

液体金属中腐食挙動における照射影響に関する研究

Influence of irradiation on the liquid metal corrosion behavior

大久保 成彰

Nariaki Okubo

友部 政勝

Masakatsu Tomobe

原子力機構

（概要）本研究では、ADS ビーム窓候補材の一つである T91 鋼（フェライト鋼）に対して、イオン照射による中性子模擬照射後、鉛ビスマス液体金属中の浸漬試験を行い、液体金属中材料腐食に及ぼす照射の影響を評価した。その結果、トリプル照射を受けた T91 では、液体金属中において、溶存酸素が少ない環境にもかかわらず、照射部では酸化皮膜形成が促進されることが明らかとなった。

キーワード：液体金属 腐食 照射 フェライト鋼 ADS

1. 目的

原子力機構では、原子力発電所から出る使用済み核燃料に含まれるマイナーアクチノイド等の長寿命放射性核種を核変換し、減容及び有害度を低減するために加速器駆動システム（ADS）の研究開発を進めている。ADS は、主に高エネルギー陽子加速器と未臨界炉から構成されるシステムであり、炉心部の冷却材と核破砕中性子源として、化学的に安定である液体鉛ビスマス共晶金属（LBE）を用いるという特徴がある。LBE 中では、炉内機器材料であるフェライト鋼は表面保護酸化被膜がなくなると腐食が加速される。LBE 中の ADS 候補材料の腐食挙動の把握は炉内機器の設計に不可欠であり、陽子加速器側の高真空と炉心部を隔てる安全上重要な機器の一つであるビーム窓や燃料被覆管の健全性（寿命）を左右するため、ADS 実現に向けた重要な研究課題の一つである。LBE 中の材料腐食挙動については最近調べられつつあるが、その多くが未照射の実験データであり、中性子照射の影響はその実験の困難さからほとんど調べられていない。核分裂中性子は、フェライト鋼中に、主に弾き出し損傷を導入するが、核変換生成ガスの導入は限定的である。一方、核破砕中性子照射により材料中に導入される H や He の割合を ADS に最適化できる強力な中性子源が存在しないため、ADS 材料での複合照射影響を精度よく推定するためには、トリプスイオン照射による近似評価が有効である。本研究では、イオンビームを用いた ADS 模擬照射（トリプル照射）により、LBE 中材料腐食挙動へ及ぼす照射の影響を調べることを目的とした。

2. 実施方法

ADS ビーム窓候補材の一つである T91 鋼に、MT チャンバーにてイオン照射を行った。タンデム加速器による Fe イオン（中性子による弾き出し損傷を模擬）、イオン注入装置による H イオン（陽子照射及び核変換生成水素ガスを模擬）及びシングルエンド加速器による He イオン（核変換生成ヘリウムガスを模擬）の 3 つのイオンを同時に使用した、トリプルビーム照射を、ADS 実機及びその照射実験施設の照射条件に合わせて行った。照射温度は 450℃とし、照射損傷量は、試料表面にて 8 dpa（dpa：弾き出し損傷量の指標）になるように照射を行った。試料の半面を Al フォイルでマスクすることにより、同一試料上にて、照射及び未照射領域とした。図 1 に、今回用いた静的な腐食試験装置の模式図を示す。トリプスイオン照射後、溶存酸素濃度を 10^{-9} wt%程度（低酸素濃度）に制御し、照射温度と同温度である 450℃の LBE 中にて約 300 時間の浸漬試験を行った。浸漬試験後、LBE を溶解除去及び樹脂埋め研磨の後、走査型電子顕微鏡（SEM）により試料表面腐食層の断面組織観察を行った。また、EDS により、断面の元素分析も実施した。

