

シビアアクシデント演習ツールの改良

Improvement of the severe accident practice tool

川崎 郁夫 (Ikuro Kawasaki)*¹ 高木 俊弥 (Toshiya Takaki)*¹
山本 治宗 (Yoshinori Yamamoto)*² 池田 浩之 (Hiroyuki Ikeda)*²

要約 東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえて開発した、シビアアクシデント (SA) 時の発電所の原子力緊急対策本部対応を疑似体験できる SA 演習ツールにおいて、緊急時活動レベル (EAL) 判断基準の見直し等を反映して改良を行った。主な改良点は、EAL 判断基準の見直し等を踏まえた演習シナリオの新規作成、SA 演習ツールのスキップ機能追加等である。改良した SA 演習ツールを SA 研修に用いた結果、EAL 判断基準の変更点について研修受講者の理解を深めることができたことを確認した。

キーワード シビアアクシデント、演習ツール、緊急時活動レベル、警戒事態、施設敷地緊急事態、全面緊急事態、原子力災害対策特別措置法

Abstract We developed the severe accident (SA) practice tool based on lessons learned in the accident at the Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Reflecting the review of EAL criteria, we utilized the developed SA practice tool. Major improvements were the creation of new exercise scenarios based on the review of EAL judgment criteria and the addition of the skip function of the SA practice tool. As a result of using the improved SA practice tool for SA training, we confirmed that trainees were able to deepen their understanding about the changes in the EAL criteria.

Keywords severe accident, practice tool, Emergency action level, Alert, Site Area Emergency, General Emergency, Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故の安全対策のうち、「事故時の判断能力の向上(対策 12)」⁽¹⁾において、シビアアクシデント(以下、SA という)教育の更なる充実が求められている。

また、2013 年度から原子力災害対策特別措置法(以下、原災法という)⁽²⁾第 6 条の 2 第 1 項の「原子力災害対策指針」⁽³⁾において、原子力災害事前対策として緊急事態区分及び緊急時活動レベル(Emergency action level:以下、EAL という)が定められた。緊急事態区分の設定は、レベル 1「警戒事態(Alert:以下、AL という)」、レベル 2「施設敷地緊急事態(Site Area Emergency:以下、SE という)」、レベル 3「全面緊急事態(General Emergency:以下、GE という)」の 3 段階とされている。AL は 2013 年度に新規追加され、SE は従来の原災法第 10 条、GE は従来の原災法第 15 条、25 条に該当する。原子力発電所において事故が発生した場合は、発電所の原子力緊急対策本部の構成員

(以下、本部構成員という)がそれぞれの事象判断(EAL 判断)を迅速かつ的確に実施して、関係各所に通報連絡を実施しなければならない。

これらを踏まえて、本部構成員が SA 発生時に適切な対応ができるようになることを目的として、SA 理解のための効果的教育・訓練ツールの検討を行い、本部構成員自らがプラント構成および応答、EAL 判断基準等を知識として習得し、SA 時の原子力緊急対策本部対応を模擬体験できる SA 演習ツールを開発した⁽⁴⁾。

SA 演習ツールの訓練シナリオ用データは 2 種類あり、過去の防災訓練シナリオ解析⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾で実施した訓練データを加工して作成したものと、研修用として EAL の見直し内容を理解させるために作成したものである。

関西電力(株)の原子力防災研修(シビアアクシデント EAL 判断対応演習)において、この SA 演習ツールを活用し有効性を確認するとともに、研修実施後、演習ツールに関する問題点、講師・受講者からの要望に対する改善策を検討し、それらを踏まえて SA 演習ツ

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 関西電力(株)

ルの改良を実施してきた。これまでの主な改良点は、EAL 説明資料表示等の演習ツールの機能追加、EAL 判断基準の変更点を含む演習シナリオの作成、演習シナリオ時間の延長、事象進展の早送り機能の強化等である⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本報告は、前回報告⁽⁹⁾以降の SA 演習ツールの改良について報告する。

2. SA演習ツールの改良点

2.1 演習シナリオの新規作成

関西電力の原子力防災研修（シビアアクシデント EAL 判断対応演習）は毎年実施されており、本研修の受講対象者は 3 年に 1 回受講することとなっている。2017 年度に作成した研修用演習シナリオを用いた研修は 2019 年度で一巡したので、2020 年度は新規の研修用演習シナリオを作成する必要があった。

