

JAERI - M
84-067

ガラス固化体 γ スキャニング装置の開発

1984年4月

大塚 久雄・田村 行人・野村 正之
田代 晋吾

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村 日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ㈱原子力資料サービス

ガラス固化体 γ スキャンニング装置の開発

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部
大塚久雄・田村行人・野村正之・田代晋吾

(1984年2月27日受理)

高レベル廃棄物ガラス固化体内に閉じ込めた放射能の均一性を測定するため、 γ 核種に着目したエミッション-CT法による γ スキャンニング装置を開発した。

本装置は、試料移動用スキャナ、 γ 線測定機器、データ収集及びデータ処理装置から構成されており、固化体試料の移動からデータ収集までの連続自動測定と重畳積分法による高速画像再構成処理を特徴としている。画像は、2 mmの分解能で任意断面の放射能濃度分布を3次元及び等濃度線で表示することができる。

本報告書は、装置の概要と機能試験結果について、まとめたものである。

Development of Gamma-Scanning System
for Vitrified HLW Forms

Hisao OTSUKA , Yukito TAMURA , Masayuki NOMURA
and Shingo TASHIRO

Department of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received February 27, 1984)

A gamma-scanning system has been developed using an emission-computed tomography (E-CT) technique in order to detect the radioactive homogeneity of vitrified HLW forms, from which samples are provided for the performance tests under the long-term storage and disposal conditions in hot cells of the Waste Safety Testing Facility (WASTEF).

The system includes gamma-scanning apparatus and software for apparatus control and data processing. The apparatus consists of a mechanical scanner for the forms, a gamma-ray measurement unit, and a data acquisition and processing unit. The system has features to be operated in automatic mode with all control through a data acquisition unit and to process the data rapidly for reconstruction with convolution method through a data processing unit. The reconstruction results of any cross section of the forms can be shown as a three-dimensional display of radioactive concentration on CRT with a resolving power of 2mm.

The report describes the outline of the system and the results of function tests.

Keywords : Vitrified Form, Radioactive Homogeneity, Gamma-Scanning System, Scanner, Emission-CT, Reconstruction, Convolution, Three-Dimensional Display

目 次

| | |
|---------------------|----|
| 1. 序 論 | 1 |
| 2. 開発の要点 | 1 |
| 3. エミッション-CT技術 | 2 |
| 3.1 CTの概要 | 2 |
| 3.2 画像再構成手法 | 2 |
| 3.3 重畳積分法 | 2 |
| 3.4 吸収補正法 | 4 |
| 4. アスキャニング装置の概要 | 4 |
| 4.1 全体構成 | 4 |
| 4.2 データ収集部 | 5 |
| 4.3 データ処理部 | 6 |
| 4.4 ソフトウェア構成 | 6 |
| 5. 機能試験及び考察 | 7 |
| 5.1 シミュレーション試験 | 7 |
| 5.2 E-CT試験 | 9 |
| 5.3 ホットガラス固化体の放射能測定 | 10 |
| 5.4 今後の課題と対策 | 11 |
| 6. 結 論 | 12 |
| 謝 辞 | 12 |
| 参考文献 | 12 |

Contents

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Introduction | 1 |
| 2. | Points of development | 1 |
| 3. | Emission-CT technique | 2 |
| 3.1 | Outline of CT | 2 |
| 3.2 | Reconstruction method | 2 |
| 3.3 | Convolution method | 2 |
| 3.4 | Attenuation correction method | 4 |
| 4. | Outline of gamma-scanning system | 4 |
| 4.1 | Total composition | 4 |
| 4.2 | Data acquisition unit | 5 |
| 4.3 | Data processing unit | 6 |
| 4.4 | Composition of software | 6 |
| 5. | Function test and discussion | 7 |
| 5.1 | Simulation test | 7 |
| 5.2 | E-CT test | 9 |
| 5.3 | Radioactive measurement of vitrified forms | 10 |
| 5.4 | Problems and countermeasures | 11 |
| 6. | Conclusions | 12 |
| | Acknowledgement | 12 |
| | References | 12 |

図表一覧表

- 表1 主要装置の仕様と機能
 表2 シミュレーションの設定条件及び幾何学的配置
 表3 フィルタ関数の比較
 表4 E-C T試験の測定条件及び幾何学的配置
 表5 ガラス固化体の評価結果
- 図1 放射能濃度分布 $f(x, y)$ と投影データ $P(X, \theta)$ との関係
 図2 E-C T投影データの r 線吸収補正
 図3 r スキャニング装置概略図
 図4 試料移動用スキャナ概念図
 図5 試料移動用スキャナの外観写真
 図6 スキャンモード
 図7 r 線検出器の外観写真
 図8 データ収集用計算機システムの外観写真
 図9 データ処理用計算機システムの外観写真
 図10 r スキャニングソフトウェア構成
 図11 データ収集プログラムフロー
 図12 画像再構成プログラムフロー
 図13 シミュレーション試料
 図14 Z断面放射能濃度分布 ($Z=30\text{ mm}$)
 図15 Z断面放射能濃度分布 ($Z=60\text{ mm}$)
 図16 X断面放射能濃度分布 ($X=0\text{ mm}, \theta=0^\circ$)
 図17 Ramachandran のフィルタによる画像
 図18 Shepp & Logan のフィルタによる画像
 図19 Chesler のフィルタによる画像
 図20 試料形状
 図21 r 線投影データの X 方向分布 (試料3)
 図22 E-C T試験結果 (試料1)
 図23 E-C T試験結果 (試料2)
 図24 E-C T試験結果 (試料3)
 図25 E-C T試験結果 (試料4)
 図26 シミュレーションによる r 線投影データの X 方向分布 (試料3)
 図27 シミュレーション結果 (試料3)
 図28 ホットガラス固化体の軸方向放射能濃度分布

1. 序 論

高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する安全評価試験を実施する廃棄物安全試験施設 (Waste Safety Testing Facility : 以下, WASTE F と略称) は, 昭和56年8月に建屋が完成し, その後, 各種試験装置の整備を行い, 昭和57年11月よりホット運転を開始している。本施設では, 核分裂生成物やアクチニド元素等を多量に含む高レベル放射性廃液とガラス素材とを熔融固化してガラス固化体を作製し, 固化体の物性測定, 貯蔵及び処分時の安全評価試験を実施する¹⁾。

この安全評価試験は, ガラス固化体の廃棄物に対する閉じ込め性能を調べることであり, 固化体からの放射性核種の浸出性, 揮発性等を測定する。この場合, 固化体内の放射性核種の分布が試験結果に大きく影響することが考えられるので, 試験に先立ち固化体内の放射能均一性を把握して, 試験の精度を高める必要がある。

従来, ガラス固化体内の放射性核種の分布を把握するには, 固化体を輪切りに分割して薄片試料を作製し, 各々試料に対して γ 線測定を行う方法を採用していた²⁾。この方法では, ① 試料の精密加工に経験や高度な熟練を必要とする, ② 試料作製から γ 線測定まで長時間を要する, ③ 再現性に乏しい, ④ 抜き取り試験程度で, 多数の試料測定が不可能, ⑤ 二次廃棄物の発生が大きい, 等の欠点があった。

そこで, WASTE F では, ガラス固化体内放射能濃度分布の非破壊測定を目的として, 最近精力的に研究開発が進められているコンピュータ断層撮影 (Computed Tomography : 以下, CT と略称) 技術³⁾を導入し, ガラス固化体の移動から γ 線測定データの解析に至る一連の操作を高精度かつ能率的に行う γ スキャニング装置を開発した。

本報では, γ スキャニング装置の概要並びに機能試験結果について報告する。

2. 開 発 の 要 点

γ スキャニング装置は, 放射能濃度が約 10^4 Ci/l の高レベルガラス固化体を測定対象とするために, 次の事項に留意して開発した。

- (1) 試料移動用のスキャナは, セル内に設置し, 耐放射線性があり, 左右, 前後, 上下, 回転の4方向に高精度で移動できるものとする。
- (2) γ 線検出器は, エネルギー分解能が高く, 多数の γ 核種弁別能力があり, しかもメンテナンスの容易な高純度ゲルマニウム検出器を選定し, 高精度化, 省力化を図る。
- (3) 機能の多様性及び高速化を考慮して, 小型計算機2台と既設の大型計算機を利用する。
- (4) ガラス固化体内の γ 核種に着目したエミッション-CT (Emission-CT : 以下, E-CT と略称) 技術を導入し, 固化体断面の放射能濃度分布表示を可能とする。

1. 序 論

高レベル放射性廃棄物の処理処分に関する安全評価試験を実施する廃棄物安全試験施設 (Waste Safety Testing Facility : 以下, WASTE F と略称) は, 昭和56年8月に建屋が完成し, その後, 各種試験装置の整備を行い, 昭和57年11月よりホット運転を開始している。本施設では, 核分裂生成物やアクチニド元素等を多量に含む高レベル放射性廃液とガラス素材とを熔融固化してガラス固化体を作製し, 固化体の物性測定, 貯蔵及び処分時の安全評価試験を実施する¹⁾。

この安全評価試験は, ガラス固化体の廃棄物に対する閉じ込め性能を調べることであり, 固化体からの放射性核種の浸出性, 揮発性等を測定する。この場合, 固化体内の放射性核種の分布が試験結果に大きく影響することが考えられるので, 試験に先立ち固化体内の放射能均一性を把握して, 試験の精度を高める必要がある。

従来, ガラス固化体内の放射性核種の分布を把握するには, 固化体を輪切りに分割して薄片試料を作製し, 各々試料に対して γ 線測定を行う方法を採用していた²⁾。この方法では, ① 試料の精密加工に経験や高度な熟練を必要とする, ② 試料作製から γ 線測定まで長時間を要する, ③ 再現性に乏しい, ④ 抜き取り試験程度で, 多数の試料測定が不可能, ⑤ 二次廃棄物の発生が大きい, 等の欠点があった。

そこで, WASTE F では, ガラス固化体内放射能濃度分布の非破壊測定を目的として, 最近精力的に研究開発が進められているコンピュータ断層撮影 (Computed Tomography : 以下, CT と略称) 技術³⁾を導入し, ガラス固化体の移動から γ 線測定データの解析に至る一連の操作を高精度かつ能率的に行う γ スキャニング装置を開発した。

本報では, γ スキャニング装置の概要並びに機能試験結果について報告する。

2. 開 発 の 要 点

γ スキャニング装置は, 放射能濃度が約 10^4 Ci/l の高レベルガラス固化体を測定対象とするために, 次の事項に留意して開発した。

- (1) 試料移動用のスキャナは, セル内に設置し, 耐放射線性があり, 左右, 前後, 上下, 回転の4方向に高精度で移動できるものとする。
- (2) γ 線検出器は, エネルギー分解能が高く, 多数の γ 核種弁別能力があり, しかもメンテナンスの容易な高純度ゲルマニウム検出器を選定し, 高精度化, 省力化を図る。
- (3) 機能の多様性及び高速化を考慮して, 小型計算機2台と既設の大型計算機を利用する。
- (4) ガラス固化体内の γ 核種に着目したエミッション-CT (Emission-CT : 以下, E-CT と略称) 技術を導入し, 固化体断面の放射能濃度分布表示を可能とする。

3. エミッション-CT技術

3.1 CTの概要

CTは、オーストラリアの数学者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⁴⁾ことに基づき、英国EMI社のG. Hounsfieldにより発明された頭部診断用X線CTの登場⁵⁾以来、急激に発展した。

CTの原理は、ある測定すべき物体の任意断面内において、すべての点を通る多方向からの投影データを収集し、これを計算機処理することにより、元の断面を再構成することである。ここで、多方向からの投影データを測定する方法として、外部からX線、 γ 線等の透過力の強いビームを物体に照射し、透過後のX線あるいは γ 線を測定するのがトランスミッション-CT (Transmission-CT: 以下、T-CTと略称)であり、現在普及しているX線CTスキャナがT-CTの代表的なものである。一方、物体内に投与した放射性同位元素(RI)から放射する γ 線を測定するのがE-CTであり、^{99m}Tc等を利用したSingle Photon-CTが、E-CTの代表である。

本システムにおける測定方法は、ガラス固化体内部から放出する γ 線を外からコリメータを通して測定し、その γ 線投影データを用いて固化体断面の放射能濃度分布を知ろうとするものであるから、E-CT技術を応用することができる。

3.2 画像再構成手法

画像再構成(reconstruction)は、ある断面内の密度関数 $f(x, y)$ をある方向に合計して得た投影データ $P(X, \theta)$ から、何らかの方法によって断面の分布を復元することに帰着する。

代表的な画像再構成手法⁶⁾としては、初期のCTに用いられた膨大な逆マトリクスを近似的に解く各種の逐次近似法、基本的な2次元フーリエ変換法、及びこれと数学的に等価であり逆投影法を改良した重畳積分法が挙げられる。これらの中で、逐次近似法は雑音の多いデータの場合に有利であるが、演算時間が長いという欠点があるため、本システムでは、最近のX線CT、E-CTに使用されている高速演算処理可能な重畳積分法を採用した。

3.3 重畳積分法

E-CTでは、断面内の密度関数 $f(x, y)$ が放射能濃度分布に相当する。したがって、放射能濃度分布 $f(x, y)$ と投影データ $P(X, \theta)$ の間には、図1に示すような関係がある。断面内の固定座標系 $x-y$ に対して、角度 θ だけ傾いた回転座標系 $X-Y$ を定義すると、座標 (x, y) と (X, Y) との間の変換は

$$\left. \begin{aligned} x &= X \cos \theta - Y \sin \theta \\ y &= X \sin \theta + Y \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。ここで、Y軸に平行な方向から得られる投影データP(X, θ)は

$$\begin{aligned} P(X, \theta) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dY \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(X \cos \theta - Y \sin \theta, X \sin \theta + Y \cos \theta) dY \end{aligned} \quad (2)$$

により表される。

この投影データP(X, θ)にあるフィルタ関数g(X)を重畳させた後、逆投影して放射能濃度分布f(x, y)を求める方法が重畳積分法であり、f(x, y)は次式で表される。

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} P(X, \theta) * g(X) d\theta \quad (3)$$

ただし、 $X = x \cos \theta + y \sin \theta$

フィルタ関数g(X)は、単純逆投影法で生じるボケを投影データの段階で前もって除去するための補正係数で、種々の特性を持ったものが提案されている。Ramachandranらは、最も基本的な空間周波数に比例した関数をフーリエ逆変換より求め、Shepp & Logan, Cheslerらは、その改良型でノイズの多いデータにも耐えるように、高周波成分を小さくした特性をもつ関数を提案している。投影データP(X, θ)のサンプリング間隔をa、周波数領域の最大周波数をRnとすると、周波数領域及び空間領域のフィルタ関数G(R)、g(X)は、それぞれ、以下の式で表される。

Ramachandranらのフィルタ関数⁷⁾：

$$G(R) = |R| \quad (|R| < Rn) \quad (4)$$

$$g(X) = g(ka) = \begin{cases} 1/4 a^2 & (k=0) \\ -1/(\pi ka)^2 & (k=\text{奇数}) \\ 0 & (k=\text{偶数}) \end{cases} \quad (5)$$

Shepp & Loganのフィルタ関数⁸⁾：

$$G(R) = \frac{2Rn}{\pi} \left| \sin \left(\frac{\pi R}{2Rn} \right) \right| \quad (6)$$

$$g(X) = g(ka) = \frac{2}{\pi^2 a^2 (1-4k^2)} \quad (k=0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (7)$$

Cheslerのフィルタ関数⁹⁾：

$$G(R) = |R| \left\{ 1 + \cos \left(\frac{\pi R}{Rn} \right) \right\} \quad (8)$$

$$g(X) = t(X) + \left\{ t(X-a) + t(X+a) \right\} / 2 \quad (9)$$

ここで、t(X)は(5)式のg(ka)と同一関数である。

本システムでは、これら3種類のフィルタ関数の外にユーザが自由に入力可能なフィルタ関数を適宜、選択できるようになっている。

3.4 吸収補正法

本システムで測定される γ 線投影データは、ガラス及び容器の γ 線吸収を伴うため、画像再構成に用いる正確な投影データではない。図2に示すように、固化体内に含有する γ 線核種は固化体断面のどんな部位に位置していても、各投影データは、同じ強さの分布として得られなければならない。この吸収の問題を完全に解決することは原理的に不可能であるが、重畳積分法で断面内の放射能濃度分布を得るために γ 線投影データをできるだけ理想的な投影データに近づける必要がある。

この吸収補正法として数種の方法が医療用に使用されている。補正はいずれも互いに対向する投影データについて、 γ 線の指数関数的な減衰を考慮した方法であり、次のような補正式¹⁰⁾が提案されている。

Sorenson の補正式：

$$P'(X, \theta) = \frac{A(X, \theta) \exp(\mu T/2) \cdot f \mu T}{2 \cdot \sinh(f \mu T/2)} \quad (10)$$

Keyes の補正式：

$$P'(X, \theta) = A(X, \theta) \frac{2}{1 + \exp(-\mu T) + 2 \cdot \exp(-\mu T/2)} \quad (11)$$

$$\text{ただし、} A(X, \theta) = \sqrt{P(X, \theta) \cdot P(-X, \theta + \pi)} \quad (12)$$

ここで、 $P(X, \theta)$ 、 $P'(X, \theta)$ はそれぞれ補正前及び補正後の投影データ、 $A(X, \theta)$ は互いに 180° 対向するデータの幾何平均、 μ は吸収係数、 T は $P(X, \theta)$ が被写体を横切る距離(厚さ)、 f は厚さ T のうち γ 核種が分布している割合($1 \geq f > 0$)である。

4. γ スキャニング装置の概要

4.1 全体構成

γ スキャニング装置は、図3に示すようにデータ収集部とデータ処理部から構成される。表1に主要装置の仕様と機能を示す。

データ収集部は、小型計算機(DEC製PDP-11/03)、試料移動用スキャナ、 γ 線検出器等で構成し、固化体試料の移動から γ 線測定、スペクトル解析、磁気テープ(MT)への核種別 γ 線投影データ収録までの連続自動運転が可能である。

データ処理部は、原研計算センターの大型計算機(M-380)とオンラインで接続している小型計算機(DEC製PDP-11/23)、及び画像表示装置のグラフィックディスプレイ(GR-D)等で構成し、 γ 線投影データの転送、画像再構成手法として重畳積分法を利用した放射能濃度分布解析及び解析結果の画像表示をする。表示形式は、Z断面及びX断面における核種別放射能濃度分布の3次元と等濃度線表示である。さらに、 γ 線投影データの軸方向と周方向の放射能

3.4 吸収補正法

本システムで測定される γ 線投影データは、ガラス及び容器の γ 線吸収を伴うため、画像再構成に用いる正確な投影データではない。図2に示すように、固化体内に含有する γ 線核種は固化体断面のどんな部位に位置していても、各投影データは、同じ強さの分布として得られなければならない。この吸収の問題を完全に解決することは原理的に不可能であるが、重畳積分法で断面内の放射能濃度分布を得るために γ 線投影データをできるだけ理想的な投影データに近づける必要がある。

この吸収補正法として数種の方法が医療用に使用されている。補正はいずれも互いに対向する投影データについて、 γ 線の指数関数的な減衰を考慮した方法であり、次のような補正式¹⁰⁾が提案されている。

Sorenson の補正式：

$$P'(X, \theta) = \frac{A(X, \theta) \exp(\mu T/2) \cdot f \mu T}{2 \cdot \sinh(f \mu T/2)} \quad (10)$$

Keyes の補正式：

$$P'(X, \theta) = A(X, \theta) \frac{2}{1 + \exp(-\mu T) + 2 \cdot \exp(-\mu T/2)} \quad (11)$$

$$\text{ただし, } A(X, \theta) = \sqrt{P(X, \theta) \cdot P(-X, \theta + \pi)} \quad (12)$$

