

# CFD Analysis(電算流體力學 解析) 通 Cement

## 製造工程 分析 活用 事例 紹介

2002 年 7 月

雙龍洋灰 東海工場 工程管理 張斗熙

- 順序 -

1. 背景
2. 電算流體力學 概念
3. CFD system 制約事項
4. 當社 保有 CFD package(FLUENT) 紹介
5. CFD 活用事例
6. 結論

## 1. 背景

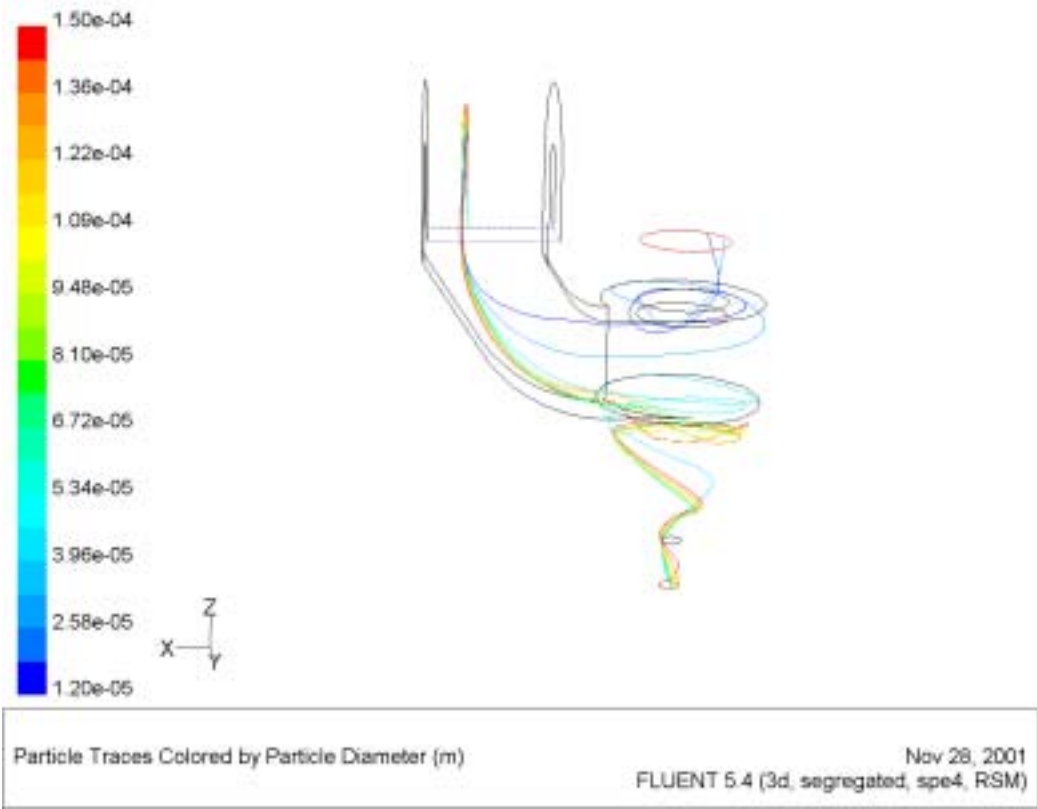
電算流體力學解析(Computational Fluid Dynamics analysis)方法 過去 computer hardware software 制約 因 航空機 等 一部 尖端高價 設備 工程 解析 利用  
最近 computer 技術發展 因 一般 製造 工程 解析 開發 利用  
. 最近 Cement 製造工程 性能 解析 設備 開發 實驗設備 費用 最小  
化, 實驗回數 減少 效率增加 等 理由 電算流體力學解析方法 利用 .  
本 稿 電算流體力學 解析 概念 對 說明 分野 活用事例中 cement  
製造工程 活用事例 紹介 .

## 2. 電算流體力學 概念

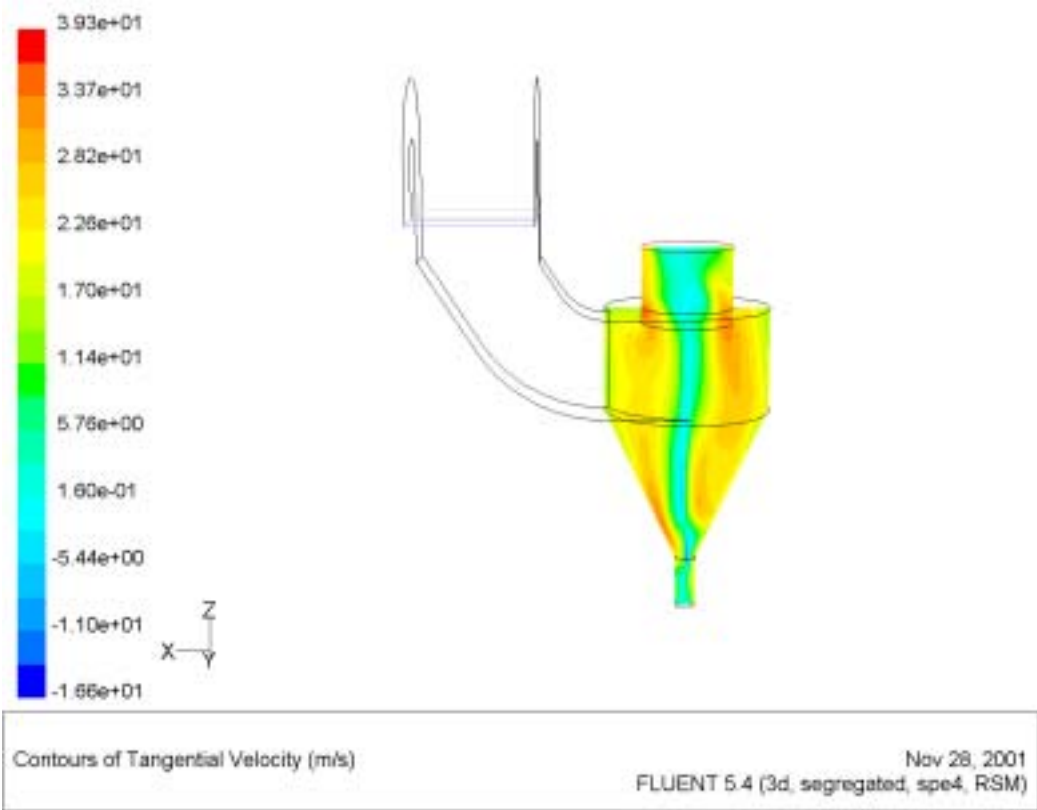
### 2-1. 電算流體力學(Computational Fluid Dynamics) ? <sup>1),2),3)</sup>

電算流體力學 定義 1,2 適用 例 表示 .