また、2019 年度に EAL の判断基準が一部見直しされた⁽¹⁰⁾。主なものとして、「原子炉停止機能の異常」、「原子炉冷却機能の異常」、「電源供給機能の異常」、「停止中の原子炉に関する異常」、「使用済燃料貯蔵槽に関する異常」、「原子炉制御室等に関する異常」等の判断基準の見直しがされた。

2020 年度の演習シナリオの新規作成にあたり、判断基準の見直しがされた EAL のシナリオを選択することとし、「原子炉停止機能の異常」、「使用済燃料貯蔵槽に関する異常」の 2 ケースの演習シナリオを新たに作成した。

「原子炉停止機能の異常」では、従来は原子炉トリップ信号の片系だけの動作が一定時間経過した場合に AL を判断することになっており、原子炉停止が発生した場合に原子炉停止機能喪失（ATWS）となれば、制御棒の挿入により原子炉を停止することができないため AL よりも先に GE を判断する必要がある。そのため、中央制御室から制御棒挿入操作が失敗した場合を AL 判断に加えると同時に、全ての停止操作失敗（AL の原子炉停止操作に加え、現場での制御棒挿入操作失敗を含む）を GE の判断とするよう EAL 判断基準が見直された。

また、原子炉緊急停止失敗時に、従来は原子炉の臨界を抑制する SA 設備（ATWS 緩和設備やほう酸注入設備）が考慮されていなかったため、SA 設備による原子炉停止を GE 判断に加えるよう EAL 判断基準が見直された。

表 1 作成した原子炉停止機能喪失 (ATWS) 事象の演習シナリオ

主要なイベント
<ul style="list-style-type: none"> ・地震発生 ・外部電源喪失 ・原子炉トリップ失敗（原子炉停止機能喪失） AL11（原子炉停止機能の異常または異常のおそれ）
<ul style="list-style-type: none"> ・A 非常用ディーゼル発電機自動起動 ・B 非常用ディーゼル発電機自動起動失敗 →15 分後 AL25（非常用交流高圧母線喪失または喪失のおそれ）
<ul style="list-style-type: none"> ・A 充てん／高圧注入ポンプ起動 ・A 電動補助給水ポンプ起動 ・タービン動補助給水ポンプ起動
<ul style="list-style-type: none"> ・格納容器内主蒸気管破断&非常用炉心冷却装置作動（安全注入信号） ・A 余熱除去ポンプ起動 ・A 電動補助給水ポンプ停止 ・タービン動補助給水ポンプ停止 AL24（蒸気発生器給水機能喪失のおそれ） SE24（蒸気発生器給水機能の喪失）
<ul style="list-style-type: none"> ・A 充てん／高圧注入ポンプ停止
<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気発生器ドライアウト（蒸気発生器広域水位 10%未満） GE24（蒸気発生器給水機能喪失後の非常用炉心冷却装置注水不能）
<ul style="list-style-type: none"> ・炉心出口温度 350℃超過 AL42（単一障壁の喪失または喪失のおそれ）
<ul style="list-style-type: none"> ・炉心出口温度 650℃超過
<ul style="list-style-type: none"> ・被覆管破損
<ul style="list-style-type: none"> ・炉心損傷検知 GE28（炉心損傷の検出）
<ul style="list-style-type: none"> ・格納容器スプレイ作動設定値到達
<ul style="list-style-type: none"> ・格納容器スプレイ作動設定値到達（2 回目） →10 分後 SE41（格納容器健全性喪失のおそれ）
<ul style="list-style-type: none"> ・格納容器最高使用圧力到達 GE41（格納容器圧力の異常上昇） GE42（2 つの障壁の喪失および 1 つの障壁の喪失または喪失のおそれ）

表2 作成した使用済燃料貯蔵槽に関する異常事象の演習シナリオ

主要なイベント
・地震発生 ・原子炉トリップ ・外部電源喪失 ・原子炉冷却材漏えい発生（大口径） ・非常用炉心冷却装置作動（安全注入信号） AL21（原子炉冷却材の漏えい） AL42（単一障壁の喪失または喪失のおそれ） ・A, B 非常用ディーゼル発電機自動起動 ・A, B 充てん/高圧注入ポンプ起動
・格納容器スプレイ作動設定値到達 ・A, B 格納容器スプレイポンプ起動失敗
・使用済燃料ピット水位低下確認 ・使用済燃料ピット水位出口配管下端確認 AL30（使用済燃料貯蔵槽の冷却機能喪失のおそれ） ・A 非常用ディーゼル発電機停止 →15 分後 AL25（非常用交流高圧母線喪失または喪失のおそれ） ・B 余熱除去ポンプ停止 SE21（原子炉冷却材漏えい時における非常用炉心冷却装置による一部注水不能）
・格納容器スプレイ作動設定値到達 →10 分後 SE41（格納容器健全性喪失のおそれ）
・再循環切替失敗 GE21（原子炉冷却材漏えい時における非常用炉心冷却装置による注水不能）
・炉心出口温度 350℃超過 SE42（2つの障壁の喪失または喪失のおそれ）
・炉心出口温度 650℃超過
・被覆管破損
・炉心損傷検知 GE28（炉心損傷の検出）
・格納容器最高使用圧力到達 GE41（格納容器圧力の異常上昇）

