技術報告

425. 六ヶ所再処理工場運転訓練シミュレータの開発

小澤 敏宏¹, 脇元 広海¹, 山岡 功¹, 青柳 春樹¹, 武内 豊^{2,*},
荒川 秋雄², 中村 健二², 柳川 幸喜², 瀧澤 洋二², 中久木 功²

Development of Operator Training Simulator for Rokkasho Reprocessing Plant

Toshihiro OZAWA, Hiromi WAKIMOTO, Isao YAMAOKA, Haruki AOYAGI, Yutaka TAKEUCHI,
Akio ARAKAWA, Kenji NAKAMURA, Kouki YANAGAWA, Yoji TAKIZAWA and Isao NAKAKUKI

The operator training simulator has been started to develop for the purpose of safety and stable operation in the Rokkasho reprocessing plant, the first commercial spent nuclear fuel reprocessing plant in Japan. At present, the safety training simulator, which had been developed for the purpose of the specified abnormal events training, has already been in operation. The simulator was designed to contribute to the acquisition of the knowledge and skills indispensable for the plant operators and to the promotion of good team-work among operators. It was also designed in consideration of the simple and consistent extensibility to the full-scope training simulator which is now planned to develop using the same hard-ware. The model building and maintenance tools were applied as trial for the model tuning and modification. They must be indispensable for the reflection of the plant operation data and for the planning full-scope training simulator development. The usefulness and the validity of the simulator were ascertained through the training and its reports as the simulator development successfulness.

KEYWORDS: Rokkasho reprocessing plant, operator training simulator, safety training simulator, training scenario, model building tool, maintenance tool, full-scope training simulator

I. はじめに

青森県六ヶ所村にて建設が進む日本原燃燃料再処理工場は、国内初の民間による軽水炉使用済み燃料再処理工場である。その年間最大処理能力は 800 tU で、これは 100 万 kW 級原子力発電所約 30 基分の使用済み燃料を処理する能力に相当する。水・蒸気・空気を用いた通水作動試験、再処理プロセスに使用される各種化学薬品を用いたケミカル試験はほぼ終了し、引き続き、ウラン試験、アクティブ試験を経て、2006 年度に操業を開始する予定である。

商業用の再処理施設は国内初であり、安全かつ安定した操業を行うために適切な技能・技術を備えた運転員を育成する必要がある。そのため六ヶ所再処理工場では、運転員の技術力向上・確保を目的に、世界でも類を見ない再処理施設運転訓練シミュレータの設置を計画し、2001 年 5 月よりその開発が開始された。2003 年 8 月には再処理工場中央制御建屋に隣接した運転訓練施設に保安訓練シミュレータが設置され、訓練が開始されている。

本報では、まず六ヶ所再処理工場におけるシミュレータ訓練の目的を説明し、さらにそれに基づいて優先的に訓練を開始すべき異常事象を選定したプロセス、選定された異

常事象の模擬範囲とその展開プロセスを説明する。次に、シミュレータの構成と特徴を述べた上で、プロセスモデルの開発・作成手法への新しい試みを説明する。また、すでに開始されている運転訓練の概要と、訓練から得られた知見を説明した上で、今後のシミュレータ開発の展開に関して述べる。

II. 開発背景

1. 再処理工場の概要^{1,2)}

六ヶ所再処理工場は、(1)一定期間、燃料貯蔵プールにて冷却・貯蔵した使用済み燃料を細かく切断し、燃料部分を高温の硝酸を用いて溶解するせん断・溶解施設、(2)使用済み燃料が溶解した硝酸溶液と有機溶媒とを接触させ、ウラン・プルトニウムと核分裂生成物を分離する分離施設、(3)硝酸ウラン溶液および硝酸プルトニウム溶液それぞれから、微量含まれている核分裂生成物をさらに取り除いて純度を高める精製施設、(4)精製された硝酸ウラン溶液と硝酸プルトニウム溶液・硝酸ウラン溶液の混合溶液からそれぞれ硝酸を蒸発および熱分解させてウラン酸化物、ウラン・プルトニウム混合酸化物として製品化し、それぞれの貯蔵施設へと移送する脱硝施設、などから構成される。

これら再処理工場内に分散設置されている各施設の運転・監視は中央制御室で集中的に行われる。中央制御室内における監視制御盤(OIS: operator interface station)の配置図を第 1 図に示す。この図からもわかるように、中央制御室は馬蹄形をした 6 個のブロック(監視制御盤群)か

