

ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD



iconCFD Conference Day

オープンソースベース iconCFD
～ CFD 活用方法の革新～

iconCFD的沸腾解析
～ 扩展CFD适用范围的一个案例 ～

Boiling Simulation with iconCFD
-an Example for Enhancement of Target of CFD-

IDAJ Co., Ltd.
鈴木 朗

1 . 概论

- 作为辅助设计的强大工具，CFD已经成功应用于很多工业区域中。但在某些区域，CFD还缺乏一定的适用性。
- 随着CFD的普遍应用，对CFD的要求也越来越高。对CFD用户来说，只用CFD计算还是不足够的，人们期待CFD对实际的设计制造工程问题，具备提供解决方案的能力。
- 在这种情况下，为了验证CFD适用性的扩展，并具备提供问题解决方案的能力，介绍使用iconCFD进行沸腾解析的一个验证计算的案例。
- 虽然一般的商用CFD软件里已经包含了沸腾模型，但由于沸腾现象包括相变过程，所以对实际的对象还存在不能适用的情况。
 - 比如，由于计算稳定性的问题，对时间步长的要求太严格，完成某些设计需求的计算时间需要半年，等等。。
- 为解决类似的问题，使用iconCFD进行沸腾模型的开发。

2 . 验证对象概述

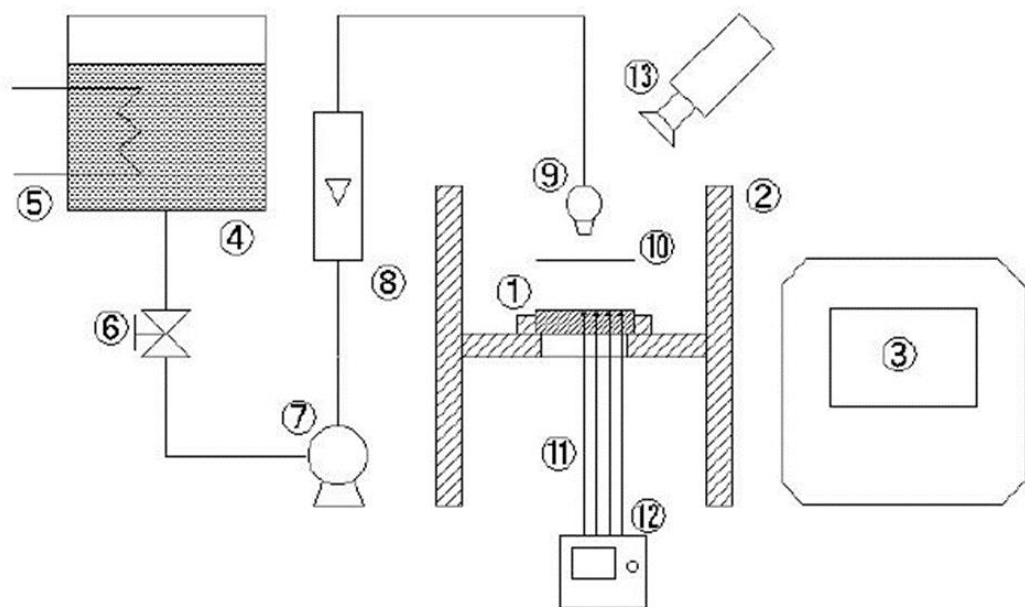
用水喷流冷却800摄氏度的不锈钢板 (150mm×10mm)

■ 确认不同水温下的冷却行为的差异

■ 70℃ , 50℃ , 30℃

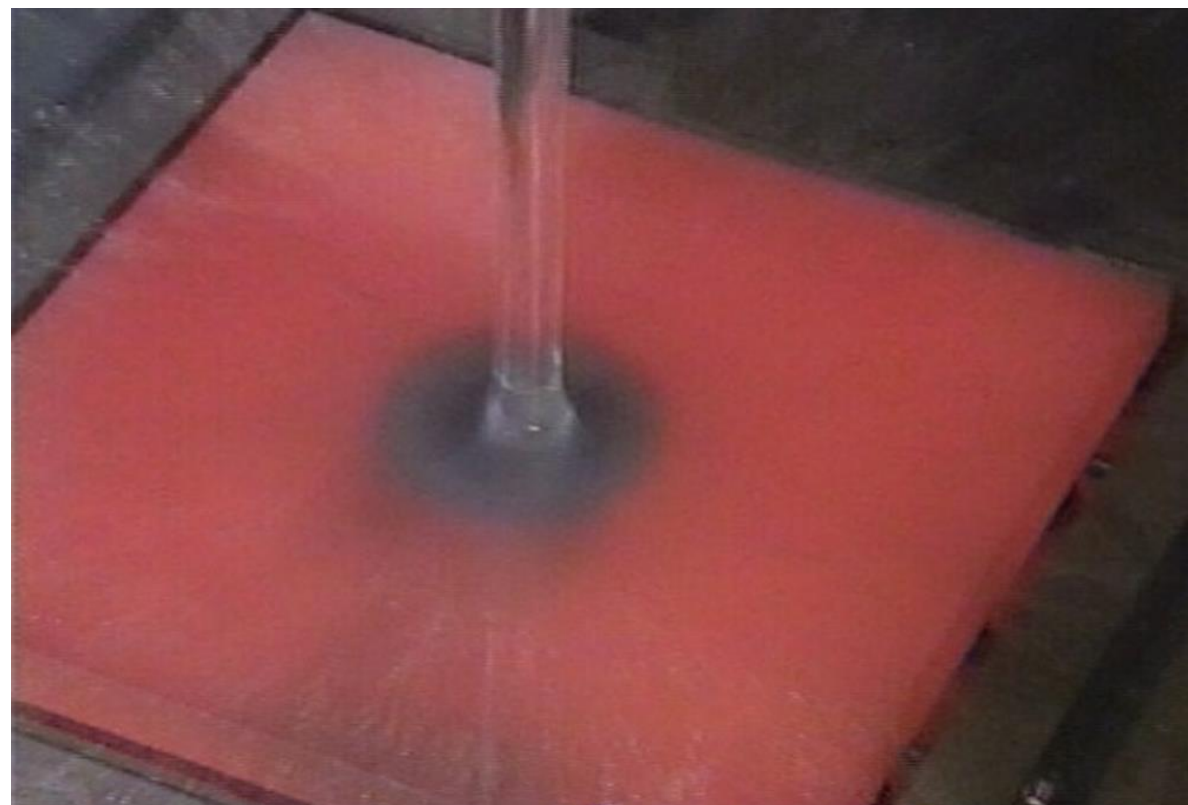
参考文献：

「高温鋼板の円形水噴流冷却のVOF シミュレーションと検証実験」
山神 成正、修士論文、東京大学(2003)



1:Heated plate 2:Plate holder 3:Furnace 4:Tank 5:Heater 6:Valve 7:Pump 8:Flowmeter 9:Nozzle 10:Shutter

