

地球シミュレータ産業利用シンポジウム

CO₂排出ミニマムを目指した実高炉内の多相 (固気粉) 流れの大規模シミュレーション

プロジェクト責任者 松崎 眞六 新日本製鐵株式会社

湯 晋一, 大岳R & Dコンサルタント事務所

梅景 俊彦, 九州工業大学大学院 工学研究院 機械知能工学研究系

松崎 眞六*1, 門脇 正具*1, 国友 和也*1, 内藤 誠章*1

*1 新日本製鐵株式会社 技術開発本部

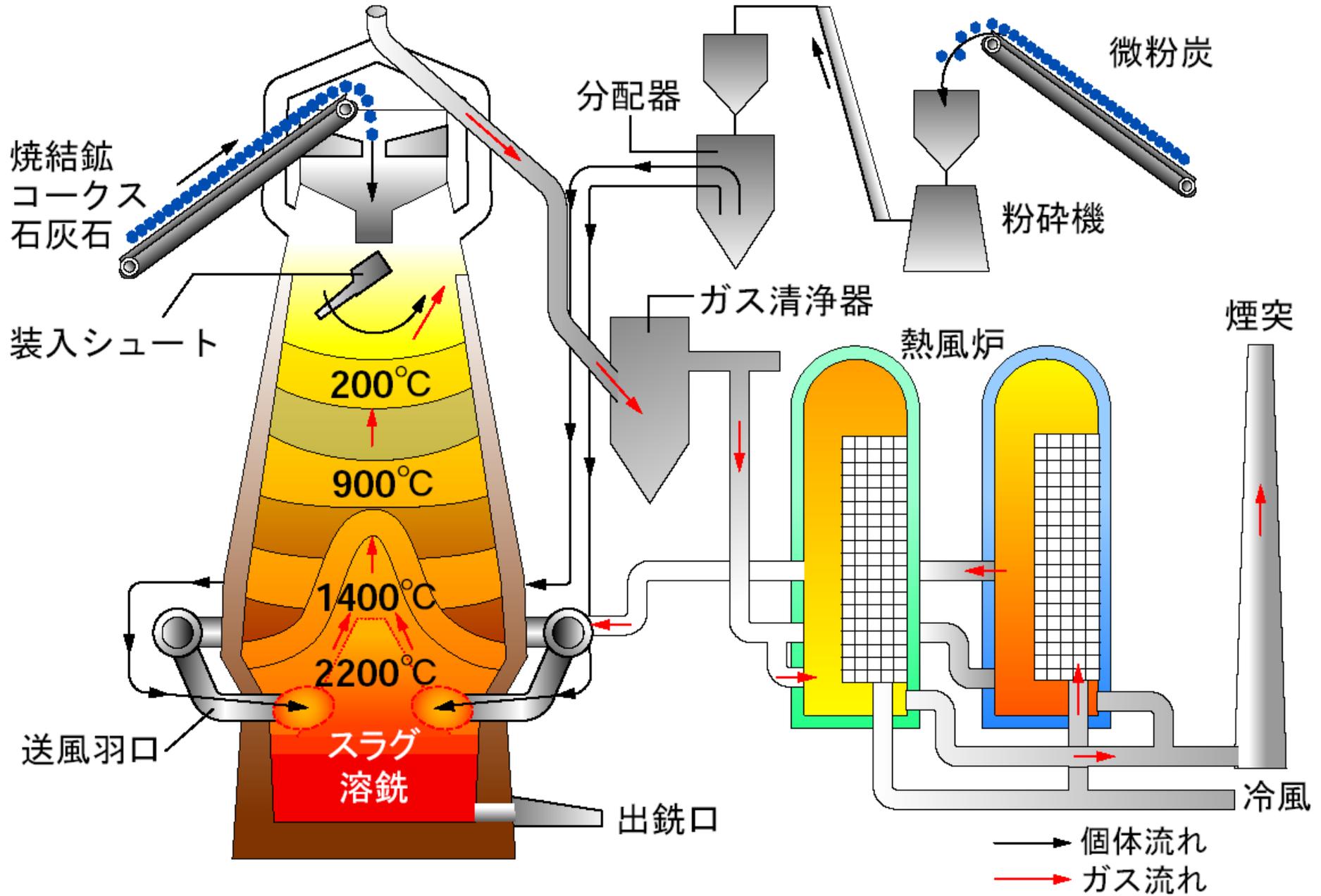
環境・プロセス研究開発センター 製鉄研究開発部

廣川 雄一*2, 上原 均*2

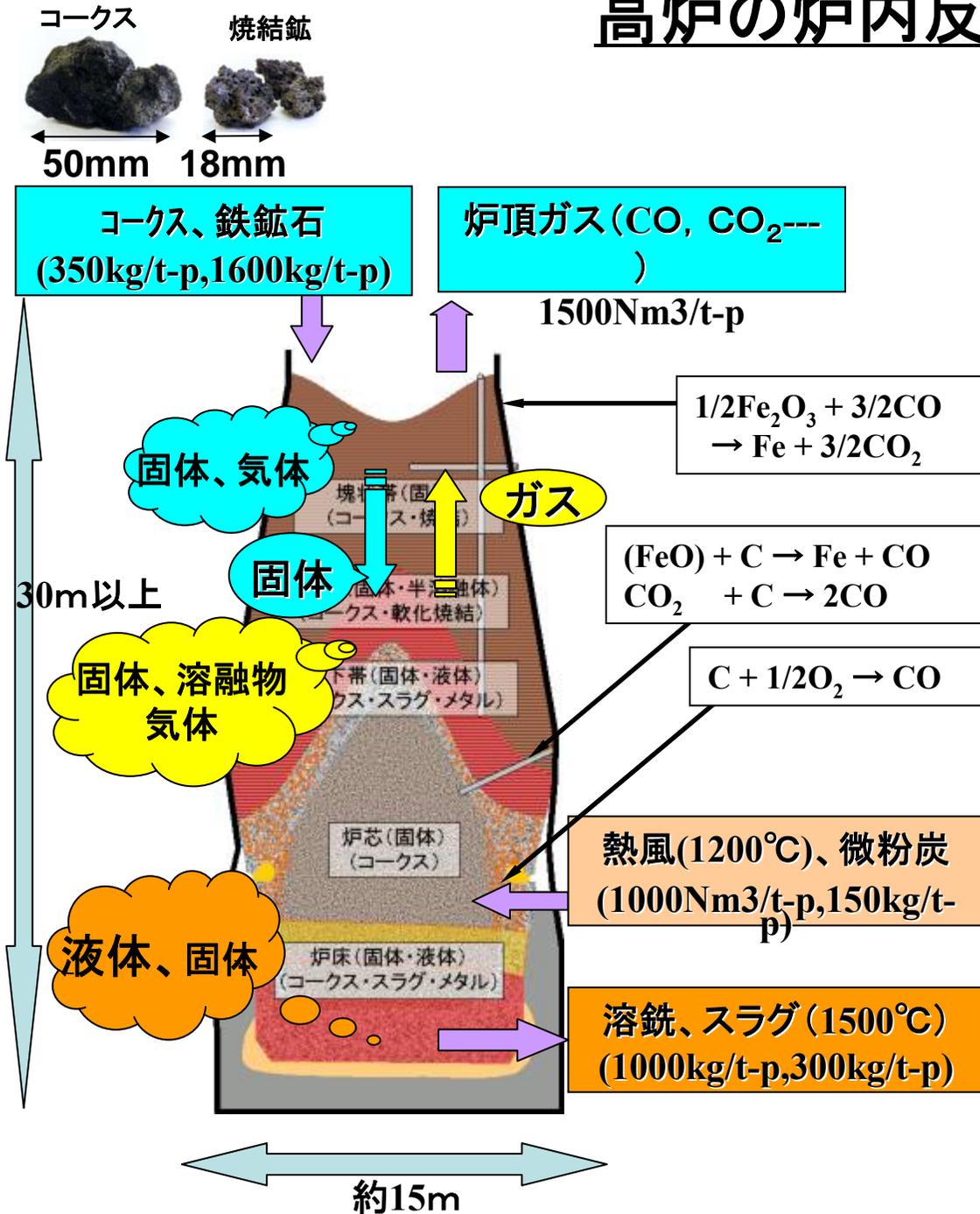
*2独立行政法人海洋研究開発機構 計算システム計画・運用部

利用施設名 : 独立行政法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

高炉設備の概要

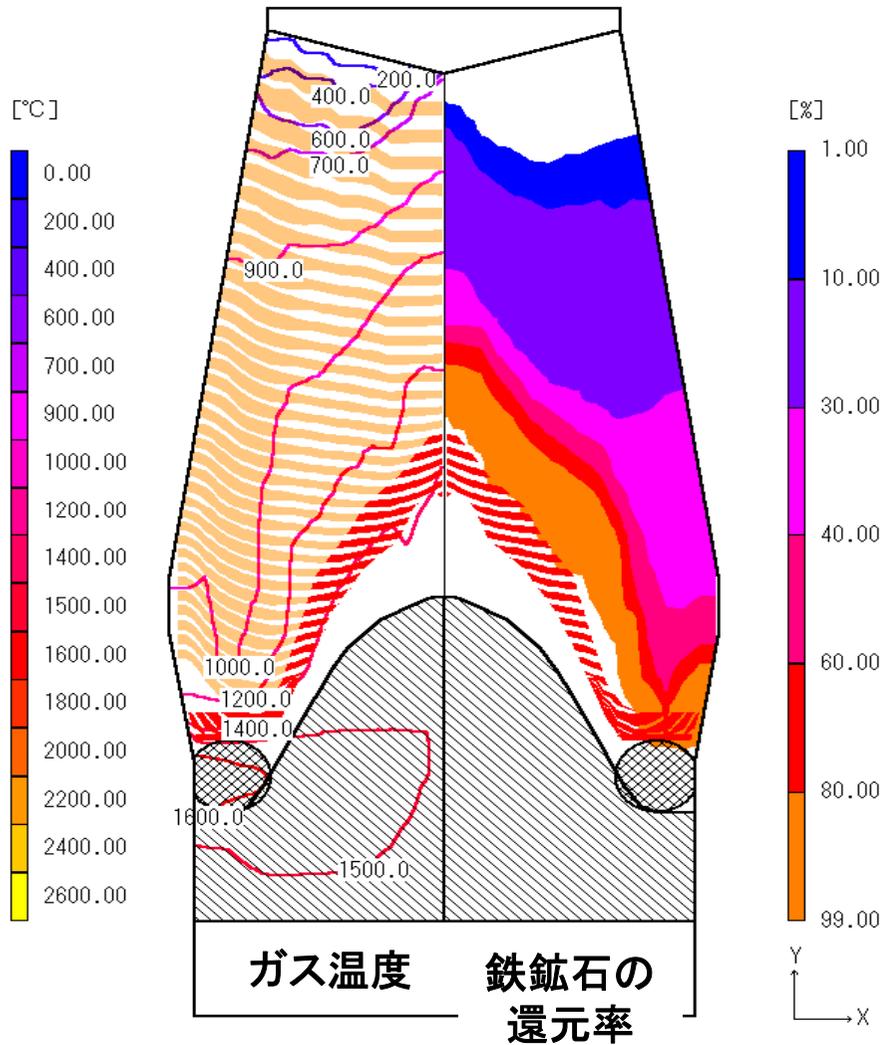


高炉の炉内反応



- ・巨大な徳利型の空洞の高圧炉 (高さ30m以上、直径15m、内容積3000~5000m³)
- ・日に1万トンの鉄を製造(車約1万台分。車1台分の鉄を作るのに、2台分の原燃料と、家一件分の容積のガスを要する。)
- ・炉内には、車7000台分の原燃料が常に詰まっている。
- ・ガスと、固体間で熱交換・還元を行う向流移動層
