

应用 STAR-CD 程序分析文殊堆热钠池热分层现象的模拟研究

Numerical Analysis of Thermal Stratification in Upper Plenum of MONJU by Using STAR-CD Code

许义军 侯志峰
中国原子能科学研究院

摘要：钠冷快堆在紧急停堆工况下，会在热钠池观察到冷却剂钠的明显的热分层现象。热分层现象会进一步加大堆内构件的热应力。本文应用 STAR-CD 程序对文殊堆在 40% 功率下的紧急停堆工况进行了计算分析，对其热分层现象的发生和发展过程进行了数值模拟。数值分析的结果同实际堆上的测量结果进行了比较，二者基本吻合。该计算对 CEFR 的热分层现象的研究有一定的借鉴意义。

关键词：文殊快堆 热分层 STARCD 数值分析

Abstract: Thermal stratification phenomena are observed in an upper plenum of liquid metal fast reactors under reactor scram conditions, which give rise to thermal stress on structural components. The numerical analysis of thermal stratification phenomena in the reactor scram condition from the 40% rated power operation are processed by using STAR-CD code. The numerical results agree well with the temperature distribution measured in MONJU reactor. The numerical analysis methods and results are important reference to the similar phenomena in CEFR.

Keyword: MONJU fast reactor thermal stratification STAR-CD numerical analysis

1 引言

无论是池式还是回路式快堆，其主容器内上腔室热钠池内的热工流体力学现象都是非常重要的研究课题。在紧急停堆工况下，反应堆的功率很快下降同时冷却剂的流量也很快衰减。由于堆的功率的下降速率远大于流体流量的下降速率，所以，堆芯的出口温度随时间很快降低。这样，从堆芯出来的冷的流体以较低的速度流入上腔室（即热钠池）。由于停堆后过渡过程开始阶段堆芯出口钠温低，流入上腔室的冷流体保持在较低的位置，而上腔室上部的流体的温度仍然较高。这样，就会在上腔室的热钠池内部形成快堆特有的热分层现象。热分层现象出现后，会在轴向高度上形成较大的温度梯度，并在堆容器和部分堆内构件内部形成明显的热应力，这对设备的结构安全是不利的。所以，必须对快堆的热分层现象进行详细的安全评估。

为了验证堆的自然循环能力，日本专门在原型快堆“文殊”上进行了 40% 额定功率下的紧急停堆实验研究，并对停堆后的上腔室内的热分层现象进行了详细的记录和分析。此后，许多学者应用不同的程序对这一问题进行了研究。为了进一步比较各种研究程序对热分层现象研究的优劣，发展更好的数值分析方法，日本在去年的“IAEA 第 39 届快堆工作年会”提出了 CRP 项目“文殊堆上腔室的钠的自然循环研究”课题，希望各国应用不同的研究程序对此问题进行研究，并进行相互间的比较分析。有鉴于此，根据中国实验快堆的实际情况，我们首先应用商用的流体力学软件 STARCD 对此过程进行了分析研究，然后再利用我们自己开发的计算程序 DHRSC 进行比较研究，从而能够较快地推动此项工作的进展。

通过对文殊堆热分层现象的研究，我们可以看到，商用的软件在计算建模、算法及模型的选择上有较大的优越性，但是较大的计算模型将耗费大量的计算时间，并需要较高的硬

件配置。

2 文殊堆实验介绍

2.1 文殊堆的堆本体结构

文殊快堆是日本前动燃集团开发的回路式钠冷快堆，额定热功率为 714MW，额定电功率为 280MW。在文殊堆上的实验主要是检验上腔室的热分层现象。在主容器的内隔板附近，布置了 38 个温度测点，用来测量稳态和紧急停堆后的瞬态的沿轴向的钠的温度分布。图 1 显示了文殊堆的主容器的钠的流动状况。在容器内为了提高冷却剂钠在上腔室的混合，安装有内隔板（内筒），位置如图 2 所示。在内隔板上，从堆芯出口平面上算起，距离高度 650mm 和 1620mm 的高度上分别有 48 和 24 个 96mm 的通流小孔，均匀布置在 3600 的圆周上。一回路的出口位于主容器的下部区域，共有 3 个，分成 1200 均布在圆周上。

