

原子力発電支援システムの開発

Development of an Operation Support System for Nuclear Power Plants

原子力発電所の状態を的確にとらえて運転員に認識させるとともに、万一故障が発生した場合、運転員に運転ガイドを与え最適な対応措置が取れるようなシステムの開発が望まれている。これは原子力発電所の稼働率向上・信頼性向上につながるもので、原子力発電支援システム開発として通商産業省補助事業により、昭和55年から5箇年計画で開発に取り組んでいるが、現時点での開発内容について報告する。現在各テーマについて、概念設計及び基礎実験を終了し各種の知見を得、これをもとに詳細設計・製作を推進している。本開発の完成により原子力発電所の稼働率向上・信頼性向上に寄与することが期待される。

能 一彦* Kazuhiko Nō
 水野雄弘** Katsuhiko Mizuno
 渡辺孝雄*** Takao Watanabe
 林 勉**** Tsutomu Hayashi

1 緒 言

原子力発電所の建設が推進され、原子力発電の比重が高まるにつれ、よりいっそうの稼働率向上、信頼性向上が重要視されるようになってきた。稼働率向上、信頼性向上については各種方策が考えられるが、事故・故障を極力未然に防止し、万一事故・故障が発生しても適切な対応によりその拡大を防止し、かつ短時間のうちに復旧することが重要である。このために原子力発電所の状態を的確にとらえ、運転員に認識させるとともに、万一事故・故障が発生した場合、運転員に適切な操作ガイドを与え、最適な対応措置が取れるようなシステムの開発が必要である。このようなシステムの開発は、米国スリーマイル島原子力発電所事故の反省事項としても取り上げられ、欧米でも開発に着手した。このような情勢のもとに、我が国の有力な原子力メーカー3グループ・6社が参加して、原子力発電支援システム開発組合が結成され、通商産業省補助事業により技術開発を行なうことになった。日立製作所は積極的に本計画に参加し開発を推進してきた。原子力発電支援システム開発は、昭和55年度から昭和59年度までの5箇年にわたって行なわれる計画であり、最初の2年間が経過した現時点での開発状況を述べる。原子力発電支援システムは、インストラクションシステムと格納容器内自動点検システムの2項目に分けられる。

2 インストラクションシステム

図1にシステムの全体構成を示す。以下、開発を進めている4項目の主要技術の概要と特徴について述べる。

2.1 インストラクション技術

原子力発電所の運転員に課せられた使命は、プラントの状況に応じた判断と操作であり、これを支援するため電子計算機を積極的に活用した監視、診断、ガイドから成るインストラクション機能を開発している。表1に主要なインストラクション機能を示す。

監視、診断機能は、運転員がプラントの状況及び発生した事象を正確かつ容易に把握できるように、プラント情報の集約化表示と事象の判別を行なう機能である。特に、安全に関連する系統とパラメータについては、監視機能を強化している。すなわち、本システムでは安全系の機能健全性を待機状態から作動状態まで一貫して監視しており、また安全パラメ

