

自己放出ガンマ線を用いたNa透視手法に関する研究
－解析的評価による基本原理の検証－
(研究報告)

2003年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2003

自己放出ガンマ線を用いたNa透視手法に関する研究
－解析的評価による基本原理の検証－

平林 勝*、大高雅彦*、林田 均*、荒 邦章*

要旨

液体金属Na冷却炉の一次系機器システム、炉内構造物および冷却材バウンダリの健全性を確認するために、放射化されたNaから放出されるガンマ線を利用した監視・検査技術を提案した。計測手法は、特定方向から放出される複数の光子数に関する情報を基に、コンピュータトモグラフィによってガンマ線源の画像を再構成するものである。

この計測手法について、適用性および開発課題を検討した。以下に、得られた主要な結果を示す。

- (1) 代表的な一次系主配管の冷却材から放出されるガンマ線の減衰をシミュレーションし、計測手法の適用性を解析的に検討した結果、ガンマ線源の画像が再構成できることを確認した。
- (2) 検出器の効率を20%とし、1mm程度の分解能を得るための計測時間を検討した。
一次系主配管系では、検出器一千個を用いて約4分/断面、代表的な蒸気発生器では、
検出器一万個を用いて約2日/断面の計測時間である。
- (3) 本システムを実現するためには、試験研究による計測原理の検証および検出器システムの構築が考えられる。検出器システムの主要な構成要素としては、入射するガンマ線の方向を制限するコリメータ、ガンマ線検出器、スキナ、信号処理装置および画像処理装置が上げられる。コリメータは、分解能を決定する重要な要素であるため、試験研究と解析的評価を組み合わせて最適な設計を行う必要がある。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 次世代機器研究Gr

**Study on Sodium Viewing Technique
applying Sodium Gamma-Rays Emission Tomography
– Verification of Basic Principle by Analytical Investigation –**

Masaru Hirabayashi*, Masahiko Ohtaka*
Hitoshi Hayashida*, Kuniaki Ara*

Abstract

To confirm structural integrity of a primary cooling system and in-vessel components in a sodium-cooled fast breeder reactor, monitoring and inspection technique applying Gamma-rays emitted from sodium are proposed. The basic principle is as follows. As radioisotope ^{24}Na decays, photons are emitted and a fraction of these photons penetrate materials. If the number of these photons is counted by radiation detectors, an image of gamma-rays source is reconstructed by a computed tomography technique.

In this report, Applicability and problems concerned with the technique are investigated. Main results are as follows:

- (1) To verify applicability, the technique was analytically investigated based on gamma-rays emitted from sodium coolant in a typical pipe of a primary cooling system. As a result, it was confirmed that the image of gamma-rays source could be reconstructed.
- (2) A required time to measure in a spatial resolution of about 1mm was investigated in the detection efficiency of 20%. The time was about 4 minutes per section by a thousand detectors in the typical pipe of a primary cooling system. And in a typical steam generator, the time was about 2 days per section by ten thousand detectors.
- (3) To realize a fluoroscopic inspection system, it is necessary that the principle should be verified by experimental researches. Main equipments of the system are a collimator, radiation detector, scanner, signal processing device and image processing device. As a spatial resolution is decided by the collimator, the shape must be evaluated by experimental researches and analytical investigation.

* Innovative Component System Research Group, Advanced Technology Division, OEC

目次

1. 緒言	1
2. 計測手法	2
2.1 CT の原理	2
2.1.1 Radon 変換	2
2.1.2 フィルタ補正逆投影法	3
2.2 光子数の減衰	4
3. 冷却材 Na から放出される γ 線エネルギーの選定	6
3.1 評価体系	6
3.2 γ 線の減衰とエネルギーの選定	6
4. 計測手法の適用性検討	8
4.1 計測対象の検討	8
4.2 Na 配管における計測手法の適用	8
4.2.1 解析体系	8
4.2.2 解析方法	9
4.2.3 解析結果	9
4.2.4 計測時間の評価	10
5. 機器システムへの適用性と課題	11
6. 結言	13
謝辞	14
参考文献	14

図表リスト

表 3.1 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）の各媒質の占める断面積割合	15
表 3.2 各物質の質量吸収係数	15
表 5.1 検討に用いた蒸気発生器（三重管型 B）に対する計測時間の概算	16
表 5.2 Na 主配管に対する計測時間の概算	17
図 2.1 Radon 変換の説明図	18
図 2.2 投影定理の説明図	19
図 2.3 光子数の計測に関する概略図	20
図 3.1 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）の概略図	21
図 3.2 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）全体の断面概略図	22
図 3.3 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）三重管部分の断面概略図	22
図 3.4 蒸気発生器容器半径に対する γ 線の減衰	23
図 4.1 計測体系の半径に対する γ 線の期待値	24
図 4.2 計測体系の半径に対する 10 個の γ 線計測時間	24
図 4.3 解析体系	25
図 4.4 配管の画像再構成結果	26
図 4.5 模擬欠陥の画像再構成結果	27
図 5.1 想定されるシステムの概念図	28

記号リスト

d : 計測対象の内径	μ_m : 質量吸収係数
D : 計測対象の外形	θ : 角度
(f_x, f_y) : 二次元直行座標	ρ : 密度
G : γ 線強度	ρ_{av} : 密度の体積平均
h : 検出器高さ	ω : 立体角
H : 計測対象の高さ	ξ : 周波数
i : 虚数	(ξ, θ) : 二次元極座標
l : コリメータの長さ	
L : 計測体系の長さ、計測体系の半径	
n : 画素数	
n_0 : 光子放出数	
n_B : 解像度 5mm を得たときの画素数	
N : 検出器で計測される全光子数	
N_B : 解像度 5mm を得るために必要な計測 γ 線光子数	
N_D : 計測すべき γ 線光子数	
N_F : n_0 の二次元フーリエ変換	
N_θ : N の一次元フーリエ変換	
N_ξ : $ \xi N_\theta$ の逆フーリエ変換	
p : 画素サイズ	
R : 断面積の割合	
(s, u) : 二次元直行座標	
(s, θ) : 二次元極座標	
S : 計測体系の断面積	
t : 構造材の肉厚	
T : 計測時間	
V : 体積	
w : 元素の重量割合、検出器幅	
(x, y) : 二次元直行座標	
δ : デルタ関数	
η : 検出器効率	
μ : 線吸収係数	
μ_{av} : 物質の平均線吸収係数	

1. 緒言

Na 冷却原子炉において、光学的に不透明な Na 中の炉内構造物、冷却材バウンダリおよび機器システムを検査することは、原子炉の健全性を維持する上で重要である。そのために、超音波を利用した炉内構造物の視認装置が開発されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、この装置は、炉容器内に超音波探触子を装荷する必要があるため、原子炉運転中に利用することはできない。

原子炉運転中における検査装置に関する制約条件としては、高温環境、高放射線環境およびバウンダリの維持が上げられる。この条件を満足し、原子炉運転中にバウンダリ内に装置を持ち込むことなく、炉内構造物等の健全性を監視・検査する装置の開発が、原子炉の安全かつ安定運転の観点から切望されている。

そこで本報告では、制約条件の一つである高放射線環境に着目し、一次系の放射化された Na から放出される γ 線を利用した監視・検査技術を提案する。この計測手法の概略は、以下の通りである。放射化された Na を内包する容器等から γ 線が放出され、この γ 線は Na および容器等を透過する。この γ 線の光子数を容器外に設置したコリメータ付きの検出器により計測する。この全光子数は、特定方向からの光子数の線積分になっていることから、このようなデータを容器等の全周から得ることができれば、コンピュータトモグラフィ（以下 CT と言う）の原理によって γ 線放出源である Na の位置を特定することが可能となる。Na の位置が特定できれば、容器内に存在する構造物の位置、変形および変位を定めることができる。また、容器等の欠陥内に放射化された Na が含まれていれば、その欠陥を識別することができる。

この手法の適用性を確認するために、検査対象として実用 Na 冷却炉の代表的な一次系 Na 主配管を用いた解析評価を実施する。また、Na 主配管および機器への適用性検討のための模擬検査対象として実用 Na 冷却炉の代表的な蒸気発生器について、計測分解能の観点から計測時間を検討する。そして最後に、本監視・計測技術の適用課題についてまとめる。

2. 計測手法

計測手法に関連し、CT の原理の基礎である Radon 変換と画像の再構成手法、および光子が物体を透過する際の減衰について以下に示す。

2.1 CT の原理⁽³⁾⁽⁴⁾

CT の原理は、オーストリアの数学者 J. Radon が、2 次元あるいは 3 次元の物体は、その投影データの無限集合から一意的に再生できることを数学的に証明したことに基づいている。それに関連し、ここでは光子放出源の分布と検出器で計測される光子数の関係を表す Radon 変換、および光子放出源の画像を再構成するための手法の一つとして、フィルタ補正逆投影法について示す。

2.1.1 Radon 変換

図 2.1 に示すような二次元の光子放出源を考える。但し、光子は放出自身および他の物質と相互作用しないと仮定する。ここで、(x,y) 座標を角度 θ だけ回転した(s,u) 座標への座標変換は、

$$\begin{bmatrix} s \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

で表されるので、u 軸に平行な線 AB の関係式は以下となる。

$$x \cos \theta + y \sin \theta - s = 0 \quad (2.2)$$

光子放出源からの光子放出数を n_0 とすると、検出器で計測される全光子数 N は、式(2.2)を満たす点からの光子数であるから、デルタ関数を用いて以下の関係式で表される。

$$N(s, \theta) = \int \int_{-\infty}^{\infty} n_0(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy \quad (2.3)$$

$$\delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) = \begin{cases} \infty & (x \cos \theta + y \sin \theta - s = 0) \\ 0 & (x \cos \theta + y \sin \theta - s \neq 0) \end{cases} \quad (2.4)$$

この関係式を二次元の光子数分布から検出器で計測される全光子数への Radon 変換という。

また、式(2.2)の x, y を式(2.1)を用いて変形すると、

$$\begin{aligned} x \cos \theta + y \sin \theta - s &= (s \cos \theta - u \sin \theta) \cos \theta + (s \sin \theta + u \cos \theta) \sin \theta - s \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

となるため、式(2.3)の積分範囲の変数変換すると、以下の関係式が得られる。

$$N(s, \theta) = \int \int_{-\infty}^{\infty} n_0(s \cos \theta - u \sin \theta, s \sin \theta + u \cos \theta) \delta(0) ds du \quad (2.6)$$

ここで、デルタ関数は、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(0) ds = 1 \quad (2.7)$$

であるから、式(2.6)は以下に示すような u のみによる線積分で表すことができる。

$$N(s, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} n_0(s \cos \theta - u \sin \theta, s \sin \theta + u \cos \theta) du \quad (2.8)$$

