

(19)日本国特許庁 ( J P )

(12)特許公報 ( B 2 )

(11)特許番号

特許第3513601号

( P 3 5 1 3 6 0 1 )

(45)発行日 平成16年 3月31日(2004.3.31)

(24)登録日 平成16年 1月23日(2004.1.23)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

G01N 27/72

G01N 27/72

27/80

27/80

請求項の数 2 (全 8 頁)

(21)出願番号 特願2001 - 181135( P 2001 - 181135)

(73)特許権者 597122725

岩手大学長

(22)出願日 平成13年 6月15日(2001.6.15)

岩手県盛岡市上田三丁目18 - 8

(65)公開番号 特開2002 - 372519( P 2002 - 372519 A )

(72)発明者 高橋 正氣

岩手県盛岡市向中野字八日市場37番 1

(43)公開日 平成14年12月26日(2002.12.26)

(74)代理人 100072051

審査請求日 平成13年 6月15日(2001.6.15)

弁理士 杉村 興作

審査官 平田 佳規

(56)参考文献 特開2001 - 21538 ( J P , A )

特開2001 - 133440 ( J P , A )

特開2002 - 214200 ( J P , A )

高橋正氣, 磁性と塑性 - 非破壊検査への応用, 日本 A E M 学会誌, 2001年 6月10日, V o l . 9 , N o . 2 , 131 - 139 頁

最終頁に続く

(54)【発明の名称】強磁性構造材の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊測定方法

1

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】 強磁性構造材の経年による脆性の変化を定量的に求めることにより、強磁性構造材の経年劣化を非破壊で測定する方法において、

強磁性材料の磁化率  $\mu$  を保磁力  $H_c$  以上に於て所定の磁界強度  $H$  で測定し、

前記磁化率  $\mu$  と前記磁界強度  $H$  とから次式

$$b = \mu H^2$$

により脆化係数  $b$  を求めるものとし、

あらかじめ、前記強磁性構造材と同種の前記強磁性材料 10 についての前記脆化係数  $b$  とその強磁性構造材の脆性の変化に対応して変化する基準脆化因子との相関関係を得ておき、

経年劣化測定対象の前記強磁性構造材について、初期状態および経年劣化後の前記脆化係数  $b$  の値を求めてそれ

2

らの値に各々対応する前記基準脆化因子の値を前記相関関係から求め、

それらの基準脆化因子の値を比較して、前記経年劣化測定対象の強磁性構造材の経年による脆性の変化を定量的に求めることを特徴とする、強磁性構造材の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊測定方法。

【請求項 2】 前記基準脆化因子が硬度であることを特徴とする、請求項 1 記載の強磁性構造材の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊測定方法。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【発明の属する技術分野】この発明は、強磁性構造材またはそれを用いた強磁性構造体の、中性子線照射等による材料の劣化を非破壊的に測定して定量的に求める方法に関するものである。

## 【 0 0 0 2 】

【従来の技術】従来の一般的な非破壊検査方法は全て、亀裂の発生とその進展を調べることが目的としていた。その結果、現在の非破壊検査方法の発展の方向は、できる限り小さい亀裂の発生を発見することであり、かかる従来の非破壊検査方法では、亀裂が発生する前の段階での非破壊検査は行うことができなかった。

【 0 0 0 3 】ところで、原子炉圧力容器の経年劣化は、一般的に、金属疲労と中性子線照射による銅原子の析出や転位ループ等とが複合して進行すると考えられている。ここで、強磁性構造材またはそれをを用いた強磁性構造体の経年による材料強度劣化を非破壊的に測定する方法として従来、被測定対象の保磁力および飽和磁化領域における磁化率を測定する方法が知られている。さらに、亀裂が発生する前段階での金属疲労による経年劣化に関しては、本願発明者が先に特開 2 0 0 1 - 0 2 1 5 3 8 号公報にて開示しているように、従来、被測定対象の強磁性構造材または強磁性構造体の保磁力  $H_c$  及び帯磁率係数  $c$  (以下、強度係数  $c$  という。) を求めてその強度係数  $c$  により強磁性構造材またはそれをを用いた強磁性構造材の強度の経年劣化を測定する非破壊検査方法が知られている。

【 0 0 0 4 】そこで、本願発明者は、材料の強度の経年劣化の非破壊検査と併せて材料の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊検査を行うことができれば、原子炉圧力容器の安全性のより一層の向上につながると考え、材料の脆性の変化に伴う経年劣化についての非破壊検査に着目した。

## 【 0 0 0 5 】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記従来の材料の強度の経年劣化の非破壊検査方法を銅原子析出等による材料の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊検査に適用することはできない。

【 0 0 0 6 】即ち、従来の材料の強度の経年劣化の測定対象は、金属疲労によって生じた転位であり、かかる転位には材料内部の異方的に存在する歪みの場が存在する。それゆえ、材料の強度の経年劣化は保磁力  $H_c$  に影響を与えることから、従来の保磁力  $H_c$  を測定する方法で経年劣化の非破壊検査をすることができた。これに対して、銅原子析出等による材料の脆性の変化に伴う経年劣化の測定対象は、中性子線照射等によって生じた原子空孔や格子間原子、熱処理などで生じる析出物などの欠陥であり、かかる欠陥には必ずしも異方的な歪みの場が存在しない。それゆえ、銅原子析出等による材料の脆性の変化に伴う経年劣化は保磁力  $H_c$  に殆ど影響を与えないことから、上記した材料の強度の経年劣化の非破壊検査方法のうち保磁力  $H_c$  を求める方法を、材料の脆性の変化に伴う経年劣化の測定に適用することはできない。また、被測定対象の強度係数  $c$  を求める従来の方法によっても、材料の脆性の変化に伴う経年劣化を捕らえることは

