

ANSYS



仿真
新时代

2017 ANSYS用户技术大会

中国·烟台

核工业中的多相流和传热

李树彦 / 流体应用工程师

安世亚太科技股份有限公司

目录 CONTENTS

1 ANSYS 与核工业

2 核电行业中的CFD需求

3 ANSYS CFD解决方案

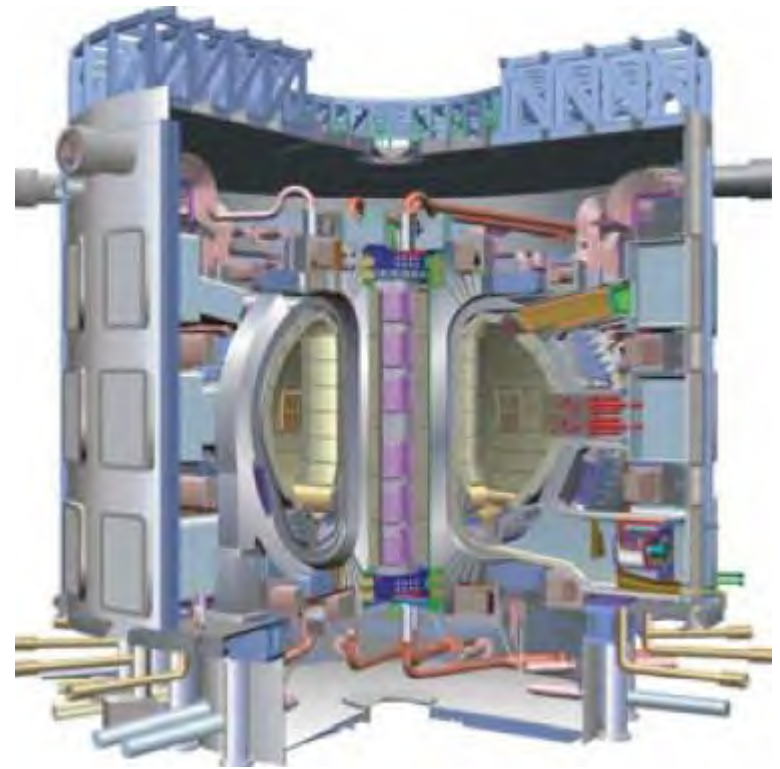
4 案例分享

ANSYS 与核工业

- 1973: ANSYS 在核工业中开始应用
- 2007: 国际热核反应堆工程选择采用ANSYS 解决方案进行核聚变装置的实验和设计

"These tools will contribute to ITER's success, leading to large-scale nuclear power without a long-term nuclear waste stream -- which would be a monumental environmental and economic achievement in the 21st century."

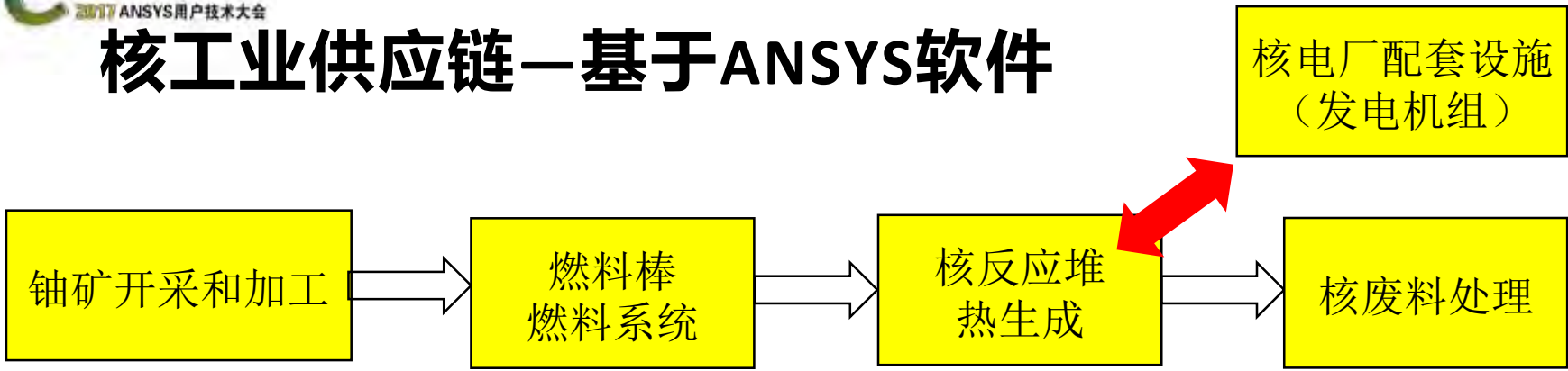
Cornelis Jong, Mechanical Engineer in the magnet division at ITER



国际热核反应堆工程



核工业供应链—基于ANSYS软件



核工业统计

ANSYS全球核工业用户群

- 完整的解决方案可以很好的满足用户模拟需求
- 严格保证产品开发过程的质量
- 提供独特的NQA-1质量服务
- 聚焦于核工业，有着超过40年的成熟的全球业务
 - 用户扩展到几乎所有的蒸汽发电公司
 - 所有主要的OEM都是ANSYS的用户
 - 几乎所有的核电厂配套设施主要设备的开发过程中都使用过ANSYS软件
 - 美国及其它的监管机构都是用ANSYS软件

目录 CONTENTS

1 ANSYS 与核工业

2 核电行业中的CFD需求

3 ANSYS CFD解决方案

4 案例分享

核工业主要关心的流体问题

- 一回路系统的关键设备

- 反应堆芯整体流场和局部换热特征研究
- 稳压器：维持一回路系统的工作压力（静压），补偿水在冷态和热态时体积的变化

- ✓ 通过加热、喷淋调整压力

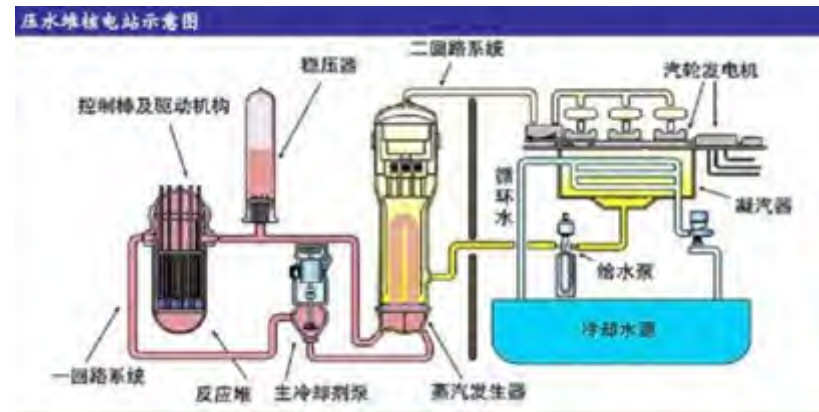
- 核心问题是其响应的速度控制

- 安全注水系统

- ✓ 反应堆失水时启动（失水事故分析）

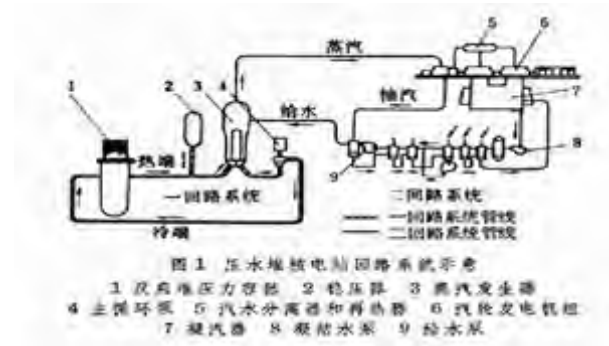
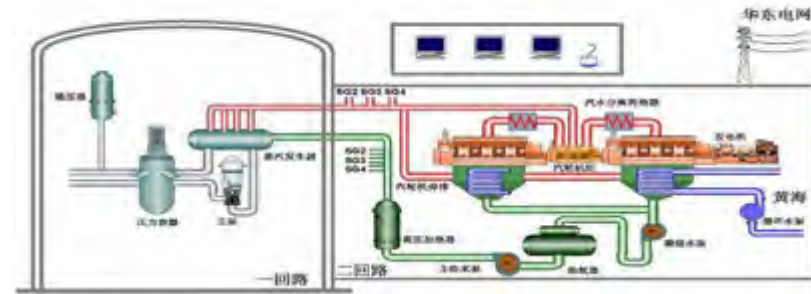
- 核阀：闸阀、安全阀、隔离阀等

- 其他：非动能安全壳体喷淋等



核工业主要关心的流体问题

- 二回路系统关键设备
 - 蒸发器
 - 半转速大流量汽轮机（低压缸叶片加长）
 - 大流量高压、低压加热器
 - 汽水分离再热器



核工业关键设备中的多相流和传热

- 堆芯冷却
- 堆芯反应棒的间隙流动
- 失水事故注水潜在风险
- 稳压器：喷淋水喷射、蒸发降压过程
- 压力安全壳：喷淋冷却过程
- 汽水分离器：两相流动
- 高压/低压加热器
- 汽轮机长叶片的气动、蒸汽过冷凝结与流致振动
- 核电站泄漏事故控制
- 建筑内部舒适度和通风
- 冷却塔内部的流动换热

