

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5347102号  
(P5347102)

(45) 発行日 平成25年11月20日 (2013.11.20)

(24) 登録日 平成25年8月30日 (2013.8.30)

(51) Int. Cl.	F 1	
GO 1 N 27/72 (2006.01)	GO 1 N 27/72	
G 2 1 C 17/003 (2006.01)	G 2 1 C 17/00	E
G 2 1 C 17/00 (2006.01)	G 2 1 C 17/00	P
G 2 1 D 1/00 (2006.01)	G 2 1 D 1/00	X

請求項の数 1 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願2008-301850 (P2008-301850)	(73) 特許権者	505374783
(22) 出願日	平成20年11月27日 (2008.11.27)		独立行政法人日本原子力研究開発機構
(65) 公開番号	特開2010-127728 (P2010-127728A)		茨城県那珂郡東海村村松4番地49
(43) 公開日	平成22年6月10日 (2010.6.10)	(73) 特許権者	592244376
審査請求日	平成23年8月25日 (2011.8.25)		日鉄住金テクノロジー株式会社
			東京都千代田区有楽町一丁目7番1号
特許法第30条第1項適用	平成20年6月20日 日本保全学会主催の「日本保全学会 平成20年度第1回「第1回材質劣化診断技術に関する調査」分科会」において文書をもって発表	(74) 代理人	100074631
			弁理士 高田 幸彦
(出願人による申告) 「平成19年度、文部科学省、エネルギー対策特別会計委託事業、超臨界圧水冷却高速炉の炉内構造材劣化予兆診断技術の開発(委託業務)、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願」		(72) 発明者	根本 義之
			茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
			独立行政法人日本原子力研究開発機構
			東海研究開発センター 原子力科学研究所内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 オーステナイトステンレス鋼の中性子照射による照射誘起応力腐食割れの予兆診断方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

オーステナイトステンレス鋼の中性子照射による照射誘起応力腐食割れの予兆診断方法において、

オーステナイトステンレス鋼の被検体表面にセンサプローブを密着させ、交流磁化法により、前記被検体の第3高調波電圧値を測定し、予め求められている第3高調波電圧値の変化と中性子照射による照射誘起応力腐食割れ感受性の度合いとの相関関係を示すデータベースを参照して、前記被検体の中性子照射による照射誘起応力腐食割れ感受性の度合いを求め、

さらに、交流磁化法で使用したセンサプローブと同一のセンサプローブを用いて、渦電流法により、前記被検体のプローブ電圧を測定し、予め求められている渦電流法プローブ電圧値と中性子照射による照射誘起応力腐食割れ感受性の度合いとの相関関係を示すデータベースを参照して、前記被検体の中性子照射による照射誘起応力腐食割れ感受性の度合いを求め、

求められた該照射誘起応力腐食割れ感受性の度合いが、前記第3高調波電圧値から求められた前記照射誘起応力腐食割れ感受性の度合いから所定の誤差範囲にあるかどうかを求め、ことを特徴とするオーステナイトステンレス鋼の中性子照射による照射誘起応力腐食割れの予兆診断方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

## 【 0 0 0 1 】

本発明は、原子炉、粒子加速器等の構造材料において発生する照射誘起応力腐食割れ（I A S C C）のき裂発生以前の予兆を監視する I A S C C 予兆診断方法及びその装置に関する。

## 【背景技術】

## 【 0 0 0 2 】

原子炉等の炉内構造物の構造材料としては、オーステナイトステンレス鋼が使用されているが、オーステナイトステンレス鋼は、繰り返し中性子照射を受けることによって粒界の C r 濃度等が変化し、その結果として、応力腐食割れを起す可能性が高まる。このため、従来より、原子炉等の安全性の確保及び寿命予測の観点から、炉内構造物の金属材料の I A S C C 診断が様々な方法で実施されてきている（例えば、特許文献 1 や特許文献 2 を参照）。

10

【特許文献 1】特開平 6 - 3 3 1 7 8 2 号公報

【特許文献 2】特開 2 0 0 2 - 1 4 8 3 8 3 号公報

## 【発明の開示】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【 0 0 0 3 】

しかし、これまでの I A S C C 診断技術は、いずれもすでに構造材料に微細き裂などの損傷が発生した後に、検知可能な診断法である。き裂などの損傷発生以前の設階での診断は困難であった。（糟谷高志, 遠藤久, 内一哲哉, 高木敏行「渦電流モニタリングシステムによる定量的き裂進展評価」日本機械学会論文集, A 編 7 2 巻 7 1 4 号 ( 2 0 0 6 ) , p p . 2 0 - 2 5 )

