

## ABWR プラント運転訓練シナリオの 難易度客観評価システムの開発

### Development of Complexity Evaluation System for Characterization of Operator Training Scenario for ABWR

○一谷 賢治\* 高橋 信\* 若林 利男\* 岩垂 功二\*\*

○Kenji Ichitani\*, Makoto Takahashi\*, Toshio Wakabayashi\*, Koji Iwatare\*\*

\*東北大学, \*\* (株)BWR 運転訓練センター

\*Tohoku University, \*\*BWR Operator Training Center Corp.

キーワード: インタフェース(interface), ヒューマンファクタ(human factor), BWR 運転訓練  
(BWR operator training), ABWR(ABWR), 認知工学的複雑度(cognitive  
complexity)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01 東北大学大学院 工学研究科  
量子エネルギー工学専攻 若林・高橋(信)研究室 一谷賢治,  
Tel./Fax. : (022)-795-7921, E-mail: kenji.ichitani@luke.qse.tohoku.ac.jp

#### 1. 序論

発電を行うための燃料に放射性物質を用いている原子力発電プラントは「安全確保」が重要であり、一般のプラントに比べて非常に高いレベルの安全性、信頼性が求められる。原子力プラントは、運転員(人間)、プラント設備(機械)、そしてそれらの間に介在する制御盤(インタフェース)という三つの要素で構成されていると考えることができる。近年の計算機技術のめざましい発展に伴って、プラント設備には様々な改良が加えられてきた。また、プラント設備と同様に制御盤も初期の第一世代型制御盤から、ABWR(Advanced Boiling Water Reactor)型プラントに使用されている最新の第三世代型制御盤へと改良がなされてきている。原子力プラン

トの安全性を向上させるためには、プラント設備や制御盤の改良だけでなく、運用に携わるオペレータが適切な訓練を通して、十分な知識と経験を身につけることが肝要である<sup>1),2)</sup>。先日、東日本大震災の影響で発生した福島第一原子力発電所における事故の際も、運転員は厳しい状況の中で出来る限りの対応を行い、事故の拡大防止に全力を注いだ。

運転訓練を提供する立場にある事業者は、社会に対して訓練の妥当性を説明する責任を負っている。安心を社会に発信していく中では、主観的な情報以上に客観的な情報が重要となると考えられる。また、今後さらに質の高い訓練を提供するために新たなシナリオを追加するには、無原則に訓練内容を増やす事は非合理的である<sup>3)</sup>。限られた時間のなかで、効率的か

つ効果的な訓練プログラムを行うためには訓練シナリオを適切に選択しなければならない。その際に、訓練生のレベルによって異常事象への対応技術は大きく異なるため、訓練生に合った難易度のシナリオを選択することが重要である。そこで、客観的に訓練シナリオの難易度を評価する手法が必要とされている。本研究グループでは(株)BWR 運転訓練センター(BTC)との共同研究として、原子炉運転員訓練における異常事象対応訓練で用いられる異常事象シナリオの評価手法に関する研究を行ってきた。但し、これまで評価の対象としてきたプラントは従来型の BWR-5 型であり、今後の増えることが予想される改良型プラントの ABWR には対応していなかった。

本報告では、訓練シナリオの認知工学的複雑度指標に基づく客観的特徴付け手法を、ヒューマンインタフェースの充実が図られた ABWR 型シミュレータ(BTC5 号機)の訓練シナリオに適用した結果を述べる。

## 2. 先行研究

原子力発電所運転員の訓練プログラムの客観的評価手法の開発を行うために、本研究グループではBTCと協力しBWR-5タイプのプラントを対象として、認知工学的複雑度指標に基づく客観的特徴付け手法を提案し<sup>4)</sup>、その基本的な妥当性を確認している<sup>5)</sup>。認知工学的複雑度指標とは D.D.Woods により提唱された「大規模システムに対峙する人間が感じる複雑度」を、先行研究において原子力プラント運転で運転員が感じる複雑度に適用したものである<sup>6),7)</sup>。Dynamism(D)、Interaction(I)、Uncertainty(U)、Perceived Risk(R)の4つの指標を用いて定義され、操作履歴情報に基づいて算出する。具体的には、訓練時に記録されるログデータから属性値を算出し、属性値を D,I,U,R に関連づけて主成分分析を行い、それぞれの第一主成分を4指標値として評価するものである。

各属性値の算出方法は以下の3つの方法に分類できる。

- 訓練時に発生した警報から算出する属性値
- 訓練時の操作履歴から算出する属性値
- 訓練時のプラントパラメータから算出する属性値

異常発生時には1秒間に何十個もの警報が同時に発生することもあるため、運転員は発生

した警報に全て同じように対応するわけではなく、警報の発生状況によって負荷は変化すると考えられる(文脈依存性)。そこで、訓練時に発生した警報から属性値を算出する際には、Table 1 のようにカテゴリ分類と呼ぶ警報の重み付けを行う。カテゴリ分類による重み付け後、Table 2 のように、シナリオ中で発生したカテゴリ A または B に分類される警報の、警報データベースの合計値を、シナリオにおける属性値としている。

