

JAERI-M
92-184

汚染配管内部の沈着、水溶液及びガス状放射能を
定量する非破壊測定システムの開発

(受託研究)

1992年11月

片桐 政樹・伊藤 博邦・若山 直昭

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。入手の問合せは、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）で複写による実費領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 Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

汚染配管内部の沈着、水溶液及びガス状放射能を
定量する非破壊測定システムの開発

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部
片桐 政樹・伊藤 博邦・若山 直昭^{*}

(1992年10月28日受理)

汚染配管内部の沈着、水溶液及びガス状放射能をそれぞれ状態毎に分離し定量する測定法を開発した。本測定法を現場測定に適用するために、非破壊測定システムの開発を行った。本測定システムは現場でガンマ線スキャンニング測定に使用する現場側装置と放射能の分離・定量計算を行うデータ処理装置から構成され、両装置の間はテレメータ装置によって接続される。この装置を実現するため、検出部小型化の重要なポイントであるガス冷却Ge検出器の実用化、超小型電子回路の開発、高速で信頼性の高いテレメータ装置の開発及び計算機による自動化等の技術開発を行った。測定システムの性能試験を行い、汚染配管内部放射能の非破壊測定システムとして十分実用となる性能を有することを確認した。また、原子炉一次系汚染模擬配管による検出性能試験の結果、10~20%の誤差で沈着状放射能と水溶液状放射能とを分離して定量できることを確認した。

本報告書は、科学技術庁との受託研究「原子炉解体技術開発」で行った研究成果をまとめたものである。

東海研究所：〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方字白根 2-4

* 高温工学部

Development of Nondestructive Measurement System for Quantifying
Radioactivity from Crud, Liquids and Gases in a Contaminated Pipe

Masaki KATAGIRI, Hirokuni ITO and Naoaki WAKAYAMA⁺

Department of Reactor Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 28, 1992)

A nondestructive measuring method was developed to quantify separately radioisotope concentrations of crud, liquids and gases in a contaminated pipe. For applying this method to practical in-situ measurement, a nondestructive measurement system was developed. The measurement system consists of an in-situ equipment for gamma-ray scanning measurements and a data-processing equipment for analysis of radioactivity. The communication between both equipments is performed by a wireless telemeter device. To construct the measurement system, a gas-cooled Ge detector of practical use, small-sized electronics circuits, a fast and reliable telemeter device and automatic measurement technics using a computer were developed. Through performance tests, it is confirmed that the measurement system is effective for in-situ measurements of radioactivity in a contaminated pipe. The measurement accuracy with this measurement system is 10 - 20%, which was determined by comparison with solid and liquid radioisotope concentrations in a mock-up contaminated pipe that had been quantified in advance.

This work was performed by JAERI in 1992 under contract with the Science and Technology Agency of Japan.

+ Department of High Temperature Engineering

Keywords: Nondestructive Method, Quantitative Method, State Separation, Measurement System, Gamma-ray Scanning, Ge Detector, Radioactivity Concentration, Contaminated Pipe, Primary Coolant System

目 次

1. まえがき	1
2. 配管内部放射能の状態分離測定法	1
2.1 状態分離測定法の原理	1
2.2 解析手法	2
3. 非破壊定量測定システム	3
3.1 装置の構成	3
3.2 ガンマ線検出部	4
3.3 スキャンニング部	6
3.4 電子回路部	7
3.4.1 現場側電子回路	7
3.4.2 データ処理側電子回路	9
3.4.3 テレメータ装置	10
3.5 制御・解析部	11
3.5.1 制御・解析部（Ⅰ）	11
3.5.2 制御・解析部（Ⅱ）	12
4. 測定システム用ソフトウェア	12
4.1 測定・制御ソフトウェア	13
4.1.1 制御・解析部（Ⅰ）用測定・制御ソフトウェア	13
4.1.2 制御・解析部（Ⅱ）用測定・制御ソフトウェア	15
4.2 放射能解析ソフトウェア	17
5. 評価試験及び結果	18
5.1 制御性能試験及び結果	18
5.2 較正試験及び結果	20
5.3 検出性能試験及び結果	20
6. 結論	22
謝辞	22
参考文献	22

Contents

1. Introduction	1
2. State-separation Method for Qualifying Radioactivity in a Contaminated Pipe	1
2.1 Principle of State-separation Method	1
2.2 Analysis Method	2
3. Nondestructive Measurement System	3
3.1 Construction of Nondestructive Measurement System	3
3.2 Gamma-ray Detection Device	4
3.3 Scanning Device	6
3.4 Electronics Circuits	7
3.4.1 Electronics Circuits at In-situ Side	7
3.4.2 Electronics Circuits at Data-processing Side	9
3.4.3 Telemeter Device	10
3.5 Control and Analysis Equipment	11
3.5.1 Control and Analysis Equipment (I)	11
3.5.2 Control and Analysis Equipment (II)	12
4. Software for Measurement System	12
4.1 Control and Analysis Software	13
4.1.1 Software for Control and Analysis Equipment (I)	13
4.1.2 Software for Control and Analysis Equipment (II)	15
4.2 Software for Qualifying Radioactivity	17
5. Evaluation Tests	18
5.1 Evaluation Tests for Control Performances and Results	18
5.2 Detection Efficiency Calibration and Results	20
5.3 Detection Performance and Results	20
6. Conclusion	22
Acknowledgements	22
References	22

1. まえがき

原子炉一次冷却系や照射試験ループ等の配管内部の放射能状態を的確に把握しておくことは、施設の運転管理及び解体撤去する上で非常に重要である。従来、配管内部の放射能を測定するには、測定箇所の一部の配管を切り出したり、内部の水溶液やガスを抜き取って測定試料とし、この試料を分析室等で測定して各状態の放射能濃度を求める試料測定法が主に使用されてきた。この方法は、測定試料を採取する際、非密封放射能を取扱う作業を伴うため、測定箇所が限られかつ測定結果を得るまでに時間がかかった。また、施設の運転管理に必要な現場での配管内部放射能のオンライン測定は不可能であった。

これに対して、非破壊定量測定法としてはガンマ線検出システムのコリメータ窓から配管全体を望み、配管内部の沈着状放射能のみを測定する方法が開発されている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾ しかし、これらの測定法では配管内部の放射能が沈着状と水溶液状またはガス状の状態で混在している場合には、これらを分離して測定することは困難であった。

これらの問題点を解決するため、配管内部の沈着状、水溶液状及びガス状放射能を状態毎に分離して非破壊的に核種毎に定量する測定手法を開発した。⁷⁾ しかし、この測定法を用いて配管内部放射能を現場においてかつリアルタイムで測定するには、従来の技術の組合せでは装置全体が大きくなり実用的ではない。このため、種々の要素技術を開発し現場で実用的に使用できる非破壊定量測定システムの開発を行った。

2. 配管内部放射能の状態分離測定法

開発した配管内部放射能の状態分離測定の概念をFig. 2. 1に示す。本測定法は配管内部の放射能から放出されるガンマ線を配管外側からスキャニング測定し、得られたガンマ線スキャニング分布をもとに配管内部の放射能を沈着、水溶液及びガス状態に分離し核種及びその放射能濃度を測定しようとするものである。

2. 1 状態分離測定法の原理

状態分離測定法⁷⁾の原理をFig. 2. 2にもとづいて説明する。配管内部の放射能から放出されるガンマ線を配管外部に置いたコリメータ窓付きのガンマ線検出システムを上下方向に直線的に動かし数箇所でスキャニング測定する。一方、あらかじめ配管内部において各状態の放射能が単独にかつ単位濃度で一様に分布しているとして各スキャニング位置で検出システムに計数される値を解析計算により求める。スキャニング分布測定結果がこれら3つの状態の放射能濃度を未知数とし連立一次方程式が成立する。つまり、求めるべき配管内の沈着状放射能を C_p (Bq/cm^2)、水溶液状放射能を C_w (Bq/cm^3) 及びガス状放射能を C_g (Bq/cm^3) とすれば以下のように求めることができる。

ガンマ線検出システムのy軸の位置を変えてn個の測定を行った場合、n個の各測定位置について、測定したガンマ線の計数を $M(1) \sim M(n)$ とし、また上記計算によって求めた単位放射能濃度を持

1. まえがき

原子炉一次冷却系や照射試験ループ等の配管内部の放射能状態を的確に把握しておくことは、施設の運転管理及び解体撤去する上で非常に重要である。従来、配管内部の放射能を測定するには、測定箇所の一部の配管を切り出したり、内部の水溶液やガスを抜き取って測定試料とし、この試料を分析室等で測定して各状態の放射能濃度を求める試料測定法が主に使用されてきた。この方法は、測定試料を採取する際、非密封放射能を取扱う作業を伴うため、測定箇所が限られかつ測定結果を得るまでに時間がかかった。また、施設の運転管理に必要な現場での配管内部放射能のオンライン測定は不可能であった。

これに対して、非破壊定量測定法としてはガンマ線検出システムのコリメータ窓から配管全体を望み、配管内部の沈着状放射能のみを測定する方法が開発されている。¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾ しかし、これらの測定法では配管内部の放射能が沈着状と水溶液状またはガス状の状態で混在している場合には、これらを分離して測定することは困難であった。

これらの問題点を解決するため、配管内部の沈着状、水溶液状及びガス状放射能を状態毎に分離して非破壊的に核種毎に定量する測定手法を開発した。⁷⁾ しかし、この測定法を用いて配管内部放射能を現場においてかつリアルタイムで測定するには、従来の技術の組合せでは装置全体が大きくなり実用的ではない。このため、種々の要素技術を開発し現場で実用的に使用できる非破壊定量測定システムの開発を行った。

2. 配管内部放射能の状態分離測定法

開発した配管内部放射能の状態分離測定の概念をFig. 2. 1に示す。本測定法は配管内部の放射能から放出されるガンマ線を配管外側からスキャンニング測定し、得られたガンマ線スキャンニング分布をもとに配管内部の放射能を沈着、水溶液及びガス状態に分離し核種及びその放射能濃度を測定しようとするものである。

2. 1 状態分離測定法の原理

状態分離測定法⁷⁾の原理をFig. 2. 2にもとづいて説明する。配管内部の放射能から放出されるガンマ線を配管外部に置いたコリメータ窓付きのガンマ線検出システムを上下方向に直線的に動かし数箇所でスキャンニング測定する。一方、あらかじめ配管内部において各状態の放射能が単独にかつ単位濃度で一様に分布しているとして各スキャンニング位置で検出システムに計数される値を解析計算により求める。スキャンニング分布測定結果がこれら3つの状態の放射能濃度を未知数とし連立一次方程式が成立する。つまり、求めるべき配管内の沈着状放射能を C_p (Bq/cm^2)、水溶液状放射能を C_w (Bq/cm^3) 及びガス状放射能を C_g (Bq/cm^3) とすれば以下のように求めることができる。

ガンマ線検出システムのy軸の位置を変えてn個の測定を行った場合、n個の各測定位置について、測定したガンマ線の計数を $M(1) \sim M(n)$ とし、また上記計算によって求めた単位放射能濃度を持

つ沈着状放射能による計数を $N_p(1) \sim N_p(n)$ 、水溶液状放射能による計数を $N_w(1) \sim N_w(n)$ 及びガス状放射能による計数を $N_g(1) \sim N_g(n)$ とすると、各測定位置について、

$$C_p \times N_p(1) + C_w \times N_w(1) + C_g \times N_g(1) = M(1) \quad (1a)$$

$$C_p \times N_p(2) + C_w \times N_w(2) + C_g \times N_g(2) = M(2) \quad (1b)$$

$$C_p \times N_p(n) + C_w \times N_w(n) + C_g \times N_g(n) = M(n) \quad (1c)$$

の n 元連立一次方程式が成立する。この n 個の式は上記計算により示したように各状態の放射能による計数の比が測定位置によって異なることから、独立に成り立つ。従って、この連立方程式は未知数が C_p 、 C_w 及び C_g の 3 つなので 3 箇所以上で測定すれば解くことができ、沈着状放射能、水溶液状放射能及びガス状放射能をそれぞれ分離して定量できる。

2. 2 解析手法

前節の状態分離法を実際に配管内部放射能測定に適用するためには、単位放射能濃度当たり配管内に存在した場合に、検出器に計数される値 $N_p(i)$ 、 $N_w(i)$ 及び $N_g(i)$ を求める必要がある。しかし、校正実験によってこの値を求ることは非常に困難なため、理論計算によって求めることにした。

配管内部の放射能解析計算モデル⁷⁾を Fig. 2, 3 に示す。配管内部の放射能から放出されるガンマ線が Ge 検出器に入射するまでの経路の距離計算を 3 次元的に行うこととし、その間に存在する空気、水、配管材料、コリメータ材料による放射線の吸収計算を行う。これをもとに各状態について、積分計算を行い検出器への到達率を求める。

解析計算プログラムの作成は、配管内部には、①内壁への沈着、②水溶液状、③ガス状の 3 つの状態で放射能が存在しかつ各状態の分布には一様性があるという条件のもとで行った。解析計算を行うための必要なパラメータとしては、検出器のガンマ線ピーク検出効率、配管とガンマ線検出部との幾何学条件、放射線吸収係数がある。

解析計算に用いる基準座標としては、 (r, θ, z) 系をとるものとし、解析範囲は、 $0 < r < r_{\max}$ 、 $0 < \theta < 2\pi$ 、 $z_{\min} < z < z_{\max}$ とする。直線スキャンニング方向として上下垂直方向とする。また、スキャンニング位置を p としスキャンニング範囲は、 $p_{\min} < p < p_{\max}$ とする。

配管内部の 3 つの状態の放射能から放出されたガンマ線は配管内部の水及びガス、配管、空気及びコリメータにより吸収されながら検出器に到達する。

この時、計算モデルは、核定数、幾何学条件、放射線吸収及び検出効率の因子から構成される。各解析因子を、

核定数 : F_n

幾何学定数 : $F_m(r, \theta, z, p)$ 、

放射線吸収 : $F_a(E, I_s, I_o, I_r, I_g, I_c)$

及び

検出効率 : $F_e(E)$

と定義する。ここで使用されている変数はFig. 4. 10に示されている値としEはガンマ線エネルギーである。

従って、状態毎の放射能濃度計算式は上記各因子の重乗形で表され以下の式で定義できる。状態($i = 1$:沈着状態、 2 :水溶液状態、 3 :ガス状態)にあるガンマ線エネルギーEを放出する核種による計数 N_i は

$$N_i(p) = 1/A_i \cdot F_n \cdot F_e \cdot \int \int \int F_m F_i d\theta dr dz \quad (2)$$

と定義される。ここで、 A_i は一様に分布する各状態の核種の単位放射能強度である。求められた N_i とスキャンニング結果M(i)とから構成される(1)式を解くことによって沈着状、水溶液状及びガス状放射能を各種毎に分離し定量することができる。

3. 非破壊定量測定システム

前章で述べた測定手法においては、配管外部からのガンマ線スキャンニング測定及びこの測定データと種々の測定パラメータをもとにした解析計算を行う必要がある。前者には小型で可搬化された検出システム、後者には高速の計算機が要求される。このようなハードウェア上の要求を満足するため、現場で測定に使用するガンマ線検出部と解析計算を行う計算機部とを別々の機器とし、両者の間をテレメータ装置によって接続する方式の測定システムを開発した。

これらの装置を実用化するためにはスキャンニング検出部の小型化、現場側装置とデータ処理側装置との接続に使用する通信方法等の要素技術の開発が重要課題であった。このため、①ガス冷却Ge検出器の実用化、②超小型電子回路の開発、③テレメータ装置の開発等を行った。さらに装置の自動化、操作性・信頼性の確保、解析時間の短縮等に関しハードウェア及びソフトウェア両面から技術開発を行った。

3. 1 装置の構成

開発した汚染配管内部の放射能を測定する非破壊定量測定システム(以後測定システムと呼称)のブロック図をFig. 3. 1に示す。測定システムは、現場側装置とデータ処理側装置とに分れており、前者はガンマ線検出部、スキャンニング部、現場側電子回路部及び現場側テレメータ部から構成し、後者はデータ処理側テレメータ部、データ処理側電子回路部、制御・解析部(I)及び制御・解析部(II)から構成した。測定システムの動作内容を以下に述べる。

現場側装置においては、ガンマ線検出部から出力された信号を増幅器と波高分析回路を用いて増幅・信号処理し、ガンマ線スペクトルとして収集する。収集したスペクトルデータはテレメータ装置を用いてデータ処理側に転送する。この信号を受信したデータ処理側テレメータ装置及び電子回路部では、復調回路においてガンマ線スペクトルを復調し、カラーCRTに表示する。データ転送を定期的に繰返し行うことによりリアルタイムでのガンマ線スペクトルのモニタを可能とした。測定が終了すると復調回路に記憶されていたスペクトルデータはインターフェイスを通して制御・解析部(I)に送られる。制御・解析部(I)においてガンマ線のスペクトル解析を行った後、制御・解析部

と定義する。ここで使用されている変数はFig. 4. 10に示されている値としEはガンマ線エネルギーである。

従って、状態毎の放射能濃度計算式は上記各因子の重乗形で表され以下の式で定義できる。状態($i = 1$:沈着状態、 2 :水溶液状態、 3 :ガス状態)にあるガンマ線エネルギーEを放出する核種による計数 N_i は

$$N_i(p) = 1/A_i \cdot F_n \cdot F_e \cdot \int \int \int F_m F_i d\theta dr dz \quad (2)$$

と定義される。ここで、 A_i は一様に分布する各状態の核種の単位放射能強度である。求められた N_i とスキャンニング結果M(i)とから構成される(1)式を解くことによって沈着状、水溶液状及びガス状放射能を各種毎に分離し定量することができる。

3. 非破壊定量測定システム

前章で述べた測定手法においては、配管外部からのガンマ線スキャンニング測定及びこの測定データと種々の測定パラメータをもとにした解析計算を行う必要がある。前者には小型で可搬化された検出システム、後者には高速の計算機が要求される。このようなハードウェア上の要求を満足するため、現場で測定に使用するガンマ線検出部と解析計算を行う計算機部とを別々の機器とし、両者の間をテレメータ装置によって接続する方式の測定システムを開発した。

これらの装置を実用化するためにはスキャンニング検出部の小型化、現場側装置とデータ処理側装置との接続に使用する通信方法等の要素技術の開発が重要課題であった。このため、①ガス冷却Ge検出器の実用化、②超小型電子回路の開発、③テレメータ装置の開発等を行った。さらに装置の自動化、操作性・信頼性の確保、解析時間の短縮等に関しハードウェア及びソフトウェア両面から技術開発を行った。

3. 1 装置の構成

開発した汚染配管内部の放射能を測定する非破壊定量測定システム(以後測定システムと呼称)のブロック図をFig. 3. 1に示す。測定システムは、現場側装置とデータ処理側装置とに分れており、前者はガンマ線検出部、スキャンニング部、現場側電子回路部及び現場側テレメータ部から構成し、後者はデータ処理側テレメータ部、データ処理側電子回路部、制御・解析部(I)及び制御・解析部(II)から構成した。測定システムの動作内容を以下に述べる。

現場側装置においては、ガンマ線検出部から出力された信号を増幅器と波高分析回路を用いて増幅・信号処理し、ガンマ線スペクトルとして収集する。収集したスペクトルデータはテレメータ装置を用いてデータ処理側に転送する。この信号を受信したデータ処理側テレメータ装置及び電子回路部では、復調回路においてガンマ線スペクトルを復調し、カラーCRTに表示する。データ転送を定期的に繰返し行うことによりリアルタイムでのガンマ線スペクトルのモニタを可能とした。測定が終了すると復調回路に記憶されていたスペクトルデータはインターフェイスを通して制御・解析部(I)に送られる。制御・解析部(I)においてガンマ線のスペクトル解析を行った後、制御・解析部

(II)において配管内部の放射能を状態毎に分離して定量する解析計算を行うと同時に測定システム全体の動作の管理・監視を行う。

一方、現場側装置を遠隔操作するために制御・解析部(I)から送られて来た制御命令は、データ処理側装置内のマイクロプロセッサによってシリアル信号に変換された後、テレメータ装置によって現場側装置に転送される。現場側装置においては、送られて来た制御命令をマイクロプロセッサで解釈し、ガンマ線検出部の制御及びスキャンニング部の制御等の操作を行う。また、制御命令に基づいて検出器の温度、冷却用ガスの圧力、流量及び蓄電池電圧等をモニタしデータをテレメータ装置を通してデータ処理側に転送する。以上の動作はすべて、制御・解析部(I)を介して現場側装置を遠隔操作することによって測定システムが自動的に動作する構成とした。

3. 2 ガンマ線検出部

ガンマ線検出部は汚染配管内部の放射能から放出されるガンマ線を精度良くコリメートし検出する機器である。核種分析を行うためガンマ線エネルギー分解能が良く、かつ現場でのスキャンニング測定に使用することから小型で軽量であることが必要である。ガンマ線検出器としてエネルギー分解能の良いGe検出器を使用した場合、従来の液体窒素冷却型Ge検出器では冷却に使用するデュアーガルが大きいため遮蔽体部分が大きくなり重量が重くなるという欠点があった。また、検出部が重くなった場合現場における可搬性・操作性が悪くなるとともに検出部を上下に移動するスキャンニング装置の負担も大きくなり検出部全体が大きな装置となり実用的ではなくなる。

このため、ガンマ線検出器としてはエネルギー分解能も良く装置の小型・軽量化に有効であるガス冷却Ge検出器を使用した。⁸⁾ また、現場で測定箇所の放射能強度及び周囲の状況に応じて最適な測定ができるように、標準型と超小型のガンマ線検出部を作製した。

1) ガス冷却Ge検出器

標準型と超小型の2種類のガンマ線検出部に対応した大きさのガス冷却Ge検出器を作製した。

標準型ガス冷却Ge検出器の構造をFig.3. 2に示す。検出器の小型化を図るため、エンドキャップ直径5cm、長さ16.7cmとした。中に納めるGe検出器については、直径3.0cm、長さ2.0cmのclosed-end型高純度Ge検出器を用いた。検出器内部は 10^{-5} mmHgの真空中に引いた後真空バルブをバルブオペレータによって閉じて封じ切った。

また、検出器の内部にはGe検出素子からの微小な信号を增幅するため、Fig.3. 3に示すCooled-FET型初段回路を内蔵させた。初段回路を内蔵することによって検出素子と初段FET間の浮遊容量を小さくしガス冷却において大きな問題となるマイクロフォニック雑音を低減した。冷却された検出器の温度をモニタするためCA熱電対をGe検出素子に取付けた。

さらに、検出器の後部から入射してくるバックグラウンドガンマ線の影響を少なくするため、Ge検出素子の背面にタンクステン製の遮蔽体を内蔵する構造とした。これによって、コリメータ後部に必要な遮蔽体をなくすことが可能となり遮蔽体重量を約3分の2に軽量化できた。

超小型ガス冷却Ge検出器の構造はFig.3. 2と同様であるが検出器のさらなる小型化を図るために、エンドキャップ直径3.5cm、長さ16.7cmとした。中に納めるGe検出素子については、直径2.2cm、長さ2cmのClosed-end型高純度Ge検出器を用いた。標準型と同様に内部は

10^{-5} mmHg の真空度に引いた後封じ切った。

製作した標準型ガス冷却Ge検出器を冷却素子とともにPhoto. 3. 1に示す。また、超小型ガス冷却Ge検出器を従来のポータブル型Ge検出器（液体窒素冷却）と比較してPhoto. 3. 2に示す。

2) ガス供給装置

ガス冷却Ge検出器の冷却には高圧の窒素あるいは空気ガスを必要とする。このため、現場で使用できるように可搬型の高圧ガス供給装置を製作した。本ガス供給装置のガスの流れ図をFig. 3. 4に示す。

最初に、 $150\text{ kg}/\text{cm}^2$ の最大圧力をもつ高圧ガスボンベ（容量： 7 m^3 ）から出たガスを減圧弁を用いて減圧する。検出器の冷却には、減圧範囲としては $30\text{ Kg}/\text{cm}^2$ から $100\text{ Kg}/\text{cm}^2$ が必要である。次に、ガスに含まれる水分を取り除くため、内部にモレキューラーシープをつめた構造のガスアブソーバに導く。その後、フレキシブル高圧ガスケーブルによってガス冷却Ge検出器に供給する。この際、検出素子冷却用ジュールトムソン冷却素子の直前に小型ガスアブソーバを挿入しガスケーブル内に含まれる水分の除去を行う。同時にガス圧力センサーにも導き、 $50\text{ kg}/\text{cm}^2$ の圧力に対して 5 V のDC信号が出力されるように電子回路によってガス圧力をモニタ可能とした。また、冷却素子から排出されるガスを質量流量計に導き $50\text{ リットル}/\text{分}$ の流量に対して 5 V の信号が出力されるように調整し電子回路によりモニタ可能とした。

上記で述べた高圧ガスケーブルとして最初ナイロン製のガスケーブルを使用したが、内部に付着した微少な水分により冷却素子先端部の目づまり現象が発生することが確認された。このため、テフロン製のフレキシブルガスケーブルを使用し検出器の直前に挿入された小型ガスアブソーバと併用することにより水分による目づまり現象を解決した。

3) ガンマ線コリメータ

ガンマ線コリメータ窓の形状としては、通常円形のものが使用されるが、本測定法の場合、配管を縦方向にスキャニングすることから長方形のコリメータ窓を使用した。また、周囲からのガンマ線バックグラウンドの影響を少なくするには、遮蔽体の遮蔽性能を上げる必要がある。一方、現場での使用を考慮するとできるだけ小型にかつ軽量にという要求がある。このため、コリメータの材料としてタンクステンを使用し、全体を遮蔽する材料としてタンクステンと鉛の混合体を使用することにより相反する要求を解決した。

ガンマ線コリメータについてはGe検出器の大きさに対応した標準型コリメータ及び超小型コリメータの2種類を製作した。

標準型コリメータの構造図をFig. 3. 5に示す。直径 16 cm 、長さ 16.6 cm であり、内部にガス冷却Ge検出器を収めるために、直径 5.1 cm 、長さ 11 cm の穴をくりぬいた構造とした。検出器の前に置かれるコリメータはパルスモータによって縦巾を $0 \sim 1.0\text{ cm}$ の範囲で可変構造にし、測定するガンマ線の強度、スキャニング精度等に対応して変更を可能とした。横幅は 2 cm に固定した。コリメータ及び遮蔽体の厚さは 5 cm である。標準型ガス冷却Ge検出器と組合わせた場合の重量は 45 Kg であった。

超小型コリメータの構造はFig. 3. 5と同様であるが小型にするために直径 12 cm 、長さ 15 cm とし、内部にガス冷却Ge検出器を収める直径 3.5 cm 、長さ 10 cm の穴をくりぬいた構造である。超小型ガス冷却Ge検出器と組合わせた場合の重量は 20 Kg であった。

前から見た標準型コリメータを Photo. 3. 3 に示すとともに後面から見た超小型コリメータを Photo. 3. 4 に示す。

3. 3 スキャンニング部

スキャンニング部は、ガンマ線検出部を配管軸に対して鉛直方向に移動させ汚染配管内部放射能の測定に必要なスキャンニング動作を行う装置である。軸に鉛直な方向を微動するスキャンニング機構については、鉛直方向に直線的にスキャンニングする直線スキャンニング機構と配管に対する仰角を変える角度スキャンニング機構の2種類を製作した。

また、これらのスキャンニング機構を配管の軸方向に移動し必要な測定箇所を連続的に測定可能とするため、配管が水平な場合と垂直な場合に対応できるように水平移動機構と垂直移動機構の2種類の移動機構を製作した。直線スキャンニング機構及び角度スキャンニング機構はこの2種類の移動機構に装着して使用する。

また、これらのスキャンニング機構及び移動機構は可搬化するために電池で駆動可能な構造とした。

1) 直線スキャンニング機構

検出部を配管軸に鉛直な方向に直線的に移動するための装置として直線スキャンニング機構を製作した。構造をFig. 3. 6 に示す。設定位置精度を良くするために、パルスモータにより駆動するとともにパルスエンコーダを用いて位置設定を行う方式を採用し位置設定精度として0.1 cmを確保した。移動速度は15 cm/分であり移動可能範囲は50 cmである。また、遮蔽体等の重量物を乗せて動作するため、電磁ブレーキを用いて停止するようにし測定中に位置が変わることを防止した。また、本装置に装着される検出器の取付台への設置角度及び検出器と測定対象配管との距離の微調整が可能な構造とした。製作した直線スキャンニング機構をPhoto. 3. 5 に示す。

2) 角度スキャンニング機構

配管軸に鉛直な方向に対する仰角を微動する装置として角度スキャンニング機構を製作した。構造図をFig. 3. 7 に示す。設定位置精度を良くするために、直線スキャンニング機構と同様にパルスモータにより駆動しパルスエンコーダを用いて角度設定を行う方式を採用した。この結果、角度設定精度として1度を確保できた。移動速度は15度/分であり移動可能範囲は±45度とした。また、遮蔽体等の重物を装着して動作するため、電磁ブレーキを用いて停止するようにし測定中に位置が変わることを防止した。また、本装置に装着される検出器の取付台への設置角度及び検出器と測定対象配管との距離の微調整が可能な構造とした。製作した角度スキャンニング機構をPhoto. 3. 6 に示す。

3) 水平移動機構

配管の水平部分を連続して測定するため、検出部を装着した直線スキャンニング機構あるいは角度スキャンニング機構を移動する装置として水平移動機構を製作した。構造図をFig. 3. 8 に示す。本機構は、DCモータで駆動しパルスエンコーダを使って位置の設定を行った。水平移動精度としては、前後1 mに対して1 cm以内である。移動速度としては7 cm/分とした。取り付け可能な配管の直径は約34 cmとし微調整可能な構造とした。最大積載重量は100 Kgとし停止機構としては電磁ブレーキを用いた。製作した水平移動機構をPhoto. 3. 7 に示す。

4) 垂直移動機構

配管の垂直部分を連続的に測定するため、検出部を装着した直線スキャンニング機構を移動する装置として垂直移動機構を製作した。移動方式としてはワイヤで上下に移動する方式を採用した。構造図をFig. 3. 9に示す。本機構では、DCモータで駆動しパルスエンコーダを使って位置設定を行っている。垂直移動精度としては、前後1mに対して1cm以内である。移動速度としては5cm/分の比較的遅い速度で移動する。移動可能範囲は5mである。取り付け可能な配管の直径は15~35cmとし変更可能な構造とした。最大積載重量は100kgとし停止機構としては電磁ブレーキを用いた。製作した垂直移動機構をPhoto. 3. 8に示す。

3. 4 電子回路部

電子回路部は、ガス冷却Ge検出器から出力される微小なガンマ線信号を増幅しその波高をアナログ・デジタル変換しパルス波高データとしてデータ処理側装置に転送する機能とデータ処理側から送られてきた制御命令にもとづいて現場側の機器を制御する機能をもつ現場側電子回路、現場側から送られてきた波高データを復調しガンマ線スペクトルを収集する機能と制御命令を現場側装置に送る機能をもつデータ処理側電子回路及び両者を接続するテレメータ装置から構成した。

製作に当たり、現場側電子回路については装置を小型・軽量そして電池駆動化を図るために、あまり使用しない機能を省きかつ回路を単純化した。また、測定現場における可搬性・作業性を考慮し、現場側電子回路は現場側テレメータ装置を一体化できる構造とした。電子回路の構成図をFig. 3. 10に示す。

