

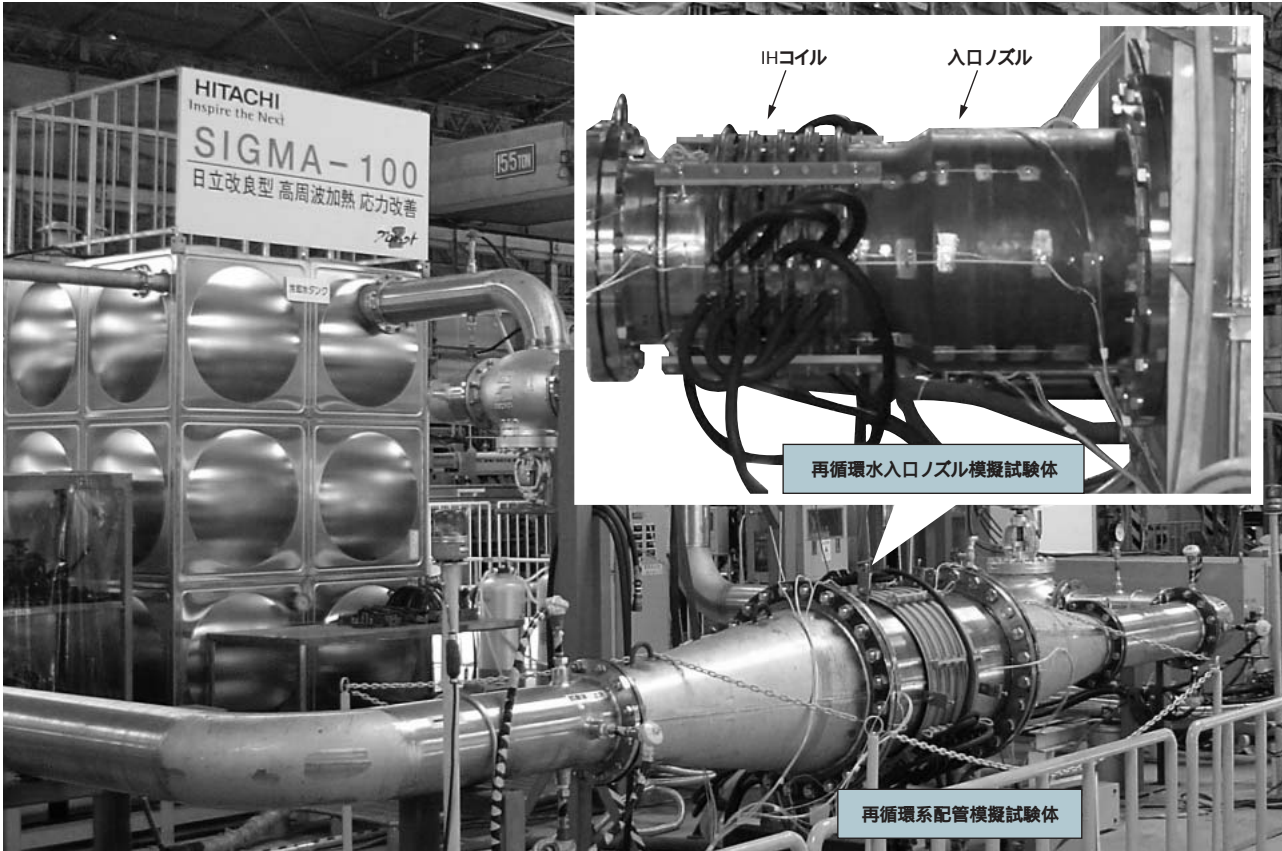
原子炉再循環水入口ノズルの応力緩和技術 IHSI施工時における冷却技術の開発

Stress Relief Technique for Inlet Nozzle in Primary Loop Recirculation System

大高 稔 Minoru Ohtaka
高橋 志郎 Shiro Takahashi

仁瓶 健一 Kenichi Nihei
椎名 孝次 Koji Shiina

林 章二 Shoji Hayashi
馬原 陽一 Yoichi Mahara



注:略語説明 IH(Induction Heating:高周波誘導加熱)

図1 実規模加熱IHSI試験装置

IHS(Induction Heating Stress Improvement:高周波誘導加熱応力改善)施工の実規模モックアップ試験装置を示す。再循環系配管や入口ノズル模擬試験体を組み込み、実施工と同じ条件で内面を通水冷却や強制冷却しつつ、外面を高周波加熱したときの温度分布の評価が可能であり、試験後に残留応力の改善を確認することによって、施工対象に応じたIHSI工法を検証する。この装置はIHSI技術の信頼性を確保するための重要なツールである。