- 流體 : 流體 內 剪斷應力 作用 限 繼續  
變形 物質(液體, 氣體狀態 物質)
- 流體動力學(fluid dynamics):運動 流體粒子 相互力 作用  
流體 作用 運動 關係 流體 運動 解析 學文分野
- 電算流體力學(computational fluid dynamics) : Computer 利用, 數值計算 適用  
支配 方程式 近似解 流體運動 流動 關聯 現象 解析 學文.  
研究 System 裝置 電算 model 樹立 假想 模型(model)  
物理的 流體力學 適用 流體力學的 output 表示 . CFD 精巧 分析技法  
, 流動 熱, 物質(吸着 等), 相變化(結冰,沸騰), 化學反應(燃燒 ),  
機械的 移動(impeller 回轉 ) 等 移動現象 對 豫測 .
- 電算流體力學 利用 : Engineering Tool(Computer 利用 實驗, 設計, Trouble shooting)



1. Cyclone 内 粒子 Size 粒子 軌跡



2. Cyclone 内 tangential velocity 分布

## 2-2 電算流體力學 解析 效果 <sup>1),2),3)</sup>

電算流體力學 效果 Insight(內部觀察), Foresight(豫測) Efficiency(效率性)等

- Insight : 物理的 模型 裝置 system 境遇 CFD 解析  
 手段 通 system 內部 現象 . CFD  
 設計 裝置 system 理解 增進 可視化 手段 提供 .
- Foresight : CFD 條件(環境)下 發生 現象 豫測 “ 萬若  
 條件 ” 疑問 對 解答 提供 . 設計 裝置 性能  
 最適 結果 變數 變化 實驗 .  
 實際 現實 model 實驗 行 前 大部分 行 . CFD  
 通 設計 適正 狀態 早期 實施 .
- Efficiency : 早期 適正 設計 分析 通 設計 時間 短縮 . 時間  
 投資費が 節減 . 裝置 改善時 施行誤差 最小化 . CFD 設計  
 開發 cycle 短縮 .

效果 對 實質的 利益 表現

- 設計 初期 段階 實驗 時間 詳細 流動 解析可能
- Simulation 通 實驗回數 減少 Study 期間 短縮
- 實驗 Risk 減少 經費 節減 效果
- 現象 對 理論的 接近 可能
- 流動場, 壓力場, 溫度場, 粒子舉動 等 可視化

## 2-3 電算流體力學 Program 數值解析 技法 <sup>1),4)</sup>

電算流體力學 基本的 數值解析 技法 對 記述

1) 基本方程式(Laminar Flow, Turbulent flow 對 追加 技法 必要)

熱流體力學 基本方程式 過去 Navier-Stokes equation 完成 基本的  
物質, Energy, Momentum, Species 保存法則 根據

• Conservation of Mass

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m$$

• Conservation of Momentum

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

• Conservation of Energy

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j J_{j,i} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h$$

• Conservation of Species

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} (J_{i,i}) + S_i$$

2) CFD 使用 數值解析 技法

熱流體解析 方程式 analytic 一般解

Computer 數值解析的 技法

依 近似解 求 工程 解析 技法

有限差分法, 有限體積法, 有限要素法等

有限差分法(Finite Difference Method)

偏微分 方程式 形態 表現 支配 方程式

Taylor Series polynomial 形態 使用

近似化, 計算領域 離散化 切點

各 切點 方程式 適用 代數方

程式 構成 解 求 方法.

### 有限體積法(Finite Volume Method)

積分形 方程式 使用 ，計算領域 volume (計算 cell) ， 基本 volume  
積分形 保存 方程式 適用 偏微分 方程式 常微分 代數 方程式 變換  
解 求 。

### 有限要素法(Finite Element Method)

積分形 方程式 使用 ，計算領域 element 方程式 適用 解 求 。

構造力學，固體力學，振動等 分野 有用 數值解析 tool 使用 ，流體力學 分  
野 適用 始作 。

## 2-4 電算流體力學 Package 構成 <sup>3)</sup>

CFD package 構成 Preprocessor, Solver Postprocessor 3 가 sub-program  
構成 。

### 1) Preprocessor(前處理器)

假想 model 生成, 內部 流動 解析 爲 Grid(Mesh) 生成 等 隨行 ， boundary  
condition initial condition 附與 ， physical property 設定 等 Solving 爲 豫備作業  
(Matrix 構成) 隨行 。

### 2) Solver

設定 model 對 熱 流體 解析 方程式 解 求 爲 反復計算 隨行 。

(Matrix solving)

### 3) Postprocessor(後處理器)

Solver 計算 加工 ，流動場 可視化 data processing

### 3. CFD System 制約事項

商業用 CFD software 汎用性 適用 model 多樣 model 有  
用 output 期待 限界 가 .  
- 各 數值解析 model 適用範圍 制限條件 存在 , 境界條件 初期條  
件 附與 境遇 制限的 各別 注意 要  
- CFD Simulation 實驗 恒常 相互 補完的  
- 物理的 Data 限界性  
- 粉體 特 dense phase 對 解析  
- 現在 Hardware 上 許容限界(convergence time, 格子數) : 複雜 形狀  
- Good Engineer 代替 (性能 對 項目選定 process 가 重要)

必要 . 限界 克復 爲 物理現象 正確 理解 , 正確 數值解析 model 選定  
가 制約事項 因 Modeling 困難 豫測  
가 假定條件 誤差가 가 豫測 數值가 改善 始發點  
意味가 .

