線源・検出器間 2 重距離方式によるガンマ線散乱密度計[†]

白 川 芳 幸*・天 野 裕**

A Gamma-Ray Backscatter Density Gauge Based on a Source-Detector Dual Spacing Method

Yoshiyuki SHIRAKAWA* and Hiro AMANO**

The establishment of technology for closely controlling the distribution of raw materials in a sintering plant has been gaining importance in order to assure the stability and flexibility of operations. The density measurement of the raw materials as charged is considered essential to this end. However a conventional γ -ray density gauge has the difficulty to be in on-line use because of its poor accuracy in case the measurement condition such as the distance from the gauge to the materials is changed.

Theoretical study and basic simulations to develop a new γ -ray density gauge made it clear that the density and the distance can be known simultaneously by detection of Compton scattered γ -rays at two different positions. Therefore the gauge has a γ -ray source and two detectors set at different positions. Experimental results show that the gauge can achieve an accuracy of $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ over the density range of 1.6 to 1.9 g/cm^3 and the distance range of 8 to 10 cm for a 60 sec counting of Compton scattered γ -rays.

This gauge has been in practical use at Kimitsu No. 3 sintering plant since 1992, contributing to the distribution control.

Key Words: sintering plant, density measurement, γ -ray density gauge, Compton scattered γ -ray

1. はじめに

放射線利用統計¹⁾によると現在、鉄鋼業では中性子水分計、ガンマ線密度計、ガンマ線厚さ計、メッキ付着量計など約 1400 台が使用されている。特にガンマ線厚さ計、ガンマ線密度計は全体の約 60% を占めている。両者とも基本的にはガンマ線のコンプトン散乱を応用した計測装置である。コンプトン散乱では測定対象物質の幾何学的特徴(たとえば物質の厚さ、物質までの距離など)、および物質の密度が主要なパラメータとなる。密度を一定とするとコンプトン散乱から物質の厚さを計測することが可能であり、ガンマ線厚さ計となる。また厚さ・距離を一定にするとコンプトン散乱から物質密度が計測で

きガンマ線密度計として使用できる。ガンマ線密度計の中で透過方式(コンプトン散乱されずに透過したガンマ線を計数する方式)と呼ばれるタイプは形状をパイプなどで一定にできる液体の密度測定に用いられている。ところがガンマ線密度計の中で散乱方式(コンプトン散乱されたガンマ線を計数する方式)と呼ばれる方式は測定対象物質までの距離などの幾何学的条件の変動に弱く、オンラインで非接触が求められる工業的応用の例がほとんどなく、土木分野で土壌の密度測定に可搬型のオフラインで接触させるタイプが使われているに過ぎない。この理由は密度の変動と距離の変動が同程度に計測量である散乱ガンマ線数に寄与し、距離の変動があれば密度の計測値が大きな誤差をもつためである²⁾。そのため、鉄鋼業における最大の生産設備である焼結設備(日産 10000 t 以上)では、装入された焼結原料の表層密度が品質、生産性を左右する重要な管理・制御項目であるにもかかわらず散乱方式の密度計の導入が見送られていた。

本論文では散乱方式の密度計の改善を目指して密度と距離が同時に変動する環境においても密度計測を可能に

[†] 第 31 回計測自動制御学会学術講演会で発表(1992・7)

* 新日本製鐵(株)君津製鐵所 君津市君津 1

** (株)天野研究所 東京都港区高輪 4-19-11

* Kimitsu Works, Nippon Steel, Kimitsu

** Amano & Associates, Minato-ku, Tokyo

(Received May 26, 1992)

(Revised November 12, 1992)