1.はじめに

沸騰水型原子炉(BWR:Boiling Water Reactor)の原子炉再循環系(PLR:Primary Loop Recirculation)などを構成するオーステナイト系ステンレス鋼配管(SUS316L)の溶接部に応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking)以下、SCCと言う。)が顕在化している。そのため、予防保全としてSCCの一つの要因である溶接部の残留応力を低減するIHSI(Induction Heating Stress Improvement:高周波誘導加熱応力改善)の施工が進められている。

IHSIは配管内面を水流で冷却しつつ、外面をIHコイル(高

周波誘導加熱コイル)で昇温し、配管肉厚方向に温度勾(こう)配を形成して腐食環境にさらされる配管内面の応力を低減、圧縮化する工法である。しかし、この開発で対象とする再循環水入口ノズル(以下、N2ノズルと言う。)は、低合金鋼製ノズルとステンレス鋼製配管がニッケル基合金で溶接され、その内部にはサーマルスリーブが設けられている。このように複雑形状のため、従来、IHSI施工での内面冷却は困難とされていた。そこで、IHSI適用範囲拡大のために新たな冷却装置を開発することとした。

ここでは、沸騰水型原子炉のN2ノズルに対するIHSI施行

沸騰水型原子炉の再循環水入口ノズルは、低合金鋼製ノズルとステンレス鋼製配管がニッケル基合金で溶接され、その内部にはサーマルスリーブが設けられている。このため、従来、IHSI(高周波誘導加熱応力改善)施工における内面冷却は困難とされていた。そこで、水平方向に一对の噴射ノズルを設けて、スリーブとノズル内面のすき間部に冷却水を吹き込む装置を新たに開発した。この噴射ノズルの噴流は自動的に方向が変化し、流体の攪拌効果によって均一かつ十分な冷却が達成される。また、この冷却装置によって、再循環水入口ノズルの異なる材料に対する制限温度を満足させた内面冷却が可能となった。さらに、実規模加熱試験によって残留応力改善効果を確認し、実機施工の見通しを得た。

における冷却技術の開発について述べる(図1参照)。

2. N2ノズルの構造と開発課題

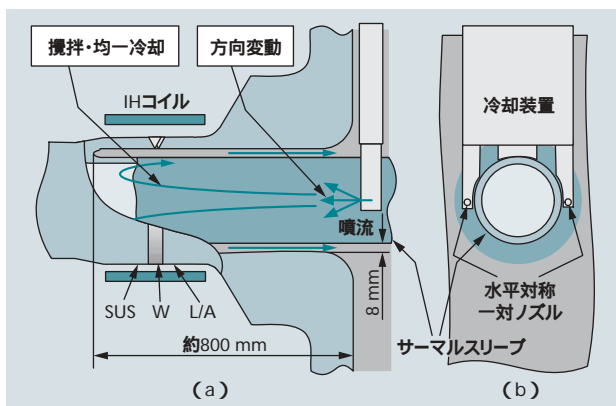
N2ノズルの構造を図2(a)に示す。N2ノズルは、圧力容器に取り付けられた低合金鋼製ノズルとステンレス鋼製配管がニッケル基合金で溶接され、その内部にはノズル内面の熱応力を緩和するためのサーマルスリーブが設けられている。一般的な配管溶接部のIHSI施工では、通常、施工対象配管への通水による内面冷却が行われる。しかし、N2ノズルの場合、通水冷却では、サーマルスリーブに阻害されてノズル内面を十分に冷却することはできない。そこで、サーマルスリーブとノズル内面とのすき間部に冷却水を炉内側から強制的に吹き込む装置を開発することとした。

すき間部の間隙(かんげき)は約8 mmと狭く、奥行きは約800 mmと深いため、冷却水の吹き込みは容易ではない。また、ノズル内面周方向に均一な冷却が要求される。

3. IHSI冷却技術

3.1 冷却装置の開発

冷却装置の概略を図2(b)に示す。前述したように配管通水による冷却では、外面加熱時にサーマルスリーブとノズル内



注:略語説明 SUS(Stainless Used Steel:ステンレス鋼) W(ニッケル基合金(溶接金属)), L/A(Low Alloy Steel:低合金鋼)

