

原子力発電所におけるロボット技術の応用

Development of Robots for Inspection and Maintenance in Nuclear Power Plants

原子力発電所での運転員と作業員の作業能率改善による稼働率向上、及び放射線被ばく量低減対策の一環として、原子炉建屋内移動式点検装置、原子炉水放射性核種の自動分析装置、及び原子炉配管の遠隔操作式自動溶接機を開発した。

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率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機能をもつ。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、全自動化している。また、原子炉配管の遠隔操作式自動溶接機は、格納容器内の配管への溶接機の装着後、溶接状態をテレビジョンで監視しながら、遠隔操作で自動溶接することが可能である。

張間利昭* Harima Toshiaki
石塚 昭** Ishizuka Akira
小倉 慧*** Kokura Satoshi
水野雄弘**** Mizuno Katsuhiko
和世啓三***** Wase Keizô

1 緒 言

国内の軽水型原子力発電所は、営業運転中のものが12基に及び、その運転経験も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稼働率向上、及び運転、保守作業に伴う放射線被ばく量低減の努力が行なわれ、相当の効果を挙げてきた。

本稿では、このような稼働率向上及び放射線被ばく量低減対策の一環として進めているプラント内の点検・保守及び修理作業の機械化を取り上げ、その成果の一端として、移動式点検装置、原子炉水放射性核種の自動分析装置及びプラント内配管の遠隔操作式自動溶接機の開発状況について紹介する。特に、移動式点検装置及び放射性核種自動分析装置は、東京電力株式会社と日立製作所とが共同して開発しているものである。

なお、このようなロボット技術を応用した機械設備にはこの外にも、制御棒駆動機構交換装置、供用期間中検査用の超音波探傷装置などがあるが、紙数の都合で本稿では割愛した。また、自動燃料交換装置については、本号の別論文で紹介しているのでこれを参照されたい。

2 原子力発電所用移動式点検装置の開発¹⁾

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の動作状態は、通常、運転員の「視覚」、「触覚」、「聴覚」及び「嗅覚」によって行なわれている。そのうち、点検に必要な感覚は「視覚」によるものが圧倒的に多く、原子炉建屋内点検箇所約70%を占めている。移動式点検装置は、運転員の感覚に代わる検出器を積載し、原子炉建屋内の機器の状態を遠隔点検する。

機器点検作業は、運転員の日常業務のうち、放射線下で作業を行なう種目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

機器点検作業を遠隔操作化するには、点検対象となるプラ

ント機器のそれぞれに検出器を設置し、これらから送られる信号を中央操作室で集中監視する、いわゆる固定方式がある。このような固定方式のものに対して、移動式点検方式では、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、異常検知に必要なデータを得ることができる。移動式点検装置の特長を挙げると、次に述べるとおりである。

(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

図1は試作機の概要を示すものである。移動ステーションは、点検用検出器、検出器操作用マニピュレータ及び信号送・受信器を積載した内部給電式の自走車であり、運転員の操作に従い原子炉建屋内を巡回する。

(1) 点検項目

温度、振動、騒音、放射線量率、外観

(2) 操作方式

遠隔手動(一部自動)

移動ステーションは、所定の点検経路に沿って点検位置まで自動走行する。各点検位置では、テレビジョンカメラ、温度計及び振動計を遠隔操作し、所定の場所、あるいは機器の状態を点検する。

(3) 設置工事

装置自体が移動機能をもつため、設置工事は簡単である。主な工事は、点検経路に沿って自走車のガイドテープ(ステンレスはく製粘着テープ)を床に貼ることである。その他、給電トロリー、信号送・受信アンテナなどは不要である。

(4) 導入指針

試作機では、全点検項目に対応する機器を積載している

* 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 *** 日立製作所日立研究所
**** 日立製作所大みか工場 ***** 日立製作所日立工場