¹ 日本原燃燃料(Japan Nuclear Fuel Limited)

² 株式会社(Toshiba Corporation)

(2004 年 6 月 25 日 受理; 2004 年 10 月 14 日 査読通過)

* 著者連絡先: Tel. 045-770-2343, Fax. 045-770-2384,
E-mail: yutaka4.takeuchi@toshiba.co.jp

第1図 ヲヶ所再処理工場中央制御室における監視制御盤の配置

ら構成されている。各ブロックには監視・制御の対象となる施設のプロセスデータなどを収集・管理する工程管理用計算機と各ブロックをそれぞれ統括する当直長盤および安全系監視制御盤が設置されており、膨大なデータを合理的に処理する最新のデジタル制御と、監視操作画面のタッチスクリーンおよび切替え機能により、設備を集中的に操作・監視できるマンマシン・システムが採用されている。6個のブロック全体は統括当直長盤で統括管理を行い、各ブロックの工程管理用計算機とも連結されている。

2. 設置目的および訓練のねらいと開発の展開

ヲヶ所再処理工場における運転訓練シミュレータ設置の目的は、シミュレータ訓練を通じて再処理工場の安全かつ安定な操業に必要な運転員の技術力向上とその確保を図り、同時に各運転員の役割に応じた技能・技術の習得程度を確認することである。このような目的から、運転員の技術習得および異常事象が発生した際の的確な対応のための訓練を行うべく、運転訓練シミュレータの開発を計画した。

運転訓練シミュレータによる訓練は再処理工場の施設別(工程別)プロセス専門教育の一環として位置付けられており、この訓練を実施することで、

- (1) プラントの特性理解
- (2) 運転操作の体得
- (3) 基本動作の体得
- (4) 異常事象の理解
- (5) 異常事象対応操作の体得
- (6) 反復訓練による技術の習熟
- (7) チームワークの醸成
- (8) 試運転未経験者の運転操作の体得

等の項目を運転員に習得させることが訓練のねらいである。

また、これらの項目の習得を図る時期の検討を行い、上記(3)～(7)項目については、実機試験を通じた運転員の技能向上の過程やシミュレータ訓練の特長を勘案し、実機ウラン試験前から先行的にシミュレータ訓練を開始し習得を図ることとした。

(1), (2), (8)項目については、実機のウラン試験時、アクティブ試験時、操業運転開始以降に収集される各種プラントデータの反映によるシミュレーションモデルの精度向上

第2図 ヲヶ所再処理工場における運転訓練シミュレータ開発の展開

第3図 ヲヶ所再処理工場における運転訓練シミュレータの開発工程

必要性を踏まえ、操業運転開始以降に習得を図るべく計画した。

上記項目習得時期の計画を踏まえたシミュレータ開発展開の概念図を第2図に、またシミュレータ開発工程を再処理工場主要工程とともに第3図に示す。今回開発を実施した運転訓練シミュレータは上記(3)～(7)項目までの習得訓練を目的とした保安訓練シミュレータ(フェーズA)である。再処理工場操業開始後において、上記8項目すべての習得を含む、総合的な運転訓練を実施するための次期開発予定フルスコープシミュレータが総合運転訓練シミュレータ(フェーズB)である。このように運転訓練シミュレータ開発は大きく2つのフェーズに分かれるが、本報では特に区別する必要がない場合には運転訓練シミュレータと記述し、今回模擬した訓練事象を限定的に対象とする場合には保安訓練シミュレータと記述する。

III. 訓練事象選定

今回開発を実施した保安訓練シミュレータは、第2図に示すように、実機ウラン試験前に優先的に開始すべき異常事象訓練を行うための設備であるため、その開発を始めるには、まず、訓練事象として「ウラン試験前に訓練を開始すべき異常事象」を選定する必要がある。それに際し、

今回は六ヶ所再処理工場に対する安全評価の知見を基に選定を進めた。本章では、まず、六ヶ所再処理工場の安全評価について概要を述べ、さらに選定に際して安全評価の知見を採用した理由を述べた上で具体的な訓練事象選定プロセスを説明する。

1. 安全評価の概要

六ヶ所再処理工場では、施設内の異常に対し第4図に示すように、

- ・異常の発生防止
- ・異常が発生したとしても、その拡大を防止する
- ・さらに、異常が事故に拡大した場合においても、その影響を緩和する

という、多重防護の考えの基に安全設計を採っている。

安全評価とは、その多重防護の考え方が施設設計の基本方針において適切に採用されていることを確認するために行うもので、「運転時の異常な過渡変化(AT: Anticipated Transient)」と「運転時の異常な過渡変化を超える事象(BAT: Beyond Anticipated Transient)」という2種類に分類して評価した³⁾。