2.1.2 フィルタ補正逆投影法

画像再構成では、検出器で計測された光子数 $N(s, \theta)$ から、光子放出源の位置を特定する、すなわち逆 Radon 変換によって光子放出数の分布 $n_0(x, y)$ を求める必要がある。これを解くために、「Radon 変換 $N(s, \theta)$ の s についての一次元フーリエ変換 $N_\theta(\xi)$ と、光子放出数の分布 $n_0(x, y)$ の二次元フーリエ変換 $N_F(f_x, f_y)$ の原点を通り f_x, f_y 面に垂直で f_x 軸に対して角度 θ をなす平面による断面は等しい（図 2.2）」という投影定理を用いる。この定理は次のように証明することができる。

Radon 変換 $N(s, \theta)$ の s についての一次元フーリエ変換 $N_\theta(\xi)$ は以下の関係式で表される。

$$N_\theta(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} N(s, \theta) \exp(-i2\pi\xi s) ds \quad (2.9)$$

式(2.9)に式(2.8)を代入すると、以下の関係式となる。

$$N_\theta(\xi) = \iint_{-\infty}^{\infty} n_0(s \cos \theta - u \sin \theta, s \sin \theta + u \cos \theta) \exp(-i2\pi\xi s) ds du \quad (2.10)$$

式(2.10)の積分範囲を変数変換すると、光子放出数の二次元分布 $n_0(x, y)$ の二次元フーリエ変換 $N_F(f_x, f_y)$ の原点を通り f_x, f_y 面に垂直で f_x 軸に対して角度 θ をなす平面による断面の関係式が以下のように得られる。

$$\begin{aligned} N_\theta(\xi) &= \iint_{-\infty}^{\infty} n_0(x, y) \exp\{-i2\pi\xi(x \cos \theta + y \sin \theta)\} dx dy \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} n_0(x, y) \exp[-i2\pi\{(\xi \cos \theta)x + (\xi \sin \theta)y\}] dx dy \\ &= N_F(\xi \cos \theta, \xi \sin \theta) \\ &= N_F(f_x, f_y) \end{aligned} \quad (2.11)$$

この投影定理より、 $N_F(f_x, f_y)$ を逆フーリエ変換したものが $n_0(x, y)$ であるから、以下の関係式が成り立つ。

$$n_0(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} N_F(f_x, f_y) \exp\{i2\pi(f_x x + f_y y)\} df_x df_y \quad (2.12)$$

この座標 (f_x, f_y) を極座標 (ξ, θ) に変換すると、以下の関係式となる。

$$n_0(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} N_F(\xi \cos \theta, \xi \sin \theta) \exp\{i2\pi\xi(x \cos \theta + y \sin \theta)\} \xi d\xi d\theta \quad (2.13)$$

式(2.13)に式(2.11)を代入すると、以下の関係式となる。

$$n_0(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} N_\theta(\xi) \exp\{i2\pi\xi(x \cos \theta + y \sin \theta)\} \xi d\xi d\theta \quad (2.14)$$

ここで、積分範囲を以下の関係式のように変更する。

$$n_0(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} N_\theta(\xi) \exp\{i2\pi\xi(x \cos \theta + y \sin \theta)\} |\xi| d\xi d\theta \quad (2.15)$$

式(2.15)に式(2.2)を代入すると、以下の関係式となる。

$$n_0(x, y) = \int_0^\pi \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} |\xi| N_\theta(\xi) \exp(i2\pi s\xi) d\xi \right\} d\theta \quad (2.16)$$

式(2.16)の中括弧内は、関数 $|\xi| N_\theta(\xi)$ の逆フーリエ変換の関係式であるから、それを

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\xi| N_\theta(\xi) \exp(i2\pi s\xi) d\xi = N_\xi(s, \theta) = N_\xi(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) \quad (2.17)$$

とすると、式(2.16)は以下の関係式となる。

$$n_0(x, y) = \int_0^\pi N_\xi(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta \quad (2.18)$$

すなわち、各角度 θ について、①検出器で計測される光子数をフーリエ変換、②周波数空間で $|\xi|$ 倍するフィルタを適用、③逆フーリエ変換、④積分することによって光子放出源の像を再構成することが可能となる。

2.2 光子数の減衰

2.1CT の原理のところでは、光子は放出自身および他の物質と相互作用しないと仮定した。しかし、実際には物質との相互作用（光電効果、コンプトン散乱、レーリー散乱等）により、光子数は減衰する⁽⁵⁾。その影響について以下に示す。

図 2.3 に光子数の計測に関する概略図を示す。計測体系からは光子が放出され、その光子を検出器で計測する。但し、光子は検出器に向かって垂直かつ検出器側にのみ放出されると仮定する。また、計測体系は、単位時間および単位体積当たりの光子放出数の分布 $n_0(x)$ を成しているものとする。計測体系において、微小長さ dx から放出される光子を検出器で計測したとすると、放出自身および他の物質との相互作用を考慮した計測光子数 dN は以下の関係式で表すことができる。

$$dN = n_0(x) S dx \exp\{-\mu(x)x\} \quad (2.19)$$

ここで、 S ：計測体系の断面積、 $\mu(x)$ ：線吸収係数の分布である。これより、全計測体系から放出される全光子数 N は以下となる。

$$N = S \int_L n_0(x) \exp\{-\mu(x)x\} dx \quad (2.20)$$

ここで、 L ：計測体系の長さである。式(2.20)と式(2.8)を比較すると、同様な光子放出数分布の線積分を表しているが、式(2.20)では、減衰効果を表す線吸収係数の分布 $\mu(x)$ という未知数が含まれており、このような線積分の無限集合を得ることができたとしても、光子放出数分布 $n_0(x)$ を一意的に決めることはできない。そのために、線吸収係数の分布 $\mu(x)$ を一様と仮定したり、像を再構成する際に、吸収の項 ($\exp(-\mu x)$) を含め、反復計算しながら再構成を行う逐次近似法等の吸収補正処理が必要となる。

また、ここでは線吸収係数 μ を单一元素として扱ったが、物質が複数の元素で構成される場合には、線吸収係数 μ_{av} として、以下の関係式を用いる。

$$\mu_{av} = \rho_{av} \sum_i w_i \cdot \mu_{mi} \quad (2.21)$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.22)$$

ここで、 ρ_{av} ：密度の体積平均、 w_i ：元素の重量割合、 μ_m ：質量吸収係数、 ρ ：密度である。

3. 冷却材 Na から放出される γ 線エネルギーの選定

一次冷却系の Na は放射化され、 ^{22}Na と ^{24}Na が生成される。但し、 ^{22}Na の放射能のレベルは ^{24}Na に比べて 1 万分の 1 以下なので、ここでは ^{24}Na を利用することとし、実際の原子炉機器システムへ適用した場合の γ 線減衰割合の概算および計測に利用する ^{24}Na から放出される γ 線のエネルギーを選定する。

3.1 評価体系

評価に用いる原子炉機器システムとしては、一次系の機器システムでは無いが、大型機器への適用性検討を考慮し、ここでは図 3.1 に示す実用炉として設計検討中の蒸気発生器（三重管型）⁽⁶⁾を選んだ。図 3.2、図 3.3 に蒸気発生器全体および三重管部分の断面概略図を示す。本検討では、蒸気発生器内部の Na が γ 線放出源となり、それが蒸気発生器の中心部に存在すると仮定する。また、鋼材はすべて鉄で模擬する。

評価体系を単純化するために、蒸気発生器内部に存在する媒質の均一化を行う。そのために、図 3.2 および図 3.3 から各媒質の占める断面積を求め、その断面積割合に対する媒質密度の平均化を行っている。表 3.1 に各媒質の占める断面積割合等を示す。これより、各媒質の均一化を行った場合の平均密度は $2.2485\text{g}/\text{cm}^3$ となる。すなわち、蒸気発生器の中心部で放出された γ 線は、密度 $2.2485\text{g}/\text{cm}^3$ の均一媒質中を距離 1.130m 透過し、さらに密度 $7.86\text{g}/\text{cm}^3$ の鉄を距離 0.03m 透過して容器外へ到達する。

3.2 γ 線の減衰とエネルギーの選定

^{24}Na が放出する γ 線のエネルギーは、 1.369MeV と 2.754MeV である。このことから、この付近の γ 線（光子）エネルギーに対する各物質の質量吸収係数 μ_m を表 3.2 に示す。質量吸収係数 μ_m は、物質にほとんど依存しないことが知られている。従って、以下の計算では均一媒質中の質量吸収係数 μ_m に鉄の質量吸収係数 μ_m を用いて γ 線の減衰を評価する。

^{24}Na が放出する γ 線のエネルギーに対して、表 3.2 より質量吸収係数 μ_m を内挿すると以下となる。

$$\mu_m = 5.128 \times 10^{-2} \ [\text{cm}^2/\text{g}] \quad 1.369\text{MeV} \quad (3.1)$$

$$\mu_m = 3.779 \times 10^{-2} \ [\text{cm}^2/\text{g}] \quad 2.754\text{MeV} \quad (3.2)$$

次に、均一媒質と蒸気発生器容器（鉄）の線吸収係数 μ を求めると以下となる。

均一媒質（密度 $\rho = 2.2485\text{g}/\text{cm}^3$ ）

$$\mu = \mu_m \times \rho = 1.15 \times 10^{-1} \ [\text{cm}^{-1}] \quad 1.369\text{MeV} \quad (3.3)$$

$$\mu = \mu_m \times \rho = 0.85 \times 10^{-1} \ [\text{cm}^{-1}] \quad 2.754\text{MeV} \quad (3.4)$$

蒸気発生器容器（鉄）（密度 $\rho = 7.86\text{g}/\text{cm}^3$ ）

$$\mu = \mu_m \times \rho = 4.03 \times 10^{-1} \ [\text{cm}^{-1}] \quad 1.369\text{MeV} \quad (3.5)$$

$$\mu = \mu_m \times \rho = 2.97 \times 10^{-1} \ [\text{cm}^{-1}] \quad 2.754\text{MeV} \quad (3.6)$$

これより、蒸気発生器の中心部で放出された γ 線が、均一媒質および蒸気発生器容器を

透過する際の減衰は式(2.20)を用いて以下となる。

$$N/n_0 = \exp\left\{-\left(1.15 \times 10^{-1}\right) \times 113.0\right\} \cdot \exp\left\{-\left(4.03 \times 10^{-1}\right) \times 3.0\right\} = 6.78 \times 10^{-7} \quad 1.369 \text{MeV}$$
(3.7)

$$N/n_0 = \exp\left\{-\left(0.85 \times 10^{-1}\right) \times 113.0\right\} \cdot \exp\left\{-\left(2.97 \times 10^{-1}\right) \times 3.0\right\} = 2.76 \times 10^{-5} \quad 2.754 \text{MeV}$$
(3.8)

