

## 人工現実感技術を用いた原子力プラント運転の体験型教育システムの開発

石井 裕剛\*, Wu Wei, Li Deheng, 下田 宏, 吉川 榮和  
(京都大学大学院エネルギー科学研究科)

### Development of a VR-based Experienceable Education System for Operating a Nuclear Power Plant

Ishii Hirotake, Wu Wei, Li Deheng, Shimoda Hiroshi and Yoshikawa Hidekazu  
(Graduate School of Energy Science, Kyoto University)

#### Abstract

A VR-based experienceable education system has been developed by realizing human-shaped virtual operator in virtual control room of Nuclear Power Plant (NPP). The virtual operator has expertise knowledge about NPP operation and it can operate the control panels by himself. With this education system, a trainee can watch the virtual operator operating the control panels from any view-direction the trainee would like to see. And the trainee can understand what the virtual operator thinks, by hearing the verbal utterance of the virtual operator. The overall architecture of the developed education system and the functional configuration of the system are described in this paper.

キーワード：人工現実感, 人体モーション, ヒューマンモデル, 教育システム, 原子力プラント  
(virtual reality, human motion, human model, education system, nuclear power plant)

#### 1. はじめに

原子力発電訓練センター(NTC)では、原子力プラントの新たな運転員を育成するために、毎年専門の初期訓練カリキュラムを設け、約22週間に渡る長期の教育訓練を実施している。訓練生は、この初期訓練カリキュラムにおいて、前半は原子力発電の基礎知識や原子力発電所の構造、発電所の起動・停止、異常時の対応方法等を講義で学び、後半はモックアップを用いた実技訓練を受ける。この教育訓練により訓練生は、最終的に原子力プラントを運転できるだけの技術を身につけることができる。しかし、実技訓練の初期段階では、訓練生は初めて原子力発電所の制御盤を操作することになるため、訓練効率が非常に悪く、労力とコストがかかるモックアップを用いた実技訓練の実施期間を長くせざるを得ないのが現状である。

このように、実技訓練の初期段階で訓練効率が悪くなるのは、訓練生が、制御盤の各機器がどのように配置されているか、どのように操作するか等の、実際の作業時のイメージを持っていないためであると考えられる。従って、訓練生が実技訓練に入る前に、何らかの方法で予め運転作業のイメージを持つことができれば、訓練効率を上げることができると期待される。

訓練生に作業のイメージを持たせる教育方法の1つとして、熟練した運転員が原子力プラントを運転する様子を録画したビデオで学習させる方法がある。この方法は、訓練生が個人で使用でき、大規模な設備も必要としない等の利点があるが、以下のような問題がある。

1. 原子力プラントの異常事象は多岐に渡り、また、同じ異常事象に対しても、考えられる対応操作は複数存在する。従って、全ての場合を訓練生に学習させるためには膨大な数のビデオを作成する必要がある。
2. 制御盤の設計が変更になった場合、ビデオを作成し直す必要がある。
3. 常に同じ視点からしか作業を観察できない。
4. 訓練生自らがプラントの状態を確認できない。

そこで本研究では、以上の問題を解決する新たな教育システムとして、人工現実感技術を用いた体験型教育システムを開発した。

体験型教育システムでは、仮想空間内に原子力プラントの制御室を構築し、その中で、自らの判断で原子力プラントの異常診断と対応操作を、実際の運転員に近い自然な動作で行うことができる仮想運転員を実現した。訓練生は、本教育システムを用いることにより、仮想運転員が制御盤を操作する様子を自由な視点から眺めることができる。特に、プラントの運転作業を体験する機能として、仮想運転員の視点からの映像を立体視しながら眺めることにより、あたかも自分で制御盤を操作しているような感覚を得ることができ、より効率的にプラント運転作業のイメージを持つことができると期待される。また、作業中に、仮想運転員が思考過程を発話する機能を利用することにより、プラントの異常診断の過程を効率的に理解できると期待される。

本論文では、開発した体験型教育システムの全体構成、体験型教育システムを構成する各シミュレータの概要、シミュレーション実行例、及び今後の課題について述べる。

## 2. 体験型教育システムの全体構成

体験型教育システムは、システム全体を複数のシミュレータに分割して実装する、分散型シミュレーションシステムとして実現した。これにより、大量の計算を要する大規模なシミュレーションを、比較的安価な計算機を複数使用することにより負荷を分散させて実行できるため、コストを削減でき、また、システムの拡張も容易に行える。本章では、体験型教育システムのソフトウェア構成及びハードウェア構成について述べる。