前者は、多重防護における異常の拡大防止対策の妥当性を評価するために想定する事象であり、後者は、多重防護における影響緩和対策の妥当性を評価するために想定する、いわゆる事故事象である。

これら AT および BAT 事象を評価して、各事象への対策の妥当性を判断するための流れを第5図に示す。

第4図 六ヶ所再処理工場における安全評価の概要

第5図 六ヶ所再処理工場における安全評価の流れ

まず AT, BAT それぞれに設計基準事象を選定する必要があるが、そのためにその候補となる事象を網羅的に洗い出し、その中から多重防護設計の妥当性を確認する観点に立ち設計基準事象とすべきものを選定した。その結果、AT では温度、濃度の変動など、BAT では各種の事故事象が選定された。次にこれらの事象の発生を想定した解析を行い、それぞれの判断基準との比較により、設計の妥当性を評価した。判断基準としては、AT については温度、濃度などの変動が最大許容限度内であること、BAT については周辺公衆への影響が線量当量で 5 mSv 以内であることである。なお、これらの判断基準は再処理施設安全審査指針(昭和61年原子力安全委員会決定)⁴⁾に基づいて設定したものであり、詳細については再処理事業指定申請書に記載した⁵⁾。こうした六ヶ所再処理工場の安全評価については、1989年から1992年にかけて実施された国による安全審査において妥当性が確認されている。

ここで、これまでの一連の安全評価の流れの中では、設計基準事象の選定や、事象の評価の過程において、一部、運転員の対応を想定している。

六ヶ所再処理工場において実際に使用済み燃料の再処理を開始するにあたっては、運転員はこの安全評価において想定した対応を着実に実施できる技能を有する必要がある。このため、ウラン試験前に訓練を行っておくべき訓練事象としては、この安全評価中で運転員対応を想定したものから選定した。

2. 訓練事象選定のプロセス

AT の安全評価については、第6図に示すように、AT 設計基準事象はすべて運転員の対応を期待せずとも設備対応済みであることが確認されている。また、設計基準事象とはならなかった AT 候補事象のほとんどが、最大許容限度に至るまでの時間余裕が十分あるものである。保安訓練シミュレータの開発にあたっては、「運転員対応」という要素と「時間余裕の長さ」に着目し、AT 候補事象の中から「時間的余裕が1日以内で運転員対応が必要な事象」の3事象を保安訓練シミュレータの訓練事象として選定した。

次に、第7図に示すように、火災、爆発、臨界、漏洩

第6図 AT の安全評価に基づく訓練事象選定

第7図 BATの安全評価に基づく訓練事象選定

第1表 訓練事象とその特徴

訓練事象	異常の分類	時間的余裕	対応操作	対象施設
AT 事象からの選定				
溶解液供給流量低下時の素追出し槽過濃縮	臨界への拡大	10時間以上	加熱蒸気供給停止	せん断・溶解
遠心清澄機における不溶解残渣排出流量低下/排出時回転不良	溶解液沸騰への拡大	2時間以上	注水系/モータの切換	せん断・溶解
外電喪失時の混合酸化剤貯蔵室送風機停止	冷却機能低下	24時間	吸気側バイパス	製品貯蔵
BAT 事象からの選定				
溶解槽セル等の漏洩事故(対象13セル)	放射性物質の大気中への拡散	沸点に至るまで	漏洩液の沸騰前での回収	せん断・溶解 分離 精製 脱硝 ガラス固化

等といった事故事象がBAT設計基準事象であり、それらが発生した場合の影響緩和対策の妥当性を判断するため、事故評価を行った。このうち漏洩については、その評価シナリオ上、運転員の対応操作を期待しているため、この点を重要視し、5施設13セルにおける漏洩事故を訓練事象として選定した。

選定した訓練事象と、その分類、時間的余裕、運転員対応操作をまとめて第1表に示す。また、これまで述べてきたものに加え、結果の重大性と事故教訓反映の観点から、プルトニウム溶液の誤移送による臨界事故についても訓練事象として選定した。

IV. 事象シナリオの展開

1. シナリオ展開の方法

シミュレーションモデルや各種ソフトウェアなどの設計を行うためには、模擬の対象となる系統・設備を明確にする必要がある。そのため、運転操作手順書や工程説明書などから操作・監視内容を把握し、さらに安全評価レポートや系統図などから事象推移の把握を行ったうえで、異常事象シナリオを展開し模擬範囲を詳細に洗い出した。

