

学位論文題名

タービン用高強度・高靱性フェライト系耐熱鋼の
開発と実用化に関する研究

学位論文内容の要旨

火力発電プラントは、これまでの日本経済発展に必要な電力需要の伸びを支え、今日約60%の電力を供給している。そして、火力発電は今後も電力供給の主役であると考えられている。しかし、火力発電プラントには地球環境及び化石燃料枯渇問題から効率向上が求められている。また、原子力発電プラントが台頭してきたために、火力発電プラントには毎日起動停止、急起動などの厳しい運転が要求されるようになってきた。さらに、火力プラントには建設コスト低減及び立地面積有効活用のためのコンパクト化も求められている。これらの問題に対処するためには、蒸気タービンではロータシャフト、ガスタービンではディスク材料の開発が重要である。そこで本研究では、蒸気タービンロータ及びガスタービンディスク用高強度・高靱性フェライト系耐熱鋼の開発と実用化について研究した。本論文内容は以下のように要約される。

第1章は序論であり、火力発電用タービンに必要とされる各種耐熱鋼の諸性質と目標値、それを達成するための方策などについて述べた。

第2章は蒸気タービン用高強度・高靱性Cr-Mo-V 低合金鋼ロータ材の開発について述べた。Cr-Mo-V 低合金鋼の脆化は不純物元素の結晶粒界偏析が原因であるとされているが、どの元素が原因であるかについては特定されていなかった。本研究では、Si濃度を変化させた鋼を溶製し、クリープ破断強度などの機械的性質の変化を測定した結果、鋼中Siを低減させた場合、著しく脆化特性が改善された。また、他の不純物元素の効果についても検討したところ、焼もどし脆化係数を $X=(10P+5Sb+4Sn+As)/100$ (ppm) と定めた場合、脆化特性 (FATT値) 及びクリープ破断強度が最も相関良く表現されることを見出した。この脆化係数の低下と低Si化の組み合わせにより、脆化感受性は一層低減するとともに、クリープ破断強度が著しく高くなることが明らかとなった。さらに、金属組織学的調査により、Cr-Mo-V 低合金鋼脆化の主因は P の粒界偏析であり、Siはその偏析を助長する作用を有することも明らかとなった。

これら基礎研究を基にして、実規模大の低Si、低脆化係数ロータを試作し、現用材よりもクリープ破断強度が高く、脆化しないことを実証した。本開発材は実機ロータ15本に適用され、問題なく運転が続けられている。

第3章は高い低温靱性と高温強度を兼ね備えた高低圧一体型蒸気タービン用ロータ材の開発を目的に研究されたものである。蒸気タービン発電機のコンパクト化のため高圧と低圧一体型のロータを開発するには、低温における高靱性と高温における高強度という矛盾する性質を兼ね添えた材料が要求される。このため、まずCr-Mo-V 低合

金鋼の高温強度及び靱性に及ぼす合金成分の影響を調査した。その結果、現用Cr-Mo-V低合金鋼ロータ材よりも、低Si($\leq 0.05\%$)、低Mn(約0.2%)化し、且つ、Niを約1.8%、Crを約2%まで増加することにより、クリープ破断強度を損なわずに靱性を著しく高めることができた。またこの効果は、結晶粒界部分の偏析が軽減することに加えNiとCrがベーナイト組織のラス構造を微細化するために生ずることを明らかにした。

これらの基礎研究をもとに開発した1.8Ni-2Cr-Mo-V低合金鋼で実機規模の高低圧一体型タービンロータを試作したところ、溶製も容易で、鑄造性も優れており、開発目標値を十分満足できる性能を有することを確認した。

第4章は593°C超々臨界圧蒸気タービン用12Cr系耐熱鋼ロータシャフト材の開発を目的に研究したものである。12Cr系耐熱鋼のクリープ破断強度は高温下で炭化物の粗大凝集が生ずるために低下することが知られている。これを改善するために、合金成分の影響について調べ、Moの増加及びWの添加が炭化物の凝集粗大化を抑制することを明らかにした。この結果に基づき、C、Si、Nbを低減し、MoとWを増加させた11Cr-1.2Mo-0.3W-0.2V-0.05Nb-0.05N鋼を開発した。

