

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	钟 志 宏
論文題目	Development of Technologies for Joining of Silicon Carbide Materials to Metals(炭化珪素セラミックス材料と金属の接合技術開発に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、優れた高温強度特性、低放射化特性、化学的安定性等から原子力分野、航空・宇宙分野への応用が期待されているSiC及びSiC/SiC複合材料に関して、実用化及び付加価値を高めるために重要な金属との接合技術開発に関するものであり、熱膨張係数等の特性の大きく異なるセラミックス材料と金属材料の接合を系統的に検討し、これまでに技術開発が行われていないSiCセラミックス材料と金属の拡散接合に関する理解の体系化を目指すものである。全5章から構成されており、研究の背景と目的から、セラミックスと金属を対象とした接合に関するこれまでの知見をまとめ、SiCセラミックス材料と金属材料の基本的な拡散接合技術開発および問題点の整理、更には中間層を用いたSiCセラミックス材料と金属材料の拡散接合の高度化について述べている。 第1章は序論で、研究の背景及び目的について述べている。特に高温強度特性や耐環境特性の観点からSiCセラミックス材料（SiC/SiC複合材料も含め）の優位性を説いており、広い範囲の応用を述べている。また、実用化に向けたSiCセラミックス材料と金属材料の接合の重要性を指摘している。次いで、SiCセラミックス材料と金属材料の接合技術開発現状および問題点を述べ、SiCセラミックス材料と金属材料接合に関する理解の体系化を目指した本研究の位置づけ、意義と研究目的を示している。 第2章では、一般的なセラミックスと金属の接合に関して、接合プロセス、界面構造や接合面での反応層形成メカニズムについて述べ、異材（セラミックス/金属）接合健全性においては基本となる残留応力影響について概説している。次いで、セラミックスと金属の物理特性差による残留応力と接合強度の関連について述べ、残留応力を緩和するための中間層の役割を述べている。さらに、これまで開発された接合材の中間層の長所や短所をまとめている。最後に、セラミックス/金属の接合強度評価法の現状についても述べている。 第3章では、ホットプレスによる基本的な拡散接合法によるSiCセラミックス材料とタングステンや鉄鋼材料（ステンレスや低放射化鋼）との接合技術に関して述べている。特に、プロセス条件による接合材界面での組織変化に注目し、接合界面における固体拡散・反応速度論を適用して論じている。さらに、組織の詳細な同定及び界面強度特性評価を行い、界面強度特性への界面反応の影響を解析・評価しており、接合条件最適化を行っている。また、SiCセラミックス材料自身や焼結助剤が及ぼす接合界面特性・健全性の影響を解明し、SiC結晶構造の接合健全性への影響は極めて小さいが、焼結助剤はある程度影響を及ぼすことを示した。これらの成果に基づきタングステンとの接合に関しては、ホットプレスを用いた拡散接合により非常に強固な接合が形成できることを示した。鉄鋼材料の拡散接合では、タングステンと異なり熱膨張係数の差に起因する残留応力が大きいいため、SiC中に亀裂が発生し、接合条件を変えるだ			

けでは解決しないことが明らかになり、残留応力を制御するために、中間層導入の必要性を示した。

第4章では、中間層を用いたSiCセラミックス材料と鉄鋼材料の拡散接合技術開発に関して述べている。残留応力緩和のために、熱膨張係数や弾性率等から中間層に用いる材料の検討を行い、ニッケルや銅をベースとした中間層を用いた開発を行った。これらの中間層とSiCセラミックス材料との過剰な反応を抑制するために、3章で得た技術を用い、さらにタングステン層をSiC材料と中間層の間に導入した。接合条件（保持温度・保持時間）の変化に伴う形成反応相に関して拡散・反応速度論で議論し、界面強度特性と微細組織との相関を解析している。また、中間層の厚さ変化に伴う接合強度への影響と要因も検討している。これらの成果に基づき、W/Niを用いた接合では、これまでに報告されている接合に比べて、非常に高い強度を持つ接合に成功した。W/Cuを用いた接合では、接合強度が比較的低かったため、Cuの両端に更にニッケルやチタンの箔を加え強度特性の改善を行った。