### 2.1. 体験型教育システムのソフトウェア構成

体験型教育システムのソフトウェア構成を図1に示す。体験型教育システムは、SEAMAID、Body Motion Simulator (BM Simulator)、CRT Monitor Simulation Process (CRT-MS Process)、Speech Synthesis Process (SS Process)及びVirtual Space Drawing Process (VSD Process)より構成される。

SEAMAIDは三菱電機との共同研究で開発したマンマシンインタフェース設計評価支援システムであり、Nuclear Power Plant Simulator (NPP Simulator)、Man-Machine Interface Simulator (MMI Simulator)及びHuman Model Simulator (HM Simulator)で構成される[1]。

NPP Simulatorは、3 ループPWR型のプラントシミュレータで、複数の異常事象を模擬できる。

MMI Simulatorは、主に制御盤の設計情報を保持し、仮想運転員の位置・視線方向に応じて、仮想運転員が制御盤上のどの機器を見ているかを判定し、それらの機器の情報をHM Simulatorに送る。

HM Simulatorは、仮想運転員の知的な判断を行うシミュレータであり、認知心理学の知見を反映したヒューマンモデルの枠組みに基づき構築されている[2]。HM Simulatorの概要は3.1.節において述べる。

BM Simulatorは、HM Simulatorからの仮想運転員の行動に関する情報を元に、人間らしい動作を合成し、VSD Processに結果を送る。BM Simulatorの概要は3.2.節において述べる。

VSD Processは仮想空間を描画するプロセスで、NPP Simulator、MMI Simulator、BM Simulatorから、それぞれ、

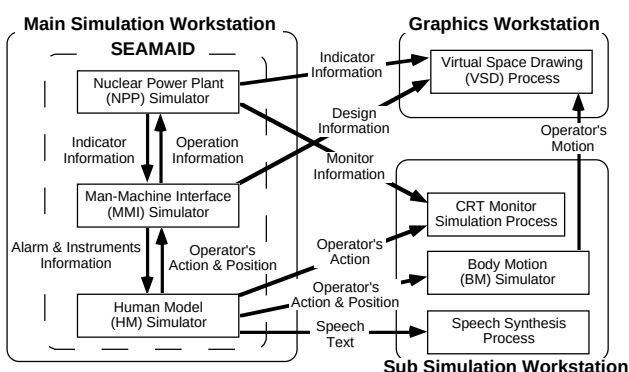


図1 体験型教育システムのソフトウェア構成

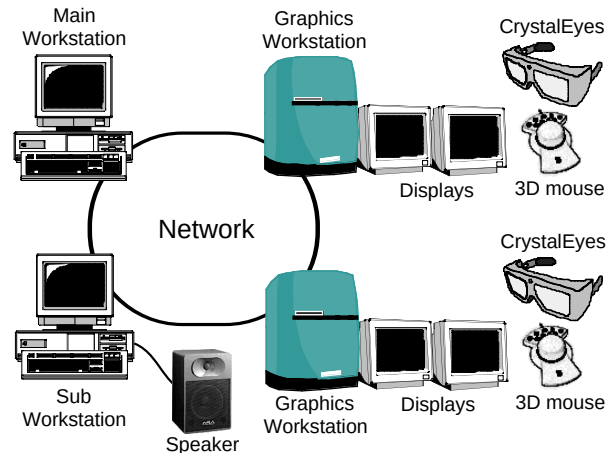


図2 体験型教育システムのハードウェア構成

原子力プラントの現在の状態に関する情報、制御盤の設計情報、仮想運転員の位置と姿勢に関する情報を受け取り制御室と仮想運転員を描画する。VSD Processの概要は3.3.節において述べる。

CRT-MS Processは、制御盤上に配置される機器の1つであるCRT Monitorの画面上に表示される映像を模擬するシミュレータで、原子力プラントの詳しい情報を提供する。CRT-MS Processの概要は、3.4.節において述べる。

SS Simulatorは、HM Simulatorから仮想運転員が発話する内容を受け取り、仮想運転員の発話を模擬するシミュレータである。SS Simulatorの概要は3.5.節において述べる。

