

共同研究成果報告書

水素吸収・高温酸化した燃料被覆管の 高温ミクロ機械特性の評価に関する研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

令和 7 年 1 月

1. 研究目的

本研究では、水素吸収、高温酸化処理等を行った燃料被覆管の高温条件における基礎的な機械特性を評価し、燃料被覆管の事故時の安全性に関する知見の拡充に資すること、また、それら一連の試験、データ分析等を通じて本研究に従事する者の技術的能力を向上することを目的とする。

2. 研究内容

燃料棒は、燃料体を構成する要素であり、国内外の軽水炉においては主としてジルコニウム合金がその被覆管として使用されている。被覆管は、放射性物質の放出を防ぐ物理的バリアとして機能するため、燃料の全寿命にわたって健全性を確保することが重要である。そのため、燃料挙動解析コードを用いて被覆管の変形、特に破損につながる変形を正確に予測することが不可欠である。

材料のヤング率は、その変形を解析する上で最も基本的な機械的性質の一つである。冷却材喪失事故時には、被覆管最高温度は 800～1000℃に達する可能性があるが、既存の燃料挙動解析コードにおける被覆管のヤング率のモデル^[1]は、主に 600℃未満で実施された試験から得られたデータに基づいて設定されており^[2]、事故時に到達しうる高温まで被覆管のヤング率の温度依存性を正確に把握することが望まれている。

また、ジルコニウム合金被覆管は、運転中の表面腐食により発生する水素を吸収するが、この水素がジルコニウム合金中に固溶することでヤング率が変化することが報告されている^[3]。固溶水素の影響及びその温度依存性に関する既往研究はあるものの、最高試験温度は 500℃であり、高温側のデータが不足しているため、既存のジルコニウム合金のヤング率モデルではこの水素固溶の影響が考慮されていない。

以上を踏まえ、本研究では水素を吸収させたジルコニウム合金被覆管試料に対して高温ナノインデンテーション試験を実施することで、ジルコニウム合金のヤング率の温度依存性及び水素濃度依存性に関する知見を拡充した。

3. 実施方法

3.1 高温・高真空下でのナノインデンテーション法に関する検討

高温・高真空下でのナノインデンテーション試験は、常温・常圧下での試験と比較すると、測定機器の熱ドリフトが増加するとともに、高真空下であっても試料表面の酸化膜形成等により試験の実施そのものが困難である。そのため、本研究では、まず以下について検討し、試験手法を確立した。

- ・ 圧子材料（文献調査）
- ・ 試料形状、試料台への固定方法
- ・ 荷重条件（負荷速度、保持時間、除荷速度）

3.2 水素吸収・高温酸化処理等を行った燃料被覆管の機械特性評価

水素を吸収させたジルコニウム合金被覆管試料を対象に、室温から 900℃までの条件でナノインデンテーション試験を実施して、ヤング率、硬さ及び塑性仕事割合を測定・評価し、それらの温度依存性及び水素濃度依存性を調べた。

4. 研究実施分担

項目	原子力規制庁	日本原子力研究開発機構
研究計画立案	◎	○
試験用試料の作製	○	◎
試験手法の検討	◎	○
試験実施	○	◎
結果の考察・とりまとめ	◎	◎

5. 共同研究参加者

区 分	氏 名	所属部局・職名	本研究における役割
原子力 規制庁	北野 剛司	技術基盤グループ システム安全研究部門	研究の統括
	山内 紹裕		試験用試料・治具の作製、試験条件の検討、試験実施、結果の考察・とりまとめ
日本原 子力研 究開発 機構	宇田川 豊	安全研究センター 原子炉安全研究ディビジョン 燃料安全研究グループ	研究の統括
	垣内 一雄		試験条件の検討、試験実施、結果の考察・とりまとめ
	田崎 雄大		試験条件の検討、試験実施、結果の考察・とりまとめ
	浦野 健太		試験用試料の作製

6. 研究実施工程

年 度	令和 4 年度				令和 5 年度			
項 目								
高温・高真空下でのナノインデンテーション法に関する検討	試験装置の改造 (高温・高真空対応)							
	試料形状等の 検討				予備試験			
水素吸収・高温酸化処理等を行った 燃料被覆管の機械特性評価					試験実施			
	試験装置不具合 による実験停止				結果の考察・とりまとめ			

7. 成果概要

試験条件検討の結果、高温・高真空下試験に最適な圧子材料、試料固定に用いる材料、荷重負荷条件等を見出し、ジルコニウム合金被覆管の 900℃までの機械特性をナノインデンテーション法により測定・評価することに成功した。

本手法で測定・評価したヤング率は、室温から 600℃までの温度領域で既往の試験データと良く一致しており、本手法が妥当であることが確認された。また、本手法により 600℃超の高温におけるヤング率についてもデータを拡充することができた。さらに、ナノインデンテーション法により評価した硬さから耐力を評価するとともに、荷重-変位曲線から塑性仕事割合を評価し、それらの 900℃までの温度依存性を調べることもできた。

以上のデータは、燃料挙動解析コードに実装されているジルコニウム合金の機械的性質モデルの高度化に活用することができる。

上記の試験の実施、それに係る課題の解決、試験結果の解釈・議論等を通じて本研究に従事する者の技術的能力を向上することができた。

8. 公表成果一覧

なし

9. 参考文献：

[1] Hagrman, D.L., Reyman, G.A., "MATPRO-Version11, A Handbook of Materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior", NUREG/CR-0497, TREE-1280, Rev.3, 1979. doi: <https://doi.org/10.2172/6442256>

- [2] Fisher, E. F., Renken, C. J., "Single-Crystal Elastic Moduli and the hcp-bcc Transformation in Ti, Zr, and Hf", *Physical Review Journals*, Vol. 135, pp. A482-A494, 1964. doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.135.A482>
- [3] Yamanaka, S., Setoyama, D., Muta, H., Uno, M., Kuroda, M., Takeda, K., Matsuda, T., "Characteristics of zirconium hydrogen solid solution", *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 372, pp. 129-135, 2004. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.09.140>