模擬範囲の洗い出しにより、操作・監視対象機器が特定でき、また、監視や操作の程度によりモデル模擬のレベルや、必要な計測・制御系やインターロックロジックの模擬範囲を設定することができる。

第8図 漏洩事故対応シナリオの例

なお、訓練事象は前章に述べたように限られてはいるが、訓練事象の初期状態(通常運転時)の設定や、異常時の停止操作などが必要となるため、訓練事象に関連する一部の工程に関しては、基本的に運転手順書に沿った起動・停止操作を可能とするほぼ全ての機器や制御系、インターロックロジックなどが模擬対象となる。

次節で、展開した事象シナリオとそこから洗い出される模擬範囲について、漏洩事故の例を具体的に述べる。

2. 漏洩事故のシナリオ展開例

高レベル放射性物質を取り扱う機器等は、セルと呼ばれる遮蔽壁で囲まれた部屋に収納されており、万一、溶液漏洩が起きたとしても、その液を受ける漏洩液受皿、漏洩検知装置、漏洩液移送機器を設置し、運転員が速やかに回収できるようにしている。

こうした運転員操作を確実なものとするため、保安訓練シミュレータではこのような漏洩事故について5施設13セル分を訓練の対象とした。この中には、対応が複数の施設にまたがるものも含まれている。

第8図に、その漏洩事故対応シナリオを示し、以下にその展開から導かれる模擬範囲・仕様をシナリオに沿って述べる。

(1) 漏洩発生・漏洩液受皿液位高警報発報

漏洩液受皿では液位が増加するとともに崩壊熱により液が昇温する。このため、漏洩液受皿モデルの模擬仕様としては、

- (a) 液成分ごとの物質収支および放射能収支
- (b) 崩壊熱発熱を考慮した熱収支
- (c) 漏洩受皿の複雑な形状を模擬した液位計算

が必要となる。

(2) 漏洩停止・工程停止・漏洩液サンプリング分析指示

上記停止操作の対象機器が模擬範囲となり、また、実機において、これらの停止操作が実行されるために必要な制御系と同等の機能を有することが求められる。さらに工程管理用計算機によるサンプリング分析要求・分析値表示模

擬が必要となる。

(3) 安全蒸気ボイラ起動・蒸気供給ライン接続

漏洩液移送用スチームジェットポンプを使用する際に、常用系に加え安全系の蒸気系統についても使用可能とするため、安全蒸気ボイラを起動し、蒸気供給ラインを接続する。実際にこれらの操作を実施する場合は現場建屋にて行われるため、シミュレータによる現場操作模倣が求められる。

(4) 中間槽への漏洩液移送・希釈・回収用貯槽への移送

冷却がなされている回収用貯槽へ移送する際、液温が高いことによるポンプ性能低下や漏洩液の過度の温度上昇を防止するため、希釈操作を行う。このため中間槽および回収用貯槽の模倣仕様としては

- (a) 液成分ごとの物質収支および放射能収支
- (b) 崩壊熱発熱、希釈、冷却を考慮した熱収支

が必要となる。また、漏洩液受皿からの払出し状況については安全系監視制御盤も使用して監視するため、安全系監視制御盤における警報および液位指示機能の模倣が求められる。

V. 運転訓練シミュレータの構成と特徴

1. 運転訓練シミュレータの構成

運転訓練シミュレータの全体構成⁶⁾を第9図に示す。本シミュレータでは、実機と同等のプラント応答や操作性と臨場感等を満足するために、実機と同じ監視制御盤と画面および制御ロジックを用いている。監視制御盤は実機では、第1図に示すように、6ブロックから構成されているが、シミュレータではこの6つのブロックのうち、サイズが最大のものと同等規模の監視制御盤を装備し、シミュ

レーション用の物理化学プロセスモデルや監視操作の画面ソフト、インターロックロジック、制御ロジックなど施設固有の内蔵のソフトウェアを切り替えることにより、実機の6ブロックすべてを模倣できる構成としている。ただし、保安訓練シミュレータでは、第1表で示された訓練事象の対象とする5ブロック分を模倣している。すなわち、せん断・溶解施設、分離施設、精製施設、脱硝施設、および高レベル廃液ガラス固化施設である。

