

原子力プラント運転・保守における
ヒューマンエラー評価技術に関する研究
－ 分析・評価ツール －

尾崎 禎彦*, 大井 忠**

A Study on Simulation based Evaluation of Human Error
in Operation and Maintenance for Nuclear Power Plants
－ System for Human Error Analysis and Evaluation －

Yoshihiko Ozaki*, Tadashi Ohi**

Now large-scale systems such as nuclear power plants have been complicated. Therefore, it becomes increasingly necessary to analyze and evaluate the HMI(Human Machine Interface) for the reliability from the HF(Human Factor) standpoint. Meanwhile, it is also important to estimate the risk of HE(Human Error) in which task in an individual work process is based on the work manual. In this paper, we introduce three kinds of system that can do easily a quantitative analysis and evaluation concerning HE and/or HF. We adopt quantitative analysis method for HRA(Human Reliability Analysis), that is THERP(Technique for HE Rate Prediction) and Event Tree Analysis in the system. Using these systems, a person, who does not have enough knowledge of HF, can estimate a HE prevention method and a HMI remediation design, etc. in a series of work task.

Keywords: Human Error Rate, Human Factor, Human Machine Interface, Human Reliability Analysis

I. はじめに

多重防護の考え方に基づいている複雑かつ大規模な原子力発電所などのシステムにおいて、事故やトラブルはある確率で起こりうる。事故やトラブルは単発的に起こるのではなく、異なった幾つかの原因による事象が連鎖的に発生して、結果的に事故に至る。

すなわち、事故の未然防止は事象の連鎖を断つことが重要となる。そのためには、事象（エラー）の背後に潜む原因を分析し、エラーが起きないようにすることが求められる。また、事象には図1に示すように重大なものから順に、事故（アクシデント）、トラブル（インシデント）、ヒヤリ・ハット（トラブルには至らないがヒヤリとした経験）と階層的に分けることができ、それらの発生確率

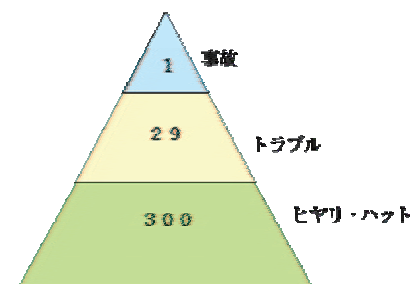


図1 ハインリッヒの法則

* 原子力技術応用工学科

** 三菱電機（株）先端技術総合研究所

はハインリッヒの法則によれば 1 : 29 : 300 で与えられる。つまり、1 回の事故の陰には 29 のトラブルが、さらには 300 ものヒヤリ・ハットが潜んでいるとされる。発生した事象に対する原因分析や対策検討には、4 M 要因分析(人:Man、機械:Machine、環境:Media、管理:Management)、なぜなぜ分析、また、チェックリスト評価による方法などがあるが、対策による改善が定量的にどの程度改善したのかが不明、場当たりの対策になりがちといった問題点も挙げられており、従来から種々の科学的分析手法が提案されてきている。プラントが複雑でも大規模でもなかった時には、技術欠陥が問題の原因であり、技術的な対応で事故を防止できると考えられてきたが、システムが複雑で大規模なものになってくると、単純に技術的問題だけでは捉えられなくなり、それを操作する人間の能力を超えはじめ、ヒューマンエラー (HE) による事故が起こるようになってきた。よく知られている通り、原子力発電所の中央制御室など、また、航空機のコックピットなどは、過去の事故／異常例を教訓とし、出来るだけエラーが生じないようなシステム設計がなされてきている。しかし、どんなシステムも完全に人間を排除した自動化システムとはなっておらず、必ず人間にある役割を期待する、言い換えれば必ず人間が何らかの形で介在するシステムとなっている。結局、システムの安全性は、人間の信頼性に大きく依存していることになる。システムを操作する人間の、例えば操作ミスといった HE を零にすることは非常に困難なことは経験的に理解できる。HE は、様々な要因が複雑に絡んで発生するが、ヒューマンファクタ (HF) の観点からは、HE は結果であって原因ではなく、原因は環境であり、エラーは環境によって引き起こされると考える。では、環境によって引き起こされる HE の起こる要因として、大きく下記の 3 つに分類される行動形成因子 (PSF: Performance Shaping Factor)¹⁾ が挙げられている。

● 外的要因 (作業時の環境) ;

