

ガンマ線の散乱現象を利用した密度計の研究

1993年6月

博士(工学)

白川芳幸

豊橋技術科学大学

①

ガンマ線の散乱現象を利用した密度計の研究

本論文は、まず散乱の密度計法の原理の中で散乱ガンマ線を用いて、計測対象の密度を測定する。その際、散乱ガンマ線の強度と密度との関係を理論的に導き出し、実験的に検証する。

1993年6月

博士（工学）

白川芳幸

豊橋技術科学大学

工業計測において重要な位置を占める分野の一つは、ガンマ線を中心とした放射線応用計測である。本論文では、放射線応用計測の中でガンマ線を利用した密度計測の現状の課題の解決、さらに新しい展開として期待されている複合計測の拡大、法律の規制を受けない微弱線源の利用促進について理論面、技術面の研究成果を示した。さらに本論文では研究成果をガンマ線散乱密度計として具現化したこと、鉄鋼分野での有用性、および発展性を確認したことについて言及した。

本研究では、まず現状の密度計測の課題の中で特にガンマ線源、計測対象、検出器の相対配置（幾何学的条件）に関する課題の重要性を示した。本課題を解決するためにはガンマ線の散乱現象をマクロなレベルで取り扱える解析的なモデルが必要であるとの結論に立ち、ガンマ線の散乱と計測対象の密度との関係を、つぎにガンマ線の散乱と計測対象の幾何学的条件（距離）との関係を理論的に研究し『ガンマ線散乱－密度モデル』と『ガンマ線散乱－距離モデル』を構築した。

『ガンマ線散乱－密度モデル』は検出器に届く散乱ガンマ線の数（散乱ガンマ線計数）を密度の関数として与える。このモデルは散乱ガンマ線の発生モデルと透過モデルの結合よりなる。発生、透過モデルでは散乱ガンマ線の発生および透過を確率と密度をパラメータとする微分方程式で表現する。境界条件は密度が 0 g/cm^3 の時、発生確率は 0 で透過確率は 1 であり、密度が $\infty \text{ g/cm}^3$ の時、発生確率は 1 で透過確率は 0 である。これらの微分方程式を解くと、密度の増加に伴い散乱ガンマ線計数は増加して極大値となり、さらに密度が増加すると散乱ガンマ線計数は減少することが示される。また密度範囲を限定すると散乱ガンマ線計数と密度は線形式で近似できる。ただし、この場合には幾何学的条件（距離）は一定とする。

一方、『ガンマ線散乱－距離モデル』は計測対象が基準面から離れた時の散乱ガンマ線計数の変化を取り扱う。すなわち散乱ガンマ線計数を距離の関数として与える。基準面に計測対象がある場合の散乱ガンマ線計数と離れた時の散乱ガンマ線計数をそれぞれの地点から検出器を見た立体角の比としてモデル化した。このモデルは散乱ガンマ線計数が距離と共に単調に減少することを示す。ただし、この場合には計測対象の密度は一定とする。

『ガンマ線散乱－密度モデル』と『ガンマ線散乱－距離モデル』から得られる散乱ガンマ線計数は同一密度、同一距離では等しくなる。したがって両方のモデルを結合すると密度と距離を未知数に持つ非線形方程式が得られる。これは密度、距離が同時に変化した場合の散乱ガンマ線計数を与える。このモデルによって幾何学的条件を含んだ密度計測原理が数学的に与えられ、現状の重要課題の解決がなされた。

さらに複数の信号を用い複数の目的量を求める複合計測の立場からの研究を実施した。すなわち2台の検出器を異なる位置に配置し、2組の非線形方程式を連立することによって計測対象の密度、計測対象までの距離を同時に求めることの可能性を示した。本方法を線源・検出器間2重距離方式と命名した。

線源・検出器間2重距離方式を密度計として焼結鉍を製造する焼結機へ導入することにした。焼結鉍は溶けた鉄を製造するための原料として溶鉍炉（高炉）へ装入される。焼結機は幅5 m×長さ100 mの巨大な装置で日産20000トンの製造能力を有する。焼結機には焼結配合原料が供給され、その原料は焼き固められて焼結鉍となる。原料の密度計測と制御によって製品歩留りを向上させ、同時にエネルギーを削減させる技術が従来は存在せず、有力な手段として密度計の研究開発が強く望まれていた。そこで焼結機へ導入可能な密度計の要件を明らかにし、技術研究をおこなった。要件の一つとして微弱線源の利用を掲げた。技術研究の成果を基に装置設計を進め、ガンマ線散乱密度計を完成させた。

基礎テストとオフラインテストでは計測原理（線源・検出器間2重距離方式）の検証と密度計の性能評価を行った。計測性能は幾何学的条件変動の中でも60秒の計数時間で密度範囲1.5～2.0 g/cm³において±0.05 g/cm³を達成した。オンラインテストでは長期安定性を実証した。すでに1年間のテストを終え、幅方向の密度計測と制御が実用技術として完成した。経済効果では歩留りの向上とエネルギー削減も図られた。

密度計測はさらに高炉への適用拡大も可能であり、鉄鋼における新しい適用の場も拡がりつつある。

以上のように本研究はガンマ線による密度計測の課題の解決と複合計測の拡大、および微弱線源の利用促進を同時に実現したものであり、放射線応用計測分野の発展に大きく寄与するものと確信する。

A Study on a Density Gauge Based on Gamma-Ray Scattering

Synopsis

Gamma-ray application in radiation measurement has carried out an important role in various industrial measurement for production lines. The present paper proposes a new theoretical and technical approach to improve conventional gamma-ray density measurement, a combination method based on the new approach and a trial of the use of a small radioactive source. The paper furthermore describes the realization of a gamma-ray backscatter density gauge and the evaluation of the gauge in the steel industry.

The study made clear that an arrangement of a gamma-ray source, a measured object and a detector (called a geometrical configuration) was a major subject for current density measurement. In order to solve the subject, mathematical models were strongly required which treated gamma-ray scattering at a macro level. The gamma-ray scattering - density model was proposed which handled the relation between gamma-ray scattering and an object density. The gamma-ray scattering - distance model was also developed which gave the relation between gamma-ray scattering and the geometrical configuration (the distance from a detector to an object).

The gamma-ray scattering - density model gives the number of scattered gamma-rays counted by a detector (called the gamma-ray count) as a function of density. This model consists of the product of a generation model and a transmission model of scattered gamma-rays. The generation model is represented by a differential equation with the parameters of generation probability (p) and density (ρ). The transmission model is given by a differential equation with the parameters of transmission probability (q) and density (ρ). The boundary conditions are shown below :

$$\rho \rightarrow 0 : p \rightarrow 0 \text{ and } q \rightarrow 1$$

$$\rho \rightarrow \infty : p \rightarrow 1 \text{ and } q \rightarrow 0$$

It becomes clear by solving the differential equations that the gamma-ray count monotonically increases up to the maximum with density and then decreases to zero. In addition, the gamma-ray count is given by a linear function of density in the restriction of a density range. Note that these relations are obtained provided that the geometrical configuration (distance) is constant.

On the other hand, the gamma-ray scattering - distance model gives the number of scattered gamma-rays under the change of the geometrical configuration. The gamma-ray count can be given by a function of distance. In this model, the count of gamma-rays scattered from the object away from the reference level is in proportion to the count of gamma-rays scattered from the object located at the reference level with a solid angle (a function of distance) from the object to the detector. The model explains that the gamma-ray count monotonically decreases with increasing distance. Note that the relation is observed provided that the object density keeps constant.

The gamma-ray count evaluated from the gamma-ray scattering - density model is equal to the gamma-ray count evaluated from the gamma-ray scattering - distance model at the same density and the same distance. A non-linear equation with parameters of density and distance is derived from the combination of these two models. The equation indicates the gamma-ray count under the condition of changes of density and distance. Therefore the combination model constructs the principle of density measurement including the factor of a geometrical configuration and solves the current problem of density measurement.

The study was further carried out with the view to developing a combination measurement to find multi-information by using multi-signals. As a result, it is shown that the density of the object and the distance from the object are simultaneously determined by solving dual non-linear equations gained in the use of dual detectors placed at different positions. The method is here called a dual spacing method.

The gamma-ray density gauge based on the dual spacing method was planned to be employed at a sintering machine producing sintered ore. Sintered ore is one of

materials charged into a blast furnace. The sintering machine is a large-scale apparatus, 5 m wide \times 100 m long, with the daily productivity of 20000 t. Raw material is supplied into the sintering machine and the material is changed into sintered ore by sintering. A density measurement and control technique in order to increase the yield of sintered ore and save energy for sintering requested a density gauge as an effective tool. Several requirements were indispensable to introduce the density gauge for practical use at the sintering plant. Technical research was made to satisfy these requirements including the use of a small radioactive source. On the bases of the research the gamma-ray density gauge was carefully designed and then constructed.

Basic experiments and off-line tests using the gamma-ray density gauge confirmed correctness of the measurement principle (the dual spacing method) and evaluated the accuracy of density measurement. According to the test results, the accuracy was found to be $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ in the range 1.5 - 2.0 g/cm^3 for 60s counting. On-line tests revealed long-term stability of this gauge. After on-line trials for one year, the gauge became in practical use for density measurement and control of sintered material and achieved the economic benefits of increasing the yield of sintered ore and saving the energy for sintering.

This measurement technique has possibility to be applied to a blast furnace. Another applications in the steel industry will be also expected.

The present study solves the current problem on density measurement and proposes the new combination method (the dual spacing method) with a small radioactive source, contributing to development in the field of applied radiation measurement.

目 次

第 1 章 緒 言	1
1. 1 ガンマ線による密度計測の現状	1
1. 2 ガンマ線による密度計測の新しい展開	1 1
1. 3 本研究のガンマ線密度計測と密度計	2 0
第 2 章 ガンマ線による密度計測原理の研究	2 7
2. 1 ガンマ線による密度計測の基本原理	2 7
2. 2 ガンマ線散乱のモデリング	3 1
2. 3 シミュレーションによる評価	3 8
2. 4 ガンマ線による密度計測の応用原理	5 7
2. 5 まとめ	5 9
第 3 章 ガンマ線散乱密度計の要素研究	6 1
3. 1 密度計の研究要素	6 1
3. 2 ガンマ線源の選定	6 4
3. 3 遮蔽材料の研究	7 0
3. 4 ガンマ線検出器の研究	7 5
3. 5 自動利得制御 (A G C) の開発	8 8
3. 6 線源・検出器間 2 重距離方式演算	9 9
3. 7 まとめ	1 0 0

第4章 ガンマ線散乱密度計の設計 ----- 103

4.1 設計条件 ----- 103

4.2 線源部の設計 ----- 104

4.3 遮蔽部の設計 ----- 106

4.4 検出部の設計 ----- 107

4.5 制御部の設計 ----- 109

4.6 演算部の設計 ----- 110

4.7 まとめ ----- 113

第5章 ガンマ線散乱密度計のテストと評価 ----- 115

5.1 テストの考え方 ----- 115

5.2 基礎テスト ----- 116

5.3 オフラインテスト ----- 127

5.4 オンラインテスト ----- 142

5.5 密度計の使用効果 ----- 144

第6章 密度計測および密度計の応用研究 ----- 149

6.1 密度計の応用研究 ----- 149

6.2 複合計測の応用研究 ----- 162

第7章 結 論 ----- 168

謝 辞 ----- 171

第1章 緒言

本章では、まずガンマ線を中心とした工業用放射線応用計測について述べ、現在までに確立している技術および残されている課題を明確にする。つぎに工業用放射線応用計測の今後の展望について論述する。現状を評価し今後を展望する中で本研究の目的、課題および研究の進め方を明らかにする。

1.1 ガンマ線による密度計測の現状

1.1.1 工業用放射線応用計測の概要

放射線が物質を通過するとき吸収、散乱、励起という相互作用が生じる。相互作用の大きさは放射線の種類とエネルギー、そして物質の原子番号、密度、寸法で決まる。この現象をある物理量の測定に利用したものが放射線応用計測である。

放射線応用計測を利用した工業機器は工業用放射線応用計測器と呼ばれ、その利点は、

- ・非接触で物質内部の物理量の計測（検査）が可能
- ・非破壊で物質内部の物理量の計測（検査）が可能
- ・放射線そのものは温度・圧力の影響を受けず、かつ時間的に安定
- ・放射線の量を大きくすれば高速応答が可能

なことであり、逆に最大の欠点としては、

- ・放射線障害防止法による安全上の厳しい管理が必要

が挙げられる。各産業界は放射線の安全管理上の問題に対処しながら、長所を活かしてプラントの計測・制御、品質管理に必須の機器として多数使用している。

放射線の主な種類は、粒子線であるアルファ線、ベータ線、中性子線、電磁波であるガンマ線、エックス線である。それらの線源として一般に放射性同位元素が使用される。ただし、エックス線はエックス線管（発生管と高電圧供給装置）により発生する。一般に工業用放射線応用計測で使用される放射性同位元素と、その主たる用途を表1.1.1に示す。放射線同位元素を装備した工業用放射線応用計測器（ただしエックス線機器は除く）は表1.1.2のように分類され、1990年3月末での国内民間企業での装備台数に関しては3.7MBq（旧単位では100 μ Ci）を越える機器は7933台^{1) 2)}である。

この詳細データは科学技術庁から放射線利用統計として毎年公表される。また3.7 MBq以下の線源を利用した機器は正確な統計はないが約3000台³⁾(煙検知器は除く)と推定される。

表1.1.1 放射性同位元素と主たる用途

核種	半減期(年)	線種とエネルギー(MeV)	主たる用途
³ H	12.3	β(0.018)	ガスクロマトグラフ
⁵⁵ Fe	2.7	EC(電子捕獲)	硫黄分析計
⁶⁰ Co	5.3	γ(1.173, 1.333)	レベル計, 密度計
⁶³ Ni	100.0	β(0.067)	ガスクロマトグラフ
⁸⁵ Kr	10.7	β(0.546)	厚さ計(紙など)
⁹⁰ Sr	28.8	β(0.672)	タバコ量目計
¹³⁷ Cs	30.2	γ(0.662)	厚さ計(鉄など) レベル計, 密度計
¹⁴⁷ Pm	2.6	β(0.223)	厚さ計(紙など)
²⁰⁴ Tl	3.8	β(0.764)	厚さ計(紙など)
²⁴¹ Am	433.0	γ(0.060)	厚さ計(鉄など)
²⁴¹ Am-B e	458.0	n(中性子)	水分計

表1.1.2 民間企業での工業用放射線応用計測器

計測器	装備数	放射性同位元素	産業分野
厚さ計	2478	Cs, Am, Pm	鉄鋼, 紙パルプ
レベル計	1441	Co, Cs	鉄鋼, 化学
密度計	697	Co, Cs	化学, 鉄鋼
水分計	181	²⁴¹ Am-B e	鉄鋼
ガスクロマトグラフ	1349	Ni, Fe, H	各製造業
硫黄分析計	369	Am, Fe	各製造業
タバコ量目計	934	Sr	タバコ産業
その他	484		各製造業

1. 1. 2 ガンマ線による工業用放射線応用計測の原理

前述の統計に見られるように工業用放射線応用計測にはベータ線、ガンマ線、中性子線が広く用いられるが、本論文ではベータ線、中性子線に関する言及を省略し、鉄鋼業で最も有用なガンマ線について論じていく。その中で工業用放射線応用計測が基本的には長さ (cm) と密度 (g/cm^3) の計測であること示し、現在の技術水準を明らかにする。

ガンマ線の吸収、散乱、励起の機構は光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成 (結果としての消滅放射) によるが、ガンマ線厚さ計、密度計⁴⁾などはコンプトン散乱が優勢な領域を利用している。このコンプトン散乱はガンマ線が静止している電子に衝突するときの非弾性散乱^{5) 6)}で、クライン・仁科の式^{7) 8)}によって電子レベルで解析されているが、工業的利用においてはつぎで述べるマクロな物体レベルで取扱いされる。

(1) ガンマ線透過の一般式

ガンマ線を図 1. 1. 1 に示すように厚い鉛板の細い孔から物体に照射し、それを透過したガンマ線についての一般式を示す。

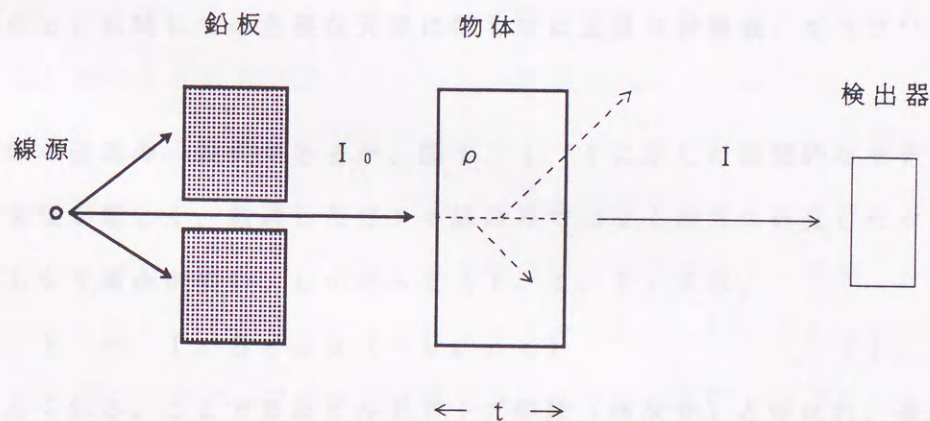


図 1. 1. 1 ガンマ線の透過のモデル

上記モデルの一般式は、

$$I = I_0 \exp(-\mu_1 t) \quad (1. 1. 1)$$

となる。ここで、 I : 物体を透過したガンマ線の強さ (数を表し無次元)

I_0 : 物体に入射するガンマ線の強さ (数を表し無次元)

μ_1 : 物体の種類と密度とガンマ線のエネルギーで決まる定数

(線減衰係数と呼ばれ $1 / \text{cm}$ の次元)

t : 物体の厚さ (長さであり cm の次元)

である。ここで μ_m を以下のように定義する。

$$\mu_m \equiv \mu_1 / \rho \quad (1.1.2)$$

ここで ρ は物体の密度 (g / cm^3) である。 μ_m は cm^2 / g の次元をもち質量減衰係数と呼ばれる。これを使用して (1.1.1) 式を書き換えると、

$$I = I_0 \exp(-\mu_m \rho t) \quad (1.1.3)$$

となる。

つぎに原子1個当たり、電子1個当たりの減衰の概念を導入し、線減衰係数、質量減衰係数と関係づける。 μ_a を原子減衰係数 ($\text{cm}^2 / \text{個}$)、 μ_e を電子減衰係数 ($\text{cm}^2 / \text{個}$) とすると、4種類の減衰係数は、

$$\mu_1 = \rho \mu_m = \rho N \mu_a = \rho N Z \mu_e \quad (1.1.4)$$

となる。ただし、 N は物体 1 g 中の原子数 ($\text{個} / \text{g}$)、 Z は物体の原子番号 (無次元) である。ガンマ線は前述したように光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成で減衰するのでそれぞれの減衰係数を τ 、 σ 、 κ とすると、4種類の減衰係数とも、

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (1.1.5)$$

が成立する。特に μ_1 に関しては主要な元素に関しては正確な数値表、グラフ⁹⁾ が作られている。

以上がガンマ線の透過の一般式であるが、図 1.1.1 に示した理想的なモデルは実際の工業利用では実現が難しく、透過したガンマ線のみではなく前方に散乱したガンマ線も同時に検出してしまう場合が多い。したがって (1.1.3) 式は、

$$I = I_0 B \exp(-\mu_m \rho t) \quad (1.1.6)$$

のように書き換えられる。ここで B はビルドアップ係数 (無次元) と呼ばれ、透過線に対する散乱線の比率の関数である。(1.1.6) 式が最も実用的なガンマ線の透過式として使用されている。

(2) ガンマ線透過の利用

物体が決まれば μ_m が決まる。ここで t が Δt だけ増したため I が ΔI だけ減少したとすると (1.1.6) 式より、

$$\Delta I / I = -\mu_m \rho \Delta t \quad (1.1.7)$$

が得られる。また、 ρ が $\Delta\rho$ だけ増したため I が ΔI だけ減少したとすると同様に、

$$\Delta I / I = -\mu_m t \Delta\rho \quad (1.1.8)$$

となる。(1.1.7)式、(1.1.8)式を変形すると、

$$\Delta t = -[1/(\mu_m \rho)] \Delta I / I \quad (1.1.9)$$

$$\Delta\rho = -[1/(\mu_m t)] \Delta I / I \quad (1.1.10)$$

となる。(1.1.9)式において密度が一定ならばガンマ線の変化率から長さ(厚さ)の変化を知ることが可能であり、厚さを測定できる。一方、(1.1.10)式において長さ(厚さ)が一定ならばガンマ線の変化率から密度の変化を知ることが可能であり、密度を測定できる。

以上のようにガンマ線透過の一般式を基本にして長さ(厚さ)、密度の計測原理が誘導できる。この原理を計測機器に応用したものが厚さ計、密度計であり、多数が各産業分野で稼働している。

(3) ガンマ線散乱の一般式

ガンマ線の散乱(ここでは特に後方散乱)に関しては透過のような簡単な一般式は提案されていない。その理由は、散乱現象は電子レベルではクライン・仁科の式により微分断面積の概念で計算されるが、アボガドロ数のオーダーで構成される物体では膨大な数の電子でガンマ線散乱が繰り返され解析的な取り扱いが困難なためである。

そこでガンマ線散乱を確率論的に取り扱う大規模なモンテカルロ法¹⁰⁾が開発されている。物体の表面が平面である場合にはガンマ線の後方散乱は本法によって微分アルベド(この量もモンテカルロ法で求める)なる散乱係数を用いて計算される。微分アルベドは境界面の微小面積から出入りするガンマ線またはエネルギーの比として定義される。図1.1.2のように境界面を平面として仮想的な垂直線と水平線を立て、入射するガンマ線と垂直線とで作られる角を θ_0 、水平線とで作られる角を ϕ_0 とし、散乱されるガンマ線のそれぞれの角を θ 、 ϕ とする。入射するガンマ線は平行でエネルギー E_0 をもち、単位面積当たり n_0 個の密度であるとする。境界面上の微小面積 dS に入射するガンマ線の数は $n_0 \cos\theta_0 dS$ となる。すると dS に入射し(θ 、 ϕ)の方向の微小立体角 $d\Omega$ 内に散乱していくガンマ線のうちエネルギーが E と $E+dE$ のガンマ線の数は、

$$N = n_0 \cos\theta_0 dS P(\theta_0, \phi_0, E_0; \theta, \phi, E) \sin\theta d\theta d\phi dE$$

と表現される。ここで P が微分アルベドと呼ばれる量である。 (1.1.11)

境界面上の微小面積 dS を通り、 (θ, ϕ) の方向の微小立体角 $d\Omega$ 内に散乱される全ガンマ線の数 $n(\theta, \phi) dS d\Omega$ とすると、

$$n(\theta, \phi) dS d\Omega = n_0 \cos \theta_0 \alpha_N dS d\Omega \quad (1.1.12)$$

と表せる。ここに、

$$\begin{aligned} \alpha_N &\equiv \alpha_N(\theta_0, \phi_0, E_0; \theta, \phi) \\ &= \int P(\theta_0, \phi_0, E_0; \theta, \phi, E) dE \end{aligned} \quad (1.1.13)$$

であり、この量は微分ガンマ線数アルベドである。エネルギーに関しても同様に微分エネルギーアルベドが定義される。

アルベドを求めるにも、散乱ガンマ線を計算するにも変数が多く膨大なヒストリー（モンテカルロ法におけるガンマ線入射から散乱までの確率的過程）計算が必要であり大型コンピュータが必須となる。また重要な要素であるアルベドも計算例はあるが鉄やコンクリートなどの原子炉材料に限られており、工業原料・材料に関するアルベドは無いのが実情である。したがって工業用放射線応用計測器では実用的な一般式がないため、実験により検量線を決めて使用しているのが実態である。

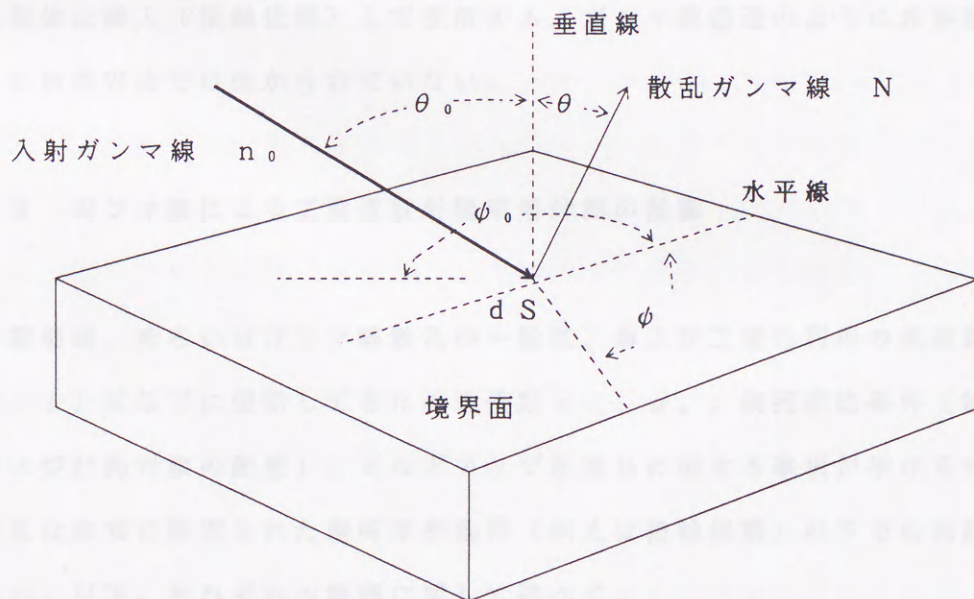


図 1. 1. 2 入射ガンマ線と散乱ガンマ線の関係

(4) ガンマ線散乱の利用

前述したようにガンマ線散乱の一般式は提案されていない。そこで実際の利用としては線源、遮蔽、検出器を図1. 1. 3で示した2種類の幾何学的配置により検量線を実験で求めている。

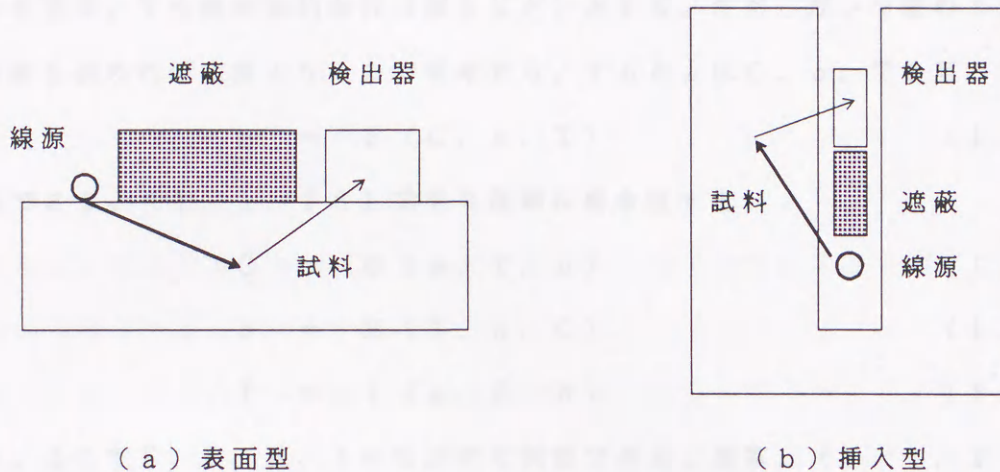


図1. 1. 3 ガンマ線散乱の利用形式

表面型は物体表面にほぼ接触させて使用する。挿入型はプローブ内に線源、遮蔽、検出器を設置し物体に挿入（接触状態）して使用する。ガンマ線透過のように非接触で測定する特徴がこの利用方法では生かされていない。

1. 1. 3 ガンマ線による工業用放射線応用計測の課題

ガンマ線透過、あるいはガンマ線散乱の一般式、および工業的利用の共通課題として、(1. 1. 1)式以下に使用してきた減衰係数 μ_1 、 μ_m 、幾何学的条件（線源、遮蔽、検出器および計測対象の配置）、ビルドアップ係数Bに関する事項が挙げられる。特にガンマ線散乱は非常に限定された幾何学的条件（例えば接触状態）の下での利用されているに過ぎない。以下、それぞれの課題に関して述べる。

(1) 減衰係数に関する課題

線減衰係数は純粋な物質に関する減衰を表す量である。純粋な物質（元素）については精密なデータ表が作成されており、計算にも実験にも問題を感じることはない。しかしな

がら、現実の計測対象は混合物であり、稠密とは限らずバルク状で、密度（この場合にはかさ密度と呼ぶ）が固定されていないことが多い。さらに厚さなどの寸法も変化する。ここで検出されるガンマ線の数 I を形式的に関数 f を用いて、

$$I = f(\mu) \quad (1.1.14)$$

とする。ただし μ は問題としている物体レベルのマクロな減衰係数である。そして C を成分、 ρ を密度、 T を幾何学的条件（厚さなど）とする。ただしガンマ線のエネルギー、強さは線源を決めれば定数となるので省略する。すると μ は C, ρ, T を用いて、

$$\mu = F(C, \rho, T) \quad (1.1.15)$$

と表現できる。（1.1.15）式を3種類に書き直すと、

$$C = G(\rho, T, \mu) \quad (1.1.16)$$

$$\rho = H(T, \mu, C) \quad (1.1.17)$$

$$T = I(\mu, C, \rho) \quad (1.1.18)$$

となる。ここで F, G, H, I は形式的な関数である。通常、（1.1.14）式の I が計測量で既知である。したがって μ, C, ρ, T のうち3者が既知（定数）であれば残りの量（未知）を求めることができる。工業利用面での組合せの例を述べる。測定（検出）されるガンマ線の数 I が一定（すなわちマクロな減衰係数 μ が一定）で、幾何学的条件 T （厚さなど）が一定の場合には、密度 ρ に関して、

①成分 C が一定（稠密） → 密度 ρ は確定

②成分 C が一定（非稠密） → 密度 ρ は不確定

③成分 C が変動（稠密） → 密度 ρ は不確定

④成分 C が変動（非稠密） → 密度 ρ は不確定

となる。提案されている一般式、あるいは実験による検量線で厳密に密度計測ができるのは①の場合のみである。しかし現実には成分が変動しバルク状（非稠密）の計測対象が多い。そのため一方を一定として計測機器を設計するには限界がある。別の例としては測定（検出）されるガンマ線の数 I が一定（したがってマクロな減衰係数 μ が一定）で成分 C が一定の場合、幾何学的条件（厚さなど）に関して次の関係を挙げるることができる。

①密度 ρ が一定 → 厚さ T は確定

②密度 ρ が変動 → 厚さ T は不確定

となる。工業的に最も利用されている厚さ計においても②の場合には厚さが不確定になってしまう。具体的には温度によって計測対象の密度が変動する場合である。

以上述べたように複数の条件が変動する中で必要な量を求めることは容易でない。ガンマ線の測定によって複数の条件変動を補償するためには、変数間で従属関係はないか、つまり変数の数は減らせないか、あるいは変動の影響を定量化して計測精度との妥協点が発見できないかなどの検討が必要である。その検討が今後のガンマ線利用の拡大に不可欠といえる。そのためには大規模なモンテカルロ法（大型コンピュータが不可欠）に頼らない簡易な計算法、そして実用的な一般式の研究が重要である。

(2) 幾何学的条件に関する課題

幾何学的条件の問題が発生する理由は、

①線源は一般的に 4π 方向にガンマ線を放射するので放射線強度（個/cm²）は距離の逆自乗則に従って減少する

②ガンマ線の電子レベル、物体レベルでの衝突・散乱は等方的ではなく、衝突エネルギーにより散乱ガンマ線の分布は変化し、散乱ガンマ線のエネルギーも散乱の方向によって変化する

③散乱ガンマ線が検出される可能性は検出器を見込む立体角に依存するためである。

この性質を前方散乱ガンマ線を含むガンマ線の透過利用について当てはめる。すると有限の面積をもつ検出器に入射する1回、あるいは複数回衝突した種々のエネルギーのガンマ線が検出され、逆自乗則と相乗して物体の厚さが同じでも線源、計測対象、検出器の位置関係（主として線源・検出器間距離）によりガンマ線の計数率が変化する現象となる。

散乱ガンマ線については透過ガンマ線よりはるかに複雑な現象となる。たとえ無限平面を仮定しても、計測対象の原子番号、密度、幾何学的条件などを変数とした非線形な関係（一般式は前述のように提案されていない）となり、このうち測定項目以外の要素（計測対象までの垂直距離など）が変動すると計測器としての機能を失うほど各要素の影響は大きい⁴⁾。前述したアルベドを使用して極座標 (r_0, θ_0, ϕ_0) の点に置かれた毎秒 Q 個のガンマ線を放出する等方線源からのガンマ線の (r, θ, ϕ) の点における散乱ガンマ線の数 $d\phi_N$ についてみると、

$$d\phi_N = Q \alpha_N(\theta_0, \phi_0, E_0; \theta, \phi) \cos \theta_0 dS / 4\pi r_0^2 r^2 \quad (1.1.19)$$

となる。上式中の文字の意味は1.1.2の(3)と同一である。この式を境界面の全体

について積分すると (r, θ, ϕ) 点のガンマ線の数が求まるが、アルベドが θ と ϕ の関数として与えられていなければならないことは前述と同様である。(1. 1. 19) 式は線源と境界面の着目する点との距離 r_0 と着目する点と検出器までの距離 r の関数となっている。これは計測対象が同じでも幾何学的条件によって異なるガンマ線強度になることを示している。

アルベドは原子炉材料などのデータがあるのみである。したがって現状では大規模なモンテカルロ法に頼っている。幾何学的条件の変動を簡単に表現できるモデルと計算手段の研究が待たれる。

(3) ビルドアップ係数 B に関する課題

ガンマ線の透過では、コリメートしたガンマ線の減衰実験のような理想的な幾何学的条件は得ることは難しい。したがって透過ガンマ線のみでなく散乱ガンマ線を考慮しなければならない。散乱ガンマ線の量は入射するガンマ線（直接ガンマ線と呼ばれる）のエネルギー、計測対象の原子番号、そして幾何学的条件に左右される。

ビルドアップ係数の定義を示すと、

$$B = \frac{\text{検出器に到達した全ガンマ線}}{\text{検出器に到達した直接ガンマ線}} \quad (1. 1. 20)$$

$$= 1 + \frac{\text{検出器に到達した散乱ガンマ線}}{\text{検出器に到達した直接ガンマ線}}$$

であるが、すべての条件の下でビルドアップ係数を求めておくことは不可能である。任意の厚さの物体に対する実験値、計算値を整理して、ビルドアップ係数を厚さの関数で近似する色々な式が発表されている¹¹⁾。最も簡単な式は、

$$B = A + a \mu_0 t \quad (1. 1. 21)$$

である。ここで A は通常 1、 a は係数、 μ_0 は入射ガンマ線の線減衰係数、 t は物体の厚さである。問題となるのは係数 a である。この係数は水、鉄、アルミニウム、鉛、コンクリート、ウランなどの原子炉材料では求められている。工業材料では a に関するデータはないが、 μ_0 が小さい場合には $a = 1$ として、ビルドアップ係数を、

$$B = 1 + \mu_0 t \quad (1. 1. 22)$$

とする。 μ_0 が大きいときには $a = 0$ を用い、

$$B = \mu_0 t \quad (1. 1. 23)$$

とするのが実用的である。さらに (1. 1. 22) 式が過大評価、(1. 1. 23) 式が過少評価である欠点を緩和するために、

$$B = 0.5 + \mu_0 t \quad (1.1.24)$$

を筆者らは使用することもある。

ビルドアップ係数は特に高精度の測定を望む場合には問題となる。

(4) 課題のまとめ

各課題を個別に述べてきたが、それぞれの課題は相互に関連していることが式中の変数が減衰係数、幾何学的条件、ビルドアップ係数であることから明らかである。この相互に関連した課題は、ガンマ線の散乱現象をマクロに表現する、言い換えれば実用的に取り扱えるモデルの構築、およびその研究のための簡易な計算方法の開発として共通化でき、今後の研究開発の重要な要素となる。

1.2 ガンマ線による密度計測の新しい展開

前節1.1で述べたように現状の密度計測には解決すべき課題が残っているが、一方では新しい展開も芽生えている。それはガンマ線の1測定値以外に別の測定値を加えた複合計測であり、富永、榎本、Clayton、その他の研究者によって種々の報告がなされている¹²⁾⁻²¹⁾。また別の流れとして微弱線源の積極的利用の研究が挙げられる。この報告は佐藤らによってなされている³⁾。本節では複合計測、微弱線源の使用について述べると同時にガンマ線による新しい密度計測の可能性を示したい。

1.2.1 複合計測の研究

ガンマ線の透過、散乱特性は放射線の種類と計測対象の原子番号、密度、寸法、また幾何学的条件によって変化することは前節で述べたとおりである。逆に、放射線の種類、計測対象の原子番号、密度、寸法、幾何学的条件を変数と考え、それに相当する異なった信号が得られるならば解が得られるはずである。全てを変数とすることは実用上困難であるので、測定したい主変数の他に一、二つの補助変数を考え、他は固定値とする。ここで主変数と補助変数の数だけ信号が得られるならば、求めようとしている主変数は計算によって得られる。以上が複合計測の基本的考え方である。数式で表現すると、主変数、補助変数をA、B、Cとし、それらのガンマ線の透過、散乱特性の影響係数を a_i 、 b_i 、 c_i

として、そのときの測定値を x_i とする。そして測定値の近傍で線形に近似できる場合には、

$$\begin{aligned}x_1 &= a_1 A + b_1 B + c_1 C \\x_2 &= a_2 A + b_2 B + c_2 C \\x_3 &= a_3 A + b_3 B + c_3 C\end{aligned}\quad (1.2.1)$$

と表せる。係数の行列式を D とすると、 $D \neq 0$ で数学的には A 、 B 、 C は求められる。このように異なった信号を組み合わせて、すなわち連立させて相互干渉のある情報から単独情報を得るのが複合計測の一般的な手法である。しかしながら工業的実現においては、

- ① 測定値近傍で線形に近似する場合、接平面を作ることになるが、この点が鞍部や頂部では計算が不安定になる。 A 、 B 、 C の x_i に関する偏微分値が単調増加、減少の領域であることが必要である
- ② 接平面は適切な勾配がないと感度が悪い
- ③ a_i 、 b_i 、 c_i が A 、 B 、 C の関数になる場合、 a_i 、 b_i 、 c_i の逐次計算が必要となる

などの制約がある。この制約を考慮しながら種々の複合計測が提案されている。筆者らの研究を含め、これまでに報告されている主な例について要約する。

(1) 複数の放射線の利用

放射線の種類（例えば中性子、ガンマ線）により減衰係数は大幅に変化する。この応用として高炉コークス水分計^{22) 23)}、石炭水分計²⁴⁾などが研究開発され、一部実用化されている。前者を例に説明すると、中性子は水素（水）の散乱断面積（散乱の強さを表す指標で 10^{-24} cm を基準単位とし barn で表す）が大きいのですぐに減速される。これによりコークスの含水量の絶対値が測定できるが、コークスの密度が中性子の測定に影響を与えることから含水率（水分で wt %）を求めるためには密度の測定が必要である。ガンマ線は水、コークスに対してほぼ等しい質量減衰係数をもつので、これを密度の測定に利用する。すなわち水分に関しては元素によって大きく変化する散乱断面積を使って感度をもたせ、密度に関しては元素に依存しにくい質量減衰係数を用いるのである。中性子とガンマ線の特性を表 1.2.1 に、この新型水分計の構成を図 1.2.1 に示す。

新しいコークス水分計には²⁵²Cf（カリフォルニウム 252）という線源が用いられる。この線源は中性子（平均エネルギー約 2 MeV）とガンマ線（平均エネルギー約 1 MeV）を同時に放出する特徴がある。強さは 1.1×10^9 Bq（30 mCi）である。

計測対象の水分は0～15wt%、密度は0.4～0.6g/cm³で計測精度は従来の水分計より4倍も良い±0.2wt%(σ)を達成し²⁵²Cfの工業利用の道を開いた。

表1.2.1 中性子とガンマ線の減衰特性(中性子は2MeVで単位はb、ガンマ線は1MeVで単位はcm²/g)

コークス主要成分	H ₂ O	C	O	Al	Si	Fe
散乱断面積	103	4.8	4.2	1.4	1.7	1.1
質量減衰係数	0.0707	0.0637	0.0637	0.0614	0.0635	0.0596

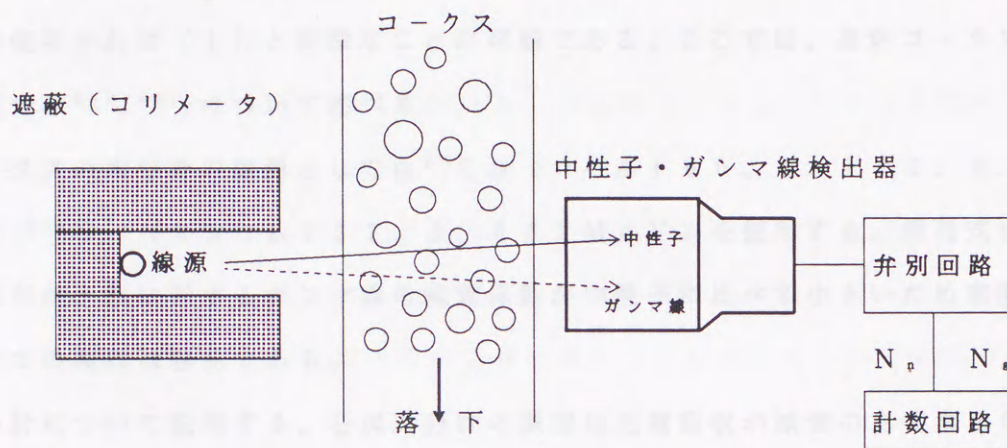


図1.2.1 新型コークス水分計の基本構成

以下に原理式を示す。

$$\begin{aligned} \mu_{n1} \rho_1 t_1 + \mu_{n2} \rho_2 t_2 &= \ln(N_{n0}/N_n) \\ \mu_{g1} \rho_1 t_1 + \mu_{g2} \rho_2 t_2 &= \ln(N_{g0}/N_g) \end{aligned} \quad (1.2.2)$$

ここで、 $\rho_1 t_1$: コークスの面密度(g/cm²)で補助変数

$\rho_2 t_2$: 水の面密度(g/cm²)で主変数

N_{n0}/N_n : 中性子の計数比率(入射中性子/透過中性子)で測定値

N_{g0}/N_g : ガンマ線の計数比率(入射ガンマ線/透過ガンマ線)で測定値

μ_{n1} : コークスの中性子減衰係数(0.06288 ± 0.010 cm²/g)

μ_{n2} : 水の中性子減衰係数(0.1644 ± 0.032 cm²/g)

μ_{g1} : コークスのガンマ線減衰係数(0.04583 ± 0.0056 cm²/g)

$\mu_{\gamma 2}$: 水のガンマ線減衰係数 ($0.05835 \pm 0.0093 \text{ cm}^2 / \text{g}$)

である。この式を解いて、 $\rho_1 t_1$ 、 $\rho_2 t_2$ を求める。すると水分 M (wt%) は、

$$M = 100 \times \rho_2 t_2 / (\rho_1 t_1 + \rho_2 t_2) \quad (1.2.3)$$

で計算できる。

さらに研究中の興味深い応用として、中性子とガンマ線を用いた層状鋼板（鋼板と鋼板の間にプラスチックをはさんだ振動防止の鋼板）の厚さ計²⁵⁾、合金中の金および銀の分析計²⁶⁾が挙げられる。

(2) 複数のエネルギーの利用

放射線のエネルギーによって減衰係数は変化する。したがって2種類のエネルギーの異なる線源を使用すれば(1)と同様なことが可能である。ここでは、高炉コークスの水分計、石炭灰分計²⁷⁾⁻³²⁾について述べる。

高炉コークスの水分計の線源としては ^{60}Co (コバルト60、1.173、1.333 MeV)と ^{137}Cs (セシウム137、0.662 MeV)を使用する。原理式は(1)の例と同様だが、水に対するガンマ線の減衰係数が中性子に比べて小さいため感度は低いが装置としての製作は容易である。

石炭灰分計について説明する。石炭灰分計の原理は光電吸収が減衰の主要素となるエネルギーとコンプトン散乱が減衰の主要素となるエネルギーを用い、減衰係数の大きな差を利用して重元素の集合（特にアルミナ）である灰分と軽元素の集合である炭素分を変数として、最終的には灰分のwt%を求めるものである。線源としては ^{241}Am (アメリカシウム241、0.060 MeV)と ^{137}Cs (セシウム137、0.662 MeV)あるいは ^{133}Ba (バリウム133、0.356 MeV)を使用する。

以上、実用化している複数のエネルギーを利用した計測装置について述べたが、さらなる応用としてガラスの成分分析の研究³³⁾も進んでいる。

(3) 放射線の異なる反応の利用

ガンマ線と物質は光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成の反応を起こすが、この中でコンプトン散乱と電子対生成を利用した鉱石の鉄分分析計³⁴⁾³⁵⁾、石炭の灰分計³⁶⁾が開発されている。

電子対生成は光電吸収、コンプトン散乱と異なり、入射ガンマ線のエネルギーが1.0

2 MeVを越えたときに生じる反応である。入射ガンマ線と原子核の相互作用でガンマ線が消滅し、電子・陽電子の対が生成する。陽電子はすぐに減速して消滅し、同時に0.51 MeVの2個の消滅ガンマ線が相対する方向に放出される。この確率は一般にエネルギーが高いほど大きく、また原子番号の2乗で増加する。したがって計測対象中に重元素（例えば鉄）が多いほど消滅ガンマ線が多くなる。これが鉄分分析計の基本原理である。ただし計測対象の密度がwt%を求めるときに必要であり、コンプトン散乱による密度計測も同時に実行される。

(4) 放射線と他の物理特性の組合せ利用

水によるマイクロ波の吸収特性、あるいは水による静電容量変化を利用した石炭水分計が開発され実用化されている^{37) 38)}。これら2例について説明する。

マイクロ波の導電体による吸収特性を利用し、非導電体である石炭中の導電体である水分を測定するのが石炭水分計の基本原理である。中性子による水分測定との相違は、中性子は計測対象の物性（例えば炭素の化学構造）に左右されない利点と結晶水でも水素をすべて検出する（誤差になる）欠点があるのに対し、マイクロ波は全く逆の特徴を示す。ただし、wt%を求めるためには密度信号が必要であり、ガンマ線による密度測定が必須である。

つぎに静電容量変化を用いた石炭水分計について述べる。計測対象の石炭は誘電率が約5であるのに対し、水は約80である。したがって水分量の変化によって誘電率が変化してインピーダンス（静電容量が含まれる）の大きさが変わる。この変化によって水分が測定できる。ただし、wt%を求めるためには密度信号が必要であり、ガンマ線による密度測定が必要である。

(5) 放射線を検出する位置を変えた利用

線源、検出器、計測対象の幾何学的条件（配置）が変われば異なった信号が得られることは、散乱線に関するアルベドの式からわかる。この現象を積極的に利用して異なる位置で計測を行うことによって複数の物理量を求める方法も考えられる。本方法は筆者の提案であり、本研究の中核でもある。

この数例でわかるように今まで精度が悪く使用に耐えないものが、また計測不可能であ

ったものが新たな関数関係の導入を基本とした複合計測の研究・開発によって工業計測として実現しつつある。また一部のものは今後の利用拡大が期待されている。

1. 2. 2 微弱線源の利用研究

つぎにガンマ線に代表される放射線利用として微弱線源の利用の現状および新しい展開について述べる。

(1) 微弱線源利用の概要

放射性同位元素は有用な物質であるが、その安全に関しては法令（放射性同位元素などによる放射線障害防止に関する法律）、施工令および規則により厳しく規制されている。さらに日本においては国際放射線障害防護委員会（ICRP）の勧告^{39) 40)}に準拠するため将来は一層厳しい管理が要求されるであろう。

放射性同位元素を取り扱うには、その事業所に放射線取扱主任者を要し、放射性同位元素の管理とそれに関係する人の安全管理を実施しなければならない。安全管理は放射性同位元素を装備している機器への接近防止と接近する人の衛生管理である。事業所は法令的な諸手続き、放射線取扱主任者の選任、貯蔵施設の建設、接近する人の医学的検査を行わなければならない、そのコストは中小企業の負担を越えるものである。このことが有用性があながら放射線応用計測機器の普及を阻害している要因である。しかし、3.7 MBq（100 μ Ci）以下の線源は放射性同位元素とみなされないので前述のような法的規制を受けない。工業利用の開発は遅れているが約3000台が使用されている。工業利用の範疇を外れるが検知器に関しては煙検知器として有用性が認められ年間約80万台が製造されていると推定される。

工業利用の測定器として微弱線源が使用されている例として、

- ① 粉塵測定装置（¹⁴⁷Pm - プロメチウム147）
- ② 水分・密度計（²⁵²Cf - カリフォルニウム252）
- ③ 充填率測定装置（⁶⁰Co - コバルト60、¹³⁷Cs - セシウム137）
- ④ 液化ガスレベル計（⁶⁰Co - コバルト60）

が挙げられる。

その内の2例について説明する。

(a) 粉塵測定装置

粉塵量測定として降下煤塵測定器がある。ベータ線の質量減衰特性を利用して直接質量濃度を読み取る装置であり、光散乱法の粒子の大きさ、成分、密度、色による誤差を一挙に解決し、今後の普及が期待される。原理は 3.3 MBq ($90\ \mu\text{Ci}$) の ^{147}Pm から放射されるベータ線を使用し、幅 30 mm の濾紙テープに煤塵を吸引付着させ、透過法で測定する。濾紙テープをセットし、濾紙テープのみのベータ線透過量を半導体検出器で測り、その後 55 分吸引付着させながら透過強度比を求め単位面積当たりの質量を計算することによって降下煤塵量が計算される。測定範囲は $1\sim 100\text{ t/km}^2/\text{月}$ で、精度は $\pm 0.1\text{ t/km}^2/\text{月}$ であり、約 700 台が使用されている。

(b) 水分・密度計

土木分野では土壌、コンクリートの水分・密度測定にポータブルな測定器が使用されている。測定原理は $1.2.1$ の(1)と同様である。測定方式としては表面型(計測対象に接触)と挿入型(計測対象に線源を挿入)がある。線源は中性子とガンマ線を同時に放出する ^{252}Cf の微弱線源である。かつては大きい線源の機器であったが移動使用の許可に時間がかかり実用的でなかったが、線源を微弱化することにより普及し、約 600 台が稼働している。

(2) 微弱線源利用の技術的考察

微弱線源はそれから放射する放射線の量が少ないだけで、放射線の性質は変わらない。すなわち、単位立体角当たりのガンマ線数が少ないだけである。しかし、これら微弱線源を使用する機器を設計するには創意工夫が必要である。 370 MBq (10 mCi) のものを 3.7 MBq ($100\ \mu\text{Ci}$) にするには、 $1/100$ の放射線強度で作用するものにすればよい。放射線強度は距離の逆自乗によるので、 $1/10$ の幾何学的条件(寸法)とすれば機器として成立する。ところが、次の問題が縮尺に付随して発生する。

① 散乱方式のとき、線源から検出器に直接入る放射線が多くなる

(遮蔽を薄くすると直接入る放射線は指数的に増加する)

② 透過方式のとき、検出器に入る放射線が少なくなり自然界からの放射線

が無視できなくなる(計測対象それ自体は縮尺できないから)

③ 寸法が縮められない場合がある(機械的強度、機構的観点から)

④ プロセスに接近できない場合がある(装置の設置スペースなどから)

⑤ プロセスに接近できない場合がある（計測対象の熱、圧力などから）

これらの問題に対処する基本技術としては、

① 検出器の効率を高める

② 検出器の体積を大きくする

③ 散乱線も有効に利用する

④ 放射線防護を工夫する

が考えられる。しかしながら上記技術のみでは自ずと限界があるので計測対象として、

① 計測範囲が小さいもの

② 熱などの防護の必要性が小さいもの

③ 測定時間、精度のいずれかが許容されるもの

が微弱線源の適用には妥当である。すなわち、微弱線源の利用は物理的に縮尺可能な範囲は縮小し、前述の基本技術を用い、その不足分を測定時間、および精度で補うのが基本といえる。ここで測定時間と精度の関係を整理する。放射線が発生する原因である放射線崩壊は単位時間と頻度に関するガウス分布となる。1回の測定の不確かさを表す指標を σ とすると、

$$\sigma = \sqrt{X} \quad (1.2.4)$$

となる。ここで X は1回の測定で得られたガンマ線の計数である。相対標準偏差は、

$$\sigma / X = \sqrt{X} / X = 1 / \sqrt{X} \quad (1.2.5)$$

と表される。したがって一定の割合で放射線と計測対象が散乱、吸収を起こしている場合には、ある与えられた相対誤差以内とするためには必要な測定時間は計数の平方根の逆数に比例して増加させる。前述の縮尺の例で説明すると、縮尺を $1/10$ にせず $1/5$ として残り $1/2$ を測定時間の増加で補うとすると、測定時間を4倍にすればよい。

かつては複数個の微弱線源で機器を構成し、法的規制を逃れていたケースもあったが、昭和62年の施工令改正で2個以上の微弱線源を同一機器内で使用することは許されなくなった。複合計測のうち(1)放射線の種類を変える方式、(2)放射線のエネルギーを変える方式には微弱線源の適用は難しい。ただし、1核種で2種類の放射線を放射するものはこの限りではない。

(3) 微弱線源利用の今後の展開

これまでの微弱線源利用機器の開発状況をみると、大手放射線機器メーカーは微弱線源の

利用には消極的であって、高付加価値を求めた大規模な計測装置の開発に熱心であった。結果として計測装置は高価であった。これは放射線応用計測装置を使用するユーザは大企業が多く、いきおい、その機能の高度化を求めたことにも一因がある。一方、小規模メーカーでは放射線応用計測器を製作するための法的許可を得るための設備費に耐えきれず、法的許可の不要な微弱線源機器の開発に対応してきたが、アプリケーション知識の不足、技術力の不足の感があった。しかし、放射線応用計測器の機能が限界に達すると、今度は大手ユーザでも安全管理が楽な微弱線源機器で、放射線応用計測器と同機能のものをエレクトロニクス機器はじめ関連機器の進歩の力を借りて低コストで開発可能でないかと考え始めた。もともと放射線の経験のない中小規模のユーザは安全管理コスト、機器コストの少ないものを望んでいるので、ここで両ユーザのニーズの一致を見た。

