

補修工法ガイドライン
[対策－高周波誘導加熱応力改善工法]
(第1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）日本原子力技術協会（以下、JANTI）が策定し、（一社）原子力安全推進協会（以下、JANSI）が管理してきた「補修工法ガイドライン[対策－高周波誘導加熱応力改善工法]（第1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

補修工法ガイドライン
[対策－高周波誘導加熱応力改善工法]

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。

目次

1	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
2	工法の概要	1
3	工法適用の条件	1
4	工法適用に対する要求事項	2
4.1	工法適用に当たっての適用条件	2
4.2	工法適用に対する要求事項	2
4.3	使用する装置に対する要求事項	2
4.4	オペレータに対する要求事項	2
4.5	工法適用にあたっての注意事項	2
5	施工後の確認	3

解説

(解説1-1)	ガイドライン制定の目的	4
(解説2-1)	対策 IHSI の原理	4
(解説3-1)	適用範囲の設定	9
(解説3-2)	期待される欠陥進展性抑制効果及び健全部の応力改善効果, その効果を得るための施工要領確認試験	11
(解説3-3)	施工確認方法の確立	11
(解説4-1)	施工前確認	11
(解説4-2)	適用対象部位の材料, 形状, 寸法, 適用可能欠陥寸法の確認	12
(解説4-3)	適用対象部位内面の通水及び水温の確認	12
(解説4-4)	基本支配因子と管理項目	13
(解説4-5)	施工管理要領	26
(解説5-1)	施工後の確認	26
(解説5-2)	供用開始後の確認	28

1 目的及び適用

1. 1 目的

本ガイドラインは原子力発電所用配管等に発生した応力腐食割れ (SCC) に対する補修を目的とした高周波誘導加熱により、既に発生したSCC欠陥の進展を抑止させるとともにSCC欠陥が存在しない範囲については溶接部の応力を改善させることでSCC発生を予防する工法 (Repair・Induction Heating Stress Improvement—以下、対策IHSIという。) について定めたものである。 (解説1-1)

1. 2 適用

1. 2. 1 適用範囲

本ガイドラインは、SCC欠陥を有する原子力発電所用配管等に適用する。 (解説1-2)

1. 2. 2 適用時期

本ガイドラインの適用時期は、発電所の商業運転開始後の供用期間中とする。

2 工法の概要

対策IHSIとは、機器 (容器、管、ポンプ、弁) の溶接継手部の管内面に発生したSCC欠陥の進展を抑止させるため、予防保全IHSIに新たな適用条件を追加した補修工法である。管内面を水冷しながら外面から高周波誘導コイルを用いて加熱し、管内外面に温度差をつけることで内面側を一時的に引張側に降伏する程度まで加重する。载荷されたSCC欠陥先端は延性き裂が進展しない程度で塑性変形することで鈍化し、冷却後にはき裂先端部での応力場が圧縮応力場に変わることからSCC欠陥の進展が抑制される工法である。

なお、同一溶接継手上のSCC欠陥が存在しない範囲については、予防保全IHSIとしての効果を有するものである。

(解説2-1)

3 工法適用の条件

本ガイドラインは、供用期間中の溶接部の溶接残留応力に起因するSCCに対する補修として実施する対策IHSI工法に適用する。本工法の適用条件として、以下の項目について事前に実施・確立しておくこと。

(事前の実施・確立事項)

- (1) 本工法を適用する範囲の設定 (解説3-1)
- (2) 期待される欠陥進展性抑制効果及び健全部の応力改善効果の設定 (解説3-2)
- (3) 施工要領確認試験の実施 (解説3-2)
- (4) 適用箇所の施工確認方法の確立 (解説3-3)

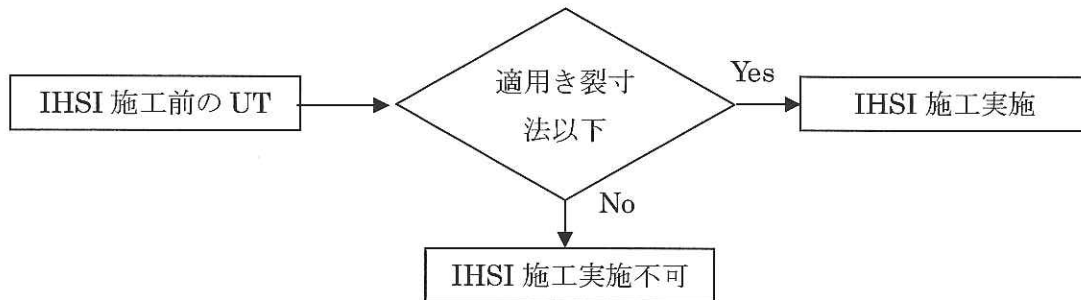
なお、工法適用にあたり、4項に示す工法に対して期待する効果に影響を及ぼす基本支配因子に対する要求値が変更される場合は、その都度、施工要領確認試験を実施し、施工要領を再設定すること。

4 工法適用に対する要求事項

4. 1 工法適用に当たっての適用条件

本補修工法を適用するための適用条件は以下とする。

- 1) 施工前に施工対象部位の内表面に存在するき裂の深さ、長さが適用可能欠陥寸法以下であることが確認できていること。(解説4-1)
- 2) 材料確認(外径/板厚/材質)ができていること(解説4-2)
- 3) 施工対象部位内面の水の有無及び水温が確認できていること。(解説4-3)
- 4) 施工対象部位(溶接位置/溶接境界)が確認できていること。(解説4-2)



4. 2 工法適用に対する要求事項

本工法を適用するにあたり、以下の要求事項を確認すること。

- (1) 工法における基本支配因子の確認
- (2) 基本支配因子における以下の管理項目の要求値の確認(解説4-4)

管理項目：外径、板厚、材質、適用部位、内面水冷有無、最高加熱温度、コイル幅、溶接線の位置、加熱時間、加熱有効範囲に必要な内外面の温度差、適用可能欠陥寸法

4. 3 使用する装置に対する要求事項

3.(3)にて実施する施工要領確認試験を実施する際に、装置仕様(要求事項)を明確にし、その仕様を満足する装置を使用すること。

なお、施工要領確認試験で明確にした装置仕様以外の装置を使用する必要がある場合は、その差異を明確にし、適切な技術的評価を実施すること。

4. 4 オペレータに対する要求事項

本補修工法に対するオペレータの技量としては、コイルの施工部への設定、入熱条件の設定及び操作盤の操作などが考えられる。したがって、オペレータは技量の確認及び関連作業との確認も含め、実機施工の一連の施工手順をモックアップなどで訓練を受ける必要がある。オペレータの技量の確認事項及び関連作業との確認事項を明確にし、これらの事項を達成するための訓練を実施すること。

4. 5 工法適用にあたっての注意事項

対策IHSI施工に際しては、規定の施工管理要領に従って施工を行うこと。

(解説4-5)

また、過度の入熱による材料への悪影響が懸念される場合には、施工要領確認試験結果に基づき、再施工や長時間施工等に対する施工時間の制限を設け、施工対象箇所周辺の機器に対し悪影響が懸念される場合には、施工前に影響を適切に評価するか、もしくは

は、施工後に健全性について確認すること。

5 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) 上記4.2項の工法に対する要求事項を満足することを確認すること(施工中の確認含む)。
- (2) 施工範囲において施工面に異常がないことを確認すること。
- (3) 必要に応じ、施工後の健全性確認を行うこと。(解説5-1)
- (4) 施工後に供用前検査(P S I)、供用開始後は次回定検時に検査を行い、その後は供用期間中検査(I S I)を行うこと。(解説5-2)

