2022年春の年会

ヒューマン・マシン・システム部会セッション

PRA における人間信頼性解析の現状と課題
Human Reliability Analysis in PRA: Current Status and Issues

（3）HRA のための人間信頼性データ収集方法の開発

(3) Development of a Human Reliability Data Collecting Method for HRA

*長谷川 尚子[1]，桐本 順広[1]，佐相 邦英[1]
[1]電力中央研究所

1. 人間信頼性データ収集の必要性

確率論的リスク評価（probabilistic risk assessment：PRA）に代表される安全性評価アプローチは，原子力プラントの設計を超えるような事故における不確実さの要素を考慮することで，従来の安全確保の取組みを，より強固にする役割を担う。原子力事業者が行う安全性向上評価では，最新知見を反映した PRA の実施が求められ，PRA モデルの高度化（例えば PRA 標準規格への適合確認や，国際的な先行事例に基づく専門家レビューの実施など）および入力パラメータの高度化（例えば機器故障率などのパラメータ推定におけるデータの精緻化）によって，PRA の質の向上が図られている。

原子力プラントの PRA の評価結果に極めて重要な影響を及ぼすのが，プラント運転員や作業員による人的過誤である。PRA において人間があるタスクに失敗する確率，すなわち人的過誤確率（human error probability：HEP）の評価を行うにあたっては，人間信頼性解析（human reliability analysis：HRA）が用いられる。上述の PRA と同様，HRA においてもその質の向上のため，モデルの高度化（例えば過酷事象状況下における HRA 分析モデルの整備）および人間の振る舞いの信頼性に関するデータ（以下，人間信頼性データ）の収集による入力パラメータの高度化が求められている。

2. 人間信頼性データ収集の必要性と課題

わが国の原子力事業者では，人間の認知・診断過程の HEP 評価の手法として CBDT 手法（the Cause-Based Decision Tree）[1]，操作実行過程の HEP 評価手法として THERP 手法（Technique for Human Error Rate Prediction）[2]が多用されている。両手法とも，想定されるエラーごとに nominal HEP が既定されており，CBDT 手法ではエラーの種類（例えば注意の失敗）ごとに 68 種類の nominal HEP が，THERP 手法ではインタフェースの様相を踏まえて想定された約 100 種類のエラーに対する nominal HEP が整備されている。あるタスクを実施するときの HEP は，この nominal HEP を利用して算出される。

しかしこれらの nominal HEP は，わが国の原子力事業者の実状に合っていない可能性がある。これらの nominal HEP の大半が欧米のエキスパートジャッジか他産業の人間信頼性データ（現実場面や訓練場面での人間の振る舞いおよびヒューマンエラーの件数や発生確率などに関するデータ）に基づいているためである[3]。また，THERP 手法は 1960 年代に開発されたため，制御盤等の高度化されたインタフェースに対応する nominal HEP が存在しない点も問題として挙げられる[4]。HRA の入力パラメータの高度化のためには，わが国の実状を反映した nominal HEP を整備する必要がある。

しかしながら，人間信頼性データ収集には大きく 2 つの課題がある。一つは，人間があるタスクを行う際に置かれている状況に関する情報も収集する必要性である。タスク実施者の判断や行動は，タスク実施時の状況（時間的余裕の無さ，手順書の有無など），実施者を取り巻く物理的環境（作業場所の暗さ，暑さなど）および社会的環境（作業チームの構成，チーム内のコミュニケーション，組織文化など）に大きく影響される。人間の信頼性を規定するこのような要因は，HRA において「文脈（context）」と呼ばれ，昨今では文脈を重視した人間信頼性評価を行う手法が HRA 手法の主流となりつつある（例えば CREAM, IDHEAS など）。タスクの失敗／成功情報だけでなく文脈情報も含めたデータ収集とは，例えば「タスク A 実施時に発生したエラー」ではなく，「手順書が整備されているタスク A を，暗い作業場所で実施した際に発生したエラー」と

