

## 高炉溶融スラグ顕熱総合回収技術の開発

解説

榑 原 路 皓\*

## Development of the Technology on Heat Recovery from Molten Slag of Blast Furnace

Michiaki SAKAKIBARA

## 1. はじめに

地球環境課題への対応が議論される中で、省エネルギー技術開発が再びクローズアップされようとしている。かつて鉄鋼各社が省エネルギー対策を講じてきた中で、スラグ顕熱回収が最後まで残った。高炉スラグは、高炉操業における溶銑の副産物として生産される。産出時は、約 47 万 kcal/t-slag の熱量を保有しており、未回収排熱の中では最大のものである。スラグの場合、既に諸用途に資源として有効活用されていることから、熱回収を考える場合、品質との両立性が要求される。この熱回収に関する試みは、いろいろおこなわれてきたが、適切なプロセスが見出せないまま、今日に至っている。それは、この品質との両立性および、次に列挙するような溶融スラグの性状からくる取扱いにくさによっている。

1) 高温溶融状態で排出されたスラグは、温度の低下にしたがい、急激に粘度を増し、流動性が極端に悪くなる。

2) 潜熱および熱伝導率が小さいこと、更に溶解ガスがあるため、冷却界面は、すぐ凝固し、ガスによって気孔の多い断熱層を形成する。一方、内部は冷えにくく、いつまでも溶融状態のままである。

このように奪熱しがたく、状態変化を伴うスラグから効率良く熱回収をおこなうプロセスの開発としては、

1) スムーズにスラグから奪熱するにはどうするか

2) 液相から固相にいたる状態変化過程をどう処理するか、更に、

3) 目的とするスラグ品質をどのようにして確保するかといったことが課題である。熱移動は、大塊より小粒の方が容易である。溶融スラグを微粒化すれば、熱伝導率の小さいことをカバーし、すみやかな冷却と相変化を完了する。これは課題解決上有利なことであり、同時に

高効率熱回収指向にも適合するものである。一般に液体の微粒化法には種々の方法<sup>1)</sup>がある。熱回収を目的としたスラグの場合、熱の一次回収媒体に空気を用いることを考慮すると、微粒化法も空気によるアトマイズ法いわゆる風砕法が適する。風砕法は、溶融スラグを高速気流で吹き飛ばして微粒化する粒化法で、設備および操作が簡単な上、他法に比較して細粒がえられやすく、熱回収上有利である。

前述のごとく、高炉スラグは全量資源活用されている。この中で、セメント原料に利用されるのがもっとも付加価値が高く、量的にも多い。また今後とも需要が増大するといわれている。セメント用原料としての品質指標にスラグのガラス化率がある。高率であるほど良質とされている。ガラス化条件は、スラグの初期温度と冷却速度に依存している<sup>2)3)4)</sup>。風砕法は、このガラス質スラグの製造に適しており、スラグの需要動向にもマッチしたものである。

スラグの顕熱を風砕法で回収するという共通認識のもとに、この熱回収技術の開発は、製錬業における共通の課題として、「共通基盤型石油代替エネルギー技術開発費補助金制度」の適用を受け、昭和 57 年度より 6 年間にわたっておこなわれた。この研究には鉄鋼 6 社（新日本製鉄、NKK、川崎製鉄、住友金属工業、神戸製鋼所、日新製鋼）が参加し、鉄溶融スラグ顕熱総合回収技術委員会のもとに、新日本製鉄名古屋製鉄所第 3 高炉から溶融スラグの供給を受けて実験をおこなった。第 1 ステップは要素技術研究、第 2 ステップは大規模プラントによる実証試験をおこない、研究を終了した。

本稿では、はじめにプロセスの概要について述べ、次に主な研究成果について紹介する。

平成 2 年 3 月 8 日受付 (Received Mar. 8, 1990) (依頼解説)

\* 新日本製鉄(株)熱・エネルギー研究センター主幹研究員、製錬新基盤技術研究組合鉄溶融スラグ顕熱総合回収技術委員会 (Heat & Energy Technology Lab., Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)

Key words : heat recovery ; slag ; blast furnace ; quality ; glasification ; granulation ; atomization ; distribution ; feasibility ; heat exchanger ; fluidized bed.

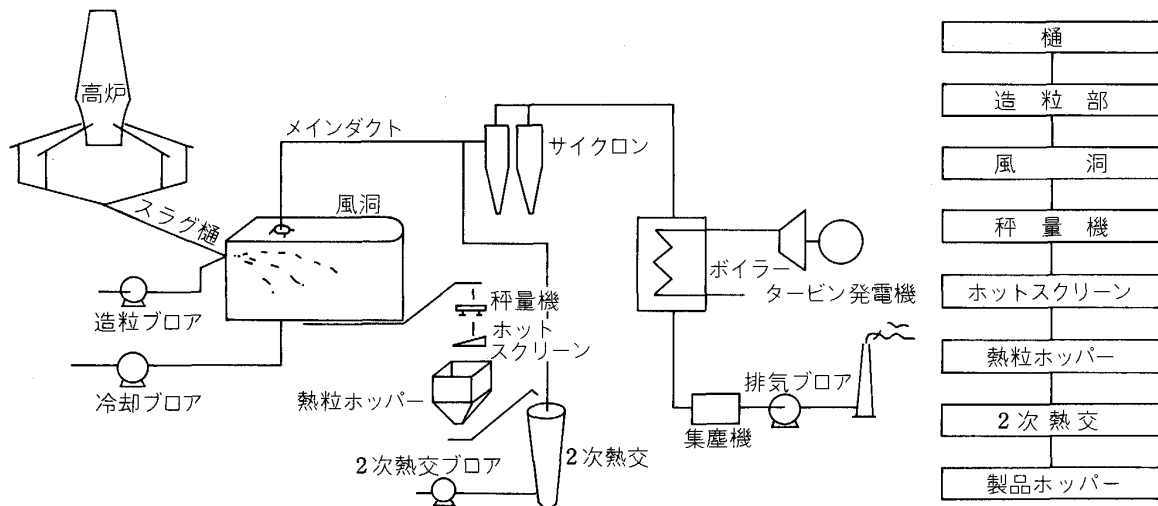


図 1 プロセスイメージ

## 2. 鉄熔融スラグ顕熱総合回収技術の概要

### 2.1 プロセス概要

高炉から 1400~1600°C で排出されたスラグを風洞内の造粒部へ導き、高速気流にて微粒化する。粒子の大部分は、風洞内に配置された分散板や内壁に衝突し、約 1050°C の温度で落下する。落下中に風洞下部からの吹込空気により冷却され、約 800°C にて排出される。排出された粒子は、大径粒を振動篩で分別除去し、熱粒ホッパーに貯留した後、2次熱交部の多段流動層にて、約 150°C まで冷却される。スラグは高炉から間欠排出されるが、2次熱交部の補完運転により、熱回収の連続性が形成される。スラグ品質は、風洞内での冷却速度によって確保される。熱回収は、風洞部および2次熱交部での冷却用空気顕熱から蒸気、電力に変換しておこなわれる。プロセスフローを図1に示す。