(解説 1-1) ガイドライン制定の目的

原子力発電用設備では、近年損傷事例が散見されてきたことから、点検により損傷を検知する前に、予防保全対策を適用することにより損傷発生を未然に防ぐことも検討されており、応力腐食割れに対する予防保全工法としてのIHSI技術の適用要領をまとめたガイドラインについては既に制定している。一方、IHSIは、決められた欠陥寸法以下であれば、その応力改善効果により、欠陥の進展性を抑制できることが確認されており、補修工法としての効果が期待できる。

本ガイドラインは原子力発電用設備の安全上要求される機能を維持するために、応力腐食割れに対する補修工法としてのIHSI技術の適用要領をまとめたものである。

(解説 1-2) 適用範囲

本補修工法は、SCC欠陥を有する原子力発電所用配管等に適用し、継手の組合せとしてはオーステナイト系ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレス鋼、フェライト鋼又は高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）等との組合せがある。具体的な施工の妥当性確認は解説 3-2 に示す方法にて確認すること。

(解説 2-1) 対策IHSIの原理

高周波誘導加熱による溶接部の応力改善工法（Induction Heating Stress Improvement以下「IHSI」という。）とは、対象部位の所定の範囲（加熱有効範囲）の板厚方向に、最高加熱温度範囲内で所定の温度差が生じるよう、内面を水冷しながら外面側を高周波誘導加熱で昇温した後加熱を停止して、板厚方向がほぼ均一な室温近くの温度となるまで内面の水冷を継続する結果、内面側の残留引張応力を改善（低減もしくは圧縮応力に転換）する応力改善方法をいう。

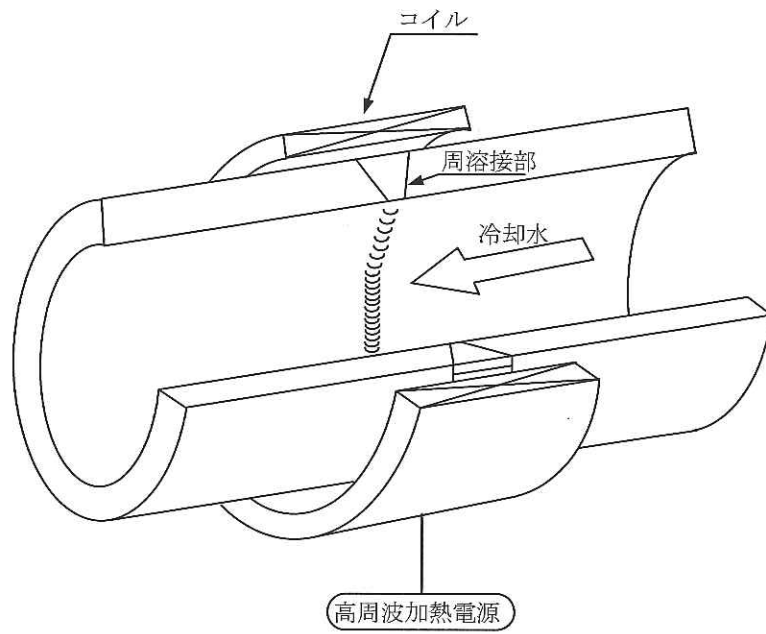
解説図 2.1-1にIHSIの施工概念図を示す。

解説図 2.1-2にIHSIによる配管内面の応力—ひずみ線図を示す。

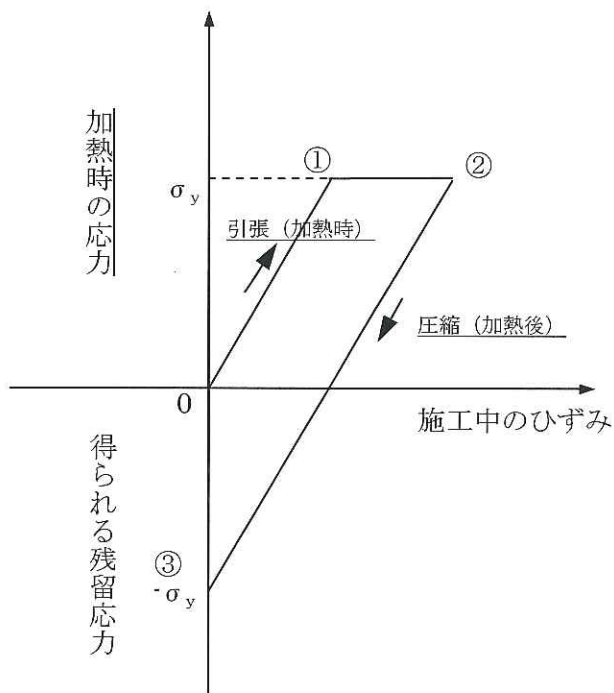
解説図 2.1-3にIHSI施工時の応力分布、変形、温度分布状態を示す。

IHSIでは、溶接部の内面を水冷しながら、外面側を高周波誘導加熱により所定の温度まで加熱する加熱過程において、板厚方向に大きな温度差を生成させる。この時、外面側では圧縮の降伏が生じ、内面側では引張りの降伏が生じる（解説図 2.1-2の②、および解説図 2.1-3の(a)の状態）。次に加熱を停止（内面の冷却は継続）すると、板厚方向の温度差が縮小する冷却過程となり、加熱過程で生成された外面側の応力は引張応力に変わり、内面の応力は圧縮応力に変わって、そのまま残留応力として残存する（解説図 2.1-2の③、および2.1-3の(b)の状態）。IHSIにより、このようなメカニズムで溶接部内面の残留引張応力を改善（低減もしくは圧縮応力に転換）することができる。

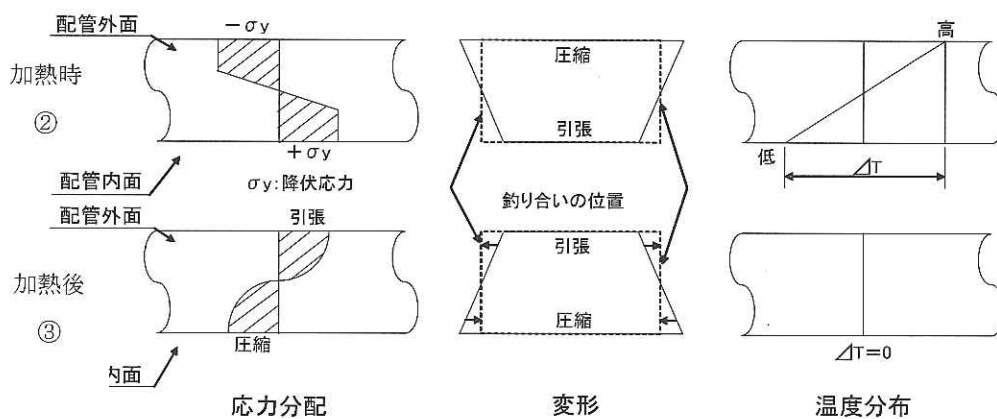
対策IHSIは、IHSI加熱中の配管内面側の欠陥先端部も引張荷重を受け、延性き裂が進展しない程度の塑性変形を与えられて加熱終了後には欠陥先端部に圧縮応力場が形成される。これらの効果により、欠陥の進展が抑制されるものである（解説図 2.1-4）。



