

令和元年5月27日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04626

研究課題名（和文）ヒドゥン・ダメージの可視化技術開発：大規模地震を経験した機器の健全性評価の為に

研究課題名（英文）Development of a visualization method of hidden damage for integrity evaluation of components exposed to a massive earthquake

研究代表者

渡辺 豊（Watanabe, Yutaka）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：10260415

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：塑性変形によって導入された変形双晶あるいはすべり線近傍における転位の集積といった母材とは結晶方位が変化した部位を溶解速度の相違を利用して可視化する、という明瞭な検出原理により、室温～炉水温度域でステンレス鋼に付与された塑性ひずみを検出・定量化できる定電位エッチング手法を開発した。SUS316系ステンレス鋼を対象として、定電位エッチングを用いた非破壊計測値に基づく損傷程度の評価手法を開発し、同手法の対象材料を他のオーステナイト系ステンレス鋼に拡張するための方法論を構築するとともに、実構造物への適用手順を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大地震を経験した原子力発電設備の健全性評価について、IAEA（国際原子力機関）レポートは『"Hidden Damage"（現状の点検手段では検知できない損傷）への対応』を重要な課題として提起し、その中でも地震動による金属材料の塑性変形あるいは繰り返し塑性変形（疲労損傷蓄積）が指摘されている。設計上の想定を超える地震動に晒された設備の健全性評価は、数値計算による各構造物の応力・ひずみ応答解析と代表箇所(point)の点検・検査とを組み合わせることにより初めて完成するが、確実な検査手法が欠けていた。本研究において開発された検査手法は、この問題を解決するための有力な技術的選択肢を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：A potentiostatic etching method to visualize plastic strain introduced in stainless steels has been newly developed, where difference in dissolution rate of metal due to local mis-orientation caused by deformation twin or accumulation of dislocation at slip planes is utilized. This method can detect and quantify pre-existing plastic strain introduced in stainless steels at ambient temperature or at operating temperature of a nuclear reactor. The potentiostatic etching method has been first developed for Type 316 stainless steels and then a methodology has been developed in order to apply the etching method to evaluate other types of austenitic stainless steels. A procedure to apply the etching method to actual components has also been proposed.

研究分野：保全工学

キーワード：非破壊評価 塑性ひずみ 疲労損傷 オーステナイト系ステンレス鋼 定電位エッチング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震国でありながら 44 基の発電用原子炉を有する我が国では、大規模地震への技術的な備えが不可欠である。最近でも、基準地震動に極めて近いあるいはそれを超える強い地震動を経験した例が続いている(2005 年宮城県沖地震: 女川原子力発電所、2007 年能登半島沖地震: 志賀原子力発電所、2007 年中越沖地震: 柏崎刈羽原子力発電所、2011 年東北地方太平洋沖地震: 福島第一原子力発電所、女川原子力発電所)。

想定を超える地震荷重を経験した原子力発電設備の健全性評価について、2011 年に IAEA(国際原子力機関) から、IAEA Safety Report Series No.66 “Earthquake Preparedness and Response for Nuclear Power Plant” が発行されており、その中で、『“Hidden Damage”(現状の点検手段では検知できないダメージ)への対応』が重要な課題として提起されている。“Hidden Damage”は、

アクセス困難な部位(埋設配管の継手、電気品の内部、高線量部位等)の損傷と

アクセス可能であるが、目視では検知できない損傷

に区分されて指摘されており、後者の代表が地震動による金属材料への繰り返し塑性変形(疲労損傷蓄積)である。交番荷重により変形が復元している場合や局所的な変形などは目視で検知できない。想定を超える地震動に晒された発電設備の健全性評価は、数値計算による各構造物の応力・ひずみ応答解析と代表箇所の点検・検査とを組み合わせることにより初めて完成するが、繰り返し塑性変形(疲労損傷蓄積)についての確実な検査手法が欠けているのが現状であった。

中越沖地震後、柏崎刈羽原子力発電所機器の健全性評価を目的として、これまで国内国外において基礎研究レベルで疲労損傷の検出可能性が示唆されてきている各種の物理的計測手法について、損傷検出感度および実プラント構造物への適用可能性が詳しく調査された((社)日本原子力技術協会「中越沖地震後の原子炉機器の健全性評価 平成 21 年度中間報告」)。バルクハウゼンノイズ、磁歪、超音波音速比、過流応答、金相、硬さなど、広範な計測手法について詳しい評価が実施された結果、同発電所の点検手法として、消去法的に硬さ測定が採用された。ただし、硬さ法にも、ベース硬さが材料ロット間で異なるため同一ロット材の非損傷部の硬さの測定値が必要であることや、測定値のバラツキが大きい(S/N 比が充分でない)などの欠点があるため、信頼性と精度の高い疲労損傷検出手法の開発が喫緊の課題として求められていた。