できなかった。

【 0 0 0 7 】従って、銅原子の析出や原子空孔の増加による脆性を定量的に測定することは困難であり、かかる脆性の変化を定量的に調べるための新たな測定量が必要とされた。

## 【 0 0 0 8 】

【課題を解決するための手段およびその作用・効果】この発明は、上記課題を有利に解決した強磁性構造材の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊測定方法を提供するものであり、この発明の強磁性構造材の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊測定方法は、強磁性構造材の経年による脆性の変化を定量的に求めることにより、強磁性構造材の経年劣化を非破壊で測定する方法において、強磁性材料の磁化率  $\mu$  を保磁力  $H_c$  以上にて所定の磁界強度  $H$  で測定し、前記磁化率  $\mu$  と前記磁界強度  $H$  とから次式  $b = \mu \cdot H^2 \cdots (1)$

により脆化係数  $b$  を求めるものとし、あらかじめ、前記強磁性構造材と同種の前記強磁性材料についての前記脆化係数  $b$  とその強磁性構造材の脆性の変化に対応して変化する基準脆化因子との相関関係を得ておき、経年劣化測定対象の前記強磁性構造材について、初期状態および経年劣化後の前記脆化係数  $b$  の値を求めてそれらの値に各々対応する前記基準脆化因子の値を前記相関関係から求め、それらの基準脆化因子の値を比較して、前記経年劣化測定対象の強磁性構造材の経年による脆性の変化を定量的に求めることを特徴とする。

【 0 0 0 9 】この発明の原理を、実際に行った試験データをもとにして説明する。鉄鋼材料の機械的性質と磁氣的性質の相関関係を明らかにするため、ここでは、銅原子 ( 1 . 5 重量 %) を加えた多結晶純鉄 ( 9 9 . 9 9 2 % ) を試験片とし、その試験片を色々な温度で熱処理することで銅原子を析出させた。このようにすることで、熱処理の温度及び時間の変化に応じて、銅原子の析出量および析出物の大きさを変化させることができる。ところで、銅原子は熱処理温度が 4 4 5 から 6 5 0 までの時効温度で析出し、かかる銅原子の析出は硬度に関係することが分かっている。このように銅原子の析出が硬度に関係するのは、銅原子の析出物が転位の運動を妨げることで鉄鋼材料の硬度が増すからである。そこで、本実験において、試験片を各温度 ( 時効温度 : 4 5 5 , 5 5 0 , 6 5 0 ) で熱処理した結果、図 4 に示すように、各温度について熱処理時間 ( 分 ) と硬度 ( ピッカース硬さ  $H_v$  ) との相関関係が得られた。ここで、図 4 中、4 5 5 の熱処理については ( 黒三角 )、5 5 0 の熱処理については ( 黒丸 )、6 5 0 の熱処理については ( 黒菱形 ) でそれぞれプロットしている。これによると、例えば時効温度 4 5 5 では 2 0 0 0 分から 7 0 0 0 分の時効時間で銅原子の析出が最も進むことが分かる。

【 0 0 1 0 】なお、上記実験では熱処理によって銅原子

を析出させているが、これは、圧力容器に中性子線が照射されると材料内部に溶けていた銅原子が析出し、その銅析出物が圧力容器を脆化させると一般的に考えられているからである。このほかに、中性子照射により転位ループができてこの転位ループが圧力容器の脆化の一因になっているとの考えもある。それゆえ、上記実験では、銅原子の析出の原因となる圧力容器への中性子線照射に代わるものとして試験片の熱処理を行い、これにより材料中の銅原子を析出させている。

【 0 0 1 1 】 図 5 および図 6 は、熱処理により銅原子を析出させた試験片に対するヒステリシス磁化特性試験により得られた磁化曲線を示す説明図である。ここで、図 5 は時効時間 ( 0min, 30min, 300min, 2000min, 7000min ) で時効温度 4 5 5 の熱処理による銅析出に伴うヒステリシス磁化特性の変化を示しており、図 6 は時効時間 ( 0min, 30min, 100min, 200min, 1000min ) で時効温度 5 5 0 の熱処理による銅析出に伴うヒステリシス磁化特性の変化を示している。図 5 及び図 6 の何れについても、

$$\log ( b ) = \log ( b ) - 2 \log ( H ) \dots (2)$$

なる関係式が得られる。この式から、

$$b = b / H^2 \dots (3)$$

なる関係式が得られ、この式は先に述べた(1)式

$$b = b H^2$$

に変形できる。それゆえ、図 7 及び図 8 に示す、傾きが - 2 の直線 ( 2 ) 式の直線 ) から  $\log ( b )$  が求められ、この  $\log ( b )$  の値から脆化係数  $b$  の値が求められる。