### 2.2 開発目標と技術課題

高効率熱回収とスラグ品質の両面から目標設定した。

- 目標 (1) 熱回収率 70% 以上
- (2) 平均ガラス化率 95% 以上

本プロセス開発上での研究すべき技術課題を整理し、表1にまとめた。

### 2.3 実機化へのアプローチ

研究開発は、表2に示すように2段階にわけておこなわれた。パイロットプラント試験では、おもに要素技術の開発により、目標とするプロセスの開発見通しを得、つぎに、試験設備の規模をスケールアップして、開発技術の検証と実機化技術の確立をはかった。基本となる造粒は、微粒化理論、操業安定性からスラグ分流供給方式とした。この造粒法をベースとして、スケールアップその他の開発をおこなった。パイロットプラントでの実験は、昭和58年10月から60年12月までの間に279回

表 1 技術開発課題一覧表

技術課題	研究内容
1. 熱回収技術	熱回収性能の評価 多段熱交換器の性能の把握
2. セメント用スラグ製造技術	水砕相当品の製造技術の確立 セメント原料としての適性をセメント製造工程で確認
3. 操業技術 ①スラグ製造、受粒、冷却 ②運転技術	高流速空気噴霧による造粒技術の確立 ノズルレイアウトの決定 新ノズル開発と造粒制御法の確立 無融着受粒法の確立 高炉操業にマッチした操業法の確立 スラグ流量連続計測技術の確立 設備のメンテナンス性、耐久性の調査
4. スケールアップ技術	造粒に関するスケールアップ技術の確立 風洞内の粒子飛翔パターン定量化 飛翔粒の均等分散化技術の確立 スラグ多分流化技術の確立
5. 実機概念設計	実機概念設計と F/S

表 2 実機化へのアプローチ

開発段階	パイロットプラント	大規模プラント	実機
	〔要素技術の検証・確立〕 (実機化技術の確立) 研究成果に基づき本プロセスの経済性評価		
規模	18t/h	100t/h	240t/h (当初計画)
造粒制御	6t/h×3ノズル	[分散理論の確認] 30t/h×3ノズル	[必要最小規模] 30t/h×8ノズル
受粒制御	[分散板有効性確認] 熱粒負荷分散	[塊化防止] 受粒制御	均等分散
熱回収向上	[風洞空冷壁技術確立] 実績 63%	コンパクト化	[熱回収率目標] 70%以上

実施された。大規模プラントでの実験は、62年4月開始、63年3月末終了した。造粒実験110回、造粒したスラグ量は、累計8200tになった。参考までに大規模試験プラントの主仕様を表3に示す。

### 3. 研究成果概要

#### 3.1 熱回収

大規模プラント風洞部における熱回収試験を20回おこなった。風洞構造は、断熱部20%弱、水冷部30%、残部は空冷となっている。本試験での平均熱回収率は、当初予想を若干上回る48%弱、熱風温度は空気原単位によって異なるが、ほぼ500°Cであった。2次熱交換器には、低圧損型多段流動層方式を選定し、この開発に取り組んだ。対象物が細粒であること、熱風の高温化に多段化が必須であることによった。既存の流動層のベッド圧損は、一般的に約250 mmAqであるのに対し、開発機器は50 mmAq以下を目標とした。供給される高温粒子の条件から表4に示す仕様の多段流動層を設計製作し、パイロット試験にて特性データを取った。流動開始点は1.8 m/s、溢流は2.5 m/s前後からおこる。図2は本流動層の運転実績を示したものである。熱風温度は、スラグ温度を補正すると各段共設計どおりの昇温を示している。伝熱特性を次式にまとめた。

$$Nu = 1.86 \times 10^{-4} Re^{1.82}$$

流動層トータル圧損 80 mmAq は設計どおりであった。流動層高も一定していることからわかるように、操業も安定している。流動層単独の熱回収率は75%強となっている。図3は100 t/hにおける熱流れ図である。総合熱回収率は63%弱であったが、輸送中の放熱が大きい。大部分がパンコンベアの蓄熱によるものである。実験が間欠的におこなわれているため、連続操作になれば解消される。実機概念設計では、この放熱ロスが7.5%改善されて、熱回収率70%に達する見通しを得た。

#### 3.2 造粒品の品質および評価

##### 3.2.1 ガラス化率

スラグがセメント原料として利用されるのは、その水硬性にある。水硬性の発現は、ガラス化率に依存している。高ガラス化率であるほど良質原料と評価される。一般的には95%以上が受入れ基準とされている。ガラス化条件と、この1年間の試験期間におけるスラグ平均組成を図4、表5に示す。液晶発生防止のため、造粒時1400°C以上の温度を保持することおよび液温レベルによる所要冷却速度を明らかにした。本プロセスは、この条件を満たすものとして設計されている。

表3 大規模プラントの主要設備内容

設 備	基	仕 様
一次熱回収	1 1 1 1	スラグ供給装置 吹製装置 風洞本体 冷却水装置 100 t/h, 3分流 吐出厚み可変ノズル 長さ25 m, 高さ13 m, 幅7 m 350 t/h
搬 送 系	1 1 1	スラグ樋 コンベア 熱粒ホッパー ふるい 40 m 100 t/h×3, 18 t/h×1 100 t/h 100 t/h
空 気 系 統	1 2 1 1 1	循環プロア サイクロン 造粒プロア 排気プロア 湿式集塵機 3100 m <sup>3</sup> /min 4000 Nm <sup>3</sup> /h 3300 m <sup>3</sup> /min

表4 多段流動層仕様

項 目	仕 様
処理量	5 t/h
スラグ温度	入口 800°C, 出口 160°C
冷却ガス温度	入口 50°C, 出口 650°C
スラグ粒径	7.0 mm 以下
目皿開孔率	25%
段数	10段
塔内寸法	高さ4 m 塔上段径770 mm, 下段径600 mm
圧損	850 mmAq