ここで、 $P(X, \theta)$ 、 $P'(X, \theta)$ はそれぞれ補正前及び補正後の投影データ、 $A(X, \theta)$ は互いに 180° 対向するデータの幾何平均、 μ は吸収係数、 T は $P(X, \theta)$ が被写体を横切る距離(厚さ)、 f は厚さ T のうち γ 核種が分布している割合($1 \geq f > 0$)である。

4. γ スキャニング装置の概要

4.1 全体構成

γ スキャニング装置は、図3に示すようにデータ収集部とデータ処理部から構成される。表1に主要装置の仕様と機能を示す。

データ収集部は、小型計算機(DEC製PDP-11/03)、試料移動用スキャナ、 γ 線検出器等で構成し、固化体試料の移動から γ 線測定、スペクトル解析、磁気テープ(MT)への核種別 γ 線投影データ収録までの連続自動運転が可能である。

データ処理部は、原研計算センターの大型計算機(M-380)とオンラインで接続している小型計算機(DEC製PDP-11/23)、及び画像表示装置のグラフィックディスプレイ(GRD)等で構成し、 γ 線投影データの転送、画像再構成手法として重畳積分法を利用した放射能濃度分布解析及び解析結果の画像表示をする。表示形式は、Z断面及びX断面における核種別放射能濃度分布の3次元と等濃度線表示である。さらに、 γ 線投影データの軸方向と周方向の放射能

濃度分布も表示可能である。

4.2 データ収集部

(1) 試料移動用スキャナ

試料移動用スキャナのご概念図を図4に、外観写真を図5に示す。

本装置は、ガラス固化体試料を電動式連動チャック装備のターンテーブル上に固定し、左右、前後、上下、回転 (X, Y, Z, θ) の4方向移動機能を有する。さらに薄片試料を測定できるように、ターンテーブルの 90° 旋回機能も有する。高速高精度の位置決め機構として、各軸に5相パルスモーターを採用し、 X, Y, Z 方向1mm、 θ 方向 1° の位置精度を得ている。固化体試料と接する部分は、耐放射線性を考慮して、SUS304を採用した。

スキャナは、コントローラを介して小型計算機で制御される。

全体寸法 : 高さ2133mm, 幅910mm, 奥行825mm

試料寸法 : 外径60~160mm, 長さ10~330mm

スキャン範囲 : $X = \pm 85$ mm, $Y = \pm 45$ mm, $Z = \pm 300$ mm, $\theta = \pm 360^\circ$

スキャン速度 : X, Y, Z 方向 最大300mm/min, θ 方向 最大 720° /min

スキャンピッチ : X, Y, Z 方向 最小1mm, θ 方向 最小 1°

スキャンモード : 2軸モード ($Z-\theta, \theta-Z, Z-X$)

3軸モード ($Z-\theta-X, \theta-Z-X, Z-X-\theta$) (図6参照)

(2) コリメータ

ガラス固化体内の一定領域からの r 線を高精度で測定するために、硬鉛製の微小口径コリメータを使用した。 r 線強度のレベルに応じて、3種類のコリメータを交換できるようになっている。微小口径コリメータの前方には、長さ552mm、口径10mmのプレコリメータが固定されている。

寸法 : 長さ250mm, 外径100mm, 口径0.3, 0.5, 1mmの3種類

(3) r 線検出器

r 線検出器の外観写真を図7に示す。

r 線検出器は、プリアンプ内蔵の高純度ゲルマニウム検出器を採用した。本検出器は、測定できるエネルギー領域が10keVから数MeVオーダであり、エネルギー分解能 (^{60}Co の1.33MeVに対するエネルギー半値幅) も1.73keVと良好であり、高レベルガラス固化体のような多数の r 核種を含む試料測定に適している。さらに、液体窒素によるGe半導体の冷却は、測定時のみ必要とするため、液体窒素消費量も少なく、メンテナンスが容易である。

r 線検出器の出力信号は、メインアンプ (Amp.) で増幅後、4096チャンネルの波高分析器 (MCA) に入力し、 r 線スペクトル解析が行われる。

(4) データ収集用計算機システム

本システムは、図8に示すように小型計算機 (PDP-11/03) とその周辺機器としてカートリッジディスク (CD), フロッピーディスク (FD), 磁気テープ (MT) 及びプリンターミナル (PT) から構成される。

PDP-11/03は、64Kbyteのメモリ容量を有し、スキャナ移動から r 線測定、 r 線スペ

クトル解析、核種別 r 線投影データ収録までのシーケンス制御を行う心臓部である。これらの制御プログラムは、10.4 MbyteのCDに格納されており、プリンターミナルからのコマンド入力により、会話形式で実行される。 r 線投影データ収録用MTは、テープ長2400 feetで、約10000データの収集容量がある。512 Kbyte*2 ディスケットのFDは、補助用メモリとして、 r 線スペクトルのデータファイルやユーザープログラムファイルに利用される。

4.3 データ処理部

(1) データ処理用計算機システム

本システムは、データ収集部のMTに収録された r 線投影データを用いて、画像再構成手法によりガラス固化体断面の放射能濃度分布を解析し、その結果を画像表示する機能を有している。

構成機器は、図9に示すように小型計算機(PDP-11/23)、画像表示装置のグラフィックディスプレイ(GR-D)とグラフィックプロッタ(GR-P)、印字出力用のラインプリンタ(LP)、磁気テープ(MT)、フロッピディスク(FD)及びプリンターミナル(PT)が装備され、大型計算機(M-380)とオンラインで接続されている。

PDP-11/23は、128 Kbyteのメモリ容量を有し、 r 線投影データ及び解析結果の転送と画像表示出力制御を行う。これらの制御プログラムは、512 KbyteのFDに格納されており、プリンターミナルからのコマンド入力により、会話形式で実行される。

M-380は、本システムの中核である画像再構成解析の高速演算処理を行う。

4.4 ソフトウェア構成

本ソフトウェアは、図10に示すようにデータ収集用計算機システム(PDP-11/03)で使用するデータ収集プログラムと、データ処理用計算機システム(PDP-11/23及びM-380)で使用する5個のプログラムから構成されている。

(1) データ収集プログラム(SCANZ)

本プログラムは、図11に示すデータ収集プログラムフローに従って、シーケンス制御を行う。即ち、PTからスキャン条件、 r 線測定時間等の測定条件を入力することにより、スキャナが自動的に移動し、測定位置を表示した後、ガラス固化体から放出する r 線を一定時間測定する。その後、汎用解析プログラム"GELIGAM"¹¹⁾を用いて、 r 線スペクトル解析を行い、核種別 r 線強度を算出し、その結果を r 線投影データとしてMTに収録する。スキャナ移動から r 線投影データ収録に至る一連の動作をガラス固化体全領域にわたって繰り返し、スキャンングを完了する。

(2) データ変換プログラム(DATACV)

本プログラムは、MTに収録された r 線投影データをPDP-11/23からオンラインで転送し、M-380のディスク内に格納するまでの動作を実行する。その際、下記のデータ変換を施して画像再構成プログラムの入力データを作成する。

- ① 文字コード変換 : ASCIIからEBCDICに変換する。

- ② 数値変換 : 2バイト整数, 4バイト実数をM-380の数値表現に変換する。
- ③ データフォーマット変換 : データ配列形式をMT形式からM-380のディスク形式に変換する。

(3) 画像再構成プログラム (GHOST)

本プログラムは図12に示す画像再構成プログラムフローに従って, M-380のディスク上に作成された投影データを読み込み, 固化体断面の放射能濃度分布を再構成し, 画像表示するまでの動作を実行する。本プログラムの特徴は下記のとおりである。

- ① 画像再構成は, r 線吸収補正を考慮した重畳積分法で行う。
- ② r 線吸収補正は, Sorenson, Keyes, 無補正の3種類から任意に選択可能である。
- ③ 重畳積分法に使用するフィルタ関数は, Ramachandran, Shepp & Logan, Cheslerの3種類から選択でき, さらに, ユーザが作成した任意関数も入力できる。
- ④ ガラス固化体及び容器の吸収係数は, プログラム内に登録された r 線核種のエネルギーと元素組成ライブラリから計算されるが, 入力パラメータにより変更可能である。
- ⑤ 再構成する固化体断面は, Z断面及びX断面である。ただし, X断面は, 複数のZ断面データを収集した後, 断面変換処理を施して表示する。
- ⑥ 画像表示形式は, 3次元濃度分布図と等濃度線図であり, 視点の角度や等濃度線間隔は任意に選択できる。その他, r 線投影データの軸方向及び周方向分布も表示可能である。
- ⑦ 画像は, M-380の出力装置(NLP)に表示される。さらに, PDP-11/23のGR-DとGR-Pに転送するための画像データファイルが, M-380のディスクに格納される。
- ⑧ 画像再構成時間は, 1断面当たり 100×100 の画像マトリックスで約15秒である。

(4) 画像転送プログラム (MTOPI)

本プログラムは, M-380のディスクに格納された画像データをPDP-11/23のMTに転送するまでの動作を実行する。その際, データ変換は前述のデータ変換プログラム(DATACV)の逆変換を行う。

(5) 画像表示プログラム (GDSCAN, GPSCAN)

本プログラムは, PDP-11/23のMTに格納された画像データを読み, GR-DあるいはGR-Pに画像表示する。PTからのオプション入力により, 任意断面の画像を表示することができる。

5. 機能試験及び考察

5.1 シミュレーション試験

本装置の画像再構成機能を確認するため, 図13に示す試料を用いてシミュレーション試験を実施した。試料はガラス固化体1ℓを模擬し, 外径89 mm, 内径81 mm, 長さ80 mmのステンレ

- ② 数値変換 : 2バイト整数, 4バイト実数をM-380の数値表現に変換する。
- ③ データフォーマット変換 : データ配列形式をMT形式からM-380のディスク形式に変換する。

(3) 画像再構成プログラム (GHOST)

本プログラムは図12に示す画像再構成プログラムフローに従って, M-380のディスク上に作成された投影データを読み込み, 固化体断面の放射能濃度分布を再構成し, 画像表示するまでの動作を実行する。本プログラムの特徴は下記のとおりである。

- ① 画像再構成は, r 線吸収補正を考慮した重畳積分法で行う。
- ② r 線吸収補正は, Sorenson, Keyes, 無補正の3種類から任意に選択可能である。
- ③ 重畳積分法に使用するフィルタ関数は, Ramachandran, Shepp & Logan, Cheslerの3種類から選択でき, さらに, ユーザが作成した任意関数も入力できる。
- ④ ガラス固化体及び容器の吸収係数は, プログラム内に登録された r 線核種のエネルギーと元素組成ライブラリから計算されるが, 入力パラメータにより変更可能である。
- ⑤ 再構成する固化体断面は, Z断面及びX断面である。ただし, X断面は, 複数のZ断面データを収集した後, 断面変換処理を施して表示する。
- ⑥ 画像表示形式は, 3次元濃度分布図と等濃度線図であり, 視点の角度や等濃度線間隔は任意に選択できる。その他, r 線投影データの軸方向及び周方向分布も表示可能である。
- ⑦ 画像は, M-380の出力装置(NLP)に表示される。さらに, PDP-11/23のGR-DとGR-Pに転送するための画像データファイルが, M-380のディスクに格納される。
- ⑧ 画像再構成時間は, 1断面当たり 100×100 の画像マトリックスで約15秒である。

(4) 画像転送プログラム (MTOPI)

本プログラムは, M-380のディスクに格納された画像データをPDP-11/23のMTに転送するまでの動作を実行する。その際, データ変換は前述のデータ変換プログラム(DATACV)の逆変換を行う。

(5) 画像表示プログラム (GDSCAN, GPSCAN)

本プログラムは, PDP-11/23のMTに格納された画像データを読み, GR-DあるいはGR-Pに画像表示する。PTからのオプション入力により, 任意断面の画像を表示することができる。

5. 機能試験及び考察

5.1 シミュレーション試験

本装置の画像再構成機能を確認するため, 図13に示す試料を用いてシミュレーション試験を実施した。試料はガラス固化体1ℓを模擬し, 外径89 mm, 内径81 mm, 長さ80 mmのステンレ

ス製容器内にガラスと空気が存在しており、ガラス素材中には ^{137}Cs が均一に分布し、さらに、濃度の異なる円柱状の ^{137}Cs 線源（直径2, 5, 15mm）と円錐台状の空気層が混在すると仮定する。線源の大きさの選定にあたっては、本装置の最小スキャンピッチが1mmであり、空間分解能がサンプリング理論より2mm以上となることを考慮して、最小直径を2mmとした。X-X, Y-Y断面における γ 線強度分布のパターンは図示したとおりである。シミュレーション試験の設定条件及び幾何学的配置は、表2に示すとおりである。この条件は本装置で実施できる最も厳しい測定条件である。

(1) Z断面放射能濃度分布

X, Z方向1mm, θ 方向 1° のスキャンピッチで γ 線投影データを収集し、Shepp & Loganのフィルタを用いて画像再構成をした場合のZ=30mm及び60mmにおけるZ断面放射能濃度分布を図14～図15に示す。各図の(a)は3次元表示, (b)は等濃度線表示である。

図14より、 ^{137}Cs が均一に分布しているガラス素材中に15mmと5mmの ^{137}Cs 線源が鮮明に再構成されていることがわかる。

図15より、 ^{137}Cs が均一に分布しているガラス素材の中央に10mmの空気層があり、2mmの ^{137}Cs 線源も再構成されることを確認した。

(2) X断面放射能濃度分布

Z=0～80mmのZ断面放射能濃度分布に断面変換処理を施して得られたX断面放射能濃度分布の表示例を図16に示す。固化体中心(X=0mm)を通り、 $\theta=0^\circ$ におけるX断面である。

同図より、ガラスと空気層との領域が判別でき、2mmと5mmの ^{137}Cs 線源の形状も鮮明に再構成されることを確認した。

以上のシミュレーション結果より、2mmの分解能で固化体内の放射能濃度分布を測定でき、空気層も検出できることがわかった。

(3) フィルタ関数の比較検討

画像再構成結果に及ぼすフィルタ関数の影響を把握することは、高精度の放射能濃度分布を得る上で重要である。そこで、図15に示したZ=60mmにおけるZ断面データを用いて、フィルタ関数の比較検討を行った。

フィルタ関数として、Ramachandran, Shepp & Logan, Cheslerの3種類を用い、各フィルタ関数に対して、無補正, Keyes, Sorensonの3種類の γ 線吸収補正を施した場合の計9種類の画像再構成結果を図17～図19に、比較リストを表3に示す。これらの結果を相互比較すると、次のことが言える。

- ① γ 線吸収補正をしない場合、いずれのフィルタ関数を用いても、原画像に忠実な結果は得られず、固化体中心部になるほど ^{137}Cs 濃度が低下する傾向がある。したがって、ECT法では、 γ 線吸収補正が必要である。
- ② γ 線吸収補正をした場合、各図の(2) Keyesと(3) Sorensonの結果から明らかのように、中央部の ^{137}Cs 濃度の低下が是正され原画像にほぼ忠実な結果が得られている。15mmの ^{137}Cs 線源に着目すれば、KeyesよりもSorensonの補正の方がさらに良好な結果が得られている。
- ③ Ramachandranのフィルタを用いた場合、解像度はシャープで良好であるが、固化体の

外周部に大きな凹凸が生じる欠点がある。これは、(4)式から明らかなように高周波領域で急激な cut-off を行っているためである。

- ④ 一方, Chesler のフィルタは, 画像平滑化の効果が大きく, 固化体外周部の大きな凹凸を完全に補正できるが, 中心付近では, 2 mm の ^{137}Cs 線源の再構成結果を他のフィルタと比較すれば明らかなように, 幾分低い強度になる傾向がある。
- ⑤ Shepp & Logan のフィルタは, 前述の 2 種類のフィルタの欠点が補正され, 原画像に最も忠実な画像を与えている。

以上の比較検討より, 本システムにおける最適な組合せは, フィルタ関数として Shepp & Logan, r 線吸収補正として Sorenson であることが明らかとなった。

5.2 E-CT 試験

本装置のデータ収集からデータ処理に至る一連の機能を確認するため, 1 ℓ 及び 5 ℓ のステンレス製容器内にコールドのガラスを充填し, その中に 3 Ci の ^{134}Cs 線源を挿入した 4 種類の試料を用いて, E-CT 試験を実施した。

(1) 測定試料

測定試料の形状を図20に示す。試料 1, 2, 3 は, ガラス固化体 1 ℓ を模擬して, 外径 89 mm, 内径 81 mm, 長さ 100 mm のステンレス製容器内にガラスを充填し, その素材中に直径 8 mm, 長さ 25 mm, 放射能 3 Ci の ^{134}Cs 線源をそれぞれ 1, 2, 3 個挿入した試料である。試料 4 は, 外径 160 mm, 内径 150 mm, 長さ 100 mm のガラス固化体 5 ℓ を模擬したステンレス製容器内に, ^{134}Cs 線源を試料 3 と同一位置に挿入した試料である。

(2) 試験方法

E-CT 試験の測定条件及び幾何学的配置を表 4 に示す。3 Ci の ^{134}Cs 線源 1 個当りの放射能濃度は 2.3 Ci/cm^3 であり, r 線計数率を上げるために, 口径 1 mm のコリメータを使用した。 r 線投影データの収集は, $\theta-Z-X$ のスキャンモードで, θ 方向 0° から 354° まで 6° ピッチで 60 点, Z 方向 55 mm から 60 mm まで 5 mm ピッチで 2 点, X 方向 -30 mm から 30 mm まで 2 mm ピッチで 31 点の計 3720 点を測定した。1 点当りの r 線測定時間は 60 sec であるが, 今回は各測定点のデータチェックを兼ねて, スキャン位置と r 線スペクトル解析結果を PT に出力しながらデータ収集を行ったため, 試料移動からデータ収録まで 2.25 min かかり, 1 試料当り 5.8 day (1 断面当り 2.9 day) を要した。

画像再構成処理は, 1 断面当り X 方向 31 点, θ 方向 60 点の計 1860 点の r 線投影データ $P(X, \theta)$ に, Sorenson の r 線吸収補正を施した後, Shepp & Logan のフィルタ関数を用いて解析した。

(3) 試験結果

r 線投影データの測定結果の 1 例として, 試料 3 に対する $\theta = 0^\circ$ 及び $\theta = 90^\circ$ 方向からの 604.7 keV の r 線強度の X 方向分布を図 21 に示す。 $\theta = 0^\circ$ では, 3 個の ^{134}Cs 線源が 1 列に重なって, $X = 0 \text{ mm}$ の位置に 1 個のピークとして投影されており, $\theta = 90^\circ$ では, $X = -15, 0, 20 \text{ mm}$ の位置に 3 個のピークが投影されている。 $\theta = 90^\circ$ における 3 個のピークの r 線強度を比

較すると、 $X = 20, -15, 0$ mmの順に低下している。これは、 r 線が透過するガラス素材と容器の厚さが各位置で異なるために、 r 線吸収効果の差によって生じたものである。次に、各線源のピーク幅に着目すると、 ^{134}Cs 線源の直径8 mmに対して投影されたピーク幅は12~14 mmと大きくなっている。これは、測定時の幾何学的配置、特にコリメータ形状と測定距離に起因するもので、長さ250 mm、口径1 mmのコリメータを使用しても、コリメータ先端から試料中心まで、さらに816 mmあるので、試料の測定領域が7.5 mmに広がるためと考えられる。

このような r 線投影データをもとに画像再構成して得られた各試料のZ断面放射能濃度分布を図22~図25に示す。いずれも、 ^{134}Cs 線源の存在位置を正確に再現していることがわかる。各線源の ^{134}Cs 線源強度は、試料4を除いてほぼ一様に再構成された。試料4の場合は、5 l容器を用いているため、 r 線吸収効果が他の試料よりも大きく現れ、画像再構成処理の段階で各線源強度に差を生じたと推定されるが、今後、さらに検討する必要がある。

