

原子力発電所へのロボット技術の応用

Application of Robot Technology to Nuclear Power Plants

原子力発電所での運転員及び作業員の放射線被ばく量と作業量の低減対策の一環として開発している移動式点検装置、原子炉冷却水放射性核種自動分析装置及び原子力配管遠隔操作式自動溶接機について紹介する。

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。原子炉冷却水放射性核種自動分析装置は、原子炉冷却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する装置である。また、原子力配管遠隔操作式自動溶接機は配管への溶接機の装着後は、溶接状態をITVで監視しながら遠隔操作で自動溶接する装置である。

張間利昭*
石塚 昭**
山田周治***
飯塚富雄****
水野雄弘*****

Harima Toshiaki
Ishizuka Akira
Yamada Shûji
Iizuka Tomio
Mizuno Katsuhiro

1 緒 言

国内の軽水冷却型商用原子力発電所は、営業運転を行なっているものも12基に及び、その運転経験も既に7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、種種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行なわれ相当の効果を挙げた。しかし、我が国での原子力発電所の建設計画に対し、現状の運転操作、保守作業及び修理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、本研究では点検、保守及び修理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箇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、定期点検及び補修などの放射線下での作業と、原子炉冷却水の化学分析などの放射性物質を取り扱う作業とがある。これらの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と自動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、従来からの産業用ロボットの技術を基礎にして、原子力配管遠隔操作式自動溶接機を開発した。更に、遠隔操作で機器の点検ができる移動式点検装置¹⁾、原子炉冷却水(以下、原子炉水と略す)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の開発を進めている。

特に、移動式点検装置及び放射性核種自動分析装置の開発は、東京電力株式会社と日立製作所とが共同研究を推進しているものである。

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²⁾。表1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

表1 機器点検項目と点検に使う感覚 沸騰水(BWR)型原子力発電所の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	—	テレビジョンカメラ
弁、スイッチの開閉 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 (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 (軸受、ドレン配管)	〃	—	温度計
機器、配管の緩み (部品の外れ、緩み)	聴	—	マイクロホン 振動計
機 器 の 過 熱	臭	視、触	テレビジョンカメラ、温度計
放 射 線 レ ベ ル	—	—	イオン チェンバ

圧倒的に多く、原子炉建屋内点検箇所の約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での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、異常を検知するのに必要なデータを得ることがで

* 東京電力株式会社福島第一原子力発電所 ** 東京電力株式会社東電原子力開発研究所 *** 日立製作所原子力研究所 工学博士

**** 日立製作所日立研究所 ***** 日立製作所大みか工場

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次に挙げる。

(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 $\frac{1}{10}$ に、信号ケーブル長さを約 $\frac{1}{10}$ に低減できる。

(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箇所以外の点も点検できる。

2.2.2 装置の構成

移動式点検装置の構成を図1に示す。

(1) プロセス計算機

点検漏れのないよう点検箇所、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。

(a) 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ジョン

カメラ(立体像を構成させるため2台使用する^{3),4)}。

(b) 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6)。

(c) 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。テレビジョン映像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。

(d) 自走車

バッテリー駆動、光学誘導方式を採用している。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ジョン、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2に移動ステーションを示す。同図の移動ステーションは、自走車の大きさが約長さ1,100×幅520×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。

偏光式立体テレビジョンを使った、視覚フィードバックによるマニピュレータの操作実験では、テレビジョンカメラに焦点距離100mmのレンズを装着した場合、テレビジョンカメラから1mの距離で10mm以内の奥行き差を識別でき、立体テレビジョンモニター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。

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目的

原子炉水の中には、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}Mn , ^{60}Co , ^{59}Fe な