20

## 【 0 0 0 4 】

本発明の目的は、原子炉、粒子加速器等の構造材料に、照射誘起応力腐食割れ（I A S C C）によるき裂が発生する以前に、その予兆を監視できる I A S C C 予兆診断方法と、そのための装置を提供することにある。

## 【課題を解決するための手段】

## 【 0 0 0 5 】

本発明者等は、オーステナイトステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ（I A S C C）の対策について研究、実験を重ねてきた結果、交流磁化法によって得られる被検体からの第 3 高調波電圧値の変化が I A S C C 感受性の度合いと極めてリニアな対応関係を持つことを発見した。

30

## 【 0 0 0 6 】

この結果得られた、本発明の 1 つの観点に係る I A S C C 予兆診断方法は、交流磁化法により、被検体の第 3 高調波電圧値を測定し、予め求められている第 3 高調波電圧値の変化と I A S C C 感受性の度合いとの相関関係を示すデータベースを参照して、被検体の I A S C C 感受性の度合いを求める段階から構成される。

## 【 0 0 0 7 】

さらに、本発明者等は、渦電流法によって被検体の測定を行った際に得られるプローブ電圧の変化もまた、I A S C C 感受性の度合いと極めてリニアな対応関係を示すことを発見した。

40

## 【 0 0 0 8 】

この結果得られた、本発明の他の観点に係る I A S C C 予兆診断方法は、前述の診断方法に、さらに、前記被検体の渦電流法プローブ電圧を測定し、予め求められている渦電流法プローブ電圧値の変化と I A S C C 感受性の度合いとの相関関係を示すデータベースを参照して、前記被検体の I A S C C 感受性の度合いを求め、求められた I A S C C 感受性の度合いが、前記第 3 高調波電圧値の変化から求められた I A S C C 感受性の度合いから所定の誤差範囲にあるかどうかを求める段階を有する。このような構成を取ることによって、より信頼性の高い I A S C C 予兆診断を行うことができる。

## 【 0 0 0 9 】

50

前述の方法は、本発明の1つの観点によれば、構造物の壁面を交流磁化する励磁コイルと、前記構造物の壁面からの磁束を検出する検出コイルから構成されるセンサプローブと、予め求められている第3高調波電圧値の変化の大きさとIASC C感受性の度合いとの相関関係を示すデータを記憶しているメモリを備え、前記センサプローブによって得られる第3高調波電圧値に基づいて、前記メモリを参照し、当該電圧値変化対応のIASC C感受性の度合いを求めるように構成されたIASC C予兆診断装置によっても実施することができる。

#### 【0010】

前述のIASC C予兆診断装置において、前記構造物が原子炉構造物である場合には、前記センサプローブは、耐放射線性部材で被覆された前記励磁コイルと前記検出コイルが高透磁率材であるフェライトコア上に巻かれ、耐放射線性部材成形体ボビンで支持されているI型コアセンサであることが好ましい。より好適には、前記耐放射線性部材がポリエーテルエーテルケトン材又はポリイミド材であることが好ましい。I型コアセンサの周囲を耐放射線性部材で覆うことによって、放射線などに対する耐環境性を大幅に向上させることができる。

10

#### 【0011】

より好適には、前述のIASC C予兆診断装置は、さらに、前記センサプローブを前記構造物の壁面上で位置決めするための位置決め装置を備え、該位置決め装置の軸方向駆動を超音波モータで行うことが好ましい。通常、非破壊検査において位置決めに使用するステッピングモータの場合、電磁ノイズが測定用プローブの検出信号に悪影響を与えるため

20

#### 【発明の効果】

#### 【0012】

構造材料を用いた原子炉、粒子加速器等の機器のメンテナンス時に、本発明を利用し、き裂発生前の照射誘起応力腐食割れ(IASC C)の予兆を評価することで、より保守的な構造材料の健全性評価が可能となり、機器の安全性を高めることが出来る。また、効率的なメンテナンス計画を立てることが出来るので、経済性を高めることが可能となる。