- ・固体の移動(荷下がり)、ガスの移動(通気)、熱レベルの維持、がポイント
- ・日本の産業活動で発生するCO₂ガスの約1割が高炉分野で発生。

連続体前提による高炉シミュレーションモデル



<計算前提>

- ・4相(固体、気体、液体、粉体)を考慮
- ・還元反応、酸化反応、燃焼反応
- ・ガス流れ、固体流れ、液流れ、熱移動
- ・物質収支、熱収支、運動量保存
- ・温度領域は常温～2000°C以上
- ・3～4気圧程度の高圧反応容器

地球シミュレータを用いた研究の目的

➤ 高炉内現象は複雑

- ・固、気、液、粉の四相、非定常、非線形、伝熱、反応(数十種)

固体流れが従来連続体として扱われてきた

⇒固体の離散的な挙動に由来する非定常的な現象が解明できない

⇒DEMにより固体を離散的に扱うことにより非定常現象の解明が可能

➤ 高炉内の塊の粒子(コークス、焼結鉱)は1億個以上

- ・通常のパソコンでは計算不可能

⇒地球シミュレータを活用

➤ 非定常現象解明による高炉操業の改善と排出CO₂の削減

- ・製鉄業におけるCO₂発生量; 日本全体の12%程度

- ・還元材として炭素源を使用する高炉からのCO₂発生量はかなりの割合を占める

⇒ 高炉の操業効率の改善や安定化により炭素系還元材の低減が可能。

研究の概要

目的 ; 高炉において鉄鉱石を還元するためのコークス等の還元材の低減を図り、CO₂排出ミニマムを目指した操業条件・高炉設備に関してブレークスルーする技術像を試案し、検討することである。

