

委員会報告

中性子水分計の現状と問題点\*

——共同研究会計測部会中性子水分計小委員会報告——

鈴木久夫\*\*

Studies of Neutron Moisture Gauges

Hisao SUZUKI

1. ま え が き

日本鉄鋼協会共同研究会計測部会では、年3回開催される例会のほかに、特定の問題をほり下げて研究するための小委員会を設けており、本技術報告は鉄鋼業で最近広く使用されるようになった中性子水分計の現状と問題点について、昭和42~43年に行なわれた小委員会における研究報告をまとめたものである。

中性子水分計は、速中性子の水素による減速作用を利用して粉粒体の水分測定を行なうもので、赤外線・電熱乾燥にくらべ、短時間でかつ非接触、連続的に測定可能なところから広く工業的に利用されるようになった。まず、1950年代の初めに土壌中の水分測定の研究報告が行なわれてから、地盤調査、コンクリート中の水分、鋳物砂中の水分測定などに利用され始め、鉄鋼においては1958年ころより焼結プロセスの操業管理上きわめて重要視されている焼結原料水分測定の研究が開始され、さらに高炉装入コークスの水分測定に利用されるようになった。

本報告では、小委員会に報告・討議された事項のうち下記について記述している。

- (1) 中性子水分計の設置状況
- (2) 精度チェック法（サンプリング、絶対乾燥法など）
- (3) 中性子水分計の誤差原因

なお、中性子水分計の詳細原理・構造・特長については多数報告がなされているので、その記述は省略し、また放射線従事者に対する安全対策について新日鉄・広畑から有益な資料が提出されたが紙面の都合から割愛した。さらに、最近の中性子水分計はハードウェア上の問題はほとんどなく信頼性も向上しているところから、中性子水分計の保守（標準作業・故障状況・予備品）と中性子水分計による秤量機の補正については、小委員会においてとくに議題として取り上げなかつた。

2. 中性子水分計の設置状況

昭和45年4月現在の設置状況ならびにその推移を、それぞれ表1、図1に示している。これより、高炉装入コークス用および焼結原料用が主で、図2、図3にその代表的設置例を示している。また、現状では焼結点火炉前パレットやコンベヤ上原料用の表面型水分計ならびに

表1 中性子水分計設置状況（1970.4月）

会社名	高炉コークス	高炉原料	焼結原料	焼結コークス	ペレット原料
新日本製鉄	25		13	11	
日本鋼管	7	2	5		
川崎製鉄	7		4	1	
住友金属	7		6	2	
神戸製鋼	2				1
日新製鋼	2		1	3	