この結果より、減衰の少ない 2.754MeV のエネルギーを利用した方が、計測の観点から有効であることが分かる。但し、その場合でも蒸気発生器の中心部で放出されたγ線は、 10^5 分の 1 程度に減衰する。

参考として、蒸気発生器容器の肉厚は 0.03m の場合で、均一媒質の半径をパラメータとした γ 線の減衰を評価した結果を図 3.4 に示す。

4. 計測手法の適用性検討

ここでは、実際に計測体系に対して γ 線の減衰評価を行い、得られたデータから計測体系の画像再構成を行う。

4.1 計測対象の検討

画像再構成を行うにあたり、 γ 線の減衰と計測時間の観点から、計測を行う体系の評価を行う。

画素サイズ、すなわち計測体系の γ 線放出源の最小サイズは1mm角とする。検出器のサイズは、幅が画素サイズの半分の0.5mm、高さを5mmとする。画素の体積は、高さを検出器の高さと同じ5mmとすると 5mm^3 となる。 ^{24}Na の γ 線強度は、「もんじゅ」での設計値より $9.6 \times 10^8 \text{Bq/cm}^3$ であるため⁽⁷⁾、画素の体積から放出される γ 線光子数は以下のように見積もることができる。

$$n_0 = 9.6 \times 10^8 [\text{Bq}/\text{cm}^3] \cdot 5 \times 10^{-3} [\text{cm}^3] = 4.8 \times 10^6 [\text{個}/\text{s}] \quad (4.1)$$

次に、検出器に入射する γ 線の期待値を求める。計測体系と検出器の間には、特定方向からの γ 線のみを計測するためのコリメータが必要である。このコリメータの長さを30cmとし、検出器までの包囲立体角を求めると以下となる。

$$\omega = \frac{0.05[\text{cm}] \cdot 0.5[\text{cm}]}{4\pi \cdot \{L[\text{cm}] + 30[\text{cm}]\}^2} \quad (4.2)$$

ここで、 L ：計測体系の半径である。以上より、検出器に入射する γ 線の期待値は、式(3.8)、(4.1)、(4.2)を用いて以下の関係式で表される。

$$N = n_0 \omega \left\{ \exp(-0.85 \times 10^{-1} L) \cdot \exp(-2.97 \times 10^{-1} \cdot 3.0) \right\} [\text{個}/\text{s}] \quad (4.3)$$

式(4.3)を用い、計測体系の半径 L に対する検出器に入射する γ 線の期待値を求めた結果を図4.1に示す。また、10個の γ 線を計測するのに要する時間を求めた結果を図4.2に示す。この結果より、計測体系の半径が大きくなれば、詳細に画像再構成を行うためには、 γ 線計測時間に長時間を要することから、以下では半径50cm程度(γ 線計測時間約19分)の計測体系について計測手法を適用する。

4.2 Na配管における計測手法の適用

4.1計測対象の検討より、半径50cm程度の計測体系であれば比較的短時間で画像再構成のための γ 線を計測できることから、ここでは実用Na冷却炉の代表的な主配管(設計例)に計測手法を適用する。

4.2.1 解析体系

図4.3に解析体系を示す。配管は二重管であり、内管中をNaが流れる。内管と外管の間はガス層であり、この領域で γ 線の減衰は無いものとする。内管、外管の鋼材は、鉄で模擬する。配管の高さ方向の厚さは5mmとし、その体積のNaから γ 線が放出される。Na

の密度は、500°Cにおける液体の値 $0.83\text{g}/\text{cm}^3$ を用いた。また、鉄の密度は、20°Cにおける値 $7.86\text{ g}/\text{cm}^3$ を用いた。これより配管中心部の Na から放出された γ 線は、Na 中を 558.8mm、内管中を 14.3mm、ガス中を 61.9mm、外管中を 10.0mm 透過して配管外へ到ることとなる。

また、計測分解能の観点から、配管に直径 2 から 20mm の模擬欠陥を配置し、これらについて画像再構成の可否を確認する。模擬欠陥には、配管を流れる Na と同一の放射能を有する Na が満たされているものとする。

4.2.2 解析方法

γ 線が検出器に到るまでの物質との相互作用による減衰挙動シミュレーションには、電磁力スケードモンテカルロコード EGS4⁽⁸⁾を用いた。EGS4 は、スタンフォード線形加速器研究所で開発され、当初は高エネルギー一分野での使用を目的としたものであったが、その後低エネルギー一分野への拡張も行い、放射線遮蔽、放射線計測、医学物理等の分野で用いられている。

γ 線検出器等の配置を図 4.3 に示す。 γ 線検出器の幅は 0.5mm、高さは配管の高さと同じ 5mm、検出器の間隔は 1.25mm で、1024 個の検出器が配置されているとする。配管と検出器の間には長さ 300mm のコリメータが配置されているとする。従って、高さ方向 5mm の範囲外に散乱した γ 線はコリメータで除去されるものとし、その γ 線についてはその時点で計算を打ち切ることとした。 γ 線検出器を回転させる角度は、 $360/2048^\circ$ である。また、画素のサイズは 0.64mm 角である。

また、EGS4 で得られた γ 線光子数分布データから画像を再構成するための手法は、2 章に記述したフィルタ補正逆投影法を利用した。この方法の適用において、線吸収係数の分布 $\mu(x)$ は一様と仮定した。

4.2.3 解析結果

図 4.4 に配管の画像再構成結果を示す。解析結果より、 γ 線放出源である Na の画像を再構成できていることが分かる。

図 4.5 には、計測する γ 線光子の総数を変化させた場合の模擬欠陥の画像再構成結果を示す。計測 γ 線光子の総数は、それぞれ 50M、100M、150M 個である。計測 γ 線光子の総数 50M 個の場合では、直径 10mm 以上の模擬欠陥しか確認することができていない。計測 γ 線光子の総数 100M 個、150M 個の場合には、直径 5mm の模擬欠陥も確認することができるが、直径 2mm の模擬欠陥については、確認することができない。

分解能の向上対策としては、画素のサイズを小さくすることが考えられる。しかしながら、それは画素数が増やすことになり、実計測においては計測時間が長くなる。そのため、監視・検査対象に必要な分解能との兼ね合いで画素サイズを決める必要がある。分解能と計測時間の関係については、5.機器システムへの適用性と課題のところに後述する。

また、本解析評価における画像の再構成では、解析を簡略化するために、線吸収係数の分布 $\mu(x)$ は一様と仮定した。実際には Na と配管では線吸収係数は異なるが、その影響を考慮していない。2.2 光子数の減衰のところで述べたが、逐次近似法等の吸収補正処理を適用し、画像再構成結果の評価を今後検討していく必要がある。

4.2.4 計測時間の評価

この Na 配管から、実際に γ 線を計測するにあたり、必要な計測時間を評価する。なお、検出器は、解析で用いたものと同じ幅 0.5mm、高さ 5mm とする。また、検出器の回転は考慮せず、検出器 1 個で 100×10^6 個の γ 線を計測するのに要する時間のみを評価する。

^{24}Na の γ 線強度は「もんじゅ」での設計値より $9.6 \times 10^8 \text{Bq/cm}^3$ であるため、半径 558.8mm で厚さが検出器と同じ 5mm の液体 Na から単位時間に放出される光子数は以下となる。

$$n_0 = 9.6 \times 10^8 [\text{Bq}/\text{cm}^3] \times (\pi \cdot 55.88^2 \cdot 0.5) [\text{cm}^3] = 4.7 \times 10^{12} [\text{個}/\text{s}] \quad (4.4)$$

γ 線がすべて中心から放出されると仮定し、さらに検出器は外管からコリメータの長さ 300mm 外側に設置されているとすると、検出器の包囲立体角は以下となる。

$$\omega = \frac{0.05 [\text{cm}] \times 0.5 [\text{cm}]}{4\pi \{64.5 [\text{cm}] + 30.0 [\text{cm}]\}^2} = 2.23 \times 10^{-7} \quad (4.5)$$

ここで、中心部から放出される γ 線の減衰は、鉄の質量吸収係数 μ_m である $3.779 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{g}$ を用いると、Na と鉄の線吸収係数 μ_{Na} 、 μ_{Fe} および減衰率 N/n_0 は、

$$\mu_{Na} = 3.779 \times 10^{-2} [\text{cm}^2/\text{g}] \times 0.83 [\text{g}/\text{cm}^3] = 3.14 \times 10^{-2} [\text{cm}^{-1}] \quad (4.6)$$

$$\mu_{Fe} = 3.779 \times 10^{-2} [\text{cm}^2/\text{g}] \times 7.86 [\text{g}/\text{cm}^3] = 2.97 \times 10^{-1} [\text{cm}^{-1}] \quad (4.7)$$

$$N/n_0 = \exp(-3.14 \times 10^{-2} \cdot 55.88) \exp\{-2.97 \times 10^{-1} \cdot (1.43 + 1.00)\} = 0.084 \quad (4.8)$$

であるから、単位時間あたりに検出器に到達する光子数 N は以下となる。

$$N = 4.7 \times 10^{12} [\text{個}/\text{s}] \times 2.23 \times 10^{-7} \times 0.084 = 8.8 \times 10^4 [\text{個}/\text{s}] \quad (4.9)$$

従って、 100×10^6 個の光子を計測するのに必要な時間 T は以下となる。

$$T = \frac{100 \times 10^6 [\text{個}]}{8.8 \times 10^4 [\text{個}/\text{s}]} = 1136 [\text{s}] \approx 19 [\text{min}] \quad (4.10)$$

これより、直径 5mm 程度の欠陥の計測は、非常に短時間で検査可能であることが分かる。

5. 機器システムへの適用性と課題

まず、実際の機器システムに対して、計測手法の適用性を検討する。解析結果より解像度は 5mm 程度であったことから、これを 1mm までの高解像度化するためには、画素サイズを細かくすることが必要である。**4. 計測手法の適用性検討**では画素サイズが 0.64mm 角であったことから、1mm の解像度をえるためには概算で約 1/5 のサイズである 0.13mm 角の画素サイズにする必要があると考えられる。しかし、それは画素数の増やすことであり、結果計測時間も長くなる。

次に、検出器の効率であるが、解析では検出効率を 100%とした。しかし、これは現実的な値では無く、一般的な X 線 CT 用半導体検出器の効率は 20%であり、この効率は主に半導体センサの材料によって決まる。

