

# 原子力発電所向け人間工学設計支援システムの開発

Development of human factors engineering design support system for nuclear power plants

三菱重工業

真塩 健二

Kenji MASHIO

Member

## Abstract

Human factors engineering process is applied in design phase from planning to commission and operation. Twelve elements of human factors engineering need to be linked closely between each information necessary for each element implementation. When a design information is changed, each element needs to be reevaluated in the design process.

A design support system for the human factors engineering process, developed and utilized internally by Mitsubishi heavy industries, LTD, is introduced in this paper. This system integrates each information concerning human factors, archives and allows practitioners to manage human factors information in design process execution. This system also allows practitioners to identify what human factors activities need to be reevaluated when design or condition changes are occurred during plant life cycle.

**Keywords:** human reliability analysis, human performance, human error, simulator, human factors

## 1. はじめに

人間工学プロセスは、原子力発電所の新設設計に適用されている。また、運転開始後の既設においても、設計変更や改造工事が発生した際に、人間工学的観点からヒューマンパフォーマンスに影響を及ぼす範囲を特定し設計へ取り込んでいくことが求められている [1]。Fig.1 に典型的な人間工学設計開発プロセスを示す。

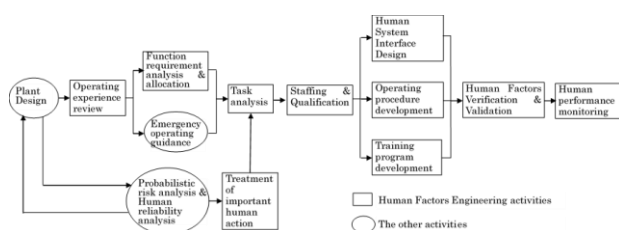


Fig.1 Human Factor Engineering Process [2]

Fig.1 に示す通り、人間工学プロセスは設計の計画段階から、試運転、プラント供用中までのプラント設計開発ライフサイクルを通じて適用され、計画設計段階においても、プラント安全解析、システム設計、設備設計、その検証及び妥当性確認など、人間工学プロセスにおいて多くの情報インタフェースが発生する。

特に、制御盤インタフェース設計、運転手順書設計、教育訓練計画などの人間工学プロセスにおいては、使用する情報を体系的に管理することが求められる。

また、Fig.2 に示す通り、中央制御室を始めとしたマンマシンシステム或いは運転手順書等のソフトウェアでは、人間工学プロセスの情報を直接使用することから、これら情報を体系的に整備しておくことが、それらの設計管理に必須となる。

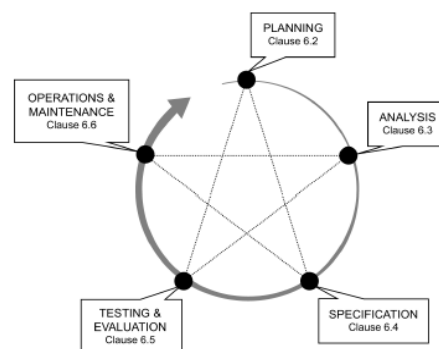


Fig.2. Engineering process model [3]

当社では人間工学プロセスにおける情報を一元的に管理する、人間工学設計支援システムを開発し、実務に適用してきているので、その概要を紹介する。

## 2. 人間工学設計支援システム

### 2.1 システムの構成

Fig.3 にシステムの構成図を示す。人間工学プロセ

スの各エレメントの情報をエレメント毎にデータベース化し、また、Success Path やタスクなど、各プロセス間を横断するデータをキーに検索、特定する機能を設け、人間工学上の課題（HED）に対する原因究明や設計改善を迅速に特定できるようにしている。

