

平成 23 年度関西電力原子力総合防災 訓練のプラント事象進展シナリオ解析

Plant incident progress scenario analysis for nuclear emergency
exercise of Kansai Electric Power Co., Inc. in fiscal 2011

米本 幸弘 (Yukihiko Yonemoto)*¹ 川崎 郁夫 (Ikuo Kawasaki)*¹ 建部 恭成 (Yasumasa Tatebe)*¹
吉田 至孝 (Yoshitaka Yoshida)*¹ 南 則敏 (Noritoshi Minami)*²

要約 関西電力では、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、津波により「外部電源や緊急時の電源」、「原子炉冷却機能」、「使用済燃料プールの冷却機能」の3つの機能を全て喪失した場合においても、炉心や使用済燃料の損傷を防止し、放射性物質の放出を抑制しつつ冷却機能回復を実現するための緊急安全対策が講じられてきた。平成 23 年度の関西電力原子力総合防災訓練は、大飯発電所 1-4 号機を対象とし、緊急安全対策の確認等を目的として行われた。具体的には、地震により運転中の 1,2 及び 3 号機が自動停止し、定期検査中の 4 号機を含め、津波の影響で全交流電源を喪失し、その上 3 号機においてはタービン動補助給水ポンプも故障し、蒸気発生器への給水機能が失われたとの想定で行われた。本論文では、防災訓練で想定したシナリオを対象に、シビアアクシデント解析コード MAAP4 を用いて行ったプラント事象進展シナリオ解析の結果を紹介し、原災法に基づく特定事象発生時刻、主要事象発生時刻等シナリオ解析時のプラント応答を含む事象進展を評価した。その結果、緊急安全対策（空冷式非常用発電装置による電源復旧等）を考慮することにより、炉心損傷に至ることなく事象収束することが可能であることを示した。

キーワード 原子力防災訓練, PWR, MAAP4

Abstract In the light of the lessons learned from the accident at Fukushima dai-ichi nuclear power plant, the Kansai Electric Power Company (KEPCO) has developed various emergency safety measures in order to restore cooling functions in the nuclear power plants (NPPs) while preventing reactor core or spent fuel damages and containing radioactive releases even in the case that all the three safety functions (all AC power sources, seawater cooling and spent fuel pit (SFP) cooling functions) are lost due to a tsunami. A nuclear emergency exercise of KEPCO, which was intended for Ohi-1-4, was held in fiscal 2011 for an evaluation of the emergency plan. The scenario of the exercise was as follows: Ohi units 1, 2 and 3 in operation scrambled automatically due to an earthquake. At that time, Ohi unit 4 was under periodic inspection. Then, an earthquake-induced tsunami hit the NPPs. Finally, all of Ohi NPPs fell into station black out (SBO) and the cooling systems totally lost their function. In addition, the turbine driven auxiliary feed water pump did not work in Ohi unit 3, thus water supply to the steam generators (SGs) was lost. In this paper, the scenario which is postulated for emergency exercise is analyzed with the MAAP4 code in order to assist the nuclear emergency exercise of KEPCO in fiscal 2011. Then, the incident progress of the postulated scenario is evaluated on the basis of the analysis results, including the time of the occurrence of specified events based on the Nuclear Disaster Special Measures Law and main events. The results indicate that it is possible to terminate the event without core damage for the postulated scenario.

Keywords Nuclear emergency exercise, PWR, MAAP4

* 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)

1. 緒言

平成 23 年 3 月 11 日に三陸沖で発生したマグニチュード 9.0 の巨大地震は、福島第一原子力発電所の複数機同時発災という深刻な事態を引き起こした。地震発生により原子炉は自動停止したものの、地震に伴って発生した津波で起きた、(1)外部電源や緊急時の電源喪失、(2)原子炉の冷却機能喪失、(3)使用済燃料プールの冷却機能の喪失が事故を拡大させ災害の規模を大きくしたと考えられている⁽¹⁾。また、津波の襲来や水素爆発等の影響により、原子炉敷地内には数多くの瓦礫が散在することとなった。