### 4. 當社 保有 CFD package(FLUENT) 紹介

- 現 保有 CFD Program
  - 現在 保有 software FVM(有限體積法) 使用 FLUENT(美, FLUENT 社) 保有
  - FLUENT 汎用性 , 經濟的 Program 認定
- FLUENT
  - 美國 Fluent 社 汎用 CFD software
  - Numerical method : Finite Volume Method
  - 適用範圍 : Subsonic, transonic, supersonic & hypersonic flows  
Laminar, transitional and turbulent flows
  - Physical model : Heat transfer, chemical reaction, multiphase flows

## 5. CFD 活用事例

### 5-1. Fluent 基本 modelling 能力 適用分野 <sup>4)</sup>

#### <Modeling Capabilities>

- Flows in 2D or 3D geometry(structured or unstructured-adaptive grids)
- Incompressible or compressible flows
- Steady-state or transient analysis
- Inviscid, laminar, and turbulent flows
- Newtonian or non-Newtonian flow
- Convective heat transfer, including natural or forced convection
- Coupled conduction/convective heat transfer
- Inertial (stationary) or non-inertial (rotating) reference frame models
- Multiple moving reference frames, including sliding mesh interfaces and mixing planes for rotor/stator interaction modeling
- Chemical species mixing and reaction, including combustion sub-models and surface deposition reaction models, chemical vapor deposition(CVD)
- Nox formation and soot formation in combustion systems
- Arbitrary volumetric sources of heat, mass, momentum, turbulence, and chemical species
- Lagrangian trajectory calculations for a dispersed phase of particles /droplets/bubbles, including coupling with the continuous phase
- Flow through porous media
- One-dimensional fan/heat-exchanger performance models
- Two-phase flows, including cavitations
- Free-surface flows with complex surface shapes

#### <Applications>

- Process and process equipment applications
- Power generation and oil/gas and environmental applications
- Aerospace and turbo-machinery applications
- Automobile applications
- Heat exchanger applications
- Electronics/HVAC/appliances
- Materials processing applications
- Architectural design and fire research



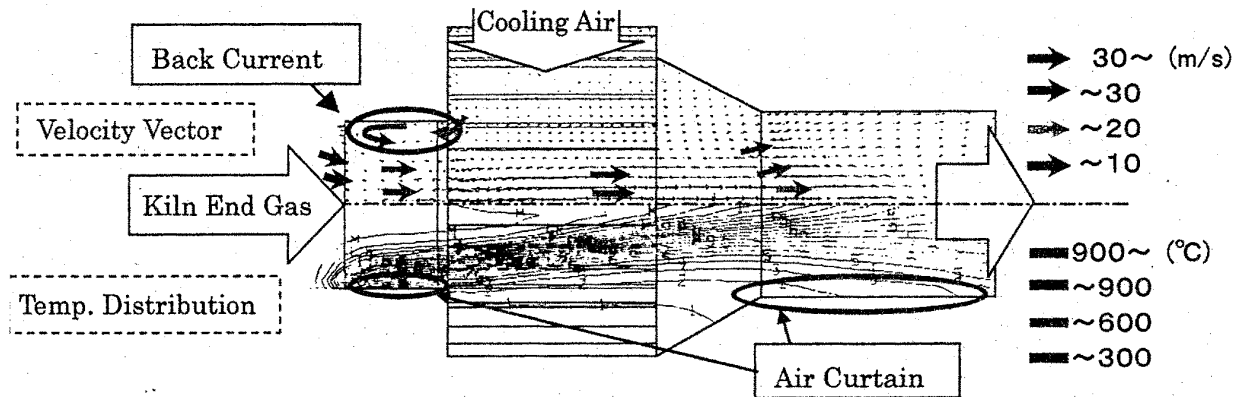
## 5-2. Cement 製造工程

## 活用 分野

工程(設備)	應 用 分 野	適用 難易度
空氣式 輸送 裝置 集塵機	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 氣流 分析 通 粉體 積粉 改善</li> <li>- System 壓損 減少 方案 提示</li> <li>- 粒子 軌跡 追跡 通 磨耗部 改善</li> <li>- 均一 分散 通 集塵效率 改善</li> <li>- 現場 trouble 發生 高級化 對策 方案 提示</li> </ul>	容易
Kiln	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 燃料 特性 Flame 變化(溫度分布, CO, NOx, Flame 變化 等) 推定</li> <li>- Burner 特性 運轉條件 Flame 變化 推定</li> <li>- 原料 燃料 品位 脫炭酸率, 熱交換量, 內部 物質 把握</li> <li>- 其他 現場 trouble 發生 高級化 對策 方案 提示</li> </ul>	適用 期間 努力 所要
Cooler	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 氣流 分析 通 2,3 次空氣 溫度 增進 排氣 Gas 溫度 減少</li> <li>- 運轉條件 氣流解析 工程 安定化</li> <li>- 現場 trouble 發生 高級化 對策 方案 提示</li> </ul>	普通
豫熱室	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cyclone 性能改善 爲 改造 方案 提示(捕集效率,壓損)</li> <li>- 現場 trouble 發生(積粉 coating trouble) 對 對策 樹立</li> <li>- 氣流 分析 通 壓損 節減 方案 提示</li> <li>- 現場 trouble 發生 高級化 對策 方案 提示</li> </ul>	普通
粉級機	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 粉級效率 改善 爲 改善 方案 提示</li> <li>- 原料 空氣 供給方法 位置 改善</li> <li>- 分散板, rotor blade, guide vane 最適條件</li> <li>- 粒子 舉動 特性</li> <li>- 現場 trouble 發生 高級化 對策 方案 提示</li> </ul>	普通
燒爐	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 燒爐 效率(脫炭酸率, 燃燒效率, 均一分布 滯留時間 等) 向上 爲 改善 事項 提示</li> <li>- 新型 燒爐 開發時 適正 設計變數 選定 性能 推定 可能</li> </ul>	適用 期間 努力 所要