「使用済燃料貯蔵槽に関する異常」では、従来は使用済燃料ピット水位低下時、注水準備にかかる時間（AL, SE は 1 時間）は EAL を判断しないこととしているため、AL よりも先に SE, GE を宣言しなければならない場合がある。そのため、原子力事業者にて「一定の水位」（AL：使用済燃料ピット出口配管下端等）が定義され、「一定の水位」となれば EAL を判断（準備時間の概念を削除）し、水位低下時に段階的な判断と

なるよう設定するよう見直された。

今回の EAL 見直し内容（判断基準）を演習に反映できるように、シナリオ上機器が故障することになるタイミング等を検討し、原子炉停止機能喪失(ATWS)事象のシナリオ（表 1）および使用済燃料貯蔵槽に関する異常事象のシナリオ（表 2）を作成した。なお、シナリオ中の赤字は今回採用した EAL 判断基準の見直し事象、青字は判断すべき EAL である。

演習シナリオは美浜、高浜、大飯発電所での研修で共通とし、1つの演習シナリオで複数の EAL 判断が要求されるように、様々な故障が重なるように工夫している。この演習シナリオを基にして発電所ごとに SA 解析コード MAAP による解析を実施した。解析時間は事象発生から格納容器最高使用圧力到達までとした。SA 演習ツールでは発電所ごとにパラメータを表示させるため、3 発電所×2 ケース、合計 6 ケースの安全重要パラメータ表示システム (SPDS) の演習用データを作成した。

演習実施後の講師による解説資料については、今回の EAL 見直し内容を踏まえて、演習の事象の概要、必要とされた EAL の判断、その解説等を作成した。解説資料の一例として、美浜 3 号機原子炉停止機能喪失 (ATWS) 事象のものを図 1~4 に示す。

演習内容の解説(1/4)

これは美浜3号機 原子炉停止機能喪失(ATWS)事象でした。
主な流れは以下の通りです。

主要なイベント	事象発生からの経過時間
地震発生	0分
原子炉トリップ&外部電源喪失、原子炉トリップ失敗(ATWS)	0分
A-非常用DG自動起動、B-非常用DG起動失敗	0分
A-充てん/高圧注入ポンプ起動	0分
A-電動補助給水ポンプ、タービン動補助給水ポンプ起動	0分
格納容器内主蒸気管破断発生&ECCS作動(SI信号)	20分
A-余熱除去ポンプ起動	20分
A-電動補助給水ポンプ、タービン動補助給水ポンプ停止	20分
A-充てん/高圧注入ポンプ停止	30分
SGドライブアウト(SG広域水位10%未満)	1時間14分
加圧器過がし弁開不能、F&B運転移行失敗	-
炉心出口温度350℃超過	2時間29分
炉心出口温度650℃超過	2時間50分
燃料被覆管破損	3時間11分
炉心損傷検知	3時間42分
格納容器スプレイ作動設定値到達	3時間43分
格納容器スプレイ作動設定値到達(2回目)	8時間41分
格納容器最高使用圧力到達	17時間00分

図 1 演習内容の解説 (1/4)

演習内容の解説(2/4)

- この演習では、演習開始直後に地震の発生によって原子炉トリップと外部電源喪失が発生しますが、原子炉の自動停止に失敗し、かつ中央制御室からの制御棒挿入操作によっても原子炉出力(中性子束)が定格出力の5%未満にならない原子炉停止機能喪失(ATWS)が発生します。これにより、AL1.1(原子炉停止機能の異常または異常のおそれ)と判断します。
- ここで、A非常用ディーゼル発電機が自動起動し、補助給水系による蒸気発生器への給水が確保されるとともに、Bオンケンス完了後にほう酸濃縮を開始することで、原子炉出力(中性子束)が定格出力の5%未満となり原子炉停止機能が確保されます。
- また、B非常用ディーゼル発電機の起動失敗に伴い、演習開始15分後にAL25(非常用交流高圧母線喪失または喪失のおそれ)と判断します。
- 演習開始20分後に格納容器内で主蒸気管破断が発生し、A系非常用炉心冷却装置の機器が作動します。
- また、A電動補助給水ポンプ、タービン動補助給水ポンプが故障停止し、全てのSG狭域水位が0%未満となっていることから、SE2.4(蒸気発生器給水機能の喪失)と判断します。同時にAL2.4(蒸気発生器給水機能喪失のおそれ)も通報する必要があります。

