

# PHOENICSを利用した 充填層シミュレーション

: バイオマスプラントでの応用

中山 悠

東京理科大学理工学研究科  
経営工学専攻 堂脇研究室



亀山光男

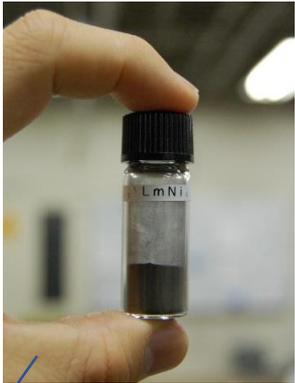
株式会社ジャパンプルーエナジー



- 研究室・JBEC・プロセスのご紹介
- 技術課題：熱媒体の昇温について
- 予熱炉：固・気二相流、移動床
- MSUESによるモデル化
- シミュレーション結果、モデル検証、結果の解釈
- MUSESのシミュレーションで気を付けたいこと



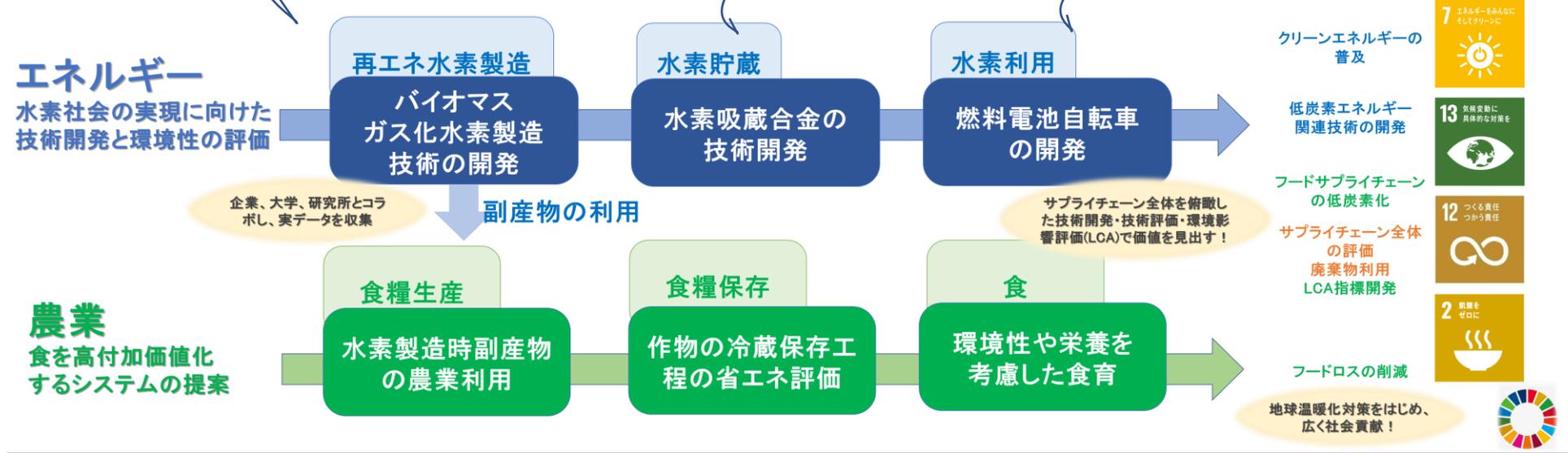
## 水素吸蔵合金



## 燃料電池自転車



### 堂脇研の研究フィールド(ライフサイクル工学を軸としたテクノロジーアセスメント)



## > バイオマス

- ・ 温室効果ガス排出の緩和
- ・ 廃棄物の利用



木質チップ

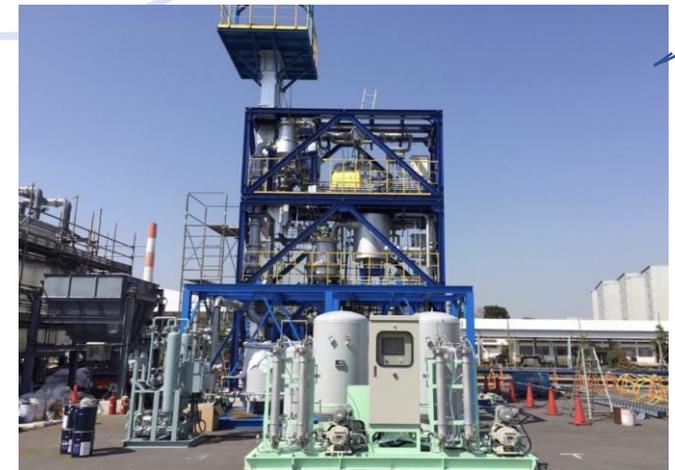


下水汚泥

- ・ 低エネルギー密度  
[kJ-LHV / kg-原料]
- ・ 各地に分散して存在

⇒原料輸送の環境影響を抑えた、**地産地消エネルギー**としての利用が効果的  
⇒**小規模プラント**

AGMパイロットプラント(東京都)  
[1]



