

ユーザー様事例紹介

2012年11月22日(木)開催
技術第3部
塩谷 仁



流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

紹介事例一覧



- パンタグラフ周り流動解析における並列性能のテスト
(公益財団法人 鉄道総合技術研究所様)
- ガスタービン燃焼器内の現象解明を目指した対向衝突噴流混合の解析
(重工業メーカー I様)
- 降下火山灰影響評価のための噴煙柱の数値流体解析
(一般財団法人 電力中央研究所様)
- 原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備における
Advance/FrontFlow/redの利用
(独立行政法人 原子力安全基盤機構様)
- IFMIF リチウムターゲット施設の工学設計のための熱流動解析
(独立行政法人 日本原子力研究開発機構様)

パンタグラフ周り流動解析における 並列性能のテスト

2012年11月22日(木)開催
技術第3部

目的

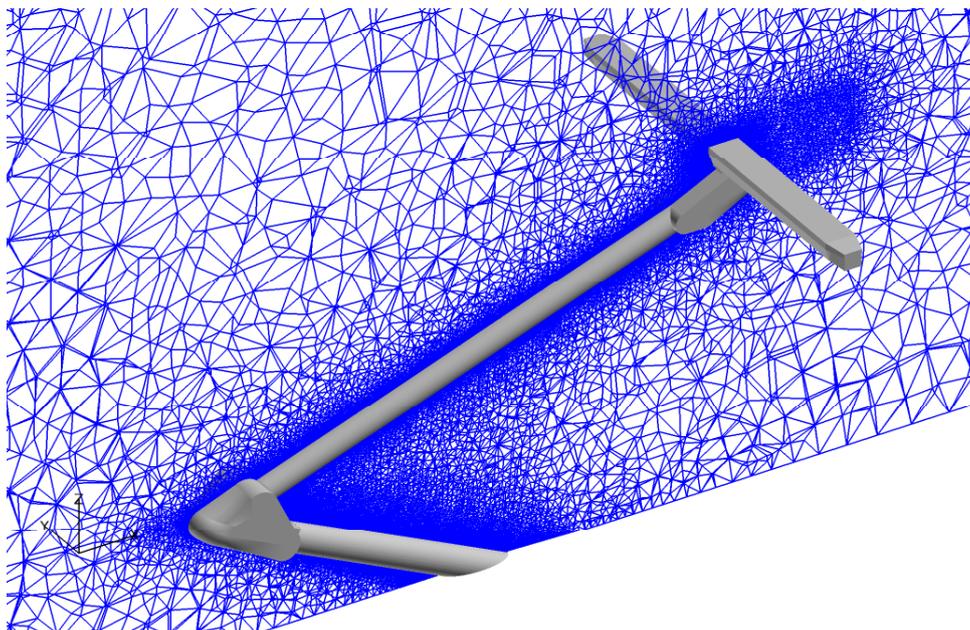
- ・パンタグラフの騒音低減のためのシミュレーションツールとして、Advance/FrontFlow/redの並列性能をテストする。
- ・節点数164万のモデルを使用して、並列数2、4、8、16、32、64、128、256、512、1024で計算する。

解析概要 ～解析手法

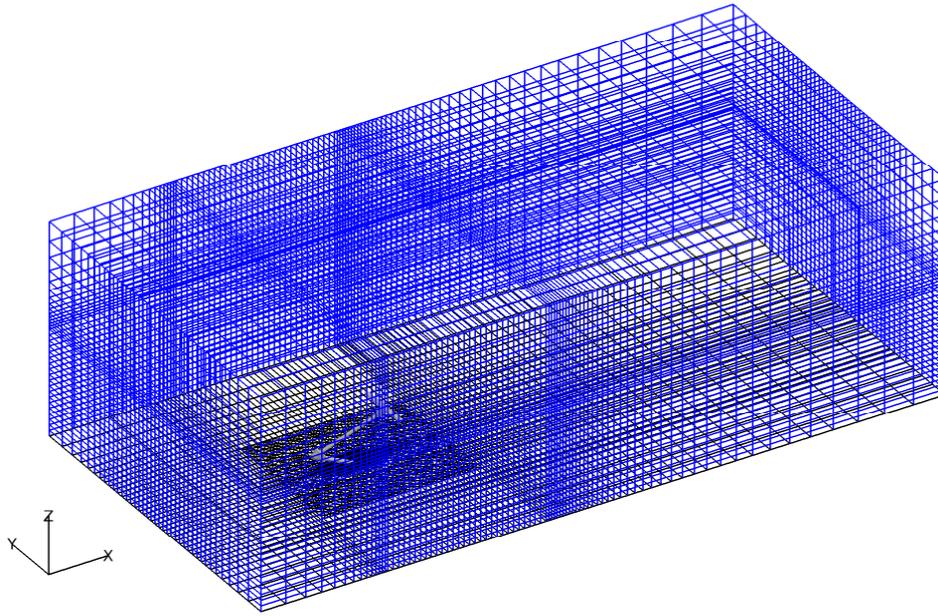


項目	内容
支配方程式	非圧縮性Navier-Stokes方程式
乱流モデル	標準Smagorinskyモデル
壁面境界	Spalding則
解析格子	非構造格子
空間離散化	2次精度風上法
時間刻み	0.0001秒
並列数	2、4、8、16、32、64、128、256、512、1024
節点数	1,643,920

解析概要 ～パンタグラフ形状とメッシュ



解析概要 ～解析領域とメッシュ



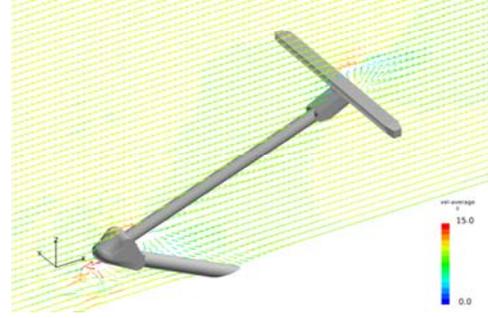
解析概要 ～速度分布の計算結果



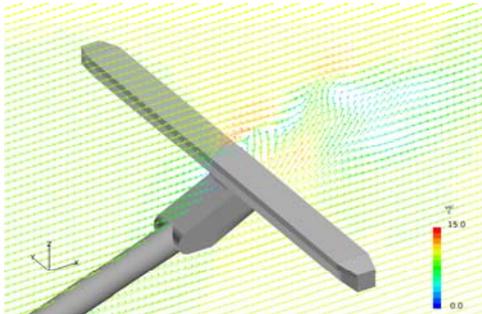
瞬時速度



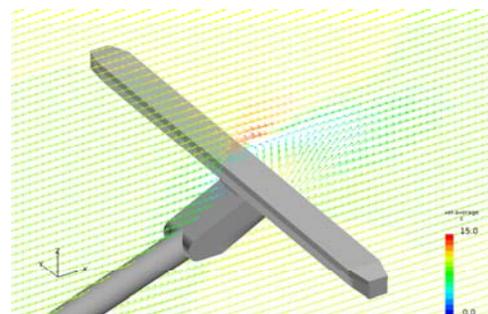
時間平均速度



瞬時速度(拡大図)



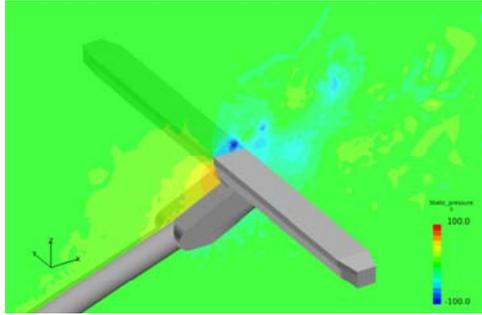
時間平均速度(拡大図)



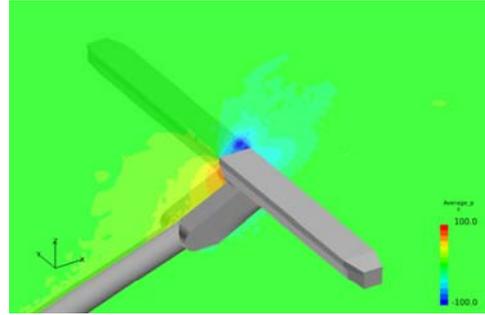
解析概要 ～圧力分布と音圧レベルの計算結果



瞬時圧力



時間平均圧力



固体表面の瞬時圧力

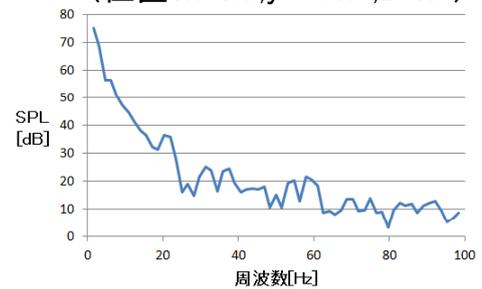


固体表面の時間平均圧力



音圧レベル

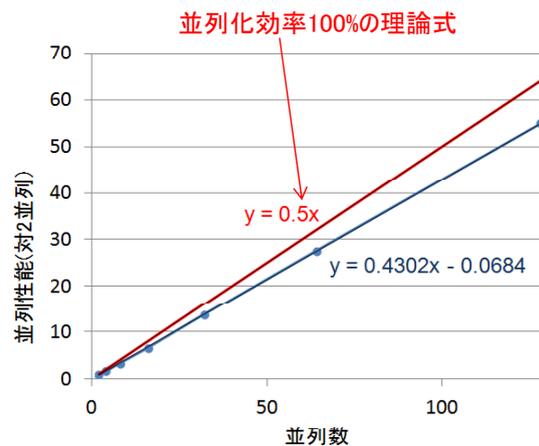
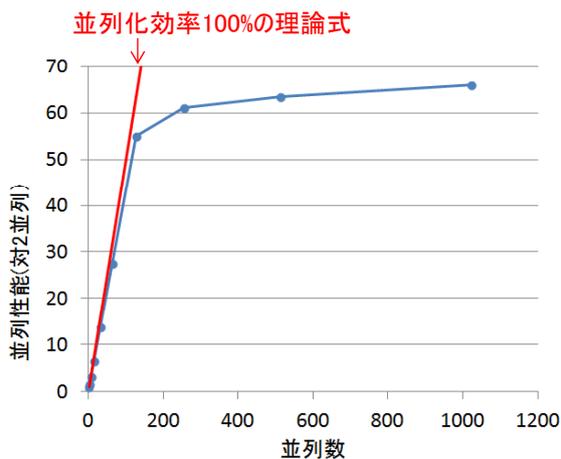
(位置 : x=0m,y=-10m,z=0m)