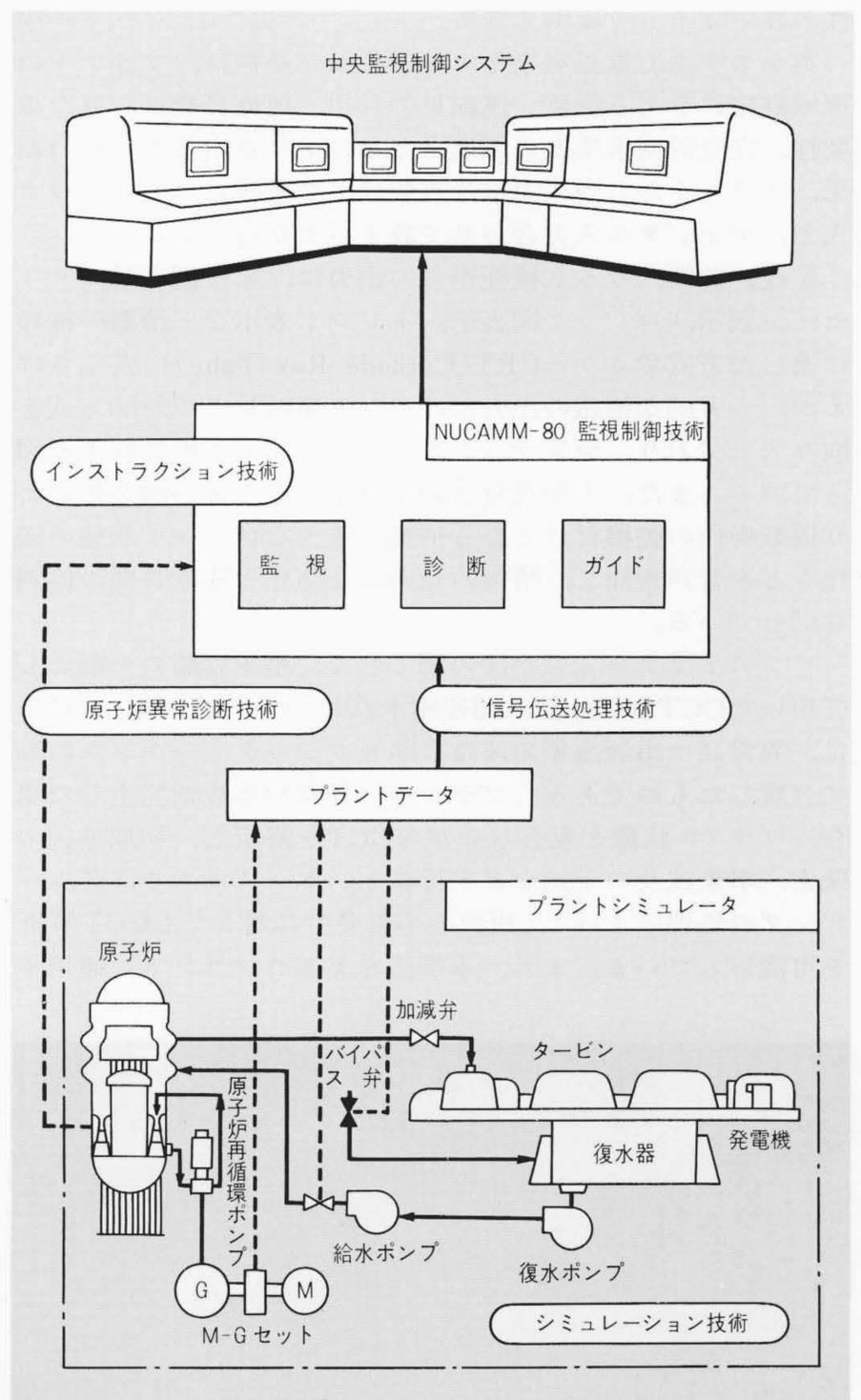


図1 インストラクションシステムの全体構成 インストラクションシステムは、プラントからの信号を処理して、中央監視制御システムのCRTにプラント状況とともに運転操作ガイドを表示する。システムの検証には、実規模プラントの実時間シミュレータを使用する。

* 日立製作所原子力事業部 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所エネルギー研究所 **** 日立製作所日立工場

表1 インストラクションシステム主要機能 各種診断評価に基づく事象対応ガイドとプラントの兆候に対応したガイドとを組み合わせ、運転支援する構成となっている。

機能分類	主 な 機 能
監視・診断	1. 運転制限モニタ
	2. 安全系機能評価
	3. パラメータ監視
	4. 事象診断
	5. プラント・系統監視表示
ガイ ド	1. 事象対応ガイド
	2. 兆候対応ガイド

ータについては、各種機能を付加して安全状態の監視を充実させている。

ガイド機能は、運転員に適切な操作内容を提示する機能であり、事象(イベント)に対応した操作手順と安全パラメータの兆候(シンプトン)に応じた処置手順を用意しており、信頼性の高いガイドを提供できる。