5-3. 海外 他社 Cement 製造工程 活用 事例

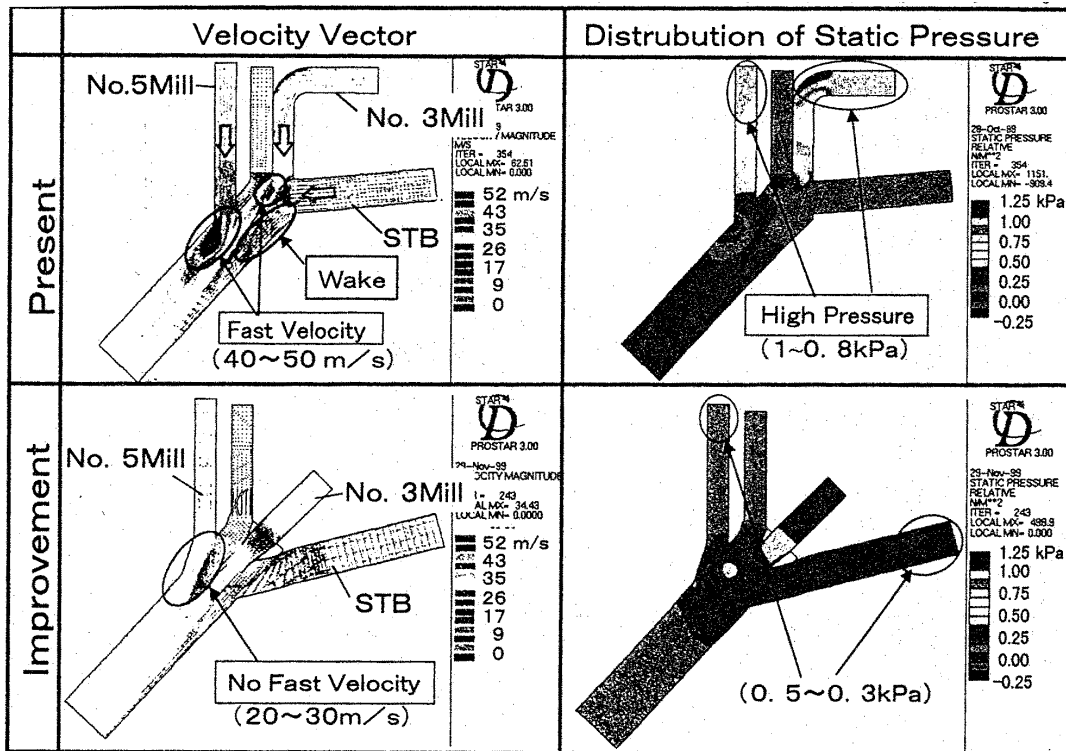
1) CI bypass system 用 Probe <sup>5)</sup>



3. 速度 vector 溫度 分布 <sup>5)</sup>

- 接線方向 流入 冷風空氣 依 旋回流が 形成 Probe 低溫 部が 形成 Probe が 保護 CI 融點以下 溫度 依 Coating 形成 防止

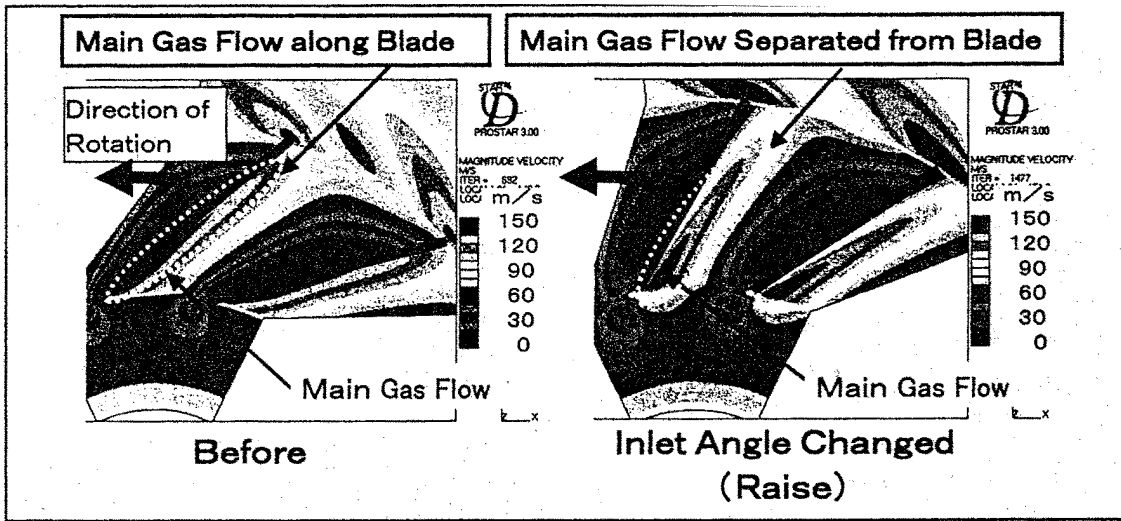
2) Kiln 排氣 gas Duct <sup>5)</sup>



4. Duct 速度 vector 靜壓 分布 <sup>5)</sup>

- Kiln 排氣 duct 靜壓分布 速度分布 現在 局部的 高流速部, 不均一 高 靜壓部 存在 問題點 把握 合流部 均一 速度分布, 靜壓分布が duct 合流位置 變更 duct 部 壓力損失 減少 (duct 老朽 交替時 工事 施行)

3) Fan blade coating 附着 防止 <sup>5)</sup>



5. Fan Rotor

速度 分布 <sup>5)</sup>

- Kiln IDF blade coating 附着  
依 微粒子が 濃度が  
間隔 灣曲形狀 改造

blade

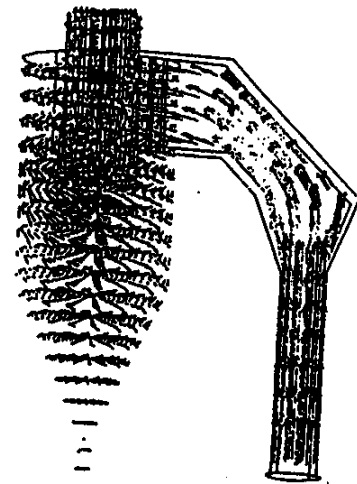
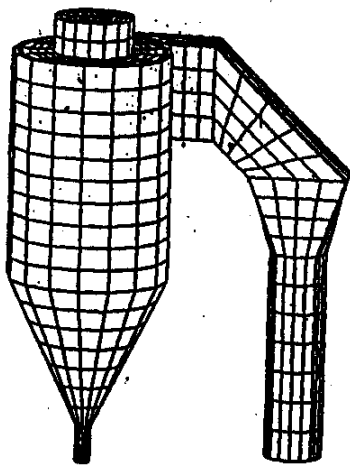
判斷