作成:*****部 ****年**月

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

並列性能のテスト結果



- ・節点数164万のモデルでは有効な最大並列数は128である。
- ・本モデルでは並列数が128を超えると、CPU間の通信時間が増えるために、並列性能が上がりなくなった。

結論



- ・パンタグラフ周りの流動解析を並列数2、4、8、16、32、64、128、256、1024でテストした結果、節点数164万のモデルでは有効な最大並列数は128である。
- ・節点数が多くなると有効な最大並列数が増えるため、Advance/FrontFlow/redは、数百万やそれ以上の節点数のモデルでは128以上の並列数を有効に利用できることが予想できる。

謝辞



事例紹介に関連して公益財団法人鉄道総合技術研究所様に多大なるご協力をいただきました。
この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。

ガスタービン燃焼器内の現象解明を目指した 対向衝突噴流混合の解析

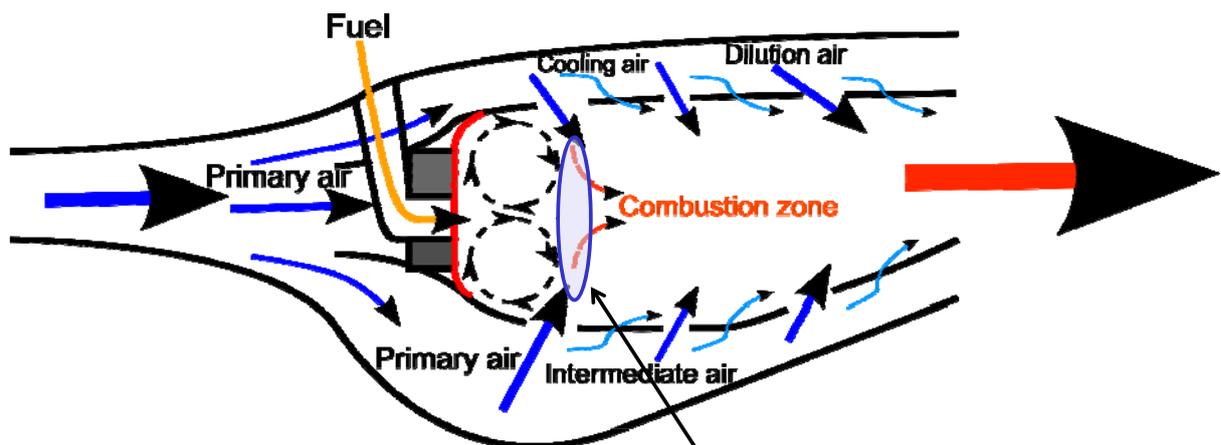
2012年11月22日(木)開催
技術第3部

第40回日本ガスタービン学会定期講演会(2012/10/18)にて発表済

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

13

背景 航空用ガスタービン燃焼器



対向噴流により混合・希釈する

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Combustor_diagram_airflow.png

実験による出口温度分布計測結果とCFDが一致しない
ケースが多い⇒衝突噴流流れが原因と推定

目的と実施内容

目的

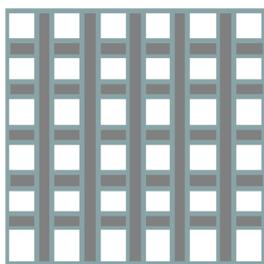
- 対向衝突噴流混合現象の解明
- パラメータ(境界・形状条件)の影響度合い解明
- 流体利用機器の混合性能向上

実施内容

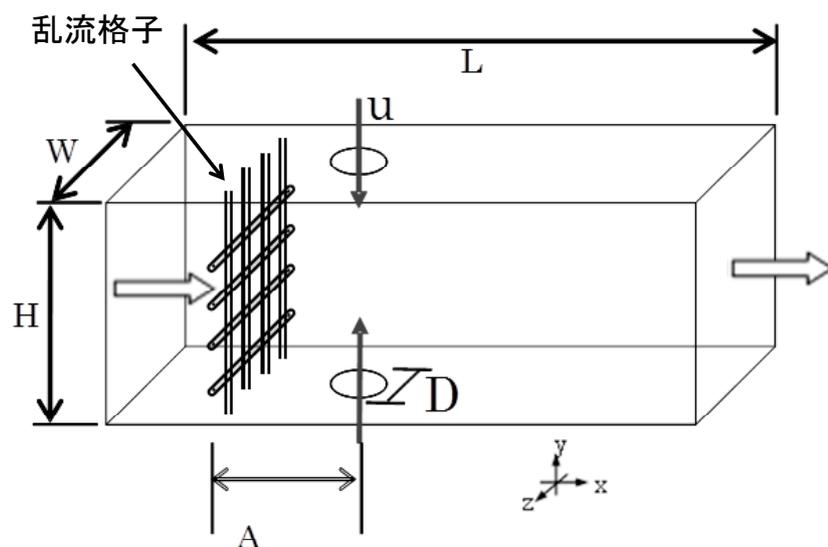
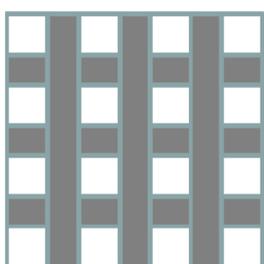
- 矩形ダクト内対向衝突噴流の解析

解析形状

乱流格子1 角柱
(□5mm、間隔20mm)



乱流格子2
(□8.3mm、間隔33.3mm)



($D=20$ 、 $L=590$ 、 $W=100$ 、 $H=100$ 、 $A=100$)
格子開口率 43.75%

解析ケース



噴流 $Re=2.0 \times 10^4$

運動量比 J	噴流速度 V_j [m/s]	主流速度 V_m [m/s]	最大貫徹力 Y_{max}/H
4	20	10	0.46
9	20	6.67	0.69
16	20	5	0.92
64	20	2.5	1.84

乱流格子あり

運動量比 $J=(\rho_j V_j^2)/(\rho_m V_m^2)$

※運動量比Jが同じ場合主流に流入する噴流の軌道が一致するとされている

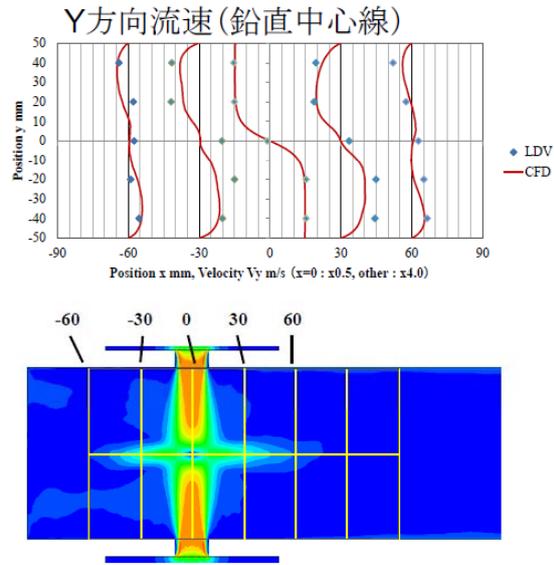
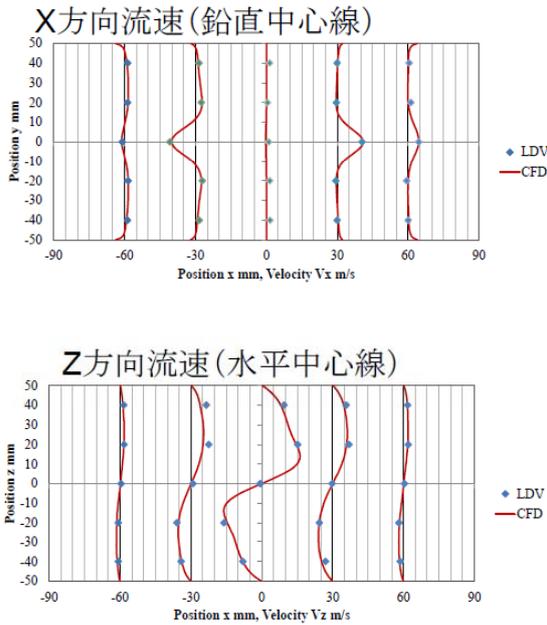
最大貫徹力 $Y_{max}=1.15D J^{0.5}\sin\theta$