する新しい計測原理の導出と、新型表面散乱密度計の設計・製作・テスト、および製鉄所内の焼結設備での実用化について述べる。

2. 密度計測の基本原則

本章ではガンマ線を用いた密度計測の基本原則を、ガンマ線と物質の相互作用、相互作用と密度との関係の観点から述べる。

2.1 コンプトン散乱の特徴

コンプトン散乱はガンマ線と1個の自由電子との弾性散乱衝突である。一般に原子の軌道電子は自由電子ではないが、ガンマ線のエネルギーが光電吸収領域より充分に大きく、原子と軌道電子との結合エネルギーが相対的に無視できる場合には、前述の自由電子と同様な弾性散乱衝突をおこす³⁾。物質中の原子当たりのコンプトン散乱の確率は電子の数に比例するので原子番号とともに直線的に増加する。一方、電子との衝突後の散乱されたガンマ線の角度分布はクライン・仁科の式で与えられる。通常の放射性同位元素からのガンマ線は横、後方へも散乱されることが式からわかる。

2.2 コンプトン散乱による密度計測

前節のコンプトン散乱の確率は原子番号に比例するという関係を複数の原子で構成された物質の密度との関係に拡張する。ここでのガンマ線はコンプトン散乱が主要になるエネルギーをもつとする。コンプトン散乱の確率を P_c 、物質の密度を ρ 、物質を構成する*i*番目の元素の重量割合、原子番号、原子量をそれぞれ w_i 、 Z_i 、 A_i とすると、

$$P_c = K_1 \rho \sum w_i (Z_i/A_i) \quad (1)$$

となる²⁾。ただし K_1 は定数。

鉄鋼原料のコークス、焼結の主要元素の Z_i/A_i の値の平均値はおおよそ0.5でほとんど変動しない⁴⁾。したがって(1)式は、

$$P_c = K_2 \rho \quad (2)$$

と単純化できる。ただし、 K_2 は定数、(2)式がコンプトン散乱と密度を関係づける基本式である。

実際の密度計測においては P_c を直接的に求め、そして ρ を計算する手法が採用されることはなく、入射ガンマ線の数を一一定、線源・物質・検出器の幾何学的配置を一一定し、散乱されるガンマ線の数と密度を対応づける検量線を作成するのが一般的である。

前節で述べたように通常の放射性同位元素からのガンマ線は前方にも後方にも散乱されるから、検出方式としては物質の相対する方向に線源と検出器を配置する透過方式と物質の片側に線源と検出器を配置する散乱方式がある。両方式の基本図をFig. 1に示す。透過方式における特徴は、入射したガンマ線の一部が散乱されて計測対

Fig. 1 Basic configurations for γ -ray density measurement

象領域から除去され、コンプトン散乱されずに透過してきたガンマ線の数と密度が関係づけられる点である。入射したガンマ線数を I_0 、透過したガンマ線数を I 、密度を ρ 、ビルドアップ係数を B とすると、

$$I = I_0 B(\rho, t) \exp(-\mu_m \rho t) \quad (3)$$

となる。ここで μ_m は物質の質量吸収係数で一定、 t は物質の厚さで一定。

一方、散乱方式は大野らが提案した線源・検出器間の距離、検出器の長さをパラメータとした式^{2),5)}があるが、一般化されておらず取り扱いが難しい。(3)式のような表現をすると、

$$I = I_0 B(\rho, t) f(\rho, t, H) \quad (4)$$

となる。ただし t は物質の厚さ、 H は物質までの距離である。関数 B 、 f は実験的に決定する、すなわち検量線を作成するのが一般的である。

3. ガンマ線散乱のモデリング

前章で述べたコンプトン散乱による密度計測の基本原則を、密度、幾何学的条件(距離など)の双方が変動する場合の新しい散乱方式の密度計測原理に発展させるために本章ではガンマ線散乱のモデリングを試みる。まずガンマ線散乱と密度を関係づけるモデルを構築し、つぎにガンマ線散乱と距離に関するモデルを提案する。

3.1 ガンマ線散乱-密度モデル

ミクロ的にはガンマ線散乱と密度はコンプトン散乱とクライン・仁科の式によって正確に確率論的に与えられる。しかしながらある大きさをもった物質の密度を与えるにはすべての電子の分布を把握し、個々の電子の散乱過程をすべて積分しなければならず現実には不可能に近い。そこで、ここでは物質の表層におけるガンマ線の散乱を発生過程、透過過程の二つの部分よりなる簡単な構造のモデルを構築する^{6),7)}。