## > 熱分解・ガス化プロセス

- ・ 固体原料を高温雰囲気中で可燃性ガスに

✓ ジャパンプルーエナジーでは、小規模なバイオマス熱分解・ガス化プラントでの水素製造実証実験を実施中

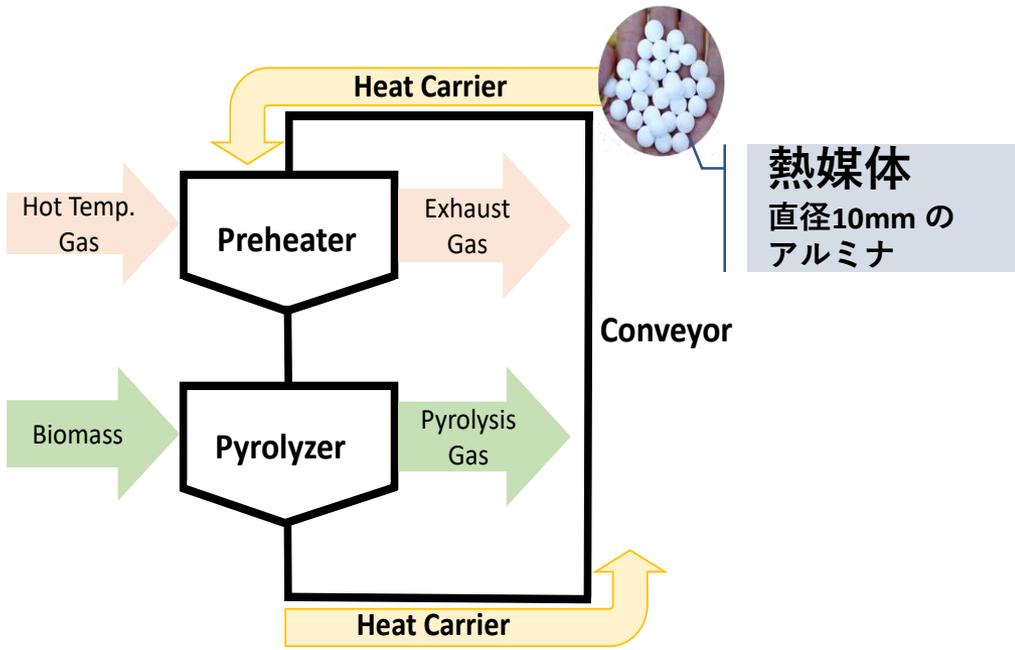
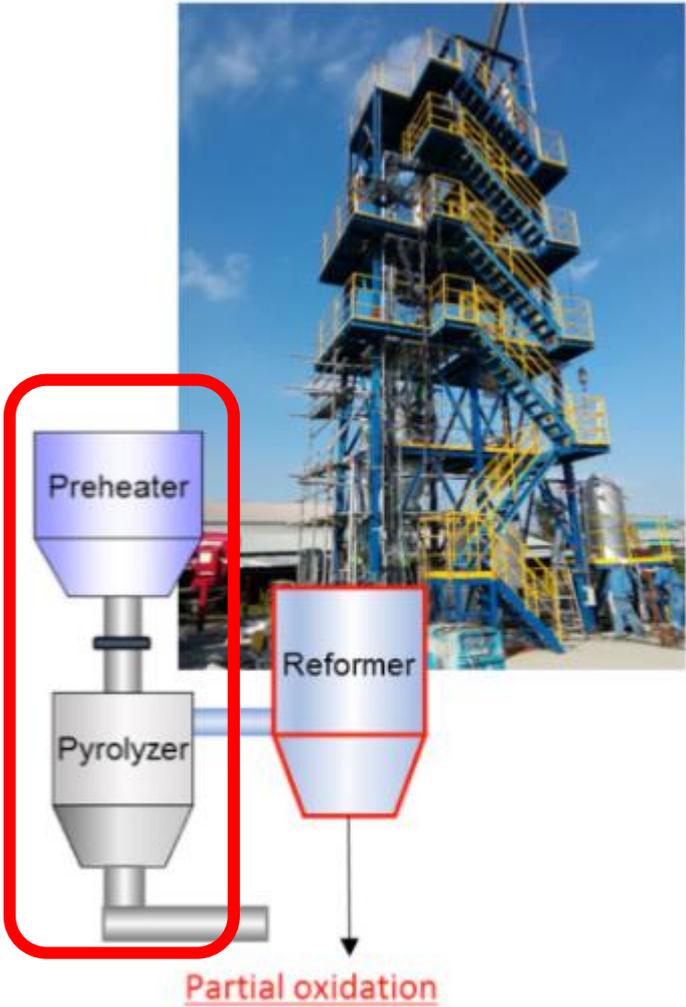
# 熱媒体を用いたバイオマスガス化

CONFIDENTIAL

(1) 熱媒体は予熱炉で高温ガスにより昇温される

(2) 熱媒体により熱分解の熱量が供給される

(3) 熱媒体はコンベアで運ばれ再び予熱炉に投入



✓ 熱分解炉での原料の熱分解のために、予熱炉で安定的に熱媒体を昇温することが重要。

課題：予熱炉で定常熱収支に基づく十分な顕熱を供給しても、熱媒体を目標温度まで昇温することができない

昇温不足だと...

