

# BWR運転訓練高度化シミュレータ技術

## Recent Technology for BWR Operator Training Simulators

わが国の原子力発電所の高稼働率維持の重要な要因の一つに、優秀な運転員の寄与があげられる。

株式会社BWR運転訓練センタは、BWR(Boiling Water Reactor: 沸騰水型原子炉)をモデルとした2基の運転訓練用フルスコープシミュレータを使用して、数多くの運転員を訓練してきたが、近年の訓練ニーズの増加と内容の高度化の要請に応じるため、3基目のシミュレータを設置することになり、日立製作所が基幹部分を受注、納入した。このシミュレータは、模擬範囲が広く、特性も実プラントにきわめて似ていると好評を得ている。また、シミュレータ制御の面でも種々の新設計を採用しており、取り扱いがきわめて容易になった。

佐藤隆雄\* Takao Satō  
橋本茂男\*\* Shigeo Hashimoto  
加藤監治\*\*\* Kanji Katō  
水野紀至\*\*\*\* Toshiyuki Mizuno  
浅岡幸一\*\*\*\*\* Kōichi Asaoka

### 1 緒 言

わが国の原子力発電プラントは、一定出力運転をしており、また予定外停止もきわめて少ないため、運転員のプラント操作の機会が少ない。そのため、プラントの挙動を計算機で模擬し、異常現象などを自由に発生できるシミュレータによる訓練がますます重要になってきている。

日立製作所では、現在まで種々のタイプのシミュレータを納入してきた。本稿では、日立製作所が基幹部分の製作を担当した株式会社BWR運転訓練センタの3号シミュレータ設備(以下、BTC-3号機と称する。)を中心に、最新のシミュレータ技術について述べる<sup>1)~4)</sup>。

### 2 運転訓練用シミュレータの形態と位置づけ

#### 2.1 シミュレータの形態

シミュレータは大別すると2種になる。一つはフルスコープ型と呼ばれるもので、制御盤とシミュレーションモデルを実際のプラントとほぼ同一に模擬する。他の一つは小型シミュレータと呼ばれるもので、制御盤のスイッチをCRT上でタッチ操作化し、シミュレーションモデルも重要部分に絞って模擬するなど、プラント挙動の学習と経済性に重点を置いたものである。

#### 2.2 運転訓練上の位置づけ

フルスコープシミュレータは、実際のプラント運転と同様のチームを組んで、通常の起動・停止から異常事象までの幅広い運転操作の訓練をするのに使われる。そのため、フルス

コープシミュレータに対しては、広い模擬範囲と高い精度が必要になるとともに、発生しうる模擬故障も充実させる必要がある。一方、小型シミュレータの主なねらいは、机上では十分習得できないプラントの過渡変化などの現象を、体験的に学習することである。最近電力会社では、サイトに小型シミュレータを設置して、かなり幅広い学習も実施するようになってきている。したがって、小型シミュレータでも学習内容を十分考慮して、模擬範囲や発生しうる異常事象を設計する必要がある。フルスコープシミュレータを基準として、小型シミュレータで習得できる内容を概念的に示すと、図1のようになる。

日立製作所では、長年培ってきたプラントメーカーとしての経験を生かして、小型シミュレータからフルスコープシミュレータまで、一連のシミュレータを製作、納入している<sup>5)</sup>。東京電力株式会社 福島第一原子力発電所向け小型シミュレータ<sup>6)</sup>を図2に、また中国電力株式会社 大野研修所納めシミュレータを図3に示す<sup>7)</sup>。

