

# 原子力発電所定期検査用自動化機器の開発

## Development of Automatic Inspection and Service Equipment for Nuclear Power Plant Annual Outage

最近の社会情勢及び相次ぐエネルギー資源価格の高騰から、原子力発電所の安全性及び稼働率向上は国家的急務となっている。現在、法規上実施されている年1回の原子炉プラントの定期検査のための所要期間は、プラント稼働率に大きな影響を及ぼしている。日立製作所はBWRの定期検査での作業期間の短縮に寄与し、同時に安全性及び信頼性の向上、放射線被曝低減、並びに省力化を目的として、多年にわたり定期検査用自動化機器の開発を進めてきた。

本論文ではこれら自動化機器のうち、自動燃料交換機、制御棒駆動機構遠隔自動交換装置、各種除染装置、改良 SHIPPING 装置、耐圧形主蒸気ラインプラグ、供用期間中検査装置及び使用済み燃料チャネルボックス減容装置について、各装置の概要と特長を紹介する。

佐々木正祥\* Masayoshi Sasaki  
藤本弘次\* Hirotugu Fujimoto

### 1 緒言

原子力発電所定期検査での作業期間の短縮、放射線被曝低減、省力化などを目的として、多年開発を進めてきた定期検査用自動化機器のうち、代表的なものを以下に概説する。

### 2 自動燃料交換機

燃料交換作業時間の短縮、省力化、被曝低減、作業の信頼性及び安全性向上を目的として、計算機制御による自動燃料交換機を開発した。本装置は、遠隔制御室からの簡単な操作指令により、燃料移送を自動的かつ安全確実にこなせる。

### 2.1 自動燃料交換機本体

自動燃料交換機本体の外観を図1に示す。本装置は、走行台車、横行台車、燃料ホイスト、伸縮管式燃料つかみ装置、補助ホイストなどから構成される。

走行台車は、炉心プールと使用済み燃料貯蔵プールにわたって敷設されたレール上を走行し、横行台車は走行台車上を横行する。横行台車には、燃料ホイストにより昇降される燃料つかみ装置が取り付けられている。また、燃料つかみ装置は燃料の装荷角度に応じて回転できるようになっている。なお、本装置は核燃料取扱い設備であるため、衝突防止装置、燃料つり落とし防止機構など、十分な安全対策を行なっている。

### 2.2 制御システム

図2に自動燃料交換機の遠隔自動化システムの概略ブロック図を示す。本システムは3種の運転モード（自動、遠隔手動及び機上手動）をもち、自動モードでは、1サイクルの動作（上昇Z、走横行XY、回転 $\theta$ 、下降Z）を連続的かつ自動的に実行する。X、Y、Zの速度制御は、計算機により演算された速度パターンに基づき、サイリスタレオナード速度制御装置により行なわれ、X、Y、Z、 $\theta$ の位置決めは、計算機による直接制御で行なわれる。総合位置決め再現精度は、燃料つかみ装置先端（17m下降点）で、 $\pm 10\text{mm}$ 以下である。計算機は、種々のハードウェアによる安全対策に加えて、種々のモニタを行ない、異常検出時は阻止信号を出力するほかに、作業記録などのロギングを行なう。

### 2.3 特長

本自動交換機の開発に当たり、特に次のような特長をもつように技術開発を行なった。

- (1) 遠隔制御室からワンマン操作で自動運転できる。
- (2) 従来機使用に比べ、約30~40%の時間短縮ができる。
- (3) 本体はできるだけコンパクトであること。
- (4) 制御装置は制御室に設置され、信頼性、保守性が高いこと。
- (5) 操作性、制御性が高く、走横行同時制御が可能なこと。
- (6) 核燃料取扱い上の安全防護対策を、ハードウェアとソフトウェアの両面から充実させている。

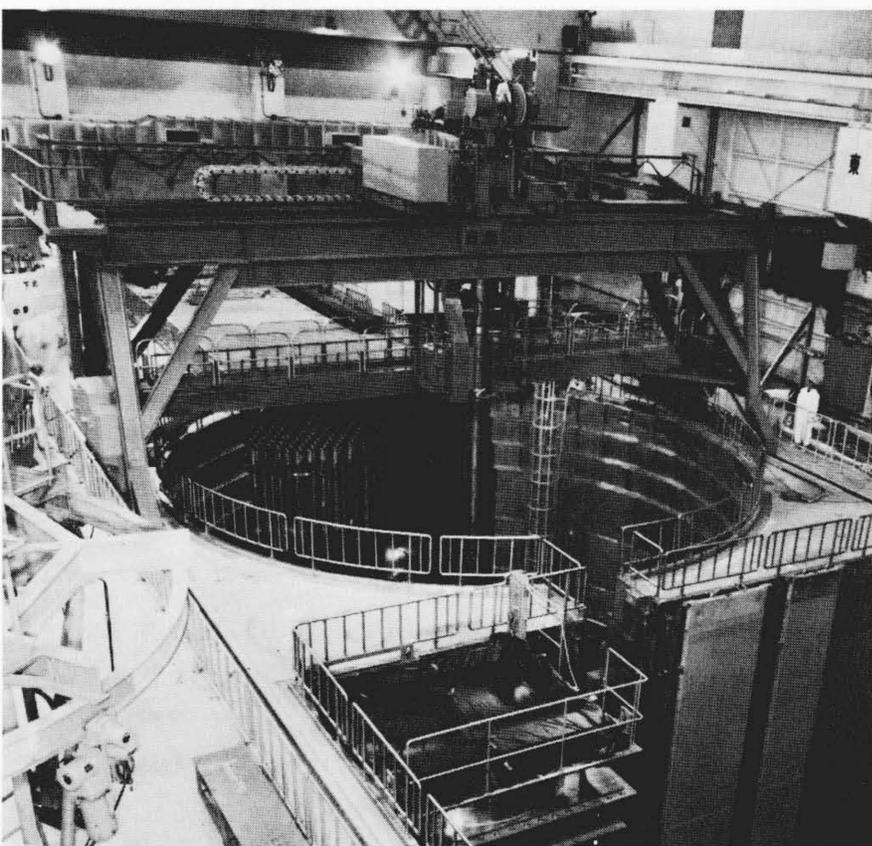


図1 自動燃料交換機本体外観 この燃料交換機は、遠隔制御室設置の計算機制御システムにより、遠隔自動操作される。走行台車と横行台車は同時制御され、高速で燃料移送が実行される。

