

格納容器内自動点検システムの開発

Development of a Remote Operated Monitoring System for Inspection Inside the Reactor Containment Vessel

原子力発電所の主要機器の多くを収めた格納容器内は、運転中は高放射線下にあるため、これらの機器については運転員の巡視点検による直接的な情報を入手しにくい状況にある。

この巡視点検を遠隔で実施可能にするため、空間走行形格納容器内自動点検システムを開発した。本システムはテレビジョンカメラ、マイクロホン、照射線量率計及び温度計を搭載した点検車が、格納容器内に敷設されたレールに沿って走行し、原子炉設備の運転状況を遠隔表示する。

本システム実証機の製作及び確性試験を行なって、開発目標仕様の性能を確認した。

本システムを、格納容器内及びその他高放射線領域で活用し、原子力発電所の信頼性向上に寄与したい。

巽 俊享* Toshiyuki Tatsumi

野口跡見** Atomi Noguchi

杉山 栄*** Sakae Sugiyama

伊藤嘉敏**** Yoshitoshi Itô

1 緒 言

原子力発電所の稼働率向上、信頼性向上などを目的とした通商産業省の補助事業「原子力発電支援システム開発」の一環として、昭和55年度から5箇年にわたって空間走行形格納容器内自動点検システムを開発した。

本システムは、テレビジョンカメラ、温度計などの検出器を搭載した点検車がレールに沿って走行し、格納容器内原子炉設備の遠隔点検を可能にするものである。原子炉压力容器、再循環ポンプなど主要設備の多くを収容して狭くなった格納容器内は、運転中高放射線、高温雰囲気となり、立入りが困難である。

これはシステム構成機器のうち、電子部品及び光学部品にとって厳しい環境であり、耐放射線性、耐高温性、機動性及び操作性に関する技術開発を要した。

以下、システムの概要、システムを構築するために開発した技術及び実証機の確性試験結果について述べる。

2 システムの概要

格納容器内自動点検システムを、原子力発電所へ導入した場合を想定し、その構成を図1に示す。自動点検システムは移動しながら主蒸気隔離弁、再循環ポンプ、逃し安全弁などを点検していく4両編成の点検車、この点検車をレール下部に懸架してけん引走行させる駆動装置、及び操作室でその運転操作を行なう操作盤から成る。

(1) 点検車

点検車は4両のユニット(図2)に機能を分割している。

カメラユニットはマイクロホン、照明灯、冷却ケースに収納されたカラーテレビジョンカメラ及びこれらの機器を搭載して被点検機器の方向へ向ける電動雲台から成る。

コントロールユニットはカメラユニットの制御装置、通信装置、更に格納容器内の雰囲気を点検する温度計及び放射線検出器を搭載している。近接視覚ユニット¹⁾は多関節の柔軟機構で、この内部に通したイメージガイドの先端部を、視野の障害物を回避しながら、その後方にある被点検機器の方向へ