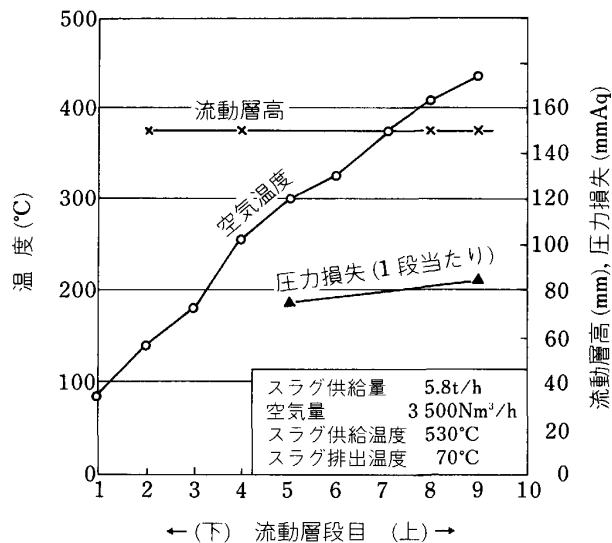


図2 多段流動層運転実績

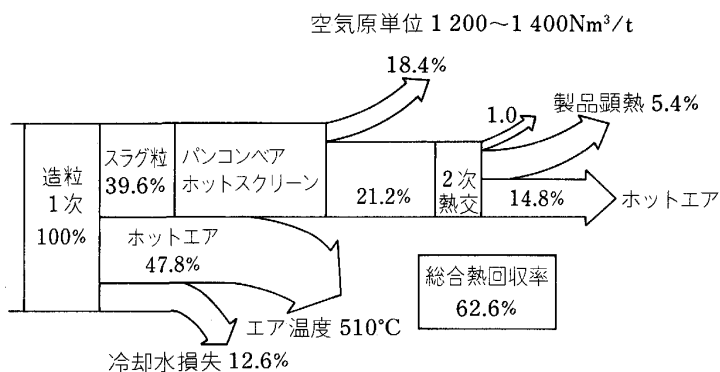


図3 熱流れ図

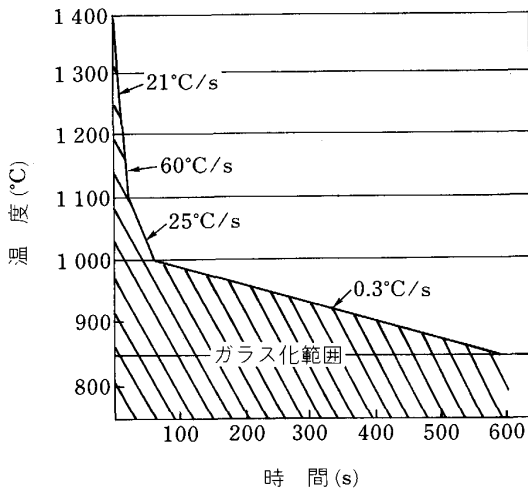


図 4 ガラス化に必要な冷却速度

表 5 高炉スラグ平均組成

成分	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	C/S
平均(%)	34.15	41.91	14.34	6.91	1.20	1.23
標準偏差	0.78	0.97	1.01	0.68	0.40	0.21

表 6 セメント原料としての評価

評価項目	風砕造粒スラグ		水砕スラグ	評 価 (対水砕)
	ウール除外品	ウール混入品		
受入れ, 払出し 貯蔵水分 乾燥	2~4% 不要	2~4% 不要	7~20% 要	○ ○ ○
ガラス化率	96~98%	98~99%	98~99%	△
粉碎性	3 900/5~8	3 950/6~6.5	3 850/6~7	○
ブレン値/時間				○
総合評価	水砕とほとんど同等レベル			○

3.2.2 造粒品の評価

セメント原料としての評価をセメント製造メーカーに依頼した。サンプルとして、造粒時に発生するウールの混入品とウール除外品をそれぞれ 400 t 提供し、メーカーの実機粉碎ミルにて粉碎した。粉末化までの主要項目について、従来品である水砕スラグと比較した結果を表 6 にまとめた。本造粒品の特徴は、乾燥が不要であること。これは、乾燥費削減として大きなメリットになる。ウール除外品はガラス化率が 1~2% 低い。粉碎性については、逆に時間短縮が可能となっている。粒径別にガラス化率を調査したところ、5 mm 以下は 95% 以上で、細粒ほど高率ではばらつきが少ない。7 mm では 82~98% にばらついていた。7 mm 以上の粒子は全体の 5% 程度であることから、ガラス化率 80% のものが混入したとしても、その影響は小さい。ミルで粉碎したスラグ粉によるモルタル強度試験のうち、28 日後の強度測定結果を図 5 に示す。図の鎖線および点線は、パイロット試験でのサンプルによる特性で、平均値、ばらつきの上下限

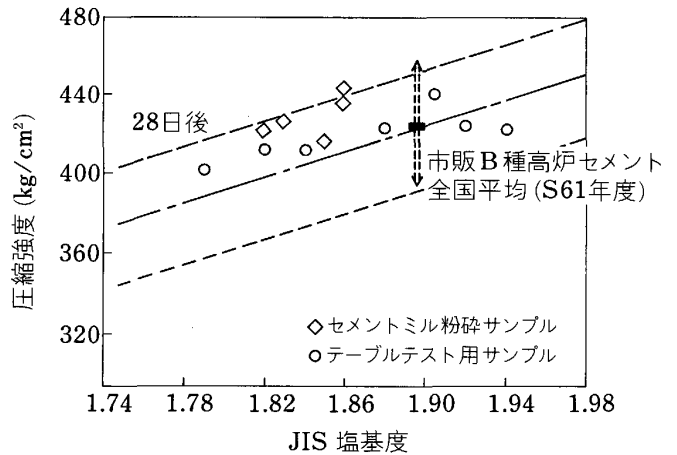


図 5 モルタル強度

を示している。本サンプルは、ややこれを上回る強度になっている。市販セメントと比較しても同等以上である。このほか、コンクリート強度試験、野積貯留時の貫入試験においても水砕品と同等以上の結果が得られている。