3. 4. 1 現場側電子回路

現場側電子回路のブロック図をFig. 3. 11に示す。本電子回路は、ガンマ線検出部用増幅器部、高圧電源部、波高分析部、制御回路部及び電源部から構成した。本装置を製作するに当たり、蓄電池によって動作できるように省電力化を図るとともに持ち運びが容易となるよう小型化を図った。また、本装置を2台（A系統及びB系統）製作し1台のデータ処理側装置によりテレメータを介して同時にA系統及びB系統の現場側装置を制御可能なシステムとした。

1) 増幅器部

本ユニットは、ガス冷却Ge検出器に直接接続し、微小なガンマ線信号を増幅する前置増幅部と波形整型を行う主増幅部から構成した。前置増幅部の初段FET回路をGe検出器内部におくことによってマイクロフォニック雑音の低減化を図った。また、前置増幅部にはCA熱電対からの信号を増幅し温度信号に変換する温度変換回路を内蔵させ冷却温度の測定を可能とした。温度モニタ範囲は55~-200°Cとした。

増幅器としての雑音特性（半値幅分解能：FWHM）は、常温で初段FET回路を作動させ波形整形時定数を1μsecに設定した時、

$$\text{FWHM} = 0.9 \text{ keV} + 0.024 \text{ keV/pF}$$

であった。また、前置増幅部を含めた増幅部の積分非直線性としてはガンマ線スペクトロスコピーオン

必要な性能である0.05%以下とした。また、増幅部の外来及び内部雑音に対する雑音性能を向上させるために、電子回路の接地方法等の調整を行い、雑音レベルを30mVpp以下とした。4cm x 5cm x 10cmの大きさまで超小型化した増幅器部の写真をPhoto. 3. 9に示す。

2) 高圧電源部

本ユニットは、ガンマ線検出器のバイアス電圧を印加するために使用する。安全にバイアス電圧を印加するために、マイクロプロセッサによるプログラム制御で電源のオン・オフ及び電圧の設定が可能とした。出力電圧は+200V～+2500Vの間で可変とし出力電流は最大30μAとれるようにした。また、高圧電圧の0～2500Vに対応してモニタ出力として0～10Vが出力される。さらに、異なった使用電圧を持つ2つの検出器に誤った電圧を印加することを防止するため、高圧電源回路に高圧電圧リミット回路を設けプログラム制御によって設定値以上印加できないようにした。設定値として標準型検出器については1500V及び超小型検出器については800Vでリミットがかかるようにした。

3) 波高分析部

本ユニットは、増幅器の出力パルスを入力信号として、その波高値をデジタル信号（12ビット～4096チャンネル）に変換するアナログ・デジタル変換回路、メモリ回路及びタイマ回路から構成した。アナログ・デジタル変換方式としては、ウイルキンソン型を用い80MHzのクロック周波数で変換した。積分非直線性として0.05%以下、微分直線性として0.8%以下、温度安定度として0.01%以下の性能が得られた。メモリとしては4096チャンネル（20ビット）を持ちマイクロプロセッサにより制御可能な回路とした。タイマの設定範囲は10～99999秒でありマイクロプロセッサにより設定可能である。

4) 制御回路部

本ユニットは、データ処理側からテレメータを介して送られて来た制御信号を変換・解釈し、ガンマ線検出部、スキャニング部及び超小型電子回路部を制御する回路である。CPUとしては8ビット省電力型のNSC800（CMOS型Z80）を用いPROMを8KB及びRAMを2KBを持った構成とした。また、制御・通信用のシリアルポートを2ポート及び現場側機器のモニタ用として8ビット逐次比較型AD変換ポート（8チャネルマルチプレクサー付き）を付属させた。

リモート制御はシリアルポートを使用して行い、ASCII文字2文字を組合せた制御文字により制御する方式を用いてインテリジェント化を図った。また、もう一方のシリアルポートを用いて、測定現場においてローカル的に現場側装置を制御可能とともに制御パラメータをモニタ可能とした。このポートにはポータブル端末（HC-88）を接続し使用した。

スキャニング部制御、コリメータ制御、高圧電源制御、波高分析部制御及び制御パラメータの読み出し等のための制御命令の一覧をTable 3. 1 (a)、(b)に示す。

また、効率良く現場での測定を可能とするため2台の現場側電子回路を1台のテレメータ装置を介してデータ処理側装置によって遠隔操作し、2系統のスキャニング測定が可能な構成とした。

5) 電源部

本ユニットは、増幅器部、高圧電源部、波高分析部、制御回路部及びテレメータ装置の現場側電子回路に直流電源を供給するユニットである。入力電圧として12V（蓄電池電圧）を入力し出力電圧として+5V(1A)、+12V(0.25A)、-12V(0.25A)、+15V(0.25

A)、-15V(0.25A)を得ている。入力電圧変動に対して±2%以内(全負荷時、入力電圧±10%可変)の性能を有する。また、リップル雑音については20mVpp以下(±15V)である。

以上の5つのユニットは、巾45cm、奥行き28cm、高さ23cmの筐体に収納され、現場側電子回路としてまとめた。現場側電子回路部とテレメータ装置からなる現場側電子回路をPhoto.3.10に示す。

3.4.2 データ処理側電子回路

データ処理側電子回路のブロック図をFig.3.12に示す。本電子回路は、変調・復調回路、スペクトル表示部及び制御回路部から構成した。

1) 変調・復調回路部

本ユニットは、テレメータ装置を介して現場側から送られて来た波高データを復調しバッファメモリに記憶するとともに、マイクロプロセッサ回路・インターフェイス回路を用いた制御信号の変調及び復調を行い現場側装置とデータ処理側装置との間の制御信号の送受信を行う機能を有する回路である。

波高データの変換はシフトレジスタ回路を用いてシリアルデータを20ビットパラレル信号に変換しバッファメモリ(20ビット4096チャネル)に記憶する方式を用いた。またバッファメモリとして両方向書き込みながらのスペクトル表示部への読み出しを可能とした。

また、制御信号の入出力はRS232Cインターフェイスを用いて行い転送速度は2400ポートである。

2) スペクトル表示部

本ユニットは現場側装置から復調回路に送られて来た波高データを処理し一定時間毎にガンマ線スペクトルとしてカラーCRTに表示する装置である。また、制御・解析部(I)からの制御命令にもとづき本ユニット内に記憶されているガンマ線スペクトルデータを制御・解析部(I)に転送する機能も有している。

回路構成をFig.3.12に示すようにパーソナルコンピュータPC-9801Mによってバッファメモリの内容を直接アクセスしプログラムによって14インチCRTカラーディスプレイにガンマ線スペクトルを表示するようにした。表示モードとしてはリニア表示及びログ表示を可能とした。時間表示はリアルタイム、ライブタイム及びデッドタイム表示を可能とした。ガンマ線スペクトルの表示例をPhoto.3.11に示す。

操作性を良くするため、ガンマ線スペクトルモニタ機能として関心領域設定機能、面積計算機能、ログ・リニア表示切替選択機能、スペクトル拡大機能等をもたらせた。また、2系統のスキャンニング測定及びスペクトル収集・表示を可能とするため、表示画面(A系統及びB系統)の切替機能をもたらせた。

スペクトル表示部から制御・解析部(I)への波高データ転送にパラレル信号転送方式を採用し転送スピードを2秒に高速化するとともに、スペクトル表示速度も一部アッセンブルプログラムを用い

ることにより7秒に高速化した。

3) 制御回路部

本ユニットは、データ解析部及びガンマ線スペクトル表示部から送られて来た制御信号を変換してテレメータ装置に送るとともに、現場側から送られてきた制御信号をシリアル信号に変換して制御・解析部（I）に送る回路である。CPUとして8ビットマイクロプロセッサNSC800(CMOS型Z80)を用いPROMを8KB、RAMを2KBで使用した。シリアルポートとして2ポート(ボーレイト：2400ボー)を制御・解析部（I）と接続した。

以上の機器を製作するに当たり構成ユニットを一体化し、巾55cm、奥行き62cm、高さ130cmのラックに組み込んだ。データ処理側電子回路をPhoto.3. 12に示す。

3. 4. 3 テレメータ装置

テレメータ装置については、現場側装置とデータ処理側装置とをケーブルを引くことなく接続するために開発した装置である。電波を使用したテレメータ装置を主装置とするとともに、測定現場における状況に応じて信号を中継するため、2種類の中継器を開発した。1つは、原子炉格納容器内の測定現場から格納容器外に信号を取り出すためのACライン方式中継器であり、もう1つは原子炉内の現場側装置の可搬性を高めるための赤外線方式中継器である。

なお、テレメータ装置で使用する電波は強度が一般に許される出力を超るために、郵政省から許可を得た。郵政省から認可された2つの無線局の割当周波数とその出力は、現場側装置からデータ処理側へ送信する無線局の周波数が169MHzで出力は0.5Wであった。また、データ処理側から現場側への無線局の送信周波数は365MHzで出力は0.5Wであった。

1) 現場側テレメータ装置

本装置は、電波を使用して現場側とデータ処理側との間を接続するための装置であり、現場側装置で収集された波高データをデータ処理側装置に転送するとともに制御信号の送受信を行う装置である。このため、データの送受信の際に必要な波高データ信号及び制御信号の変換を行う機能ももっている。本ユニットの構成をFig.3. 13に示す。本ユニットは、波高分析部及び制御回路部と接続して使用する。

本装置は認可を得た周波数とその帯域幅より送信機については周波数195MHz、送信速度は2400フレーム／秒とし受信機については受信周波数365MHz、受信速度は120フレーム／秒の機能で運用した。送信の際の最終変調方式としてはFM変調を用いた。また、受信性能としては、受信感度 $15\mu V$ 以下及びスプリアス感度-60dB以下の性能をもたらせた。

信号変換のエンコード・デコード方式としては、PCM方式(位相分割符号変換)を採用し、高速かつ信頼性の高いデータ転送を可能とした。転送ビット数は1フレーム20ビットとしブロック転送を行うことによりエラーが生じた場合の再転送を容易にした。

2) データ処理側テレメータ装置

本装置は、現場側テレメータ装置と組み合わせて使用され、現場側から送られてきた波高データ及び制御信号を受信し、復調回路に送るとともに、制御・解析部（I）から送られて来る制御命令を現場側に送信する機能を持っている。本ユニットの構成はFig.3. 13と同様である。

本装置は認可を得た周波数とその帯域幅より送信機については周波数 3 6 5 M H z、送信速度は 1 2 0 フレーム／秒とし受信機については受信周波数 1 9 5 M H z、受信速度は 2 4 0 0 フレーム／秒の機能で運用した。送信の際の最終変調方式としては FM 変調を用いた。また、受信性能としては、受信感度 $15 \mu V$ 以下及びスプリアス感度 - 6 0 d B 以下の性能をもっている。

3) 中継器

中継器は、テレメータ装置の信号を接続するための装置であり、信号転送方式として採用した P C M 方式（位相分割符号変換）の信号の送受信を可能にした装置である。赤外線方式中継器と A C ライン方式中継器の 2 種類の中継器を製作した。

① 赤外線方式中継器

本中継器は現場側信号処理部とテレメータ装置を赤外線により接続する中継器であり、原子炉格納容器内での検出部の可搬性の確保を目的として製作した。通信媒体として赤外線を用い、到達距離として 1 0 m の性能を持っている。回路構成を Fig. 3. 1 4 に示す。また、赤外線送受信センサとともに本体を Photo. 3. 1 3 に示す。

② A C ライン方式中継器

本中継器は原子炉格納容器内から信号を外部に取り出すことを目的として開発した中継器である。通信媒体として A C ラインにキャリア（微弱電波）を乗せて FM 変調を行うことによりデータ転送を行う方法を採用した。到達距離としては約 1 0 0 m の性能を持っている。回路構成を Fig. 3. 1 5 に示す。

3. 5 制御・解析部

制御・解析部はテレメータ装置を介した遠隔操作による現場側装置の制御、データ処理側装置の制御及びスキャンニングデータの解析処理等を行う装置である。本測定システムでの制御・計算内容が多岐にわたるので、主に現場側装置の測定・制御を受け持つ制御・解析部（I）と装置全体の管理及び解析計算を受け持つ制御・解析部（II）の 2 つの小型計算機システムから構成した。

3. 5. 1 制御・解析部（I）

制御・解析部（I）はテレメータ装置を用いて遠隔操作により現場側装置を制御し、ガンマ線スキャンニング測定を行うとともに測定されたガンマ線スペクトルのピーク解析・核種同定等を行う装置である。種々の制御・解析処理を行う必要があるため、リアルタイム及びマルチタスク処理に優れた小型計算機を使用する必要があった。製作した制御・解析部（I）の構成を Fig. 3. 1 6 に示す。

小型計算システムとしては DEC 社 P D P - 1 1 / 7 3 を用い、メモリ容量を 6 4 0 k W で動作させた。オペレーティングシステムとしてはマルチタスク・リアルタイム・オペレーティングシステムである R S X - 1 1 を用いた。ディスク記憶装置としては、記憶容量が 1 0 M バイトのカートリッジディスク装置（R L 0 2）を 2 台使用した。フロッピーディスク装置としては記憶容量 1 M バイトの 8 インチフロッピーディスク装置 R Q X - 0 5 を使用した。

また、データ転送の高速化を行うため C R T 表示部とのデータ転送には 1 6 ビットパラレルインターフェースを使用した。

ーフェイスボード (DRV11) を使用した。

製作した機器は縦幅 106 cm × 横幅 54 cm × 奥行 76 cm のキャビネットに収納した。

3. 5. 2 制御・解析部 (II)

制御・解析部 (II) は、

- ①測定システムの各構成機器の動作を総合的に管理し、あらかじめ与えられた動作手順に基づいて管理下にある各構成機器に制御・解析部 (I) を介して制御命令を出す機能、
- ②測定データの整理・解析、解析結果の表示・印字出力及びモニタ情報の表示を行う機能、
- ③モニタ情報をもとに、警報パネルや監視用ターミナルに装置の動作状態あるいは警報を出力する機能、
- ④操作員が容易に配管内部放射能の分離測定を行うことができるにするためのマンマシンインターフェイス機能の 4 つの機能を有した装置である。

製作した制御・解析部 (II) の構成を Fig. 3. 17 に示す。

小型計算機システムとしては 32 ビットの CPU を持つ DEC 社 VAX-11/730 を使用しシステムメモリとしては 768 kW を用いた。また、オペレーティングシステムとしてはリアルタイム・マルチタスク・オペーティングシステム VAX/VMS を使用し必要な制御機能を確保した。また、放射能解析ソフトウェアによる解析計算速度を高速化するため Fig. 3. 18 に示す構成の並列演算プロセッサ AP-500 を付属させた。ディスク装置としては 80 Mバイト固定磁気ディスク装置 R80 と 10 Mバイトカートリッジディスク装置 RL02 を用いた。さらに、大量の測定データを記録するための外部記憶装置として記憶密度 1600 bpi の磁気テープ装置 TU80 を使用した。

また、ガンマ線スペクトル解析結果及び放射能解析結果等をカラーで表示するため、カラー表示装置を製作した。表示用プロセッサとして PC-98XA を用い高解像度 CRT ディスプレイを用いることにより描画範囲水平 1120 ドット × 垂直 750 ドットの種々のモードで解析結果を表示した。データ転送は RS232C インターフェイスを用い 9600 ポーの速度で行った。

警報表示パネルには警報ランプを 10 個、アナログ指示計（メータリレー付）を 4 個を取り付け RS-232C による制御命令により警報を出すようにした。本パネルを Photo. 3. 14 に示す。

さらに、日本語で測定データ、解析結果を出力するため、漢字出力のできるレーザープリンタ装置 LBP-8 を使用した。インターフェイスは RS-232C を用い 9600 ポーの転送速度で接続した。

製作した制御・解析部 (I) と制御・解析部 (II) を接続し一体の装置とし Photo. 3. 15 に示す。

4. 測定システム用ソフトウェア

測定システム用ソフトウェアは、制御・解析部の 2 つの小型計算機システム PDP-11/73 及び VAX-11/730 にインストールして、現場側装置及びデータ処理側装置の制御及び測定データの解析・処理を行うためのソフトウェアである。測定・制御ソフトウェアと放射能解析ソフトウェ

ーフェイスボード (DRV11) を使用した。

製作した機器は縦幅 106 cm × 横幅 54 cm × 奥行 76 cm のキャビネットに収納した。

3. 5. 2 制御・解析部 (II)

制御・解析部 (II) は、

- ①測定システムの各構成機器の動作を総合的に管理し、あらかじめ与えられた動作手順に基づいて管理下にある各構成機器に制御・解析部 (I) を介して制御命令を出す機能、
- ②測定データの整理・解析、解析結果の表示・印字出力及びモニタ情報の表示を行う機能、
- ③モニタ情報をもとに、警報パネルや監視用ターミナルに装置の動作状態あるいは警報を出力する機能、
- ④操作員が容易に配管内部放射能の分離測定を行うことができるにするためのマンマシンインターフェイス機能の 4 つの機能を有した装置である。

製作した制御・解析部 (II) の構成を Fig. 3. 17 に示す。

小型計算機システムとしては 32 ビットの CPU を持つ DEC 社 VAX-11/730 を使用しシステムメモリとしては 768 kW を用いた。また、オペレーティングシステムとしてはリアルタイム・マルチタスク・オペーティングシステム VAX/VMS を使用し必要な制御機能を確保した。また、放射能解析ソフトウェアによる解析計算速度を高速化するため Fig. 3. 18 に示す構成の並列演算プロセッサ AP-500 を付属させた。ディスク装置としては 80 Mバイト固定磁気ディスク装置 R80 と 10 Mバイトカートリッジディスク装置 RL02 を用いた。さらに、大量の測定データを記録するための外部記憶装置として記憶密度 1600 bpi の磁気テープ装置 TU80 を使用した。

また、ガンマ線スペクトル解析結果及び放射能解析結果等をカラーで表示するため、カラー表示装置を製作した。表示用プロセッサとして PC-98XA を用い高解像度 CRT ディスプレイを用いることにより描画範囲水平 1120 ドット × 垂直 750 ドットの種々のモードで解析結果を表示した。データ転送は RS232C インターフェイスを用い 9600 ポーの速度で行った。

警報表示パネルには警報ランプを 10 個、アナログ指示計（メータリレー付）を 4 個を取り付け RS-232C による制御命令により警報を出すようにした。本パネルを Photo. 3. 14 に示す。

さらに、日本語で測定データ、解析結果を出力するため、漢字出力のできるレーザープリンタ装置 LBP-8 を使用した。インターフェイスは RS-232C を用い 9600 ポーの転送速度で接続した。

製作した制御・解析部 (I) と制御・解析部 (II) を接続し一体の装置とし Photo. 3. 15 に示す。

4. 測定システム用ソフトウェア

測定システム用ソフトウェアは、制御・解析部の 2 つの小型計算機システム PDP-11/73 及び VAX-11/730 にインストールして、現場側装置及びデータ処理側装置の制御及び測定データの解析・処理を行うためのソフトウェアである。測定・制御ソフトウェアと放射能解析ソフトウェ

アから構成された本ソフトウェアの構成をFig. 4. 1に示すとともに測定システムの動作フローをFig. 4. 2に示す。

4. 1 測定・制御ソフトウェア

ソフトウェア作成にあたり、測定システムの操作を専門的な知識がなくても簡便に行うことができるようとするため、以下の様な考え方に基づいてソフトウェアを作成した。

- 1) 測定位置、測定箇所数等の簡単なパラメータのみを入力することにより、測定システムが動作し最終的に指定した箇所の配管内部放射能を核種及び状態毎に分離して求めることができる測定システムとする。このため、測定に必要な測定条件、解析条件等のパラメータをあらかじめパラメータファイルに作成しておく、このパラメータファイルをもとに指定された手順に従い測定・解析動作を行う。
- 2) 測定システムの動作はリアルタイムで行い、現場側及びデータ処理側装置の動作状態を監視できる。
- 3) 測定と解析を平行して行い、測定を中断した場合でも中断時の次の手順から自動的に再開する。
- 4) 測定システム内でエラーが生じた場合には、できるだけ測定を停止することなく回復し重度のエラーが発生した場合には警告を発して操作員に知らせる。

測定・制御ソフトウェアは、制御・解析部（I）のPDP-11/73用及び制御・解析部（II）のVAX-11/730用ソフトウェアの2つのソフトウェアから構成した。両者はネットワークで接続されており、一体となって測定システムの各構成機器の測定・制御を行う。

4. 1. 1 制御・解析部（I）用測定・制御ソフトウェア

本測定・制御ソフトウェアは制御・解析部（II）のVAX-11/730システムからDECNETを介して送られて来る各種のパラメータファイルに基づいて、現場側装置を制御しガンマ線スキャンニング測定を行うとともに、現場側装置から送られてきたガンマ線スペクトルのスペクトル解析を行うプログラムである。

本ソフトウェアは、ガス冷却ガンマ線検出器の冷却制御、スキャンニング部の制御、ガンマ線スペクトルデータの収集、スペクトル解析・核種同定、テレメータ装置の制御、波高分析部の制御、制御・解析部（II）との通信及び制御・解析部（I）プログラムの管理等を行うソフトウェアから構成した。

A系統とB系統の2台の現場側装置をそれぞれ独立に制御しスキャンニング測定を行うことができるようするため、2つの系統のプログラムを作成した。両者の違いはプログラム名の先頭にAまたはBがつくことと内部で使用しているイベントフラッグの値がB系統の場合にA系統に64を加えた値であることなどである。

以下に各制御機能の概要を示す。

1) 検出器冷却制御

ガス冷却型Ge検出器をあらかじめ設定した温度まで冷却しその温度を維持するためのプログラム

である。冷却制御手順をFig. 4. 3に示す。設定温度の冷却過程においては、冷却するための高圧ガスの操作を手動で行う必要があるため、この冷却操作をサポートし簡単に設定温度までGe検出器を冷却できるようにした。このため、冷却温度、ガス流量、ガスピボンベの残圧をモニタしらかじめ設定した値をはずれた場合に警告を発するようにした。また、設定温度に到達した後は、ガス圧力、流量及び冷却温度をパラメータとした冷却制御方式を採用し安定に検出器の温度を一定に保持できるようにした。

2) Ge検出器のバイアス電圧制御

Ge検出器の冷却後、検出器として動作させるにはバイアス電圧を印加する必要がある。バイアス電圧を印加するには、前置増幅器を壊さないようにゆっくり電圧を上げる必要があるため、現場側装置の前置増幅器出力レベルのモニタ機能を利用して安全に高圧電圧を印加できるようにした。バイアス電圧の印加手順のフローチャートをFig. 4. 4に示す。設定電圧まで印加する場合、100Vずつバイアス電圧を印加し前置増幅部のDCレベルをモニタし正常な出力電圧範囲にあることを確認しながら次のステップへ進むようにしている。

また、検出器型信号（標準型：1、超小型：0）を検知してガンマ線検出器ごとに標準型検出器には1500V、超小型検出器には800Vまでの設定したバイアス電圧が自動的にかかるようにした。

3) スキャンニング部制御

配管内部の放射能を分離して測定するには、放射能の分離解析に最適な位置をスキャンニング測定する必要がある。このため、測定する配管の直径にあわせて最適な測定条件を求めて書き込んだパラメータファイルをもとにGe検出器の位置を移動するプログラムを作成した。設定位置での測定が終了すると順次パラメータファイルに従って設定位置までスキャンニング部を制御して検出システムを移動するようにしている。

4) 波高分析部制御

本機能においてはスペクトル表示部を介して1つの制御プログラムで2系統の現場側装置の波高分析部（MCA）の制御を可能としている。スペクトル表示部に使用されているパーソナルコンピュータPC-9801と制御・解析部（I）のPDP-11/73とをパラレルインターフェイス用いて接続し迅速にガンマ線スペクトル転送を可能するためにアッセンブリ言語で入出力サブルーチンを作成した。

また、スペクトルデータを転送誤差なくデータ処理側で得るために、波高データの転送を2回行って両者を比較し、データが一致しない場合には再転送を繰り返し行う転送方式を採用した。設定した転送回数を越えた場合はテレメータ装置異常の警告を出力するようにした。

5) スペクトル解析・同定

本機能は波高分析部制御機能により収集したガンマ線波高分布データについてガンマ線スペクトル解析及び核種同定を行うものである。核種同定は2種類の検出器に対応して自動的にエネルギー校正係数を選択しガンマ線ピークエネルギーを求め、あらかじめデータベース化しておいた核種名と放出されるガンマ線エネルギーの関係をもとに行う。また、ガンマ線スペクトルのピーク解析結果の良・不良の判定条件を用い測定条件の良いガンマ線ピークについてのみ後に述べる放射能解析を行うようにした。

6) テレメータ制御

テレメータ装置の制御機能については、現場側装置との通信プロトコルを簡単でかつ信頼性の高いものにし、テレメータによる現場側装置の遠隔操作性能を向上させるように作成した。転送プロトコルをFig. 4. 5 に示す。制御コマンドの転送は現場装置側で必ず正常にコマンドを受信し制御動作を完了したことを示す信号をデータ処理側に返送することにより完結するようにした。

7) ネットワーク管理

本機能は、制御・解析部（I）のPDP-11/73と制御・解析部（II）とをDECNETを介して接続し制御命令と各種のパラメータファイル及びデータファイルの相互転送を行うための機能である。

9) システム管理

システム管理機能は、制御・解析部（II）から送られてきたパラメータファイルに基づき制御・解析部（I）の各プログラムを管理し、かつ各プログラムの動作状態をネットワークを介して制御・解析部（II）へ送り出すプログラムである。

また、制御・解析部（I）の動作状態を確認できるように、測定動作中の特に重要な動作については、メッセージをコンソールターミナルに出力するようにした。出力されるメッセージは、①測定開始、測定終了時のメッセージと時間・日付、②冷却が完了しバイアス電圧が設定値に達した時のメッセージと時間・日付、③バイアス電圧が切れた時のメッセージと時間・日付、④各測定箇所ごとの時間・位置・測定ポイント、⑤エラー発生時のエラー内容及び系統名等である。

4. 1. 2 制御・解析部（II）用測定・制御ソフトウェア

制御・解析部（II）用測定・制御ソフトウェアは、あらかじめ測定システムの制御や解析処理などに使用される全てのパラメータを設定してファイルに書き込み、このパラメータファイルをもとに手順に従い各装置を動作させる機能を有している。本ソフトウェアは、パラメータ入力、動作監視、プロット、表示、印字、ファイル管理及びネットワークのプログラムから構成されている。

1) パラメータ入力機能

パラメータ入力機能は、配管内部放射能分離測定システムの構成機器の制御及びデータ処理に使用するパラメータを制御パネルより入力するための機能である。

主な入力項目は、①データ収集条件、②ガス冷却Ge検出器の冷却条件、③現場側装置の制御条件、④ガンマ線スペクトルの解析条件、⑤配管内部放射能の解析条件、⑥表示条件ファイル、⑦解析結果出力条件、⑧警報条件及び⑩これらの条件をまとめ測定システムを動作させるための管理条件等である。動作させるのに必要なパラメータファイルの構成をFig. 4. 6 に示す。

本機能を用いてパラメータ入力・変更を簡便に行うため、CRTスクリーン上でファイルを編集可能なスクリーン編集方式の入力ソフトウェアを作成した。

2) 起動機能

本機能は入力したパラメータファイルを用いて測定システムを起動するための機能である。起動手順をFig. 4. 7 に示す。

3) 動作監視機能

動作監視機能は制御・解析部（I）及び（II）で動作する制御・解析プログラムを有機的に接続し各パラメータファイルに従って測定システムを動作させるとともに、現場側及びデータ処理側構成機器の動作状態やデータ解析の処理状態を管理・監視する機能である。監視情報は動作モニタによって表示される。本機能を用いてシステムの動作の状態を監視している様子をPhoto. 4. 1に示す。リアルタイムで現場側装置の動作状態や測定・解析の状態を監視する機能を有している。

また、装置の動作中にエラーが生じた場合には、モニタ画面（V T - 8 0）にエラーメッセージを表示させる機能をもたせるとともに、現場側装置の状態を表示するステータス表示画面を作成しスキャニング機構の位置やコリメータの開閉の様子を表示するようにした。

4) 警報パネル制御

本制御機能は現場側装置の警報パネルを制御し現場側装置が正常に動作していることをモニタするための機能である。測定を継続する上で重要なパラメータについてあらかじめ設定した値からはずれた場合に警報（電子ブザー）を出すようにした。また、オンライン起動時のガス圧力・流量等の最大・最小値の設定を超えた場合には、ブザーで警告するようにした。

5) データ印字機能

データ印字機能については、ガンマ線スペクトル解析結果や放射能解析計算結果等のデータをプリンタ装置に出力できるようにした。

6) プロット機能

ガンマ線スペクトルデータ、スペクトル解析結果、放射能解析結果をオンラインでプロッタにプロットする機能である。

7) カラー表示機能

カラー表示機能は、V A X側からカラー表示装置として使用するパーソナルコンピュータP C - 9 8 X Aを制御し種々の解析結果をわかりやすく表示するための機能である。プログラムの構成をFig. 4. 8に示す。

表示方式は、カラー表示装置内に必要な表示フォーマットを用意しV A X側から表示条件ファイル及び表示データを転送することにより行う。表示装置内の制御プログラムはB A S I C言語を使用して作成されており、送られてきた表示条件及びデータをもとにカラー表示を行う。

表示モードは2つあり、1つは、測定情報（配管名、配管直径、配管厚、測定時刻等）及び測定された配管内部放射能の核種、量、状態（沈着状、水溶液状、ガス状）が一目でわかるように色分けし表示するモード（T Y P E 1）である。表示サンプルをPhoto. 4. 2に示す。

他の1つは、特定核種についての情報を詳細に表示するモード（T Y P E 2）で、その核種が配管の中にどのように分布しているかを表示することができる。また、これらの画面表示はオンライン測定中にスキャニング測定と同期を取りながら動作可能である。

8) ネットワーク機能

V A X - 1 1 / 7 3 0とP D P - 1 1 / 7 3 の間はD E C N E T（ネットワーク）で接続されておりこのネットワークを用いて制御命令及び各種データファイルの相互転送を行いうようにした。

9) データ記録機能

磁気テープ装置（T U - 8 0）を用いてデータ収集後自動的に測定データ及び解析結果等を磁気テ

ープに書き込むことができるようにした。

1.0) 並列演算プロセッサの平行処理機能

放射能解析計算に使用している並列演算プロセッサ A P 5 0 0 を解析計算プログラム内において制御できるように、並列演算プロセッサの平行処理機能ソフトウェアを作成した。この結果、VAX-11/730 システムの C P U の占有時間を解析計算に使用する割合が少なくなったため、測定しながらバッチ処理等の解析計算を行うことが可能となった。

4. 2 放射能解析ソフトウェア

放射能解析ソフトウェアは、第2章で説明した放射能分離測定のための解析法を実際に本測定システムに適用するためのソフトウェアである。本ソフトウェアは、制御・解析部(II)のVAX-11/730 及び並列演算プロセッサ A P 5 0 0 において、ピーク解析及び核種同定されたガンマ線スキャニング測定結果をもとに配管内部放射能の定量解析計算を行う。

測定法を現実的に測定システムにおいて使用するためには種々の工夫が必要である。最も大きい問題点はガンマ線のエネルギーが大きい場合コリメータ内を通過してくる割合が大きくなるため理想的なコリメータを作ることは非常に困難なことである。このため、本測定法の最も重要な開発ポイントは、配管内部から放出されたガンマ線がコリメータを通過し検出器に入射する数を3次元的に解析計算する計算アルゴリズムを開発することである。また、現場で測定結果を迅速に得ることができるよう計算コードの最適化を行い計算時間の短縮を図ることも重要な開発項目である。

