

あらゆる高流束に対応する水素障壁 Hydrogen barrier for various high fluxes

近田 拓未
Takumi Chikada

静岡大
Shizuoka Univ.

1. はじめに

核融合炉燃料システムにおけるトリチウムの透過漏洩は、ほぼ全てのブランケット概念において燃料効率の致命的な低下を引き起こす深刻な課題である。これまで、トリチウム透過低減技術として、構造材料表面に機能性被覆を設置することが長年検討されてきた。ブランケットは、トリチウム増殖、エネルギー変換、および中性子遮蔽を担うことから、水素同位体、熱、気体や液体、中性子線、ガンマ線といったあらゆる高流束や非平衡状態が存在し、機能性被覆はこの過酷かつ特殊な環境下で所定の性能を維持することが要求される。このように、機能性被覆に対する性能要求はきわめて高い一方で、近年の研究では、高流束下で生じる「劣化」とは異なる材料の「対応」についても見出されている。本発表では、高流束と協奏する水素障壁として、機能性被覆についてこれまでの成果について報告する。

2. 機能性被覆の要素技術研究開発

機能被覆研究は、トリチウム透過低減を主眼としつつ、ブランケット概念に応じて電気絶縁性や腐食耐性が要求されることを背景に、水素同位体透過低減性能や腐食耐性など、個別の性能を評価する要素研究が数多く実施されてきた[1]。一方、中性子照射による影響についての詳細な調査は、重イオン照射で損傷を模擬した研究が2010年代後半になって開始された。図1に、真空アーク蒸着法で作製した酸化エルビウム (Er_2O_3) 被覆を照射温度600 °Cで6.4 MeVの鉄イオンによって各損傷量を与えたときの重水素透過試験結果を示す[2]。400 °C以下では損傷密度に応じて透過係数に大きな差が生じたものの、最終的にはいずれの試料においても未照射の結果より透過低減性能が向上する結果が得られた。この結果は、照射による損傷導入と加熱による結晶粒の成長が競合すると同時に、被覆に残存した欠陥集合体などの照射損傷

によって重水素透過が阻害されたことを示唆している。このように、照射という一見「劣化」が起こると想定される高流束に対しても、被覆の「対応」の一端が見られたといえる。

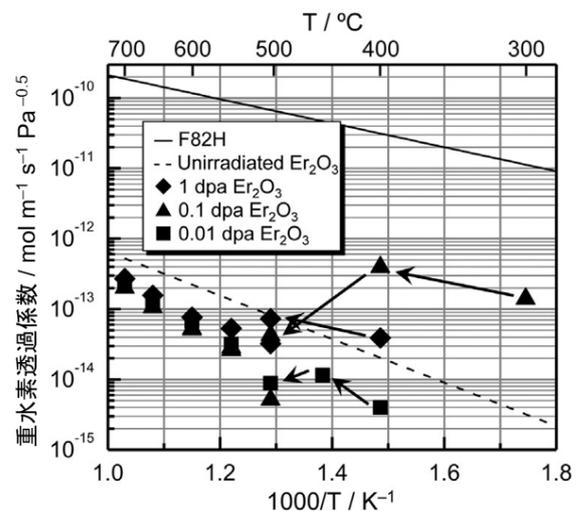


図1 600 °Cで鉄イオン照射した Er_2O_3 被覆の重水素透過係数に対する損傷密度依存性[2]

3. 水素－照射－腐食相乗効果

核融合炉ブランケットで想定されるあらゆる高流束下における機能性被覆の挙動理解のために、照射と腐食による相乗効果を水素同位体透過で捉える研究が近年進められている。図2に、ニッケルイオン照射で4.0 dpaの損傷密度を導入した酸化ジルコニウム (ZrO_2) 被覆を、液体トリチウム増殖材の候補であるリチウム鉛 (Li-Pb) 合金に曝露した状態で重水素透過試験を実施した結果を示す[3]。この場合においても、非照射の結果と比較して低い重水素透過フラックスが得られ、かつ異なる温度依存性を示した。さらに、透過フラックスの温度依存性の傾きから透過の活性化エネルギーを求めたところ、照射損傷を導入した試料で高い値がみられたことから、透過を構成する固溶 (溶解熱) と拡散 (拡散係数) のエネルギー障壁の増加が示唆された。これは、照射損傷による水素同位

体の拡散への寄与と、腐食生成物層の成長による固溶への寄与によるものと考えられる。このように、複合的な高流束下の試験においても、「腐食」は「劣化」の原因となる一方で、準安定層の生成などによる「対応」にも寄与しうることが示された。

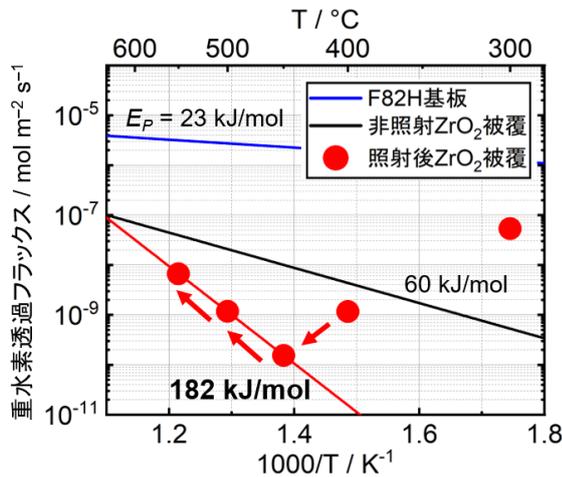


図2 Niイオンで4.0 dpaの損傷密度を導入したZrO₂被覆のLi-Pb曝露環境下重水素透過試験結果[3]

4. まとめ

核融合炉ブランケットへの適用に向けて研究開発が進められている機能性被覆には、あらゆる高流束に対応しつつ交換時期まで機能を発揮するという高い要求がある一方、これまでの検討では見出だせなかった特殊な変化が高流束下で発現しうることが明らかになりつつある。この協奏を理解し、制御することによって、核融合炉および高流束環境で高機能、長寿命の材料を創成することにつながると考えられる。

参考文献

- [1] T. Chikada, Ceramic coatings for fusion reactors, in: R. Konings, R. Stoller (Eds.), Comprehensive Nuclear Materials, 2nd edition, Elsevier, Oxford, 2020, pp. 274–283.
- [2] T. Chikada et al., Fusion Eng. Des. 88 (2017) 640–643.
- [3] S. Miura et al., Nucl. Mater. Energy 30 (2022) 101109.