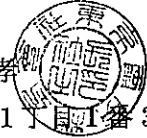


法令適用事前確認手続  
照会書

原管発官 22 第 371 号  
平成 22 年 12 月 7 日

原子力発電検査課長 殿

東京電力株式会社  
取締役社長 清水 正孝  
東京都千代田区内幸町 1 丁目 1 番 3 号



下記について、照会をします。

なお、照会及び回答内容が公表されることに同意します。また、照会対象法令（条項）の性質上照会者名を公にすることが回答に当たって必要とされる場合には、照会者名が公表されることに同意します。

記

1. 法令名及び条項

- ① 電気事業法第 52 条第 1 項に基づく溶接事業者検査
- ② 電気事業法第 55 条第 2 項及び第 3 項に基づく評価

2. 実現しようとする自己の事業活動に係る具体的な行為

- ① 欠陥を有する原子炉冷却材再循環系配管等に高周波誘導加熱応力改善法（以下、「対策 IHSI」という。）を施工するに際し、既存の欠陥の無い配管に施工する高周波誘導加熱応力改善法（以下、「予防保全 IHSI」という。）の溶接施工法（既設継手溶接時の溶接施工法と同等の内容に、IHSI 条件を付加した溶接施工法。溶接施工法整理番号は適用継手に応じて溶接事業者検査要領書にて申請している。）（以下、「IHSI が付加された溶接施工法」という。）を適用し、溶接事業者検査は、予防保全 IHSI と同様に溶接後熱処理として確認すべき事項（施工条件を満足すること）を満足した施工がなされていることを確認するとともに、配管溶接実施時の記録を確認する検査を実施する。なお、対策 IHSI を施工するにあたっては、予防保全 IHSI 施工の施工条件に加えて、定期事業者検査で確認した欠陥深さを溶接事業者検査前確認事項として確認するものとする。
- ② 対策 IHSI を施工した欠陥の技術基準への適合性を確認する評価について、予防保全 IHSI の評価結果を用いて評価する。

3. 当該行為と照会対象法令（条項）の規定との関係についての自己の見解

- ① 現在、予防保全 IHSI を適用するにあたっては、溶接後熱処理として電気事業法第 52 条第 1 項に基づく溶接事業者検査を実施しており、電気事業法第 39 条第 1 項に定める「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令（以下、「技術基準」という。）第 9 条第

15号に適合していることを確認しなければならない。実機に適用されている予防保全IHSIについては、溶接後熱処理として確認すべき項目（施工条件を満足すること）を満足した施工がなされていることを確認するとともに、溶接実施時の記録を確認する検査を行い、技術基準に適合していることが確認されている。

上記2.で適用しようとする対策IHSIについては、添付資料に示すとおり、(財)発電設備技術検査協会確性試験委員会「欠陥を有する継手へのIHSI適用に関する確性試験委員会」(同報告書(19確S1号))及び「補修IHSIの適用性に関する確性試験」(19確S2号)(以下、「確性試験」という。)において、IHSIが付加された溶接施工法に規定されている施工条件の範囲において、新たにき裂深さの条件を付与した試験を行い、技術基準の要求する性能を有することが確認されている。

したがって、上記2.で適用しようとする対策IHSIは、確性試験で確認されたき裂深さの範囲において、IHSIが付加された溶接施工法を適用できるものとする。また、溶接事業者検査においては、予防保全IHSIと同様、溶接後熱処理として確認すべき項目(施工条件(欠陥深さの確認含む)を満足すること)を満足した施工がなされていることを確認するとともに、溶接実施時の記録を確認する検査を行うことで、技術基準への適合が確認できるものとする。

- ② 上記2.で適用しようとする対策IHSIについては、添付資料に示すとおり、対策IHSIを施工することにより、欠陥の先端部は延性破壊には至らない程度の塑性変形を与えられて、施工後には欠陥先端部に圧縮応力が残留することにより、SCC及び疲労による欠陥の進展が抑制されるものとなる。き裂進展評価に用いる対策IHSI後の残留応力は、対策IHSI後の残留応力(き裂有り)と、き裂無しでIHSIを施工した後き裂を想定した残留応力とほぼ同じであることが確認されたことから、対策IHSI後の評価に用いる残留応力は欠陥のない配管へのIHSIを施工した残留応力である予防保全IHSI後の残留応力を用いることで、妥当な評価ができると考える。

#### 4. 公表の遅延の希望

なし

#### 5. 連絡先 <非公開>

以上

欠陥を有する配管系に対する IHSI（対策 IHSI）の技術基準への適合性について

## 1. はじめに

原子炉再循環系配管等の応力腐食割れ（以下 SCC と呼ぶ）の予防保全技術の一つである高周波誘導加熱応力改善法（以下 IHSI と呼ぶ）は、確性試験等において溶接残留応力を改善する効果が確認され、多くのプラントに適用されている。この予防保全工法としての IHSI は、欠陥が存在しない状態で適用することとしており、事前検査にて欠陥が確認された場合には、現状、継続使用・補修・取替の選択肢の中から状況に応じた手法が適用されている。

また、欠陥を有する配管への IHSI 施工により、欠陥の進展を抑制させる効果が確認される場合には、補修等の選択肢が増え、作業環境等に配慮した補修工法が適用できることから、欠陥を有する配管系への IHSI 施工の有効性を確認する確性試験が実施された。

ここでは、確性試験において技術確認された技術的妥当性の内容を踏まえ、技術基準への適合性を評価、検討した。

- ① （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）  
（以下、「19 確 S1 号」）
- ② （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）（以下、「19 確 S2 号」）

## 2. 工法概要

IHSI は配管外面側に高周波加熱コイルを設置して加熱を行い、内面は水冷することで板厚方向に温度分布を形成し、その発生する熱応力で配管内面の残留応力を改善する工法である（図－1（1）参照）。

IHSI は、図－1（2）に示すように、以下のようなメカニズムにより残留応力を改善する。

(1)配管溶接部内面を水冷しながら、外面側を高周波誘導加熱により加熱し、板厚方向に大きな温度差（板厚内の温度分布はほぼ直線的）を生成させる。

加熱中は、外面側の加熱範囲は熱膨張により伸びようとするが、加熱範囲外は温度が低いため伸びが抑制され、圧縮応力が発生する。この外面側の応力と釣り合うように、内面側は引張応力が発生する。最高加熱温度時には、外面側では熱膨張による伸びが最大となり圧縮の降伏が生じ、内面側では、引張の降伏が生じる。（①施工中）

(2)次に内面冷却を継続しながら外面からの加熱を停止すると、板厚方向の温度差が縮小し、熱荷重が除荷されることから、加熱により配管内外面で降伏した状態から、加熱過程で生成された外面側の圧縮応力は引張応力、内面の引張応力は圧縮応力に変化する。（②施工後）

き裂を有する部位に IHSI を施工した場合については、図－1（3）に示すように、以下のようなメカニズムにより残留応力を改善する（残留応力の評価結果については、図－1（4）参照）。

(1)配管溶接部内面を水冷しながら、外面側を高周波誘導加熱により加熱し、板厚方向に大きな温度差（板厚内の温度分布はほぼ直線的）を生成させる。

加熱中は、外面側の加熱範囲は熱膨張により伸びようとするが、加熱範囲外は温度が低いため伸びが抑制され、圧縮応力が発生する。この外面側の応力と釣り合うように、内面側引張応力が発生する。このとき、内面側にき裂が存在すると、き裂先端部で引張り応力が集中する。（②加熱中）

(2)最高加熱温度時は(1)の状態が顕著となり、外面側では熱膨張による伸びが最大となり圧縮の降伏が生じ、き裂先端は引張応力が降伏応力に至り、延性破壊には至らない程度に引張塑性域が最大となり、鈍化する。（③最高加熱温度時）

(3)次に内面冷却を継続しながら外面からの加熱を停止すると、板厚方向の温度差が縮小し、熱荷重が除荷されることから、加熱過程で生成された塑性域内で外

面側の圧縮応力は引張応力、内面の引張応力は圧縮応力に変わり、き裂先端部についても引張塑性域内の引張応力が減少し、き裂先端から圧縮塑性域が発生・拡大する。(④加熱終了後冷却時)

(4)IHSI 施工後は(3)が更に顕著となり、外面は引張応力、き裂先端は圧縮応力が残留する。(⑤IHSI 施工後)

板厚の 3/8 以下の深さの欠陥を有する配管については、これらの効果により欠陥の進展が抑制され、欠陥を有する配管への IHSI 適用は、対策工法としての効果を有することから、従来の予防保全工法としての IHSI (以下予防保全 IHSI と称する) と区別するために、『対策 IHSI』と呼称することとする。

### 3. 確性試験結果の整理

対策 IHSI の有効性は以下の観点に着目し確認している。以下に確性試験結果概要を示す。

① き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。

き裂を有する試験体へ対策 IHSI を施工することで、き裂が対策 IHSI 加熱中に有意に進展しないこと、材料の機械的性質に悪影響が生じていないことを、超音波探傷試験(UT)サイジング、硬さ計測、断面観察等により確認している。その結果、き裂先端からの延性破壊の兆候、き裂先端の極端な硬さ上昇、材料特性の特異な変化の無いことが確認されている。

② き裂先端部での応力が改善され、き裂の進展性が抑制されること。

対策 IHSI の効果についてき裂を模擬した条件で解析した結果、き裂先端に圧縮応力場が形成されることが確認されており、き裂の進展が抑制されると考えられる。また、塩化マグネシウム水溶液(以下  $MgCl_2$  と呼ぶ)浸漬試験により SCC を模擬した板厚の 3/8 程度の深さのき裂を付与し、対策 IHSI 施工した試験体を再度  $MgCl_2$  浸漬試験を行い、き裂が有意に進展しないことを、UT サイジングと断面観察により確認している。その結果、対策 IHSI 施工前から存在するき裂 (以下主き裂と呼ぶ) は先端の応力が低減され、き裂の進展性が抑制されることが確認されている。

③ き裂の近傍における対策 IHSI による残留応力改善効果を確認する。

対策 IHSI 前後の残留応力分布の比較において、対策 IHSI 後の方が対策 IHSI 施工前に比べ、残留応力が低減されていることが確認されている。管内表面のき裂近傍の対策 IHSI 効果確認のため、模擬き裂を有する試験体に対策 IHSI 施工していないもの(以下 As Welded と呼ぶ)、対策 IHSI 施工したものを  $MgCl_2$  浸漬し、新たなき裂の発生有無について内面の浸透探傷試験(以下 PT と呼ぶ)及び断面観察により確認している。その結果、対策 IHSI 施工していないものは、ほぼ全周に新たなひびが確認されたが、対策 IHSI 施工したものは放電加工(以下 EDM と呼ぶ)き裂近傍のみ新たなひびが確認された。また、き裂先端部においては対策 IHSI を施工したものについては新たなひびは確認されず、対策 IHSI 施工することで新たなき裂の発生は As Weld より改善されることが確認されている。但し、 $MgCl_2$  浸漬試験により主き裂周辺の限定的な範囲から新たなき裂(副次き裂)発生の可能性は否定できないことが確認されている。なお、 $MgCl_2$  浸漬試験は微小な応力でも SCC が発生する試験であり、実機環境を考慮すると同様なき裂が発生する可能性は小さいと考えられる。

④ き裂の存在しない健全部においては予防保全 IHSI と同等の効果があること

管内表面のき裂部以外の対策 IHSI 効果確認のため、EDM き裂を有する試験体に対策 IHSI 施工後  $MgCl_2$  浸漬試験を実施し、き裂部以外は新たなひびが発生しないことを内面 PT により確認している。その結果、き裂部以外は新たなひびが発生しないことが確認されている。また、別途実施した残留応力測定結果において、十分な応力低減効果があることが確認されており、健全部は予防保全 IHSI と同等の効果があることが確認されている。

確性試験の詳細を添付資料 1-1, 1-2 に示す。

#### 4. 適用条件

対策 IHSI と従来の予防保全 IHSI と比較した場合、IHSI の施工プロセスそのものは同じである。予防保全 IHSI と、対策 IHSI の施工条件等の比較を参考資料に示す。対策 IHSI として新たに確認すべき事項は、以下の適用可能なき裂寸法を施工前に確認することとなる。

適用き裂寸法 深さ：板厚の 3/8 以下，長さ：全周以下

(それぞれの確性試験にて確認された詳細な適用条件は別紙 1-1, 1-2 参照)

#### 5. 検討の観点

対策 IHSI 工法に関して、以下の観点で検討する。なお、技術的妥当性については、確性試験の審議結果を確認する。

- ・ 対策 IHSI に関して、確性試験委員会にて確認された結果に基づき、技術基準（省令 62 号第 9 条第 15 号及び 9 条の 2）、同省令の解釈、技術基準の仕様規格（日本機械学会溶接規格及び設計・建設規格）及びき裂の解釈（経済産業省原子力安全・保安院文書「発電用原子力設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について）への適合性を確認する。
- ・ 実機での運用方法の明確化を行う。（評価方法，検査頻度を含む）

#### 6. 技術基準への適合性確認結果

本作業会では確性試験の結果を確認し、以下の通り、技術基準（省令 62 号第 9 条第 15 号及び第 9 条の 2）の各条項への適合性を確認した。なお、確認されたき裂に関しては、第 9 条の 2 にて取り扱うものとする。

表 1 に技術基準の仕様規格である溶接規格，設計・建設規格及び維持規格の各規定に対する適合性確認の結果を整理する。

##### (1) 省令 62 号第 9 条第 15 号への適合性確認結果

対策 IHSI の確性試験の結果，施工プロセスは予防保全 IHSI と同様の施工法であることが確認されている。対策 IHSI の省令第 9 条第 15 号への適合性については，以下に示すとおり，予防保全 IHSI と同様，主に新たに溶接後熱処理として確認すべき項目（施工の前提条件と，施工時の E.V.を満足すること）を満足した施

工がなされていることを確認するとともに、溶接実施時の記録により確認する。なお、対策 IHSI 施工可否（き裂寸法が板厚の 3/8 以下、かつ第 9 条の 2 に適合していること）については、UT（定事検）記録にて、溶接事業者検査前確認事項として確認される。

(イ) 不連続で特異な形状でないものであること。

『不連続で特異な形状でないものであること。』とは溶接時の開先や母材を対象としており、対策 IHSI 施工前に確認されているき裂や欠陥に関しては省令 62 号第 9 条の 2 において取り扱うものとする。従って、当該規定への適合性確認は対策 IHSI 施工対象継手に対して溶接実施時の記録で再確認するものとするが、対策 IHSI 施工対象継手の設計は日本機械学会設計・建設規格の規定「PPB-4000 溶接部の設計」（以下 PPB-4000 と呼ぶ）を満足する開先設計となっており、不連続で特異な形状でないものであることから技術基準に適合するものと判断する。

(ロ) 溶接による割れが生ずるおそれがなく、かつ、健全な溶接部の確保に有害な溶込み不良その他の欠陥がないことを非破壊試験により確認したものであること。

溶接部の設計・形状は PPB-4000 を満足しており、溶接の条件はあらかじめ取得した溶接施工法に従い施工されているため、溶け込み不良その他の欠陥を生じがたいものであるとともに、溶接実施時の放射線透過試験(以下 RT と呼ぶ)において、溶接による割れ・有害な溶込み不良その他の欠陥がないことが確認されている。

また、対策 IHSI は新たに溶接を行うものではないものの、便宜上、当該継手に対する溶接後熱処理の位置づけとして整理するものとし、当該溶接部に悪影響を及ぼさないことは、施工法確認試験時に確認されている。さらに、対策 IHSI 施工後に溶接事業者検査として実施する PT にて、配管外面での溶接部の健全性を確認することで、溶接部の外表面に有害な欠陥がないことが確認される。