#### 【発明を実施するための最良の形態】

#### 【0013】

最初に、本発明の一実施形態に係る、ホットセル内で行った照射誘起応力腐食割れ(IASC C)予兆診断装置の概略構成について、図1を用いて説明する。図1において、符号10はホットセル内部を示し、20はホットセル外部を示している。ホットセル内部10には、交流磁気センサであるI型コアセンサ13の他に、静的で微弱な漏洩磁束密度を測定するための直流磁気センサであるFGセンサ11とMIセンサ12が取り付けられている。本発明では、I型コアセンサ13のみを使用して、交流磁化法による被検体の第3高調波電圧値の測定、及び渦電流法によるプローブ電圧値の測定を行う。また、診断位置を決めるための位置決め手段として、CCDカメラ14と試験片が載せられたステージを所望の位置に移動させるための1軸ボールネジ駆動機構と超音波モータ16が設けられている。また、磁気センサに悪影響を与えないように磁気センサから十分離れた位置に、直流磁気センサによる測定のために被検体の着磁や脱磁を行うための着脱磁励磁コイル15

30

40

#### 【0014】

一方、ホットセル外部20には、各種センサ11、12、13からの検出信号を増幅するためのセンサアンプ21、センサアンプ21からの信号を処理するための信号処理ユニット22、位置決め用の超音波モータ16を駆動させる超音波モータドライバ24、その超音波モータドライバ24に駆動制御信号を与えるパワーユニット/ステージ制御ユニット23、及び信号処理結果を表示する表示装置25が設けられている。

#### 【0015】

以上の装置構成において、上述した以外の装置全体の基本動作はこれまでに周知の原子炉内の非破壊検査装置の動作と同様であるので、詳細については省略する。また、この実

50

施形態では、ホットセル内での試験片観測によって、予兆診断を行うように構成されているが、実機においては、例えば、原子炉の構造材に直接レーンを敷設して、遠隔操作によって上述のI型コアセンサ13をレーン上で移動させ、位置決めを行う。遠隔操作については、実験によって、信号減衰なしに10mまでの遠隔操作が可能であることを確認した。

#### 【0016】

I型コアセンサ13の概略構成を図2に示す。I型コアセンサ13は、センサプローブ131とそのセンサプローブ131を支持するボビン132から構成されている。センサプローブ131の中心に延びるボビン132には、中心に直径1.2mmの高透磁率材であるフェライトコア133が埋め込まれて、励磁コイル134で励磁された磁束密度を高め、また上下の検出コイル135、136の検出感度を高める役目を果たしている。ボビン132は、耐放射線性の高い材料であるポリエーテルエーテルケトン(PEEK)材で形成され、耐放射線性を確保している。また励磁コイル134と上下の検出コイル135、136は、耐放射線性の高い材料であるポリイミド(PI)材で被覆されており、耐放射線性を確保している。なおボビン132を、ポリイミド(PI)材で形成し、励磁コイル134と上下の検出コイル135、136をポリエーテルエーテルケトン(PEEK)材で被覆しても良いし、ボビン132と励磁コイル134と上下の検出コイル135、136の被覆にポリエーテルエーテルケトン(PEEK)材のみを使用しても良いし、ポリイミド(PI)材のみを使用しても良い。

#### 【0017】

次に、実機を対象にした場合のIASCC予兆診断方法の手順を、図3を参照して説明する。図3のフローチャートにおいて、初めに基準となるデータを得るため、炉外にてIASCC感受性が0の未照射ステンレス鋼を用いて、交流磁化法による第3高調波電圧値の測定及び渦電流法に使用する測定装置の0点調整を行う(ステップ200)。次に、定期点検などの原子炉のメンテナンス時に、I型コアセンサプローブ13を遠隔操作で原子炉内に挿入し、位置決めして構造材表面に密着させる(ステップ300)。次に、構造材に関しての交流磁化法による第3高調波電圧値の測定及び渦電流法によるプローブ電圧値の測定を行う(ステップ400)。次に、予め試料片を使用して作成し、信号処理ユニット22のメモリ(図示せず)に記憶してあるIASCC感受性/第3高調波電圧値変化のデータベースを参照して、IASCC感受性を評価する(ステップ500)。また、同様にして予めメモリに記憶されているIASCC感受性/渦電流法プローブ電圧値変化のデータベースを参照して、ステップ500で求めたIASCC感受性の信頼性を評価する(ステップ600)。両者のIASCC感受性が実質的に同等でない場合には、測定環境に問題があったものとしてステップ300に戻り、再度ステップ600までの手順を実行する。一方、両者の感受性が実質的に同等である場合には、さらに先のステップに進み、プローブ位置を移動させた後、ステップ300からステップ600の手順を繰り返し、炉内構造材のIASCC感受性マップを作成し(ステップ700)、信号処理ユニット22のメモリに記憶する。ここで両者のIASCC感受性が実質的に同等とは、例えば両者のIASCC感受性が20%以内を言う。