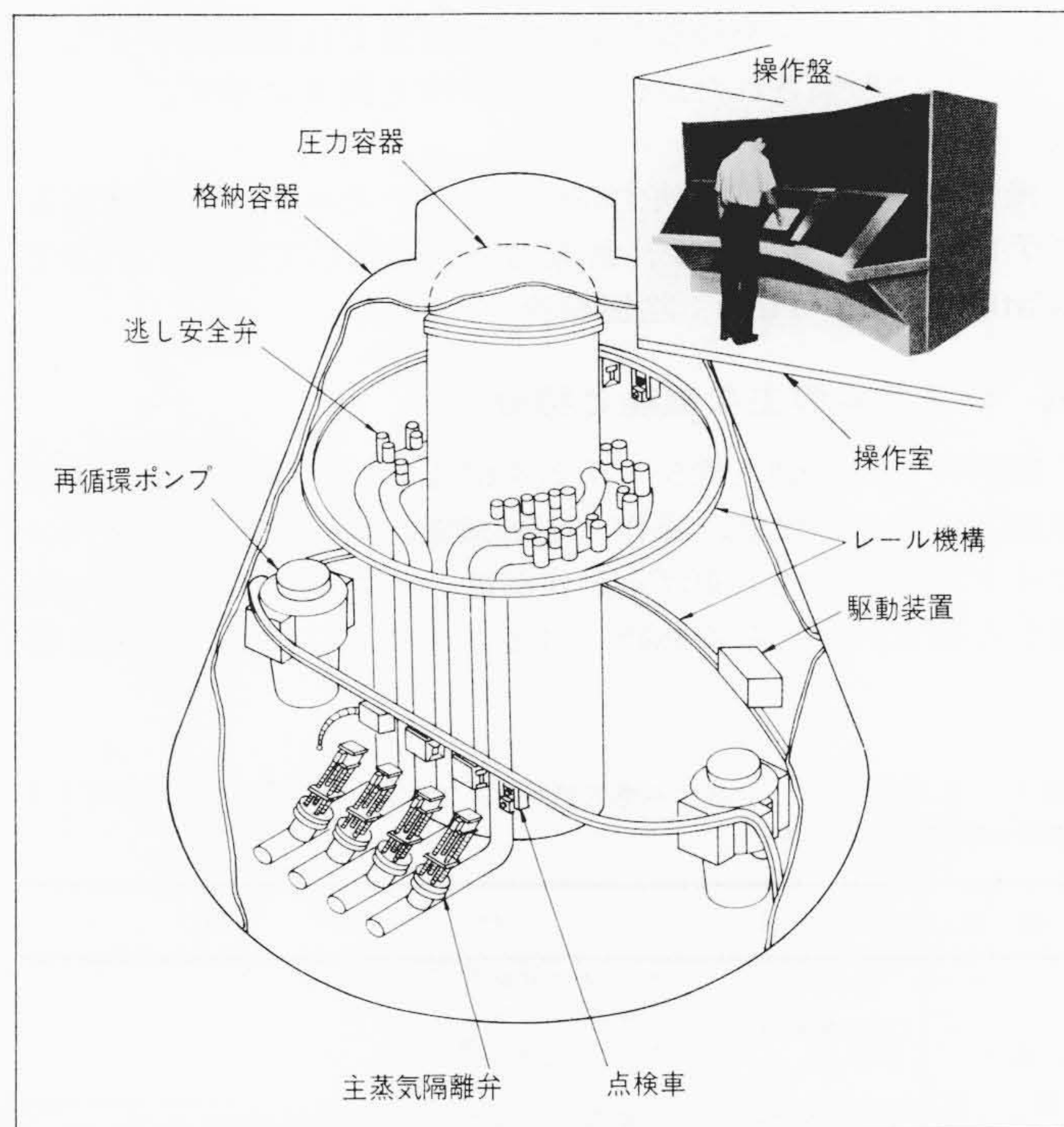


図1 空間走行形格納容器内自動点検システム 点検車、レール機構、駆動装置及び操作盤から成る本システムの適用想定図を示す。操作盤は高精細カラーモニター、点検車の空間的な位置を表示する3次元グラフィックディスプレイなどを備え、CRT(Cathode Ray Tube)のタッチオペレーションにより操作を行なう。

向ける。近接視覚コントロールユニットは、近接視覚ユニットの制御装置、通信装置及びイメージガイドでとらえた像を電気信号に変換する白黒テレビジョンカメラを搭載している。

