

ICS 07.060

CCS A 45; A 90

团 体 标 准

T/CS0 *-2023

滨海核电液态流出物数值模拟技术规范

Technical Specifications for Liquid Effluents from Coastal Nuclear Power Plants

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国海洋学会 发 布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
3.1	1
3.2	1
4 数据资料	1
4.1 地形岸线	2
4.2 水文气象	2
5 计算方法	2
5.1 模型选择	2
5.2 计算范围	2
5.3 网格设计	2
5.4 源强布置	2
5.5 边界条件	2
5.6 模型验证	3
5.7 参数选取	3
5.8 工况计算	3
6 结果统计与分析	3
6.1 结果数据统计	3
6.2 专题图件绘制	3
7 成果报告编写	3
附 录 A （资料性） 液态流出物三维数值模拟推荐方案	5
A.1 控制方程	5
A.2 主要参数	5
A.2.1 水平紊动粘性系数	5
A.2.2 垂向扩散系数	5
A.2.3 衰减系数	6
附 录 B （资料性） 液态流出物二维数值模拟推荐方案	7
B.1 控制方程	7
B.2 主要参数	7
B.2.1 水平紊动粘性系数	7
B.2.2 衰减系数	7
参 考 文 献	8

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院）提出。

本文件由中国海洋学会归口。

本文件起草单位：浙江省水利河口研究院（浙江省海洋规划设计研究院）、南京水利科学研究院。

本文件主要起草人：应超、刘勇、王乐乐、李新文、杨汜、韩宇、陈俐骁、娄海峰、张广之。

本文件为首次发布。

滨海核电液态流出物数值模拟技术规范

1 范围

本文件规定了滨海核电厂液态流出物数值模拟基本要求、计算方法及结果统计分析要求。
本文件适用于滨海核电厂数值模拟，其他放射性工业排放项目可以参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

HJ 1409—2025 环境影响评价技术导则 海洋生态环境

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

液态流出物 liquid effluent

滨海核电厂排入环境水体并可在环境水体中得到稀释和弥散的含放射性核素的液态物质。

3.2

环境敏感区 environmental sensitive area

依法设立的各级各类保护区域和对核动力厂产生的环境影响特别敏感的区域，主要包括国家公园、自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、海洋特别保护区、饮用水源保护区、重点保护野生动物栖息地和野生植物生长繁殖地、重要水生生物的自然产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道等。以及已经确权的海域养殖区。

3.3

二维数学模型 Two-Dimensional Numerical Model

指在平面或立面坐标系中，通过二维空间变量（ x, y ）和时间变量 t ，描述液态流出物迁移规律的数学模型。适用于水平尺度远大于垂向尺度的近岸海域，忽略垂向分层效应，仅模拟液态流出物在水平方向的扩散（如潮汐驱动的扩散过程）。

3.4

三维数学模型 Three-Dimensional Numerical Model

通过三维空间变量（ x, y, z ）和时间变量 t 构建的数值模拟体系，用于描述三维流体中液态流出物的迁移规律，可反应液态流出物的垂向运动。

3.5

核素 Nuclide

具有特定原子核结构（确定质子数 Z 、中子数 N 及能态）的原子类别，具有特定半衰期和辐射特性，是放射性液态流出物中释放的基本放射性单位。

4 数据资料

4.1 地形岸线

4.1.1 取排水口周围不小于 2km 范围内需采用近五年内不低于 1:5000 的水深地形资料，其余计算域水下地形需采用比例尺不低于 1:150000 的最新测图、海图。

4.1.2 模型计算需采用正确的岸线，既需准确反映岛屿、礁石等天然岸线，也需准确反映工程周边围垦、码头、防波堤等已建工程。

4.1.3 所有采用地形图应修正到统一的高程基准（例如 1985 国家高程基准）

4.2 水文气象

4.2.1 应收集近五年内工程周边至少 6 个定点水文测点的大、中、小潮测量资料。液态流出物排放口周边 500m 范围内，应至少布置一个水文测点。

4.2.2 应收集工程周边包含水文测量时间的潮位测量资料。同步潮位测站不少于 2 个，同时应收集至少一个工程周边的长期站资料进行潮汐征对比分析。

4.2.3 应收集工程周边气象站 5 年以内的冬、夏季气象资料。如果无长期气象站，则至少应收集近五年内遥感再分析气象数据，数据精度不低于 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