作成した解析ソフトウェアの概略のフローチャートをFig.4. 9 に示す。本解析ソフトウェアの作成にあたっては、測定・制御ソフトウェアとのインターフェイス部分の整合を行い、測定・制御ソフトウェアと同期して、種々の条件で測定されたスキャニング測定結果を自動的に解析できるようにした。

効率良く解析計算を行うため計算フロー及びインターフェイス部分を工夫し解析計算機能を十分実用可能となるようにした。また、並列演算プロセッサによる解析速度の向上を図るために解析ソフトウェアの計算アルゴリズムの並列演算化を行った。

さらに、配管のスキャニング測定方法が直線スキャニングモードと角度スキャニングモードの2つあることに対応し、直線スキャニング用及び角度スキャニング用の2種類の解析ソフトウェアを作成した。作成言語は主にFORTRANを用いた。

直線スキャニング用解析ソフトウェアは第2章で説明した解析手法を直線スキャニング測定を行う場合に適用するためのソフトウェアである。配管から放出されるガンマ線がコリメータを通って検出器に入射するまでのパス計算を行い得られた沈着状、水溶液状及びガス状の各状態毎の計数分布と測定したガンマ線スキャニング分布をもとに状態毎に放射能を分離・定量するソフトウェアである。作成した直線スキャニング用解析ソフトウェアのフローをFig.4. 10 に示す。

1) 計算アルゴリズム

配管内の放射能から放出されるガンマ線が検出システムのコリメータ部を通して検出器に到達するまでのパス計算を3次元的に計算すると非常に時間がかかるため、誤差として許される範囲内で必要な部分のみを計算しつつ精度を要求される部分のみ精度良く計算する手法を使用した。

実際の測定においてはバックグラウンドを差し引く操作が入るため、解析計算のアルゴリズムを Fig. 4. 11 に示すように、検出器がコリメータ窓を望む角度内についてのみバス計算を行うこととした。また、この角度内の外側に近い部分はバス計算の割り合いを少なくしても解析精度にあまり影響を与えないことがわかったため、コリメータの中心部と外周部とでバス計算の頻度を変えて計算することとした。

2) 解析計算の並列演算化

解析時間をさらに短縮するため並列演算装置を用いた。解析計算プログラムの並列演算化を行うに当たりプログラム開発ユーティリティを使用して解析計算に時間のかかるルーチンの検索を行った。この結果、配管から放出されたガンマ線が検出器に達するまでのバス計算、配管やコリメータ等の吸収体によるガンマ線吸収率計算等に計算時間のほとんどを使用していることがわかった。このため、この部分のルーチンの並列演算化を行うこととした。

開発手順としては、最初に並列演算可能な大型計算機 V P - 1 0 0 を使用して並列演算化したルーチンを作成し計算時間及び計算精度の評価を行った。その後、作成した F O R T R A N 言語によるルーチンを並列演算プロセッサ (A P - 5 0 0) の開発言語に合せて変換した。

主な並列演算化したルーチンは、関数計算ルーチン、直線と円の交点計算ルーチン等である。並列演算化に伴い、計算条件のうちエネルギーと測定点数をそれぞれ 1 4 個及び 2 5 に固定した。

作成したプログラムについて計算速度を測定した結果、1箇所のスキャニング点について 1 4 核種の解析計算を行った場合、従来 C P U 時間として約 7 分かかっていたものが並列演算化により 1 分 3 0 秒に短縮され約 4 倍高速化できた。計算速度の高速化により、測定システムが効率良く動作するようになった。

さらに、角度スキャニング機構によってガンマ線検出部の配管を望む角度を変えてスキャニング測定する方法に対応した角度スキャニング解析計算プログラムを作成した。解析手法としては、直線スキャニングモードと同じとし、共用できるサブルーチンは共通に使用して作成を行った。

5. 評価試験及び結果

測定システムの基本的動作性能の評価のため、測定システム用ソフトウェアを 2 つの小型計算機にインストールした後、制御性能試験を行うと共に検出器の検出特性を測定するため較正試験を行った。また、測定システムの測定性能を評価するため、一次冷却系汚染配管を模擬した標準較正装置及びガンマ線標準線源等を用いて検出性能評価試験を行った。

5. 1 制御性能試験及び結果

最初に、製作した各構成機器が、現場でのガンマ線スキャニング測定に必要な性能を有していることを確認するため、ガンマ線検出部の冷却特性、検出部装着時のスキャニング部の位置設定特性、電子回路部の電源電圧依存特性等の単体機能試験を行った。最終的に全構成機器を接続し測定システムの動作試験を行った。

1) ガス冷却ガンマ線検出器の冷却特性

実際の測定においてはバックグラウンドを差し引く操作が入るため、解析計算のアルゴリズムを Fig. 4. 11 に示すように、検出器がコリメータ窓を望む角度内についてのみパス計算を行うこととした。また、この角度内の外側に近い部分はパス計算の割り合いを少なくしても解析精度にあまり影響を与えないことがわかったため、コリメータの中心部と外周部とでパス計算の頻度を変えて計算することとした。

2) 解析計算の並列演算化

解析時間をさらに短縮するため並列演算装置を用いた。解析計算プログラムの並列演算化を行うに当たりプログラム開発ユーティリティを使用して解析計算に時間のかかるルーチンの検索を行った。この結果、配管から放出されたガンマ線が検出器に達するまでのパス計算、配管やコリメータ等の吸収体によるガンマ線吸収率計算等に計算時間のほとんどを使用していることがわかった。このため、この部分のルーチンの並列演算化を行うこととした。

開発手順としては、最初に並列演算可能な大型計算機 V P - 1 0 0 を使用して並列演算化したルーチンを作成し計算時間及び計算精度の評価を行った。その後、作成した F O R T R A N 言語によるルーチンを並列演算プロセッサ (A P - 5 0 0) の開発言語に合せて変換した。

主な並列演算化したルーチンは、関数計算ルーチン、直線と円の交点計算ルーチン等である。並列演算化に伴い、計算条件のうちエネルギーと測定点数をそれぞれ 1 4 個及び 2 5 に固定した。

作成したプログラムについて計算速度を測定した結果、1箇所のスキャニング点について 1 4 核種の解析計算を行った場合、従来 C P U 時間として約 7 分かかっていたものが並列演算化により 1 分 3 0 秒に短縮され約 4 倍高速化できた。計算速度の高速化により、測定システムが効率良く動作するようになった。

さらに、角度スキャニング機構によってガンマ線検出部の配管を望む角度を変えてスキャニング測定する方法に対応した角度スキャニング解析計算プログラムを作成した。解析手法としては、直線スキャニングモードと同じとし、共用できるサブルーチンは共通に使用して作成を行った。

5. 評価試験及び結果

測定システムの基本的動作性能の評価のため、測定システム用ソフトウェアを 2 つの小型計算機にインストールした後、制御性能試験を行うと共に検出器の検出特性を測定するため較正試験を行った。また、測定システムの測定性能を評価するため、一次冷却系汚染配管を模擬した標準較正装置及びガンマ線標準線源等を用いて検出性能評価試験を行った。

5. 1 制御性能試験及び結果

最初に、製作した各構成機器が、現場でのガンマ線スキャニング測定に必要な性能を有していることを確認するため、ガンマ線検出部の冷却特性、検出部装着時のスキャニング部の位置設定特性、電子回路部の電源電圧依存特性等の単体機能試験を行った。最終的に全構成機器を接続し測定システムの動作試験を行った。

1) ガス冷却ガンマ線検出器の冷却特性

ガンマ線検出部に用いているガス冷却G e 検出器について、測定現場での冷却作業に必要な特性を得るため、窒素ガスを冷却用ガスとして使用し冷却試験を行った。手順としては、最初にガス圧力を $100 \text{ K g}/\text{cm}^2$ で約40分間冷却を行い使用温度（-190°C程度）まで冷却した後、30~40K g/cm²で冷却温度を維持する。本冷却試験は標準型ガンマ線検出器及び超小型ガンマ線検出器の2種類の検出器について行い、標準型は約50分、超小型は約30分の時間で使用可能状態まで冷却できることを確認した。Fig. 5. 1に標準型及び超小型検出器の冷却特性を示す。

また、液体窒素温度に冷却した後の温度の維持は、約35K g/cm²の圧力で12~15リッター/分のガス流量で維持できることを確認した。

さらに、ガス冷却G e 検出器に印加するバイアス電圧の変化によるガンマ線スペクトルのピーク位置及びピーク面積の変動幅の測定を行った。ガンマ線線源としては¹³²Euを用いガンマ線エネルギーとしては122 keV、780 keV及び1408 keVについて解析を行った。標準型及び超小型検出器についての測定結果をTable 5. 1及びTable 5. 2に示す。標準型については、1300 Vから1700 Vまで変動した場合、ピーク位置については約0.6 keV、ピーク面積については約1.5%の変動幅であった。超小型については、650 Vから800 Vまで変動した場合、ピーク位置については約0.5 keV、ピーク面積については約4.0%の変動幅であった。この結果、バイアス電圧が多少変動しても実用上問題ないことが確認できた。

2) スキャンニング部の位置設定特性

スキャンニング部については、電源に蓄電池を使用することから、装置の電源電圧変動に対するスキャンニング位置設定特性の測定を行った。測定結果をTable 5. 3に示す。この結果、電源電圧が1 Vから13 Vまで変化してもスキャンニング測定に必要な位置設定精度を確保できることを確認した。

3) 電子回路部の電源電圧依存性

現場側装置の超小型電子回路部及びテレメータ・信号処理部への供給電源電圧が変動した場合に対応するため、電子回路の電圧依存性について測定した。この結果、供給電圧が11 Vから13 Vまで電圧が変化しても正常に現場側装置が動作し、制御できることを確認した。また、ガンマ線スペクトル測定にとって重要な特性である増幅部のゲイン変動についても測定した。その結果、Table 5. 4に示すように電源電圧を11 Vから13 Vに変えてゲインの変動幅は約0.05%であり、ガンマ線スペクトル測定には十分な性能であることを確認した。

4) 測定システムの動作試験

垂直移動機構動作試験用配管(20 cm φ)及び水平移動機構動作試験用配管(32 cm φ)を用いて、測定システム全体の動作試験を行った。垂直移動機構あるいは水平移動機構にガンマ線検出部を装着した直線スキャンニング機構を付けて現場側装置を構築しデータ処理側装置によってあらかじめ定めた測定条件によって動作すること試験した。試験の結果、測定システムはあらかじめ入力しておいた測定条件どおりスキャンニング動作及びスペクトル測定・解析動作を行うことを確認した。

垂直移動機構及び水平移動機構の動作試験の様子をPhoto. 5. 1及びPhoto. 5. 2に示す。

5. 2 較正試験及び結果

配管内部放射能の定量を行う際に必要となる標準型及び超小型ガンマ線検出部の絶対ピーク検出効率の較正を行うとともにコリメータの特性測定を行った。

ガンマ線検出部に使用されている2種類のGe検出器の絶対ピーク検出効率特性の測定を行った。ガンマ線源としては、 ^{152}Eu を使用し線源一検出器間距離を10cmに設定して測定した。標準型及び超小型検出器の絶対ピーク検出効率特性をFig. 5. 2に示す。この結果、1.33MeVガンマ線に対する絶対ピーク検出効率は、それぞれ、標準型検出器で 7.49×10^{-5} 及び超小型検出器で 3.93×10^{-5} の値を示した。

また、2種類のGe検出器について、3次元バス計算を行う際のガンマ線入射方向依存性の評価に必要なピーク検出効率の角度依存性の測定を行った。線源一検出器間距離を10cmに固定し中心部からガンマ線源を上部に移動することにより測定を行った。標準型及び超小型検出器についての測定結果をFig. 5. 3及びFig. 5. 4に示す。エネルギーの低い122keVは検出器への入射角度が変わると大きく変化するが、356keV以上のガンマ線についてはあまり変化しないことがわかった。

また、2種類のガンマ線検出器とコリメータと組み合わせてコリメータ特性の測定を行った。標準型及び超小型ガンマ線検出部について行った4種類のガンマ線に対するコリメータ特性の測定結果をFig. 5. 5及びFig. 5. 6に示す。2つのガンマ線検出部ともコリメータ窓の縦幅を0.2cmから1cmまで変化させた場合、ほぼ、コリメータ窓の縦幅に比例して検出効率が変化することが確認できた。

5. 3 検出性能試験及び結果

製作した測定システムを用いて配管内部の放射能を配管外側から非破壊的に測定し核種ごとに定量できることを確認するため、原子炉1次冷却系の放射能汚染配管を模擬した標準較正装置を用いて検出性能試験を行った。

製作した20cm ϕ 汚染模擬配管を取付けた標準較正装置の構造図をFig. 5. 7に示す。汚染模擬配管の内部には、Table 5. 5に示すような放射能を沈着状放射能及び水溶液状放射能として封入した。また、この汚染模擬配管は水溶液レベルの設定を可能するために、中央部分に上部に穴の空いた仕切板を設けた。片側を水溶液の貯蔵場所とし仕切板から出る水溶液の量を配管の軸方向と回転方向を調整することにより水溶液レベルを設定する。

また、製作した40cm ϕ 汚染模擬配管を取付けた標準較正装置も直径が40cm ϕ と約2倍となつたことを除いて同様の構造である。内部に封入した放射能量をTable 5. 5に示す。

測定試験は、測定システムの現場側装置を、JPD-Rダンプコンデンサ建家内の実験室（管理区域）に設置した標準較正装置に装着後、約60m離れた倉庫内実験室（非管理区域）に置かれたデータ処理側装置を用いてテレメータにより遠隔操作することによって行った。20cm ϕ 汚染模擬配管を収めた標準較正装置に角度スキャニング機構を装着して測定試験を行っている様子をPhoto. 5. 3に示す。以下に種々の測定条件下における試験結果を示す。

1) スキャニング機構及び検出器依存性

20 cm ϕ 汚染模擬配管について、直線スキャンニング機構及び角度スキャンニング機構を用いて配管内部放射能の測定試験を行った。測定に使用したガンマ線検出部は標準型及び超小型の2種類である。

汚染模擬配管の水溶液線源の水面レベルを配管の丁度半分に当たる 0 cm (基点) に設定しガンマ線スキャンニング測定を行った。直線スキャンニング測定については、-12 cm から 12 cm まで 2 cm おきに測定を行った。また、角度スキャンニング測定については、-30 度から 30 度まで 5 度おきに測定を行った。標準型及び超小型検出器をそれぞれ用いて測定した配管内部の沈着状放射能及び水溶液状放射能の定量結果を配管に封入した値と比較した結果を Table 5, 6 に示す。スキャンニング方法別に、試験結果を比較すると、直線スキャンニング測定及び角度スキャンニング測定ともほぼ同じ定量結果が得られた。また、検出器別に定量結果を検討すると、沈着状放射能については約 1% 以下の誤差で、また、水溶液状放射能については一部を除いて約 20% 以下の誤差で測定できることがわかった。一部で測定誤差が大きい原因是、ガンマ線の計数が少なく統計誤差が大きいためと考えられる。以上の試験の結果、スキャンニング方法 (直線スキャンニング法及び角度スキャンニング法) を変えてもかつガンマ線検出器の大きさが異なってもほぼ同じ定量結果を得ることができることを確認した。

2) 配管内水位レベル依存性

20 cm ϕ 汚染模擬配管を収めた標準較正装置に標準型ガンマ線検出器を装着した直線スキャンニング機構を取り付け、配管内部の水面レベルが配管の中心部を原点として、-10 cm (水溶液がない場合)、-5 cm、0 cm 及び 5 cm の 4 種類の場合について配管内部放射能の測定を行った。測定は配管の中心部を原点として -12 cm の位置から +12 cm の位置まで配管軸の鉛直方向に平行な直線に沿って、0, 5 cm あるいは 1 cm 間隔で行った。配管内部放射能の解析ソフトウェアを用いて、上記測定結果を解析し標準較正装置に封入した沈着状及び水溶液状の放射能濃度を求めた。4 種類の水溶液レベルに対する ^{60}Co 及び ^{152}Eu についての測定結果をまとめて Table 5, 7 に示す。水溶液レベルが変化しても両核種とも封入値とほぼ一致することがわかった。以上の試験の結果、① 水溶液レベルが変化しても沈着状放射能及び水溶液状放射能を分離し定量でき、かつ② 配管内部に封入した沈着状放射能及び水溶液状放射能をガンマ線エネルギーが異なっても 5 ~ 15% の誤差で測定できることを確認した。

3) 配管直径依存性

配管直径が変化した場合の特性の評価を行うため、40 cm ϕ 汚染模擬配管を収めた標準較正装置に標準型ガンマ線検出器を装着した直線スキャンニング機構を取り付け、配管内部の水面レベルが、配管の中心を原点として -20 cm (水溶液がない場合)、-10 cm 及び 0 cm の 3 種類の場合について配管内部放射能の測定を行った。測定は、配管の中心部を原点として -22 cm の位置から +22 cm の位置まで配管軸の鉛直方向に沿って、1 cm あるいは 2 cm 間隔で測定を行った。最初に、水溶液線源がない場合のスキャンニング測定結果について解析計算を行った。 ^{152}Eu 及び ^{60}Co の沈着状放射能濃度を求めた結果を Table 5, 8 に示す。各ガンマ線エネルギーごとに検討すると配管内部にあらかじめ封入した値と良く一致していることがわかる。定量解析計算によって求めた定量値は配管内に封入した量と 15% 程度の誤差で一致していることを確認した。次に、水溶液がない場合、水面レベルが 10 cm 及び 0 cm の場合の測定結果について検討を行った。 ^{152}Eu については 34

4 K e V、 ^{60}Co については1 3 3 2 K e Vのガンマ線に対する定量計算結果をTable 5. 9に示す。2 0 c m ϕ 汚染模擬配管の場合と同様に、水溶液レベルが変化しても沈着状放射能及び水溶液状放射能を分離して定量できることがわかった。この結果、配管直径が異なる場合でも精度良く定量測定が可能であることを確認できた。

6. 結 論

配管内部の沈着状、水溶液状及びガス状放射能をそれぞれ状態毎に分離し非破壊的に定量する測定手法を実際に現場において適用可能とした配管内部放射能非破壊定量測定システムを開発した。本測定システムは、検出部小型化の重要なポイントであるガス冷却G e 検出器の実用化と超小型電子回路の開発、高速で信頼性の高いテレメータ装置の開発及び計算機による自動化等の技術開発を行うことにより実現した。測定システムの性能試験を行った結果、配管内部放射能の非破壊測定システムとして十分実用となる性能を有することが確認できた。また、原子炉一次系汚染模擬配管による検出性能試験の結果、1 0 ~ 2 0 %の誤差で沈着状放射能と水溶液状放射能とを分離して定量できることを確認した。

謝 辞

本技術開発研究を進める上で色々な御援助をいただきましたバックエンド技術部（旧動力炉試験炉部）の方々に深く感謝致します。また、本報告をまとめるにあたって有効な議論をしていただくと共に励ましを与えていただきました原子炉工学部原子炉計測研究室の八木秀之氏及び荒克之氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Hanson, D. L.: Results of the general atomic deposition loop program, GA-A 13140, (1976).
- 2) Radiation Level Assessment of the DRESDEN-1 Decontamination Pilot Loop, HCP/T4014-01, UC-78(1978).
- 3) Katagiri, M., et al.: JAERI-M 7579, (in Japanese), (1978).
- 4) Uchida, S., et al.: Nucl. Sci. Eng., 69, 78, (1979).
- 5) Terada, H., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 17[3], 225, (1980).
- 6) Terada, H., et al.: J. At. Energy Soc. Japan, 23[10], 762, (in Japanese), (1981).
- 7) Katagiri, M., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 29[9], 831, (1992).
- 8) Katagiri, M., et al.: JAERI-M 82-114, 103, (1982).

4 K e V、 ^{60}Co については1332 K e Vのガンマ線に対する定量計算結果をTable 5. 9に示す。20 cm ϕ 汚染模擬配管の場合と同様に、水溶液レベルが変化しても沈着状放射能及び水溶液状放射能を分離して定量できることがわかった。この結果、配管直径が異なる場合でも精度良く定量測定が可能であることを確認できた。

6. 結 論

配管内部の沈着状、水溶液状及びガス状放射能をそれぞれ状態毎に分離し非破壊的に定量する測定手法を実際に現場において適用可能とした配管内部放射能非破壊定量測定システムを開発した。本測定システムは、検出部小型化の重要なポイントであるガス冷却G e 検出器の実用化と超小型電子回路の開発、高速で信頼性の高いテレメータ装置の開発及び計算機による自動化等の技術開発を行うことにより実現した。測定システムの性能試験を行った結果、配管内部放射能の非破壊測定システムとして十分実用となる性能を有することが確認できた。また、原子炉一次系汚染模擬配管による検出性能試験の結果、10～20%の誤差で沈着状放射能と水溶液状放射能とを分離して定量できることを確認した。

謝 辞

本技術開発研究を進める上で色々な御援助をいただきましたバックエンド技術部（旧動力炉試験炉部）の方々に深く感謝致します。また、本報告をまとめるにあたって有効な議論をしていただくと共に励ましを与えていただきました原子炉工学部原子炉計測研究室の八木秀之氏及び荒克之氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Hanson, D. L.: Results of the general atomic deposition loop program, GA-A 13140, (1976).
- 2) Radiation Level Assessment of the DRESDEN-1 Decontamination Pilot Loop, HCP/T4014-01, UC-78(1978).
- 3) Katagiri, M., et al.: JAERI-M 7579, (in Japanese), (1978).
- 4) Uchida, S., et al.: Nucl. Sci. Eng., 69, 78, (1979).
- 5) Terada, H., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 17[3], 225, (1980).
- 6) Terada, H., et al.: J. At. Energy Soc. Japan, 23[10], 762, (in Japanese), (1981).
- 7) Katagiri, M., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 29[9], 831, (1992).
- 8) Katagiri, M., et al.: JAERI-M 82-114, 103, (1982).

4 K e V、 ^{60}Co については1 3 3 2 K e Vのガンマ線に対する定量計算結果をTable 5. 9に示す。2 0 c m ϕ 汚染模擬配管の場合と同様に、水溶液レベルが変化しても沈着状放射能及び水溶液状放射能を分離して定量できることがわかった。この結果、配管直径が異なる場合でも精度良く定量測定が可能であることを確認できた。

6. 結 論

配管内部の沈着状、水溶液状及びガス状放射能をそれぞれ状態毎に分離し非破壊的に定量する測定手法を実際に現場において適用可能とした配管内部放射能非破壊定量測定システムを開発した。本測定システムは、検出部小型化の重要なポイントであるガス冷却G e 検出器の実用化と超小型電子回路の開発、高速で信頼性の高いテレメータ装置の開発及び計算機による自動化等の技術開発を行うことにより実現した。測定システムの性能試験を行った結果、配管内部放射能の非破壊測定システムとして十分実用となる性能を有することが確認できた。また、原子炉一次系汚染模擬配管による検出性能試験の結果、1 0 ~ 2 0 %の誤差で沈着状放射能と水溶液状放射能とを分離して定量できることを確認した。

謝 辞

本技術開発研究を進める上で色々な御援助をいただきましたバックエンド技術部（旧動力炉試験炉部）の方々に深く感謝致します。また、本報告をまとめるにあたって有効な議論をしていただくと共に励ましを与えていただきました原子炉工学部原子炉計測研究室の八木秀之氏及び荒克之氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Hanson, D. L.: Results of the general atomic deposition loop program, GA-A 13140, (1976).
- 2) Radiation Level Assessment of the DRESDEN-1 Decontamination Pilot Loop, HCP/T4014-01, UC-78(1978).
- 3) Katagiri, M., et al.: JAERI-M 7579, (in Japanese), (1978).
- 4) Uchida, S., et al.: Nucl. Sci. Eng., 69, 78, (1979).
- 5) Terada, H., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 17[3], 225, (1980).
- 6) Terada, H., et al.: J. At. Energy Soc. Japan, 23[10], 762, (in Japanese), (1981).
- 7) Katagiri, M., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 29[9], 831, (1992).
- 8) Katagiri, M., et al.: JAERI-M 82-114, 103, (1982).

4 K e V、 ^{60}Co については1 3 3 2 K e Vのガンマ線に対する定量計算結果をTable 5. 9に示す。2 0 c m ϕ 汚染模擬配管の場合と同様に、水溶液レベルが変化しても沈着状放射能及び水溶液状放射能を分離して定量できることがわかった。この結果、配管直径が異なる場合でも精度良く定量測定が可能であることを確認できた。

6. 結 論

配管内部の沈着状、水溶液状及びガス状放射能をそれぞれ状態毎に分離し非破壊的に定量する測定手法を実際に現場において適用可能とした配管内部放射能非破壊定量測定システムを開発した。本測定システムは、検出部小型化の重要なポイントであるガス冷却G e 検出器の実用化と超小型電子回路の開発、高速で信頼性の高いテレメータ装置の開発及び計算機による自動化等の技術開発を行うことにより実現した。測定システムの性能試験を行った結果、配管内部放射能の非破壊測定システムとして十分実用となる性能を有することが確認できた。また、原子炉一次系汚染模擬配管による検出性能試験の結果、1 0 ~ 2 0 %の誤差で沈着状放射能と水溶液状放射能とを分離して定量できることを確認した。

謝 辞

本技術開発研究を進める上で色々な御援助をいただきましたバックエンド技術部（旧動力炉試験炉部）の方々に深く感謝致します。また、本報告をまとめるにあたって有効な議論をしていただくと共に励ましを与えていただきました原子炉工学部原子炉計測研究室の八木秀之氏及び荒克之氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Hanson, D. L.: Results of the general atomic deposition loop program, GA-A 13140, (1976).
- 2) Radiation Level Assessment of the DRESDEN-1 Decontamination Pilot Loop, HCP/T4014-01, UC-78(1978).
- 3) Katagiri, M., et al.: JAERI-M 7579, (in Japanese), (1978).
- 4) Uchida, S., et al.: Nucl. Sci. Eng., 69, 78, (1979).
- 5) Terada, H., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 17[3], 225, (1980).
- 6) Terada, H., et al.: J. At. Energy Soc. Japan, 23[10], 762, (in Japanese), (1981).
- 7) Katagiri, M., et al.: J. Nucl. Sci. Technol., 29[9], 831, (1992).
- 8) Katagiri, M., et al.: JAERI-M 82-114, 103, (1982).

Table 3.1(a) Command list for controlling in-situ-side system

Command	Parameter	Content	Comment
AB	None	Buzzer	
AC	Beep type	Beep	
BD	Position(mm)	Move to minus position	Angular/Straight
BF	None	Pulse motor power OFF	
BJ	Type No	Inquire scanning type	Angular:1,Straight:2
BN	Position(mm)	Move to plus position	Angular/Straight
CD	None	Search center position from plus position	
CU	None	Search center position from minus position	
DO	Voltage	Read circuit voltage	
DF	Flow rate	Read gas flow rate	
DH	Voltage	Read detector bias voltage	
DJ	Type No	Read detector type	
DM	Voltage	Read pulse motor voltage	
DO	Voltage	Read preamplifier output voltage	
DP	pressure	Read gas pressure	
DT	Temperature	Read detector temperature	
FF	None	Gas supply circuit power OFF	
FN	None	Gas supply circuit power OFF	
HD	Voltage	Set detector bias voltage	
HF	None	Detector bias voltage OFF	
HN	None	Detector bias voltage ON	
JO	None	Confirm basic position of positioning mechanism	
MF	None	Motor battery OFF	
MN	None	Motor battery ON	
MC	None	Microcomputer memory clear	
MD	Status	Read Microcomputer status	
MG	None	Microcomputer reset	
MP	None	MCA timer stop	
MR	None	MCA timer reset	
MS	None	MCA timer start	
MT	Time(sec)	Set MCA timer	

Table 3.1(b) Command list for controlling in-situ-side system

Command	Parameter	Content	Comment
NB	Distance	Read moving distance of angular or straight scanning	
NS	Distance	Read moving distance of collimator	
NZ	Distance	Read moving distance of horizontal or vertical positioning mechanism	
OF	None	Set OFF-line mode	
ON	None	Set ON-line mode	
PP	Parity number	Read PROM parity check	
PS	Sum check	Read PROM sum check	
QA	Message	Read message from remote terminal device	
QD	Status	Read motor status	
QM	Message	Output Message to remote terminal device	
SC	None	Confirm shutting collimator window	
SD	Length	Shut collimator window	
SF	None	Collimator motor power OFF	
SN	None	Collimator motor power ON	
SU	Length	Open collimator window	
TA	Pulse width	Set pulse motor drive pulse width for angular scanning mechanism	
TL	Pulse width	Set pulse motor drive pulse width for straight scanning mechanism	
TS	Pulse width	Set pulse motor drive pulse width for collimator	
UU	Unit number	Read unit number	
UN	Unit number	Set unit number	
X0	Position	Read position of collimator	
X1	Position	Read position of angular scanning mechanism	
X2	Position	Read position of straight scanning mechanism	
X3	Position	Read position of horizontal positioning mechanism	
X4	Position	Read position of vertical positioning mechanism	
ZD	Distance	Move to minus position of horizontal or vertical positioning mechanism	
ZF	None	DC motor OFF	
ZJ	Type	Read mechanism type	
ZN	None	DC motor ON	
ZU	Distance	Move to plus position of horizontal or vertical positioning mechanism	

Table 5.1 Dependency of gamma-ray peak position and counting rate on detector bias voltage for standard-type Ge detector

Energy (keV)	Detector bias voltage (V)							
	1300 V		1500 V		1700 V		1900 V	
	Peak position (keV)	Relative counting rate (cps)						
122	-0.12	1.010	0.00	1.000	0.12	1.015	0.39	1.005
780	-0.30	0.985	0.00	1.000	0.61	1.000	1.83	0.986
1408	-0.74	1.002	0.00	1.000	0.94	0.984	3.11	1.017

Table 5.2 Dependency of gamma-ray peak position and counting rate on detector bias voltage for small-type Ge detector

Energy (keV)	Detector bias voltage (V)							
	650 V		700 V		750 V		800 V	
	Peak position (keV)	Relative counting rate (cps)						
122	0.04	0.994	0.00	1.000	0.04	0.993	0.04	0.994
778	0.47	1.037	0.00	1.000	0.57	1.005	0.02	1.017
1408	-0.54	0.987	0.00	1.000	0.69	1.031	0.02	1.023

Table 5.3 Characteristics of positioning devices and scanning devices as function of operation voltage

Collimator Type	Voltage	Vertical posit.		Horizontal posit.		Straight scan.		Angular scan.	
		Positioning error	Speed	Positioning error	Speed	Positioning error	Speed	Positioning error	Speed
Standard	12 V	-2.2	0.97	-7.4	1.34	-0.5	1.56	-0.5	0.39
	11 V	-0.5	0.83	-7.7	1.22	-0.5	1.56	-0.5	0.39
	10 V	-0.5	0.68	-8.0	1.02	-0.5	1.56	-0.5	0.39
	9 V	Not move		Not move		-0.5	1.56	-0.5	0.39
Small	12 V	3.3	0.92	-0.86	1.56	-0.5	1.56	-0.5	0.38
	11 V	2.8	0.84	-7.2	1.33	-0.5	1.56	-0.5	0.38
	10 V	3.0	0.68	-7.1	1.09	-0.5	1.56	-0.5	0.38
	9 V	Not move		Not move		-0.5	1.56	-0.5	0.38

