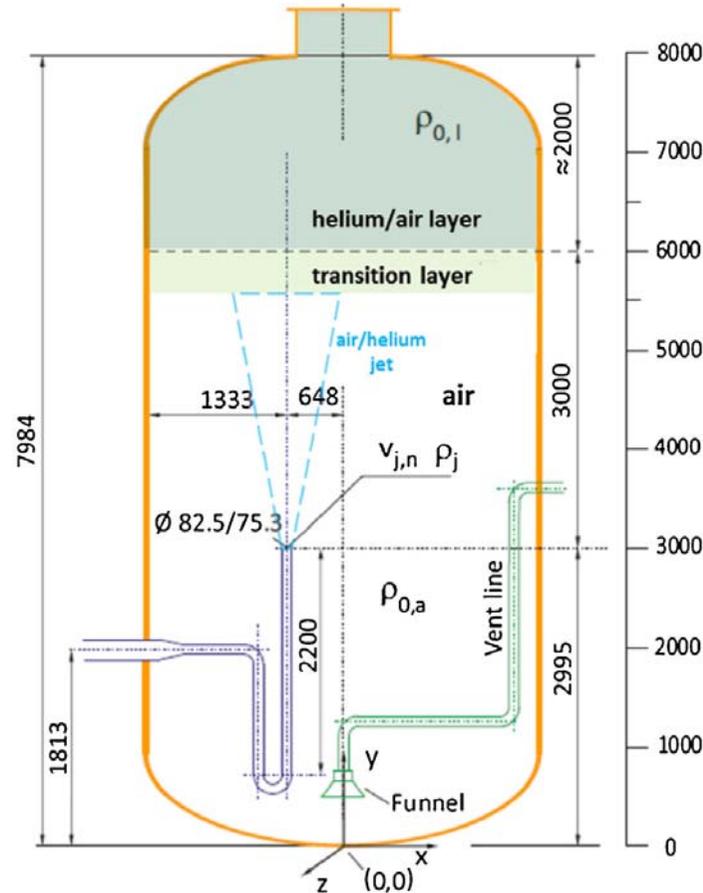
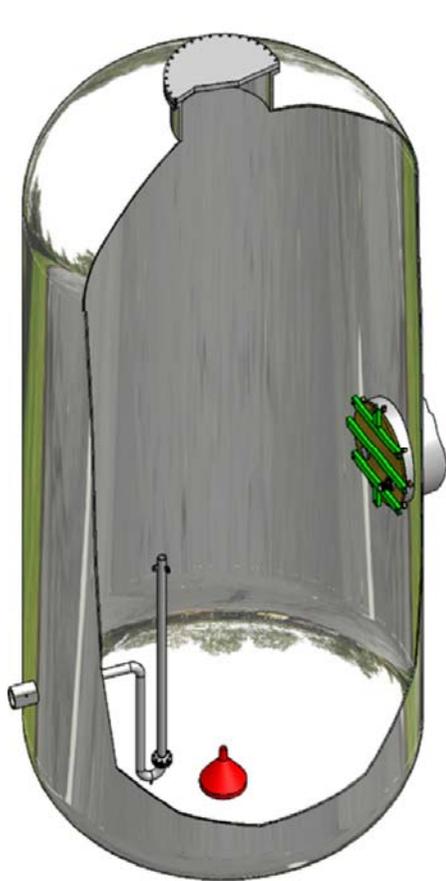


原子炉格納容器内の
成層化ヘリウム浸食現象予測

原子炉格納容器内の成層化ヘリウム浸食実験



- 計測パラメータ
 - ・速度
 - ・ヘリウム濃度
 - ・レイノルズ応力
 - ・温度
- 実験条件
 - ・放出速度: 4.59 m/s
 - ・放出ヘリウム濃度: 13.4%
 - ・Reynolds数: $Re=21834$
 - ・Froude数: $Fr=28.54$
 - ・Schmidt数: $Sc=0.21$
- 実験方法
 - ・格納容器上部にヘリウム成層化。
 - ・格納容器下部に設置したパイプから低濃度ヘリウムを放出し成層化ヘリウムを浸食。

Pressure	0.994 bar
Air mass flow rate	21.52 g/s
Helium mass flow rate	0.42 g/s
Gas molar fraction s in the inlet flow gas mixture	Air: 0.862 Helium: 0.134 Water vapour: 0.004
Injection temperature	From 20 to 29.3 °C

速度・温度・濃度場での乱流モデル・解析手法

- 速度場：
代数レイノルズ応力モデル
- 温度場：
代数乱流熱流束モデル（温度差による浮力乱流モデル）
- 濃度場：
ヘリウム ▶ 代数乱流熱物質流束モデル（濃度差による浮力乱流モデル）
水蒸気 ▶ 乱流シュミット数仮定、渦動粘性係数による等方性乱流モデル
- 解析手法：
無次元化された輸送方程式にて解析。スケールなど次元に左右されることなく、無次元パラメータにより支配される。
- 無次元パラメータ：
レイノルズ数： $Re=21834$
プラントル数： $Pr=0.717$ グラスホフ数： $Gr=1.22 \times 10^{-2}$
フルード数： $Fr=28.6$ シュミット数： $Sc=0.21$
乱流シュミット数(水蒸気)： $Sc_t=0.9$

対象空間での支配方程式

○ 運動量輸送方程式

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_k \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{1}{Re} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_k} - \overline{u_i u_k} \right) + \frac{1}{Fr_i} (\bar{C} - \bar{C}_m) + Ri_i \bar{T} \quad \bar{C}_m = \frac{\int \bar{C} dv}{\int dv}$$

○ 圧力方程式

$$\nabla^2 \bar{P} = -\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial X_j} \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial X_i} + \frac{1}{Fr_i} \frac{\partial \bar{C}}{\partial X_i} + Ri_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial X_i}$$

○ 物質輸送方程式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{U}_k \frac{\partial \bar{C}}{\partial X_k} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{1}{Re Sc} \frac{\partial \bar{C}}{\partial X_k} - \overline{u_k c'} \right)$$

$$Re = \frac{\bar{U}_{ref} D_{ref}}{\nu}, \quad Fr_i = \frac{\bar{U}_{ref}^2}{g_i D_{ref}}, \quad Ri_i = \frac{Gr_i}{Re^2}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}$$

Re : Reynolds number
 Fr : Froud number
 Ri : Richardson number
 Gr : Grashof number
 Sc : Schmidt number

