

討 5

高炉プロセス制御のための計測技術の検討

住友金属工業(株) 中央技術研究所 阪本喜保, 的場祥行, 稲永昭二
大塚宏一, 山本俊行
小倉製鉄所 上野保長

I 緒言

高炉プロセス制御の研究は、炉熱・通気性制御を中心に長年各方面で行なわれてきたが、自動制御のレベルまで完成されたものは少いようである。この一つの要因として、制御のために用いられる各種データの計測精度の問題があげられる。ここでは高炉モデルにもとづいて開発した溶銑温度自動制御システムと入力データに対するモデル要求精度の観点から検討し改善・開発した計測技術、及びこれらの実操業への適用結果について述べる。

II 高炉数式モデル概要

1. モデルの構造¹⁾

モデルは断面均一で下記仮定のもとに構築され、高炉の入出力データから炉内温度を推定・予測する。

- (1) 炉内は高さ方向に5段に分割され、各段では特定の反応のみ進行する(図1-(c))。
- (2) 各段に存在する物質量は不変とする(図1-(b))。従って炉内での還元反応は逐次定常的に進行し、鉱石・コークスはそれぞれ炉下部での銑鉄生成速度・コークス消費速度に比例して装入され降下する。
- (3) 物質収支は各成分毎に考慮し、熱収支では各段平均固体温度(TSi), ガス温度(TGi)のみを考慮する。

2. モデルによる高炉プロセスのシミュレーション

(1) 反応速度の推定・予測計算(図2)

送風・炉頂ガスデータより、それぞれ酸素、炭素、水素収支にもとづいてCO還元、カーボンソリュージョン、H₂還元の各反応速度を推定(間接測定)する。

また反応速度の予測については、上記間接測定値を初期値として操作量変更に伴う変化をステップ応答特性にもとづいて計算することにより行う。

(2) 物質流量計算

各段固体流入出量は、仮定(2)より銑鉄生成・コークス消費速度に応じて決定される。ガスについても各段において流入し、生成しただけ上昇するとして計算される。

(3) 炉内温度計算

各段固体・ガスについて流入出熱、反応熱、熱交換熱、熱損失熱を考慮して立てられた熱収支方程式を解くことにより、各段固体・ガス温度が計算される。

図3は本モデルによるシミュレーションの概念図を示し、第5段(羽口レベル)固体温度TS₅より溶銑温度が推定・予測される。

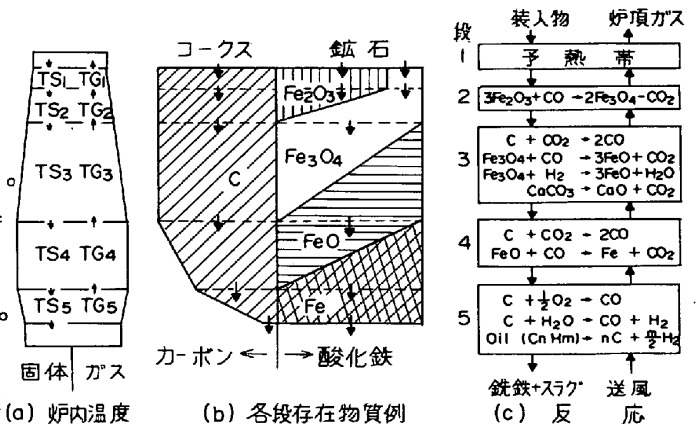


図 1. モデルの構造

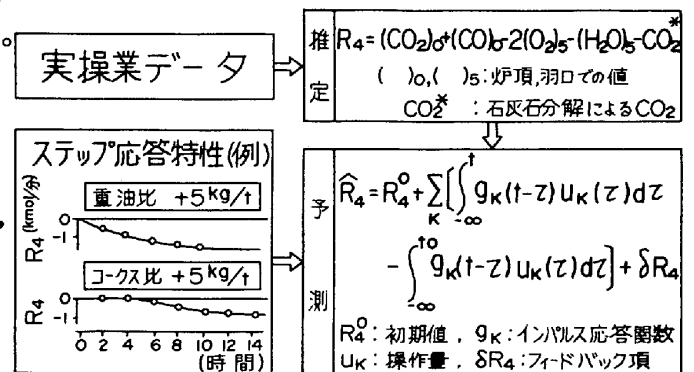


図 2. 反応速度の計算(カーボンソリュージョン反応速度R₄例)

