

陽電子消滅法を用いた原子力発電所ステンレス鋼配管の 疲労損傷評価

Fatigue Damage Evaluation of Stainless Steel Pipes in Nuclear Power Plants Using Positron Annihilation Lineshape Analysis

河口 恭寛 (Yasuhiro Kawaguchi) *

中村 規子 (Noriko Nakamura) † 遊佐 寛 (Satoru Yusa) †

要約 陽電子消滅法では、金属材料中の転位等の格子欠陥を検出し疲労による損傷程度を推定できることから、原子力発電所の1次系に用いられているステンレス鋼 (SUS316) 配管について、疲労による損傷度を陽電子消滅法を用いて評価することを試みた。陽電子源として⁶⁸Geを用い、陽電子が材料中で対消滅したときに発生する γ 線のエネルギーピークの広がり測定しSパラメータとして表した。加圧水型原子力発電所の加圧器下部のサージ管から切り出した実機材を陽電子消滅法で測定しSパラメータを求め、これまでに得られているSUS316鋼の疲労寿命比とSパラメータの関係と対比することで測定した配管の疲労損傷度の評価を行った。さらに、透過型電子顕微鏡で同じ実機材のミクロ組織観察を行い、転位の発生状況を観察することで陽電子消滅法による疲労評価の妥当性を確認した。その結果、基準としている受入材のSパラメータのばらつきが ± 0.002 程度であるのに対し、実機材と受入材のSパラメータの差は $-0.0013 \sim 0.0014$ の範囲に収まっており、この実機材の値は受入材からの有意な差は見られず、またその実機材の透過型電子顕微鏡によるミクロ観察でも転位の発生状況が受入材と同程度であったことから、陽電子消滅法によるステンレス鋼の疲労損傷評価の妥当性を確認することができた。

キーワード 原子力発電所, 疲労, 陽電子消滅法, SUS316, ドップラー幅広がり測定, 転位

Abstract Since positron annihilation lineshape analysis can evaluate the degree of fatigue damage by detecting defects such as dislocations in metals, we applied this method to evaluate that in a type 316 stainless steel pipe which was used in the primary system of a nuclear power plant. Using ⁶⁸Ge as a positron source, an energy spread of annihilation gamma ray peak from the material was measured and expressed as the S-parameter.

Actual plant material cut from a surge line pipe of a pressurizer in a pressurized water reactor type nuclear power plant was measured by positron annihilation lineshape analysis and the S-parameter was obtained. Comparing the S-parameter with a relationship between the S-parameter and fatigue life ratio of the type 316 stainless steel, we evaluated the degree of fatigue damage of the actual material. Furthermore, to verify the evaluation, microstructures of the actual material were investigated with TEM (transmission electron microscope) to observe dislocation densities. As a result, a change in the S-parameter of the actual material from standard as-received material (type 316 stainless steel) was in the range from -0.0013 to 0.0014 , while variations in the S-parameter of the standard as-received material were about ± 0.002 , and hence the differences between the actual material and the as-received material were negligible. Moreover, the dislocation density of the actual plant material observed with TEM was almost the same as that of the as-received one. In conclusion, we could confirm the applicability of the positron annihilation lineshape analysis to fatigue damage evaluation of stainless steel.

Keywords nuclear power plant, fatigue, positron annihilation, type 316 stainless steel, lineshape analysis, dislocation

1. 緒言

軽水炉型原子力発電所が運転を開始してから30年

以上経過するものが増加しており、その設備の高経
年化に対し、使用されている構造材料の経年的な変
化を把握し、それらの健全性を診断し余寿命を推定

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 関西電力(株) 美浜発電所

† 石川島播磨重工業(株) 基盤技術研究所

することが求められている。そのため原子力発電所では機器の機能が損なわれる以前に経年劣化を検出するため液体浸透探傷検査，超音波探傷検査，渦電流探傷検査等の様々な検査が行われている。