解析手法



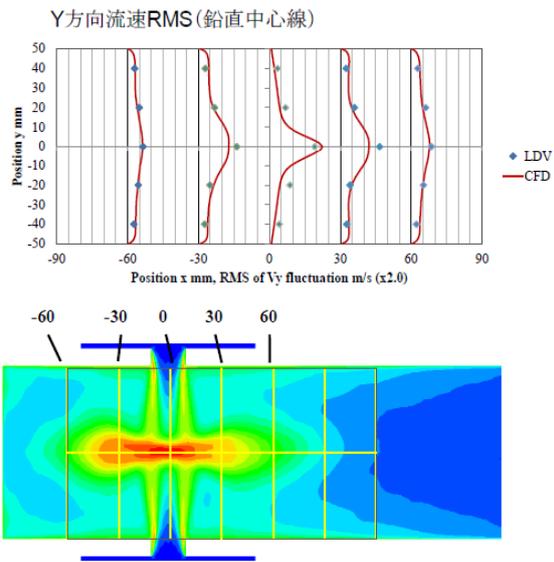
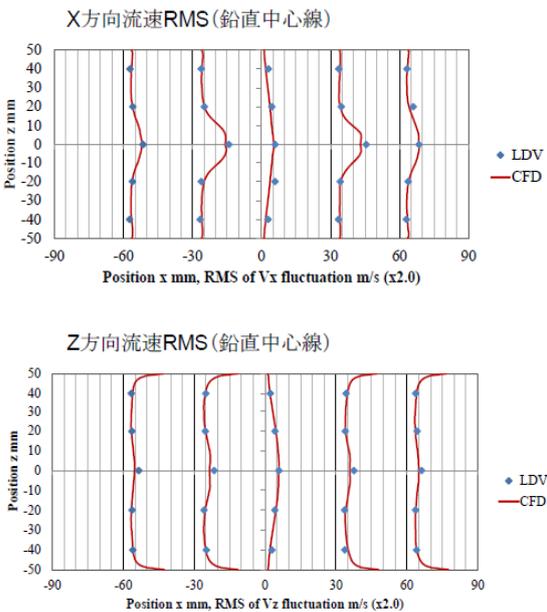
項目	内容
支配方程式	非圧縮性Navier-Stokes方程式
乱流モデル	Dynamic Smagorinskyモデル
噴流流入条件	ランダム摂動
壁面境界	Spalding則
解析格子	非構造格子
空間離散化	2次精度中心差分法 +20% 1次精度風上差分法のブレンド
並列数	64~100
格子数	300万
最小格子幅	0.2[mm]
平均格子幅	2[mm]

精度確認 (主流なし)



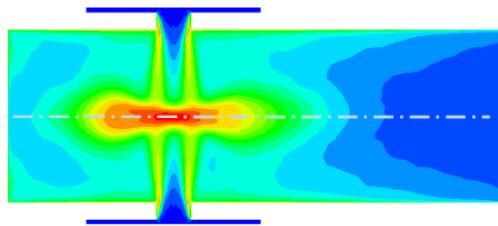
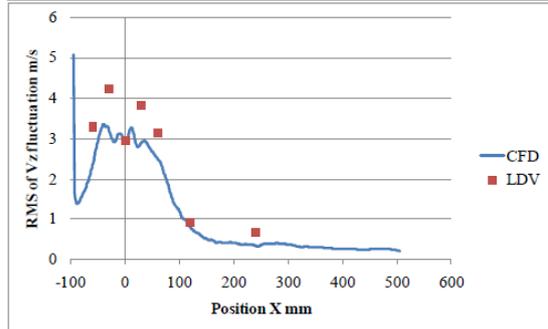
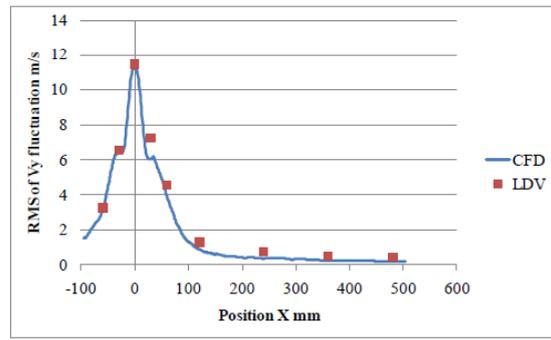
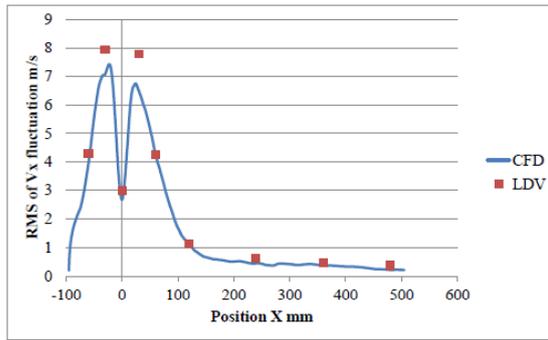
ほぼ定量的な一致が見られる

精度確認 (中心線上変動RMS)



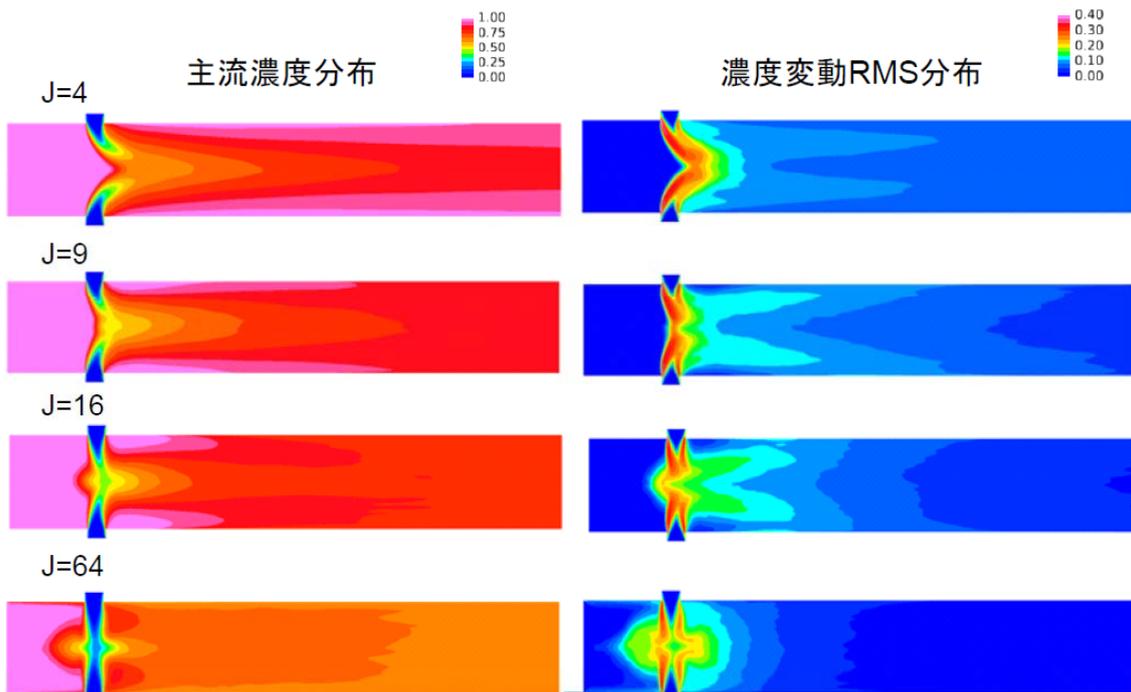
変動速度RMSは定量的に一致

精度確認 (流れ方向軸上流速RMS)

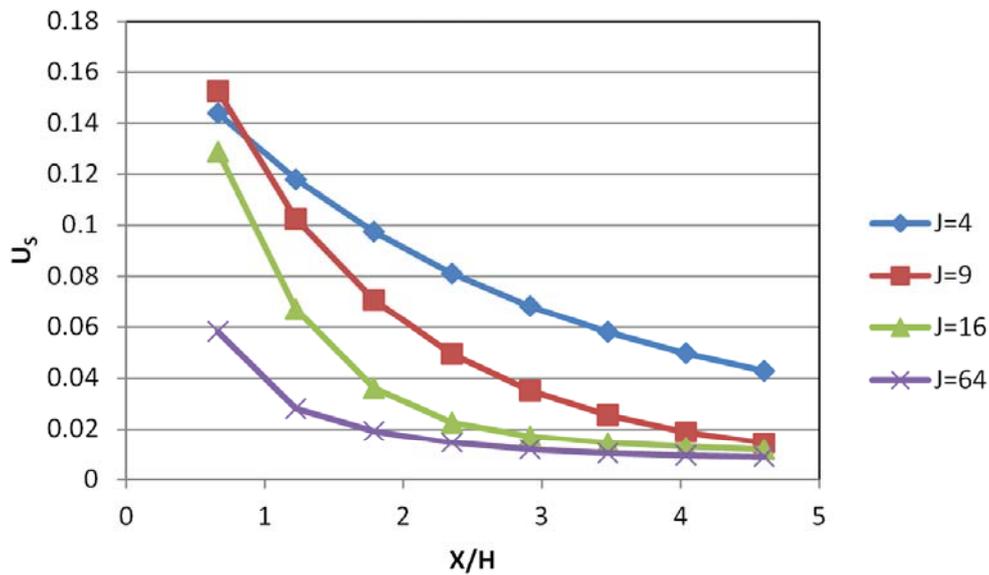


異なる部分もあるが、全体的に見てCFDは実験を定量的に再現

解析結果 時間平均分布(乱流格子なし)



JとUsの関係(乱流格子なし)



