

# 非破壊手法による鋳造 2 相ステンレス鋼の熱時効評価

Non-Destructive Evaluation of Thermal Aging of Cast Duplex Stainless Steel

河口 恭寛 (Yasuhiro Kawaguchi)\*

**要約** 鋳造 2 相ステンレス鋼は優れた材料強度および靱性を持ち、耐食性にも優れているため、原子力発電所の 1 次冷却材管や 1 次冷却材ポンプのケーシングなどに使用されることが多い。しかしながら、300 以上の高温で長時間にわたって使用された場合、熱時効と呼ばれる材料劣化が進行し、靱性が低下することが知られている。従って、この材料で構成される設備の維持管理においては、熱時効による機械的特性の変化を非破壊的に検査することが必要とされる。

本研究では、鋳造 2 相ステンレス鋼の熱時効に伴う靱性の低下を非破壊的に評価する技術を開発することを目的として、超音波音速測定法、熱起電力法、電気抵抗法、SQUID法（超伝導量子干渉計法）および陽電子消滅法の 5 種類の技術について、実際に加速熱時効させた供試体を用いた実験を行い、熱時効の検出性を比較検討した。その結果、熱起電力法が非破壊評価パラメータと熱時効材の力学的特性の相関係数が高く、測定におけるばらつきが小さいことから最も有効な熱時効評価技術であるとの結論を得た。

**キーワード** 鋳造 2 相ステンレス鋼、熱時効、超音波音速測定法、熱起電力法、電気抵抗法、SQUID法（超伝導量子干渉計法）、陽電子消滅法

**Abstract** Cast duplex stainless steel is frequently used in main coolant pipes and reactor coolant pump casings in nuclear power plants because of its excellent material strength, toughness and superior corrosion resistance. It is known, however, that thermal aging occurs when this material is exposed to temperatures over 300 for extended periods of time. As a result, the material toughness decreases. It is necessary therefore to evaluate changes in the mechanical properties of this material caused by thermal aging using non-destructive methods for the maintenance and management of components made of cast duplex stainless steel.

In order to develop a non-destructive technique for evaluating the toughness reduction of cast duplex stainless steel due to thermal aging, five types of non-destructive techniques were compared. These include ultrasonic sound velocity measurement, the thermoelectric power measurement the electric resistance method, the SQUID (Superconducting Quantum Interface Device) method, and the positron annihilation method. The thermal aging detectability of each technique was compared and examined in experiments using specimens on which accelerated thermal aging had been carried out. It was concluded that the thermoelectric power measurement was the most effective technique for evaluating thermal aging because the correlation coefficient between the non-destructive evaluation parameters and the mechanical properties of aged materials was high and the dispersion of measurements was small.

**Keywords** Cast duplex stainless steel, thermal aging, ultrasonic sound velocity measurement, thermoelectric power measurement electric resistance method, SQUID (Superconducting Quantum Interface Device) method, positron annihilation method.

## 1. はじめに

原子力発電所の設備の高経年化に対し、プラント

の運転に伴う構造物各部位における材料の経年的な変化を把握し、それらの健全性を判定し、かつ残存する寿命を予測する手法が求められている。

\* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

鑄造 2 相ステンレス鋼は、オーステナイト相およびフェライト相の 2 つの相から構成されており、耐食性に優れ、高い強度と靱性をもち溶接性にも優れている。そのため、原子力発電所の 1 次冷却材系などの厳しい環境下で使用される。しかしながら、鑄造 2 相ステンレス鋼は、長時間高温（300～450℃）にさらされると靱性が低下する。従って、この材料で構成される設備の維持管理においては、熱時効による機械的特性の変化を非破壊的に検査することが必要とされる。

本研究では、鑄造 2 相ステンレス鋼の主要な材料劣化モードである熱時効に伴う靱性の低下を非破壊的に評価するための最適な検査技術の開発を目的とする。これまで、鑄造 2 相ステンレス鋼の熱時効を評価する手法について実験的に比較評価したものは少なく、本研究では、実際に加速熱時効させたフェライト量の異なる 3 種類の鑄造 2 相ステンレス鋼の供試体を用い、超音波音速測定法<sup>(1)</sup>、熱起電力法<sup>(2)</sup>、電気抵抗法、SQUID 法<sup>(3)</sup>および陽電子消滅法<sup>(4)</sup>の 5 種類の評価手法について熱時効の検出性を比較検討した。

鑄造 2 相ステンレス鋼の熱時効は、フェライト相でスピノーダル分解により相分離が徐々に進行し、鉄原子の密度が高くなる鉄リッチ相とクロム原子の密度の高くなるクロムリッチ相が生成するため、靱性が低下すると考えられている。また、近年では熱時効に伴う組織変化としてフェライト相内の G 相析出や粒界への炭化物の析出なども起こることが知られている<sup>(5)</sup>。

本研究で取り上げた 5 種類の非破壊評価手法は、熱時効に伴う材料の組織変化によってもたらされるヤング率の変化（超音波音速測定法）、フェルミエ

ネルギーの変化（熱起電力法、電気抵抗法）、透磁率の変化（SQUID 法）あるいは析出物に起因する点欠陥の増加（陽電子消滅法）を間接的に測定していると考えられる。これ以外にも、鑄造 2 相ステンレス鋼の熱時効を非破壊的に評価する手法は研究されている。これらの手法は、前述の 5 種類の手法と同様に熱時効に伴う材料組織の変化を超音波の伝播特性、電気的特性あるいは磁気的特性等の材料物性の変化として非破壊的に捉えているものと考えられる<sup>(6)(7)</sup>。本研究では、現在容易に利用でき、かつ原子力発電所の現場での適用を考へ上記の手法を選定した。