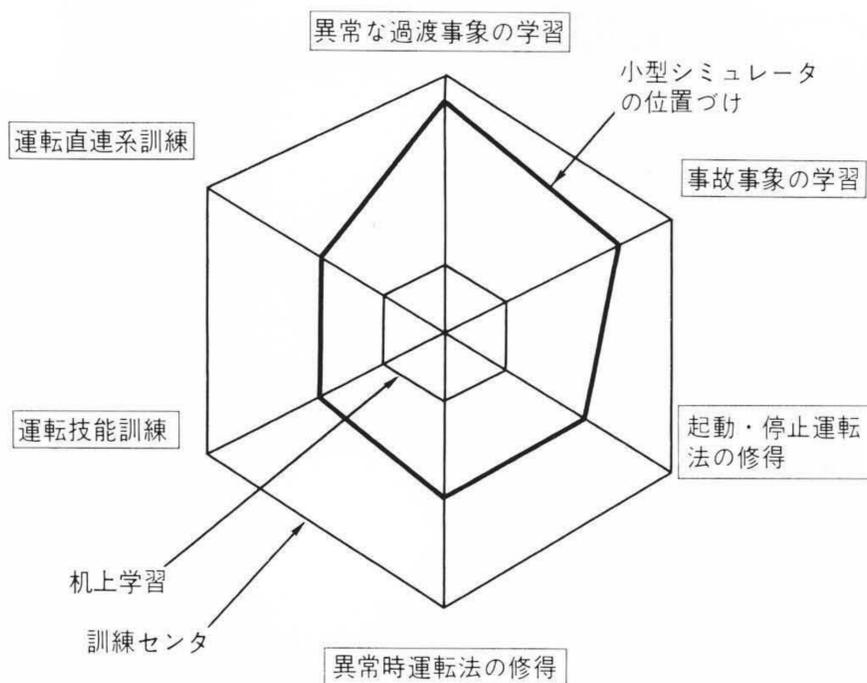
### 3 BTC-3号フルスコープシミュレータ

#### 3.1 概 要

株式会社BWR運転訓練センタは、わが国で唯一のBWR(Boiling Water Reactor: 沸騰水型原子炉)発電プラントの運転員を訓練している機関である。ここでは、最近の訓練の需要増加と内容の高度化のニーズにこたえるため、BTC-3号