過去の運転結果[2]

Run	1	2
熱分解温度[°C]	650	600
原料当たりの合成ガス収量[Nm <sup>3</sup> /kg]	1.4	0.6

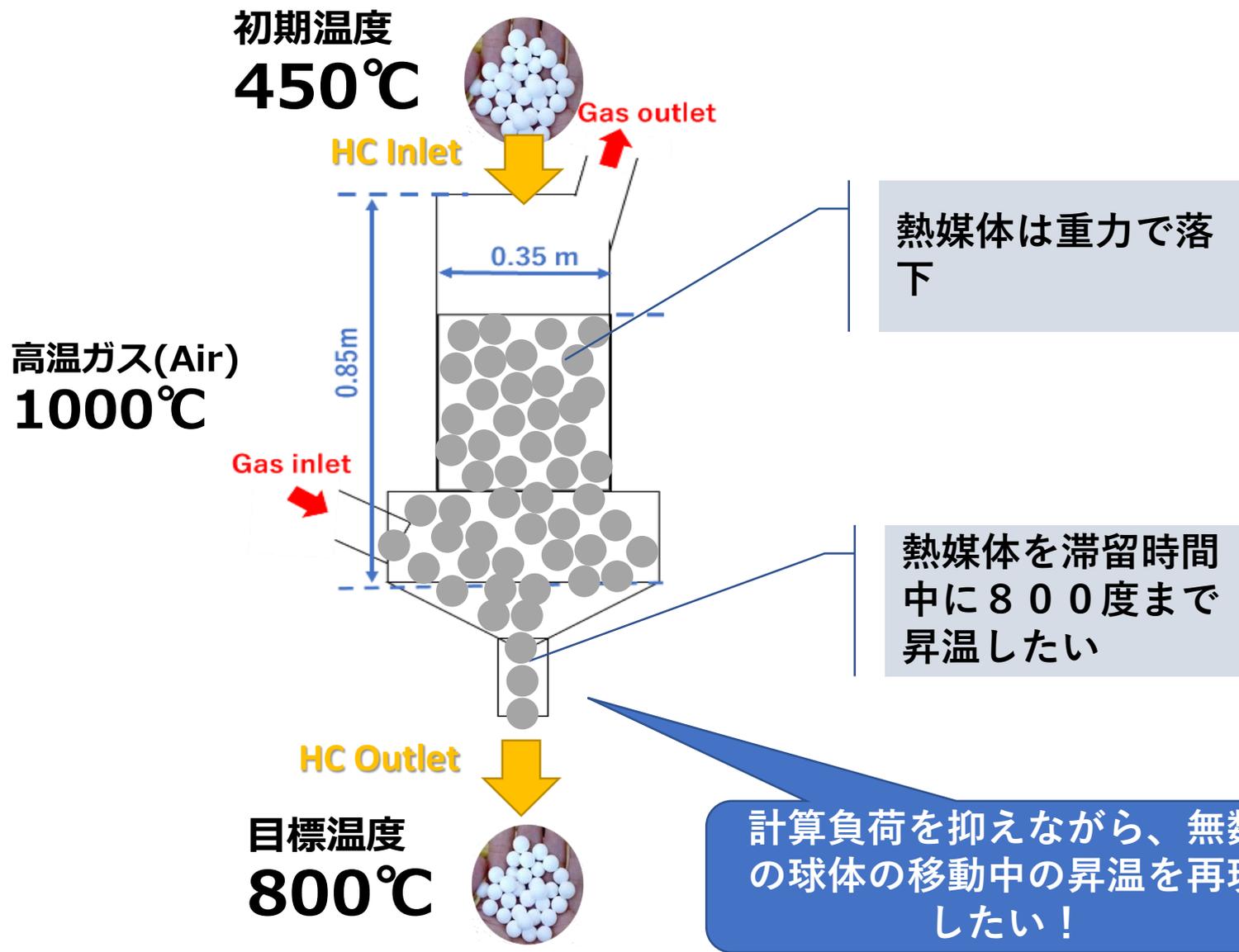
原料からとれる揮発性成分収量が減少してしまう

・ 熱媒体が滞留時間以内に昇温できていない？  
・ 炉の形状によって昇温にばらつきがある？



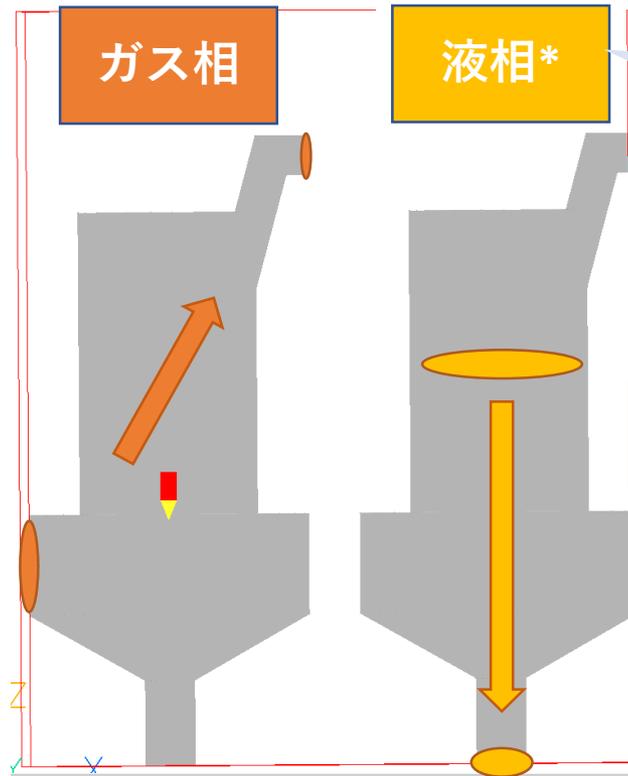
✓ CFDを用いて現状を把握し、適切な条件を検討する

- ・ 高温ガス
- ・ 予熱炉の設計
- ・ 熱媒体の循環量
- ・ 熱媒体の素材
- ・ 熱媒体の直径



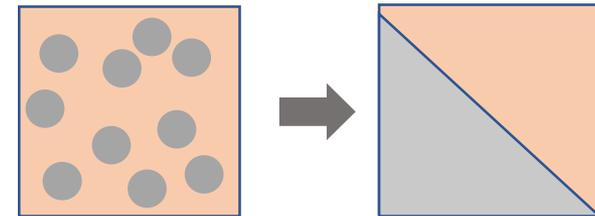
[3] Jizhong CHEN et al., ISIJ International,33(6) 664-671(1993)

MUSESとは：混相流をそれぞれ別のグリッドに表現し、それぞれのグリッドで单相流として変数を解く手法。



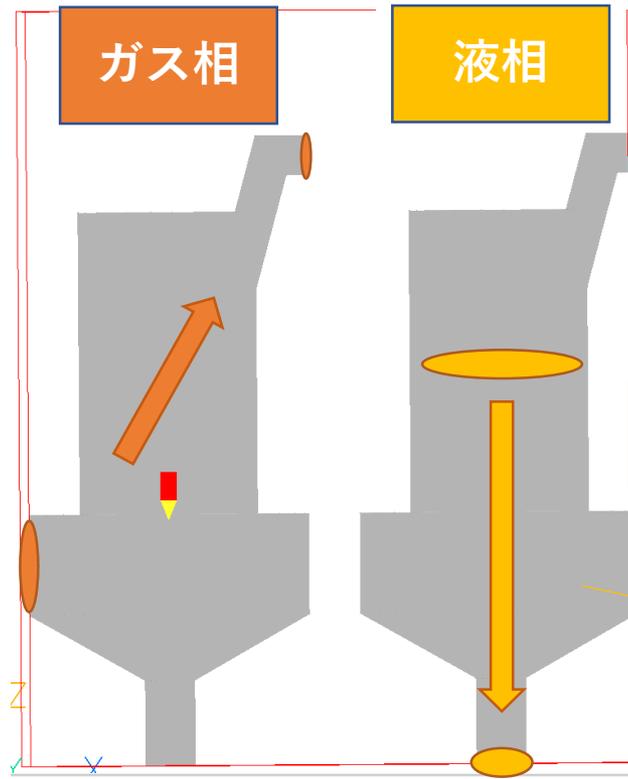
熱媒体の重力による連続的な落下を表現するため、液体としてモデル化することを検討（粉体の粘性流体モデルによる解析[3]）