警報データベースとは、警報発生時操作手順書という各警報が発生した際の対応マニュアルの記載内容から、運転員にかかる認知的負荷に関連のある項目の数をカウントし、カウント数に応じて「各警報の属性値」を3段階に定めデータベース化したものである。

Table 1 警報の発生状況によるカテゴリ分類。  
Categorization of Alarms.

| 警報の発生状況 | 意味                          |
|---------|-----------------------------|
| カテゴリA   | 当該警報が異常事象対応において重要な情報源となる    |
| カテゴリB   | 当該警報が事象進展の流れの中で発生している       |
| カテゴリC   | 同質の意味を持つ警報と同時、または繰り返し発生している |
| カテゴリD   | スクラム後に必ず発生する警報がスクラム後に発生している |

Table 2 シナリオの属性値の算出方法。  
Attributes for Scenario Characterization.

| 属性値                        | 属性値の算出方法               |
|----------------------------|------------------------|
| 関連パラメータの数                  | カテゴリAとBに分類された警報の属性値の総和 |
| その他確認すべき項目                 |                        |
| インターロックの数                  |                        |
| 推定要因の数                     | カテゴリAに分類された警報の属性値の総和   |
| 現場確認の必要性の有無                |                        |
| 要因調査のための判断数                |                        |
| 警報が持つ重要度                   |                        |
| 工学的安全設備、給水喪失、放射性物質への関連     |                        |
| 事故時操作手順書、プラント緊急停止、直接制御の必要性 |                        |

評価システムにおいては警報のカテゴリ分類は半自動化されており、評価者はカテゴリ A に属する警報を分類するのみで、他のカテゴリについては自動で分類される。これにより評価者の主観を排除し、一貫した評価を得ることが可能となった。

さらに、BTC インストラクタが実務レベルで利用可能なものとするために、BWR-5 型シミュレータの訓練シナリオを対象としてシステム化を行った<sup>4)</sup>。

### 3. 対象システム(ABWR)

BWR型プラントの最新型であるABWRは、従来型のBWRに比して種々の改良設計を採用することで、安全性、信頼性、運転・保守性を向上に加え廃棄物量、被ばく量を低減するなど、プラントライフを通して経済的で使いやすいBWRプラントの決定版を目指して開発された。ヒューマンファクタには特に中央制御室の制御盤改良が大きく関わっており、運転員にかかる認知的負荷が小さくなるように設計されている。

例えば、大型表示盤の導入によって、運転員間の情報の共有、プラント状態の概要の把握が容易になった。従来のBWR型プラントでは、プラント全体の状態を把握するには、中央制御室の各計器やモニタに分散している情報を、運転員自ら移動して確認するか、他の運転員に確認してもらい報告を受けることで把握していた。ABWRでは、プラント全体の状態を把握するために必要な情報を集約した大型表示盤が中央制御室の中央正面に位置し、全ての運転員がどの位置からでも情報を確認できる。

また、ABWRでは警報の階層的分類が行われ(Fig.1)、警報認識の容易化と混乱防止が図られた。BWRでは全ての個別警報に固定警報窓を設けており、異常時には中央制御室内の何百という警報窓が点灯する場合もある。警報の重要度は、個別の警報一つ一つに対し、重要度が高い順に特赤、赤、黄、白の4段階で分類していた。一方ABWRでは、個別の警報をまとめた一括警報にのみ大型表示盤に固定警報窓を設けており、プラントの状態を素早く大まかに把握することに適している。原子炉制御盤のディスプレイを操作することにより、必要に応じて個別の警報を確認する。このように、運転員に必要以上に情報を与え、負荷を上げてしまうことがないよう考慮されている。警報の重要度は、一括警報を重要警報と系統警報に分け差が付けられている。

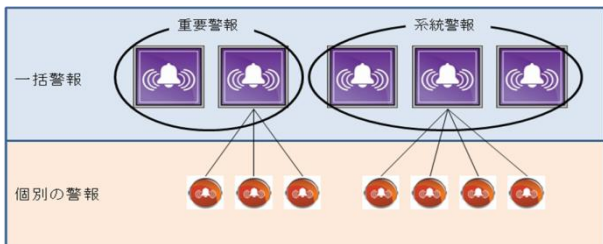


Fig.1 ABWRの警報の階層的分類イメージ. Hierarchical Categorization of Alarm in ABWR.

