

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

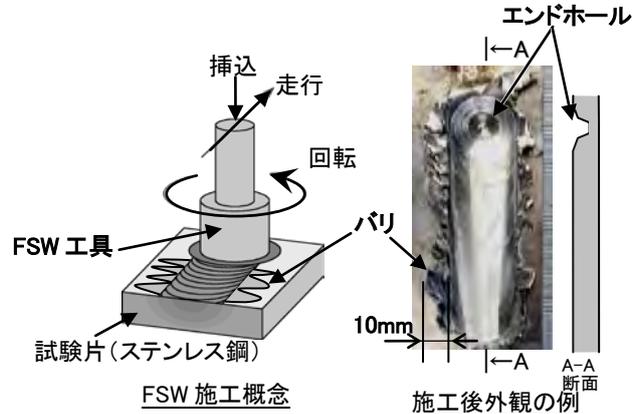
(研究開発期間) 平成21年度～23年度

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、ナトリウムを満た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

ステンレス鋼への適用は難易度が高く、実績が乏しかった。そこで、平成20年度までにステンレス鋼への施工方法を確立し、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た。本稿では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、施工部の周囲に幅10mm程度のバリが発生し、FSW工具を引き抜いた後に深さ6mm程度の凹み（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、バリは施工部から剥離すると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。そこでこれらの解消策について試験で有効性を評価した。

エンドホールに対し、表－1に示す「穴ならし法」「穴埋め法」「2段階施工法」の3種類の解消策を検討した。

穴ならし法は、段階的に形状が平坦となる8種類の工具を用いることで図－2に示すようにエンドホールを2.7mm（工具外周部で1.2mm）まで浅くでき、引張強度は母材と同等であった。ただし施工の手間と埋め戻し深さに課題が残った。

穴埋め法は、圧入荷重を約1kNから30kNまで段階的に増加させ、穴埋め工具の座屈変形を防止することで図－3に示すように完全に埋めることができた。ただし穴底の引張強度は母材の65%程度に留まり、接合品質に課題が残った。

2段階施工法は、穴埋め施工で接合不良が生じにくい半球状の曲率を見出すことで図-4に示すように半球状の穴ならしと穴埋めをそれぞれ1回実施することで強度低下を起こすことなく2~3mm埋め戻せることができた。施工条件や工具の放熱防止策などを試みたものの、1回の埋め戻し量を改善することはできなかつたため、2段階施工法を2~3回繰り返すことで深さ1mm以下にできると結論付けた。

表-1 エンドホール解消策

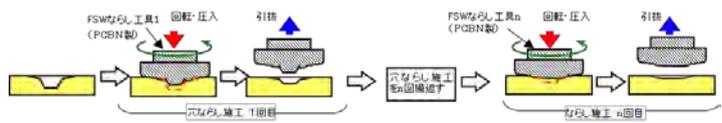
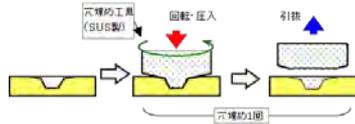
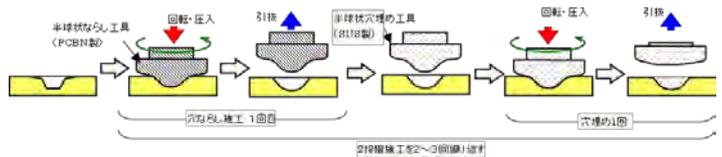
施工方法		深さ	強度	手間
穴ならし法	FSW工具よりも先端の突起が短い数種類のFSWならし工具を用いて、エンドホールをならす 	2.7mm △	100% ○	8工数 △
穴埋め法	エンドホールにフィットする形状のステンレス製の穴埋め工具を回転・圧入して埋める 	0mm ○	65% △	1工数 ○
2段階施工法	エンドホールを半球状に整形した後に半球状のステンレス製穴埋め工具を回転・圧入して埋める 	1mm ○	100% ○	4~6工数 △



図-2 穴ならし法の試験結果



図-3 穴埋め法の試験結果

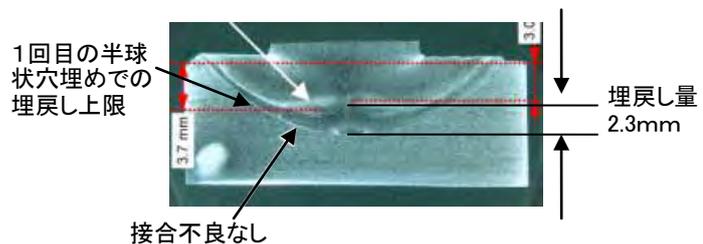


図-4 2段階施工法の試験結果

バリに対し、文献などにより発生原因を調べた結果、FSW工具最外周部の母材へのめり込み防止が有効であることが分かった。そこで図-5上段に示すような3種類のバリ抑制工具を試作し、FSW施工を行った。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3mm以下となり、目標とする5mm以下に抑制できた。一方、始端部についてはFSW工具を母材に挿し込む体積分がバリとなって周辺に押し出されるため、図-5のような工具形