以上のことから技術基準に適合するものと判断する。

(ハ) 適切な強度を有するものであること。

溶接時においては、あらかじめ実施する施工法確認試験時に母材の強度と同等



以上であることが確認されている。また、対策 IHSI の施工に当たっては確認済みの予防保全 IHSI の施工法の E.V.を満足するように行うため、母材と同等以上の強度を有するものであると判断されることから技術基準に適合するものと判断する。

なお、き裂が板厚の  $3/8t$  以下であり、且つ、省令 62 号第 9 条の 2 に適合していることが別途確認されるとともに、対策 IHSI 施工後には、耐圧試験を行い当該継手の健全性が確認される。

(二) 機械試験等により適切な溶接施工法等であることをあらかじめ確認したものにより溶接したものであること。

施工対象継手部は、溶接施工法取得時に機械試験を実施し適切な施工法であることを確認したうえで溶接を実施し、当時の溶接検査に合格している。

また、溶接後に施工する予防保全 IHSI に関しては予防保全 IHSI を含む施工法取得時に機械試験によりその適切性はあらかじめ確認されている。

ここで、対策 IHSI の E.V.は、従来の予防保全 IHSI と同じで、適用き裂寸法のみ付加したものであることから、従来の予防保全 IHSI の溶接施工法を用いて施工することで問題ないものと判断する。(図 2 に溶接施工法での確認事項と確性試験にて確認した事項との関係を整理して示す。)

以上のことから技術基準に適合するものと判断する。

(2) (使用中のき裂等による破壊の防止) 第 9 条の 2

(イ) 対策 IHSI 施工によるき裂の性状の変化について

対策 IHSI 施工前後でのき裂の性状は、『対策 IHSI 施工によってき裂の先端部は延性破壊には至らない程度の塑性変形を与えられて鈍化し、施工後にはき裂先端部での応力場が圧縮応力場が変わることにより、SCC 及び疲労によるき裂の進展が抑制される』状態に変化する。よって対策 IHSI 施工後の主き裂については、SCC 及び疲労による進展性が抑制されたき裂もしくはその他の欠陥として整理し、技術基準(省令 62 号第 9 条の 2)の各条項への適合性を確認した。

(ロ) (使用中のき裂等による破壊の防止) 第 9 条の 2 への適合性

UT(定事検)にて検出された溶接部近傍の配管内表面に存在する欠陥に関しては、9 条の 2 において取り扱う。表 2 に IHSI 施工前後での UT 検査の位置づ

けを、また表－3に IHSI 施工前後での検査の運用手順を整理して示す。

対策 IHSI の第 9 条の 2 への適合性については、UT（定事検）の結果を用い、『き裂の解釈』に基づく評価結果が適合することを確認する。この場合、き裂進展評価に用いる対策 IHSI 後の溶接残留応力は、欠陥のない配管への IHSI を施工した残留応力を用いることで、妥当な評価ができると判断する。検討結果を添付資料 2 に示す。

## 7. 施工後の効果の確認

対策 IHSI 施工後の主き裂先端部は、IHSI 施工によってき裂の先端部が延性破壊には至らない程度の塑性変形を与えられて鈍化し、IHSI 施工後にはき裂先端部での応力場が圧縮応力場が変わることにより、SCC 及び疲労によるき裂の進展が抑制される。き裂の解釈に基づく評価の結果、進展が無いと評価される場合にあっては、SCC による進展を前提にした検査をする必要は無いと考えられるが、実機における進展抑制効果確認の観点から、当初の 5 年間については、保守的にき裂の解釈における SCC に対する点検周期にて検査を行い、進展状況を確認する。また、その確認結果を踏まえ、き裂の解釈によらず維持規格の継続検査として実施することが妥当か判断する。

また、確性試験において、主き裂周辺の限定的な範囲で副次き裂の発生の可能性は否定できないことが確認されているが、副次き裂は主き裂を超えて進展する可能性が極めて低いことから、主き裂の継続検査を行うことで、当該部位の健全性は確保されるものと判断する。

## 8. まとめ

以上のとおり、対策 IHSI 工法は、技術基準に適合するものであることを確認した。加えて実機での運用方法の明確化を行った。

以上

表1: 対策HSIと省令62号第9条第15号、第9条の2との関連

				対策HSI(既設継手+HSI)における適合性	確認		備考(確性試験での確認結果との対応等)
					確性試験	溶接事業者検査	
第九条(材料及び構造)	-	-	-	-	-	-	-
十五 クラス1容器、クラス1管、クラス2容器、クラス2管、クラス3容器、クラス3管、クラス4管及び原子炉格納容器のうち主要な溶接部(溶接部、溶接部及び熱影響部)については、次に示すこと。	17 第15号イに規定する「不連続で特異な形状でないもの」とは、溶接部の設計において、溶接部の開先等の形状に配慮し、鋭い切欠き等の不連続で特異な形状でないものをいう。	N-5010 溶接部の設計 PPB-4000 溶接部の設計		PPB-4000を満足する開先設計となっているため、不連続で特異な形状ではないものと判断する。なお当該継手溶接時に溶接検査にて確認済みと考える。 対策HSI施工に関しては溶接事業者検査として、建設時の記録確認を行うものとする。	-	○	『イ 不連続で特異な形状でないものであること。』とは溶接時の開先や母材を対象としており、供用開始後に発生したき裂や欠陥に関しては9条の2において取り扱う。従って、対策HSIの場合も建設時の記録確認とする。
		N-5140 準用 (N-1060 溶接部による継手面の食違い)	○	開先形状は当該規格を満足するよう設計されている。なお当該継手溶接時に溶接検査にて確認済みと考える。 対策HSI施工に関しては溶接事業者検査として、建設時の記録確認を行うものとする。	-	○	-
		N-5140 準用 (N-1070 厚さの異なる母材の溶接)	○	開先形状は当該規格を満足するよう設計されている。なお当該継手溶接時に溶接検査にて確認済みと考える。 対策HSI施工に関しては溶接事業者検査として、建設時の記録確認を行うものとする。	-	○	-
ロ 溶接による割れが生ずるおそれなく、かつ、健全な溶接部の確保に有害な溶込み不良その他の欠陥がないことを非破壊試験により確認したものであること。	18 第15号ロに規定する「溶接による割れが生ずるおそれなく」とは、溶接後の非破壊試験において割れがないことに加え、溶接時の有害な欠陥により割れが生じるおそれがないことをい、「健全な溶接部の確保に有害な溶込み不良その他の欠陥がないこと」とは、溶接部の設計及び形状が溶込み不足を生じがたいものであり、溶接部の表面及び内部に有害な欠陥がないことをいう。 19 第15号ロに規定する「非破壊試験」は、放射線透過試験、超音波探傷試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、目視試験等という。	N-5010 溶接部の設計 PPB-4000 溶接部の設計	○	溶接部の設計・形状はPPB-4000を満足しており、溶接及び対策HSIの条件はあらかじめ取得した溶接施工法に依り施工がなされるため、『溶接部の設計及び形状が溶込み不足を生じがたいもの』であると判断する。また、溶接後の非破壊試験の結果を施工時の記録にて確認するため、『溶接による割れがないこと』が確認されると判断する。 溶接後に実施する対策HSIは新たに溶接を行うものではなく、便宜上、当該継手に対する熱処理の位置づけであり、当該継手の溶接部に悪影響を及ぼさないこと、施工法取得時に確認されている。加えて対策HSI後PT(溶接)検査にて、配管外面での溶接部の健全性を確認するため、『溶接部の外面に有害な欠陥がないこと』が確認されると判断する。	○	○	供用開始後に発生したき裂や欠陥に関しては9条の2において取り扱うものとする。
		N-5140 準用 (N-1020 溶接部の制限)	○	炭素含有量が0.35%を超えない母材であり、適合する。なお当該継手溶接時に溶接検査にて確認済みと考える。 HSI施工に関しては溶接事業者検査として、建設時の記録確認を行うものとする。	-	○	-
		N-5140 準用 (N-1030 開先面)	○	開先面およびその付近の必要部分は溶接に先立ち、水分など、その他の有害な異物を除去し、その後検査を実施することから適合する。なお当該継手溶接時に溶接検査にて確認済みと考える。 HSI施工に関しては溶接事業者検査として、建設時の記録確認を行うものとする。	-	○	-
		N-5140 準用 (N-1040 溶接部の強度等(2))	○	認可された施工法に基づき溶接を実施し、かつ規定の非破壊検査を実施しているため、適合する。なお当該継手溶接時に溶接検査にて確認済みと考える。 HSI施工に関しては溶接事業者検査として、建設時の記録確認を行うものとする。加えてHSI施工後にPT(溶接)検査を実施することで配管外面の健全性が確認される。	-	○	-
		N-5050 クラス1配管の溶接部(1)	○		-	○	-
		N-5140 準用 (N-1080 継手の仕上げ)	○	規定の非破壊試験を実施するために規格を満足する仕上げがなされており、適合する。なお当該継手溶接時に溶接検査にて確認済みと考える。 (HSI前後UT及びHSIのUTが実施可能な仕上げを実施している。)	-	○	-
		N-5140 準用 (N-1090 溶接後熱処理)	○	施工対象の母材はP-8に区分されるため、溶接後熱処理を要さない。なおHSIは便宜上、溶接後熱処理として運用しているが、その際には施工法にて規定されているエッセンシャルリアプルスに適合する施工を実施しており、溶接事業者検査にて確認される。	-	◎	-
		N-5140 準用 (N-1100 非破壊試験)	○	溶接時に規定の非破壊試験を実施しており適合する。なお当該継手溶接時に溶接検査にて確認済みと考える。 HSI施工に関しては溶接事業者検査として、溶接部のPT(溶接)記録確認を行うものとする。加えてHSI施工後に技術基準に適合するPT(溶接)検査を実施する。	-	○、◎	確性試験において欠陥を有する配管にHSIを施工する場合(対策HSI)、確性試験にて確認された記録もあれば、悪影響を及ぼさないことは確認済みである。
ハ 適切な強度を有するものであること。	20 第15号ハに規定する「適切な強度を有する」とは、母材と同等以上の機械的強度を有するものであることという。	N-5140 準用 (N-1040 溶接部の強度等(1))	○	あらかじめ溶接施工法を取得することによって母材の強度と同等以上であることが確認され、これと同じ方法によって溶接を行っていることを記録にて確認し、かつ、エッセンシャルリアプルスに適合する対策HSIを行うため、実際においても母材の強度と同等以上の強度が確保されると判断される。	-	○	-
		N-5050 クラス1配管の溶接部(2)機械試験	-	施工対象継手は継手区分: 5であることから要求される機械試験は破壊性試験となるが、母材の区分がP-8であり、溶接金属はオーステナイト系ステンレス鋼であることから、破壊性試験を実施することを要しない。	-	-	-
		N-5140 準用 (N-1110 機械試験)	-		-	-	-
		N-5140 準用 (N-1120 再試験)	-		-	-	-
		N-5140 準用 (N-1130 耐圧試験)	-	素線の耐圧試験で確認することから適合する。 (溶接のみの状態でも当該継手施工時に溶接検査の耐圧にて確認済み。)	-	◎	-
ニ 機械試験等により適切な溶接施工法等であることをあらかじめ確認したものであり、溶接施工法、溶接検査及び溶接士技能について適切であることをあらかじめ確認したものをいう。当該溶接施工法等による溶接施工について、機械試験等により確認するものとする。	21 第15号ニに規定する「適切な溶接施工法等」とは、あらかじめ確認したものは、溶接施工法、溶接検査及び溶接士技能について適切であることをあらかじめ確認したものをいう。当該溶接施工法等による溶接施工について、機械試験等により確認するものとする。	N-0030 溶接施工法 第2部 溶接施工法認証標準	○	対策HSIを施工対象の溶接部はあらかじめ溶接施工法を取得し、これに適合するもので申請を行った上で溶接を行っているため、溶接施工法について適切であることがあらかじめ確認できると判断する。加えて溶接施工法取得時に機械試験を実施するため、機械試験等による確認があらかじめ成されていると判断する。 溶接後に施工するHSIに関しては当該溶接部にHSIを施工する施工法取得時に機械試験を実施しているため、機械試験等による確認があらかじめ成されていると判断する。	-	○	-
		N-0040 溶接設備	○	あらかじめ溶接施工法を取得し、これに適合するもので申請を行った上で溶接を行うため、溶接設備について適切であることがあらかじめ確認できると判断する。 対策HSI施工に関しては溶接事業者検査として、建設時の記録確認を行うものとする。	-	○	-
		N-0050 溶接士 第3部 溶接士技能認証標準	○	あらかじめ溶接士の技能に係る試験を実施し、これに適合するもので申請を行った上で溶接を行うため、溶接士技能について適切であることがあらかじめ確認できると判断する。 HSI施工に関しては溶接事業者検査として、建設時の記録確認を行うものとする。	-	○	-

注: 『確認』のうち、溶接事業者検査の項目の判別は、○: 溶接施工時の記録確認、◎: 対策HSIに対する検査項目を示す。

				対策HSI(既設継手+HSI)における適合性	確認		備考(確性試験での確認結果との対応等)
					確性試験	溶接事業者検査	
(使用中のき裂等による破壊の防止) 第九条の二							
1 使用中のクラス1機器、クラス1支持構造物、クラス2機器、クラス2支持構造物、クラス3機器、クラス4管、原子炉格納容器、原子炉格納容器支持構造物及び炉心支持構造物には、その破壊を引き起こすき裂その他の欠陥があつてはならない。	第1項に規定する「その破壊を引き起こすき裂その他の欠陥があつてはならない」とは、「発電原子力炉設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈については(平成21年2月27日付け平成21-02-18内閣第2号)※の規定に適合するものであること。」 ※き裂の解釈と呼称する。			対策HSI(既設継手)にて検出された溶接部近傍の配管内表面に存在する欠陥に関しては、対策HSI(既設継手)の結果も踏まえ、『き裂の解釈』に基づく評価結果が適合すれば、技術基準への適合性は確認できると考える。この場合、評価手法のうち、対策HSI後の溶接検査応用が欠陥のない配管へのHSIを施工した残留応力を用いることで、妥当な評価ができると判断する。	-	-	確性試験において、適用可能法以下のき裂及び継手に悪影響を及ぼさないこと、及びき裂の進展性が抑制されていることが確認されている。
2 使用中のクラス1機器の耐圧部分には、その耐圧部分を通ずるき裂その他の欠陥があつてはならない。					○	『き裂の解釈』	

表2:IHSI施行前後でのUT検査の位置づけ

区分	IHSI施工前UT	IHSI施工後UT
ひびの無い場合 (従来IHSI)	<p>定期事業者検査として実施。</p> <p>IHSI施工前にひびが無いことを確認するために実施。</p>	<p>定期事業者検査として実施。</p> <p>IHSI施工後に継手が健全であることを確認すると共に、溶接部に対する熱処理と便宜上の位置づけを行っているIHSIの施行後のPSI記録としても運用。</p>
ひびの有る場合 (対策IHSI)	<p>定期事業者検査として実施。</p> <p>ひびのサイジングを行い、当該継手の余寿命を確認する。この場合、5年間の健全性を確認し、かつ欠陥寸法が確性試験:19確S1号での確認範囲であるならば、IHSIを施行することが可能となる。</p>	<p>定期事業者検査として実施。</p> <p>IHSI施工が当該欠陥に悪影響を及ぼしておらず、有意差が無いことを確認する。ただし、IHSI施工によって当該欠陥に悪影響を及ぼさないことは基本的には確性試験の範疇で確認済みである。</p> <p>加えて溶接部に対する熱処理と便宜上の位置づけを行っているIHSIの、施工後のPSI記録としても運用。</p>

