

基于COMSOL多物理场耦合的FCM燃料性能分析模型

张程¹

1. 核科学与技术学院, 西安交通大学, 陕西, 西安

简介: 全陶瓷微密封装 (FCM: Fully Ceramic Microencapsulated) 燃料, 是由大量TRISO燃料颗粒 (~1000个/芯块) 弥散于SiC基体组成的柱状芯块。作为新一代用于核反应堆的燃料, 具有裂变产物包容能力强、热导率高、辐照稳定性好等优势。基于COMSOL多物理场开发的FCM燃料单颗粒和芯块的多维热学-力学-裂变产物扩散耦合分析模型, 详细考虑了材料物性参数随温度、燃耗、快中子注量等因素的变化, 基于COMSOL内置和自定义的模块, 实现了对TRISO燃料颗粒和FCM燃料的热膨胀, 辐照肿胀, 蠕变, 裂变气体释放行为等热学性能 (如导热) 及力学性能 (如应力分布状态) 的模拟和分析。

结果: 仿真研究的结果, 包括燃料热导率、芯块温度场、应力应变、Mises应力分布等如下图所示。

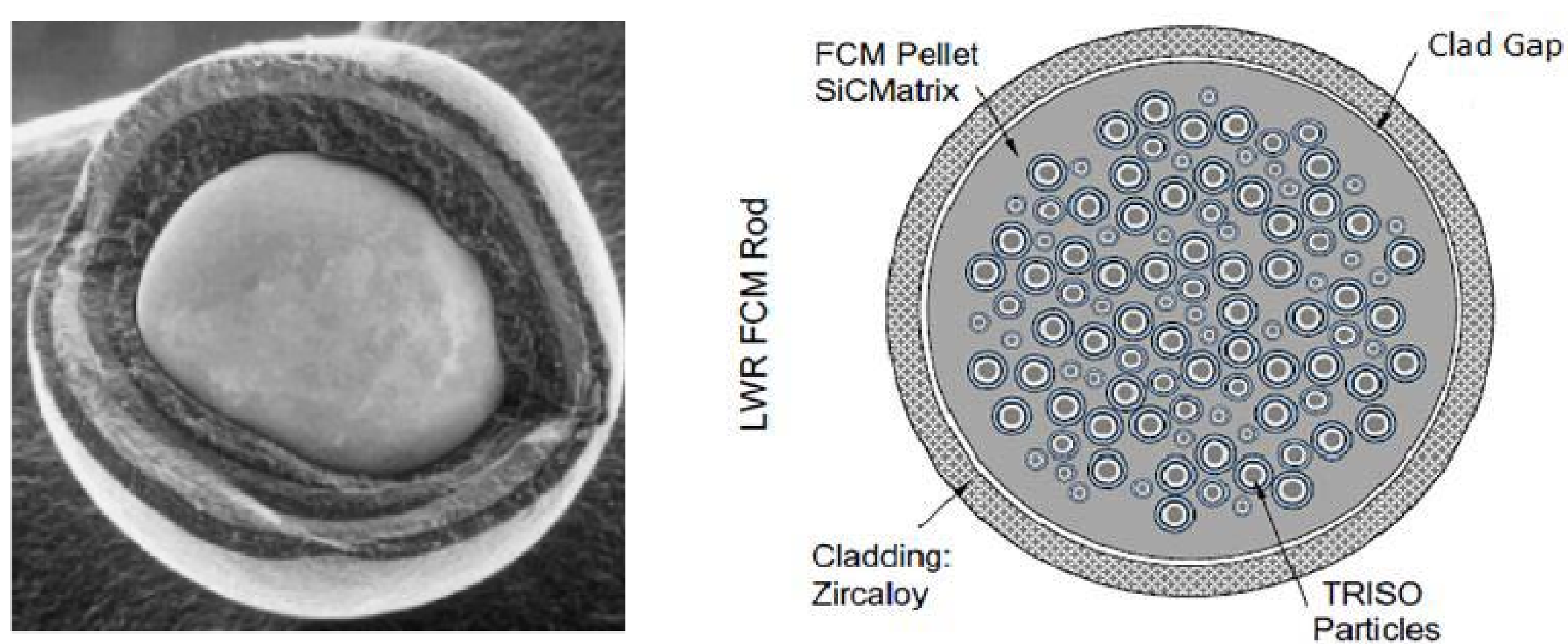


图 1. TRISO颗粒^[1]及FCM燃料^[2]结构示意图

计算方法: 在研究中使用二维及三维建模方法, 通过COMSOL中的固体力学模块、固体传热模块、数学模块中的PDE和ODE接口, 实现对TRISO燃料及FCM的仿真和性能分析。