* 全SG狭域水位0%未満および補助給水流量なしで「SG除熱機能の維持」の手順により給水回復操作を行う。

図 2 演習内容の解説 (2/4)

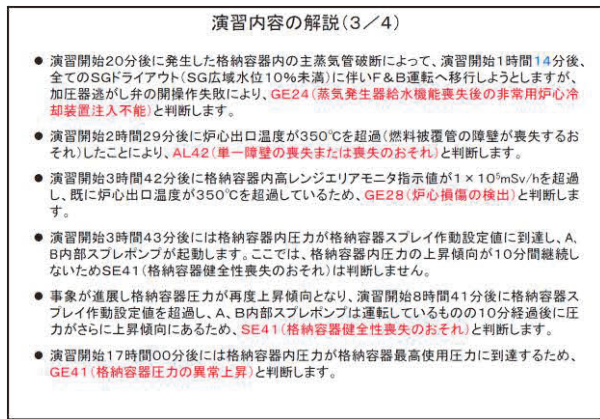


図3 演習内容の解説(3/4)

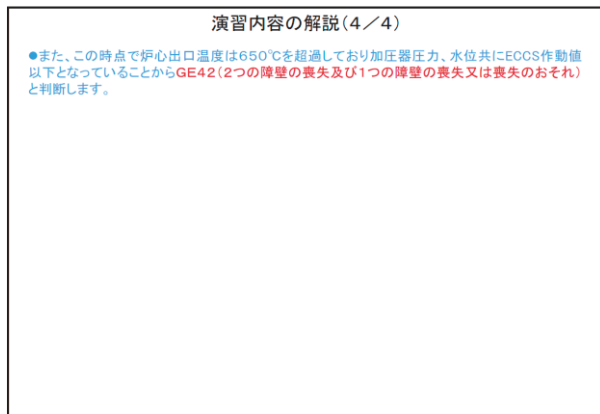


図4 演習内容の解説(4/4)

2.2 SA演習ツールの機能追加

研修実施後、SA演習ツールに関する問題点、講師・受講者からの要望に対する改善策を検討し、それらを踏まえて以下のSA演習ツールの改良を実施した。

2.2.1 スキップ機能追加

長時間のシナリオを研修時間内で効率よく学習するため、事象進展の早送り機能の強化として、事象速度を最大64倍速まで変更可能としていた⁽⁹⁾。しかしながら、演習中に事象速度を早くし過ぎると、事象速度の切り替え操作が間に合わず、確認すべき時間を過ぎてしまうことがあった。SA演習ツールには事象の後戻り機能を設けていなかったため、この場合最初から事象進展をやり直す必要があった。そのため、指定した時間まで早送り、早戻しできるようスキップ機能を追加した。

スキップ機能は、事象進展を確認する「訓練プラントステータスサマリ画面」、「訓練AMサマリ画面」、「訓練プラントステータス画面」、「訓練環境監視データ(狭域)画面」に追加し、指定可能な時間は演習用

SPDSデータの時間範囲内としており、過去の時間へのスキップも可能とすることで、効率的に演習を進められるようになった。

2.2.2 原子炉下部キャビティ注水ポンプの運転表示追加

美浜3号機、高浜1,2号機では事故時のアクシデントマネジメント策として、本来はSA時に原子炉下部キャビティへの水張りのために設置された原子炉下部キャビティ注水ポンプを使用した炉心注入、または格納容器スプレイを実施することがある。そのため、美浜3号機、高浜1,2号機の「訓練AMサマリ画面」に、原子炉下部キャビティ注水ポンプの運転表示を追加した。

2.2.3 補助給水系ミニマムフロー運転中表示追加

美浜3号機、高浜1~4号機、大飯3,4号機の訓練AMサマリ画面において、補助給水系がミニマムフロー運転中の場合、流量は $0 \text{m}^3/\text{h}$ と表示される。電動およびタービン動補助給水ポンプが運転中であるのに流量が $0 \text{m}^3/\text{h}$ のため、演習中に計器の誤りと誤解される恐れがあった。そのため、美浜3号機、高浜1~4号機、大飯3,4号機の「訓練AMサマリ画面」に、電動およびタービン動補助給水ポンプのミニマムフロー運転中が分かる表示を追加した。なお、本表示はミニマムフロー運転をしている時のみ表示させることとした。