11:Thermocouples 12:Recorder 13:Video camera



3 . 本过程计算上的难点和能完成计算的意义

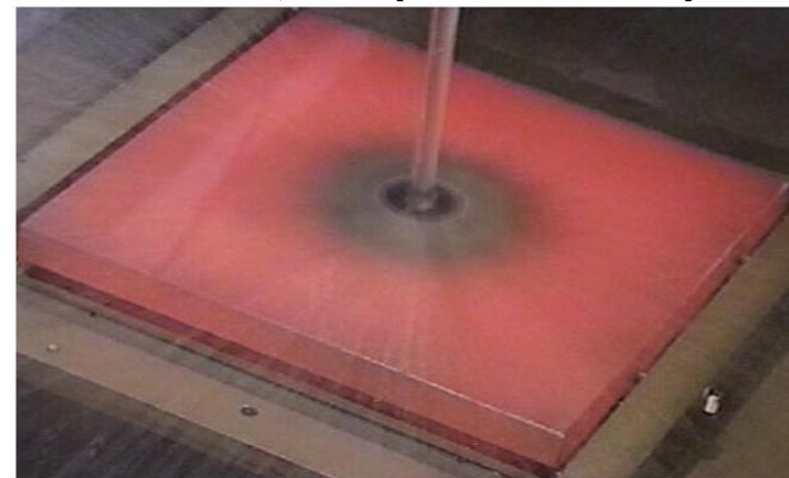
计算上的难点：

- 本过程中，水和高温不锈钢的初始温差超过摄氏700度，水喷流接触高温不锈钢板时，相变发生，钢板被急剧冷却
- 这个相变也包括膜态沸腾
 - 实际上，预热区域，核态沸腾区域和膜态区域都存在（右图）
- 产生的水蒸汽跟水和空气混合，冷凝发生
- 相变发生时，密度变化巨大
- 很难保持热平衡和计算稳定性

能完成计算的意义：

- 目前还不适用CFD的领域也可以进行计算
- 案例：淬火过程→制造过程中的一个必要过程
- 冷却速度：170°C/sec以上

0.1sec时的照片（水温：30°C）



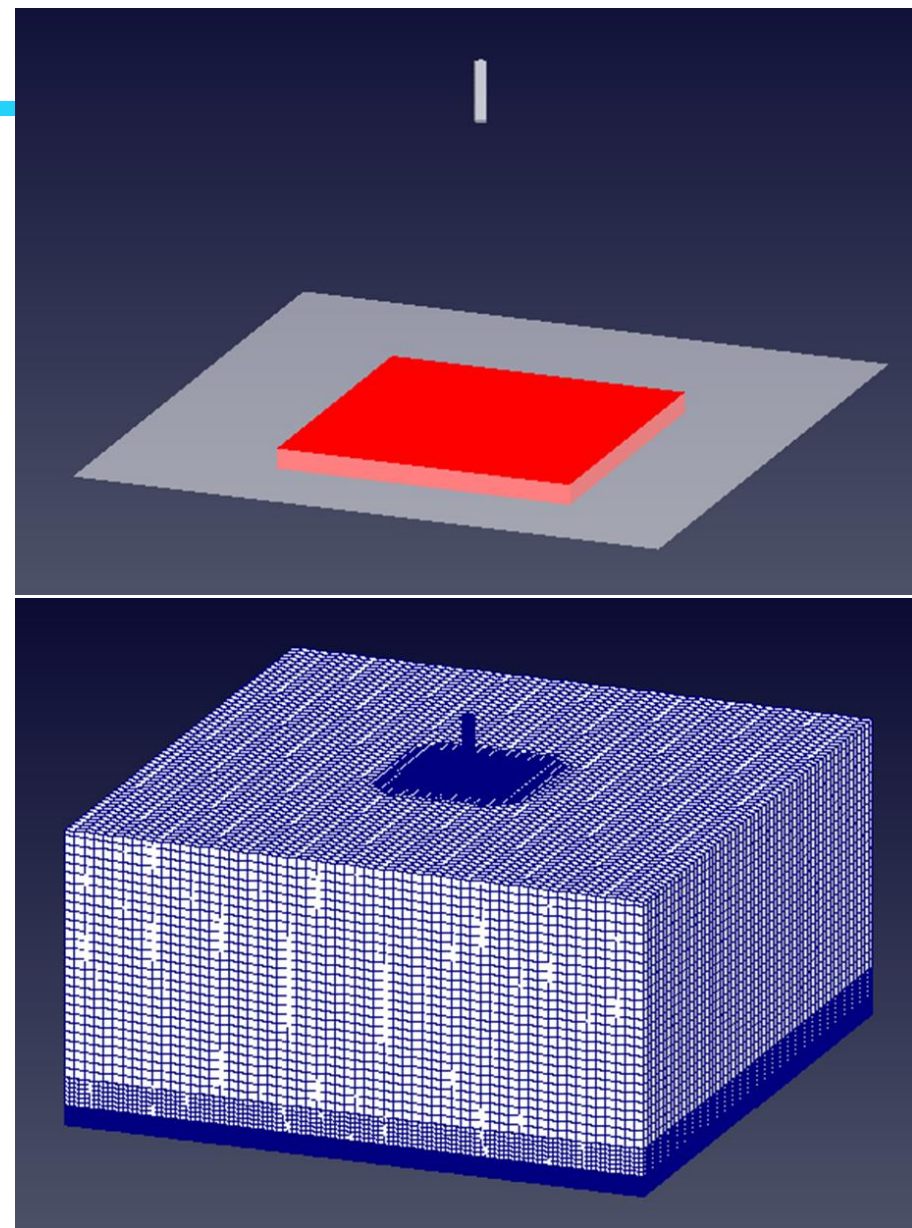
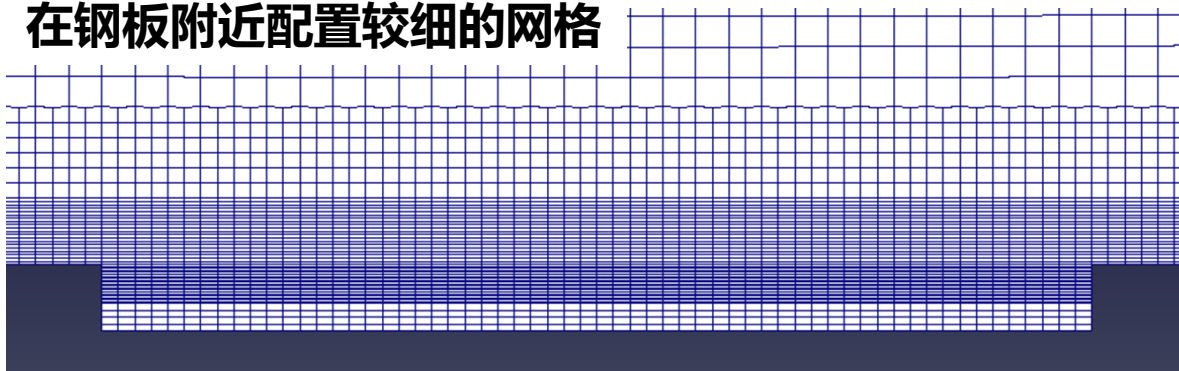
膜态沸腾区域 预热~核态沸腾区域 膜态沸腾区域

4 . 解析区域 + 解析网格

包括从喷嘴到加热不锈钢板的区域

- 喷嘴直径： $\Phi 6\text{mm}$
- 喷嘴口到加热不锈钢板的距离：150mm
- 网格生成工具：iconHexMesh
- 总网格数：894,124
 - 流体区域：757,500
 - 固体区域：136,624

