

ナトリウム冷却型 FBR 向け摩擦攪拌接合補修装置の開発

Development of a repairing machine based on Friction Stir Welding (FSW) for the sodium coolant Fast Breeder Reactor

三菱重工業(株) 原子力事業本部	加藤 潤悟 ^{*1}	Jungo KATO
三菱重工業(株) 原子力事業本部	森本 将明 ^{*2}	Masaaki MORIMOTO
三菱重工業(株) 技術本部	篠原 種宏	Tanehiro SHINOHARA
三菱重工業(株) 技術本部	堀 匠	Takumi HORI
三菱重工業(株) 技術本部	渡部 裕二郎	Yujiro WATANABE
三菱重工業(株) 技術本部	藤谷 泰之	Yasuyuki FUJIYA
三菱重工業(株) 技術本部	道下 幸雄	Yukio MICHISHITA
大阪大学 接合科学研究所	中田 一博	Kazuhiro NAKATA
大阪大学 接合科学研究所	津村 卓也	Takuya TSUMURA

Abstract:

An in-vessel repairing machine for Fast Breeder Reactor (FBR) needs to work under liquid sodium environment. We have been worked the development of a repairing machine based on Friction Stir Welding (FSW) method. The experiment of repairing artificial crack in liquid sodium was successful by prototype FSW-repairing machine. In this report, we also introduce our studies on the particular problems of FSW-repairing such as burr and end hole.

Keywords: Friction Stir Welding, Fast Breeder Reactor, In-Service Inspection, Under the Liquid Metal Environment, Repairing Reactor Vessel Cracks

1. 概要

ナトリウム冷却型高速増殖炉(FBR)の炉内補修装置の実現を目指し、摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding : FSW)を応用してナトリウム中で使用できる補修装置の開発に取り組んでいる。試作した FSW 補修装置を用いてナトリウム中試験を実施し、模擬亀裂の補修に成功した。また FSW 補修で問題となるバリやエンドホールに対する取り組みについても紹介する。

2. ナトリウム中 FSW 補修技術の開発

FSW 技術[1]は、Fig. 1 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固相のまま塑性流動させて（攪拌して）接合する。この技術を使えば FBR の原子炉を、ナトリウムを抜かずに補修できる可能性がある。ナトリウムを抜かずに補修できるということは、崩壊熱を発生する燃料の一時退避が不要となり、補修期間の大幅短縮につながる。本章では、FBR の原子炉内構造物をナトリウム中で補修する方法の実証を目指して実施した、① 最適な FSW 工具の開発、② 最適な施工条件の抽出、③ ナトリウム中での原理確認について紹介する。

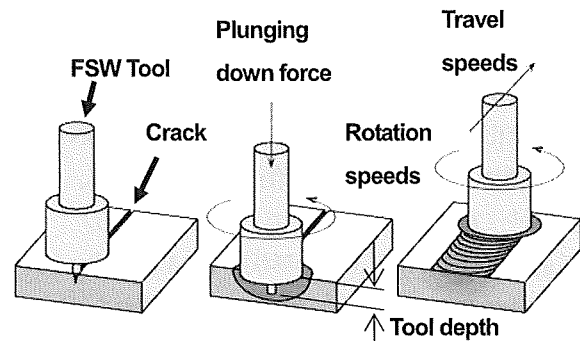


Fig.1 Principal of repair with FSW method

2.1 FBR の補修対象部位

最初に補修対象である FBR の原子炉について述べる。

材質はステンレス鋼であり、FSW 開発の初期に接合対象とされたアルミなどの軽金属よりも硬い。そのため FSW 工具には耐摩耗性の優れたものが必要となる。

補修部位は Fig.2 に示すように原子炉容器や炉心支持構造が考えられる。前者はナトリウム液位を下げ、補修箇所をカバーガス中に露出させる余地があるが、後者は燃料よりも下であるため、燃料退避しない場合は約 200°C のナトリウム中で補修することとなる。また補修装置は炉上部からアームを長く伸ばしてアクセスするため、FBR の燃料交換機の駆動力を参考に、FSW 施工荷重は最大 30kN 程度に設定した。