各線源の放射能濃度分布の形状は、線源の中心部を頂点とする円錐形となっており、線源の直径も実物より大きめに再構成されている。これは、図21に示した r 線投影データの例で触れたように、コリメータの形状と測定距離に起因するものと考えられ、測定条件を考慮することにより真の分布に近づくとと思われる。この傾向を検討するため、試料3を用いたシミュレーション試験により画像再構成を行い、E-C T試験結果と比較した。シミュレーション試験の測定条件は、コリメータ口径0.3 mm、 $\Delta X = 1$ mm、 $\Delta \theta = 1^\circ$ のスキャンピッチとした。

図26は、 $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ 方向からの r 線投影データのX方向分布である。図21と比較すると明らかなように、直径8 mmの ^{134}Cs 線源の投影ピーク幅が最大14 mmから10 mmに是正されることがわかる。

図27は、図26の r 線投影データを画像再構成して得られたZ断面放射能濃度分布である。図24のE-C T試験結果よりも、ノイズも少く、真の濃度分布の形状に近い結果が得られることを示唆している。

以上の既知試料を用いたE-C T試験により、固化体内の r 線源の存在位置を正確に検出でき、放射能濃度分布も半定量的ではあるが測定可能であることを確認した。

5.3 ホットガラス固化体の放射能測定

WASTEFで作製したホットガラス固化体試料を用いて、軸方向放射能濃度分布を測定した。試料は、1 lステンレス製容器（外径89 mm、内径81 mm、長さ250 mm）内に ^{137}Cs 12.8 mCi とガラス素材とを熔融固化したものである。

本試料をZ- θ スキャンモードで、Z方向5 mm、 θ 方向 90° ピッチで測定した場合の軸方向放射能濃度分布を図28に示す。横軸は軸方向（Z方向）位置、縦軸は662 keV r 線強度の相対値を表わす。 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の4方向からの濃度パターンはいずれも、Z = 40 mmから60 mmまで急激に立ち上り、その後、緩慢に増加しながら、Z = 120 mmより下部ではほぼ定常に達している。この結果より、容器内のガラス固化体の充填状況が把握できる。即ち、これまでのコールド試験結果より推測すると、ガラスの完全充填領域はZ = 120 mmより下部であり、それより上部は不完全充填領域で、固化体中心部にくぼみができていると推察される。

さらに、この軸方向放射能濃度分布より、充填容積、総放射能量、密度及び濃度分布の均一性等が評価できる。これらの評価結果を表5に示す。

前述の充填状況をもとに幾何学的に算出した充填容積は、重量測定値から算出した値と約2%の誤差で一致した。

総放射能量は、 θ 方向4個の r 線強度平均値から任意断面 Z_i における放射能を求め、 Z_i 断面では均一分布という仮定のもとに算出し、11.6 mCiを得たが、投入前の定量値12.8 mCiよりも約10%減少している。これは、ガラス固化体作製時に溶融炉等に付着したためと思われる。

密度は充填容積をもとに、100%の充填率と仮定すれば、重量測定値から約2%の精度で算出可能である。

濃度分布の均一性は、 $Z > 120$ mmの完全充填領域を対象に、 r 線強度の平均値に対する標準偏差の割合で定義したが、 $\pm 2\%$ の範囲で均一であった。

以上のように、固化体の軸方向放射能濃度分布特性から種々の物性評価が可能となったが、E-CT結果を用いることにより、さらに高精度の評価が可能である。

5.4 今後の課題と対策

(1) データ収集時間の短縮化

今回の機能試験において、1点当りのデータ収集時間は2.25 minを要した。固化体全領域を測定するためには、膨大な時間を要する。その対策として、①データチェックとしてのスキャン位置と r 線スペクトル解析結果の出力を省くことにより、スキャナ移動からデータ収集までのシーケンス時間は、 r 線測定時間を除いて約50%短縮できること、②実固化体の放射能レベルになれば、 r 線測定時間も今回の1 minから20~30 secに短縮できること、③さらに、 r 線検出器をX方向位置に複数個(n 個)並列に設置することにより、データ収集時間を $1/n$ に短縮できることが考えられる。

(2) 画像再構成の高精度化

鮮明な画像を得るためには、①十分にコリメートされた r 線投影データを収集し、②最適なフィルタ関数と r 線吸収補正法を選択することが重要である。

①に関しては、コリメータの長さを250 mmよりさらに長く、微小口径を0.3 mmよりさらに小さくすることにより、高精度の r 線投影データを得ることができるが、 r 線計数率が低下し、データ収集時間の短縮化を妨げることになる。そのため、コリメータの改良には限界がある。その対策として、今回の測定で問題となった r 線投影データのピーク幅の拡がりを補正するデータ処理上の検討が必要である。

②に関しては、E-CT技術の発展に伴い、新しいフィルタ関数及び r 線吸収補正法の提案が期待されるため、今後、画像再構成アルゴリズムを改善することにより、さらに高精度の画像が得られると確信する。

(3) 空気層の定量化

シミュレーション試験により、固化体内の空気層が検出できることを確認したが、定量的には検討していない。今後、既知試料を用いたE-CT試験により、空気層の定量化を行い、固化体

充填容積，密度等の物性評価の精度向上を図る必要がある。

6. 結 論

高レベル廃棄物ガラス固化体内の放射性核種の均一性を把握するため、E-C T技術を導入した γ スキャン装置を開発し、シミュレーション試験及び既知試料による機能試験を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 本装置は、2 mmの分解能で固化体のZ、X断面の放射能濃度分布を3次元及び等濃度線で表示できる。
- (2) 画像再構成処理において、Sorensonの γ 線吸収補正とShepp & Loganのフィルタ関数を使用することにより、原画像に最も忠実な再構成結果が得られる。
- (3) 画像再構成処理時間は、1断面約15 secである。
- (4) E-C T法により、固化体内の空気層も検出可能である。
- (5) γ スキャンによる軸方向放射能濃度分布測定から、固化体充填容積，総放射エネルギー，密度及び放射能濃度分布均一性を評価できる。

今後、データ収集時間の短縮化，画像再構成の高精度化及び空気層の定量化を検討し、固化体内放射能濃度分布の測定精度向上を図る必要がある。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、御激励と御助言を戴いた環境安全研究部 今井和彦部長，荒木邦夫次長に感謝致します。さらに本研究の遂行に当たり、御助言と御協力を戴いたWASTEF管理室 松本征一郎氏，塩田得浩氏，及び山本皓靖氏に感謝致します。

また、本装置のハードウェアとソフトウェアの開発に御協力を戴いたセイコーEG&G(株)及び日本電子計算(株)の関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 田代，青山，松本：廃棄物安全試験施設(WASTEF)(建屋及びセルの設計と仕様)，JAERI-M 83-175 ('83)
- 2) Mendel, J. E., et al.: Annual Report on the Characteristics of High-Level Waste Glasses, Battelle Rep. BNWL-2252 ('77)

充填容積，密度等の物性評価の精度向上を図る必要がある。

6. 結 論

高レベル廃棄物ガラス固化体内の放射性核種の均一性を把握するため、E-C T技術を導入した γ スキャン装置を開発し、シミュレーション試験及び既知試料による機能試験を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 本装置は、2 mmの分解能で固化体のZ、X断面の放射能濃度分布を3次元及び等濃度線で表示できる。
- (2) 画像再構成処理において、Sorensonの γ 線吸収補正とShepp & Loganのフィルタ関数を使用することにより、原画像に最も忠実な再構成結果が得られる。
- (3) 画像再構成処理時間は、1断面約15 secである。
- (4) E-C T法により、固化体内の空気層も検出可能である。
- (5) γ スキャンによる軸方向放射能濃度分布測定から、固化体充填容積，総放射エネルギー，密度及び放射能濃度分布均一性を評価できる。

今後、データ収集時間の短縮化，画像再構成の高精度化及び空気層の定量化を検討し、固化体内放射能濃度分布の測定精度向上を図る必要がある。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、御激励と御助言を戴いた環境安全研究部 今井和彦部長，荒木邦夫次長に感謝致します。さらに本研究の遂行に当たり、御助言と御協力を戴いたWASTE F管理室 松本征一郎氏，塩田得浩氏，及び山本皓靖氏に感謝致します。

また、本装置のハードウェアとソフトウェアの開発に御協力を戴いたセイコーEG&G（株）及び日本電子計算（株）の関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 田代，青山，松本：廃棄物安全試験施設（WASTE F）（建屋及びセルの設計と仕様），JAERI-M 83-175（'83）
- 2) Mendel, J. E., et al.: Annual Report on the Characteristics of High-Level Waste Glasses, Battelle Rep. BNWL-2252（'77）

充填容積，密度等の物性評価の精度向上を図る必要がある。

6. 結 論

高レベル廃棄物ガラス固化体内の放射性核種の均一性を把握するため，E-C T技術を導入した γ スキャン装置を開発し，シミュレーション試験及び既知試料による機能試験を実施した。その結果，以下の結論を得た。

- (1) 本装置は，2 mmの分解能で固化体のZ，X断面の放射能濃度分布を3次元及び等濃度線で表示できる。
- (2) 画像再構成処理において，Sorensonの γ 線吸収補正とShepp & Loganのフィルタ関数を使用することにより，原画像に最も忠実な再構成結果が得られる。
- (3) 画像再構成処理時間は，1断面約15 secである。
- (4) E-C T法により，固化体内の空気層も検出可能である。
- (5) γ スキャンによる軸方向放射能濃度分布測定から，固化体充填容積，総放射能量，密度及び放射能濃度分布均一性を評価できる。

今後，データ収集時間の短縮化，画像再構成の高精度化及び空気層の定量化を検討し，固化体内放射能濃度分布の測定精度向上を図る必要がある。

謝 辞

本研究を実施するに当たり，御激励と御助言を戴いた環境安全研究部 今井和彦部長，荒木邦夫次長に感謝致します。さらに本研究の遂行に当たり，御助言と御協力を戴いたWASTEF管理室 松本征一郎氏，塩田得浩氏，及び山本皓靖氏に感謝致します。

また，本装置のハードウェアとソフトウェアの開発に御協力を戴いたセイコーEG&G（株）及び日本電子計算（株）の関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 田代，青山，松本：廃棄物安全試験施設（WASTEF）（建屋及びセルの設計と仕様），JAERI-M 83-175（'83）
- 2) Mendel, J. E., et al.: Annual Report on the Characteristics of High-Level Waste Glasses, Battelle Rep. BNWL-2252（'77）

充填容積，密度等の物性評価の精度向上を図る必要がある。

6. 結 論

高レベル廃棄物ガラス固化体内の放射性核種の均一性を把握するため、E-C T技術を導入した γ スキャン装置を開発し、シミュレーション試験及び既知試料による機能試験を実施した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 本装置は、2 mmの分解能で固化体のZ、X断面の放射能濃度分布を3次元及び等濃度線で表示できる。
- (2) 画像再構成処理において、Sorensonの γ 線吸収補正とShepp & Loganのフィルタ関数を使用することにより、原画像に最も忠実な再構成結果が得られる。
- (3) 画像再構成処理時間は、1断面約15 secである。
- (4) E-C T法により、固化体内の空気層も検出可能である。
- (5) γ スキャンによる軸方向放射能濃度分布測定から、固化体充填容積，総放射エネルギー，密度及び放射能濃度分布均一性を評価できる。

今後、データ収集時間の短縮化，画像再構成の高精度化及び空気層の定量化を検討し、固化体内放射能濃度分布の測定精度向上を図る必要がある。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、御激励と御助言を戴いた環境安全研究部 今井和彦部長，荒木邦夫次長に感謝致します。さらに本研究の遂行に当たり、御助言と御協力を戴いたWASTE F管理室 松本征一郎氏，塩田得浩氏，及び山本皓靖氏に感謝致します。

また、本装置のハードウェアとソフトウェアの開発に御協力を戴いたセイコーEG&G（株）及び日本電子計算（株）の関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 田代，青山，松本：廃棄物安全試験施設（WASTE F）（建屋及びセルの設計と仕様），JAERI-M 83-175（'83）
- 2) Mendel, J. E., et al.: Annual Report on the Characteristics of High-Level Waste Glasses, Battelle Rep. BNWL-2252（'77）

- 3) 鈴木, 木村: CT技術の現状, 原子力誌, 25〔1〕, 2~9 ('83)
- 4) J. Radon: On the Determination of Functions from Their Integrals along Certain Manifolds, Ber. Verh. Sächs Akad. Wiss. 69, 262-277 ('17)
- 5) Hounsfield, G. N.: Computerized Transverse Axial Scanning (Tomography) Part 1 Description of System, Br. J. Radiol., 46, pp. 1016-1022 ('73)
- 6) 飯沼: コンピュータ断層撮影法, 電子通信学会誌, Vol. 64, NO. 4, p 401-408 ('81)
- 7) G. N. Ramachandran & A. V. Lakshminarayanan: Three-dimensional Reconstruction from Radiographs and Electron Micrographs, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 68 (1971) p 2236
- 8) L. A. Shepp & B. F. Logan: The Fourier Reconstruction of a Head Section, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-21 (1974) p 21
- 9) D. A. Chesler & S. J. Riederer: Ripple Suppression during Reconstruction in Transverse Tomography, PHY. MED. BIOL., 1975, Vol. 20, NO. 4, 632-636
- 10) 岩井: CTスキャナ, p16-17, コロナ社 (1981)
- 11) EG&G ORTEC: Operator's Manual Analytical Software for Nuclear Power Plant Germanium Detectors Model 6527FM

表1 主要装置の仕様と機能

| | 装置名 | 仕様 | 機能 |
|---------|--------------------------------|--|---------------------------------|
| データ収集部 | 小型電子計算機 | PDP-11/03-LK型 メモリ容量: 64 Kbyte | システム制御 入出力データ制御 |
| | プリンタ ターミナル | DECライタIII-LA120型 印字速度: 180 字/sec | 入出力操作 |
| | カートリッジ ディスク装置 | DEC RL02型 メモリ容量: 10.4 Mbyte | プログラムファイル データファイル |
| | フロッピ ディスク装置 | DEC RX02型 メモリ容量: 512 Kbyte | データファイル |
| | 磁気テープ装置 | AMT-1740型 | データファイル |
| | スキャナ | X, Y, Z, θ 方向スキャン 位置精度: 1 mm, 1° | 試料移動 |
| | γ 線検出器 | GEM-15200/CFG型 高純度Ge検出器 | γ 線測定 |
| 多重波高分析器 | ORTEC 7010型 チャンネル数: 4096 ch | γ 線スペクトル分析 | |
| データ処理部 | 小型電子計算機 | PDP-11/23型 メモリ容量: 128 Kbyte | オンライン制御 入出力データ制御 |
| | プリンタ ターミナル | DECライタIII-LA120型 印字速度: 180 字/sec | 入出力操作 |
| | フロッピ ディスク装置 | DEC RX02型 メモリ容量: 512 Kbyte | プログラムファイル 解析データファイル |
| | 磁気テープ装置 | AMT-1740型 | 解析データファイル |
| | ラインプリンタ | LSQ11-LK型 印字速度: 250 行/min | 解析データ出力 |
| | グラフィック ディスプレイ | D-SCAN GR-2201型 | 解析データ画像出力 |
| | グラフィック プロッタ | HP7240A型 | 解析データ画像出力 |
| | 大型計算機 システム | FACOM M-380型 | 画像再構成解析 解析データ出力 解析データ画像出力 |

表2 シミュレーションの設定条件及び幾何学的配置

| シミュレーションの設定条件 | | (mm) | |
|---------------|-------------|----------------|---|
| コリメータ内径 | $D_c = 0.3$ | スキャンピッチ | $\Delta X = 1, \Delta Z = 1$ $\Delta \theta = 1^\circ$ |
| コリメータ長さ | $L_c = 250$ | | |
| 試料直径 | $D_g = 81$ | 試料放射能 | 相対値 (図13参照) |
| 試料長さ | $L_g = 80$ | 放射性核種 | Cs-137 |
| 容器肉厚 | $T_s = 4$ | γ 線吸収補正 | Sorenson |
| スキャナ位置 | $Y = -40$ | フィルタ関数 | Shepp |
| 検出器試料間距離 | $L = 1108$ | | |

| 幾何学的配置 | | (mm) | |
|----------|------------|--------|--|
| | | | |
| Detector | Collimator | Sample | |

表3 フィルタ関数の比較

| γ線吸収 補正 | フィルタ関数 | | |
|------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | R a m a - c h a n d r a n | S h e p p & L o g a n | C h e s l e r |
| | 図17 参照 | 図18 参照 | 図19 参照 |
| (1) | 中心部低, 外周部高 使用不可 | 中心部低, 外周部高 使用不可 | 中心部低, 外周部高 使用不可 |
| (2) | シャープ画像 外周部が凹凸になる 使用可 | シャープ画像 使用可 | 平滑画像 使用可 |
| (3) | 原画像にほぼ忠実な 画像 使用可 | 原画像に最も忠実な 画像 使用可 | 原画像にほぼ忠実な 画像 使用可 |

(1) : No Correction (2) : Keys

(3) : Sorenson

表4 E-C T試験の測定条件及び幾何学的配置

| E-C T試験の測定条件 | | (mm) |
|--------------|-----------------|---|
| コリメータ内径 | $D_c = 1.0$ | スキャンモード $\theta-Z-X$ スキャンピッチ $\Delta X = 2, \Delta Z = 5$ $\Delta \theta = 6^\circ$ |
| コリメータ長さ | $L_c = 250$ | |
| 試料直径 | $D_g = 81, 150$ | 試料放射能 3 Ci (図20参照) |
| 試料長さ | $L_g = 100$ | 放射性核種 Cs-134 |
| 容器肉厚 | $T_s = 4, 5$ | γ 線測定時間 60 sec |
| スキャナ位置 | $Y = -40$ | γ 線吸収補正 Sorenson |
| 検出器試料間距離 | $L = 1108$ | フィルタ関数 Shepp |

| 幾何学的配置 | | (mm) |
|----------|------------|--------|
| | | |
| Detector | Collimator | Sample |

表5 ガラス固化体の評価結果

| 評価項目 | 評価結果 | 参考値 |
|--------------------|------------------------------------|-----------------|
| 充填容積 (ℓ) | 1.031 | 1.053 (重量測定) |
| 総放射能量 (mCi) | 11.6 | 12.8 (投入量) |
| 密度 (g/cm^3) | 2.76 | 2.70 |
| 濃度分布均一性 (%) | ± 2 ($Z > 120\text{ mm}$) | — |

