

# 原子力発電所保守点検機械化設備の開発

## Development of Automated Equipment for Reduction of Personnel Radiation Exposure in Nuclear Power Plants

原子力発電所運転員の放射線被ばく量低減対策の一環として開発している移動式点検装置と原子炉水放射性核種自動分析装置について紹介する。移動式点検装置は、温度計、振動計、マイクロホン及び放射線量計を積載した自走車を発電所の中央操作室から遠隔操作し、原子炉建屋内の機器を遠隔点検する装置である。原子炉水放射性核種自動分析装置は、原子炉水の採取から放射線計測、計測データの解析に至る一連の作業を自動化し、放射能分析作業の省力化とともに作業員の被ばく量を低減する。

大串 明\* Akira Ôgushi

藤井正昭\* Masaaki Fujii

水野雄弘\*\* Kazuhiro Mizuno

### 1 緒 言

国内の商用原子力発電所は、営業運転するものも10基に及び、その運転経験も5年を超えるに至った。この間、各電力会社を中心として、これら原子力発電所の運転、保守について多くの情報を得るとともに、種々の経験を積んできた。これらの結果に基づき、運転操作、保守作業をルーチン化、合理化し、運転員の作業量と放射線被ばく量を低減する努力がなされ相当の効果を挙げた。しかし、我が国における原子力発電所の建設計画に対し、現状の運転操作、保守作業で臨むとすると、運転要員の確保が近い将来切実な問題となるのは明白である。この問題に対処するため、本稿は保守点検作業を更に高度に機械化し、運転員の放射線被ばく量を低減することを第一目標とし、更には高放射線レベルのため、運転員が常時近づくことを避けていた個所まで保守点検ができる設備の開発を試みた。

原子力発電所の運転保守に伴って放射線被ばくを受ける作業には、運転中の機器を点検確認するような放射線下での作業と、原子炉冷却水の化学分析のような放射性物質を直接取り扱う作業とがある。これら作業時の放射線被ばく量を低減させるためには、放射線下での作業の遠隔化及び放射性物質取扱い作業の自動化が必要である。このような観点から、まず第一に遠隔操作で機器の点検ができる移動式点検装置と、原子炉冷却水中の放射性物質を自動的に分析定量できる原子炉水放射性核種自動分析装置を試作した。

### 2 原子力発電所用移動式点検装置の開発

#### 2.1 原子力発電所内の機器点検作業

原子力発電所の通常運転中の作業内容を表1に示す。これらの作業による放射線被ばく量は、年間約65マンrem<sup>(2)</sup>である。放射線被ばくは、放射線下での作業割合の高い機器の巡回点検、保守及び修理によるものが大部分である。

原子炉建屋内の機器は、通常、運転員の巡回点検により、その動作状態を確認している<sup>(3)</sup>。表2に、巡回点検時の主な点検項目とその点検に必要な感覚、更に点検の遠隔操作化に使用する検出器も合わせて示す。点検に必要な感覚は、視覚が圧倒的に多く、原子炉建屋内点検個所の約70%を占めている。

機器点検作業は、運転員の日常業務のうち放射線下作業の主要項目の一つであり、これを遠隔操作化すれば次の効果が

表1 原子力発電所通常運転中の作業 沸騰水型(BWR-3)原子力発電所の作業分析結果の一部である。

| 作業場所<br>作業名               | 中央操作室              | 原子炉建屋、タービン建屋                           |
|---------------------------|--------------------|----------------------------------------|
| 巡 回 点 検                   | ――                 | 運転中機器の動作状況点検                           |
| 定 例 試 験<br>(待機系の機能<br>試験) | 系統の起動、停止操作<br>計器監視 | 機器の動作確認                                |
| 保 守                       | 計器保守               | イオン交換樹脂、フィルタ類の<br>再生、交換及びガス、油脂類の<br>補給 |
| 修 理                       | 系統の隔離、復旧           | 小規模な機器分解修理*                            |
| 運 転                       | 計器監視<br>出力変更操作     | ――                                     |

注：\*大規模な機器分解は、燃料交換時などプラント停止時に実施する。

期待できる。

- (1) 機器点検に伴う放射線被ばく量の低減
- (2) 高放射線領域点検機能の強化

#### 2.2 移動式点検装置

##### 2.2.1 概 要

移動式点検装置の概念的な構成を図1に示す。この点検装置では、運転員は中央操作室から原子炉建屋内の移動ステーションを操作し、点検対象機器の温度、振動などを知り、異常を検知するに必要なデータを得ることができる。

機器点検作業を遠隔操作化するには、点検対象機器のそれぞれに検出器を設置し、それらの信号を中央操作室で集中監視してもよい。このような固定式のものに対して、移動式点検装置の特長を挙げると、

- (1) 低コスト

検出器数が少なく、信号用ケーブル長さが短くて済む。沸騰水型(BWR)-3型原子力発電所の原子炉建屋を対象にした試算では、固定式と比較して検出器数を約 $\frac{1}{2}$ に、信号ケーブル長さを約 $\frac{1}{8}$ に低減できる。

\* 日立製作所原子力研究所

\*\* 日立製作所大みか工場



(2) 汎 用 性

検出器を固定していないため、機器故障時などには通常の点検個所以外の点も点検できる。

表 2 機器点検項目と点検に使う感覚 BWR型原子力発電所の作業分析結果の一部である。

| 点 検 項 目                 | 点検に使う感覚 |     | 感覚に代わる検出器       |
|-------------------------|---------|-----|-----------------|
|                         | 主       | 従   |                 |
| 機器配管からの水、水蒸気の漏れ         | 視       | —   | テレビカメラ          |
| 弁、スイッチの開閉<br>機器の格納位置    | "       | 触   | "               |
| 計器指示、サイトグラス（流量、液量）      | "       | —   | "               |
| ベルトの緩み                  | "       | —   | "               |
| ブラシの火花<br>（整流子、スリップリング） | "       | —   | "               |
| 機 器 外 観                 | "       | —   | "               |
| 回 転 機 の 振 動             | 触       | —   | 振 動 計           |
| 機器、配管の温度<br>（軸受、ドレン配管）  | "       | —   | 温 度 計           |
| 機器、配管の緩み<br>（部品の外れ、緩み）  | 聴       | —   | マイクロホン<br>振 動 計 |
| 機 器 の 過 熱               | 臭       | 視、触 | テレビカメラ、温度計      |
| 放 射 線 レ ベ ル             | —       | —   | イオン チェンバ        |

