

# 高温堆加热除湿试验升温过程研究

沈凯跃<sup>1</sup>, 郑伟<sup>1</sup>, 银华强<sup>1</sup>, 何学东<sup>1</sup>, 马晓珑<sup>2</sup>

1. 核能与新能源技术研究院, 清华大学, 北京市, 海淀区

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西, 西安。

**简介:**高温气冷堆中使用了大量的碳素材料, 作为多孔材料, 碳素材料含有一定水分等杂质。为了减小反应堆高温运行条件下的堆内材料腐蚀, 高温堆在初装堆和事故后需要对一回路进行严格的加热除湿操作。本文针对高温堆加热除湿试验升温过程作数值分析, 为高温堆加热除湿方案的选择提供有益的指导。使用的物理场为固体和流体传热传热和k-ε湍流模型, 多物理场耦合为非等温流动。

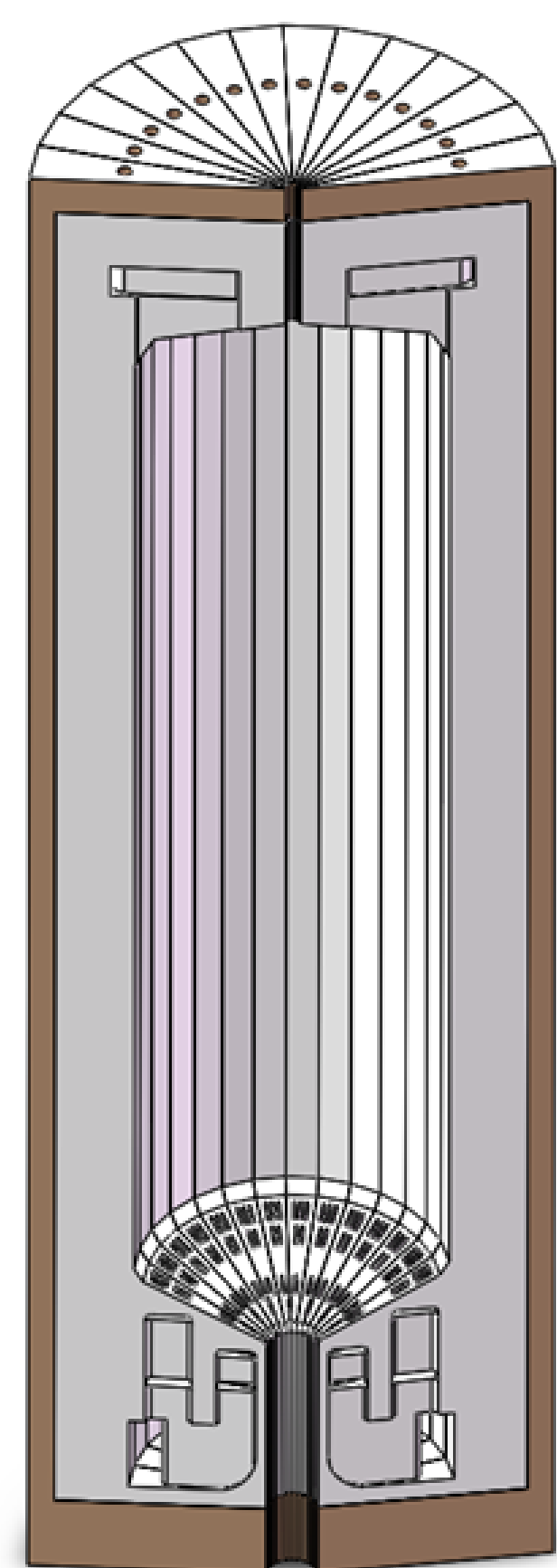


图 1. 高温堆堆芯几何模型

**计算方法:** 计算主要以传热和流动的耦合进行, 得到堆芯内的流动情况和温度场分布。对应传热模块选择固体和流体传热接口, 流动选择流体流动模块—湍流--k-ε湍流接口。

传热方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \vec{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \vec{q} = Q$$

$$\vec{q} = -k \nabla T$$

k-ε湍流方程:

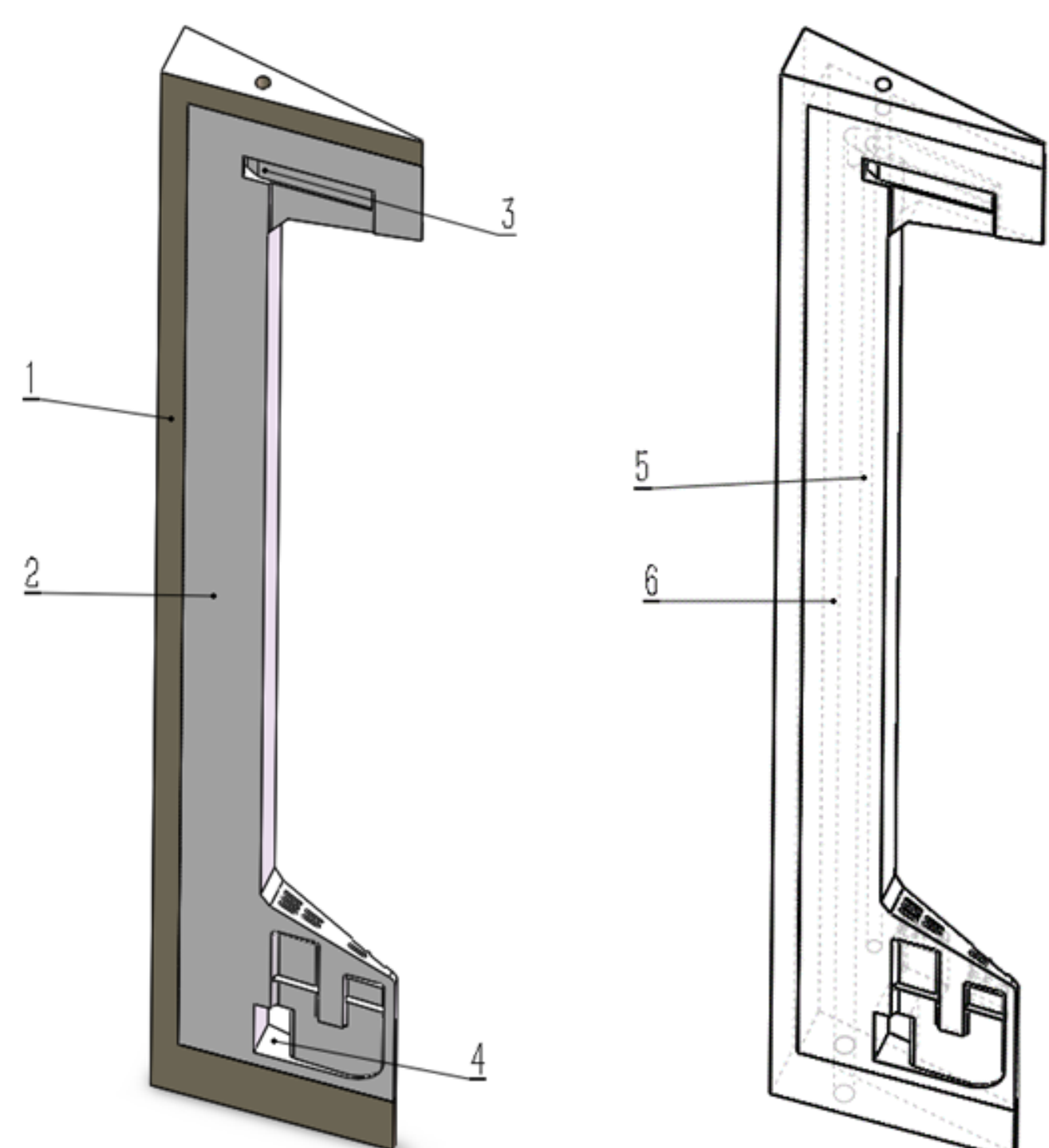
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

式中:  $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $\sigma_\epsilon$ 、 $\sigma_k$ --经验常数;

取值分别为  $C_{1\epsilon}=1.44$ ,  $C_{2\epsilon}=1.92$ ,  $\sigma_\epsilon=1.3$ ,  $\sigma_k=1$

