JANTI-VIP-02－第1版

予防保全工法ガイドライン

［外面からの入熱による応力改善方法］

平成 20 年 1 月

有限責任中間法人　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、有限責任中間法人　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，メーカの方々等，関係各位に深く感謝いたします。

平成 20 年 1 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

予防保全工法ガイドライン［外面からの入熱による応力改善方法］

改訂履歴

ガイドライン名： 改訂年月	版	改訂内容	備考
平成 20 年 1 月	初版発行	－	

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 19 年 12 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　柱	横浜国立大学教授
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	大阪大学教授
委員	橋爪　秀利	東北大学教授
委員	班目　春樹	東京大学教授
幹事	坂下　彰浩	東京電力(株)
幹事	吉田　裕彦	関西電力(株)
幹事	堂崎　浩二	日本原子力発電(株)
委員	小林　敏行	北海道電力(株)
委員	丹治　和宏	東北電力(株)
委員	松本　純	東京電力(株)
委員	石沢　順一	東京電力(株)
委員	鈴木　俊一	東京電力(株)
委員	肥田　茂	中部電力(株)
委員	米田　貢	北陸電力(株)
委員	野村　友典	関西電力(株)
委員	平野　伸朗	関西電力(株)
委員	小川　誓	中国電力(株)
委員	高木　敏光	四国電力(株)
委員	水繰　浩一	九州電力(株)
委員	青木　孝行	日本原子力発電(株)
委員	師尾　直登	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	谷本　政隆	原子力安全・保安院
参加者	菊池　正明	(独)原子力安全基盤機構
参加者	山本　豊	(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、有限責任中間法人　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。

予防保全工法ガイドライン

［外面からの入熱による応力改善方法］

目次

第１章　目的及び適用　1

第２章　工法の概要　1

第３章　工法適用の条件　1

第４章　工法適用に対する要求事項　2
4.1　工法適用にあたっての前提条件　2
4.2　工法に対する要求事項　2
4.3　使用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

第５章　施工後の確認　2

解　説
（解説-1）期待する応力改善効果の設定　3

［添付］
添付１　高周波誘導加熱応力改善工法（ＩＨＳＩ）
添付２　レーザ外面照射応力改善工法（Ｌ－ＳＩＰ）

第１章　目的及び適用

本ガイドラインは､沸騰水型原子力発電所（BWR）及び加圧水型原子力発電所（PWR）用機器の応力腐食割れ（SCC）に対する予防保全を目的に、機器の各部材における内表面の応力改善を図るために適用される外面からの入熱による応力改善方法の適用要領についてまとめたものである。

なお、具体的な適用対象および工法の詳細は、添付１～添付２によるものとする。

第２章　工法の概要

オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金(ニッケルクロム鉄合金)の SCC が発生する一要因として、構造体の接液部表面における引張残留応力が挙げられる。

外面からの入熱による応力改善方法は、入熱により構造体の板厚方向に温度差を発生させ、内面側を一時的に引張降伏させることにより、冷却後内面に存在する残留引張応力を圧縮側に改善する工法である。

圧縮残留応力の生成に影響を与える施工因子（基本支配因子）としては、以下のものが考えられるが、各施工因子の影響は工法毎に定め、工法適用の条件および工法適用に対する要求事項に反映する必要がある。

－最高加熱温度及び加熱範囲

－板厚方向の温度分布に寄与する加熱時間等

－対象材料の周辺環境

第３章　工法適用の条件

本予防保全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

(2) 期待する応力改善効果の設定（解説-1）

(3) 施工要領確認試験の実施

(4) 適用箇所の施工確認方法の確立

尚、工法適用にあたり、第４章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。

第４章　工法適用に対する要求事項

4.1　工法適用にあたっての前提条件

本予防保全工法を適用するにあたり、適用対象および工法毎に定めた前提条件に従うこと。

4.2　工法に対する要求事項

本予防保全工法を適用する場合は、適用対象および工法毎に定めた以下の要求事項を確認すること。

(1) 適用対象部位の材料、形状、寸法の確認

(2) 工法毎の基本支配因子の確認

(3) 基本支配因子における管理項目の要求値の確認

4.3　使用装置に対する要求事項

第３章（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生じた場合は、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

本予防保全工法に関するオペレータの技量としては、装置の施工対象部位への設定、入熱条件の設定及び操作盤の操作・運転などが考えられる。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

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施工の重ね合わせや長時間施工等に対する施工時間の制限を設けること。

また、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、施工後に健全性について確認すること。

第５章　施工後の確認

本予防保全工法の施工後、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）。また、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。

（解説-1）期待する応力改善効果の設定

溶接試験材を用いた場合の施工要領確認試験において、施工後に応力改善を期待する範囲の内表面の歪みゲージによる残留応力測定を行い、溶接による引張残留応力が改善（低減もしくは圧縮応力に転換）されていることを確認する必要がある。

目標とする残留応力および残留応力改善深さは、SCC の発生抑制の観点、あるいは微小き裂が存在する場合の進展抑制の観点から、それぞれの工法に応じて設定することが望ましい。なお、供用期間中に想定される減肉量に相当する深さを、残留応力改善深さに予め考慮して対処する必要がある。

添付１

予防保全工法ガイドライン

［高周波誘導加熱応力改善工法］

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する可能性のある応力腐食割れ(SCC)に対する予防保全を目的とした高周波誘導加熱により溶接部の応力を改善する方法（Induction Heating Stress Improvement－以下　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、オーステナイト系ステンレス鋼、炭素鋼、低合金鋼及び高ニッケル合金(ニッケルクロム鉄合金)を使用してい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、製造・建設時を含む発電所の商業運転開始前及び商業運転開始後の供用期間中とする。

2　工法の概要

ＩＨＳＩとは、機器（容器，管，ポンプ，弁）の溶接継手部の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，管の内外面に温度差をつけることで、内面側を一時的に引張降伏させることにより内面に生じる残留引張応力を，冷却後圧縮側に改善する工法である。（解説２－１）

3　工法適用の条件

本ガイドラインは､供用期間中及び供用開始前の溶接部の溶接残留応力に起因するSCCに対する予防保全として実施するIHSI工法に適用する。本予防保全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) 期待する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）

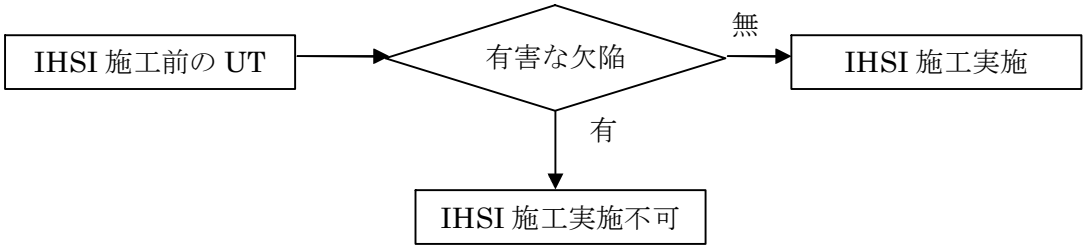
なお、工法適用にあたり、４項に示す工法に対して期待する効果に影響を及ぼす基本支配因子に対する要求値が変更される場合は、その都度、施工要領確認試験を実施し、施工要領を再設定すること。

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

本予防保全工法を適用するための適用条件は以下とする。

1) 供用期間中の溶接部に適用する場合には、施工前に施工対象部位の内表面に割れ等の有害な欠陥がないことを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

本予防保全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) 工法における基本因子の確認
(2) 基本支配因子における管理項目の要求値の確認（解説４－４）

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生じた場合は，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

本予防保全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

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，施工後に健全性について確認すること。

5　施工後の確認

本予防保全工法の施工後、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）。また、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。

（解説５－１）

（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，機器に適した合理的な点検要領が検討されている。一方で，さらに，点検の合理化を図るために，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ついても検討されてきている。

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予防保全工法としての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

本予防保全工法は，オーステナイト系ステンレス鋼，フェライト鋼，高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）を使用している原子力発電所用配管等に効果があることを試験により確認している。具体的に確認している材料は以下のとおりである。なお，以下の材料以外を施工対象とする場合には，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。

- ステンレス鋼－ステンレス鋼周溶接及び長手継手
- ステンレス鋼－炭素鋼周溶接
- ステンレス鋼－低合金鋼周溶接
- ステンレス鋼－高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）周溶接