2.2.2 装置の構成

移動式点検装置の構成を図 2 に示す。

(1) プロセス計算機

点検漏れのないよう点検個所、点検項目などのガイダンスと移動ステーションからの信号の処理及び機器点検結果の管理など、運転員補助機能をもつ。

(2) コンソール

移動ステーションの操作、点検データの監視などに使う。

(3) 固定ステーション

移動ステーションとコンソール間の信号中継器と移動ステーション自走車のバッテリー充電器から成る。

(4) 移動ステーション

点検用検出器、検出器操作用マニピュレータ、信号送・受信器及び自走車から成る。

点検用検出器：サーミスタ温度計、圧電形振動計、マイクロホン、放射線量率計（イオン チェンバ）及び白黒ビジコン テレビカメラ（立体像を構成させるため 2 台使用する<sup>(4),(5)</sup>）。

マニピュレータ：温度、振動検出器を点検対象機器に接触させるために使う（電動サーボ式、動作の自由度 5）。

信号送受信器：検出器の信号と移動ステーションの制御信号を 1 本の同軸ケーブルを通して多重伝送する。テレビ映像 2 回線、デジタル 21 回線及びアナログ 27 回線の容量をもつ。

自走車：バッテリー駆動、光学誘導方式。床面に布設したガイドテープと床面との光の反射率の差を検出しながら、ガイドテープに沿って自動走行する。

2.2.3 試作機の概要

移動式点検装置を構成する立体テレビ、マニピュレータ及び自走車について、試作機によりその機能を確認した。

図 3 にコンソール、図 4 に移動ステーションを示す。コンソールの上部左は CRT（Cathod Ray Tube）ディスプレイで、点検対象機器の配置と移動ステーションの走行ルートを表示