以上の内容を考慮し、**4.2.4 計測時間の評価**で用いた方法で、図 3.1 に示す蒸気発生器（三重管型）および図 4.3 に示す Na 主配管について、計測時間の概算を行った。

表 5.1 に、蒸気発生器（三重管型）に対しての計測時間の概算を示す。この結果は、検出器 1 個を用いた場合であり、1mm の解像度を得るために画素サイズ 0.1mm では、 2.05×10^4 日となり実用的な計測時間ではない。この改善策として、検出器の数を増やすことが考えられ、一万個の検出器を同時に用いることが可能であれば計測時間は一断面当たり約 2 日となり、実用可能な領域に近づけることができる。

また、**表 5.2** には Na 主配管についての計測時間の概算を示す。同様にこの結果も検出器 1 個を用いた場合であるが、計測対象が小さくなるために計測時間も短縮される。1mm の解像度を得るために画素サイズ 0.1mm では、2.69 日となるが、検出器を一千個用いて同時計測を行えば、一断面当たり 4 分で計測することができる。

このようなシステムを実現するための課題としては、以下に示す 2 点が考えられる。

- (1) 計測手法の試験研究による検証と詳細シミュレーションによる検証
- (2) 監視・検査システムの構築

それぞれの課題について、現時点で考えられることを以下に列挙する。

(1) 計測手法の試験研究による検証と詳細シミュレーションによる検証

本手法の有効性を確認するために、試験研究による検証を行う必要である。実機サイズよりも小さなサイズで良いが、その試験体系と合わせてシミュレーションを行うことにより、シミュレーションの妥当性を検証することが可能となる。この段階では、放射化された Na では無く、他の γ 線放出源を利用することも考えられる。同時に、画素サイズの影響および吸収補正処理を考慮した追加シミュレーションを行い、分解能、計測時間の詳細な評価を行う必要がある。

(2) 監視・検査システムの構築

監視・検査システムの構築に関しては、新たな開発要素が多くあり、十分な検討が必要である。図 5.1 に想定されるシステムの概念図を示す。また、以下にそれぞれの構成機器に

についての課題を示す。

① コリメータ

実機に適用する監視・検査システムにおいて、重要な役割を占めるのがコリメータである。コリメータは、入射する γ 線の方向を制限することから、位置分解能を決定する機器となる。コリメータの設計には、本解析で用いた EGS4 を利用することができ、コリメータの長さや間隔、および材質をパラメータとして最適な設計を行う必要がある。

② γ 線検出器

検出器には、X線 CT で用いられている半導体検出器を利用するのが有効である。検出器の設置数に関しては、検出器設置空間の観点から検討する必要があるが、図 5.1 に示すように計測対象の長さを占めるように設置すれば、並進走査が不要となり、計測時間を短縮することができる。但し、その場合信号処理装置への負荷が大きくなることを考慮しなければならない。

検出器の寿命に関しては、利用する半導体によって異なるが、Si 半導体の場合 $10^4 \sim 10^5$ Gy で寿命に達するのに対し、GaAs 半導体ではその 100 倍の寿命を有する。実機に適用する監視・検査システムでは、計測対象である Na から常時 γ 線が放出されているため、測定以外では検出器を遮蔽する必要があると考えられる。

③ スキャナ

スキャナは、並進と回転走査が必要であるが、前述のように検出器を多数設置することが可能であれば、並進走査は不要となる。スキャナの課題としては、計測対象への設置方法と走査精度の確保であり、また、高放射線下に設置されるため、耐放射線性についても検討する必要があると考えられる。

④ 信号処理装置

本システムは、 ^{24}Na から放出される γ 線の直達成分のみを利用する点にある。すなわち、散乱されて進行角度が変化した γ 線を除去することにより、画像の分解能を向上させている。従って、信号処理回路として波高弁別は必須となる。検出器の数だけ、波高弁別装置が必要となるため、検出器の数が増えれば、処理回路も複雑となる。そのため、波高弁別回路を IC 化する等の対策が必要と考えられる。

⑤ 画像処理装置

信号処理された情報（各位置毎の光子カウント数）は、画像処理装置に送られ、画像再構成を行う。従って、その情報を確保できる記憶容量が必要であるとともに、処理に関しても相応の処理能力を備える必要があると考えられる。

6. 結言

液体金属 Na 冷却炉の一次系機器システム、炉内構造物および冷却材バウンダリの健全性を確認するために、放射化された Na から放出される γ 線を利用した監視・検査技術を提案し、その適用性および開発課題を検討した。以下に得られた結果についてまとめる。

- (1) 実用 Na 冷却炉の代表的な一次系 Na 主配管（設計例）を用いて、 γ 線放出源の画像を再構成した結果、配管内の Na の画像を再構成できることを確認した。また、分解能の観点から、配管に設けた模擬欠陥に放射化された Na が含まれているとし、模擬欠陥の画像を再構成した。その結果、直径 5mm 以上の模擬欠陥を画像再構成することができ、解析的評価により計測手法の適用性を検証した。しかし直径 2mm の模擬欠陥については、画像を再構成することができなかった。分解能の向上対策としては、画素のサイズを小さくすることが考えられる。画像再構成の段階における吸収補正処理を含めて、今後詳細なシミュレーションを行い、分解能を評価する必要がある。
- (2) (1)の結果を踏まえて、実用 Na 冷却炉の代表的な一次系 Na 主配管（設計例）および大型機器の模擬検査対象として蒸気発生器について、1mm 程度の分解能を得るために計測時間を検討した。検出器の効率を 20% とすると、一次系 Na 主配管では、検出器一千個を用いて約 4 分/断面、蒸気発生器では、検出器一万個を用いて約 2 日/断面で計測が可能である。
- (3) 監視・検査システムを実現するための課題としては、試験研究による原理の検証および検出器システムの構築が考えられる。検出器システムの主要な構成要素としては、入射する γ 線の方向を制限するコリメータ、 γ 線検出器、検出器を走査するスキャナ、信号処理装置および画像処理装置が上げられる。特にコリメータに関しては、分解能を決定する重要な要素となるため、試験研究とシミュレーションを組み合わせて最適な設計を行う必要がある。

謝辞

提案した計測手法の検討において御助力頂いた株式会社日立製作所の佐藤克利氏、松井哲也氏、上村博氏、澤田周作氏に感謝致します。

参考文献

- (1) 中本香一郎、他、「動燃技報」、No.73 (1990)
- (2) 荒邦章、他、「原子力学会誌」、Vol.28、No.12、1129 (1986)
- (3) 岩井喜典、「CT スキャナ X 線コンピュータ断層撮影装置」、コロナ社 (1979)
- (4) 森村正直、他、「最新精密計測技術」、総合技術センター (1990)
- (5) 社団法人日本アイソトープ協会、「アイソトープ便覧」、丸善 (1970)
- (6) 堀徹、他、「ナトリウム冷却炉の二次系簡素化概念に関する研究」、JNC TY9400
2002-018 (2002)
- (7) 宇佐美晋、他、「「もんじゅ」のしゃへい性能試験結果について」、サイクル機構技報、
No. 11 (2001)
- (8) W. R. Nelson, et al., "The EGS4 code system", Stanford Linear Accelerator Center
Report SLAC-256 (1985)

表 3.1 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）の各媒質の占める断面積割合

項目	断面積 : $S(\text{cm}^2)$	割合 : $R(\%)$	密度 : $\rho (\text{kg}/\text{m}^3)$	$\rho \cdot R/100$
Na	30259	75.43	0.93	0.7015
Fe	5714	14.24	7.86	1.1193
Pb·Bi ①	676	1.69	10.57	0.1786
Pb·Bi ②	683	1.70	10.57	0.1797
水 or 蒸気	2783	6.94	1.00	0.0694
合計	40115	100.00		2.2485

但し、Na の密度は 98°C における液体の値を用い、他は 20°C における値を用いた。また、Pb·Bi の値は、鉛とビスマスの平均を用いた。

表 3.2 各物質の質量吸収係数

光子エネルギー (MeV)	Na(固体) $\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$	Fe(固体) $\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$	Pb(固体) $\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$	Bi(固体) $\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$	水(液体) $\mu_m(\text{cm}^2/\text{g})$
0.5	8.372×10^{-2}	8.414×10^{-2}	1.614×10^{-1}	1.656×10^{-1}	9.687×10^{-2}
0.6	7.736×10^{-2}	7.704×10^{-2}	1.248×10^{-1}	1.277×10^{-1}	8.956×10^{-2}
0.8	6.788×10^{-2}	6.699×10^{-2}	8.870×10^{-2}	9.036×10^{-2}	7.865×10^{-2}
1.0	6.100×10^{-2}	5.995×10^{-2}	7.102×10^{-2}	7.214×10^{-2}	7.072×10^{-2}
1.25	5.454×10^{-2}	5.350×10^{-2}	5.876×10^{-2}	5.955×10^{-2}	6.323×10^{-2}
1.5	4.968×10^{-2}	4.883×10^{-2}	5.222×10^{-2}	5.285×10^{-2}	5.754×10^{-2}
2.0	4.282×10^{-2}	4.265×10^{-2}	4.606×10^{-2}	4.659×10^{-2}	4.942×10^{-2}
3.0	3.487×10^{-2}	3.621×10^{-2}	4.234×10^{-2}	4.279×10^{-2}	3.969×10^{-2}
4.0	3.037×10^{-2}	3.312×10^{-2}	4.197×10^{-2}	4.242×10^{-2}	3.403×10^{-2}
5.0	2.753×10^{-2}	3.146×10^{-2}	4.272×10^{-2}	4.317×10^{-2}	3.031×10^{-2}

*NIST データベースより引用

表 5.1 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）に対する計測時間の概算

(a) 評価条件

測定対象の内径 d (mm)	2260
測定対象の外径 D (mm)	2320
測定対象の高さ H (mm)	5
計測対象内径内物質の平均密度 ρ_{av} (g/cm ³)	2.2485
構造材の密度 ρ_{Fe} (g/cm ³)	7.86
コリメータの長さ l (mm)	300
検出器幅 w (mm)	0.5
検出器高さ h (mm)	5
検出器効率 η (%)	20
単位時間に発生する γ 線光子数 n_0 (個/s)	1.45×10^{13}
検出器の包囲立体角 ω (rad)	9.33×10^{-8}
全体での減衰率 N/n_0	2.77×10^{-5}
検出器到達 γ 線光子数(個/s) N	37.5