（解説２－１）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。

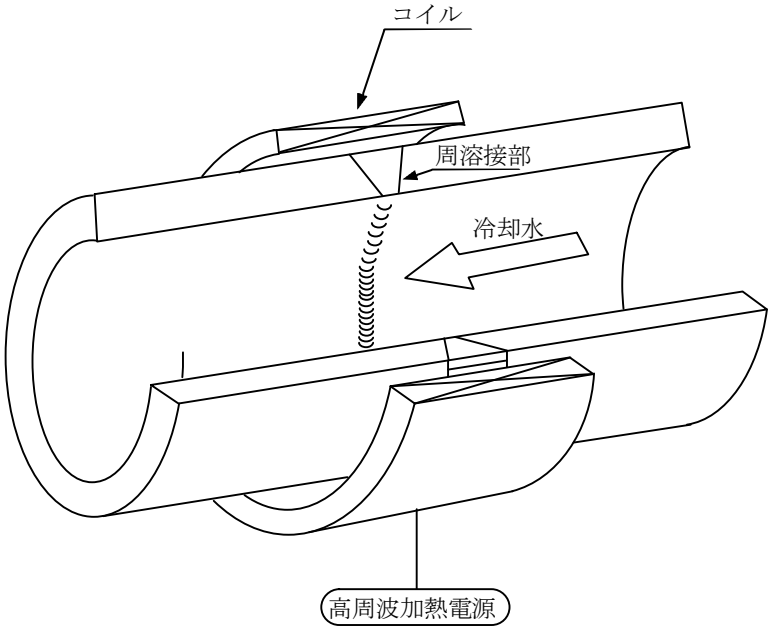
解説図 2.1-1にIHSIの施工概念図を示す。

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。

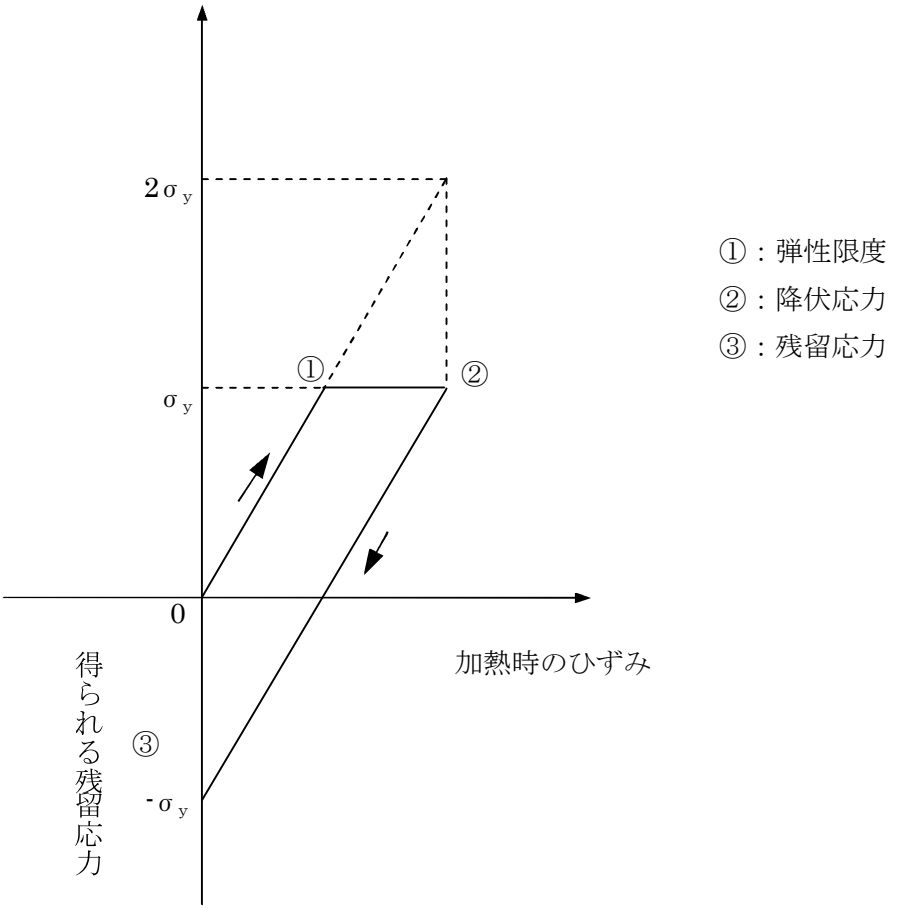
解説図 2.1-3にIHSI施工時の応力分布，変形，温度分布状態を示す。

IHSIでは，まず，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

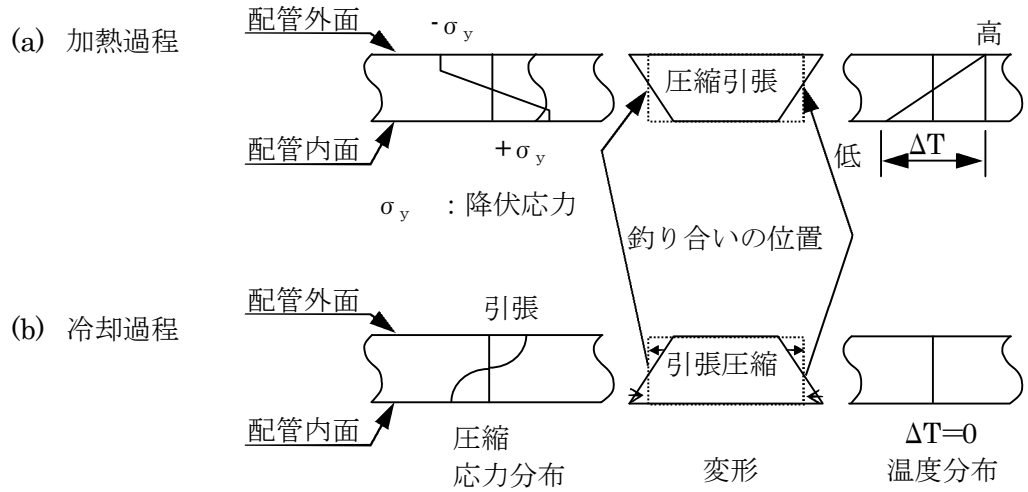
の③，および2.1-3の(b)の状態）。IHSIにより，このようなメカニズムで溶接部内面の残留引張応力を改善（低減もしくは圧縮応力に転換）することができる。



解説図 2.1-1　IHSI 施工概念図



解説図 2.1-2　IHSI 応力-ひずみ線図



解説図 2.1-3　IHSI　施工時の応力分布，変形，温度分布状態

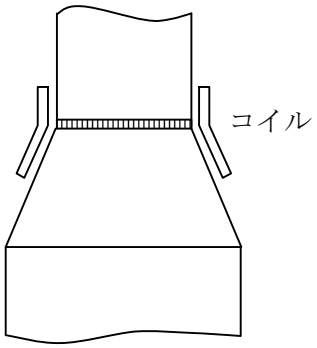
（解説３－１）適用範囲の設定

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により残留応力が発生し，ＳＣＣの懸念のある内表面の応力改善必要範囲とし，当該の溶接部を含む外面をＩＨＳＩ施工範囲とする。

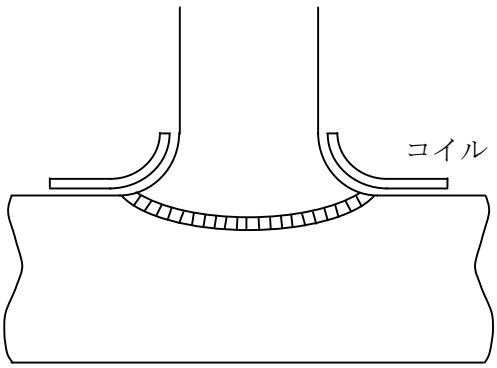
なお，適用範囲例を以下に示す。

解説表 3.1-1　IHSI 適用範囲例

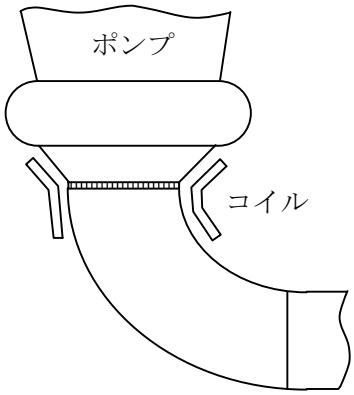
IHSI 適用箇所	備　考
直管＋直管 クロス＋リングヘッダ キャップ＋リングヘッダ ポンプ＋直管，弁＋直管， クロス＋直管，ティーズ＋直管， キャップ＋直管，エルボ＋直管， レデューサ＋直管*1 ポンプ＋エルボ*2，弁＋エルボ 管台＋直管*3 圧力容器ノズル＋セーフエンド	*1 : レデューサと直管のコイル取付例を解説図 3.1-1 に示す。 *2 : ポンプとエルボのコイル取付例を解説図 3.1-2 に示す。 *3 : 管台と直管のコイル取付例を解説図 3.1-3 に示す。



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）期待する応力改善効果及びその効果を得るための施工要領確認試験

ＩＨＳＩ適用の目的は，応力腐食割れに対する予防保全工法として，管内表面の残留引張応力を改善（低減もしくは圧縮応力に転換）することである。

目標とする残留応力改善深さは，耐ＳＣＣ性の観点から，微小き裂の存在を仮定しても，その微小き裂からのＳＣＣ進展が抑制されるという考え方を基に設定することが望ましいが，ＩＨＳＩにおいては原理的に内面から板厚の中央部近傍までは圧縮応力となることが期待される。一方，対象が配管等の内表面であるため，残留応力の計測はひずみゲージを用いた応力開放法に依らざるを得ず，板厚方向の残留応力の計測が容易でない。

このため，期待する応力改善効果の確認としては，効果に影響を及ぼす施工条件である基本支配因子に対する要求値を設定した上で，対象の内表面の残留引張応力が100MPa以下となっていることを施工要領確認試験やFEM解析等で確認する。

なお，残留応力は100MPa以下であればSCC発生の抑制効果が試験で確認されており，施工実績の観点からも抑制効果が期待できると言える。（付録１）

（解説３－３）施工確認方法の確立

適用する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）施工前検査

ＩＨＳＩを適用するにあたり，適用箇所の表面状態の確認として，内表面近傍に割れ等の有意な欠陥がないことを確認する必要がある。

供用期間中の溶接部に適用する場合には，施工前に施工対象部位に対してJEAG4207-2004（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，合格していること（有意な指示がないこと）を前提条件とする。

（解説４－２）適用対象部位の材料，形状，寸法の確認

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）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