【 0 0 1 3 】 図 9 ~ 図 11 は、上述のようにして求めた脆化係数  $b$  と時効時間との関係をビッカース硬さ  $H_v$  と比較して例示する説明図である。ここでは、図 9 に時効温度 4 5 5 、図 10 に時効温度 5 5 0 、図 11 に時効温度 6 5 0 のときの関係線図をそれぞれ示している。これらによると、図 9 ~ 図 11 のいずれについても、時効時間に応じて、脆化係数  $b$  の値が減少して極小値を取る現象と、ビッカース硬さ  $H_v$  が増加して極大値を取る現象とが良く対応していることが、本願発明者の実験により判明した。そこで、図 9 ~ 図 11 で表わされた関係線図から脆化係数  $b$  とビッカース硬さ  $H_v$  との関係を図示すると、図 12 に示す値の分布が得られ、この分布から図 12 中曲線で示すような相関関係が得られる。なお、図 12 中、4 5 5 の熱処理については ( 黒三角 )、5 5 0 の熱処理については ( 黒丸 )、6 5 0 の熱処理については ( 黒菱形 ) でそれぞれプロットしている。

【 0 0 1 4 】 ところで、上記図 4 によれば、ビッカース硬さは、時効温度 4 5 5 のとき 5 0 0 分、時効温度 5 5 0 のとき 2 0 0 分、時効温度 6 5 0 のとき 1 0 分付近でそれぞれ極大値 ( 最大値 ) を示していることが分かる。これは、原子空孔の助けで銅原子が析出するが、その析出の初期段階でビッカース硬さがピークとなり、その後さらに時効すると微細に析出した銅原子が次

ヒステリシス磁化特性試験により得られた磁化曲線は、時効時間の変化によっては大きな変化が見られない。しかし、本願発明者の研究によって、以下で説明する解析を行うと、ヒステリシス磁化曲線に基づいて、時効条件 ( 時効時間、時効温度 ) の変化に伴う材料中の銅原子の析出状態の変化 ( 脆性の変化 ) を定量的に表わすことができることと判明した。

【 0 0 1 2 】 図 5 に示すヒステリシス磁化曲線から、磁界強度  $H$  の対数  $\log ( H )$  に対する磁化率  $b$  ( = 磁束密度  $B$  ( Gauss ) / 磁界強度  $H$  ( Oe ) ) の対数  $\log ( b )$  の関係をプロットすると、時効温度 4 5 5 で時効時間 3 0 0 分のものについては図 7 に、また時効温度 4 5 5 での時効時間 2 0 0 0 分のものについては図 8 に示す関係線図がそれぞれ得られる。なお、ここでの対数は、常用対数 ( 底が 1 0 の対数 ) を用いて図示し、また、図中には関係線図に最も良くのる - 2 の傾きの直線を図示している。そして、図 7 及び図 8 に図示された関係線図 ( - 2 の傾きの直線 ) から次式、

$$\log ( b ) = \log ( b ) - 2 \log ( H ) \dots (2)$$

第に粗大化して平均距離が大きくなってビッカース硬さが低下するからである。このことは、ビッカース硬さが極大となるときに脆性が最も大きくなる ( 脆化が最も進む ) ことを示すものである。このことから、強磁性構造材の脆性の変化に対応してビッカース硬さが変化することが分かり、かかるビッカース硬さを基準脆化因子とすることができる。それゆえ、経年劣化測定対象の強磁性構造材について、初期状態および経年劣化後の脆化係数  $b$  の値を求めてそれらの値に各々対応する基準脆化因子の値を図 12 に示すような相関関係から求め、それらの基準脆化因子の値を比較することで、経年劣化測定対象の強磁性構造材の経年による脆性の変化 ( 脆化の程度 ) を定量的に求めることが出来る。

【 0 0 1 5 】 即ち、本発明の方法によれば、あらかじめ、経年劣化の非破壊検査をする強磁性構造材と同じ種類の強磁性材料の試験片を用いて、上述した方法により、例えば図 12 中の曲線にて示すような脆化係数  $b$  と基準脆化因子 ( 図 12 ではビッカース硬さ  $H_v$  ) との相関関係を求めてその相関関係をその構造材の基準相関としておき、経年劣化測定対象である強磁性構造材またはそれをを用いた強磁性構造体 ( 例えば原子炉圧力容器等 ) の初期状態及び経年劣化後について、ヒステリシス磁化特性試験を行って得られた磁化曲線から、上記方法と同様の方法にて脆化係数  $b$  の値をそれぞれ求め、それら脆化係数  $b$  に各々対応する基準脆化因子の値を前述の基準相関から求め、それらの基準脆化因子の値を比較することで、測定対象とした構造物の脆化の程度を定量的に求めることができる。

【 0 0 1 6 】 しかも、ビッカース硬さを測定する一般的な方法によれば、材料の表面の情報を得ることはできても被測定強磁性構造材内部の脆性の情報を得ることはで

きないのに対して、本発明の方法によれば、材料内部の情報の含まれたヒステリシス磁化曲線に基づいて脆化係数  $b$  を求めているので、被測定強磁性構造材の内部も含めた材料全体の情報を得ることができるという利点がある。

【 0 0 1 7 】なお、原子炉压力容器等を被測定対象とする場合には、測定対象物の形状に応じて、その測定対象物に巻線を直に巻くか、あるいは巻線を巻いた磁気ヨークを測定対象物に当てることで、ヒステリシス磁化特性試験を行うことができ、得られたヒステリシス磁化曲線から脆化係数  $b$  の値を求めることができる。