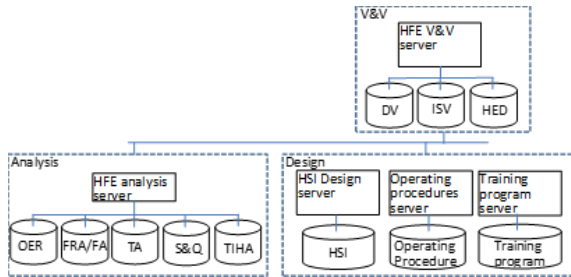


Fig.3 Overall system configuration

## 2.2 取り扱う情報

人間工学設計では、規制や人間工学ガイド[1][2][3]で、以下12エレメントの情報を取り扱うことが求められている。

- a. Program management plan (PMP)
- b. Operating experience review (OER)
- c. Function requirement analysis and function allocation (FRA/FA)
- d. Task analysis (TA)
- e. Staffing and qualifications (S&Q)
- f. Treatment of important human actions (TIHA)
- g. Human system interface (HSI) design
- h. Operating procedure development (OPD)
- i. Training program development (TPD)
- j. HFE verification and validation (V&V)
- k. Design implementation (DI)
- l. Human performance monitoring (HPM)

本システムは、人間工学プロセスをどのように実行するか、のフレームワークを具体的に運用する設計支援ツールであることから PMP は不要とし、また、DI や HPM は要求情報が限られ、OPD, TPD は HSI Design を代表として展開可能であることから不要とし、以下情報を取り扱っている。以下に個々説明する。

- Operating experience review (OER)
- Function requirement analysis and function allocation (FRA/FA)
- Task analysis (TA)

- Staffing and qualifications (S&Q)
- Treatment of important human actions (TIHA)
- Human system interface (HSI) design
- HFE verification and validation (V&V)

## 2.3 OER

OER の目的は、参照プラント又は類似適用技術（他産業を含む）の事例を調査し、設計開発の目的とする対象設備に適用する良好事項及び改善事項を設計考慮事項として特定することである。

Fig.4 に OER の全体プロセスを示すとともに、Table 1 にインタフェース情報を含めた、OER に関連する設計開発情報を纏めたものを示す。

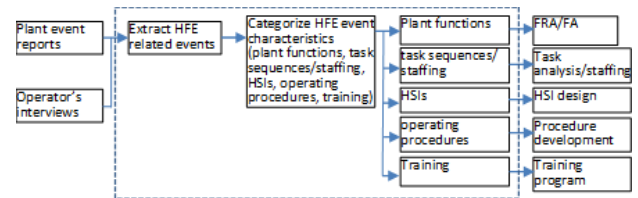


Fig.4 OER process

Table 1 OER database

INPUT	OER process		OUTPUT	
INPUT sources (by event)	HFE related events	Event descriptions/ correspondences for this event	Design corresponden ce/ strategies	Assigned HFE element for further considerations
AAA.BB.C C-1	H-AAA.BB.C C-1	...	Consider to put tag ID on each switch not to select the different switch	HSI design
AAA.BB.C C-2	H-AAA.BB.C C-2	...	...	FRA/FA Operating procedure

## 2.4 FRA/FA

FRA/FA の目的は、発電所の目標（安全目標や発電目標）を司る上位レベルの機能、その機能を達成するために必要なサブ機能、系統、及び主要機器を明らかにして、それぞれのサブ機能、系統、及び主要機器の階層経路（success path）毎に自動、手動、又は両方（自動手動のコンビネーション）を人間の特性や機械（システム）側の技術的制約を含めて決定することである。ここで、上位レベルの機能を達成するために、複数のサブ機能、系統、主要機器が樹形図的に展開されることから、これを機能階層図、及びそれぞれの上位レベル機能、サブ機能、系統、主要機器の一連の各



INPUT sources (Scenarios/Events)	Task sequence					
	Time	Tasks (:): Duration	Subtask (:): Duration	Interactions	Related success path	Descriptions/Remarks (complexities/task target)
LOCA	00:00	Task 1 (5 min.)	Sub-task 1-1 (2 min.)	-	Success path 1	...
	00:01		Sub-task 1-2 (3 min.)	Sub-task 1-1	Success path 1	...
	00:02	Task 2	...	...	...	...
	...	...	...	...	...	...