5 计算方法

5.1 模型选择

5.1.1 需选用成熟通用的数学模型。

5.1.2 建议采用基于有限体积法离散的数学模型，若采用其他数值格式，需要对模型守恒性进行论证分析。

5.1.3 液态流出物数值模拟可采用二维学模型进行计算。但对于流速存在明显垂向梯度或者存在垂向环流的海域，应采用三维数学模型进行计算。

5.1.4 二维、三维推荐数学模型方程，详见附录。

5.2 计算范围

5.2.1 模型计算范围应能科学合理地反应工程区水动力条件。

5.2.2 模型计算范围应充分考虑液态流出物可能的扩散范围。

5.2.3 模型边界距离工程区一般不宜小于 50km。

5.3 网格设计

5.3.1 推荐采用三角形或三角形、四边形混合网格进行计算域空间离散。使数学模型计算网格尽可能贴近真实岸线。

5.3.2 模型网格尺度需根据计算精度要求进行细致设计。工程区附近、水工建筑物附近、地形变化剧烈的水道附近均应进行网格合理加密。

5.3.3 一般情况下，距排水口 500m 范围内，最大网格尺度应不超过 30m；距离排水口 2km 内，最大网格尺度应不超过 200m；距离排水口 5km 内，最大网格尺度应不超过 300m。

5.3.4 数学模型方案计算前应进行网格收敛性测试。在距排水口 500m 范围内，分别构建 30m、20m、10m 左右尺度的计算网格，进行保守污染物扩散试算。不同网格尺度下，当污染物包络差异在 2% 以内时，可选择相对较大的网格进行计算。

5.4 源强布置

5.4.1 源强点应根据工程设计所确定的位置进行布置。正确输入工程设计所确定的流量及浓度。

5.4.2 液态流出物数值模拟应考虑取排水口的回归效应，即取水口取到的核素浓度应叠加至排水口排出。如果核素扩散范围内存在其他取排水工程，其他取排水工程也需考虑回归效应。

5.4.3 如果采用三维模型，源强布置时应按设计排放口高程进行布置。

5.5 边界条件

5.5.1 液态流出物数值模拟过程中应全面考虑可能影响扩散范围的气象及水文动力条件。至少应考虑潮汐边界条件，对于余流较大的海域应分析余流产生机制，并在数学模型中予以体现。

5.5.2 如果工程周边有大量径流注入，在数学模型中应考虑流量边界。根据计算季节的多年平均径流资料，合理确定径流量。

5.5.3 外海潮汐边界可通过调和常数预报得到，一般来说，中国外海至少通过 10 个分潮推算边界天文潮位。包含八个主要分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 P_1 、 K_2 、 Q_1 ，以及两个长周期分潮 M_f 和 M_m 。外海潮汐边界也可由更大范围模型的计算结果来提取。

5.6 模型验证

5.6.1 在充分考虑工程区域水文动力条件的基础上，需采用实测潮位、水文资料进行模型率定。如采用三维数学模型计算，需给出潮位及分层流速、流向验证过程线。如采用二维数学模型计算，需给出潮位及垂向平均流速、流向验证过程线。

5.6.2 数学模型验证完成后，应进行验证误差定量统计。模型验证精度控制参考 HJ1409—2025 D6.2 规定执行。如果定点水文测站的平均流速小于 0.1m/s，可以放宽流向验证精度要求。

5.7 参数选取

详见附录A与附录B。

5.8 工况计算

5.8.1 数学模型方案计算前应进行模型稳定时间测试。若两个半月潮之间核素包络面积差异在 5%以内，可认为模型基本稳定。一般来说，模型稳定期至少应大于 2 个半月潮。

5.8.2 根据设计及环评要求，按需考虑正常情况排放（连续性排放、间隙性排放）及事故情况排放（连续性排放、间隙性排放）等各种可能排放情况。

5.8.3 液态流出物需要计算冬、夏两个典型季节。

5.8.4 各典型季节均应在模型稳定期之后，再计算一个包含典型大、中、小潮的连续半月潮，然后再进行结果统计。

6 结果统计与分析

6.1 结果数据统计

6.1.1 计算不同半衰期物质的相对出口浓度的稀释因子。至少包括以下几个半衰期：1.5 小时、8 天、70 天、250 天、5 年和不衰变。

6.1.2 统计每个潮型、每个半衰期物质在长期累积平衡下的平均浓度场和最大包络浓度场，统计因子为 0.5、0.4、0.3、0.2、0.13、0.1、0.05、0.02、0.01、0.005、0.001 的包络面积。

6.1.3 给出以排放口为中心，0km~1km、1km~2km、2km~3km、3km~5km、10km~20km、20km~50km 各距离环段区间平均浓度和最大浓度稀释因子，若其中数值四舍五入小于 0.001 的可以用“<0.001”表示。