① 高炉内のガスと固体粒子群(コークスと鉄鉱石)及び粉の運動をモデル化

- ・粒子 ; DEM(Distinct Element Method)
- ・気流 ; Navier-StokesのFDM(Finite Difference Method)
- ・粉 ; SPH法(Smoothed Particle Hydrodynamics法)

⇒相互に連成

融着帯(鉄鉱石の溶融により生成)⇒粒子間付着力によってモデル化

② 上記シミュレータの、計算結果の有効性の検証、操業条件や高炉設備に関する改善策、新技術の探索などの試行研究を行う。

③ さらに炭素系還元材の低減すなわちCO₂排出低減のための大きな障害である高炉内の不安定現象が、どのようなガス及び固体粒子群の条件下で形成されるのか等の検討を行い、高効率安定操業によるCO₂の低減のシーズを提言する。

高炉内のコークス、鉄鉱石の挙動および気流の計算方法

コークス粒子の運動の基礎式は、直交座標系における並進および回転に関するLagrangian型運動方程式で、それぞれ次式で表される。

$$m_p \frac{d(U_{pi})}{dT} = \sum_j (F_j + D_j)_i + F_{Di} + F_{Li} + F_{gi} \quad (1)$$

$$I_p \frac{d(\Omega_{pi})}{dT} = \sum_j (M_j + M_{Dj})_i + M_{Fi} \quad (2)$$

Eqs.(1),(2)の右辺第1項は、それぞれ着目粒子と直接接触する全粒子から作用する接触力および接触力モーメントの総和で、DEMを用いて計算した。Eq.(1)の F_{Di} , F_{Li} はそれぞれ粒子に作用する抗力と揚力で、その反作用力が気流に作用する St および St_L で下記の気流のところで示しているEqs.(7)-(9)で求まる。これらの項で粒子の運動と気流の運動がリンクされ、それらが連成された運動が求まる。

Eq.(1)の F_{gi} は粒子に作用する重力、Eq.(2)の M_{Fi} は粒子が流体から受ける摩擦トルクである。なお本計算では流体による摩擦トルク M_{Fi} をTakagiの式に基づいて計算した。

気流の運動の基礎式は、空隙率及び粒子との相互作用を考慮した無次元化された円柱座標系のNavier-Stokes式と連続の式で、それぞれ次式で表される。

$$\begin{aligned}
 (\text{r方向}) \quad & \varepsilon \frac{\partial u_r}{\partial t} + \varepsilon u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} + \varepsilon u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \varepsilon \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \varepsilon \frac{u_\theta^2}{r} \\
 & = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \varepsilon \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] - St_r - St_{Lr}
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 (\theta \text{方向}) \quad & \varepsilon \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + \varepsilon u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \varepsilon u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \varepsilon \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \varepsilon \frac{u_r u_\theta}{r} \\
 & = -\varepsilon \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{Re} \varepsilon \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{u_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] - St_\theta - St_{L\theta}
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 (\text{z方向}) \quad & \varepsilon \frac{\partial u_z}{\partial t} + \varepsilon u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} + \varepsilon u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \varepsilon \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \\
 & = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \varepsilon \left[\frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} \right] - St_z - St_{Lz}
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$(\text{連続の式}) \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \varepsilon \frac{u_r}{r} + \varepsilon \frac{\partial u_z}{\partial z} + \varepsilon \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \varepsilon \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 \tag{6}$$

式中の St および St_L はそれぞれ気流・粒子間で作用する抗力と揚力で気流と粒子の相互干渉項を表わす。前述したようにこれらがEq.(1)の F_D と F_L に相当し、気流と粒子が連成された運動が求まる。

気流・粒子間で作用する抗力による相互干渉項には、粒子周りレイノルズ数が1000以下の場合にはShiller and Naumannの実験式に基づく次式を用い、

$$St = \frac{3\pi\mu D_p ND(1 + 0.15Re_p^{0.687})}{U_0\rho} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \xi(\varepsilon) \quad (0 \leq Re_p \leq 1000) \quad (7)$$

粒子周りレイノルズ数が1000より大きい場合にはNewton域の抗力係数に基づく次式を用いた。

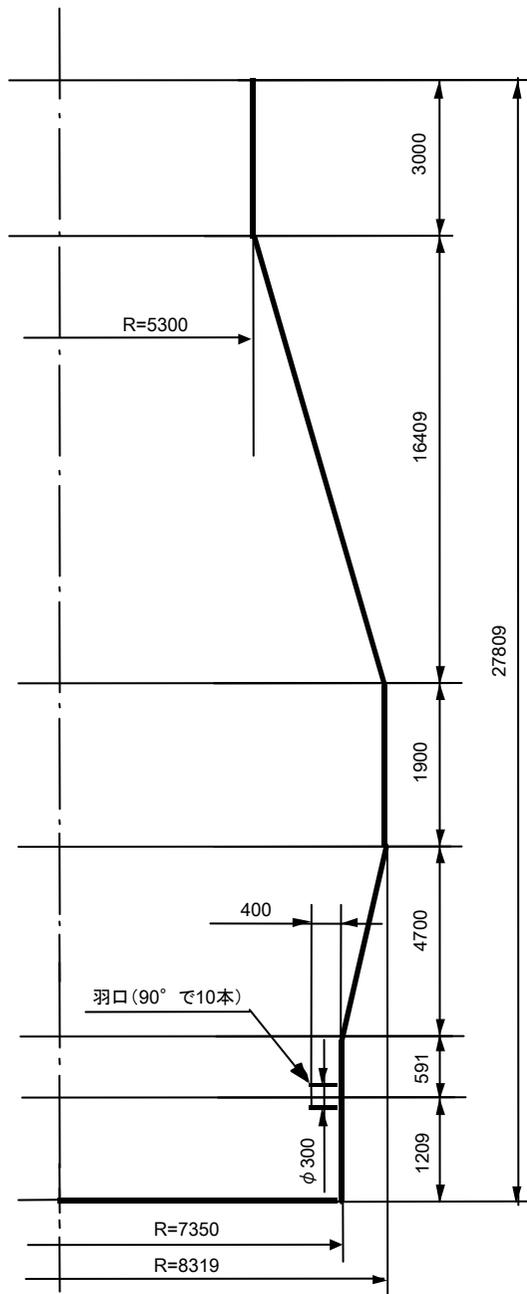
$$St = 0.055\pi D_p^2 ND(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)^2 \xi(\varepsilon) \quad (1000 < Re_p) \quad (8)$$