(2) 走行装置

レールは2本の溝形材を向かい合わせて構成し、その中間にはチェーンチューブを、外側には給電及び通信に用いるト

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所大みか工場

*** 日立製作所エネルギー研究所

**** 日立製作所中央研究所

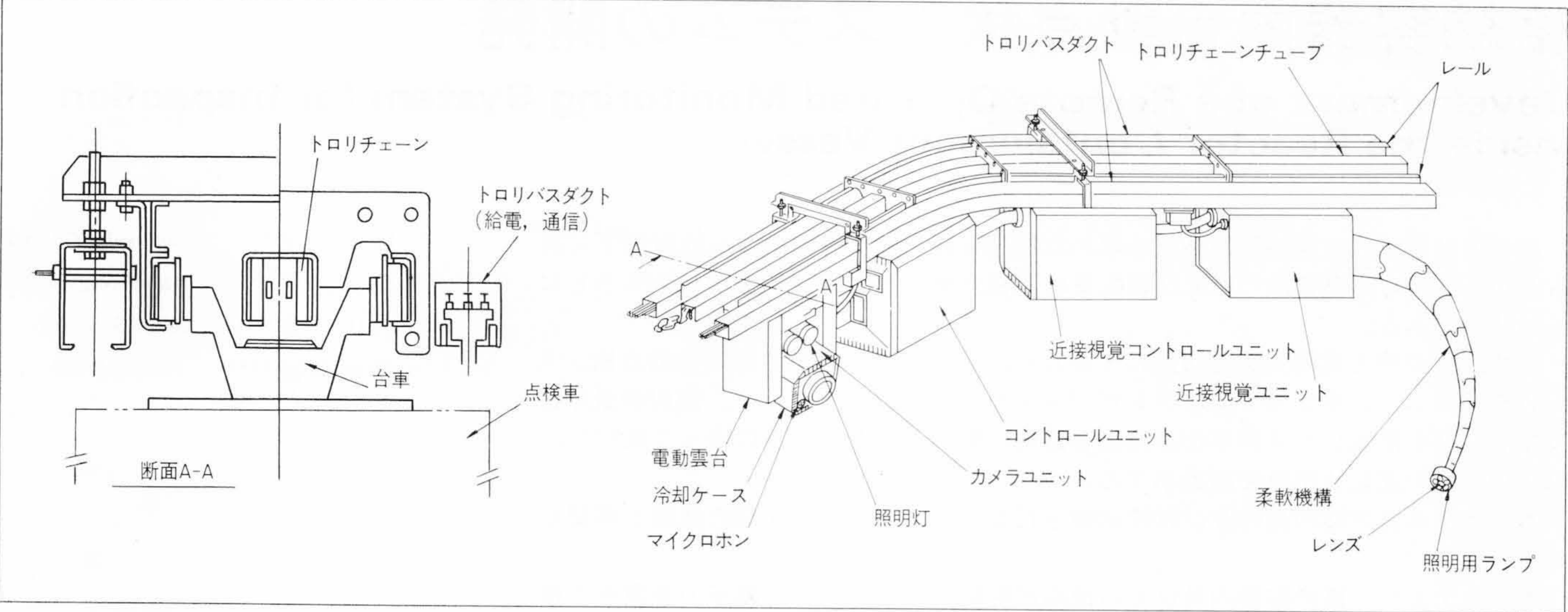


図2 空間走行形点検車 各ユニットは、トロリチェーンにけん引されて往復走行する。

ロリバスダクト 2 本を組み合わせている。
点検車は閉ループを成すトロリチェーンにけん引されており、このチェーンを無限軌道式駆動装置で往復運転する²⁾。
レールに懸架された点検車の実証機を図 3 に示す。

(3) 操作盤

操作盤は現場状況を映す高精細カラーモニタ、臨場感あるステレオスピーカのほか、計測結果を編集して表示するCRT (Cathode Ray Tube：陰極線管) を備える。

3 システムの主な機能と特徴

格納容器内自動点検システムを機能面から眺めると、検出機能、信号伝送機能、操作・制御機能、走行機能、イメージガイドを撮像方向へ曲げる動作機能、その他付帯的な冷却機能から成る。これらの機能に対応させて、システム構成機器