- 本解析対象とした原子炉格納容器は、密閉空間であるため運動量輸送方程式の浮力項には、格納容器内における空間平均濃度 \bar{C}_m を導入。
- 圧力方程式には浮力の影響を加味。

レイノルズ応力、乱流物質流束輸送方程式

○ レイノルズ応力輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial X_k} = & \overline{u_i u_k} \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial X_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_k} + \overbrace{\frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}^{\text{圧力・歪み相関項}} - (g_i \overline{u_j c} + g_j \overline{u_i c}) \\ & - \frac{\partial}{\partial X_k} \left[\overline{u_i u_j u_k} - \nu \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial X_k} - \frac{p}{\rho} (\delta_{jk} u_i + \delta_{ik} u_j) \right] - 2\nu \frac{\partial \overline{u_i} \partial \overline{u_j}}{\partial X_k \partial X_k} \end{aligned}$$

○ 乱流物質流束輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{u_i c}}{\partial t} + U_k \frac{\partial \overline{u_i c}}{\partial X_k} = & \overline{u_i u_j} \frac{\partial \overline{c}}{\partial X_j} - \overline{u_j c} \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial X_j} + \overbrace{\frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial c}{\partial X_i} \right)}^{\text{圧力・物質勾配相関項}} - g_i \overline{c^2} \\ & - \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\overline{u_i u_j c} + \frac{p}{\rho} c \delta_{ij} \right] - (\nu + \alpha) \frac{\partial \overline{c} \partial \overline{u_i}}{\partial X_j \partial X_j} \end{aligned}$$

圧力・歪み相関項のモデル化とモデル定数系

$\pi_{ij,1} + \pi_{ji,1}$	$- C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right)$
$\pi_{ij,2} + \pi_{ji,2}$	$- \frac{C_2 + 8}{11} (P_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij}) + \zeta k \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right)$ $- \frac{8C_2 - 2}{11} (D_{ij} - \frac{2}{3} P_k \delta_{ij})$
$\pi_{ij,3} + \pi_{ji,3}$	$- C_3 \left(P_{ij,c} - \frac{2}{3} P_c \delta_{ij} \right)$
$\pi_{ij,w} + \pi_{ji,w}$	$C_1 = C_1^* + C_1' f(L / X_w) \quad C_2 = C_2^* + C_2' f(L / X_w)$ $\zeta = \zeta^* + \zeta' f(L / X_w)$
$P_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial X_k} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k}, \quad D_{ij} = -\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial X_i} - \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_k}{\partial X_i},$ $P_k = -\overline{u_k u_l} \frac{\partial U_k}{\partial X_l}, \quad P_{ij,c} = -\left(g_i \overline{u_j c} + g_j \overline{u_i c} \right), \quad P_c = -g_i \overline{u_i c},$ $f(L / X_w) = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / \kappa \varepsilon X_w$	

C_1^*	C_2^*	ζ^*	C_1'	C_2'	C_3	ζ'	C_μ	κ
1.4	0.44	-0.16	-0.35	0.12	1.8	-0.1	0.09	0.42

圧力・物質勾配相関項のモデル化とモデル定数系

$\pi_{ic,1}$	$-C_{1c} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i c} - C'_{1c} \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\overline{u_i u_j}}{k} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \right) \overline{u_j c}$
$\pi_{ic,2}$	$C_{2c} \overline{u_m c} \frac{\partial U_i}{\partial X_m} - C'_{2c} \overline{u_m c} \frac{\partial U_m}{\partial X_i}$
$\pi_{ic,3}$	$-C_{3c} g_i \overline{c^2}$
$\pi_{ic,w}$	$C_{1c} = C_{1c}^* \{1 + C_{1c,w} \cdot f(L / X_w)\}$ $C'_{1c} = C'_{1c}^* \{1 + C_{1c,w} \cdot f(L / X_w)\}$ $C_{2c} = C_{2c}^* \{1 + C_{2c,w} \cdot f(L / X_w)\}$ $C'_{2c} = C'_{2c}^* \{1 + C_{2c,w} \cdot f(L / X_w)\}$
$\overline{c^2} = -\frac{1}{C_{4c}} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_k c} \frac{\partial C}{\partial X_k}$ $f(L / X_w) = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / \kappa \varepsilon X_w$	

C_{1c}^*	C'_{1c}^*	C_{2c}^*	C'_{2c}^*	C_{3c}	C_{4c}	$C_{1c,w}$	$C_{2c,w}$
3.9	-2.5	0.8	0.2	1.0	0.62	0.25	-0.46

乱流エネルギー、乱流散逸輸送方程式とモデル定数

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{\delta_{kj}}{Re} + c_s \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_j} \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} - \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} - g_i \overline{u_i T'} - g_i \overline{u_i c'} - g_i \frac{c_\mu}{Sc_t} \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial C_v}{\partial X_i} - \varepsilon$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{\delta_{kj}}{Re} + c_\varepsilon \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_j} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} - \frac{\varepsilon}{k} \left(c_{1\varepsilon} \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} + c_{3\varepsilon} g_i \overline{u_i T'} + c_{4\varepsilon} g_i \overline{u_i c'} + c_{4\varepsilon} g_i \frac{c_\mu}{Sc_t} \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial C_v}{\partial X_i} + c_{2\varepsilon} \varepsilon \right)$$

C_s	C_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_{3\varepsilon}$	$C_{4\varepsilon}$
0.22	0.15	1.44	1.92	1.44	0.5

- 乱流エネルギー、散逸輸送方程式中の拡散項にはDaly-Harlowモデルを適用。
- 拡散項は物理的に常に正の値を示すが、本解析の様に非軸対称流れにおいては、せん断応力は負の値を示すこともあり改良が必要。
- 軸対称流れの場合、せん断応力は正領域と負領域が対照的に存在し、総和すると零となり、正の値を示す垂直応力のみが拡散項を構成。