blade 入口角

流速

氣流  
blade

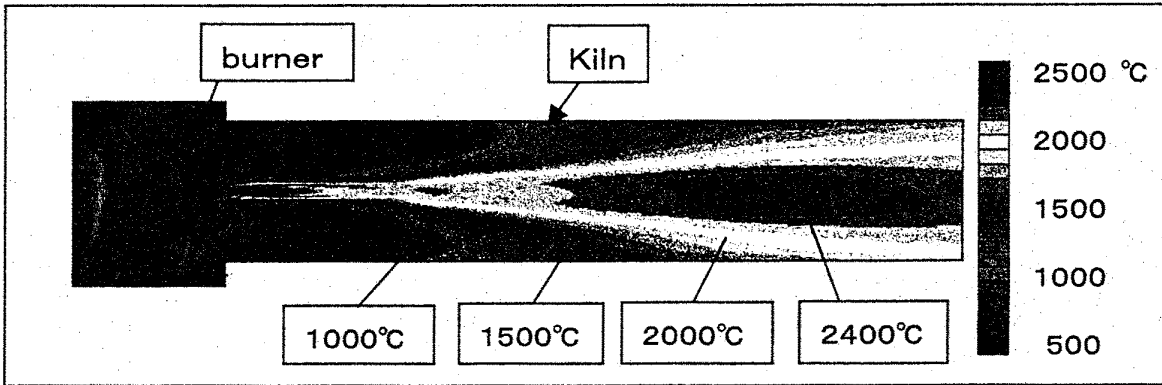
4) Cyclone 解析 <sup>7)</sup>



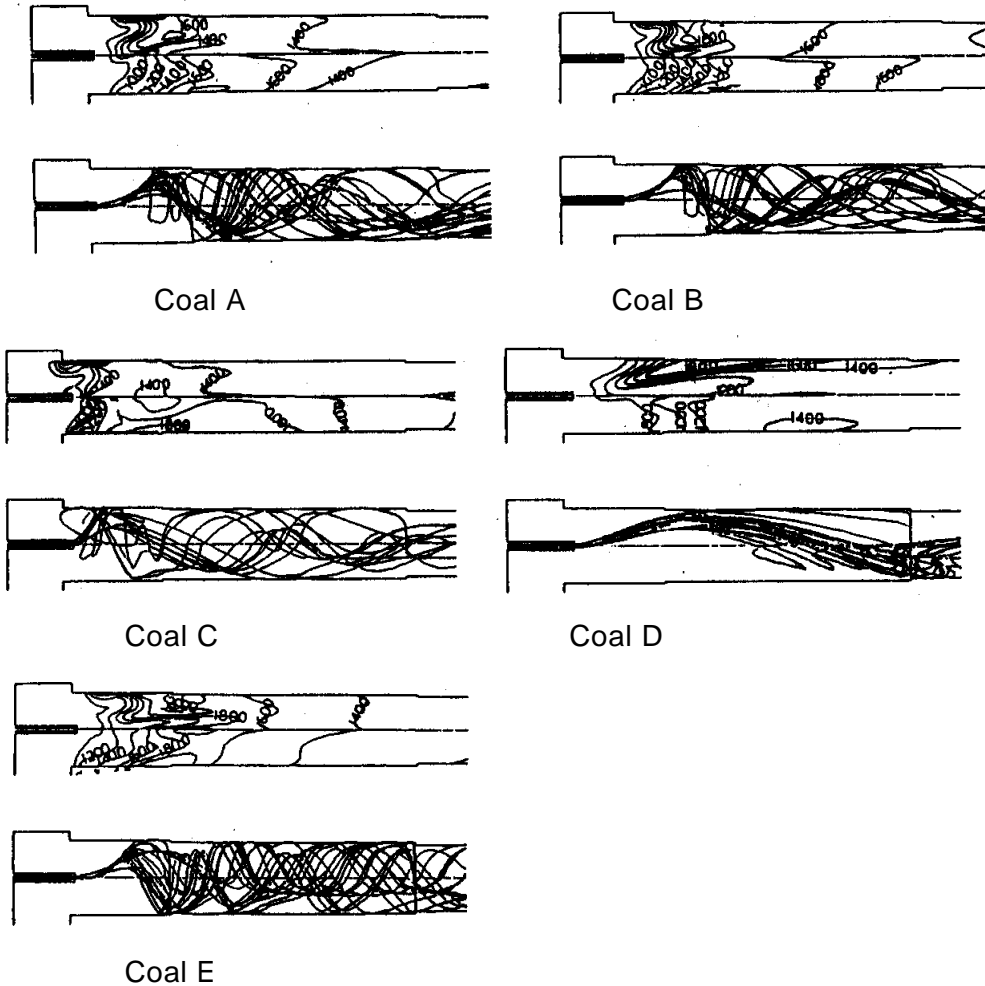
6. Cyclone physical grid 速度 vector <sup>7)</sup>

- 最適 cyclone 開發 爲 3次元 simulation model 開發 通 捕集效率 增加 壓力損失  
減少 效果 入口部 出口部 Duct 形狀 氣流 分析  
壓力損失 增加 coating 附着問題 解決

