

氏 名 郑 鹏飞(ZHENG Pengfei)

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1546 号

学位授与の日付 平成24年9月28日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Investigation on high temperature deformation mechanism and  
strengthening of V-4Cr-4Ti alloys

論文審査委員 主 査 教授 相良 明男  
教授 中村 幸男  
准教授 長坂 琢也  
教授 福元 謙一 福井大学  
准教授 渡辺 英雄 九州大学

核融合炉ブランケットは、核融合炉プラズマを取り囲むように配置される機器であり、プラズマで発生した中性子の運動エネルギーを熱エネルギーに変換するエネルギー変換、中性子とリチウムとの核反応による燃料トリチウムの生産、そしてプラズマの磁場閉じ込めのために外側に配置される超電導コイルを中性子照射から守る遮蔽の機能を持つ重要な機器である。ブランケットの動作温度が高くなれば、より高い温度の冷却材を使用することができるため、発電効率を改善することができる。ブランケットの動作温度は構造材料の高温強度によって定められる。そこで本研究では、核融合炉ブランケット容器の構造材料候補であるバナジウム合金 (V-4Cr-4Ti合金) の高温での高強度化に取り組んだ。具体的には、析出熱処理と圧延加工を組み合わせ加工・析出強化、及び先進手法であるメカニカルアロイング法 (MA: 機械的合金化) によるナノ粒子分散・結晶粒微細化強化を試みた。これらの強化法は鉄鋼及びその他の合金で有効性が明らかにされているが、核融合炉用V-4Cr-4Ti合金でも有効であるかどうかは自明ではなく、実験での検証が必要である。強化材について、短時間での引張強度と長時間でのクリープ変形を明らかにするための2通りの試験を行い、耐久性の評価を行った。その結果、強化の発現機構及び、高温での変形機構を明らかにし、これに基づいてバナジウム合金の一層の高強度化への指針を得た。

析出強化と加工強化を組み合わせ実験では、核融合炉ブランケット容器の構造材料候補であるV-4Cr-4Ti合金に対し、析出強化処理 (Tiと不純物C, O, NからなるTi-CON析出物を析出させる時効熱処理) の後に加工強化処理 (圧延加工) をした場合 (析出・加工材) と、逆の順序で加工強化後に析出強化した場合 (加工・析出材) の強度を比較した。核融合炉ブランケット容器の運転温度は鉄鋼材料では550°Cが上限と考えられているが、バナジウム合金ではより高い700~750°Cと想定した。一方、設計応力は核融合炉材料における一般的な値として100 MPaを想定した。引張試験における引張強さは設計応力の3~4倍必要であることから、400 MPa以上を目標とした。引張試験の結果、析出強化後の加工強化 (析出・加工材) または、加工強化後の析出強化 (加工・析出材)、いずれの順序の処理でも、700°C及び750°Cの試験温度において目標より高い引張強さ429~499 MPaを得た。さらに、ブランケット材料の寿命として期待される10年程度の荷重負荷に対するクリープ変形量を予測するため、700°C及び750°Cにおいてクリープ速度を評価したところ、加工・析出材は、180 MPa以上の高応力下でのクリープ速度が低下し、析出・加工材と比較して材料の耐久性が上がることを見出した。クリープ変形の活性化エネルギーの評価、X線解析による析出物同定、電子顕微鏡による微細組織観察と、それにもとづく考察から、加工によって先に導入した強化因子、すなわち材料欠陥である転位上に、時効熱処理中にTi-CONが析出し、転位のすべり運動をピン止めしてクリープ中の消滅を抑制し、結果としてクリープ速度低下に効果があったと結論した。