Daly-Harlowモデル修正

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{1}{Re} + c_s' \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k^2} \right) \frac{\partial k}{\partial X_k} - \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} - g_i \overline{u_i T'} - g_i \overline{u_i c'} - g_i \frac{c_\mu}{Sc_t} \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial C_v}{\partial X_i} - \varepsilon$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{1}{Re} + c_\varepsilon' \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k^2} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_k} - \frac{\varepsilon}{k} \left(c_{1\varepsilon} \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial X_k} + c_{3\varepsilon} g_i \overline{u_i T'} + c_{4\varepsilon} g_i \overline{u_i c'} + c_{4\varepsilon} g_i \frac{c_\mu}{Sc_t} \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial C_v}{\partial X_i} + c_{2\varepsilon} \varepsilon \right)$$

$$c_s' \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_j} \approx c_s' \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_j^2} \approx c_s' \frac{k}{\varepsilon} \frac{2k}{3} = \frac{2}{3} c_s' \frac{k^2}{\varepsilon} \approx \frac{c_\mu}{\sigma_k} \frac{k^2}{\varepsilon} \rightarrow \frac{2}{3} c_s' \approx \frac{c_\mu}{\sigma_k} \rightarrow c_s' = \frac{3}{2} \frac{c_\mu}{\sigma_k}$$

$$c_\varepsilon' \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_k u_j} \approx c_\varepsilon' \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_j^2} \approx c_\varepsilon' \frac{k}{\varepsilon} \frac{2k}{3} = \frac{2}{3} c_\varepsilon' \frac{k^2}{\varepsilon} \approx \frac{c_\mu}{\sigma_\varepsilon} \frac{k^2}{\varepsilon} \rightarrow \frac{2}{3} c_\varepsilon' \approx \frac{c_\mu}{\sigma_\varepsilon} \rightarrow c_\varepsilon' = \frac{3}{2} \frac{c_\mu}{\sigma_\varepsilon}$$

$$c_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

- 乱流エネルギー、乱流散逸の拡散項は、レイノルズ応力の垂直応力により構成されるものと仮定。
- 垂直応力を $2k/3$ とモデル化し、モデル定数は渦動粘性係数にて使用される定数から導出。

ヘリウム拡散係数の検討

○ 対流領域での物質輸送方程式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \overline{U_k} \frac{\partial \bar{C}}{\partial X_k} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{1}{Re Sc} \frac{\partial \bar{C}}{\partial X_k} - \overline{u_k c'} \right)$$

○ 成層化領域での物質輸送方程式

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_k} \left(\frac{1}{Re Sc'} \frac{\partial \bar{C}}{\partial X_k} \right)$$

$$Re = \frac{\overline{U_{ref}} D_{ref}}{\nu}, \quad Fr_i = \frac{\overline{U_{ref}}^2}{g_i D_{ref}}, \quad Sc = \frac{\nu}{D}$$