いうデータとして収集することに相当する。

このような文脈情報も併せたデータの収集は，プラント運転時は無論，訓練場面においても困難が伴う。これまでにもプラント運転時の人的過誤事象の事象報告に基づくデータベース（CAHR など）の開発が試みられたが，文脈情報の記載が少なく，HEP 推定に利用可能な報告数に至らない[5]といった点が指摘された。より多くのデータを収集するため，最近では運転訓練シミュレータを用いた訓練時にデータを収集する手法が開発されている（例えば SACADA[6]や HuREX[3]）。これらの手法では，文脈情報として 90 種類程度の要因の有無や程度に関する情報を収集するため，データ収集に過大な負担が生じる懸念がある。当然のことながらデータ収集者には，これらの文脈要因の有無を判別する知識や経験，能力が必要となる。

二つめの課題は，人間信頼性データから HEP を求めるために，エラーが発生した回数だけでなく，エラーを発生させずにタスクに成功した回数もデータとして収集する必要性である。エラー発生回数とエラー無発生回数を合計した数値が HEP の分母に相当する。CBDT 手法や THERP 手法で既定されている nominal HEP を更新するには，この分母に相当する数，すなわち「エラーが発生する機会が何回あったのか」を明らかにしなければならない。例えば THERP 手法では「アナログメータから値を読み取る」「スイッチを操作する」といった各行為に対して nominal HEP が整備されているため，あるタスクの実施時にこのような行為が何回行われたかを運転員らの行動観察から求める必要があるが，これはたやすいことではない。

3. HRA のための人間信頼性データ収集方法の開発

わが国の原子力事業者では CBDT 手法および THERP 手法が多用されている現状を踏まえると，HRA における入力パラメータの高度化にあたっては，両手法の nominal HEP を我が国の実状に合わせて見直すことが必要となる。筆者らは，CBDT 手法および THERP 手法にて HRA を実施したタスクをシミュレータ訓練で実施した際の失敗／成功情報をデータとして収集し，このデータに基づいて nominal HEP を更新する方法を開発した[4]。HRA が実施されているタスクを対象とするため，当該タスクの文脈に関するデータは HRA 実施時に収集済みであり，データ収集時に改めて集める必要はない。また，認知・診断が行われた回数は，当該タスクをシミュレータ訓練で実施した回数に相当し，操作実施の回数については HRA を実施した段階で必要な行為等が書き起こされていることから，この情報が利用できる。本稿では，開発したデータ収集手法および nominal HEP の更新方法の概要を紹介する。

CBDT 手法および THERP 手法を用いて HRA を実施する際には，①ある特定のタスクに対する認知・診断過程および実行過程の各ステップ（タスクの決定・実施に必要な一連の手順）で発生が予想されるエラー要素（エラーの種類）の整理，および②各ステップにおける文脈要因（performance shaping factor: PSF）の評価を行う。CBDT 手法の PSF には作業負荷の高低や警報装置の有無など，THERP 手法の PSF にはストレスの高低がある。次に各ステップにおいて，先行ステップとの関連性（従属性と呼ぶ。認知・診断過程にはそれに先行するステップが存在しないため，当該の認知・診断過程とリカバリーとの関連性を指す。）およびリカバリーの失敗確率を考慮し，ステップごとの HEP を算出する。すなわち下式のとおりである。

$$\mathrm{HEP} = \text{nominal HEP} \times S \times R \times D$$

ここで S とはストレス係数，R とはリカバリーに失敗する確率，D とは従属性による調整係数である。

この分析の仕組みを利用し，以下のようにデータを収集して nominal HEP の更新を行う（図 1）。

(1) データ入力用のシート（HRA ステップ表）の作成

HRA 実施時に認知・診断過程および実行過程の各ステップで発生すると予想したエラー要素を，ステップごとに整理したデータ入力用シート（HRA ステップ表）を作成する。

(2) 対象タスクが含まれる事故シナリオの訓練における観察

運転訓練シミュレータを用い，HRA を実施したタスクが必要となる事故シナリオにて訓練を行う。訓練中，当該タスク実施時にエラーが観察されたら，訓練後の振り返りで聞き取りを行い，エラーが発生したステッ