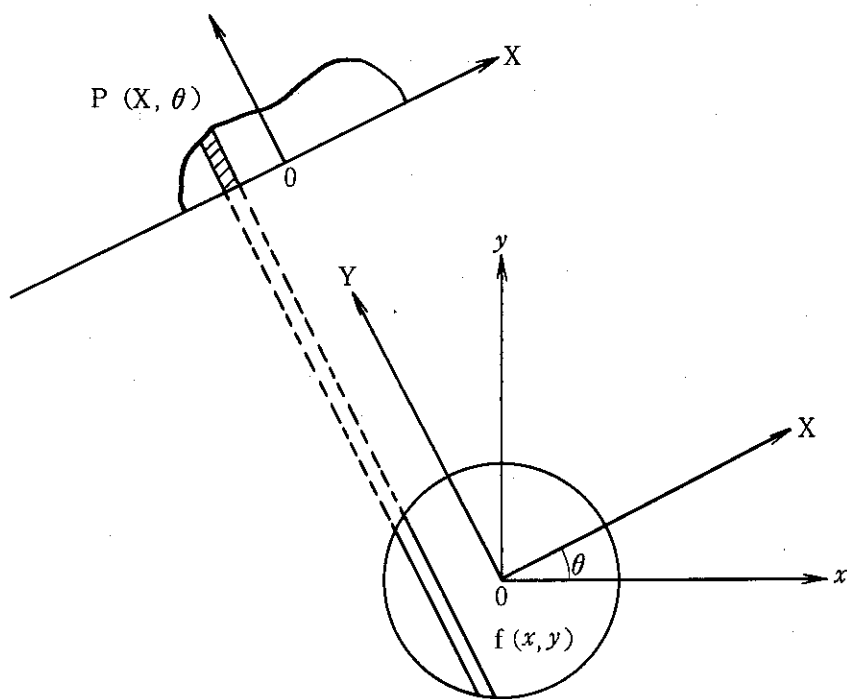


図1 放射能濃度分布 $f(x, y)$ と投影データ $P(X, \theta)$ との関係

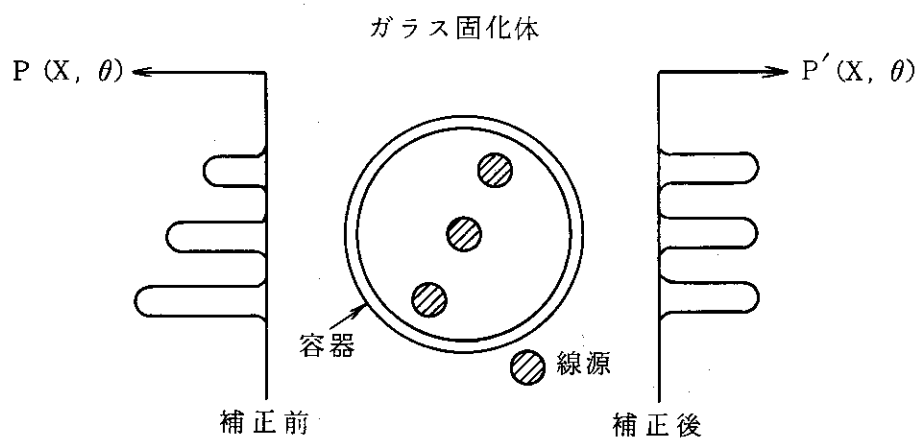
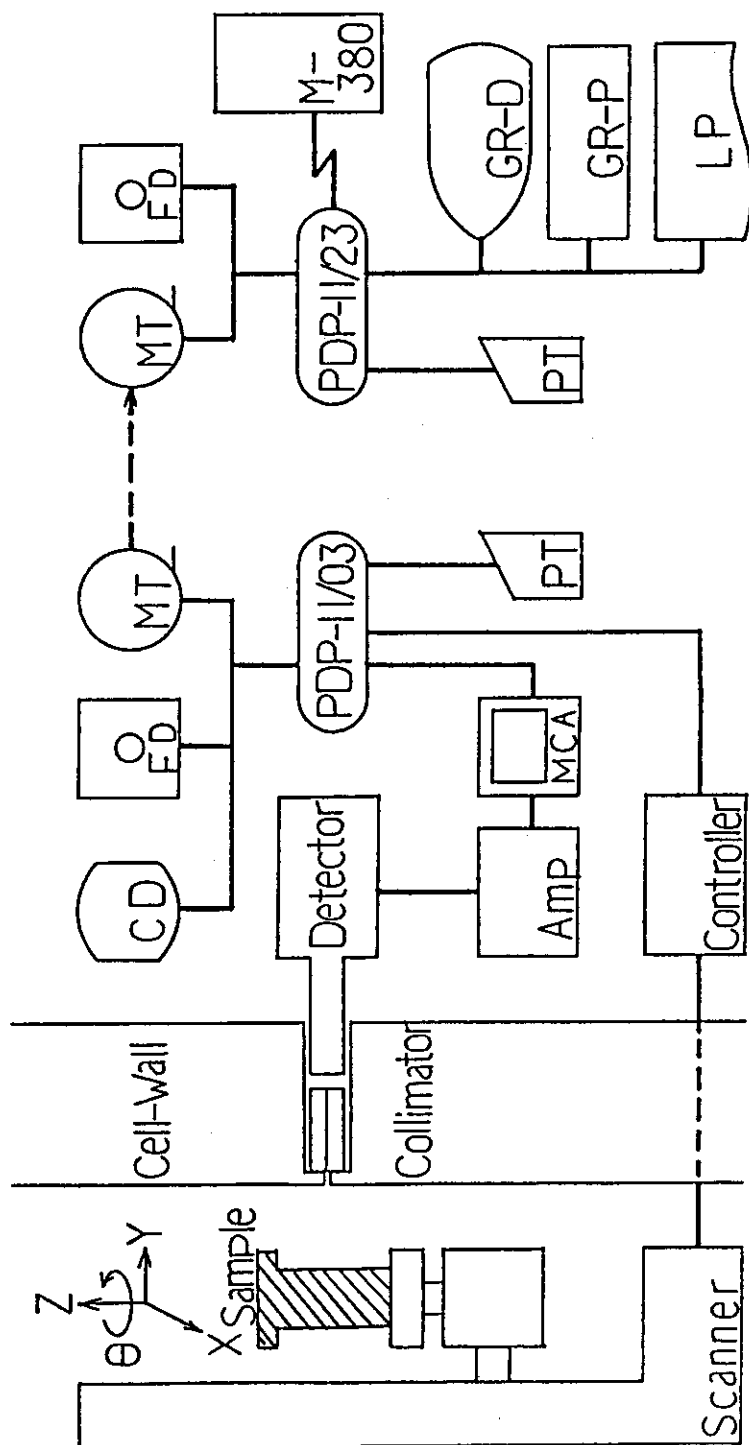


図2 E-CT投影データの γ 線吸収補正



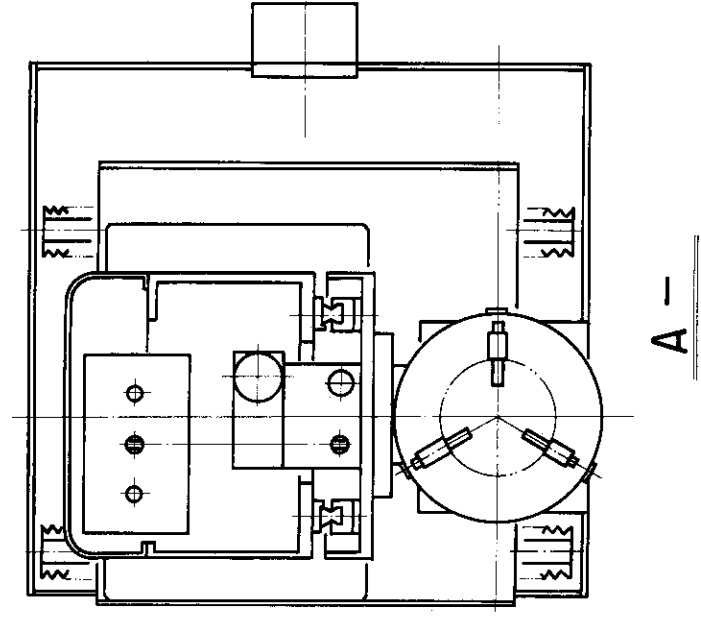
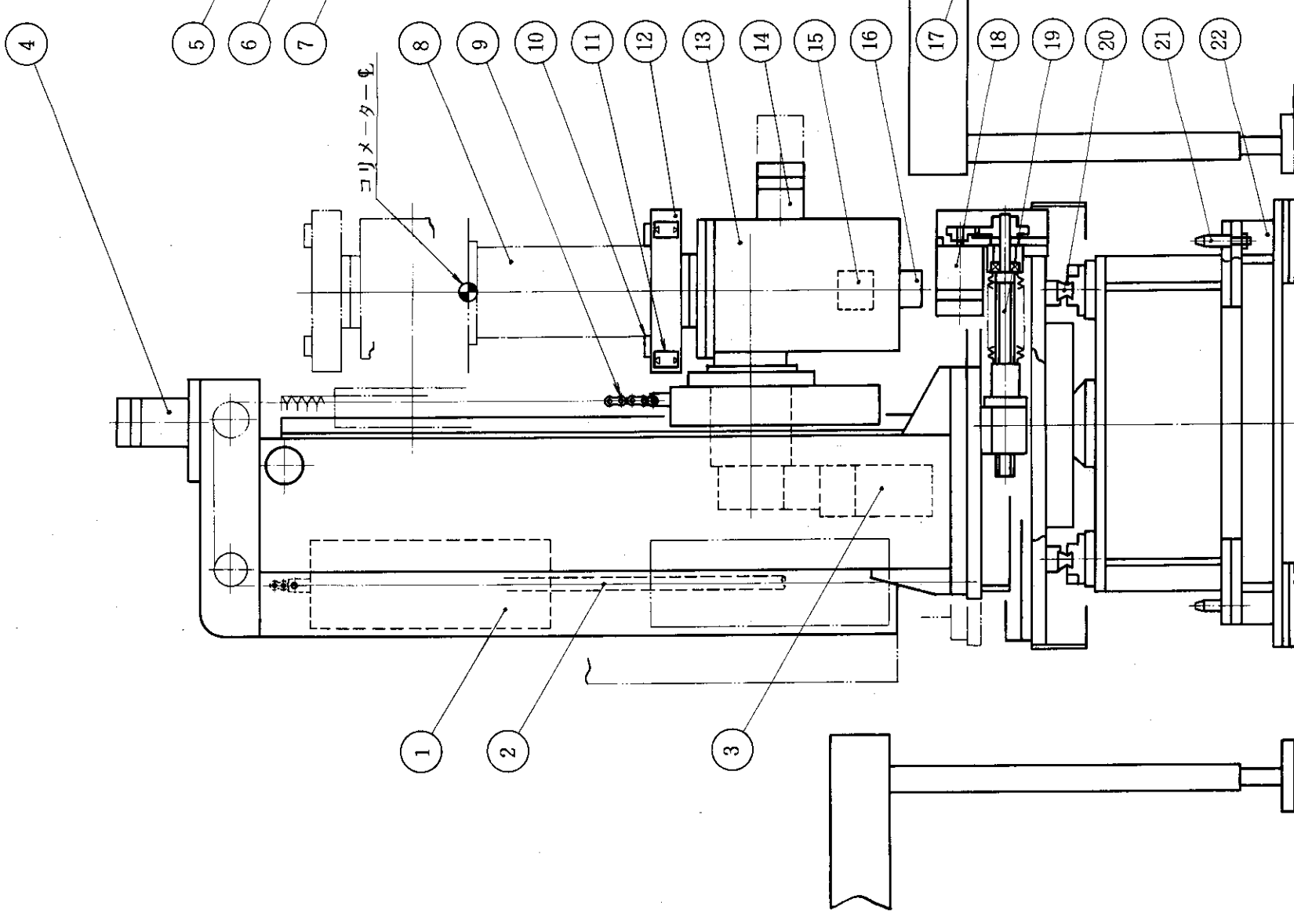
(データ処理部)

(データ収集部)

図3 アスキャニング装置概略図

各部の名称

- ① バランスウェート
- ② ウエートガイドバー
- ③ テーブルユニット旋回ACモーター
- ④ テーブルユニット上下パルスモーター
- ⑤ 吊り金具
- ⑥ 上下移動用ガイドレール
- ⑦ 上下移動用ポールスクリュー
- ⑧ 被検体
- ⑨ 連結チェーン
- ⑩ 運動チャック爪
- ⑪ チャック爪番号プレート
- ⑫ ターンテーブル
- ⑬ ターンテーブルユニット
- ⑭ テーブル回転パルスモーター
- ⑮ チャック用トルクリミッター
- ⑯ チャック用ACモーター
- ⑰ 左右移動用ガイドレール
- ⑱ 左右移動用パルスモーター
- ⑲ 左右移動用ポールスクリュー
- ⑳ 前後移動用ガイドレール
- ㉑ 固定ベースハメアイピン
- ㉒ 固定ベース
- ㉓ 上下移動用フレキ (電気用)
- ㉔ ターミナルボックス (TB-2)
- ㉕ ターミナルボックス (TB-3)
- ㉖ ターミナルボックス (TB-1)
- ㉗ 左右移動用フレキ (電気用)
- ㉘ 前後移動用パルスモーター
- ㉙ 前後移動用ポールスクリュー