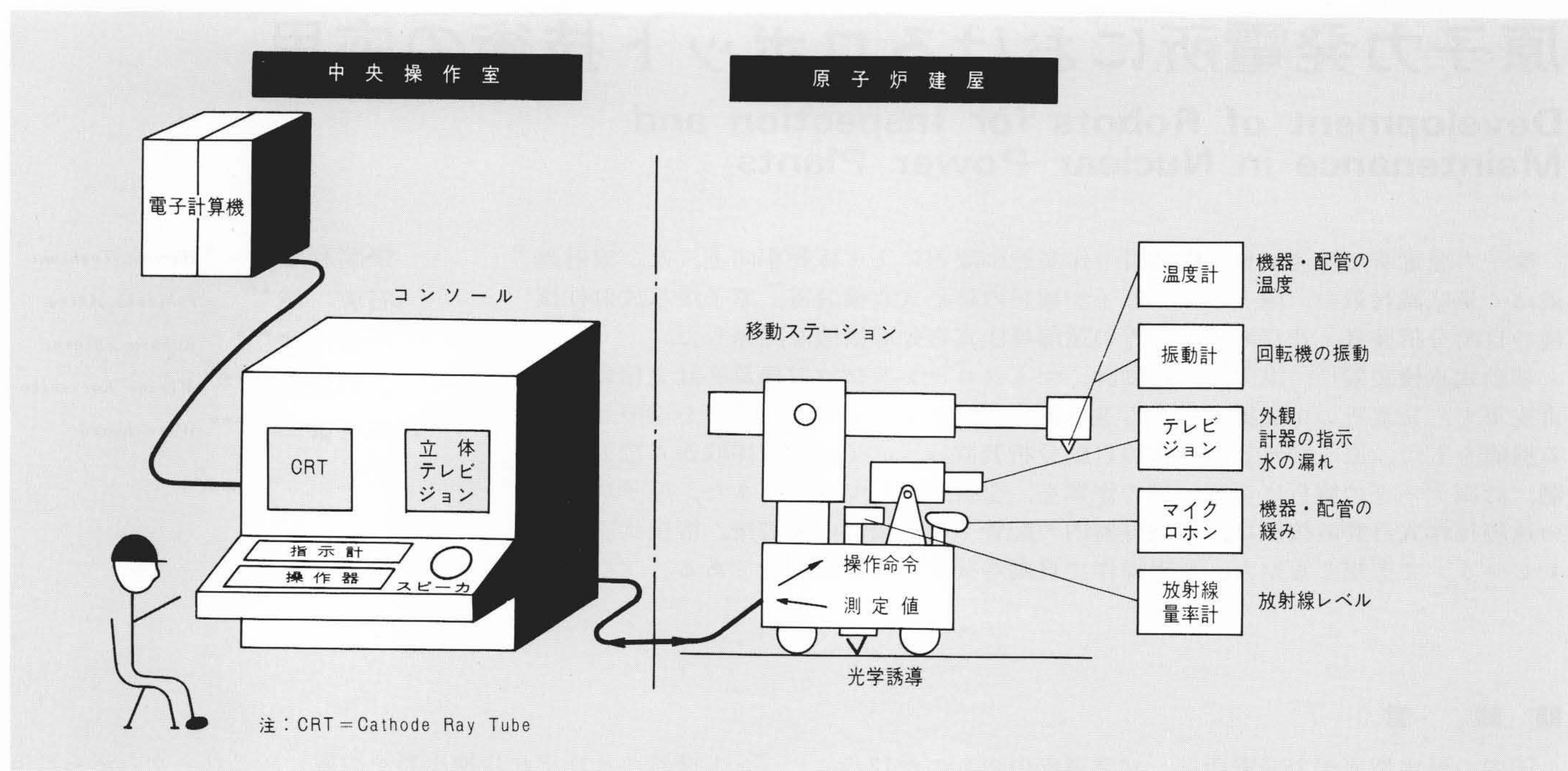