6.1.4 统计每个潮型、每个半衰期物质在长期累积平衡下对可能的环境敏感区的影响，包括平均和最大相对浓度。

6.2 专题图件绘制

6.2.1 需绘制各工况稀释因子平均浓度场和最大包络浓度场，给出 0.5、0.4、0.3、0.2、0.13、0.1、0.05、0.02、0.01、0.005、0.001 的等值线分布图。

6.2.2 专题图件中均应包含比例尺与指北针。

6.2.3 专题图件中应准确反应设计工程，及周边已建工程的矢量。

6.2.4 如果出图范围内存在环境敏感区，专题图件中应叠置环境敏感区，并标注环境敏感区的名称。

7 成果报告编写

液态流出物数值模拟报告编写宜包含以下内容。可根据项目特点和相关工作要求，对相关章节做适当增减。

前言：

——项目背景；

——工作目的；

——工作依据；

工程设计方案：

——工程概况；

——取排水工程介绍；

——周边已建工程介绍；

自然地理概况：

——气候气象；

——海洋水文；

——地形地貌；

——环境敏感区介绍；

数值模拟：

——数学模型介绍；

——模型构建；

——模型验证；

工况计算：

——设计工况汇总；

——各方案液态流出物浓度包络；

——各方案排放口周围不同半径海域核素平均浓度；

——各方案对环境敏感区的影响；

结论与建议：

——结论；

——建议。

附录 A
(资料性)
液态流出物三维数值模拟推荐方案

A.1 控制方程

对于流速存在明显垂向梯度或者存在垂向环流的海域,应采用三维数学模型进行计算。建议采用基于静压和Boussinesq假定的三维浅水方程,其控制方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= S \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial T_{xx}^{uv}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}^{uv}}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f v + u_s S \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= \frac{\partial T_{yx}^{uv}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}^{uv}}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f u + v_s S \\ \frac{\partial p}{\partial z} &= -\rho g \end{aligned}$$

上式中, t 为时间; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的流速; g 为重力加速度; ρ 为水体密度; ρ_0 为水体参考密度; v_v 为垂向紊动粘性系数; $f = 2\alpha \sin\varphi$ 为柯氏力参量 (北半球: $\alpha = 7.29 \times 10^{-5} \text{rad/s}$, φ 为纬度值); S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为波浪辐射应力张量; T_{xx}^{uv} 、 T_{xy}^{uv} 、 T_{yx}^{uv} 、 T_{yy}^{uv} 为平水切应力张量, 由基于速度梯度的代数表达式计算: $T_{xx}^{uv} = 2v_h \frac{\partial u}{\partial x}$, $T_{xy}^{uv} = T_{yx}^{uv} = v_h \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$, $T_{yy}^{uv} = 2v_h \frac{\partial v}{\partial y}$; v_h 为水平紊动粘性系数, 取值见 A.2.1; S 为点源产生的源项流量; u_s 、 v_s 为点源流速的 x 、 y 方向上的流速分量。

三维液态流出物计算控制方程如下:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial T_{xx}^c}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}^c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_v}{\sigma_\tau} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - k_p c + c_s S$$

式中, $T_{xx}^c = \frac{v_h}{\sigma_\tau} \frac{\partial c}{\partial x}$, $T_{xy}^c = \frac{v_h}{\sigma_\tau} \frac{\partial c}{\partial y}$, σ_τ 为 Prandtl 数, 在大多数工程应用中, 其值可以取为常数 $\sigma_\tau = 1.1$; k_p 为液态流出物现性衰减系数, 取值见 A2.2.2; c_s 为点源浓度。

A.2 主要参数

A.2.1 水平紊动粘性系数

水平紊动粘性系数 v_h 可利用 Smagorinsky 亚格子紊流模型计算:

$$v_h = 0.5C\Omega \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}, \text{ 其中 } C \text{ 为常量, } \Omega \text{ 为控制体的体积。}$$

A.2.2 垂向扩散系数

垂向扩散系数 $v_v = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, 通过求解 k - ε 湍流模型求解。

k - ε 湍流模型控制方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} &= \frac{\partial T_{xx}^k}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}^k}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_v}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \varepsilon \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \frac{\partial T_{xx}^\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}^\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_v}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \end{aligned}$$

其中, k 为单位质量水体的湍动能 (Turbulent kinetic energy), ε 为湍动能耗散率 (Dissipation rate of kinetic energy); P 和 B 分别为湍动能的切变和浮力产生项。 $P = v_v \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)$, $B = \frac{g}{\rho_0} \frac{v_v}{\sigma_k} \frac{\partial \rho}{\partial z}$ 。 T_{xx}^k 、 T_{xy}^k 、 T_{xx}^ε 、 T_{xy}^ε 为 k - ε 方程的水平切应力张量。经验系数 $(\sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}, c_\mu) = (1.0, 1.3, 1.44, 1.92, 0.09)$ 。