図2 再循環水入口ノズル(N2ノズル)(a)のIHSI施工用冷却装置(b) 一对の冷却ノズルを対称に設置することにより、流体攪拌による冷却効果を促進し、均一冷却が可能である。

面とのすき間部の水が沸騰して、蒸気層を形成し、内面冷却が阻害されて、肉厚内部の十分な温度勾配が得られない。

溶接部の応力改善に必要な温度勾配は、材料強度によって異なるが、ステンレス鋼配管の内外面温度差で300程度以上である。一方、N2ノズルを形成するステンレス鋼、ニッケル基合金(溶接金属)、低合金鋼の最高加熱温度制限は、それぞれ、550 以下、600 以下、595 未満である。ここで、ニッケル基合金(溶接金属)に注目して、実機施工性から余裕を見込んで最高加熱温度を550 程度とし、内面温度を100 未満(目標温度差450)に冷却できれば、前述したステンレス鋼配管で300 程度以上の内外面温度差が達成される。すなわち、ノズル内面を確実に100 未満に冷却する必要がある。したがって、沸騰の抑制はもちろんのこと、冷却水の流速を高め、限界熱流束を向上させる必要がある。そこで、サーマルスリーブとノズル内面とのすき間部に冷却水を炉内側から強制的に吹き込む装置を開発することとした。実機施工においては、製造公差、冷却装置の姿勢や位置決め精度などの影響に対して性能の変化が少なく、かつ、ノズル内面周方向に均一な冷却手法が必要となる。そのため、この冷却装置では、水平方向に対称な位置に一对の冷却水噴射ノズルを配置した。その結果、この噴射ノズルの噴流は自動的に方向が変動することがわかり、流体の攪拌(かくはん)効果によって均一かつ十分な冷却が達成される可能性を見出した。

3.2 非定常熱流動評価技術

IHSIの開発では、電磁場、熱流動および構造解析などの解析技術を用いて、各種評価を実施している。冷却装置の開発においては、熱流動解析は特に有効な手段である。N2ノズルにおける熱流動現象は非定常性が強く、定常解法では解決できない。そのため、乱流モデルとしてLES(Large Eddy Simulation)と低レイノルズ数型k-モデルを組み合わせたDEX(Detached-Eddy Simulation)を使用し、非定常熱流動現象を評価した。なお、IHヒータによる発熱量は、配管内を流れる電流密度の2乗に比例させて与えた。

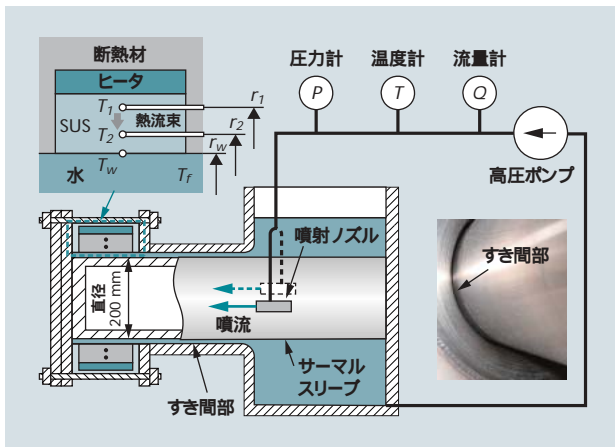


図3 縮小(1/2)モデルを用いた熱伝達率評価試験装置
冷却装置の設計に必要な流速と熱伝達率の関係を評価した。

3.3 熱伝達率評価技術

噴流流速と熱伝達率の関係を求めるため、図3に示す縮小(1/2)モデルを用いた熱伝達率測定試験を行った。ステンレス鋼で製作した円筒に熱電対を埋め込み、外面からヒータで加熱した。円筒内面の流体境界以外は断熱材で保温され、熱流束の方向は外周から中心方向となる。熱電対で測定した温度から、次式で熱伝達率を算出した。

$$Q = \frac{2}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2) \dots\dots\dots(1)$$

$$T_w = T_2 - \frac{Q}{2} \ln(r_2/r_w) \dots\dots\dots(2)$$

$$h = \frac{Q}{T_w - T_f} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 Q は熱流束(kW/m^2)、 h は熱伝達率(kW/K)、 r_1 、 r_2 、 r_w は半径方向位置(m)、 T_1 、 T_2 、 T_w は温度(°C)で、添え字はそれぞれ測定位置1,2および内壁面を表す。また、 T_f は噴流出口の水温(°C)、 h は熱伝達率($\text{kW/m}^2\text{K}$)である。