2. 研究の目的

IAEA から課題提起されている『地震荷重を受けた機器・構造物に生じた“Hidden Damage”(疲労蓄積)』を非破壊的に検出する手法を開発するとともに、実機適用技術としての基盤を確立する。具体的には下記項目を実現する。

- (1) 繰り返し塑性変形による材料組織への損傷蓄積を非破壊的に可視化する手法を創出する。
- (2) 損傷蓄積が可視化される原理(物理的内容)を明示する。
- (3) 可視化手法による測定値と材料の損傷程度との定量的関係を得て、データベース化する。
- (4) この手法をプラント構造物に適用するための現位置計測技術を開発し、適用性を実証する。

オーステナイト単相合金、とくに SUS316 系および SUS304 系ステンレス鋼に対して上記項目を達成することを目的とした。

3. 研究の方法

電気化学的エッチングを利用した手法により上述の課題を解決することを着想した。金属に塑性変形が生じる時、変形機構がすべりであっても双晶であっても、結晶中に方位の異なる微小領域が形成されるか(変形双晶)あるいは局所的に乱れの増大する箇所ができる(転位の集積)溶解速度の結晶方位依存性が極大になる条件を電気化学的制御により維持しながらエッチングを施すという単純な原理によって、この不規則さの増大を極めて感度良く可視化することができることを着想した。この基本原理に基づいて手法開発を行うことにより、前述の要件を満足する“Hidden Damage”の非破壊検出・評価方法を実現した。金属結晶内の局所的な方位のずれの可視化は、従来、EBSD(電子線後方散乱回折)を用いるなど、電子顕微鏡の中でのみ可能であった。それに対して本手法では、溶解速度の結晶方位依存性を最大限に利用する(方位依存性が極大になるよう設計された条件下でエッチングを施す)という単純な原理により損傷を可視化する。ゆえに計測の再現性や信頼性、説明性、実機非破壊計測への適用性など多くの面で有利である。

4. 研究成果

本研究では、塑性変形により導入された変形双晶やすべりといった結晶格子の規則性の乱れを非破壊的に可視化する技術を開発した。これは、結晶方位の違いに起因する溶解速度の相違を最大限に利用することによって、塑性変形により導入された変形双晶やすべりをエッチング痕として可視化する技術であり、SUS316L ステンレス鋼について、まずその原理を明らかにした。室温領域で塑性変形を受けた場合には、変形双晶に着目したエッチングが有効である(図 1)。一方、300 に近い軽水炉の運転温度域において塑性ひずみを受けた場合には、塑性変形機構として変形双晶よりもすべりが優勢になるため、エッチング速度の結晶方位依存性が顕著

に大となるエッチング条件の探索が肝要である。電位制御下でのエッチングを系統的に実施して、これらのエッチングについての最適条件を見出した。すべり線エッチング痕の数密度と塑性ひずみの大きさが一対一に対応することを明らかにするとともに、この定電位エッチング法によれば塑性ひずみを 1%程度の微小量から 20%を超える範囲まで定量的に非破壊計測することが可能であることを示した(図2)。