今後の研究・開発の成果に左右されるが、停滞していた微弱線源のアプリケーションの急速な進展が期待される。

1. 3 本研究のガンマ線密度計測と密度計

ここでは本研究のガンマ線密度計測、その具現化としての焼結ガンマ線密度計の特徴について述べ、つぎに研究の課題、進め方を明らかにする。

1. 3. 1 本研究の特徴

本研究の対象であるガンマ線密度計測および密度計の要件と概要について述べる。

(1) ガンマ線密度計測および密度計の要件

本研究のガンマ線による密度計測の要件は、

- ① 計測対象は焼結配合原料（バルク状であるが粒度は微細で稠密性を確保）
- ② 非接触の表面散乱方式（オンライン計測のため幾何学的条件の変動有り）
- ③ 微弱線源の使用（法規制の排除）

である。バルク状の物質を計測対象とした接触、挿入型表面散乱方式は前述したように、土壌の水分・密度計として製品が実用化されているが、非接触の表面散乱方式は幾何学的条件（計測対象と密度計の距離）の変動があるため実施例がなく全く新しい試みである。特に非接触化はオンライン密度計測には必須の要件である。

(2) ガンマ線密度計測および密度計の概要

まず計測対象である焼結配合原料を扱う焼結機を概観する。焼結機とは高炉（溶鉱炉）に装入する原料である焼結鉱を製造する装置であり、日産約20000tもの能力を有する巨大な設備である。焼結機は幅5m×長さ100mの鉄製のコンベアー（150台のパレットを連結）をもち、この上に粉鉱石、石灰、コークス、水を混合した配合原料を55～60cmの厚さに積みつけ、点火炉で着火させ、焼き固めるものである。焼き固まった（焼結された）原料は20mm程度の大きさに砕かれ、高炉に運ばれる。焼結機の構成を図1.3.1に示す。

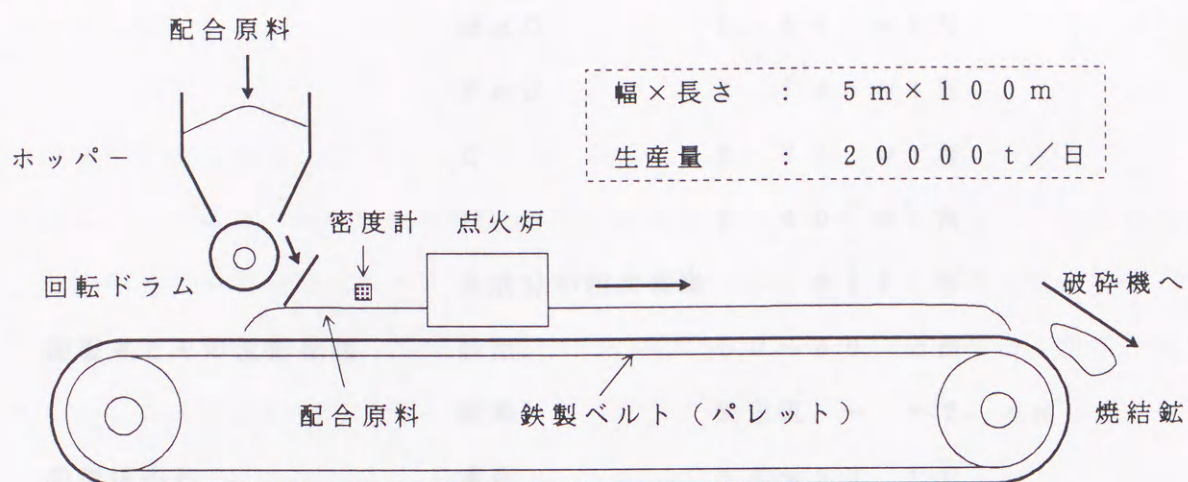


図 1. 3. 1 焼結機の構成

パレット上に積みつけられた配合原料は自然落下ではなく回転ドラムで排出されゲートに衝突し、その後にパレットに落下する。したがってどのような密度になっているか不明であり、層の密度平均値を計算で推定するしかなかった。しかし、密度（かさ密度）は焼結鉱の品質、生産性に及ぼす影響は大きい。一般に焼成された鉱層（シンターケーキと呼ぶ）の品質は上層ほど劣悪で、まともな製品になる率（歩留り）も70～80%に過ぎない。この理由は鉱層内を移動する火炎の移動速度と層各部がもつ熱量の移動速度が異なるためである。鉱層上部は燃料であるコークスが燃え尽きると、冷たい空気が吸引され、特に上層部は急冷され焼結鉱の品質は低下する。この対策として、鉱層の単位面積当たりの密度増、特に上層部の密度を増加させ燃焼速度を遅延する方法が有力である。本研究のガンマ線密度計は配合原料の表面密度を非接触で連続的に測定し、密度を定量的に管理・制御することによって焼結鉱の品質、生産性を向上しようとする目的のものである。

焼結配合原料の特性と測定条件は、次の通りである。

①密度とその変動範囲	1.5 ~ 2.0	g / cm ³
②粒度とその変動範囲	1.5 ~ 2.0	mm φ
③成分とその変動範囲	Fe ₂ O ₃	69.05 wt %
(実際の配合例)	CaO	8.93 wt %
	SiO ₂	4.79 wt %

	Al_2O_3	1.61	wt%
	MgO	1.48	wt%
	FeO	3.78	wt%
	C	3.76	wt%
	H_2O	6.60	wt%
	各成分の相対変動	± 10	%
④層厚とその変動範囲	設定	55~60	cm
	変動	設定値 ~ -2	cm
⑤環境条件	温度	10~50	°C
	湿度	< 90	%

粗鋼年産800万tクラスの製鐵所での焼結鉱の生産量は1200万t/年であり、その製造コストに占める生産性と品質歩留りの影響はきわめて大きい。例えば、歩留り1%の改善は年間2億円規模のメリットを生み出す。

1.3.2 本研究の課題と進め方

計測原理上の課題と工業計測上の課題について述べ、つぎに本研究の進め方を示す。

(1) 計測原理上の課題

計測対象の密度が同じであっても幾何学的条件が変動すれば検出されるガンマ線の計数が変化する。焼結配合原料の特性と測定条件で示したように層厚は設定に対して変動するため、この変動を補償する計測原理の研究が必要である。成分、粒度なども変化するが、層厚変動による影響と比較して無視できるレベルである。したがって成分、粒度で変化する質量吸収係数の変動、ビルドアップ係数に関する課題は実学的に処理し、計測原理の課題として幾何学的条件変動の研究に重点を絞る。すなわち、密度と距離（装置と配合原料までの垂直距離が層厚変動によって変化）が同時に変化の中で密度を計測する原理の導出が課題となる。そのためにガンマ線散乱と密度、ガンマ線散乱と距離を関係づけるマクロモデルを構築し、両者を結合させ密度、距離を変数とする非線形連立方程式の導出を行う。研究の範疇は複合計測に属し、前例のない1.2.1の(5)放射線を検出する位置

を変えた利用を試みる。同時に研究のツールとしてモンテカルロ法に代わるシミュレーションコードも開発する。

(2) 工業計測上の課題

工業計測上での課題は微弱線源の利用と長期連続使用の点から発生する。微弱線源利用に関しては最適な線源の選定、コンパクトなガンマ線遮蔽の研究、検出器の評価が課題となる。長期連続使用の観点では昼夜の温度変化、季節の温度変化に影響される検出器の安定化のための自動利得制御の開発が課題である。

(3) 本研究の進め方

計測原理、工業計測の課題を解決し、前例のない焼結密度計としての実用化を目指して以下のように研究を進めた。

- ① 計測原理研究 (マクロモデルの構築、非線形連立方程式の導出)
- ② コンピュータシミュレーション (実用的なガンマ線区分体積積分法を開発し、プログラムを製作してシミュレーションを実施)
- ③ 計測原理評価 (構築したモデルの妥当性を上記シミュレーションによって検討、実用機によるテスト結果で再度検証)
- ④ 計測技術評価 (工業計測上の課題の技術検討)
- ⑤ 実用機的设计・製作
- ⑥ 実用機の評価 (実験によって計測理論を実証、工業計測の可能性判断)
- ⑦ 密度計測および密度計の応用研究

昭和59年4月の研究発案から、試行錯誤の繰り返しを続け、平成4年3月の実用化に至まで8年の年月が過ぎた。すでに焼結配合原料の密度管理・制御は上位コンピュータによってオンライン化され安定稼働を続け、当初の予想以上のメリットを創出している。

以下、本研究の詳細について述べていく。

第1章の参考文献

- 1) 科学技術庁原子力安全局：放射線利用統計（1970-1990）
- 2) 原子力委員会：原子力白書（1991）
- 3) 佐藤乙丸：微弱アイソトープ利用技術の現状と問題点，第29回 理工学における同位元素研究発表会要旨集，特別講演I，185/194（1992）
- 4) 大野博教：密度計，RADIOISOTOPES, 22-5, 59/63（1973）
- 5) 関口晃：放射線計測概論，27，東京大学出版会（1988）
- 6) E. Serge: Nuclei and Particles Second Edition, 54, W. A. Benjamin(1977)
- 7) G. F. Knoll: Radiation Detection and Measurement, 56, Jhon Wiley and Sons(1979)
- 8) W. E. Burcham: Elements of Nuclear Physics, 86, Longman(1985)
- 9) 村上悠紀雄，他：放射線データブック，地人書館（1982）
- 10) AEE-Winfrith: McBEND 5, AEE-Winfrith(1985)
- 11) 日本アイソトープ協会：改定3版 アイソトープ便覧，418，丸善（1984）
- 12) 富永洋：アイソトープの工業利用，原子力工業，29-12, 20/30（1983）
- 13) 富永洋：最近のラジオアイソトープ工業利用開発，日本原子力学会誌，25-9, 676/682（1983）
- 14) H. Tominaga: Current Trend and Future Prospect of Nuclear Instruments in industrial Radioisotope Application, RADIOISOTOPE, 33-2, 52/60(1984)
- 15) 榎本茂正，他：海外におけるアイソトープ・放射線関係研究機関の活動状況（調査報告），日本原子力研究所（1990）
- 16) 中部原子力懇談会：第27回 RI-放射線利用促進セミナー（1992）
- 17) 榎本茂正，他：放射線応用計測の新しい展開を求めて（II），RADIOISOTOPE, 36-7, 369/377(1987)
- 18) C. G. Clayton: Some Comments on the Development of Radiation and Radioisotope Measurement Applications in Industry, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 41-10, 917/934(1990)

- 19) B. D. Sowerby: On-line Nuclear Technique in the Coal Industry, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 5-4, 491/506 (1991)
- 20) 日本原子力産業会議: 放射線利用研究会報告書 (1991)
- 21) 小林彬: 複合計測, 計測と制御, 31-1, 101/107 (1992)
- 22) H. Tominaga, et al: Simultaneous utilization of neutrons and γ -rays from ^{252}Cf for measurement of moisture and density, Nuclear Geophysics, 429/436, Pergamon Press (1983)
- 23) H. Tominaga, et al: Benefits from New Application of New Types of Gauges Using Nuclear Technique in the Iron Making Process, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 5-1, 137/140 (1991)
- 24) B. D. Sowerby: Measurement of Specific Energy, Ash and Moisture in Bulk Coal Samples by a Combined Neutron and Gamma-ray Method, Nuclear Instruments and Method, 160, 173/182 (1979)
- 25) 富永洋, 他: 鋼板中のプラスチック厚さ測定のための中性子応用計測, 第29回理工学における同位元素研究発表会要旨集, 29a-III-1, 38 (1992)
- 26) C. Mancini: Neutron and Gamma Ray Transmission: Methods and Accuracy for the Analysis of Silver and Gold Alloys, Radiation and Isotopes, 36-6 489/494 (1983)
- 27) C. G. Clayton, et al: Coal Analysis by Nuclear Methods, Nuclear Geophysics, 3/22, Pergamon Press (1983)
- 28) R. A. Fooks, et al: Feasibility Study of Low Energy γ -ray Technique for On-line Determination of Ash Content of Coal on Conveyors, Nuclear Geophysics, 37/44, Pergamon Press (1983)
- 29) J. A. Czubek: Advances in Gamma-gamma Logging, Nuclear Geophysics, 153/172, Pergamon Press (1983)
- 30) J. Charbucinski: A universal Gamma-gamma Method for Simultaneous Determination of Rock and Ore Properties, Nuclear Geophysics, 353/362, Pergamon Press (1983)

- 3 1) J. S. Watt, et al: Dual Energy Gamma-ray Transmission Techniques Applied to On-line Analysis in the Coal and Mineral Industries, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 0-0, 1/11(1985)
- 3 2) 古川万寿夫, 他: ハイブリッド線源を用いる散乱 γ 線・蛍光X線法による石炭配分計量、第24回 理工学における同位元素研究発表会要旨集, 29 p - II - 6, 37 (1987)
- 3 3) 倉地晴幸, 他: デュアル・エネルギー γ 線透過法によるガラス成分の推定, 第28回 理工学における同位元素研究発表会要旨集, 2 p - II - 7, 76 (1991)
- 3 4) M. J. Millen, et al: Field Trial of a Pair Production Gauge for On-line Determination of Ash in Coal on a Conveyor Belt, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 35-11, 1009/1021(1984)
- 3 5) J. A. Aylmer, et al: Dynamic Trial an Iron Ore Analyser Based on Pair Production, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 1-1, 51/58(1987)
- 3 6) M. J. Millen, et al: Correction of Pair Production Gauge Ash Determination for Changes in Coal Ash Composition, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 36-8, 627/633(1985)
- 3 7) I. A. Klein: Experiencies with the Microwave Moisture Meter "Micro-Moist", Aufbereitungs-Tecnik Minerasl Processing, 9, 549/557(1989)
- 3 8) N. G. Cutmore, et al: An Under-belt Capacitance and γ -ray Backscatter Gauge for On-line Determination of Moisture in Coal, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 1-4, 319/328(1987)
- 3 9) 松平寛通: ICRP勧告の背景, 原子力工業, 37-5, 23/27 (1991)
- 4 0) 草間明子: 1990年ICRP勧告の概要, 原子力工業, 37-5, 27/32 (1991)

第2章 ガンマ線による密度計測原理の研究

本章ではガンマ線による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連の観点から述べる。つぎに密度と距離をガンマ線の散乱から求めるためのモデリングを試みる。提案したモデルをシミュレーションによって評価し、密度・距離の計測を可能にする応用原則を示す。

2.1 ガンマ線による密度計測の基本原則

ガンマ線と物質との相互作用として重要なものは光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成の3つである。上記の相互作用が生じる確率はガンマ線のエネルギーと物質の原子番号によって定まり、低エネルギー（100 keV以下）では光電吸収が、高エネルギー（1000 keV以上）では電子対生成が優勢である。中間のエネルギー領域（100～1000 keV）ではコンプトン散乱が主となる。さらに低原子番号の物質においては広いエネルギー領域においてコンプトン散乱が主要な相互作用である。

2.1.1 コンプトン散乱の特徴

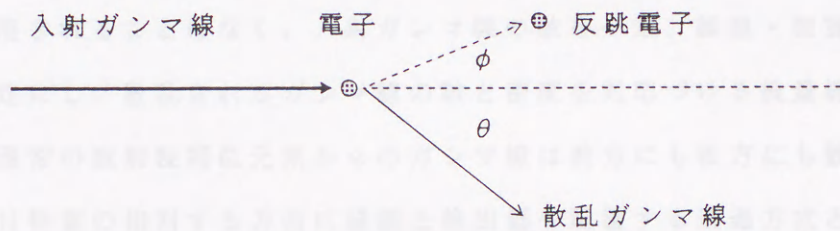
コンプトン散乱はガンマ線と1個の自由電子との弾性散乱衝突である。原子の軌道電子は自由電子ではないが、ガンマ線のエネルギーが光電吸収領域より十分に大きく、原子と軌道電子との結合エネルギーが相対的に無視できる場合には、前述の自由電子と同様な弾性散乱衝突をおこす¹⁾。物質中の原子当たりのコンプトン散乱の確率は電子の数に比例するので原子番号とともに直線的に増加する。一方、電子との衝突後の散乱されたガンマ線の角度の分布はクライン・仁科の式で与えられる。高エネルギーのガンマ線は前方散乱が著しく、通常の放射性同位元素¹³⁷Cs、²⁴¹Amなどのガンマ線は横、後方へも散乱されることが式から示される。以下にクライン・仁科の式、コンプトン散乱の模式図を示す。ただし、(2.1.1)式中の記号は、

- σ : 断面積 (cm²)
 Ω : 立体角 (Sr)
 $d\sigma/d\Omega$: 微分断面積 (cm²/Sr/electron)

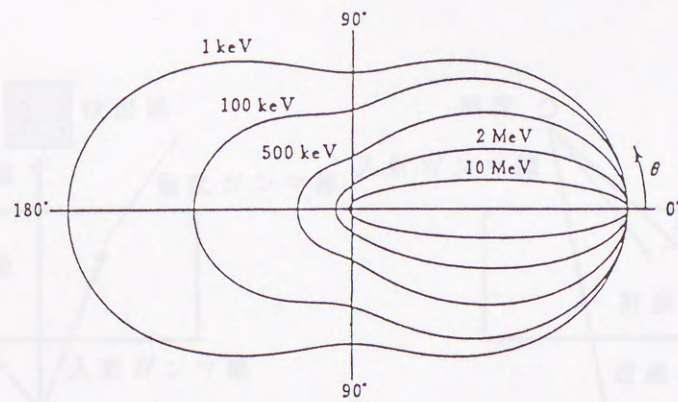
θ : 1次ガンマ線と散乱ガンマ線が作る補角 (radまたは度)
 α : $h\nu / m_0 c^2$ (無次元)、 h はプランク定数、 ν は1次ガンマ線の振動数、 m_0 は古典的電子半径、 c は光速
 を意味する。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \cdot \left[\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right] \cdot \left[1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right] \quad (2.1.1)$$

図2.1.1の(a)にコンプトン散乱の概念を示し、(b)にクライン・仁科の式の計算結果²⁾を示す。



(a) コンプトン散乱の概念図



(b) クライン・仁科の式の計算結果 (左よりガンマ線が入射した場合、散乱角 θ の単位立体角内へコンプトン散乱される確率の相対分布)

図2.1.1 コンプトン散乱の模式図

2. 1. 2 コンプトン散乱による密度計測の基本原理

前項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、

$$P_c = K_1 \rho \sum w_i (Z_i / A_i) \quad (2. 1. 2)$$

となる³⁾。ただし K_1 は定数である。

鉄鋼原料のコークス、焼結の主要元素の Z_i / A_i の値は放射線データブック⁴⁾より判るように物質の組成が異なっても Z_i / A_i の平均値はおよそ0.5でほとんど変動しない。従って(2. 1. 2)式は、

$$P_c = K_2 \rho \quad (2. 1. 3)$$

と単純化できる。ただし K_2 は定数である。(2. 1. 3)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定、線源・物質・検出器の幾何学的配置を一定にし、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主流である。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。両方式の基本的概念を図2. 1. 2に示す。

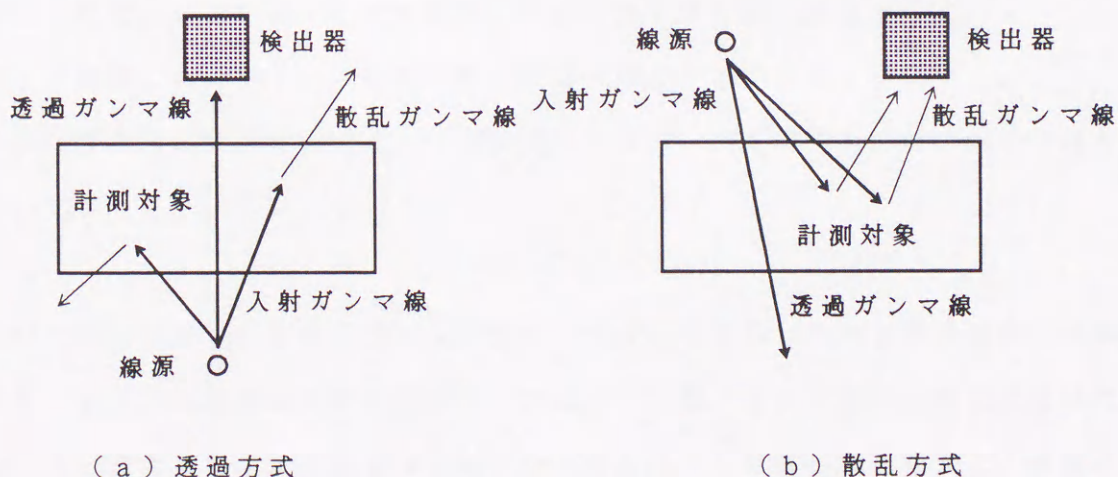


図2. 1. 2 透過方式と散乱方式の基本構成

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。入射したガンマ線の数を I_0 、透過したガンマ線の数を I_t 、密度を ρ 、ビルドアップ係数を B とすると、

$$I_t = I_0 B(\mu_m, t) \exp(-\mu_m \rho t) \quad (2.1.4)$$

となる。ここで μ_m は物質の質量減衰係数で一定、 t は物質の厚さで一定である。

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³⁾⁵⁾があるが、一般化されておらず取り扱いが難しい。(2.1.4)式のような表現をすると散乱したガンマ線の数 I_s は、

$$I_s = I_0 B(\mu_m, t) f(\mu_m, \rho, t, H) \quad (2.1.5)$$

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。

2. 2 ガンマ線散乱のモデリング

前節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密度計測の応用原理に発展させるために本節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する。つぎにガンマ線散乱と距離に関するモデルを提案する。

2. 2. 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持った物質（計測対象）の密度を知るにはすべての電子の分布を把握し、1個1個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。この困難を克服するためにスーパーコンピュータを利用する種々のシミュレーションコード^{6) 7) 8)}が開発されているが計算費用は膨大になる。そこで、ここでは解析的に取り扱えることを念頭に、物質によるガンマ線の散乱現象を発生過程と透過過程に分離してモデルを構築し、つぎに双方のモデルを結合して散乱現象全体を表現する^{9) 10) 11)}。

発生過程を表す発生モデル、透過過程を表す透過モデル、そして散乱現象全体に関する結合モデルを構築するための前提条件①～③を示す。

- ①ガンマ線源、およびガンマ線検出器を計測対象の同じ側に配置する。
- ②ガンマ線源、およびガンマ線検出器と計測対象の垂直距離を一定とする。
- ③計測対象の大きさ（厚さなど）に制限を設けない。例えば計測対象が極めて厚くても極めて薄くてもよい。

規格化した入射ガンマ線の数を1、散乱ガンマ線の発生率（計測対象内でガンマ線が散乱される）を p 、散乱ガンマ線の透過率（散乱ガンマ線が計測対象内を表面に向けて透過する）を q 、透過してきた散乱ガンマ線が検出器に入射し検出される数を I 、物質の密度を ρ とする。まず散乱ガンマ線の発生メカニズムを図2. 2. 1に示した概念から微分方程式でモデル化する。

..... : 計測対象 ⊙ : 密度の基準増分 $d\rho$ (電子数の増分)
 → : 入射ガンマ線 → : 散乱ガンマ線

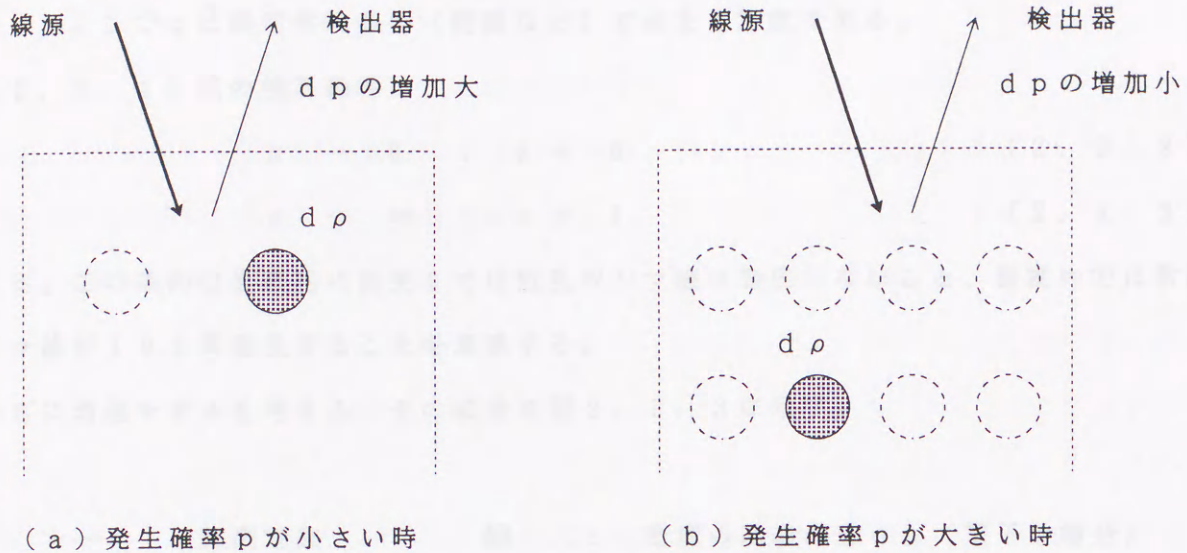


図 2. 2. 1 発生モデルの概念図

発生確率 p が小さい時は密度の基準増分 $d\rho$ に対して発生確率の増分 dp は大きい。一方、発生確率 p が大きい時は密度の基準増分 $d\rho$ に対して発生確率の増分 dp は小さくなる。この現象は、図 2. 2. 2 に示すように、一定の面積の円 (計測対象に対応) の中に微小な面積をもつ別の円 (密度の基準増分 $d\rho$ に対応) を無作為にならべた時に微小な円が集合して作る図形の面積の増加 (発生確率の増分 dp に対応) の仕方に一致する。すなわち面積確率の考え方をコンプトン散乱 (確率を断面積で表現) に応用して発生確率を与える発生モデルを構築するわけである。

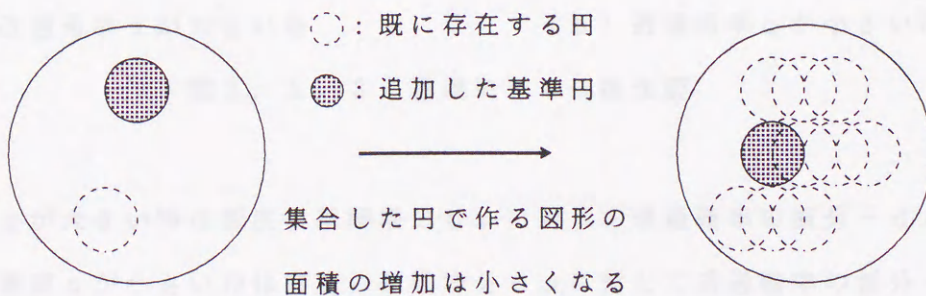


図 2. 2. 2 面積確率の基本的な考え方

上記の考え方を定式化する際に増分の大きさを示す因子として $1 - p$ を用いる。すると発生モデルは、

$$d p = \alpha (1 - p) d \rho, \quad \alpha > 0 \quad (2.2.1)$$

となる。ここで α は幾何学的条件（距離など）で決まる定数である。

(2.2.1) 式の境界条件は、

$$\rho \rightarrow 0 : p \rightarrow 0 \quad (2.2.2)$$

$$\rho \rightarrow \infty : p \rightarrow 1 \quad (2.2.3)$$

である。この条件は直観的に密度 0 では散乱ガンマ線は発生しないこと、密度 ∞ では散乱ガンマ線が 100% 発生することを意味する。

つぎに透過モデルを考える。その概念を図 2.2.3 に示す。

- : 計測対象 ⊕ : 密度の基準増分 $d\rho$ (電子の増分)
 ———> : 散乱ガンマ線 - - - -> : 透過した散乱ガンマ線

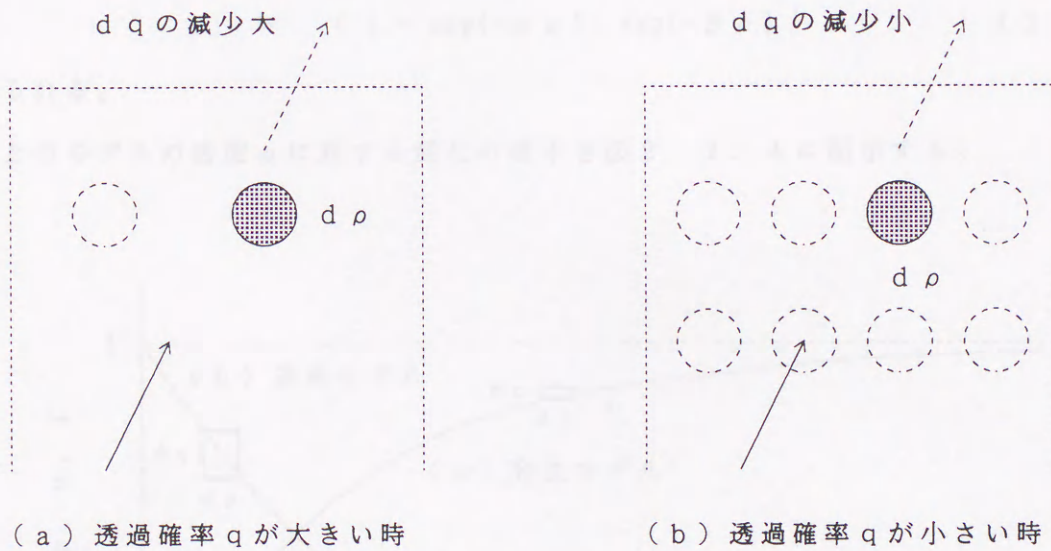


図 2.2.3 透過モデルの概念図

透過確率 q が大きい時は密度の基準増分 $d\rho$ に対して透過確率の減分 $-dq$ は大きい。一方、透過確率 q が小さい時は密度の基準増分 $d\rho$ に対して透過確率の減分 $-dq$ は小さくなる。この現象も面積確率の考え方からの帰結である。

上記の考え方を定式化する際に減分の大きさを示す因子として $-q$ を用いる。すると透過モデルは、

$$dq = -\beta q d\rho \quad , \quad \beta > 0 \quad (2.2.4)$$

となる。ここで β は幾何学的条件(距離など)で決まる定数である。

(2.2.4)式の境界条件は、

$$\rho \rightarrow 0 : q \rightarrow 1 \quad (2.2.5)$$

$$\rho \rightarrow \infty : q \rightarrow 0 \quad (2.2.6)$$

である。この条件は直観的に密度0では散乱ガンマ線は100%透過すること、密度 ∞ では散乱ガンマ線は透過しないことを意味する。

ここで境界条件を用いて(2.2.1)、(2.2.4)式を解くと、

$$p = 1 - \exp(-\alpha \rho) \quad (2.2.7)$$

$$q = \exp(-\beta \rho) \quad (2.2.8)$$

となる。

発生モデル、透過モデルを結合して検出器に届く散乱ガンマ線の数を表す結合モデルを作ると、

$$\begin{aligned} I &= lpq \\ &= (1 - \exp(-\alpha \rho)) \exp(-\beta \rho) \end{aligned} \quad (2.2.9)$$

が得られる。

以上のモデルの密度 ρ に対する変化の様子を図2.2.4に図示する。

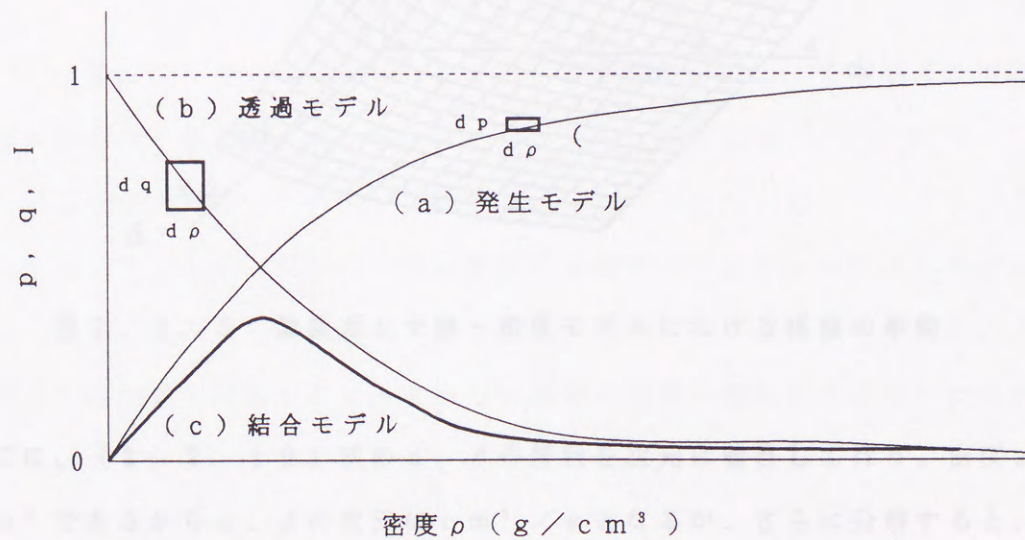


図2.2.4 発生・透過・結合モデルの変化の様子

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（2.2.9）式を書き直すと、

$$I = A(1 - \exp(-\alpha\rho)) \exp(-\beta\rho) \quad (2.2.10)$$

となる。（2.2.10）式がガンマ線散乱と密度をマクロに関係づけるモデルである。（2.2.10）式は1つの極大値と1つの変曲点を持ち、密度計測に重要な極大値を与える ρ_m は、

$$\rho_m = \ln(1 + \alpha/\beta) / \alpha \quad (2.2.11)$$

である。 ρ_m よりも密度が小さい時は密度が増加するにしたがい検出器に届く散乱ガンマ線の数が増え、逆に ρ_m よりも密度が大きくなると検出器に届く散乱ガンマ線数は減少する。この現象は大野の論文³⁾の結果と一致する。ここで（2.2.11）式をある範囲の α 、 β でグラフ化し、図2.2.5に示す。このグラフより極大値は α より β の値に敏感なことがわかる。すなわち透過過程が発生過程よりグラフの形状に影響を与えることが示された。

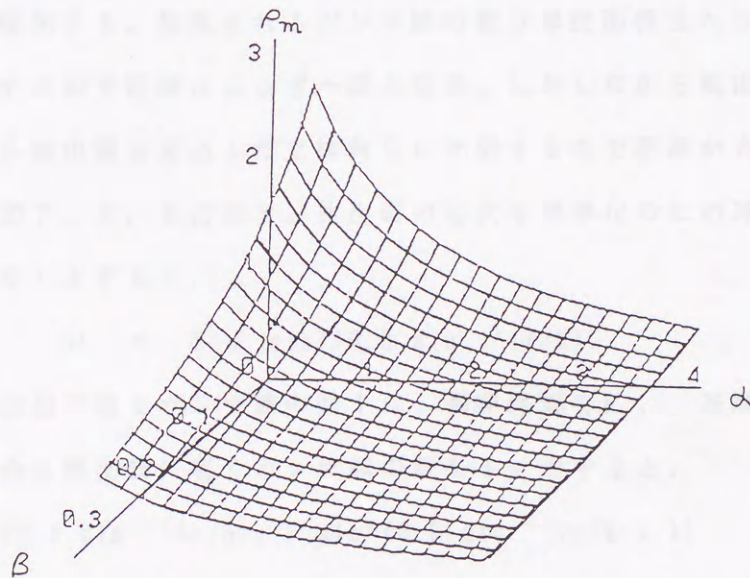


図2.2.5 散乱ガンマ線-密度モデルにおける極値の挙動

さいごに、（2.2.10）式の α 、 β の解釈を次元に着目して行う。密度 ρ の次元は g/cm^3 であるから α 、 β の次元は cm^3/g となるが、さらに分解すると、

$$cm^3/g = cm^2/g \cdot cm \quad (2.2.12)$$

となる。つまり、 α 、 β は物質が決まれば一定となる質量減衰係数と幾何学的条件の反映である長さの次元 cm より構成され、長さ (cm) のみの関数として解釈できる。

2. 2. 2 ガンマ線散乱 - 距離モデル

ガンマ線源、ガンマ線検出器、および計測対象の配置を一般には幾何学的条件と呼ぶ。ここでは幾何学的条件を示すものとして距離を扱いガンマ線散乱 - 距離モデルを構築することにする。モデルを構築するにあたり以下の前提条件①～③を掲げる。

- ①ガンマ線源、およびガンマ線検出器を計測対象の同じ側に配置する。
- ②計測対象の密度を一定とする。
- ③計測対象の大きさ（厚さなど）に制限を設ける。例えば計測対象の厚さを有限の10 cmとするなど。

線源からガンマ線が放射され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自乗で減少する。一方では、照射される面積は測定対象が適当な大きさであると距離の自乗で増加する。散乱されるガンマ線の数に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小さくなる。この様子を図2. 2. 6に示す。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、

$$\Omega = 4\pi \sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h)) \quad (2. 2. 13)$$

となる¹¹⁾。検出器に届くガンマ線の数 I は、基準距離を h_s 、基準距離の位置に計測対象を配置した場合に検出器に届くガンマ線数を I_s とすると、

$$I = I_s \sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h)) / \sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h_s)) \quad (2. 2. 14)$$

となる。(2. 2. 14)式がガンマ線散乱と距離をマクロに関係づけるモデルであり、(2. 2. 10)式のように複雑な挙動を示さず距離と共に単調に減少する。

このガンマ線散乱 - 距離モデルを使用して実際の対象（焼結配合原料）の密度計測を行う場合には、さらに以下の前提条件④、⑤を設けた方が容易となる。

- ④計測対象の上面、および下面は平面とする。
- ⑤計測対象の上面、および下面はガンマ線源とガンマ線検出器の下端とを結ぶ直線とは互いに平行である。

上記の前提条件④、⑤の意味を図2. 2. 7に示す。この図に示した垂直距離 H_s 、 H はガンマ線散乱-密度モデルの前提条件②に示したものと同一であり、後述するように図2. 2. 6の距離 h_s 、 h と関係づけられる。

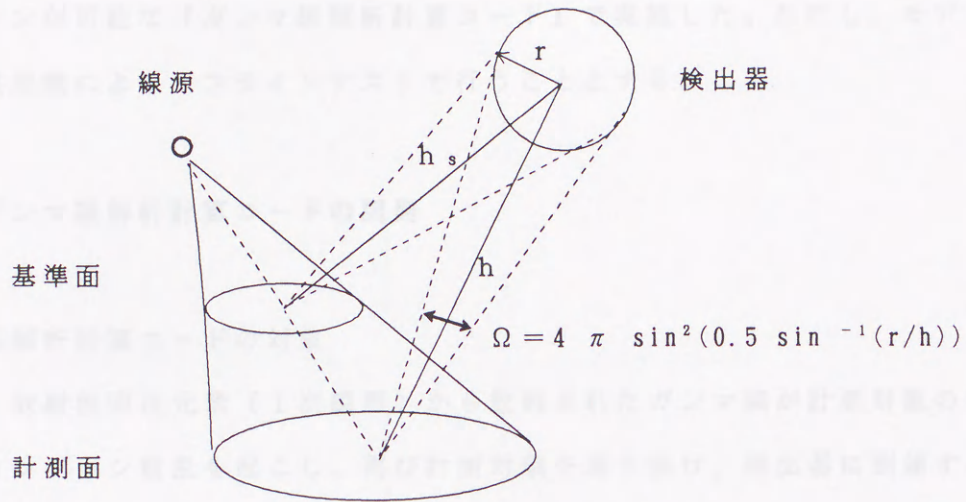


図2. 2. 6 ガンマ線散乱-距離モデルの概念図

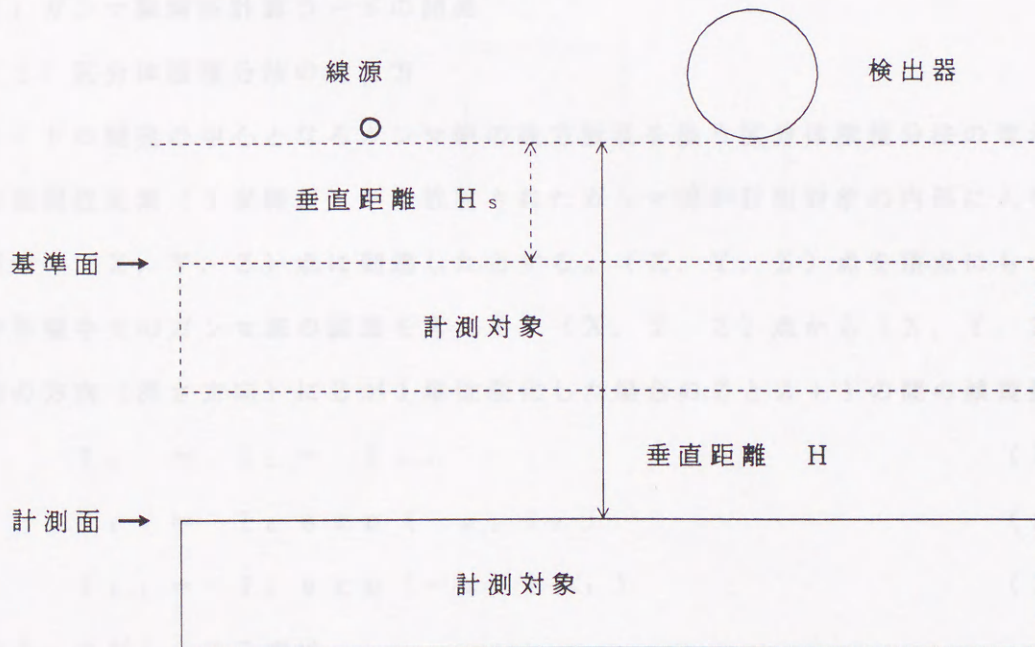


図2. 2. 7 線源・検出器・計測対象の限定した関係

2. 3 シミュレーションによる評価

本節では2. 2において提唱した『ガンマ線散乱-密度モデル』、『ガンマ線散乱-距離モデル』の評価を行う。モデルの評価としてはモンテカルロ法によるシミュレーションとの比較が確立された手法であるが、ここでは限定された計測対象に対してより実用的なシミュレーションが可能な『ガンマ線解析計算コード』で実施した。ただし、モデルの検証は後述する実用機によるオフラインテストで行うこととする。

2. 3. 1 ガンマ線解析計算コードの開発

(1) ガンマ線解析計算コードの対象

本コードは、放射性同位元素（1次線源）から放射されたガンマ線が計測対象の内部に入り、そこでコンプトン散乱を起こし、再び計測対象を通り抜け、検出器に到達するまでの過程を解析的（モンテカルロ法は確率的）に扱う。計算結果として検出器で検出されるガンマ線計数が得られる。

(2) ガンマ線解析計算コードの開発

(i) 区分体積積分法の考え方

コードの開発の中心となるガンマ線の後方散乱を扱う区分体積積分法の考え方を示す。放射性同位元素（1次線源）から放射されたガンマ線が計測対象の内部に入り、3次元直交座標の (X, Y, Z) 点に到達したとする。 (X, Y, Z) 点を頂点にもつ区分立体の区分体積中でのガンマ線の減衰を考える。 (X, Y, Z) 点から $(X, Y, Z+1)$ 点へZ軸の方向（深さ方向）にZが1単位変化した場合のZとZ+1の間の減衰量は、

$$I_s = I_z - I_{z+1} \quad (2. 3. 1)$$

$$I_z = I_0 \exp(-\mu_1 l_z) \quad (2. 3. 2)$$

$$I_{z+1} = I_0 \exp(-\mu_1 l_{z+1}) \quad (2. 3. 3)$$

となる。ただし、ここでは、

I_s : ZとZ+1の間の減衰量（散乱ガンマ線の発生量に対応）

I_z : Zまでの透過量

I_{z+1} : Z+1までの透過量

I_0 : 計測対象への入射量

μ_1 : 1次線のエネルギーにおける線減衰係数 (/cm)

l_z : 計測対象表面からZまでの距離 (cm)

l_{z+1} : 計測対象表面からZ+1までの距離 (cm)

である。上記の関係を図2.3.1に示す。

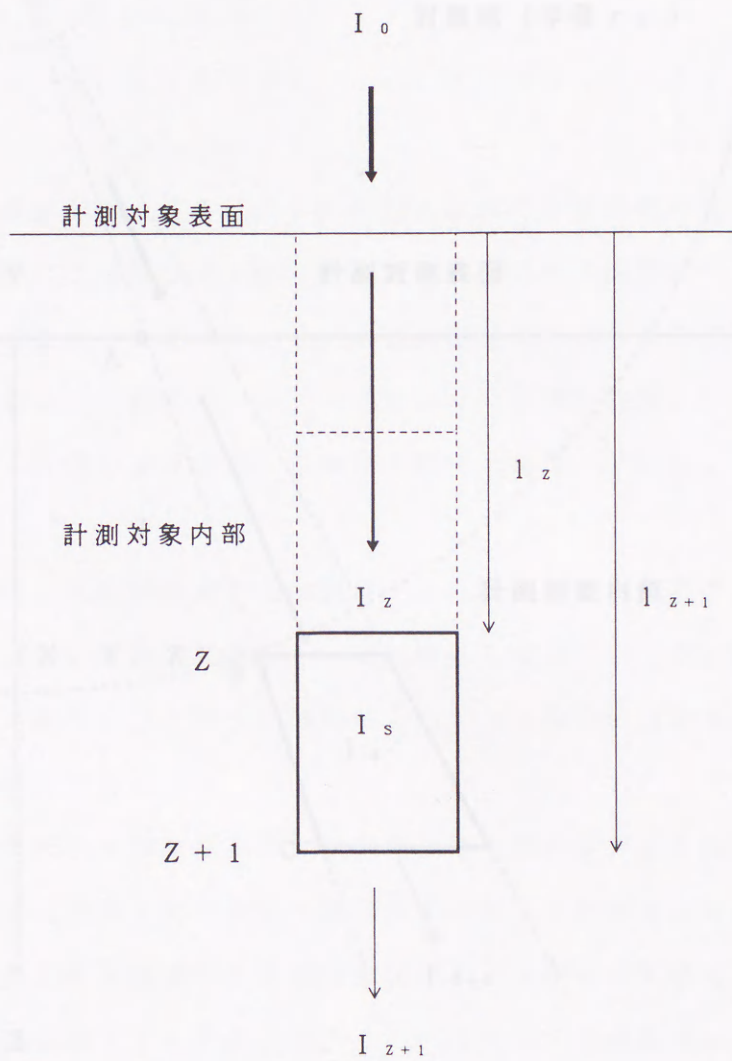


図2.3.1 計測対象内部での減衰量の基本モデル

基本モデルでは計測対象に垂直にガンマ線が入射する場合を考えた。実際、放射性同位元素は点線源のため 4π 方向にガンマ線を放射する。さらに基本モデルでは l_z は Z に、

I_{z+1} は $Z + 1$ に一致したが点線源の場合は X 、 Y 、 Z の関数となる。拡張したモデルを
 図 2. 3. 2 に示す。

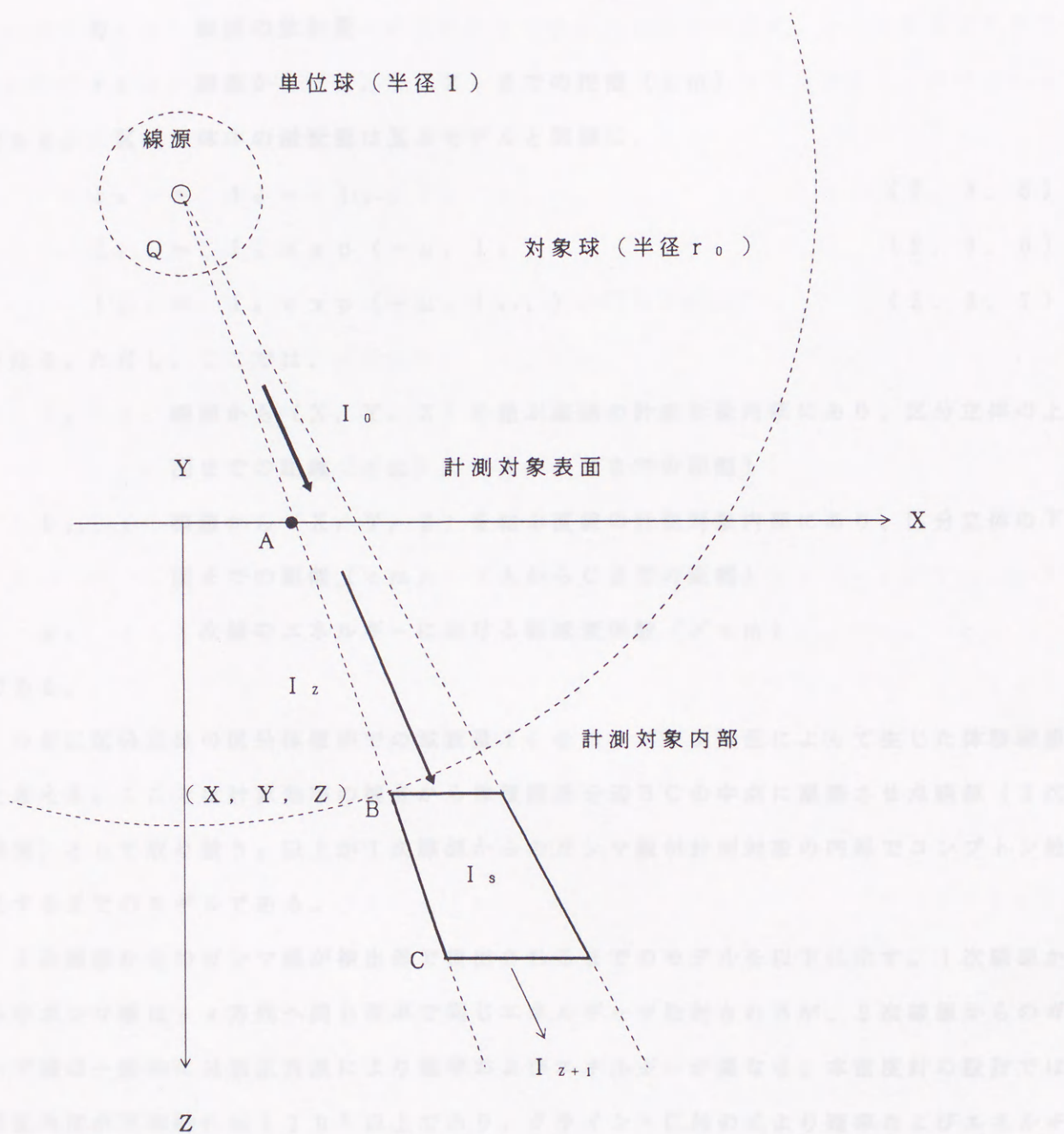


図 2. 3. 2 計測対象内部での減衰量の拡張モデル

線源から 4π 方向に放射されるガンマ線が区分立体の方向へ向かう量 (基本モデルの
 入射量に対応) を考える。区分立体の上面の面積を単位面積とすると、

$$I_0 = Q / (4 \pi r_0^2) \quad (2.3.4)$$

となる。ただし、ここでは、

I_0 : (X, Y, Z) 点を頂点にもつ区分立体へ向かう入射量

Q : 線源の放射量

r_0 : 線源から (X, Y, Z) までの距離 (cm)

である。区分立体中の減衰量は基本モデルと同様に、

$$I_s = I_z - I_{z+1} \quad (2.3.5)$$

$$I_z = I_0 \exp(-\mu_1 l_z) \quad (2.3.6)$$

$$I_{z+1} = I_0 \exp(-\mu_1 l_{z+1}) \quad (2.3.7)$$

となる。ただし、ここでは、

l_z : 線源から (X, Y, Z) を結ぶ直線の計測対象内部にあり、区分立体の上面までの距離 (cm) (A から B までの距離)

l_{z+1} : 線源から (X, Y, Z) を結ぶ直線の計測対象内部にあり、区分立体の下面までの距離 (cm) (A から C までの距離)

μ_1 : 1 次線のエネルギーにおける線減衰係数 (/ cm)

である。

つぎに区分立体の区分体積中での減衰量 I_s をコンプトン散乱によって生じた体積線源と考える。ここでは計算効率の観点から体積線源を辺 BC の中点に凝集させ点線源 (2 次線源) として取り扱う。以上が 1 次線源からのガンマ線が計測対象の内部でコンプトン散乱するまでのモデルである。

2 次線源からのガンマ線が検出器で検出されるまでのモデルを以下に示す。1 次線源からのガンマ線は 4π 方向へ同じ確率で同じエネルギーで放射されるが、2 次線源からのガンマ線は一般的には散乱角度により確率およびエネルギーが異なる。本密度計の設計では散乱角度が平均的には 110° 以上であり、クライン・仁科の式より確率およびエネルギーが一様と近似できる。次に 2 次線源から検出器 (球体で大円の面積 S) を見た場合、そこに向かうガンマ線量 I_{ss} は、

$$I_{ss} = I_s (DCS / TCS) \Omega S / (4 \pi r^2) \quad (2.3.8)$$

となる。ただし、ここでは、

DCS : 散乱角度 110° おける微分断面積 (/ cm^2 / sr)

TCS : 全微分断面積 (/ cm^2)

Ω : 2次線源から検出器を見た立体角 (sr)

r : 2次線源から検出器中心までの距離 (cm)

である。つぎに2次ガンマ線が計測対象中で減衰しながら検出器に到達し検出されるまでの過程を考える。2次ガンマ線は計測対象中で散乱され向きを変え、さらに散乱され検出器に向かう場合がある。これをビルドアップ効果という。この効果も考慮して検出されるガンマ線量 I_{SD} を求めると、

$$I_{SD} = I_{SS} B \eta \exp(-\mu_2 l_2) \quad (2.3.9)$$

となる。ただし、ここでは、

B : ビルドアップ係数 ($\mu_2 l_2$ の関数で近似)

η : 検出器の検出効率

μ_2 : 2次ガンマ線のエネルギーにおける線減衰係数 (/cm)

l_2 : 2次ガンマ線の計測対象中の通過距離 (cm)

である。以上の関係式をまとめると、

$$I_{SD} = [Q / (4\pi r_0^2)] [\exp(-\mu_1 l_z) - \exp(-\mu_1 l_{z+1})] \\ [(DCS / TCS) \Omega S / (4\pi r^2)] B \eta \exp(-\mu_2 l_2) \quad (2.3.10)$$

となる。区分立体 (区分体積 dV) を計測対象において積分すると、検出器で検出されるガンマ線量 I は、

$$I = \int I_{SD} dV \\ = \int I_{SD} dx dy dz \quad (2.3.11)$$

となる。 Z の増分を1ではなく、さらに小さな値にすることにより積分精度は向上する。

本方法は区分立体 (区分体積 dV) を積分することより区分体積積分法と命名した。

図2.3.3に区分体積積分法の全過程を示す。区分体積積分法をプログラム化したのがガンマ線解析計算コードである。本コードは区分体積を大きくする (Z の1単位を1cm) と短時間で大局感を把握でき、小さくする (Z の単位を0.5cm) と高精度な計算が可能である。