CFD仿真流程及注意事项

几何

核电设备结构
形式多样

CAD数模与CAE链
接遇到挑战

SCDM基于直接建模思想，能够一键完成几何修改和清理。同时能够直接打开和编辑其它商业软件的几何文件



网格

网格划分难度大，需要灵活的网格划分策略

TurboGrid短时间内对复杂的叶片和叶栅通道自动生成高质量的结构化网格

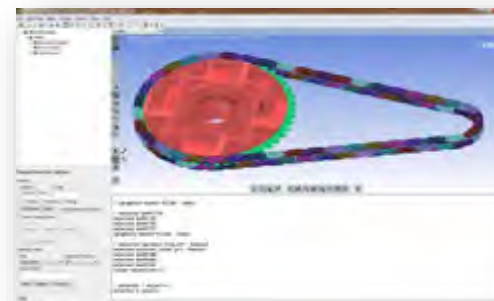


FLUENT Meshing使用网格包裹技术，针对大规模复杂网格生成高质量的网格文件

求解器

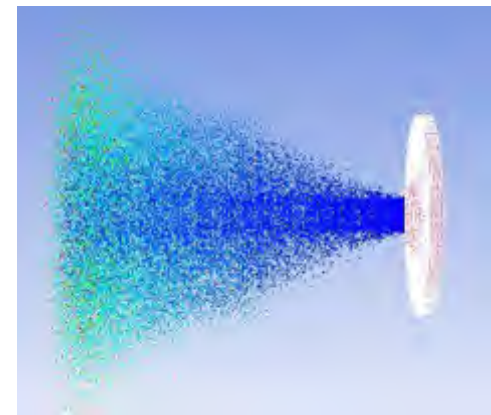
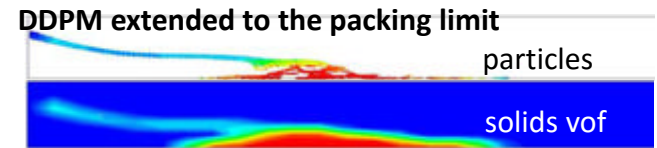
计算规模大，流场复杂，多数情况下涉及到多物理场耦合

ANSYS Workbench协同仿真平台，能够快速完成不同软件之间的数据传递，实现多物理场间的单向和双向耦合



ANSYS CFD-多相流模型

- 拉格朗日多相流
 - DPM
 - 欧拉多相流
 - VOF
 - Mixture
 - Eulerian多相流
 - IAC 模型
 - 欧拉粒子流
 - Dense Discrete Phase Model (DDPM模型) : 拉格朗日与欧拉方法的组合
- 附加模型
 - 群体平衡模型
- DEM

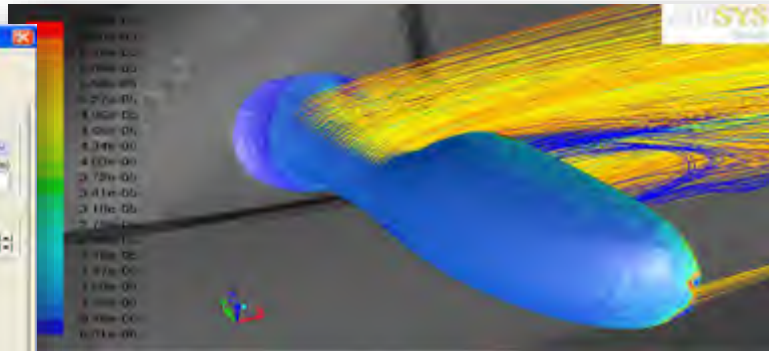


ANSYS CFD-壁面液膜模型

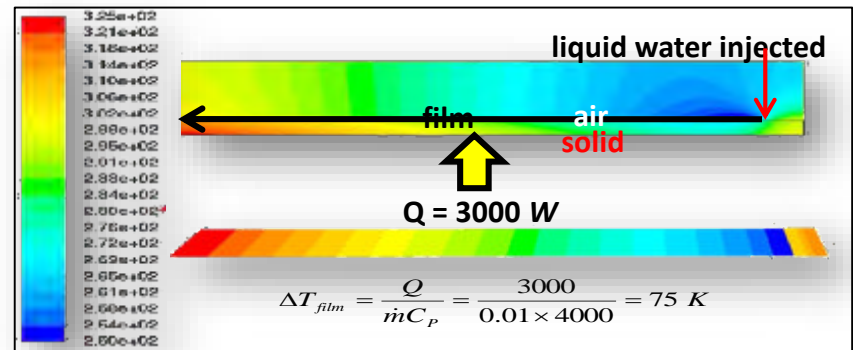
- **液膜在壁面的形成**
 - 粒子撞击时发生的飞溅
 - 液滴的脱落
 - 边界分离
 - 液膜和壁面间的换热

- 与欧拉模型耦合
- 与DPM模型耦合 计算颗粒捕集率

- **应用：波纹板分离器**



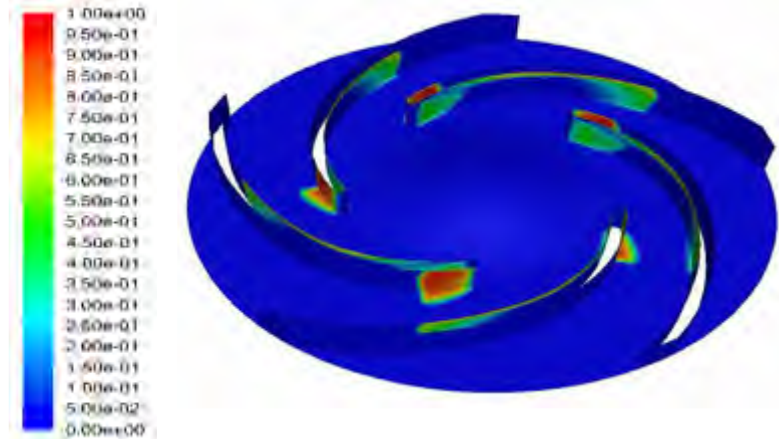
The wall film on a car mirror with droplets released due to wind shear



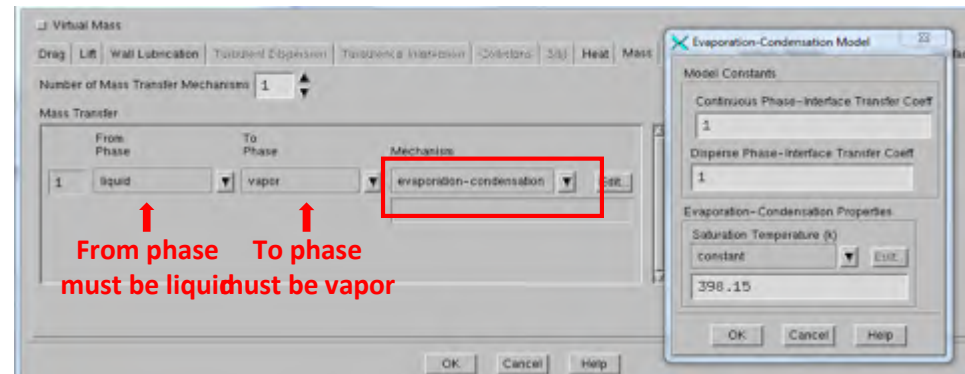
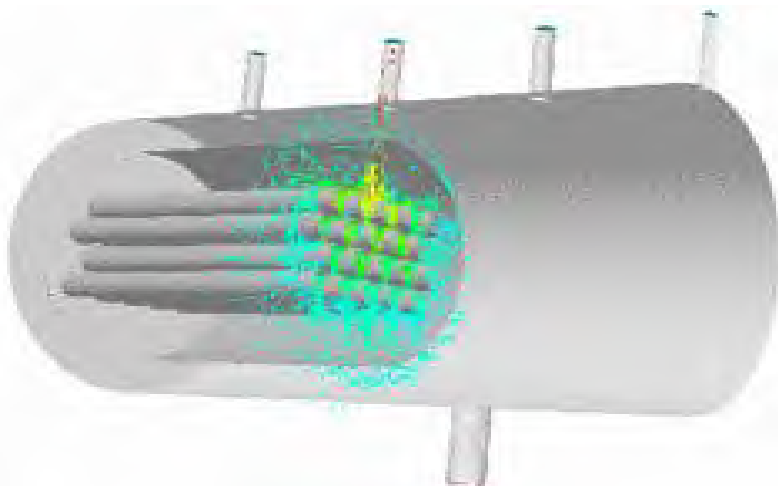
Contours of temperature in an Eulerian Wall Film with heat transfer case

