

課題目標・目的及び研究成果

<p>研究開発課題名（研究機関名）： <div style="text-align: center;">液体金属中で適用可能な摩擦攪拌接合補修技術の開発</div> <div style="text-align: right;">（三菱重工業株式会社）</div> </p> <p>研究開発の実施者 機関名：三菱重工業株式会社 代表者氏名：加藤 潤悟 機関名：国立大学法人大阪大学 代表者氏名：中田 一博</p> <p>研究期間及び予算額：平成18年度～平成20年度（3年計画） 344,220千円</p> <p>研究開発予算</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 30%;">平成18年度</td> <td style="text-align: right;">126,245千円</td> </tr> <tr> <td>平成19年度</td> <td style="text-align: right;">127,221千円</td> </tr> <tr> <td>平成20年度</td> <td style="text-align: right;">90,754千円</td> </tr> </table>		平成18年度	126,245千円	平成19年度	127,221千円	平成20年度	90,754千円
平成18年度	126,245千円						
平成19年度	127,221千円						
平成20年度	90,754千円						
項目	内容						
1. 目的・目標	<p>液体金属を冷却材に用いる高速増殖炉（FBR）の保守・補修性を向上させるべく、液体金属中の検査で検出できる軽微な欠陥（幅0.5mm、深さ5mm）を対象として、液体金属中で補修でき、補修部に液体金属が残ることなく、母材と同等の強度を有する補修技術を開発することを目的とする。平成18年度はアルミニウムなどで実用化されている摩擦攪拌接合（FSW）技術をFBRの原子炉構造材であるステンレス（SUS）材に適用し、補修に適した工具形状、施工条件などを検討する。平成19年度は亀裂を模擬した人工欠陥のFSW補修試験を行いつつ、FSW補修部の耐ナトリウム腐食性を確認する。平成20年度はナトリウム中でFSW補修の試験を行い、液体金属中で欠陥補修が可能であるか確認する。またFBRの炉内補修装置の概念を検討し、開発課題を抽出する。</p>						
2. 研究成果	<p>【研究開発項目（1）FSWによるFBR材料の欠陥補修技術の確立】 [得られた成果]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 成果 ・ 副次的な成果 ・ 論文、特許等 <ol style="list-style-type: none"> ① FSW工具の最適化検討、工具試作 FSW工具として耐摩耗性に優れた立方晶窒化ホウ素（PCBN）やタングステン合金を用いて、ピン長さ、ピン直径等をパラメータにFSW工具を試作し、施工試験を行った。これによって目標の5mmの施工深さを達成し、使用後も先端形状が残る高い形状安定性のある工具形状が分かった。工具素材は研究実績の豊富なPCBNをレファレンスに選定した。 ② 施工条件の最適化要素試験（位置制御方式） 工具回転数、施工速度、工具差込量を変えてFSW施工を行い、表面欠陥が発生しない施工条件範囲を得た。 ③ 施工条件の最適化要素試験（荷重制御方式） 工具回転数、施工速度、施工荷重を変えてFSW施工を行い、表面欠陥が発生しない施工条件範囲を得た。 ④ 補修部金属組織、機械的性質試験 施工条件の最適化要素試験（位置制御方式と荷重制御方式）で施工したFSW施工断面の金属組織観察を行った結果、FSW施工部にシグマ相を含む組織が生成したことが分かった。シグマ相を含むFSW施工部 						

の引張試験を行った結果、接合部強度は母材と同等以上であり、シグマ相が機械的性質に悪影響を与えていないことが分かった。

⑤ FSW 施工条件の検討

補修部金属組織、機械的性質試験の結果に基づき、最適な FSW 施工条件を検討した結果、気中では施工荷重 30kN において工具回転数 240～300rpm、施工速度 16～24mm/min の範囲がステンレス鋼に好適であることが分かった。また位置制御方式と荷重制御方式を比較した結果、荷重制御方式のほうが施工荷重を 30kN 以下に確実に制御できるので、位置制御方式より施工条件通りに施工できると考えられるため、炉内補修装置としてはより適切であると評価した。

⑥ 欠陥（亀裂）補修試験

グローブボックス等から構成する Na 中補修試験装置 I を設計・製作し、この装置 I 内部でナトリウムを注入した深さ 5mm、幅 0.5mm のスリット状人工欠陥を有する試験片に補修試験を行った。ナトリウム無しでの適正施工条件（施工速度 20mm/min）に比較して、7.5mm/min と低い施工速度にすることで入熱を増やし、ナトリウムの潤滑効果による入熱不足を補うことで、健全な施工結果を得られることが分かった。断面の金属組織観察を行い、ナトリウムは残留なく排出され人工欠陥は完全に補修されたことを確認した。引張強度は母材と同程度以上であった。

⑦ 補修部耐ナトリウム腐食性試験

ステンレス鋼板から製作した FSW 施工部を 500℃ のナトリウム（酸素濃度約 10ppm）に約 2000 時間浸漬した。浸漬前後の寸法、重量、外観の変化は FSW 施工部と母材との間に有意差がなかった。これらの結果より、FSW 施工部は母材と同程度の耐ナトリウム腐食性があり、シグマ相も耐ナトリウム腐食性に影響を与えていないことを確認した。

【研究開発項目（2）ナトリウム中試験】

[得られた成果]

① 装置設計、製作

ナトリウム中での FSW 補修試験を実施するための、Na 中補修試験装置 II の設計、製作を行い、装置の性能を確認することで、ナトリウム中補修試験を行う準備を整えた。