Table 5 TA database (TTA)

INPUT sources (Tasks/Sub tasks)	TTA						
	Descriptions	Information	Control	Staffing number/s/ qualifications	Work-place	Environment	Task support
Task 1	...	Parameter A	A-pump	RO	MCB(MCR)	MCR	N/A
Task 2	...	...	...	...	...	...	...

Table 6 TA database (CWLA)

INPUT sources (Tasks/Sub tasks)	SWLA						
	Descriptions (Necessary information and tools)	Task Complexities	Physical effort	Cognitive effort	NASA TLX score (optional)	Influence factors to HTA, OSTA, TTA	Remarks
Task 1	...	High	Physical movement	High demand	6.5	Add complexities to OSTA Add AAA to TTA	N/A
Task 2	...	...	...	...	...	...	...

## 2.6 S&Q

S&Q は、タスク分析の結果（場合により、OER 等の他の HFE 分析のアウトプットも含む）により、プラント運転対応上必要なタスクを遂行するために必要とされる要員について、シフトローテーション等も考慮して、組織体制が備わっていることを確認することを目的とする。

運転組織体制については先行プラントの経験や法令規則に基づき、先行して独立に設定される場合があり、その設定条件で人間工学的観点からも妥当であることを確認する。

Fig.7 に S&Q の全体プロセスを示すと同時に、Table 7 にインタフェース情報を含めた、S&Q に関連する設計開発情報を纏めたものを示す。

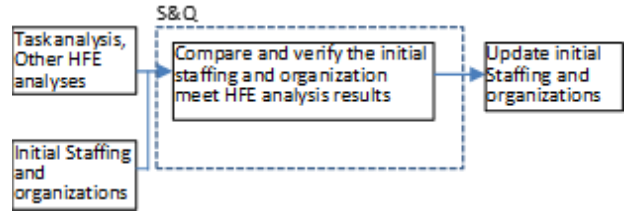


Fig.7 S&Q process

Table 7 S&Q database

INPUT sources	S&Q Comparison				Evaluations & conclusions		
	Operator 1 (Reactor)	Operator 2 (Turbine/auxiliary)	Supervisor	Local operators	Evaluations	Conclusions	Rationales
Initial Staffing and organizations	1	1	1	2	From TA results, Two reactor operators are needed to perform Task 1 (SP112)	Refine the organization by following organization numbers based on the evaluations.	Operator 1: 1 Operator 2: 1 Supervisor: 1 Local operators: 3
Task analysis	2	1	1	3			
OER	1	1	1	3			

## 2.7 TIHA

TIHA は、安全解析、有効性評価で運転員に期待しているタスク（重要なタスク）について抽出を行うとともに、これらを他の人間工学プロセス（分析や設計）へ取り込むことを目的とする。

安全解析、有効性評価は先行して独立に実施される場合があり、人間工学プロセスにおいて想定条件（設計初期の設定情報）が妥当であることを確認するとともに、人間工学分析を通じて、各設計へのインプットとして展開する。

Fig.8 に TIHA の全体プロセスを示すと同時に、Table 8 にインタフェース情報を含めた、TIHA に関連する設計開発情報を纏めたものを示す。

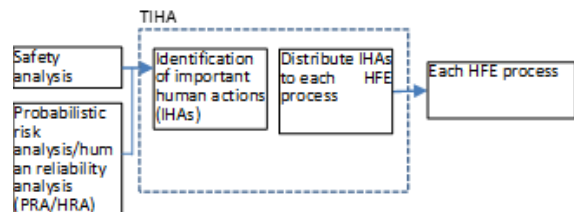


Fig.8 TIHA process

**Table 8 TA database (TIHA)**

INPUT sources	TIHA			HFE process to be refined	
	IHAs	Assumptions	References (Specific citations)	HFE area to be distributed	Requirement (what to be incorporated)
Safety Analysis Results	D-IHAs-1	...	...	TA(OSTA)...	...
	D-IHAs-2	...	...	...	...
	D-IHAs-3	...	...	...	...
PRA/HRA Results	...	...	...	...	...