钢板附近截面图：
在钢板附近配置较细的网格



5 . 物理模型

- iconCFD版本：v3.3.14
- 求解器名称：idajChtMixingInterPimpleFoam
- 时间项：瞬态
- 控制方程（固体只考虑能量方程）
 - 连续性方程
 - Navier-Stokes方程
 - 能量方程
 - 体积分数方程（VOF方法）←水，水蒸汽和空气的三相
- 湍流模型：k- ω SST
- 相变模型
 - 流体区域的相变模型
 - 基于沸腾曲线的壁面沸腾模型

6 . 沸腾模型概述

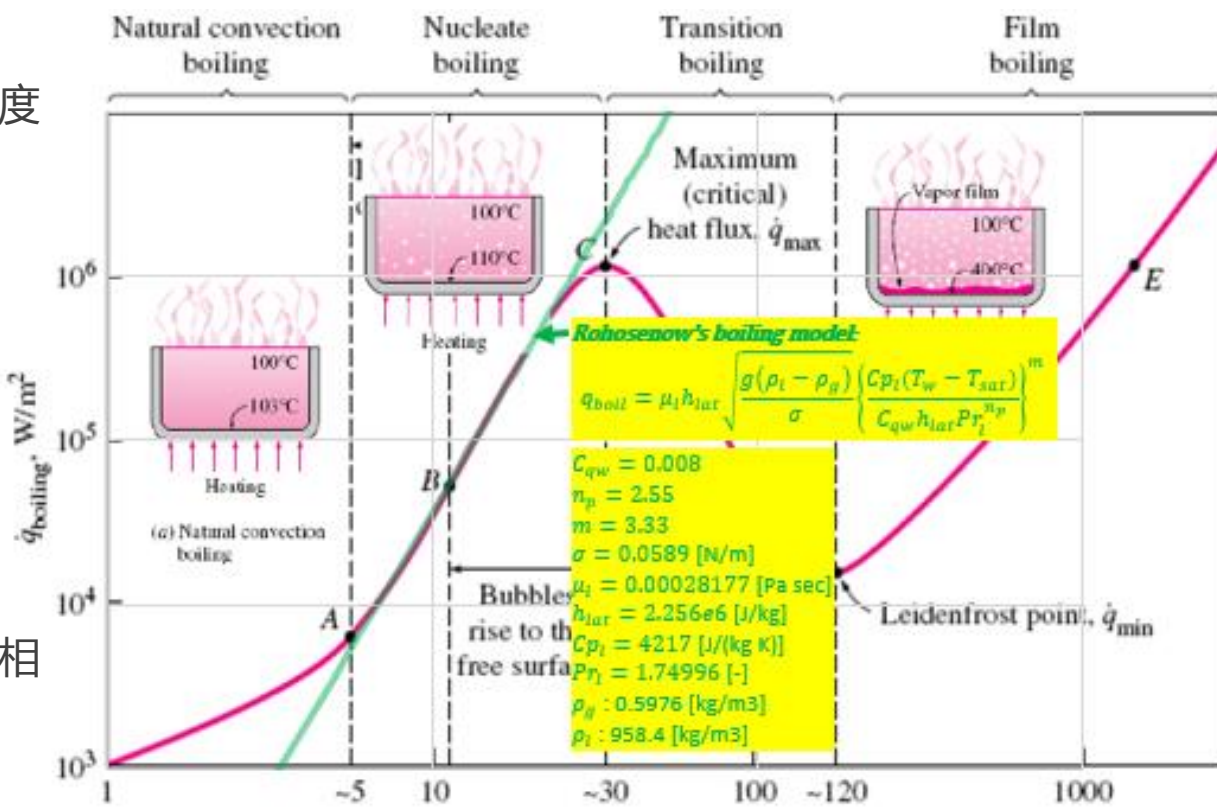
两个子模型构成iconCFD的沸腾模型

流体区域的相变模型

- 在流体网格中，根据网格温度和饱和温度的差异，计算相变速度
- 网格温度 > 饱和温度：蒸发
- 网格温度 < 饱和温度：冷凝

根据沸腾曲线的壁面沸腾模型

- 按照Rohsenow模型，算出沸腾热流密度（右图）
- 临界热流密度（根据burn-out，控制热流密度）会考虑
- 全热流密度=沸腾热流密度 + 对流热流密度
- 全热流密度的一个部分被用于流体的加热，另一部分被使用于相变



7 . 物性值设定 (1)

水 :

- 密度 : 995.65 kg/m³
- 动力粘度 : 8.01e-4 Pa sec
- 比热 : 4178 J/(kg K)
- 热导率 : 0.618 W/(m K)
- 表面张力 :
 - 0.0589 N/m (水-水蒸汽)
 - 0.0712 N/m (水-空气)
- 饱和温度 : 373.15 K
- 蒸发潜热 : 2256000 J/kg

不锈钢 (SUS304) :

- 密度 , 比热 , 热导率 : 温度多项式 (下一页)

水蒸汽 :

- 密度 : 理想气体方程
 - 分子量:18 kg/kmol
- 动力粘度 : 1.18e-4 Pa sec
- 比热 : 2077 J/(kg K)
- 热导率 : 0.0251 W/(m K)

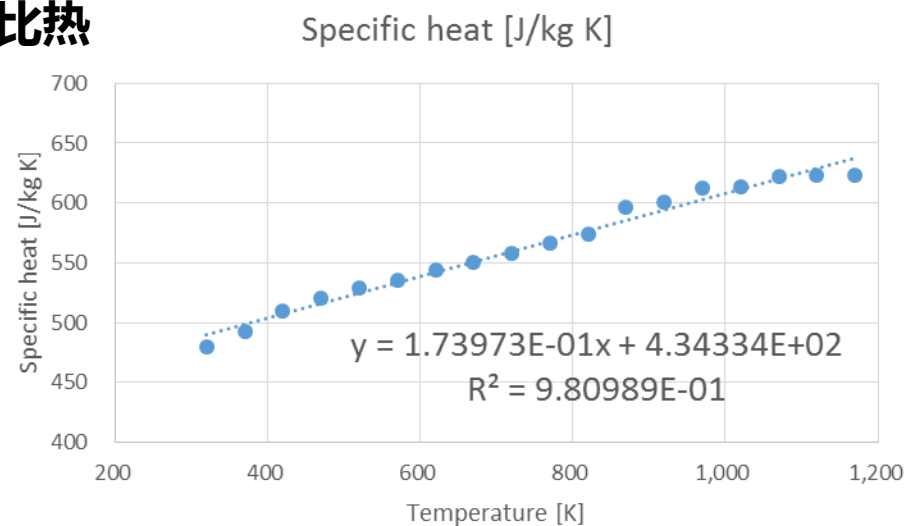
空气 :

- 密度 : 理想气体的方程
 - 分子量 : 28.9 kg/kmol
- 动力粘度 : 2.685e-5 Pa sec
- 比热 : 1007 J/(kg K)
- 热导率 : 0.02645 W/(m K)