\* 日立製作所日立工場

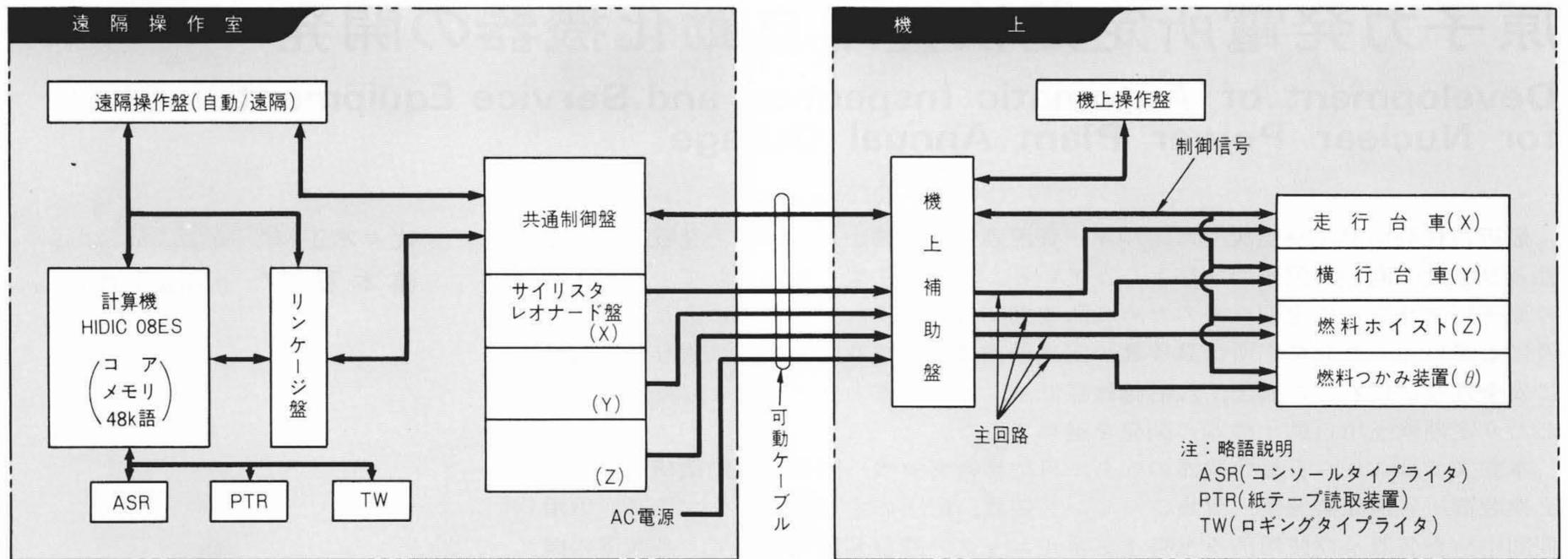


図2 燃料交換機遠隔自動化システムの構成 燃料交換機は、サイリスタレオナード装置で速度制御され、計算機による直接制御で位置決めされる。ほとんどの制御装置は、信頼性、保守性を上げるため遠隔制御室に設置している。

### 3 制御棒駆動機構遠隔自動交換装置

原子力発電所の定期検査でのCRD(制御棒駆動機構)の分解点検は、毎年全数の約20%(電気出力1,100MWe級で約40体/年)を対象として実施される。その際CRDは、いったん原子炉から取り外し分解点検した後、原子炉に再装着される。CRDを原子炉から取り外し、また再装着する作業は、原子炉

圧力容器直下のRPV(Reactor Pressure Vessel)ペDESTAL室内で、従来簡単な工具を使用し、数名の作業員による協同手作業によって行なわれていた。この作業を遠隔自動化して、CRD交換時間の短縮、省力化、放射線被曝低減、作業の安全性及び信頼性向上を図るため、CRD遠隔自動交換装置を開発した。本機は既設発電所に適用して、好調に運転中である。

#### 3.1 CRD遠隔自動交換装置の構造

CRD遠隔自動交換装置の全体構造を図3に示す。装置本体はRPVペDESTAL室内に、制御盤及び空圧供給源は格納容器外にそれぞれ設置されている。CRD着脱装置を図4に、CRD取扱い装置を図5に示す。

#### 3.2 CRD遠隔自動交換装置の特長

- (1) 着脱ヘッドは8台のエアモータ駆動レンチをもち、8本のCRDマウンティングボルトを同時に着脱できる。
- (2) ボルトの着脱トルクは空圧制御され、CRD装着時にボルトを手作業により増締めする必要がない。
- (3) ボルトの着脱状況は、振動計及び音響により検出される。
- (4) CRDと制御棒のアンカップリング動作は、空圧機構により自動的に行なわれ、検出される。
- (5) 初期ドレンは、着脱装置中央部を通過して下方に導かれるので、周辺機器の放射能汚染が少ない。
- (6) CRD搬出入用のCRDカートにCRDを積んで、CRD取扱い装置に装着すると、そのままCRD交換装置の一部となって作動するので、CRD積替えの必要がない。
- (7) 動力源として空圧を多用し、電気品の水による絶縁劣化の問題を少なくし、安全性を高めている。

#### 3.3 CRD遠隔自動交換装置の効果

CRD遠隔自動交換装置採用の効果を表1に例示する。

### 4 各種除染装置

原子力発電所の運転年数が長くなるに従い、一次冷却系で放射性核種を含む不溶性懸濁物(クラッド)が増加し、原子炉機器などの汚染をもたらす。原子炉定期検査などでの作業員の放射線被曝の原因になる可能性がある。この低減対策として、放射線量率が高い場所を積極的に除染する装置を開発し、定期検査時などに使用し効果を上げている。これら装置の主要なものを表2に示す。