3.3 操業技術

3.3.1 造粒安定条件

ノズルから流下する熔融スラグの断面形状と微粒化の現象観察結果を図 6 に示す。図の(口)の場合は、微粒化が安定している。(イ)の場合は、粒子の飛翔が不規則であり、後方に散乱する粒子がノズル部に付着し、その結果、スラグ流下軌跡を乱し、ますます不安定となる。造粒の安定化のためには、まず第 1 にスラグ流下断面が(口)の状態になるような点で微粒化をおこなわねばならない。更に、造粒空気の衝突エネルギーを一定にすることが重要である。実験の結果、得られたノズルレイアウトを図 7 に示す。上段 B ノズルは、スラグ断面形状改善用である。A ノズルは、本研究で独自開発した粒化用ノズルである。空気吐出断面厚が可変になっており、風量変化とは独立に吐出風速を制御できる機構を内蔵している。安定造粒ができる空気側の特性式は下記のとおりである。

$$\begin{aligned}
 m &= 200 \sim 250 \\
 v_b \leq 60 & \quad v_b = 0.17 v_a + 40 \\
 v_b > 60 & \quad v_b = 60 \\
 l/t &\geq 5.5 \\
 t &= Q_a / (3600 v_a \cdot B) \cdot (5.5/l) \\
 l/t < 5.5 \\
 t &= Q_a / (3600 v_a \cdot B)
 \end{aligned}$$

ただし

$$l = 310 (W_s / 500)^{0.2} \leq 310$$

3.3.2 自動造粒制御技術

開発のポイントは、造粒時の熔融スラグ量を ±10% の精度で検出可能にしたことおよびエアノズルの開発により、粒化エネルギーを常に一定になるように制御可能

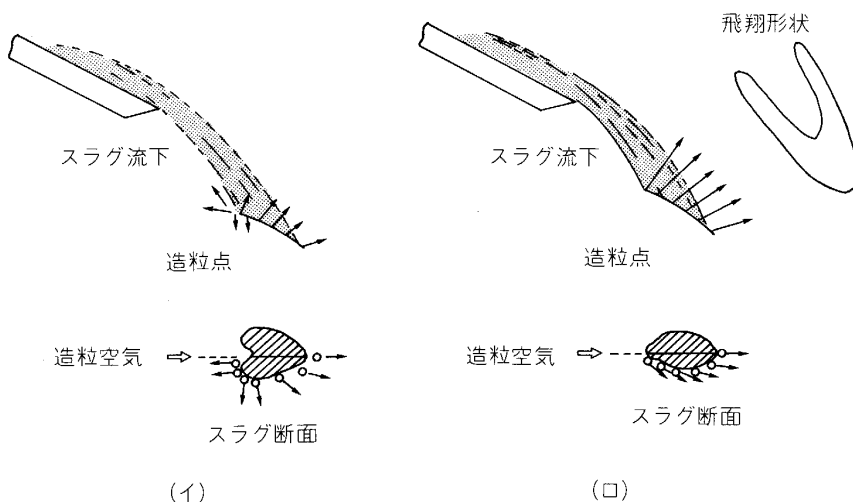


図 6 微粒化時のスラグ断面形状と飛翔状況

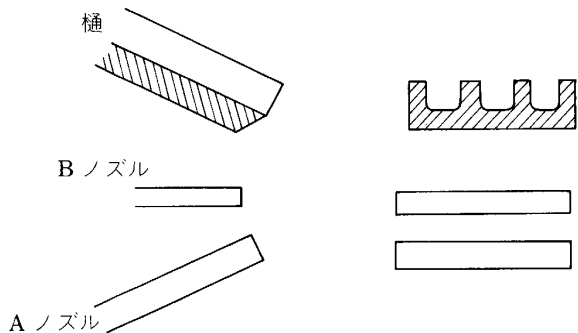


図 7 ノズルレイアウト

にしたことである。排出中の溶融スラグ流量測定法の開発は、従来からいろいろ試みられ、報文<sup>5)</sup>も見受けられるが、凝固層が簡単にできてしまうことや排出が間欠的であるため毎回流れが変化することにより、制御用に使えるレベルにまで達していない。今回、本研究で開発した測定法は、このプロセス独特なもので、その特徴は、間接計測と直接秤量を組み合わせた2段方式になっていることである。すなわち、微粒化直後のスラグ粒群の放射エネルギーを熱流計で検出して求めたスラグ量を、風洞出側コンベアスケールにて粒子重量を実秤して常時補正を加える機構となっている。熱流計は粒化時の流量を瞬時に計測でき、制御用検出端として適しているが、スラグ温度の変化等により誤差が生じやすい。一方、粒子重量は高精度に秤量できるが、タイムラグがあり、制御用としては無理がある。本方式は、両者の長所を組み合わせ、制御用計測法として完成させたもので、スラグ量は、次式にてあらわされる。

$$W_s = K(2\epsilon \cdot Q_s)^a$$

Kは秤量値と熱流計での計測値との換算係数である。図8は、精度についての調査結果である。広流量域にわ

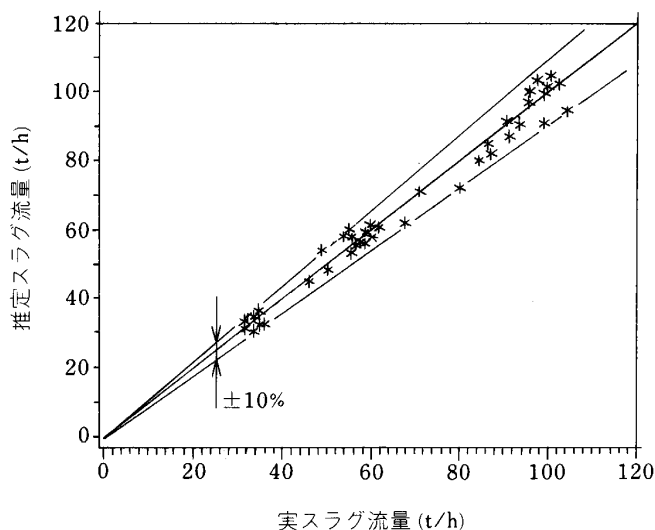


図 8 スラグ量推定精度

たって ±10% 内となっており、制御用として利用し得る精度である。また、別途調査した流量変動に対する追従性についても満足する結果が得られている。造粒制御システムを図9に示す。スラグ量を入力して、前記造粒条件式により、A、Bノズル風量およびAノズル開度が操作され、写真1にみられる造粒がおこなわれ、図10にあらわした粒度分布の造粒品が製造される。造粒品は、後工程のホットスクリーンで分別され、粒径5mm以下が製品となる。製品歩留りは約90%で、当初目標85%を上回る結果となった。