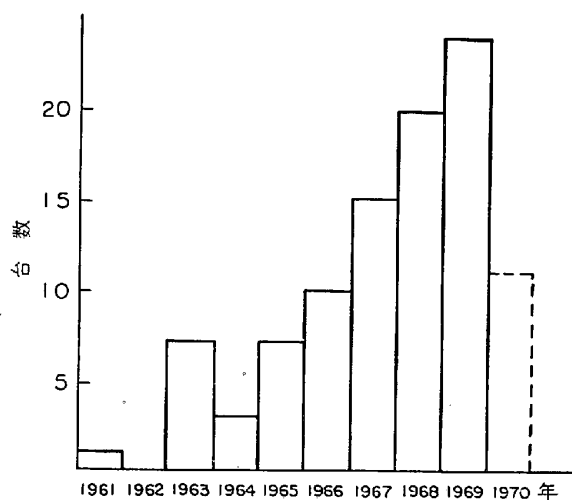


図1 中性子水分計設置状況

\* 昭和43年7月 共同研究会計測部会にて発表  
昭和45年5月8日受付

\*\* 新日本製鉄(株)  
計測部会中性子水分計小委員会 主査

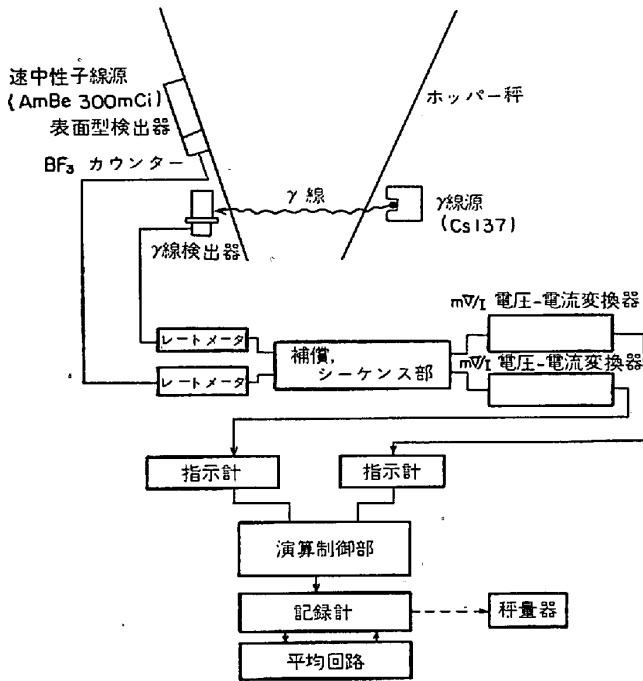


図 2 高炉コークス用中性子水分計系統図

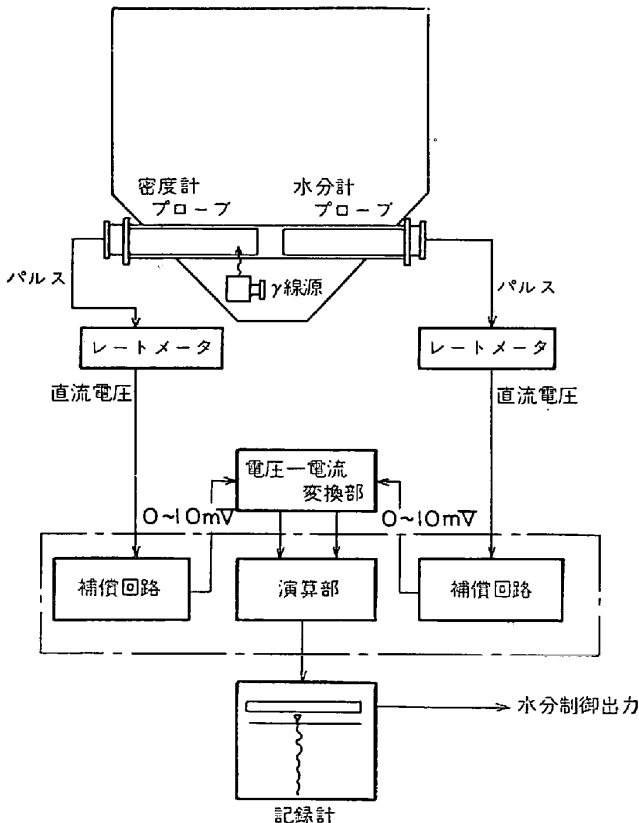


図 3 焼結原料用中性子水分計系統図

高炉鉍石用水分計はほとんど使用されていない。

小委員会開催に先立ち、製鉄技術部門の要求精度をまとめると表 2 のごとくで、機器自体の故障が少ないとはいえ、その精度に満足していないところが多い。これは精度を簡単にチェックするのが困難であり、また誤差の

表 2 要求精度と満足状況

	要 求 精 度		満 足 状 況	
	0.5%	0.3%	満 足	0 製鉄所
高炉コークス	0.5%	4 製鉄所	満 足	0 製鉄所
	0.3%	1 製鉄所	不満足	3 製鉄所
	0.2%	1 製鉄所	不 明	3 製鉄所
焼 結 原 料	0.5%	2 製鉄所	満 足	1 製鉄所
	0.3%	1 製鉄所	不満足	3 製鉄所
	0.2%	2 製鉄所	不 明	1 製鉄所

表 3 中性子水分計の校正・保守状況例 (日本鋼管水江)

		高炉コークス	焼 結 原 料
		校正	方法
	周期	2 回/3 月	1 回/3 週
保守	検出部	① 2 回/3 月 ② ホッパーから外し手入れする	① 1 回/3 週 ② ホッパーから外し手入れする
	指示・記録装置	2 回/3 月	1 回/3 週
	プローブ故障の処置	メーカー、自社の両方で行なう	メーカーにて大半行なう

原因となる要因が多く、誤差原因と指示値との相関が明白でないところから、測定系全体に対する信頼感が薄いことに起因しており、小委員会ではとくに (1) 中性子水分計の校正、(2) 誤差原因の 2 点に問題を絞り検計を行なった。