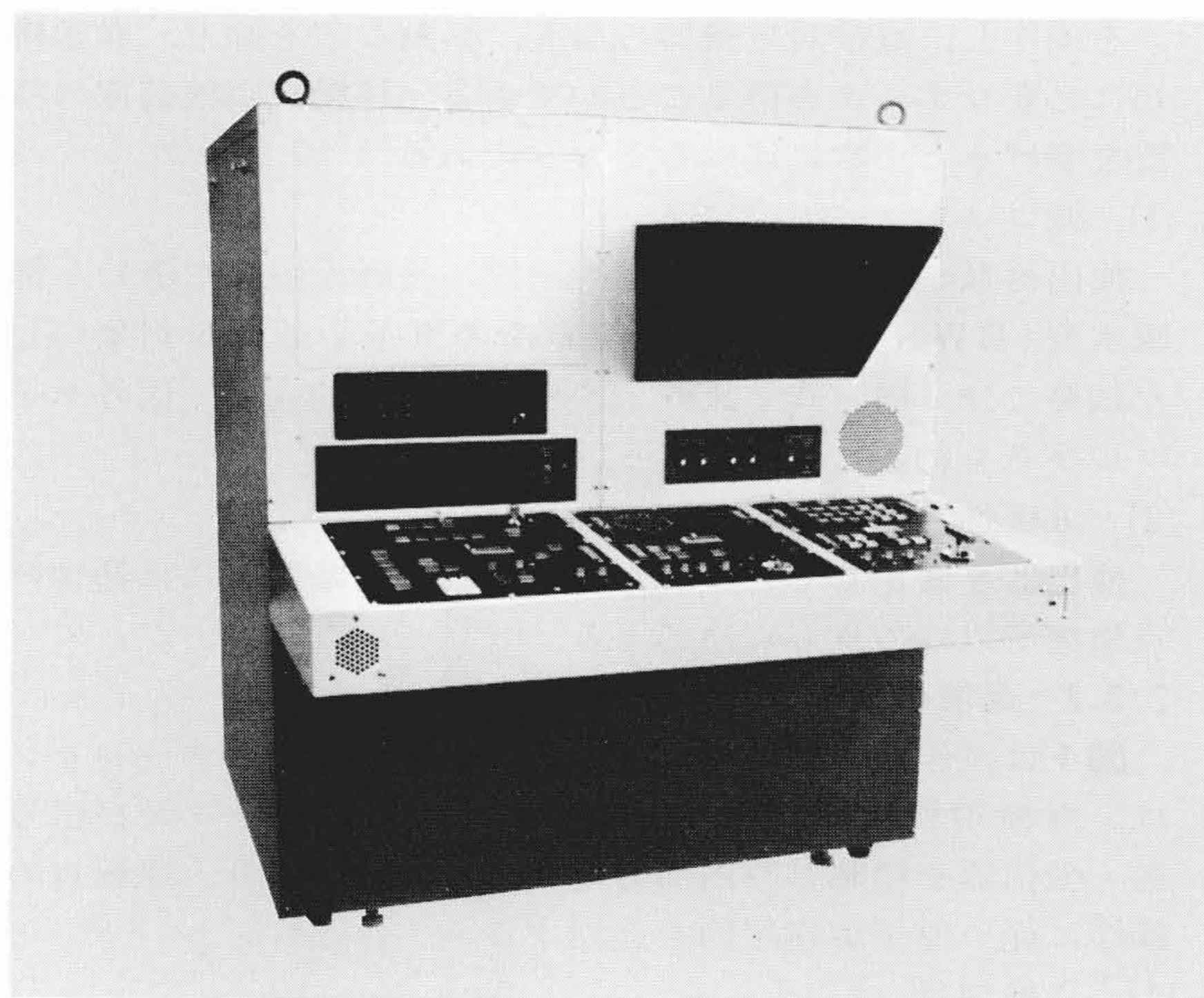