\* 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 工学博士

\*\*\*\* 日立ニュークリアエンジニアリング株式会社 品質管理部 \*\*\*\*\* 株式会社日立情報制御システム システム第一設計部



注：訓練センター（株式会社BWR運転訓練センター）

図1 シミュレータの位置づけ 訓練センターでのフルスコープシミュレータを用いた訓練と、机上学習の間を埋めるのが小型シミュレータである。



図2 東京電力株式会社 福島第一原子力発電所向け小型シミュレータ CRT 3台は、プラント状態の監視と操作スイッチ(タッチスクリーン)用として使われる。

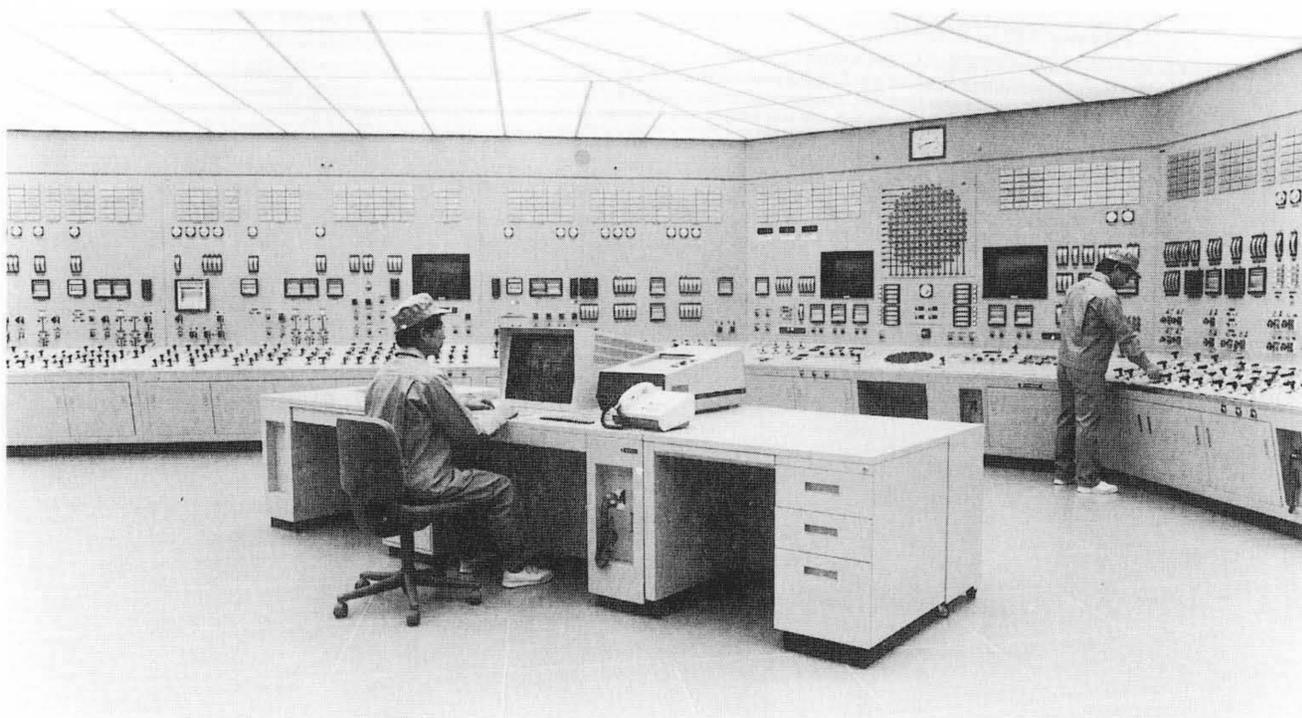


図3 中国電力株式会社 大野研修所納め訓練用シミュレータ 制御盤は、同社島根原子力発電所2号機とほとんど同一の設計としている。

機を建設し、平成元年10月から訓練を開始した。BTC-3号機は、これまでの経験と最新の技術を駆使したきわめて高度なフルスコープシミュレータ設備である。なお、BTC-3号機は、制御盤の一部が他社に分割発注された。日立製作所は、主な制御盤とシミュレータ計算機システムの設計、製作および全体の取りまとめを担当した。

### 3.2 設備構成

シミュレータ設備のシステム構成は図4に示すとおり、訓練生が操作するシミュレータ室設置の中央制御盤などの機器、インストラクタが、シミュレータの状態を制御するインストラクタコンソール、および計算機システムで構成している。

