

液体金属中で適用可能な摩擦攪拌接合補修装置の開発

(受託者) 三菱重工業株式会社

(研究代表者) 森本将明 新型炉プラント設計課

(再委託先) 国立大学法人大阪大学

(研究開発期間) 平成21年度～23年度

1. 研究開発の背景とねらい

摩擦攪拌接合（以下、FSW）技術は、図-1（左）に示すように、FSW 工具を対象物に押し当て、回転させて摩擦熱で加熱し、対象物を溶かすことなく攪拌して接合する。この技術を使うことで、ナトリウム冷却高速増殖炉（以下、FBR）の原子炉を、ナトリウムを満したままで補修できる可能性があり、プラントの長寿命化と、補修期間の大幅短縮による経済性向上に寄与できると期待されている。

FSW は、アルミへの施工を主として開発が進められてきたが、融点が高く機械的強度が高いステンレス鋼への施工は難易度が高く、施工実績が乏しかった。

そこで、これまでにステンレス鋼への施工方法を確立するとともに、ナトリウム中でも FSW による欠陥補修ができることを実証した。^[1] これを受け、本事業では、原子炉内構造物をナトリウム中で補修する装置の実現を目指して、① 実機に適用できるレベルの高度な FSW 施工方法の開発と、② ナトリウム中で使用できる FSW 補修装置のうち、「攪拌機構部」の開発をねらいとして実施している。本稿では2年目である平成22年度の成果に関し、①については2.1章で、②については2.2章で詳しく述べる。

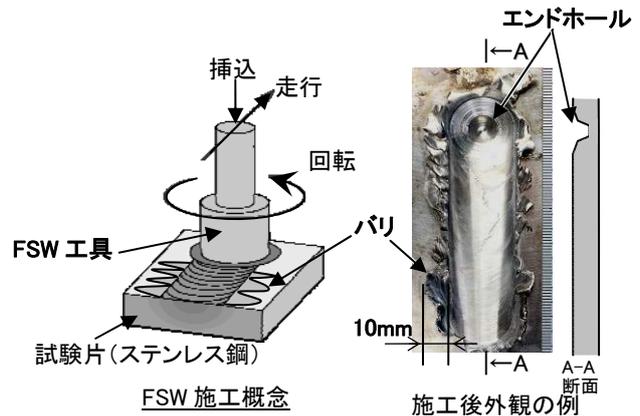


図-1 FSWの施工概念と施工例

2. 研究開発成果

2.1 FSWによる実機施工方法の開発

FSWの施工後には図-1（右）に示すように、施工部の周囲にバリが発生し、FSW 工具を引き抜いた後にくぼみ(エンドホール)が残る。エンドホールは構造物の強度を低下させる懸念があり、またバリは、施工部から剥離した場合、原子炉内に浮遊して炉内機器を傷つけたり機能を劣化させる懸念があるため、対策を検討し、試験を実施して有効性を評価した。

エンドホールについては、FSW 施工による欠陥補修の後、図-2 (a)に示すように欠陥補修に用いた FSW 工具よりも先端の突起が短い工具 (FSW ならし工具) を用いて、エンドホールをならす方法 (穴ならし法) と、図-2 (b)に示すようにエンドホールにフィットする形状のステンレス製工具を回転・圧入し、摩擦圧接の要領でエンドホールを埋める方法 (穴埋め法) の2種類を検討した。穴埋め法は、平成21年度に原理的にエンドホールが埋められることを確認したが、その際穴底に微細な未接合部 (内部欠陥) が残留することと、施工部の引張強度が母材に比べて低いことが分かったため、接合品質の改善を図った。