本システムで重点対象とする事象及び系統は、プラントの運転継続に与える影響、運転員の負担、運転経験から見た重要性、安全評価事象との関連などを基準に選定した。その結果、プラントからの入力信号点数は主要系統だけでアナログ入力、デジタル入力合わせて数千点となっている。

監視、診断、ガイド機能からの出力は、系統図表示、メッセージ表示、ロジック図表示、トレンド表示など情報の種類に適した方式でカラーCRT(Cathode Ray Tube)に表示されるが、一方的な情報の出力だけでなく運転員との対話方式を取り入れており、マンマシンインタフェースの性能向上を図っている。また、上記視覚情報と併用して音声合成装置により運転操作の動機付けとなる情報、重大なプラント状態の変化などを音声告知し、情報の見過ごし防止と運転員間の協調を図っている。

インストラクション手法の例として、事象診断の一部として用いたCCT(原因-結果関連樹木)¹⁾について述べる。CCTは、異常又は事故事象の波及経路をロジックシーケンスの形で表現したものである。プラントに異常や事故が発生した場合、プラント状態と照合しながらCCTを解析し、初期原因の探索、事象波及の予測などを行なう。本システムではグルーピングの処理によって、複数の事象発生に対してもCCT解析を可能にしている。また、本手法を実際のプラントに適用す

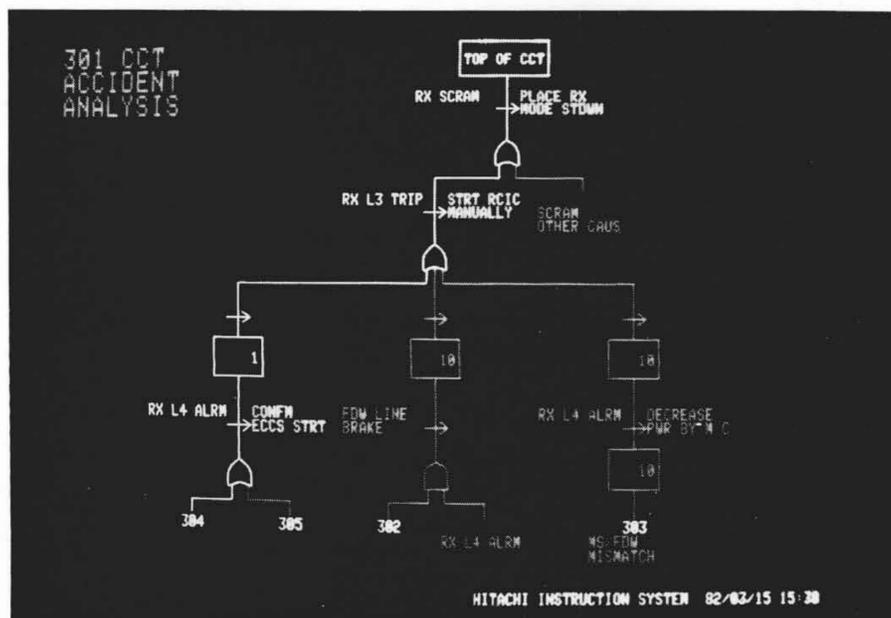


図2 ロジック図のCRT表示例 異常・事故事象の波及過程が色彩表示され、直観的な状態把握が可能である。

る場合、CCTは大規模なものになるので、CCTの自動生成プログラム及びロジック図のCRT自動作画プログラムを開発した。これによって、CCTの電子計算機への入力とCRTへのロジック図作画が自動的にこなされ、CCTの修正及び改造などのメンテナンスに対しても柔軟に対処できるようになった。