規格化した入射ガンマ線数を1、散乱ガンマ線の発

生率(入射ガンマ線が表層で散乱される確率)を p , 散乱ガンマ線の透過率(散乱ガンマ線が表層から外部へ透過する確率)を q , 検出器に届く散乱ガンマ線の数 i_s , 物質の密度を ρ とすると,

$$\partial p / \partial \rho = \alpha(1-p), \quad \alpha > 0 \quad (5)$$

$$\partial q / \partial \rho = -\beta q, \quad \beta > 0 \quad (6)$$

$$i_s = 1pq \quad (7)$$

となる。ここで α, β は幾何学的条件(距離など)で決まる定数である。

(5)式の境界条件は,

$$\rho \rightarrow 0: p \rightarrow 0 \quad (8)$$

$$\rho \rightarrow \infty: p \rightarrow 1 \quad (9)$$

である。

(6)式の境界条件は,

$$\rho \rightarrow 0: q \rightarrow 1 \quad (10)$$

$$\rho \rightarrow \infty: q \rightarrow 0 \quad (11)$$

である。

境界条件を用いて(5), (6)式を解くと,

$$p = 1 - \exp(-\alpha\rho) \quad (12)$$

$$q = \exp(-\beta\rho) \quad (13)$$

となる。したがって,

$$i_s = (1 - \exp(-\alpha\rho))\exp(-\beta\rho) \quad (14)$$

が得られる。実際の線源の強さ, 幾何学的条件(距離など)で決まる定数 A を用いて(14)式を書き直すと, 実際に検出器に届くガンマ線の数 I は,

$$I = A(1 - \exp(-\alpha\rho))\exp(-\beta\rho) \quad (15)$$

となる。(15)式がガンマ線散乱と密度をマクロに関係づけるモデル式である。(15)式は一つ極大値と一つの変曲点をもち, 密度計測に重要な極大値を与える ρ_m は,

$$\rho_m = \ln(1 + \alpha/\beta)/\alpha \quad (16)$$

で表わされる。

3.2 ガンマ線散乱-距離モデル

ここでは幾何学的条件として線源と計測対象との距離を考える。線源の強さ, 照射する立体角を一定とすると, ガンマ線の単位面積当たりの個数は距離の逆 2 乗で減少する。一方, 照射される面積は測定対象が十分に大きいとすると距離の 2 乗で増加する。散乱されるガンマ線の数 i_s は単位面積当たりの個数と照射される面積の積に比例するので距離によらず一定となる。しかしながら検出器に届くガンマ線数は散乱位置から検出器を見込んだ立体角 Ω に比例するので距離が大きくなれば少なくなる。検出器の形状を簡単化のため球形とし, 半径を r , 中心までの距離を h とすると,

$$\Omega = 4\pi \sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h)) \quad (17)$$

となる⁹⁾。検出器に届くガンマ線の数 I は, 基準距離を h_s , そのときのガンマ線の数 I_s とすると,

$$I = I_s \frac{\sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h))}{\sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h_s))} \quad (18)$$

となる。ただし I_s は密度 ρ の関数である。(18)式がガンマ線散乱と距離をマクロに関係づけるモデル式であり, (15)式のように複雑な挙動を示さず, 距離とともに単調に減少する。

3.3 シミュレーション

本節ではモデル(15)式, (18)式に具体的数値を与えてガンマ線散乱挙動の特徴を示す。

ガンマ線散乱-密度モデルのシミュレーションはわれわれの開発した解析計算コードでいくつかの密度における散乱ガンマ線の数 i_s を求め, つぎに(15)式をフィッティングさせる手順で行った。シミュレーション条件は線源の種類 ^{137}Cs (エネルギー 664 keV), 強さ 3.7 MBq(1 秒で 3.7×10^6 個), 線源と検出器間の距離 22 cm, 線源と計測対象までの距離 1 cm(通常の散乱方式の密度計の場合), 計測対象は焼結原料で大きさは幅 40 cm, 長さ 40 cm, 厚さ 10 cm, 密度は 0.5~2.5 g/cm³, 計測時間は 60 s とした。シミュレーション結果をもとにして, (15)式をフィッティングさせる A, α, β を決める。ここでは(15)式は,