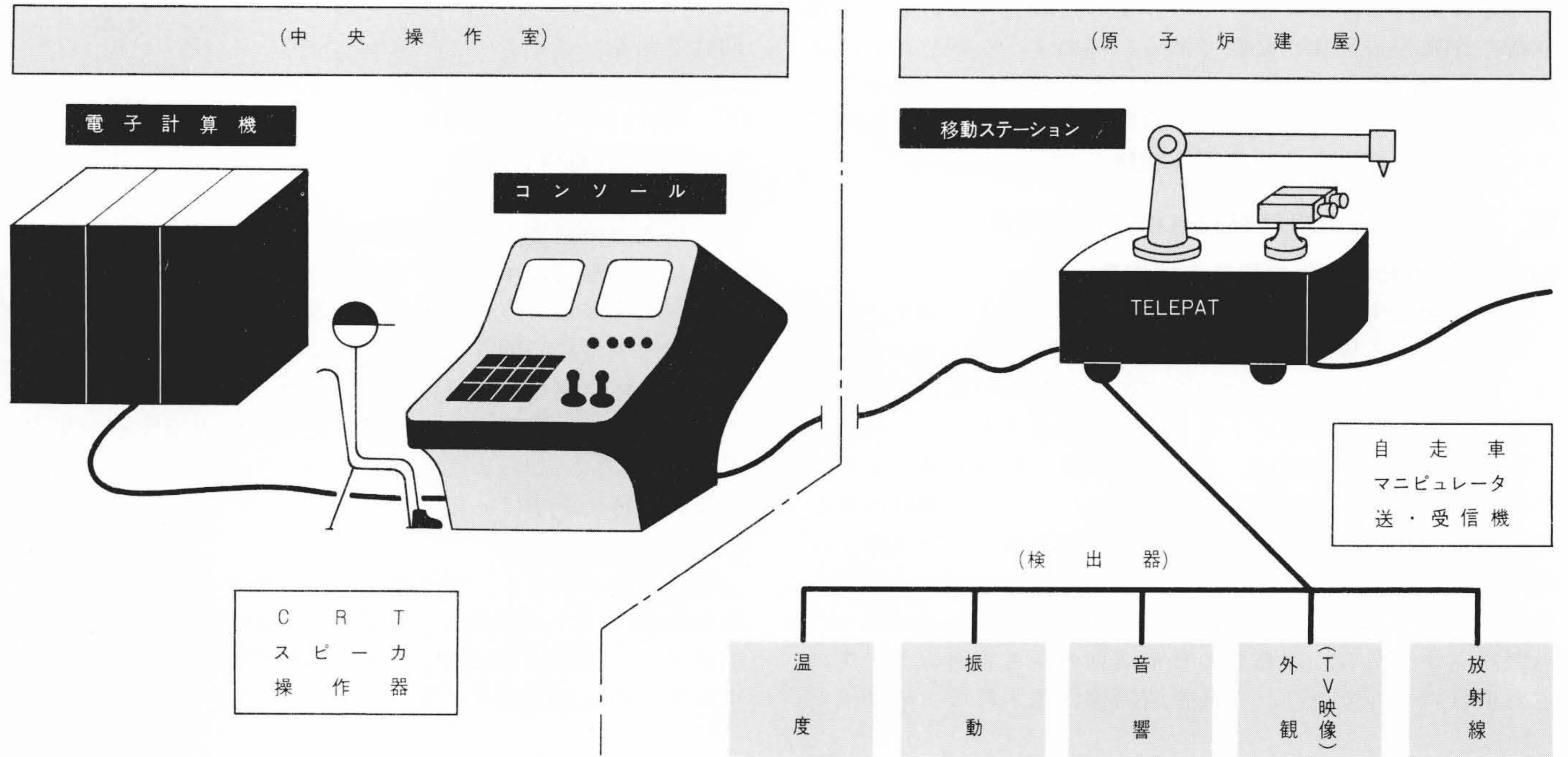


図 1 移動式点検装置の概要 運転員は、中央操作室から移動ステーションを遠隔操作し、機器を点検する。



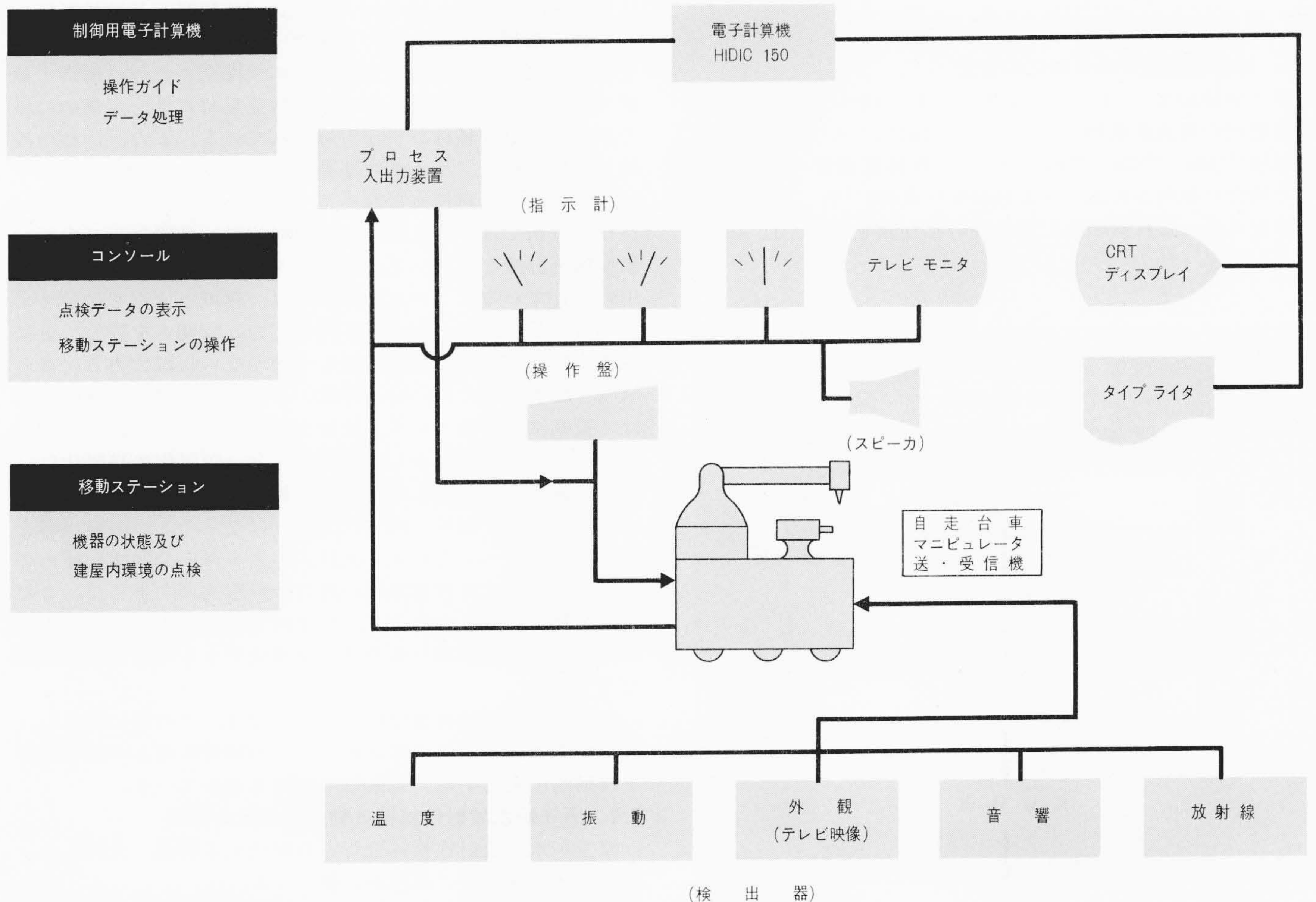


図2 移動式点検装置の機器構成と機能分担 遠隔操作による原子力発電所用機器点検装置である。

している。上部右はテレビモニタで、点検中のモータとマニピュレータの先端部が映っている。

図4の移動ステーションは、自走車の大きさが約長さ1,000×幅500×高さ500(mm)である。5cm幅のガイドテープを使い、50cm/sの速度の場合、車体の位置ずれ±4cm以内で自動走行できた。

図3、4に示した試作機と別に、2台のテレビカメラを使い、偏光式立体テレビを構成し、マニピュレータの操作実験を行なった。テレビカメラに焦点距離100mmのレンズを装着した場合、テレビカメラから1mの距離において10mm以内の奥行き差を識別でき、立体テレビモニタで監視しながらマニピュレータを遠隔操作できることを確認した。