【 0 0 1 8 】すなわち、構造材が長期間に亘って中性子線の照射を受けると、材料内部の空孔が増加し、その結果、銅原子が析出して構造材中の脆化が進行する。この発明の方法によれば、かかる銅原子の析出等による実質的な脆化の程度を正確に測定し得て、材料の経年劣化を非破壊的に測定することができる。

【 0 0 1 9 】さらに、強度係数  $c$  を求めて材料の強度の経年劣化を非破壊的に測定し定量的に求める上記従来の方法と併せることもでき、このようにすれば、材料の強度だけでなく脆性の変化も定量的に求めることができるので、金属疲労や中性子線照射等に伴う転位密度の変化を同時に調べることができて、材料の強度および脆性の変化に伴う経年劣化を評価することができる。なお、上記強度係数  $c$  は、次式

$$c = \mu_0 H^3 \quad \dots (4)$$

で定義される。

【 0 0 2 0 】特に、原子炉压力容器の中性子線照射による経年劣化は、原子空孔や格子間原子、銅原子の析出、転位ループの増加などが互いに相関して進むとされている。それゆえ、本発明の強磁性構造材の経年劣化の測定方法における脆化係数  $b$  と、従来の強磁性構造材の強度の経年劣化の測定方法における強度係数  $c$  の値とを、ヒステリシス磁化曲線から上記(1)式、(4)式によってそれぞれ求めることで、強度および脆性のそれぞれの劣化情報を得ることができるとともに、材料の強度の変化による劣化から、原子空孔や格子間原子、銅原子の析出および転位ループなどの増加による脆性の変化による劣化を分離することができる。

【 0 0 2 1 】なお、この発明の強磁性構造材の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊測定方法では、前記基準脆化因子が硬度であっても良く、このようにすれば、脆化係数  $b$  と硬度との相関関係を示す次式

$$Hv = f(b) \quad \dots (5)$$

から脆化係数  $b$  の値に対応する硬度を得ることができ、先に述べたように硬度は材料の脆性の変化に対応することが分かっているので、脆化係数  $b$  に対応するピッカース硬さ  $Hv$  により、材料の脆性の変化の定量的な値を確実に求めることができる。

【 0 0 2 2 】

【発明の実施の形態】以下に、この発明の実施例の形態を実施例によって、図面に基づき詳細に説明する。図 1 は、この発明の強磁性構造材の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊測定方法の第一実施例において用いる、脆化係数  $b$  と基準脆化因子（ピッカース硬さ  $Hv$ ）との基準相関を例示する説明図であり、図 2 は、本実施例の非破壊測定方法を示す説明図である。図中符号 1 は、銅原子の析出等により脆化が進行している強磁性構造材によって構成された被測定強磁性構造体、2 は励磁巻線、3 は磁束検出巻線、4 はそれらの巻線が巻かれた磁気ヨークである。ここでは、図 2 に示すように、励磁巻線 2 と磁束検出巻線 3 とを直接巻けない形状の被測定強磁性構造体 1 に対し、励磁巻線 2 と磁束検出巻線 3 とを有する磁気ヨーク 4 を密着させ、磁気閉回路 5 を形成する。6 は、上記励磁巻線 2 と磁束検出巻線 3 とが接続されたヒステリシス磁化特性測定装置であり、このヒステリシス磁化特性測定装置 6 には、一般の市販品を用いることができる。また 7 は、この実施例を実施した結果として、ヒステリシス磁化特性測定装置 6 に表示される、被測定強磁性構造体 1 のヒステリシス磁化特性である。

【 0 0 2 3 】この実施例の強磁性構造材の脆性の変化に伴う経年劣化の非破壊測定方法によれば、ヒステリシス磁化特性測定装置 6 より励磁巻線 2 に励磁電流が供給され、このとき磁束検出巻線 3 に誘起した電圧が、ヒステリシス磁化特性測定装置 6 に導かれて増幅積分され、その結果ヒステリシス磁化特性 7 が得られる。この実施例では、磁化率  $\mu$  が求められれば良いので、従来方法の実施のために飽和磁化まで磁化させて測定するのに必要な磁界強度  $H$  がおよそ 1000 ~ 2000 Oe であるのに対して、50 Oe 程度の極めて低い磁界強度  $H$  で測定を行えば足りる。

【 0 0 2 4 】上述した極めて低い磁界強度  $H$  での測定により得られたヒステリシス磁化特性 7 は、被測定強磁性構造体 1 の内部での 3 次元的磁路の広がりや反磁界係数の影響による誤差を含んだものである。ゆえに、この誤差を除去したヒステリシス磁化特性を得るための補正係数を求める必要があるが、この補正係数は、既知の静磁界解析手法を用いた計算機実験あるいは実測定体系を模擬したモックアップ実験により前もって求めておくことができる。