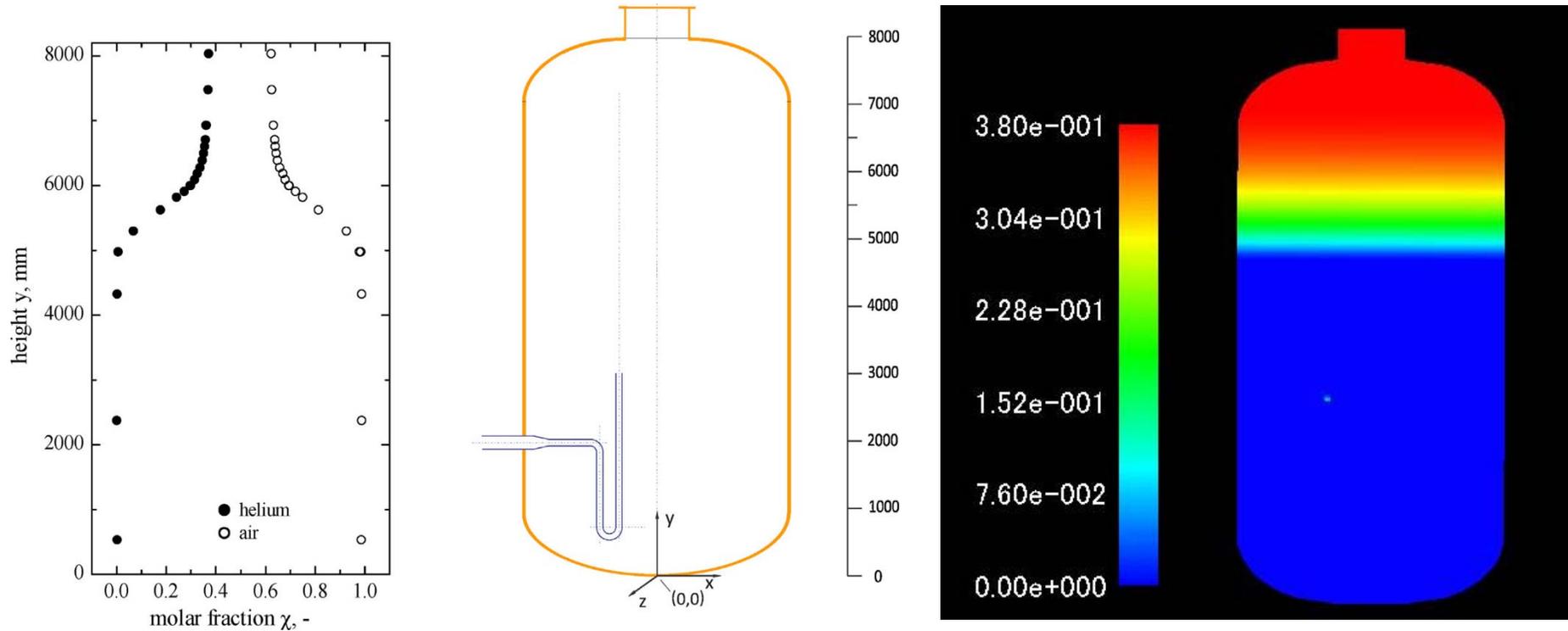
Re : Reynolds number

Fr : Froude number

Sc : Schmidt number

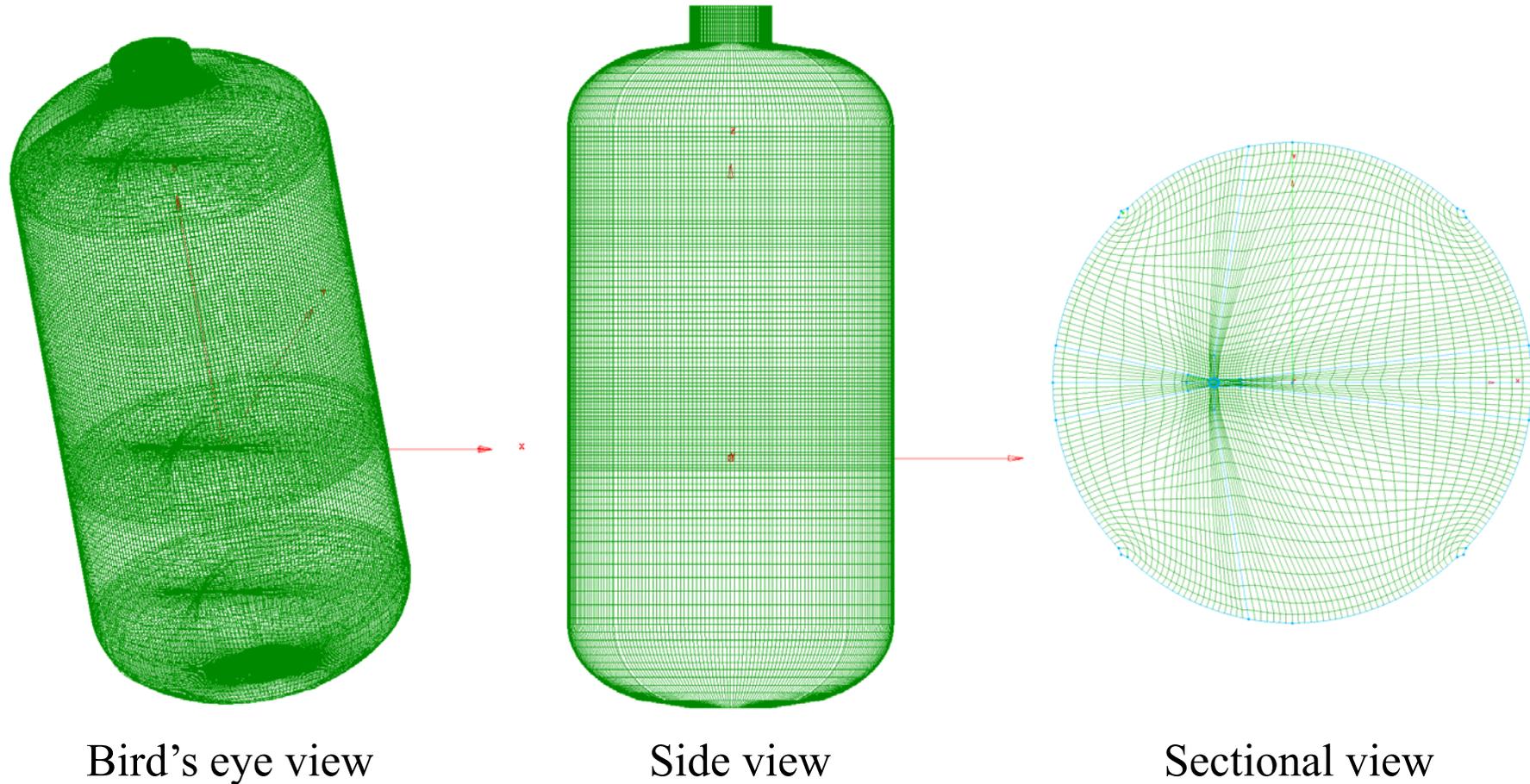
- 対流領域でのヘリウム拡散係数 (Sc 数) と成層化した領域での拡散係数は異なる。
- 対流領域では $Sc=0.21$ 、成層化領域では $Sc=0.021$ を仮定して解析。

成層化へリウム初期濃度分布，成層化条件



○ 成層化条件 : 主流速度方向へのヘリウム濃度勾配は正值。
成層化領域で、ヘリウムは静止状態で速度は0。

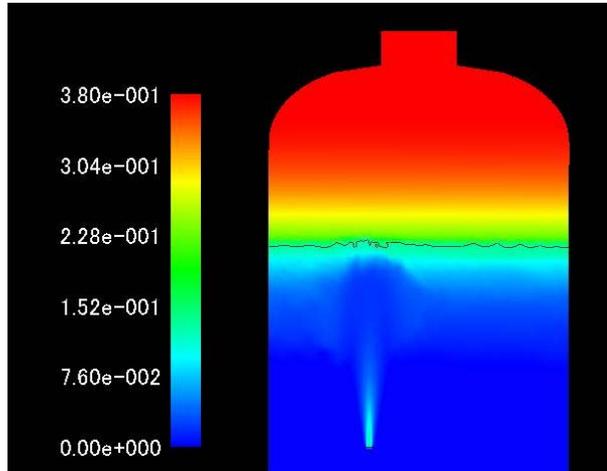
原子炉格納容器の計算格子



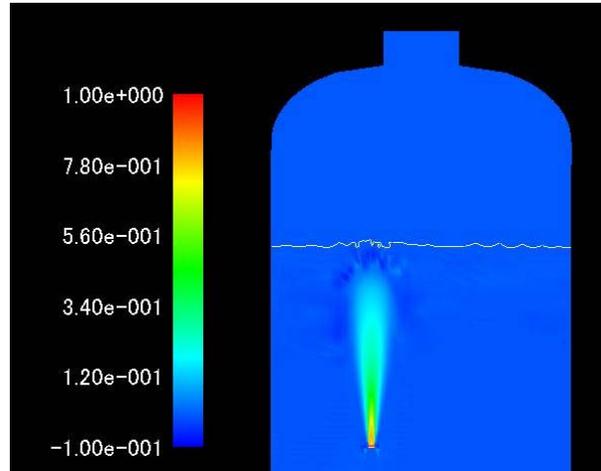
○ 計算格子総数： $61 \times 61 \times 129 = 480,009$

解析結果：41秒經過時

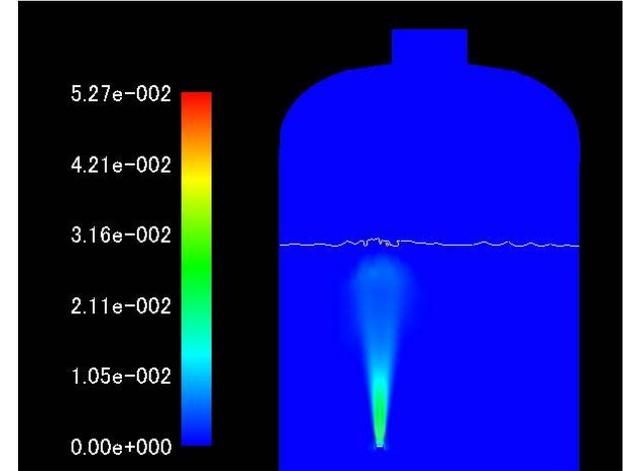
(成層化領域 $Sc'=0.021$, 対流領域 $Sc=0.21$)