②⑧ ②⑨

図4 試料移動用スキヤナの概念図

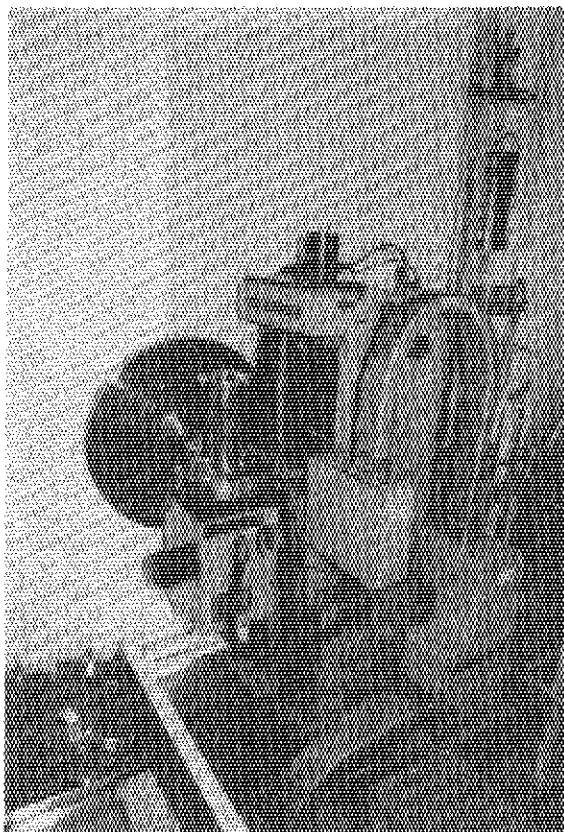


図5 試料移動用スキャナの外觀写真

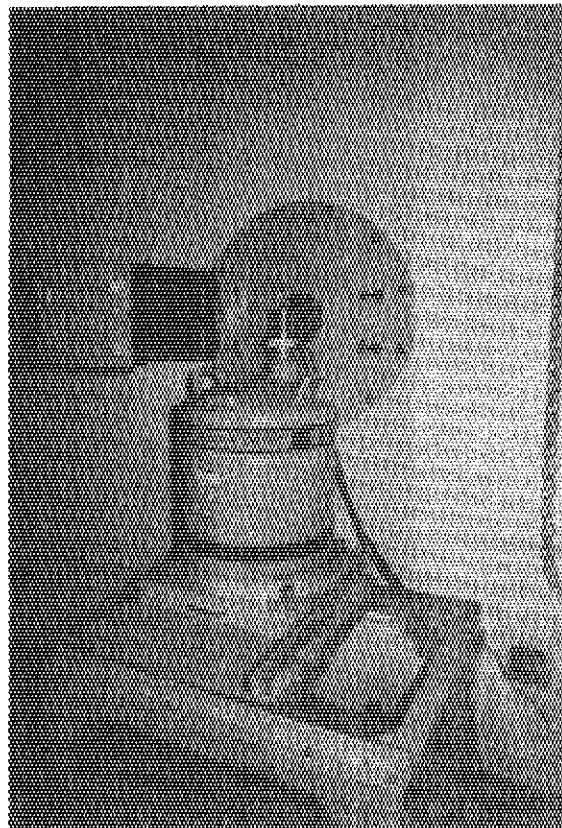


図7 γ 線検出器の外觀写真

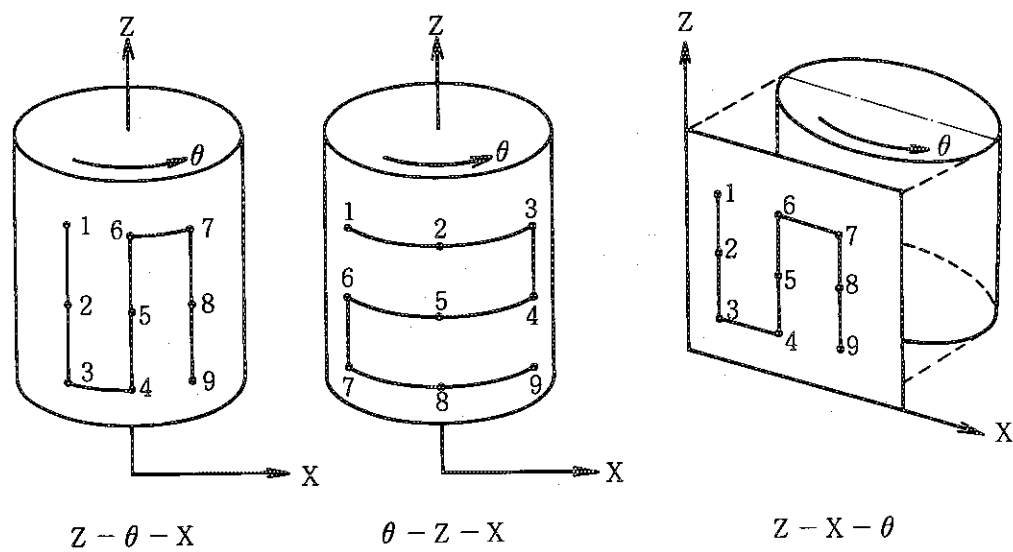


図6 スキャンモード

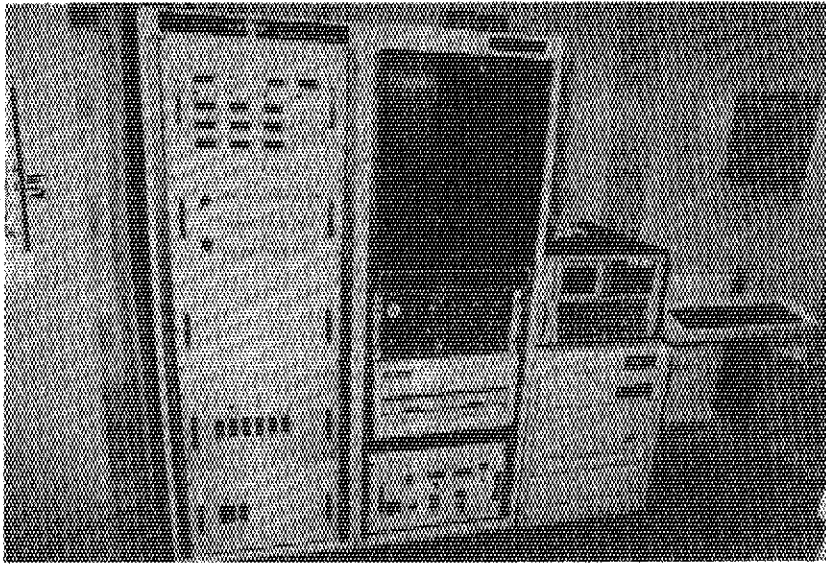


図8 データ収集用計算機システムの外観写真

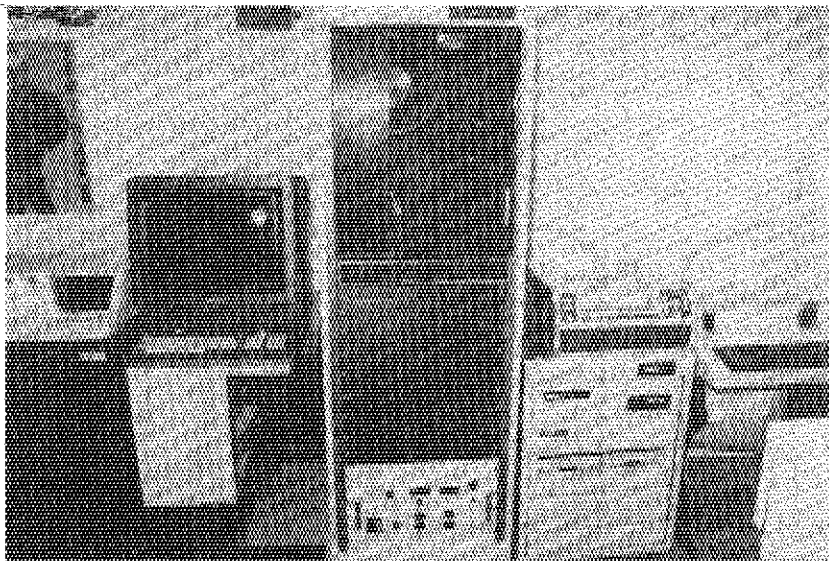


図9 データ処理用計算機システムの外観写真

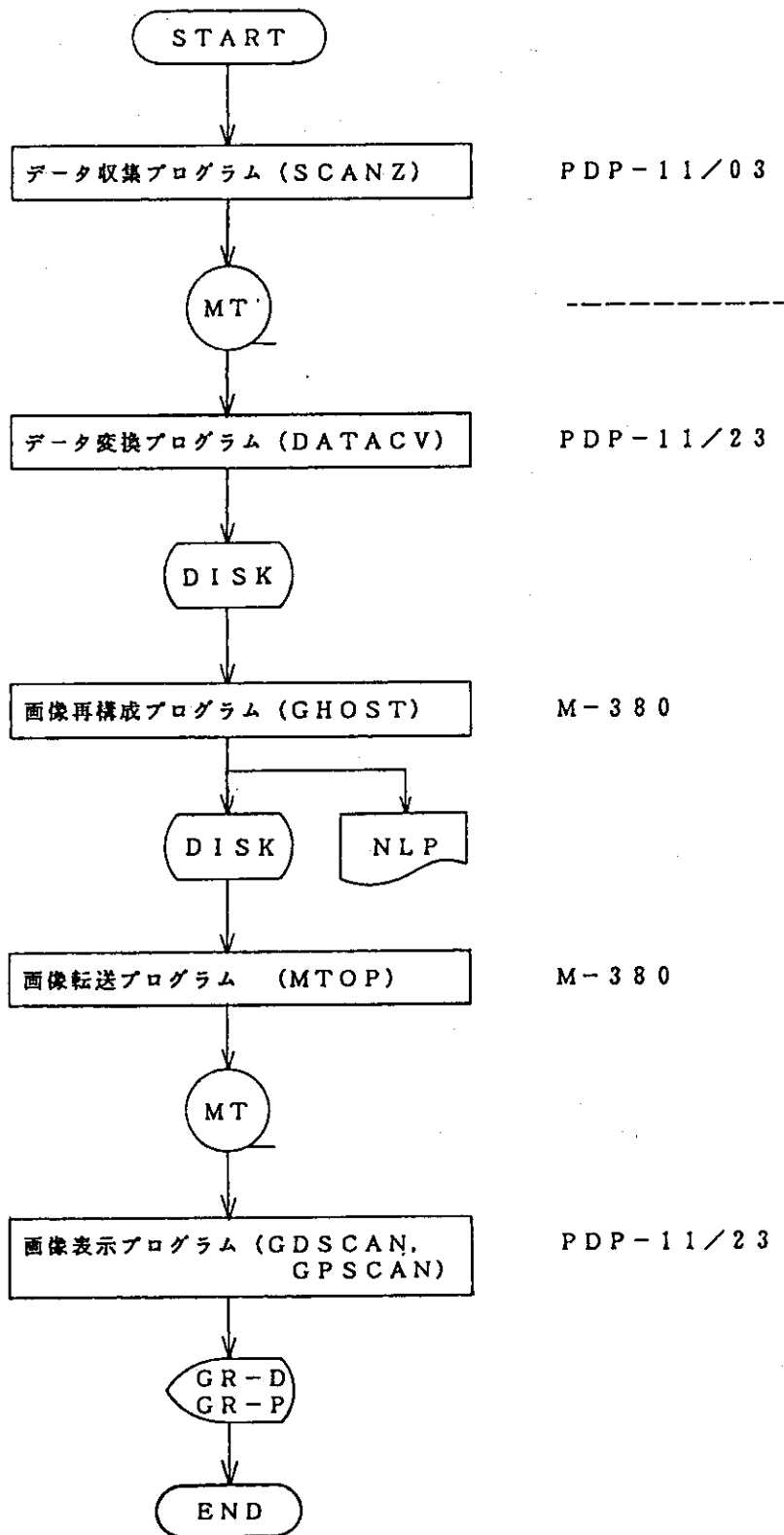


図10 アスキャニングソフトウェア構成

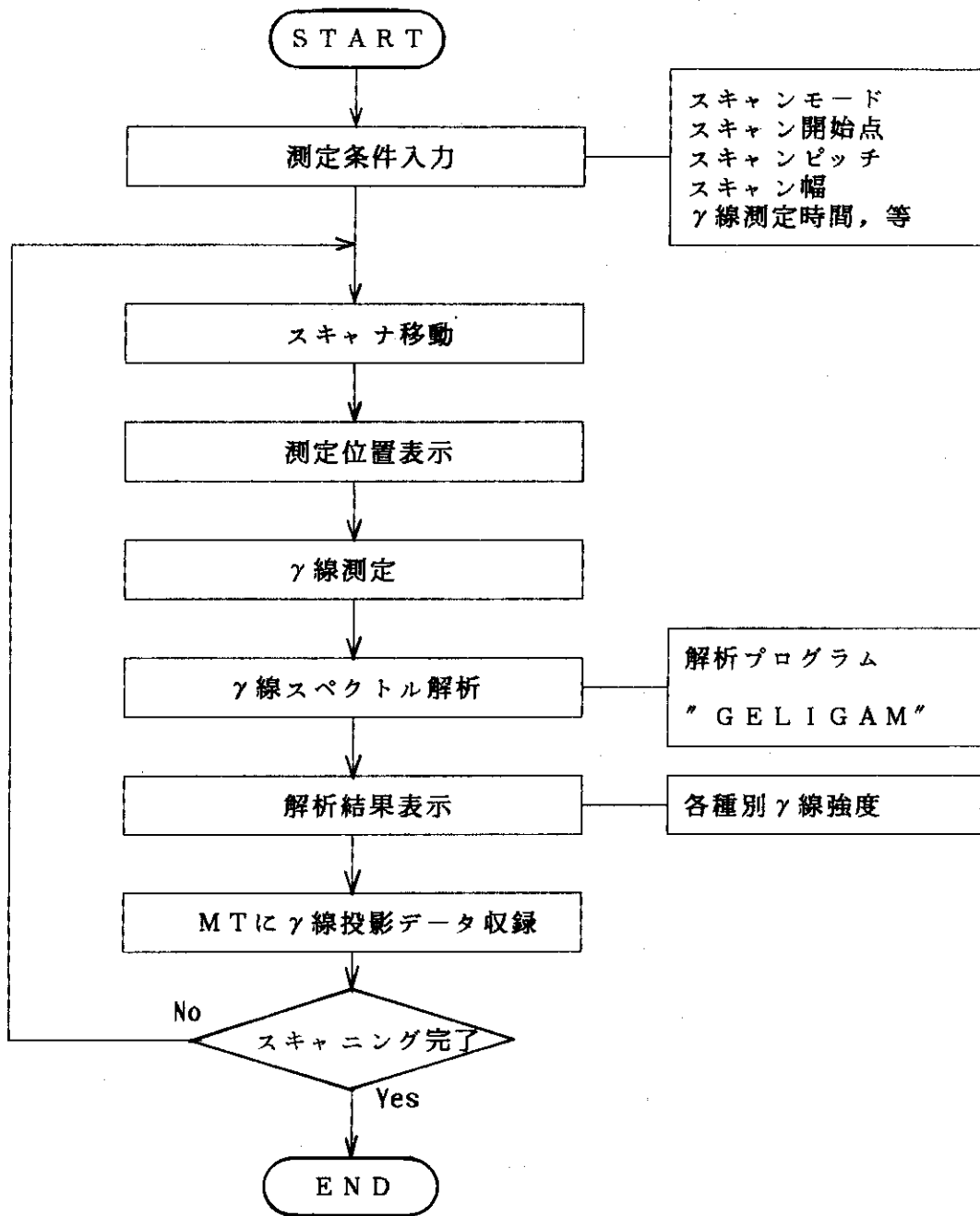


図11 データ収集プログラムフロー

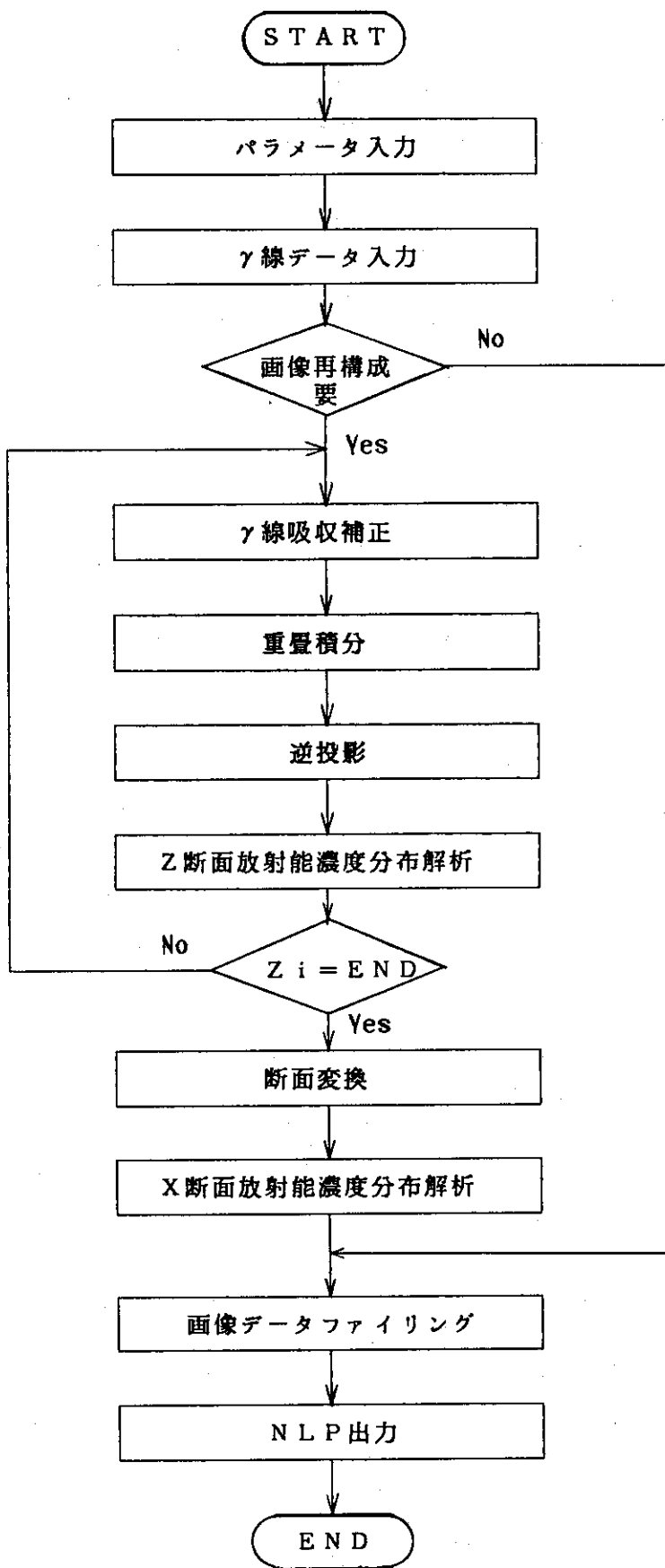


図12 画像再構成プログラムフロー

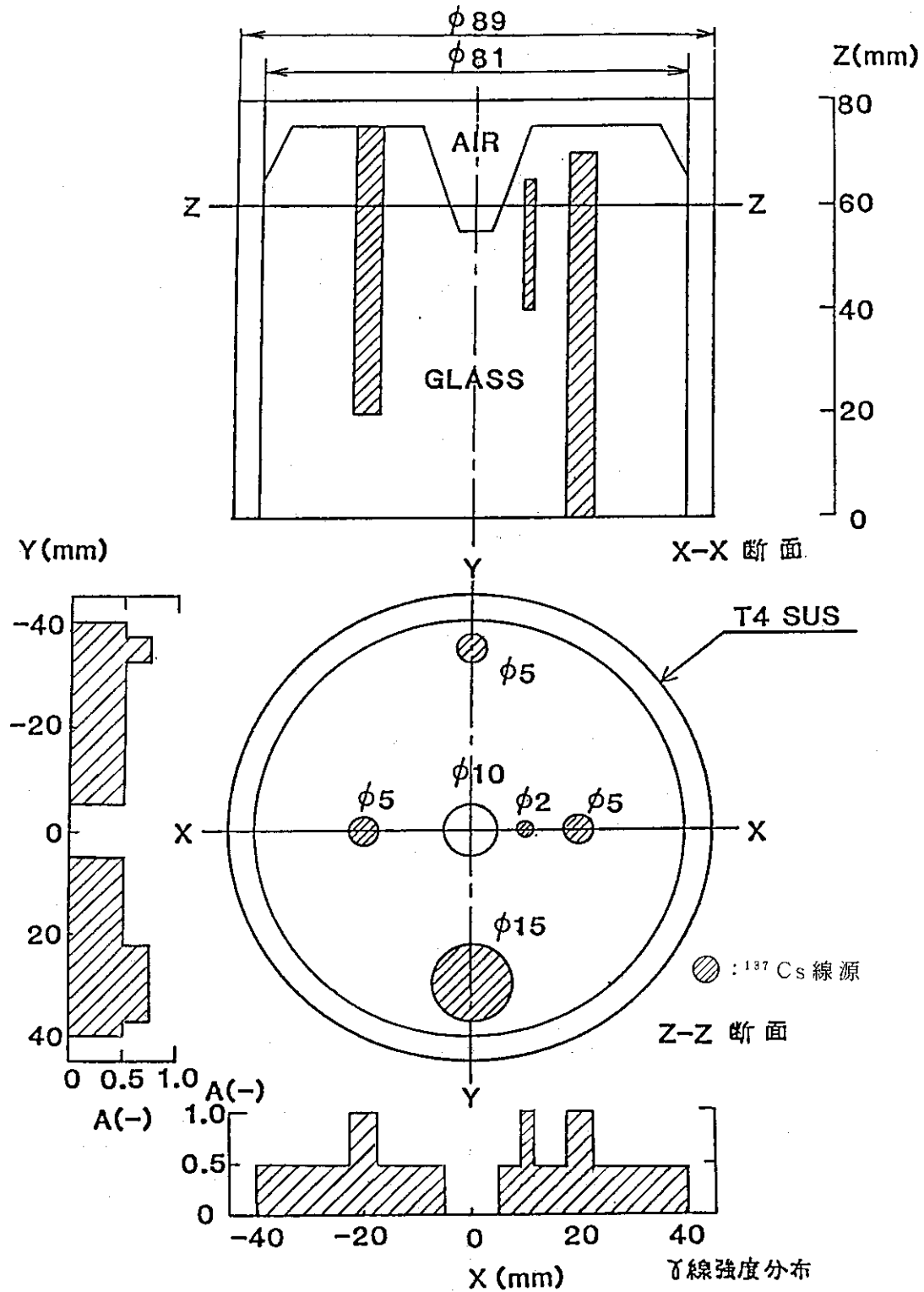


図13 シミュレーション試料

*** TEST BY SIMULATION DATA ***
 X : -50.0 50.0 1.0
 Y : -50.0 50.0 1.0
 Z : 30.0
 CS-137 TIMECORRE APERTURE 0.3
 CONVOLUTION (SHEPP)
 ATTENUATION CORRECTED(SORENSEN) 0.021

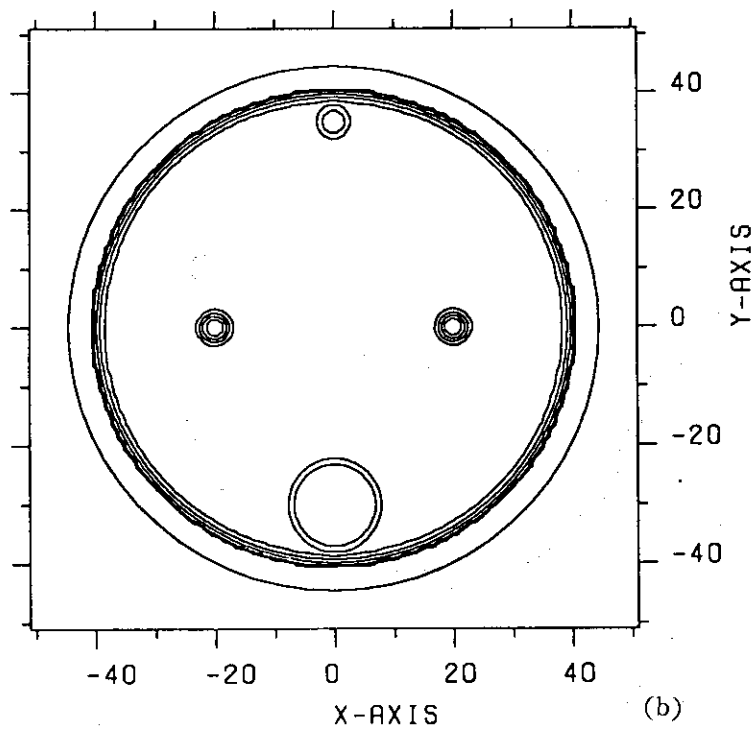
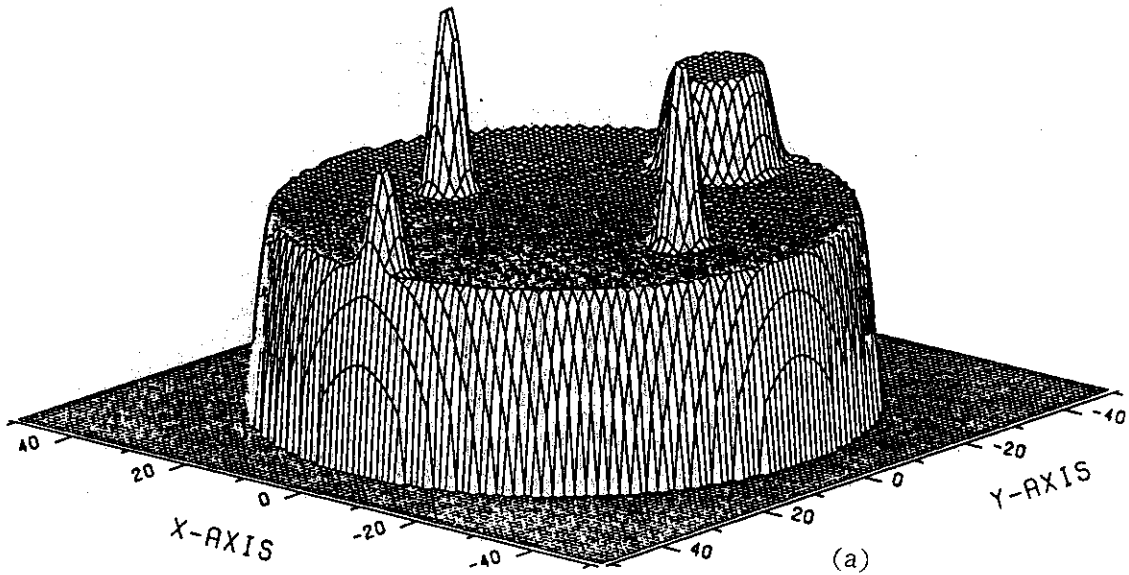


图 14 Z 断面放射能濃度分布 (Z = 30 mm)