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_{ted} \quad \mathbf{q} = -k \nabla T$$

$$\varepsilon_{inel} = \varepsilon_0 + \varepsilon_{ext} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{hs} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{vp}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right] \quad \frac{dC}{dt} = D(t) \Delta r C(r, t) + \beta(t)$$

创建典型几何模型如下图所示, 并对相关条件进行描述。

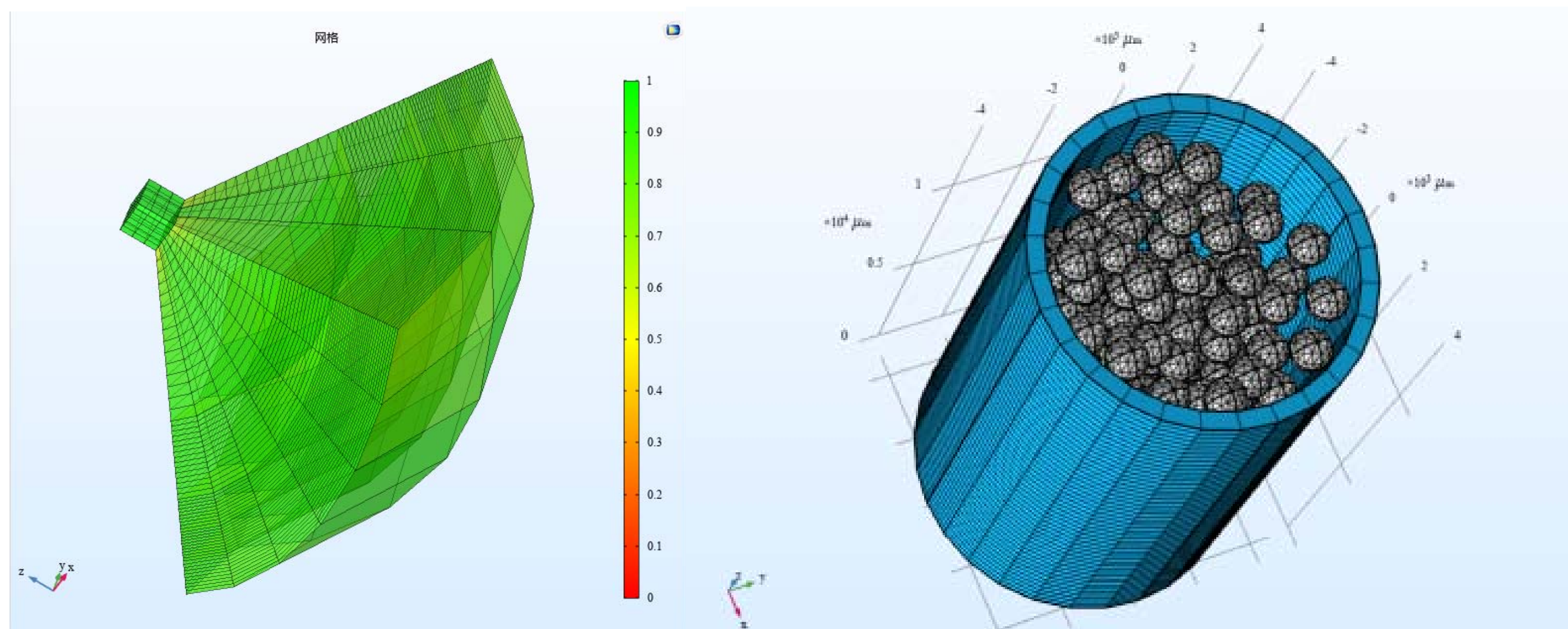


图 2. 典型TRISO颗粒及FCM的几何建模

物理模型: 通过用户自定义的方法, 添加了物性参数、裂变产物扩散, 燃耗, 辐照效应, 裂变气体释放等模型。

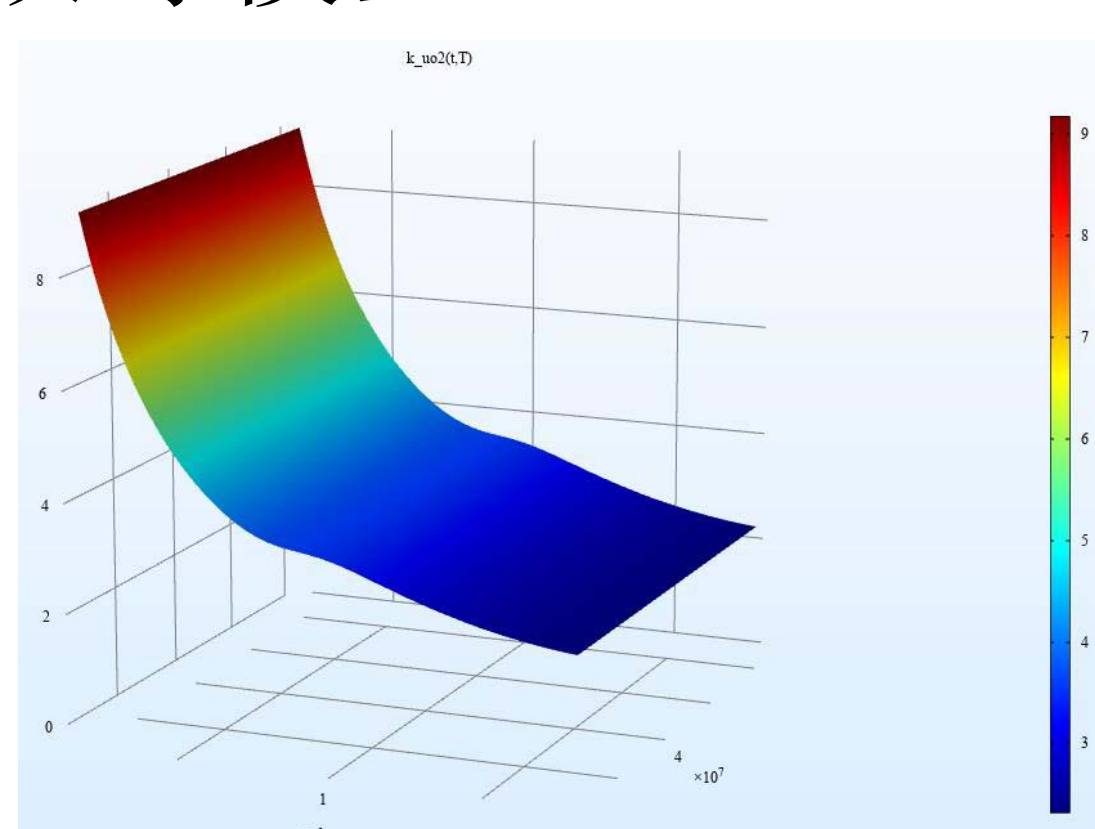


图 3. 芯块热导率的变化

$$\frac{dm_{gb}}{dt} = (1 - F_c) J_1 - J_2$$

$$\frac{dm_{bl}}{dt} = F_c J_1 + J_2 - J_3$$

$$\frac{dr_{bl}}{dt} = \frac{\pi \delta_b D_{gb}^v \Omega}{4 r_{bl}^2 k T} (P_{bl} - P_h - 2 \gamma \sin \theta / r_{bl}) k_f^2$$

