

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3）

Clarification of embrittlement mechanism of cladding tube of LWR nuclear fuels by means of ion accelerator (Phase-3)

園田 健¹⁾澤部孝史¹⁾中森文博¹⁾石川法人²⁾

Takeshi SONODA

Takashi SAWABE

Fumihiko 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）

原子炉運転中に形成する微小な水素化物とアトムプローブ試料作製時に形成される水素化物を区別するため、イオン照射した Zry-2 および Zry-4 に重水素を注入し、アトムプローブを用いて合金元素分布と重水素分布との関係を調査した。結果、上記 2 種類の水素化物を区別する指針が示唆された。

キーワード：軽水炉燃料被覆管，Zr 合金，アトムプローブ，集束イオンビーム装置、重水素

1. 目的

軽水炉燃料被覆管の水素化物による脆化メカニズムを解明するためには、形成初期の水素化物を分析することが重要であり、ナノメートルサイズでの水素分布の把握が求められる。この分析技術としてアトムプローブ (APT) が挙げられ、被覆管 (Zr 合金) から APT 用の針状試料を作製する際には集束イオンビーム (FIB) 加工が用いられる。しかし FIB の試料加工チャンバー内に微量に存在する水素が FIB 加工中に試料へ吸収され、新たな水素化物 (アーティファクト) を形成する可能性が指摘されている [1]。原子炉運転中に形成された水素化物を分析するためには、このアーティファクトと区別して分析する必要がある。2025 年度は原子炉運転中に形成された水素化物とアーティファクトを区別する指針を得るために、イオン照射後の Zry-2 および Zry-4 に重水素を注入し、意図的に区別可能なアーティファクトとして重水素化物を形成させ、APT 分析により評価した重水素分布と微細組織変化との関係を調査した。

2. 実施方法

試料には Zry-2 および Zry-4 の板材から $\phi 3$ mm のディスク試料を作製し、高崎量子技術基盤研究所のイオン照射研究施設 (TIARA) にて、12 MeV の Zr イオンを照射温度 400 °C で最大損傷量 20 dpa まで照射した。その後、照射ダメージを与えた領域を保持したイオン照射材に Ar-3.01%D₂ 混合ガスを接続した熱重量-示差熱同時分析装置 STA449 (NETZSCH) を用いて 350 °C で重水素を注入した。APT 分析用の針状試料の作製には FIB 装置 NX2000 (日立ハイテック) を用い、最大損傷領域付近を APT 分析できるように試料片を採取し針状に加工した。APT 分析には LEAP5000XR (CAMECA) を用いた。

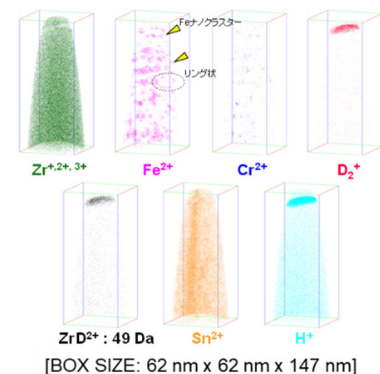


図1 イオン照射を行った Zry-4 に重水素を注入した試料の原子マップ

3. 結果及び考察、今後の展開等

イオン照射後試料にアーティファクトを模して形成させた重水素化物中に、照射誘起析出物である Fe ナノクラスターが確認された (図 1)。他方、炉内で中性子照射された被覆管からは、Fe ナノクラスターを含む水素化物と含まない水素化物が確認されており、本実験結果から前者はアーティファクトの可能性が高いことが示唆された。また、重水素化物には FIB 加工中に導入されたと考えられる軽水素が含まれていた。試料加工チャンバー内の水素の影響を取り除くには、FIB 加工中に試料を冷却する方法が有効と推測される。

4. 引用(参照)文献等

[1] S. M. Hanlon et al., J of Nucl. Mater. Vol. 515 (2019) 122-134.