

基于REVENT实验的气溶胶再夹带模型 适用性分析

何丽雯¹ 侯丽强² 佟立丽¹ 曹学武¹

1(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

2(中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室 成都 610041)

摘要 在核反应堆事故后卸压等特定场景下,安全壳内液体大量蒸发,液相中气溶胶在蒸汽作用下被夹带回气相中的现象称为再夹带。本文基于Revent实验结果对Kataoka & Ishi's和Cosandey's再夹带模型的适用性进行了评估。首先将模型转化为程序语言,针对实验建立分析模型并对不同工况开展模拟研究;然后通过对分析模型预测结果与实验测量结果,评估了在不同压力、气体组分条件下,Kataoka & Ishi's各夹带区域模型预测可溶性气溶胶再夹带行为的适用性,Cosandey's模型预测可溶性、不可溶性气溶胶再夹带行为的适用性。结果表明:Cosandey's模型更适用于预测核电厂事故工况下安全壳内不同种类气溶胶粒子再夹带行为。

关键词 再夹带,可溶性气溶胶,不可溶性气溶胶,纯蒸汽,空气-蒸汽

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.070603

Applicability analysis of aerosol reentrainment model based on revent experiment

HE Liwen¹ HOU Liqiang² TONG Lili¹ CAO Xuewu¹

1(School of Mechanical and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

2(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract [Background] During nuclear power plant accident, operations such as containment depressurization will lead to strong evaporation of liquid. The phenomenon that aerosol in the liquid phase is entrained back into the atmosphere under the action of steam is called re-entrainment. It will increase the risk of radioactive sources leaking into the environment. [Purpose] This study aims to evaluate the applicability of Kataoka & Ishi's and Cosandey's aerosol re-entrainment models based on the Revent experiment results. [Methods] First of all, these models were converted into programming languages. Analytical models were established for the experiments, and simulation studies were carried out under experimental condition of different pressure and gas composition. Then the results of model prediction and experimental measurement were compared and analyzed to evaluate the applicability of these models for aerosol re-entrainment behaviour. [Results & Conclusions] Cosandey's model is more suitable for predicting the re-entrainment behavior of different aerosol particles in the containment during nuclear power plants accident.

Key words Re-entrainment, Soluble aerosol, Solid aerosol, Pure steam, Air-steam

国家科技重大专项(No.2017ZX06004006-003)资助

第一作者: 何丽雯, 女, 1996年出生, 2017年毕业于东北大学, 现为博士研究生, 研究领域为核反应堆安全

通信作者: 佟立丽, E-mail: lltong@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-12-31, 修回日期: 2020-04-20

Supported by National Science and Technology Major Project (No.2017ZX06004006-003)

First author: HE Liwen, female, born in 1996, graduated from Northeast University in 2017, doctoral student, focusing on nuclear reactor safety

Corresponding author: TONG Lili, E-mail: lltong@sjtu.edu.cn

Received date: 2019-12-31, revised date: 2020-04-20

液相中气溶胶在蒸汽作用下被夹带回到气相中的现象称为再夹带^[1]。核反应堆发生事故时裂变产物从堆芯释放,并以气态、蒸汽、气溶胶等形式存在,气溶胶是分散并悬浮在介质中的固体或液体小颗粒,是裂变产物的主要存在形式之一,其在安全壳内的行为直接影响最终释放到环境中的放射性源项。在核反应堆事故后卸压等特定场景下,安全壳内的液体大量蒸发,已经被冲洗掉的气溶胶粒子在再夹带作用下回到空气中,气相中放射性源项增加,并可能导致最终向环境的释放增加^[2]。因此开展气溶胶再夹带行为研究,对澄清严重事故最终的释放源项具有重要意义。