補修対象亀裂のサイズは幅 0.5mm、深さはその 10 倍の 5mm とした。ナトリウム炉内では腐食よりも、クリープ

*1) 〒652-8585 兵庫県 神戸市 兵庫区 和田崎町 1-1-1、
新型炉プラント設計課、E-mail: jungo_kato@mhi.co.jp

*2) 2012 年 6 月現在は日本原子力研究開発機構

疲労などによる破損モードが想定される。クリープ疲労による亀裂発生は設計段階で十分な余裕を持って防止できるが、万一の場合として想定する。このことはFBR実用化に向けた炉内検査技術の開発[2]ともリンクする。開発中のナトリウム中目視センサは0.3mm程度の解像度を目標としており、幅0.5mmの亀裂を発見できるとして上記サイズを設定した。

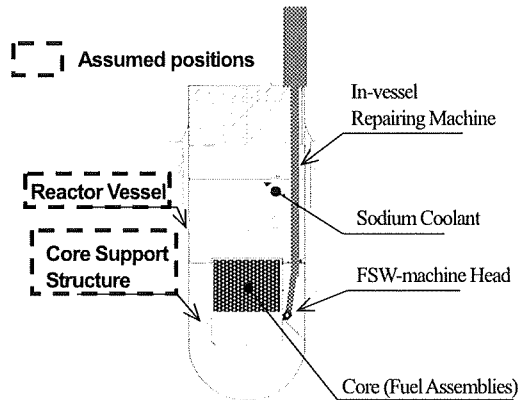


Fig.2 Assumed repairing positions

2.2 最適なFSW工具の開発

ステンレス鋼の補修に適用するため、FSW工具の材質は鋼用FSW工具材として豊富な研究実績を有している立方晶窒化ホウ素(PCBN)材を採用した。PCBNは耐摩耗性に優れ、難削材の高速切削工具に用いられ、また化学反応性に富むナトリウム中でも安定している。

最適化されたFSW工具の形状をFig.3に示す。図中の黒い部品がPCBNであり、面取り加工がされたピン部とスクリー溝を設けたショルダー部からなる。ピン部はFSW工具を施工部に差し込む(突入させる)際に、施工部を速やかに加熱し軟化させ、工具自身の破損を防止するとともに、亀裂の底に到達して攪拌接合させる働きがある。ショルダー部は摩擦加熱域を拡大し、接合方向に軟化域を拡げて連続的な接合を可能にさせる働きがある。

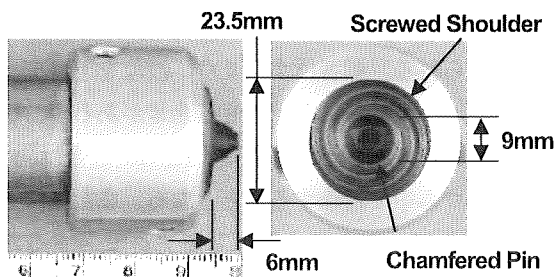


Fig.3 Appearance of the optimized FSW tool

PCBN部の直径(24mm)やピン部の長さ(6mm)およびスクリー溝などの形状は、約30種類の試作工具より比

較選定した。選定は①深さ5mm以上の攪拌ができること②十分な発熱があり内部欠陥が発生しないこと③工具の摩耗が少なく折損が生じないこと、などの視点で行なった。

2.3 最適な施工条件の抽出

30kN前後の施工荷重で深さ5mmの亀裂を無欠陥で補修するための施工条件を抽出した。FSW工具の回転数、施工速度、施工荷重をパラメータに大気中での比較試験を実施した。Fig.4に施工荷重30kNと35kNの結果を示す。工具回転数に応じて、適度な施工速度であれば30kNの施工荷重で無欠陥補修でき、母材と同等の接合強度が得られることが判った[3]。また施工速度を更に下げると共に工具回転数を増加させれば施工荷重30kN以下でも補修できることが示された。尚、工具回転数が高く、施工速度が小さ過ぎると施工部が過熱し、FSW工具が空回りして攪拌不良が生じることも判った。これらのデータがナトリウム中での施工条件に役立てられた。