### 3.4 スケールアップ

本プロセスの主要なユニット設備は、風洞部と2次熱交部である。風洞部は、造粒部と風洞本体にわけられる。ここでは風洞部のスケールアップについて述べる。風洞

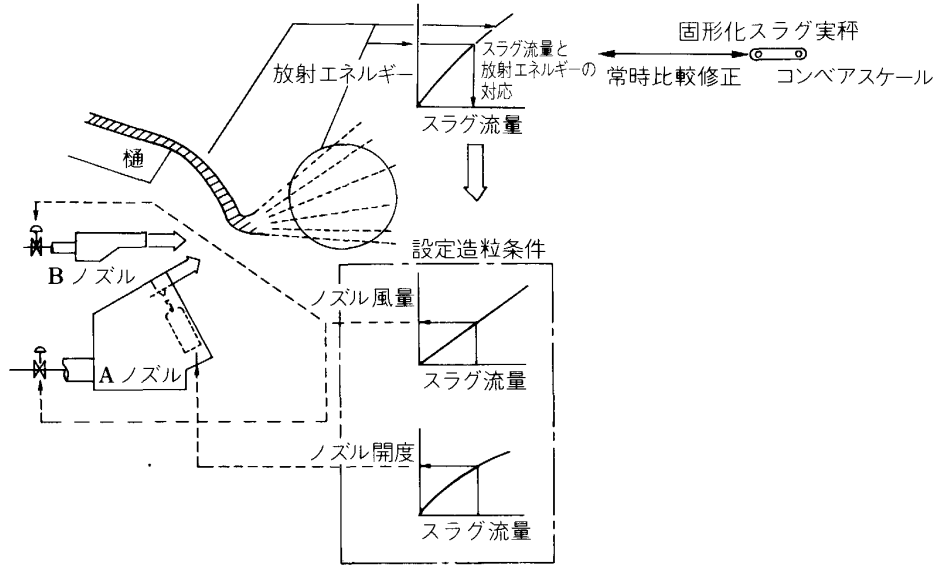


図 9 制御システム



写真 1 スラグの微粒化状況

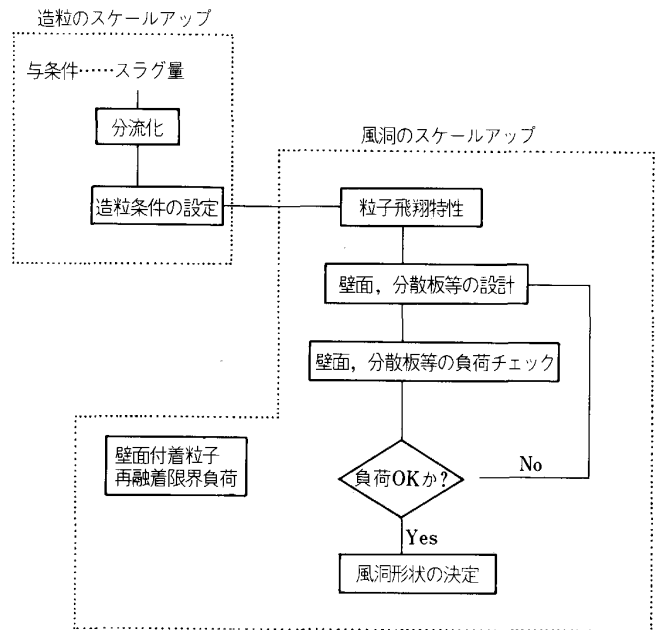


図 11 造粒. 風洞の設計手法

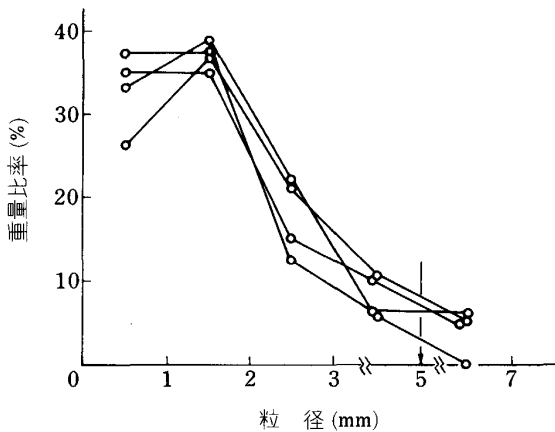


図 10 粒度分布

部の設計手法を図 11 に示す。造粒のスケールアップは、分流能力と分流数にておこなう。パイロット試験では、1 分流 7.5~30 t/h での造粒技術を確認した。この分流能力をベースに、国内最大級高炉から排出されるスラグ処理に要する分流数を 8~9 個と想定した。多分流化の課題は、スラグ少流量時の均一分流の確保である。大規模プラント実験では、造粒部を 9 分流に改造して、均一分流が形成されるスラグ下限流量の調査を実施し、67 t/h であることを確認した。風洞スケールアップは、粒子の飛翔特性の数式化、壁面衝突負荷許容値の把握および粒子冷却モデルの開発によって可能となった。冷却モ

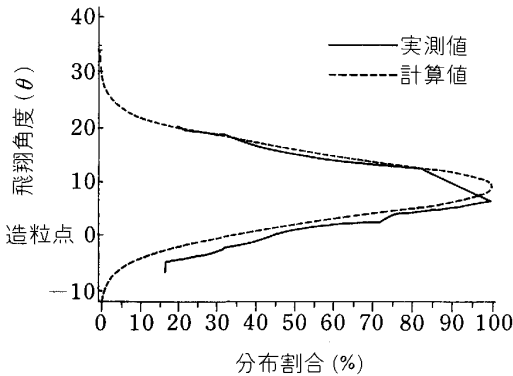


図 12 飛翔粒子密度分布の比較

デルは、高温融滴スラグが風洞壁面に衝突すると、そこで付着し、約 1050°C まで冷却された後、壁面を離脱、落下中に更に冷却されるとしたものである。この壁面付着現象および冷却計算モデルについては既報<sup>6)7)</sup>を参照されたい。

