燃料被覆管材料への照射と水素化の重畳効果

Combinatorial effect on irradiation and hydrogenation in fuel cladding tube material

*叶野翔 [1]，楊会龍 [1]，申晶潔 [1]，趙子寿 [1]，John McGrady[1]，栄藤良則 [2]，阿部弘亨 [1]
[1] 東京大学，[2] 日本核燃料開発株式会社

燃料被覆管材料であるジルカロイとその水素化材料に対し、サイクロトロン加速器を利用したイオン照射、ならびに BR-2 炉での中性子照射を実施し、機械特性への照射と水素化の重畳効果について評価した。

キーワード：燃料被覆管、ジルカロイ、中性子照射、水素化

軽水炉燃料被覆管材料は炉内環境下において、高温、腐食、照射に曝され、その中でも、腐食（水素化）と照射による劣化は材料の健全性を決める重要因子である。本研究では、現行の軽水炉燃料被覆管材料であるジルカロイ２に対し、炉内環境下における材料の主要劣化因子である照射と水素化の重畳影響について明らかにすることを目的とし、ジルカロイ２（無垢材）ならびに水素チャージしたジルカロイ２（水素化材）を BR-2 炉に装荷し、これら照射材に対して高温引張試験を実施し、材料強度学的観点から当該材料への照射と水素化影響について調査した。

供試材として日本核燃料開発株式会社より提供された平板引張試験形状のジルカロイ２の無垢材と、その水素化材（約 100 wt. ppmH）を使用した。これら試料は、ベルギーの BR-2 炉に装荷し、563 K において中性子照射を行った。なお、損傷速度は 10^{-8} dpa/s であり、最大 0.212 dpa までの照射を行った。照射材は東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターに輸送し、563 K において高温引張試験を実施した。昇温速度 10 K/min において 563 K まで昇温し、5 min の等温保持後、ひずみ速度（$\dot{\varepsilon}$）10^{-3} s^{-1} にて引張試験を実施した。また、破断後の試料は破面観察を実施し、破壊形態への照射ならびに水素化影響を評価した。

未照射時の無垢材の 0.2%耐力（$\sigma_{0.2}$）と引張強さ（σ_{UTS}）は水素化材に比べ僅かに高く、また、均一伸び（ε_{UTS}）と破断伸び（ε_{rp}）は水素化材に比べ少なかった。無垢材への照射により、$\sigma_{0.2}$ と σ_{UTS} は照射量の増加に伴い増加し、尚且つ、0.060 dpa 以上で $\sigma_{0.2}$ と σ_{UTS} が概ね一致した。ε_{UTS} と ε_{rp} については、照射量の増加に伴い低下し、0.011 dpa 以上で、ε_{UTS} と ε_{rp} が 0.05 と 0.1 となり、その後は照射量に依存しなかった。なお、加工硬化指数（n）は 0.004 dpa 以下の照射量で急激に増加しており、0.060 dpa では n = 0.93 となり、その後、1.0 付近で飽和した。さらに、0.153 dpa 以上の照射材の破面観察結果より、試験片表面において引張方向に対して垂直方向の割れが見られ、これらは、σ_{UTS} 以降の急激に軟化挙動を示した際に形成されたものであることが分かった。また、水素化材への照射により、$\sigma_{0.2}$ と σ_{UTS} は照射量の増加に伴い増加したが、その硬化量は、無垢材に比べ低く、さらに、ε_{UTS} と ε_{rp} の低下傾向については、無垢材に比べ緩やかであった。これより、563 K 引張強度特性に対し照射と水素化の重畳影響により、照射硬化ならびに照射脆化を抑えることが分かった。

なお、当日は、照射材の引張特性の温度依存性結果、ならびにサイクロトロン照射材の試験結果についても述べる。

---

*S. Kano[1], H. Yang[1], J. Shen[1], Z. Zhao[1], J. McGrady[1], Y. Etoh[2], H. Abe[1]

[1]The University of Tokyo, [2]Nippon Nuclear Fuel Development Co., Ltd.