図2に上記プログラムによって作成したCRT表示の例を示す。ロジック図表示は、異常・事故事象の波及していく過程が色彩表示されており、直観的な状態把握に有効である。

2.2 シミュレーション技術

インストラクションシステムの有効性を、運転員操作も含めて総合的に評価するため、検証用シミュレータを開発中である。このシミュレータは、標準的BWR(沸騰水型原子炉)-5型(電気出力1,100MW)プラント及びその新型中央制御盤を対象として、プラントの挙動を実時間シミュレーションするものである。シミュレーションモデルは、事故時の模擬に重点を置いたものとしており、事故あるいは機器故障などのマルファンクションを任意に発生させ、事故時での原子炉の圧力、水位及び格納容器内圧力やサブプレッションプール水温度を、非常用炉心冷却機能をも含めて模擬する。ソフトウェアは、系統あるいは機能を単位としたモジュール構成とし、容易に機能拡充ができる柔軟なものとするほか、汎用性の高いシミュレーションを行なうため、物理モデルを多く利用している。

図3に、ソフトウェアの概略構成を示す。

なお、インストラクションシステムとシミュレータには、日立大形制御用計算機HIDIC V90/50などを採用し、詳細な診断ガイド技術を提供できるようにするとともに、シミュレータでも精度よく高速にシミュレーションが可能にしている。

2.3 原子炉異常診断技術

原子炉圧力容器内の機械的健全性を常時確認し、万一炉内構造物の支持具の緩みなどによる異常振動や、ルースパーツ(脱落あるいは系外から混入した金属片)が発生した場合はこれらを早期に検出し、その状況を把握することが事故の未然防止あるいは拡大防止を図る上で重要である。原子炉異常診断技術は、前記のような原子炉圧力容器内の機械的異常事象を炉容器の外部から検出・診断する技術である。

原子炉異常診断システムの構成を図4に示す。本システムは、炉内構造物の異常振動やルースパーツによる金属相互の

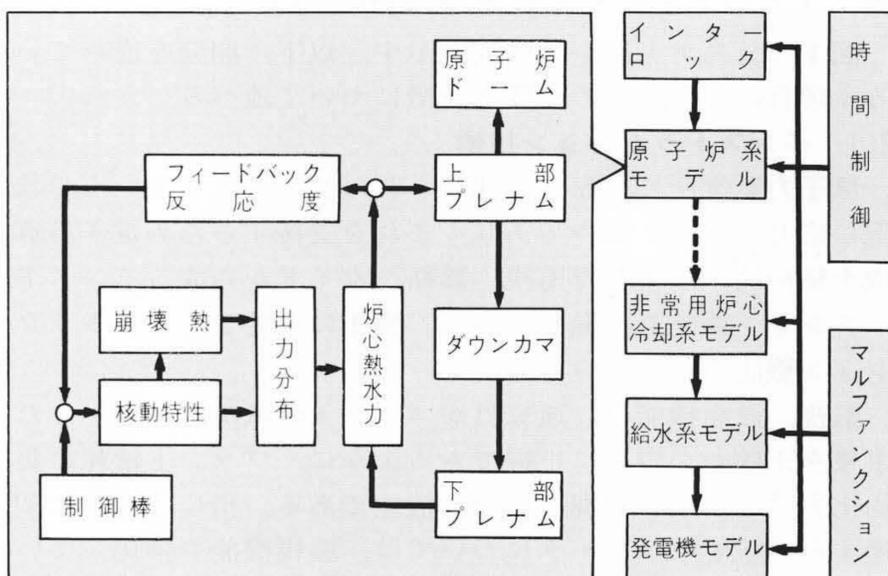


図3 シミュレータソフトウェアの構成概要 シミュレーションモデルは系統あるいは機能ごとに分割したモジュール構成とする。各モデルは時間制御やマルファンクション発生などを行なう管理プログラムの下に実行される。