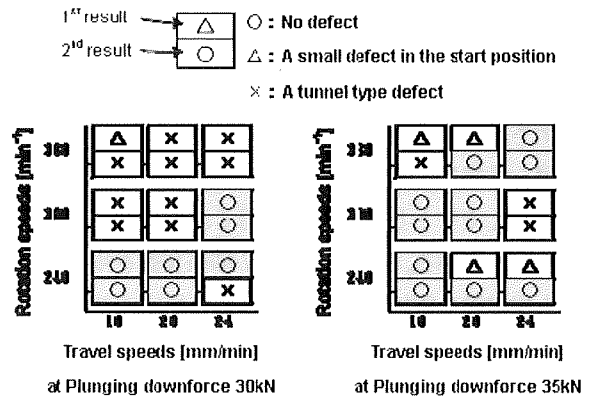


Fig.4 Results of FSW tests

また原子炉内で亀裂発生確率が高いと想定される溶接工作部に着目して、熱影響部及び溶金部近傍に気中でFSW施工を実施し、施工条件に違いがないことを確認した。更に、炉内機器の表面は曲面である場合が多いので、曲面に対して直線運動で施工可能な長さ进行评估した。Fig.5に示すように-0.5~+8度の傾きで施工できることが判り、仮に対象部位が直径5mの曲率であれば370mm程度の施工ができる。

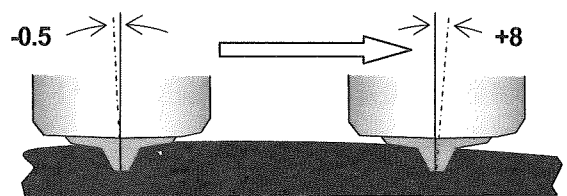


Fig.5 FSW on curved surface

2.4 ナトリウム中での原理確認

FSW 施工によって亀裂内にナトリウムが残留することなく無欠陥で補修できることを確認するため、Ar ガスを充填したグローブボックス内にナトリウムポットを設置し、ナトリウム中 FSW 試験を行った。Fig.6 に試験体系を示す。

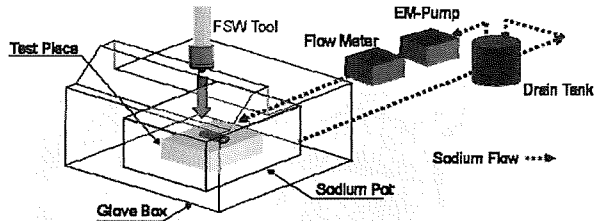


Fig.6 In-Sodium Test Facilities

ステンレス製の試験片には幅 0.5mm、深さ 5mm、長さ 60mm の模擬欠陥（スリット）を加工し、事前にナトリウムを充填した。

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工具回転数の増加及び施工速度の低速化を図りながら、無欠陥補修できる施工条件を見出した。Fig.7 に施工条件範囲を示す。工具回転数を 480min^{-1} に増やし、施工速度を $10\text{mm}/\text{min}$ 以下に抑えることで、ナトリウム中でも無欠陥で FSW 施工するだけの発熱が得られることが判った。

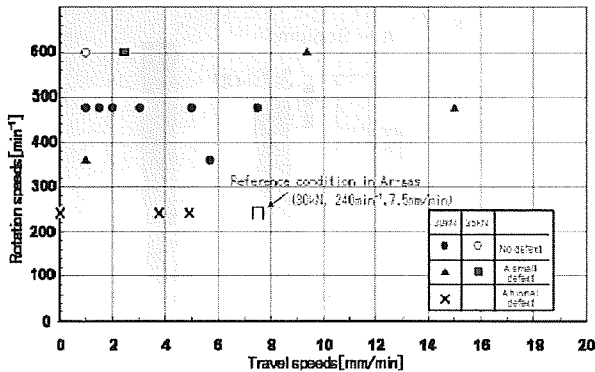


Fig.7 Results of in-sodium test

Fig.8 に代表的な施工部の外観、放射線探傷画像および金相断面を示す。金相断面からナトリウムの残留がないことが確認された。また FSW 施工部位から引張試験を採取して、FBR の40年運転に相当する熱時効を与えた結果、引張強度は母材と同等以上であることを確認した。

更にナトリウム浸漬試験を実施し、酸素濃度 10ppm、ナトリウム温度 500°C で 1800 時間に渡る腐食試験でステンレス母材と耐腐食性に差がないことを確認した。

