を実施してよい。

(2)点検必要範囲 A%は、3.2 項の点検周期に対応して設定する。

## 3. 2 点検周期

### a. 管の周溶接部（ステンレス鋳鋼同士の溶接部を除く。）

再点検は、欠陥の進展による健全部の長さの減少を想定し、再点検時の健全部の長さが許容残存長さ以上となるように点検時期を決定して実施する。(解説 3-5, 3-6)

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。

b. ジェットポンプビーム

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 3-2)

c. ウエッジ、位置決めボルト、ライザブレースのヨークとリーフの溶接部、ヨークとライザ管の溶接部、ライザブレースと RPV パッドの溶接部、ブラケットとライザ管の溶接部

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 3-2)

### 3. 3 評価

以下の判定基準により点検の結果を評価する。

#### 3. 3. 1 管の周溶接部

(1) 点検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。

点検健全部長さとは、当該点検において異常が確認されなかった溶接線の長さをいい、点検必要範囲とは、次回点検の時点において許容残存長さ以上の健全部の長さを確保するために点検が必要な周溶接線の長さをいう。

(2) 点検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、点検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点検健全部長さが点検必要範囲未満の場合は、当該点検時の健全部の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、当該点検時の健全部の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 3-7, 8)

#### 3. 3. 2 その他の部位

(1) ジェットポンプビーム

- 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, ②項に適合しない場合には、補修等の措置を行う。

(2) ウエッジ, 位置決めボルト, ライザブレースのヨークとリーフの溶接部, ヨークとライザ管の溶接部, ライザブレースと RPV パッドの溶接部, ブラケットとライザ管の溶接部

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, ②項に適合しない場合には, 補修等の措置を行う。

### 3. 4 点検フロー

ジェットポンプの点検フローを図 3. 4-1, 2 に示す。

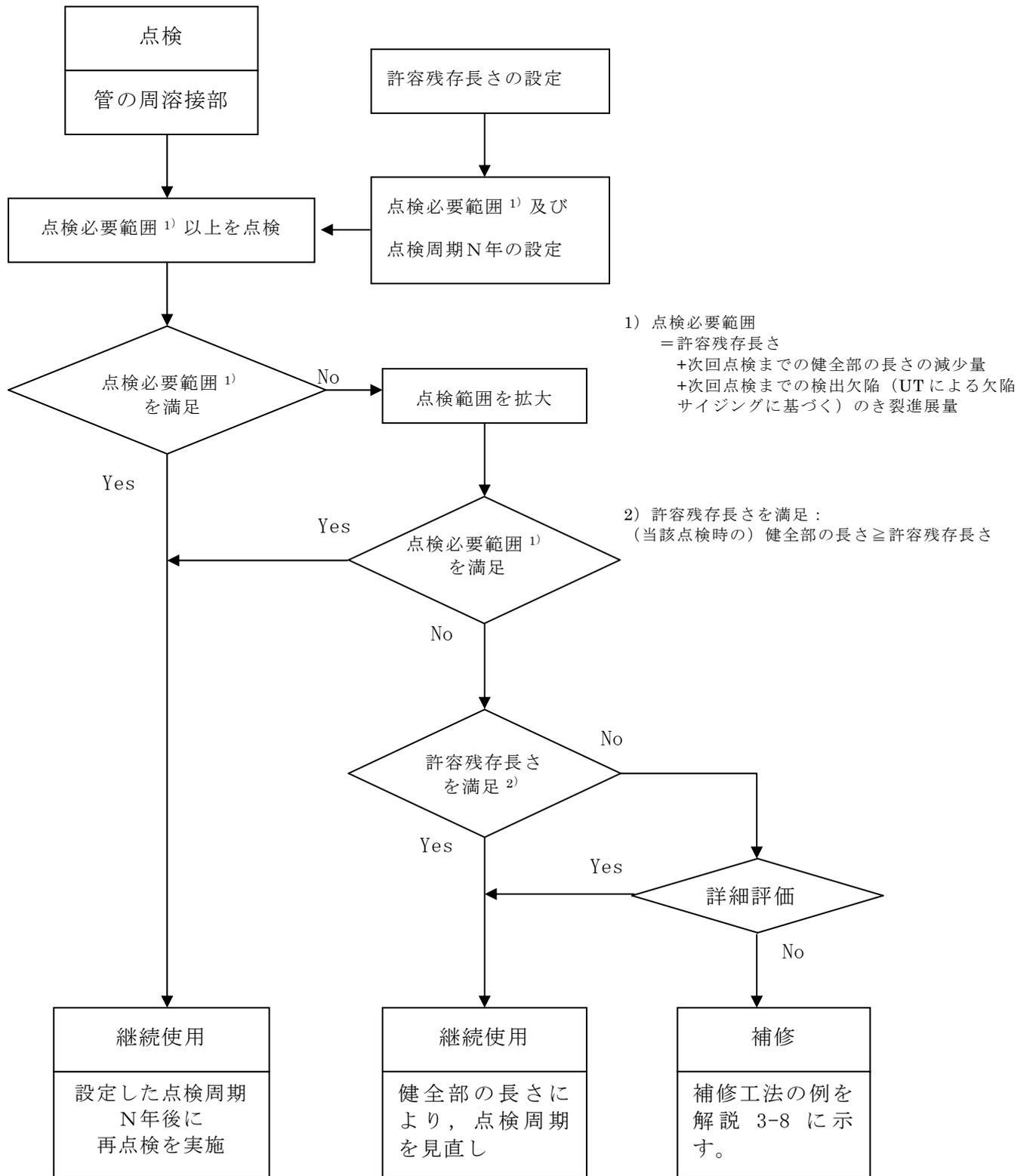


図 3.4-1 ジェットポンプの管の周溶接部の点検フロー

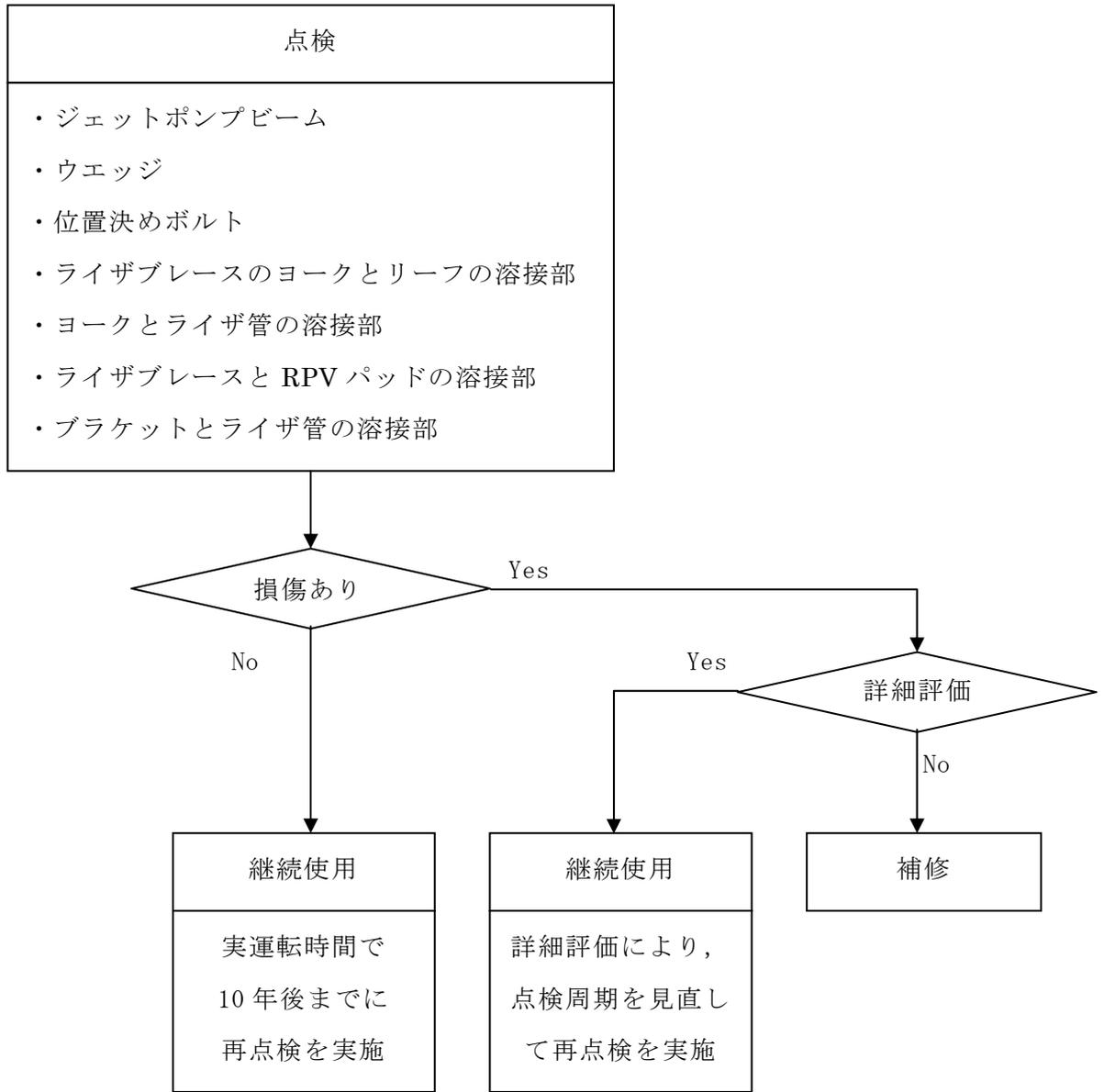


図 3.4-2 ジェットポンプのジェットポンプビーム他の点検フロー

### (解説 1-1) ガイドライン制定の目的

炉内構造物の点検では、構造上、点検装置の接近を制約する範囲が大きくなるため、従来から、最新の知見を随時点検技術開発に反映して、その向上に努めてきた。一方、近年、国内において、応力腐食割れに起因すると考えられるひびが、炉内構造物の様々な部位に散見されている。そのため、点検が広範囲に制約を受ける炉内構造物の健全性を確認する方法を考える上で、点検技術の向上に加え、包括的な点検のあり方を検討する必要性が高まってきている。

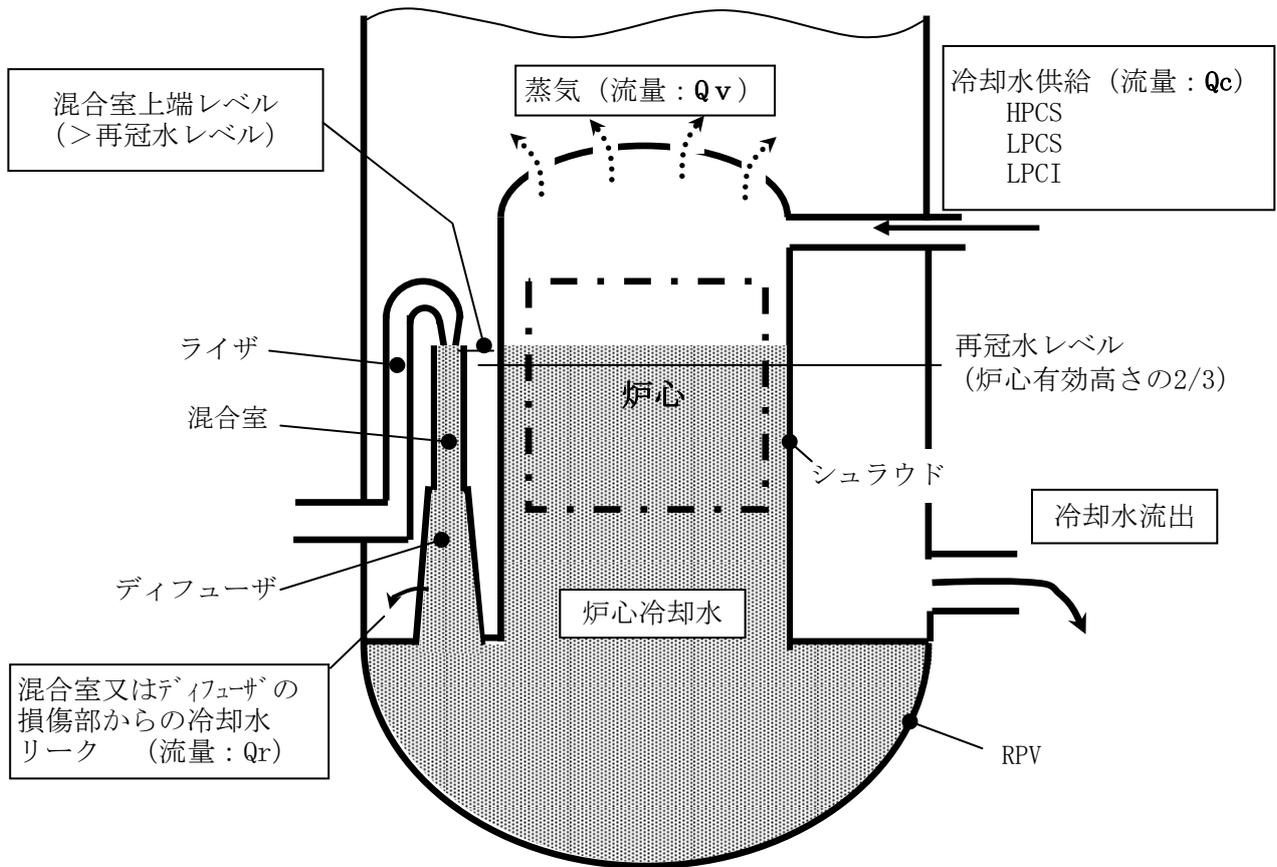
以上の状況を鑑み、本ガイドラインは、炉内構造物に要求される安全上重要な機能が維持されていることを確認するための、合理的な点検のあり方を示すことを目的とする。

### (解説 2-1) ジェットポンプの機能

ジェットポンプは、原子炉の安全性に係わる機能として、冷却材喪失事故（LOCA）時の炉心再冠水機能を有する。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欠陥が存在した状態で 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 2-2-2 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。

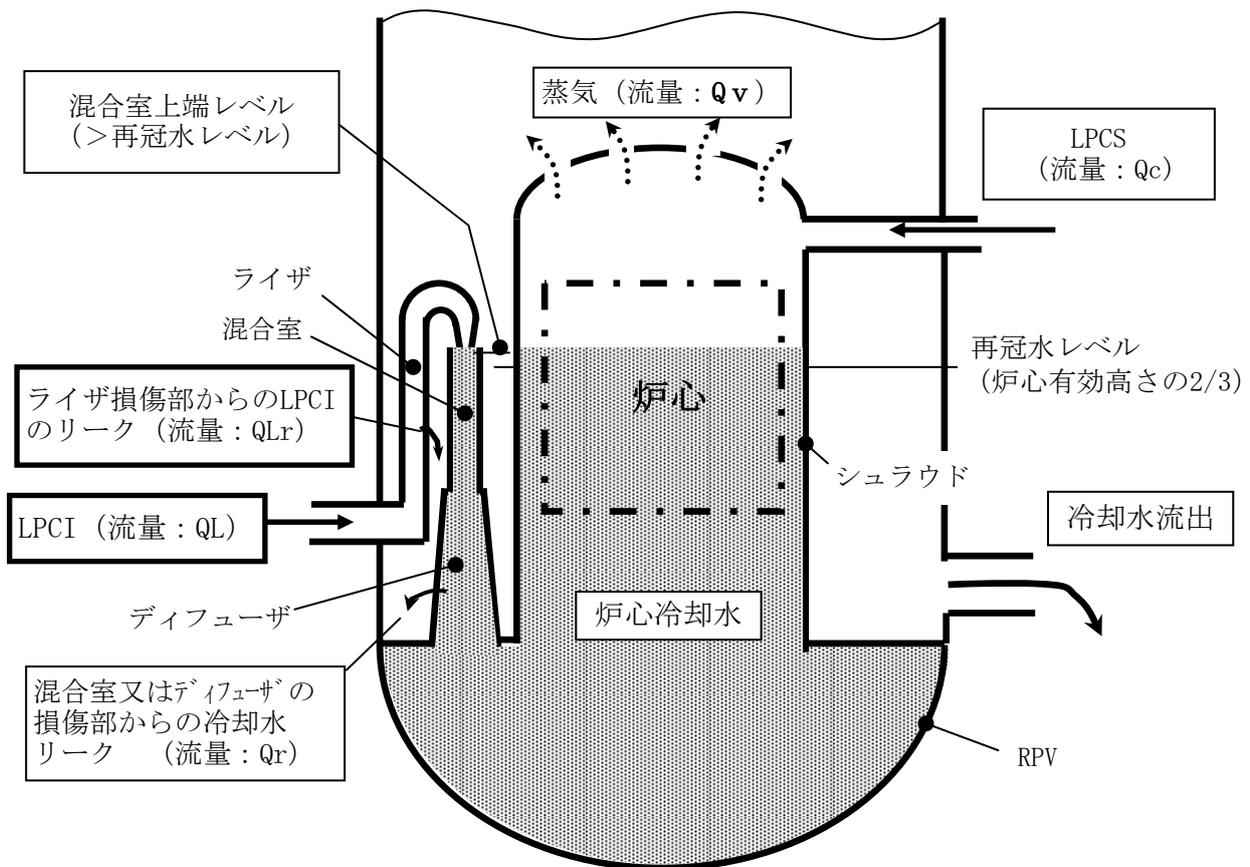


再冠水機能維持の条件：  
 $冷却水供給流量 (Q_c) - 蒸気流量 (Q_v) > 0 \rightarrow$  安全解析で確認済

冷却水供給量の設計裕度： $\Delta Q$   
 $=$ 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：  
 $冷却水供給流量の設計裕度 (\Delta Q) >$  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、溶接部の応力腐食割れ (SCC) を想定した。また、溶接部以外で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 (インコネル X750 製) の SCC, ウエッジ, 位置決めボルトでの振動による摩耗も経年変化事象として想定した。

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) 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) 耐応力腐食割れ性

ジェットポンプの材料としては、ステンレスと Ni 基合金が使用されている。

- ・ 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、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 0.03% 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、前者に比べて発生の可能性は小さい。
- ・ 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。
- ・ インコネル 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は、従来材に比べ応力腐食割れの発生の可能性が小さい。
- ・ インコネル 182 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 含有のインコネル 82 及び高 Nb 含有の改良インコネル 182 は、応力腐食割れが発生する可能性は小さい。

各材料の応力腐食割れ関連データを付録 B に示す。

### (解説 2-4) 点検対象

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、すべての管の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。

計測管及びそのサポートは、損傷しても炉心再冠水機能及び LPCI 機能に有意な影響を及ぼさないと考えられることから、点検対象外とした。

ディフューザのテーパ管には縦溶接線があるが、縦溶接線の損傷は構造維持に有意な影響を及ぼさないものと考えられること、また、万一貫通欠陥が生じても、周溶接部に比べ地震荷重等による欠陥開口幅が小さく冷却水の漏えい量も小さいと考えられることから、機能維持に有意な影響は及ぼさないものと考えられるため点検対象外とした。

構造的に接近が困難なサーマルスリーブと RPV ノズルの溶接部は、当該溶接部が万一破断してもサーマルスリーブはノズル内面に保持される構造であり、漏えい量はサーマルスリーブ外面とノズル内面の隙間により制限され、LPCI 機能に影響を及ぼすことはないものと考えられることから、点検対象外とした。

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 C に示す。

### （解説 3-1）渦流探傷試験

渦流探傷試験（ET）を適用する場合には、点検対象部位と電磁気的特性が同等な材料の校正試験片により、人工欠陥に対する検出感度を確認した手法を用いるものとする。試験装置及び機具等の要求仕様、試験の実施要領、並びに、信号の解析手法については、JEAC 4208「軽水型原子力発電所蒸気発生器伝熱管の供用期間中検査における渦流探傷試験指針」に準拠して、設定する。

### （解説 3-2）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以下の考え方により定めた。

#### （1）管の周溶接部

管の内面に想定した初期き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き裂の進展評価を実施。  
(付録D, E, F, G)
- b. LOCA 時の地震に対して構造維持が可能な限界き裂長さの評価 (付録H)
- 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 I)
- 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, き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 J)

代表プラントについてき裂進展評価を実施した結果, 鋭敏化 SUS304 鋼製の管の周溶接部では, 実運転時間で約 14 年を経過するとき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。

低炭素ステンレス鋼製の管の周溶接部では, 内面からのき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インコネル溶接部は, 供用開始から 80 年を経過してもき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 (インコネル 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。(付録 B)
- ・ 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 K)
- ・ 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, 実験室データにより 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) 位置決めボルト，ライザブレース等

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の摩耗による損傷事例が唯一 1 件あるのみであり，損傷ポテンシャルは低いものと考えられる。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 3-3) 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「健全部の長さ」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 H 参照)

#### (1) 荷重

$S_1$  地震荷重を考慮する。

#### (2) 想定する欠陥

周方向板厚貫通き裂を想定する。

#### (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き裂がある場合には，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 L 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 3-4) 点検方法

#### ・ 管の周溶接部及びその他の溶接部

SCC によるき裂が検知可能な MVT-1 により点検する。また，き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。

#### ・ ビーム，ウエッジ，位置決めボルト

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 3-5) き裂進展評価

周溶接部の SCC き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き裂（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) き裂進展速度式

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

（付録D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き裂（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による軸方向き裂は、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、周方向き裂を想定した。
- b. 周方向き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、管内面側に初期き裂を想定した。
- c. 初期き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き裂の数は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、き裂進展評価においては、供用開始時に初期き裂（深さ  $50\mu\text{m}$ 、長さ  $500\mu\text{m}$ ）を想定して、き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、板厚貫通後のき裂の周方向進展速度は、本ガイドラインで設定したき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、評価された周方向き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 き裂は 1 個であった。

同一溶接線上に複数の SCC き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、確認された複数のき裂は比較的接近した位置にあり、本評価で想定する初期き裂 1 個の板厚貫通時のき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き裂 1 個の板厚貫通時のき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き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。(付録 L)

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

(付録 L)

本ガイドラインで設定した想定初期き裂は、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 個の初期き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 3-6) 再点検周期の設定

管の周溶接部の再点検時期は、図 3.4-1 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 M)

- (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き裂が周方向に進展するものとして再点検時までのき裂進展量を評価する。
- (3) 点検で欠陥が発見された場合は、UT 等により欠陥の長さ／深さを同定してき裂進展評価を行う。
- (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/進展に関与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。(付録N)

### (解説 3-7) 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。
ピーニング	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き裂進展速度を求め、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 3-8) 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」に示すとおりである。以下に数例を示す。

- ・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

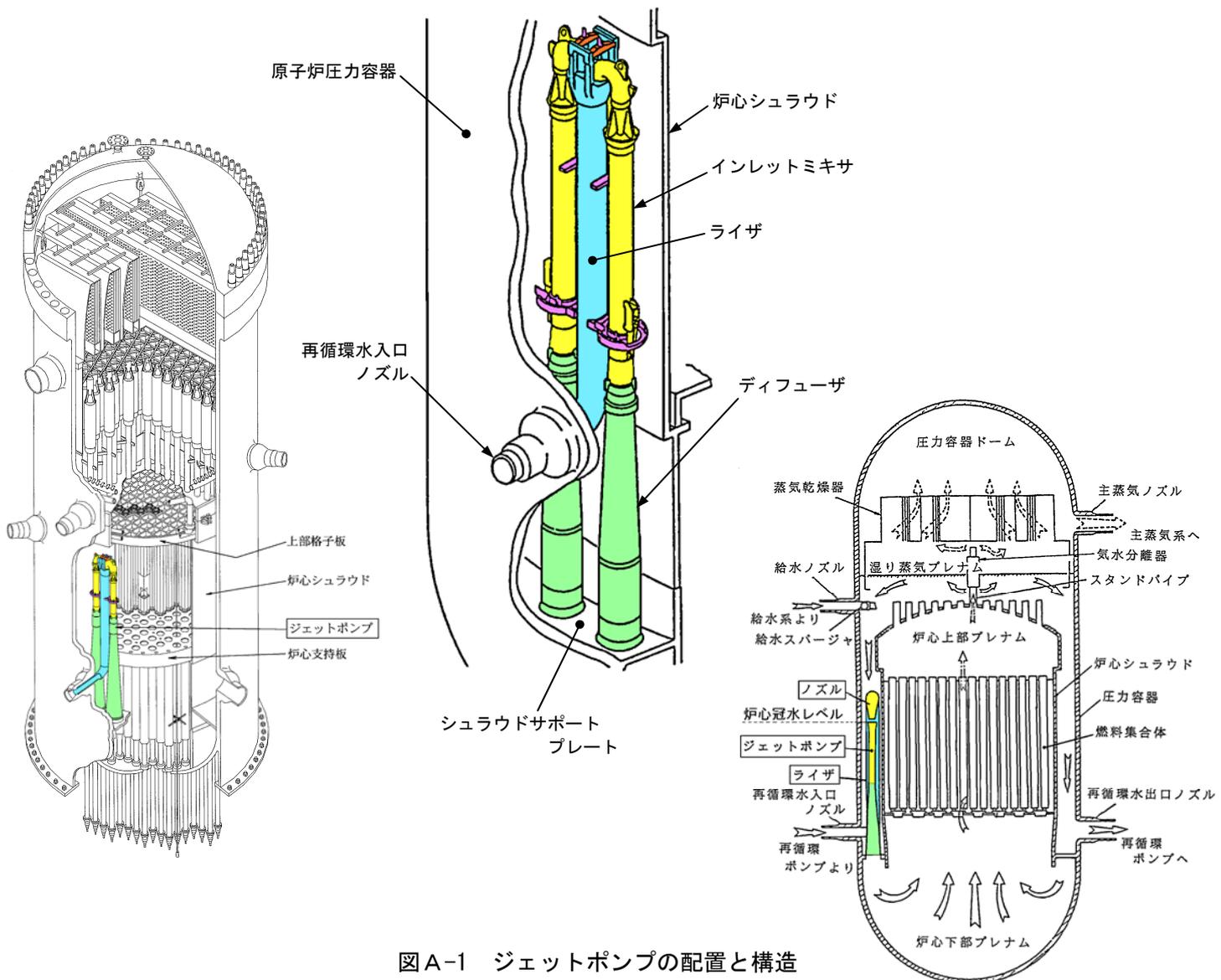
ジェットポンプは、原子炉圧力容器と炉心シュラウドとの間の環状部（アニュラス部）に設置され、再循環ポンプで昇圧された循環水をノズルから吹き出し、アニュラス部の循環水を吸引して両者を混合し、ディフューザから炉心下部プレナムへ供給するものである。

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

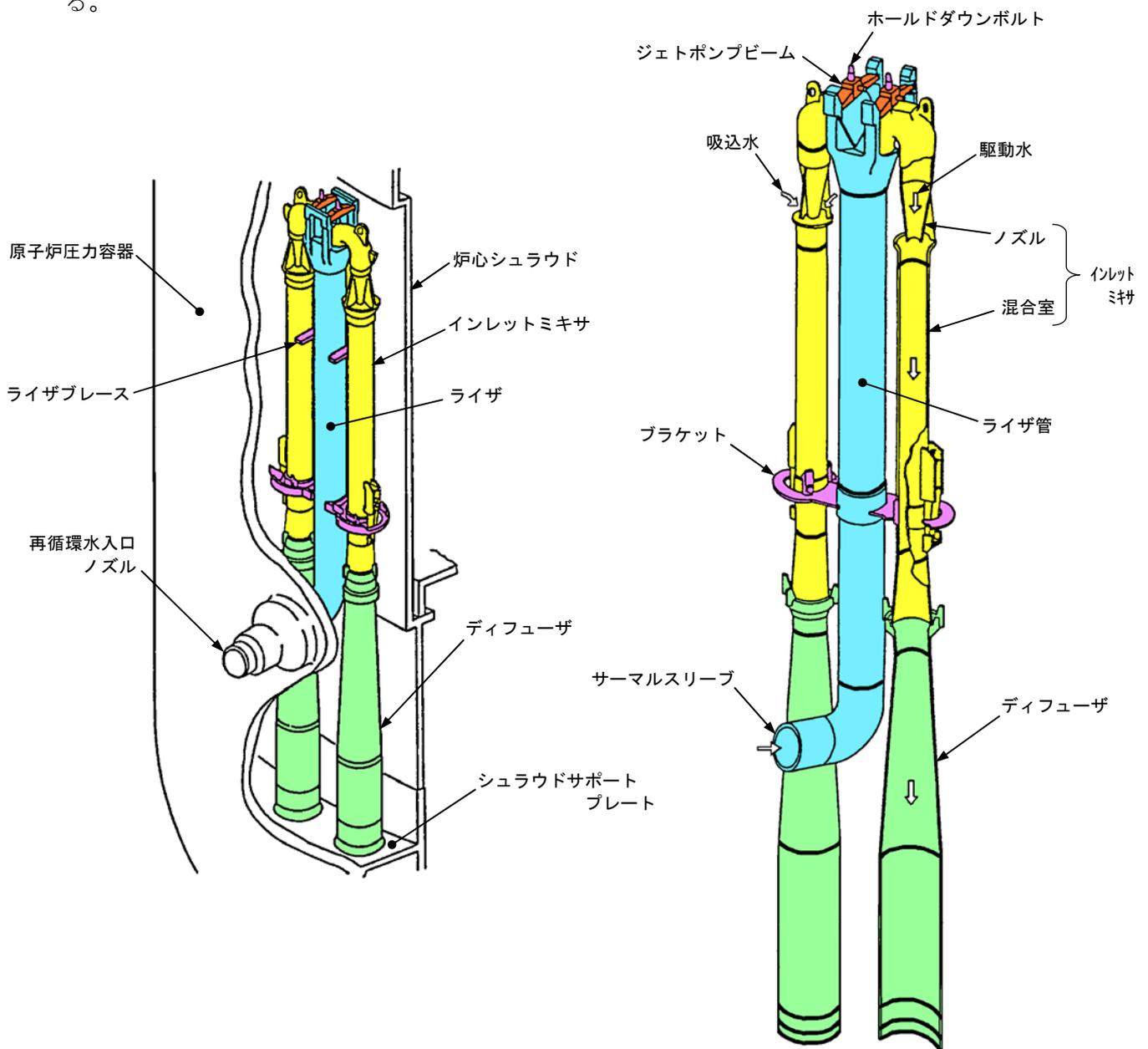
## (2) ジェットポンプの構造

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（ノズル、混合室）及びディフューザより構成される。

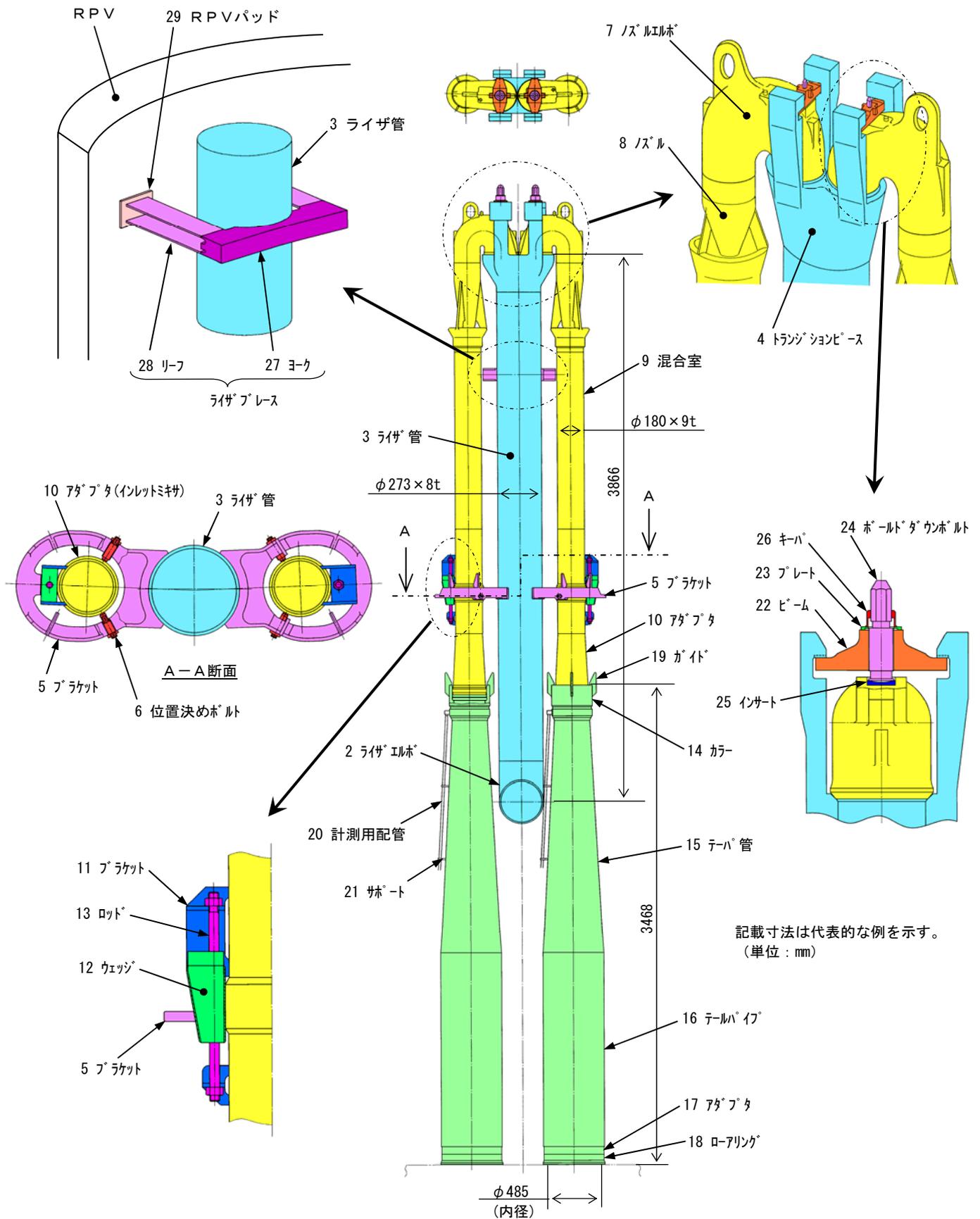
ディフューザの下端は、シュラウドサポートプレート上に溶接して組み立てられる。

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。

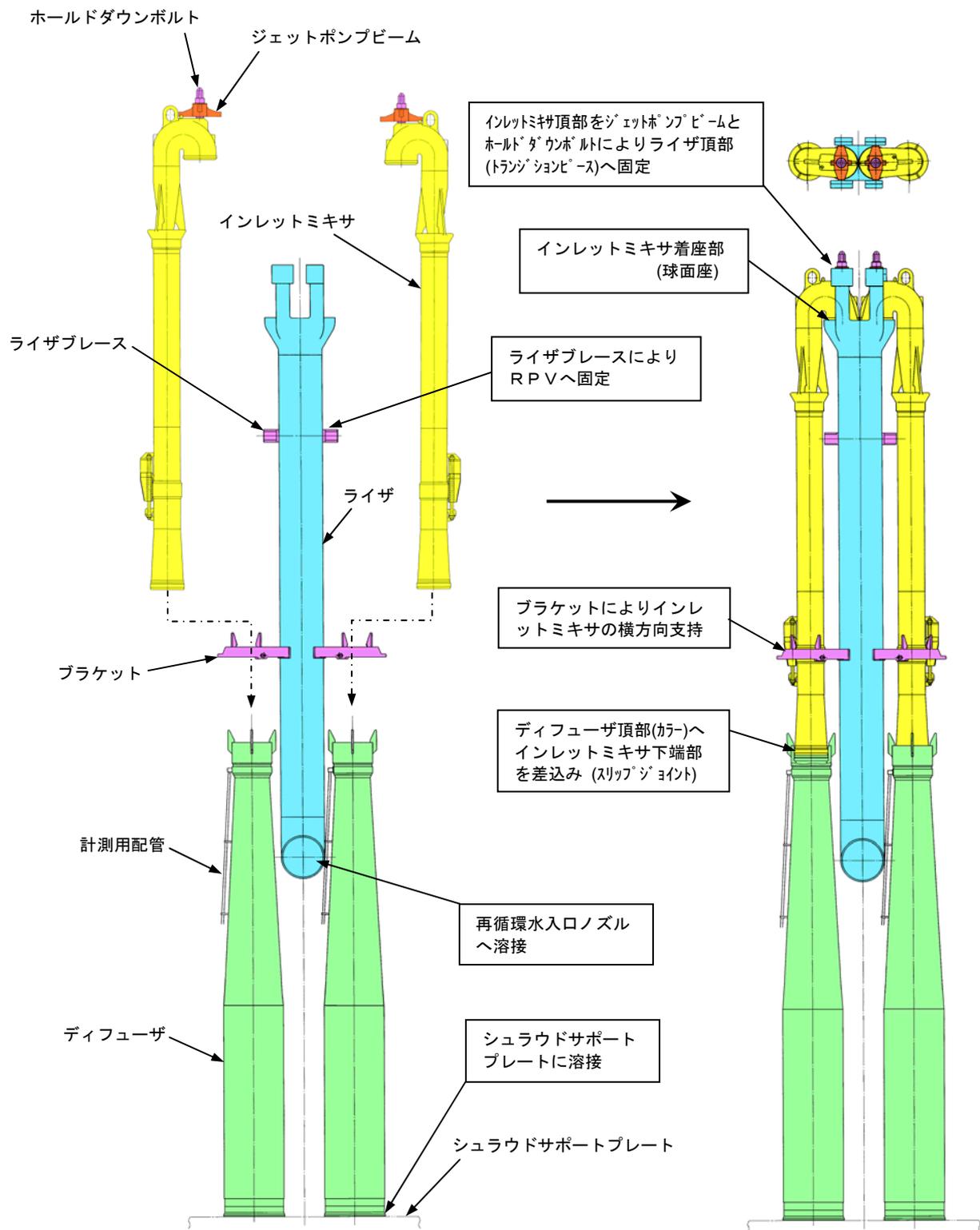
インレットミキサは取外し可能な構造となっており、下端をディフューザ上端に差込み、上端をライザ管上端の球面座にジェットポンプビームを介してホールダウンボルトにより押さえつけて固定する。インレットミキサはライザ管に固定してあるブラケットにより横方向を支持される。



