

技術資料

UDC 53.08 : 669.1

製鉄工程における計測技術の進歩*

松田 一敏**・島田 勝彦***・福喜多興二****

On Development of Measuring Technique in Iron Making Process

Kazutoshi MATSUDA, Katsuhiko SHIMADA, and Koji FUKUKITA

1. ま え が き

製鉄業における計測技術はプラント操業の自動化が進むにつれてその重要性が認識され急激な進歩をとげてきた。更に最近の計算機制御の導入によりその重要性はますます高まってきたといえよう。

内容的にみると計測対象は従来の温度・流量・圧力のようなプロセスの状態量から、製品の品質に代わりつつあり、とくに計算機制御技術が一段落した後これを飛躍させるためにも品質計測はきわめて重要な意味を持つようになると思われる。また最近の省力化の要請からも新しい計測手段が要求されるようになっていく。

本文は製鉄工程の主要なものとして原料処理・焼結・高炉の各プロセスについて最近の新しい計測技術についての展望をまとめたものである。

2. 原 料 処 理

製鉄所における原料の取扱量・貯蔵量・設備の占める面積はきわめて大きい。原料の経済的な運用は大きな関心事であるが、製鉄原料をオン・ラインで体系的に運用するシステムの必要性の提起・計画にとどまっておらず¹⁾、具体的な展開・成果について述べたものは見当たらない。原料に関する計測については槽内のレベル測定に関する報告が多く、これは原料ヤードにおける量の管理の関心が重量よりもレベルにあることを示している。

2-1 ホッパ・レベル計測

原料槽のレベルの計測は設備の広域化により自動運転・省力化・安全を確保するためには欠くべからざるものとして重要視されている。製鉄原料は粉粒体であり槽内における表面形状は一定でなく、粉塵や高熱などによりレベル測定には種々の困難な問題がある。

(1) 非接触式レベル計

この代表的なものとして超音波を利用したものがあ

る²⁾。超音波の減衰または反射を利用したもので、可動部が無く装置が密封されているため悪環境にも耐えることができる。減衰を利用したものは超音波発信器と対向して受信器を設置しておき、被測定物質が伝ば空間をさえぎることを検出するもので、一点測定に使われる。これに対して反射を利用する方式は超音波を間欠的に発信し、被測定物に反射して戻ってくるまでの時間によってレベルを測定するもので、連続的に測定することができる。米国のコークス工場では超音波レベル計を用いて、コンベア系統を集中制御した結果、従来の操業費を約15%減少させることができた³⁾。国内では焼結原料槽への適用が報告されており、測定精度は±2%で、被測定物の粒度その他の性状に対して安定であるとしている⁴⁾。

(2) 接触式レベル計

被測定物と接触してレベルを検知するもので一点測定方式(回転羽根式⁵⁾)と連続測定方式(サウンジング式など)がある。接触式は検出端が被測定物に接しているため、粉塵、摩耗、埋没などは避けられない。とくに埋没した場合は被測定物の流動抵抗が大きくレベル計の損傷が激しい。このような欠点を除くためにサウンジング式において検出重錘は被測定物に接触するや直ちに巻上るが、測定信号は次回測定時まで保持し連続的に監視ができるものが用いられている⁶⁾。

(3) 収支差によるレベル計

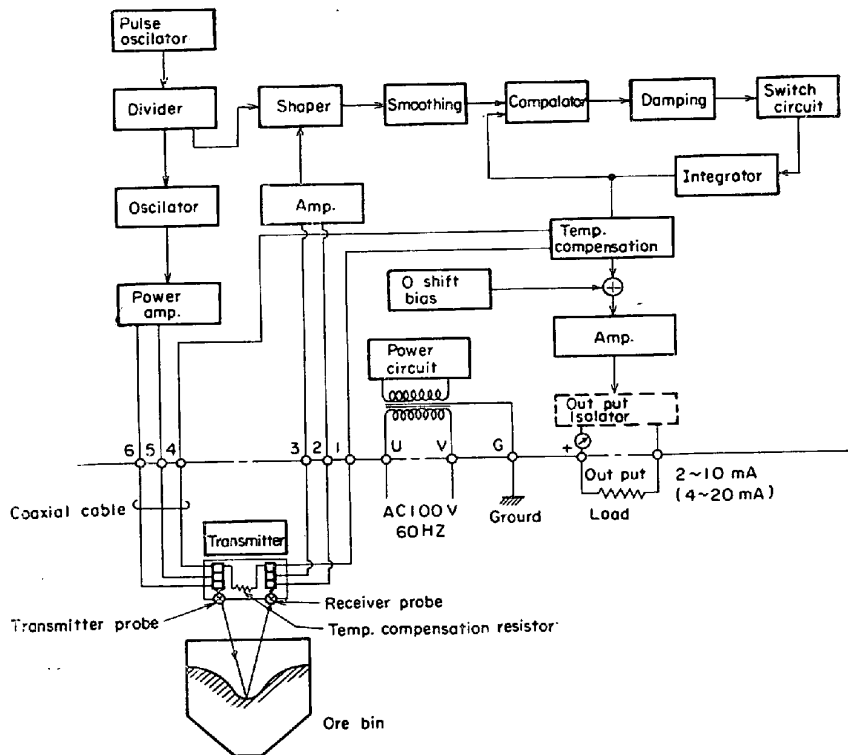
上述の方法とは別に原料槽に供給された重量と排出された重量との差によりレベルを測定する方法がある⁷⁾。供給側と排出側との秤量装置の誤差が集積されるのを防ぐために、原料槽の上限に固定式のレベル計を置き被測定物が上限に達すると、自動的に誤差が修正されるよう

* 昭和47年7月7日受付(依頼技術資料)

** 日本鋼管(株)技術部

*** 日本鋼管(株)京浜製鉄所

**** 日本鋼管(株)福山製鉄所

Fig. 1. Schematic diagram of ultrasonic ware level meter⁶⁾.

になつてゐる収支演算はデジタル回路で行なわれ、嵩密度の補正をするほか供給コンベア上の原料はシフト・レジスタを用いて追跡され原料槽の位置による誤差を補償することによつて精度の向上をはかつてゐることなど測定値の遠隔伝送にも工夫がみられる。

2.2 その他の計測

原料の移動はほとんどすべてベルト・コンベアを使つて行なわれ目的のホッパに移される。その際の問題として原料に混入する異物の検出がある。中でも金属片の混入はベルトに損傷を与え使用不能になることもあり、また原料槽からの切出フィード・ゲートその他の設備にも害を与えることが多い。原料に混入している金属片を検知する方法として鉄損型金属片検知器を使用し、40 mm × 40 mm × 20 mm の鉄片が十分検出され、磁鉄鉱の影響は無いといわれる¹⁰⁾。

原料の分析は原料の適確な使用上ますます重要になると思われるが、試料の採取から分析までを全て含むシステムについての報告は見当たらない。化学分析を自動化した装置が報告されている¹¹⁾。

3. 焼 結

焼結法は粉鉄石の塊成法として今日最も主要な地位を占めている。焼結設備の方式としては連続式で大量生産に適したドワイト・ロイド式 (DL式) がほとんどであ

る。高炉の原料としての焼結鉄に対しては、高炉の大型化と高効率操業によりその品質についての要求はきびしい。従来は、バーン・スルー・ポイント、水分、通気度などに関する計測が多かつたが、最近では直接品質をとらえようとしており、中でも磁気特性の計測が注目されている。

3.1 焼結鉄の品質の計測

焼結鉄が必要な品質を持つてゐるかどうかの試験方法としてタンブラ・テスト、シャッタ・テストの強度試験や還元性試験などがあるが、一般にサンプリングから試験結果が出るまで数時間を必要とするので、オン・ラインの測定法が要求されている。

3.1.1 化学的性質の計測

焼結鉄の分子構造が焼結鉄の性質に関係があることはよく知られてゐる。このためにX線回折法を使つて分子構造の解明とヘマタイト・マグネタイト・ウスタイトの定量分析が行なわれている。さらにX線回折法を改良し直接カルシウム化合物などの分析ができるようになった。またX線回折のデータから焼結鉄の品質が算出されている¹²⁾。(Fig. 2)

3.1.2 磁氣的性質の計測

マグネタイトの含有率が焼結鉄の品質とは密接な関係があるので、マグネタイトの持つ磁氣的性質の測定を行なう方法が開発され Permagnag と呼ばれるものがある

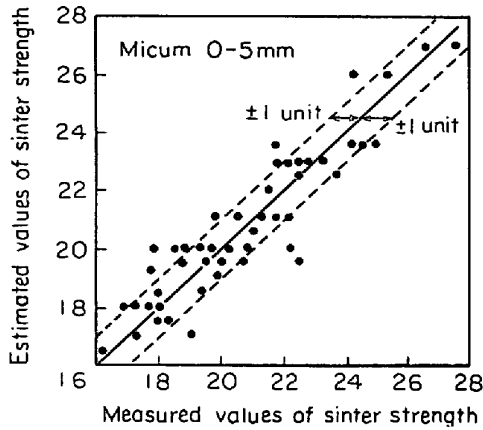


Fig. 2. Relationship between the measured values of sinter strength and the values estimated from the sinter molecular composition¹²⁾.