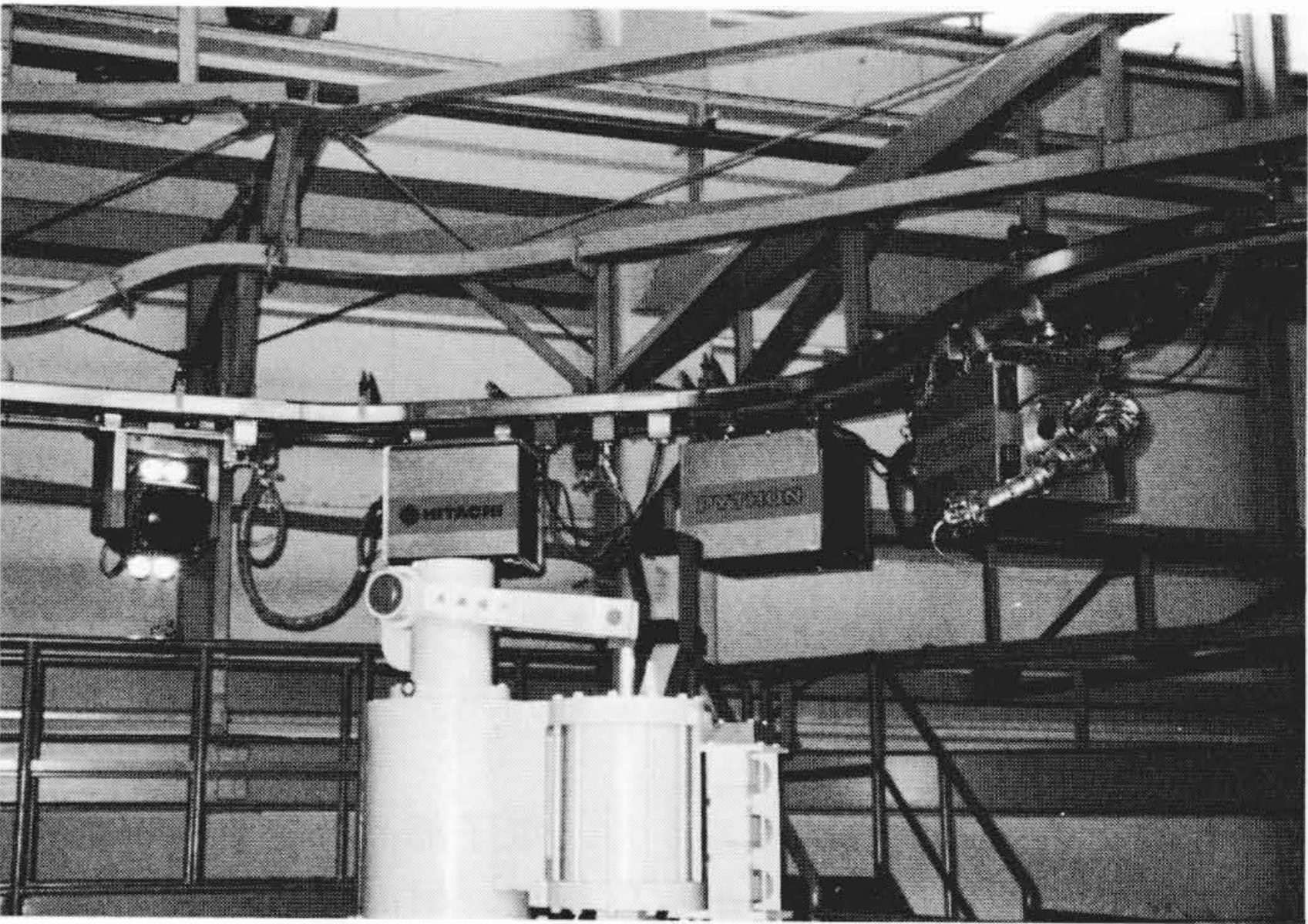


図3 格納容器内自動点検システムの実証機 格納容器内の点検ルート約50mを模擬した試験設備により、機能試験を行なっている。

表1 主な仕様 システム構成機器の主な仕様及び格納容器内に設置する機器の環境条件を示す。

機 能	機 器	仕 様
検 出	ITV*カメラ	・カラー用単管式撮像管 電動ズームレンズ装備 ・白黒用撮像管 イメージガイド装備
	イメージガイド	画素数15,000本、シース外径10mm
	温 度 計	サーミスタ、測定範囲0～99℃
	マイクロホン	可動コイル形、集音域60Hz～10kHz
	線量率計	GM計数管、測定範囲10 ⁻² ～10 ² R/h
信号伝送	信号伝送路	トロリバスダクト(給電と兼用) 静電容量結合器
	信号伝送装置	時分割多重伝送
冷 却	冷却ケース	電子冷却
操作制御	操 作 盤	カラーCRT：4台 (タッチパネル用1面含む) モ ニ タ：2台 ス ピ ー カ：2個(ステレオ) ミニマスタ：1台(柔軟機構用)
動 作	柔軟機構	11関節、全長約1m
	電動雲台	上下振り角+60°、-90° 左右振り角±180°
走 行	レール機構	幅400mm、最小曲げ半径900mm
	駆動装置	無限軌道式駆動装置、往復駆動 走行速度10m/min、鉛直登坂
・格納容器内の環境条件		照射線量10 ⁶ R、最高温度70℃ 最大湿度約100%RH
・点検車の通過可能断面		幅500mm、高さ600mm

注：略語説明 * ITV[Industrial Television(工業用テレビジョン)]

の仕様を表 1 に示す。
3.1 検出機能
格納容器内での機器の点検には、耐放射線性と解像力に優れた視覚センサが重要である。

(1) テレビジョンカメラ

従来のものは相当量の放射線が当たると、光学ガラスの着色現象(ブラウニング)による色情報の喪失、電子回路部品の動作レベル低下や誤動作などが発生して、性能が低下する。そこで、テレビジョンカメラの一連の照射試験により、放射線損傷で機能を喪失する部品を明らかにし、次の改良を行なった。

撮像方式は耐放射線性に優れた撮像管方式を、光学ガラスには着色防止に酸化セリウムを添加したガラス素材を用いた。撮像管を制御する電子回路部品には、放射線に強いタイプの部品を選別し、回路的にも工夫して耐照射線量10⁶R以上を達成した。開発した耐放射線形カラーITVカメラの外観を図 4 に示す。また、カメラ用照明灯は小形で高光束の必要性からハロゲンランプ(100W)を採用し、2灯ずつカメラの上下に配置し、被写体によるハレーションを防ぐため片方の選択使用も可能にした。