本研究では、加速熱時効させた鑄造 2 相ステンレス鋼の供試体を用いて、熱時効に伴う力学的特性の変化と各非破壊手法で測定された値の関係を明らかにすることにより熱時効評価の検出性の比較を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試体

本研究では、フェライト量の異なる 3 種類の鑄造 2 相ステンレス鋼を供試体として用いた。これら供試体の化学成分を表 1 に示す。また化学成分から Shaefferler 線図により算出したフェライト量を表 2 に示す。

供試体の材質は、JIS SCS14A であり、製造はアーク炉により溶解し、AOD (Argon Oxygen Decarburization) 炉で精錬した溶鋼を遠心鑄造した。製造時の固溶化熱処理は、加熱温度 1,070 ～ 1,120℃ で 1 時間以上保持し、水冷にて 5 分以内で 426℃ 以下に冷却した。供試体の断面マクロ写真と光学顕微鏡観察

表 1 供試体の化学成分 (wt %)

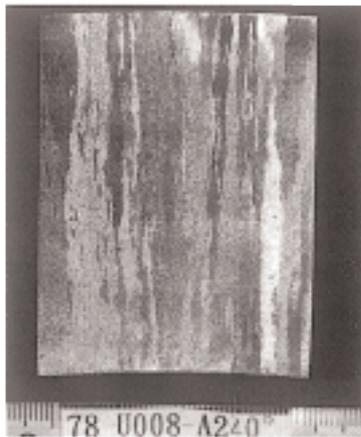
供試体 No	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Fe
F 8	0.047	0.79	0.90	0.026	0.017	10.67	18.85	2.22	0.0056	bal.
F 15	0.039	1.07	0.84	0.023	0.008	9.28	18.80	2.14	0.0056	bal.
F 23	0.044	1.46	0.68	0.029	0.016	9.57	20.02	2.23	0.0050	bal.

写真を図1と図2に示す。

供試体は、加速的に熱時効を進行させるため400℃の大気中で0時間、100時間、300時間、1,000時間、3,000時間および10,000時間の6段階において熱時効処理を行った。

表2 供試体のフェライト量 (vol. %)

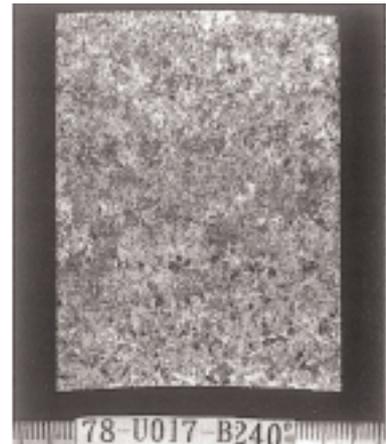
供試体 No	フェライト量
F 8	7.3
F 15	14.6
F 23	21.3



(a) 供試体 F 8

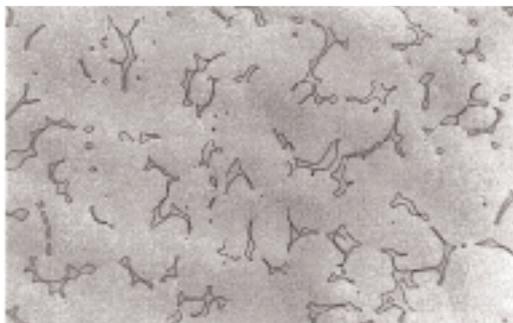


(b) 供試体 F 15

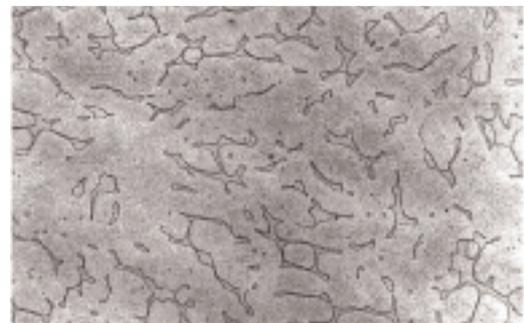


(c) 供試体 F 23

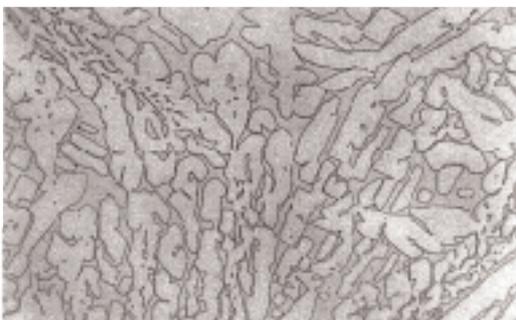
図1 供試体（未時効材）の断面マクロ写真



(a) 供試体 F 8



(b) 供試体 F 15



(c) 供試体 F 23

図2 供試体（未時効材）の光学顕微鏡観察写真(× 100)

## 2.2 熱時効による力学的特性の変化の確認

### 2.2.1 硬さ試験

鋳造 2 相ステンレス鋼の熱時効に伴う硬さの変化を調べるため、マイクロピッカース硬度計（島津製作所製 NS-IV2000）により、フェライト相の硬さ測定を行った。計測においては、供試体表面をエメリ紙およびバフで研磨し、エッチング処理を施しフェライト相とオーステナイト相が識別できるようにしたうえで、25gの荷重を用いてフェライト相の硬さを計測した。

### 2.2.2 引張試験

熱時効に伴う材料強度の変化を確認するために、引張試験（島津製作所製オートグラフAG-100NE）を行った。試験片は 14mm標点間距離60mm（4号試験片）で、引張強度を求めた。