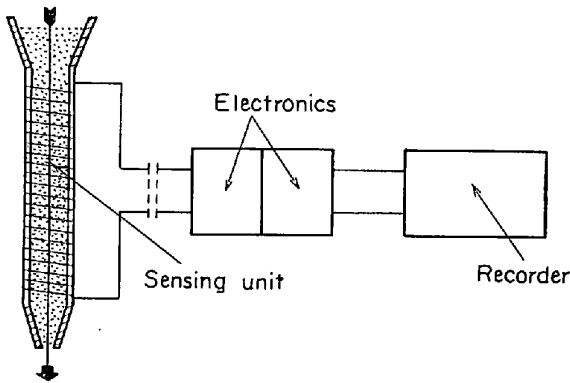


Fig. 3. Diagrammatic representation of the permagnag¹³⁾.

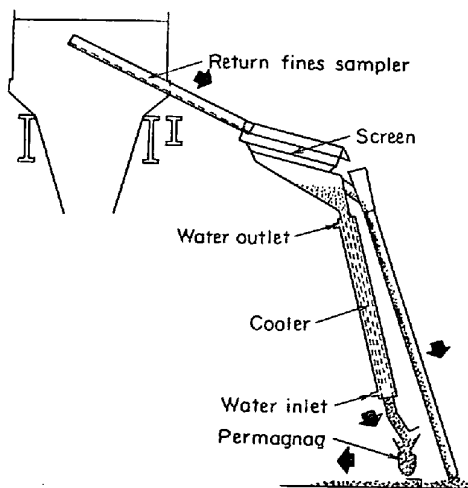


Fig. 4. Diagrammatic representation of the permagnag installation¹³⁾.

^{13) 14)}

この装置は Fig. 3 に示すようにコイルを持った円筒でできており、円筒内の焼結鉱に含まれるマグネタイトの割合が変化すればコイルのインダクタンスが変化して

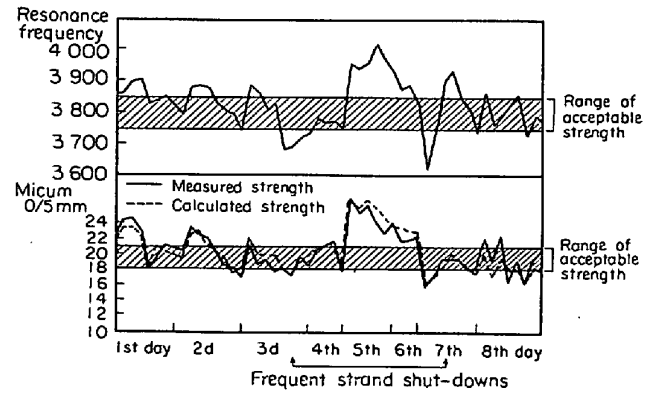


Fig. 5. Variation of micum index and resonance frequency¹³⁾.

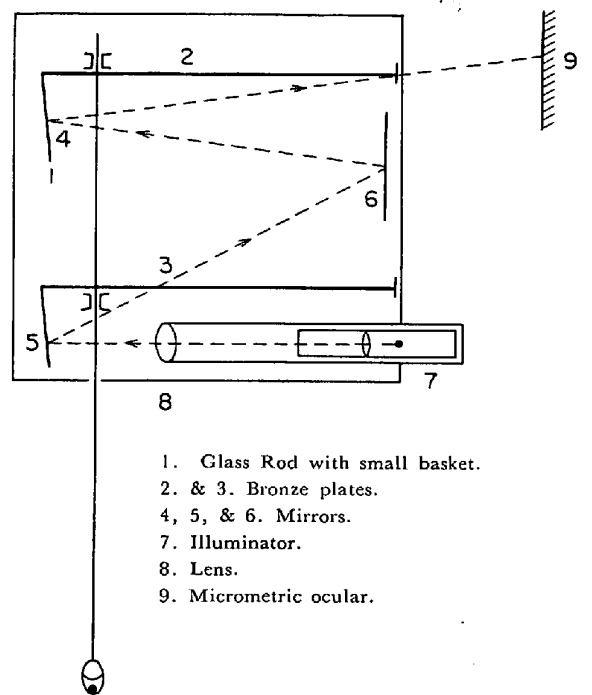


Fig. 6. Operation principle of the magnetic balance¹⁴⁾.

共振周波数が変化する。この周波数の変化がマグネタイト含有量を与えるのである。測定に影響を与える因子として

- ① 高密度 (焼結鉱の量および粒度分布)
- ② 焼結鉱の温度

の2つがある。測定に際してサンプルはホット・スクリーンのおり下から採取されるが、この点でサンプルすることは成品とのよい一致を示している。この装置による測定の例を Fig. 5 に示す。Micum 法による強度測定値(実線)と 3.1.1 で述べた X 線回折法により計算で求めたもの(点線)を示したが、Permagnag の実測値はこれらとかなり良い相関を示している。

このほかに磁氣的性質を Fig. 6 に示す磁気天秤を用

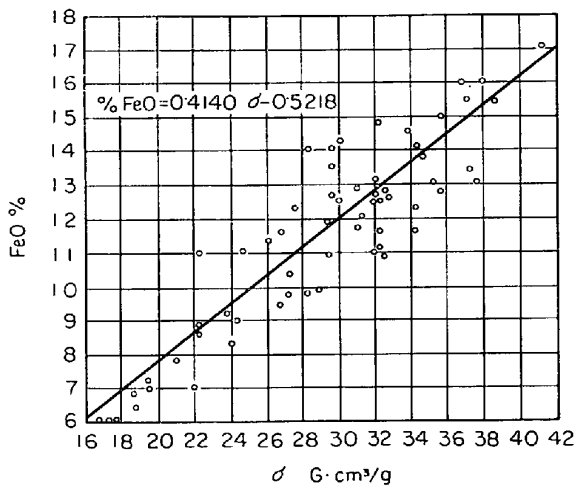


Fig. 7. Specific σ magnetization in relation to %FeO-content in sinter¹⁵⁾.

いて行なう方法もある¹⁵⁾。サンプルは細粒化されて混合され 100 気圧の圧力で 1.5~2.5 mm ϕ , 30~50mg の粒に成型したものを 1g 用いる。このサンプルを 70 個 17 800G の磁界の中で実験した結果を Fig. 7 に示す。

3.2 混合原料に関する計測

焼結機の操業において製品の品質および生産性に混合原料の性状が大きな影響を持っている。混合原料の性状の決定に水分が大きな役割を果たしている。水分添加の目的は原料の擬似粒度を向上させ、パレット上での適正な通気性を確保し、燃料消費を押えながら生産、品質を維持しようとするものである。混合原料の粒度を直接測定する試みはみられないが、通気度の測定あるいは水分測定に関する研究は多くみられる。

3.2.1 混合原料の水分計測

混合原料の水分測定には各種の方法があるが、従来乾燥前後の重量差で求める方法または混合原料を手で握って観察する方法などがあつた。現在最も広く用いられているのは中性子水分計でその評価が確立されているように見受けられる。わが国では中性子水分計以外の報告が見当たらないのに対して、海外では電気伝導度測定などの報告があり著しい対照をみせている。

(1) 中性子水分計

中性子水分計の原理は文献¹⁶⁾に詳しく述べられているが、その原理から明らかなように混合原料の水分測定に用いた場合、鉱石中の結晶水分を含めて測定してしまうことおよび周囲の試料の嵩密度の影響を受ける。後者の問題には γ 線密度計で補正する方法が一般的に行なわれており、その効果が認められている^{17)~20)}。中性子水分計の使用上の問題点、精度などに関して計測部会中性子水分計小委員会報告¹⁷⁾¹⁸⁾に詳述してある。

混合原料の水分測定はサージ・ホッパで行なわれることが多くほとんど挿入型が用いられている。これはホッパ内の原料の滞留が避けられないためである。一方点火炉前のパレット上に表面型の検出器を取付けて成功したという報告があるが²⁰⁾、これは装入された混合原料の嵩密度と層厚を完全に一定に保つために種々の問題を解決しなければならないと述べている。また検出器の位置をコンベア、パレット、サージ・ホッパと変えているのも同様な理由によるものであろう²¹⁾。

コンベア上の原料の水分測定に関しては Moisturay と呼ばれるものがある²²⁾。これはコンベア上の原料の輸送量、形状、成分、粒度分布、嵩密度に関係なく長期間にわたって精度よく測定できるようになっている。測定原理は Fig. 8 に示す通りで γ 線密度補正付中性子水分計である。精度維持のためオン・ラインの校正装置により周期的または随時校正が可能となっている。この装置の結果は Fig. 9 に示すが、コンベアに付着している水分や輸送原料中の炭素などの測定に影響を及ぼす要因などに注意する必要がある。