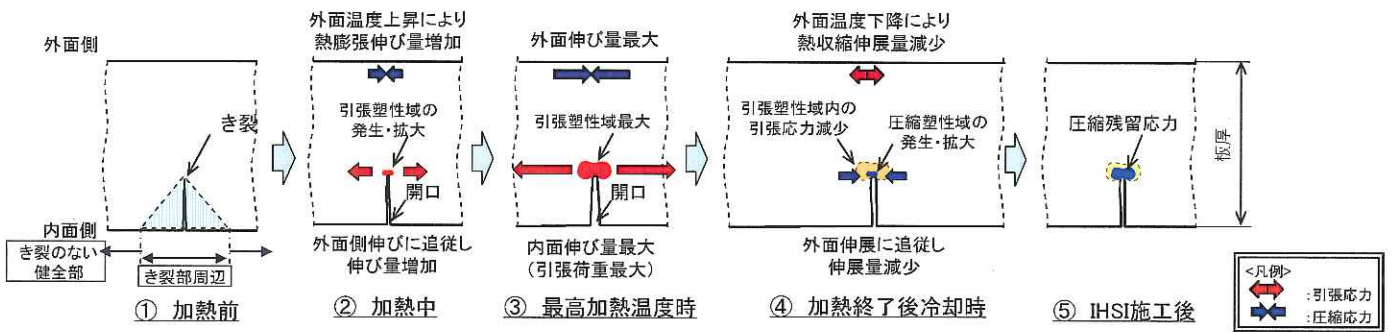
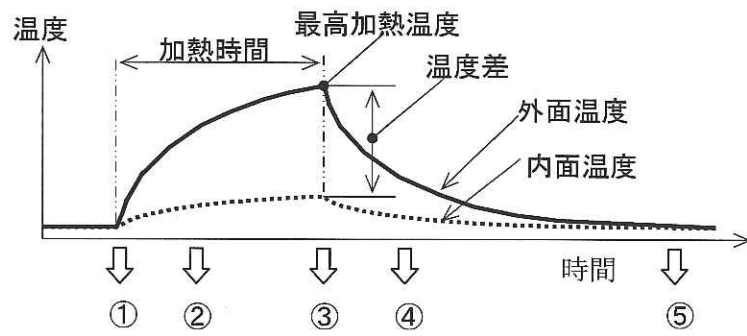
解説図 2.1-1 IHSI 施工概念図



解説図 2.1-2 IHSI 施工中の配管内面における応力-ひずみ概念図



解説図 2.1-3 IHSI 施工時の応力分布，変形，温度分布状態



解説図 2.1-4 対策 IHSI 施工効果概念図

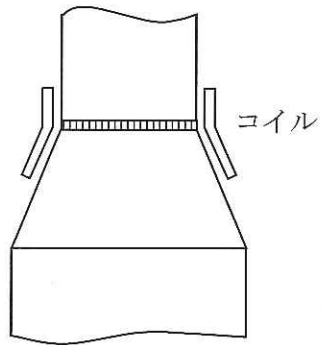
(解説 3-1) 適用範囲の設定

適用範囲は、管・管継手・管台・弁・ポンプ・ノズル・セーフエンドの溶接部内表面の SCC 欠陥を含む応力改善必要範囲とし、当該の溶接部を含む外面を対策 IHSI 施工範囲とする。但し、適用箇所については 3 項及び (解説 3-2) で規定している施工要領確認試験を実施し、その効果を確認すること。

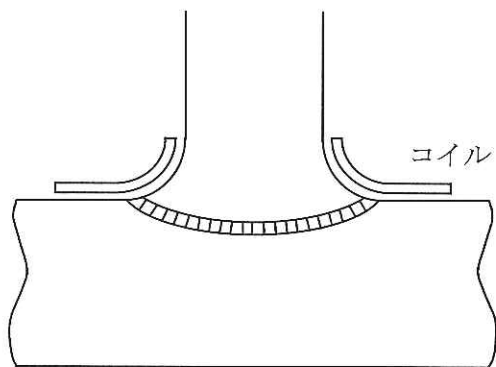
適用範囲例を以下に示す。

解説表 3.1-1 対策 IHSI 適用範囲例

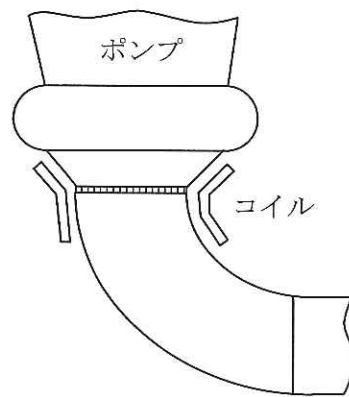
対策 IHSI 適用箇所	備考
直管+直管 クロス+リングヘッド キャップ+リングヘッド ポンプ+直管, 弁+直管, クロス+直管, ティーズ+直管, キャップ+直管, エルボ+直管, レデューサ+直管*1 ポンプ+エルボ*2, 弁+エルボ 管台+直管*3 圧力容器ノズル+セーフエンド	*1: レデューサと直管のコイル取付例を解説図 3.1-1 に示す。 *2: ポンプとエルボのコイル取付例を解説図 3.1-2 に示す。 *3: 管台と直管のコイル取付例を解説図 3.1-3 に示す。



解説図 3.1.1 レデューサと直管のコイル取付例



解説図 3.1.3 管台と直管のコイル取付例



解説図 3.1.2 ポンプとエルボ
のコイル取付例

(解説3-2) 期待される欠陥進展性抑制効果及び健全部の応力改善効果, その効果を得るための施工要領確認試験

対策IHSI適用の目的は, 明確に応力腐食割れに起因すると考えられる欠陥に対する補修工法として, 管内表面を一時的に引張側に降伏する程度まで荷重することで, 欠陥先端部を延性き裂が進展しない程度に塑性変形を与え鈍化させ, 欠陥先端部での応力を圧縮応力場に転換することである。また, 同一溶接継手上の欠陥が存在しない健全部においては, 予防保全工法としてのIHSIと同様に残留引張応力を改善(低減もしくは圧縮応力に転換)することである。

目標とする欠陥進展抑制効果及び健全部の応力改善効果は, 以下項目を施工要領確認試験やFEM解析等で確認し, 適切な施工条件を示すこと。特に本工法は欠陥を残存させる工法であることから, 欠陥先端部及びその近傍における改善効果については留意した検討を行うこと。

- (1) 欠陥及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと
- (2) 欠陥先端部での応力が改善され, 進展性が抑制されること
- (3) 欠陥近傍における残留応力改善効果を確認すること
- (4) 欠陥の存在しない健全部においては, 予防保全工法IHSIと同等の効果があること

なお, 本技術のオーステナイト系ステンレス鋼とオーステナイト系ステンレス鋼継手で有効性を示す一例を以下参考文献に示す。

参考文献: 笹山, 本郷「欠陥を有する配管へのIHSIの有効性確認」日本保全学会
第7回学術講演会要旨集(2010年7月15日)

(解説3-3) 施工確認方法の確立

適用する対策IHSIにて期待する効果が得られることを, 適用後に直接確認することは不可能であるため, 施工管理項目が設定された施工条件範囲内であることを施工後に確認する。(解説4-4)

(解説4-1) 施工前確認

対策IHSIを適用するにあたり, 適用箇所に存在する欠陥寸法が, 予め実施した施工要領確認試験やFEM解析等で確認された適用寸法以下であることを確認する必要がある。また, 対策IHSIは, き裂を残存させた状態で当該き裂の進展性を抑制する工法であるため, 省令への適合性要否を確認すること。

(解説4-2) 適用対象部位の材料，形状，寸法，適用可能欠陥寸法の確認

対策IHSIを適用する際の基本支配因子・管理項目には，材料・寸法（外径及び板厚），適用可能欠陥寸法による項が含まれ，また，形状によって加熱コイルの設置条件が左右されることから，施工対象の材料・形状・寸法は予め確認しておく必要がある。

