

学位論文題名

発電プラント機器構造部品の欠陥および経年劣化の 評価技術に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、国内の電気エネルギーの大部分を賄っている火力ならびに原子力発電プラントは、年間を通じての安定な電力供給と長期間の安全運転に対する信頼性が強く求められている。特に、一部の火力発電プラントでは、相当の年月が経過して老朽化した設備も有り、しかもピークロード用として日常的に起動-停止運転が行われている。このような運用形態などにより、発電プラント機器の構造部品には、当初、予想もしなかった欠陥および経年劣化などの問題が発生し、それを何らかの非破壊計測手法により把握して適切な対策を施す必要がある。

本研究は以上のような社会的要請の下で進められたものであり、発電プラント機器構造部品の欠陥および材料劣化現象を精度良く検出する手法ならびに機器の開発、その成果を適用して得られた欠陥および劣化に関して、疲労とクリープ解析および破壊力学的な手法を用いた新たな余寿命評価の手法を提案している。

本論文は6章より構成されている。

第1章においては発電プラント機器、特にタービン部材の欠陥検出技術の現況、解決すべき問題点、余寿命予測高精度化の必要性を説き、本研究の目的ならびに本論文の概要について述べている。

第2章では、蒸気タービンロータの大型化に伴って深刻な問題となってきた翼植込円板キー溝部の応力腐食割れ(SCC)を、超音波探傷法によつて的確に検出すると共にその寸法を高い精度で評価する手法を検討した。SCCの検出にはき裂先端からの反射エコーである端部ピークエコーを用いるのが有効で、最大エコーを得るには探触子入射角 45° 、首振り角 30° の2探触子によるPitch-Catch法が最適であることを明らかにした。一方、き裂寸法評価には地震の震源値算定と同じ原理であるALOK法を適用することを試み、高い絶対位置精度を得るための自動走行装置を開発するとともに、データ収集と処理についても自動処理を行い、寸法評価精度と処理時間短縮の向上を図った。データ処理については、有効データの選別、形状エコーを除去ならびにデータ群のスージングから成る三つの新しいアルゴリズムを提案した。モックアップによる検証試験を行った結果、5mmのSCCに対し $\pm 0.5\text{mm}$ 以内の寸法精度を得ている。このように、高い精度で欠陥寸法を推定する手法を確立したことにより、破壊力学に基づく余寿命評価への適用を可能にした。

第3章では、発電プラント機器に多用される大型溶接構造物の非溶着部寸法を高い精度で評価することを目的とした電子走査型多チャンネル超音波探傷装置の開発と応用につい

て述べている。8ch.のフェーズドアレイ型探触子を用いて金属材料中の超音波の集束と偏向に関する音場特性試験と理論解析を実施し、振動子幅1.5mmで最小の近距離音場が得られた。さらに、各振動子に与えるパルスの遅延時間を制御することにより、5~25mmの任意の点に超音波を集束制御可能であり、振動子寸法6.0mmでは近距離音場は大きくなるが、75~400mmの広範囲に集束点が制御できること、および偏向の音場測定ではパルス信号制御により、偏向角度として片振り60°まで可能であることを明らかにした。以上の成果をもとに、32ch.のフェーズドアレイ型探触子による電子走査型超音波探傷装置を試作し、集束と偏向に関する性能を確認するとともに、溶接部などの探傷試験を行って、十分に実用性が有ることを明らかにした。さらに、部分溶け込み溶接材を用いた疲労試験結果を破壊力学に基づいて解析し、ルート部からの疲労き裂発生にはルートギャップおよび応力比の影響がほとんど無いこと、疲労き裂発生寿命は長い疲労き裂から得られた進展曲線と有効応力拡大係数を用いることで十分推定可能であることを明らかにした。以上の推定結果は工学的にも安全側にあり、実機への適用が十分に可能であると考えている。

第4章では、20年以上運転された蒸気タービンロータ材(CrMoV鋼)の経年劣化を非破壊的に評価する方法を開発し高い精度の余寿命予測を可能にした。ロータ材の脆化は500℃以上の高温で長時間使用中に、リングが結晶粒界に偏析することが主原因であることをつきとめ、これを電気化学的な手法である分極法を用いて非破壊的に測定し、脆化パラメータである分極曲線の最小電流密度と破壊パラメータである $\Delta F A T T$ との間に良い相関が有ることを明らかにした。その後、製造履歴の異なるロータを調査するに伴い $\Delta F A T T$ と最小電流密度の関係が一義的に表されないという問題に遭遇した。そのため新しい評価方法として、最小電流密度に加えて、結晶粒度、引張り強さ、化学成分(P, S, Cr, C, Mo, Si, V, Mn)を考慮することによって、 $\Delta F A T T$ と最小電流密度を一義的に表すことに成功し、高い精度で $\Delta F A T T$ を推定できる評価式が導出できた。この $\Delta F A T T$ から経年劣化を考慮した疲労強度、疲労き裂進展特性ならびに破壊靱性値の関係式を導き出し、疲労寿命を高い精度で予測することが可能となった。

