

BWR 炉心安全性向上のための SiC 材料適用に向けた研究開発

(8) 事故時を想定した SiC 円管端栓接合部の強度評価

R&D for Introducing Silicon Carbide Materials to Safety Improvement of BWR's Core

(8) Joint Strength Evaluation of End-plug Joints in SiC Tubes at A Simulated Severe Accident

*石橋 良¹, 廣坂 和馬¹, 山名 哲平¹, 柴田 昌利¹, 佐々木 政名¹, 近藤 貴夫¹

¹ 日立 GE ニュークリア・エナジー

炭化ケイ素 (SiC) 製燃料被覆管には事故時に高い耐熱性を期待しており、強度上の課題となりうる端栓接合部に対して事故時を想定した高温強度の評価を目的に、事故時の端栓接合部での圧力および温度を評価するとともに、試作した試験片の端栓接合部での耐荷重を引張試験により検討した。

キーワード：事故耐性燃料，炭化ケイ素，端栓接合，過酷事故，高温強度

1. 緒言

従来の Zr 合金と比べて水素発生速度および水蒸気酸化の反応熱が低い SiC は事故耐性燃料材料として有望である一方で、SiC を燃料被覆管に実際に適用するにあたっては多くの課題が存在すると考えられており、その一つが端栓接合である¹⁾。燃料棒の端栓接合部には、気密性、強度などが要求され、溶接のできない SiC 被覆管に対して様々な方法が検討されている²⁾。その中で、少なくとも最終接合部は局所的な加熱プロセスが必要であることから、ロウ付け法を検討してきた³⁾。耐熱性の優れる SiC 被覆管を適用して事故耐性を向上させるにあたって、事故時における温度と内圧の上昇のため端栓接合部の強度が弱点となる可能性がある。そこで、本検討では、事故時を想定した端栓接合部の高温強度の評価を目的に、簡易モデルおよび解析コードにより事故時を想定した燃料棒内の圧力および温度を評価するとともに、試作した接合試験片に対して高温引張試験を実施して、事故時の端栓接合部の健全性を評価した。

2. 検討方法

2-1. 事故時評価

燃料ペレットのない燃料棒を均一に昇温した場合（以下、簡易モデル計算）、および、TRACG コードを用いて燃料ペレットのある燃料棒に対して炉心構造を考慮して事故時の温度分布を解析した場合（以下、TRACG 解析）について検討し、端栓接合部での負荷および温度を評価した。SiC 被覆管が破損する事象や温度は明らかではないため、SiC-UO₂ 系計算状態図において約 58 mol.% 以下の SiC 組成で SiC が消滅する 2052~2149℃ の範囲⁴⁾を SiC 被覆管における健全性評価上の温度しきい値と仮定した。燃料棒の内部ガス量は温度上昇に関わらず一定として圧力を評価した。TRACG 解析では Step IIIA 燃料炉心を評価対象とした。

2-2. 端栓接合試験片の高温引張試験

外径約 10 mm の SiC 円管に、引張試験用のピン孔を擁した外径約 10 mm の SiC 端栓を Si を用いてロウ付け法により接合した。円管と端栓とは、それぞれに対してねじ構造を擁するコネクタを介して結合した。接合試験片に対して、Ar ガス雰囲気中で 1400℃ に保持後、荷重速度 16 N/min で引張試験を実施した。併せて、有限要素法解析を用いて接合部における応力の分布状態から内圧負荷と引張荷重との相関を定義し、事故時の内圧負荷と引張試験での接合部の耐荷重とを比較した。

3. 結果と考察

燃料被覆管の上・下端部での内外圧差が端栓接合部での主な負荷と考えて、事故シーケンスは全交流動力電源喪失よりも内外圧差が大きくなる高圧・低圧注水機能喪失を扱った。温度しきい値に至った時の内外圧差は、簡易モデル計算では 25 MPa 程度に上昇した。TRACG 解析では、最高被覆管温度が温度しきい値に到達した時、内部ガスの大部分が有効長部よりも低温のプレナム部に存在する等の理由で、内外圧差は 8 MPa 程度と簡易モデル計算値よりも低かった。この時、下部端栓接合部よりも上部端栓接合部のほうが温度が高く、直下のプレナム部では 1100℃ 程度まで上昇した。引張試験では、この温度よりも高い温度で実施され、試験片が破断した引張荷重に対応する負荷は内外圧差の最大評価値 25 MPa よりも高かった。この結果は、事故時における端栓接合部の健全性を示唆すると考える。いずれも円管／コネクタ部以外の破断であり、断面観察では SiC 複合材料製円管／コネクタ部に円管を貫通するき裂は確認されなかった。

参考文献

- [1] Y. Katoh, K. A. Terrani and L. L. Snead, ORNL/TM-2014/210, (2014).
- [2] T. Koyanagi, Y. Katou, et. al, J. Nucl. Mater., 488, 150-159 (2017).
- [3] 石橋, 池側, 柴田, 佐々木, 近藤, 日本原子力学会 2021 年秋の大会予稿集, 1E02, (2020).
- [4] B. Braun, C. Gueneau, et. al, J. Nucl. Mater., 487, 380-395 (2017).

*Ryo Ishibashi¹, Kazuma Hirosaka¹, Teppei Yamana¹, Masatoshi Shibata¹, Masana Sasaki¹ and Takao Kondo¹

¹Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.