未混合度 U_s

※混合されていない度合いを示す指標

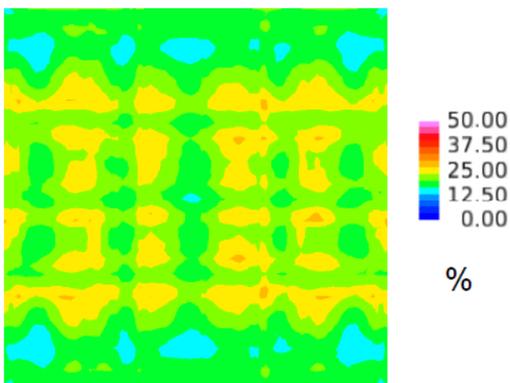
$$U_s = C_{rms} / C_{avg}$$

$$C_{avg} = (w_j/w_m)/(1+w_j/w_m)$$

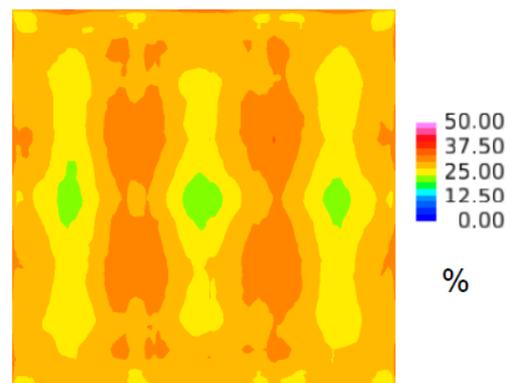
$$C_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{C}_i - C_{avg})^2}$$

噴流直前の乱流強度

乱流格子1

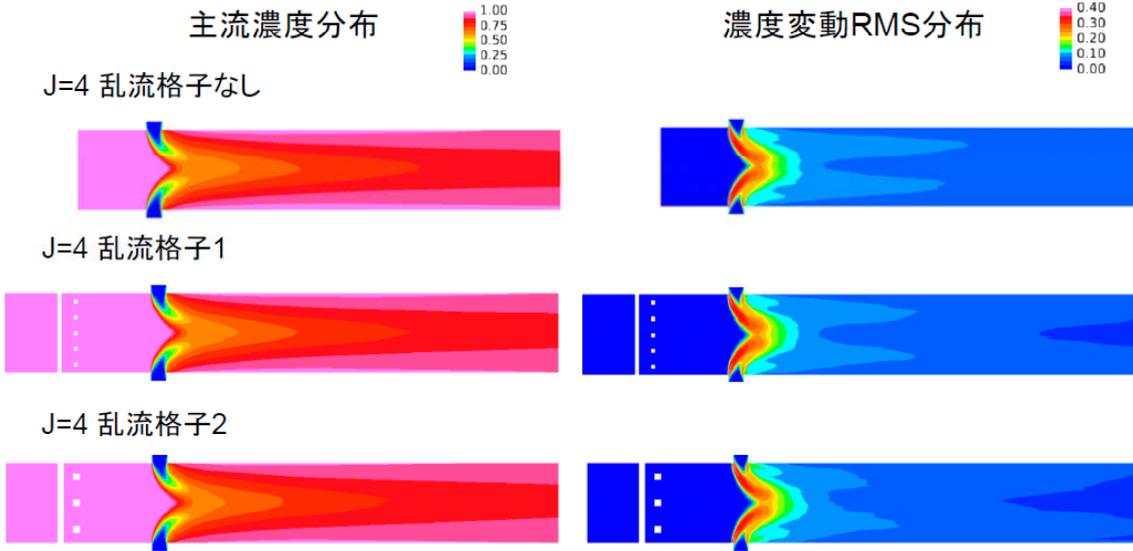


乱流格子2



乱流格子1は約15%、乱流格子2は約30%の乱流強度
(主流平均速度基準)

解析結果 時間平均分布 J=4

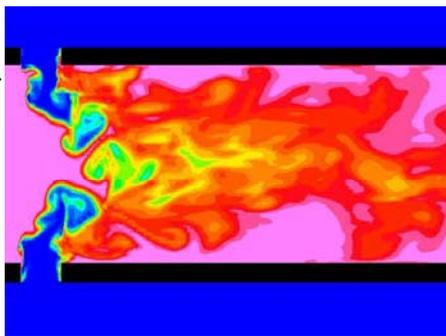


定性的な違いは現れない

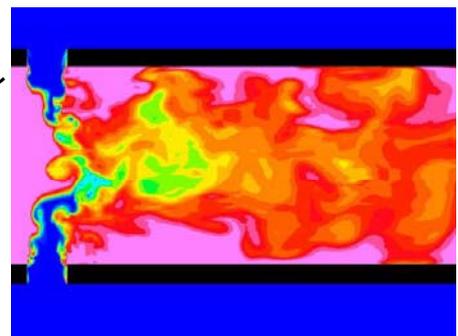
混合の様子(中心縦断面)



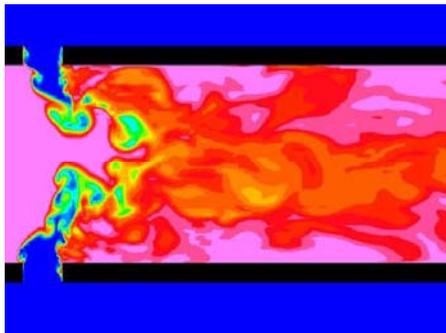
J=4
乱流格子なし



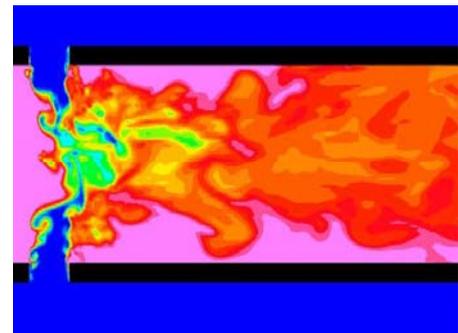
J=9
乱流格子なし



J=4
乱流格子2



J=9
乱流格子2



結果・考察



- 横風を受ける対向噴流を解析し、運動量比 J と乱流格子が混合へ与える影響を検討した
- $J=4$ において特徴的に混合が悪くなる現象を確認した
- $J=4$ では上下噴流が衝突しないため、混合が悪くなると考えられる
- J が大きいケースでは、上下噴流が衝突し、衝突面で混合が促進されたり、低濃度の塊が毎回異なる方向に放出されるために混合が大きいと推測した
- 主流に乱流格子を導入した結果、 $J=4$ のほうが $J=9$ よりも混合が促進された。これは $J=9$ では噴流衝突による混合が支配的か、または主流流速が低いため、流速変動値が小さいためと推測できる
- 乱流格子によって定性的に噴流が影響を受けることは無かった。これは主流乱れ度が小さいためと思われる

謝辞



事例紹介に関連して重工メーカーI様に
多大なるご協力をいただきました。
この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。

降下火山灰影響評価のための 噴煙柱の数値流体解析

本件は電力中央研究所様からの受託案件
として実施されました。

2012年11月22日(木)開催
技術第3部

背景

火山噴火に伴い発生する降下火山灰の影響の適切な評価と対策が
電力事業における発電・流通設備の健全性確保のために重要である。



多様な噴煙形状(噴煙柱、火砕流等)を決定づける重要な要素である
上昇過程での乱流混合のモデリングについての十分な知見がない



多様な噴煙形状を再現するための非定常三次元噴煙柱解析コードを開発し
噴煙形状に及ぼす乱流モデルの影響を評価する。

基礎方程式2 エネルギー方程式

ガス相

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g h_g) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_g \rho_g u_{g,j} h_g) = \varepsilon_g \frac{\partial}{\partial t} P + \varepsilon_g u_{g,j} \frac{\partial}{\partial x_j} P + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{g,e} \varepsilon_g \frac{\partial}{\partial x_j} T_g \right) + \sum_{k=1}^N Q_k (T_k - T_g)$$

粒子相

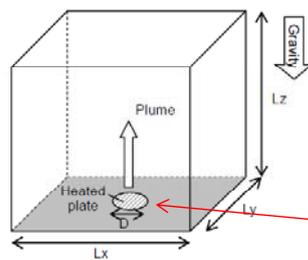
$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_k \rho_k h_k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_k \rho_k u_{k,j} h_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{k,e} \varepsilon_k \frac{\partial}{\partial x_j} T_k \right) - \sum_{k=1}^N Q_k (T_k - T_g)$$

$k = 1, \dots, N$

$$T_g = \frac{h_g}{Cp_g}, T_k = \frac{h_k}{Cp_k}$$

Q_k : ガス-粒子間の熱伝達係数
 $k_{g,e}$: ガス相有効熱伝導率
 $k_{k,e}$: 粒子相有効熱伝導率
 Cp_g : ガス相比熱
 Cp_k : 粒子相相比熱

検証解析1 単相流浮カプルーム概要



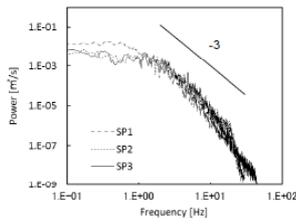
500Kの熱源

格子系	格子間隔 dx/D (=dy/D)	格子間隔 dz/D (min, max)	領域サイズ Lx/D, Ly/D, Lz/D	総格子点数 nx x ny x nz	熱源・噴出口の直 径 D [m]
GSP1	0.067	0.015~0.1	4.0, 4.0, 5.0	60x60x100	0.3
GSP2	0.033	0.01~0.07	2.5, 2.5, 5.0	75x75x150	0.3
GSP3	0.033	0.005~0.035	2.5, 2.5, 5.0	75x75x300	0.3