在稳态工况下，从堆芯流出的冷却剂钠在上腔室的流动分成两部分，大部分的钠沿着内隔板上行经过内隔板和主容器之间的缝隙流到主容器的出口管流出堆容器。另外，一小部分钠经过内隔板上的上下两排通流小孔直接流到主容器的出口。这样的布置对提高堆芯出口钠的流动搅混有重要的意义，能够使上腔室热钠池的温度更加均匀。

在本次实验过程中，反应堆在 40% 的额定运行功率下紧急停堆，一回路主循环泵停用，导致堆芯的出口温度和流量很快降低。大约在 30 秒后，堆芯出口流量降低到稳态运行工况的 10% 左右。

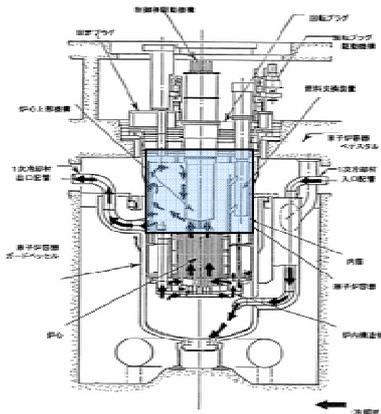


图 1 文殊堆的一回路流动简图



图 2 文殊堆的上腔室结构简图

3 计算程序及其建模

3.1 计算程序

STAR-CD 流体分析软件包是由 Computational Dynamics 公司开发的，最先在汽车工业得到广泛应用，后发展成为通用的商业 CFD 软件包。其功能主要包括了流固耦合、燃烧与化学反应、湍流模型以及气动声学等方面。可以进行牛顿流体、非牛顿流体；稳态、非稳态。层流、湍流（旋流、周期性流动）；可压、不可压流动；拉格朗日多相流、欧拉多相流；燃烧、辐射、传热、传质及化学反应（多相，平衡、非平衡化学反应（包括 NOX 生成））；自由表面模拟及空化；专用于汽油机和柴油机的燃烧化学反应计算模型等方面的数值模拟分析。它的内核求解器可以求解任意形状的（包括六面体、四面体、棱柱体、金字塔、多面体等）非结构化贴体网格，STAR-CD 的核心解算器有较高的内存效率，时间离散采用二阶精度的全隐式时间步方法，空间离散提供了 7 种以上的计算格式来满足不同的计算范围，在复杂几何、多重物理模型的组合计算方面的 STAR-CD 求解器内核有较高的强壮性。本文使用的版本为 3.15A。

3.2 网格生成

考虑到主容器上有三个出口管，沿圆周方向均匀布置，所以在计算中对计算对象采用 120° 的对称计算模型。计算中使用的整体网格参见图 1。对于主容器上的出口，以及内隔板上的通流小孔，考虑其对流动的影响有限，故而在实际的网格设置中采用等效模拟的方法进行处理。