## 2.8 HSI 設計

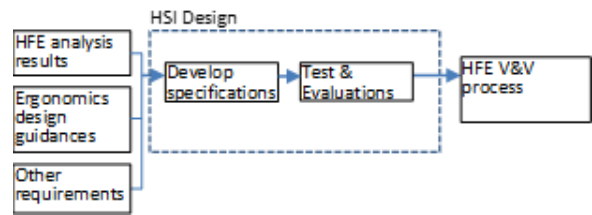
HSI 設計では、適用する計測制御装置の技術的性能（実現機能）や制約を考慮しながら、搭載するシステムの要件や規制要件などに適合したマンマシンシステムの設計を行うことを目的とする。システム要件や規制要件の一部となっている人間工学的考慮の観点からは、人間工学設計ガイド（文字の大きさ、色の使い方など、人間の身体形状や特性を考慮したマンマシン設計原則類）の適用の他、プラントの要求や誤操作防止の観点から具体的なコンテンツレベルでの設計要求を HSI 設計への考慮事項として HSI 設計に取り入れる。

Fig.9 に HSI 設計の全体プロセスを示すとともに、Table 9 にインタフェース情報を含めた、HSI 設計に関連する設計開発情報を纏めたものを示す。なお、TIHA は基本的に人間工学分析へフィードバックし、タスク遂行のための HSI 設計要求としてその他の人間工学分析経由で要求が特定されるため、その他の人間工学分析で取り扱われない特別な設計要求などがあれば、追加される可能性はある。

## 2.9 HFE V&V

HFE V&V では、設計仕様(HSI, Operating procedure, 訓練プログラム)が、人間工学設計ガイドに合致しているか、HFE 分析でのタスク遂行のための想定条件、要件に合致しているか、を検証すること (Design Verification, DV という)、また、統合システム (マンマシン、想定する運転員数や訓練プログラムで訓練された要員、適用する手順書) の妥当性 (Integrated System Validation, ISV という) を確認するため、実際の環境を模擬したシミュレータ等で想定される要員配置及び適用される手順書を用いて、想定する運転シナリオを模擬して、パフォーマンス及び達成度を評価する。

Fig.10 に DV の全体プロセスを示すとともに、Table 10 にインタフェース情報を含めた、DV に関連する設計開発情報を纏めたものを示す。また、Fig.11 に ISV の全体プロセスを示すとともに、Table 11 にインタフェース情報を含めた、ISV に関連する設計開発情報を纏めたものを示す。



**Fig.9 HSI design process**

**Table 9 HSI design database**

INPUT sources	HSI design			Test and evaluations	
	Requirements analysis	specification development		Verify effectiveness and integrations	Final specifications
OER	Extracted requirements	Applied objectives	Specifications	Verify effectiveness and integrations	Final specifications
	H-AAA.BB.CC-1 Consider to put tag ID on each switch	Switches in MCR, local stations	Develop unique ID template and assign tag ID on each switch name list	(Develop check lists concerning effectiveness and integrations)	Need to adjust tag ID numbers to meet plant name plate policy.
FRA/FA	(Automation) Monitor parameter XXX for SPI-1-1 health check	The Operational VDU in MCR	Incorporate XXX in Display YYY in the O-VDU specification	...	...
TA (TTA)	Assign parameter aaa with switch a as MCR display information	Present aaa with switch a on the Operational VDU in MCR	Incorporate aaa with switch a on the same Operational VDU display in MCR	...	...
S&Q	Staffing base: Operator 1: 1 Operator 2: 1 Supervisor: 1 Local operators: 3	Workplace layout, VDU numbers	Incorporate operation console layout and display numbers.	...	...