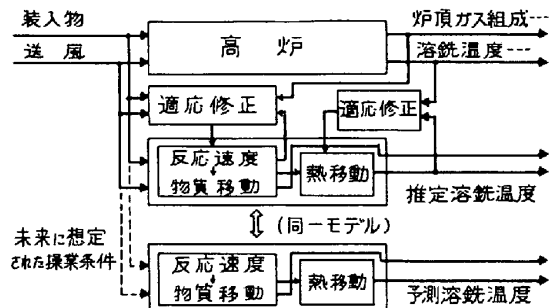


図 3. 高炉モデルシミュレーション方法

Ⅲ 溶銑温度制御に必要な計測精度

溶銑温度自動制御を行うためには、各種計測の高精度化が要求される。そのため許容誤差として溶銑温度 5℃及び出銑量 0.5%を一つの目安として設定し、これらの変化を与える操作諸元等の入力データ及び炉頂ガス分析値等の出力データの変更量を、高炉モデルを用いて算定し、従来の計測器管理精度と比較した。その結果表 1 に示す項目について特に精度上問題があることが判明した。

表 1. 代表計測値に対するモデル要求精度と従来管理精度との比較

モデル 要求精度	出 銑 量 (0.5%変化に換算)	※	※	炉 頂 ガ ス 成 分			
		装 入 物 F e 量	送 風 量	N ₂	CO	CO ₂	H ₂
		0.35%	0.375%	0.15%	0.18%	0.09%	0.18%
	溶 銑 温 度 (5℃変化に換算)	0.36%	3.75%	0.11%	0.10%	0.08%	0.32%
従 来 管 理 精 度		0.50%	0.50%	0.50%	0.15%	0.15%	0.05%

注 (1) ※印は相対値、他は絶対値、符号は省略
 (2) 要求精度上装入物 Fe 量、N₂、CO₂ が問題
 送風量は熱の点から問題ないが、マスバランス上問題

以下これら計測値の精度向上のために検討した内容について述べる。

Ⅳ 計測技術改善の検討と結果

1. 装入物 Fe 量測定精度向上化の検討

従来、高炉へ装入される原料の量については精度よく計測されているが、成分については分析のためのサンプル頻度が少く、代表性に問題があった。この対策として鉱石の大部分を占める焼結鉄について成分分析の頻度を上げる(1回/8hr→1回/1hr)と共に、貯鉄槽を経て高炉に至るまでの搬送過程のトラッキングにより、高炉に装入される各成分重量の把握の精度向上をはかり、下記改善効果が認められた。

(1) マスバランスの向上

装入量より計算される出銑量は、一日平均データで検討した結果、従来±3%の誤差が認められたが、多頻度分析・トラッキングデータ使用により±2%へ精度向上した(図4)。炉内での残銑量の増減の問題を考慮すれば、ほぼ許容すべきものと考えられる。また装入物 CaO/SiO₂ 比についても、±5%より±2%へ精度が向上した。

(2) 溶銑温度予測精度の向上

焼結鉄のFe%が変化すればコークス比が変化するので、その結果として溶銑温度が変化する。図5は、Fe%が顕著に変化した期間の例を示す。本例について、高炉モデルよりFe%一定と見なして求めた溶銑温度予測値と、トラッキングされたFe%を用いて求めた溶銑温度予測値を比較した結果、図5に示す如く、トラッキングデータ使用により予測精度が向上することが確認された。また本検討結果からわかるように、焼結鉄Fe%の変動は溶銑温度変動をもたらす外乱として無視できないことから、焼結鉄成分一定化制御の強化がはかられている。