### 2.2. 体験型教育システムのハードウェア構成

体験型教育システムのハードウェア構成を図2に示す。体験型教育システムは、SEAMAIDを実行するためのMain Workstation、BM Simulator、CRT-MS Process、SS Processを実行するためのSub Workstation、VSD Processを実行するための複数のGraphic Workstationとディスプレイ、訓練生の視点を変更するための3次元マウス、3次元映像を立体視するための液晶シャッターめがね、仮想運転員の発話を提示するためのスピーカで構成され、各Workstation間はネットワークにより繋がれている。

本体験型教育システムは、分散型シミュレーションシステムとして設計しているため、Graphic Workstationを複数台用意し、各Workstation上で個々にVSD Processを実行することにより、各Graphic Workstation上に提示する3次元映像の画質を落とすことなく、1つの制御室を同時に複数の方向から眺める環境を提供することが可能である。これにより、1人の訓練生が仮想運転員の視点からの映像を立体視しながら体験し、同時に別の訓練生が、仮想運転員の作業の様子を別の方向から観察することも可能である。

## 3. 各シミュレータの概要

本章では、体験型教育システムを構成する各シミュレータの概要を述べる。

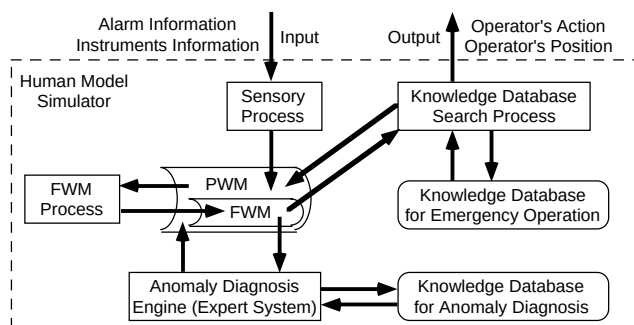


図3 Human Model Simulatorの構成

### 3.1. Human Model Simulator

HM Simulatorの構成を図3に示す。HM Simulatorは、主に、人間の短期記憶にある焦点記憶(Focal Working Memory; FWM)と周辺記憶(Peripheral Working Memory; PWM)及び長期記憶に当たる知識ベースである原子力プラントの診断知識(Knowledge Database for Anomaly Diagnosis)と緊急時におけるプラント操作手順の知識(Knowledge Database for Emergency Operation)より構成される。

HM SimulatorはMMI Simulatorから送られる原子力プラントの状態に関する情報を元に、以下の手順でプラントの診断及び対応操作を行う。

1. 原子力プラントの状態を監視する。プラントの各パラメータが、知識として持つ通常値から大幅にずれた場合、そのパラメータに異常が発生したものとして診断を開始する。
2. 異常を認識したパラメータの種類に応じて、「原子力プラントの診断知識」を用いて、考えられるプラントの異常事象を異常事象候補として立てる。
3. 考えられる異常事象候補の内1つを選択し、その異常事象が発生したと仮定した場合に考えられる他のパラメータの値の変化を予想し、実際に値を確認する。予想が正しい場合は確信度を増し、正しくない場合は確信度を減らす。
4. 確信度がある一定値よりも低くなった場合にはその異常事象候補を棄却し、他に考えられる異常事象候補の内の1つを新たに選択し、3.を繰り返す。
5. 確信度がある一定値よりも高くなった場合、その異常事象が発生したものと断定し、「緊急時におけるプラント操作手順の知識」を用いて対応操作を行う。

以上の手順により、HM Simulatorは、仮想運転員が何処に移動すべきか、何を見るべきか、何をどのように操作すべきかの判断を行う。

本教育システムでは、HM Simulatorの知識ベースや知識ベースを処理するプロセスを変更することにより、仮想運転員に、同じ異常事象に対しても、異なった手順で作業を行わせたり、間違った作業を行わせることも可能である。

HM Simulatorの詳細については、参考文献[2]を参照されたい。

表1 歩行動作に対する基本動作データベース

| 基本データの分類 | 基本データの種類                                  | データ数 |
|----------|-------------------------------------------|------|
| 1 歩の歩行   | 開始方向 7 種×終了方向 7 種×歩幅 2 種 (方向は30度ステップ)     | 98   |
| 2 歩の歩行   | 開始方向 7 種×終了方向 7 種×歩幅 2 種 (方向は30度ステップ)     | 98   |
| 歩きはじめ    | 方向 7 種 (方向は30度ステップ)                       | 7    |
| 定常歩行     | 右足前、左足前                                   | 2    |
| 歩き終わり    | 方向 7 種 (方向は30度ステップ) × 歩幅 2 種×最後に踏み出す足 2 種 | 28   |