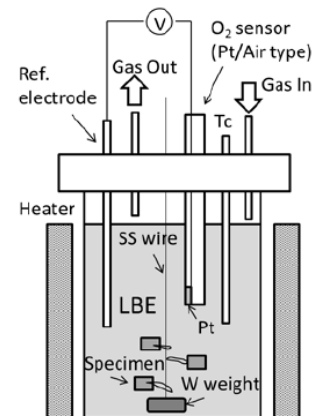


図1 静腐食試験装置模式図

3. 結果及び考察、今後の展開等

ADS ビーム窓条件にて、MT チャンバーを用いた 450℃のトリプル照射後に、JAEA 東海にて、同温の LBE 中にて約 300 時間の浸漬試験を行った。その結果、トリプル照射が腐食（表面酸化皮膜形成）に及ぼす照射効果を初めて見出した。図 2 に示すように、未照射エリアでは、薄い酸化皮膜が観察され、照射エリアは、およそ 2 倍の厚さの酸化皮膜で覆われている。弾き出し損傷のみの場合、T91 では、照射による酸化皮膜形成への影響はみられず、また照射量依存性も観察されなかった。未照射部で 2 層酸化皮膜が形成しない程度の短時間の浸漬にも関わらず、照射部では、表面が Fe 系酸化物 Fe_3O_4 、その内側にスピネル系酸化物 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{O}_4$ の 2 層酸化皮膜が形成した。照射部では約 2 倍の厚さであったが、これは、未照射の数千時間の長時間の LBE 中浸漬試験結果[1]に匹敵する皮膜厚さである。照射部の酸化皮膜形成が促進された理由としては、450℃の照射により導入されて残留したボイド等の空孔集合体が、450℃の LBE 中にて空孔に熱分解し、空孔機構により Fe や Cr、格子間機構により O の拡散が促進されることによって、低い酸素濃度でも効率的に酸化し、2 層酸化皮膜へと成長したものと考えられる。 10^{-9} wt% という、 Fe_3O_4 が形成するかしないかの低酸素濃度においても酸化皮膜が形成した理由としては、図 3 に腐食試験中の LBE 中の溶存酸素濃度を示すが、試験開始直後の比較的高い濃度の溶存酸素が、照射による欠陥によって拡散し、効率的に酸化反応に寄与したためと考えられる。今後、TEM による微細組織評価を行い、詳細な機構について調べる予定である。

照射条件：8 dpa, 15 appmHe/dpa, 150 appmH/dpa (ADSビーム窓条件)
浸漬条件：低酸素濃度： $1\sim 2 \times 10^{-9}$ wt% 450℃, 330時間

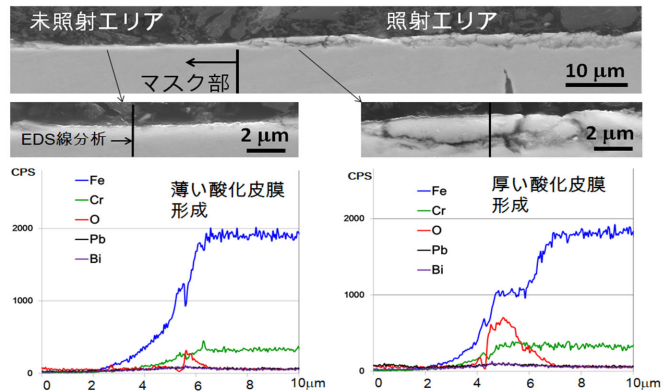


図 2 照射による表面酸化皮膜形成に及ぼす影響

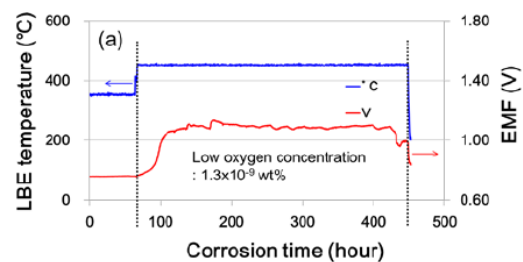


図 3 腐食試験中の LBE の溶存酸素濃度及び温度履歴

4. 引用(参照)文献等

[1] A. Heinzl et al. JNM 448 (2014) 163-171