気流・粒子間で作用する揚力による相互干渉項には揚力係数に基づく次式を用いた。

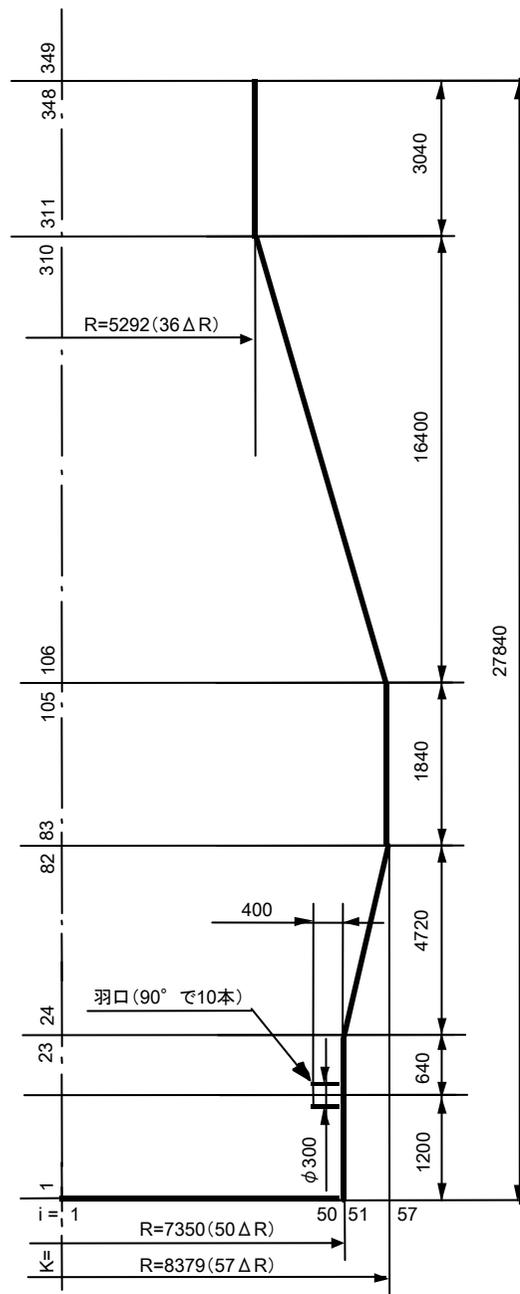
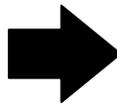
$$St_L = \frac{\pi}{16} \left(\frac{C_L}{\Omega^*} \right) D_p^3 N(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \times \left(\frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{u} - \boldsymbol{\omega}_p \right) \xi_L(\varepsilon) \quad (9)$$

本計算ではKurose and Komorisが数値計算によって求めた揚力係数のデータを著者らが数式化して用いた。

数値計算ではNavier-Stokes式のダイバージェンスを取って得られる圧力に関するポアソンの式を緩和法を用いて計算した。



実炉寸法



計算領域寸法

気流の計算セルサイズ

$$\Delta r = 147 \text{ mm}$$

$$\Delta \theta = 1.122 \times 10^{-2} \text{ rad}$$

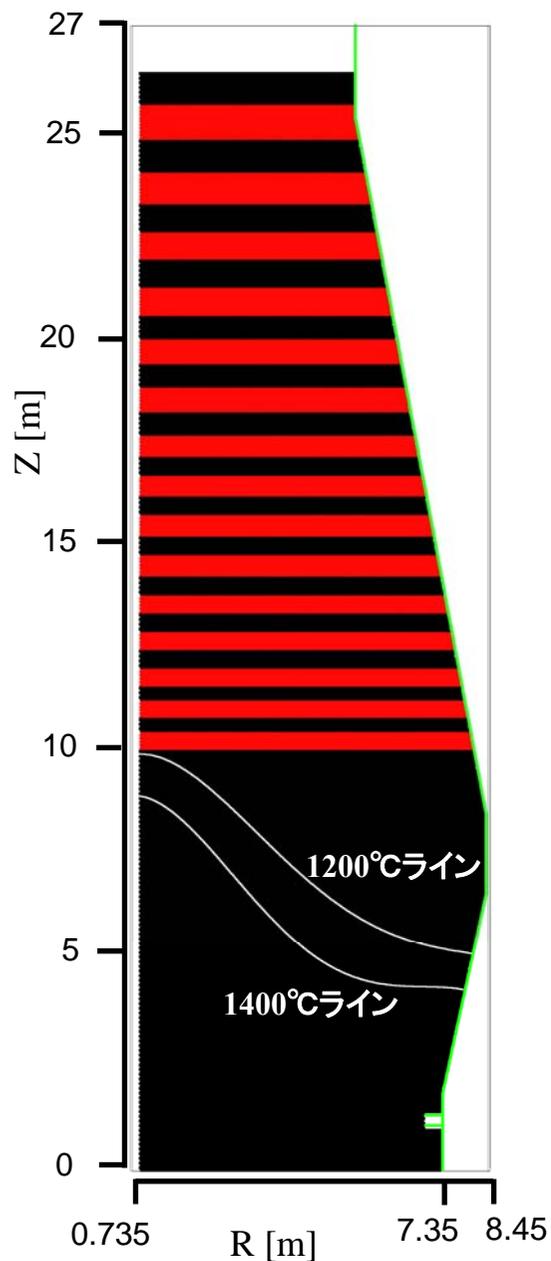
$$\Delta z = 80 \text{ mm}$$

気流の計算セル数

r 方向: $i = 57$ (最大)

θ 方向: $j = 140$ ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$)

z 方向: $k = 348$ (炉頂部まで)