(解説4-3) 適用対象部位内面の通水及び水温の確認

対策IHSIは板厚内温度分布を制御して残留応力を改善する方法であり，応力改善に必要な内外面の温度差を与えるために，内面を水冷する必要がある。このことから，通水を確認するとともに，水温についても監視する必要がある。

(解説 4-4) 基本支配因子と管理項目

対策IHSIにおける基本支配因子と管理すべき項目を表4.4-1に示す。

解説表4.4-1 対策IHSIの前提条件及び基本支配因子

区 分	管理項目	確認項目
前提条件	内面冷却条件：水（通水）	○
	外径	○
	板厚 t	○
	材質	○
	適用可能欠陥寸法	○
残留応力改善に関する基本支配因子	最高加熱温度 Tmax	○
	コイル幅 L	○
	加熱時間 τ	○
	加熱有効範囲で必要な内外面の温度差 ΔT	○

(1) 最高加熱温度 (Tmax) (°C)

軸方向4箇所各温度履歴での最高温度を当該材質の最高到達温度とする。

(2) コイル幅 (L) (mm)

下記式にて算出する。

$$L \geq 2.7\sqrt{Rt}$$

R：板厚中心における曲率半径(mm)

t：板厚(mm)

(3) 加熱時間 (τ) (s)

下記式にて算出する。

$$\tau \geq 0.7t^2 / a$$

t：板厚(mm)

a：温度伝導率(mm²/s)

(4) 加熱有効範囲で必要な内外面の温度差 (ΔT) (°C)

下記式にて算出する。

$$\Delta T \geq [4(1-\nu)\sigma_y] / (E\alpha)$$

ν：ポアソン比

σ_y：材料の降伏強さ(MPa)

E：縦弾性係数(MPa)

α：線膨張係数(mm/mm/°C)

[適用条件設定の根拠]

(a) 管内面水冷

管外面の温度が最高加熱温度以下の状態で、必要とされる内外面温度差 (ΔT) が得られるよう管内面を水冷する。

(b) 適用可能欠陥寸法

適用可能欠陥寸法（深さ、長さ）は、IHSI 施工により、その欠陥の進展性が抑制される程度の残留応力改善効果があること、IHSI 施工中に有意に進展しないこと、材料の機械的性質の悪影響が生じていないこと等を施工要領確認試験や FEM 解析等で確認し、総合的に決定する必要がある。なお、オーステナイト系ステンレス鋼継手の下記参考文献に示す先行研究では深さ： $3t/8$ 以下（ t ：管の厚さ）、長さ：全周の欠陥に適用可能であることが確認されている。施工に必要な基本支配因子と管理項目の例を表 4.4-3 に示す。

参考文献：笹山，本郷「欠陥を有する配管への IHSI の有効性確認」日本保全学会
第 7 回学術講演会要旨集（2010 年 7 月 15 日）

(c) 最高加熱温度

最高加熱温度（施工管理において外表面の温度測定を要求している）は、表 4.4-2 の例に示す様に材料により悪影響を及ぼす可能性があることから設定されている。下記以外の材料へ適用する場合にも同様に悪影響がないことを確認する必要がある。

解説表 4.4-2 最高加熱温度設定理由の例

材 料	設定理由
オーステナイト系 ステンレス鋼	材料の鋭敏化推進防止との関連で設定。
フェライト鋼	機械的性質の低下および溶接規格の PWHT 温度を超えない範囲で設定。
高ニッケル合金（ニッ ケルクロム鉄合金）	材料の鋭敏化推進防止との関連で設定。

(d) コイル幅

解説図 4.4-1 は、コイル幅と残留応力の関係について実験値と計算値を比較したもので、横軸は加熱幅の有効係数 K で整理されている。

K の定義は,

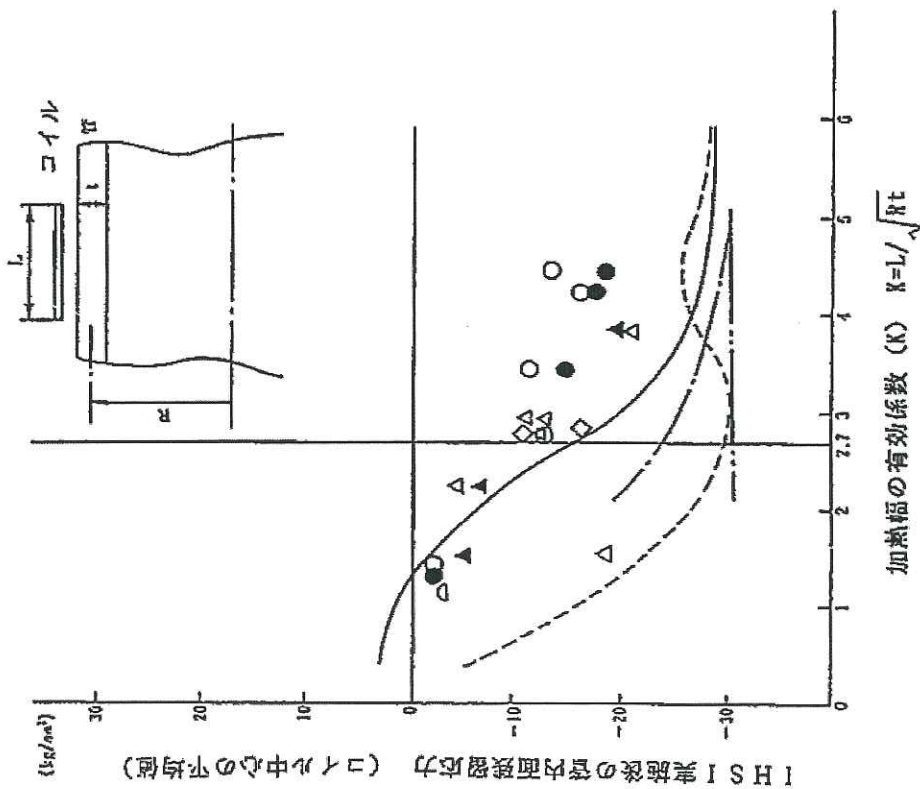
$$K = L / \sqrt{Rt}$$

L : コイル幅 (mm)

R : 管の公称板厚の中心における曲率半径 (mm)

t : 板厚 (mm)

図から K が 2.7 以上になると, 残留対応は十分に圧縮側になり, コイル幅 L は,
 $L \geq 2.7\sqrt{Rt}$ とすれば十分な効果が得られる。



解説図 4.4-1 コイル幅と IHSI 後の残留応力

- ◇ : 軸方向応力 (100A×Sch80) 実験値
- : 軸方向応力 (250A×Sch80) 実験値
- : 軸方向応力 (300A×Sch100) 実験値
- : 周方向応力 (300A×Sch100) 実験値
- ▲ : 軸方向応力 (500A×Sch100) 実験値
- △ : 周方向応力 (500A×Sch100) 実験値

- : 軸方向応力 (300A×Sch100) 計算値
- - - : 周方向応力 (300A×Sch100) 計算値
- · - · : 軸方向応力 (500A×Sch100) 計算値
- · - · : 周方向応力 (500A×Sch100) 計算値

L : コイル幅 (mm)

R : 管の公称厚の中心における曲率半径 (mm)