関西電力においては、万一、福島第一原子力発電所のような地震・津波に起因する(1)―(3)に関する事象が発生した場合でも、炉心や使用済燃料の損傷防止、放射性物質の放出を抑制しつつ冷却機能を確保するための安全性向上対策（電源確保、水源確保、浸水対策など）が講じられてきた⁽²⁾。空冷式非常用発電装置や電源車、（ディーゼル駆動式）大容量海水ポンプの配備などハード面の対策だけでなく、シビアアクシデントに対応する初動人員体制の強化やマニュアル整備等のソフト面における対策も行われてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。その際、安全確保対策の効果を確実にするための措置として、瓦礫の撤去等に関する対策も行われている⁽⁵⁾。

平成 24 年 3 月 18 日の関西電力原子力総合防災訓練では、上述した緊急安全対策の確認、対応能力の向上や関係機関相互の協力体制の強化を目的に大飯発電所 1―4 号機を対象として、協力会社等の関係者を含めた約 300 人が参加し行われた。訓練は、『1―3 号機定格熱出力一定運転中（4 号機は定期検査中）に、若狭湾沖で発生した地震（震度 6 強）により運転中の原子炉が自動停止するとともに、外部電源喪失に至るが、非常用ディーゼル発電機（D/G）により電源供給される。その後、津波の影響により全 D/G が自動停止し、全交流電源喪失事象（5 分間継続で原災法 10 条該当事象）を想定した訓練を実施する。3 号機は、D/G 自動停止直後、別の要因によりタービン動補助給水ポンプが故障停止し、蒸気発生器（S/G）への給水機能が喪失する事象〔原災法 15 条該当事象〕が発生。その後、空冷式非常用発電装置により電源が復旧するが 2 台の電動補助給水ポンプの起動に失敗する。』との想定の下で行われた。図 1 は防災訓練の様子を示した一例である。

（株）原子力安全システム研究所（以下、INSS という）では、毎年原子力事業者より提示された防災訓練



図 1 防災訓練の様子（電源確保訓練）⁽⁴⁾

シナリオに基づいて、訓練シナリオの解析を実施シラント事象進展評価を行うとともに各種防災システム用のデータ作成を行っている⁽⁶⁾。本報では、定期検査中の大飯発電所 4 号機を除く大飯 1、2 及び 3 号機を対象とし、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ複数機同時発災と緊急安全対策を考慮した防災訓練シナリオの解析を、シビアアクシデント解析コード MAAP4⁽⁷⁾を用いて実施したので、その結果を報告する。

2. 訓練想定とシナリオ解析

図 2 は関西電力より提示された防災訓練シナリオの概要を示している。MAAP4 による防災訓練シナリオ解析は、図 2 のシナリオに基づき実施した。大飯 1―3 号機のいずれも、外部電源喪失を起因事象とし、津波により海水系統が故障して全交流電源喪失に至る事象とし、福島第一原子力発電所事故以降整備した設備や手順書に基づき復旧作業を実施することを想定した解析条件となっている。具体的な AM 策として、大飯 1、2 号機は、主蒸気逃がし弁による 1 次冷却系の急速冷却/減圧の実施、大飯 3 号機においては、主蒸気逃がし弁による 1 次冷却系の冷却/減圧となっている。なお、図 2 に示すように、大飯 1、2 号機に関しては同一の事象を想定していることから、解析結果では、1 号機を例に取り紹介する。

ここで、図 2 の防災訓練のシナリオは、事象発生時の常駐体制を強化するための追加要員の参集や、電源の確保作業及び S/G や使用済燃料ピット (SFP) への給水機能確保作業等の事前訓練実績⁽⁵⁾に基づく作業時間を考慮した上で作成されている。追加要員の参集については、寮等を出発地点とする休日・夜間等を考慮した参集訓練を実施しており、最も近い場所からの参集で約 30 分である⁽⁵⁾。図 3 は防災訓練当日の参集風景の様子である。電源復旧に関わる作業では、恒設