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

ＩＨＳＩにおける基本支配因子と管理すべき項目を表4.1-1に示す。

解説表4.1-1 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	○
	材料	○
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 ⊿T	○

(1) 最高加熱温度（Tmax）(℃)

軸方向４箇所の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：管の厚さの中心における曲率半径(mm)

t：管の厚さ(mm)

(3) 加熱時間（τ）(s)

下記式にて算出する。

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

t：管の厚さ(mm)

a：温度伝導率(mm^2/s)

(4) 加熱有効範囲で必要な内外面の温度差（⊿T）(℃)

下記式にて算出する。

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

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/℃)

［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) 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 4.1-2 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 4.1-2　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。

(c) コイル幅

解説図 4.1-1 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，

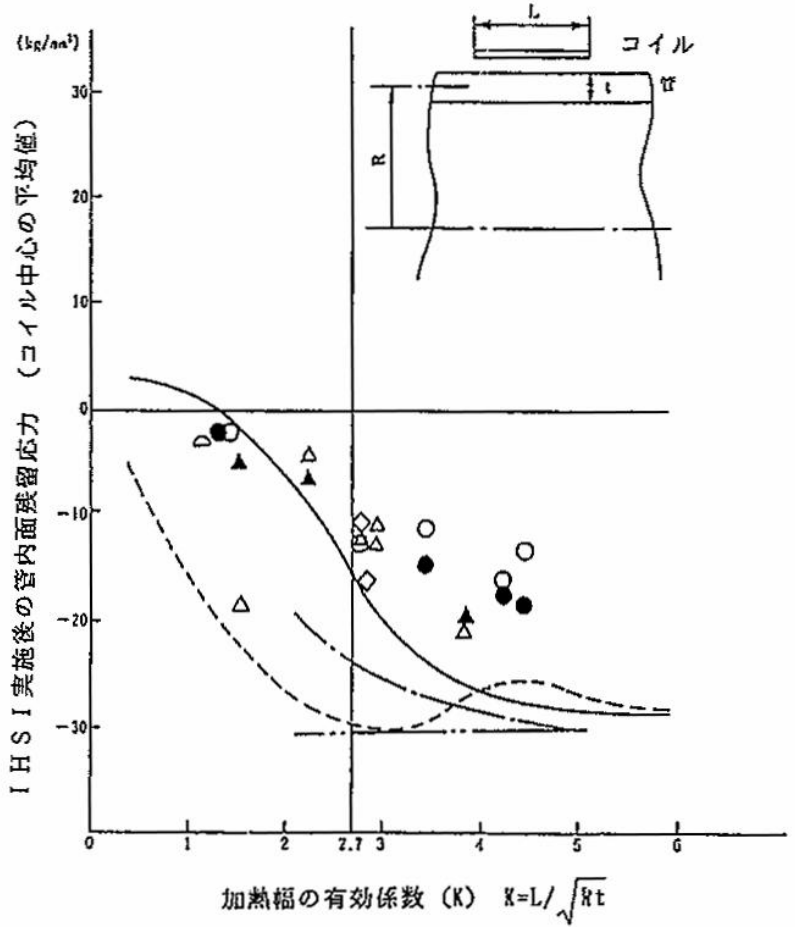
$$K = L / \sqrt{Rt}$$

L　：コイル幅（mm）

R　：管の公称厚の中心における曲率半径（mm）

t　：管の厚さ（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。



◇ ：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）

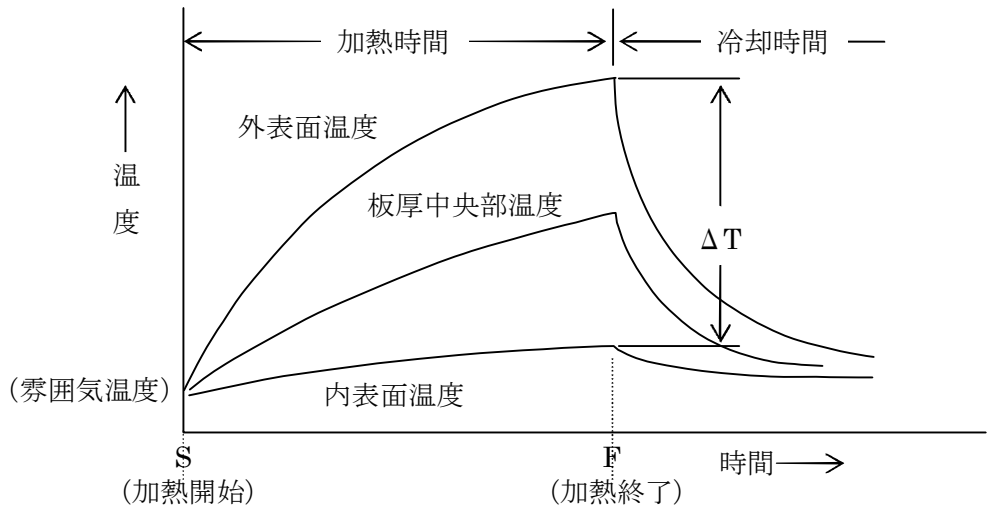
ｔ：管の厚さ（mm）

解説図 4.1-1　コイル幅と IHSI 後の残留応力

（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。

(d) 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 4.1-2(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 4.1-2(a)　ＩＨＳＩの加熱・冷却過程の温度変化

(2) 解説図 4.1-2(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，　$T_{1/2}$：管の肉厚中心の温度（℃）

T_o：管の外面温度（℃），T_i：管の内面温度（℃）

a：温度伝導率（mm^2/s）

t：管の厚さ（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。

(e) 熱影響部での内面温度差

解説図 4.1-3 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/℃）

ΔT：内外面温度差（℃）

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必要があり，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。