### 2.2.3 シャルピー衝撃試験

熱時効に伴う靱性の低下程度を評価するため、シャルピー衝撃試験を行った（温度150 以下は前川試験製作所製シャルピー式縦型、温度200 以上は東京衡機製シャルピー式縦型を使用）。試験片の大きさは10mm×10mm×55mm（4号試験片）で、延性脆性遷移温度（DBTT）と上部棚吸収エネルギーを求めた。

## 2.3 熱時効に伴う非破壊評価パラメータの変化の確認

### 2.3.1 超音波音速測定法による測定

通常、超音波の音速測定は、材料中に垂直縦波超音波を伝播させ、その経路と伝播時間から求められるが、本研究では、鋳造材を扱うことから、減衰、散乱等の影響を少なくするよう伝播距離の短くできる漏洩弾性表面波を用いた。その原理を図3に示す。

超音波音速測定システム(MATEC INSTRUMENTS製)を図4に示す。本研究においては、中心周波数

が25 MHzの線集束型探触子を用いて、水浸法にて正反射波と漏洩表面波の干渉波の振幅を探触子のデフォーカス量 $z$ の関数とした $V(z)$ 曲線より音速を算出した。

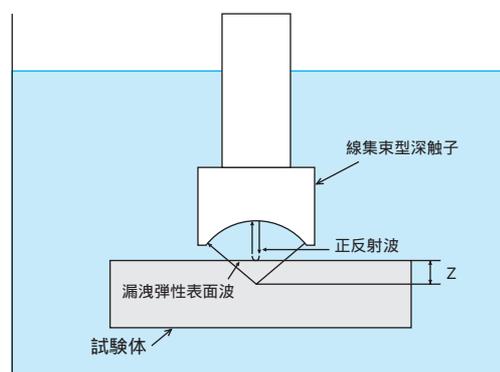


図3 漏洩弾性表面波の伝播経路

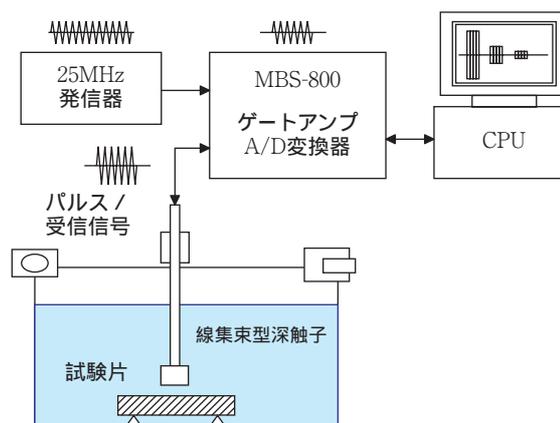


図4 超音波音速測定システム

### 2.3.2 熱起電力法による測定

この手法は、図5に示すように、2つの銅製のプロッドを材料表面に押し当てると2点間の温度差 $T$ のためゼーベック効果でホットチップ、コールドタッチを通る回路で熱電位差 $V$ が発生する。熱起電力（TEP）は、 $V/T$ で表される。

測定装置（仏国電力庁（EDF）製）を図6に示す。測定装置では、ホットチップ先端が直径0.6 mmに

切った円錐で、40 に加熱され、コールドタッチは材料と同じ室温としている．熱起電力は、測定温度に影響されないよう 20 での熱起電力に補正した．

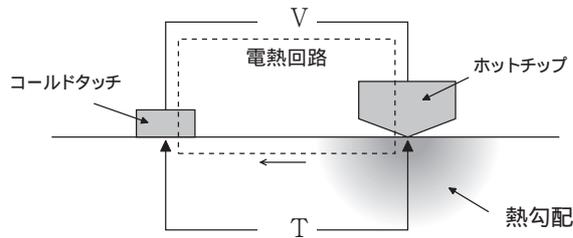


図5 ゼーベック効果

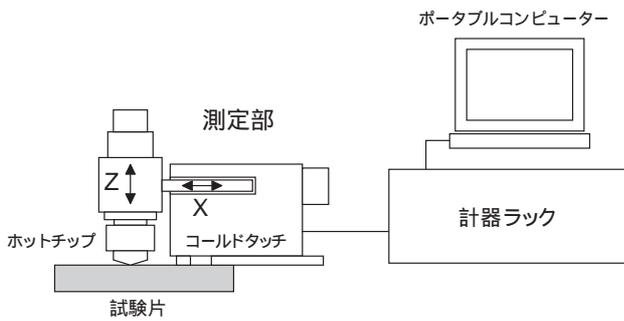


図6 熱起電力測定装置

2.3.3 電気抵抗法による測定

JIS C2526に準拠し、定電流4端子法（電流を固定し、電圧変動を測定）を用いて供試体の電気抵抗率を測定した．試験片の大きさは、5 mm×5 mm×50 mmで、図7に示すように、試験片の長手方向両端部に定電流Iを流す端子を、それらより内側に電圧Vを検出する端子を押し当てる．そして定電流10Aを流したときの端子間電圧 V（電圧端子間距離 L:40mm,電圧計:IWATSU ELECTRIC製 VOAC7411）を測定することにより室温での電気抵抗率を求めた．

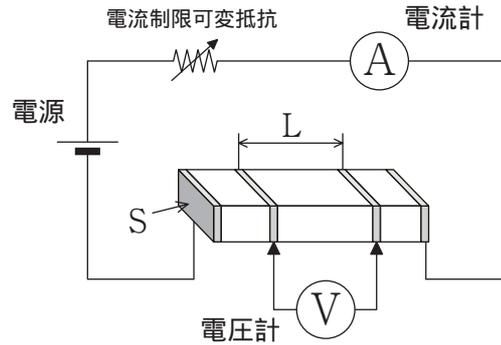


図7 定電流4端子法

2.3.4 SQUID法による測定

供試体について、図8に示すシステム(TRISTAN TECHNOLOGY製)により、表3の条件で交流磁場を印可しながら、SQUID磁束計で磁気特性を測定した．測定した磁気特性パラメータはスロープ値であり図9にスロープ値の意味を示す．図9の横軸は超伝導マグネットに流れる交流電流、縦軸はSQUID出力電圧を示す．本研究で用いたSQUID磁束計は、磁気シールドを使用せずに測定が可能である1次微分型グラディオメータであり、2個の検出コイル間の磁束の勾配（差分）を測定するため、遠方で発生した磁場はキャンセルされ基本的には出力に影響しない．