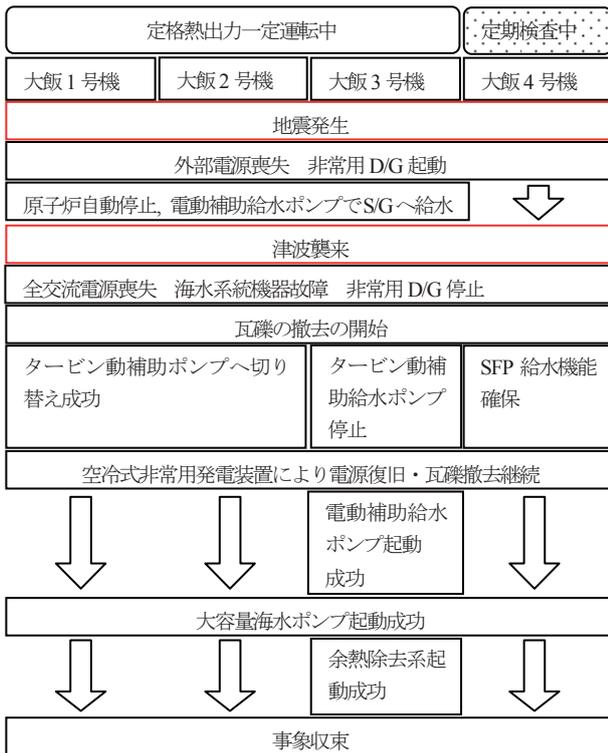


図2 訓練想定概要



図3 追加要員参集の様子(4)

の空冷式非常用発電装置から各給電先への電源接続・接続後の給電状況の確認等を実施し、一連の作業が完了するまで約1.3時間となる。復水タンクやSFPへの給水作業に関しては、給水のための消防ポンプやホース等を資機材運搬用トラックにより設置場所まで運搬し、取水口から復水タンクやSFPまでポンプやホースを敷設する(約1.1時間)。図2で示した防災訓練シナリオは、上述するように、事前訓練に基づく実際の作業性を考慮した上で策定されているため現実性の高い想定内容になっている。

3. 事象進展シナリオの解析結果

大飯1号機、3号機の事象進展シナリオの解析結果から得られた主要事象の発生時刻を表1、2に、そして、プラント主要パラメータである1次冷却系圧力やその他関連するパラメータの経時変化の結果を図4、5にそれぞれ示す。ただし、シナリオ解析では図2で示した「大容量海水ポンプ起動成功」以降は考慮していない。

【事象進展シナリオの解析結果(大飯1号機)】

大飯発電所1号機定格熱出力一定運転中のところ、若狭湾沖にて大地震が発生し地震加速度大により直ちに制御棒が全挿入されて原子炉が自動停止した。また、地震により外部電源を喪失したため、非常用ディーゼル発電機ならびに電動補助給水ポンプ、タービン動補助給水ポンプが自動起動した。

約30分後に発電所を含む一帯に大津波が襲来し海水ポンプが故障したため、非常用ディーゼル発電機が

表1 主要事象の発生時刻(大飯1号機)

経過時間	主要事象
事象発生前	定格熱出力一定運転中
0分	[大地震発生] ・地震加速度大による原子炉トリップ ・外部電源喪失 ・A, B 非常用ディーゼル発電機自動起動 ・A, B 電動補助給水ポンプ自動起動 ・タービン動補助給水ポンプ自動起動
30分	[津波襲来] ・海水系統の機器故障 ・A, B 非常用ディーゼル発電機停止, 全交流電源喪失 ・A, B 電動補助給水ポンプ停止 ・タービン動補助給水ポンプへの切替成功 ・主蒸気逃がし弁による1次冷却系の急速冷却/減圧開始
33分	・加圧器圧力低, 安全注入信号発信
35分	・全交流電源の喪失(5分継続) 原災法第10条通報該当事象
39分	・蓄圧タンク作動
1.3時間	・空冷式非常用発電装置により交流電源復旧
5.7時間	・主蒸気逃がし弁による冷却の調節
15.7時間	・余熱除去系接続可能な状態に到達
—	解析終了