図A-2 ジェットポンプの構造 (1)



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 オーステナイト系ステンレス鋼，インコネル溶接金属及び  
インコネル X750 の SCC 関連データ

1. ステンレス鋼

1. 1 炉内構造物に用いられているステンレス鋼は，主に 304 系及び 316 系のオーステナイト系ステンレス鋼である。当初は主に SUS304 が用いられていたが，現在では，耐 SCC 性の観点から，C 量を 0.03%以下に下げた低炭素ステンレス鋼（SUS304L 及び SUS316L）が用いられている。また C 量を下げたことによる強度低下を補うために，強度を必要とする部材については N を 0.1%程度添加した原子力用低炭素ステンレス鋼（原子力用 304 及び 316 ステンレス鋼）が用いられている。（表 B-1）

1. 2 10%しゅう酸エッチングによるミクロ組織は，鋭敏化 SUS304 ではみぞ状組織となっており，鋭敏化の兆候が確認されるが，低炭素ステンレス鋼（SUS304L 及び SUS316L）では段状組織であり，健全な組織となっている。（図 B-1）

1. 3 鋭敏化 SUS304 の SCC による粒界割れは，溶接入熱によるクロム炭化物の粒界析出による粒界近傍の Cr 欠乏に起因している。（図 B-2）

1. 4 鋭敏化 SUS304 の高温水中の SCC 発生までの時間は，炭素含有量との相関が見られる。285℃純水，溶存酸素濃度 8ppm 環境中，及び負荷荷重  $1.35\sigma_y$  の繰り返し台形波（一定保持時間=159 分）で，炭素含有量が異なる溶接継手付き 304 管（100A）は短時間で破断したが，低炭素ステンレス鋼（SUS304L 及び 316L）の溶接継手付き管は 3000 時間経過しても破断していない。（図 B-3）これより，低炭素ステンレス鋼（SUS304L、316L）は SUS304 に比べ数倍以上の SCC 発生裕度を有していることが示された。

1. 5 鋭敏化 SUS304 の高温水中の SCC 発生及び進展は，腐食電位との相関が見られる。（図 B-4）また，NWC 環境下（導電率  $< 0.2 \mu\text{S/cm}$ ，腐食電位  $\geq 150\text{mVSHE}$ ）及び HWC 環境下（導電率  $< 0.2 \mu\text{S/cm}$ ，腐食電位  $\leq -200\text{mVSHE}$ ）での低炭素ステンレス鋼（SUS304L 及び SUS316L）のき裂進展速度は，鋭敏化 SUS304 のそれよりも小さくなっている。（図 B-5）

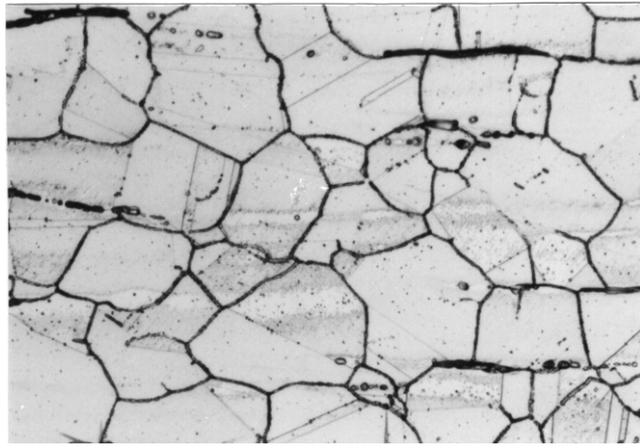
1. 6 SUS304 及び SUS316 ステンレス鋼の IASCC 感受性は，照射量が  $1 \times 10^{25}\text{n/m}^2$ （ $E > 1\text{MeV}$ ）を越えると顕著に増大している。（図 B-6）

表 B-1 炉内構造物に用いられる主なオーステナイト系ステンレス鋼の  
化学成分

鋼種	化 学 成 分 (重量%)														その他
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Mo	N	Cu	Al	Ti	Nb+Ta	
SUS 304	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	8.00 }	18.00 }	残	—	—	—	—	—	—	—
						10.50 }	20.00 }								
SUS 304 L	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	9.00 }	18.00 }	残	—	—	—	—	—	—	—
						13.00 }	20.00 }								
原子力用 304	≤0.02	≤0.75	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00 }	18.00 }	残	—	≤0.12	—	—	—	—	—
						10.50 }	20.00 }								C+N ≤0.13
SUS 316	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	10.00 }	16.00 }	残	2.00 }	—	—	—	—	—	—
						14.00 }	18.00 }		3.00 }						
SUS 316 L	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045	≤0.030	12.00 }	16.00 }	残	2.00 }	—	—	—	—	—	—
						15.00 }	18.00 }		3.00 }						
原子力用 316	≤0.02	≤0.75	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00 }	16.00 }	残	2.00 }	≤0.12	—	—	—	—	—
						14.00 }	18.00 }		3.00 }						C+N ≤0.13

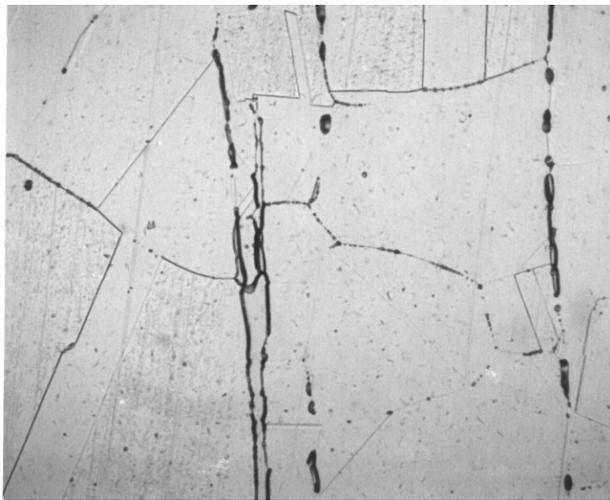
(出典)

伊藤、矢島, 「BWR 型機器材料」, 火力原子力発電, Vol. 34, No. 10, pp. 113-126 (1983).



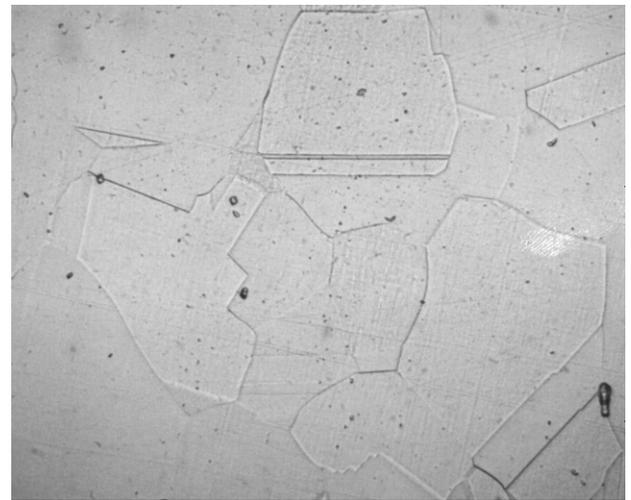
50  $\mu$  m

(a) SUS304  
(炭素含有量 0.06%)



50  $\mu$  m

(b) SUS304L  
(炭素含有量 0.017%)

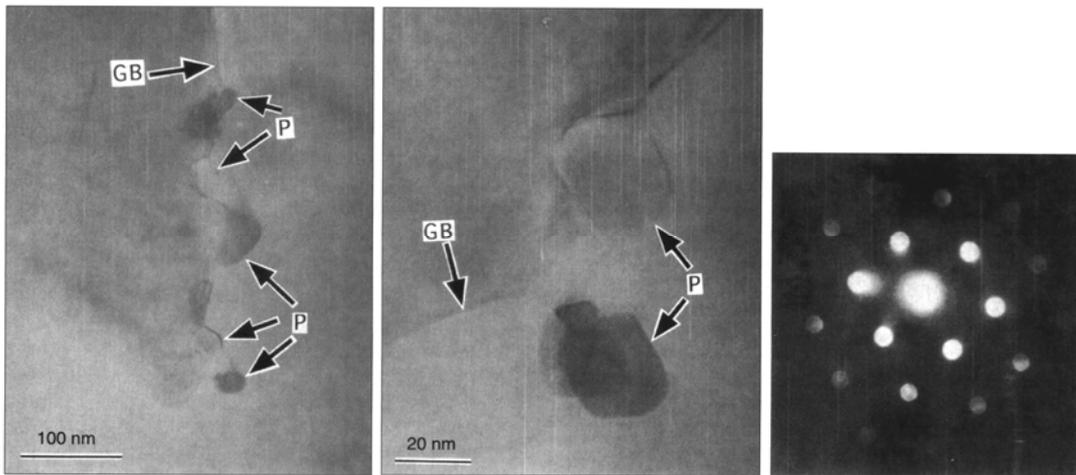
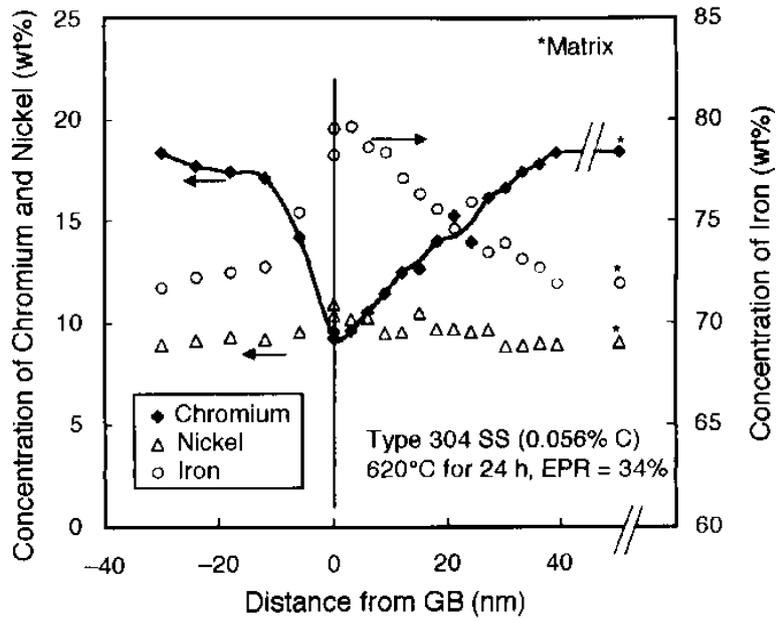


50  $\mu$  m

(c) SUS316L  
(炭素含有量 0.010%)

図 B-1 10%しゅう酸エッチングによるオーステナイト系ステンレス鋼 (620°C  
×24h 熱処理材) のマイクロ組織観察結果

(出典)  
BWR 電力共同研究「低炭素系ステンレス鋼の耐 IGSCC 評価研究」(最終報告書), 平成 12  
年 9 月.



(注) “P” : 析出物 (Precipitate) .....  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$

図 B-2 鋭敏化 SUS304 (620°C × 24h 熱処理材) の TEM 粒界分析結果

(出典)

N. Saito, Y. Tsuchiya, F. Kano, N. Tanaka, “Variation of Slow Strain Rate Test Fracture Mode of Type 304L Stainless Steel in 288°C Water,” Corrosion, Vol. 56. No. 1, pp. 57-69 (2000).

試験体の分析値例（重量%）及び 285℃における 0.2%耐力（kgf/mm<sup>2</sup>）

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	$\sigma_y$
SUS304	0.05	0.49	1.65	0.027	0.003	9.30	18.75	—	17
	0.06	0.48	1.56	0.027	0.002	9.20	18.65	—	18
	0.07	0.50	1.55	0.027	0.001	9.30	18.75	—	19
SUS304L	0.015	0.42	1.49	0.028	0.005	10.95	18.35	—	17
SUS316L	0.018	0.52	1.42	0.028	0.005	13.70	16.37	2.15	16

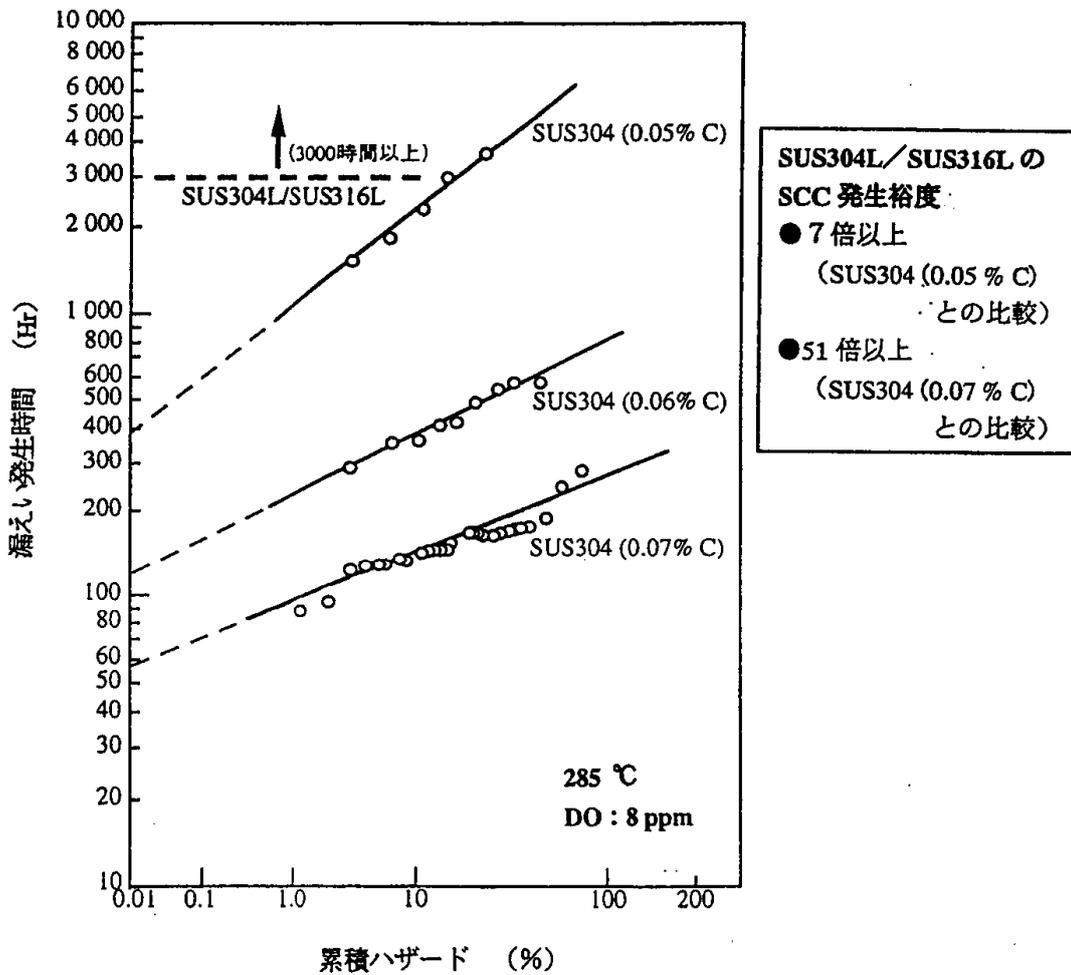


図 B-3 配管を試験体とした SCC 試験における漏えい発生時間の比較  
 負荷荷重：1.35  $\sigma_y$ ，繰り返し台形波（一定荷重保持時間=159 分）  
 試験温度：285℃，溶存酸素濃度：8ppm  
 試験体：溶接継手付き配管（呼び径 100A）

（出典）

（財）原子力工学試験センター，（財）発電用熱機関協会，「原子力発電施設信頼性実証試験の現状（昭和 59 年）」。

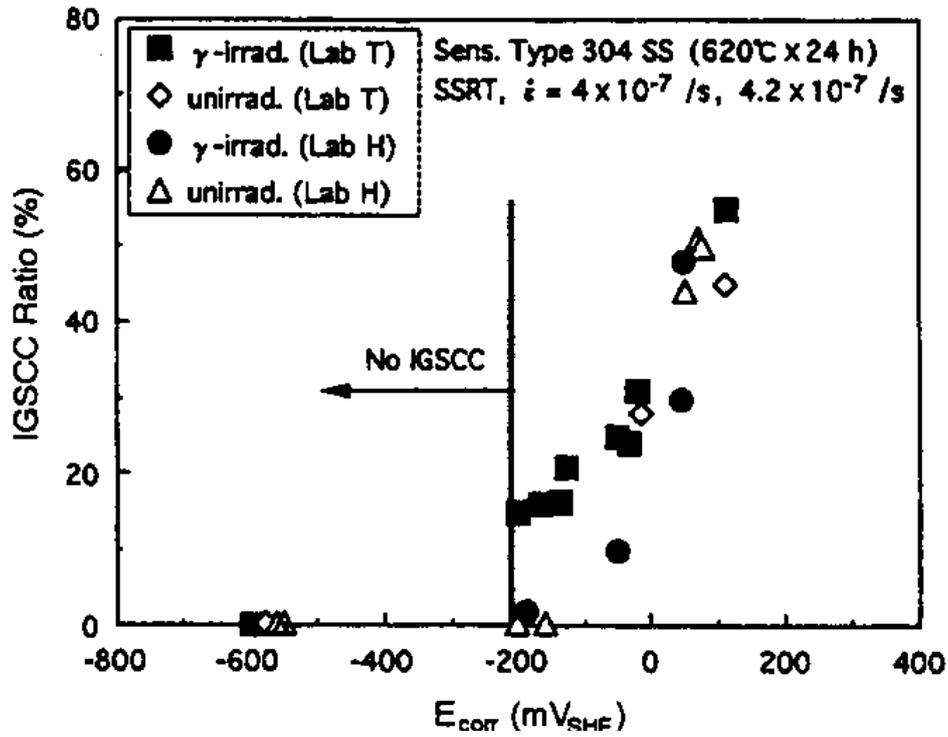


図 B-4(1) SSRT 試験による鋭敏化 SUS304 (620°C × 24h 熱処理材) の IGSCC 破面率と腐食電位の関係  
 (280 及び 288°C,  $O_2 \leq 440$ ppb,  $H_2O_2 = 0 \sim 570$ ppb,  $H_2 = 0 \sim 150$ ppb, 導電率  $\leq 0.1 \mu S/cm$  及び  $0.3 \mu S/cm$ )

(出典)

N. Saito, E. Kikuchi, H. Sakamoto, J. Kuniya, S. Suzuki, "Susceptibility of Sensitized Type 304 Stainless Steel to Intergranular Stress Corrosion Cracking in Simulated Boiling-Water Reactor Environments," Corrosion, Vol. 53, No. 7, pp. 537-545 (1997).

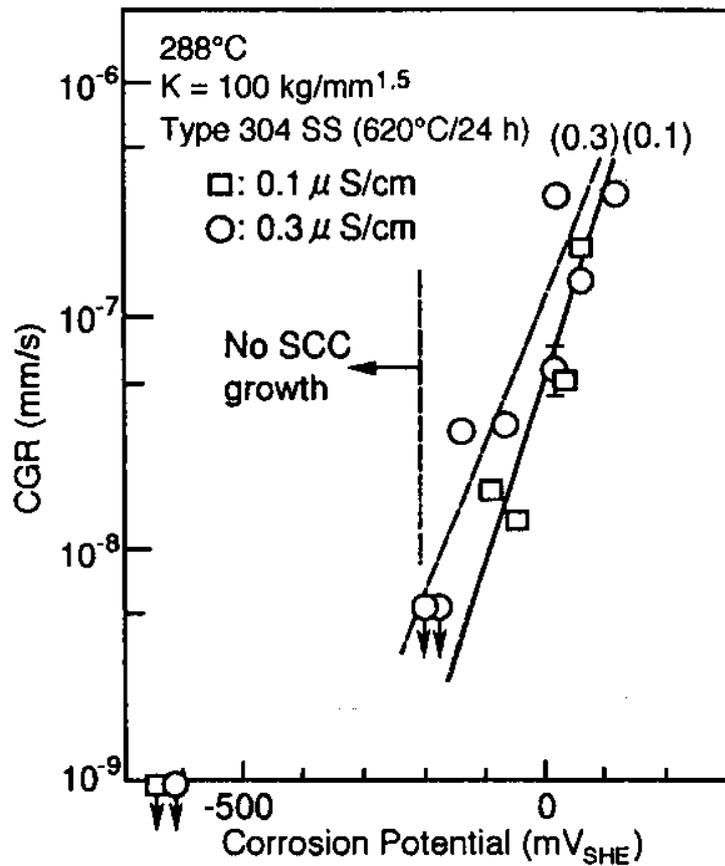


図 B-4(2) 鋭敏化 SUS304 (620°C×24h 熱処理材) のき裂進展速度と腐食電位の関係  
 (288°C,  $\text{O}_2 \leq 440 \text{ ppb}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2 = 0 \sim 570 \text{ ppb}$ ,  $\text{H}_2 = 14 \sim 150 \text{ ppb}$ ,  
 導電率= $0.1 \mu \text{ S/cm}$  及び  $0.3 \mu \text{ S/cm}$ )

(出典)

E. Kikuchi, M. Itow, J. Kuniya, H. Sakamoto, M. Yamamoto, A. Sudo, S. Suzuki, M. Kitamura,  
 "Intergranular Stress Corrosion Crack Growth of Type 304 Stainless Steel in a Simulated Boiling-Water Reactor Environment," Corrosion, Vol. 53, No. 4, pp. 306-311 (1997).

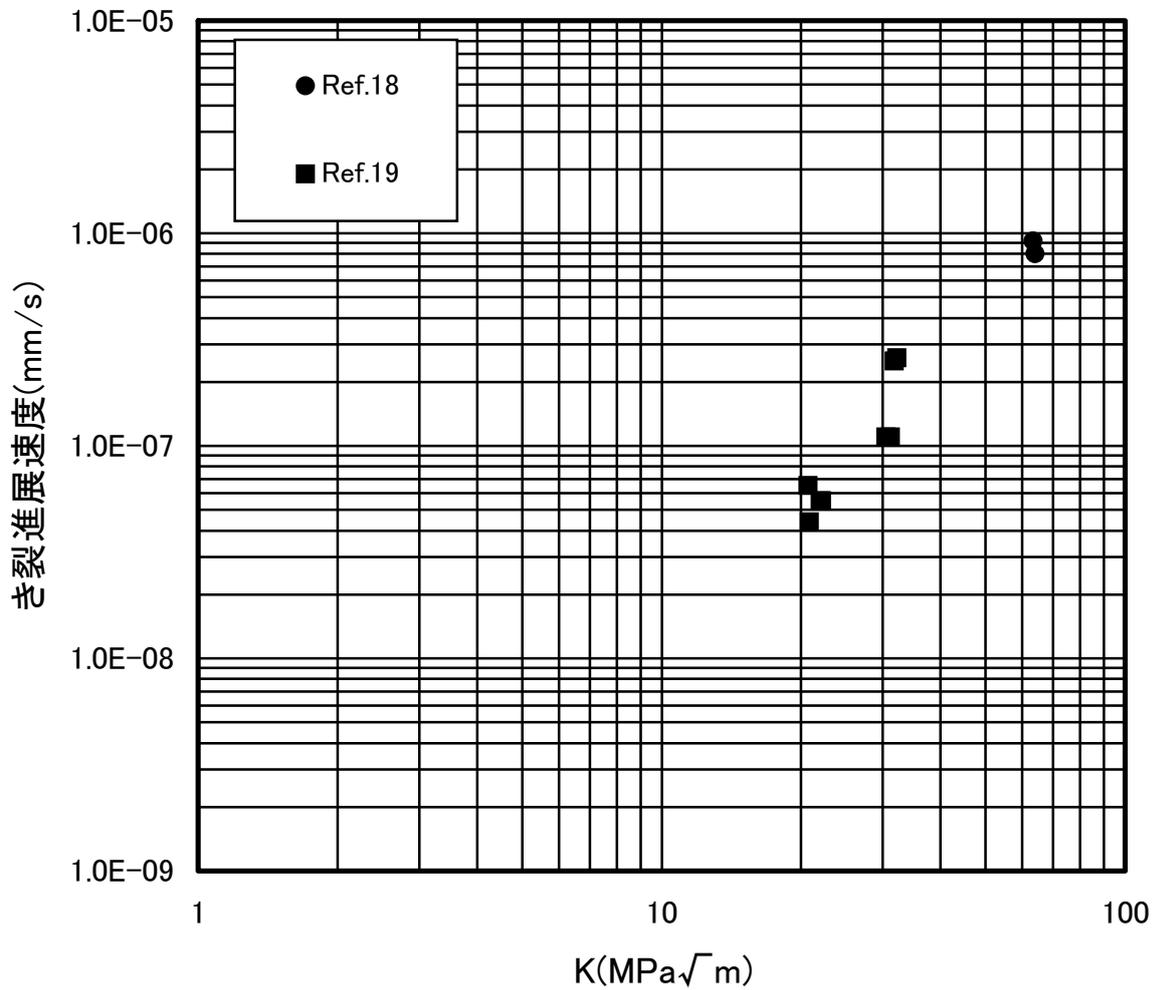
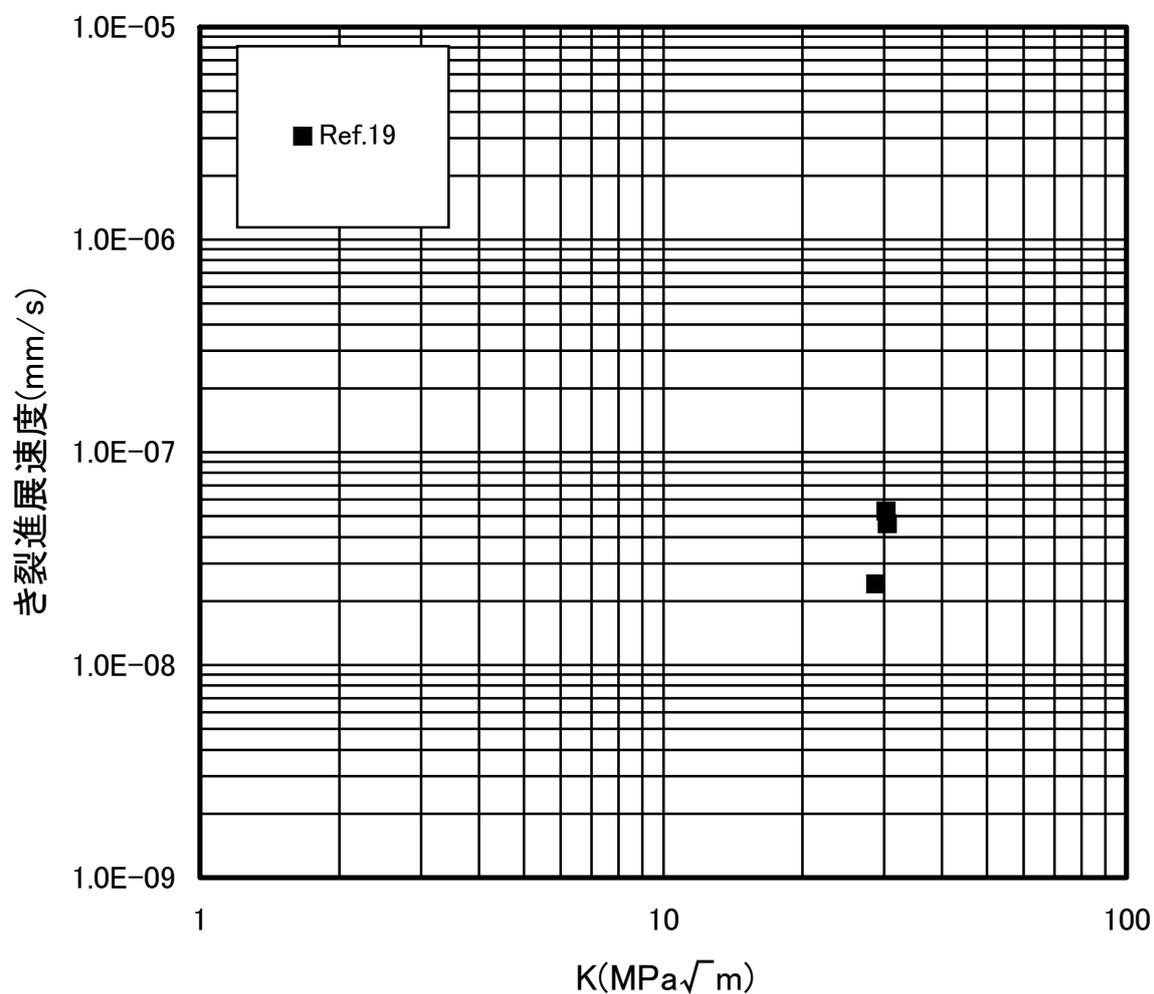


図 B-5(1) 通常炉内水質環境中における鋭敏化 SUS304 の SCC 進展データ (導電率 $<0.2 \mu\text{S/cm}$ , 腐食電位 $\geq 150\text{mVSHE}$ )

(出典)

- 18) M. Itow et al., "SCC Crack Growth Rates of Type 304 Stainless Steel at High K Region in Simulated BWR Environment," CORROSION 2000, Paper 00221.
- 19) BWR 電力共同研究「低炭素系ステンレス鋼の耐 IGSCC 評価研究」(最終報告書), 平成 12 年 9 月.



