



原子力発電

燃焼度

→ p.17参照

水素脆化

→ p.17参照

## PWR燃料被覆管の水素脆化を抑制する微細な材料組織を評価

● 軽水炉燃料の高燃焼度化を支援する技術的知見の拡充に貢献

### 背景

軽水炉燃料の高燃焼度化によって燃料の燃焼期間を延伸させることで、経済性を向上させ、発電量に対して使用する燃料を減らすことができます。しかし、燃料を原子炉内で長く燃焼させることになり、燃料被覆管が水素脆化を起こし健全性を損なう可能性があります。そこで、電気事業者と燃料メーカーは、研究炉等を用いた実証試験により、高燃焼度化燃料を使った時の被覆管の水素脆化の有無を確認しています。実証試験結果の説明性向上に資するため、当所では、最先端の分析・解析技術を使って、水素脆化の要因である被覆管の水素吸収現象に関する知見の蓄積、公開を進めています。

### 成果の概要

#### ◇ 照射後の燃料被覆管の微細組織観察からNbナノクラスターによる水素吸収の抑制効果を推定

ニオブ (Nb) はジルコニウム (Zr) よりも酸化速度が遅いことが知られています。加圧水型原子炉 (PWR) で使用されるNb添加燃料被覆管では、Zr母相が酸化したZr酸化膜中にてNb析出物の酸化が確認されており、Nbの酸化時に放出される電子により水素の移動を抑制すると考えられています (図1右)。実際の燃焼後の被覆管には、Nb析出物よりも小さいNbナノクラスターも形成されますが (図1左)、水素吸収の抑制効果は不明でした。本研究では、使用済みの被覆管表面に形成されたZrの酸化膜をナノスケールで三次元分析し、Zr酸化膜の中のNbナノクラスターは酸化が完了していないことを明らかにしました。この酸化の途中であるNbナノクラスターもNb析出物と同様に、被覆管と炉水との酸化反応で生じた水素のZr酸化膜を通じた拡散を抑制することができ、被覆管全体の水素吸収量を抑制する効果があることが強く推定されました。

#### ◇ 高燃焼度化による燃料被覆管の水素吸収特性への影響を重イオン模擬照射実験から評価

Zrイオン模擬照射によってNb添加燃料被覆管に国内PWRの燃料使用制限 (制限燃焼度) を超える照射損傷量を与え、Nbの分布状態の変化が被覆管の水素吸収抑制効果に及ぼす影響を評価しました。その結果、制限燃焼度の2倍相当の照射損傷量を与えた場合にも、Nb析出物およびNbナノクラスターが確認されました (図2)。これらの酸化により、燃料被覆管へのNb添加は高燃焼度化を想定した場合にも水素吸収の抑制効果が期待できることを明らかにしました。

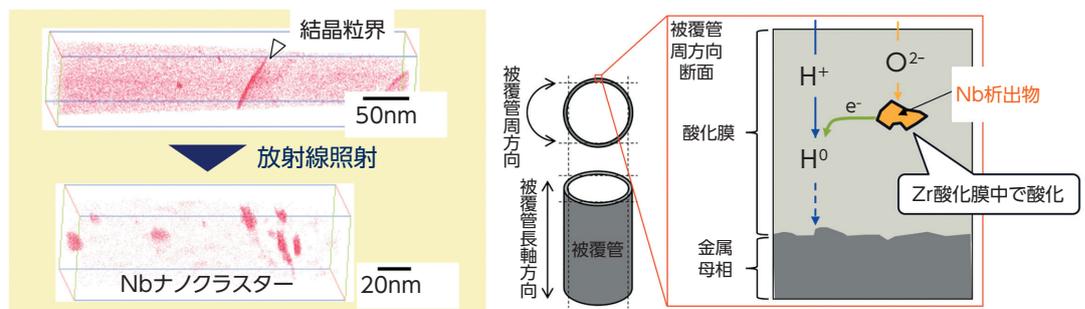


図1 放射線照射前後のNb分布変化とNbの酸化による水素吸収の抑制機構

Nb添加Zr合金被覆管に放射線照射すると金属母相では微小なNbナノクラスターが形成されます。Nbナノクラスターも製造時から存在するNb析出物と同じメカニズムで燃焼被覆管の水素吸収抑制の効果が見込まれることがわかりました。



中森 文博(なかもり ふみひろ)／澤部 孝史(さわべ たかし)  
エネルギー変換研究本部 材料科学研究部門

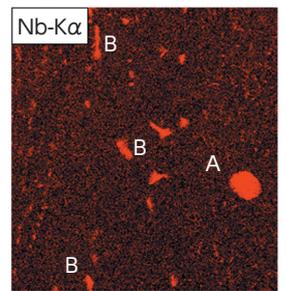
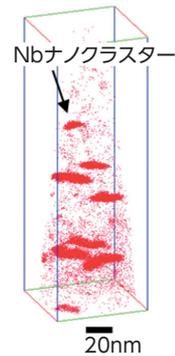
アトムプローブ装置 材料中に極微量に添加された元素の三次元分布をナノスケールで分析することが可能です。

主要な研究成果

原子力発電

放射線照射後に観察された様々な大きさのNb析出物

Nbナノクラスターは、より大きな第二相析出物やNbリッチ相とともに水素吸収の抑制に寄与すると考えられます。



A: 第二相析出物 200nm  
B: Nbリッチ相

図2 重イオン模擬照射後のNb系析出物の観察結果

※重イオン模擬照射は、量子科学技術研究開発機構の施設供用制度を利用しました。

### 成果の活用先・事例

高燃焼度燃料の導入に係る設置許可基準適合性審査において、現行の制限燃焼度以上でもNb添加燃料被覆管が使用できることを裏付ける技術的知見の一つとして活用され、PWRの安全かつ効率的な運転を支援します。

参考 中森ほか、電力中央研究所 研究報告 EX23006 (2024)  
Sawabe et al., J. Nucl. Sci. Technol. (in press)