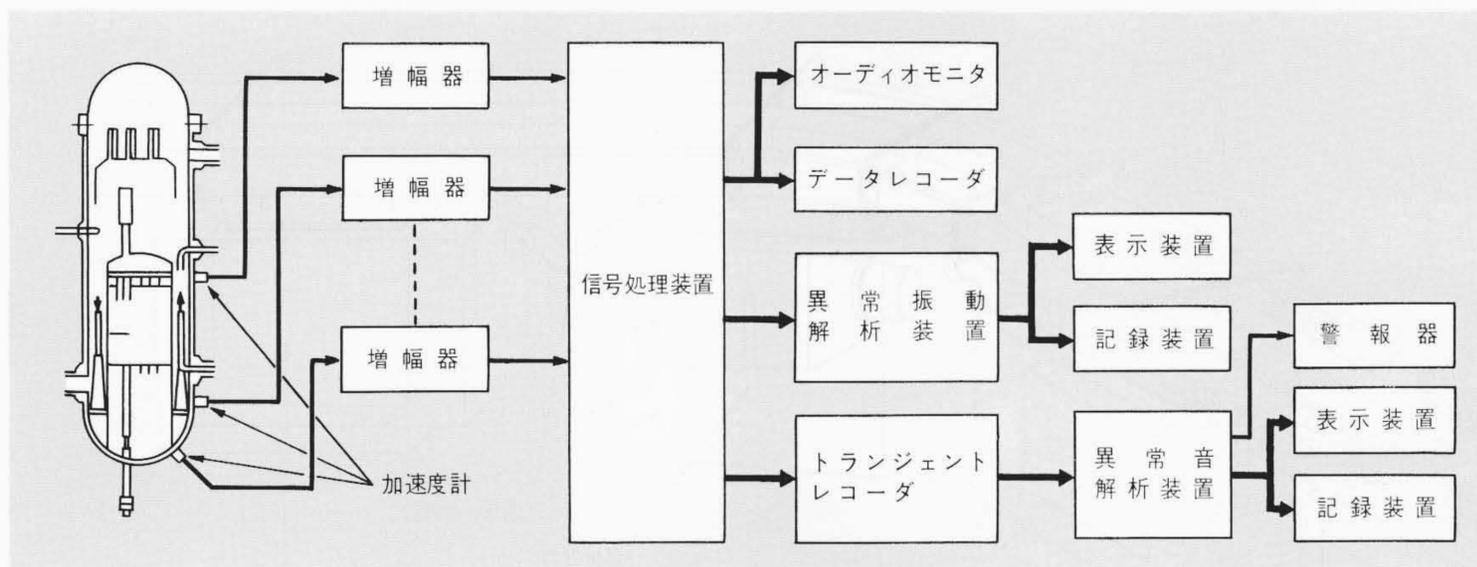


図4 原子炉異常診断システムの構成 信号処理装置で診断に必要な特徴抽出を行なったのち、解析装置で分析し、音源位置など分析結果を表示、記録する。異常発生後の信号は自動的にデータレコーダに記録される。また、オーディオモニタにより異常音と正常音を比較して聴くことができる。

衝突音の検出とその位置の推定、データの収録、聴音機能及びチャンネルの機能チェックなどの校正機能をもっている。

異常事象の検出は、原子炉圧力容器の外部に設置する加速度検出器などにより異常音を検知して行なうが、原子炉運転中の雑音(流動・沸騰音、機械動作音、電気ノイズなど)と、構造物の異常振動やルースパーツによる衝突音とを識別するための特徴抽出法などの適切な信号処理を行ない、誤警報の発生を防ぐ必要がある。異常振動している構造物名を推定する手法としては、これまでに検出器信号の包絡線検波による周期測定法や、信号発生周期をヒストグラム処理する周期分析法が考案され、簡単な実験により有効性が確認されている²⁾。この手法が本システムに適用できるかは、支持が緩んだときの炉内構造物の振動特性及び信号の伝搬特性について、モデル試験により確認してから判断する必要がある。ルースパーツ衝突音などの音源発生位置を推定する手法としては、伝搬距離と時間の比例関係を利用して求める時間差法や、伝搬距離に依存した音の減衰特性を利用する振幅減衰法が一般に知られている。しかし、原子炉圧力容器の場合は、構造体系が複雑なため、音の伝搬経路が種々あり、また音の伝搬速度も場所によって変わり得ることが考えられ、位置の推定精度が悪くなると予想される。したがって、推定精度向上のためには音の伝搬速度や径路に直接依存しない推定手法が必要であるが、同一音源に対し、各検出器に到達する信号の時間と各検出器信号間の相対強度は同一となることに着目し、時間差波高値座標上に既知の音源に対するパターンを記憶しておき、このリストと対比して未知の音源を推定する特徴抽出法が応用できると考えられる。この手法は、電気ノイズや機械動作により発生するノイズの除去にも有効である²⁾。