表3:IHSI施工前後での検査の運用手順

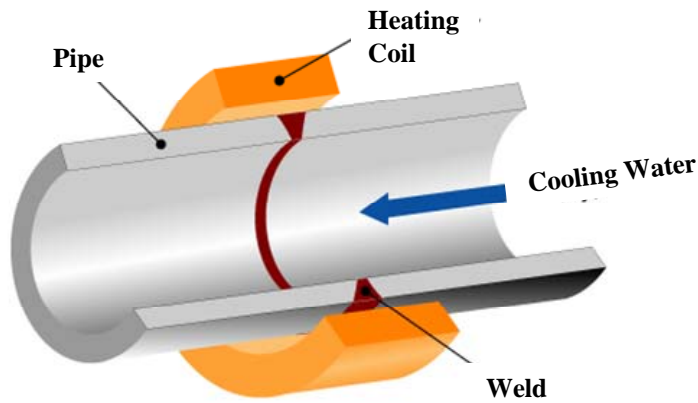
対策IHSI

手順		定期事業者検査	溶接事業者検査
1	IHSI前UT	○	
2	UTサイジング	○	
3	維持基準評価(5年を満足)	○	
4	IHSI施行前準備		*1
5	IHSI前の記録確認 既設の溶接記録 既設の検査記録(RT含む) 材料/溶接材料の確認 等		○(記録確認)
6	IHSI施工		○
7	PT		○
8	UT(サイジング含む)	○	
9	IHSI後の評価		○
10	維持基準評価(5年を満足)	○	
11	耐圧試験		○

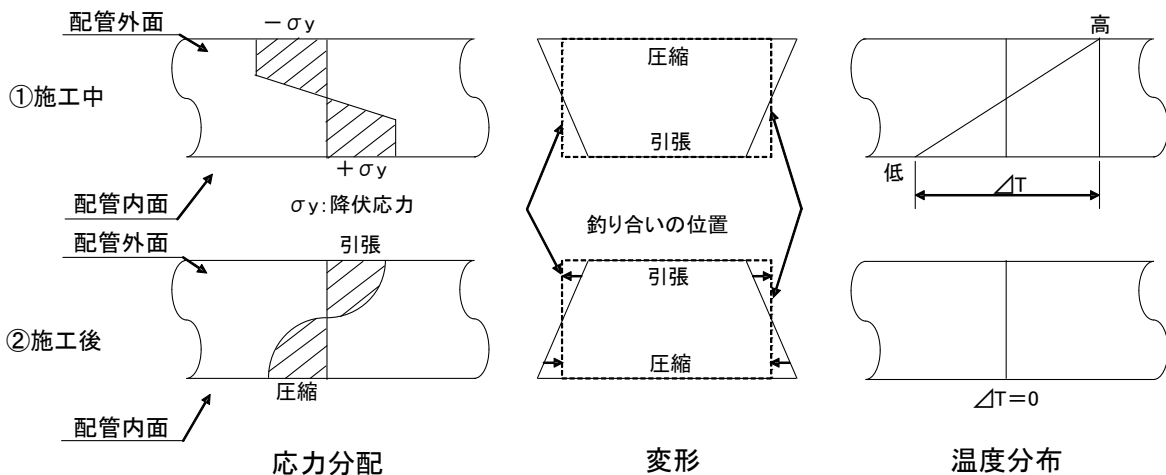
予防保全IHSI

手順		定期事業者検査	溶接事業者検査
1	IHSI前UT	○	
2	UTサイジング		
3	維持基準評価(5年を満足)		
4	IHSI施行前準備		*1
5	IHSI前の記録確認 既設の溶接記録 既設の検査記録(RT含む) 材料/溶接材料の確認 等		○(記録確認)
6	IHSI施工		○
7	PT		○
8	UT(サイジング含む)	○	
9	IHSI後の評価		○
10	維持基準評価(5年を満足)		
11	耐圧試験		○

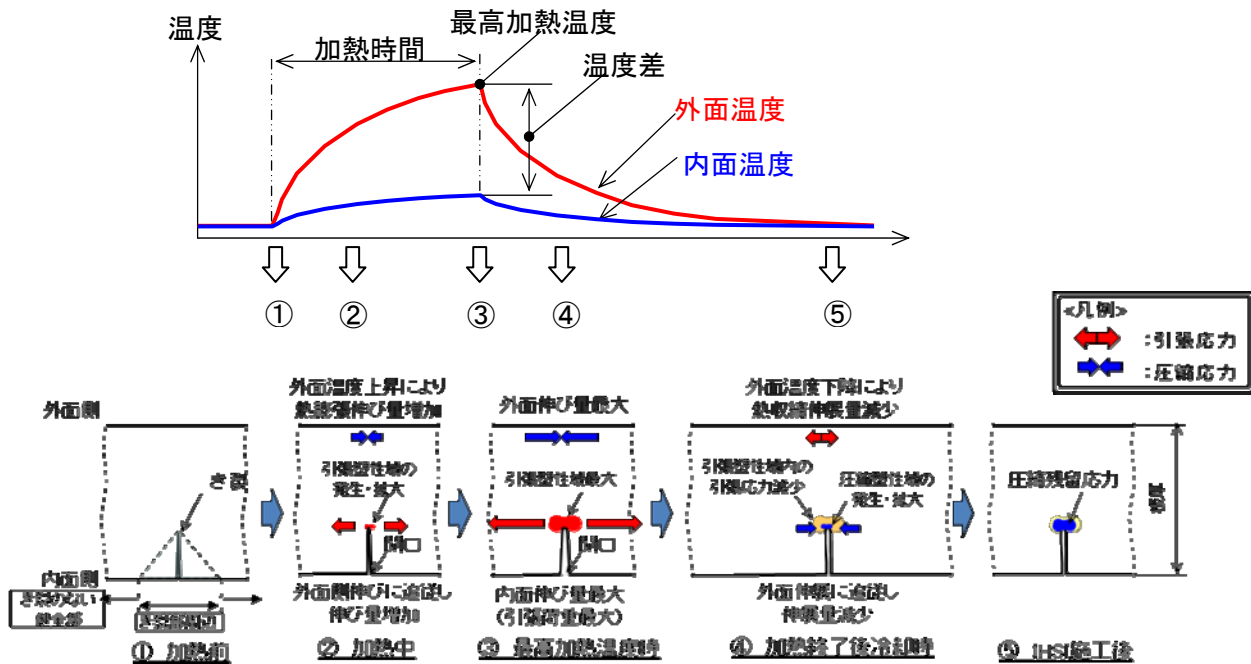
\*1: IHSI施工条件(エッセンシャルバリアブルス)を確認する。合せて検査前準備として、定期事業者検査において欠陥が確認された場合には、その欠陥の大きさを定期事業者検査記録で確認するとともに、その大きさがIHSIの施工が可能な寸法以下であることを確認する。



(1) IHSI 施工概要



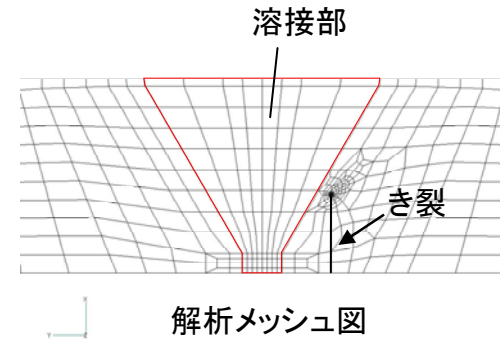
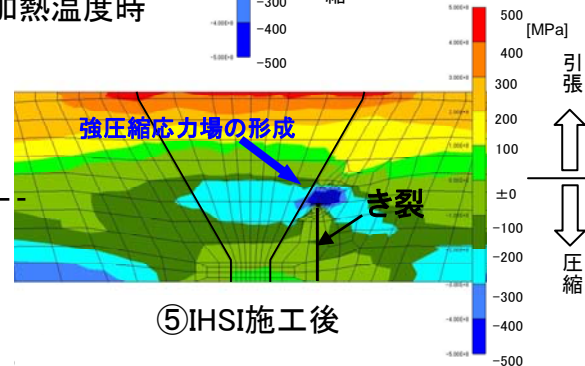
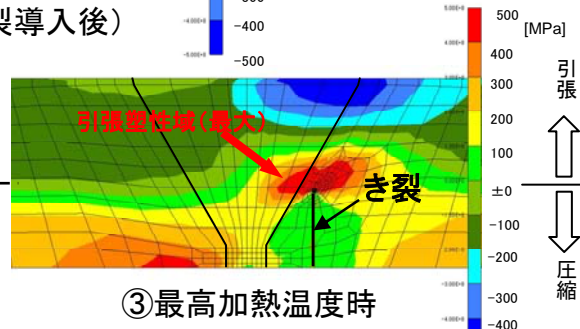
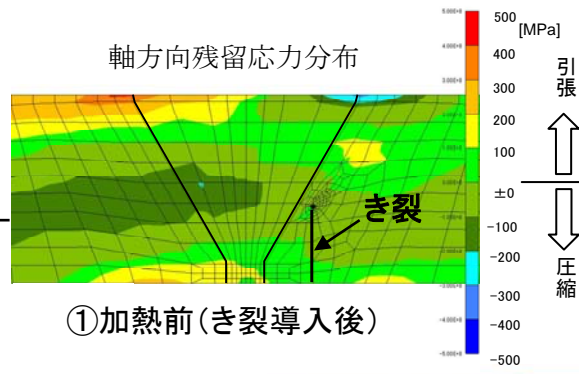
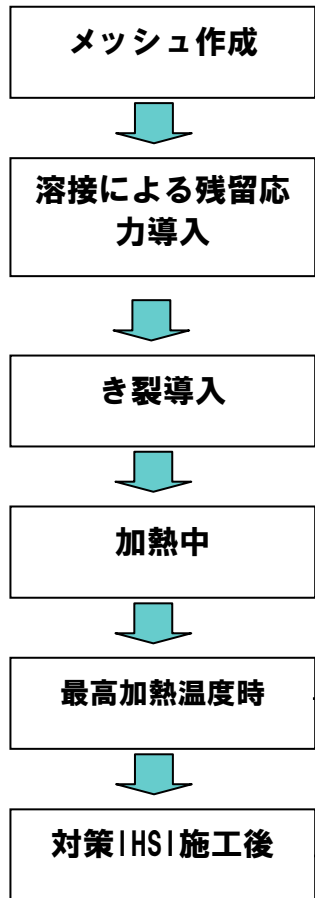
(2) IHSI の原理概要