$$I = 190560(1 - \exp(-2.924\rho))\exp(-0.149\rho) \quad (19)$$

となる。(19)式の極大値を与える ρ は 1.04 g/cm³ である。(19)式の挙動を Fig. 2 に示す。土木分野で使われる散乱方式の密度計は, その測定範囲が 1.5~2.5 g/cm³ であり, Fig. 2 で密度と共にガンマ線計数がほぼ直線的に減少する領域を選んである。この例でわかるように密度計測の領域を限定し, かつ極大値の近傍を避ければ(15)式は実用上,

Fig. 2 Typical relation between γ -ray counts and densities

Fig. 3 Simulation geometry to calculate scattered γ -ray counts with respect to a distance H

$$I = a\rho + b \quad (20)$$

と近似できる。ここで a , b は定数。

実際の装置であらかじめ密度がわかっている物質とそのときの散乱ガンマ線の計数を求め、つぎに密度を変えて同様なテストを3回行えば(15)式が決定できる。したがって密度が未知の場合、散乱ガンマ線の数を計数することにより(15)式を用いて密度を知ることができる。密度計測の領域を限定すれば一層取扱いが容易な(20)式により密度を求めることができる。

ガンマ線散乱-距離モデルのシミュレーションは、Fig. 3に示された条件で実施した。検出器を見込む基準距離 h_s は図より $\sqrt{(3.5^2 + 11^2)}$ cm となる。検出器下端と計測対象までの距離を H とすると h は、

$$h = \sqrt{((H + 2.5)^2 + 11^2)} \quad (21)$$

と表わせる。基準距離 h_s ($H = 1$ cm) のときの I_s を 10000 として、(18)式の挙動を Fig. 4 に示した。図からわかるように I と H は優れた直線関係をもつ。連続する H の4点を選び I との相関係数を計算するといずれも 99.9% 以上となる。したがって(18)式は簡単化で、

$$\begin{aligned} I &= I_s(c_s H + d_s) \\ &= I_s c_s H + I_s d_s \\ &= cH + d \end{aligned} \quad (22)$$

となる。ただし c_s , d_s , c , d は定数である。

Fig. 4 Typical relation between γ -ray counts and distances

3.4 ガンマ線散乱-密度-距離の関係

(15)式において H を、(16)式において ρ を固定したが、ここでは ρ , H が同時に変化する場合を考える。

(15)式、(18)式はいかなる (ρ, H) に対しても成立するので、

$$\begin{aligned} I &= A(H)(1 - \exp(-a(H)\rho)) \\ &\quad \times \exp(-\beta(H)\rho) \\ &= I_s(\rho) \sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h)) / \\ &\quad \sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h_s)) \end{aligned} \quad (23)$$

となる。ここで A , a , β は H の関数、 I_s は ρ の関数である。さらに計測条件を限定すると、(20)式、(22)式が満足され、

$$\begin{aligned} I &= a(H)\rho + b(H) \\ &= c(\rho)H + d(\rho) \end{aligned} \quad (24)$$

が成立する。ここで a , b は H の関数 c , d は ρ の関数である。

4. 線源・検出器間2重距離方式

第3章ではガンマ線散乱-密度モデル、ガンマ線散乱-距離モデルを構築し、その挙動の特徴を明らかにした。そして広い範囲において成立する(23)式、ある計測条件下において成立する(24)式を提案した。これらの式によって密度 ρ , 距離 H を同時に求めることができるが、現在のところ(23)式による方法は研究中であり、ここでは(24)式による方法を示したい。

(24)式の $a(H)$, $b(H)$ が線形化できる (ρ, H) の範囲を考える。すると、 $a(H)$, $b(H)$ は、

$$a(H) = k_1 H + k_2 \quad (25)$$

$$b(H) = k_3 H + k_4 \quad (26)$$

と表現できる。ここで k_1, k_2, k_3, k_4 は定数。(24)式に代入すると、

$$\begin{aligned} I &= (k_1 H + k_2) \rho + (k_3 H + k_4) \\ &= k_1 \rho H + k_2 \rho + k_3 H + k_4 \end{aligned} \quad (27)$$