最終章として、第5章では、本研究の成果を総括した。

金属材料の信頼性とセラミックス材料の高温強度特性や耐食性を融合させた、優れた特性が期待できる材料として原子力分野、航空・宇宙分野への応用が期待されている、SiCセラミックス材料と金属材料の接合材に関しては、これまでにほとんど報告がなされていない。本研究で開発・評価したSiCセラミックス材料と金属の接合法は、核融合炉の高熱負荷機器や、先進ブランケットシステム開発に直接貢献できる世界で初めての成果であり、その学術的意味も十分高い。また、先進核分裂炉や一般工業分野においてもセラミックス材料の幅広い利用には、金属材料との接合は非常に重要な要素であり、本研究の成果が貢献できるものと考えられる。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、優れた高温強度特性、低放射化特性、化学的安定性等から原子力分野、航空・宇宙分野への応用が期待されているSiC及びSiC/SiC複合材料と、金属材料の接合技術開発を主目的に行った研究に関するものである。SiCセラミックス材料の基本的な製造技術は確立しつつあるが、実用化のためには、成形や接合技術が不可欠となる。特に金属材料との接合に関しては、全体のシステムとしての成立性に必要なだけでなく、新たな機能の付加、セラミックスの高温特性や耐食性と金属の構造信頼性を有する高性能システム構築に向けた重要な技術開発であるが、これまでにSiCセラミックス材料と金属材料の接合に関しては、ほとんど報告されておらず、特に熱膨張係数に大きな差のある低放射化鉄鋼材料に関しては皆無である。

本研究は、(1) ホットプレス法によるSiCセラミックス材料と金属の拡散接合技術の開発と、(2) (1) を応用して熱膨張係数差の大きい金属とも接合できるように中間層を導入したSiCセラミックス材料と金属の拡散接合技術の開発に大別される。SiCセラミックス材料と金属のホットプレスによる拡散接合では、焼結助材の効果も含めて作製条件を論理的に検討し、接合界面特性・健全性を電子顕微鏡等の分析機器を用いて評価し、接合プロセスに対する機構論的な検討を行い、接合条件の最適化を行った。さらに、タングステンの直接拡散接合のプロセスの成立性を示すとともに、SiCセラミックス材料自身や焼結助剤が及ぼす接合界面特性・健全性の影響を解明した。また、SiCセラミックス材料と鉄鋼材料(ステンレスや低放射化フェライト鋼)の接合も同様に試み、残留応力等の問題を明らかにした。これらの基本的な拡散接合技術に基づき、SiCセラミックス材料と熱膨張係数の大きく異なる金属材料との接合に、熱膨張係数を緩和させるための中間層の導入を提案した。また、中間層とSiCセラミックス材料との過剰な反応を抑制するために、間にタングステン層の導入を検討し、W/NiやW/Cu等の中間層を提案した。これらの接合プロセスの成立性を確認した後、界面微細構造と組成解析により界面近傍の反応生成物を解析し、プロセス条件の最適化を達成するため接合材の界面硬度及び強度特性の評価および物理化学的な検討を行った上で、熱膨張係数の大きく異なるSiCセラミックス材料と鉄鋼材料の接合技術を開発した。特に、核融合炉では、第一壁やダイバータへの応用において、タングステン被覆は重要な課題とされており、鉄鋼材料を構造材料とし、SiCセラミックス材料のインサート材を組み合わせるようなシステムも提案されているが、SiCセラミックス材料と低放射化鉄鋼材料の接合に関してはこれまで全く報告されていない。本研究はこれらの課題の解決や提案の実現に向けて直接貢献できる世界で初めての成果であり、その学術的意味も十分高く、セラミックス材料の一般工業分野への用途を広げることに本研究が貢献できるものと考えられる。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認め、平成22年2月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認める。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降