図3 移動式点検装置のコンソール 中央操作室に設置する。上部左はCRTディスプレイ、上部右はテレビモニタを示す。

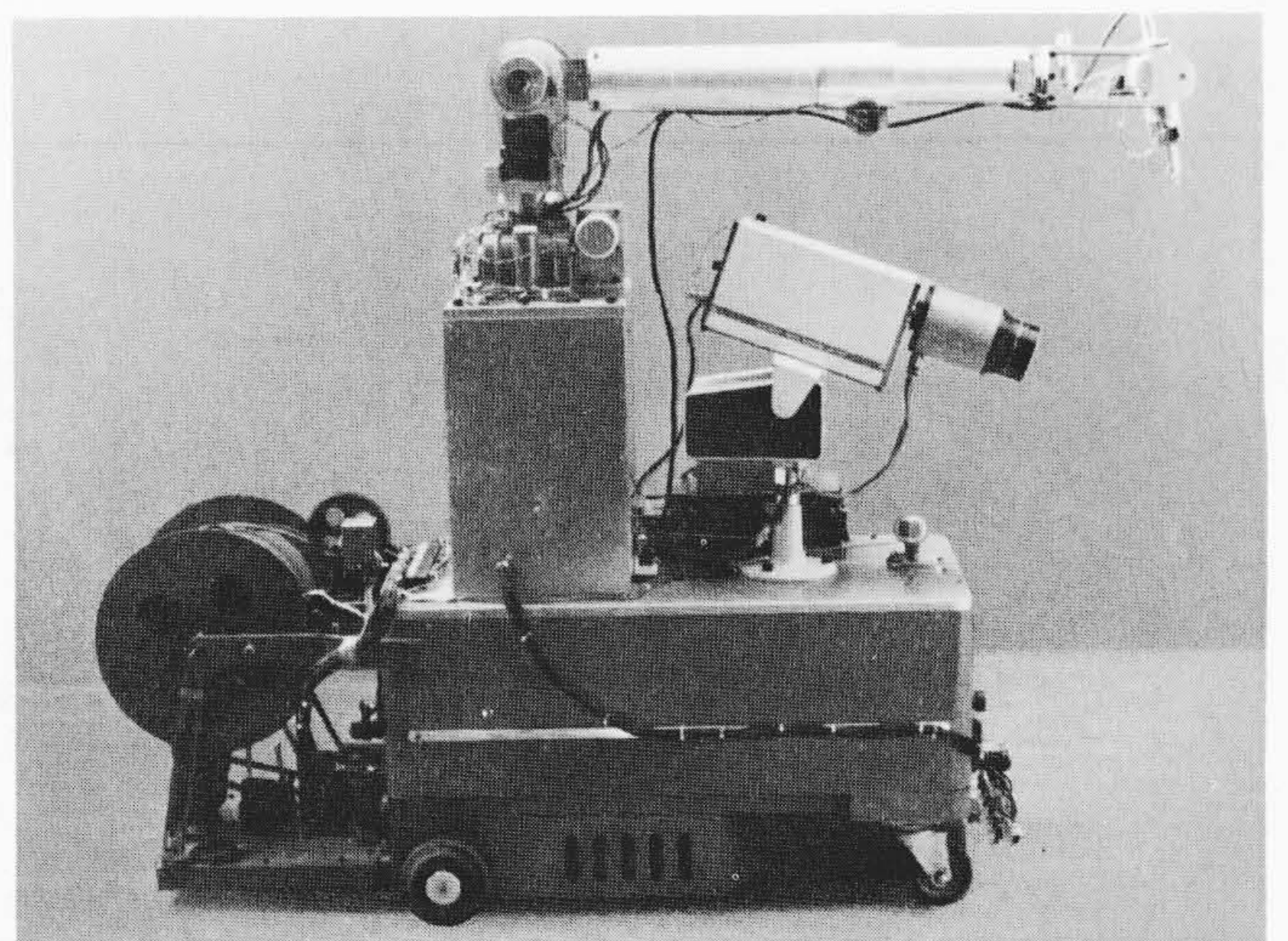


図4 移動式点検装置の移動ステーション 点検用検出器を積載し、中央操作室からの遠隔操作により原子炉建屋内を巡回する。



### 3 原子炉水放射性核種分析の自動化

#### 3.1 放射性核種分析自動化の背景

原子炉冷却水(以下、原子炉水と略す)の中には、一次冷却系構造材の腐食生成物が原子炉内で放射化されて生じた放射性核種( $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ など)と、燃料被覆管に破損が生じた場合に燃料から漏出する核分裂生成物( $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ など)が存在する。これらの放射性核種の存在量を迅速、且つ的確

に把握することは、構造材の腐食状況の監視、及び燃料棒の健全性の監視に欠くことのできない手段であり、原子炉の安全運転、更には、原子力発電所の環境保全のために極めて重要である。このため、原子炉の平常運転時には、定期的に原子炉水の放射性核種分析が実施されている。また、同様の放射性核種分析は、原子炉の運転停止時、及び定期検査期間中に実施される燃料検査においても行なわれる。これらの放射性核種分析では、これまで主に放射化学的手段により分析対象核種を分離した後、その放射能を測定する方法が一般的に用いられている。この化学分離には、複雑な操作を必要とする場合が多く、そのため、多大の労力と時間とを要し、更に分析作業中の放射線被ばく量も少なくない状況にある。この現状を改善するため、分析作業の省力化と作業者の放射線被ばく量低減を目的として、放射性核種分析の自動化の要求が強くなってきた。しかし、複雑な化学分離操作の自動化には難しい面が多い。最近、 $\text{Ge}(\text{Li})$   $\gamma$ 線検出器が著しい進歩をとげ、広い分野で実用に供されるようになった。この検出器を用いた  $\gamma$ 線スペクトロメータは、エネルギー分解能が極めて高く、これにより核種弁別能力が飛躍的に向上した。この特長を利用することにより、化学的な核種分離操作を最小限に抑え、放射性核種分析の目的を達成できる可能性が生まれた<sup>(6),(7)</sup>。

原子炉水放射性核種分析の自動化では、この点に着目し、原子炉水の採取から  $\gamma$ 線計測データの解析に至る一連の操作を自動的に実行する分析装置の開発を進めている。