風洞内にサンプラーを装入し、飛翔中の粒子の空間における濃度分布を調査した。その結果、分布は正規分布していること、濃度は粒化点からの距離の 2 乗に反比例して減少するが、パターンは変わらないことがわかった。この濃度分布を粒子空間密度と定義し、推定モデル式を作成した。初期モデルについては、アトマイズ粒子の分散特性として発表している<sup>8)</sup>。今回のスケールアップ実験にて得られたデータから、飛翔パターンは、図 6 に示したような V 字型になっており、Y 軸（風洞幅方向）が直交軸から 45 度ずれていることがわかった。解析の結果、粒化ノズルの噴流特性に起因していることが判明し、モデル式に修正を加えた。修正モデル式による実測値との比較を図 12 に示したが、比較的良く一致している。モデル式の概要を下記に示す。

$$\rho(\theta, \psi) = a(m \cdot v_a)^{0.9} W_s^{0.3} \rho'(\theta) \cdot \rho'(\psi) / (\beta/40)^2 / R^2$$

$$\rho'(\psi) = 100 \exp[-0.5(\psi - \theta)^2 / \sigma_\psi^2]$$

$$\rho'(\theta) = 100 \exp[-(\theta / \sigma_\theta)^{1.5}]$$

$$\theta_0 = |\psi| + b \cdot m^{0.4} \cdot v_a^{0.15} t^{-0.3}$$

$$X = v_x \cdot \tau$$

$$Y = v_y \cdot \tau$$

$$Z = v \cdot \sin(\theta) \cdot \tau - 0.5 g \cdot \tau^2$$

図 13 は、大規模プラントの風洞イメージを示している。分散板類は、風洞容積を有効に活用するために粒子を分散化し、排出時の均等化をはかる目的で装入されている。これらがないと、粒子が局部的に過度に集中し、冷却不足となって塊を発生する。前にも触れたように、高温粒子は、壁面や分散板につきつき衝突し、板面上で付着、冷却、離脱を繰り返す。衝突密度が高いと、粒子

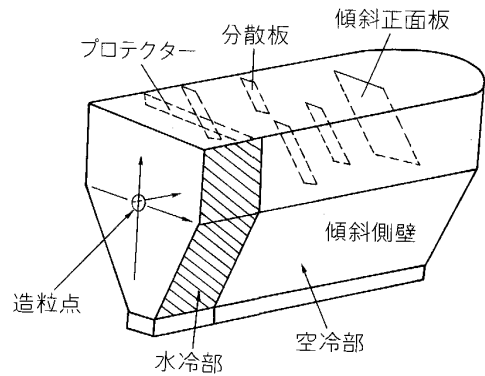


図 13 風洞イメージ

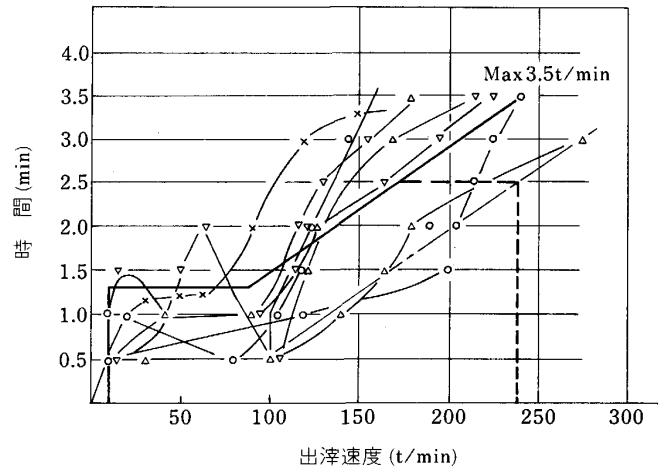


図 14 出滓速度調査結果と標準出滓パターン

が相互付着し、面上で塊化する。塊化を生じない衝突密度を負荷許容値と称し、現象観察結果より求めている。許容値は、粒子の衝突角、板冷却法によってそれぞれ異なる。図の分散板の場合、水冷構造で 30 度傾斜しており、許容値は 55 kg/m<sup>2</sup>・min であった。同様に風洞内各部について値を把握した。図 11 の壁面付着粒子再融着限界負荷が、この上限値に相当する。飛翔粒子の空間密度推定式の作成と限界負荷の把握により、風洞のスケールアップが可能となった。

#### 4. 実機概念設計と経済性評価

設備検討と F/S を行うに際し、前提条件をつぎのように決めた。

- (1) 設備設置場所はグリーンフィールドとする。
- (2) 設備能力は 4000 m<sup>3</sup> 級高炉を対象とする。
- (3) 風洞部は、1 基の場合と 2 基の場合の 2 ケースについて検討する。ただし、他設備は 1 系統とする。
- (4) 熱の回収形態は、電力、電力+蒸気、蒸気の 3 ケースについて検討する。
- (5) 設備単価は、昭和 63 年度下期ベースとする。用

役費は、原油価格基準として連動させる。円レートは 139 円/\$ とする。

(6) 水砕品との差異を考慮する。本プロセス製品は、乾粒砕なので、需要先での大幅な乾燥費削減が見込まれる。乾燥費は、需要先での実績にて評価する。

4・1 実機概念設計

国内の主要高炉のスラグ排出調査結果を参考に能力 150 t/h とした。図 14 に太線にて標準排出パターンを示す。排出速度は、時間経過とともに増大し、最大 3, 5 t/min に達する。高炉操業側からみた場合、本プロセスで全量処理することが望ましい。しかしながら、熱回収設備としては、排出最大値設計では、設備余裕率が高すぎて経済的でない。また、初期スラグは滓樋を流下中に温度が低下するため、製品ガラス化率確保上除外せざるを得ない。以上の観点から、設備能力 2.5 t/min とし、それ以上のものはカットすることとした。この結果、1 タップ当たりのスラグ処理率 94% となり、稼働率を考慮すると、年間排出スラグ量の 90% が処理可能となる。造粒サイクルは、排出間隔から造粒 230 min, 切替え 10 min とした。実機設備仕様を表 7 にまとめた。滓樋長は、造粒時スラグ温度 1400°C 確保上、出銑口から 84 m 以

内とした。風洞壁面は大幅に空冷を取り入れている。空冷許容範囲は、大規模プラント試験での実験結果にもとづいて決定した。この冷却用空気は、側壁上部から入って下部に抜け、下部より風洞内に吹き込まれ、粒子冷却用に再利用される。風洞内には、左右 6 対の分散板と 1 枚の正面板が配置されている。粒子衝突密度負荷計算から許容範囲内におさまるよう設計してある。この分散板

