

# 摩擦攪拌接合による Na 高速炉炉心材料の新たな接合技術に関する研究

(受託者) 国立大学法人東北大学

(研究代表者) 佐藤 裕 大学院工学研究科

(再委託先) 独立行政法人日本原子力研究開発機構

(研究開発期間) 平成 22 年度～23 年度

## 1. 研究開発の背景とねらい

次世代の高速炉炉心材料のうち、ラップ管用材料として開発されたフェライト鋼 (PNC-FMS) に対し、摩擦攪拌接合 (FSW) による共材および異材接合を行い、炉心材料への新たな溶接技術としての可能性を探るとともに、試作した接合継手における微細構造・強度データベースの確立とそれらに及ぼす接合条件の影響を明らかにすることを目的とする。

平成 22 年度は「フェライト鋼 (PNC-FMS) の共材接合に関する研究」を、平成 23 年度は「フェライト鋼 (PNC-FMS) / ステンレス鋼 (SUS316) の異材接合に関する研究」を実施した。種々の接合条件下での共材および異材接合を FSW にて実施する過程で、既存の FSW 装置に設置可能な温度測定装置を用いて接合中ツール温度をリアルタイムでモニタリングし、さらには得られた接合部の微細構造を定量化するとともに、継手強度を評価して、接合条件、ツール温度、微細構造、継手強度に関するデータベースを確立する。

## 2. 研究開発成果

### 2-1. フェライト鋼 (PNC-FMS) の共材接合

FSW における接合条件を種々に変化させて、無欠陥継手を得るための接合条件範囲を選定し、データベース作成を実施した。

接合中のツール温度を測定した結果、ツール温度はツール回転速度と挿入深さとともに増加する傾向が見られる一方、接合速度および突合せの影響はほとんどなかった。

攪拌領域の微細構造を調べた結果、いずれの条件でもフェライト (軟質組織) とマルテンサイト (硬化組織) が混在した組織が得られた。ツール回転速度が高い場合、フェライトを含むラス状マルテンサイトが生成したが、回転速度の低下とともにマルテンサイト量が減少し、極めて微細なマルテンサイトとフェライトからなる等軸粒組織が得られた。ツール回転速度と挿入深さが増加するほどツール温度は増加し、それに伴ってマルテンサイトの生成量および結晶粒径は増加した。

継手引張試験の結果、全ての継手は接合条件に依らず、最弱の母材部で破断し、ほぼ母材と同等の継手強度を示した。攪拌領域の強度は室温、550°C のいずれの温度でも母材よりも著しく高い値を示したが、攪拌領域の強度に及ぼす接合条件・ツール温度の影響はあまり大きくなかった。

以上の結果をまとめ、フェライト鋼 (PNC-FMS) の共材接合において、接合条件、ツール温度、微細構造、継手強度に関するデータベースを確立した。フェライト鋼共材接合部に優れた強度・延性を得るためには、低い回転速度を用いてツール温度を 700°C 以下に保つことが有効であり、良好な強度特性は硬化組織の存在率の低い極めて微細なマイクロ組織の形成により達成されることが明らかとなった。

### 2-2. フェライト鋼 (PNC-FMS) / ステンレス鋼 (SUS316) の異材接合

上記共材接合の結果を踏まえて低いツール回転速度を用いた FSW 試験を実施した。その結果、ツール回転方向と進行方向が一致する側（前進側）にステンレス鋼、逆になる側（後退側）にフェライト鋼を配置した場合、無欠陥継手を得ることができたため、この材料配置および接合条件にてデータベースの確立を試みた。

継手の断面観察を実施した結果、両材料がジグザグラインに沿って分離した断面マクロを呈した。両材料の界面に隙間はなく、合金元素の拡散が若干確認された。攪拌領域のフェライト鋼側では、微細なフェライトとマルテンサイトからなる等軸粒組織となる一方、ステンレス鋼側では、微細なオーステナイト単相組織が得られた。ツール回転速度の増加とともにフェライト鋼側のマルテンサイト量および結晶粒径は増加した。共材接合と同一接合条件下では、ツール温度および攪拌領域のフェライト鋼側の微細構造は共材接合のものと同様であった。

継手の最大引張強さを調べた結果、いずれの接合条件においてもステンレス鋼母材と同様であり、引張試験温度とともに減少する傾向を示した。攪拌領域の強度を調べた結果、フェライト鋼母材とステンレス鋼母材の中間の値を示し、ツール回転速度の増加とともに低下する傾向を示した。衝撃試験による吸収エネルギーを調べた結果、異材接合部の衝撃特性は母材よりも低下することが示された。

以上の結果をまとめて、フェライト鋼（PNC-FMS）／ステンレス鋼（SUS316）の異材接合の接合条件、ツール温度、継手強度、微細構造に関するデータベースを作成した。異材接合においては、前進側にステンレス鋼、後退側にフェライト鋼を配置し、共材接合と同様、低い回転速度を用いてツール温度を 700℃以下に保つことが有効であることが示された。

### 3. 今後の展望

本研究は、FSW によるフェライト鋼の共材接合およびフェライト鋼／オーステナイト系ステンレス鋼の異材接合において、接合条件、温度、継手強度、微細構造の関連性を系統的に纏めた初めての成果であり、他の鋼種の共材接合や異材接合においても有益な情報を提供しうる。FSW を利用することにより、共材接合および異材接合において、既存の溶融溶接法では避けられない劣化組織の生成を抑制することができ、炉心材料の接合技術としての有効性を示した。また、フェライト鋼の共材接合で得られた「母材以上の強度と伸び特性の共存」は特筆すべき成果と言える。すなわち、接合時のツール回転速度を低くしてツール温度を低く保つことにより、攪拌領域には微細なフェライト/マルテンサイト混合組織が生成し、母材以上の強度・伸び特性が達成された。このような微細構造と強度特性は、既存の接合技術はもとより微細構造制御法（組織改質法）を用いても達成することが難しく、摩擦攪拌が鉄鋼の新たな微細構造制御法として利用しうる可能性を示唆している。

炉心材料の接合技術として FSW が有効であることを示したが、攪拌領域の衝撃特性が低下するため、PWHT（接合後熱処理）による靱性改善を試みる必要がある。また、六角管から構成されるラップ管構造（もしくは円管）に対する FSW 試験やプロセス最適化、鉄鋼の FSW に適した安価で信頼性の高い接合ツールの開発などが実機適用に向けた今後の課題となるであろう。