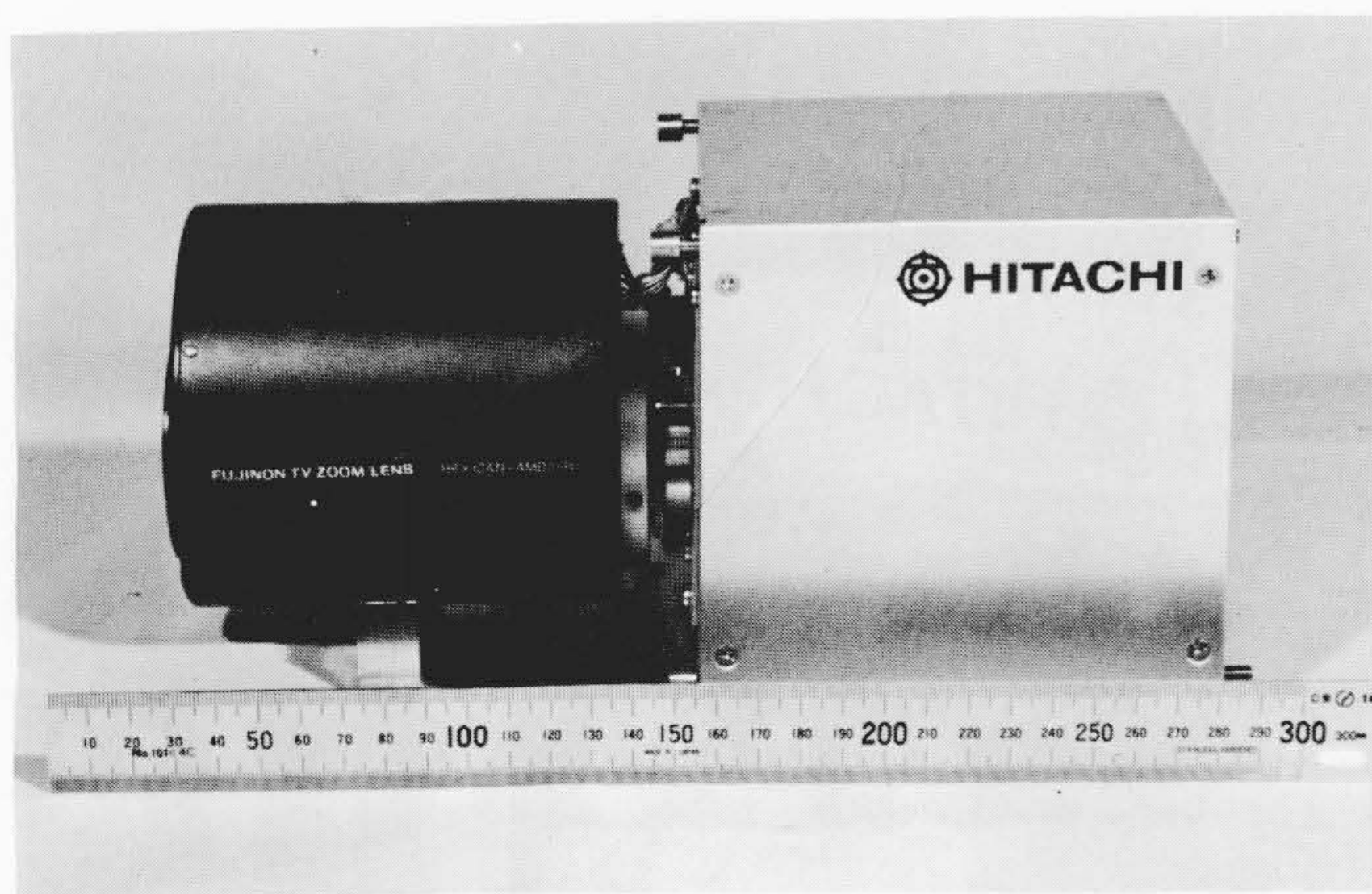


図4 耐放射線形カラーITVカメラの外観 カメラ制御ユニットと一体構造で、電動ズームレンズを装備している。耐照射線量は 10^6 Rをもっている。

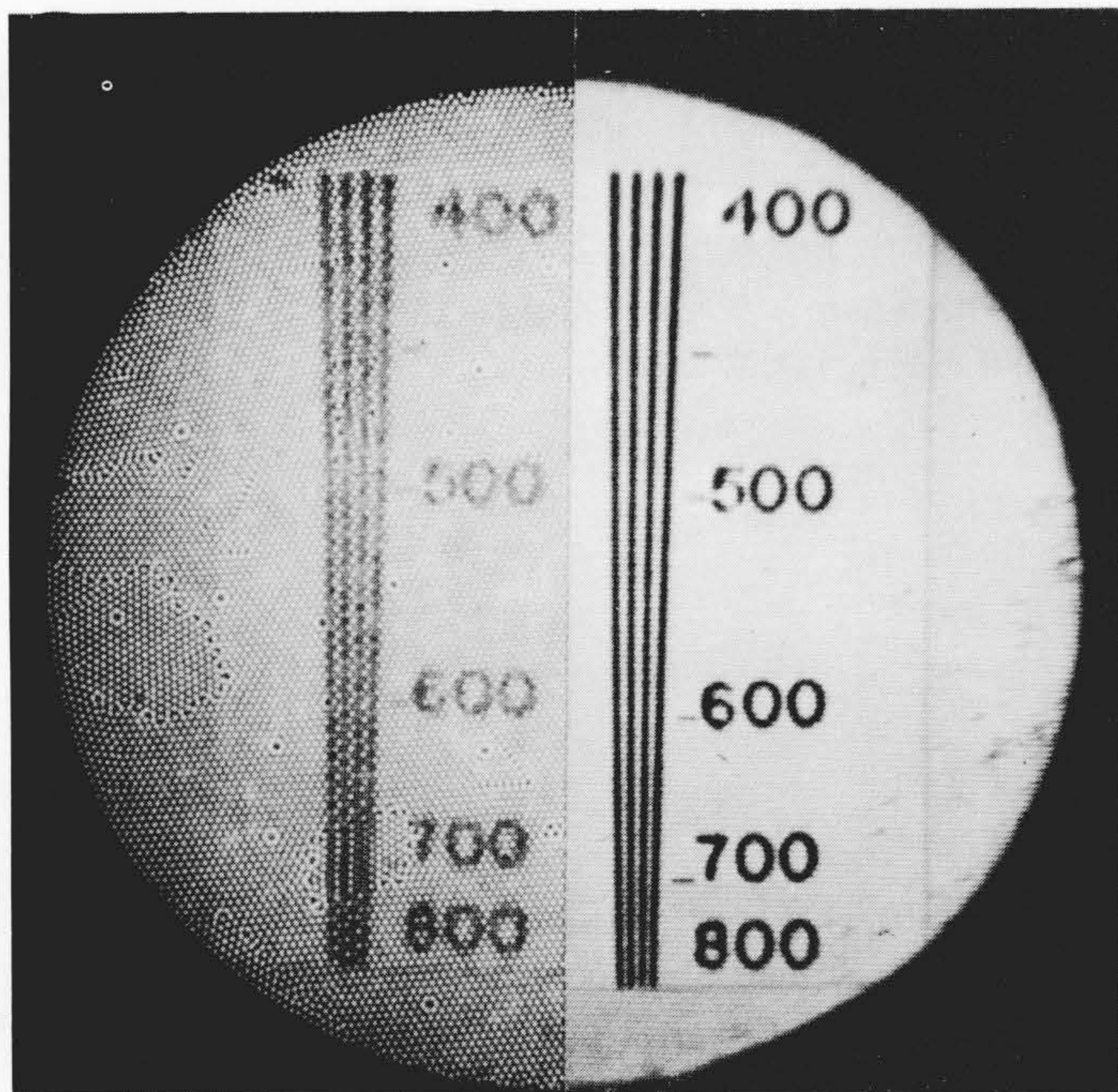
(2) イメージガイド

従来の多成分ガラスは γ 線が当たると黒化していくので光の透過率が低下する。その結果、イメージガイドの明解な映像が得られなくなる。そこで、照射試験により黒化程度の少ないガラス素材としてガラスファイバのコア部に純粋石英、クラッド部にフッ素を添加した石英を採用し、イメージガイドの耐照射線量 10^6 R以上を達成した。

また、イメージガイドを構成するガラスファイバ間の漏光を抑え、接眼部と対物部に直視プリズムを装着して、ガラスファイバ1本当たりの情報伝送量を増やし、映像の高解像度化を図った³⁾。図5に、従来品との解像度の比較結果を示す。

3.2 冷却機能

狭い格納容器内で、常時 70°C 環境下で機能を維持するためには、小形で高性能な冷却装置が必要である。そこで、小形かつ信頼性の高い使用実績のある電子冷却方式を採用した。冷却設計に当たっては、まずソフトウェアモデルによるシミュレーション技法を導入し、電子冷却の回路及び実装方式の



画素数：15,000、シース外径10mm、条長：4m

図5 高解像度形と従来形イメージガイドの画像比較 右半分の画像は直視プリズムを装着することにより、左半分の従来形に比べて約4倍の等価画素数を達成した。

ほか、熱伝導及び放熱構造の最適化を図り耐高温性を向上させた。その結果、常時では 70°C 、短時間では 90°C を実現した。

3.3 信号伝送機能