在再夹带实验研究方面,1985~1987年 Bunz^[3]在 REST 装置上开展了空气-蒸汽混合气体条件下的气溶胶再夹带实验研究,且仅采用了不可溶性的 BaSO₄ 作为实验材料。1994 年日本原子能研究所的 Kudo 等^[4]模拟实际电场中卸压导致的再夹带过程开展了实验研究,但仅在实验容器内压力分别从 1.3 MPa、1.5 MPa 快速下降至环境压力条件下开展了实验研究,且两工况测量得到的气溶胶再夹带因子相差较大。1999 年瑞士联邦理工学院的 Cosandey^[5]参考瑞士核电站(900 MW 热功率)以 1:20 的缩放比建立了 REVENT 实验装置,并采用可溶性和不可溶性气溶胶在 0.2~0.6 MPa 压力、0%~36% 空气份额条件下开展了再夹带实验研究。2003~2007 年在 THAI (Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosol, and Iodine) 等试验装置中进行了气溶胶再夹带实验^[6],但实验仅在较低的压力范围内进行。因此,选择覆盖的热工水力和源项参数范围较广且考虑影响因素较为全面的 Revent 实验作为气溶胶再夹带模型适用性评估的验证实验。

在模型研究方面,1996 年 Müller 等^[7-8]通过实验发现随着沸腾池中示踪剂浓度的增加,气溶胶的再夹带率也随之增加,并建立了基于在沸腾池周围一定空间内动量和能量守恒的气溶胶再夹带模型。1999 年 Cosandey^[5]在 Müller 模型的基础上考虑自由对流等影响因素,提出了半经验模型。Kataoka 等^[9-10]根据与液面的距离将再夹带区间分为 3 部分:表面附近区域、动量控制区域和沉积控制区域,并针对不同区域提出了考虑不同影响因素的再夹带半经验公式。安全壳内气溶胶再夹带行为是国际上严重事故研究领域中的关键问题,但目前通用的严重事故分析程序中尚未考虑此行为^[11],因此有必要开展气溶胶再夹带模型的适用性分析为后续向严重事故分析程序中添加提供支持。

本文中筛选出两个典型的再夹带模型:Kataoka

& Ishi's 模型和 Cosandey's 模型,分别针对 Revent 实验建立分析模型,通过对比分析模型模拟结果与实验测量值评估模型的适用性,并探究关键因素对再夹带的影响。

1 再夹带模型

沸腾水池中气溶胶在蒸汽夹带下克服重力作用重新进入气相的现象即为气溶胶再夹带,现有的气溶胶再夹带模型多为半经验公式,不同模型的区别主要在于对气流作用和重力影响的表征方法。

1.1 Kataoka & Ishi's 模型

Kataoka & Ishi's 模型^[9]认为沸腾池上部不同区域影响再夹带的主要因素不同,按照距离液面由近到远可分为三个区域:表面附近区域、动量控制区域和沉积控制区域,再夹带区域在高度方向上的分布如图 1 所示。

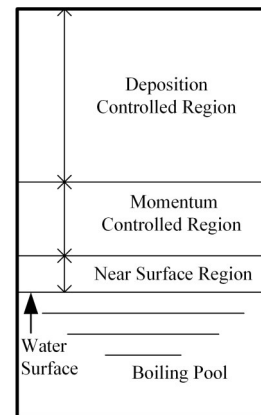


图 1 再夹带区域在高度方向上的分布
Fig.1 The distribution of the reentrainment regions

表面附近区域仅限于池面附近,在这一区域所有脱离水池表面的液滴均会再夹带,此区域的上限为:

$$\hat{z}_{\text{nsr}} = 1.038 \times 10^3 \hat{j}_g N_{\mu g}^{0.5} \hat{D}^{-0.42} \left(\frac{\rho_g}{\Delta \rho} \right)^{-0.23} \quad (1)$$

再夹带因子为:

$$\hat{E}_{\text{nsr}} = 4.84 \times 10^{-3} \left(\frac{\rho_g}{\Delta \rho} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中: $\hat{j}_g$ 为表征液体表面气流速度的无量纲数, $\hat{j}_g = \frac{j_g}{\sqrt{\sigma g \Delta \rho / \rho_g^2}}$ 。其中: j_g 为液体表面气流速度; σ 为液体表面张力; g 为重力加速度; $\Delta \rho$ 为气液相密度差; ρ_g 为气相密度。 $N_{\mu g}$ 为表征气体粘度的无量纲数,