図B-5(2) 通常炉内水質環境中における低炭素ステンレス鋼の SCC 進展データ (導電率 $<0.2 \mu S/cm$ , 腐食電位 $\geq 150mVSHE$ )

(出典)

19) BWR 電力共同研究「低炭素系ステンレス鋼の耐 IGSCC 評価研究」(最終報告書), 平成 12 年 9 月.

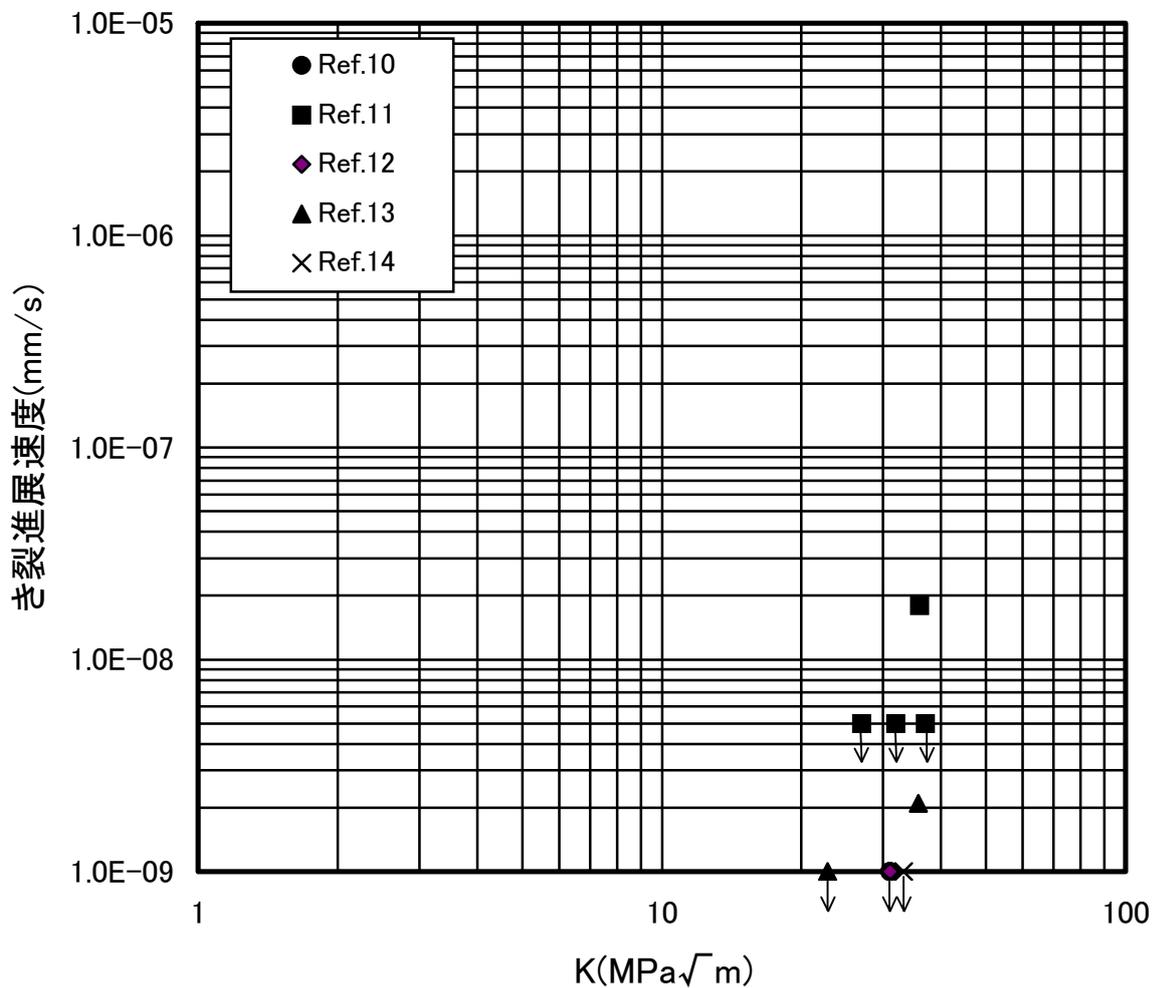
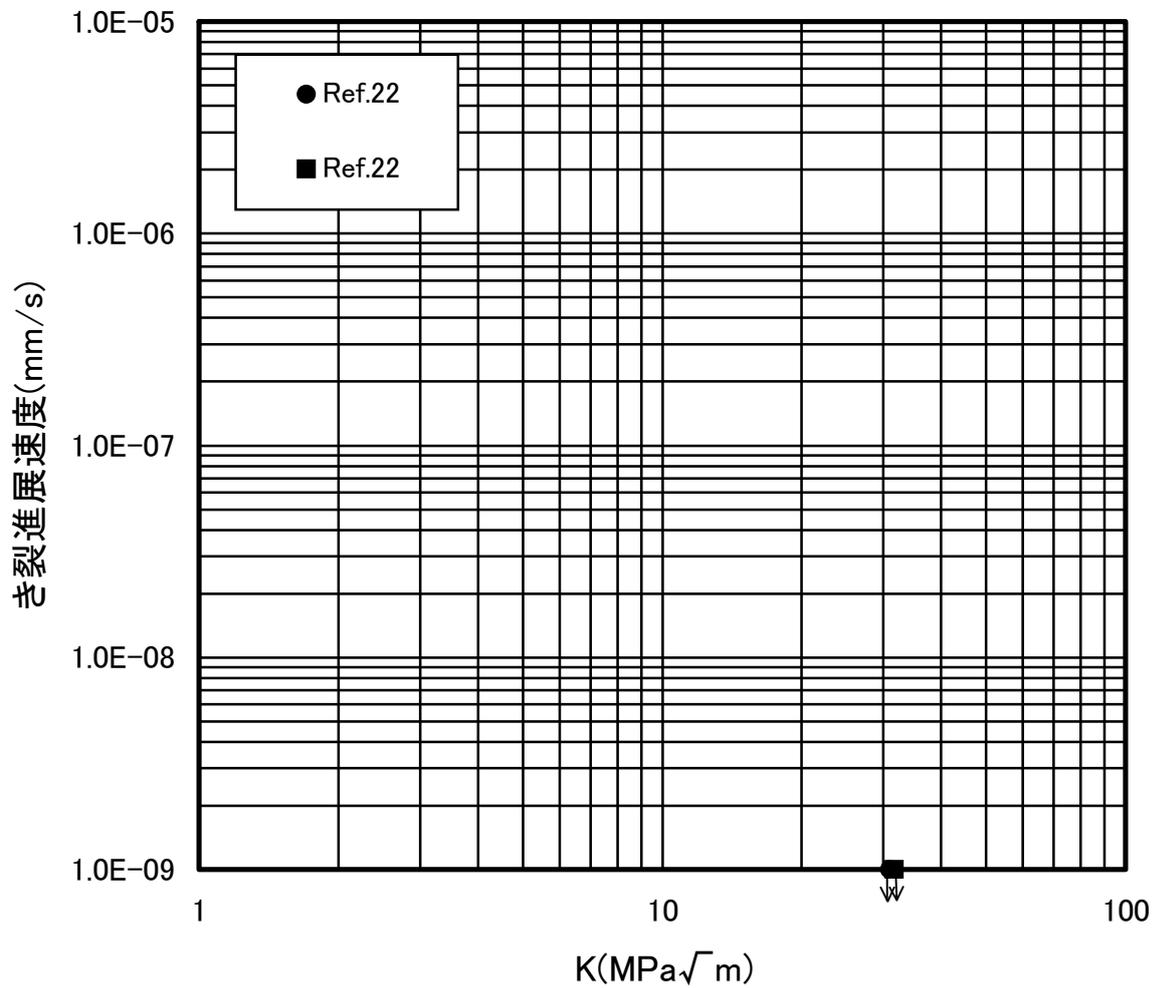


図 B-5(3) 水素注入環境中における鋭敏化 SUS304 の SCC 進展データ  
(導電率 <math>< 0.2 \mu S/cm</math>, 腐食電位  $\leq -200mVSHE</math>)$

(出典)

- 10) E. Kikuchi et al, "Intergranular Stress Corrosion Crack Growth of Sensitized Type 304 Stainless Steel in a Simulated Boiling-Water Reactor Environment," Corrosion Vol. 53, No. 4, pp. 307-311 (1997).
- 11) L. Lungberg, "BWR Water Chemistry Impurity Studies, Volume 3: Fracture Mechanics Studies," EPRI NP-6773-SD (March, 1990).
- 12) A. Sudo and M. Itow, "SCC Propagation of Sensitized Materials in BWR Environment," Proc. of the International Symposium on Plant Aging and Life Predictions of Corrodible Structures, pp. 903-908, May 15-18, 1995, Sapporo, Japan.
- 13) BWR 電力共同研究「長期水素注入による腐食環境改善技術評価研究」(最終報告書), 平成 9 年 3 月.
- 14) BWR 電力共同研究「原子炉腐食環境及び材料耐食性評価に関する研究」(最終報告書), 平成 7 年 3 月.



図B-5(4) 水素注入環境中における低炭素ステンレス鋼の SCC 進展データ  
(導電率 $<0.2 \mu\text{S/cm}$ , 腐食電位 $\leq -200\text{mVSHE}$ )

(出典)

- 22) 電力共同研究「実機水素注入プラントにおける材料き裂進展及び腐食電位評価」  
(最終報告書), 平成 12 年 3 月.

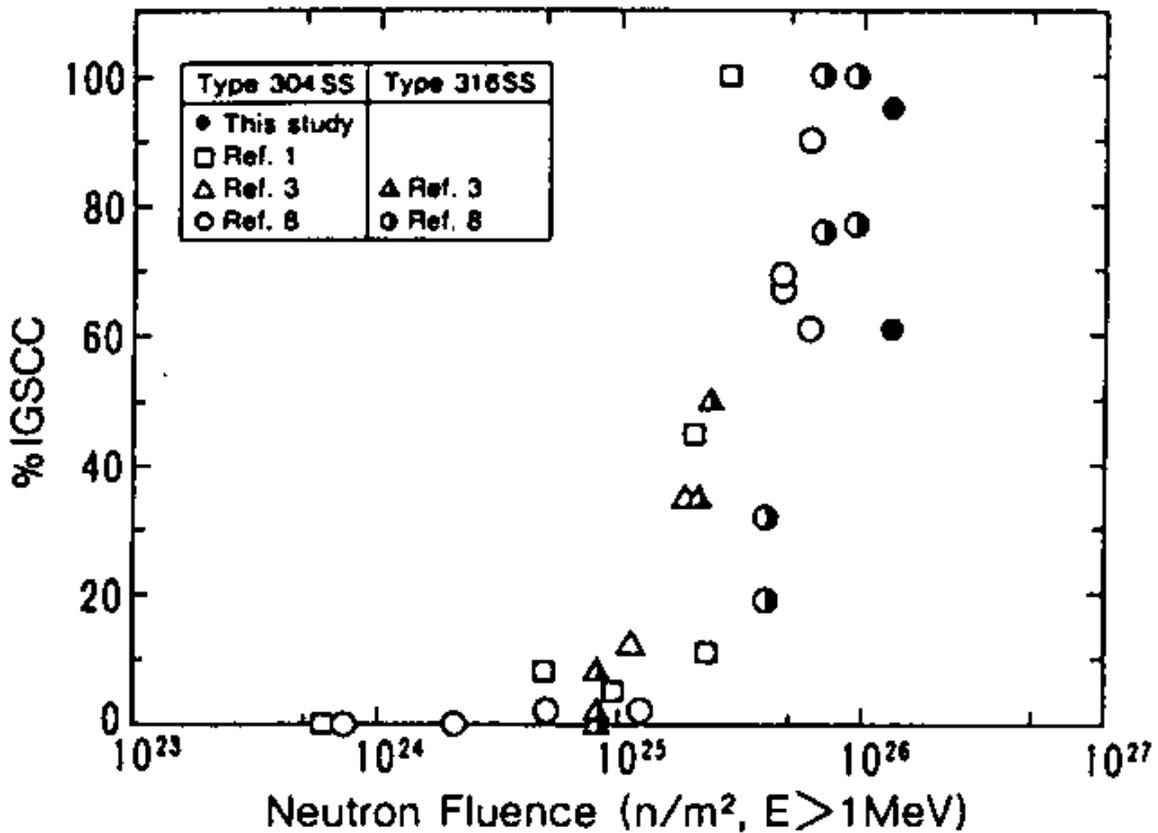


図 B-6 SSRT 試験による中性子照射した SUS304 及び SUS316 の IGSCC 破面率と照射量の関係  
(288°C, O<sub>2</sub>=0.02~32ppm, 導電率<0.1 μ S/cm)

(出典)

M. Kodama, R. Katsura, J. Morisawa, S. Nishimura, S. Suzuki, K. Asano, K. Fukuya, K. Nakata, "IASCC Susceptibility of Austenitic Stainless Steels Irradiated to High Neutron Fluence," Proc. of 6th Int. Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, TMS, 1993, pp.583-588.

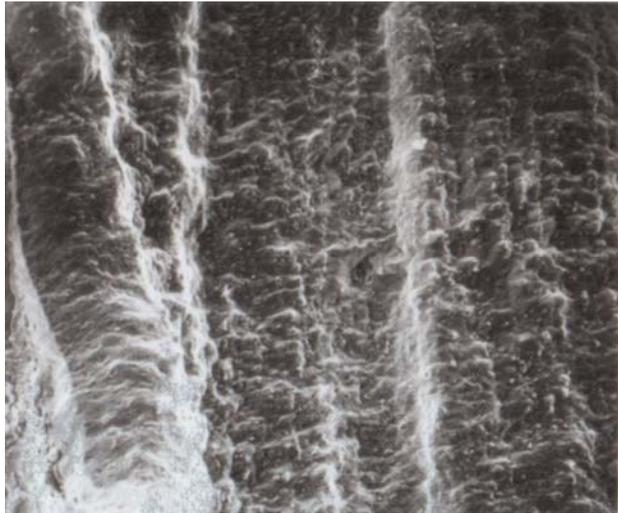
[図 B-6 で引用されている参考文献]

- Ref.1:W. L. Clarke , A. J. Jacobs, Proc. of 1<sup>st</sup> Int. Symposium. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, NACE, 1983, pp. 451-461.
- Ref.3:A. J. Jacobs, G. P. Wozaldo, K. Nakata, T. Yoshida, I. Masaoka, Proc. of 3rd Int. Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, TMS, 1987, pp. 673-680.
- Ref.8:M. Kodama, S. Nishimura, J. Morisawa, S. Suzuki, S. Shima, M. Yamamoto, Proc. of 5th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, ANS, 1991, pp.948-954.

## 2. インコネル溶接部

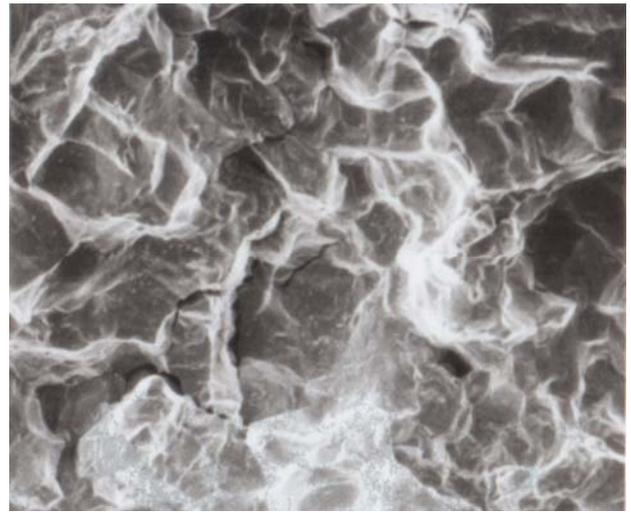
2. 1 インコネル 182 はデンドライト構造(柱状晶)であり, 高腐食電位環境下で SCC 感受性を有する。(図 B-7、図 B-8、図 B-9)
2. 2 インコネル 182 の SCC は, ステンレス鋼と同様に, 溶接入熱によるクロムカーバイド析出に伴う Cr の枯渇に起因する。(図 B-10)
2. 3 高 Cr, 高 Nb 含有のインコネル 82 及び高 Nb 含有の改良 182 合金は, インコネル 182 と比較して優れた耐 SCC 性を示す。(表 B-2、表 B-3、図 B-11)
2. 4 インコネル 600 溶接熱影響部 (HAZ) は, すき間環境下では SCC 感受性を示し, その形態は粒界割れである。(表 B-3、図 B-7、図 B-12)
2. 5 インコネル 182 の SCC 発生寿命は腐食電位依存性を示す。(図 B-13)
2. 6 インコネル 182 の SCC 進展速度は, 応力拡大係数(K 値)依存性及び腐食電位依存性を示す。(図 B-14、B-15)
2. 7 インコネル 182 の SCC 進展速度は, 進展面のデンドライトに対する方向に依存し, デンドライト構造を横切って進展する場合の速度は, 並行に進展する場合の約 10 分の 1 となる。(図 B-16)

なお, インコネル合金のき裂進展速度に関するデータ, 照射を考慮した SCC 進展データを国プロで取得予定である。一方民間研究においてもステンレス鋼 (SUS304L, SUS316L) の SCC 発生評価データ及び進展データを取得しており, 適時に新たなデータを取り入れ見直してゆく。



75 μm

a) Alloy182



75 μm

b) Alloy600 HAZ

図 B-7 Alloy182/600 溶接継手における単軸定荷重試験後の SCC 破面の SEM 観察結果

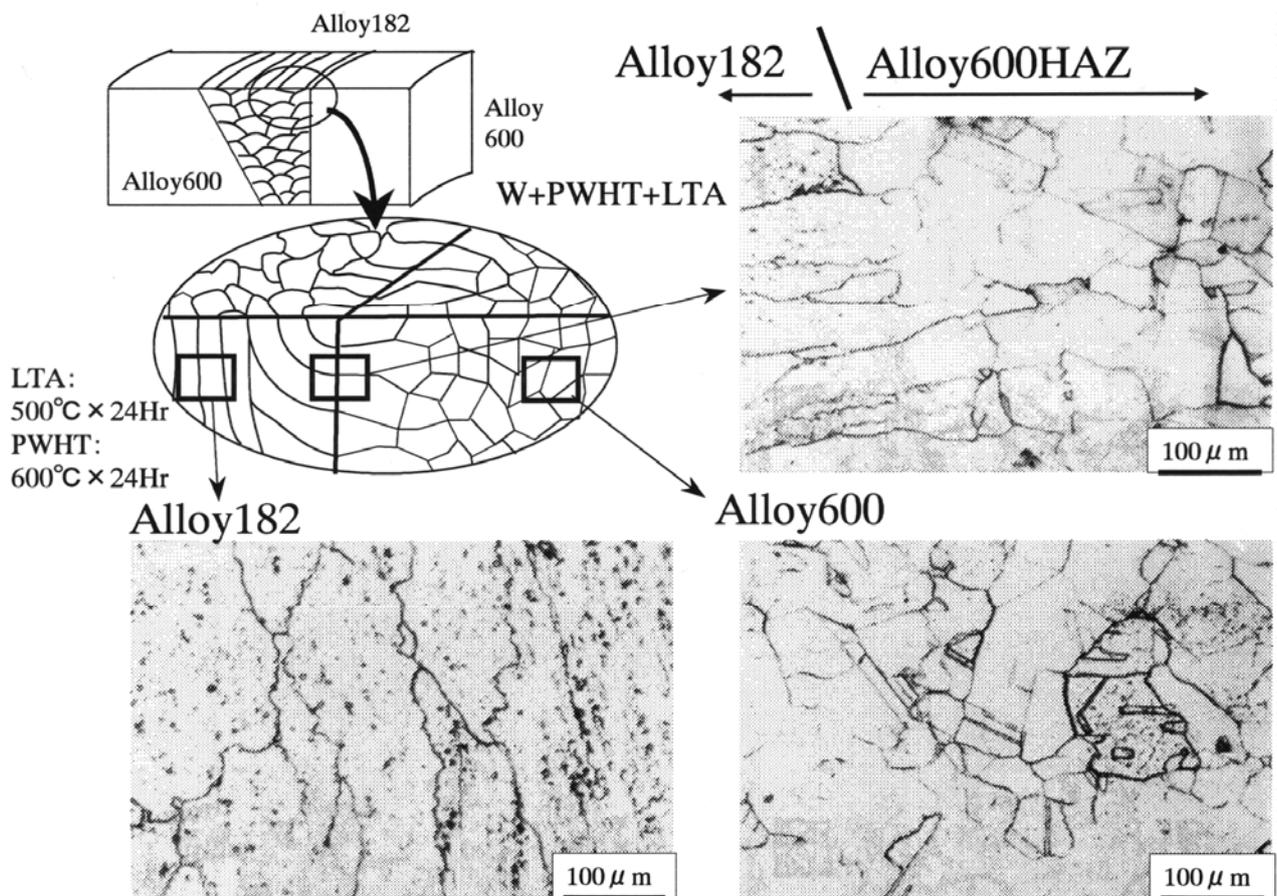


図 B-8 Alloy182/600 溶接継手の組織観察結果

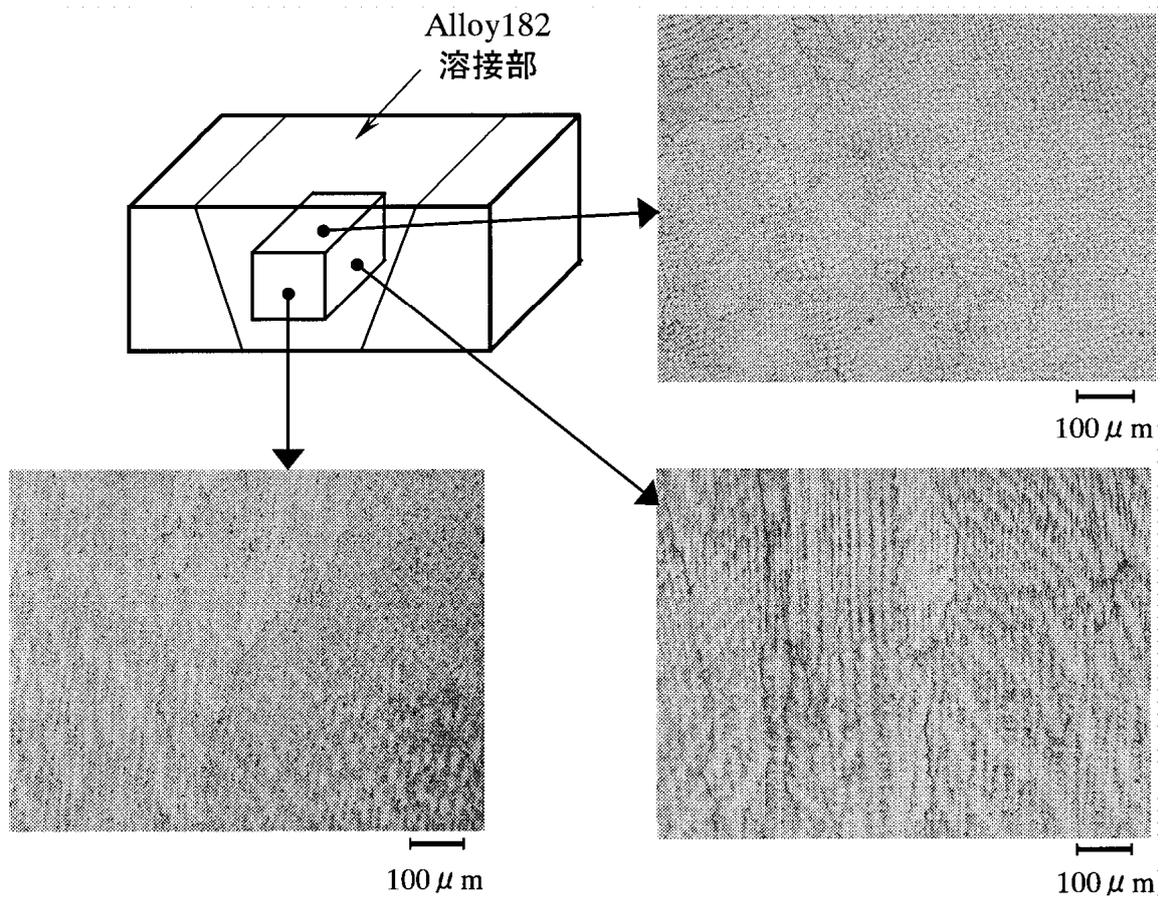


図 B-9 Alloy182 溶接部組織観察結果

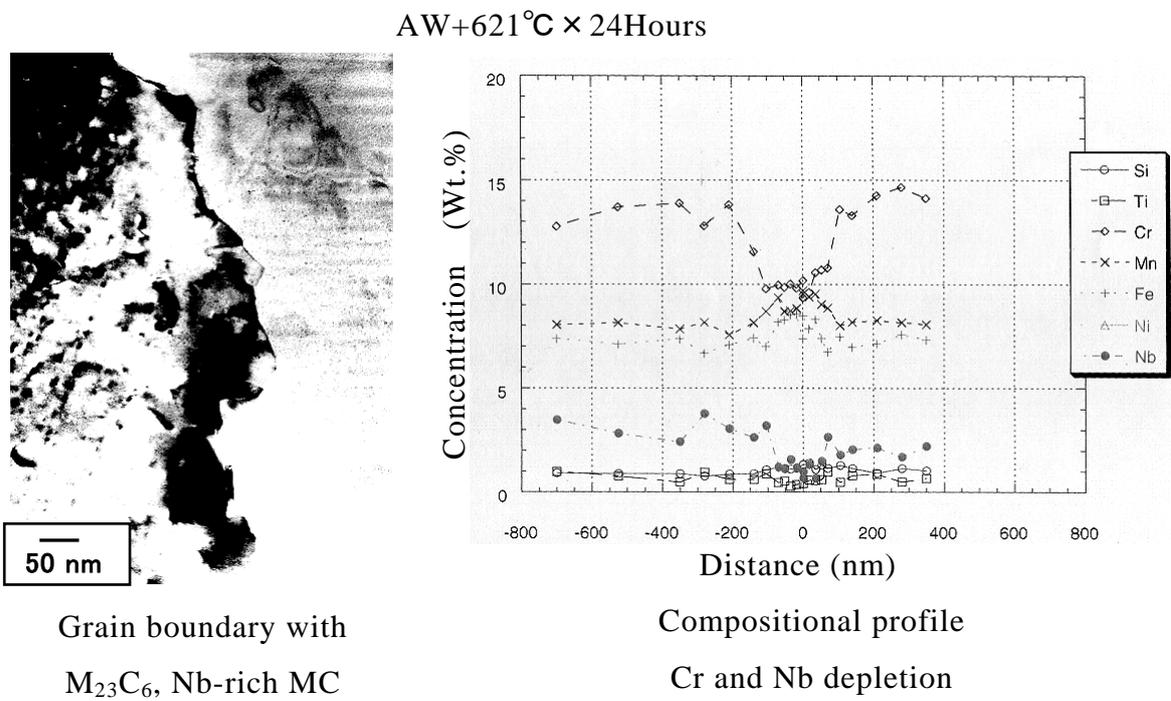


図 B-10 Alloy182 の粒界組成

表 B-2 インコネル溶接部の材料組成

(重量%)

材料名	C	Ni	Cr	Fe	Nb(+Ta)
600合金	≤0.15	≥72.0	14.0~ 17.0	6.0~ 10.0	—
182合金	≤0.10	≥59.0	13.0~ 17.0	≤10.0	0.5~ 3.0
改良 182合金	≤0.10	≥59.0	13.0~ 17.0	≤10.0	2.5~ 4.5
82合金	≤0.10	≥67.0	18.0~ 22.0	≤3.0	2.0~ 3.0

- ・600合金はNbの規定なし。
- ・82合金は182合金よりCr量が高い。
- ・改良182合金及び82合金は、182合金よりNb量が高い。

表 B-3 インコネル溶接部の SCC 感受性

材料	600合金 HAZ		182合金		改良182合金		82合金	
	無	有	無	有	無	有	無	有
SCC 試験結果	○	●	—	●	—	○	—	○
実機事例 有無	○	●	●	●	○	○	○	○

\* HAZ: 熱影響部(Heat Affected Zone)