中性子水分計の標準設置法については、統一見解が得られなかったが、誤差原因の検討状況を参照することにより、設置上の注意事項がある程度把握できると考える。

### 3. 中性子水分計の精度チェック法

中性子水分計の設置環境は悪いため、保守を確実に行なわないと十分な精度を維持することは困難である。各社でその頻度は若干異なるが、日本鋼管水江の例を表 3 に示している。これにより、現場で比較的容易に行なうことのできる計器単体のチェック、含湿プラスチック板によるチェックの状況を知ることができる。

ここではさらに、系全体のチェック、検量線作成のための (1) 高炉コークスサンプリング、(2) 検定装置による校正試験、(3) 校正器による試験について記している。

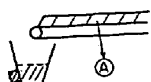
### 3.1 高炉コークス試料サンプリング

検量線を作成するために試料をサンプリングする場合、設備や操業条件によりその位置・頻度・量が異なってくるが、新日本製鉄八幡の例を表4に示している。ここで、乾燥温度が 200°C の場合揮発分が出る可能性があるため、150°C が望ましい。また、水分 (%) の定義

表4 試料サンプリング、絶対乾燥法手順例

- ① 計量ホッパー(4トン)へコークスが投入され、1.1t になったときベルトコンベヤを停止する(原料レベルがプローブの中心となる)
- ② ベルトコンベヤの④部から、試料を採取する。採取量は5ガロンカン一杯(約9~10kg)
- ③ ベルトコンベヤをふたたび起動して、満量になって停止する
- ④ 中性子水分計測定開始、測定完了とともに指示を読みとる
- ⑤ 試料は約200m離れた検定課分析掛へ運搬する
- ⑥ ジョウクラッシャにて10mm以下に破碎する
- ⑦ 二分機(200mm幅)にかけて縮分し、約1kgの試料とする
- ⑧ 試料を秤量し(秤量10kg, 感量1g), その指示( $W_1$ )を読む
- ⑨ 試料を乾燥皿(600×400×60)に入れる
- ⑩ 乾燥炉(COG 200°C)で、1.5時間乾燥する(水分の多い場合、減少しなくなるまで乾燥する)
- ⑪ 乾燥完了後試料を秤量し、その指示値 $W_2$ から水分値(dry base)を計算する(小数点以下1位まで)

$$\text{水分}(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100$$



として dry base と wet base とがあるため、測定値を比較する場合注意を必要とする。サンプル量が少ないとサンプリング誤差を生ずる場合があり、また採取から分析までの間の試料の乾燥、吸湿に注意しなければならない。

さらに、新日本製鉄八幡は下記の方法を推奨している。

- (1) 水分水準は3点で十分である
- (2) 各水準ごとのプロット点数は3~8個
- (3) 1プロット点のインクリメント数は10~15個
- (4) インクリメントのサイズは2~3kg
- (5) サンプルは計量ホッパー前のコンベヤ上で1チャージの流れから等間隔で採取する

### 3.2 検定装置による校正試験

川崎製鉄千葉においては、図4の検定装置による中性子水分計の校正を行なっている。校正順序は、(コークス乾燥)→(秤量)→(水分添加)→(秤量)→(ボックス装入)→(嵩密度計算)→(中性子水分計指示読み取り)

測定結果の一例を表5に示している。誤差検討の結果を表6に示しているが、これより嵩密度の影響が大きい

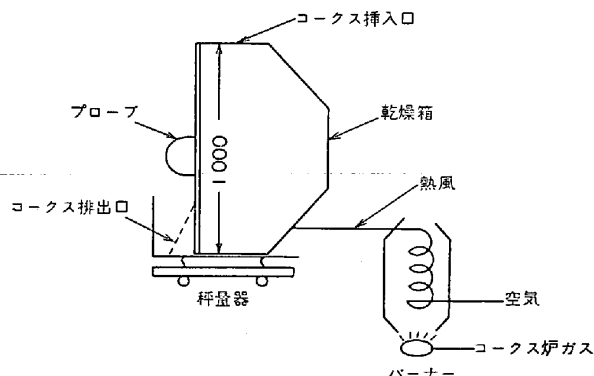


図4 コークス水分計検定装置

表5 検定装置による乾燥法と中性子水分計の測定値の比較

サンプル No	粒 度	嵩 密 度①	乾燥法水分平均②	水分計指示平均	水分計指示3点のバラツキ③	水分計指示ふれ幅
1	10~20 mm	0.493	6.97%	6.80%	0.08%	0.85%
			9.09	8.26	0.13	0.90
			13.40	11.80	0.65	1.00
2	20~25 mm	0.496	2.07	3.83	0.03	0.80
			5.81	6.80	0.13	0.80
			6.32	6.43	0.003	0.70
3	50~75 mm	0.487	13.30	11.50	0.65	0.80
			2.12	2.03	0.05	0.65
			7.07	6.83	0.14	0.90
			8.40	6.16	0.24	0.90
			14.29	11.30	0.54	0.80