本研究になる新12Cr鋼で実機規模のロータを試作したところ、593°C、 10^5 hクリープ破断強度は、150Mpaに達し、開発目標値=108Mpaを十分満足することを確認した。本開発鋼は実機蒸気タービンロータに適用され実用化されている。

第5章は625°C超々臨界圧蒸気タービンロータ用として超高強度材料を開発した研究である。593°Cよりもさらに高温の条件で使用するには、クリープ破断強度をさらに高める必要がある。本研究では炭化物の微細分散とマルテンサイト母相への固溶効果を狙いとして、12Cr耐熱鋼の機械的性質に及ぼすN、B及びCoの影響について調べた。その結果、Nの低減、B及びCoの添加は、クリープ破断強度を著しく高めることが明らかとなった。電子顕微鏡による調査の結果、NbC化合物が炭化物析出の核になり炭化物を微細化すること、Coは炭化物を安定化させてクリープ強度を増加させることがわかった。

この基礎研究により、11Cr-2.6W-2.5Co-0.2Mo-0.2V-0.1Nb-0.02N-0.015B鋼が開発され、現在、実用化に向けた研究が続けられている。

第6章では高温ガスタービンディスク用高強度12Cr系耐熱鋼を開発する目的で行われた研究について述べた。高温ガスタービンディスクは高速で回転するため、蒸気用タービンロータ材よりもさらに高い耐高温クリープ性能が要求される。12Cr鋼の合金濃度を変えて試験した結果、MoとVの炭化物による強化に加え、NbC炭化物を微細分散させることにより、一層クリープ破断強度が高められることを見いだした。衝撃値に対しMoはVの2倍の効果を持つこと、Nbはオーステナイト結晶粒を微細化させる効果を合わせ持ち靱性を高めること、などの新しい知見も明らかとなった。これらの結果に基づいて、従来の12Cr-2.5Ni-1.7Mo-0.35V鋼にくらべ、Vを低減してMoを増加し、さらにNbを添加した高強度12Cr-2.5Ni-2Mo-0.2V-0.08Nb-N鋼の開発に成功した。新耐熱鋼で実物大のディスクを試作したところ、450°C、 10^5 hクリープ破断強度は569Mpaと著しく高く、開発目標値=490Mpaを十分満足することを確認した。現在、新12Cr耐熱鋼製ディスク4台が実用プラントに採用されている。

第7章は高温ガスタービン用高靱性12Cr鋼ディスク材を目的に研究した結果について述べた。第6章で開発された新12Cr耐熱鋼の高温靱性をさらに高めた耐熱鋼の開発が要求された。低合金鋼の脆化特性改善に関する研究成果(第2章)をふまえ、低Si、低Mn及び不純物元素の低減が12Cr耐熱鋼にも有効かどうか検討した。その結果、12Cr耐熱鋼についても低合金鋼と同様な効果を認めた。これに基づき、12Cr耐熱鋼のSiとMnを低減し、且つ非金属介在物を極限まで低下する、いわゆるスーパークリーン化を行ったところ、靱性及び耐脆化特性が著しく改善されることが明らかとなった。この

試作鋼による大型ディスクは、低温靱性FATT値が $-9\sim-11^{\circ}\text{C}$ と極めて優れた特性を示すことが確認された。

第8章は本論文の総括である。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 井 邦 宜
副 査 教 授 鈴 木 朝 夫
副 査 教 授 工 藤 昌 行
副 査 教 授 高 橋 平七郎

学 位 論 文 題 名

タービン用高強度・高靱性フェライト系耐熱鋼の 開発と実用化に関する研究

日本の電力需要を支えている火力発電プラントには、a)地球環境及び化石燃料枯渇問題に対処するための効率向上、b)毎日起動停止、急起動などの過酷な運転、c)プラントの建設コスト低減及び立地面積有効活用のためのコンパクト化、などが求められている。これらの問題を解決するには、より一層の高温で使用でき且つ安価な蒸気タービン用ロータシャフト材やガスタービン用ディスク材の開発が不可欠である。本論文は、これら部材のための高強度・高靱性フェライト系耐熱鋼の開発と実用化について述べたものである。