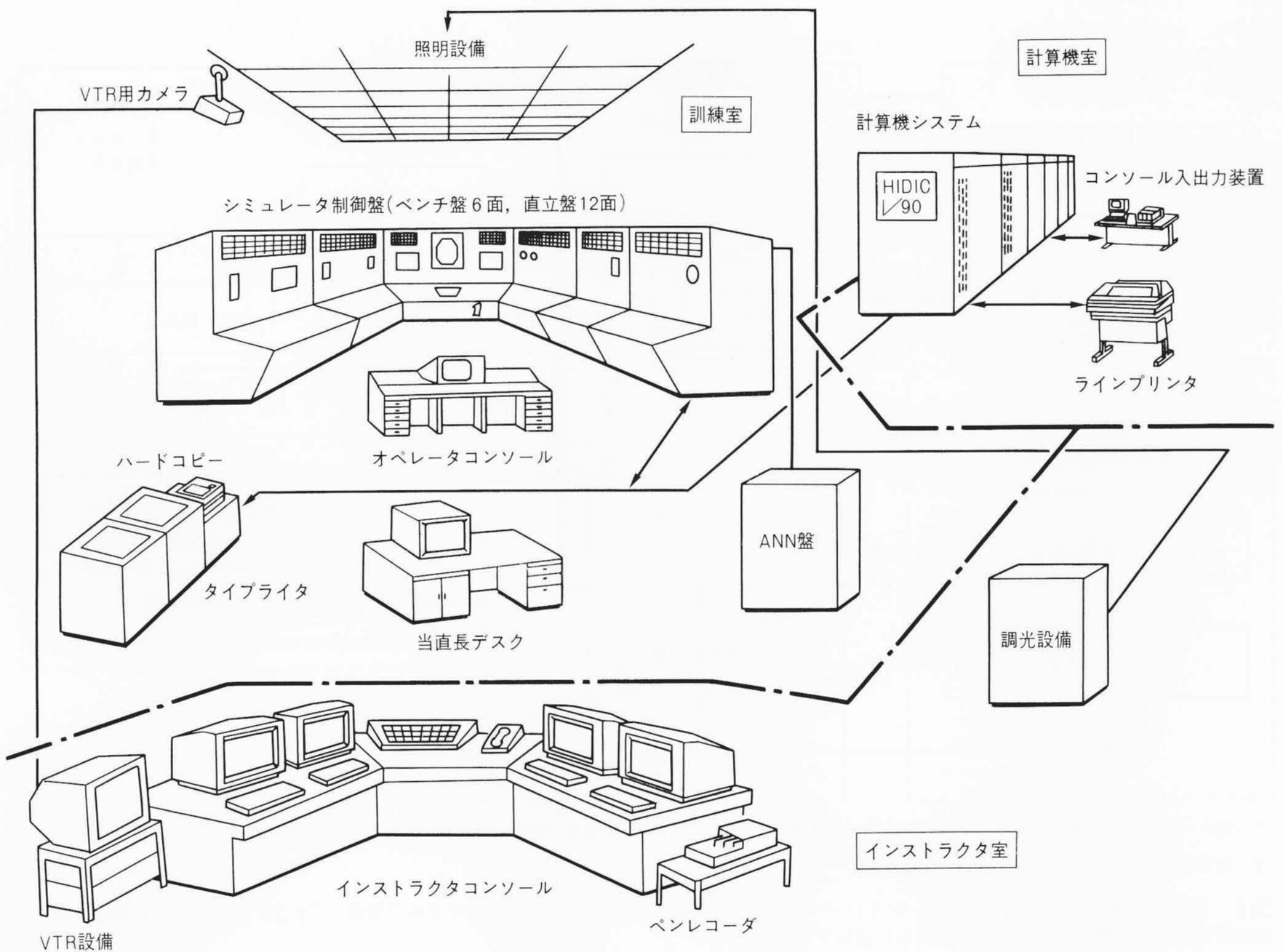
BTC-3号機を使った訓練状況を図5に示す。

#### (1) シミュレータ室設置盤

モデルプラントと同等の中央制御室ベンチ盤に加えて、操作頻度が高く訓練上重要な中央制御室直立盤と、訓練上必要な現場盤を設置した。また、プロセス計算機の監視データを提供するオペレータコンソール、当直長デスク、タイプライタなど実プラントと同等の設備を設置し、訓練効果の向上を図った。

#### (2) インストラクタコンソール

インストラクタコンソールは、インストラクタが訓練の進行に合わせてシミュレータを制御するための装置であり、模



注：略語説明 ANN盤 (Annunciator)

