

BWR 補修工法ガイドライン
[ウェルドオーバーレイ工法]
(第2版)

2026年4月

一般社団法人 原子力エネルギー協議会
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

本ガイドの位置づけ

本ガイドライン（以下「本ガイド」）は、従前より(一社)原子力安全推進協会(以下、JANSI)が策定・管理してきた「BWR 補修工法ガイドライン[ウェルドオーバーレイ工法]（第2版）」（以下「従来のガイド」）を原文のまま原子力エネルギー協議会（以下、ATENA）の管理体制下で引き継いで使用するものである。本ガイドの内容については、ATENA 炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会を経て改訂が決定されるまでの間、変更は行わない。

運用時期

本ガイドの運用開始日は 2026 年 4 月とする。

運用上の注意

1. 本ガイドは従来のガイドを踏襲したものであり、運用上の変更はない。
2. ATENA は必要に応じて、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会を経て改訂しますが、その場合は別途改訂履歴を明示する。

本ガイドラインの情報等の取扱いについては、以下のとおりとする。

（免責）

ATENA、ATENA 従業員、会員、支援組織等本書の作成に関わる関係者（「ATENA 関係者」）は、本書の内容について、明示黙示を問わず、情報の完全性及び第三者の知的財産権の非侵害を含め、一切保証しない。ATENA 関係者は、本書の使用により使用者その他の第三者に生じた一切の損失、損害及び費用についてその責任を負わない。使用者は、自己の責任において本書を使用するものとする。

（権利帰属）

本書の著作権その他の知的財産権（「本件知的財産権」）は、ATENA に帰属する。本件知的財産権は、本書の使用者に移転せず、また、ATENA の承諾がない限り、本書の使用者には本件知的財産権に関する何らの権利も付与されない。

2026 年 4 月
原子力エネルギー協議会

BWR補修工法ガイドライン

[ウェルドオーバーレイ工法]

(第2版)

平成27年3月

一般社団法人 原子力安全推進協会
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

はじめに

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

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 27 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

BWR補修工法ガイドライン

改訂履歴

ガイドライン名：ウェルドオーバーレイ工法

改訂年月	版	改訂内容	備考
平成 17 年 10 月	初版発行		
平成 27 年 3 月	第 2 版発行	適用する規格基準ほか見直し	

※ 改訂の詳細は参考資料 2 参照

ガイドラインの責任範囲

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

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

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

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 委員名簿

(平成 27 年 3 月現在, 順不同, 敬称略)

委員長	野本 敏治	東京大学名誉教授
副委員長	関村 直人	東京大学教授
委員	安藤 博	元(財)発電設備技術検査協会
委員	辻川 茂男	東京大学名誉教授
委員	西本 和俊	大阪大学名誉教授 福井工業大学教授
委員	橋爪 秀利	東北大学教授
委員	望月 正人	大阪大学教授
幹事	村井 荘太郎	東京電力(株)
幹事	中野 守人	関西電力(株)
幹事	小林 広幸	日本原子力発電(株)
委員	勝海 和彦	北海道電力(株)
委員	清水 敬輔	東北電力(株)
委員	吉田 伸司	東京電力(株)
委員	鈴木 俊一	東京電力(株)
委員	庄司 卓	中部電力(株)
委員	新屋 和彦	北陸電力(株)
委員	桑田 賢一郎	中国電力(株)
委員	松浦 正幸	四国電力(株)
委員	大久保 康志	九州電力(株)
委員	堂崎 浩二	日本原子力発電(株)
委員	浦辺 守	日本原子力発電(株)
委員	枅 明彦	電源開発(株)
委員	増田 稔	日立GEニュークリア・エナジー(株)
委員	磯 敦夫	(株)東芝
委員	小山 幸司	三菱重工業(株)
委員	太田 丈児	電力中央研究所
委員	杉江 保彰	原子力安全推進協会
事務局	関 弘明	原子力安全推進協会

BWR 補修工法ガイドライン
[ウェルドオーバーレイ工法]

目 次

第1章	目的・適用及び工法の概要	
1.1	目的	1
1.2	適用	1
1.3	工法の概要	1
第2章	工法の適用範囲	
2.1	本工法を施工できる配管の適用範囲	2
2.2	本工法を施工できる亀裂の適用範囲	2
第3章	WOL工法の設計及び施工	
3.1	構造設計	3
3.2	溶接条件	6
3.3	溶接施工法確認試験	7
3.4	WOL施工の管理	9
第4章	WOL施工後の供用期間中の検査	13
第5章	適用フロー	14
解説		
(解説 1-1)	ガイドライン制定の目的	16
(解説 1-2)	本ガイドラインの適用にあたって	16
(解説 2-1)	WOL工法について	17
(解説 2-2)	WOL工法を適用する母材の厚さについて	18
(解説 2-3)	WOL工法を適用する亀裂について	18
(解説 2-4)	WOL工法を適用する亀裂の周方向欠陥長さについて	19
(解説 3-1)	WOLの厚さ設計	20
(解説 3-2)	WOLの長さ設計	24
(解説 3-3)	肉盛溶接に用いる溶加材の炭素含有量について	28
(解説 3-4)	WOL層のSCC進展抑制効果について	28
(解説 3-5)	フェライト量の管理方法について	29
(解説 3-6)	WOL溶接後のUT検査で確認する範囲について	32
(解説 4-1)	供用期間中検査	33

付録

- 付録-A WOL 溶接金属の耐 IGSCC 性（亀裂進展停止特性）について
- 付録-B WOL 設計手順の具体例
- 付録-C 破壊力学評価上の WOL 構造強度比較の計算例
- 付録-D WOL の長さに沿った荷重伝達の FEM 計算例
- 付録-E WOL 工法を適用する亀裂の周方向欠陥長さ制限について

参考資料

- 参考資料 1 BWR 補修工法ガイドライン[ウェルドオーバーレイ工法]の概要
- 参考資料 2 改訂経緯

第1章 目的及び適用及び工法の概要

1.1 目的

本ガイドラインは、沸騰水型原子力発電所(BWR)用配管等に発生した粒界型応力腐食割れ(IGSCC)に対する補修を目的としたウェルドオーバーレイ(以下WOLと略す)工法について定めたものである。(解説 1-1)

1.2 適用

1.2.1 適用

本ガイドラインは、オーステナイト系ステンレス鋼を使用している BWR 用一次系配管等の周溶接継手部を対象に適用する。ガイドラインの適用時期は、機器の商業運転開始後の供用期間中とする。(解説 1-2)

1.3 工法の概要

WOL工法は、亀裂が発生した配管などの周溶接継手に対して、耐 IGSCC 性に優れた溶接金属(フェライト含有量の高い低炭素オーステナイト系ステンレス鋼溶接材料)を強度部材として外面全周にわたり複数層の肉盛溶接を施工することにより構造健全性を確保・維持する補修工法である。

第2章 工法の適用範囲（解説 2-1）

2.1 本工法を施工できる配管の適用範囲

本ガイドラインを用いてWOL工法を施工できる配管の適用範囲を表1に示す。

表1 適用範囲

項目	適用範囲
(a) 口径	100A～700A
(b) 母材の厚さ（解説 2-2）	14.0～46.0mm
(c) 対象材料	P-8 ¹⁾
(d) 溶接金属	A-7 ²⁾ またはR-7 ³⁾
(e) 適用部位	周継手部 ⁴⁾

- 1) 高合金鋼（オーステナイト系ステンレス鋼）母材。P-8は、日本機械学会 溶接規格第2部「溶接施工法認証標準」の表WP-302-1の区分による。
- 2) 母材P-8に対する溶接金属。A-7は日本機械学会 溶接規格第2部「溶接施工法認証標準」の表WP-304-1の区分による。
- 3) 溶接金属A-7に相当する溶加材。R-7は日本機械学会 溶接規格第2部「溶接施工法認証標準」の表WP-309-1の区分による。
- 4) 周継手部とは直管と直管、エルボー、ティー、バルブまたはポンプ等との継手部をいう。

2.2 本工法を施工できる亀裂の適用範囲

本ガイドラインを用いてWOL工法を施工できる亀裂の適用範囲を以下に示す。

- (1) WOL工法は、IGSCCが主因と考えられるオーステナイト系ステンレス鋼配管の周溶接継手部に発生した亀裂であること。
- (2) WOLを施工する配管の超音波探傷試験を行い、配管外表面の開先エッジの両端から13mm以内の範囲に存在する亀裂であること、および、亀裂先端と配管外表面間に7mm以上の残厚がある未貫通亀裂であること。（解説 2-3）、（解説 2-4）

第3章 WOL工法の設計及び施工

3.1 構造設計

WOL工法の構造は、表2によること。

表2 WOL工法の構造設計

項目	内容
(a)WOLの厚さ (t_w) mm	3.1.1項による。
(b)WOLの長さ (L_w) mm	3.1.2項による。

・溶接止端部の勾配は、 30° 以下が望ましい（勾配が 30° を超え、 45° 以下の範囲とする場合は、別途止端部の応力係数を定めて使用することができる）。

・止端部アールは $r = t_p / 2$ 以上とする。

R : 原配管の外半径 (mm)

t_p : 原配管の厚さ (mm)

t_w : WOLの厚さ (mm)
(平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上の強度上有効な層の厚さ)

L_w : WOLの長さ (mm)

(*) : 原配管溶接中心から図面寸法により求めた長さに相当する位置

(**) : t_n は平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満の層の厚さを示し、WOLの厚さには含めない。

3.1.1 WOLの厚さ

WOLの厚さは、以下を満足すること。(解説 3-1)

- (a) 360° 貫通亀裂が原配管に存在したと仮定しても破壊しない強度を有すること。
- (b) 内面より原配管とWOLの厚さを加えた厚さの75%を越える領域には亀裂が存在してはならない。(設計上は t_w を $t_p/3$ 以上とする必要がある)
- (c) 内圧による軸方向応力、自重及び地震力による軸方向荷重により発生する応力の総和が設計応力強さ (S_m) 以下であること。
- (d) プラント寿命中における疲労による亀裂進展量を算出し、必要WOL厚さに加算する。
- (e) WOLの厚さは、各層毎の測定点のフェライト番号 (FN) の値で、平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上の強度上有効な層の厚さとし、これを満足しない平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満の層は、WOLの厚さに含めないものとする。(具体的な強度上有効な層の取り方は図1及び図2を参照のこと。) したがって、WOL施工時の肉盛溶接の厚さは、FN7.5 未満の層の厚さに強度上有効なWOLの厚さを加えたものとなる。

3.1.2 WOLの長さ

WOLの長さは、以下を満足するようにする。(解説 3-2)

- (a) 原配管周溶接 HAZ 部から両側に $0.75\sqrt{Rt_p}$ 以上の長さを有すること。
ここで R は原配管の外半径、 t_p は原配管の厚さを示す。
- (b) 供用期間中検査が要求される範囲について、超音波探傷試験 (UT) が可能であること。

3.1.3 WOL施工による配管系への影響評価

WOL施工により当該部が軸方向に収縮することから配管系への影響を評価する。

なお、WOLによる溶接收縮量把握のため、基準ベンチマークをWOL施工部の両側に 90°ピッチで4方位に打刻し、施工前後でベンチマーク間の距離を測定・記録する。

WOL施工による当該溶接継手部の収縮量の評価方法は以下とする。

- ・ 先ず、WOL設計時の検討に用いる収縮量を実機データから適切に設定する。なお、実機データが無い場合は米国データを使用することも可とする。
- ・ 設定した収縮量を用いて応力解析を行い、WOL施工による収縮によって配管系に発生する応力が設計応力強さ (S_m) 以下であることを確認する。
- ・ WOL施工後に実際の収縮量を測定し、設定した収縮量以下であることを確認する。
設定した収縮量以上の場合は、実測値により再評価する。

なお、同一配管系の他の溶接継手部に新たにWOLを施工する場合には、既にWOLを施工してある溶接継手部での収縮量(実測値)も合わせて評価する。

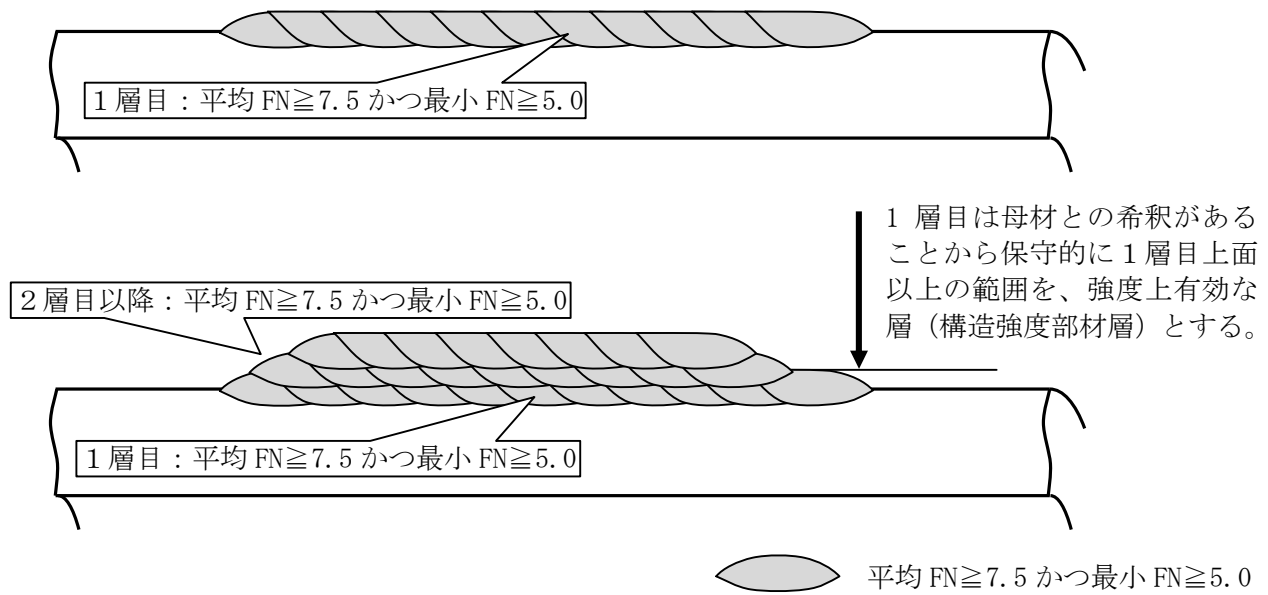


図1 WOL 1層目が平均 FN7.5 以上かつ最小 FN5.0 以上の場合の強度上有効な層の取り方

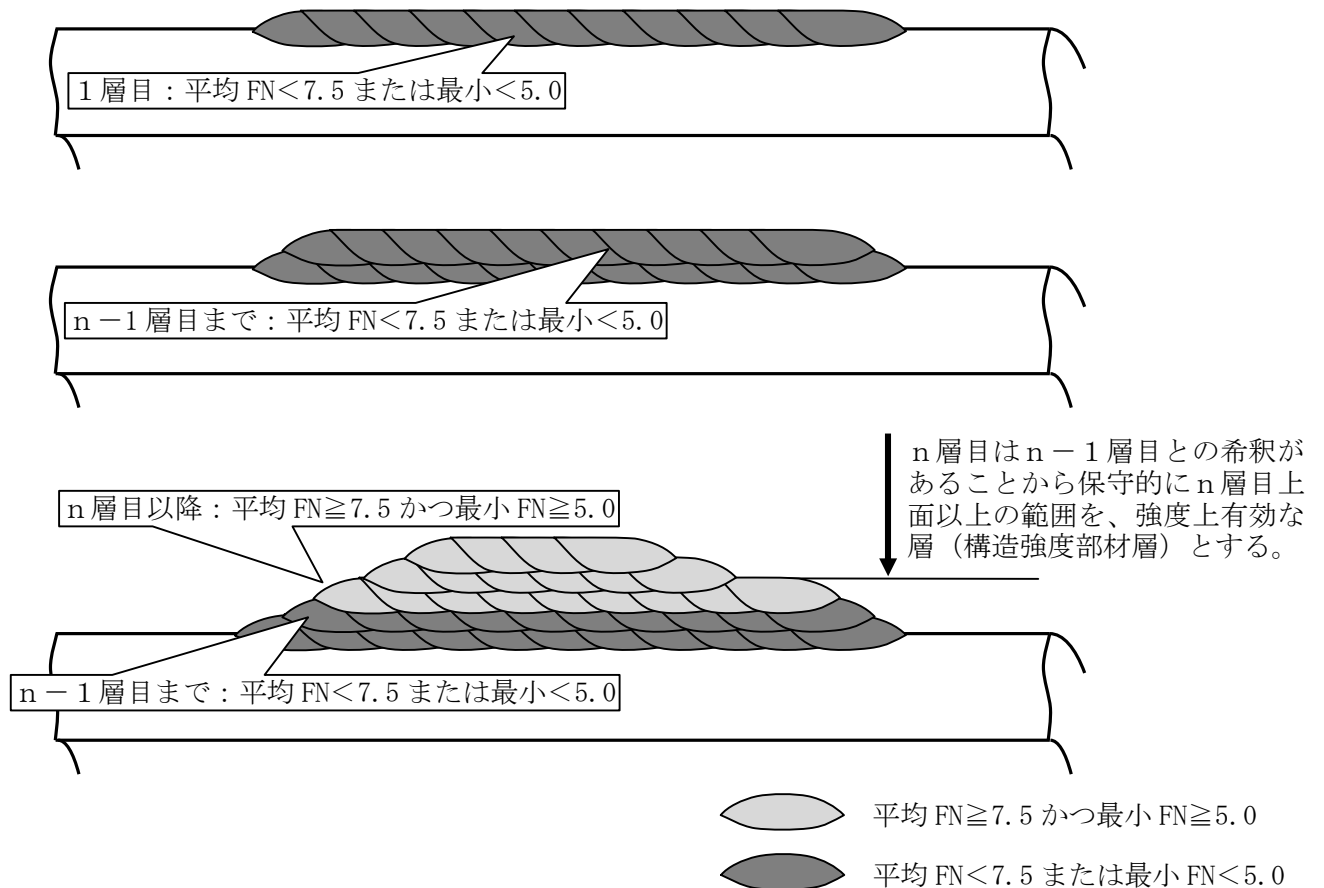


図2 WOL n層目が平均 FN7.5 以上かつ最小 FN5.0 以上の場合の強度上有効な層の取り方

3.2 溶接条件

WOL工法の溶接条件を表3に示す。

表3 WOL工法の溶接条件

項目	溶接条件
(a) 継手種別	肉盛溶接の継手
(b) 溶接方法	自動ティグ溶接
(c) 溶加材	R-7 ¹⁾
(d) 溶加材の炭素含有量(解説3-3)	0.030 % 以下
(e) 積層数	最小2層(強度上有効な層) ²⁾
(f) 内面水冷	有り(流速は0 m/s 以上)
(g) 溶接条件 溶接入熱量 溶接速度 溶加材供給速度 パス間温度	6.9 kJ/cm 以上、15.8 kJ/cm 以下 6.0cm/min 以上、17.4cm/min 以下 5.1 g/min 以上、8.8 g/min 以下 150℃ 以下

- 1) オーステナイト系ステンレス鋼に対する溶加材として、308Lを適用する。ただし、308Lと同等な耐IGSCC性が確認された場合には、その溶加材も適用できるものとする。
- 2) 強度上有効な層とは、フェライト番号(FN)が平均FN7.5以上、かつ、最小FN5.0以上の層とする。(具体的な強度上有効な層の取り方は図1及び図2を参照。)(解説3-4)