$$\Delta T \geq \lfloor 4(1-\nu)\sigma_y \rfloor/(E\alpha)$$

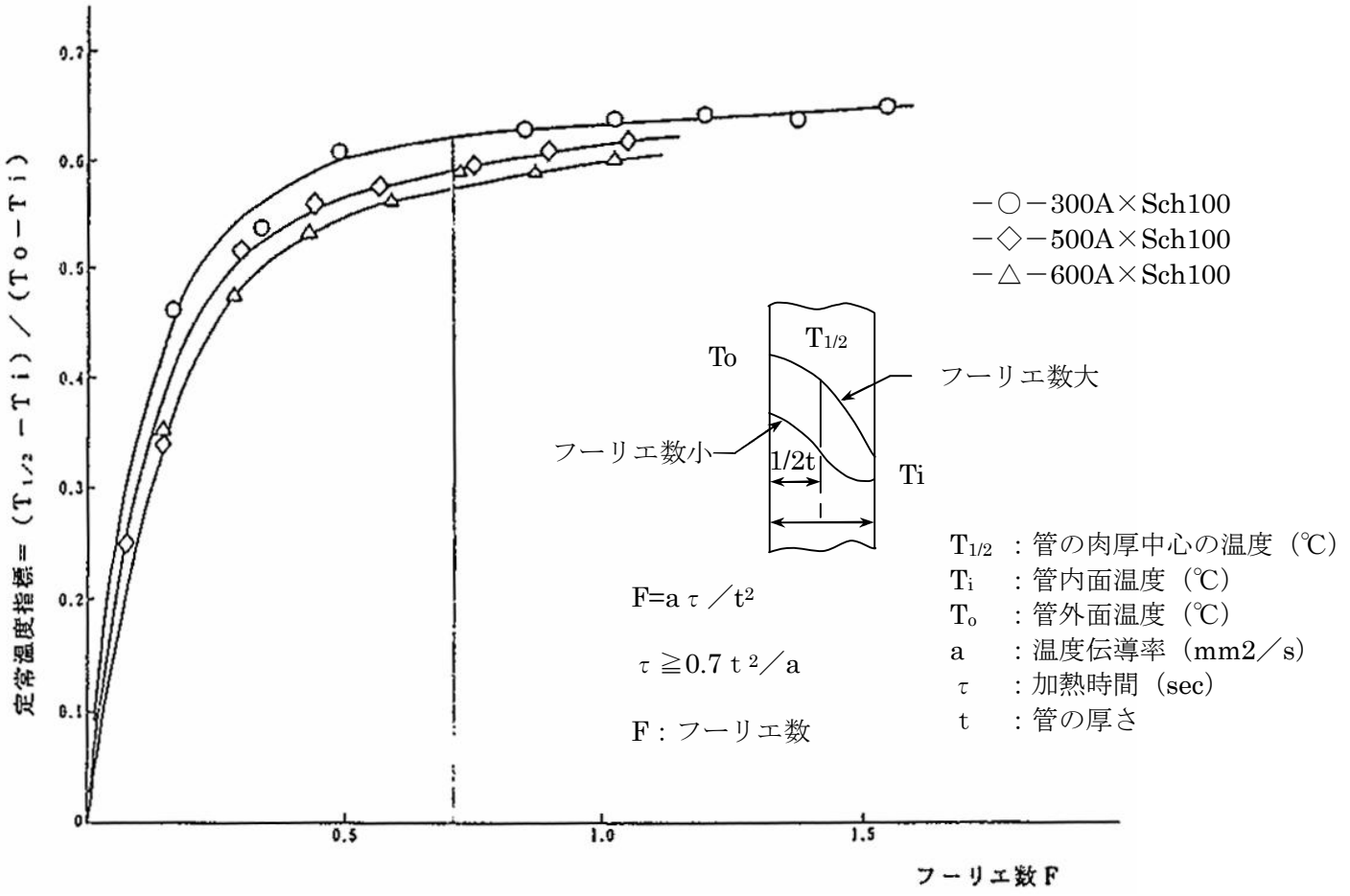
ここで，　σ_y ：ミルシートに記載の降伏強さ（MPa）

（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）

(f) 溶接線位置とコイルの位置の関係

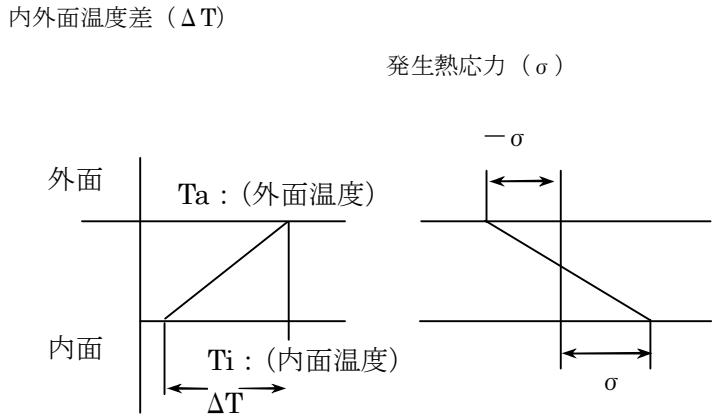
加熱部配管軸方向の温度は，コイルの端部で急激に下がる。したがって，応力を改善する部分の管内外面の温度差を十分にとるために，溶接位置をできる限りコイルの中心部に設けることが望ましい。この点を評価するためにコイル位置の軸方向の温度分布と残留応力分布との関係を各々解説図 4.1-4 と解説図 4.1-5 に示した。これからわかるように，溶接中心からコイル端までの距離がコイル幅 $2.7\sqrt{Rt}$ の 2 分の 1 あれば，残留応力の低減効果は十分にあることがわかる。

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 4.1-6 参照）



解説図 4.1-2(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。



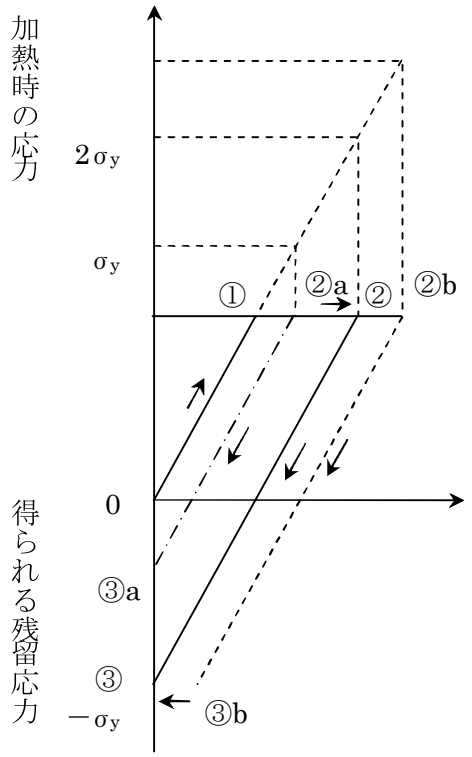
$$\Delta T \geq \frac{4(1-\nu)\sigma_y}{E\alpha} \quad \longleftarrow \quad \sigma = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)} \geq 2\sigma_y \cdots\cdots(1)$$

E：縦弾性係数（MPa）

α：線膨張係数（m/m℃）

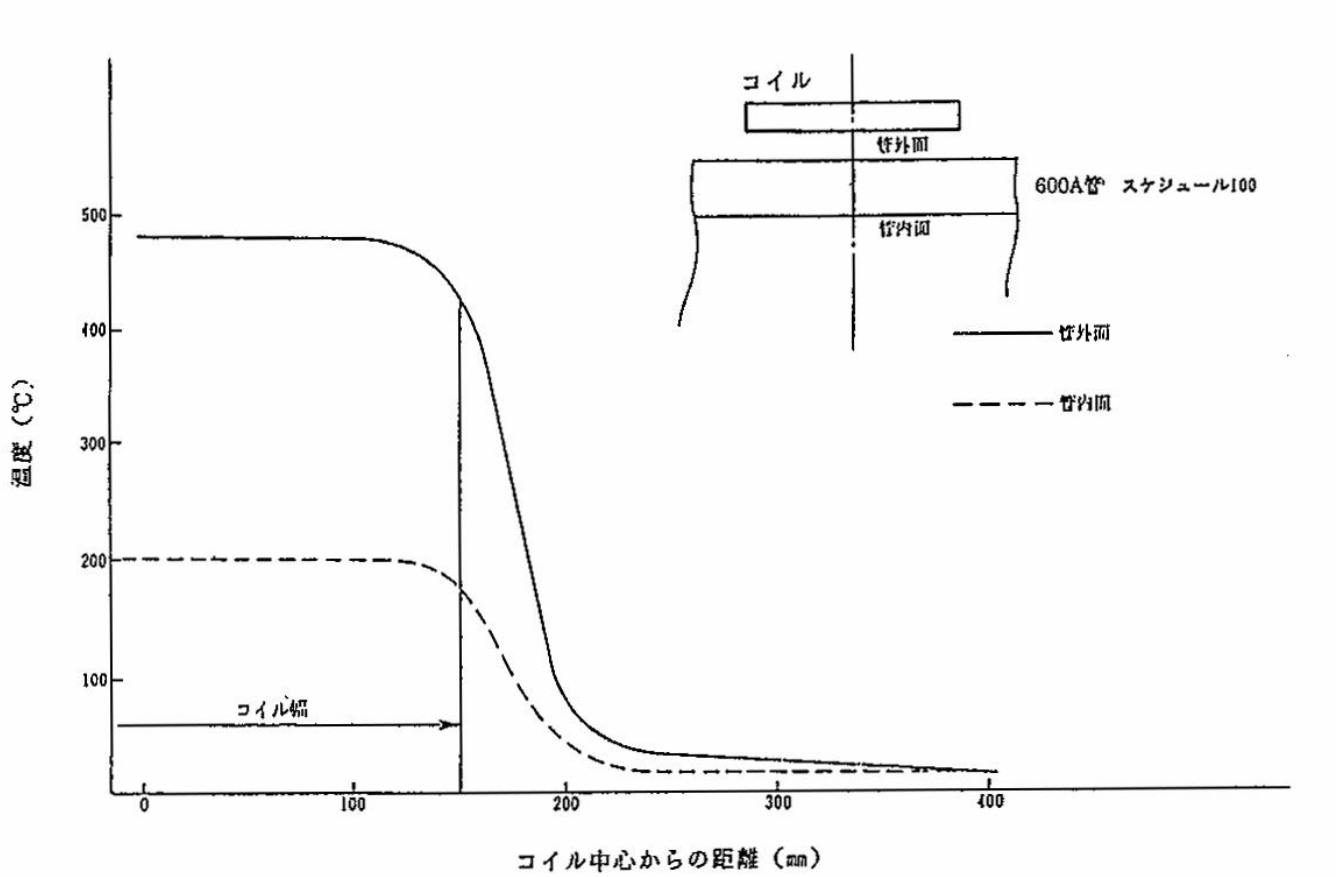
ν：ポアソン比

σ_y：降伏強さ（MPa）



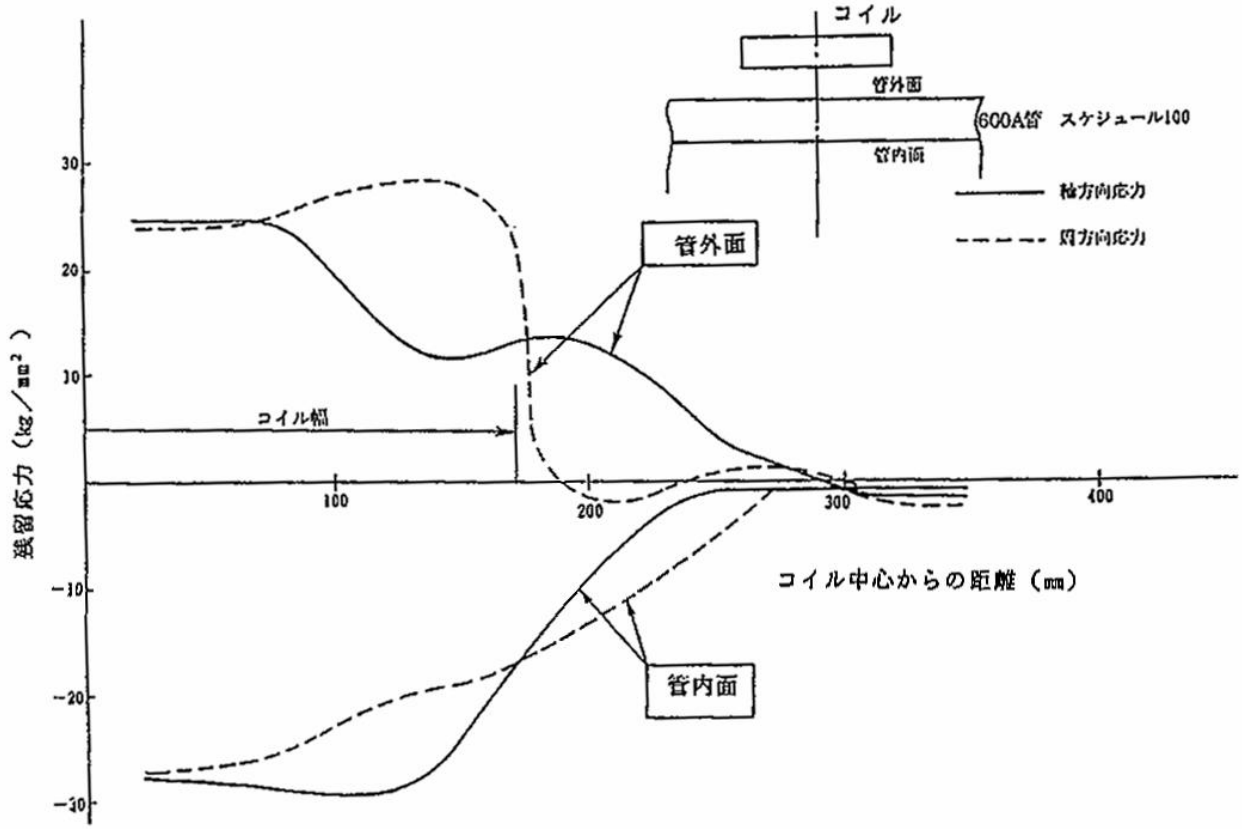
式(1)のσ_y	応力－ひずみ挙動	得られる残留応力	線
$2\sigma_y$	0 → ① → ② → ③	$-\sigma_y$	――――
$<2\sigma_y$	0 → ① → ②a → ③a	$>-\sigma_y$	－・－・－・－
$>2\sigma_y$	0 → ① → ②b → ③b	$-\sigma_y$	－・・－・・－