疲労については，構造材料中の欠陥，きず，介在物などを起点として，材料の降伏応力以下の小さな応力でも亀裂は徐々に成長し，最終的には急速破壊をもたらすことがある。疲労寿命の大部分は，巨視的な亀裂が顕在化する前の1~3結晶粒内での亀裂の発生や安定成長などの時期に費やされるため^{(1), (2)}，この段階において損傷程度を把握することが重要となる。本研究では，原子力発電所の一次系ステンレス配管の疲労について，繰り返し応力が作用し疲労損傷が生じる可能性がある箇所から切り出した実機材を供試体として，亀裂が顕在化し成長する以前の疲労損傷度を破断までの疲労寿命比として陽電子消滅法により評価することを試みた。陽電子消滅法は，加速器や放射性同位元素から出る陽電子が材料中の電子と対消滅する際に発生する γ 線のドップラー広がりや空間分布，あるいは陽電子が材料中で消滅するまでの時間分布を測定する方法であり，亀裂が発生する前の塑性変形による空孔や転位などの格子欠陥の増加に敏感である^{(3)~(7)}。ここでは，原子力発電所内でのその場測定を行うことを目指しているため，測定システムが簡単な消滅 γ 線のエネルギー広がり測定する方法（ドップラー幅広がり測定）を採用した。

これまでに筆者らは⁽⁸⁾，SUS316鋼の疲労試験片を用いてドップラー幅広がり測定を行い，疲労損傷度と測定したパラメータとの関係を明らかにした。また，それら試験片のミクロ組織観察により疲労損傷度による転位の発生状況も調べた。そこで，本研究では，原子力発電所の実機材を陽電子消滅法で測定し，得られたパラメータから疲労損傷度を評価した。さらに，透過型電子顕微鏡で転位の状況を観察することで陽電子消滅法による疲労損傷度の評価の妥当性を確認した。

2. 実験方法

2.1 陽電子消滅のSパラメータ測定

材料中に転位や空孔などの格子欠陥があると，原子核が無いところに伝導電子がしみだし格子欠陥は負に帯電した状態となるため，正の電荷を持つ陽電

子は格子欠陥に引き寄せられ伝導電子と対消滅する割合が高くなる。金属材料中の電子を内殻電子と伝導電子に分けると，伝導電子が陽電子と消滅した場合に発生する γ 線のエネルギー分布は内殻電子と陽電子が消滅した場合よりも幅の狭い鋭いピークの分布となる^{(9), (10)}。従って，疲労より材料中に転位などの格子欠陥が多くなると伝導電子との消滅割合が多くなり，陽電子が消滅して発生する γ 線のエネルギー分布の幅が狭く，ピークは鋭くなる。

測定に用いた陽電子消滅測定装置（AEA Technology製PALA-2）を図1に示す。装置は，高純度Ge単結晶 γ 線検出器（分解能： ^{60}Co の1.332MeVの γ 線に対しFWHM = 1.75keV，検出器を冷却するための液体窒素デュアーを含む），前置増幅器，高電圧電源，計数部（主増幅器，アナログ/デジタル変換器，カウンタ），解析部，陽電子源およびその他の構成部品からなる。本研究では陽電子源に約3.7MBqの ^{68}Ge を用いた。測定する実機材の表面汚染および放射化による γ 線の検出器への影響を低減するため，試料と検出器の間に陽電子の消滅 γ 線を通す検出用の穴（前面から30mmまでは ϕ 8 mm，30mmから60mmまでは ϕ 14mm）を設けた鉛遮蔽（厚さ60 mm）を設置し，陽電子源の強度も高くした（通常，約740kBq）。陽電子源は当て金材と一体化されており，測定時には当て金材の反対側から発する陽電子を測定試料に照射する。試料中の電子-陽電子対消滅により発生した γ 線を試料および陽電子源の前方に位置する γ 線検出器により検出し，検出器の出力パルスは増幅した後にデジタル化しパーソナルコンピュータで解析した。検出された信号はその場で解析し，消滅 γ 線のエネルギーピークの広がり程度を示すSパラメータを計算した。Sパラメータは，図2に示すように，消滅 γ 線のエネルギーピーク中央部（ 511 ± 0.89 keVの範囲）でのカウント数と全体（ 511 ± 14.83 keVの範囲）でのカウント数の比で表される。1回の測定時間が6分程度で，同一箇所でも5回の繰り返し測定を行い，その平均値を測定点におけるSパラメータとした。