第2章は、蒸気タービン用高強度・高靱性Cr-Mo-V 低合金鋼ロータ材の開発について述べた。Cr-Mo-V 低合金鋼の脆化特性 (FATT値) について、不純物元素の効果を検討し、焼もどし脆化係数を $\bar{X}=(10P+5Sb+4Sn+As)/100(\text{ppm})$ と定めた場合、FATT値及びクリープ破断強度が最も相関良く表現されること、この脆化係数の低下と低Si化の組み合わせにより、脆化感受性は一層低減するとともに、クリープ破断強度が著しく高くなることを明らかにした。また、Cr-Mo-V 低合金鋼脆化の主因は Pの粒界偏析であり、Siはその偏析を助長する作用を有することを金属組織学的調査により明らかにした。さらに著者は、これら基礎研究に基づき、実規模大の低Si、低脆化係数ロータを試作し、現用材よりもクリープ破断強度が高く、脆化しないことを実証した。

第3章は、蒸気タービン発電機のコンパクト化のため、高い低温靱性と高温強度という矛盾する性質を兼ね備えた高低圧一体型蒸気タービン用ロータ材の開発研究について述べた。現用Cr-Mo-V 低合金鋼ロータ材の多種にわたる合金成分について精査し、低Si($\leq 0.05\%$)、低Mn(約 0.2%)化し、且つ、Niを約 1.8%、Crを約 2%まで増加することにより、クリープ破断強度を損なわずに靱性を著しく高めることを見出した。そしてこれが、結晶粒界偏析の軽減、およびNiとCrによ

るベーナイトラス構造の微細化、の複合効果であることを明らかにした。また、実機規模で試作された高低圧一体型タービンロータ用1.8Ni-2Cr-Mo-V低合金鋼は溶製も容易で、鑄造性にも優れていることを確認した。

第4章は、593℃超々臨界圧蒸気タービン用12Cr系耐熱鋼ロータシャフト材の研究について述べた。クリープ破断強度低下の原因となる、炭化物の凝集粗大化に及ぼす合金成分の影響について調べ、Moの増加及びWの添加が炭化物の凝集粗大化を抑制することを明らかにした。この結果に基づき、C、Si、Nbを低減し、Moを増加しWを添加し11Cr-1.2Mo-0.3W-0.2V-0.05Nb-0.05N 鋼を開発し、593℃、 10^5 h クリープ破断強度150MPaを達成した。

第5章は、625℃超々臨界圧蒸気タービンロータ用として超高強度12Cr耐熱鋼を開発した研究である。593℃よりもさらに高温で使用するため、炭化物の微細分散とマルテンサイト母相への固溶効果を狙いとして、Wを高めた材料をベースにしてN、B及びCoの影響について研究した。その結果、Nの低減、B及びCoの添加は、クリープ破断強度を著しく高めることを明らかにした。そして、電子顕微鏡観察及びEDX分析によって、炭化物中のWの富化と $M_{23}(CB)_6$ の析出により、炭化物の凝集粗大化を抑制し、クリープ強度を増加させることを示した。これにより、11Cr-2.6W-2.5Co-0.2Mo-0.2V-0.1Nb-0.02N-0.015B 鋼を開発した。

第6章は、蒸気タービン用ロータ材よりさらに高い耐高温クリープ性能が要求される、高温ガスタービンディスク用高強度12Cr系耐熱鋼の研究である。①MoとVの炭化物による強化、②NbC炭化物の微細分散でクリープ強度が向上、③Vは衝撃値を低下させる、④Nbはオーステナイト結晶粒を微細化させ靱性を高める、などの新知見を明らかにした。これらに基づいて、従来鋼のVを低減してMoを増加し、さらにNbを添加した高強度12Cr-2.5Ni-2Mo-0.2V-0.08Nb-N鋼の開発に成功した。新耐熱鋼の450℃、 10^5 hクリープ破断強度は569Mpaと著しく高く、新12Cr耐熱鋼製ディスク4台が実用プラントに採用されている。

第7章は高温ガスタービン用高靱性12Cr鋼ディスク材の研究について述べた。前章で開発された新12Cr耐熱鋼の低温靱性をさらに高めるため、12Cr耐熱鋼のSiとMnを低減し、且つ非金属介在物を極限まで低下する、いわゆるスーパークリーン化を行い、靱性及び耐脆化特性が著しく改善されることを明らかにした。この試作鋼による大型ディスクは、低温靱性FATT値が-9~-11℃と極めて優れていることを示した。

これを要するに、著者は、フェライト系耐熱鋼の一層の高靱性化、高強度化に成功したものであり、金属材料学の進歩に貢献するところ大である。

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。