2.4 信号伝送処理技術

原子力発電所にインストラクションシステム、及び構成機器の診断システムを適用するためには、現場から膨大な数の信号を計算機室まで適切に伝送する必要がある。このための方法としては、多数の信号を少数の媒体により伝送する多重伝送方式が適している。多重伝送方式は一般産業用として実用に供されている例もあるが、原子力発電所では、耐放射線、耐震、火災対策など特異な環境条件を考慮した特殊設計が要求される。また、システムの信頼性確保も重要な課題である。比較的伝送量の多い幹線は、高速の大容量伝送に適したループ構成とし、比較的伝送量の少ないプラント内各建屋からの支線は、ラダー構成とスター構成としている。これは、各構成要素の故障を局所化し、インストラクションシステムへの影響を極力小さくするためである。

信号伝送の媒体としては、実績が多く技術的にも安定した

電線が一般的であった。最近では、誘導ノイズの影響を受けない、電氣的に絶縁されている、伝送容量が大きいという長所から、光ファイバケーブルの利用が通信の分野を中心に広がっている。原子力用としては、放射線で光減衰量が増大する欠点があったが、耐放射線光ファイバの開発が進んでおり、原子力プラントへの適用が図られている。

なお電子部品、特に高集積度の半導体素子は、放射線による影響を受けるので、設置場所の選定に際しては十分注意する必要がある。

3 格納容器内自動点検システム

3.1 システムの構成

走行装置は種々の方式が考えられるが、操舵が不要であり自由な点検路が選べる方式として、空中に設けたレールから懸架した点検車をチェーンで引っ張って走行させるシステムを採用した。駆動動力源は地上に固定されるので、小形・軽量となる。格納容器内機器間の狭い空間で点検できるように、通過断面積と旋回半径を小さくするため機能ユニットごとに分割し、縦列接続したトレーン構造としている。

日立製作所は数年前に格納容器内自動点検システムの開発に着手した。開発の第一段階として、弁、ポンプ類からの蒸気漏れ、水漏れ点検を主要目的としたテレビジョンカメラだけを積載した移動点検車を開発した²⁾。

模擬試験で点検システムの有効性が確認されたので、引き続いて、温度計、マイクロホン、放射線線量率計を搭載して点検機能の拡大を図るとともに、冷却機能を向上して耐環境性能の向上を図ったシステムが、現在の政府補助金による開発機である。

3.2 開発機の概要

点検車は図5に示すように、テレビジョンカメラユニット、コントロールユニット、センサユニット及びパワーユニットから構成される。走行部分を除く通過断面積は400mm×400mm、最小回転半径は水平方向900mm、垂直方向900mm、走行速度は300mm/sと150mm/sの切替え、垂直の登坂能力をもっている。周囲温度70℃、相対湿度100%に耐えられるように密閉構造とし、ペルチェ素子による電子冷却を行なっている。単一の伝送路でテレビジョン画像、音、測定データ、点検車の状況データ、点検車への制御指令などの各種信号の双方向通信をするため、周波数分割と時分割とを併用した多重伝送方式を採用した。