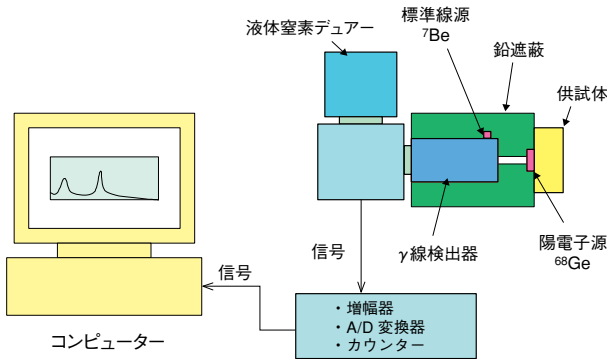
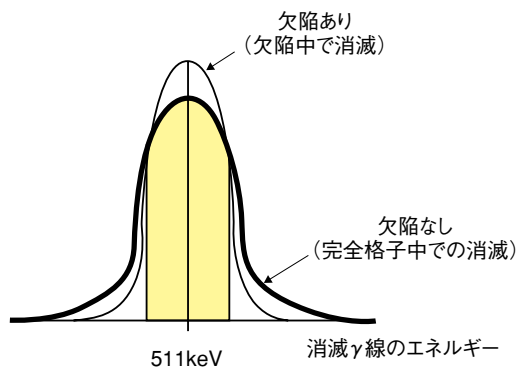


図1 ドップラー幅広がり測定による陽電子消滅測定装置



$$S = \frac{\text{ピーク中央部のカウント数}}{\text{全体のカウント数}}$$

図2 ドップラー幅広がり測定におけるSパラメータ

2.2 供試体

本研究では、原子力発電所の一次系配管で内部の流体の温度変化が激しく、熱による繰り返し応力が加わり疲労が起こりやすいと考えられている加圧器と主冷却材管をつなぐ加圧器サージ管の水平部から切り出した試料を供試体とした。供試体の採取箇所を図3および図4に示す。材質は、SUS316で、発電所の運転開始以降30年近く供用されたものである。測定した供試体の大きさは約50mm×30mm×20mmで、実機から切り出した段階での配管の表面線量当量率は0.6~1.1mSv/h（表面から50mmの位置）と高いため、消滅 γ 線の測定における表面汚染による γ 線の影響を低減するため供試体表面を除染し、測定面にあたる配管の切断面をエメリ紙で800番まで研磨した。陽電子消滅法による測定は、8個の切り出した供試体について、それぞれ配管の切断面で外表面に近い箇所と内表面に近い箇所の2箇所について行った。陽電子消滅法で測定した際の供試体の表面線量当量率は最大で13 μ Sv/h程度（表面から50mmの位置）

であり、測定に影響がない範囲（100 μ Sv/h以下）に収まっている。

これらの供試体の陽電子消滅法で測定した箇所について透過型電子顕微鏡（TEM）によりマイクロ組織観察を行った。

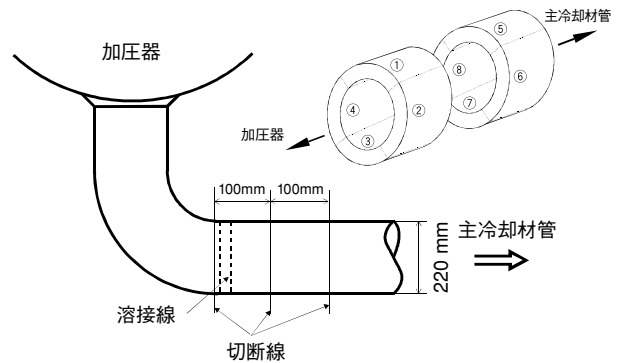


図3 加圧器サージ管の切断位置
(図中の丸番号は、供試体の番号を示す)