A. 2. 3 衰减系数

液态流出物现性衰减系数 $k_p = \frac{\ln 2}{T_{50\%}}$ 。 $T_{50\%}$ 为液态流出物半衰期。常见半衰期对应的 k_p 见表2。

表1 常见半衰期对应的 k_p

半衰期	1.5 小时	8 天	70 天	250 天	5 年
衰减系数 (s^{-1})	1.29×10^{-4}	1.00×10^{-6}	1.15×10^{-7}	3.21×10^{-8}	4.40×10^{-9}

附 录 B
(资料性)
液态流出物二维数值模拟推荐方案

B.1 控制方程

对于大部分水平尺度远大于垂向尺度的滨海区域,可采用二维数学模型进行计算。二维水动力控制方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} &= \frac{S}{A_s} \\ \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} &= fh\bar{v} - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{gh^2}{\rho_0}\frac{\partial\rho'}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial\bar{S}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{S}_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial(h\bar{T}_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{T}_{xy})}{\partial y} + \frac{u_s S}{A_s} \\ \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} &= -fh\bar{u} - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0} - \frac{gh^2}{\rho_0}\frac{\partial\rho'}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial\bar{S}_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{S}_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial(h\bar{T}_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{T}_{yy})}{\partial y} + \frac{v_s S}{A_s} \end{aligned}$$

式中, h 为水深; η 为水位; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 为 x 、 y 方向的平均流速; ρ' 为三维扰动密度的垂向平均值; S 为点源流量; A_s 为点源附近流体微团面积; u_s 、 v_s 为点源流速的 x 、 y 方向上的流速分量; $\bar{S}_{xx}$ 、 $\bar{S}_{xy}$ 、 $\bar{S}_{yx}$ 、 $\bar{S}_{yy}$ 为沿水深平均的辐射应力张量; $\bar{T}_{xx}$ 、 $\bar{T}_{xy}$ 、 $\bar{T}_{yx}$ 、 $\bar{T}_{yy}$ 为沿水深平均的切应力张量; $\bar{T}_{xx} = 2\bar{v}_h \frac{\partial\bar{u}}{\partial x}$ 、 $\bar{T}_{xy} = \bar{T}_{yx} = \bar{v}_h \left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right)$ 、 $\bar{T}_{yy} = 2\bar{v}_h \frac{\partial\bar{v}}{\partial y}$; $\bar{v}_h$ 为二维模型中的水平紊动粘性系数; τ_{sx} 、 τ_{sy} 为表面切应力; τ_{bx} 、 τ_{by} 为底部切应力, $(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \frac{\rho_0 g n^2}{h^3} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} (\bar{u}, \bar{v})$; n 为Manning糙率系数。

二维液态流出物控制方程如下:

$$\frac{\partial h\bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{c}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{c}}{\partial y} = \frac{\partial\bar{T}_{xx}^c}{\partial x} + \frac{\partial\bar{T}_{xy}^c}{\partial y} - hk_p\bar{c} + \frac{c_s S}{A_s}$$

$\bar{c}$ 为重向平均的液态流出浓度; h 为水深; $\bar{T}_{xx}^c = \frac{\bar{v}_h}{\sigma_\tau} \frac{\partial\bar{c}}{\partial x}$ 、 $\bar{T}_{xy}^c = \frac{\bar{v}_h}{\sigma_\tau} \frac{\partial\bar{c}}{\partial y}$ 。 σ_τ 为Prandtl数,在大多数工程应用中,其值可以取为常数 $\sigma_\tau = 1.1$; k_p 为液态流出物现性衰减系数,取值见A2.2.2; c_s 为点源浓度。

B.2 主要参数

B.2.1 水平紊动粘性系数

水平紊动粘性系数 $\bar{v}_h$ 可利用Smagorinsky亚格子紊流模型计算:

$$\bar{v}_h = 0.5C\Omega \sqrt{\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\bar{v}}{\partial x}\right)^2}, \text{ 其中 } C \text{ 为常量, } \Omega \text{ 为控制体的体积。}$$

B.2.2 衰减系数

k_p 为液态流出物现性衰减系数,取值见A2.2.2。

参 考 文 献

- [1] HJ 1409—2025 环境影响评价技术导则 海洋生态环境
 - [2] GB6249—2025 核动力厂环境辐射防护规定
 - [3] GB14587—2011 核电厂放射液态流出物排放技术要求
-