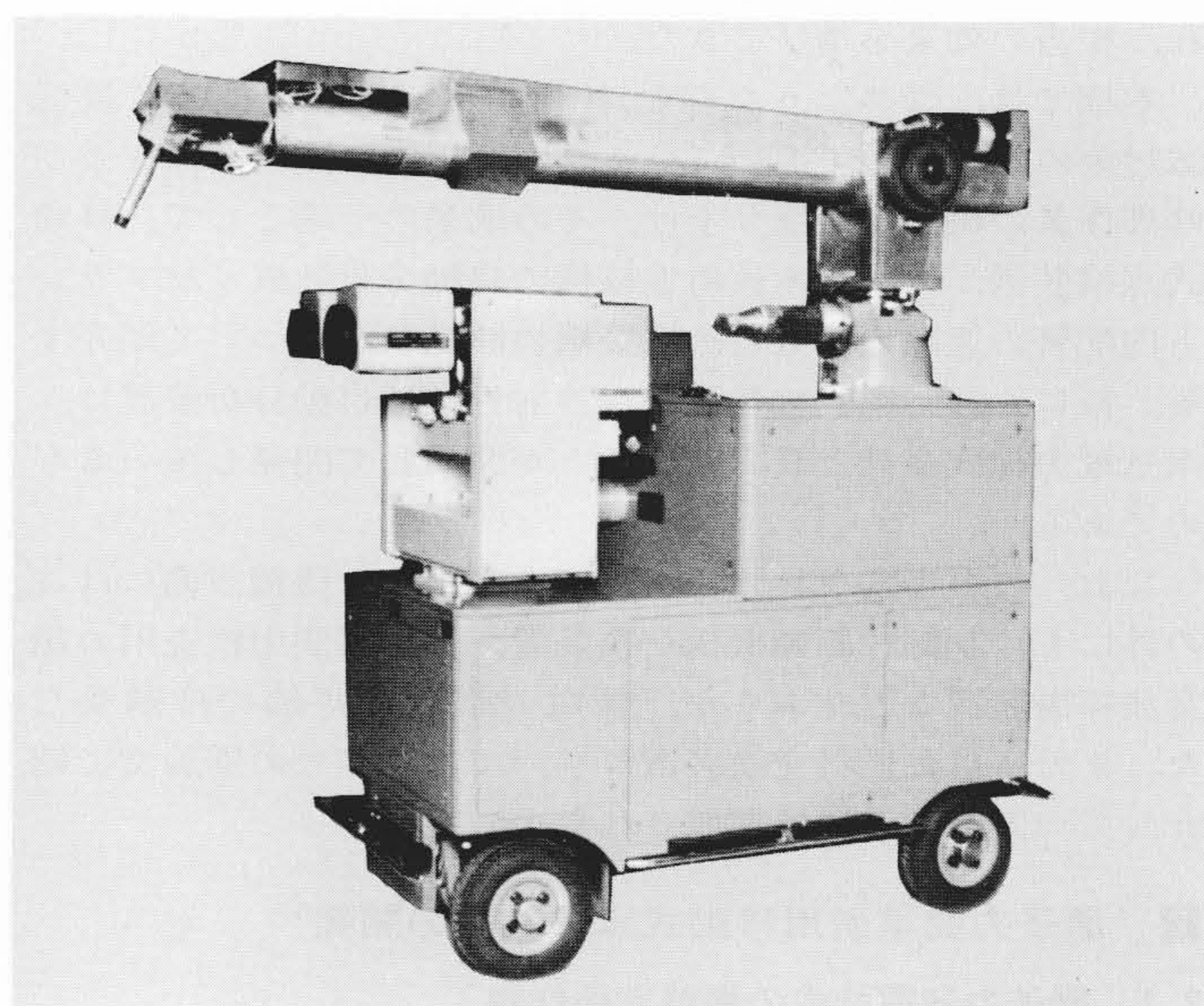


