

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 (24) 損傷力学有限要素解析による溶融凝固体の圧縮強度評価

Research and Human Resource Development for Analysis of Fuel Debris and Decommissioning Technology
of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants

(24) Evaluation of Compressive Strength of Melted-solidified Ceramics by Damage Mechanics Finite Element Analysis

*桑水流 理¹, 野坂 耀平¹, 寺西 正輝²

¹ 福井大学, ² 新潟大学

The compressive fracture strength of melted-solidified $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ eutectic ceramics and its dependency on the porosity were investigated by the finite element analyses. The damage mechanics model tuned up for the brittle fracture was employed in the fracture simulation. The formula was obtained to predict the strength from the porosity fraction.

Keywords: Fuel Debris, Compressive Strength, Porosity, Damage Mechanics, Finite Element Method

1. 緒 言

福島第一原子力発電所における燃料デブリの取り出しに際し、デブリの強度は重要なパラメータである。燃料被覆管は、水素爆発の要因ともなった $\text{Zr} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 反応により、そのほとんどが ZrO_2 になったと考えられている。本研究では ZrO_2 の模擬デブリとして溶融凝固した $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 共晶体を対象とし、圧縮破壊強度とその空隙率依存性を有限要素解析 (FEA) により調査し、圧縮破壊強度と空隙率の関係式を作成した。

2. 解析方法

ZrO_2 と Al_2O_3 を 426 : 574 の質量比で混合して加熱、溶融後、120 K/min で冷却、凝固させた試験片を対象とした。ナノインデンテーション試験の結果に基づき、FEA による材料定数同定[1]を行い、ヤング率 433 GPa、降伏応力 7517 MPa を得た。ポアソン比は 0.3 とした。凝固時に発生する空洞欠陥の形状はアルミ鋳物の鑄巣形状[2]で代替した。空隙率の異なる 6 つの有限要素モデル (直径 0.7 mm、高さ 0.7 mm) を作成した。下面を剛体床で支持し、上から剛体板で準静的に速度制御で圧縮した。床および板との摩擦係数は 0.1 とし、重力は無視した。解析には汎用 FEA コード Abaqus を用いた。

圧縮破壊解析では弾完全塑性体を仮定するが、脆性破壊を模擬するため、塑性変形開始後すぐに有限要素を除去する損傷力学モデルを適用した。脆性的な破損により、不安定な破壊が進むため、解法には動的陽解法を用いた。しかしクーラン条件により時間増分が過度に小さくなるので、時間増分を大きくするため、質量密度を ZrO_2 の 10^8 倍に設定した。境界条件は剛体板の初速度を 0 mm/s とし、圧縮開始後 0.71 s まで加速度 $9.8 \times 10^{-3} \text{ mm/s}^2$ で加速し、以後は 0.007 mm/s で等速圧縮した。破壊の進展挙動が質量密度の影響を若干受けるが、境界条件は準静的なので、質量密度は強度には影響しない。

3. 解析結果と考察

FEA から得られた $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ の応力とひずみの関係を図 1 に示す。応力の急激な低下として脆性破壊[3]が再現された。圧縮破壊強度と空隙率の関係を図 2 に示す。実際の圧縮試験の結果も示す。また比較のため $\text{UO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ について同様の検証を行った結果[4]も示す。図中の数式は解析結果の回帰曲線である。 $\text{ZrO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ の解析結果は実験結果よりも大幅に高い結果となった。バルクの材料特性を過大評価したことと、焼結体 (空隙 2%) は微細空孔により、凝固体 (空隙 22%) は大きい気泡により強度が低下したためである。強度の絶対値には再検討が必要であるが、空隙形状を実物に近づけることで、強度予測式を改善できる。

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 31 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] Li, H., *et al.*, Int. J. Solids Struct. 81 (2016), 151-159.
- [2] 桑水流理, 他, 日本機械学会論文集 A 編 77 (2011), 1046-1050.
- [3] Yusufu, A., *et al.*, Journal of Nuclear Materials 499 (2018), 175-181.
- [4] 寺西正輝, 他, 日本原子力学会 2019 年秋の大会 (2019), 3E06.

*Osamu Kuwazuru¹, Yohei Nosaka¹ and Masaki Teranishi²

¹Univ. of Fukui, ²Niigata Univ.

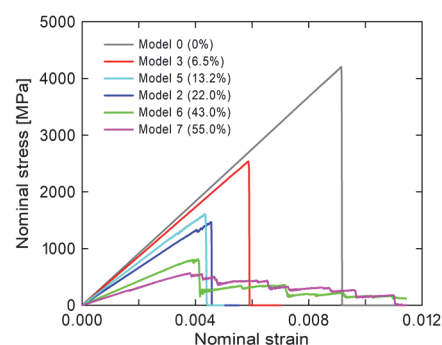


図 1 応力とひずみの関係

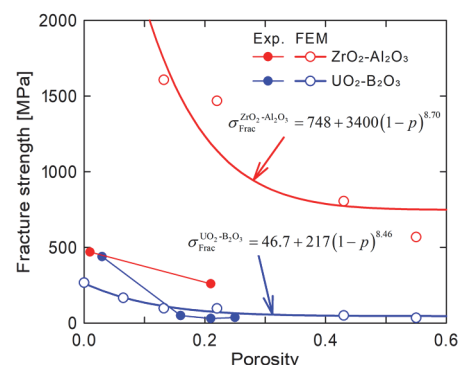


図 2 破壊強度と空隙率の関係