解説図 4.1-3　内外面温度差と残留応力



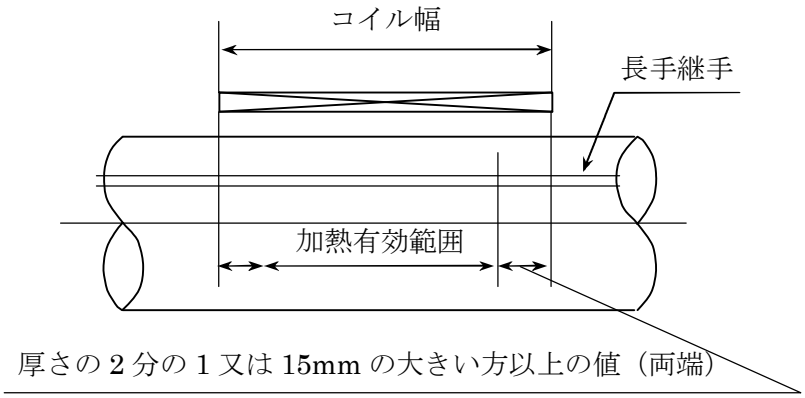
解説図 4.1-4　軸方向の温度分布（実測値）

（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 4.1-5　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。



解説図 4.1-6　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を以下に示す。

［基本支配因子と管理項目の例］

ＩＨＳＩ施工に必要な基本支配因子と管理項目の例を表4.1-2に示す。

解説表4.1-2 基本支配因子と管理項目の例

項 目		適 用 条 件
外　　径		150A～750A
母材の厚さ		14mm～64mm
材　料	周溶接部 および 長手溶接部	① P-8とP-8の溶接部 ② P-8とP-1の溶接部 ③ P-8とP-3の溶接部 ④ P-8とP-43の溶接部
	管台溶接部	P-8とP-8の溶接部
適用部位		周溶接部，管台溶接部及び長手継手
内面水冷		有り
最高加熱温度		①650℃（SUS304は550℃） ②600℃ ③600℃ ④650℃，600℃，550℃*1
コイル幅Ｌ（mm）		$L \geq 2.7\sqrt{Rt}$
加熱時間τ（S）		$\tau \geq 0.7t^2/a$
加熱有効範囲で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

*1：P-43(Nb=1～3%)+P-8(C≦0.020%)：650℃（但し，溶接部はR-43, Alloy82に限る）

P-43(上記以外)+ P-8(C≦0.020%)：600℃

P-43(上記以外)+ P-8(上記以外)：550℃

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／℃）　：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

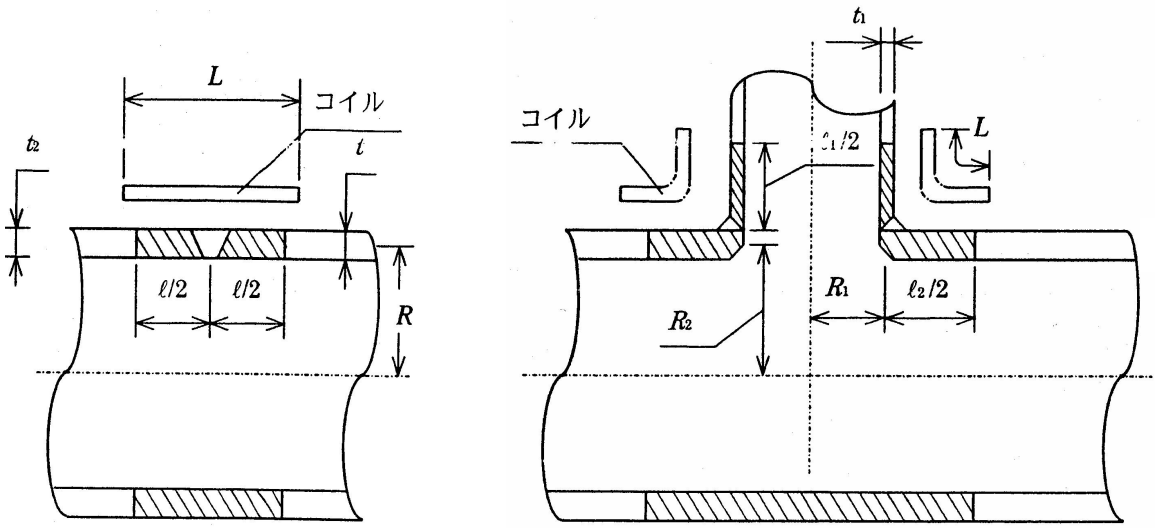
R（mm）　：管の厚さの中心における曲率半径（管台の場合は，R_1，R_2）

t（mm）　：管の厚さ（管台の場合は，t_1, t_2）

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4.1-7）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 管台の場合はそれぞれℓ_1、ℓ_2の合計の範囲）。

ここで，$\ell = \sqrt{Rt}$, $\ell_1 = \sqrt{R_1 t_1}$, $\ell_2 = \sqrt{R_2 t_2}$　で計算。



（**a**）管の溶接部の場合　　（**b**）管台の溶接部の場合

解説図4.1-7　IHSI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。

（解説４－５）施工管理要領

本工法適用に当たっては，表4.1-3に規定の施工管理要領によらなければならない。

解説表4.1-3　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点についは温度指示の高い方を正とすること。*1
解体	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た場合は，グラインダにて除去すること

＊１：実機におけるIHSIの温度管理は，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

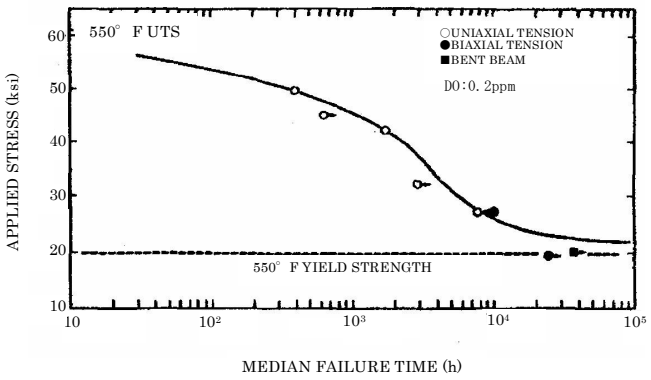
施工後に，各管理項目が施工条件範囲内であることを確認する。また，施工対象部位に対してJEAG4207-2004（軽水炉型原子力発電用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針）に準拠したUT検査を実施し，合格基準に適合していること，溶接で取り付けた温度計を除去した部分については、JIS Z 2343-1～4（非破壊試験　浸透探傷試験　第１～４部）により浸透探傷試験を行い、有意な指示がないことを確認する。

付録１　ＩＨＳＩ施工　残留応力の目安について

IGSCC を生ずるための応力の最小値（しきい値）についての検討を行った。以下に IGSCC 発生確認試験結果例を示す。

IGSCC発生に必要な応力は、以下の実験結果より、使用温度における0.2%耐力程度である。

（データ1）



＜試験条件＞

・供試材：鋭敏化304鋼（621℃／24h）

・温度：288℃

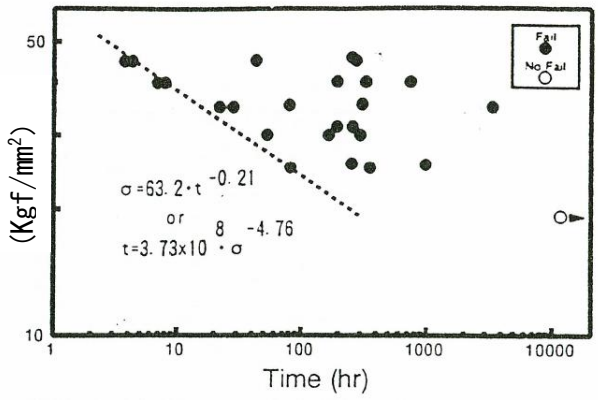
・溶存酸素濃度：0.2ppm

出典

W.L.Clarke, G.M.Gordon: Investigation of Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Fe-Ni-Cr Alloys in Nuclear Reactor Water Environments, Corrosion, Vol.29,No.1 (1973)

