

中性子回折による原子炉用小口径配管の残留応力分布測定
Residual stress measurement of small diameter piping for nuclear reactors
by neutron diffraction

佐野雄二¹⁾ 秋田貢一²⁾ 塙崇弘²⁾ 鈴木裕士³⁾ 町屋修太郎³⁾
 Yuji SANO Koichi AKITA Takahiro SAKAI Hiroshi SUZUKI Shutaro MACHIYA

¹⁾株式会社 東芝 ²⁾武藏工業大学 ³⁾日本原子力研究開発機構

JRR-3 中性子ビームを使用して、小口径配管の残留ひずみ分布を測定した。その結果、レーザビーニング処理により、内径 9.5mm の配管内面に圧縮残留応力が形成されることを非破壊で確認した。

キーワード： 原子炉、配管、残留応力、レーザビーニング、中性子、非破壊

1. 目的

原子炉用材料（ニッケル基合金 Alloy600 など）およびその溶接金属（Alloy182 など）に対する中性子残留応力測定技術の適用可能性を確認する。また、応力腐食割れ（SCC）対策として使用されているレーザビーニング処理による残留応力の改善効果を非破壊で確認する。さらに、材料内部の残留ひずみ分布を測定し、有限要素法（FEM）による残留応力予測技術の妥当性を評価するための基礎データとする。

2. 方法

ニッケル基合金模擬配管（Alloy600）、ニッケル基合金溶接継手（Alloy182）および中性子回折による残留応力測定例が豊富なフェライト系材料による模擬配管（SK3）を用意した。中性子回折による残留応力測定は、独立行政法人日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 ガイドホール T2-1 に設置されている残留応力解析用中性子回折装置（RESA）で実施した。測定のようすを図 1 に示す。



図 1 中性子回折による残留ひずみの測定

各試験体について、回折角および回折強度を測定し、測定可能な体系（中性子透過長さ）を評価した。次に、レーザピーニング処理を行った試験体および未処理の試験体についてひずみ測定を行い、レーザピーニング処理による残留応力改善効果を確認した。さらに、FEMによるレーザピーニング処理のシミュレーションを行って中性子回折による測定結果と比較することにより、シミュレーションの有効性、レーザピーニング処理の曲面形状への適用性を評価した。溶接継手については、ひずみ測定から予想される初期残留ひずみ分布を仮定し、レーザピーニングシミュレーションによって求まるひずみ分布を測定結果と比較することにより、適用性を評価した。

3. 研究成果

フェライト系材料（SK3）配管（内径 9.5mm、肉厚 3.75mm）については、全肉厚にわたる残留ひずみおよび応力の深さ分布測定が可能であることを確認した。また、内面にレーザピーニング処理を行うことにより、配管の内面側に圧縮残留応力が形成され、それとバランスする形で肉厚中央および外側の残留応力は引張側に変移することを確認した。

測定結果の一例として、内面にレーザピーニング処理した配管および未処理の配管のひずみ分布を図2に示す。また、表1には測定条件をまとめて示す。レーザピーニング施工により配管内面から約0.5mmないし1mmの深さまで、圧縮の周方向ひずみ（ ε_h ）と引張の径方向ひずみ（ ε_r ）が導入されている。なお、配管肉厚中心部には、内面側の圧縮ひずみを補償する形で引張ひずみが生じている。

ニッケル基合金（Alloy600）については結晶粒が大きいためか、回折角の変化を十分な精度で決定できるような回折プロファイルは得られなかった。このため、特殊治具を使用して回転揺動を行うことにより、全肉厚（3.75mm）にわたるひずみ分布の測定を行った。

表1 中性子回折測定条件

Detector	PSD		
Wavelength, nm	0.2073		
Strain component	ε_h	ε_r	ε_z
Diffraction plane	$\alpha\text{-Fe}211$	$\alpha\text{-Fe}110$	$\alpha\text{-Fe}110$
Diffraction angle $2\theta_0$, deg	124.55	61.37	61.37
Divergent slit, mm	W=0.5, H=15	W=0.5, H=15	W=1.0, H=1.0
Receiving slit, mm	W=0.5, H=15	W=0.5, H=15	-

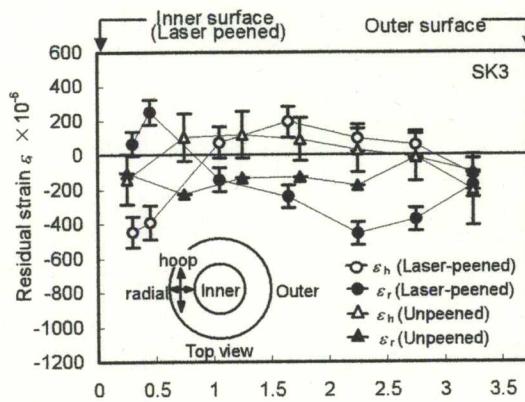


図2 残留ひずみ分布の測定結果

4. 結論・考察

実機最小径配管（内径 9.5mm）を使用して、中性子回折の有効性を確認するとともに、レーザピーニング処理による残留応力改善効果を非破壊で確認した。
 フェライト系材料と比較して、ニッケル基合金（オーステナイト）の中性子回折ではバックグラウンドが高く、測定の S/N 比が低下する傾向にあった。このため、比較的薄肉の配管については中性子回折による残留応力測定が可能であるが、厚肉のニッケル基合金配管についてはバックグラウンド低減など、今後の検討が必要である。

5. 引用(参照)文献等

- (1) 佐野雄二, 秋田貢一, 政木清孝, 越智保雄, 佐藤眞直, 梶原堅太郎, 鈴木裕士, “放射光および中性子によるレーザピーニング効果の確認”, 日本実験力学会 2006 年度年次講演会, 2006 年 3 月.
- (2) 佐野雄二, 小畠稔, 内藤英樹, 秋田貢一, 田中寛大, 高橋和馬, 鈴木裕士, “レーザピーニングによる細管内面の残留応力改善と中性子回折による確認”, 日本材料学会第 55 期学術講演会, 2006 年 5 月.
- (3) Y. Sano, N. Mukai, M. Yoda, T. Uehara, I. Chida, and M. Obata, “Development and Applications of Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology,” Proc. Int. Conf. on Application of Photonic Technology (Photonics North 2006), Quebec City, June 2006.
- (4) 鈴木裕士, 佐野雄二, 田中寛大, 秋田貢一, レーザピーニング処理面における第二種ひずみの発生, 日本機械学会材料力学部門カンファレンス (M&M2006), 2006 年 8 月.
- (5) 佐野雄二, 小畠稔, 内藤英樹, 秋田貢一, 鈴木裕士, レーザピーニング処理した小口径配管の中性子回折による残留応力評価, 日本機械学会材料力学部門カンファレンス (M&M2006), 2006 年 8 月.
- (6) Y. Sano, M. Obata, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, H. Suzuki, M. Sato and K. Kajiwara, “Characterization of Laser Peened Materials by X-ray and Neutron Diffraction Techniques,” Proc. Int. Symp. on Advanced Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, Sapporo, September 2006.
- (7) 堀崇弘, 秋田貢一, 大谷真一, 佐野雄二, 町屋修太郎, 盛合敦, 鈴木裕士, レーザピーニング施工した細管内部の中性子回折による残留応力測定, 第 50 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2006 年 12 月発表予定.