(2) 電気伝導度による水分計測

混合原料の電気伝導度が含有水分と共に増加することを利用して水分測定を行なうもので海外で試験または実用に供されている²⁰⁾²³⁾。

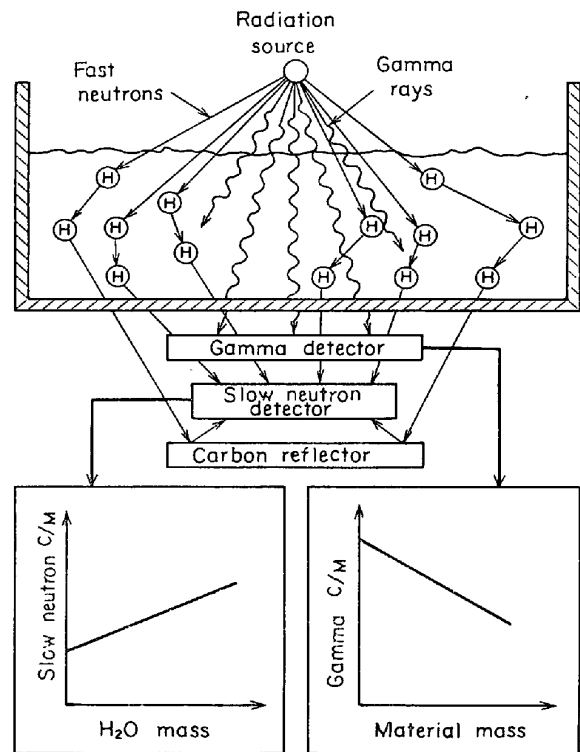


Fig. 8. The mechanics of neutron and gamma ray detection²²⁾.

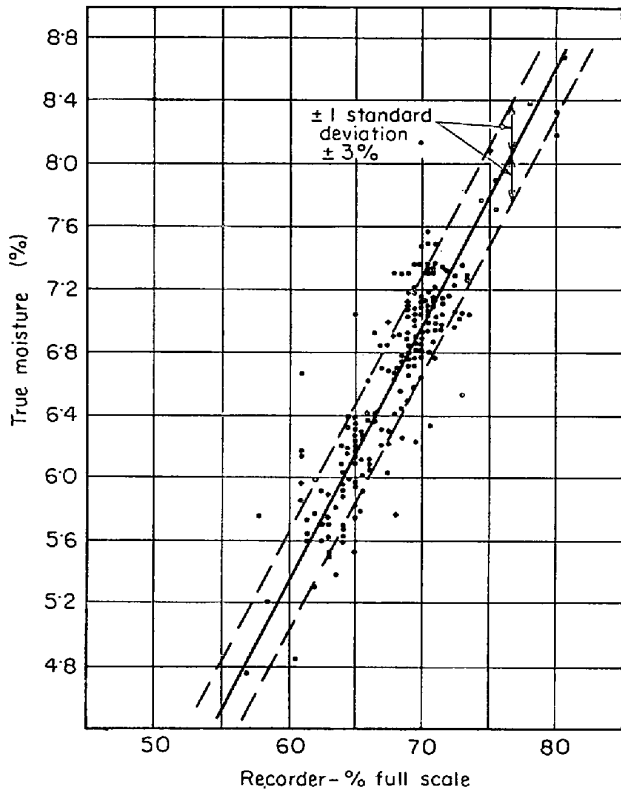


Fig. 9. Field test results under planned extreme operating conditions²²⁾.

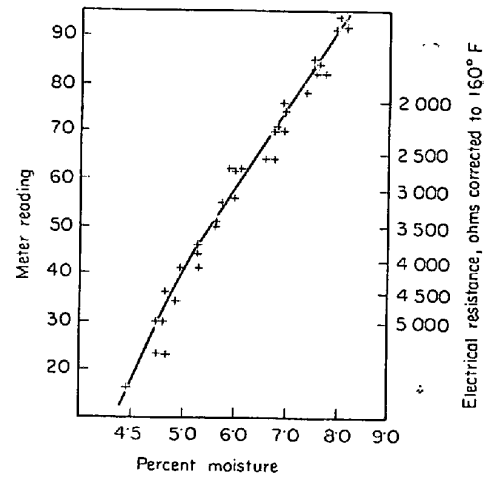


Fig. 11. Calibration curve showing the inverse relationship between electrical resistance and moisture content of a sinter mix²³⁾.

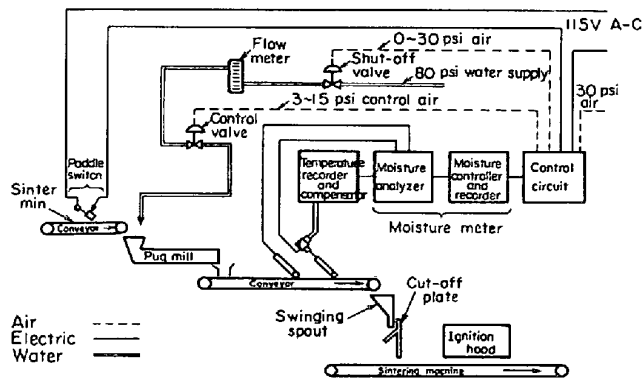


Fig. 10. Automatic moisture control in sinter-mix feed²³⁾.

米国のものの²³⁾測定方法および制御方法は Fig. 10 に示すもので、コンベア上に対の特殊な電極を設置して電気伝導度を測定し、一方の電極に熱電対を組み込んで温度補償ができるようになっていいる。測定の結果電気伝導度と水分の関係は Fig. 11 に示すような関係があつた。この方法はコンベア上の原料の量、混合原料の成分、水溶性の電解質の量などによつて電気伝導度が一定でないが、輸送量や層厚の変化に対してはプローブの混合原料に対する接触圧を重りによつて一定とすることで対処しており、 $\pm 0.32\%$ の精度であるとしている。

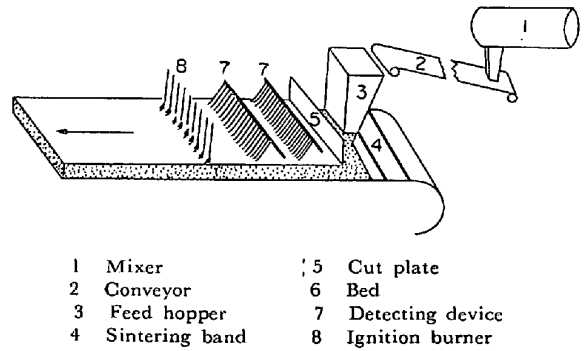


Fig. 12. Schematic diagram of comb type detector²⁰⁾.

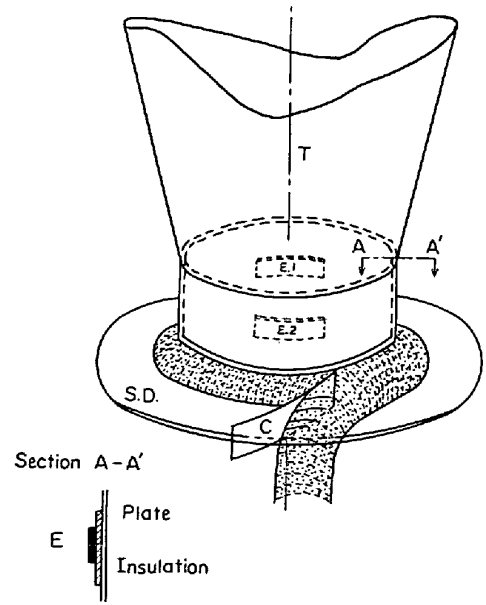


Fig. 13. Measurement of electric conductivity at constant feeder²⁴⁾.