ABWRプラントの優れた性能は国内におけるこれまでの運転で確認されており、今後増加が見込まれるプラントである<sup>8)</sup>。プラントの増加に伴い、今後より多くのABWR型プラントの運転員が必要になると考えられ、訓練においてもABWRタイプのプラントを対象とする訓練が増えることが予想されている。これに伴い、シナリオ評価に関してもABWRタイプへの対応が必要となるが、評価において基本となる警報内容、意味付けが従来のタイプと違っているために手法としての見直しを行う必要がある。

### 4. 手法

本章では、客観的特徴付け手法に対するABWR型プラントの特徴の反映方法、大型表示盤のミミック表示によるカテゴリ分類の支援方法、Visual Basicを用いたシステムの改良方法について述べる。

#### 4.1 手法の全体構成

本手法の基本的な考え方は、先行研究<sup>4)</sup>で提案された手法と同じであるが、属性値の算出方法をABWRプラントに対応した形に改良することにより、ABWRプラントを対象にした訓練シナリオに対応している。手法の概要をFig.2に示し、以下では本研究で行ったABWRタイプのプラントへ対応するための変更点について述べる。

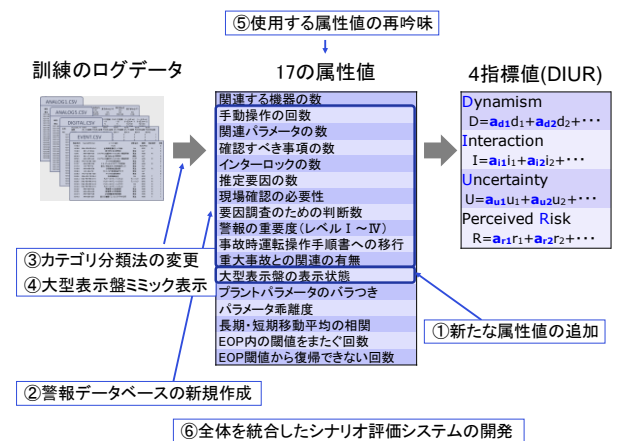


Fig.2 本研究の概要. Research Perspectives.

#### ① 新たな属性値の追加

ABWRでは従来のBWRに比べてヒューマンインタフェースの充実が図られ、大型表示盤の導入により運転員の認知活動が変化した。中央制御室において、大型表示盤は運転員がプラントの監視、状態の把握を行うための主要な情

報源であり、その表示状態は運転員の認知活動に大きく関わっていると考えられる。そこで、本手法では新たに「大型表示盤の表示状態」という属性値を追加し、大型表示盤の固定警報窓の状態をもとに、運転員にかかっている認知的負荷を客観的に評価する。

大型表示盤は中央制御室の中央正面に位置し、運転員はどの位置からもその表示を見ることが可能になっている。大型表示盤には一括警報の固定警報窓が設置されており、異常時にはこの窓が点灯することにより、運転員に視覚的に異常を知らせている。より多くの固定警報窓が点灯することは、より多くの異常が発生していることを意味し、運転員にかかるプレッシャーも大きくなると考えられる。特に Fig.1 の重要警報に当たる警報窓が点灯することは、プラントに深刻な異常が発生していることを意味する。そこで、大型表示盤の固定警報窓の状態から、運転員にかかるプレッシャーを客観的に評価する手法を考案した。

固定警報窓は Table 3 のように異常の程度によって赤・橙・緑の3段階で点灯する。その固定警報窓を重要度によって最重要警報窓・重要警報窓・系統警報窓の3グループに分ける。個別の警報の重要度を Table 4 のように全部で3段階に分け定義する。そして、警報窓の状態から感じるリスクを、Table 5 のように重み付けをして数値化する。

Table 3 大型表示盤固定警報窓の色の基準.  
Characterization of Fixed-Tile Alarms.

| 警報の分類 | 点灯色     | 分類の主な基準                             |
|-------|---------|-------------------------------------|
| 重要警報  | 赤       | トリップ論理成立 (2 out of 4)               |
|       | 橙       | トリップ論理の1チャンネルのみ成立                   |
|       | 緑       | トリップ論理のバイパス条件成立                     |
| 系統警報  | 赤(重故障)  | 系統/機器の機能喪失<br>(ポンプトリップ、コントローラ1系故障等) |
|       | 橙(軽故障)  | 系統/機器の異常<br>(流量低、コントローラ1系故障等)       |
|       | 緑(状態表示) | 通常と異なる状態の表示<br>(安全系操作SWの手動起動位置等)    |

Table 4 本研究で用いる個別警報の分類基準.  
Criterion for Alarm Categorization.

| 分類      | 分類の基準  |
|---------|--|
| 個別最重要警報 | 重要警報下層の個別の警報のうち4大イベント、スクラム要因、MSIV閉要因、原子炉水位の低下及びそれに伴う安全系機器の動作に当たる警報 |
| 個別重要警報  | その他の重要警報下層の個別の警報(出力変動を伴う機器の動作、トリップには至らないが重要な警報)                    |
| 個別系統警報  | 系統警報下層の個別の警報   |

Table 5 本研究で定義する警報窓ごとの重み付け係数. Weighting Factors for each Alarm Category.

|        | 赤(重故障) | 橙(軽故障) | 緑(状態表示) |
|--------|--------|--------|---------|
| 最重要警報窓 | 3      | 1.5    | 0.3     |
| 重要警報窓  | 2      | 1      | 0.2     |
| 系統警報窓  | 1      | 0.5    | 0.1     |