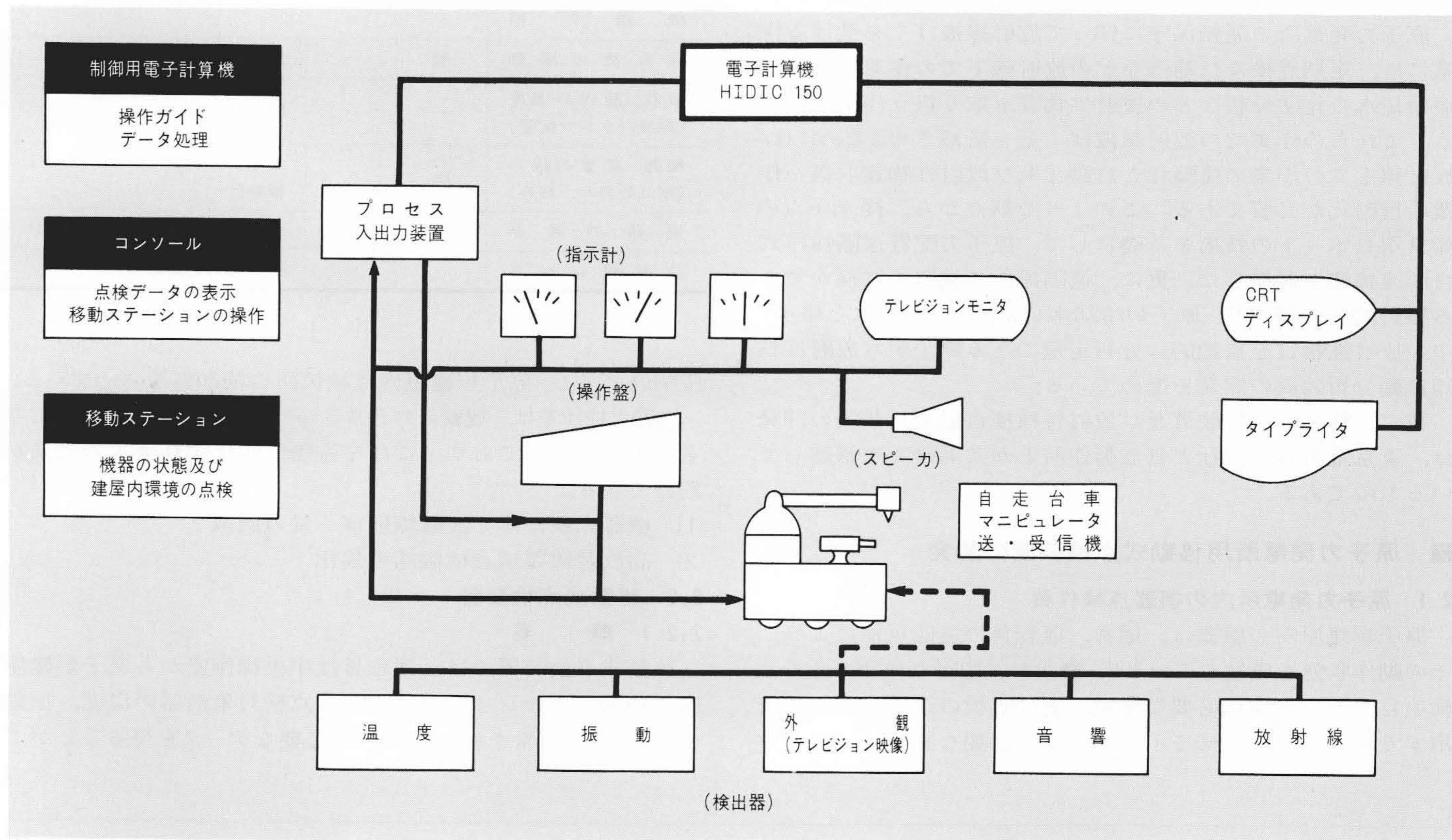


図1 移動式点検装置の機器構成と機能分担 遠隔操作による原子力発電所用機器点検装置である。

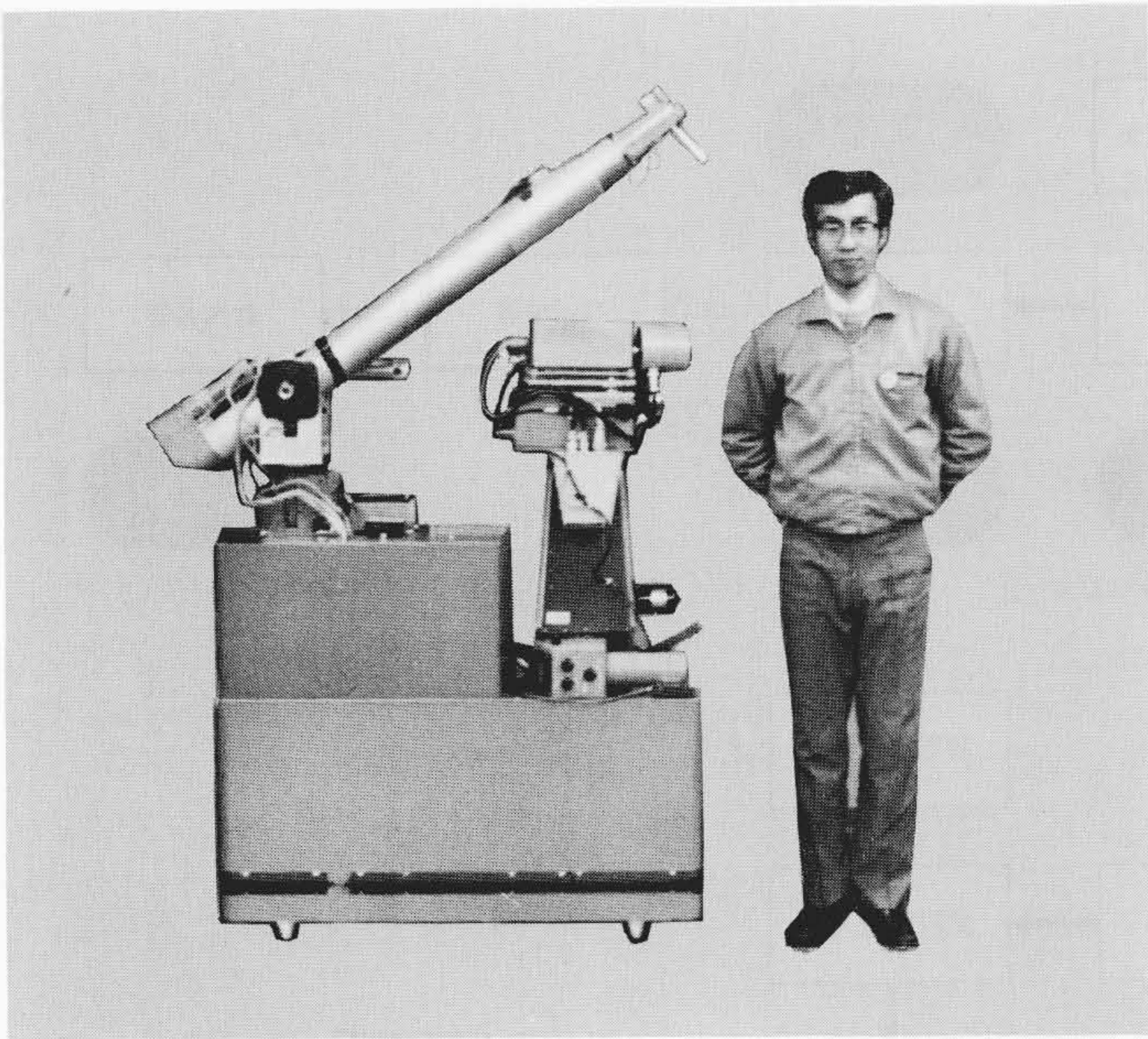


図2 移動式点検装置の移動ステーション 点検用検出器を積載し、中央操作室からの遠隔操作により原子炉建屋内を巡回する。

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}I , ^{137}Cs など)とが存在する。これらの放射性核種の存在量を迅速、か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時でも行なわれる。これらの放射性核種分析は、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、分析作業の自動化の要求が強くなってきた。この要求にこたえ、最近著しい発展を遂げたGe(Li)検出器γ線スペクトロメトリを応用して、原子炉水の採取からγ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取り上げた。

3.2 原子炉水放射性核種自動分析装置の概要

原子炉水放射性核種自動分析装置は、図3に示すような機器で構成されている。

試料水処理装置は、原子炉水の採取、前処理(汙過)、放射能測定試料の作製を行ない、その試料をγ線検出器に移送する。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。

Ge(Li)γ線検出器と多チャンネル波高分析器が、γ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γ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。

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 試料水処理装置

試料水処理装置の設計で最も重要な問題は、試料水処理法の選定である。この試料水の処理法としては、分析装置としての信頼性及びコストなどを考慮し、次の二つの方法を取り上げた。