さらに、本研究ではMA法を、核融合炉ブランケット容器の構造材料候補であるV-4Cr-4Ti系へ初めて適用した。これによって、 $Y_2O_3$ 析出物を20 nm以下のサイズで高密度に導入するナノ粒子分散強化、そして同時に、ナノ粒子による粒界ピン止め・結晶粒成長抑制を利用した結晶粒微細化強化を試みた。 $Y_2O_3$ はTi-CONよりも生成自由エネルギーが低く熱的に安定なので、より高温まで安定に析出状態を保ち、強化に寄与することが期待できる。MA条件 (主にMA時間、MAのためのボールと合金原料の割合、MAの際の容器の回転速度) を系統的に変化させて材料の試作実験を行い、MAプロセスにおけるCr, Ti, Yの合金化過程と、MA条件が硬さに及ぼす影響を明らかにした。その結果、MA時間40 hrで材料は著しい硬化を示し、微細組織観察の結果から、それがナノ粒子分散と結晶粒微細化の複合効果であることを定量的に示した。一連の試作実験から、適切な組成としてV-4Cr-4Ti-1.5Y-0.3TiCを選定し、700°Cでの引張強さは500 MPaとなり、前述の加工・析出材と同程度の強度が得られ、クリープ速度は前述の加工・析出材の1/9にまで改善できた。また、純Vでの実験との比較から、ナノ粒子分散は転位によるクリープ変形を抑制するものの、結晶粒の微細化 (0.37  $\mu\text{m}$ ) による粒界クリープ変形も同時に促進することが明らかになった。従って、クリープ特性を今

後更に向上させるには、分散ナノ粒子を固溶させない範囲で保持したまま、熱処理で適切に結晶粒を成長させることが重要である、と結論した。

## 博士論文の審査結果の要旨

本博士論文は、核融合炉ブランケット容器の構造材料候補であるバナジウム合金 (V-4Cr-4Ti合金) の高温での高強度化に関するもので、析出熱処理と圧延加工を組み合わせた加工・析出強化、及び先進手法であるメカニカルアロイング法 (MA: 機械的合金化) によるナノ粒子分散・結晶粒微細化強化を実験的に試みている。強化材について、構造材料として要求される引張試験とクリープ試験を行い、荷重負荷に対する耐久性の評価を行った。その結果、強化の発現機構及び、高温での変形機構を明らかにし、それに基づいてバナジウム合金の一層の高強度化への指針を示している。

これらの成果は、長寿命かつ、高温運転での高効率の核融合炉ブランケット実現につながるものであり、工学的意義が大きい。さらに、析出と加工の複合プロセスによる強化機構、高温での変形機構や、MA プロセスでの合金化、析出の過程を明らかにしたことは、学術的にも高く評価できる。

本博士論文の審査委員会においては、審査委員よりクリープ試験データ及び微細組織観察データの解析手法、バナジウム合金における固溶強化、中性子照射下での強度変化、接合法開発の必要性等に関して様々な質問とコメントが出されたが、それらに対して著者は的確な返答を行った。これらの発表ならびに質疑を通じ、著者がこれまでの研究内容について良く理解するとともに、将来の核融合炉を建設する際にブランケット構造材料に必要とされる諸問題について深い洞察を行っていることが理解できた。また、核融合炉材料工学に関わる基礎的な知識や核融合開発研究における材料の高温強度改善の意義に関する理解も深いことがわかった。

本博士論文の公開発表会においては、研究の背景、目的、特徴、方法、実験結果とその解析などについて約 1 時間の発表を行い、引き続いて、出席者による質疑応答が約 20 分間行われた。ここでも明確な発表と質問に対する的確な回答がなされた。

関連する学術論文としては、査読つき英文論文 (第一著者) として計 2 編が発表済みであり、1 編が現在査読中である。また、国際会議でのポスター発表も 4 回行っており、英語表現能力も充分であると判断できる。

結論として、本研究は、核融合炉ブランケット構造材料用バナジウム合金の第一候補材料 V-4Cr-4Ti 合金に、有望な種々の強化機構を系統的に適用し、その複合効果とその発現機構を実験で明らかにし、それに基づいて一層の高強度材料開発への指針を導出したものであり、独創性、新規性、工学的意義および今後の発展性を高く評価できる。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として十分価値があると判断した。