縮小モデル試験と実機との相関は、熱伝達率を無次元化したヌセルト数 N_u を用いて評価される。縮小モデル試験結果を整理して次式が得られた。

$$N_u = 0.011 \cdot R^{0.7} \cdot P^{0.4} \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 R はレイノルズ数、 P はプラントル数で、それぞれ、流速、流体物性の無次元数である。

式(4)を用いれば、ノズル内面冷却に必要な熱伝達率とそれを達成するための流速を求めることが可能となり、冷却装置の設計に反映した。

4.冷却装置の性能評価

4.1 熱流動解析による冷却性能評価

実機大の流動可視化試験に基づいて流動解析を行い、さらに、熱流動解析から冷却装置の性能を評価した。結果をまとめて図4(a)に示す。この冷却装置では、水平方向に対称な位置に一对の冷却水噴射ノズルを配置した。水中での高

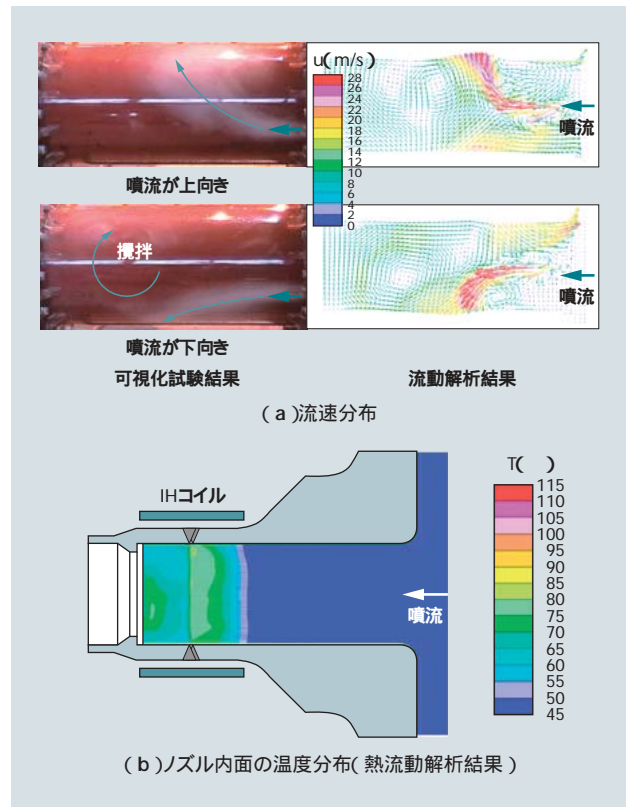


図4 可視化試験結果と流速および温度分布の解析結果
流動解析により、流動および温度特性を把握した。噴流が上下に変動するため、流体攪拌が生じ、温度分布を均一化する。

速噴流前方には圧力増加が生じ、噴射方向に対して噴流方向は変動する。さらに、対称に一对の噴射ノズルを設けることによる相互作用を利用して噴流方向の変動幅を増大させることができる。流動可視化試験の結果、噴流は数Hzで自立的に方向が変動することがわかり、この事象は非定常流動解析によっても裏付けられた。また、すき間部の奥での噴流速度は、式(4)から得られる冷却性能を満足する流速以上の約2 m/sを達成できることがわかった。

以上の知見に基づき、熱流動解析を行った結果、前述した噴流方向の変動による流体の攪拌効果によって、N2ノズルの内面は周方向に一樣な温度分布(100 °C未満)となることがわかった(図4(b)参照)。

4.2 実規模試験による検証

実機大のN2ノズル模擬試験体にIHSIを施工する実規模加熱試験を行った。結果をまとめて図5に示す。

図5(a)はIHSI施工中のN2ノズル外面および内面の温度履歴である。加熱開始後、内面および外面温度が上昇し、約350秒後に所定の外面温度に達して試験を終了した。N2ノズルを構成するステンレス鋼、ニッケル基合金(溶接金属)、低合金鋼は、材料定数の違いから低合金鋼が最も高温となり、最高加熱温度制限(595 °C未満)に最も近づく結果となった。そのときの溶接金属の外面温度は約550 °C、内面温度は