点検箇所までの走行、データの収集記録を電子計算機の使用により自動化し、操作員の負担の軽減を図っている。

システムの故障や誤操作によって、点検システムが点検対

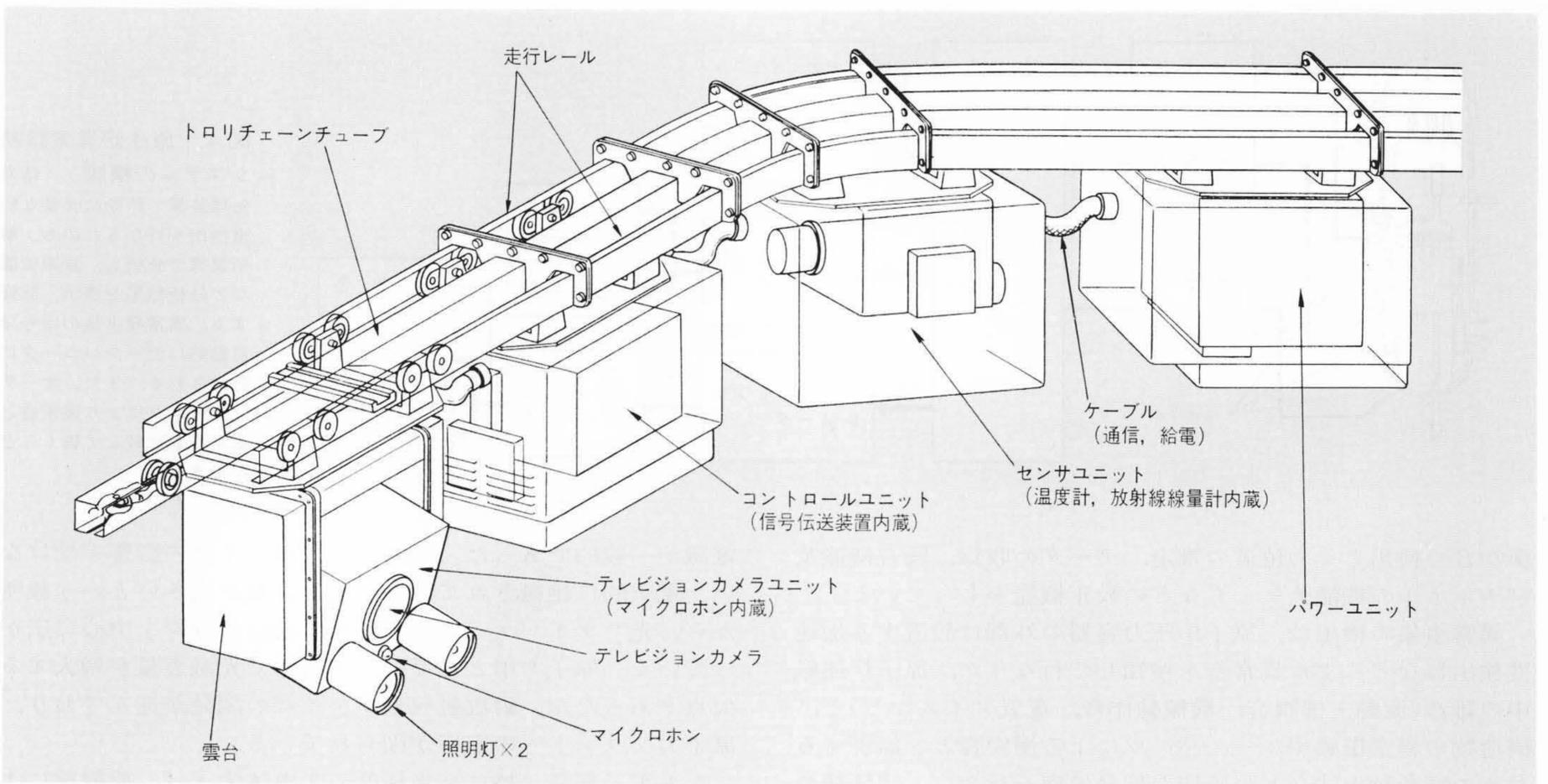


図5 空間走行型点検システム概念図 機能ユニットごとに走行車を構成し、縦列接続する。機能の追加、削減が自由にできる。

象機器に損傷を与えるようなことは絶対に防止しなければならない。衝突防止を配慮して走行ルートを設定するとともに、地震時にも点検車が脱落しないように走行レール、同支持構造物及び点検車の台車機構部は耐震設計を行ない、更に1台の点検車に対して二組みの懸架装置を用いて落下防止を図っている。