となる。

検出器を 2 台用意する。線源に近い検出器を n 検出器 (線源・検出器間距離 L_1)、遠い検出器を f 検出器 (線源・検出器間距離 L_2) と呼ぶことにする。各検出器ごとにシミュレーション、あるいは実験によって (27) 式を作る。

$$I_n = k_{n1} \rho H + k_{n2} \rho + k_{n3} H + k_{n4} \quad (28)$$

$$I_f = k_{f1} \rho H + k_{f2} \rho + k_{f3} H + k_{f4} \quad (29)$$

が得られる。ここで n, f は各検出器に関する係数を表す添字である。(28), (29) 式から ρ, H を計算するためには、

$$\begin{aligned} k_{n1} &= m k_{f1} \\ k_{n2} &= m k_{f2} \\ k_{n3} &= m k_{f3} \end{aligned} \quad (30)$$

が必要であり、 L_1, L_2 を最適に選ぶことにより達成できる。本方式により距離 H が変動する環境の中で ρ を求めることができる。 L_1, L_2 の二つの位置に検出器を配置することにより、線源・検出器間 2 重距離方式と呼ぶことにする。

5. 密度計の設計・製作

線源・検出器間 2 重距離方式を採用したガンマ線密度計の設計・製作を行った。基本設計および主な仕様を示す。

まず、密度計は基本的には Fig. 5 のように線源部、遮蔽部、検出部、制御部、入出力部より構成される。各部

Fig. 5 Components of a dual spacing γ -ray density gauge

の配置に関して述べる。線源部、遮蔽部、検出部はセンサヘッドとして一体化し、計測対象から適切な距離範囲に設置する。制御部、入出力部はマンマシンインタフェースを兼ねるため操業オペレータのいる計器室に配置することを前提に設計した。さらに法の規制を受けない微弱なガンマ線源を使用することを必須の基本設計条件とした。

上記の考え方を基に詳細仕様を検討した。以下に主な仕様を示す。

- ① 線源部 — ^{137}Cs , 3.7 MBq $\times$ 1 個
- ② 遮蔽部 — Pb 50 mm および W 50 mm
- ③ 検出部 — 50 mm ϕ $\times$ 50 mm のビスマスジャーマネード $[\text{Bi}_4(\text{GeO}_4)_3]$ 検出器 $\times$ 2 台
- ④ 制御部 — 高圧電源、各種アンプ、シングルチャンネルアナライザ、レートメータ、スケーラ、タイマ、自動利得制御回路など
- ⑤ 入出力部 — ファクトリコンピュータ、プリンタ、制御ソフト、演算ソフトなど

つぎに各部の設計上での特徴について述べる。

- ① 線源部におけるガンマ線源はコンプトン散乱がエネルギー的に優位である ^{137}Cs (664 keV) を採用することにした。
- ② 遮蔽部に関しては、一般的に Pb が用いられるが、遮蔽距離が小さくて済む W も併用することにより遮蔽効果を高めた。 ^{137}Cs からの 664 keV のガンマ線の内、上記遮蔽を貫通できるのは 0.01% 以下である。
- ③ 検出部のガンマ線検出器は一般的に NaI(Tl) が最も良く使用されるが、今回は、法規制を受けない微弱な線源を必須条件とすることより、最も検出効率が高いビスマスジャーマネイド検出器 (BGO) を導入した。1000 keV 以下のガンマ線に対して NaI(Tl) の 2 ~ 3 倍の検出効率であることが報告されている^{9),10)}。この理由は BGO の主要原子であるビスマスの原子番号が 83 と大きく、密度も 7.13 g/cm³ でありガンマ線が検出器内部で止められる確率が高いことによる¹¹⁾。
- ④ 制御部の特徴は工業的使用を前提に周囲の温度変化の影響を受けない自動利得制御⁹⁾を開発したことである。これは温度が変化すると検出器と一体の光電子増倍管からの出力のスペクトルが変化することに着目して標準状態のスペクトルとの差をなくすように光電子増倍管に印加する高圧 (約 1850 V) を制御するメカニズムである。
- ⑤ 入出力部には線源・検出器間 2 重距離方式の連立