ANSYS CFD-多相流相变模型

- 通过相变吸热、放热达到更好换热效果
- 蒸发冷凝
- 空化模型
- 核状沸腾模型

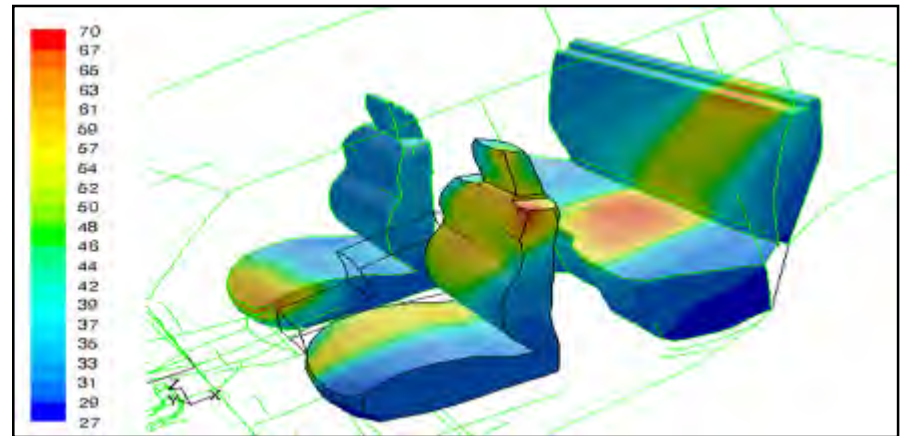
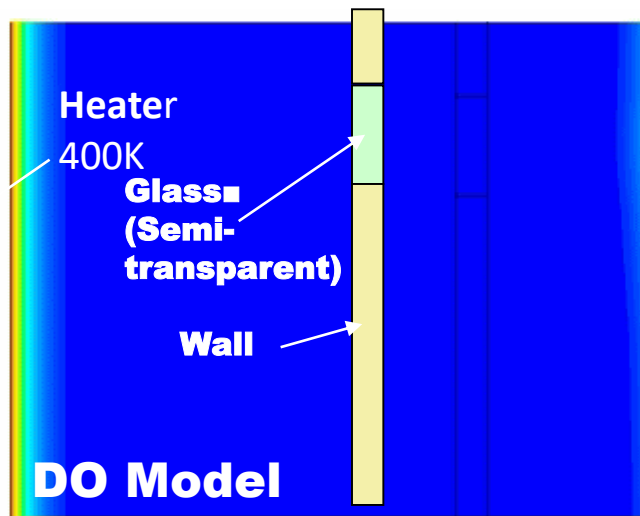


Surface Vapor Volume Fraction: $P_b = 350$ kPa.



ANSYS CFD-传热模型

- 能够模拟热传导、对流传热，包括自然对流和强迫对流
- 具有分析流体和固体共轭传热的能力，分别设定流体域和固体域模型，在流体域和固体域之间采用域交接面的方法来连接
- 高级的热辐射模型，包括DO模型，P1模型，DTM模型，太阳辐射模型等



目录 CONTENTS

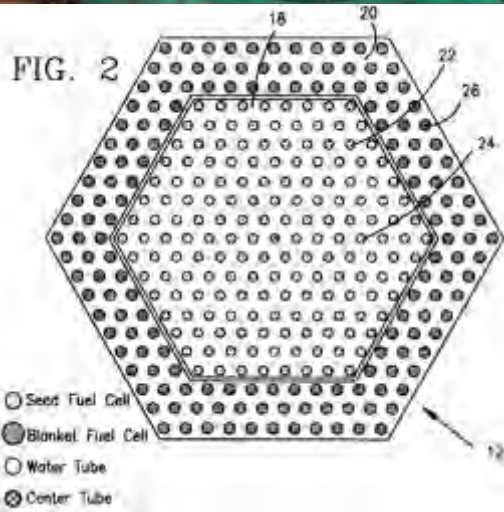
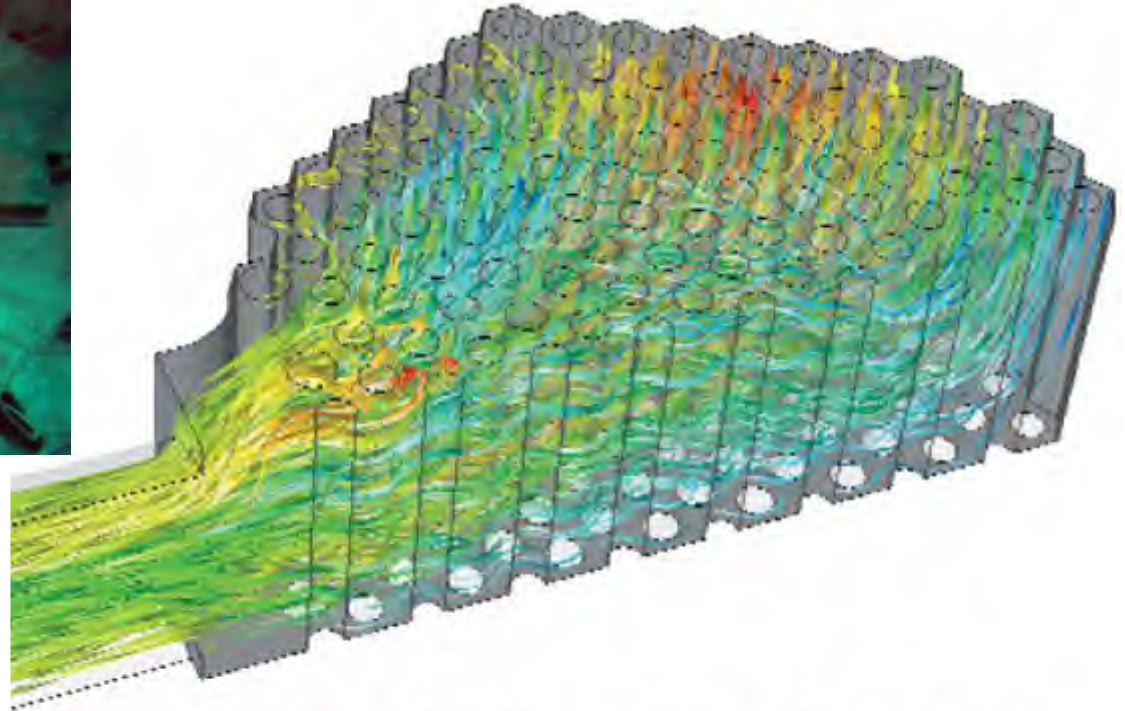
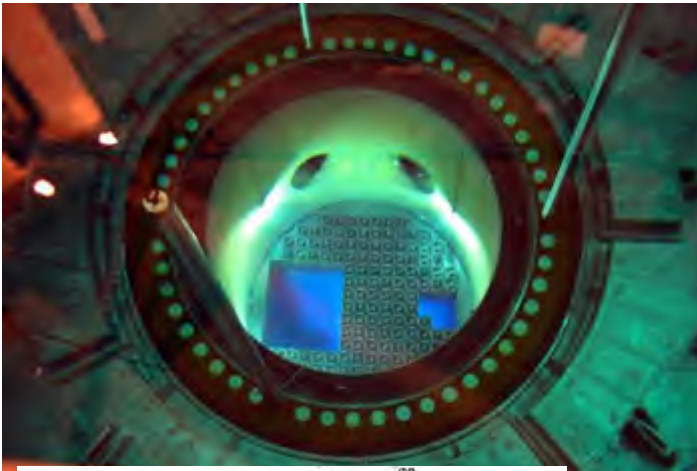
1 ANSYS 与核工业

2 核电行业中的CFD需求

3 ANSYS CFD解决方案

4 案例分享

反应堆燃料棒温度场模拟

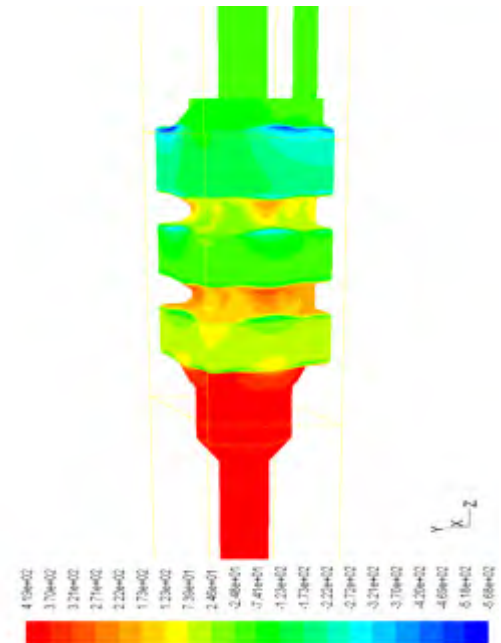
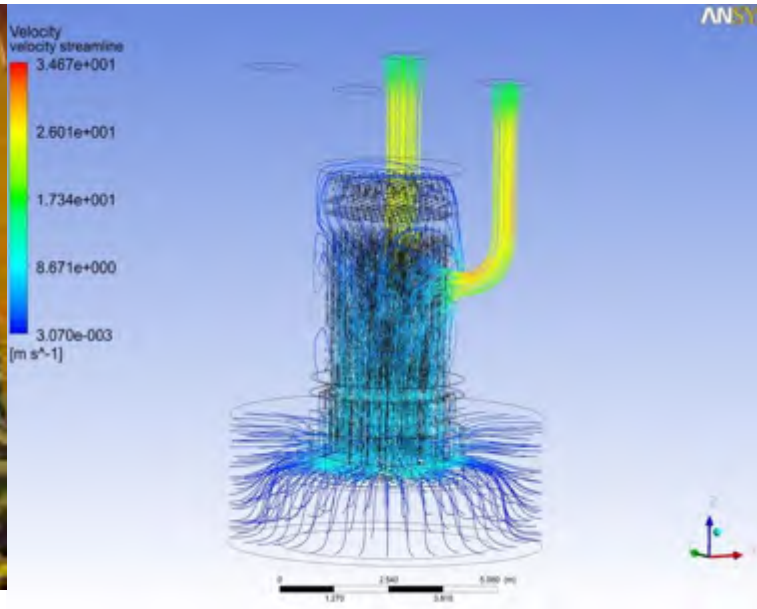