表2 機器操作に対する基本動作データベース

| 基本データの分類 | 基本データの種類                                | データ数 |
|----------|-----------------------------------------|------|
| レバー操作    | 倒す方向 2 種×機器の位置 9 種                      | 18   |
| ボタン操作    | 直立からの操作 9 種<br>直立への操作 9 種<br>連続ボタン操作81種 | 99   |

### 3.2. Body Motion Simulator

訓練生が原子力プラントの異常時における診断と対応操作の作業の様子をイメージできるようにするためには、仮想運転員が実際の人と同様の動きで制御盤を操作する必要がある。

現在、人の動きを3次元アニメーションとして合成する方法は、幾つか提案されているが、本研究では、リアルタイムに仮想運転員の動きを合成する必要があること、制御盤の操作は、比較的少ない種類の動作を組み合わせで表現できること等を考慮し、3次元モーションキャプチャシステムを用いる方法を採用した。すなわち、3次元モーションキャプチャシステムを用いて基本的な運転員の動作を計測し、基本動作データベースを作成する。そして、仮想運転員の動作を合成する際には、基本動作データベースから最も目的の動作に近い動作を選択し、それを変形することにより目的の動作を合成するものとした。具体的には、運転員の動作を、歩行動作と機器を操作する動作に分け、歩行動作に関しては、表1に示す233種類の基本動作を、機器を操作する動作に関しては表2に示す117種類の動作を基本動作データベースとして作成した。

この手法により、制御室の任意の場所、任意の方向への歩行動作と、体の前面に置かれた機器を操作する動作について毎秒当たり10～30姿勢の連続的な変化として計算することが可能となった。仮想運転員の動作の合成方法の詳細については参考文献[3]を参照されたい。

### 3.3. Virtual Space Drawing Process

VSD Processは、制御盤と仮想運転員が制御盤を操作する様子を3次元アニメーションとして描画する。本節では、制御盤の描画方法、仮想運転員の描画方法及び、仮想運転員の視点からの映像を合成する方法について述べる。

#### 3.3.1. 制御盤の描画

本研究で開発した教育システムでは、制御室に10個の制御盤が配置され、それらの制御盤上に約20種類の機器が、合計約500個配置されている。訓練生が仮想空間内の各機器を見ることにより、いつでもプラントの状態を確認できるようにするため、各機器の具体的な数値表示等も描くものとした。

これら全てをポリゴンを用いて詳細に描く場合、非常に描画能力が高い高価な計算機が必要となる。そこで本研究では、機器の詳細は、ポリゴンを用いず、全てテクスチャを用いて描画し、さらに、訓練生の視点と個々の機器との距離に応じて、描く機器の詳細度を変化させる Level Of Detail(LOD)の手法を適用した。具体的には、訓練生の視点と機器との距離に応じて、機器の描き方を、1. 機器の枠のみ描く、2. 数値表示以外の機器の全体を描く、3. 機器の数値表示等まで描く、の3段階に分けて描画するものとした。また、NPP Simulatorからは、値が更新された機器の情報のみ受け取るものとした。この手法により、全ての機器の数値表示等まで詳細に描く場合と比べて、約1.5倍(訓練生と制御盤の距離が近い場合)から5倍(訓練生と制御盤の距離が遠い場合)の描画速度を得ることができた。図4に本手法で描画した制御室を、図5に制御盤を示す。

#### 3.3.2. 仮想運転員の描画

仮想運転員は、腕の長さや足の大きさ等、実際の人の各部位のサイズを計測し、その結果をもとにCADを用いて形状を作成した。これにより、仮想運転員を構成するポリゴンの総数は約700個となった。また、仮想運転員の各部位には、テクスチャを張っている。

仮想運転員の手の指の動きは、今回の教育システムでは、それほど自然である必要はないと考え、歩行動作時には完全に開き、ボタンを押す場合には、開いた状態から徐々に人差し指だけ伸ばす状態に変化させるアニメーションを提