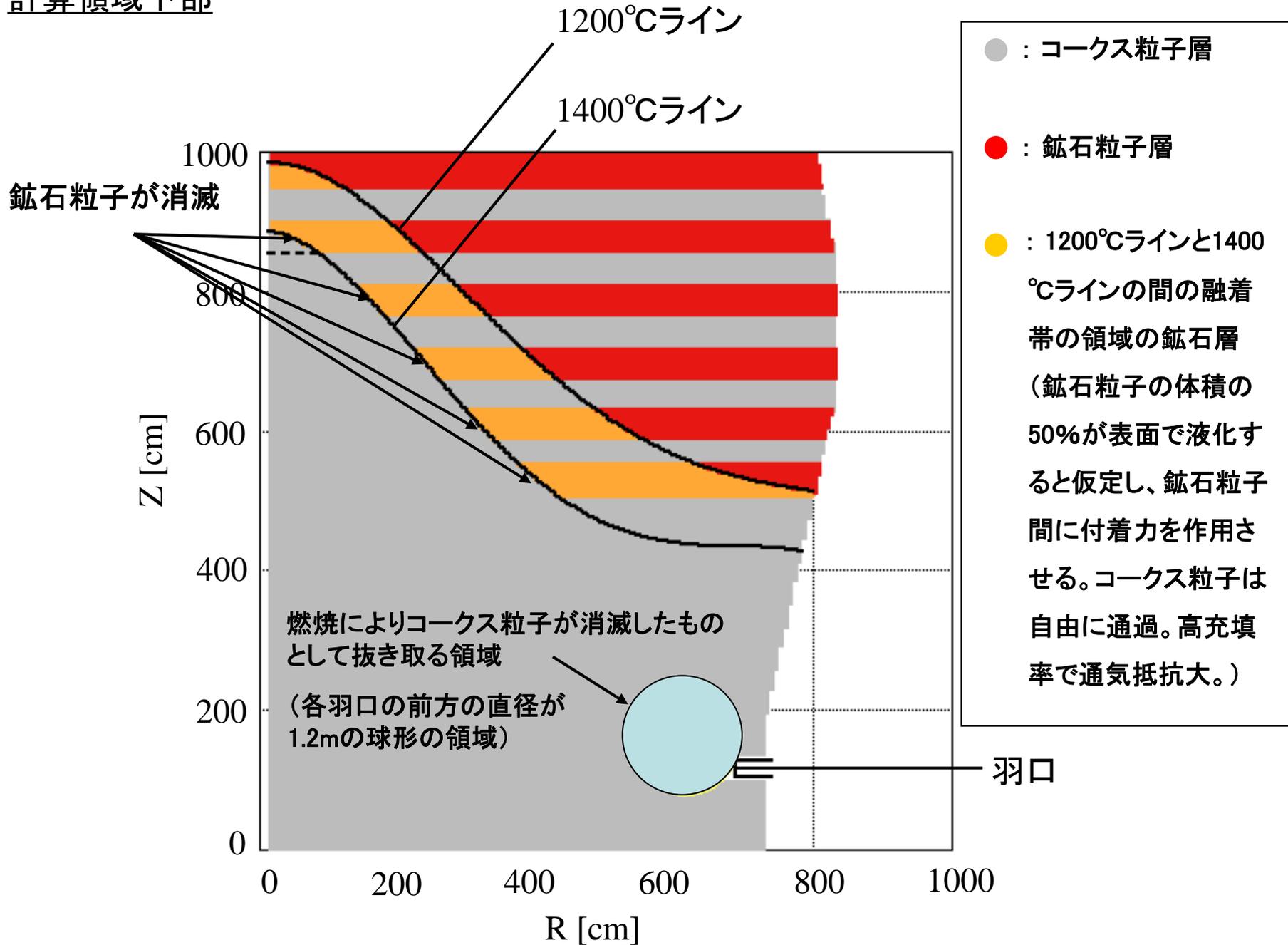


計算開始時における粒子の充填状態
(黒:コークス層, 赤:鉱石層)

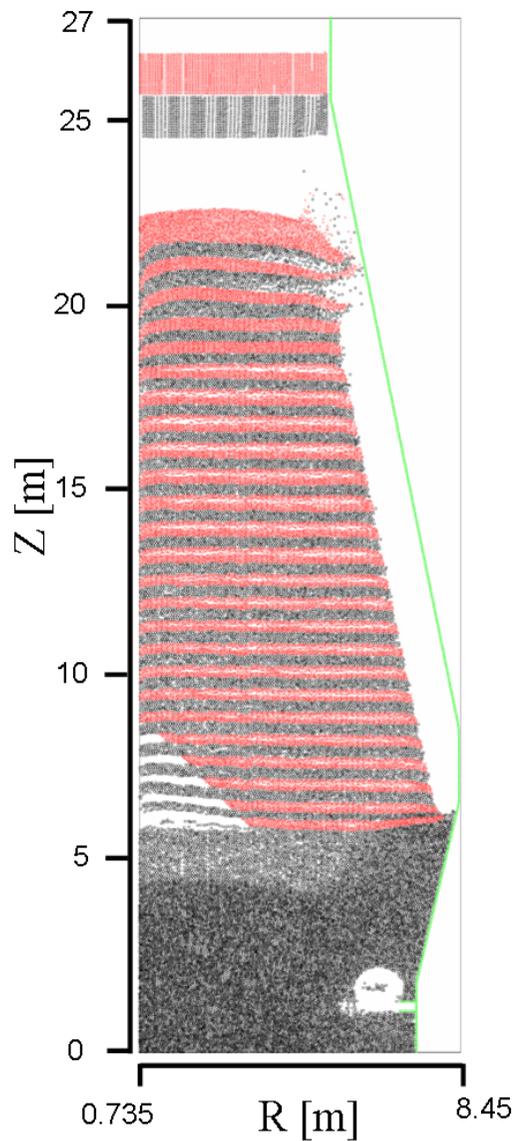
計算条件

計算領域 (炉体) 寸法	半径: $R_0 = 7,350\text{mm}$ (羽口部), $R_f = 8,379\text{mm}$ (ペリ一部) 円周方向: 90° , 高さ: $H = 27,840\text{mm}$ (炉頂まで)
計算時間ステップ	$\Delta t = 3.0 \times 10^{-5} \text{ s} \sim 2.5 \times 10^{-4} \text{ s}$
気流計算セル数 (内点)	57 (r 方向) \times 140 (θ 方向) \times 348 (z 方向)
気流計算セル幅 (有次元値)	$\Delta r = 147.0\text{mm}$, $\Delta \theta = 1.122 \times 10^{-2} \text{ rad}$, $\Delta z = 80.0\text{mm}$
羽口(ノズル)気流噴出速度	$U_0 = 250 \text{ m/s} \sim 340 \text{ m/s}$
計算粒子径	炉壁および羽口を構成する粒子: 50.0 mm (均一) コークス粒子: 平均径 57 mm (最小径 39.5 mm ~ 最大径 67.5 mm) 鉱石粒子: 平均径 45 mm (最小径 41.0 mm ~ 最大径 49.0 mm) コークス粒子と鉱石粒子は粒径分布と粒度偏析を考慮
計算粒子数	炉壁および羽口を構成する固定粒子の数: 約 23.5 万個
	重力沈降開始時の初期配置粒子の数: コークス粒子: 約 519.0 万個 鉱石粒子: 約 398.7 万個
	荷下り時に炉頂部から1チャージ毎に 供給する粒子数: コークス粒子: 約 7.7 万個 鉱石粒子: 約 20.8 万個
	最大計算粒子数: 合計 1250 万個
計算粒子の見掛け密度	コークス粒子: 1050 kg/m^3 , 鉱石粒子: 3260 kg/m^3
計算粒子のその他の物性	縦弾性係数: $E = 1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, ポアソン比: $\nu = 0.25$, 摩擦係数 $\mu = 0.45$