#### 3.2 原子炉水放射性核種自動分析装置の概要

原子炉水の放射性核種分析を自動化する場合、大別して、**図5**に示す8段階の操作が必要になる。

原子炉水放射性核種自動分析装置は、**図6**に示すような機器で構成し、**図5**の8段階の操作を順次実行するように設計する。

試料処理装置は、原子炉水の採取から試料移送までの機能をもつ。この装置には、原子炉水のサンプリング配管が接続され、この配管を通して原子炉水を採取する。

$\text{Ge}(\text{Li})$   $\gamma$ 線検出器は、実際には、試料処理装置内に組み込まれている。この検出器と多チャンネル波高分析器が、 $\gamma$ 線スペクトロメータの主要構成要素である。

データ処理装置は、多チャンネル波高分析器から転送される  $\gamma$ 線計測データを解析し、分析対象核種ごとに放射能濃度を

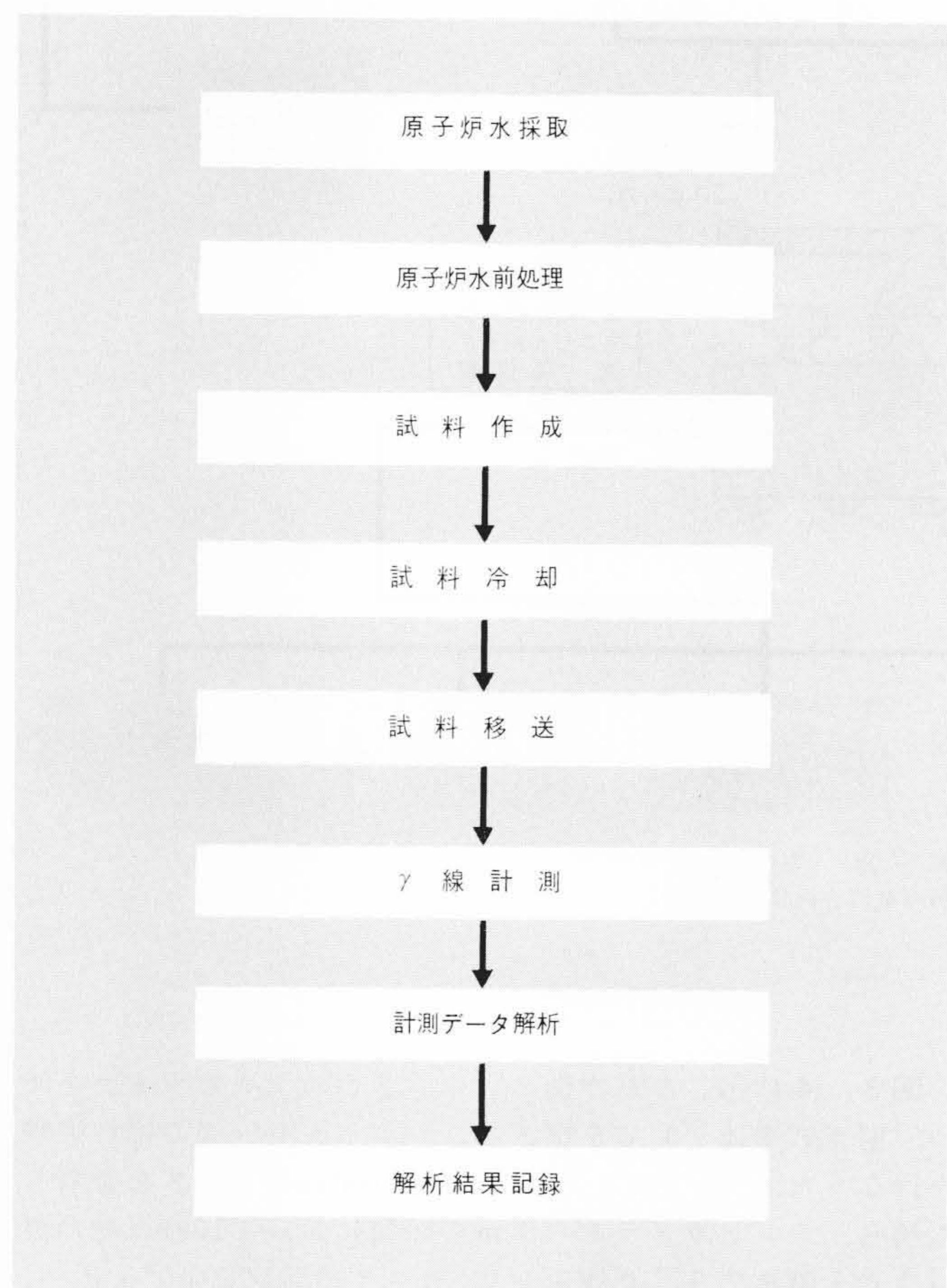