(b) 画素サイズに対する計測時間

画素サイ ズ p (mm)	画 素 数 n (個)	計測すべき γ 線 光子数 N_D (個)	計測時間 T			
			(s)	(min)	(hr)	(day)
0.1	5.38×10^8	1.33×10^{10}	1.77×10^9	2.95×10^7	4.92×10^5	2.05×10^4
0.2	1.35×10^8	3.33×10^9	4.44×10^8	7.40×10^6	1.23×10^5	5.13×10^3
0.5	2.15×10^7	5.30×10^8	7.07×10^7	1.18×10^6	1.97×10^4	821
0.64	1.31×10^7	3.23×10^8	4.31×10^7	7.18×10^5	1.20×10^4	500
1.25	3.44×10^6	8.47×10^7	1.13×10^7	1.88×10^5	3.13×10^3	130

但し、

$$\text{単位時間に発生する } \gamma \text{ 線光子数} : n_0 = G \cdot V = G \cdot S \cdot H$$

$$\text{検出器の包囲立体角} : \omega = \frac{w \cdot h}{4\pi(D+l)^2}$$

$$\text{全体での減衰率} : N/n_0 = \exp(-\mu_m \cdot \rho_{av} \cdot d) \times \exp(-\mu_m \cdot \rho_{Fe} \cdot t)$$

$$\text{検出器到達 } \gamma \text{ 線光子数} : N = n_0 \cdot \omega \cdot N/n_0$$

$$\text{画素数} : n = (D/p)^2$$

$$\text{計測すべき } \gamma \text{ 線光子数} : N_D = \frac{N_B}{n_B} \cdot n = \frac{100 \times 10^6}{4.06 \times 10^6} \cdot n$$

$$\text{計測時間} : T = \frac{N_D}{N \cdot \eta}$$

ここで、 G : γ 線強度（「もんじゅ」での²⁴Na の設計値 9.6×10^8 Bq/cm³ を用いた）、 V : Na

の体積、 S : Na の占める断面積、 μ_m : 質量吸収係数（2.754MeV の γ 線エネルギーに対応する鉄の値 $3.779 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{g}$ を用いた）、 ρ_{Fe} : 構造材の密度（20°Cにおける鉄の値 7.86g/cm^3 を用いた）、 t : 構造材の肉厚、 N_B : 解像度 5mm を得るために必要な計測 γ 線光子数（4章の解析より 100×10^6 個とした）、 n_B : 解像度 5mm を得たときの画素数（4章の解析より 4.06×10^6 個とした）である。

表 5.2 Na 主配管に対する計測時間の概算

(a) 評価条件

測定対象の内径 $d(\text{mm})$	1117.6
測定対象の外径 $D(\text{mm})$	1290
測定対象の高さ $H(\text{mm})$	5
コリメータの長さ $l(\text{mm})$	300
検出器幅 $w(\text{mm})$	0.5
検出器高さ $h(\text{mm})$	5
検出器効率 η (%)	20
単位時間に発生する γ 線光子数 n_0 (個/s)	4.71×10^{12}
検出器の包囲立体角 ω (rad)	2.23×10^{-7}
全体での減衰率 N/n_0	0.084
検出器到達 γ 線光子数(個/s) N	8.82×10^4

(b) 画素サイズに対する計測時間

画素サイ ズ $p(\text{mm})$	画 素 数 n (個)	計測すべき γ 線 光子数 N_D (個)	計測時間 T			
			(s)	(min)	(hr)	(day)
0.1	1.66×10^8	4.09×10^9	2.32×10^5	3.87×10^3	64.5	2.69
0.2	4.16×10^7	1.02×10^9	5.78×10^4	963	16.1	0.671
0.5	6.66×10^6	1.64×10^8	9.30×10^3	155	2.58	0.108
0.64	4.06×10^6	1.00×10^8	5.67×10^3	94.5	1.58	0.0658
1.25	1.07×10^6	2.64×10^7	1.50×10^3	25.0	0.42	0.0175

但し、

$$\text{全体での減衰率} : N/N_0 = \exp(-\mu_m \cdot \rho \cdot d) \times \exp(-\mu_m \cdot \rho_{Fe} \cdot t)$$