Pathlines colored by temperature in the lower plenum of a General Atomics GT-MHR reactor show sufficient thermal mixing prior to the turbine entrance (at left)

Courtesy of General Atomics

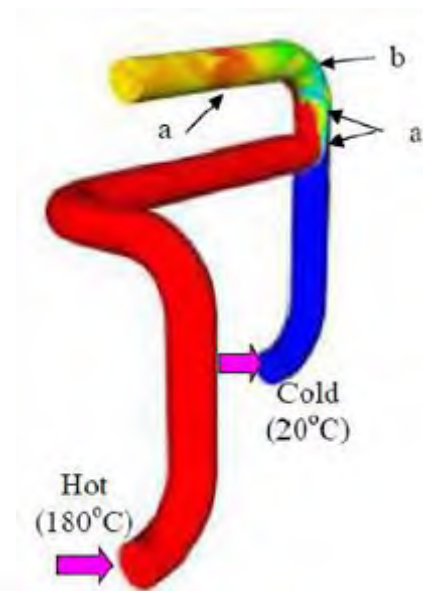
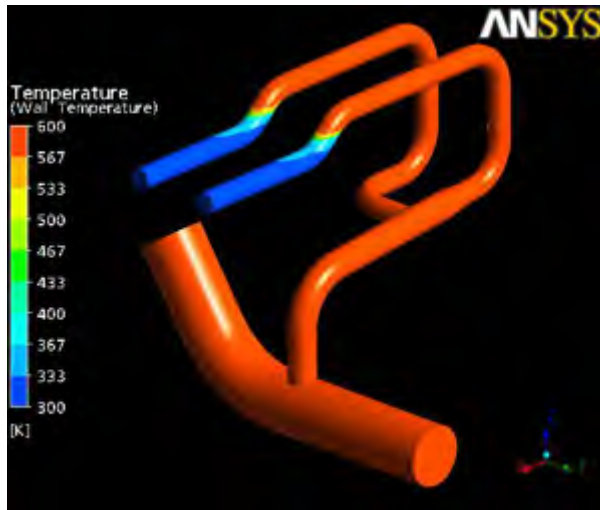
反应堆-堆顶

- 控制棒驱动机构冷却性能



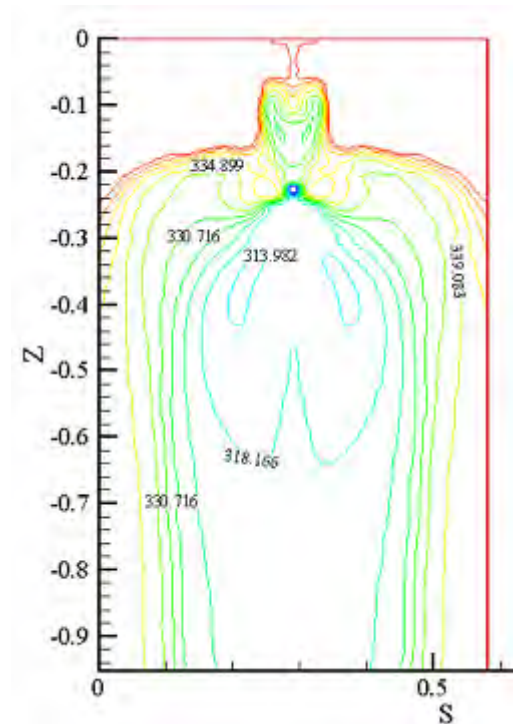
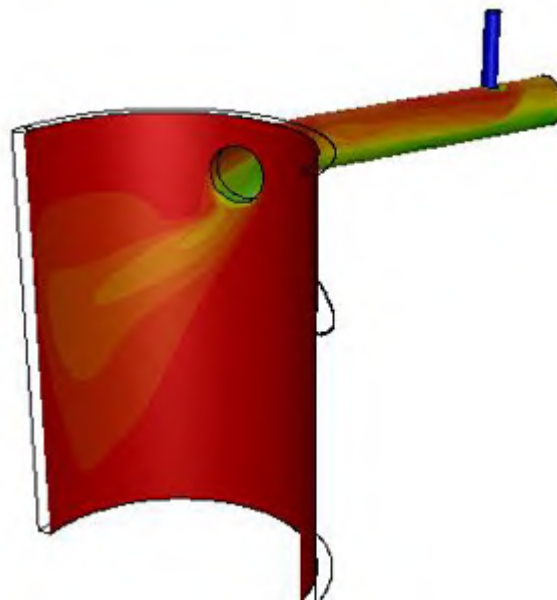
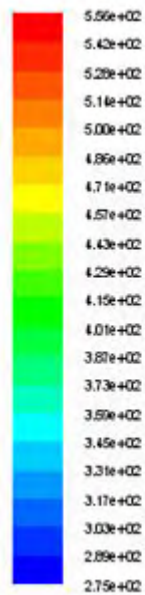
热疲劳&热分层

- 冷热冷却剂混合现象在反应堆中经常发生，交变的温度变化（温差可达 160°C ）现象会产生管道的热疲劳，影响管道的寿命。
- 该现象需要建立完整的3D模型，与湍流方程的选取和模拟精度密切相关。
- 法国西奥1号机组RHR系统管道热疲劳失效事故分析。



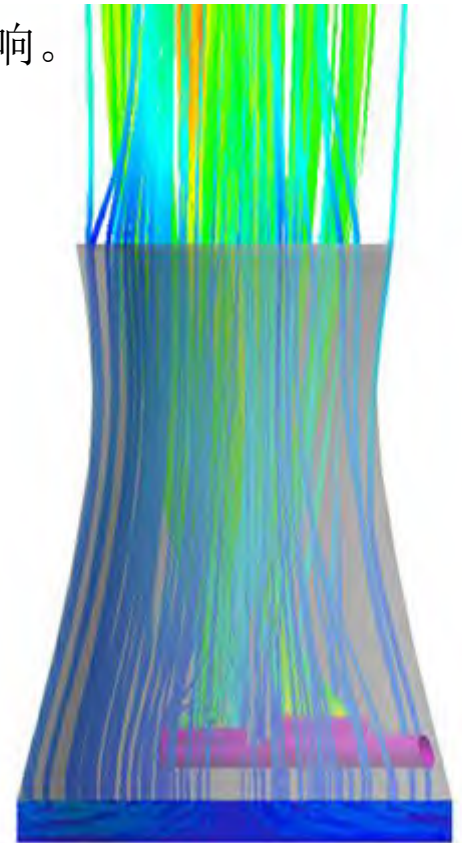
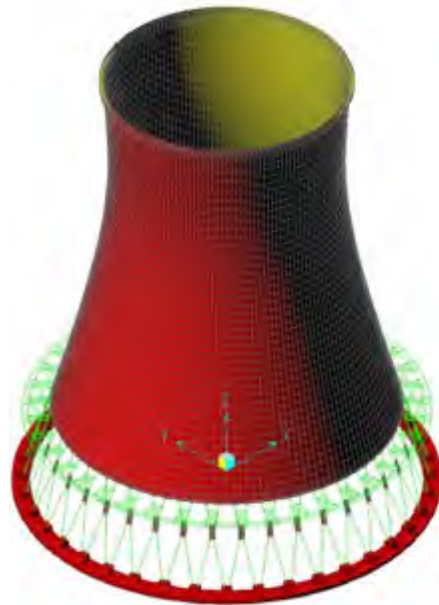
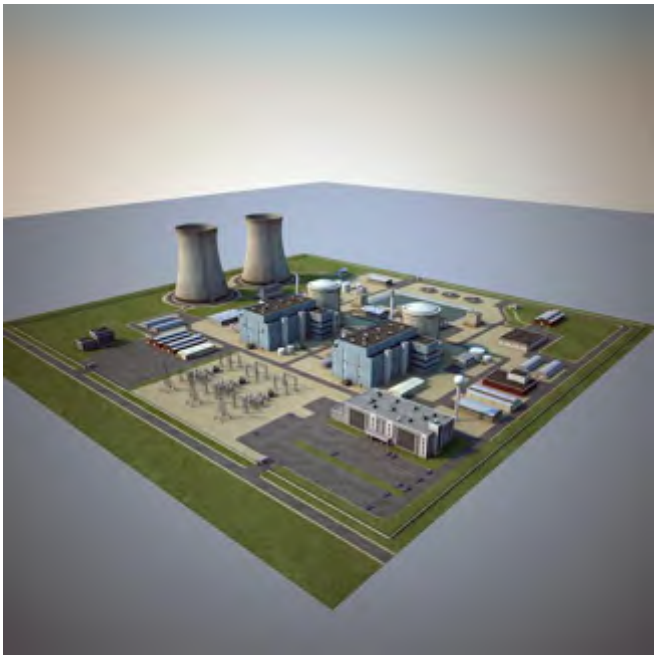
承压热冲击 (PTS)

- 该问题需要处理复杂的全尺寸模型和复杂的流动形态（分层流、射流、羽流），且可能需要处理两相流及相变现象



核电站冷却塔模拟

- 该问题主要模拟冷却塔的传热传质动态响应对冷凝器入口冷却水水温的影响，进而考虑其对核电站的效率及安全的影响。



核岛及堆内流动模拟

Containment Atmosphere Mixing (CAM)