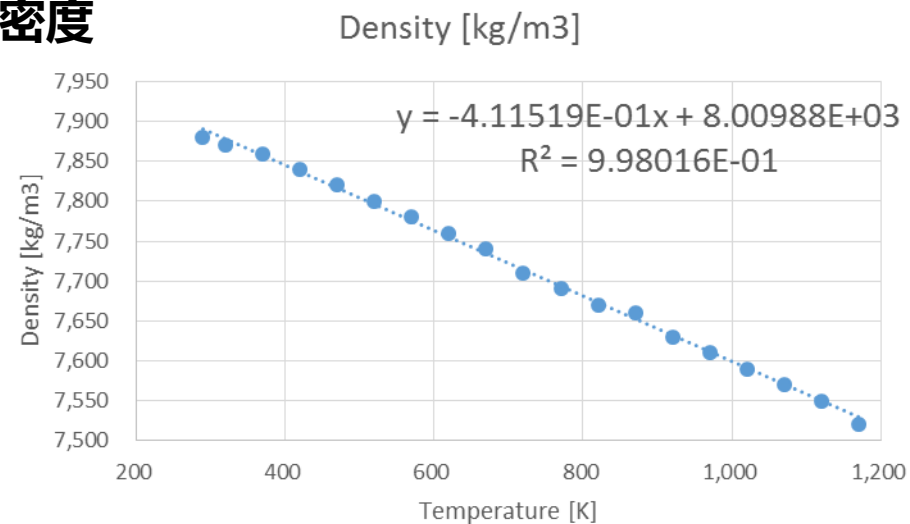
7 . 物性值设定 (2)

考虑不锈钢板 (SUS304) 的物性值
随温度的变化

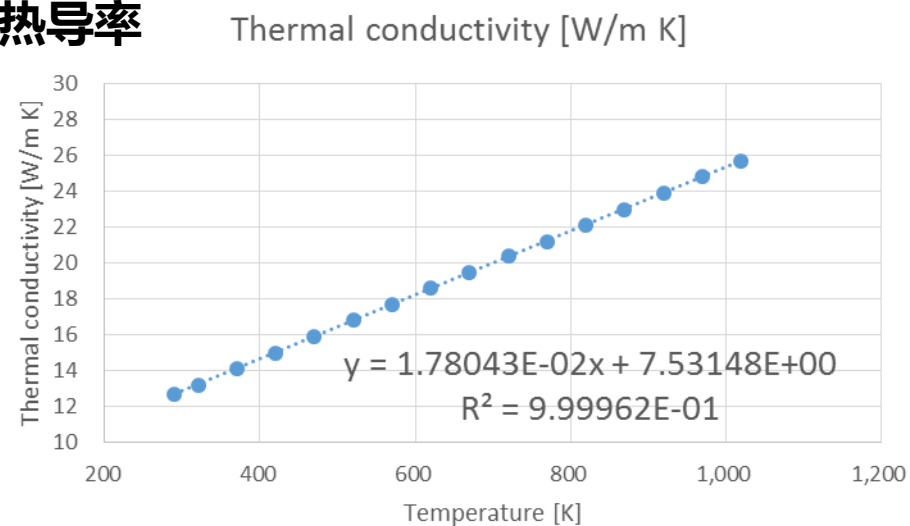
比热



密度



热导率



8 . 计算条件

关于水喷流，运行不同水温的3个工况计算，对比实验和计算的固体内部温度差异

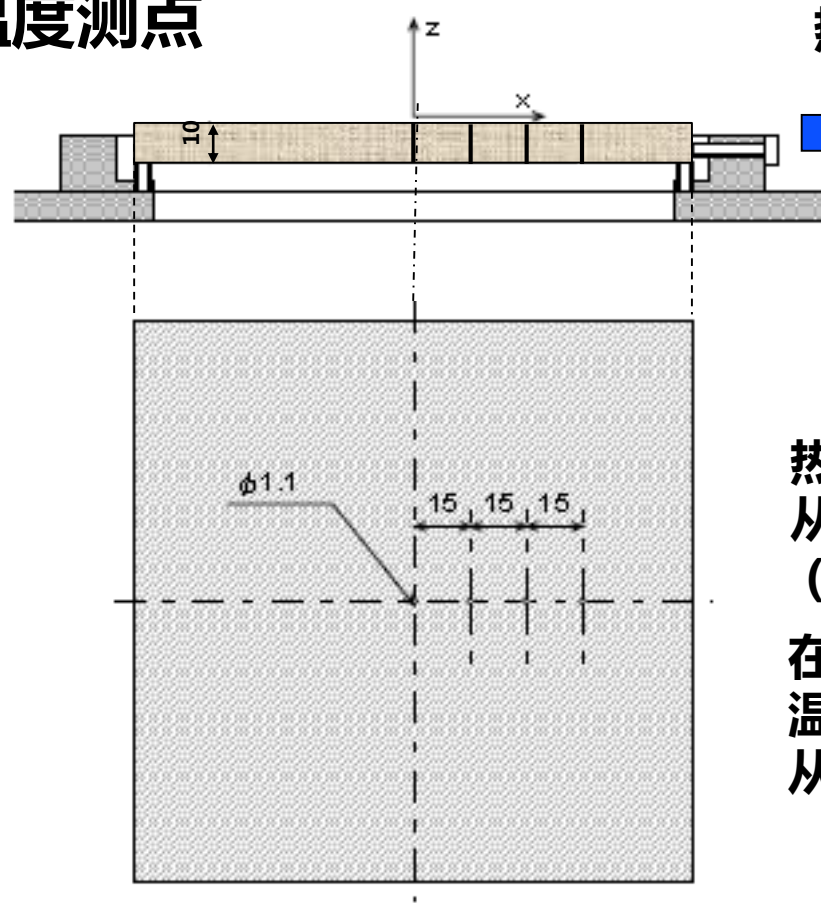
■水温：

- 30℃
- 50℃
- 70℃

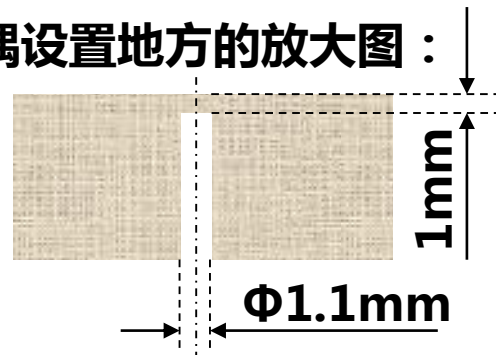
■其它条件：

- 水体积流量：10 //min
- 钢板初始温度：800℃均一
- 周围空气温度：30℃
- 压力：1大气压 (101325Pa)