トリップ論理の1チャンネルのみ成立やコントローラ1系故障の際に橙点灯し、トリップ論理の2チャンネル以上成立やコントローラ2系故障等の際に赤点灯することから、基準となる数値が2倍となっていることに注目し、赤点灯は橙点灯の2倍の重みとした。また、インストラクタへのインタビューにおいて、「緑点灯ではほとんどリスクを感じない」との回答を得たので、緑点灯は赤点灯の10分の1の重みとした。さらに警報窓のグループ分けによって、最重要警報窓と重要警報窓の重みの値を、それぞれ系統警報窓の3倍、2倍とした。これらの重み付けの値については、インストラクタより「概ね妥当」という意見を得ている。

ログデータを読み込むと、訓練時にどの警報窓がどの色で点灯していたかを自動で判別し、Table 5 の数値を足し合わせることで属性値が算出される。

## ② ABWR の警報に対応した、警報データベースの作成

本研究では、訓練時に発生した警報から以下に示す9個の属性値を算出するが、そのもととなる警報発生時操作手順書が ABWR ではこれまでの BWR-5 とは内容が異なっているため、警報のデータベースの再構築を行った。

- 関連パラメータの数
- その他確認すべき項目の数
- インターロックの数
- 推定要因の数
- 現場確認の必要性の有無
- 要因調査のための判断数
- 警報が持つ重要度
- 工学的安全設備、給水喪失、放射性物質の放散の関連性の有無
- 事故時運転操作手順書、プラント緊急停止に移行、直接制御の必要性

本研究では、ログデータに記録される 3340 個の ABWR 全警報について、先行研究<sup>4)</sup>と同様の基準で、警報発生時手順書に記載された各属性に関連のある情報(Fig.3 の赤字で示すような記載内容)の数をカウントし、警報の分布から、各警報の属性値を「0」「1」「2」の3段階で数量化する。

具体的には、手順書に記載のある数が 0 個であれば、その属性に関する寄与は「無い」とし警報の属性値を「0」とし、手順書に記載のある数が 1 個以上である警報を、その属性に関する寄与が「小さい」と「大きい」の二つにできるだけ 2 等分に近くなるよう大別し、それぞれの警報の属性値を「1」「2」とする。この値をデータベース化しておき、③で述べるカテゴリ分類(警報の重み付け)を行うことにより、シナリオの各属性値を算出する。

|  |                 |
|--|-----------------|
| 給水装置   | M/D 給水ポンプ(B) 停止 |
| インターロック  |                 |
| 給水ポンプ(B)トリップ<br>給水ポンプ(A)自動起動   |                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的<br/>ポンプの停止を知らせる。</li> <li>・設定根拠</li> </ul>  |                 |
| インターロックの数:カウント数2   |                 |
| 1. 警報の確認   |                 |
| 2. 警報発生に関連するパラメータの確認   |                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 水位</li> <li>2. 給水量</li> <li>3. 復水量</li> </ul>  |                 |
| 関連パラメータの数:カウント数3   |                 |
| 3. 対応操作を行う   |                 |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 給水ポンプ(B)が停止したことを確認する。</li> <li>2. 給水ポンプ(A)が自動起動したことを確認する。</li> <li>3. 弁の開閉状態を確認する。</li> <li>4. 事故時運転転操作手順書第~章の手順に従って対応する。</li> </ul> |                 |
| 確認すべき事項の数:カウント数3   |                 |
| 事故時運転転操作手順書への移行:カウント数1   |                 |

Fig.3 警報発生時操作手順書のイメージ図.  
Example of Alarm Handling Manual.

### ③ カテゴリ分類の方法の一部変更

原子炉運転員は発生した警報に全て同じように対応するわけではない。そのため、認知的負荷の適切な評価を行うためには、カテゴリ分類による運転員の認知活動に合った警報の重み付けが重要となる。BWR-5 型を対象にした先行研究<sup>4)</sup>では、Table 1 のようにカテゴリを 4 つに分けていたが ABWR のログデータには個別の警報だけでなく、Fig.1 の一括警報に当たる警報も一部記録されるようになった。一括警

報は個別の警報と同様には扱えないが、プラントの異常状態を端的に表しているため、カテゴリ分類時に訓練時に発生した個別の警報と共に時系列に並べることで、異常事象の進展の様子を把握しやすくなると考えられる。そこで本研究では、新たにカテゴリ E を定義し、一括警報をここに分類する。

一括警報には警報発生時操作手順書がないため、警報の属性値を数量化することができない。よって、シナリオの属性値算出方法は先行研究と変えず、Table 2 の通りとする。