- ・ 状況的特性 (温度、湿度、照明、組織)
- ・ 職務／作業の指示 (手順書、口頭指示)
- ・ 作業と設備 (機器—表示の関連性、コミュニケーション)

● 内的要因 (作業者の資質や性格) ;

● ストレス要因 ;

- ・ 心理的 (時間の制約、単調さ、危険性)
- ・ 生理的 (疲労、痛み、振動)

この PSF 条件が悪い状況は人が HE を起こしやすい状況であるといえる。HE を防止するためには、設備の改善や HE 防止機器の導入などの物理的な対策を講じることによって、HE が起こりにくい状況を作ることである。つまり、PSF の外的要因を改善することである。しかし、実際の現場での作業は多岐にわたり、全ての設備や作業に対して、個々の作業に適した設備改善や機器を導入することは、膨大なコストと時間が掛かる。また一方、従来、中央制御室内の盤配置、盤面上の操作機器、指示器、表示器などの配置などのヒューマンマシンインタフェース (HMI) 評価では、モックアップ設備と運転訓練シミュレータを用いた被験者実験が行われ、また、作業手順書に記載された個々の作業プロセスで HE が起こりうる危険度の評価では、作業員自身による

一連の作業項目毎のチェックリスト評価などを実施し、これらの評価結果を HF に関して多くの専門的知識を持つ専門家が分析するという手法が採られてきていた。つまり、設備の設計者が、また、作業者自身や作業監督者が事前／事後に HE について簡単に分析・評価することは困難であった。

本研究の目的は、原子力プラントなどでの運転・保守・点検などの作業を対象に HE の定量的な事前／事後の分析・評価を HF についての高度の専門知識のない人でも簡単に、かつ、簡便に行うことのできる HE 分析・評価ツールを提供することにある。

II. HE 分析・評価ツール概要

現在、広く用いられている HE 評価方法を事前分析か事後分析か、また、定量的評価か定性的評価かという指標で整理したのが図 2 である。

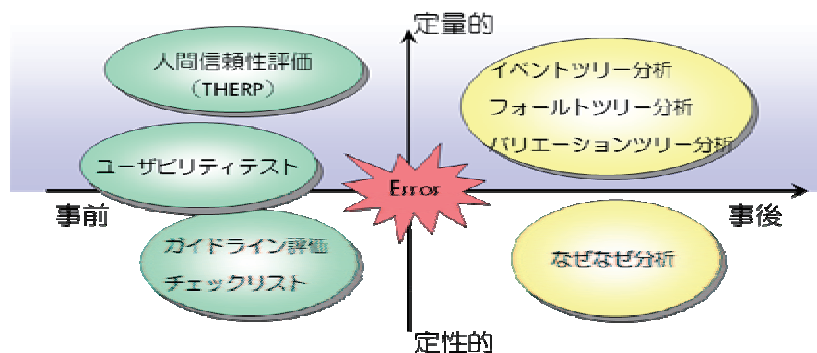


図 2 HE 評価手法

本研究で提供しようとする定量的 HE 分析・評価ツールでは、図 2 に示した HE 評価手法のうち THERP (Technique for HE Rate Prediction) 手法¹⁾とイベントツリー分析を援用している。ここで、THERP 手法とイベントツリー分析の各々について簡単に説明する。原子力プラントを対象にした確率論的安全評価手法 (PSA: Probabilistic Safety Assessment) は WASH-1400²⁾において、事故シーケンスの中で運転員の HE がどのように影響するか、その影響度を推定するための人間信頼性解析 (HRA: Human Reliability Analys_is) として開発が進められ、TMI (Three Miles Island) 事故を契機に THERP 手法としてまとめられた。THERP 手法は、運転手順書や作業手順書に従ってステップバイステップで行われる作業(タスク)の評価に用いられる。THERP ハンドブックは、HE 率評価手法と膨大なサンプル実験から求められた人間信頼性データである HE 率データベース (DB) から成り、全てが公開されている。次に、信頼性工学で広く用いられるイベントツリー分析について述べる。手順書に記載されたタスクシーケンスからイベントツリーを作成すると、図 3 に示すようなツリー状展開図ができる。図に示したイベントツリーの各分岐点に THERP の HE 率 DB から各枝の成功／失敗の確率を評価することで、タスク全体の失敗確率を計算していく手法である。なお、各枝の左側分岐が成功、右側分岐が失敗を表している。手順書通りにタスクが行われる場合は、その手順書通りにイベントツリーを作成すればよいが、ケースバイケースで手順が変わるような場合は、そのケース毎の実際の手順を反映したイベント

