

Nb 添加ジルコニウム合金の微細組織と元素分布に及ぼす照射の影響

(9) Zr イオン照射 MDA 材の高損傷領域でのアトムプローブ分析

Evaluation of irradiation effects on microstructure and element distribution in Nb-doped Zr alloys

(9) Atom probe analysis of MDA under high dose Zr ion irradiation

*中森 文博¹, 澤部 孝史¹, 園田 健¹

¹電力中央研究所

高照射損傷領域での Nb 添加 Zr 合金の照射挙動の理解を目的に、Zr イオンを 40 dpa まで照射した MDA 被覆管材の Zr 母相をアトムプローブ分析した。40 dpa 照射後においても、照射誘起析出物である Nb ナノクラスターが確認され、高照射損傷領域ではそのサイズは増加し、照射に対して成長することが示唆された。

キーワード：燃料被覆管，Nb 添加 Zr 合金，イオン照射，アトムプローブ

1. 緒言

国内外の PWR 被覆管で使用されている Nb 添加 Zr 合金は、ジルカロイ-4 被覆管と比較して耐食性に優れ、水素吸収量が少ない。水素吸収量の低減には、母相に形成される Nb 系析出物が寄与すると考えられ、製造時に形成される第二相析出物（SPP）と照射により形成される照射誘起析出物がある。一方、使用済燃料発生量低減の観点から、燃料の高燃焼度化がこれまで段階的に実施されており、耐食性に優れる Nb 添加 Zr 合金被覆管は、より高い燃焼度までの使用が期待される。このため、現行の燃焼度の制限値よりも高い照射損傷領域での Nb 系析出物の照射挙動の知見は重要となるが、そのような燃焼度をターゲットとした炉内照射試験は限られており、適当な条件で照射された被覆管材の入手は難しい。そこで当所では、現行燃焼度の制限値相当よりも高い損傷量まで、Nb 添加 Zr 合金に Zr イオンを照射し、高照射領域での合金元素の照射挙動を調査している。本発表では、Zr イオン照射後の Nb 添加 Zr 合金のアトムプローブ（APT）分析から明らかとなった照射誘起析出物 Nb ナノクラスターおよび Zr 母相の Nb の固溶濃度の照射による変化を報告する。

2. 実験と結果

2-1. イオン照射、アトムプローブ分析

Nb 添加 PWR 被覆管として MDA (Zr-0.8Sn-0.5Nb-0.2Fe-0.1Cr) 被覆管を用いた。イオン照射は高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設（TIARA）にて実施し、 $\phi 3$ mm に加工した MDA に 12 MeV の Zr イオンを照射温度 400 °C にて、最大損傷量 40 dpa まで照射した。APT 分析試料の作製には集束イオンビーム装置 NX2000（日立ハイテク）また Ga イオンを用いて、最大損傷領域付近を APT 分析できるように試料片を採取また針状に加工した。APT 分析は LEAP5000XR（CAMECA）を用い、試料温度 50 K、レーザーエネルギー 50 pJ、レーザーパルス周波数 200 kHz および検出率 0.01 ion/pulse の測定条件で実施した。

2-2. Nb ナノクラスターおよび Nb 固溶濃度の高照射損傷領域での照射挙動

イオン照射後の Zr 母相では、照射誘起析出物の一つである Nb ナノクラスターが確認されている^[1]。この Nb ナノクラスターは 40 dpa 照射後の母相でも確認され、20 dpa 照射後と比較して数密度は減少し、Nb ナノクラスターの形状を球形と仮定すると平均直径が約 6–7 nm から約 9 nm に増加した。また、母相の Nb 固溶濃度は 20 dpa 照射後よりも減少した。照射量の増加とともに、Nb ナノクラスターは成長したと考えられた。

参考文献 [1] 中森文博, 澤部孝史, 園田健, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 1I15, 2022 年 3 月。

謝辞 本研究で用いた MDA 被覆管は、三菱原子燃料株式会社（現三菱重工業株式会社）殿よりご提供いただいた。イオン照射試験は、量子科学技術研究開発機構殿の施設共用制度を利用した。

*Fumihiko Nakamori¹, Takashi Sawabe¹ and Takeshi Sonoda¹

¹CRIEPI