图 4. 裂变气体释放模型

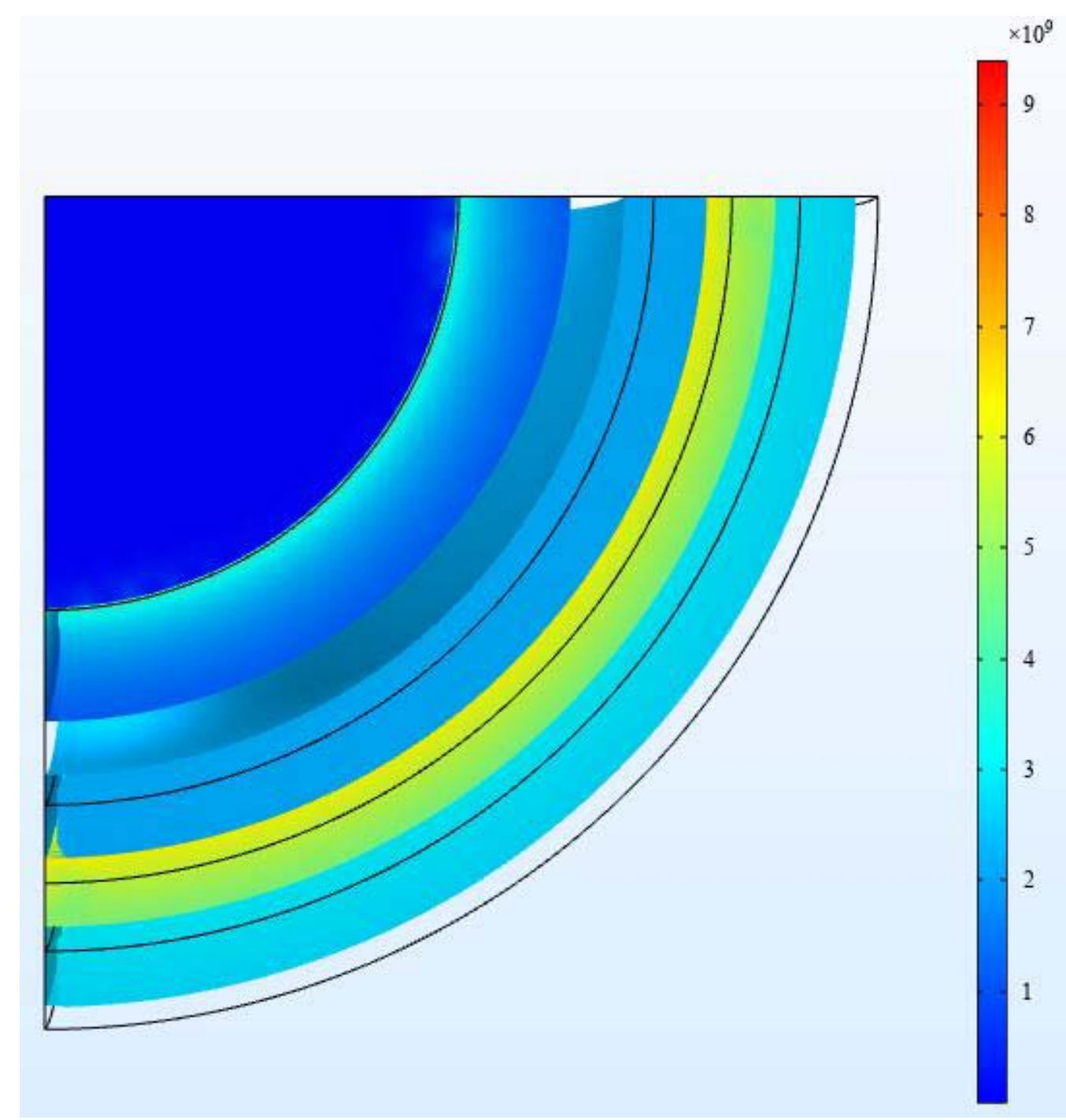


图 5. 辐照变形及应力分布

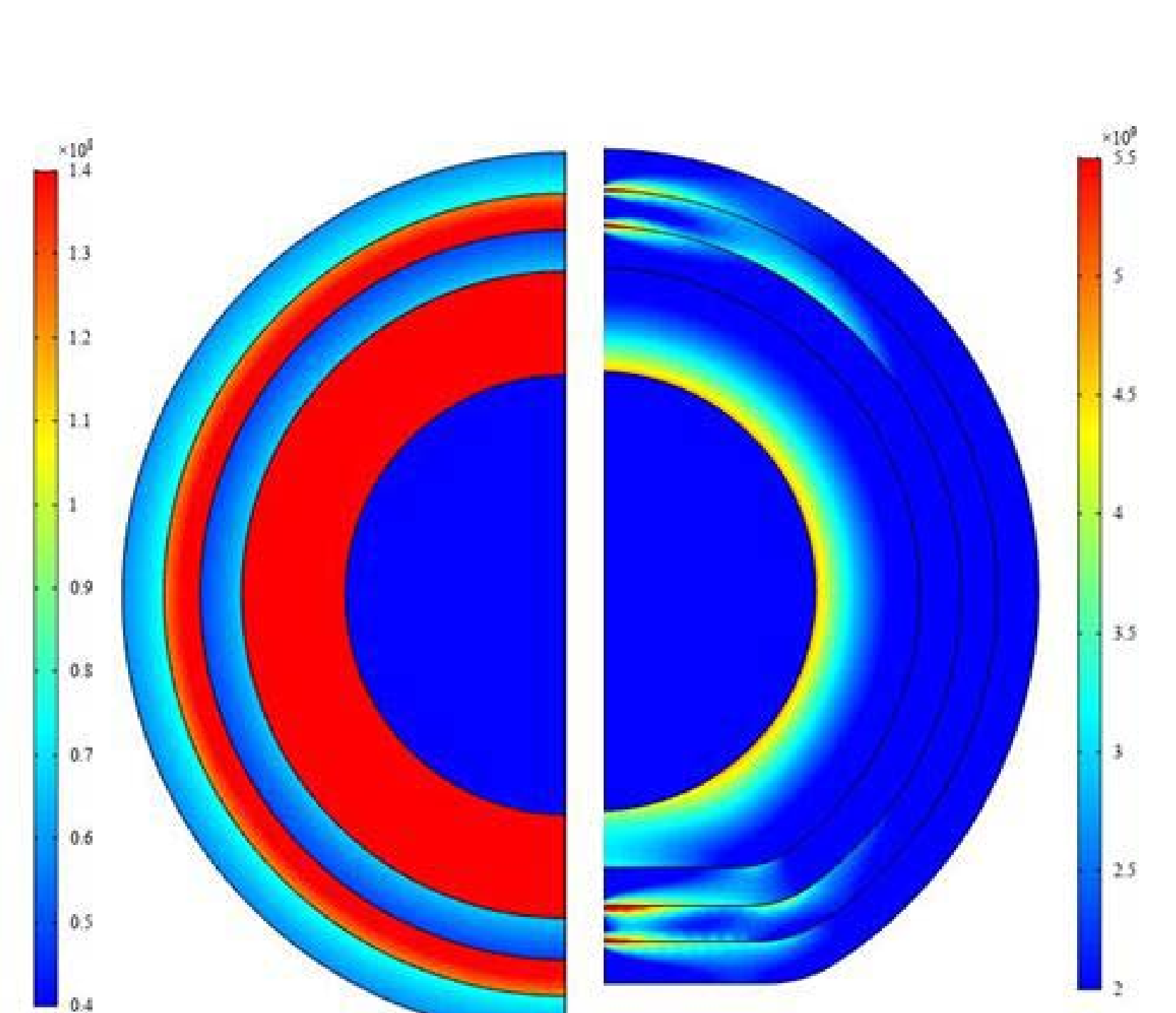


图 6. 几何缺陷下的Mises应力

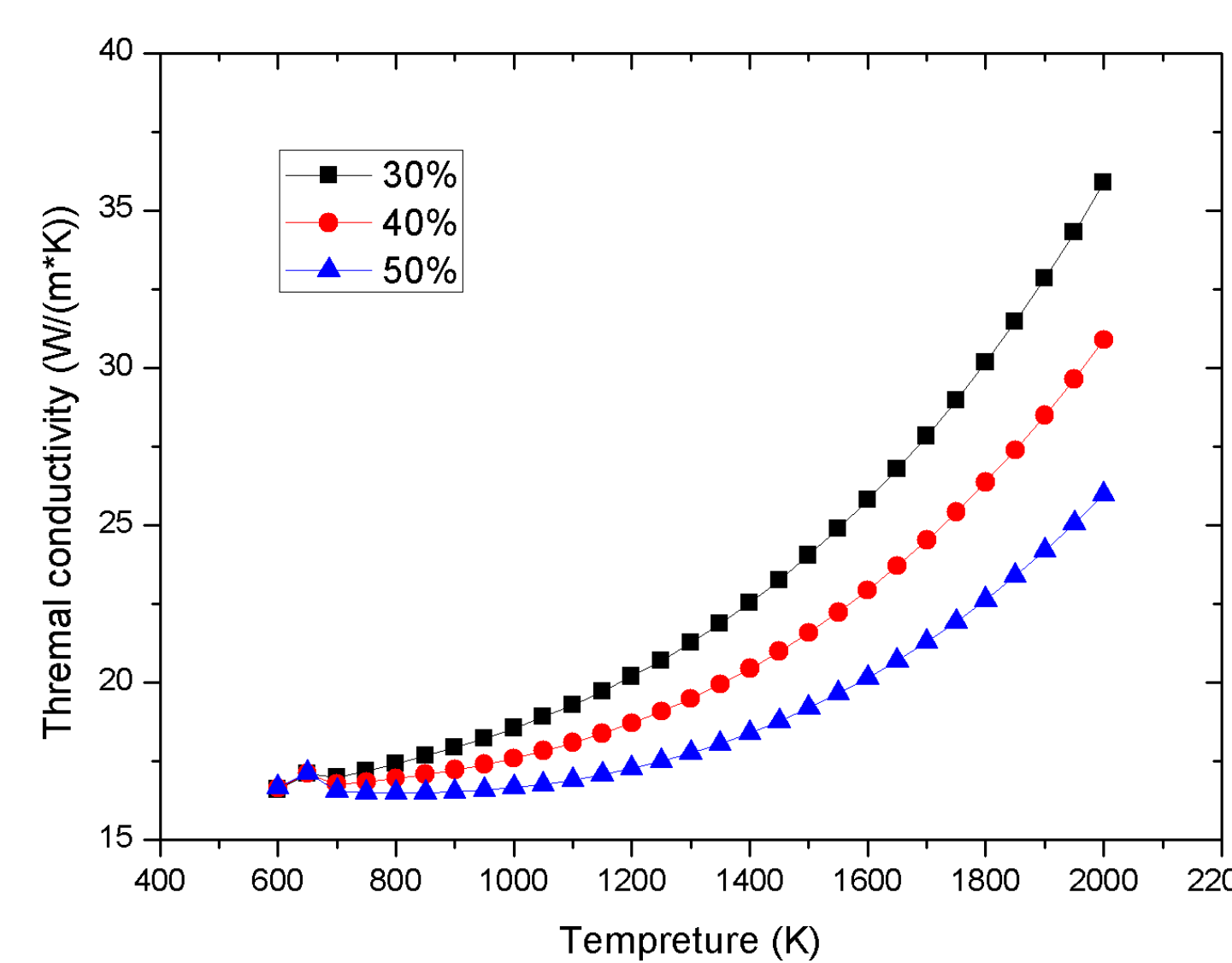


图 7. 不同工况下的热导率

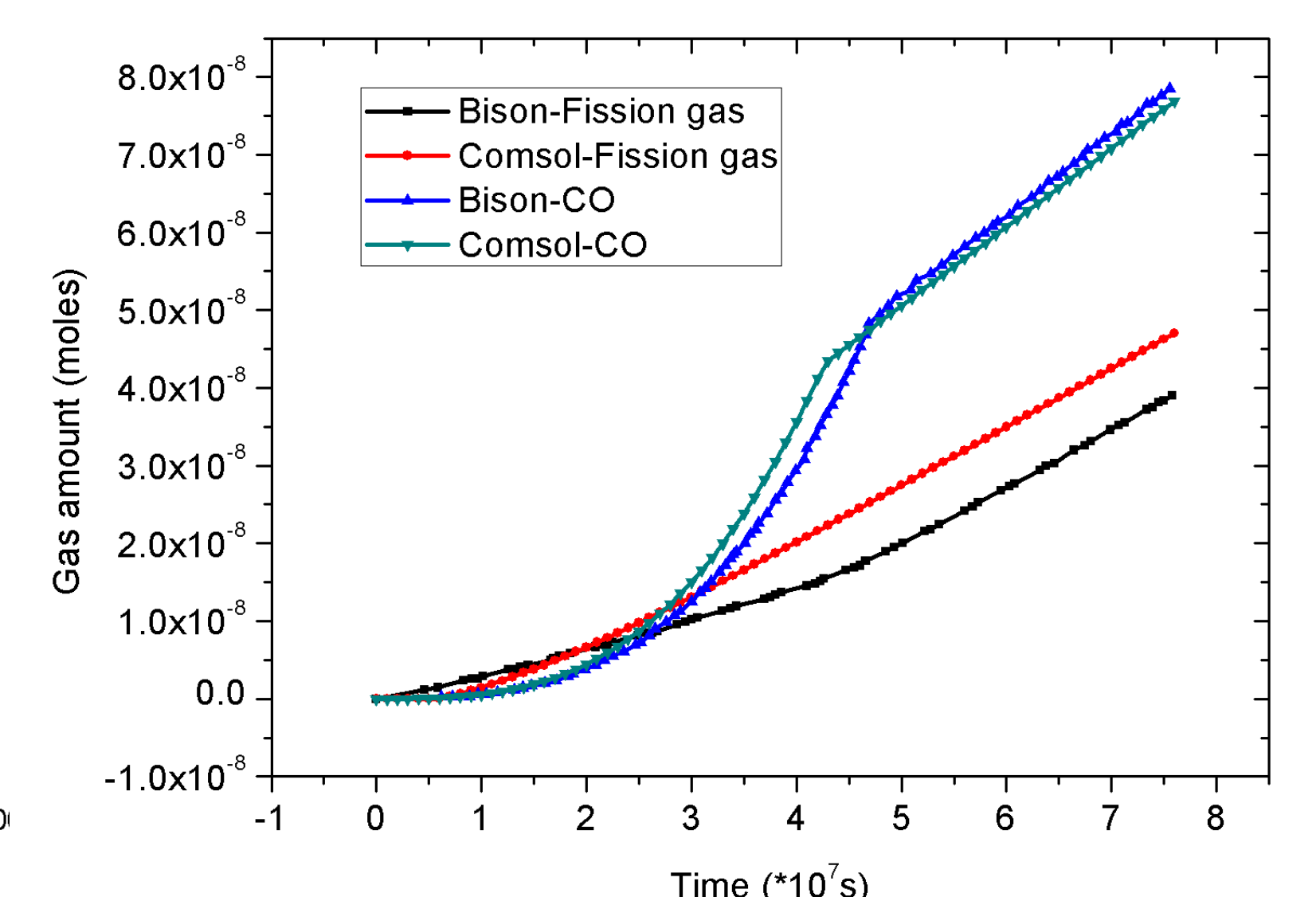


图 8. 裂变气体释放结果

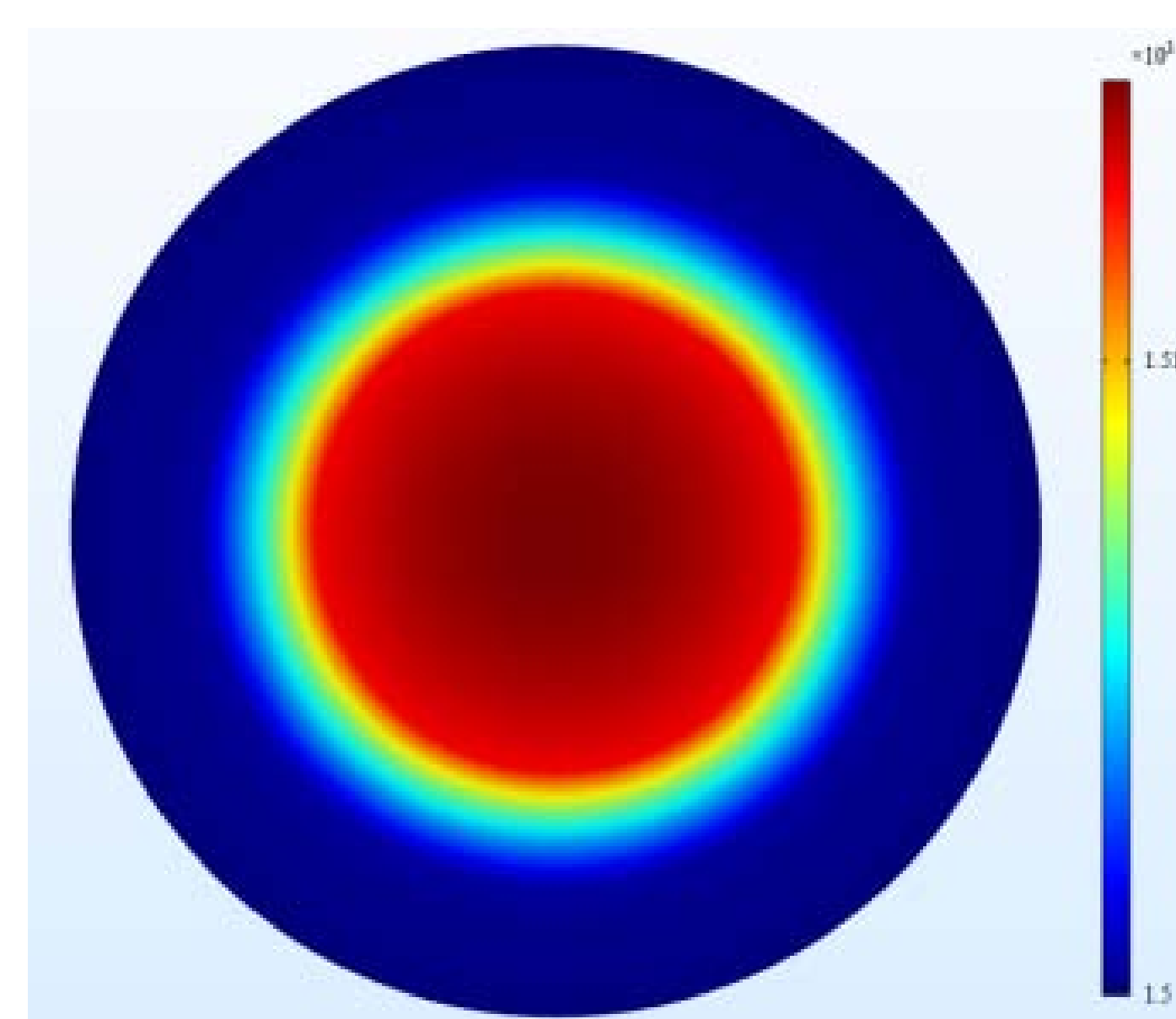