また、先行研究<sup>4)</sup>では、BWR-5 型プラントでの警報の重要度別分類で特赤や赤に分類される警報を、事故・主要トリップ警報としてカテゴリ A に分類していた。しかしながら、ABWR の警報は重要度の分類法が BWR-5 と変わったため、本手法ではここでも Table 4 の個別の警報の分類を用いてカテゴリ A に自動で分類する警報を定める。Table 4 の分類の基準の通り、個別最重要警報と個別重要警報は異常事象対応において重要な情報源になると考えられる。そこで個別最重要警報と個別重要警報を事故・主要トリップ警報などの重要な警報として扱い、自動でカテゴリ A に分類することとした。

この警報カテゴリの分類は Fig.4 に示す分類インタフェースにより支援される。

| 時間   | Tag-ID      | 警報名称            | カテゴリ |
|------|-------------|-----------------|------|
| 0231 | ANN-RAD140  | L-2             | E    |
| 0231 | ANN-RGD431  | L-2外側(作動)系      | C    |
| 0231 | ANN-RGD432  | L-2内側(作動)系      | C    |
| 0231 | ANN-RGD421  | L-2内側(作動)系      | C    |
| 0231 | ANN-RGD422  | L-2内側(作動)系      | C    |
| 0231 | ANN-RD165   | 降圧トリップ          | A    |
| 0231 | ANN-RLD154  | RC圧作動(2系)       | C    |
| 0231 | ANN-RAD146  | RC圧作動           | E    |
| 0231 | ANN-RPD054  | タービトリップ         | B    |
| 0231 | ANN-TQD156  | 非著トリップ油圧低トリップ   | D    |
| 0232 | ANN-RGD441  | ECOS/ESF区 分1L-2 | A    |
| 0232 | ANN-RGD442  | ECOS/ESF区 分2L-2 | C    |
| 0232 | ANN-RGD443  | ECOS/ESF区 分3L-2 | C    |
| 0232 | ANN-RGD444  | ECOS/ESF区 分4L-2 | C    |
| 0232 | ANN-EGD114  | 発電機電圧/周波数異常     | D    |
| 0232 | ANN-ESG1178 | 発電機励磁電力異常自動トリップ | A    |
| 0234 | ANN-RPD2504 | サイリスタ故障/除外      | D    |
| 0234 | ANN-RPD055  | 発電機トリップ         | B    |
| 0234 | ANN-EAD242  | 発電機励磁装置異常       | D    |
| 0234 | ANN-EAD610  | 発電機励磁装置異常       | D    |
| 0234 | ANN-EGD118  | 発電機シーケンストリップ    | D    |
| 0234 | ANN-EGD120  | 発電機励磁装置異常トリップ   | B    |
| 0234 | ANN-EHD165  | 発電機励磁装置異常トリップ   | D    |
| 0234 | ANN-EGD119  | 発電機励磁装置異常トリップ   | B    |
| 0234 | ANN-RPD469  | ATWS(A)-L-2     | C    |
| 0234 | ANN-RPD470  | ATWS(B)-L-2     | C    |
| 0234 | ANN-RPD471  | ATWS(C)-L-2     | C    |
| 0234 | ANN-RPD472  | ATWS(D)-L-2     | C    |
| 0234 | ANN-RRD841  | ATWS(L-2)トリップ   | A    |
| 0234 | ANN-RRD842  | ATWS(L-2)トリップ   | A    |
| 0234 | ANN-RAQ214  | AR圧作動           | E    |
| 0234 | ANN-RRD842  | AR圧作動           | C    |
| 0234 | ANN-RRD472  | RIP(B)トリップ      | B    |
| 0234 | ANN-RRD476  | RIP(E)トリップ      | C    |

Fig.4 警報カテゴリ分類のためのインタフェース画面. Interface Window for Alarm Categorization.

#### ④ 大型表示盤のミミック表示

原子炉運転員は基本的に、発生した警報やプラントの主要なパラメータをもとにプラント状態を把握している。これら重要な情報は ABWR では大型表示盤に集約されている。

そこで開発した評価システムにおいては、運転員がプラントの状態を把握する主要な情報源である大型表示盤のミミック表示を行う機能を実装した。ミミック表示の例を Fig.5 に示す。この表示により訓練時に運転員が見ていた情報を可視化し、カテゴリ分類に必要な異常事象進展の状況の把握を支援することが可能となる。

このミミック表示は大型表示盤を忠実に再現しており、start ボタンを押すと、下部スクロールバー下に記した間隔でシナリオが再生され、主要なポンプ、弁、非常用炉心冷却装置 ECCS (Emergency Core Cooling System) の動作状況や、各パラメータの値が実際の大型表示盤と同じように動く。訓練時に運転員が見ていた情報を、後から何度でも再現できるのである。また、上部に各パラメータのトレンドグラフを表示している。各種パラメータの数値をクリックすることで、トレンドグラフにそのパラメータのトレンドを表示することができる。



Fig.5 大型表示盤のミミック表示. Mimic Display for Large Display Area.