(3) 対策 IHSI の効果概要

図-1 IHSI 施工状況概要及び原理の概要

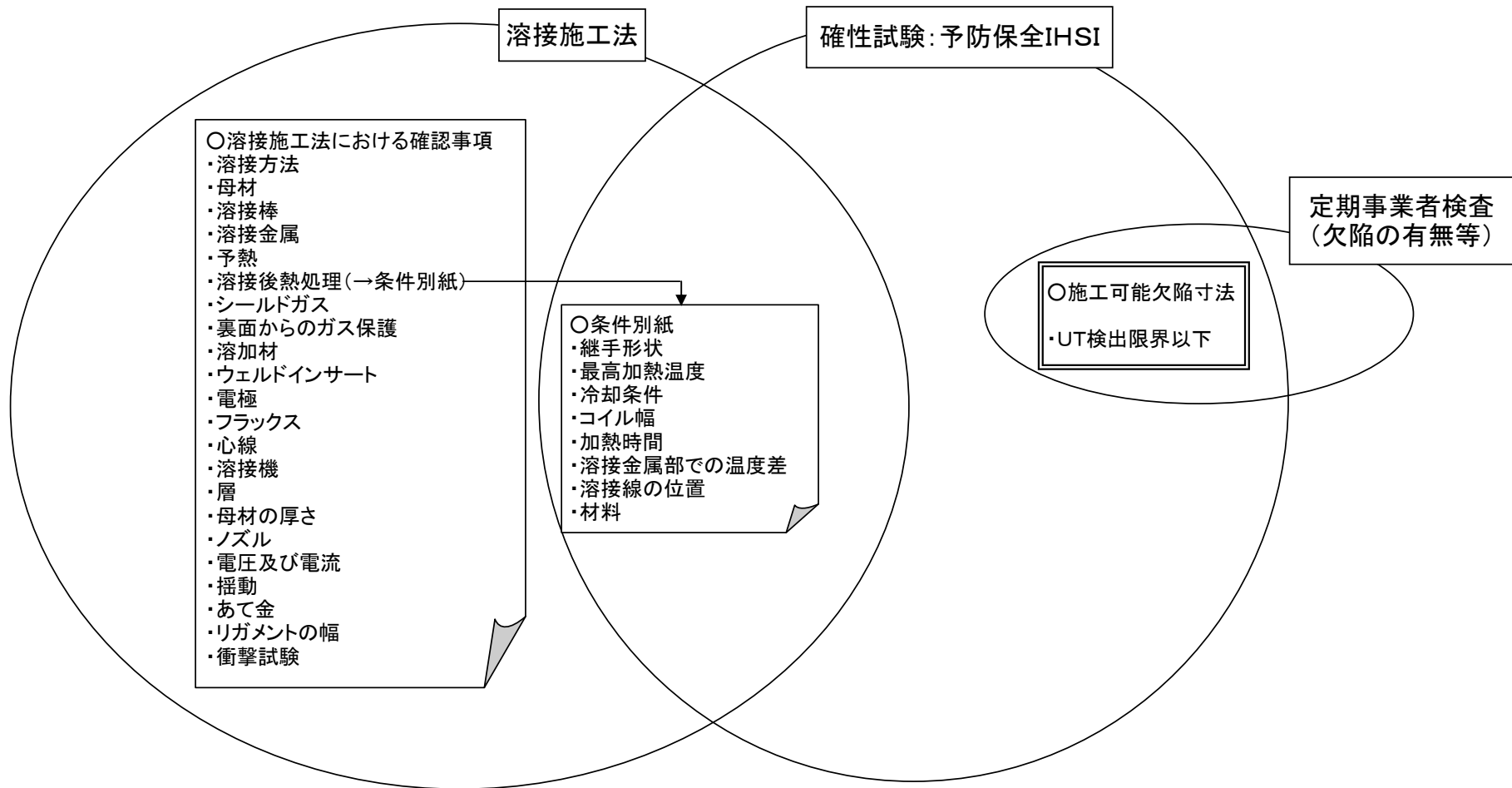
# 残留応力解析



\* き裂先端部は応力場を把握するため、他の部位に比べ細かいメッシュとしている。

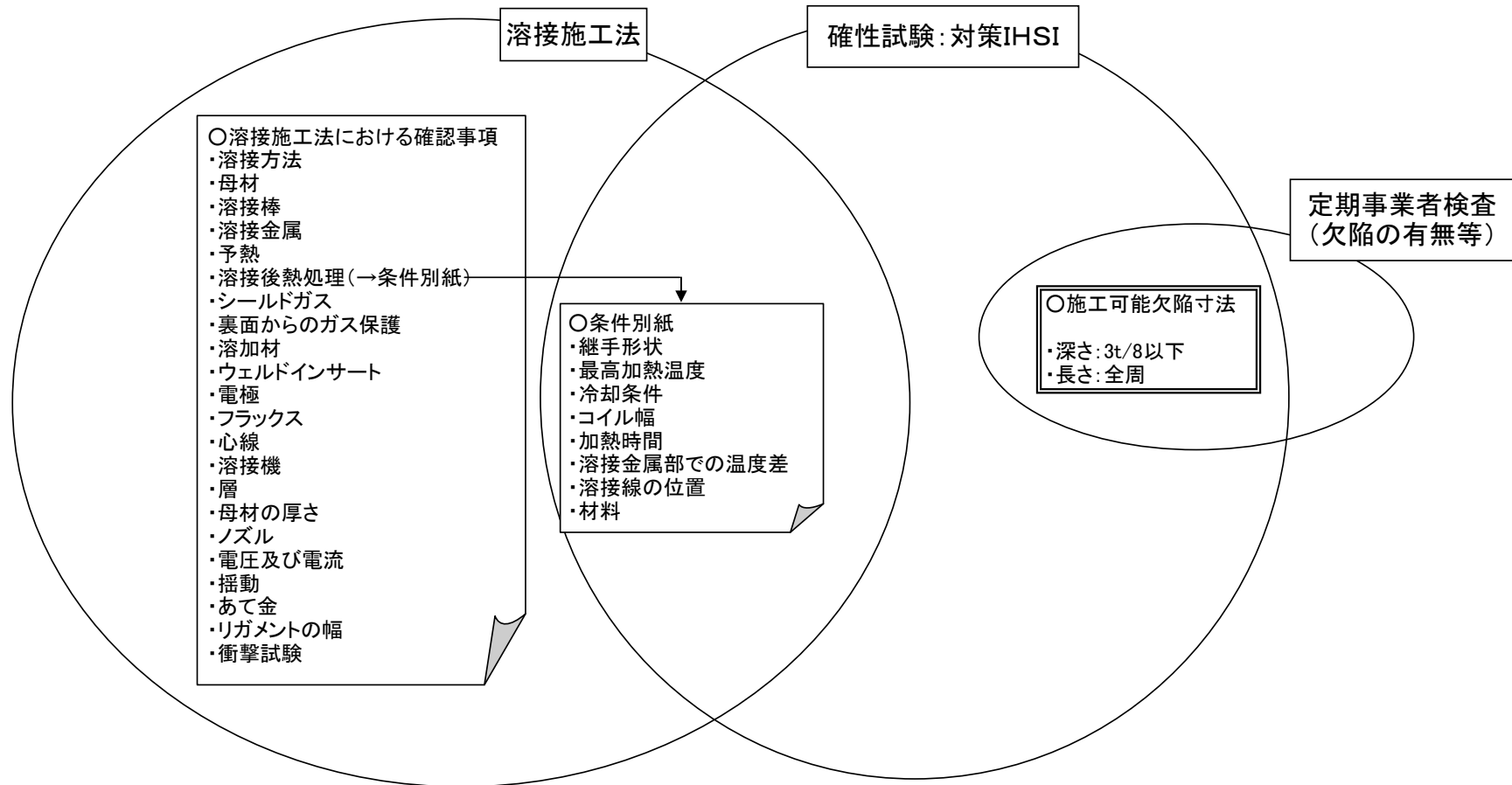
(4) 対策 IHSI の効果の具体例 (軸方向残留応力解析結果)

図-1 IHSI 施工状況概要及び原理の概要



図一2(1) 溶接施工法における確認事項と、確性試験にて確認した事項との関係(予防保全IHSI)





○補足: IHSI施工法の運用に関して

欠陥を有する配管に施工する対策IHSIも、予防保全IHSIと同じ施工法に基づき実施する。

この場合、以下の観点から対策IHSIとして新たな施工法の取得は不要であり、既に取得済みの施工法にき裂寸法の制限条件を設けて運用することとする。

- ・施工法試験で実施する機械試験(引張、曲げ試験等)は健全な試験片により実施するものである。
- ・IHSIが適用可能なき裂寸法は本確性試験として確認しているものである。
- ・最高加熱温度、溶接金属部での温度差( $\Delta T_{req}$ )等の既に取得済みの施工法に係るエッセンシャルバリアブルは変更にはならない。
- ・コイル寸法や溶接線の位置に関しても取得済みの施工法の下限寸法を満足する寸法で設定する。

図-2(2): 溶接施工法における確認事項と、確性試験にて確認した事項との関係(対策IHSI)  
(対策IHSI適用範囲: P-8+P-8及び周継手に限定)

## 確性試験で確認された適用条件(1/2) (19 確 S1 号)

項目	施工条件	
外径 (A)	250~700	
母材の厚さ : $t$ (mm)	18~48 * 1	
材 料	P-8 + P-8の溶接部 * 2	
適用部位	周継手	
最高加熱温度	650℃以下	母材の炭素含有量が 0.020%以下 * 2 * 3
	550℃以下	上段以外のもの
冷 却	内面水冷 (通水 * 4)	
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15 mmの大きい方以上コイル端の内側	
加熱時間 : $\tau$ (sec)	$0.7 \times t^2 / a$ 以上 * 5	
配管内外面温度差 : $\Delta T$ (℃)	$\Delta T \geq \frac{4(1-\gamma)\sigma_y}{E\alpha} = \Delta T_{\text{req}}$	
適用き裂寸法	深さ : $3t/8$ 以下, 長さ : 全周以下 * 6 * 7	
備 考	$R$ : 配管の公称厚さ中心における曲率半径 (mm) $a$ : 材料の熱拡散率 ( $\text{mm}^2/\text{sec}$ ) $\gamma$ : ポアソン比 $E$ : 縦弾性係数 (MPa) $\alpha$ : 線膨張係数 ( $\text{mm}/\text{mm}^\circ\text{C}$ ) $\sigma_y$ : 材料の降伏点応力 (ミルシートにおける値) (MPa)	

- \* 1 公称厚さとする。
- \* 2 P-8 に区分される母材で、オーステナイト系ステンレス鋼及びステンレス鋳鋼とする。
- \* 3 溶接材料の炭素含有量は、0.030%以下とする。
- \* 4 停滞水以外の流速を有する状態とする。閉止端での流れや自然対流による流れ等も含む。外面温度が十分に低下するまで冷却を続け、外面温度が 300℃以下となるまで温度計測を継続する。
- \* 5 300℃を超える温度領域での高周波加熱による累積加熱時間は、3時間以内とする。
- \* 6 複数き裂が存在する場合の深さは、最深き裂の数値とする。
- \* 7 サブマージ溶接及び被覆アーク溶接により溶接されている場合で、き裂の先端が溶接金属に達している可能性がある場合は、適用き裂深さを下表の範囲とする。ただし、き裂のサイジング結果に基づき IHSI 施工中の J 値を FEM 等で算出し、安全率 (1.25 倍) を見込んだ上で IHSI 施工中の健全性が確認された場合は、この条件での IHSI 施工を可能とする。また、対象溶接継手を模擬した試験体を用いて破壊靱性試験を実施し、 $J_{Ic}$  が 165000 N/m を超えることが確認された場合には、適用き裂深さを  $3t/8$  以下としてもよい。

外径 (A)	施工条件	き裂深さ/母材の厚さ	備 考
300 を超え 600 以下	最高加熱温度 650℃以下	0.1179 以下	
	$\Delta T / \Delta T_{\text{req}} = 1.4$ 以下	0.1590 以下	
250 以上 300 以下	最高加熱温度 650℃以下	0.2100 以下	
	$\Delta T / \Delta T_{\text{req}} = 1.4$ 以下	0.2738 以下	

確性試験で確認された適用条件(2/2) (19 確 S2 号)

項 目	施 工 条 件	
外 径 (A)	250~700	
母材の厚さ : $t$ (mm)	18.2~49.9 * 1	
材 料	P-8 + P-8の溶接部 * 2	
適用部位	周継手	
最高加熱温度	650℃以下	炭素含有量が 0.030%以下 * 2
	550℃以下	炭素含有量が 0.030%を超えるもの* 2
冷 却	内面水冷 (通水 * 3)	
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15 mmの大きい方以上コイル端の内側	
加熱時間 : $\tau$ (sec)	$0.7 \times t^2 / a$ 以上 * 4	
配管内外面温度差 : $\Delta T$ (°C)	$\Delta T \geq \frac{4(1-\gamma)\sigma_y}{E\alpha}$	
適用き裂寸法	深さ : $0.3t$ ( $2.4 t/8$ ) 以下, 長さ : 全周以下 * 5 * 6 * 7	
備 考	$R$ : 配管の公称厚さ中心における曲率半径 (mm) $a$ : 材料の熱拡散率 ( $\text{mm}^2/\text{sec}$ ) $\gamma$ : ポアソン比 $E$ : 縦弾性係数 (MPa) $\alpha$ : 線膨張係数 ( $\text{mm}/\text{mm}^\circ\text{C}$ ) $\sigma_y$ : 材料の降伏点応力 (ミルシートにおける値) (MPa)	

\* 1 公称厚さ

\* 2 P-8 に区分される母材で、オーステナイト系ステンレス鋼及びステンレス鋳鋼とし、熱鋭敏化の観点から温度に対応した炭素含有量を規定した。

\* 3 停滞水以外の流速を有する状態とする。閉止端での流れや自然対流による流れ等も含む。

なお、加熱終了後、外面温度が十分に低下するまで冷却を続け、外面温度が 60℃以下となるまで温度計測を継続する。

\* 4 機器の最高使用温度(302℃)を超える加熱回数は 3 回以下とする。

\* 5 複数き裂が存在する場合の深さは、最も深いき裂深さの値とする。

\* 6 き裂深さ  $3t/8$  以上の自然欠陥を導入したモックアップ試験で、き裂先端の応力改善を確認した場合、き裂深さ  $3t/8$  まで適用できる。\* 7 溶接方法が、サブマージ溶接で、かつき裂の先端が溶接金属に達している場合は、FEM 解析により求めた補修 IHSI 施工時の J 値が材料試験によって得られた  $J_{Ic}$  の値以下であることを確認する。

新保全技術適合性検討作業会（RNP）

# 欠陥を有する配管系に対するIHSIの有効性確性試験 概要

（株）東 芝 / （株）I H I

無断複製・転載等禁止

## 1. 目的

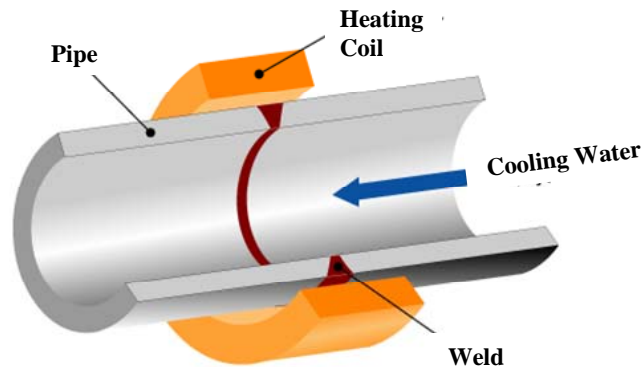
- 現状、明確に欠陥の存在が確認された配管溶接継手に対してはIHSIを施工することができない。欠陥の存在が確認された場合には、現状、継続使用・補修・取替の選択肢の中から状況に応じた手法が適用されており、プラント長期停止につながる可能性がある。
- そこで、本確性試験は明確に欠陥の存在が確認された配管溶接継手に対するIHSI施工が、既存欠陥の進展を抑制するとともに、健全部の予防保全効果も有することを確認し、対策工法としての実機適用を目指すことを目的として実施した。

## 2. I H S I の概要

### ■ I H S I (Induction Heating Stress Improvement )

#### ：高周波誘導加熱応力改善法

- ・配管板厚方向に温度差が生じるよう内面を冷却しながら外面側を高周波誘導加熱により昇温
- ・加熱停止後板厚方向がほぼ均一な室温近くの温度となるまで内面を冷却
- ・熱応力を利用し、配管内面残留応力を改善する工法



## 3. 予防保全工法 I H S I, 対策工法 I H S I の差異

### ■ 予防保全工法としての I H S I

従来の予防保全工法としての I H S I は施工前の U T 検査で、欠陥の存在が確認された場合には施工を実施していない。過去の検証で欠陥を付与した確認が行われているが、それらは U T 検出限界以下の微小な欠陥が存在した場合を想定して実施しているものである。

### ■ 対策工法としての I H S I

今回の確性試験において検証を行う対策工法としての I H S I は、施工前の U T 検査において、明確に欠陥の存在が確認された継手に対して施工することを想定している。

## 4. 対策IHSIでの確認項目

### (1) 対策IHSI特有の確認項目

- ①き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。
- ②き裂先端部での応力が改善され、き裂の進展性が抑制されること。

### (2) 予防保全IHSIとしての確認項目

- ③き裂の近傍におけるIHSIによる残留応力改善効果を確認する。
- ④き裂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。

## 5. 試験結果（概要）

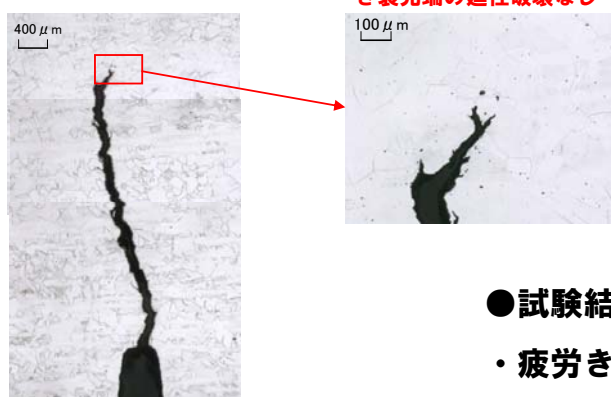
### ①き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。