4 今後の計画

4.1 インストラクションシステム

これまでインストラクション技術については、CCTによる診断技術、事象対応・兆候対応ガイドを組み合わせた、事故時ガイドシステムなどの原型的なシステム開発を行ってきた。今後はこの原型システムを、具体的に主要系統、主要事象レベルまで拡大を図る一方、更に有効な診断・ガイド技術の開発を進める予定である。また、監視技術については、従来から新形制御盤開発^{3), 4)}の中で開発を進めてきたが、この技術とも融和を図って開発を進める。シミュレーション技術については、原子炉系を中心としてモデル化を図ってきたが、今後はプラント主要系統のモデル化を図り種々の事故事象が模擬可能なように開発を進めてゆく考えである。

原子炉異常診断技術は、今後実機で発生すると予想される異常時の振動挙動や音の伝搬特性をモデル試験などで確認するとともに、音源位置の推定をオンラインで行なうソフトウェア技術を確立してゆく。

信号伝送処理技術に関しては、これまで原子力発電所用の多重伝送システムの試設計、部品の耐放射線試験を実施してきた。今後は、原子力発電所用伝送システムの基本単位部分について製作、評価してゆく。

4.2 格納容器内自動点検システム

電子回路は放射線による影響を受けやすいので、格納容器内のような高放射線領域では、従来も電子装置が使われることはなかった。特に最近の半導体は、高集積化、小消費電力化を目指しているため放射線には敏感となっている。一方、いったん格納容器内に入れた装置は、1年後の定期検査時

で取り出して保守することはできない。

放射線損傷、温・湿度による劣化はコモンモードであり、冗長化による信頼度向上は期待できない。このような条件を配慮して、部品の選定、回路設計及び構造設計を行なうとともに、十分な確認試験が必要である。

原型機を試作し、模擬走行路を用いての走行テスト、環境試験装置を用いての耐環境性能の確認を経て、実プラントに適用できるシステムを構築する予定である。なお放射線照射テストは破壊テストとなるため、部品レベルで放射線損傷を確認し、システムとしての耐放射線性能を推測する計画である。

5 結 言

以上述べたように原子力発電支援システムの概念設計を確立し、詳細設計・製作に反映させてゆくことになった。インストラクションシステムでは誤った情報やガイドが運転員に提供されると、運転員の混乱を招き有害無益のものとなるので、設計段階での検討だけでなく試作品が出来上がった段階で徹底的に操作実験を重ねて完成させる考えである。また、格納容器自動点検システムでは耐環境特性(特に耐放射線特性)の十分な機器の開発が重要であり、この点に特に留意して開発を進めていきたい。

本開発を進めるに当たり、御指導をいただいている通商産業省機械情報産業局及び原子力発電支援システム開発調査委員会の各位に対し深く謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) A. B. Long: On-Line Power Plant Alarm and Disturbance Analysis System, EPRI NP-1379 (1980, 4)
- 2) 中村, 外: 原子力発電所用機器診断装置の開発, 日立評論, 62, 9, 659-662 (昭55-9)
- 3) 山崎, 外: 原子炉プラントの異常監視装置の開発, 日本原子力学会誌, 24, 217-227 (昭57-3)
- 4) 佐藤, 外: BWR原子力発電所用新型中央監視制御システム (NUCAMP-80)の開発, 火力原子力発電, 32, 245-254 (昭56-3)