*** TEST BY SIMULATION DATA ***

X : -50.0 50.0 1.0

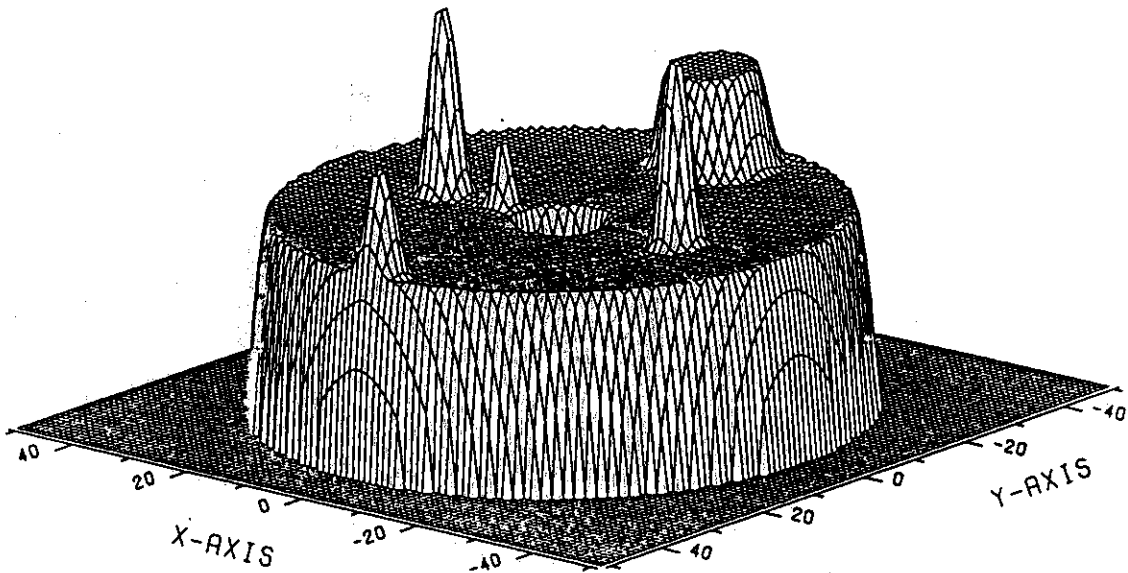
Y : -50.0 50.0 1.0

Z : 60.0

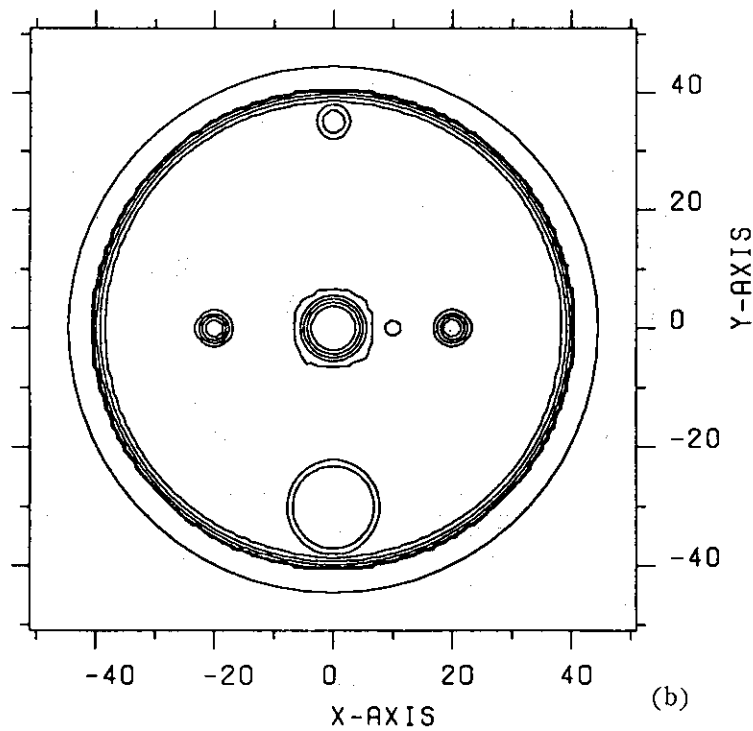
CS-137 TIMECORRE APERTURE 0.3

CONVOLUTION (SHEPP)

ATTENUATION CORRECTED(SORENSEN) 0.021



(a)



(b)

図15 Z断面放射能濃度分布 (Z = 60 mm)

*** TEST BY SIMULATION DATA ***

X : 0.0

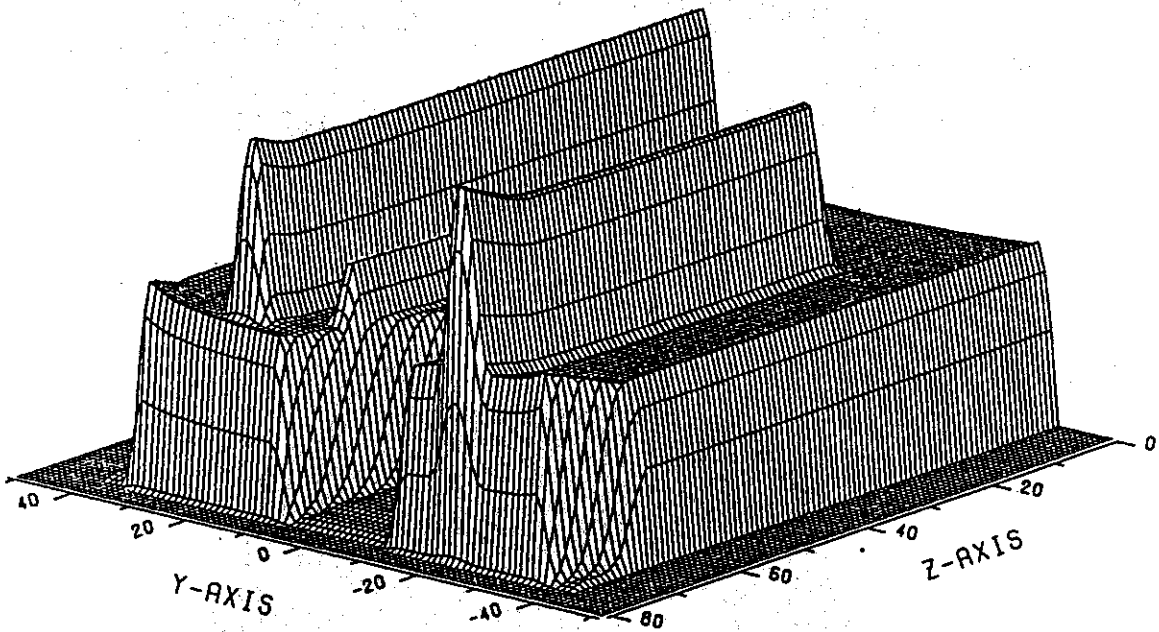
Y : -50.0 50.0 1.0

Z : 0.0 80.0 0.8

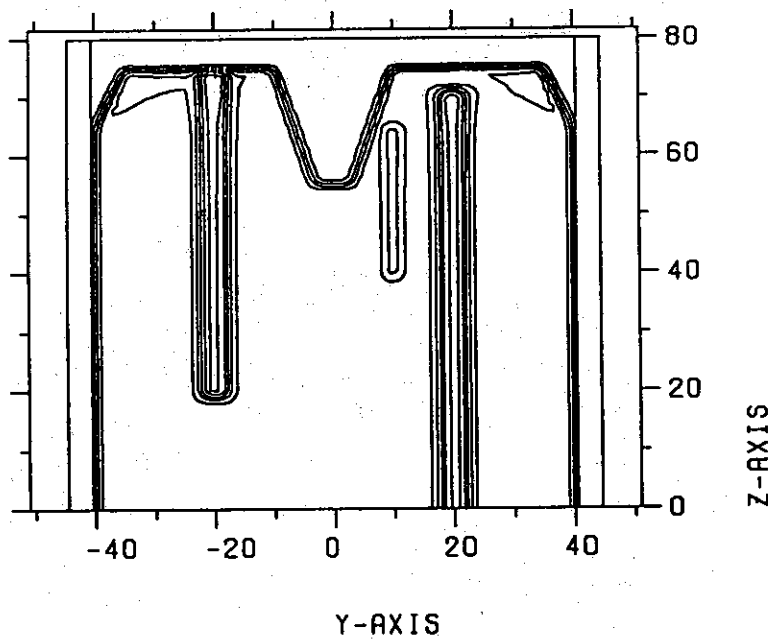
CS-137 · TIMECORRE APERTURE 0.3

CONVOLUTION (SHEPP)

ATTENUATION CORRECTED(SORENSEN) 0.021



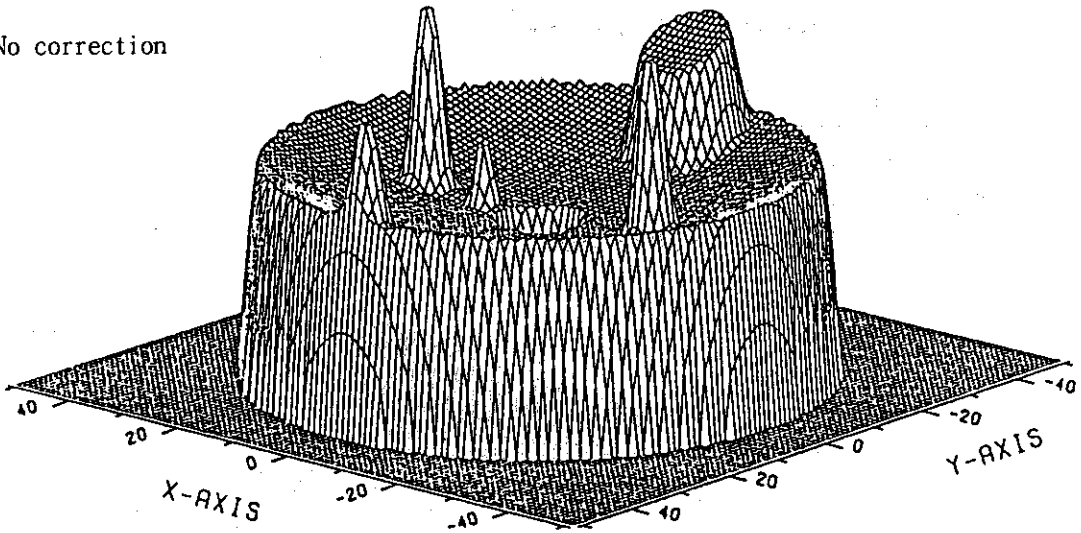
(a)



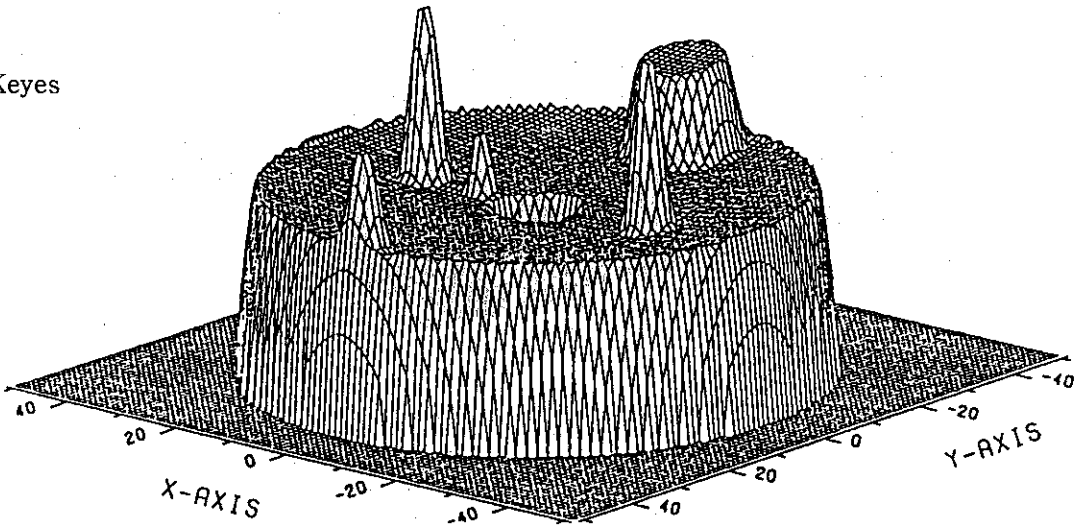
(b)

图 16 X断面放射能濃度分布 ($X = 0 \text{ mm}$, $\theta = 0^\circ$)

(1) No correction



(2) Keyes



(3) Sorenson

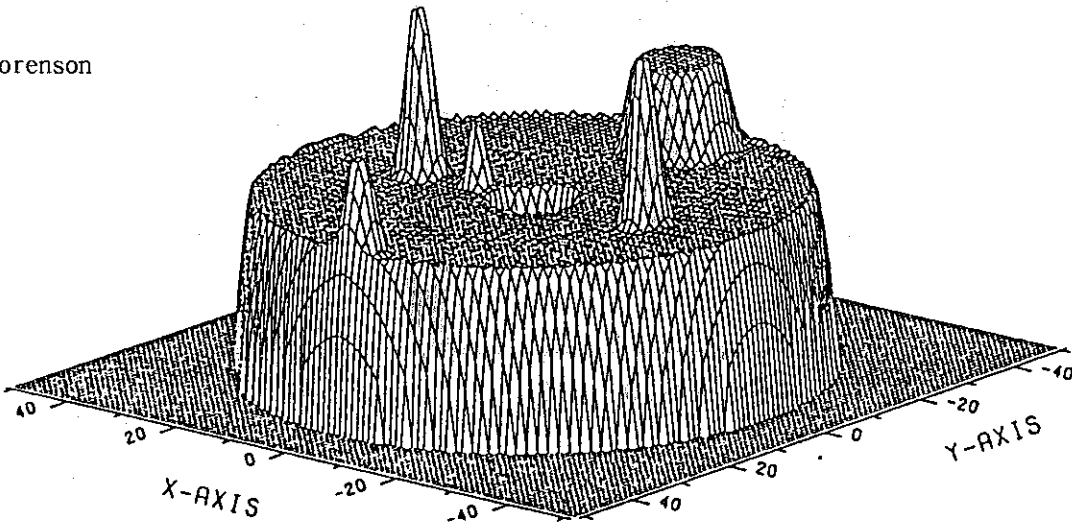
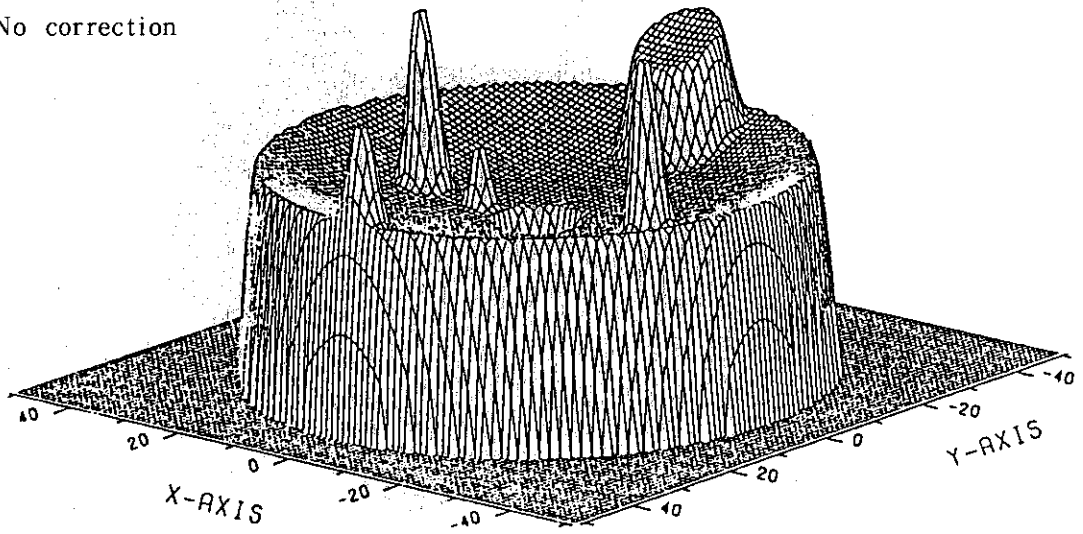
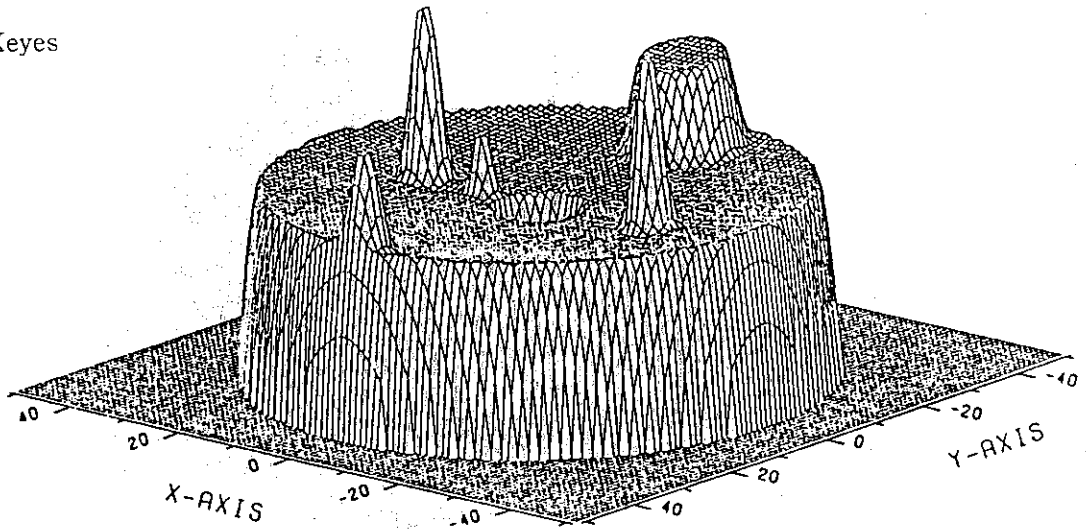


図17 Ramachandranのフィルタによる画像

(1) No correction



(2) Keyes



(3) Sorenson

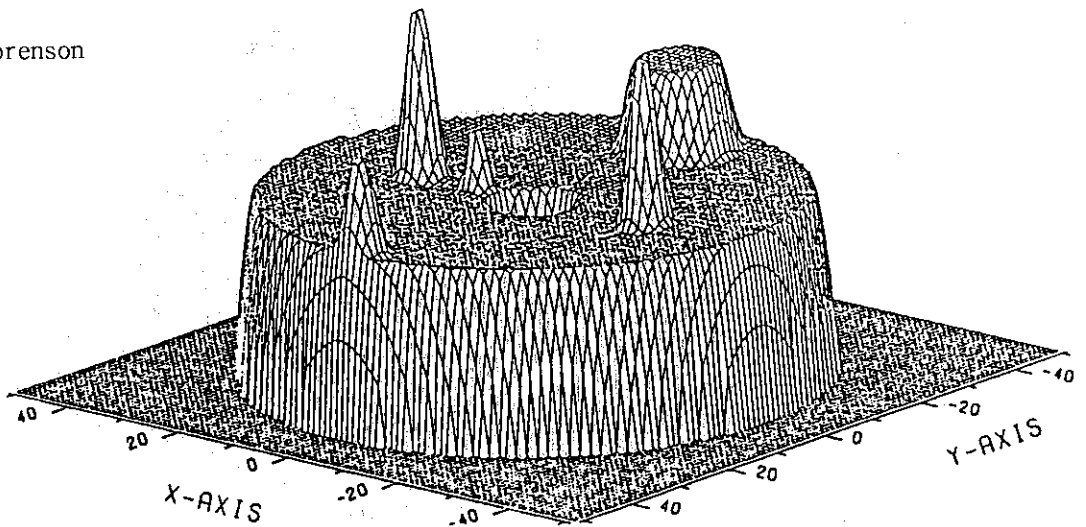
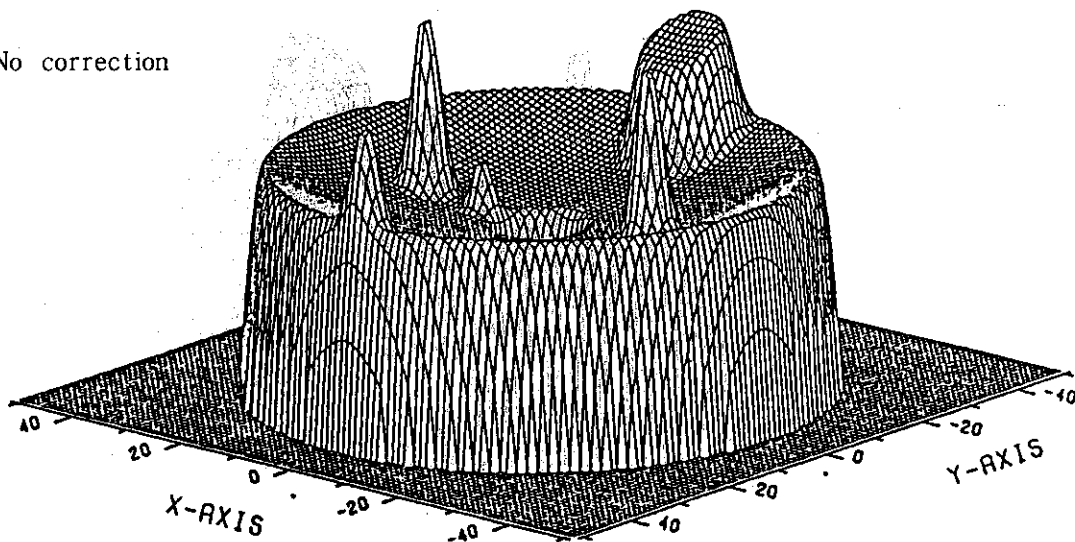
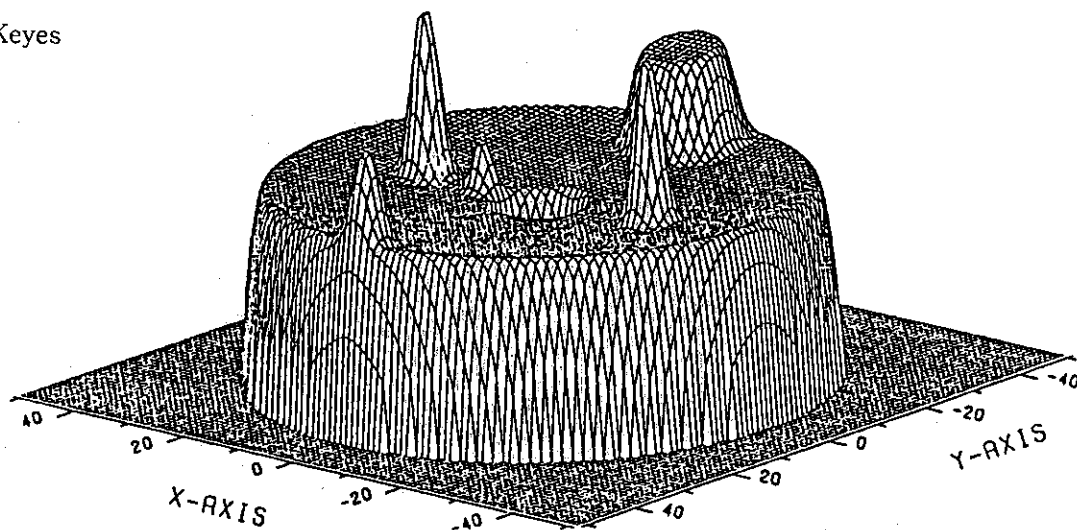