・ガス相：液相の体積比率は、セルにポロシティとして与える（体積平均法）



✓ 二相間の相互作用(熱伝達や抗力)はInFormで設定

MUSESとは：混相流をそれぞれ別のグリッドに表現し、それぞれのグリッドで单相流として変数を解く手法。



## ✓ 各相の基礎方程式

Solid: 
$$\frac{\partial(1 - \varepsilon)\rho_s C p_s T_s}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_e \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) = S_{T_s}$$

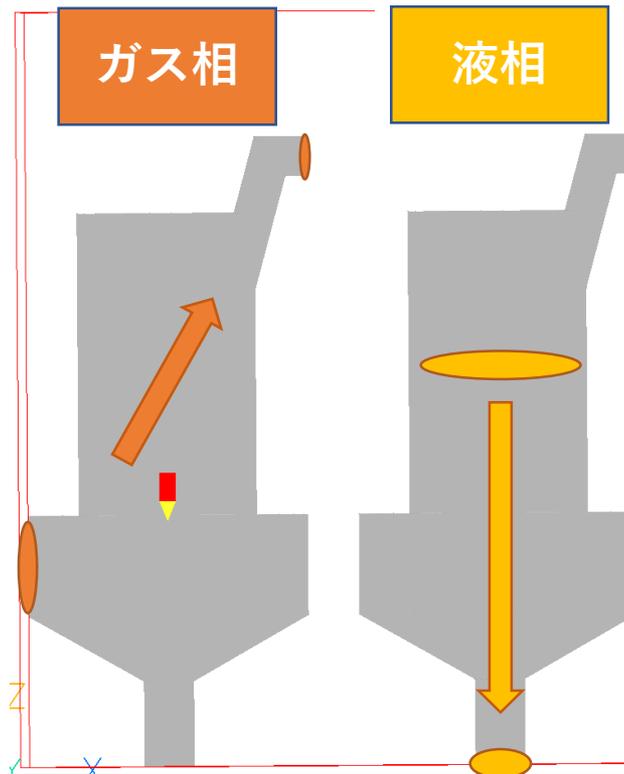
Gas: 
$$\frac{\partial \varepsilon \rho_f C p_f T_f}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \gamma \rho_f C p_f u T_f - \gamma k_f \frac{\partial T_f}{\partial x_j} \right) = S_{T_f}$$