#### 【0018】

上述のようにして、炉内構造材のIASCC感受性マップを作成しておくことにより、次回メンテナンス時には、IASCC感受性の高い箇所を特に重点的に点検を行うことで、メンテナンスを効率的に正確に行うことが可能となる。

#### 【0019】

次に、図4から図9を参照し、本発明の原理となるIASCC感受性(%)と第3高調波強度(dB)(基準電圧に対する比率)の関係、及びIASCC感受性(%)とプローブ電圧(a.u.)の関係について説明する。各図においてHP304、HP316、HP304/C、HP304/Si、HP304/P、HP304/Sは、いずれも高純度モデルオーステナイト系ステンレス合金である。これらの合金は、SUS304の不純物元素濃度が極力少なくなるように作成したHP304を基に、それぞれMo、C、Si、P、

S等の元素を個別に添加して作成したものである。その後、試験片を切り出し、所定の中性子照射を行った。試験片のつかみ部の直径は11mmであり、この端部の磁気測定を行い、軽水炉条件の高温水中でのSSRT試験(Slow Strain Rate Technique:低歪速度引張試験)を行って、IASCC感受性(%)の評価を行った。

#### 【0020】

図4にHP304等の高純度モデルオーステナイト系ステンレス合金照射材について取得した交流磁化法による第3高調波強度(dB)の測定結果とIASCC感受性(%)の評価結果の関係を示す。本実施例では、励磁周波数は10kHzであり、検出コイル135、136で検出された電圧値をフーリエ変換して、基本波の電圧値や第3高調波電圧値の成分を求めた。図4から、IASCC感受性(%)の上昇に伴い、第3高調波強度(dB)がほぼ二アに上昇する、正の相関関係があることがわかる。なおここでは、第3高調波強度(dB)として第3高調波の電圧1Vを0dBと換算している。つまり第3高調波電圧値の変化とIASCC感受性(%)とは、1対1の対応関係が存在することを示している。また、図5に同じ照射材の渦電流法による位相平面上( $V_x, V_y$ )での評価結果を示す。ここでは、これまでの研究においてIASCC感受性が0となったHP316の1dpa照射材を基準として測定を行った。

10

#### 【0021】

この位相平面上での評価結果から得られたプローブ電圧の相対値(a.u.)と、IASCC感受性(%)との関係をプロットしたグラフを図6に示す。ここでプローブ電圧の相対値(a.u.)とは、 $(V_x^2 + V_y^2)$ と定義した。交流磁化法による結果と比較してばらつきが大きくなったが、IASCC感受性(%)の上昇に伴い、プローブ電圧が上昇する、正の相関関係が得られた。図4に示した、交流磁化法によって取得した第3高調波強度のIASCC感受性(%)への依存性のデータのばらつきは、これまでに発明者等が得た漏洩磁束密度のIASCC感受性(%)への依存性の場合と同程度である。交流磁化法の場合は励磁周波数の調整により漏洩磁束密度に比べ、深さ変化に基づく情報を取得することができる。そのため、交流磁化法は、試験片表面に生成した酸化層や表面粗さの影響を分離して評価でき、漏洩磁束密度測定と比較して実機への適用性がより高い。