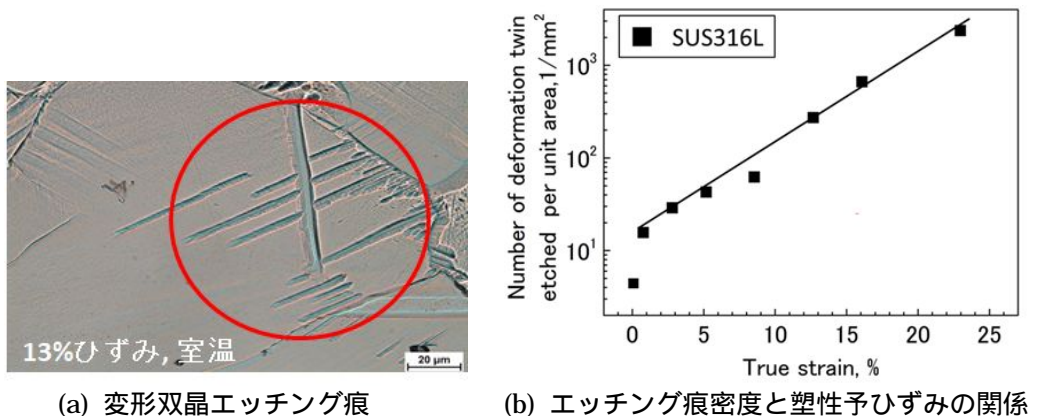


図1 室温で塑性変形を受けたSUS316Lを対象とした定電位エッチングによる塑性予ひずみの評価例

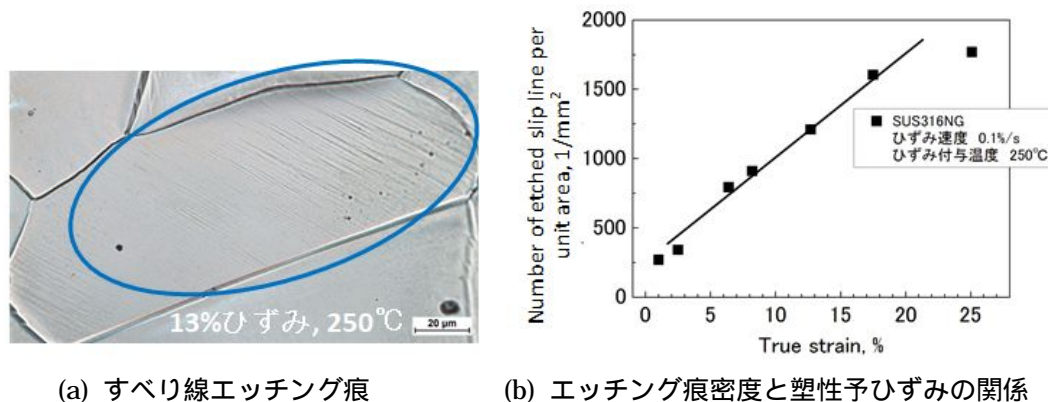


図2 炉水温度域で塑性変形を受けたSUS316Lを対象とした定電位エッチングによる塑性予ひずみの評価例

本手法の適用範囲を他のオーステナイト系ステンレス鋼種に拡張するため、化学組成の異なる材料間におけるひずみと変形双晶エッチング痕の定量的関係を調査し、SFEの観点から、化学組成依存性を考慮したひずみ評価モデル式を提案した。まず、塑性予ひずみと変形双晶エッチング痕密度の関係は片対数グラフ上に整理すると、SFEが異なる材料間でグラフの傾きは一定かつ切片はSFEに依存する傾向があることを見出した。このことを用いて、化学組成からSFEを導出することにより、鋼種やロットが異なっても塑性予ひずみを精度良く評価することを可能にした。提案したひずみ評価モデルは変形双晶エッチング痕密度が 100 /mm² 以上であれば、真値の相対誤差±20%程度以内で塑性予ひずみを定量化できることを示した。

変形温度が異なる条件下におけるひずみと変形双晶エッチング痕の定量的関係を調査し、SFEの温度依存性に基づいた塑性予ひずみ評価モデル式の補正方法を提案した。まず、変形時の温度が種々異なる試料について、塑性予ひずみと変形双晶エッチング痕密度の関係を片対数グラフ上に整理すると、グラフの傾きは一定かつ切片は変形温度に依存することを見出した。変形温度ごとのSFEを算出することで、異なる変形温度条件下でも変形双晶エッチングを用いて塑性予ひずみを評価することが可能となった。提案したひずみ評価モデル式は真値の相対誤差±20%程度以内で塑性予ひずみを定量化できることが示された。ただし、温度が上昇するとすべり変形が支配的になるため変形双晶エッチングに基づいたひずみ評価は精度が低下することから、その場合にはすべり線エッチングに基づいた評価が有効になる。

SUS316Lに室温あるいは炉水温度域を想定した300で繰り返しひずみを与え、ひずみの付与形態が繰り返しひずみとなった場合の定電位エッチング手法の適用性を検討した。室温繰り返しひずみ材の変形双晶エッチング痕密度と寿命消費率の関係を調査すると、寿命消費率0.1 N_f程度の段階でエッチング痕密度が急激に立ち上がり、寿命消費率0.1 N_f程度までの定量化が可能であることを示した(図3)。また、変形双晶エッチング痕密度と累積ひずみの関係を調査すると、少なくとも低サイクル疲労寿命に影響を与えない累積ひずみ8%程度までのひずみの定量化は可能であることを示した。300繰り返しひずみ材におけるすべり線エッチング痕密度と寿命消費率の関係を調査すると、0.1 N_f程度以前の寿命初期段階では寿命消費率の増

加に対するエッチング痕の増分が大きいことから、寿命初期に限れば寿命消費率を定量化出来る可能性があることがわかった。さらに、すべり線エッチング痕密度と累積ひずみの関係を調査すると、少なくとも 8%程度のひずみまで定量化が可能であることを示した。加えて、室温で曲げによる繰り返しひずみを付与した SUS316NG に対し定電位エッチング手法の適用を行った。板厚中央部から端部(繰り返しひずみ試験片の表面)にかけて、ひずみの大きさが板厚に渡って分布していることに対応した変形双晶エッチング痕密度に明確なコントラストが現れることがわかった。また、変形双晶エッチング痕密度と累積塑性ひずみの関係は、単軸繰り返しひずみと曲げ繰り返しひずみ(表面付近)と概ね同じであることが示された。