この中でキャスク除染装置の構成を図6に示す。本装置は、

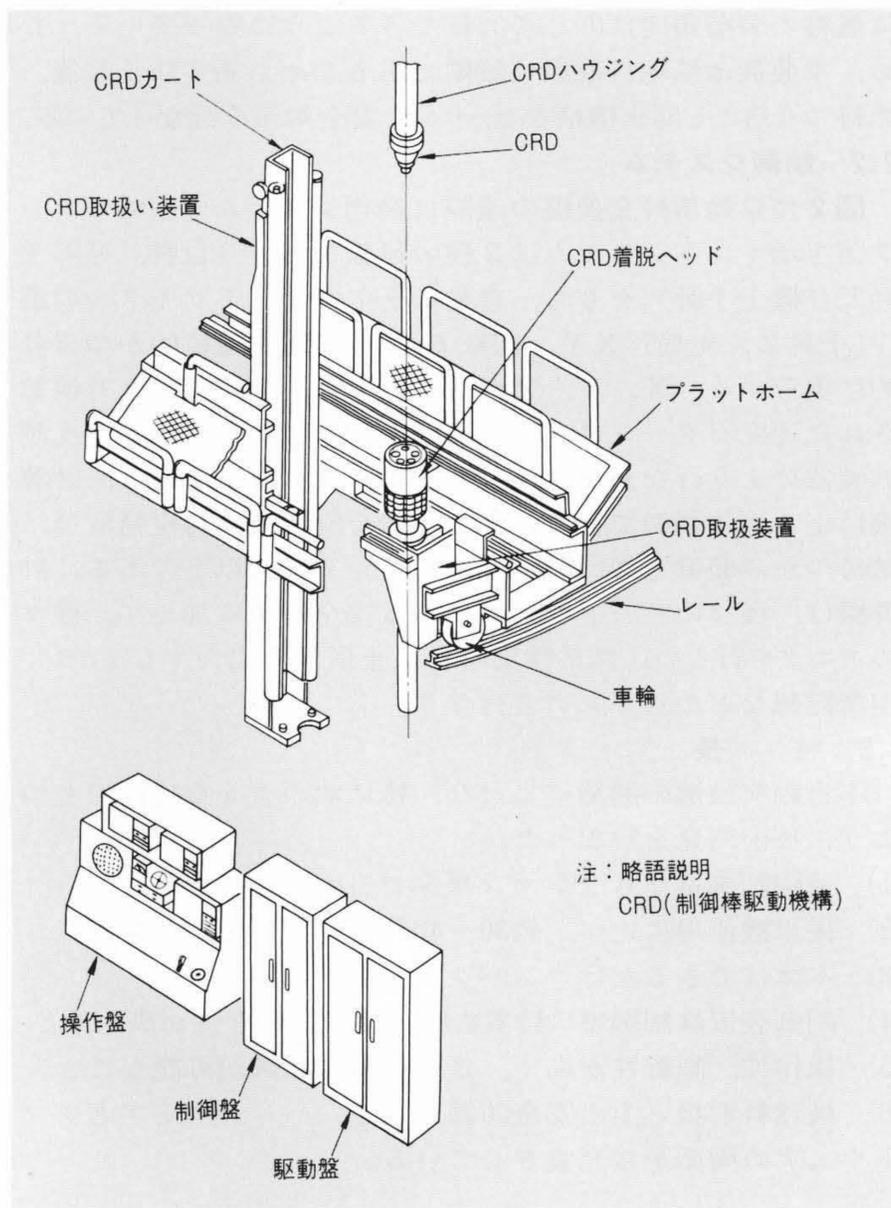


図3 CRD遠隔自動交換装置 CRDカートにCRDを積んで、CRD取扱い装置に装着すると、交換装置の一部となって動作する。

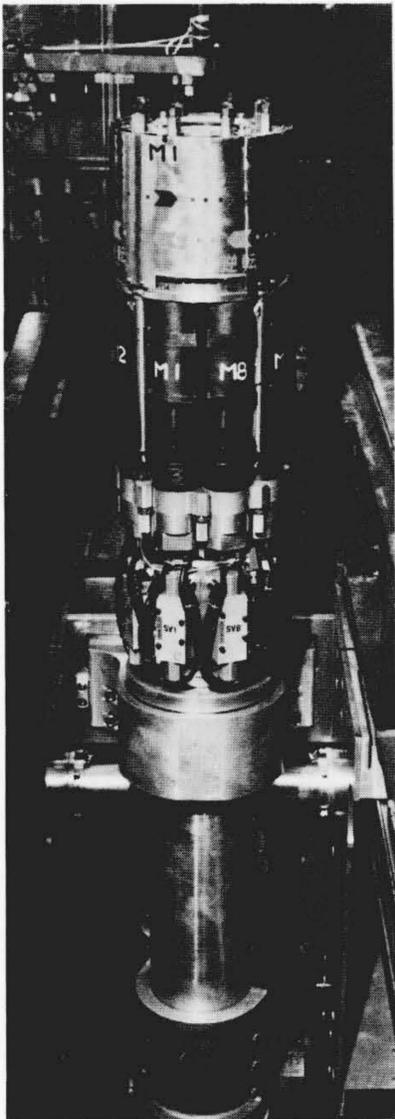


図4 CRD着脱装置 8台のエアモータ駆動レンチにより、8本のマウンティングボルトを同時に所定トルクで締め付けることができる。

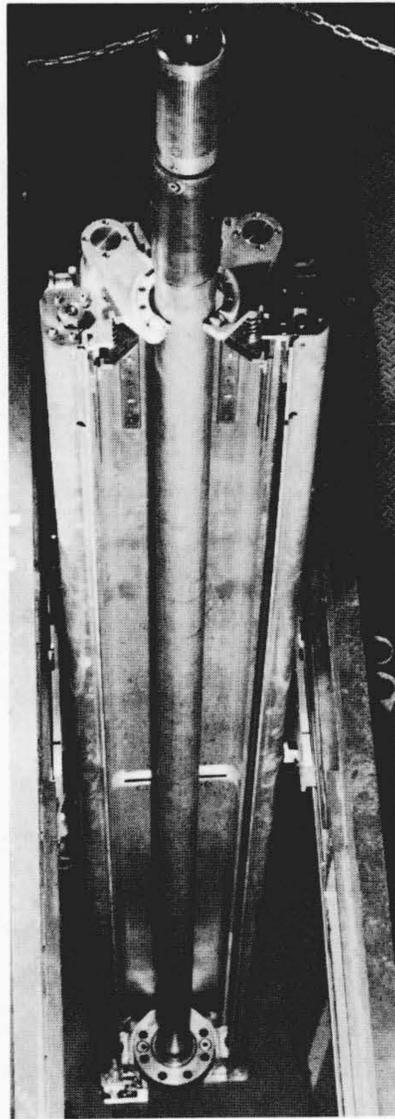


図5 CRD取扱い装置 CRDを積んだカートが取扱い装置に装着されている。

電動機によって駆動され、自動及び手動運転によりキャスク表面を除染するものである。ノズルユニットは、高圧水ノズルとエアノズルから構成され、回転方向及び水平方向に旋回運動すると同時に、上下方向にも移動する。またキャスクの上部及び底部を重点的に除染できるように、除染範囲及び移動ピッチの設定が可能である。除染プロセスは、まず高圧水噴射による除染を行ない、次いでエアブローによりキャスク表面の乾燥を行なう。

5 改良 SHIPPING 装置

原子力発電所の定期検査時に、燃料の健全性を確認し、被覆管のピンホールなどから放射能が漏れている燃料を取り出す目的で、炉内燃料 SHIPPING 検査が実施されている。本検査は定期検査のクリティカルパスとなっているが、従来の方法では、検査期間が長く、多人数の作業者を要していた。今回、定期検査の短縮及び省力化を目的として、燃料 SHIPPING 検査の効率を大幅に向上する改良 SHIPPING 装置を開発した。

5.1 改良 SHIPPING 装置の仕様

改良 SHIPPING 装置は、図7に示す16体シッパーキャップと、図8に示す16体同時自動サンプリング装置から構成されている。

16体シッパーキャップは、従来の4体シッパーキャップを大型化し、一度に16体の燃料を周囲炉水から隔離できるようにしたもので、燃料の高さのばらつきを吸収できる構造となっている。また、従来のものに比べて、操作性と安定性を向上させた構造とした。

