

学位論文題名

蒸気タービン用高 Cr フェライト鋼耐熱ロータ軸材の
高温特性向上に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、地球環境問題がクローズアップされ、地球温暖化の要因である CO₂ の排出量の削減が重要課題となっている。火力発電プラントにおいては、CO₂ 排出量を減少させるため、発電効率の向上が指向されており、その代表的な技術として、ガスタービンと蒸気タービンとを複合させたコンバインドサイクル(C/C)発電や蒸気条件をさらに高温高圧とした超々臨界圧(USC)発電が注目されている。C/C発電では、起動停止しやすいことが要求から、蒸気タービンとして、高低圧一体型ロータの採用による出力増大を可能にする、高低圧一体型ロータの高強度・高靱性化が要求されている。一方、USC 発電では、従来の最高蒸気温度:593℃以上の蒸気温度で操業が可能な高い高温クリープ強度を有する材料の開発が期待されている。

このような背景から、本学位論文では、先進型 C/C 発電に対応した高低圧一体型ロータ用材料の開発と USC 発電の高温化に対応した高圧ロータおよび中圧ロータ用材料開発のための高温特性向上に関する研究を記述した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

第2章では、高強度高靱性を有する高低圧一体型ロータ用材料として、改良 CrMoV 鋼以上の高強度と高温クリープ強度を有するロータ用材料の開発経緯述べた。先ず、高強度高靱性を有する高低圧一体型ロータ用材料として、高 Cr フェライト鋼を対象に焼戻し軟化抵抗、靱性および高温クリープ強度に及ぼす合金元素含有量の効果を調査し、その結果を基に室温引張強度、9%CrMoV 鋼を基本成分に靱性および高温クリープ強度バランスを考慮し、Ni 添加による靱性向上と同時に Si、Mn および他の不純物元素を極力低減させた成分から成るスーパークリーン 9%CrMoVNbN 鋼を開発した。この開発鋼の成分を有する実機規模の高低圧一体型ロータ軸材を試作し、材料特性の検証試験を行なった。その結果、優れた製造性および優れた強度・靱性バランスと高温クリープ強度の材料特性が確認された。

第3章、および、第4章では、高クリープ強度を有する高圧、中圧ロータ用材料として、600℃以上の温度域で使用可能なロータ用材料を開発することを目的とし、高 Cr フェライト鋼のクリープ強度向上に B 添加が有効である知見を考慮し、クリープ強化メカニズムを検討した。

具体的には、第3章では、B 添加によるクリープ強化機構を中心に検討した。最初に、高温での析出物の安定性に及ぼす B 添加の効果を詳細に調べた。B の効果の直接的は検出は困難であることから、再結晶温度に及ぼす B の影響を検討した。その結果、B の添加によって M₂₃C₆ 炭化物および(Nb,V)C (MX 型析出物)の固溶は高温側へ移行し、オーステナイト相での析出物の高温安定性に大きく寄与す

ることを始めて明らかにした。また、この析出物の安定化効果は、マルテンサイト素地においても有効であるが確認された。次に、B 添加の有無でクリープ変形に伴う組織変化にどのような影響を受けるか、その相違について、クリープ変形中の組織変化から調査した。その結果、Bの添加により、クリープ変形過程におけるマルテンサイト組織の回復が抑制されることをクリープ過程の組織の直接観察から明らかにした。さらに、上述のマルテンサイト組織の回復抑制に対する析出物の効果として、高温における析出物の挙動に及ぼすBの影響を調査した結果、 $M_{23}C_6$ の粗大化と同時に Laves 相の凝集粗大化が抑制されること、さらに、調質状態から MX 型析出物を微細化する効果があることを初めて明らかとした。このように、析出物の安定化を促進することで、マルテンサイト組織の回復が抑制されることによって高温クリープが強化される機構を提案した。さらに、本研究で得られた新たな知見を基に高 Cr フェライト系耐熱鋼におけるB添加によるクリープ強化挙動を検討した。B添加によりクリープ強化は、長時間側でのクリープ強化作用と短時間側でのクリープ強化機構が作用していることが示された。長時間側でのクリープ強化は、主として、 $M_{23}C_6$ と Laves 相の凝集粗大化の抑制効果に起因し、短時間側でのクリープ強化は、MX 型析出物の微細化に起因する強化機構を提案した。

第4章では、優れた高温クリープ強度を有するロータ用材料の開発を目標に、得られた合金元素の影響に関する知見およびB添加によるクリープ強化作用を考慮して、ロータ用材料の最適鋼種の開発と実機規模の大型試作ロータの製造・評価試験を実施した。その結果、開発鋼であるスーパークリーン 10CrMoVNbWCobN 鋼は、大型ロータ用材料としてこれまでの鋼と比較し最も優れた高温クリープ強度を有しており、630°Cの蒸気条件で使用可能なロータ材料として適用が可能であることを確認した。

このように、先進型 C/C 発電プラントに用いられる高低圧一体型ロータ用材料および USC 発電プラントの高温化に対応可能な高圧、中圧ロータ用材料の2鋼種のロータ材料が適正な合金元素の添加調整により開発した。また、高温クリープ強度に及ぼすBの析出物の高温安定化に関する効果を考慮し開発した鋼を実機規模のロータとして試作し、その材料特性の検証から開発鋼の製造性と高温特性が優れていることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 高 橋 平七郎
副 査 教 授 石 井 邦 宜
副 査 教 授 工 藤 昌 行
副 査 教 授 野 口 徹