○: SCC試験において耐SCC性に裕度有り。実機事例無し。

●: SCC試験においてSCC感受性有り。実機事例有り。

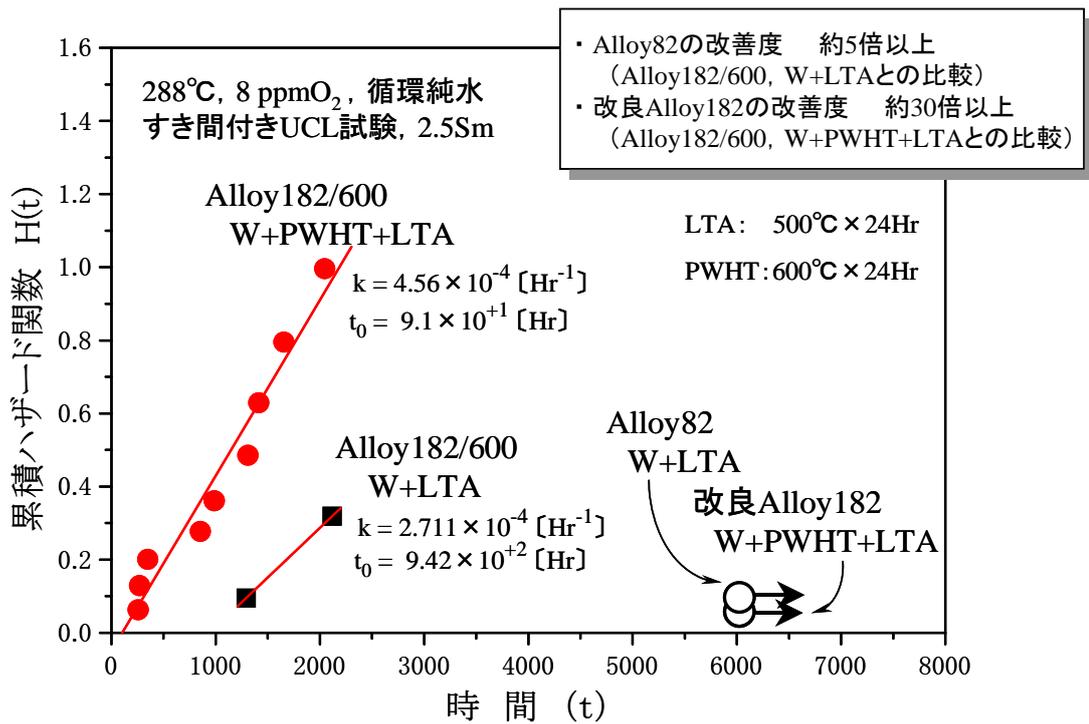


図 B-11 Alloy82 及び改良 182 の SCC 裕度

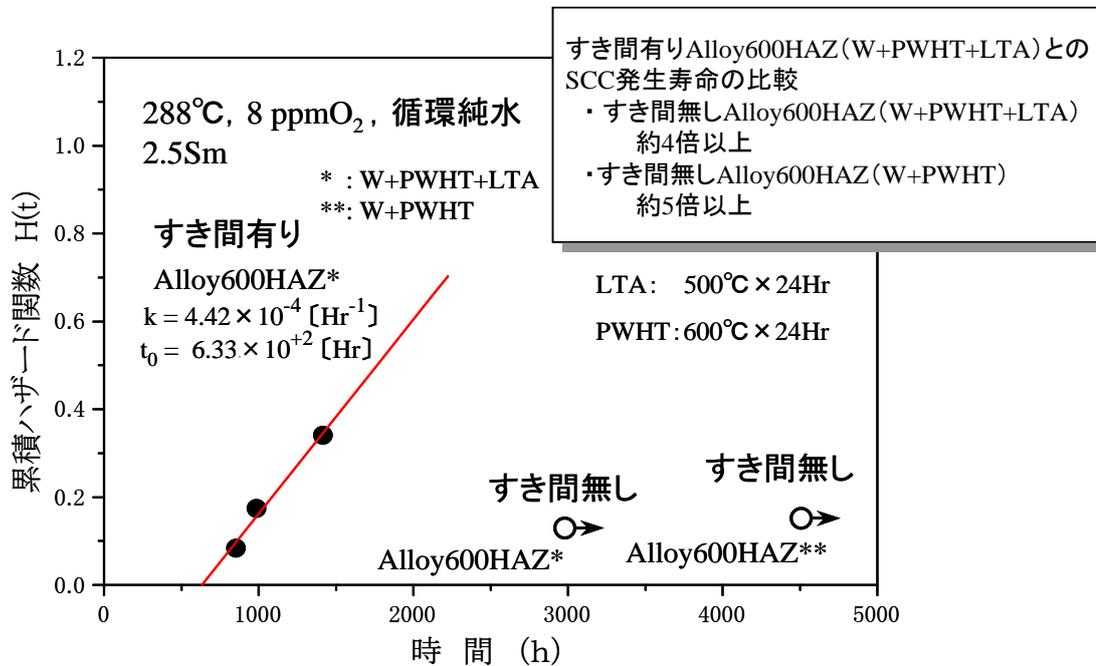


図 B-12 Alloy600HAZ の SCC 発生寿命に及ぼす すき間の影響

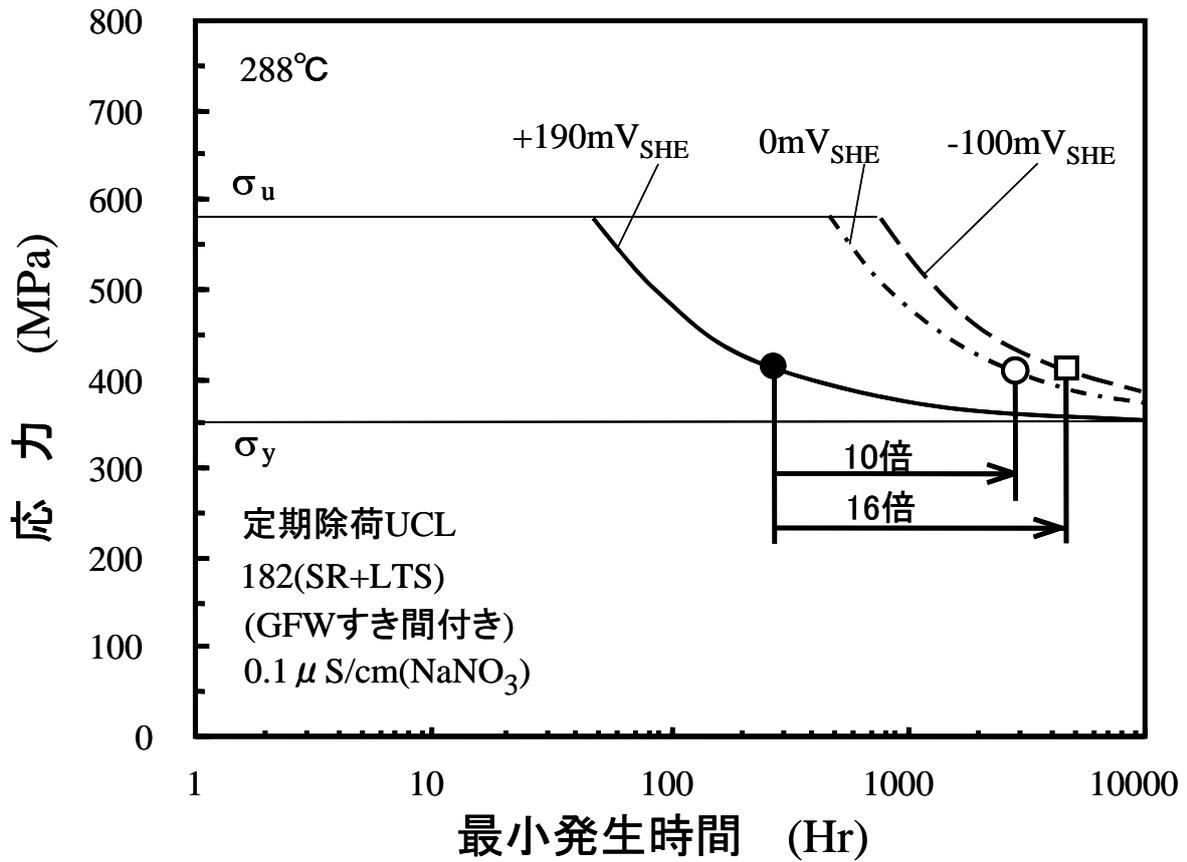
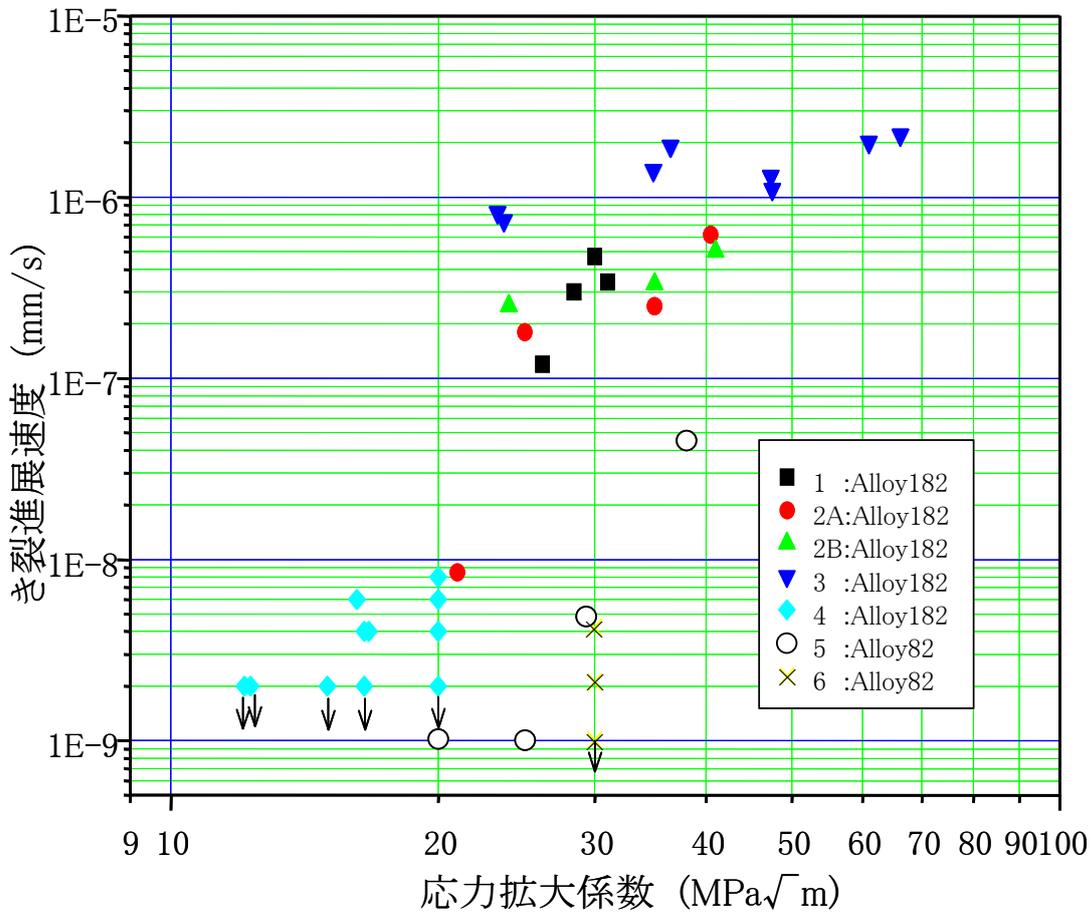


図 B-13 Alloy182 の SCC 発生寿命に及ぼす腐食電位の影響

(出典)

齋藤ら, 182 溶接金属の高温水中 SCC 発生寿命に対する腐食電位の影響, 第 45 回 材料と環境討論会講演集(1998.8) pp. 271-272.



各データの試験条件.

- 1 : インコネル182, PWHT, 288°C, 12~36ppmO<sub>2</sub>, 高温純水, 0.2 μ S/cm以下(出口)
- 2A: インコネル182, PWHT, 288°C, 250ppbO<sub>2</sub>, 高温純水, 0.1 μ S/cm以下(入口)
- 2B: インコネル182, AW, 288°C, 250ppbO<sub>2</sub>, 高温純水, 0.1 μ S/cm以下(入口)
- 3 : インコネル182, PWHT+LTA, 288°C, NWC,ECP170 ~ 220mV, 高温純水, 0.1 μ S/cm以下(入口)
- 4 : インコネル182, AW&PWHT, 288°C, > 250ppbO<sub>2</sub>, >50mV, 高温純水, <0.3 μ S/cm
- 5 : インコネル82, AW, 288°C, 150~610ppbO<sub>2</sub>, 高温純水, 0.06~0.45 μ S/cm
- 6 : インコネル82, PWHT+LTA, 288°C, NWC, 高温純水, 実機導電率

図 B-14 BWR 模擬環境中でのインコネル 182 及び 82 の SCC 進展速度

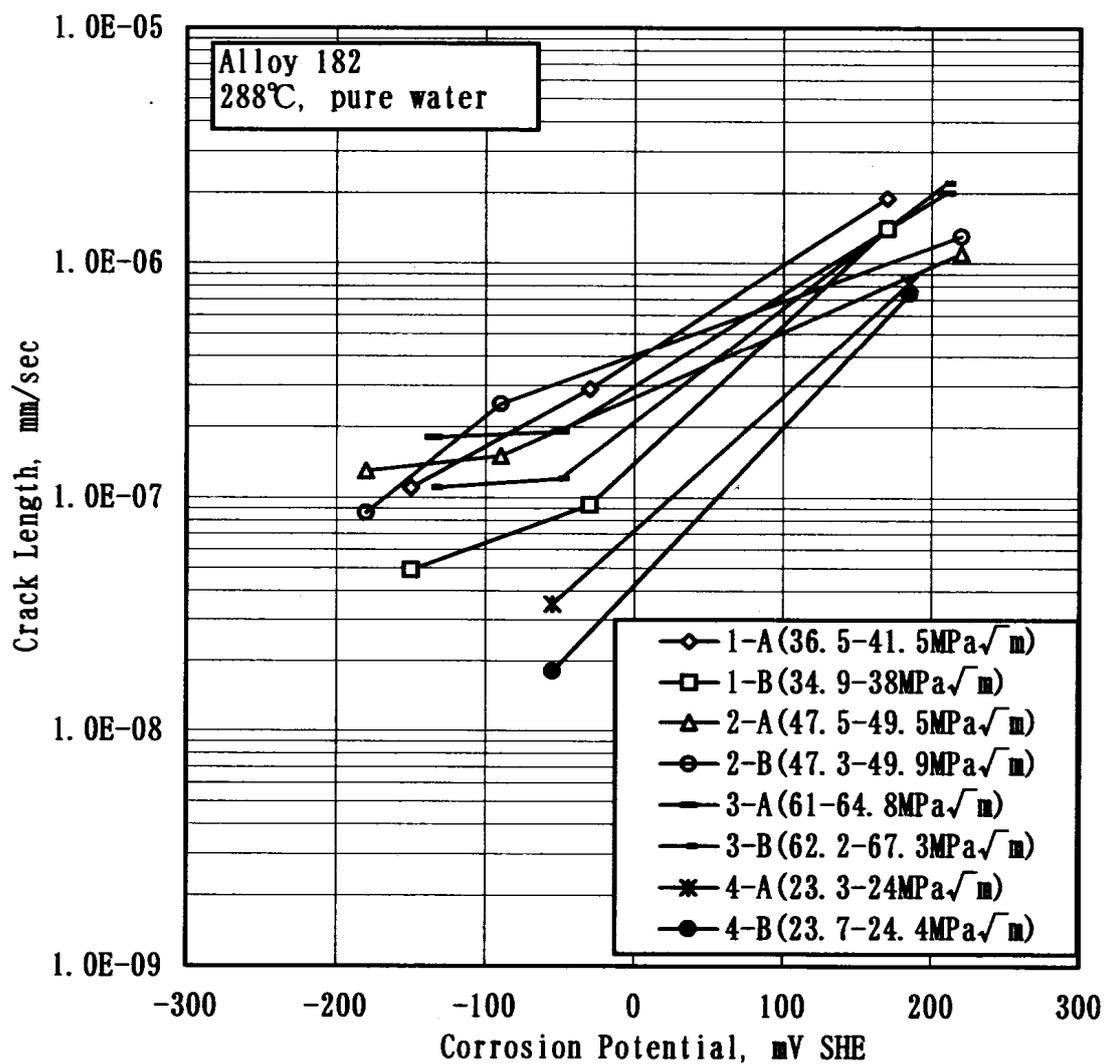
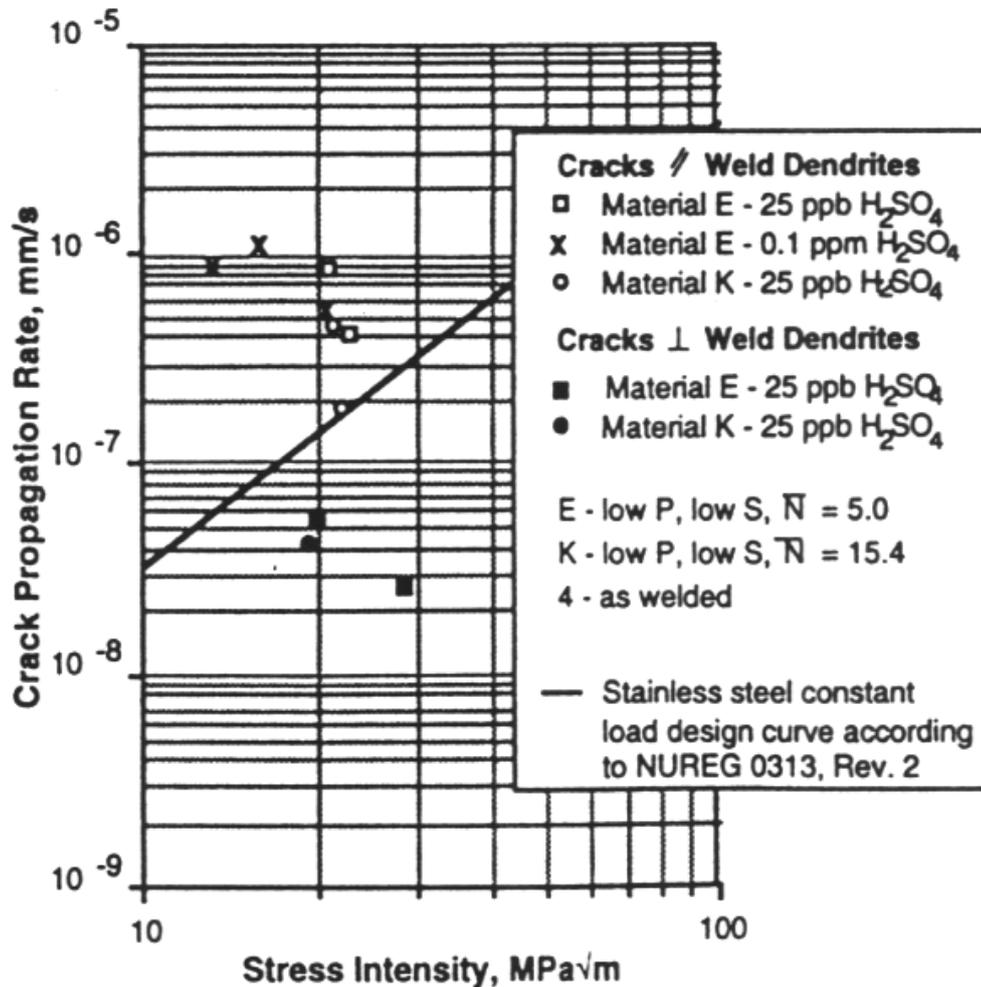


図 B-15 Alloy182 における SCC 進展速度の環境依存性

(出典)

M. Itow, Y. Abe, H. Sakamoto, S. Hida, K. Takamori, S. Suzuki, "The Effect of Corrosion Potential on Alloy 182 Crack Growth Rate in High Temperature Water," Proc. of 8th Int. Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Amelia Island, USA, pp.712-719 (1997).



図B-16 Alloy182 のデンドライト組織における SCC 進展速度の方向依存性

(出典)

L. G. Ljungberg M. Stigenberg, K. Gott, U. Morin, J. L. Nelson, B. Bengtsson and C. Jansson, "Propagation of Stress Corrosion Cracking in Weld Structures of the Nickel-Base Alloy182," Proceedings of the International Symposium on Plant Aging and Life Predictions of Corrodible Structures, Japan, pp.911-920 (1995).

### 3. インコネル X-750 の特徴

3.1 インコネル X-750 (JIS 規格 : NCF750) は、金属化合物の時効析出を利用した析出強化型の Ni 基合金であり、炉内構造物においては、ジェットポンプビーム等の高強度部材として適用されている。(表 B-4)

3.2 インコネル X-750 は、高温水中で SCC 感受性を示し、その形態は粒界割れである。(図 B-17)

3.3 インコネル X-750 の SCC 感受性は、熱処理条件に依存し、溶体化処理後に時効処理を施す直接時効材(改良熱処理材)は、溶体化処理後に中間熱処理を経てから時効処理を施す二段時効材(従来熱処理材)と比較して、優れた耐 SCC 性を示す。(図 B-18)

表 B-4 インコネル X-750 の化学組成

化学成分 (wt%)						
C	Ni	Cr	Fe	Al	Ti	Nb+Ta
<0.08	>70.00	14.0~ 17.0	5.0~9.0	0.40~ 1.00	2.25~ 2.75	0.70~ 1.20

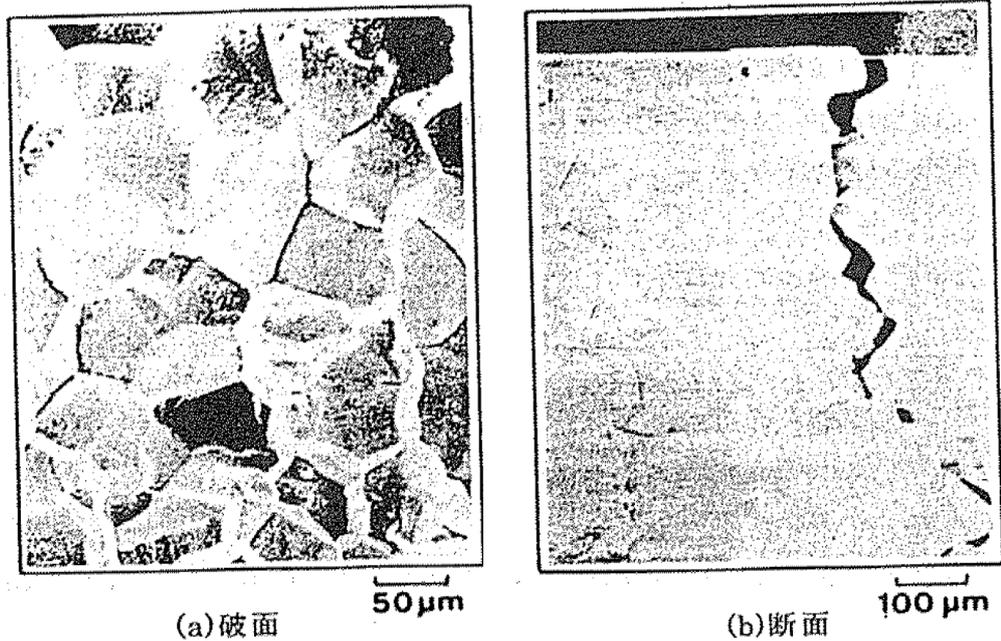


図 B-17 インコネル X-750 の SCC 形態の例

<出典>

服部成雄, 「原子力用高強度ニッケル基合金の耐応力腐食割れ性に関する研究」大阪大学工学部学位論文 (1994)

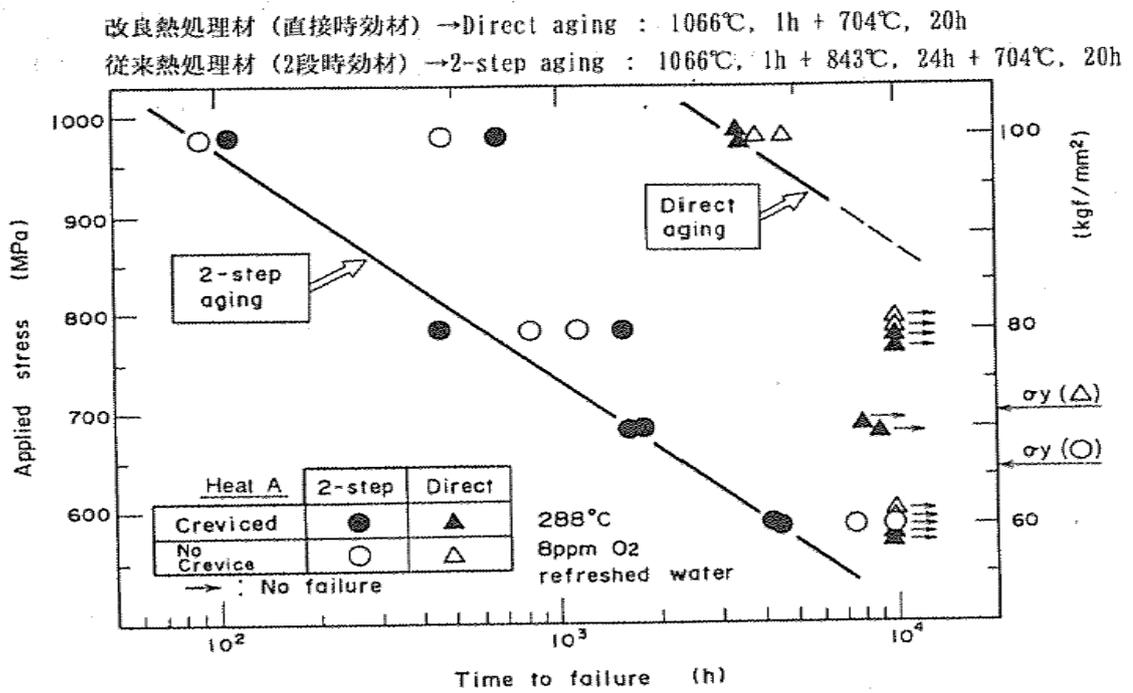


図 B-18 インコネル X-750 の SCC 破断時間の応力依存性

<出典>

服部成雄, 森康彦, 正岡功, 佐々木良一, 防食技術, 第 33 巻, 86 (1984)

付録C ジェットポンプの点検における接近性

表C-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.	名称 (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
TR-1	トランジションピース	90%	ビームと接触している部分があるため	20%	ノズルエルボ及びビームと吊下式カメラの干渉のため
IM-1	ノズルエルボノズル溶接部(20箇所)	90%	トランジションピ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
IM-2	ノズル混合室溶接部(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	混合室アダプタ溶接部(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-2	アダプターブラケット溶接部(160箇所)	100%	—	50%	ブラケットと吊下式カメラの干渉のため
BR-3	位置決めボルト廻り止め溶接部(40箇所)	100%	—	-	-
BR-4	ロッド廻り止め溶接部(40箇所)	100%	—	-	-
BR-5	ウエッジ	100%	—	0%	トランジションピース側はアクセス不可
DF-1	カラーテーパ管溶接部(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	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
DF-4	計装管バンド溶接部(20箇所)	90%	ライザ管と吊下式カメラの干渉のため	0%	—
AD-1	アダプターローアリング溶接部(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

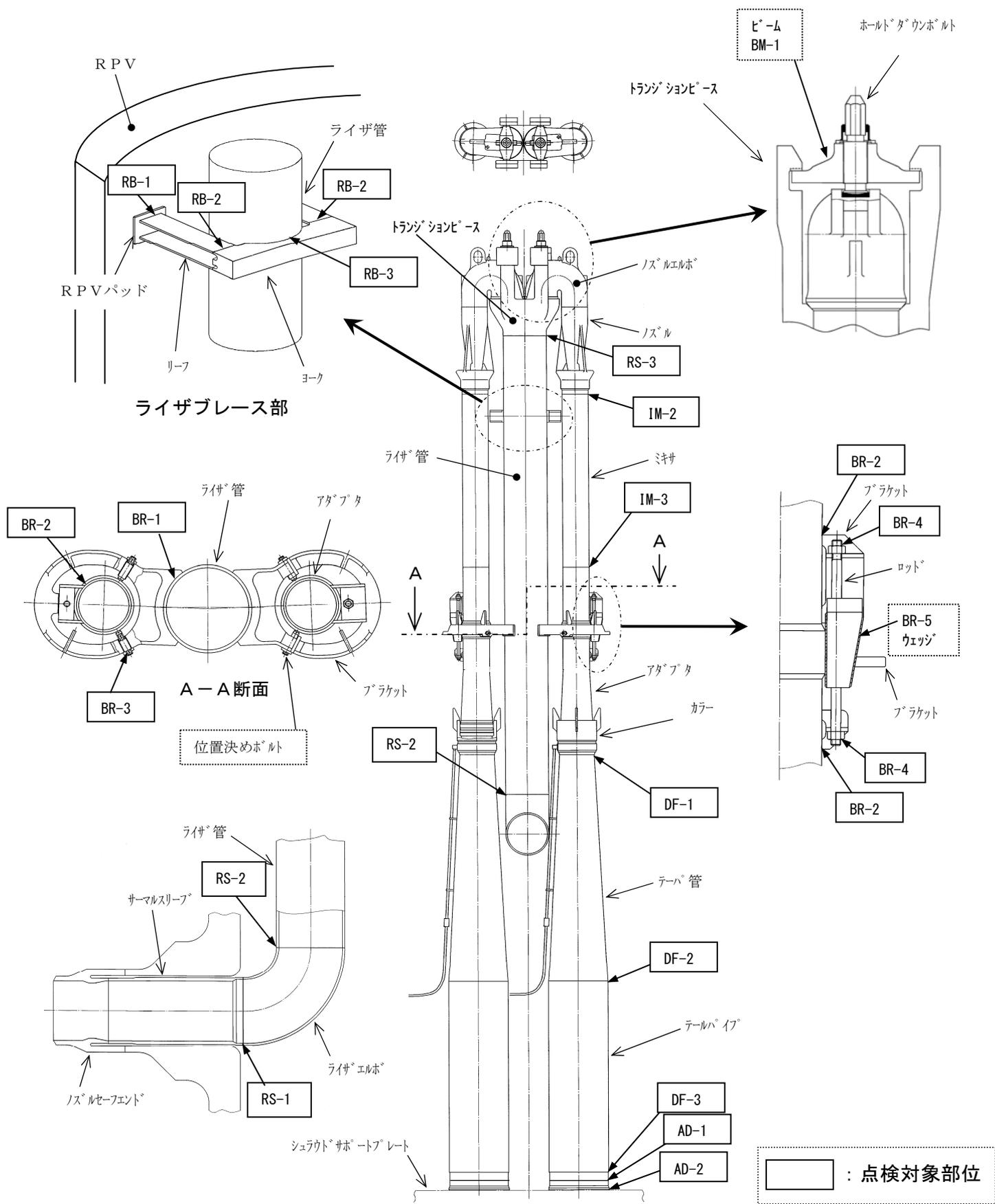


図1 ジェットポンプの点検対象部位

## 付録D SCC き裂進展速度式

### 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き裂進展評価に適用する SCC き裂進展速度式を示すものである。

### 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 及びインコネル 182 をき裂進展の評価対象とする。

### 3. SCC き裂進展速度式

#### 3.1 鋭敏化 SUS304 の SCC き裂進展速度式

##### (a) 通常一次水質環境下(NWC)

SCC き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 き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、き裂進展速度  $da/dt$  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 き裂進展特性を図D-1 に示す。

##### (b) 水素注入環境下(HWC)

SCC き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 き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、き裂進展速度  $da/dt$  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 き裂進展特性を図D-2 に示す。

### 3.2 低炭素ステンレス鋼の SCC き裂進展速度式

#### (a) 通常一次水質環境下(NWC)

SCC き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 き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、き裂進展速度  $da/dt$  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 き裂進展特性を鋭敏化 SUS304 の SCC き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 き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 き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、き裂進展速度  $da/dt$  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 き裂進展特性を鋭敏化 SUS304 の SCC き裂進展特性と併せて、図D-2 に示した。

### 3.3 インコネル 182 の SCC き裂進展速度式

#### (a) 通常一次水質環境下(NWC)

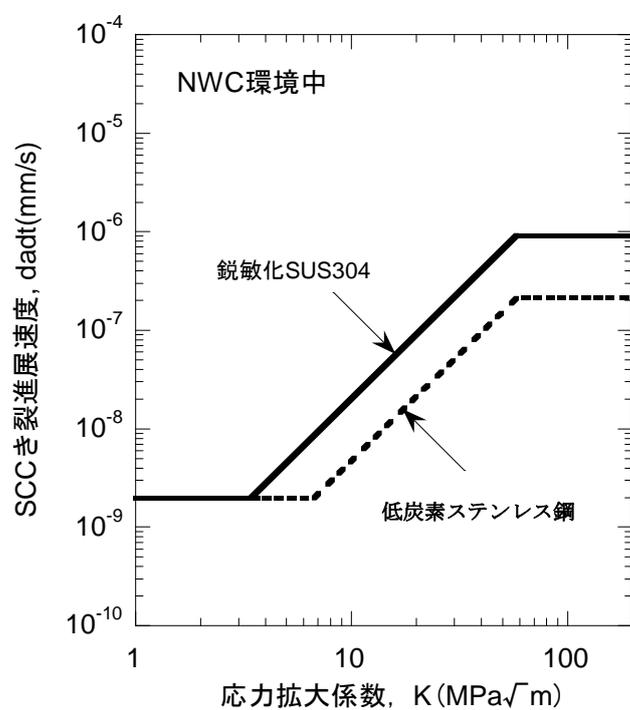
SCC き裂進展速度の試験結果をもとに設定された、NWC におけるインコネル 182 の SCC き裂進展特性を次式に示す。

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

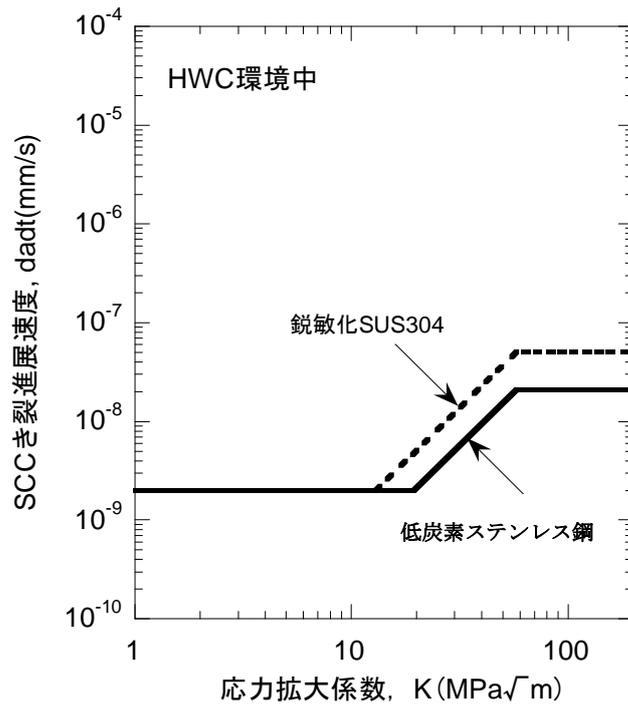
$$da/dt = 3 \times 10^{-15} K^{5.186} \quad (13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (14)$$

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

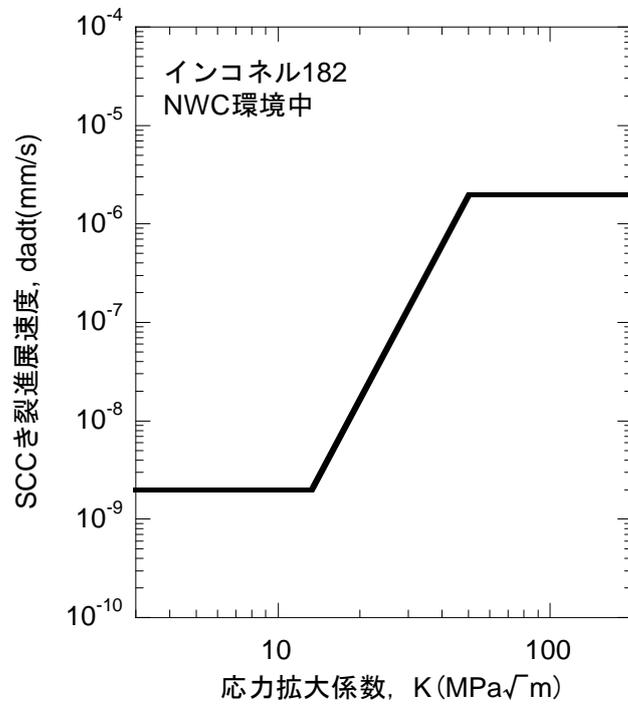
上式において、き裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。また、上式で表されるインコネル 182 の SCC き裂進展特性を図D-3 に示す。



図D-1 NWC環境中におけるステンレス鋼の SCC き裂進展特性



図D-2 HWC環境中におけるステンレス鋼のSCCき裂進展特性



図D-3 NWC環境中におけるインコネル182のSCCき裂進展特性

## 付録E 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き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E-1 参照）から、内表面 216N/mm<sup>2</sup> の引張応力、外表面 167N/mm<sup>2</sup> 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、軸方向き裂は管の強度に及ぼす影響が小さいことから軸方き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

