

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

(9) 事故時を想定した SiC 円管端栓接合部の強度評価 (2)

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

(9) Joint Strength Evaluation of End-plug Joints in SiC Tubes at A Simulated Severe Accident (2)

*石橋 良¹, 廣坂 和馬¹, 柴田 昌利¹, 佐々木 政名¹, 土屋 暁之¹, 根本 義之²

¹ 日立 GE ニュークリア・エナジー, ² 日本原子力研究開発機構

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いる。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荷重に対する健全性の評価を目的に、端栓接合部での耐荷重を内圧負荷により評価する試験方法とともに、解析により荷重負荷時の端栓接合部での変形挙動を検討した。

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だが、SiC を燃料被覆管に実際に適用するにあたって多くの課題がある。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。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^[2]。耐熱性の優れる SiC 被覆管を適用して燃料棒の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に対する端栓接合部の健全性も重要である。そこで、事故時を想定した端栓接合部の強度評価を目的に、燃料棒内の圧力および温度を評価、試作した接合試験片に対して高温引張試験を実施して、少なくとも軸方向の荷重に対して強度が十分であることを確認した^[3]。さらに、本研究では、事故時と同様の内圧負荷により端栓接合部の健全性を評価する試験方法とともに、端栓接合部の詳細構造に対して解析することにより荷重負荷時の変形挙動を検討した。

2. 検討方法

2-1. 端栓接合試験片の高温内圧負荷試験

外径約 10 mm の SiC 円管に SiC 端栓をロウ付け法により接合した試験片を作製した。この試験片を締結用部材を介して水冷気密治具に締結し、この治具に接続した細管を通じて外部から Ar ガスによって円管内に内圧を負荷できるようにした。次に、原子力機構設備の光学式加熱炉を用いて Ar ガス雰囲気中で試験片の接合部を所定の温度に加熱した。内圧変化は Ar ガス導入のための細管に取り付けた圧力計により測定した。今回は設備の制約により初期内圧を 5 MPa まで上昇させた後、圧力計のガス供給側を閉止し、試験片の加熱により上昇した圧力を測定した。

2-2. 端栓接合部の変形解析

端栓接合部に対する高温引張試験では、試験片の破損前に接合部での滑りが原因と推定される荷重と変位の変化が確認された^[3]。この滑りの起点として接合材料の塑性に着目し、接合部の詳細構造に対し有限要素法による静解析を用い、接合材料領域での応力状態を調査した。引張試験での挙動を再現する滑り開始の指標と接合材料の強度条件を検討し、次に同じ指標と条件で内圧負荷に対する応力状態を評価した。

3. 結果と考察

接合部付近の外表面温度を室温から 1250℃付近に上昇させ 1 h 保持した時、内圧は有意な低下なく 5 MPa から 6.6 MPa まで上昇した。この内圧は現行 BWR 燃料棒の寿命末期の内圧以上であることから、通常運転時の接合部の気密性を期待できる。保守的な条件での解析結果^[3]と比較して高い接合部温度で試験しており、事故時を想定した温度と内圧の上昇に対する接合部の健全性を本試験法により評価できる見込みが得られた。

端栓接合部を解析した結果、円管内面と端栓の差し込み胴部外面との間隙にある接合材料の領域では、荷重が大きくなるとせん断応力が降伏条件に至る領域が増加することがわかった。接合材料領域全体が降伏条件に至った時を接合部の滑りが開始する指標とし、引張試験の結果と対応する接合材料の強度条件を求めた。この強度条件の解析モデルを使って内圧負荷に対して評価したところ、接合部の滑りが開始する内圧は事故時の内外圧差を上回った。このことから、接合部の健全性の維持が可能であることが示された。

参考文献

[1] Y. Katoh, K. A. Terrani and L. L. Snead, ORNL/TM-2014/210, (2014).

[2] 石橋, 池側, 柴田, 佐々木, 近藤, 日本原子力学会 2020 年秋の大会予稿集, 1E02, (2020).

[3] 石橋, 廣坂, 山名, 柴田, 佐々木, 近藤, 日本原子力学会 2021 年秋の大会予稿集, 2D05, (2021).

*Ryo Ishibashi¹, Kazuma Hirosaka¹, Masatoshi Shibata¹, Masana Sasaki¹, Akiyuki Tsuchiya¹ and Yoshiyuki Nemoto²

¹Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd., ²Japan Atomic Energy Agency