学位論文題名

蒸気タービン用高Crフェライト鋼耐熱ロータ軸材の 高温特性向上に関する研究

近年、地球環境問題がクローズアップされ、地球温暖化の要因であるCO₂の排出量の削減が重要課題となっている。火力発電プラントにおいては、CO₂排出量を減少させるため、発電効率の向上が指向されており、その代表的な技術として、ガスタービンと蒸気タービンとを複合させたコンバインドサイクル (C/C) 発電や、蒸気条件をさらに高温高压とした超々臨界圧 (USC) 発電が注目されている。ここで、C/C発電では、起動停止の容易さと出力の増大に対応可能な高低圧一体型ロータの高強度/高靱性化が要求されている。USC発電においては、従来の最高蒸気温度、593℃以上の温度で稼働を可能とする高温クリープ強度を有する材料の開発が望まれている。本研究論文では、先進型C/C発電用の高低圧一体型ロータ用材料の開発とUSC発電用の高压ロータおよび中圧ロータ用材料開発のための材料高温特性向上に関する研究について述べている。得られた結果の要約は以下の通りである。

まず、高強度高靱性を有する高低圧一体型ロータ用材料として、改良CrMoV鋼以上の高強度を有する高温クリープ強度に優れたロータ用材料を開発について論じた。高Crフェライト鋼を対象に、焼戻し軟化抵抗、靱性および高温クリープ強度に及ぼす合金元素含有量の影響に関する調査を基に室温引張強度、靱性および高温クリープ強度バランスを考慮した結果、高強度高靱性を有する高低圧一体型ロータ用材料として、9%CrMoV鋼を基本成分とし、これにNiを添加して靱性向上を図り、Si、Mnおよび他の不純物元素を極力低減させたスーパークリーン9%CrMoVNbN鋼を開発してきた。さらに、開発鋼の成分を有する実機規模の高低圧一体型ロータ軸材を試作し材料特性の検証試験を行なった結果、製造性と強度・靱性バランスに優れた特性、並びに優れた高温クリープ強度特性を有していることを確認した。

次に、600℃以上の温度域で使用可能なロータ用材料としての高Crフェライト鋼のクリープ強度をB添加によるクリープ強化機構を応用して向上させた優れた鋼の開発結果を記述した。特に、再結晶挙動への微細析出物の影響をB添加効果の視点から検討した。その結果、Bの添加により、M₂₃C₆炭化物が安定化され、さらに (Nb, V) C型炭化物が固溶する温度が高温側へ移行することを初めて見出した。B添加によりマルテンサイト素地もMX型析出物が安定化されること示した。また、クリープ変形における組織変化の観察から、Bの添加によりクリープ変形過程におけるマルテンサイト組織回復が抑制されることを確認した。このマルテンサイト組織の回復抑制は析出物M₂₃C₆のB添加による粗大化とLaves相の凝集粗大化が抑制されることに起因すること、さらに、調質状態からMX型炭化物が微細化されることを初めて明らかにした。このようにBは析出物の安定化に有効に作用することによって、マルテンサイ

ト組織の回復が抑制されることによるクリープ強化機構を提案した。

本研究で得られた新知見を基に、高Crフェライト系耐熱鋼におけるB添加によるクリープ強化機構を検討した。その結果、B添加によるクリープ強化は、長時間側でのクリープ強化作用と短時間側でのクリープ強化作用に分離した強化機構が作用していることを見出した。即ち、長時間側でのクリープ強化は、 $M_{23}C_6$ およびLaves相の凝集粗大化が抑制されることに起因していること、一方、短時間側でのクリープ強化は、MX炭化物の大きさが微細化されていることに起因していることを明らかにした。

最後に、優れた高温クリープ強度を達成したロータ用材料を開発した結果を述べている。本研究で明らかにした合金元素の影響に関する新知見およびB添加によるクリープ強化作用とBを添加した10CrMoVNbWCoBN鋼の高温クリープ強度に及ぼす合金元素の効果を活用することにより高クリープ強度を有するロータ用材料の最適鋼種を開発した。この開発鋼種について、実機規模の大型試作ロータの製造・評価試験を実施した結果、開発鋼であるスーパークリーン10CrMoVNbWCoBN鋼は、大型ロータ用材料として世界で最も優れた高温クリープ強度を有しており、630℃の蒸気条件で使用可能なロータ材料として適用が可能であることを確認した。

このように、先進型C/C発電プラントに用いられる高低圧一体型ロータ用材料およびUSC発電プラントの高温化に対応可能な高圧、中圧ロータ用材料の開発を目的とした材料特性に及ぼす合金元素であるBの影響を明らかにすることによって、2鋼種のロータ材料を開発し実機規模のロータ試作試験から優れた製造性と高温材料特性を有することを確認した。

これを要するに、著者は、蒸気タービン用耐熱鋼の高温特性向上を可能にする鉄鋼材料開発に関する新知見を得たものであり、金属材料工学に貢献するところ大なるものがある。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。