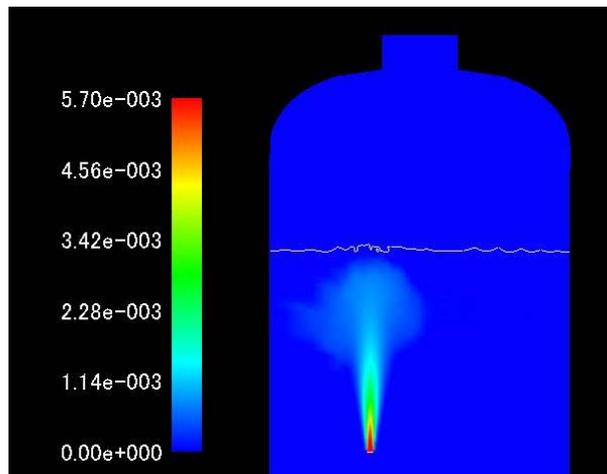
Helium concentration



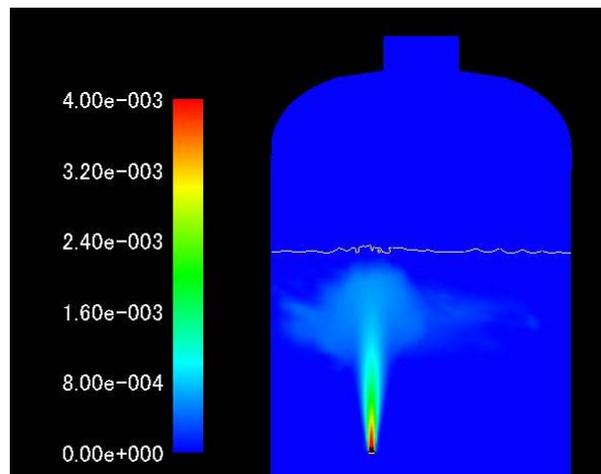
Streamwise velocity



Turbulent energy



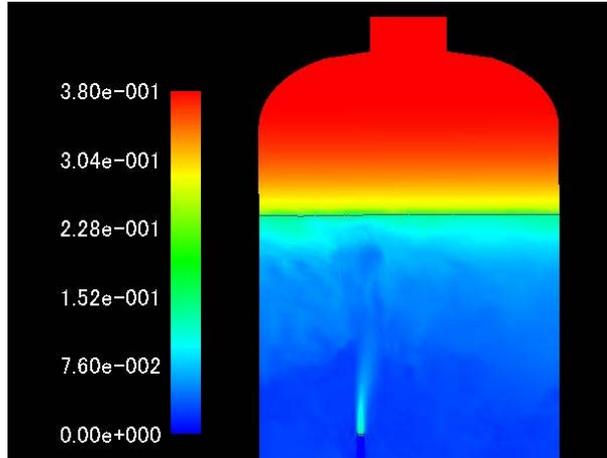
Temperature



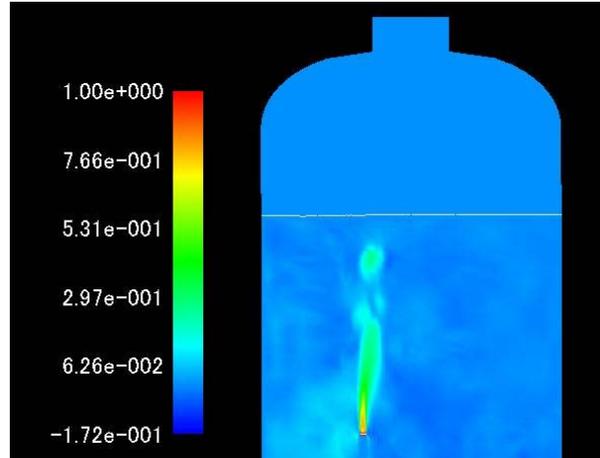
Steam concentration

解析結果：164秒經過時

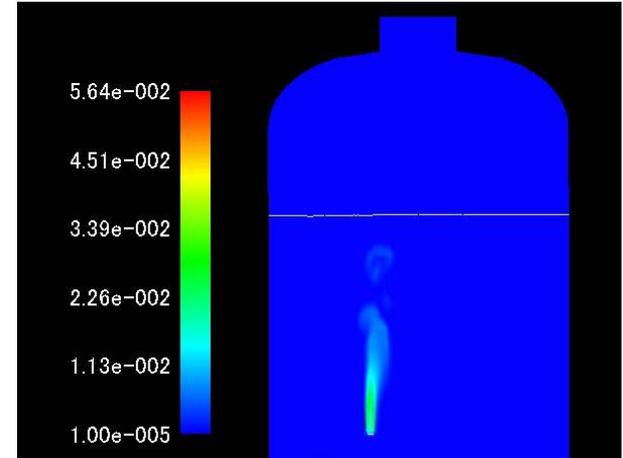
(成層化領域 $Sc'=0.021$, 対流領域 $Sc=0.21$)