点検車の移動範囲の増加に伴い、適切な給電及び信号伝送方式を選ぶ必要がある。そこで、(1)格納容器内の機器に、機械的にも電氣的にも悪影響を与えない、(2)信頼性が高い、(3)システムの構築が容易である、という優れた特長をもっているトロリバスダクトと集電子から構成される静電容量結合形通信方式を開発した。本方式は、トロリバスと集電子を接触させて給電するとともに、信号を重畳させて通信するもので、ケーブル処理装置を必要としないため、合理的なシステムが構成できる。

3.4 操作・制御機能

操作盤には人間工学的見地から視認性及び操作の容易さを考慮して、用途ごとにCRTディスプレイを装備した。点検車から送られてくる映像信号は、デジタル処理装置で信号補正が行われ高精細映像として、オペレータに提供される。

図6に高精細カラーモニタの映像例を示す。オペレータは、点検車の現在位置・姿勢を3次元グラフィックCRTを用いて、また現在位置の温度・照射線量率に関するデータを、計測データ表示用CRTを用いて認識できる。

点検車の操作は任意の場所で任意の点検ができる手動モード、あらかじめ決められた点検ポイントをプログラムどおりに自動的に点検し運転操作の省力化を図る自動モードと、高精細カラーモニタの映像を注視しながらオペレータの声で制御ができる音声モードのいずれかを選べるものとした。また操作スイッチはCRTディスプレイに表示され、該当する操作シンボルに指で触れることにより、点検車の移動やカメラの首振りなどを可能とした。

3.5 動作機能

近接視覚ユニットの柔軟機構(図7)は、左右に 45° 曲がる関節と上下に 45° 曲がる関節を交互に11関節接続し、ワイヤを介して電動機11台で駆動する。イメージガイドは撮像距離30cm、照度6,000lxに設定し、その接近は柔軟機構の操作が感覚的で容易なマスタスレーブ方式とした。また、各関節の周りには接触センサ(コイルばね)を浮かせて巻き付け、他の設備に干渉すると、その押付け力で関節表面に接し通電状態となって、関節停止及び警報発生 of 保護回路を働かせるものとした。