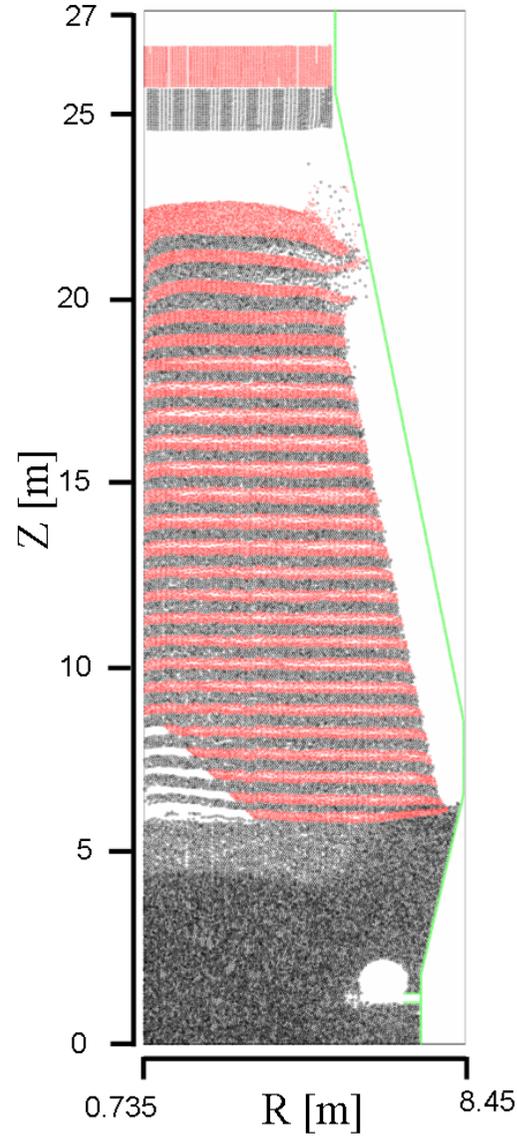
計算領域下部



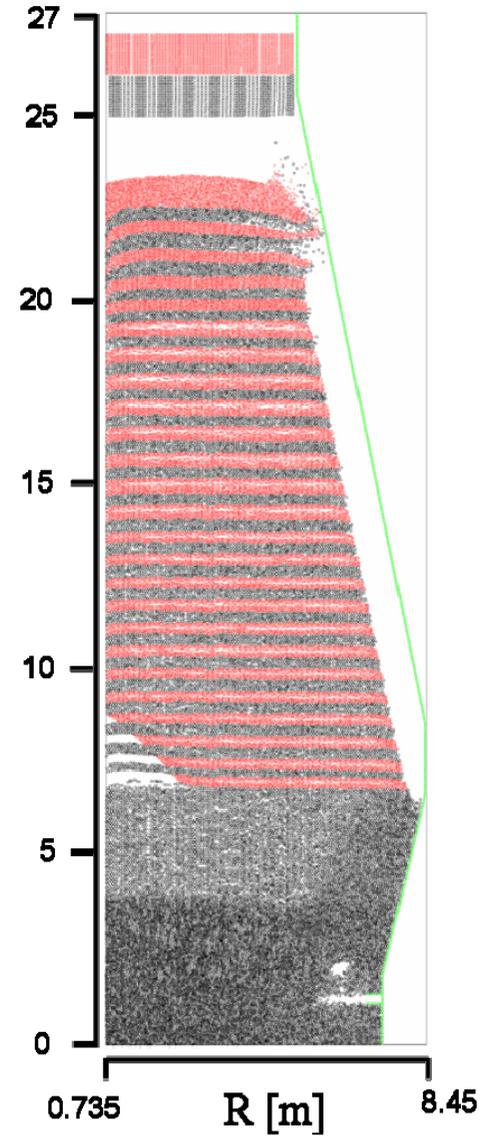
実高炉と同一寸法の高炉における $T=1.04s$ または $T=0.93s$ の粒子位置図



羽口1箇所当りコークス粒子を
9個抜き取り/サイクル ($T=1.04s$)



羽口1箇所当りコークス粒子を
13個抜き取り/サイクル ($T=1.04s$)

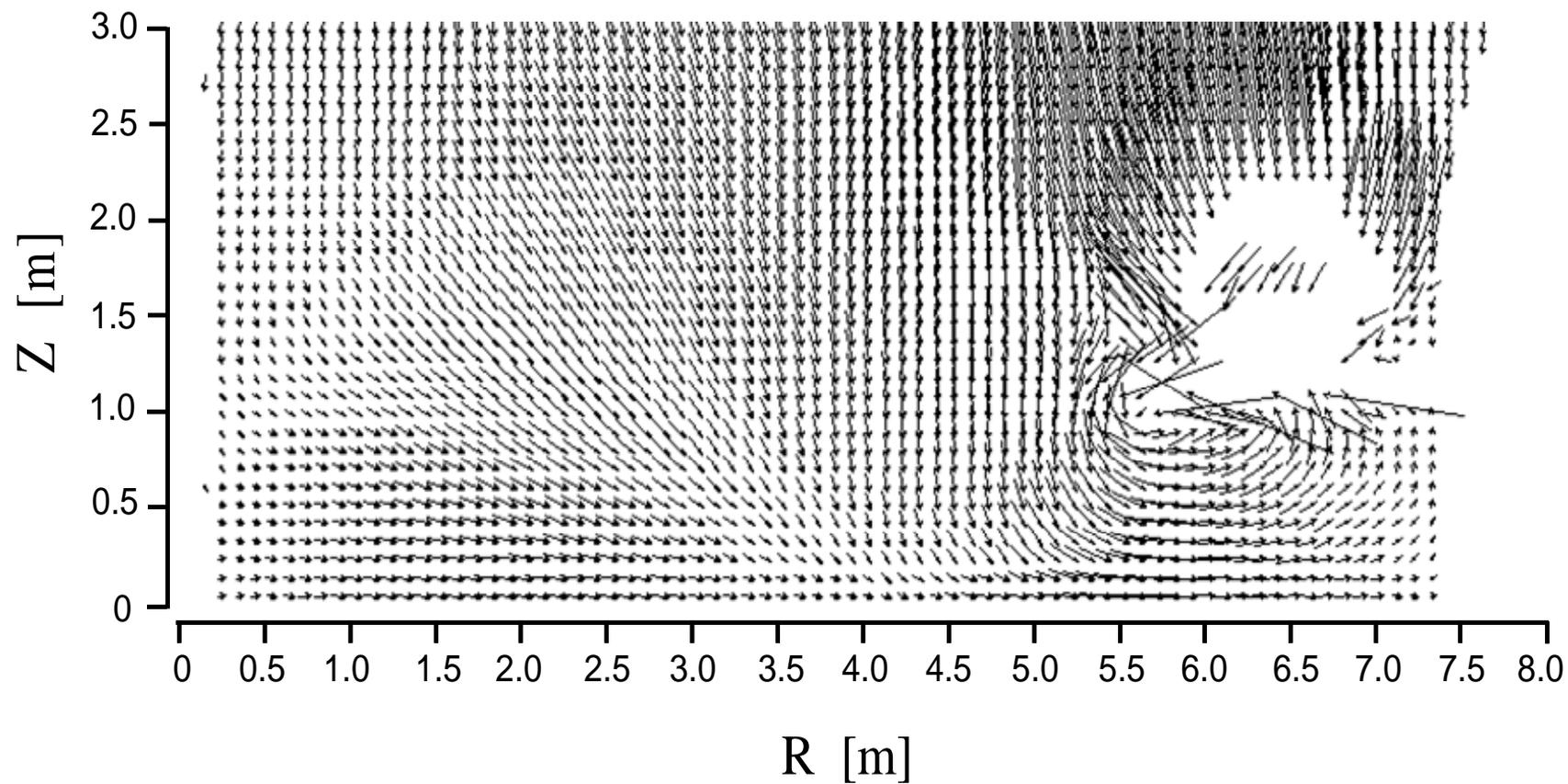


羽口1箇所当りコークス粒子を
3個抜き取り/サイクル ($T=0.93s$)