ツリーを作成する必要があるのはもちろんである。

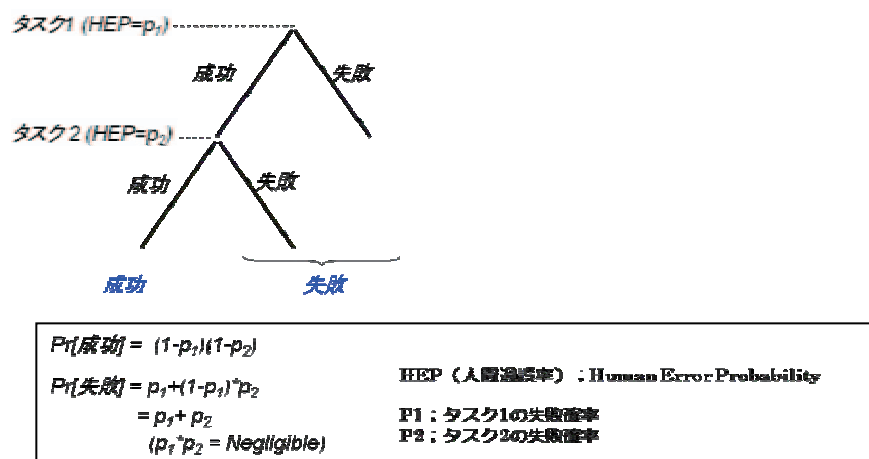


図3 イベントツリー分析

表1にHE率DBの一例として、値の確認に関するDBの一部を示す。

表1 HE率DBの例（値の確認に関するHE）

Item	Display or Task	BHEP	EF
(1)	デジタル表示である	0.001	3
	アナログ表示である		
(2)	見やすいリミットマークがある	0.001	3
(3)	見にくいリミットマークがある	0.002	3
(4)	リミットマークがない	0.003	3
	アナログ記録計である		
(5)	リミットマークがある	0.002	3
(6)	リミットマークがない	0.006	3
(7)	状態表示ランプで状態変化を確認する	Negligible	
(8)	インジケータランプの表示の解釈を誤る	Negligible	

標準 HEP (nominal-HEP)

<PSF による修正>

基本 HEP (Basic-HEP:BHEP)

<従属性による補正>

最終的に HEP は、

$BHEP/EF \leq HEP \leq BHEP \times EF$

Basic HEP
(基本的なエラー確率)

Error Factor
(エラー補正因子)

PSFによる修正とは、その作業環境のストレス度合いによる修正であり、ストレス度が高ければ標準HEPに係数(≥ 1)を掛けることになり、また、作業者が熟練者か新人かによっても掛ける係数を変える。従属性による修正とは、HRAの特徴でもあるが、仕事を複数の人間で行う場合に、機械の場合とは異なり、人間は他人に引きずられるという特質を加味することである。すなわち、作業員A、Bの二人で作業している場合を考える。作業員Aが上級者であれば、作業員Bは当該作業の誤りを発見する確率は小さくなり、HEPは大きくなることになる。つまり、最終的なHEPは、 $BHEP/EF \leq HEP \leq BHEP \times EF$ の範囲内で与えられるということになる。

従って、THERP手法を用いたHE分析・評価手法の特徴は図4に示すように、タスク毎にBHEP、HEPが定量的に求められ、しかも、HEPは $BHEP/EF \leq HEP \leq BHEP \times EF$ で与えられること

から、タスク毎の EF を介してエラー要因の明確化とタスクの改善点の明確化が可能となる

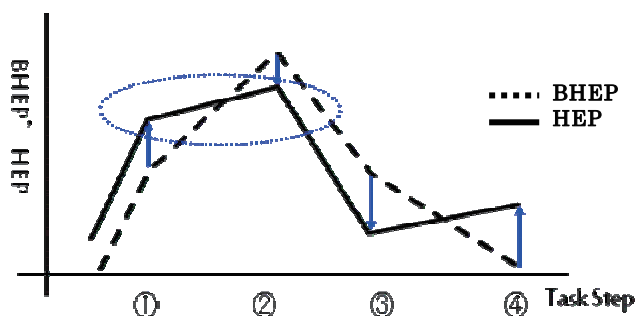


図 4 THERP 手法によって得られる結果

ここまで説明してきた THERP 手法、イベントツリー分析を援用した HE 分析・評価ツールとして、本研究では以下に述べる 3 種類のものを提供する。3 種類の各々のツールには、仮に System A”、“ System B”、“ System C” と呼称することにする。