(1) イオン交換法

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線を計測する方法である。

(2) 原子炉水γ線の直接計測法

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線を計測する方法である。この方法で、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て試料水を入れ、そのγ線を計測する方法がある。

図4に、この二つの方法に基づく試料処理装置の概要を比較して示した。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、低レベル放射能濃度の試料に対して有利である。しかし、通水装置、カラムの移送装置などの機構部が必要となる。

原子炉水γ線の直接計測法では、単純な装置構成に特徴があ

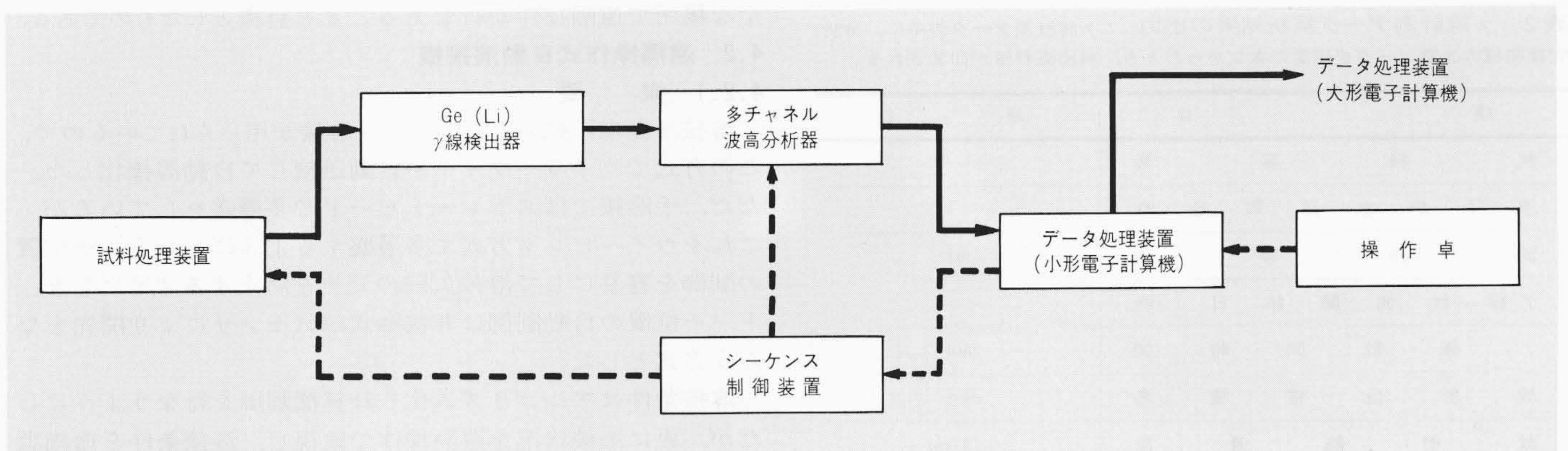


図3 原子炉水放射性核種自動分析装置の構成 試料水処理装置により、原子炉水を採取処理して放射能測定試料を作製し、そのγ線を計測する。γ線計測データは、データ処理装置で解析し、核種と放射能濃度を求める。