16体同時自動サンプリング装置は、16体の燃料からのサン

表1 CRD遠隔自動交換装置の効果 雰囲気線量40mrem/h, CRD交換本数40体での値を示す。

番号	項目	手動交換	自動交換	効果
1	作業時間 (h/1台)	2	1.5	$\frac{3}{4}$
2	作業人員 (人/1台)	5	1	$\frac{1}{5}$
3	総被曝量 (mR・人/1台)	400	60	約 $\frac{1}{7}$
4	定期検査作業必要人員(人・日/1定期検査)	800	112	約 $\frac{1}{7}$
5	定期検査総被曝量(mR・人/1定期検査)	16,000	2,400	約 $\frac{1}{7}$
6	定期検査日数 (日)	20	14	$\frac{7}{10}$

表2 主要除染装置 除染対象箇所の状況に応じて、高圧水噴射、ブラッシング及び真空吸引を適宜組み合わせて使用している。

除染装置名称	除染方法	除染対象機器
キャスク除染装置	高圧水噴射式	使用済み燃料移送キャスク 固体廃棄物移送キャスク
原子炉圧力容器内壁除染装置	高圧水噴射式	原子炉圧力容器内壁
サーマルスリーブ除染装置	高圧水噴射及び真空吸引式	原子炉圧力容器ノズル サーマルスリーブ間隙
壁面除染装置	ブラッシング方式	原子炉ウエル壁面 機器プール壁面
原子炉ウエルシール部除染装置	ブラッシング及び真空吸引式	原子炉ウエルシール部
水中真空掃除機	高圧水噴射及び真空吸引式	プール底面