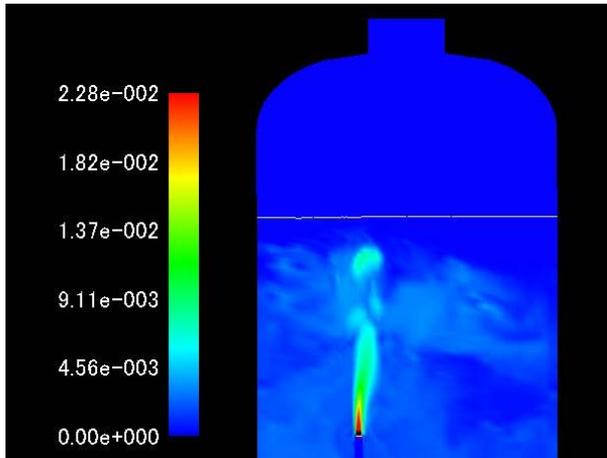
Helium concentration



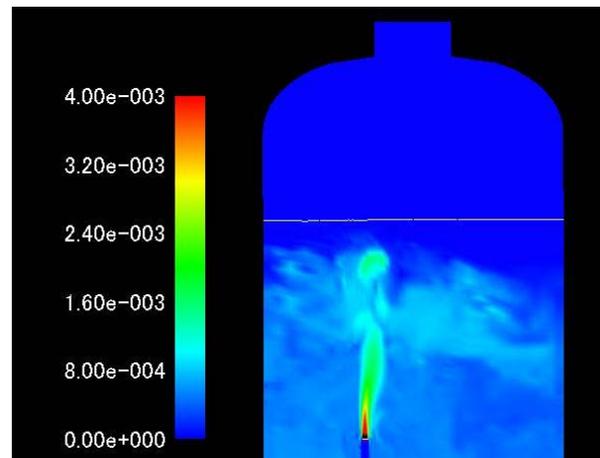
Streamwise velocity



Turbulent energy



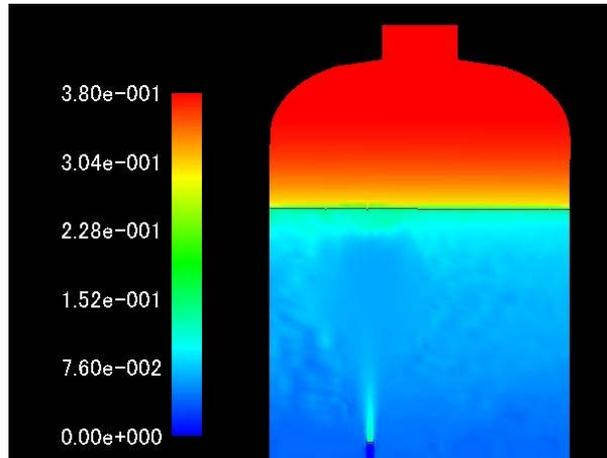
Temperature



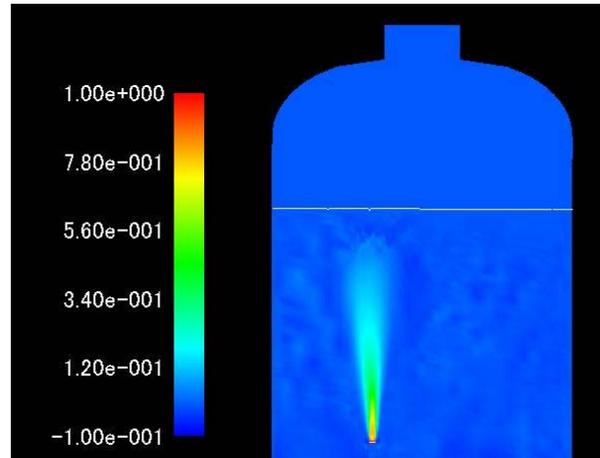
Steam concentration

解析結果：328秒經過時

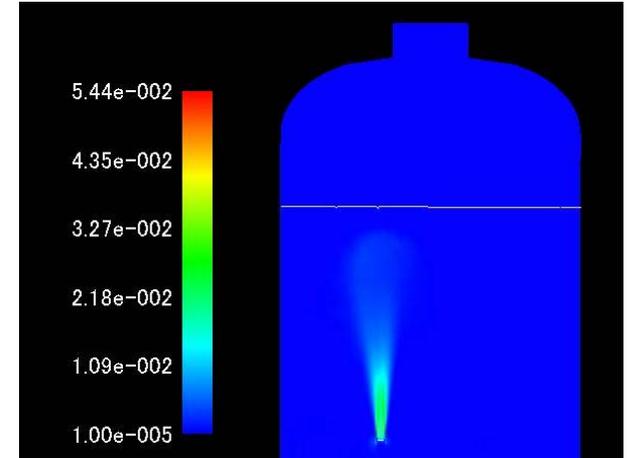
(成層化領域 $Sc'=0.021$, 対流領域 $Sc=0.21$)