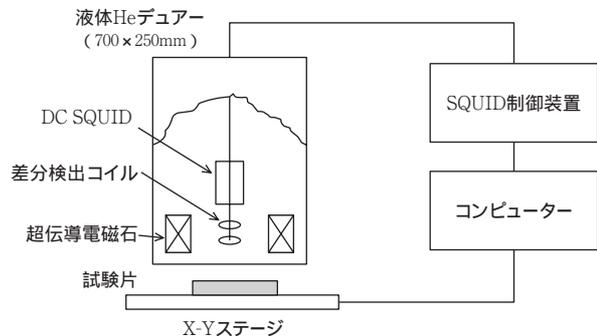


図8 低温SQUID磁束計計測システム

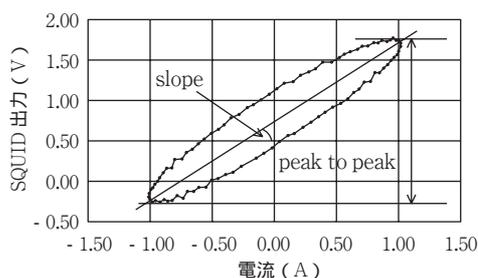


図9 電流とSQUID磁束計出力の関係

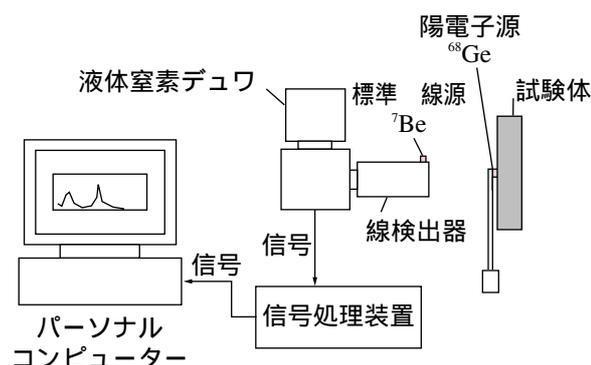


図10 陽電子消滅測定装置

表3 低温SQUID磁束計の仕様

検出コイルの種類	1次微分型コイル
検出コイルと試験片距離	8mm
SQUID磁束計サンプリングレート	100Hz
AC超伝導マグネット電流	1A
AC超伝導マグネット周波数	1Hz

### 2.3.5 陽電子消滅法による測定

本研究で用いた陽電子消滅法としては、システムをより簡単にするため消滅対線のエネルギー拡がりを観測する方法（ドップラーブロードニング法）をとった。線エネルギー分布の評価は、ピーク中央部のカウント数と全体のカウント数の比で表されるSパラメータで行った。

陽電子消滅測定装置（AEA Technology 製 PALA-2）を図10に示す。全体は、高純度Ge-線検出器（分解能： $^{60}\text{Co}$ の線(1.332MeV)においてFWHM=1.75keV、検出器を冷却するための液体窒素デューワーを含む）、前置増幅器、高電圧電源、計数部（主増幅器、A/D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。陽電子源には $^{68}\text{Ge}$ を用い、この電子捕獲で生成する $^{68}\text{Ga}$ の崩壊によって発生する陽電子測定試料にあてた。試料中の電子-陽電子対消滅により発生した線は、試料および陽電子源の前方に位置する線検出器によりとらえられ、増幅、デジタル化しSパラメータを計算した。

## 3. 実験結果

### 3.1 熱時効による力学的特性の変化

#### 3.1.1 硬さ試験

400 で熱時効させた供試体の時効時間に伴うフェライト相の硬さの変化を図11に示す。フェライト相の硬さは各供試体に共通して、1,000時間と3,000時間のデータに少しばらつきがあるが、他はほぼ同じ値であり時効時間に伴い上昇する。

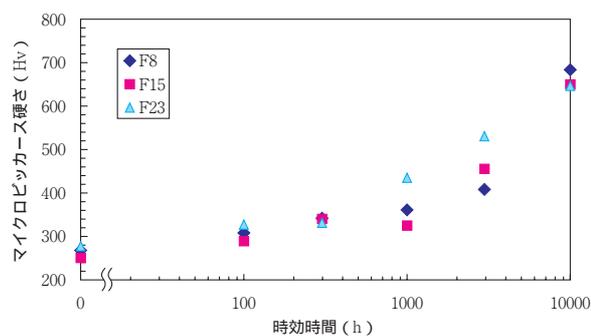


図11 400 熱時効における時効時間に伴うフェライト相硬さの変化

#### 3.1.2 引張試験

400 で熱時効させた供試体の時効時間に伴う引張強さの変化を図12に示す。時効時間に伴い引張

強さが上昇している．また，引張強さの上昇傾向はフェライト量が多いほど顕著であることが分かる．

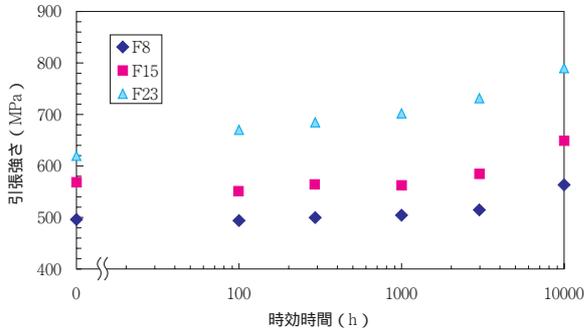


図12 400 熱時効における時効時間に伴う引張強さの変化

### 3.1.3 シャルピー衝撃試験

各供試体の時効時間に伴う，上部柵吸収エネルギー(USE)の変化を図13に示す．供試体F23およびF15は，時効時間に伴い上部柵吸収エネルギーが低下していくが，供試体F8は時効時間に伴う上部柵吸収エネルギーの変化はほとんど見られない．すなわち，時効時間に伴う上部柵吸収エネルギーの減少は，供試体のフェライト量が多いほど顕著である．