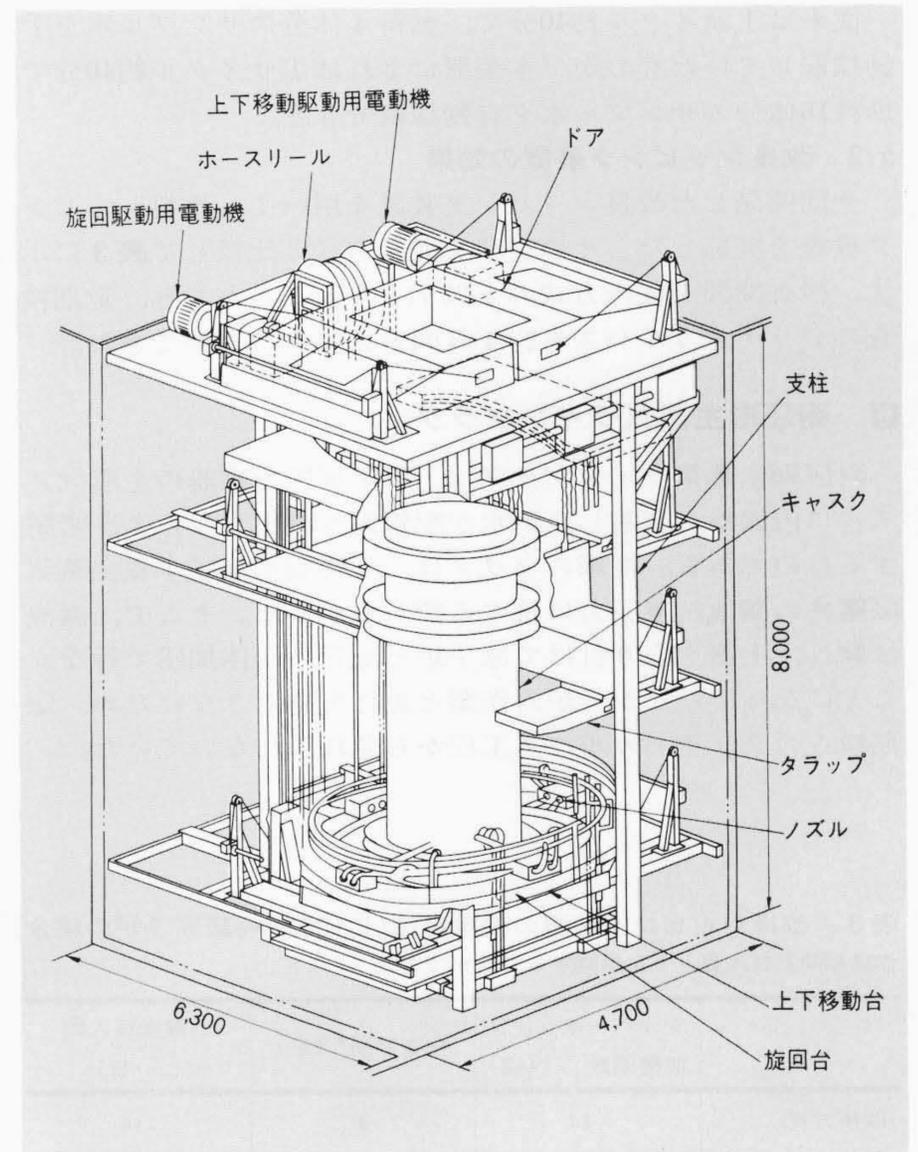


図6 キャスク除染装置 キャスク外表面の高圧水除染及び空圧ブローを、自動的に行なう。

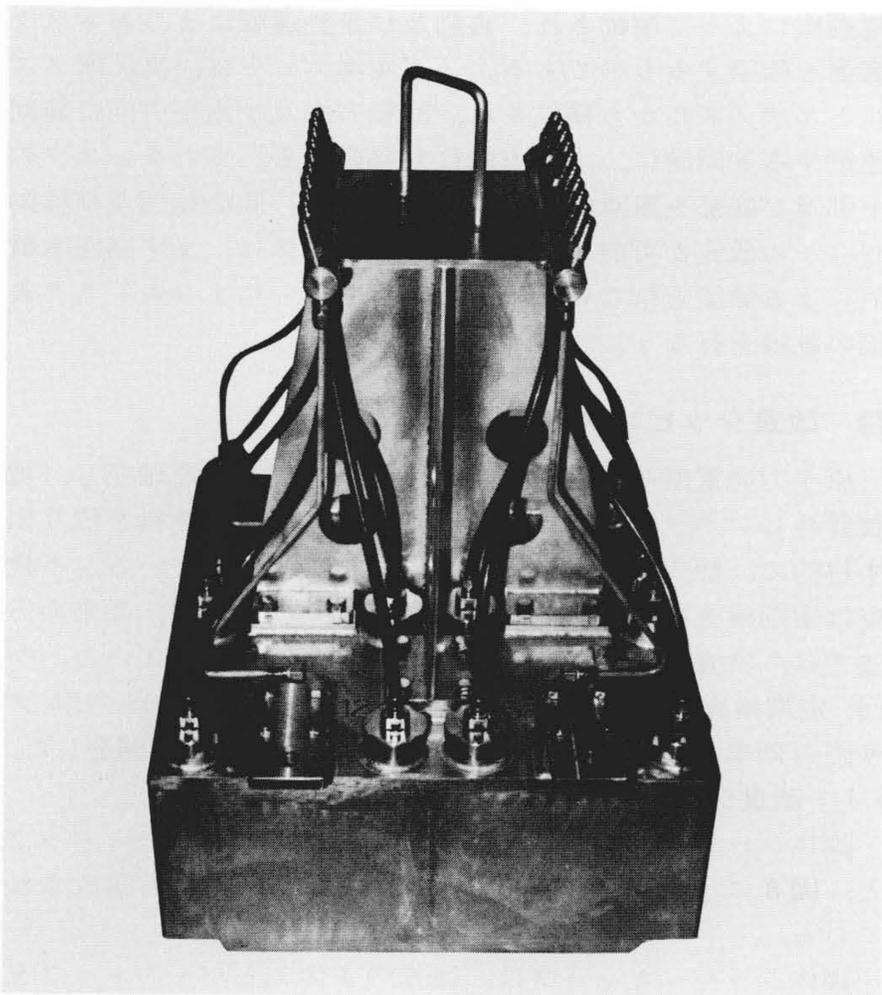


図7 16バンドル用シッパーキャップ 一度に16体の燃料を周囲炉水から隔離し、サンプリングできるようになっている。

プル水を一度に採取できるもので、空気供給による燃料水の周囲炉水からの隔離、サンプリングラインの洗浄、サンプル水の採取といった一連の操作が、すべて自動化されている。

従来は1サイクル約40分で、燃料4体分のサンプル水を手動採取していたものが、本装置によれば1サイクル約40分で燃料16体分のサンプル水を自動採取できる。

### 5.2 改良 SHIPPING 装置の効果

今回開発した改良 SHIPPING 装置を用いて、燃料 SHIPPING 検査を実施した。その実績を従来方式と比較して表3に示す。検査期間を従来方式の1/2以下とすることができ、定期検査のクリティカルパスを約4日間短縮することができた。

## 6 耐圧形主蒸気ラインプラグ

耐圧形主蒸気ラインプラグは、原子炉圧力容器の主蒸気ノズルに内側から装着し、炉水が配管側へ流出しないよう密閉するものである。従来のプラグは、配管側を加圧する主蒸気隔離弁の漏洩試験圧力に抗する術がなかった。そこで、漏洩試験は、上蓋を取り付けて原子炉と配管の一体加圧で行なうことになっていたが、炉内作業と並行実施できないため、定期検査のクリティカルパス工程から免れられないでいた。

表3 改良 SHIPPING 装置の使用実績(1,100MWe級原子炉の場合) 作業期間及び人員ともに半減することができた。

	シッパーキャップ 装着回数 (回)	検査期間* (日)	作業員延人数 (人・日)
改良方式	84	4	114
従来方式(予想)	201	8	237

注：\*は、正味作業期間を示す。

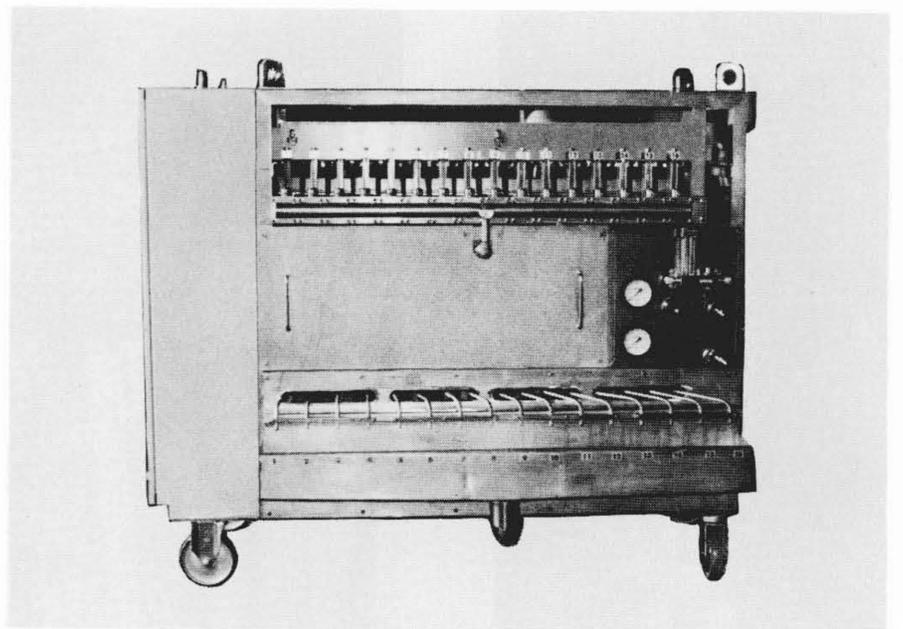


図8 16バンドル同時自動サンプリング装置 16バンドル用シッパーキャップと組み合わせ、同時に16体の燃料からサンプル水を採取する。

この問題を解決し定期検査工程の短縮を図るため、図9に示す耐圧形主蒸気ラインプラグを開発し実用化した。

### 6.1 耐圧形主蒸気ラインプラグの構造

リング状のフレームはプラグユニット4台を備え、原子炉圧力容器内壁に設けられた蒸気乾燥器サポートブラケット上に着座する。また、輸送及び保管時は4等分に分解できる。

プラグユニットはエアシリンダ駆動機構をもち、操作盤から遠隔操作でプラグの着脱ができる。

プラグは外周にインフラットリングパッキンを備え、空圧で膨張させて水及び空気をシールする。

### 6.2 耐圧形主蒸気ラインプラグ採用の効果

主蒸気隔離弁の漏洩試験(社内、通商産業省立会)、作動試験及び分解組立作業が、(1) 定期検査のクリティカルパス工程から除外できる、(2) 作業ピーク時を避け、かつフレームがリング状のため燃料交換などの炉内作業と並行して実施できる、(3) 分解点検後の漏洩試験は前倒して行なえば、万一漏洩があった場合でも余裕をもって再点検でき、工程的不確定要素が除去できるだけでなく試験関係者の心理的圧迫感も解消される。

