

放射光 X 線分光を用いた原子力材料・燃料の照射効果の研究

岩瀬彰宏

大阪府立大学工学研究科

原子炉の炉内構造物材料や燃料は、長期間にわたり高エネルギーの中性子やガンマ線などの放射線に曝され、その構造や物性が大きく劣化する。この現象は、放射線による原子のはじき出しの蓄積やそれによる添加元素の偏析・析出によるものであり、照射損傷 (radiation damage) と呼ばれる。照射損傷による機械的特性の変化 (照射脆化など) に関しては、実用炉の監視試験片や研究炉で照射した材料の引っ張り試験、クリーブ試験、シャルピー試験などによるマクロ的变化の評価や、透過型電子顕微鏡 (TEM)、アトムプローブトモグラフィ (APT)、陽電子消滅 (PA) などを用いたミクロ的測定が精力的に行われ、照射による微細組織変化の解明につながっている。しかし一方で、これらの方法は、薄膜や極細ニードル状の試料が必要であったり、得られる情報がある特定の元素周辺に関するものに特化する、さらには、材料の非常に狭い領域を観測することになるので、統計的処理に十分な平均情報が得られにくいという欠点を併せ持つ。

これに対して、高輝度放射光による XAFS、XPS 法などの放射光分光測定は、内殻電子の励起による元素選択性と非破壊評価を大きな特徴とする分析法であり、材料内の軽元素 (O,C) から重元素 (アクチノイド、ランタノイド) に至るほぼすべての元素周辺の局所原子配列や化学結合状態、電子状態を非破壊で評価することができる。そのため、原子力構造物のように多くの添加元素を含む合金における放射線照射によるミクロ組織評価に適している。さらに非破壊検査であるため、同一試料における熱処理や放射線照射でミクロ組織がどう変化していくかを系統的に追跡していくことも可能であるため、今後の原子力材料の照射効果研究に大いに活用すべきであると考えられる。

本講演では、高エネルギー荷電粒子ビーム照射した压力容器鋼モデル合金 FeCu や実用鋼 A533B において、照射促進偏析による特定元素周りの原子配列の局所変化を EXAFS 法で観察した結果を紹介する[1]。また、XAFS 法、XPS 法は、压力容器鋼の照射損傷だけでなく、高燃焼度核燃料の高エネルギー核分裂生成片照射効果や核分裂生成片の 1 部である Xe,Kr などの燃料内偏析挙動の評価にも活用可能である。本講演では、核燃料 UO₂,PuO₂ の模擬物質としての CeO₂ に 100MeV 領域の Xe イオン照射したときの構造変化や化学結合状態変化、さらには、可燃毒 Gd₂O₃ 添加が照射効果に及ぼす影響などを XPS,XAFS で評価した結果を報告する[2-5]。

放射光分光による信頼性の高い照射損傷評価のためには、監視試験片や研究炉で中性子照射して放射化した材料、さらには実際の核燃料を取り扱う必要がある。そのための放射化材料、核燃料の持ち込み、測定が可能な放射光ビームラインの重要性についても触れたい。

[1] Y. Fujimura et.al., Nucl. Instr. Meth., B354(2015) 120-124

[2] H. Ohno et.al., Nucl. Instr. Meth. B 266(2008) 3013-3017.

[3] A. Iwase et.al., Nucl. Instr. Meth. B 267(2009) 969-972.

[4] Y. Tahara et. al., Nucl. Instr. Meth B277(2012)53-57

[5] K. Shimizu et.al., Nucl. Instr. Meth. B 286(2012) 291-294.