• 試験温度における材料の降伏応力（20ksi＝約138MPa）の20%増程度からIGSCCの発生が確認されている。

（データ2）



＜試験条件＞

・供試材：鋭敏化304鋼（621℃／24h）

・温度：288℃

・圧力：80kgf/cm^2

・溶存酸素濃度：8ppm

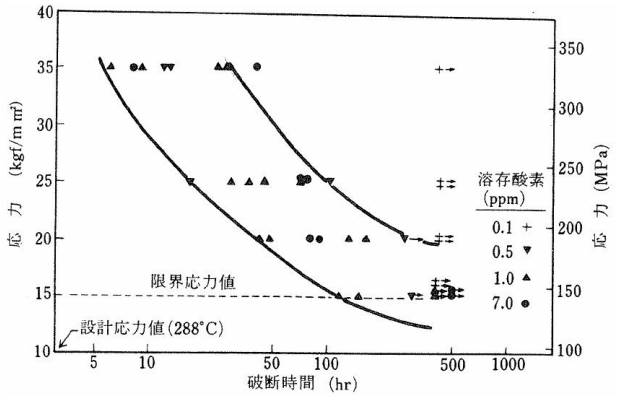
・グラファイトウールすき間付

出典

M.Tsubota, Y.Kanazawa: Prediction of the Crack Initiation Time of the Alloys Used in High Temperature Water, Corrosion 94, Paper No.238 (1994)

• SCCを生ずるための応力の最小値は、耐力程度の応力である。

（データ3）



＜試験条件＞

・供試材：鋭敏化304鋼（650℃／2h）

・温度：250℃

・溶存酸素濃度：0.1～7.0ppm

出典

小若 正倫：金属の腐食損傷と防食技術，新版第2刷，アグネ社（2000）

• SCC発生の限界応力値は、ほぼ試験温度における材料の耐力に相当した値である。

以上の結果より，IGSCC は降伏応力と同程度かそれより高い値で発生が確認されている。また，過去からのＩＨＳＩ技術の連続性も勘案し，100MPa 以下であれば SCC 発生抑制効果があると考えられる。

添付２

予防保全工法ガイドライン

［レーザ外面照射応力改善工法］

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）に対する予防保全を目的としたレーザ外面照射応力改善工法（outer surface irradiated Laser Stress Improvement Process ：以下Ｌ－ＳＩＰと略す）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、オーステナイト系ステンレス鋼、低合金鋼及び高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）を使用してい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、製造・建設時を含む発電所の商業運転開始前及び商業運転開始後の供用期間中とする。

２．　工法の概要

Ｌ－ＳＩＰ工法は、周溶接継手に対して、外面からレーザ照射することで、配管の内側と外側に温度差を付けて内面側を一時的に引張降伏させることにより、冷却後に溶接残留応力を圧縮応力側に改善する工法である。また、Ｌ－ＳＩＰ工法は、原理的には管内の水有り無しに関わらず管内面の溶接残留応力の改善可能な工法である。（解説２－１）

３．　工法適用の条件

本ガイドラインは、供用期間中及び供用期間前の溶接部の溶接残留応力に起因するSCCに対する予防保全として実施するＬ－ＳＩＰ工法に適用する。本予防保全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) 期待する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）

尚、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前提条件

本予防保全工法を適用するための前提条件は以下とする。

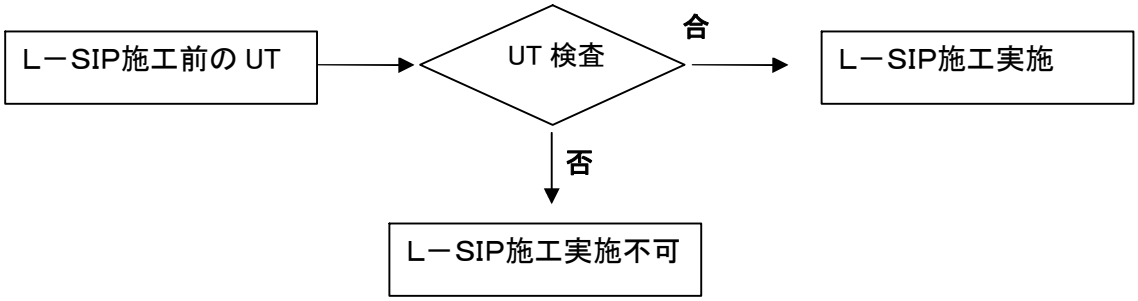
１）供用期間中の溶接部に適用する場合には、施工前に、施工対象部位の内表面に割れ等の有害な欠陥が無いことが確認できていること。（解説４－１）

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を確認できていること。（解説４－３）

４）施工対象部（溶接位置/溶接境界）が確認できること。（解説４－２）

５）施工対象部の施工前温度が確認できること。（解説４－４）



４．２　工法に対する要求事項

本予防保全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（解説４－５）

(2)基本支配因子における管理項目の要求値の確認（解説４－５）

４．３　使用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生じた場合は、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

本予防保全工法に関するオペレータの技量としては、装置の施工対象部位への設定、入熱条件の設定及び操作盤の操作・運転などが考えられる。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

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施工の重ね合わせや長時間施工等に対する施工時間の制限を設けること。

また、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、施工後に健全性について確認すること。

５．施工後の確認

本予防保全工法の施工後、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）。また、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。（解説５－１）

（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、機器に適した合理的な点検要領が検討されている。一方で、さらに、点検の合理化を図るために、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ついても検討されてきている。

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予防保全工法としてのＬ－ＳＩＰ技術の適用要領をまとめたものである。

（解説１－２）適用材料

本予防保全工法は、オーステナイト系ステンレス鋼、低合金鋼及び高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）を使用している原子力発電所用配管等に効果があることを試験により確認している。具体的に確認している材料は以下のとおりである。なお、以下の材料以外を施工対象とする場合には、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。

- ステンレス鋼－ステンレス鋼周溶接
- 低合金鋼－ステンレス鋼異材周溶接
- 高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）－ステンレス鋼異材周溶接

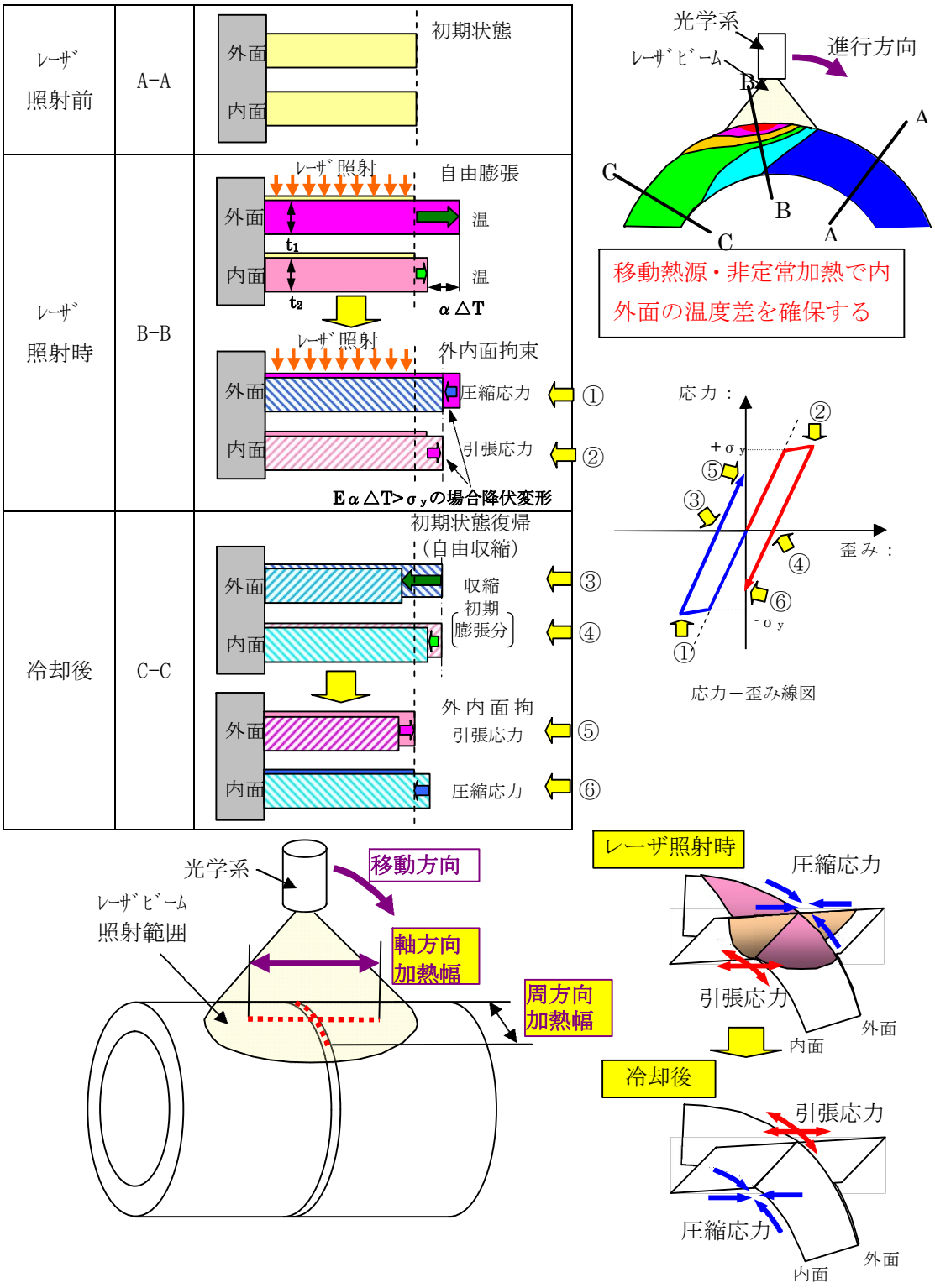
（解説２－１）Ｌ－ＳＩＰの原理

Ｌ－ＳＩＰは、解説図 2.1-1 に示すように対象となる配管又は管台に対して、外面からレーザを局部的に照射し、全周を移動させることで、内面側の溶接残留応力を圧縮側に改善する工法である。原理の概要は、以下のとおりである。