Table 5.4 Dependency of gain stability of electronic circuits on operation voltage

Circuit Voltage	11.0 V	11.5 V	12.0 V	12.5 V	13.0 V
Peak channel	4068.04	4068.40	4068.40	4068.53	4068.64

Table 5.5 Radioactivity of plateout and liquid contained in 20cm ϕ and 40cm ϕ mock-up pipe

State	Nuclide	Radioactivity in 20cm ϕ pipe	Radioactivity in 40cm ϕ pipe
Plateout	^{152}Eu	8621 Bq/cm 2	4033 Bq/cm 2
	^{60}Co	3145 Bq/cm 2	1591 Bq/cm 2
Liquid	^{152}Eu	377 Bq/cm 3	89 Bq/cm 3
	^{60}Co	278 Bq/cm 3	70 Bq/cm 3
	^{22}Na	137 Bq/cm 3	34 Bq/cm 3
	^{137}Cs	411 Bq/cm 3	103 Bq/cm 3
	^{133}Ba	374 Bq/cm 3	93 Bq/cm 3

Table 5.6 Separation performance between plateout and liquid radioactivity by measuring system

Scanning type	Detector type	Nuclide	Energy	Plateout radioactivity (Bq/cm 2)			Liquid radioactivity (Bq/cm 3)		
				Measured	Contained	Error	Measured	Contained	Error
Straight scan.	Standard	^{60}Co	1332	2442	2701	-12.0%	215	240	-10.5%
		^{152}Eu	1408	7881	8066	-2.3%	318	351	-9.5%
Angular scan.	Standard	^{60}Co	1332	2627	2701	-2.8%	273	240	+13.7%
		^{152}Eu	1408	9398	8066	+16.5%	314	351	-10.6%
	Small	^{60}Co	1332	2442	2701	-12.0%	196	240	-18.4%
		^{152}Eu	1408	8399	8066	+4.1%	414	351	+17.9%

Table 5.7 Dependency of measured radioactivity on liquid level of contaminated pipe

Liquid level (cm)	^{152}Eu (344 keV)				^{60}Co (1332 keV)			
	Plateout radioactivity (Bq/cm ²)		Liquid radioactivity (Bq/cm ³)		Plateout radioactivity (Bq/cm ²)		Liquid radioactivity (Bq/cm ³)	
	Measured	Error	Measured	Error	Measured	Error	Measured	Error
5	7659	-11.2%	463	+22.8%	3108	-1.2%	215	-22.4%
0	8288	-3.9%	458	+21.4%	2701	-14.2%	226	-18.5%
-5	8806	+2.1%	288	-23.7%	2627	-16.5%	277	0.0%
-10	7548	-12.5%	-	-	2812	-10.6%	-	-
Contained	8621		377		3145		277	

Table 5.8 Dependency of measured radioactivity on gamma-ray energy

Nuclide	Energy (keV)	Plateout radioactivity (Bq/cm ²)		
		Measured	Error	Contained
^{152}Eu	344	4514	+5.2%	4292
	778	4588	+6.9%	
	964	5069	+18.1	
	1408	4625	+7.8%	
^{60}Co	1173	1480	-4.8%	1554
	1332	1591	+2.3%	

Table 5.9 Separation performance between plateout and liquid radioactivity in 40cmφ mock-up pipe

Liquid level (cm)	^{152}Eu (344 keV)				^{60}Co (1332 keV)			
	Plateout radioactivity (Bq/cm ²)		Liquid radioactivity (Bq/cm ³)		Plateout radioactivity (Bq/cm ²)		Liquid radioactivity (Bq/cm ³)	
	Measured	Error	Measured	Error	Measured	Error	Measured	Error
0	4403	+9.2%	103	+15.7%	1591	0.0%	52	-25.8%
-10	4181	+3.7%	-	-	1554	-2.4%	-	-
-20	4736	+17.4%	-	-	1554	-2.4%	-	-
Contained	4033		89		1591		70	

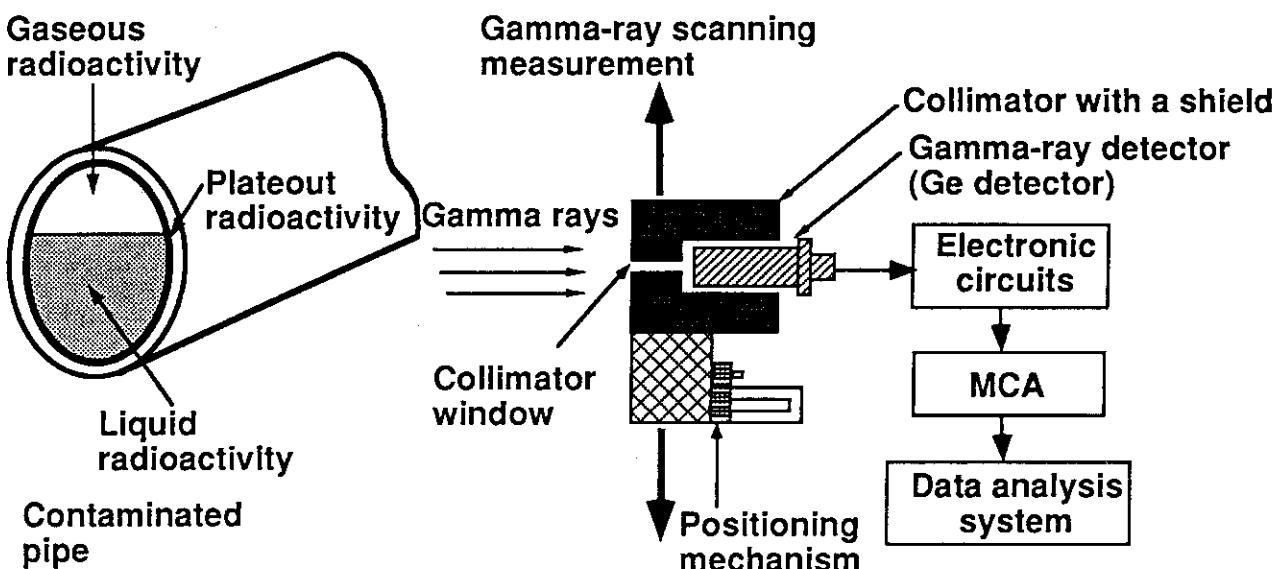


Fig. 2.1 Concept of nondestructive and quantitative method for measuring plateout, liquid and gaseous radioactivity in a contaminated pipe

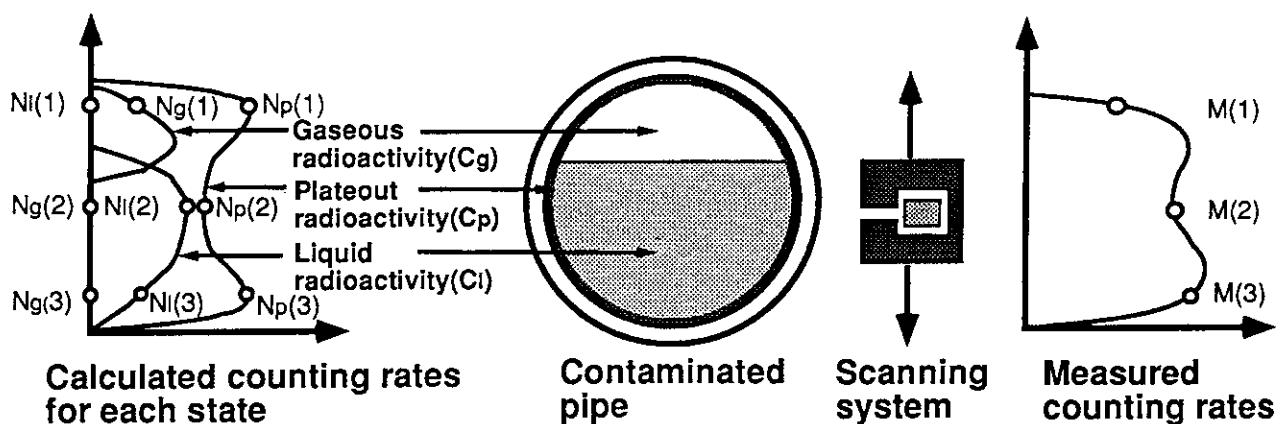


Fig. 2.2 State-separation method for separately qualifying radioisotopic concentrations of three states in a contaminated pipe

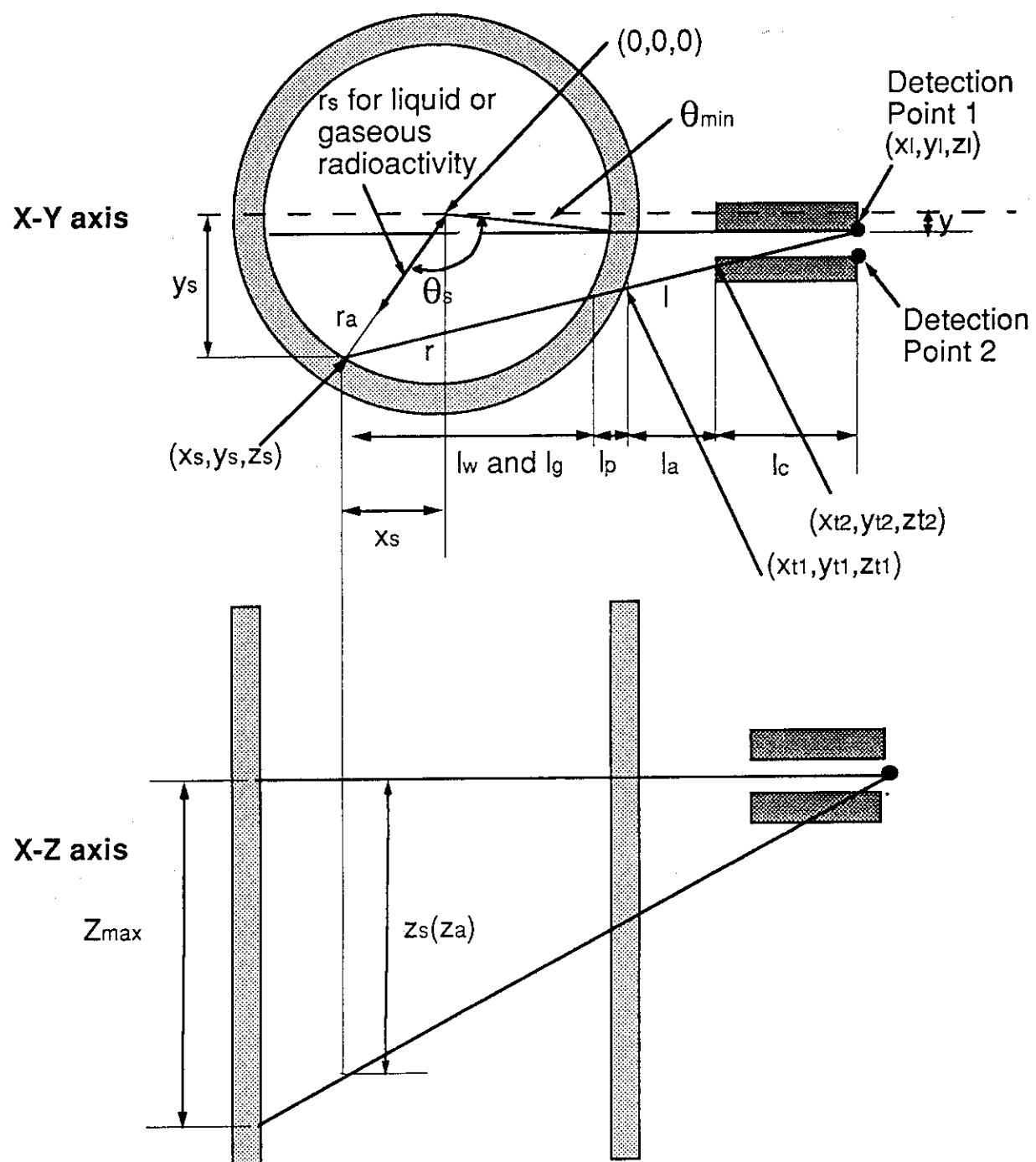
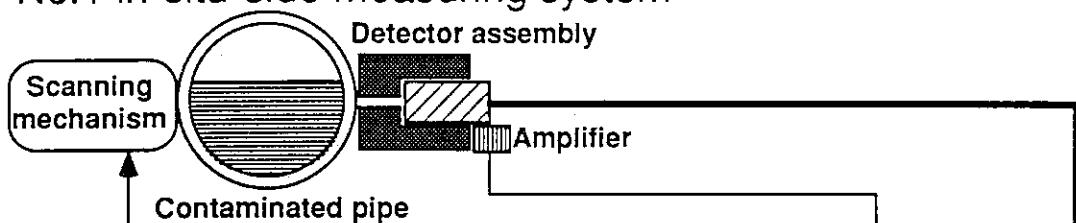
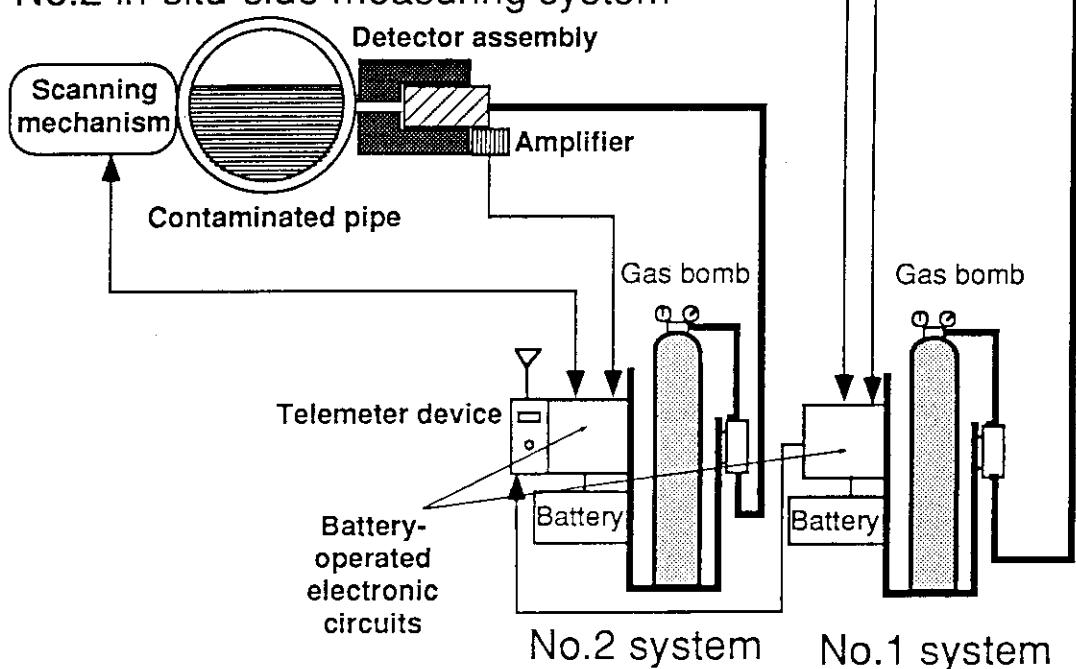


Fig. 2.3 Calculation model for state-separation method

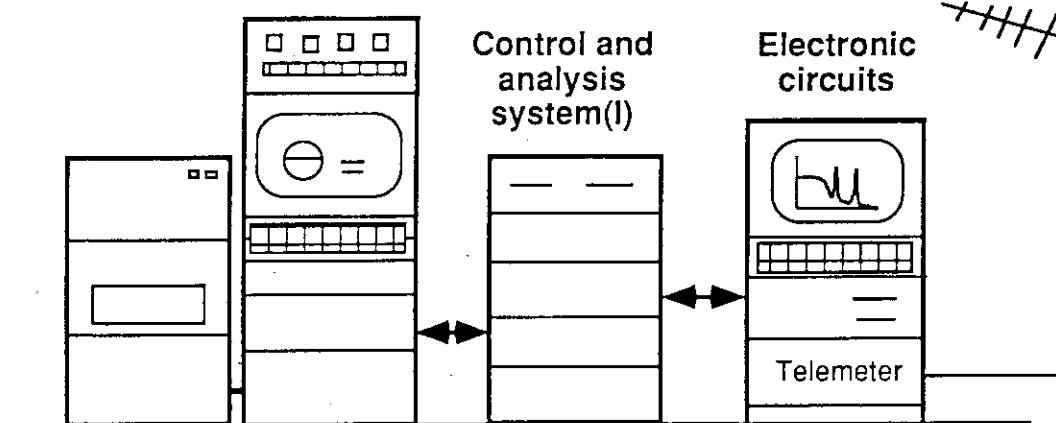
No.1 in-situ-side measuring system



No.2 in-situ-side measuring system



Control and analysis system(II)



Data-processing side System

Fig. 3.1 Schematic diagram of measuring system

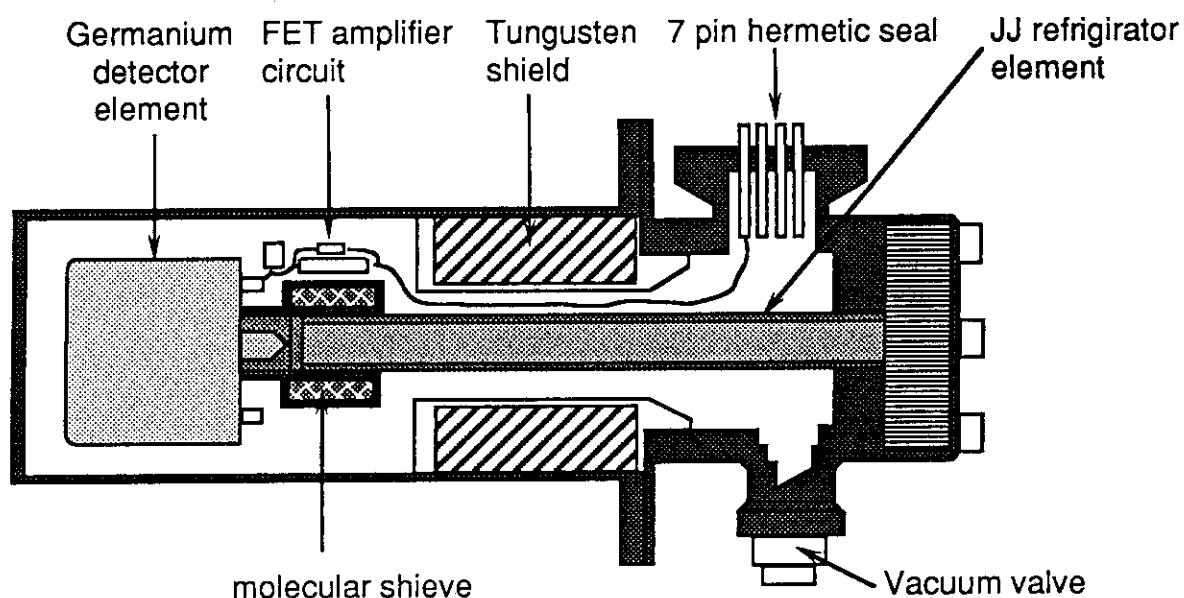


Fig. 3.2 Structure of gas-cooled Ge detector

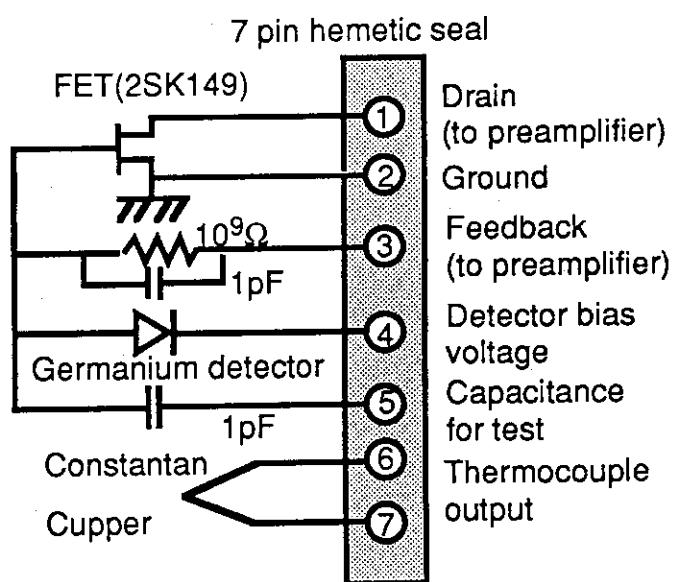


Fig. 3.3 Block diagram of first amplifier circuit in preamplifier

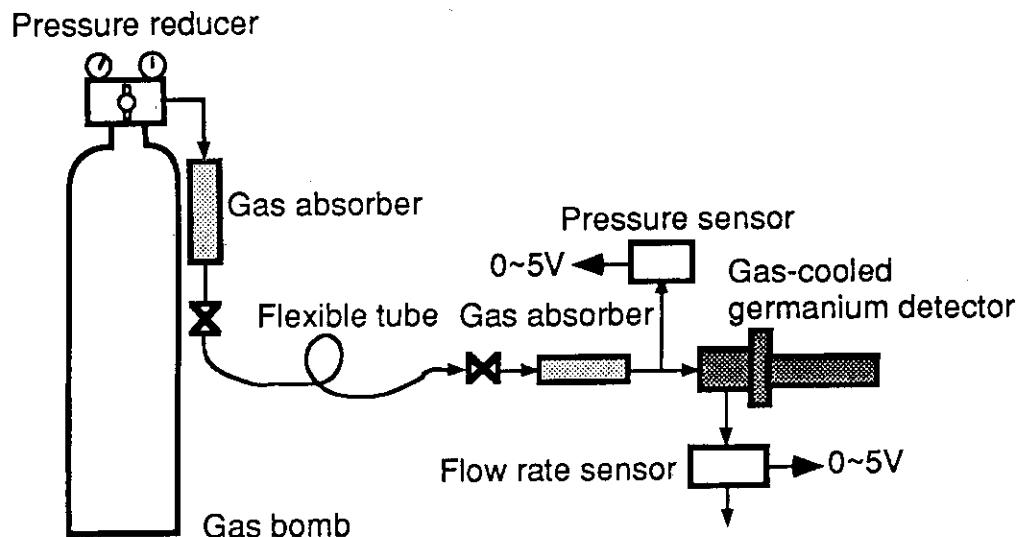


Fig. 3.4 Block diagram of high pressure gas supply system used for gas-cooled Ge detector

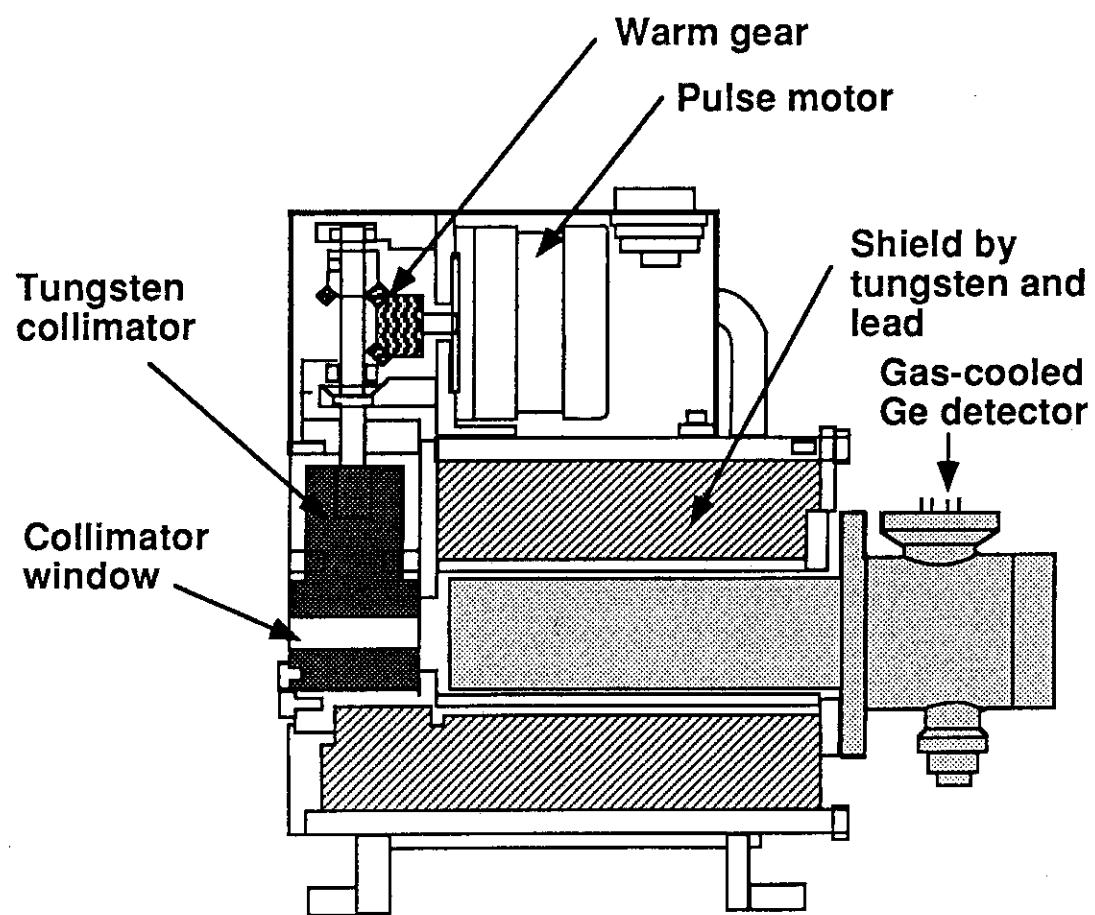


Fig. 3.5 Structure of collimator

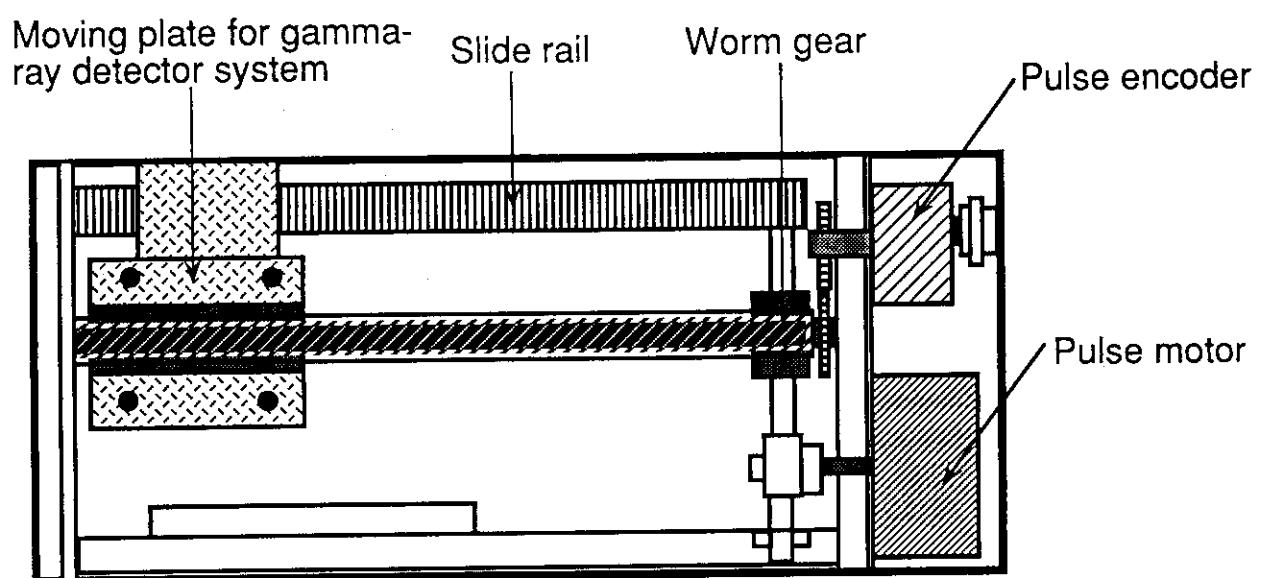


Fig. 3.6 Structure of straight scanning mechanism

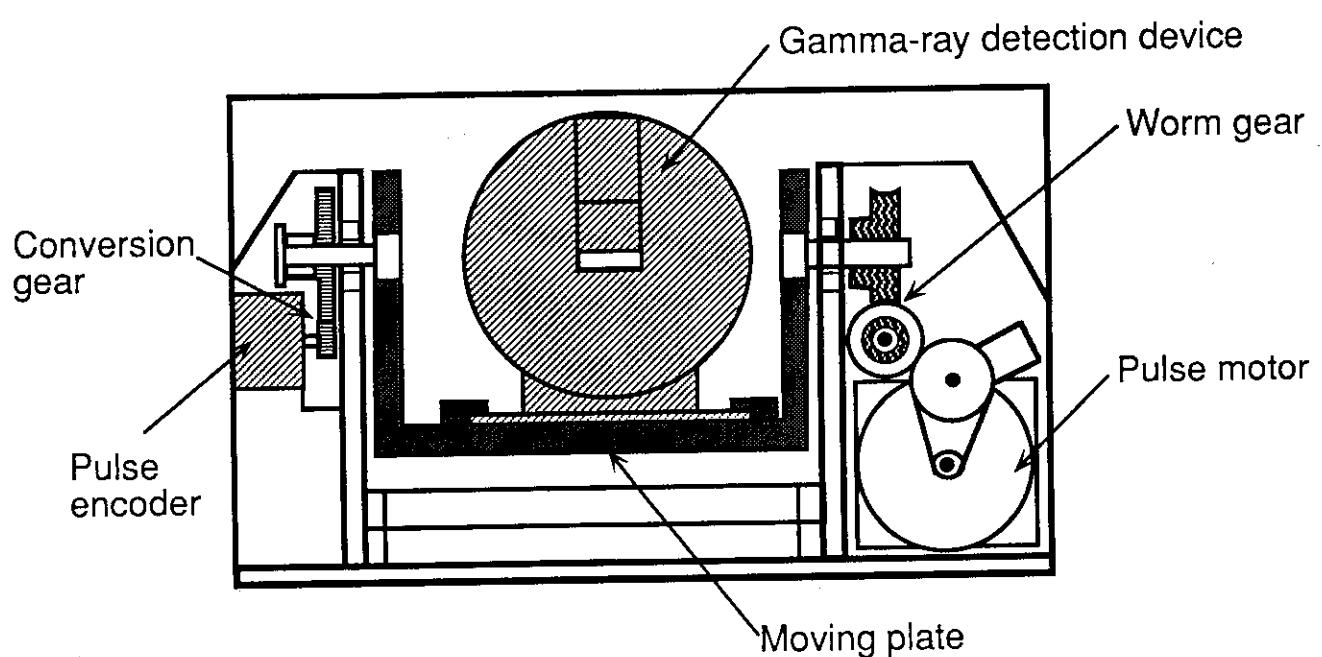


Fig. 3.7 Structure of angular scanning mechanism

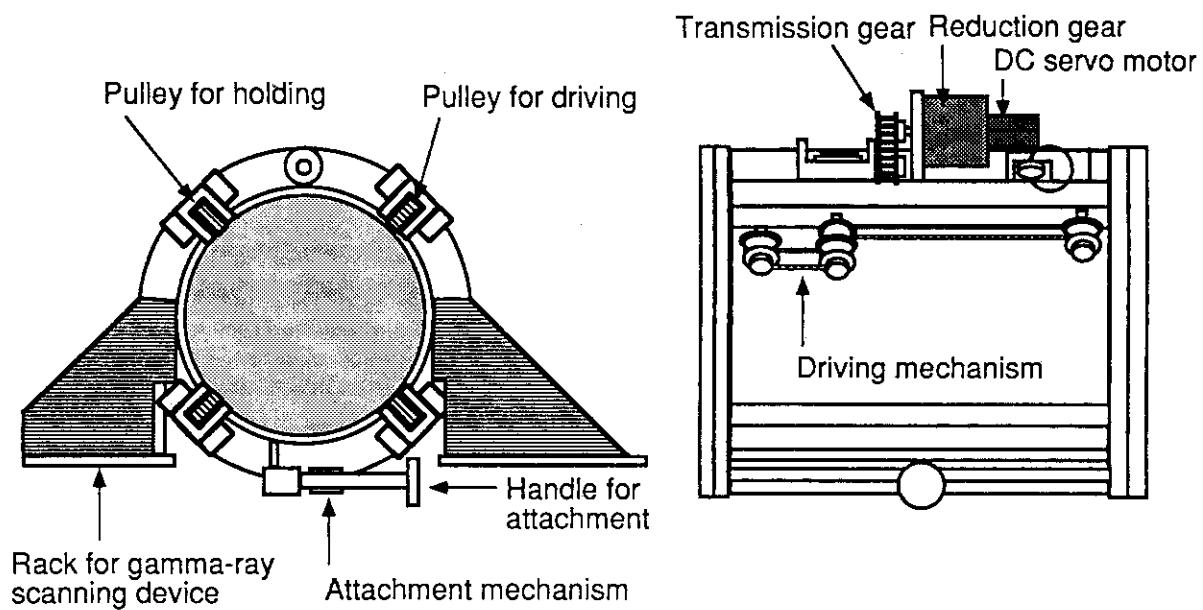
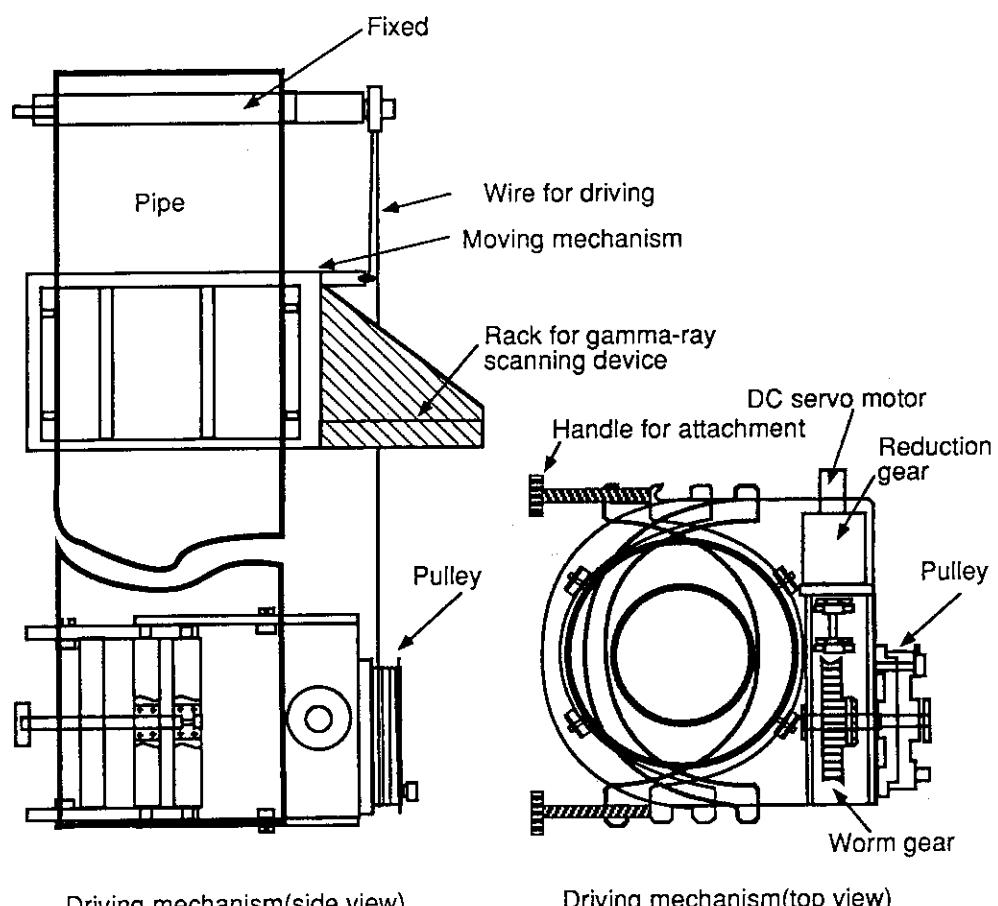


