エネルギー分析型中性子イメージング装置(RADEN)を用いたホウ素の三次元可視化技術の開発

Development of Three-Dimensional Distribution Visualization Technology for Boron Using Energy Resolved Neutron-Imaging System (RADEN)

*阿部 雄太[1],土川 雄介[1],甲斐 哲也[1],松本 吉弘[2],Parker D. Joseph[2],篠原 武尚[1]
大石 佑治[3],加美山 隆[4],永江 勇二[1],佐藤 一憲[1]
[1]JAEA、[2]CROSS、[3]阪大、[4]北大

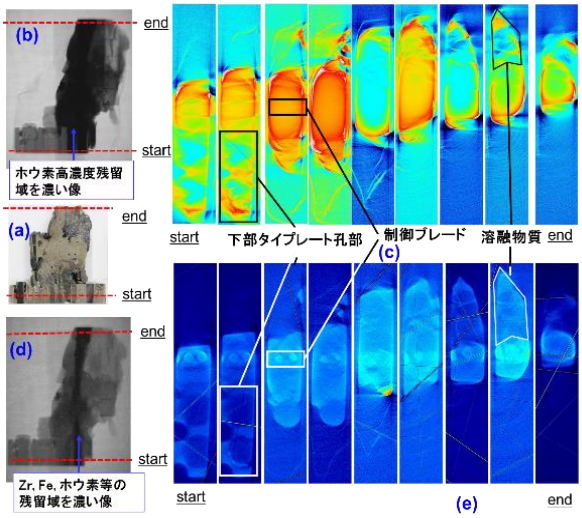
燃料デブリの臨界性評価や取出し時の超高硬度物質への対処等へ反映する炉内のホウ素含有物分布の推定精度を高める目的でホウ素の三次元可視化技術の開発を実施している。本報では、J-PARC のエネルギー分析型中性子イメージング装置(RADEN)を用いた CMMR 試験(模擬燃料集合体による破損試験)体のホウ素含有物分布について紹介する。

キーワード：エネルギー分析型中性子イメージング装置(RADEN)、福島第一原子力発電所(1F)、ホウ素含有物分布

1. 緒言 福島第一原子力(1F)発電所事故における炉内状況の把握における重要な要素として、粒子状の炭化ホウ素を内包した制御棒ブレードの炉心溶融時の振舞いが挙げられる。炉内のホウ素含有物分布の評価は、燃料デブリの臨界性評価(中性子吸収が高いホウ素含有物の定量的な情報等)や取出し時の超高硬度物質(ホウ化物の硬度は酸化物の約 2 倍[1])への対処等の観点から重要な課題である。1F2 号機の温度履歴を模擬した CMMR 試験(模擬燃料集合体による破損試験)においてもホウ素含有物が存在することが確認[2]されている。

2. ホウ素含有物の三次元可視化技術 中性子は、ホウ素等の一部の元素に大きな吸収を持つだけでなく、高密度元素(Fe 等)に透過性を持ち、透過度もエネルギーにより異なる。このような中性子の特性に着目し、1F2 号機を模擬した条件で破損試験を行った CMMR 試験体を対象に、エネルギー分析型中性子イメージング装置(RADEN)を用いて、ホウ素含有量分布を測定し、校正用標準試料(Zr_xB_{1-x} 及び Fe_xB_{1-x}、ホウ素密度 0.11～1.08[g/cm^3])による較正を行うことで、ホウ素含有物の三次元可視化技術を開発している。なお装置は、異なるエネルギーで得た CT 画像間で十分なコントラスト及び有効断面積の差とホウ素濃度に相関を得ることで、空間分解能 0.1mm で 3mol%(Fe 及び Zr 混在時)の B 検出下限値で撮像できると期待される。

3. 結果及び考察 CMMR 試験体においては、透過像(図 b, d)ではホウ素高濃度残留域と Zr、Fe 及びホウ素等の残留域を観測でき、CT 画像(図 c, e)ではホウ素含有物分布が熱外と冷中性子に関して十分なコントラストの違いや(ホウ素含有量が少ない)溶融物質が確認できた。冷中性子 CT 画像(図 c)では、下部タイプレートの形状が実物より歪んでいることが確認され、制御ブレードも近傍に存在するホウ素の影響で十分な位置情報が得られなかった。熱外中性子 CT 画像(図 e)では、実物同様の形状が確認でき、制御ブレードにおいても明確な位置情報が得られた。これは、冷中性子が一部を透過しなかったことによる影響と推察され、許容できるコントラストを確保しつつ、熱外中性子近傍までエネルギー上げることで解決が見込める。校正用標準試料では、熱外と冷中性子における有効断面積の差とホウ素濃度で良好な相関が確認できた。



図CMMR試験体の各種撮像結果 (a)可視画像、(b) 冷中性子透過像、(c) 冷中性子CT画像、(d)熱外中性子透過像、(e)熱外中性子CT画像

4. 結論 RADEN を用いて、CMMR 試験体におけるホウ素含有物の三次元可視化技術の見通しが得られた。今後は、校正用標準試料で得られた相関で CT 撮像を較正することで、ホウ素含有物の定量化を実施する。

謝辞：本研究での測定はユーザープログラム(提案課題番号：2019P0702)の下で MLF / J-PARC の BL22-RADEN で 2019A 期に行われました。

参考文献 [1] Takano, M. et. al., J. Nucl. Sci. Technol, 51, (2014), [2] Y. Abe. et. al., Jour. of Nucl. Eng. and Rad. Sci., 021113, 6(2), (2020)

* Yuta Abe[1], Yusuke Tsuchikawa[1], Tetsuya Kai[1], Yoshihiro Matsumoto[2], Joseph D Parker[2], Takenao Shinohara[1], Yuji Ohishi[3], Takashi Kamiyama[4], Yuji Nagae[1], and Ikken Sato[1], [1]JAEA, [2]CROSS, [3]Osaka Univ., [4]Hokkaido Univ.,