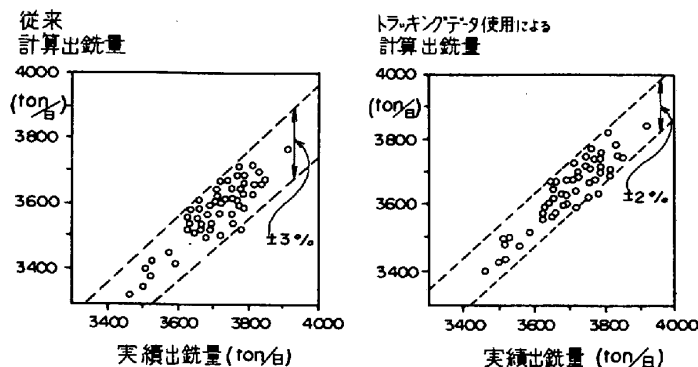


図 4. マスバランスの向上例

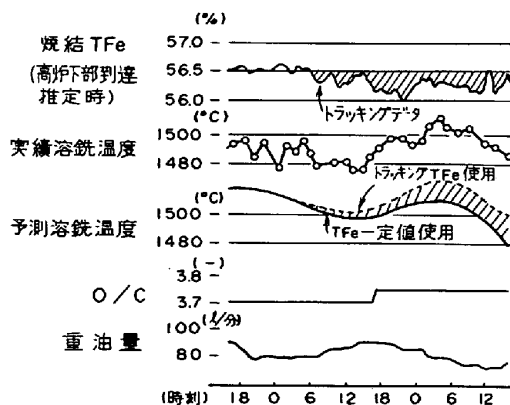


図 5. 焼結 Fe % 変化の影響

2. 送風量測定精度の検討

送風量の測定誤差は物質収支に関して影響が大きい。送風量はオリフィスで測定しており、差圧発振器以降は±0.5%F.S.の精度で管理されている。この場合、オリフィスを含む全測定系での誤差が問題になる。そこでJISピトー管（精度±1%）で流速分布を実測し、オリフィス値と比較したところ両者の間で3%を越す有意差が認められた。これを補正する事により、実績装入量(Fe,C)とモデル計算物質収支との偏差の約半分が説明できた。オリフィスに関しては設計諸元の見直しを、又発信器以降のデータ処理に関してはデジタル化による処理精度向上を検討している。

3. 高精度ガスクロの開発²⁾

高精度ガス分析に関しては、分析計本体だけでなくガスサンプリング法、分析計較正用標準ガスの信頼性の問題がある。ここでは分析計本体の高精度化につき述べる。既設ガスクロの分析再現性に影響を与える因子につき検討を行なった。その結果表2に示す1)~5)の項目に対し改良を行なった高精度ガスクロを開発した。

本高精度ガスクロはN₂ 0.1%, CO₂ 0.07%の分析精度が長期に安定しており表1の要求精度を達成できた。

図6はガス分析精度が向上することにより、制御モデルの溶銑温度推定的中率がどの様に変化するかを実炉テストした結果である。

高精度分析を行なう事によりの中率が上昇する事が確認された(表3)。

表2. ガスクロ分析精度に影響を与える因子

項目	既設ガスクロのガス分析値に与える影響	高精度ガスクロの改良点
1. 分析計本体 イ) キャリヤーガス	T.C.Dの感度 He>Ar (CO, N ₂ , CO ₂ に有利)	Heをキャリヤーとして採用
ロ) 恒温槽の温度制御	-0.33 volume %/+1℃	二重恒温槽とし温度変動±0.05℃以下
2. アナライザー周囲温度の変動	+0.28 volume %/+10℃	T.C.D以降の信号処理系をデジタル化
3. 大気圧の変動	+0.30 volume %/+10mbar	総和補正により補償
4. 電源電圧の変動	+0.15 volume %/+20V	T.C.D電流の安定化と信号処理系のデジタル化
5. サンプル中水分の変動	-0.05 volume %/+1℃	総和補正により補償
6. 出力信号処理の精度向上		信号処理系のデジタル化

