

燃料被覆管コーティング層及び界面での照射による材質変化に関する研究

Study on Material Evolution by Irradiation at Fuel Cladding Coating Layer and Interface

井岡 郁夫¹⁾ 鈴木 恵理子¹⁾ モハマド アフィカ¹⁾ 山下 真一郎¹⁾

Ikuko IOKA Eriko SUZUKI Afika B. Mohamad Shinichiro YAMASHITA Daiki SATO Yuji OKADA

¹⁾原子力機構

（概要）

事故耐性燃料被覆管として開発が進められている Cr コーティング Zr 合金（Cr-coated Zry）被覆管のイオン照射を行い、既存軽水炉環境を模擬した照射下での Cr-coated Zry 被覆管の健全性を確認するため、Cr コーティング層、Cr/Zry 界面における照射後特性変化の評価を進めた。

キーワード：

事故耐性燃料被覆管、Cr コーティング、Zr 合金、イオン照射、界面、微細組織

1. 目的

原子力の安全性向上の観点から、軽水炉において事故が発生した際、事象の進展を抑制または緩和する、いわゆる「事故耐性燃料」（Accident Tolerant Fuel：ATF）として、Cr コーティング Zr 合金（Cr-coated Zry）、改良ステンレス鋼（FeCrAl-ODS）、SiC/SiC 複合材料の開発が世界的に進められている。特に、Cr-coated Zry 被覆管は既存の Zr 合金被覆管に Cr をコーティングした被覆管で、欧米を中心に精力的に開発が進められている。国内では PWR プラントの再稼働が進んでいる状況にあり、より早期に事故耐性燃料を実機導入することで安全性向上に貢献することが期待できる。このような状況を踏まえ、国内外の技術開発状況の調査より、PWR 用にコーティング層の密着性が優れた Cr-coated Zry 被覆管の開発を進めており、高温水中耐食性、機械的特性、事故時の耐性等を評価している[1, 2]。

本研究では、実用化に向けて今後必要となる Cr-coated Zry 被覆管の照射後挙動を先行的に把握することを目的に、開発中の Cr-coated Zry 被覆管のコーティング層、Cr/Zry 界面に着目して耐照射性を調べ、既存軽水炉への適用性を確認するとともに、得られる知見をもとに、より優れたコーティング層の開発に資する。

2. 実施方法

イオン照射実験に用いた Cr-coated Zry 被覆管は、直径約 10mm、肉厚約 0.6mm の Zr 合金管の外表面にスパッタリングにより約 10 μ m の Cr コーティングを施したものである。この被覆管から切り出した照射用試験片は、横 6mm、縦 3mm、幅 0.6mm の湾曲したものである。照射面は 0.5 μ m Al₂O₃ 粒子でのバフ研磨後、加工歪を除去するためイオンミリングを行った。図 1 に照射用試験片の断面観察の結果を示す。約 10 μ m の Cr が緻密にコーティングされている。照射に対する界面特性を確認するために、照射用試験片は高崎量子研究所の TIARA の 3MV タンデム加速器により、試験片の断面方向から 10.5 MeV Fe³⁺を用いて 10dpa（表面から 1 μ m 深さ位置での照射量）まで照射した。照射温度は約 350℃で、過加熱とならないように照射ステージを水冷し、照射中は試験片温度を熱電対及び放射温度計により監視した。その後、試験片の損傷領域について集束イオンビーム装置（FIB）により試験片加工を行った。さらに、FIB 加工により観察面に導入された欠陥を除去するため、2kV のジェントルミルで表面処理を行い、透過型電子顕微鏡（TEM）による微細組織観察を行った。

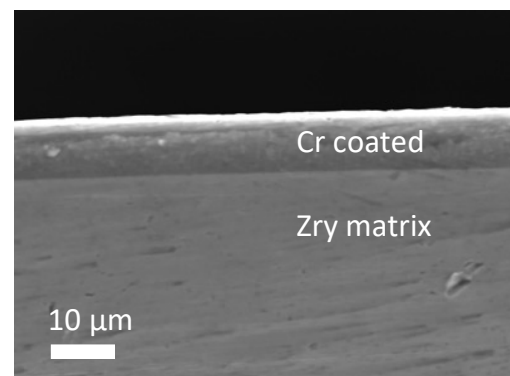


図 1 に照射用試験片の断面

3. 結果及び考察、今後の展開等

断面方向よりイオン照射した Cr-coated Zry 被覆管から FIB 加工により TEM 試験片を採取する様子を図 2 に示す。Cr/Zry 界面で剥離のない TEM 試験片を採取することができた。Cr/Zry 界面での剥離は認められなかったが、Zry 母材には粒内や粒界に沿った多数のクラックが、また Cr コーティング層にも粒界に沿ったクラックが、それぞれ観察された。同一イオン照射材から採取した他の TEM 試験片にも同様なクラックが確認された。表面から 1～1.5 μm の微細組織観察位置（注入した Fe イオンの影響がなく、照射損傷だけが付与された領域）でもクラックが観察されたことから、所期の目的を達することは困難と判断し本イオン照射材の微細組織観察を中止した。なお、非照射材の TEM 試験片では同様なクラックは観察されなかったことから、このイオン照射材のクラック発生は、円管の Cr-coated Zry 被覆管を照射用試験片に切断する際、あるいは照射面研磨時に試験片を固定した際のいずれかに試験片に過度な力が加えられたことが原因と考えられる。今後は、イオン照射用試験片の作製時に過度な力が試験片に加わらないように慎重に行うこととする。再度 10dpa のイオン照射を実施し、TEM による微細組織観察を行う計画である。

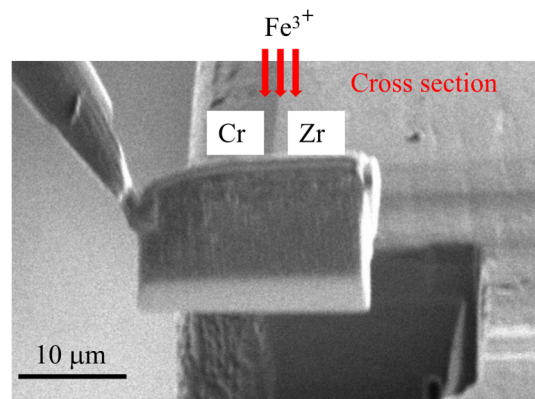


図2 FIB 加工により採取した TEM 試験片

4. 引用(参照)文献等

- [1] 村上ら、「早期実用化に向けたPWR向け事故耐性燃料被覆管（コーティング被覆管）の開発（1）開発コンセプト及び開発状況について」日本原子力学会2020秋の年会, 1E03.
- [2] N.Murakaami, et.al., "Development status of Cr coated zirconium alloy fuel cladding as an accident tolerant fuel for PWRs", 10th Annual EPRI/DOE/INL Joint Workshop on Accident Tolerant Fuel, March 30-April 1, 2021 (WebEx meeting).