図4 株式会社BWR運転訓練センター納めBTC-3号機システム構成 シミュレータ制御盤は、ベンチ盤6面のほか、直立盤12面を設置して、臨場感を向上させている。



図5 BTC-3号シミュレータによる訓練状況 実機とほぼ同一の設備環境の中で、真剣な訓練が実施される。

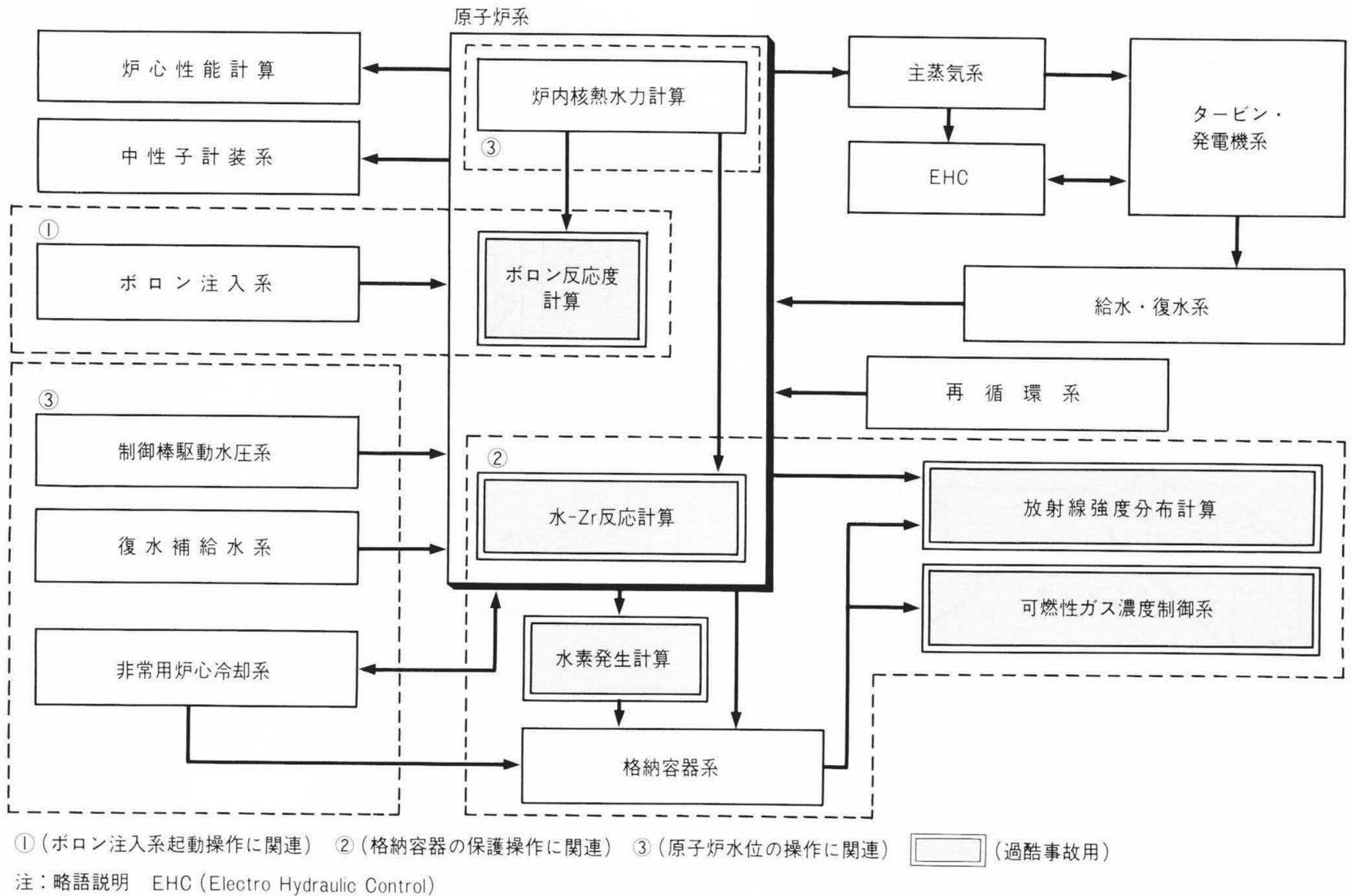


図6 BTC-3号機のプラント動特性シミュレーションモデルの構成 全体は54個のモデルで構成しており、図にその主要部分を示す。点線枠内が異常時操作用にモデルを拡充した部分である。

擬中央制御室の全容が見渡せるガラス張りのインストラクタ室に設置される。シミュレータの状態監視・制御用に2台、プラント状態監視用に2台、計4台のCRT・キーボードと各種の押しボタンなどで構成し、ほかにインストラクタが持ち運び操作可能なりモートコントローラも準備した。なお、計算機室にもCRT・キーボードを設置し、訓練中でも後述のスケジューリング作成などを可能とした。

(3) 計算機システム

プラントシミュレーションモデル(動特性モデルおよびインタロックモデル)の計算やCRT表示制御などのため、制御用計算機HIDIC V90シリーズによるマルチ計算機システム構成を採用した。