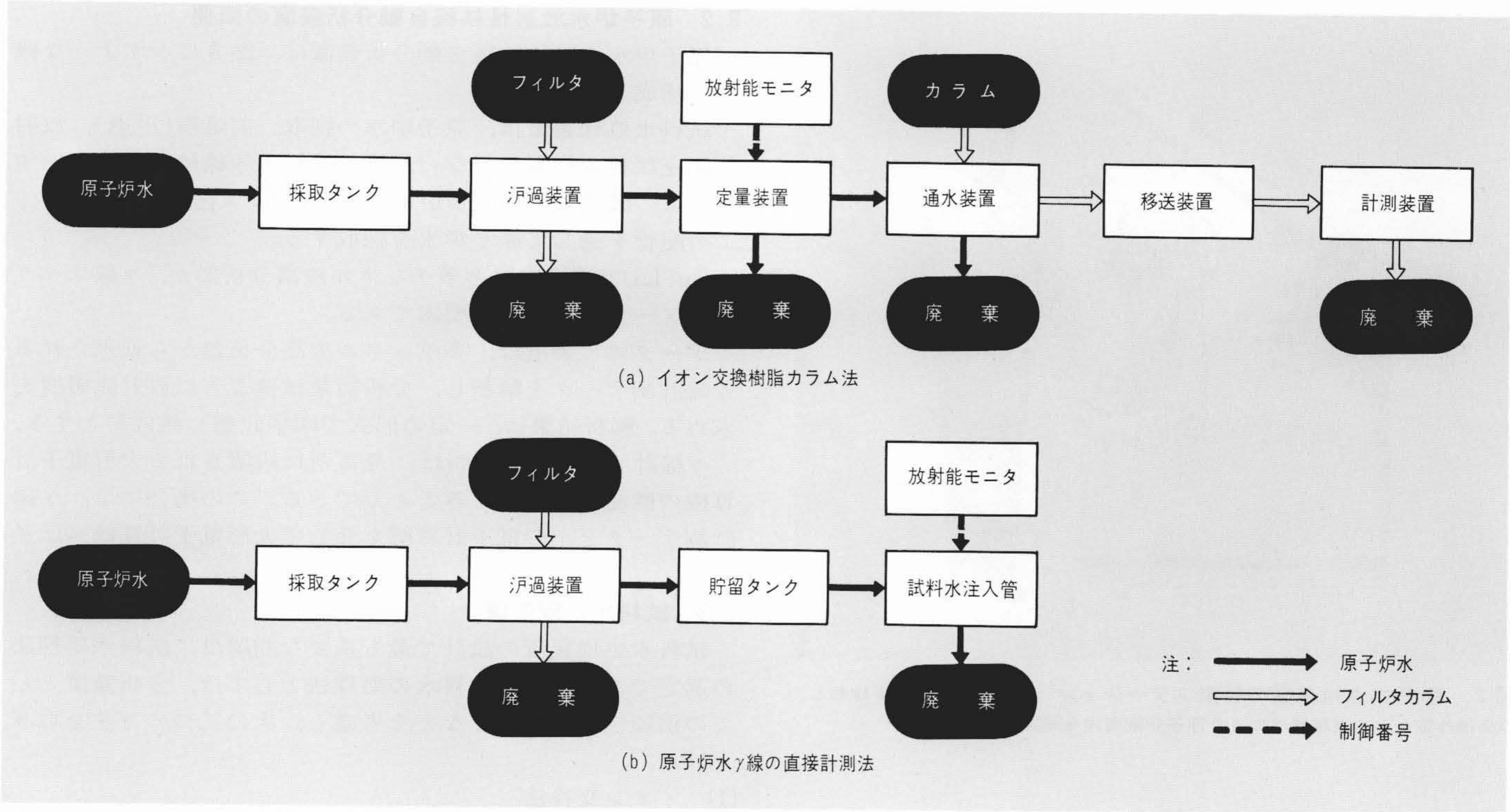


図 4 試料水処理装置の概要 イオン交換樹脂カラム法は、装置に複雑な機構部が必要となる。

る。試作装置の試験の結果、この方法は放射能濃度 $10^{-5}\mu\text{Ci/ml}$ 以上の原子炉水に適用でき、試料水処理過程で発生する分析誤差が小さく、妨害核種の影響が少ない場合に有利であることが判明した。

3.4 γ 線スペクトロメータ

Ge(Li) γ 線検出器は、有効体積50ml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。

3.5 γ 線計測データの解析

γ 線計測データの解析は、 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。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2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。今後、試作装置の製作、試験により保全作業を含めて実用化に際しての問題点を解決していきたいと考える。

4 原子力配管遠隔操作式自動溶接機

4.1 原子力発電所内の配管溶接作業

原子炉の配管は大小様々のステンレス鋼鋼管と炭素鋼鋼管により構成されている。その溶接部は安全上高度な品質が要求され、十分な非破壊検査によりその健全性を保証しなければならない。したがって、配管の溶接作業には従来高度な溶接技能をもった作業者が必要で、しかも狭い場所で、かつ高い放射線レベル下での困難な作業が多く、自動化に対する要望は極めて強かった。配管の取替作業は、配管の切断、開先切削、配管組立、溶接、溶接部の研削及び溶接部の非破壊検査から成っている。