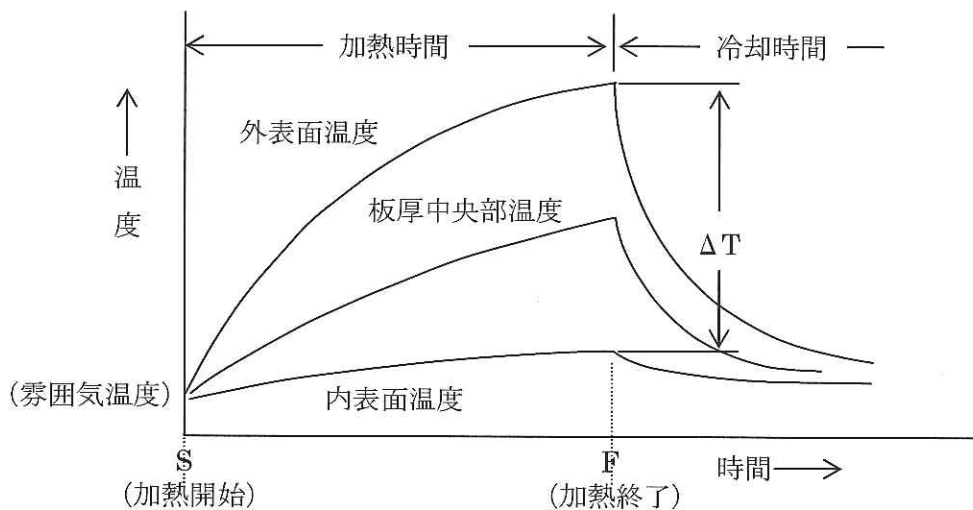
t : 板厚 (mm)

(出典) : 社団法人 火力原子力発電技術協会「高周波誘導加熱による応力緩和法に関する指針 (SCC 対策工法)」(TNS-G2804-1985) による。

(e) 加熱時間

(1) IHSI における管内外面の加熱・冷却過程の温度変化を解説図 4.4-2(a)に示す。

図に示すように、加熱時間とは、高周波加熱の開始（高周波加熱入力オンの S 点）から終了（高周波加熱入力オフの F 点）までの時間をいう。加熱終了時点 F における厚さ方向の温度分布は、内外面の温度差 ΔT が必要な値以上であることおよび厚さ方向が適切な温度分布状態となっていることが必要である。高周波加熱の場合、外表面近傍が加熱の起点となり、板厚内部の温度上昇は熱伝導率に依存するため、過熱時間の短い急速加熱を行った場合には、内外面の温度差 ΔT を満足する外表面温度となっても、厚さ方向の温度が定常状態を掛け離れた分布となり、内表面が加熱終了時点で引張降伏しないこととなり結果的に冷却過程終了後の内表面応力が IHSI の目的である圧縮側とならないこととなる。



解説図 4.4-2(a) IHSI の加熱・冷却過程の温度変化

(2) 解説図 4.4-2(b)は、加熱開始後の時間温度変化を非定常温度分布解析により求めた結果を示す。縦軸は、板厚中央部と管内面の温度差と外表面と内表面の温度差の比を示し横軸は、加熱開始後の時間 τ を無次元表示フーリエ数 F により示す。

$$F = (a\tau)/t^2$$

ここで、 $T_{1/2}$: 管の板厚中心の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_o : 管の外面温度 ($^{\circ}\text{C}$), T_i : 管の内面温度 ($^{\circ}\text{C}$)

a : 温度伝導率 (mm^2/s)

t : 板厚 (mm), τ : 加熱時間 (s)

図からフーリエ数が 0.7 以上となれば、厚さ方向の温度分布が一定の勾配をもった定常状態に近くなることが分かる。したがって加熱時間は、 $\tau \geq 0.7t^2/a$ とすることとした。

(f) 熱影響部での内外面温度差

解説図 4.4-3 に管内外面の必要温度差の算出概念図を示す。

管内外面に ΔT の温度差がある時の熱応力 σ は、次式で示される。

$$\sigma = E\alpha\Delta T/[2(1-\nu)]$$

ここで、 E : 縦弾性係数 (MPa)

α : 線膨張係数 (mm/mm/°C)

ΔT : 内外面温度差 (°C)

ν : ポアソン比

必要な熱応力を得るために $E\alpha\Delta T$ をある大きさ以上にすることがあり、十分な塑性域を得るために上式の計算による応力が $2\sigma_y$ より大きくなるようにする。

従って、必要温度差としては、次式のとおりとする。

$$\Delta T \geq [4(1-\nu)\sigma_y]/(E\alpha)$$

ここで、 σ_y : ミルシートに記載の降伏強さ (MPa)

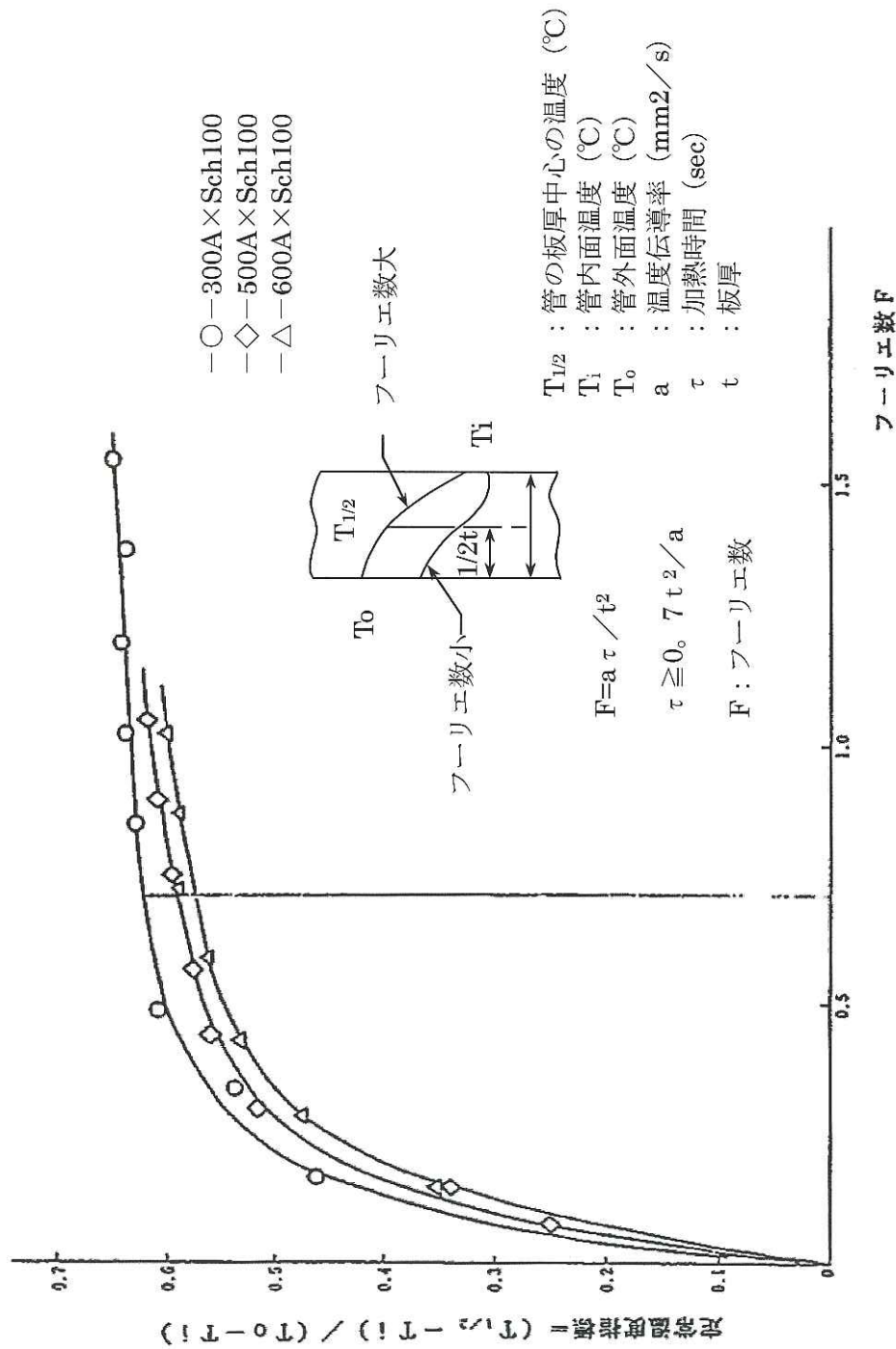
(継手の双方が同材の場合は大きい方の値、異材の場合は施工対象材の値)

