

学位論文の要旨

氏名

渡部 康明

学位論文題目

高Cr鋼の余寿命診断技術の開発

本論文は、超々臨界圧（USC）発電プラントの部材である高Cr鋼を対象に、衝撃特性の予測方法の検討とスモールパンチ試験法を用いた機械的特性とクリープ損傷率の予測方法の検討をまとめたものである。

第1章は、研究背景と目的をまとめたものである。石炭火力発電分野で現在主流の発電方式であるUSCプラントは、設備の経年化が進んでおり、保全技術の要求が高まっている。USCプラントの部材である高Cr鋼は高温環境下で衝撃特性が低下する特徴を有するが、その検査方法は限定的である。また、非破壊試験法によるクリープ損傷の予測技術に関する報告があるが、その精度は必ずしも高いとは言えない。そこで、高Cr鋼の衝撃特性の予測方法確立および破壊試験法による機械的特性およびクリープ損傷率の高精度な予測方法の検討を本研究の目的とした。

第2章は、実機の衝撃特性を予測する手法の検討に向け、欧州系高Cr鋼を対象に610℃、630℃にて最長2万時間の時効材を作製し、衝撃特性とLaves相の析出状態（組成、面積率、サイズ）の相関から影響因子を検討した。第一原理計算にてLaves相中のWが増加（Moは減少）すると破壊靱性値が上昇する結果が得られた。しかし、加熱時効に伴うW増加に反し、吸収エネルギーは低下傾向を示したことから、衝撃特性に対するLaves相の組成変化の影響は小さいと結論付けた。他方、吸収エネルギーおよび延性脆性遷移温度はLaves相の析出面積率、サイズと良い相関関係が得られ、実機にてLaves相の析出面積率およびサイズを定量化することで衝撃特性の予測ができるものと考えた。

第3章は、非破壊試験法による衝撃特性の予測方法確立に向け、電気化学的計測法のアノード分極試験にて、衝撃特性の影響因子であるLaves相の析出面積率、サイズを反映している評価指標を検討した。 $(Fe, Cr)_2(Mo, W)$ 型Laves相と $(Fe, Cr)_2Mo$ 型Laves相ともに10mol/L-KOH溶液のアノード分極試験にて-900mV~-300mV(vs Ag/AgCl)の範囲にLaves相のみ選択溶解するピーク電流密度 I_{p2} が検出されることを確認した。ピーク電流密度 I_{p2} の溶解電荷量 Q とLaves相面積率に良好な相関関係が得られた。本技術を用いることで、現地にて実機の衝撃特性を定量的に予測できる可能性を示した。

第4章は、実機診断部位の機械的特性の予測精度向上に向け、スモールパンチ（SP）試験による延性脆性特性評価、引張特性の予測方法について検討した。延性脆性遷移特性評価については、COST-E鋼の鋳造品の加熱時効およびクリープに伴うSP延性-脆性遷移特性を調査した。SP破壊エネルギー $E_{sp}=1$ （J）となる試験温度をSPDBTT(T_{1J})と定義し、ラーソンミラーパラメータ（LMP）にてSPDBTT(T_{1J})の変化を整理した結果、加熱時効、クリープによりSPDBTT(T_{1J})は高温側へ移行した後、LMPの増加に伴い徐々に延性が回復した。LMPの増加に伴うSPDBTT(T_{1J})の延性回復傾向は、Laves相の個数密度減少によりマトリックス中の転位が移動しやすくなっているため、あるいはLaves相個数密度の減少によりLaves相を起点とする凝へき開割れの発生確率が低下したためと推測したが、詳細な要因は今後の検討課題である。引張特性の予測については、COST-E鋼の鍛造品、鋳造品ともに、Garcíaらの提案式を用いることで、SP破壊特性から降伏応力、引張強さが予測可能であることを明らかにした。

第5章は、スモールパンチクリープ（SPC）試験法によるクリープ損傷評価法の適用に向け、SPC破断時間に対する試験治具（下部ダイ形状）の影響を明らかにし、下部ダイ形状の違いによるSPC破断時間の補正方法を検討した。また、クリープ損傷率の予測精度向上に向け、単軸クリープ試験中断材を用いてSPC特性に及ぼす単軸クリープ損傷率の影響を明らかにし、クリープ損傷率の予測法を検討した。下部ダイ形状の影響については、FEM解析を用いて下部ダイ形状の違いによるSPC破断時間の変化が定常クリープ域における平均相当応力の変化に対応していることを明らかにした。下部ダイ形状の違いによるSPC破断時間の補正指標として、「初期非接触長さ」、「初期非接触面積」の2つの指標を定義した。下部ダイ形状の違いによるSPC破断時間の変化と補正指標の関係は、実験値と解析値が良く一致した。このことから、「初期非接触長さ」、「初期非接触面積」を用いることで下部ダイ形状の違いによるSPC破断時間の補正が可能であることを示した。クリープ損傷率の予測方法の検討では、SPC破断曲線は単軸クリープ損傷率の増加に伴い低LMP側にシフトし、SPC破断特性に単軸クリープにおける損傷率が反映されていることを確認した。比較的低荷重、長時間のSPC試験データを含んだSPクリープ破断曲線について、欧州提案の F/σ 式を用いて応力-LMPによるクリープ破断曲線を整理することで、単軸クリープ試験によるクリープ損傷率を精度良く予測できる可能性が示唆された。

第6章は、各章で得られた成果を総括した。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Development of residual life assessment for high chromium steels

Name: WATANABE Yasuaki

This thesis investigated a method for predicting mechanical properties and creep damage rate using destructive testing method for high Chromium steel, which is a component of ultra-super critical power plants.