温度测点



热电偶设置地方的放大图：



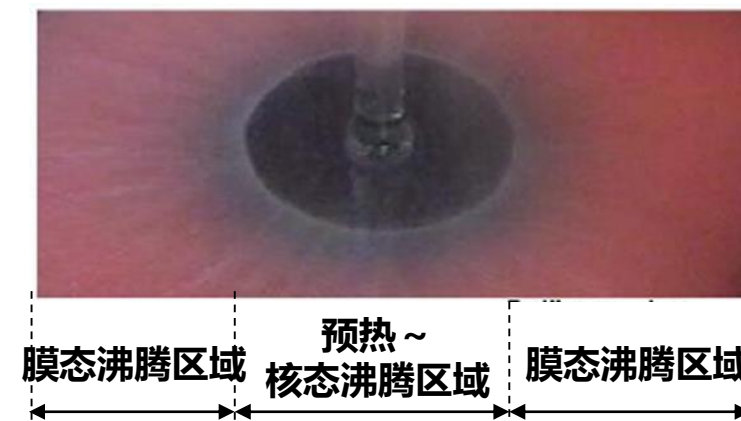
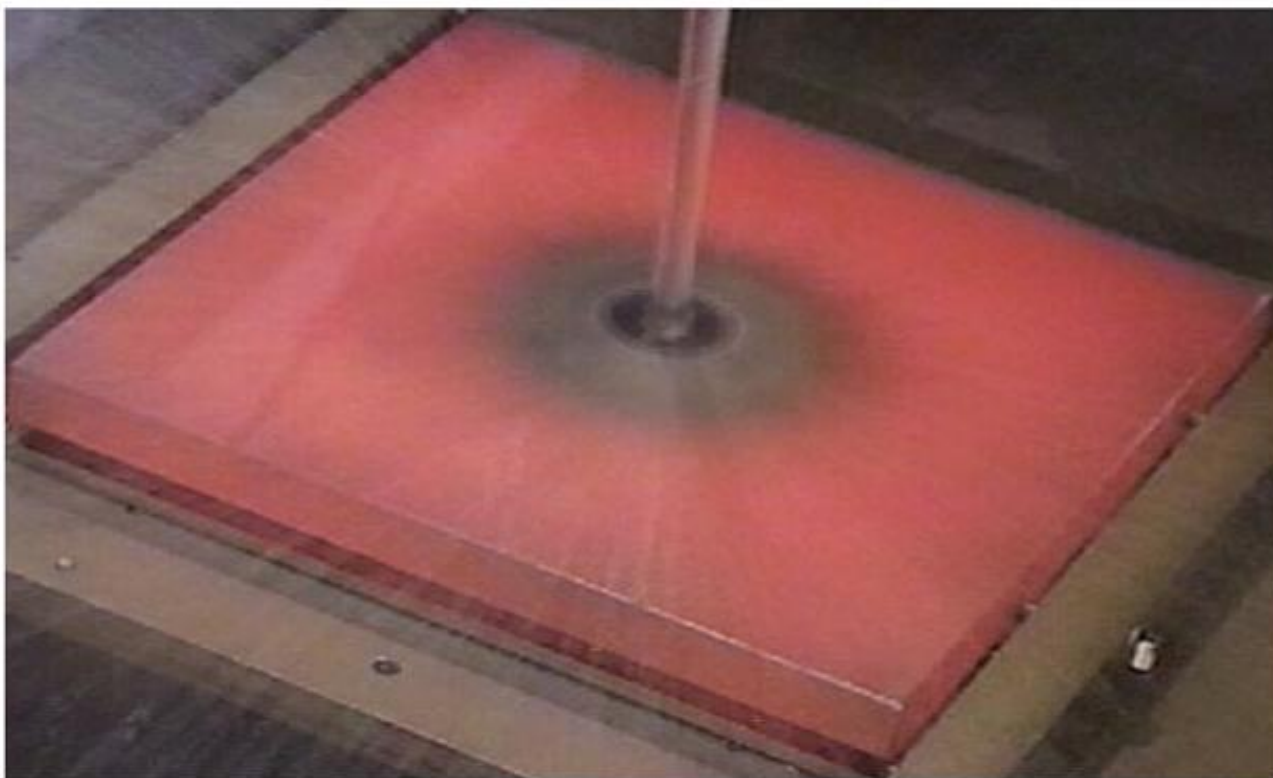
热电偶设置在
从钢板中央每15mm一个点，共4个点
(从钢板表面1mm里面的位置)

在计算上也设置温度监控点，确认
温度随时间的变化：
从中心point1-4的4点

9 . 再现现象的关键点 (1)

能不能再现预热区域，核态沸腾区域和膜态沸腾区域的所有情况下的现象？

0.1sec时的照片 (水温：30℃)



9 . 再现现象的关键点 (2)

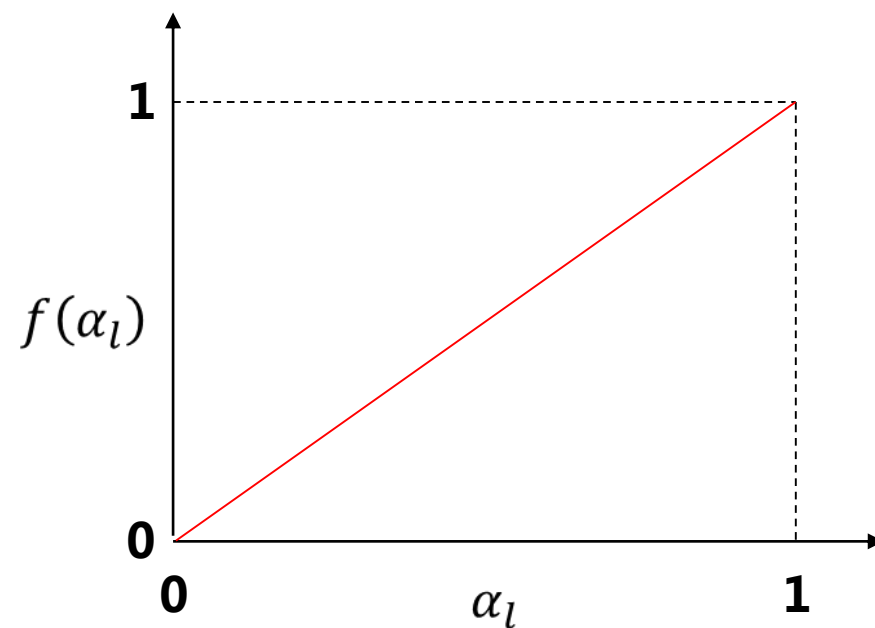
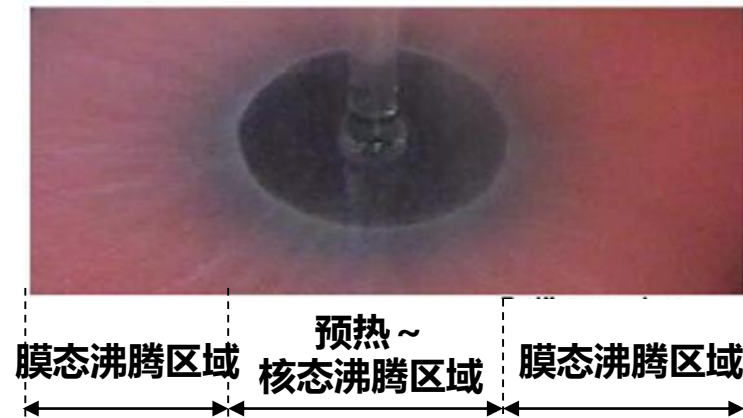
对这个对象适用沸腾曲线

- 沸腾曲线是过热度 (= 壁面温度同饱和温度的差) 的函数。
但是对这个对象，只采用沸腾曲线也再现不了现象。
- 还需要考虑对加热壁面水的供给情况

Rohsenow's boiling model:

$$q_{Rohsenow} = \mu_l h_{lat} \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\sigma}} \left\{ \frac{Cp_l(T_w - T_{sat})}{C_{qw} h_{lat} Pr_l^{n_p}} \right\}^m \times f(\alpha_l)$$