#### ⑤ 使用する属性値の再吟味

先行研究<sup>4)</sup>で使用していた属性値の一部に対し、運転員の認知的負荷にあまり寄与していない等の問題が指摘されていた。そのため、従来の属性値を使用することは本当に適切であるかどうか吟味し、除外した方がよいと思われる属性値は、指標値の算出に使用しないこととする。

本研究で主成分分析によって各指標値の算出に用いる属性値は Table 6 に示した 14 個の属性値とする。なお、今回は指標値の算出に用いない属性値も、その属性値を算出する機能自体

はシステムに実装されており、評価者の判断次第で指標値の算出に用いることもできる。

Table 6 各指標の算出に用いる属性値. Attributes to be utilized for Indices.

| 指標値            | 利用する属性値  |
|----------------|--|
| Dynamism       | パラメータ変動のバラつき                                   |
|                | 長期・短期移動平均の相関                                   |
|                | 微候ベース操作手順書内の閾値を逸脱する回数                          |
|                | 微候ベース操作手順書内の閾値を逸脱し復帰できない回数                     |
| Interaction    | 関連パラメータの数                                      |
|                | その他確認すべき項目の数                                   |
|                | インターロックの数                                      |
| Uncertainty    | 関連する機器の数                                       |
|                | 推定要因の数   |
|                | 現場確認の必要性の有無                                    |
| Perceived Risk | 要因調査のための判断数                                    |
|                | 警報が持つ重要度                                       |
|                | 事故時運転操作手順書、プラントの急停止に移行する、直接制御の有無<br>大型表示盤の表示状態 |

#### ⑥ Visual Basic を用いた ABWR 型のログデータ出力形式に対応するシステムへ改良

以上の変更・改良を加えた手法により訓練シナリオの複雑度を算出できるようにシステムを改良する。ABWR シミュレータでは BWR-5 とログデータの出力形式が異なるため、様々なプログラミングの変更を加えた。

#### 4.2 インタフェースの構築

インタフェースの構築は Microsoft 社製の Visual Basic2010 を用いて行った。本研究で開発したシステムは、ABWR シミュレータの訓練シナリオのログデータから、指標値 (DIUR) を算出するシステムである。操作方法や手順、メインウィンドウは先行研究<sup>4)</sup>で開発されたものと同様とし、インストラクタが実務レベルで使用する際に、それぞれのシステムを使用する場合にも新たな操作の習熟が必要ないように考慮した。開発した評価システムの操作手順を Fig.6 に示す。

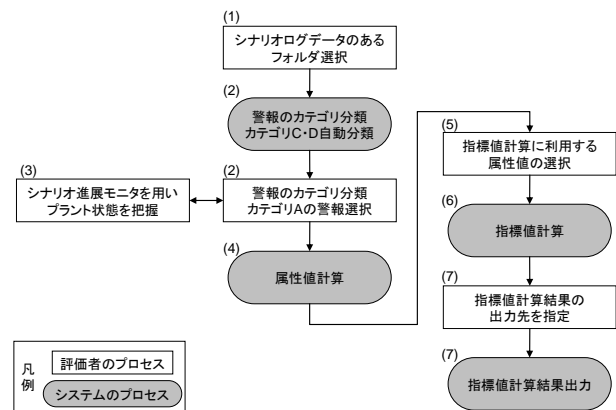


Fig.6 シナリオ評価システムの手順フローチャート. Procedure for Scenario Characterization.

- (1) 評価対象となるシナリオのログデータがあるフォルダを選択する。
- (2) ログデータから警報の発生情報を抽出し、警報のカテゴリ分類を行う。
- (3) 訓練時の機器の動作状況やパラメータのトレンドグラフといったプラント状態を表示する大型表示盤のミミック表示を利用し、評価者はカテゴリ分類を行う。
- (4) カテゴリ分類終了後、全ての属性値を計算する。
- (5) 各指標値の算出に利用する属性値を評価者の判断で必要に応じて取捨選択する。
- (6) (5)で選択された属性値を用い、主成分分析による指標値を計算する。
- (7) 最後に、指標値の計算結果を CSV 形式で出力する。

## 5. 適用結果と考察

### 5.1 対象シナリオ

本研究では、シミュレータを用いた運転訓練を対象に、訓練シナリオに対して標準的な対応操作を行った場合のログデータに基づいて、シナリオの特徴付けを行う。本研究で対象とするシナリオを Table 7 に示す。

Table 7 本研究で対象とするシナリオ。  
Scenarios utilized in the present study.

| 分類            | シナリオNo. | 名称               |
|---------------|---------|------------------|
| 手動スクラム対応      | 1-a     | 手動スクラム           |
|               | 2-a     | RFP4台順次トリップ      |
| 給水喪失対応        | 2-b     | T/D RFP 2台給水停止   |
|               | 2-c     | RFP全台給水停止        |
|               | 2-d     | HPCP全台トリップ       |
| 格納容器内冷却材漏えい対応 | 3-a     | 格納容器内冷却材漏えい(中規模) |
|               | 3-b     | 格納容器内冷却材漏えい(大規模) |