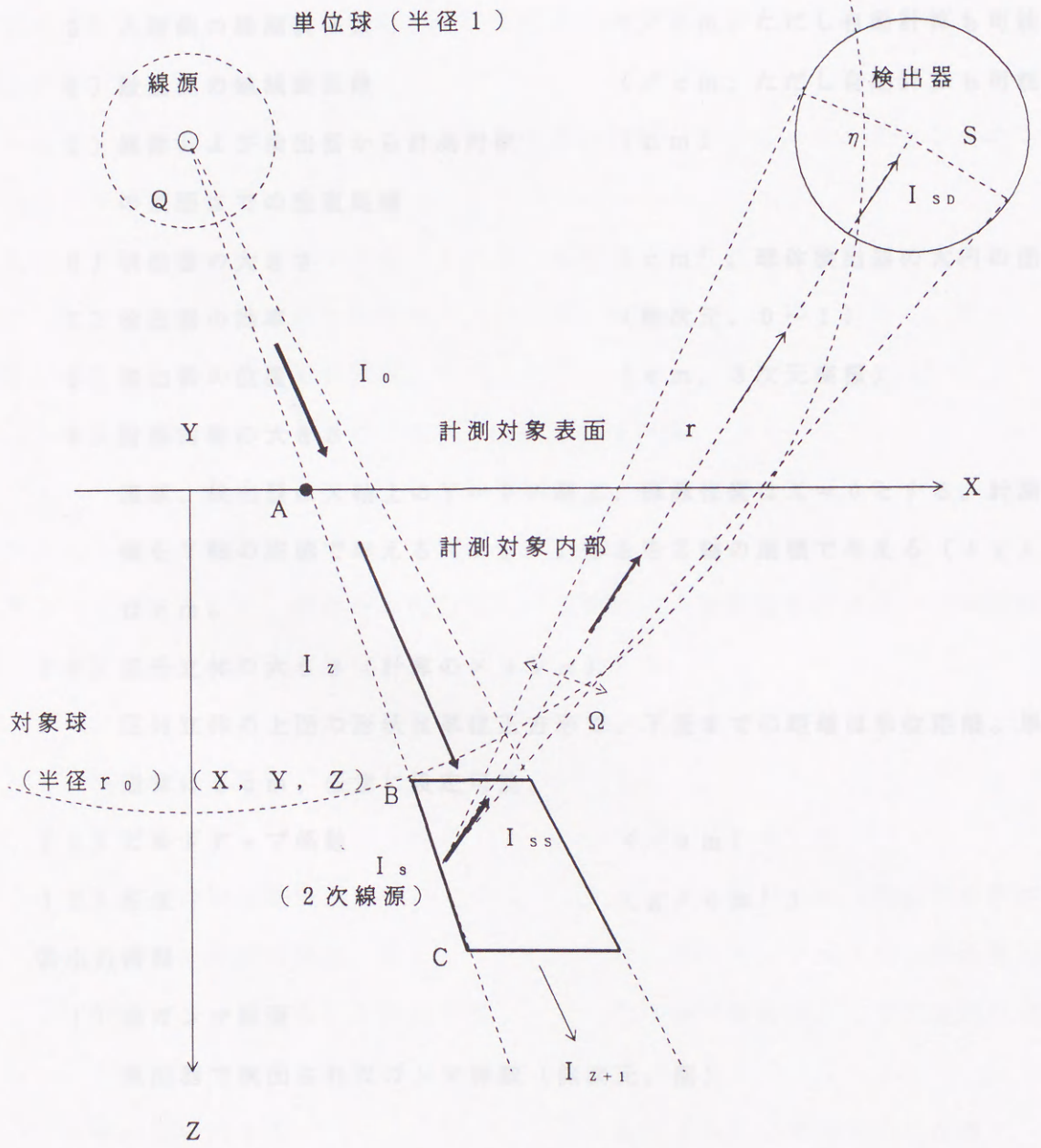


図 2. 3. 3 散乱ガンマ線が検出されるまでの全過程

(ii) 区分体積積分法の使用条件

入力項目と出力情報を示す。

① 入力項目

- 1) 放射性同位元素 (Cs または Co)
- 2) 放射線の量 (無次元、個)
- 3) 入射側の線減衰係数 (cm^{-1} 、ただし自動計算も可能)
- 4) 散乱側の線減衰係数 (cm^{-1} 、ただし自動計算も可能)
- 5) 線源および検出器から計測対象の表面までの垂直距離 (cm)
- 6) 検出器の大きさ (cm^2 、球体検出器の大円の面積)
- 7) 検出器の効率 (無次元、0 ~ 1)
- 8) 検出器の位置 (cm, 3次元座標)
- 9) 計測対象の大きさ

線源、検出器は X 軸上の $Y = 0$ の線上、線源位置は $X = 0$ とする。計測対象の幅を Y 軸の座標で与える ($\pm y$)。厚さを Z 軸の座標で与える ($+z$)。単位は cm。

10) 区分立体の大きさ (計算のメッシュ)

区分立体の上面の形状は単位正方形で、下面までの距離は単位距離。単位量は通常は 1 cm、任意に設定可能。

11) ビルドアップ係数 (cm^{-1})

12) 密度 (g/cm^3)

② 出力情報

1) 総ガンマ線量

検出器で検出されたガンマ線数 (無次元、個)

(iii) 支援コードの設計

(i) ではコードの中心となる区分体積積分法について論じたが、ここでは区分体積積分法に使用されるデータを事前に計算する支援コードについて説明する。

(a) 支援コードの種類

- ① コンプトン全微分断面積計算コード、② コンプトン微分断面積計算コード、③ 散乱角

度計算コード、④ガンマ線減衰計算コードを支援コードとして保有する。

(b) 支援コードの内容

①コンプトン全微分断面積計算コード

入射ガンマ線のエネルギーに対する全微分断面積(TCS)を求めるコード

②コンプトン微分断面積計算コード

入射ガンマ線のエネルギーに対する任意角度の微分断面積(DCS)を求めるコード

③散乱角度計算コード

入射ガンマ線のエネルギーに対する任意角度の散乱ガンマ線エネルギーを求めるコード

④ガンマ線減衰計算コード

入射ガンマ線のエネルギー(0.1~1.5 MeV)に対する物質の減衰係数を求める

コードで、物質を構成する元素はH、C、O、Mg、Al、Si、Ca、Fe、W、

Pbの11元素と焼結配合原料、コークス

以上の4種類の支援コードがプログラム化されている。

(3) コードのシミュレーション例

本コードを利用して、従来から使われている接触式の表面散乱密度計の応答関数(散乱ガンマ線数と密度の関係式)をシミュレーションした。

以下にシミュレーション条件を示す。

- | | |
|--|---|
| 1) 放射性同位元素 | Cs |
| 2) 放射線の量 | 1.9×10^8 個 |
| 3) 入射側の線減衰係数 | $0.133 / \text{cm}$ (焼結配合原料) |
| 4) 散乱側の線減衰係数(例) | $0.223 / \text{cm}$ (焼結配合原料) |
| 5) 線源および検出器から計測対象
の表面までの垂直距離 | 1 cm (密度計としては接触状態) |
| 6) 検出器の大きさ | 20 cm^2 (球の大円の面積) |
| 7) 検出器の効率 | 1 |
| 8) 検出器の位置 | (22, 0, -1) cm |
| 9) 計測対象の大きさ
(幅40 cm, 長さ40 cm,
厚さ10 cmの直方体) | X軸 —10 ~ +30 cm
Y軸 —20 ~ +20 cm
Z軸 0 ~ +10 cm |

- 1 0) 区分立体の大きさ (計算のメッシュ) 1 cm
- 1 1) ビルドアップ係数 0.06 / cm
- 1 2) 密度 0.25 ~ 2.50 g / cm³

総散乱ガンマ線計数の出力結果を表 2.3.1、図 2.3.4 に示す。

表 2.3.1 焼結配合原料の密度と散乱ガンマ線数の関係

密度	散乱ガンマ線計数	密度	散乱ガンマ線計数
0.250	95205	1.500	150720
0.500	136200	1.750	145941
0.750	151397	2.000	141060
1.000	155580	2.250	136091
1.250	154087	2.500	131280

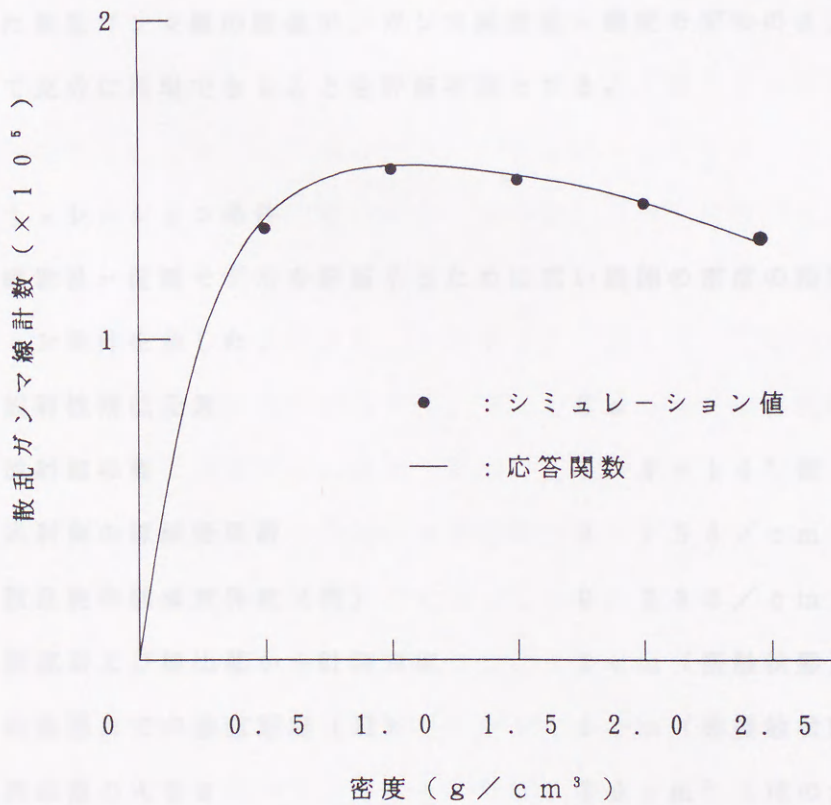


図 2.3.4 従来の表面散乱密度計の応答関数とシミュレーション結果

従来の表面散乱方式の密度計の知見と同様、密度が 1 g/cm^3 程度まで散乱ガンマ線計数は単調に増加し、極大値となり以降は単調に減少することが本コードを用いたシミュレーションでも示された。

(4) まとめ

区分体積積分法を中核とするガンマ線解析計算コードは原子炉設計（遮蔽計算）などに用いられるモンテカルロ法のように大型コンピュータを前提としたシミュレーションコードと比較して汎用性に欠けるが、線源・検出器・計測対象の形状が限定された問題に対しては実用的（32bitパーソナルコンピュータ利用で計算時間は約10分から60分）である。本研究の理論的検討（モデルの評価）、装置設計などに充分に使用できる。

2.3.2 ガンマ線散乱－密度モデルの評価

放射線解析計算コードを用いてガンマ線散乱－密度モデルの評価を行う。コードを用いて計算した散乱ガンマ線の数値が、ガンマ線散乱－密度モデルの A 、 α 、 β を調整することによって十分に再現できることを評価手段とする。

(1) シミュレーション条件

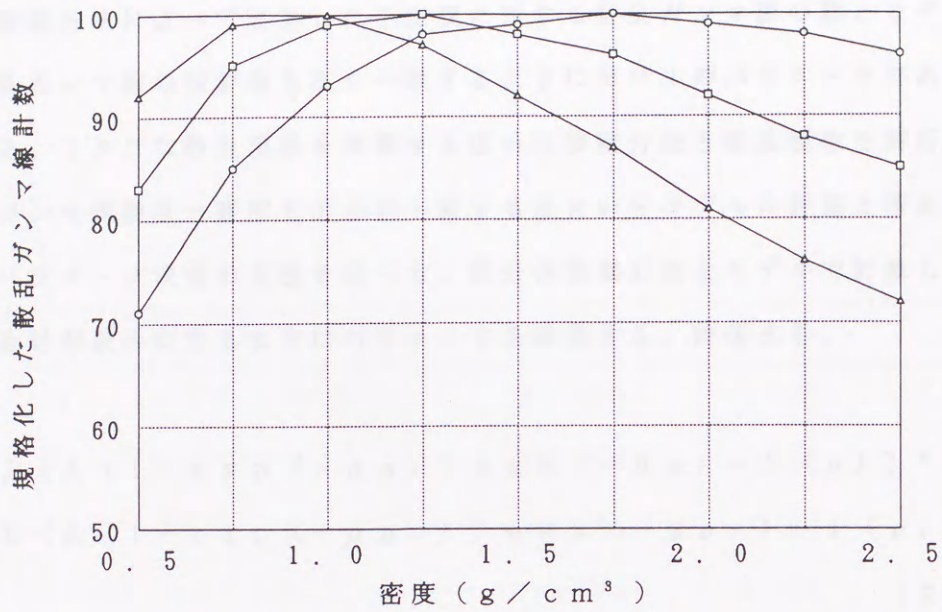
ガンマ線散乱－距離モデルを評価するために広い範囲の密度の設定を行う。以下にシミュレーション条件を示した。

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1) 放射性同位元素 | Cs |
| 2) 放射線の量 | 1.9×10^8 個 |
| 3) 入射側の線減衰係数 | $0.133 / \text{cm}$ (焼結配合原料) |
| 4) 散乱側の線減衰係数 (例) | $0.233 / \text{cm}$ (焼結配合原料) |
| 5) 線源および検出器から計測対象
の表面までの垂直距離 (H) | 1 cm (接触状態)
8 cm (非接触状態の代表例) |
| 6) 検出器の大きさ | 20 cm^2 (球の大円の面積) |
| 7) 検出器の効率 | 1 |
| 8) 検出器の位置 | (14, 0, -H) cm
(19, 0, -H) cm |

	(24, 0, -H) cm
9) 計測対象の大きさ	X軸 —10 ~ +30 cm
(幅40 cm, 長さ40 cm,	Y軸 —20 ~ +20 cm
厚さ10 cmの直方体)	Z軸 0 ~ +10 cm
10) 区分立体の大きさ (計算のメッシュ)	1 cm
11) ビルドアップ係数	0.06 / cm
12) 密度	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50 g / cm ³

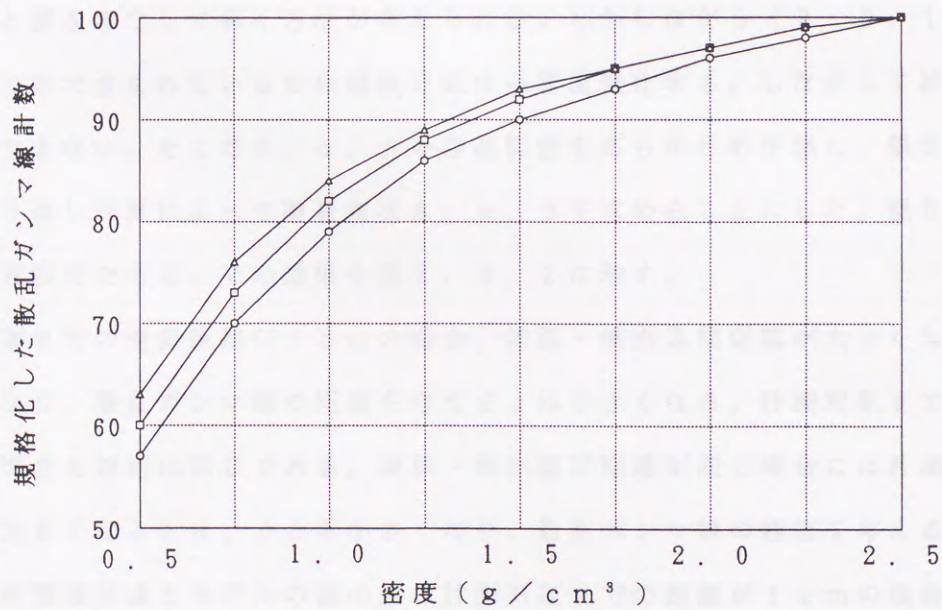
(2) シミュレーション結果

シミュレーション結果の一例を図2.3.5(a)、(b)に示す。ガンマ線の数と密度の関係をパターンとして認識するために最大ガンマ線の数を100として規格化してある。図2.3.5(a)について考察する。計測対象と1cmの距離に線源と検出器が配置される条件(装置を接触させた密度計測の条件)は従来の土木分野における土壤の密度計測の場合に対応する。密度の増加にしたがい散乱ガンマ線数は単調に増加し、ある密度で極大値(最大値)となり、その後、単調に減少する。極大値を与える密度は線源・検出器間距離に依存し、14cmの場合は1.75 g / cm³前後、19cmの場合は1.25 g / cm³前後、24cmの場合は1.00 g / cm³前後である。土壤密度は1.50 ~ 2.50 g / cm³程度であるので負の勾配を利用して密度計測を行う。このシミュレーション結果は従来の知見に完全に一致する³⁾。図2.3.5(b)は本研究における非接触を条件とした密度計測に対応する。シミュレーションの密度範囲では密度と共に散乱ガンマ線数は単調に増加する。線源・検出器間距離が小さくなると正の勾配が大きくなることが観察される。焼結配合原料の密度範囲である1.50 ~ 2.00 g / cm³では散乱ガンマ線と密度の関係は線形的であることも認められる。これは密度計測には有利な特性である。シミュレーション結果の考察により散乱ガンマ線の数と密度の関係は明確化された。開発した区分体積積分法を使用したシミュレーションは従来の知見(接触方式による密度計測)を十分に反映できることが実証され、さらに後述する実用機のテスト結果の考察より非接触の場合にも適用できることも確認できた。以上より本シミュレーションの信頼性は十分に高くガンマ線散乱-密度モデルの評価に使用可能と結論できる。



(a) 計測対象との距離が 1 cm の場合の規格化した散乱ガンマ線計数

(○、□、△は線源と検出器の距離が 1.4、1.9、2.4 cm を示す)



(b) 計測対象との距離が 8 cm の場合の規格化した散乱ガンマ線計数

(○、□、△は線源と検出器の距離が 1.4、1.9、2.4 cm を示す)

図 2. 3. 5 規格化した散乱ガンマ線数と密度の関係 (シミュレーション)

(3) モデルの評価

区分体積積分法によって計算した各密度に対する散乱ガンマ線の数とモデルによって計算した散乱ガンマ線の数が最も良く一致するようにモデルのパラメータである A 、 α 、 β を決定する。ミクロな散乱現象を積算する区分体積積分法と散乱現象を解析的にマクロに表現するガンマ線散乱-密度モデルが一致する度合いをモデルの評価と考える。

以下にパラメータ決定の方法を述べる。区分体積積分法とモデルで計算した散乱ガンマ線の差の合計が最小になるようにパラメータを調整する。評価式を、

$$\begin{aligned} S &= \int [A(1 - \exp(-\alpha\rho)) \exp(-\beta\rho) - I(\rho)]^2 d\rho \\ &= \sum [A(1 - \exp(-\alpha\rho_i)) \exp(-\beta\rho_i) - I(\rho_i)]^2 \end{aligned} \quad (2.3.12)$$

とする。ここで ρ_i は密度で 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g/cm³ の値とし、その密度に対応する区分体積積分法から計算した散乱ガンマ線の数を $I(\rho_i)$ とする。(2.3.12)式から最適な A 、 α 、 β を求めるには S を各パラメータで偏微分し値をゼロと置き連立して解く方法が考えられる。しかしながら(2.3.12)式には指数項が積の形で含まれているため偏微分式は一層複雑化する。したがって解析的に解く方法は採用できない。そこで A 、 α 、 β の存在範囲をあらかじめ予想し、限定された範囲における繰り返し計算によって準最適な A 、 α 、 β を求めることにした。繰り返しの回数は100万回程度である。その結果を表2.3.2に示す。

計測対象までの垂直距離が1cmの場合、線源・検出器間距離が大きくなると α 、 β とも大きくなり、散乱ガンマ線の極値を与える ρ は小さくなる。計測対象までの垂直距離が8cmの場合も傾向は同じである。線源・検出器間距離が同じ場合には計測対象までの垂直距離が大きくなると α 、 β とも小さくなり、散乱ガンマ線の極値を与える ρ は大きくなる。区分体積積分法とモデルの値の差は計測対象までの距離が1cmの場合には0.03~0.9程度であり相対誤差としては±1%以下である。一方、計測対象までの距離が8cmの場合には0.1~0.2程度であり相対誤差としては±2%程度である。これによってガンマ線の散乱と密度との関係は提案したマクロなモデルで十分な精度で表現できることが判明した。比較する密度の点数が多いほど A 、 α 、 β は高精度に求められることは自明であり、繰り返し回数が多いほど精度が良くなることも自明である。したがって必要な精度に応じてモデルのパラメータは決定すればよい。

以上よりモデルは十分に信頼できるものと判断する。

表 2. 3. 2 区分体積積分法とガンマ線散乱 - 密度モデルの比較

(a) ガンマ線散乱 - 密度モデルのパラメータ

	垂直距離	線源・検出器間距離	A	α	β
①	1 cm	14 cm	118.694	1.949	0.0809
②	1	19	129.038	2.394	0.1653
③	1	24	138.394	2.843	0.2633
④	8	14	103.038	1.524	0.0036
⑤	8	19	101.953	1.717	0.0050
⑥	8	24	100.881	1.879	0.0073

(b) 区分体積積分法とガンマ線散乱 - 密度モデル誤差評価

(表中の①～⑥は(a)の①～⑥に対応)

密度 (g/cm ³)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	極大値の ρ
①	-0.036	0.870	0.469	-0.098	0.203	1.653
②	-0.075	0.403	-0.072	-0.058	0.144	1.144
③	0.043	0.159	-0.079	0.452	-0.412	0.868
④	-2.160	1.296	2.059	1.443	-0.146	3.973
⑤	-1.408	1.218	1.482	0.676	-0.697	3.400
⑥	-1.761	0.859	0.834	0.168	-1.837	2.958

2. 3. 3 ガンマ線散乱-距離モデルの評価

放射線解析計算コードを用いてガンマ線散乱-距離モデルの評価を行う。コードを用いて計算した結果、すなわち距離ごとの散乱ガンマ線の数値がモデルの h_s （具体的には後述する H_s, m, n ）を調整することによって十分に再現できることを評価手段とする。

(1) シミュレーション条件

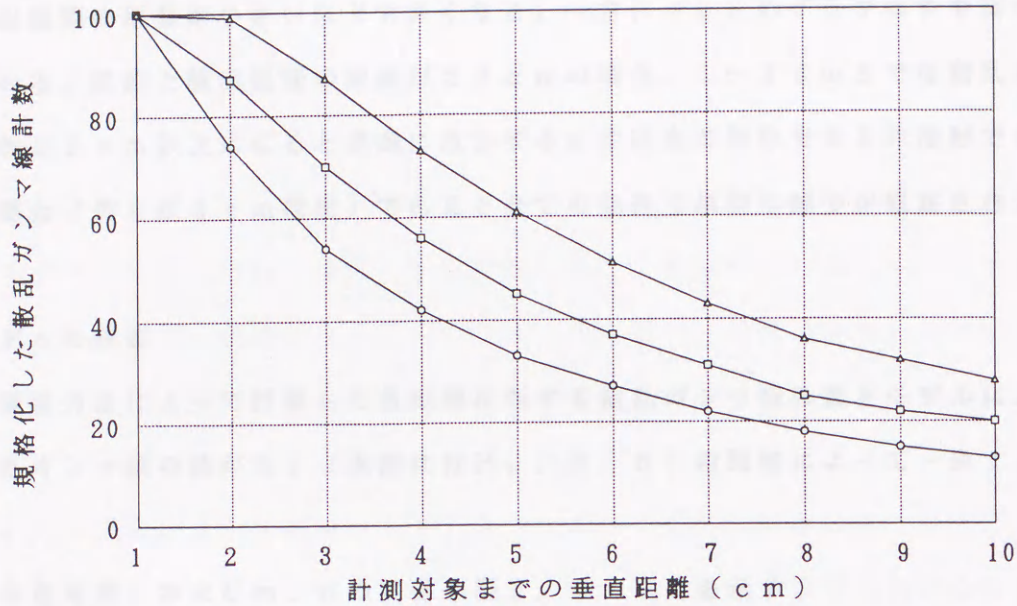
ガンマ線散乱-距離モデルを評価するために広範囲に h を変化させてシミュレーションすることが必要であるが、開発した区分体積積分法において直接的には h を入力できないので、ここでは垂直距離 H （ h に変換可能）を変化させることにする。

以下にシミュレーション条件を示す。

1) 放射性同位元素	Cs
2) 放射線の量	1.9×10^8 個
3) 入射側の線減衰係数	$0.133 / \text{cm}$ (焼結配合原料)
4) 散乱側の線減衰係数 (例)	$0.233 / \text{cm}$ (焼結配合原料)
5) 線源および検出器から計測対象 の表面までの垂直距離 (H)	1, 2, 3, 4, 5 6, 7, 8, 9, 10 cm
6) 検出器の大きさ	20 cm^2 (球の大円の面積)
7) 検出器の効率	1
8) 検出器の位置	(14, 0, -H) cm (19, 0, -H) cm (24, 0, -H) cm
9) 計測対象の大きさ (幅40 cm, 長さ40 cm, 厚さ10 cmの直方体)	X軸 -10 ~ +30 cm Y軸 -20 ~ +20 cm Z軸 0 ~ +10 cm
10) 区分立体の大きさ (計算のメッシュ)	1 cm
11) ビルドアップ係数	$0.06 / \text{cm}$
12) 密度	1.50, 2.00 g / cm^3

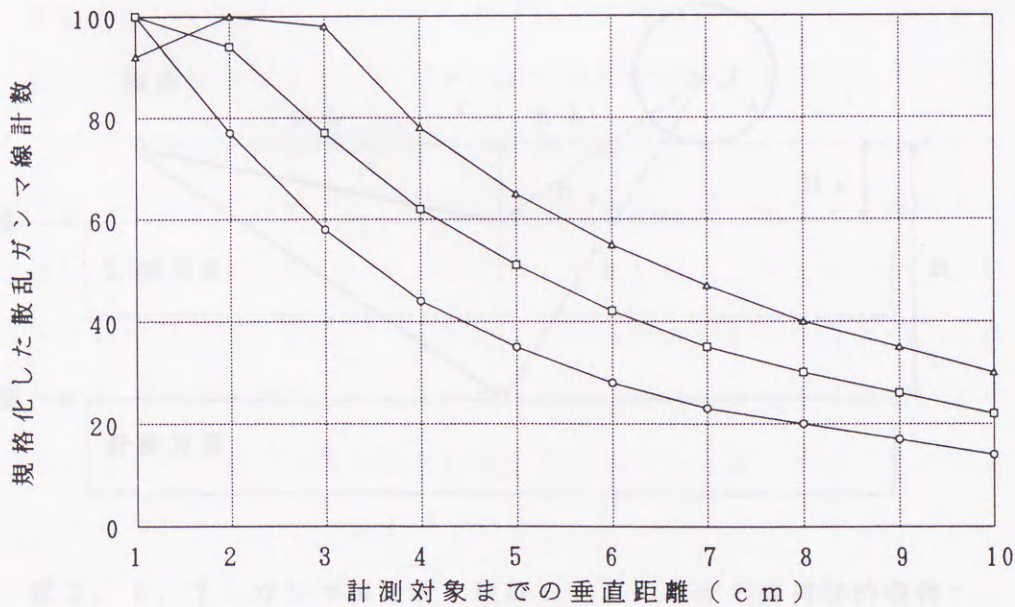
(2) シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 2. 3. 6 の (a)、(b) に示す。



(a) 計測対象の密度が 1.5 g/cm^3 の場合の規格化した散乱ガンマ線数

[○、□、△は線源・検出器間距離が 14、19、24 cm の場合を示す]



(b) 計測対象の密度が 2.0 g/cm^3 の場合の規格化した散乱ガンマ線数

[○、□、△は線源・検出器間距離が 14、19、24 cm の場合を示す]

図 2. 3. 6 規格化した散乱ガンマ線数と距離の関係 (シミュレーション)

ガンマ線の数と距離の関係をパターンとして認識するために最大ガンマ線の数を100として規格化した。図2.3.6(a)について考察する。計測対象との距離が1cm以上になると計測対象との距離と共に散乱ガンマ線の数は単調に減少する。減少の割合は線源と検出器間の距離が小さいほど大きくなる。一方、(b)のグラフはやや異なる挙動を示している。線源と検出器間の距離が24cmの場合、1~2cmまでは散乱ガンマ線の数は増加し2cm以上になると単調に減少する。本研究の対象である非接触で十分に距離を離す場合(例えば8cm程度)であると全ての条件で単調な減少が観察される。

(3) モデルの評価

区分体積積分法によって計算した各距離に対する散乱ガンマ線の数とモデルによって計算した散乱ガンマ線の数が h_s (実際には H_s, m, n)の調整によって一致することを確認する。

まず、各種距離、および m, n の関係を図2.3.7に示す。

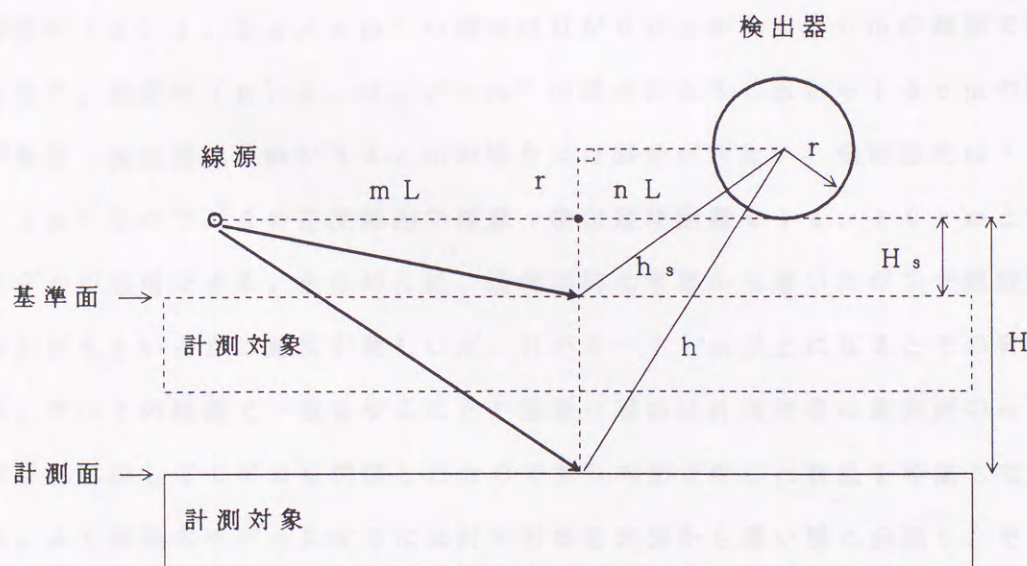


図2.3.7 ガンマ線散乱-距離モデルにおける幾何学的条件

図2.3.7の H_s と h_s の関係を数式で表現すると、ピタゴラスの定理より、

$$h_s = \sqrt{[(H_s + r)^2 + (nL)^2]} \quad (2.3.13)$$

$$m + n = 1, \quad m > 0, \quad n > 0$$

となる。ただし、 r は検出器の半径、 L は線源・検出器間距離である。また h と H の関係も (2. 3. 13) 式で表現される。したがって今後は h_s 、 h の代わりに H_s 、 H を使用することにする。上式における m と n の最適配分とは、その配分で決まる計測対象表面の位置が散乱ガンマ線の検出に最も寄与するという意味である。すなわち散乱ガンマ線の発生源（体積線源）である計測対象全体を計測対象表面の m 、 n で定まる位置に凝縮させて点線源と見なすことである。この操作はモデル構築の前提条件③によって可能となる。

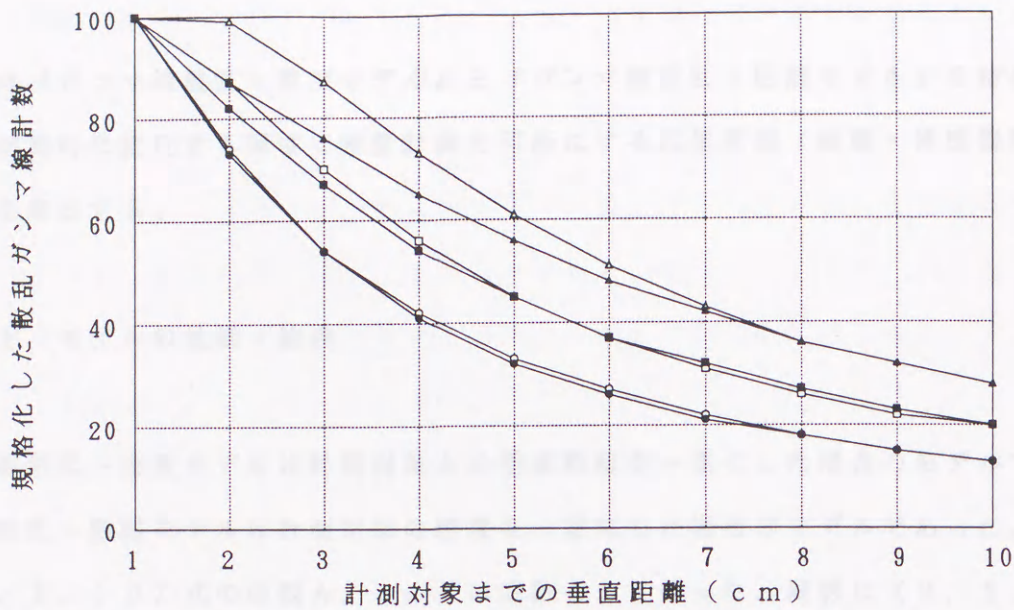
ここで検出器の直径を 5 cm、したがって $r = 2.5$ cm とする。また垂直距離 H_s は 1 cm（従来の散乱型密度計の条件）とし計測対象との垂直距離 H を 2 ~ 10 cm まで 1 cm の刻みで計算する。計算は (2. 2. 14) 式を用い、規格化のために I_s を 100 とする。本モデルによる計算結果を区分体積積分法で計算した結果と重ね合わせて図 2. 3. 8 の (a)、(b) に示す。ただし線源・検出器間距離が 14、19、24 cm のとき、それぞれの (m , n) の値は、(0.85, 0.15)、(0.77, 0.23)、および (0.76, 0.24) である。これらの組合せは区分体積積分法の各距離での検出されたガンマ線計数とモデル計算の結果の差の合計が最も小さくなるように決定した。

密度が (a) 1.5 g/cm^3 の場合は H が 6 cm から 10 cm の範囲で極めて良い一致を示す。密度が (b) 2.0 g/cm^3 の場合にも 7 cm から 10 cm の範囲で良く合うが線源・検出器間距離が 24 cm の場合には誤差が大きい。焼結密度は $1.5 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ なので、この密度範囲で線源・検出器間距離を 14、19 cm とすれば提案したモデルが活用できる。全体的には、幾何学的な考察から導いたガンマ線散乱-距離モデルは H が小さいときは適用が難しいが、 H が 6 ~ 7 cm 以上になるとその有効性が発揮される。すべての距離で一致させることが困難な理由は計測対象の最表面のみの散乱現象の幾何学を応用してモデルを構築したためであり内部で生じた散乱を考慮していないことによる。より精緻なモデルにするには計測対象を表面から薄い層に分割し、それぞれの層で重みを付け積算すればよい。その場合のモデルは、

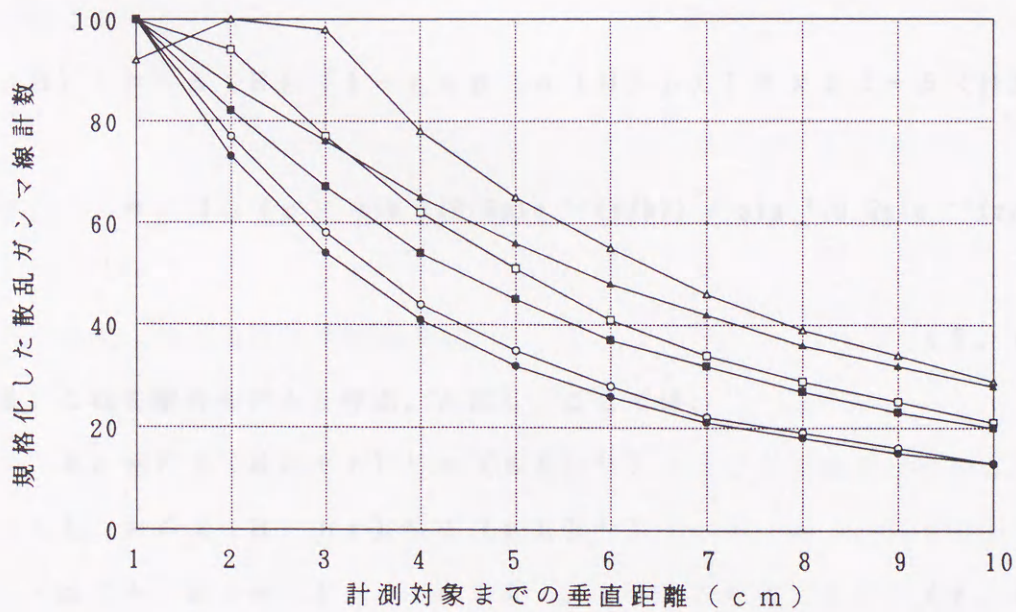
$$I = \sum w_i I_{s_i} \sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h_i)) / \sin^2(0.5 \sin^{-1}(r/h_{s_i}))$$

$$\sum w_i = 1, \quad w_i > 0 \quad (2. 3. 14)$$

となる。 w_i は i 層からの散乱ガンマ線が検出器に到達する相対比率（重み）である。実際には w_i は事前に求めるのは困難であり、モデルも複雑になる。本研究では垂直距離変化の範囲を限定して (2. 2. 14) 式のモデルを使う。限定範囲においてガンマ線散乱-距離モデルの信頼性は充分である。



(a) 計測対象の密度が 1.5 g/cm^3 の場合の区分体積積分法 (○、□、△) とガンマ線散乱-距離モデルによる計算値の比較 (●、■、▲)
 [丸、四角、三角は線源・検出器間距離が 14、19、24 cm の場合を示す]



(b) 計測対象の密度が 2.0 g/cm^3 の場合の区分体積積分法 (○、□、△) とガンマ線散乱-距離モデルによる計算値の比較 (●、■、▲)
 [丸、四角、三角は線源・検出器間距離が 14、19、24 cm の場合を示す]

図 2. 3. 8 区分体積積分法とガンマ線散乱-距離モデルによる計算結果比較

2. 4 ガンマ線による密度計測の応用原理

本節では『ガンマ線散乱-密度モデル』と『ガンマ線散乱-距離モデル』を結合し、密度と距離が同時に変化する環境で密度計測を可能にする応用原理（線源・検出器間2重距離方式）を導出する。

2. 4. 1 モデルの拡張・結合

ガンマ線散乱-密度モデルは計測対象との垂直距離を一定にした場合のモデルであり、ガンマ線散乱-距離モデルは計測対象の密度を一定にした場合のモデルであった。したがって(2. 2. 10)式の係数 A 、 α 、 β は定数として扱った。同様に(2. 2. 14)式の係数 I_s も定数とした。密度と垂直距離が同時に変化する場合を対象としてモデルを拡張すると A 、 α 、 β 、および I_s は定数として扱えなくなり、前述のように A 、 α 、 β は垂直距離 H の関数となり I_s は密度 ρ の関数となる。二つモデルは同じ (ρ, H) に対しては I の値が等しくなるので、

$$\begin{aligned} I(\rho, H) &= A(H) [1 - \exp(\alpha(H)\rho)] \exp(-\beta(H)\rho) \\ &= I_s(\rho) \sin^2(0.5\sin^{-1}(r/h)) / \sin^2(0.5\sin^{-1}(r/h_s)) \end{aligned} \quad (2. 4. 1)$$

が成立する。これを結合モデルと呼ぶ。ただし、ここでは、

$$\begin{aligned} h_s &= \sqrt{(H_s + r)^2 + (nL)^2} \\ h &= \sqrt{(H + r)^2 + (nL)^2} \\ m + n &= 1, \quad m > 0, \quad n > 0 \end{aligned} \quad (2. 4. 2)$$

である。前節で述べたようにガンマ線散乱-密度モデルは広い範囲の密度 ρ ($0.5 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$)で成立する。一方、ガンマ線散乱-距離モデルは垂直距離 H が6 cm以上で成立するが、8 cmから10 cmの範囲の限定において特に一致度合いが良い。したがって、(2. 4. 1)式の成立条件は、

$$(0.5 \leq \rho \leq 2.5) \cap (8 \leq H \leq 10) \quad (2. 4. 3)$$

である。

つぎに上記の結合モデルの取扱いを容易にする。実際の計測対象である焼結配合原料の密度範囲は $1.5 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$ であるから (2.4.3) 式の ρ をさらに限定し、

$$(1.5 \leq \rho \leq 2.0) \cap (8 \leq H \leq 10) \quad (2.4.4)$$

とする。図 2.3.5 の (b) で観察されるように散乱ガンマ線の数 I と密度 ρ は直線的に変化する。事実、相関係数は 99.9% 以上である。図 2.3.8 の (b) は I と垂直距離 H の関係が前述の範囲では直線的であることを示している。相関係数は 99.9% 以上である。したがって (2.4.1) 式は、

$$\begin{aligned} I(\rho, H) &= a(H)\rho + b(H) \\ &= c(\rho)H + d(\rho) \end{aligned} \quad (2.4.5)$$

と簡単化できる。シミュレーション結果より係数 a 、 b 、 c 、 d の変化も (2.4.4) 式の限定において直線的である。そこで、

$$\begin{aligned} a(H) &= k_1 H + k_2 \\ b(H) &= k_3 H + k_4 \end{aligned} \quad (2.4.6)$$

と表現する。ここで k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 は定数である。これらを (2.4.5) 式に代入して整理すると、

$$\begin{aligned} I(\rho, H) &= (k_1 H + k_2)\rho + (k_3 H + k_4) \\ &= k_1 \rho H + k_2 \rho + k_3 H + k_4 \end{aligned} \quad (2.4.7)$$

のように ρ と H の 2 次形式で表すことができる。

2.4.2 線源・検出器間 2 重距離方式

(2.4.7) 式により散乱ガンマ線の数と密度 ρ 、および垂直距離 H の関係が明確になった。ただし、この式のみでは散乱ガンマ線の数が入力されても ρ 、 H を求めることはできない。そこで 2 台の検出器を線源から 14、19 cm の位置に配置する。14 cm の位置の検出器 (n 検出器) から得られる散乱ガンマ線の数を I_n 、19 cm の位置の検出器 (f 検出器) から得られる散乱ガンマ線の数を I_f とすると、

$$I_n(\rho, H) = k_{1n}\rho H + k_{2n}\rho + k_{3n}H + k_{4n} \quad (2.4.8)$$

$$I_f(\rho, H) = k_{1f}\rho H + k_{2f}\rho + k_{3f}H + k_{4f} \quad (2.4.9)$$

が得られる。ただし n 、 f は各検出器に関する係数を表す添字である。係数 k はシミュレ

ーション、あるいは実験によって決定する。ただし連立方程式が解けるためには、

$$k_{1n} \neq m k_{1r}, \quad k_{2n} \neq m k_{2r}, \quad k_{3n} \neq m k_{3r} \quad (2.4.10)$$

の条件が必要である。

本方式は2つの検出器を別々の位置に配置することより線源・検出器間2重距離方式と呼ぶことにする。

2.5 まとめ

本章ではガンマ線と計測対象とのコンプトン散乱の結果として検出される散乱ガンマ線の数が密度と垂直距離の関数で表現されることを明らかにし、線源・検出器間2重距離方式として定式化した。これによって2台の検出器から得られる散乱ガンマ線の数を入力とし密度と垂直距離を出力とする新しい非接触のガンマ線散乱密度計の可能性が示された。同時に、第1章で述べた計測原理上の課題、すなわち散乱方式の欠点である幾何学的条件の変動に対する弱さの克服、散乱現象を表現できる解析的モデルの構築、および研究のツールとなる簡易な計算法（ガンマ線解析計算コード）の開発という課題が解決された。

第2章の参考文献

- 1) 関口晃：放射線計測概論，30，東京大学出版会（1988）
- 2) G. F. Knoll: Radiation Detection and Measurement, 66, Jhon Wiley and Sons(1989)
- 3) 大野博教：密度計，RADIOISOTOPES, 22-5, 59/63（1973）
- 4) 村上悠紀雄，他：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) L. G. Sanders: The Application of Monte Carlo Computations to Formation Analysis by Neutron Interactions, Nuclear Geophysics, 173/198, Pergamon Press(1983)
- 7) AEE-Winfrith: McBEND 5, AEE-Winfrith(1985)
- 8) J. L. Pinault: Application of the MOCA Monte Carlo Code to Simulate Gamma-gamma Logging Tool Behaviour for Density Measurement in Mining Areas, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 5-4, 403/420(1991)
- 9) Y. Shirakawa, et al: An In-stream Gamma-ray Scatter Gauge for Sintering Plant Control in the Steel Industry, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 3-2, 147/156(1989)
- 10) Y. Shirakawa, et al: A Feasibility Study to Determine the Carbon and Oxygen Contents of Steel Using Fast Neutron Technique, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 5-4, 519/528(1991)
- 11) Y. Shirakawa: Rapid Analysis of Carbon and Oxygen in Steel based on Fast Neutron Interactions, Harwell Report(1986)

第3章 ガンマ線散乱密度計の要素研究

本章では線源・検出器間2重距離方式を具現化するための密度計の要素研究について述べる。まず密度計の基本構成を示し、各構成要素の中で重要な研究要素を選定する。理論的研究、あるいはシミュレーションによって最適な装置を決定し、その基本仕様を明らかにする。

3.1 密度計の研究要素

ガンマ線散乱密度計は一般的には線源部、遮蔽部、検出部、制御部、演算部、入出力部より構成される。ただし、線源・検出器間2重距離方式では検出器2台が必要である。構成を図3.1.1に示す。

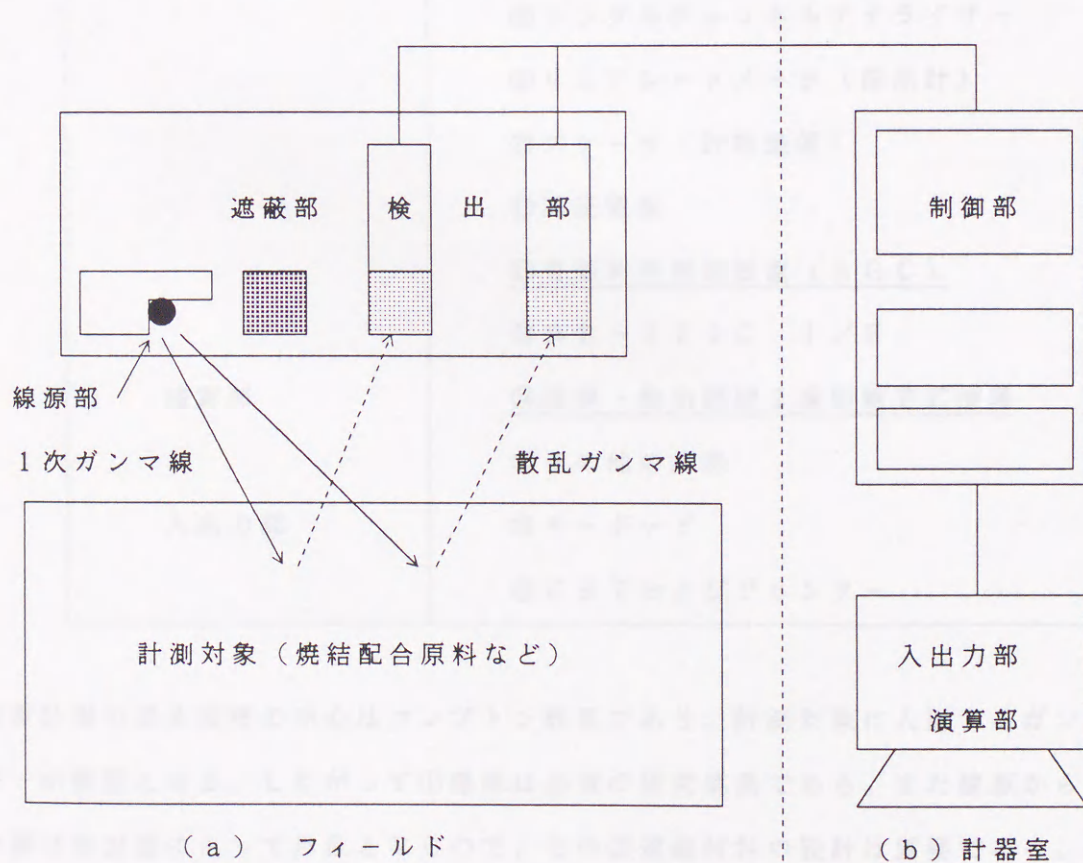


図3.1.1 ガンマ線散乱密度計の基本構成

つぎに基本構成要素をさらに細かなレベルまで分割を試み、表 3. 1. 1 に一覧としてまとめる。

表 3. 1. 1 密度計の詳細構成要素

構成要素	機能部品
線源部	① <u>ガンマ線を放出する線源</u>
遮蔽部	② <u>ガンマ線の遮蔽材料</u>
	③ シャッター機構
検出部	④ <u>シンチレーション検出器</u>
	⑤ フォトマル（光電子増倍管）
制御部	⑥ プリアンプ（前置増幅器）
	⑦ リニアアンプ（線型増幅器）
	⑧ シングルチャンネルアナライザー
	⑨ リニアレートメータ（指示計）
	⑩ スケータ（計数装置）
	⑪ 高圧電源
	⑫ <u>自動利得制御装置（AGC）</u>
演算部	⑬ RS-232C I/F
	⑭ <u>線源・検出器間 2 重距離方式演算</u>
	⑮ その他の演算
入出力部	⑯ キーボード
	⑰ CRT およびプリンター

密度計測の基本原理の中心はコンプトン散乱であり、計測対象に入射するガンマ線エネルギーが重要となる。したがって①線源は必須の研究要素である。また線源からの1次ガンマ線は検出器にとって外乱となるので、その②遮蔽材料の設計は重要である。散乱ガンマ線を受ける④検出器の性能は直接的に計測精度に関連するので最も検討を要する。制御部のほとんどの構成要素は規格化されているので研究対象から除外する。しかしながら⑫自動利得制御装置（AGC）は設置環境の変化（温度変化）の中で検出器を安定に維持す

る役割があり、規格品もないため独自の開発が必要である。⑭線源・検出器間2重距離方式演算は本研究で考える性格のものであることは自明である。以上を表3. 1. 2に整理する。次節より表にしたがって要素研究を行う。

表3. 1. 2 密度計の研究要素

構成要素	研究要素
線源部	・ガンマ線を放出する線源
遮蔽部	・ガンマ線の遮蔽材料
検出部	・シンチレーション検出器
制御部	・自動利得制御装置 (AGC)
演算部	・線源・検出器間2重距離方式演算

測定対象	測定距離 (cm)	測定方式	測定値 (N・V)	検出率 (%)
鉛	420	β線法	8.2254	15.7
			8.2253	2.4
鉛	2424	β線法	6.99742	29.5
			6.18918	51.1
鉛	10.73	β線法	6.25887	52.1
			6.03109	53.5
			6.20239	16.3
鉛	30.37	β線法	6.28185	55.9
鉛	9.211	β線法	1.37324	69.9
			1.38259	100.0

3. 2 ガンマ線源の選定

ガンマ線源を一覧し、焼結配合原料を計測対象とした場合の最適な線源を選定する。

3. 2. 1 ガンマ線源概観

ガンマ線はアルファ崩壊、ベータ崩壊、軌道電子捕獲（EC）、核異性体転移（IT）および自発核分裂（SF）などの反応のエネルギー収支の結果として放射される波長の短い電磁波である。したがってほとんどの放射性同位元素がガンマ線源と成り得る。しかしながら、ガンマ線のエネルギーや半減期、商用化の有無、価格などの観点から工業的に用いられるガンマ線源は限られる場合が多い。工業的に利用されている線源は、たとえば、 ^{241}Am 、 ^{153}Gd 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co などである。各ガンマ線源の特性を表3. 2. 1に示す^{1) 2) 3)}。

表3. 2. 1 代表的なガンマ線源の諸特性

ガンマ線源	半減期	崩壊形式	エネルギー (MeV)	放出率 (%)
^{241}Am	432y	α 崩壊	0.05954	35.7
			0.02635	2.4
^{153}Gd	242d	EC	0.09743	29.5
			0.10318	21.1
^{133}Ba	10.7y	EC	0.35600	62.1
			0.08100	33.5
			0.30285	18.4
^{137}Cs	30.0y	β 崩壊	0.66165	85.0
^{60}Co	5.27y	β 崩壊	1.17324	99.9
			1.33250	100.0

密度計測はコンプトン散乱の利用である。したがって1次ガンマ線のコンプトン散乱の角度分布、コンプトン散乱後の散乱ガンマ線（2次ガンマ線）のエネルギー分布が重要であり、線源の選定の指標となる。

まず、コンプトン散乱の角度分布を与えるクライン・仁科の式を示す。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \cdot \left[\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right] \cdot \left[1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)(1 + \alpha(1 - \cos\theta))} \right] \quad (3.2.1)$$

ただし、ここでは、

- σ : 断面積 (cm²)
- Ω : 立体角 (Sr)
- $d\sigma/d\Omega$: 微分断面積 (cm²/Sr/electron)
角度分布の確率を与える指標
- θ : 1次ガンマ線と散乱ガンマ線が作る補角 (radまたは度)
- α : $h\nu/m_0c^2$ (無次元)、 h はプランク定数、 ν は1次ガンマ線の振動数、 m_0 は古典的電子半径、 c は光速

とする。

また、エネルギー $h\nu$ をもつ1次ガンマ線がコンプトン散乱されエネルギーを減少する過程は以下の式によって与えられる。

$$h\nu_s = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (3.2.2)$$

ここで、 $h\nu_s$ は散乱ガンマ線のエネルギーである。(3.2.1)、(3.2.2)式を用いて、候補に挙げた線源の散乱特性を調べる。

表 3. 2. 2 に散乱角度分布を与える微分散乱断面積を示す。

表 3. 2. 2 各種線源からのガンマ線の散乱断面積分布
($10^{-26} \text{ cm}^2 / \text{Sr} / \text{electron}$)