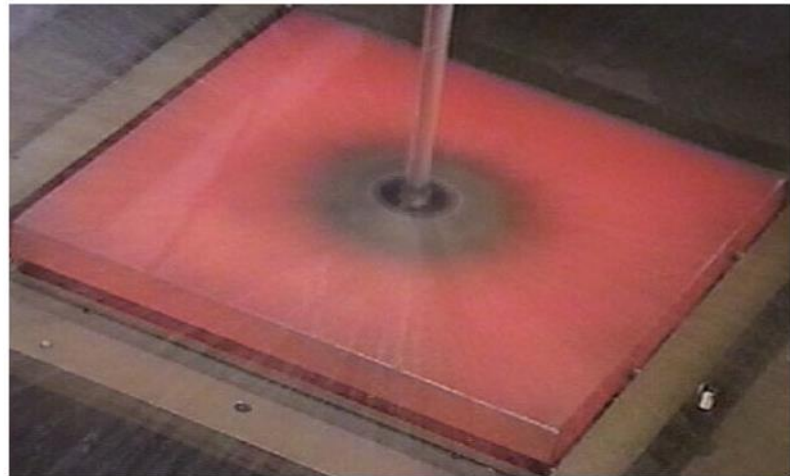
为了再现膜态沸腾下的热流密度，附加加热壁面第一层的液体体积分数有关的衰减函数项



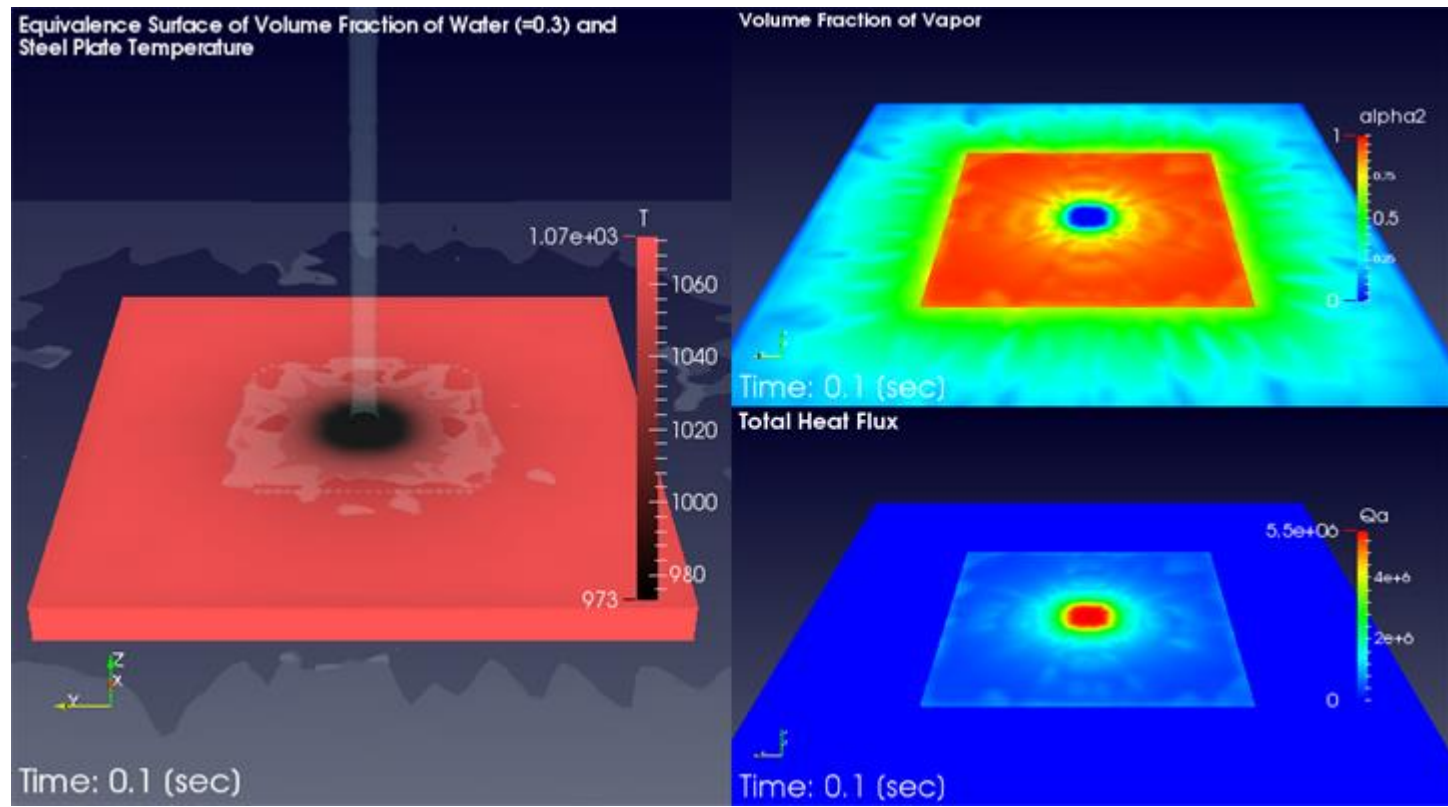
9 . 再现现象的关键点 (3)

能不能再现预热区域，核态沸腾区域和膜态沸腾区域的所有情况下的现象？

0.1sec时的照片 (水温：30℃) 计算结果 (左：温度，右上：蒸汽体积分数，右下：热流密度) (水温：30℃)



膜态沸腾区域 预热~核态沸腾区域 膜态沸腾区域

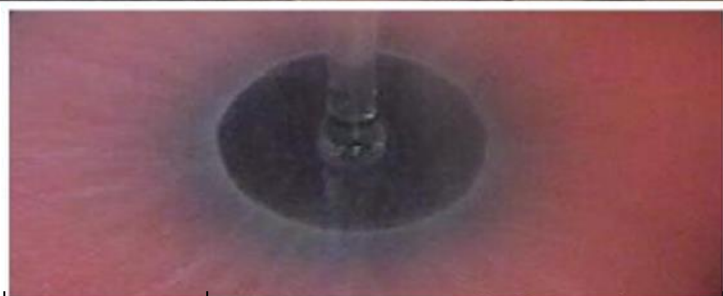
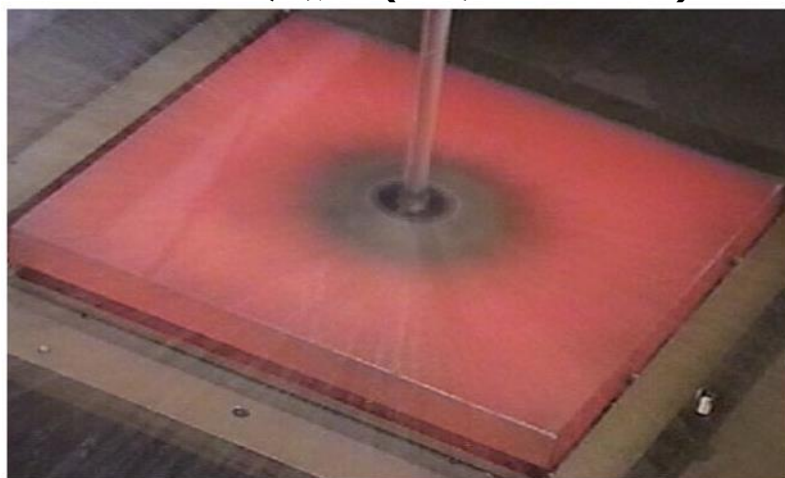