数値解析手法

運動量、化学種、エネルギーの対流項、	すべて2次中心差分
時間積分法	運動量は3次精度陰解法、その他は、1次精度オイラー陰解法
乱流モデル	標準スマゴリンスキーモデル

検証解析1 単相流浮カプルーム計算結果



(a) $z/D=0.5$

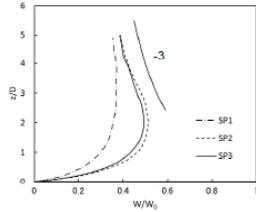


図3 中心軸上の平均速度の鉛直分布

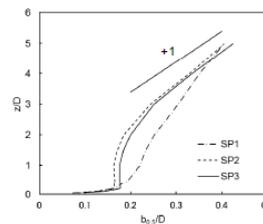


図5 速度半値幅の鉛直分布

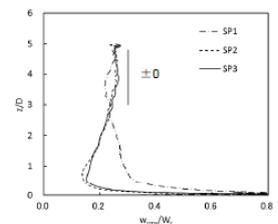
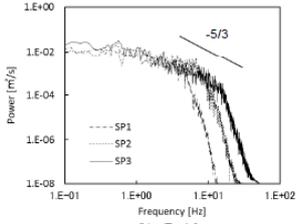


図7 中心軸上の速度乱れ強さの鉛直分布



(b) $z/D=4.0$

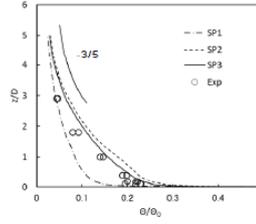


図4 中心軸上の平均温度の鉛直分布 (実験値 (Exp) は須藤ら (2007) による.)

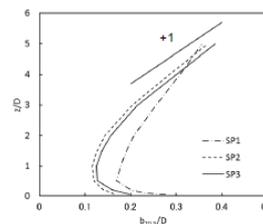


図6 温度半値幅の鉛直分布

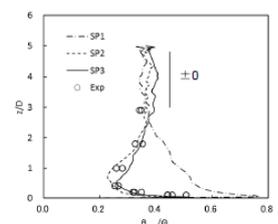
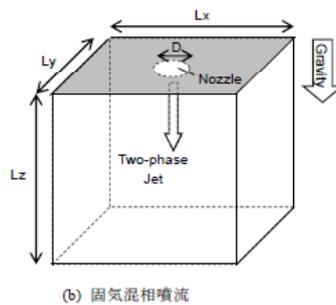


図8 中心軸上の温度乱れ強さの鉛直分布 (実験値 (Exp) は須藤ら (2007) による.)

※電中研 研究報告N12003より抜粋

浮カプルームの主要なスペクトル帯域を捉えた格子系を用いれば本コードにより発達した浮カプルームの熱流動性を良好に再現できることを示している。

検証解析2 固気混相噴流 概要



(b) 固気混相噴流

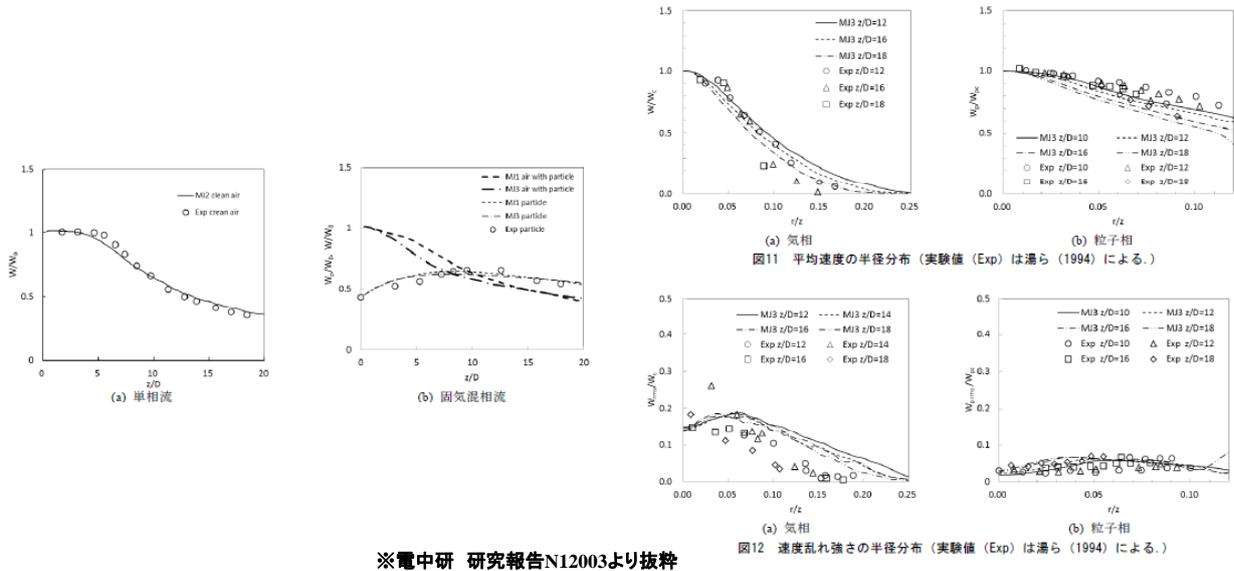
気相14.9m/s、粒子相6.407m/sで噴出

粒子:
 粒径 5.8e-5 [m]
 体積分率0.001
 密度 2520[kg/m3]

数値解析手法

運動量、化学種、エネルギー、濃度の対流項、	すべて2次中心差分
時間積分法	運動量は3次精度陰解法、その他は、1次精度オイラー陰解法
乱流モデル	標準スマゴリンスキーモデル

検証解析2 固気混相噴流 計算結果



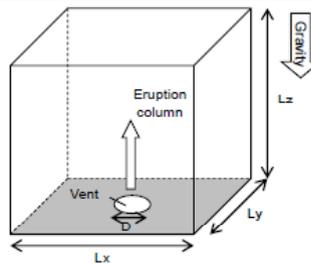
実験で計測された速度場を良く再現している。

検証解析3 噴煙柱解析 概要



円形の火口から1000Kで水蒸気と3種類の粒径の火砕物が噴出

解析は火口噴出流速が200m/s, 100m/s, 50m/sの3ケースを実施した。



$L_x=10\text{km}, L_y=10\text{km}, L_z=20\text{km}$
 $D=100\text{m}$
 $N_x, N_y, N_z=142 \times 142 \times 205$

(c) 噴煙柱

粒子相 (k 相)	粒径 d [m]	密度 ρ [kg/m ³]	粒子相における質量分率 γ	定圧比熱 c_p [J/(kg K)]	熱伝導率 k [W/(m K)]	定数 c_k (式(A13))
1	6.4E-05	2100	0.333	1000	2.2	0.5
2	2.8E-04	1450	0.333	1000	2.2	1.0
3	1.1E-03	1100	0.333	1000	2.2	2.0

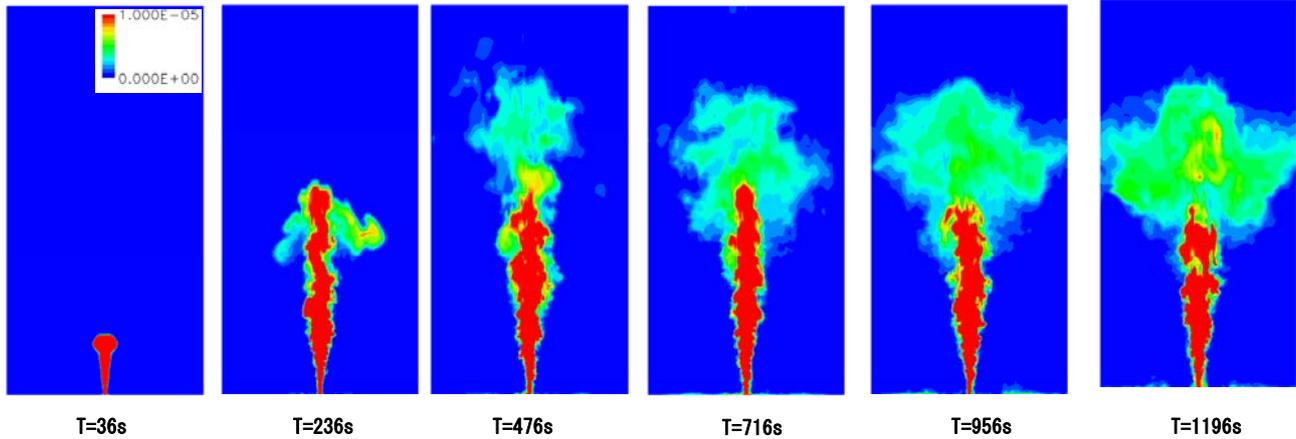
数値解析手法

運動量、化学種、エネルギー、濃度の対流項、	すべて2次中心差分
時間積分法	運動量は3次精度陰解法、その他は、1次精度オイラー陰解法
乱流モデル	標準スマゴリンスキーモデル