以上から FSW がナトリウム中の炉内補修技術として有望であることが確認された。

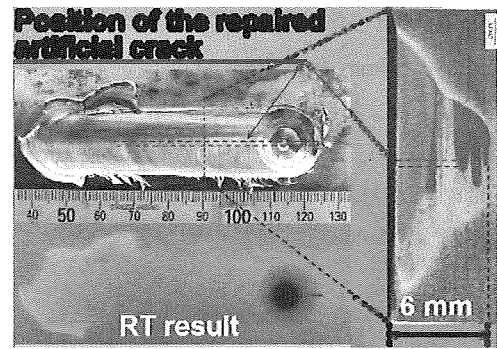


Fig.8 Appearance and cross section of the FSWed weld

3. ナトリウム中 FSW 補修装置の開発

本章では炉内補修装置の実現に向けて実施した、① FSW 補修後のバリ等の解決、② ナトリウム中で使用できる攪拌機構部の開発について紹介する。

3.1 FSW 補修後のバリ等の解決

Fig.8 にも示したように FSW 施工では施工部にバリや FSW 工具を引き抜いた後にくぼみ(エンドホール)が残る。Fig.9 にバリとエンドホールの典型的な大きさを示す。

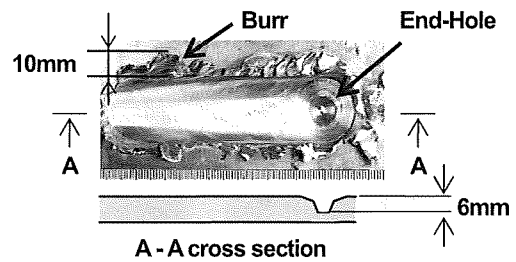


Fig.9 Typical size of the burr and the end-hole

バリは原子炉内に浮遊して炉内機器を傷つけ、機能を劣化させる懸念があり、エンドホールは構造物本来の板厚が低減する分だけ強度を低下させる。

バリは、FSW 工具が補修部にめり込み過ぎることが主要因である。そこで母材へのめり込みが抑制されるよう Fig.10 に示すように FSW 工具のショルダー径を大きくすることでバリの発生を抑制した。

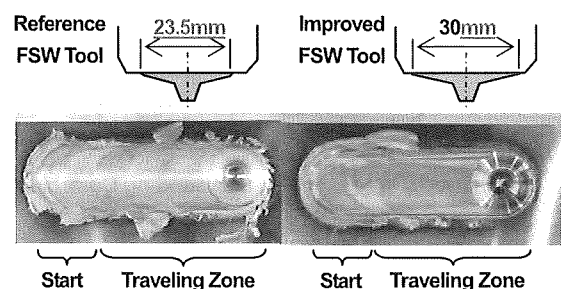


Fig.10 Result of burr reduction

Fig.10 に示したように FSW 工具の改善によってバリの大きさは 6.5mm から 3mm 以下へ半減したが、依然として始端部には大きなバリが発生している。そこでバリを切削するため、FSW 工具の周囲に切削刃を設置し、FSW 工具の回転力の一部を利用する切削機構を開発した。Fig.11 にバリの切削機構を示す。

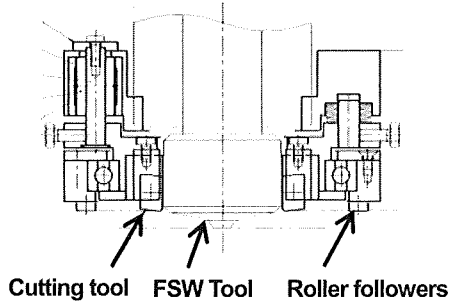
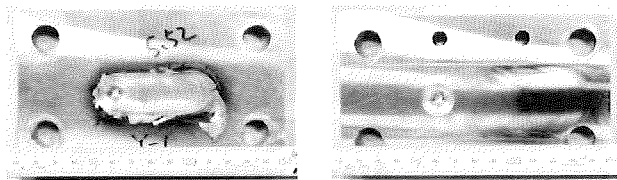


Fig.11 Deburr mechanism

切削刃にはナトリウムとの共存性を考慮し、チタン膜コーティング超硬材を採用した。また切削刃が施工面より僅かに深く切り込めるように切削機構の四隅にローラフォロアーを設け、皿バネによって一定荷重で密着できるようにした。バリ切削機構によるバリ除去状況を Fig.12 に示す。