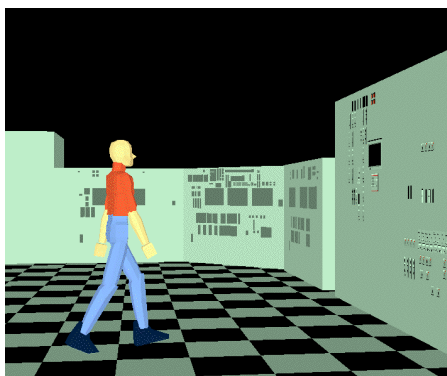


図4 制御室

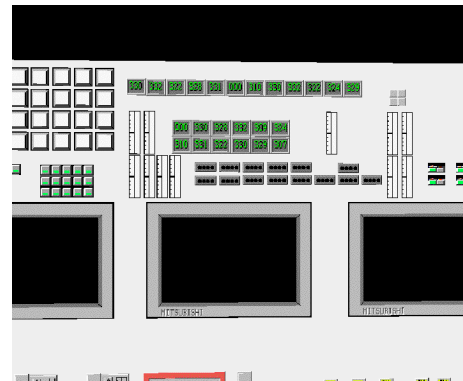


図5 制御盤

示するものとした。

#### 3.3.3. 仮想運転員の視点からの映像の描画

仮想運転員の視点からの映像は、基本的にはBM Simulatorにおいて求められた仮想運転員の姿勢における、頭の位置と方向を元に合成される。

例えば、仮想運転員がある機器に向かって歩いている時には、上体が揺れるため、制御室が上下左右に揺れながら、目的の機器が徐々に大きくなっていくアニメーションが合成される。また、仮想運転員が振り返る場合には、制御室が仮想運転員の頭の振りに応じて徐々に横にずれるアニメーションが合成される。さらに、機器を操作する場合には、対象となる機器を視野の中心に合わせながら仮想運転員の手が機器を操作する様子を眺めることになる。図6に仮想運転員の視点からの映像を示す。

### 3.4. CRT Monitor Simulation Process

今回の教育対象とした原子力プラントの制御盤は、プラントの状態をまとめて表示するCRT Monitorを備えているが、この画面上には、図7に示すようなトレンドグラフが表示される場合がある。これらの画面を仮想空間内に3次元映像として詳細に描画する場合、計算機に多大な負荷がかかる上に、非常に見にくいと予想される。そこで、本研究では、CRT Monitor Simulation Processを構築し、制御盤上のCRT Monitorに表示される画面の詳細は、仮想空間内には描かず、3次元映像を提示するディスプレイとは別のディスプレイ上に2次元の映像として描画するものとした。

具体的には、CRT-MS Processは、HM Simulatorから、仮想運転員が現在どの機器を眺めているかに関する情報を得て、それに応じて、CRT Monitorの画面上に描かれる内容を決定する。

図8にCRT-MS Processが表示する2次元映像の例を示す。この画面は、仮想運転員が見ているCRT Monitorの種類に応じてリアルタイムに変化する。さらに、仮想運転員がこのCRT Monitorの画面のどの部分を参照しているのかを示すために、仮想作業員が参照しているパラメータ表示部分に矢印を表示し、参照しているパラメータが変化した場合、それに応じて、矢印が移動する機能も構築した。