表 7 設備仕様

項 目	仕 様
能力	150 t/h
エア原単位	造粒 250 Nm <sup>3</sup> /t 冷却 1 200 Nm <sup>3</sup> /t 二次熱交 620 Nm <sup>3</sup> /t
スラグ樋長さ	84 m
スラグ分流数	5 分流
風洞寸法	W7.6×L26×H11.5
風洞冷却法	天井：断熱 分散板：水冷 壁：空冷
二次熱交	195 t/h 塔径 Max 5.2 mφ
バンコンベア No. 1~3	150 t/h
No. 4	200 t/h
サイクロン	230 000 Nm <sup>3</sup> /h 8 基
ボイラー	28.9 t/h
タービン発電機	6 500 kW

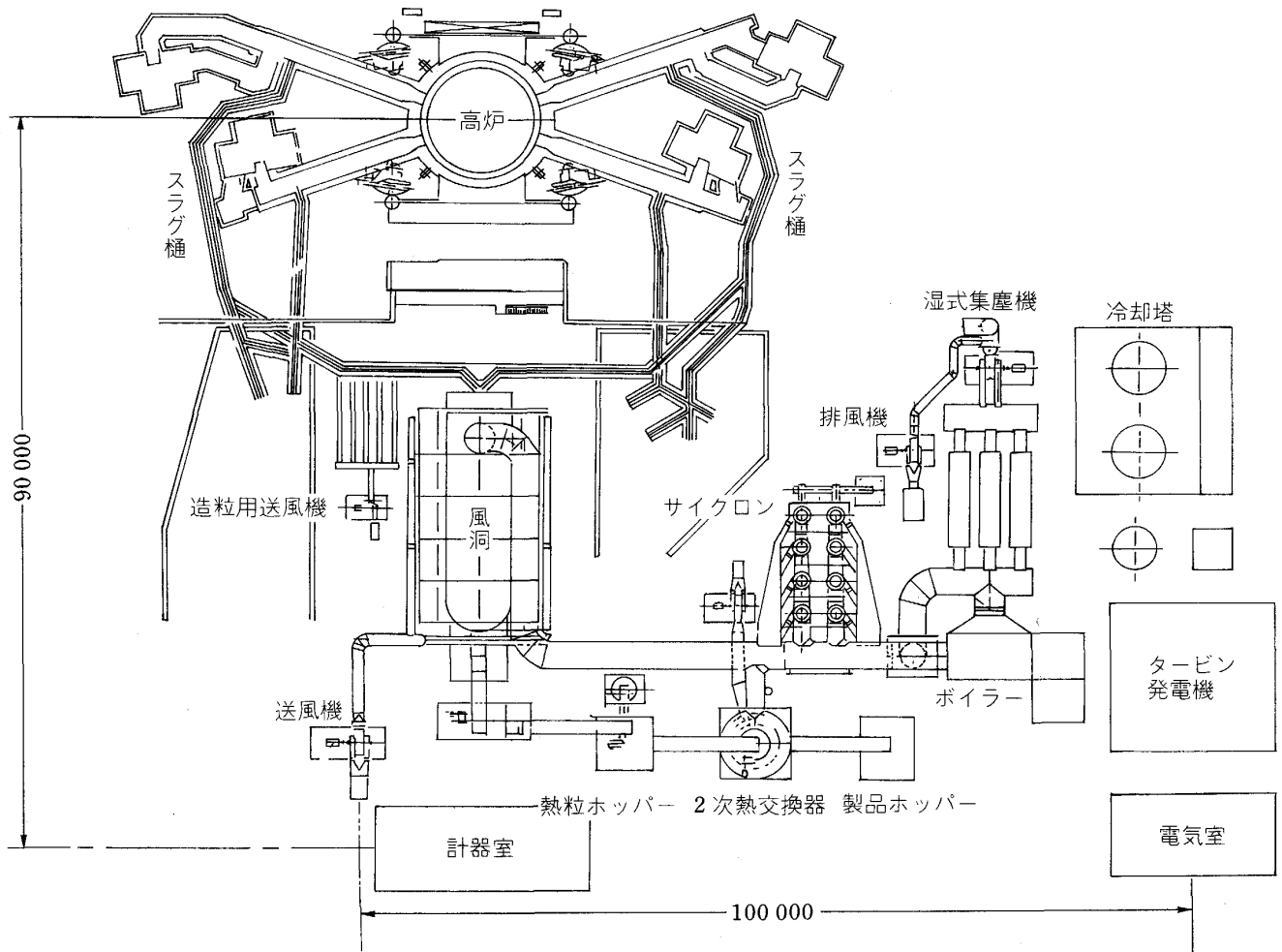


図 15 風洞 1 基案レイアウト



の配置により、風洞長を短縮した。高さは排出粒温 800°C にて設計した。2次熱交部は、風洞部回収熱との連続性および熱量の平準化から 195 t/h となった。回収熱量をすべて電力転換するとした場合の発電機規模は 6500 kW である。図 15 は風洞 1 基の場合のレイアウト例である。送銃線と反対側にレイアウトしている。所要敷地面積は、80 × 130 m 程度である。表 8 は、この時の熱精算結果である。熱風温度 500°C、熱回収率 70% となった。

4.2 経済性評価

実機概念設計、熱精算、前提条件をベースに 12 ケースについて F/S をおこなった。表 9 は、基準値として、原油価格 18.5 \$/bbl に固定した時の F/S 内容をまとめたものであり、図 16 は原油価格を変動させた場合の経済性を回収熱形態ごとにあらわしたものである。検討結果は、次のように要約される。

(1) 回収エネルギーとしては、変換数の少ない蒸気で回収するのが、もっとも投資回収が良い。

(2) 風洞 1 基と 2 基とでは、設備費で約 7 億円の差がある。設備利用効率が落ちる分だけ経済性が悪くなり、投資回収年で、電力の場合、5 割弱のびる。実機化にあたっては、風洞 1 基にて済むようにレイアウトを考えてゆくべきである。

(3) 現状の原油価格 18.5 \$/bbl で、蒸気回収では、2.7 年、電力回収で 4.3 年となる。風洞 2 基では、それ

ぞれ 3.7 年、5.7 年となる。

(4) 水砕との比較差で、製品の乾燥メリットが大きい。この乾燥メリットを差し引くと、風洞 1 基蒸気回収 3.9 年、電力回収 6.8 年となる。

現在は、開発当初のエネルギー事情、円相場とは大きな隔りがあるため、直ちに民間で設備投資ができるほどの経済性は残念ながらない。ただし、長期的にみれば、エネルギー情勢の逼迫が、いずれ到来することは確かであり、開発当初のような経済情勢になれば、十分経済性をもつプロセスである。