状の工夫では解消できないと判断し、図-6に示すバリ切削回収機構を開発した。

	(a) 従来工具	バリ抑制工具 (— は従来工具形状、- - - は工具と母材の接触部)		
		(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 (注) 注: 始端部のバリを除去した後の写真	 定常走行部 始端部

図-5 バリ抑制試験の結果

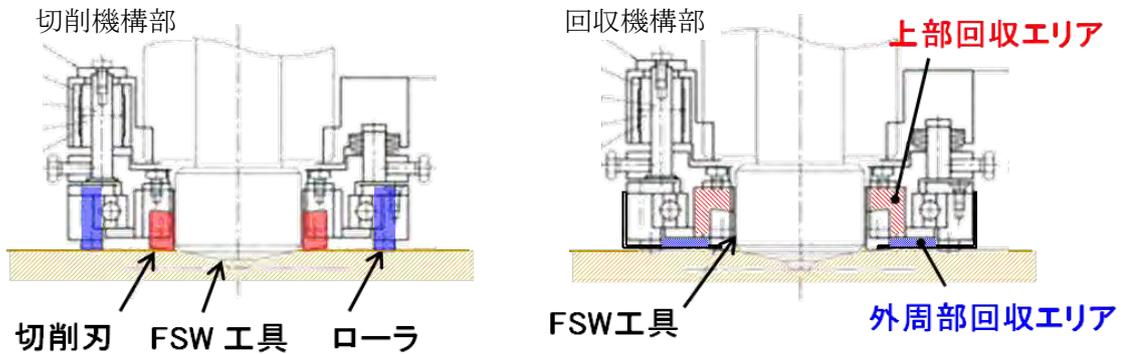


図-6 バリ切削回収機構

バリの切削機構部は FSW 工具の回転モーメントを利用して、FSW 工具の側面に設けた 2 枚の切削刃でバリが発生する間際で切削する構造とした。また切削刃が常に母材表面に位置するようローラにより潜り込み防止を図った。バリの回収機構部には切削刃の周囲と上方にポケット状の外周部回収エリアと上部回収エリアを設けた。前者はガス中施工で飛散するバリに効果があり、後者は液中施工で発生する流れに導かれたバリに効果があることが分かった。図-7に示すように双方の回収エリアによってガス中で 95%以上、液中ではほぼ 100%のバリが回収できることが分かった。バリ切削回収機構は後述するナトリウム中補修装置試作機に組み込んだ。