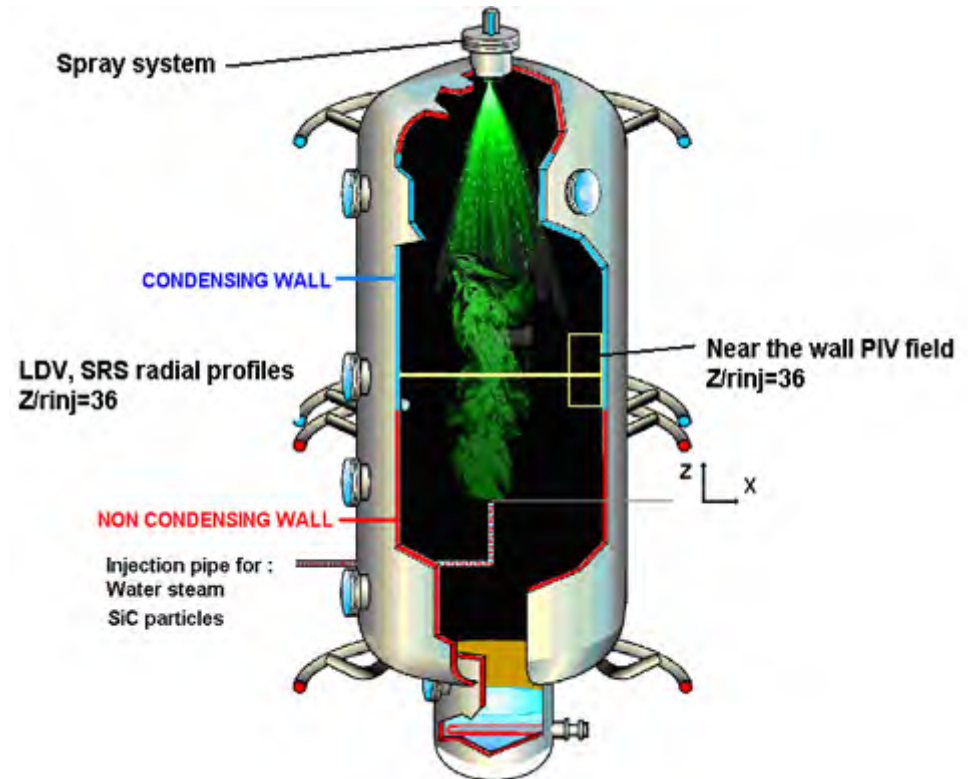
Simulation of spray experiments performed in TOSQAN facility

Facility located at IRSN Saclay

Volume: 7 m^3 , height: 4.8 m

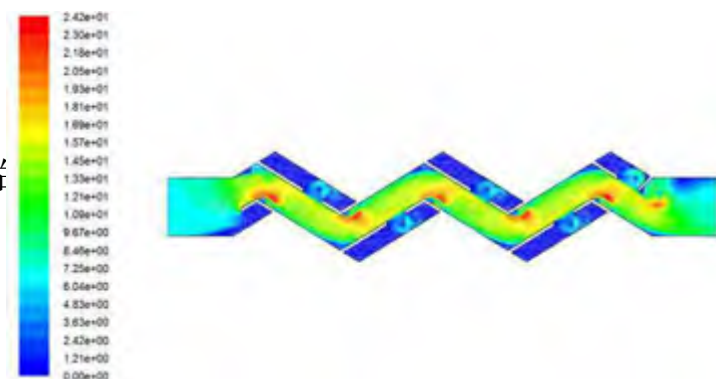
Wall temperature controlled

Test 101: depressurization test

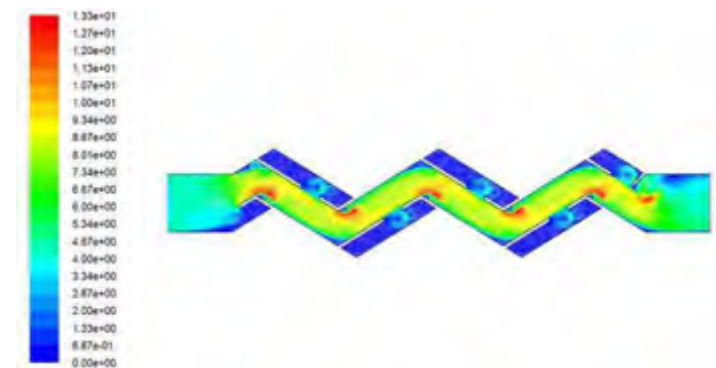


波纹板汽水分离器

- 分析流速、液滴直径、板间距对分离效率的影响
- DPM模拟液滴运动
- Wall film模型模拟液膜在壁面的形成
 - 粒子撞击时发生的飞溅
 - 液滴的脱落、边界分离
 - 液膜运动
 - 液膜和壁面间的换热



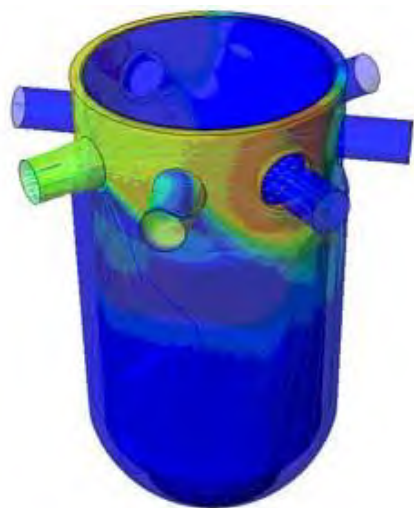
入口速度为7m/s双沟波纹板速度分布云图



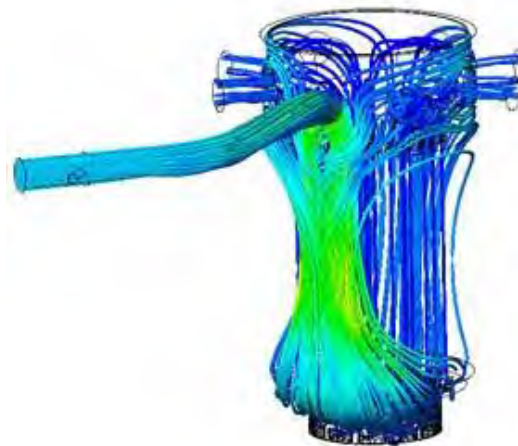
入口速度为4m/s双沟波纹板速度分布云图

硼稀释

- 欧盟的EUBORA和FLOWMIX-R项目使用ANSYS Fluent产品
- ANSYS-CFX被应用在VVER-1000机组的相关分析中
- 该分析需要模拟完整的一回路系统，要求能够合理模拟硼在冷却剂系统中的传播以及主泵转速变化和自然对流现象