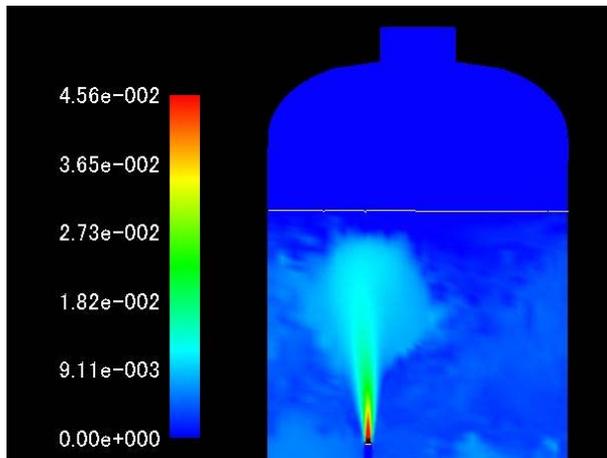
Helium concentration



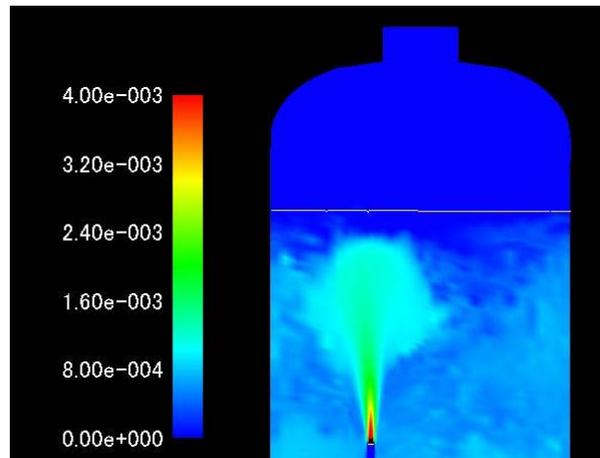
Streamwise velocity



Turbulent energy



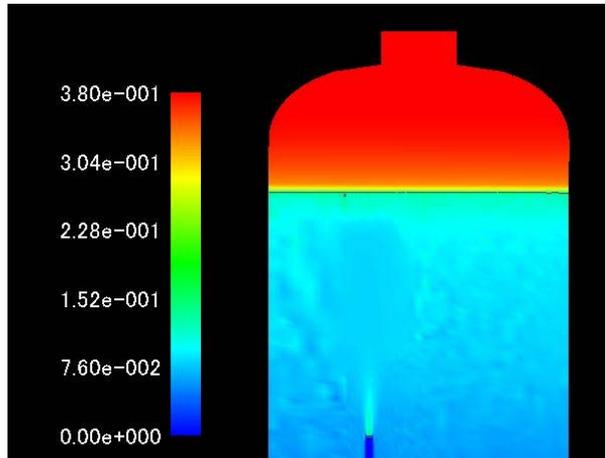
Temperature



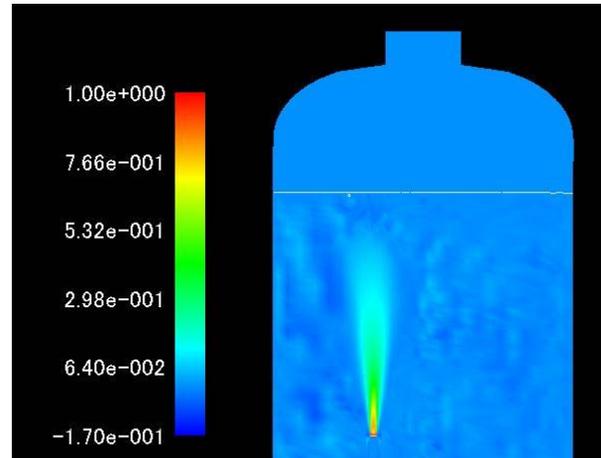
Steam concentration

解析結果：656秒經過時

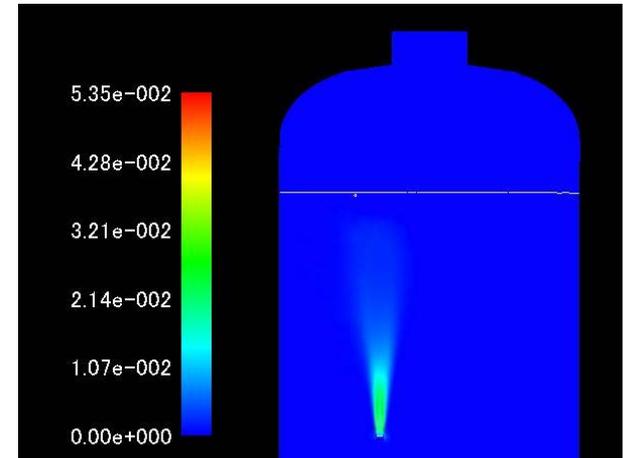
(成層化領域 $Sc'=0.021$, 対流領域 $Sc=0.21$)