Before Deburr After Deburr

Fig.12 Effects of deburr mechanism

切削したバリを回収するため、バリの飛散過程を観察して、Fig.13 に示すように切削刃の周囲および上部にバリ回収スペースを設けた。

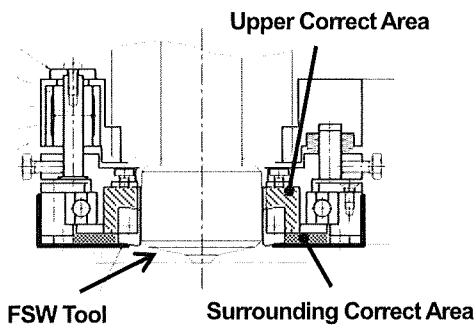


Fig.13 Burr correct areas

気中と水中で回収したバリの回収状況を Fig.14 に示す。水中およびナトリウム中では切削刃の回転によって生じ

た旋回流でほとんどのバリが上部の回収スペースへ導かれる。そのため FSW 工具周辺の隙間からのバリの漏れが減り、気中よりも 30%回収率が向上することが確認された。またバリを漏れなく回収できるように回転部とバリ回収構造の隙間を調整することで、ほぼ 100%のバリを回収できる見通しが得られた (Fig.15)。

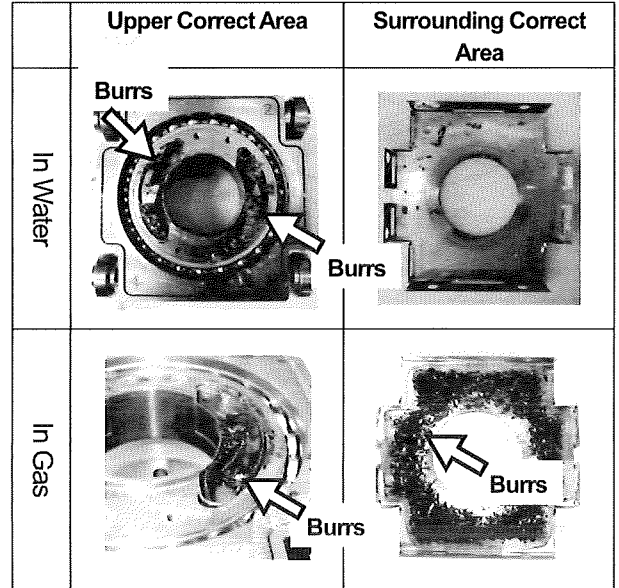


Fig.14 Results of burr correcting test

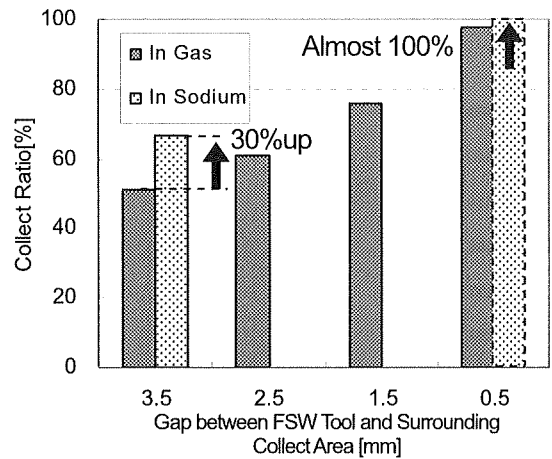


Fig.15 Burr correct ratio

次にエンドホール対策について述べる。Fig.16 は FSW 施工部の末端に残るエンドホールの形状を模擬した試験板の断面である。

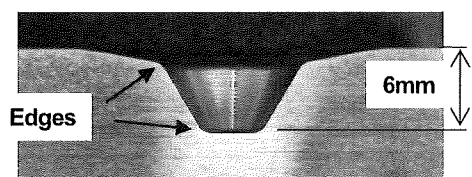


Fig.16 Mock of end-hole

エンドホールの形状は Fig.16 に示すように複数のエッジを有しているため、エッジを均す「穴ならし」と FSW と類似の施工技術である摩擦圧接による「穴埋め」の 2 つのプロセスを組み合わせた。

穴ならしと穴埋めの組み合わせでエンドホールを解消する概念を Fig.17 に示す。穴ならしでは、PCBN 製で半球ドーム状の先端部を有する穴ならし工具を用いてエンドホールを半球状の穴に均す。次に施工部と同じステンレス製で半球ドーム状の先端部を有する穴埋め工具を用いて摩擦圧接で工具先端をエンドホールに接合する。