① (乾燥コークス重量)/(ボックス内容積)

② [(ボックス+湿コークス)-(ボックス+乾コークス)]/[(ボックス+湿コークス)-(ボックス)]……3回の平均

③ 3点のバラツキ =  $\sum_{i=1}^3 (x_i - \bar{x})^2$

表 6 要 因 別 誤 差

要 因 誤 差	誤 差
熱中性子統計的変動	0.91~0.81%
嵩密度の変動	0.986~0.706%
元素組成の変動	
間 隙 の 変 動	0.356~0.212%
測 定 誤 差	0.14%
綜 合	1.395~1.51%

のが注目される。

### 3.3 校正器による試験

新日本製鉄広畑では、含水素プラスチック校正器を用いて高炉休風時ごとにコークス水分計を校正している。校正は検出プローブ取付位置で校正器を挿入する方法と検出プローブを取りはずし校正器上に乗せて行なう方法とがあるが、これは中性子水分計の設置状況によって決まってくる。校正の際の注意事項としては、

- (1) 校正器を挿入する場合、ホッパ内の残留コークスの影響があるため、コークスの有無の確認を行なう。
- (2) いずれの場合も校正器の周囲に近づくと指示値が変動するため校正時はプローブ周囲から離れる。
- (3) 同じ校正器でもプローブにより値が異なるため絶対乾燥法との対応をとり、プローブと校正器の関係を求めておく。
- (4) 校正器に鉄板などを付加することにより中間目盛を校正することが可能である。

日本鋼管川崎では、水分 2% 付近で校正器により連続 50 回の試験を行なった結果、水分に換算して  $\sigma=0.103\%$  のバラツキが得られ、計算により統計誤差 0.075%、水分計自体の誤差 0.071% となった。

## 4. 中性子水分計の誤差原因

中性子水分計自体の問題については、最近非常に信頼性が向上して問題が少なくなっているが、系全体を見た場合、その設置条件により各種の誤差を生ずる原因が存在しており、製鉄技術者側で満足しているところは少ない。これらの誤差原因については以下に記す。

### 4.1 原料滞留による誤差

焼結原料の装入ホッパに挿入型水分計を設置後、1~2 週間で乾燥法との指示差が大幅に変化した例が報告されている。この場合、図 5 のようにアクセスパイプ上部に異物がひっかかり、原料の流動性が著しく阻害されることが判明し、掃除後改善されている<sup>3)</sup>。

新日本製鉄広畑では、掃除周期を 20 日間とし、さらに

- (1) 保護管上 600 mm のところに平行にビームを設

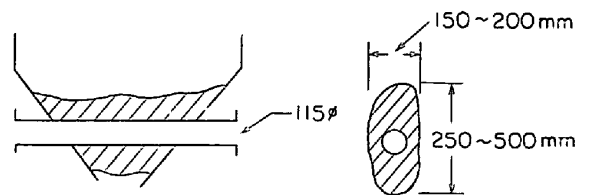


図 5 アクセスパイプ周辺の原料付着状況 (掃除後 13 日目)

置し、原料付着の核となる針金などがひっかかるようにした。

- (2) 原料中の異物混入防止のため、作業管理を徹底した。

### 4.2 ホッパ内水分分布の差

コークス秤量ホッパにおいては、下部の 1/3~1/4 の場所を測定して全体の水分を代表しているが、住友金属和歌山の測定によると変動幅が 0.7~3.0% におよんでいる。

また、神戸製鋼神戸によると  $\sigma$  は通常 0.3% 程度であるが、雨期やホッパ前で散水するような場合、1.2% 程度になることが報告されている。

### 4.3 ホッパ壁の含水量の変動

神戸製鋼の場合、ホッパ壁に耐摩耗性の溶融玄武岩をモルタルではりつけたものを使用しており、水分計取付部のみ鉄板を露出させている。この被覆内の水分は、付近の散水状態などによって異なり、空槽の指示値を連続的に調査したところ、統計的変動などを含めて指示値に 1% 程度の差があつたことが報告されている。