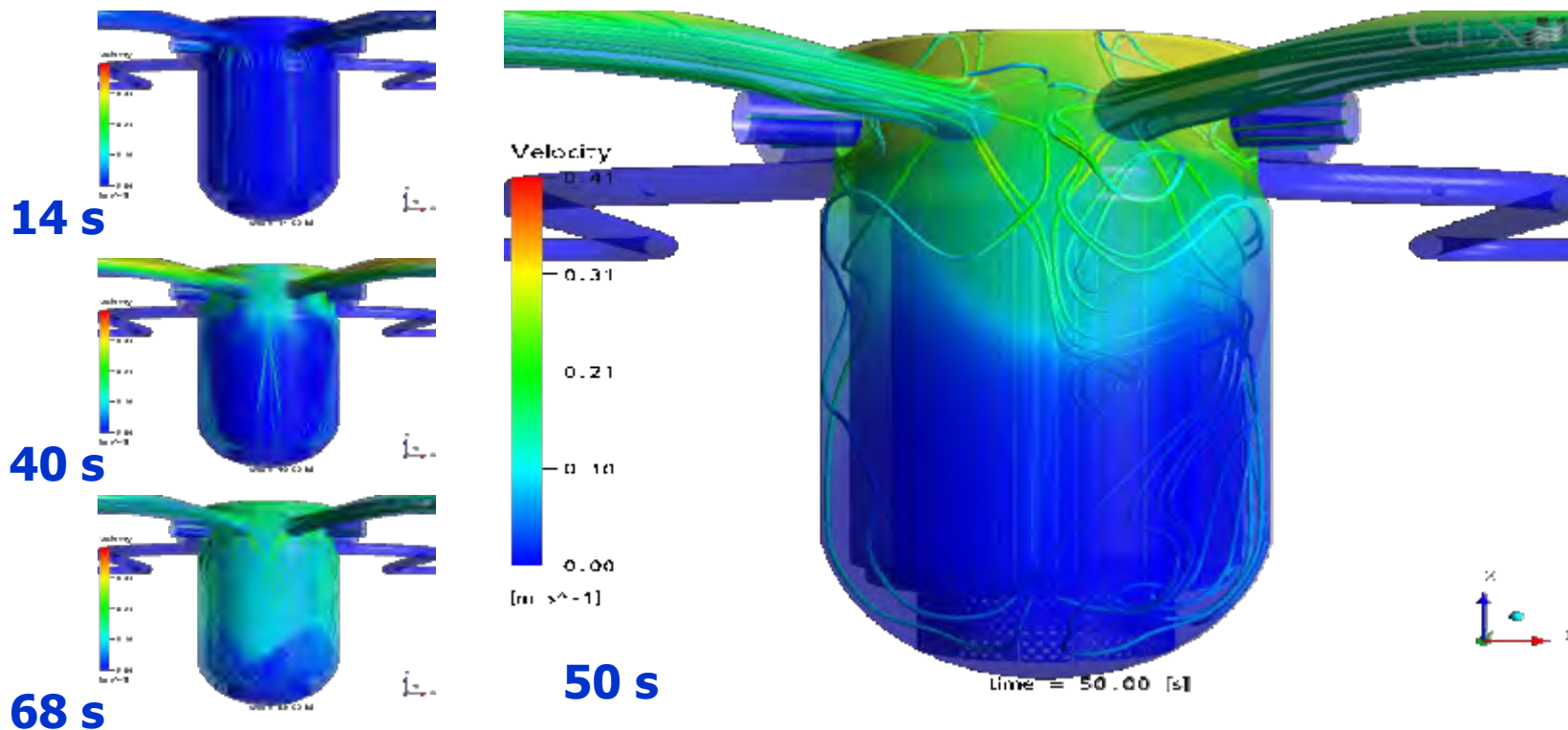
CFX



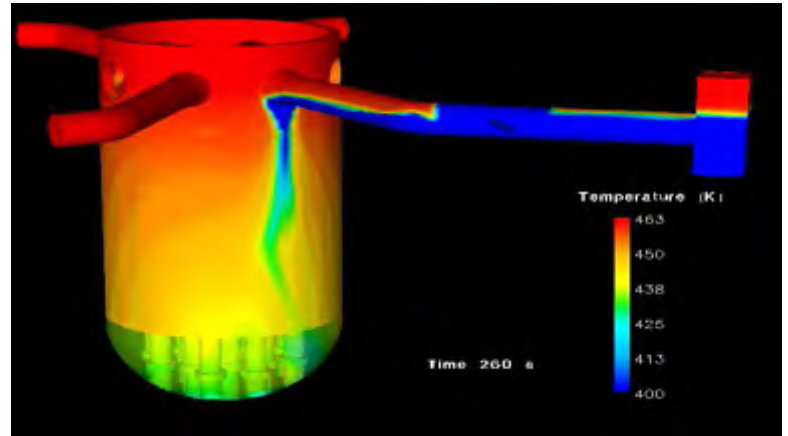
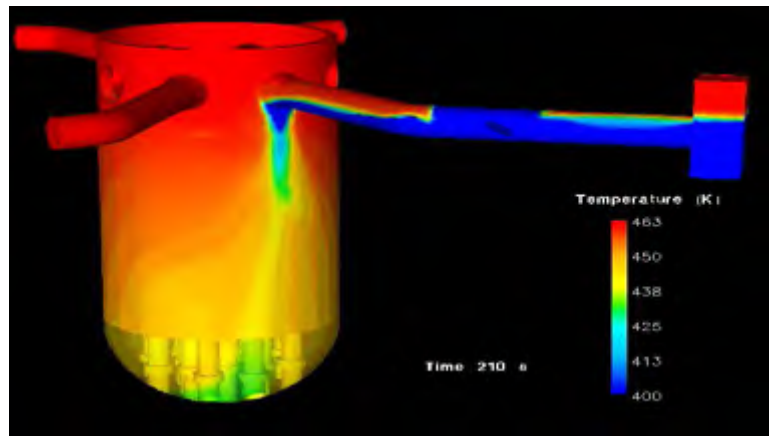
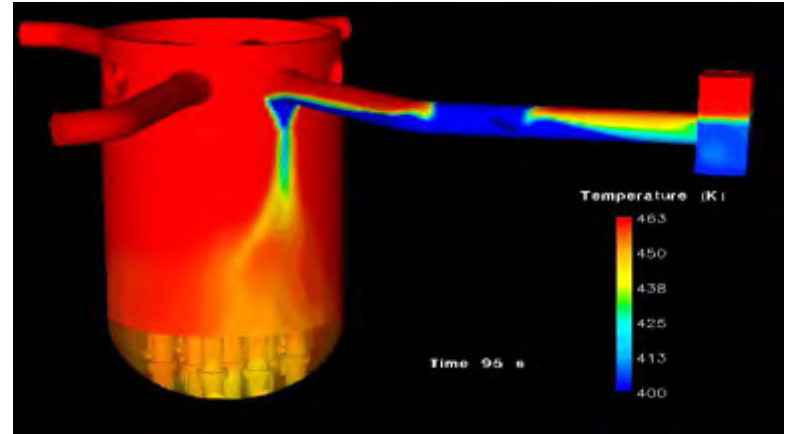
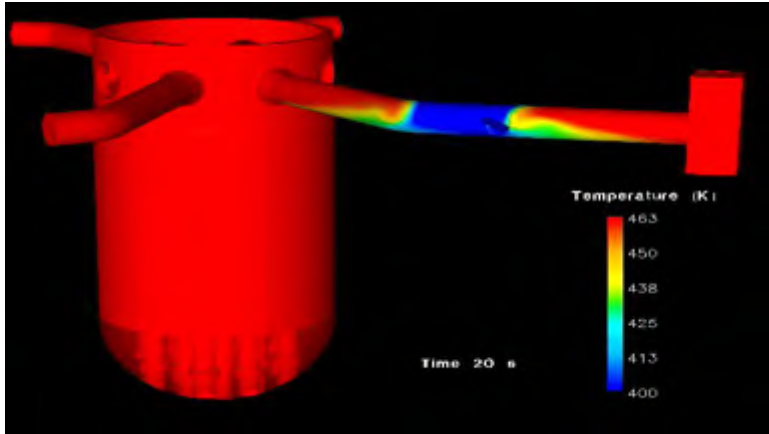
CFX

压水堆失水事故补水分析

- 该问题需要对完整的一回路系统进行瞬态分析，而随着LOCA的进行，当闪蒸发生后，需要考虑两相流及相变的模拟



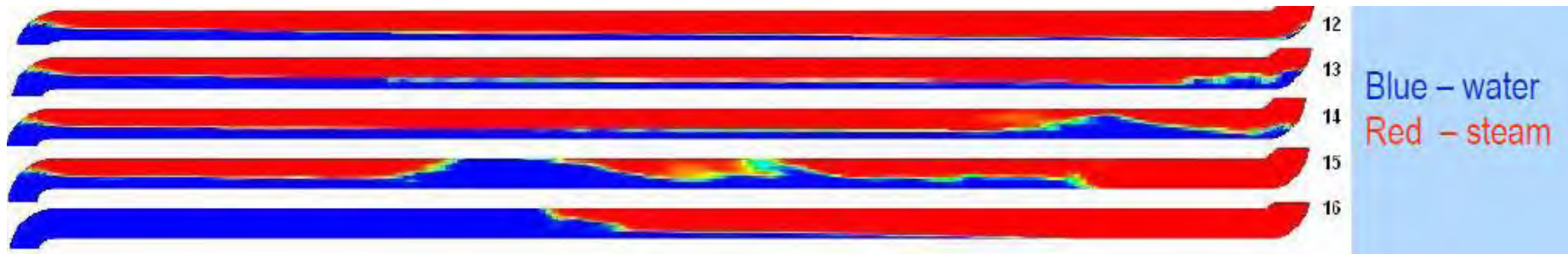
压水堆失水事故补水分析



Courtesy of Sander Willemsen

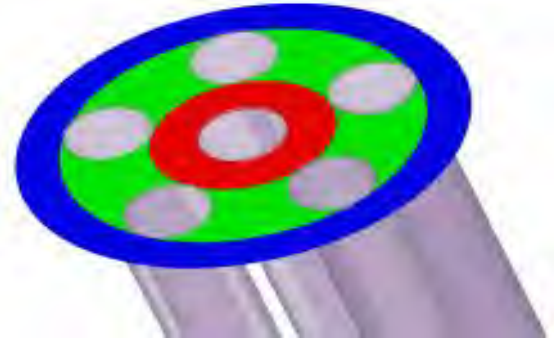
水锤

- 欧盟的FWP项目使用ANSYS CFD产品
- 该分析需要模拟高速的瞬态过程，且伴随着气液两相流动及相变等现象



过冷沸腾

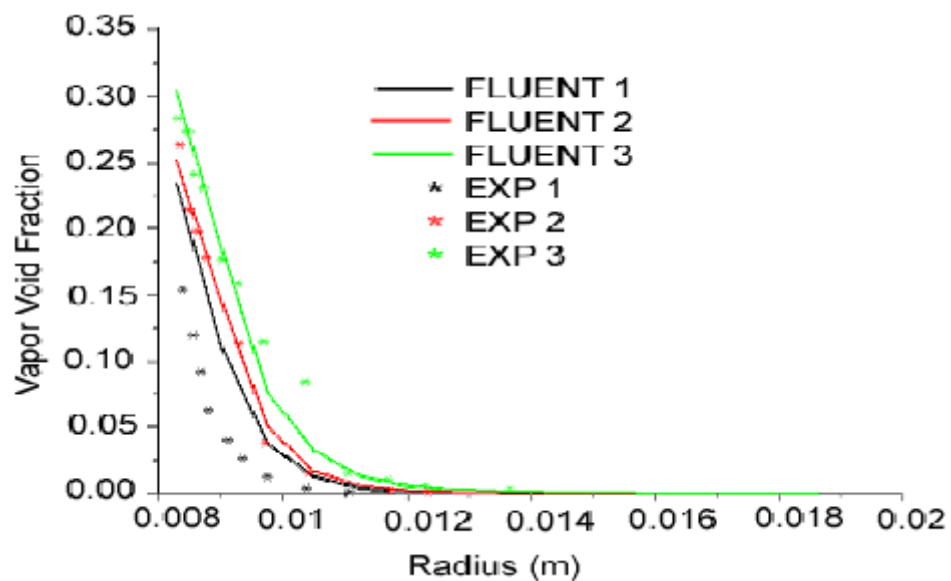
- 模拟一个环形域
- FLUENT 模拟了三组试验条件下的流动和换热
- 使用Eulerian multiphase 模型和RPI model



