

鑄造ステンレス鋼の超音波探傷試験技術の開発状況

Development Status of Ultrasonic Test Techniques for Cast Stainless Steel

西川 嘉人 (Yoshito Nishikawa) *1

要約 PWR 1次冷却材管の材料である鑄造ステンレス鋼では超音波探傷試験が困難とされている。これに対してINSSでは、PWR 1次冷却材管の検査に供することを目的に、大型2振動子探触子を開発し、周方向および軸方向の欠陥への超音波探傷法の適用性を検討した。その結果、評価不要とされる寸法の疲労き裂を検出できること、深さおよび長さのサイジングが可能であることを確認した。

キーワード 鑄造ステンレス鋼, 加圧水型軽水炉, 1次冷却材管, 超音波探傷試験, 2振動子探触子

Abstract Ultrasonic testing has been thought to be difficult to apply to cast stainless steel which is used as the material for the main coolant pipes in pressurized water reactors (PWRs). An ultrasonic testing technique using large aperture twin crystal transducers was developed in INSS for application to inspection of the main coolant pipes. The method was evaluated in an application to detect circumferential and axial defects in the cast stainless steel pipes. It was found that (1) the defects could be detected which had a depth that was so small that their evaluation was not required; and (2) depth sizing and length sizing of detected defects were also possible.

Keywords Cast stainless steel, PWR, main coolant pipe, ultrasonic test, twin crystal transducer

1. はじめに

鑄造ステンレス鋼は強度が高く優れた耐食性、溶接性を有することから、PWR (Pressurized Water Reactor, 加圧水型軽水炉) の1次冷却材管や1次冷却材ポンプケーシングに使用されている。これら1次冷却材圧力バウンダリー機器の溶接部は、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格⁽¹⁾では、供用期間中検査で体積試験を実施することが要求されており、体積試験として超音波探傷試験を実施している。超音波探傷試験は、配管外面から配管内面の欠陥を検出し、検出した欠陥については、深さおよび長さの評価を行う。

鑄造ステンレス鋼には、図1に示すように鍛造ステンレス鋼と比較して非常に大きな柱状晶が成長する。超音波探傷法を適用する場合、この柱状晶の結晶粒界とその異方性が材料中を通過する超音波を散乱させるとともに伝搬方向を偏向させ、欠陥識別性の低下や欠陥位置の誤認等を発生させる。

結晶粒における超音波の散乱と減衰への対処法としては、低周波数で送受信分割の大型の集束型振動子により集束効果を持たせることが、結晶異方性への対処法としては、縦波の超音波を使用することが有効であることから、INSSではこれらの特徴を持った探触子を開発し⁽²⁾、これを走査するシステムとともに鑄造ステンレス鋼の1次冷却材管の超音波探

鍛造ステンレス鋼 溶接部 鑄造ステンレス鋼

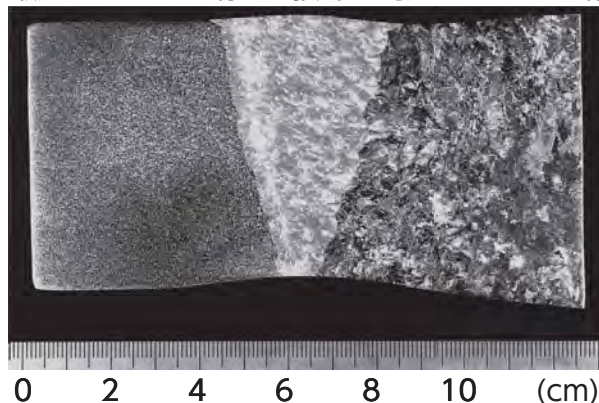


図1 ステンレス鋼の組織

*1 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現関西電力(株)

傷試験技術を検討・評価してきた。(2)~(6)