図1 移動式点検装置の概要 運転員は、中央操作室から移動ステーションを遠隔操作し、機器を点検する。



(a) コンソール部



(b) 移動ステーション部

図2 移動式点検装置 操作員は、コンソール部(a)から移動ステーション部(b)を遠隔操作し、現場機器を点検する。点検結果は、コンソールパネル部にデジタル表示される。

が、実プラントでは場所により所要点検項目は異なる。したがって、移動ステーションに積載する機器は、信号送・受信器など必須のものを除いて、導入場所に依じて、検出器、マニピュレータなど必要最小限度のものを選択すればよい。コンソールは1台で、機能の異なる複数台の移動ステーションを操作できる(図2)。

3 原子炉冷却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}Mn , ^{60}Co , ^{59}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}I , ^{137}Cs など)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。

現在の分析装置は、複雑な操作を必要とするため、かなりの操作時間と熟練を要求されている。操作作業の合理化に加えて作業員の被ばく低減も考えて、一連の分析操作を自動化した分析装置を開発した。

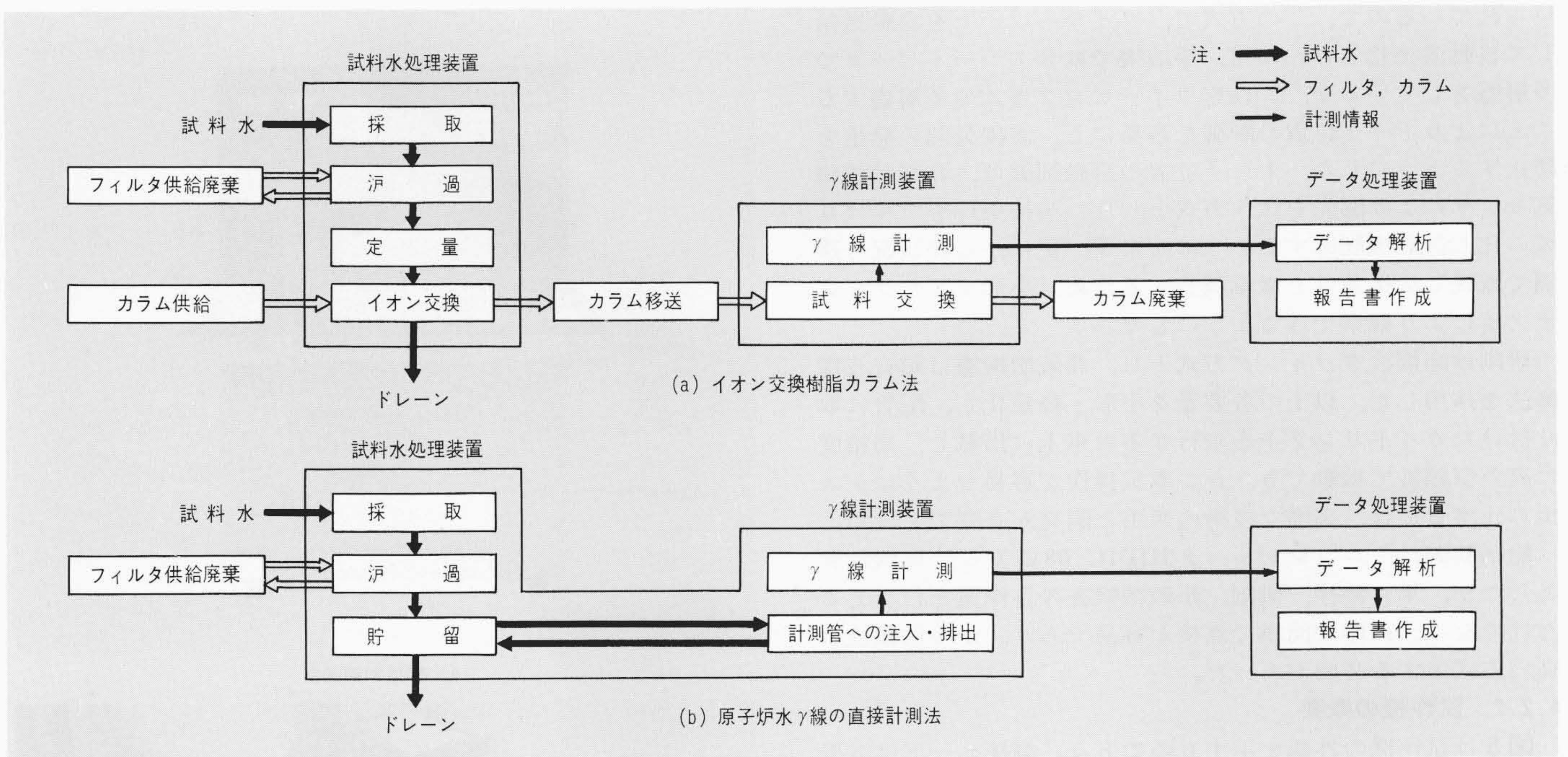


図3 原子炉水放射性核種自動分析装置の概要 γ線計測装置とデータ処理装置を一体とすることもできる。

3.2 原子炉水放射性核種自動分析装置の概要

原子炉水放射性核種の自動分析装置は、試料水処理装置、γ線計測装置及びデータ処理装置で構成される。

試料水処理装置は、原子炉水の採取、前処理(濾過)、放射能測定試料の作製を行なう。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。

γ線計測装置は、Ge(Li)γ線検出器と多チャンネル波高分析器を主要な構成要素とし、放射能測定試料のγ線スペクトルを測定する。

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、印字記録し報告書とする。

3.3 試料水処理法の選定

放射性核種自動分析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、コストなどを考慮し、イオン交換樹脂カラム法と原子炉水γ線の直接計測法を採用した。

図3に、この二つの方法に基づく放射性核種の自動分析装置の概要を示し比較した(図4)。

イオン交換樹脂カラム法では、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り、カラムの移送を自動化することにより、試料水処理装置とγ線計測装置を結合することもできる。

原子炉水γ線の直接計測法は、単純な装置構成に特徴がある。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^{2),3)}。

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を解決してゆく計画である。

4 原子炉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管と炭素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、加えて狭い場所で、しかも高い放射線レベル下での困難な作業が多く、溶接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、数十メートル離れた格納容器外の安全な場所から遠隔操作でき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