欠陥を有する配管にIHSIを施行することで、欠陥がIHSI加熱中に有意に進展しないこと、材料の機械的性質に悪影響が生じてないことを確認。

#### ●試験条件

- ・き裂の形態：EDMノッチ+疲労き裂 深さ：3/8t
- ・IHSI条件：最高加熱温度：650℃を超える加熱を3回実施

#### (1) 断面観察（例）

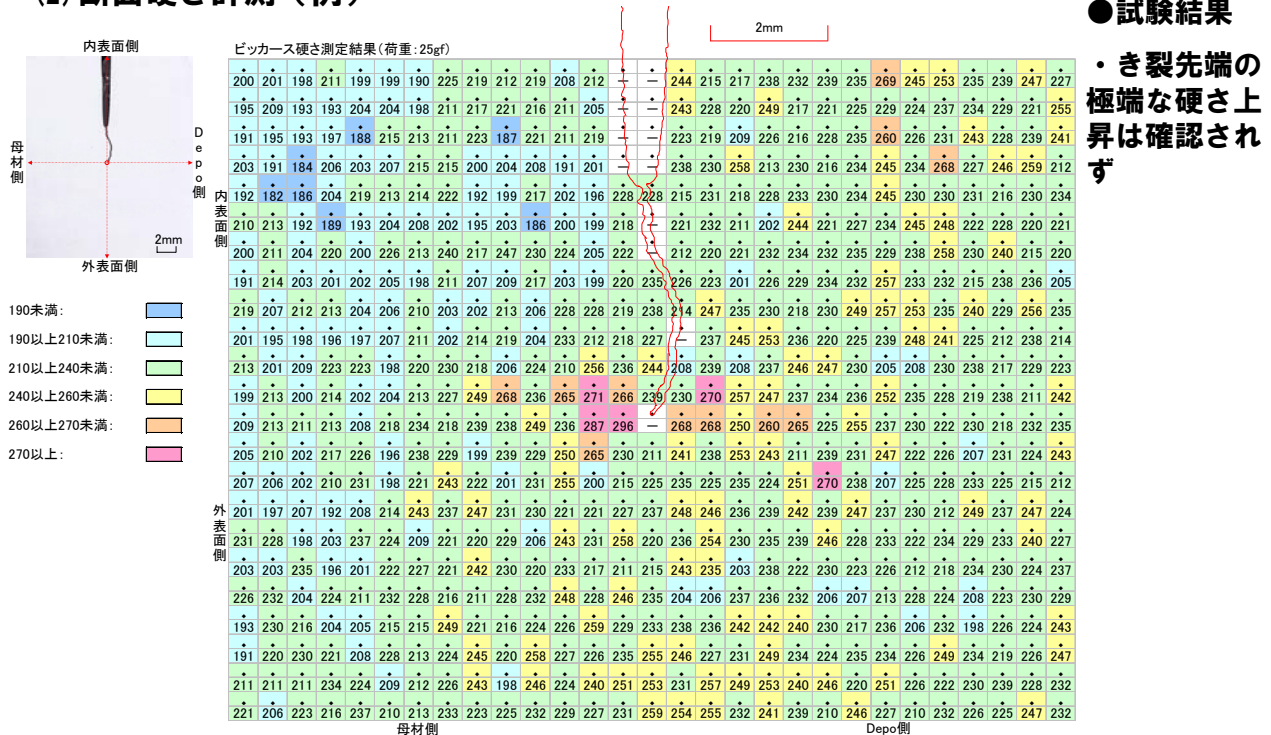


#### ●試験結果

- ・疲労き裂先端での延性破壊兆候なし

# 5. 試験結果（概要）

## (2) 断面硬さ計測（例）



IHSIの施工がき裂及び継手に対し、悪影響を及ぼさないことを確認

# 5. 試験結果（概要）

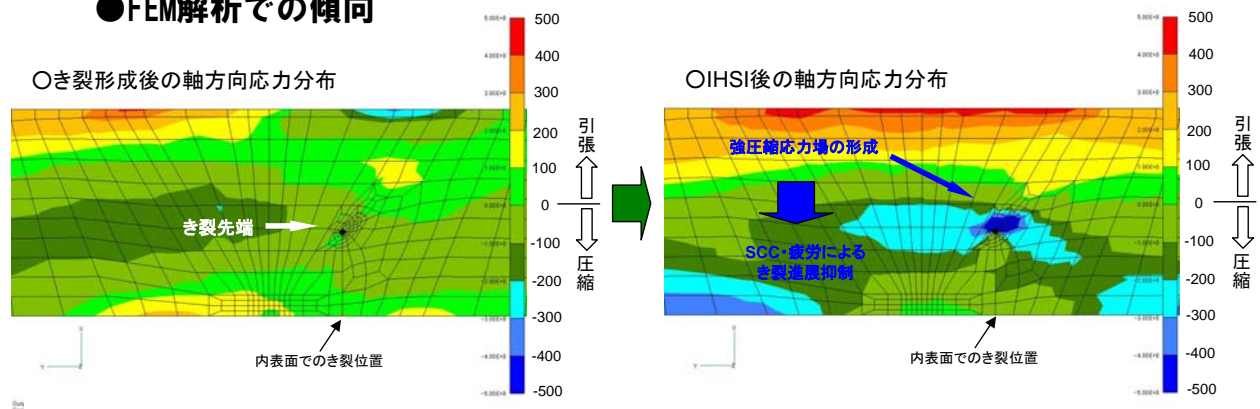
## ②き裂先端部での応力が改善され、き裂の進展性が抑制されること。

MgCl2浸漬によりSCCを模擬した深いき裂を強制的に付与し、IHSI施行した試験体を再度 MgCl2浸漬を行い、き裂が有意に進展しないことを確認。

### ●試験条件

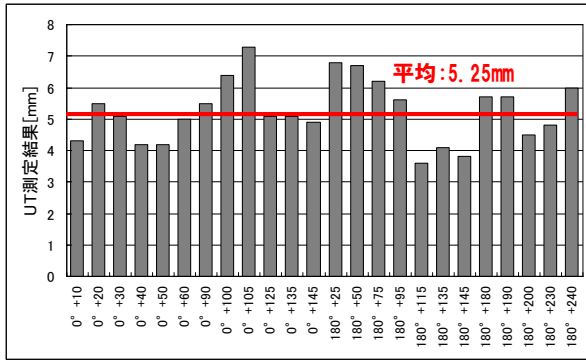
- ・き裂の形態：MgCl2き裂 深さ：3/8t
- ・IHSI条件：E. V. の  $\Delta T_{req}$  の約1.5倍の温度差でのIHSIを1回施行

### ●FEM解析での傾向

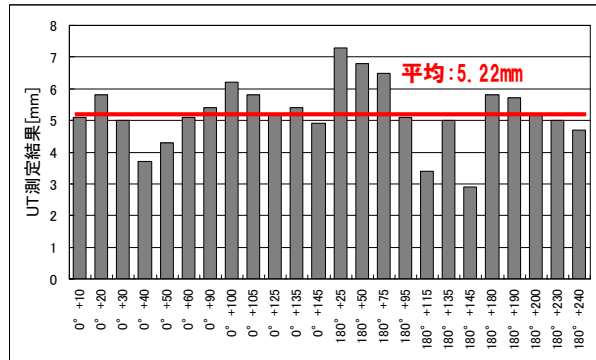


# 5. 試験結果（概要）

## (1) IHSI後 MgCl<sub>2</sub>浸漬前後のUTサイジング結果



MgCl<sub>2</sub>浸漬前



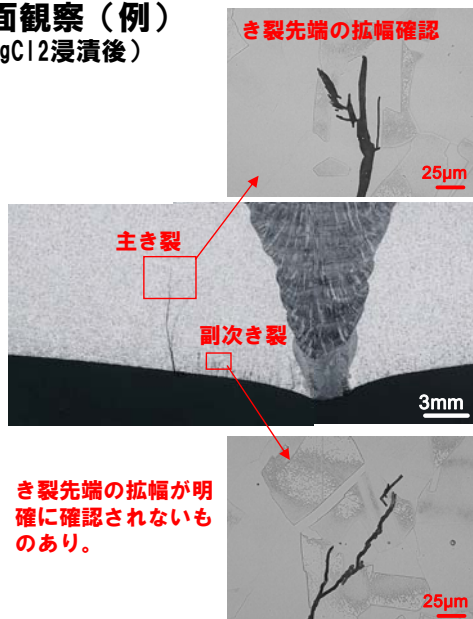
MgCl<sub>2</sub>浸漬後  
(120時間)

### ●検査結果

UTによるき裂深さに有意な変化は確認されず。

# 5. 試験結果（概要）

## (2) 断面観察（例） (再MgCl<sub>2</sub>浸漬後)



### ●試験結果

- ・深いき裂（主き裂）で、明確なき裂の拡幅を確認。
- ・主き裂まわりに発生した浅いき裂（副次き裂）等なき裂の拡幅が明確に観察されないものあり。

**主き裂は先端が強圧縮となり、き裂の進展性が抑制されることを確認。但し、新たなき裂発生の可能性は否定できない。**



## 5. 試験結果（概要）

### ③き裂の近傍におけるIHSIによる残留応力改善効果を確認する。

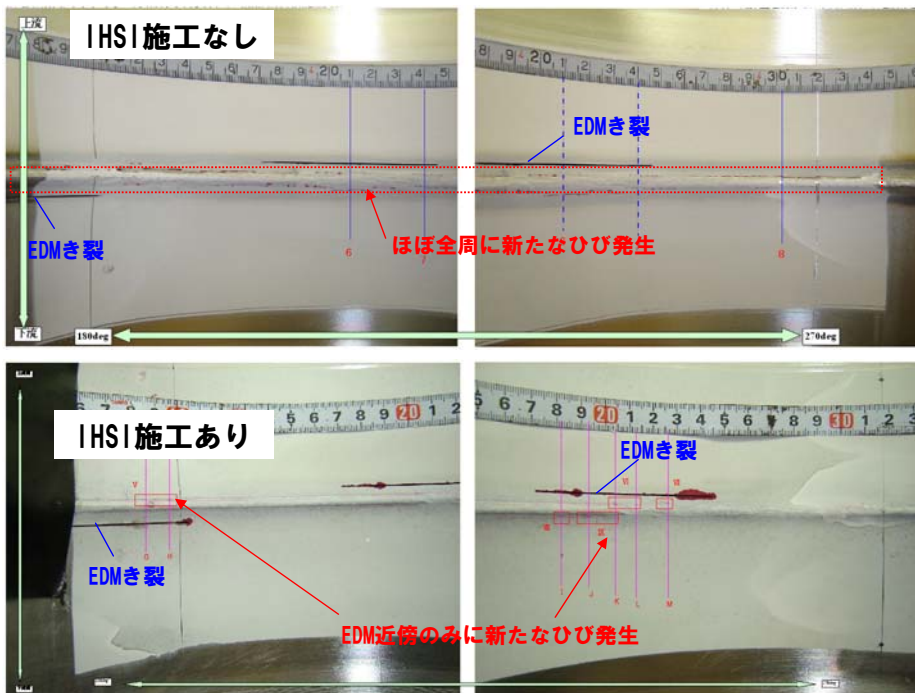
管内表面のき裂近傍のIHSI効果確認のため、EDMき裂を有する試験体にIHSI施工したもの、IHSI施工していないもの(As Weld)をMgCl<sub>2</sub>浸漬し、新たなき裂の発生有無を確認。

#### ●試験条件

- ・き裂の形態：EDMき裂 深さ：3/8t
- ・IHSI条件：E. V. の $\Delta T_{req}$ の約1.5倍の温度差でのIHSIを1回施行

## 5. 試験結果（概要）

### (1) 内面PT観察



#### ●試験結果

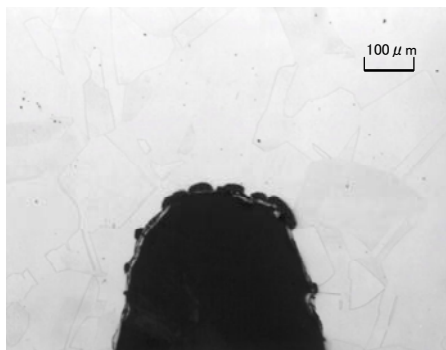
IHSI施工なし  
→ほぼ全周に新たなひびが発生

IHSI施工あり  
→EDMき裂近傍のみひびが発生

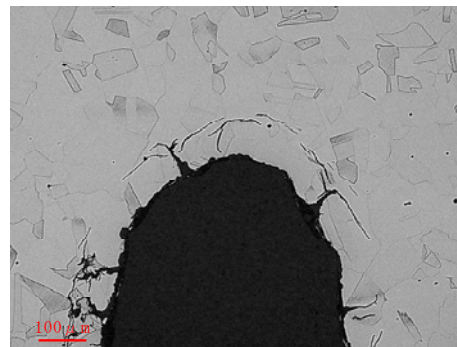
## 5. 試験結果（概要）

### (2) 断面観察

EDM先端部のMgCl<sub>2</sub>浸漬後の状態



IHSI施工あり



IHSI施工なし

#### ●試験結果

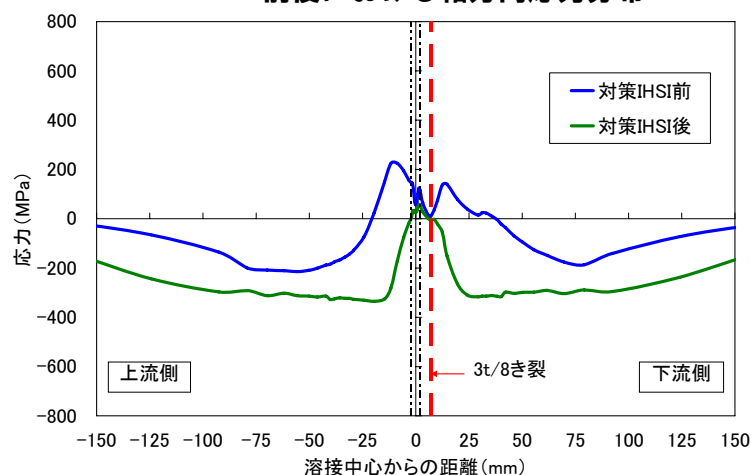
き裂先端においてもIHSI施工なしでは微細なひびが発生

**き裂近傍でのIHSI効果は減少傾向。  
新たなき裂の発生はAs Weldより改善。**

## 5. 試験結果（概要）

### (3) FEM解析

300A 3/8t 全周欠陥を有する場合のIHSI前後における軸方向応力分布



#### ●解析結果

対策IHSIの施工によって残留応力が低減されることが確認できる。

## 5. 試験結果（概要）

### ④き裂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。

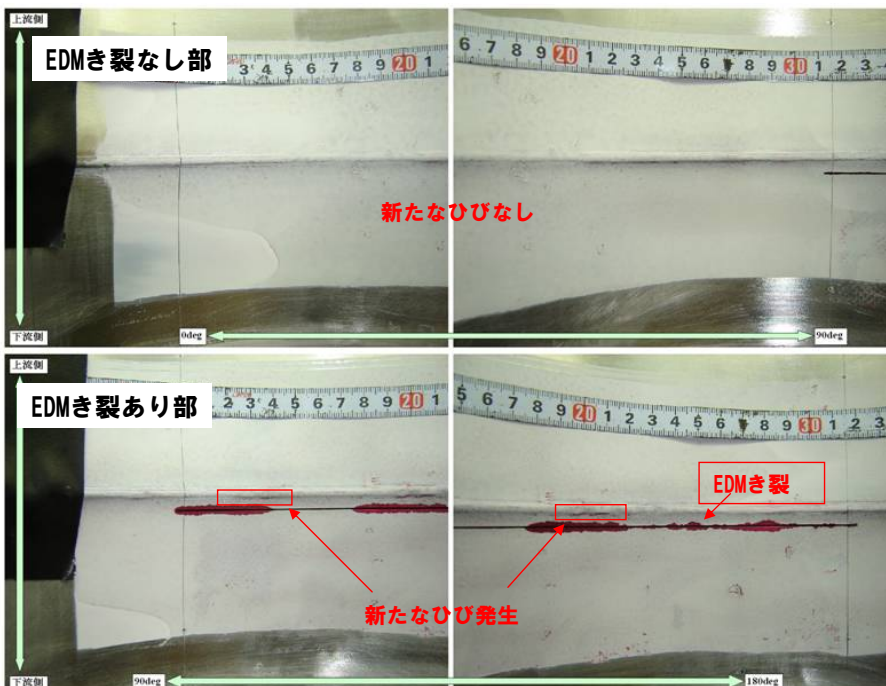
管内表面のき裂部以外のIHSI効果確認のため、EDMき裂を有する試験体にIHSI施工後MgCl<sub>2</sub>浸漬し、き裂部以外の新たなき裂の発生有無を確認。

#### ●試験条件

- ・き裂の形態：EDMき裂 深さ：3/8t及び5/8t
- ・IHSI条件：E. V. の $\Delta T_{req}$ の約1.5倍の温度差でのIHSIを1回施行

## 5. 試験結果（概要）

### (1) 内面PT観察



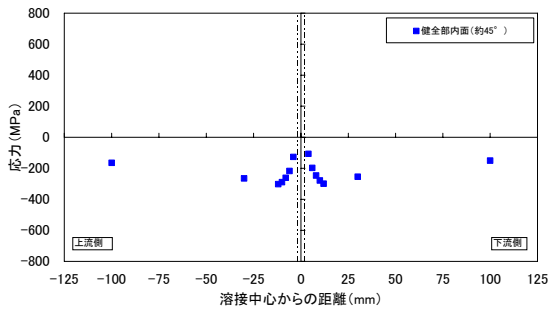
#### ●試験結果

き裂がない部位はPT結果、新たなひびは確認されなかった。

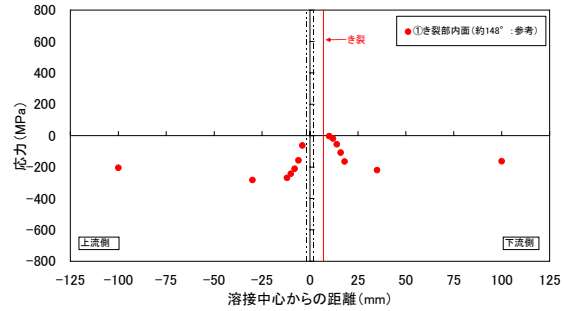
# 5. 試験結果（概要）

## (2) 残留応力測定

EDMき裂あり部・なし部の軸方向残留応力分布



EDMき裂なし部



EDMき裂あり部

### ●試験結果

き裂なし部は十分に圧縮側へ改善されており予防保全効果があることを確認。

**健全部は予防保全工法IHSIと同等の効果があることを確認。**

# 6. まとめ

## (1) 対策IHSI特有の確認項目

- ①き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。  
→ IHSI施工がき裂及び継手に対し、悪影響を及ぼさないことを確認
- ②き裂先端部での応力が改善され、き裂の進展性が抑制されること。  
→ 主き裂は先端が強圧縮となり、き裂の進展性が抑制されることを確認。  
但し、新たなき裂発生の可能性は否定できない。