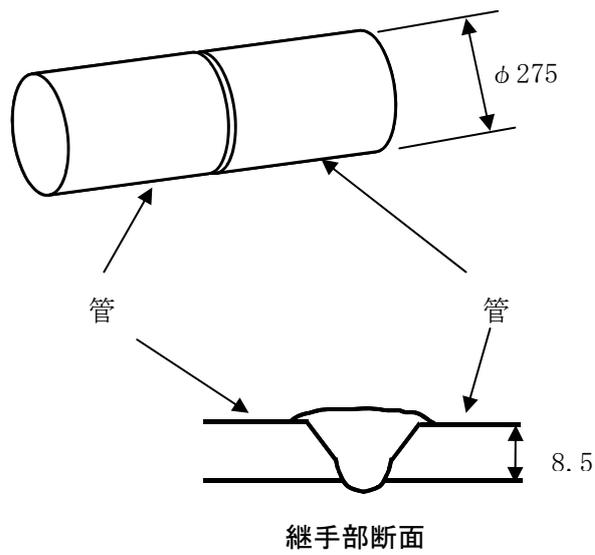
当該溶接部の溶接施工条件から、溶接パス毎に溶接入熱条件を設定して伝熱解析を実施し、得られた非定常温度分布に基づいて、大変形弾塑性応力解析を実施した。

#### (3) 物性値

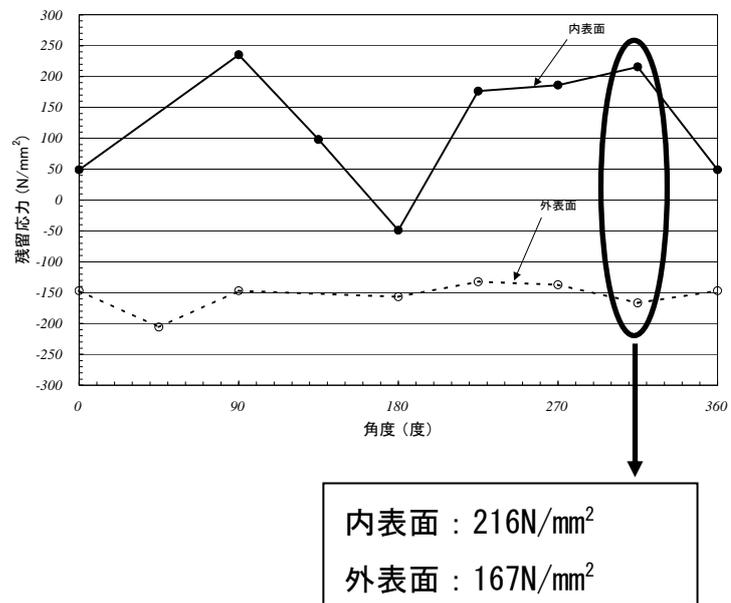
伝熱解析には、表E-1 に示す物性値を用いた。また、熱応力解析には、図E-2 に示す物性値を用いた。

#### (4) 解析結果

図E-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



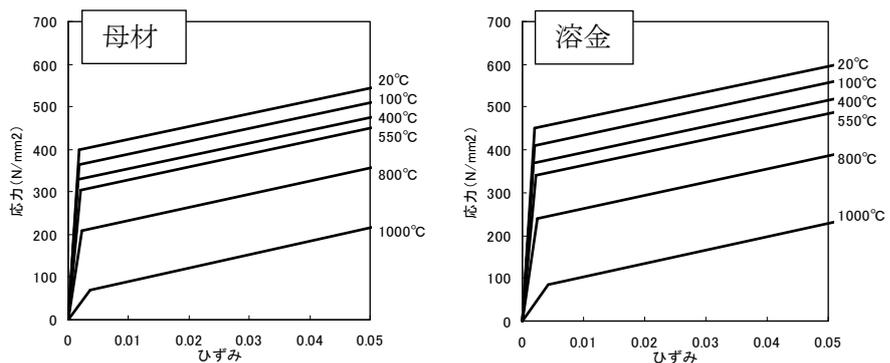
(b) 軸方向溶接残留応力分布

図E-1 管と管との溶接残留応力分布

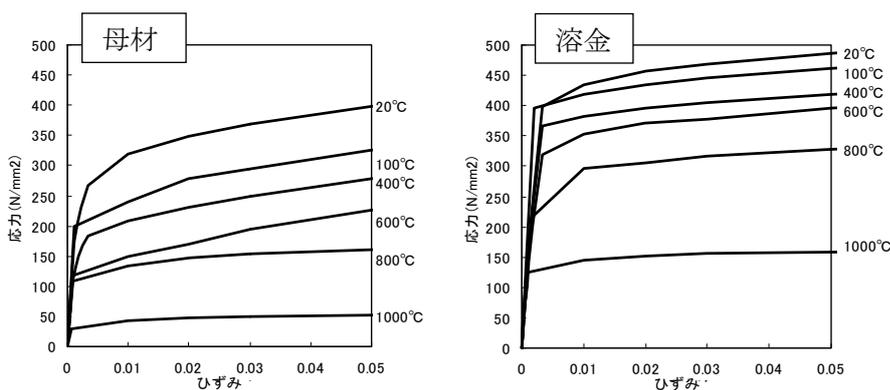
表E-1 伝熱解析に用いた物性値

SUS304及びSUS316L		20	100	200	400	600	1000	1500	2000
温度	°C								
熱伝導率	$\text{kJ}/\text{mm}\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$	$1.46\times 10^{-5}$	$1.56\times 10^{-5}$	$1.70\times 10^{-5}$	$1.97\times 10^{-5}$	$2.24\times 10^{-5}$	$2.76\times 10^{-5}$	$3.43\times 10^{-5}$	$4.12\times 10^{-5}$
密度	$\text{Kg}/\text{mm}^3$	$7.86\times 10^{-6}$							
比熱	$\text{KJ}/\text{kg}\cdot\text{°C}$	0.452	0.493	0.523	0.553	0.578	0.620	0.678	0.737
インコネ ル		20	149	288	566	815	1000	1500	2000
温度	°C								
熱伝導率	$\text{kJ}/\text{mm}\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$	$1.49\times 10^{-5}$	$1.66\times 10^{-5}$	$1.87\times 10^{-5}$	$2.34\times 10^{-5}$	$2.77\times 10^{-5}$	$3.10\times 10^{-5}$	$3.98\times 10^{-5}$	$4.89\times 10^{-5}$
密度	$\text{Kg}/\text{mm}^3$	$8.50\times 10^{-6}$							
比熱	$\text{KJ}/\text{kg}\cdot\text{°C}$	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) インコネル



(b) ステンレス鋼

図E-2 熱応力解析に用いた物性値

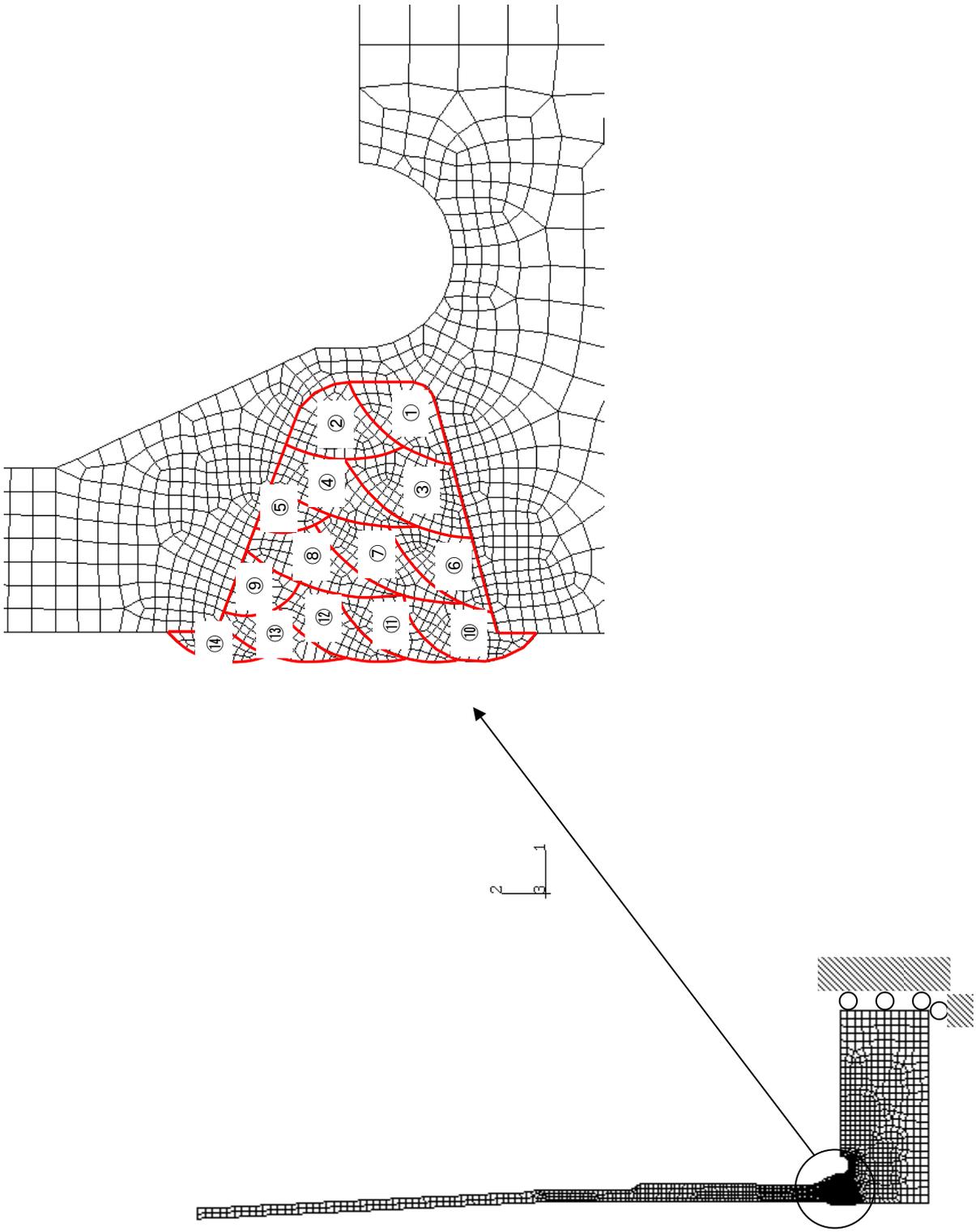
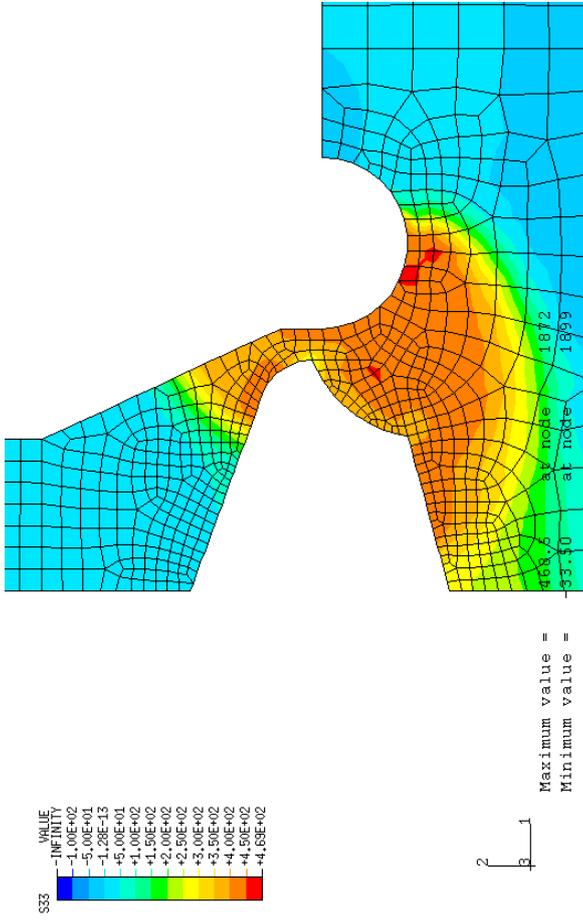
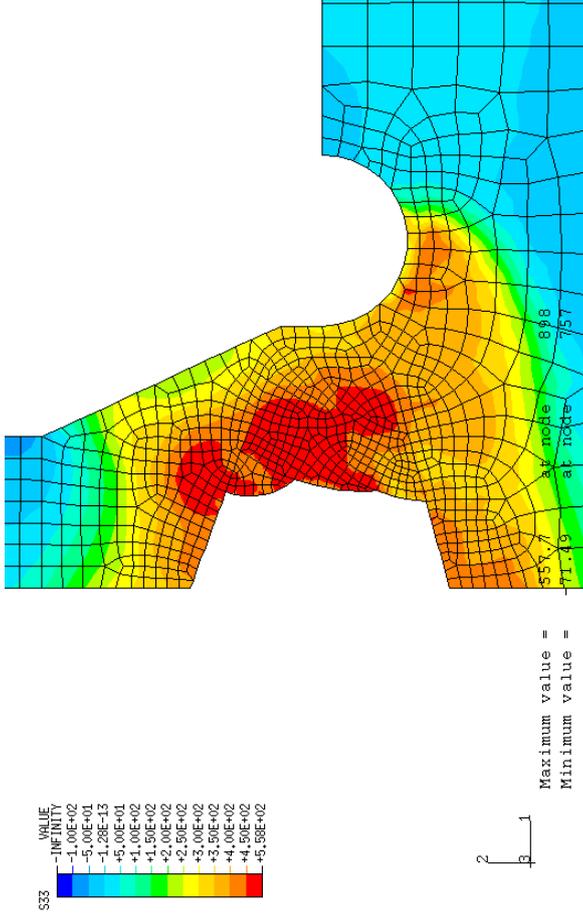


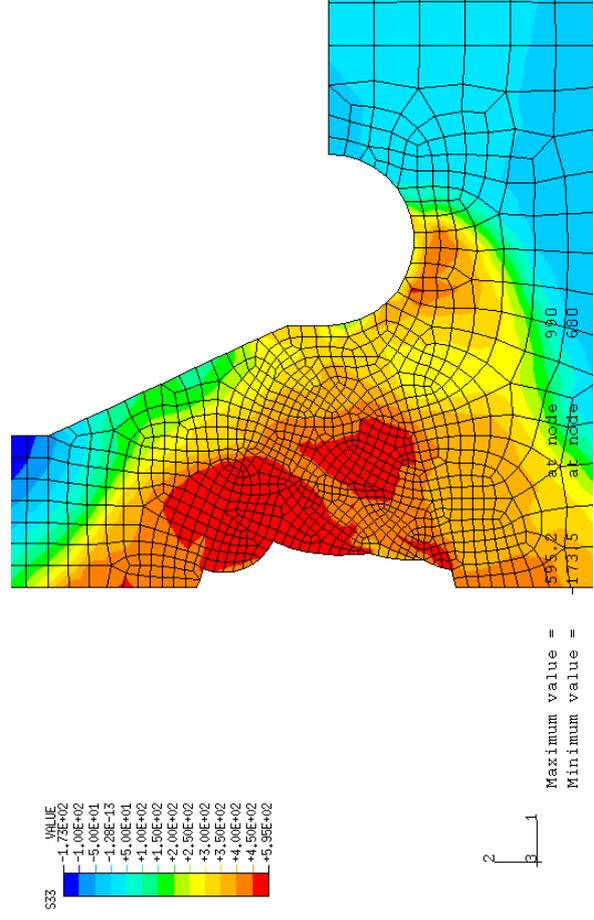
図 E-3(1) 解析モデル及び拘束条件 (2次元軸対称要素)



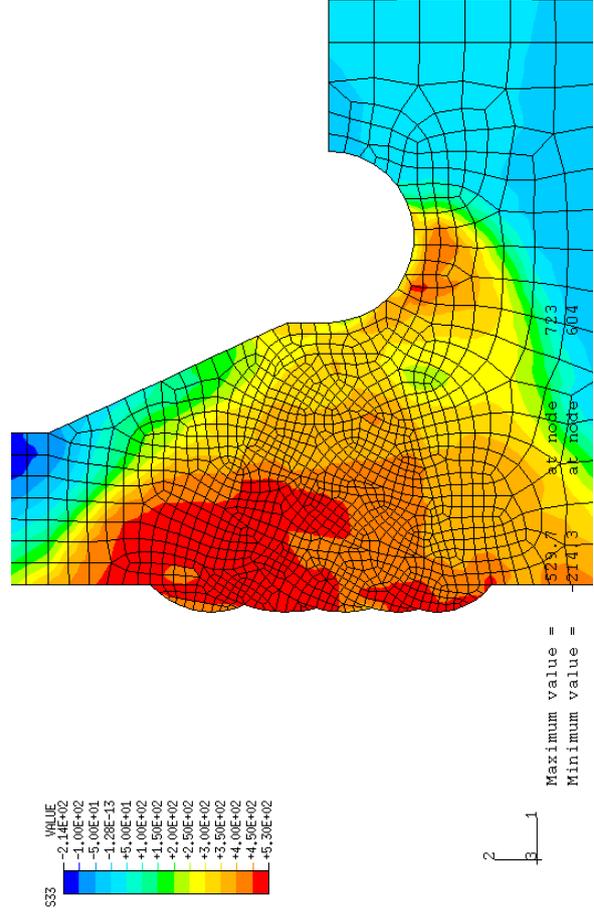
<1パス終了時>



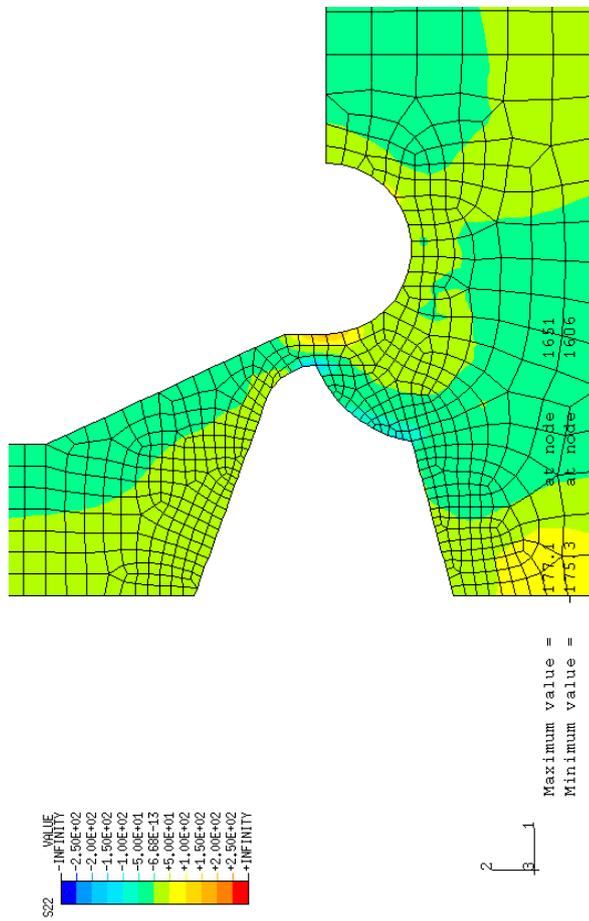
<5パス終了時>



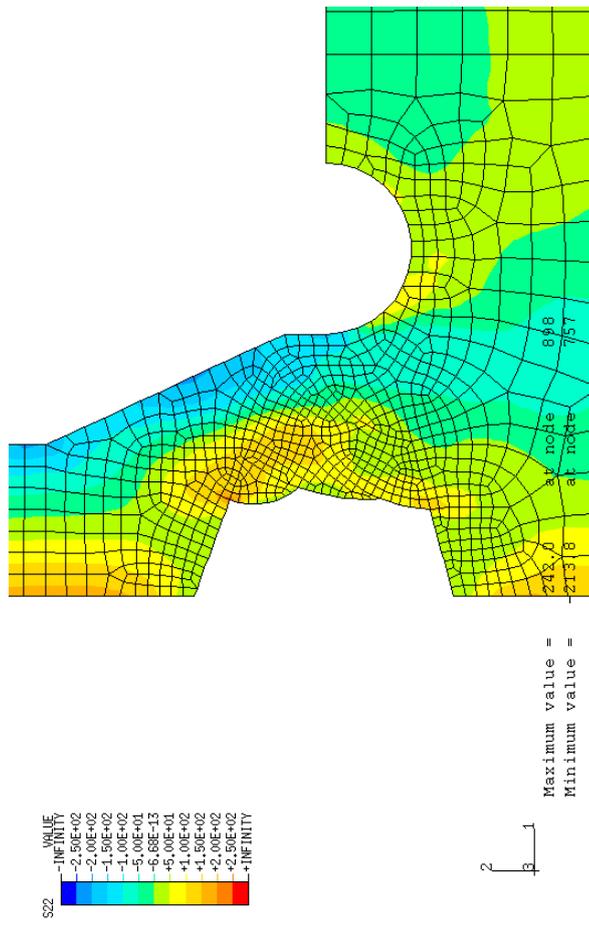
<9パス終了時> 図E-3(2) 代表パスにおける周方向応力分布 (単位N/mm<sup>2</sup>)



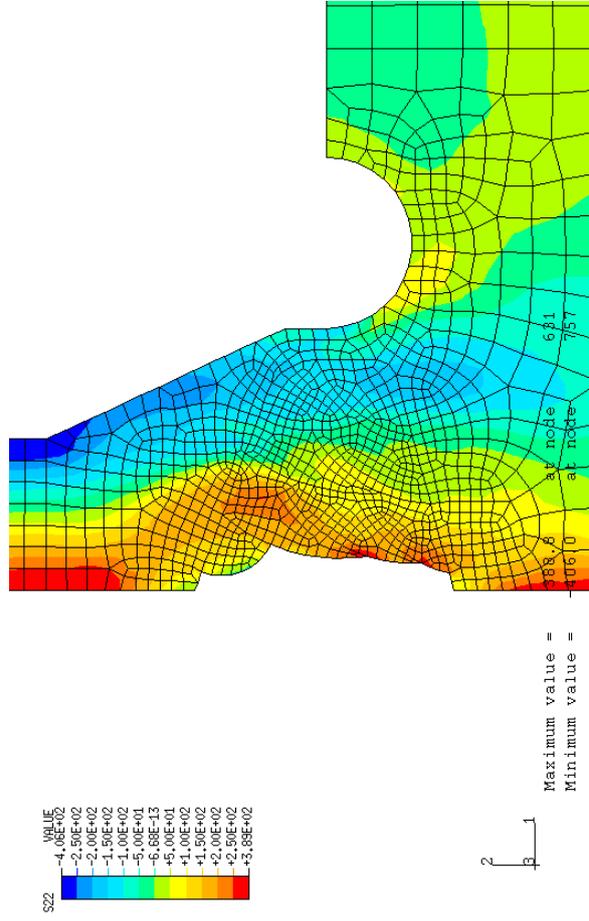
<14パス終了時:最終パス>



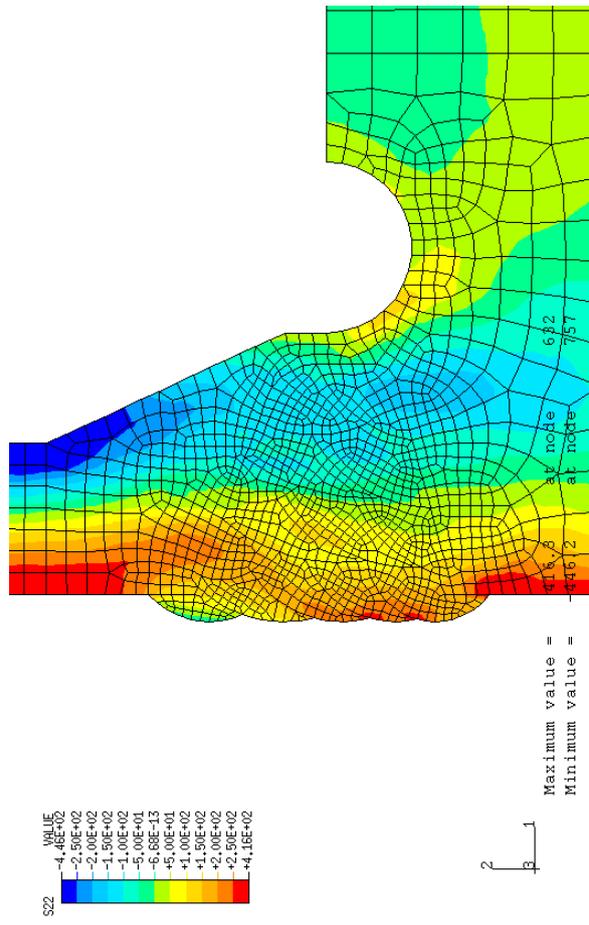
<1パス終了時>



<5パス終了時>



<9パス終了時> 図E-3(3) 代表パスにおける軸方向応力分布 (単位N/mm<sup>2</sup>) <14パス終了時:最終パス>



## 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き裂のき裂進展評価を実施して、想定したき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E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き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、評価対象とするき裂は周方向き裂とする。

### 2.2 き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、き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き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 き裂進展特性

当該溶接部はステンレス鋼であることから、SCC き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 き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 き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、き裂進展速度  $da/dt$  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 き裂進展特性及び低炭素ステンレス鋼の SCC き裂進展特性を図 F-1 に示す。

## 2.5 初期き裂形状

初期き裂形状として、初期き裂深さ  $a_0$  が 0.05 mm、初期き裂長さ  $l_0$  が 0.5 mm の半楕円形状の表面き裂を想定した。

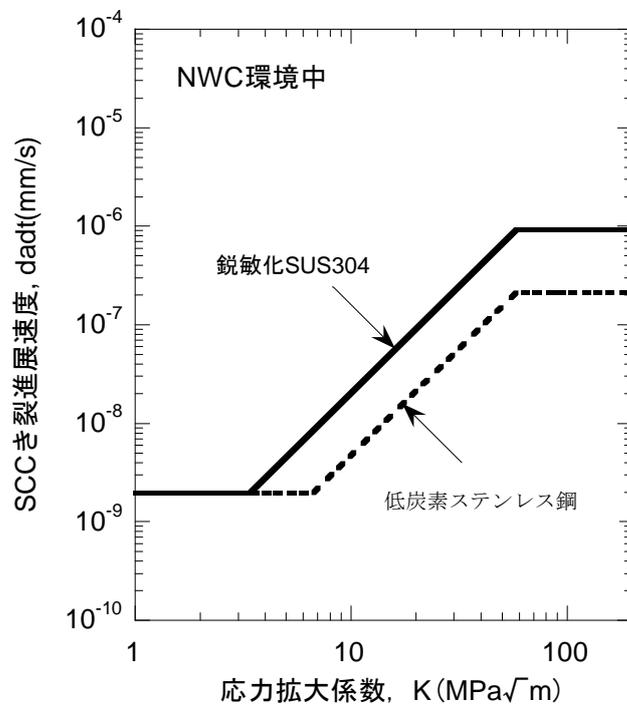


図 F-1 NWC 環境中における鋭敏化 SUS304 及び低炭素ステンレス鋼の SCC き裂進展特性

### 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き裂進展評価に用いた当該部の軸方向残留応力分布を図F-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き裂進展評価結果を図F-3に示す。図F-3(a)では、き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-3(b)では、き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き裂進展特性としてNWC環境中における鋭敏化SUS304のSCC進展特性を用いた場合、き裂が経路全長に達する年数は13.9年、SCCき裂進展特性として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、き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き裂進展評価に用いた当該部の軸方向残留応力分布を図F-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き裂進展評価結果を図F-5に示す。図F-5(a)では、き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-5(b)では、き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き裂進展特性としてNWC環境中における鋭敏化SUS304のSCC進展特性を用いた場合、き裂が経路全長に達する年数は18.3年、SCCき裂進展特性として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、き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き裂進展評価に用いた当該部の軸方向残留応力分布を図F-6に示す。また、テーパ管とテールパイプ溶接部の周方向き裂進展評価結果を図F-7に示す。図F-7(a)では、き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-7(b)では、き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き裂進展特性としてNWC環境中における鋭敏化SUS304のSCC進展特性を用いた場合、き裂が経路全長に達する年数は17.1年、SCCき裂進展特性として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、き裂が経路全長に達する年数は62.6年である。

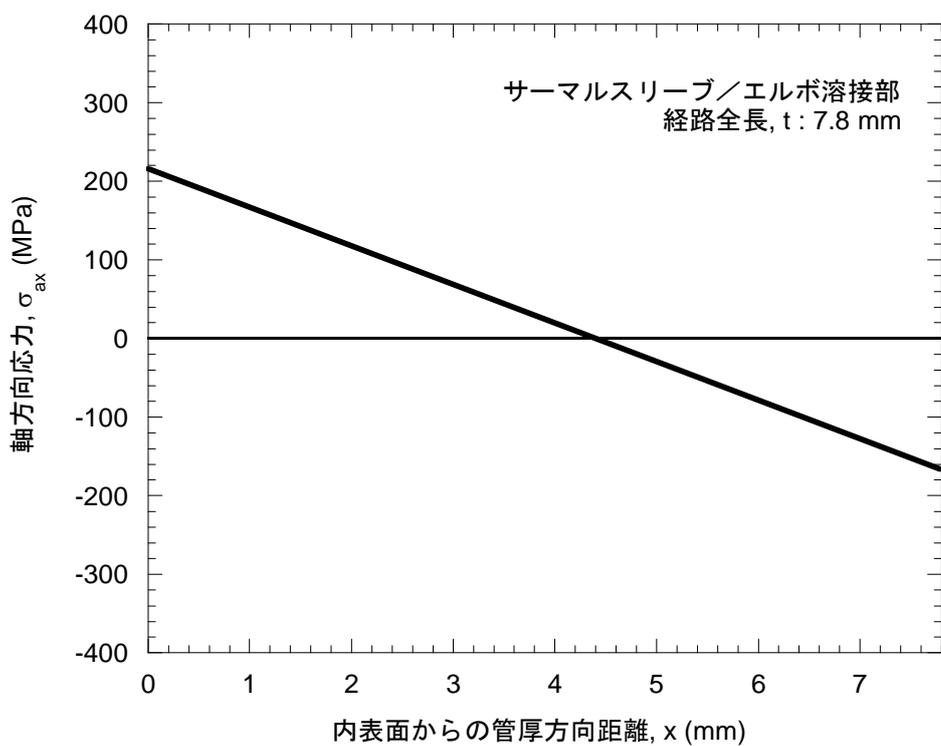
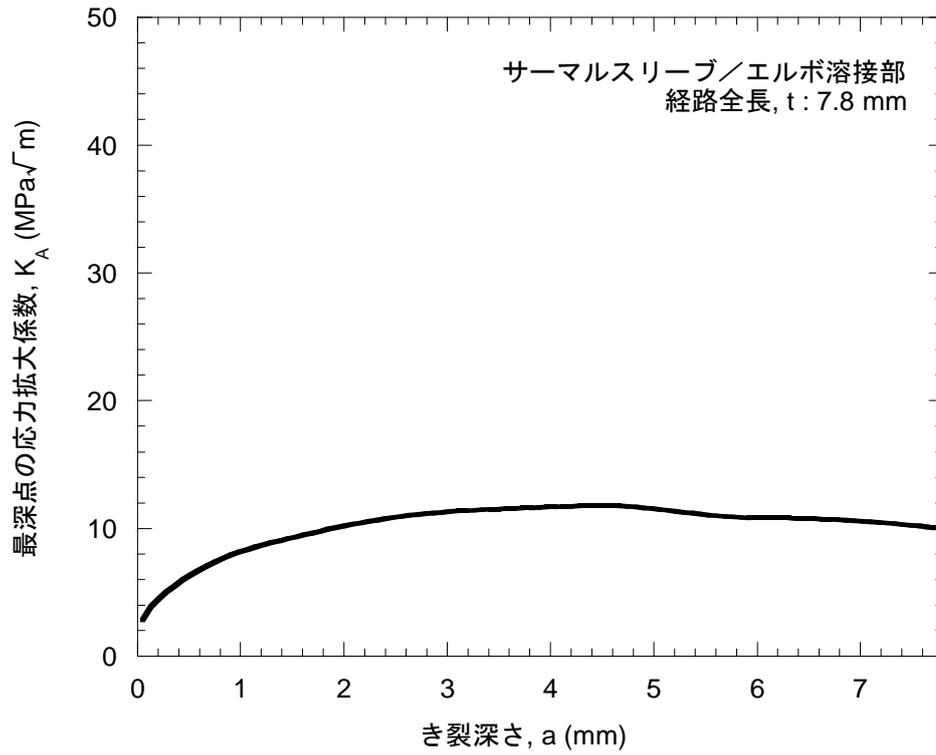
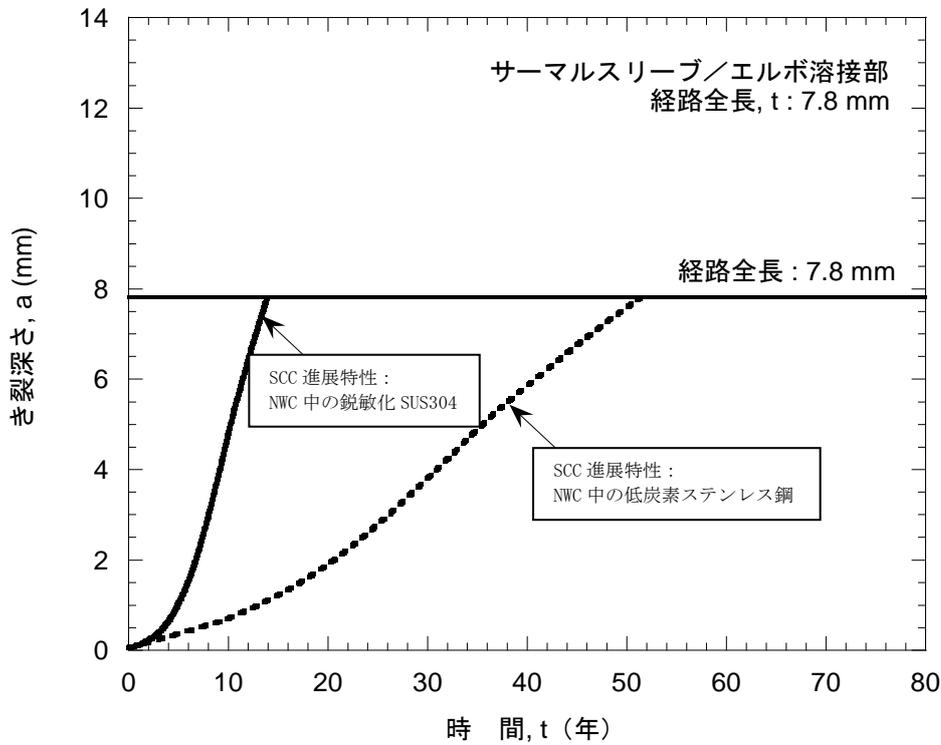