各供試体の時効時間に伴うDBTTの変化を図14に示す．全ての供試体に置いて時効時間に伴うDBTTの上昇が見られる．この時効時間に伴うDBTTの上昇傾向は，供試体のフェライト量が多いほど顕著である．

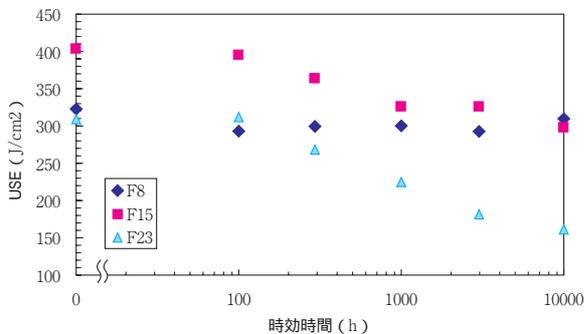


図13 400 熱時効における時効時間に伴う上部柵吸収エネルギーの変化

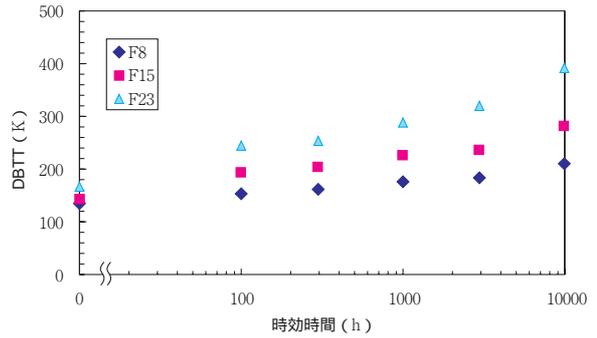


図14 400 熱時効における時効時間に伴うDBTTの変化

## 3.2 熱時効に伴う非破壊評価パラメータの変化

### 3.2.1 超音波音速測定法

400 熱時効における供試体の時効時間に伴う漏洩表面波の音速の変化を図15に示す．測定された漏洩表面波の音速は，フェライト量が多いほど高くなっているが，時効時間に伴う変化にはばらつきが大きい．

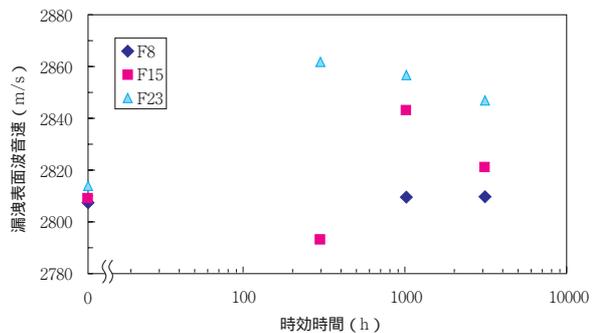


図15 時効時間に伴う超音波の音速変化

### 3.2.2 熱起電力法

400 熱時効における供試体の時効時間に伴う熱起電力の変化を図16に示す．熱起電力は時効時間に伴い上昇している．また，フェライト量が多いほど

ど熱起電力は高く、時効時間に伴う上昇は顕著である。これらのことから、鑄造2相ステンレス鋼の熱時効の進行を熱起電力の変化として検出でき、熱時効に伴う熱起電力の上昇の程度は、フェライト量に依存することがわかる。

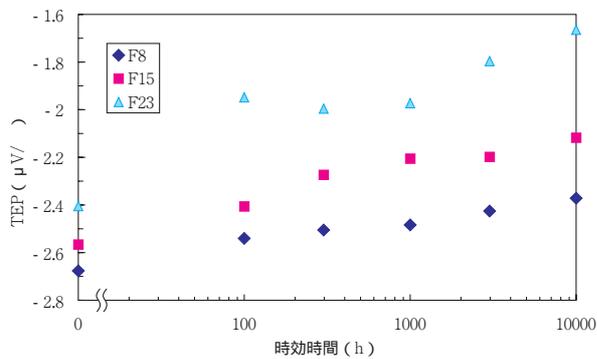


図16 時効時間に伴う熱起電力の変化

### 3.2.3 電気抵抗法

400 熱時効における供試体の時効時間に伴う電気抵抗率の変化を図17に示す。フェライト量の高い供試体F23は、電気抵抗率が高く、時効時間に伴い電気抵抗率が低下している。一方、フェライト量の低い供試体F8, F15では、もともと電気抵抗率は低く、両者の差は小さい。また、時効時間に伴う電気抵抗率の変化はほとんど見られない。全体として、フェライト量が多いほど電気抵抗率が高く、熱時効による変化が大きい傾向にある。