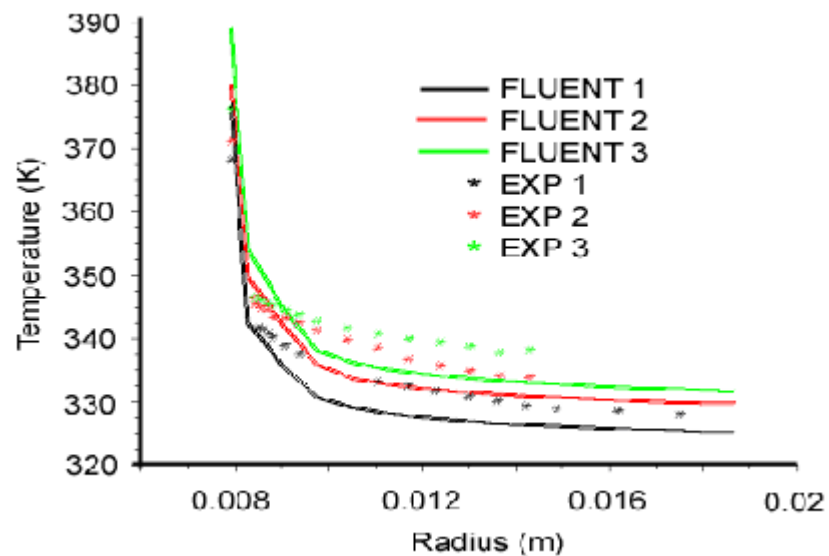
Parameter	EXP 1	EXP 2	EXP 3
Inner wall heat flux, W/m^2	80,000	95,000	116,000
Fluid mass velocity, $kg/m^2/sec$	565	785	785
Mean liquid subcooling at test section inlet, $^{\circ}C$	37.8	30.3	30.3

²Roy, R. P., Velidandla, V., and Kalra, S. P., ASME J. Heat Trans. 119, 754-766 (1997).

过冷沸腾



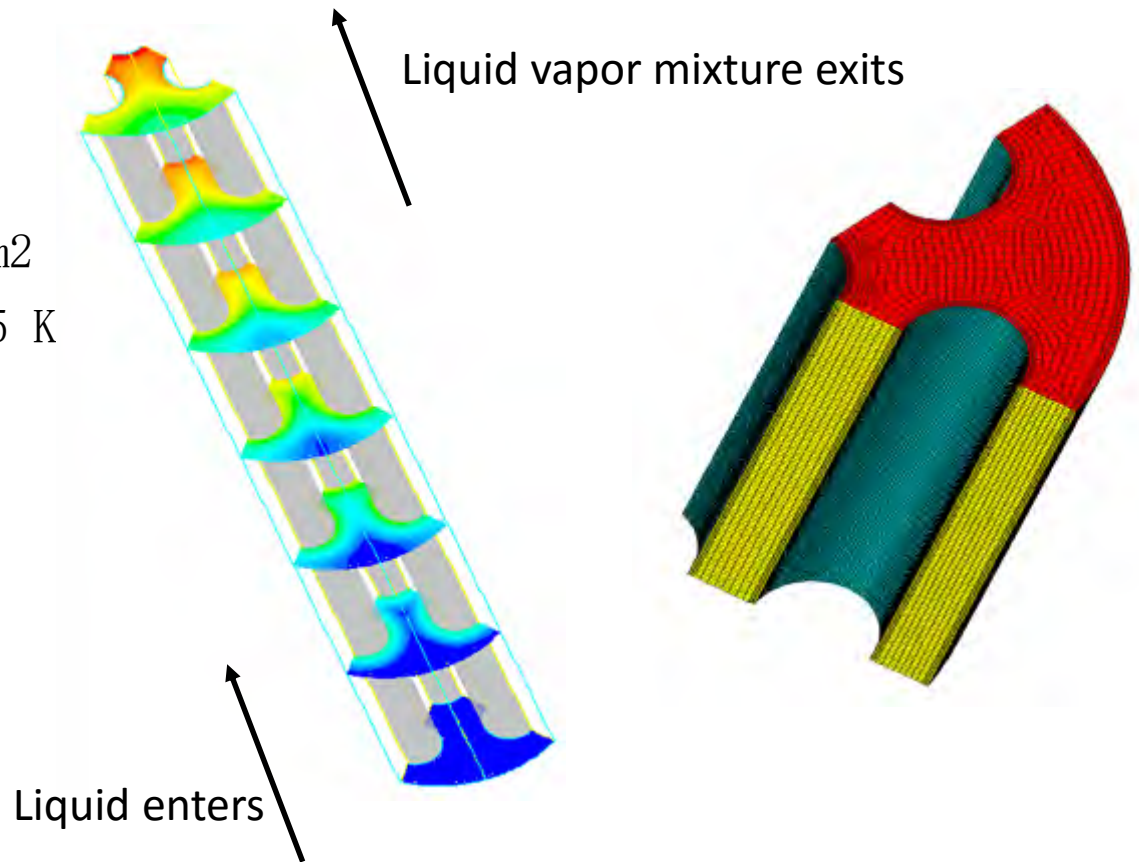
气相体积分数分布



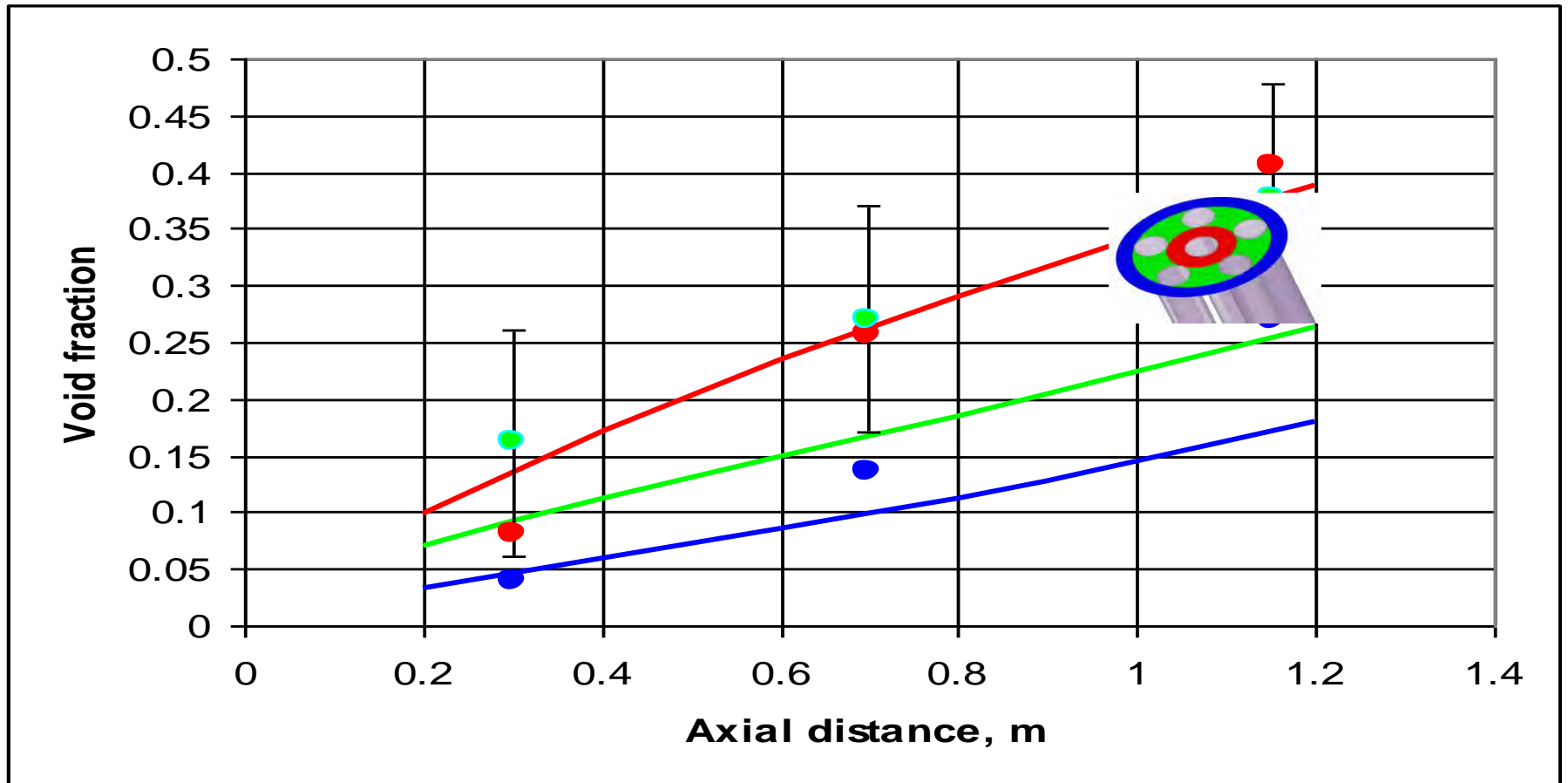
温度分布

过冷沸腾-两相流模型

- 核燃料棒周围的流动
 - Pressure 50 atm
 - $Re_{liq}=300,000$
 - Heat flux 0.522 MW/m²
 - Inlet subcooling 4.5 K
 - $y^+=100$