2. INSSにおける超音波探傷試験技術開発

2.1 探触子

1次冷却材と接触する1次冷却材管内面の欠陥を配管外面から検出するため、鋳造ステンレス鋼における超音波の伝搬特性に対処できるよう、表1および図2に示す大型2振動子探触子を開発した。これは図3に示すように低周波数の縦波を用いた斜角探触子であり、板厚が約70mmの配管内面に超音波を集束させるよう2個の球面振動子を送受信それぞれに角度を持たせて配置している。

表1 大型2振動子探触子の仕様

型式	縦波斜角2振動子
外形寸法	100×100×80 mm
周波数	0.5～1 MHz
振動子形状	球面型
屈折角	40～55°
集束深さ	40～75 mm



図2 大型2振動子探触子

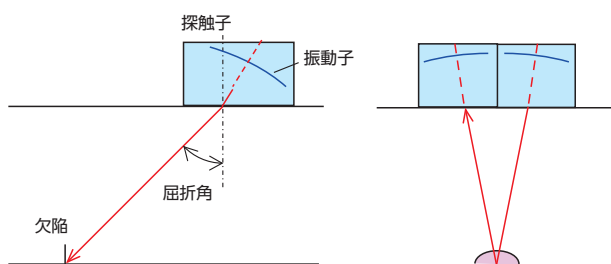


図3 大型2振動子探触子の振動子の配置

2.2 周方向欠陥の探傷試験

溶接残留応力の影響等で比較的発生しやすいと考えられる1次冷却材管の溶接部近傍での溶接線に平行な割れを対象に、溶接線に直交する方向からの探傷試験を行った。

鋳造ステンレス鋼の配管試験体内面に欠陥を導入し、開発した大型2振動子探触子で検出性を確認した。なお検出性については、コーナーエコーのSN比が2倍以上のものを検出可能とした。

さらに検出した欠陥について深さサイジングおよび長さサイジングを行った。深さサイジングは、端部エコー法により、図4に示すように欠陥のコーナーエコーと端部エコーを検出し、両者の位置関係から欠陥の深さを求めた。また、長さサイジングは、欠陥の長さ方向に探触子を移動させコーナーエコーを検出する範囲（消失長さ）から求めた。深さサイジングおよび長さサイジングの精度は、米国機械学会（American Society for Mechanical Engineers, ASME）が制定するボイラ・圧力容器規格のSection XI Appendix VIII（Performance Demonstration for Ultrasonic Examination）で検査員の合格基準として定められている鍛造ステンレス鋼の基準値である、欠陥深さのRMS（Root Mean Square, 二乗平均平方根）誤差3.2mm、欠陥長さのRMS誤差19mmを目標に検討した。

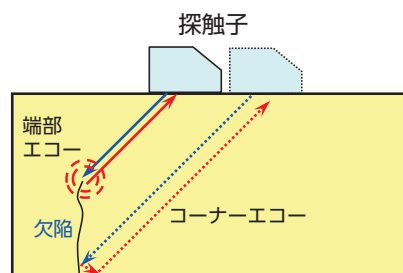


図4 深さサイジングの方法

(1) 試験装置・方法

表1の仕様で作製した6種類の大型2振動子探触子と、図5に示すXYスキャナ、Zetec社製の超音波探傷器および専用の分析ソフト（DYNARAYおよびUltraVision）からなる試験装置により、水を接触媒質として探傷試験を行った。

(2) 試験体

超音波探傷試験には、1次冷却材管と同等の厚

さ69mmの鍛造ステンレス鋼配管材に板厚に対して10%、20%、30%、50%となる深さの異なる4種類の疲労き裂を導入した小型試験体を製作した。小型試験体の例を図6に示す。



図5 試験装置 (XYスキャナと超音波探傷器)