ここで、 ρ : Na の密度（500°Cにおける液体の値 0.83g/cm^3 を用いた）である。

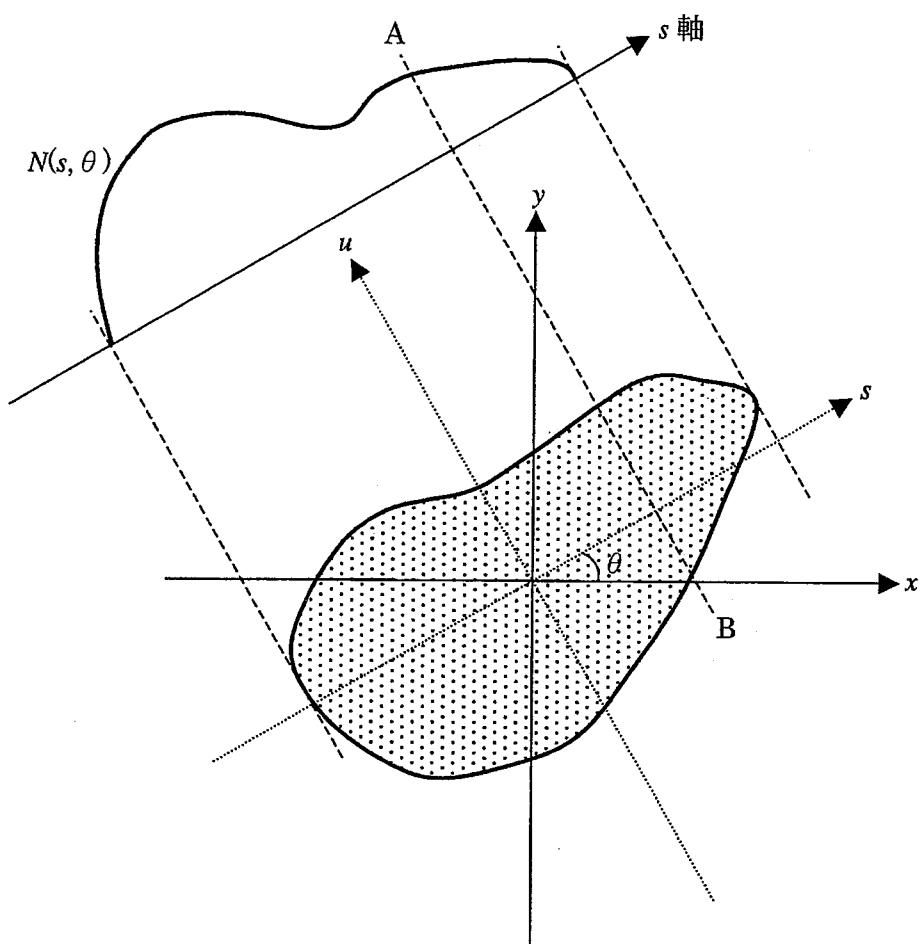


図 2.1 Radon 変換の説明図

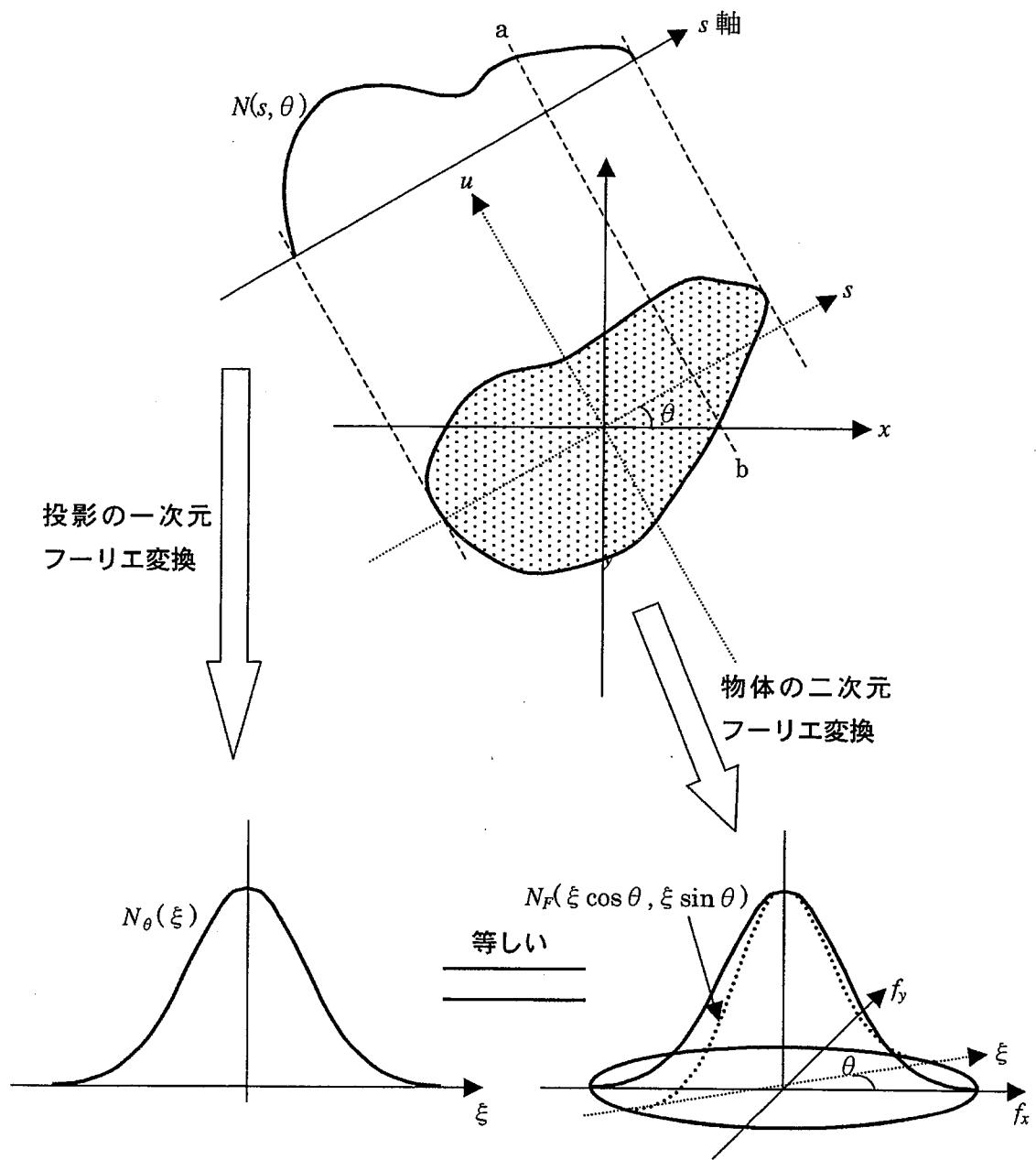


図 2.2 投影定理の説明図

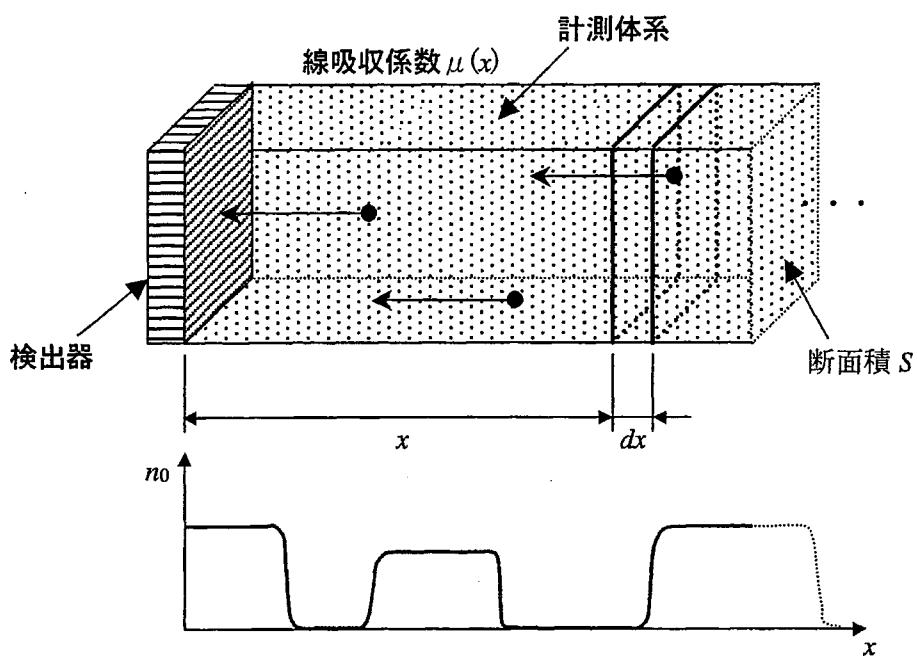


図 2.3 光子数の計測に関する概略図

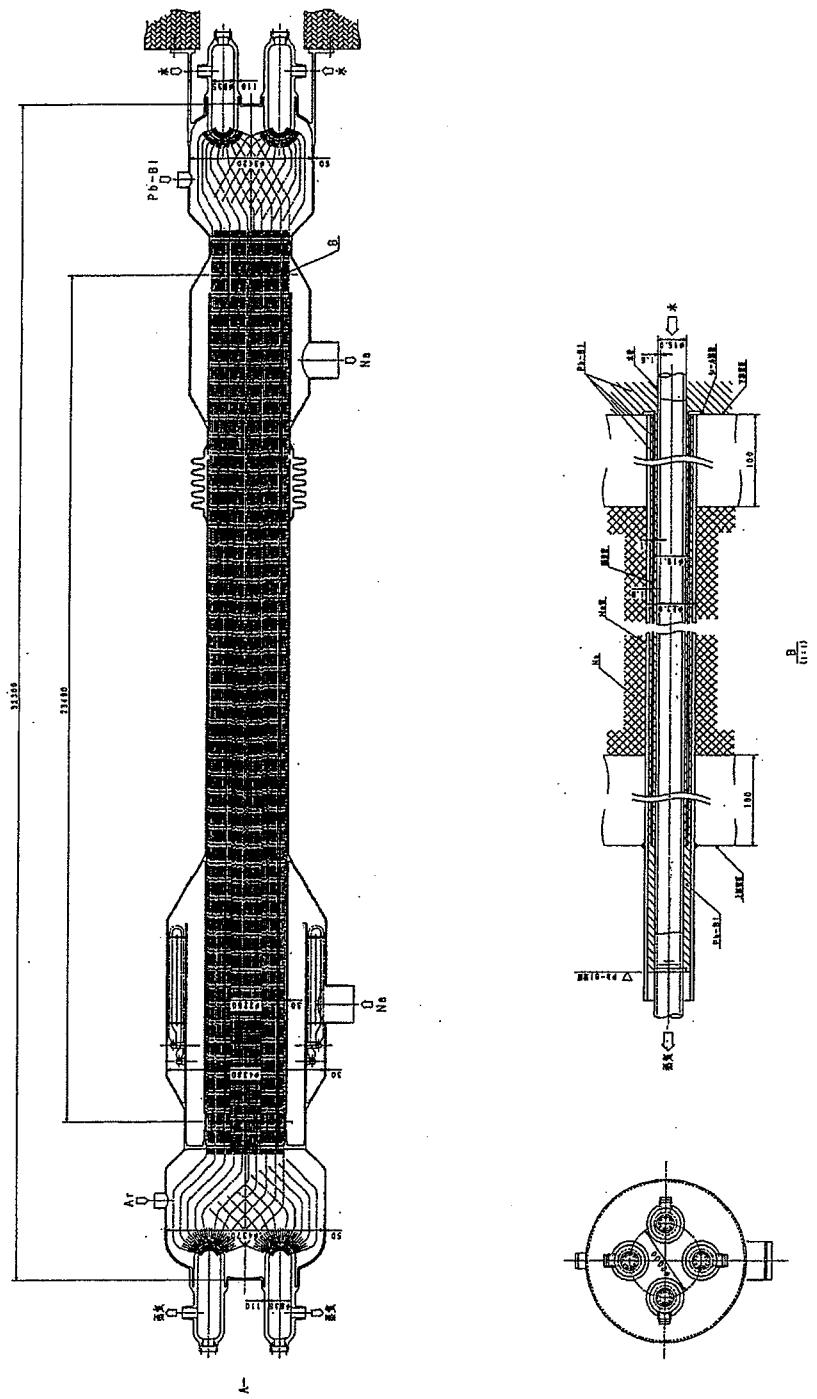