今回開発した自動溶接機はこれらの作業のうち、溶接、研削、非破壊検査作業を自動化し、数十米離れた格納容器外の安全な場所で遠隔操作が行なえることを目標としたものである。

4.2 遠隔操作式自動溶接機

4.2.1 概 要

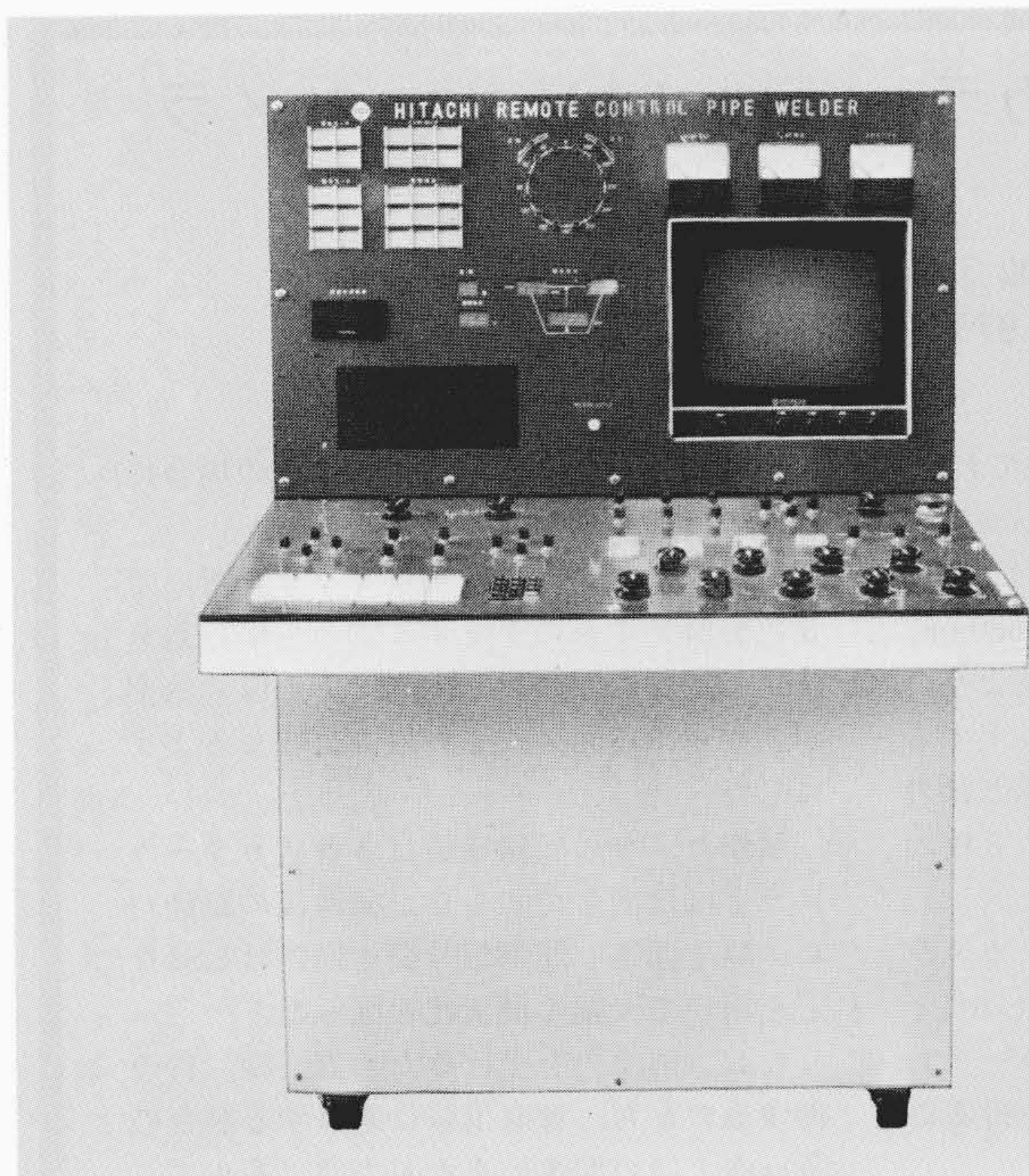
溶接は従来手動のTIGファイラー溶接が用いられているので、この方式でファイラーワイヤを自動送給して自動溶接化した。ただ、手溶接ではストレートビードで多層盛をしているが、これをウイーピング方式で多層盛するようにし、トーチ位置の制御を容易にして溶接欠陥の発生を防止するようにした。トーチ位置の自動制御は非接触式磁気センサにより開先をならう方式とした。