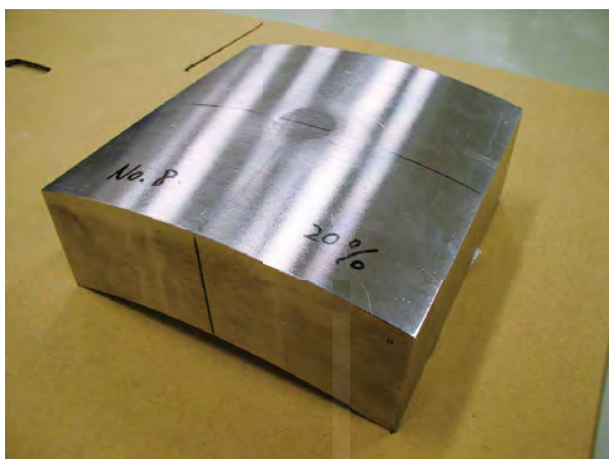


図6 小型試験体 (200×200×69 mm)

(3) 試験結果

本試験では深さ7mm以上の疲労き裂の検出が可能であった。なお発電用原子力設備規格 維持規格によれば、板厚70mmでアスペクト比を最小に仮定したとき、深さ約5mmの欠陥は評価不要の欠陥となるが、本試験とは別にINSSが受託して実施した試験では本探傷法で深さ5mmの疲労き裂を検出した⁽³⁾ことから、評価不要の欠陥まで検出できることを確認している。

また、深さサイジングを実施した結果を図7に示す。ASMEの鍛造ステンレス鋼に対する検査員の合格基準3.2mmに対し、全体のRMS誤差は2.0mmであり良好な結果を得た。

なお、長さサイジングについてはASME規格の

鍛造ステンレス鋼に対する検査員の合格基準19mmに対し、RMS誤差は14mmであり良好な結果であった。

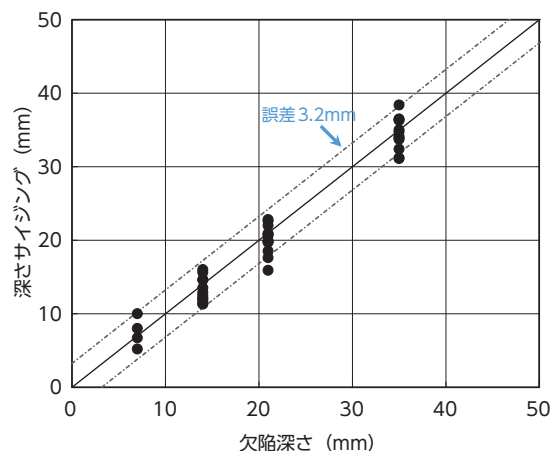


図7 周方向疲労き裂の深さサイジング結果

2.3 軸方向欠陥の探傷試験技術開発

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規程 (JEAC4207-2008)⁽⁷⁾では、斜角法により配管の超音波探傷試験を実施する場合は、溶接線に対して直角方向及び平行方向に探傷することが定められていることから、溶接線に直交する軸方向欠陥に対する周方向からの探傷試験も行った。

(1) 試験装置・方法

周方向欠陥の探傷試験と同様の装置・方法で試験を実施した。

(2) 試験体

鍛造ステンレス鋼配管を溶接した後に溶接線を横切る方向の疲労き裂を導入し、探傷試験と疲労進展を交互に実施することで、同じ試験体を使用して異なる深さの疲労き裂について試験を実施した。

(3) 試験結果

軸方向欠陥については、発電用原子力設備規格 維持規格から求められる評価不要欠陥寸法より小さい深さ4mmの疲労き裂の検出が可能であった⁽⁵⁾。また深さサイジングの結果を図8に示す。そのRMS誤差は3.9mmで、ASME規格の鍛造ステンレス鋼に対する検査員の合格基準3.2mmより大きく、周方向欠陥の深さサイジング結果より誤差が大き