POROSITYに固体の比率を入力する

```
INIT(INIPOR , NPOR, 0., 0.6)  
INIT(INIPOR , HPOR, 0., 0.6)  
INIT(INIPOR , EPOR, 0., 0.6)  
INIT(INIPOR , VPOR, 0., 0.6)
```

✓ サポート項目/4 熱・圧縮性・自然対流/圧多孔質熱伝達モデル(MUSES)に例題が掲載されています！

MUSESとは：混相流をそれぞれ別のグリッドに表現し、それぞれのグリッドで单相流として変数を解く手法。



## ✓ 熱伝達の設定の例

$$S_{Ts} = h(T_f - T_s)UV = -S_{Tf}$$

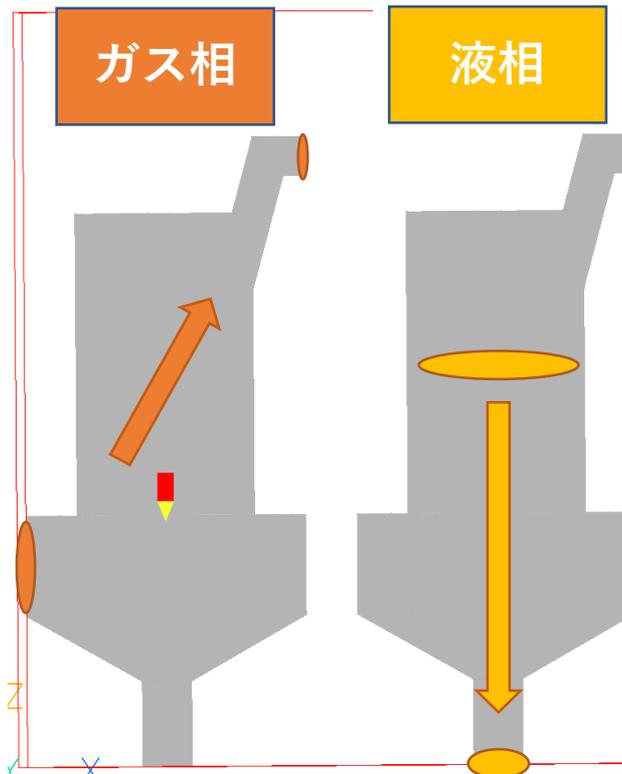
セル当たりの2相間の接触面積[m2/m3]

```
inform13begin
real(afac,hcon)
afac=500
hcon=100.
(source of tem1 at S2F is hcon*afac*(tem1[&+2]-TEM1) with line)
(source of tem1 at F2S is hcon*afac*(tem1[&-2]-TEM1) with line)
inform13end
```