方程式 (28), (29) を繰返し計算で解く演算ソフトが内蔵されている。

上記の設計に則したガンマ線散乱密度計の製作を開始し 1991 年 12 月に完成をみた。

6. 密度計のテストと評価

開発した密度計をオフラインおよびオンライン状態でテストした。オフラインテストは以下の順序で進めた。

- ① 基準試料の設計・製作
- ② ガンマ線散乱-密度の関係テスト
- ③ ガンマ線散乱-距離の関係テスト
- ④ 線源・検出器間 2 重距離方式テスト
- ⑤ 計測精度の評価

上記テストの完了後、実際の焼結設備に設置してオンラインテストを実施した。

6.1 オフラインテスト

(1) 基準試料の設計・製作

焼結原料は粉体であり、時間の経過にしたがって自重で圧縮され密度が変化してしまう問題をもつ。そこで組成、密度がほぼ同じで一般に基準として用いられているコンクリート試料を設計・製作し計測対象とした。

コンクリートはセメント、粗骨材、細骨材の 3 種類の混合物であり、各骨材はさらに密度の高い普通骨材と密度の小さい人工計量骨材よりなる。骨材の配合比率を変化させて異なる密度を有するコンクリートを設計・製作した。その密度は 1.707, 1.777, 1.829, 1.885 g/cm³ であり、形状は幅 40 cm, 奥行き 40 cm, 厚さ 10 cm である。実際の焼結原料は充填の仕方により通常は 1.6~1.9 g/cm³ の範囲を推移し、平均的には 1.8 g/cm³ である。基準試料は実際の密度変化にほぼ一致しているので以降のテストに使用した。

(2) ガンマ線散乱-密度の関係テストおよび

(3) ガンマ線散乱-距離の関係テスト

ガンマ線散乱-密度の関係テストとガンマ線散乱-距離の関係テストは同時に実施できる。以下にテスト条件、テスト方法を述べる。

〔テスト条件〕

密度：基準試料(コンクリート)の密度

1.707, 1.777, 1.829, 1.885 g/cm³

距離：線源・検出器下端から試料までの最短距離

8.00, 9.00, 10.00 cm

L_1 ：線源と n 検出器の中央間の距離 14.00 cm

L_2 ：線源と f 検出器の中央間の距離 19.00 cm

距離に関しては実際の焼結設備に設置することを考慮して 5 cm 以上で予備テストの結果、直線性が高い距離を選定した。 L_1 と L_2 については線源・検出器間 2 重

距離方式の実現に必要な条件 (30) 式を満足するように予備テストで決定した。

〔テスト方法〕

計数方法：計測時間 60 s で得られるガンマ線計数を各密度、各距離で記録する。

検量線作成：距離を一定にしたときのガンマ線計数と密度の関係を最小 2 乗法で線形式で求める。同様に密度を一定にしたときのガンマ線計数と距離の関係を最小 2 乗法で線形式で求める。

〔テスト結果〕

以上のテスト条件、テスト方法においてテストを実施した。テスト結果を Fig. 6 にグラフ化し、検量線の各係数を Table 1 に示す。検量線(回帰直線)の相関係数はいずれも 99.9% を越えている。

(4) 線源・検出器間 2 重距離方式テスト

上記 (2), (3) 項で得られた検量線をもとに線源・検出器間 2 重距離方式の関係式を求める。(25), (26) 式における $a(H)$, $b(H)$ を Table 1 の係数を用いて決定する。

その結果をまとめると、

〔 n 検出器の場合〕

$$a(H) = -382H + 70452 \quad (31)$$

$$b(H) = -19809H + 252791 \quad (32)$$

〔 f 検出器の場合〕

$$a(H) = 1200H + 25810 \quad (33)$$

$$b(H) = -13260H + 202800 \quad (34)$$

Fig. 6 Calibration curves for γ -ray counts with respect to a density and a distance