散乱角度	$^{241} \text{Am}$	$^{153} \text{Gd}$	$^{133} \text{Ba}$	$^{137} \text{Cs}$	$^{60} \text{Co}$
0	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94
10	7.79	7.78	7.66	7.52	7.27
20	7.37	7.31	6.89	6.45	5.73
30	6.73	6.61	5.84	5.12	4.12
40	5.97	5.78	4.73	3.88	2.88
50	5.17	4.94	3.72	2.89	2.06
60	4.44	4.17	2.93	2.20	1.54
70	3.84	3.55	2.35	1.75	1.23
80	3.42	3.12	1.98	1.47	1.03
90	3.21	2.89	1.77	1.30	0.91
100	3.21	2.84	1.68	1.22	0.84
110	3.37	2.95	1.66	1.18	0.79
120	3.66	3.16	1.69	1.16	0.75
130	4.02	3.43	1.75	1.17	0.73
140	4.41	3.72	1.81	1.18	0.71
150	4.77	3.99	1.87	1.18	0.70
160	5.06	4.20	1.91	1.18	0.70
170	5.24	4.34	1.94	1.19	0.70
180	5.31	4.39	1.95	1.19	0.69

$^{241} \text{Am}$ 、 $^{153} \text{Gd}$ からのエネルギーの低いガンマ線のコンプトン散乱の微分断面積は 0° から 90° 付近まで減少し、その後、 180° まで増加する。大局的には前方にも後方にもほぼ均一に散乱される。一方、 $^{133} \text{Ba}$ 、 $^{137} \text{Cs}$ 、 $^{60} \text{Co}$ からの高エネルギーのガンマ線の場合は、 0° から 60° 付近までの前方へ著しく大きな確率で散乱される。後方への散乱の確率は 100° を越えると変化が少なく一様と考えてもよい。

つぎに表 3. 2. 3 に散乱ガンマ線のエネルギー変化を示す。

表 3. 2. 3 各種線源からのガンマ線の散乱後のエネルギー分布 (MeV)

散乱角度	^{241}Am	^{153}Gd	^{133}Ba	^{137}Cs	^{60}Co
0	0.061	0.097	0.356	0.662	1.253
10	0.059	0.097	0.352	0.649	1.208
20	0.059	0.096	0.342	0.614	1.092
30	0.059	0.095	0.326	0.564	0.943
40	0.058	0.093	0.306	0.508	0.796
50	0.057	0.091	0.285	0.453	0.668
60	0.056	0.089	0.264	0.402	0.563
70	0.055	0.086	0.244	0.357	0.479
80	0.054	0.084	0.226	0.320	0.414
90	0.053	0.082	0.210	0.288	0.363
100	0.052	0.079	0.196	0.263	0.323
110	0.051	0.077	0.184	0.242	0.292
120	0.051	0.076	0.174	0.225	0.268
130	0.050	0.074	0.166	0.212	0.249
140	0.049	0.073	0.160	0.201	0.235
150	0.049	0.072	0.155	0.194	0.225
160	0.049	0.071	0.151	0.188	0.218
170	0.048	0.070	0.149	0.185	0.214
180	0.048	0.070	0.149	0.184	0.212

^{241}Am 、 ^{153}Gd からのガンマ線の散乱後のエネルギーは、20%程度減少(入射エネルギーが小さいため絶対値としては非常に小さい)するに留まり、散乱角度の影響を強くは受けない。一方、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co からのガンマ線の散乱後のエネルギーは散乱角度の影響を強く受け、後方散乱(90°以上)の場合、入射エネルギーの60~70%が電子に与えられ、散乱ガンマ線のエネルギーは30~40%程度に低下する。

3. 2. 2 ガンマ線源の評価・選定

^{241}Am 、 ^{153}Gd 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co の各線源の諸特性を調べた。特に散乱角度分布、散乱エネルギーを計算によって詳細に求め表3. 2. 2、表3. 2. 3に示した。ここでは焼結配合原料を計測対象にした場合の最適な線源を、

- ・散乱角度分布と線源、検出器の幾何学的配置の関係
- ・散乱エネルギーと計測対象内での減衰の関係
- ・線源の半減期、価格
- ・総合評価

の観点により選定する。

(1) 散乱角度分布と線源・検出器の幾何学的条件の関係

散乱方式の密度計では入射ガンマ線（1次ガンマ線）がコンプトン散乱され、散乱ガンマ線（2次ガンマ線）となり、検出器に到達する。その散乱角度は一般に $90 \sim 180^\circ$ である。したがって、 $90 \sim 180^\circ$ の範囲で十分な微分断面積をもつことが望ましい。表3. 2. 2より各線源の $90 \sim 180^\circ$ の微分断面積の平均を求めて表3. 2. 4に整理する。

表3. 2. 4 各線源からのガンマ線の平均微分断面積

($10^{-26} \text{ cm}^2 / \text{Sr} / \text{electron}$)

	^{241}Am	^{153}Gd	^{133}Ba	^{137}Cs	^{60}Co
平均値	4.23	3.59	1.80	1.17	0.75

さらに、同量の強さ ($3.7 \times 10^6 \text{ Bq}$) の各々の線源から放射されるガンマ線に関して、発生割合が100%ならば1とする。 ^{60}Co の場合は1Bqの崩壊でガンマ線を2個発生するので2となる。 ^{137}Cs の場合は0.85、 ^{133}Ba の場合は1.14、そして ^{153}Gd の場合は0.56、 ^{241}Am の場合は0.56となる。線源からのガンマ線数と $90 \sim 180^\circ$ の平均微分断面積の積を線源の適正を評価する指標とする。積の大きさの順に配置すると、

^{241}Am (2.37) > ^{153}Gd (2.01) > ^{133}Ba (2.05) > ^{60}Co (1.50) > ^{137}Cs (1.00)

となる。

(2) 散乱エネルギーと計測対象内での減衰の関係

つぎに焼結配合原料を計測対象とした場合、散乱ガンマ線が内部で減衰する度合いの評価を行う。まず、焼結配合原料の代表的な密度と組成を表3.2.5に示す。

表3.2.5 焼結配合原料の代表的な密度 (g/cm³) と組成 (wt%)

密度	Fe	O	C	Ca	Si	H	Al	Mg
1.800	46.2	38.1	4.6	6.3	2.4	0.9	0.8	0.7

上記計測対象のエネルギーごとの線減衰係数を調べると、0.1~0.2 MeVの散乱ガンマ線 (^{241}Am 、 ^{153}Gd 、 ^{133}Ba) に対して0.463/cm、0.2~0.3 MeVの散乱ガンマ線 (^{137}Cs 、 ^{60}Co) に対して0.239/cmである。散乱ガンマ線が計測対象内部をおよそ10cm通過するとすると、ガンマ線の割合は ^{241}Am 、 ^{153}Gd 、 ^{133}Ba の場合、約3.0%に減衰する。一方、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co の場合は約11.5%である。この値に前項の各線源の評価の値をかけると、

^{60}Co (17.25) > ^{137}Cs (11.50) > ^{241}Am (7.11) > ^{133}Ba (6.15) > ^{153}Gd (6.03)

となり、線源の候補を絞ると、 ^{60}Co と ^{137}Cs となる。

(3) 線源の半減期、価格

^{60}Co と ^{137}Cs の価格は大差ない。但し半減期は、 ^{60}Co は5.27y、 ^{137}Cs は30.17yである。 ^{137}Cs は半減期が長く、工業計測装置として使用できる。しかしながら、 ^{60}Co は半減期が短く工業計測装置としてはきめ細かい管理が必要である。

(4) 総合評価

両線源には決定的な差異はないが、半減期が長く、工業的に多数使用されている点の評価して ^{137}Cs を選定する。

3. 3 遮蔽材料の研究

表面散乱方式の密度計は放射性同位元素（線源）からの1次ガンマ線を計測対象に照射し、計測対象でコンプトン散乱された2次ガンマ線を計測する。したがって密度情報をもつ2次ガンマ線のみを計数する必要がある。しかし線源は全方向に1次ガンマ線を放射するため、不必要なバックグラウンドを生じる。バックグラウンドを低減するために遮蔽が必要である。精度を確保するためには遮蔽材料の選定が重要な要素となる。線源、検出器、遮蔽の配置の基本的関係を図3. 3. 1に示す。

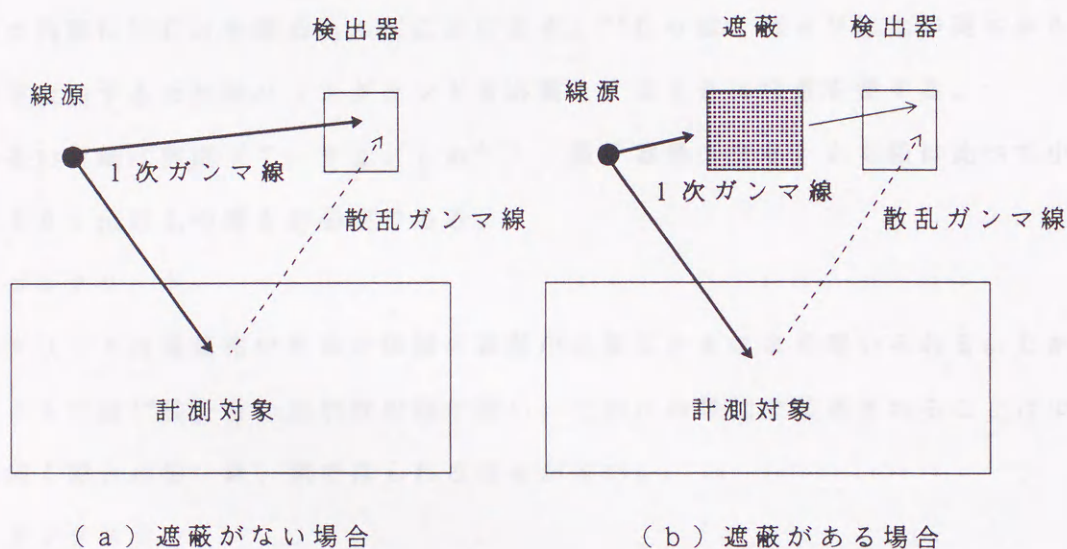


図3. 3. 1 線源・検出器・遮蔽の基本的配置

3. 3. 1 遮蔽材料概論

ガンマ線の遮蔽には、鉛、鉄（鋼）、コンクリートなどの密度の大きい物質が使用される。高価なため一般的ではないが、タングステンも利用価値が高い。ここでは、各物質の特徴を概観する。

(1) 鉛

鉛は密度 (11.3 g/cm^3) が大きく原子番号 (82) が大きいので検出器の遮蔽材料として最も広く用いられている。密度が大きいため2~3 cmの厚さで実用的に十分な場合が多い。バックグラウンドを大幅に低減するときは10 cm以上とすることもありますがビルドアップ効果があるため、それ以上の厚さにしてもバックグラウンドの計数率は大きく

は減少しない^{4) 5)}。

鉛の利点は形状の加工が容易な点である。融点が 327°C と低いため型に入れて自由な形状に鑄造できる。別法としては適当な容器に鉛の小さな粒を詰める方法もある。ただし、密度が小さくなる欠点がある。

(2) 鉄

鉄あるいは鋼もガンマ線の遮蔽材料として用いられている。特に遮蔽の形状が大きい場合で鉛のみでは高価になり過ぎるときによく用いられる。線源に近い内面を鉛で作し、外面を鉄あるいは鋼でつくる折衷法が効果的である。ただし、1950年以降に作られた鉄あるいは鋼は少量の ^{60}Co を含む。この理由は溶鉱炉の炉壁レンガの磨耗監視のために炉壁レンガ内部に ^{60}Co を埋め込んだことによる。 ^{60}Co は 1MeV 以上の高エネルギーガンマ線を放射するため低バックグラウンドを必要とするときは注意を要する。

鉄あるいは鋼は密度($7.8\text{g}/\text{cm}^3$)、原子番号(26)とも鉛に比べて小さいため通常 50cm 以上の厚さが必要である。

(3) コンクリート

コンクリートは低価格のため大体積の遮蔽が必要なきときによく用いられる。しかし、コンクリートには ^{40}K を含め自然放射能が高い。このため単独で使用されることは少なく検出器に向く部分は鉛、鉄、鋼で作られる場合が多い。

(4) タングステン

タングステンは固く融点も 3382°C ときわめて高いため加工が難しい。適当な形状に加工するためにはタングステン粉末を型に入れて 3000°C で焼結冶金することが必要である⁶⁾。材料費も加工費も鉛の10倍以上であり高価すぎて一般には用いられない。しかしながら高密度($19.3\text{g}/\text{cm}^3$)、高原子番号(73)であり遮蔽能力は格段に優れている。組合せて使用すれば最適な遮蔽が設計できる可能性がある。

3.3.2 遮蔽材料の性能比較

遮蔽材料の性能を N/N_0 (N :遮蔽材料を透過したガンマ線数、 N_0 :遮蔽材料に入射するガンマ線数)と定義し、シミュレーションによって比較する。

(1) 計算式および結果

計算式は全線減衰計数 μ ($/\text{cm}$) とビルドアップ係数 ($A + \mu t$) を組合せ、

$$N/N_0 = (A + \mu t) \exp(-\mu t) \quad (3.3.1)$$

とする。ただし、 t は遮蔽材料の厚さ (cm) である。 A の値は鉄あるいは鋼、およびコンクリートのように μ が小さい場合は 0.5 とし、鉛やタングステンは 0 とする。計算条件を表 3.3.1 に、シミュレーション結果を図 3.3.2 に示す。

表 3.3.1 遮蔽材料の性能比較シミュレーション条件

項目	条件
放射性同位元素 (線源)	^{137}Cs (662 keV)
遮蔽材料の全線減衰計数 ⁷⁾	
鉛	$1.413 / \text{cm}$
鉄あるいは鋼	$0.600 / \text{cm}$
コンクリート	$0.186 / \text{cm}$
タングステン	$2.084 / \text{cm}$
遮蔽材料の厚さ	1 cm 刻みで 10 cm まで

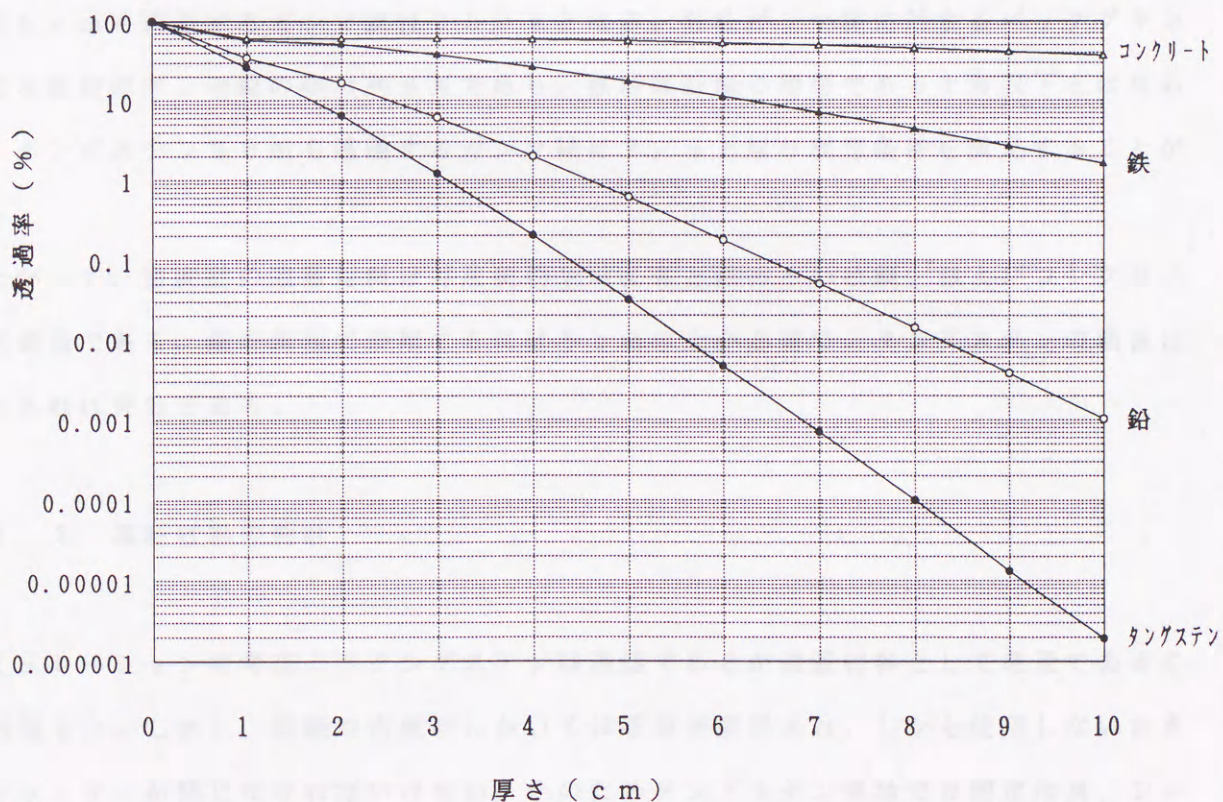


図 3.3.2 遮蔽材料の性能シミュレーション結果

(2) 結果の考察

図3.3.2を参照して遮蔽材料の性能について考察する。鉄あるいは鋼、およびコンクリートは厚さが薄い場合、減衰とビルドアップ効果が相殺し急峻な減衰過程とならないことがわかる。ただし、シミュレーションに用いた計算式の中でビルドアップ効果を示す μt の項は近似式である。ビルドアップ効果の定式化は現在のところ完全なものではなく一般的に認められている近似式を使用した。そのため厳密な絶対値議論になじまない。しかしながら5 cmより厚さが増すと減少過程がはっきりする。10 cmの点で鉄あるいは鋼を透過するガンマ線は2%に減少し、コンクリートを透過するガンマ線は37%である。

一方、密度の大きい鉛、およびタングステンはビルドアップ効果より減衰効果はるかに大きく単調に、かつ急峻に減衰する。10 cmの点で鉛を透過するガンマ線は0.001%である。タングステンの場合は 2×10^{-5} %となり実用上は透過しないと考えてよい。5 cmの厚さを見ると鉛を透過するガンマ線は0.6%、タングステンを透過するガンマ線は0.03%である。線源から $10^6 / s$ でガンマ線が放射されたとして通常の数密度計の場合、検出器に入る散乱ガンマ線はおよそ0.1%程度であり、 $1000 / s$ である。線源から直接に検出器に向かうガンマ線はおよそ0.5%とすると $5000 / s$ となる。鉛5 cmを透過するガンマ線は $30 / s$ となる。散乱ガンマ線に対するバックグラウンドとなる直接のガンマ線の率は約3%であり、放射線計測の理想である1%以下とはならない。タングステン5 cmを透過するガンマ線は $2 / s$ となり理想条件を満足することができる。

したがって、数密度計の遮蔽材料は寸法制約を考えると鉄あるいは鋼、およびコンクリートは不適當である。鉛を単独で使用するには5 cm以上が必要で、タングステンの場合は5 cmあれば充分である。

3.3.3 遮蔽材料の設計

シミュレーションの考察よりタングステンは高価であるが遮蔽材料として最適であることが判明した。しかし、実際の数密度計においては線源が固定され、しかも使用しないときにはシャッターが閉じなければいけない。そのためタングステン単独では固定治具、シャッター機構を設けることは現実的ではない。したがって固定治具、シャッター機構は鉛で製作し、検出器近傍の遮蔽にタングステンをを用いる複合遮蔽を設計の基本思想とする。

一例として同じ厚さの鉛とタングステンの複合遮蔽をした場合の遮蔽性能のシミュレーション結果を図3.3.3に示す。

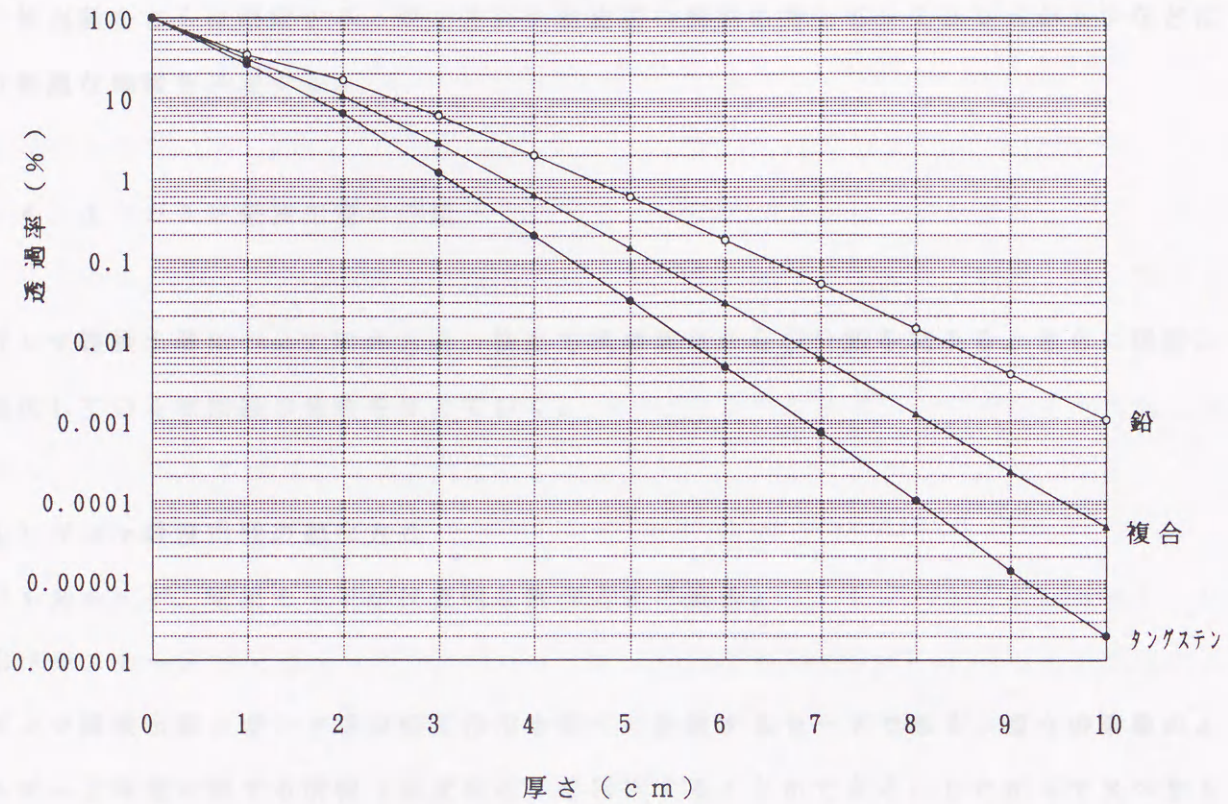


図3.3.3 鉛とタングステンの複合遮蔽のシミュレーション結果

3. 4 ガンマ線検出器の研究

まず、ガンマ線検出器を分類する。つぎに本研究の密度計に要求される条件を明らかにし、検出器をさらに限定する。限定された検出器の候補に対してシミュレーションなどにより最適な機種を決定する。

3. 4. 1 ガンマ線検出器の分類

ガンマ線検出器について動作方式、検出方式の観点からの分類を試みる。さらに現在、実用化している検出器の名称を与えていく。

(1) ガンマ線検出器の動作方式

パルスモード、電流モードが代表的な動作方式である。

①パルスモード

ガンマ線検出器とガンマ線の相互作用を個々に計数するモードである。個々の事象のエネルギーと時間に関する情報（頻度など）を保持することができる。したがってスペクトル測定に不可欠である。ただし、事象の発生が極めて高頻度（ $10^6 / \text{s}$ 以上）の場合には計数回路の動作が追いつかず数え落とし、パイルアップなどが起こる。

②電流モード

ガンマ線検出器とガンマ線の相互作用を電流値として測定するモードである。通常の応答は1 s程度であるので個々の事象は平均化される。つまり相互作用の頻度と相互作用当たりの平均電荷の積に依存する平均電流が記録される。事象の発生が極めて高頻度の場合には有効な方式である。

(2) ガンマ線検出器の検出方式

電離箱、比例計数管、ガイガーミュラー計数管、シンチレーション検出器が代表的である。それぞれの概要を述べる。

①電離箱

電離箱にはガス（Ar、He、H₂、N₂、O₂、CH₄、Airなど）が封入される。ガンマ線などの放射線がガス中を通過する際、相互作用によって通路に沿ってガスの電離

が起こり陽イオンと自由電子からなるイオン対が生成される。電離箱に電界を印加すると正負の電荷が移動して電離電流を作る。この電流を測定するのが電離箱による放射線測定の基本方式である。電離箱は放射線の分布を測定する可搬型サーベイメータとして広く使用されている。工業計測においてはエネルギーの低いガンマ線、X線の応用計測装置である厚さ計としての実績が多い。

② 比例計数管

比例計数管も電離箱と同様なガス入り検出器の一種でArとCH₄を混合したガスがよく用いられる。イオン対の電荷を比例的増幅する現象に基づいており、収集された電荷は入射放射線によって作られた最初のイオン対の数に比例する。電離箱より感度が良く事象の頻度が少なくても検出できる。得られたパルスは入射した放射線のエネルギー情報を保存する。したがってスペクトル測定に適している。

③ ガイガーミュラー計数管 (GM管)

GM管も比例計数管と同様なガス入り検出器の一種でHe、Arがよく用いられる。比例計数管よりも印加電界が大きく、なだれ的なガス増幅作用を示す。入射した放射線によって作られたイオン対の数に関係なく、一定の電荷が収集され大きなパルスを発生する。したがって入射放射線のエネルギー情報はすべて失われる。この理由からスペクトル測定には不向きである。放射線の分布を測定する可搬型サーベイメータとして安価なためよく使用される。ただし計数が多くなるとそれ以上計数できなくなる窒息現象をもつため低計数率のときのみ用いられる。

④ シンチレーション検出器

シンチレーション検出器はガス入り検出器と全く異なる原理に基づいて放射線を検出する。放射線がある物質に衝突すると光(シンチレーション光あるいは蛍光)を発生する。この微弱な光を光電子増倍管で電圧パルスに変えて測定する装置がシンチレーション検出器である。荷電粒子、光子(ガンマ線、X線)、中性子などのあらゆる放射線の検出、計数に使用できる。発光の波長が可視領域またはそれに近いこと、発光物質が透明であること、発光の減衰時間が短いことなどの条件が発光物質(シンチレータ)に要求される。無機物質、有機物質を利用した種々の検出器が作られている。無機物質としては、NaI、CsI、BGOなどが有る。有機物質としてはアントラセン、スチルベンが有用で液体として用いる液体シンチレータ、プラスチックに成形したプラスチックシンチレータが代表的である。荷電粒子の検出効率は100%であり、ガンマ線に対しても数10%の検出効

率がある。さらに計数率も高く、無機シンチレータでは $10^6 / s$ 、有機シンチレータでは $10^8 / s$ にも達する。

(3) 検出器の分類

ガンマ線検出器の動作方式、検出方式を表 3.4.1 に整理する。

表 3.4.1 ガンマ線検出器の動作方式、検出方式一覧

モード	パルスモード	電流モード
電離箱 比例計数管 GM管	電離箱 比例計数管 GM管	電離箱 ———— ————
シンチレーション 検出器	NaI (Tl) CsI (Tl) ビスマスジェ-マネイド (BGO) 液体シンチレータ その他	ビスマスジェ-マネイド (BGO) (X線CTにおける応用)

3.4.2 密度計における検出器の要件

本研究における密度計は実際の焼結プロセスに導入するため以下に示す要件を満足する必要がある。

- ① 微弱な線源（法規性を受けない）を使用することにより取り扱いを容易にする。
したがってガンマ線減の強さを 3.7 MBq (3.7×10^6 崩壊/s) に制限する必要がある。そのため同一寸法の検出器の中で検出効率が高いものであることが必須条件である。
- ② 焼結プロセスにおける振動、周囲の温度変化 ($10 \sim 50^\circ \text{C}$)、湿度変化 ($30 \sim 90\%$) に対して頑強でなければならない。
- ③ 整備性（取り替え・修理）からすでに実用化・市販化されている必要がある。

3. 4. 3 ガンマ線検出器の限定

密度計における検出器の要件で最も重要な①に関して表3. 4. 1に示した検出器を評価し機種を限定する。

ガンマ線は検出器内の物質の電子との相互作用で検出される。したがって検出される確率は電子密度の大きさに依存する。電子密度と物質の密度は比例するので検出器の検出効率は密度を求めれば概略の評価が可能である。

電離箱、比例計数管、GM管ではガンマ線はガスと相互作用する。密度は空気とほぼ同様 (0.0013 g/cm^3) でありシンチレーション検出器の密度 ($1 \sim 8 \text{ g/cm}^3$ 程度) と比較して格段に小さい。検出効率を上げるためには非常に大きな体積が必要となり線源・検出器間2重距離方式の原理を実現できない。したがって今後の検討はシンチレーション検出器に限定する。

3. 4. 4 シンチレーション検出器の性能比較

理想的なシンチレーション材料の一般的な条件を挙げる。

- ①放射線を高いシンチレーション効率で光に変換すること
- ②変換された光が光電子増倍管に感ずること
- ③変換された光の収量がガンマ線のエネルギーと比例すること
- ④良好な収光特性を得るために材料は変換された光をよく透過すること
- ⑤光の減衰時間が短く、高速のパルスを発生すること
- ⑥シンチレータの光の屈折率がガラスに近く光電子増倍管に効率よく導かれること

さらに密度計に求められる条件を付加すると、

- ⑦ガンマ線をシンチレータ内で止めるために十分に高い密度であること

上記の条件をすべて満足する材料は存在しないので、必要不可欠の条件と他の条件を妥協させることにする。まず有機物質のシンチレータ(液体シンチレータ、プラスチックシンチレータ)は⑤に優れているが①、⑦に劣っている。一方、無機物質のシンチレータは⑤に劣るが、②、⑦に優れている。本研究の密度計では微弱線源を使用するので⑤の条件は必須ではない。⑦は必須条件であることより無機シンチレータが適している。

(1) 無機シンチレータの概要

代表的な無機シンチレータとしてNaI(Tl)が最も普及している。さらに、特徴を生かした使用の際にはCsI(Tl)、BGOが使用されている。これらのシンチレータの概要を以下に述べる。

① NaI(Tl) - タリウム活性化ヨウ化ナトリウム^{8) 9) 10)}

1948年、微量のヨウ化タリウムを添加したヨウ化ナトリウム結晶が作られ、それまでの有機物に比べて格段に大きなシンチレーション光を発することが認められた。この発見によってガンマ線のスペクトル測定が前進をみた。その後、40年強、他のシンチレーション物質が発見されたにもかかわらず最も優れたものとして普及している。

NaI(Tl)は直径75cm、厚さ25cmまでの単結晶が実用的に製作できる。密度は 3.67 g/cm^3 と高く、原子番号も大きいので、適当な大きさ以上であれば非常に高い検出効率をもつガンマ線検出器となる。ガンマ線のエネルギー分解能は半導体検出器に劣るが、大体積の検出器を必要とする場合には現在でも最も有用な検出器といえる。

NaI(Tl)の発光スペクトルは410nmにピークを示し、光変換効率(シンチレーション効率)は無機シンチレータの中で最大である。しかし以下の点には注意すべきである。NaI(Tl)は割れ安く、振動、温度変化、熱ショックに弱い。また吸湿性があるので高湿度の環境での使用には慎重さが必要である。

② CsI(Tl) - タリウム活性化ヨウ化セシウム^{8) 10)}

CsI(Tl)はNaI(Tl)よりも密度が高く(4.51 g/cm^3)、原子番号が大きいのでガンマ線の検出効率は高い。光変換効率(シンチレーション効率)はNaI(Tl)の約45%である。発光スペクトルは420~600nmに延びている。

CsI(Tl)はNaI(Tl)より柔かく、振動、温度変化、熱ショックにも強い特徴がある。最近、この特徴が評価され宇宙での計測実験に使用されている。さらに有用な性質として各種の放射線に対する光の減衰時間が異なる点が挙げられる。陽子、アルファ線のような荷電粒子と電子による事象を減衰時間の差を利用したパルス波形弁別法によって分離する技術が開発されている。ただし、CsI(Tl)は吸湿性が多少あるため高湿度の環境では劣化する場合がある。

③ BGO - ビスマスジャーマネイド^{8) 11)}

1970年代後半からシンチレーション材料としてビスマスジャーマネイド(BGO - $\text{Bi}_{14}\text{Ge}_{13}\text{O}_{12}$)が市販され、種々の応用が生まれた。BGOの最大の特徴はビスマス

の大きな原子番号（83）と大きな密度（ 7.13 g/cm^3 ）である。この特徴により単位体積当たりのガンマ線検出効率は最大である。また機械的性質、化学的性質により振動、温度変化、熱ショック、高湿度環境に強く、NaI(Tl)に比べて頑丈である。しかしながらシンチレーション効率はNaI(Tl)の20%程度である。またエネルギー分解能も劣る。この点からエネルギー分解能より最大の検出効率が望まれる应用到に有利といえる。

BGO検出器の発展の歴史と応用例を表3.4.2に示す。

表3.4.2 BGO検出器の発展の歴史と応用例¹²⁾

(Harshaw社における開発と応用から引用)

年次	直径×長さ	分解能	応用例
1977年	38×102 mm	—	X線CT ガンマ線CT
1978年	51×152 mm	25%	X線CT ガンマ線CT ポジトロンCT
1982年	76×152 mm	15% 以下	X線CT ガンマ線CT ポジトロンCT 高エネルギー物理学 核物理学
1983年	127×229 mm	15% 以下	X線CT ガンマ線CT ポジトロンCT 高エネルギー物理学 核物理学 工業利用

(2) シミュレーションによる検討

3種類のシンチレーション検出器の概要を述べたが、密度計への応用の立場から最も普及しているNaI(Tl)、あるいは最大の検出効率を有するBGOの両者がより詳細検討に値する。

①シミュレーションコードの開発

検出器の設計研究を推進するにあたりシミュレーションツールとして開発したガンマ線球体検出器効率計算コードについて述べる。

本コードはガンマ線が球の形状の検出器(球体検出器)に入射し、検出される過程を扱う。シミュレーション結果として検出される効率(検出されるガンマ線数/入射したガンマ線数)が得られる。

効率を計算するコードを設計する前提となる線源・検出器の幾何学的条件(配置条件)を図3.4.1に示す。

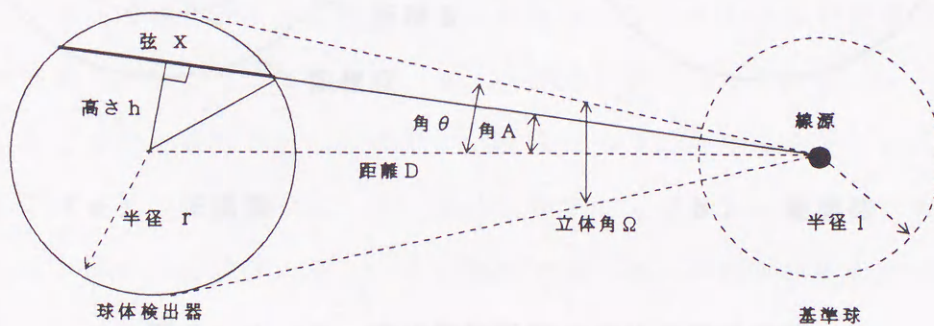


図3.4.1 線源・検出器の幾何学条件(配置条件)

線源から放射されたガンマ線が仮想的な基準球(半径1)を通過し、角Aの方向で球体検出器に入り、弦xの線上で検出器と相互作用(光電吸収、コンプトン散乱、電子対生成のいずれかの反応)を起こし検出される場合を考える。

検出器の線減衰係数 μ (/cm) は、

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (3.4.1)$$

である。ただし、ここでは、

$$\tau : \text{光電吸収による線減衰係数} \quad (/cm)$$

$$\sigma : \text{コンプトン散乱による線減衰係数} \quad (/cm)$$

κ : 電子対生成による線減衰係数 (/ cm)

である。したがって、ガンマ線が検出器に検出される、すなわち上記のいずれかの反応を起こす確率 p は、

$$p = 1 - \exp(-\mu x(A)) \quad (3.4.2)$$

$$x(A) = 2\sqrt{[r^2 - (D \sin A)^2]}$$

となる。

つぎに、(3.4.2)式で示される確率を、すべての方向で積分する操作を行う。積分の方法を図3.4.2にしたがって導く。

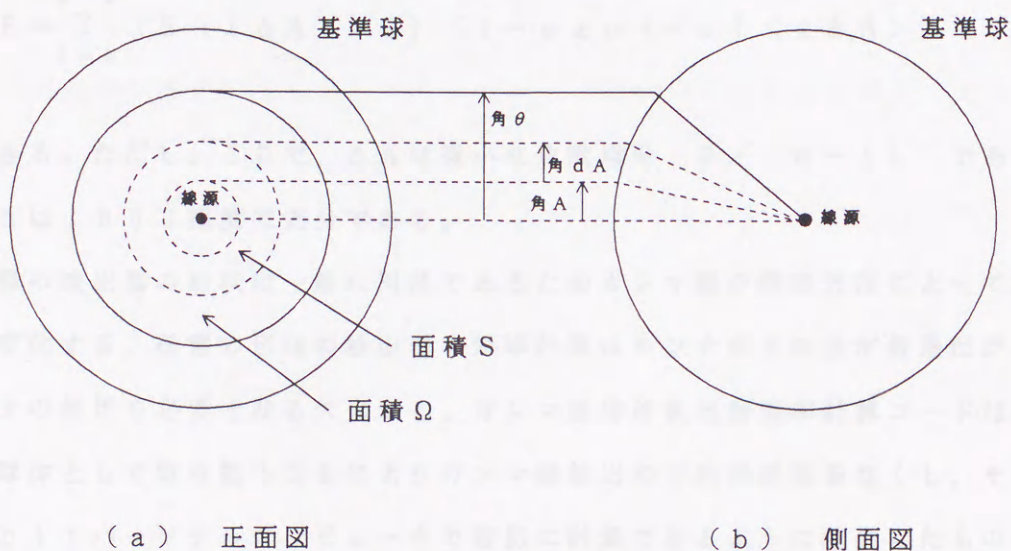


図3.4.2 検出効率計算における積分方法

図3.4.1の配置において線源から球体検出器への接線と線源と検出器の中心とを結ぶ直線とで作る角 θ は、

$$\theta = \sin^{-1}(r/D) \quad (3.4.3)$$

となる。線源から球体検出器を見込む立体角 Ω は、

$$\Omega = 4\pi \sin^2(\theta/2) \quad (3.4.4)$$

と表せる。図3.4.2では基準球(半径1)であるから角 θ で切り取られる面積は Ω に一致する。つぎに角 A と微小な角 dA で切り取られる部分の面積 S を求める。

$$S(A) = 4\pi [\sin^2((A+dA)/2) - \sin^2(A/2)]$$

となる。 (3.4.5)

ここである角 A で検出器に入射したガンマ線が検出される確率 p を積分し効率 E を計算すると、

$$E = \int_0^{\theta} (S(A) / \Omega) [1 - \exp(-\mu x(A))] dA \quad (3.4.6)$$

となる。

(3.4.6) 式を計算に適した形に直すと、

$$E = \sum_{i=0}^{n-1} (S(i \Delta A) / \Omega) [1 - \exp(-\mu l(x \Delta A))] \quad (3.4.7)$$

とできる。ただし、ここで、 ΔA は微小な角度増分 $\theta / (n-1)$ である。通常の場合、 n は 1000 程度で充分である。

実際の検出器の形状は一般に円柱であるためガンマ線の飛来方向によって検出効率が複雑に変化する。任意の形状の検出器の効率計算はモンテカルロ法が最適だが、大型コンピュータの使用を必要とする欠点がある。ガンマ線球体検出器効率計算コードは円柱を等価体積の球体として取り扱うことによりガンマ線検出の方向依存性をなくし、その結果として 32 bit パーソナルコンピュータで容易に計算できるように開発したものである。シミュレーション例の計算時間は約 1~2 分程度であった。本研究の推進において装置設計に有力なツールとなった。

②シミュレーションの実施

まず種々のエネルギーにおけるガンマ線の検出効率を前述のガンマ線球体検出器効率計算コードを使用して計算する。

シミュレーションにおけるガンマ線のエネルギーは 700 KeV (^{137}Cs の 1 次線の 662 KeV 相当)、600 KeV、500 KeV、400 KeV、300 KeV、200 KeV とする。この中で 300 KeV、200 KeV は散乱ガンマ線のエネルギーに対応する。検出器の大きさは入手が最も容易(特に BGO の場合)な直径 50 mm × 長さ 50 mm と直径 25 mm × 長さ 25 mm とする。等価球のそれぞれ半径は 28.62 mm、14.31 mm となる。図 3.4.3 にシミュレーションの幾何学的条件を示す。

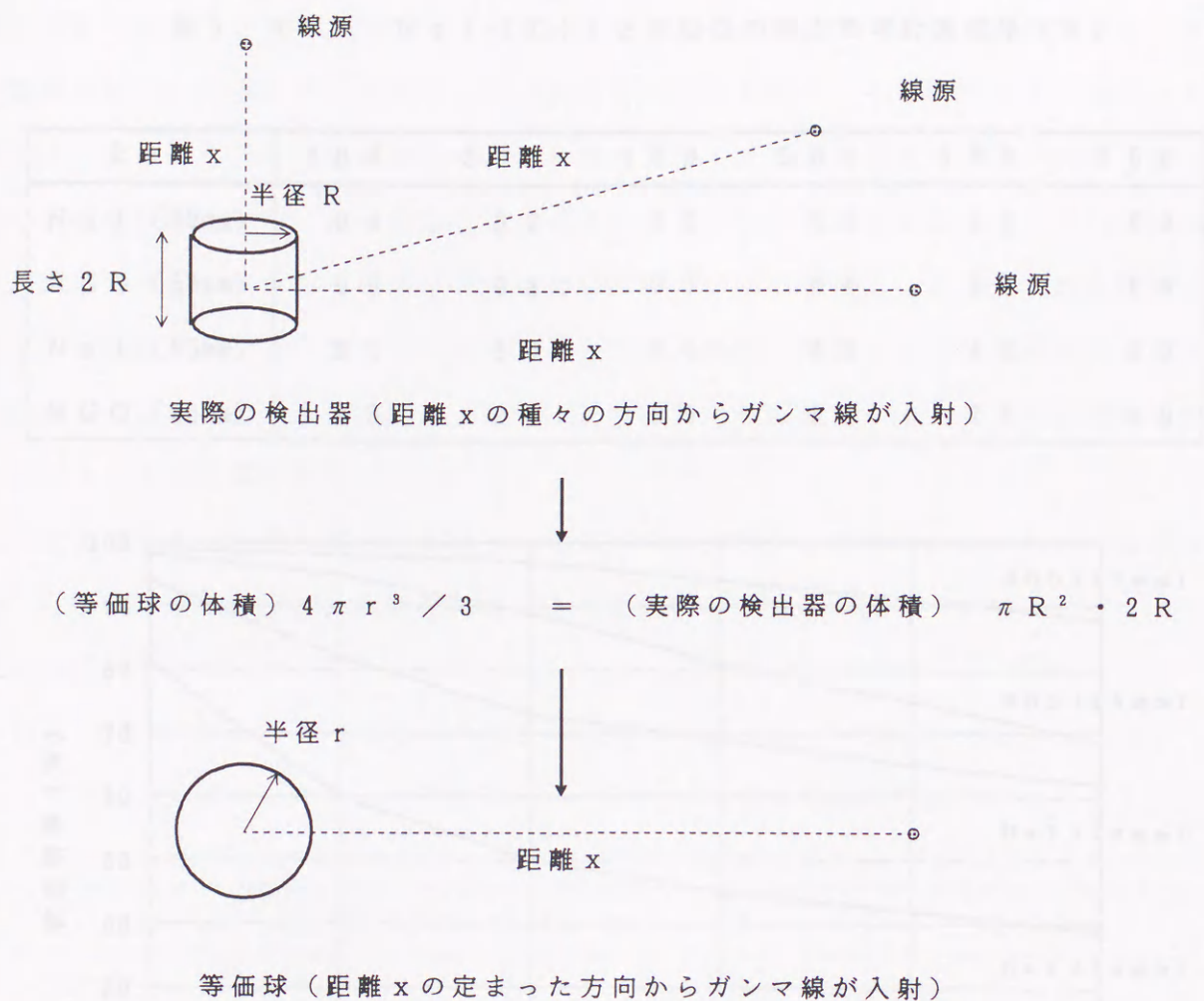


図 3. 4. 3 シミュレーションにおける幾何学的条件

NaI(Tl)の線減衰係数データは応用光研工業カタログ⁹⁾から引用した。またBGOの線減衰係数データはHarshaw社の解説書¹²⁾などから引用した^{14) 15)}。シミュレーション結果を表3.4.3と図3.4.4に示す。

シミュレーションよりガンマ線エネルギーが高くなるにしたがいBGO検出器の検出効率とNaI(Tl)検出器の検出効率の差が大きくなり700KeVでは約30%もBGO検出器が高くなる。したがって1次ガンマ線を測定する透過密度計の場合はBGO検出器が非常に有利となる。BGO検出器は半径25mm×長さ25mmの大きさでもNaI(Tl)検出器の半径50mm×長さ50mmのものよりも高い検出効率をもつ。この特性は検出器の大きさが小さくなればより顕著に現れる。BGO検出器が位置分解能(検出

表 3. 4. 3 NaI (T1) と BGO の検出効率計算結果 (%)

keV	200	300	400	500	600	700
NaI (50mm)	94	82	73	69	65	62
BGO (50mm)	99	98	97	94	91	88
NaI (25mm)	81	60	50	45	42	39
BGO (25mm)	98	95	89	81	75	69

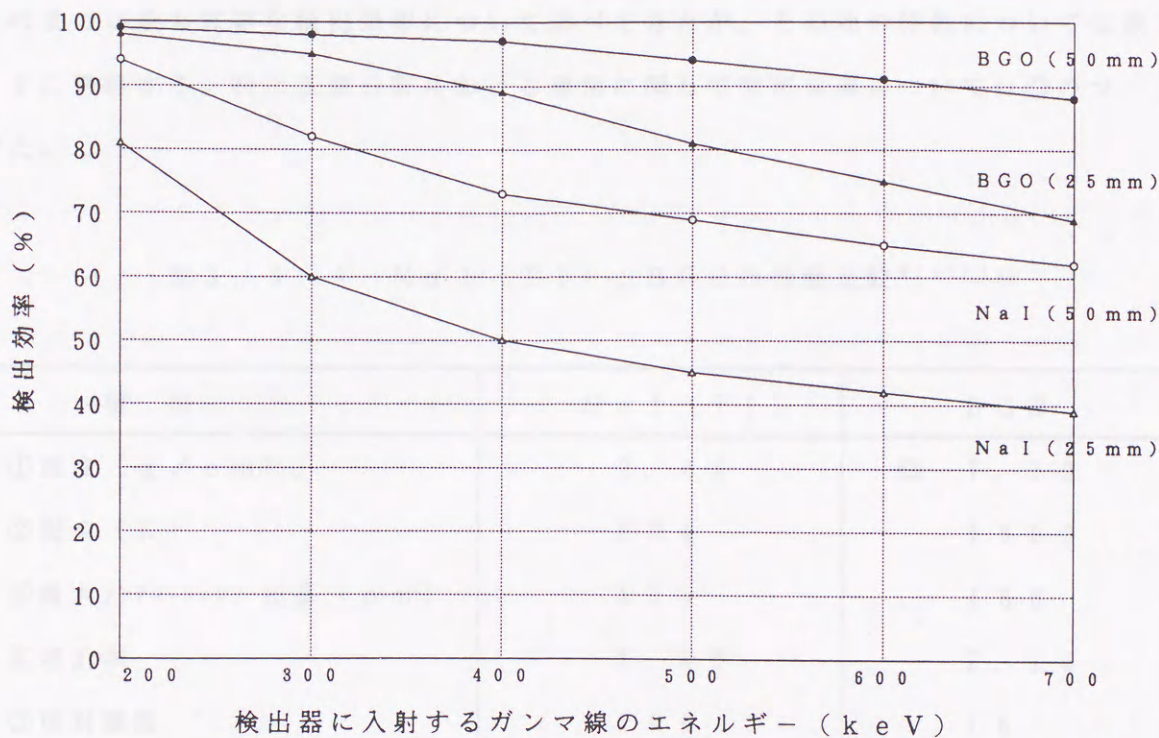


図 3. 4. 4 NaI (T1) と BGO の検出効率比較シミュレーション

器の大きさが小さいほど向上)を重視するCT(コンピュータトモグラフィー)で普及したことと呼応する。つぎに低エネルギー領域の特性を考察する。ガンマ線のエネルギーが400keV以下になると検出効率が急に上昇する。この傾向はNaI(T1)検出器で顕著に観察される。BGO検出器の場合は漸増に近いが50mm、25mmともに90%を越え始める。散乱ガンマ線のエネルギー領域、すなわち300~200keVではBGO検出器はほぼ100%の検出効率となる。NaI(T1)では50mmの場合、80~

95%、25mmの場合は60~80%の検出効率をもつ。散乱ガンマ線の測定が必要な本密度計ではBGO検出器が有利となるが、透過方式の密度計の場合ほどの絶対的な有利さは無くなる。検出器の大きさとしてはBGOを用いる場合、50mmも25mmも検出効率は大きくないが、検出器の体積で8倍の差があり、検出されるガンマ線の数も8倍も異なる。計測精度の指標である統計変動は $\sqrt{8}$ (= 2.8) 倍の相違となる。したがって25mmの検出器で同精度を確保するためには8倍の時間が必要となる。同じ計測時間であれば計測精度が $\sqrt{8}$ (= 2.8) 倍の悪化となる。価格が許せばBGO検出器は50mmの大きさがより適切であり、NaI(Tl)検出器は検出効率90%を目標にすれば50mmの大きさが必須である。

これまでは最も重要な検出効率について述べてきたが、その他の特性については表3.4.4に整理する。特に工業分野における適用に関して有利な点については◎のマークを付けた。

表3.4.4 NaI(Tl)とBGOの特性比較^{9) 11) 12)}

項目	NaI(Tl)	BGO
①密度 (g/cm ³)	3.63	◎ 7.13
②融点 (K)	924	1323
③最大シフト波長 (nm)	415	480
④屈折率	1.85	2.15
⑤相対感度	100	16
⑥シフト減衰定数 (ns)	230	300
⑦時間分解能 (ns)	2.0	4.0
⑧残光 (3ms後の%)	0.5	0.005
⑨シフト温度特性 (%/K)	◎ -0.2	-1.5
⑩潮解性	有り	◎ 無し
⑪劈開性	有り	◎ 無し
⑫相対価格	◎ 1	2-3

①密度は検出効率と直接的に関係しBGOが優れている。⑤相対感度はエネルギー分解能と関係し、スペクトル測定による元素分析では最も重要な因子である。シンチレーション検出器の中ではNaI(Tl)が最大の値を示す。しかしながら密度計測ではガンマ線の数を計数するだけであるので特に必須の要素とはならない。⑨シンチレーション温度特性は小さい方がよいが、接続する光電子増倍管も温度特性を有するためいずれの検出器を採用しても対策が必要である。⑩潮解性は湿度が高い環境では望ましくない性質であり、⑪劈開性は振動などが存在する場合には問題となる。これらの点に関しては密度計の設置環境を完全に整えることは実際には困難であり、BGOが有利と言える。⑫価格に関してはNaI(Tl)の50万円程度に対してBGOは100万円強でありNaI(Tl)が有利である。

(3) 総合評価

実際のプロセスで工業計測器として密度計を使用する観点からガンマ線検出器を考察してきた。シミュレーションおよび各種の特性を考慮し、NaI(Tl)およびBGOの利点・欠点を重みを付けて総合評価すると、本研究の密度計においては直径50mm×長さ50mmのBGO検出器が最適と結論される。

3. 5 自動利得制御 (AGC) の開発

本密度計を実際のプロセスで使用するためには長期安定性を確保する必要がある。密度計の部品自体はエレクトロニクスの進歩によって十分に安定化 (特に信頼性の観点から) しているので、ここでは長期安定性として同じ密度、同じ幾何学的条件において同じガンマ線の計数値が長期に渡って得られることと定義する。

まず長期安定性を阻害する要因を示し、その解決策である自動利得制御 (AGC) について論じる。

3. 5. 1 密度計の長期安定性

密度計の検出部はアナログ系のシンチレーション検出器、フォトマル (光電子増倍管) より構成される。制御部の中では各種アンプ (増幅器)、シングルチャンネルアナライザ (SCA)、高圧電源などがアナログ系である。その他の信号伝送、処理はデジタル系である。各装置の部品の信頼性は充分であるが、それらを組み合わせて増幅などの機能を実現する際にはアナログ系は周囲の環境条件の影響を受ける。一方、デジタル系は影響の度合いが無視できる。周囲の環境条件としては温度、湿度、振動などが考えられるが、温度の変化が最も影響する。実際のプロセスでは温度変化は $10 \sim 50^{\circ}\text{C}$ にも及ぶ。ここで表 3. 5. 1 に各装置の温度変化の影響をまとめる^{16) 17)}。

表からエレクトロニクス回路 (固体電子素子) が主要要素であるアンプ類、SCAなどは温度変化 $10 \sim 50^{\circ}\text{C}$ が生じてても出力は高々 $0.2 \sim 0.8\% / 40^{\circ}\text{C}$ に過ぎないことがわかる。高圧電源の安定性は若干悪く、 $\pm 3.2\% / 40^{\circ}\text{C}$ である。一方、フォトマル (光電子増倍管) の出力は温度変化 $10 \sim 50^{\circ}\text{C}$ に対して $-8\% / 40^{\circ}\text{C}$ も有り補償するための制御が必須である。また、シンチレータも温度変化によって発光の強さが変わり、本密度計で採用するBGOの場合は温度変化 $10 \sim 50^{\circ}\text{C}$ に対して $-60\% / 40^{\circ}\text{C}$ で有り制御が極めて重要な役割となる。

以上のように密度計の主要構成要素の中でシンチレーション検出器 (BGOシンチレータと光電子増倍管) は環境条件 (特に温度変化) の影響を強く受け出力が変化する。実際のプロセスにおいて計測の安定化のためには装置全体の温度制御、あるいは自動利得制御 (AGC) が必要である。しかし温度変化が激しいプロセスの環境 ($10 \sim 50^{\circ}\text{C}$) で

は、前者の方法は冷却装置のみでなく昇温装置まで必要であり本密度計における寸法の制約、整備性を考慮して採用せず、後者の自動利得制御（AGC）を開発・導入することにした。

表 3. 5. 1 密度計の主要構成要素の温度特性

構成要素	温度特性
BGOシンチレータ	-1.5% / °C
フォトマル（光電子増倍管）	-0.2% / °C
各種アンプ（増幅器）	±7% / 1V（高圧）
SCA	±0.0005 ~ 0.002% / °C
各種計数回路（デジタル式）	出力変化は無視できる
高圧電源	±0.08% / °C