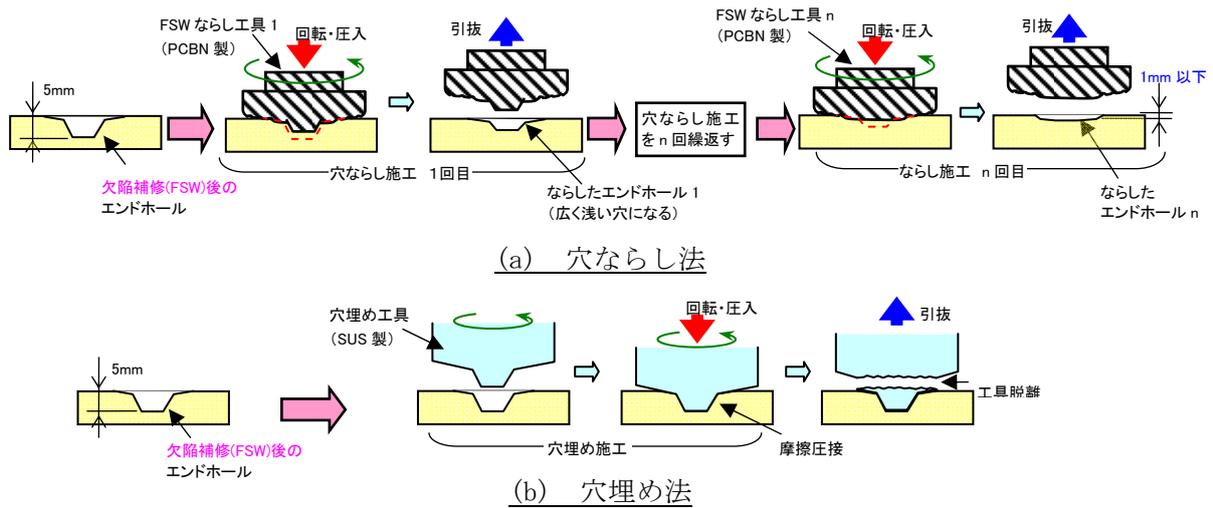


図-2 エンドホールレス施工法の概念

穴ならし法の結果、図-3に示すように、施工前は5.8mmであったエンドホールの深さが、施工後は工具外周部で1.2mmまで浅くできた。引張強度は母材と同等以上であり、穴ならし法によるエンドホールレス施工方法の有効性が確認できた。



図-3 穴ならし法の試験結果

穴埋め法では、穴埋め工具を圧入する際に低荷重（約1kN）で施工開始し、次第に荷重を30kNまで増加させる方法を検討した。最初から高荷重で圧入した場合は穴底部が接合する前に工具先端が座屈変形してしまい、未接合部の発生原因となっていたが、採用した方法では図-4に示すように良好な接合部を得ることができた。

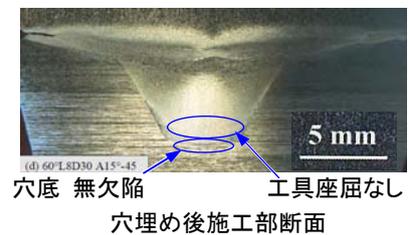


図-4 穴埋め法の試験結果

バリについては、バリ発生の原因となる、FSW 工具最外周部の母材への めり込みを防止することに着目して、図-5 上段に示すような3種類のバリ抑制工具を作成し、FSW 施工を行った。

		バリ抑制工具 (.....は従来工具形状、- - -は工具と母材の接触部)			
		(a) 従来工具	(b) 大径化工具	(c) 鋭角化工具	(d) 鋭角化+ピン長増工具
工具形状					
施工部外観					
		定常走行部 始端部	定常走行部 始端部	定常走行部 始端部 <small>(注)</small>	定常走行部 始端部

注: 始端部のバリを除去した後の写真

図-5 バリ抑制試験の結果

その結果、図-5 下段に示すように、いずれの工具でも定常走行部のバリは3 mm 以下となり、目標とする5 mm 以下に抑制できた。一方、始端部のバリについては顕著な抑制効果が得られず、改善の必要があることが分かった。

2.2 ナトリウム中補修装置の開発

ナトリウムは還元性でかつ化学的に活性であるため、液体ナトリウム中では金属表面の酸化皮膜が除去される上、潤滑性が期待できないことから、焼き付きや固着が生じやすくなると考えられる。従来、FBR の炉停止時温度 200℃ のナトリウム中で、FSW 施工条件（最大荷重 30kN、最大回転数 1200min⁻¹）のような厳しい条件で機械要素を使用した実績は無かったことから、平成 21 年度に要素試験を実施して、ナトリウム中で FSW 施工条件にて使用可能な軸受等の機械要素を開発した。平成 22 年度は、開発した機械要素を組み合わせ、図-6 に示すようなナトリウム中補修装置試作機を試作した。試作機は、原子炉内に挿入可能なようにコンパクトでありながら、200℃環境で FSW 施工に必要な高トルク、高回転を発揮できるモータを内蔵し、ステンレス製の躯体により FSW 施工反力に対して十分な剛性を確保した構造となっている。荷重制御により最大 40kN まで負荷でき、ステンレス鋼に FSW 施工するのに十分な性能を有している。