1) “ System A” ;

“System A”は、作業手順書に基づく作業プロセスにイベントツリー分析を適用し、ある HE が発生するまでに生じたインシデント事象を分析し、HE を防止するためにはどのタスクにどのような機能が欠けているのかを提示する分析・評価ツールである。すなわち、“ System A” では、作業プロセスでのエラー発生メカニズムを科学的（定量的）に分析ができ、作業毎の HEP を推定、作業改善が必要な箇所を特定、分析できる。ツール利用者としては、品管部門などの作業分析のできる人を想定している。“ System A” の機能の概要を下図に示す。

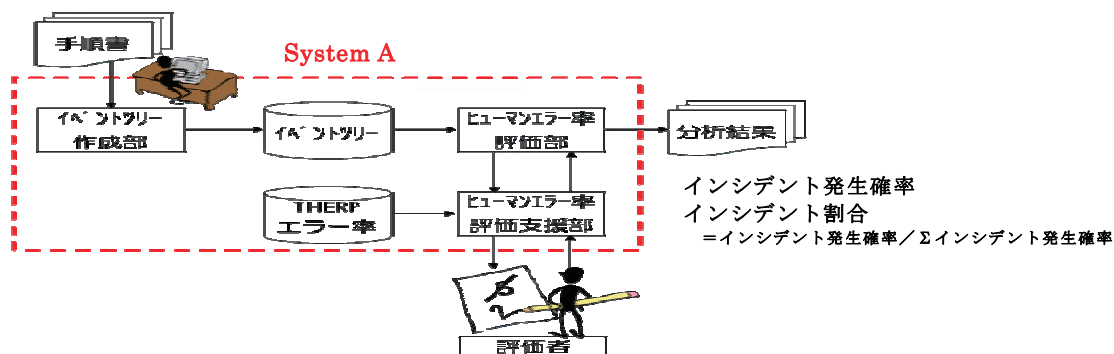


図 5 “System A” 機能ブロック図

2) “ System B” ;

“ System B” は、作業現場で作業員自身や作業監督者が作業手順書に基づく作業プロセスでの作業毎の HE の危険度評価を実施するためのものである。作業手順データを入力するだけで評価シートが作成され、評価シートにアンケートに答えていく感覚で数値を入力していただくだけで、THERP 手法に基づく作業毎の誤る危険度、PSF、作業員危険度などの分析結果を提示する分析・評価ツールである。また、“ System B”は、対象作業の危険予知訓練 (KYT: Kiken Yochi Training) ツールとしての利用や熟練者が作業を行っていくうえでの勘所抽出による技能伝承ツールとしての利用も可能である。“ System B”の機能の概要を下図に示す。

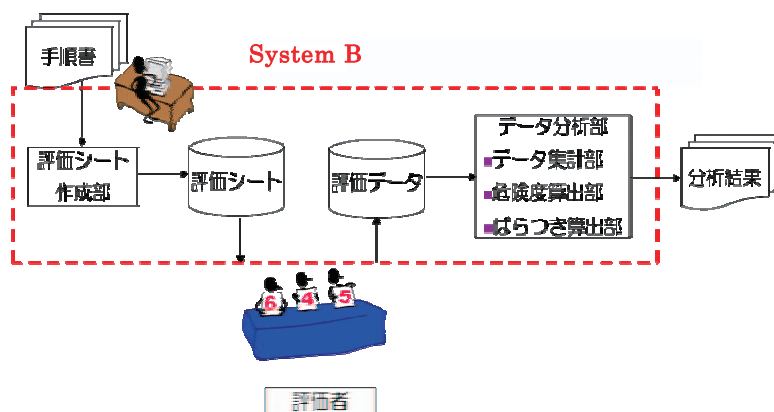


図6 “System B” 機能ブロック図

3) “System C” ;