Table 1 Coefficients of calibration curves
($I = a\rho + b = cH + d$)

(a) Coefficients of calibration curves of a formula
 $I = a\rho + b$ with respect to a distance H

H cm	n detector		f detector	
	a	b	a	b
8.00	67411	94291	35359	96819
9.00	66994	74577	36715	83259
10.00	66739	54673	37759	70299

(b) Coefficients of calibration curves of a formula
 $I = cH + d$ with respect to a density ρ

ρ g/cm	n detector		f detector	
	c	d	c	d
1.707	-20536	373726	-11251	247205
1.777	-20397	377208	-11082	248270
1.829	-20441	381040	-11027	249654
1.885	-20609	386322	-11042	251847

Table 2 Experimental data obtained by a conventional method and a dual spacing method

(a) Data obtained by a conventional method
(distance $H=8$ cm, n detector)

sample density g/cm ³	calculated density g/cm ³		
	8 cm	9 cm	10 cm
1.707	1.708	1.403	1.099
1.777	1.776	1.474	1.171
1.829	1.827	1.523	1.220
1.885	1.887	1.579	1.276

(b) Data obtained by a dual spacing method
(distance $H=8, 9, 10$ cm)

sample density g/cm ³	calculated density g/cm ³		
	8 cm	9 cm	10 cm
1.707	1.696	1.718	1.724
1.777	1.774	1.775	1.776
1.829	1.811	1.781	1.842
1.885	1.880	1.880	1.886

となる。つぎに(31)~(34)式を(27)式に代入すると、

$$I_n = (-382H + 70452)\rho + (-19809H + 252791) \quad (35)$$

$$I_f = (1200H + 25810)\rho + (-13260H + 202800) \quad (36)$$

が得られる。(35)式が(28)式に、(36)式が(29)式に対応し、線源・検出器間 2 重距離方式の連立方程式となる。

(5) 計測精度の評価

まず、テストで得られたガンマ線の計数値を検量線を用いて計算した密度と基準試料の真の密度を比較した。ここでは代表例として距離 8 cm で、 n 検出器を用いた場合を Table 2 に示す。同様にガンマ線の計数値を与えて連立方程式(35)、(36)式を解いて求めた密度と真の密

(a) Sintering machine

(b) Experimental setup

Fig. 7 Schematic of a new density gauge in experimental trials

度を比較した。結果を同じく Table 2 にまとめた。距離 8 cm, n 検出器で得られた検量線(距離を固定した従来の密度計測)の精度は ± 0.005 g/cm³以内である。一方連立方程式(35)、(36)式の場合、距離が 8, 9, 10 cm と変化しても精度は ± 0.02 g/cm³が確保できる。距離 8 cm, n 検出器で得られた検量線において計測対象(密度 1.707 g/cm³)までの距離が 9, 10 cm と変化した場合の計算値は、1.403 g/cm³, 1.099 g/cm³ となり大きな誤差を生じてしまう。実際の焼結設備における密度計測の精度は ± 0.05 g/cm³であれば充分であり、本方式がきわめて有望である。

6.2 オンラインテスト

本密度計を焼結設備に設置してオンラインテストを行った。焼結設備は幅 5 m×長さ 100 m の巨大なコンベアを有し、焼結原料が片側より厚さ約 60 cm(この厚さが変動し密度計との距離が変化する)で供給され一方へゆっくりした速さで移動する。途中で点火炉があり原料が焼き固まり焼結鉱(高炉の原料)となる。特に表層密度は原料の焼き具合を左右する重要な因子である。密度計は原料が装入された直後の幅方向の均一性を確認するための役割を担うものである。

密度計は Fig. 7 のように設置され、幅方向 7 カ所の密

Table 3 Some results of on-line tests

position		density g/cm ³	distance cm
left	1	1.779	8.77
	2	1.845	8.51
	3	1.616	9.30
center	4	1.880	8.42
	5	1.885	8.38
	6	1.700	8.92
right	7	1.759	8.81