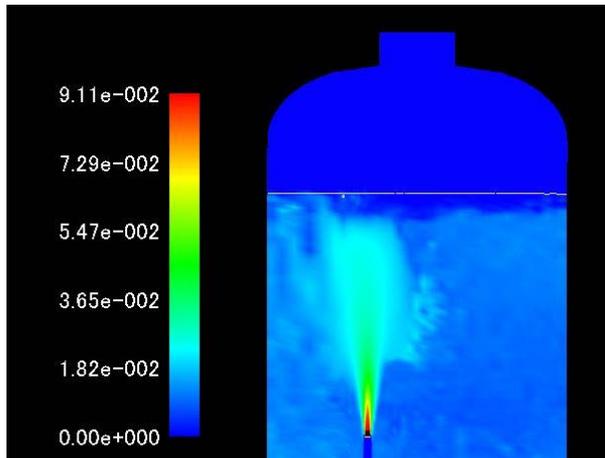
Helium concentration



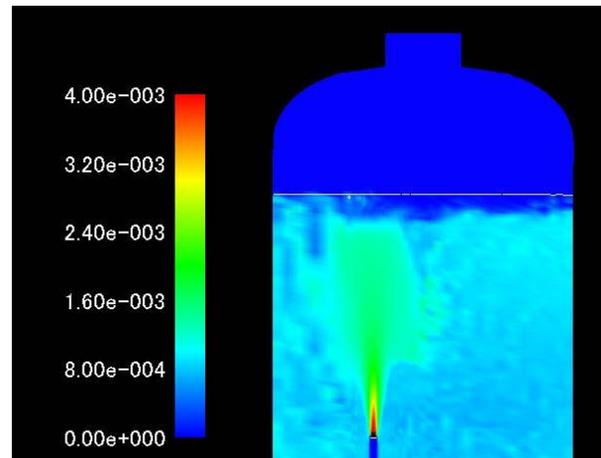
Streamwise velocity



Turbulent energy

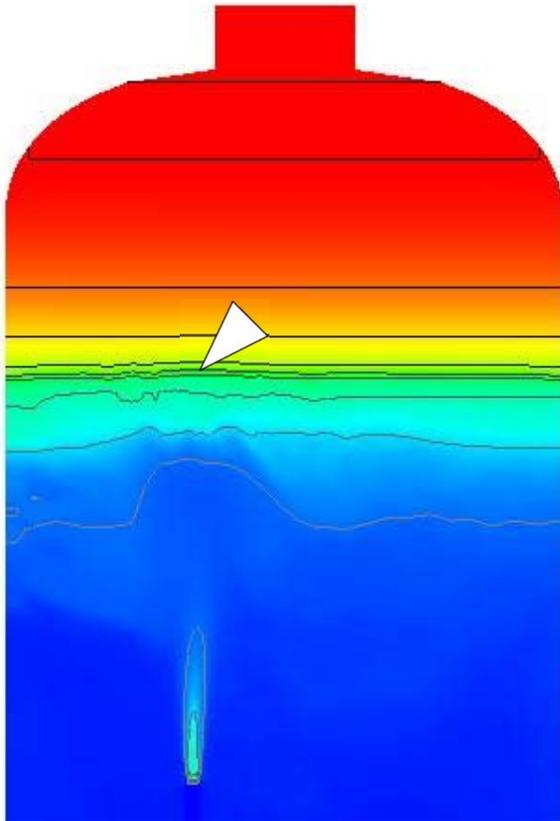


Temperature

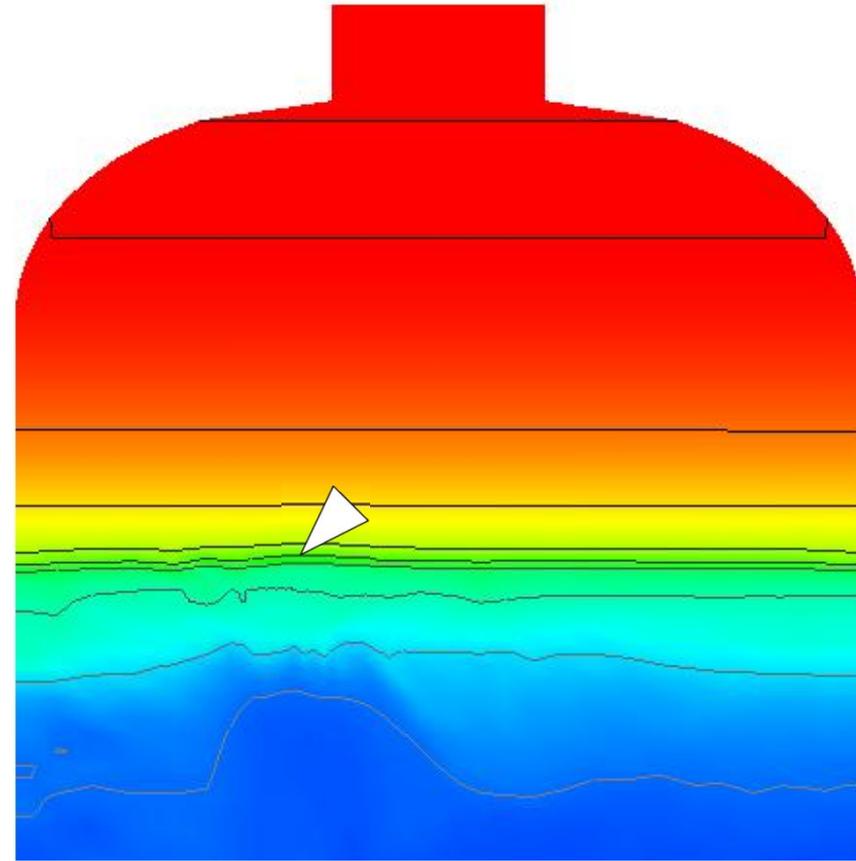


Steam concentration

ヘリウム浸食位置の定義



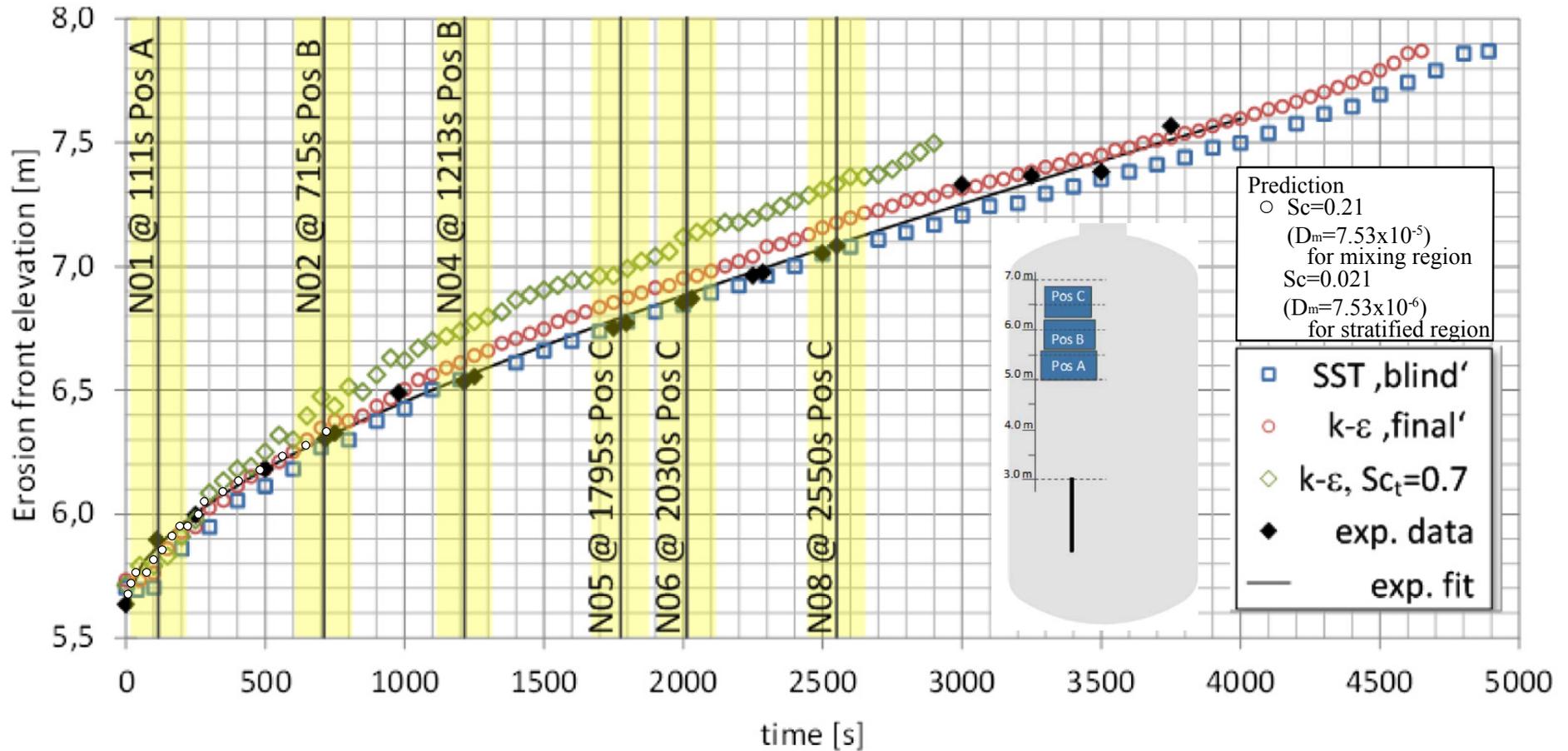
浸食領域全体図



浸食領域の拡大図

- 実験におけるヘリウム浸食位置は、ヘリウム噴出管の中心軸上におけるヘリウム濃度勾配が最大値を示す位置と定義。解析結果も実験同様に噴出中心軸上でのヘリウム濃度勾配の最大値を浸食位置として実験と比較。

浸食位置の計測値との比較



Kelm, S., Kapulla, R., Allelein, H.-J.
 “Erosion of a confined stratified layer by a vertical jet – Detailed assessment of a CFD approach the OECD/NEA PSI benchmark”, Nuclear Engineering and Design., 312 (2017)

結 論

- 大きなスケール空間を有する原子炉格納容器内の成層ヘリウムの浸食実験を対象に解析を実施した。解析途中であるが以下の結論を得た。
 - 乱流エネルギー、乱流散逸の拡散項に使用したDaly-Harlowモデルの問題点を指摘しモデル修正を提案した。
 - 圧力方程式に、濃度、温度による項を加味した。成層ヘリウム浸食現象を解析する際には浮力に関する項を加味する必要がある。
 - ヘリウムの拡散係数に関して、成層化された領域とヘリウム拡散が顕著な領域での拡散係数は異なることを仮定し解析を実施した。その結果、成層化されたヘリウム領域の値を変更することにより、ヘリウムの浸食位置を比較的良好に予測できることを明らかにした。
 - ヘリウムの浸食位置を正確に予測するには、成層化領域での拡散係数を設定することが重要である。
 - 乱流モデルの評価は、ヘリウム浸食位置を予測したうえで、乱流特性量を比較し乱流モデルを評価することが必要である。

謝 辞

- 本研究は、経済産業省資源エネルギー庁からの受託事業として実施した令和2年度「発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業（水素安全対策高度化）」の成果であり、ここに記して謝意を表す。