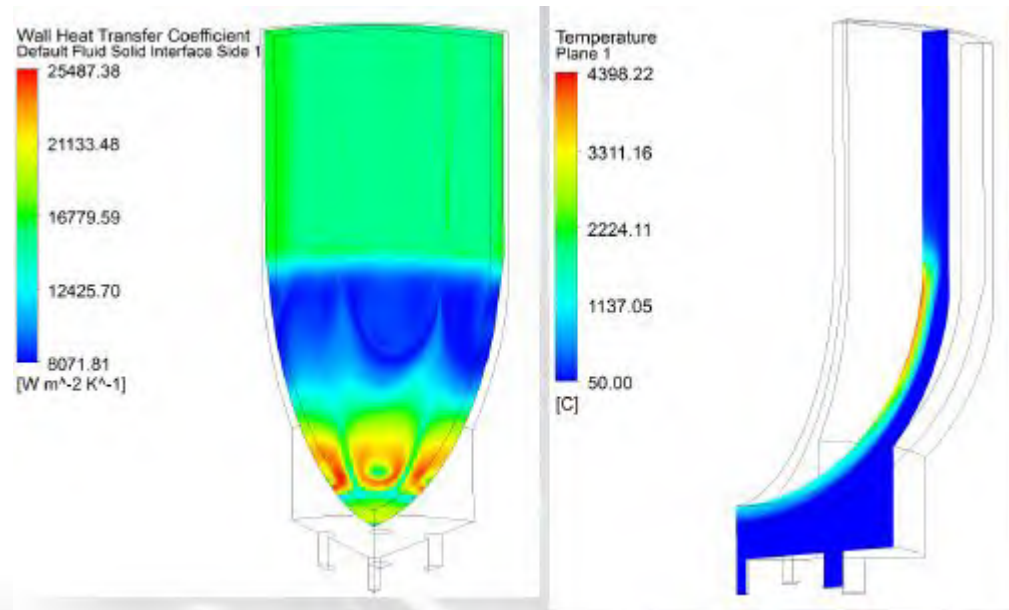
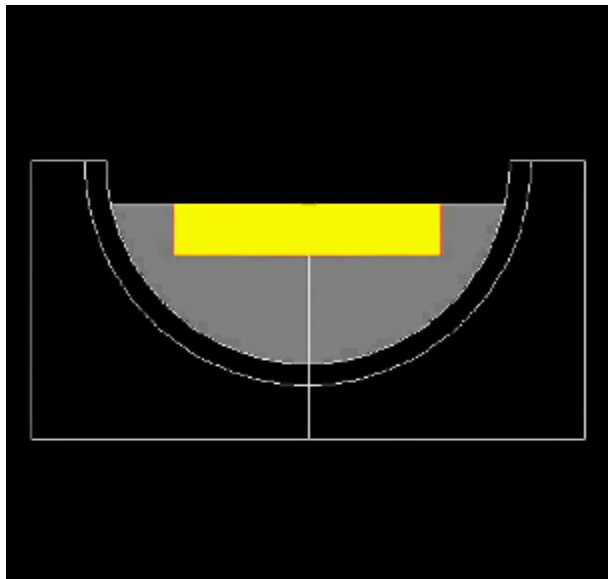
过冷沸腾-两相流模型



气相体积分数和试验的比较

熔融物堆内滞留

- 当发生堆芯熔融时，如何使放射性熔融物保持在压力容器（或安全壳）内，关系到周边环境和人员的安全
- 该问题需要考虑金属的融化/凝固相变、多相混合物的流动和传热等因素



氢气分布

- 该问题需要模拟安全壳内巨大的空间，同时需要考虑氢气组分在空气中的传播，以及多热源、大空间自然对流等因素
- 冷凝现象在精确的分析中也需要考虑

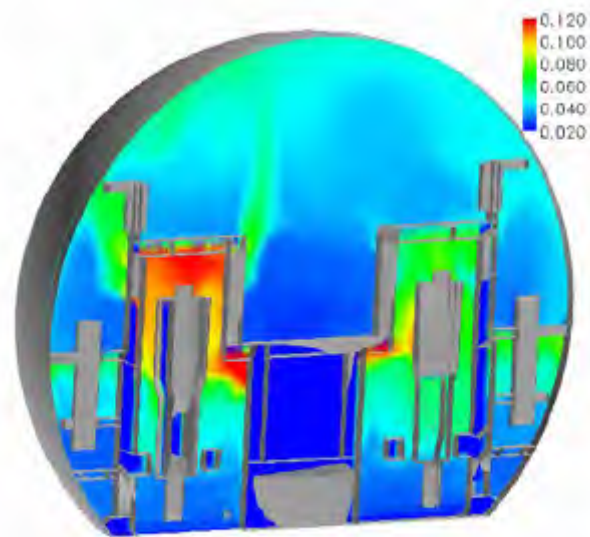
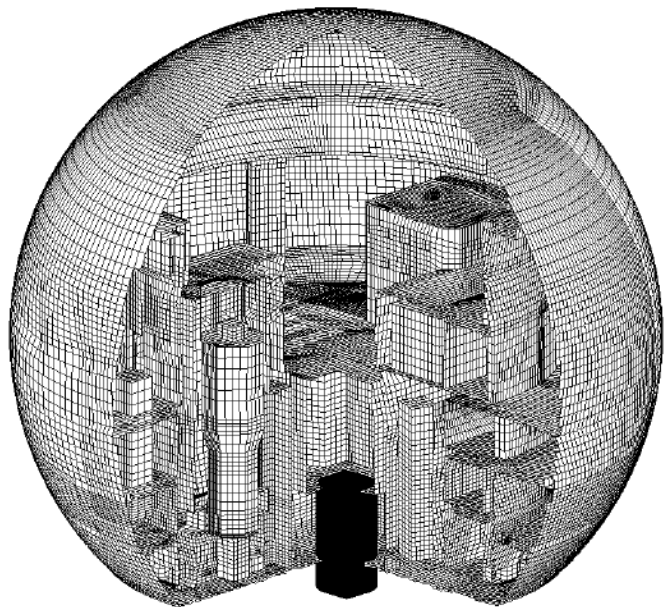
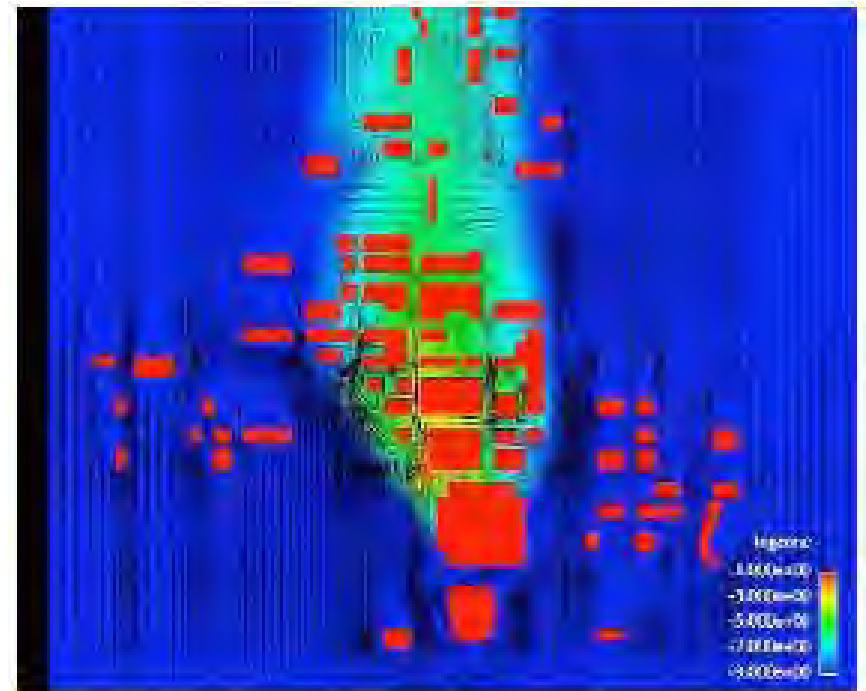


Fig. 77 Realistically modelled break: hydrogen volume fraction at $t=1.885$ h into the transient

气溶胶/大气运输

- 该问题需要处理巨大的计算区域和地表形态，考虑大气流动、日照等现象



ANSYS



仿真
新时代

2017 ANSYS用户技术大会

中国·烟台

感谢聆听



ANSYS-China