

FeCrAl 系合金の α' 相析出に及ぼす照射条件パラメータの影響評価

Effect Evaluation of Irradiation Condition Parameters on α' phase precipitation in FeCrAl-based system

山下 真一郎¹⁾ 阿部 陽介¹⁾ 大久保 成彰¹⁾ 鶴飼 重治¹⁾ 佐々木 泰祐²⁾
Shinichiro YAMASHITA Yosuke ABE Nariaki OKUBO Shigeharu UKAI Taisuke SASAKI

¹⁾原子力機構 ²⁾物質・材料研究機構

（概要）

事故耐性燃料被覆管として開発が進められている FeCrAl 系合金の脆化相 (α' 相) の析出挙動に着目し、R5 年度も化学組成、損傷速度、損傷量を実験パラメータに目標照射量までのイオン照射実験を継続し、 α' 相の析出マップ整備のためのデータ取得を進めた。

キーワード：事故耐性燃料被覆管、FeCrAl 系合金、イオン照射、 α' 相、微細組織

1. 目的

2011 年に発生した東京電力福島第一原子力発電所 (1F) 事故を受けて、既存の燃料部材に比べて事故耐性の高い新型燃料部材、いわゆる事故耐性燃料 (ATF: Accident Tolerant Fuel) の需要が世界的に高まっている。耐熱鋼として広く知られている FeCrAl 系合金は、1F 事故で経験した過酷事故 (SA: Severe Accident) 時に、その初期段階で生じた被覆管酸化反応を低減 (従来材であるジルコニウム基合金に比べて酸化速度を 2 桁以上低減) し、水素と熱の発生を抑制することで過酷事故への進展を遅らせる、もしくは過酷事故そのものを生じさせない既存軽水炉の安全性を向上させる概念として早期実用化が期待されている。FeCrAl 系合金に関しては米国での先行研究の報告 [1] があり、Fe-xCr-yAl-zY モデル合金 ($X=5\sim 25$, $y=4\sim 8$, $z=0\sim 3$ (wt%)) に対して、様々な材料特性が調査されている。FeCrAl 系合金を軽水炉の炉心材料として適用するに当たっては、中性子照射下での材料脆化、とりわけ 288~360℃の低温で長期間の照射を受けたことによりその発現が懸念される、脆化相 (クロムリッチの α' 相) の析出挙動 (化学組成、照射温度、損傷速度、損傷量、初期組織等との関係) が重要であることが指摘されている。

以上のことから、本研究では FeCrAl 系合金の脆化相 (α' 相) の析出挙動に着目し、化学組成、照射温度、損傷速度、損傷量、初期組織の違いをパラメータにイオン照射実験を行い、照射前後の詳細なキャラクタリゼーションから体系的に FeCrAl 系合金の α' 相の析出マップを整備することを目的とする。この析出マップの整備により、より損傷速度が低い実機中性子照射環境下での、FeCrAl 系合金の α' 相の析出挙動、及び材料脆化の予測シミュレーション等に発展させていくことを目指す。

2. 実施方法

R4 年度に作製した Fe-xCr-yAl モデル合金 ($X=5\sim 40$, $y=0\sim 8$ (wt%)) 14 種類の短冊状試料を準備し、イオン照射試験に供した。イオン照射は、表 1 に示した試験マトリックスに従い、10.5 MeV の Fe イオンを照射温度 350℃の条件を中心に、 $1\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-3}$ dpa/s の範囲の 3 段階の異なる損傷速度で 0.3、0.8、1.8 dpa の照射量まで実施した (R5 年度実施分は、表 1 の青色で示した照射条件、R6 年度は赤色を実施予定)。

イオン照射試験後の試料は、集束イオンビーム加工装置 (FIB) にて 3 次元アトムプローブ (3DAP) 用試験片と透過型電子顕微鏡 (TEM) 用試験片にそれぞれ加工し、3DAP 測定と TEM 観察に供した。

3. 結果及び考察、今後の展開等

図 1 に、照射温度 350℃、損傷速度 1×10^{-5} dpa/s、照射量 0.3 dpa の条件で Fe イオン照射した Fe-17.5Cr-8Al と Fe-21Cr を、入射方位 B=[001] から観察した時の明視野像を示す。イオン照射により、いずれの組織にも

表 1 イオン照射試験マトリックス

		照射温度					
		300℃		350℃		450℃	
		照射量 (dpa)		照射量 (dpa)		照射量 (dpa)	
損傷速度 (dpa/s)	1e-5			0.3	0.8	1.8	
	1e-4		1.8	0.3	0.8	1.8	1.8
	1e-3			0.3	0.8	1.8	

