

福島第一原子力発電所の燃料デブリ分析・廃炉技術に関わる研究・人材育成

(11) 模擬燃料デブリのミクロ材料特性とマクロ圧縮強度

Research and human resource development for analysis of fuel debris and decommissioning technology of Fukushima Daiichi nuclear power plants

(11) Microscopic material properties and macroscopic compression strength of simulated nuclear fuel debris

*川上 有都¹, 寺西 正輝¹, 桑水流 理¹

¹福井大学

模擬燃料デブリのミクロな弾塑性特性をナノインデンテーションにより同定した。凝固欠陥の代替として鑄造材の鑄巣の形状を使用し、同定した材料特性と併せて、空隙率の異なる複数の有限要素モデルを作成した。マクロな圧縮強度に対する空隙の影響を有限要素解析により評価し、圧縮試験の結果と比較した。

キーワード: 燃料デブリ, 二酸化ウラン, 空隙, 圧縮強度, 有限要素解析, ナノインデンテーション

1. 緒言

福島第一原子力発電所における核燃料デブリの取り出しに際して、デブリを分割した上で、安全に取り出す必要があるため、デブリの機械的性質の把握が重要である。デブリは一度溶融し、固化しているため、多数の凝固欠陥を含んでいると予想される。本研究では圧縮強度に対する空隙率の影響を明らかにする。

2. ミクロ材料特性の同定

模擬燃料デブリとして溶融固化した共晶 $\text{UO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ を使用し、ナノインデンテーション試験を実施した。圧子にはバーコビッチ圧子を用い、押込荷重は 98 mN として 12 点測定し、最も硬度の低い結果を材料同定に使用した。荷重と変位の関係を 2 次近似し[1]、有限要素解析の結果がこの曲線に一致するように、材料定数を同定した[2]。ただし有限要素解析は軸対称 2 次元問題で近似し、ひずみ硬化曲線 (降伏応力 σ_Y と塑性ひずみ ϵ_p の関係) には Swift 式を用いた。有限要素解析には MSC Marc を使用した。同定の結果、ヤング率は $E = 260.7 \text{ GPa}$ 、ひずみ硬化曲線は $\sigma_Y = 7288 (6.5 \times 10^{-5} + \epsilon_p)^{0.2997} [\text{MPa}]$ となった。

3. マクロ圧縮強度の推定

溶融凝固体の模擬欠陥としてアルミニウム鑄造合金の鑄巣の 3 次元画像[3]を使用した。画像は連続研磨面の光学顕微鏡画像である。そこから直径 670 μm 、高さ 700 μm の円柱形に画像を切り抜き、空隙率の異なる 8 通りの有限要素モデルを作成した。これを上下から剛体板で挟み、接触解析により 10% 圧縮ひずみを与えた。材料特性には上記のヤング率とひずみ硬化曲線を使用し、ポアソン比は 0.3 とした。解析には Abaqus を使用した。解析より得られた公称ヤング率と公称 0.2% 耐力と空隙率の関係を図 1 に示す。図中に回帰曲線の近似関数を示す。指数の違いから、ヤング率より 0.2% 耐力の方が空隙率の影響が強く、強度の低下が大きいことがわかる。また、図 1(b)には実際の圧縮試験で得られた圧縮破壊強度を併せて示した。解析と実験の比較より、解析は模擬デブリの強度を過大評価しており、空隙による強度低下も小さい。解析では延性材料を仮定しており、延性破壊強度として耐力を用いたが、実際の $\text{UO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ は脆性破壊したので、強度評価法に問題がある。ひずみ硬化を無視し、弾完全塑性体を用いた解析[4]と比較すれば、空隙による強度低下は大きくなっているため、強度は材料の非弾性特性に依存することが明らかであり、今後は脆性的な挙動を評価する解析方法について検討する必要がある。

謝辞

本研究は、文部科学省の英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業による委託業務として、国立大学法人福井大学が実施した平成 29 年度「福島第一原子力発電所の燃料デブリ分析・廃炉技術に関わる研究・人材育成」の成果の一部である。

参考文献

- [1] 小笠原永久, ほか, 日本機械学会論文集 A 編, 70 (2004), 1592-1534.
 [2] Li, H., et al., Int. J. Solids Structures, 81 (2016), 151-159.
 [3] 桑水流理, ほか, 日本機械学会論文集 A 編 77 (2011), 1046-1050.
 [4] 寺西正輝, 桑水流理, 日本原子力学会 2017 年秋の大会 (2017), 3J06.

*Aruto Kawakami¹, Masaki Teranishi¹ and Osamu Kuwazuru¹

¹University of Fukui

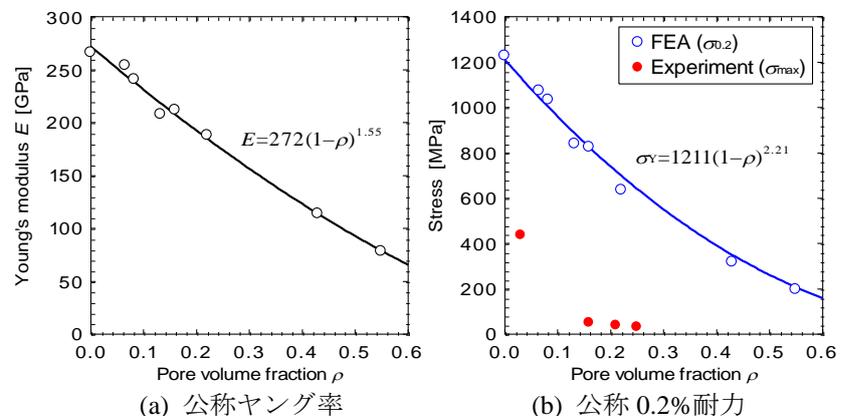


図 1 空隙率の影響