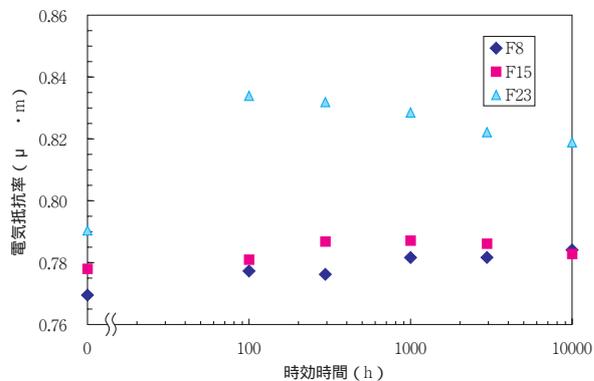


図17 時効時間に伴う電気抵抗率の変化

### 3.2.4 SQUID法

400 熱時効における供試体の時効時間に伴う磁束のスロープ値の変化を図18に示す。フェライト量によって明確にスロープ値が異なり、フェライト量が多いほどスロープ値が高くなっている。スロープ値は時効初期に若干低下しているが、時効時間に伴う変化はほとんど見られない。

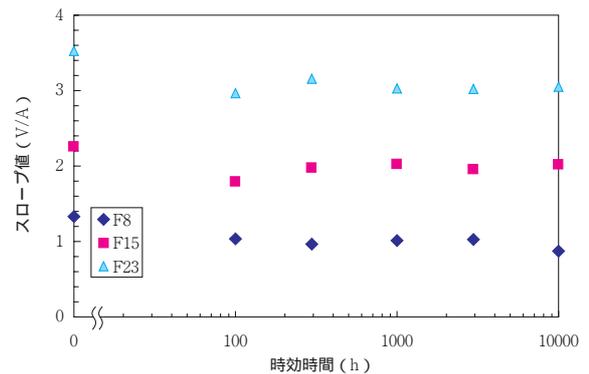


図18 時効時間に伴うSQUIDのスロープ値の変化

### 3.2.5 陽電子消滅法

400 熱時効における供試体の時効時間に伴うSパラメータの変化を図19に示す。時効初期においてばらつきがあるが、時効時間に伴いSパラメータは上昇している。フェライト量が多いほどSパラメータは高く、時効時間に伴う上昇も顕著である。ところがフェライト量の低い供試体F8では、時効時間に伴うSパラメータの変化はほとんど見られない。

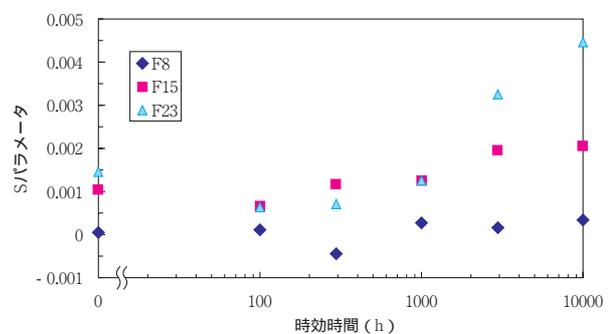


図19 時効時間に伴う陽電子消滅Sパラメータの変化

### 3.3 熱時効に伴う非破壊評価パラメータの変化と力学的特性の関係

#### 3.3.1 超音波音速測定法

漏洩表面波音速とDBTTの関係を図20に示す。全体として音速が高い領域でDBTTは高くなっているが、ばらつきが大きい。フェライト量の同じ供試体においても、音速とDBTTの相関は高いとはいえない。

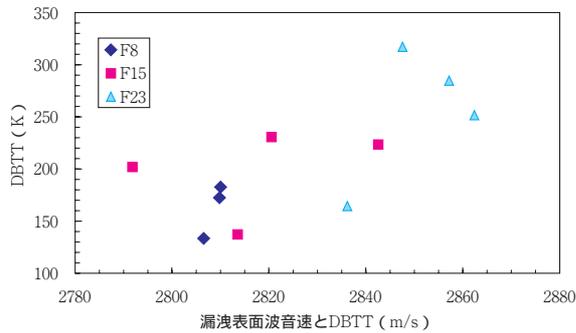


図20 漏洩表面波音速とDBTTの関係

#### 3.3.2 熱起電力法

熱起電力とDBTTの関係を図21に示す。熱起電力の上昇に伴い、DBTTがほぼ単調に増加しており、ばらつきも少ない。また、熱起電力とDBTTの関係はフェライト量に依存せず、一つの直線で関係づけられる。すなわち、熱起電力を測定することにより、フェライト量に関係なくDBTTが求められることになる。

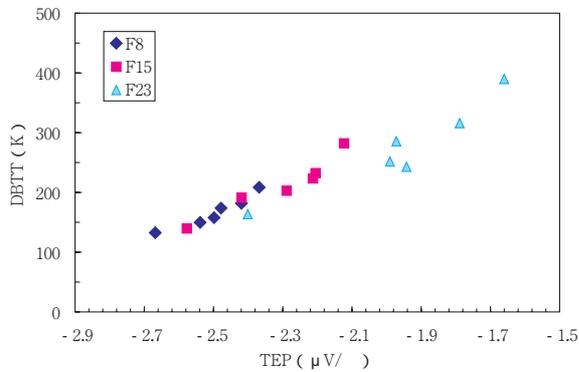


図21 熱起電力とDBTTの関係

#### 3.3.3 電気抵抗法

電気抵抗率とDBTTの関係を図22に示す。フェライト量の多い供試体F23では、電気抵抗率とDBTTに高い負の相関が見られるが、フェライト量の少ない供試体F8, F15では相関はほとんど見られない。また、電気抵抗率とDBTTの関係はフェライト量によって異なり、電気抵抗率からDBTTを評価する場合、フェライト量を考慮する必要がある。