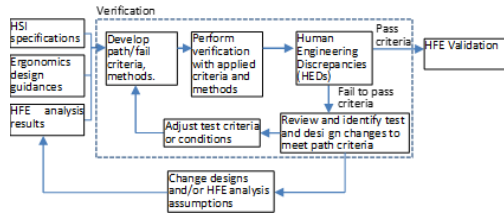


Fig.10 HFE DV process

Table 10 DV database

INPUT	HFE design verification (Path/fail criteria)				HFE design verification (Results)			
	Ergonomics verifications		Task support verifications		Ergonomics verifications		Task support verifications	
INPUT sources (Design specifications)	Guidance-1	Guidance-2	TTA Task 1 (SP112)	OSTA D-IHAs-1 (SPXX)	Guidance-1	Guidance-2	TTA Task 1 (SP112)	OSTA D-IHAs-1 (SPXX)
Control room layout	(Guidance descriptions and provide identifications in design specifications)	...	(Verify available control/parameters staffs, and task support tool identified in TTA in design specifications)	(Verify all necessary information for monitoring and control executions in control room specifications.	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...

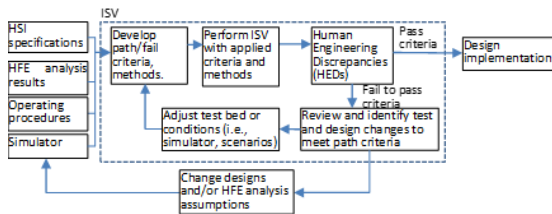


Fig.11 ISV process

Table 11 ISV database

INPUT	Sampling dimensions (path/fail criteria)				HFE design verification (Results)			
	Performance evaluation criteria		Scenario assumptions based on design specifications and HFE analysis results		Performance evaluation 1 (Achievement checklists)		Performance evaluation 1 (Workload/Situation awareness)	
INPUT sources (Scenarios)	Human actions	Time required	Workplace	Staffing	Guidance-1	Guidance-2	NA SAG	Remarks / Observations
LOCA Step-1	Incorporate critical human actions which	XXX from event start.	MCR	MCR staffing number	...	...	6.5 5.4	...

INPUT	Sampling dimensions (path/fail criteria)				HFE design verification (Results)			
	Performance evaluation criteria		Scenario assumptions based on design specifications and HFE analysis results		Performance evaluation 1 (Achievement checklists)		Performance evaluation 1 (Workload/Situation awareness)	
INPUT sources (Scenarios)	Human actions	Time required	Workplace	Staffing	Guidance-1	Guidance-2	NA SAG	Remarks / Observations
...	need to be evaluated from TA results, including IHAs)	...	...	...	...	...	...	...
Step-2	...	...	...	...	...	...	...	...

### 3. おわりに

人間工学設計プロセスでは、プラントの計画から運転まで長期的に関連する情報を体系的に管理し連携する必要がある。当社では、人間工学プロセスの各エレメントで使用する情報、インタフェース情報を明らかにして、これらを個別レベルの情報で横断的に検索、特定し管理する人間工学設計支援システムを開発し適用している。このシステムにより、発生した事象の原因究明や改善（設計改善や分析の見直し）を迅速に行うことができ、また、設計変更が生じた場合、設備改造が生じた場合でも、人間工学プロセスの再評価を迅速かつ正確に行うことができるようにして、原子力プラントの安全性・信頼性の向上に活用している。

### 参考文献

- [1] 原子力規制庁、人間工学設計開発に関する設計及び検査ガイド（案），April, 2021
- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission. “Human Factors Engineering Program Review Model”, November 2012
- [3] IEEE Standard Association, “IEEE Recommended Practice for the Application of Human Factors Engineering to Systems, Equipment, and Facilities of Nuclear Power Generating Stations and Other Nuclear Facilities, April 2020