3.3 溶接施工法確認試験

3.2 項の表 3 に示す溶接条件について事前に溶接施工法の確認試験を実施し、施工法を確立しておくこと。なお、溶接施工法の確認については、日本機械学会 溶接規格第 2 部「溶接施工法認証標準」を準用のこと。また、溶接士の技能及び有効期間については、日本機械学会 溶接規格第 3 部「溶接士技能認証標準」を準用のこと。

3.3.1 溶接施工法確認項目

溶接施工法確認試験における確認項目を表 4 に示す。確認項目は、溶接規格 第 2 部「溶接施工法認証標準」 表 WP-301-1 の溶接方法「自動ティグ溶接(ST)」に準じた項目とし、WOL 溶接に関する追加確認項目として表中の No. 14 の適用範囲を満足すること。

表 4 溶接施工法確認試験における確認項目

No.	確認項目	適用範囲
1	溶接方法	自動ティグ溶接(ST)
2	母材	P-8
3	予熱	行わない
4	溶接後熱処理	行わない
5	シールドガスの種類	アルゴンガス
6	裏面からのガス保護	なし
7	溶加材	R-7 ¹⁾ 炭素含有量 0.030%以下
8	ウェルドインサート	なし
9	電極	1
10	溶接機	自動ティグ溶接機
11	母材の厚さ	14.0～46.0 mm
12	積層数	最小 2 層 (強度上有効な層) ²⁾
13	内面水冷	有り (流速は 0 m/s 以上)
14	溶接入熱量等	6.9～15.8 kJ/cm (溶接速度は 6.0cm/min 以上で、かつ、 17.4cm/min 以下の範囲。 溶加材供給速度は 5.1g/min 以上で、かつ、8.8g/min 以下の範囲。 また、パス間温度は 150℃ 以下。)

3.3.2 溶接施工法確認試験方法

溶接施工法の確認試験は、次に掲げるところにより行うものとする。

(1) 試験材とその取付け方法（溶接姿勢）

a. 試験材は次のとおりとする。

試験材は事前に周継手を施工した管とし、その厚さは 23 mm 以上、46 mm 以下とする。

b. 試験材の取付け方法（溶接姿勢）は、水平固定とし、管の外面に次の肉盛溶接を行うものとする。

1) 管外面への肉盛溶接の厚さは、原配管の板厚の 1/3 以上とし、かつ、機械試験片を採取できる厚さ以上とする。また、その長さは、管周継手の溶接部両端部から $13\text{ mm} + 0.75\sqrt{Rt_p}$ 以上とし、かつ、機械試験片を採取できる長さとする。ここで、R とは使用する管の外半径、 t_p とは使用する管の板厚である。

2) 引張試験片は肉盛溶接部で、かつ、デルタフェライト量の測定値で平均 7.5 FN 以上で、かつ、最小 5.0 FN 以上の範囲より採取するものとする。なお、フェライト番号 (FN) の測定要領は、(3)による。



(2) 試験片およびその試験方法

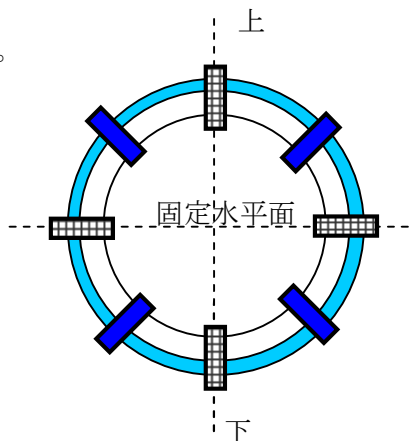
a. 試験片の種類、数および採取位置は次による。

機械試験

引張試験 4 個

側曲げ試験 4 個

 引張試験
 側曲げ試験



側曲げ試験片

(試験材と WOL 溶接部の厚さが 38 mm 以下の場合
は、試験材と WOL 溶接部の厚さの曲げ試験片と
する。

その厚さが 38 mm を超える場合は、WOL 溶接部
を含む厚さが 38 mm の曲げ試験片とする。)

引張試験片採取位置/方向

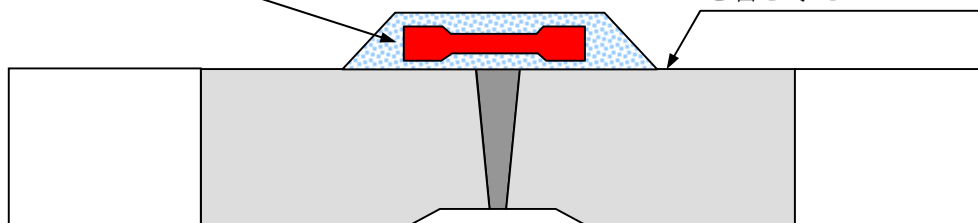


図 3 試験片採取位置

b. 試験片，試験方法および判定基準

試験片の形状，寸法，試験方法および判定基準は次に掲げるところにより行う。

- 1) 引張試験は，JIS Z2241「金属材料引張試験方法」によるものとし，判定基準は母材の引張強さ（母材の引張強さが異なる場合は，強い方の引張強さ）と同等以上の引張強さとする。
- 2) 側曲げ試験は，JIS Z3122「突合せ溶接継手の曲げ試験方法」によるものし，判定基準は溶接規格の第2部「溶接施工法認証標準」の表 WP400-1 に掲げる判定基準による。

(3) デルタフェライト量の測定は次のとおりとする。

- a. 測定方法は，JIS Z 3119「オーステナイト系及びオーステナイト・フェライト系ステンレス鋼溶着金属のフェライト量の測定方法」の磁気的な装置による方法とし，フェライト量 (FN 量) で評価する。
- b. 測定箇所は，肉盛溶接部の積層ごとに，周方向 4 方位 (90 所ピッチ) について管の軸方向の中央，両端の 3 箇所の計 12 箇所とする。

3.4 WOL 施工の管理

3.4.1 WOL 施工に対するリソースに関する事項

(1) 使用装置に対する事項

WOL 施工等の装置仕様（要求事項）を明確にし，本補修工法に対する要求事項を満足できる装置であることを確認する。

(2) 施工に係わる作業員に対する事項

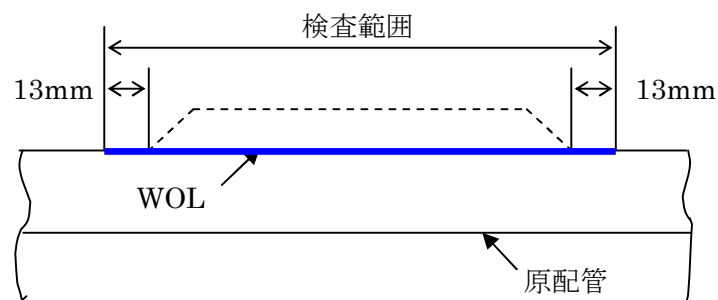
WOL 工法の溶接施工は，3.3 項に示すように日本機械学会溶接規格に基づく認定を受けた溶接施工法及び溶接士により行うものとする。

WOL 工法における超音波探傷試験の方法及び検査員は，日本非破壊検査協会規格「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証」(NDIS 0603:2013) の付属書 B (規定)「軽水型原子力発電所用機器のウェルドオーバーレイ施工部に対する PD 資格試験」に合格し認証された方法及び検査員により行うものとする。

また，その他の作業員についても実機施工の一連の施工手順に従って，事前にモックアップなどでトレーニングを行うこと。

3.4.2 WOL施工前の確認

- (a) WOLを施工する配管の外表面には、溶接に悪影響を及ぼす亀裂や欠陥、有害な異物(水分、ごみ、さび等)がないことを確認すること。
- (b) WOLを施工する配管の外表面は、溶接規格 第1部「溶接規格」表 N-X100-4 の規定に基づいて、浸透探傷試験を行い、同表の開先面の規定を満足すること。
なお、検査範囲は以下の範囲とする。



3.4.3 WOL施工中の確認

WOL施工中の管理は以下による。

- (a) WOL溶接部は、1層施工する毎にフェライト量を計測する。なお、フェライト量の測定方法は下記による。(解説 3-5)
 - ・フェライト番号 (FN) 測定は、フェライトスコープ又はマグネゲージを使用して測定する。測定箇所は軸方向で3箇所、周方向で4箇所の合計12箇所とする。
- (b) WOL構造強度部材としての有効な層は、層毎の各測定箇所のフェライト番号 FN が平均 FN7.5 以上かつ最小 FN5.0 以上であること。これに適合しない(平均 FN7.5 未滿または最小 FN5.0 未滿)場合は、適合するまで追加肉盛溶接を行う。
以降、最初に適合した層の外表面から外側の層が上記適合条件を満足することを確認し、この範囲を強度上有効な範囲とする。(具体的な強度上有効な層の取り方は、図1または図2参照。)
その後、WOL構造強度部材としての必要厚さを確保するよう積層する。
- (c) WOL施工部は、肉盛後の仕上げ加工を考慮してもなお、最終的な長さ、厚さ、端部形状が必要な寸法・形状を確保できるように肉盛ること。

3.4.4 WOL施工後の確認

本補修工法の施工後、以下の確認を行うこと。

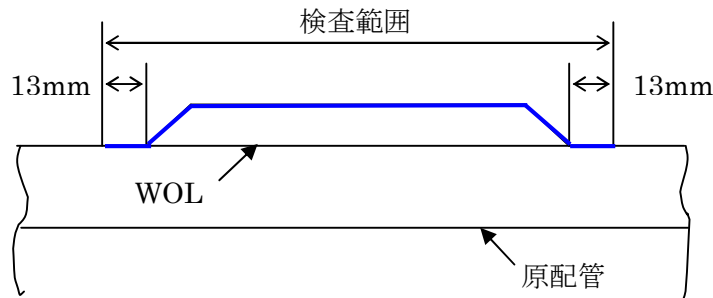
- (1) 本補修工法の施工後、上記3.1及び3.2項の記載事項を満足しているを確認する。
 - (a) WOL施工部は、長さ、厚さ、端部形状が必要な寸法・形状となっていることを確認する。

- (b) ベンチマーク間の距離を計測し、設定した収縮量以下であることを確認する。設定した収縮量以上の場合は、必要に応じ実測値により 3.1.2 項の配管系への影響を再評価する。
- (c) 配管系のサポート、スナッチ類は、目視検査を行い、起動・停止に伴う熱移動を阻害しないことを確認する。

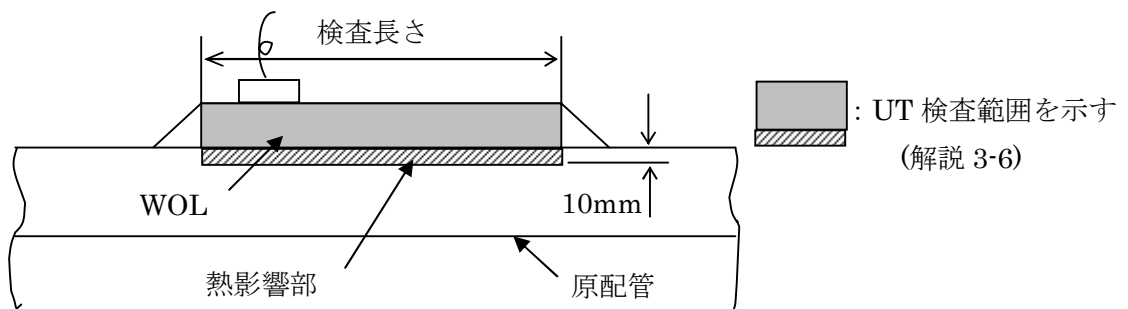
(2) WOL 施工後の溶接検査は次の各号による。

なお、非破壊検査範囲は以下の範囲とする。

- ・浸透探傷試験 (PT)



- ・超音波探傷試験 (UT)



- (a) WOL 施工部は、溶接規格 第 1 部「溶接規格」表 N-X100-4 の規定に基づいて浸透探傷試験 (PT) を行い、同表の溶接部の場合の規定を満足しなければならない。
- (b) WOL 施工部は、超音波探傷試験 (UT) を行い、溶接規格 第 1 部「溶接規格」表 N-X100-2 の規定を満足しなければならない。なお、検査方法は WOL 施工した予亀裂付き試験体を使用して事前に検出性及びサイジング精度について有効性を確認した手法とする。

ただし、4.1 項に示すように、WOL 工法適用にあたっての前提条件として、原配管に発生した亀裂の先端と原配管外表面の間に 7mm 以上の残肉があることを確認することとなっている。したがって、上図の原配管外表面から 10mm の UT 検査範囲 (熱影響部) の中に、この亀裂先端が存在することを許容しているが、WOL 溶接検査においては、予め WOL 工法適用前に確認した亀裂以外に新たな欠陥がないことを確認するものとする。

なお、この既存の亀裂については、後述の供用期間中検査 (ISI) による UT 検査にて、亀裂の進展を監視するものとする。

- (c) 非破壊検査完了後、溶接規格 第 1 部「溶接規格」表 N-X130-1 の規定を満足する耐圧試験を行い、これに合格しなければならない。

なお、WOL肉盛溶接部に非破壊試験にて欠陥が検出された場合は、欠陥の位置及び欠陥の大きさ等に応じて、欠陥除去の形状及び手直し溶接方法を決定し、本WOL工法の溶接方法に準じた溶接方法で手直しを行う。ここで、手直し溶接回数は、同一箇所に対して、3回までとする。

第4章 WOL施工後の供用期間中の検査

WOL施工後の供用期間中検査は以下のとおり

- (1) WOL施工後に供用前検査 (PSI)、供用開始後は供用期間中検査 (ISI) を行う。

(図4及び(解説4-1)参照)