Chapter 1 gives the background and purpose. In recent years, as the equipment of ultra-super critical power plants has aged, the demand for maintenance technology has increased. High chromium steels for component of USC plants, has the characteristic that the impact properties deteriorate in high temperature. However, Testing methods for Impact properties of high chromium steels are limited. On the other hand, There are research reports on methods for predicting creep damage rates using non-destructive tests, but the accuracy is not high. Therefore, the purpose of this study was to establish a method for predicting the impact properties a highly accurate method for predicting mechanical properties and creep damage rate using small punch testing methods.

Chapter 2 examined indicators for predicting the impact characteristics of High chromium steels. In order to study the index for predicting the impact properties of high chromium steel, we prepared heat aged materials for up to 20,000 hours at 610°C and 630°C. First-principles calculations showed that the fracture toughness value increase as W increase (Mo decreases) in the Laves phase. However, contrary to the increase in W associated with heating aging, the absorbed energy tended to decrease, so it was concluded that the effect of changes in the composition of the Laves phase on the impact properties was small. On the other hand, a good correlation between the absorbed energy and the ductile-brittle transition temperature was obtained with the precipitated area ratio and size of the Laves phase. It is believed that impact properties can be predicted by quantifying the precipitation area ratio and size of the Laves phase in actual machine.

In Chapter 3, in order to establish a method for predicting impact properties using non-destructive testing methods, we investigated evaluation indicators that reflect the precipitation area ratio and size of the Laves phase using electrochemical measurement methods. In an anodic polarization test using 10mol/L-KOH solution, it was confirmed that a peak current density I_{p2} that selectively dissolves only the Laves phases (both Fe_2Mo type and $Fe_2(Mo,W)$ type) were detected in the range of -900mV to -300mV (vs Ag/AgCl). A good correlation was obtained between the amount of dissolved charge Q at the peak current density I_{p2} and the Laves phase area ratio. By using the technology, we demonstrated the possibility of quantitatively predicting the impact characteristics of actual machines on-site.

In Chapter 4, we investigated methods for evaluating ductile-brittle properties using small punch tests and predicting tensile properties in order to improve the prediction accuracy of mechanical properties of actual machines. The SP ductile-brittle transition characteristics associated with heat aging and creep were

investigated for COST-E cast steel. The test temperature at SP fracture energy $E_{sp}=1$ (J) was defined as SPDBTT (T_{1J}). As a result of organizing the change in SPDBTT (T_{1J}) using the Larson-Miller parameter (LMP), it was found that SPDBTT (T_{1J}) shifted to the high temperature side due to heating aging and creep, and then ductility recovered as LMP increased. The ductility recovery tendency of SPDBTT(T_{1J}) with increasing LMP is due to the fact that the number density of the Laves phase decreases, making it easier for dislocations in the matrix to move, or because the probability of occurrence of cleavage cracks originating from the Laves phase decreases. However, the detailed factors are a subject for future study. In predicting tensile properties, it was confirmed that yield stress and tensile strength can be predicted from SP fracture properties by using the formula proposed by García et al. for both forged and cast COST-E steels.

Chapter 5 examines the correction of the small punch creep (SPC) rupture time due to differences in the jig (lower die shape) in order to apply the SPC test method to creep damage evaluation. In addition, in order to improve the prediction accuracy of creep damage rate, we clarified the effect of uniaxial creep damage rate on SPC properties using uniaxial creep test suspended materials, and investigated a methods for predicting creep damage rate. Regarding the influence of the lower die shape, we used in SPC rupture time due to the difference in the lower die shape corresponds to the change in the average equivalent stress in the steady creep region. Two evaluation indicators, ‘initial non-contact length’, ‘initial non-contact area’], were defined as correction indicators for SPC rupture time due to differences in the lower die shape. Regarding the relationship between the change in SPC rupture time due to the difference in the lower die shape and the correction index, the experimental values and analytical values were in good agreement. This shows that it is possible to correct the SPC rupture time due to the difference in the lower die shape by using the ‘initial non-contact length’ and ‘initial non-contact area’. In examining the prediction method for creep damage rate, it was confirmed that the SPC rupture curve shifted to the lower LMP side as the uniaxial creep was reflected in the SPC rupture characteristics. It was suggested that it is possible to accurately predict the creep damage rate by organizing the SPC rupture curve based on long-term SPC test data using the F/σ equation proposed by Europe

In Chapter 6, the result of this study were summarized.