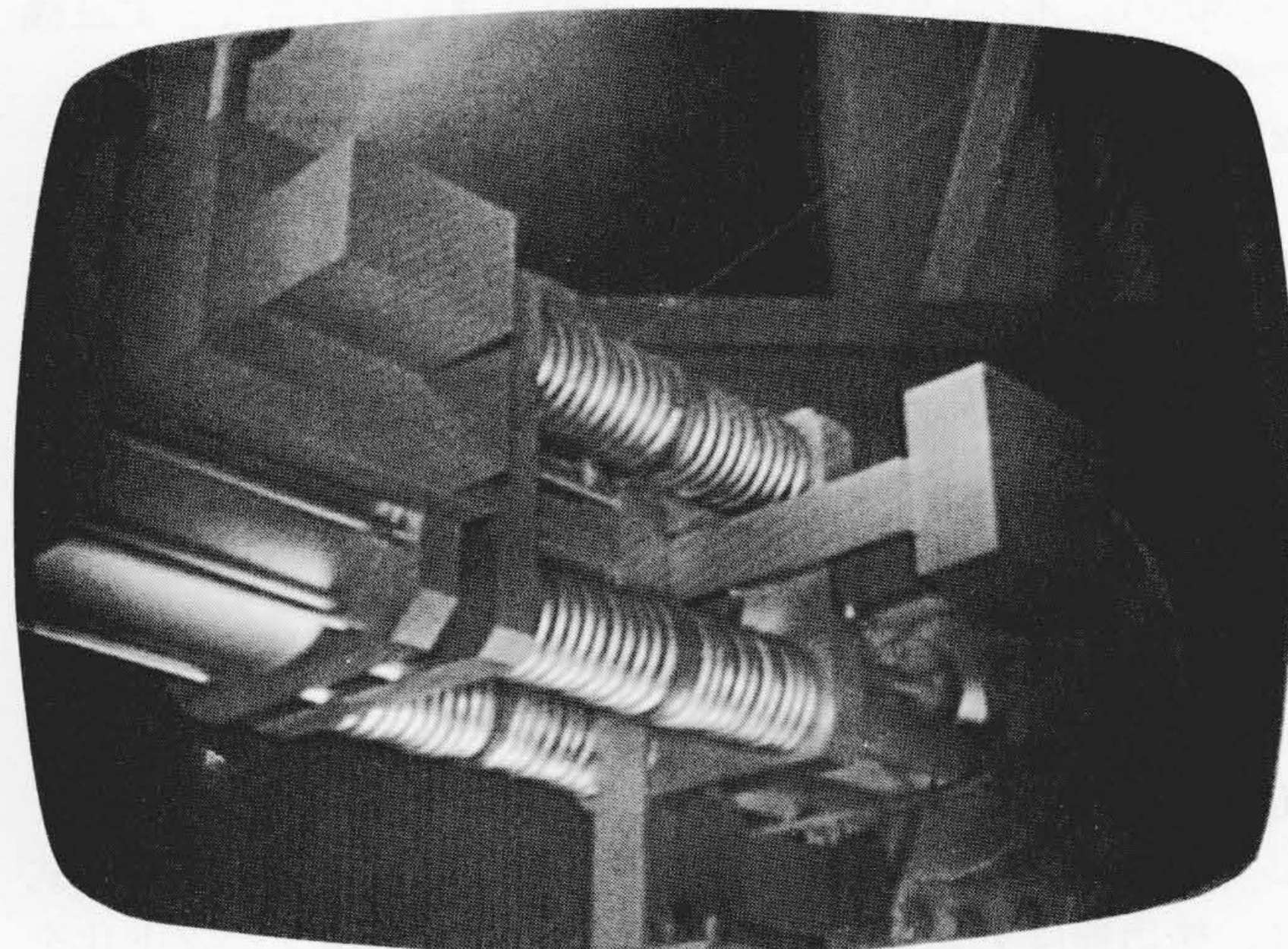


図6 高精細カラーモニタの映像例 約4mの距離から、主蒸気隔離弁 $\phi 500 \times$ 長さ3,000mmの模型を点検している映像を示す。

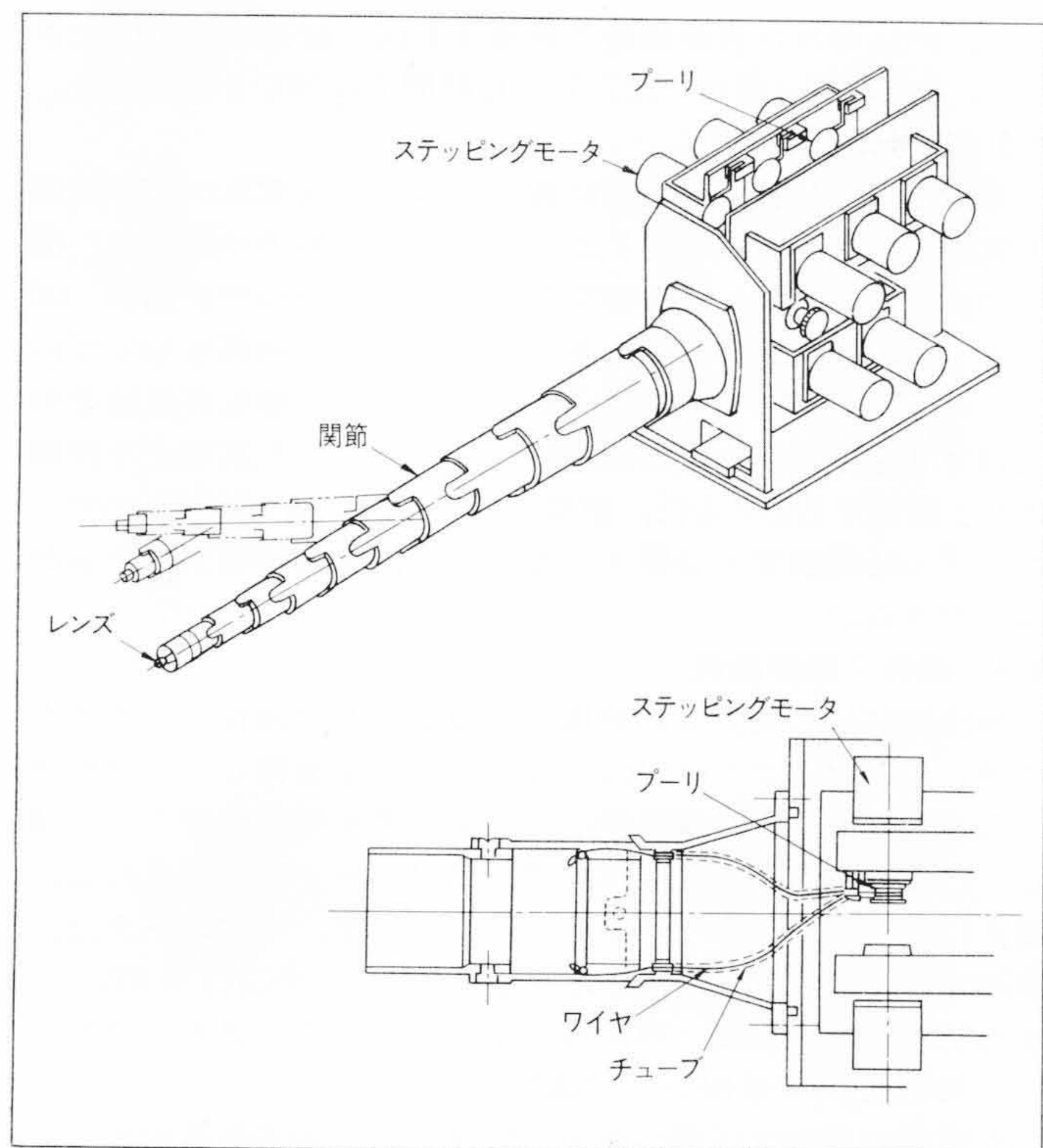


図7 柔軟機構 柔軟機構の構造及び動作機構を示す。ステッピングモータでプーリを回すと、ワイヤの一端が引っ張られその方向に関節が曲がる。

3.6 走行機能

走行装置は機動性向上の検討を重ね、水平にも鉛直にも屈曲自在のユニバーサル式トロリチェーンを用いて点検車をけん引する方式とした。走行装置の小形化目標はカメラを冷却保護し、電動雲台に搭載した場合の限界寸法を目安とし、レール幅などを決めた。レールの曲げ程度は点検車の車輪間隔から通過可能な最小曲げ半径が求まるが、これをより小さくするためにボギー台車を採用している。

4 システムの確性試験

確性試験は実使用条件をできるだけ模擬して実施した。

(1) 機能試験

格納容器内で最も大きな動的機器である再循環ポンプ・電動機2台を結ぶ点検ルート約50mの模擬試験設備により点検(約30分)、走行(速度10m/min一定)、運転操作性など実証機の機能を確認した。

(2) 耐環境試験

点検車について、温度70℃の雰囲気中で400時間、更に相対湿度を100%に上げた雰囲気中で100時間それぞれ運転した。また、照射線量10⁶Rのγ線照射試験を行ない耐環境性を確認した。

以上のほか耐震試験などを実施し、所期性能が確認された。

5 既設発電所への適用

既に運転されている発電所へ点検システムを導入する場合は、定期検査の短期間内に据え付ける考慮が必要である。