図5 放射性核種自動分析の手順 原子炉水の採取から試料移送までが、試料処理装置の機能となる。

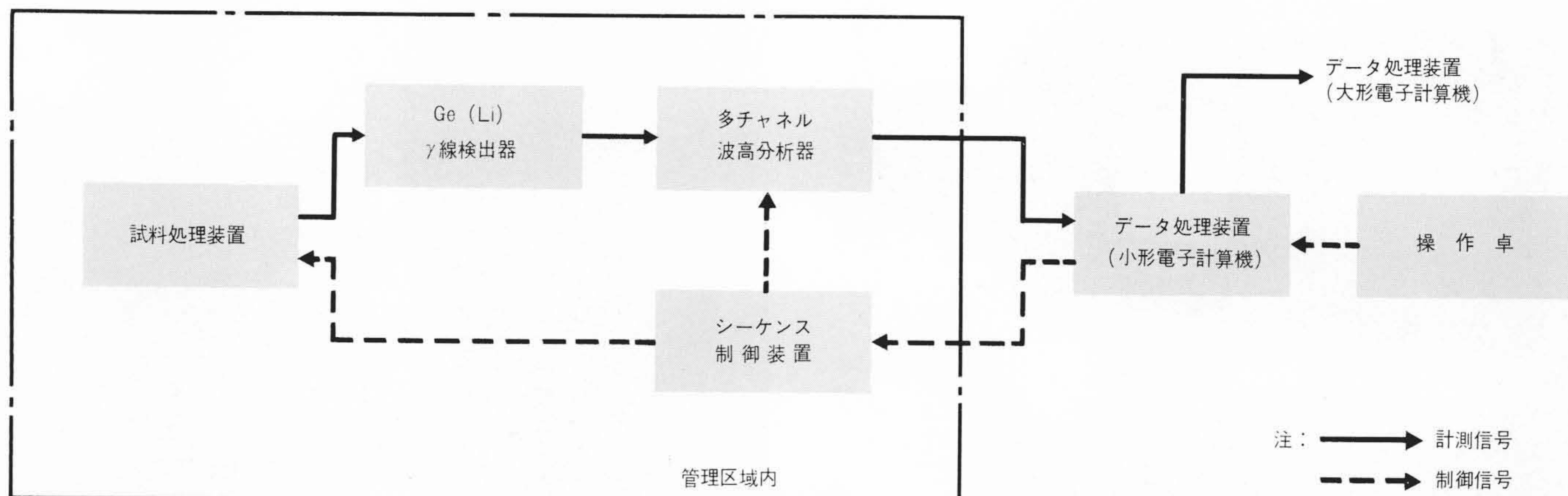


図6 原子炉水放射性核種自動分析装置の構成 原子炉水は、試料処理装置により採取処理され、その  $\gamma$ 線が計測される。 $\gamma$ 線計測データは、データ処理装置で解析し、核種と放射能濃度を求める。



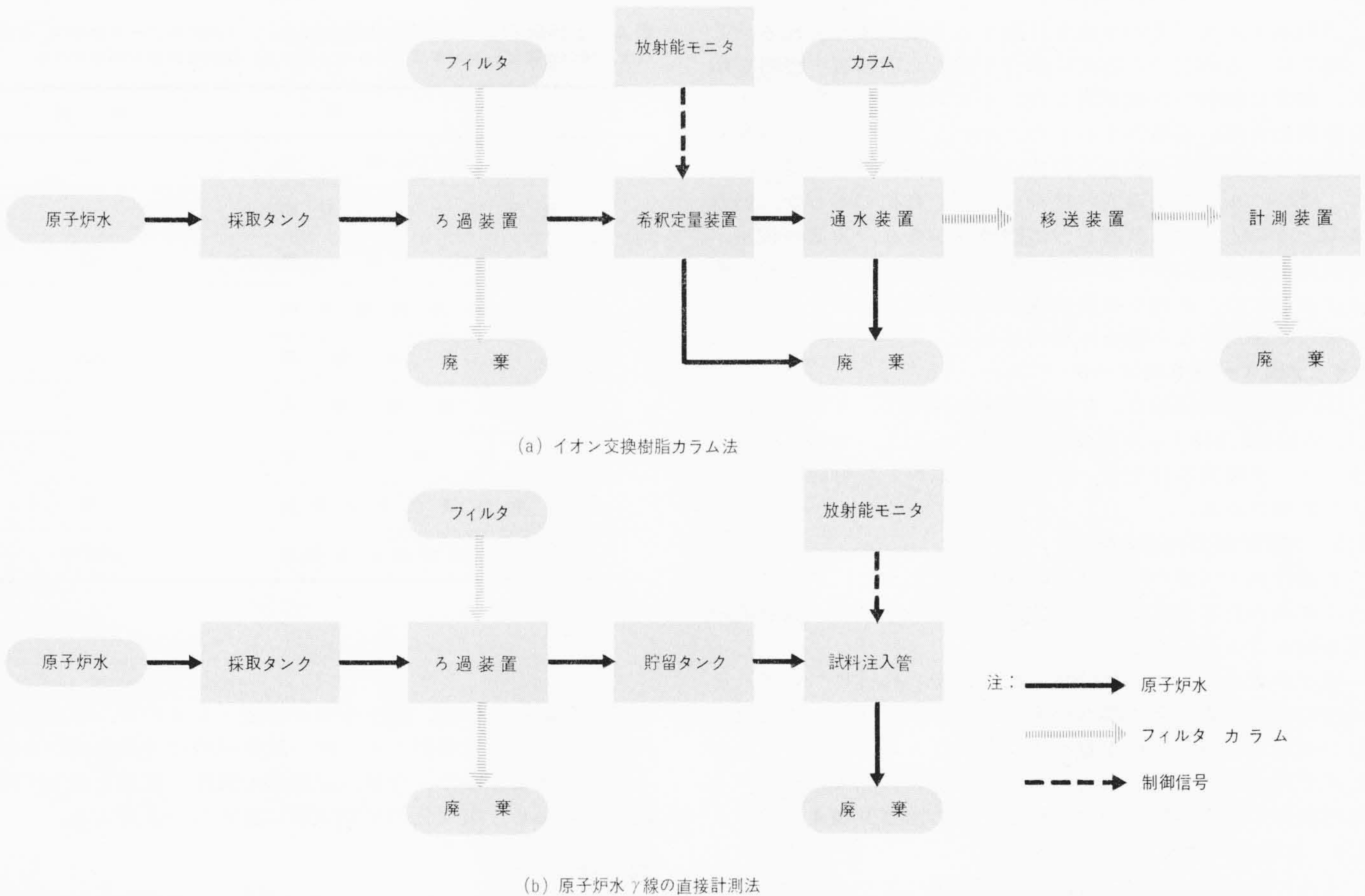


図 7 試料処理装置の概要      イオン交換樹脂カラム法は、装置に複雑な機構部が必要となる。

求める。解析結果は、一定の形式で印字記録し、報告書とする。

図 6 の一点鎖線内は、管理区域内に設置される機器を示す。これらは分析実施時には、シーケンス制御装置の制御のもとに動作し、オペレータの介入は必要としない。但し、操作卓からの指令で制御することもできる。