【 0 0 2 5 】上述のようにして求めた磁界強度  $H$  での擬似的ヒステリシス磁化特性により求めた磁化率  $\mu$  と磁界強度  $H$  との値を上記(1)式

$$b = \mu H^2$$

に代入することで脆化係数  $b$  の値が求められる。そして図 1 に示す、脆化係数  $b$  と基準脆化因子としてのピッカース硬さ  $Hv$  との相関関係としての相関関係を示す上記(5)式

$$Hv = f(b)$$

に、先に求めた脆化係数  $b$  の値を代入することで、脆化

係数  $b$  に対応するピッカース硬さ  $H_v$  の値が得られ、ピッカース硬さ  $H_v$  と材料の脆性の变化との対応関係から、銅原子の析出等により脆化が進行している被測定強磁性構造体 1 の内部の実質的な材料の脆性の变化を求めることができる。

【 0 0 2 6 】上記相関関係  $H_v = f(b)$  は材料の内部構造によって定まるが、この相関関係  $H_v = f(b)$  は、経年劣化測定対象の強磁性構造材としての被測定強磁性構造体 1 と同種の材料のテストピースを用いて測定により前もって求めておくことができる。そして、その相関関係  $H_v = f(b)$  を図示すると、脆化係数  $b$  とピッカース硬さ  $H_v$  との関係が、図 1 に示す校正曲線  $H_v = f(b)$  として表わされる。その校正曲線  $H_v = f(b)$  を基準相関として、この基準相関  $H_v = f(b)$  から、上述の測定で求めた脆化係数  $b$  の値に対応するピッカース硬さ  $H_v$  (実質的な脆性) の値が容易に求められる。

【 0 0 2 7 】そして、材料の脆性の变化に伴う経年劣化を評価するに際しては、経年劣化前の被測定構造体 1 について同様にヒステリシス磁化特性試験を行っておき、上記と同様の方法にて脆化係数  $b$  の値を求め、この脆化係数  $b$  の値を図 1 に示すように初期値  $b_0$  としておく。また、上記で求めた経年劣化後の脆化係数  $b$  を  $b_1$  (初期値  $b_0$  から離れた脆化係数) とする。そして図 1 の基準相関  $H_v = f(b)$  から、経年劣化後の脆化係数  $b_1$  に対応するピッカース硬さ  $H_{v1}$  と、初期値  $b_0$  に対応するピッカース硬さ  $H_{v0}$  とを得ることができる。これらピッカース硬さの値  $H_{v0}$  ,  $H_{v1}$  は脆性の变化に対応していることから、ピッカース硬さの値  $H_{v0}$  と  $H_{v1}$  とを比較することで、被測定構造体 1 の経年による脆性の变化 (脆化の程度) を非破壊的に測定できる。

【 0 0 2 8 】なお、本実施例の非破壊検査方法では、経年後の被測定構造体 1 について、定期的にヒステリシス磁化特性試験を行って材料の脆性の变化を測定することができ、これにより、被測定構造体 1 が最も脆くなっている状態 (図 1 では脆化係数  $b$  の最大値) を検出することも可能である。

【 0 0 2 9 】従って、本実施例の強磁性構造材の脆性の变化に伴う経年劣化の非破壊測定方法によれば、被測定強磁性構造材の所定の磁界強度  $H$  での測定により得られた擬似的なヒステリシス磁化曲線 7 から脆化係数  $b$  の値を計算し、図 1 に例示する如き脆化係数  $b$  とピッカース硬さ  $H_v$  との関係を示す基準相関  $H_v = f(b)$  から、脆化係数  $b$  の値  $b_0$  ,  $b_1$  に対応するピッカース硬さ  $H_v$  の値  $H_{v0}$  ,  $H_{v1}$  を得て、脆性の变化に対応するピッカース硬さ  $H_v$  の値  $H_{v0}$  ,  $H_{v1}$  を比較することで、強磁性構造材の脆性の变化に伴う経年劣化の程度を定量的に非破壊的に測定できる。

【 0 0 3 0 】しかも、本実施例の強磁性構造材の脆性の变化に伴う経年劣化の非破壊測定方法では、被測定強磁性構造材の所定の磁界強度  $H$  での測定により得られた擬

似的なヒステリシス磁化曲線 7 から、上記(4)式  $c = H^3$  により、強磁性構造材の強度の経年劣化の程度を表わす強度係数  $c$  の値も併せて求めることができる。

【 0 0 3 1 】それゆえ、この実施例の測定方法によれば、原子炉圧力容器等、強磁性構造材で製造された全ての構造物の経年劣化の程度を、亀裂が発生する前段階での、材料内部の銅原子の析出量、転位密度及びそれらの分布の変化から非破壊的に正確に検査でき、なおかつ小型の磁気ヨークと小容量の励磁電源を具える簡単な装置で測定することができる。

【 0 0 3 2 】図 3 は、この発明の強磁性構造材の脆性の变化に伴う経年劣化の非破壊測定方法の第 2 実施例を示す説明図である。この実施例では、第 1 実施例と異なり、中性子線照射等により銅原子が析出等して脆化が進行している被測定構造体 1 が、シャルピー試験片に代表されるように、励磁巻線 2 と磁束検出巻線 3 とを直接巻ける形状を有しているので、被測定構造体 1 に、励磁巻線 2 と磁束検出巻線 3 とが直接巻かれている。ここでも、ヒステリシス磁化特性測定装置 6 には、先の第 1 実施例と同様に、一般の市販品を用いることができる。また 8 は、この実施例を実施した結果として、ヒステリシス磁化特性測定装置 6 に表示されるヒステリシス磁化特性である。