$N_{\mu g} = \frac{\mu_g}{(\rho_g \sigma \sqrt{\sigma/(g\Delta\rho)})^{1/2}}$, 其中: μ_g 为气体粘度。 $\hat{D}$ 为

表征安全壳直径的无量纲数, $\hat{D} = \frac{D}{(\sqrt{\sigma/(g\Delta\rho)})}$, 其

中: D 为再夹带空间的当量直径。

动量控制区域处于中间高度范围, 再夹带与粒子的初始动量和沉降速度有关。动量控制区域的上限可以表示为:

$$\hat{z}_{\text{mcr}} = 1.97 \times 10^3 N_{\mu g}^{1/3} \hat{D}^{-0.42} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-0.23} \quad (3)$$

在这个区域内, 再夹带因子和与液面之间的距离成负相关。根据液体表面气流速度, 可分为: 由低速气流导致的再夹带, 再夹带因子可表示为式(4)和由中速气流导致的再夹带, 再夹带因子可表示为式(5)。

$$E_{\text{mcr}_{\text{low}}} = 2.21 N_{\mu g}^{1.5} \hat{D}^{1.25} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-0.31} \frac{\hat{j}_g}{\hat{z}} \quad (4)$$

$$E_{\text{mcr}_{\text{mid}}} = k_1 \hat{j}_g^{2.76} \hat{z}^{-2.3} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-0.26} N_{\mu l}^{2.2} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_l} \right)^{-0.31} \quad (5)$$

式中: k_1 为常数, $k_1 = 6.09 \times 10^9$ 。

低速气流的判断依据为:

$$\hat{j}_g \leq 6.39 \times 10^{-4} \cdot \hat{z} \quad (6)$$

式中: $\hat{z} = \frac{z}{(\sqrt{\sigma/(g \cdot \Delta\rho)})}$ 为表征距离液面高度的无量纲数, z 为距离液面的高度; $N_{\mu l} =$

$\frac{\mu_l}{(\rho_l \cdot \sigma \cdot \sqrt{\sigma/(g \cdot \Delta\rho)})^{1/2}}$ 为表征液体粘度的无量纲数; μ_l 为液相粘度; ρ_l 为液相密度。

在沉积控制区域, 液滴的沉积是影响再夹带的主要因素。此区域中再夹带粒子的沉降速度低于气流速度, 再夹带因子随着高度的升高而降低。

$$E_{\text{dcr}_{\text{deposition}}} = 7.13 \times 10^{-4} \hat{j}_g^3 N_{\mu g}^{0.5} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-1} e^{-0.205 \cdot \frac{\hat{z}}{\hat{D}}} \quad (7)$$

如果忽略沉积的影响, 此区域再夹带因子与高度无关, 可表示为:

$$E_{\text{dcr}} = 1.99 \times 10^{-3} \hat{j}_g^3 N_{\mu g}^{0.5} \left(\frac{\rho_g}{\Delta\rho} \right)^{-1} \quad (8)$$

1.2 Cosandey's 模型

Cosandey^[5]考虑沸腾池浓度、惯性、表面张力、重力和自然对流的影响, 结合无量纲特征参数, 构建了气溶胶再夹带模型。可溶性气溶胶再夹带的浓

度为:

$$x_{\text{cond}} = k_2 x_{\text{BP}}^{0.363} We_{\text{cont}}^{1.1968} Fr_{\text{cont}}^{-1.3057} (1 + Ra)^{-0.0216} \quad (9)$$

式中: k_2 为常数, $k_2 = 2.954 \times 10^{-9}$ 。

不可溶性气溶胶再夹带的浓度为:

$$x_{\text{cond}} = 0.095 We_{\text{cont}}^{-0.0997} Fr_{\text{cont}}^{0.0153} (1 + Ra)^{0.006} \quad (10)$$