Fig. 3.8 Structure of horizontal positioning mechanism



Driving mechanism(side view)

Driving mechanism(top view)

Fig. 3.9 Structure of vertical positioning mechanism

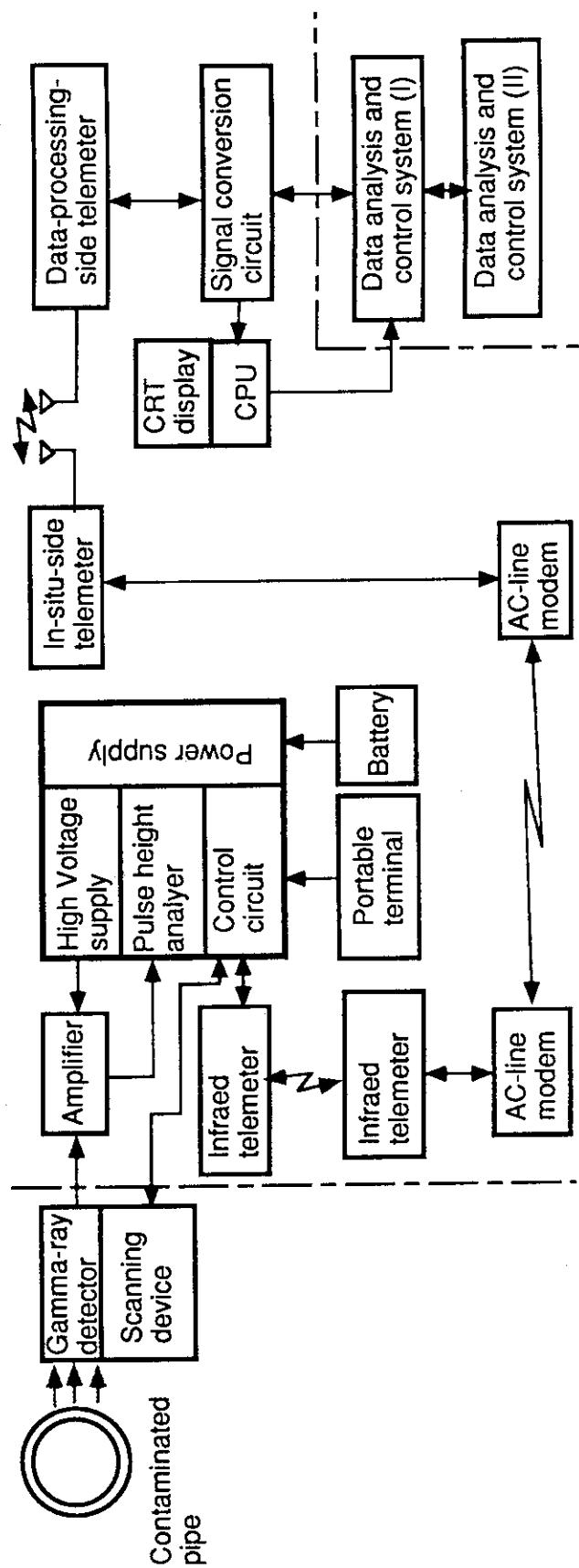


Fig. 3.10 Block diagram of electronic circuits

<現場側ロックダイアグラム>

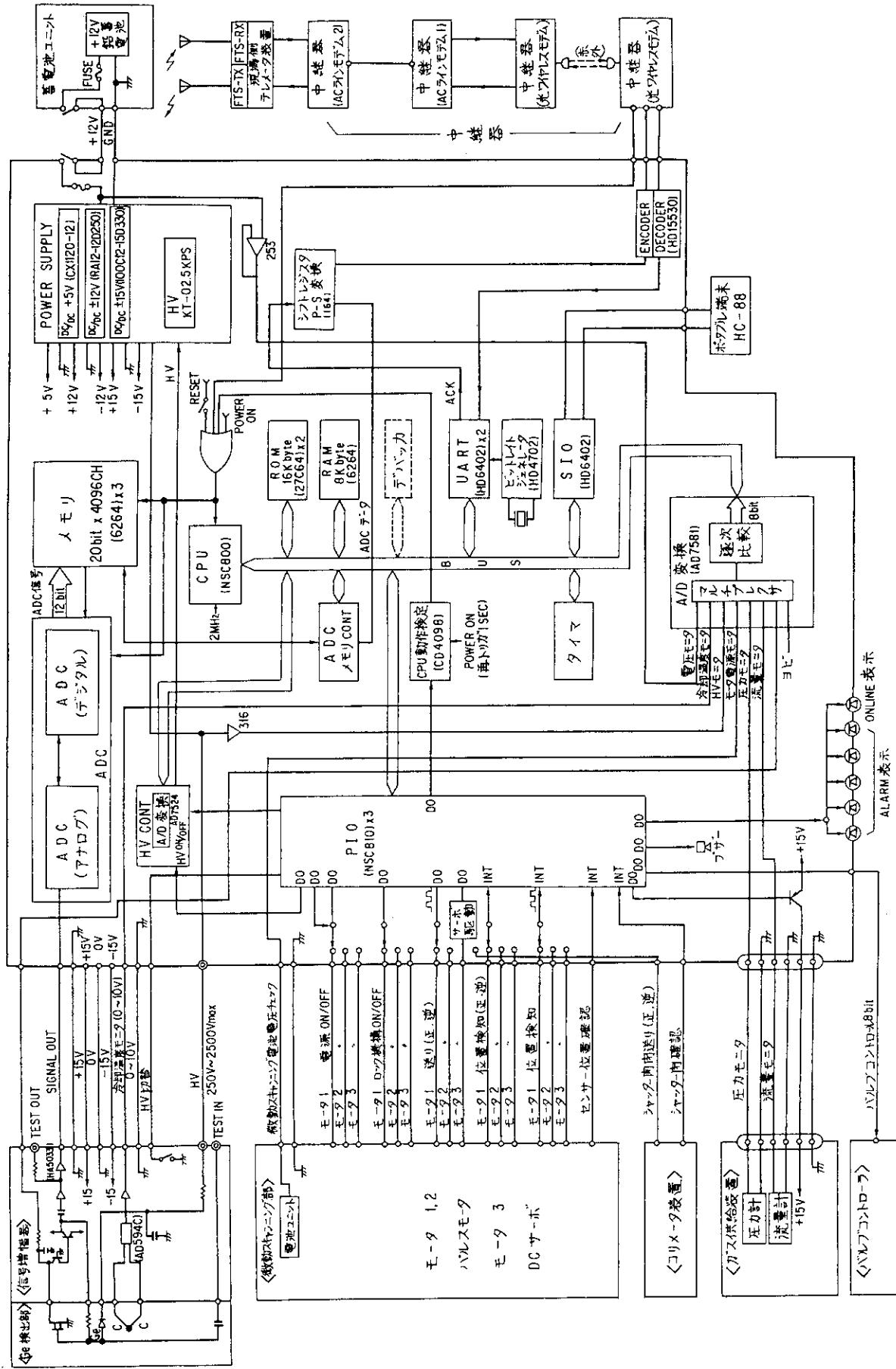


Fig. 3.11 Block diagram of in-situ side electronic circuits

<データ処理側プログラム>

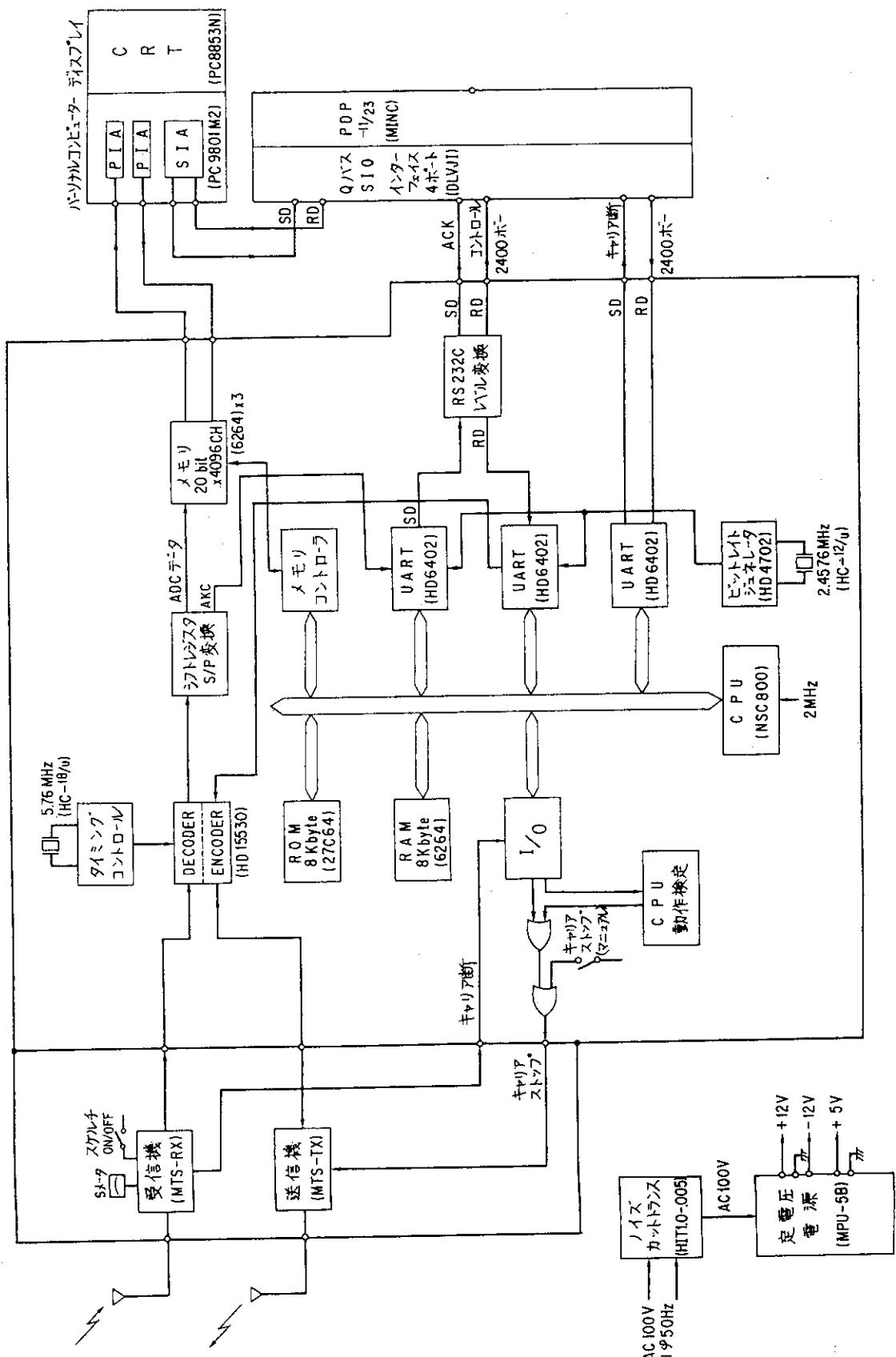


Fig. 3.12 Block diagram of data-processing-side electronic circuits

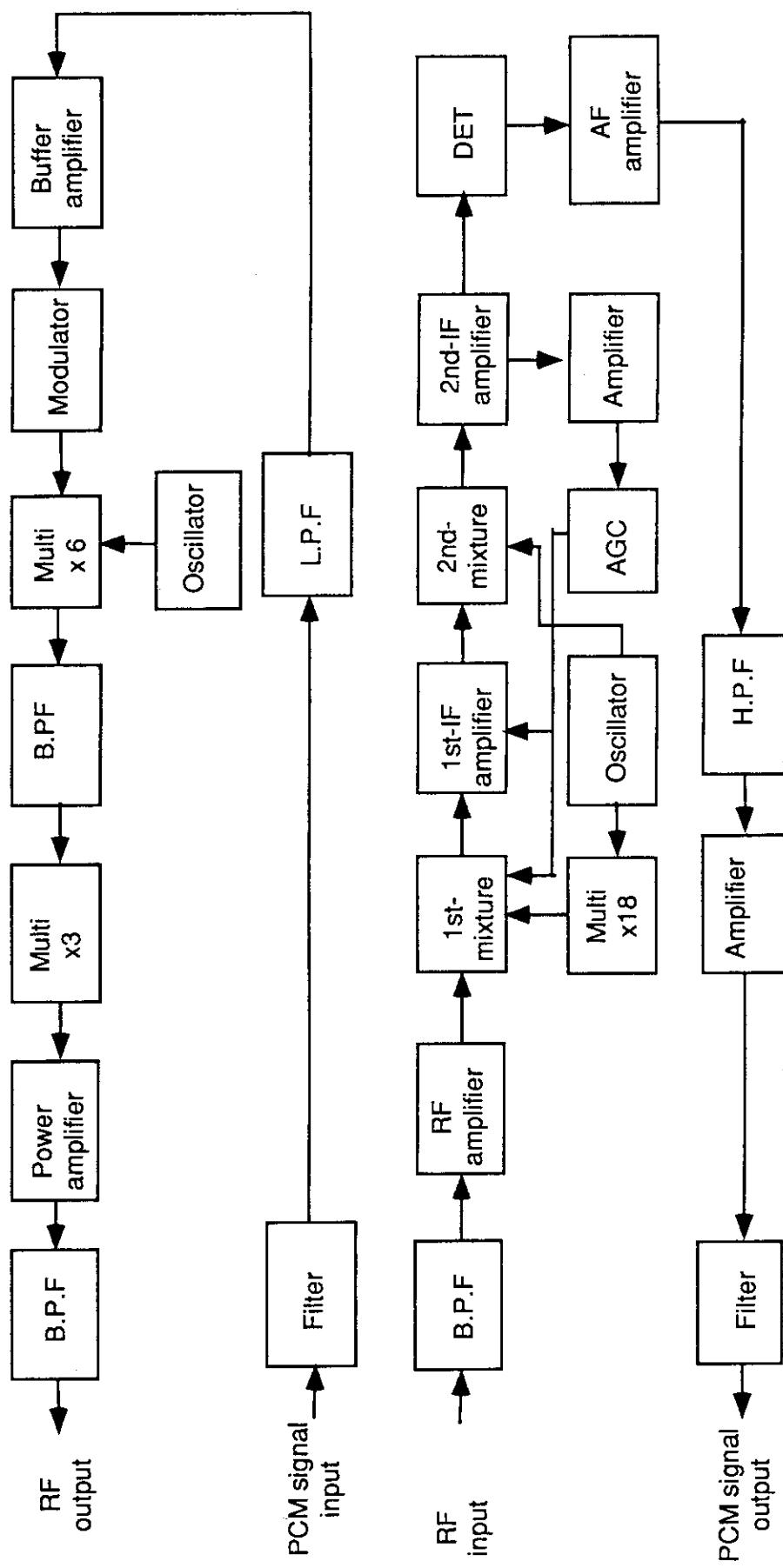


Fig. 3.13 Block diagram of wireless telemeter device

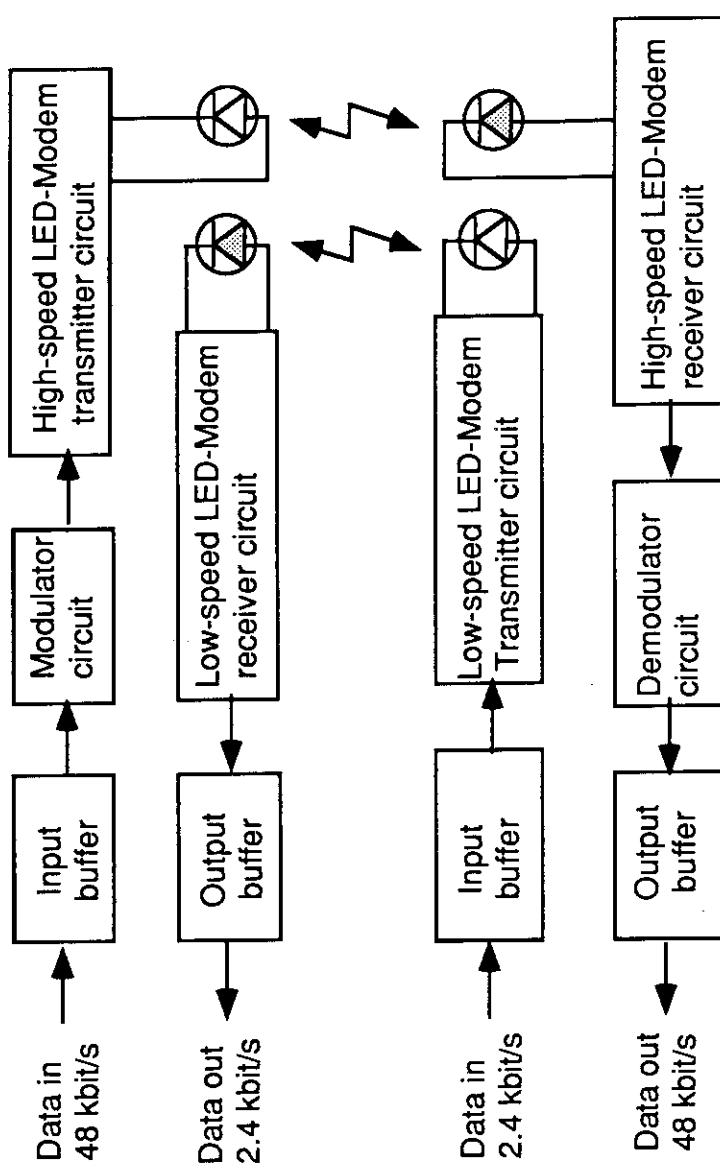


Fig. 3.14 Block diagram of infrared telemeter device

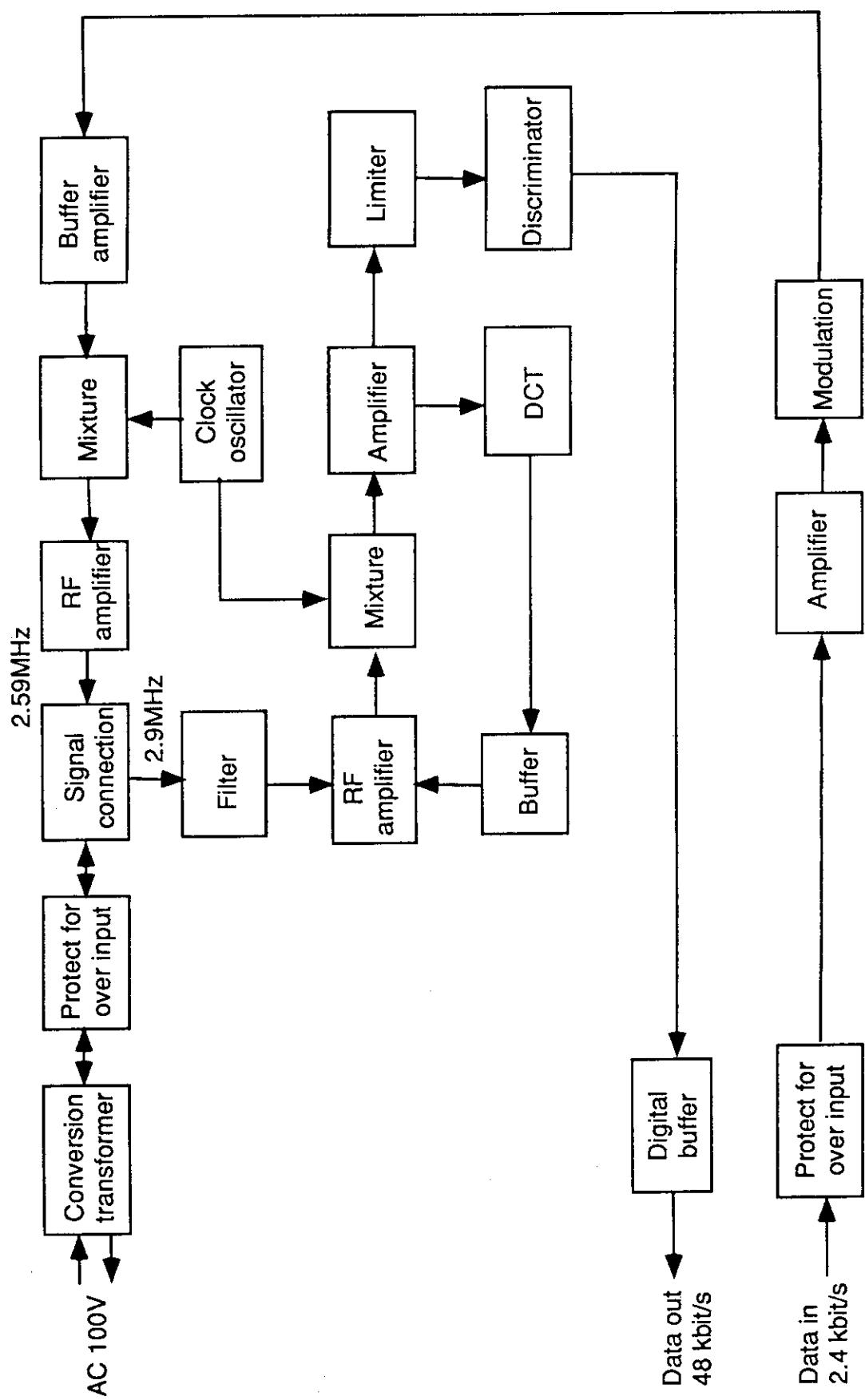


Fig. 3.15 Block diagram of AC-line telemeter device

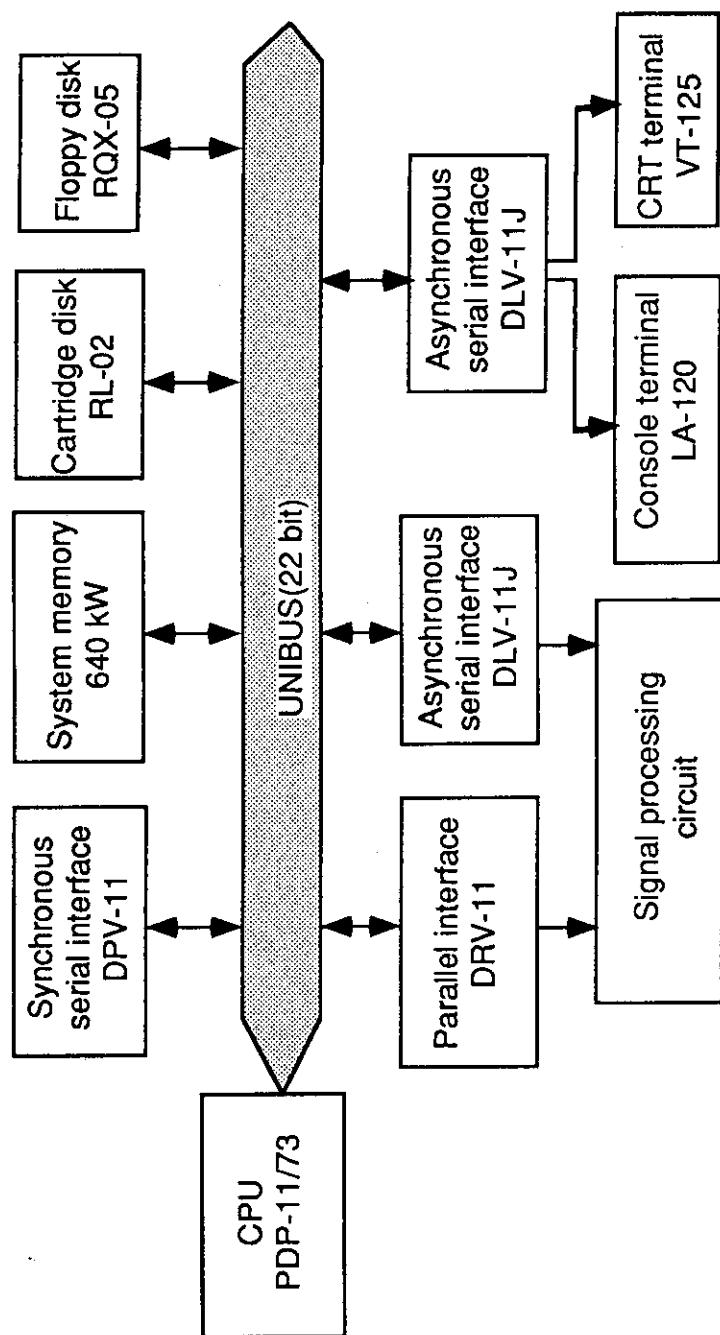


Fig. 3.16 Block diagram of control and analysis system (I)

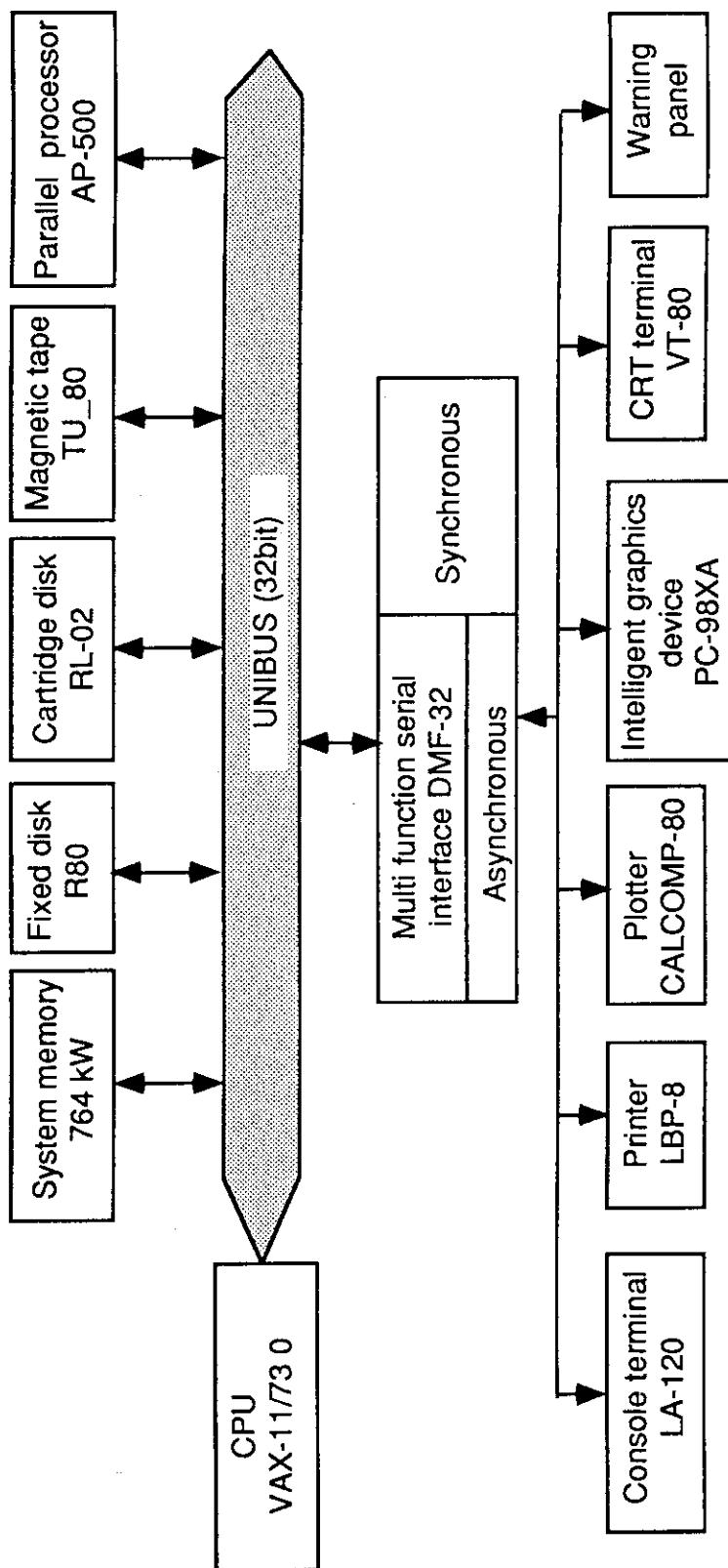


Fig. 3.17 Block diagram of control and analysis system (II)