図18 Shepp & Loganのフィルタによる画像

(1) No correction



(2) Keyes



(3) Sorenson

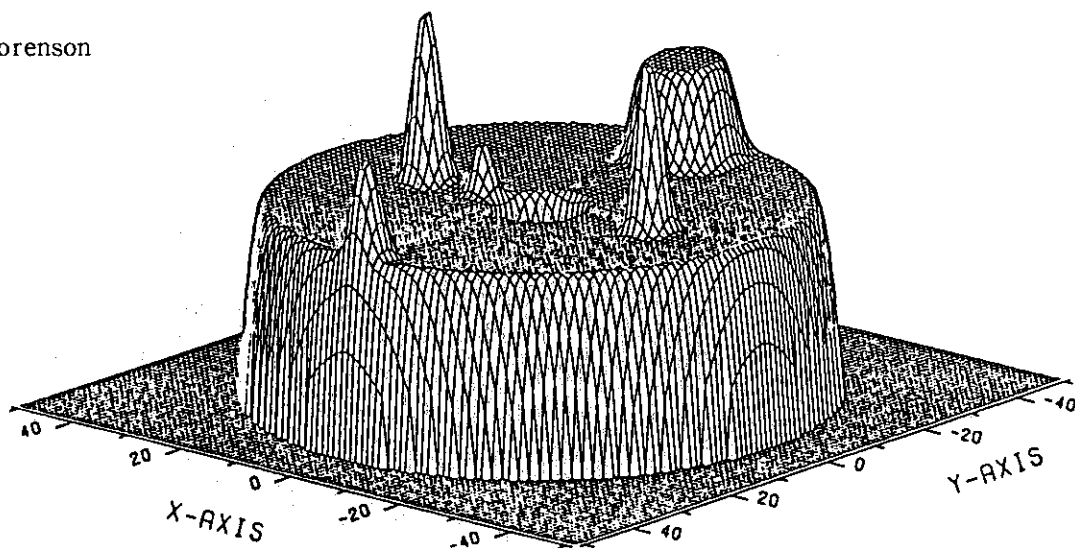
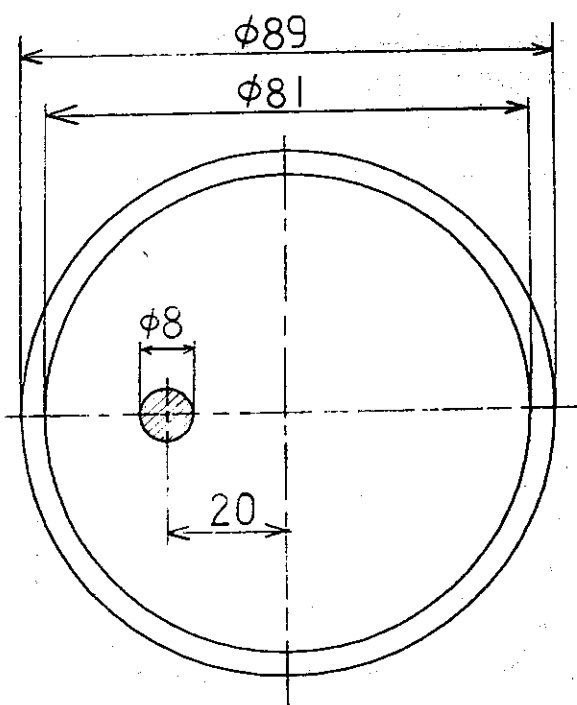
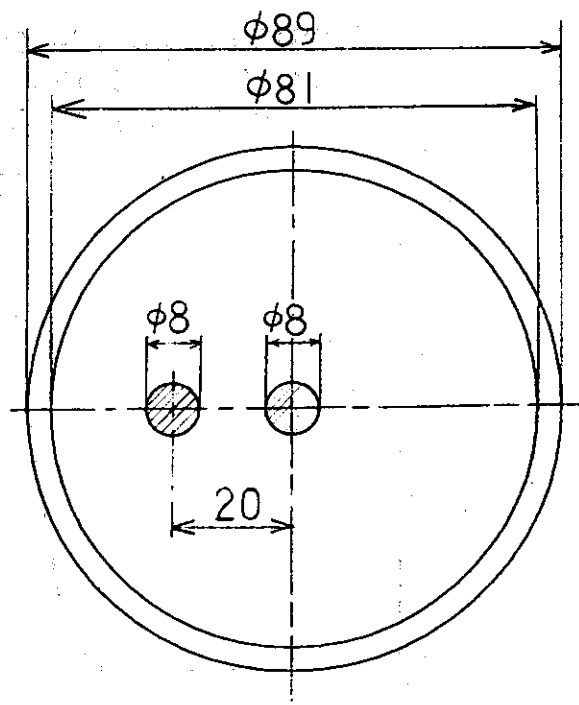


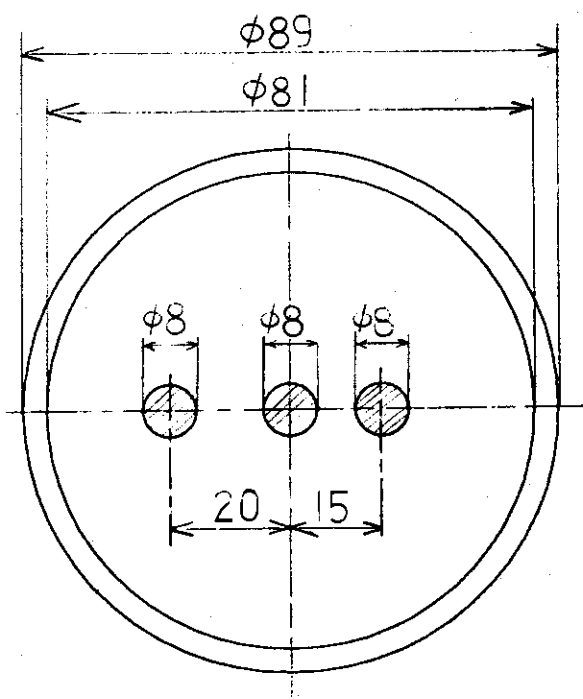
図19 Cheslerのフィルタによる画像



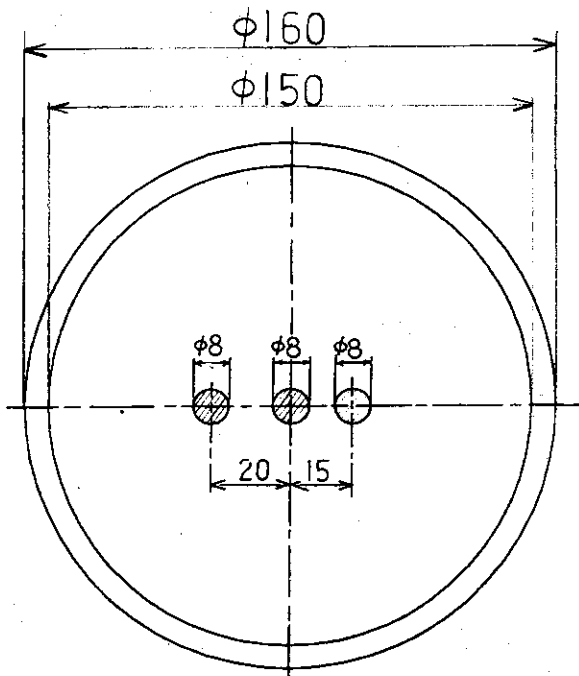
試料 1



試料 2



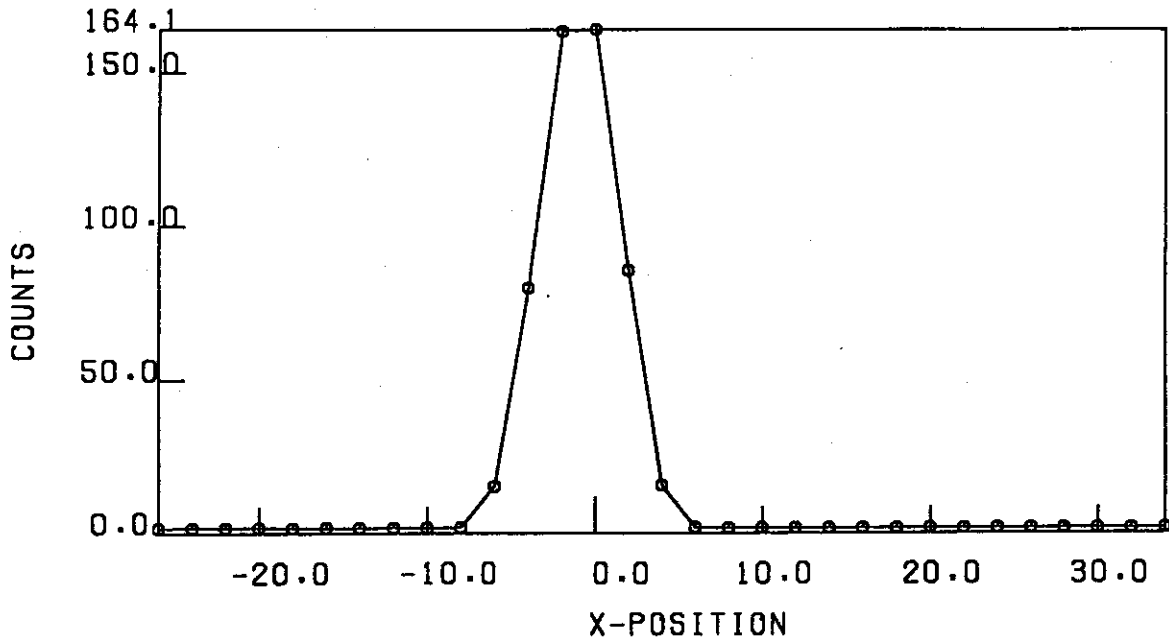
試料 3



試料 4

図 20 試料形状 (● : ^{134}Cs 線源 3Ci)

000100C31CS-134,SAMPLE3 602
 ISOTOPE CS-134 ENERGY 604.7 KEV
 THETA = 0.0 Z = 60.0



000100C31CS-134,SAMPLE3 602
 ISOTOPE CS-134 ENERGY 604.7 KEV
 THETA = 90.0 Z = 60.0

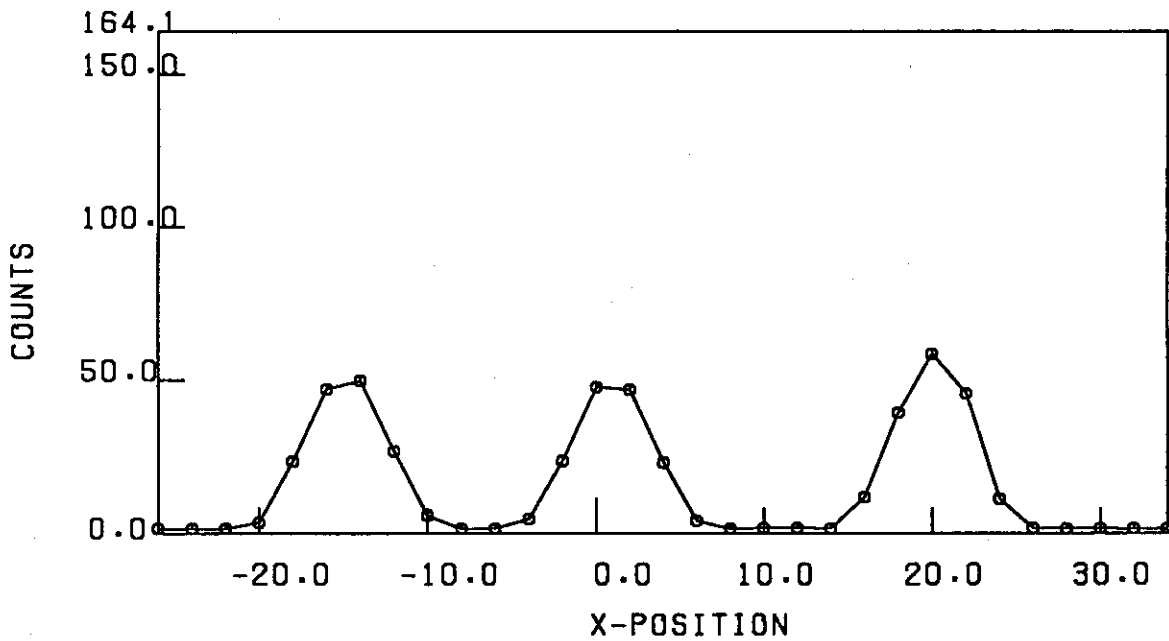


図21 r線投影データのX方向分布(試料3)

1 PEAK DATA
X : -50.0 50.0 1.0
Y : -50.0 50.0 1.0
Z : 60.0
CS-134 TIMECORRE APERTURE 1.0
CONVOLUTION (SHEPP)
ATTENUATION CORRECTED(SORENSEN) 0.021

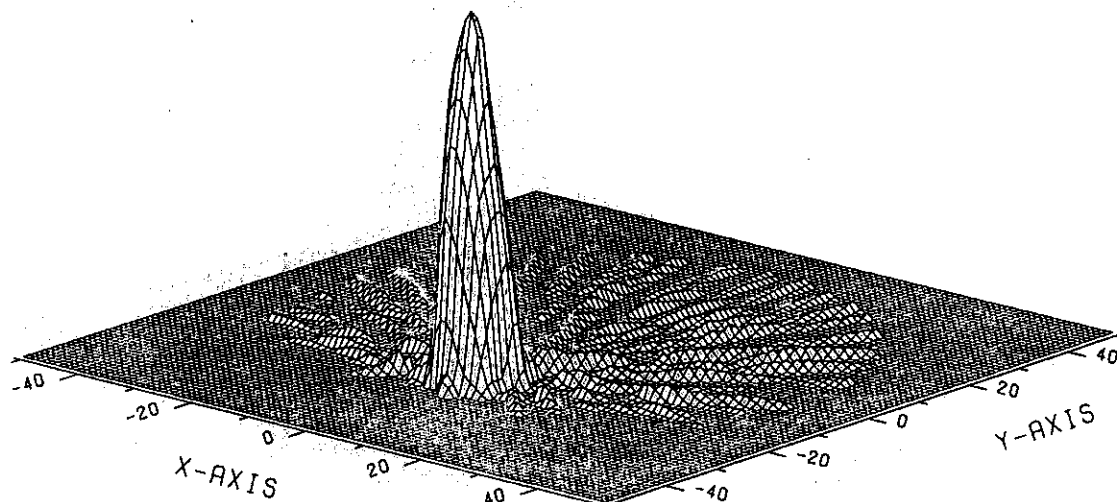


図22 E-C T試験結果(試料1)

000100C21CS-134.SAMPLE2##### 602
X : -50.0 50.0 1.0
Y : -50.0 50.0 1.0
Z : 60.0
CS-134 TIMECORRE APERTURE 1.0
CONVOLUTION (SHEPP)
ATTENUATION CORRECTED(SORENSEN) 0.021

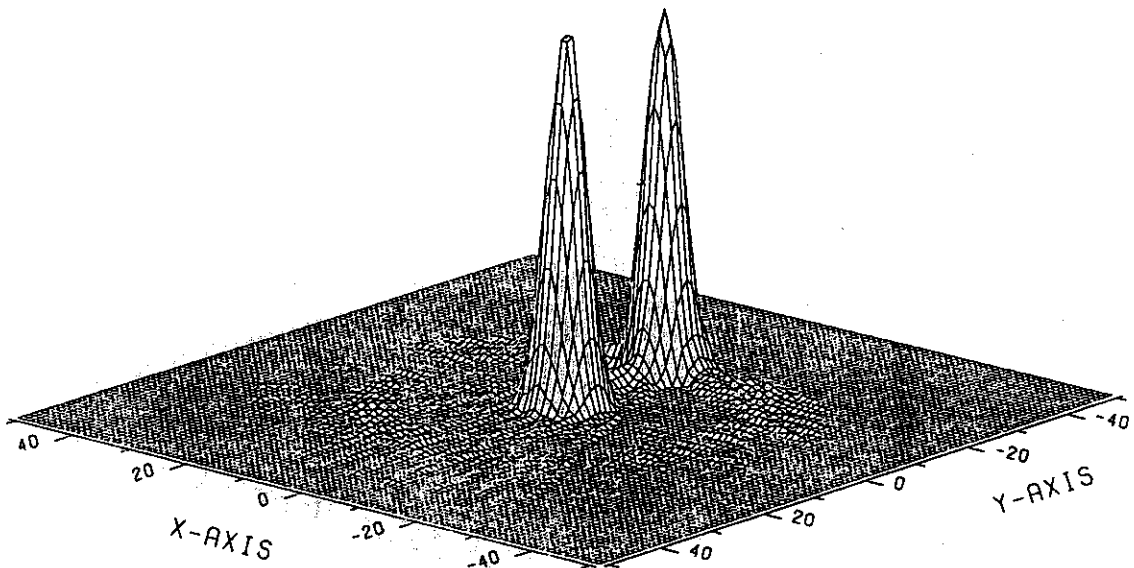


図23 E-C T試験結果(試料2)

000100C31CS-134,SAMPLE3##### 602

X : -50.0 50.0 1.0

Y : -50.0 50.0 1.0

Z : 60.0

CS-134 TIMECORRE APERTURE 1.0

CONVOLUTION (SHEPP)