【 0 0 3 3 】本実施例では、先の第 1 の実施例と同様にして、極めて低い磁界強度  $H$  での測定により得られたヒステリシス磁化特性 8 から脆化係数  $b$  の値を求める。また、あらかじめ、先の第 1 実施例にて示した図 1 の基準相関を得た方法と同様の方法により、脆化係数  $b$  と基準脆化因子としてのピッカース硬さとの基準相関 (図示せず) を得ておく。そして、かかる基準相関から、被測定構造体 1 について、上記第 1 実施例と同様に求めた、経年劣化後のピッカース硬さ  $H_v$  の値  $H_{v1}$  と初期状態のピッカース硬さ  $H_v$  の値  $H_{v0}$  とを比較することで、強磁性構造体 1 の経年による脆性の变化 (脆化の程度) を非破壊的に測定することができる。

【 0 0 3 4 】従って、本実施例の方法によれば、原子炉圧力容器中に装備されているシャルピー試験片と同様に巻線を巻ける形状の部材に対して、先の実施例と同様に強磁性構造体 1 の銅原子の析出等に伴う経年劣化の非破壊検査を行うことができる。しかも磁気ヨークを使用しなくてすむことから、装置の単純化及び軽量化を図ることができる。

【 0 0 3 5 】以上、図示例に基づき説明したが、この発明は上述の例に限定されるものではなく、例えば、上記実施例では構造体について測定したが、構造体用の構造材についても測定し得ることはいうまでもない。また、この発明の方法の各工程を実施する手段を組合わせて、経年劣化測定装置を構成することもできる。そして、上記第 1 及び第 2 実施例では、脆性の变化に対応する基準脆化因子としてピッカース硬さ  $H_v$  を用いたが、強磁性材

料の脆性の变化に対応して变化する因子であればこれに限られず、例えば、シャルピー衝撃試験による延性脆性遷移温度を基準脆化因子とすることもでき、また、硬度についても、ピッカース硬さに限られず、例えばロックウェル硬さ等の硬度を基準脆化因子とすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 この発明の強磁性構造材の脆性の变化に伴う経年劣化の非破壊測定方法の第一実施例において用いる、脆化係数  $b$  と基準脆化因子（ピッカース硬さ  $Hv$ ）との基準相関を例示する説明図である。

【図 2】 上記第 1 実施例の非破壊測定方法を示す説明図である。

【図 3】 この発明の強磁性構造材の脆性の变化に伴う経年劣化の非破壊測定方法の第 2 実施例を示す説明図である。

【図 4】 時効温度（455、550、650）の熱処理による銅原子析出の変化に伴う時効時間（分）とピッカース硬さ  $Hv$  との関係を試験結果に基づき例示する説明図である。

【図 5】 時効温度 455 で時効時間（0分、30分、300分、2000分、7000分）にて時効したときのヒステリシス磁化特性の変化を試験結果に基づき例示する説明図である。

【図 6】 時効温度 550 で時効時間（0分、30分、100分、200分、1000分）にて時効したときのヒステリシス磁化特性の変化を試験結果に基づき例示する説明図である。

【図 7】 時効温度 455 で時効時間 300 分間時効したときの、磁化率  $b$  の対数  $\log(b)$  と磁界強度  $H$  の対数

$\log(H)$  との関係を試験結果に基づき例示する説明図である。

【図 8】 時効温度 455 で時効時間 2000 分間時効したときの、磁化率  $b$  の常用対数  $\log(b)$  と磁界強度  $H$  の対数  $\log(H)$  との関係を試験結果に基づき例示する説明図である。

【図 9】 時効温度 455 で時効したときの、時効時間に対する脆化係数  $b$  およびピッカース硬さ  $Hv$  の関係を試験結果に基づき例示する説明図である。

【図 10】 時効温度 550 で時効したときの、時効時間に対する脆化係数  $b$  およびピッカース硬さ  $Hv$  の関係を試験結果に基づき例示する説明図である。

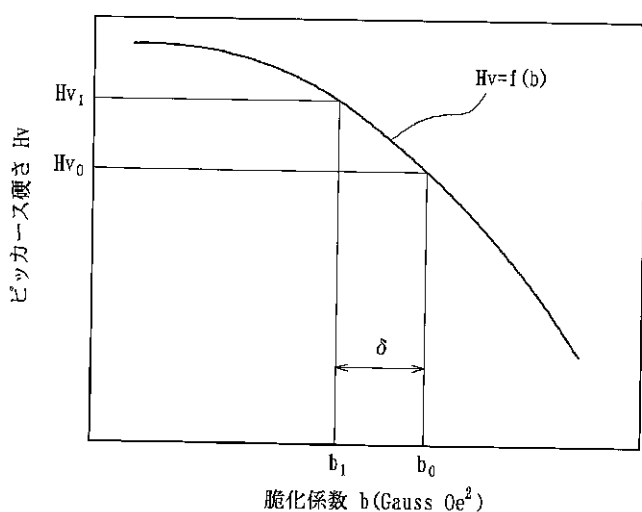
【図 11】 時効温度 650 で時効したときの、時効時間に対する脆化係数  $b$  およびピッカース硬さ  $Hv$  の関係を試験結果に基づき例示する説明図である。