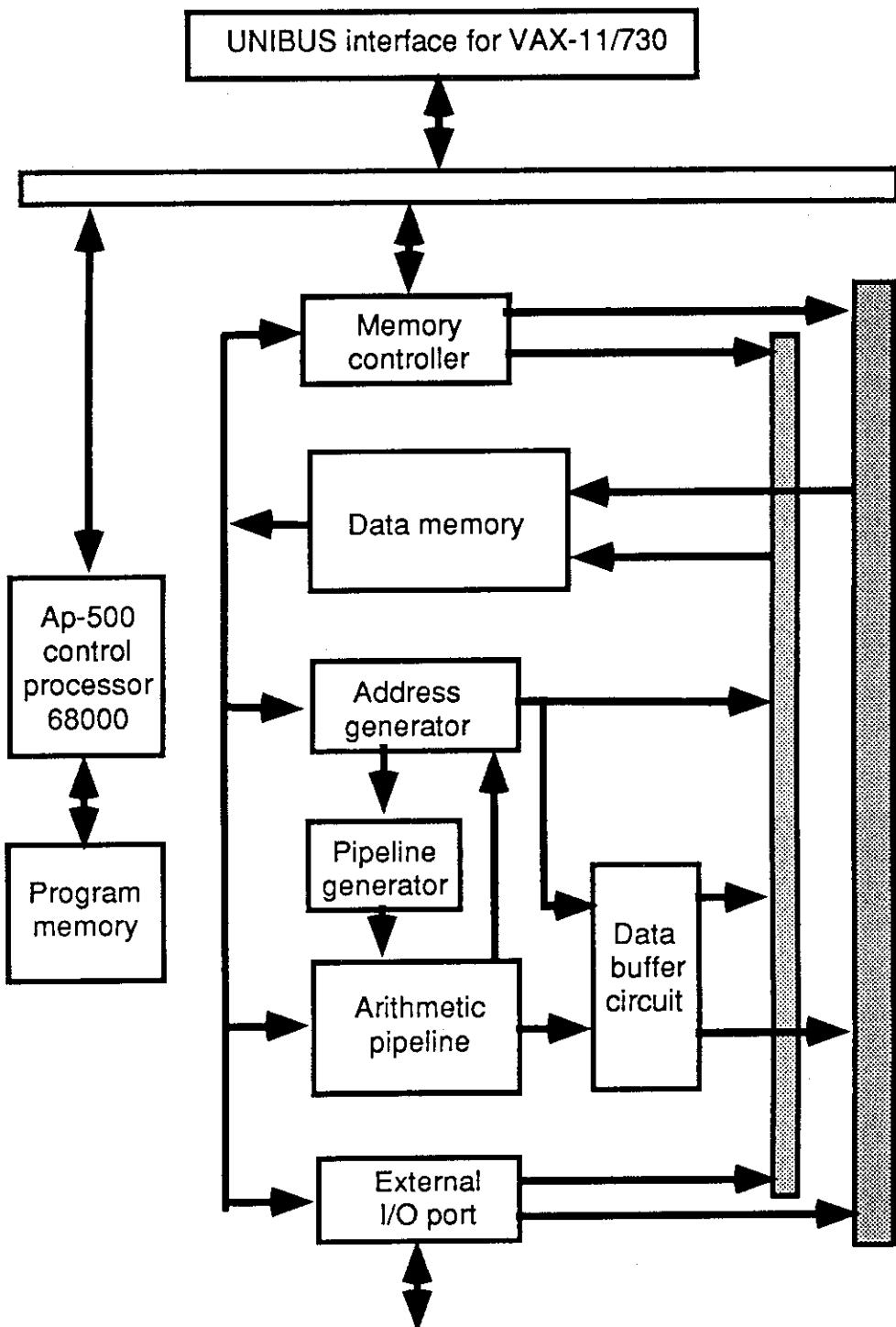


Fig. 3.18 Block diagram of parallel arithmetic processor system

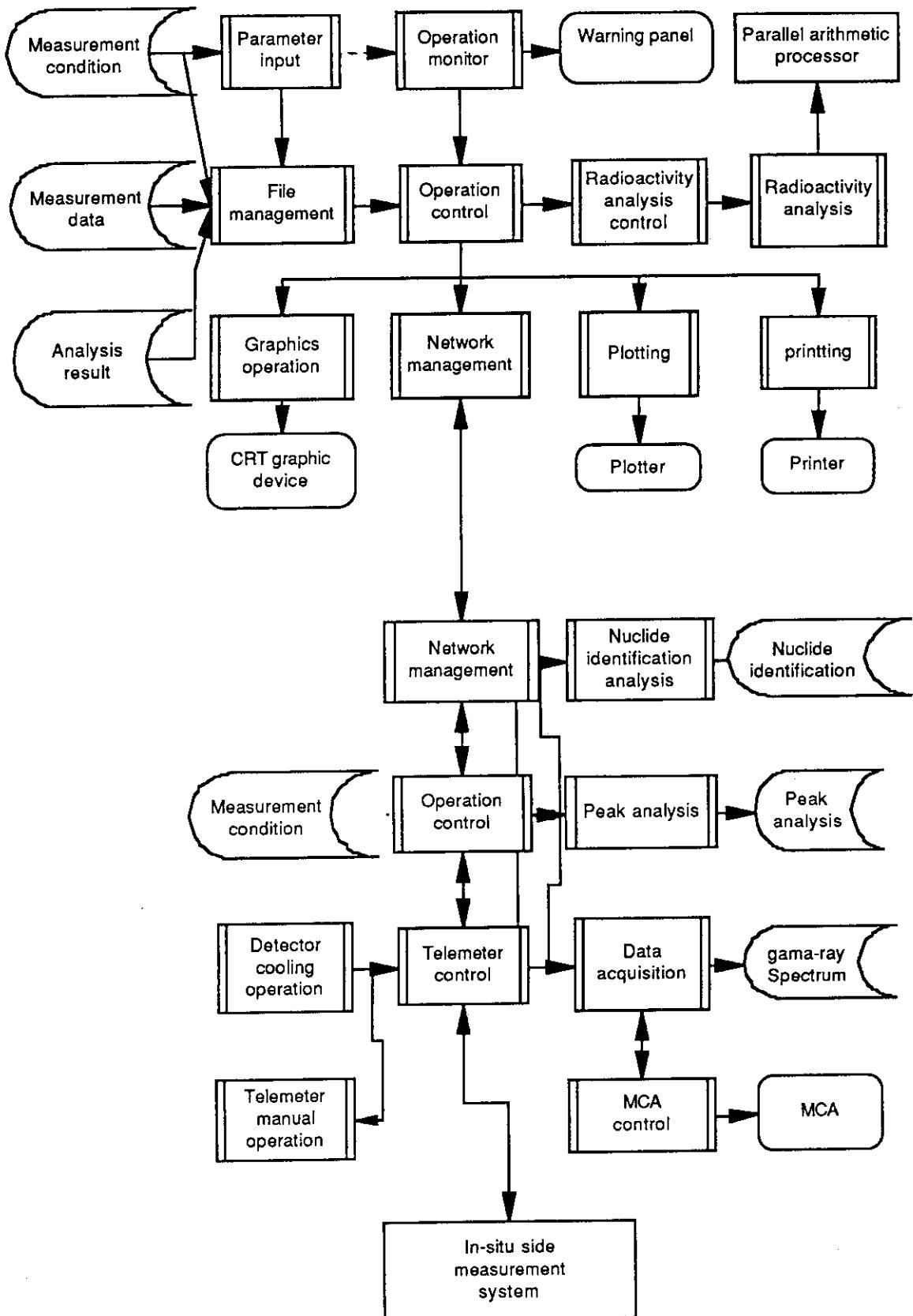


Fig. 4.1 Block diagram of control and analysis software system in measuring system

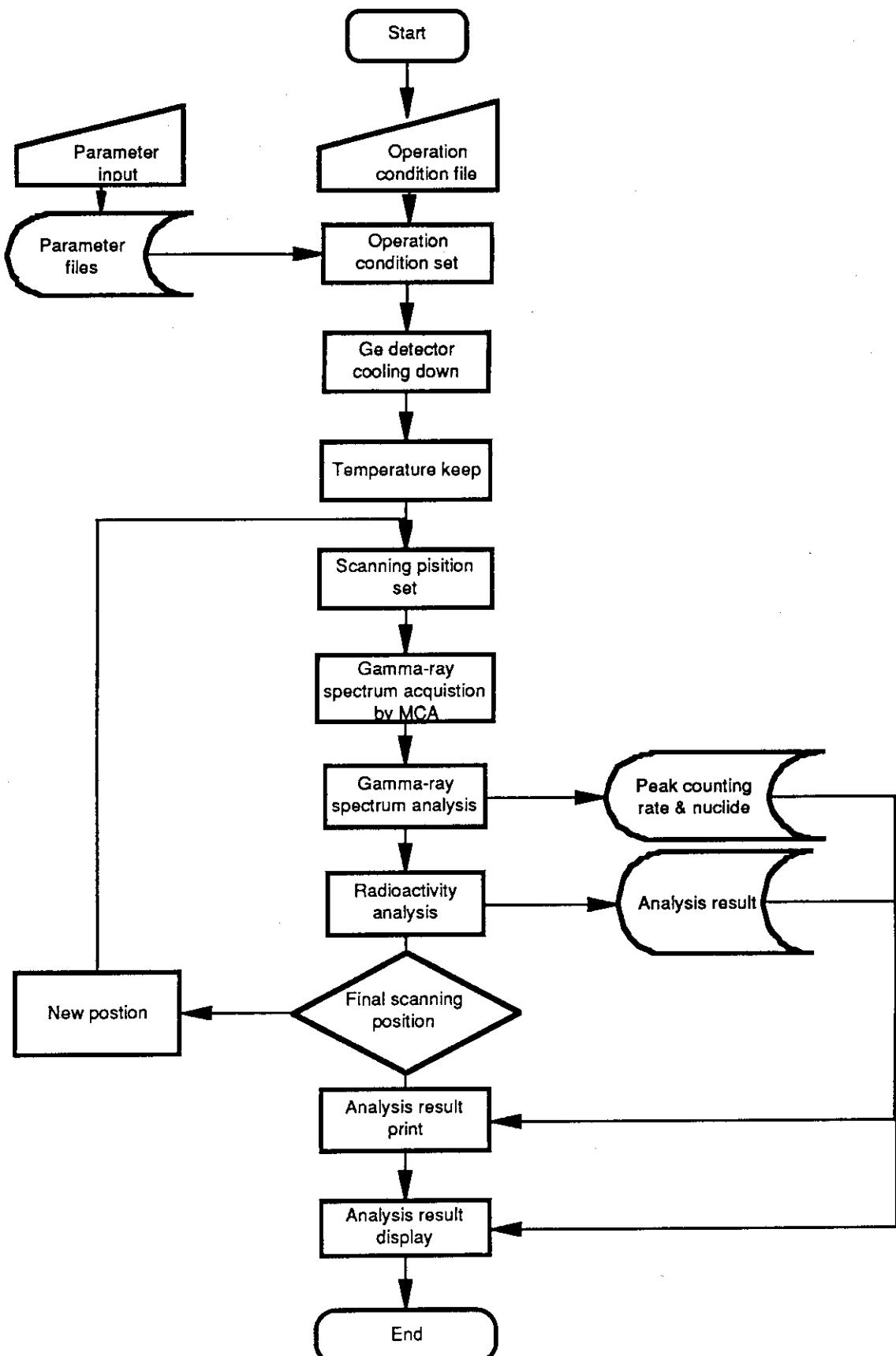


Fig. 4.2 Flow chart of control and analysis software system in measuring system

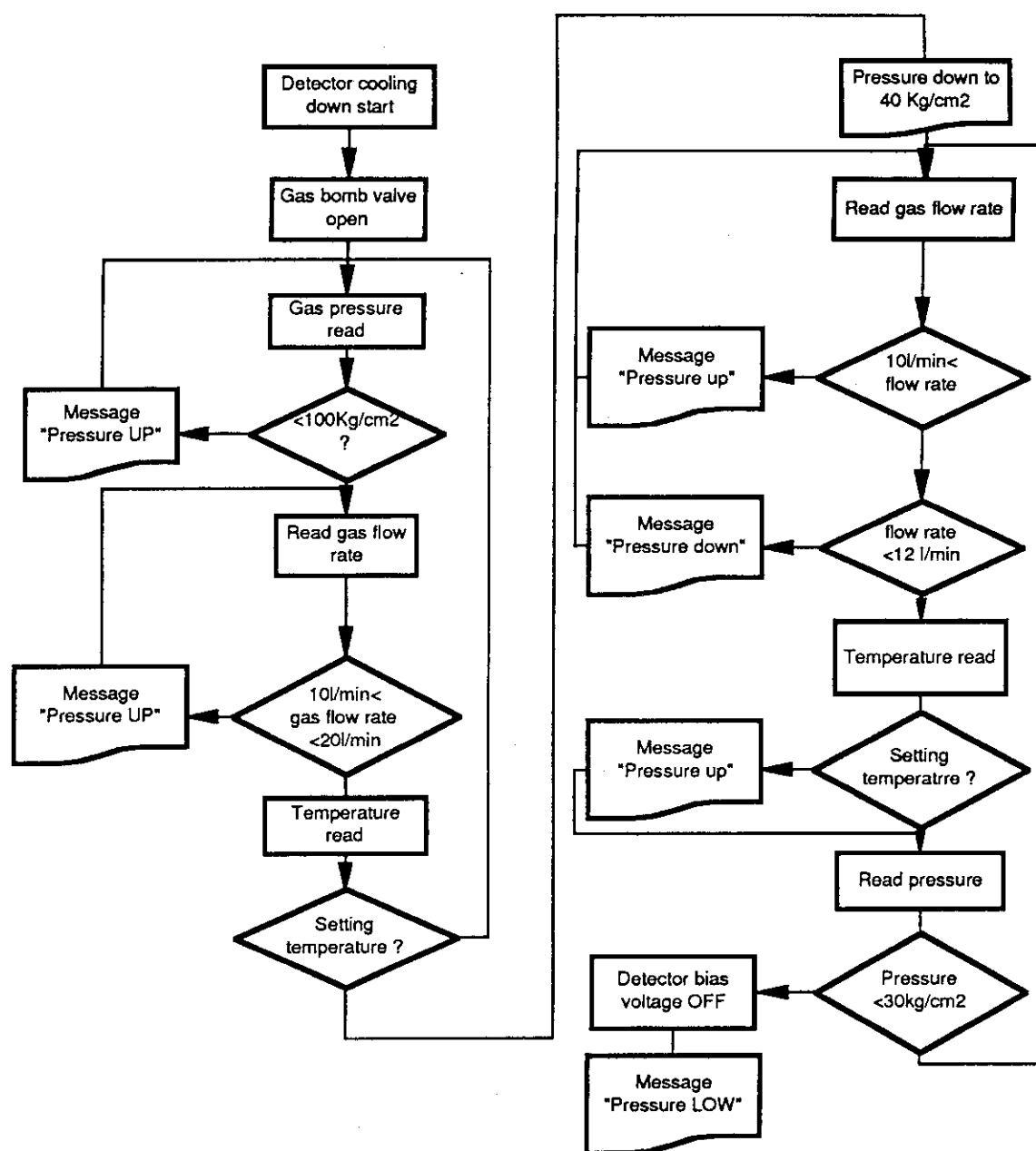


Fig. 4.3 Flow chart of software for cooling gas-cooled Ge detector

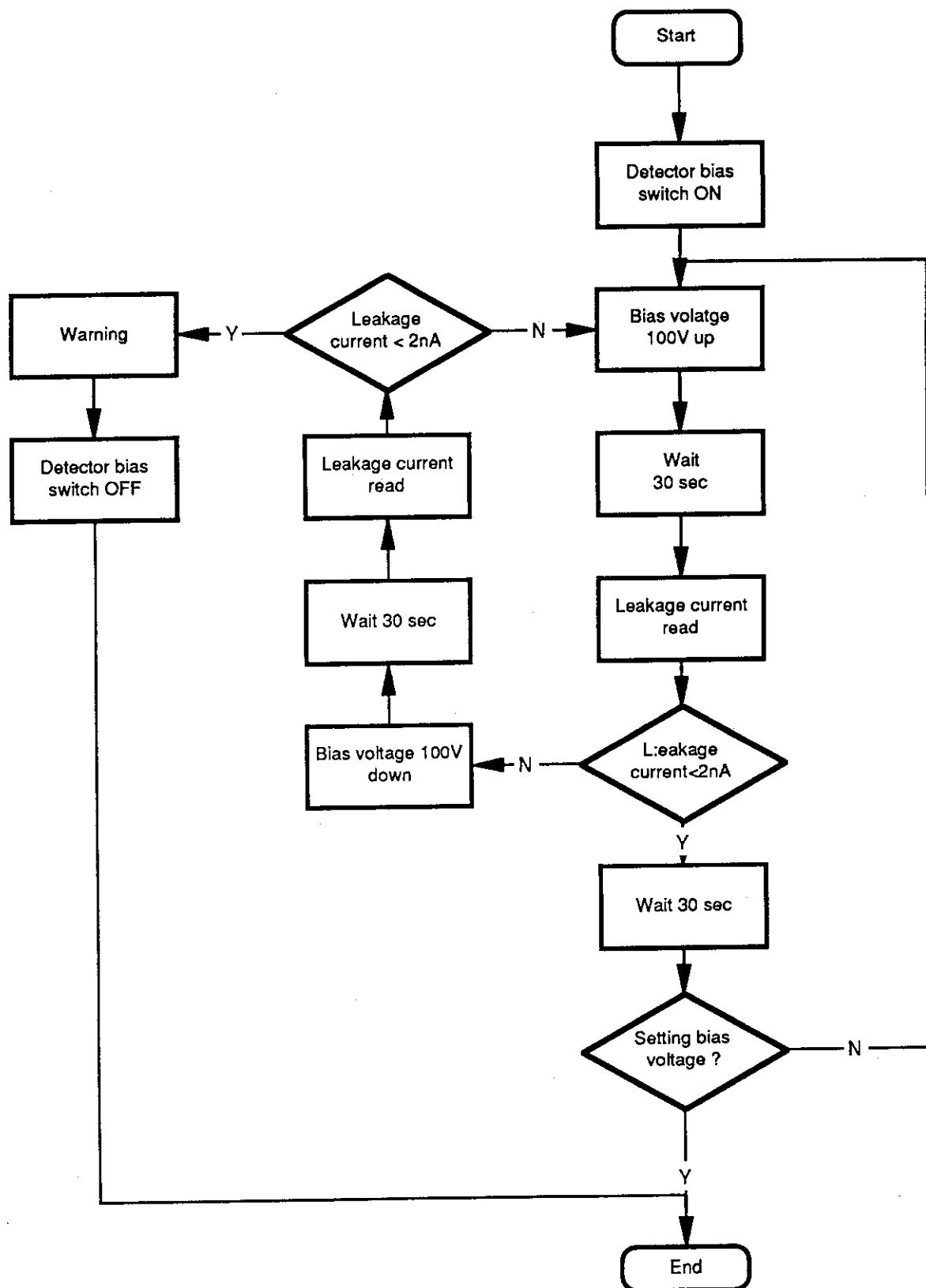


Fig. 4.4 Flow chart of software for supplying detector bias voltage

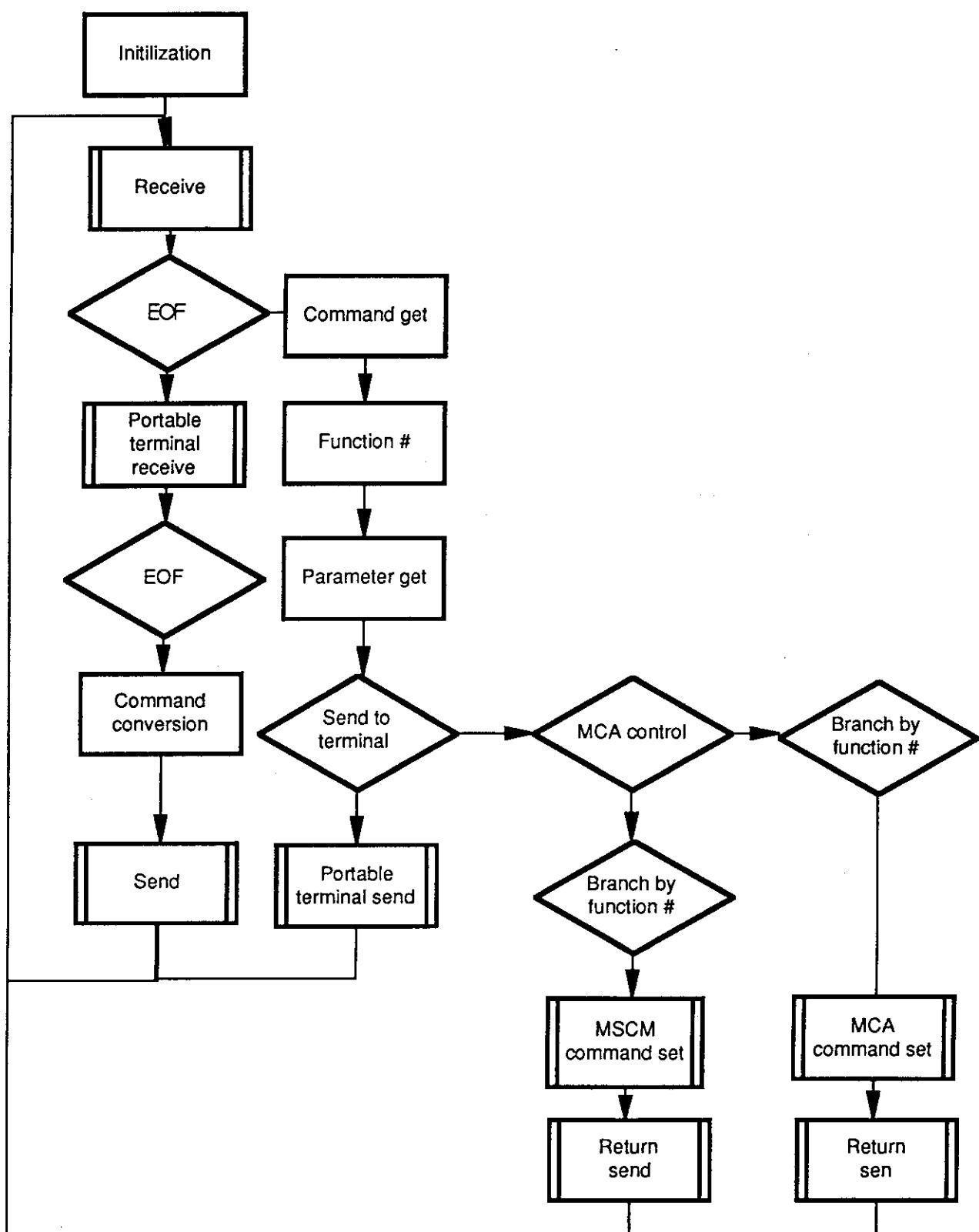


Fig. 4.5 Flow chart of subroutine for controlling in-situ-side system by using telemeter

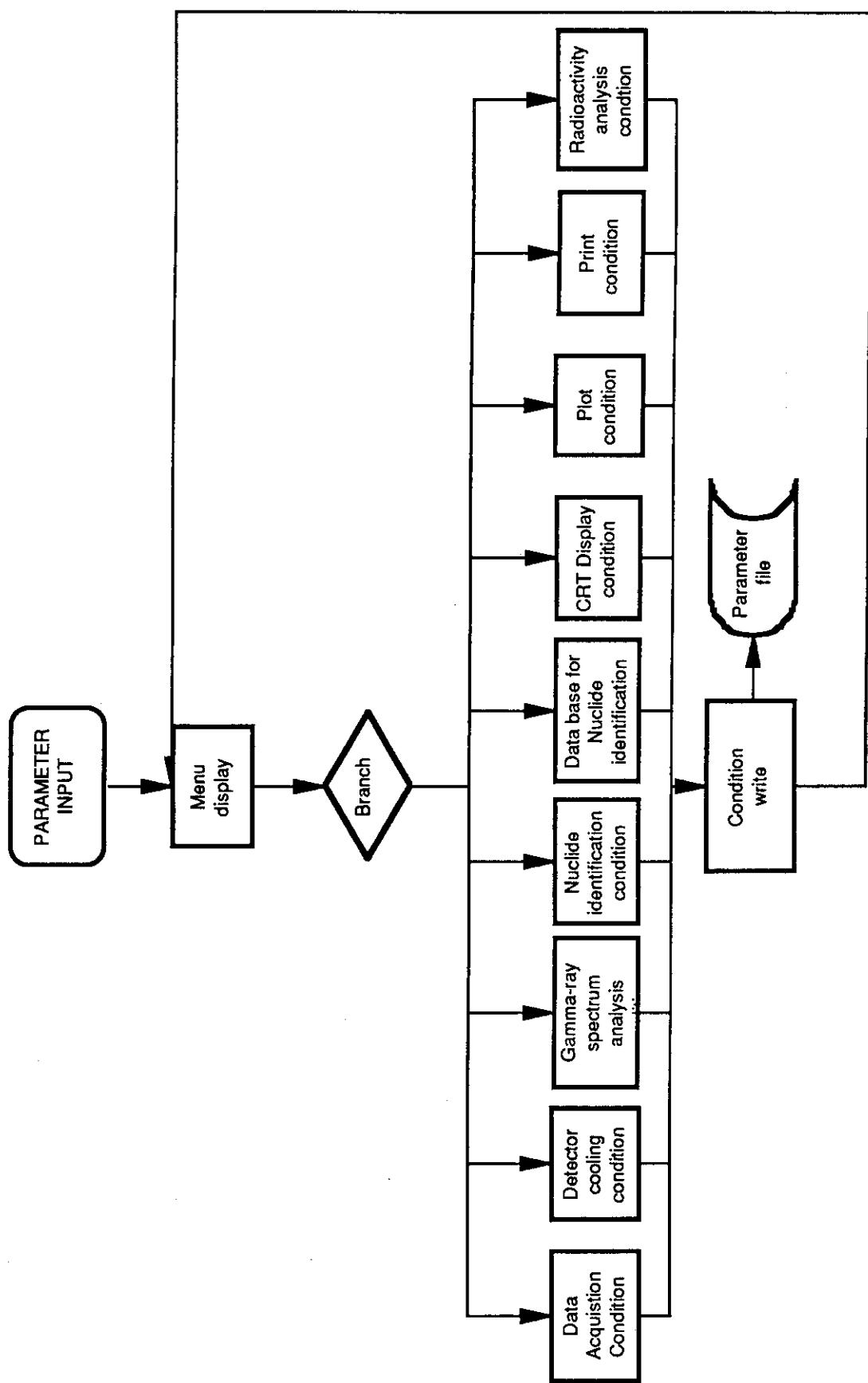


Fig. 4.6 Block diagram of parameter files used in control and analysis software system