一方欧州のものは²⁰⁾ Fig. 12 のようにくし形検出器を点火炉の前に設置したもので、測定の精度は水分で $\pm 0.5\%$ 程度である。また板状の検出器を備えた電気伝導計を定量切出装置に取付けた方法が試みられている²⁴⁾。(Fig. 13) 電極は絶縁板を介して対向して配置され 48V の一定電圧が印加されている。この方法による精度は水分で $\pm 0.5\%$ 以下である。

この他電気伝導度を測定して水分を測定する方法はソ連でも試みられているが²⁵⁾、このサージ・ホッパに取付けられた検出端の詳細は明らかでない。測定に当つては混合原料中の炭素含有量および温度の影響が大きく、電極に取付けたサーミスタ温度計で補正を行なっている。炭素含有量は原料切出の比率制御が安定しているため変動の原因とはならない。ホッパ内の嵩密度、電解質の影響についてはふれてないが測定精度は水分で $\pm 0.4\%$ 以下であるとしている。

(3) その他の水分計測法

混合原料を電気炉で加熱し、蒸発した水分を回収凝縮させて、凝縮した水分を自動ビューレットで定量する方法で水分で $\pm 0.3\%$ 以下の精度が得られるという報告があるが²⁶⁾、実験室的にはとにかく工業的には自動化、省力化、保守上からみて問題であると思われる。

混合原料の熱伝導を測定して水分との関係を見い出そうとする試み²⁰⁾は時定数が大きくかつ粒度分布の影響が大きく実用化されなかつた。

3.2.2 混合原料の通気度の計測

混合原料の通気度を直接測定することは水分測定のように間接的な方法よりも操業管理上有効であろう。欧州で開発され実用化されている通気度測定 (Permea Meter) の方法は Fig. 14 に示すように混合原料のホッパにパイプを入れ一定圧力または流量の空気を供給して、その圧力または流量を測定して通気度を求める方法である¹³⁾²⁷⁾²⁸⁾。この装置を用いて実際のプラントで測定した結果は Fig. 15 に示すように乾燥法と比較して $\pm 0.2\sim 0.3\%$ の精度を示しており基礎試験とよく一致した。しかしこのようなよい一致が得られるのはごく短期間で、混合原料の成分、混合原料の粒度分布、返鉄の量と質、コークスの性質 (特に粒度) などの影響を受けるので混合原料の予備処理が十分行なわれている必要がある。

この他同様に混合原料を円筒型の容器に入れて通過する空気の量を測定する方法がある²⁹⁾。測定の結果通気度と粒度の間には Fig. 16 に示す関係があつたが通気度と水分の間には一般的な関係は認められないとしている。これは混合原料が変われば必要水分量が変わるためである。この方式は測定装置への混合原料の供給、排出を自

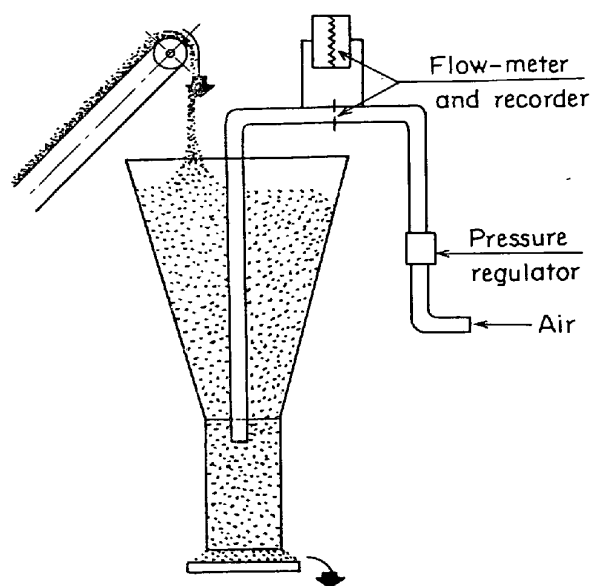


Fig. 14. Diagrammatic representation of the device for measuring the permeability of the raw sinter mix.

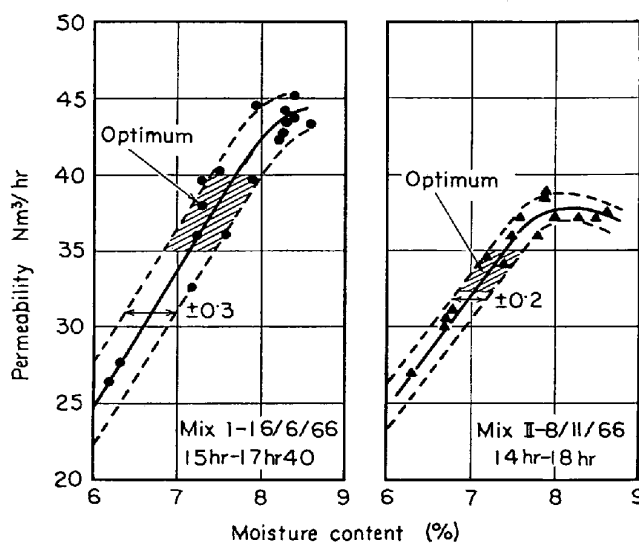


Fig. 15. Permeability/Moisture content relationship¹³⁾.

動化することによつて、オンライン測定も可能である。焼結作業により直接結びつく通気度測定の方法として焼結機に装入された状態の混合原料の通気度測定を行なっている例もある³⁰⁾。この方法はカット・プレート直後の点火炉前の混合原料にパイプをそう入し、パイプに供給された空気の流量および圧力を測定して通気度を計算する。この結果と焼結終了点の風箱温度との対比を求めているが、両者の間には強い相関があることが確認でき、パレット上の通気度は給鉄装置で制御できると述べている。

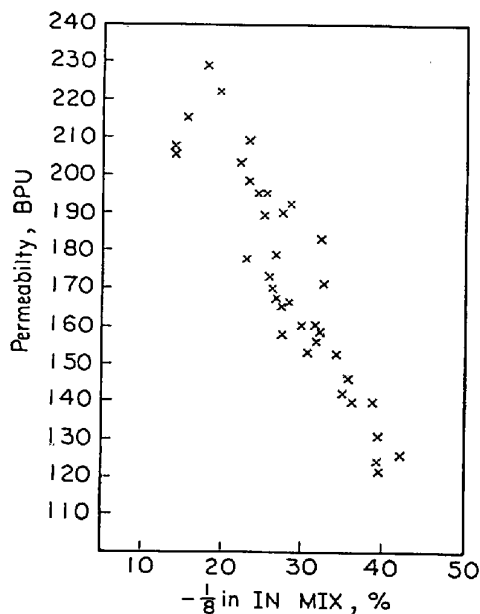


Fig. 16. Sinter mixture permeability v. $\frac{1}{8}$ in in mix²⁰⁾.

3.3 焼結機に関する計測

焼結鉱の生産性、品質に関しては混合原料の性状だけでなく、パレット上での焼結過程も影響を与える。焼結機の周辺におけるいくつかの測定が試みられている。

(1) 風箱排ガスに関する計測

風箱流量の測定は標準ノズルの使用が困難であるため悪環境でも使用可能な新型ノズルが開発されている。これは模型実験に基づいて種々の型式のノズルについて流量係数を求め、実操業に適したノズルの内に堆積するダストの影響を受けないような形状のノズルの設計の経過が報告されている³¹⁾。

排ガスの成分分析においてサンプルガスに含まれるダストの除去は重要な問題であるが、シリカ繊維のフィルタにより 700°C の温度に耐え、除塵率は 99.8% であるとの例がある。フィルタの洗浄は圧縮空気による逆洗で行ない、サンプリング配管を加熱してドレンの発生を防止してガス分析計システムの信頼性を高めようとしている³²⁾。一方ドレンを除去しなければならない場合測定ガスの種類によってドレンへの溶解によるガス成分の変動、ガスを含むドレンによる機器の腐食などの問題が多い。このようなときドレンは電子冷却装置などによって急速に冷却しドレンの分離を短時間に局所的に行なう必要がある³³⁾。

(2) パレット積込みに関する計測

パレット上に混合原料を均一にかつ一定に装入するためにいくつかの計測方法が考えられている。この中にはカット・プレート付近の混合原料の山の高さを電極で検

出する方法³⁴⁾、カット・プレートにかかる力をロード・セルで検出する方法³⁵⁾が報告されており、給鉱量を制御することにより焼結条件を安定させようとしている。

(3) 焼結過程に関する計測

焼結過程における液相が電気良導体であることに着目し、これを測定することによって焼結鉱の性質を究明しようとしている試みがある。基礎実験として電気炉において各層（床敷層、湿潤凝縮層、乾燥層、加熱層、燃焼溶融層、焼結・冷却層）の電気伝導度について測定し、実際のプラントにおいて電気伝導度によって焼結過程を知ることができるとしている³⁶⁾。

焼結過程の完了を排鉱部の焼結層の温度によって判定することは広く行なわれているが、排鉱部に放射温度計を取付けて、焼結層温度と焼結完了状態の関係を調査し実操業で利用できるという報告もある³⁷⁾。

4. 高 炉

最近の高炉の大型化、高能率化、自動化に伴い各種の計測技術の開発がみられた。送風湿度、重油吹込、溶鉄温度などの測定は一応その開発が一段落したものと見ることが出来る。最近の傾向としては炉頂関係（ガス分析炉頂温度パターン、ストック・ラインなど）と羽口や冷却函の関係の計測の研究が盛んである。これは高炉を一つのブラック・ボックスとして扱う方法では限界があることや省力化の要請に基づくものである。

4.1 炉頂関係の計測

4.1.1 炉頂ガス分析計

高炉の炉況制御として熱レベルモデルが数多く開発され計算機を用いてオン・ライン制御されているが、このモデルにとって最大の情報を与えるものが炉頂ガス分析計である。一般に分析しているのは一酸化炭素 (CO)、二酸化炭素 (CO₂)、水素 (H₂) の三成分である。

(1) 分析計の比較

ガス分析計として一般に用いられるものとして吸気式、熱伝導式、密度比式、赤外線式、ガスクロマトグラフなどがあるが、工業的に高炉の炉頂ガス分析計としては赤外線式で CO、CO₂ 熱伝導式で H₂ を分析するものと、ガスクロマトグラフの 2 種類が多く用いられている。最近欧州で質量分析による高炉ガス分析が試みられているが、まだ一般的ではない³⁸⁾。

