

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期待される FeCrAl 合金において、脆化相 (α' 相) の析出挙動を把握し、予測モデルの構築に資することを目的として、イオン照射実験を継続した。R6 年度は、既達成の 0.3 dpa から照射量を拡大し、0.64 dpa (一部 1.44 dpa) までのデータを取得した。これにより、化学組成、損傷速度、損傷量をパラメータとした α' 相析出マップの整備を進めた。重回帰分析により、損傷速度の低下、Cr 濃度および損傷量の増加が析出量を増やす傾向にあることが定量的に示された。特に、Al 添加が α' 相の析出を抑制することが明らかとなり、合金設計上の重要な知見が得られた。」

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°C 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

Fe-xCr-yAl モデル合金 ($x=10\sim 21$, $y=0\sim 8$ (wt%)) の複数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°C の条件を中心に、 $8\times 10^{-6}\sim 8\times 10^{-4}$ dpa/s の範囲の 3 段階の異なる損傷速度で 0.24、0.64、1.44 dpa の照射量まで実施した。

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。

表 1 イオン照射試験マトリックス

実験マトリックス		照射温度								
		300°C			350°C			450°C		
		損傷速度 (dpa/s)			損傷速度 (dpa/s)			損傷速度 (dpa/s)		
14種類の短冊試料	照射量 (dpa)	0.24			済	済	済			
		0.64			済	済	済			
		1.44		R7		R7	済	済		R7
		0.64				R7				R7
コンビナトリアル試料	照射量 (dpa)	0.64				R7				R7
		1.44				R7				R7

3. 結果及び考察、今後の展開等

図1に、これまでにイオン照射を実施した Fe-xCr-yAl モデル合金から試験片を採取し、3DAP 測定で得られた脆化相 (α' 相) の3次元アトムプローブ像 (一部) を示す。図1の3DAP 測定結果の試験パラメータは、それぞれ照射温度: 350°C、損傷速度: $8 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-4}$ dpa/s、照射量: 0.24、0.64 dpa、化学組成の範囲: 15Cr、15Cr-4Al、15Cr-6Al、17.5Cr、17.5Cr-3Al、17.5Cr-8Al である。系統的な3DAP 測定データの比較から損傷速度の違い、化学組成の違い、損傷量の違いに応じて、脆化相 (α' 相) の大きさや分布に明瞭な差異が生じていることが分かる。

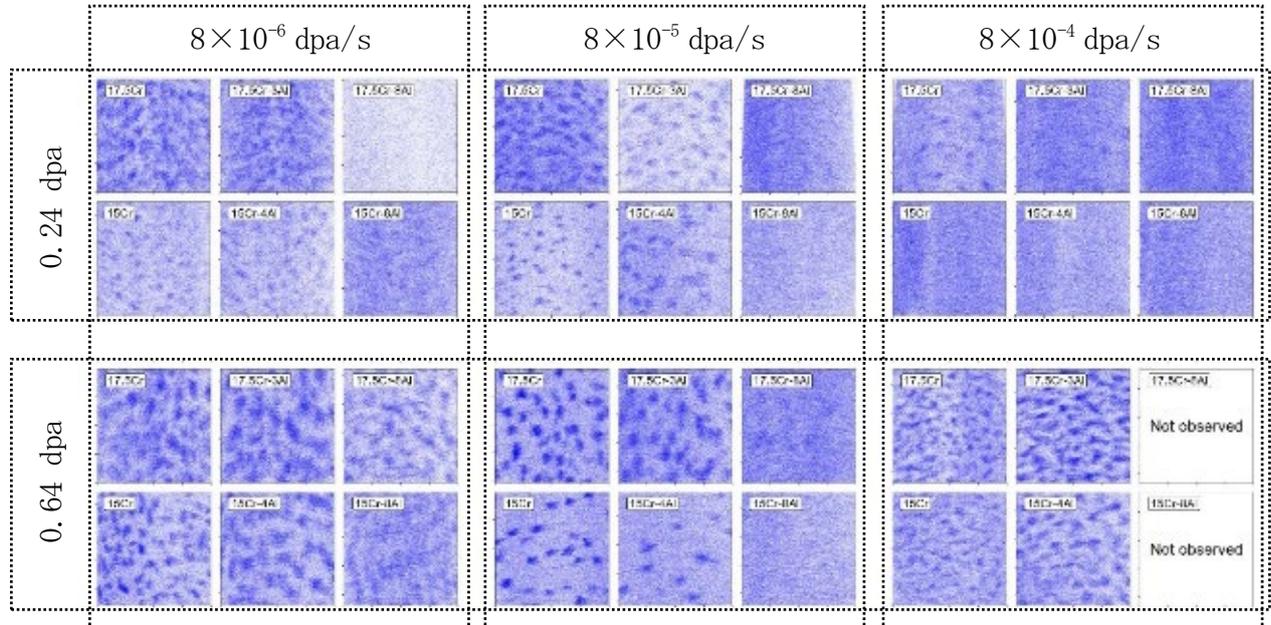


図1 系統的なイオン照射実験で得られた脆化相 (α' 相) の3次元アトムプローブ像
 損傷速度 (上側に表記): $8 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-4}$ dpa/s、損傷量 (左側に表記): 0.24、0.64 dpa
 化学組成 (各図左上に表示): 15Cr、15Cr-4Al、15Cr-6Al、17.5Cr、17.5Cr-3Al、17.5Cr-8Al

本研究ではさらに、上記のような系統的な3DAP を用いてイオン照射した時の脆化相の定量化を試みた。

図2は重回帰分析による脆化相の体積率の比較により、各照射実験パラメータと各材料パラメータの影響度合いを定量化及び視覚化して提示したものである。このような分析結果からも損傷速度の違い (より低損傷速度の方が脆化相の生成量が増加)、化学組成の違い (高 Cr になるに連れ脆化相の生成量が増加)、損傷量の違い (損傷量が増加するに連れ脆化相の生成量が増加) と脆化相の体積率の関係が定量化して示された。

R7 年度においても引き続き、試験データを拡充するとともに、効率的なデータベース拡充に資するコンビナトリアル試料の照射試験および照射後の各種測定と解析評価を進めていく予定である。

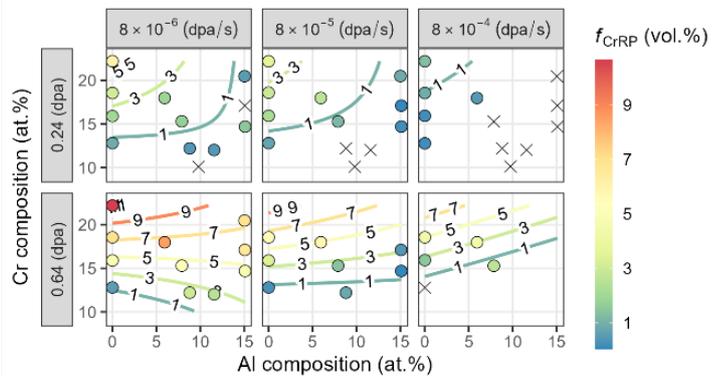


図2 重回帰分析による脆化相の体積率の比較
 (損傷速度、損傷量、化学組成の違いによる脆化量の違いを定量化&視覚化して提示)

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.