再夹带因子可表示为:

$$E = x_{\text{cond}}/x_{\text{BP}} \quad (11)$$

式中: x_{BP} 为沸腾水池中气溶胶浓度。 $We_{\text{cont}} = \frac{j_{g, \text{cont}}^2 D_{\text{cont}} \rho_l}{\sigma}$ 为韦伯数, 表征惯性与表面张力的影响; $Fr_{\text{cont}} = \frac{j_{g, \text{cont}}^2}{g D_{\text{cont}}}$ 为弗劳德数, 表征惯性与重力的影响; Ra 为瑞利数, 表征自由对流的影响, $Ra = \frac{H^3 g \beta \Delta T \rho_{\text{hom}}^2}{\mu_{\text{hom}}^2} \cdot Pr$ 。 $j_{g, \text{cont}}$ 为表面气流速度; D_{cont} 为安

全壳直径; ρ_l 为液体密度; σ 为表面张力; g 为重力加速度; H 为沸腾池表面到安全壳顶部之间的距离; β 为体积膨胀系数; ΔT 为水池与气相之间的温度差; ρ_{hom} 为气相密度; μ_{hom} 为气相的粘度; Pr 为普朗特数。

2 模型适用性验证

2 模型适用性验证

Revent (Reentrainment by Venting) 实验^[5]由瑞士联邦理工大学开展, 探究了沸腾池中气溶胶特性、压力、气体组分等对再夹带的影响。在容器底部的水池中安装有电加热器, 模拟反应堆的衰变热; 在实验容器顶部安装热交换器, 使顶部与底部产生温度差, 模拟实际情况中的自然对流; 通过向水池中提供空气等模拟反应堆事故情况下金属和蒸汽反应或熔融的堆芯与混凝土反应产生的不可凝气体。实验中采用 KI、CsI 作为实验材料探究可溶性气溶胶再夹带行为, 采用 Al_2O_3 为实验材料探究不可溶性气溶胶再夹带行为。

2.1 Kataoka & Ishi's 模型适用性分析

利用 Kataoka & Ishi's 模型针对 Revent 实验中采用可溶性气溶胶作为实验材料的工况开展模拟研究, 表 1 为不同压力、不同气体组分等典型工况下 Kataoka & Ishi's 模型模拟得到的各夹带区域的上限。实验容器中整个再夹带空间高度 (液面距离容器顶部的距离) 约为 3 m, 而表面附近区域的高度仅为微米量级, 此区域的再夹带对整个空间内的再夹带影响较小, 故在此处不予讨论。

模型计算的 Revent 实验动量控制区域上限为 0.11~0.16 m, 且实验在动量控制区域为低速气流, 故依据式(4)模拟得到动量控制区域再夹带因子。表

表1 Kataoka & Ishi's 模型模拟各夹带区域上限
Table 1 The predicted upper limit of reentrainment regions of Kataoka & Ishi's model

压力 Pressure / MPa	空气份额 Molecule fraction of air / %	水池温度 Temperature in pool / K	空气温度 Temperature in atmosphere / K	表面附近区域上限 Upper limit of near surface region / 10^{-6} m	动量控制区域上限 Upper limit of momentum controlled region / m
0.2	0	393.15	393.75	18.1	0.16
0.4	0	416.15	417.05	10.4	0.12
0.6	0	431.55	432.05	6.34	0.10
0.2	12	384.55	388.15	24.3	0.16
0.2	20	380.95	386.35	24.8	0.16
0.4	13	406.45	410.95	12.8	0.12
0.4	28	395.85	404.75	13.3	0.12
0.55	13	417.95	422.05	6.59	0.11
0.55	36	402.45	412.85	6.92	0.11

2为Kataoka & Ishi's 模型预测结果与实验结果对比,预测的0.1 m高度处再夹带因子与实验测量再夹带因子拟合较好,不存在量级上的差异。图2和图3为针对Revent实验采用可溶性气溶胶的所有工况,