3.3 边界条件

整个计算的边界条件，根据文殊堆的实际的实验条件进行确定。

堆芯的出口温度和流量条件分别由以下的图 3 和图 4 确定。对于 0° 和 120° 的轴向纵剖面，采用对称边界条件。

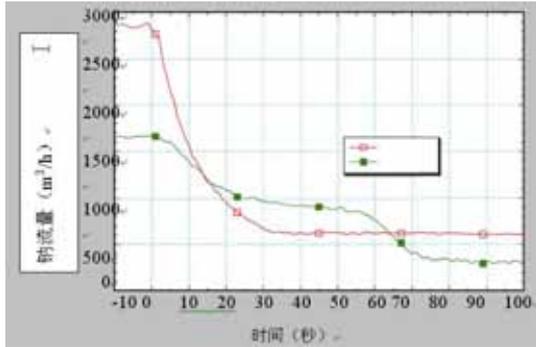


图 3 计算模型的整体网格图

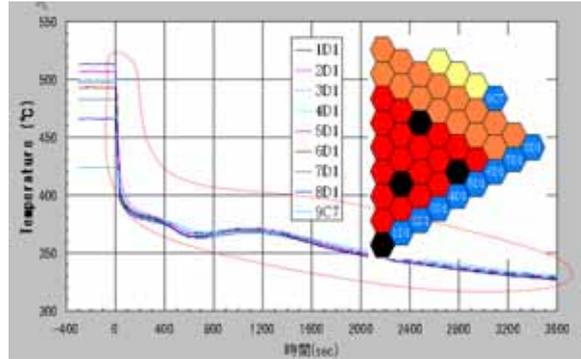


图 4 内隔板上的通流小孔网格图

3.4 结构建模分析

整个计算生成的网格如下图 5 所示，图 6 主要显示了计算中的固体网格图。

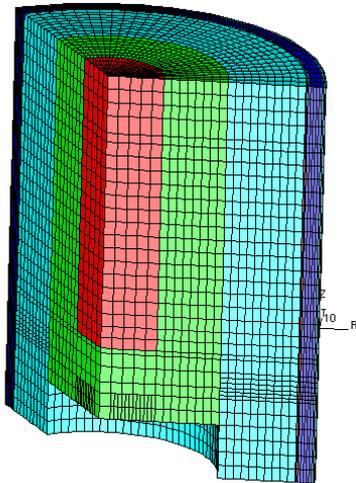


图 5 计算模型的整体网格图

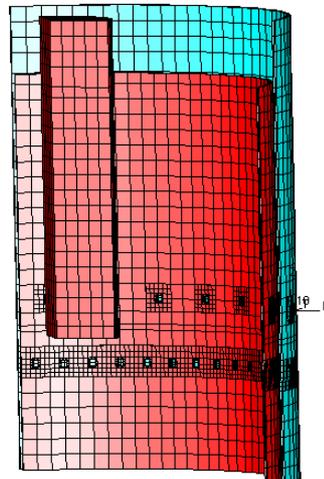


图 6 内隔板上的通流小孔网格图

从图上可以看到，计算网格全部采用了高质量的六面体网格，在内隔板上的通流小孔的处理没有按实际形状模拟，而是采用了等效流通面积的方法，这主要是考虑这些小孔对流动的影响不起主要的决定作用的缘故，同时可以节省较多的网格，提高计算的经济性。

3.5 计算方法

计算中的压力修正方法为 PISO 算法，该方法是 SIMPLE 法的改进方法，具有收敛速度快等特点，但是其每步的计算时间较长。通过对不同湍流模型比较研究和试算，本计算依旧采用标准的 $k-\varepsilon$ 模型。在差分格式的选取上，本计算采用了 STAR 提供的 MARS 格式，能

保证较高的计算精度。

4 计算结果分析

整个计算分为稳态计算和瞬态计算两部分。稳态计算主要是文殊堆 40% 额定功率运行下的上腔室内的温度场和流场计算，其计算结果是瞬态分析的基础。瞬态计算主要是在紧急停堆事故发生后，上腔室内由剧烈的温度和流动变化到缓慢的温度分层形成的过程。由于整个瞬态计算的数据分析量巨大，所以，为了从整体上把握热分层现象的发生和发展过程，本文将选取有代表性的时刻进行细致的分析。

4.1 稳态计算结果

文殊堆在 40% 额定功率运行下的上腔室内的流场和温度场分布如下图 6 和图 7 所示，其轴向剖面为通过主容器出口的剖面。

从图 7 可以看到，稳态工况下，从堆芯出来的钠速度较高，约为 0.7m/s，受到堆芯上部结构的限制，会首先向主容器内隔板横向流去，但是受到堆芯边缘热钠较低温度和较低流速流动的影响，最后形成 45° 的流动方向，并在上腔室的上下分别形成两个大的漩涡。然后，热钠会沿着内隔板向上流动，并最终通过隔板与主容器形成的间隙向下流动，最终到达主容器出口管，流出主容器。在稳态工况下，会有很小部分的钠通过内隔板上的通流小孔流动隔板间隙，并最终通过主容器出口管流出主容器。