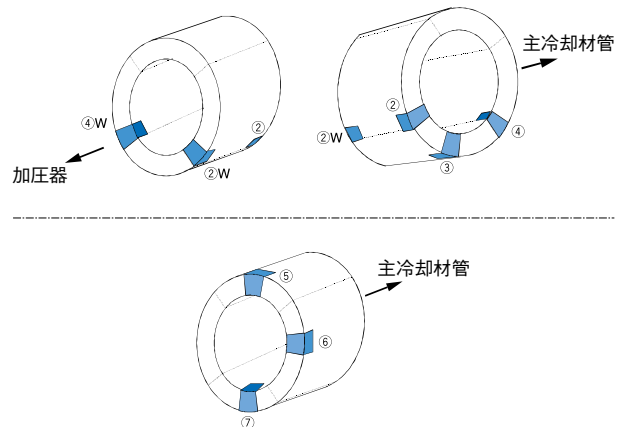


図4 供試体の採取箇所

(着色部が測定用に採取した供試体で、Wは溶接線側を示す)

3. 実験結果および考察

3.1 陽電子消滅測定結果

配管から切り出した供試体のSパラメータを標準材として用いたSUS316の受入材からのSパラメータの変化量として図5に示す。Sパラメータの変化量は、どの供試体においても内表面側および外表面側で-0.0013~0.0014の範囲に収まっており、受入材自体のSパラメータの測定によるばらつきが ± 0.002 程度であることから受入材からの有意な差は見られない。

筆者らのこれまでの研究⁽⁸⁾で得られている、SUS 316鋼の丸棒試験片に1軸の完全引張圧縮疲労試験を行ったときの疲労損傷度とSパラメータの関係を図6および図7に引用する。疲労損傷度とSパラメータの変化量の間には高い相関関係がある。図6は、正弦波による荷重制御（周波数：1.7Hzおよび2Hz）で、応力振幅が200~250MPaの範囲で疲労試験を行ったときの疲労寿命比とSパラメータの変化量の関係を示す。疲労寿命比の増加に伴いSパラメータの変化量は増加し、その傾向は応力振幅に依存していない。図7は、三角波（歪み速度：0.4%/s）あるいは正弦波（周波数：1Hz）で歪み振幅が0.25~0.31%の範囲で疲労試験を行ったときの疲労寿命比とSパラメータの変化量の関係を示す。歪み制御の場合も、疲労寿命比の増加に伴いSパラメータの変化量は増加し、その傾向は歪み振幅に依存しない。歪み制御では、荷重制御に比べ疲労初期においてSパラメータは早くから上昇するが、疲労末期（破断時）では両者とも0.016~0.020になっている。

供試体を切り出した箇所では、配管の内部流体の温度変化に起因する応力による歪み制御的な疲労が主体と考えられることから、図7の歪み制御での疲労寿命比とSパラメータの関係を適用すると、疲労寿命比が0.1%でSパラメータの変化量が0.008程度であり、測定で得られた実機材のSパラメータ変化量が最大で0.0014であることから供試体の疲労損傷は認められず受入材と同等な状態であることがわかる。