検証解析3 噴煙柱解析 計算結果 その1



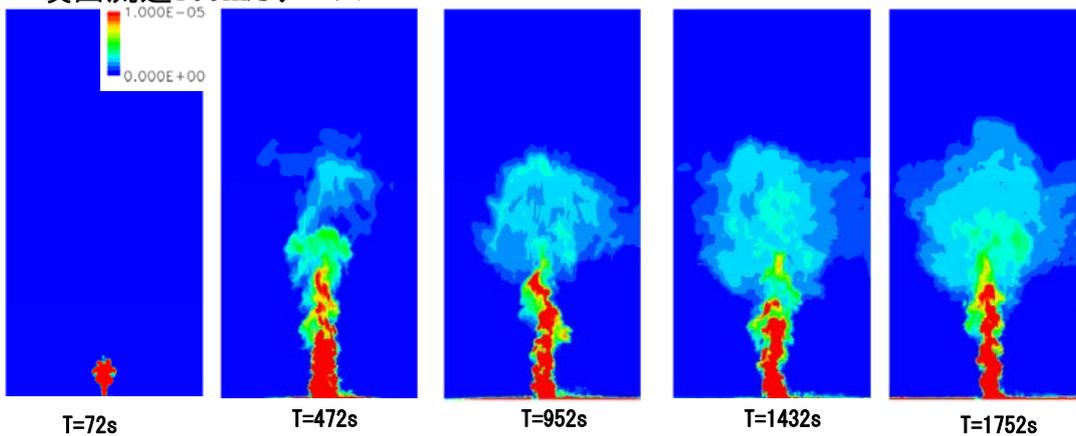
火口噴出流速200m/sの噴煙柱 (粒子相1の体積分率)



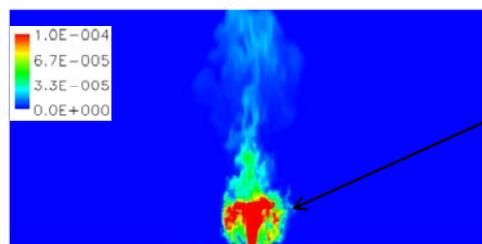
検証解析3 噴煙柱解析 計算結果 その2



・噴出流速100m/sケース



火口付近



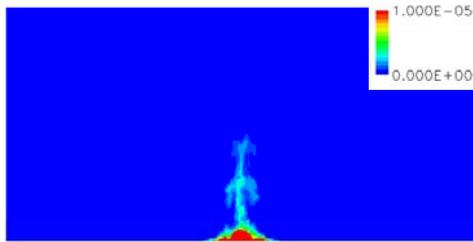
Suspended flow

粒子相1 体積分率分布

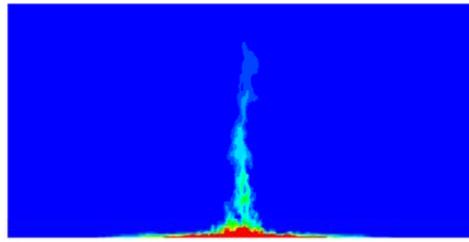
検証解析3 噴煙柱解析 計算結果 その3



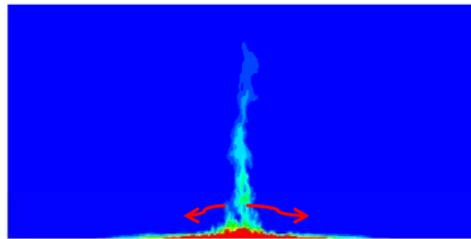
・噴出流速50m/sケース



T=80s



T=800s



火砕流になっている

検証解析3 噴煙柱解析 計算結果 その4



定常1次元モデルと比較

噴出速度の低下に伴い
噴煙の到達高度も低下する

ケースEC3(噴出速度50m/s)
では火砕流に変化する

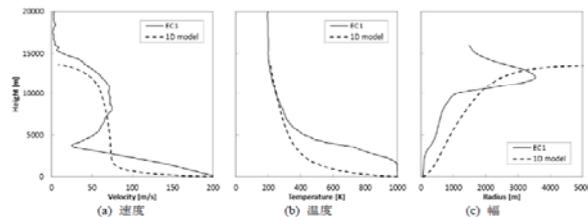


図16 定常1次元モデルとの比較 (ケースEC1)

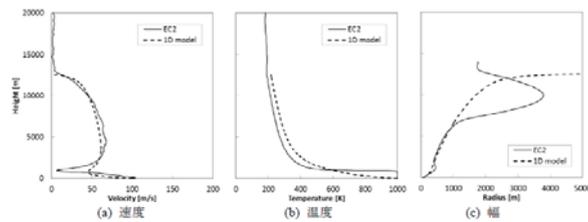


図17 定常1次元モデルとの比較 (ケースEC2)

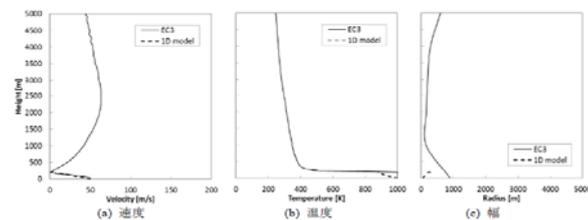


図18 定常1次元モデルとの比較 (ケースEC3)

※電中研 研究報告N12003より抜粋

謝辞



事例紹介に関連して電力中央研究所様に
多大なるご協力をいただきました。
この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。



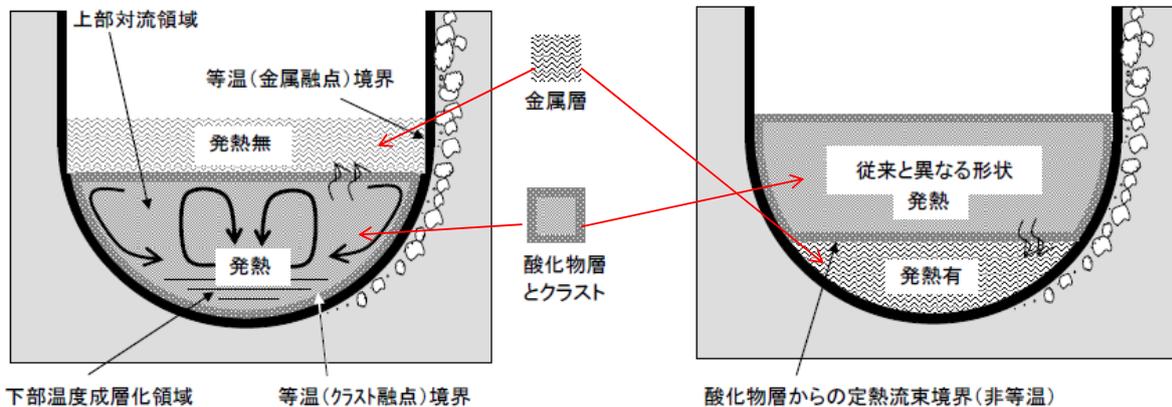
原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る 知識ベースの整備における *Advance/FrontFlow/red*の利用

2012年11月22日(木)開催
技術第3部

目的

逆成層化時の対流熱伝達を評価することを目的とする。その解析を実施するために適切な周方向の範囲を確認する。

前年度に実施した内容については、JNES様のホームページで公開予定の成果報告書をご参照ください。



従来成層化時のデブリ流動

逆成層化時のデブリ流動

引用：独立行政法人 原子力安全基盤機構，平成20年度原子炉施設のアクシデントマネジメントに係る知識ベースの整備に関する報告書＝環境への影響緩和＝，平成21年9月。

解析条件

項目	内容
支配方程式	非圧縮性Navier-Stokes方程式
乱流モデル	MD-Smagorinsky LESモデル
Smagorinsky定数	0.2
SGS乱流プラントル数	0.4
解析格子	非構造格子
時間積分法	Adams-Moulton法
空間離散化	2次精度中心差分
内部レイリー数	3×10^{15}
周方向の領域	1[rad]と 2π [rad]

MD-Smagorinsky LESモデル

- MD-Smagorinsky LESモデルは、最も代表的なLESの手法であるSmagorinskyモデルにおいて、SGS渦動粘性係数の計算に浮力による効果を考慮したもの
- SGS渦動粘性係数 ν_{SGS} は以下のように定式化される。

$$\nu_{SGS} = (C_s \bar{\Delta}_m)^2 |\bar{S}|$$

ここで、

$$\bar{\Delta}_m = \bar{\Delta} \left(1 - \frac{Rf}{Rf_c} \right) \quad Rf > 0$$

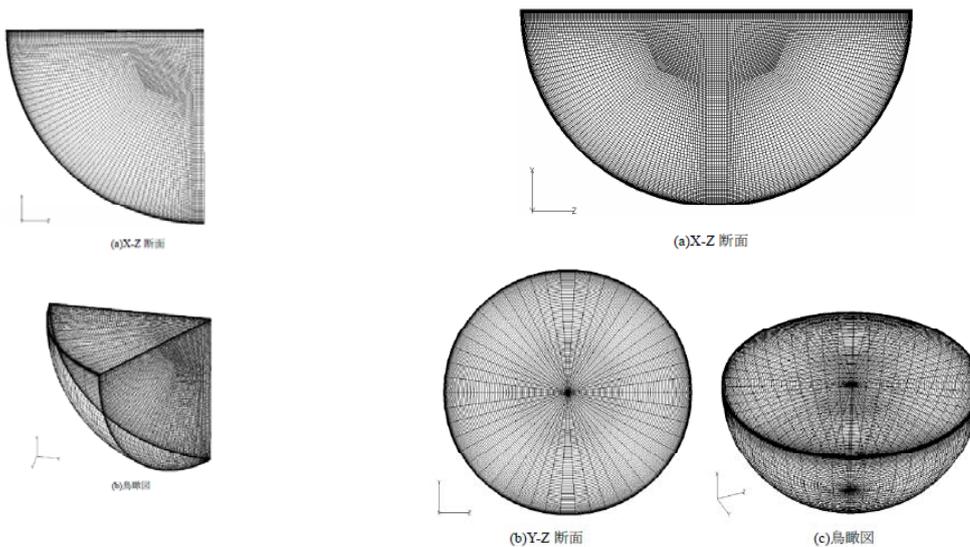
$$\bar{\Delta}_m = \bar{\Delta} (1 - Rf)^{1/4} \quad Rf < 0$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{1/2}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

$$Rf = -\frac{G_{kSGS}}{P_{kSGS}} = \frac{1}{Pr_{SGS}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} g_i \beta$$