シナリオは ABWR シミュレータにおいて代表的なものを選択した。手動スクラム対応、給水喪失対応、格納容器内冷却材漏えい対応の 3 グループに分類することができ、これらのシナリオは、いずれも実際の訓練で用いられる頻度が高い重要なシナリオである。

### 5.2 算出した属性値

本手法において算出された属性値の結果を Table 8 に示す。ここで、シナリオ No.1-a の「関連する機器の数」が 38、「パラメータ変動」が 391 となっているが、これは「パラメータ変動」による負荷が「関連する機器の数」による負荷の 10 倍以上あるということを意味しているわ

けではない。あくまでもシナリオ間で同じ属性値同士を比較するための数値である。

Table 8 対象シナリオの属性値. Attribute Values for each Scenario.

| 属性値        | シナリオNo. |      |      |      |     |      |      |
|------------|---------|------|------|------|-----|------|------|
|            | 1-a     | 2-a  | 2-b  | 2-c  | 2-d | 3-a  | 3-b  |
| 関連する機器の数   | 38      | 45   | 44   | 44   | 57  | 64   | 66   |
| 確認パラメータ    | 7       | 47   | 36   | 40   | 87  | 66   | 77   |
| 確認事項の数     | 13      | 61   | 57   | 59   | 96  | 74   | 85   |
| インターロック数   | 8       | 39   | 30   | 32   | 61  | 36   | 38   |
| 推定要因       | 0       | 6    | 4    | 4    | 6   | 13   | 17   |
| 現場確認       | 0       | 2    | 1    | 1    | 3   | 0    | 0    |
| 要因調査の判断数   | 2       | 12   | 11   | 11   | 22  | 21   | 24   |
| 重要度        | 6       | 16   | 17   | 17   | 29  | 29   | 31   |
| 操作手順書      | 0       | 10   | 7    | 7    | 19  | 20   | 23   |
| 大型表示盤状態    | 50.2    | 59.9 | 60.3 | 60.3 | 85  | 95.1 | 97.6 |
| パラメータ変動    | 391     | 408  | 406  | 373  | 472 | 587  | 586  |
| 短期・長期移動平均  | 14      | 13   | 16   | 14   | 19  | 22   | 25   |
| EOP 逸脱     | 2       | 2    | 2    | 2    | 4   | 3    | 6    |
| EOP 復帰できない | 0       | 0    | 0    | 1    | 1   | 1    | 1    |

主成分分析はいくつものデータから共通する特性、傾向を抽出する手法である。データの数が少ないと、全体的な特性、傾向に反する例外があった場合に、計算の途中で算出する重み付け係数の値にその影響に左右されやすくなってしま<sup>9)</sup>。今回の 7 つのシナリオではデータが少ないため、重み付け係数は先行研究において算出した値を使用することとした。

### 5.3 算出した指標値

対象としたシナリオから算出した指標値を Fig.7 に示す。各指標値の値は相対評価で決定している。値が大きいほどその指標に関する難易度が高いことを表し、平均を 0 としている。

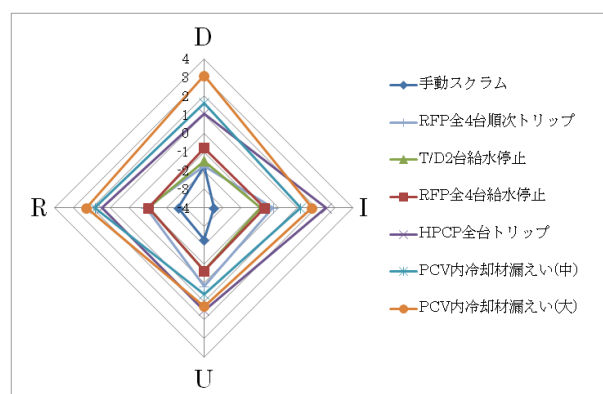


Fig.7 属性値より算出した各指標値. Indices for each Scenario.

この結果の妥当性を、2 つの側面から検証した結果を以下に示す。

## 1. 複雑度の大小関係が明確なシナリオによる比較

今回評価を実施した 7 つのシナリオは全てスクラムするシナリオであるため、単純にスクラムさせるのみという手動スクラムのシナリオが最も簡易なシナリオであるというのは明確な事実である。Fig.7 を見ると、手動スクラムシナリオの複雑度が、期待される複雑度の通り一番小さくなっていることがわかる。

PCV 内冷却材漏えい対応に分類されるシナリオでは、漏えいの規模が大きくなるほど複雑度が増加することは明確な事実である。Fig.7 のように本手法でも PCV 内冷却材漏えいを比較すると、中規模よりも大規模の方が各複雑度指標は上がっており、算出された指標値が期待される複雑度を的確に反映していることが示されている。