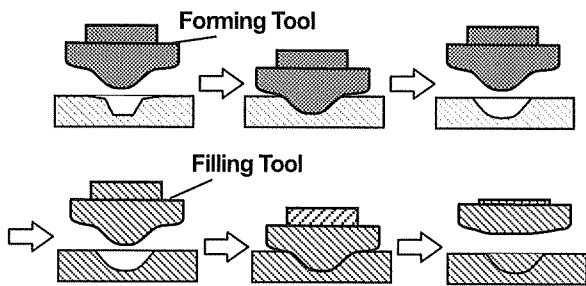


Fig.17 Combination of forming and filling processes

開発した穴ならし工具を Fig.18 に、穴埋め工具を Fig.19 に示す。穴ならし工具は先端の半球部の曲率半径を 15mm とし、溝を付けることで深さ 6mm のエンドホールの底面を均せることができた。穴埋め工具も半球部の曲率半径は 15mm とし、摩擦圧接に必要な摩擦熱が工具軸側に逃げないように断熱性を高める等の工夫をした。

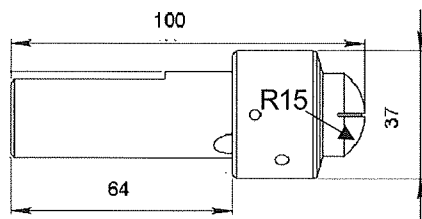


Fig.18 Forming tool

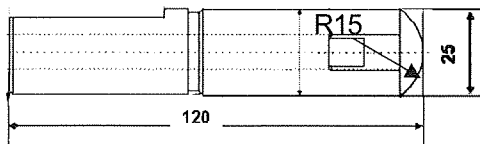


Fig.19 Filling tool

Fig.20 に穴埋め後の施工部断面を示す。半球状に均された面は母材と同等の強度で接合した。また母材表面より 3.7mm 程度の深さに、工具脱離を示す内部界面が生じた。このことは穴埋めプロセスの終了時に、穴埋め工具を施工部から容易に脱離できることを示す。一方で、深さ 6mm のエンドホールを 2mm 程度埋め戻すに留まることから、

エンドホールを完全に埋めるには Fig.17 のプロセスを 3 回程度繰り返す必要があることが判った。

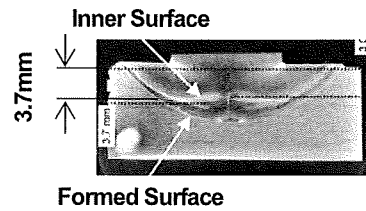


Fig.20 Cross section of filled end-hole

3.2 ナトリウム中で使用できる攪拌機構部の開発

FBR 実用炉を想定した炉内補修装置の概念を Fig.21 に示す。炉内補修装置は長尺の多関節アームの先端に攪拌機構を有する FSW ヘッド部を装備することとなる。

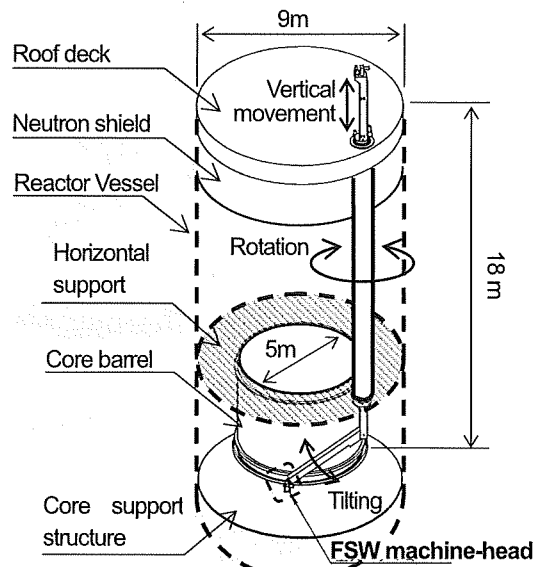


Fig.21 Concept of the in-vessel repairing machine

多関節アームに関しては、FBR 実用炉の寸法・形状・補修対象部位に適した開発が必要である。そこで本研究では炉の大きさや補修部位によらず、常に必要となる FSW ヘッド部を対象に開発を行なった。FSW ヘッド部は補修対象と直接接する部分であり、FSW 工具、工具モータ等を含む。ナトリウム中での FSW 施工条件を踏まえて、FSW ヘッド部の主要な設計要求を Table1 に示す。

Table 1 Design spec.