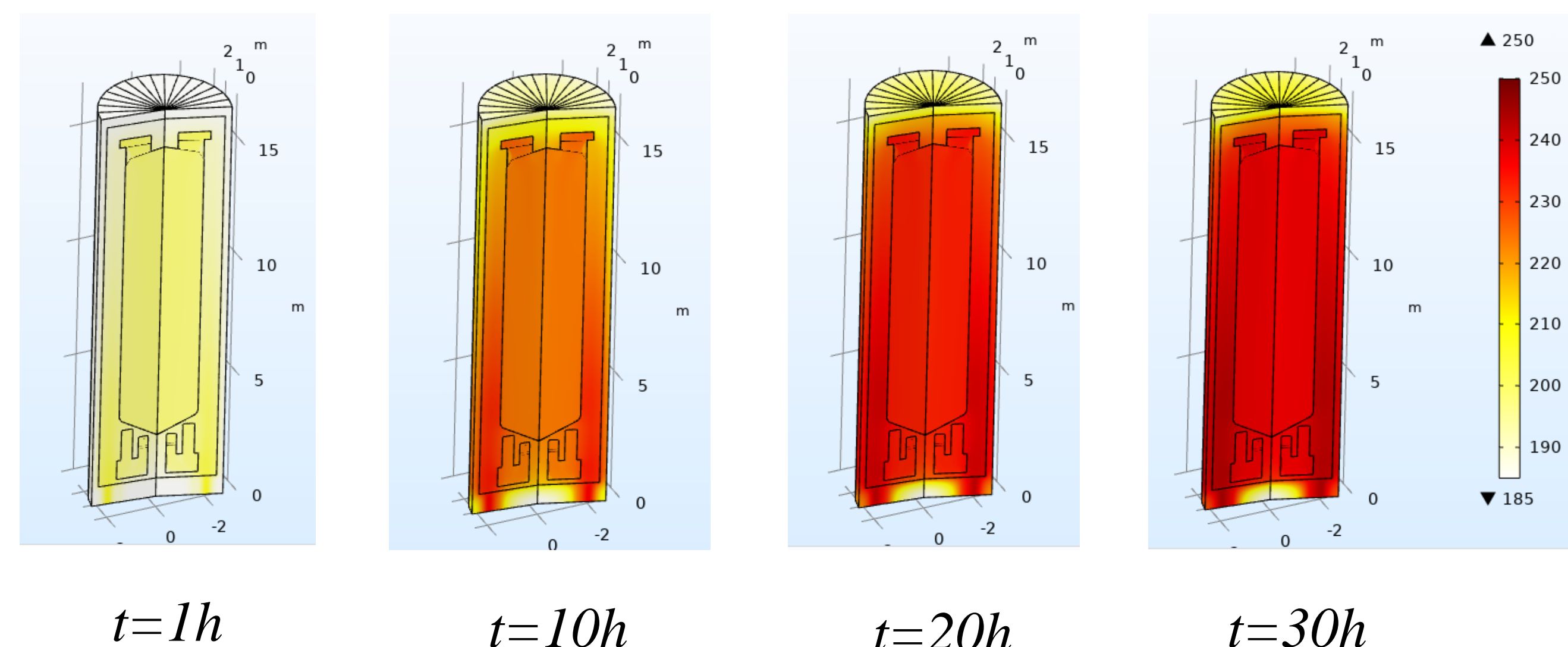
根据堆芯几何对称性特点, 只取1/30构件模型的简化几何进行计算, 如图所示:



1. 碳砖屏蔽层
2. 石墨反射层
3. 冷气室
4. 热气联箱
5. 控制棒孔道
6. 冷氦气孔道

用于加热堆芯的干燥热氦气的主要流动路径为: 通过冷氦气孔道从堆芯底部进入顶部的冷气室, 再通过堆芯腔下降至热气联箱, 最后通过热气导管离开堆芯。

**结果:** 高温堆堆芯堆内构件 (石墨反射层和碳砖屏蔽层) 及氦气的初始温度均为100°C, 目标温度250°C, 由计算可知在30h, 高温堆内大部分区域达到目标温度。堆芯区域的升温过程如下所示:

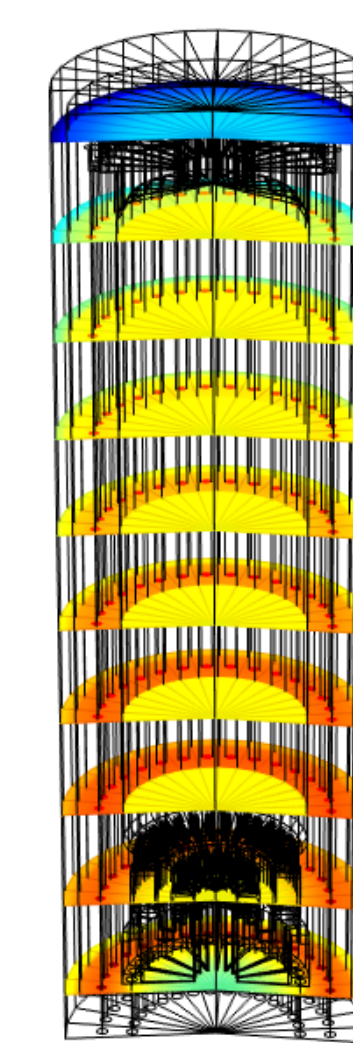


t=1h

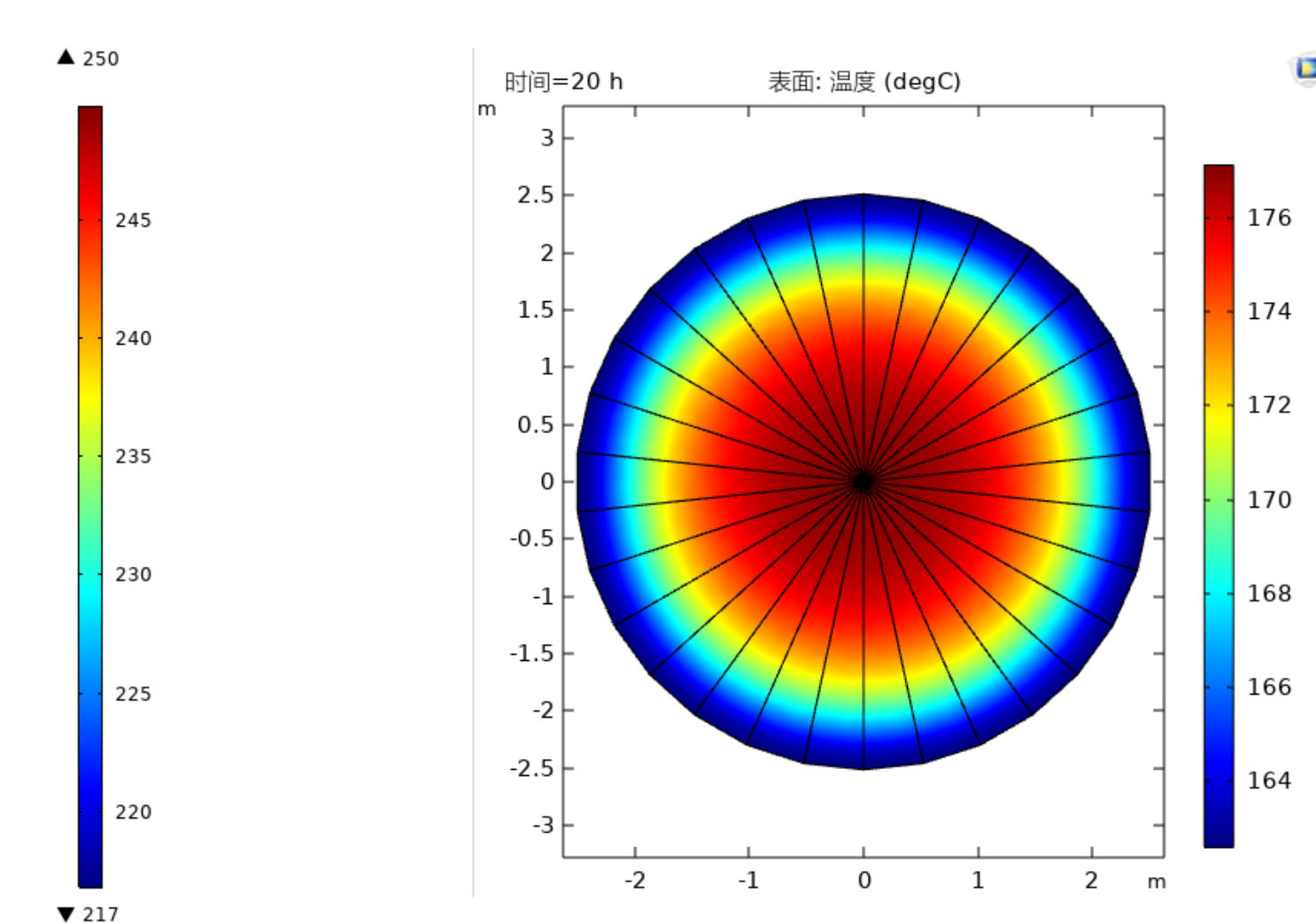
t=10h

t=20h

t=30h

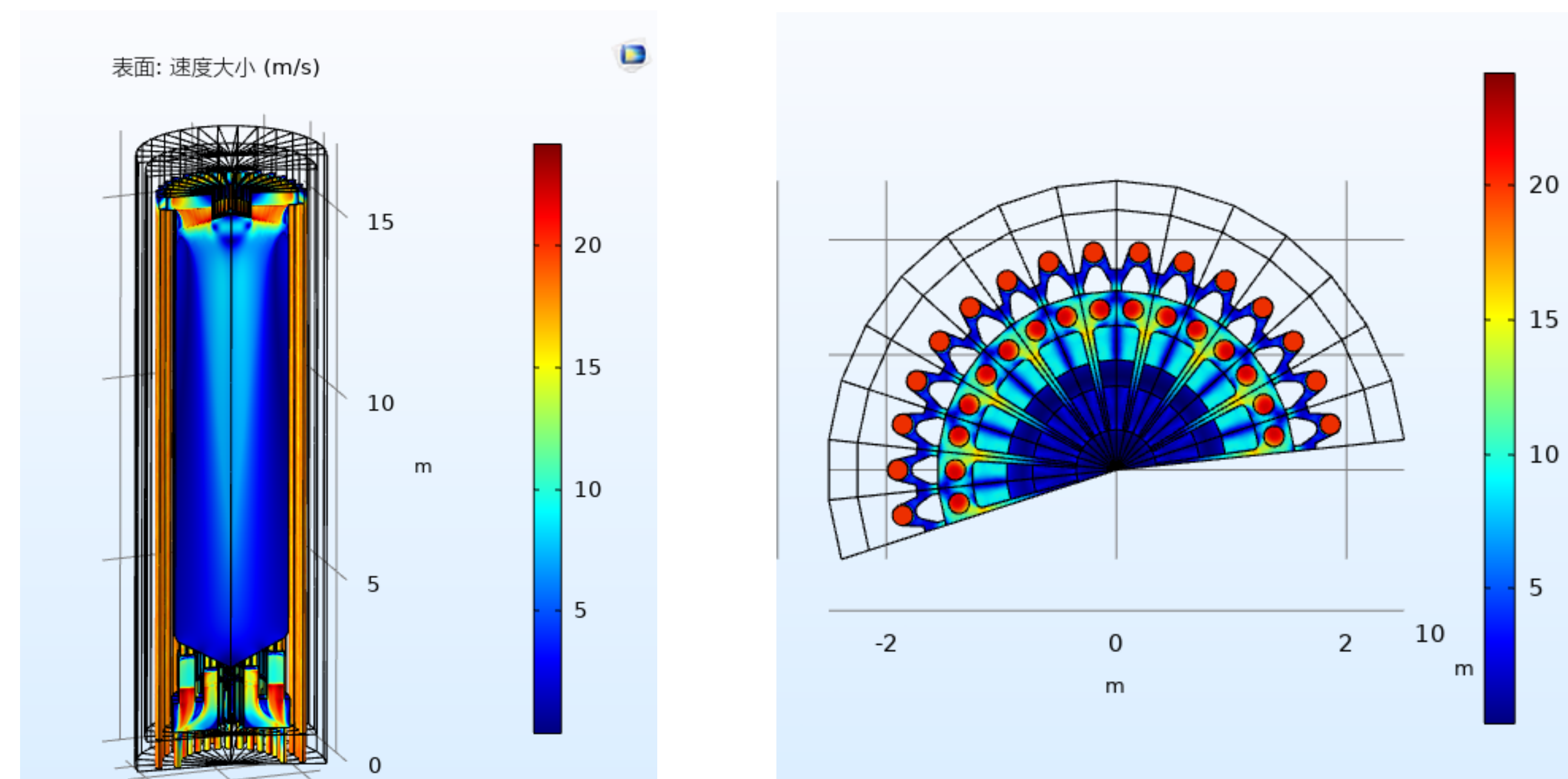


温度切片, t=20h



堆芯顶部温度, t=20h

高温堆内氦气流动情况如下所示:



氦气流动情况 (正视)

氦气流动情况 (俯视)

**结论:** 高温堆堆芯温度从100°C到250°C大概需要30h左右, 需要的时间较长, 主要是其加热是依靠主氦风机旋转, 将动能转换为热能来提升温度, 风机旋转产生的热量有限。此过程的数值模拟可以用于指导高温堆加热除湿试验, 为除湿方案的选择提供依据。展望: 之后将采取另外一种方案, 在蒸汽发生器 (二回路) 处外加热源来加热一回路工质, 提高加热效率。

## 参考文献:

1. 窦金元, & 银华强. HTR-PM加热除湿过程研究. (2018).
2. 李俊, & 银华强. 高温气冷堆碳素材料中水分迁移行为的研究. (2018).