20

#### 【0022】

以上の交流磁化法と渦電流法による評価は、同じセンサプローブ、同じ測定装置を用いて行うことができる。そのため、実機への適用の際にも構造材の同じ測定箇所に対して、交流磁化法と渦電流法の評価を並行して行い、その結果を比較検討することによって、適切なIASCC予兆診断を行うことができる。また、つかみ部の直径が11mmの試験片について評価を行い、IASCC感受性と相関性のある磁気データを取得できたことから、実機構造材の例えば壁面のような比較的複雑な形状をした部位についても、適切な位置合わせ等を行うことにより、交流磁化法、渦電流法によるIASCC予兆診断を行うことができる。

30

#### 【0023】

次に、SUS316L照射材の交流磁化法による第3高調波強度(dB)の測定結果と、これまでに得られたIASCC感受性(%)の評価結果の関係をプロットしたグラフを図7に示す。IASCC感受性(%)の上昇に伴い、第3高調波強度が上昇する、正の相関関係が得られた。

40

#### 【0024】

また、図8に同じ照射材の渦電流法による位相平面上での評価結果を示す。ここでは、これまでの研究においてIASCC感受性(%)が0となった0.12dpa照射材を基準として測定を行った。この位相平面上( $V_x, V_y$ )での評価結果から得られたプローブ電圧の相対値と、IASCC感受性(%)との関係をプロットしたグラフを図9に示す。IASCC感受性の上昇に伴い、プローブ電圧が上昇する、正の相関関係が得られた。

#### 【0025】

本発明は上述の実施形態に限定されるものではなく、本発明の技術的思想の範囲を逸脱しない限り、本願の請求項に含まれる。例えば、本願の実施形態においては、第3高調波

50

電圧値を利用しているが、検出感度の向上が図られれば、第5高調波や第7高調波電圧を利用できる。また、上述の実施形態では、位置決め精度を上げるために1軸ボールネジ駆動機構で行っているが、大型の構造部材の検査では、従来のX-Yの2軸方向に移動できる位置決め装置の使用が効率的である。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1】本発明の一実施形態に係る照射誘起応力腐食割れ(IASCC)予兆診断装置の概略構成図である。

【図2】I型コアセンサ13の概略構成を示す図である。

【図3】IASCC予兆診断方法の手順を示すフローチャートである。

【図4】交流磁化法による第3次高調波強度(dB)の測定結果とIASCC感受性(%)の評価結果の関係を示す図である。

【図5】渦電流法による位相平面上( $V_x, V_y$ )のプローブ電圧分布を示す図である。

【図6】渦電流法プローブ電圧値測定結果とIASCC感受性(%)の評価結果の関係を示す図である。

【図7】交流磁化法による第3次高調波強度(dB)の測定結果とIASCC感受性(%)の評価結果の関係を示す図である。

【図8】渦電流法による位相平面上( $V_x, V_y$ )のプローブ電圧分布を示す図である。

【図9】渦電流法プローブ電圧値測定結果とIASCC感受性(%)の評価結果の関係を示す図である。

【符号の説明】

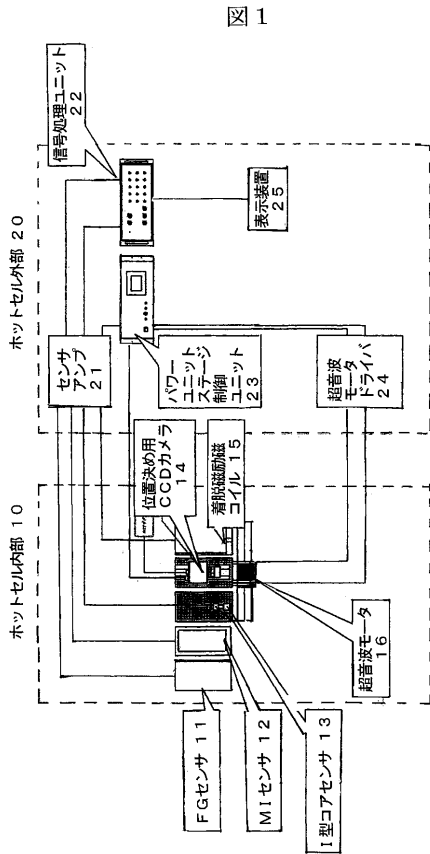
【0027】

11、12	直流磁気センサ	
13	I型コアセンサ	
14	CCDカメラ	
15	着脱磁励磁コイル	
16	超音波モータ	
21	センサアンプ	
22	信号処理ユニット	
23	パワーユニット/ステージ制御ユニット	30
24	超音波モータドライバ	
25	表示装置	
131	センサプローブ	
132	ボビン	
133	フェライトコア	
134	励磁コイル	
135、136	検出コイル	