① 局所的にレーザを外表面に移動させながら照射し、全周にわたって板厚の内外面に温度差を与える。

② 外表面の熱膨張により、外面が伸びようとして板厚内で曲げの変形が発生するが、配管・管台が剛体であるので、変形が拘束される結果、外面側が圧縮、内面側が引張の降伏状態になる。

③ 板厚の内外面の温度差がなくなる過程（外表面が冷却する過程）において、今度は、外表面の収縮により外表面が縮もうとして、板厚内で曲げの変形が発生（膨張時とは逆の方向）するが、配管・管台が剛体であるので、変形が拘束される結果、外面側を引張、内面側を圧縮応力状態にする。



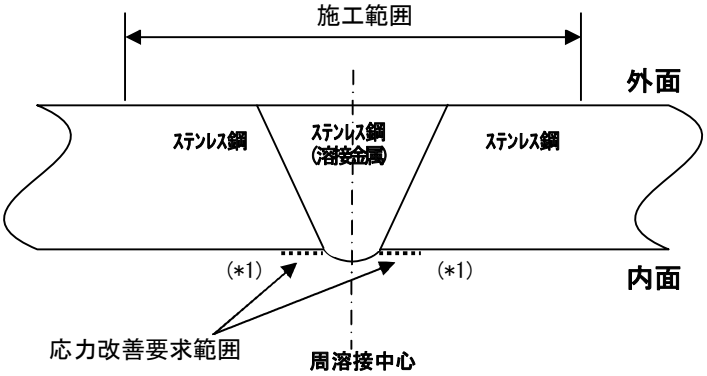
解説図 2.1-1　Ｌ－ＳＩＰ応力改善原理

（解説３－１）適用範囲の設定

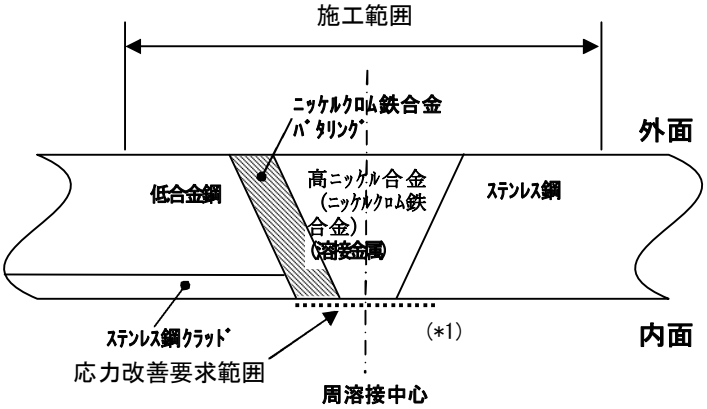
適用範囲は、管台・配管の周溶接により残留応力が発生し、SCC の懸念のある内表面を応力改善要求範囲とし、当該の周溶接を含む外面をＬ－ＳＩＰ施工範囲とする。

平成 18 年に（財）発電設備技術検査協会にて行った確性試験で確認した適用範囲例を以下に示す。

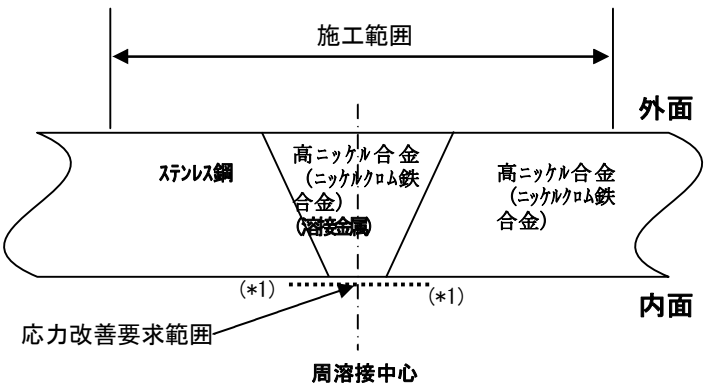
１）ステンレス鋼-ステンレス鋼周溶接継手



２）低合金鋼-ステンレス鋼周溶接継手



３）高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）-ステンレス鋼周溶接継手



(*1)熱影響部

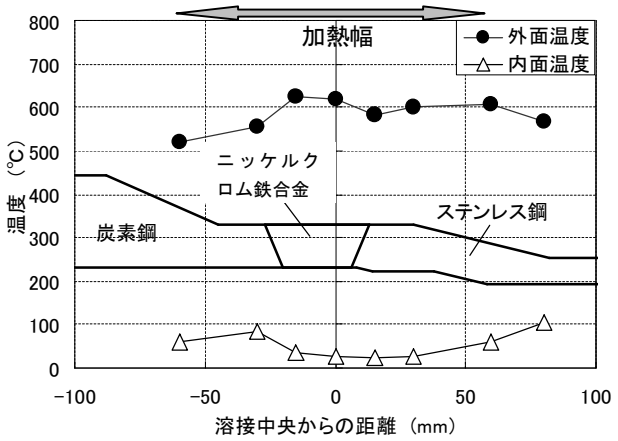
解説図 3.1-1　Ｌ－ＳＩＰ適用範囲

（解説３－２）期待する応力改善効果及びその効果を得るための施工要領確認試験

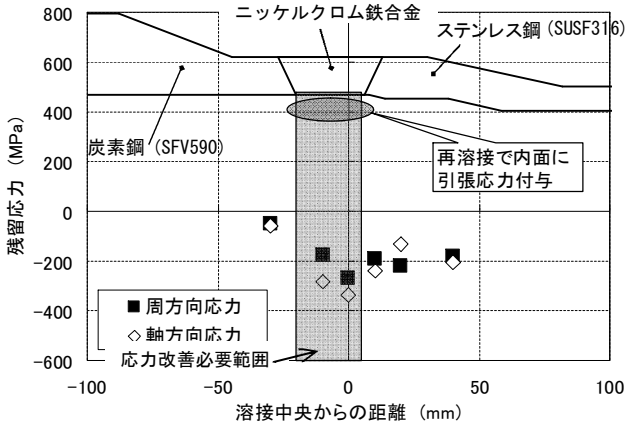
Ｌ－ＳＩＰ適用の目的は、応力腐食割れに対する予防保全工法として、内表面の応力状態を圧縮応力に改善することである。

目標とする残留応力改善深さは、耐ＳＣＣ性の観点から、微小き裂の存在を仮定しても、その微小き裂からのＳＣＣ進展が抑制されるという考え方を基に設定する必要があるが、Ｌ－ＳＩＰにおいては原理的に内面から板厚の 1/2 程度までは圧縮応力となることが期待される。一方、対象が配管等の内表面であるため、残留応力の計測はひずみゲージを用いた応力開放法に依らざるを得ず、板厚方向の残留応力の計測が容易でない。

このため、期待する応力改善効果の確認としては、施工要領確認試験において対象の内表面の残留応力が圧縮となっていることを確認する。なお、施工要領確認試験は、期待する効果に影響を及ぼす施工条件である基本支配因子に対する要求値を設定した上で、期待する効果が得られるかどうかの確認を、実機条件を模擬したモックアップ供試体などを使用して実施する。



内外面温度分布



内外面残留応力分布

解説図 3.2-1　期待する効果例

出典：「レーザ外面照射応力改善法による残留応力低減法」
三菱重工 鬼塚ら　'06 火力原子力発電大会　予稿

（解説３－３）施工確認方法の確立

適用するＬ－ＳＩＰ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４－５参照）

（解説４－１）施工前検査

Ｌ－ＳＩＰを適用するにあたり、適用箇所の表面状態の確認として、内表面近傍に割れ等の有害な欠陥がないことを確認する必要がある。

供用期間中の溶接部に適用する場合には、施工前に、施工対象部位に対して JEAG4207-2004（軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針）に準拠した UT 検査を実施し、合格していること（有意な指示がないこと）を前提条件とする。

（解説４－２）適用対象部位の材料、形状、寸法の確認

Ｌ－ＳＩＰ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）による項が含まれ、また、形状によってレーザの照射範囲等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水有無の確認

Ｌ－ＳＩＰ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、内面の水あり／水なしの状態により境界条件が異なるため、その効果に差異が生じる。このため、内面水あり状態を水冷モード、内面水なし状態を空冷モードとして区分し、施工条件を別々に設定する。