図 F-2 サーマルスリーブとエルボ溶接部の周方向き裂進展評価に用いた軸方向残留応力分布

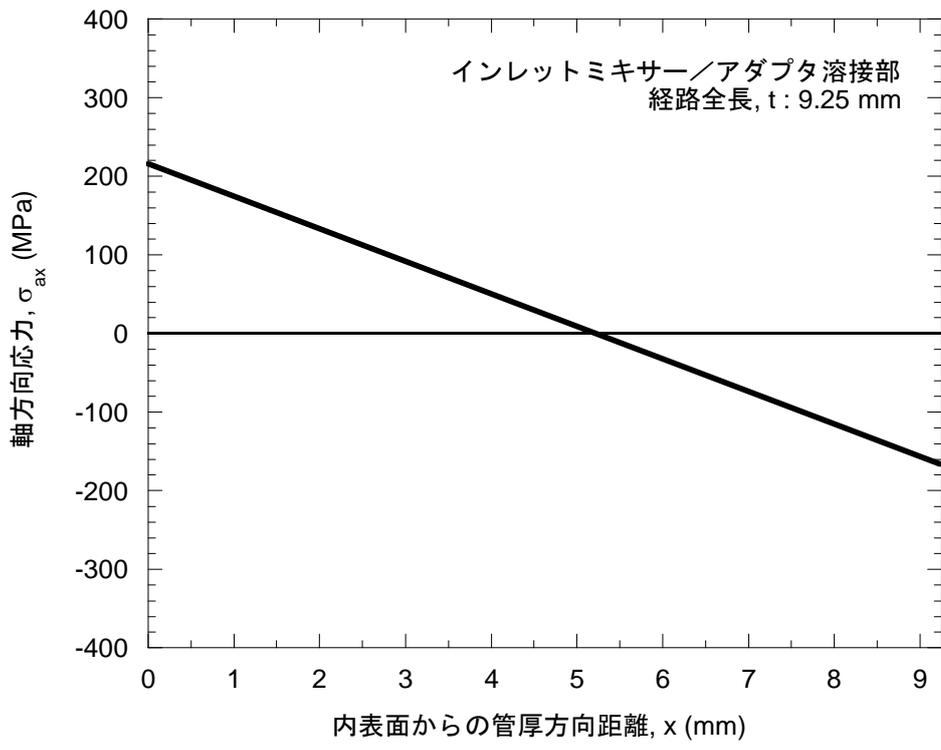


(a) 最深点の応力拡大係数とき裂深さの関係

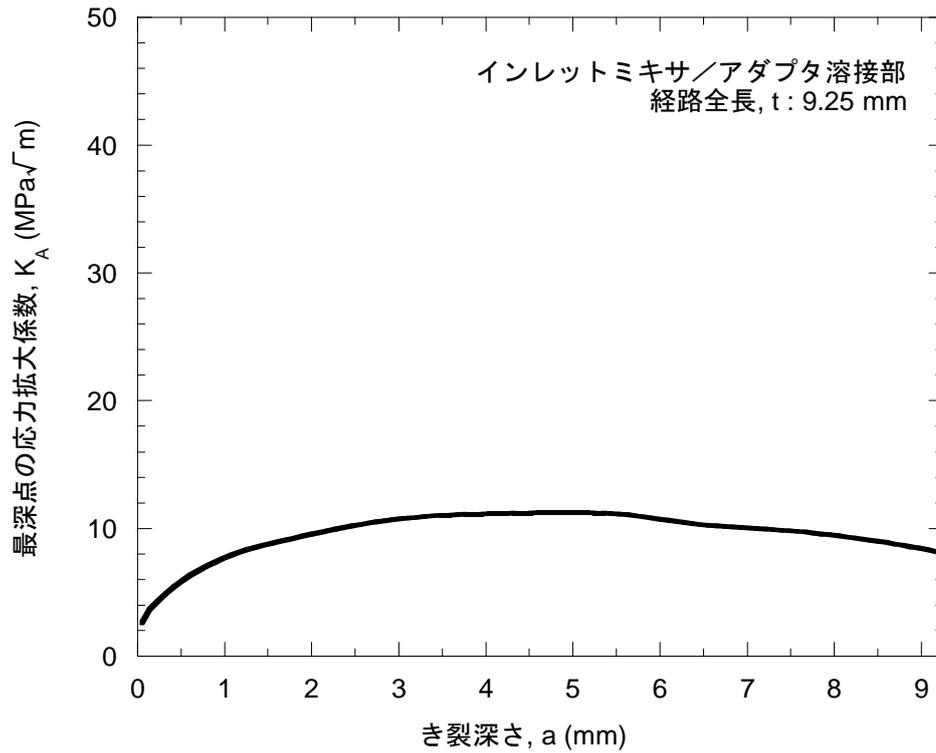


(b) き裂深さと時間の関係

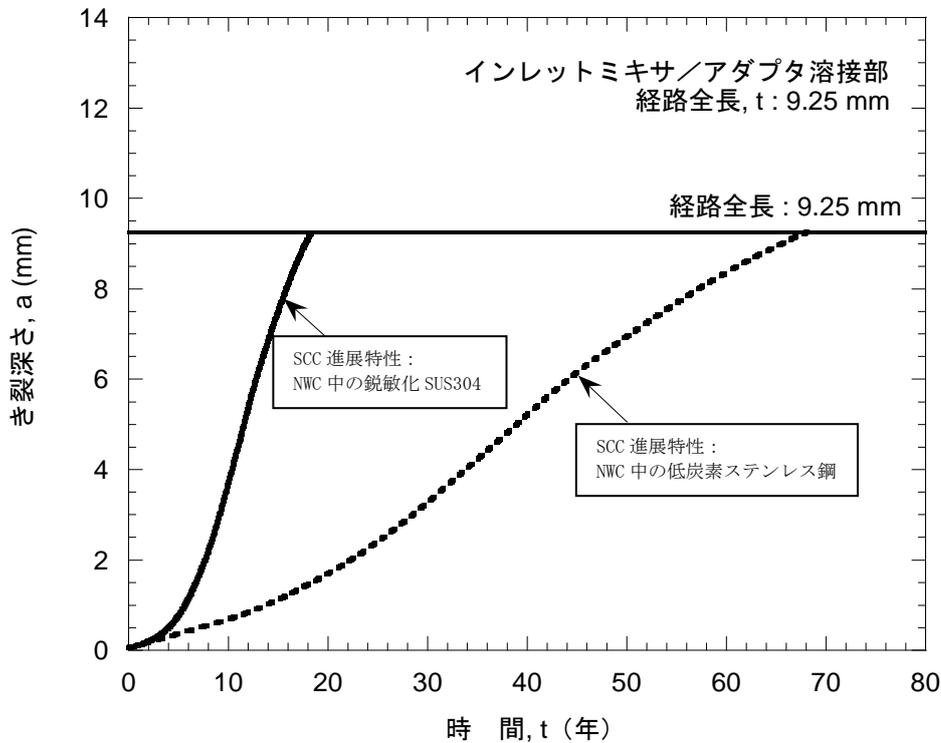
図 F-3 サーマルスリーブとエルボ溶接部の周方向き裂進展評価結果



図F-4 インレットミキサとアダプタ溶接部の周方向き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き裂深さの関係



(b) き裂深さと時間の関係

図 F-5 インレットミキサとアダプタ溶接部の周方向き裂進展評価結果

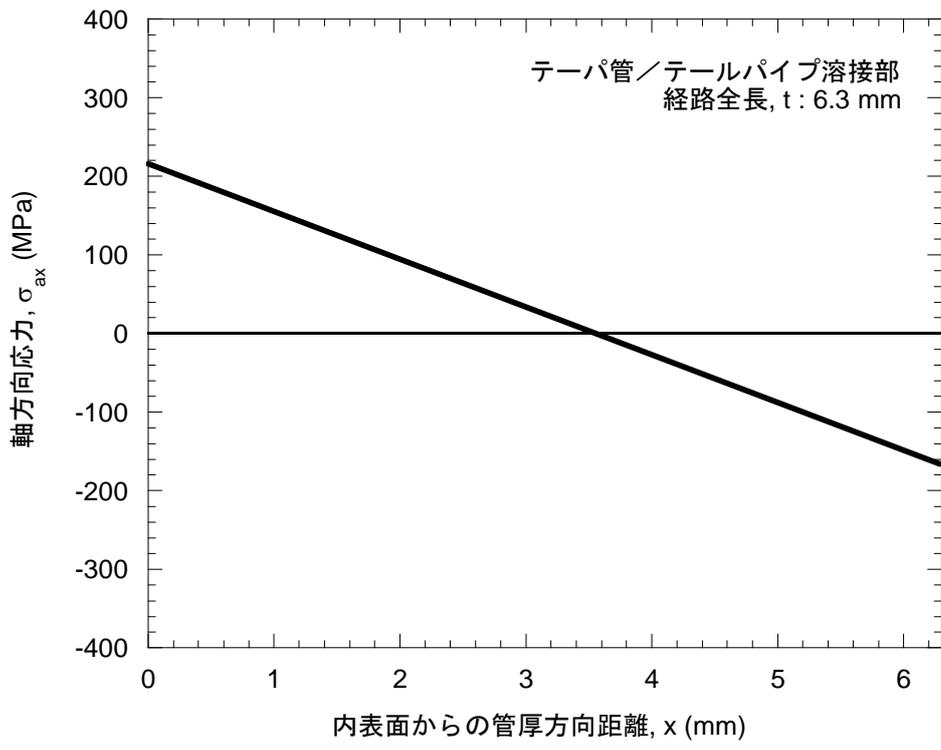
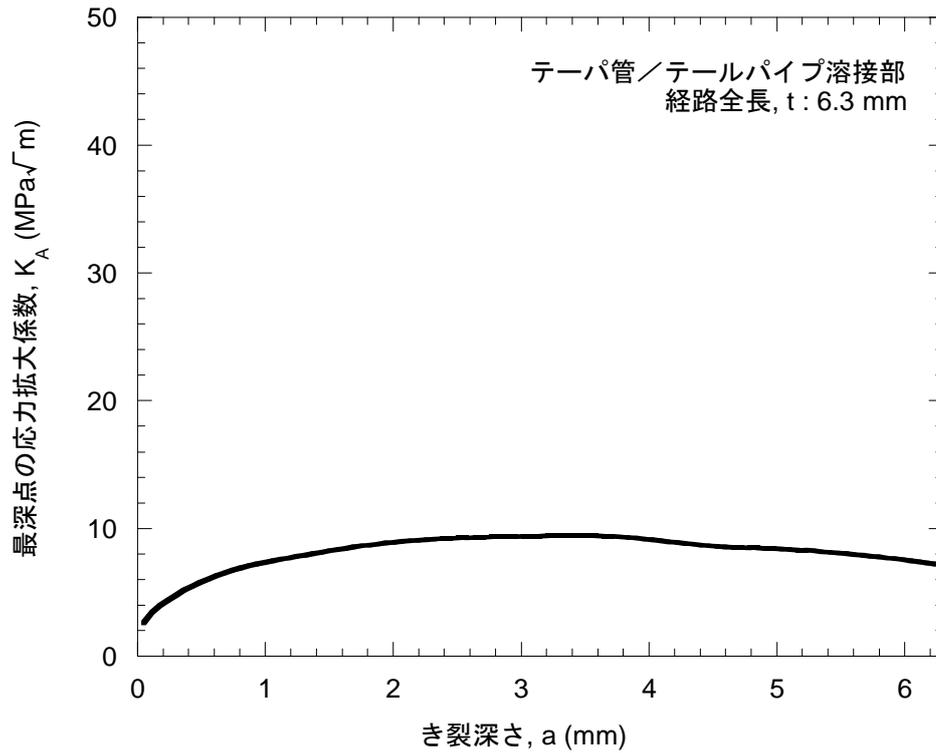
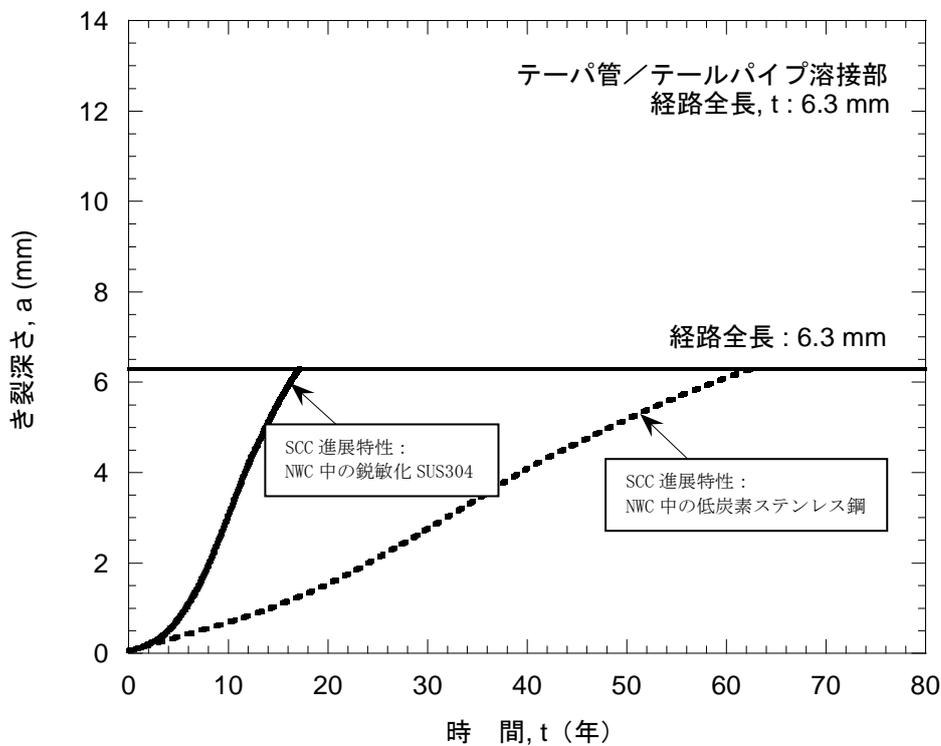


図 F-6 テーパ管とテールパイプ溶接部の周方向き裂進展評価に用いた軸方向残留応力分布



(a) 最深点の応力拡大係数とき裂深さの関係



(b) き裂深さと時間の関係

図 F-7 テーパー管とテールパイプ溶接部の周方向き裂進展評価結果

#### 4. まとめ

ジェットポンプにおける管／管溶接部におけるき裂進展評価を実施して、き裂の板厚貫通時期の検討を行った。き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、評価対象とするき裂は周方向き裂を想定して、き裂進展評価を実施した。

SCC き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、き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 き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、き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G ローアリング/シュラウドサポートプレート溶接部の SCC き裂進展評価

### 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き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 想定するき裂進展経路

き裂進展評価において、想定するき裂進展経路を図G-1に示す。

内面から外面へ向かうき裂進展経路のうち、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としてき裂進展経路を設定した。

#### 2.2 き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き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E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き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 き裂進展特性

当該溶接部はインコネル 182 であることから、SCC き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) におけるインコネル 182 の SCC き裂進展特性を用いた。

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

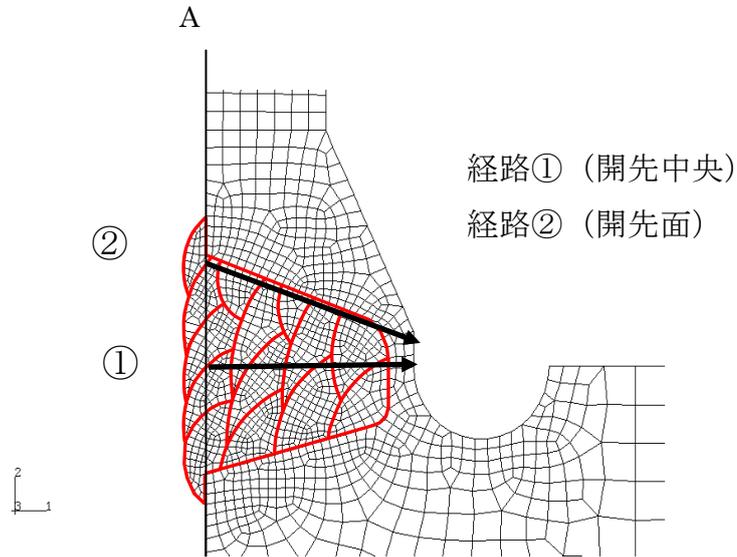
$$da/dt = 3 \times 10^{-15} K^{5.186} \quad (13.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \leq K \leq 50.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (2)$$

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

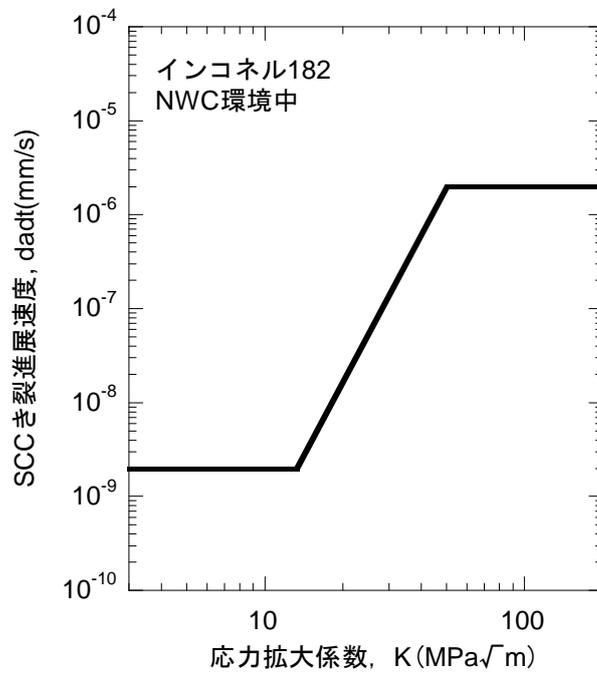
上式において、き裂進展速度  $da/dt$  の単位は mm/s、応力拡大係数  $K$  の単位は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  である。また、上式で表されるインコネル 182 の SCC き裂進展特性を図G-2に示す。

## 2.5 初期き裂形状

初期き裂形状として、初期き裂深さ  $a_0$  が 0.05 mm、初期き裂長さ  $l_0$  が 0.5 mm の半楕円形状の表面き裂を想定した。



図G-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き裂進展経路

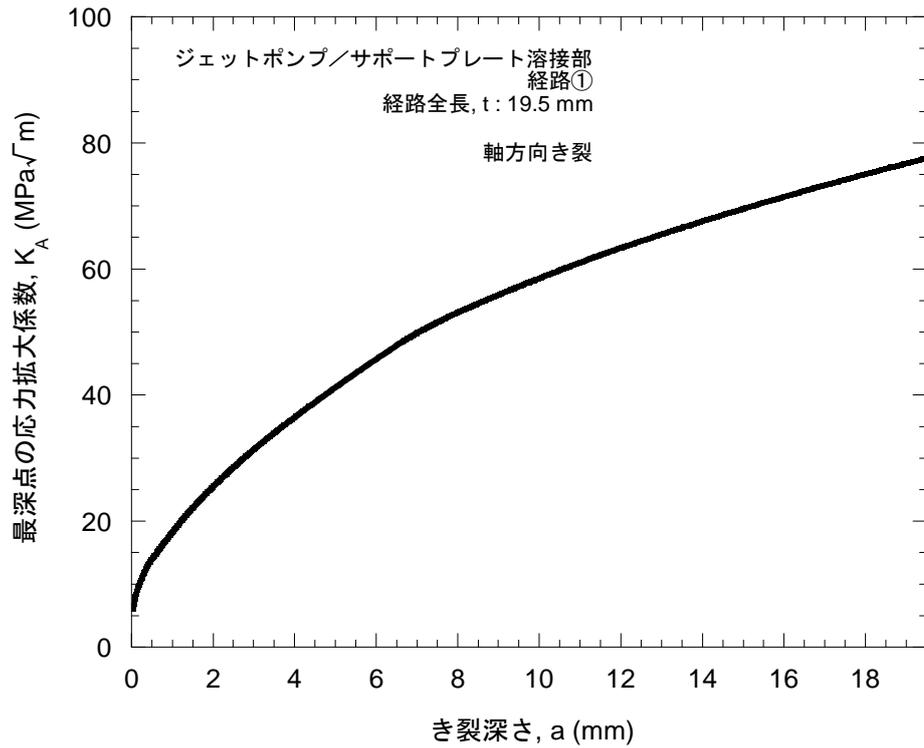


図G-2 NWC 環境中におけるインコネル 182 の SCC き裂進展特性

### 3. 評価結果

経路①の周方向き裂進展評価に用いた当該部のき裂進展方向に対する鉛直方向応力分布を図G-3に示す。また、経路①の周方向き裂進展評価結果を図G-4に示す。図G-4(a)では、き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G-4(b)では、き裂深さと時間の関係を示した。経路①の周方向き裂の場合、経路全長は19.5mmであるが、80年経過しても、き裂は経路全長に達しない。

経路②の周方向き裂進展評価に用いた当該部のき裂進展方向に対する鉛直方向応力分布を図G-5に示す。また、経路②の周方向き裂進展評価結果を図G-6に示す。図G-6(a)では、き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G-6(b)では、き裂深さと時間の関係を示した。経路②の周方向き裂の場合、経路全長は19.5mmであるが、80年経過しても、き裂は経路全長に達しない。



(a) 最深点の応力拡大係数とき裂深さの関係

(b) き裂深さと時間の関係

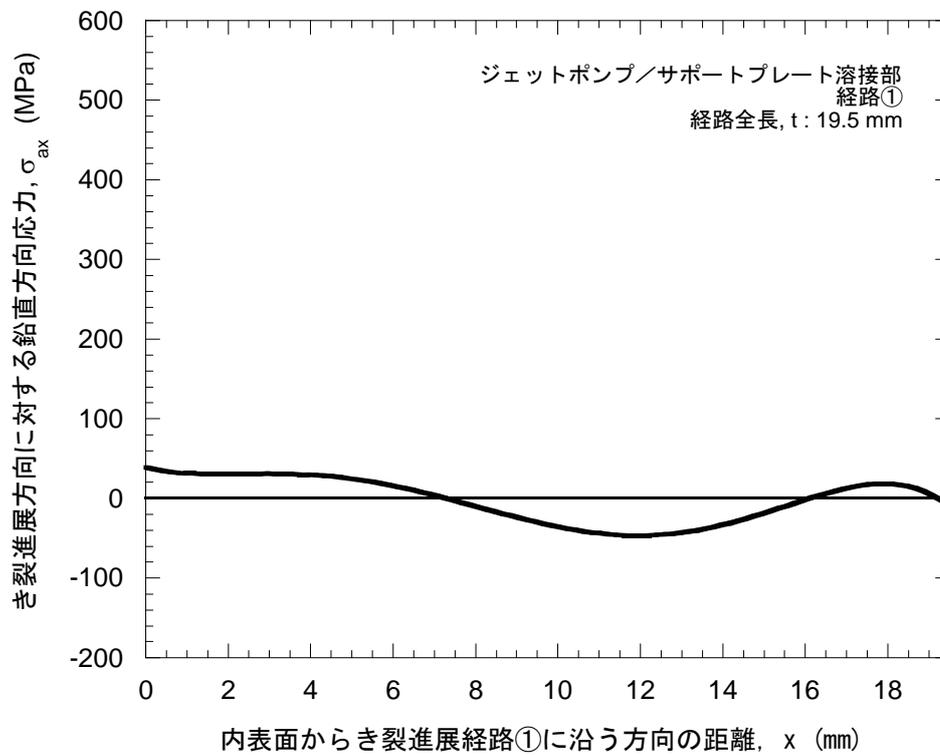
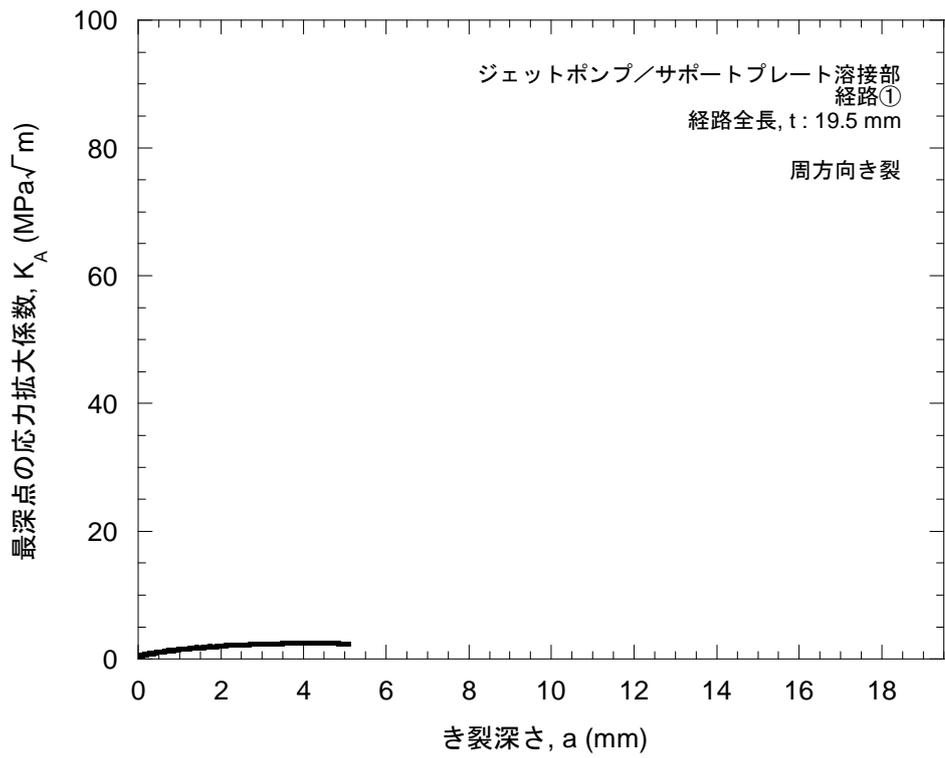
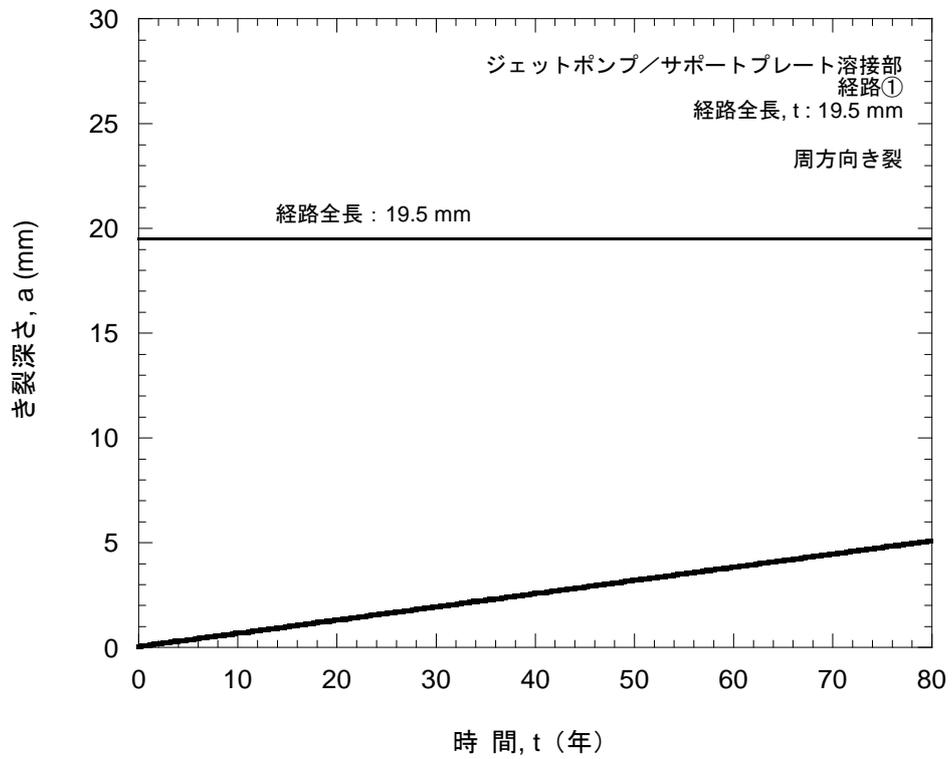


図3 経路①の周方向き裂進展評価に用いたき裂に対する鉛直方向残留応力分布



(a) 最深点の応力拡大係数とき裂深さの関係



(b) き裂深さと時間の関係

図4 経路①の周方向き裂進展評価結果

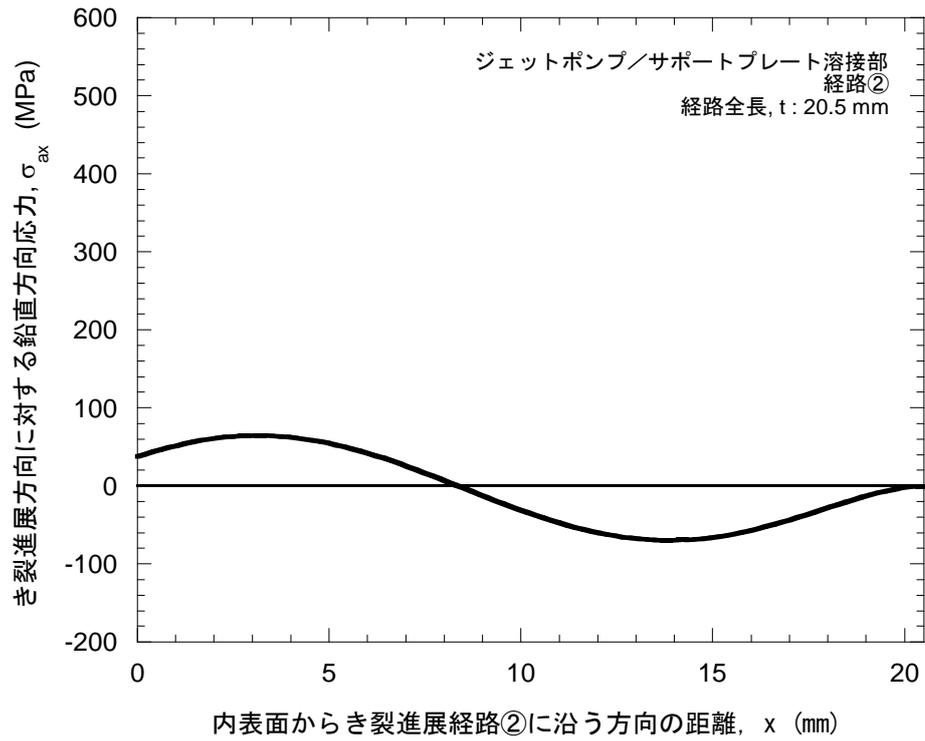
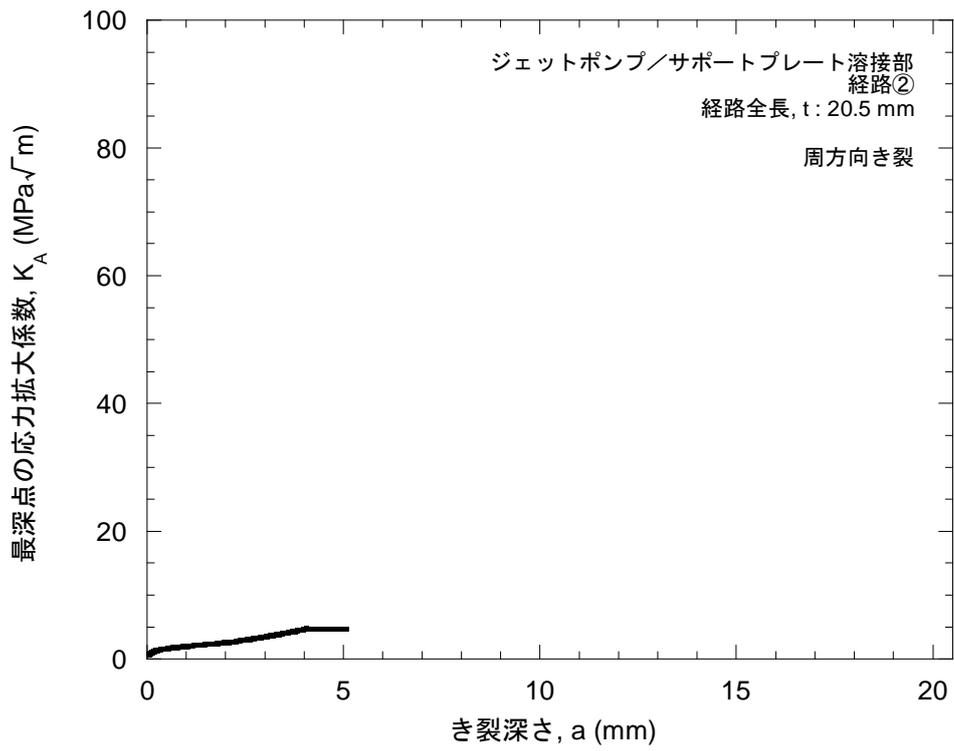
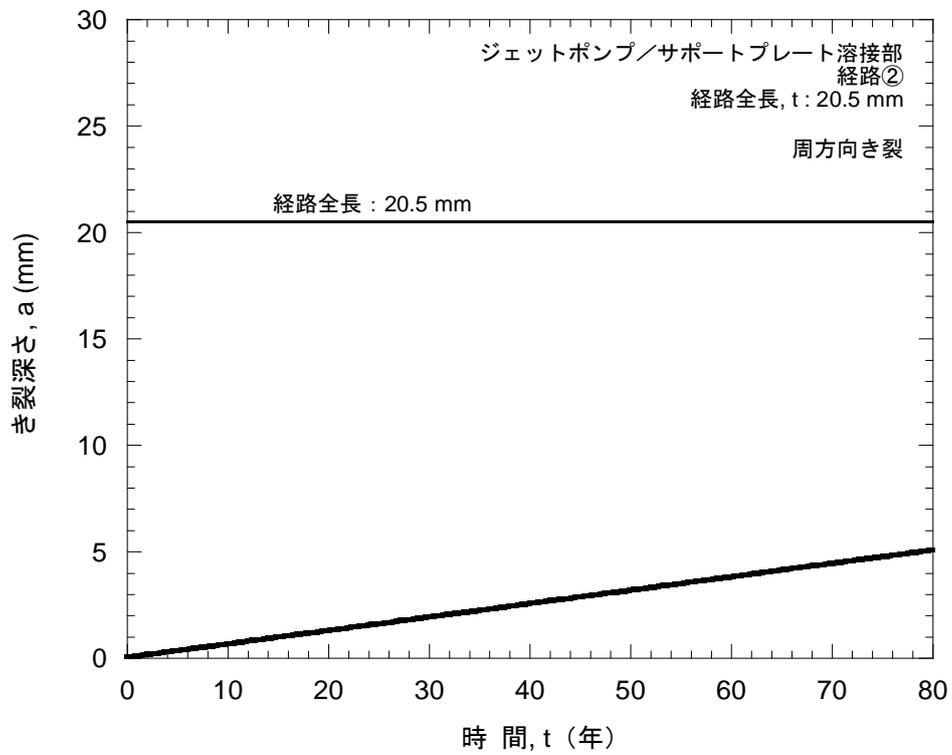