2相間のメッシュ数

✓ サポート項目/4 熱・圧縮性・自然対流/圧多孔質熱伝達モデル(MUSES)に例題が掲載されています！

MUSESとは：混相流をそれぞれ別のグリッドに表現し、それぞれのグリッドで单相流として変数を解く手法。



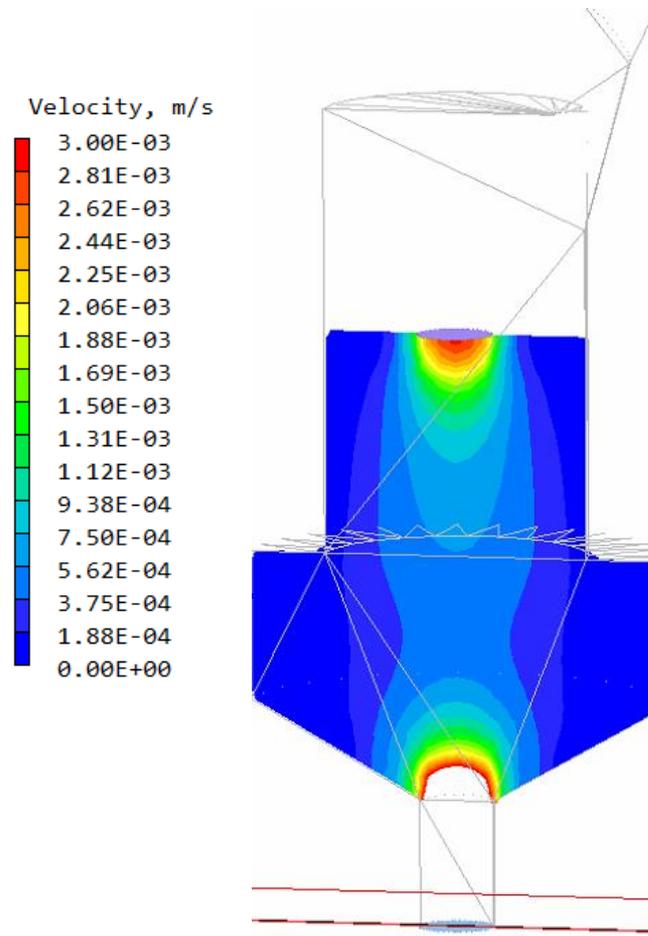
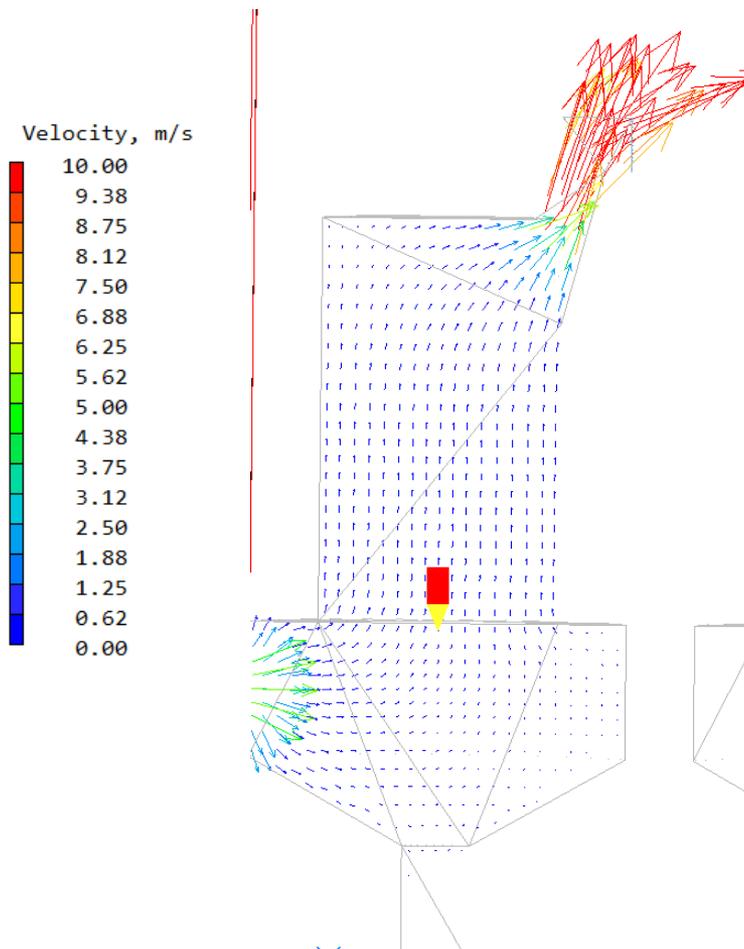
## ✓ ガスの流動抵抗設定の例

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2} \frac{\mu_f}{\varphi^2} u + 1.75 \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^3} \frac{\rho_f}{\varphi} u^2$$

Ergunの式(粒子充填層の圧力損失)

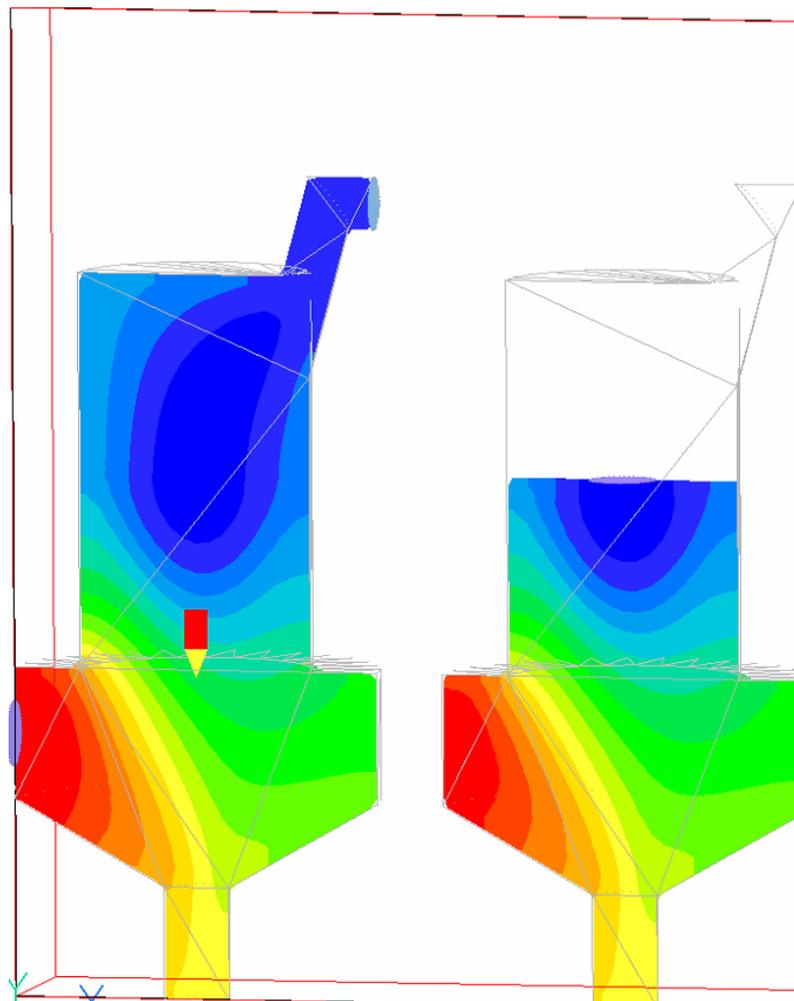
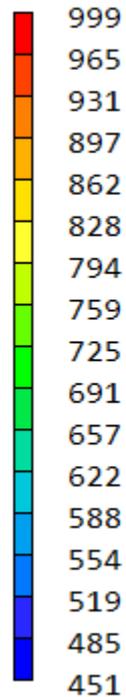
```
(source of U1 at Ergun is (150*(1-ep1)*vis1/dd+1.75*den1*vabs)*(1-ep1)/ep3/dd*(0-u1) with line)  
(source of V1 at Ergun is (150*(1-ep1)*vis1/dd+1.75*den1*vabs)*(1-ep1)/ep3/dd*(0-v1) with line)  
(source of W1 at Ergun is (150*(1-ep1)*vis1/dd+1.75*den1*vabs)*(1-ep1)/ep3/dd*(0-w1) with line)
```