尚、上記式で適用する E : 縦弾性係数及び α : 線膨張係数は、 ΔT : 必要内外面温度差が保守的な値となる様に留意し、必要に応じ試験や解析で確認すること。

(g) 溶接線位置とコイルの位置の関係

加熱部配管軸方向の温度は、コイルの端部で急激に下がる。したがって、応力を改善する部分の管内外面の温度差を十分にとるために、溶接位置をできる限りコイルの中心部に設けることが望ましい。この点を評価するためにコイル位置の軸方向の温度分布と残留応力分布との関係を各々解説図 4.4-4 と解説図 4.4-5 に示した。これからわかるように、溶接中心からコイル端までの距離がコイル幅 $2.7\sqrt{Rt}$ の 2 分の 1 あれば、残留応力の低減効果は十分にあることがわかる。

長手継手に用いる場合は、コイル両端からそれぞれ 0.5t または 15mm の大きい方以上内側の部分を加熱範囲とみなす。(解説図 4.4-6 参照)

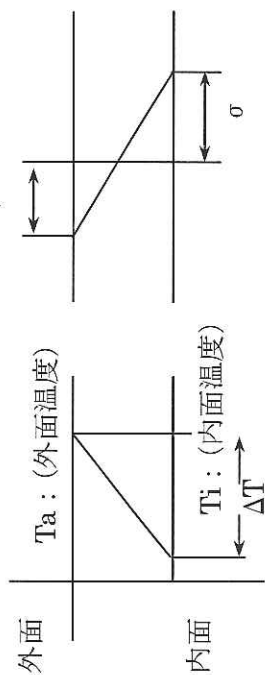


解説図 4.4-2(b) 厚さ方向の過渡的温度変化

(出典): 社団法人 火力原子力発電技術協会「高周波誘導加熱による応力緩和法に関する指針 (SCC 対策工法)」(TNS-G2804-1985) による。

内外面温度差 (ΔT)

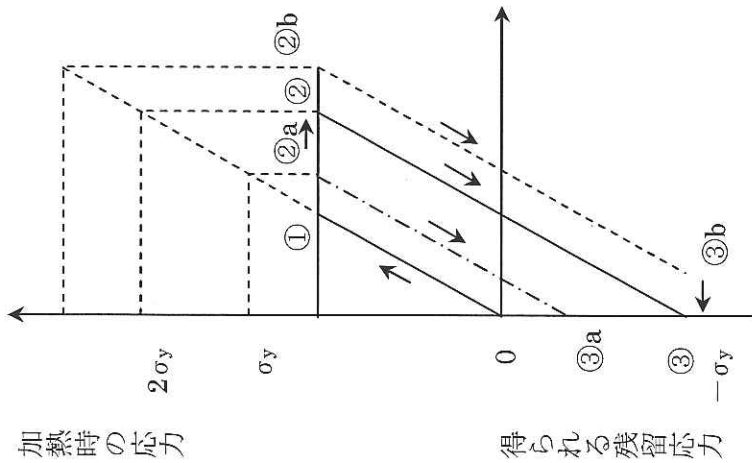
発生熱応力 (σ)



$$\Delta T \geq \frac{4(1-\nu)\sigma_y}{E\alpha}$$

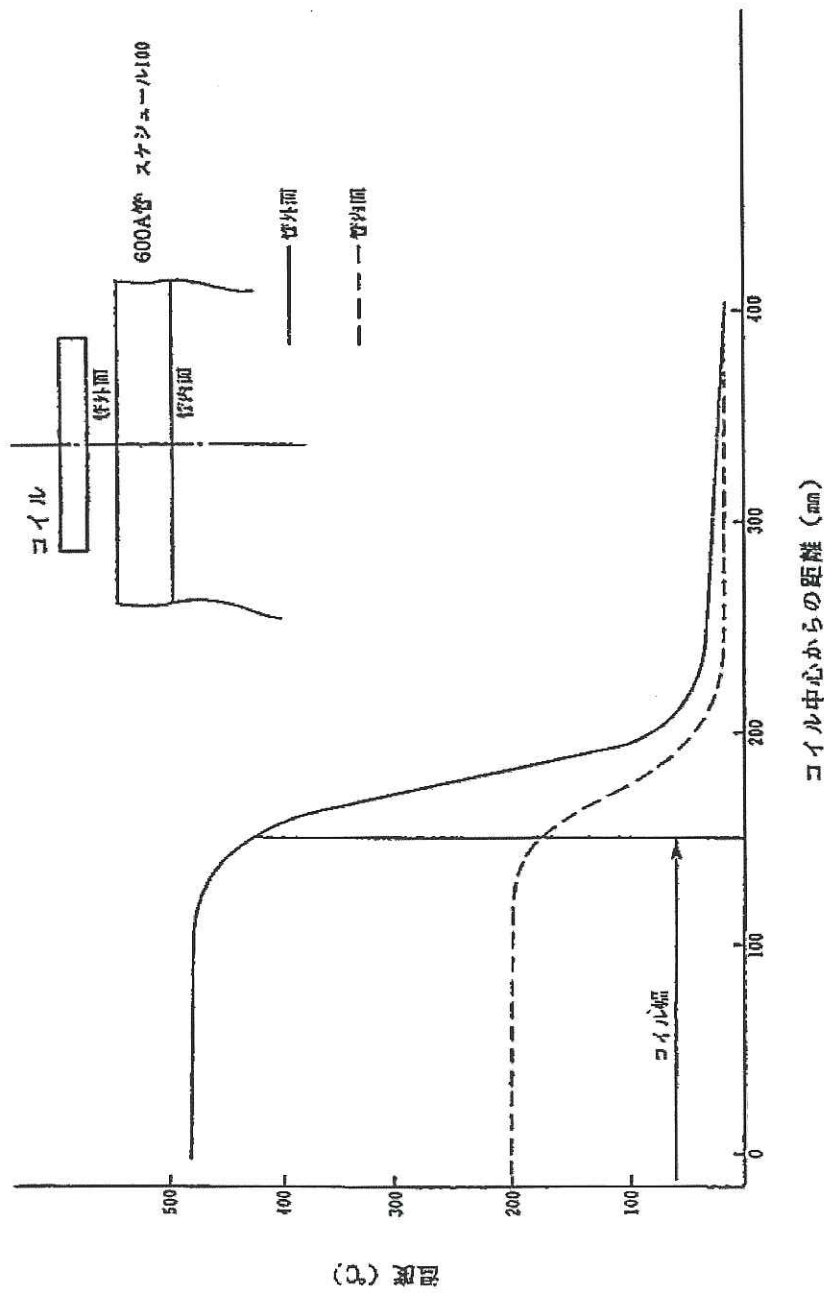
$$\sigma = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)} \geq 2\sigma_y \dots\dots(1)$$

- E : 縦弾性係数 (MPa)
- α : 線膨張係数 (m/m°C)
- ν : ポアソン比
- σ_y : 降伏強さ (MPa)