（解説４－４）対象部位の施工前温度の確認

施工前の温度が高すぎると最高到達温度（解説４－５）が目標から逸脱してしまう可能性があることから、施工前の対象部の温度を予め確認する。

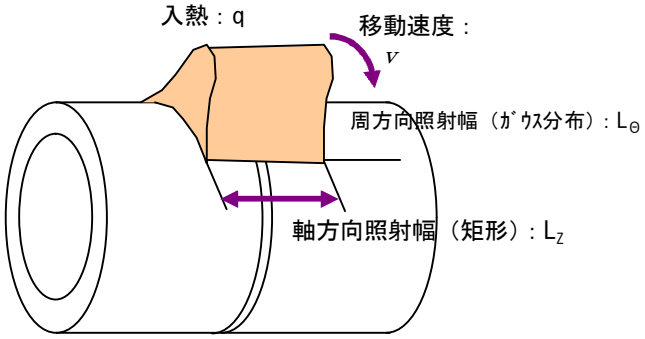
（解説４－５）基本支配因子と管理項目

L-SIP では，管の表面を幅を持った熱源が一定速度で移動しながら加熱を行うが、このときの管全体の温度分布が残留応力改善に影響を与える。

与える熱源は、管軸方向にはフラット（矩形）で、周方向にガウス分布状の入熱分布（矩形ガウス分布）を持つものとし、この熱源が下図のように管外面を速度ｖで移動しているとすると、時間ｔでの管の温度分布（T(z，θ，r，t)）は，入熱量ｑ，移動速度ｖ，周方向照射幅L_θ，軸方向照射幅L_zで決まる。

$$T(z,\ \theta,\ r,\ t) = f\ (q,\ v,\ L_z,\ L_\theta)$$

ここで，ｚ，θ，ｒはそれぞれ軸方向位置，周方向位置，半径方法位置を示す。



しかしながら、これらのパラメータは施工時の確認ができたいなため，温度計測結果から確認できるように以下の等価なパラメータに置き換えを行った。

$$T(z,\ \theta,\ r,\ t) = f\ (q,\ v,\ L_z,\ L_\theta) = f'\ (Tmax,\ \tau o,\ v,\ W,\ L)$$

解説表 4.5-1　L-SIP の等価なパラメータ

温度分布のパラメータ	等価なパラメータ（基本支配因子）	定義
入熱量：ｑ	①最高到達温度 Tmax	① 温度計測点が記録した最高到達温度
速度：ｖ	②昇温時間　τo	② 温度計測点が 100℃から，最高到達温度に達するまでの時間 τo
	③移動速度　v	③ 光学系の移動速度
周方向照射幅L_θ	④周方向加熱幅 W	④ 温度計測点が 100℃から，最高到達温度に達するまでの時間 τo と速度 v の積
軸方向照射幅L_z	⑤軸方向加熱幅 L	⑤ 温度計測点が記録した最高到達温度が規定の温度範囲内である軸方向の幅

ここで、残留応力改善効果に最も影響を与える最高到達温度に達した時の板厚内温度分布の支配因子の一つは、表面の微小体積が最高到達温度までに入熱される時間（昇温時間）τo(s)

と考えられることから、基本支配因子に追加している。なお、昇温時間τo(s)と熱源の周方向加熱幅W(mm)、移動速度v(mm/s)の間にはτo＝W／vの関係があるため、独立なパラメータは置き換え前と同じ４パラメータである。

また、最高温度到達時（t＝τo）の外面からの熱浸透深さ（板厚比）Ωoは下式で示される。

$$\Omega o = 2\sqrt{k \times \tau o} / h = 2\sqrt{k \times \tau o / h^2} = 2\sqrt{Fo}$$

ここで，kは熱拡散率，hは板厚である。Foは昇温時間τoを熱伝導系の相似性を示したものであり、昇温時間パラメータと称することとし、昇温時間と等価である。

$$Fo = k \times \tau o / h^2$$

以上から、Ｌ－ＳＩＰにおける基本支配因子と管理すべき項目は以下のように整理される。

解説表 4.5-2　L-SIP 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（空気）	○
	外径	○
	板厚 h	○
	材料	○
残留応力改善に関する基本支配因子	最高到達温度 T_{max}	○
	昇温時間パラメータ Fo(昇温時間 τo)	○
	移動速度 v	○
	周方向加熱幅 W	○
	軸方向加熱幅 L	○

(1)最高到達温度（T_{max}）

軸方向３箇所の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)昇温時間パラメータ（Fo）

中央部の温度履歴において、100℃から最高加熱温度に到達するまでの時間を昇温時間（τo）とし、式　Fo＝τo×k / h^2にて昇温時間パラメータFoを算出する。(k：熱拡散率)

(3)移動速度（ｖ）

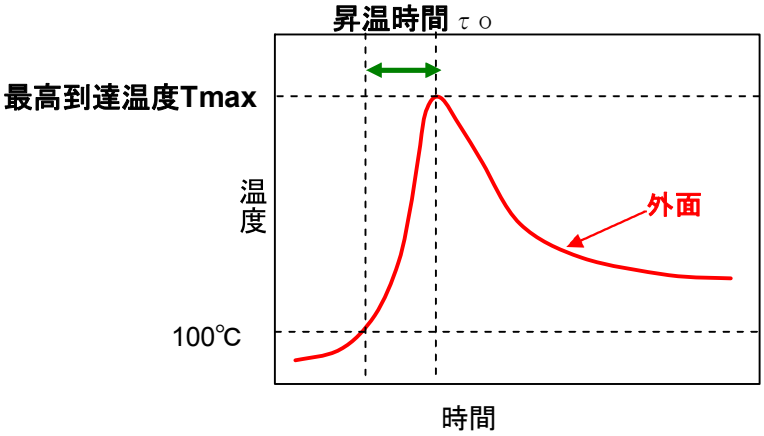
装置の回転速度から移動速度（v）に換算する。

(4)周方向加熱幅（W）

上記で算出される昇温時間（τo）と移動速度（v）との積により算出する。

(5)軸方向加熱幅（Ｌ）

軸方向両端の最高到達温度が所定温度を満たしていることを確認し、設置した軸方向両端の温度計間距離を軸方向加熱幅とする。



周方向加熱幅 $W = \tau o \times \nu$

＊軸方向加熱幅Ｌ ：
両端の温度計取付距離をＬと設定

また、基本支配因子と管理項目の例を解説表 4.5－3 に示す。

解説表 4.5-3　基本支配因子と管理項目の例　（低合金鋼－ステンレス鋼管継手）

前提条件	モード	空冷モード	水冷モード
	内面の適用条件	内面が気相　あるいは 施工前に水が内面に充満している場合	常に水が内面に充満している場合
	板厚 *1	22～49mm	22～49mm
	材料	P-3+P-8（溶接金属:F-43,R-43） P-8：ｵｰｽﾃﾅｲﾄ系ｽﾃﾝﾚｽ鋼 P-3：低合金鋼 F-43，R-43：高ﾆｯｹﾙ合金 （ﾆｯｹﾙｸﾛﾑ鉄合金）溶接金属 （600 合金系溶接金属）	P-3+P-8（溶接金属:F-43,R-43） P-8：ｵｰｽﾃﾅｲﾄ系ｽﾃﾝﾚｽ鋼 P-3：低合金鋼 F-43，R-43：高ﾆｯｹﾙ合金 （ﾆｯｹﾙｸﾛﾑ鉄合金）溶接金属 （600 合金系溶接金属）
	適用部位	管台及び配管の周溶接	管台及び配管の周溶接
残留応力改善に関する基本支配因子	最高到達温度 T_{max}	ｵｰｽﾃﾅｲﾄ系ｽﾃﾝﾚｽ鋼： 550℃≦ $Tmax$ ＜650℃ 高ﾆｯｹﾙ合金（ﾆｯｹﾙｸﾛﾑ鉄合金）溶接金属： 550℃≦ $Tmax$ ＜650℃ 低合金鋼：500℃≦ $Tmax$ ＜ 595℃ （注：溶接規格の PWHT 規定温度未満）	ｵｰｽﾃﾅｲﾄ系ｽﾃﾝﾚｽ鋼： 550℃≦ $Tmax$ ＜650℃ 高ﾆｯｹﾙ合金（ﾆｯｹﾙｸﾛﾑ鉄合金）溶接金属： 550℃≦ $Tmax$ ＜650℃ 低合金鋼：500℃≦ $Tmax$ ＜ 595℃ （注：溶接規格の PWHT 規定温度未満）
	昇温時間ﾊﾟﾗﾒｰﾀ Fo *2	$0.04 \leqq Fo \leqq 0.08$	$0.04 \leqq Fo \leqq 0.50$
	移動速度 v	$vh \geqq 111\text{mm}^2/\text{s}$	$vh \geqq 15\text{mm}^2/\text{s}$
	周方向加熱幅 W *2	$1.7\times\sqrt{rh} \leqq W \leqq 4.0\times\sqrt{rh}$	$1.0\times\sqrt{rh} \leqq W \leqq 4.0\times\sqrt{rh}$
	軸方向加熱幅 L	$3\times\sqrt{rh}$　以上	$3\times\sqrt{rh}$　以上
施工回数*3		３回以下	３回以下

r：平均半径　h：板厚　　k：熱拡散率

v：ﾚｰｻﾞ光源の移動速度

τ_o：外面が 100℃から最高温度まで加熱されるのに要する昇温時間

昇温時間ﾊﾟﾗﾒｰﾀ：$Fo = \tau_o \times k / h^2$

W：最高温度まで加熱するのに有効な周方向加熱幅（$=\tau_o \times v$）

L：外面が所定温度に加熱されている領域の軸方向長さ

*1　外径と板厚は溶接金属での値とし，図面などの資料もしくは現物の調査により確認する。なお，外径と板厚の範囲は公称値である。

*2　Fo と Wは溶接部での温度計測結果を用いて評価する。

*3　施工の１回は２周が１セットである。

（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、施工外表面に異常が生じていないことを目視にて確認する。

予防保全工法ガイドライン
［外面からの入熱による応力改善方法］

編集者　有限責任中間法人　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　有限責任中間法人　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

© 日本原子力技術協会，2008　本書に掲載されたすべての記事内容は，日本原子力技術協会の許可なく，転載・複写することはできません。