“System C”は、作業員が制御盤などの HMI に対して作業手順に従った作業を実施する際の作業員と HMI の相互作用を計算機上に再現することで、THERP に基づく HE 率と併せて作業員の作業時間、動線移動距離、視線移動距離などの作業員負担指標を提示する分析・評価ツールである。ツール利用者としては、HF に関する知識をある程度有する設計部門などのエンジニアを想定している。例えば、既存の設備／機器が誤りやすくそれを改善したいと考え更新設計案を構築しようとしている場合に、既存設備に対する更新設計案の誤りやすさの指標がどの程度改善されているかを把握するとともに、他の評価指標が既存設備／機器に対する指標よりも悪化していないこと（トレードオフ関係）を確認したりすることができる。“System C”のこうした特徴を実現するために評価対象の制御室、盤面レイアウトなどでの作業員の動的な評価と作業毎の HE 率を得るために、ツール内には作業員（操作員）の行動を再現するオペレータシミュレータと、評価対象の HMI の機能や作業員との相互作用を再現することのできる HMI シミュレータとが組み込まれている。“System C”の機能の概要を下図に示した。

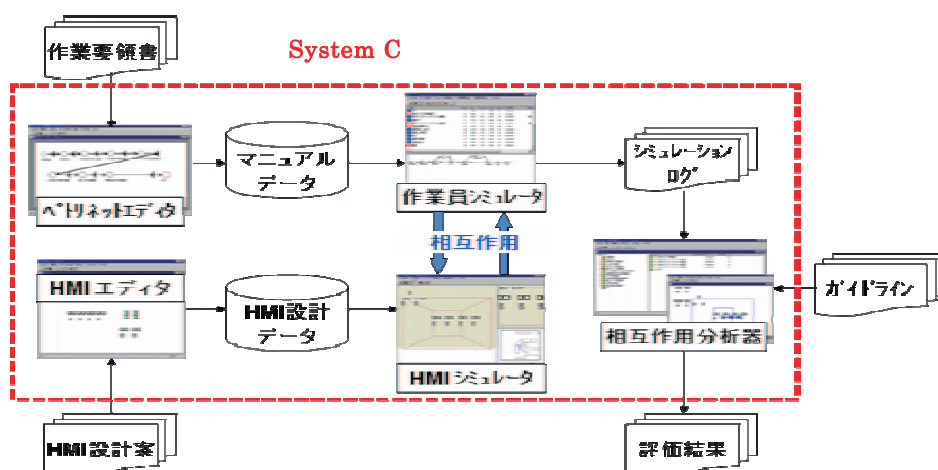


図7 “System C” 機能ブロック図

Ⅲ. HE 分析・評価ツール実行例

Ⅱ節に述べた3種の HE 分析・評価ツール、“System A”、“System B”、“System C”を PC 上

で動作する環境を整備した。そして、各々のツールに対して、簡単な例題を用いて各々の実行を確認した。

1) “System A”³⁾;

“System A”は、Excel のマクロ機能を利用して動作するツールである。ここでは、内線／所外／外線が可能な社内電話を例題として取り上げて説明する。まず、図 8 に示す作業手順入力画面で作業手順を入力する。作業手順は、「電話の受話器を上げる→内線／所外／外線のための発信番号をダイヤル→相手先番号をダイヤル→話をする→受話器を置く」までの一連の作業手順を階層的に入力すると、図 9 に示すイベントツリー図が作成される。

作業手順	入力項目
受話器を上げる	
所内電話のとき	内線番号をダイヤルする
所外電話のとき	7をダイヤルする 場所番号をダイヤルする 内線番号をダイヤルする
社外電話のとき	0をダイヤルする 外線番号をダイヤルする
話をする	
受話器を置く	

イベントツリー作成

図 8 作業手順入力画面

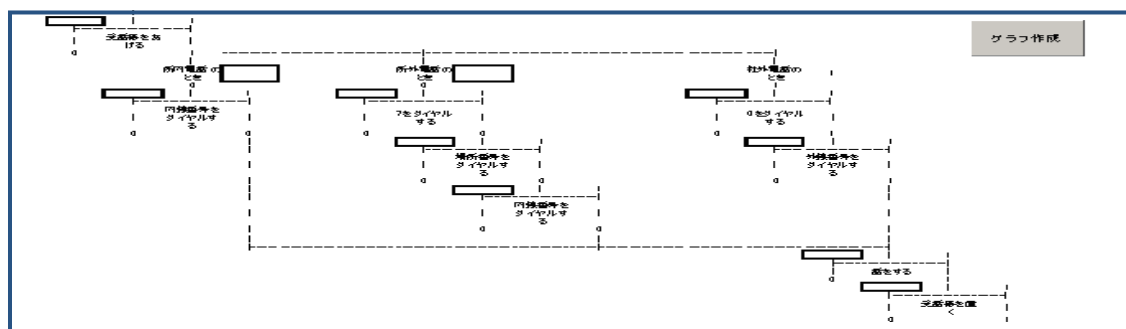


図 9 イベントツリー表示画面

図 9 に現れる セルには、図 10 に示した HE 率入力画面から作業を失敗する確率を入力する。図 9 に示した全ての分岐点の HE 率が入力されると一連のタスクにおけるインシデント発生確率が計算されたツリー図が得られ、最終的に図 11 のようなインシデント発生確率のグラフが