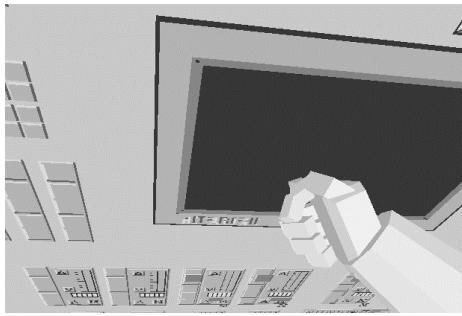


図6 仮想運転員の視点からの映像

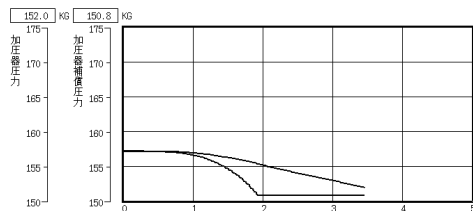


図7 トレンドグラフの例

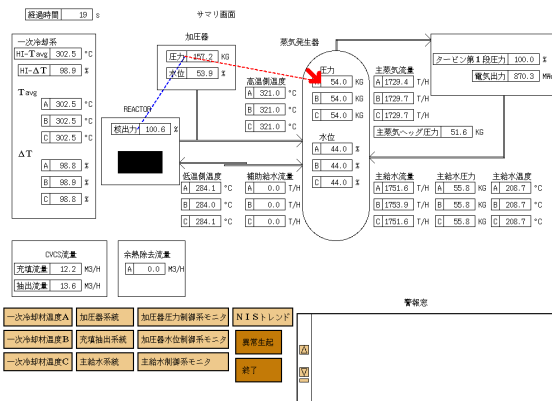


図8 CRT-MS Process が表示する2次元映像の例

### 3.5. Speech Synthesis Process

本教育システムでは、仮想運転員の行動を眺めるための機能に加えて、仮想運転員が考えている内容をリアルタイムに発話させる機能も構築した。その際、訓練生が仮想運転員の思考過程を理解できるようにするために、主に以下の場合に発話させるものとした。

1. プラントの異常を認識した場合  
例) 異常が発生しました。診断を開始します。
2. 異常事象の候補を立てた場合  
例) RCS漏洩が発生したとの仮説を立てます。
3. プラントのパラメータを見に行く場合  
例) 加圧器圧力を調べます。
4. パラメータの値を参照した場合  
例) 加圧器水位は過去より小さくなっています。
5. 異常事象の原因が判明した場合  
例) 一次漏洩が発生したと思われます。
6. 警報が発生した場合  
例) プロセスモニタ注意警報が発生しました。

実際には、SS ProcessはHM Simulatorから送られてくる仮想運転員の発話内容に関する情報を元に、予め人が発話した内容を録音して作成したオーディオファイルを再生することにより仮想運転員の発話を模擬した。その際、録音するオーディオファイルを、名詞、動詞等、幾つかに分割し、発話を合成する際に適切なファイルを複数選択して、それらを連続して再生することにより、予め準備すべきオーディオファイルの総数を減らす工夫を行った。これにより、例えば一次漏洩の異常事象を診断するシミュレーションを実行するために必要なオーディオファイルの総数は約70種類となった。

## 4. シミュレーション例

体験型教育システムの実行例として、NPP SimulatorにRCS漏洩の異常を発生させた場合の仮想運転員の行動と発話内容を表3及び表4に、その時の仮想運転員が制御室内を歩いた軌跡を図10に示す。これらの結果により、仮想運転員が、ほぼ実際の運転員と同様の速さと手順で、異常を認識し、プラントを診断し、対応操作を行うことが確認できる。

また、本研究で提案した教育システムを用いることにより、訓練生が、原子力プラントの異常診断と対応操作の様子を観察でき、診断の内容を理解できることを確認するために、研究室の数人の大学院生に教育システムを試用してもらった。その結果以下のような感想を得ることができた。

1. 仮想運転員の視点からの映像を眺める機能を用いることにより、自分で制御室の中を歩き回っている感覚を得ることができた。
2. 仮想運転員の視点を体験する機能は面白い。
3. 仮想運転員が何を考え、何をしようとしているのかよく分かった。
4. システムを使用している内に気分が悪くなってきた。

これらの結果により、本教育システムでは、システムの利用者が仮想運転員の行動を眺め、発話内容を聞くことにより、仮想運転員の思考過程と行動を理解できることが確認できた。

また、「仮想運転員の視点を体験する機能は面白い」という意見が得られたことにより、本教育システムは、システム利用者の学習意欲を促進する可能性があることが分かった。

一方、「システムを使用している内に気分が悪くなってきた。」との意見が得られたが、教育システムを使用することにより、訓練生の気分が悪くなるならば、訓練生の学習意欲を削ぐ可能性がある。従って、教育システムを使用してもシステム利用者の気分が悪くならないように何らかの対策を行う必要がある。

## 5. 将来課題

本研究で開発した体験型教育システムを、実際の訓練に使用する為には、以下の項目の追加を今後行う必要がある。

表3 仮想運転員の発話

A-SG-水位を調べます。  
A-SG-水位は変化していません。  
プロセスモニタ注意警報が発生しました。  
格納容器ガスモニタを調べます。  
格納容器ガスモニタの値は大きくなっています。  
今考えられる異常はRCS漏洩です。  
従ってRCS漏洩を調べます。  
.....  
格納容器じんあいモニタの変化傾向を調べます。  
格納容器じんあいモニタは過去に増加し現在も増加中です。  
.....  
加圧器水位の変化傾向を調べます。  
加圧器水位は過去に減少し現在も減少中です。  
RCS漏洩が発生したと確信しました。  
対応操作に入ります。