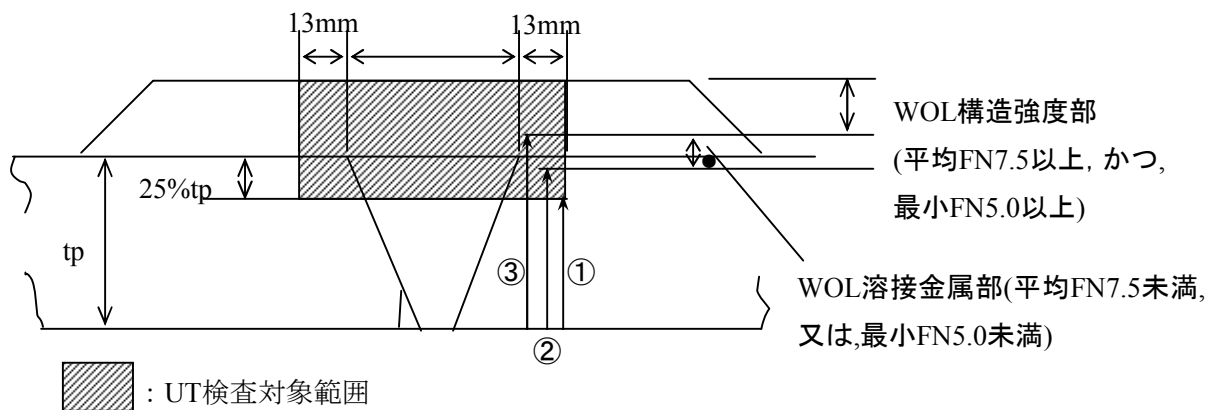


図4 供用期間中のUT検査対象範囲及び亀裂進展位置について

第5章 適用フロー

WOL工法の適用フローを図5に示す。

下記フローにより、原配管へのIGSCCによる亀裂発生確認後、WOL工法の適用可否を判断する。

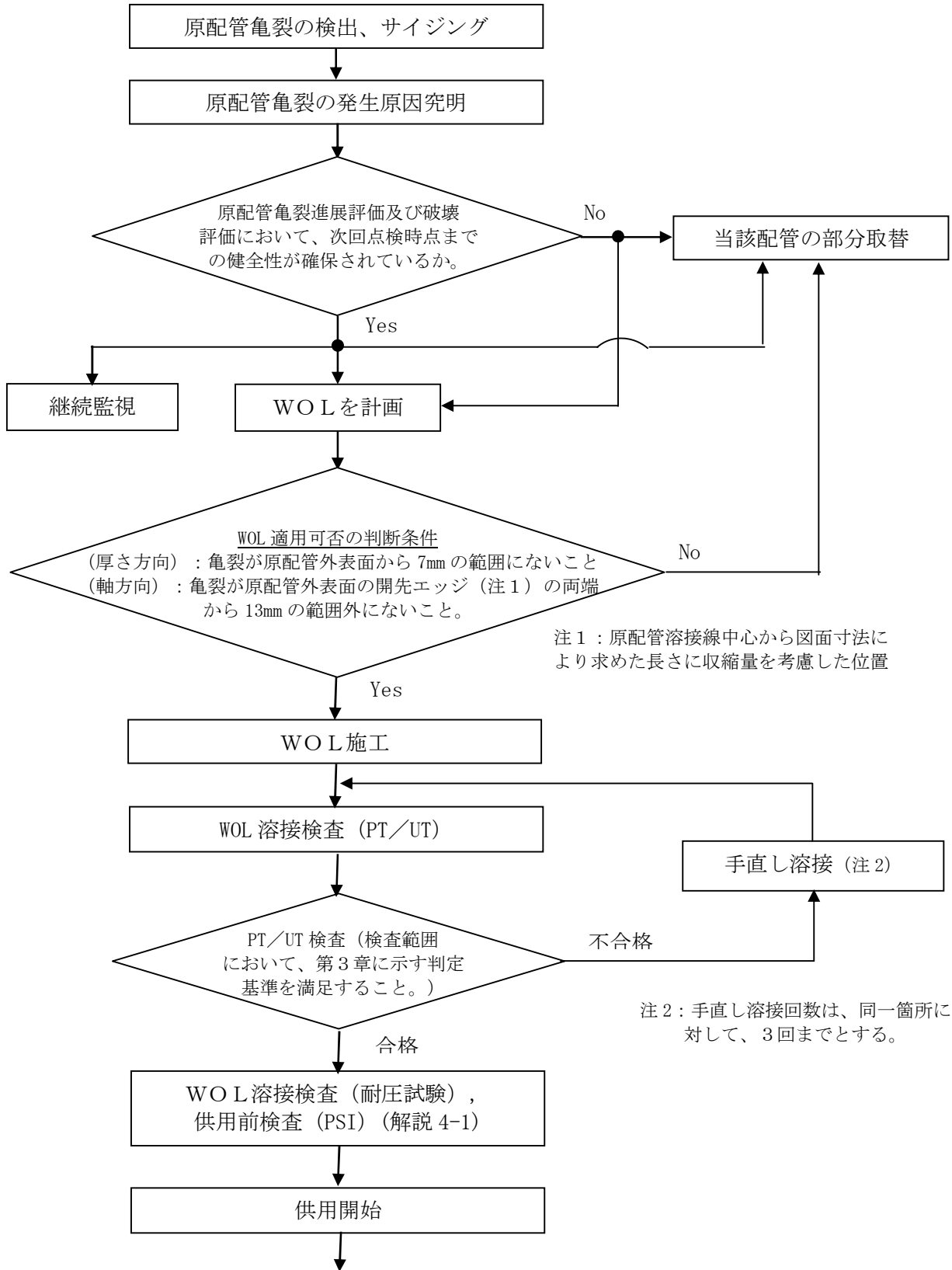


図5 WOL工法の適用フロー

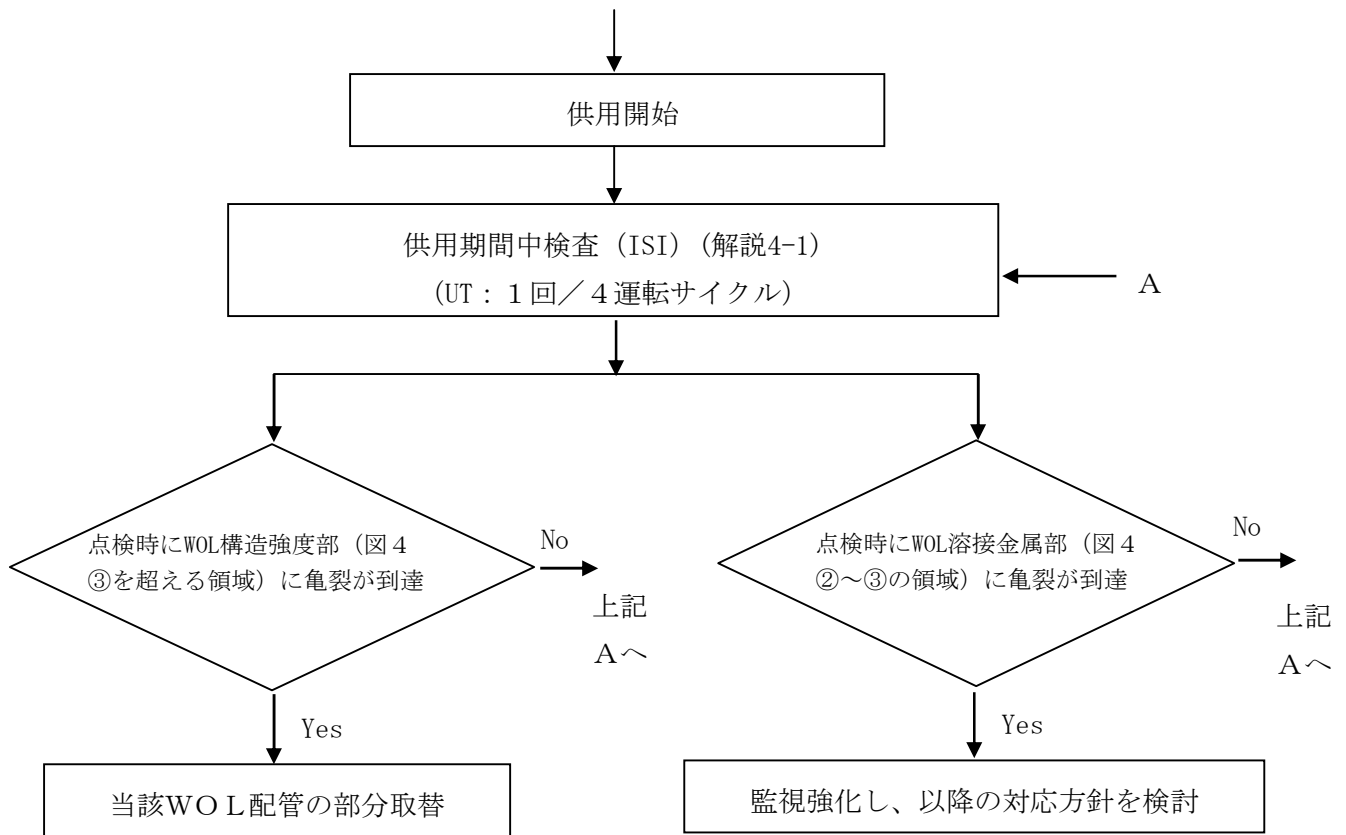


図5 WOL工法の適用フロー (続き)

(解説 1-1) ガイドライン制定の目的

国内プラントにおいて、経年変化事象による損傷が散見されてきたことから、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点検手法として、炉内構造物の点検評価ガイドラインの検討を進めており、損傷を未然に防止するための予防保全並びに補修工法についても、施工管理に関するガイドラインが必要となる。

本ガイドラインは、オーステナイト系ステンレス鋼製の一次系配管等のWOL補修工法に関して、配管等の構造健全性の確保及び維持に必要な施工管理項目と施工管理条件を示すことを目的とする。

(解説 1-2) 本ガイドラインの適用にあたって

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

本ガイドラインでは、引用する学協会規格の改訂年度を記載していない。学協会規格は新知見反映等の理由で定期改訂されるため、利用者は最新版の適用可否を確認するとともに、原子力規制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 S2 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 Ss 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。

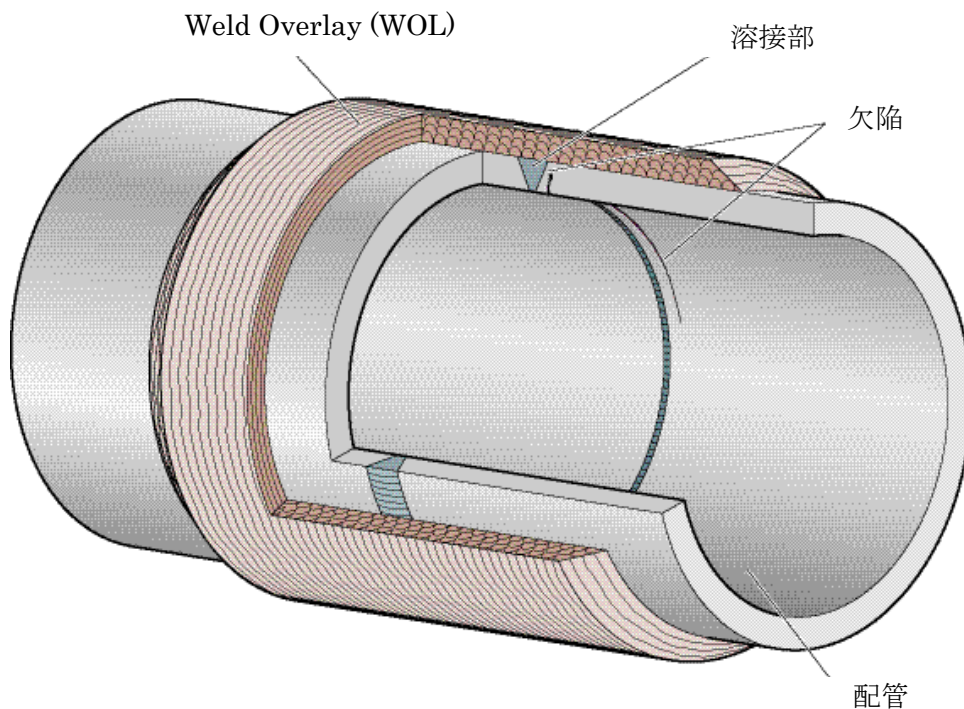
注*1：「設置許可基準規則」とは、原子力規制委員会の「実用発電用原子炉及びその付属設備の位置、構造及び設備の基準に関する規則」をいう。

(解説 2-1) WOL工法について

(1) 内容

WOL工法は、亀裂が発生したオーステナイト系ステンレス鋼製の一次系配管等の周溶接継手に対して、自動ティグ溶接を用いて、耐 IGSCC 性に優れた溶接金属（フェライト含有量の高い低炭素オーステナイト系ステンレス鋼溶接材料）を当該配管の外面全周にわたり複数層肉盛する補修工法である。（下図参照）

本工法では、肉盛りした溶接金属部（WOL部）を構造強度部材として位置付け、原配管に発生した周方向亀裂が全周貫通しても構造強度を確保できる設計としている。



(2) 海外などにおける適用実績

本工法は、米国において、1982年に初めて Hatch 原子力発電所に適用されて以降、BWR 運転プラントで 1000 個所以上の適用事例があり、超音波探傷試験の結果、いずれの溶接部においても WOL 施工部に亀裂が進展した事例は報告されていない。また、米国内に限らず、スペイン、スイス、台湾など、各国の原子力発電所でも適用されている。

本工法は、ASME Section XI Code Case N-504-2 “Alternative Rules for Repair of Class 1, 2, and 3 Austenitic Stainless Steel Piping Section XI, Division 1”（1997年3月承認）に標準的なルールとして規定されている。

また、米国 NRC(原子力規制委員会)は、NRC 公式報告書 NUREG-0313, Rev. 2(1988年1月)” Technical Report on Material Selection and Processing Guides for BWR Coolant Pressure Boundary Piping” の中で、本工法を IGSCC に対する補修工法として既に認めている。

(解説 2-2) WOL工法を適用する母材の厚さについて

WOL初層溶接の母材溶け込み深さは、自動ティグ溶接で3.5mm程度であるので、この2倍に相当する7mmの厚さの未貫通残肉を原配管の外表面に確保し、IGSCCの先端が溶接の溶け込み範囲に入らないように配慮した（(解説 2-3)参照）。

一方、WOL施工部位に対する供用期間中検査（ISI）は、「肉盛溶接部+原配管の外周部25%」の深さ範囲をUT検査し、この範囲に進展してきた亀裂を検出、サイジングすることを意図して規定されている。ここで、WOLを適用する母材の最小厚さを14.0mmとすれば、この母材溶け込み深さ3.5mm（原配管の外周部25%に相当）の溶け込み部へ既存の亀裂が進展しているかどうかの確認が可能である。

したがって、母材溶け込み深さ3.5mmが原配管外周部の25%に相当する原配管の厚さ、すなわち、14.0mmが必要最小限の原配管厚さということになる。

以上より、WOL工法を適用する原配管の最小厚さを14.0mmとした。

(解説 2-3) WOL工法を適用する亀裂について

(1) WOL工法を適用する亀裂の種類

WOL工法は、オーステナイト系ステンレス鋼配管の周溶接継手部に発生したIGSCCに対して適用することを原則とする。これは、WOL工法自体が、オーステナイト系ステンレス鋼配管の溶接継手に発生したIGSCCに対する補修工法として米国で開発され、米国を含む諸外国の実機BWRプラントで適用されてきたことを考慮したものである。

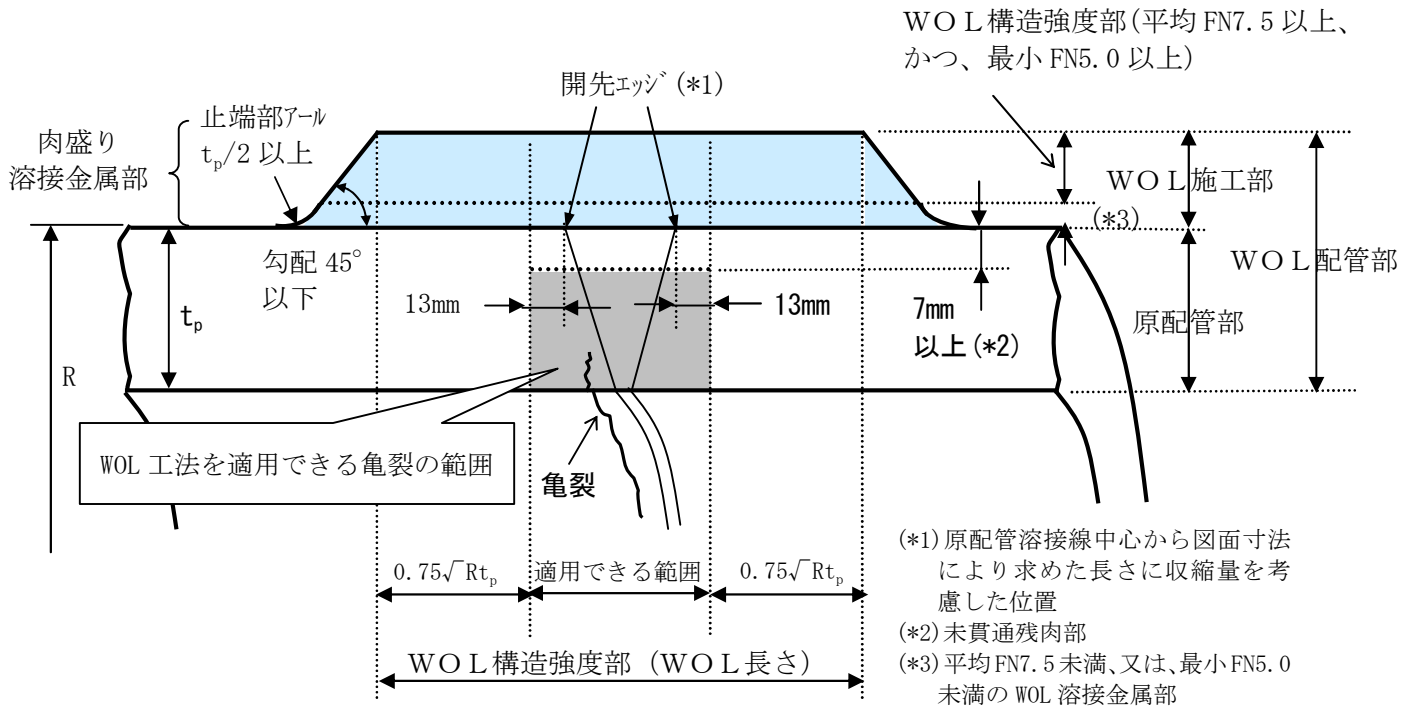
(2) WOL工法を適用できる亀裂の範囲

検出された亀裂が、解説図 5-1 に示すように、軸方向については、「原配管外表面の開先エッジ(*1)の両端から13mm以内の範囲に存在する亀裂」を「WOL工法を適用できる亀裂の範囲」とした。

これは、WOL長さの設計（亀裂が原配管を360°全周貫通と仮定しての荷重伝達機能）において、13mm幅の範囲内における亀裂の存在を想定していることを踏まえたものである。

また、13mm幅としたのは、配管口径・厚さによらずこの幅の範囲内で溶接熱影響部を包含していること、及び原配管内面の軸方向及び周方向の残留応力が、溶接止端部から軸方向に離れるに従い小さくなることを考慮したものである。

なお、厚さ方向については、WOL 1層目の溶接時の溶け込み量を考慮し、既存の亀裂による影響などを避けるため、「原配管外表面から7mm（溶け込み量3.5mm程度の2倍）の範囲に亀裂先端がないこと(*2)」を制限条件とした。（ただし、設計上は360°貫通亀裂として評価する。）



解説図 5-1 WOL工法を適用できる亀裂の範囲

(解説 2-4) WOL工法を適用する亀裂の周方向欠陥長さについて

「日本機械学会維持規格 (JSME S NA1)」では、周方向に欠陥を有する管が曲げモーメントを受けるとき、欠陥角度 2θ (θ は亀裂の半角) は 60° 以下である制限を設けられている。これに対し、「【事例規格】周方向欠陥に対する許容欠陥角度制限の代替規定 (CC-002) 2005 年発行」により、WOL工法を適用する場合においては、維持規格の周方向許容欠陥角度 $2\theta \leq 60^\circ$ の制限規定を適用除外できる。 [付録-E]

(解説 3-1) WOLの厚さ設計

WOLの厚さを決める設計フローを解説図 7-1 に示す。解説図 7-1 及び以下の評価式は、原配管外表面からWOL構造強度部（平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上）と仮定した場合の基本的な設計フローを示している。なお、WOL 1層目あるいは数層目まで、平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満の層がある場合のWOL設計手順の具体例を付録-Bに示す。

WOLの厚さ設計の基本的な考え方としては 日本機械学会維持規格（JSME S NA1 以下、維持規格という）の EB-4410「負荷条件」及び添付 E-7「欠陥評価に用いる荷重」に従い、原配管のWOL施工予定個所における評価荷重をあらかじめ算出し、その荷重を用いて維持規格の要求を満足するような厚さが決定される。本設計の特徴は、亀裂を周方向に 360° と想定し、周方向の荷重は原配管及びWOLが負担することから軸方向荷重に対してのみ評価することである。

(i) 亀裂を有する円管の塑性崩壊時の曲げ応力から要求されるWOLの厚さ

原配管の周方向に 360° 貫通亀裂を想定し、運転中に発生する荷重は内圧、自重、熱及び地震であり、それぞれの荷重により、厚さ(初期値)断面に発生する軸方向応力(Pm)、曲げモーメントにより発生する軸方向応力(Pb)及び熱膨張応力(Pe)を求める。その応力により塑性破壊しないWOLの厚さを算出する。破壊評価は、維持規格 EB-4440 に規定される「弾塑性破壊力学評価方法」及び添付 E-9「弾塑性破壊力学評価法」に従い評価を行う。なお、全周亀裂に対しては、「維持規格【事例規格】周方向欠陥に対する許容欠陥角度制限の代替規定 (CC-002)」の $(\theta + \beta) > \pi$ の場合の曲げ応力式を用いる。

・作用曲げ応力(維持規格の添付 E-9)

$$P_{b1} = Z(SF) [P_m + P_b + P_e / (SF)] - P_m \quad \text{式 6-1}$$

・周方向亀裂のある場合の塑性崩壊時の曲げ応力評価式(JSME 維持規格の事例規格)

$(\theta + \beta) > \pi$ の場合

$$P_{bc} = \frac{2 \sigma f}{\pi} \left(2 - \frac{a}{t_p + t_w} \right) \sin(\beta) \quad \text{式 6-2}$$

$$\beta = \frac{\pi}{\left(2 - \frac{a}{t_p + t_w} \right)} \left(1 - \frac{a}{t_p + t_w} - \frac{P_m}{\sigma f} \right) \quad \text{式 6-3}$$

塑性破壊しない条件

$$Pb1 < Pbc \quad \text{式 6-4}$$

ここで、 Pbc ：塑性崩壊時の曲げ応力

$Pb1$ ：作用曲げ応力

SF ：安全率

Z ： Z 係数（割増し係数）

σf ：流動応力

a ：亀裂深さ（ $a=t_p$ ）

t_p ：原配管の厚さ

t_w ： WOL の厚さ（平均 $FN7.5$ 以上、かつ、最小 $FN5.0$ 以上の強度上有効な層の厚さ）

なお、 WOL 1層目あるいは数層目まで、平均 $FN7.5$ 未満、又は、最小 $FN5.0$ 未満の層がある場合は、原配管の厚さに WOL 施工部の厚さを加えた「 WOL 配管部の厚さ」に対する「想定亀裂深さ」の比率が一定の条件では、 $FN7.5$ 未満層の厚さを考慮しない場合よりも WOL 施工部の厚さが厚くなり、塑性崩壊時の曲げ応力（許容曲げ応力）が大きくなる。したがって、 $FN7.5$ 未満層の厚さを考慮しない場合の方が保守的な評価となる。

ここで、 $FN7.5$ 未満層の厚さをパラメータとした破壊力学評価上の WOL 構造強度比較のサンプル計算結果を付録-Cに示す。

(ii) 亀裂深さの制限から要求される WOL の厚さ

WOL 施工後も維持規格の許容亀裂深さを満足するように、 WOL の厚さ(t_w)を $0.75t$ ($t=t_p+t_w$)の許容亀裂深さ比から求める。原配管の貫通割れを想定しているから、

$$\cdot t_p/(t_p+t_w)=0.75 \text{ より} \quad \text{式 6-5}$$

$$\cdot t_w=1/3t_p \text{ となる。}$$

(iii) 一次一般膜応力の制限を満足する WOL の厚さ

WOL 施工部（原配管の厚さは考慮しない）の内圧、自重及び地震荷重による軸方向の一次一般膜応力が設計応力強さ(S_m)以下となる厚さ（設計・建設規格要求）

$$\cdot P_m \leq S_m \quad \text{式 6-6}$$

(iv) 疲労による亀裂進展評価

プラント運転中に発生する荷重による疲労亀裂進展評価を実施し、進展がある場合は、進展量を WOL の厚さに考慮する（付録-B、付録-C参照）。プラント寿命中に WOL 部が受ける荷重としては、維持規格のEB-4320「負荷条件」に従い、供用状態A,Bに対応する負荷条件とし