かった。なお、長さサイジングの結果は、ASME規格の鍛造ステンレス鋼に対する検査員の合格基準19mmに対し、RMS誤差が8.5mmであり良好であった。

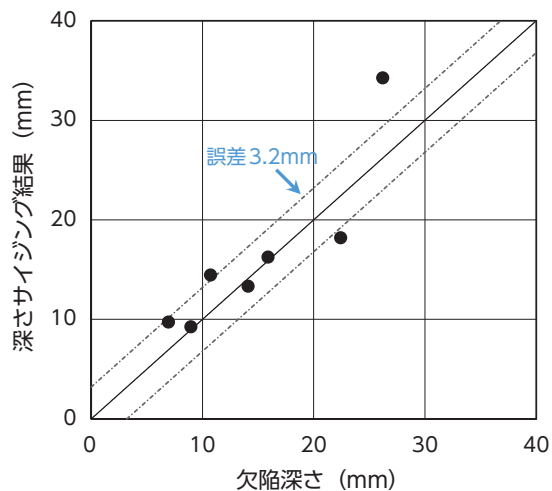


図8 軸方向疲労き裂の深さサイジング結果

2.4 配管試験体での探傷試験技術開発

1次冷却材管と同規模の配管の内面に欠陥を導入した試験体に配管外周から探傷する自動走査機構を適用し、1次冷却材管での試験条件を模擬した。

(1) 試験装置

図9に示す直径900mmの大径配管の外周からの自動探傷が可能となる配管用自動走査機構を開発し、6種類の大型2振動子探触子とZetec社製の超音波探傷器および専用の分析ソフト（DYNARAYおよびUltraVision）からなる試験装置により探傷試験を行った。なお、配管の探傷面と探触子間を常

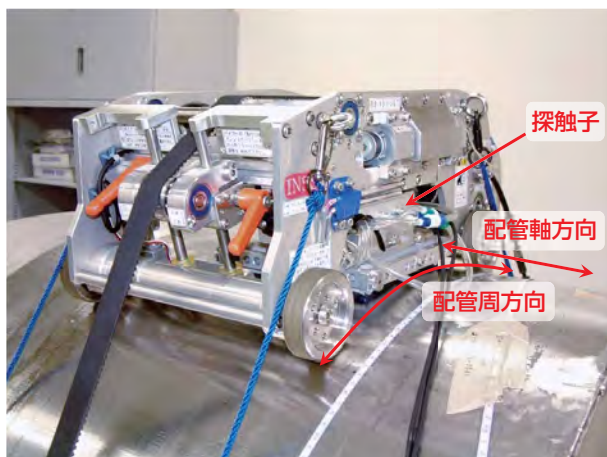


図9 配管（直径900 mm）用自動走査機構

に接触媒質がある状態を維持できるように局部水浸治具を開発⁽²⁾し、適用した。

(2) 試験体

超音波探傷試験には、図10に示す1次冷却材管と同規模の試験体を製作し、溶接線付近の周方向に深さ7mm、20mm、28mmの3個の放電加工スリットおよび深さ20mmの1個の疲労き裂を導入した。

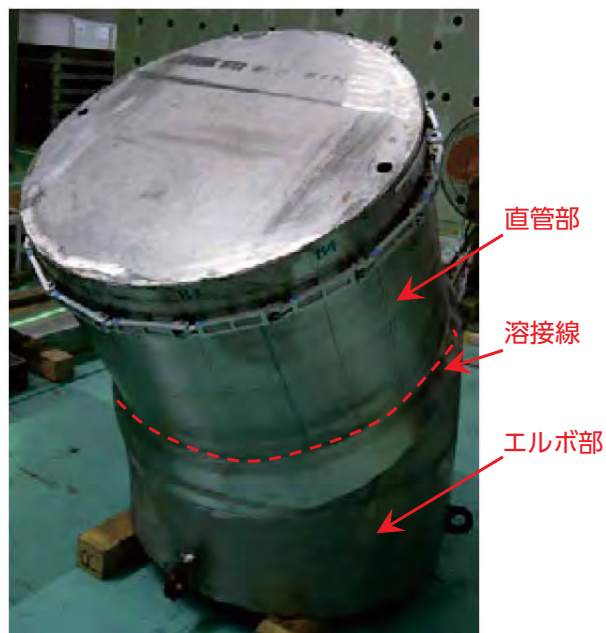


図10 配管試験体

(3) 試験結果

放電加工スリットと疲労き裂を探傷した結果、いずれの欠陥も検出は可能であった。深さサイジングを実施した結果を図11に示す。放電加工スリットに対してRMS誤差は5.7mmで、疲労き裂に対してRMS誤差は4.8mmであり、いずれもASME規格の鍛造ステンレス鋼に対する検査員の合格基準3.2mmより大きかったが、いずれの欠陥に対しても誤差が3.2mm以下となった探触子があった。