溶接条件はアルゴリズム化し計算機制御を行なうようにしたが、更に溶接状況を遠隔操作で監視し、溶接条件を微細調整するため小形テレビジョンカメラにより観察できるようにした。

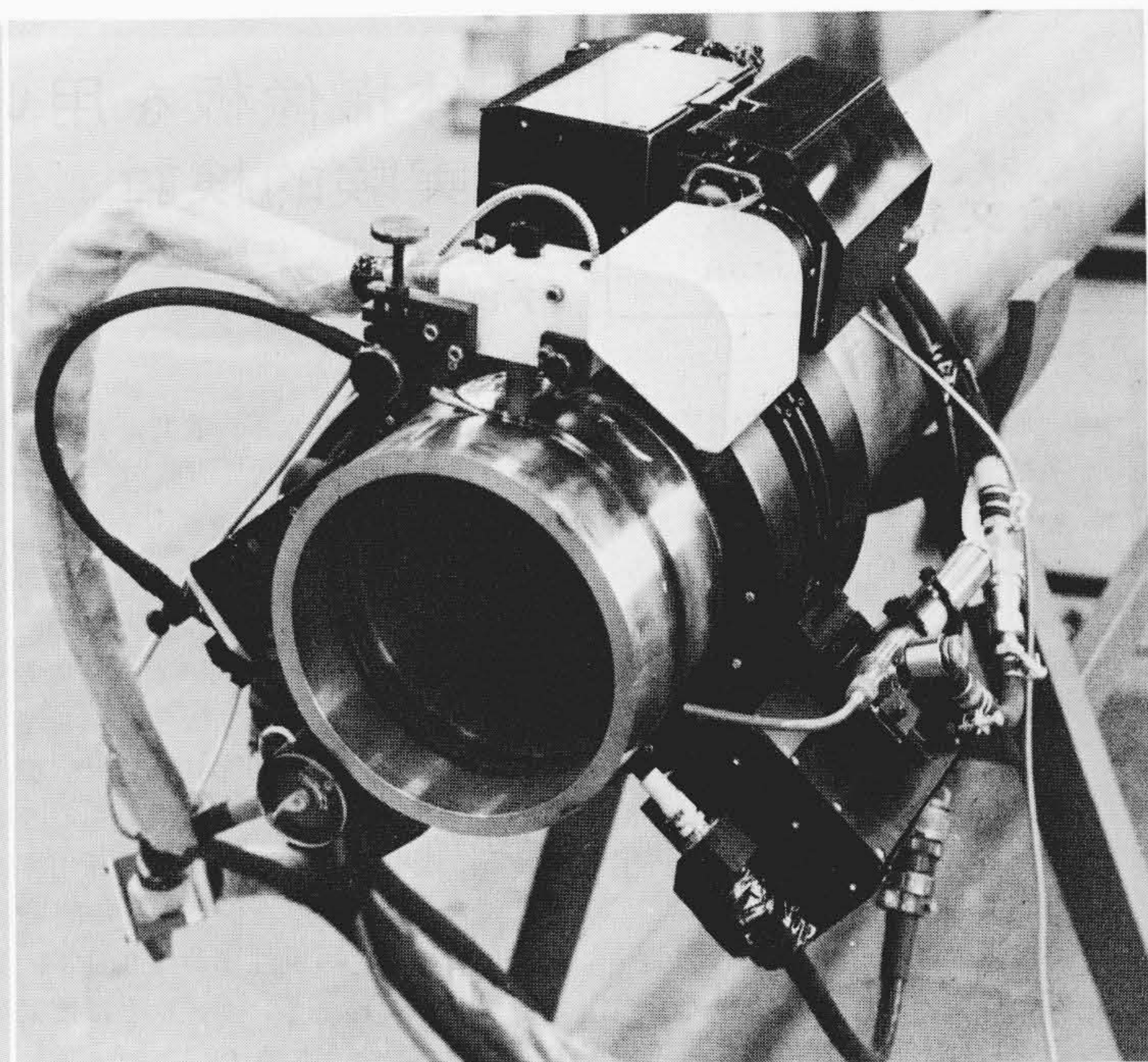
研削は高周波グラインダ方式とし、非破壊検査は超音波探

表 2 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		$\mu\text{Ci/ml}$	
放	射	能	濃
度	測	定	誤
差		%	
放	射	能	濃
度	検	出	限
界	値	$\mu\text{Ci/ml}$	



(a) 自動配管溶接機総括制御装置



(b) 自動配管溶接機溶接ヘッド

図5 原子力配管遠隔操作式自動溶接機 溶接ヘッドは触覚、視覚及び自動溶接機能を持ち、ミニコンピュータを内蔵した総括制御装置により遠隔操作される。

傷法を採用した。以上の各要素を小形軽量化し、配管に取り付けたガイドリング上を走行する台車上に搭載し、高精度に高い信頼性で稼働でき、かつ取扱い操作が容易なようにシステム化するにはそれに伴う高度な技術の適用と開発が必要であった。

総括制御はミニコンピュータHIDIC 08による計算機制御としたが、単に溶接、研削及び非破壊検査の各作業が行なえるだけでなく、操作が簡単で点検も容易であり、かつ信頼性の高い方式とする必要があった。

4.2.2 試作機の概要

図5に試作機の外観を示す。溶接ヘッドは溶接ユニット、ドライブユニット及び触覚センサユニットに3分割されている。同図の総括制御装置と溶接電源及び記録計は、溶接位置から数十メートル離れた格納容器外の安全な場所に設置され、溶接ヘッドとの間はケーブルで連結されている。

溶接ユニットには溶接トーチのほかにウイーピング機構、自動アーク電圧制御機構及びテレビジョンカメラが設置されている。テレビジョンカメラはピント調整、レンズ切替及びモニタ位置調整機能をもっている。ドライブユニットには台車走行機構のほかにファイラワイヤ送給装置が付属している。走行速度は30mm/minから400mm/minまで連続的に可変できる。