て、内圧、自重、熱及び $1/3S_1$ *地震による荷重を考慮する。但し、IGSCC についてはWOLの強度上有効な層が平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上であることから考慮しない。

疲労亀裂進展速度:

疲労亀裂進展速度は、維持規格添付 E-2 の「図 添付 E-2-FA-2 オーステナイト系ステンレス鋼の BWR 通常一次系水質環境中の疲労亀裂進展速度線図」を使用する。

$$da/dn=8.17 \times 10^{-12} \cdot t_r^{0.5} \cdot (\Delta K)^{3.0} / (1-R)^{2.12} \quad \text{式 6-7}$$

ここで

ΔK : 応力拡大係数の変動範囲

$\Delta K = \Delta K$ ($R \geq 0$ の場合)

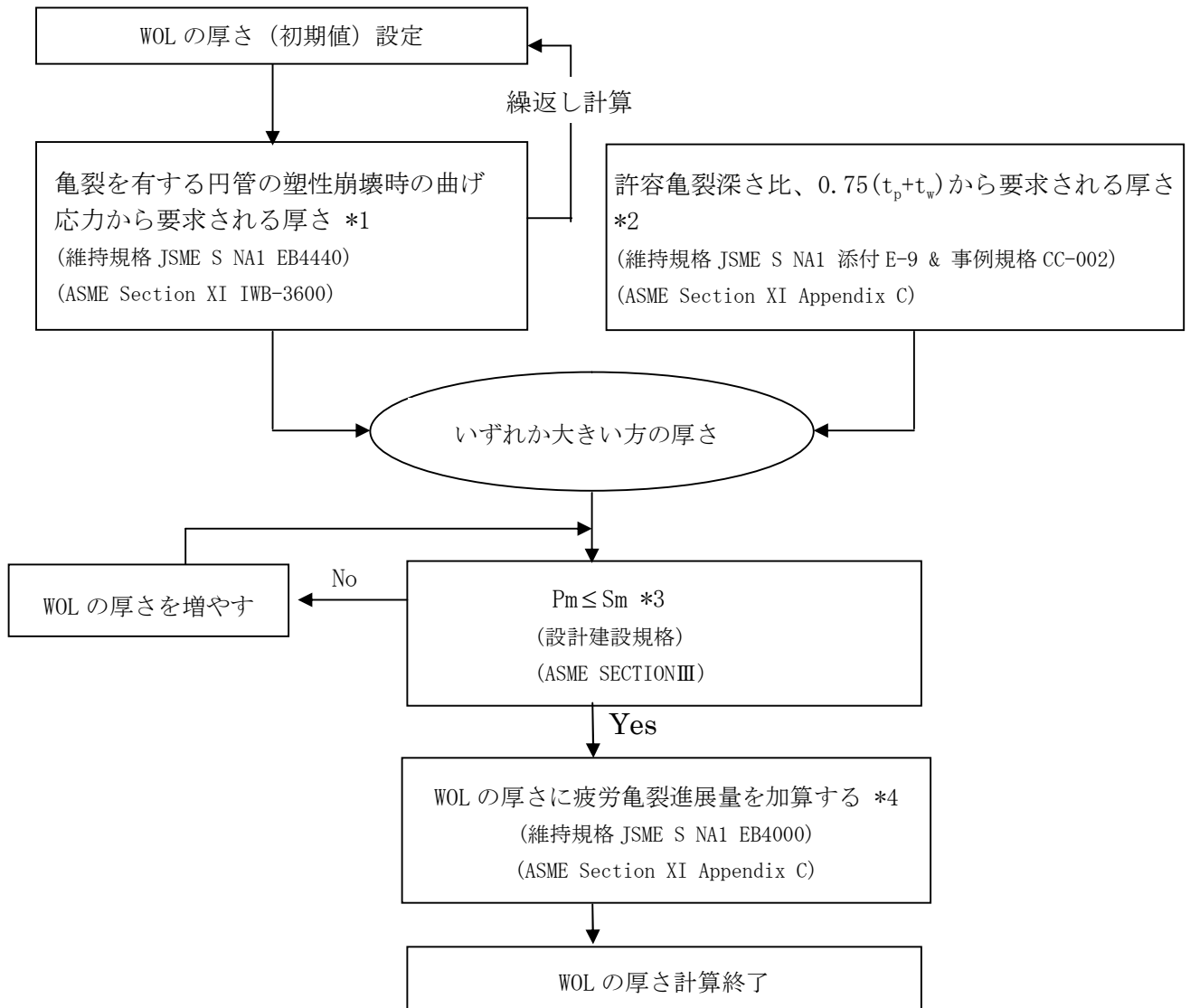
$\Delta K = K_{\max}$ ($R < 0$ の場合)

R : 応力比 (K_{\min}/K_{\max})

t_r : 負荷上昇時間 (sec)

$t_r = 1$ ($t_r < 1$ sec の場合)

$t_r = 1000$ (t_r が定義できない場合)

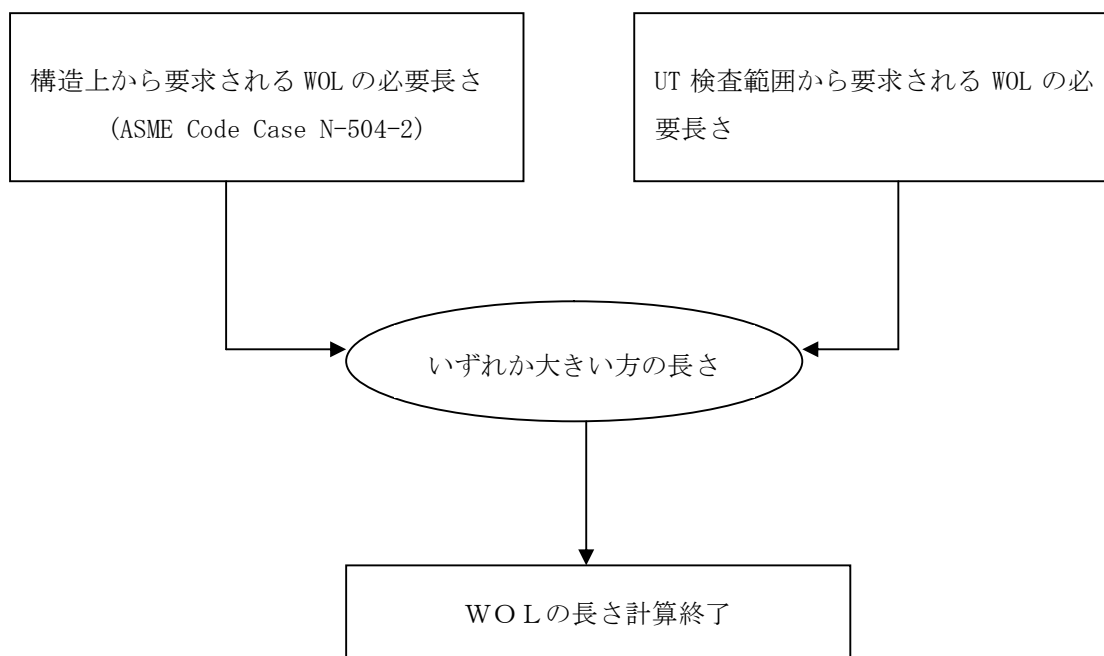


記号	WOL部原配管から算出評価荷重/評価対象項目	応力評価部位
*1	1次応力: ・一次一般膜応力 ・一次曲げ応力	WOL部+原配管の断面
*2	亀裂深さ:原配管厚さ	—
*3	1次応力: ・一次一般膜応力	WOL部の断面
*4	1次応力: ・一次一般膜応力 ・一次曲げ応力 2次応力	WOL部+原配管の断面

解説図 7-1 WOLの厚さ設計フロー

(解説 3-2) WOLの長さ設計

WOLの長さを決める設計フローを解説図 8-1 に示す。基本的な考えとしては、ASME Section XI Code Case N-504-2 にしたがった構造上の要求を満たす長さと UT 検査範囲から要求される長さを求め、いずれか大きい方の長さをWOLの長さとする。



解説図 8-1 WOL の長さの設計

(1) 構造上から要求されるWOLの長さ

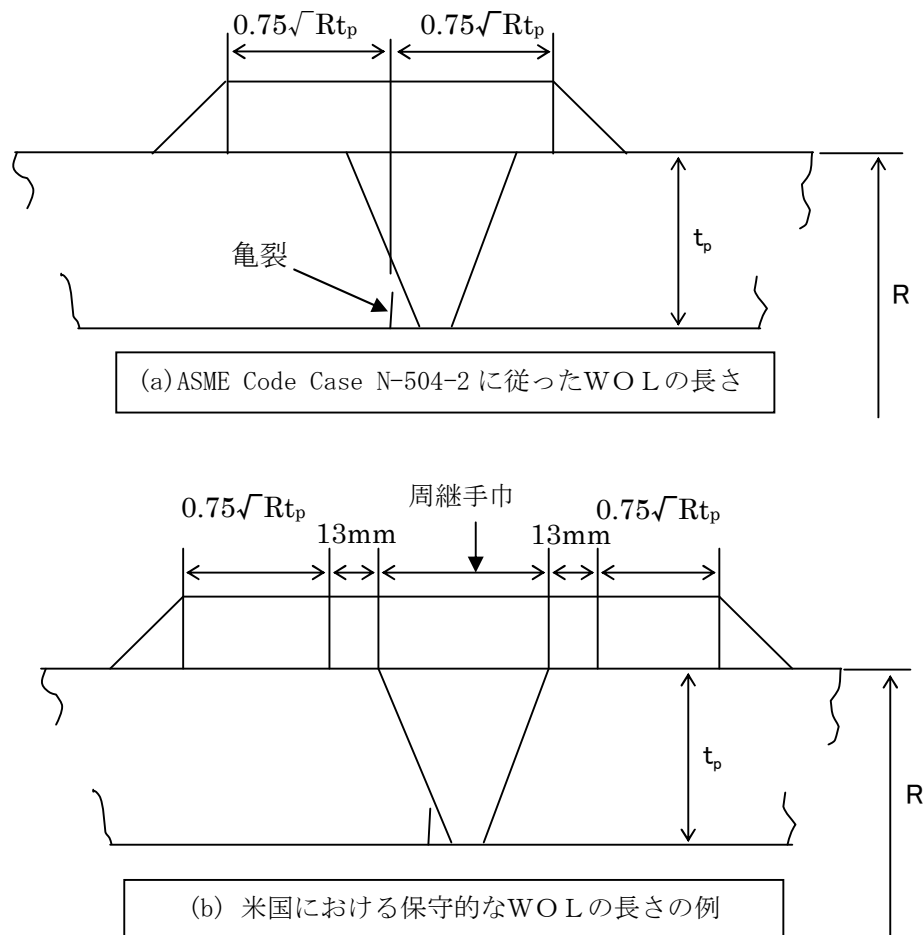
ASME Code Case N-504-2の荷重伝達の要求から、亀裂の両側に各々 $0.75\sqrt{Rt_p}$ (R : 原配管の外半径)の長さを確保する。

WOLの設計上は原配管360°貫通亀裂を想定するので、亀裂部はWOLのみで荷重を伝達することになる。また、原配管亀裂部のWOLには局部的な曲げ応力が発生するが、WOLの長さを長くした方が、発生応力を小さくできる。

ここで、WOLの長さについてのFEMによるサンプル解析結果(付録-D参照)では、 $0.75\sqrt{Rt_p}$ の長さがあれば、上記発生応力を考慮しても、荷重伝達には十分であることが確認されている。

しかし、米国における実際の設計例では保守的にASMEの要求にHAZ部の13mmを加えた範囲をWOLの長さとしている。

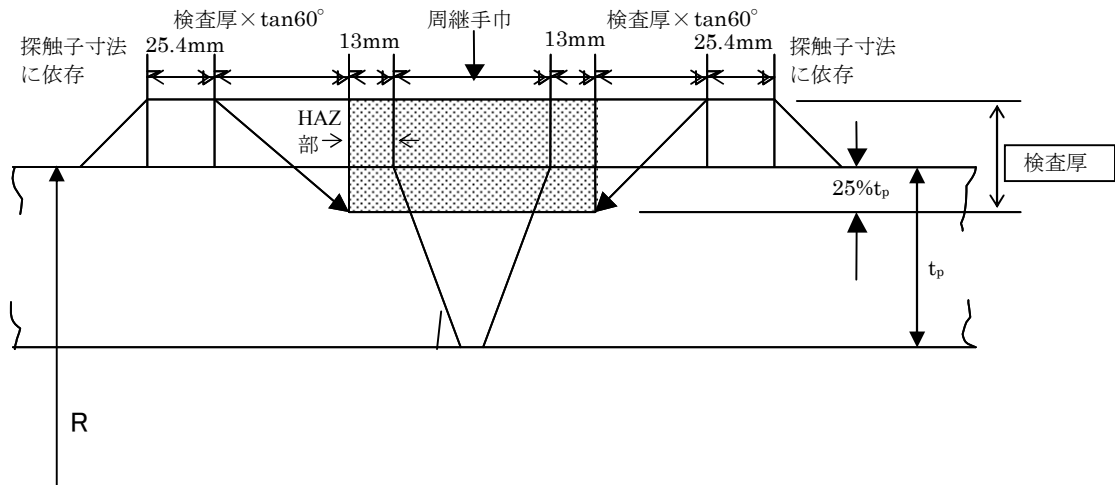
解説図8-2にWOLの長さの代表例を示す。



解説図 8-2 構造上から要求される WOL の長さ

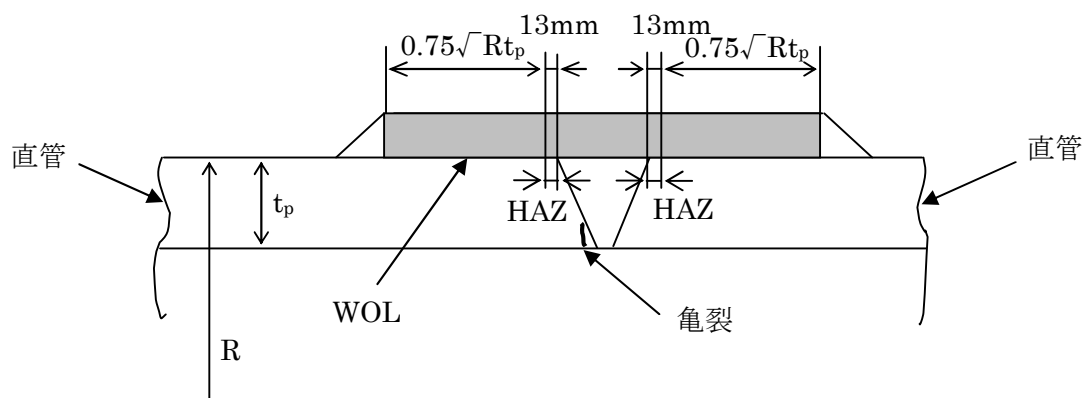
(2) UT の要求によるWOLの長さ

WOL施工後のPSI、ISIを考慮した長さとして探傷範囲に対する斜角探触子の移動範囲を満足する長さとする。解説図8-3に具体的なUTの要求によるWOLの長さの例を示す。

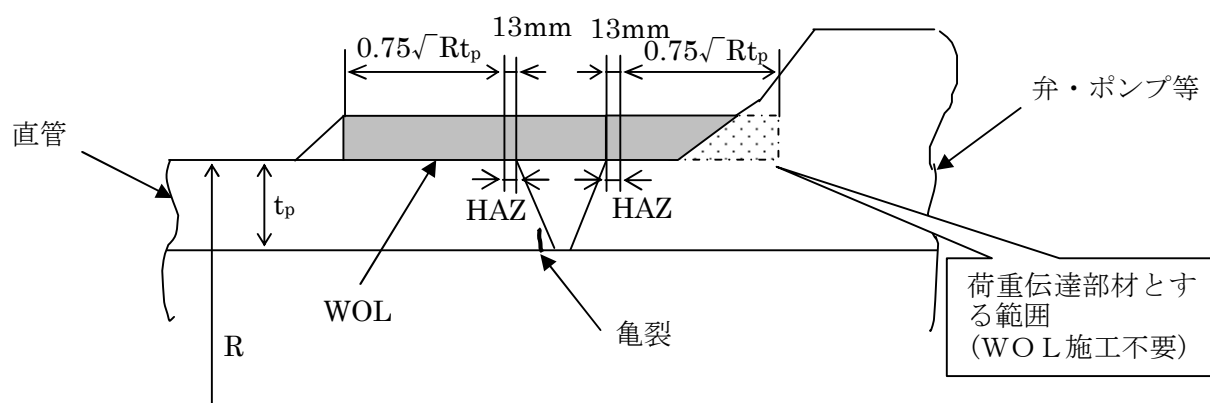


解説図 8-3 UT の要求によるWOLの長さの例
(60° の斜角探触子を使用した場合)

注) 周継手の組合せによるWOLの長さの取り方を解説図8-4に示す。解説図8-4は、原配管外表面からWOL構造強度部(平均FN7.5以上、かつ、最小FN5.0以上)と仮定した場合のWOLの長さの取り方を示している。なお、WOL1層目あるいは数層目まで、平均FN7.5未満、又は、最小FN5.0未満の層がある場合のWOLの長さの取り方を付録Bの2項に示す。



直管と直管の場合



直管と弁・ポンプ等の場合の例

注： WOLの長さは荷重伝達の為に要求されるものであり、溶接材、母材を問わず、物理的に要求長さを確保していれば良い。

また、弁・ポンプ等は2相ステンレス鋼であり、良好な耐食性を有していることから、これまでIGSCCが発生した事例は無く、荷重伝達の観点から長さを確保すればよい。

なお、上記は一例であり、個別のケースについてはそれぞれの施工対象部の荷重伝達状況等を確認した上で、荷重伝達が最適となるようにWOLの設計を行うこととする。

解説図 8-4 WOLの長さの取り方

(解説 3-3) 肉盛溶接に用いる溶加材の炭素含有量について

米国では炭素含有量0.035%以下の条件でWOLの試験を行い、耐IGSCC性等を確認しており、ASME Code Case N-504-2では、WOLを施工する場合の炭素含有量を0.035%以下としている。

国内適用にあたっては、溶加材として米国でも実績のある耐IGSCC性の高い308Lを使用することとしている。一方、国内の材料規格であるJIS Z3321 Y308Lの炭素含有量は0.030%以下に規定されていることから、国内で施工する場合には、炭素含有量0.030%以下の溶加材にて行うことになる。