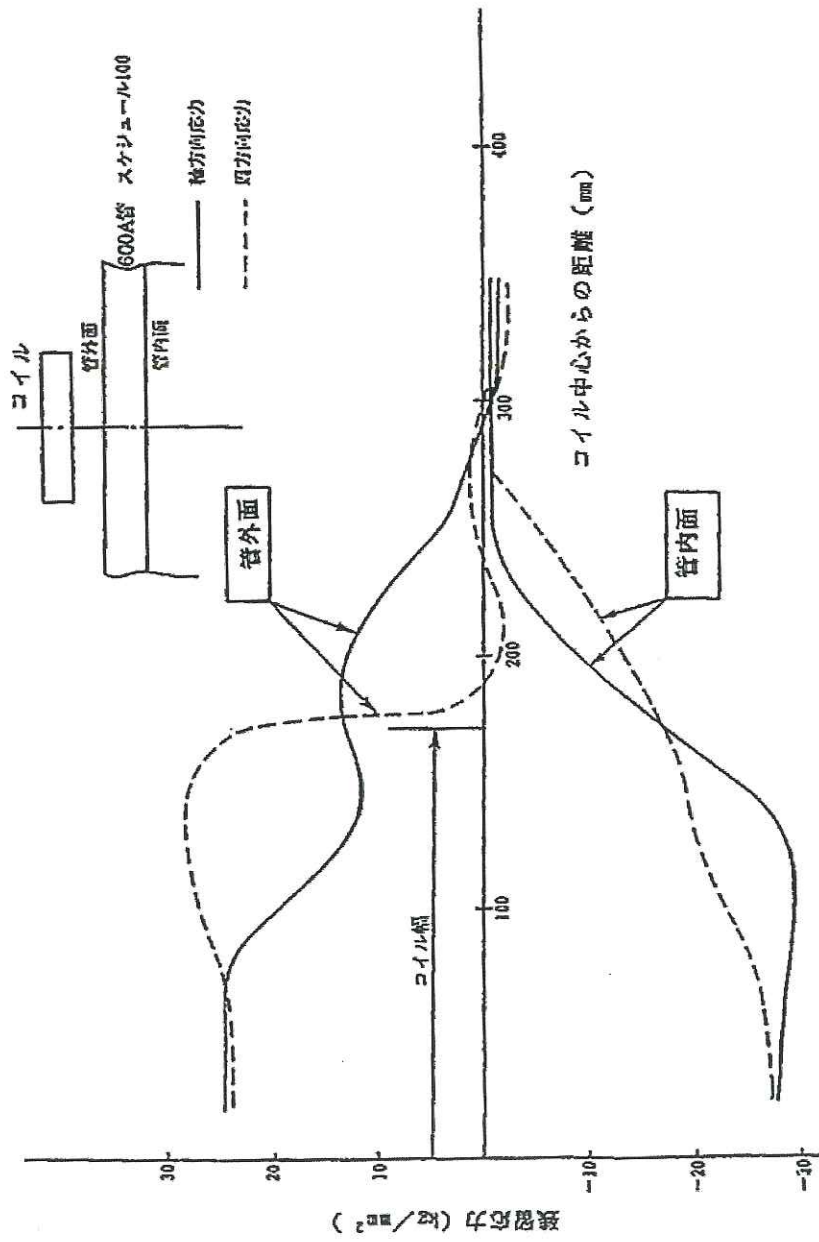
式(1)の σ_y	応力-ひずみ挙動	得られる残留応力	線
$2\sigma_y$	0 → ① → ② → ③	$-\sigma_y$	———
$< 2\sigma_y$	0 → ① → ②a → ③a	$> -\sigma_y$	-----
$> 2\sigma_y$	0 → ① → ②b → ③b	$-\sigma_y$	-----

解説図 4.4.3 内外面温度差と残留応力



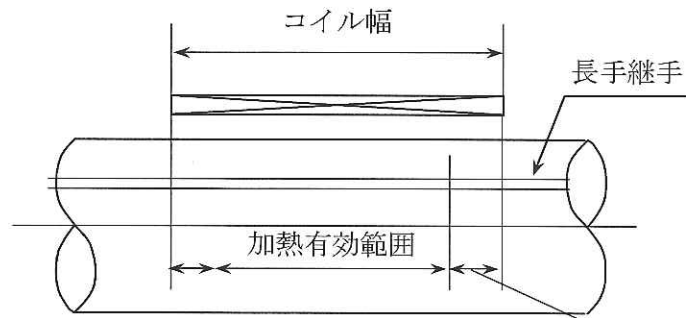
解説図 4.4-4 軸方向の温度分布 (実測値)

(出典)：社団法人 火力原子力発電技術協会「高周波誘導加熱による応力緩和法に関する指針 (SCC 対策工法)」(TNS-G2804-1985) による。



解説図 4.4-5 残留応力の軸方向分布 (実測値)

(出典)：社団法人 火力原子力発電技術協会「高周波誘導加熱による応力緩和法に関する指針 (SCC 対策工法)」(TNS-G2804-1985) による。



厚さの 2 分の 1 又は 15mm の大きい方以上の値 (両端)

解説図 4.4-6 長手継手における加熱有効範囲

[基本支配因子と管理項目の例]

対策IHSI施工に必要な基本支配因子と管理項目の例を表4.4-3に示す。

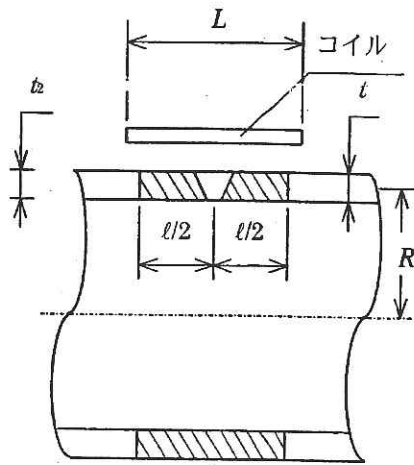
解説表4.4-3 基本支配因子と管理項目の例

項目	適用条件
外径	250A~700A
板厚	18mm~48mm
材質	P-8とP-8の溶接部
適用部位	周継手
内面水冷	有り
最高加熱温度	①650℃以下（炭素含有量が0.030%以下） ②550℃以下（炭素含有量が0.030%を越えるもの）
コイル幅L (mm)	$L \geq 2.7\sqrt{Rt}$
溶接線の位置(mm)	t/2若しくは15mmの大きい方以上コイル端の内側
加熱時間 τ (s)	$\tau \geq 0.7t^2/a$
加熱有効範囲に必要な内外面の温度差 ΔT (°C)	$[4(1-\nu)\sigma_y]/[E\alpha]$ で計算した値以上
適用可能欠陥寸法	深さ：3t/8以下，長さ：全周以下

備考)

1. 計算に使う記号の説明および加熱有効範囲の計算は，下記による。

- α (mm/mm/°C) : 線膨張係数
- E (MPa) : 縦弾性係数
- ν : ポアソン比
- a (mm²/s) : 温度伝導率
- R (mm) : 管の厚さの中心における曲率半径
- t (mm) : 管の厚さ
- σ_y (MPa) : 材料の降伏強さ
- l, l_1, l_2 (mm) : 加熱有効範囲（解説図4.4-7）に示すように，溶接中心から両側に，直管の場合は $l/2$ ずつの合計の範囲）。
ここで， $l = \sqrt{Rt}$, $l_1 = \sqrt{R_1t_1}$, $l_2 = \sqrt{R_2t_2}$ で計算。