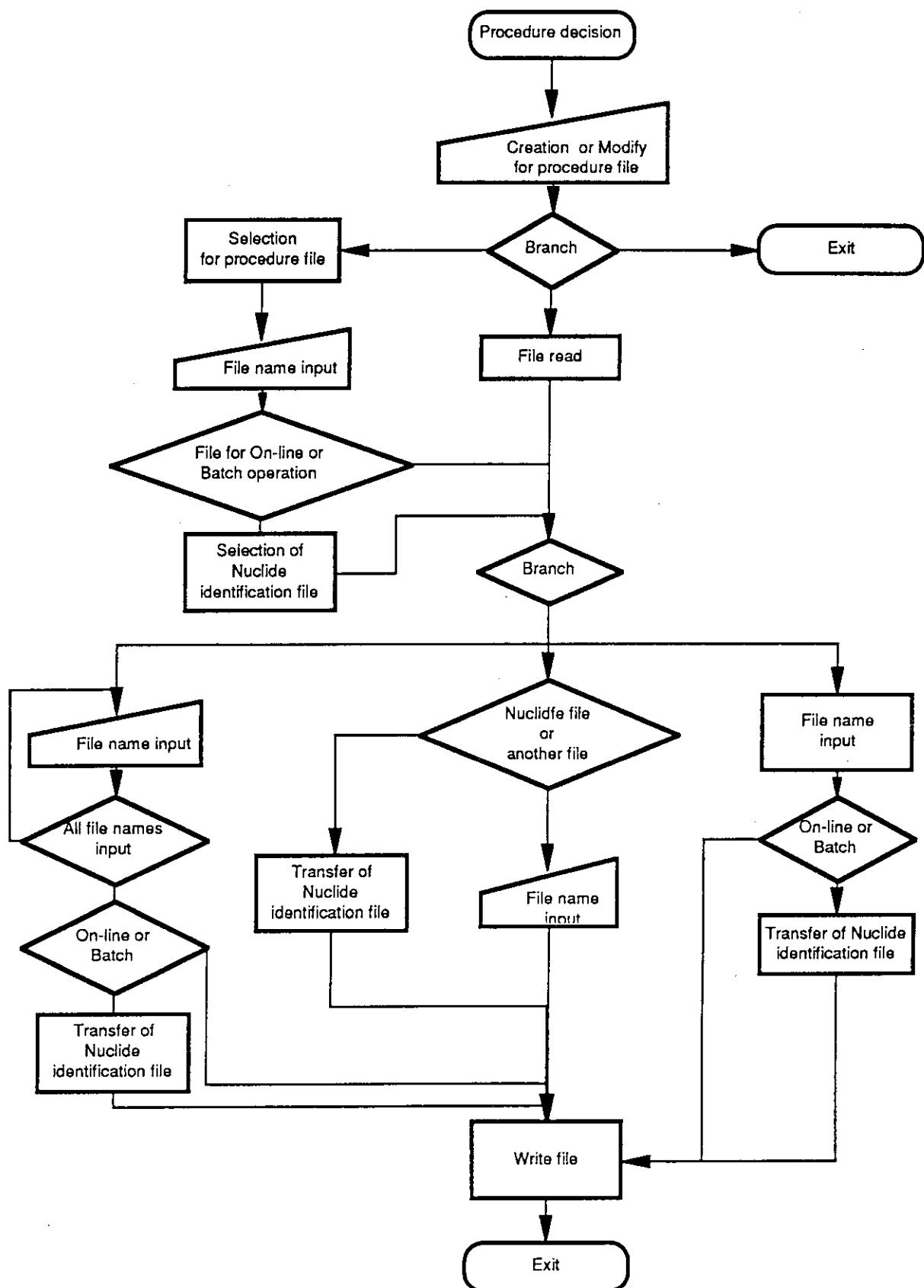


Fig. 4.7 Flow chart of software for creating and modifying parameter files

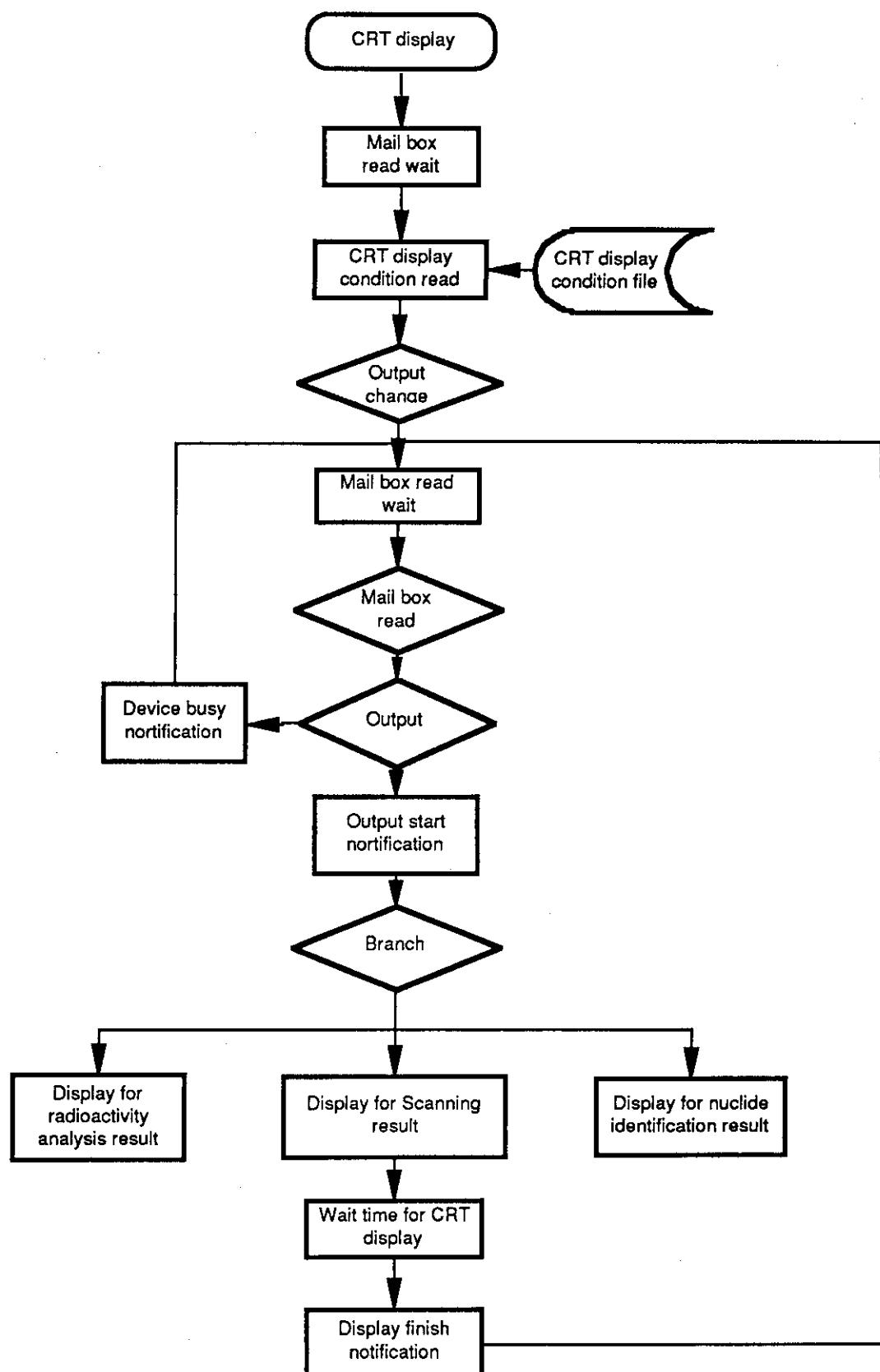


Fig. 48 Flow chart of software for controlling CRT display

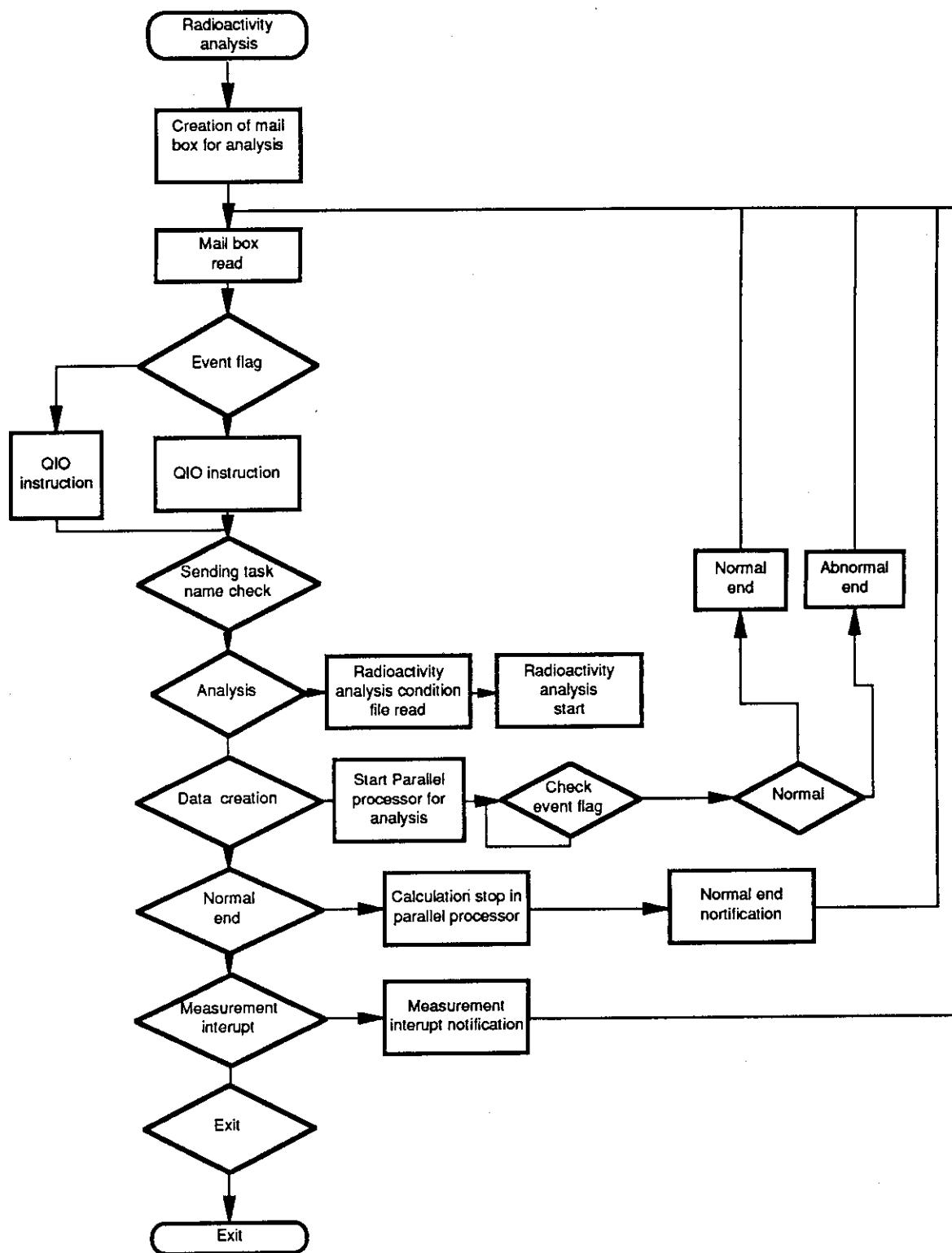


Fig. 4.9 Flow chart of software for radioactivity analysis

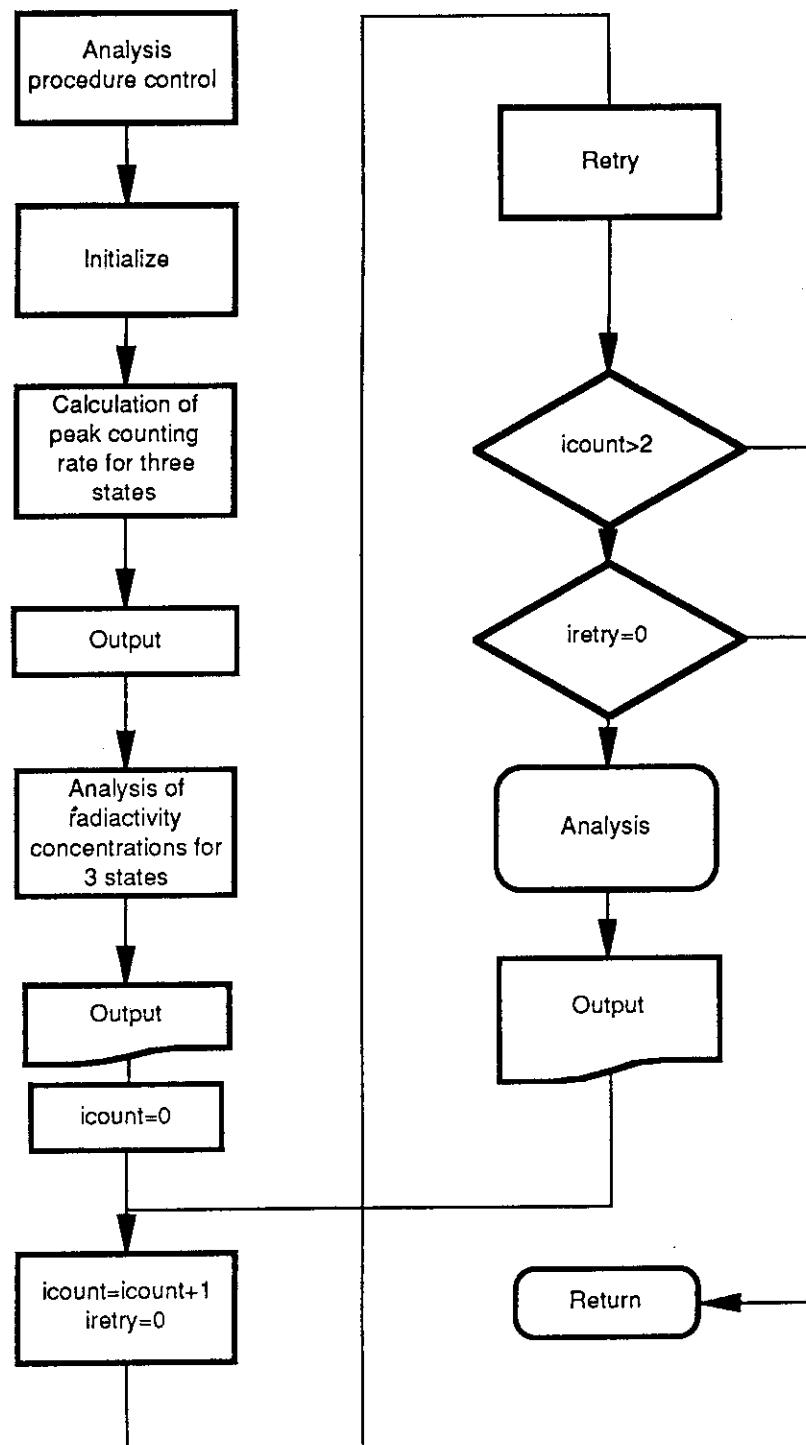


Fig. 4.10 Flow chart of software for state-separation analysis

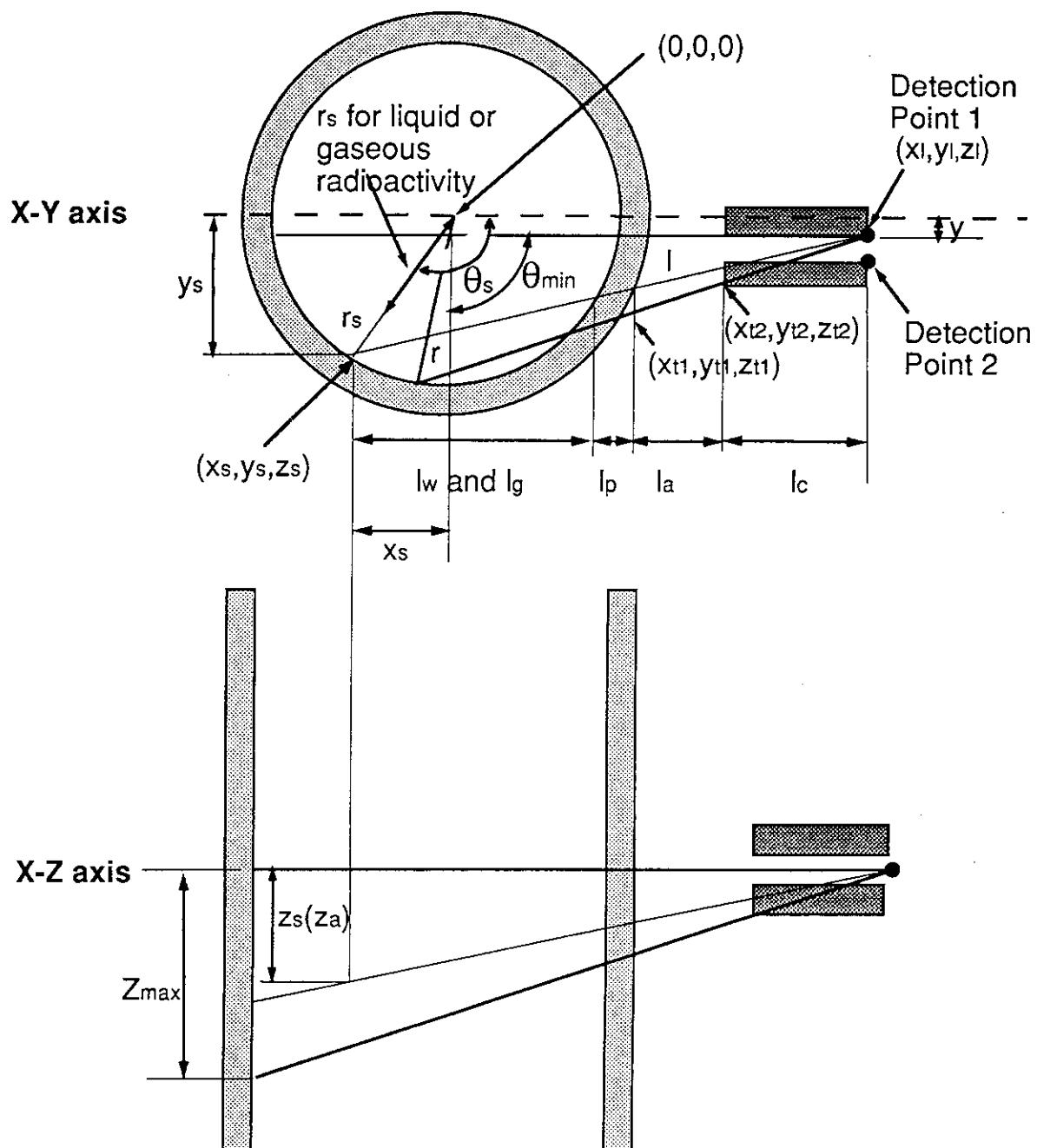


Fig. 4.11 Modified calculation model for state-separation method

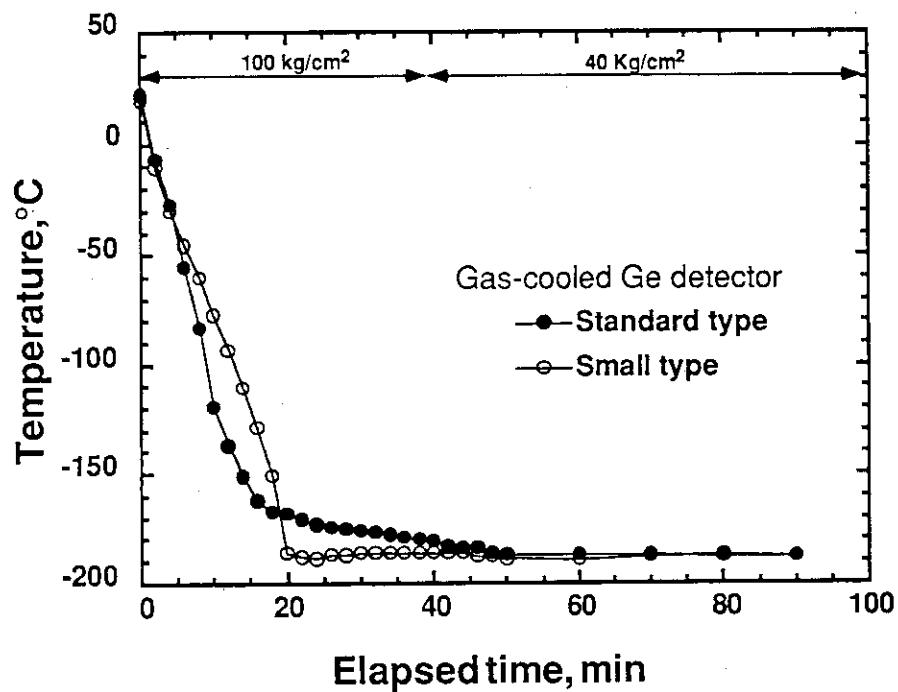


Fig. 5.1 Cooling characteristics of standard- and small-type gas-cooled Ge detector

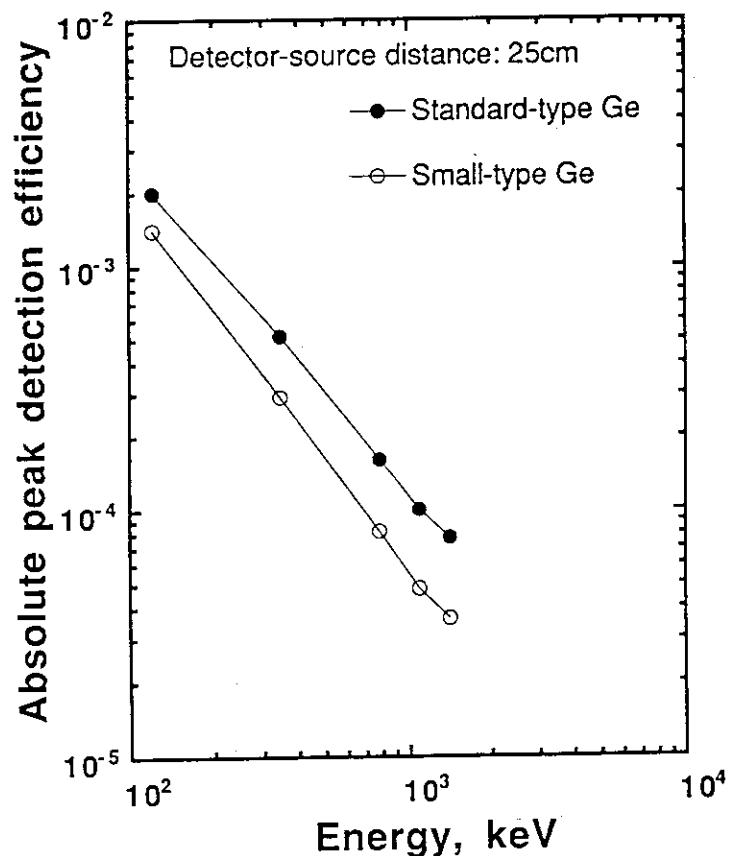


Fig. 5.2 Absolute detection efficiency of standard- and small-type gas-cooled Ge detector

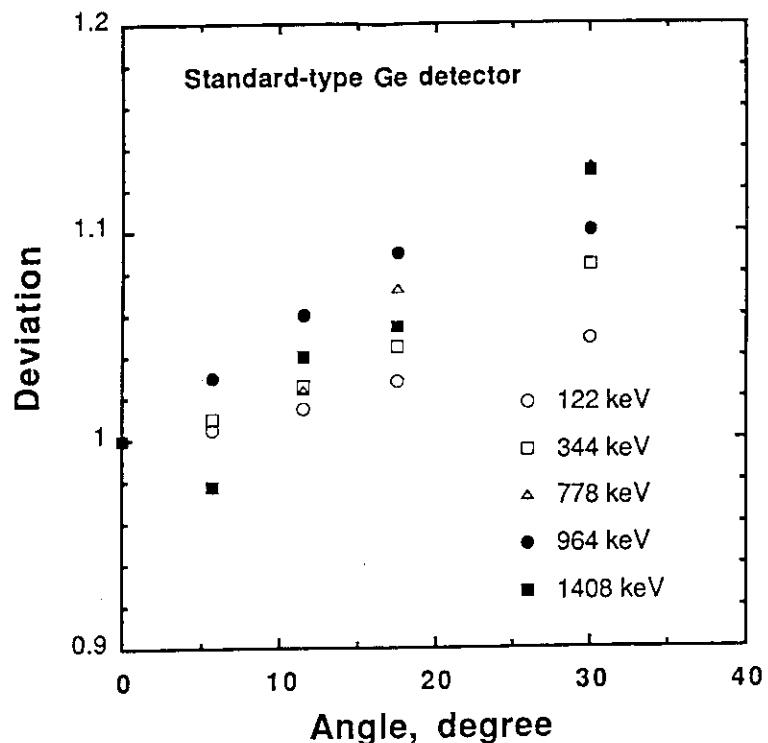


Fig. 5.3 Dependency of detection efficiency on incident angle of gamma-rays for standard-type gas-cooled Ge detector

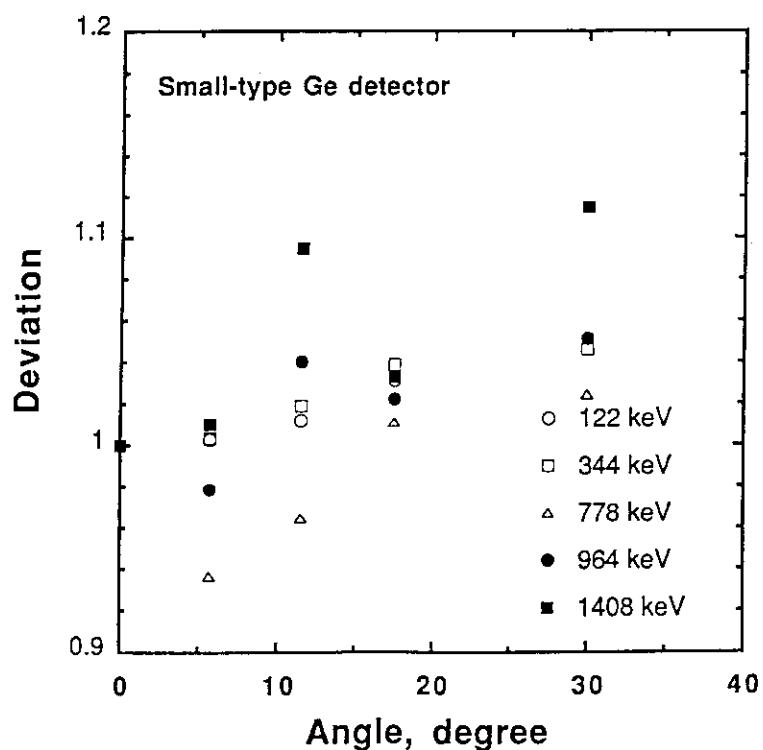


Fig. 5.4 Dependency of detection efficiency on incident angle of gamma-rays for small-type gas-cooled Ge detector

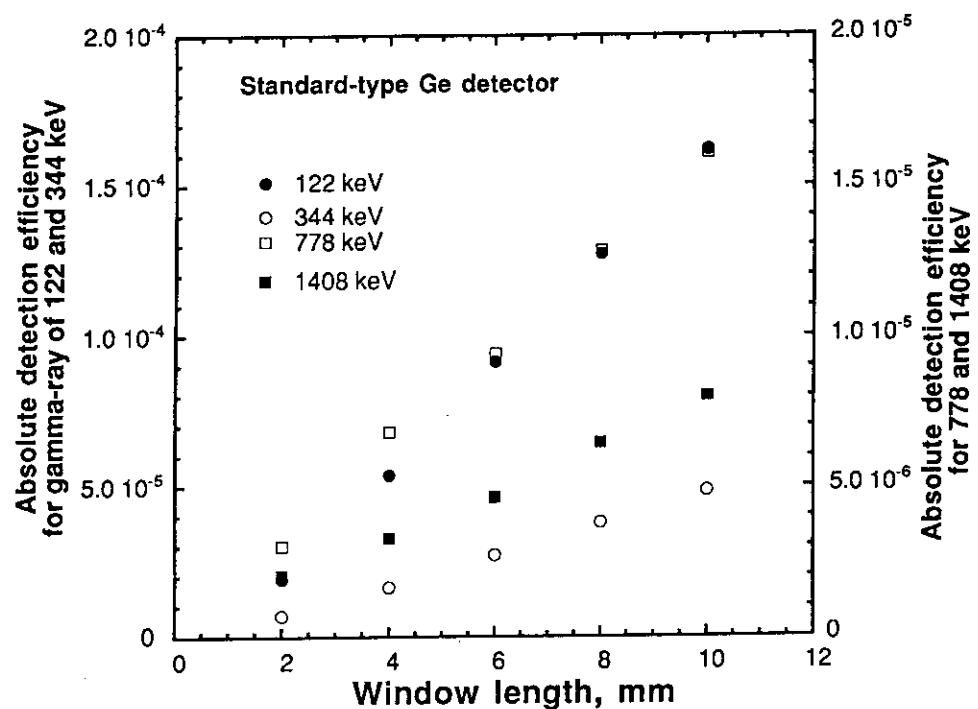


Fig. 5.5 Dependency of detection efficiency of detector assembly with collimator on opening length of collimator for standard-type gas-cooled Ge detector

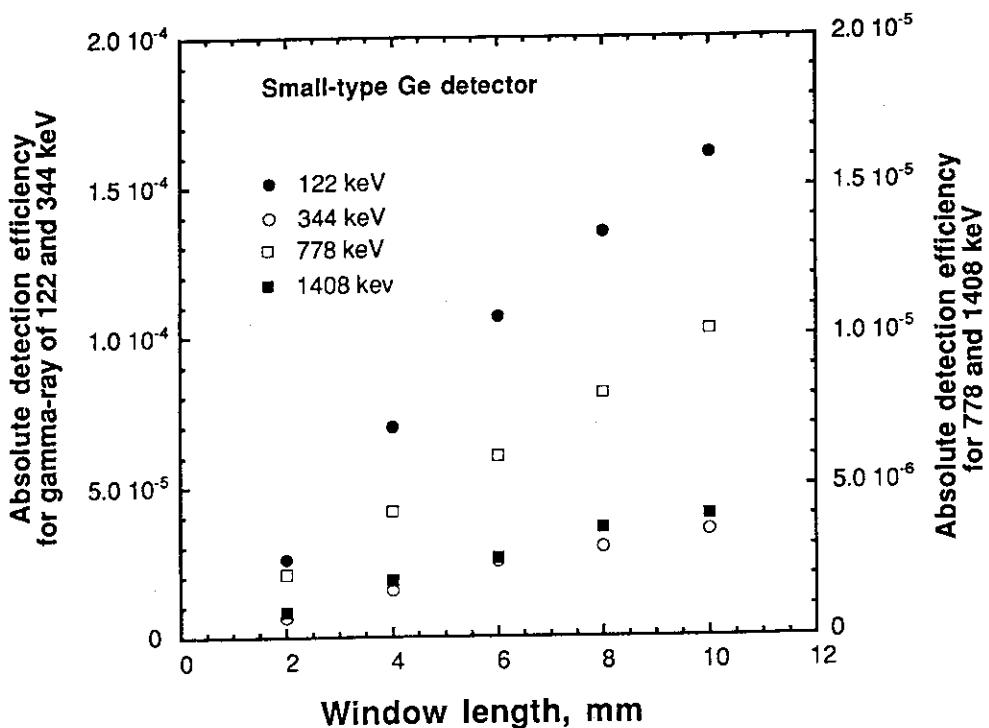


Fig. 5.6 Dependency of detection efficiency of detector assembly with collimator on opening length of collimator for small-type gas-cooled Ge detector

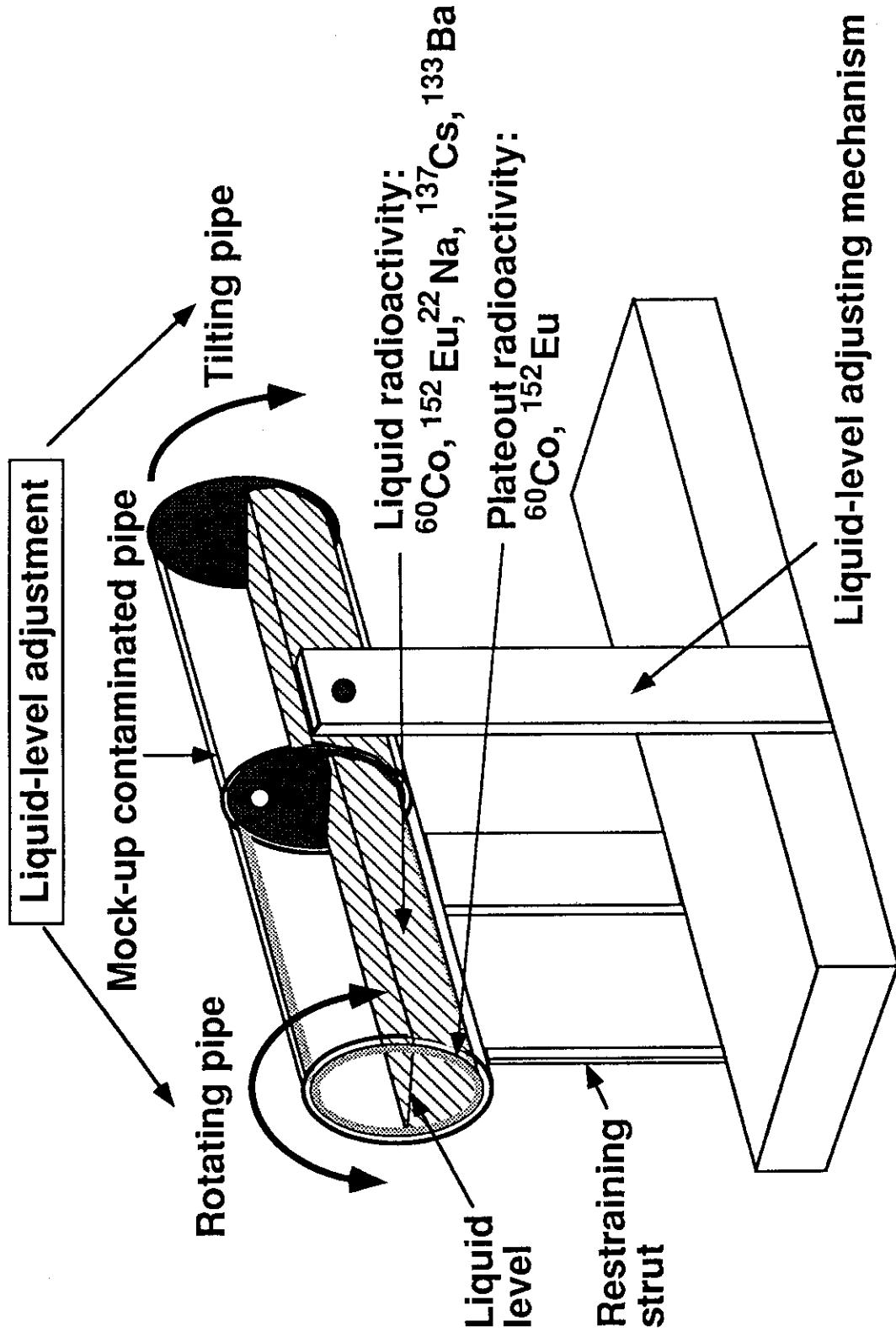


Fig. 5.7 Structure of mock-up contaminated pipe

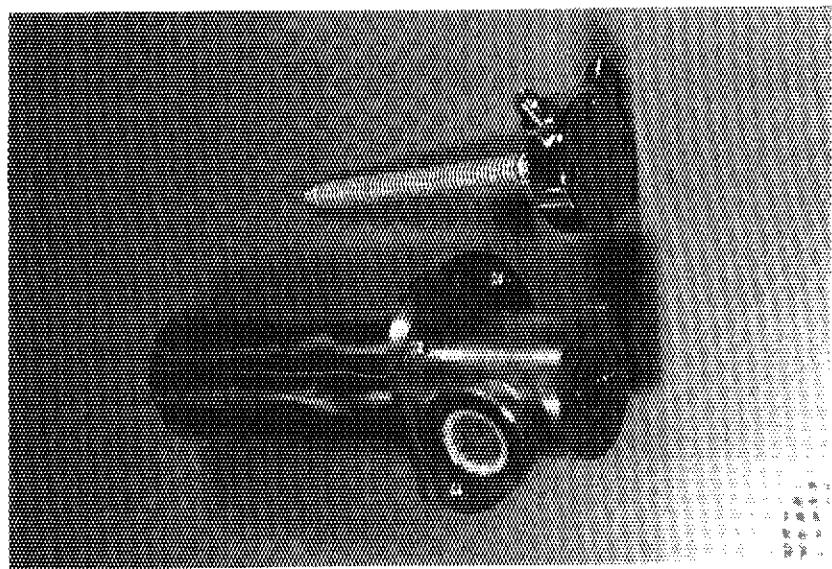


Photo. 3.1 Standard-type gas-cooled Ge detector with Joule-Thomson refrigerator element