跟预热和核态沸腾区域相比，膜态沸腾区域的热流密度更小。

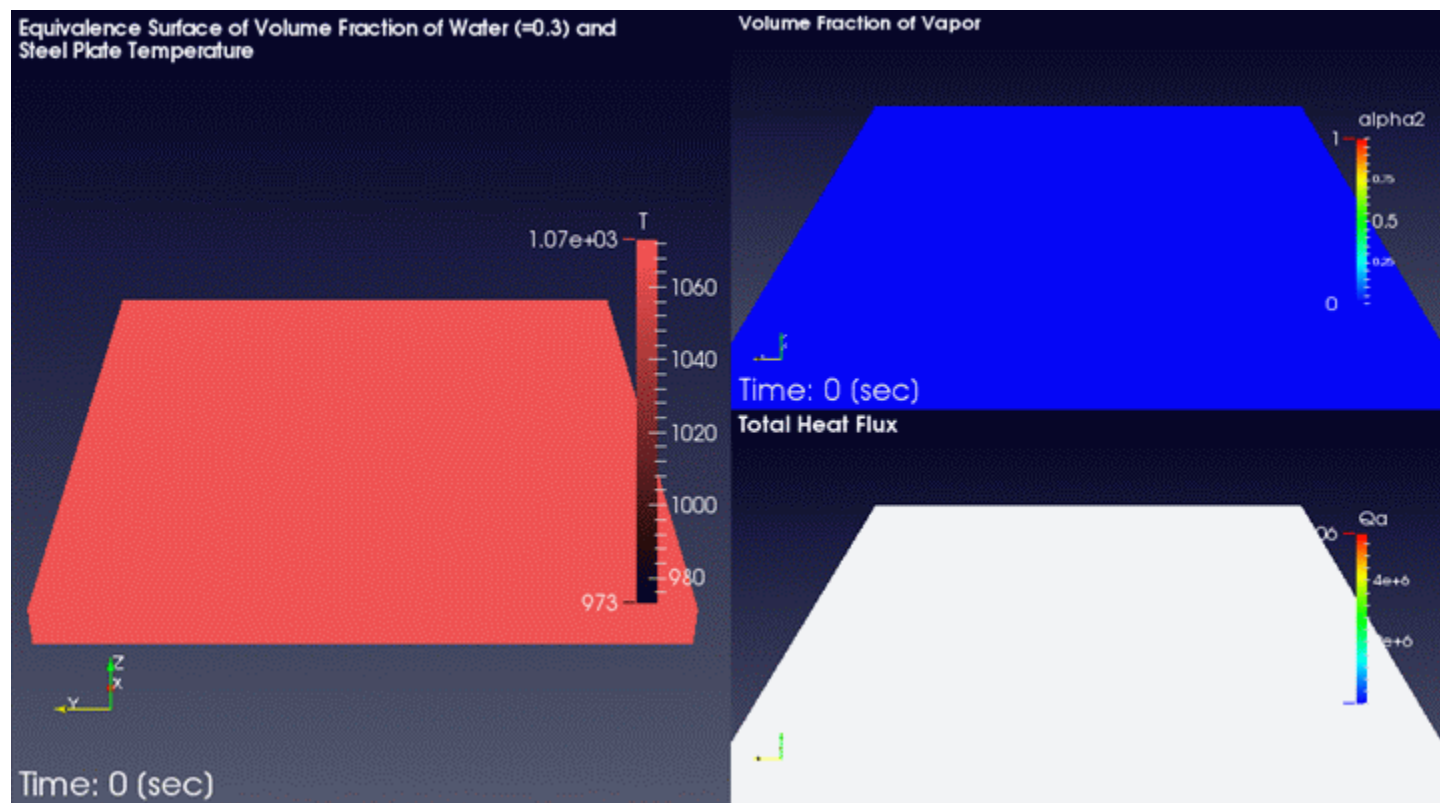
9 . 再现现象的关键点 (3)

能不能再现预热区域，核态沸腾区域和膜态沸腾区域的所有情况下的现象？

0.1sec时的照片 (水温：30℃) 计算结果 (左：温度，右上：蒸汽体积分数，右下：热流密度) (水温：30℃)



膜态沸腾区域 预热~核态沸腾区域 膜态沸腾区域



跟预热和核态沸腾区域相比，膜态沸腾区域的热流密度更小。

1 0 . 计算时间

计算环境：Intel(R) Xeon(R) CPU E5645@2.40GHz 12Core

工况	计算时间 [day]
水温：30℃	11.9
水温：50℃	10.5
水温：70℃	10.3

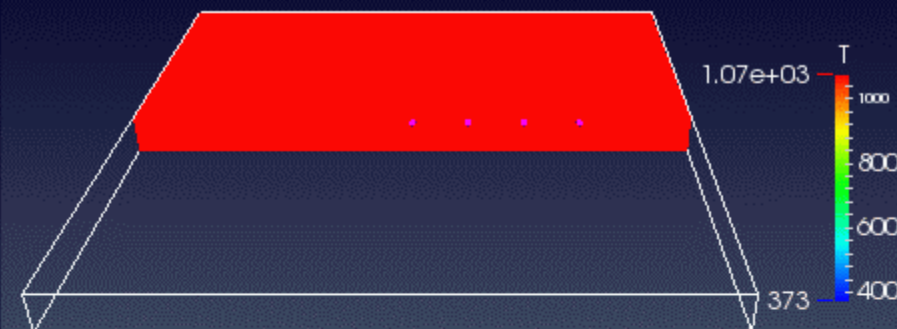
1 1 . 计算结果 (水温30℃)

Equivalence Surface of Volume Fraction of Water (=0.3) and Steel Plate Temperature



Time: 0 (sec)

Clipped Steel Plate Temperature



Time: 0 (sec)

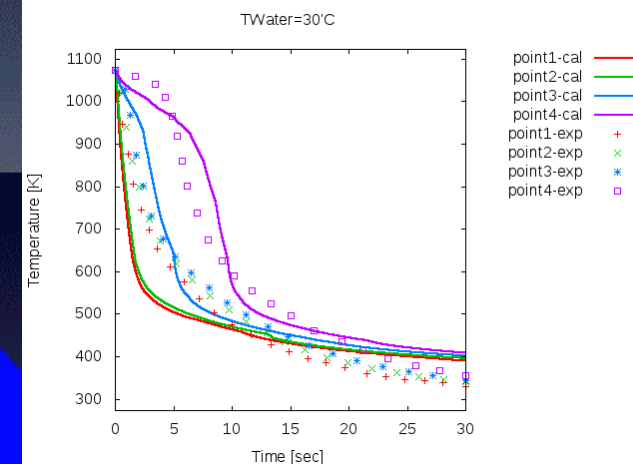
Volume Fraction of Vapor



Time: 0 (sec)