メッシュ



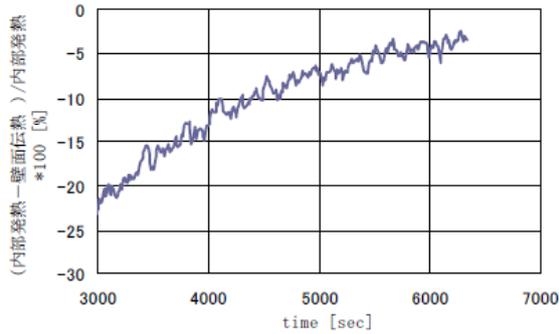
(a) 周方向1radのメッシュ

(b) 周方向2π radのメッシュ

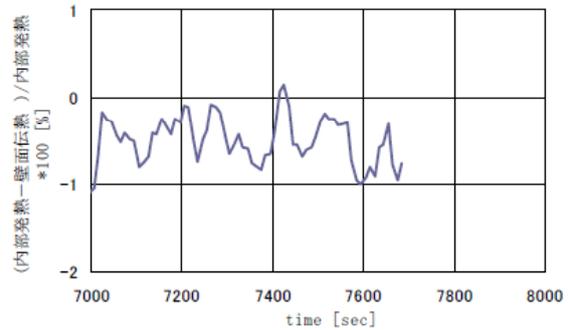
実炉スケール体系

引用: 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成20年度原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書=環境への影響緩和=, 平成21年9月.

収束性



(a)周方向1rad



(b)周方向2π rad

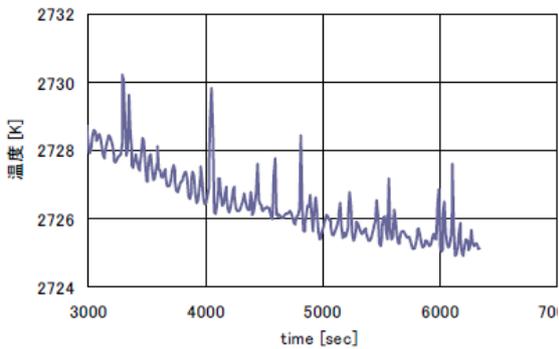
熱収支

引用： 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成20年度原子炉施設のアクシデントマネジメントに係る知識ベースの整備に関する報告書=環境への影響緩和=,平成21年9月.

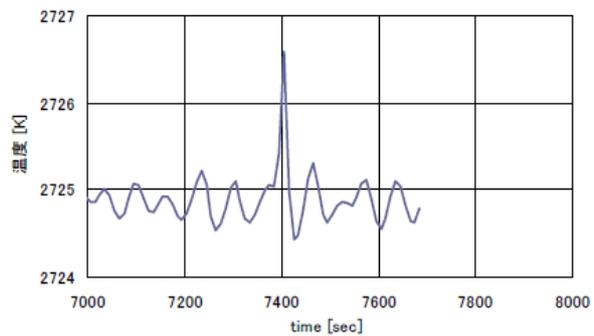
作成: 技術第3部 2012年11月

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

収束性



(a)周方向1rad



(b)周方向2π rad

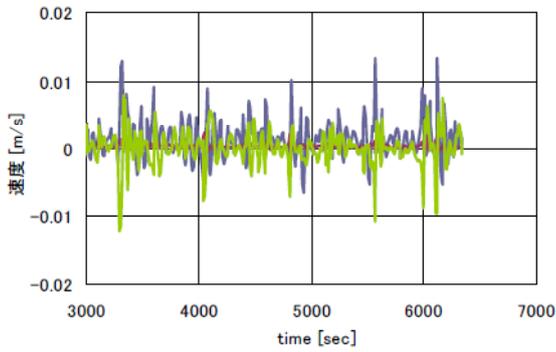
モニター温度の時間変化

引用： 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成20年度原子炉施設のアクシデントマネジメントに係る知識ベースの整備に関する報告書=環境への影響緩和=,平成21年9月.

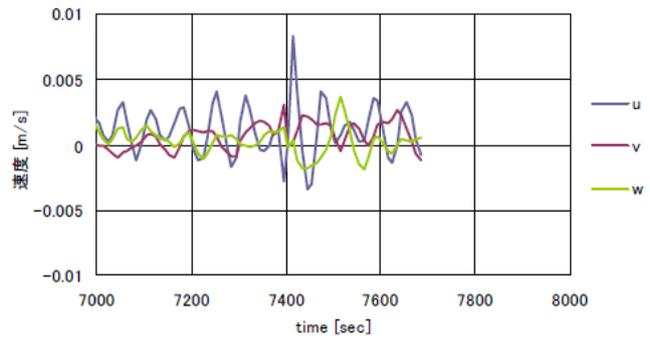
作成: 技術第3部 2012年11月

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

収束性



(a)周方向1rad

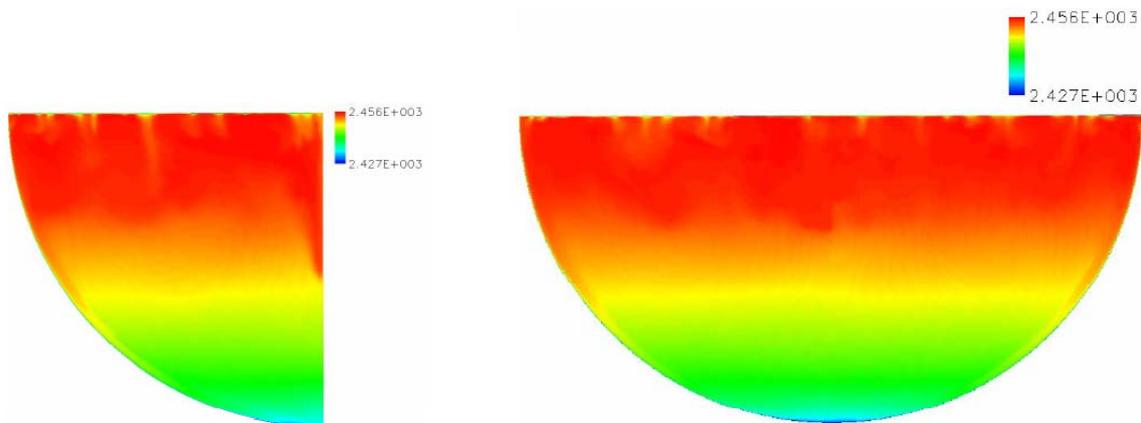


(b)周方向2π rad

モニター速度の時間変化

引用: 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成20年度原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書=環境への影響緩和=,平成21年9月.

解析結果



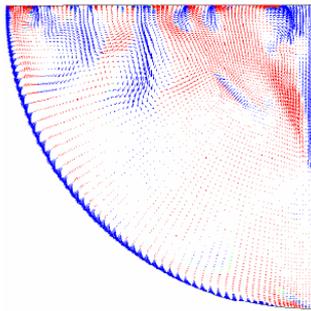
(a)周方向1rad

(b)周方向2π rad

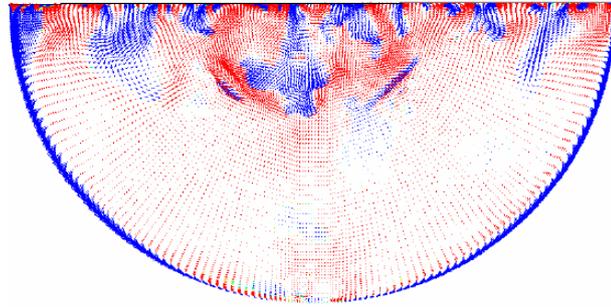
時間平均温度分布の比較(単位: °C)

引用: 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成20年度原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書=環境への影響緩和=,平成21年9月.

解析結果



(a)周方向1rad



(b)周方向2π rad

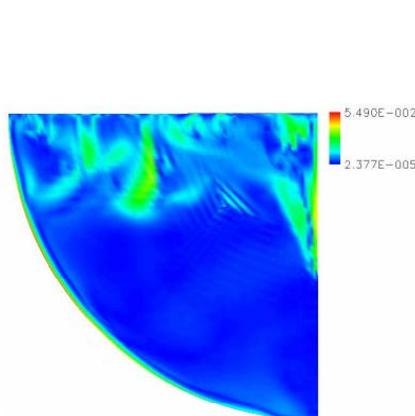
瞬時速度の上下方向分布の比較(上方向が赤、下方向が青)

引用: 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成20年度原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書=環境への影響緩和=,平成21年9月.