作業手順入力画面

作業手順	入力項目
受話器を上げる	
所内電話のとき	内線番号をダイヤルする
所外電話のとき	7をダイヤルする 場所番号をダイヤルする 内線番号をダイヤルする
社外電話のとき	0をダイヤルする 外線番号をダイヤルする
話をする	
受話器を置く	

イベントツリー作成

図 10 HE 率入力画面

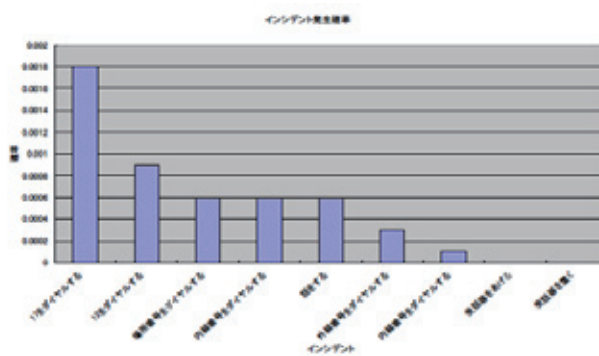


図 11 インシデント発生確率

得られる。図 11 に示したインシデント発生確率から、どの作業で誤り易いのか、どの作業の改善を図るべきかについてのデータが提供される。このことから複数の改善後の作業／機器案と改善前とで定量的な HE 率という観点から相互比較でき、客観的指標による優劣の議論が可能となる。

2) "System B" ³⁾ ;

“System B”は、既に述べたように複数の作業者、作業監督者が各々の立場で評価シートにアンケート形式で答えていくことで、各々の作業者が作業手順書の作業毎に **PSF** がどの程度悪いのか、また誤りを犯した場合に機器にどの程度の影響を及ぼすのか、作業者自身に危険が及ぶと考えているのかを調べ、重点的に **HE** 防止策を施すべき箇所を発見するためのツールである。作業設定画面で作業名を設定し、図 12 に示す作業内容編集画面で作業手順を作業毎に階層的に入力していく。

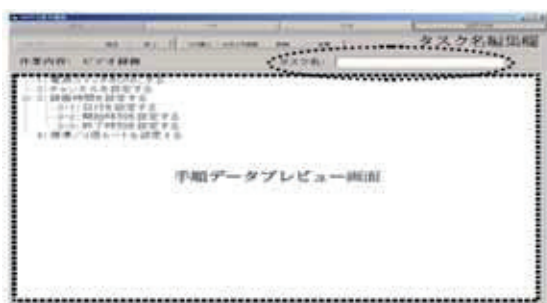


図 12 作業内容編集画面

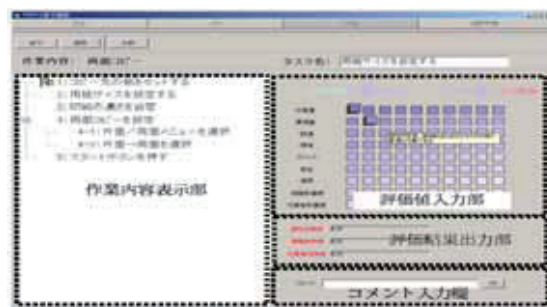


図 13 評価シート入力画面

作業内容を編集された後、複数の作業者の各々が“ **System B**” にログインし、編集後の作業名を呼び出し、図 13 に示した評価シート入力画面の作業内容で選択された作業毎に評価入力部から値を入力していく。入力し終えた作業員は個々に自分はその作業に対してどう評価しているかの分析結果を図 14 に示す分析結果表示画面によって知ることができる。