图 9. 温度分布云图

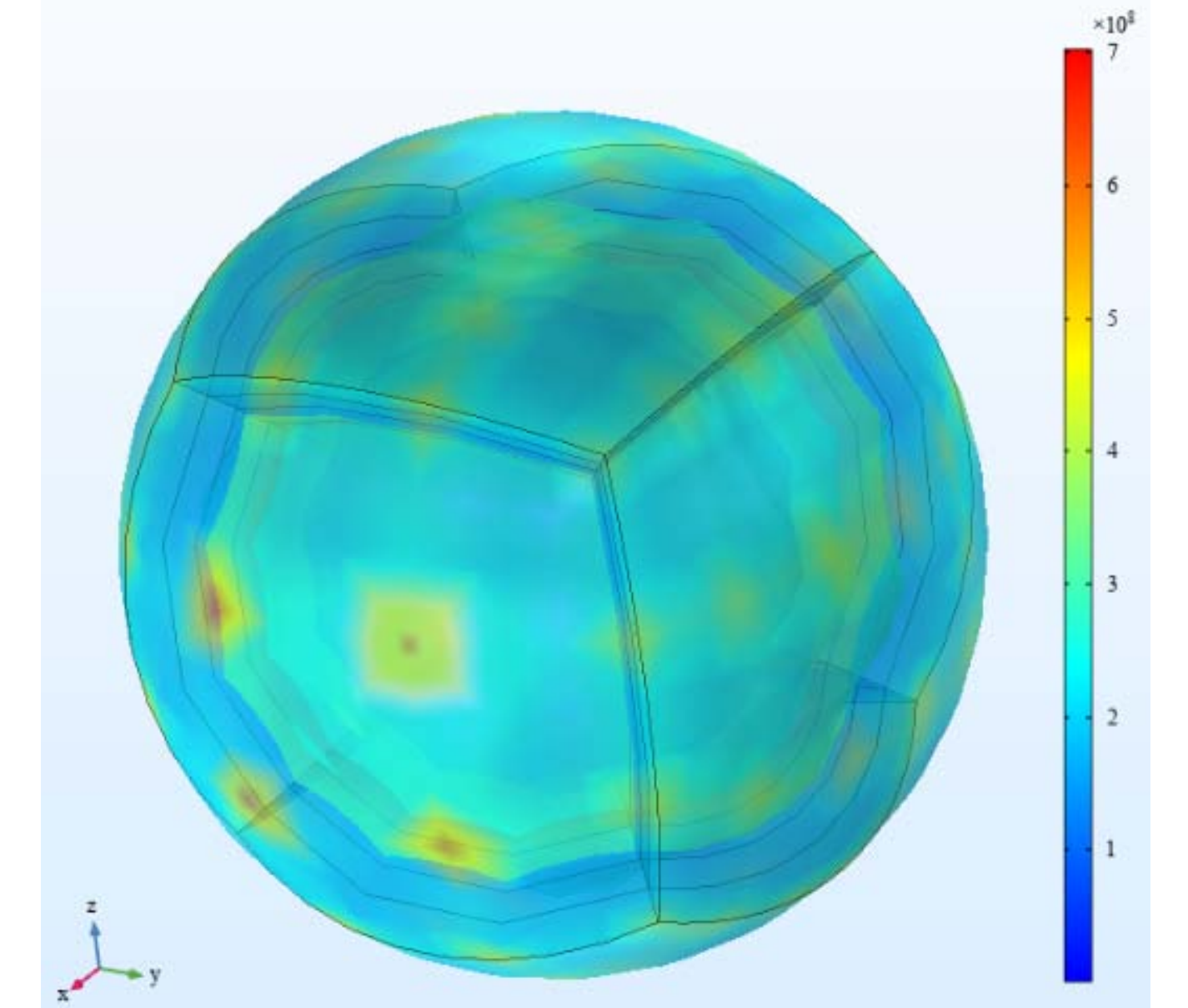


图 10. 表面应力分布

结论: 通过 **COMSOL Multiphysics** 中二维及三维建模方法, 利用固体力学模块、固体传热模块、PDE和ODE接口, 实现了对TRISO燃料颗粒和FCM燃料的热膨胀, 辐照肿胀, 蠕变, 裂变气体释放行为等的多尺度多物理场耦合和分析。基于COMSOL平台初步建立了燃料性能分析方法, 并得到了应力应变分布、温度分布、热导率等结果, 并进行了对比验证。

参考文献:

1. J.D. Hales, et al. Multidimensional multiphysics simulation of TRISO particle fuel[J]. Journal of Nuclear Materials, 443, 531-543. (2013)
2. Terrani, et al. Fabrication and characterization of FCM fuels. J. Nucl. Mater. 426, 268-276. (2012)
3. K. Fukuda, T. Ogawa, K. Hayashi, et al. Research and development of HTTR coated particle fuel[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 28, 570-581. (1991)
4. X.W. Zhou, C.H. Tang. Current status and future development of coated fuel particles for high temperature gas-cooled reactors[J]. Progress in Nuclear Energy, 53, 182-188. (2011)
5. Homan, F.J., Kania. Irradiation performance of HTGR coated particle fuels with ZrC coatings[R]. ORNL/TM-9085, ORNL. January. (1985)
6. Ogawa, T., Fukuda, K. Research and development of ZrC-coated UO2 particle fuel at the Japan Atomic Energy Research Institute in nuclear fuel performance, BNES London, 163-169. (1985)