3.3 プラント動特性シミュレーションモデル

このシミュレータでは以下の点を強化して、過酷事故を含む、より高度な運転訓練に対応可能とした。

(1) 通常時訓練

プラント起動・停止時や将来実施が予想される負荷追従運転時の三次元原子炉出力分布を、常時監視可能にする。

(2) 異常時訓練

過酷事故時での兆候ベース運転操作が可能のように、ボロ

ン注入系起動操作、放射能拡散を防ぐ格納容器の保護操作、および炉心冷却材確保のため種々の系統を使った原子炉水位操作を模擬する。

これらの特徴を実現する54個のモデルで構成するシミュレーションモデルの主要部分の構成を図6に示す。同図中の点線枠で囲んだモデルが、今回開発したシミュレーションモデルで拡充した部分である。特に、同図中の二重枠で示したモデルは、過酷事故時に想定される現象や対応操作も模擬するため新たに開発した。以下に、主なモデルの概要について述べる。

(1) 炉内核熱水力計算

熱水力モデルでは、通常時から異常時を通し、また原子炉内が満水状態から大部分がボイドの状態までの大きな状態変化を模擬可能である。また炉内核計算では、原子炉出力分布をゼノン、ボイド分布効果を組み入れた軸方向次元拡散方程式の解をベースとし、制御棒操作による局所出力分布変化も模擬する、簡易三次元モデルで計算している。

(2) ボロン注入系起動時ボロン反応度計算

異常時訓練の一つとして制御棒によるスクラムが失敗したときの訓練がある。この場合の対応操作として、ボロン注入

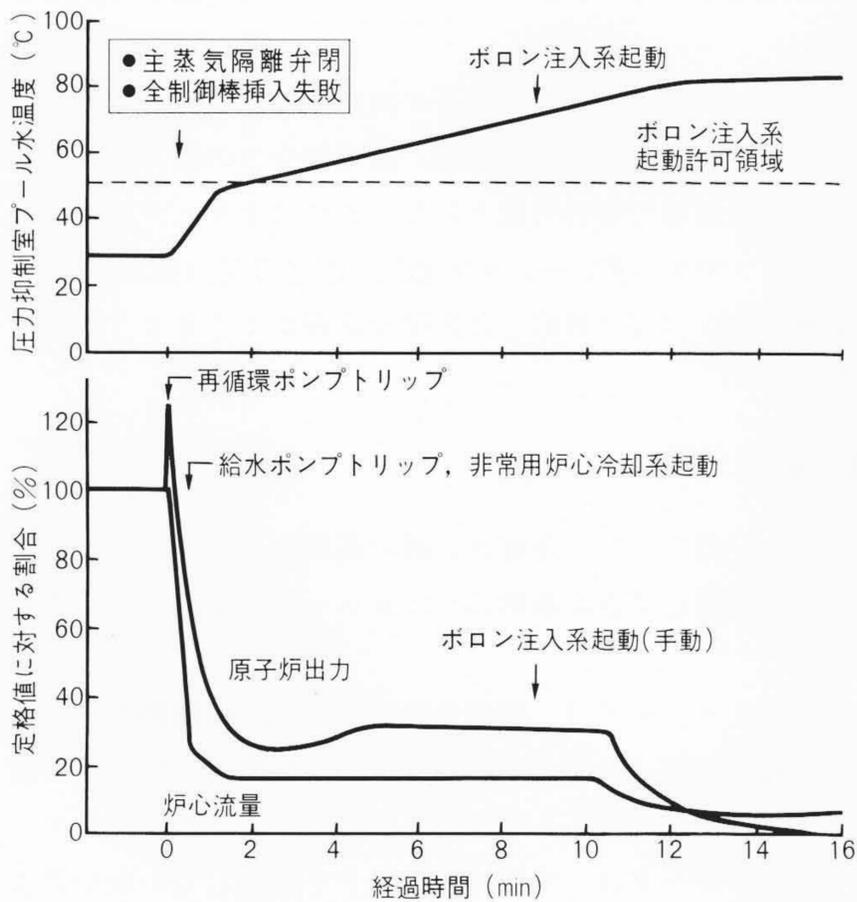


図7 BTC-3号機ボロン注入系起動時シミュレーション結果の例  
 主蒸気隔離弁閉発生後、制御棒によるスクラム失敗時のボロン注水系  
 起動操作とプラント対応のシミュレーション結果を示す。ボロン注入に  
 より、原子炉は安全に未臨界に移行する。

