

316系低炭素ステンレス鋼における塑性予ひずみの 非破壊計測手法開発に関する研究

著者	帆加利 翔太
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第17185号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00096952

氏名 ばかりしょうた 帆加利翔太
研究科, 専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻
学位論文題目 316系低炭素ステンレス鋼における塑性予ひずみの非破壊計測手法
開発に関する研究
論文審査委員 主査 東北大学教授 渡邊 豊 東北大学教授 長谷川 晃
東北大学教授 小川 和洋

論文内容要約

地震荷重を経験した原子力発電プラントにおいて、塑性ひずみの導入により低サイクル疲労寿命の低下が危惧されていることから、より感度が高く、ヒート依存性の小さい塑性予ひずみ検出評価手法が求められている。

本研究では、鋼のアノード溶解速度の結晶方位依存性を最大化して利用することにより、高感度かつ検出原理が明確で原子力プラント機器に適用可能性を有する塑性予ひずみ検出手法を提案した。

本研究では2つの課題を検討する。

一つ目は塑性予ひずみが応力腐食割れ感受性に与える影響の調査である。冷間加工によりオーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れ感受性が上昇する場合があることがわかっていることから、地震動等で導入される冷間・温間における一方向ひずみおよび繰り返しひずみが応力腐食割れ感受性に影響を与えることが懸念される。このことから塑性予ひずみを付与した材料において応力腐食割れ感受性を調査することにより、構造物の保守性を保つのに必要な塑性予ひずみ検出手法の目標感度の設定を行った。

二つ目は塑性予ひずみ検出・定量化手法の実用化に向けての検討である。本研究の基本原理である定電位エッチング手法では、室温・一方向で付与された塑性予ひずみを変形双晶エッチング痕密度という尺度を利用して検出・定量化しているが、例えば炉水温度域で塑性予ひずみが付与された場合、変形様式の差異から塑性変形において双晶変形がほとんど導入されず、すべり変形が支配的になり、同様に適用できない可能性が示唆される。そのため、炉水温度域での変形への拡張を行った。また、感度良い塑性予ひずみ検出を実現するために、エッチング条件の最適化を行った。次に、実際の構造物の変形においては一方向のひずみだけでなく、交番荷重のように、ひずみの付与形態が繰り返しひずみとなる場合が予想される。ひずみの付与形態が繰り返しひずみとなった場合のエッチング結果を調査し、エッチング手法による損傷度の評価が可能であるか、また可能であればどの程度の損傷を評価できるのかを調査する。地震荷重の影響を受け易い(柔構造である)配管においては、単軸以外に曲げの形態でひずみが導入される場合が想定されるため、曲げ形式で導入された繰り返しひずみに対する適用性も検討する。最後に、現場条件において定電位エッチング手法を適用できるか考察する必要がある。携帯型プローブやレプリカ手法を使用した現場適用手順を検討する。

本論文は7章より構成される。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、中越沖地震を経験した柏崎刈羽原子力発電所の健全性評価手法として採用された硬さ測定法や、その他の塑性ひずみ検出に適用できる可能性がある検査手法に関して知見と課題を述べた。また、本研究の基本原則となる定電位エッチング手法を用いた室温で付与された塑性ひずみを検出できる手法の開発の経緯について述べた。室温で塑性ひずみが付与された316系ステンレス鋼について、溶液：1 N HNO₃、温度：35°C、電位：-600 mV_{SCE}、時間：20 min というエッチング条件でエッチングを施すことにより、材料中に導入された塑性変形の一つの形式である変形双晶をエッチング痕として現出させ、その数密度を用いて塑性ひずみの検出・定量化ができることを示した。