■ : R4年度実施済み
■ : R5年度実施予定
■ : R6年度実施予定

微小な転位ループが形成している様子が確認された。これらの転位ループの解析により、Fe-17.5Cr-8Al と Fe-21Cr の照射後組織には 100 タイプと 111 タイプの 2 種類の転位ループが形成していることが判明した。次に、これらの転位ループ近傍における Cr 濃度プロファイルと主要構成元素（Fe、Cr、Al）の元素マッピングを図 2 に示す。Fe-21Cr、Fe-17.5Cr-8Al とともに、転位ループ近傍の元素濃度プロファイル（図 2 左写真中の緑線に沿って測定した結果を左下グラフに表示）

には有意な Cr 濃度（グラフ中の赤線）の変化を確認できなかった。また、観察領域全体の元素マッピング（Fe：青、Cr：赤、Al：緑）の結果からも、明確に Cr 原子が濃化していると判断される領域の確認には至らなかった。Fe-21Cr、Fe-17.5Cr-8Al の照射材に対して行った 3DAP 測定の結果からは、微小かつ高密度に Cr 原子が濃化している領域（ α' 相と推定）が確認されていることから、今回の TEM の観察結果が 3DAP の結果と整合していない理由などについて検討を進めて行く予定である。

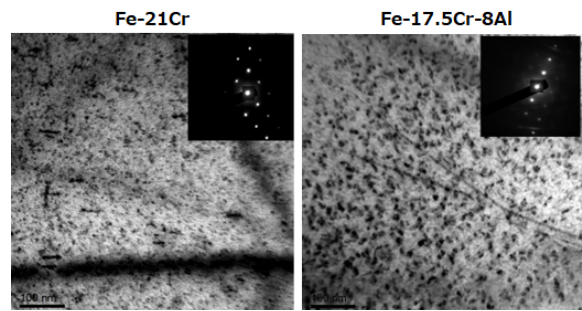


図 1 イオン照射した Fe-21Cr（左写真）及び Fe-17.5Cr-8Al（右写真）で観察された転位ループ組織（Temp：350℃、Damage rate： 1×10^{-5} dpa/s、Dose：0.3 dpa）

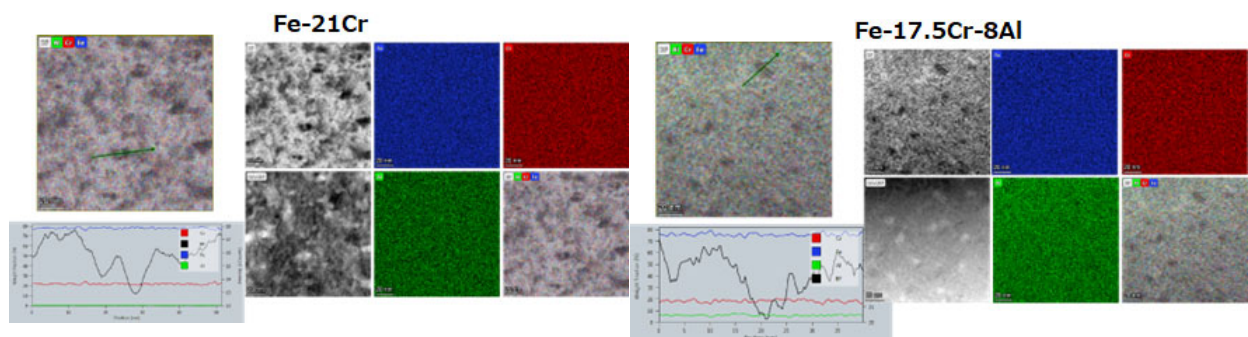


図 2 イオン照射した Fe-21Cr（左）及び Fe-17.5Cr-8Al（右）の BF/HAADF 像、濃度プロファイルと元素マッピング（Temp：350℃、Damage rate： 1×10^{-5} dpa/s、Dose：0.3 dpa）

4. 引用(参照)文献等

- [1] ORNL/TM-2017/186 Rev.1 “Handbook on the Material Properties of FeCrAl Alloys for Nuclear Power Production Applications”, August 2017.
- [2] S. A. Briggs et al., A combined APT and SANS investigation of α' phase precipitation in neutron-irradiated model FeCrAl alloys, Acta Mater. 129 (2017) 217-228. doi:10.1016/j.actamat.2017.02.077.