

加速器を用いた軽水炉燃料被覆管の脆化機構の解明（フェーズ2）

Clarification of embrittlement mechanism of cladding tube of LWR nuclear fuels by means of ion accelerator (Phase-2)

園田 健¹⁾ 澤部孝史¹⁾ 中森文博¹⁾ 石川法人²⁾
Takeshi SONODA Takashi SAWABE Fumihiro NAKAMORI Norito ISHIKAWA

¹⁾電力中央研究所 ²⁾日本原子力研究開発機構

（概要）

商用の Nb 添加 Zr 合金に、現行燃焼度を超える高燃焼度に相当する損傷量を Zr イオン照射により導入した結果、被覆管中の 2 次析出物（Zr-Nb-Fe-Cr 系）が照射により非晶質化することが明らかとなった。

キーワード：

軽水炉燃料被覆管、Nb 添加 Zr 合金、走査透過電子顕微鏡 (STEM)、アトムプローブ (APT)、

1. 目的

原子力発電の安全性保持に加え、経済性向上に資する更なる高燃焼度化を進めるには、軽水炉燃料被覆管の健全性向上が求められる。近年の高燃焼度化に伴い、被覆管では腐食・水素吸収が増大し、機械的性質に影響を及ぼす事例が報告されている[1]。燃料被覆管の健全性向上には腐食・水素吸収挙動の解明が必要であり、被覆管の照射欠陥蓄積過程の観察が進められている。PWR では水素吸収特性の改善を目指した Nb 添加被覆管が実用化されているが、腐食・水素吸収特性に及ぼす Nb 元素の効果の機構論的解明に必要な情報は不足している。2024 年度は Nb 添加 Zr 合金への Zr イオン照射試験を継続し、STEM-EDS 分析および APT 分析から高照射時の二次析出物の組織変化を調べる。

2. 実施方法

イオン照射試料には、機械加工後に酸洗で酸化皮膜を取り除き、円盤状（ $\phi 3 \times t 0.2$ mm）に加工した Nb 添加 Zr 合金を用いた。QST 高崎量子応用研究所にある複合照射施設 TIARA のタンデム加速器 TA1 チャンバーにて照射温度 400 °C で 12 MeV Zr⁴⁺イオン照射を行い、最大 1.2×10^{17} ions/cm²（損傷量：40 dpa）までの照射を行った。電中研横須賀地区の集束イオンビーム装置を用いて照射後試料から TEM 用試料および APT 用試料を作製し、STEM-EDS 測定および APT 分析を行った。

3. 結果及び考察、今後の展開等

図 1 に未照射および 400 °C で 12 MeV Zr⁴⁺イオン照射を損傷量が 40dpa（燃焼度換算：～100 GWd/kgU）まで照射した Nb 添加 Zr 合金の 2 次析出物の TEM 像および回折像を示す。これより未照射では結晶性を有している 2 次析出物が照射により非晶質化することが明らかとなった[2]。また EDS による元素分析から 2 次析出物から Fe が有意に溶出していることが観察されたため、本現象は BWR 被覆管材中の二次析出物の照射による組織変化と類似していると推測された。今後、APT 測定結果と併せ照射による微細組織変化の機構解明を進める。

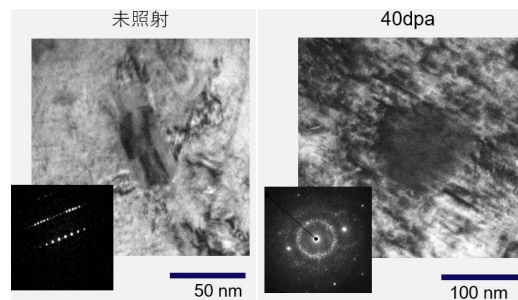


図 1 未照射(左図)およびイオン照射を行った Nb 添加 Zr 合金中の 2 次析出物の TEM 像及び回折像(右図)[2]

4. 引用(参照)文献等

- [1] 実務テキストシリーズ No. 3 「軽水炉燃料のふるまい第 5 版」、(公財) 原子力安全研究協会(2013).
[2] 澤部孝史、中森文博、園田 健、「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 (8)Zr イオン照射 MDA 材の高損傷領域での (S) TEM-EDS 分析」 3N01、日本原子力学会 2024 年秋の大会（東北大学）、2024/09/13.