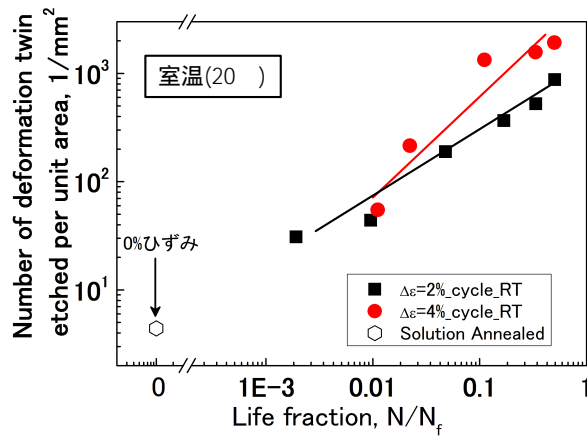


図 3 室温での低サイクル疲労寿命消費率と変形双晶エッチング痕密度との関係 (SUS316L)

次に、定電位エッチング手法を現場での実構造物の計測に適用する方法を検討した。実機部材表面にエッチングを施した後に表面のレプリカを採取してレプリカを顕微鏡観察することにより、ステンレス鋼試料の表面そのものを顕微鏡で観測した場合と同程度の精度で評価できることを示した。さらに、携帯型プローブを作成し、電解研磨と定電位エッチング手法とレプリカ手法を組み合わせた現場適用手順を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

- Shota Hokari, Akiyoshi Suzuki, and Yutaka Watanabe
 Application of Potentiostatic Etching for Nondestructive Testing of Accumulated Plastic Strain in Austenitic Stainless Steels
 Materials Evaluation, 75 (2017), 1399-1405. (査読有)
<https://ndtlibrary.asnt.org/2017/ApplicationofPotentiostaticEtchingforNondestructiveTestingofAccumulatedPlasticStraininAusteniticS>
- 帆加利翔太, 山本康平, 渡邊 豊
 定電位エッチングを用いたオーステナイト系ステンレス鋼の塑性ひずみ検出手法の現場計測適用性, 保全学, 16 (2017), 75-81. (査読有)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsm/16/2/16_75/_article/-char/ja
- Shota Hokari, Akiyoshi Suzuki, and Yutaka Watanabe
 Nondestructive Potentiostatic Etching Technique for the Detection and Quantification of Pre-existing Plastic Strain in Austenitic Stainless Steel,
 Materials Evaluation, 74 (2016), 1287-1295. (査読有)
<https://ndtlibrary.asnt.org/2016/NondestructivePotentiostaticEtchingTechniquefortheDetectionandQuantificationofPreexistingPlasticS>

〔学会発表〕(計 3 件)

- Taiki Nishimura, Hiroshi Abe, Yutaka Watanabe
 Pre-existing Plastic Strain Quantification of Austenitic Stainless Steel by Potentiostatic Etching Method: Relation with Plastic Deformation Mechanism in Stacking Fault Energy
 The fourth International Conference on Maintenance Science and Technology (ICMST 2018) (国際会議, 仙台) 2018.
- 西村 敦貴, 阿部 博志, 渡邊 豊
 定電位エッチング手法によるオーステナイト系ステンレス鋼の塑性予ひずみ検出・定量化: 塑性変形様式に及ぼす積層欠陥エネルギーの影響
 M&M2018材料力学カンファレンス, 2018.
- Yutaka WATANABE, Shota HOKARI
 Nondestructive and quantitative detection of pre-existing plastic strain in stainless steels by means of potentiostatic etching
 5th International Symposium on Materials and Reliability in Nuclear Power Plants
 【招待講演】(国際会議, 瀋陽), 2017.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：竹田 陽一
ローマ字氏名：(TAKADA, Yoichi)
所属研究機関名：東北大学
部局名：工学研究科
職名：准教授
研究者番号(8桁)：40374970

研究分担者氏名：阿部 博志
ローマ字氏名：(ABE, Hiroshi)
所属研究機関名：東北大学
部局名：工学研究科
職名：講師
研究者番号(8桁)：30540695

研究分担者氏名：宮崎 孝道
ローマ字氏名：(MIYAZAKI, Takamichi)
所属研究機関名：東北大学
部局名：工学研究科
職名：技術職員
研究者番号(8桁)：20422090

(2)研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。