【図 12】 時効温度（455、550、650）について脆化係数  $b$  とピッカース硬さ  $Hv$  との関係を試験結果に基づき例示する説明図である。

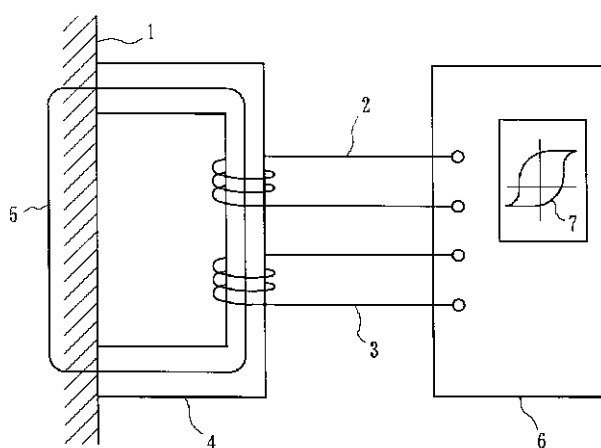
【符号の説明】

- 20 1 被測定強磁性構造体
- 2 励磁巻線
- 3 磁束検出巻線
- 4 磁気ヨーク
- 5 磁気閉回路
- 6 ヒステリシス磁化特性測定装置
- 7 第 1 実施例のヒステリシス磁化特性
- 8 第 2 実施例のヒステリシス磁化特性