## (2) 予防保全IHSIとしての確認項目

- ③き裂の近傍におけるIHSIによる残留応力改善効果を確認する。  
→ き裂近傍でのIHSI効果は減少傾向。新たなき裂の発生はAs Weldより改善。
- ④き裂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。  
→ 健全部は予防保全工法IHSIと同等の効果があることを確認。



・き裂を有する実機配管へのIHSI施工は技術的には問題無く、その有効性（深いき裂の進展性を抑制すること）が確認された。  
・但し、対策IHSI施工後の運用においては既に発生している深いき裂近傍からの新たなき裂の発生が否定できないため留意する必要がある。

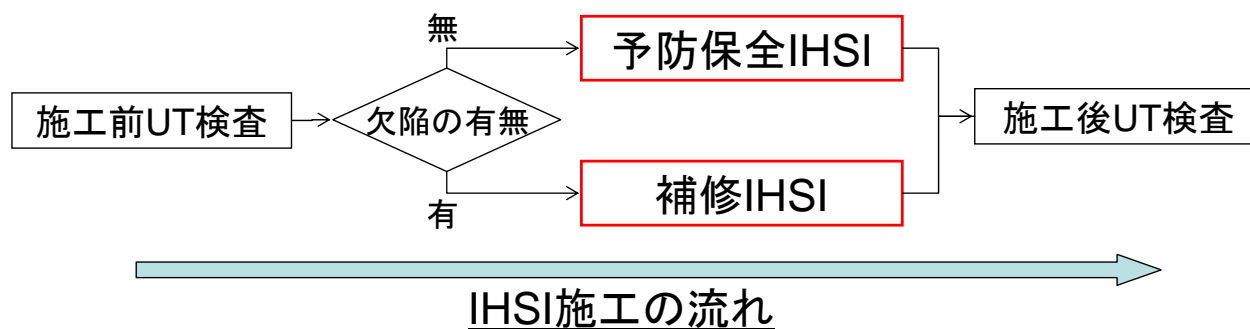
# 補修IHSIの適用性に関する 確性試験結果

日立GEニュークリア・エナジー株式会社

添付1-2-1

## 1. 試験の目的

- 従来のIHSI(予防保全IHSI)は、欠陥がないオーステナイト系ステンレス鋼配管溶接継手部のSCC予防保全工法として開発されている。施工前のUT検査で欠陥が検出された場合、IHSIを施工することができず、継続使用・補修・取替えの選択肢の中から状況に応じた手法が選択されることになる。
- 確性試験では、欠陥を有する継手に対するIHSIを、欠陥の進展を抑制させる効果があると共に、健全部に対しては、予防保全効果を有する補修工法として適用可能であることを確認する。



※ 確性試験の中では、対策IHSIを補修IHSIと称しているが、以降、本資料中では、対策IHSIと称するものとする。

添付1-2-2

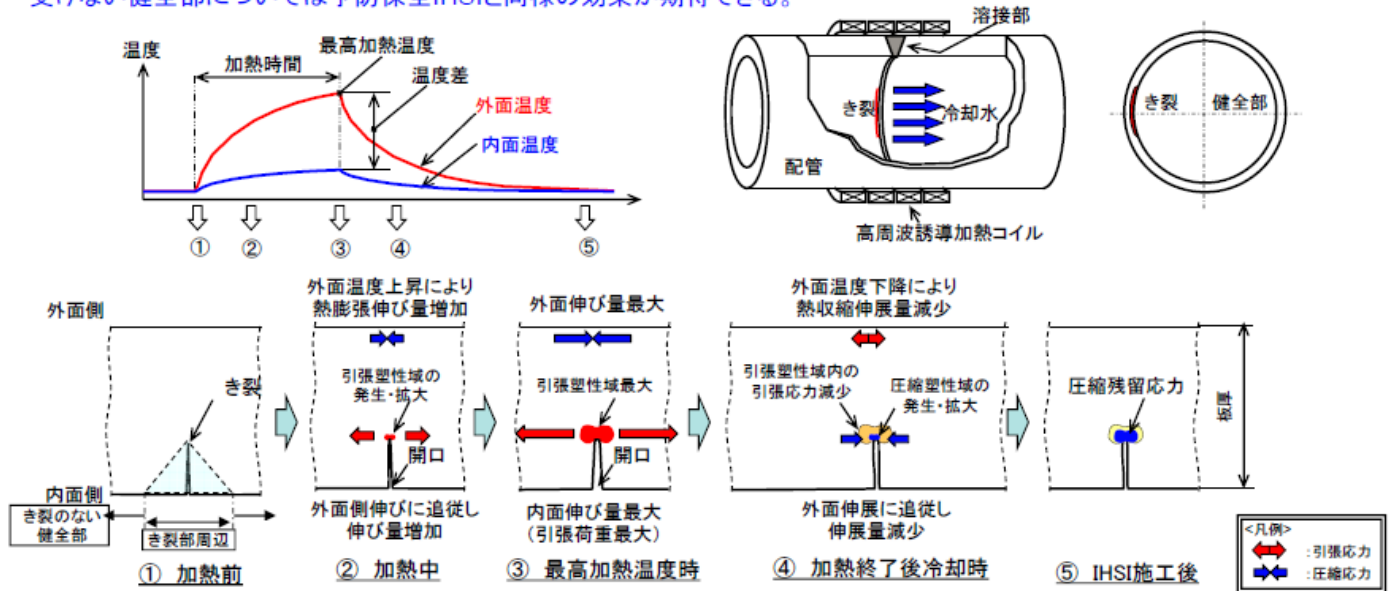
## 2. IHSIの概要

### IHSI工法(高周波誘導加熱応力改善)

配管の板厚方向に、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を水冷する方法である。その結果、内面側では加熱時に引張荷重が作用し塑性変形し、冷却により圧縮荷重が作用することにより、既存の引張溶接残留応力は圧縮側に改善される。

### 欠陥を有する継手に対するIHSI工法(対策IHSI)

図のようにき裂を有する配管でも、き裂が比較的浅い場合、き裂先端では上記の効果が期待できる。また、き裂の影響を受けない健全部については予防保全IHSIと同様の効果が期待できる。



添付1-2-3

## 3. 対策IHSIの確認項目

- ① き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。
  - a. 対策IHSI施工によって健全部の機械的性質に悪影響を及ぼさないこと。
  - b. 対策IHSI施工時にき裂から延性破壊が生じないこと。
  - c. き裂先端近傍部の機械的性質に悪影響を及ぼさないこと。
- ② き裂先端での応力が改善され、き裂の進展が抑制されること。
  - a. 対策IHSI後のき裂先端の鈍化及び圧縮応力域の確認。
- ③ 対策IHSIを施工した場合、未施工に比べて残留応力が同等か低減できていること。
  - a. き裂周辺部の残留応力が、対策IHSI後に低減されていること。
  - b. き裂のない健全部の残留応力が、予防保全IHSIと同等に低減されていること。

添付1-2-4

## 4. 対策IHSIの確認結果(概要)

①き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。

a. 対策IHSI施工によって健全部の機械的性質に悪影響を及ぼさないこと。

対策IHSI施工条件(適用部位、加熱時間、最高加熱温度、温度差、口径、板厚等)を予防保全IHSIの範囲内とすることで、き裂近傍以外の一般部に有意な材料変化は生じない。(予防保全IHSIと同じ。)

項目	予防保全IHSI (16確S1号他)	対策IHSI (19確S2号)
適用部位	周継手、管台	周継手
材質	P8+P8	左記に同じ
口径	規定せず	250A~700A
最高加熱温度	650°C(C≤0.030%) 550°C(C>0.030%)	左記に同じ
冷却	内面冷却	左記に同じ
コイル幅:L(mm)	$L \geq 2.7\sqrt{Rt}$	左記に同じ
加熱時間:(s)	$0.7 \times t^2/a$ 以上	左記に同じ
内外面温度差: ΔT(°C)	$\frac{4(1-\gamma)\sigma_y}{E\alpha}$ 以上	左記に同じ
備考	R:配管の公称厚さ中心における半径(mm) a:材料の熱拡散率(mm <sup>2</sup> /sec) γ:ポアソン比 E:縦弾性係数(MPa) α:線膨張係数(mm/mm°C) t:板厚(mm) σ <sub>y</sub> :材料の降伏点応力(ミルシートにおける値)(MPa)	

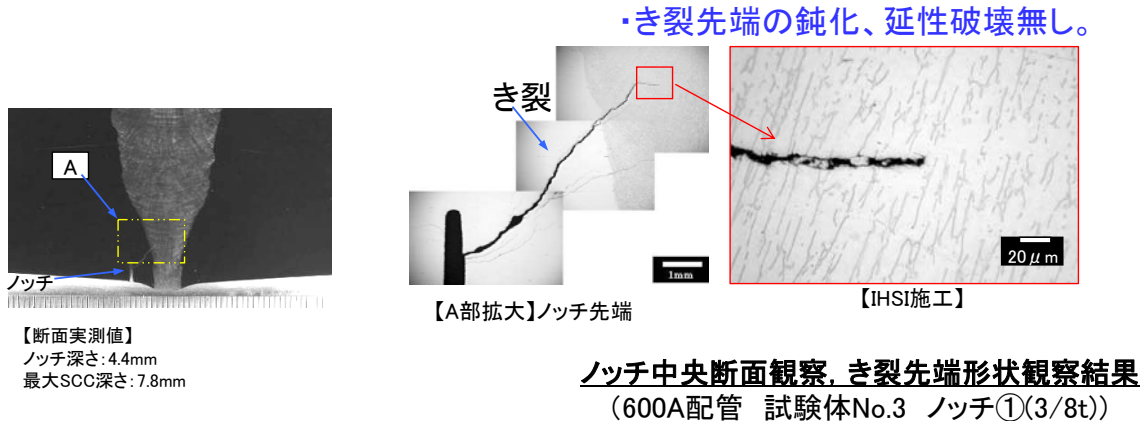
添付1-2-5

## 4. 対策IHSIの確認結果(概要)

① き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。

b.対策IHSI施工時にき裂から延性破壊が生じないこと。

### 深さ方向き裂観察結果



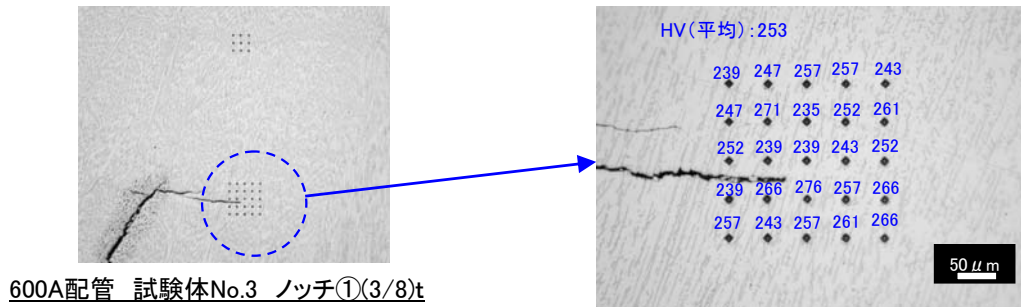
SCC予き裂を導入した試験体に対策IHSIを施工した結果、き裂先端は鈍化しているが、延性破壊は生じていない。

添付1-2-6

## 4. 対策IHSIの確認結果(概要)

- ① き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。
  - c. き裂先端近傍部の機械的性質に悪影響を及ぼさないこと。

### 硬さ試験結果



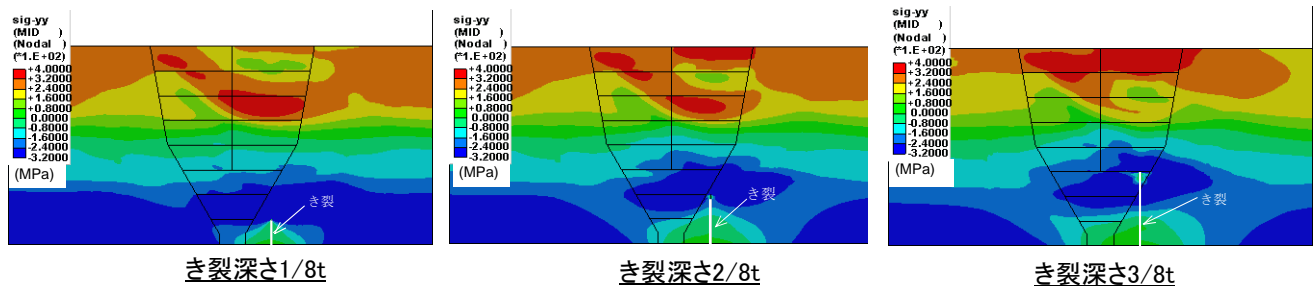
対策IHSI後にき裂先端近傍の硬さ測定を実施。変化は微小であり、異常な硬さ上昇はない。

## 4. 対策IHSIの確認結果(概要)

- ② き裂先端での応力が改善され、き裂の進展が抑制されること。
  - a. 対策IHSI後のき裂先端の鈍化及び圧縮応力域の確認。

### (1)解析結果

対策IHSI施工後のき裂先端応力、残留応力分布の確認。



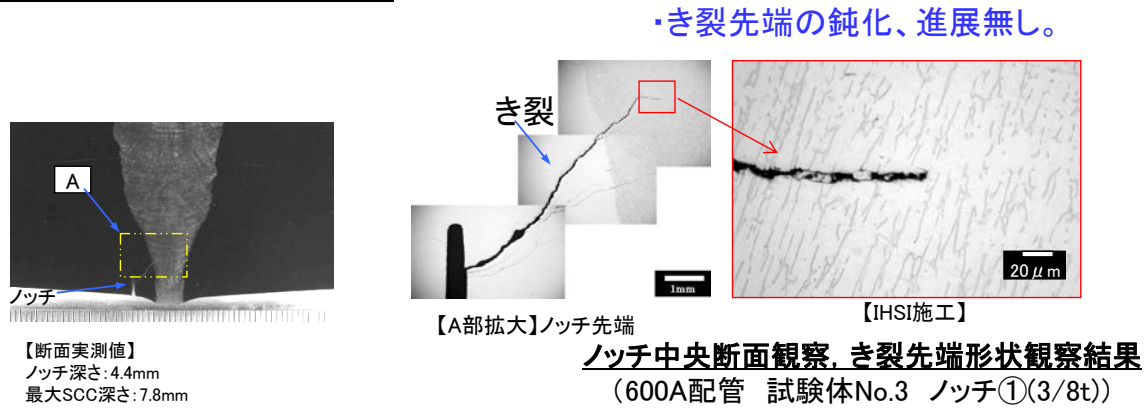
対策IHSI施工後、き裂深さ3/8t以下においてき裂先端部からき裂を取りむように圧縮応力領域が形成されることを確認した。