原子炉配管の溶接は、従来手動のTIGファイラー溶接が用

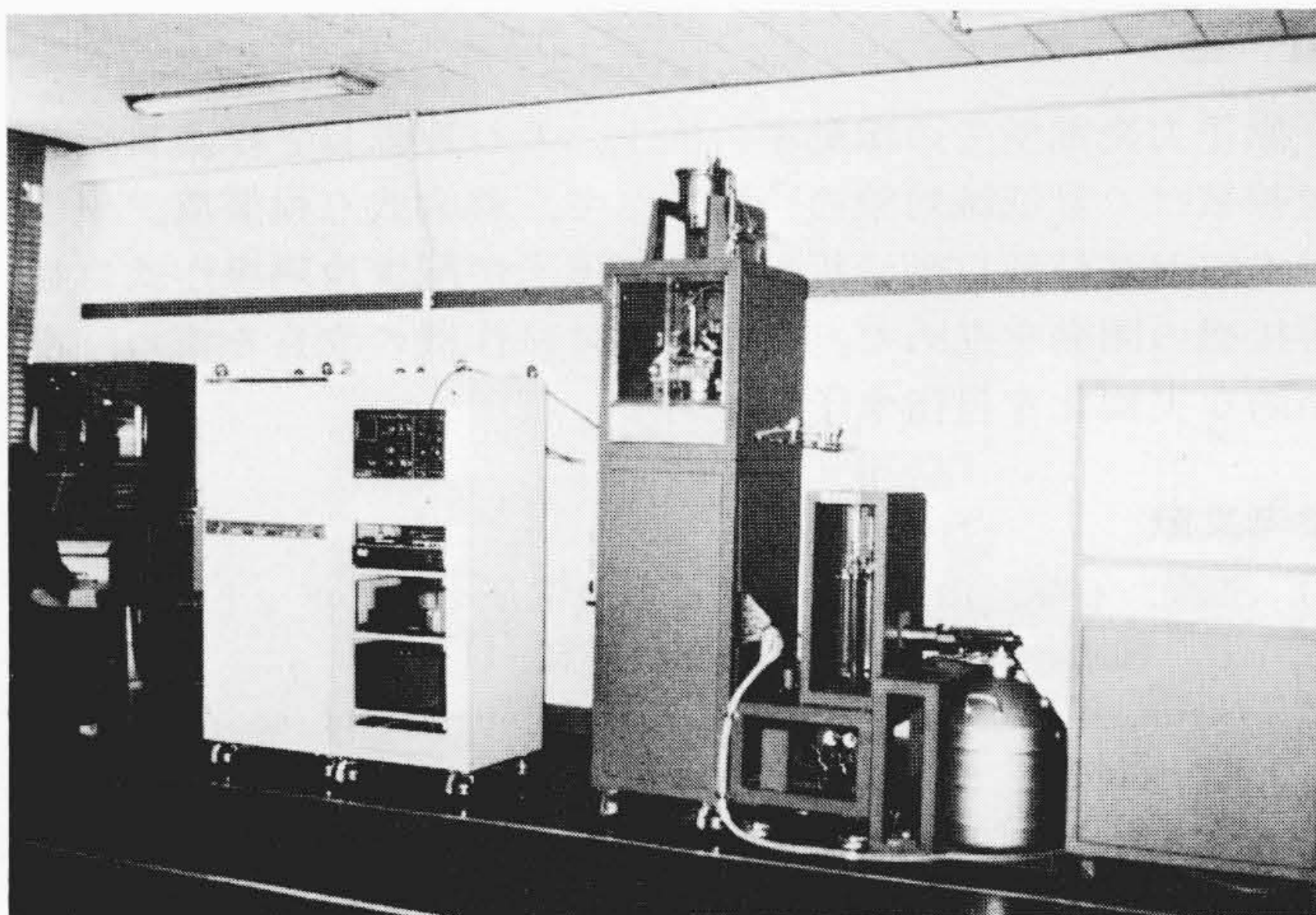


図4 放射性核種自動分析装置 原子炉冷却水の採取、前処理、γ線の計測、データ処理及び報告書の作成に至る一連の処理を自動的に実施する。

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ことによりトーチ位置の制御を容易にし、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倣う方式とした。溶接条件をアルゴリズム化し計算機制御するようにしたが、更に、溶接状況を遠隔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нда方式とし、非破壊検査は超音波探傷法を採用した。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、かつ取扱操作が容易なようにシステム化するには、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、非破壊検査の各作業を行なえるだけでなく、操作が簡単で点検が容易であり、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は試作機の外観を示すものである。溶接ヘッドは溶接ユニット、ドライブユニット、触覚センサユニットに三分割されている。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。