② ナトリウム中補修試験

Na 中補修試験装置 I 及び II を使用して、約 200℃ のナトリウム中で、ナトリウムを注入した人工欠陥付き試験片に対する補修試験を行った。ナトリウムによる潤滑効果及び放熱効果を考慮して、気中での施工条件に対して FSW 工具回転数の増加及び施工速度の低速化を図った。その結果、施工荷重 30kN、工具回転数 360～600rpm、施工速度 1～15mm/min の範囲から表面欠陥が発生しない施工条件範囲を得た。更に施工荷重 20kN でも工具回転数 600rpm、施工速度 1mm/min の施工条件で表面欠陥が発生しないことを確認した。

③ 補修部金属組織、機械的性質試験

ナトリウム中補修試験で得られた FSW 施工部のうち、表面欠陥のないものに対し、X線透過探傷試験及び断面の金属組織観察を行った結果、内部欠陥や、ナトリウムの残留がないことを確認した。また FSW 施工部に FBR での 40 年運転に相当する熱時効を与えた後、透過型電子顕微鏡観察を実施した結果、シグマ相は観察されなかったが、部分的にクロム炭化物の析出が観察された。熱時効処理前後でこの析出物の出現頻度や面積率に変化は認められなかった。この試験片に対して引張試験を実施した結果、全て母材で破断し、FSW 施工部の引張強度は母材と同等以上であることを確認した。従って、上

記クロム炭化物は引張強度に影響を与えていないことが確認され、FBRの長期間運転後もFSW補修部の健全性が保たれる可能性は十分であると評価した。

【研究開発項目（3）実機適用性評価】

[得られた成果]

① 原子炉内部の曲面への適用性評価

原子炉内で曲面部に FSW 施工する可能性を想定し、曲面に対して直線運動で施工可能な長さを評価した。工具の傾きに対する適正施工範囲を把握するため、平板に対して工具チルト角をパラメータとして気中で FSW 施工を実施し、FSW 施工部の X 線透過探傷試験及び断面の金属組織観察を行った結果、内部欠陥の無い FSW 施工部を得るために許容されるチルト角の範囲は、鉛直方向に対して -0.5° ～ $+8.0^{\circ}$ であると評価した。許容されるチルト角と原子炉内部に設置される炉心槽外面の半径 2500mm から算出される FSW 施工可能な円弧長さは、約 370mm と評価した。次いで、半径 2500mm の曲面試験片を用いて FSW 施工を実施した結果、良好な施工ビードが得られ、FSW 施工部断面の金属組織観察によっても、内部欠陥は認められなかった。これにより、曲面に対する施工性は良好であると評価した。

② 原子炉内部の溶接部への適用性評価

原子炉内で亀裂発生確率が高いと想定される溶接部（熱影響部、溶金部）に着目し、溶接部のある試験板を作成して、熱影響部及び溶金部近傍に気中で FSW 施工を実施した。この FSW 施工部に対して X 線透過探傷試験及び断面の金属組織観察を行い、溶接部及び熱影響部とも適正施工範囲は母材と同等であることを確認した。金属組織は、溶接部の粗大な凝固組織が FSW 施工により微細化組織へ改善されることを確認した。引張試験では FSW 施工部で破断することなく母材で破断し、母材と同等以上の強度及び伸びであることを確認した。

③ 炉内補修装置の検討

将来のFBR実用炉で使用することを想定し、FSWによる炉内補修装置の検討を行った。原子炉容器の搬入孔や高さなどの検討条件をまとめ、FSW工具ヘッド部、施工荷重の反力受け構造、施工方向への駆動機構、補修部へのアクセス構造を検討した。これら各構成要素をまとめて、炉内補修装置として、多関節アームにて補修部にアクセスし、耐熱モータ及びマグネットカップリングをFSW工具ヘッド部の駆動に採用する概念を構築した。また、炉内補修装置の実現に向けて検討すべき課題を整理し装置として摺動部のナトリウム中での適用性評価をする必要がある等の課題があること、バリ及びエンドホールの処理方法を確立する必要があることなどを明らかにした。

【事業全体】を通して

当初計画した全ての業務項目を実施し、所期の目標を達成した。計画時には想定できなかったFSW施工部のシグマ相については熱時効効果やナトリウム腐食との組み合わせによる影響評価を行い、補修部の強度に影響ないことを確認できた。ナトリウム中補修試験では広範囲にわたる好適施工条件が分かり、FBR原子炉内の補修装置の実現に向けた有用なデータを揃えることができた。

【論文、特許等】

三菱重工による発表：

・FR09(International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles) (学会発表。2009年12月を予定)

	<p>再委託先（大阪大学）による発表：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ Friction stir processing of 316L stainless steel plate, Science and Technology of Welding and Joining, 2009, vol. 14, No.3（論文発表）
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 実施計画の進捗 ・ 革新的なブレイクスルー ・ 成果及び発展性 	<p>【実施計画の進捗】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計画通り順調に進捗し、大きな成果が得られていると考える。 <p>【革新的なブレイクスルー】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ナトリウムをドレンすることなく欠陥の補修ができる要素技術の成立性が見通せた。本研究開発は、ナトリウム冷却炉の運転コストの低減に役立つものであり、経済的観点からも重要な成果である。 <p>【成果及び発展性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 要素技術としては成立の見通しが得られている。実際のプラントで利用可能にするためには、まだ克服すべき技術課題が残っているものの、その多くについて、次の開発ステップに関する具体的な構想が示されているので、実用化に向けた発展性が期待できる。
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究は計画通りに実施されており、今後の課題も明確になっている。現在実施中の「革新技術創出発展型研究開発」において、技術課題の解決を期待する。