## 4. 対策IHSIの確認結果(概要)

- ② き裂先端での応力が改善され、き裂の進展が抑制されること。
  - a. 対策IHSI後のき裂先端の鈍化及び圧縮応力域の確認。

### (2)深さ方向き裂観察結果

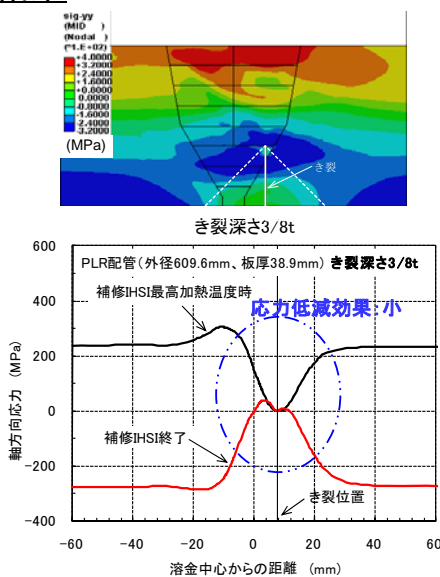


対策IHSI後のSCC試験(塩化マグネシウム浸漬試験)を実施し、鈍化したき裂先端からのSCC発生が抑制されていることを確認。

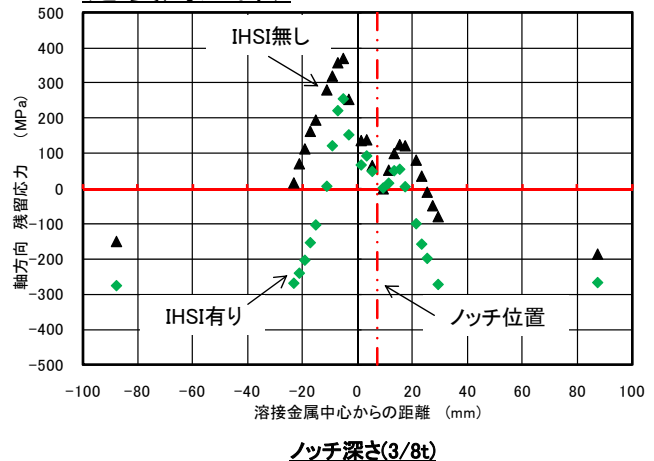
## 4. 対策IHSIの確認結果(概要)

- ③ 対策IHSIを施工した場合、未施工に比べて残留応力が同等か低減できていること。
  - a. き裂周辺部の残留応力が、対策IHSI後に同等か低減されていることの確認。

### (1)解析結果



### (2)内表面残留応力測定結果 (き裂周辺部)



き裂周辺にIHSI効果が少ない領域ができるが、IHSI未施工に較べて残留応力は低減されていることを確認した。

## 4. 対策IHSIの確認結果(概要)

- ③ 対策IHSIを施工した場合、未施工に比べて残留応力が同等か低減できていること。

b.き裂のない健全部の残留応力が、予防保全IHSIと同等に低減されていることの確認。

### 内表面(健全部)PT観察結果

・IHSI施工後に塩化マグネシウム浸漬試験を実施しても、健全部に新たな割れは発生していない。(参考資料参照)



45° 側 健全部



315° 側 健全部

対策IHSI施工後の健全部内表面の残留応力が、予防保全IHSIと同程度に低減できていることを確認した。

添付1-2-11

## 5. まとめ

- ① き裂及び継手に対して悪影響を及ぼさないこと。
  - ・施工条件を予防保全IHSIの範囲内とすることで、健全部の機械的性質に優位な変化が生じない。
  - ・対策IHSI施工時に、き裂から延性破壊が生じないことを確認。
  - ・対策IHSI施工後に、き裂先端近傍部の機械的性質に悪影響を及ぼさないことを確認。
- ② き裂先端での応力が改善され、き裂の進展が抑制されること。
  - ・対策IHSI後のき裂先端の鈍化及び圧縮応力域を確認。
- ③ 対策IHSIを施工した場合、未施工に比べて残留応力が同等か低減できていること。
  - ・き裂周辺部の残留応力が、対策IHSI後に低減されていることを確認。
  - ・き裂のない健全部の残留応力が、予防保全IHSIと同等に低減されていることを確認。

・欠陥を有する継手に対するIHSI(対策IHSI)は、き裂(既に発生しているき裂)の進展を抑制することに、有効な技術であることが確認できた。

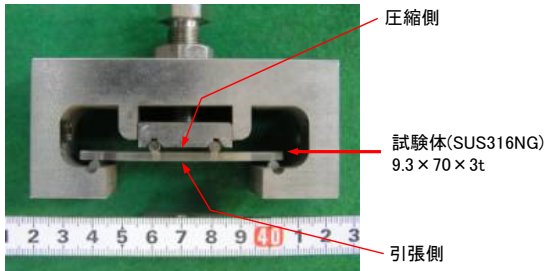
・但し、対策IHSI施工後の運用に関しては既に発生しているき裂近傍から、新たな微細なき裂の発生する可能性は否定できないため、継続監視に留意が必要である。

添付1-2-12

# <添付資料>

## 塩化マグネシウム浸漬による割れ発生応力値の確認

塩化マグネシウム浸漬時に割れが発生する応力値を試験により確認した。



試験片曲げ状況(4点曲げ)

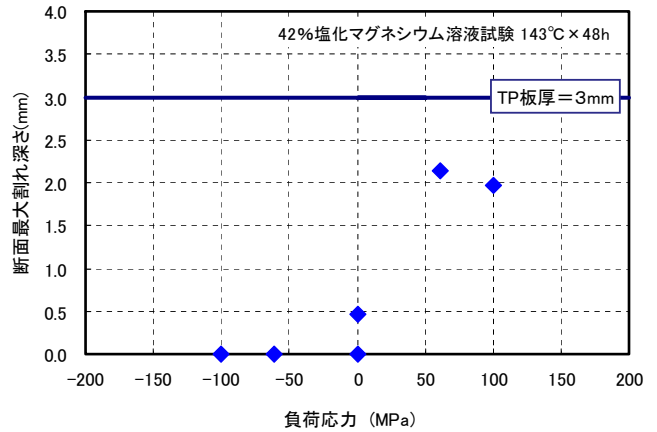
No.	負荷応力(MPa)		PT & 深さ測定結果		備考
	目標	実績	引張側(表面)	圧縮側(裏面)	
1	0	0	● (470 μm)	○	エメリー+電解研磨
2	50	61	● (2140 μm)	○	
3	100	100	● (1970 μm)	○	

●:割れあり  
○:割れなし

### <試験結果>

- ・ 50MPa程度の負荷応力(曲げ応力)を加えたものは、発生した割れが深く進展しているのが確認された。
- ・ 圧縮側では、割れは発生していない。
- ・ 無負荷状態で部分的に僅かに浅い割れの発生が確認された。

以上より、塩化マグネシウム浸漬試験により割れが発生する応力値は50MPa程度であると判断した。



## 対策IHSI

### 維持規格評価における溶接部残留応力の扱い

新保全技術適合性検討作業会  
対策IHSIタスクグループ

1

無断複製・転載禁止 日立GEニュークリア・エナジー/東芝/HHI

### ○対策IHSI施工後の主き裂評価(案)

対策IHSI後のき裂進展評価において、軸方向応力の板厚分布を定義する場合、残留応力等の取扱いに関しては以下の手法が考えられる。

- I. 対策IHSI未施工のAs Weldedの応力分布を用いる。
- II. 検出されたき裂を模擬し、対策IHSIを施工した後の応力分布を用いる。
- III. き裂無し状態で対策IHSIを施工した後の応力分布を用いる。

対策IHSI後の応力分布は、P3～P5に示す様に、き裂の先端部が強圧縮になり、き裂の進展性は抑制される。このことは確性試験(添付資料1参照)において実験的にも確認されている。これらを踏まえた上記3つの応力分布に基づくき裂進展評価は以下の特徴がある。

- I : 対策IHSI効果を考慮していないことから、過度に保守的に評価することになる。
- II : き裂先端が圧縮応力となる対策IHSIの効果を考慮した評価ができる。
- III : IIと同様の評価であるとともに、合理的な評価ができる。

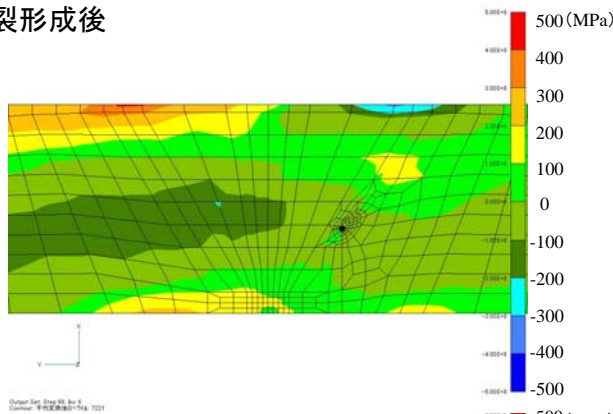
2

無断複製・転載禁止 日立GEニュークリア・エナジー/東芝/HHI

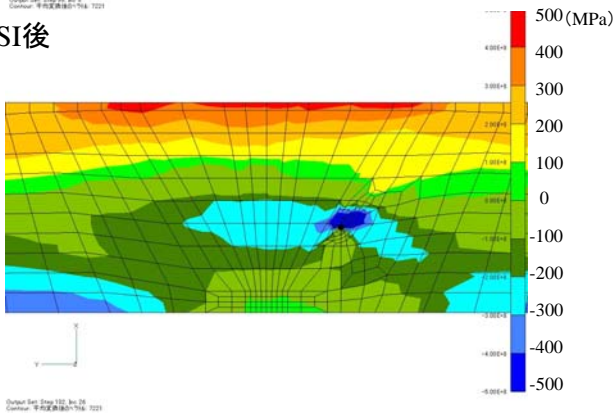
## ○対策IHSI後の応力分布(1)

### 【き裂を有する配管での応力分布例(軸方向)】

○き裂形成後



○IHSI後



EDMき裂を模擬した解析での軸方向応力分布を示す。

・IHSI施工によってき裂の先端部周辺は強圧縮応力場となり、当該き裂(主き裂)のSCCおよび疲労によるき裂の進展性が抑制されることが期待できる。

・IHSI施工後においても配管内表面の溶接部周辺には引張応力場が残存するが、その周囲は圧縮応力場で囲まれていることから、仮に内表面から新たなき裂(副次き裂)が発生したとしても、その深さ方向の進展は少なく、主き裂の深さを越えて進展することは無いと考えられる。

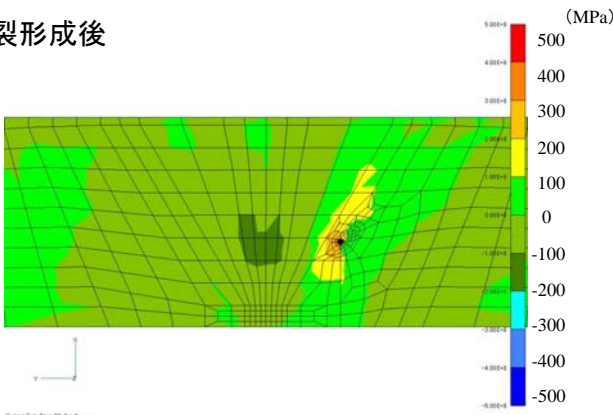
3

無断複製・転載禁止 日立GEニュークリア・エナジー/東芝/HH

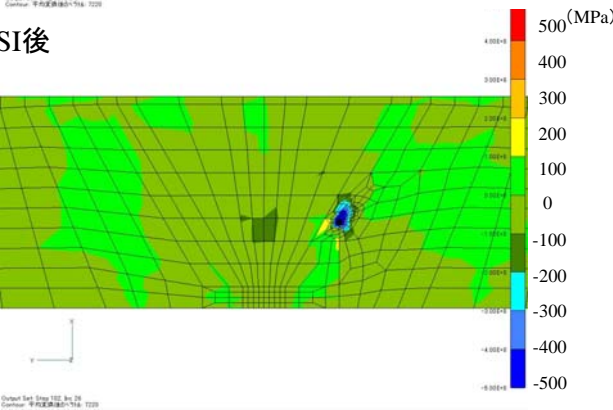
## ○対策IHSI後の応力分布(2)

### 【き裂を有する配管での応力分布例(径方向)】

○き裂形成後



○IHSI後



EDMき裂を模擬した解析での径方向応力分布を示す。

・IHSI施工によってき裂の先端部周辺は強圧縮応力場となり、当該き裂(主き裂)のSCCおよび疲労によるき裂の進展性が抑制されることが期待できる。

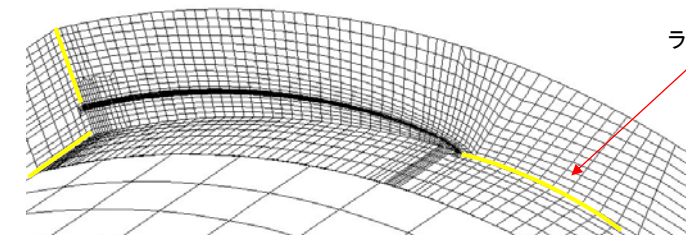
・き裂の側面には引張応力場が残存するが、その周囲は圧縮応力場で囲まれていることから、仮にき裂側面から新たなき裂(分岐き裂)が発生したとしても、その進展距離は短いと考えられる。

4

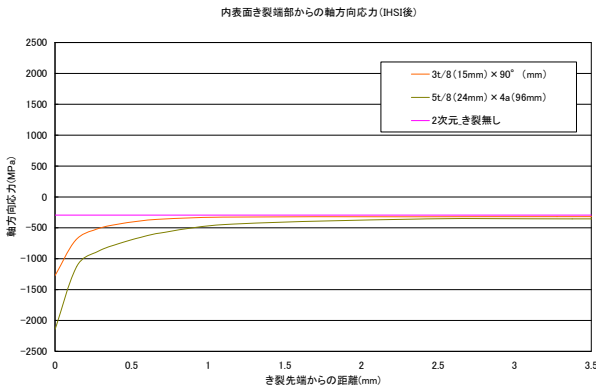
無断複製・転載禁止 日立GEニュークリア・エナジー/東芝/HH

# ○対策IHSI後の応力分布(3)

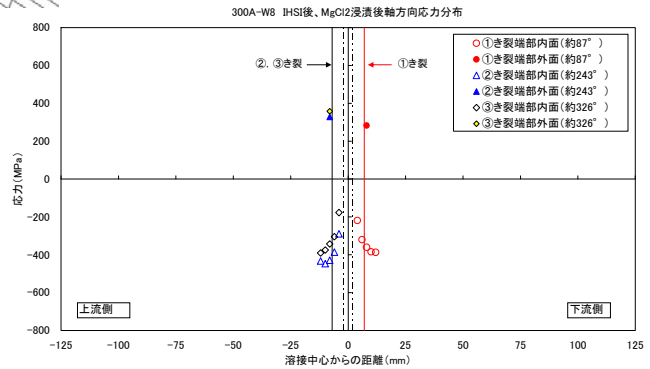
## 【配管内表面き裂端部でのIHSI効果の例】



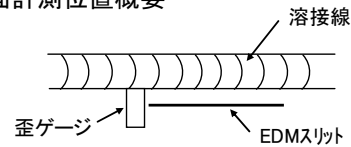
下図は300A-W8試験体での内表面き裂の端部における軸方向応力の計測結果である。解析と同様にき裂端部でも十分にIHSI効果が発揮されており、IHSI施工によってき裂の長さ方向の進展も抑制されると考えられる。



上図はき裂を有する600A配管を模擬した3次元モデルでのラインd上での軸方向応力の解析結果である。(溶接は模擬していない)  
図よりき裂端部でも十分にIHSI効果が発揮されており、IHSI施工によってき裂の長さ方向の進展も抑制されると考えられる。



配管内面計測位置概要



5

無断複製・転載禁止 日立GEニュークリア・エナジー/東芝/HHI

# ○対策IHSIの効果を見込んだき裂進展評価の考え方

対策IHSIの効果については、解析的・実験的に確認されている通り、対策IHSIを施工することで当該主き裂の深さ方向および長さ方向へのSCCおよび疲労進展は抑制される。

