

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	盧 相熏
論文題目	Welding and Joining Technology Development of Oxide Dispersion Strengthened Ferritic Steels（酸化物分散強化フェライト鋼の接合技術開発）		
（論文内容の要旨） 本論文は、ODSフェライト鋼の接合技術を開発するため、摩擦撹拌接合（Friction Stir Welding; FSW）、固相拡散接合（Solid-State Diffusion Bonding; SSDB）及び液相拡散接合（Transient Liquid Phase Bonding; TLPB）法を用いて、ODS鋼と同種及び異種材料間の接合技術開発に関する材料組織・強度特性相関について論じた結果をまとめたもので、7章からなっている。 第1章では、研究の背景および従来の研究成果のまとめと今後の課題を抽出し、それらに基づいて、本研究の目的を述べている。 第2章では、摩擦撹拌接合法の適用性について検討している。ODSフェライト鋼の押し出し棒材から切り出した板材に対し、摩擦撹拌処理（Friction stir processing: FSP）を施し、微細組織及び強度特性の相関を調べた結果、FSP後の組織は撹拌部、熱影響部および母材部からなり、いずれの箇所にも気孔や亀裂などの損傷欠陥は観察されず、良好な組織であることが確認されている。また、撹拌部では、動的再結晶が生じており、押し出し材に特有の顕著な異方性を持つ集合組織が消失し、等軸結晶粒への粗大化が生じたため、硬度は低下するが引張強度特性における顕著な異方性は抑制されることが判明している。さらに、撹拌部では、撹拌後進部が前進部よりも硬度が高く、撹拌ツール位置に対し非対称の硬度分布を示すことが判っている。一方、撹拌部の酸化物粒子の分散状況を調べた結果、撹拌による酸化物粒子の凝集などは観察されず、酸化物粒子は母材とほぼ同様に微細分散されていることが確認されている。 撹拌部の強度特性に関しては、室温強度は顕著に低下（35%）したが、微細組織観察とその定量的考察に基づき、この低下は結晶粒度の増大および転位密度の減少によることを明らかにしている。一方、撹拌による高温（700℃）での引張強度の低下は抑制（17%）されており、高温強度は、結晶粒度よりも酸化物粒子の分散状況に、より強く依存するとしている。 以上の結果に基づき、FSW法は、ODS鋼の強度特性における異方性の改善のみならず、室温における加工性を改善すると共に、高温強度を維持することのできる適切な接合方法であると結論している。 第3章では、SSDB法の接合条件を探索すると共に、そのODS鋼への適用性について検討している。まず、接合界面組織に及ぼす接合条件（温度、時間、接合界面の研磨状態）の影響を調べ、微細結晶粒及びナノスケールの酸化物粒子の分散状態を維持するための適切な接合条件が決定されている。適切な接合組織を得るためには、接合材を構成する原子の相互拡散および接合界面におけるクリープ変形が重要であると述べている。 次に、SSDB部に対し、引張試験および衝撃破断試験を行った結果、本研究で作製したODS鋼のSSDB部は、母材部とほぼ同様の引張特性および衝撃破壊特性を示し、極めて良好な接合強度を持つことが確認され、ODS鋼に適切な接合技術開発に成功している。平均結晶粒径がサブミクロンのODS鋼においては、粒界面積の大きいことが接合部における原子の拡散を促進し、緻密な組織を形成することで優れた強度特性を維持していると結論している。 以上の結果から、SSDB法は、接合可能な寸法は制限されるものの、ODS鋼の優れた高			

温高強度および衝撃破壊特性を維持しうる優れた接合法であると結論している。

第4章では、ODS鋼の同種材料に対して、二種類の低融点インサート材を用いてTLPBを施し、本接合法の適用性について評価している。非晶質Fe-Si-B系のインサート材の場合は、TLPB部にはインサート材が一部残留し、その周辺にはCr硼化物の形成や低融点金属原子の不均一な濃度分布が認められるとともに、接合界面上に凝集粗大化したY-Ti-O系の複合酸化物が存在していることが確認されている。そのため、接合部の界面で破断が生じており、顕著な引張伸びの低下が見られている。

一方、電子ビーム蒸着Bをインサート材として用いたTLPBは、母材部とほぼ同様の引張変形および破壊挙動を示しており、この優れた特性は、蒸着B層が非常に薄いため、低融点原子の均一分散による微細結晶粒の連続的な分布が可能になることに起因すると結論している。インサート材の選定においては、ODS鋼中への低融点金属原子の拡散に伴う溶融範囲を狭め、かつ、低融点金属原子の均一分布を実現するための拡散を可能にする接合条件を選定することが重要であると述べている。

以上の結果から、TLPB法は、インサート材及び凝集粗大析出物の存在により、高温での延性や衝撃破壊特性に顕著な劣化が認められたが、電子ビーム蒸着B等のインサート材の開発や接合条件の探索により、さらに改善される可能性があり、潜在的には優れた接合方法であると結論している。