図 14 分析結果画面（個人毎の評価結果）

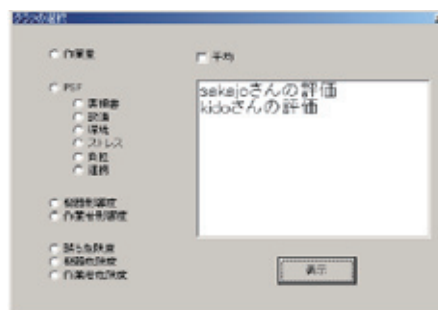



図 15 グラフ種類選択画面

こうして複数の作業員によって入力された作業に対して、管理者という立場で“ System B”にログインすることで図 14 に示した個々の作業者の分析結果はもちろん、作業者全員の分析結果を分析することができる。すなわち、図 15 に示したグラフ種類選択画面から、作業者とその作業者が例えば PSF と機器影響度についてどう評価しているかについてのグラフ表示を選定すると、その選定された作業者と評価項目に関する図 14 相当のグラフが表示される。さらに、図 16 に示した評価指標毎の分析結果表示画面の  カラムで複数の評価指標候補から分析したい評価指標を選択すれば、その選択され

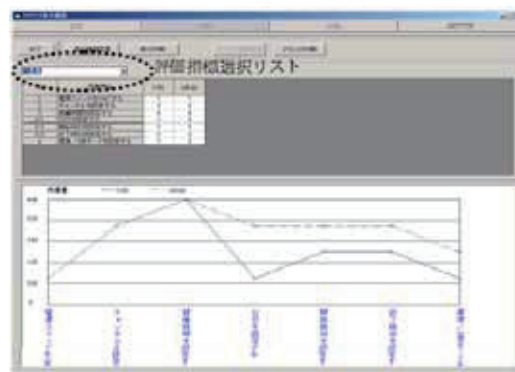


図 16 評価項目毎の分析結果表示画面

た評価指標についての作業員全員の分析結果が図のように得られる。すなわち、“System B”は個々作業員がどの作業でストレスを感じているか、どの作業を危険と見ているか、また、ベテランと新人作業員で分析結果がどう違っているか、などの様々な視点から HE の分析を行うことができる。こうした機能を“System B”は有するが故に作業開始前の KYT ツールとしての利用、ベテランから新人への技能伝承への利用も可能と述べた所以である。

3) “System C”⁴⁾；

“System C”は、オペレータシミュレータと HMI シミュレータの 2 種類のシミュレータを同時に動作させ、作業員が作業手順に基づき、例えば、ある作業終了後に制御室内の計器盤の位置に移動、計器盤上のデジタル計器から指示値を読み取り、操作盤に移動、その指示値に従って操作盤にあるレバー式の操作スイッチをオンからオフに切り換え、次の作業に移っていくというような一連の作業の中での HE 率と作業時間、作業員動線移動距離、視線移動距離などの作業員負担指標などを分析するツールである。

オペレータシミュレータでは、作業員の作業手順に基づく行動を図 17 に示した Petri Editor の編集画面を介してペトリネット形式で表現していく。ペトリネットは、プレース（図 17 で○）、トランジション（図 17 で | ）、アーク（図 17 で→）の組み合わせにより、手順の流れを作業員行動ルールとして表現するものである。また、手順データには手順書に記載された上位レベル（例：**系が正常であることを確認する）、上位レベルをより下位レベルに分解した中位レベル（例：**表示計が**以上であることを確認する）、さらにその下位レベル（例：移動する、思い出すなど）と複数の階層から成っている。図 17 に示した Petri Editor 編集画面では一つのウィンドウをシートと称し、同一のシートには同じレベルのタスクを入力するものとする。このシート上のプレースを下位のシートと関連付けることで手順データの階層性を表現していくことができる。