✓ 粒子周りのガス流速は、運動量保存を解かずにErgunの式により求める。



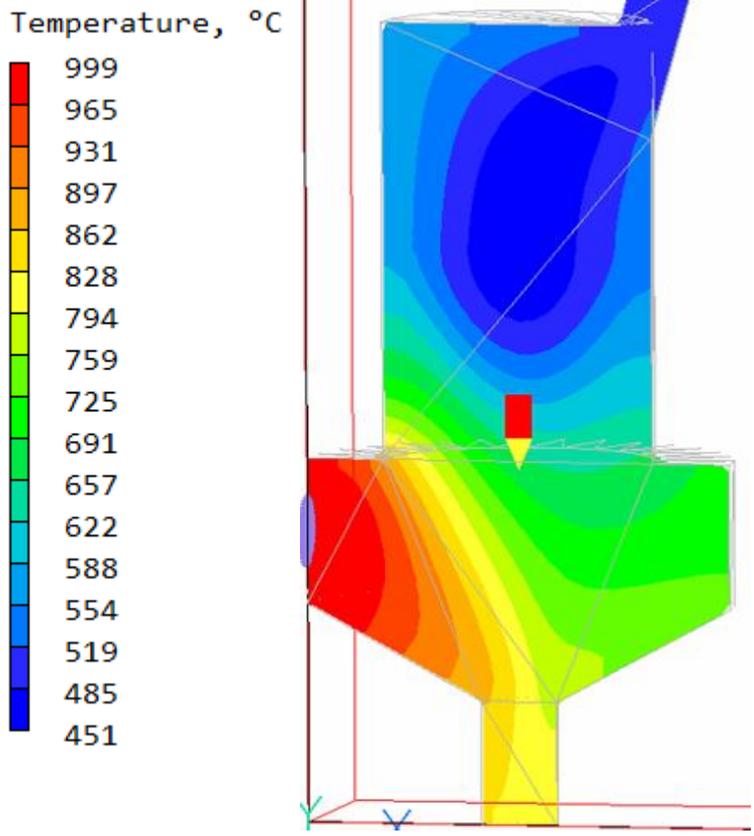
✓ 粉体の流速について、容器壁面との摩擦を設定していないため、あくまで概算となっている。