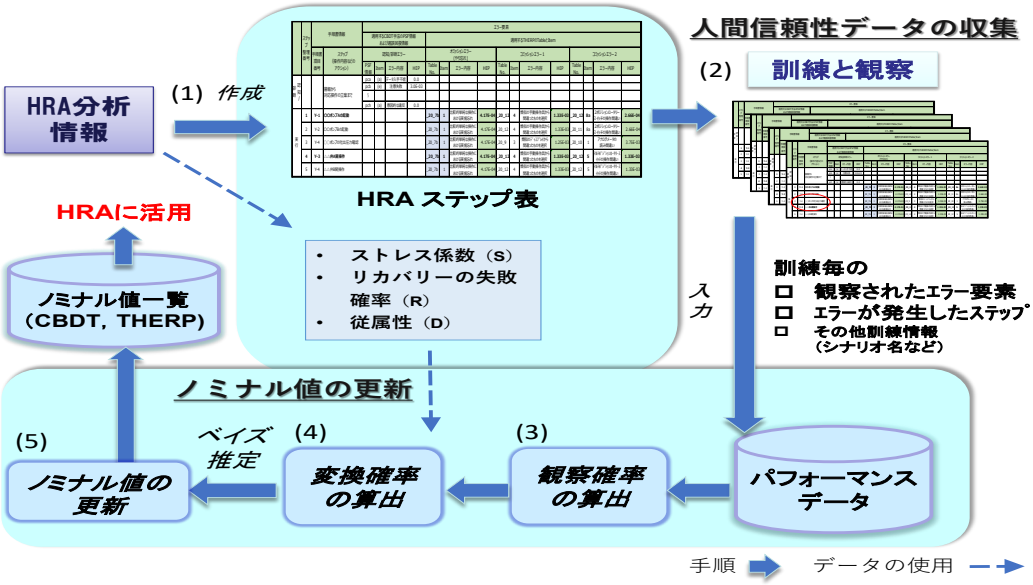

図 1　人間信頼性データ収集および nominal HEP 更新のためのフレームワーク [4]より一部改変

プとエラー要素を同定する。

(3) 観察確率の算出

対象タスクの訓練を複数回実施する中で観察されたエラー回数を各ステップのエラー要素ごとに集計し，訓練回数で除す。これにより，訓練時のエラー発生確率（観察確率）が算出される。

(4) 変換確率の算出

事故シナリオの訓練を実施中の運転員はストレスや従属性などの影響を受けているため，nominal HEP よりも高い確率でエラーが観察されるはずである。そこでそれぞれの HRA 手法で設定された，ストレス係数等が含まれた HEP の算出式を利用して，文脈の影響を排除したエラー確率（変換確率）を算出する。すなわち下式のとおりである。

$$\text{c-HEP} = \frac{\text{o-HEP}}{\text{S} \times \text{R} \times \text{D}}$$

ここで c-HEP とは変換確率，o-HEP とは観察確率である。

(5) ベイズ推定による nominal HEP の更新

試行回数と変換確率から求められるエラー数を観測データとし，各 HRA 手法における既存の nominal HEP を事前情報とするベイズ推定を用いて，エラー要素ごとに nominal HEP を更新する。

原子力事業者にて上記のデータ収集を簡便に行えるよう，筆者らは，Microsoft Excel がインストールされた Windows マシンで作動する人間信頼性データベースシステムを開発した。本システムを用いれば，上記の(2)以外はシステム上で実施できる。

4. 人間信頼性データ収集上の留意点

3.で述べた方法では，データ収集者が文脈情報のデータを収集する必要がないため，データ収集の負担は SACADA や HuREX と比較すると格段に少なくて済む。また，訓練シナリオの始めから終わりまで通してデータ収集を行う必要はなく，HRA で実施したタスクが実施される部分だけで良いため，タスク実施時にエラーが発生しても訓練後にはその部分だけを振り返り，エラー要素等を同定すればよい。一方，HRA 実施時に想定した状況と同様の状況下でデータを収集する必要があるため，データ収集時には主に以下の点に留意が必要である。

(1)　可能であれば HRA や PRA を実施した事故シナリオを訓練でそのまま実演した際のデータを収集する

HRA 実施時に想定したストレスレベルと異なる状況下で当該タスクを実施した際のデータを収集すると，変換確率の算出時に異なるストレス係数の状況下のデータが混ざることとなり，期待された値が得られない可能性がある。