## 2. インストラクタの主観的な評価との比較

漏えいの含まれるシナリオは、原子力プラント運転において最も避けなければならない事象である放射性物質の外部拡散という要素に関わっている。PCV 内での漏えいであるため、この事象一つでは原子力発電所設計の際に熟考された何重ものバリアを突破して放射性物質が周辺環境に放出されるようなことはないが、その第一のバリアが破れたことによるプレッシャは大きいと考えられる。Fig.7 を見ると、本手法でも、運転員にかかるプレッシャが大きいだろうという予想の通り、PCV 内冷却材漏えいの R 値は他のどのシナリオよりも大きくなっている。本研究では ABWR 運転員の認知に関わる重要な要素として新たに追加した「大型表示盤の表示状態」の属性値を R 値の算出に用いているが、この結果からも追加した属性値が妥当であったことが示唆される。

給水喪失対応に分類されるシナリオの指標値を抜き出したものを Fig.8 に示す。凡例は水位の変動が小さいシナリオの順に上から並べており、水位の変動が大きいほど D 値が大きくなっていることがわかる。給水喪失対応のシナリオでは、給水量が減少し原始炉水位が下がるため、原子炉水位をいかに保てるかが重要である。よって水位の変動が激しいほど D 値が大きくなるという結果は妥当だと考えられる。

また、HPCP 全台トリップのシナリオの各指標値が大きくなっているのは、他の 3 つの給水喪失シナリオに比べて特に水位の低下が激しく、より多くの工学的安全設備が起動するため

と考えられる。工学的安全設備に関連する警報が発生するという事は、原子炉のリスクが高いことを意味し、運転員にかかる認知的負荷は大きくなると考えられるため、HPCP 全台トリップの各複雑度が大きくなる結果は妥当だと考えられる。

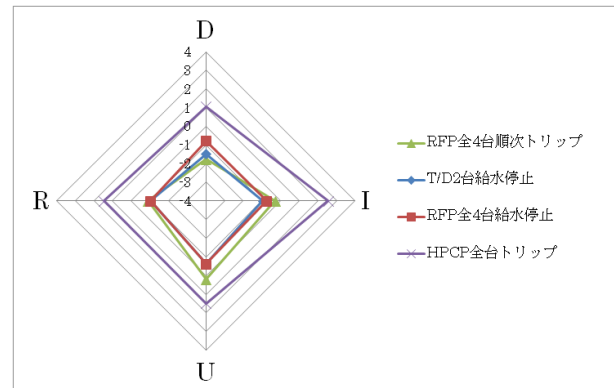


Fig.8 給水シナリオの各指標値. Indices for the Loss of Feedwater Scenario.

以上の結果から、本手法で算出した各シナリオの複雑度は概ね妥当であると考えられる。

## 6. 結言

本研究では、先行研究で提案された BWR-5 型シミュレータの訓練シナリオの認知工学的複雑度指標に基づく客観的特徴付け手法を、ABWR 型シミュレータの訓練シナリオに適用するために、手法の変更を行った。特に、ABWR において運転員の認知活動に変化をもたらした大型表示盤の情報を属性値に取り入れ、ABWR の特徴を反映した。

ABWR においてよく使われるシナリオに対して改良した手法を適用し評価を行った結果、今回対象としたシナリオの範囲においては、結果が概ね妥当であることを確認した。

本研究による訓練シナリオの客観評価システムを利用することで、新しく作成した訓練シナリオをどの訓練段階で採用すべきかの検討材料の一つとして使用でき、また現行ではインストラクタが決定している訓練シナリオの選定における検討材料とすることで、訓練の合理化と内容の充実が図れると考える。



## 7. 参考文献

- 1) E.Hollnagel: Understanding Performance Deviations, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Human Centered Technology for Nuclear Applications, 69/76 (2002)
- 2) S.Kunito: Man-Machine Interface systems and operator training program for ABWR in Japan, The 4th intentional topical meeting on nuclear thermal hydraulics, operations and safety, 41-D-1 to 41-D-5 (1994)
- 3) N.Moray: Advanced displays can be hazardous: the problem of evaluation, POST HCI '95Conference seminar on Human-Machine Interface in process control, 59/62 (1995)
- 4) 田嶋: BWR 運転訓練シナリオの客観的評価システムの開発, 修士学位論文, 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻 (2008)
- 5) 鈴木,高橋,若林: BWR 運転訓練シナリオ客観評価の対象データの拡張と感度分析, 日本原子力学会 2010 春の年会 D24 (2010)
- 6) D. D. Woods: "Coping with complexity: the psychology of human behavior in complex systems" in "Tasks, errors, and mental models" (L. P. Goodstein et.al.Ed), Taylor & Francis (1998)
- 7) 高橋,丹羽,北村: 大規模システムインタフェース評価における Complexity Reduction 規範, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, 2[3], 27/32 (2000)
- 8) 電気事業連合会: 電気事業のデータベース, (<http://www.fepec.or.jp/library/data/infobase/pdf/infobase2010.pdf>)
- 9) 小椋: Excel で簡単 多変量解析, 64/65,株式会社 講談社 (2006)