3. 5. 2 自動利得制御（AGC）の基本的な方法

自動利得制御（AGC）はスペクトル測定におけるスペクトル（縦軸に計数值、横軸にエネルギーをとったグラフ）の安定化のために研究され、スペクトル安定化回路として実用になっている。これは、実験室内の種々の測定の中で気温の変化が問題となる昼夜、数日を要する場合に効果を発揮する。本研究の密度計は原則的には24時間×30日間の連続運転であり、より以上に自動利得制御（AGC）が重要である。ここではすでに実用化となった自動利得制御（AGC）¹⁸⁾の方法を整理する。

スペクトル安定化回路はある種の方法によりスペクトルの形状（特に位置）を検出し、それを既知の基準の形状と比較して誤差信号を発生し、この誤差信号を負のフィードバック信号としてある回路の利得を直接的（アンプゲイン自身）に、あるいは間接的（フォト

マルの印加電圧などを經由)に制御して形状を元の状態に戻すものである。まず制御対象となる回路を表3.5.2に示す。

表3.5.2 自動利得制御 (AGC) の制御対象回路

	直接的方法	間接的方法
対象回路	<ul style="list-style-type: none"> ・ フォトマル回路 ・ 比例増幅器 ・ A/D変換器 (マルチチャンネル波高分析器 MCA) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ フォトマル回路用の 高圧発生器 (印加電圧 の変化によって結果と して出力パルスが変化)

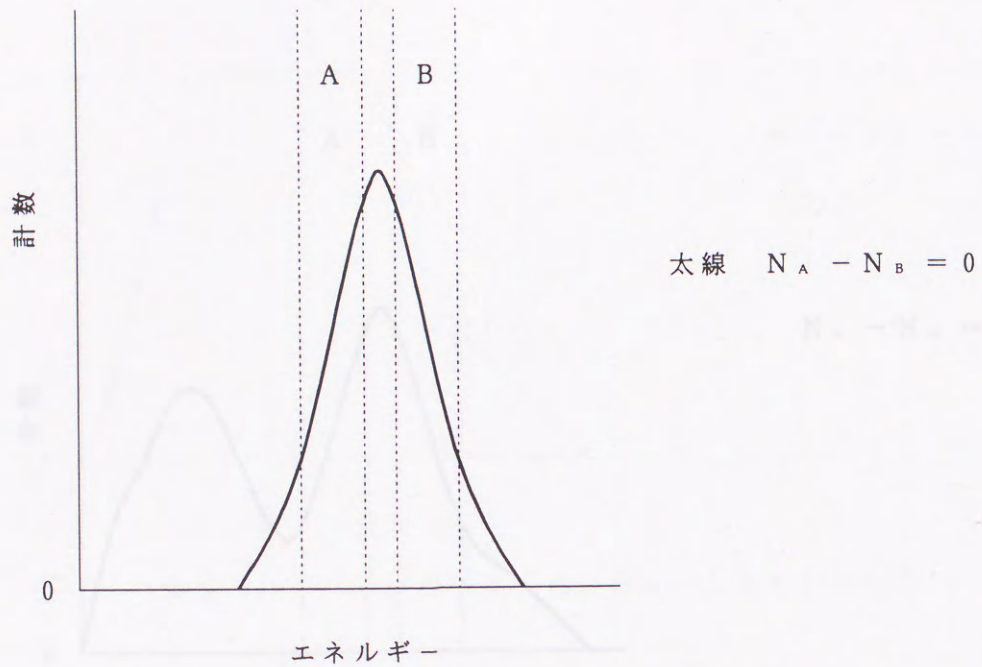
つぎに既知の基準と比較する方法について述べる。基本的には、

- ①測定スペクトルに存在する種々のピークの中で明瞭なピークの形状を利用する
- ②測定スペクトルとは全く別の位置にピークを人工的に作り、その形状を利用する
- ③測定スペクトルのピーク以外の部分の形状を利用する¹⁹⁾
- ④測定スペクトルの形状の特徴をマイクロプロセッサを用いて計算する^{20) 21)}

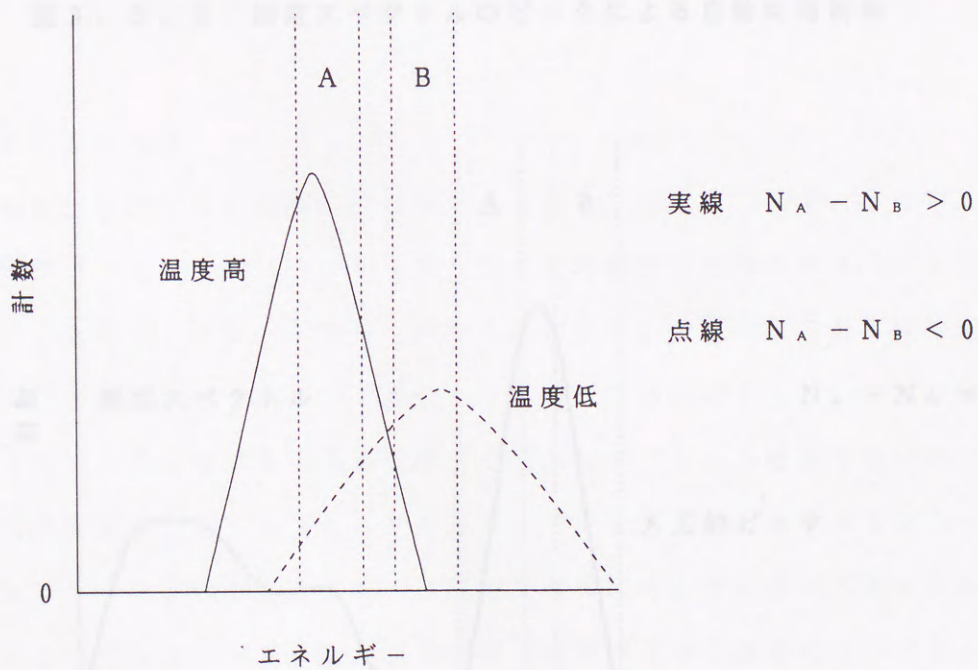
などの方法がある。①、②はピークの発生源の違いがあるのみで本質的には同一の方法である。③は測定スペクトルが分かりやすいピークを示さない場合に有力な方法である。④は汎用的で自由度が大きいが高精度に特徴を計算するには時間が必要な点、および高価な点より選択には慎重にならざるを得ない。

ここでは①～③の方法を説明する。図3.5.1には全ての方法に共通する基準スペクトルと測定スペクトルを比較し誤差信号を発生させるメカニズムを示す。ピークの両側に2台のシングルチャンネル波高分析器 (SCA) のウィンドウ (エネルギー区間) を設定する²²⁾。基準状態 (例えば 20°C) でウィンドウAとウィンドウBの計数の差がゼロになるように利得を調整しておく。温度が上昇すると利得は減少し、ウィンドウAの計数 N_A が多くなり、そしてウィンドウBの計数 N_B は少なくなる。逆に温度が低下すると利得の増加によりウィンドウAの計数 N_A が小さくなり、ウィンドウBの計数 N_B は多くなる。したがって、 $N_A - N_B > 0$ ならば利得を増加、 $N_A - N_B < 0$ ならば利得を減少す

る制御を実施すればある時定数で誤差はゼロに近づく。温度変化は通常は緩やかであるので制御方式としてはP I動作で充分である。



(a) 基準状態のスペクトル



(b) 温度変化による測定スペクトル変化

図 3. 5. 1 自動利得制御 (AGC) の基本原理

図 3. 5. 1 で示した基本原理を応用したものが①、②、③である。応用の様子をそれぞれ図 3. 5. 2、図 3. 5. 3、および図 3. 5. 4 に示す。

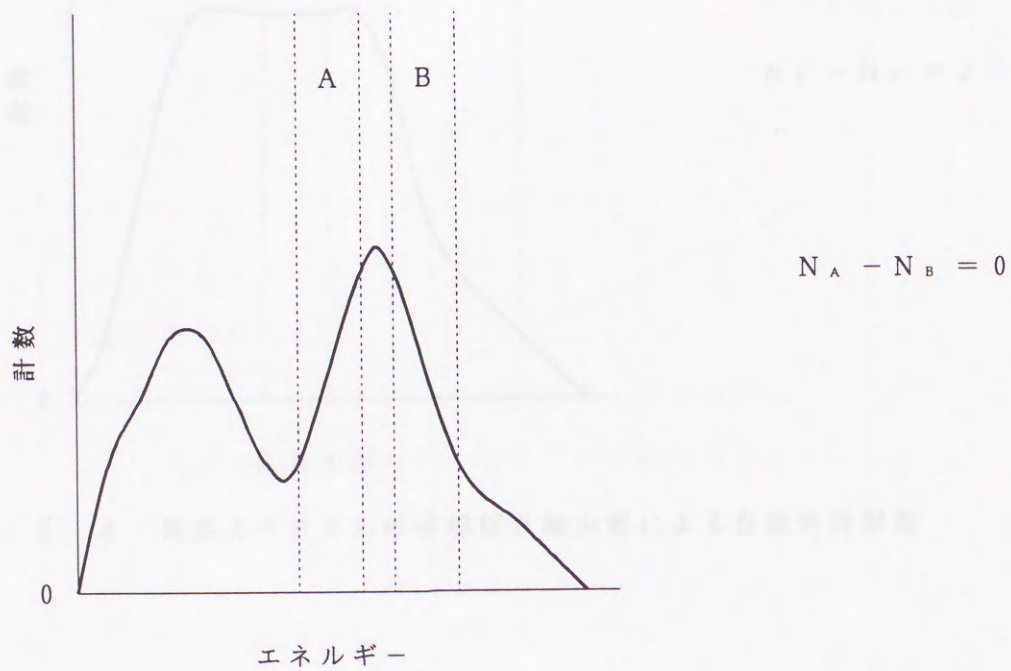


図 3. 5. 2 測定スペクトルのピークによる自動利得制御

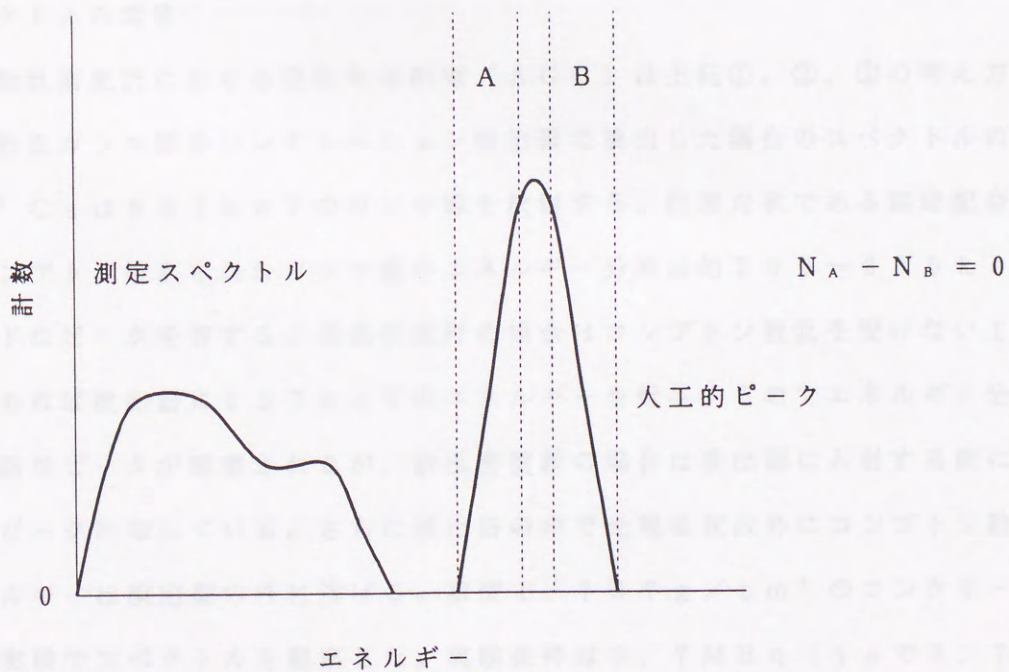


図 3. 5. 3 測定スペクトル以外の人工的ピークによる自動利得制御

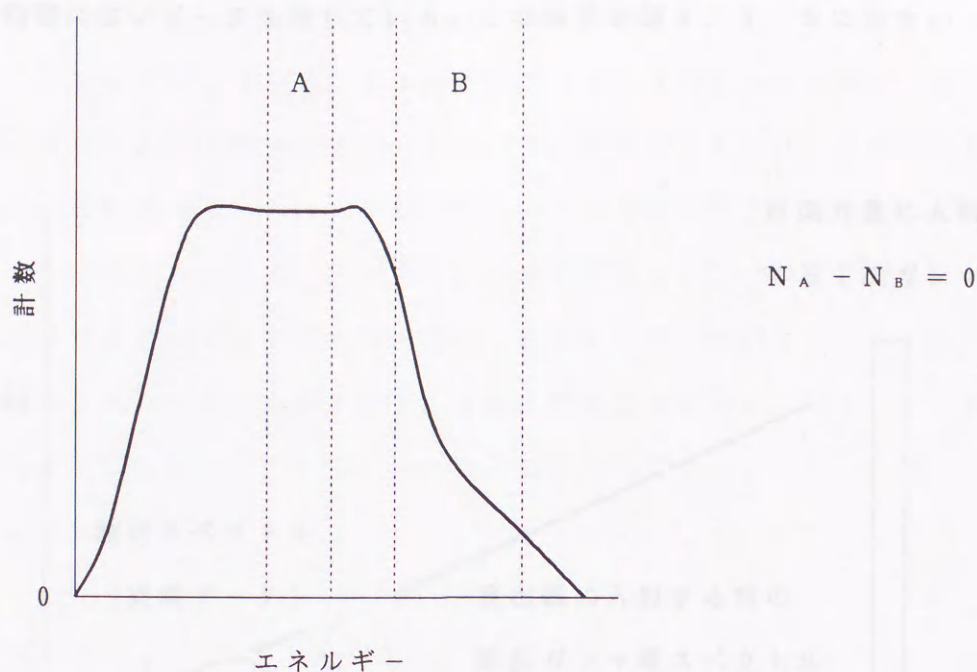


図 3. 5. 4 測定スペクトルの平坦部と減少部による自動利得制御

3. 5. 3 ガンマ線散乱密度計における自動利得制御 (AGC)

(1) スペクトルの考察

ガンマ線散乱密度計における自動利得制御 (AGC) は上記①、②、③の考え方を応用する。まず散乱ガンマ線をシンチレーション検出器で検出した場合のスペクトルの形状を考える。 ^{137}Cs は 662keV のガンマ線を放射する。計測対象である焼結配合原料中で後方にコンプトン散乱されたガンマ線のエネルギー分布は約 $200 \sim 300\text{keV}$ の範囲にブロードなピークを有する。透過密度計の場合はコンプトン散乱を受けない1次ガンマ線が相当あれば検出器に 662keV のエネルギーを付与するのでエネルギー分解能に見合った明瞭なピークが観察されるが、散乱密度計の場合は検出器に入射する前にすでにブロードなピークになっている。さらに検出器の中で光電吸収以外にコンプトン散乱され一部のエネルギーは検出器の外に逃げる。密度 1.707g/cm^3 のコンクリート板を用いた予備実験でスペクトルを観察した。実験条件は 3.7MBq (1sで 3.7M 回崩壊) の ^{137}Cs 、鉛 5cm + タングステン 5cm の複合遮蔽、 $50\text{mm}\phi \times 50\text{mm}1$ の BGO 検出器、線源・検出器間距離 14cm 、コンクリート板までの垂直距離 8cm 、計

数時間 60 s である。この実験により観察される散乱ガンマ線のスペクトルは 50 ~ 250 keV の範囲に広いピークを有している。この様子を図 3.5.5 に示す。

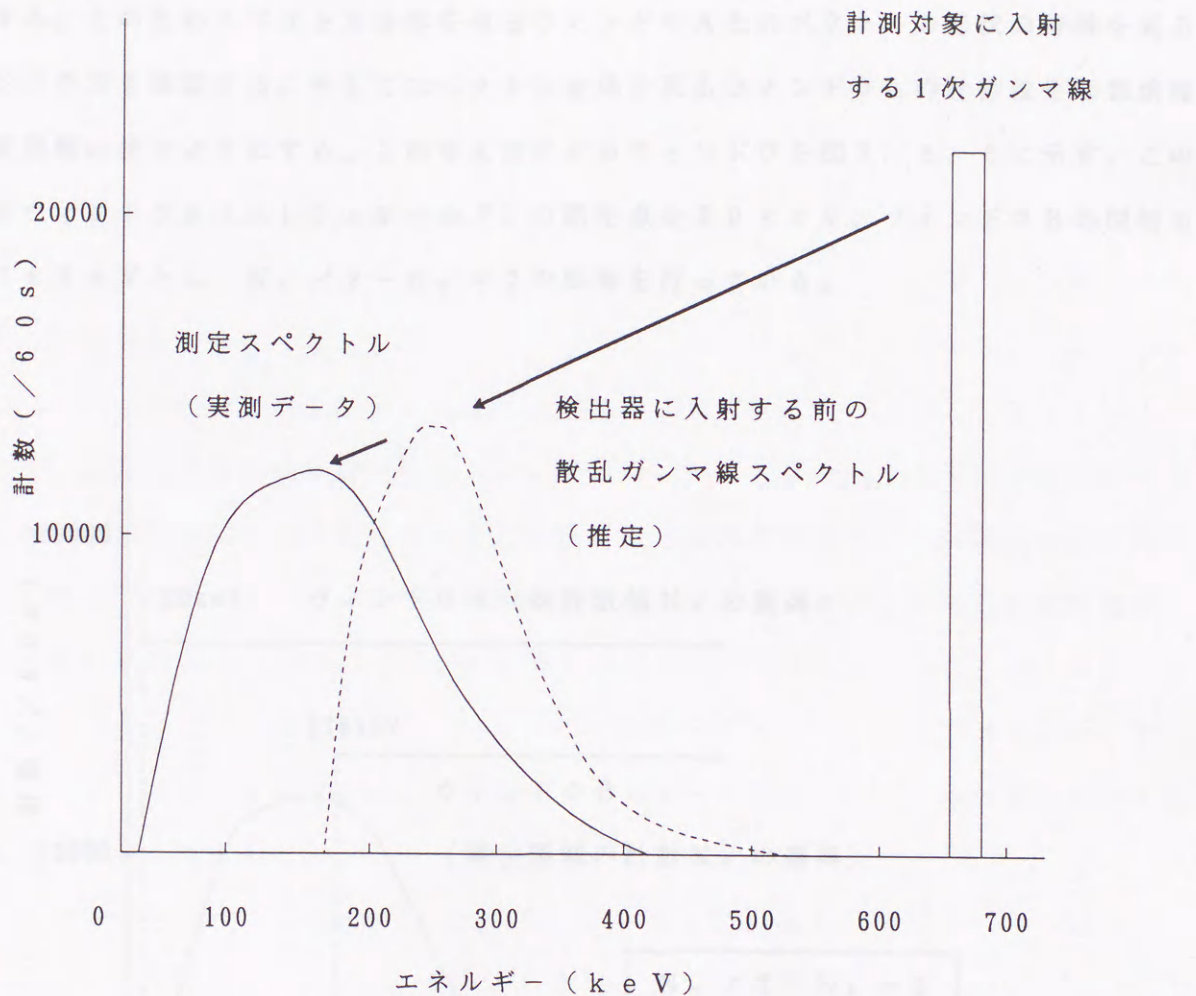


図 3.5.5 スペクトルの変化状態

(2) ウィンドウの設定の考え方

図 3.5.5 から明らかなように測定スペクトルには明瞭なピークが存在しないため、①、②の方式を採用できない。測定スペクトルは③で示した形状に近い。したがって③方式の応用で自動利得制御 (AGC) を検討する。まずウィンドウの設定を考える。従来の考え方はウィンドウの幅を調節して、あるいは利得を調節して N_A と N_B の計数が等しくなる基準状態を設定した。ウィンドウ A、B は利得制御のためのみに設けられたものであった。密度計測の場合はピークの部分の計数値ではなく、あるエネルギーレベル (スレッシュホールドレベル) 以上の総計数値が密度情報をもつ。原理的には利得が変化してもスペ

クトルの形状が変わるだけで総計数値は一定となる。しかし実際の計測においてはフォトマルなどで発生するガンマ線に起因しないノイズが存在するため、スレッシュホールドレベルを設定し、このレベル以下をカットする必要がある。スレッシュホールドレベルが存在するため利得の変化によって測定スペクトルの一部がカットされたり、ノイズが加わってきたりする。このためスペクトル全体を見るウィンドウAとスペクトルの形状の特徴を見るウィンドウBを設定する。そしてスペクトル全体を見るウィンドウAの計数値を制御情報と密度情報に使うようにする。この考え方によるウィンドウを図3.5.6に示す。この例ではウィンドウA（スレッシュホールド）の開始点を20keV、ウィンドウBの開始点を176keVとし、 $N_A / 2 - N_B = 0$ の制御を行っている。

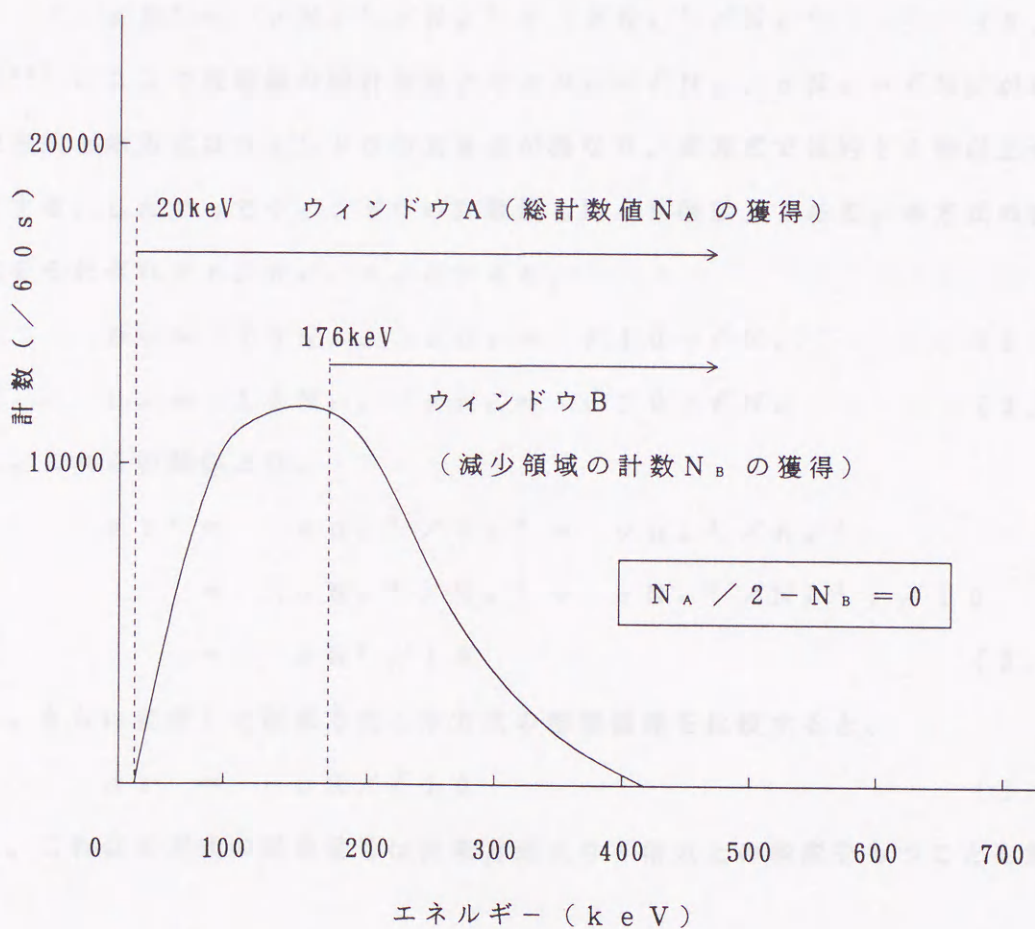


図3.5.6 密度計測におけるウィンドウの設定方法

本方式のウィンドウ設定の利点は上述のほかに制御情報としての信頼性向上にある。例を示して説明する。狭いウィンドウの例として N_A が100、 N_B が90の場合、広いウ

ウィンドウの例として N_A が 10000、 N_B が 9990 の場合を考える。両者とも $N_A - N_B$ は 10 であるが測定スペクトルの形状のずれは前者の方が大きく、後者はほとんど無視できる差である。つまり単純な差のみを制御情報とすることは安定性の確保の点では問題がある。そこで相対変動の概念を導入し、 $(N_A - N_B) / N_A$ を誤差信号と考える。前者の例では誤差信号は 0.1、後者の例では 0.001 となりスペクトルの乱れの大きさが反映されている。ここで誤差伝搬理論を用いて誤差信号の精度を従来方式と本方式を比較する。

まず、 $(N_A - N_B) / N_A$ を変形して、

$$R = 1 - N_B / N_A \quad (3.5.1)$$

とする。標準偏差を σ とすると、

$$\sigma R^2 = \sigma N_B^2 / N_B^2 + \sigma N_A^2 / N_A^2 \quad (3.5.2)$$

となる²³⁾。ここで放射線の統計理論より $\sigma N_A = \sqrt{N_A}$ 、 $\sigma N_B = \sqrt{N_B}$ が成り立つ。

従来方式と本方式はウィンドウの大きさが異なり、本方式では約 10 倍以上大きく取ることにする。したがってウィンドウの計数値も約 10 倍以上である。本方式の標準偏差、計数値をそれぞれ σr 、 n_A 、 n_B とすると、

$$n_A = 10 N_A, \quad \sigma n_A = \sqrt{10} \cdot \sqrt{N_A} \quad (3.5.3)$$

$$n_B = 10 N_B, \quad \sigma n_B = \sqrt{10} \cdot \sqrt{N_B} \quad (3.5.4)$$

である。これらの関係より、

$$\begin{aligned} \sigma r^2 &= \sigma n_B^2 / n_B^2 + \sigma n_A^2 / n_A^2 \\ &= (\sigma N_B^2 / N_B^2 + \sigma N_A^2 / N_A^2) / 10 \\ &= \sigma R^2 / 10 \end{aligned} \quad (3.5.5)$$

となる。さらに変形して従来方式と本方式の標準偏差を比較すると、

$$\sigma r = \sigma R / \sqrt{10} \quad (3.5.6)$$

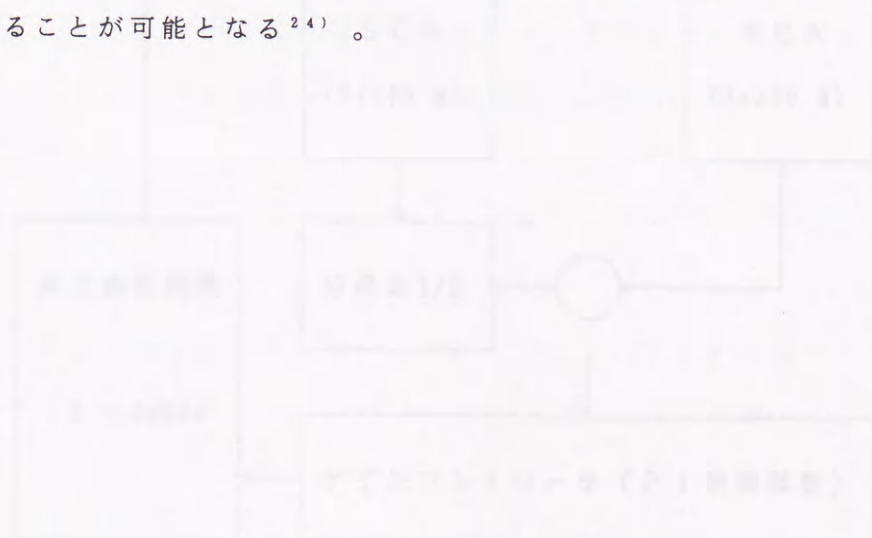
である。これは本方式の誤差信号は従来方式より 3 倍以上の精度をもつことを意味する。

(3) 自動利得制御 (AGC) の装置構成

自動利得制御 (AGC) の考え方を各機能の装置を組み合わせ実現したものを図 3.5.7 に示す。図中の前置増幅器はパルスの出力を長距離伝送するための増幅器、線型増幅器は測定目的に応じた増幅特性を有する増幅器で、直接的には自動利得制御には関係しない。図中で自動利得制御に直接関係する装置は光電子増倍管 (高圧回路の部分)、SC

A、ゲインコントローラ（分周器を含む）、高圧調整装置である。

つぎに制御動作を説明する。ウィンドウB（176 keV以上）のSCAからのパルスを一定時間（60 s）計数すると N_B となる。同様にウィンドウA（20 keV以上）のSCAからのパルスを一定時間（60 s）計数すると N_A となる。（2）のウィンドウの考え方では N_A 、 N_B を用いて $N_A / 2 - N_B = 0$ となる制御を行うことを述べた。厳密に $N_A / 2 - N_B = 0$ を満たすためには N_A 、 N_B が判っていないなければならない。つまり60 sの間に計数して、その後に制御をかける動作である。連続的な制御ではなく離散的制御といえる。簡単なアナログ回路の組合せで離散的制御を実行することは不可能であるし、必要性もないので、 $N_A / 2 - N_B = 0$ の関係を連続的なアナログ関係として取り扱う装置構成をする。まずウィンドウAからのパルスを分周器に入力する。設定は1/2とする。これは分周器にパルスが2回入ると、1回のパルスを出力する動作である。このパルス出力とウィンドウBからのパルス出力を逆符号で重ね合わせると瞬時（例えば1 s）の $N_A / 2 - N_B$ の値を示すし、重ね合わせを60 s間蓄積すれば（2）で述べた $N_A / 2 - N_B$ となる。しかも60 sの移動平均の値で連続制御となる特徴がある。実際の動作はゲインコントローラ（中身はPI制御）の中で処理され、出力としての操作信号は高圧調整装置に送られ光電子増倍管の高圧を時々刻々変化させ、スペクトルの形状を基準状態に合わせ込む。この制御によって10～50°Cまでも変動するフィールドで本密度計を連続使用することが可能となる²⁴⁾。



B G O 光電子増倍管

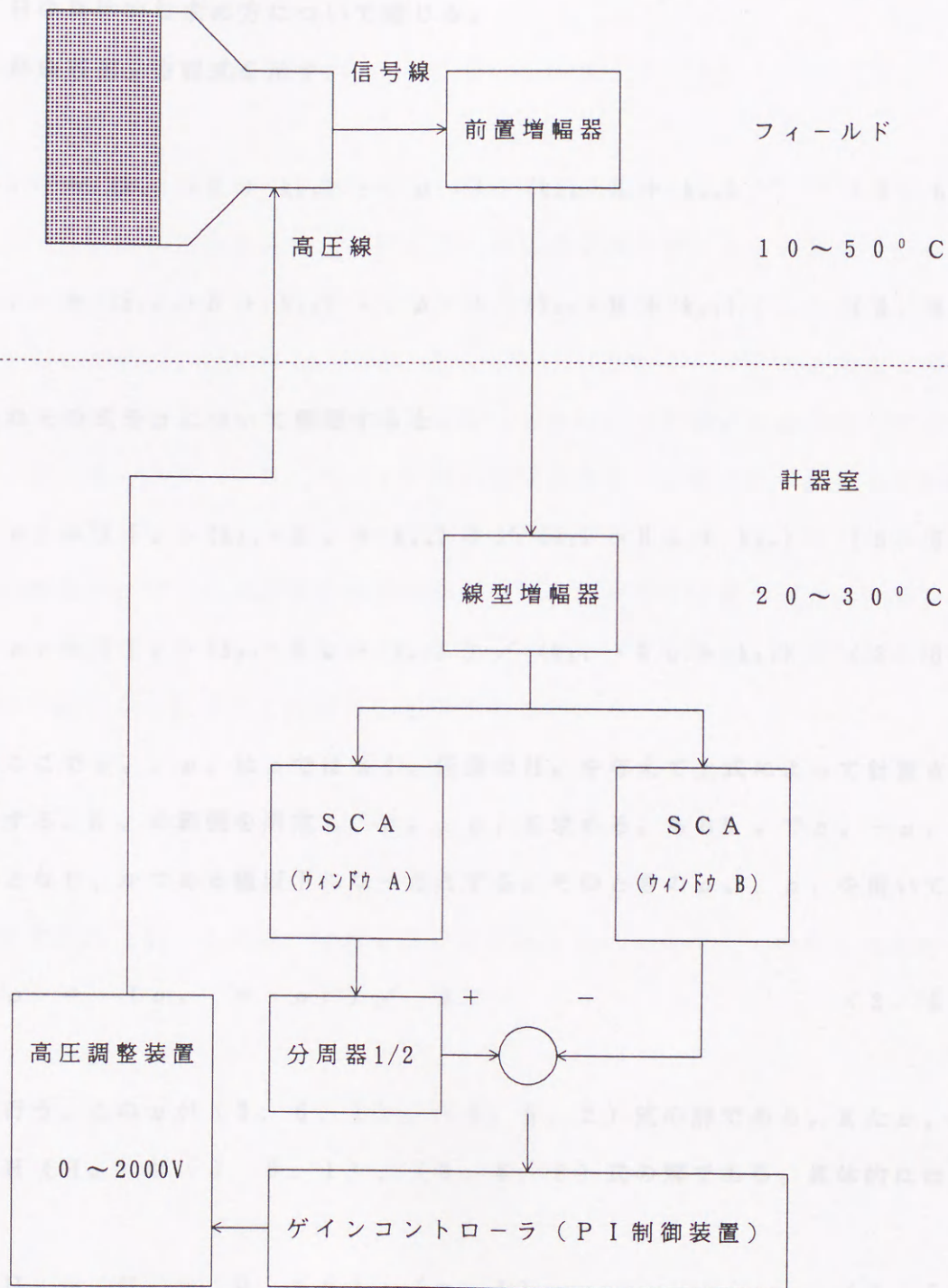


図 3 . 5 . 7 自動利得制御 (A G C) の装置構成

3. 6 線源・検出器間2重距離方式演算

ここでは線源・検出器間2重距離方式における非線形連立方程式から密度 ρ 、高さ(垂直距離) H の具体的な求め方について論じる。

再度、非線形連立方程式を示す。

$$I_n = (k_{1n} \cdot H + k_{2n}) \cdot \rho + (k_{3n} \cdot H + k_{4n}) \quad (3. 6. 1)$$

$$I_r = (k_{1r} \cdot H + k_{2r}) \cdot \rho + (k_{3r} \cdot H + k_{4r}) \quad (3. 6. 2)$$

つぎにこれらの式を ρ について整理すると、

$$\rho_n = [I_n - (k_{3n} \cdot H_m + k_{4n})] / (k_{1n} \cdot H_m + k_{2n}) \quad (3. 6. 3)$$

$$\rho_r = [I_r - (k_{3r} \cdot H_m + k_{4r})] / (k_{1r} \cdot H_m + k_{2r}) \quad (3. 6. 4)$$

となる。ここで ρ_n 、 ρ_r は ρ ではなく、任意の H_m を与えて上式によって計算されるものと解釈する。 H_m の範囲を限定し、 ρ_n 、 ρ_r を求める。ある H_m で $\rho_n - \rho_r$ の絶対値が最小となり、かつある値以下になったとする。そのときの ρ_n 、 ρ_r を用いて、

$$\rho = (\rho_n + \rho_r) / 2 \quad (3. 6. 5)$$

の計算を行う。この ρ が(3. 6. 1)、(3. 6. 2)式の解である。また ρ_n 、 ρ_r を与える H (H_m)が(3. 6. 1)、(3. 6. 2)式の解である。具体的には、

$$H_m = H_L + 0.001 \cdot (n - 1) \quad (3. 6. 6)$$

$$H_L \leq H_m \leq H_H \quad (3. 6. 7)$$

とする。すなわち H_m の値を H_L から0.001ずつ H_H まで変化させ、 $\rho_n - \rho_r$ の絶

対値が最小になったときの H_m から ρ_0 、 ρ_1 を計算するのである。実際の密度計では、 H は約 $8 \sim 10$ cm、安全を見て、 $6 \leq H_m \leq 12$ とする。また、 ρ の範囲は $1.5 \sim 2.0$ g/cm³ である。ここで解の条件をまとめると、

$$(6 \leq H \leq 12) \cap (1.5 \leq \rho \leq 2.0) \quad (3.6.8)$$

となる。この解き方の利点は必ず解が求められることにある。つまり、(3.6.8) 式を満足する (ρ, H) が求まるか、存在しないかが必ず判明するという意味である。さらに本方法の特徴は、方程式の各係数、入力されるガンマ線数 I_0 、 I_1 に誤差が多少あっても解けることである。なぜなら、(3.6.1)、(3.6.2) 式の厳密な解法を用い根の公式を適用するとルートの中が誤差によって負になった場合は解けなくなるが、本方法では(3.6.3)、(3.6.4) 式の分母は大きな正数であるから必ず計算を続けられるからである。さらに、(3.6.7) 式を満足する2組の (ρ, H) が存在する場合は厳密な方法ではどちらが真実の解かわからないが、本方法は最小の $\rho_0 - \rho_1$ の絶対値はただ一つに決定できるので実用的といえる。ただし、その場合、求められた解が真実かどうかの保証はなくなることに留意しておく必要がある。

3.7 まとめ

以上の要素研究を通して線源・検出器間2重距離方式によるガンマ線散乱密度計の設計が可能になった。

第3章の参考文献

- 1) 村上悠紀雄, 他:放射線データブック, 27, 地人書館(1982)
- 2) 日本アイソトープ協会:ガンマ線源カタログ
- 3) Amersham:Radioisotope catalog
- 4) G. F. Knoll:Radiation Detection and Measurement, 66, Jhon Wiley and Sons(1989)
- 5) J. H. Kaya, et al:Nucl. Instr. and Meth., 113, 5(1973)
- 6) 玉虫文一, 他:理化学辞典 第3版, 岩波書店(1973)
- 7) K. Umiastock:Gamma-ray Absorption Coefficient for Non-homogeneous Materials, Nucl. Instr. and Meth., 141, 347/351(1977)
- 8) G. F. Knoll:Radiation Detection and Measurement, 257, 330, 347, Jhon Wiley and Sons(1989)
- 9) 応用光研工業:タリウム活性化酸化ナトリウムカタログ
- 10) ニコラス ツルファニデス:放射線計測の理論と演習, 211, 現代工学社(1986)
- 11) Harshaw Chemicals:Nuclear Detectors-Bismuth Germanate(1982)
- 12) Harshaw Chemicals:Bismuth Germanate Detectors(1986)
- 13) Y. Shirakawa:Rapid Analysis of Carbon and Oxygen in Steel based on Fast Neutron Interactions, Harwell Report(1986)
- 14) A. E. Evans Jr:Gamma-ray Response of a 38mm Bismuth Germanate Scintillator, IEEE Trans. Nucl. Sc., 27-1, 172/175(1980)
- 15) D. M. Drake, et al:Bismuth Germanate Scintillator as Detectors for High Energy Gamma Radiation, Nucl. Instr. and Meth., 188, 313/317(1981)
- 16) EG & G ORTEC:Nuclear Instruments and Systems(1986-1987)
- 17) 浜松フォトニクス:光電子増倍管カタログ(1991)
- 18) G. F. Knoll:Radiation Detection and Measurement, 289, 294, Jhon Wiley and Sons(1989)
- 19) M. Matoba, et al:Stabilization of Spectrum with No Reference Peaks, Nucl. Instr. and Meth., 92, 153/153(1971)
- 20) J. Braunsfurth, et al:A Digital Gain Stabilizer for Large Volume Organic

- Scintillation Detectors, Nucl. Instr. and Meth., 133, 549/552(1976)
- 2 1) M. Brendle: A Microprocessor-Controlled Digital Spectrum Stabilizer,
Nucl. Instr. and Meth., 141, 577/586(1977)
- 2 2) M. Yamashita: A Pulser-Controlled Dual Window Unit for Use in Gain
Stabilization of Scintillation Detectors, Nucl. Instr. and Meth.,
114, 75/82(1974)
- 2 3) ニコラス ツルファニデス: 放射線計測の理論と演習, 54, 現代工学社
(1986)
- 2 4) Y. Shirakawa, et al: An In-stream Gamma-ray Scatter Gauge for Sintering Plant
Control in the Steel Industry, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 3-2,
147/156(1989)

測定精度の向上を図るには、検出器の特性を十分に把握し、その特性を補正して測定精度を向上させる必要がある。

(2) 計測条件
計測時間、計測位置についてはそれぞれを決定し、その条件を厳格に守る必要がある。

(3) 測定条件
測定条件を示した測定条件とする。

① 検出器の固有電圧	1.5 - 2.0 V/cm ²
② 検出器とその固有電圧	1.5 - 2.0 V/cm ²
③ 成分とその固有電圧	F, O, ...
④ (検出器の固有電圧)	...
⑤ SiO ₂	4.75 Wt%
⑥ Al ₂ O ₃	1.81 Wt%
⑦ FeO	1.48 Wt%
⑧ CaO	0.73 Wt%
⑨ H ₂ O	0.46 Wt%
⑩ 成分の固有電圧	...
⑪ 検出器とその固有電圧	...
⑫ 検出器	...

第4章 ガンマ線散乱密度計の設計

本章では提案した密度計測原理を具現化する密度計を要素研究の結果を反映して設計する。まず設計条件を挙げ、つぎに各部の設計について詳細に述べる¹⁻³⁾。

4.1 設計条件

ここでは詳細設計の前提となる設計条件について述べる。設計条件としては線源条件、計測条件、原料条件、環境条件、設置条件がある。

(1) 線源条件

線源の強さは法規制を受けない 3.7MBq ($100\mu\text{Ci}$) 以下とする。

(2) 計測条件

計測時間、計測精度についてはそれぞれ 60s 程度、 $\pm 0.05\text{g/cm}^3$ とする。

(3) 原料条件

下記に示した原料条件とする。

①密度とその変動範囲	1.5 ~ 2.0	g/cm^3
②粒度とその変動範囲	1.5 ~ 2.0	$\text{mm}\phi$
③成分とその変動範囲	Fe_2O_3	69.05 wt%
(実際の配合例)	CaO	8.93 wt%
	SiO_2	4.79 wt%
	Al_2O_3	1.61 wt%
	MgO	1.48 wt%
	FeO	3.78 wt%
	C	3.76 wt%
	H_2O	6.60 wt%
	各成分の相対変動	$\pm 10\%$
④層厚とその変動範囲	設定	55 ~ 60 cm
	変動	-2 cm (下がる方向)

(4) 環境条件

環境条件は温度 10 ~ 50 °C、湿度 90% 未満とする。

(5) 設置条件

密度計は焼結機への設置の関係から、密度計~焼結原料表面までの垂直距離は 5 cm 以上とする。

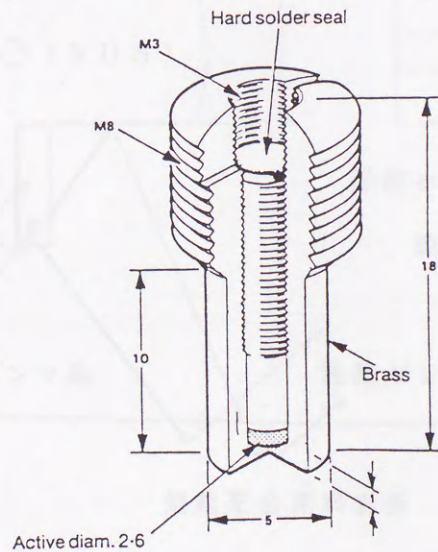
4.2 線源部の設計

線源部は線源およびシャッターより構成される。以下にそれぞれの仕様と構成図を示す。

(1) 線源

- | | |
|-------------|--------------------------------------|
| ・線源の種類 | ^{137}Cs |
| ・線源の強さ(放射能) | 3.7 MBq ($\pm 0.4\%$) |
| ・線源本体の形状 | 直径 2.8 mm × 長さ 0.5 mm |
| ・線源ホルダーの形状 | 長さ 18 mm、M8 のネジをもつ真ちゅう製の外筒と線源を固定する内筒 |

組立の様子を図 4.2.1 に示す。



X. 249

Safety performance testing

ISO classification

C44343

図 4.2.1 線源の組立図

(2) シャッター

シャッターは開の状態（照射の状態）で焼結配合原料にガンマ線を十分に照射でき、閉の状態（非照射の状態）で遮蔽部に格納できて漏洩を防ぐ構造とする。

- ・シャッターの方式 手動による回転方式
- ・シャッターの材質 SUS304
- ・シャッターの形状 直径60mmの円盤

図4.2.2にシャッターの構造を示す。図中の太線は不要な方向のガンマ線を遮蔽する役目をもつ。同時に一部のガンマ線を再度、焼結配合原料方向へ散乱させる働きを期待したものである。

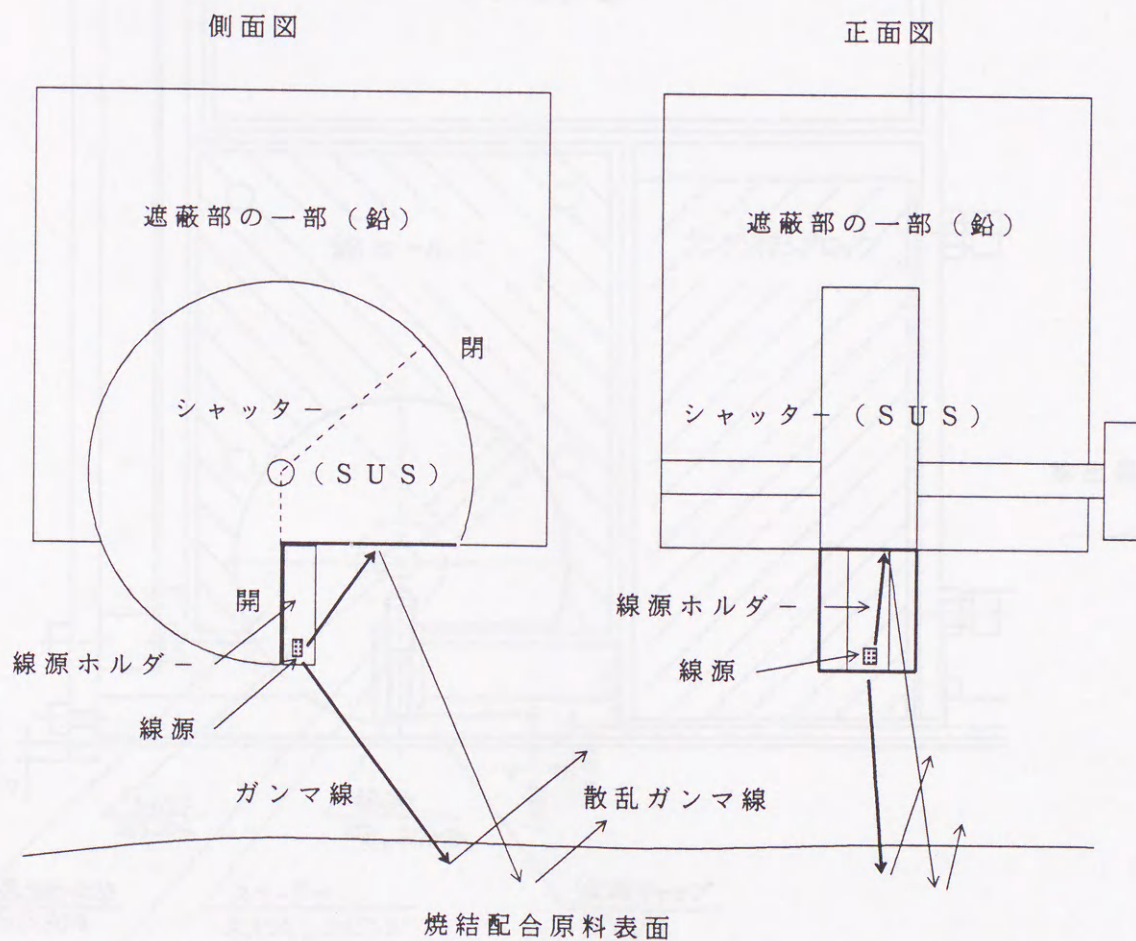


図4.2.2 シャッターの基本構造

4. 3 遮蔽部の設計

遮蔽部は縦10 cm×横10 cm×厚さ5 cmのタングステン（純度99%）を用いることにする。これにより遮蔽を透過し検出器に入射する不要なガンマ線は高々0.03%である。線源部のシャッター機構が閉の場合の遮蔽として周りを10 cm×横10 cm×厚さ10 cmの加工の容易な鉛を使用する。これは検出器に入射する不要なガンマ線を減じるだけでなく、シャッターが閉の場合に外に漏洩するガンマ線を減らすものである。図4.3.1に遮蔽部の構造を示す。

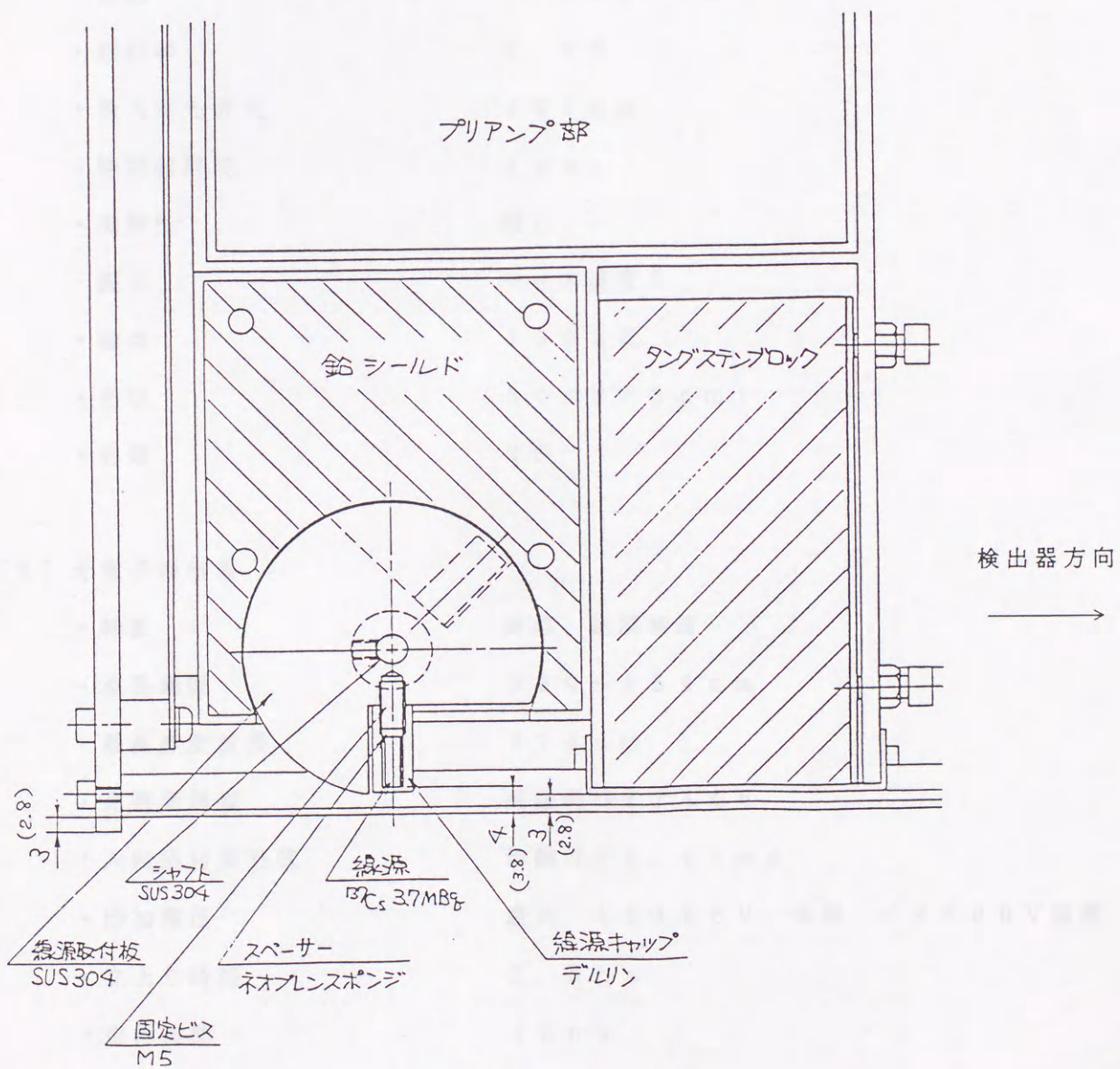


図4.3.1 遮蔽部の構造

4. 4 検出部の設計

検出部はシンチレータ、光電子増倍管よりなる検出器と検出器の位置を設定するスライド機構より構成される。以下に主たる仕様を示す。

(1) シンチレータ

・種類	ビスマスジャーマネイド (BGO)
・組成	$\text{Bi}_{14}\text{Ge}_{13}\text{O}_{12}$
・密度	7.13 g/cm^3
・屈折率	2.15
・最大蛍光波長	480 nm
・時間分解能	$4 \mu\text{s}$
・潮解性	無し
・固さ	モース硬度 5
・融点	1323 K
・形状	$5 \text{ cm } \phi \times 5 \text{ cm l}$
・台数	2台

(2) 光電子増倍管

・特徴	高温、耐震構造
・波長範囲	300 ~ 650 nm
・最高感度波長	375 nm
・光電面種類	高温用バイアルカリ
・入射窓材質形状	珪酸ガラス、 $5 \text{ cm } \phi$
・印加電圧	最大 +2400 V、常用 +2000 V程度
・立上り時間	2.3 ns
・走行時間	45 ns
・台数	2台