プロセスモデルや制御ロジックなどの演算を行う計算機サーバはA/Bの2系統用意しているため、それに従って監視制御盤も2系統に分割して用いることが可能であり、当直長盤やインストラクタコンソールもおおの2系統用意されている。また、監視制御盤からは操作できない現場操作機器に関しては、タッチスクリーン操作による専用の模倣操作補助装置を設けることにより、シミュレータからも現場操作模倣を可能にしている。

安全系監視制御盤は、運転訓練にとって重要なアラーム信号や安全系操作スイッチを選定して、全施設5ブロック分の安全系監視制御盤を1ブロック相当規模に縮約して設置している。

インストラクタコンソールは、シミュレータ全体を見渡せる2階のインストラクタ室に設置されているが、無線LANを用いた携帯用パソコンを用いて、シミュレータ室の任意の場所においてもインストラクタ機能を使用することができる。

第2表に運転訓練シミュレータの主な構成機器の機能を実機と比較して示す。

2. 運転訓練シミュレータの特徴

運転訓練を効果的・効率的に行うために、本シミュレー

タは以下のような特徴を備えている。

(1) 複数施設の訓練

すでに述べたように、実機では6つのブロックから構成されている監視制御盤群を、本シミュレータでは1ブロック相当のものを設置している。監視操作に関するハードウェア1ブロック(施設)に対し、ソフトウェアの部分を切り替えることにより、複数の施設の訓練が可能になる。具体的に切り替えられるソフトウェアは、シミュレータ計算機(ロジック、データベース、プロセスモデルな

ど)、監視制御盤(画面制御)、工程管理用計算機(施設データベース)に関するものであり、それらの機能切替えの概念図を第10図に示す。

切替えはインストラクタコンソールから要求する。切替え先の施設コードを、シミュレータ計算機が受け取ると、その施設のロジックおよびプロセスモデルの格納されているデータベースへとアクセスが切り替わる。工程管理用計算機についても同様に、データベースへのアクセスを切り替える。また、監視制御盤では切り替え先の施設のデータベースがメモリーにロードされる。このように、訓練対象施設のデータベースへのアクセスを切り替える方式を用いているので、訓練対象施設を追加する場合には、そのデータベースを追加するだけで済むことから、拡張性に優れた施設切替えの方式であると言える。

(2) 異なる施設間での連携訓練

本シミュレータは、第9図に示したように、同じ機能を備えた2系統(A/B系)から構成されており、いずれも5施設の模擬が可能である。したがって、A系とB系で互いに異なる施設を模擬させれば、施設間での連携訓練が可能である。この場合は、施設間でインターロック信号とプロセス値を互いに送受信することになる。現状ではこうしたインターフェイスのとられている施設間連携の組合せは、(a)せん断・溶解施設と高レベル廃液ガラス固化施設、(b)分離施設と高レベル廃液ガラス固化施設、の2パターンである。

連携訓練の概念図を第11図に示す。この例ではA系のタンクV11からB系のタンクV12に液移送を行う際に、まずB系から移送許可のインターロック信号をA系に送る。A系で許可信号を受け取ると、ポンプを起動してB系に移送液のプロセス値を送る。B系はそのプロセス値か

第2表 運転訓練シミュレータの主要機器・機能と実機との比較

役 割	機 器	機 能	実機との比較
運転・監視	監視制御盤	再処理工場の各施設の運転・監視を行う	実機同等
	安全系監視制御盤	安全上重要な操作、計器の表示および警報を動作させる	実機同等 ただし、安全評価上必要な計器およびスイッチを模擬
	模擬操作補助装置	現場操作を模擬する	なし
プラント制御	シミュレータ計算機	プラント運転のインターロックロジック、動特性モデル等を模擬する	インターロックロジックについてはPCSが実現 動特性については実プロセス
	統合コントローラ(ゲートウェイ)	監視制御盤とシミュレータ計算機間のゲートウェイ機能を有する	なし
	インストラクタ計算機	シミュレーション状態の操作/制御を行う	なし
プラントデータ収集	工程管理用計算機	各施設のデータを収集し、監視する	実機同等
	当直長業務支援用計算機	各工程管理用計算機で収集したデータを統括して管理する	実機同等

第10図 運転訓練シミュレータにおける模擬施設切替えの概念図

第11図 施設間連携訓練の概念図

ら、タンク液位などのOIS表示値を更新する。

(3) 訓練速度の変更

訓練対象となる事象には操作完了まで数日を要するようなものもある。ただし、一般に時間がかかるのは運転操作を要しない操作の合間(例えば、移送機器起動後の払い出し完了までの時間)であることから、このような場合にはシミュレーション速度を実時間に対して加速することにより、全体の訓練時間を短縮させて、効率的な訓練が可能になる。