一方、対策IHSI後のき裂進展評価を行う場合、評価に用いる残留応力の検討として、

- ・溶接後、き裂を導入し、その後対策IHSIを施工
- ・溶接後、対策IHSI(き裂がないので予防保全IHSI)を施工し、その後にき裂を導入

について、比較した結果、次頁に示すとおり両者の応力分布は同等であることが確認された。

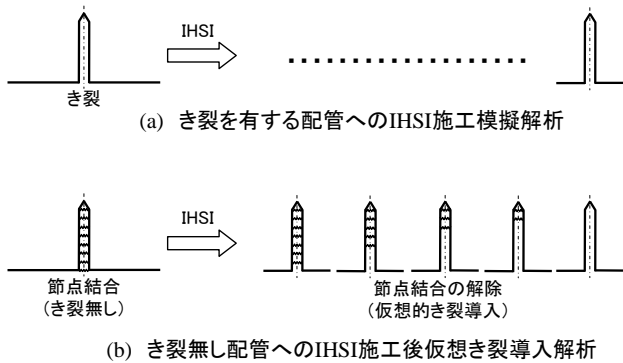
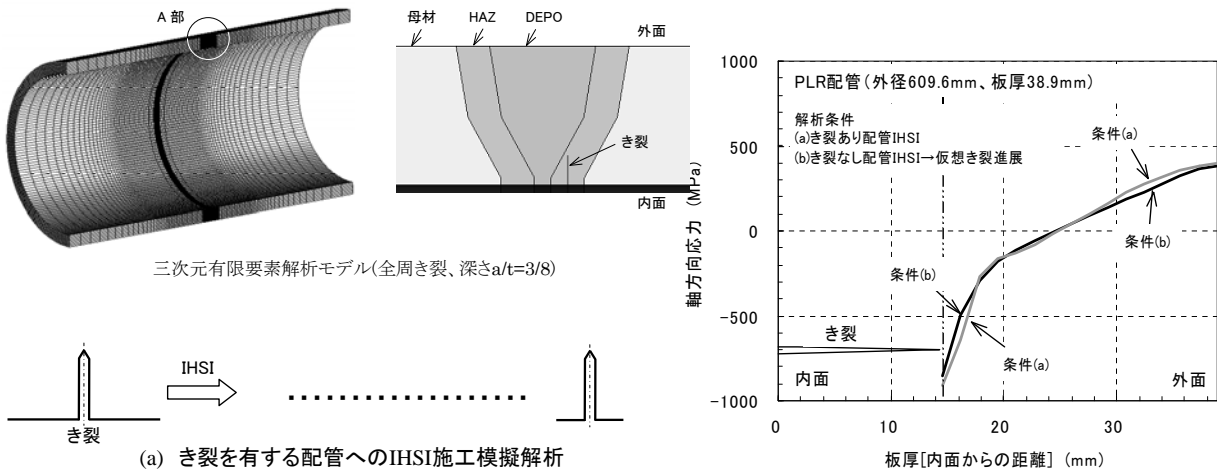
このことから、対策IHSI後のき裂の評価に用いる残留応力は欠陥のない配管へのIHSIを施工した残留応力を用いることで、妥当な評価ができると判断した。

## 添付資料

- ・き裂なしの状態に対策IHSIを施工した場合の残留応力分布の妥当性確認
- ・溶接部近傍での軸方向応力の板厚方向分布例
- ・SCCき裂進展試算

# ○き裂なしの状態に対策IHSIを施工した場合の残留応力分布の妥当性確認

き裂が存在している配管に対策IHSIを施工した後の再分布した応力分布に対し、重ね合わせの原理が成立するか確認するため、き裂がある場合とない場合の残留応力解析を実施した。

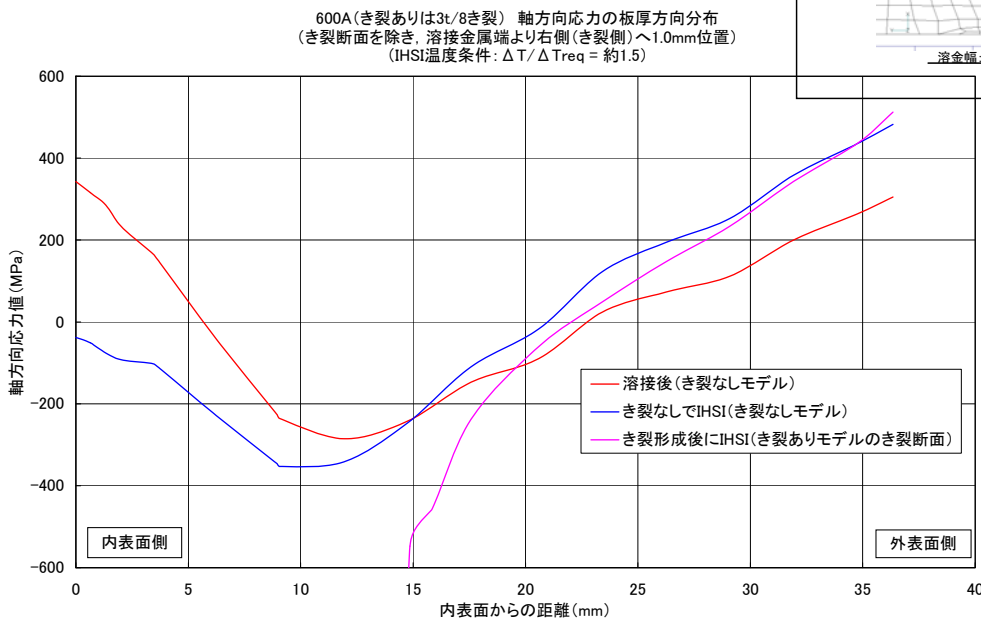


解析の結果、IHSIによる応力の再分布の影響は小さく、上記に示す様に概ね等しいことが分かった。  
以上より、き裂なし状態で対策IHSIを施工した残留応力を用いることで妥当な評価ができると判断する。

# ○溶接部近傍での軸方向応力の板厚方向分布例

下図は溶接部を模擬した600A配管モデルによる軸方向応力の板厚方向分布である。『溶接後』と『き裂なしでIHSI』はどちらもき裂を模擬していないモデルでの解析結果である。なお断面は溶接金属端部から1mm離れた断面である。  
I : 溶接後 / II : き裂なしでIHSIに対応する。

また参考記載している『き裂形成後にIHSI』はき裂断面での分布である。(溶接金属中心から8mm位置)



# OSCCき裂進展試算例【試算条件】

## 1. 溶接部近傍での残留応力分布

- I : As Welded(き裂なしモデル)
- II : 溶接後にIHSI(き裂なしモデル)

## 2. 作用応力

内圧項及び、内圧、熱、自重による応力の合計として、60MPaを考慮。  
(2003年健全性小委員会での代表3継手を参考にして設定)

## 3. 想定配管寸法

外径:625.4mm 肉厚:36.35mm

## 4. 初期き裂寸法

深さ:2mm×長さ:20mmに設定

## 5. 進展速度

維持規格JSME S NA1-2008 図 添付E-2-SA-2 オーステナイト系ステンレス鋼(低炭素系ステンレス鋼)の  
BWR通常炉内水質環境中のSCCき裂進展速度線図

$$da/dt=0 \quad (K \leq 0)$$

$$da/dt=2.0 \times 10^{-9} \quad (0 < K < 6.7)$$

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

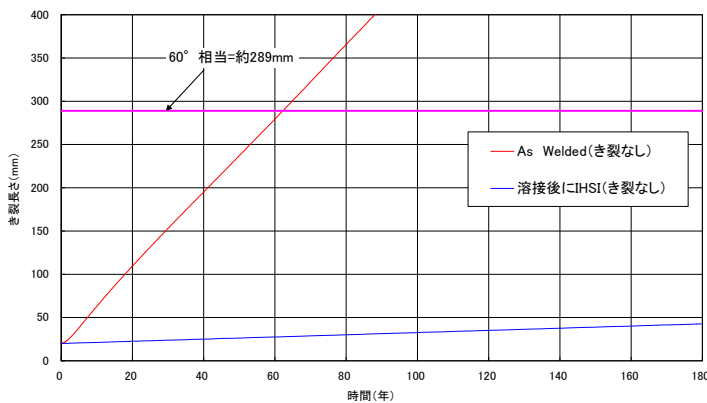
$$da/dt=2.1 \times 10^{-7} \quad (K > 57.9) \quad \text{単位}(da/dt : \text{mm/s}, K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}})$$

## 6. 応力拡大係数

応力拡大係数は、維持規格のEB-4360「応力拡大係数」及び添付E-5[応力拡大係数の算出]のうち、「5.3 表面欠陥に対する算出方法」を使用

# OSCCき裂進展試算例【試算結果】

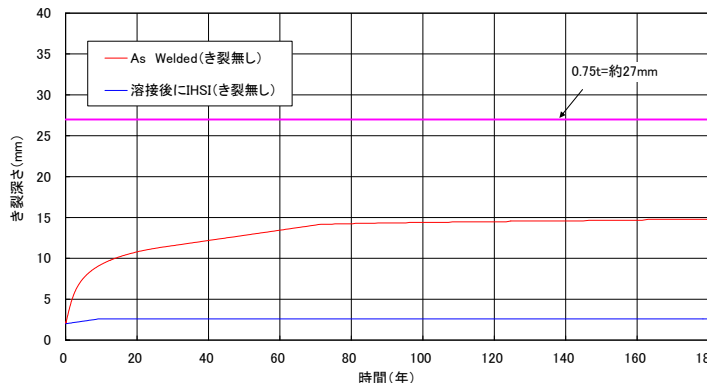
作用応力:60MPaでのSCCき裂進展解析結果 き裂長さ



左図にSCC進展試算結果を示す。

対策IHSIを施工するためには当面、『As Welded』の応力分布で評価を行い、5年間の健全性を確認する必要があることから、IHSIの効果を見込んだ評価をするためにあえて『As Welded』の分布を適用する意義は少ない。

作用応力:60MPaでのSCCき裂進展解析結果 き裂深さ



以上の観点からIHSI効果を見込んだき裂進展評価ではII案の『溶接後にIHSI(き裂なし)』が妥当と考えている。  
また実際にはき裂先端部が強圧縮で、進展性が抑制されていると考えられる実機評価に対し、保守性を有していると考ええる。



予防保全 IHSI 及び対策 IHSI との施工対象及び主要施工条件の比較

項目		予防保全 IHSI (TNS-G2804-1985, JAPEIC-W-W04 及び 16 確 S3 号)	対策 IHSI (19 確 S1 号)
材料	周継手	P-8+P-8、P-8+P-1、P-8+P-3	P-8+P-8
	長手継手	P-8+P-8、P-8+P-1、P-8+P-3	—
	管台継手	P-8+P-8	—
適用部位		周、長手、管台継手 (*1)	周継手
最高加熱温度	P-8、A-7	550℃以下	左記に同じ
	P-8、A-7 (*2)	650℃以下 (*3)	左記に同じ
	P-1、P-3	595℃以下	—
	R-43 又は F-43	600℃以下	—
冷却		内面水冷	左記に同じ
コイル幅 : L (mm)		$L \geq 2.7\sqrt{Rt}$ (*4)	左記に同じ
溶接線の位置 (mm)		板厚の半分若しくは 15mm の大きい方以上コイル端の内側 (*4)	左記に同じ
加熱時間 : $\tau$ (sec)		$\tau \geq 0.7t^2 / a$	左記に同じ
配管内外面温度差 : $\Delta T$ (°C)		$\Delta T \geq \frac{4(1-\nu)\sigma_y}{E\alpha} = \Delta T_{req}$ (*4)	左記に同じ
欠陥		微小インディケーション (*5)	板厚の 3/8t 以下 (*6)

\*1 : P-8, A-7 の組み合わせで、以下の\*2 に該当する場合で、最高加熱温度 : 650℃以下を適用する場合には適用部位から長手継手を除外する。

\*2 : P-8 に区分される母材で、低炭素のオーステナイト系ステンレス鋼及び低炭素のステンレス鋳鋼で炭素含有量 0.020%以下のものに限る。(溶接材料の炭素含有量は、0.030%以下とする。)

\*3 : 300℃を超える温度域での高周波加熱による累積加熱時間は、3 時間以内とする。

\*4 : 管台継手の場合には定義が異なるが、ここでは省略する。

\*5 : 微小インディケーションとは UT 検出限界以下の微小欠陥を意味する。

\*6 : t はき裂が存在する部位での公称肉厚とする。複数き裂が存在する場合には深さは最深き裂の数値とする。

なお溶接方法が SAW (サブマージ溶接)、SMAW (被覆アーク溶接) の場合で、かつき裂の先端が溶金部に達している可能性がある場合には、その適用き裂深さを制限することを推奨する。ただし、対象溶接継手を模擬した試験体を用いて、破壊靱性試験を実施し、 $J_{Ic}$  が 165000N/m (根拠は別途) を超えることが確認される場合には、3/8t を適用き裂深さとしてよい。(ただし本確性試験において確認された深さ以下の場合には改めての確認は不要とする。)

予防保全 IHSI 及び対策 IHSI との施工対象及び主要施工条件の比較

項目		予防保全 IHSI (TNS-G2804-1985, JAPEIC-W-W04 及び 16 確 S1 号)	対策 IHSI (19 確 S2 号)
材料	周継手	P-8+P-8、P-8+P-1、P-8+P-3	P-8+P-8
	長手継手	P-8+P-8、P-8+P-1、P-8+P-3	—
	管台継手	P-8+P-8	—
適用部位		周、長手、管台継手 (*1)	周継手
最高加熱温度	P-8	550℃以下	左記に同じ
	P-8 (*2)	650℃以下 (*3)	左記に同じ
	P-1、P-3	595℃以下	—
	R-43 又は F-43	600℃以下	—
冷却		内面水冷	左記に同じ
コイル幅 : L (mm)		$L \geq 2.7\sqrt{Rt}$ (*4)	左記に同じ
溶接線の位置 (mm)		板厚の半分若しくは 15mm の大きい方以上コイル端の内側 (*4)	左記に同じ
加熱時間 : $\tau$ (sec)		$\tau \geq 0.7t^2 / a$	左記に同じ
配管内外面温度差 : $\Delta T$ (℃)		$\Delta T \geq \frac{4(1-\nu)\sigma_y}{E\alpha} = \Delta T_{req}$ (*4)	左記に同じ
欠陥		微小インディケーション (*5)	板厚の 0.3t 以下 (*6)

\*1 : P-8+ P-8 の組み合わせで、以下の\*2 に該当する場合で、最高加熱温度 : 650℃以下を適用する場合には適用部位から長手継手を除外する。

\*2 : P-8 に区分される母材で、低炭素のオーステナイト系ステンレス鋼及びステンレス鋳鋼に限る。(炭素含有量 0.030%以下のもの)

\*3 : 最高使用温度を超える温度域での高周波加熱による加熱回数は、3 回以内とする。

\*4 : 管台継手の場合には定義が異なるが、ここでは省略する。

\*5 : 微小インディケーションとは UT 検出限界以下の微小欠陥を意味する。

\*6 : t はき裂が存在する部位での公称肉厚とする。複数き裂が存在する場合には深さは最深き裂の数値とする。

なお、き裂深さ  $3t/8$  以上の自然欠陥を導入したモックアップ試験で、き裂先端の応力改善を確認した場合、き裂深さ  $3t/8$  まで適用できる。また、溶接方法が、サブマージ溶接で、かつき裂の先端が溶接金属に達している場合は、FEM 解析により求めた補修 IHSI 施工時の J 値が材料試験によって得られた  $J_{Ic}$  の値以下であることを確認する。