表3. ガス分析精度が溶銑温度推定の中率に及ぼす影響

	テスト期間	分析値の信頼性	溶銑温度推定の中率
高精度分析	21日間	N ₂ ±0.06% CO, CO ₂ ±0.03%	82.3% (95.1%)
従来ガスクロ	21日間 (上と同一期間)	N ₂ ±0.3% CO, CO ₂ ±0.15%	78.6% (94.6%)

的中率：実績溶銑温度±10℃, ()内は±15℃的中率

4. 溶銑温度の測定タイミングの改善

従来溶銑温度はトピードに受けた溶銑の平均温度を管理する目的で、各トピード毎に受銑時間のほぼ中間で測定していた。しかし測定位置がスキンマー後であるため、出銑初期には溶銑が極耐火物で冷やされ、実際の溶銑温度より低めの温度を示す事がわかった(図7)。

炉熱制御に使用する溶銑温度は、出銑開始40分以後の測定値を使用する事で上記影響がなくなり、結果的に推定の中率が約5%程度向上した。

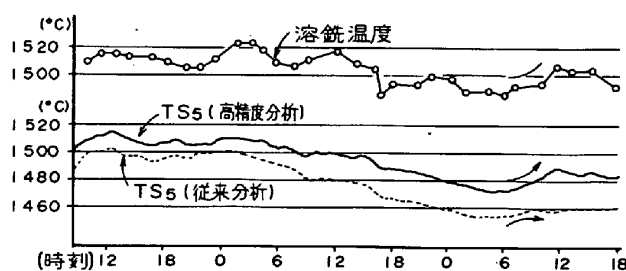


図6. 高精度分析値と従来分析値によるモデル計算値比較

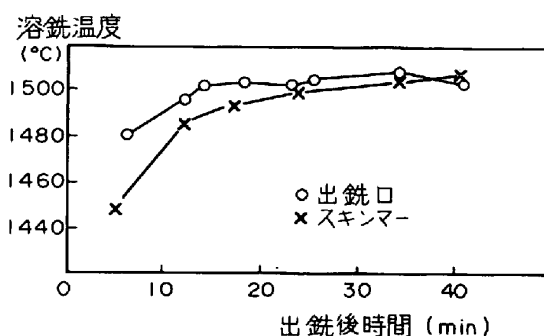


図7. 出銑口・スキンマーにおける溶銑温度測定値比較

V 実操作への適用

1. 計算機制御システム

図8に溶銑温度自動制御システムの概念図を示す。本システムでは10分毎に収集された各種操作データから高炉モデルを用いて溶銑温度が予測され、予測値と目標値の比較から制御に必要な操作量が算出される。ここで炉頂ガス・出銑データ等の高炉の出力データは高炉モデルをより実炉に適合させるための適応修正に使用されている。図9にその一例を示す如く、前述の高精度ガスクロの分析値を用いて適応修正することにより、モデル計算値の精度が向上することが確認されている。

本システムは上記制御機能の他に、モデルで使用する各種データの異常及び炉況不調の前兆となる圧損・荷下がり速度・炉頂ガス比・炉壁温度等の急変異常時には自動操作を停止し、誤動作を防止するとともに、警報により操作者が入力データ・炉況異常を早期に検出するための補助を行う機能を有している。