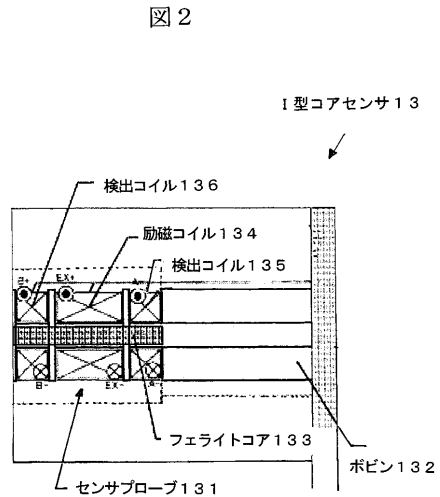
10

20

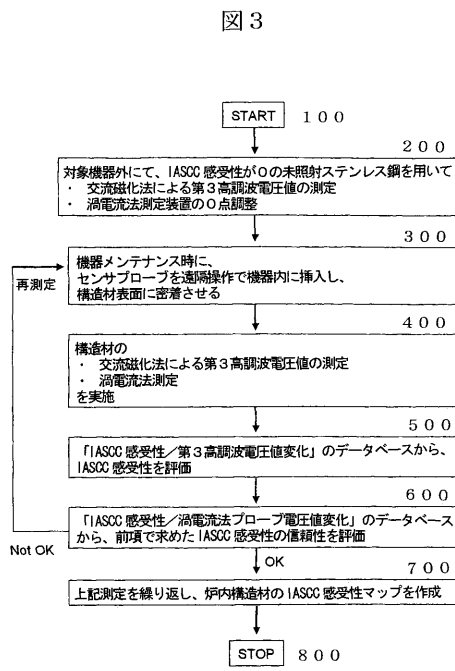
【図1】



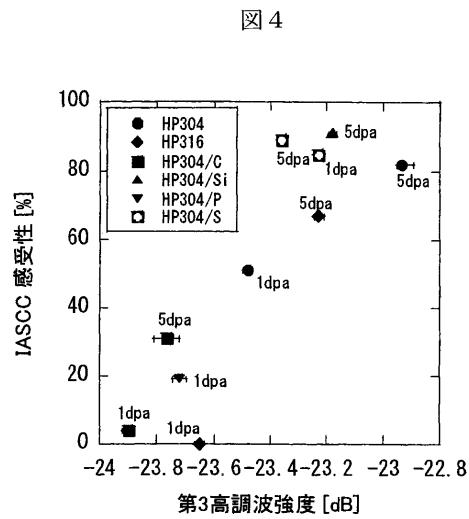
【図2】



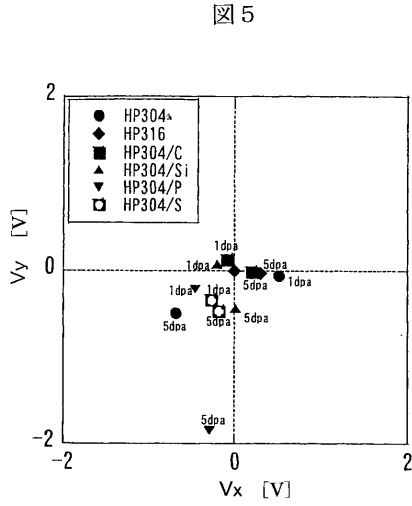
【図3】



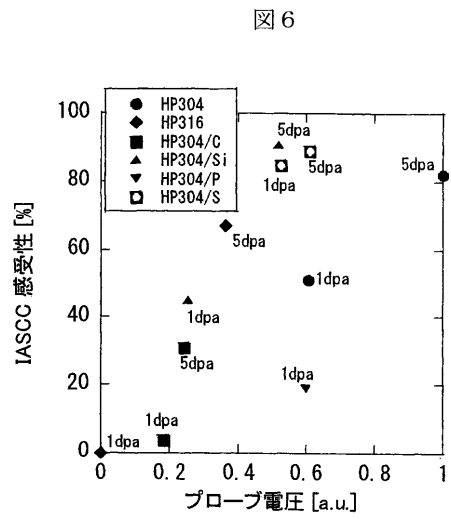
【図4】



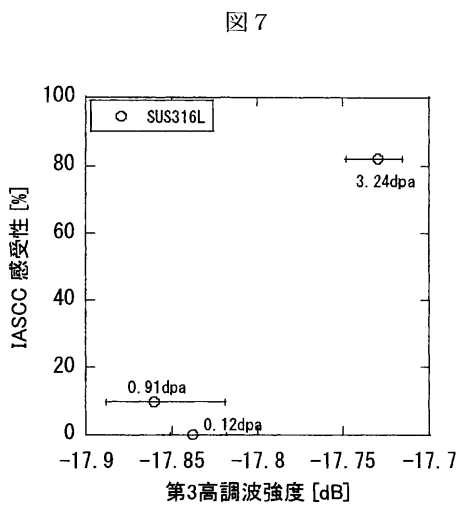
【 図 5 】



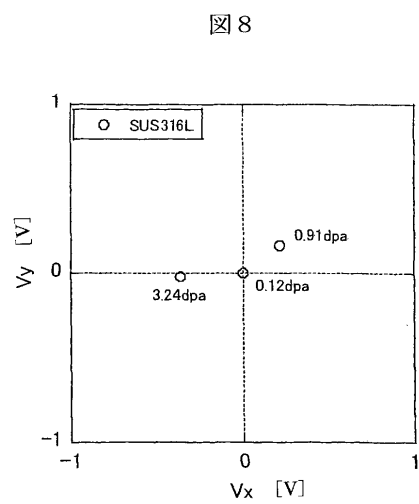
【 図 6 】



【 図 7 】



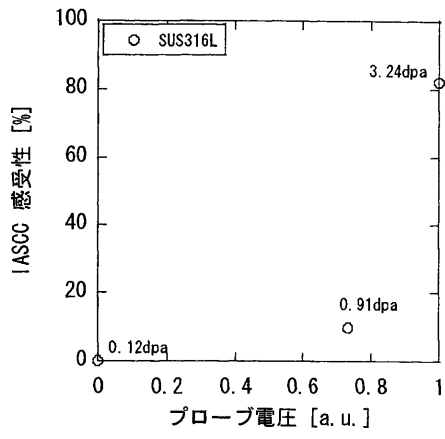
【 図 8 】





【 図 9 】

図 9



## フロントページの続き

- (72)発明者 高屋 茂  
茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番地 独立行政法人日本原子力研究開発  
機構 大洗研究開発センター内
- (72)発明者 海老根 典也  
茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 独立行政法人日本原子力研究開発  
機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所内
- (72)発明者 樺田 理  
兵庫県尼崎市扶桑町1番8号 住友金属テクノロジー株式会社

審査官 田中 洋介

- (56)参考文献 特開平09-049897(JP,A)  