(3) スライド機構

・スライド範囲

近い方の検出器中心と線源までの距離

(線源・検出器間距離) 14 ~ 24 cm

遠い方の検出器中心と線源までの距離

(線源・検出器間距離) 19 ~ 28 cm

図4.4.1に検出部の構造(含む線源部、遮蔽部)を示す。

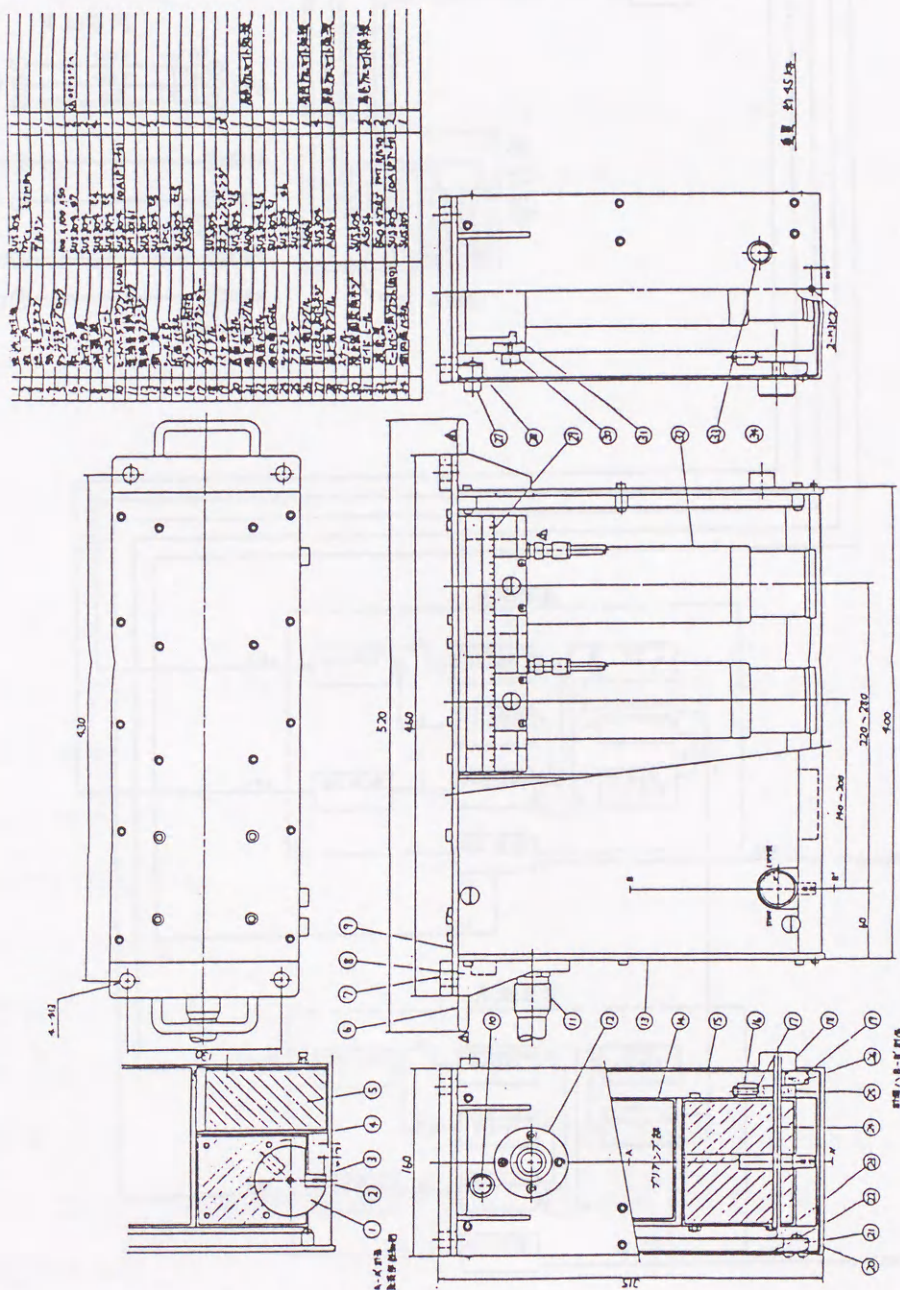


図4.4.1 検出部の構造(含む線源部、遮蔽部)

4. 5 制御部の設計

自動利得制御回路、および信号処理回路、電源などで構成された制御部のブロック回路を図4. 5. 1に示す。

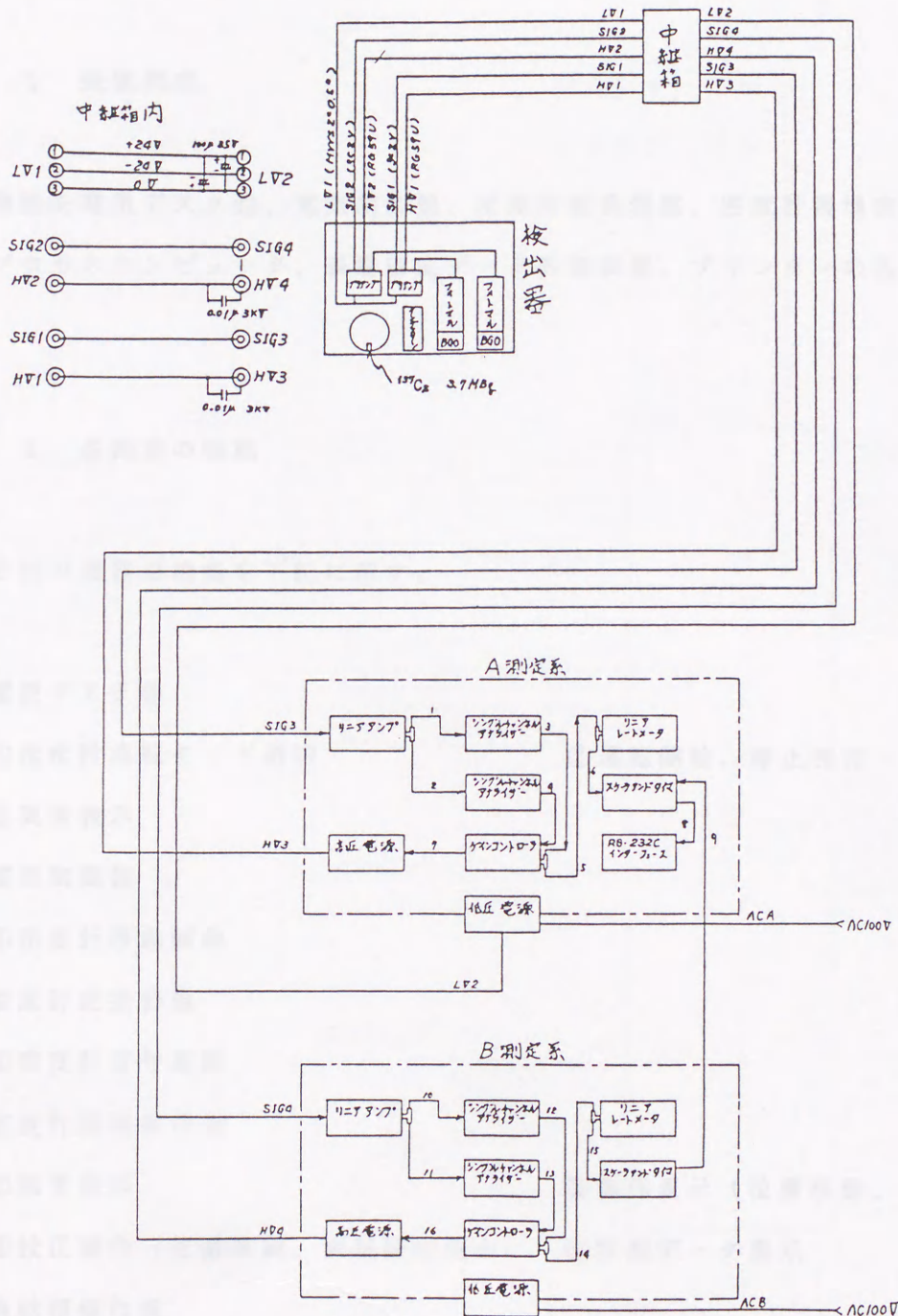


図4. 5. 1 制御部のブロック回路

4. 6 演算部の設計

焼結機の幅方向7箇所を表層密度を線源・検出器間2重距離方式を用いて演算し、CRT表示、プリンター印字および外部表示（プロセスコンピュータへの伝送など）、さらに装置の動作制御の機能を有する演算部（含む入出力部）の設計（機能設計）について述べる。

4. 6. 1 装置構成

上記機能を電気デスク盤、電気制御盤、密度計変換器盤、密度計現場表示盤、3焼結計装盤、プロセスコンピュータ、表層密度データ処理装置、プリンターの各機器により実現する。

4. 6. 2 各機器の機能

それぞれの機器の機能を下記に示す。

(1) 電気デスク盤

- ①密度計運転モード選択
- ②運転開始、停止操作
- ③異常表示

(2) 電気制御盤

- ①密度計移動制御

(3) 密度計変換器盤

- ①密度計信号変換

(4) 密度計現場表示盤

- ①異常表示
- ②動作表示（位置移動、計測）
- ③校正操作（位置移動、測定開始指令）
- ④計測データ表示

(5) 焼結機操作盤

- ①状態表示（測定中、停止、校正中）
- ②計測データ表示
- ③パレット動作検出

(6) プロセスコンピュータ

- ① 計測データ取り込み (位置、密度)

(7) 表層密度データ処理装置

- ① 密度計データ演算
- ② 運転モード監視
- ③ 異常監視
- ④ 密度計移動監視
- ⑤ データ表示、出力

(8) プリンターおよびCRT (含むキーボード)

- ① 密度データ出力
- ② 設定データ出力
- ③ 異常データ出力
- ④ 各種設定操作

以上の各機器を内蔵した演算部を図4.6.1に示す。

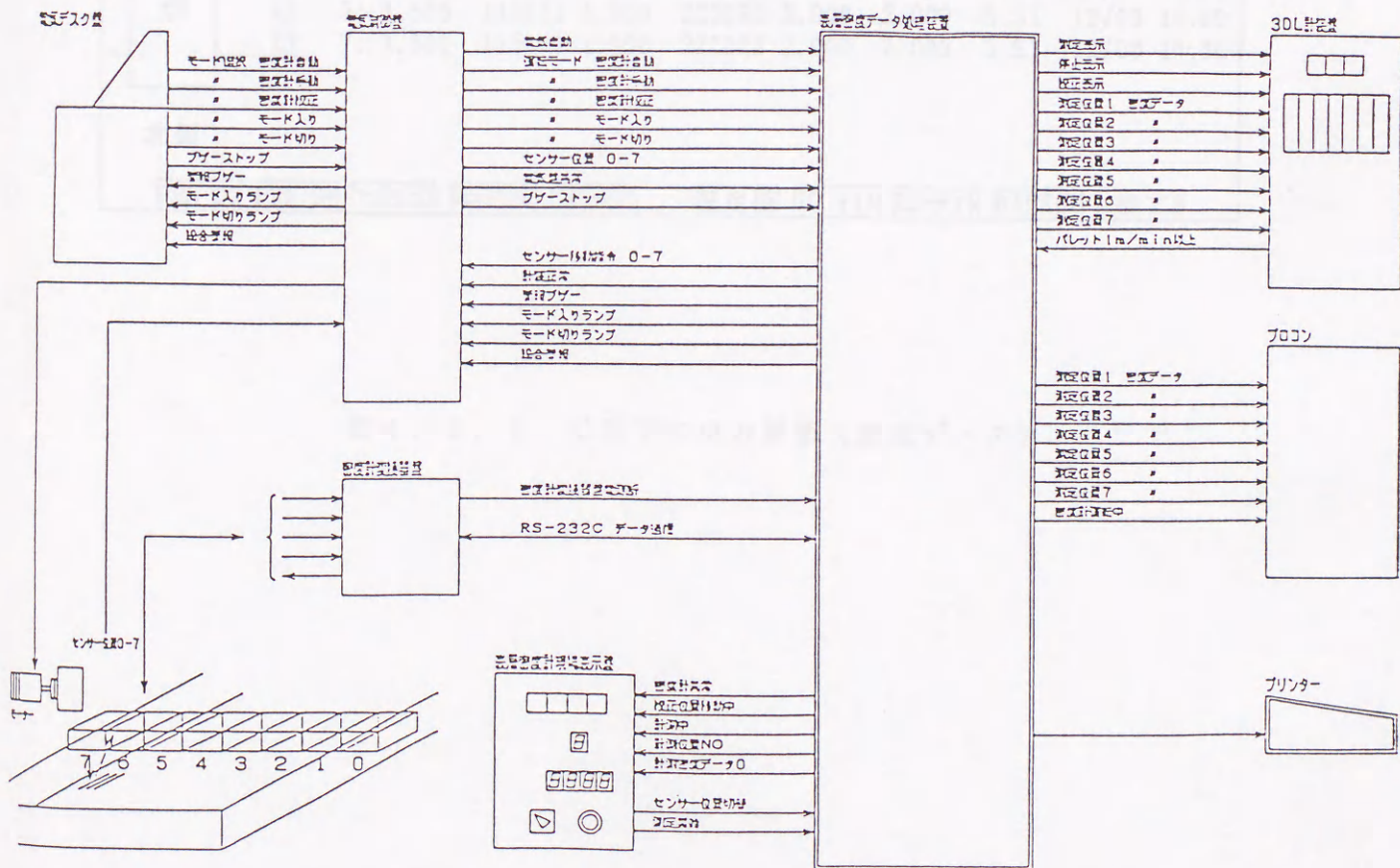


図4.6.1 演算部の構成

またCRTの出力画面（密度データ）の例を図4.6.2に示す。

		【データ表示】		91/12/03 12:00:00							
		運転モード：自動									
		処理モード：自動									
南側	センサー位置	表層 No	表層密度 g/cm3	γ線数 CN	密度 DN g/cm3	γ線数 CF	密度 DF g/cm3	密度 DD g/cm3	距離 HI cm	測定時刻 月/日 時:分	
点 火 炉	<input type="checkbox"/>	0:	1.500	111111	1.500	222222	2.000	2.000	5.51	12/03 00:00	
	<input type="checkbox"/>	1:	1.500	111111	1.500	222222	2.000	2.000	5.51	12/03 11:30	
	<input checked="" type="checkbox"/>	2:	1.500	111111	1.500	222222	2.000	2.000	5.51	12/03 08:00	
	<input type="checkbox"/>	3:	1.500	111111	1.500	222222	2.000	2.000	5.51	12/03 08:30	
	<input type="checkbox"/>	4:	1.500	111111	1.500	222222	2.000	2.000	5.51	12/03 09:00	
	<input type="checkbox"/>	5:	1.500	111111	1.500	222222	2.000	2.000	5.51	12/03 09:30	
	<input type="checkbox"/>	6:	1.500	111111	1.500	222222	2.000	2.000	5.51	12/03 10:00	
	<input type="checkbox"/>	7:	1.500	111111	1.500	222222	2.000	2.000	5.51	12/03 10:30	
北側											
		PRN ON	PRN OFF				設定値	IO入力	RS入力	BACKUP	終了

図4.6.2 CRTの出力画面（密度データ）

4. 7 まとめ

以上、主要部分の設計について述べたが、その他の細かな機器についてはNIM規格（米国原子力委員会による放射線測定モジュールの標準規格）に基づいたものを使用することにした。

設計は平成3年6月に完了した。応用光研工業に製作を発注し、平成3年12月に完成をみた。以降、本密度計のテストを開始した。

第4章の参考文献

- 1) 白川芳幸, 他: 距離変動を補償したガンマ線による密度測定, SICE'92, DS46-1, 491/492 (1992)
- 2) 白川芳幸, 他: 線源・検出器間2重距離方式による密度測定, 第29回 理工学における同位元素研究発表会要旨集, 29a-III-2, 39 (1992)
- 3) 応用光研工業: 表層密度計完成図書 (1992)

2.1.1 テスト参考書

本書テストプログラムソフト、およびオンラインテストの項目と内容を表す。2.1.1に示される。

2.1.1.1 測定用ソフトの項目と内容

測定ソフト

ソフトの項目	ソフトの内容
基本ソフト	機器準備や仕様の調整(特にB.G.D.調整)
測定ソフト	測定条件や測定方法の調整(特に自動取得制御)

オンラインソフト

ソフトの項目	ソフトの内容
測定	測定プログラムの実行(コンタクト、検出器)
測定ガンマ線計測	上記プログラムを用いて測定ガンマ線計測と密度を同時に測定
密度の調整	校正標準試料を用いて
測定ガンマ線計測	上記プログラムを用いて測定ガンマ線計測と密度を同時に測定
密度の調整	校正標準試料を用いて
線源・検出器調整	上記ソフトの動作条件を調整
距離方式ソフト	距離測定方式による測定
計測精度	ソフトインプットの精度と上記方式による計測精度の比較

第5章 ガンマ線散乱密度計のテストと評価

本章では、まず密度計の基礎テストとして重要機器であるBGO検出器の単体テスト、および総合テスト（安定性確保のための自動利得制御のテスト）について述べる。つぎに標準サンプルによるオフラインテストによって散乱ガンマ線計数と密度の関係、散乱ガンマ線計数と距離の関係を求める。そして両者を関係させた線源・検出器間2重距離方式の係数の決定を行い計測精度を評価する。その後、実際の焼結機に設置してオンラインテストを実施し、主として密度計全体の動作を確認する。同時に実際の環境で長期の使用可能性を実証する。さいごに密度計の操業での使用方法とその効果について述べる。

5.1 テストの考え方

基礎テスト、オフラインテスト、およびオンラインテストの項目と内容を表5.1.1にまとめる。

表5.1.1 密度計のテストの項目と内容

基礎テスト

テストの項目	テストの内容
単体テスト	機器単体の性能の確認（特にBGO検出器）
総合テスト	機器を組み合わせた動作確認（特に自動利得制御）

オフラインテスト

テストの項目	テストの内容
準備	テストサンプル製作（コンクリート、実試料）
散乱ガンマ線計数と密度の関係	上記サンプルを用いて散乱ガンマ線計数と密度を関数化（線形関数を決定）
散乱ガンマ線計数と距離の関係	上記サンプルを用いて散乱ガンマ線計数と距離を関数化（線形関数を決定）
線源・検出器間2重距離方式テスト	上記テストの結果から各係数を決定（非線形連立方程式の係数の決定）
計測精度	テストサンプルの密度と上記方式による計算密度の比較

表 5. 1. 1 密度計のテストの項目と内容 (続き)

オンラインテスト

テストの項目	テストの内容
総合動作確認	すべての機器の連動運転 (総合動作)
安定性テスト	実際の環境での長期安定性 (同一試料、同一幾何学的条件における再現性テスト)

5. 2 基礎テスト

単体テストと総合テストの方法および結果について示す。

5. 2. 1 単体テスト

密度計は種々のモジュールで構成されているが、ここでは特に重要な BGO 検出器の主たる特性をテストする。

(1) テスト方法

検出器の特性の中で最も重要な要素は、検出効率、エネルギー分解能、立ち上がり時間である。検出効率は第 3 章で評価したので、エネルギー分解能と立ち上がり時間をテストすることにする。

エネルギー分解能は単一のエネルギーの放射線に対して検出器から得られたパルスの幅の広がりに関する量であり、異なるエネルギーのパルスを識別する能力である。正式には単一のエネルギーの放射線だけが記録されると仮定した場合の仮想の検出器を用いて得られるパルスに関して以下の R で定義する。定義のイメージを図 5. 2. 1 に示す。

$$R = \frac{\text{最大高さの } 1/2 \text{ の高さにおけるエネルギー幅 (FWHM)}}{\text{最大高さに対応するエネルギー値 (H}_0\text{)}} \quad (5. 2. 1)$$

最大高さに対応するエネルギー値 (H₀)

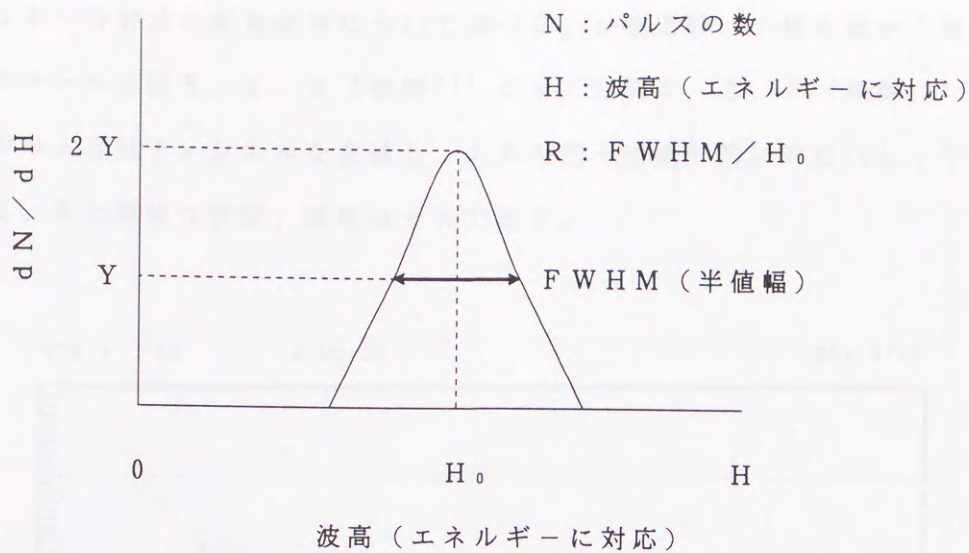


図 5. 2. 1 エネルギー分解能の定義

立ち上がり時間は検出器の出力電流を時定数の短い収集回路で収集した際に得られるパルスの 10% から 90% への到達時間であり、検出器に依存するものである。一方、パルスの減衰時間は回路に依存し、可変することができる。したがって、ここでは本質的な特性である立ち上がり時間について調べることにする。

定義を終えたのでテストに移る。まずテストの条件と方法を示す。

〔テスト条件〕

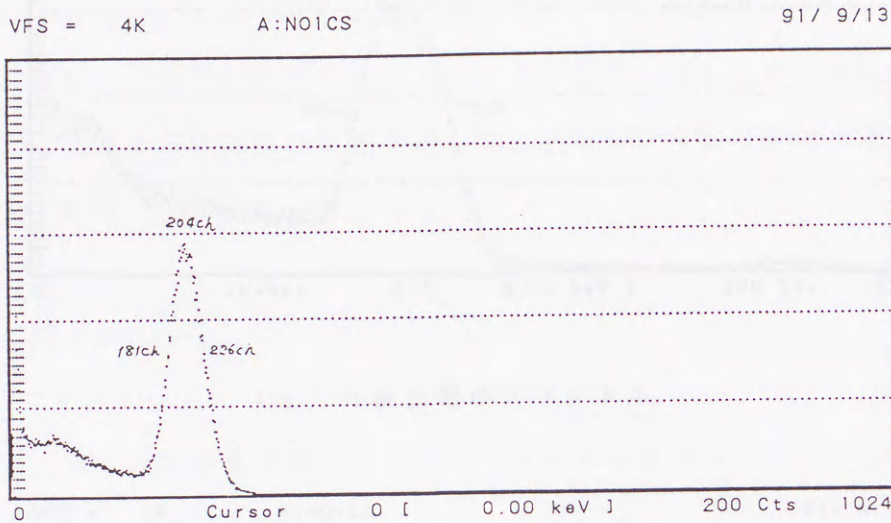
- ・線源の種類 ^{137}Cs 、 ^{60}Co
- ・線源の強さ 3.7 MBq
- ・幾何学的条件 検出器の下面の中心から 50 cm の位置
に線源を設置
- ・計数時間 200 s

〔テスト方法〕

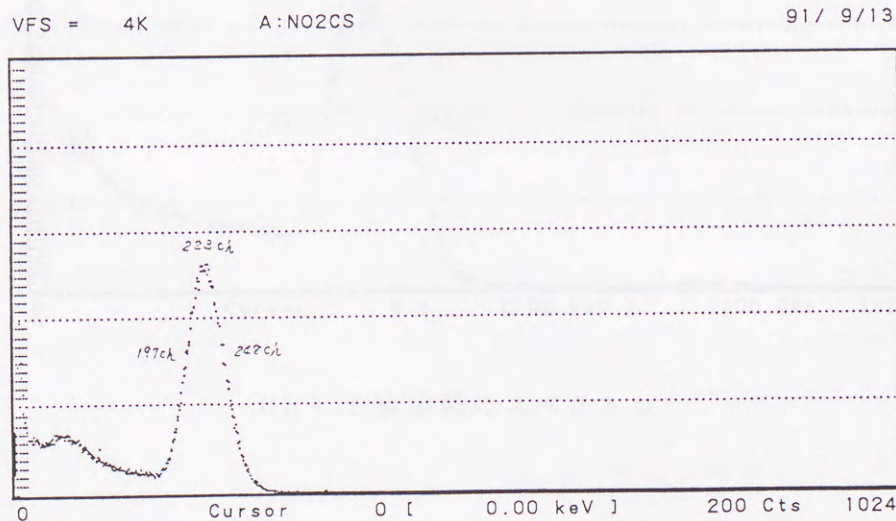
- ・エネルギー分解能の測定 マルチチャンネルアナライザーによってスペクトル
を記録、図 5. 2. 1 に示した方法で R を計算
- ・立ち上がり時間の測定 シンクロスコープでパルスを測定し、最大の波高の
10% から 90% までの時間を測定

(2) テスト結果と評価

エネルギー分解能の測定結果について述べる。n 検出器、f 検出器から得られたエネルギースペクトルを図 5. 2. 2 (線源 ^{137}Cs) と図 5. 2. 3 (線源 ^{60}Co) に示した。図中の ch はチャンネルを意味し、エネルギーに線形的に対応 ($\text{keV} \approx 3 \times \text{ch}$) している。また縦軸は計数、横軸は ch である。



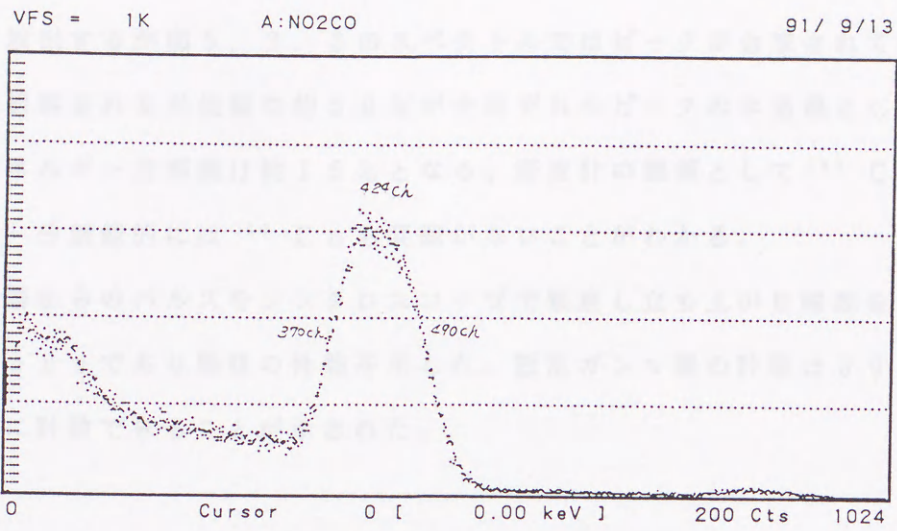
(a) n 検出器のスペクトル



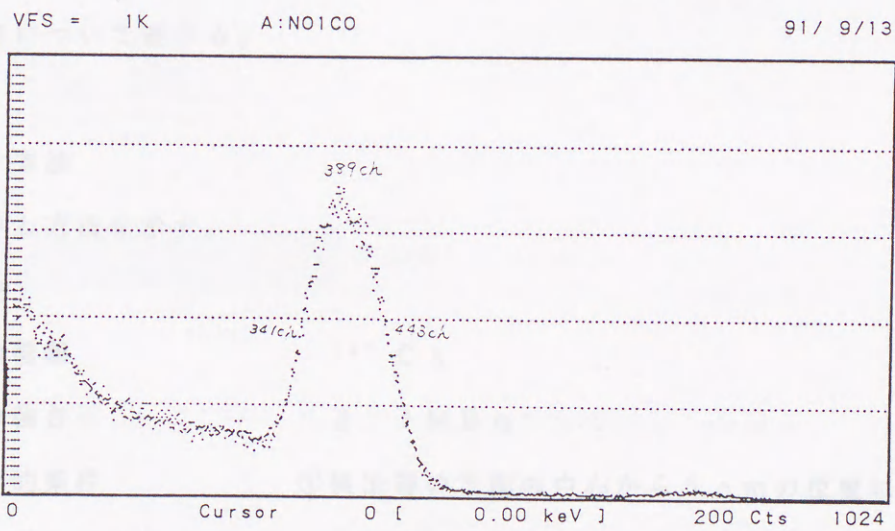
(b) f 検出器のスペクトル

図 5. 2. 2 ^{137}Cs に対する検出器のスペクトル

(高圧 1800 V 印加、縦軸：計数、横軸：チャンネルでエネルギーに対応)



(a) n 検出器のスペクトル



(b) f 検出器のスペクトル

図 5 . 2 . 3 ^{60}Co に対する検出器のスペクトル

(高圧 1800 V 印加、縦軸：計数、横軸：チャンネルでエネルギーに対応)

測定データを基にエネルギー分解能Rを計算すると、 ^{137}Cs に対してはn検出器では $R = 20.6\%$ 、f検出器では $R = 22.9\%$ が得られた。規格値の25%を十分に満足していることが示された。 ^{60}Co は1.173 MeV、1.132 MeVのエネルギーのガンマ線を放出するが図5.2.3のスペクトルではピークが合成されて明確に分離されていない。観察される半値幅の約50%がそれぞれのピークの半値幅として計算すると両検出器のエネルギー分解能は約15%となる。密度計の線源として ^{137}Cs を使用するが、エネルギー分解能的には ^{60}Co も問題がないことがわかる。

つぎに検出器からのパルスをシンクログラフで観察し立ち上がり時間を求めた。両検出器とも $0.5\ \mu\text{s}$ であり規格の性能を示した。散乱ガンマ線の計数は $3000\ \text{個}/\text{s}$ 程度であり十分に計数できることが示された。

5.2.2 総合テスト

総合テストは全ての機器を連動させて性能を確性するものである。ここでは特に重要な自動利得制御について述べる。

(1) テスト方法

テスト条件と方法を示す。

[テスト条件]

- ・線源の種類 ^{137}Cs
- ・線源の強さ $3.7\ \text{MBq}$
- ・幾何学的条件
 - ① 検出器の下面の中心から5 cmの位置に試料として幅10 cm×厚さ5 cm×長さ40 cmの鉛を配置
 - ② 線源とn検出器の中心間距離14 cm
 - 線源とf検出器の中心間距離19 cm
- ・ウィンドウの設定
 - ウィンドウAは20 keV以上
 - ウィンドウBは176 keV以上
- ・計数時間 60 s
- ・環境温度 $10、30、50^\circ\text{C}$

〔テスト方法〕

- ・ ウィンドウ A の計数 N_A とウィンドウ B の計数 N_B を求める。
- ・ 自動利得制御を使用した場合の計数と使用しない場合の計数を比較する。
- ・ 自動利得制御を使用した場合の N_B/N_A を設定値 0.5 と比較する。
- ・ 自動利得制御を使用した場合は計数が一定であり、 N_B/N_A が 0.5 であることを確認、評価する。

以上の手順で総合テスト（自動利得制御）を実施した。テストの装置構成を図 5. 2. 4 に示す。

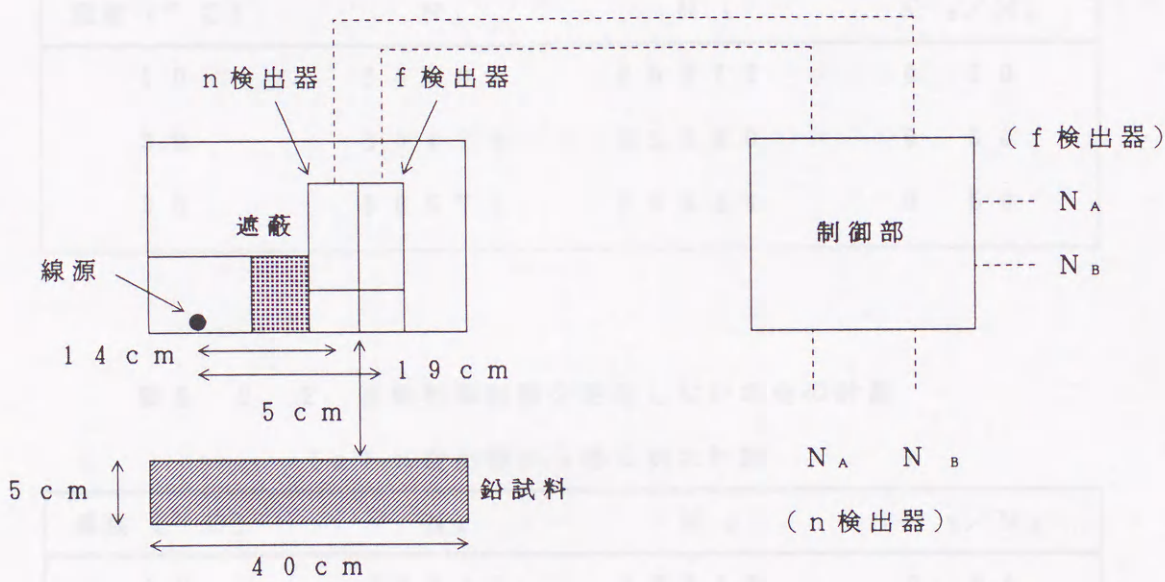


図 5. 2. 4 総合テスト（自動利得制御）の構成

(2) テスト結果と評価

表 5. 2. 1 と表 5. 2. 2 に自動利得制御を使用した場合と使用しない場合の計数の変化を示す。また図 5. 2. 5 に計数 N_A 、 N_B と N_B/N_A の変化の様子をグラフ化する。自動利得制御を使用した場合には温度が変化しても計数は高々 0.1 ~ 0.5% しか変化しない。これは統計変動程度である。また比率は設定にしたがって 0.5 に確実に制御されている。ところが自動利得制御を使用しないと、計数 N_A は 1% を越える変化を示し、計数 N_B は 20% 以上も変化する。比率も 0.5 から大き外れ実際の密度計測には適用不能である。ここで、温度が変化しても自動利得制御によってスペクトルの形状が安定

(形状が一定)であることを図5.2.6と図5.2.7の実例で示す。

表5.2.1 自動利得制御を使用した場合の計数

(a) n検出器から得られた計数

温度 (°C)	N_A	N_B	N_B / N_A
10	75443	38087	0.50
30	74911	37813	0.50
50	75469	38099	0.50

(b) f検出器から得られた計数

温度 (°C)	N_A	N_B	N_B / N_A
10	50508	25372	0.50
30	50479	25380	0.50
50	50576	25434	0.50

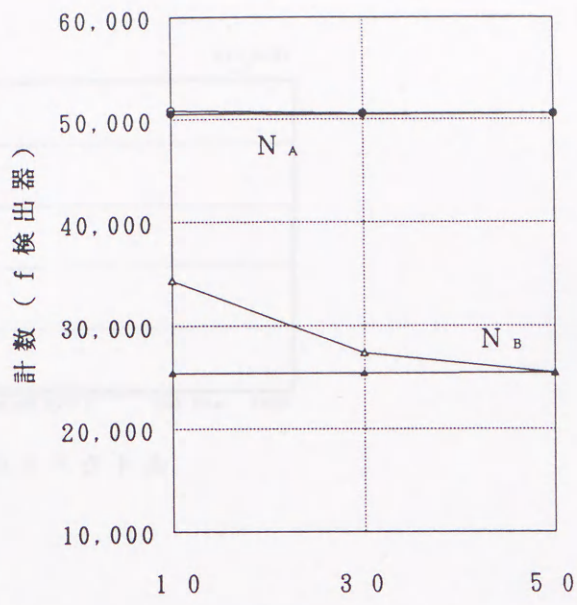
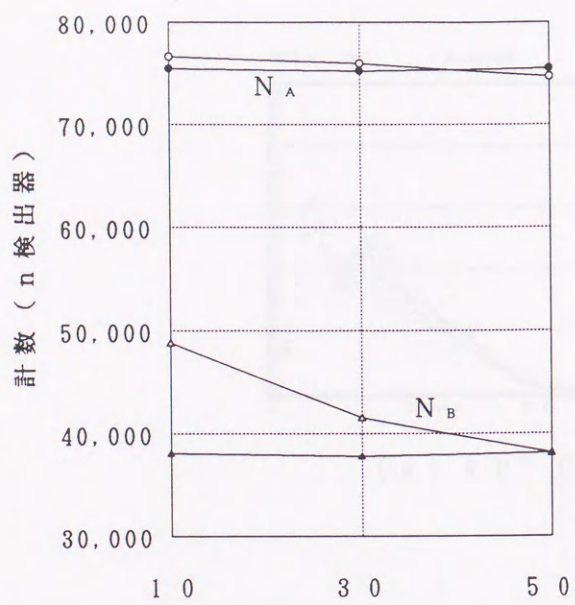
表5.2.2 自動利得制御を使用しない場合の計数

(a) n検出器から得られた計数

温度 (°C)	N_A	N_B	N_B / N_A
10	76615	48819	0.64
30	75928	41519	0.55
50	74692	28531	0.38

(b) f検出器から得られた計数

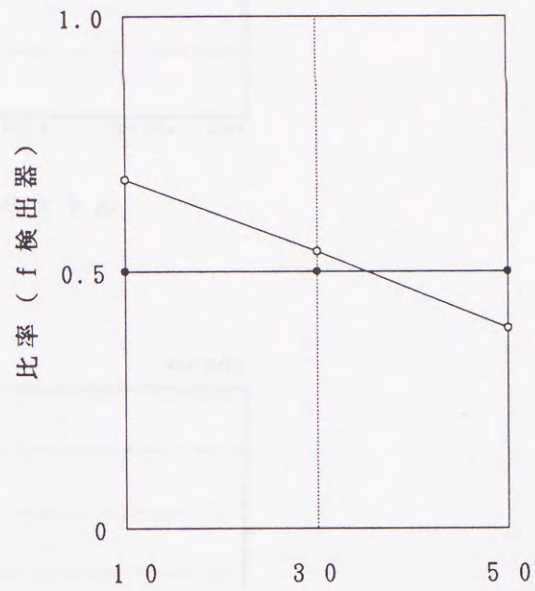
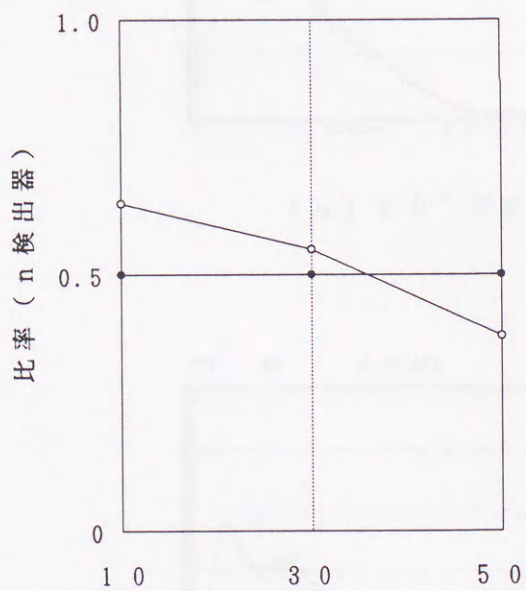
温度 (°C)	N_A	N_B	N_B / N_A
10	50819	34332	0.68
30	50536	27355	0.54
50	50393	19528	0.39



環境温度 (°C)

環境温度 (°C)

(a) n、f 検出器の温度による計数変化



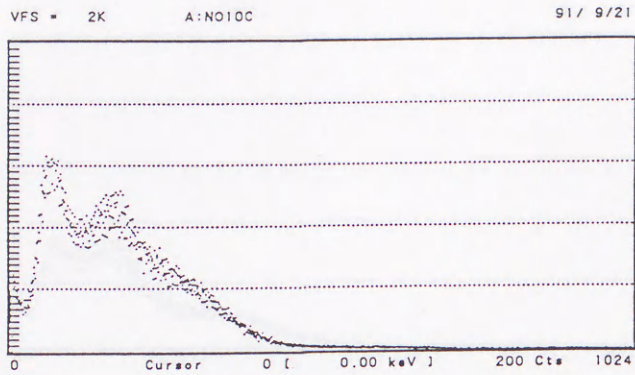
環境温度 (°C)

環境温度 (°C)

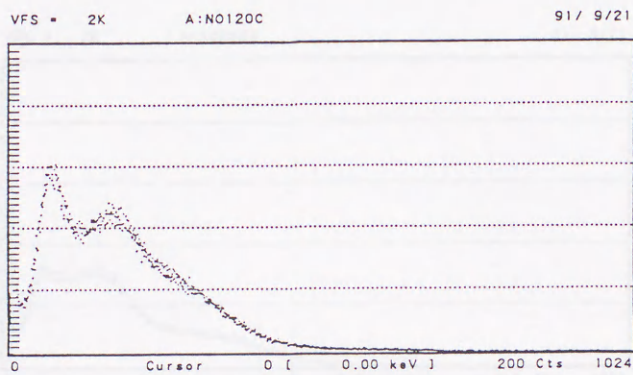
(b) n、f 検出器の比率変化

図 5. 2. 5 各検出器の温度による計数変化および比率変化

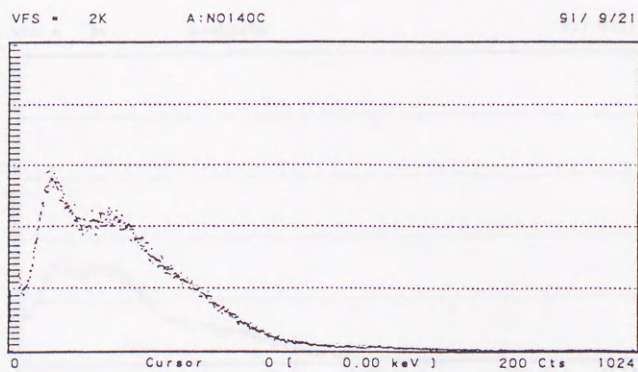
(●、▲ : 自動利得制御有り、○、△ : 自動利得制御無し)



(a) 1 0 ⁰ C のスペクトル

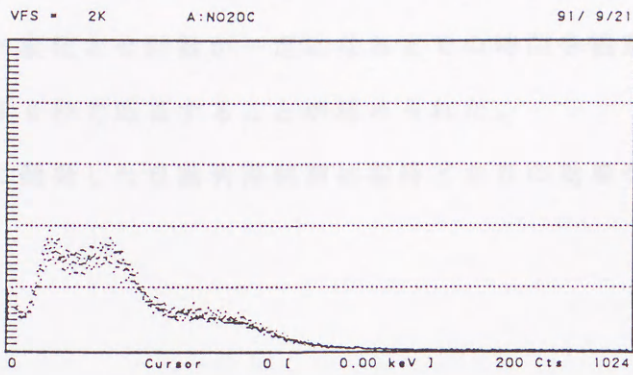


(b) 3 0 ⁰ C のスペクトル

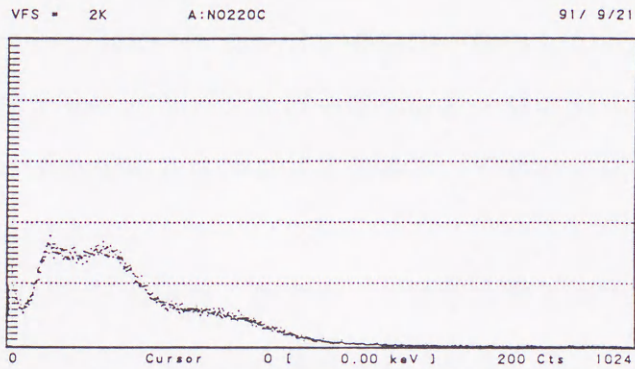


(c) 5 0 ⁰ C のスペクトル

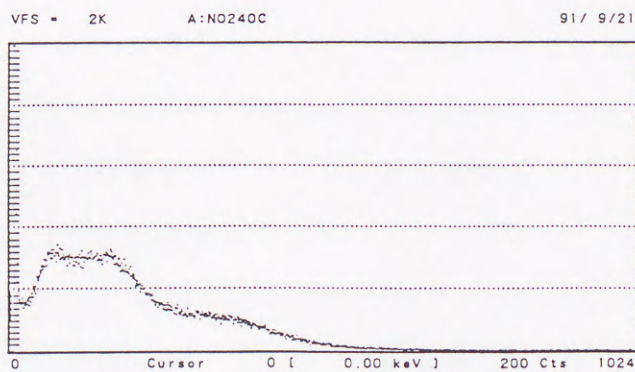
図 5 . 2 . 6 自動利得制御によるスペクトル安定化 (n 検出器)
 (高圧可変、縦軸 : 計数、横軸 : チャンネルでエネルギーに対応)



(a) 10^0 C のスペクトル



(b) 30^0 C のスペクトル



(c) 50^0 C のスペクトル

図 5 . 2 . 7 自動利得制御によるスペクトル安定化 (f 検出器)
 (高圧可変、縦軸 : 計数、横軸 : チャンネルでエネルギーに対応)

なおテストは恒温槽に装置を入れて実施したので熱慣性のため温度をステップ状に変化させることはできなかった。そこで制御の応答性を求めるために自動制御を使用しない状態から使用した状態へ変化させ計数が一定になるまでの時間を観察した。その結果、どの温度状態からでも約30秒で応答することが認められた。

以上、述べたように開発した自動利得制御は期待どおりの効果を発揮した。

5. 2. 3. 3. 結論

本テストは従来ではテスト中の温度を一定とし、サンプルとしては固定対象と同一物質を用いることが必要だったが、本装置は温度を一定に保つ作業はかなりの軽減と楽観を認める。また時間が経つと試料の温度で密度が変化すること、あるいは水分が蒸発して密度が変化することを考慮して湿度測定もこのソフトウェアルールテストに用いたことにより、その代償としてコンクリートサンプルを乾燥・製成した。コンクリートモルタルとした場合は乾燥させればよいが、コンクリートモルタル（コンクリートモルタル）が乾燥しすぎると、品質が悪くなる恐れがある。そのため、乾燥させすぎないように注意が必要である。

コンクリートはセメント、粗骨材、細骨材、水等の混合物であり、品質は水分に最も敏感な材料と密度が小さい人工骨材よりなる。従って、本装置に使用材料を定めて、品質管理を行い、本装置に使用する。

表 5. 2. 3. 3. 1. コンクリートモルタルの配合割合

材料	名称	規格	配合割合 (%)
セメント	普通セメント	JIS A 5307	40
粗骨材	人工砂	JIS A 5201	50
細骨材	人工砂	JIS A 5201	10
水	水道水	-	10

5. 3 オフラインテスト

基礎テストにより密度計単体の性能、連動動作の確認を終えたので、つぎにガンマ線散乱と密度、距離（ここでは垂直距離）を関係づけるオフラインテストを実施した。

5. 3. 1 準備

まずテストに使用するサンプルの製作を行った。サンプルとしては計測対象と同じ物質を用いることが望ましいが、焼結配合原料をできる限り均一に詰める作業はかなりの経験と熟練を要する。また時間が経つと試料の自重で密度が変化すること、含まれる水分が蒸発して密度が変化することを考慮して焼結配合原料をオフラインテストに用いないことにした。その代替としてコンクリートサンプルを設計・製作した。コンクリートをサンプルとした理由は計測原理で述べた Z/A （原子番号を原子量で割った値）が 0.497 であり²⁾、計測対象である焼結配合原料の Z/A の値 0.495 ときわめて近く等価物質と考えることができるからである。

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。表 5. 3. 1 に使用材料をまとめ、配合設計を表 5. 3. 2 に示す。

表 5. 3. 1 コンクリートの使用材料

項目	分類	銘柄	密度 (g / cm ³)
粗骨材	普通骨材	栃木産碎石	2.6
	人工計量骨材	メサライト	1.6
細骨材	普通骨材	富津産山砂	2.6
	人工計量骨材	メサライト	1.3
セメント	普通セメント	日本セメント	3.2

表 5. 3. 2 コンクリートの配合設計

(a) 各材料の配合比率

材 料	水	セメント	空気	粗骨材	細骨材
容積比率	170	108	50	367	305

(b) 密度を変化させるための粗骨材、細骨材の配合比率 (%)

密度 g / cm ³	粗骨材		細骨材	
	碎石	メサライト	山砂	メサライト
1.707	0	100	0	100
1.777	0	100	35	65
1.829	0	100	75	25
1.885	21	79	100	0

以上の設計のもとにコンクリートサンプルを製作した。表 5. 3. 2 (b) の密度は設計密度ではなく実績密度である。実際の焼結配合原料は最大 1.5 ~ 2.0 g / cm³ の密度範囲を変動するのに対してコンクリートサンプルの密度変化範囲は小さい。しかしながら定常操業においては 1.7 ~ 1.9 g / cm³ の密度範囲が大多数であることより今後のテストに十分に使用できる。なお、コンクリートサンプルの形状は幅 40 cm × 長さ 40 cm × 厚さ 10 cm である。

さらに、コンクリートと焼結配合原料の散乱特性が同じことの確認の意味で、散乱ガンマ線計数 - 密度の関係を求めるテストのときに 2 種類の実原料サンプルも用意した。2 種類の実原料サンプルの密度は充填直後で 1.73、および 1.82 g / cm³ であるが、時間の経過と共に高くなる傾向がある。したがって測定は充填直後に実施した。ただし、測定結果の扱いは参考および確認に留め、関係式の係数の決定などには使用しないこととする。

5. 3. 2 散乱ガンマ線計数と密度・距離の関係

上記サンプルを使用して図5. 3. 1の構成で散乱ガンマ線計数と密度の関係を求めるテストを実施した。なお、図5. 3. 1の構成は散乱ガンマ線計数と距離の関係を求めるテストにおいても使用する。

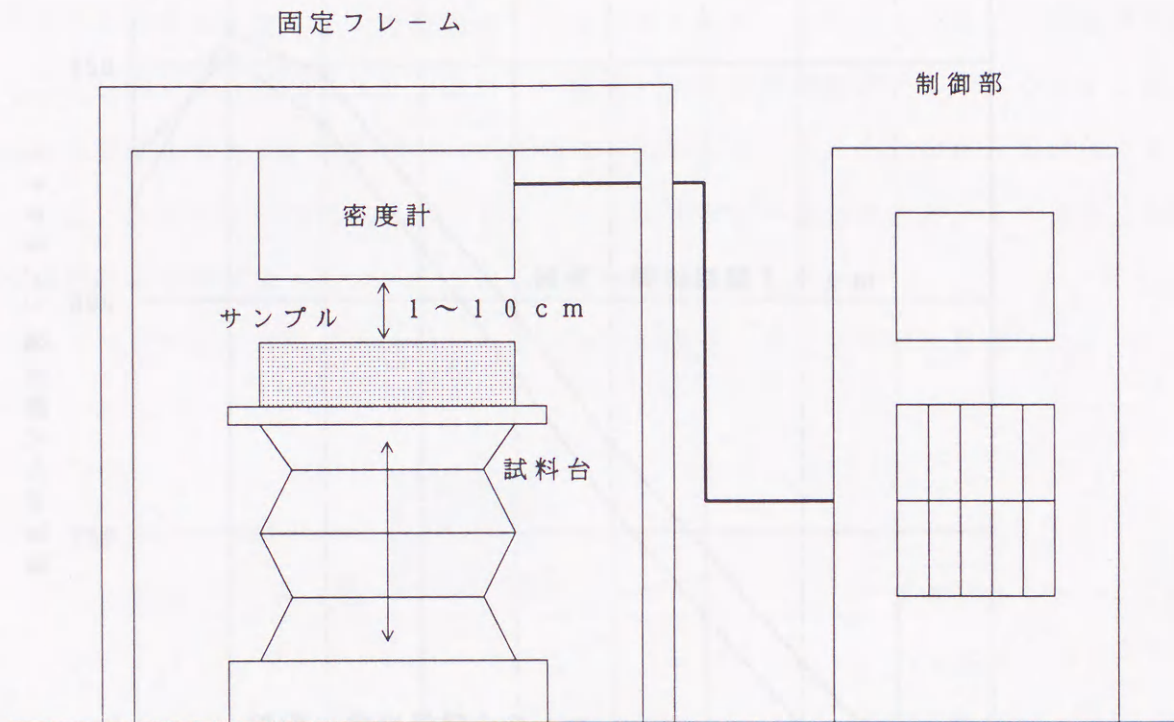


図5. 3. 1 オフラインテストにおける装置構成

(1) 予備テスト

まず予備テストを行う。この目的は線源とn検出器の距離、線源とf検出器の距離を決めるためのものである。

遮蔽があること、検出器の直径が5 cmであることから最小距離は14 cmとなる。また最大距離は密度計の大きさ内であることから29 cmである。そこで14、19、24および29 cmの距離で予備テストを行った。テスト方法は密度1.707、1.885 g/cm^3 のサンプルを使用し、線源とサンプルの垂直距離を1~10 cmまで1 cm刻みで変えて計数変化を調べる。線源・検出器間距離を決める評価項目は密度変化と共に散乱ガンマ線計数が充分変化すること、垂直距離を変えたとき散乱ガンマ線計数が直線的に変化することである。テスト結果を図5. 3. 2に示す。

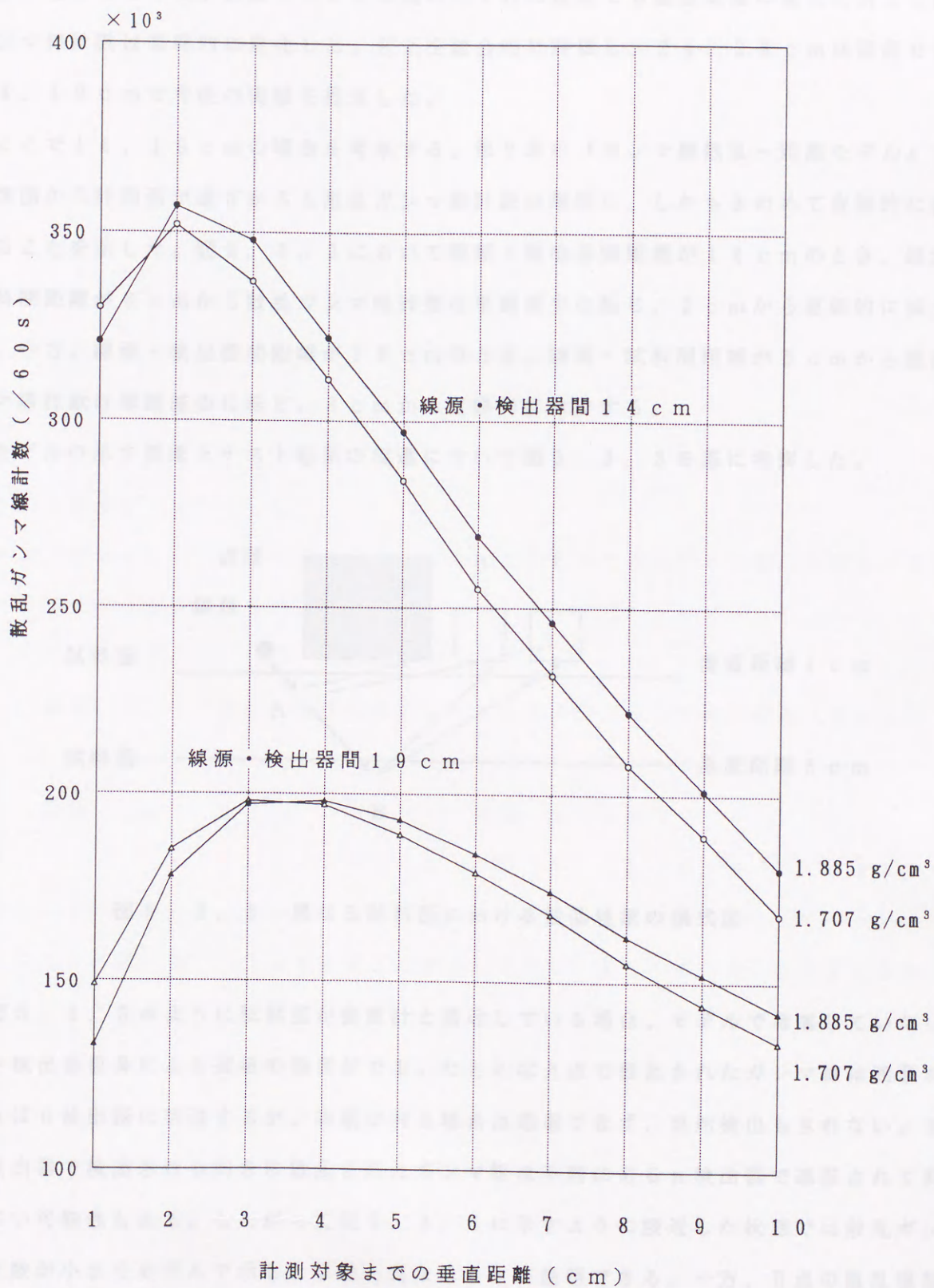


図 5. 3. 2 散乱ガンマ線計数と密度および距離の大局的關係

線源・検出器間距離が24、29 cmのとき評価項目を満足することができなかった。すなわち、14、19 cmのときに比較し密度変化に対する散乱ガンマ線計数変化が小さ過ぎる結果であった。線源・サンプル間のいずれの距離でも垂直距離の変化に対して散乱ガンマ線計数は直線的に変化した。以上を総合的に評価し、24、29 cmは採用せず、14、19 cmで今後の実験を推進した。