赤外線式+熱伝導式とガスクロマトグラフのいずれを採用するべきかは、なかなかむずかしい問題であるが、おのおのの方式の特徴を吟味してそれぞれの高炉にあつたものを採用しているようである。

赤外線式+熱伝導式の特長は連続測定が可能であるが

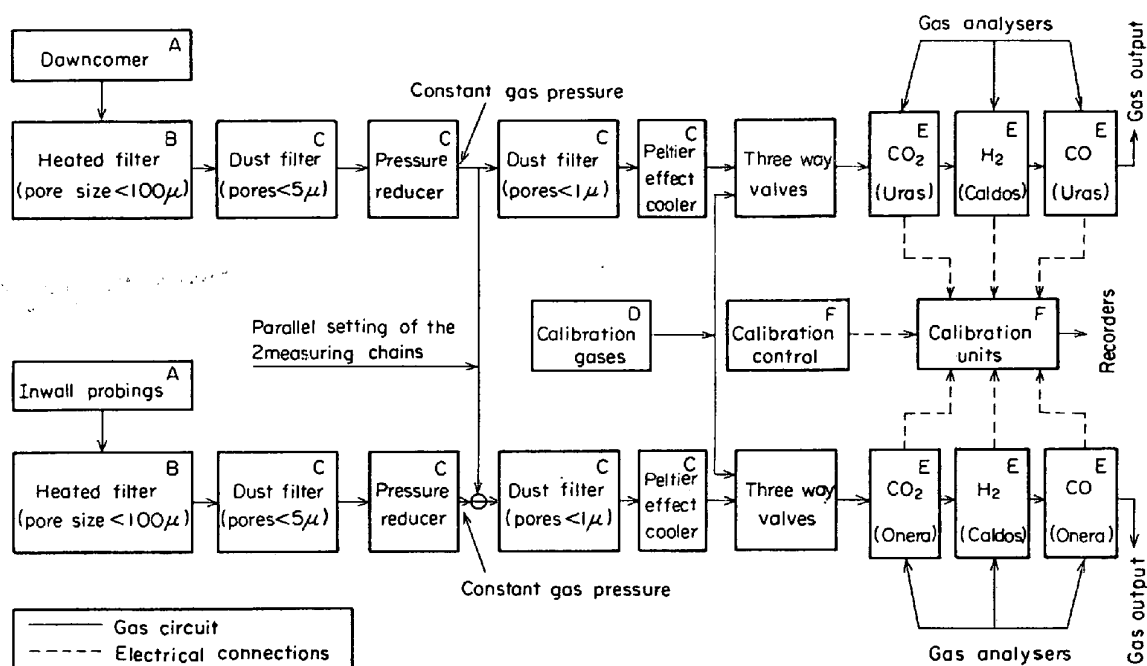


Fig. 17. General layout of the measuring circuit⁴⁸⁾.

周囲条件の変動を受けやすく、一成分に一台ずつの計器が必要である。一方ガスクロマトグラフは一台で多成分系のガスが分析可能であるがその性格上測定が間欠的になる点が問題である。ヘンペル式分析計との比較試験によれば測定精度は両方式ともほぼ似たようなものである^{39)~41)}。

(2) サンプルングに関する問題

ガス分析計の種類にかかわらずその精度維持に大きな影響を与えるものはガスのサンプルング装置である。サンプル・ガス中には多くのダストや水分が含まれており、これをいかにうまく処理することができるかが、分析計の安定性を大きく左右すると言えよう。

ダスト除去にはフィルタを多段式とし、第一段の加熱フィルタで 100μ 以上のダストを除去し、第二段のフィルタで 10μ 、第三段のフィルタで 1μ までのダストを除去している⁴¹⁾⁴²⁾。またドレン対策としては加熱フィルタ直後に水冷式の冷却器を取付け、さらに第三段フィルタの直後に電子冷却器を置いてサンプル温度を $4^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ に制御している⁴²⁾。

サンプルガスのコンディショニングとしてこのほかに圧力を一定に保つことが重要である。標準ガスを用いてガスクロマトグラフのガス圧による指示誤差の調査を Fig. 18 に示す⁴³⁾。圧力が高くなると分析値は高目になり、 $100\text{ mm H}_2\text{O}$ の圧力変動によつて分析値は H_2 が 0.02% 、 CO が 0.25% 、 CO_2 が 0.19% 変化した。分析計へのガス導入圧は一定に保つことが必要であり、精

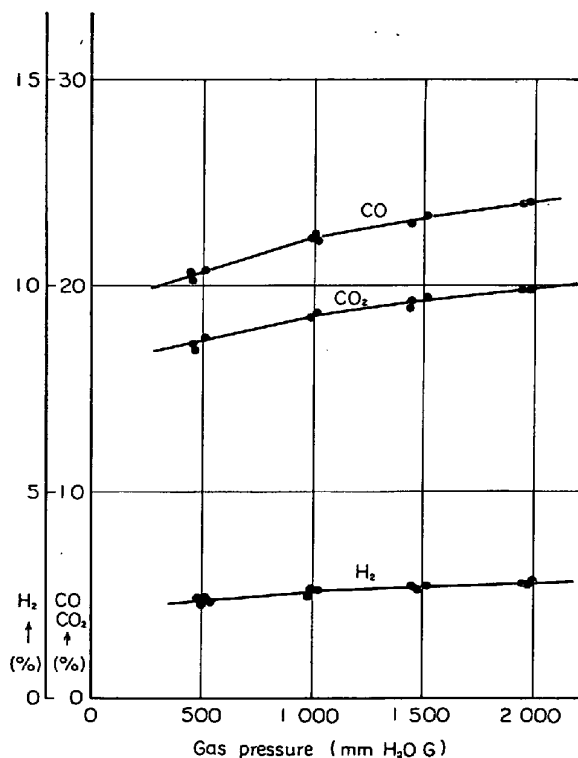
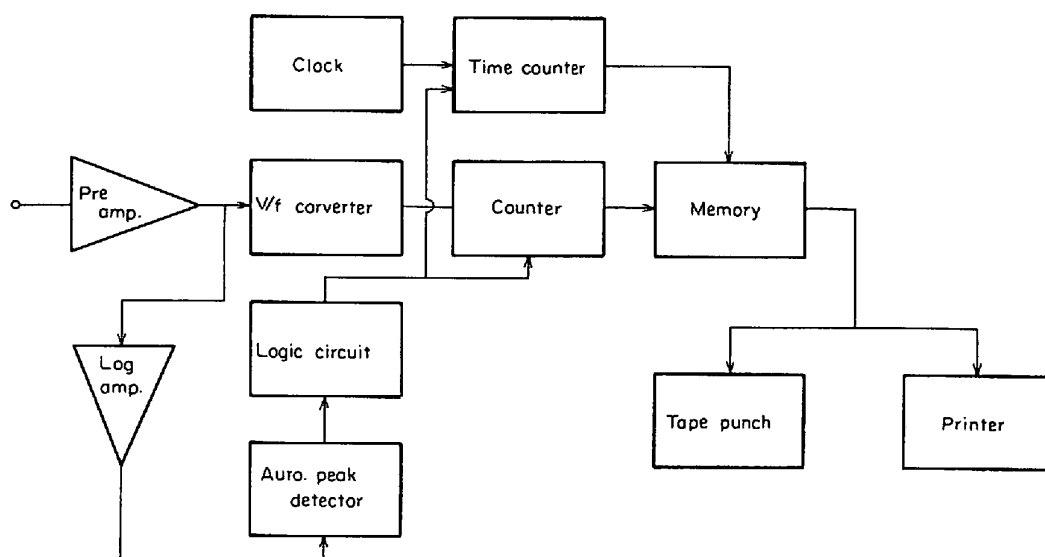


Fig. 18. Relation between sample pressure and indication⁴³⁾.

度向上のためには大気圧の変動も考慮しなければならない。

(3) デジタル技術の応用

プロセス用ガスクロマトグラフではピークの面積を求めの代わりにピーク高さで測定しているのが通常であ

Fig. 19. Schematic diagram of digital integrator⁴⁴⁾.Table 1. Accuracy of gas chromatograph with digital integrator⁴⁴⁾.