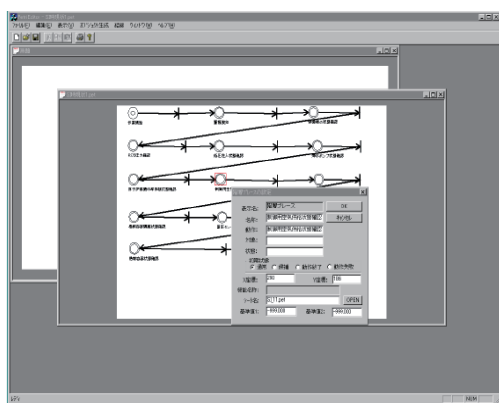


図 17 Petri Editor 編集画面

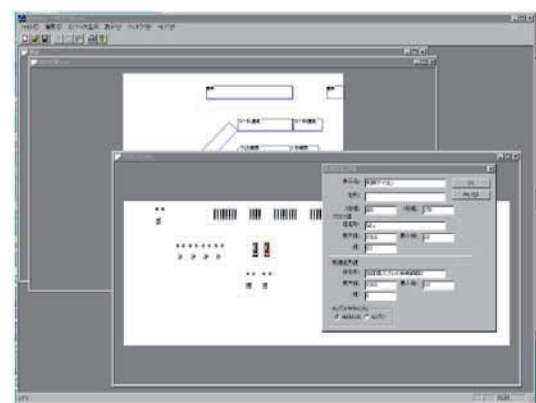


図 18 HMI Editor 編集画面

HMI シミュレータでは、HMI データを図 18 に示した HMI Editor 編集画面を介して構築していく。HMI も、例えば、中央制御室→制御盤→各装置というように作業手順データと同じように階層性があり、その階層レベルに合わせて構築する必要がある。操作方法は、Petri Editor と同様である。

次に Petri Editor、HMI Editor によって定義された作業員の行動と HMI との相互作用を模擬するためのオペレータシミュレータと HMI シミュレータを同時に起動、動作させる。図 19 に相互作用シミュレーション時の画面を示した。画面左側ウィンドウにオペレータシミュレータで今、作業員はどういう行動しているかが示され、右側ウィンドウでその行動における作業員の位置が右下隅に赤点で、左側には操作盤内での作業員の最大視野と右側上部に最適視野が示されている。

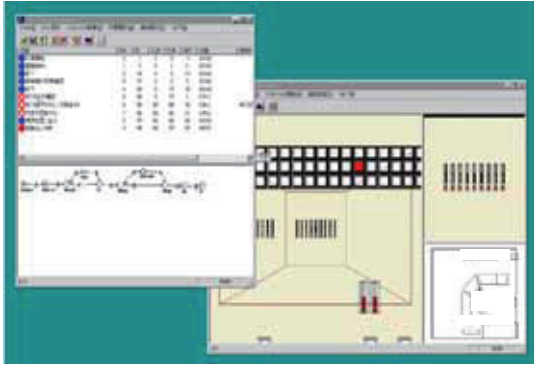


図 19 相互作用シミュレーション時の画面

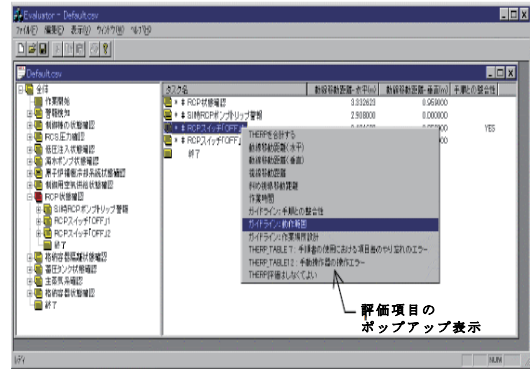


図 20 Analyzer による分析評価画面

相互作用シミュレーション終了後、HMI 分析評価の段階で使用するのが Analyzer である。図 20 に示した Analyzer の分析評価画面にあるように、ポップアップメニューから動線移動距離(水平、垂直)、視線移動距離(水平、垂直)、斜め視線移動距離、作業時間や THERP 評価などを選択し、その選択評価項目についての分析結果が得られることになる。

IV. 結言

原子力プラントなどでの運転・保守などの作業を対象に、HE に関する定量的な事前／事後分析・評価を容易に行える 3 種類の分析・評価ツールの実行環境を構築し、各々の動作を確認した。HF に関する高度の専門知識がない人でも、作業手順書に基づく作業や作業員と HMI との相互作用を HF の観点から定量的／客観的分析・評価、HE 防止策検討、HMI 改善設計などが可能となる。今後は、現実的な課題設定によるツールの有効性検証を実施していく所存である。

参考文献

- 1) U.S. Nuclear Regulatory Commission : "Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications", NUREG/CR-1278, 1983
- 2) U.S. Nuclear Regulatory Commission : "Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in US Commercial Nuclear Power Plants", WASH-1400(NUREG-75/014), 1975
- 3) 坂上聡子、大井忠 : "プラント機器保守作業向け HE 評価システムの開発", 電気学会全国大会講演論文集, Vol.2003, 7S16, 2003
- 4) 坂上聡子、寺下尚孝 : "産業用ヒューマンインターフェース", 三菱電機技報, Vol.76, No.8, 2002

(平成 23 年 3 月 31 日受理)