ATTENUATION CORRECTED(SORENSEN) 0.021

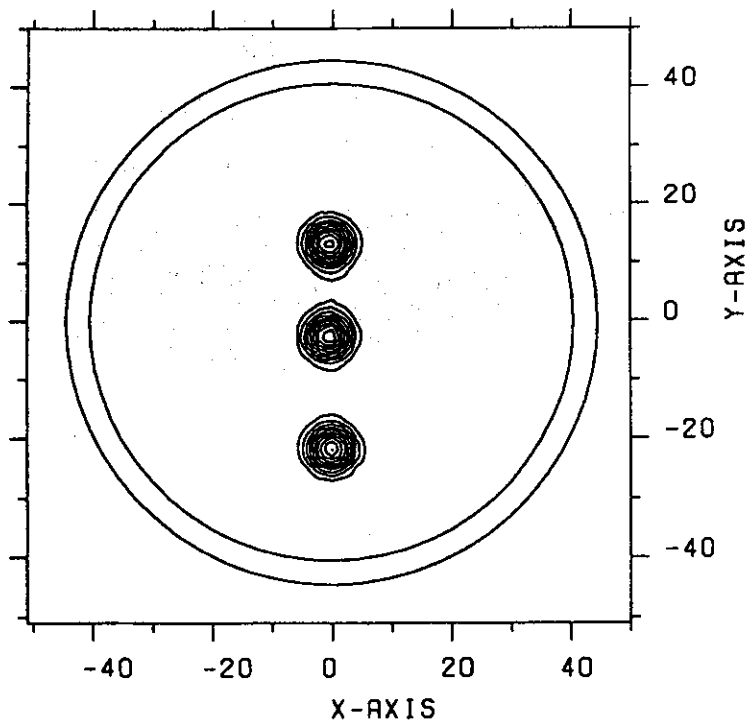
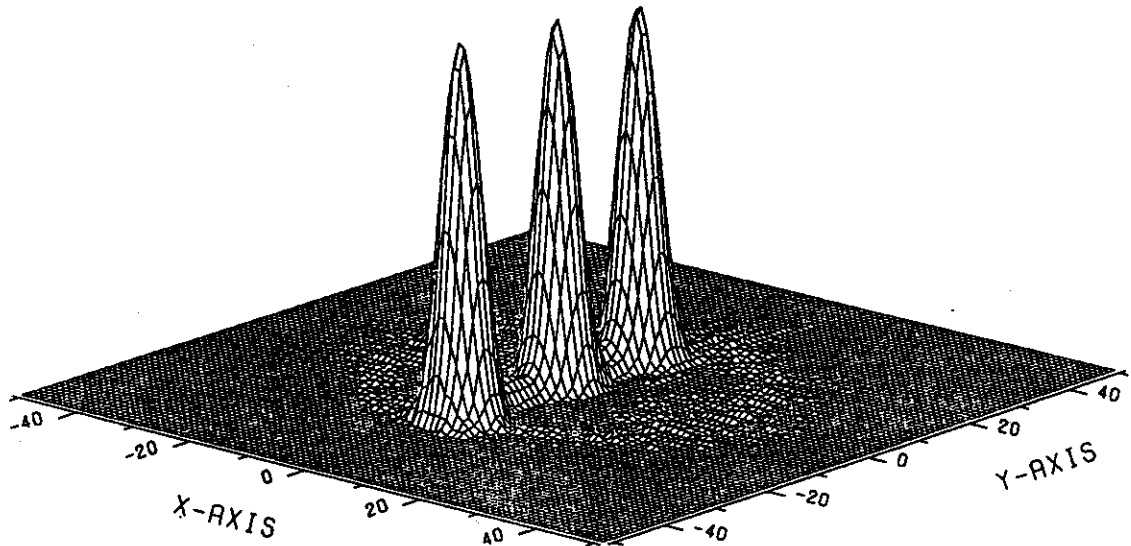


図24 E-CT試験結果(試料3)

00010NV28***** N04 SAMPLE ***** 602
X : -80.0 80.0 1.6
Y : -80.0 80.0 1.6
Z : 60.0
CS-134 TIMECORRE APERTURE 1.0
CONVOLUTION (SHEPP)
ATTENUATION CORRECTED(SORENSEN) 0.021

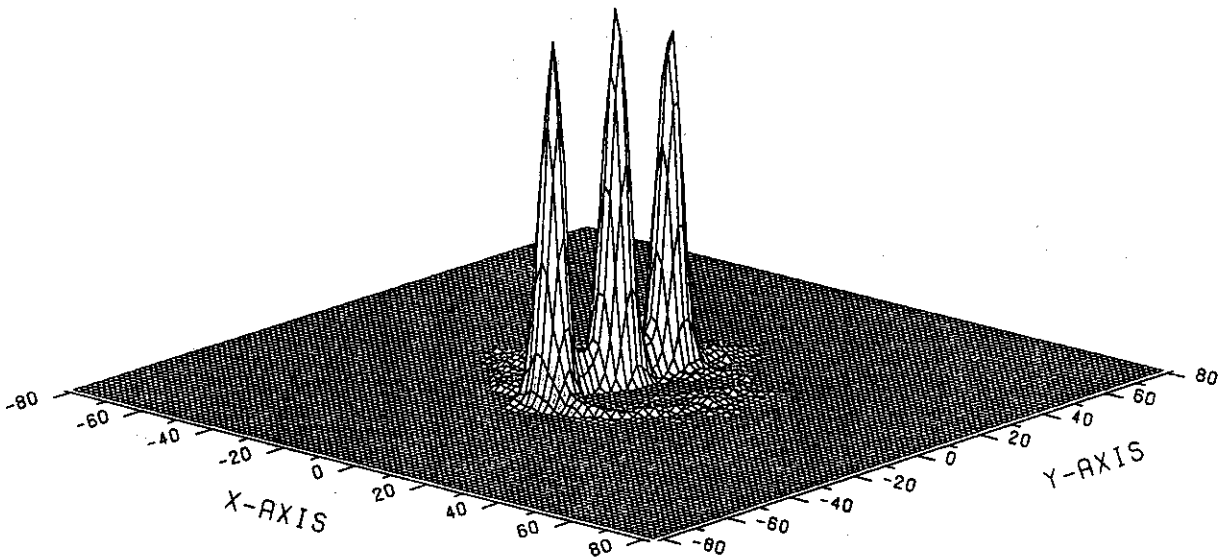
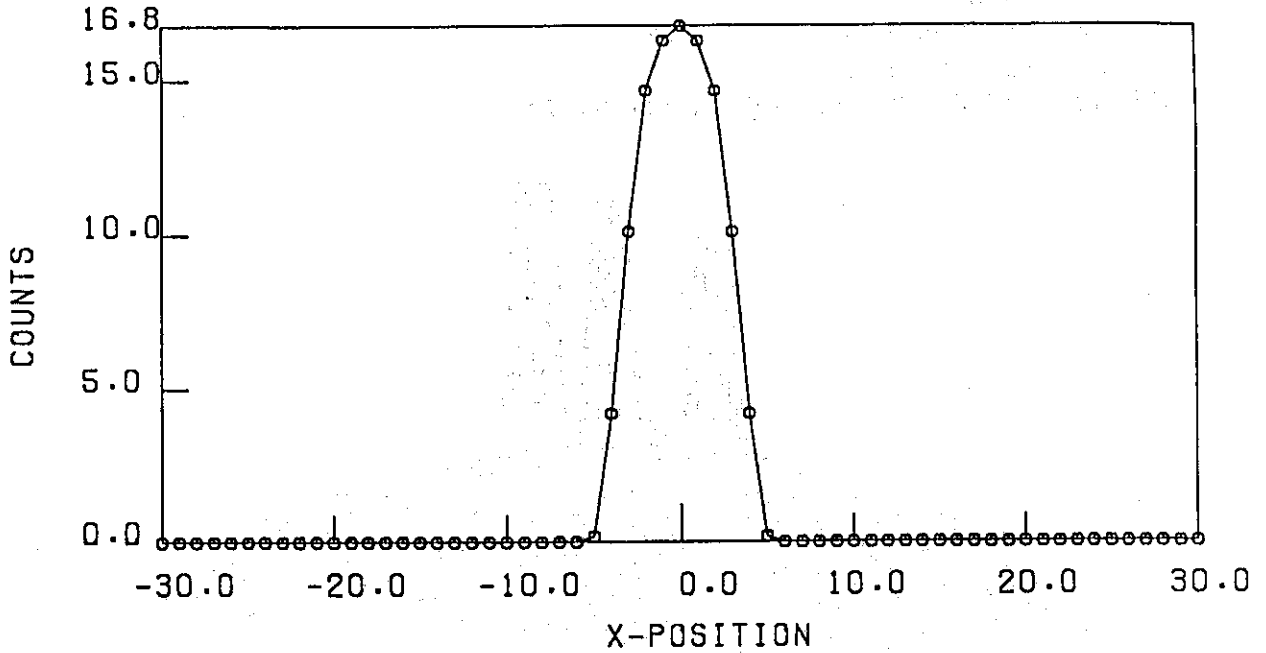


図25 E-CT試験結果(試料4)

*** SIMULATION TEST OF SAMPLE 3 ***
 ISOTOPE CS-134 ENERGY 604.7 KEV
 THETA = 0.0 Z = 60.0



*** SIMULATION TEST OF SAMPLE 3 ***
 ISOTOPE CS-134 ENERGY 604.7 KEV
 THETA = 90.0 Z = 60.0

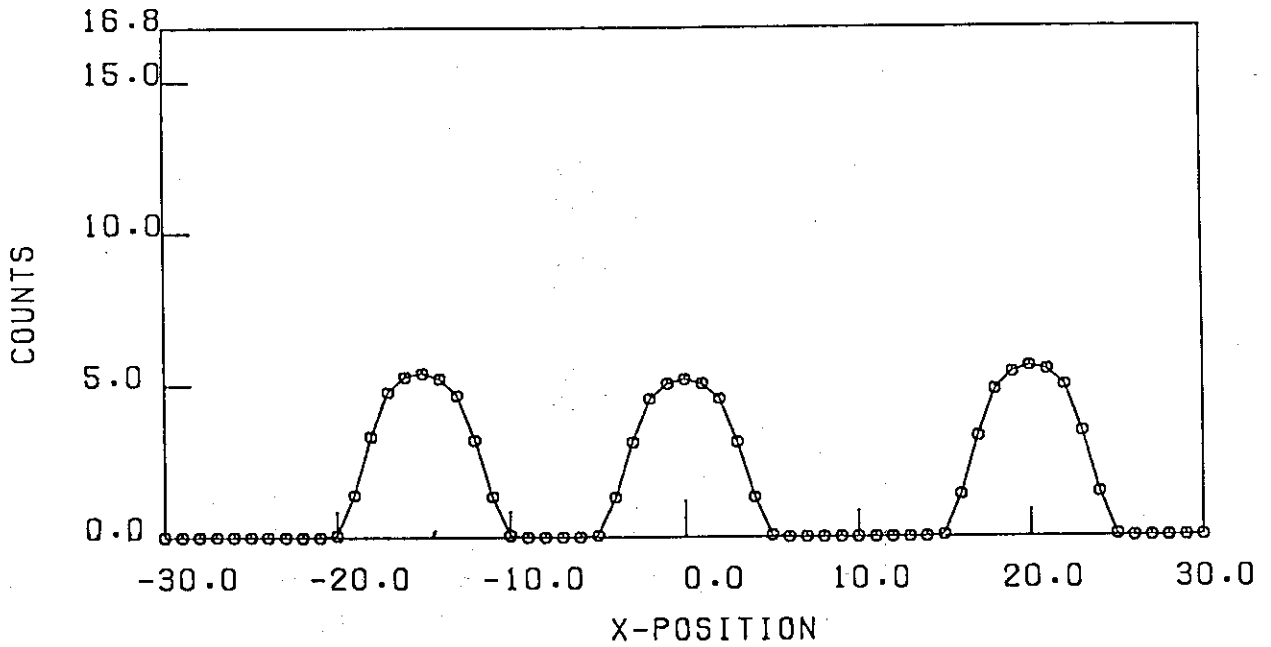


図 26 シミュレーションによる γ 線投影データの X 方向分布 (試料 3)

*** SIMULATION TEST OF SAMPLE 3 ***

X : -50.0 50.0 1.0

Y : -50.0 50.0 1.0

Z : 60.0

CS-134 TIMECORRE APERTURE 0.3

CONVOLUTION (SHEPP)

ATTENUATION CORRECTED(SORENSEN) 0.021

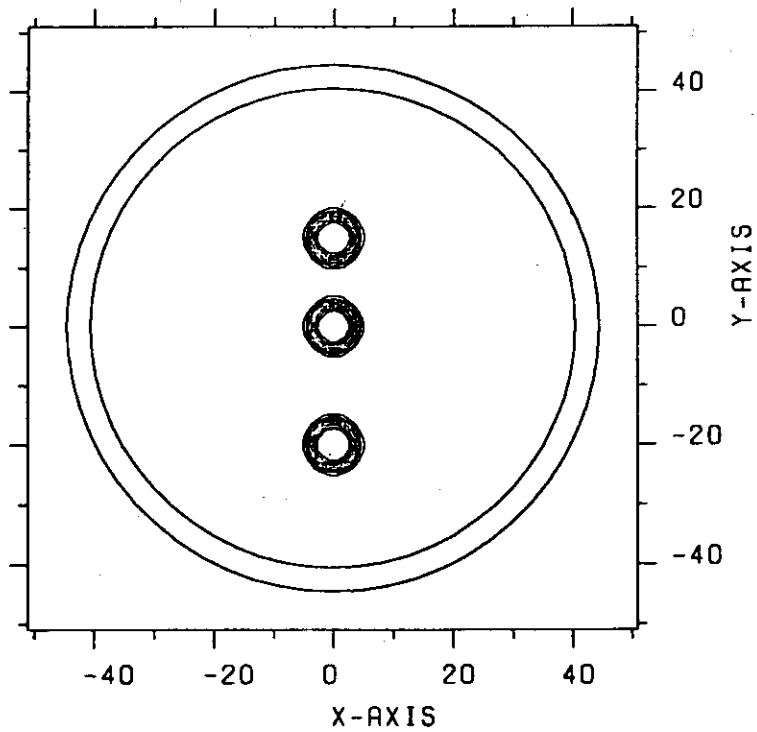
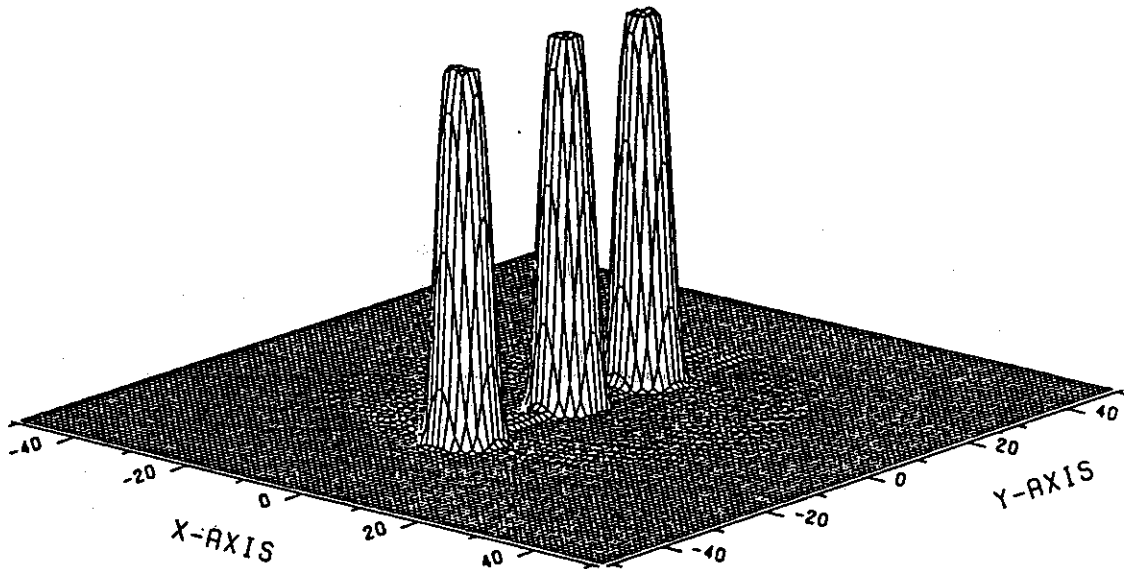


図 27 シミュレーション結果 (試料 3)

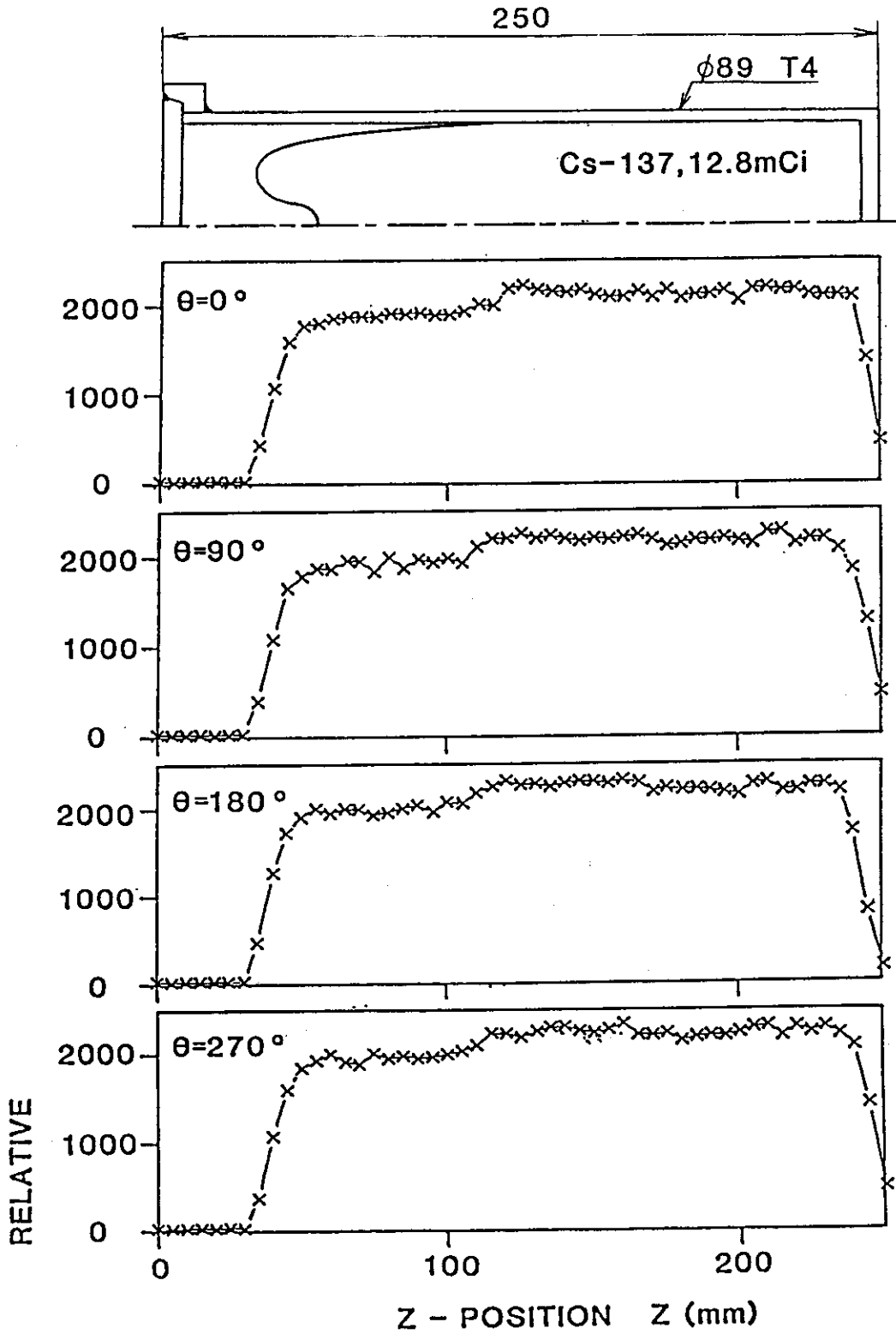


図 28 ホットガラス固化体の軸方向放射能濃度分布