表4 仮想運転員の行動

| 時間    | 行動（イベント）                                                 |
|-------|----------------------------------------------------------|
| 00:00 | (Simulation start)                                       |
| 00:08 | Notifies the anomaly by a process monitor alarm          |
| 00:08 | Suspects primary leak                                    |
| 00:24 | Recognizes an alarm that Bu heater is ON                 |
| 00:34 | Confirms primary leak occurred                           |
| 00:34 | Suspects LOCA                                            |
| 00:48 | Confirms LOCA occurred                                   |
| 00:50 | Starts counter-operation of pressurizer level & pressure |
| ..... | .....                                                    |
| 02:26 | Finishes the counter-operation                           |
| 02:27 | Starts emergency load down operation                     |
| 04:38 | Finishes emergency load down operation                   |
| 05:00 | (Automatically reactor tripped)                          |

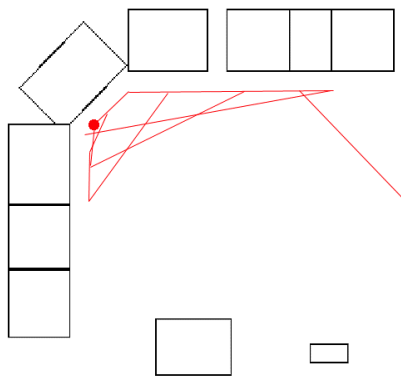


図10 仮想運転員の歩行軌跡

#### 1. 訓練生自らが仮想制御盤を操作できる機能の構築

現時点の体験型教育システムを用いることにより、訓練生は、原子力プラントの異常時における、診断・対応操作の様子をイメージできるようになると期待されるが、これに加えて、訓練生が作業のイメージを得た後に、訓練生自らが仮想制御盤を操作することにより、イメージの確認ができるようになれば、さらに学習効果が上がると思われる。

#### 2. 仮想運転員が診断可能な異常事象の追加

現時点のシステムでは、仮想運転員が診断・対応が可能な異常事象は、RCS漏洩とSGTRの2種類である。前述したように、訓練生が診断・対応技術を習得すべき異常事象は多岐にわたり、現在のシステムでは十分とは言えない。今後、仮想運転員の知識を増やすことにより、診断・対応が可能な異常事象の種類を増やす必要がある。

#### 3. 体験型教育システムのインタフェースの改良

訓練生が長時間教育システムを使用しても気分が悪くならない様、システムのインタフェースを今後を改良する必要がある。

#### 4. 体験型教育システムの使用による学習効果の評価

今回、体験型教育システムを使用してもらった結果により、システムの使用者が仮想運転員の行動を自由に眺め、仮想運転員の思考過程を理解できることが確認されたが、実際に、訓練生が、本教育システムを用いることにより学習効果が上がるかどうかの評価はしていない。この確認も、今後の課題である。

#### 6. 結論

本研究では、仮想運転員が原子力プラントの制御盤を操作する様子を自由な視点・方向で眺めることができ、同時に仮想運転員の思考過程もリアルタイムに知ることができる体験型教育システムの開発を行った。今回の研究では、システム全体を分散型シミュレーションシステムとして実現し、その動作を確認した。また、教育システムを実際の訓練に使用するために、今後進めるべき作業についても検討した。

#### 7. 謝辞

SEAMAIDは通産省及び原子力技術機構の委託により開発したものである。

#### <参考文献>

- [1] H. Yoshikawa et al., "Development of an Analysis Support System for Man-Machine System Design Information", Control Engineering Practice, Vol. 5, No. 3, 1997, pp. 417-425.
- [2] Wu Wei他, "プラント運転員の異常診断行動のモデリングとヒューマンモデルシミュレーションによるHCR曲線の導出法の研究", ヒューマンインタフェース学会誌, Vol. 1, No. 2, 1999, pp.11-23.
- [3] H. Shimoda et al., "A Computer-Aided Sensing and Design Methodology for the Simulation of Natural Human Body Motion and Facial Expression", Proceedings of EDA'98, 1998. (CD-ROM)