度を計測する。実際のデータを Table 3 に示す。オンライン状態では真値との比較は困難であるが従来の経験およびミニプラントでの装束実験の知見より、通常の表層密度は約 1.80 g/cm³ 程度となることよりオンラインテストにおける幅方向平均 1.808 g/cm³ は非常に良好な結果といえる。

本密度計はオンラインで非接触という工業計測に望まれる要件を満たし、現在、君津製鐵所の3号焼結設備における実用的センサとして長期安定稼働を続け密度管理・制御に大きく貢献している。

7. おわりに

本論文ではガンマ線による密度計測の工業利用の範囲を拡大すべく、従来のガンマ線散乱密度計の弱点であった幾何学的条件(計測対象と密度計の距離など)の変動に対する制限の緩和を試みた。検出されるガンマ線の計数は計測対象の密度と幾何学的条件の両者の影響を受けるため幾何学的条件を固定して密度による変化のみをとらえる方法が従来より用いられてきた。提案した方法はガンマ線検出器を2台、それぞれ異なる適切な位置に配置し、各検出器ごとに得られる密度、距離とガンマ線計数の関係式を連立して解くことを特徴とするものである。実験の結果、距離が基準面より2 cm 変動しても計測精度は 1.60~1.90 g/cm³ の範囲で ± 0.02 g/cm³ (計測時間 60 s) であり十分に工業利用に有用であることがわかった。使用した線源の強度は通常の密度計測に利用される線源の強度の 1/1000 以下の 3.7 MBq (100 μ Ci) であり安全管理上の取扱いも容易である。本密度計は新日本製鐵(株)君津製鐵所の焼結設備で実用化され安定操業に貢献している。

本研究を進めるにあたり有益な助言をいただいた放射

線計測協会調査役富永洋博士、実験に協力いただいた新日本製鐵(株)君津製鐵所電気計装技術室関屋政洋掛員および日鉄エレクトックス君津支店高橋俊博係員、小関哲也係員に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 科学技術庁原子力安全局編：放射線利用統計(1990)
- 2) 大野博教：密度計, RADIOISOTOPES, 22-5, 59/66(1973)
- 3) 関口 晃：放射線計測概論, 30, 東京大学出版会(1988)
- 4) 村上, ほか：放射線データブック, 27, 地人書館(1982)
- 5) J. J. Taylor : USAEC Report, WAPD-RM-217(1954)
- 6) Y. Shirakawa, et al. : An In-Stream Gamma-Ray Gauge for Sintering Plant Control in the Steel Industry, Nucl. Geophs, 3-2, 147/156(1989)
- 7) Y. Shirakawa : A Feasibility Study to Determine the Carbon and Oxygen Contents of Steel Using Fast Neutron Techniques, 5-4, Nucl. Geophs, 519/528(1991)
- 8) Y. Shirakawa : Rapid Analysis of Carbon and Oxygen in Steel based on Fast Neutron Interactions, 28, Harwell Report (1987)
- 9) Brochure on Bismuth Germanate Detectors, Harshaw (1986)
- 10) A. E. Evans and J. D. Orndoff : NUREG/CR-1398(LA-830) (1980)
- 11) G. F. Knoll : Radiation Detection and Measurement Second Edition, 326, John Wiley & Sons (1989)

著者紹介

白川 芳 幸 (正会員)

1980年、東京工業大学理工学研究科電気電子工学専攻修了。同年新日本製鐵(株)に入社、現在に至る。同社君津製鐵所製鉄地区設備室長。この間、英国ハーウェル原子力研究所に留学(85~87年)。主として放射線応用計測の研究などに従事。

天 野 裕 (正会員)

1959年、東京大学工学部応用物理学科計測工学科卒業。同年八幡製鐵所(現新日本製鐵(株))に入社、87年退社。その間計測自動制御関係業務に従事。90年計測システムを企画、設計する天野研究所を設立、代表取締役、現在に至る(工学博士)。