以上を踏まえて、国内適用の溶加材の炭素含有量は、ASME Code Case N-504-2 (0.035%以下) に包含される0.030%以下とした。

(解説 3-4) WOL層のSCC進展抑制効果について

溶加材308LによるWOL層(溶接金属)のIGSCC進展に対する優れた抵抗性は、確認試験(付録-A参照)や豊富で良好な実機での適用実績から確認されている。

これは先ず、308Lは炭素含有量が低い(0.030%以下)ため、WOL層にCr欠乏型の鋭敏化が生じ難いこと、並びに δ フェライト相中のCr量が高いこと及びその δ フェライト相がオーステナイト相との2相組織において、細かい網目状に分散して存在していることが耐IGSCC性に寄与していると考えられる。

すなわち、308L溶接金属の化学組成とティグ溶接時のかなり速い冷却速度($10^2 \sim 10^3$ °C/s)とが、オーステナイト基地中に樹枝状のフェライト相を細かく分散させた組織を形成させるが、このフェライト相の方向は様々であり、亀裂の進展に対する繰返し障害になると考えられる。高フェライト量(フェライト番号(FN)の測定値が平均FN7.5以上、かつ、最小FN5.0以上)の溶接金属においては、このような障害物が多量に形成されている。

このように、仮に母材中を進展してきたIGSCCが308L溶接金属に到達したとしても、その進展は溶接希釈部に限定され、高Cr、高フェライトの存在域に達すると、その進展を防止あるいは停留させることになると考えられる。

(解説 3-5) フェライト量の管理方法について

(1) フェライト量管理の目的

「(解説 3-2) WOL 層の SCC 進展抑制効果について」で述べているように、WOL 構造強度部に、耐 IGSCC 性に優れた材質（フェライト番号 (FN) の測定値が平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上で炭素含有量 0.030% 以下の 308L 溶接金属）を採用することにより、仮に母材中を進展してきた IGSCC が 308L 溶接金属に到達したとしても、その進展は溶接希釈部に限定され、高 Cr、高フェライトの存在域に達すると、その進展を防止あるいは停留させると考えられる（付録-A 参照）。

それ故に、WOL 施工においては、溶接金属のフェライト量を把握することが特に重要となるが、溶接材料自体が有しているフェライト量は母材との希釈による影響を受けることから、これらの希釈による影響を把握し、規定値を満足するように適切に管理することが必要である。

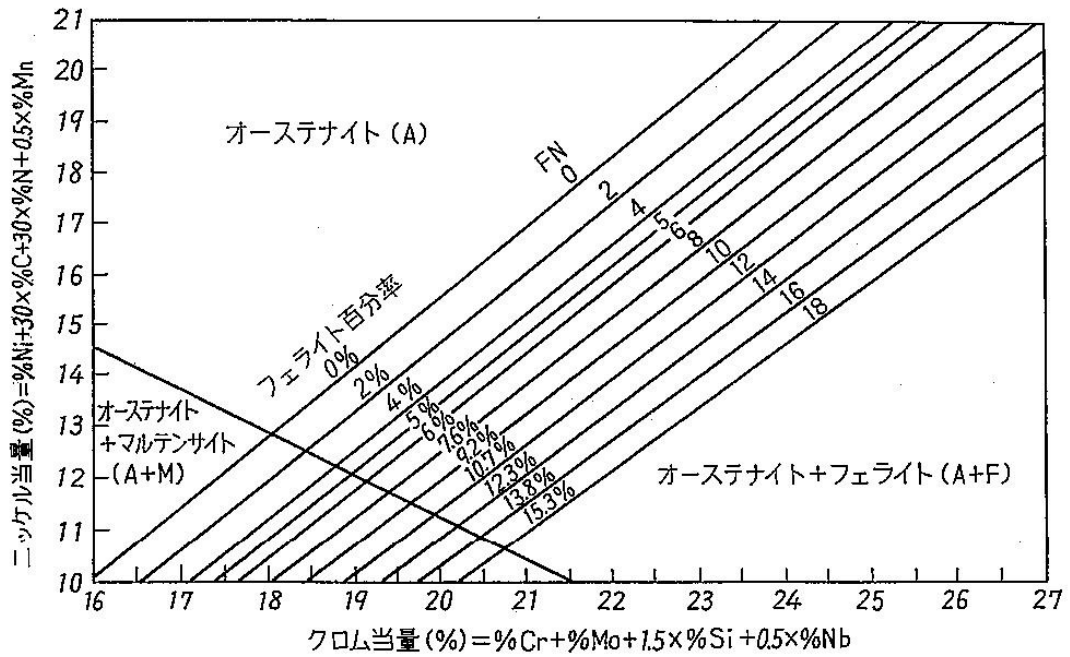
(2) フェライト量について⁽¹⁾⁽²⁾

オーステナイト系ステンレス鋼用の溶接材料は、溶接時の高温割れ防止を目的に、通常は数%程度のフェライトを含有しており、組織はオーステナイト相+フェライト相の混合組織を呈するように設計されている。溶接金属中のフェライト量を知るには、溶接金属の化学成分から予測する方法と、磁氣的に直接溶接金属を測定する方法がある。

溶接金属の化学成分から予測する方法としては、オーステナイト安定化元素の量より算出される Ni 当量及びフェライト安定化元素の量より算出される Cr 当量とフェライト量の関係を示す組織図を用いて、フェライト量を予測するもので、組織図としては、解説図 11-1、解説図 11-2 に示すように JIS Z 3119 にはディロングの組織図及びシェフラーの組織図が規定されている。フェライトの予測方法は、溶接金属の化学成分よりそれぞれの図に示してある式より Ni 当量と Cr 当量を算出し、組織図より対応するフェライト量を読み取ればよい。

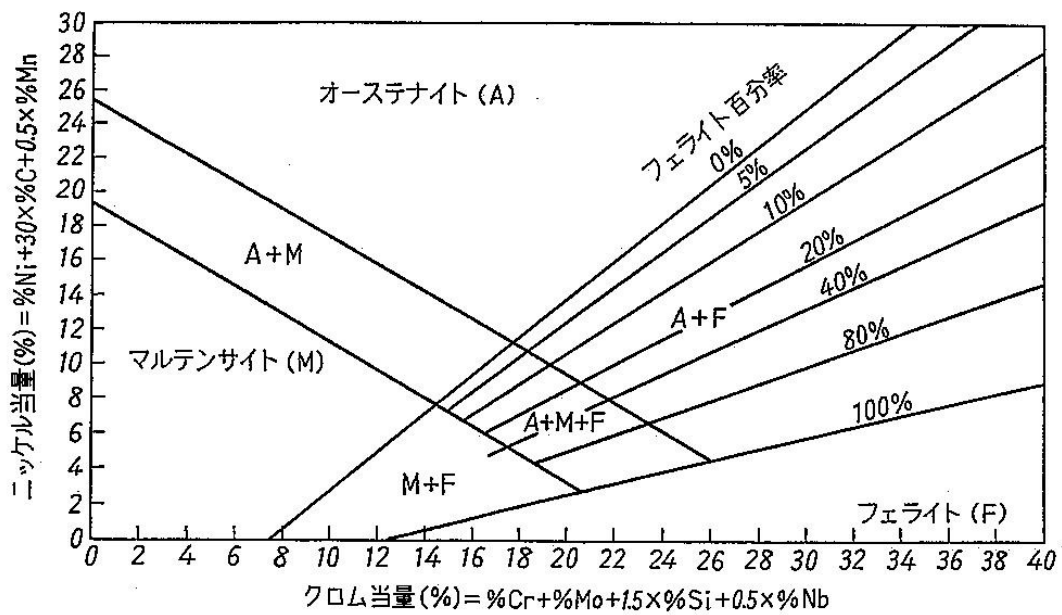
磁氣的に直接溶接金属を測定する方法は、オーステナイト相が非磁性であるのに対して、フェライト相が磁性を持つことを利用して磁性特有の強度を計器によって測定するもので、マグネゲージとフェライトスコープが代表的な計測器である。マグネゲージは磁氣的な吸引力を測るのに対して、フェライトスコープは磁気誘導を利用した電磁氣的な測定方法であり、現場での実溶接物のフェライト量測定に利用されることが多い。

なお、フェライト量の表記方法には、%表示と FN（フェライト番号）表示がある。%表示は δ フェライト相の体積百分率を示したものであり、組織観察から求められるフェライト相の面積率で求められるのに対し、FN は永久磁石と試験片との間の吸引力でフェライト量を示したものである。解説図 11-1 に示すディロングの組織図では、体積率で示した % 表示に対応する FN が表示されている。



解説図 11-1 ディロングの組織図

(出典：JIS Z 3119 図3 フェライト量算定組織図B(1988))



解説図 11-2 シェフラーの組織図

(出典：JIS Z 3119 図2 フェライト量算定組織図A(1988))

(3) フェライト量の管理方法

(a) 溶接材料の選定

(2)項の化学成分からフェライト量を予測することが可能であることから、溶接材料購入時には、(b)項に示す母材との希釈を考慮して規定値より高めのフェライト量を有する溶接材料を選定する。

なお、WOLで用いるティグ溶接の場合は、被覆アーク溶接棒のような被覆剤との冶金的反応がなく、溶接材料そのものが溶融されるので、溶接金属のフェライト量の推定において、母材との希釈の影響を検討するのに用いる溶着金属の化学成分は、溶接材料成分とほぼ同等であると考えてよい。

(b) 肉盛溶接時における母材との希釈の考慮

WOL施工部では、一般に母材のフェライト量が溶接材料のフェライト量に比べて少ないことから、初層から数層まで母材との溶け込みによる希釈の影響を受ける。

一例として、フェライト量 8FN の溶接材料を用いて、母材（フェライト量：0FN とおく）との溶け込み量が 30%となるような溶接条件で肉盛溶接する場合を考えると、初層のフェライト量は、母材との希釈（母材への溶け込み 30%）により 5.6FN ($=0\text{FN} \times 0.3 + 8\text{FN} \times 0.7$) と推定される。2層目のフェライト量は、初層（5.6FN）との希釈により 7.3FN ($=5.6\text{FN} \times 0.3 + 8\text{FN} \times 0.7$) と推定され、3層目のフェライト量は、2層（7.3FN）との希釈により 7.8FN ($=7.3\text{FN} \times 0.3 + 8\text{FN} \times 0.7$) と推定される。従って、3層目からフェライト量平均 7.5FN を確保できると推測できる。

このように、母材との希釈と溶接材料のフェライト量により、規定値を満足する層を推測することが可能である。

(c) 肉盛溶接金属部のフェライト量の測定・確認

肉盛溶接金属部は、フェライトスコープ又はマグネゲージを使用して、各層のフェライト量 (FN 値) を測定・確認していき、規定値を満足する層より外周側の肉盛溶接部をWOL構造強度部とする。

参考文献

- (1) 接合・溶接技術 Q&A1000, (株) 産業技術センター 編集 松田福久他, Q5-2-59、Q6-5-6 溶接
- (2) JIS Z 3119: オーステナイト系ステンレス鋼溶着金属のフェライト量の測定方法(1988)

(解説 3-6) WOL溶接後の UT 検査で確認する範囲について

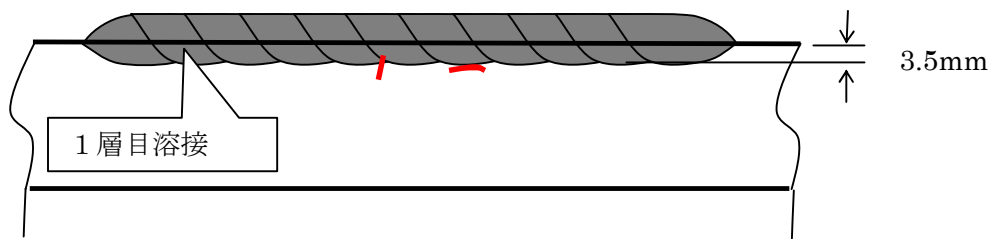
- (1) WOL施工部の溶接検査として実施する非破壊検査については、溶接部の割れ及び溶接部の欠陥の有無をPT、UTで検査することになる。

このうち、UT 検査については、WOL施工部(両端のスロープを除く(*))に加えて、溶接金属近傍の欠陥が発生する可能性のある母材部を検査範囲とする必要がある。

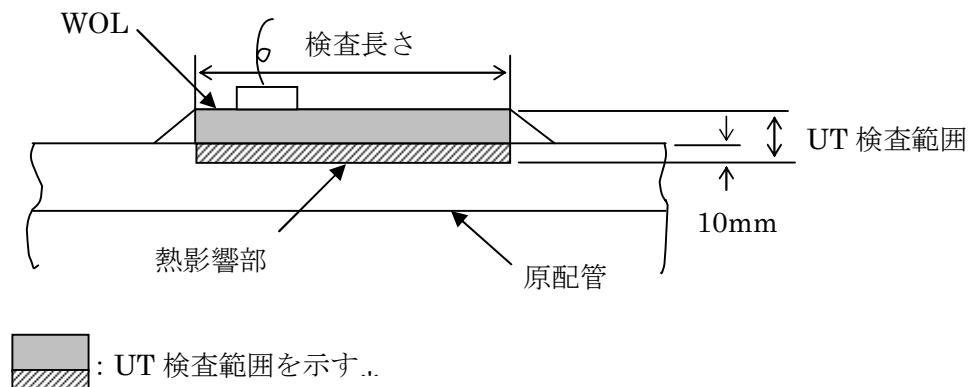
(*)：構造強度を期待しないWOL両端のスロープ部については、荷重の伝達と応力集中の低減を目的としたものであり、WOL溶接後に外表面のPT 検査のみを実施する。)

- (2) 溶接金属近傍における母材の欠陥としては、溶接による高温割れが考えられる。解説図 12-1 にオーステナイトステンレス鋼の溶接による割れの模式図を示す。一般にオーステナイト系ステンレス鋼母材での高温割れ、液化割れ及び高温延性低下割れが発生し得る温度領域まで加熱される溶接境界部及びその近傍を考慮すればよいと考えられる。

WOL施工条件における温度解析の結果、原配管の外表面から7mmの位置における最高加熱温度は700℃程度と得られており、この範囲のUT 検査を実施することで十分と考えられるが、従来のUT 検査と同様に熱影響部として10mmをUT 検査範囲とする。(解説図 11-2 参照)



解説図 12-1 WOL溶接時の高温割れイメージ

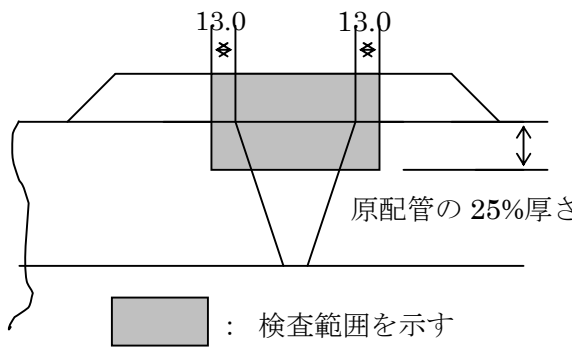


解説図 12-2 WOL溶接後の UT 検査範囲

(解説 4-1) 供用期間中検査

(1) 供用期間中の適用部位検査方法

WOL適用部位は、供用期間中検査（ISI）として超音波探傷試験（UT）を実施する。検査範囲及び超音波探傷試験条件を下表に示す。なお、供用前検査（PSI）は、供用期間中検査と同じ検査範囲及び超音波探傷試験条件にて実施する。

項 目	内 容
(1) 検査範囲	<p>下図に示す範囲のWOL溶接部並びに原配管部とする。</p>  <p style="text-align: center;"> : 検査範囲を示す </p>
(2) 検査手法	<p>WOL工法における超音波探傷試験の方法及び検査員は、日本非破壊検査協会規格「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証」(NDIS 0603)の付属書B（規定）「軽水型原子力発電所用機器のウェルドオーバーレイ施工部に対する PD 資格試験」に合格し認証された方法及び検査員により行うものとする。</p>
(3) 判定基準	<p>亀裂が強度上有効なWOL層（平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上）に進展していないこと。</p>

(2) 供用期間中検査 (ISI) 頻度

現行の日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1)」においては、クラス 1 配管であって呼び径 100A 以上の配管の円周方向溶接部については、10 年間で全継手数の 25% の体積検査 (UT、RT のいずれか) を供用期間中検査 (ISI) として行うこととしているが、これは健全な配管に対する規定である。

本工法を適用している米国では、WOL 施工部に対する供用期間中検査の要求を通常の配管への要求とは別に定めている。具体的には、米国 NRC (原子力規制委員会) の規制書簡 Generic Letter 88-01 ” NRC Position on IGSCC in BWR Austenitic Stainless Steel Piping” とその技術的根拠を含んだ NRC 公式報告書 NUREG-0313, Rev. 2 ” Technical Report on Material Selection and Processing Guides for BWR Coolant Pressure Boundary Piping” の中で、WOL 施工部の検査頻度は、2 運転サイクル (1 運転サイクルの最大運転長さ 24 ヶ月) に 1 回の割合とし、検査方法は ASME Code Case N-504-2 の規定に従って、「肉盛溶接部+原配管の外周部 25%」の範囲を UT 検査するように要求している。

その後、米国においては、20 年に及ぶ長年の良好な運転実績や ISI 実績を踏まえ、検査頻度の低減を求める動きが始まり、2000 年には「Request for Relief form」を NRC へ提出することにより、個別施工部位毎に検査頻度を低減することが認められるようになった。

上記の米国の状況も踏まえて、WOL 国内適用時の供用期間中検査 (ISI) 頻度は、WOL 施工直後に PSI を実施し、その後は当面、米国の ISI 頻度と同等な 4 運転サイクル (1 運転サイクルの最大運転長さ 13 ヶ月) 以内に 1 回の割合とすることが妥当と判断した。