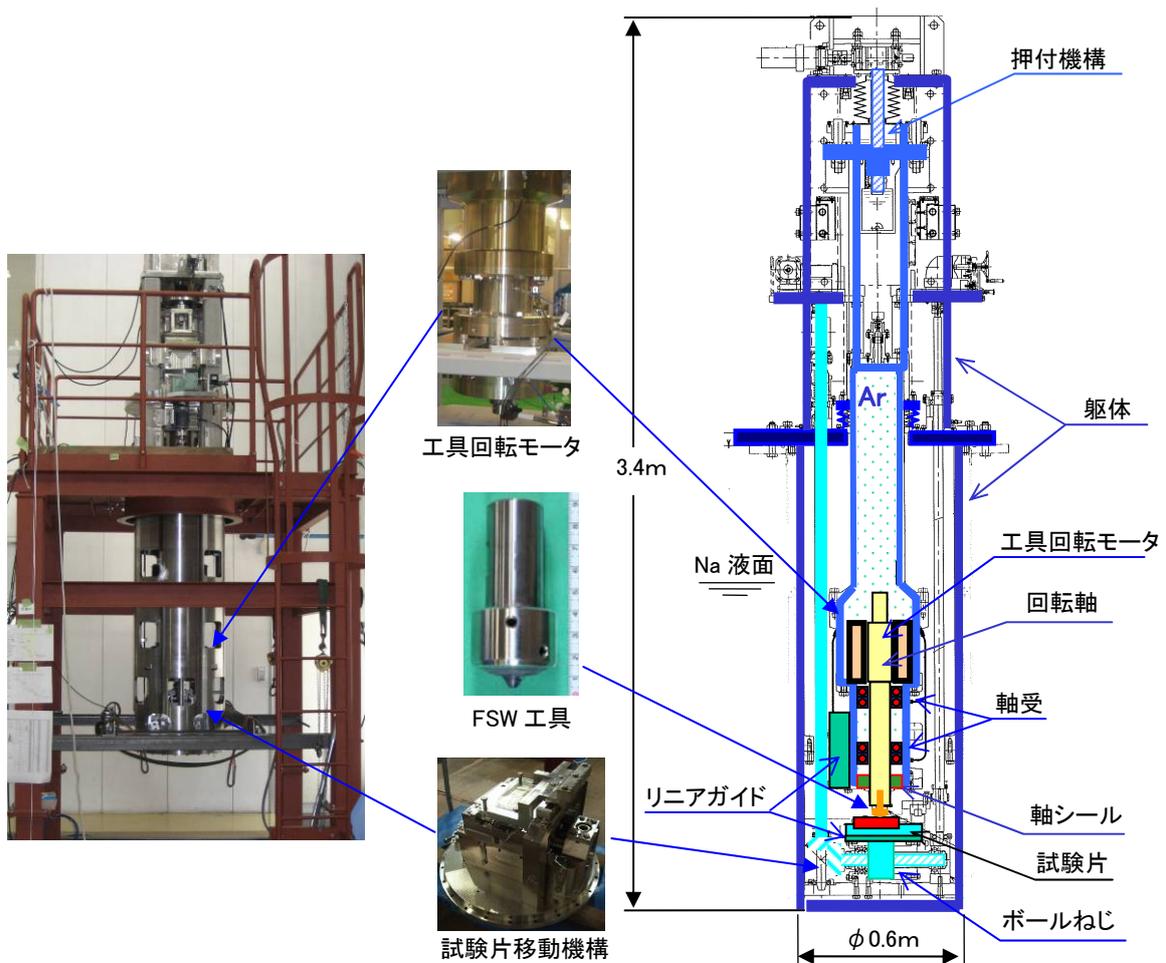


図-6 ナトリウム中補修装置試作機

この試作機を用いて、気中及びナトリウム中で FSW 施工条件を包絡する表-1 の条件で動作することを確認し、必要な性能を有していることを確認した。

表－1 試作機の性能

項目	目標仕様	達成性能(確認範囲)
使用温度	200°C±20°C	200°C (H23年度に220°Cまで昇温予定)
使用環境	液体ナトリウム中	液体ナトリウム中でFSW施工可能
施工荷重	30kN 以上	40kN
施工速度	1～20mm/min	1～20mm/min
工具挿入速度	0.1mm/min ～ 1.5mm/minを包絡	0.1mm/min ～ 5mm/min
工具回転数	1200min ⁻¹ 以上	1200min ⁻¹
工具回転トルク	80N-m 以上	100N-m

更に実際に気中およびナトリウム中でFSW施工を行った。SUS316L製の試験片に、深さ5mm、幅0.5mm、長さ38mmの模擬欠陥（スリット）を設け、模擬欠陥に沿ってFSW施工した後、X線透過探傷試験と断面の金属組織観察を実施して内部欠陥の有無を評価した。図－7に気中およびナトリウム中での欠陥補修試験で得られたFSW施工部の外観を示す。気中、ナトリウム中いずれも内部欠陥の無い施工部が得られ、ナトリウム中補修試験では、施工部にナトリウムが残留していないことを確認した。また施工荷重を、過去の委託業務^[1]で得られた条件である30kNから、20kN～25kNに低減することで、より安定して良好な施工部が得られることを見出した。



図－7 FSW施工部外観

3. 今後の展望

エンドホールレス施工については、穴ならし法は特に穴底近傍の施工に適している一方、穴埋め法は特に表面近傍の施工に適していることが分かったため、両方式を組み合わせることにより、エンドホールレス施工をより合理化する。最終的には、補修部の最小板厚が確保できるよう、エンドホールの深さを1mm以内にすることを目標とする。バリ抑制施工については、バリ抑制工具形状と施工条件を最適化するとともに、バリ除去・回収機構を開発する。最終的には、プラント運転に影響がでないよう、バリの大きさを5mm以下にすることを目標とする。また、ナトリウム中補修装置の開発については、試作機を用いたナトリウム中補修試験を実施し、適正施工範囲を評価する。

4. 参考文献

- [1] 平成 18-20 年度 文部科学省 原子力システム研究開発事業 「液体金属中で適用可能な摩擦攪拌接合補修技術の開発」 成果報告書