第5章では、ODS鋼と異種材料の拡散接合について検討されている。まず、核融合炉第一壁やダイバータへの応用が期待されるODS鋼とWの接合法およびプロセス条件を探索し、接合組織および接合強度を評価している。SSDB部の接合強度は低いですが、TLPBプロセスを適用したODS鋼/Wの接合界面上には、Fe-Si-B系インサート材が残留することが確認され、SSDB部に比べ、接合プロセス中に発生した熱応力が軽減されることで、破壊は接合界面では無く、W内部で生じており、良好な接合強度を示すことを確認している。また、接合部の粒界面上には、インサート材に含まれるBと母材中のCrからなるCr硼化物の形成が認められたが、接合時間の経過とともに、Cr硼化物は固溶することを確認している。この現象は、固溶体析出と拡散の一次元モデルに基づき、理論的に再現されている。また、接合プロセス下における関連するほとんどの原子（W、Fe、Cr、Si、B）の拡散挙動は、体拡散により説明できるとしている。

ODS鋼/低放射化フェライト（RAFM）鋼のSSDBでは、接合界面上にCr炭化物が形成され、RAFM鋼中のC量が減少してしまうため、フェライト相が形成され引張特性の劣化が認められている。一方、TLPBでは、Cr硼化物が形成され、Cの枯渇が抑制されたため、マルテンサイト相が残留しており、良好な接合強度が得られたと結論している。

第6章では、第2章から第5章までの研究成果に基づき、各接合法の長所および短所をまとめ、各接合法の適用性を総合的に評価している。

第7章では、ODS鋼に適切な接合技術の開発に成功したと結論している。

以上、本論文は、核融合炉ブランケットや次世代原子力システム用の構造材料として開発されているODS鋼の接合技術開発に関する研究成果をまとめたものであり、高効率なエネルギー変換とCO₂ゼロエミッションを目指す革新的原子力システムの実現において不可欠とされているODS鋼の接合技術に関する基礎的知見を与えると共に、ODS鋼の実用化への道を拓く接合技術の開発に成功している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、酸化物分散強化(ODS)フェライト鋼に適用可能な接合技術を開発するため、ODS鋼と同種及び異種の材料間の接合技術開発に関する研究を行った結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding; FSW)法の開発においては、摩擦攪拌処理を施し、微細組織及び強度特性の相関を調べた結果、攪拌部では動的再結晶が生じており、押し出し材に特有の顕著な異方性を持つ集合組織が消失し、等軸結晶粒への粗大化が生じたため硬度は低下するが、引張強度特性における顕著な異方性は抑制されることを確認している。一方、ナノスケール酸化物粒子の分散状態を詳細に調べ、攪拌による酸化物粒子の凝集などは生じておらず、高温(700℃)での引張強度の低下が抑制されていることが示されている。以上の結果から、FSW法は、ODS鋼の強度特性における異方性および室温における加工性を改善すると共に、高温強度を維持することのできる適切な接合方法であると結論している。

固相拡散接合(Solid-State Diffusion Bonding; SSDB)法の開発研究においては、最適な接合条件の探索を行い、微細結晶粒及びナノスケールの酸化物粒子の分散状態を維持するためには、材料を構成する原子の相互拡散および接合界面におけるクリープ変形が重要であると述べている。また、SSDB部に対し、引張試験および衝撃破断試験を行った結果、本研究で作製したODS鋼のSSDB部は、母材部とほぼ同様な引張特性および衝撃破壊特性を示し、極めて良好な接合強度を持つことが確認され、ODS鋼に適切な接合技術開発に成功している。以上の結果から、SSDB法は、接合可能な寸法は制限されるが、ODS鋼の優れた高温高強度および衝撃破壊特性を維持しうる優れた接合法であると結論している。

低融点インサート材を用いた液相拡散接合(Transient Liquid Phase Bonding; TLPB)法の開発においては、インサート材の選定と接合条件の適正化が不可欠であり、ODS鋼中への低融点金属原子の拡散に伴う溶融範囲を狭め、かつ、低融点金属原子の均一分布を促進させるプロセス条件を選定することが重要であると述べている。TLPB材においては、高温での延性や衝撃破壊特性に顕著な劣化が認められたが、電子ビーム蒸着B等のインサート材の開発や接合条件の探索により、さらに接合強度が改善される可能性があり、潜在的に優れた接合方法であると結論している。

ODS鋼と異種材料の接合法の研究においては、核融合炉第一壁やダイバータへの応用が期待されるODS鋼とWの接合法およびプロセス条件を探索し、TLPB部はSSDBに比べ、接合時に発生した熱応力が軽減されることで、良好な接合強度の得られることを確認している。また、接合部の粒界面上に存在するCr硼化物の形成挙動を一次元拡散モデルに基づき、理論的に模擬することに成功している。

ODS鋼/低放射化フェライト(RAFM)鋼のSSDBでは、接合界面上にCr炭化物が形成され、RAFM鋼中のC量の減少によりフェライト相が形成され、引張特性の劣化が認められたが、TLPBでは、Cr硼化物が形成され、Cの枯渇が抑制されたため、マルテンサイト相が残留しており、良好な接合強度が得られたと結論している。

以上、本論文は、核融合炉ブランケットや次世代原子力システム用の構造材料として開発されているODS鋼の接合技術開発に関する研究成果をまとめたものであり、高効率なエネルギー変換とCO₂ゼロエミッションを目指す革新的原子力システムの実現において不可欠とされているODS鋼の接合技術に関する基礎的知見を与えると共に、ODS鋼の実用化への道を拓く接合技術の開発に成功している。

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る。また、平成22年8月20日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

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