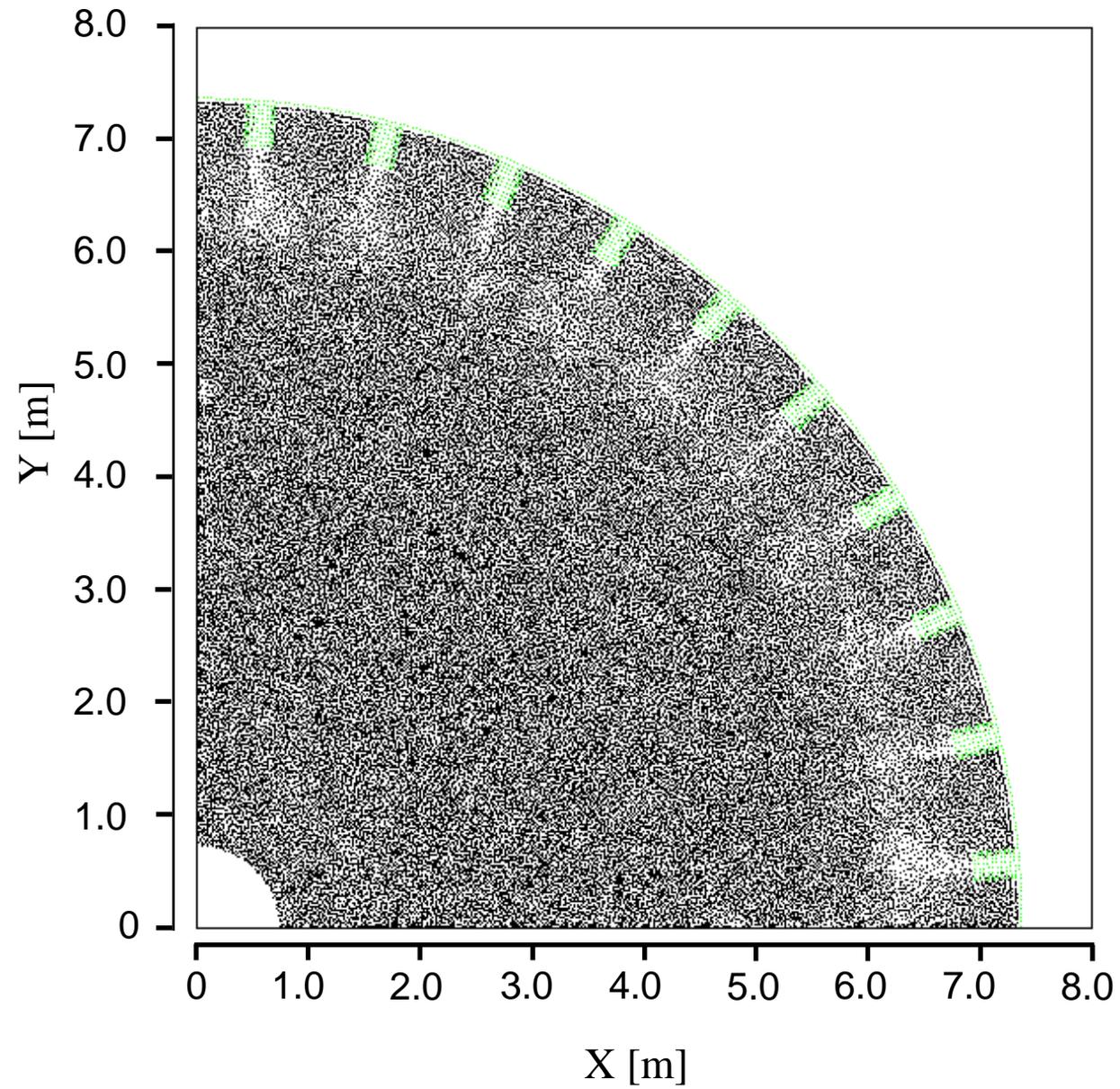
実高炉と同一寸法の高炉における粒子速度ベクトル図

(羽口近傍の鉛直断面図, 9個抜き取り/サイクル、 $T=1.04\text{s}$)