	H ₂ = 2.9%	N ₂ = 63.1%	CO= 19.7%	CO ₂ = 14.3%
\bar{X}	19 652	40 581	12 946	6 574
R	125	143	245	132
δ	39	45	45	43
σ/\bar{X}	0.0057	0.0011	0.0035	0.0065
run number : 13				

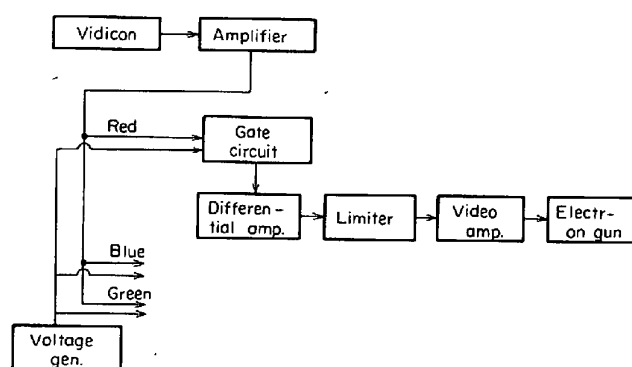
る。しかし精度の点から考えるとピーク高さは誤差が生じやすく、原理的にもピークの面積を測定すべきである。このためにデジタル積分器を用いた方法が報告されている⁴⁴⁾。Fig. 19 にそのブロック図を示すが、ガスクロマトグラフの電気出力は電圧一周波数変換器でデジタル変換されカウンタで計数される。一方信号は対数増幅器を通して自動ピーク検出回路に入りカウンタの動作終了を制定する。この方法の精度試験の結果はTable 1 に示すとおりである。

4.1.2 炉頂温度に関する計測

高炉炉頂の装入物やガスの温度分布を測定して、炉況判定や異常炉況予知の手段にしようとする試みが最近盛んに行なわれている。炉頂の温度計測については炉径方向に熱電対を 5~10 本設置して径方向の温度分布を測定する方法もあるが、この方法では装入物の落下によって熱電対が破損しやすく、また炉頂面全体の情報を得るのはなかなかむずかしい。

(1) 赤外線テレビによる計測

赤外線 Vidicon を用いて炉頂温度パターンを測定し

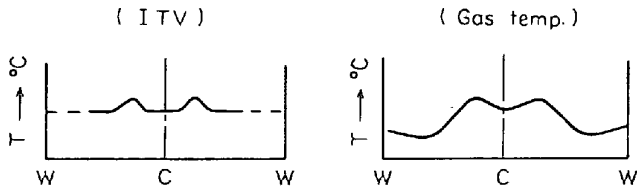
Fig. 20. Block diagram of temperature pattern indicating device⁴⁶⁾.

た報告がある⁴⁵⁾⁴⁶⁾。この赤外線テレビは中温領域の工業的溫度パターン計測用に開発されたもので Fig. 20 に系統図を示す。これによつて測定した結果ストック・ラインの溫度パターンがほぼ等しいことがわかつた。またストック・ラインの溫度パターンから炉内のガス流速分布が推定でき、望ましいガス流速分布が得られるように装入方法が制御できると共に、棚吊り、スリップ、吹抜けなども観察できる。溫度パターンとガス溫度分布の状態を Fig. 21 に示す。

(2) 炉内観察窓

赤外線テレビによる溫度パターン計測時はもちろん、他の種々な目的で炉内観察を行なうためには観察用の窓が必要となる。この窓についてこれまでの欠点を除くために次のような考え方で検討し成功したという報告がある⁴⁷⁾。

- ① 窓の大きさは炉内が十分観察できるように十分大きくする。



(C : center of furnace, W : wall of furnace)

Fig. 21. Temperature pattern of burden and temperature distribution of gas in blast furnace top⁴⁶⁾. (Relatively much ore is charged at and around the furnace center)

- ② 窓は透明に保たねばならないので、適当な清掃装置を取付けておくこと。(電磁弁を介して圧縮空気によつて駆動されるブラシによつて清掃する.)
- ③ 窓にはガスを通さない扉を取付ける。(この扉はハンドルによつて開閉される.)
- ④ 窓に付属する全ての機械装置は温度、蒸気、振動、ダストに十分堪えるようにすること。

4.1.3 装入高さや形状の計測

装入高さの計測は炉が順調に操業されているか否かの重要な指標になっている。異常に荷の降下速度が遅い場合は棚吊りとして検出できるし、速度の大小によつて炉熱の推定も行なっている。装入形状の計測も装入の分配がうまく行なわれているか、また吹抜けを起こして異常に下つている部分がないかなどの検出に役立つ。

装入高さの計測はわが国ではほとんど機械式の検尺棒で行なっているが、欧州では放射性同位元素やマイクロ波を使つた非接触式測定器が用いられている。後者の方法では検尺と形状の測定が共に可能である。わが国では検尺棒を使用しているため形状の測定は不可能なので、前項で述べた炉頂温度測定装置などにより炉頂ガスの温度分布を測定することで代用しているところが多い。

(1) マイクロ波による計測

このシステムはマイクロ波送信器、受信器と2つのアンテナからなる周波数変調 (FM) マイクロ波高度計である⁴⁸⁾。FM 高度計の動作原理を Fig. 22 に示す。ここでは時間に対して周波数の変調が三角波であるものが示されている。実線は送信器で選出された信号を示し、点線は同じ信号が目標から反射されて受信器に現われたものを示している。2つの信号が受信器で混合されると、その大きさが送信器と目標の距離に比例したうなり周波数が検出される。送信および受信信号の折返し期間にはうなり周波数は0に低下しそれからもとの値に再び戻る。この期間に得られる誤った情報は距離の測定において“固定誤差”として現われる。この誤差を低減するた

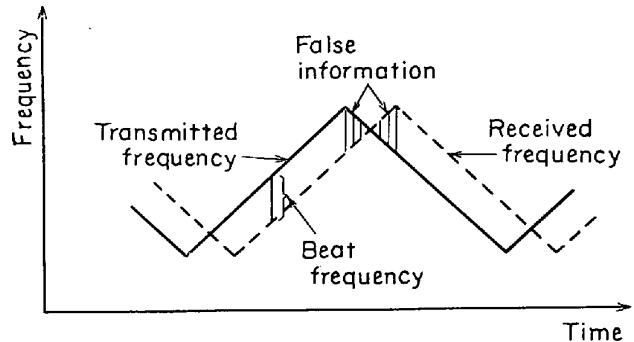


Fig. 22. Principle of FM Altimeter⁴⁸⁾.

めに二重変調システムを使用して誤差を ± 50 mm 程度にしている。

(2) 放射線同位元素による計測

この方法は計測しようとするレベルに鉄皮にそつて垂直方向に数個の放射性同位元素を並べておき、水平方向に 180° 反対側に計数管を設置して、線源と計数管の間に装入物があるか否かを検出しようとするものである⁴⁹⁾。線源としては 50mCi の Co^{60} が使用されている。

Fig. 23 に線源と計数管の位置を示す。6組の装置間の垂直距離は 400 mm で装入の1/2回分に相当する。Fig. 24は装置全体のブロック図で、同一レベルには線源と受信器が 90° 間隔に配置されていて装入線が傾斜していても平均的なレベルが得られるようになっている。

4.1.4 垂直ゾンデによる計測

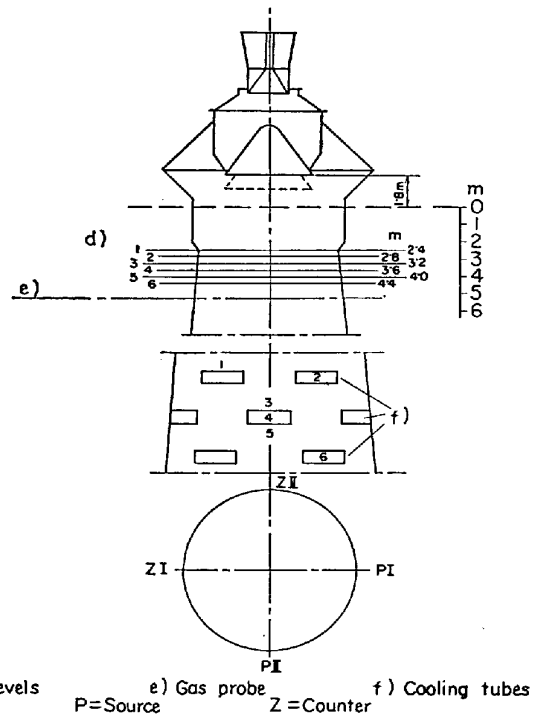


Fig. 23. Arrangement of measuring levels on the stack⁵⁰⁾.

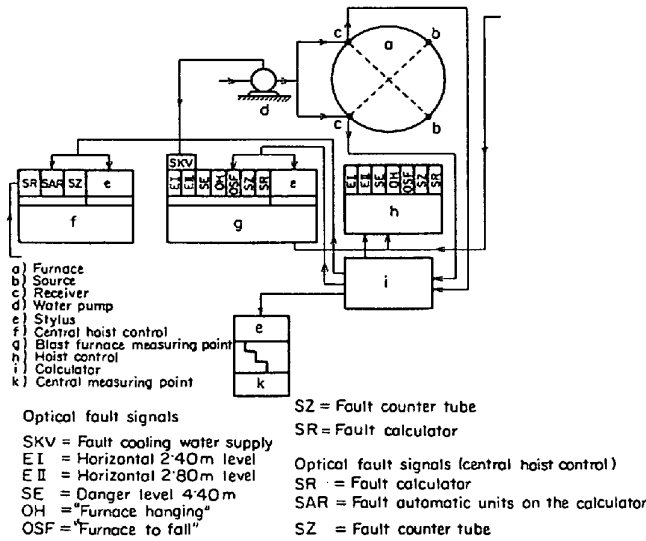


Fig. 24. Block diagram of burden level indicator using radioactive isotopes⁵¹⁾.