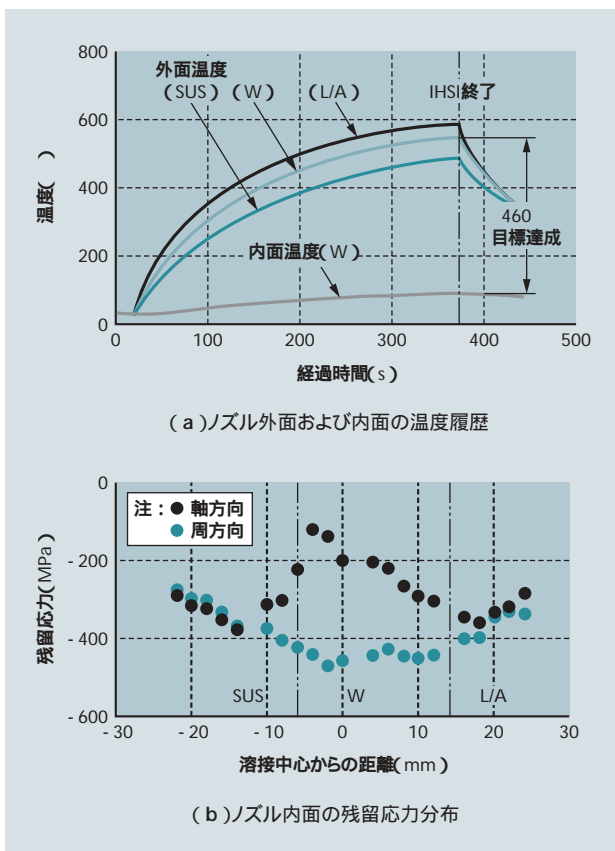


図5 実規模加熱試験結果

目標温度差450 に対して460 を達成し、ノズル内面の残留応力を圧縮することに成功した。

約90 となり、内外面温度差は約460 で、目標の450 以上を達成した。なお、すべての材料での最高加熱温度制限は満足されている。

図5(b)は、ひずみ解放法で測定したIHSI施工後のN2ノ

ズル内面の残留応力分布である。ノズル内面は軸、周方向ともに圧縮応力になっていることがわかる。特に、SCCが顕在化しているオーステナイト系ステンレス鋼で周・軸方向ともに-300 ~ -400 MPaの圧縮化に成功した。

以上、従来困難と考えられていたN2ノズルに対し、新たに開発した冷却装置によってIHSI施工が可能となった。

5. おわりに

ここでは、沸騰水型原子炉のN2ノズルに対するIHSI施行における冷却技術の開発について述べた。

原子力プラントの経年変化に伴って機器・構造物の健全性の確保が重要になってきており、IHSIなどの予防保全技術のニーズが今後ますます高まっていくことが予想される。この開発では、従来困難と考えられていたN2ノズルのIHSI施工について、主に熱流動解析技術の高度化を図り、すき間部に噴流を吹き込む強制冷却装置を開発した。さらに、開発した冷却装置を用いた実規模試験によって残留応力改善効果を確認した。これにより、実機へのIHSI施工の見通しが得られ、予防保全のための技術力を向上させることができた。今後は、実機でのIHSI施工の経験を蓄積し、さらなる技術の高度化を図る予定である。

参考文献

- 1) 高橋, 外: IHSI施工時における原子炉再循環水入口ノズルの冷却技術, 日本原子力学会2006年秋の大会(2006.3)
- 2) Takahashi, et al.: Development of Cooling Techniques on Induction Heating Stress Improvement of Reactor Recirculation Inlet Nozzle, ICONE15-10244(2007.4)

執筆者紹介



大高 稔
1983年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所
原子力設計部 所属
現在, 原子力発電プラントの原子炉保全業務に従事



椎名 孝次
1980年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発
研究所 原子力システムプロジェクト 所属
現在, 原子力システム・機器の研究開発に従事
工学博士
日本原子力学会会員, 日本機械学会会員, 日本伝熱学会
会員



高橋 志郎
1992年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発
研究所 原子力システムプロジェクト 所属
現在, 原子力機器の研究開発に従事
工学博士
日本原子力学会会員, 日本機械学会会員



林 章二
1981年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所
原子力設計部 所属
現在, 原子力発電プラントの原子炉保全業務に従事



仁瓶 健一
1984年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所
原子力設計部 所属
現在, 原子力発電プラントの原子炉保全業務に従事



馬原 陽一
1991年パブコック日立株式会社入社, 呉事業所 プラント
技術本部 原子力設計部 所属
現在, 原子炉圧力容器の予防保全業務に従事