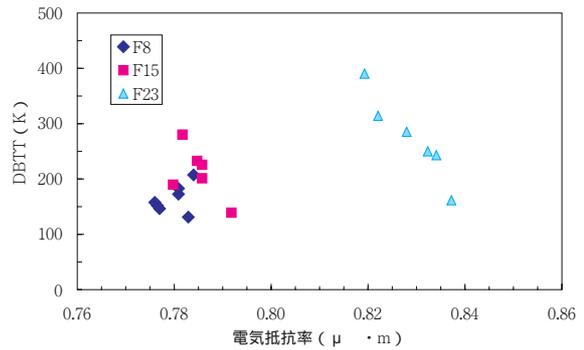


図22 電気抵抗率とDBTTの関係

#### 3.3.4 SQUID法

SQUID磁束計で測定したスロープ値とDBTTの関係を図23に示す。フェライト量によってグループ化され、フェライト量が多いほどスロープ値とDBTTは高い値をとる。また、スロープ値とDBTTの相関は低い。

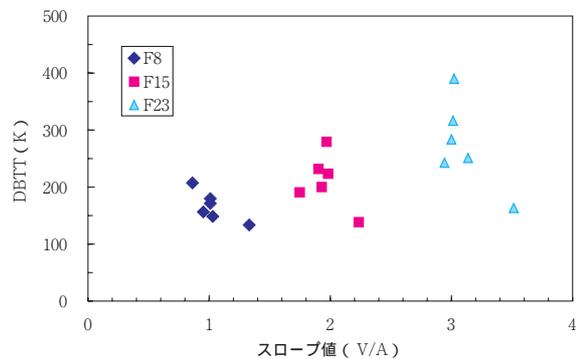


図23 スロープ値とDBTTの関係

### 3.3.5 陽電子消滅法

陽電子消滅法で測定したSパラメータとDBTTの関係を図24に示す。Sパラメータの増加に伴いDBTTが増加している。また、SパラメータとDBTTの関係はフェライト量に影響されない。

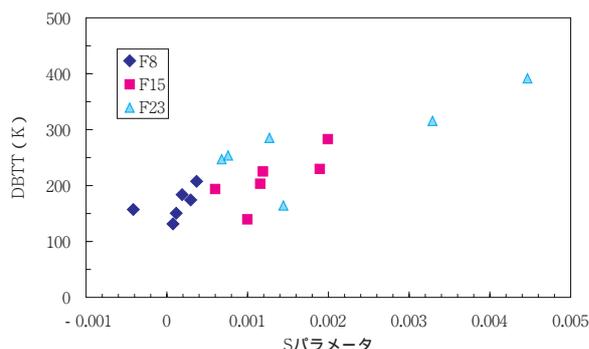


図24 SパラメータとDBTTの関係

## 4. 考察

5種類の手法について鋳造2相ステンレス鋼の熱時効に対する検出性の比較評価を行うため、供試体について各手法で測定した値（非破壊評価パラメータ）とDBTTとの相関係数を求めると共に、鋳造材の材料組織の不均一性の影響による非破壊評価パラメータのばらつきの影響について確認した。

各手法の非破壊評価パラメータとDBTTの相関係数を図25に示す。相関係数は、非破壊評価パラメータを $x_i$ 、DBTTを $y_i$ とし次式で定義される。ここで $i$ は、供試体の番号を表す。

$$r = \frac{(x_i - X)(y_i - Y)}{\sqrt{(x_i - X)^2} \sqrt{(y_i - Y)^2}}$$

ここで、 $X$ 、 $Y$ はそれぞれ $x_i$ 、 $y_i$ の平均を示す。相関係数は、熱起電力法が0.96で最も高く、ついで陽電子消滅法が0.84となっている。また、電気抵抗法は全体としての相関係数は低いが、図26に示すようにフェライト量毎の相関係数を見ると、フェライト量の高い供試体F23では0.96と高い負の相関係数を示した。

このことから、熱起電力法をもちいて熱起電力を測定することにより高い精度で材料の靱性を推定できると考えられる。

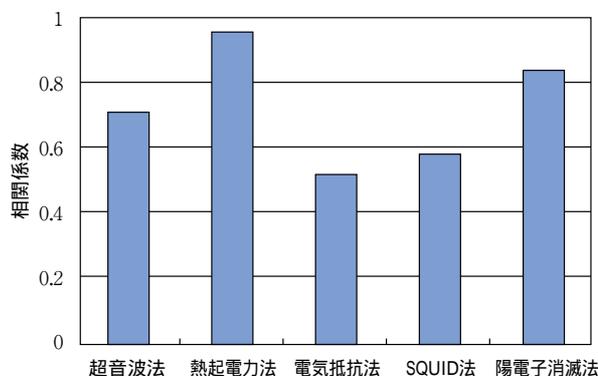


図25 非破壊評価パラメータと熱時効の相関係数

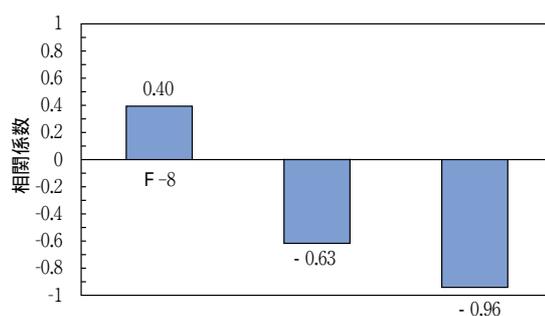


図26 フェライト量による電気抵抗率とDBTTの相関係数

次に、鋳造材の材料組織の不均一性の影響を調べるため、測定位置による非破壊評価パラメータのばらつきを各手法で比較した。各々の手法により評価パラメータの単位が異なるため、不均一性の影響は、非破壊評価パラメータの測定位置によるばらつきを熱時効に伴う変化量で除した値で表した。非破壊評価パラメータの測定位置によるばらつき(標準偏差)を $S_x$ 、靱性が最も高い供試体F8の未時効材の非破壊評価パラメータを $X_{received}$ 、靱性が最も低い供試体F23の10,000h熱時効材の非破壊評価パラメータを $X_{aged}$ として、不均一性の影響度 $D$ を次式で表し、得られた各評価パラメータの $D$ 値を図27に示した。