ここで14、19 cmの場合を考察する。第2章の『ガンマ線散乱－距離モデル』では基準面から計測面が遠ざかると散乱ガンマ線計数は単調に、しかもきわめて直線的に減少することを示した。図5.3.2において線源・検出器間距離が14 cmのとき、線源・試料間距離が3 cmから散乱ガンマ線計数は単調減少に転じ、5 cmから直線的に減少する。一方、線源・検出器間距離が19 cmのとき、線源・試料間距離が5 cmから散乱ガンマ線計数は単調減少に転じ、8 cmから直線的に減少する。

モデルの示す現象とテスト結果の相違について図5.3.3を基に考察した。

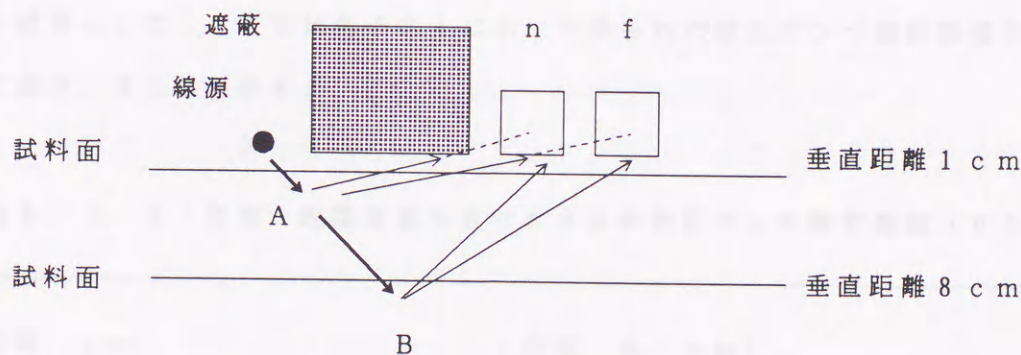


図5.3.3 異なる試料面における散乱現象の模式図

図5.3.3のように試料面が密度計と接近している場合、モデルで考慮していない遮蔽や検出器自身による遮蔽の効果がでる。たとえばA点で散乱されたガンマ線は遮蔽が無ければn検出器に到達するが、遮蔽が有る場合は透過できず、当然検出もされない。またf検出器で検出される向きに散乱されたガンマ線は手前にあるn検出器で遮蔽されて到達しない可能性もある。したがって図5.3.3に示すように接近した状態では散乱ガンマ線計数が小さくモデルで示した挙動と異なることが説明できる。一方、B点の散乱現象は妨害となるものが存在せずモデルの予想と一致する。今後のテストはn検出器（線源との距離14 cm）、およびf検出器（線源との距離19 cm）の計数の変化が直線的減少と

なる 8、9、10 cm の場合で進めることにする。

(2) 散乱ガンマ線計数と密度・距離の関係テスト

図 5. 3. 1 のテスト装置を用いて散乱ガンマ線計数と密度、散乱ガンマ線計数と距離の関係を求めるテスト実施した。

〔テスト方法〕

- ① 密度計とコンクリートサンプルとの距離を 8 cm に設定する。
- ② 各サンプルをセットして 60 s 計数する。
- ③ 上記計測を 5 回繰り返す。平均値を記録する。
- ④ 上記手順を距離を 9 cm、10 cm で繰り返す。

〔テスト結果〕

テスト結果として、ここでは各テストにおいて得られた散乱ガンマ線計数値を一覧表にまとめて表 5. 3. 3 に示す。

表 5. 3. 3 密度・距離を変化させたときの散乱ガンマ線計数値 (60 s)

距離 cm		密度 g / cm ³			
		1. 7 0 7	1. 7 7 7	1. 8 2 9	1. 8 8 5
8	n 検出器	2 0 9 4 5 7	2 1 4 0 0 0	2 1 7 4 3 9	2 2 1 4 9 3
	f 検出器	1 5 7 2 3 0	1 5 9 6 0 0	1 6 1 4 2 1	1 6 3 5 3 9
9	n 検出器	1 8 8 8 6 1	1 9 3 6 9 4	1 9 7 2 1 5	2 0 0 7 6 2
	f 検出器	1 4 5 8 9 0	1 4 8 5 5 9	1 5 0 4 4 4	1 5 2 4 2 5
10	n 検出器	1 6 8 3 8 5	1 7 3 2 0 6	1 7 6 5 5 7	1 8 0 2 7 6
	f 検出器	1 3 4 7 2 9	1 3 7 4 3 6	1 3 9 3 6 7	1 4 1 4 5 6

〔非線形モデルと線形モデルの比較〕

距離 8 cm を例として厳密な『ガンマ線散乱-密度モデル』と線形化したモデルがきわめて良く一致することを示す。再び、『ガンマ線散乱-密度モデル』を数式で述べると、

$$I(\rho) = A(1 - \exp(-\alpha\rho)) \exp(-\beta\rho) \quad (5.3.1)$$

となり、線形化したモデルは、

$$I(\rho) = a\rho + b \quad (5.3.2)$$

となる。

(5.3.1) 式の A 、 α および β を表 5.3.3 のデータ I を用いて決定することが検量線の作成である。ただし、上記 A 、 α および β の最適値の条件は、評価式 R が、

$$R = \min \sum (I(\rho) - I)^2 \quad (5.3.3)$$

となる A 、 α 、 β を決めることである。一般的には、

$$dR/dA = 0$$

$$dR/d\alpha = 0 \quad (5.3.4)$$

$$dR/d\beta = 0$$

を満足する値が最適値であるが、ここで R は \exp 関数であるため、(5.3.4) 式は (5.3.3) 式より一層複雑化し解くことができない。そこで、乱数による方法を考案した。次式の $rnd(i)$ は発生器 i から発生した 0~1 までの乱数値を表す。

$$A = 200000(1 + 2 \times rnd(1))$$

$$\alpha = 0.5 \times rnd(2) \quad (5.3.5)$$

$$\beta = 0.1 \times rnd(3)$$

(5.3.5) 式により 1 組の (A, α, β) が決まり評価式の R の値が決まる。この操作を 100 万回繰り返し、最適の (A, α, β) を求めた。なお (5.3.5) 式の定数項は思考錯誤で範囲を限定したものである。このようにして求めた検量線が、

$$I_n(\rho) = 423976(1 - \exp(-0.451\rho)) \exp(-0.0492\rho) \quad (5.3.6)$$

$$I_r(\rho) = 263856(1 - \exp(-0.616\rho)) \exp(-0.0549\rho) \quad (5.3.7)$$

である。 I_n と I_r の極大値を与える ρ はそれぞれ 4.524 と 4.063 g/cm^2 であることもわかる。

一方、最小自乗法によって求めた回帰直線を検量線とする方法では、

$$I_n(\rho) = 67411\rho + 94291 \quad (5.3.8)$$

$$I_r(\rho) = 35359\rho + 96819 \quad (5.3.9)$$

が得られる。実際の測定データと比較した結果を表5.3.4に示す。

表5.3.4 非線形モデルと線形モデルの誤差比較

(a) n検出器から得られた結果とモデルの比較

密度 g/cm ³	測定データ	非線形モデル		線形モデル	
		計算値	誤差	計算値	誤差
1.707	209457	209304	-153	209361	-96
1.777	214000	214175	175	214080	80
1.829	217439	217657	218	217585	146
1.885	221493	221283	-210	221360	-132

(b) f検出器から得られた結果とモデルの比較

密度 g/cm ³	測定データ	非線形モデル		線形モデル	
		計算値	誤差	計算値	誤差
1.707	157230	156350	-879	157176	-53
1.777	159600	159280	-320	159652	52
1.829	161421	161343	-78	161491	70
1.885	163539	163462	-80	163471	-68

表が示すように『ガンマ線散乱-密度モデル』における非線形モデルと線形モデルに関しては広い密度範囲において非線形モデルのみが有効であるが、範囲を限定すると線形モデルのほうが実際の測定データとの一致性が良いことが誤差からわかる。したがって、取扱いが容易で精度が高い線形モデルを使用していく。

つぎに『ガンマ線散乱-距離モデル』における非線形モデルと線形モデルを比較する。比較例として密度1.707 g/cm³の場合を考える。第2章で述べた非線形モデルの基準面を8 cmとし、(2.3.13)式のm、nの値は試行錯誤でそれぞれ0.35と0.65に選んだ。線形モデルの場合は従来の最小自乗法で直線を決定した。これらのモデルを使用して計算した結果と実際の測定データを表5.3.5に示す。比較する距離は8、9、10 cmの3点のみであるので線形モデルがきわめて有効であることが示された。

表 5. 3. 5 非線形モデルと線形モデルの誤差比較

(a) n 検出器から得られた結果とモデルの比較

距離 c m	測定データ	非線形モデル		線形モデル	
		計算値	誤差	計算値	誤差
8	209457	209457	0	209438	-19
9	188861	187558	-1303	188902	41
10	168385	168402	17	168366	-19

(b) f 検出器から得られた結果とモデルの比較

距離 c m	測定データ	非線形モデル		線形モデル	
		計算値	誤差	計算値	誤差
8	157230	157230	0	157197	-33
9	145890	145634	256	145946	56
10	134719	134816	97	134695	-24

『ガンマ線散乱-密度モデル』および『ガンマ線散乱-距離モデル』は広域に適用できる非線形モデルと限定範囲に適用できる線形モデルで構成されるが、上記結果より密度と距離の範囲を限定すると線形化モデルがきわめて高精度であることが判明した。線形性の指標である相関係数は99.9%以上であり相対誤差で見ると±0.05%以下である。したがって以降は線形モデルで検討を進める。

〔検量線の作成〕

表 5. 3. 3 のデータを用いて線形モデルの係数を決定、すなわち検量線の作成を実施した。

(散乱ガンマ線計数-密度の検量線)

① 垂直距離 8 c m

$$I_n(\rho) = 67411\rho + 94291 \quad (5.3.10)$$

$$I_r(\rho) = 35359\rho + 96819 \quad (5.3.11)$$

② 垂直距離 9 cm

$$I_n(\rho) = 66994\rho + 74577 \quad (5.3.12)$$

$$I_t(\rho) = 36715\rho + 83259 \quad (5.3.13)$$

③ 垂直距離 10 cm

$$I_n(\rho) = 66739\rho + 54673 \quad (5.3.14)$$

$$I_t(\rho) = 37759\rho + 70299 \quad (5.3.15)$$

これらの検量線と測定データを図 5. 3. 4 に示す。

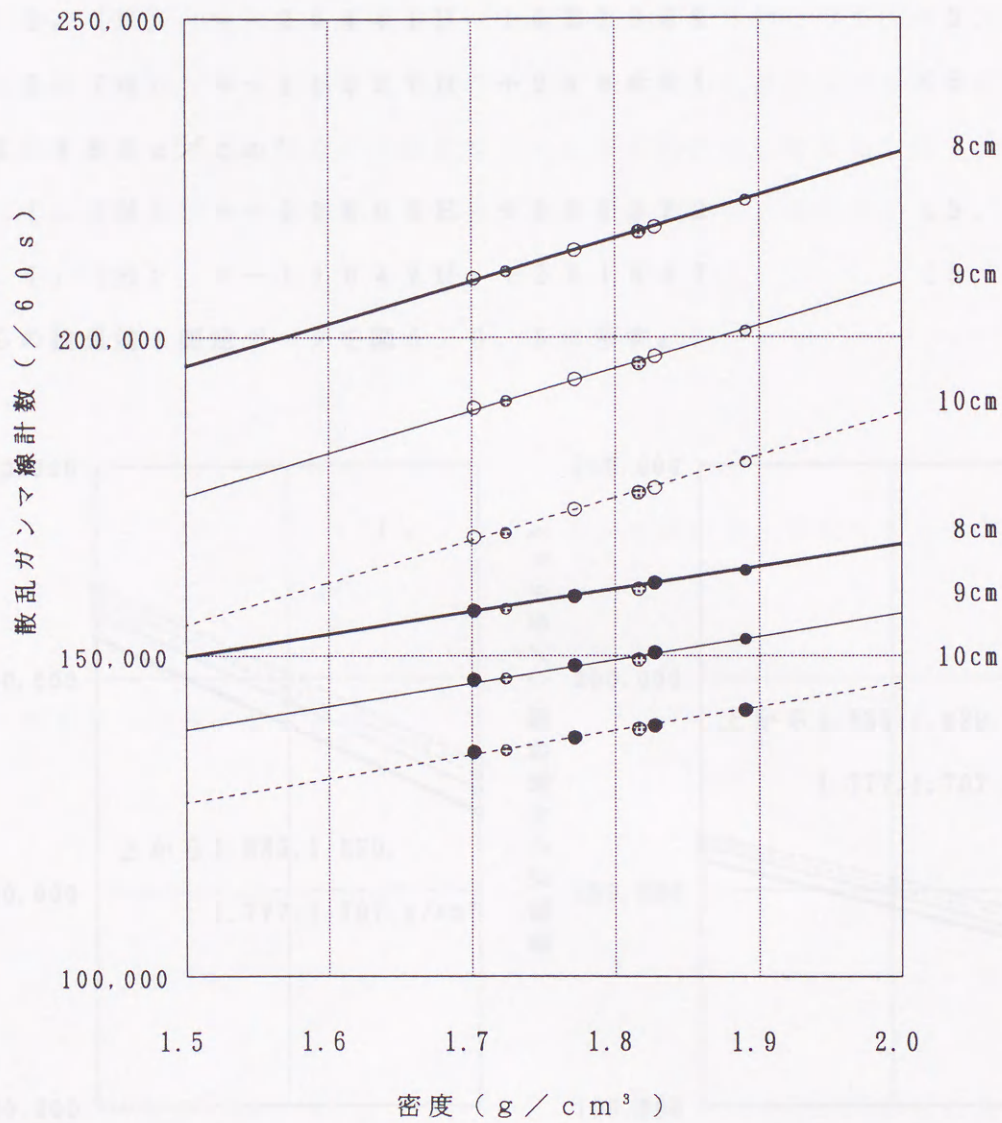


図 5. 3. 4 散乱ガンマ線計数と密度の検量線

(○ : I_n ● : I_t ⊗ : 実試料)

(散乱ガンマ線計数 - 距離の検量線)

① 密度 1.707 g/cm^3

$$I_n (H) = -20536H + 373726 \quad (5.3.16)$$

$$I_r (H) = -11251H + 247205 \quad (5.3.17)$$

② 密度 1.777 g/cm^3

$$I_n (H) = -20397H + 377208 \quad (5.3.18)$$

$$I_r (H) = -11082H + 248270 \quad (5.3.19)$$

③ 密度 1.829 g/cm^3

$$I_n (H) = -20441H + 381040 \quad (5.3.20)$$

$$I_r (H) = -11027H + 249654 \quad (5.3.21)$$

④ 密度 1.885 g/cm^3

$$I_n (H) = -20609H + 386322 \quad (5.3.22)$$

$$I_r (H) = -11042H + 251847 \quad (5.3.23)$$

これらの検量線と測定データを図 5.3.5 に示す。

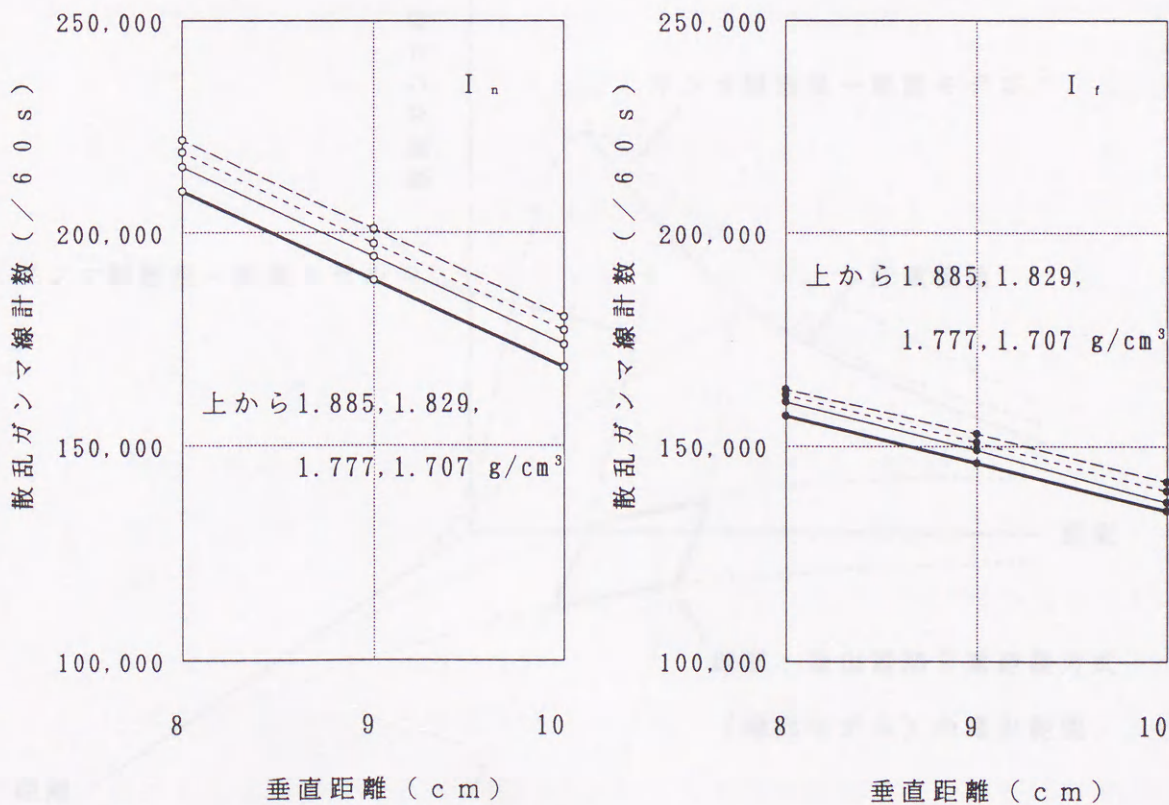


図 5.3.5 散乱ガンマ線計数と距離 (垂直距離) の検量線

〔線源・検出器間2重距離方式テスト〕

距離（この場合は垂直距離）を一定した場合の散乱ガンマ線計数-密度の検量線、および密度を一定にした場合の散乱ガンマ線計数-距離の検量線の各係数を用いて線源・検出器間2重距離方式の非線形連立方程式の係数を決定する。

(1) 幾何学的イメージ

まず、非線形モデルと線形モデルの幾何学的な特徴と線源・検出器間2重距離方式の適用範囲を図5.3.6にグラフ化する。広い範囲で成立する非線形モデルの示す曲面は、密度軸に沿ってゼロから単調に増加し、一つの極値を通り単調にゼロに向けて減少する曲線群と距離軸に沿ってゼロに向けて単調に減少する曲線群の集合した複雑な形状を持つ。一方、密度と距離の限定で成立する線形モデルの示す曲面は、密度軸の方では単調増加、距離軸の方では単調減少する直線群の集合で極めて平面に近い形状となる。

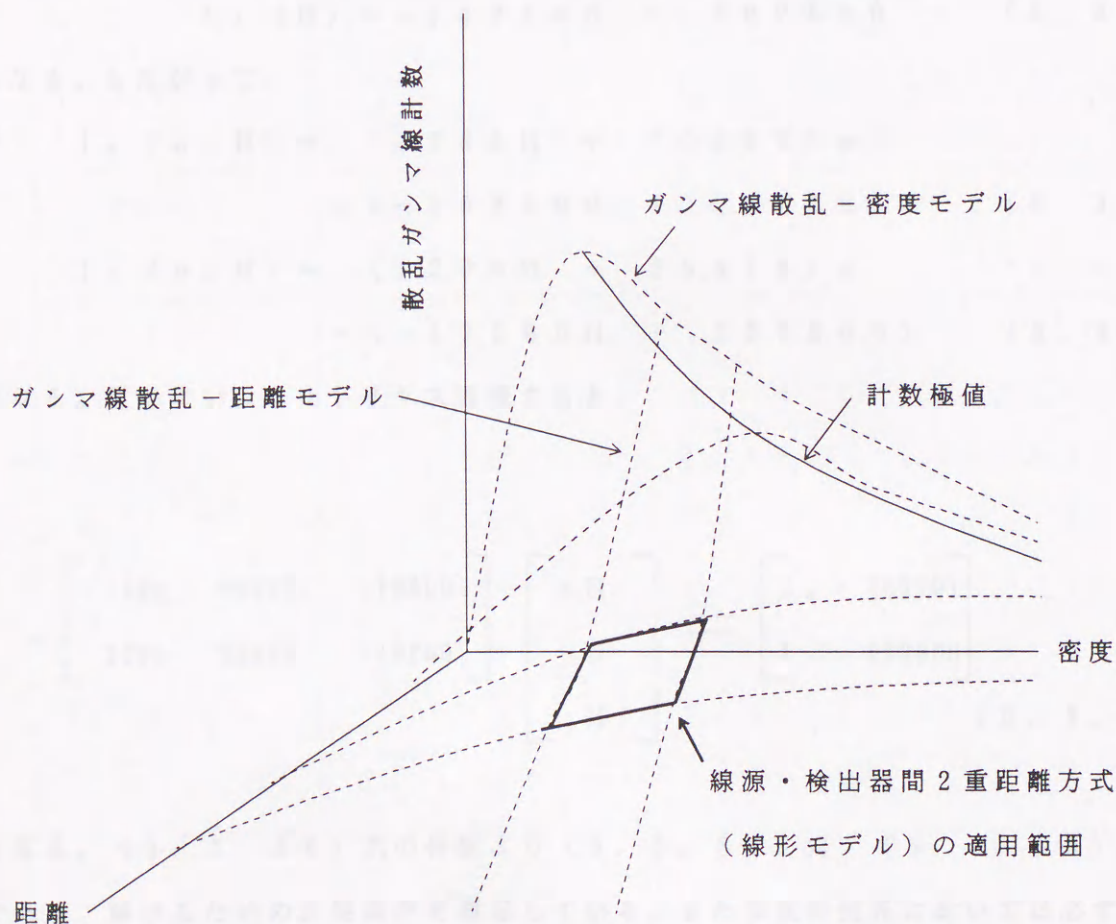


図5.3.6 線源・検出器間2重距離方式の適用範囲

(2) 係数の決定

第2章の(2.4.5)式、(2.4.6)式を再度示す。

$$I_n(\rho, H) = a_n(H)\rho + b_n(H) \quad (5.3.24)$$

$$I_r(\rho, H) = a_r(H)\rho + b_r(H) \quad (5.3.25)$$

ここで、

$$a_n(H) = k_{1n}H + k_{2n} \quad (5.3.26)$$

$$b_n(H) = k_{3n}H + k_{4n} \quad (5.3.27)$$

$$a_r(H) = k_{1r}H + k_{2r} \quad (5.3.28)$$

$$b_r(H) = k_{3r}H + k_{4r} \quad (5.3.29)$$

である。各検量線の ρ の係数、定数項を H の関数として最小自乗法で求めると、

$$a_n(H) = -382H + 70452 \quad (5.3.30)$$

$$b_n(H) = -19809H + 252791 \quad (5.3.31)$$

$$a_r(H) = 1200H + 25810 \quad (5.3.32)$$

$$b_r(H) = -13260H + 202800 \quad (5.3.33)$$

となる。したがって、

$$I_n(\rho, H) = (-382H + 70452)\rho + (-19809H + 252791) \quad (5.3.34)$$

$$I_r(\rho, H) = (1200H + 25810)\rho + (-13260H + 202800) \quad (5.3.35)$$

となる。見やすいようマトリクス表現すると、

$$\begin{bmatrix} -382 & 70452 & -19809 \\ 1200 & 25810 & -13260 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho H \\ \rho \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n - 252791 \\ I_r - 202800 \end{bmatrix} \quad (5.3.36)$$

となる。(5.3.36)式の係数より(5.3.34)式、(5.3.35)式は独立であり、解けるための必要条件を満足している。また現実の世界においては必ず ρ 、 H は存在するので、 I_n 、 I_r の値の誤差によって解けない場合が生じたら、 $\pm\sqrt{I_n}$ および $\pm\sqrt{I_r}$ の範囲内の変動を与えて解く手法も考えられる。

〔計測精度〕

(5.3.36)式を用いて計算した密度、および8cmのときの検量線を用いて求めた密度(従来法)を真値と比較する。比較結果を表5.3.6に示す。

表5.3.6 線源・検出器間2重距離方式と従来方式の精度比較

(a) 従来方式の精度 (n検出器の8cmの検量線使用)

真密度 g / cm ³	密度計と試料との垂直距離		
	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) 線源・検出器間2重距離方式の精度

真密度 g / cm ³	密度計と試料との垂直距離		
	8 cm	9 cm	10 cm
1.707	1.696	1.718	1.724
	(7.96)	(9.04)	(10.06)
1.777	1.774	1.775	1.776
	(7.99)	(8.92)	(9.99)
1.829	1.811	1.781	1.842
	(7.95)	(8.85)	(10.04)
1.885	1.880	1.880	1.886
	(7.98)	(8.99)	(10.01)

()内は計算によって得られた線源～試料間の垂直距離 (cm)

計測精度を評価する際、線源・検出器間2重距離方式が完全としても生じる放射線の統計変動による誤差と線源・検出器間2重距離方式が不完全であるために生じる誤差を検討する必要がある。線源と試料面との垂直距離8 cm、密度 1.829 g/cm^3 の条件で統計変動による誤差を次式により計算する。ただし、 ΔI_n は ± 466 、 ΔI_r は ± 402 である。

$$\Delta \rho = \Delta I_n / (-328H + 70452) \quad (5.3.37)$$

$$\Delta H = \Delta I_n / (-328\rho - 19809) \quad (5.3.38)$$

$$\Delta \rho = \Delta I_r / (1200H + 25810) \quad (5.3.39)$$

$$\Delta H = \Delta I_r / (1200\rho - 13260) \quad (5.3.40)$$

から $\Delta \rho$ は ± 0.007 および $\pm 0.011 \text{ g/cm}^3$ となり、 ΔH は ± 0.023 および $\pm 0.037 \text{ cm}$ となる。

一方、線源・検出器間2重距離方式が不完全であるために生じる誤差は真値との差であり、前述の誤差を含めて密度では、 $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 以下であることが、また垂直距離では、 $\pm 0.2 \text{ cm}$ 以下であることが表5.3.6からわかる。それに対して従来方式においては垂直距離が8 cmから9、10 cmに変化した場合、それぞれ真の密度値から $0.3 \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$ もずれてしまい全く使用できない状態となる。

このように垂直距離が変動した場合には従来方式は適用不能となるのに対し、線源・検出器間2重距離方式は8~10 cmと2 cmの幅で変動しても $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ の精度が確保できる。実際の焼結機の装入制御においては十分な精度であり、さらに制御を長周期で行う場合は密度の時間平均値が使用されるので一層の高精度化が図れる。

以上のオフラインテストにおいて新型密度計の有効性が確認された。

5. 4 オンラインテスト

密度計のオフラインテストを完了し、動作確認および性能評価を終えたので実際の焼結機に設置しオンラインテストを実施した。

5. 4. 1 設置方法

密度計を図5. 4. 1に示すように設置した。焼結配合原料の層厚は60cmに設定した。層厚は変動を含めて60~58cmの範囲である。この時の焼結配合原料表面と密度計との垂直距離は8~10cmとなる。焼結機のパレット(鉄製のベルト)の幅方向5mを均等に7分割した点で密度計測が可能ないように幅方向移動台車も設置した。

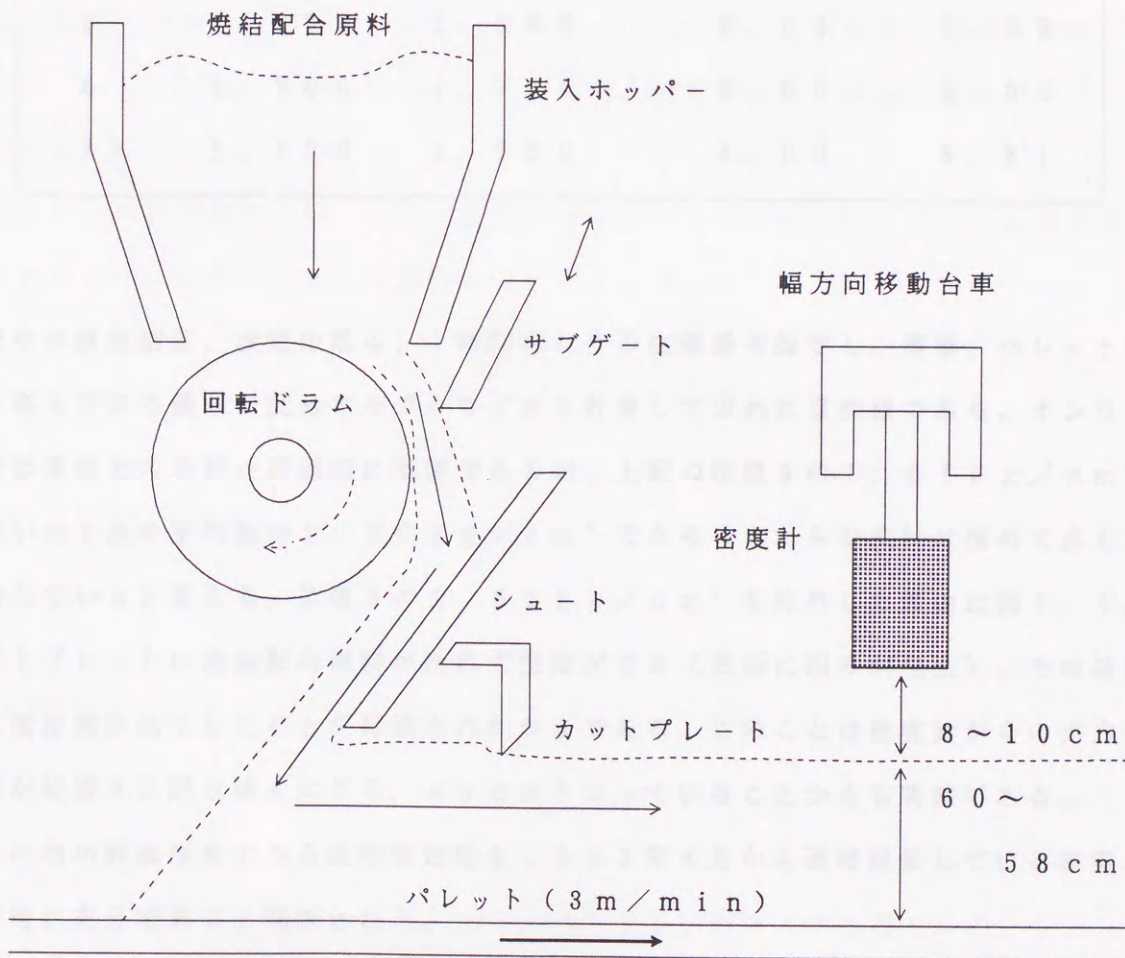


図5. 4. 1 密度計の焼結機への設置

5. 4. 2 テスト結果および評価

テスト結果の例を表5. 4. 1に示す。

表5. 4. 1 オンラインテスト結果

位 置	設定密度 g / c m ³	計測密度 g / c m ³	設定距離 c m	計測距離 c m
1	1. 8 0 0	1. 7 7 9	8. 0 0	8. 7 7
2	1. 8 0 0	1. 8 4 5	8. 0 0	8. 5 1
3	1. 8 0 0	1. 6 1 6	8. 0 0	9. 3 0
4	1. 8 0 0	1. 8 8 0	8. 0 0	8. 4 2
5	1. 8 0 0	1. 8 8 5	8. 0 0	8. 3 8
6	1. 8 0 0	1. 7 0 0	8. 0 0	8. 9 2
7	1. 8 0 0	1. 7 5 9	8. 0 0	8. 8 1

表中の設定密度、設定距離は、1時間当たりの生産量を指定し、層厚、パレット移動速度、高さ方向の最適密度分布モデルなどから計算して求めた目標値である。オンライン状態では真値との比較は原理的に困難であるが、上記の位置3の1. 6 1 6 g / c m³の値を除いた6点の平均値が1. 8 0 8 g / c m³であることから密度計は極めて良く実態を反映していると言える。位置3の1. 6 1 6 g / c m³を除外した理由は図5. 4. 1のカットプレートに焼結配合原料が触れず空隙ができ（表面に凹みが発生）、その結果として充填密度が低下したことが確認されたからである。このことは密度計からの出力である距離が位置3に限り遠くなり9. 3 0 c mとなっていることから明確である。

その他の評価項目である長期安定性も1992年4月から連続稼働している事実より実用使用に充分であると判断される。

5. 5 密度計の使用効果

密度計を使用した焼結配合原料の装入制御について従来技術と比較して述べ、その効果を明らかにする。

5. 5. 1 密度計の使用法

(1) 従来技術による装入制御と問題点

焼結機においては、原料の層厚の幅方向の平均値を一定にし、表面の凹凸を少なくするように装入制御することにより生産量、歩留り、品質を確保する方法が研究開発されてきた。例えば原料の装入線（パレットと原料の傾斜面の接する線）をテレビカメラで撮影して目標線に一致するようにサブゲートの開度を調整し、その結果として層厚を一定にする方法がある。また超音波距離計を用いてパレット上に装入された原料の傾斜面のたくれ量（図5. 5. 1参照）を検出してパレット速度、原料供給量を調整し層厚を一定にする方法も採用されている。

しかしながら原料の層厚、および表面が滑らかでも密度が不均一であれば焼成も不均一となり歩留りや品質は必ずしも期待ほどは向上しない。

(2) 新型密度計による装入制御

新型密度計を焼結機に設置し、層厚、密度を制御し、上記の問題点を解決する方法を述べる。密度計および超音波距離計を図5. 5. 1に示すように配置した。層厚、密度の制御方法は図5. 5. 2にブロック図として示した。

層厚は、原料傾斜面がほぼ安息角に従って決定されるので原料傾斜面を測定すれば求めることができる。原料傾斜面の測定方法は図に示したように超音波距離計でたくれ量を測定すればよい。シュートの下端にカットプレートを設置したので装入面はこれ以上に上昇することはない。したがって制御の留意点はカットプレートより下に装入面が下がらないことである。図5. 5. 2に示したように層厚制御は開ループ制御である。しかし、原料がカットプレートに接触しないと押し込み効果（原料表面を圧縮する効果）が作用しないので密度制御はできない。そこで目標密度より計測された密度が小さい時はたくれ量の目標値を上げることで押し込み効果を強くする。逆の場合はたくれ量の目標値を下げる。こ

のように常にカットプレートの中に原料が入るように制御する。ただし外乱として焼結配合原料中に塊が混入することがあり、カットプレートに引っ掛かり装入面が低下し、密度が減少する場合、押し込み異常になり密度が増加する場合なども生じることがある。さらにたくれ量制御が正確でも原料条件変動による安息角の変化により層厚が一定に制御できない場合も考えられる。このような予測不能な外乱による装入面変動時でも密度計測が可能な本密度計は装入制御の最も重要な装置として位置付けされる。

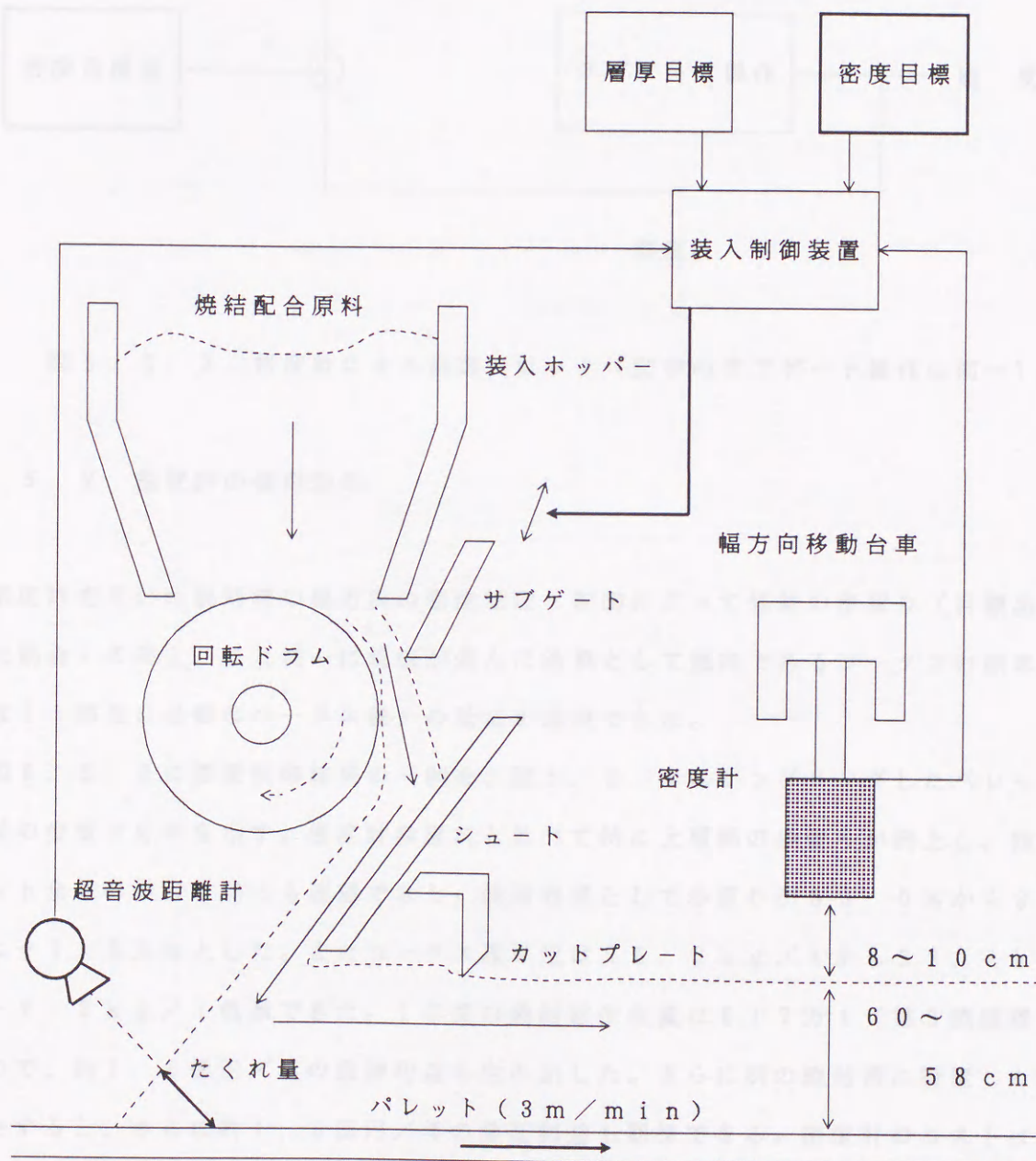


図 5. 5. 1 密度計の使用方法

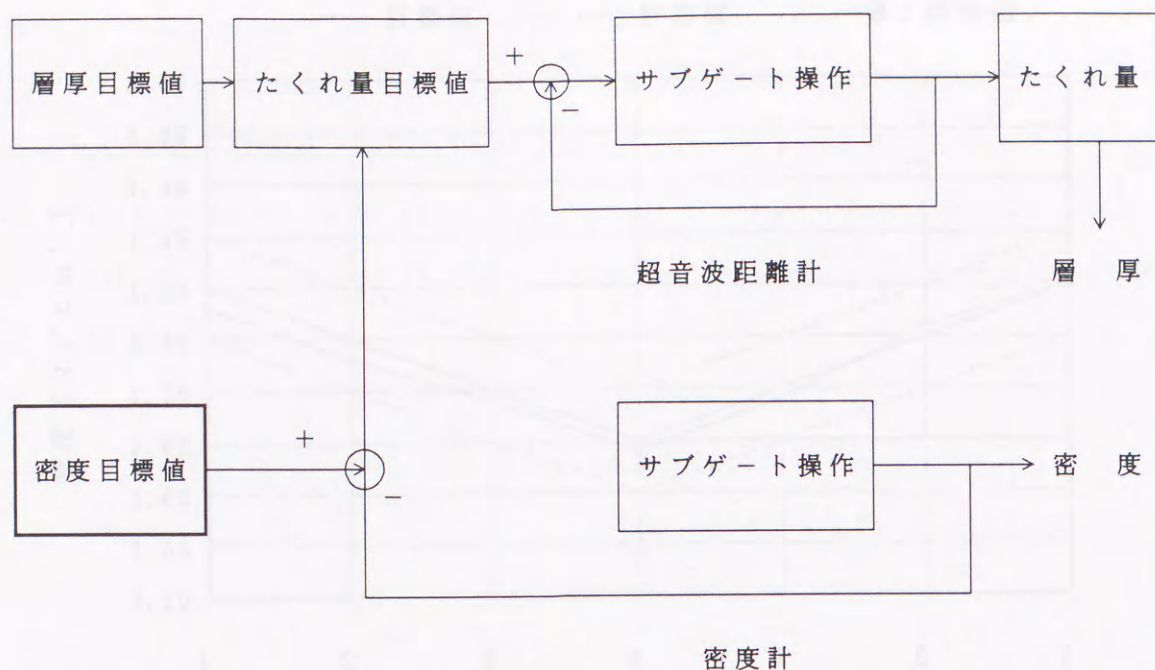


図 5. 5. 2 密度計による制御ブロック（図中のサブゲート操作は同一）

5. 5. 2 密度計の使用効果

密度計を用いた焼結機の幅方向の密度管理・制御によって焼結の歩留り（目標品質になった割合）の向上、また均一に焼成が進んだ結果として燃料であるコークスの原単位（焼結鉱 1 t 製造に必要なコークス量）の低減が達成できた。

図 5. 5. 3 に密度制御結果の一例を、図 5. 5. 4 にサンプリングしたパレットの焼結鉱の歩留り分布を示す。密度計設置前と比べて特に上層部の歩留りが向上し、同時にパレット全体の歩留り向上も確認できた。使用効果として歩留りが 83.0% から 84.2% に +1.2% 向上した。またコークス原単位は 55.3 kg/t から 52.4 kg/t へ -2.8 kg/t 低減できた。1 年間の焼結鉱生産量は 617 万 t（第 3 焼結機）であるので、約 1.6 億円/年の直接利益を生み出した。さらに別の焼結機に設置した場合を推定すると、さらに約 1.3 億円/年の潜在利益も期待できる。密度計のコストは 0.3 億円程度であるので 3~4 カ月で設備投資を回収できることより極めてコストパフォーマンスに優れた装置といえる。

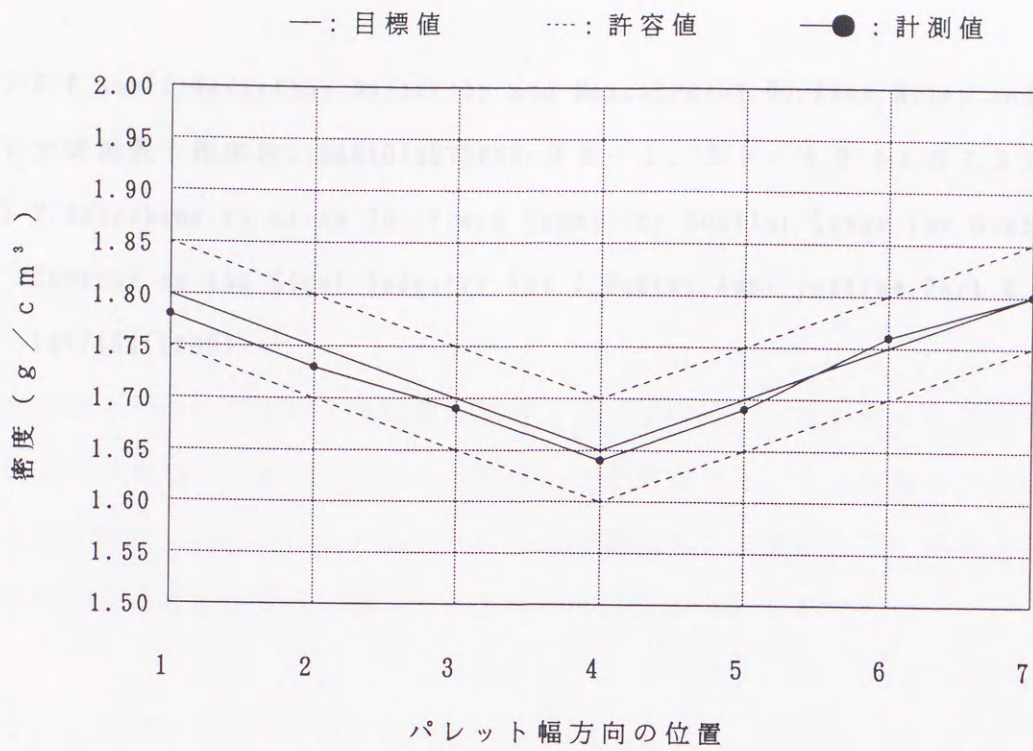
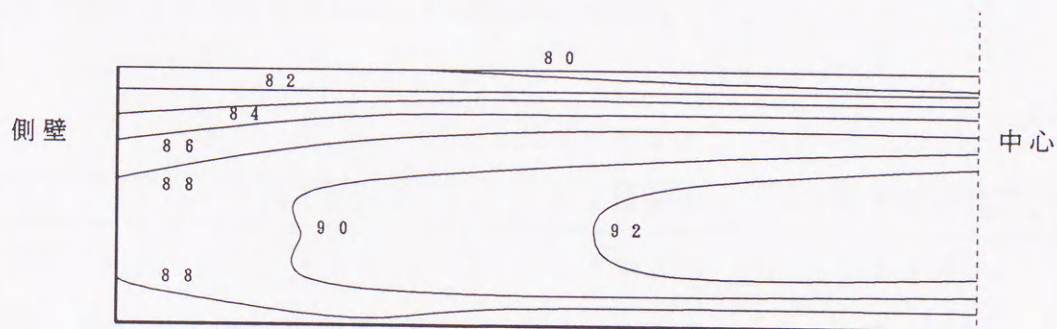
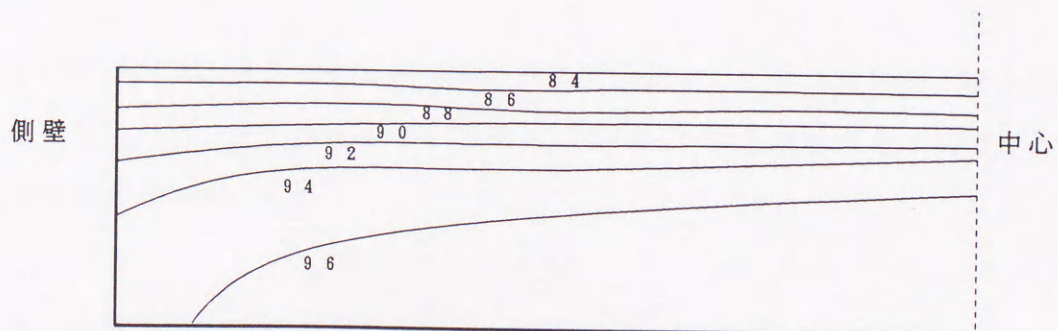


図 5. 5. 3 密度計による幅方向密度制御の例



(a) 密度計設置前の歩留り分布



(b) 密度計設置後の歩留り分布

図 5. 5. 4 密度計による歩留り向上効果の例

第6章 密度計測および密度計の応用研究

本章ではガンマ線散乱密度計の応用に関する研究、さらに密度計測を核とした新しい複合計測の可能性に関する研究について述べる。

6.1 密度計の応用研究

研究開発した新型密度計は焼結配合原料のような粉体のかさ密度を計測するものであるが、原理的には塊状物質のかさ密度の計測にも使用できる。君津製鐵所において粉、塊の原料を取り扱う工程はコークス工場（新日本製鐵化学）、焼結工場、高炉工場である。そこで当所の管轄である焼結工場、高炉工場への応用について研究した。

6.1.1 焼結工場への適用拡大

焼結工場には3台の焼結機がある。機種別能力を表6.1.1に示す。

表6.1.1 焼結機の機種別能力

	第1焼結機	第2焼結機	第3焼結機
有効面積 m ²	183	330	500
生産量 t/h	290	400	810

本密度計は経済効果が最も大きい第3焼結機で実用化した。第1焼結機、第2焼結機に関しては設備規模は第3焼結機に比べて小さいが基本的な装入設備などは共通であるので問題なく適用可能である。

6.1.2 高炉工場への応用研究

つぎに高炉工場への応用について論じる。高炉（溶鋳炉）は製鐵所の象徴であり、溶けた鉄（銑鉄）を生産する最も重要な設備である。高炉は巨大な鋼鉄の容器にレンガの内張

りをしたものであり、内容積は3000~5000m³で生産量は1日で10000t以上のものも稼働している¹⁾²⁾。図6.1.1に君津の高炉の概要を示す。

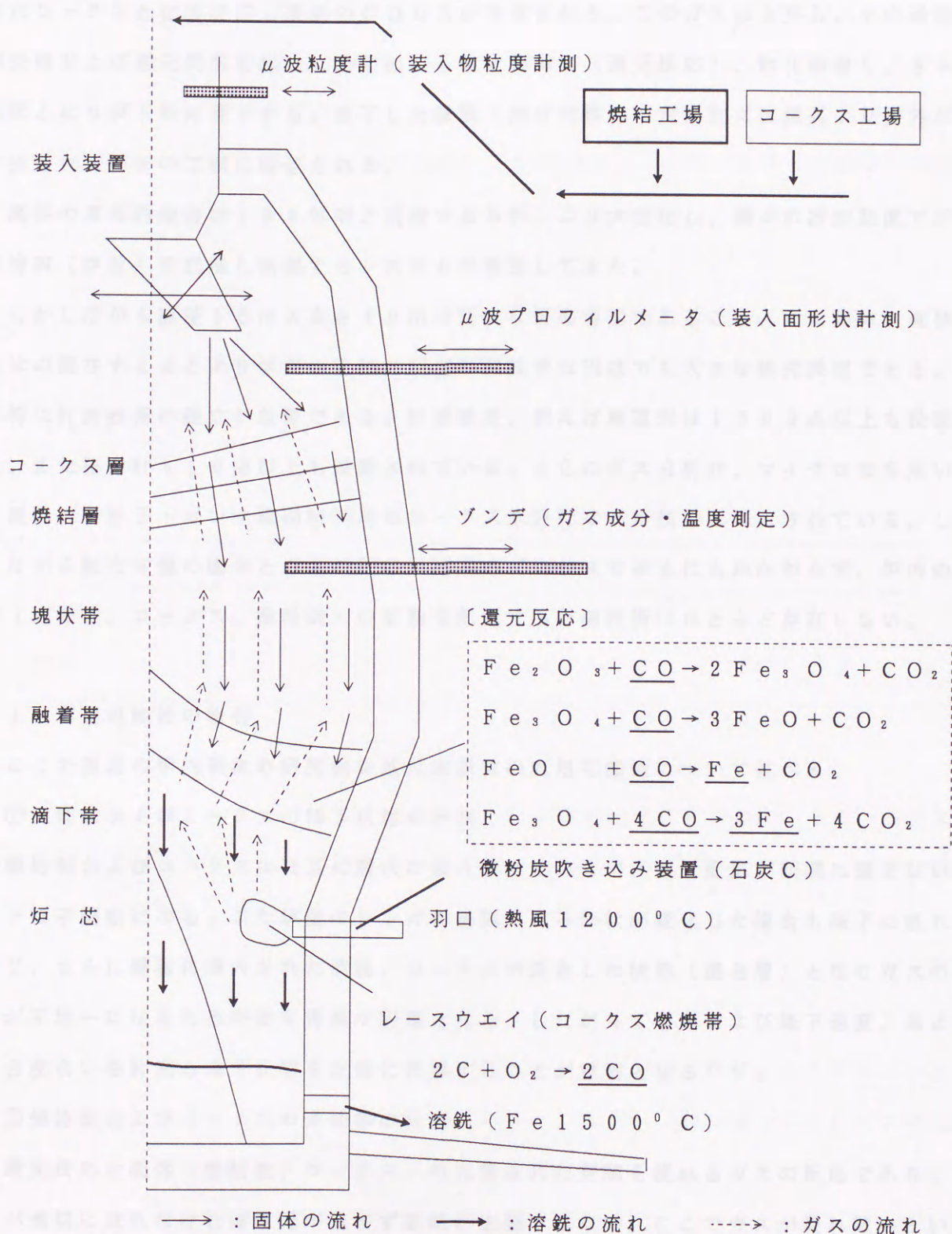


図6.1.1 君津の高炉の概要

図6. 1. 1に示したように焼結工場で生産された焼結鉱とコークス工場で生産されたコークスは交互に装入ベルトコンベアーで高炉の炉頂に運ばれ装入装置によって炉内に装入される。一方、高炉の炉下部の羽口から熱風および微粉炭が同時に吹き込まれ、装入されたコークスと化学反応し高温のCOガスが生成される。このガスは上昇し、その過程で熱交換および還元反応を起こし焼結鉱から酸素を奪い（還元反応）、軟化融着し、さらに液体となり炉下部に滴下する。滴下した銑鉄（溶けた鉄）は定期的に出銑孔より炉外に取り出され、つぎの工場に輸送される。