系から中性子吸収材のボロン水を原子炉内に注入するケースがある。注入されたボロン水は、冷却材によって混合、輸送され原子炉内全体に分布する。このボロンの負の反応度効果によって、原子炉は安全に停止する。ボロンの反応度効果や冷却材流量が低下したときのボロンの沈降や滞留などを模擬するために、原子炉内でのボロン濃度分布を的確に計算する必要がある。このため、原子炉を多領域に分割し、各領域内でのボロンの輸送、および領域内での混合現象を模擬するモデルとした。ボロン注入系起動時のシミュレーション結果の例を図7に示す。初期事象は主蒸気隔離弁閉であり、蒸気発生持続による原子炉圧力上昇を抑えるため、逃し安全弁が断続的に開閉し、圧力制御室のプール水温は徐々に上昇していく。ここで、運転員は制御棒によるスクラム失敗と、圧力制御室のプール水温がボロン注入許可領域内に到達したことを確認し、ボロン注入系を起動する。原子炉は、これに従って安全に未臨界に移行する。

### (3) 水素発生計算

原子炉の冷却材喪失などの事故時の訓練には、可燃性ガス(水素と酸素)の濃度制御の操作が含まれる。原子炉内で水素が発生する主な要因である放射線による原子炉内の水の分解や、冷却材喪失などの事故時に、燃料被覆材のZrと高温水との反応による水素発生現象を、原子炉水位、 $\gamma$ 線強度分布な

表1 株式会社BWR運転訓練センタBTC-3号機シミュレーション制御機能一覧 シミュレータによる運転訓練を、より効果的に行うため、本表に示すシミュレータの模擬状態を制御する機能を採用した。

No.	項目	内容
1	初期状態登録・設定	冷温停止、部分負荷、定格負荷など任意のプラント状態を、初期状態として登録・設定(再現)する。
2	スナップショット	運転操作の重要なポイントを反復訓練するため、任意の時点のプラント状態を登録する。
3	フリーズ・ラン	シミュレーションを停止し、その状態を保持する。また、その状態からシミュレーションを再現する。
4	スイッチ位置診断	初期状態設定時に、盤上のスイッチ位置が所定の状態になっていることを診断する。
5	セットバック	反復訓練のため、シミュレータの状態を指定した過去の状態に戻す。
6	リプレイ	指定した過去の状態から、操作内容を再現する。
7	スピードアップ・ダウン	シミュレーションの時間スケールを縮めたり、延ばしたりできる( $\frac{1}{8}$ 倍、 $\frac{1}{4}$ 倍、4倍、8倍など)。
8	マルファンクション	あらかじめ定めたマルファンクション(プラントの異常・事故)項目を挿入、解除する。
9	オルタレーション	あらかじめ定めた入出力点に対し、シミュレーション結果、操作結果とは独立に状態設定する。
10	スケジューリング	マルファンクション項目、オルタレーション項目の挿入・解除のスケジュールをあらかじめ設定する。
11	現場操作代行	あらかじめ定めた現場操作(弁、スイッチほか)を実行する。
12	運転員操作記録	運転員のスイッチ操作状態をラインプリンタに印字する。
13	リモートコントロール	インストラクタコンソール機能の一部を携帯用小型リモートコントローラによってシミュレータ室から制御できる。
14	データの保持	外部記憶装置へ初期状態、リプレイの内容を保存でき、任意に再現できる。