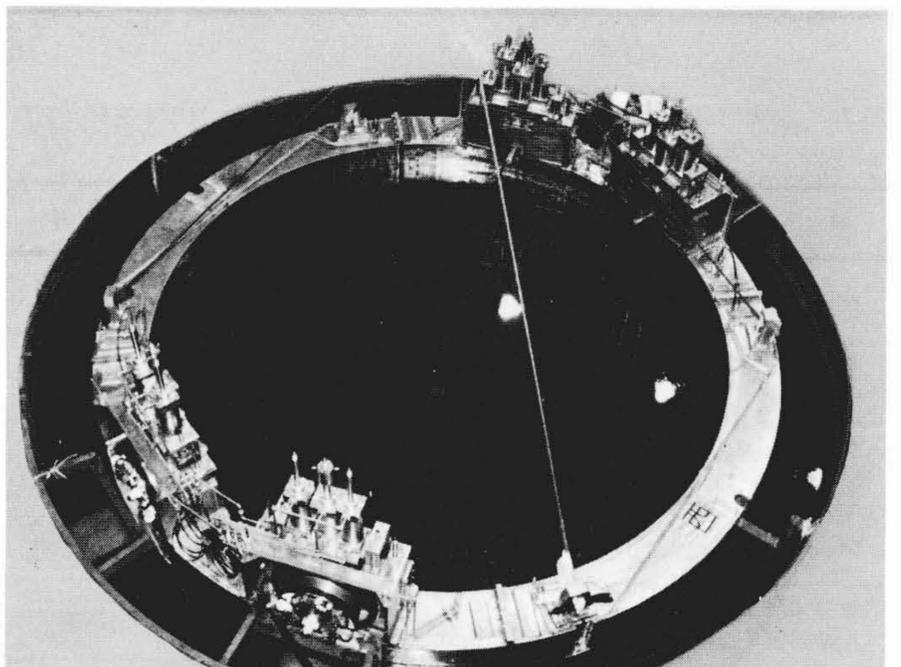


図9 耐圧形主蒸気ラインプラグ(工場モックアップ試験) 模擬RPVのノズル位置に、プラグを装着しようとしているところを示す。

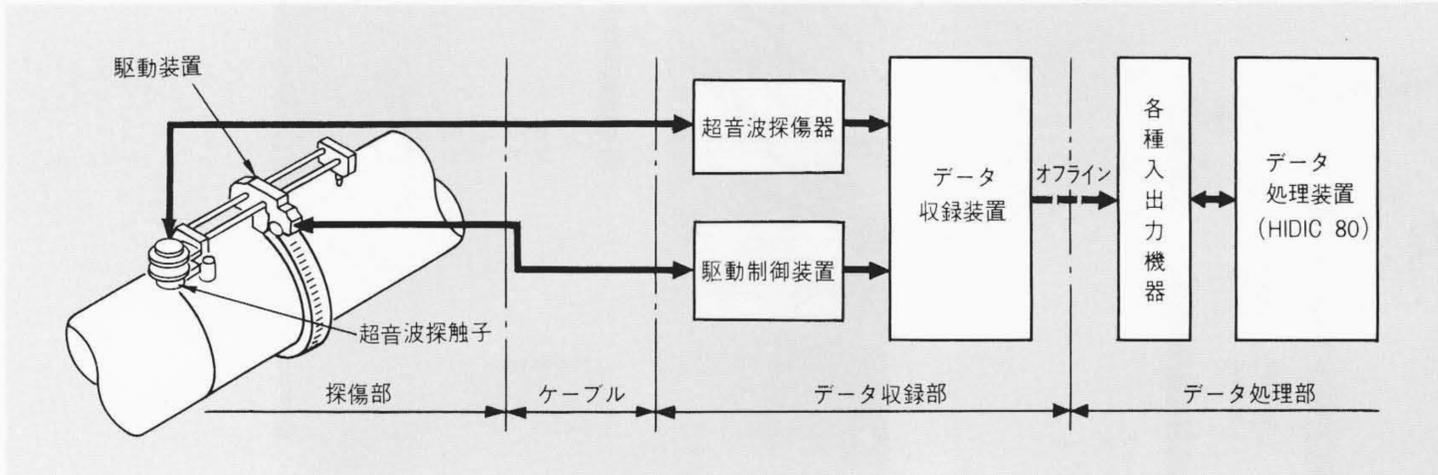


図10 日立遠隔自動・半自動超音波探傷装置の概要  
駆動装置を交換することにより  
各種対象部の検査が可能である。

## 7 供用期間中検査装置

原子力発電プラントの安全性及び稼働率向上のために、ISI (供用期間中検査) がますます重要になっている。ところで、原子力発電プラントでのISI作業は放射線下の作業であり、検査員の被曝低減が大きな課題である。このため、検査の自

動化及び半自動化が強く望まれている。

日立製作所では各電力会社の指導で昭和51年からISI装置の開発を進めてきた。以下に、その概要について述べる。

### 7.1 装置の構成と機能

日立遠隔自動・半自動超音波探傷装置の概要を図10に示す。本装置は大別して、探傷部、データ収録部、データ処理部から構成される。探傷現場に持ち込まれる探傷部とデータ収録部はケーブルで接続される。データ処理部は収録されたデータをオフラインにより処理する。

#### 7.1.1 超音波探触子

超音波探触子にはマルチ探触子を主として採用している。マルチ探触子は、垂直及び斜角用振動子を同一探触子ケース内に収め、同時に0度、45度、60度の3角度の探傷を可能にする。

#### 7.1.2 探触子駆動装置

圧力容器胴体用の探触子駆動装置を図11に示す。胴体には縦溶接線と周溶接線がある。このため、同図に示すように溶接線に沿って縦軌道と周軌道が設けられ、両軌道の交点にはターンテーブルが置かれる。駆動装置は軌道と胴体の間を走行し、探触子を走査する。

配管用半自動探触子駆動装置を図12に示す。本装置は探触子を手動により走査し、探触子位置を軌道及びアームにより計測する。本装置は直管とエルボ溶接部のエルボ側の探傷も行なえる機構になっている。

その他、ノズル、下鏡部など各種の駆動装置がある。

#### 7.1.3 データ収録装置

データ収録装置は、超音波探触子の位置信号及びインディケーションの波高値、路程などの探傷データをフロッピディスクに収録する。

データ収録装置の外観を図13に示す。データ収録部は、探傷現場から十分離れた距離にあるデータ収録室、又はISI検査室など原子炉建屋内に設置される。

また、データ収録部に探触子駆動装置を制御する制御装置、探傷結果を断面像、平面像などの画像として表示する超音波探傷画像表示装置などが設置される。

#### 7.1.4 データ処理装置

データ処理装置は、オフラインによりフロッピディスクの記憶媒体であるディスクを介して探傷データを入力し、整理、解析、作図、作表、ファイリングなどの処理を行なう。

出力内容は断面図、平面図、側面図、波高円形図、展開表示図、データ表、評価リストなどであり、断面図の一例を図14に示す。同図は溶接線を横切った一断面の図であり、溶接