2. 適用結果

上記制御システムは小倉2高炉に導入され、操作ガイド・制御テストの段階を経て昭和52年より通常操業下において重油吹込み量操作による自動制御が適用された。図10に手動制御・自動制御期間における溶銑温度の制御状況の代表例を示す如く、自動制御実施により溶銑温度のバラツキが低減されることが確認され、低熱レベル操業が実施された結果、燃料比も低下した。本高炉は昭和56年1月に吹止められたが、片肺操業下で安定操業化がはかられ炉一代の燃料比は475kg/tを達成した。この結果は種々の操業改善の総合的效果であるが、計測技術のレベルアップ(精度向上, 安定稼動)を背景として、溶銑温度制御システムを用いた低熱レベル操業の推進, 異常検知補助による安定操業化が少なからず貢献したものと考えられる。

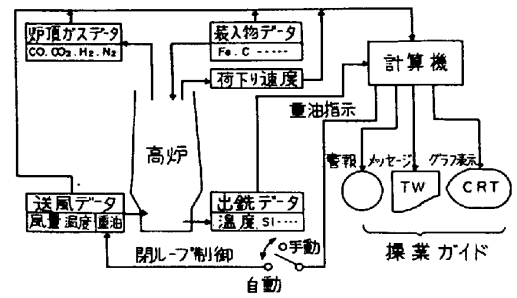


図8. 自動制御システム概念図

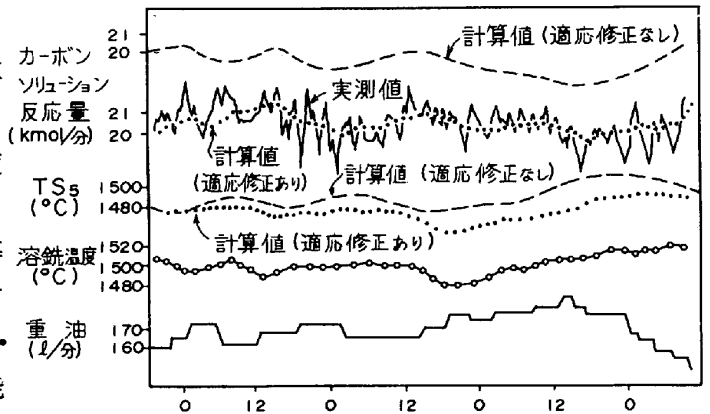


図9. モデル適応修正効果

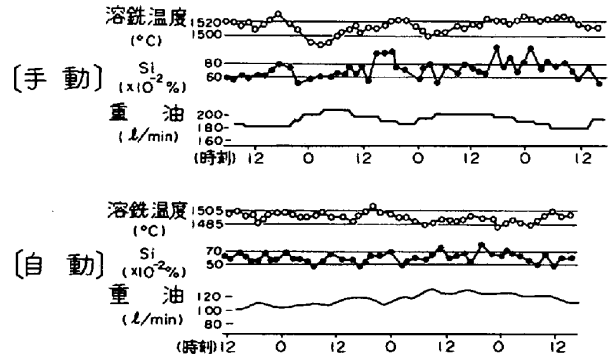


図10. 手動制御と自動制御の比較

VI 結言

高炉溶銑温度制御に要求される計測精度を数式モデルにより解析し、実際の測定精度と比較した。この結果炉頂ガス N_2 , CO_2 成分, 装入物Fe量, 送風量の測定精度が不足していることがわかった。対策として高精度ガスクロの開発, 装入物分析値のトラッキング, ピトー管によるオリフィスの較正などを行い, マスバランス, 溶銑温度推定・予測精度の向上がはかられた。この結果, 断面均一を前提とした本モデルで, 通常操業時における溶銑温度自動制御の適用が可能となった。異常炉況の予測や早期対策のためには, さらに炉内状態に対する各種計測技術の開発が必要であり, 今後の課題である。

- 参考文献 1) 羽田野, 美坂, 的場, 大塚: 鉄と鋼 67(1981)3, P518 3) 羽田野, 的場, 大塚, 芳木, 宮木: 鉄と鋼 67(1981)3, P528
2) 阪本, 藤野, 山本ら: 鉄と鋼 65(1979)11, S596