また、長さサイジングについては、ASME規格の鍛造ステンレス鋼に対する検査員の合格基準19mmに対し、放電加工スリットのRMS誤差は17.4mm、疲労き裂のRMS誤差は16.3mmであり良好であった。

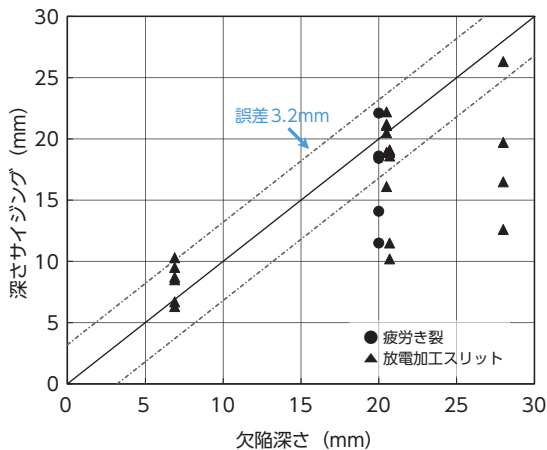


図11 配管試験体の深さサイジング結果

3. まとめと今後の課題

これまでINSSにて開発した大型2振動子探触子は、評価不要寸法の欠陥を検出可能であることを確認した。また、検出した欠陥について深さサイジングおよび長さサイジングは可能であり、ASME規格の鍛造ステンレス鋼に対する検査員の合格基準に対して、深さサイジングでは一部の結果で満足しなかったものの、長さサイジングは基準内の結果が得られた。

有意な信号を検出した場合はそれが欠陥からの反射波であることを確認する必要がある。また検出された欠陥の深さサイジング結果の誤差はASMEの鍛造ステンレス鋼に対する検査員の合格基準を満足するレベルであることが望ましい。これらに対応するため、大型2振動子探触子と同様に低周波数で発信・受信を分割した大型のフェーズドアレイ探触子を用いた超音波探傷試験技術の開発を行っている。フェーズドアレイ探触子は、探触子ユニットに複数の振動子を並べ、各振動子の発信・受信タイミングを調整することで、同時に異なる複数の条件での探傷が実施できる。一度の試験で同時に異なる複数条件の探傷を行った中で最適な探傷結果を確認することや、異なる条件による探傷結果を比較して評価することで、検出性能の向上と誤検出の防止が可能になり、探傷結果の信頼性向上が期待できる。

参考文献

- (1) 発電用原子力設備規格 維持規格 (2012年版), 日本機械学会 (2012).
- (2) 黒住保夫, “鍛造ステンレス鋼の超音波探傷検査技術の開発,” INSS Journal, Vol.7, p.159 (2000).
- (3) 黒住保夫, 石田仁志, “新開発自動超音波探傷システムを用いた鍛造ステンレス鋼中の欠陥検出感度およびサイジング特性,” INSS Journal, Vol.11, p.182 (2004).
- (4) 西川嘉人, 石田仁志, 黒住保夫, “鍛造ステンレス鋼溶接部における軸方向き裂の大型探触子による検出性評価,” INSS Journal, Vol.20, p.182 (2013).
- (5) 西川嘉人, 石田仁志, 黒住保夫, “鍛造ステンレス鋼溶接部における軸方向き裂の大型探触子による検出性評価,” INSS Journal, Vol.20, p.182 (2013).
- (6) 西川嘉人, “鍛造ステンレス鋼配管溶接部における軸方向き裂の大型探触子による深さサイジング性評価,” INSS Journal, Vol.21, p.163 (2014).
- (7) 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規程 (JEAC4207-2008), 日本電気協会 (2008).