### 4.4 ホッパ壁 (アクセスパイプ) の摩耗

ホッパ塗の摩耗については、摩耗状況検出用ボルトを埋め込み、月 1 回程度取り出し手動補正を行なっている。(新日本製鉄広畑では自社製厚み測定器を使用)

ホッパ壁、アクセスパイプの摩耗状況は、ホッパの構造、流入量によって異なるが、神戸製鋼神戸ではフィーダからの原料落下点を避けて水分計を設置したため、5 カ月程度の使用ではほとんど摩耗しなかつたことが報告されている。

新日本製鉄広畑では、2S 引抜鋼管に 200 mm おきにステライトおよび WC を約 0.5 mm 厚さにコーティングし、ホッパ中央に挿入して摩耗状況を調査した。1 カ月後、0.1~0.45 mm 摩耗しており、コーティング可能な厚さ (0.5 mm) から判断すると寿命が約 1~2 カ月程度で、高炉用としては不十分と結論づけている。

また、焼結中継槽およびコークス槽にダクタイル鑄鉄管を水平に挿入して摩耗状況を測定している。前者の場合、原料の流入量 400 t/hr で約 10 カ月、700 t/hr で約 6 カ月耐久度があり、後者ではホッパ下部から 2000 mm のところに設置したところ、約 3~4 カ月で取り替える必要のあることが判明した。

4.5 ホッパ内原料レベル（原料流入状態）

(1) 高炉コークスホッパ

高炉コークスは、通常図6の左のように装入線が山形の形状をなして上昇するが、周辺部へはコークスが転がり落ちて堆積するため、A部には比較的粒度の大きなものが集まる。また、振動、圧力が少ないため嵩密度が小さくなつていと考えられる。そこで、神戸製鋼神戸では図6のような案内板を設けて粒度の偏在を軽減する対策をとつている。設置の効果を定量的に把握することは困難であるが、回帰係数の増大からみて平均化に対して若干の効果があつたと考えられる。

(2) 焼結原料ホッパ

サージホッパに焼結原料が、あるレベル以上入つていないと見かけの水分量が低下する。住友金属和歌山の調査では、最低500mm以上のレベルが必要であり、このため別途γ線レベル計を設置し、規定以下のレベルになつた場合水分計の出力を遮断するようにしている。また原料厚みによる影響を調べるための実験では、水分計のプロープの周辺に直径300mm以上被測定物が存在すれば、水分計の指示値は一定値に飽和し安定する。

4.6 粒度の差による影響

ホッパに装入されるコークスの粒度は、その装入状態によつて粒度が変化することは前節に記したが、コークス粒度によつて付着する水分は当然変わつてくる。神戸製鋼神戸の測定例を表7に示している。これより、小粒度のコークスほど水分値が高いことがわかる。

日本鋼管川崎でも、同様にコンベヤ上から試料を採取

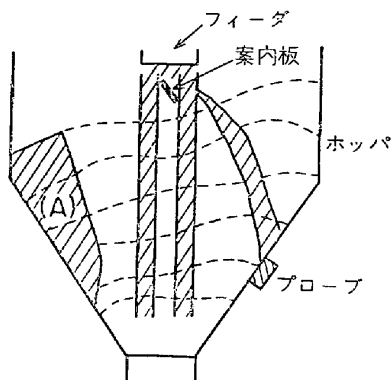


図6 案内板を設置したホッパ

して粒度別に篩い分け、それぞれの重量%ならびに水分%を測定したところ、ほぼ同じ結果を示している。

これは、コークスの体積がその径の3乗に比例し、表面積が2乗に比例するため、径の大きいコークスほど体積にくらべて表面積が小さくなるためと、散水時の水分吸収速度または冷却速度は表面積に比例するところから同一水分または同一温度にするためには径の大きいコークスほど多量に散水する必要があるが、現状では設備的に不可能なため、大きいコークスほど水分が少なくなつてい。

このように、粒体原料の水分は粒度によつて異なるので、粒度の偏在のない場所を選択して水分計を設置する必要がある。

4.7 嵩密度の差による影響

嵩密度の変動は、水分計の指示に影響を与え、水分計の出力は嵩密度に比例するものと考えられている。住友金属和歌山の調査では、嵩密度により0.5%程度の誤差を生ずることが明らかにされている。銘柄変更の多いところでは、γ線密度計を併置したりまたは設置後多くのデータを採取して銘柄による嵩密度の値を求めておき、手動によつて密度補正ダイヤルをセットする必要がある。