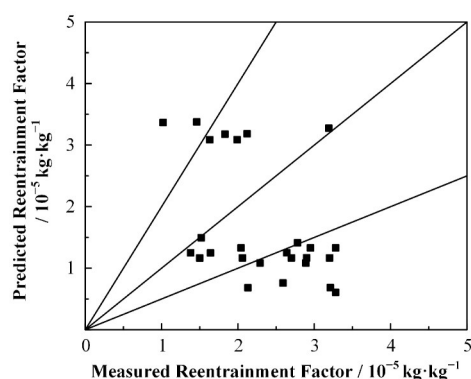


图2 动量控制区域Kataoka & Ishi's 模型模拟(纯蒸汽)
Fig.2 Comparison between the prediction results of Kataoka & Ishi's model in the momentum controlled region and the experimental results (steam)

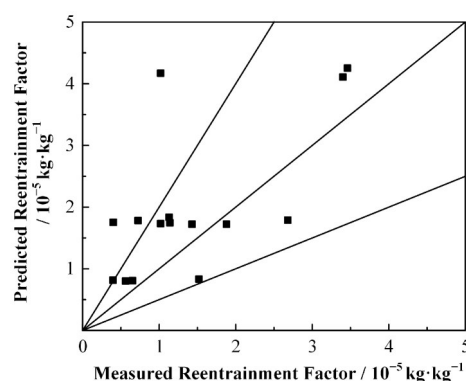


图3 动量控制区域Kataoka & Ishi's 模型模拟(空气-蒸汽)
Fig.3 Comparison between the prediction results of Kataoka & Ishi's model in the momentum controlled region and the experimental results (air-steam)

Kataoka & Ishi's 模型动量控制区域预测与实验测量再夹带因子对比。纯蒸汽条件下约有一半的工况模拟与实验误差超过100%,即在图中表示的误差带外,且大部分工况实验测量值高于模型模拟值。而

表2 Kataoka & Ishi's 模型模拟结果与实验结果对比
Table 2 Comparison between the prediction results of Kataoka & Ishi's model and the experimental measurements

压力 Pressure / MPa	空气份额 Molecule fraction of air / %	再夹带因子 Reentrainment factor			实验测量 Experiment / 10^{-6}
		动量控制区域 Momentum controlled region / 10^{-6}	沉积控制区域 Deposition controlled region / 10^{-12}	沉积控制区域(不考虑沉积) Deposition controlled region (no deposition) / 10^{-12}	
0.2	0	30.9	4.83	17.7	19.9
0.4	0	14.1	1.04	3.80	27.8
0.6	0	7.58	0.249	0.913	25.9
0.2	12	41.1	10.8	39.5	34.0
0.2	20	42.5	11.0	40.2	34.6
0.4	13	17.4	1.75	6.43	11.4
0.4	28	17.8	1.80	6.59	7.24
0.55	13	8.08	0.249	0.913	6.53
0.55	36	8.33	0.256	0.940	15.2

对于空气-蒸汽条件,大部分的点落在了 $y=2x$ 和 $y=0.5x$ 所夹的区域内,即误差小于 100%,整体来看模型预测值偏高。另一方面,无论是否考虑沉积影响,模型预测的沉积控制区域(2 m)再夹带因子与实验测量的整体区间内再夹带因子相比存在 6~8 个量级的差异。

气溶胶行为模拟具有较大的不确定性,水洗效率预测为实验值的 0.1~10 倍均为可接受范围^[12],部分通用的分析程序对气溶胶沉降行为的预测误差超过 100%^[13],对气溶胶再悬浮行为的预测误差超过 200%^[13]。故认为 Kataoka & Ishi's 模型预测的动量控制区域再夹带因子与实验测量值拟合较好,但沉积控制区域预测值明显偏低,且对于空气-蒸汽混合条件下的预测结果优于纯蒸汽条件下的预测结果。但 Kataoka & Ishi's 模型并未考虑沸腾水池中气溶胶浓度对再夹带行为的影响,只适用于模拟可溶性气溶胶的再夹带行为。