第5章では、ガスタービン動翼材(IN738LC)の使用における組織変化を非破壊的に観察する手法を確立し、組織変化と最小クリープ速度の相関から高い精度でクリープ余寿命を推定することを可能にした。ガスタービンの高温部品は、定期的に行う点検時に何らかの手法により、材料劣化を検出し、補修あるいは回復処理を施して設計寿命近くまで用いる運用がなされている。本章では高温部品のうちで最も厳しい条件に曝される動翼材を取り上げ、実験室的な時効処理材を用いて、この材料の主強化相である γ' 相の組織変化の解析にレプリカ法の適用を試みた。その結果、レプリカ法によって得られた γ' 相の粒径は、時効温度が高く、時効時間が長いほど粗大化し、粒径は時間の1/3乗に比例することが明らかになった。さらに、時効処理材を分極試験に供し、その過程で抽出した試料のE P M A分析を行ったところ、 γ' 相の主要構成元素であるAlの濃度低下が認められ、 γ' 相が選択的に溶解していることが明らかになった。このことは、分極法によって γ' 相の組織変化の評価が可能であることを示唆しており、検討の結果 γ' 相の粒径ならびに析出密度変化と分極計測の順掃引時の極大値である最大電流密度(I_p)との間に良い相関が有ることを見出した。本合金のクリープ現象は γ' 相の周囲に集積した転位ループの上昇運動が律速過程であるとするモデルを考え、レプリカ法による組織調査および分極計測から得られる I_p 値パラメータからクリープ余寿命が推定可能であることを明らかにした。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果を要約して述べている。

以上、本研究において検討され開発された発電プラント機器構造部品の欠陥ならびに経年劣化検出手法および余寿命評価手法は、既設の火力ならびに原子力発電プラントの機器構造部品の信頼性向上をもたらし、社会的要求である電力安定供給に大きく貢献している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 工 藤 昌 行
副 査 教 授 石 井 邦 宜
副 査 教 授 成 田 敏 夫
副 査 助 教 授 伊 藤 洋 一

学 位 論 文 題 名

発電プラント機器構造部品の欠陥および経年劣化の 評価技術に関する研究

近年、国内における電気エネルギーの需要変化に伴い、火力発電プラントではピークロード用として日常的に起動-停止運転が行われている。このような過酷な条件で使われる発電機器の構造部品には、当初予想もしなかった欠陥や経年劣化などの問題が発生しており、それを何らかの非破壊的な計測手法により把握して適切な対策を施すことが急務となってきた。

本研究は以上のような社会的要請に基づいて進められたものであり、本論文の主要な成果は以下の点に要約される。

1. 蒸気タービンロータの大型化に伴って深刻な問題となってきた翼植込円板キー溝部の微小な応力腐食割れの位置及び寸法を、高精度でかつ短時間に検出するための自動走行型の超音波探傷装置ならびに新たなデータ処理アルゴリズムを開発した。これを実機相当のモックアップ検証試験に適用したところ、深さ5mmの微小割れを±0.5mm以内の小さな誤差で検出することが可能となり、余寿命評価の精度が著しく向上した。

2. フェーズドアレイ型多チャンネル探触子による金属材料中の超音波の集束と偏向に関する音場特性試験と理論解析の結果に基づき、発電プラント機器に多用される大型溶接構造物の非溶着部寸法を高精度で評価できる電子走査型多チャンネル超音波探傷装置を開発した。この成果を、部分溶け込み溶接材の疲労試験結果と組み合わせて破壊力学に基づく解析を行い、実機への適用が十分に可能な疲労き裂発生寿命の予測に成功した。

3. 蒸気タービンロータ材 (CrMoV鋼) の経年劣化の主原因がリンの粒界偏析にあることを明らかにし、これを電気化学的手法である分極法を用いた非破壊的測定法を開発した。この可搬型分極試験装置によって得られた分極特性値と結晶粒度、製造時の化学成分、引張り強さを因子とした破壊パラメータ $\Delta F A T T$ の推定式を導出し、疲労寿命を高い精度で予測することを可能にした。

4. ガスタービン動翼材 (IN738LC) の経年劣化が γ' 相の粗大化によることを見だし、これをレプリカ法による電顕観察並びに分極試験によって非破壊的に定量化する方法を開発した。さらに、本合金のクリープ現象の律速過程が γ' 相の周囲に集積した転位ループの上昇運動にあるとするモデルを考え、上記の試験結果からクリープ余寿命の推定を可能にした。

これを要するに著者は、火力発電プラント機器に発生する欠陥並びに経年劣化を非破壊的に検出する手法および装置の開発に関する広範な研究を行い、余寿命予測精度を飛躍的に向上させることに成功しており、金属材料工学並びに機械材料工学の進展に寄与すること大である。

よって、著者は北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。