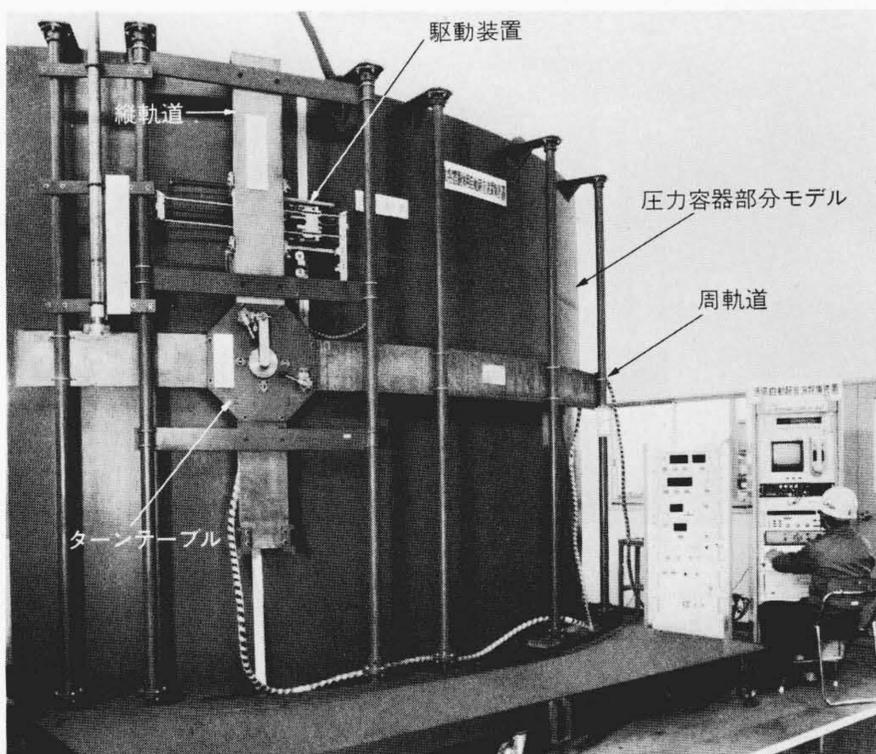


図11 圧力容器胴体用探触子駆動装置 圧力容器部分モデルによる胴体用探触子駆動装置の走行テスト状況を示す。

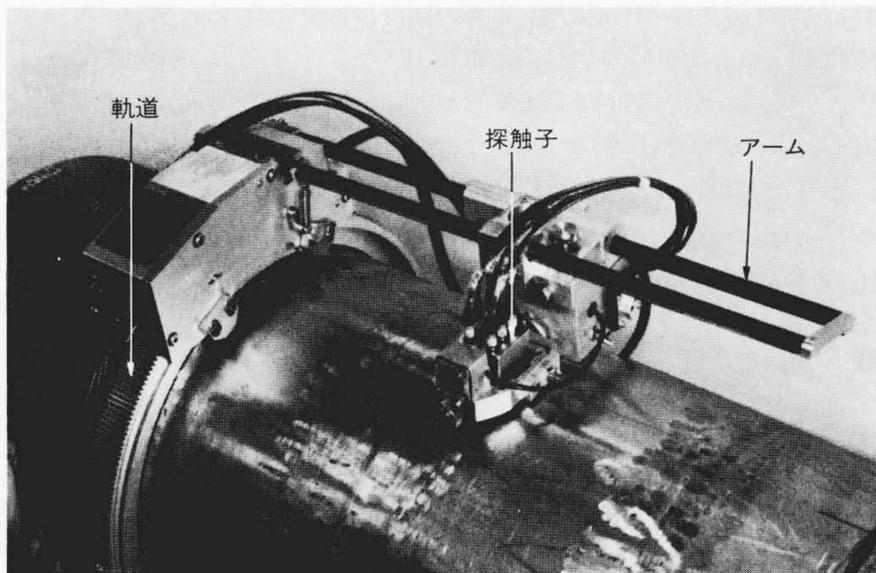


図12 配管用半自動探触子駆動装置 配管の軸方向を手動により走査し、周方向を電動により走査する。

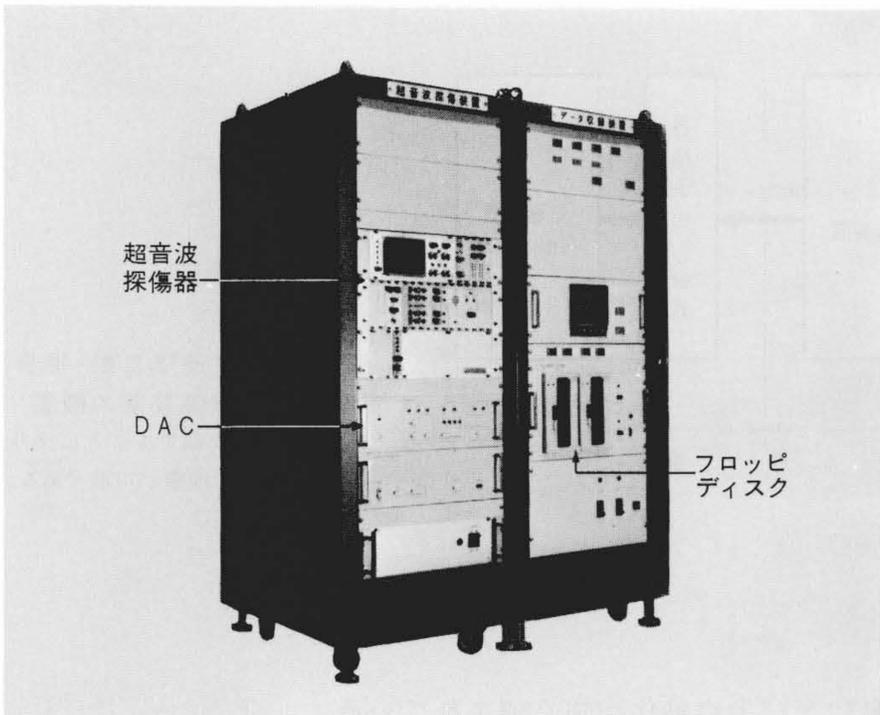


図13 データ収録装置 探傷データを高速で取り込み、フロッピディスクに収録する。

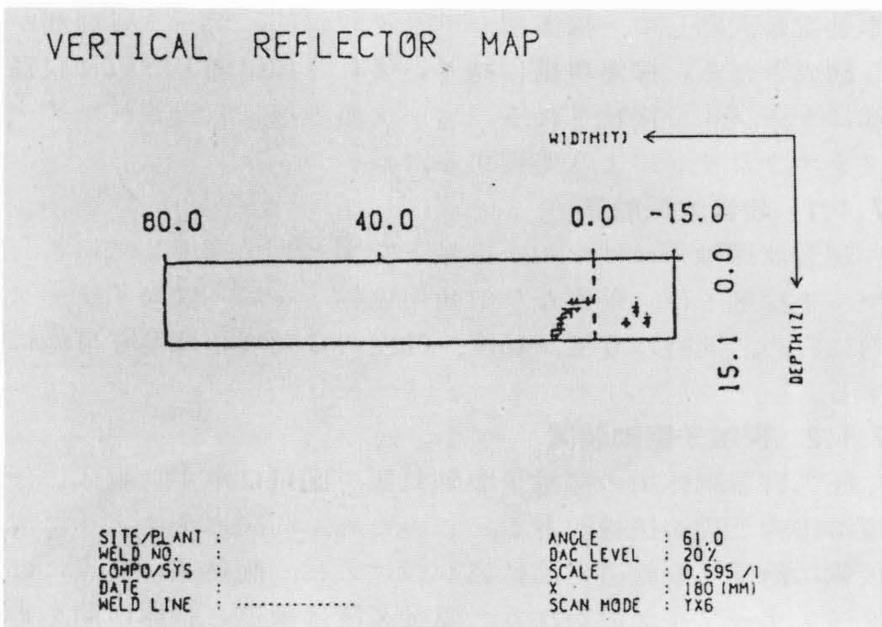


図14 断面図(人工欠陥) 溶接部付近に設けたスリット状人工欠陥の断面表示例を示す。

線を中心は点線で示してある。人工欠陥のインディケーションは、溶接線の付近に示されている。

## 7.2 本装置の特長

- (1) ASME (American Society of Mechanical Engineers) Sec. XI要求の体積検査要領を満足している。
- (2) 軌道及びアームによる位置決めのため、再現性が良好である。
- (3) 軌道、駆動装置などが簡易に着脱できるので、放射線の被曝低減が可能である。
- (4) マルチ探触子により、規格で要求される0度、45度、60度の3角度の探傷を同時に行なうことを可能とした。
- (5) 压力容器胴体用縦軌道と周軌道の交点にターンテーブルを採用し、両溶接線の探傷を可能とした。
- (6) DAC (距離・振幅補正装置)にマイクロコンピュータを導入し、調整を大幅に簡易化した。