この加速割合を変えることにより訓練速度を変更できる。プロセスモデルに関しては、1回の処理周期内で処理する演算回数をこの加速割合分だけ増加させる(その割合分だけのタイムステップを更新させるため)。インターロックロジックに関しては、タイマーをその割合分加速させる。変更はインストラクタコンソールから、最大30倍までの速度変更が可能である。

3. シミュレータ開発・保守ツール

今後、試運転や操業開始後の実機データを反映するために、シミュレータの調整・改造といった保守作業が必要になってくることが考えられることから、各種の保守ツールが用意されているが、代表的なものを紹介する。

(1) インターロックロジック保守ツール

インターロックロジックとしては、実機相当のものがシミュレータ用に自動変換されてインストールされているが、これらのロジック編集や、リアルタイムでのロジック実行状況の監視ができるOED(Object Editor Diagram)と呼ばれるツールがインストールされている。OEDはインストラクタ用パソコンから利用可能であり、画面を用いた編集機能、リアルタイムでのロジック監視機能などを備えている。

(2) プロセスモデル開発・保守ツール

今後収集される実機データの反映や、実機改造、あるいはシミュレータの機能拡張などに必要とされるプロセスモデルの変更や保守を支援するツールとして、オブジェクト指向に基づいたモデリングツールMDS(Model Description System)を、一部の工程のモデル作成に試験的に導入して、その適用性を評価した。

MDSによるモデル作成の流れを第12図に示す。まず、

第12図 MDSを用いたプロセスモデル作成の流れ

モデルを構成する機器を部品化して登録を行う。この部品(モジュール)には入出力情報と処理情報(処理をプログラミングしたFortranのサブルーチン相当)が含まれている。登録した部品を編集画面上に配置して、部品(機器)間での結線を行うことにより、工程のシステムを組み上げる。そして、各部品に必要な初期値設定を行う。

これらの作業が終了すると、システム全体のFortranコードを自動生成する。自動生成されたコードをコンパイルすることにより実行モジュールを生成すると、MDSのコントローラを用いて、モデル単体で実行することが可能となる。このように入力パラメータの初期値を任意に編集し、モデル単体で実行して、出力パラメータのトレンド表示を行うことにより、作成したモデルの妥当性が確認できる。モデルの妥当性が確認されたら、モデルのFortranソースコードをシミュレータにインストールして、コンパイル・リンクすることにより、MDSで改良したモデル機能をシミュレータに反映することが可能である。

なお、MDSを用いたモデル作成評価に関しては、次章で述べる。

(3) パラメータ変更ツール

モデルパラメータの変更はMDSでも可能であるが、モデルのソースを修正せずにデータ値を変更するだけで、変更可能なパラメータに関しては、インストラクタコンソールから変更が可能である。

ここで変更できるパラメータは運転状態に依存しない機器固有のパラメータ(ポンプ定格流量など)であり、通常の運転初期設定データとは異なるデータベースに保存されるため、運転の初期状態を変更しても、これらの値は変更されない。

変更はシミュレータデータベースからインストラクタコンソール(パソコン)に現行値をダウンロードして行う。変更ツールは表形式で工程番号や機器名称、変数の内容とその単位、および現在設定されている値を表示しており、変更作業をわかりやすくしている。変更が終わると、修正したデータベースをシミュレータのそれにアップロードする

ことにより、シミュレータのパラメータ値が変更される。

VI. シミュレータの実運用と訓練

本章では、まず試験的に導入したモデル開発・保守ツールによるモデル作成の手順を説明して、ツールの適用性評価を行う。そして実際に行った訓練の概要を紹介することにより、シミュレータ導入の有効性について述べ、最後に、今回の保安訓練シミュレータ開発と訓練の経験を踏まえた上での、今後の展望と展開について述べる。

1. 開発・保守ツールを用いたモデル作成

今回、一部の工程設備を対象として、MDSを適用したモデル開発と、そのモデルのシミュレータ本体へのインストールを行い、MDSの適用性を評価した。

モデル開発・保守ツールを用いたモデル作成・調整とシミュレータ本体へのモデルインストールの流れを第13図に示す。今回はせん断・溶解施設の清澄・計量設備を対象に、モデル開発・保守ツールの適用性評価を行った。清澄・計量設備には遠心清澄機と呼ばれる再処理施設特有の機器がある。まず、MDSでモデル作成を行い、単体テストにより工程のプロセス挙動の妥当性を確認する。その後、MDSで作成したモデルのFortranプログラムソースと定数・初期値をシミュレータ本体にインストールして、シミュレータのインターロックロジックと組み合わせ、シミュレータ全体としての応答を確認する。ここで清澄・計量設備のモデルは、すでに従来手法、すなわち人手によるコーディングでソースコードを作成したものが存在するが、この従来手法によって作成されたモデルと同等の応答が得られることを、工程の起動・停止操作を通して確認した。