高炉の基本的構造は100年前と同様であるが、より大型化し、種々の計測装置で炉内の情報（炉況）を把握し制御するシステムが普及してきた。

しかしながら直径15m×高さ40mの巨大な反応容器であること、また固体、液体、気体の混在することより炉況の正確な計測制御技術は現在でも大きな研究課題である。

特に計測技術の確立が急務である。計測装置、例えば熱電対は1000点以上も設置され、また圧力計も10点以上も設置されている。さらにガス分析計、マイクロ波を用いた粒度計、中性子・ガンマ線同時利用のコークス水分計など新技術も導入されている。しかしながら膨大な量の固体とガスの反応が基本のプロセスであるにもかかわらず、炉内の固体（焼結鉱、コークス、微粉炭）の挙動を把握する計測技術はほとんど存在しない。

（1）応用可能性の検討

ここで最近の炉内現象の研究例を基に本研究の応用可能性について述べる。

① 焼結鉱およびコークスの降下状態の計測

焼結鉱およびコークスは交互に層状に装入されているが、還元反応が順調に進まないとき降下は不規則になる。また炉壁のレンガの損耗が進み形状が変化した場合も降下に乱れを生じ、さらに層状に装入された焼結、コークスが混合した状態（混合層）となりガスの流れが不均一になるため安定な操業が困難となる。したがって層厚および降下速度、および混合度合いを計測し降下状態を正確に把握することが重要となる^{3) 4)}。

② 焼結鉱およびコークスの空間率の計測

還元反応は固体（焼結鉱、コークス）の充填された空間を流れるガスの反応であり、ガスが適切に流れなければ還元が進まず銑鉄が生産できない。ここでガスが流れ難いということは通気が悪いことであり、ガスは別の通気抵抗の少ない所に集中し、通気の悪い所はますますガスが流れず、炉況の急激な悪化（不活性化）が生じる。したがって適切な空間

の確保と計測技術の研究開発が望まれる⁵⁾。

③ 微粉炭の燃焼状態の把握

炉頂から装入した焼結鉱、コークスの挙動の計測について述べたが、最近の高炉操業の特徴は羽口から高温の空気と同時に微粉炭を吹き込むことである。現在、溶銑1 tあたり約100 kgの微粉炭を燃料(熱源、COガス源)として吹き込んでいる。ところが完全燃焼したかどうかの確認方法がなく、未燃焼の粉が上昇し焼結鉱、コークスの間に滞留すると通気抵抗が大きくなりガス流れが乱される恐れがある。今後、ますます多量の微粉炭吹き込みが経済性の観点から望まれているため微粉炭の燃焼状態の把握は必須となってきた⁶⁾⁷⁾。

以上の課題に対して密度計および密度計測技術の応用可能性について論じる。まず焼結鉱、コークス、微粉炭の充填された状態での密度(かさ密度)と粒度を表6.1.2に整理する。

表6.1.2 焼結鉱・コークス・微粉炭の特性比較

	焼結鉱	コークス	微粉炭
密度 g/cm^3	1.5 ~ 2.0	0.4 ~ 0.6	0.4 ~ 0.6
粒度 mm	10 ~ 25	40 ~ 70	0.07

表が示すように焼結鉱、コークスおよび微粉炭の密度は大きく異なる。すなわち密度の差を利用すれば原料の識別は可能である。原料が識別できれば①の課題である降下状況の指標である各層厚D、降下速度Vを次式によって求めることができる。

$$V = L / (t_3 - t_1) \quad (6.1.1)$$

$$D = V \cdot (t_2 - t_1) \quad (6.1.2)$$

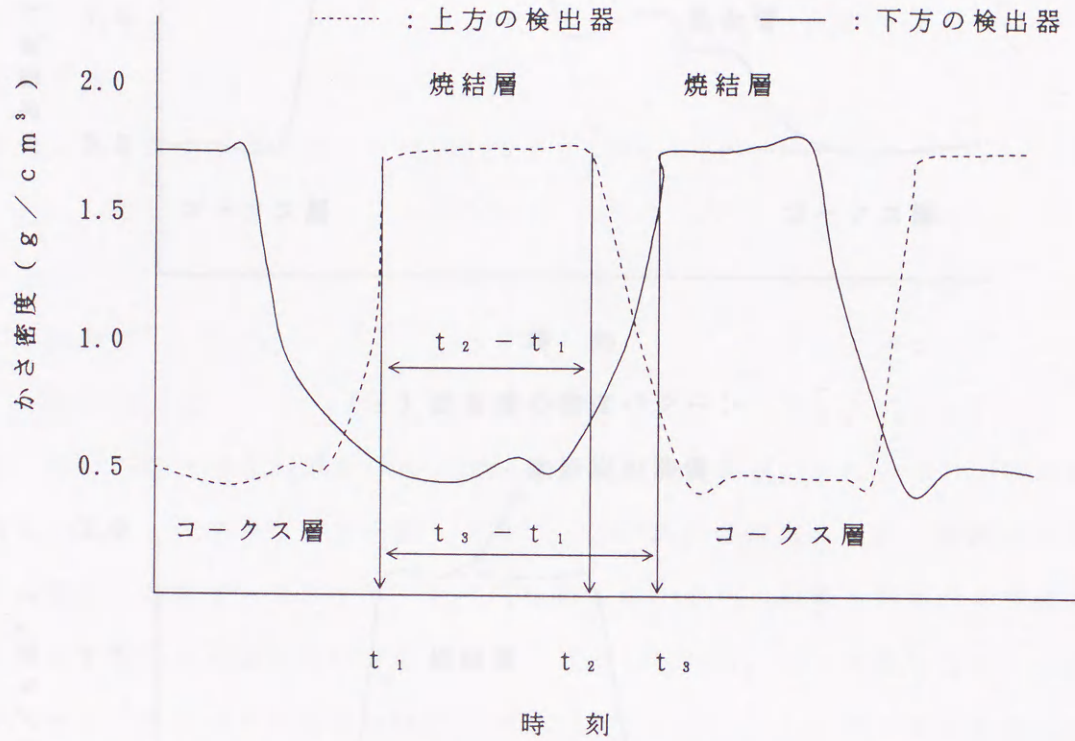
ここで、Lは密度を計測する2つの位置の距離、 t_1 は上方の検出器からの密度が変化した時刻、 t_2 は密度が最初の状態に戻った時刻、 t_3 は下方の検出器からの密度が変化した時刻である。原料の混合状態が発生すると密度は $0.4 \sim 0.6 g/cm^3$ と $1.5 \sim 2.0 g/cm^3$ の中間の値となる。また課題②の空間率Pは、

$$P = 1 - \rho_0 / \rho_m \quad (6.1.3)$$

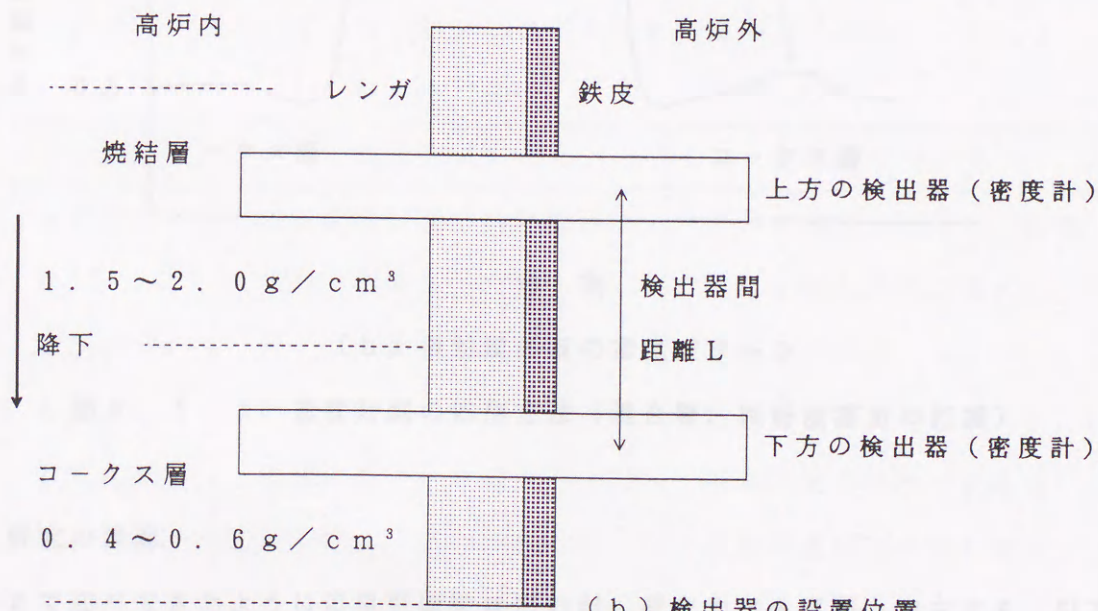
で定義される。ここで ρ_0 は計測されるかさ密度、 ρ_m は物質密度で物質により一定であ

る。課題③の微粉炭の未燃焼分はコークス層、焼結層に堆積するので各層の密度が大きくなる。

このように上記の課題①、②、③とも密度の計測に帰着する。この様子を図6.1.2と図6.1.3に示す。

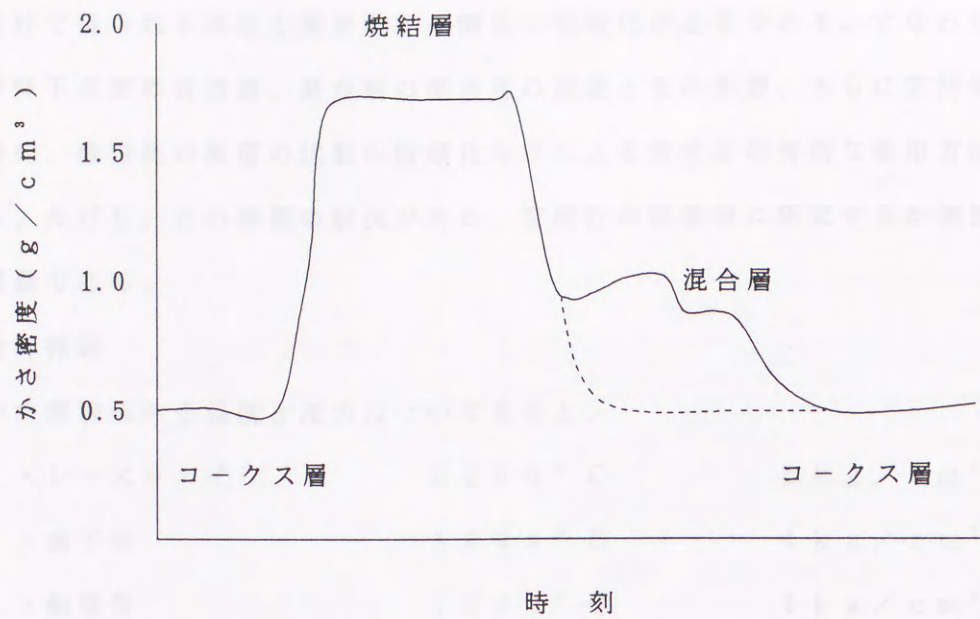


(a) 2つの検出器による密度パターンの概要

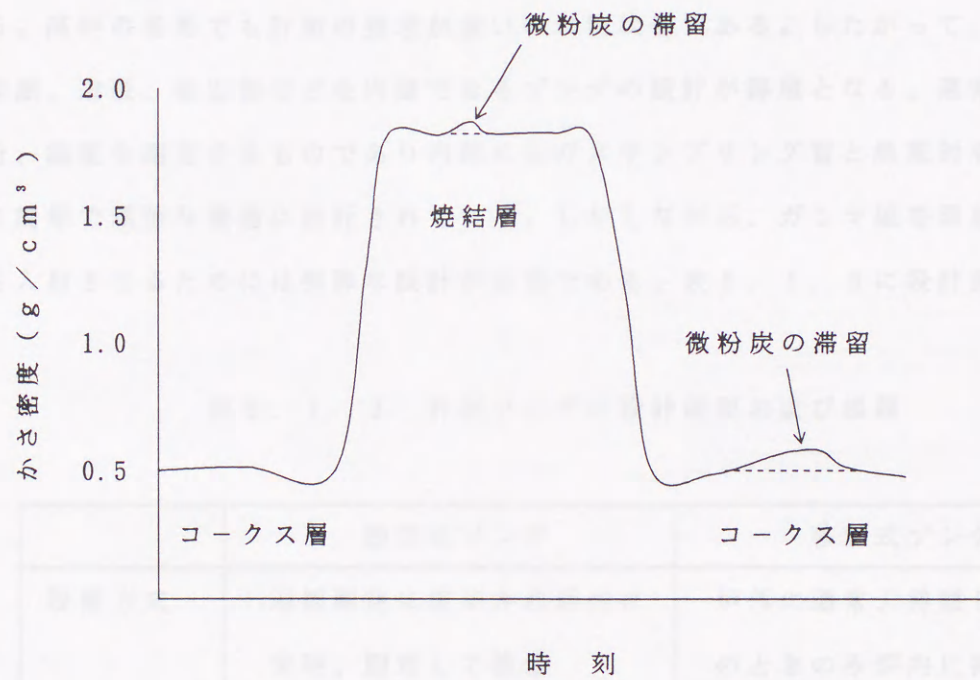


(b) 検出器の設置位置

図6.1.2 密度計測の応用方法 (降下状態の計測)



(a) 混合層の密度パターン



(b) 微粉炭滞留の密度パターン

図6. 1. 3 密度計測の応用方法 (混合層、微粉炭滞留の把握)

(2) 研究の課題

これまで述べてきたように応用可能性は広いが、研究すべき課題も内在する。以下、基本課題、設計課題および計測課題について論じる。特に計測課題については予備テストのデータを示しながら検討する。

①基本課題

密度計で得られる密度と操業条件の関係の明確化が必要である。すなわち、最適な層厚および降下速度の目標値、混合層の混合度の定義とその影響、さらに空間率の定量的影響の明確化、微粉炭の滞留の状態の指標化などによる密度計の有効な使用方法の確立が必要である。ただし、この課題の解決が先か、密度計の設置後に研究するか選択の予知がある研究課題である。

②設計課題

高炉の環境条件を温度と圧力について見ると、

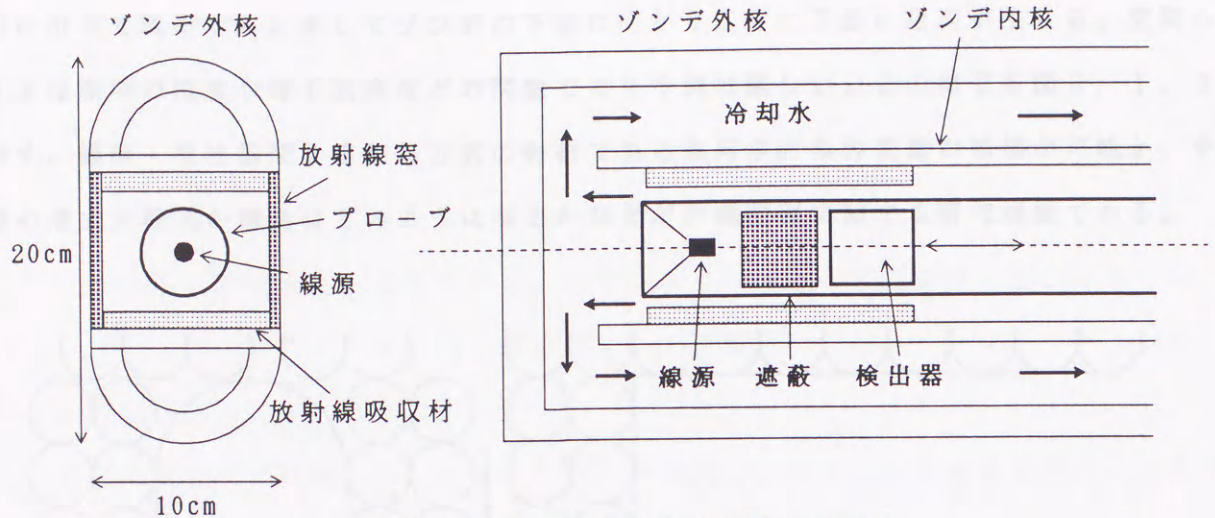
・レースウェイ	2 2 0 0 ° C	5 k g / c m ²
・滴下帯	1 6 0 0 ° C	4 k g / c m ²
・融着帯	1 5 0 0 ° C	3 k g / c m ²
・塊状帯	1 0 0 0 ° C	2 k g / c m ²

である。高炉の各部でも計測の要求が強いのが塊状帯である。したがって、この条件に耐えて線源、遮蔽、検出器などを内蔵できるゾンデの設計が課題となる。通常のゾンデはガス成分、温度を測定するものであり内部にはガスサンプリング管と熱電対を内蔵するだけであり簡単で頑強な構造に設計されている。しかしながら、ガンマ線を照射し、散乱ガンマ線を入射させるためには特殊な設計が必要である。表 6. 1. 3 に設計課題を述べる。

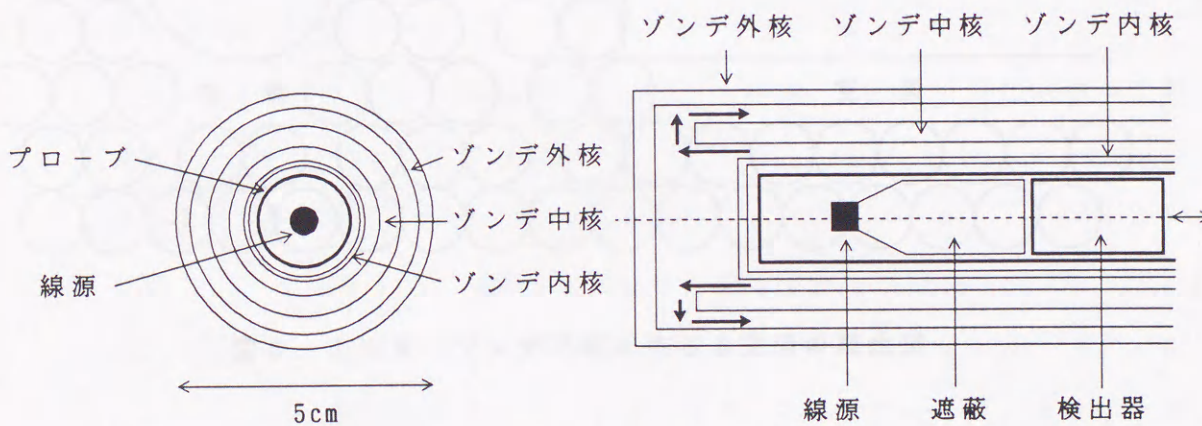
表 6. 1. 3 計測ゾンデの設計概要および課題

	固定式ゾンデ	移動式ゾンデ
設置方式	連続測定に使用され炉内に常時、固定して設置	炉外に通常、待機し、測定するときのみ炉内に挿入
断面形状	幅 1 0 c m × 高さ 2 0 c m	直径 5 c m
長さ	約 2 ~ 3 m	約 2 0 m
設計課題 1	冷却方法 (水冷式)	冷却方法 (水冷、空冷式)
設計課題 2	放射線透過窓の材質形状	放射線透過窓の材質形状
設計課題 3	低バックグラウンド構造	特になし
設計課題 4	耐摩耗性	特になし

表6. 1. 3の課題のFSの結果を図6. 1. 4に示す。このFSで設計したゾンデは
 ついで論じる計測課題の検討における予備実験に使用したものである。



(a) 固定式ゾンデの先端構造の検討例



(b) 移動式ゾンデの先端構造の検討例

図6. 1. 4 FSで設計したゾンデの先端構造

表6. 1. 3に示した設計課題1~4に関しては種々の選択枝が可能である。今後、シ
 ミュレーション、予備実験を繰り返し研究していく必要がある。図6. 1. 4においては
 材質を明示できるに至っていないが、基本的な形状としては実際に高炉内に設置できるも
 のである。図6. 1. 4のゾンデ(一例)を用いて予備実験を実施した。

③計測課題

計測原理に関する課題と計測技術に関する課題がある。これら課題を整理する。

(計測原理上の課題)

ゾンデは炉内に挿入される。焼結鉱、コークスはゾンデの上面にまず接触し、続いて側面に沿って降下する。そしてゾンデの下面に向かうときに下面に空洞が生じる。空洞の大きさは原料の粒度や降下速度などの関数であり予測は難しい。この様子を図6.1.5に示す。線源・検出器間2重距離方式の特徴である幾何学的条件変動の補償が可能か、その際の連立方程式の構造はどのようになるかなどが計測原理に関する研究課題である。

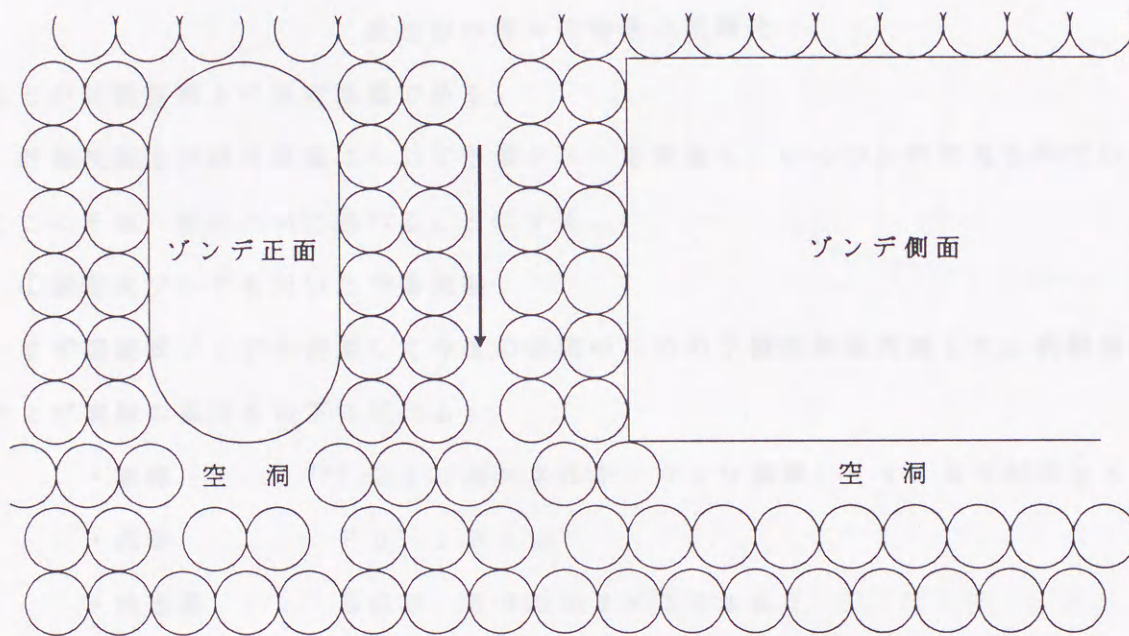


図6.1.5 ゾンデ下面に生じる空洞の概念図

(計測技術上の課題)

本研究の密度計は非接触方式を採用したが、高炉内の計測はゾンデによる接触した計測である。そのためゾンデは一般に鉄、ステンレス、銅などで造られ、厚さも5~10mmもある。非接触方式では高々1~2mmの厚さの鉄板を貫通すれば良いので、ほとんどのガンマ線源が検討の対象になった。今回は高エネルギーのガンマ線源の検討が必要であり¹³⁷Cs、⁶⁰Co、そして強力な中性子源であると同時に高エネルギーのガンマ線源として魅力的で工業利用(水分測定)の例⁸⁾がある²⁵²Cfが有力である。またゾンデは幅方向の厚さがあるため、線源を中心に置くか、半分の線源にして両端に配置するかなどが線

源の配置に関する研究課題といえる。また散乱ガンマ線を計数するエネルギー領域の最適化も重要である。さらに、移動式ゾンデの場合は散乱ガンマ線の検出効率を高めるために直径が小さく、長さが長いBGO検出器が必要となり、その特性を明らかにすることが必要である。まとめると、

- ・線源の種類検討： ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{252}Cf など
- ・線源の配置検討：線源を中心に配置する、あるいは両端に配置するなど
側面へガンマ線を放出しやすいコリメータの検討など
- ・計測領域の検討：検出するときのエネルギーの上限、下限の最適化
- ・検出器の特性検討：直径25mm×長さ100mmなどの細長い形状のBGO
検出器の種々の特性の明確化

などが計測技術上の研究課題である。

計測技術上の研究課題について予備テストを実施し、いくつかの知見を得ているので、ここにその一部について述べることにする。

①固定式ゾンデを用いた予備実験

まず固定式ゾンデを使用して今後の研究のための予備実験を実施した。実験装置、構成および実験の条件を以下に述べる。

- ・線源： ^{252}Cf （高エネルギーガンマ線源）1.85MBq×2個
- ・遮蔽：Pb 10cm
- ・検出器：BGO 50mmφ×50mm l
- ・試料：縦60cm×横60cm×深さ50cmの容器にコークス、焼結鈷を充填、それぞれの密度はコークスが 0.53g/cm^3 、
焼結鈷が 1.79 、 1.88 、 1.95 、 1.99g/cm^3
- ・計測時間：200s
- ・計測領域：1.0～1.5MeV

予備実験の装置構成を図6.1.6に示し、散乱ガンマ線と密度の関係を表6.1.4に整理する。図6.1.6に示したように ^{252}Cf のエネルギーが極めて高いエネルギー（6.5MeV）まで連続分布していること、および ^{252}Cf から放射された中性子による種々の核反応より生じる捕獲ガンマ線および非弾性散乱ガンマ線がコンプトン散乱したガンマ線と重なる場合があることより、密度の情報となる純粋なコンプトン散乱の領域をスペクトル上から見つけることは相当のスペクトルの分析が必要である。この予備実験で

はスペクトルが滑らかな（コンプトン散乱の特徴）な1.0～1.5 MeVの領域を選んだ。実験の結果はコークス、焼結鈷の区別はそれらの計数の大きな差より容易であることを示している。また固定ソンドは鉄で製作され、しかも冷却水が流れている。したがって試料以外にも鉄、水とガンマ線がコンプトン散乱を起こし、一緒に計数されるため散乱ガンマ線－試料密度の関数の勾配が小さいことが判明した。しかしながら密度計測の可能性は実証されたので、今後、前述した課題に対して研究を続ける意義は十分に存在する。

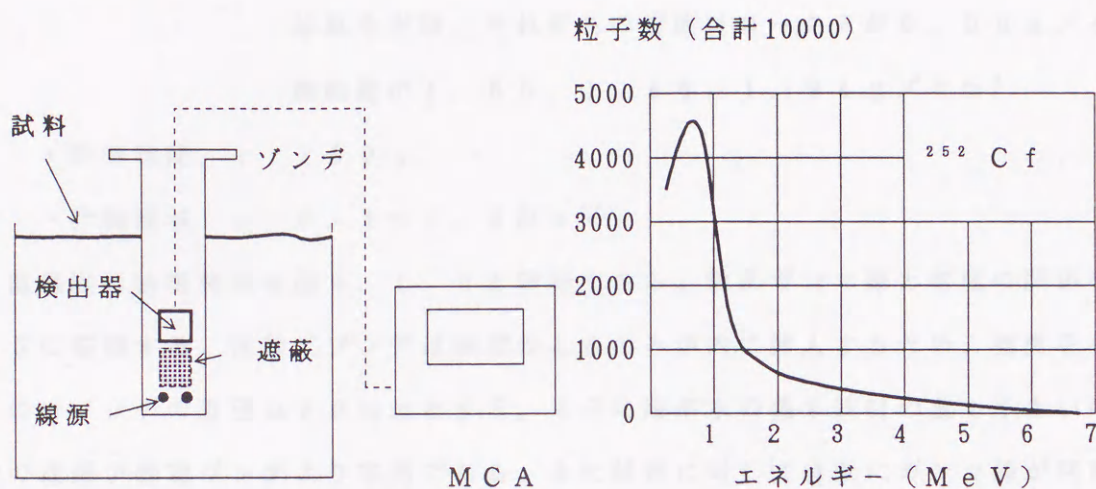


図6.1.6 予備実験の装置構成および ^{252}Cf のガンマ線特性

表6.1.4 ^{252}Cf を使用したときの散乱ガンマ線計数と密度の関係

密度 (g / cm ³)	線源中心	線源両端
コークス 0.53	6689	6510
焼結鈷 1.79	8883	8505
焼結鈷 1.88	9019	8744
焼結鈷 1.95	9230	8839
焼結鈷 1.99	9313	8903

②移動式ゾンデ

まず移動式ゾンデを使用して今後の研究のための予備実験を実施した。実験装置、構成および実験の条件を以下に述べる。

- ・線源 : ^{60}Co (高エネルギーガンマ線源) 3.7 MBq
- ・遮蔽 : Pb 30 cm
- ・検出器 : BGO 20 mm ϕ \times 100 mm l
- ・試料 : 縦60 cm \times 横60 cm \times 深さ50 cmの容器にコークス、焼結鈳を充填、それぞれの密度はコークスが0.56 g/cm³、焼結鈳が1.65、1.88、1.94 g/cm³
- ・計測時間 : 100 s
- ・計測領域 : 0.1 ~ 1.0 MeV

予備実験の装置構成は図6.1.6と同様である。散乱ガンマ線と密度の関係を表6.1.5に整理する。移動式ゾンデは測定するときのみ炉内に挿入するため、強度を小さくできるのでゾンデの直径は50 mmとする。さらに冷却水の量も鉄材の量も小さいのでガンマ線の透過が固定ゾンデより容易である。また試料に対して有効にガンマ線が利用できる特徴もある。予備実験では ^{137}Cs より透過力の大きい ^{60}Co を使用した。 ^{252}Cf を使用しなかった理由は透過力が充分であるため、中性子の外乱反応を有する ^{252}Cf を使用する利点がなかったことによる。また、遮蔽の距離を十分に長くした理由は細長いプローブを使用する場合は正勾配より負勾配の傾きが大きくなることが一般的にも筆者らの実験によっても確かめられているためである¹⁰⁻¹²⁾。

表6.1.5 ^{60}Co を使用したときの散乱ガンマ線計数と密度の関係

	コークス	焼結鈳	焼結鈳	焼結鈳
密度 (g/cm ³)	0.56	1.65	1.88	1.94
計 数	60266	19620	14542	13253

表6.1.5に示したようにコークス、焼結鈳の区別はそれらの大きな計数の差から容易である。しかも計数時間は100 sと固定ゾンデの半分であり、炉内に装入する

6. 2 複合計測の応用研究

複合計測として、①複数の放射線の利用、②複数のエネルギーの利用、③放射線の異なる反応の利用、④放射線と他の物理特性の組合せ利用、⑤放射線を検出する位置を変えた利用が考えられる。本研究は⑤に関するものであるが、さらに①を同時に利用することで新しい応用計測が開けることが判明した。この応用も密度計測の発展的なものである。

6. 2. 1 焼結鉄の還元率測定への応用

高炉の最も重要なメカニズムは還元反応であると述べた。種々の間接的計測から得られた情報を総合して還元を予測して高炉の操業は行われているが、直接的に還元率の情報を得たいという強い要求があり、計測技術の研究が待たれていた。

(1) 還元率の定義

焼結鉄の還元の進行状況の変化と還元率Rの意味を図6. 2. 1に示す。

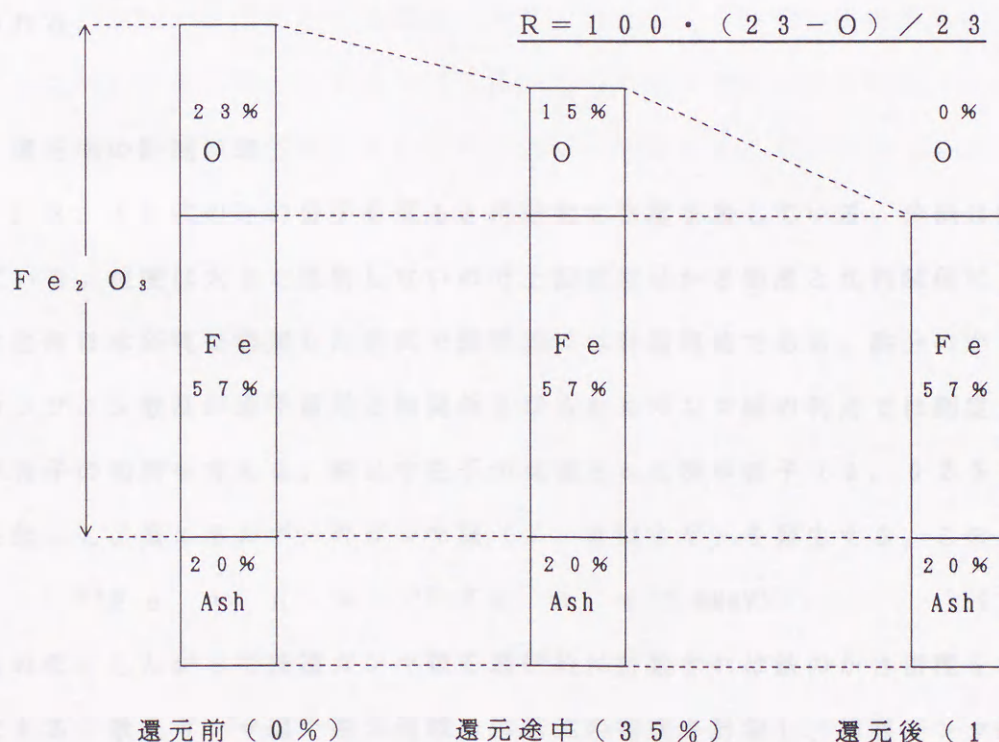


図6. 2. 1 焼結鉄の還元過程 (絶対重量変化)

還元率は還元前の鉄と結合している酸素重量と還元途中の酸素重量の差、すなわち減少した酸素重量を還元前の鉄と結合している酸素重量で除した値を%表示したものである。還元過程では鉄重量、脈石(Ash)重量は一定で、しかも事前に知り得る値である。したがって還元過程の酸素重量を測定できれば直接定義式で還元率は計算できる。しかしながら酸素は放射線とほとんど反応しない(高速中性子とわずかに非弾性散乱するのみ)ため直接定義式による還元率計算はできない。そこで、直接定義式を変形して新たな定義式を導くことにした。

計測対象領域に存在する還元過程の鉄重量密度、酸素重量密度、脈石重量密度を、それぞれF、O、Aとして指標kを、

$$k = (F + O + A) / F \quad (6.2.1)$$

とする。すると、

$$O = (k - 1)F - A \quad (6.2.2)$$

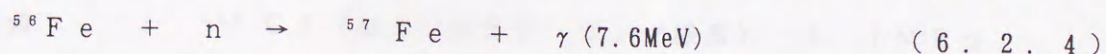
となる。図6.2.1の還元率Rの式を重量密度の式と読み変えて代入すると、

$$\begin{aligned} R &= 100 \cdot [23 - [(k - 1)F - A]] / 23 \\ &= 100 \cdot [23 - [(k - 1)57 - 20]] / 23 \\ &= -248k + 435 \quad (6.2.3) \end{aligned}$$

が得られる。

(2) 還元率の計測原理

(6.2.1)式のkの分子を見ると焼結鉄の密度を表している。分母は鉄分の密度を表している。粒度は大きく変動しないので上記密度はかさ密度と比例関係にある。焼結鉄のかさ密度は本研究で提案した方式で原理的には計測可能である。鉄分のかさ密度に関してはコンプトン散乱が原子番号と無関係となるためガンマ線の利用では測定できない。そこで中性子の利用を考える。鉄は中性子が減速された熱中性子(0.025 eV)と捕獲反応を起こし、高エネルギーのガンマ線(7.6 MeV)を発生する。この反応は、



で示される。したがって捕獲ガンマ線を選択的に計数すれば鉄のかさ密度を求めることが可能である。散乱ガンマ線で還元過程の焼結鉄の密度を計測し、捕獲ガンマ線で鉄のかさ密度を計測することによりkの値が計算できる。したがって(6.2.3)式に代入して還元率を求めることができる。線源としては最も中性子の放出が多く、かつガンマ線も放

出する ^{252}Cf が最適である。

(3) 研究の課題

設計課題および計測課題について予備テストの結果を示しながら検討する。

① 設計課題

固定式ゾンデ、移動式ゾンデは環境条件が同じであるから構造は基本的には図 6. 1. 4 と同じである。したがって検討課題も表 6. 1. 3 と同様である。

② 計測課題

計測課題の中で計測原理上の課題と計測技術上の課題について述べる。

(計測原理上の課題)

以下に課題をまとめる。

- ・鉄のかさ密度の変化で捕獲ガンマ線の計数が変化することの確認
- ・鉄のかさ密度の変化と捕獲ガンマ線の計数変化の関数関係の決定

(計測技術上の課題)

鉄でゾンデを製作することより、ゾンデ自体が捕獲ガンマ線の発生源、すなわちバックグラウンドとなる。したがって、

- ・バックグラウンドを最小とする線源、遮蔽、検出器、ゾンデの幾何学的配置の研究
- ・バックグラウンドを最小とする不要な熱中性子の吸収材の材質の検討

が必要である。また、焼結鈷に十分な熱中性子を照射することが重要である。熱中性子は中性子が原子核と弾性散乱を繰り返して減速され、最終的に熱平衡に達したものである。

そこで、

- ・十分に中性子を減速するための減速材（ポリエチレン、水などの軽元素で作られた材料）の材質および形状の研究

が必須の課題となる。

以上を検討しながら予備実験を実施した。実験の条件は、

- ・線源 : ^{252}Cf (強力な中性子・ガンマ線源) 3. 7 MBq
- ・遮蔽 : Pb 5 cm
- ・減速材 : ポリエチレン 50 mm ϕ \times 100 mm l
- ・吸収材 : 吸収率の最も高いボロン添加ポリエチレン
- ・検出器 : BGO 50 mm ϕ \times 50 mm l

- ・計測時間 : 200 s
- ・計測領域 : 捕獲ガンマ線 6.0 ~ 8.0 MeV
散乱ガンマ線 1.0 ~ 1.5 MeV
- ・試料 : 表6.2.1の仕様

表6.2.1 還元率測定用の焼結鉍試料

還元率 (%)	かさ密度 (g/cm ³)	鉄かさ密度 (g/cm ³)
2.5	1.88	1.07
30.0	1.79	1.12
60.0	1.95	1.40
97.8	1.99	1.44

予備実験に使用したゾンデの構造を図6.2.2に示す。

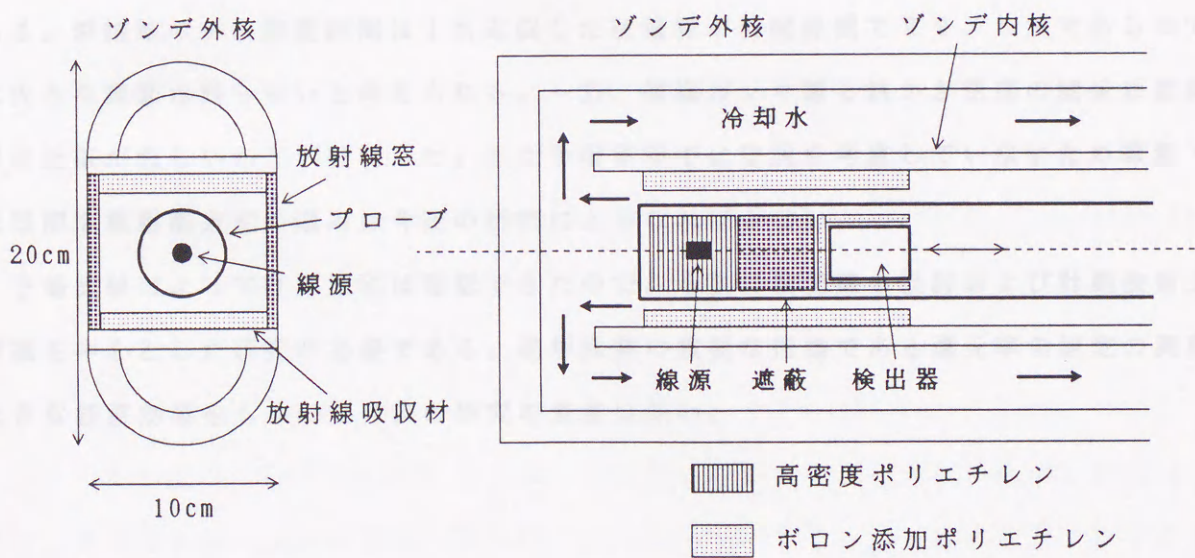


図6.2.2 還元率測定用のゾンデの構造

実験結果を表 6. 2. 2 に示す。

表 6. 2. 2 還元率測定の実験結果

(①, ③の単位: g/cm^3 ②, ④の単位: 個/200s)

①焼結鉍かさ密度	②計 数	③鉄かさ密度	④計 数
1. 7 9	1 4 5 9 7	1. 0 7	5 3 3 6
1. 8 8	1 4 9 8 1	1. 1 2	5 4 5 8
1. 9 5	1 5 2 6 8	1. 4 0	5 9 5 3
1. 9 9	1 5 5 4 6	1. 4 4	6 3 9 0

表で示したように密度と共に計数の増加が観察された。すなわち密度と計数は正勾配をもつ比例関係にある。1次の検量線は、

$$N_m = 4606 \rho_m + 6336 \quad r = 99.5\% \quad (6.2.5)$$

$$N_r = 2447 \rho_r + 2707 \quad r = 95.8\% \quad (6.2.6)$$

となった。ここで N_m 、 N_r は焼結鉍全体からの散乱ガンマ線計数、鉄分からの捕獲ガンマ線の計数であり、 ρ_m 、 ρ_r は焼結鉍のかさ密度、鉄かさ密度である。r は相関係数である。焼結鉍のかさ密度計測は1次近似した検量線が相関係数で99.5%であるので特に大きな課題は残らないと考えられる。一方、捕獲ガンマ線と鉄かさ密度の関係は直線式では近似が難しいことが判明した。また予備実験では空洞を考慮していないため線源・検出器間2重距離方式の適用は今後の研究によらなければならない。

予備実験によって計測原理は確認できたので、今後は検量線の検討および計測技術上の課題を中心とした研究が必要である。高炉操業の重要な指標である還元率の測定の実現は大きな経済効果をもつので今後の研究の意義は深い。

第6章の参考文献

- 1) 製鉄機械設備総覧編集委員会：'83製鉄機械設備総覧，155，
重工業新聞社（1983）
- 2) 日本鉄鋼協会：第3版 鉄鋼便覧 II 製鉄・製鋼，215，丸善（1979）
- 3) 一田守政，他：高炉内における装入物の降下と熔融の挙動に及ぼす炉体内面形状の
影響，鉄と鋼，77-12，39/46（1991）
- 4) 一田守政，他：炉壁混合層の形成とガス流れに及ぼすシャフト上部プロフィール，
装入物性状の影響，鉄と鋼，78-1，58/65（1992）
- 5) 一田守政，他：焼結鉱およびコークスの層空間率と形状係数の推定，鉄と鋼，
77-10，23/30（1991）
- 6) 田村健二，他：高炉レースウェイ部での微粉炭の燃焼限界と吹込位置の適正化，
鉄と鋼，77-6，53/60（1991）
- 7) 大野陽太郎，他：高炉レースウェイ空間における微粉炭の燃焼挙動と多量吹込
技術，鉄と鋼，78-1，50/57（1992）
- 8) H. Tominaga, et al: Simultaneous utilization of neutrons and γ -rays from
 ^{252}Cf for measurement of moisture and density, Nuclear Geophysics, 429/436,
Pergamon Press (1983)
- 9) D. H. Stoddard, et al: AEC Research and Development Report, ^{252}Cf Shielding
Guide, Savannah River Laboratory (1971)
- 10) Y. Shirakawa, et al: An In-stream Gamma-ray Scatter Gauge for Sintering Plant
Control in the Steel Industry, Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part E, 3-2,
147/156 (1989)
- 11) Y. Shirakawa, et al: Development of a Gamma-ray Backscatter Gauge for
Sintering Plant Control in the Steel Industry, SICE'88, ES3-4, 807/810 (1988)
- 12) 富永洋，他：焼結鉱製造工程管理のためのインストリーム γ 線密度計，第25回
理工学における同位元素研究発表会要旨集，6a-III-1，150（1988）

第7章 結 論

本研究を各章ごとに振り返りまとめを行う。さいごに結論として本研究の成果と今後の発展の可能性について述べる。

第1章では本研究の背景として放射線を利用した工業用応用計測の現状と課題を明確にし、同時に新しい研究領域として注目される複合計測、および微弱線源の利用について述べた。すなわち現状の課題の中で最も重要なものは線源、検出器、計測対象との幾何学的条件（幾何学的配置）の影響の定式化（モデリング）であることを明らかにし、複合計測に関しては異なる位置で放射線を検出することによって新たな展開の可能性を提唱し、さらに微弱線源の利用拡大が一層求められる時代になったことを述べた。以上の論点を踏まえ、研究テーマをガンマ線の散乱現象を利用した密度計測および密度計とした。具体的応用として鉄鋼業の焼結製造のプロセスにおける原料（焼結配合原料）の密度管理を取り上げた。本研究では理論的側面としてガンマ線の散乱現象の理論的解明（マクロモデルの構築と評価）、密度計測の応用原理の導出（線源・検出器間2重距離方式）を行う。研究の推進に際してはコンピュータシミュレーションの積極的な活用を試みる。さらに密度計としての具現化のための要素技術研究、設計・製作を行い、種々のテストにより原理の検証と密度計としての性能評価、使用効果の確認を行う。以上の進め方で研究を実施することにした。さらに本研究の今後の発展についても取り上げることにした。

第2章ではガンマ線の散乱を利用して密度計測を可能にする基本原理を述べた。つぎにガンマ線の散乱と計測対象の密度を関係づけるマクロモデルを確率論から提案した。またガンマ線散乱と計測対象までの距離を関係づけるマクロモデルを幾何学的観点から導出した。そしてガンマ線散乱-密度モデルとガンマ線散乱-距離モデルを結合して距離変動下においても密度計測を可能にする線源・検出器間2重距離方式、すなわち密度計測の応用原理を導いた。さらにこれらの計測原理をシミュレーションによって評価した。

第3章では原理研究の成果を具現化するための技術的側面の研究要素、すなわち線源、遮蔽、検出器などの検討について述べた。

第4章では第3章の要素研究を受けて具体的にガンマ線散乱密度計の設計仕様を明らかにした。

第5章ではガンマ線散乱密度計の基礎テスト、オフラインテスト、オンラインテストによって装置としての性能を評価すると同時に計測原理の検証を行った。さらに実際の焼結

機に設置し、使用方法を検討すると共に経済効果を実証した。

第6章では密度計測および密度計の応用研究を実施し、高炉の種々の情報獲得への適用可能性を示した。さらに中性子の利用を組み合わせることによって新しい複合計測が展開できることを述べた。

以上を結論としてまとめると、ここで研究開発した線源・検出器間2重距離方式によるガンマ線散乱密度計は、密度計測および密度計測装置として以下の特徴、および可能性を有するものといえる。

(1) 密度計測に関する特徴

- ①ガンマ線の散乱と計測対象（焼結配合原料）の密度を対応させた『ガンマ線散乱－密度モデル』を構築したこと
- ②ガンマ線の散乱と計測対象（焼結配合原料）の幾何学的配置（計測対象と密度計の距離）の関係を示す『ガンマ線散乱－距離モデル』を構築したこと
- ③上記のモデルを結合した密度計測方法である『線源・検出器間2重距離方式』を提案し、幾何的条件変動（距離変動）の存在する環境で密度計測を可能にしたこと
- ④密度計測の研究を円滑に推進するための道具として『ガンマ線解析計算コード（区分体積積分法など）』を開発したこと

(2) 密度計測装置に関する特徴

- ①法律（放射線障害防止法）の規制を受けない微弱なガンマ線源（3.7 MBq）を使用したこと
- ②ガンマ線の検出効率の高いビスマスジャーマネイド（BGO）検出器を採用したこと
- ③検出器の種類、および大きさの選定を検討するために『ガンマ線球体検出器効率計算コード』を開発したこと
- ④環境条件変動（温度変動など）の中で長期安定な密度計測を可能にする『自動利得制御（AGC）』を開発したこと
- ⑤計測精度は1.5～2.0 g/cm³の範囲でかつ距離8～10 cmの範囲において60 sの計測時間で±0.05 g/cm³を達成したこと

これらにより従来型の密度計（接触方式）の適用が不可能であった焼結配合原料の密度計測（オンラインで非接触が要件）を可能にし、実際の焼結機に設置できる密度計として実用化できた。

（3）今後の発展性

さらに、焼結配合原料の密度計測のみならず高炉の装入原料（焼結鉱、コークス）の挙動の把握にも適用拡大できることを示した。また、今後の複合計測の高度化（複数の放射線利用と放射線を検出する位置を変えた利用の結合など）、および微弱線源の工業利用などに活路を開くものである。

①本密度計は他の焼結機に適用可能である

②本密度計は高炉の装入物の降下状況の把握、空間率の測定、微粉炭の燃焼状況の推定に有用である

③本密度計にさらに中性子利用を組み合わせると焼結鉱の高炉内での還元状態の計測が可能である

このように新しい密度計測原理の提唱、研究を促進するツールである種々のコンピュータシミュレーションコードの開発、ガンマ線散乱密度計としての密度計測原理の具現化は放射線応用計測分野に大きな発展の可能性を与えると同時に、放射線応用計測が産業分野（鉄鋼業における焼結配合原料密度計測、その他）で多大な経済効果を創出できることを示したものである。

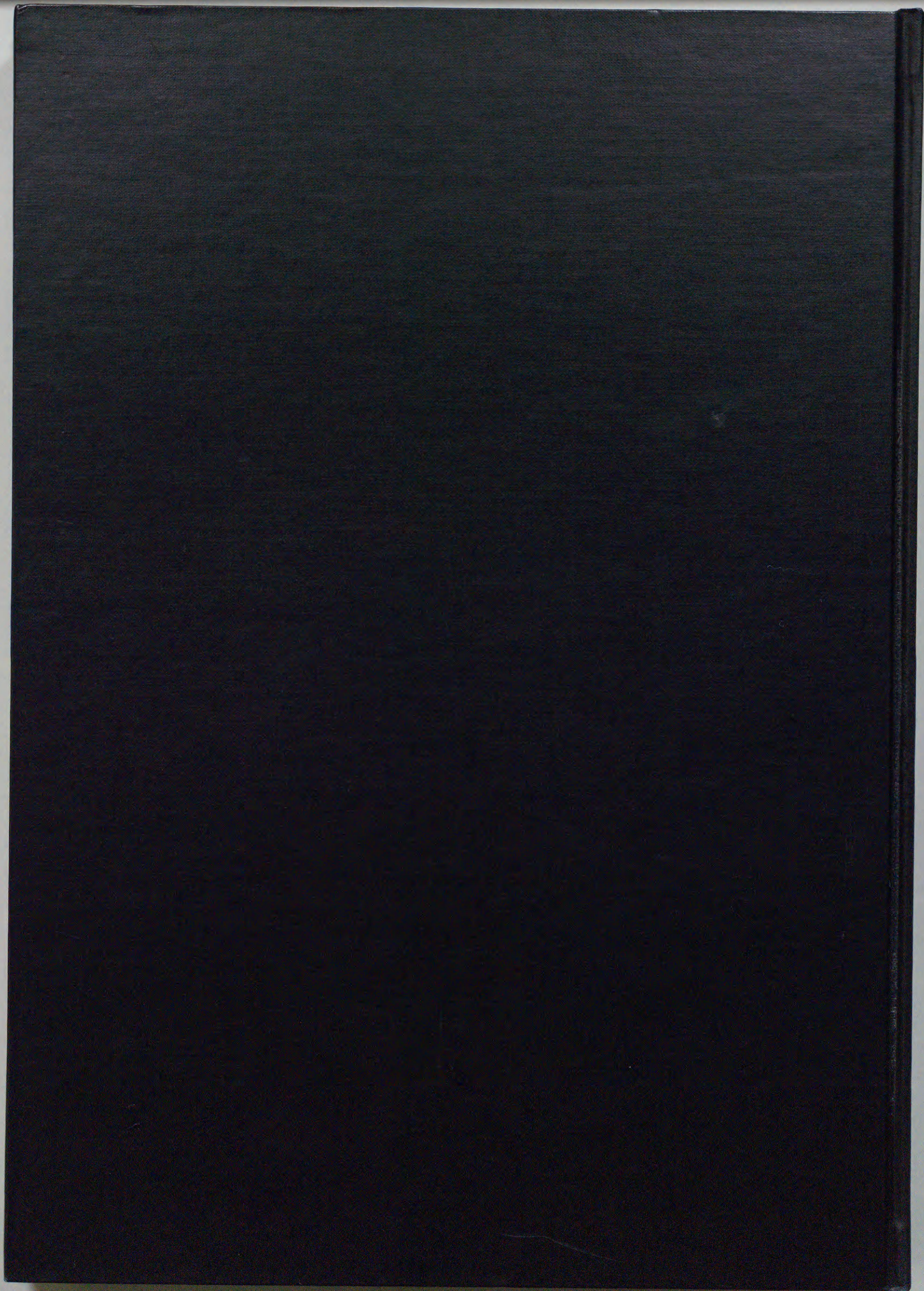
謝 辞

本論文をまとめるに当たって懇切にご指導くださった豊橋技術科学大学－北川孟教授、田所嘉昭教授、川上正博教授、鈴木新一助教授に心からお礼申し上げます。また、放射線計測の問題を常々ご指導下さった放射線計測協会－富永洋博士、静岡理工科大学－榎本茂正教授、天野研究所－天野豁博士にお礼申し上げます。

本論文は筆者が新日本製鐵株式会社君津製鐵所電気計装技術室に在籍した昭和56年～平成3年（途中昭和60年～62年英国留学）にかけて従事した放射線高度応用計測技術の研究の中で『ガンマ線による密度計測の研究および密度計としての装置化』についてまとめたものである。本研究の推進にあたり、君津製鐵所関係部門の方々をはじめ、日本原子力研究所アイソトープ部利用開発室、英国ハーウエル原子力研究所核物理学部、応用光研工業株式会社の多くの方々のご援助に感謝いたします。

また、オフラインテスト、オンラインテストに多大のご尽力を頂いた新日本製鐵株式会社君津製鐵所製銑技術室－下澤栄一掛員、電気計装技術室－関屋政洋掛員、日鉄エレクトロニクス君津支店計装制御システム課－高橋俊弘係員、小関哲也係員にお礼申し上げます。

さいごに論文作成に強いご支援を下さり、また激励して下さった上司設備部－三澤康雄部長にお礼申し上げます。



inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

