

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、R4 年度は化学組成、損傷速度、損傷量を実験パラメータにイオン照射実験を行い、 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=5~25, y=4~8, z=0~3 (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

溶解法にて作製した Fe-xCr-yAl モデル合金 (X=5~20, y=4~9 (wt%)) 14 種類に対して試料調整し短冊状試料を作製した。各短冊状試料は、それぞれイオン照射実験に供するため、試料調整時に試料表面に導入された加工ひずみを除去するため電解研磨を施し、専用のイオン照射試験用試料ホルダーに装荷した (図 1)。

イオン照射は、Fe イオンを 10.5 MeV の加速電圧で、350°C に

て $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$ dpa/s の範囲の 3 段階の異なる損傷速度で 0.3 dpa (各損傷速度での照射時間は、高損傷速度側からそれぞれ 5 分、50 分、500 分となる) 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

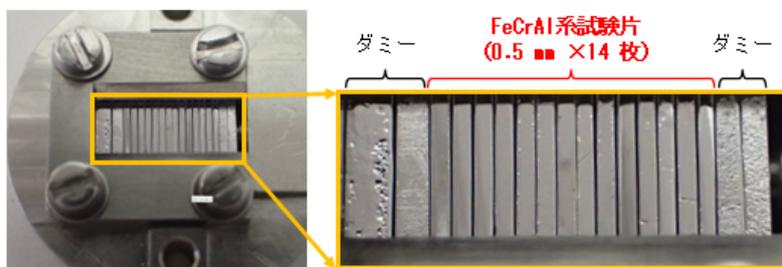


図 1 イオン照射試験用試料ホルダーと電解研磨により表面加工層を除去した後の各イオン照射試験用試料 (14 種類) の外観

試験片に加工し、3DAP 測定と TEM 観察に供した。

3. 結果及び考察、今後の展開等

先行研究 ([2]) の結果をもとに作成した α' 相析出の化学組成範囲 (境界線を点線で表示) と、R4 年度にイオン照射し、照射後 3DAP 測定を実施した 6 種類の化学組成の関係を図 2 に示す。Fe-17.5Cr, Fe-17.5Cr-3Al, Fe-17.5Cr-8Al の 3 種類を比較した場合、Fe-17.5Al 及び Fe-17.5Cr-3Al の試料では Cr 原子のクラスター化に伴いまだら模様を呈している様子が観察されたのに対し、Fe-17.5Cr-8Al では明確には Cr 原子がクラスター化している様子は見られず、先行研究の結果と概ね一致する傾向にあることが確認された。一方、Fe-15Cr, Fe-15Cr-4Al, Fe-15Cr-8Al の 3 種類を比較した場合では、Fe-15Cr 及び Fe-15Cr-8Al では明確な Cr 原子のクラスター化は観察されなかったが、Fe-15Cr-4Al で低密度の Cr 原子のクラスターが観察された。Fe-15Cr シリーズの結果を先行研究結果と比較して考えた場合、Fe-15Cr-4Al と Fe-15Cr-8Al の結果は先行研究と一致する傾向があることを確認したが、Fe-15Cr の結果は異なる傾向にあることが示された。現在、この原因を明らかにするために、3DAP の再測定を実施中である。

今後は、 α' 相形成に及ぼすイオン照射の影響について、熱的な影響分とイオン照射の影響分を分離して評価すべく、熱時効試験を並行して実施することを計画中である。また、当初計画に沿って、照射条件パラメータ (化学組成、損傷速度、損傷量等) を変えた照射実験で照射試験片を作製するとともに、TEM 観察、3DAP 測定でイオン照射材に対する評価データを拡充していく予定である。

3DAP解析結果

照射条件:
 1×10^{-4} (dpa/s) / 50 min
 積算照射量: 0.30 dpa

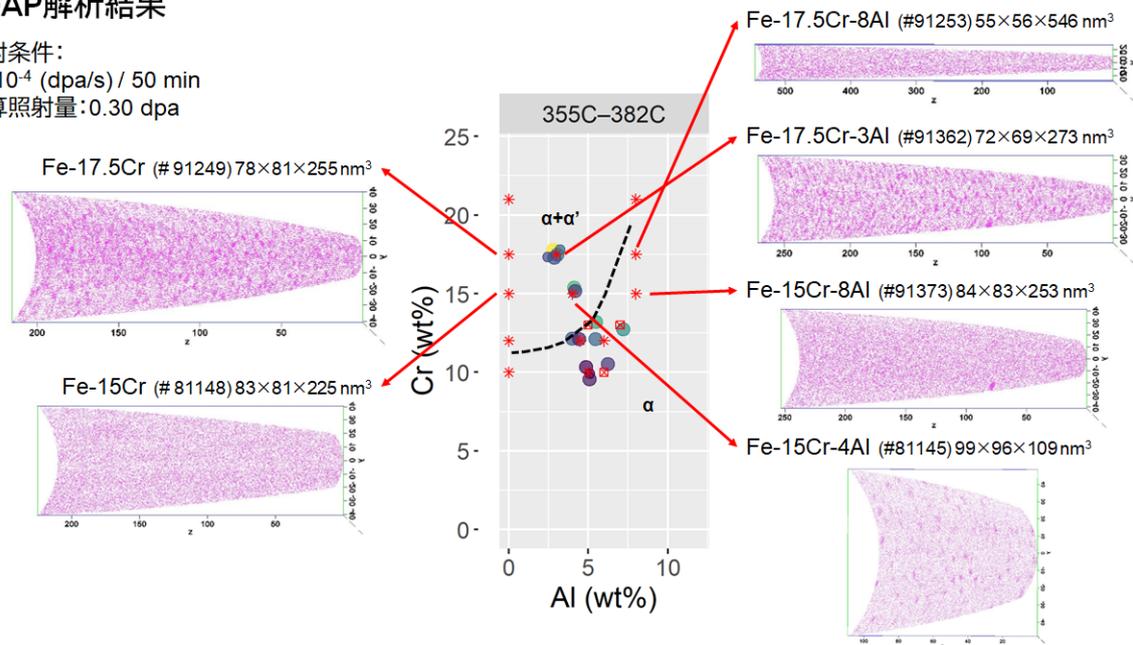


図 2 Fe イオン照射した FeCrAl 系合金 (6 種類) の 3DAP 像 (Cr 原子をピンクで描写)
 (照射条件パラメータ: 温度 350°C、損傷速度: 1×10^{-4} dpa/s、照射量: 0.3 dpa)

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.