また、逆にシミュレータ本体で使用している初期値データをダンプして、モデル開発・保守ツールにインストールすることも可能である。この機能により、シミュレータの

用いている初期値に対して、MDS側で自由にパラメータサーベイを行うことにより、実機応答に合わせるチューニング作業が効率的に行える。チューニング作業により調整されたパラメータ値は、パラメータ変更ツールを用いてシミュレータ本体へ反映することができる。

以上の適用検討により、以下の評価結果が得られた。

- (1) MDSで作成したモデルと従来手法によって作成されたモデルでは、起動・停止操作に対して同様のシミュレータ応答が得られ、MDSによるシミュレータモデル作成が可能であることが確認された。
- (2) 再処理プロセスで使用される特殊な機器のモデル化、シミュレータへの組み込みにもMDSは適用可能であることが確認された。
- (3) シミュレータ本体の初期値をMDS側に逆にインストールすることが可能であり、MDS単体計算によりシミュレータチューニングが効率的に行えることが確認された。
- (4) すでに作成されているモデルを、大幅な変更を行わずにMDSの部品としてモジュール化することが可能であり、プログラム資産が有効利用できることが確認された。
- (5) パラメータ変更ツールを用いて、シミュレータモデル定数を表形式で編集・変更することにより、シミュレータシステムへ反映することが可能であることが確認された。
- (6) 反応器モデルは、単体でもそのモデル構造が大変複雑になるため、機器モデル内の各種の演算部分を可視的なモジュールとしておのおの登録し、モデル内を階層的なモジュール構造とすることが今後必要となる。
- (7) ユーザーインターフェイスに関しては、使いやすさの観点から必要な改良点などが課題として抽出された。

2. 運用後の訓練内容と実施状況

保安訓練シミュレータを用いた訓練は2003年8月から開始し、現在も継続中である。すでに運転クルーに対する1回目の教育・訓練が完了して、2003年末現在で、約200名にのぼる訓練実績を上げている。

これまでの訓練は、

- ・基本動作(報告・指示・指差呼称など)の体得
- ・チームワークの醸成

といった「運転の基本」の習得に重点を置くことと、

- ・異常時対応操作フローの理解

を当面の訓練目標として進めてきた。

また、現在の訓練実施要領は以下のようになっている。

- ・施設ごとの運転班単位で実施
- ・訓練事象のうち溶解液漏洩事象、混合酸化物貯蔵建屋外電喪失事象など8つの異常事象を実施
- ・1事象当たり約40分、1回6時間の訓練を実施

実際の訓練風景を第14図に示す。

第13図 モデル開発・保守ツールを用いたプロセスモデル作成・調整の手順

第14図 訓練風景

これまでの訓練を通じて以下のような成果や経験が得られた。

- (1) 訓練後のアンケートにより、特に基本動作の定着などに対してシミュレータ訓練が有効であることが確認された。
- (2) 大半の運転員がシミュレータによる運転訓練が初めてであった中で、シミュレータ訓練自体が定着化した。
- (3) 訓練を通じて、運転員が特に陥りやすいヒューマンエラー事例がいくつか抽出されたが、それらの発生防止を図るため今後の訓練に反映する。
- (4) 操作ミスの中で、実機での操作機会の少ないものに関しては、その発生防止のためにはシミュレータによる訓練が特に有効である。
- (5) 安全評価上の運転員対応の必要性に着目した今回の訓練事象選定手法は、重大な操作ミスを防止する観点から妥当なものである。
- (6) 運転員が試験運転を通じて蓄積している触手経験を、さらに補完するうえでシミュレータによる訓練が有効である。

3. 今後の展望と展開

運転訓練シミュレータ開発の展開を第2図に示したが、再処理工場操業開始後の安定運転に向けて、総合運転訓練シミュレータを操業2年後を目標に設置する予定である。

総合運転訓練シミュレータは保安訓練シミュレータを継承発展させ、試験運転を経験できない操業後配属運転員の養成を主眼として開発するシミュレータである。通常運転におけるプラントの起動/停止訓練、異常事象への対応訓練、施設間の連携や統括当直長も含めた包括的な訓練を行うとともに運転技術の継承を図り、プラントの安定運転、生産性の維持・向上を目指す。