どを考慮してモデル化している。

#### (4) 放射線強度分布計算

異常時に放射性物質のプラント内への放出、移動の有無を監視することは重要である。この監視、対応操作の訓練を可能とするため、主蒸気管、燃料などから放射性物質が放出された後の、プラント内各個所での放射能強度の時間変化を計算するモデルを開発した。計算の対象となる個所は原子炉内、格納容器内、原子炉・タービン建屋および放射線モニタが設置されている場所すべてである。モデルでは、対象領域への放射性物質の流出入と、減衰特性の双方を考慮して放射能強度を求めている。

### 3.4 シミュレータ制御機能

#### (1) 概要

訓練を効果的に行うにはシミュレータを初期化したりするほか、プラントの異常や事故をマルファンクションやオルタレーションを適切に発生させて、リアルに模擬するなど、シミュレータのきめ細かな制御が必要となる。このためBTC-3号機は、表1に示す機能を持たせることにより、シミュレータ制御に対するインストラクタの負担を減らし、本来の訓練に専念できるようくふうを凝らした。以下、特に従来よりも強化された機能を中心に説明する。

#### (2) オルタレーション機能の高度化

シミュレーションモデルの計算結果や訓練生の操作とは独立に、インストラクタの操作によってプラント機器状態を強制的に設定する機能であり、任意の弁、ポンプ、コントローラ、指示計、記録計など多種類の設定が可能である。

例えば、任意の弁に対し微小開度を設定し、シートリーク状態の模擬を行う。

#### (3) スケジュール機能の高度化

インストラクタが計画したスケジュールどおりに、自動的にマルファンクションやオルタレーションを発生(または解除)する機能であり、下記の特徴を持っている。

- (a) オルタレーション項目一覧表など、入力操作に必要な補助情報を要求によってそのつどガイド表示する機能を追加した。
- (b) すでに作成済みのスケジュールリング情報を切りばりイメージで一部流用、追加、削除などの編集機能によって有

効に活用し、スケジュールリング労力の大幅削減が可能になった。

(c) スケジュールされた項目の実行条件を1個のプラント条件でなく、複数個の論理積、論理和などの組み合わせによる論理演算で実行可能とした。これにより、マルファンクションやオルタレーション発生、解除の自由度が増加し、訓練生のレベルに対応した高度な訓練ができるようになった。

## 4 結 言

原子力発電プラント運転員訓練の高度化ニーズにこたえるために、開発してきた最新のシミュレータ技術について述べた。

小型シミュレータは、経済性を重要視し、模擬範囲を重要系統に絞る反面、通常起動・停止から各種事故の模擬が可能なように、設計上のくふうを凝らしている。また、フルスコープシミュレータは、実際のプラントを運転しているかのような臨場感を持たせるために、物理モデルによる忠実な模擬を行い、使い勝手の面でも種々の新機能を折り込んでいる。

これらのシミュレータの設計にあたっては、機能面や使い勝手の面で、東京電力株式会社、中国電力株式会社および株式会社BWR運転訓練センタの関係各位から多大なご指導、ご協力を得た。ここに深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) 藤田, 外: BTC-3号の概要と使用経験, 平成2年日本原子力学会年会要旨集, D41
- 2) 今永, 外: シミュレータの機能と構成, 平成2年日本原子力学会年会要旨集, D42
- 3) 中原, 外: シミュレーションモデル, 平成2年日本原子力学会年会要旨集, D43
- 4) 浅岡, 外: ハードウェア及びシミュレータ制御, 日本原子力学会年会要旨集, D44
- 5) 村田, 外: 原子力発電支援システムの開発—インストラクションシステム—, 日立評論, 67, 12, 1005~1010(昭60-12)
- 6) 山谷, 外: 東京電力(株)福島第一原子力発電所学習用小型シミュレータ, 平成2年日本原子力学会年会要旨集, D45
- 7) 国清, 外: 原子力発電運転訓練シミュレータの開発, 平成元年度火力原子力発電大会要旨集, 76~77