图 8 显示的相应剖面的温度分布，可以看到，除了堆芯出口区域以及钠的横向流动区域外，钠的温度比较均匀，约为 470 左右。堆芯出口区域的温度最高，最大为 516 ，最低为 430 ，这主要受边界条件的影响。另外，堆芯出口区域整体温度混合较好，这可以从热钠的横向流动温度上反映出来。

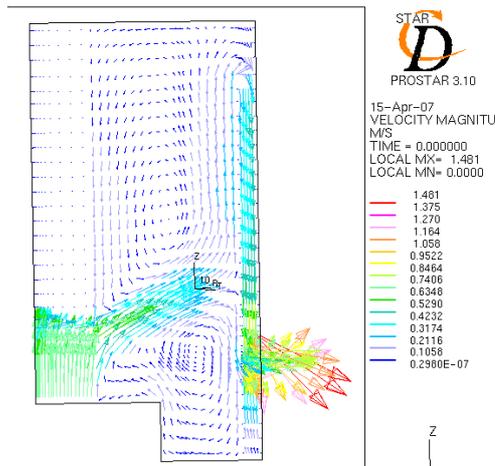


图 7 稳态时刻的上腔室速度分布

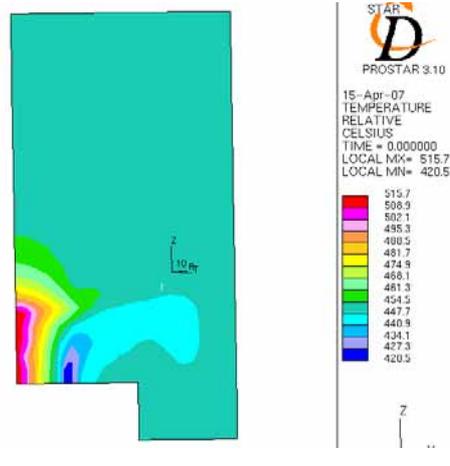


图 8 稳态时刻的上腔室温度分布

4.2 瞬态计算结果分析

在整个的瞬态计算分析中，300 秒以前的变化过程是热分层研究的重点，主要是在此段时间内的受堆芯出口流量的迅速减小，堆芯出口流量和温度大幅降低所致。所以，为研究方便，将整个过程分为 300 秒前和 300 秒后两个部分。

4.2.1 300 秒前的上腔室流动和温度分布

图 9 显示了上腔室热钠池在 20、40、80、160、220、300 秒时的速度分布。从图中可以看到，在紧急停堆的开始时刻，堆芯出口流速迅速下降，在 20 秒时最大为 0.57，80 秒时为 0.28，到 300 秒时只有 0.27。随着堆芯出口动能的逐渐减弱，整个上腔室的热钠的搅混力度也在逐渐减小，横向的动能在 160 秒以后基本消退。在 160 秒以后，堆芯出口水平面以下的钠的流动仍然比较活跃，这与流经内隔板上的通流小孔的流量增加，而通过内隔板上部折返通过隔板间隙流到主容器出口管的流量减小有一定的关系。