図3.1 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）の概略図

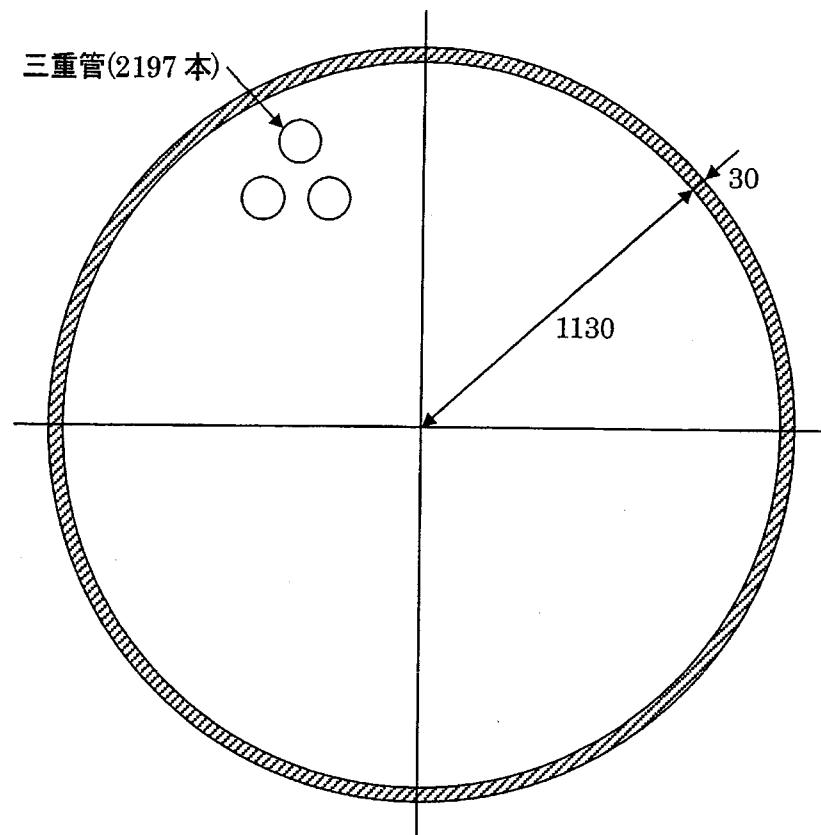


図 3.2 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）全体の断面概略図

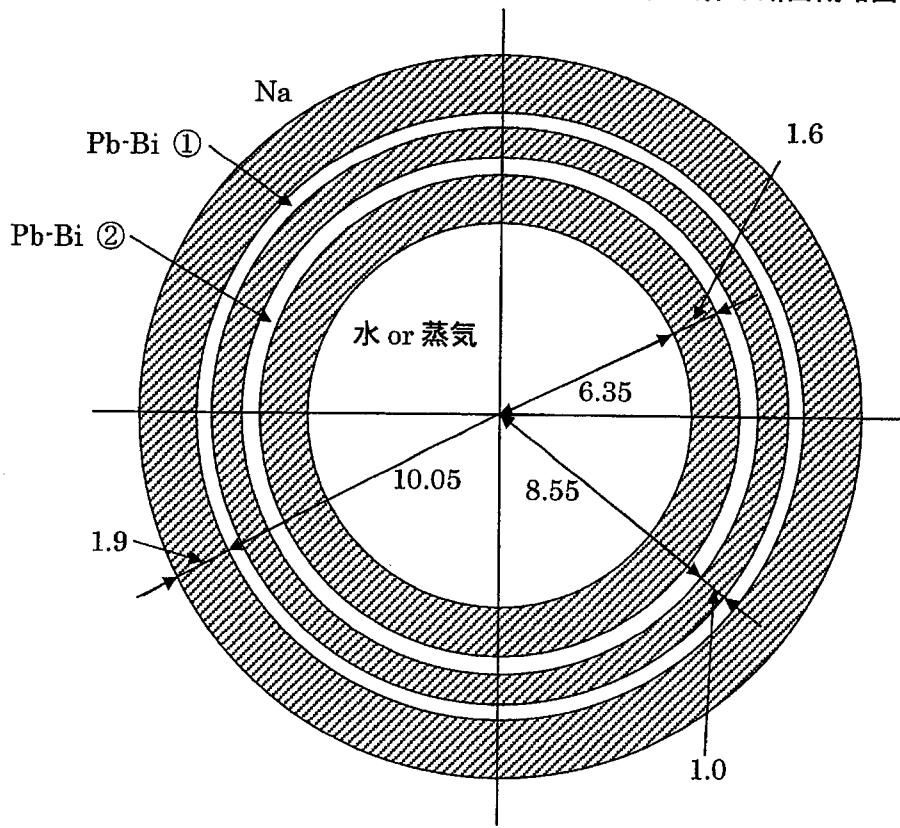


図 3.3 検討に用いた蒸気発生器（三重管型）三重管部分の断面概略図

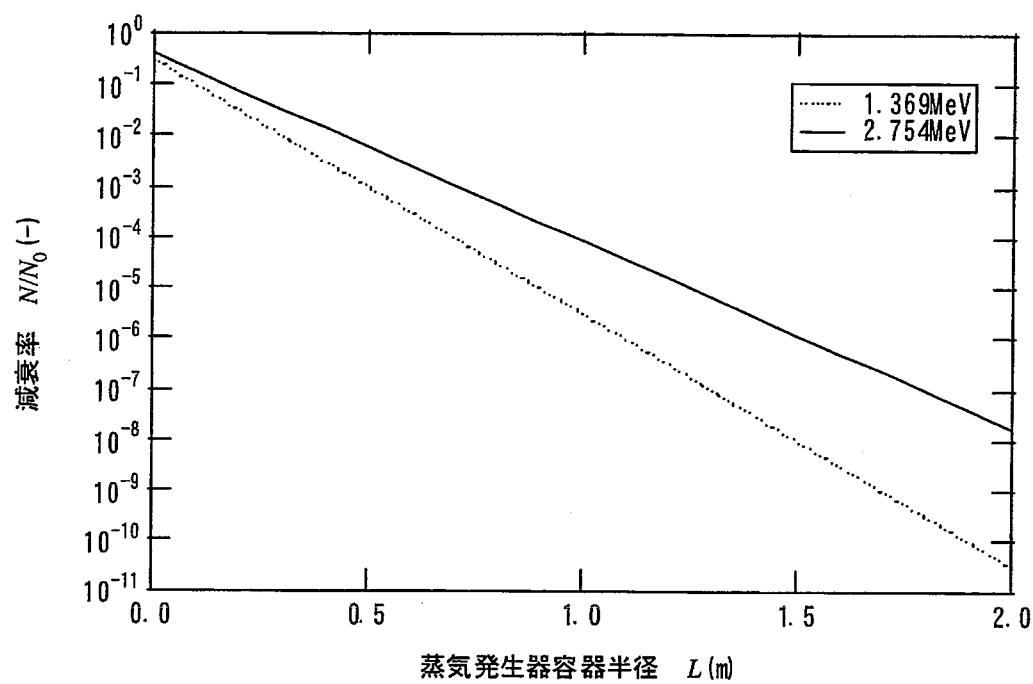


図 3.4 蒸気発生器容器半径に対する γ 線の減衰
(但し、容器の肉厚：0.03m)