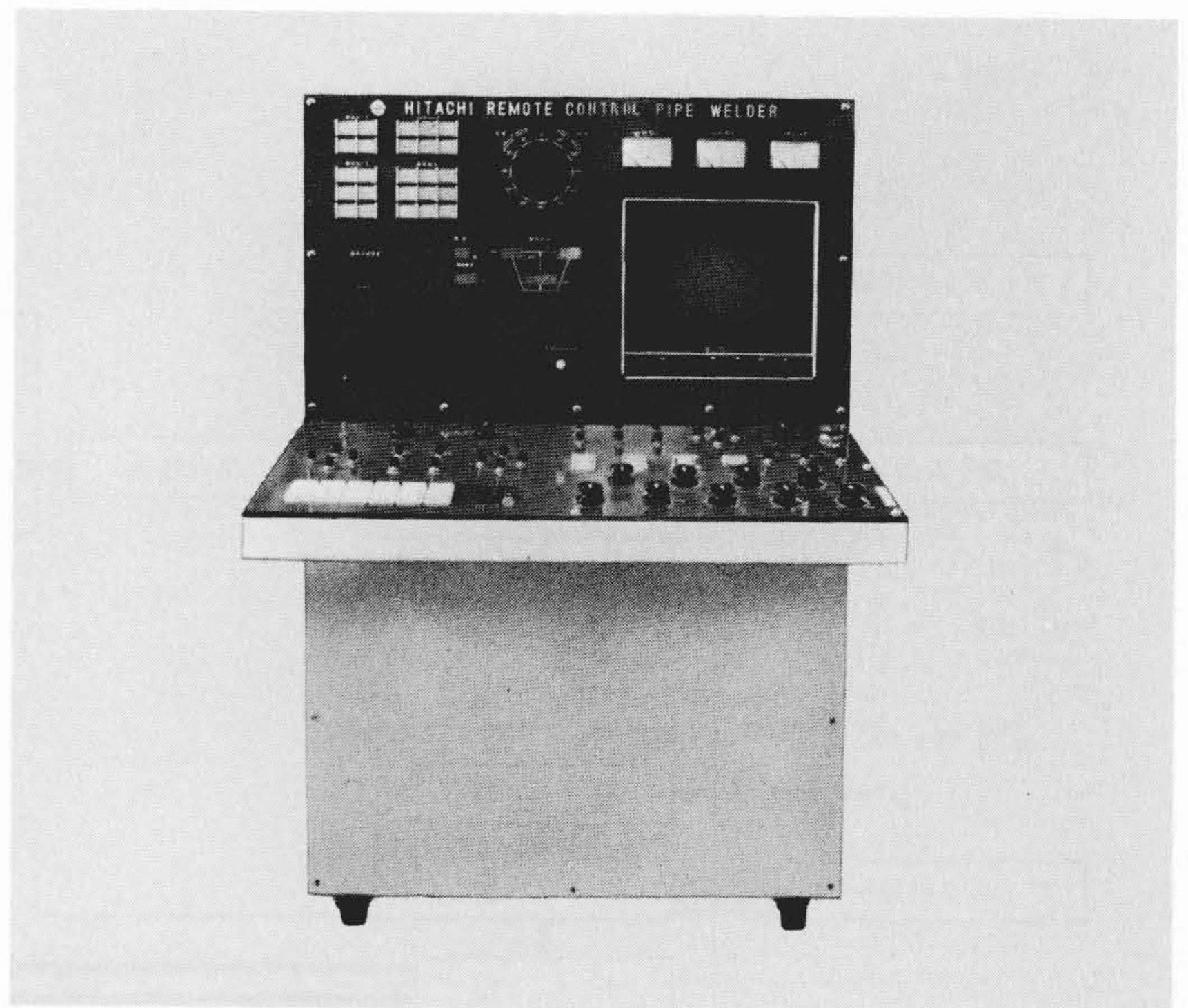
溶接ユニットには、溶接トーチのほかに、ウイーピング機構、自動アーク電圧制御機構及びテレビジョンカメラが設置されている。テレビジョンカメラは、ピント調整、レンズ切替及びモニタ位置調整機能をもっている。ドライブユニットには、台車走行機構のほかにファイラーワイヤ送給装置が付属している。走行速度は、 30mm/min より 400mm/min まで連続的に可変な構造となっている。

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することができる。また、ディスプレイ装置は、溶接電圧、電流、溶接速度などの溶接諸条件を表示する。溶接条件はキーボードよりプリセットするか、あるいは、あらかじめ計算された溶接アルゴリズムによって設定できる。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： $0.2\sim 20\text{Hz}$ 、ハイパルス： $20\sim 2,000\text{Hz}$ が発生でき、平均電流は 350A である。

