

設計基準外事故時におけるクロム被覆ジルコニウム合金燃料棒の挙動

Behavior of chromium-coated zirconium alloy fuel rods in simulated beyond design basis accident

*中村 勤也¹, 稲垣 健太¹, Juri Stuckert², Martin Ševeček³

¹ 電中研, ² カールスルーエ工科大学, ³ チェコ工科大学

単一棒と 3×3 型バンドルの Cr 被覆 Zr 合金燃料棒を用いて、現行の冷却材喪失事故（LOCA）基準を上回る被覆管最大表面温度 1600℃以下の著しい炉心損傷に至らない設計基準外事故（BDBA）模擬試験を実施した。被覆厚さや被覆材の種類が事故時挙動に及ぼす影響や、バンドル固有のふるまいについて報告する。

キーワード：事故耐性燃料、クロム被覆、ジルコニウム合金、設計基準外事故、燃料バンドル

1. 緒言

通常運転時の燃料性能の向上に加え事故時の燃料の安全裕度の拡大等も期待される事故耐性燃料（ATF）の国内開発を推進し、現行炉および次期炉の安全性や経済性の向上に資することが望まれる。著しい炉心損傷に至らないBDBA時におけるATFのふるまいをモデル化して燃料挙動解析コードの高度化に資するため、国際協力を活用した先行的な試験データの取得が求められている。一方、Cr被覆Zr合金燃料被覆管の被覆層が1000℃以上の高温で損傷して基材表面の金属Zrが露出すると、瞬時にZr-水反応に伴う化学反応熱が発生しうするため、従来材よりも加速的に昇温して早期に炉心損傷に至る可能性が否定されていない。このため、実機の燃料棒配置を模擬したバンドル試験による確認が必要と考えられている^[1]。電中研は、国際原子力機関のATF開発に係るATF-TSプロジェクトに参加し、Cr被覆Zr合金燃料バンドルのBDBA-LOCA模擬試験とその解析を実施している。本研究では、単一棒およびバンドル試験の一部成果について報告する。

2. 試験方法

PVD 法により厚さ 10μm または 20μm の Cr または厚さ 26μm の Cr/CrN を被覆した Zircaloy-4 燃料被覆管（外径 10.75mm、肉厚 0.725mm、長さ 235mm）に、UO₂ 燃料を模擬する Al₂O₃ 中空ペレットと内部発熱を模擬する W 棒を装荷し、He ガスを 6MPa 充填した試験体を用いた。8 本のヒーターロッド（Al₂O₃ 被覆 W 棒）の中心に試験体 1 本を置き、高周波加熱方式の炉外試験設備 DEGREE^[2]に配置した（単一棒試験）。0.4g/s の水蒸気気流中、高周波電源の出力勾配を一定にして被覆管最大表面温度（1350℃または 1600℃）まで加熱後、高周波電源の遮断と同時に雰囲気水を水蒸気から Ar ガスに切り替えて炉冷した。また、3×3 型 Cr 被覆 Zircaloy-4 燃料バンドル（燃料ピッチ 14.5mm、Cr 厚さ 20μm）についても同様に 1350℃までの試験を実施した（バンドル試験）。被覆管表面温度、燃料棒内圧、発生水素量等のオンライン計測に加え、周ひずみ、破裂開口部の寸法、微細組織等について調べた。加えて、高周波加熱によって発生する試験体内部の渦電流損による発熱分布を評価する電磁場解析を実施した。

3. 試験結果

単一棒試験において、被覆厚さが異なるいずれの被覆材も、破裂温度と破裂圧力に有意な差は見られず、被覆なしに比べて最大周ひずみを低下させる傾向が認められた。また、α-Zr(O)/prior β-Zr 界面に、1350℃では被覆管の脆化挙動に影響を及ぼす(Cr,Fe)₂Zr 相が Cr の内方拡散に伴い形成され、1600℃では(Cr,Fe)₂Zr 相を含む Cr 拡散層が形成された。

バンドル試験の時刻歴を図 1 に示す。バンドルを構成するいずれの試験体も、単一棒試験と同様に 800℃前後で膨れ破裂した。1000℃以下では抑制された水素発生量が約 1060℃から急激に増大した。また、高周波電源の出力勾配が同じにも係わらず、単一棒試験の昇温速度 2-3℃/s に対して 6-7℃/s に増加した。これらの現象は、隣接棒の化学反応熱による寄与の他、一定ひずみ値を超えた Cr₂O₃ 層の割れと Cr の内方拡散に伴う金属 Cr 層の欠乏により、露出した Zr と水の反応が加速的に進行したことによる寄与も含まれると推測される。なお、Cr 被覆に伴う、燃料バンドルの冷却可能形状の維持に及ぼす負の影響は見られなかった。

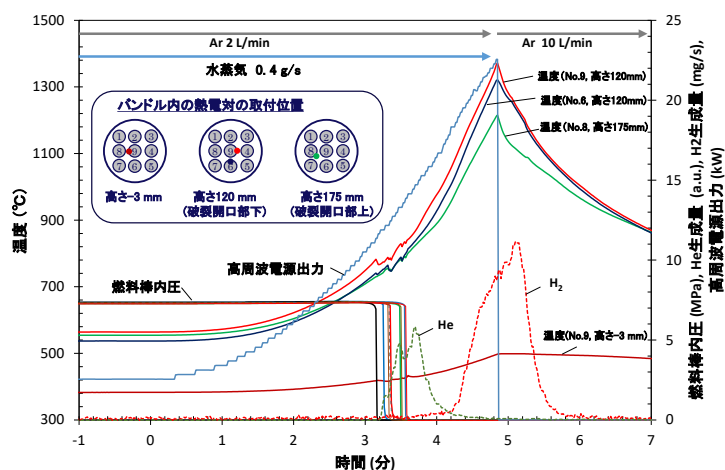


図 1 3×3 型 Cr 被覆 Zircaloy-4 燃料バンドルの BDBA-LOCA 模擬試験の時刻歴

参考文献 [1] M. Steinbrück, et al., JNM 559(2022)153470. [2] 中村ら, AESJ2016 春の年会, 2G05.

*Kinya NAKAMURA¹, Kenta INAGAKI¹, Juri Stuckert², Martin Ševeček³, ¹CRIEPI, ²KIT, ³CTU