図5 経路②の周方向き裂進展評価に用いたき裂に対する鉛直方向残留応力分布



(a) 最深点の応力拡大係数とき裂深さの関係



(b) き裂深さと時間の関係

図6 経路②の周方向き裂進展評価結果

付録H 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 により貫通き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インコネル、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。

部分貫通き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、 $\sigma_f$ : 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/mm<sup>2</sup> (@276°C)

SUS304 : 117.9 N/mm<sup>2</sup> (@276°C)

SUS316L : 97.8 N/mm<sup>2</sup> (@276°C)

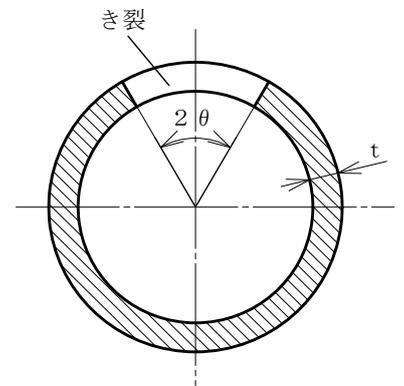
$R$ : 管の平均半径

$t$ : 管の板厚

$P$ : 内圧 (差圧)

$a$ : き裂の深さ

$\theta$ : き裂の半角 (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。

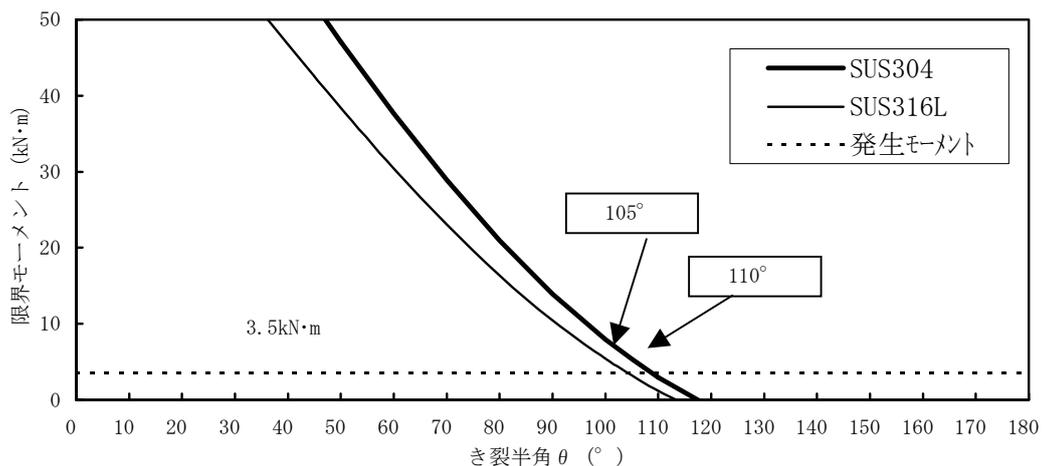
### 4. 許容貫通欠陥の評価結果

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H-1～4にそれぞれ示す。

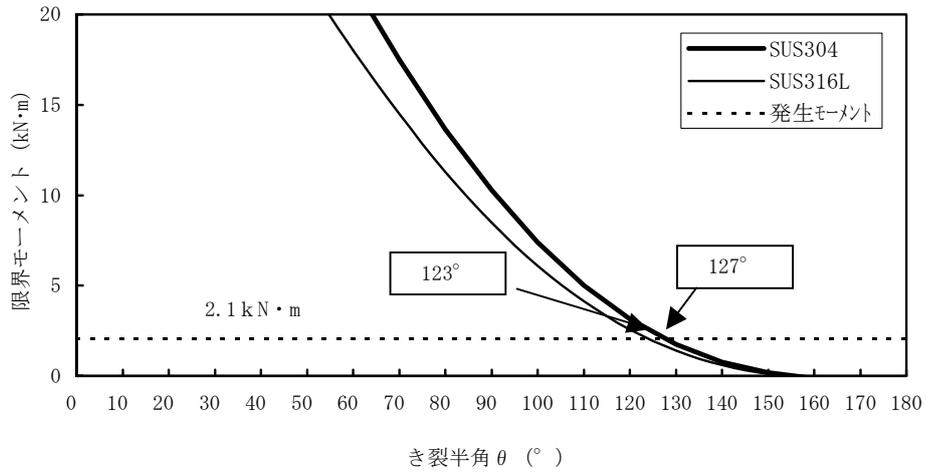
各図において、限界モーメント  $M_c(SF)$  の曲線が、発生モーメントと等しくなるき裂半角  $\theta$  を求めた。各溶接部の許容貫通欠陥（中心角  $2\theta$ ）の評価結果を表H-1にまとめて示す。

表H-1 許容貫通欠陥の評価結果

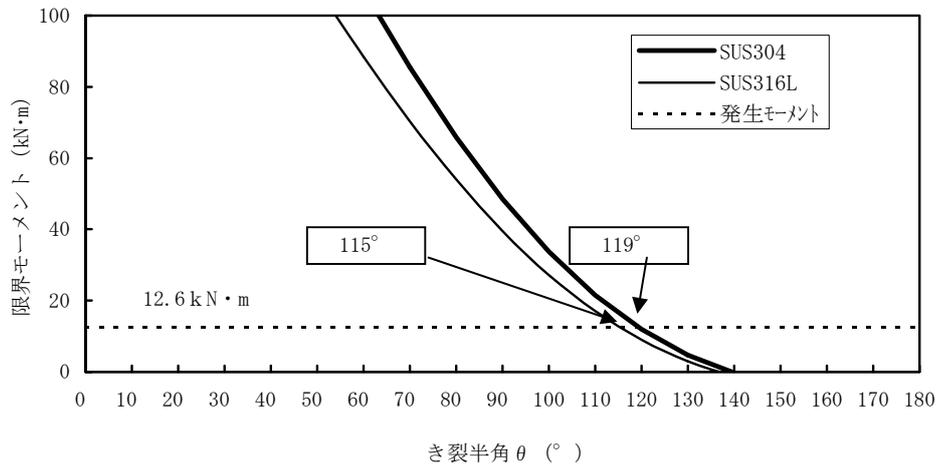
溶接部	発生モーメント	材料の種類	許容貫通欠陥の中心角
サーマルスリーブ/エルボ溶接部 (図H-1)	3.5 kN・m	SUS304	110°
		SUS316L	105°
ミキサー/アダプタ溶接部 (図H-2)	2.1 kN・m	SUS304	127°
		SUS316L	123°
テーパ管/テールパイプ溶接部 (図H-3)	12.6 kN・m	SUS304	119°
		SUS316L	115°
ローアリング/シュラウドサポートプレート溶接部 (図H-4)	12.6 kN・m	NCF600	138°



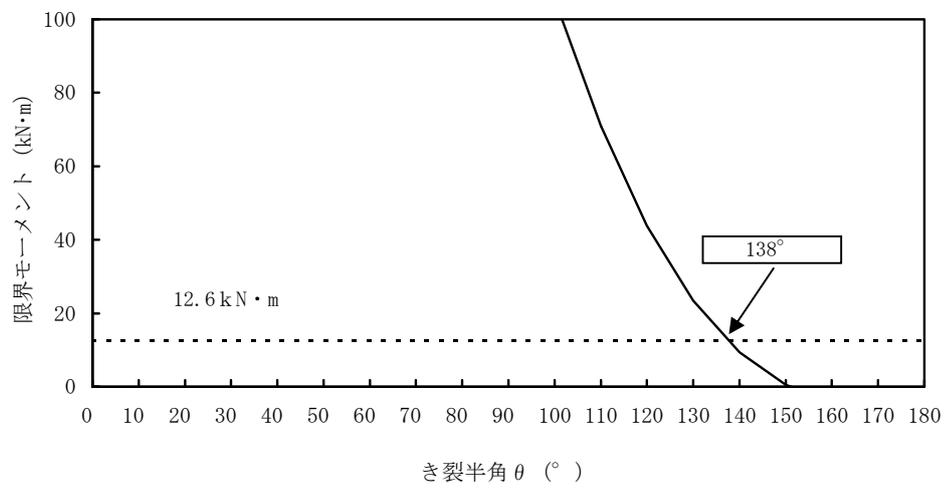
図H-1 サーマルスリーブ/エルボ溶接部の許容貫通欠陥



図H-2 ミキサー／アダプタ溶接部の許容貫通欠陥



図H-3 テープ管／テールパイプ溶接部の許容貫通欠陥

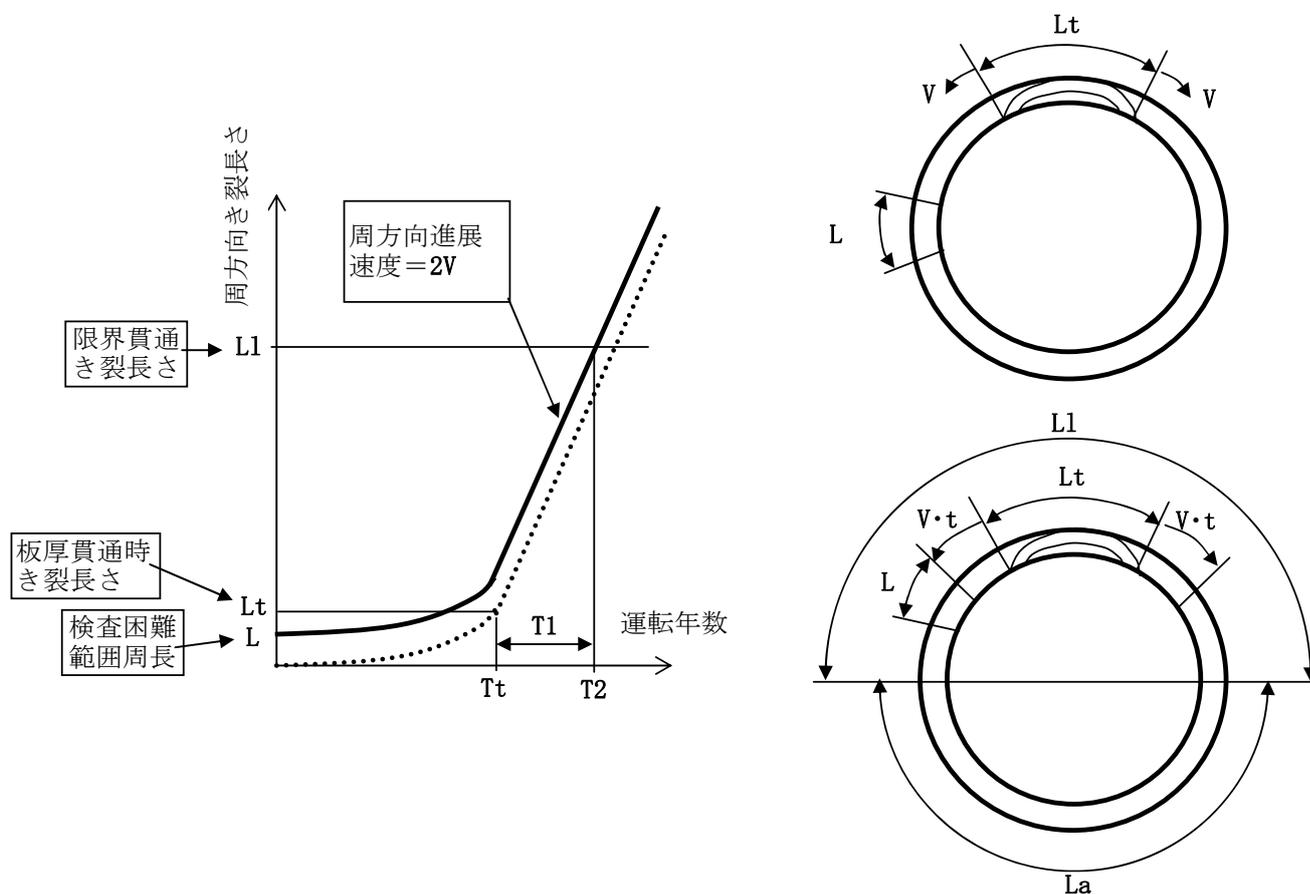


図H-4 ローリング/シュラウドサポートプレート溶接部の許容貫通欠陥

付録 I 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F
板厚貫通時の周方向き裂長さ	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C
周方向進展速度 (両側)	2V (mm/年)	58	13	58	13	58	13	Vは付録D の上限速度
許容残存長さ (半周)	La (mm)	401	401	255	255	761	761	注1
板厚貫通から限界き裂長さに 達するまでの期間	T1 (年)	5.8	25.2	1.9	8.2	9.4	41.2	
供用開始から限界き裂長さに 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H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、貫通き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、限界貫通き裂長さは半周とした。



付録 J 炉心冷却水の漏えい量評価

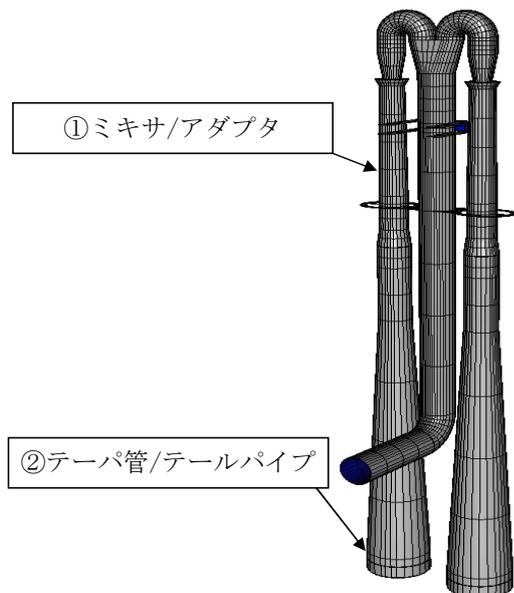
表 J-1 炉心再冠水機能評価結果

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 <sup>2</sup>	1.7696E+11	1.7696E+11				
周方向貫通き裂角度		度	180	180				
荷重	S <sub>1</sub> 地震によるモーメント	N・m	2100	12600				
応力	曲げ応力	N/mm <sup>2</sup>	10.9	10.8				
き裂開口面積 (注1)		mm <sup>2</sup>	67.0	386.0				
漏えい量 (注2)		m <sup>3</sup> /hr	3.3	18.7	13.2	261.8		
漏えい量合計		m <sup>3</sup> /hr			275		2750	
原子炉冷却水流量の設計裕 度 (注3)		m <sup>3</sup> /hr	5103					

注1：Tada-Parisの方法による曲げ開口面積に、き裂幅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き裂開口からの漏えい量。

注3：炉心再冠水維持は、低圧炉心スプレイ (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 J-2 LPCI機能評価結果

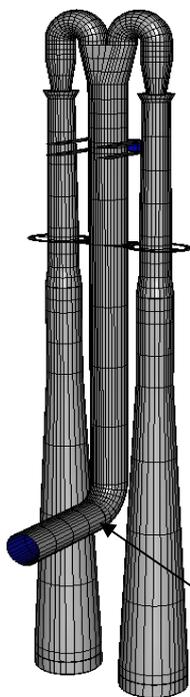
漏えい量評価部位			ライザ		
			サーマルスリーブ/エルボ	5箇所/1組 (溶接線の 両側考慮)	10組の すべての 溶接線
形状	外径	m	0.271		
	板厚	m	0.0078		
	縦弾性係数 (276℃)	N/m <sup>2</sup>	1.7696E+11		
周方向貫通き裂角度		度	180		
荷重	S <sub>1</sub> 地震によるモーメント	N・m	3500		
	差圧	kg/cm <sup>2</sup>	1.4		
き裂開口面積 (注1)		mm <sup>2</sup>	217.0		
漏えい量 (注2)		m <sup>3</sup> /hr	14.9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

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

注2：差圧による貫通き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 K 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 K-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 K-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。

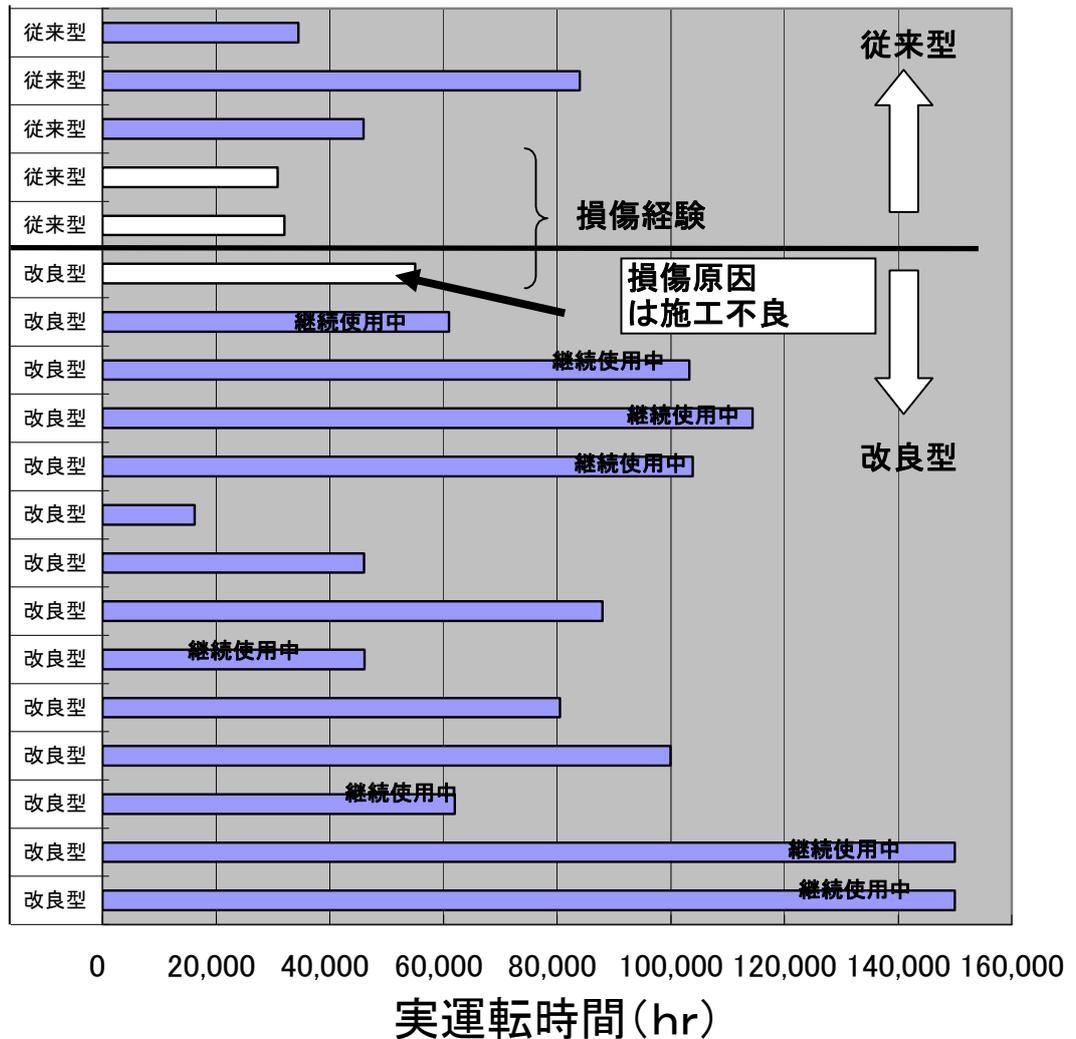


図 K-1 国内プラントのジェットポンプビームの使用実績

## 付録L 想定する周方向初期き裂の数等の検討

### 1. 実機配管 SCC 事例における周方向き裂の配置

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き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き裂の長さ、配置と、本ガイドラインで想定される板厚貫通時のき裂長さ（注 1）とを比較して、それぞれ図 L-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き裂に包絡されている。実機事例 5 については、想定貫通き裂に包絡されてはいないが、想定貫通き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）：周方向初期き裂（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き裂（き裂長さが板厚の 10 倍）

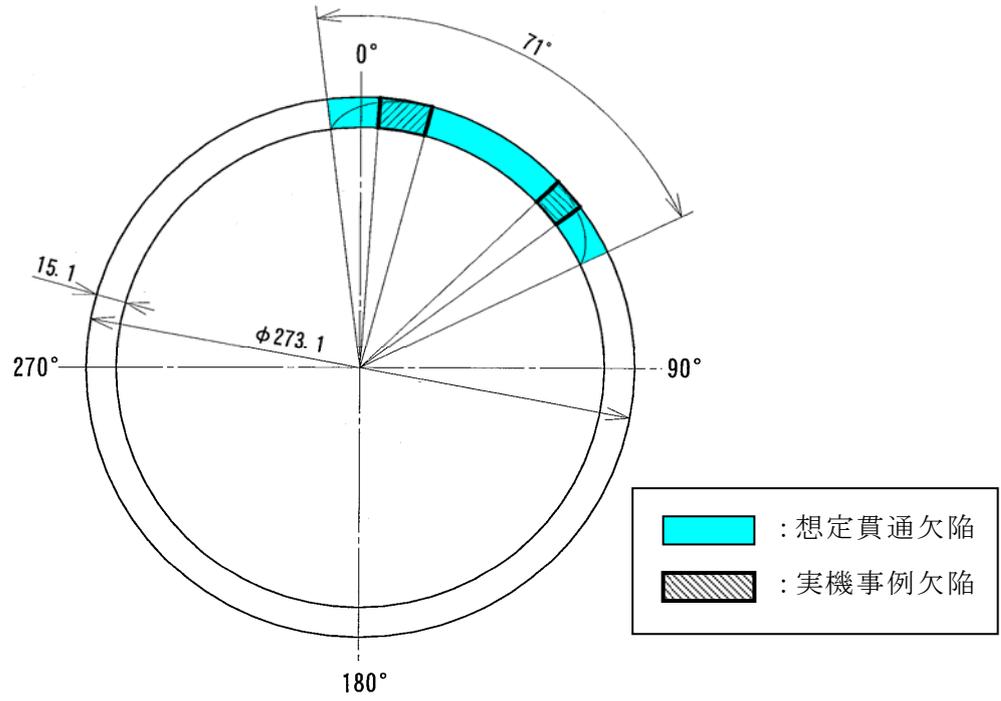


図 L-1 実機事例 1 の欠陥配置

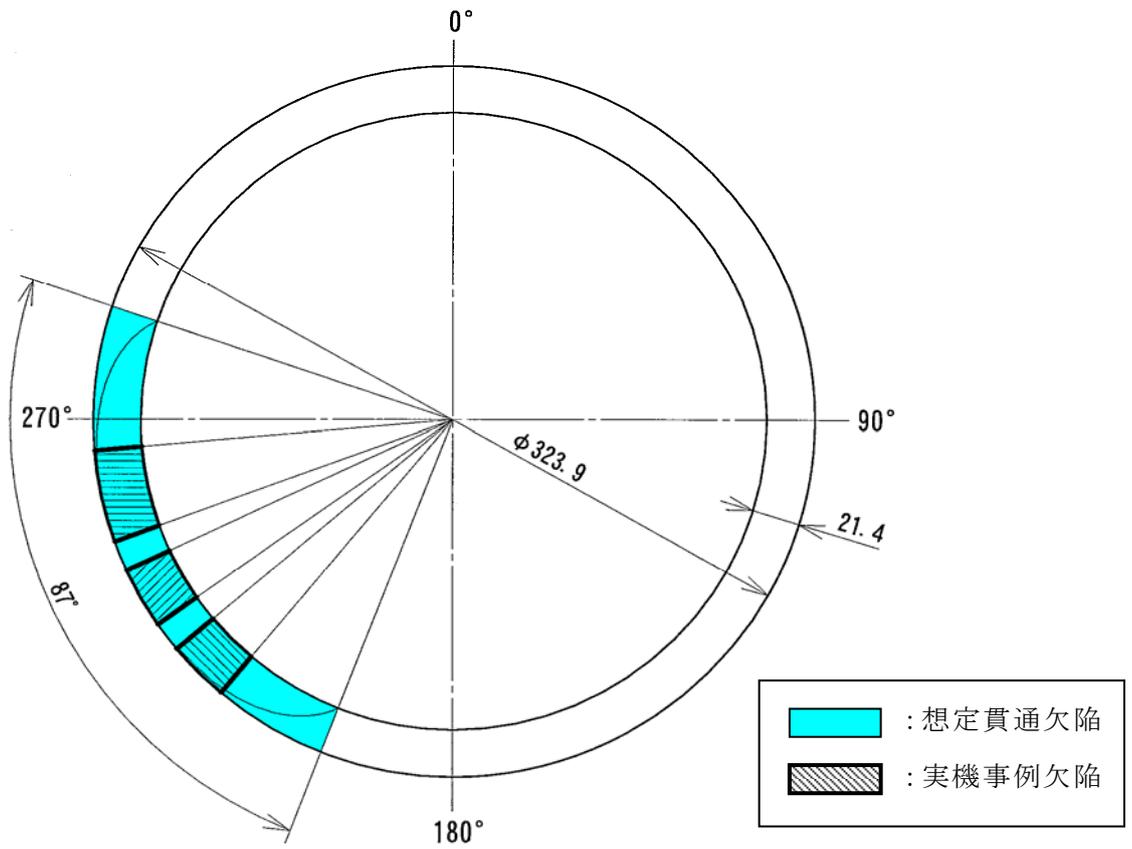


図 L-2 実機事例 2 の欠陥配置

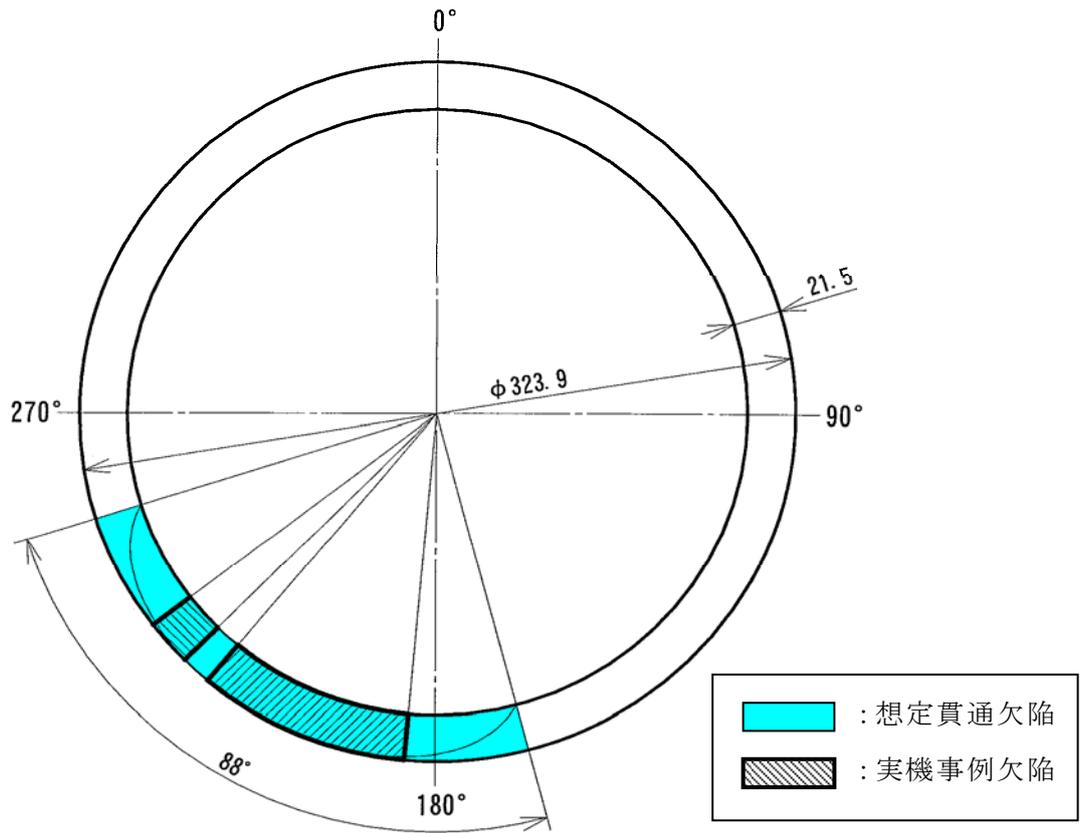


図 L-3 実機事例 3 の欠陥配置

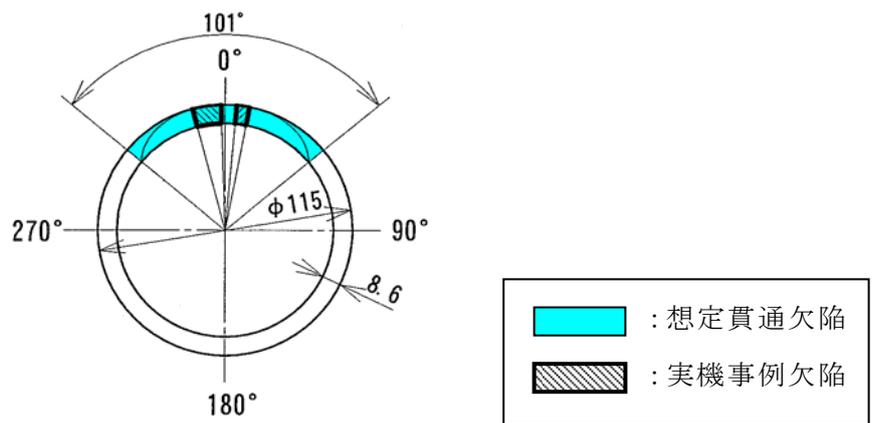


図 L-4 実機事例 4 の欠陥配置

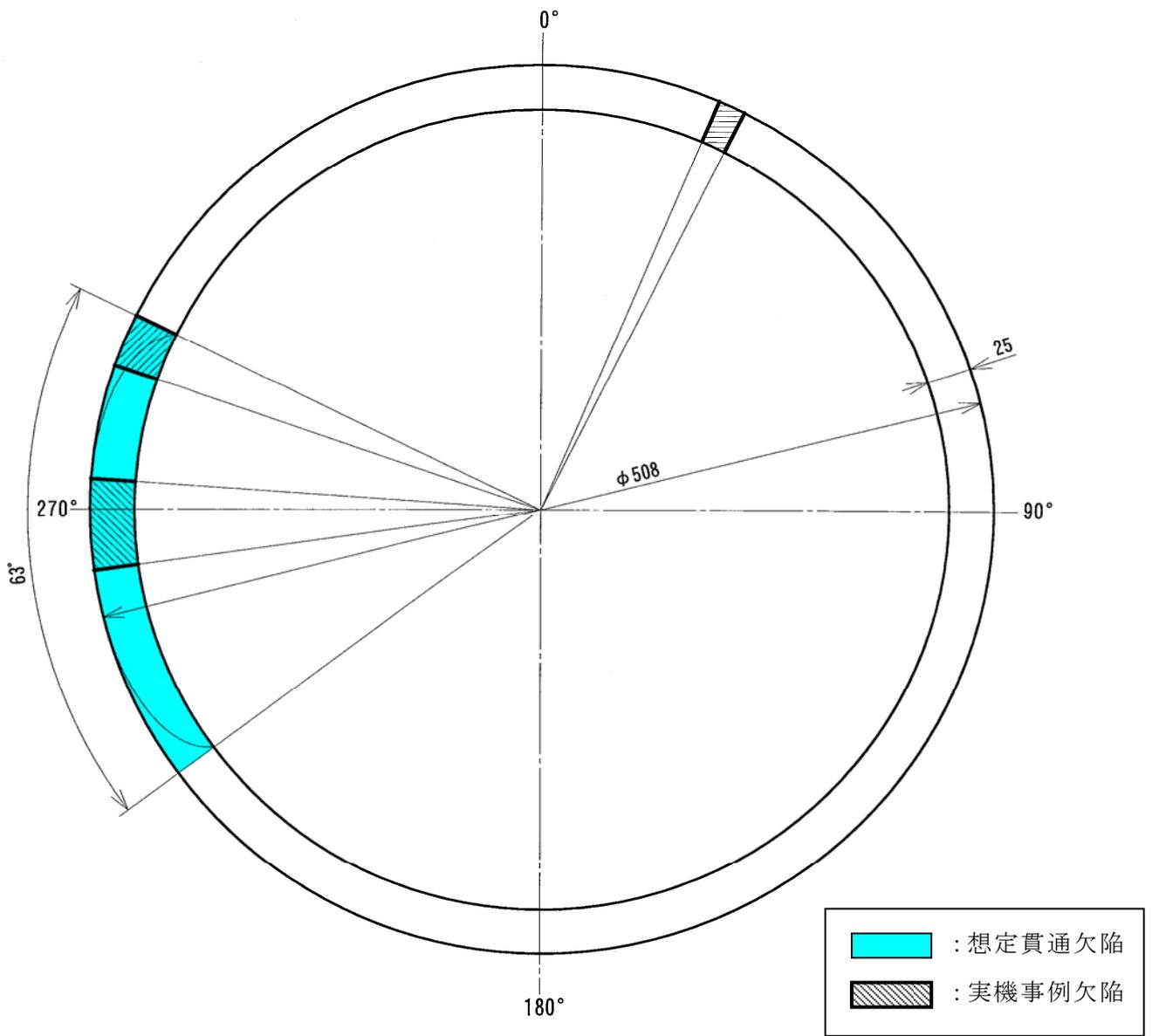


図 L-5 実機事例 5 の欠陥配置

## 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L-1に示す。

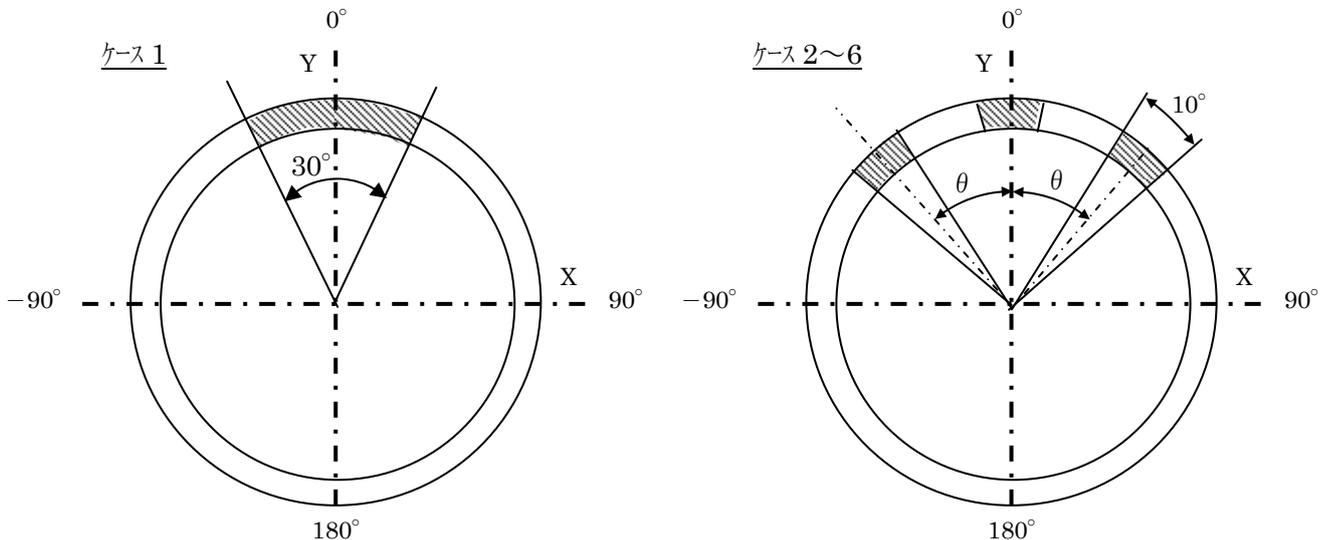
表L-1から、比較的大きな1つの貫通欠陥がある場合の断面2次モーメントの最小値は、3つの小さな欠陥がいずれの配置となった場合の断面2次モーメントよりも小さくなっていることが分かる。