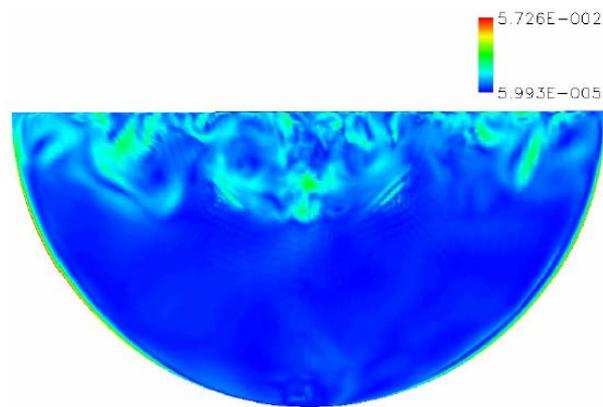
作成: 技術第3部 2012年11月

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

解析結果



(a)周方向1rad



(b)周方向2π rad

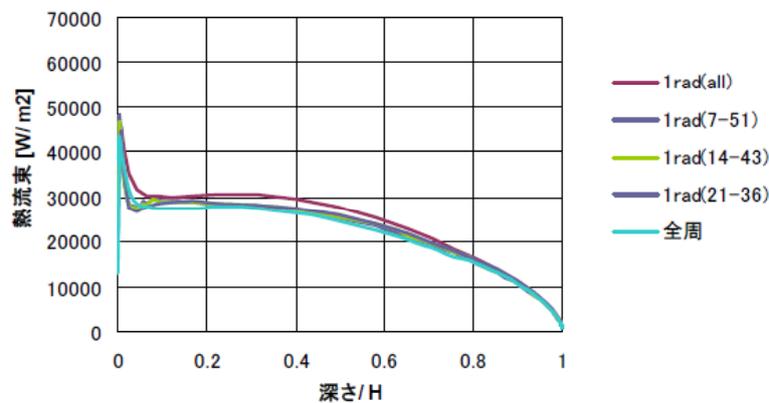
瞬時速度の大きさ分布の比較(単位:m/s)

引用: 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成20年度原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書=環境への影響緩和=,平成21年9月.

作成: 技術第3部 2012年11月

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

解析結果



壁面への熱流束分布の比較

引用：独立行政法人 原子力安全基盤機構，平成20年度原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書＝環境への影響緩和＝，平成21年9月。

作成：技術第3部 2012年11月

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

55

結論



実炉を想定した半球状の压力容器下部ヘッド内の熔融デブリからの熱伝達について、全周を考慮した解析と 1 rad の軸対称領域で近似した解析を実施した。その結果、IVR で重要となる壁面や上面への熱伝達及び壁面への熱流束分布における両者の差は数%であり、実炉解析において軸対称形状を用いることが妥当であることが示された。

引用：独立行政法人 原子力安全基盤機構，平成20年度原子炉施設のアクシデントマネージメントに係る知識ベースの整備に関する報告書＝環境への影響緩和＝，平成21年9月。

作成：技術第3部 2012年11月

流体解析ソフトウェア Advance/FrontFlow/red最新動向セミナー

56

謝辞



事例紹介に関連して独立行政法人 原子力安全基盤機構様に多大なるご協力をいただきました。

この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。



IFMIF リチウムターゲット施設の工学設計 のための熱流動解析

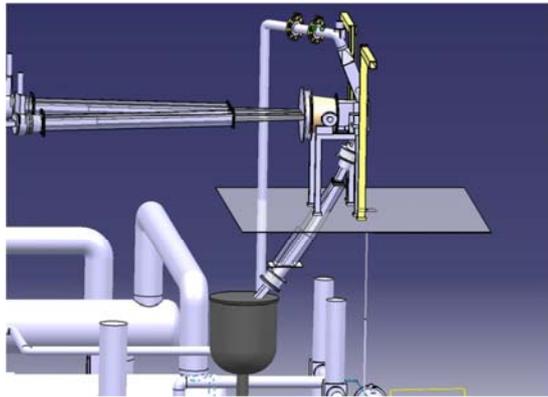
2012年11月22日(木)開催

技術第3部

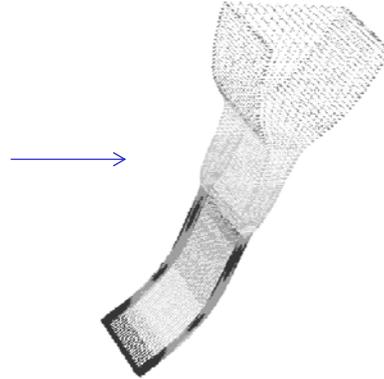
目的

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
ナトリウム機器構造第一試験室
IFMIF照射・試験施設開発グループ殿ご提供

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の工学実証・工学設計活動 (EVEDA) で実施される IFMIF 実機のリチウム (Li) ターゲット施設の工学設計では熱、流体、真空等、種々の挙動を予測することが必要である。ターゲット施設と他の施設とのインターフェイスとなるために早急に解明しておくべき挙動を Advance/FrontFlow/red の VOF 法を用いて計算評価した。



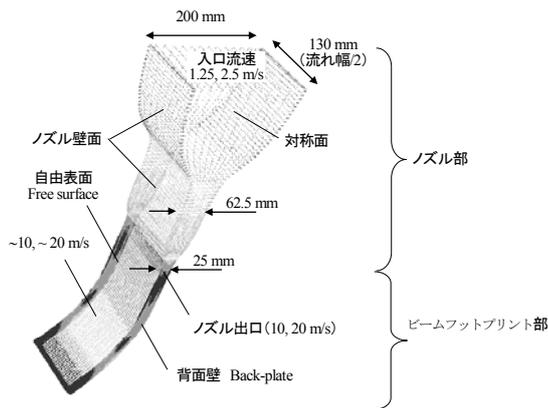
IFMIF概略図



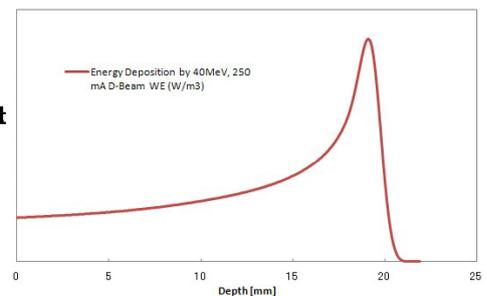
解析モデル

[解析対象]

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
ナトリウム機器構造第一試験室
IFMIF照射・試験施設開発グループ殿ご提供



発熱量



重陽子ビーム照射によるLi発熱はLi自由表面からの深さに応じて右図のように与えられる。



VOF法で求めた自由表面位置からの距離関数を解くレベルセット法を協調的に使用することで発熱量を与えた。

[解析手法 1]



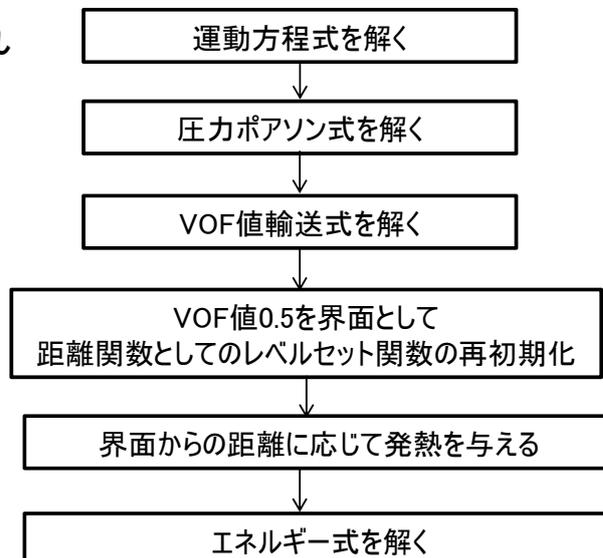
ソルバー	Advance/FrontFlow/Red ver. 4.1
支配方程式	非定常非圧縮性NS方程式
乱流モデル	RNG k-ε
運動方程式、エネルギー方程式及び質量保存方程式の時間積分法	オイラー陽解法
運動方程式、エネルギー方程式及び質量保存方程式の移流項スキーム	1次精度風上差分法
速度-カップリング	SIMPLEC法
時間刻み[sec.]	1e-4
状態方程式	ユーザー定義関数でLiの密度、比熱、輸送係数等熱物性を表現した。

[解析手法 2]



VOF値輸送式の移流項スキーム	CICSAM法
VOF値輸送式の時間積分法	オイラー陽解法

計算流れ



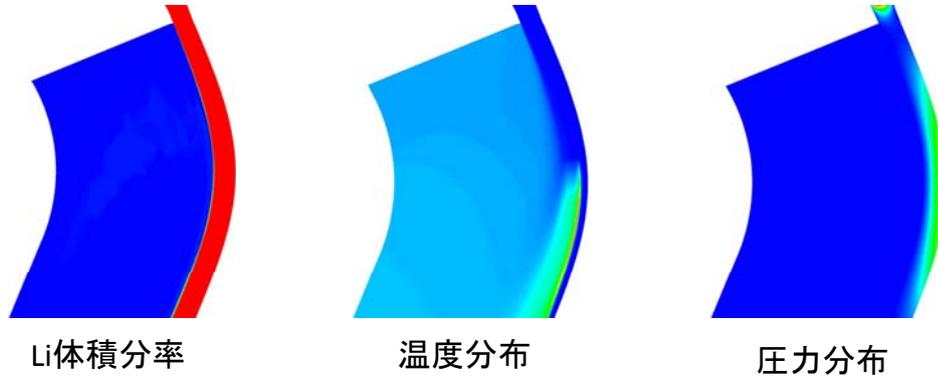
[解析結果]



VOF法とLevel Set 法を協調的に利用することでLi自由表面と温度場のふるまいを把握することに成功

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
ナトリウム機器構造第一試験室
IFMIF照射・試験施設開発グループ 殿ご提供

湾曲部(重陽子ビーム照射部)のLi流動結果



成果 変動する自由表面からの深さに応じた発熱分布を有する液体リチウム流内での温度と圧力の分布を計算でき、リチウムが沸騰しないことを明らかにした。

謝辞



事例紹介に関連して
独立行政法人日本原子力研究開発機構様に
多大なるご協力をいただきました。
この場をお借りして、改めてお礼申し上げます。