Temperature, °C

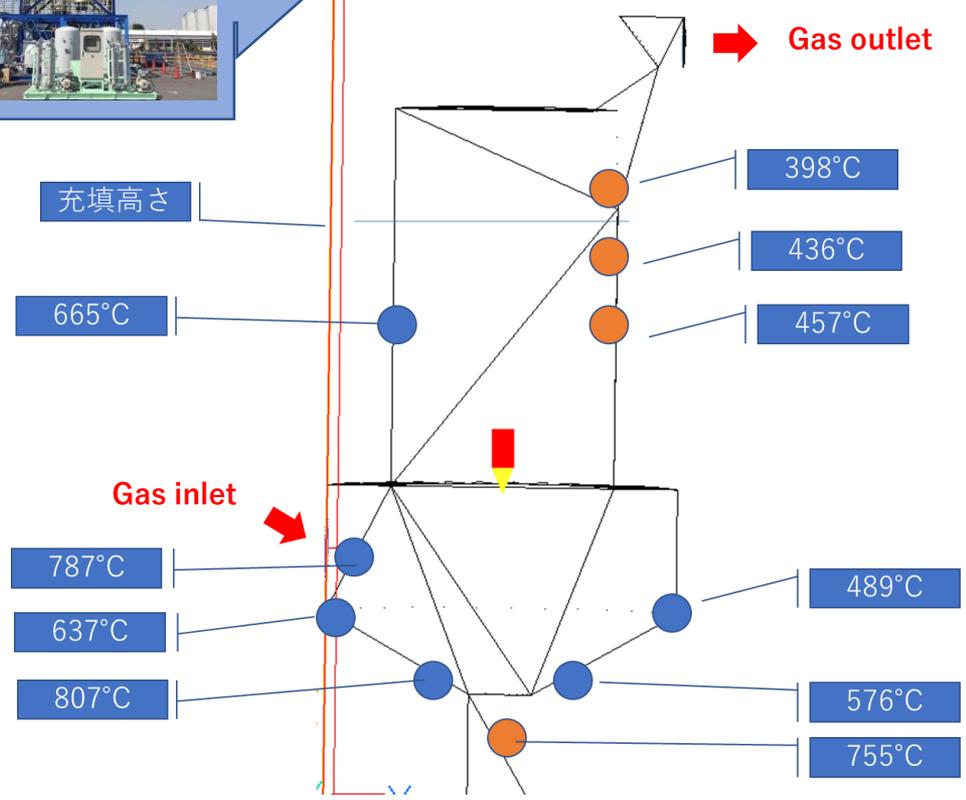


✓ 粒子流体間の熱伝達率が高く、各相でほぼ同じ温度分布になっている。

## ✓ シミュレーション結果



## ✓ 実証プラントでの温度取得結果

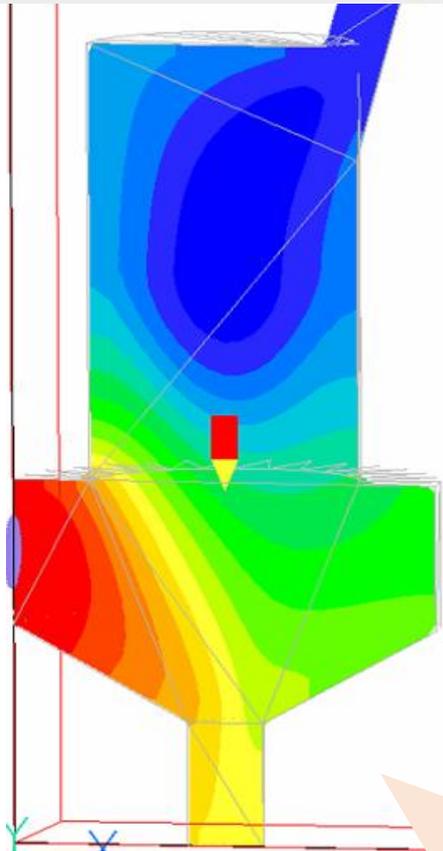


✓ 実証実験の予熱炉の温度を取得したところ、傾向が取れていることが分かり、今後モデル上で壁面の放熱を加味することでおおよその一致が得られそうである ⇒ 2相流でのMUSESの有効性

## ✓ 解析結果(温度分布)

Temperature, °C

999  
965  
931  
897  
862  
828  
794  
759  
725  
691  
657  
622  
588  
554  
519  
485  
451



- ・ 熱媒体が滞留時間以内に昇温できていない？
- ・ 炉の形状によって昇温にばらつきがある？



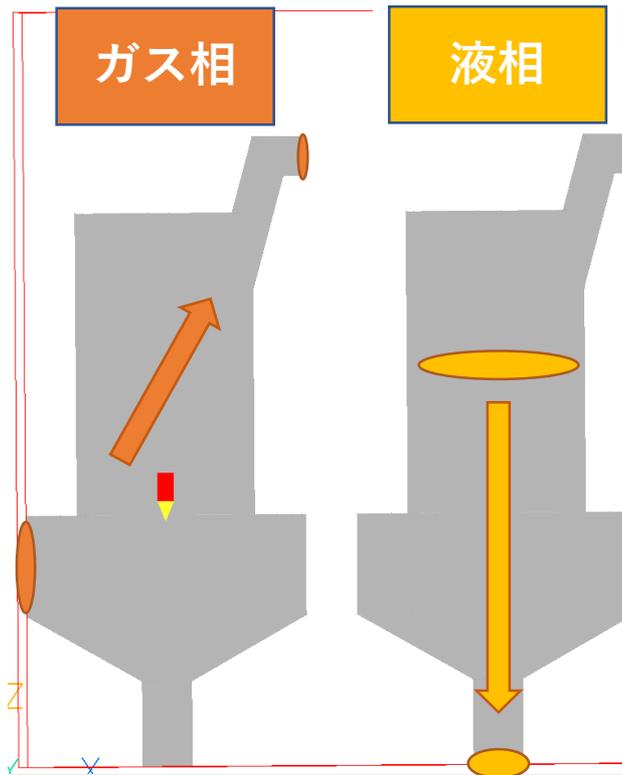
・ 入口ガス流量を増やすことで、モデルで設定したガス流量(アプローチ温度差100度)により、滞留時間以内の昇温が可能であることが分かった。

・ ガス入口からの距離が遠い場所では昇温が進みずらく、熱媒体出口にも30度ほどのばらつきがある =>ガス入口の数を増やすことを検討

・ ガス温度をより高くすることで入口ガスの顕熱量を減らすことが分かった。  
(ガス条件を変更したシミュレーションより)

# MUSESのシミュレーションで 気を付けたいこと

CONFIDENTIAL



- ・ 熱伝達率、熱伝導率、液相の粘性を入力として与える必要あり。
- ・ Informで熱伝導率を設定するとき (PRNDT(TEM1))、負の値で定義する。
- ・ 粘性は非常に温度分布に与える影響が大きいため、慎重に推定する必要がある。
- ・ 相互作用させるセルがずれていないか、各相での熱伝達量の絶対値は同じになっているか、net source を出力して確認する。

CONFIDENTIAL

ご清聴ありがとうございました



Tokyo University of Science, Japan  
Email: [7420523@ed.tus.ac.jp](mailto:7420523@ed.tus.ac.jp)