- (7) データ処理はオフライン処理方式とし、探傷中でも他の解析、処理などを行なえるようにするとともに、データ収録部を追設することにより、例えば、胴体部、配管部などの2箇所同時探傷を可能とした。

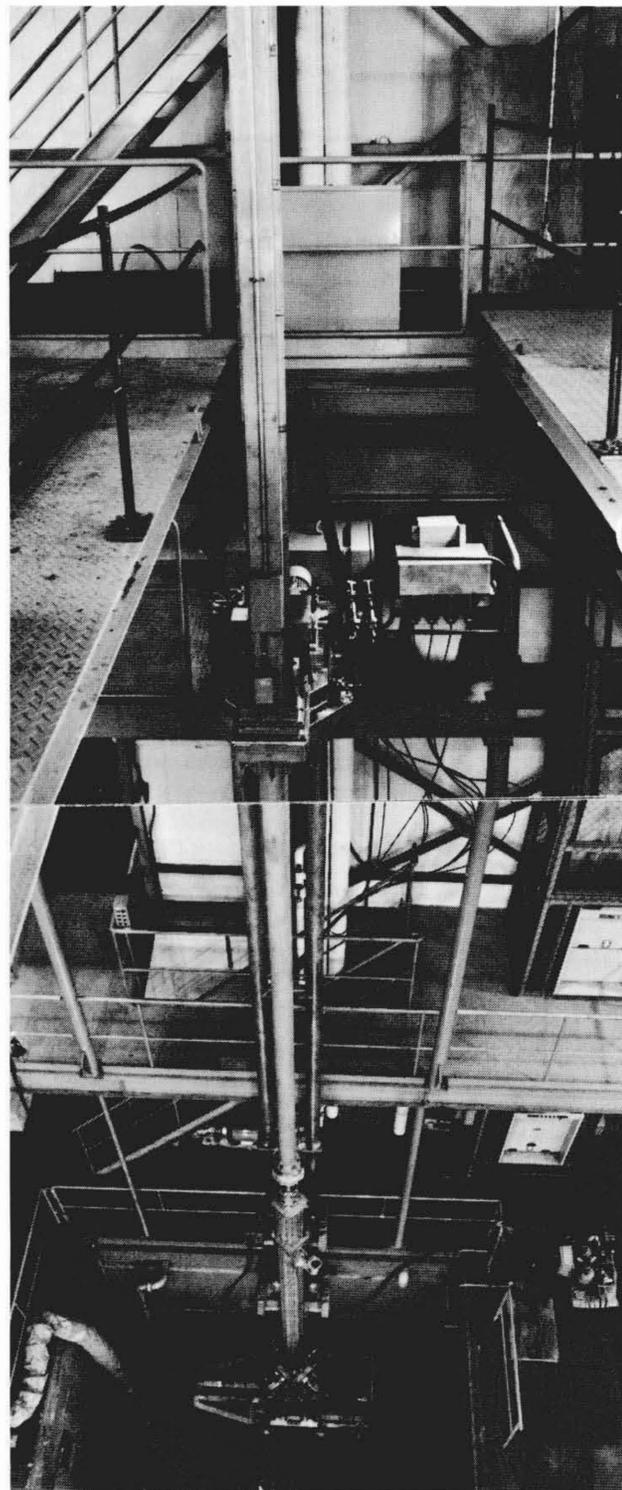


図15 使用済み燃料チャンネルボックス減容装置の外觀 密閉容器内でチャンネルボックスの四隅を切断し、続いて小片にシャー一切断する。

## 8 使用済み燃料チャンネルボックス減容装置

本装置は、BWRプラントの運転経過に伴って発生する使用済み燃料チャンネルボックスを、効率良く貯蔵プールに保管するための減容処理装置である。装置の外觀を図15に示す。

本装置は、使用済み燃料チャンネルボックスの諸性質を考慮し、水中遠隔操作式となっている。切断方法は、チャンネルボックスの四隅を内側から長手方向にローラカッタで4枚の平板に切断後、シャー一切断により短尺平板とする。切断片は受箱に収納し、ラック中に重ねて水中保管する。本装置はチャンネルボックスを密封容器内で切断し、クラッド回収機構を付属しているので、作業中にクラッドがプール水中に拡散しないように配慮した。また、作業員の放射線被曝も極小である。チャンネルボックス1体当たりの切断時間は約1時間で、減容比は $\frac{1}{4}$ ～ $\frac{1}{3}$ である。

## 9 結 言

以上、原子力発電所定期検査用自動化機器の開発状況の概要と、その特長について述べた。今後、引き続き新機種の開発と改良を重ねてゆく予定である。

最後に、これら自動化機器の開発に当たり、御指導をいただいた各電力会社の関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。