—————→ = 4.0 m/s

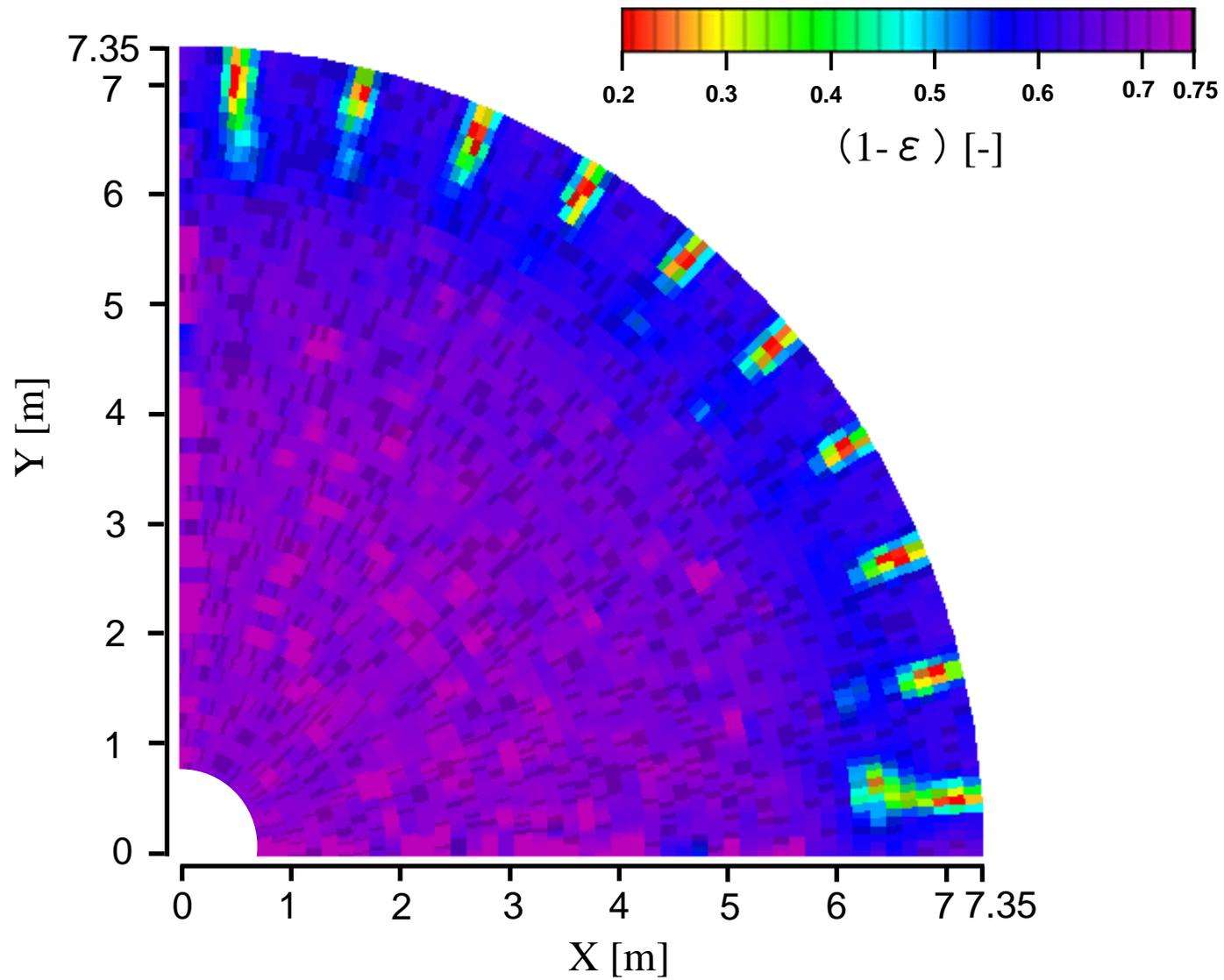


瞬時粒子位置図(R- θ 断面)



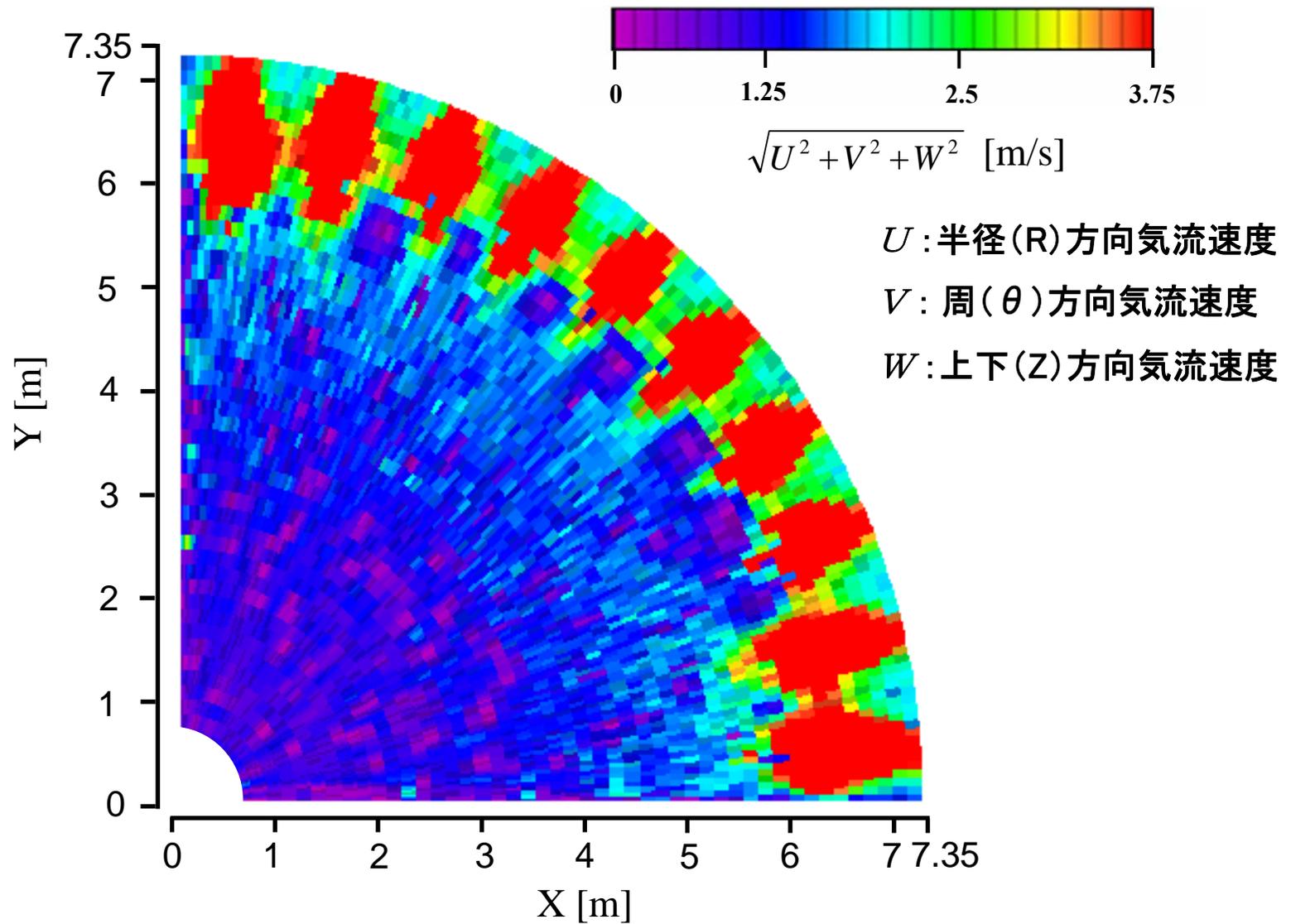
T=1.45s , Z=1.12~1.20m, 毎サイクル9個抜き取り

瞬時充填率分布図(R- θ 断面図) コークス・鉱石の区別なし



T=1.45s , Z=1.12~1.20m, 毎サイクル9個抜き取り

瞬時気流速度 ($\sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$) 分布図 (R-Z断面図)



T=1.45s , Z=1.12~1.20m, 毎サイクル9個抜き取り

結論

1. 実高炉におけるコークス・鉄鉱石と気流の連成計算のプログラムの地球シミュレータへの最適化を行った。
2. 実高炉におけるDEMに基づく炉内の固体流れの計算を可能とした。
3. 実高炉において、融着帯がコークス・気流の流れに与える影響を、仮想的な融着帯を想定することによって、解析可能とした。