製鋼炉と違って高炉の炉内現象を直接つかむことは非常にむずかしいこととされてきた。したがって炉頂ガス分析計の情報などを手がかりとして炉内現象を推定してきたわけである。炉内の直接測定のために垂直ゾンデを用いる方法が最近本格的に行なわれ、炉内調査が行なえるようになってきている⁵¹⁾⁵²⁾。このゾンデによつて装入物上面からシャフト下部までの間で、ガス組成、温度、ガス圧力などの軸方向の変化が調査可能となり、これらの測定値から各セクションごとのソリューション・ロス、石灰石分解反応、鉄鉱石の間接還元反応などの反応速度を求め、さらに温度プロファイルあるいは炉内の通気性についても検討を加えることができるようになった。

ゾンデの概要は Fig. 25 に示す。本体は外径 34 mm 肉厚 3.2 mm あるいは外径 43 mm 肉厚 6.4 mm の鋼管製で全長約 20m である。ゾンデは炉頂から炉内にそう入され、シャフト上端から 10~11m 下まで測定可能である。先端側面にはガス・サンプリング用の 5 mm φ の穴が 20~30 個あけてあり、測温は G-A のシース熱電対が取付けられている。ゾンデの内部やガス配管がダストで閉塞することを防ぐために窒素ボンベが接続されパージを行なっている。Fig. 26 に測定結果の一例を示す。

4.2 羽口および冷却板破損防止に関する計測

今日高炉の生産性に最も影響しているのは羽口破損による休風で、この破損原因の解明と寿命延長対策が進められている。また冷却板についても炉体の保護寿命の延長の点からみてきわめて重要で、炉体の冷却を十分に行なうためにはその数が高炉一基当たり千個を超えることもあり、その傾向は高炉の大型化に伴つて増加すると考

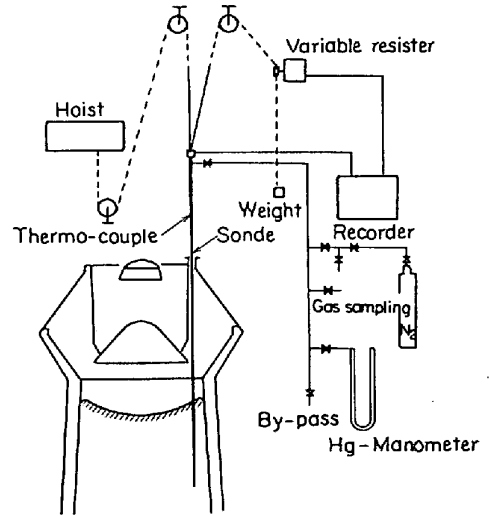


Fig. 25. Schematic arrangement of the experimental apparatus⁵²⁾.

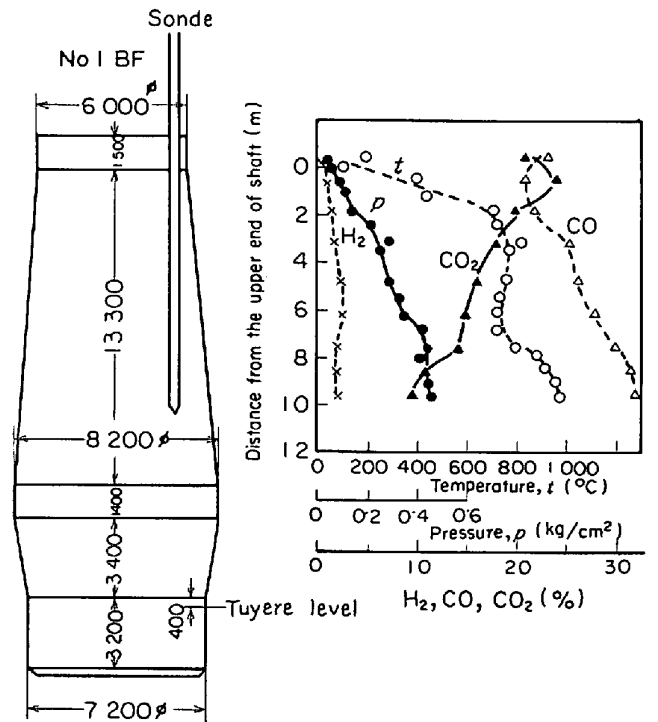


Fig. 26. Longitudinal distributions of temperature, composition and pressure of gas in the blast furnace shaft⁵²⁾.

えられる。万一羽口や冷却板より漏水した場合にはワークス比の上昇のみならず、炉の冷え込などの事故に結びつくことも考えられる。したがってこの漏水を早期に見つけて大事に至らないうちに処置するために、漏水検出方法が各所で検討されている。

(1) 冷却水排水温度測定による方法

羽口や冷却板の溶損によつて生ずる冷却排水の温度変化を検出しようとする方法である。ただ単に排水の温度

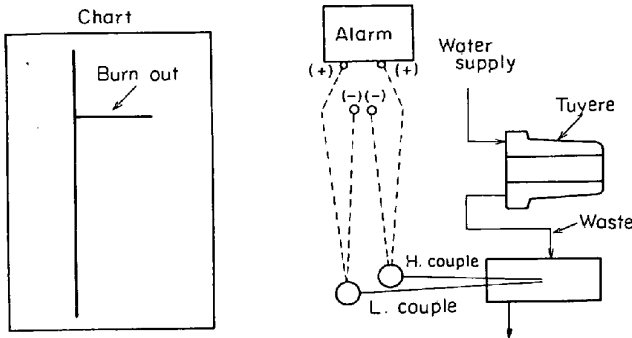


Fig. 27. Principle of water leakage detector⁵³⁾.

を測定する方法では、給水温度、給水量あるいは炉況などによる温度変化が大きく、これが外乱となつてなかなか溶損を発見することができなかつた。しかしこの外乱による温度変化は緩慢であり、一方羽口が異常をきたしたときはパルス状の急激な変化を生ずることにより、これを検出する方法がある⁵³⁾。

Fig. 27 のように冷却排水管の同一箇所感度の異なる二本の熱電対をそう入し、両熱電対の起電力が打ち消し合うように接続する。こうすることにより羽口が正常で排水温度が外乱のみによつてゆるやかな変化をしているときは二本の熱電対の間に温度差が生ぜずバランスして直線的な指示が得られる。これに対して羽口が溶損する過程において排水温度が急上昇した後下降するというパルス状の温度変化が生ずると両熱電対の間には一時的に温度差が生じる。この変化を警報計でとらえて溶損を発見する。

(2) 冷却水の流量測定による方法

溶損によつて生ずる冷却水の入口と出口の流量差を検出しようとする方法である。溶損をなるべく早く発見するには入口と出口の微小流量差が検出できなければならないが、現存の差圧式流量計ではせいぜい 0.5% 程度の精度しかない。また電磁流量計についても単独で使用した場合はたかだか同程度の精度であるが、これを Twin 型にして同一磁場の中でその他の条件もそろえてやることにより、微小流量差を検出する方法がある⁵⁴⁾。この型式の電磁流量計の構成を Fig. 28 に、差流量の検出精度を Table 2 に示す。流量差が大きくなる(漏れ量が多くなる)と誤差は若干大きくなるが記録上は大幅なペン移動となるし、また流量差が小さい(漏れ量が少ない)場合は精度がよく漏れの検出に使用可能であるとしている。

(3) 音響による破損検出の方法

一般的に炉内圧力と冷却水圧力との大小関係によつて冷却函に小孔または小さな破損が生じた場合には、炉内

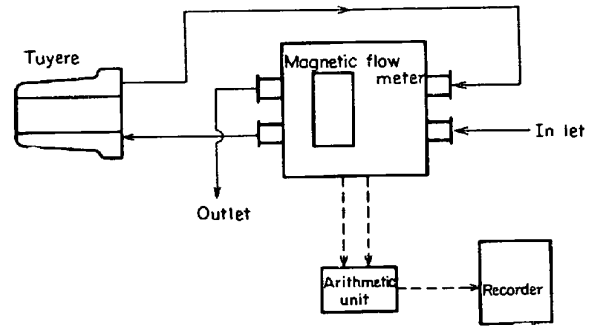


Fig. 28. Feature of twin type-magnetic flow meter⁵⁴⁾.

Table 2. Accuracy of twin type magnetic flow meter⁵⁴⁾.