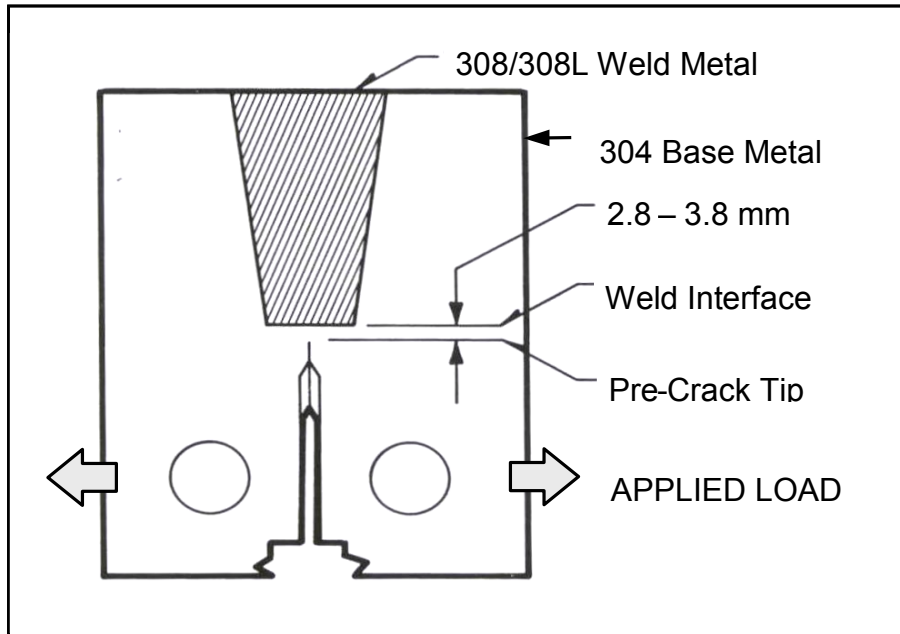
付録-A WOL溶接金属の耐 IGSCC 性（亀裂進展停止特性）について

WOL溶接金属の耐 IGSCC 性（亀裂進展停止特性）に関しては、米国（GE 社）において、以下のような試験結果が得られている。

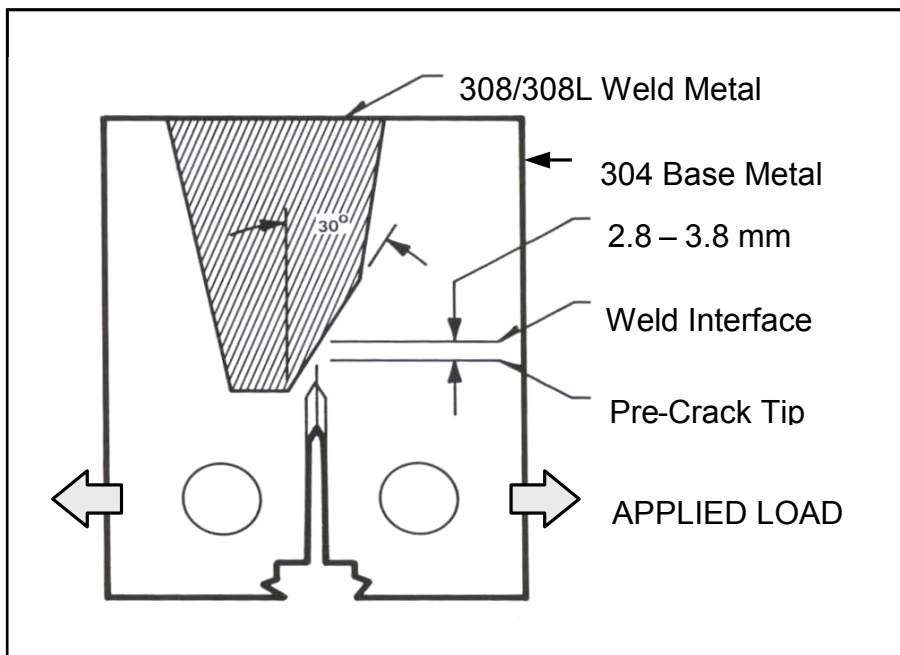
先ず、付録図 A-1 に示すように、溶接金属(308 又は 308L)を肉盛した 1TCT 試験片に実機 BWR 環境条件よりも IGSCC の観点で厳しい環境条件（導電率：1.0 μ S/cm、溶存酸素濃度：6 ppm）で、引張荷重を延べ 5,448 時間、繰り返し負荷し、予め導入した亀裂が溶接金属内に進展するか否かを確認した。

その結果、炭素含有量が 0.053%でフェライト量が 7.0~8.5%の条件では溶接金属内への進展量は 2.54 mm であったが（付録図 A-2）、炭素含有量が低く、フェライト量が高くなるに従い、溶接金属部への亀裂の進展量は小さくなり、炭素含有量が 0.025%でフェライト量が 8.5~11.5%の条件では、溶接金属内への進展がない（付録図 A-3）との結果が得られている。

また、貫通 IGSCC を導入した 100A 配管に WOL を施工し、実機 BWR 環境条件よりも IGSCC の観点で厳しい環境条件（導電率：1.5 μ S/cm、溶存酸素濃度：6 ppm）で、1.0 Sm（設計応力強さ）に相当する引張応力を最大延べ 15,928 時間、繰り返し負荷した亀裂進展試験での溶接金属への最大亀裂進展量は 1.4 mm であり、かつ WOL 部の第 2 層目（最小 FN=8.8（実測値））で、亀裂の進展停止が確認されている。（付録図 A-4）

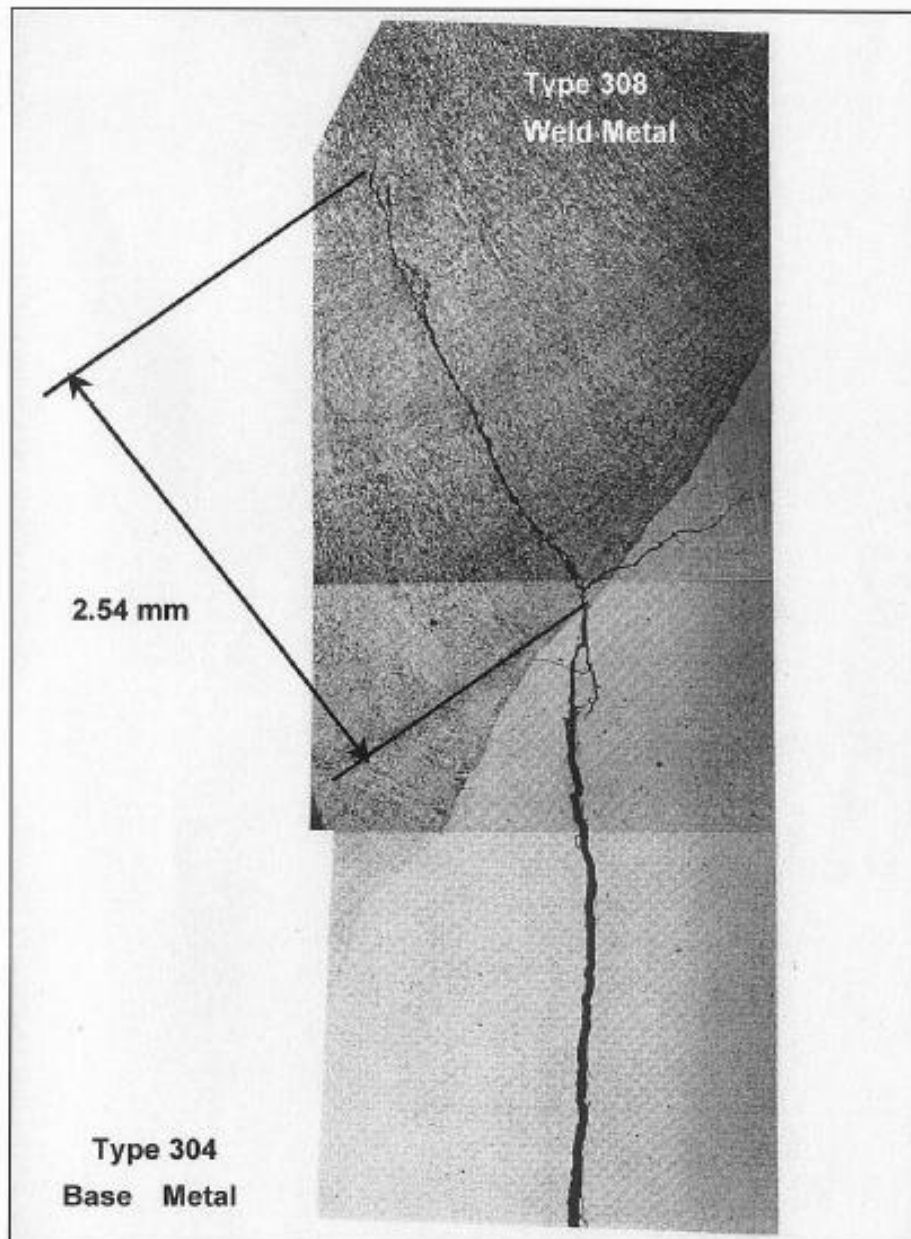


(Specimen Configured for 90 Degree Crack Orientation) (ケース 1)

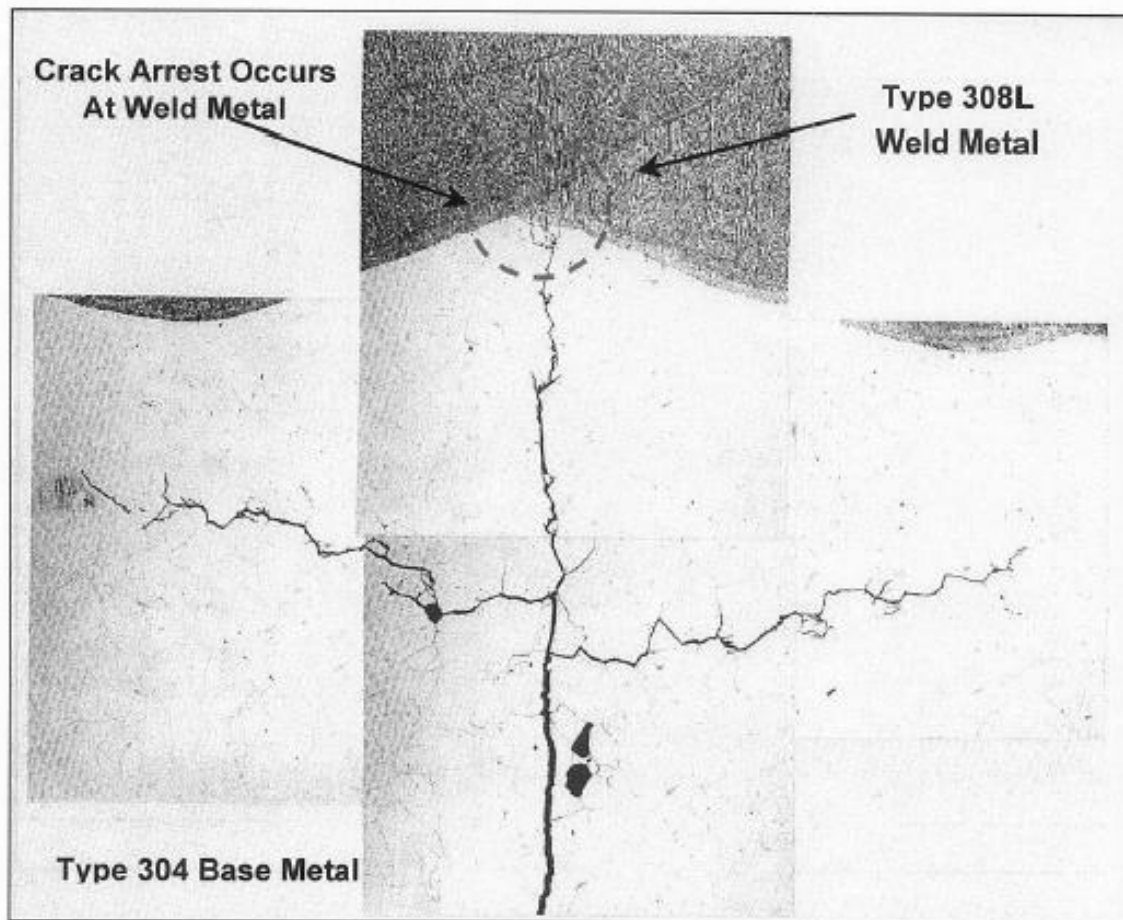


(Specimen Configured for 30 Degree Crack Orientation) (ケース 2)

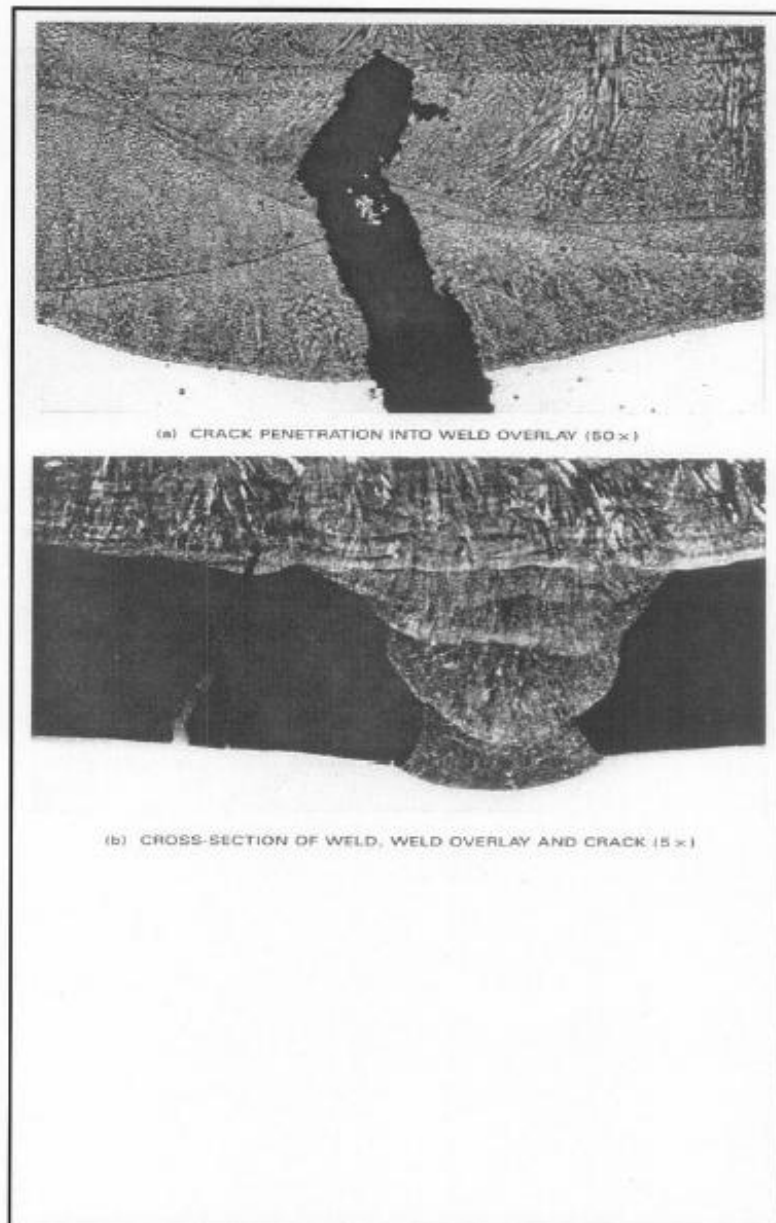
付録図A-1 CT試験片を用いた亀裂進展停止試験における試験体
(GE社 提供データ)



付録図A-2 亀裂進展停止試験結果例
(ケース2で炭素含有量：0.053%、フェライト量：7.0～8.5%の場合)
(GE社 提供データ)



付録図A-3 亀裂進展停止試験結果例
(ケース1で炭素含有量: 0.025%、フェライト量: 8.0~11.5%の場合)
(GE社 提供データ)



付録図A-4 WOLを施工した配管試験体による亀裂進展試験結果
(貫通予亀裂付き 100A 配管にWOLを施工した場合)
(GE社 提供データ)

付録-B WOL設計手順の具体例

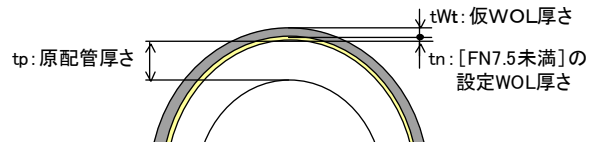
WOL施工において、WOL 1層目あるいは数層目まで、フェライト番号 (FN) の測定値が平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満である場合のWOLの厚さ及びWOLの長さを決める設計手順の具体例を以下に示す。

なお、WOLの厚さは、平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上 (以下、[FN7.5 以上] と略す) の強度上有効な層の厚さとし、これを満足しない平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満 (以下、[FN7.5 未満] と略す) の層は、WOLの厚さを含めないものとする。

1. WOLの厚さ

(1) WOLの厚さ (仮WOL厚さ) を仮設定

計算上の原配管厚さ $tp' = tp + tn$
 想定亀裂長さ = 計算上の原配管厚さ



(2) WOL 施工部に作用する荷重 (内圧、自重、熱及び地震) の計算

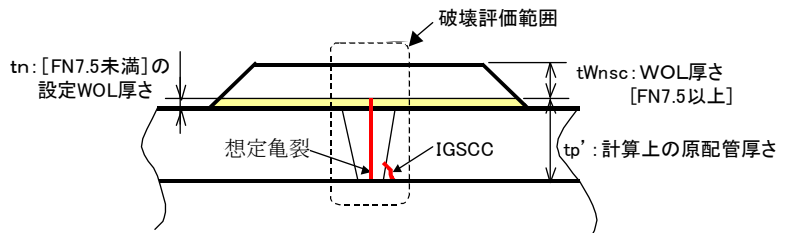
(3) WOL厚さの計算

①破壊力学評価手法に基づくWOL厚さ (tWnsc) の計算

全周亀裂で貫通している断面に対して、(1)で設定した仮WOL厚さで評価を行う。

↓
 評価結果

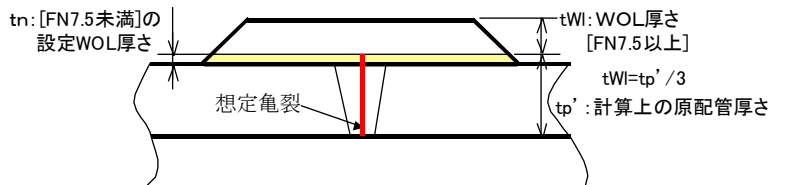
- ・ 破壊しない : 仮WOL厚さ = tWnsc
- ・ 破壊する : 仮WOL厚さの再設定



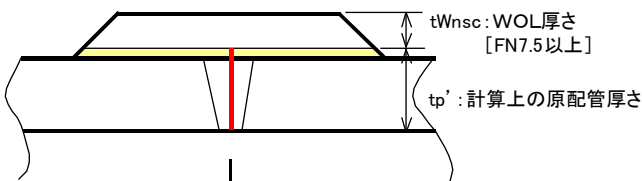
②許容亀裂深さ比に基づくWOL厚さの計算

許容亀裂深さ比から、WOL厚さ (tWl) を計算する。

許容亀裂深さ比より、 $tp' / (tp' + tWl) = 0.75$ から、 $tWl = tp' / 3$



(4) 破壊力学評価手法と許容亀裂深さ比から要求されるWOL厚さの比較



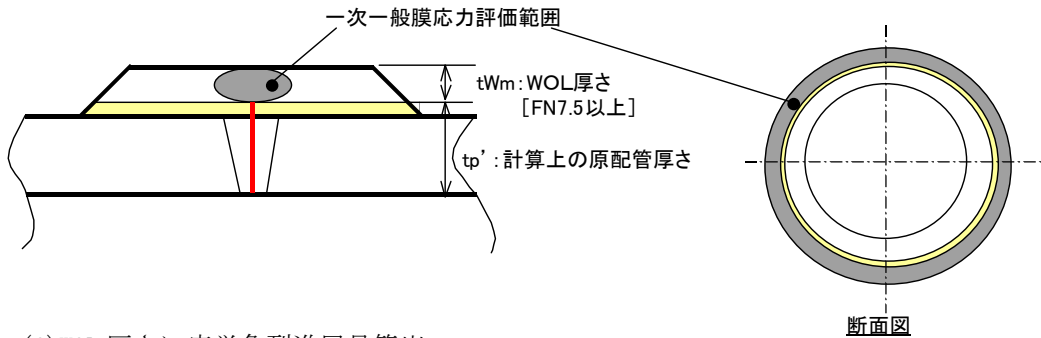
破壊力学評価方法から求めた結果

許容亀裂深さ比から求めた結果

比較して大きい方の厚さを採用 ($tWm = \text{Max} \{tWnsc, tWl\}$)