2.2 Cosandey's 模型适用性分析

利用 Cosandey's 模型针对 Revent 实验开展模拟研究,图 4、5 为采用可溶性气溶胶作为实验材料, Cosandey's 模型预测值与实验测量结果对比,纯蒸汽条件下 27 个工况中仅 1 个工况模拟误差超过 100%,空气-蒸汽混合气体条件下大部分的点也处于 $y=2x$ 和 $y=0.5x$ 所夹区域内。图 6 和图 7 为采用不可溶性气溶胶作为实验材料,纯蒸汽条件和空气-蒸汽混合气体条件下 Cosandey's 模型模拟与实验测量结果对比,整体来看模型预测值与实验测量值拟合较好,但针对再夹带因子较小工况的模型预测值略有偏高。

通过对比分析 Cosandey's 模型针对 Revent 实验不同工况的模拟结果与实验测量值,认为模型可适用于可溶性气溶胶、不可溶性气溶胶在纯蒸汽、空

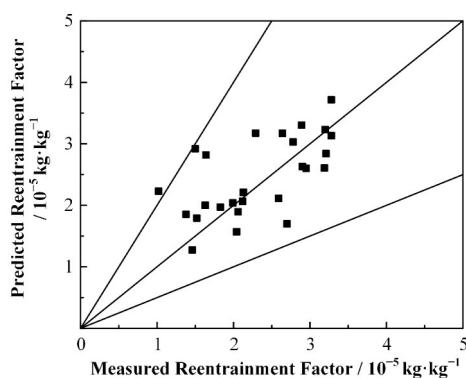


图4 Cosandey's 模型模拟与实验结果对比(可溶性-纯蒸汽)
Fig.4 Comparison between the prediction results of Cosandey's model and the experimental results (soluble-steam)

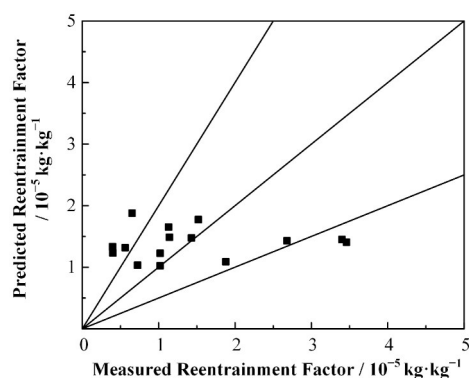


图5 Cosandey's 模型模拟与实验结果对比(可溶性-空气-蒸汽)

Fig.5 Comparison between the prediction results of Cosandey's model and the experimental results (soluble-air-steam)

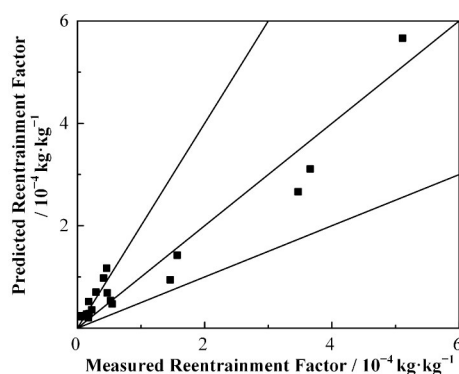


图6 Cosandey's 模型模拟与实验结果对比(不可溶性气溶胶-纯蒸汽)

Fig.6 Comparison between the prediction results of Cosandey's model and the experimental results (solid-steam)

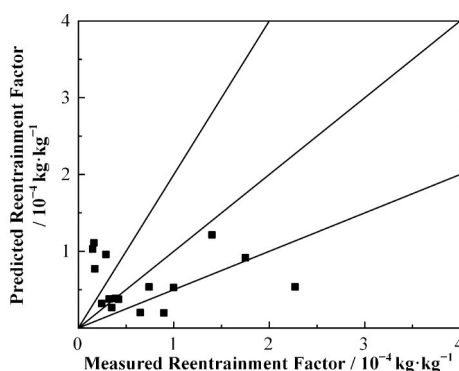


图7 Cosandey's 模型模拟与实验结果对比(不可溶性气溶胶-空气-蒸汽)