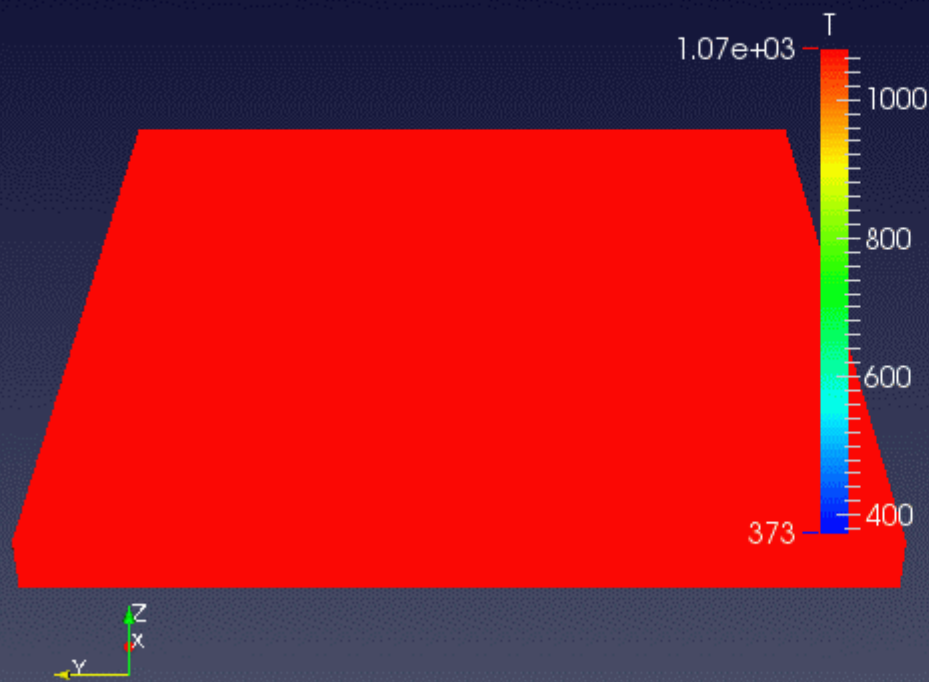
左图：固体温度 [K]
+ 水体积分数=0.3的等值面
右上图：固体温度的中心截面 [K]
右下图：蒸汽体积分数 [-]

计算和实验的
固体温度变化对比



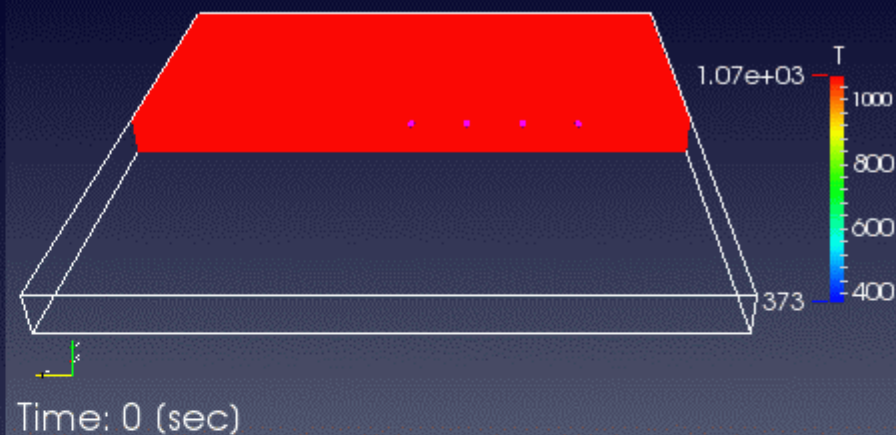
1 1 . 计算结果 (水温50°C)

Equivalence Surface of Volume Fraction of Water (≈ 0.3) and Steel Plate Temperature



Time: 0 (sec)

Clipped Steel Plate Temperature



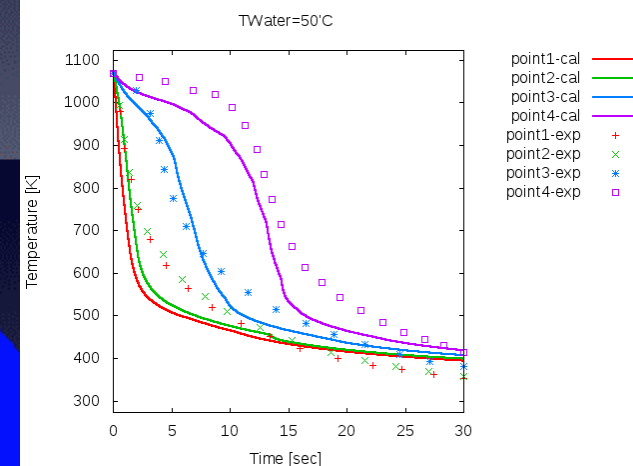
Volume Fraction of Vapor



Time: 0 (sec)

左图：固体温度 [K]
+ 水体积分数=0.3的等值面
右上图：固体温度的中心截面 [K]
右下图：蒸汽体积分数 [-]

计算和实验的
固体温度变化对比



1 1 . 计算结果 (水温70°C)

Equivalence Surface of Volume Fraction of Water (=0.3) and Steel Plate Temperature



Time: 0 (sec)

Clipped Steel Plate Temperature



Time: 0 (sec)

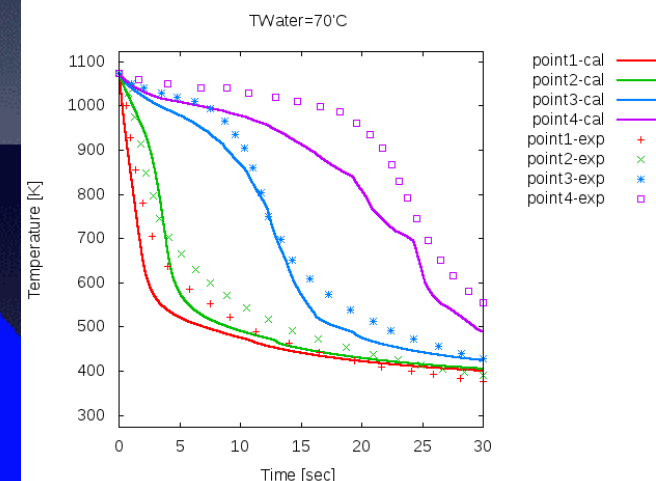
Volume Fraction of Vapor



Time: 0 (sec)

左图：固体温度 [K]
+ 水体积分数=0.3的等值面
右上图：固体温度的中心截面 [K]
右下图：蒸汽体积分数 [-]

计算和实验的
固体温度变化对比



1 2 . 结论

本次报告，针对扩展CFD适用范围的一个案例，介绍使用iconCFD的沸腾解析的验证计算。

- 对于使用一般的商用CFD软件不能计算的温差非常大的沸腾计算（预热区域，核态沸腾和膜态沸腾都包括），iconCFD可以计算。
- 对于不同水温的3个工况，采用统一参数，能再现钢板的冷却趋势。
- 在水喷流刚到达加热钢板时，钢板的冷却速度超过 $200^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 。这样的计算也可以进行，那么在制造过程中的「淬火过程」也可以计算。
- 通过求解器的开发和验证计算，iconCFD可以针对用户的特殊物理现象和问题提供解决方案。

艾迪捷信息科技有限公司(上海)有限公司



联系我们

——申请试用/软件询价/技术培训/专题活动

- 网站: <https://www.idaj.cn/>
- 邮箱: idaj.marketing@idaj.cn
- 电话: 021-50588290; 010-65881497

扫一扫, 关注艾迪捷
第一时间获得更多产品介绍/成功案例/市场活动