(2) HRA 実施時に想定した熟達度の運転チームで訓練を実施する

熟達度の低い運転員の初期訓練でデータを収集すると，観察確率は高値になると予想される。そのため，このようなデータを nominal HEP の更新に用いるのは相応しくない。

(3) データ収集者は当該タスクの失敗と成功を判定できる者が担う

事故シナリオによっては，複数タスクを同時並行で実施する場面が出現し，HRA 実施時に想定していたステップどおりに進まないケースもありうる（例えば，行為が予定されていたタイミングよりも多少遅れて実施されるなど)。その場合，プラントに悪影響を及ぼさない時点までに当該タスクを完了させられれば成功とみなすが，プラント運転に熟達したデータ収集者でなければその判定が難しい可能性もある。例えば訓練インストラクターや，ある程度の運転経験を保有する者であればデータ収集を行えるだろう。

(4) エラー発生時には訓練直後に当事者から話を聞き，エラー要素を同定する

訓練直後でないと当事者の記憶があいまいとなり，データの精度が低下する。特に留意したいのは，実行過程のエラーとして観察されても，実際にはそれより前のステップもしくは認知・診断過程で発生したエラーが後のステップで顕在化したケースである。この場合には，当事者に HRA ステップ表を見せ，観察されたステップでのエラーだったのか，あるいはそれより前の段階でのエラーだったのかを聞き取りによって明らかにする必要がある。訓練時の録画でエラーを発見できたとしてもこの聞き取りができないため，エラーの観察は訓練時に行い，エラー発生時には訓練直後に当事者から話を聞くことが望ましい。

nominal HEP は，10^{-3} オーダーの数字である。つまり理論上は，エラーが発生するのは 1,000 回のうち 10 回未満（9 回以下）であり，そのようなエラーを観察するにはエラーなしの行為を 991 回以上観察する必要がある。このような取組みを行わなければ，わが国の実態を反映させた HEP の推定は不可能であるため，筆者らが開発した手法ではベイズ推定を取り入れ，比較的少ない回数での nominal HEP の更新を可能とした。また，HRA の実施結果を活用することで，運転員らの全行為を観察する必要性はなくなり，エラーが発生した時に聞き取りをするだけでデータ収集が可能となった。発生したエラーについて振り返ることは運転技能の向上にも役立ち，継続的なデータ収集は運転員の力量の確認にもつながる。PRA の評価結果から重要なタスクが特定できれば，訓練の重点化につながる可能性もある。運転訓練と HRA の連携によって，リスク情報の包括的な活用にも貢献できると考えられる。

参考文献

[1] EPRI, “Fire human reliability analysis guidelines,” EPRI 1023001 (NUREG-1921) EPRI/NRC-RES Final Report (2012).

[2] US Nuclear Regulatory Committee（NRC）, “Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications,” NUREG/CR-1278 Final Report (1983).

[3] W. Jung, J. Park, Y. Kim, S. Y. Choi, S. Kim, “HuREX – A framework of HRA data collection from simulators in nuclear power plants.” *Reliability Engineering and System Safety,* **194**, 106235 https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.07.036 (2020).

[4] 桐本順広・佐相邦英・長谷川尚子・長坂彰彦 “人間信頼性データベースの開発” 電力中央研究所報告 O19008 (2020).

[5] W. Preischl, M. Hellmich, “Human error probabilities from operational experience of German nuclear power plants.” *Reliability Engineering and System Safety*, **109**, 150-159 (2013).

[6] Y. J. Chang, D. Bley, L. Criscione, B. Kirwan, A. Mosleh, T. Madary, R. Nowell, R. Richards, E. M. Roth, S. Sieben, A. Zoulis, “The SACADA database for human reliability and human performance,” *Reliability Engineering and System Safety,* **125**, 117-133 (2014).

*Naoko Hasegawa[1], Yukihiro Kirimoto [1], and Kunihide Sasou [1]

[1]Central Research Institute of Electric Power Industry.