γ線計測データの解析は、発電所に設置される大形電子計算機の機能の一つとすることもできる。この場合には、γ線計測データを小形電子計算機を介して大形電子計算機へ伝送する。

3.3 試料処理装置

試料処理装置の設計で最も重要な問題は試料水処理方式の選定である。この試料水の処理方式としては、分析装置としての信頼性、コストなどを考慮すると、より単純な方式の採用が望ましい。この観点から、ここでは次の二つの方式を取り上げ説明する。

- (1) イオン交換方式：イオン交換樹脂、又はイオン交換紙により、原子炉水から分析対象核種を分離捕集し、このイオン交換樹脂、又はイオン交換紙を放射能測定試料として、そのγ線を計測する方式である。この方式では、広い放射能濃度範囲の分析を可能にする手段として、イオン交換樹脂などへの試料水の通水量を変化させることが考えられる。この場合、特に高放射能濃度の試料水に対しては希釈した後、適当量を通水する方法をとる。
- (2) 原子炉水γ線の直接計測方式：原子炉水そのものを放射能測定試料としその放出するγ線を計測する方式である。この方式で、特に広い放射能濃度範囲の分析を可能にする一つの案として、Ge(Li)γ線検出器の周囲に有効体積の異なる試料注入管を配置し、放射能濃度レベルにより注入管を選択し

表 3 試料水処理方式の比較      原子炉水γ線の直接計測法は、信頼性の高い試料処理装置を実現するものと期待される。

| 試料水処理方式         |                   | イオン交換樹脂カラム法               | 原子炉水γ線の直接計測法              |
|-----------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|
| 項 目             |                   |                           |                           |
| 放 射 能 濃 度 範 囲   |                   | 10 <sup>-5</sup> μCi/ml以上 | 10 <sup>-5</sup> μCi/ml以上 |
| 分析精度            | 希釈などで生ずる定量誤差      | あ り                       | な し                       |
|                 | 核 種 捕 集 効 率 の 変 動 | 〃                         | 〃                         |
|                 | 妨 害 核 種 の 影 響     | 小                         | 大                         |
|                 | 配管内残留放射能の影響       | 〃                         | やや大                       |
| 分析所要時間(冷却時間を除く) |                   | 30min以下                   | 30min以下                   |
| 原 子 炉 水 採 取 量   |                   | 1,000ml以下                 | 1,000ml以下                 |
| 校正作業            | 試料水定量装置の校正        | 要                         | 不 要                       |
|                 | 核 種 捕 集 効 率 の 測 定 | 〃                         | 〃                         |
|                 | γ線検出効率の測定         | 〃                         | 要                         |
| 保全作業            | 前処理フィルタの交換        | 〃                         | 〃                         |
|                 | 核 種 捕 集 材 の 補 充   | 〃                         | 不 要                       |
|                 | 計測済み試料の廃棄         | 〃                         | 〃                         |
| 信 頼 性<br>安 全 性  | 部 品 点 数           | 多                         | 少                         |
|                 | 機 構 部             | ろ過装置、通水装置<br>カラム移送装置      | ろ過装置                      |
|                 | 開 口 部             | 2 個所                      | 1 個所                      |



て試料水を入れ、そのγ線を計測する方法が考えられる。

図7に、この二つの方式に基づく試料処理装置の概略を示し、表3に両者の比較を示した。イオン交換法では、イオン交換樹脂を用いる場合を示した。イオン交換法では、分析対象核種の分離濃縮ができるので、妨害核種の影響を受けにくく、低レベル放射能濃度の試料に対して有利であるが、通水装置、カラムの移送装置などの機構部があり、装置の校正、保全作業も比較的多いという欠点がある。原子炉水γ線の直接計測法では、単純な装置構成で高信頼性が期待され、妨害核種の影響が少ない場合に有利になる。

3.4 γ線スペクトロメータ

Ge(Li)γ線検出器は、有効体積50cc程度で、その出力信号は、増幅後2,048チャンネル波高分析器に入力し、γ線スペクトルのデータ収集を行なう。計測時間は試料の放射能レベルにより制御される。

3.5 γ線計測データの解析

γ線計測データの解析は、図8に示すように、γ線スペクトルに現われる光電ピークの位置と面積から核種と放射能濃度を知ることが基本とする。

原子炉水の放射性核種分析では、特定の核種について、その放射能濃度を求める場合が多いと思われるが、この場合には分析対象核種、そのγ線エネルギーなどのデータをあらかじめデータ処理装置へ入力しておく。解析の結果は、データ処理装置の出力機器に出力される。その内容を表4に示す。

3.6 自動化の効果

上述の放射性核種自動分析装置の採用により、分析作業そのものの省力化、放射線被ばく量低減が達成できる。しかし、

表4 γ線計測データ解析結果の出力 γ線計測データの中に、分析対象核種の光電ピークが確認できなかったとき、検出限界値が印字される。

| 項 目                 | 単 位    |
|---------------------|--------|
| 試 料 番 号             | —      |
| 原 子 炉 水 採 取 日 時     | —      |
| 試 料 容 積             | ml     |
| γ 線 計 測 開 始 日 時     | —      |
| γ 線 計 測 時 間         | min    |
| 放 射 性 核 種 名         | —      |
| 放 射 能 濃 度           | μCi/ml |
| 放 射 能 濃 度 測 定 誤 差   | %      |
| 放 射 能 濃 度 検 出 限 界 値 | μCi/ml |

分析装置の校正作業、保全作業が必要となるので、これらの作業に要する作業時間とその際の放射線被ばく量を減少させることが必要になる。今後、試作機の製作、試験を通じて問題点を解決し、実用化の早期実現に努めたいと考える。