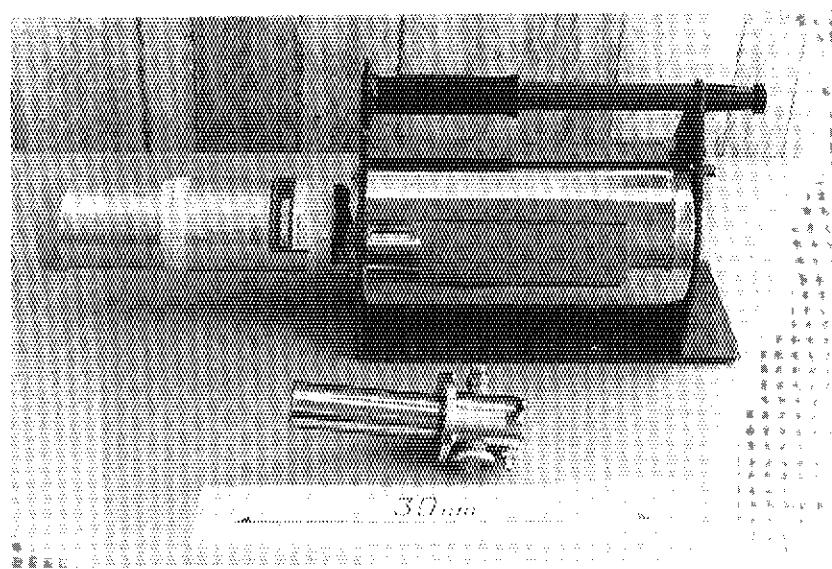


Photo. 3.2 Small-type gas-cooled Ge detector

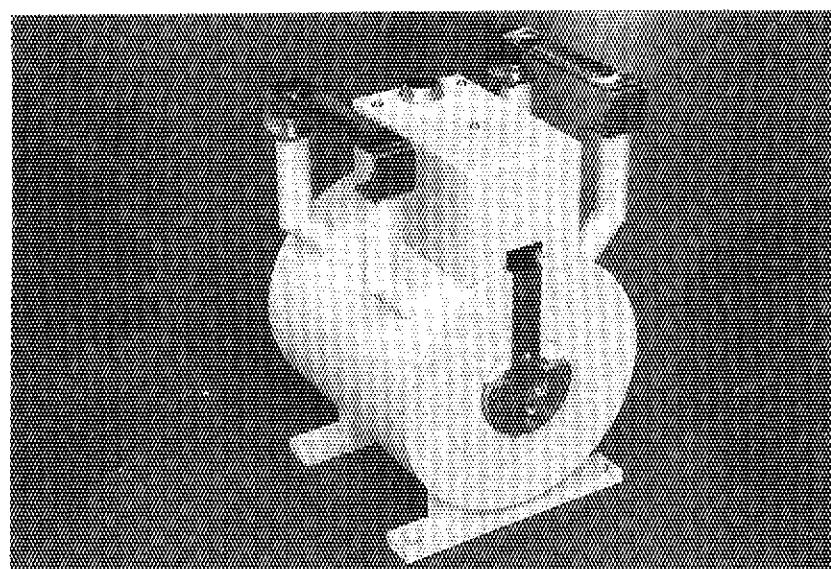


Photo. 3.3 Standard-type collimator (front view)

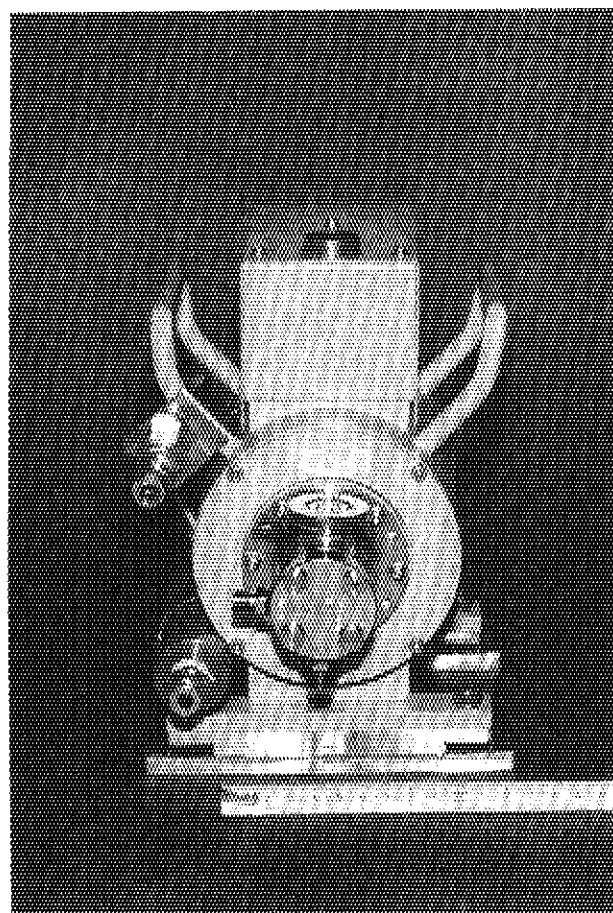


Photo. 3.4 Small-type collimator (back view)

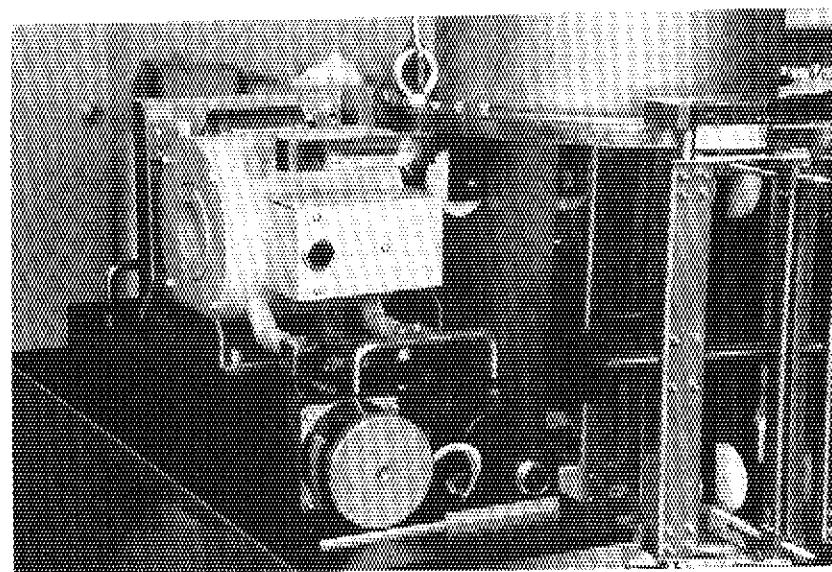


Photo. 3.5 Straight scanning mechanism

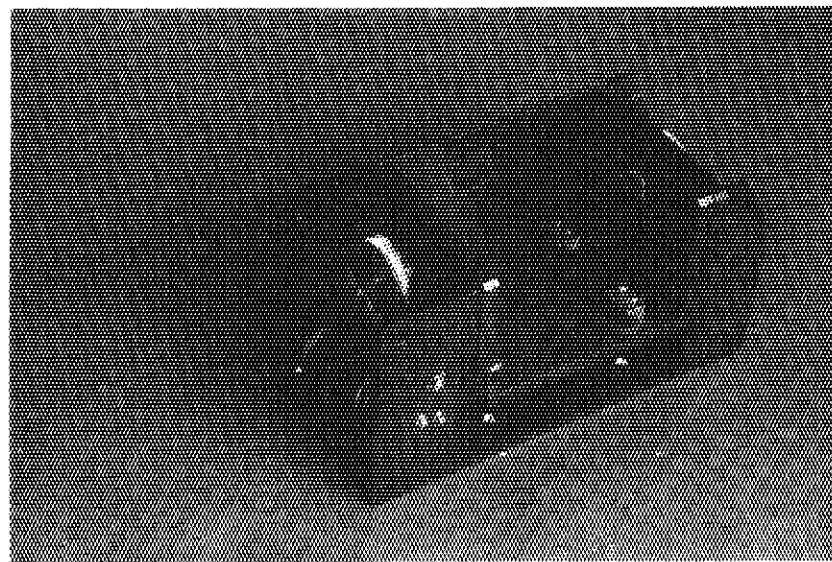


Photo. 3.6 Angular scanning mechanism

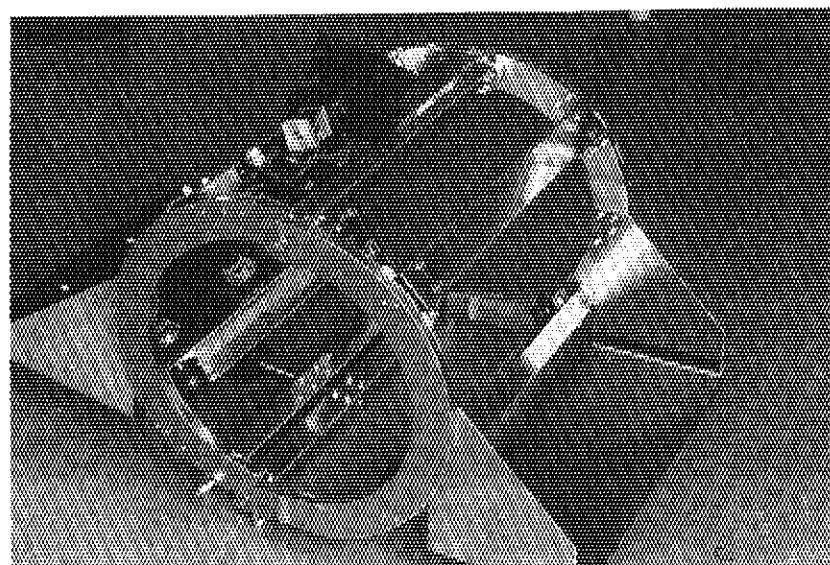
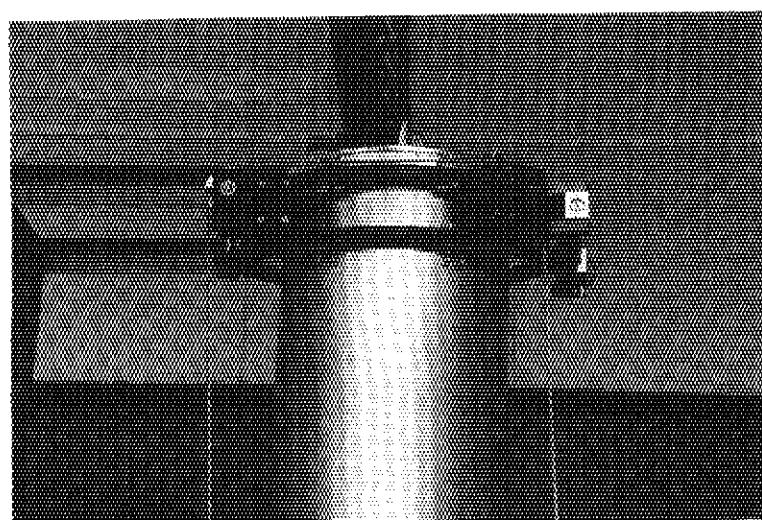
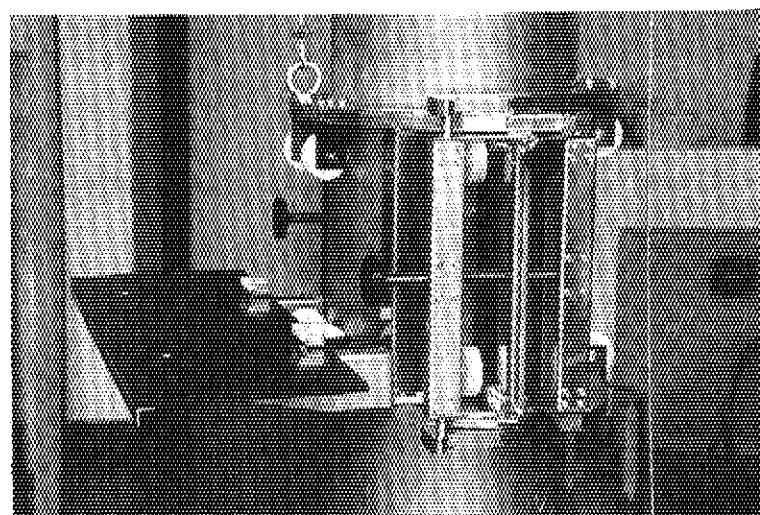


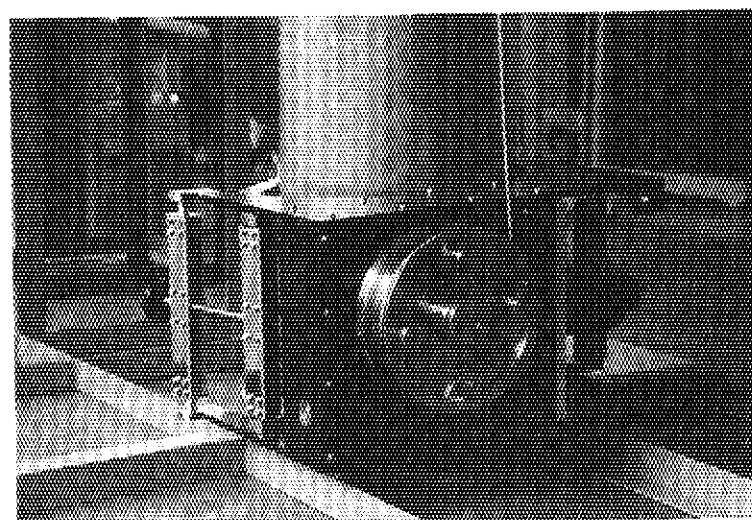
Photo. 3.7 Horizontal positioning mechanism



(a)



(b)



(c)

Photo. 3.8 Vertical positioning mechanism

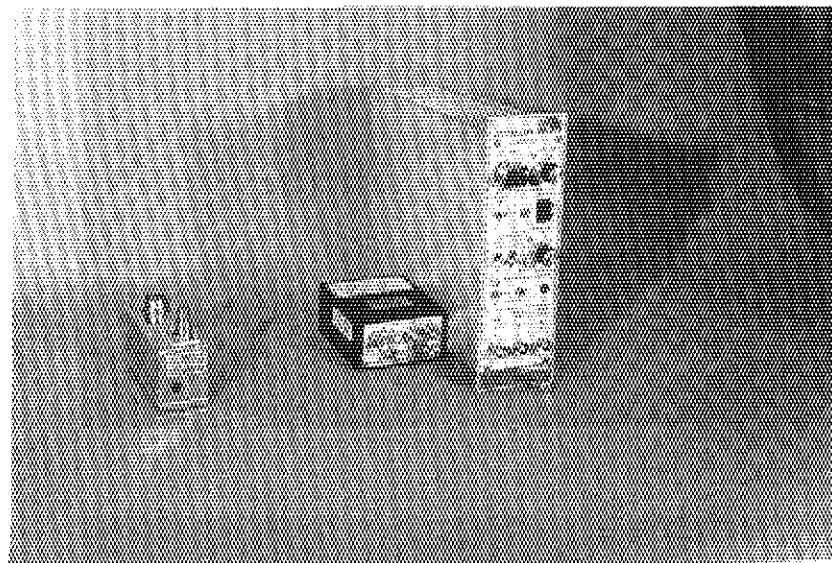


Photo. 3.9 Developed small amplifier compared with NIM-module-type amplifier

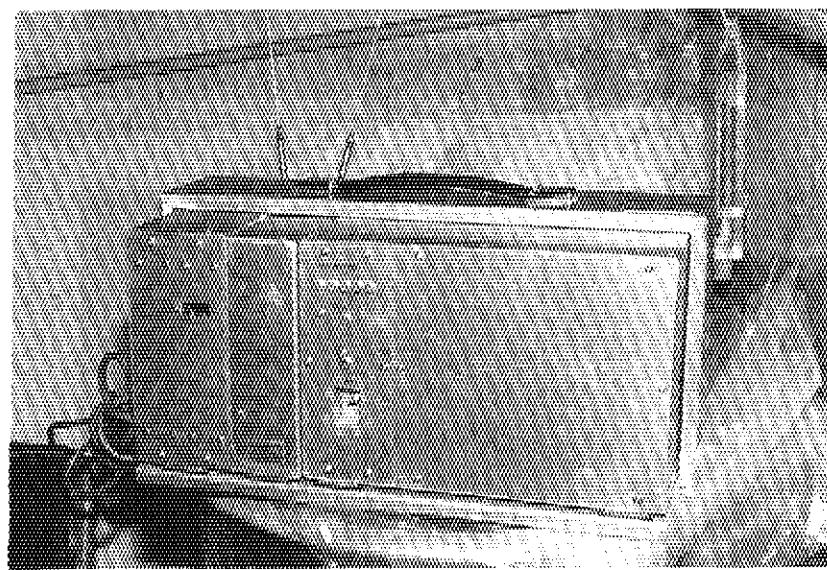


Photo. 3.10 In-situ-side electronic circuits with wireless telemeter

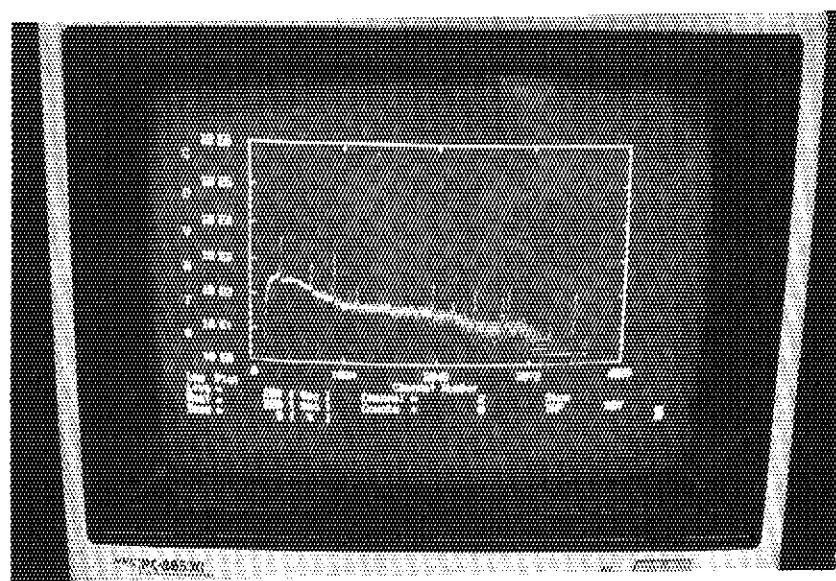


Photo. 3.11 Example of gamma-ray spectra displayed on CRT



Photo. 3.12 Data-processing-side electronic circuits

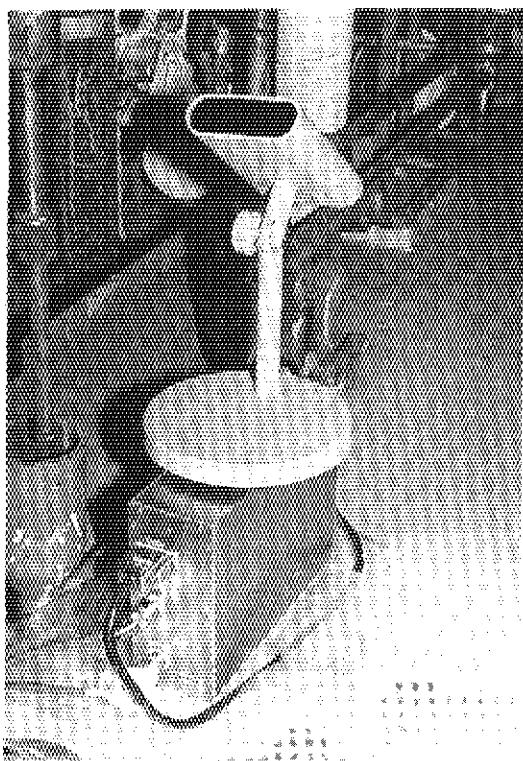


Photo. 3.13 Infrared telemeter device



Photo. 3.14 Control and alarm panel of measuring system

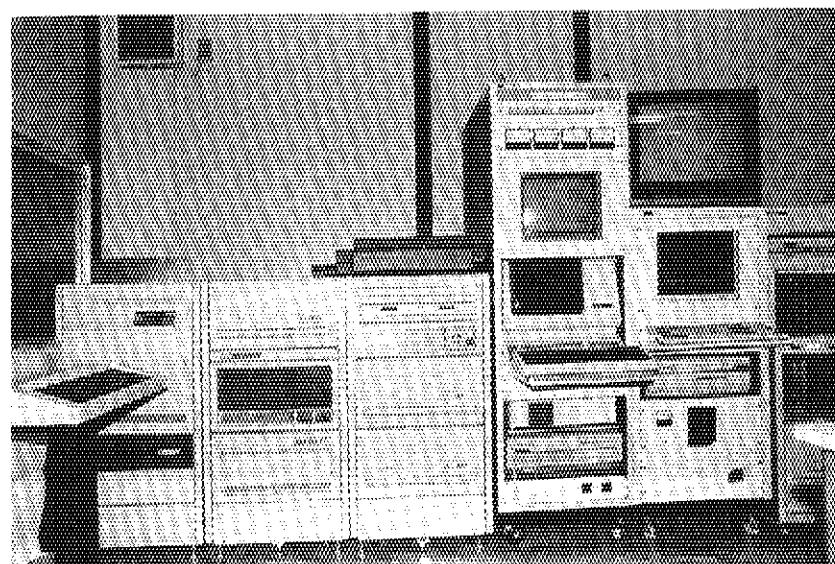


Photo. 3.15 Control and analysis system (I) and (II)

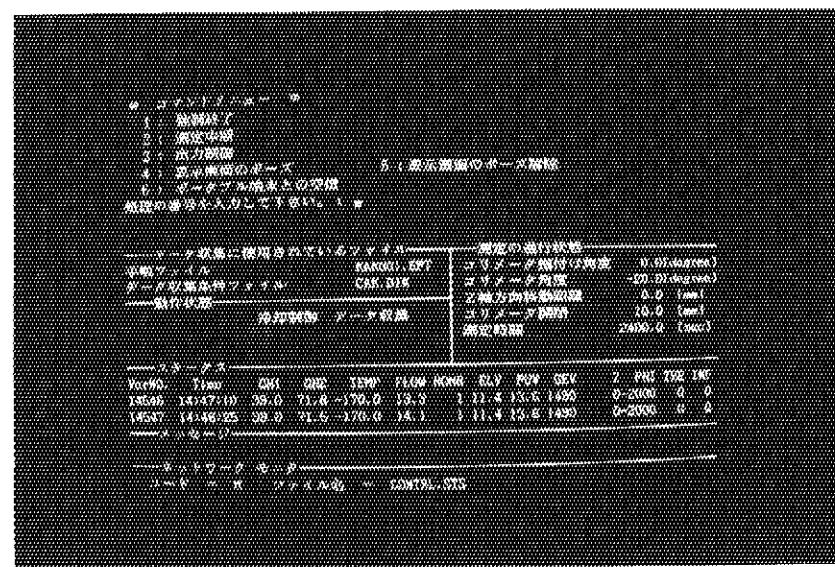


Photo. 4.1 Example of monitoring display of in-situ-side system

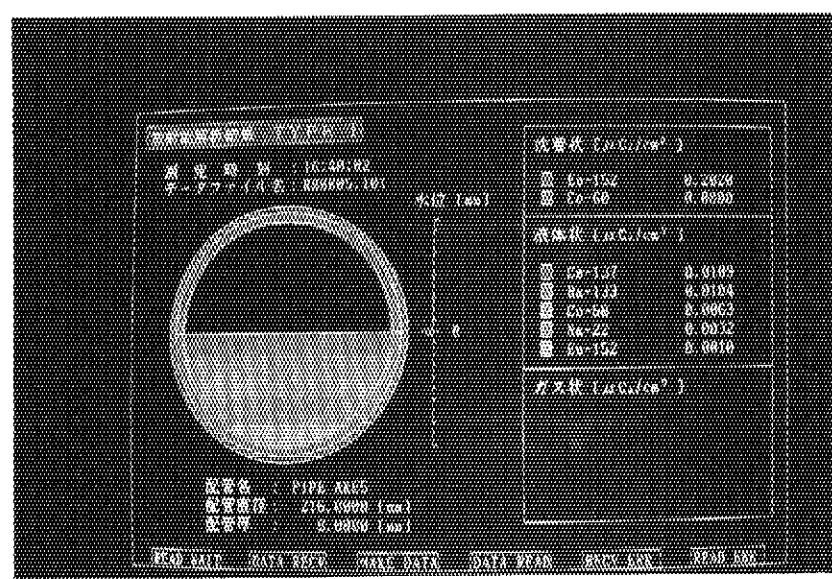


Photo. 4.2 Example of a color graphic display of analysis results

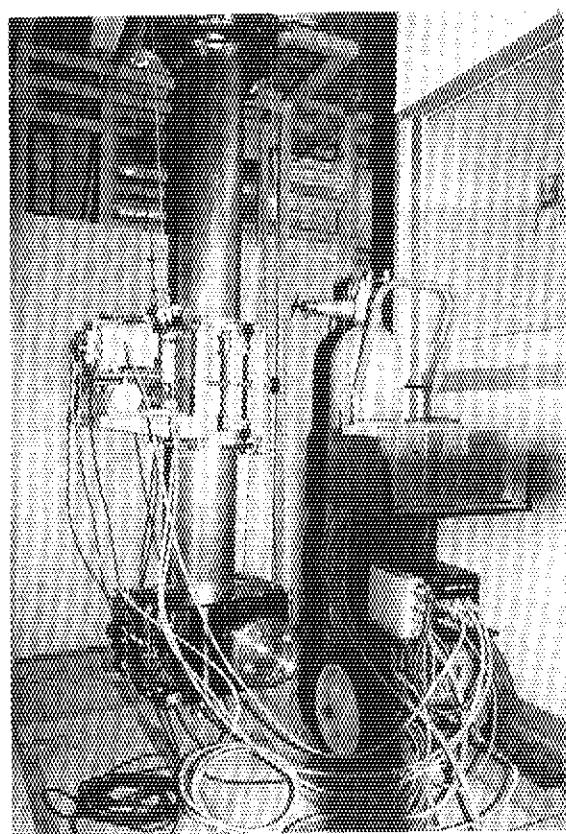


Photo. 5.1 Performance tests using vertical positioning mechanism

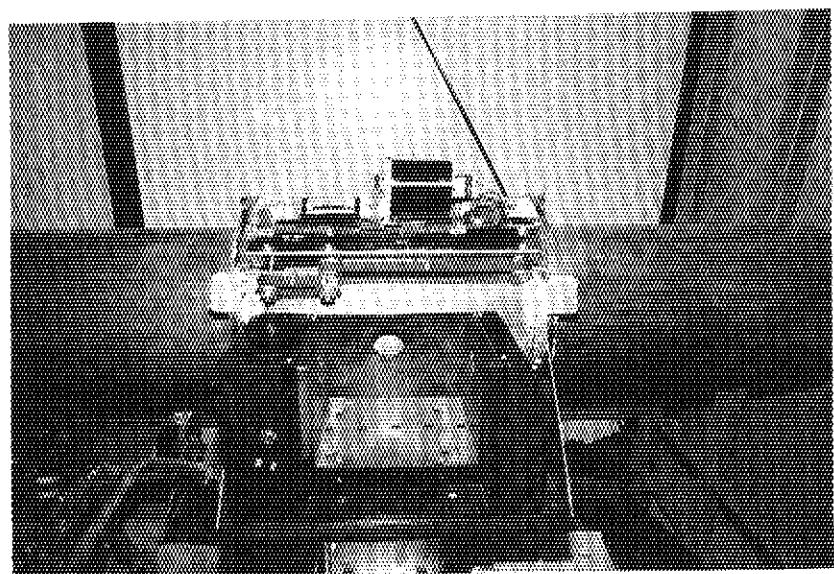


Photo. 5.2 Performance tests using horizontal positioning mechanism

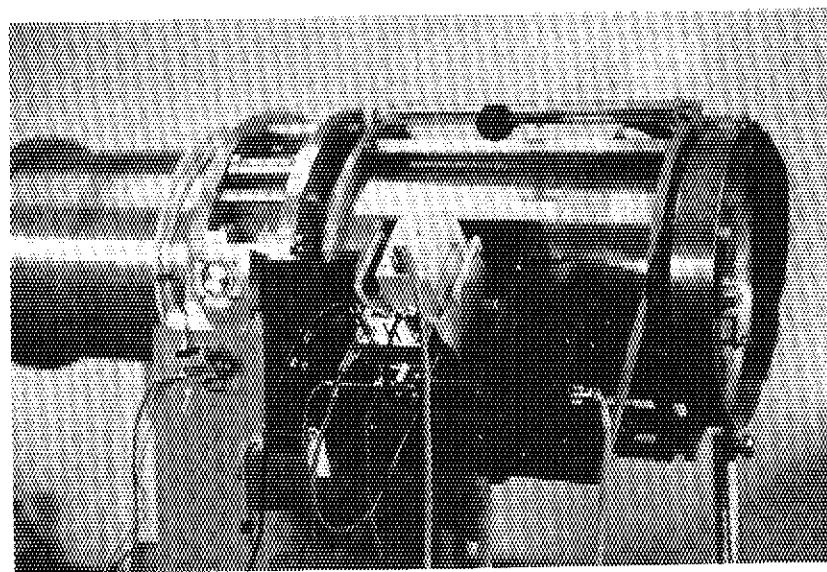


Photo. 5.3 Performance tests of developed measuring system using
40cm ϕ mock-up contaminated pipe