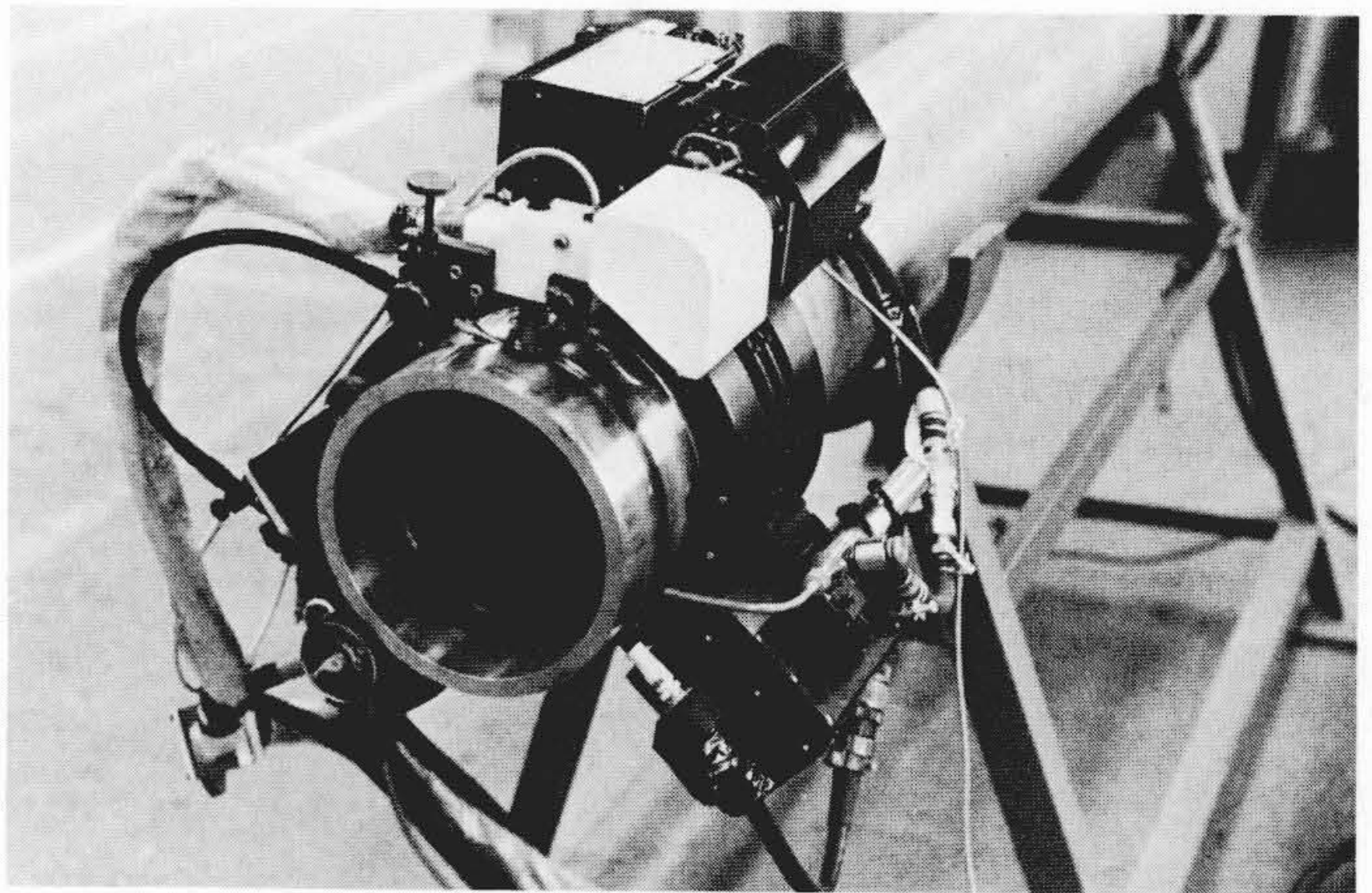
以上、概要を述べたように、この溶接機の特徴は、触覚、視覚によって溶接部のデータを入手し、コンピュータによって状況判断をしながら遠隔制御溶接が可能な配管自動溶接機である。

使用上の利点を記すと次のとおりである。

- (1) 溶接ヘッドは小形・軽量化されているので、狭い場所でも取付けや取外しが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



(a) 総括制御装置



(b) 溶接ヘッド

図5 原子炉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。

連続的に溶接できる。

- (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、同様に遠隔操作で行なうことができる。

5 結 言

原子力発電所での稼働率の向上、及び運転員と作業員の放射線被ばく量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炉配管遠隔操作式自動溶接機の開発を進めた。今後、更に試作機の改良を重ね、本格的な実用化を目指す予定である。

参考文献

- 1) 張間, 石塚, 山田ほか: 原子力発電所へのロボット技術の応用, 日立評論, **59**, 901~905 (昭52-11)
- 2) Ikeda, T. Ogushi, A. et al.: Development of an Automatic Radioiodine Analysis System for Reactor Coolant, Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 5, 516 (1977)
- 3) 北口, 大串ほか: 放射性よう素自動分析装置の炉水採取処理における誤差, 日本原子力学会, 昭52年炉物理, 炉工学分科会予稿集 C17