Item	Spec.
Plunging down force	Max. 30 kN
Rotation speeds	Max. 1200 min ⁻¹
Rotation torque	Max. 100 N-m
Operating temp.	200 degree C
Environment	sodium

工具回転数は補修部へ FSW 工具を差し込む際に十分な発熱が得られるよう最大値を 1200min^{-1} としている。FSW ヘッド部は 200°C のナトリウム中環境に置かれるため、軸受、軸シール、直動機構、ボールねじなどの機械要素は耐熱性とナトリウム共存性に配慮して材質選定した。また高温モータは FSW 施工に十分なトルクを確保する観点からモータ素線の耐熱化、絶縁強化を行なった。Fig.22 に FSW ヘッド部の試作機を示す。FSW ヘッド部のサイズは直径 600mm 以下とし、可能な限り小型化した。

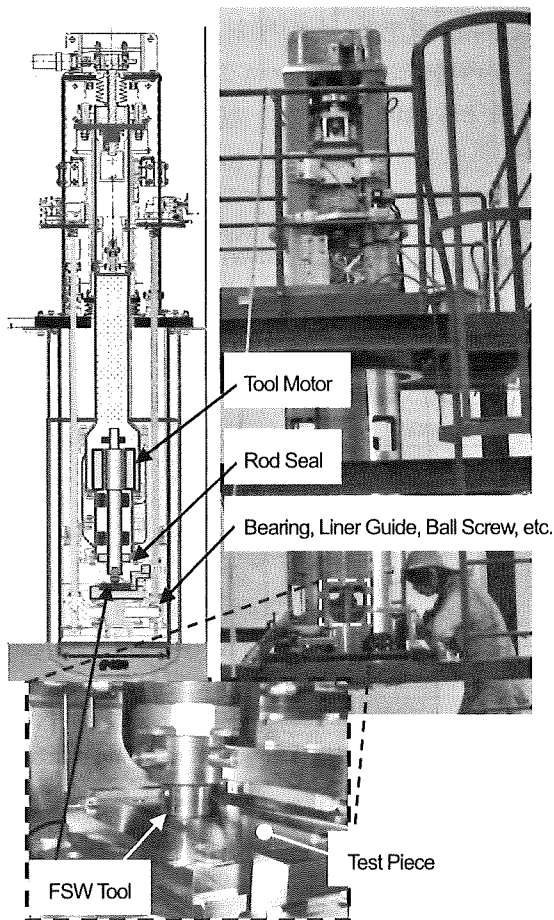


Fig.22 FSW machine-head test facility

200°C の高温ガス中で動作確認した後に、三菱重工業が所有する多目的ナトリウム試験ループへ設置して、幅 0.5mm、深さ 5mm のスリット付きの SUS316L 鋼試験片をナトリウム中で FSW 補修した。13 回におよぶ施工結果から Fig.7 で示した施工条件範囲で無欠陥補修できるこ

とを確認した。また装置に焼付きや過大摩耗は発生せず、FSW に支障のない構造であることが確認された。

4. まとめ

ナトリウム冷却型 FBR の炉内補修技術として FSW が適用可能であることが確認された。最適な FSW 工具や施工条件を抽出し、バリやエンドホールといった FSW 特有の課題解決策の研究を踏まえて、 200°C ナトリウム中で使用可能な FSW ヘッド部を製作し、ナトリウム中で問題なく FSW 補修ができることを確認した。エンドホール対策のナトリウム中での確認や、炉内補修装置のアーム機構の開発など、今後の実用化に向けた開発・検証作業は残っているが、FSW を用いた FBR の炉内補修を実現性のある技術選択肢とすることができた。

尚、これらの成果は電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、三菱重工業(株)が実施した平成 18~20 年度「液体金属中で適用可能な摩擦攪拌接合補修技術の開発」および平成 21~23 年度「液体金属中で適用可能な摩擦攪拌接合補修装置の開発」の研究で得られたものである。

参考文献

- [1] 石川 武、藤井 英俊、玄地 一夫、崔 靈、松岡 茂樹、野城 清、“摩擦攪拌接合による薄板オーステナイト系ステンレス鋼の継手特性”、溶接学会論文集、Vol.24 (2006)、No.2、p.174-180
- [2] 山下卓哉、田川明広「Na 中目視検査用高解像度センサの開発」、原子力学会 2009 年秋の大会。
- [3] Y. C. Chen, H. Fujii, T. Tsumura et al. , “Friction stir processing of 316L stainless steel plate”, Science and Technology of Welding and Joining, Vol.14, 2009, p.197-201.
- [4] M. Morimoto, J. Katoh, et al. , “Development of the in-vessel repairing technology with friction stir welding method for FBR”, 2009 International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles.

(平成 24 年 6 月 20 日)