5) Kiln 燃燒解析 <sup>5)</sup>



7. Kiln 溫度分布 <sup>5)</sup>

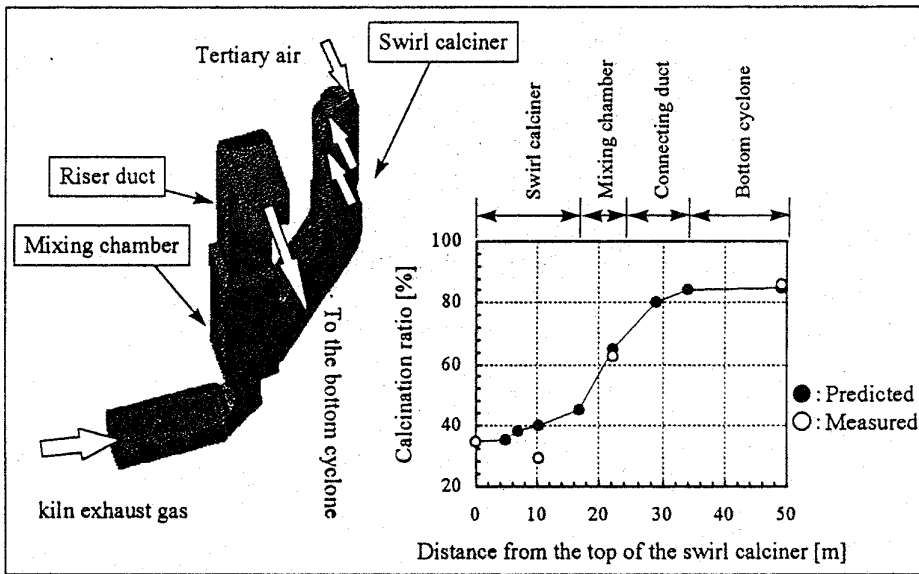


Coal E

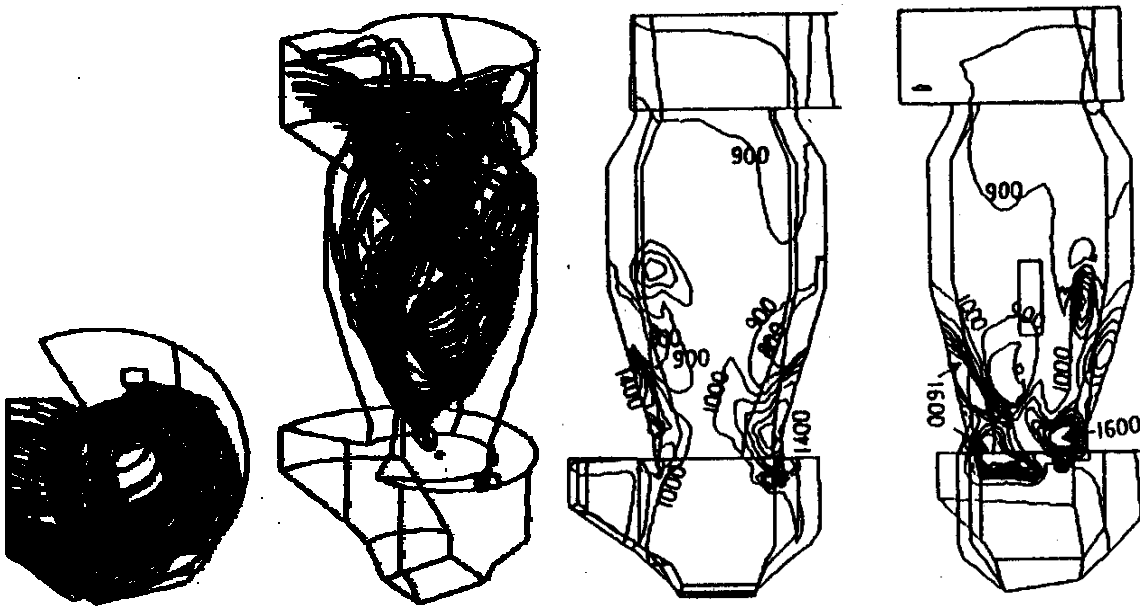
8. 各種類 Coal 對 溫度分布 粒子軌跡 <sup>8)</sup>

- 7 Kiln 內 火焰溫度分布 表示 8 kiln 內 Coal 燃燒時 coal 種類別 溫度分布 粒子軌跡追跡圖 表示 . 微粉炭 着火性(700 等溫曲線), Kiln 平均溫度 分布曲線, 未燃燒率, 火焰 (高溫維持時間), 原料 還元雰囲気 等 性能 評價 <sup>8)</sup> coal(低價炭包含) 評價, burner 評價, Kiln 運轉條件 評價 改善 應用 .

6) NSP 燒爐 解析 <sup>6),9)</sup>



9. RSP calciner 脫炭酸率 <sup>6)</sup>

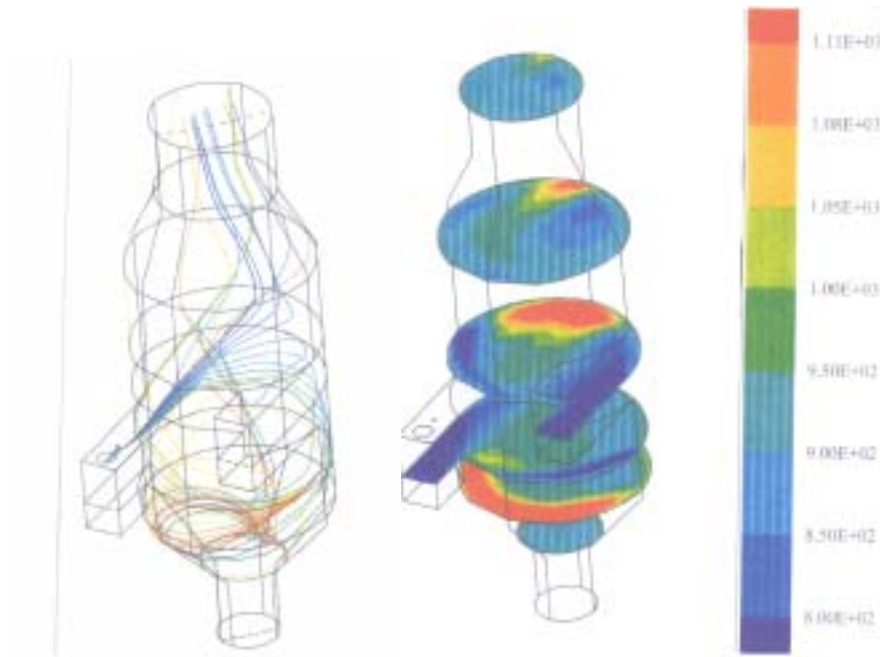


10. 燒爐 粒子軌跡 溫度分布 <sup>9)</sup>

- 9 RSP 燒爐 脫炭酸率 simulation 結果 實測值 表示.  
 10 CSF 燒爐 溫度分布 原料粒子 軌跡 追跡 結果 表示  
 燒爐 性能 脫炭酸率, 局部的高溫 均一 溫度分布 均一  
 原料濃度分布, coal 燃燒率 等 表現 改善 為 CFD system  
 利用 simulation 實施 .

