ナノインデンテーション法を用いた燃料被覆管の機械特性評価

Evaluation of mechanical properties of fuel cladding tubes using nanoindentation

*山内 紹裕[1]，垣内 一雄[2]、宇田川 豊[2]，北野 剛司[1]
[1]原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、[2]日本原子力研究開発機構（JAEA）

水素吸収及び高温酸化によって燃料被覆管中に析出した相の機械特性を評価するため、ナノインデンテーション（NI）法の適用を検討している。本稿では、圧痕投影面積の補正手法の検討結果及び LOCA 模擬試験後試料の測定結果について報告する。なお、本研究は原子力規制庁及び JAEA との共同研究として行われたものである。

キーワード：燃料被覆管、ナノインデンテーション法、機械特性、Zr 合金

1. 緒言

Zr 合金燃料被覆管の機械特性は、通常運転時の水側腐食に伴う水素吸収や冷却材喪失事故（LOCA）時の高温酸化によって水素化物や酸素固溶相等が析出することで劣化するため、このような析出物を含む被覆管の機械特性を把握することが、通常運転時の燃料健全性や事故時の燃料挙動を評価する上で必要かつ重要である。そこで、本研究では被覆管中に析出した相の局所的な機械特性を NI 法により直接測定する手法について検討している。

NI 法では、圧痕の投影面積に基づき硬さ及びヤング率を評価する。圧痕投影面積は、通常、試験時に測定する押し込み深さ及び圧子の幾何学形状を用いて算出するが、圧痕周辺に盛り上がり（以下「パイルアップ」という。）が生じて硬さ等の評価値に荷重依存性が生じる場合がある。この場合にはパイルアップを考慮して圧痕投影面積を補正・評価する必要がある。そこで、本研究では、Zr 合金を対象とした NI 試験について、パイルアップを考慮した圧痕投影面積の補正手法を検討した。また本稿では、NI 法による測定データの一例として、LOCA 模擬試験後被覆管試料の断面微小領域の硬さ分布についても報告する。

2. 試験方法

本研究では、NI 試験装置として Micro Materials 社製の Vacuum Ready を用いた。圧痕投影面積の補正手法の検討では、応力除去焼鈍及び再結晶焼鈍 Zry-4 被覆管試料の研磨面に対して、最大荷重をパラメータ（10mN、50mN、100mN）とした押し込み試験を室温にて実施した。Kese[1]らの手法を参考に、圧痕を原子間力顕微鏡で観察することでパイルアップ部分を含めた圧痕の投影面積を評価し、押し込み深さから単純に算出した圧痕の投影面積と比較した。

LOCA 模擬試験後試料の測定では、昇温破裂後に水蒸気雰囲気中、1200℃で酸化量約 20%まで高温酸化し、700℃まで徐冷後に急冷した被覆管試料を用いて、破裂部及び破裂部から軸方向に約 20mm 離れた位置における残存金属層中の硬さ分布を荷重 10mN にて測定した。

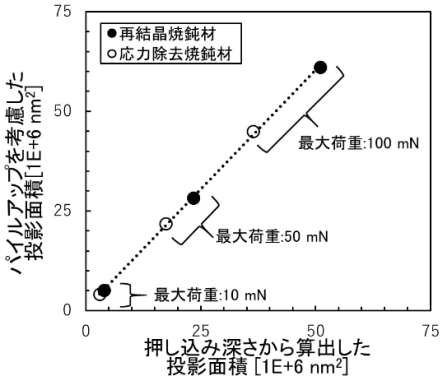

図 1　補正の有無による圧痕投影面積の比較

3. 結果及び考察

図 1 に、押し込み深さから算出した圧痕の投影面積及びパイルアップを考慮した投影面積の関係を示す。両者の間には、被覆管製造時の最終焼鈍条件及び荷重に依存しない一次相関が得られた。この関係を用いてパイルアップの影響を補正した圧痕投影面積に基づき硬さ及びヤング率を評価したところ、補正しない場合と比べ荷重依存性が低減することを確認した。

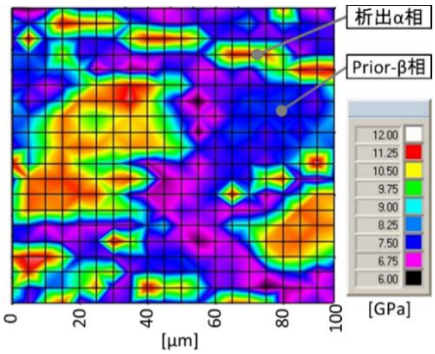

図 2　LOCA 模擬試験後試料の硬さ分布
（破裂部から軸方向に約 20mm 位置）

LOCA 模擬試験後試料の残存金属層中の硬さ分布を図 2 に示す。析出 α 相の硬さは prior-β 相と比較して高いことがわかる。また、破裂部から軸方向に約 20mm 離れた位置（二次水素吸収を生じた位置）では、prior-β 相及び析出 α 相ともに、破裂部よりも高い硬さを示した。これは、prior-β 相中の水素濃度増加等に起因するものと考えられる。

参考文献

[1] K.O.Kese et al., Journal of Nuclear Materials 507 (2018) 267-275

*Akihiro Yamauchi[1], Kazuo Kakiuchi[2] , Yutaka Udagawa[2] and Koji Kitano[1], [1]Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R), [2] Japan Atomic Energy Agency (JAEA)