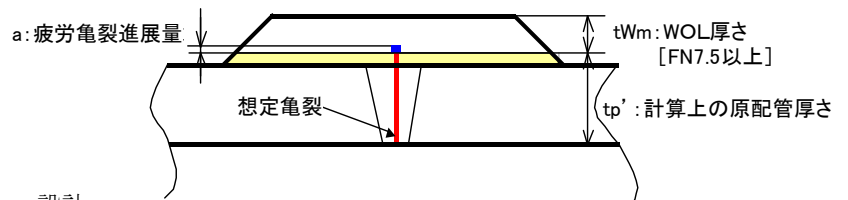
(5) 一次一般膜応力評価

(4)で選定した厚さに対して、 $P_m \leq S_m$ であることを確認する。満足しない場合、WOL厚さを増やす。



(6) WOL厚さに疲労亀裂進展量算出

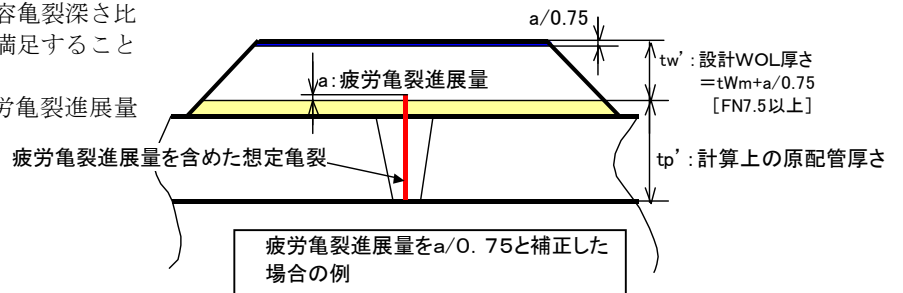
破壊力学評価手法により、疲労亀裂進展量(a)を算出する。



(7) 設計 WOL 厚さ (t_w')

疲労亀裂進展量(a)を WOL 厚さ(t_{Wm})に加算し、設計 WOL 厚さ($t_w' = t_{Wm} + a$)とする。次に許容亀裂深さ比($(t_p' + a) / (t_p' + t_w') \leq 0.75$)を満足することを確認する。

もし、満足していなければ加算する疲労亀裂進展量は、 $a/0.75$ とする。



(8) 最終の設計 WOL 厚さ (t_w)

設計 WOL 厚さ(t_w')を用いて、(3)から(5)までを再確認する。

再確認結果、満足している場合の設計 WOL 厚さ(t_w')を最終の設計 WOL 厚さ(t_w)とする。

2. WOLの長さ

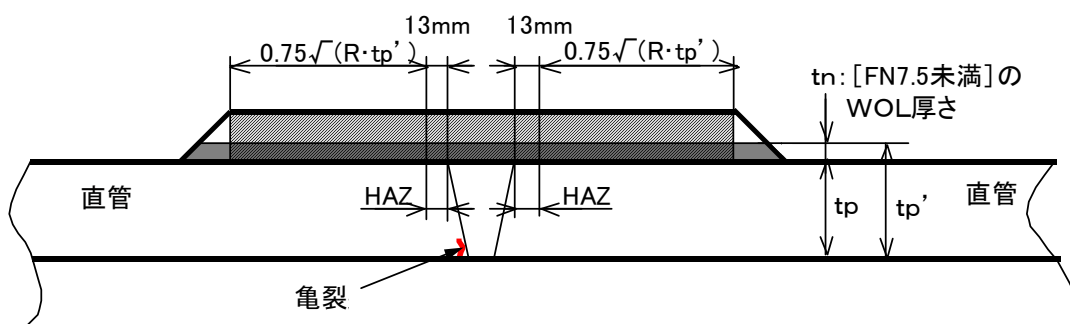
(1) 原配管周溶接 HAZ 部から両側に $0.75\sqrt{R \cdot tp'}$ の長さを有すること。

ここで、 R は原配管の外半径を示し、 tp' は原配管厚さ tp に [FN7.5 未満] の WOL 厚さ tn を加えた厚さを保守的に用いることとする。

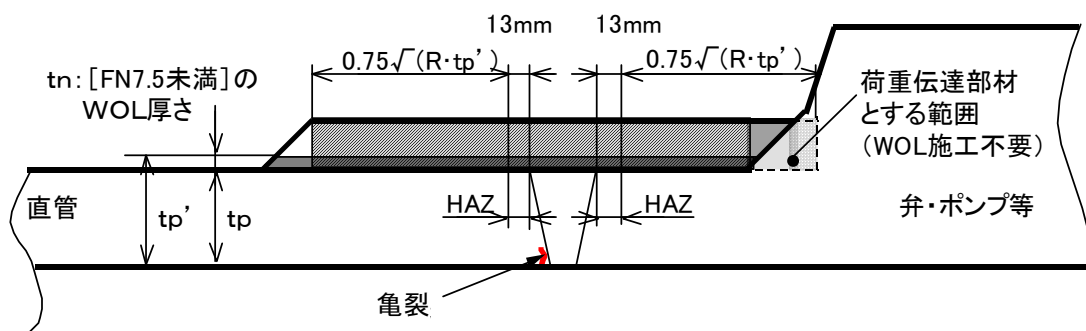
$$tp' = tp + tn$$

(2) ISI で要求される範囲について、超音波探傷試験 (UT) が可能であること。

直管と直管の場合



直管と弁・ポンプ等の場合の例



付録-C 破壊力学評価上のWOL構造強度比較の計算例

● 目的

WOL 1層目あるいは数層目まで、平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満の層が存在し得るので、そのことを考慮して工認申請時には工認・強度計算書等を作成する必要がある。しかしながら、現地工事後の As-Built 寸法によっては、再計算が必要となる場合があるので、実用的に考えて、以下のように保守的な評価方法を示すものである。

● 保守的な評価方法

WOL 1層目あるいは数層目まで、平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満の層がある場合は、原配管の厚さにWOL施工部の厚さを加えた「WOL配管部の厚さ」に対する「想定亀裂深さ」の比率が一定の条件では、FN7.5 未満層の厚さを考慮しない場合よりもWOL施工部の厚さが厚くなり、塑性崩壊時の曲げ応力（許容曲げ応力）が大きくなる。したがって、FN7.5 未満層の厚さを考慮しない場合の方が保守的な評価となる。

ここで、FN7.5 未満層の厚さをパラメータとした破壊力学評価上のWOL構造強度比較のサンプル計算結果を以下に示す。

1. サンプル計算

1.1 WOL施工仕様

WOLを施工する対象配管は、国内 1100MWe の代表プラントの PLR 配管とする。

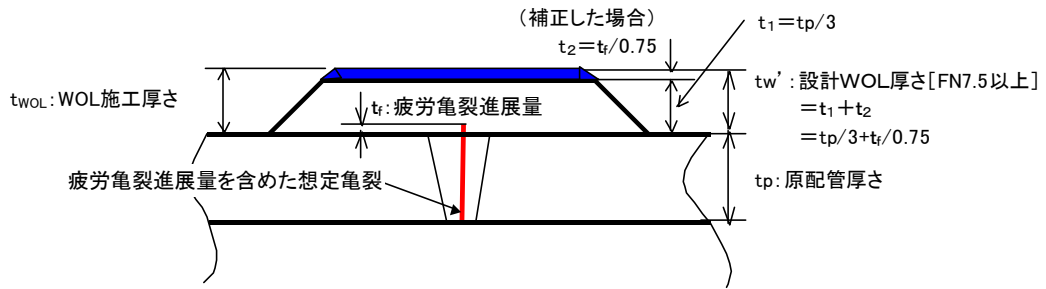
(1) 配管仕様

- (a) 材料 : SUS316TP
- (b) 配管外径 (D_o) : 609.6 mm
- (c) 配管内径 (D_i) : 531.8 mm
- (d) 肉厚 (t_p) : 38.9 mm

(2) WOLの厚さ

原配管外表面からWOL構造強度部(FN7.5以上)と仮定した場合とFN7.5未満のWOL層(4.0mmと仮設定)がある場合の破壊力学評価上のWOL構造強度比較のサンプル計算結果を以下に示す。

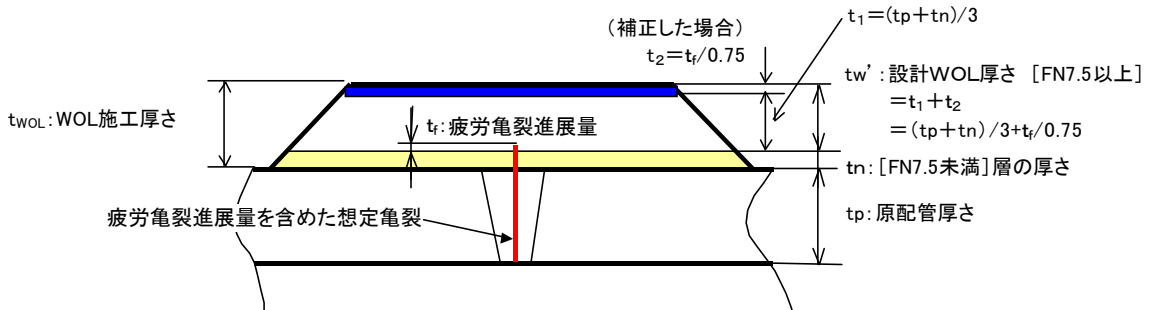
- (a) ケース 1 : 原配管外表面からWOL構造強度部 (FN7.5 以上) と仮定した場合
(付録図C-1 参照)



付録図C-1 原配管外表面からWOL構造強度部 [FN7.5 以上] と仮定した場合の設計WOL厚さ (ケース 1)
(最終の設計WOL厚さ (tw) は破壊力学評価と許容亀裂深さ比 (0.75) を再確認して決定する。)

- 破壊力学評価と許容亀裂深さ制限より決まる厚さ : $t_1(1) \approx \frac{t_p}{3} = 12.97mm$
- 疲労亀裂進展量 (t_f) : $t_f = 1.93mm$
- これを、許容亀裂深さ比 0.75 で補正した値を用いると、 $t_2(1) = \frac{1.93}{0.75} = 2.58mm$
- 設計WOL厚さ : $t_w(1) = t_1(1) + t_2(1) = 15.55mm$
- WOL施工厚さ : $t_{WOL}(1) = t_w(1) = 15.55mm$

- (b) ケース 2 : FN7.5 未満のWOL層 (4.0mm と仮設定) がある場合 (付録図C-2 参照)



付録図C-2 [FN7.5 未満] のWOL層が有る場合の設計WOL厚さ (ケース 2)
(最終の設計WOL厚さ (tw) は破壊力学評価と許容亀裂深さ比 (0.75) を再確認して決定する。)

- 破壊力学評価と許容亀裂深さ制限より決まる厚さ : $t_1(2) \approx \frac{t_p + t_n(2)}{3} = 14.3mm$
- 疲労亀裂進展量 (t_f) : $t_f = 1.93mm$
- これを、許容亀裂深さ比 0.75 で補正した値を用いると、 $t_2(2) = \frac{1.93}{0.75} = 2.58mm$
- FN7.5 未満のWOL層の厚さ : $t_n(2) = 4.0mm$
- 設計WOL厚さ : $t_w(2) = t_1(2) + t_2(2) = 16.88mm$
- WOL施工厚さ : $t_{WOL}(2) = t_w(2) + t_n(2) = 20.88mm$

1.2 塑性崩壊に至る時の曲げモーメント及び許容曲げ応力

(1) ケース 1 :

(a) 塑性崩壊時の曲げモーメント

$$M_b = 2\sigma_f R^2 t \left(2 - \frac{a}{t}\right) \sin \beta \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2 - \frac{a}{t}} \cdot \left(1 - \frac{a}{t} - \frac{P_m}{\sigma_f}\right)$$

ここに、 $\sigma_f =$ 流動応力 $= 2.7Sm = 2.7 \times 122.0 = 329.4MPa$

$Sm =$ 設計応力強さ $= 122.0MPa$ (運転温度 276℃)

$t = t_p + t_{WOL} (1) = 38.9 + 15.55 = 54.45mm$

$a =$ 原配管の全周貫通き裂に疲労き裂進展量を含めたき裂を想定

$= t_p + t_f = 40.83mm$

$$\frac{a}{t} = \frac{40.83}{54.45} = 0.75$$

$$R = R_i + \frac{t}{2} = \frac{D_i + t}{2} = \frac{531.8 + 54.45}{2} = 293.125mm$$

$P = 9.14MPa$ (ポンプ吐出側の運転圧力)

$$\sin \beta = 0.4563$$

故に、塑性崩壊時の曲げモーメントは、(1)式より

$$M_b (1) = 1.758 \times 10^9 Nmm$$

(b) 塑性崩壊時の許容曲げ応力

$$P_{bc} (1) = \frac{M_b (1)}{Z}$$

ここに、 $Z =$ 断面係数 $= \pi R^2 t = \pi \times 293.125^2 \times 54.45 = 1.470 \times 10^7 mm^3$

故に、塑性崩壊時の許容曲げ応力は、

$$P_{bc} (1) = \frac{1.758 \times 10^9}{1.470 \times 10^7} = 119.6MPa$$

(2) ケース 2 :

(a) 塑性崩壊時の曲げモーメント

(1)式において、

$\sigma_f =$ 流動応力 $= 2.7Sm = 2.7 \times 122.0 = 329.4MPa$

$Sm =$ 設計応力強さ $= 122.0MPa$ (運転温度 276℃)

$t = t_p + t_{WOL} (2) = 38.9 + 20.88 = 59.78mm$

$a =$ 原配管及びFN7.5未満のWOL層までの全周貫通き裂に疲労き裂

進展量を含めたき裂を想定 $= t_p + t_n (2) + t_f = 44.83mm$

$$\frac{a}{t} = \frac{44.83}{59.78} = 0.75$$

$$R = R_i + \frac{t}{2} = \frac{D_i + t}{2} = \frac{531.8 + 59.78}{2} = 295.79 \text{ mm}$$

$$P = 9.14 \text{ MPa} (\text{ポンプ吐出側の運転圧力})$$

$$\sin \beta = 0.4696$$

故に、塑性崩壊時の曲げモーメントは、(1)式より

$$M_b(2) = 2.023 \times 10^9 \text{ Nmm}$$

(b) 塑性崩壊時の許容曲げ応力

$$P_{bc}(2) = \frac{M_b(2)}{Z}$$

$$\text{ここに、} Z = \text{断面係数} = \pi R^2 t = \pi \times 295.79^2 \times 59.78 = 1.643 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

故に、塑性崩壊時の許容曲げ応力は、

$$P_{bc}(2) = \frac{2.023 \times 10^9}{1.643 \times 10^7} = 123.1 \text{ MPa}$$

1.3 塑性崩壊時の曲げモーメント及び許容曲げ応力の比較

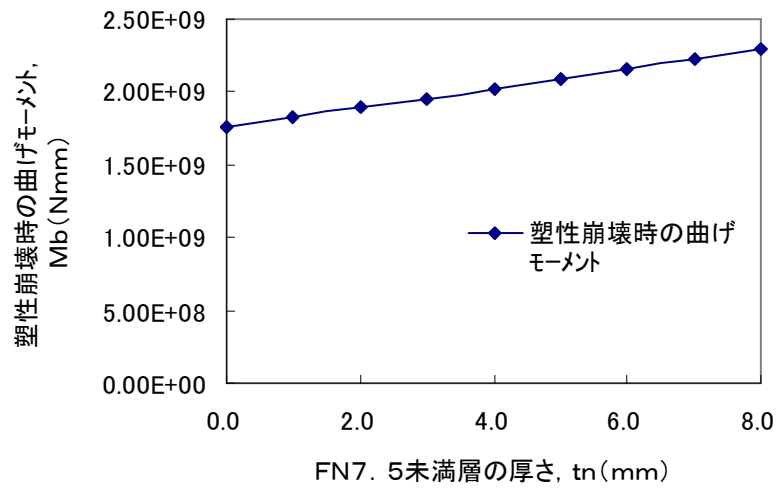
上記のサンプル計算結果から、ケース1とケース2の塑性崩壊に至る曲げモーメント及び許容曲げ応力の比較をすると、

$$M_b(2) > M_b(1) \text{ で、かつ、} P_{bc}(2) > P_{bc}(1)$$

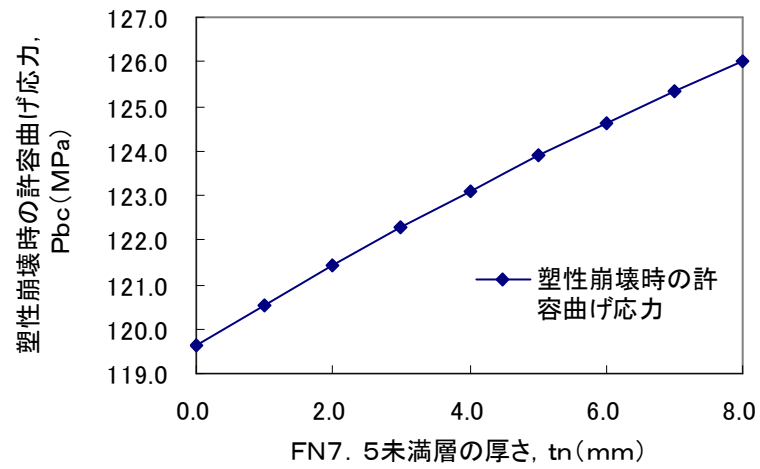
となり、いずれもケース2の方が大きくなる。

また、FN7.5未満層の厚さ(t_n)を、 $t_n=0.0\sim 8.0\text{mm}$ の範囲に仮設定した場合の上記と同様な破壊力学評価上のWOL構造強度の比較計算を行った。その計算結果を、付録図C-3及び付録図C-4に示す。これらの図より、FN7.5未満層の厚さが増えるに従って、塑性崩壊時の曲げモーメント及び許容曲げ応力のいずれも増大する。

すなわち、上記サンプル計算結果及び付録図C-3、付録図C-4によれば、FN7.5未満層の厚さを考慮しない方が、破壊力学評価上、保守的な評価となる。



付録図C-3 塑性崩壊時の曲げモーメント



付録図C-4 塑性崩壊時の許容曲げ応力

付録-D WOLの長さに沿った荷重伝達のFEM 計算例

・FEMによるWOLの長さに沿った荷重伝達の計算例を付録図D-1に示す。

・計算条件

材料 316

配管厚さ (t_p) : 35.6mm

配管外径 (D_0) : 711.2mm

配管の外半径 (R) : 355.6mm

WOL厚さ (t_w) : 12.9mm

端部勾配 45度

配管内圧 1350PSI (9.3MPa)

軸方向配管死荷重 9750N

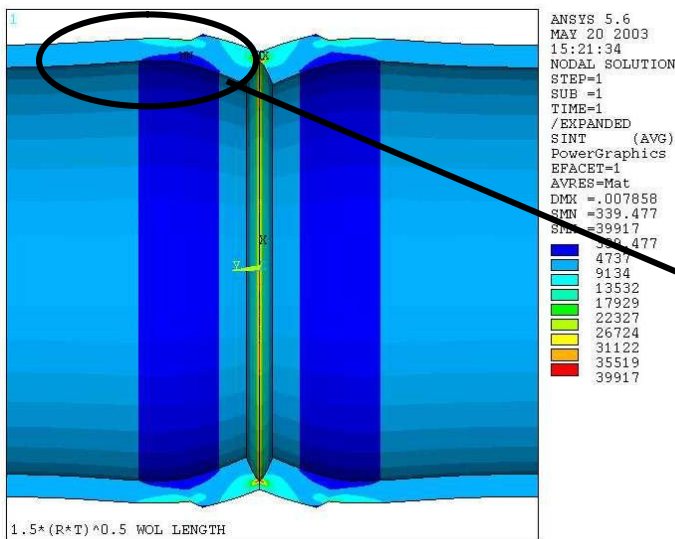
軸方向地震荷重 27360N

・全長を $1.0\sqrt{R \cdot t_p} \sim 2.0\sqrt{R \cdot t_p}$ まで変化させた時の応力計算結果

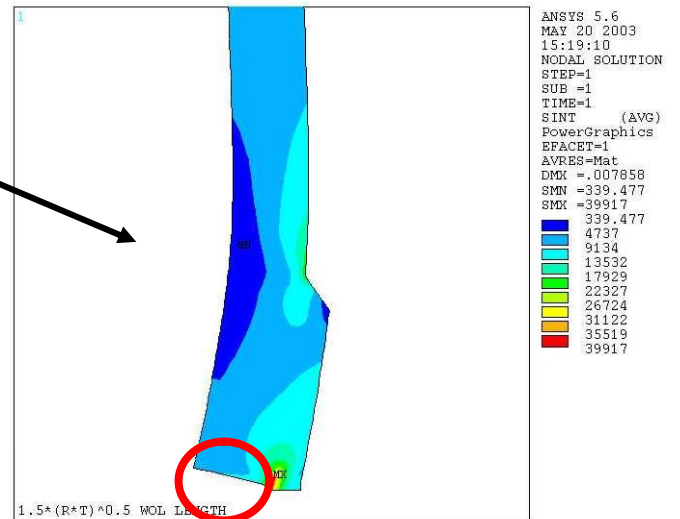
Stress Intensity

Total WOL length ¹ , $\cdot(R \cdot t_p)^{0.5}$	Membrane, psi, (MPa)	Membrane + Bending ² psi, (MPa)	% Change of Membrane + Bending from nominal length ³
2	14490 (101.2)	25210 (176.1)	-8.1
1.5	15410 (107.6)	27420 (191.5)	—
1	16880 (117.9)	30400 (212.3)	10.9
地震時の許容応力	$1.5S_m \cdot 0.8 =$ 144.4MPa	$2.25S_m = 270.9$ MPa	$(S_m = 120.4\text{MPa,}$ at 288°C)

1. This length represents the total WOL length. $2 \cdot [0.75 \cdot (R \cdot t_p)^{0.5}] = 1.5 \cdot (R \cdot t_p)^{0.5}$.
2. Maximum value occurred at inside surface.
3. Nominal WOL length is $0.75 \cdot (R \cdot t_p)^{0.5}$.