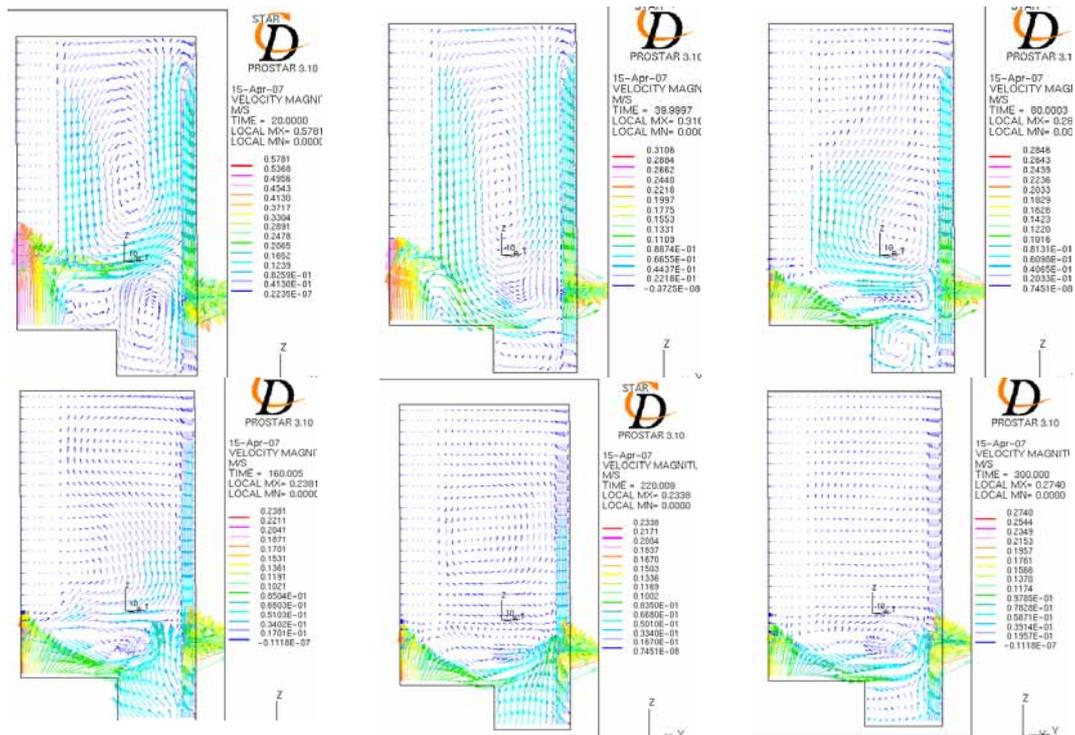


图 9 上腔室热钠池在 20、40、80、160、220、300 秒时的速度分布

图 10 显示了上腔室热钠池在 20、40、80、160、220、300 秒时的温度分布。从图中可以看到，随着堆芯出口流速和温度的迅速下降，整个上腔室的温度整体有所下降，并在紧急停堆的开始时刻下降的速率最快，在 100 秒以后下降的速率趋缓。随着堆芯出口温度的逐渐降低，较冷的冷却剂钠逐渐沉积在上腔室的下部区域，而较热的冷却剂钠仍然保留在上腔室的上部区域，使得冷热分层逐渐变得明显，从 160 秒以后的温度分布图上可以较为清晰地看到这一点。