Actual value	Measured value	Error
5.9 l / min	5.5 l / min	-0.2
16.6	16.0	-0.3
31.0	30.0	-0.5
52.0	48.5	-0.7
73.0	69.0	-2.0
100.0	100.0	0
147.0	144.5	-1.3

error : per 200 l/min

への漏水が生ずる場合と逆に炉内ガスが冷却水中に混入する場合があります、この二つの状態が高炉内での激しい動圧変化によつて交互に繰り返されながら漏水が進行していくと考えられる。したがつて漏水に伴つて発生する気泡による音が検出できれば漏水の検知が可能となる⁵⁵⁾。

気泡音は気泡が生成したときの体積変化が音波として伝ばするものでその周波数は計算すると 500~1 000 HZ 程度である。この音は耳で聞いてかなりよく判別できる。羽口と冷却板では後者の方が雑音が小さく判別しやすい。時間的にあるリズムを持つ音の解析はかなり困難であるが Sonagram (声紋) による解析などが利用されている。

(4) 炉頂ガス中の水素による方法

炉頂ガス中の水素の挙動を CO ガス利用率と関連して考察すると、水素の利用率と CO の利用率の間には一定の関係があるので、この関係を用いて漏水検知を行なう方法がある。炉頂ガス中の水素の増加で検出する試みが各所で行なわれたが、この方法では水素含有率の急激な上昇という現象で判断しなければならない。これは連続分析を採用し、しかも破損が急激に起きた場合には有効であるが、連続分析していない場合や破損が小さく長期間わずかに漏水している場合には、他の操業要因の変化による影響に隠されてしまう。水素利用率 η_{H_2} と CO ガス利用率 η_{CO} との間の相関関係を利用すれば、炉内

に漏水があると水が水性ガス反応を起こし、見かけ上の η_{H_2} が低下して η_{H_2} と η_{CO} の関係が崩れ漏水の検出ができるといわれている⁵⁷⁾。

4.3 原料装入における計測

原料の高炉装入に際しては、高炉の炉況とか銑鉄の品質などによつて厳密な配合が要求されるので、原料の切出しは各銘柄ごとに正確に秤量されなければならない。

原料装入用の秤量機としては、コークス秤量用のホッパ秤は別として鉄鉱石、焼結鉱や石灰石などは近年まではほとんど秤量車によつて秤量されていたが、最近ではほとんどホッパ秤によつて計量されている。

秤量車方式は常に移動秤量を行なうため、秤量精度、計量能率に問題があり高炉の大型化に伴つて

- ① 秤量精度の向上
- ② 切出秤量を並行に行なつて全所要時間の短縮
- ③ 複雑な切出しおよび秤量作業を自動化し、かつより正確な操作を行なう。
- ④ 秤量車秤量作業員の省力化
- ⑤ 計算機との結合が容易

などの理由により、ホッパ秤が採用されるようになってきた。

このホッパ秤についても他の秤量機と同様機械式（こうかん式）のものからロードセル式のものに次第に移行しているようである。こうかん式のものからロードセル式のものに移行してきている背景としてはロードセル式のもの総合精度が0.1%級のものが実用化の時代になつてきたことが考えられる。

5. あとがき

最近の製鉄工程の計測技術の進歩についての概略について述べてきたが、問題点が以前に比較してかなり整理され、新しい計測器特に品質計測について数多く開発され実用化されつつある。しかしこれからプロセスの自動化による省力化と高生産性がますます要請されることは明らかであり、計測技術として未解決のものも多いことは確かである。このような諸問題に対して計測機器が自動化の手足として、また計算機制御システムのセンサとして、これからも改善・開発が進められなければならない。

文 献

- 1) 坪井: 制御工学, 12 (1968) 2, p. 70
- 2) 吉谷: 鉄鋼界, 19 (1969) 9, p. 29
- 3) G. SPRIPCARU, et al.: Proc. 4th Congr. IFAC, (1969) 39, p. 116
- 4) J. D. BAIRD: Proc. Natl. Conf. Instrument. Iron and Steel ISA, 17 (1967), p. 2~1
- 5) E. J. TOGGART: Blast Furn. Steel Pl., 58(1970) 5, p. 330
- 6) 新日本製鉄: 計測部会資料, 計 48-2-3 (1971)
- 7) 林: 選炭, 17 (1967) 89, p. 232
- 8) 日本鋼管: 計測部会資料, 計 46-2-2 (1970)
- 9) 日本鋼管: 計測部会資料, 計 49-2-4 (1971)
- 10) 新日本製鉄: 計測部会資料, 計 37-3-3 (1967)
- 11) P. E. KILSBY and W. CONAGHAN: Steel Times, 198 (1970) 10, p. 697
- 12) P. COHEUR: JISI, 207 (1969) 10, p. 1291
- 13) A. HERMAN and G. MEUNIER: Met. Rep. CNRM, (1968) 16, p. 11
- 14) A. BRAGARD and J. HANCART: Iron Steel Eng., 45 (1968) 2, p. 87
- 15) E. MAZANEK, et al. J. Metals, 21 (1969) 2, p. 23
- 16) 宮川, ほか: 富士製鉄技報, 16 (1967) 3/4, p. 246
- 17) 中性子水分計小委員会: 計測部会資料, 計40-2-1 (1968)
- 18) 鈴木: 鉄と鋼, 57 (1971) 1, p. 175
- 19) 日本鋼管: 計測部会資料, 計 44-2-4 (1969)
- 20) I. HARVENG: Rev. Mét., 66 (1969) 6, p. 465
- 21) D. Nick: Met. Rep. CNRM, (1968) 16, p. 19
- 22) T. E. REIM: Proc. Natl. Conf. Instrument. Iron and Steel ISA, 17 (1967) p. 1-1
- 23) L. V. FEGAN and C. E. TAYLOR: Society of Mining Engineers, 241 (1968) 1, p. 27
- 24) I. HARVENG: Rev. Indust. Min., 50 (1968) 3, p. 212
- 25) Yu. A. BOLOTOV, et al.: Stal', 29 (1969) 10, p. 884
- 26) L. BRAHÁČEK, et al.: Arch. Eisenhüttenw., 39 (1968) 7, p. 477
- 27) A. HERMAN and G. MEUNIER: Rev. Mét., 66 (1969) 7/8, p. 353
- 28) 満岡: 川崎製鉄技報, 1 (1969) 3, p. 309
- 29) G. R. OLIVER and E. W. NIXON: JISI, 208 (1970) 1, p. 36
- 30) 八浪, ほか: 鉄と鋼, 55 (1969) 11, p. 47
- 31) J. BLACHOCINSKI: Prace. Inst. Hutniczych, 21 (1969) 1, p. 11
- 32) A. I. IVANOV, et al.: Stal', 31 (1971) 4, p. 311
- 33) 住友金属工業: 計測部会資料, 計48-2-2 (1971)
- 34) D. Nick: Centre Doc. Sidér. Circ. Inform. Tech., 24 (1967) 11, p. 2503
- 35) C. NEWTON: JISI, 207 (1969) 1, p. 1
- 36) A. A. VOLKOV, et al.: Russ. Met., (1968) 1, p. 25
- 37) 重見: 鉄と鋼, 54 (1968) 10, S 387
- 38) K. D. SCHUY and B. REINHOLD: Meas. Control, 4 (1971) 5, p. T 84
- 39) G. JECKO and B. REYNAUD: Rev. Mét., 64 (1967) 7/8, p. 681
- 40) 日本鋼管: 計測部会資料, 計 36-3-3 (1967)
- 41) 川崎製鉄: 計測部会資料, 計 42-2-1 (1969)

-
- 42) J. LÜCKERS: Met. Rep. CNRM, (1967) 12, p. 27
 - 43) 新日本製鉄: 計測部会資料, 計 37-3-4 (1967)
 - 44) 日新製鋼: 計測部会資料, 計 43-2-1 (1969)
 - 45) 豊田, ほか: 計測と制御, 10 (1961) 1, p. 25
 - 46) T. SHIMOTSUMA, et al. 5th Symposium on Temperature, (1971), Q5-20
 - 47) R. PIRET, et al.: Met. Rep. CNRM, (1968) 14, p. 15
 - 48) J. FALKARD and B. L. DALTON: Internatl. Meeting Iron Steel Making, 1970 Automation, (1970), B 102
 - 49) B. KRÜGER: Stahl u. Eisen, 88 (1968) 11, p. 533
 - 50) F. W. HILLNHÜTTER and B. KÖSTLER: Stahl u. Eisen, 88 (1968) 11, p. 541
 - 51) D. BÜLTER and von KLITZING: Stahl u. Eisen, 88 (1968) 3, p. 108
 - 52) 岡部, ほか: 鉄と鋼, 55 (1969) 9, p. 764
 - 53) 日新製鋼: 計測部会資料, 計 50-2-1 (1972)
 - 54) 新日本製鉄: 計測部会資料, 計 49-2-5 (1971)
 - 55) 新日本製鉄: 計測部会資料, 計 37-3-1 (1967)
 - 56) 曾我, ほか: 鉄と鋼, 54 (1968) 4, p. 307
 - 57) 斧, ほか: 鉄と鋼, 54 (1968) 12, p. 70
-