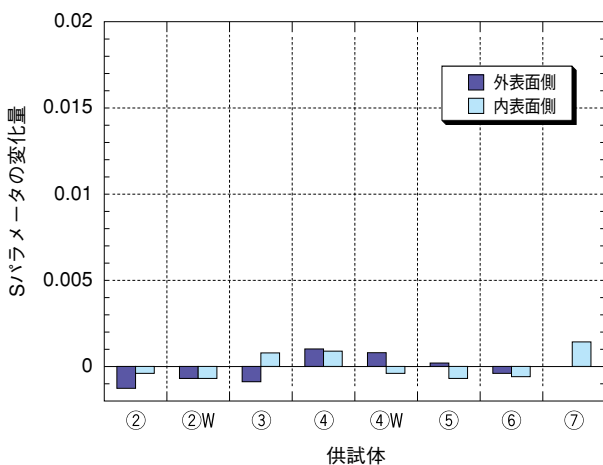


図5 実機ステンレス配管(SUS316)のSパラメータ測定結果

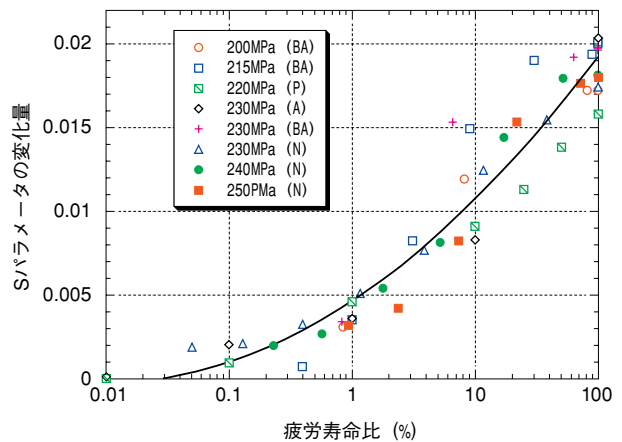


図6 荷重制御疲労でのSUS316鋼の疲労寿命比とSパラメータの変化量の関係⁽⁸⁾, ()はロット名を示す

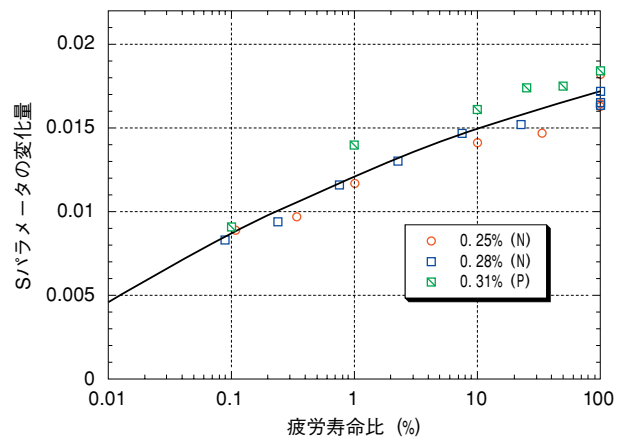


図7 ひずみ制御疲労でのSUS316鋼の疲労寿命比とSパラメータの変化量の関係⁽⁸⁾, ()内はロット名を示す

3.2 ミクロ組織観察結果

供試体のTEMによるミクロ組織観察結果をそれぞれ図8に示す。どの供試体においても、転位等の格子欠陥は少なく、また析出物も観察されていない。これまでに、筆者らの研究で得られた、歪み制御疲労を付与させたSUS316鋼試験片（受入材、疲労寿命比1%および100%）のTEMによるミクロ組織観察結果をSパラメータの変化量と併せて図9に示す。疲労寿命比の増加あるいはSパラメータの変化量の増加に伴い、転位が絡まるように増加し、転位の密度が高くなっている。ステンレス鋼SUS316は1000℃以上で固溶化熱処理を行っているため受入状態でのミクロ組織は転位などの格子欠陥が少なく、また析出物も観察されない。供試体のミクロ組織観察結果を