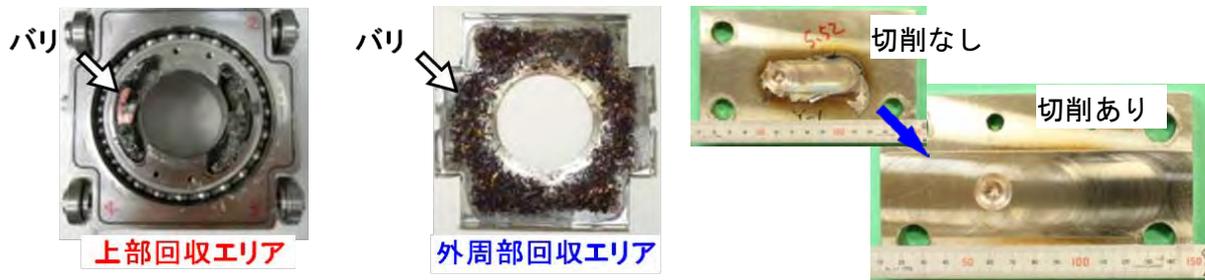
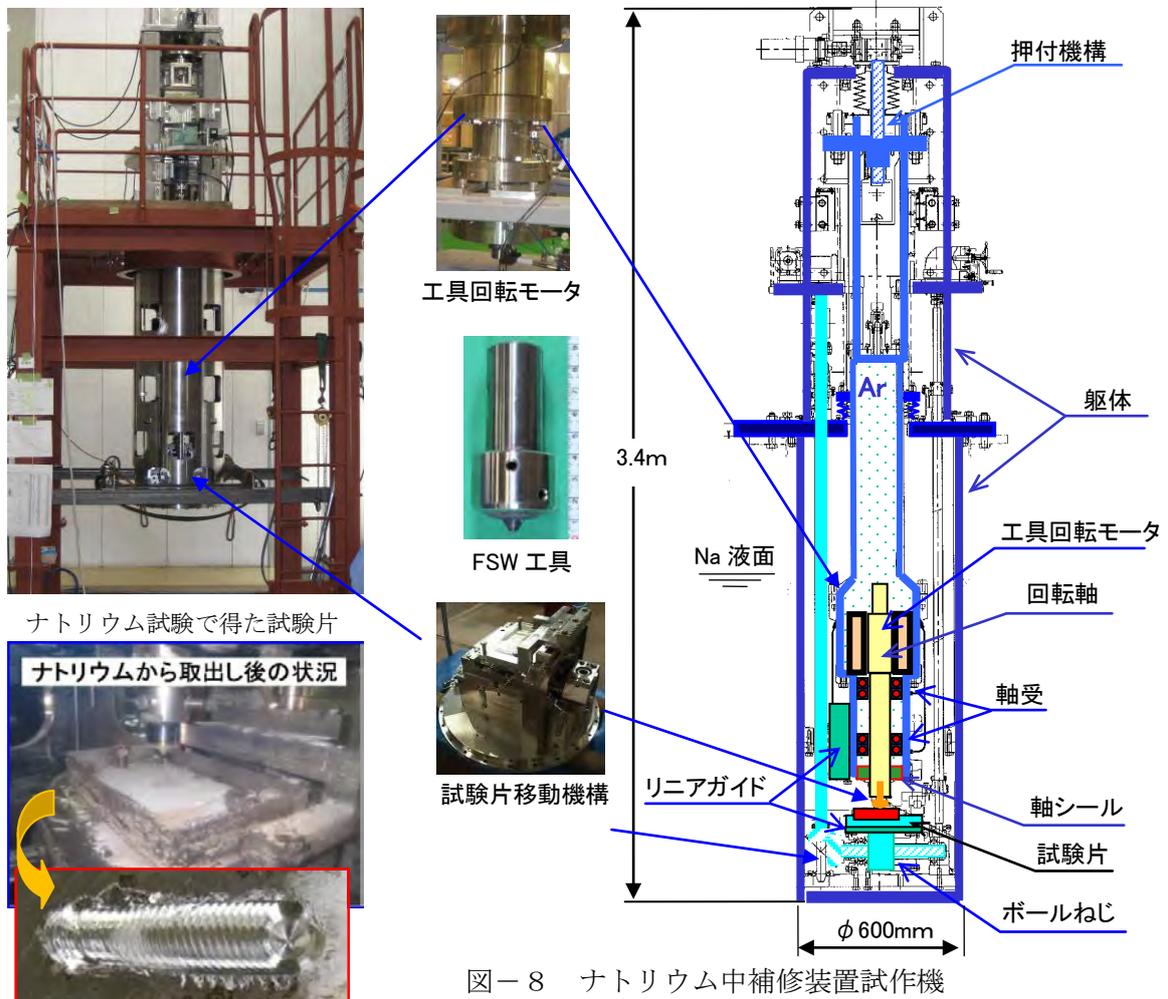


図-7 バリ切削回収試験結果

2.2 ナトリウム中補修装置の開発

原子炉内のどの部位で補修が必要になるか分からないため、部位に依らず必要となる「攪拌機構部」を開発した。化学的に活性で 200℃前後の液体ナトリウム中で、潤滑材がなくても機

能する軸受などを開発した。また平成 20 年度の研究で見出したナトリウム中での FSW 施工条件（最大荷重 30kN、最大回転数 1200min^{-1} ）を達成できるよう、工具回転モータなどの耐久性向上を図った。図-8 に試作したナトリウム中補修装置試作機を示す。原子炉内に挿入可能なように直径 600mm 程度の躯体内に実機補修で必要となる機械要素をすべて配置しつつ、FSW 施工中に作用する荷重に耐えられる剛性を確保した。



この試作機を用いて、ナトリウム中で FSW 施工が無欠陥で可能なこと（図-8 左下）、広範囲の施工条件でも良好な施工ができること、十分な耐久性を有することを確認した。

3. まとめと今後の展望

FSW 施工の課題であるエンドホール、バリの解決策を見出すことができた。またナトリウム中で動作する攪拌機構部の開発によって FSW 技術は FBR 炉内補修の現実的な選択肢となった。

今後は長尺アームや反力支持機構などについて、原子炉本体の設計と連携を図りながら開発を進めていくこととなる。

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