$$D = \frac{S_x}{|X_{aged} - X_{received}|}$$

その結果，SQUID法，熱起電力法，電気抵抗法は不均一性の影響は小さく，圧延・鍛造材等の均一な材料では音速のばらつきの小さいとされる超音波音速測定法は鍛造材では測定位置による音速のばらつきが大きく不均一性の影響が大きいことが分かった．このことから，鍛造材のような材料組織が不均一な材料を評価する場合，超音波などの機械的な方法では音響異方性などの影響を受けやすく，評価パラメータにばらつきが大きい，SQUID法，熱起電力法，電気抵抗法などの電磁気的な手法は不均一性の影響を受けにくく評価パラメータのばらつきは小さいため鍛造材の評価に適していると考えられる．

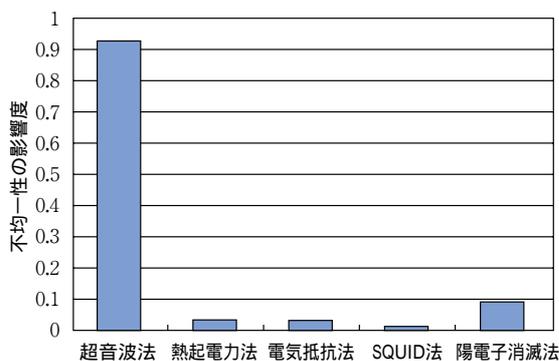


図27 非破壊評価パラメータの材料組織不均一性の影響

以上のことから，鍛造2相ステンレス鋼の熱時効を非破壊的に評価する上で，熱起電力法が非破壊評価パラメータと力学的特性の相関が最も強く，また鍛造材の材料組織の不均一性の影響を受けにくいいため，最も適した評価手法であるといえる．

本研究における各手法での測定は，実験室内の環境の整った状態で行っており信頼性の高いデータが得られていると考えられる．しかしながら，原子力発電所の現場においてこれらの手法を適用する場合，現場の環境や測定対象設備の形状等の影響を受けることになる．原子力発電所の現場の放射線は，陽電子消滅法の消滅線の測定にノイズとして影響

するであろうし，超音波音速測定法，電気抵抗法およびSQUID法では測定設備の形状や肉厚を考慮した測定を行う必要がある．このような現場への適用性の観点から見ると，熱起電力法は，環境に影響される要素が少なく現場への適用面で有利な手法であると考えられる．

## 5. 結論

鍛造2相ステンレス鋼の熱時効に伴う靱性の低下を非破壊的に評価するため，加速熱時効させた供試体を用いて超音波音速測定法，熱起電力法，電気抵抗法，SQUID法，および陽電子消滅法による実験を行い，熱時効に伴う力学的特性の変化と各手法の非破壊評価パラメータの関係を明らかにすることにより最適な評価手法の検討を行った．以下に主な結果を列挙する．

- (1) 鍛造2相ステンレス鋼の熱時効を非破壊的に評価するには，熱起電力法が力学的特性(DBTT)の相関が最も強く，鍛造材の材料組織の不均一性の影響も受けにくい評価手法であることから最適な評価手法であると考えられる．
- (2) フェライト量の高い材料では，電気抵抗法も有効な評価手法であるが，力学的特性と電気抵抗率の関係はフェライト量に依存するため，熱時効評価のためにはフェライト量を考慮する必要がある．
- (3) 鍛造2相ステンレス鋼は，材料組織が不均一のため音響異方性が強い．そのため，超音波音速測定法などの機械的な測定手法よりも，電磁気的な測定手法の方が測定のばらつきが小さく，鍛造材の評価手法に適している．

## 6. 謝辞

本研究の実施において，仏国電力庁(EDF) Renardieres研究所のCoste氏，住友金属テクノロジー(株)の奥山氏，原子燃料工業(株)の磯部氏ならびに石川島播磨重工業(株)技術研究所の中村氏に多大な御協力をいただき，ここに記して感謝の意を表します．

## 文献

- (1) S.Matsubara, Y.kawaguchi., "Evaluation of Thermal Aging in Duplex Stainless Steel by nd Velocity Measurement of Surface Acoustic wave"., Proc. The First International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components"., Vol.1, pp.262-270(1998).
- (2) J.P.Massoud, J.F.Coste, J.M.Leborgne., "Thermal Aging of PWR Duplex Stainless Steel Components Development of a Thermoelectrical Thechnique as a Non-Destructive Evaluation Method of Aging"., Proc. 7th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE-7243(1999).
- (3) Y.Isobe, T.Aoki., "Detection of Thermal Aging of Duplex Stainless Steel with SQUID Magnetometer"., Materials Science Reseach International, Vol.5, No.1, pp.51-56(1999).
- (4) M.Uchida., "Application of Positron Annihilation Lineshape Analysis to Fatigue Damage and Thermal Embrittlement for Nuclear Plant Materials"., Proc. 13th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp.349-353(1995).
- (5) 桑野寿, 「 2 相ステンレス鋼の時効脆化と寿命予測」, まてりあ, 第35巻, pp.747-752(1996).
- (6) H.Ogi, M.Hirao., "Ultrasonic Noise Relaxation for Evaluating Thermal Aging Embrittlement of Duplex Stainless Steels"., Reseach in Nondestructive Evaluation, Vol.9, pp.171-180(1997).
- (7) N.Maeda., "Non-Destructive Evaluation of Material Degradation in Nuclear Power Plant Components"., Proc. A Joint IAEA Specialists Meeting on NDT Methods for Monitoring Detection, pp.43-52(1999).