第3章では、塑性ひずみの付与により、オーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れ(SCC)感受性が影響を受ける可能性を調査するために、高温水中CBB試験を用いて30°C(もしくは室温(20°C程度))、あるいは炉水温度域に近い300°Cで各種予ひずみを経験したSUS316Lの応力腐食割れ感受性の調査を行った。8%ひずみ(30°C、300°C)、室温(20°C程度)における繰り返しひずみ($\Delta\epsilon=2\% \text{ } 0.5 \text{ N}_D$)においては溶体化材とき裂深さに大きな差異は見られなかったが、300°C繰り返しひずみ材($\Delta\epsilon=2\% \text{ } 0.5 \text{ N}_D$)においては比較的深いき裂が観察され、当該予ひずみが応力腐食割れ感受性に影響を及ぼしている可能性があることが認められた。ただし、低サイクル疲労寿命に大きな影響を与えないことが知られている8%ひずみにおいては塑性変形に伴う応力腐食割れ感受性上昇がないので、塑性ひずみ検出において塑性予ひずみが低サイクル疲労寿命に影響を与えないことが知られている8%ひずみ(30°C)、4%ひずみ(300°C)までを目標感度とすれば保守性が保たれることが示された。

第4章では、第2章で示した定電位エッチングを用いた塑性ひずみ検出・定量化手法の炉水温度域への拡張を検討し、最適エッチング条件の探索を行った。30°Cから100°Cまでは予ひずみ付与温度の上昇に伴いエッチング後に観察される変形双晶エッチング痕密度が低下し、30-100°C付近の温度範囲で316系ステンレス鋼の塑性変形におけるすべり変形/双晶変形の遷移が顕著に起こることを示すことが出来た。また、変形双晶エッチング痕とは様相の異なるエッチング痕の割合が増加しており、それがすべり線を起点としたエッチング痕であることを明らかにした。炉水温度域を想定した250°Cで付与された予ひずみについてはすべり線エッチング痕密度を用いたひずみの定量化が出来ることを示した。溶解速度の結晶方位依存性が最大となるエッチング最適条件を、溶液：1N HNO₃、電位：-675mV_{SCE}、時間：10min、温度：35°Cと定め、最適条件においてはすべり線エッチング痕密度が増加しより感度が高い測定が可能であることを示した。

第5章では、SUS316Lに室温(20°C程度)あるいは炉水温度域を想定した300°Cで繰り返しひずみにエッチングを施し、交番荷重のように、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程度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程度までの定量化が可能であることを示した、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°C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_r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。このことから、塑性ひずみが結晶粒毎に大きく異なる様子がエッチングによって可視化されることが示された。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。

第 6 章では、定電位エッチング手法の現場適用性する手順を検討した。エッチング温度を変更し SUS316L ひずみ材(ひずみ付与温度： 300°C)をエッチングし、結果を比較することで、良好なエッチング結果を得るには試験中に溶液が 30~40°Cの温度域を保つように溶液温度およびまたはヒーター等により試験部温度の調整を行うことが必要であることがわかった。また、レプリカ技術は、エッチング後表面のエッチング痕を転写するのに適切な感度を持っており、レプリカの観察を行うことにより、実構造物におけるエッチング表面を観察した場合と同程度の精度での評価ができると考えられる。さらに、携帯型プローブを作成し、以下に示す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。

STEP 1. 加工硬化層を除去するために 100 μ m 相当の電解研磨を行う。

STEP 2. 試験部付近にヒーターを設置して試験部温度を 30-40°Cの間に調整できるようにし、硝酸溶液で定電位エッチングを行う。

STEP 3. 試験面のレプリカを取り、エッチング痕を転写する。

STEP 4. レプリカを光学顕微鏡で観察し、エッチング痕密度を計数する。

第 7 章では、結論を述べた。

以上より、本論文では、塑性変形により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優先的に溶解する、という明瞭な検出原理を持ち、室温付近あるいは炉水温度域付近で付与された 316 系ステンレス鋼に付与された塑性ひずみを感度よく検出・定量化できる定電位エッチング手法を開発することにより、原子力発電設備を始めとして大規模地震等の入力を受けたプラント設備の健全性点検手段の選択肢を広げることが出来た。繰り返しひずみや曲げひずみといった、単軸一方向ひずみとは異なるひずみ形態においても累積塑性ひずみという尺度を用いることにより、室温においては変形双晶エッチング痕密度、300°Cで付与された予ひずみにおいてはすべり線エッチング痕密度で比較することにより、予ひずみを感度よく検出し、特に損傷初期段階において統一的にひずみを定量化できることが示され

た。より複雑なひずみ履歴への適用に対し更なる研究が望まれる。また、現場適用手順を提案した。実際の現場における適用も期待される。