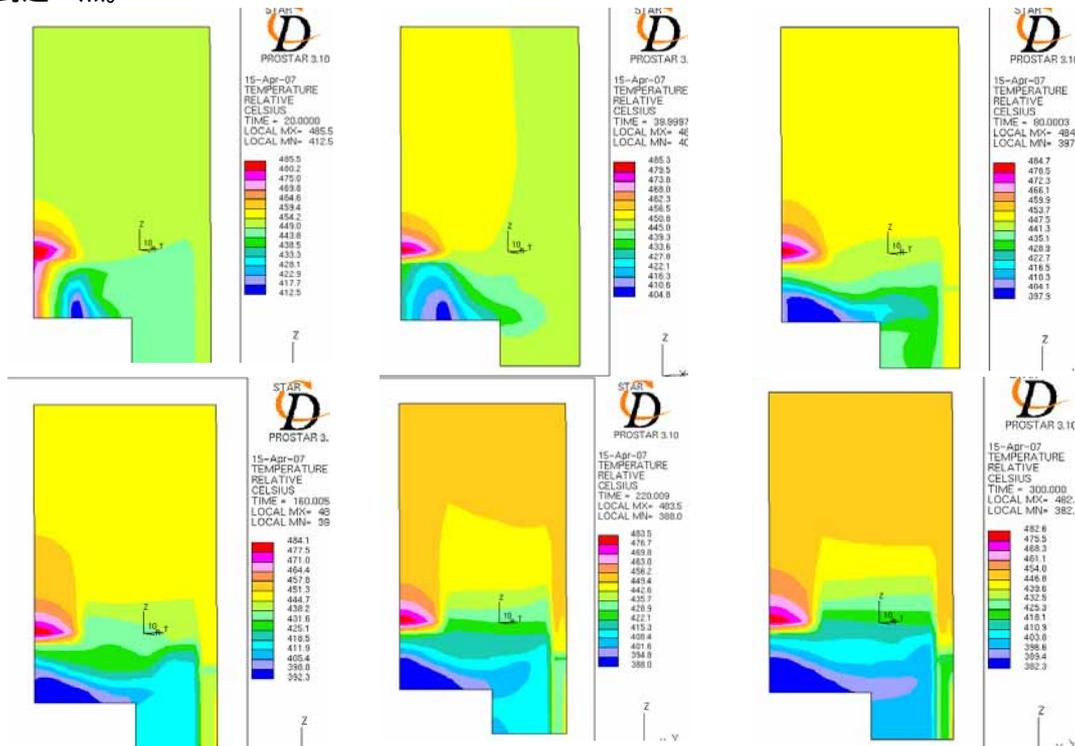


图 10 上腔室热钠池在 20、40、80、160、220、300 秒时的温度分布

4.2.2 300 秒以后的流场和温度场分析

300 秒以后的上腔室的热钠的流动比较缓慢，冷热钠的热分层的界面逐渐清晰，而且随着时间的推移，分层界面也逐渐上移，下面将重点分析 1000 秒、2000 秒和 3000 秒时的流动和温度情况。

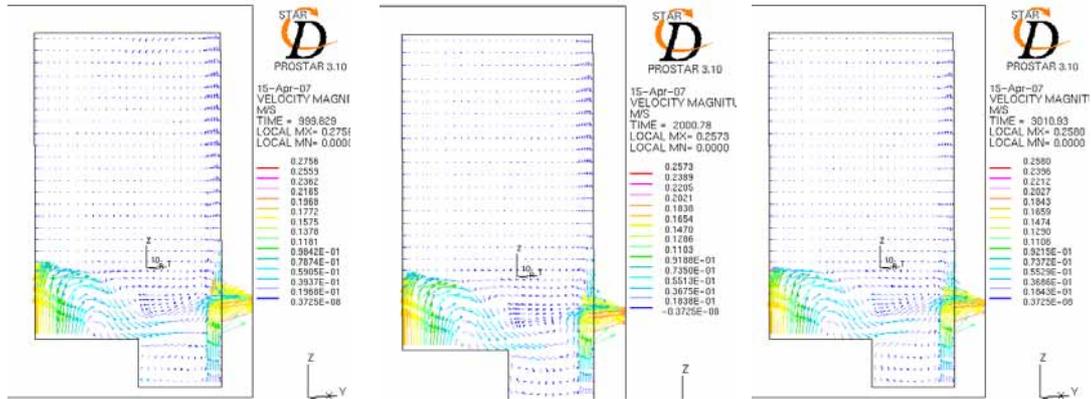


图 11 上腔室热钠池在 1000、2000、3000 秒时的速度分布

图 11 显示的是上腔室热钠池在 1000、2000、3000 秒时的速度分布。从图上可以看到，在 1000 秒以后，上腔室热钠池的钠流动的流态没有发生较大的变化，但是整体的流速在逐渐降低。整个上腔室的上部的流动非常微弱，而下部区域的流动，尤其在隔板上下两排通流小孔附近的流动比较活跃，通过通流小孔的流速较高，显示出在热分层发展的后期，通流小孔内的流动对堆容器内的热量的排出具有重要作用。

图 12 显示的是上腔室热钠池在 1000、2000、3000 秒时的温度分布。从图上可以看到，在 1000 秒以后，上腔室热钠池的热分层的温度分布基本形成，并逐步发展，整个上腔室的上部的温度较高，而下部区域的冷流体的占比在逐步增加，而温度在逐步下降。同时也可以看到，内隔板与主容器之间的钠的温度在通流小孔以上的钠的温度与上腔室上部的温度一致，而通流小孔下部的流体的温度与上腔室下部的钠温一致，说明通流小孔内的钠的流量一直在增加，从而在隔板间隙内部也形成类似的分层分布。