以上の目的を満たすために、保安訓練シミュレータにおける模擬範囲からの施設・工程・機器などの更なる拡張

や、異常訓練事象の拡大などを含めて、訓練シナリオおよびプロセスモデルの大幅な改造・追加が必要になる。また、試験運転や操業運転を通じて得られたプラント特性を反映し、実機模擬精度の向上を図る必要がある。

このように総合運転訓練シミュレータの開発規模は今回開発した保安訓練シミュレータに比べて大幅に増加するため、保安訓練シミュレータ開発の経験を活かした効率的な開発を進める必要がある。そのための課題としては、下記のような項目が挙げられる。

- (1) 訓練事象の明確な選定基準と選択
- (2) 訓練シナリオ展開の効率化
- (3) 訓練シナリオに基づいた模擬範囲の明確化
- (4) プログラムソース管理の効率化
- (5) 開発・保守ツールを有効活用したモデル開発の効率化
- (6) シミュレータ動作確認試験およびモデル・ロジック結合試験の効率化

これらの課題を解決しつつ、総合運転訓練シミュレータの効率的かつ完成度の高い開発に取り組む。

VII. ま と め

六ヶ所再処理工場における運転訓練シミュレータ開発計画の第1フェーズである保安訓練シミュレータの開発・設置を行い、2003年8月から訓練を開始した。

運転訓練シミュレータの開発に当たっては、運転訓練の目的・ねらいを十分吟味し、優先的に訓練を開始すべき異常事象の選定を安全評価の知見に基づき行った。また今後開発予定の総合運転訓練シミュレータへの継続的な拡張可能性を考慮した上で、その基本構成を検討・設計した。シミュレータのプロセスモデルの開発・作成に当たっては、試験データや操業開始後の実機データに基づいたパラメータ調整やモデル改造が予想されることから、保守性を考慮したモデル開発・作成の手法を検討し、一部の工程に対して適用・評価を行った。

運転訓練シミュレータ設置直後に開始された訓練では、すでに運転クルーに対する1回目の教育・訓練が完了して、約200名に上る訓練実績を上げている。その結果、基本動作の体得には本シミュレータは非常に有効であることが確認された。また訓練を通じて、運転員が陥りやすい操作ミスが抽出され、今後発生防止に向け訓練へ反映する。

再処理工場操業開始後の総合的な運転訓練に供するものとして開発予定の総合運転訓練シミュレータでは、今回設置したシミュレータ設備を有効活用して、模擬対象施設や機器の拡充、実機運転手順に沿った通常運転訓練を可能とする拡張、模擬対象異常事象の充実、実機データによる精度向上などを目指している。このために、今回試験的に導入したモデル開発・保守ツールの評価を重ね、グラフィックモジュールを用いたモデル作成ツールを全面的に導入し、開発・保守の効率化を図る必要がある。今回の試

験的導入評価ではツールの有効性が確認され、同時に効率的に利用するための課題点なども抽出できた。

今回開発・設置した運転訓練シミュレータは、使用済み燃料再処理施設の運転訓練シミュレータとしては世界でも例を見ない初めての施設である。六ヶ所再処理工場の安全かつ安定な操業に向けて、運転員の技術・技能向上に本シミュレータを有効活用する所存である。

－参考文献－

- 1) 住谷 寛，竹内 仁，佐々木貞明，“再処理工場開発の現状，”原子力工業，38[10]，10（1992）.
- 2) 川勝 理，“六ヶ所再処理工場の設備概要と設計，”原子力工業，35[9]，9（1989）.
- 3) 住谷 寛，川勝 理，“六ヶ所再処理工場の安全性，”原子力工業，35[9]，24（1989）.
- 4) 原子力安全委員会，“再処理施設安全審査指針，”原子力安全委員会安全審査指針集 改訂11版，770（2003）.
- 5) 日本原燃協，“添付書類八 再処理施設の操作上の過失，機械又は装置の故障，浸水，地震，火災等があった場合に発生すると想定される再処理施設の事故の種類，程度，影響等に関する説明書，”再処理事業指定申請書，（2002）.
- 6) 中村健二，荒川秋雄，龍澤洋二，“再処理施設運転訓練シミュレータ，”東芝レビュー，59[7]，（2004）.