5-4. 當社 活用 事例

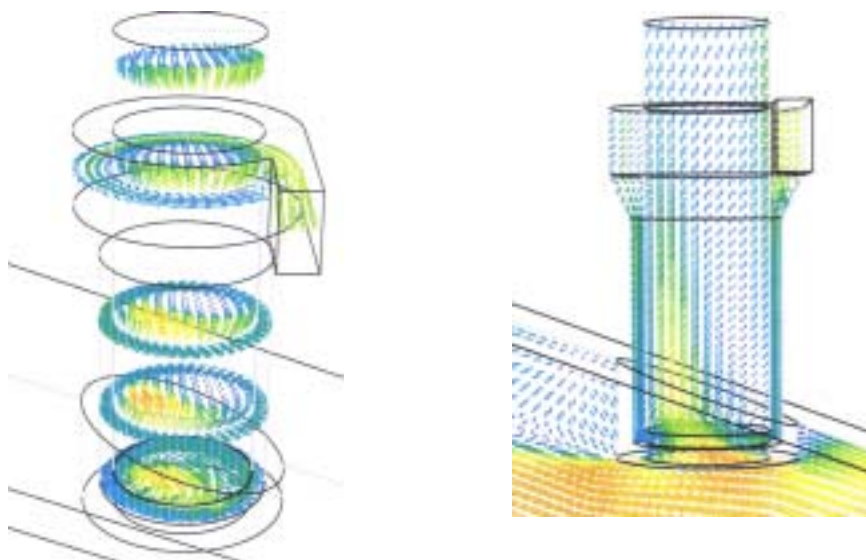
1) NSP 燒爐 開發 <sup>10)</sup>



11. 燒爐 粒子軌跡 溫度 分布 <sup>10)</sup>

- 1995 年 技術研究所 開發 寧越工場 pilot 設置 燒爐 coal 溫度分布  
 cold model hot model 設置 前 simulation 結果  
 選定 設計 使用 . 最適條件

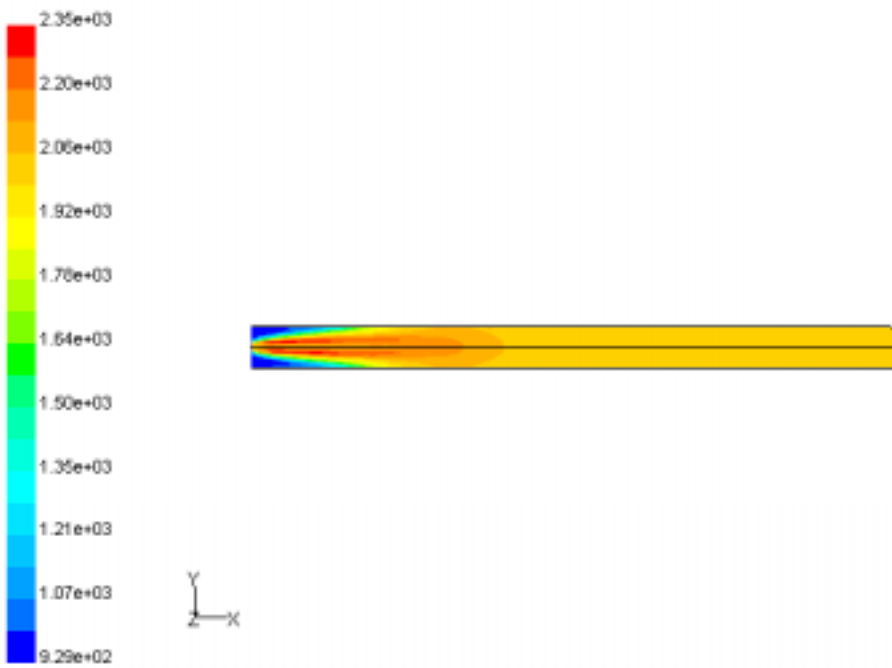
2) CI bypass system 用 Probe <sup>11)</sup>



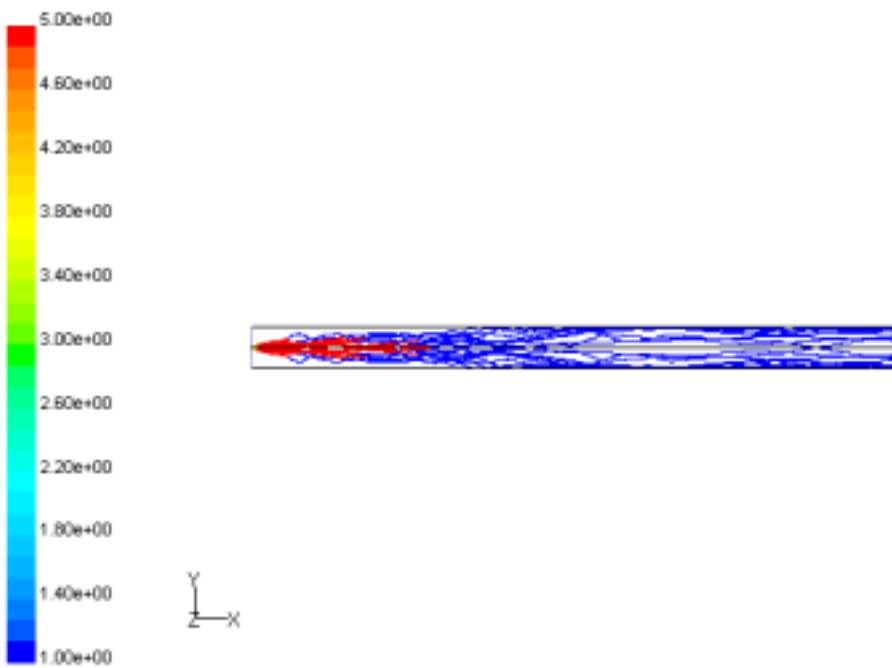
12. CI bypass 用 Probe 速度 vector 分布 <sup>11)</sup>

- 寧越工場 設置 CI bypass system(pilot test 設備)用 probe 流速分布  
 probe 가 高溫 保護 coating 形成 構造 가 .