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 L-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き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： $195000 \text{ N/mm}^2$ （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L-6参照）

##### (3) 境界条件：両端固定

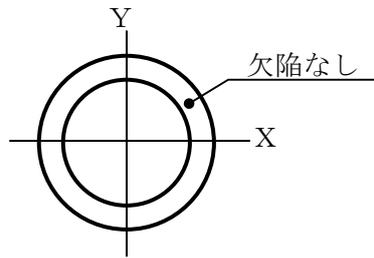
#### 3.3 解析結果

貫通欠陥の影響が大きくなる振動モード（図L-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L-2に示す。

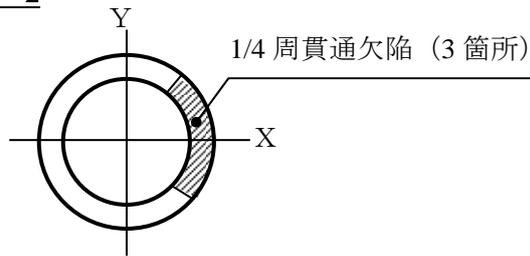
#### 3.4 まとめ

配管の全長を4等分する位置に同時に1/4周の貫通き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

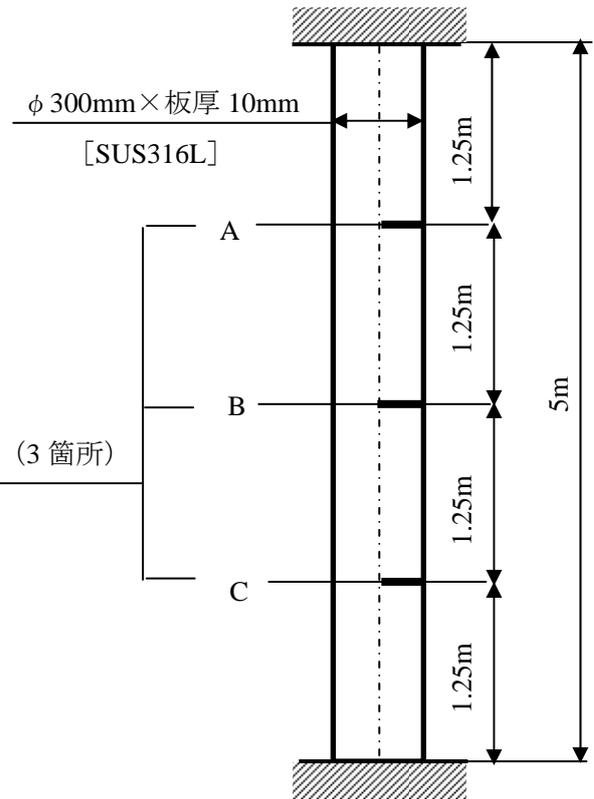


図 L-6 固有値解析モデル

表 L-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 L-6)	66.56	168.25

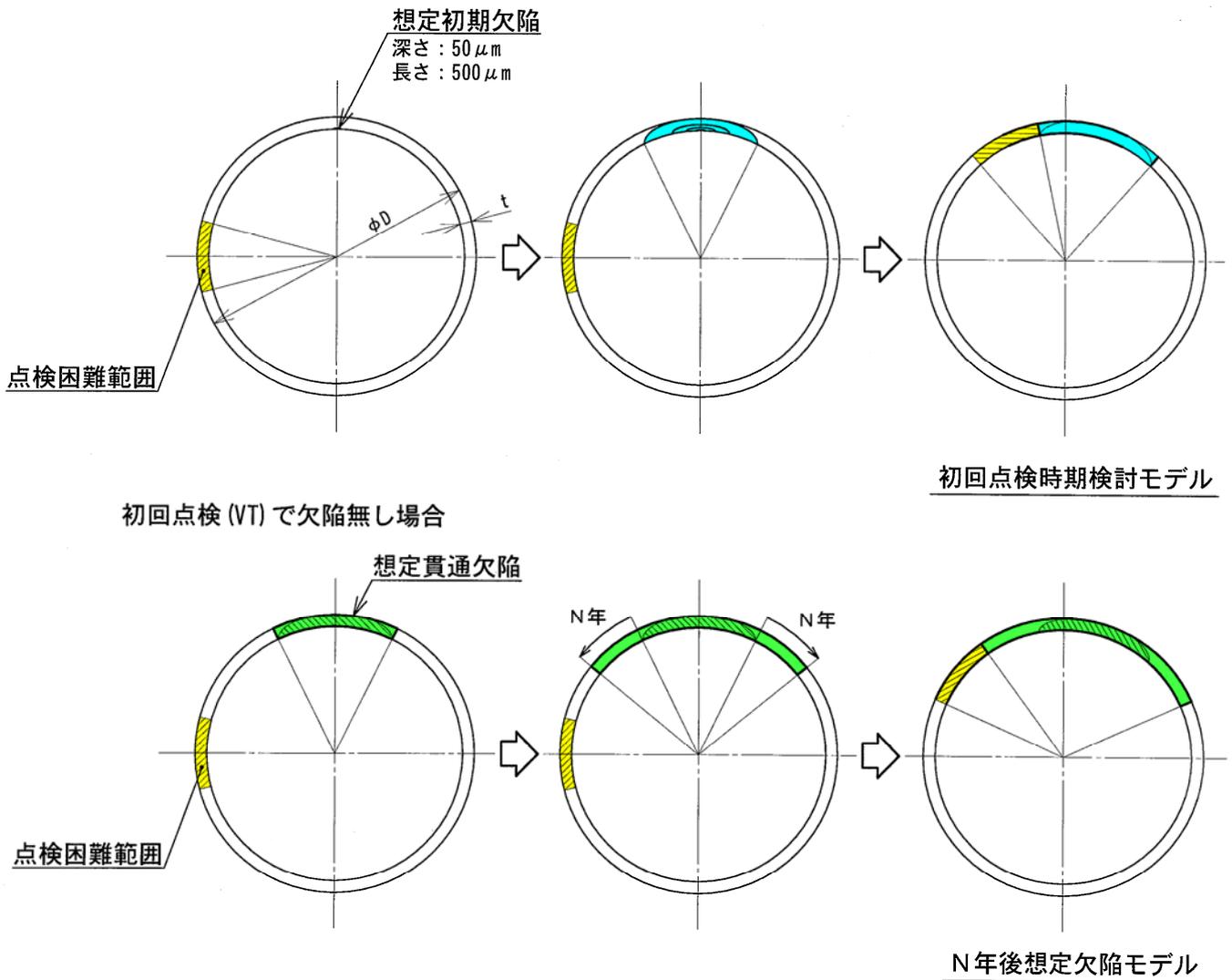
注 : 図 L-6 の X 軸を含む面内の振動モードのうち、低次のものからそれぞれ 1 次~2 次とした。

付録M 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M-1 に示す。

また，再点検周期の検討例を表M-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。

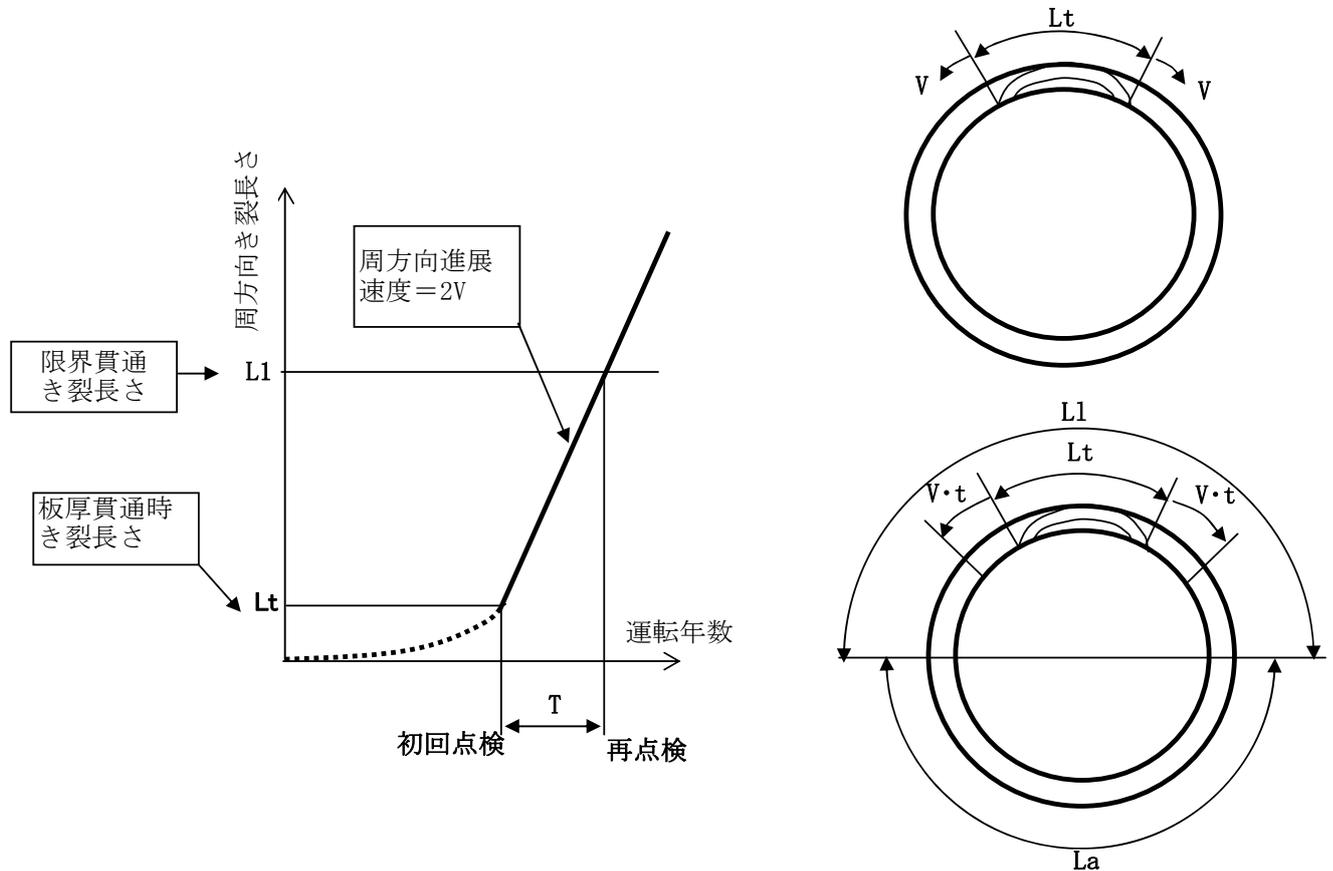


図M-1 点検周期を設定する上での想定欠陥の考え方

表M-1 初回点検において溶接線の全周の外周VTを実施し、欠陥が確認されなかった場合の再点検時期の検討例

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F
板厚貫通時の周方向き裂長さ	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D の上限速度
許容残存長さ (半周)	La (mm)	401	401	255	255	761	761	注1
板厚貫通から限界き裂長さに 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Hの許容欠陥評価結果から許容欠陥は半周以上であるが、貫通き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、限界貫通き裂長さは半周とした。



## 付録 N 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1に示す。

図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、炉内配管の中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2に示す。なお、図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C) 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 (炉心スプレー配管/スパージャガイドライン 付録H) 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ー配管) の推定点検範囲 (0.75~0.9) を図 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ー配管) 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-α)%信頼区間は、

$$\begin{aligned} & (m/N) - Z(\alpha/2) \times \text{SQRT}((M-N)/(M-1) \times (m/N) \times (1-m/N)/N) \\ & \leq p \leq \\ & (m/N) + Z(\alpha/2) \times \text{SQRT}((M-N)/(M-1) \times (m/N) \times (1-m/N)/N) \end{aligned}$$

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

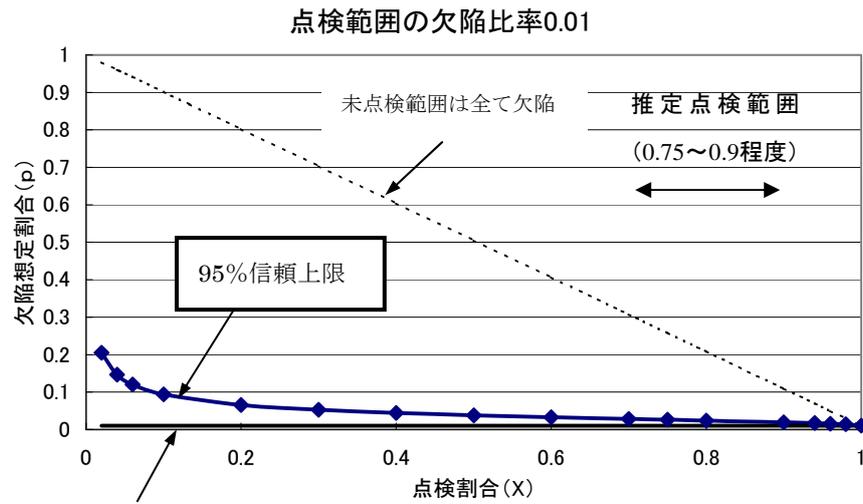


### 炉内配管全周の欠陥割合の95%信頼上限推定

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 + Δp	炉内配管全周の欠陥割合の上限
m/N - Δp	炉内配管全周の欠陥割合の下限
Δp	Z(α/2) × SQRT((M-N)/(M-1) × (m/N) × (1-m/N)/N)

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

図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

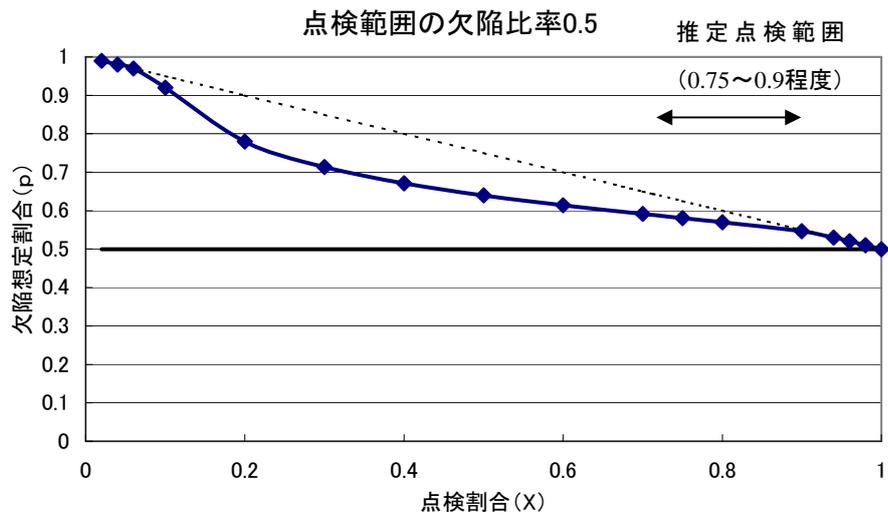
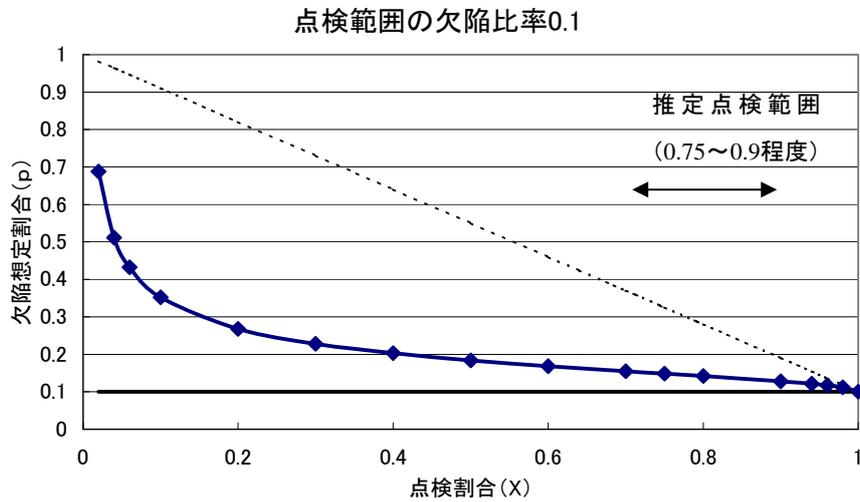
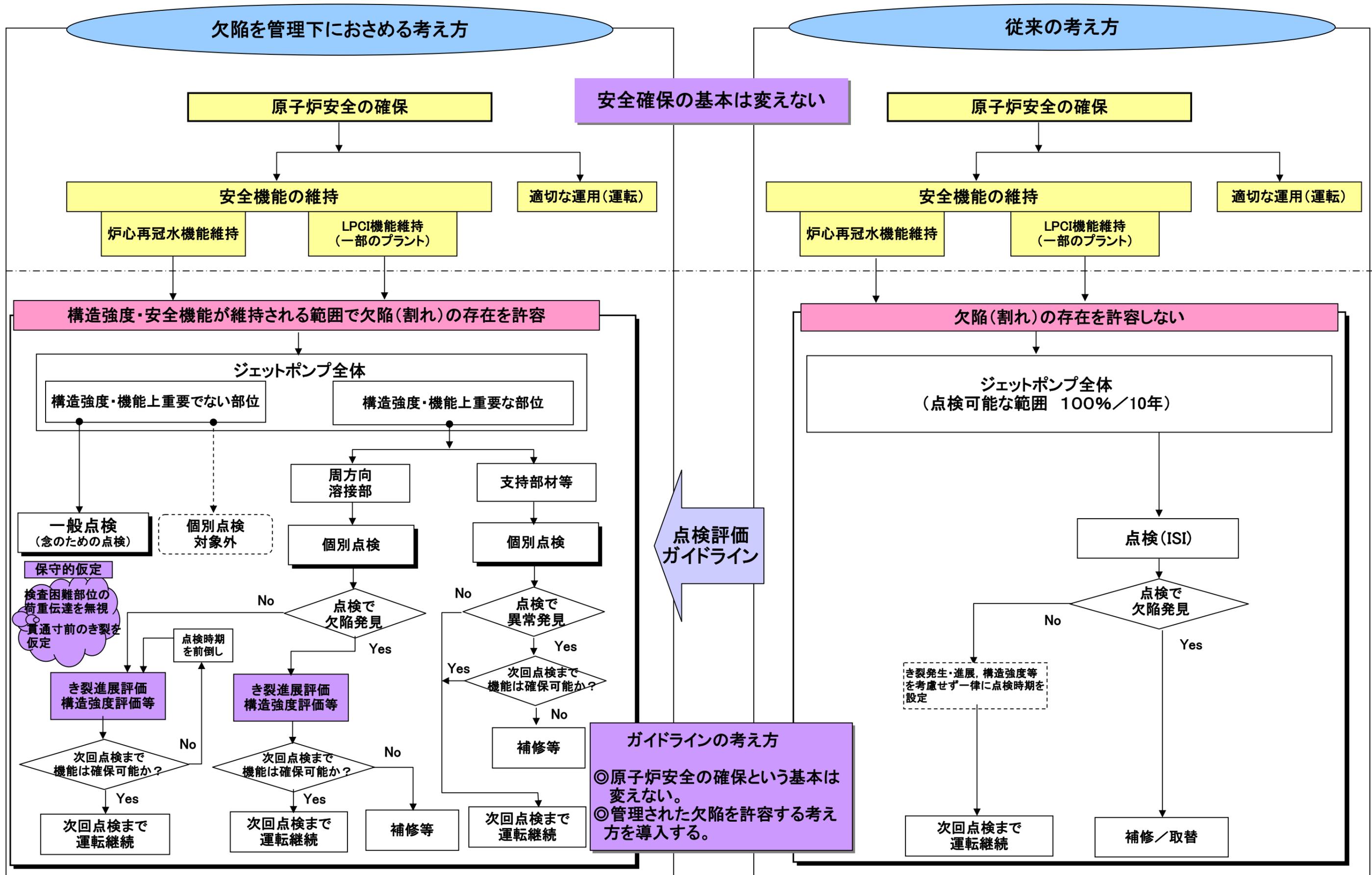


図2 全周の想定欠陥割合 (p) の信頼上限計算結果

## 用語一覧表

告示501号	発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年通商産業省告示第501号）
ISI	供用期間中検査（In-service Inspection）の略称
JEAG	日本電気協会発行の電気技術指針（Japan Electric Association Guideline）の略称
LOCA	冷却材喪失事故（Loss of Coolant Accident）の略称
SCC	応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking）の略称
S1地震	起こることを予期することが適切と考えられる地震のうち、敷地の基盤に最強の地震動を与える地震で、設計用最強地震
VT	目視試験（Visual Test）の略称
ET	渦流探傷試験（Eddy Current Test）の略称
UT	超音波探傷試験（Ultrasonic Test）の略称

# BWR炉内構造物点検評価ガイドライン[ジェットポンプ]の考え方



# 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、インコネル 182、インコネル 82 溶接部及びインコネル X750

## 2. 点検対象部位 (図 1)

- ・ 管の周方向溶接部（ステンレス 鋳鋼 同士の溶接部を除く）
- ・ ① ジェットポンプビーム、② 位置決めボルト、③ ウェッジ、④ ライザプ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 ライザプレースと 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、JEAG 4207 に従って実施する。
- (4) 渦流探傷試験は、JEAG 4208 に従って実施する。

## 4. 点検範囲及び点検周期の考え方

- (1) 管の周方向溶接部
  - ・ 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、位置決めボルト、ウェッジ

点検可能な範囲の目視点検 (VT-3) 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) 管の周溶接部以外の溶接部（ライザプレースのヨークとリーフの溶接部他）

点検可能な範囲の目視点検 (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) 管の周方向溶接部

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) 管の溶接部以外（ジェットポンプビーム他）

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。

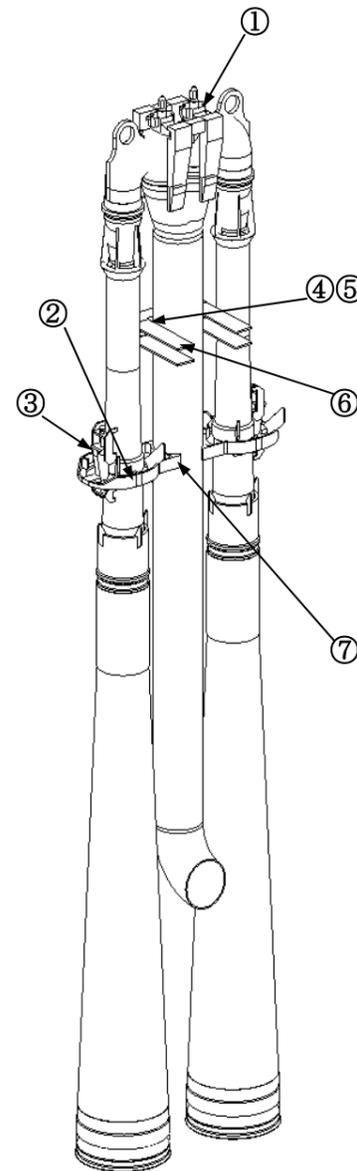


図 1 点検対象部位

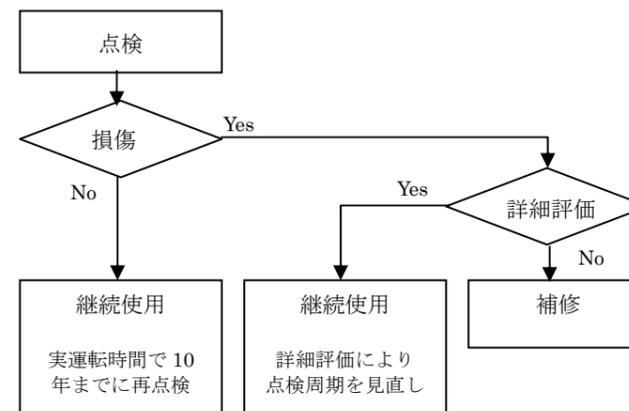


図 5 ジェットポンプビーム他の点検フロー

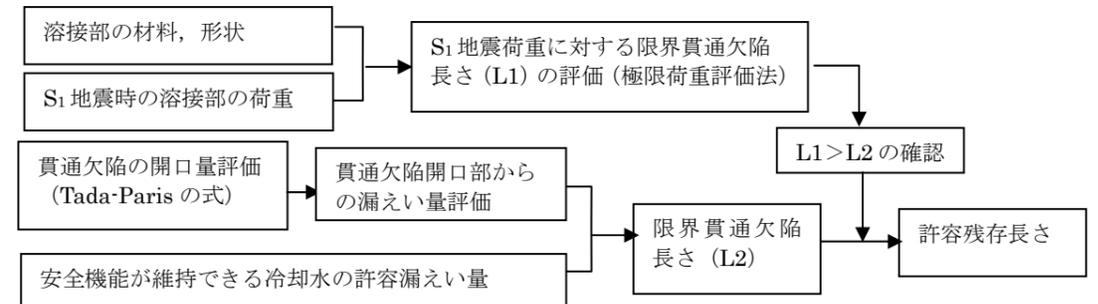


図 2 周方向溶接部の許容残存長さの評価フロー

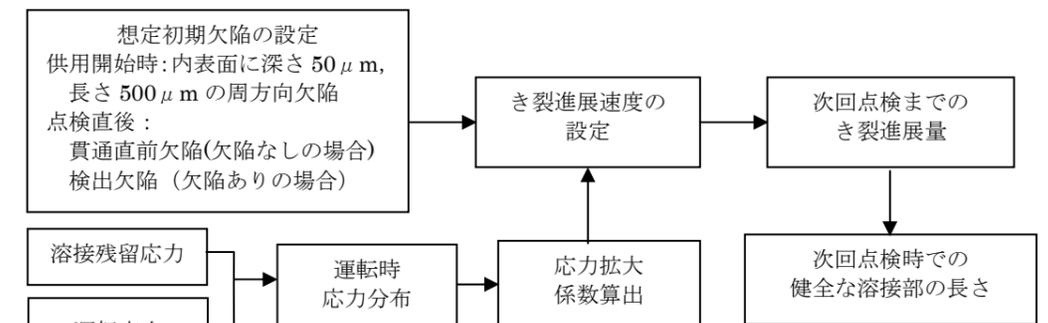


図 3 き裂進展評価フロー

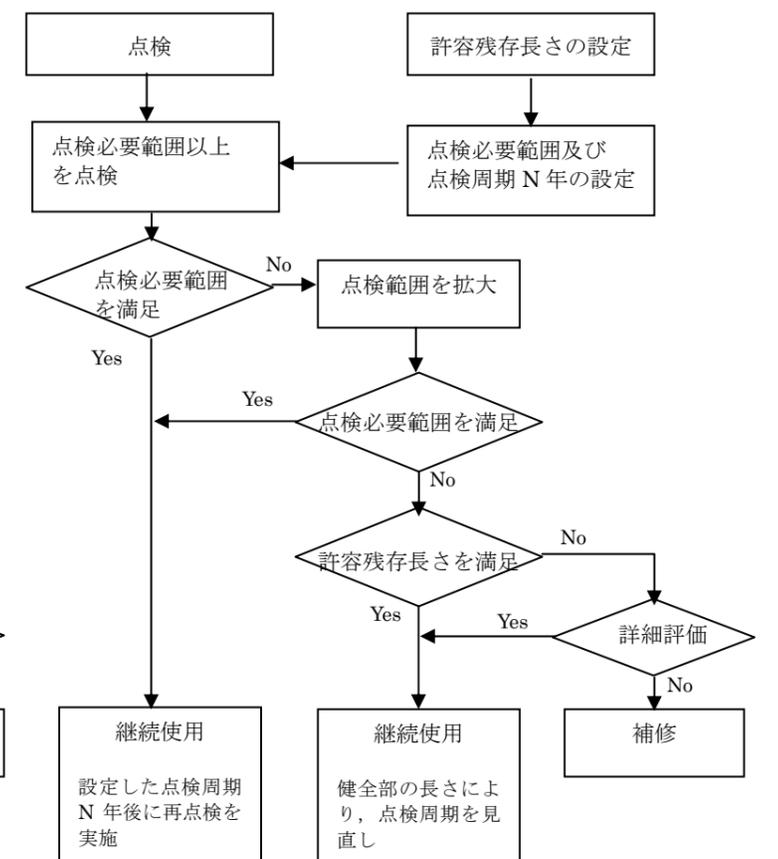


図 4 周方向溶接部の点検フロー

---

BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン  
[ジェットポンプ]

編集者 一般社団法人 日本原子力技術協会  
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 日本原子力技術協会  
〒108-0014 東京都港区芝4-2-3 NOF芝ビル7階  
電 話 03 (5440) 3603 (代)  
FAX 03 (5440) 3606