4 結 言

原子力発電所の放射線被ばく量低減対策の一環として、機器点検作業を遠隔操作化する移動式点検装置“TELEPAT”と原子炉水放射性核種自動分析装置の開発を進めた。今後、更に試作機の改良を重ね、実用化を目指す予定である。

終わりに、本点検装置及び放射性核種自動分析装置の構成に関し、運転経験に基づく有益な御意見をいただいた東京電力株式会社福島原子力発電所並びに同社原子力開発研究所の各位、立体テレビの性能試験に便宜を図っていただいた日立電子株式会社の各位に対し深謝するとともに、本開発研究に当たり終始御指導を得た関係各位に対しても併せて深く謝意を表わす次第である。

参考文献

(1) 木村、福崎ほか：「保守管理用コンソール、計算機化制御盤の開発(2)」 日本原子力学会 昭和49年炉物理・炉工学分科会予稿集、C 27 (昭49-10)

(2) D. G. Bridenbaugh, G. B. Lloydほか：“Maintenance and In-Service Inspection Experience At Large Nuclear Power Plants” IAEA Symposium on Experience from Operating and Fueling of Nuclear Power Plants, Vienna, Austria (Oct. 8-12, 1973)

(3) 高橋：「運転員3人の秘密、火力発電所にみるジョブ分析の成果」 オーム (昭46-8)

(4) 大越：「三次元画像工学」 産業図書 (昭47-6)

(5) 野田ほか：「医用立体X線テレビジョン」 テレビジョン Vol. 25, No. 5 (昭46-5)

(6) K. F. Graham, W. J. Bestoso and J. M. Forker：“Light-Water Reactor Coolant Activity Monitor Based on Ge(Li) Detector”, Trans. Am. Nucl. Soc., 16, 237 (1973)

(7) 大塔、中岡、神戸、神山：「原子炉冷却水系の放射化学管理 その1 放射能統計解析装置による原子炉冷却水中の放射性核種の同定」 電力中央研究所技術第一研究所報告, 研究報告 73031, (昭48-11)

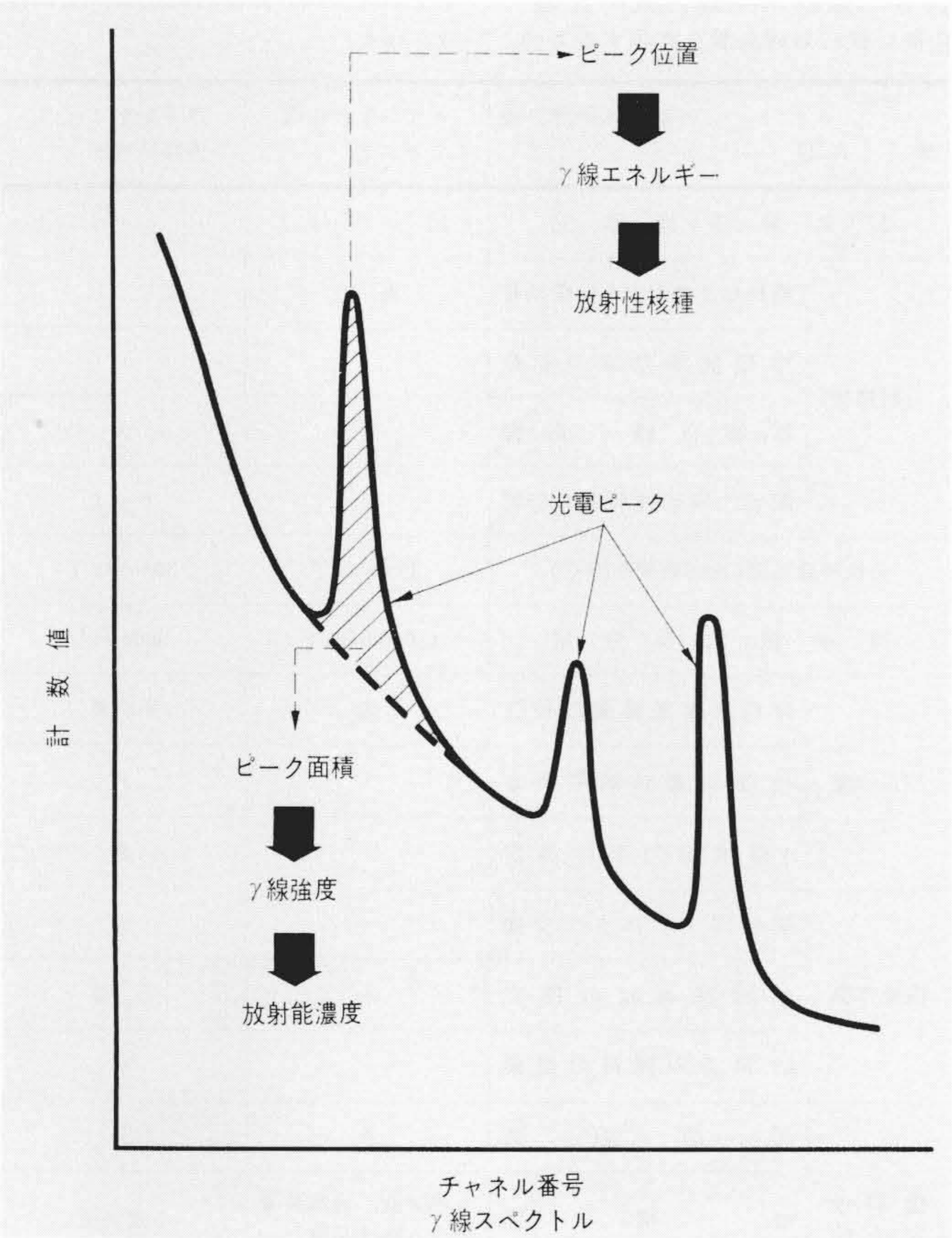


図8 γ線計測データ解析の方法 γ線スペクトルの光電ピークの位置(チャンネル番号)と面積が核種についての情報を与える。