・片側 $0.75\sqrt{R \cdot t_p}$ 時の解析結果例



- ・片側 $0.75\sqrt{R \cdot t_p}$ のWOL長さは、荷重伝達に十分な長さである。
- ・WOL長さの長い方が、発生応力は小さい。

付録図D-1 WOLの長さに沿った荷重伝達のFEM 計算例

付録-E WOL工法を適用する亀裂の周方向欠陥長さ制限について

(本付録は、初版の解説-5の内容をガイドラインの根拠として保存することを目的したものである。)

日本機械学会維持規格 (JSME S NA1-2002。以下、維持規格という。) では、周方向に欠陥を有する管が曲げモーメントを受けるとき、欠陥長さが短いと LBB (Leak Before Break : 破断前漏えい) が成立することと、LBB が成立する欠陥角度は、ほぼ 2θ (θ は亀裂の半角) が 60° 以下であることから、周方向欠陥に対して、 $2\theta \leq 60^\circ$ の亀裂長さの制限を設けている。

WOL工法を適用する場合においては、維持規格の周方向許容欠陥角度 $2\theta \leq 60^\circ$ の制限規定を事例規格の基づき適用除外するとしても、十分な安全水準が確保されていることを以下に説明する。

WOL工法は肉盛した溶接金属 (WOL構造強度部) を構造強度部材として位置付け、原配管に発生した亀裂が全周貫通しても、地震荷重を含む全ての想定される荷重に対して、十分な強度余裕を確保した設計としている。

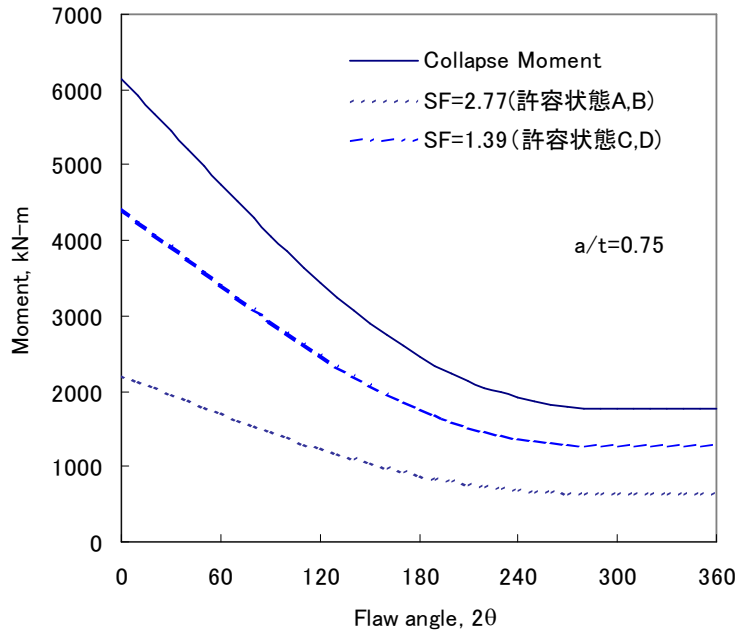
また、プラント供用期間中における疲労亀裂進展解析を行い、亀裂進展量を求め、それに相当する寸法をWOL構造強度部の厚さに加えることにより、更なる強度を持たせる設計としている (第4章の4.2.1.1(d)参照)。

「[解説3-4] WOL層のSCC進展抑制効果について」において述べているように、WOL構造強度部には、耐IGSCC性に優れた材質 (フェライト番号 (FN) の測定値が平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上で炭素含有量 0.030% 以下の低炭素オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属) を採用し、施工管理において FN を適正に管理することで、SCC が万一、WOL施工部に進展してきても、WOL構造強度部内への進展を防止あるいは停留させる性能を有している (付録-A参照)。

また、WOL工法は原配管の内面を水冷しながら施工するので、原配管内面の残留応力が圧縮応力となること、海外 BWR プラントでの 15 年間に亘る延べ 1000 箇所以上の WOL 施工部に対する UT 検査において、WOL 施工部に亀裂が進展した例は報告されていないことから、原配管亀裂が WOL 構造強度部に到達する可能性は少ないと考えられる。

上記に示す WOL 工法の設計、施工管理を行った上で、供用期間中に非破壊検査 (UT 検査) により、亀裂が WOL 構造強度部 (平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上) に進展していないことを定期的に監視することを義務付けている。これにより、供用期間中全体にわたって破壊に対する十分な強度余裕を確保し、WOL 施工部からの漏えいの発生を防止する考え方をとっている。

ここで、代表的な原子炉再循環系配管 (原配管外径 609.6mm) に WOL 工法を施工したケースを例にとり、WOL 施工部の構造強度余裕が十分確保されることを以下に説明する。付録図 E-1 (SF は安全率、 a は亀裂の深さ、 t は管の厚さ) に示すように、原配管を貫通する周方向亀裂長さ (角度) $2\theta = 60^\circ$ の場合の崩壊曲げモーメントは 4750 kN-m、 $2\theta = 360^\circ$ の全周亀裂の場合の崩壊曲げモーメントは 1760 kN-m になる。WOL の設計は、全周貫通亀裂 ($2\theta = 360^\circ$) を想定し、許容状態 A, B で約 640 kN-m、許容状態 C, D で約 1270 kN-m 以下になるように設計している。 $2\theta = 360^\circ$ の場合の崩壊曲げモーメントは 1760 kN-m であることから、亀裂の長さを $2\theta = 60^\circ$ から 360° に拡大しても WOL は安全側に管理されることになる。



付録図E-1 極限荷重評価法における限界モーメント（実線）と許容モーメント（破線）の関係
 (計算条件：材料：SUS316TP，運転圧力：9.14MPa，運転温度 276°C，配管口径 609.6mm，
 管の厚さ 38.9mm+WOL 施工厚さ 15.55mm の例(吐出配管))

なお、国内でのWOL工法適用部位において、万一、原配管に存在した亀裂がWOL構造強度部に到達するような事象が発生した場合は、図5（第5章）のWOL工法の適用フローに示すように、その時点で当該WOL施工部位の配管の部分取替を行うことを推奨する。

BWR 補修工法ガイドライン[ウェルドオーバーレイ工法]の概要

1. ウェルドオーバーレイ工法の概要

ウェルドオーバーレイ (WOL) 工法は、き裂が発生したオーステナイト系ステンレス鋼製の一次系配管等の周溶接継手に対して、自動ティグ溶接を用いて、耐 IGSCC 性に優れた溶接金属 (フェライト含有量の高い低炭素オーステナイト系ステンレス鋼溶接材料) を当該配管の外表面全周にわたり複数層の肉盛溶接を施工することにより、構造健全性を確保、維持する補修工法である。

WOL工法の概念図を図1に示す。

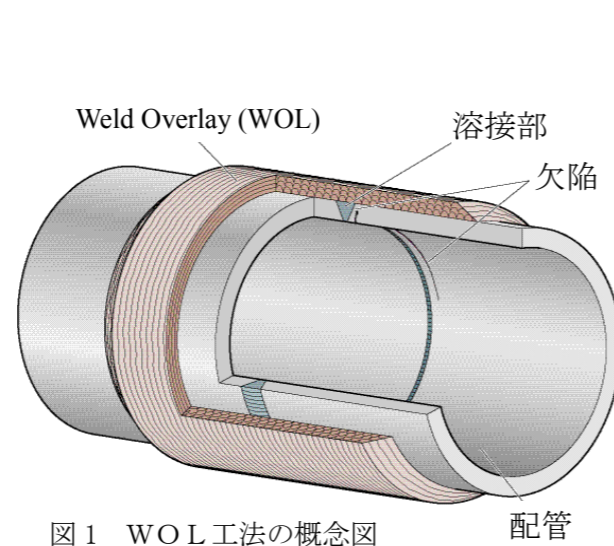


図1 WOL工法の概念図

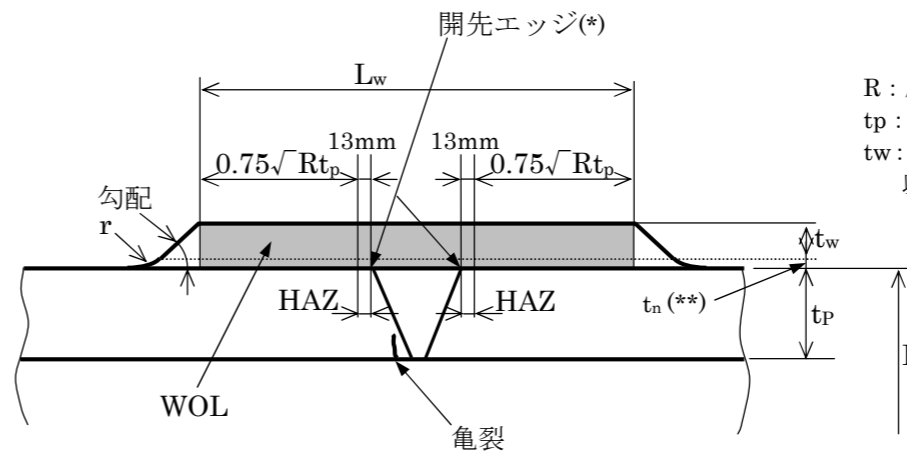


図3 WOLの構造設計

R : 原配管の外半径 (mm)
 tp : 原配管の厚さ (mm)
 tw : WOLの厚さ (mm) 平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上の強度上有効な層の厚さ)

(*) : 原配管溶接中心から図面寸法により求めた長さに相当する位置
 (**): tn は平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満の層の厚さを示し、WOLの厚さには含まない。

2. 工法適用範囲

WOL工法の適用範囲の配管及び亀裂を表1及び図2に示す。

表1 工法の適用範囲

項目	適用範囲
(a) 口径	100A~700A
(b) 母材の厚さ	14.0~46.0mm
(c) 対象材料	P-8
(d) 溶接金属	A-7 または R-7
(e) 適用部位	周継手部
(f) 適用可能な亀裂	配管外表面の開先エッジの両端から 13mm 以内、かつ外表面から 7mm 以上の範囲に存在する亀裂 (図2参照)

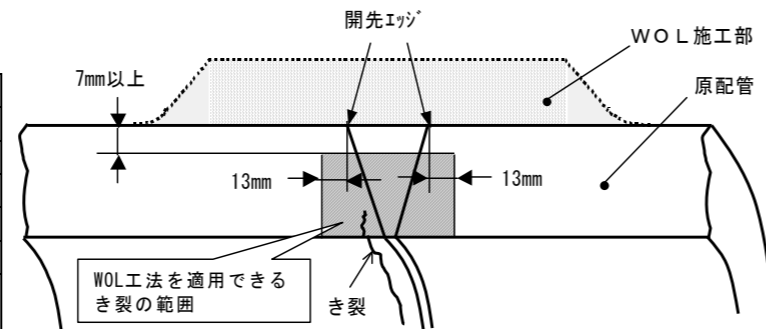


図2 適用可能なき裂

3.2 溶接条件

WOLの肉盛溶接の溶接条件を表2に示す。

3.3 施工法確認試験

表2の溶接条件にて、事前に施工法確認試験を実施し、溶接施工法を確立する。

3.4 WOL施工中の管理

WOL溶接部は、フェライト量が平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上となるまで1層施工する毎にフェライト量を計測する。

表2 WOL工法の溶接条件

項目	溶接条件
(a) 継手種別	肉盛溶接の継手
(b) 溶接方法	自動ティグ溶接
(c) 溶加材	R-7
(d) 溶加材の炭素含有量	0.030 % 以下
(e) 積層数	最小 2 層 (強度上有効な層)
(f) 内面水冷	有り (流速は 0 m/s 以上)
(g) 溶接条件	
溶接入熱量	6.9 kJ/cm 以上、15.8 kJ/cm 以下
溶接速度	6.0cm/min 以上、17.4cm/min 以下
溶加材供給速度	5.1 g/min 以上、8.8 g/min 以下
パス間温度	150℃ 以下

3. WOLの設計及び施工

3.1 WOLの構造設計 (図3参照)

(1) WOLの厚さ

WOLの厚さは、以下を満足するようになければならない。

- 360° 貫通き裂が原配管に存在したとしても破壊しない強度を有していなければならない。
- 原配管とWOLの厚さを加えた厚さの75%を越える領域にはき裂が存在してはならない。(設計上は t_w を $t_p/3$ 以上とする必要がある)
- 内圧による軸方向応力、自重及び地震力による軸方向荷重により発生する応力の総和が設計応力強さ (S_m) 以下でなければならない。
- プラント寿命中における疲労によるき裂進展量を算出し、必要WOL厚さに加えなければならない。
- WOLの厚さは、フェライト番号 (FN) の測定値で、平均 FN7.5 以上、かつ、最小 FN5.0 以上の強度上有効な層の厚さとし、これを満足しない平均 FN7.5 未満、又は、最小 FN5.0 未満の層は、WOLの厚さに含まれないものとする。ここで、WOL施工部の厚さは、FN7.5 未満の層の厚さに強度上有効なWOLの厚さを加えたものとなる。

(2) WOLの長さ

WOLの長さは、以下を満足するようにする。

- 原配管周溶接 HAZ 部から両側に $0.75\sqrt{Rt_p}$ 以上の長さを有していなければならない。
- 供用期間中検査で要求される範囲について超音波探傷試験 (UT) が可能でなければならない。

(3) 端部形状

- 溶接止端部の勾配は、30° 以下が望ましい (勾配が 30° を超え、45° 以下の範囲とする場合は、別途止端部の応力係数を定めて使用することができる)。
- 止端部アールは $r = t_p / 2$ 以上とする。

4. 適用後の確認

- WOL施工後の溶接検査として図4に示す範囲の PT 及び UT を行う。
- 供用開始後は図5に示す範囲の UT を 4 運転サイクル毎に行う。

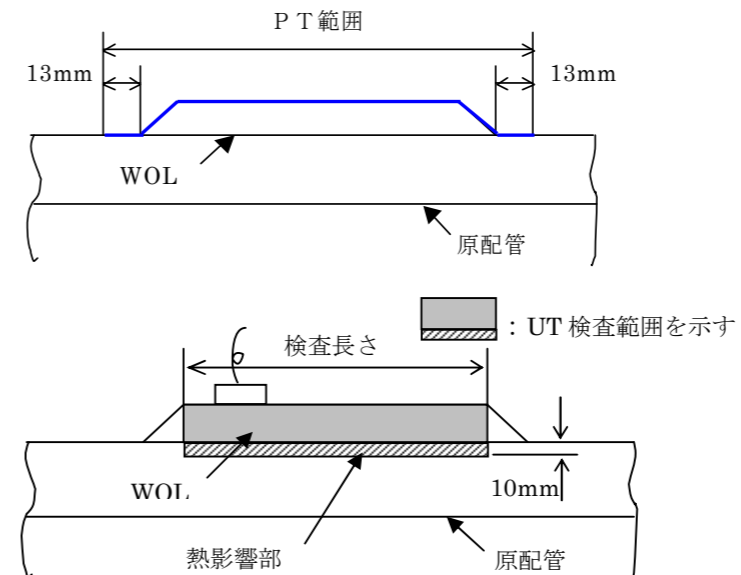


図4 施工後の溶接検査範囲

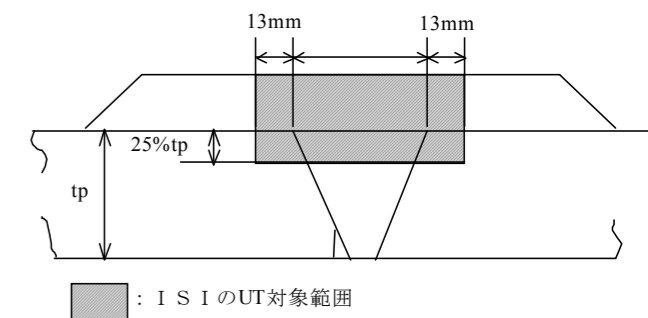


図5 I S I の UT 検査範囲

改訂経緯

平成 14 年 7 月 初版発行

平成 27 年 3 月 第 2 版発行

解説 1-2 にガイドライン適用にあたっての留意事項を記載し，適用する規格基準を見直した。また改訂に合わせて，全体の構成等見直した。

- ・周方向き裂長さの制限についての JSME 事例規格を反映した。
- ・WOL 施工後の UT 検査の認定基準（NDIS0603）を反映した。
- ・施工法確認試験の記載を充実した。

BWR補修工法ガイドライン
[ウェルドオーバーレイ工法]
(第2版)

編集者 一般社団法人 原子力安全推進協会
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会

発行者 一般社団法人 原子力安全推進協会
〒108-0014 東京都港区芝 5-36-7 三田ベルジュビル 13～15 階
TEL 03-5418-9312 FAX 03-5440-3606

©原子力安全推進協会，2015

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。