3) 無煙炭 燃燒解析 <sup>12)</sup>



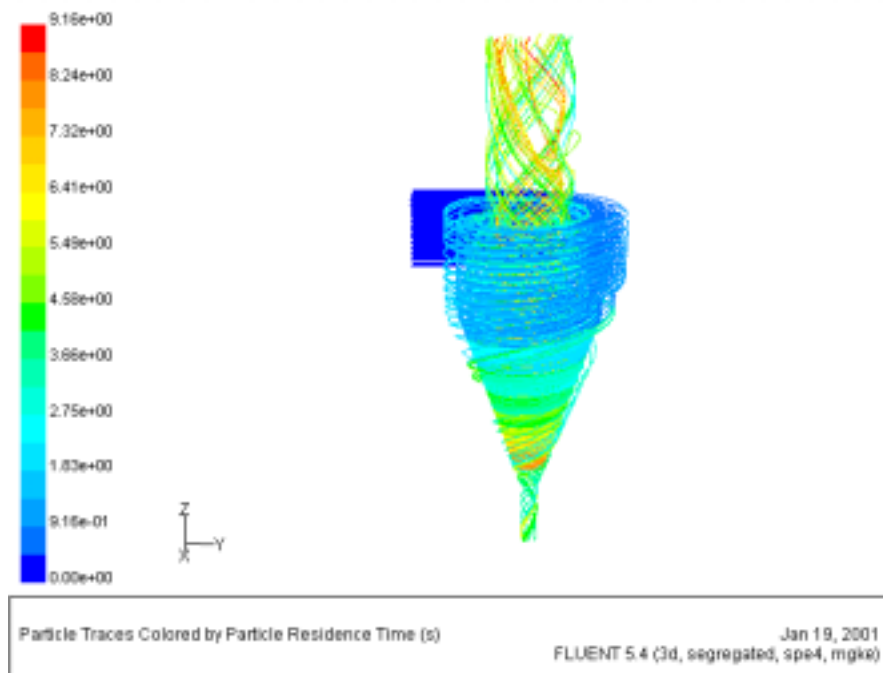
13. Kiln 火焰 溫度 分布 <sup>12)</sup>



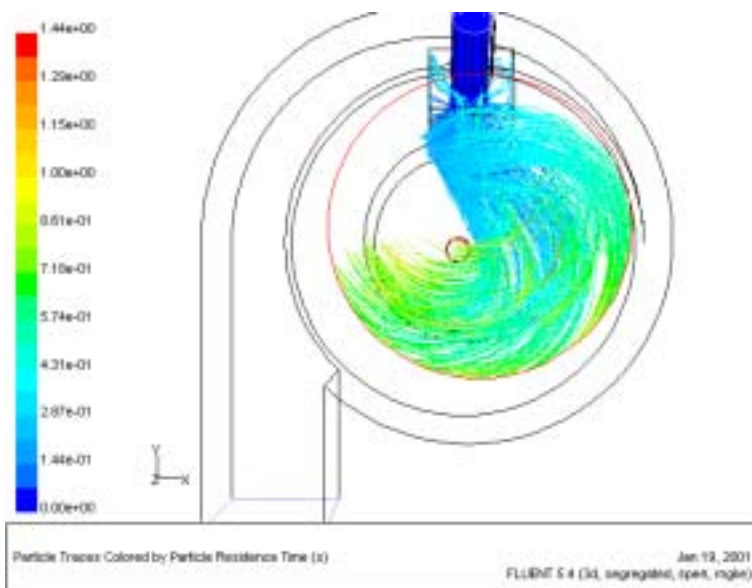
14. Kiln coal 粒子 軌跡 <sup>12)</sup>

- 13 14 各各 無煙炭 使用 Kiln 火焰溫度 分布 粒子軌跡  
 coal 全燒時 對比 火焰溫度 分布 變化 無煙炭 使用量 burner 選定  
 利用 燃燒條件 變化等 推定 .

#### 4) Cyclone 解析



15. Cyclone 粒子 軌跡



16. Cyclone 分散 box 粒子 軌跡 出口 旋回氣流 分布

- Cyclone 捕集效率 壓力損失等 性能 分析 氣流 分析 Cyclone 積粉  
 現象 改善 熱效率 增進 . Cyclone 出口 原料分散狀態 分析  
 出口 原料 Coating 狀態 改善



## 6. 結論

工程 分析 改善 使用 工程分析 方法  
- 物質 熱收支 (Mass, Gas, Heat balance)  
- Trend 依 方法  
- Benchmarking 依 方法  
- 設備 設計條件 理論的 原理 立脚 分析  
等 技法 使用 . 分析方法 中 電算流體解析 技法 設計條件 檢討  
定性的, 理論的 接近方法 가 適合 Tool 使用 .

### \*\* 參考文獻 \*\*

- 1) 明賢菊, “ 電算熱流體工學” , 文雲堂, 2000
- 2) Fluent Inc., “ What is CFD” , Fluent seminar, 1998
- 3) Fluent Inc., “ CFD Introduction” , Presentations about FLUENT 5, 2000
- 4) Fluent Inc., “ FLUENT5 User’ s Guide” , Fluent Inc., 1998
- 5) 三隅正機 外, “ 流れ問題のシミュレ-シヨン適用” , セメント製造技術シンポジウム報告集(2000), pp54 60
- 6) 氏川淳一 外, “ 熱流體シミュレ-シヨン技術のセメント製造プロセスへの適用” , セメント製造技術シンポジウム報告集(1999), pp44 51
- 7) 横下俊章 外, “ セメント製造プロセスのシミュレ-シヨン” , セメント製造技術シンポジウム報告集(1992), pp80 85
- 8) 大野猛 外, “ ロ-タリ-キルンの微粉炭燃焼解析” , セメント製造技術シンポジウム報告集(1992), pp72 79
- 9) 須藤勘三郎 外 ,” 燒爐の微粉炭燃焼解析” , セメント製造技術シンポジウム報告集(1993), pp86 93
- 10) 郭弘培 外, “ 固有 model NSP system 開發研究” , 雙龍研究報告, 1995
- 11) 柳在相 外, “ 燒成工程 循環物質 減少 關 研究” , 雙龍研究報告, 2000
- 12) 朴春根 外, “ 廢 FRP 燃料/原料 再活用時 燒成工程 品質 影響 關 研究” , 忠南大學校, 1999