焼結原料においても、原料密度により水分計出力が影響を受け、しかも実際操業での原料中の付着水分量は水分計として最も検出され難い範囲にある。すなわち、操業範囲である水分4.5~7%が水分計出力の変曲点に相当しており、水分が変化しても水分計の出力は変化しない。このため、住友金属和歌山ではこの操業範囲で水分計の出力が水分に対してリニアになるようになるようにゲインを上げると同時に零点を下げ、特性の改善を行なつてい。この関係を図7に示している。

4.8 原料組成変化による影響

(1) コークス

コークス揮発分中に含まれるH<sub>2</sub>は、水分計指示を高める働きをする。コークスの種類によつて異なるが、実指示で0.05%×9=0.45% 高く出ることが予想され、ばらつきで±0.02%×9=0.2%程度あると考えられる。

(2) 焼結原料

住友金属和歌山の調査によると、焼結原料の各銘柄について完全に乾燥したものから順次既知の水量を添加し

表7 コークス粒度分布および粒度による水分変動例

サンプル	粒度 mm	~25	25~30	30~40	40~50	50~60	60~	水分平均値
1	粒度分布%	0.8	2.1	18.6	33.6	24.3	20.6	2.3
	水分%	—	4.3	3.3	2.1	2.0	1.9	
2	粒度分布%	3.0	6.9	34.5	32.0	14.8	8.8	3.8
	水分%	—	5.5	4.7	3.3	2.0	2.6	
3	粒度分布%	0.5	0.9	3.0	15.5	24.4	55.7	1.9
	水分%	—	4.8	4.2	1.9	2.1	1.6	

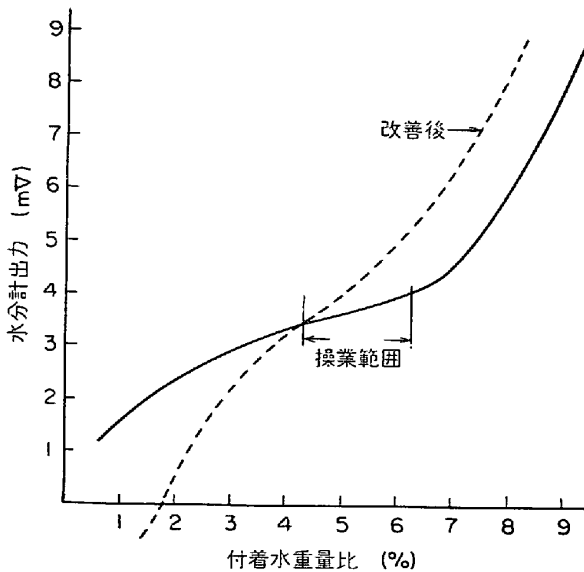


図 7 付着水重量%と水分計出力との関係

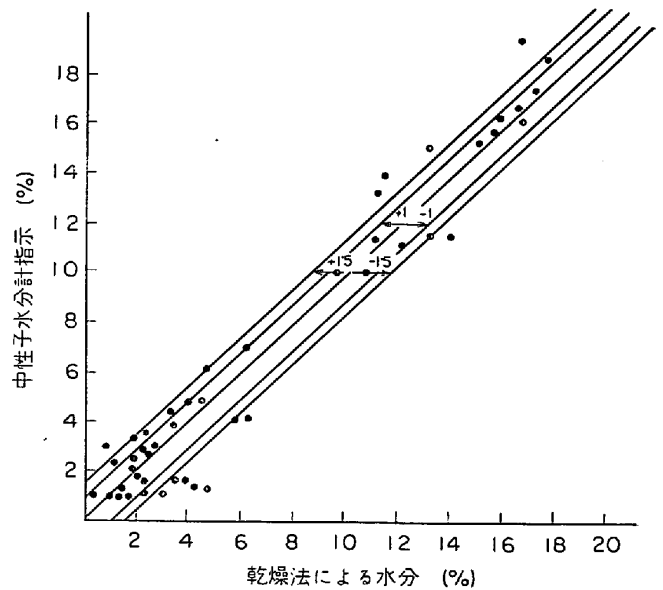


図 8 乾燥法との比較

てその出力を試験したところ、添加水のほかに各銘柄に含まれる結晶水が影響し、その重みは添加水に対して0.5であることがつきとめられている。

4.9 統計的誤差

放射性物質崩壊による本質的な誤差で、通常測定中変動的な指示となつてあらわれ、住友金属和歌山の調査では、コークスホッパ中にコークスを装入したままの状態ですラクチュエーションを測定したところ、約 ±0.5%の変動が認められた。