特開2006-308547(JP,A)  
特開平05-080184(JP,A)  
特開2001-255305(JP,A)  
特開2004-279055(JP,A)  
中東重雄 他, 電磁気的手法による压力容器鋼(SQV2A)の照射脆化度評価, 溶接・非破壊検査技術  
センター 技術レビュー, 2006年, Vol.2, pp.34-40  
中東重雄 他, 電磁気的手法による原子炉压力容器鋼(SQV2A)の照射脆化度評価, 検査技術, 20  
08年 3月, Vol.13 No.3, pp.9-16  
上野文義 他, 照射環境における原子炉構造材料の劣化現象に関する研究, 原研-サイクル機構融  
合研究成果報告書, 2005年 9月, 報告書番号: JAERI-Research 2005-023, pp.22-32  
内一哲哉 他, 非線形渦電流法によるオーステナイト系ステンレス鋼の材料劣化診断, 第20回  
「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム 講演論文集, 2008年, pp.661-664  
根本義之 他, IASCC感受性と電磁気特性の相関についての検討(1), 日本原子力学会「2007年春  
の年会」要旨集, 2007年 3月, p.544  
根本義之 他, IASCC感受性と電磁気特性の相関についての検討(2), 日本原子力学会「2007年秋  
の大会」要旨集, 2007年 9月, p.417

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 27/72 - 27/90

G21C 17/00 - 17/14

JSTPlus/JST7580(JDreamIII)