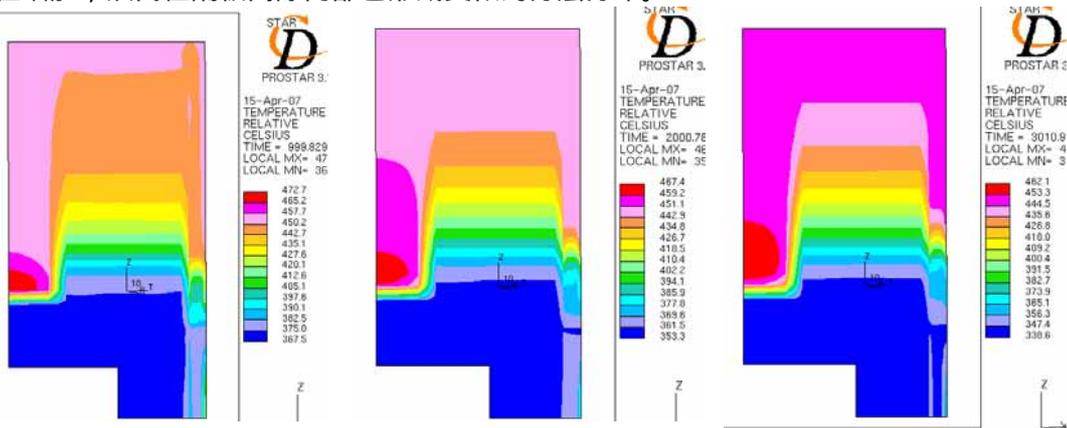


图 12 上腔室热钠池在 1000、2000、3000 秒时的温度分布

图 13 显示的在文殊堆的实际记录的数据与 STARCD 计算的数值分析的比较，通过对比可以看到，数值分析的结果和实验结果吻合的较好。

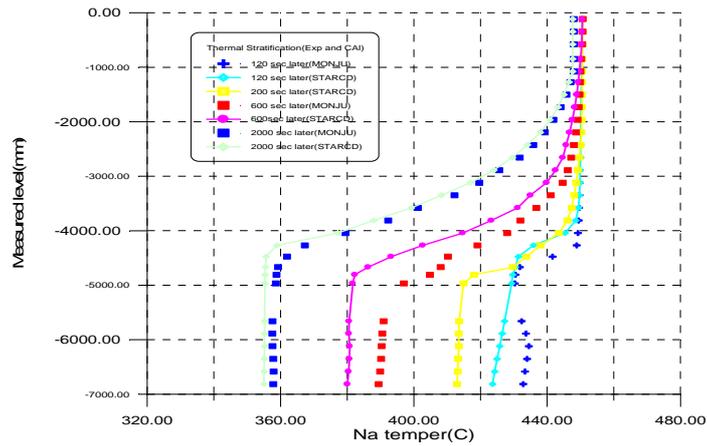


图 13 STAR 计算数据与文殊堆实测数据比较图

5 结论

本文通过应用 STARCD 对文殊堆上腔室热钠池热分层现象的计算分析研究，并和实际堆上的数据记录分析比较，可以得到如下结论：

- 商用软件 STARCD 能够分析了快堆紧急停堆工况下的热分层的发生和发展过程；
- 通过计算可知，在紧急停堆的初期，堆芯出口区域的钠有着较大的温度和流动变化，在 300 秒以后，钠的流动和温度变化较为缓慢；
- 数值分析计算数据分析表明，内隔板上的通流小孔在热分层现象的发展过程中起重要作用，通过通流小孔的钠的流量大小对钠的分层界面的位置有重要影响；
- 文殊快堆的热分层现象的研究对今后原型快堆的结构设计有重要的借鉴意义。

6 参考文献

- [1] Daogang Lu, Yasuhiro E , Analysis of Thermal-hydraulic Behavior in the Upper Plenum of Fast Breeder Reactor “Monju” during Reactor Scram Transient, PNC PN9410 98-091
- [2] USER GUIDE, STAR-CD VERSION 3.10 , 1999 Computational Dynamics Limited