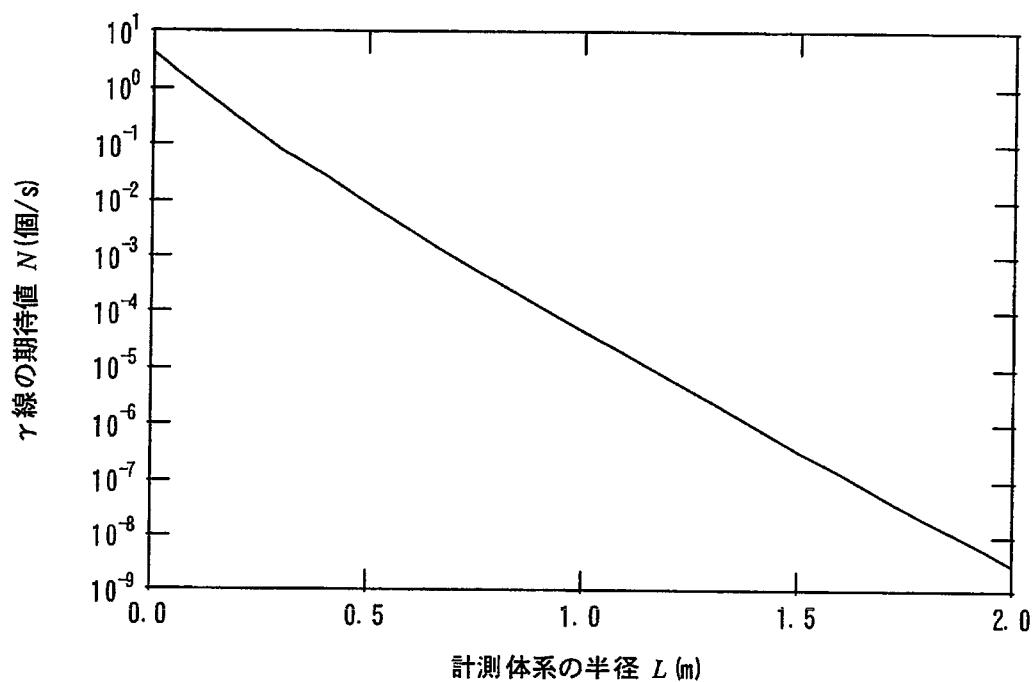


図 4.1 計測体系の半径に対する γ 線の期待値

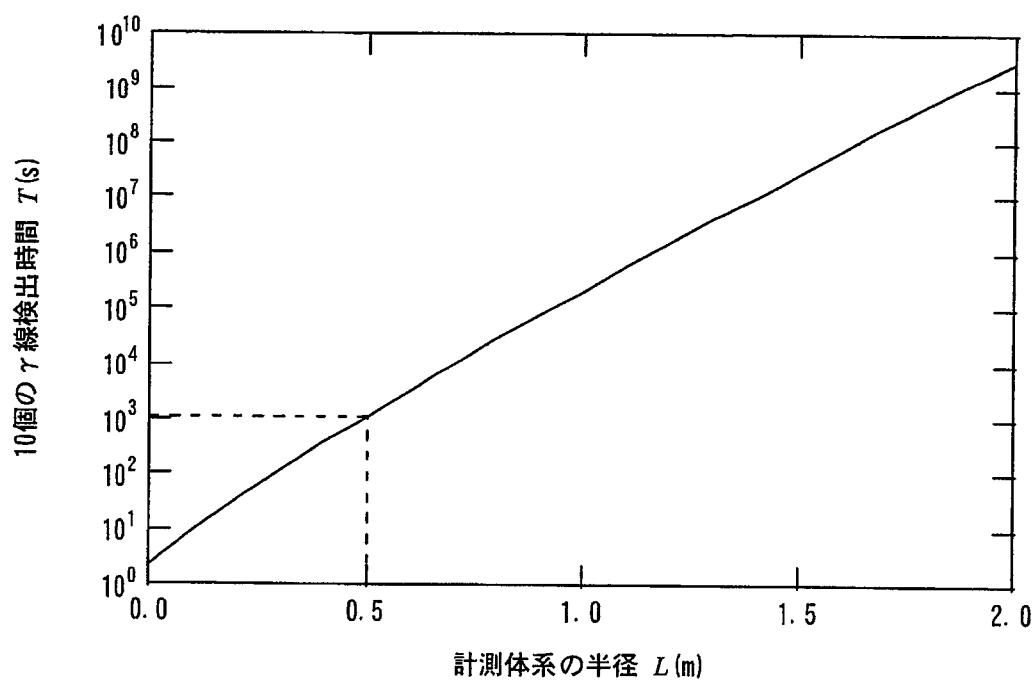


図 4.2 計測体系の半径に対する 10 個の γ 線計測時間

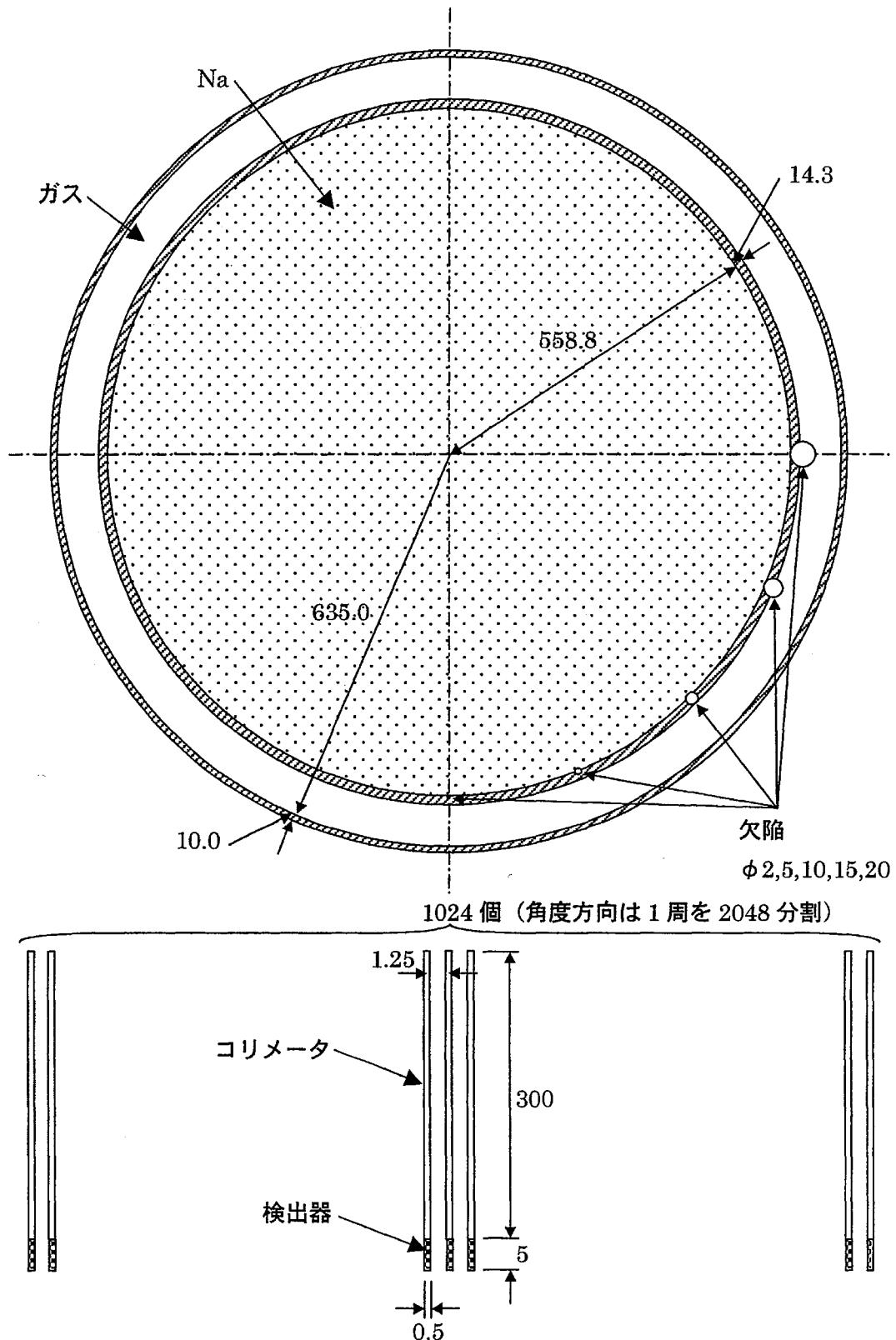


図 4.3 解析体系

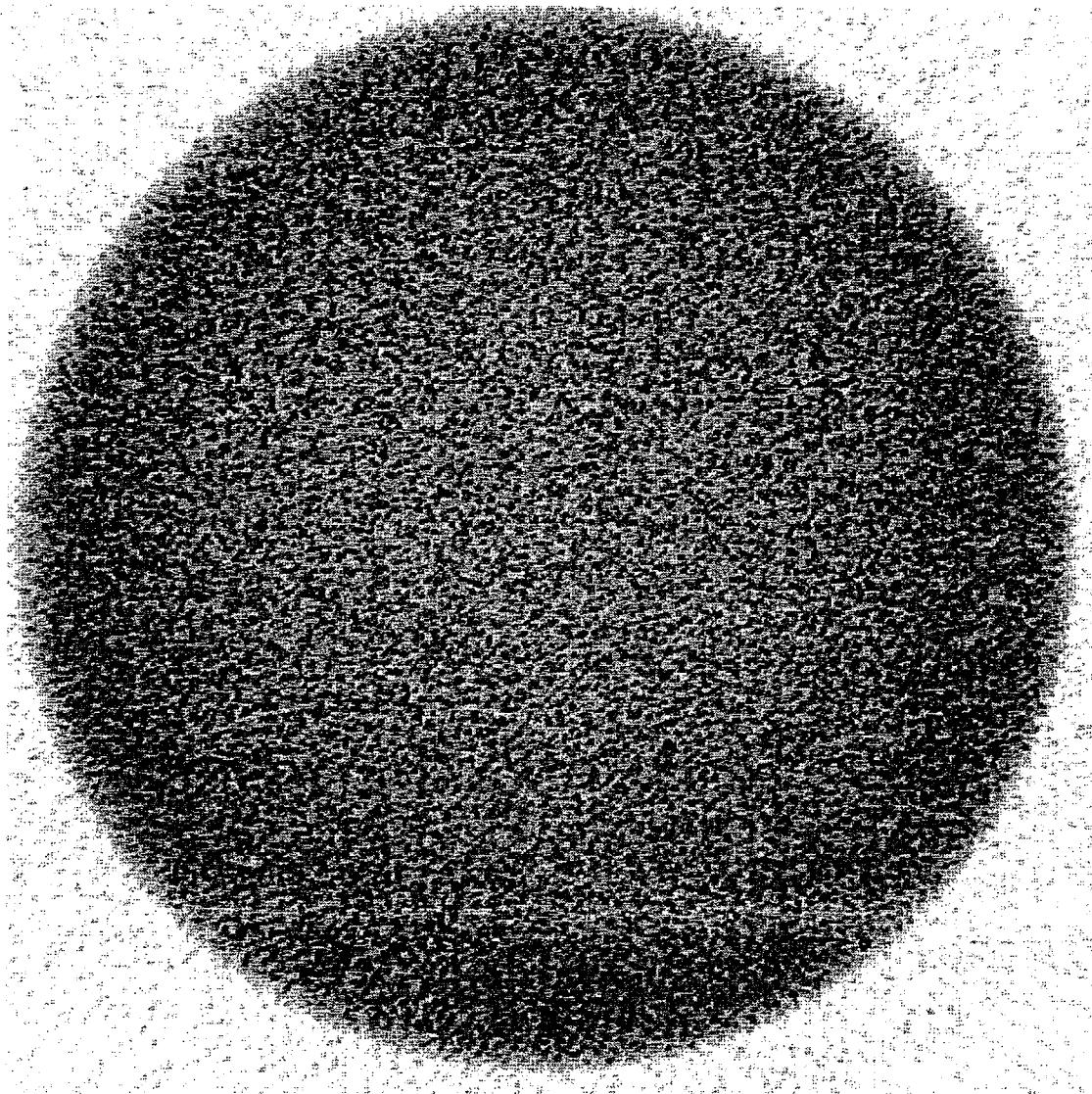


図 4.4 配管の画像再構成結果

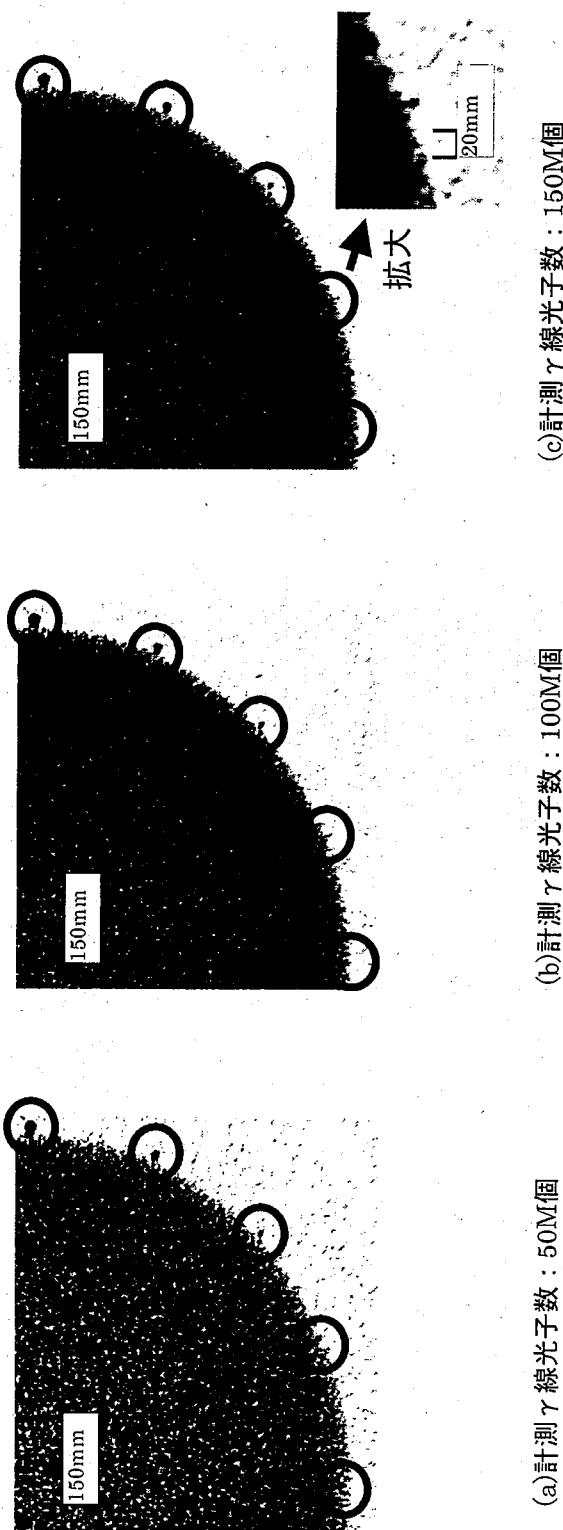


図4.5 模擬欠陥の画像再構成結果

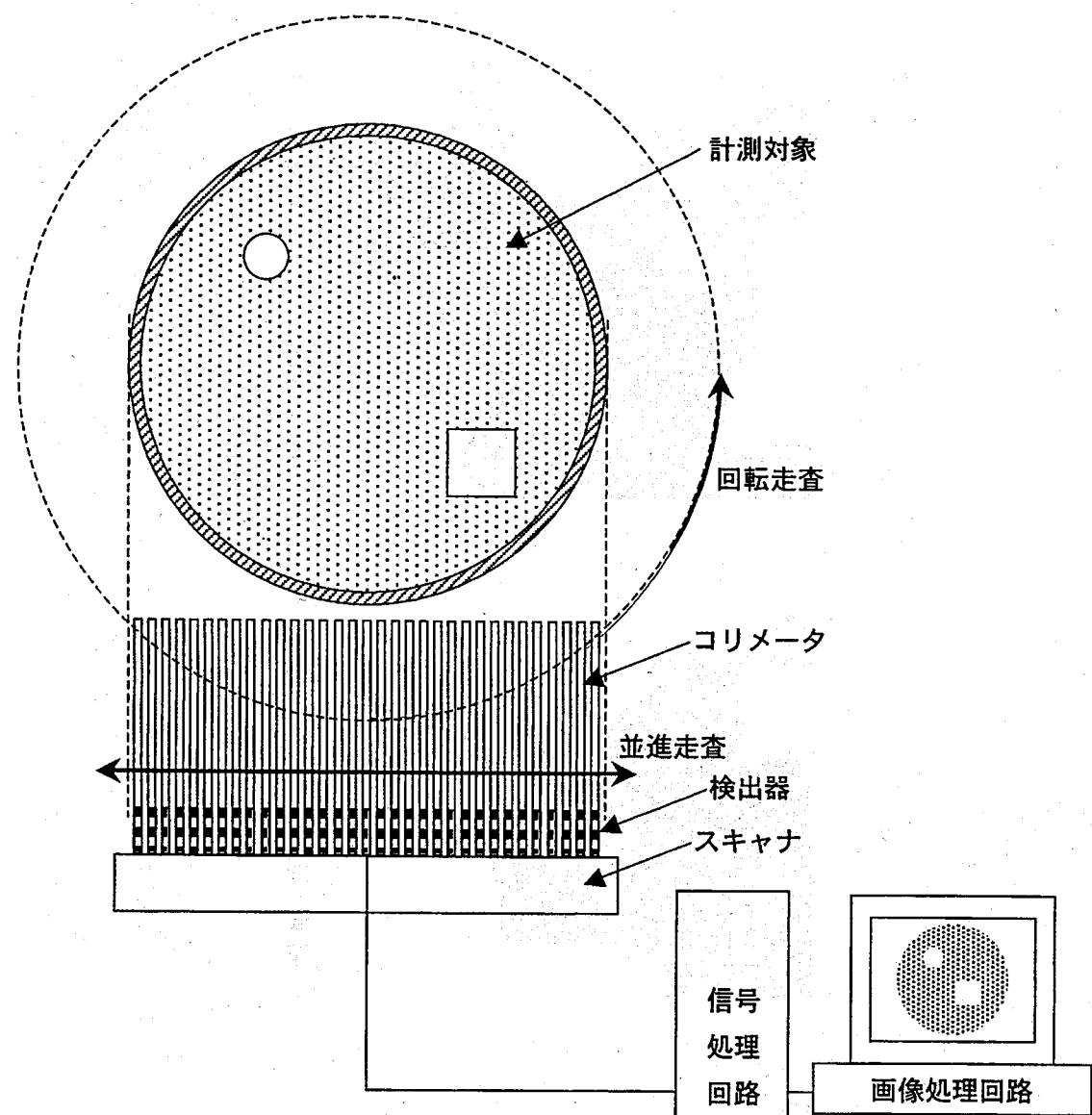


図 5.1 想定されるシステムの概念図