総括制御装置はミニコンピュータを内蔵し、表示盤には溶接状況を監視するテレビジョンモニタ及び各種の温度、台車の位置、開先形状値などが表示され、溶接状況を十分に把握できる。また、ディスプレイは溶接電圧、電流、溶接速度などの溶接諸条件を表示する。研削及び非破壊検査を行なう場合は、溶接ユニット及び触覚センサユニットを取り外しそれぞれのヘッドを取り付ける。

溶接電源はトランジスタスイッチング方式によりローパルス：0.2～20Hz、ハイパルス：20～20000Hzが発生でき、平均電流は350Aである。

以上、概要述べたように本溶接機の特徴は触覚、視覚付で

電子計算機により遠隔制御溶接が可能な配管自動溶接機であるが、更に優れた点について次に述べる。

- (1) 溶接ヘッドは小形軽量化され、狭い場所でも取付け、取外しが1名の作業員で簡単に行なえる。
- (2) テレビジョン画像により終始溶接状況及び溶接結果を確認できる。
- (3) 数十メートル離れた場所から遠隔操作が行なえる。
- (4) 電源はトランジスタスイッチング方式のハイパルス及びローパルス電源なので、各種材質、寸法の配管に対し高品質の溶接が可能である。
- (5) 多層溶接の場合でも、初層から最終層まで全層について連続的に溶接が行なえる。
- (6) 簡単なアタッチメントを交換することにより、溶接表面の研削仕上及び超音波探傷検査を同様遠隔操作で行なうことができる。

5 結 言

原子力発電所での運転員と作業員の放射線被ばく量と作業量の低減対策の一環として移動式点検装置、原子炉水放射性核種自動分析装置及び原子力配管遠隔操作式自動溶接機の開発を進めた。今後、更に試作機に改良を重ね本格的な実用化を目指す予定である。

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) 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)
- 3) 大越：三次元画像工学、産業図書(昭47-6)
- 4) 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)