4.10 その他

神戸製鋼神戸の報告によると、ガソリンエンジンの誘導によるノイズの影響を非常に受けやすいことのほか、付近のリレーなどの作動の影響を受けやすいことが指摘されており、配線のシールドに十分注意する必要がある。また、電子回路部が温度の影響を受ける場合があるので注意を必要とする。

新日本製鉄広畑では、焼結原料中に温度 200°C 前後の返し鉱が含まれている場合があり、水分計設置位置と試料サンプリング位置までの間の水分蒸発を調査してその影響のないことを確認しているが、試料サンプリングの位置、搬送スピード、原料温度、サンプリングから検定までの時間・距離について検討を行ない、その対応関係を確認しておかなければならない。

5. 総合精度

3. において中性子水分計の校正、4. においてその誤差原因を記したが、ここでは実際の試験結果、総合精度について住友金属和歌山の報告例をもとに記している。

高炉コークス用水分計指示と乾燥法との比較結果を図8に示している。これをまとめると 3σで約2%の誤差があり、予想より若干大きい値が出ている<sup>3)</sup>。

表 8 水分計設置法の比較

側壁型	① 水分測定体積が小さい ② 側壁付着原料の影響大 ③ 側壁附近の原料流動性が悪い ④ 保守が容易 ⑤ 取り付けが容易
挿入型 (縦方向)	① 水分測定体積が大きい ② アクセスパイプへの原料付着は少ない ③ パイプの固定が困難 ④ ホッパ上部にコンベヤなどがあるとパイプの交換が困難 ⑤ パイプからリード線の取り出しが困難
挿入型 (横方向)	① 水分測定体積が大きい ② 原料がパイプ上に堆積しやすい ③ パイプの機械的強度が問題 ④ ホッパ下部にパイプを設置すると棚吊を生じやすい

4. で記した誤差原因とその代表的な値から総合精度を検討してみると

- (1) サンプリングによる誤差  $\epsilon_1$  ±0.5%
- (2) 原料レベル  $\epsilon_2$  "
- (3) 嵩密度変動  $\epsilon_3$  ±0.5%
- (4) 組成変動  $\epsilon_4$  ±0.2%
- (5) 統計的変動  $\epsilon_5$  ±0.5%
- (6) 計器  $\epsilon_6$  "
- (7) その他  $\epsilon_7$  "

となり、誤差が一様に分布しているとすると総合精度σは

$$\pm\sigma = \pm 0.53\% \quad (74\%)$$

$$\pm 2\sigma = \pm 1.06\% \quad (96\%)$$

となる。

以上は、統計的な誤差であるが実際にはバイアス的な誤差(鉄板厚み、原料滞留など)に十分注意しなければ

ならない。

## 6. 今後の問題

今回の小委員会では、高炉コークス用および焼結原料用の中性子水分計に限定したが、それぞれの設置法をまとめると表8のようになる。

今後の問題としては、中性子水分計の特長をよく生かした上で、プロセス管理上どこが重要な点か解析を十分行ない、たとえばベルトコンベヤ上の移動粉粒体の水分を非接触で、しかも連続的に測定するなどして、プロセスの特性把握、操業管理ひいては制御へと発展させてゆかなければならないだろう。

## 8. あとがき

本技術資料は、昭和43年7月第40回計測部会にお

いて報告した中性子水分計小委員会報告を抜すいたしたもので、紙数の都合から多くの貴重な資料を省略している。その詳細については、原報告を参照していただければ幸いである。

また、本報告は鉄鋼6社の小委員の方々が、それぞれテーマを分担して調査討議し、さらに東京芝浦電気(株)・(株)日立製作所・三菱電機(株)のメーカー側からも有益な資料を提出していただき討議に参加していただいた。関係者の皆様に厚くお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 石松：計測，11 (1961) 8, p. 451
- 2) 辻畑ほか：日立評論，45 (1963) 7, p. 47
- 3) 宮川ほか：富士製鉄技報，16 (1967) 3-4, p. 44
- 4) 井上ほか：東芝レビュー，21 (1966) 11, p. 1130
- 5) 江上ほか：住友金属，19 (1967) 1, p. 23