2.2.4 トレンドグラフの値表示機能追加

トレンドグラフで表示した時、デジタル値が読み取れなかったため、格納容器圧力のような縦軸のスペンが大きいパラメータについてはEAL判断基準に達したかどうかの判断がしづらかった。そのため、図5のようにトレンドグラフで表示されている線にカーソルを合わせた時に、縦軸のパラメータの値と横軸の時間を表示できるようにした。

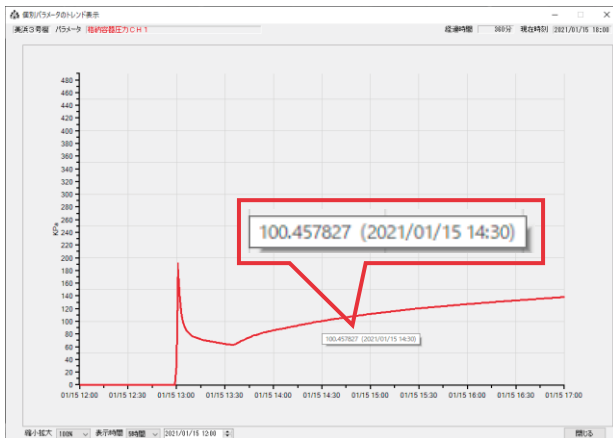


図5 トレンドグラフの値表示機能追加

3. SA 演習ツールを活用した研修の実施結果と今後の課題

今回改良した SA 演習ツールを活用し、美浜、高浜、大飯の各発電所において、2020 年 9 月に SA 研修を実施した。その結果、EAL 判断基準の変更点について研修受講者の理解を深めることができたことを確認した。

今後の課題として、種々の EAL を網羅するよう演習シナリオの充実を図っていく必要がある。また、SA 研修の実施結果および受講者からの改善要望を踏まえた演習ツールの改善を継続して実施することにより、研修の効率化を図っていく必要がある。



図6 研修風景

4. 結論

東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえて開発した、SA 時の事象進展を疑似体験できる SA 演習ツールについて、EAL 判断基準の見直し等を反映して改良を行った。

主な改良点は、EAL 判断基準の見直し等を踏まえた演習シナリオの新規作成、SA 演習ツールのスキップ機能追加等である。本演習ツールを SA 研修に用いた結果、EAL 判断基準の変更点について研修受講者の理

解を深めることができたことを確認した。

今後も研修後の改善要望を踏まえた SA 演習ツールの改善を継続し、SA 演習ツールが更に効果的なものになるように努める。

引用文献

- (1) 経済産業省ホームページ，“東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について”，<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/3491725/www.nisa.meti.go.jp/shingikai/800/28/008/8-2-1.pdf>
- (2) 内閣府ホームページ，“原子力災害対策特別措置法”，<http://www.bousai.go.jp/shiryuu/houritsu/002-1.html>
- (3) 原子力規制委員会，“原子力災害対策指針（令和2年10月28日一部改正）”，（2020）。
- (4) 川崎郁夫，吉田至孝，岩崎良人“シビアアクシデント演習ツールの開発と適用”，INSS Journal, Vol. 21, PP. 196 -204 (2014)。
- (5) 川崎郁夫，吉田至孝，山本泰功，岩城隆則，“平成26年度福井県原子力防災訓練のプラント事象進展シナリオ解析”，INSS Journal, Vol. 22, PP. 169-176 (2015)。
- (6) 川崎郁夫，中村晶，山本泰功，高橋俊佑，“平成28年度福井県原子力防災訓練のプラント事象進展シナリオ解析”，INSS Journal, Vol. 24, PP. 167-174 (2017)。
- (7) 川崎郁夫，高木俊哉，尾上彰，池田浩之，“平成30年度 関西電力美浜発電所原子力防災訓練のプラント事象進展シナリオ解析”，INSS Journal, Vol. 26, PP. 179-186 (2019)。
- (8) 川崎郁夫，高橋俊佑“シビアアクシデント演習ツールの改良”，INSS Journal, Vol. 23, PP. 135 -144 (2016)。
- (9) 川崎郁夫，中村晶，高橋俊佑“シビアアクシデント演習ツールの改良”，INSS Journal, Vol. 25, PP. 137 -142 (2018)。
- (10) 原子力規制委員会，“原子力災害対策指針の緊急事態区分を判断する基準等の解説”，（2020）。