5. おわりに

実機概念設計を検討しているうちに、このプロセスが高炉周辺設備として、たいへん魅力あるものであると思うようになった。一つは、溶銃と分離後のスラグを密閉装置内ですばやく処理できるので、周辺環境が良くなるだろうということ、二つ目は、粉碎ミルを連結すれば、10 数分後には粉末化（水砕では水分多く無理）しており、最終製品たる高炉セメントの製造工程が大幅に短縮されること、野積等ヤード面積が縮小できるであろうという点である。更に、高炉セメントに付言すれば、スラグ粉を用いている分、製造時における CO<sub>2</sub> 発生量も一般セメントより少ないという今日のニーズを満足する条件を備えている。したがって、単なる熱回収プロセスと限定するのではなく、広範囲な技術としてとらえれば、おのずから異なった評価もでてこよう。高炉改修時に積極的に検討をお願いしたいものである。本プロセスの詳細については、単年度ごとにまとめた試験研究成果報告書<sup>9)</sup>をご参照いただければ幸いである。6 年間にわたる開発研究も、63 年 3 月に無事当初目標を達成し、技術の確立を得て終了した。この間、ともに研究に携った研究組合員の方々および代々の委員諸氏、ならびに 1 貫して本研究を支援し続けてくださったたくさんの方々

表 8 総合熱精算結果

スラグ量 150 t/h			
空気原単位 風洞部：1450 Nm <sup>3</sup> /t 2次熱交部：620 Nm <sup>3</sup> /t			
熱風温度 500°C			
製品歩留り 90% (10%はホットスクリーンにて系外へ)			
入熱 10 <sup>3</sup> kcal/t	割合 (%)	出熱 10 <sup>3</sup> kcal/t	割合 (%)
スラグ顕熱 412.7	100.0	熱風顕熱 290.1 (70.3)	
		(風洞部 206.4) (50.0)	
		(2次熱交 83.6) (20.3)	
		冷却水損失 49.5 (12.0)	
		製品持出顕熱 22.3 (5.4)	
		放熱その他 50.8 (12.3)	
	100.0		100.0

表 9 F/S 結果 (風洞 1 基/BF の場合)

	単位：百万円		
設備費	電力 3098	電力+蒸気 2940	蒸気 2370
回収量	4950 kW	1880 kW 26.5 t/h	30 t/h
メリット	1292 (1016)	1473 (1198)	1363 (1087)
運転費	450	423	385
粗利益	566	775	702
投資回収年数	4.3 (6.8)	3.2 (4.4)	2.7 (3.9)

( ) 内数値は乾燥メリット除外  
原油価格 18.5 \$/bbl, 139 円/\$

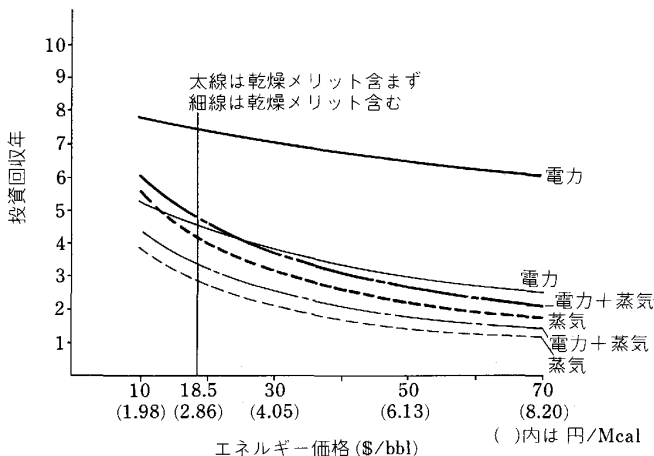


図 16 エネルギー価格と投資回収年 (風洞 1 基案)

に、紙上にて深く謝意を表するしだいである。

### 記 号

$Nu$ : ヌッセルト数 (—)  
 $Re$ : レイノルズ数 (—)  
 $m$ : アトマイズ比 ( $Nm^3/t$ )  
 $v_a$ : A ノズル造粒点流速 (m/s)  
 $v_b$ : B ノズル流速 (m/s)  
 $l$ : A ノズルと造粒点との距離 (mm)  
 $t$ : A ノズル吐出口厚 (mm)  
 $Q_a$ : A ノズル風量 ( $Nm^3/h$ )  
 $B$ : ノズル幅 (mm)  
 $W_s, W_S$ : 熔融スラグ量 (kg/min), (t/h)  
 $K$ : コンベアスケール秤量値との換算係数 (—)  
 $Q_s$ : 熱流計指示値 (—)  
 $\varepsilon$ : 熱流計黒度 (—)  
 $\alpha$ : 相関係数 (—)  
 $\beta$ : A ノズル噴流特性値 (—)  
 $\rho$ : 粒子飛翔密度 ( $kg/m^2 \cdot min$ )  
 $\rho'$ : 粒子拡散パターン (—)  
 $\theta, \theta_0$ : 粒子飛翔仰角, 飛翔中心角 (deg)  
 $R$ : 造粒点からの距離 (m)

$\sigma_\theta, \sigma_\psi$ : 標準偏差 (deg)  
 $\psi$ : 粒子飛翔水平角 (deg)  
 $a, b$ : 定数 (—)  
 $\tau$ : 飛翔時間 (s)  
 $X, Y, Z$ : 座標点 (m)

### 文 献

- 1) 造粒と造粒装置 (日本機械学会編) (1976)
- 2) 赤津 健, 志賀直敏: 第 35 回セメント製造技術シンポジウム報告集 (1978), p. 59
- 3) 花田光雄, 宮入英彦, 河内 勉: セメント技術年報, 20 (1966), p. 175
- 4) 柴田正孝, 井出久之, 森永健次, 柳ヶ瀬勉: 鉄と鋼, 66 (1980), S115
- 5) 佐野和夫, 宮崎孝雄, 金井一夫, 伊藤春男, 丹羽康夫, 山田 裕: 鉄と鋼, 66 (1980), S664
- 6) 藤本政美, 長尾由一, 榊原路悟, 村中正信: 鉄と鋼, 69 (1983), S841
- 7) 稲山邦彦, 江上利弘, 加藤秀男, 村中正信: 鉄と鋼, 70 (1984), S106
- 8) 村中正信, 稲山邦彦, 加藤秀男, 江上利弘: 鉄と鋼, 70 (1984), S886
- 9) 試験研究成果報告書, 鉄熔融スラグ顕熱総合回収技術の研究開発 (製錬新基盤技術研究組合編) (昭和 57 年度版 ~ 昭和 63 年度版)