解説図4.4-7 対策IH施工時の管理寸法の説明
 (備考) ハッチング部は、加熱有効範囲を示す。

2. 周波数により加熱深さや時間が影響を受けることから、予め装置の加熱特性を十分に確認しておく必要がある。

(解説4-5) 施工管理要領

本工法適用に当たっては、表4.5-1に規定の施工管理要領によらなければならない。

解説表4.5-1 対策IHSIの施工管理要領

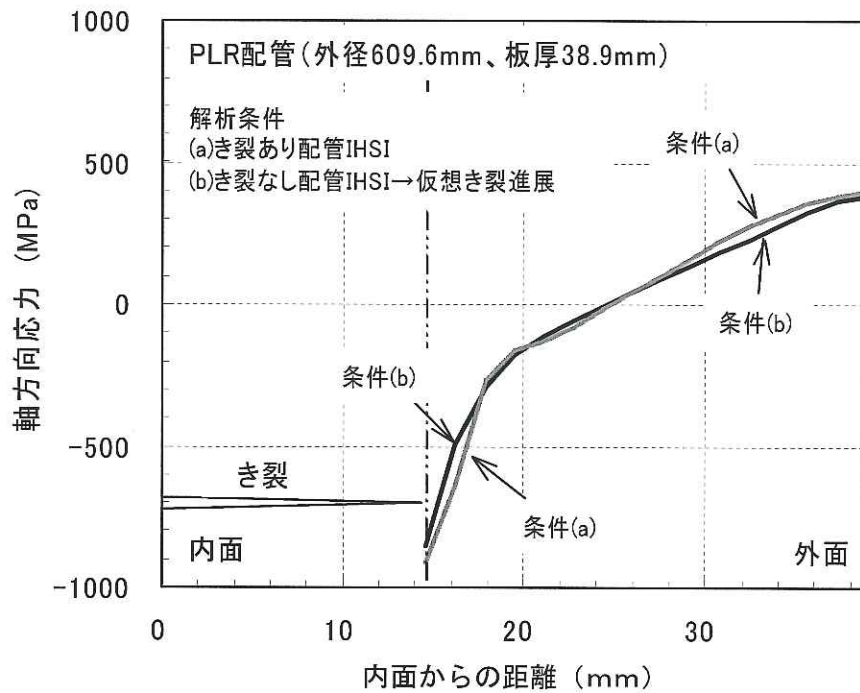
項目	施工条件
準備	(a) 外表面の温度測定のため、溶接熱影響部の任意の1箇所に2点および加熱時に最高温度となると考えられる部分の1箇所に2点の合計4点に温度計を取り付けること。 (b) コイルの取り付けは、加熱有効範囲を満足するよう行うこと。
加熱	内面を水冷しながらコイルに通電して加熱を行い、加熱時の最高温度、加熱時間、内外面の温度差 (ΔT) を確認後、加熱を停止し、室温近くまで内面水冷を継続すること。温度の管理は、任意の1箇所の2点については温度指示の低い方を正とし、加熱時に最高温度となる部分の2点については温度指示の高い方を正とすること。*1
解体	対策IHSI施工後、コイルを解体し、温度計を取り外すこと。温度計を溶接で取り付けられた場合は、グラインダにて除去すること

*1 : 実機における温度管理は、溶接熱影響部外表面の温度管理で代表するものとするが、事前に、解析または管径、厚さ、加熱条件、冷却水流量の模擬した実験により、加熱有効範囲で ΔT が確保されることを確認しておくこと。

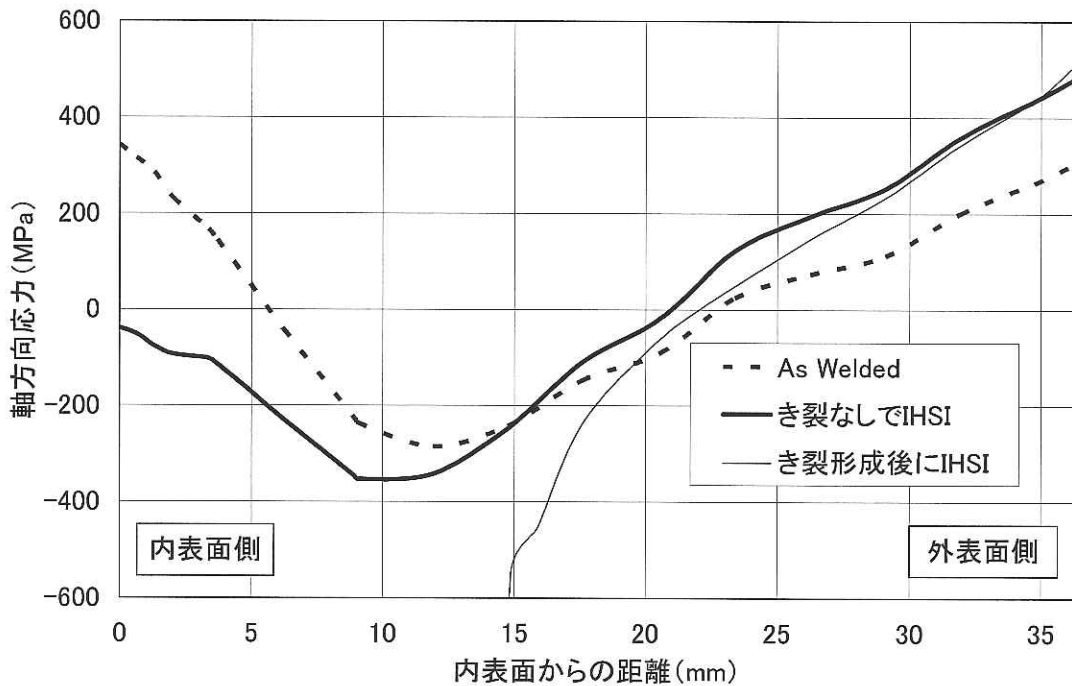
(解説5-1) 施工後の確認

施工後に、各管理項目が施工条件範囲内であることを確認する。また、施工対象部位に対してJEAC4207-2008（軽水炉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）に準拠したUT検査を実施し、欠陥寸法が有意に変化していないことを確認すること。溶接で取り付けられた温度計を除去した部分については、JIS Z 2343-1（非破壊試験 浸透探傷試験 第1部）により浸透探傷試験を行い、有意な指示がないことを確認する。

また、対策IHSIは、き裂を残存させた状態で当該き裂の進展性を抑制する工法であるため、必要に応じ、省令への適合性を確認する場合がある。適合性確認として、き裂進展評価を実施する場合の溶接残留応力は、き裂無しでIHSIを施工した部位にき裂を想定した残留応力と比較した結果、同等であることが確認されている（解説図5.1-1）。このことから、対策IHSI後のき裂進展評価は欠陥のない配管へのIHSIを施工した残留応力分布（解説図5.1-2）を用いて評価できると判断される。



解説図 5.1-1 管板厚方向の残留応力分布(軸方向)の比較
 (き裂無し+IHSI+き裂模擬, き裂有り+対策 IHSI)
 (出典): (財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会
 「補修 IHSI の適用性に関する確性試験」(確性試験証明書番号: 19 確 S2 号)



解説図 5.1-2 管板厚方向の残留応力分布(軸方向)の比較
 (溶接後, き裂無し+IHSI, き裂有り+IHSI)
 (出典): (財) 発電設備技術検査協会確性試験委員会
 「欠陥を有する配管系に対する高周波誘導加熱の有効性の確性試験」
 (確性試験証明書番号: 19 確 S1 号)

(解説 5 - 2) 供用開始後の確認

対策IHSI施工後のき裂は、SCC及び疲労によるき裂の進展が抑制されることから、原則、進展を前提にした検査をする必要は無いが、実機における進展抑制効果確認の観点から、供用開始後の次回定検時に検査を実施し、その後は供用期間中検査 (ISI) を行う。検査は JEAC4207-2008(軽水炉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)に準拠したUT検査を実施し、欠陥寸法が有意に変化していないことを確認する。

補修工法ガイドライン
[対策－高周波誘導加熱応力改善工法]

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