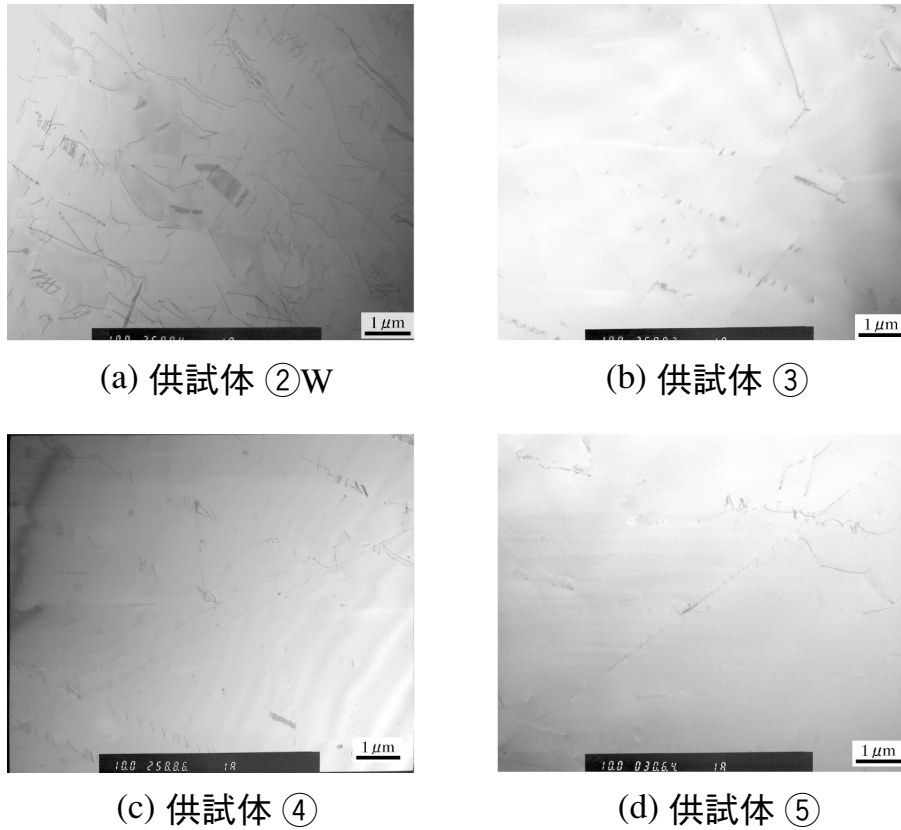


図8 加圧器サージ管の水平部から切り出した供試体のTEM観察写真

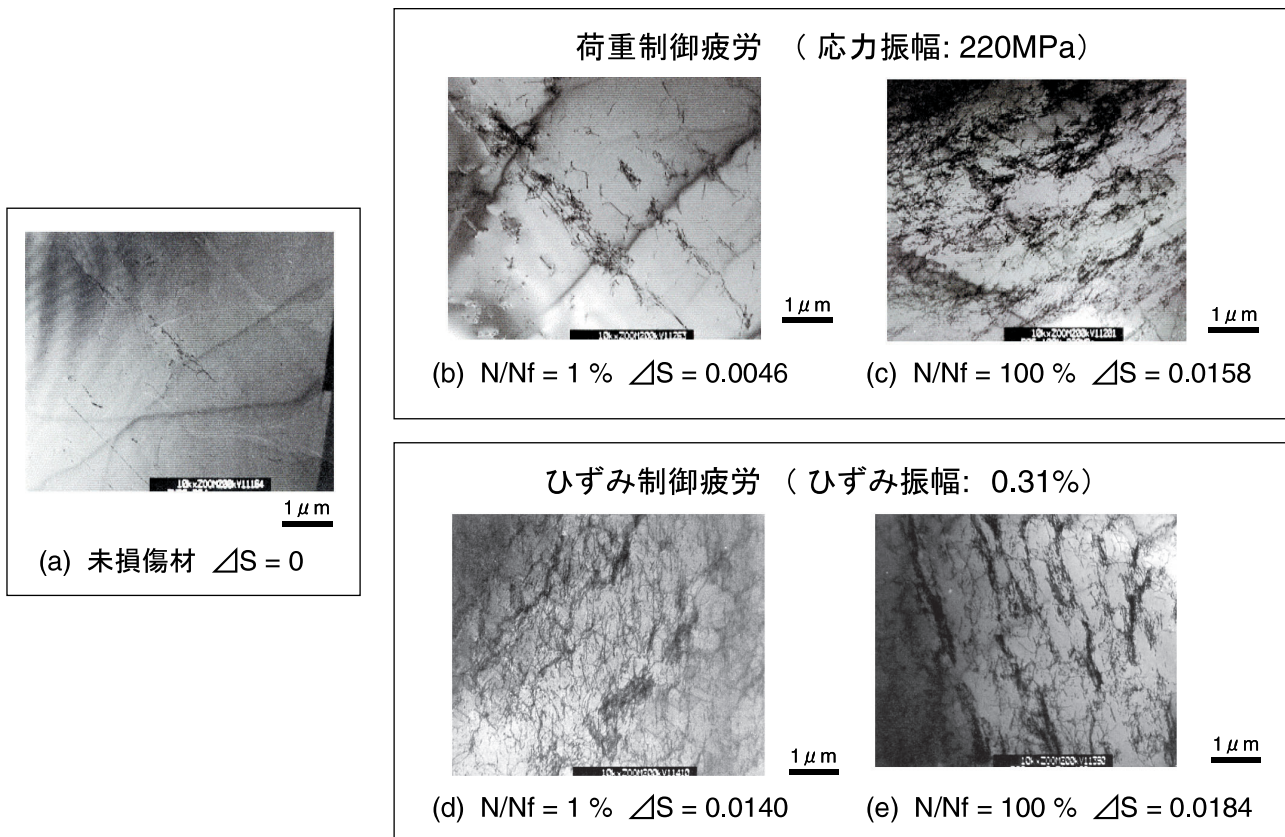


図9 SUS 316 鋼の荷重制御およびひずみ制御疲労試験材料のTEM観察写真

これらの疲労損傷材のミクロ組織観察結果と比較すると、供試体の転位の状況は受入材に近く、疲労損傷はないことがわかる。従って、これらのことから陽電子消滅法で測定したSパラメータでの疲労損傷度評価の結果がミクロ組織観察による結果と一致しており、陽電子消滅法による疲労損傷評価の妥当性を示すことができた。

4. 結言

金属材料中の転位などの格子欠陥を敏感に捉える陽電子消滅法のうち陽電子が材料中で消滅したときに発生する γ 線のエネルギーピーク広がりを測定するドップラー幅広がり測定を用いて、原子力発電所で長期間使用されていた実機配管SUS316鋼の疲労損傷度評価を行った。その結果、測定した実機材のSパラメータは受入材から-0.0013~0.0014の変化範囲に収まっており、受入材と有意な差はなく疲労損傷はないと評価された。また、測定した実機材のTEMによるミクロ組織観察により転位の発生状況が受入材に近いことが確認され陽電子消滅法による疲労損傷評価と同様の結論を得た。これにより、陽電子消滅法による実機材料であるSUS316鋼の疲労損傷評価の妥当性を示すことができた。

文献

- (1) 矢川元基 編, 破壊力学, 培風館, p.85-89 (1994).
- (2) S. Kocanda, 金属疲労の解析と応用 (横堀武夫 監修, 石井仁, 田中正清 訳), p. 78-82 (1981).
- (3) G. Brauer, L. Liskay, B. Molnar, R. Krause, Nuclear Engineering and Design, 127 47-68 (1991).
- (4) 長谷川雅幸, あたりあ, 35 93-102 (1996).
- (5) A. E. Hughes, Materials in Engineering, 2 34-40 (1980).
- (6) M. Uchida, Y. Ohta, N. Nakamura, K. Yoshida, "Application of positron annihilation lineshape analysis to fatigue damage and thermal embrittlement for nuclear plant materials", Proceeding of 13th international conference on NDE in the nuclear and pressure vessel industries, 349-353 (1995).
- (7) N. Maeda, N. Nakamura, M. Uchida, Y. Ohta, K. Yoshida, Nuclear Engineering and Design, 167 169-174 (1996).
- (8) 河口恭寛, 中村規子, 日本金属学会誌, 65 9 835-842

(2001).

- (9) 大槻義彦 編, 物理学最前線, 共立出版, 5 75-80 (1983).
- (10) 日本アイソトープ, 協会陽電子計測の科学, 丸善, p. 1-6 (1993)