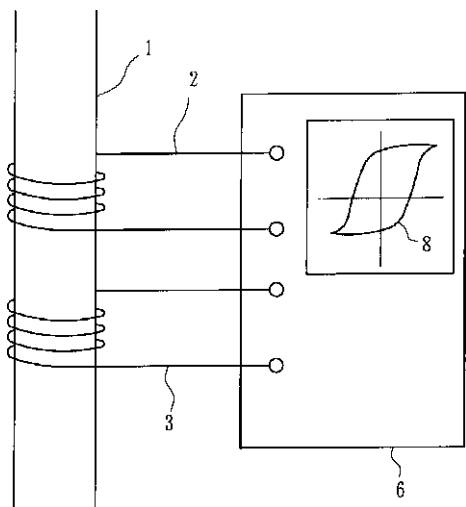
【図 1】



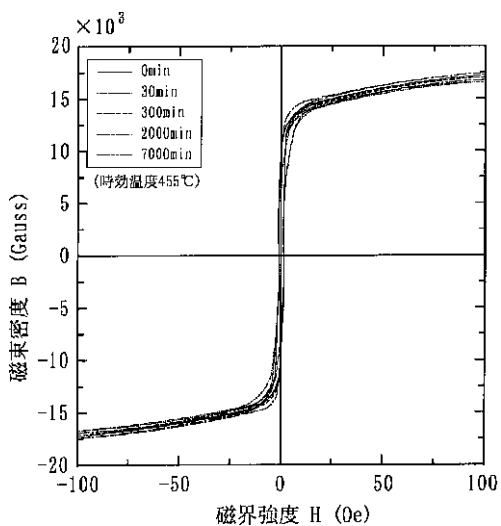
【図 2】



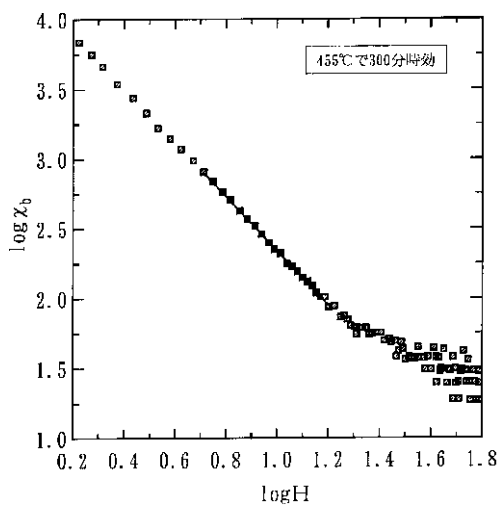
【図 3】



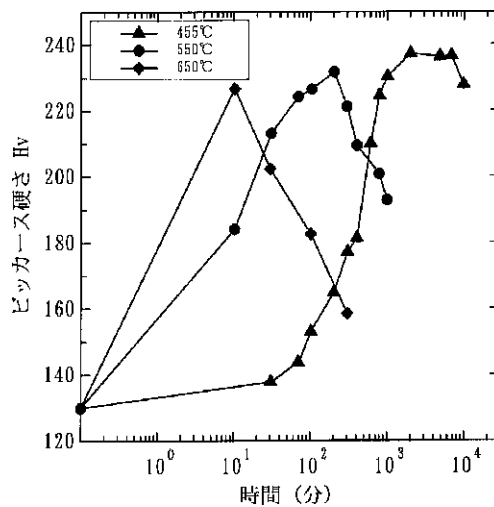
【図 5】



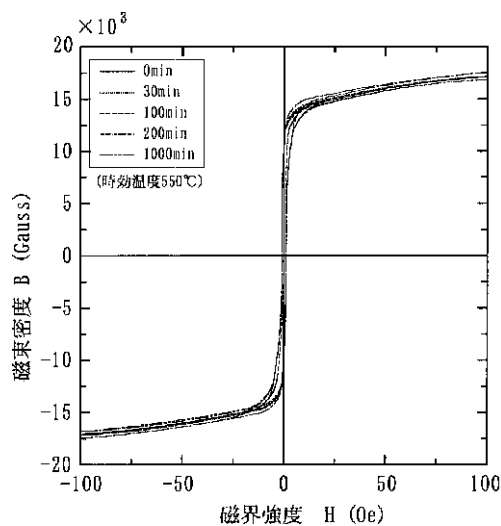
【図 7】



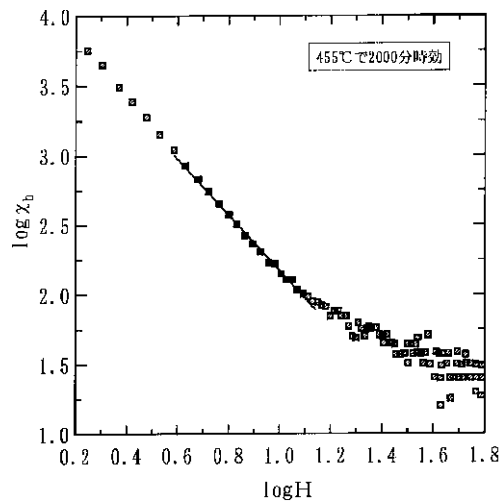
【図 4】



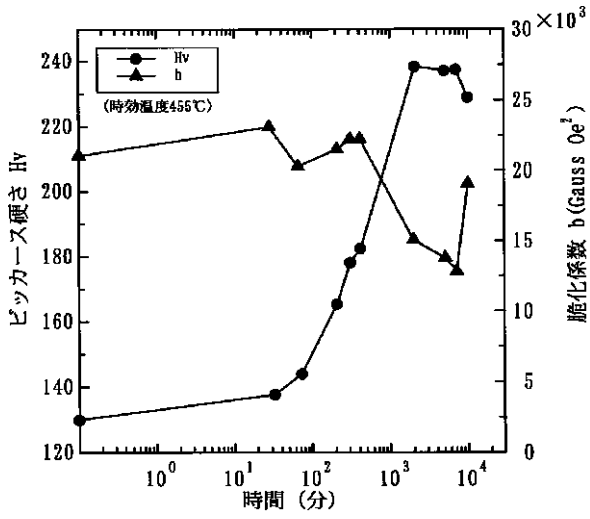
【図 6】



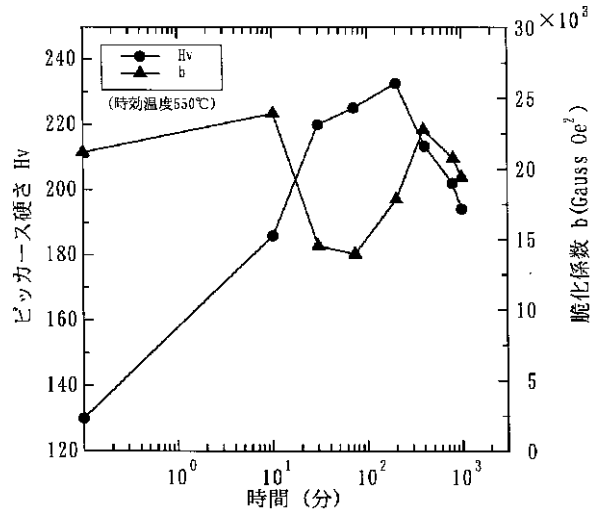
【図 8】



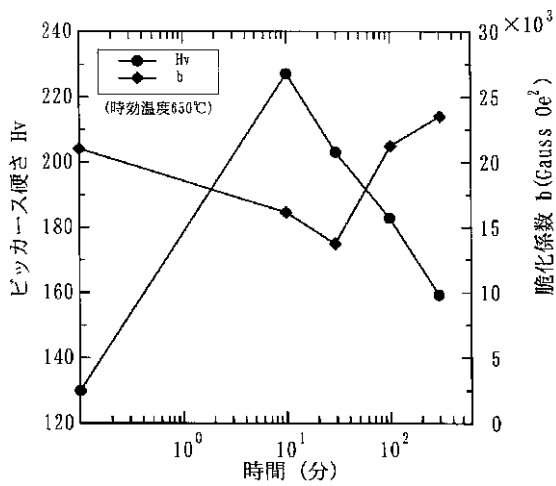
【 図 9 】



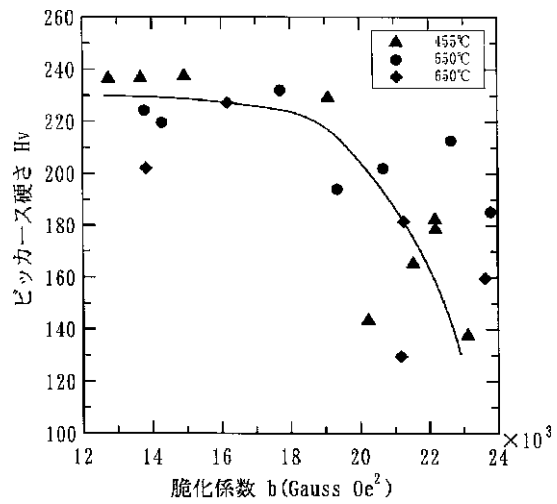
【 図 10 】



【 図 11 】



【 図 12 】



フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl.<sup>7</sup>, DB名)

G01N 27/72 - 27/90

J I C S T ファイル ( J O I S )