Fig.7 Comparison between the prediction results of Cosandey's model and the experimental results (solid-air-steam)

气-蒸汽混合条件下的再夹带行为模拟,且对于纯蒸汽条件下的预测结果优于空气-蒸汽混合条件下的预测结果。

3 结语

通过对比分析 Revent 实验测量结果与 Kataoka & Ishi's 模型、Cosandey's 模型模拟值,评估了模型预测气溶胶再夹带行为的适用性,分析了气溶胶特性、气体组分等条件对再夹带预测的影响。

结果表明: Kataoka & Ishi's 模型预测的动量控制区域再夹带因子与实验测量值拟合较好,但沉积控制区域预测值明显偏低,且对于空气-蒸汽混合条件下的预测结果优于纯蒸汽条件下的预测结果,但该模型仅适用于可溶性气溶胶。Cosandey's 模型可适用于可溶性气溶胶、不可溶性气溶胶在纯蒸汽、空气-蒸汽混合条件下的再夹带行为模拟,且对于纯蒸汽条件下的预测结果优于空气-蒸汽混合条件下的预测结果。建议使用 Cosandey's 模型预测核电厂事故工况下安全壳内不同种类气溶胶粒子再夹带行为。

参考文献

- Schroedl E, Friederichs H G. Source term modifications by re-entrainment aerosols from boiling sump water[C]. Columbus, OH (USA): International symposium on source term evaluation for accident conditions, 1986.
- Koch M K, Voßnackea A, Starflinger J, *et al.* Radionuclide re-entrainment at bubbling water pool surfaces[J]. Journal of Aerosol Science, 2000, **31**(9): 1015–1028. DOI: 10.1016/S0021-8502(00)00025-2.
- Bunz H, Koyro M, Propheter B, *et al.* Resuspension of fission products from sump water[R]. Commission of the European Communities, 1992.
- Kudo T, Yamano N, Moriyama K, *et al.* Experimental study of aerosol reentrainment from flashing pool in ALPHA program[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on Vessel Design and Operation, Toronto, 1994.
- Cosandey J. Droplet production over a boiling pool during a slow depressurization[D]. ETH Zurich, 1999. DOI: 10.3929/ethz-a-003871633.
- Gupta S, Schmidt E. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behaviour in light water reactor containments[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, **294**: 183 – 201. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2015.09.013.
- Müller M, von Rohr P R. Revent program-modelling of aerosol reentrainment from boiling pool during controlled filtered venting after a severe core melt accident[J]. Journal of Aerosol Science, 1997, **28**: S711–S712. DOI: 10.1016/S0021-8502(97)85354-2.
- Cosandey J O, von Rohr P R. Experimental validation of a deterministic model for aerosol reentrainment out from the boiling pool[J]. Journal of Aerosol Science, 1998, **29**: S1171–S1172. DOI: 10.1016/S0021-8502(98)90768-6.
- Kataoka I, Ishii M. Mechanistic modeling and correlations for pool-entrainment phenomenon[R]. Argonne National Laboratory, 1983.
- Kataoka I, Ishii M. Mechanistic modeling of pool entrainment phenomenon[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, **27**(11): 1999 – 2014. DOI: 10.1016/0017-9310(84)90187-x.
- Humphries L, Beeny B, Gelbard F, *et al.* MELCOR computer code manuals vol. 1: primer and users' guide version 2.2. 9541 2017[R]. SAND2017-0455O, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 2017.
- Gauntt R O, Cole R K, Erickson C M, *et al.* MELCOR computer code manuals, vol. 2: reference manuals, version 1.8. 5 May 2000[R]. NUREG/CR-6119, 2000.
- DeLos R A, Areia C, De Santi G. International standard problem 40-aerosol deposition and resuspension, final comparison report[R]. Organisation for Economic Co-Operation and Development-Nuclear Energy Agency, 1999.