一方、使用の目的によっては限られた狭い場所で、それに応じたシステムの部分導入が考えられる。その一つの試みとして本点検システムの小形簡略化を検討し、通信を有線方式に、検出器はテレビジョンカメラだけ搭載のコンパクト化を図った電動トロリ形移動式監視装置(図8)を試作し、実用性を確認した。



図8 電動トロリ形移動式監視装置 Iビームに沿って走行する電動トロリの下部に、電動雲台とテレビジョンカメラを搭載している。給電、通信はカーテンケーブルによる。

6 結 言

耐環境性をもつ小形・軽量の格納容器内自動点検システムを開発した。本システムは格納容器内を広範囲に移動して、外観、音響、温度及び照射線量率のモニタリングを行ない、直接的な情報からよりの確な判断を可能とすることにより、原子力発電所の信頼性向上などに寄与する。今後、格納容器内への適用性向上を図り、使いやすいシステムとなるように、いっそうの努力を続けてゆく考えである。

格納容器内自動点検システムの開発に当たり、通商産業省殿及び関係各位から多大の御指導をいただいた。ここに深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) F. Tomizawa, et al.: Flexible Manipulator for Inspection Inside the Primary Containment Vessel, Trans. of ANS-ENS 1984 International Conf., pp.452~454 (Nov. 1984)
- 2) K. Sadakane, et al.: Tele-Operated Robot for Inspection Inside the PCV, Proc. of 30th Conf. Remote System Technol. (1982)
- 3) 伊藤, 外: ファイバースコープの解像度の改善, 第45回応用物理学学会学術講演会, 予稿集, p.48 (1984)