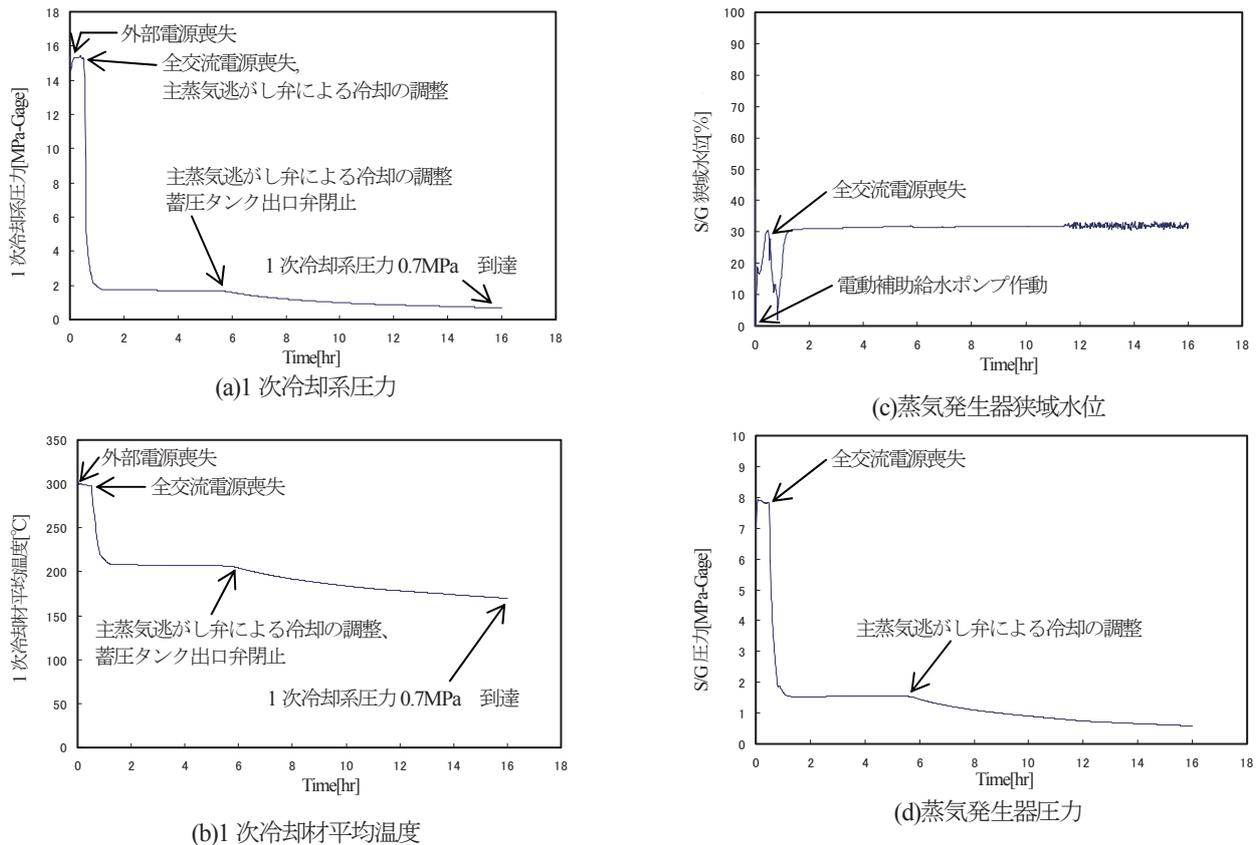


図4 大飯1号機プラント内部の各種パラメータの挙動

自動停止し、全交流電源喪失状態となった。全交流電源喪失に伴って電動補助給水ポンプが停止するが、直後にタービン動補助給水ポンプへ切り替えてS/Gへの給水機能を維持した。このとき、電源復旧操作を試みるも失敗し、2号機も全交流電源喪失となり電源融通ができないため、全交流電源喪失(SBO)時対策を開始するとともに主蒸気逃がし弁による1次冷却系の急速冷却/減圧を開始した。この操作により、図4-(a)に示すように1次冷却系圧力は急激に低下していることがわかる。また、1次冷却材温度(図4-(b))とS/G圧力も同様に低下している。約35分後には全ての交流電源を喪失した状態が5分継続し、原災法第10条通報該当事象(*4)に至った。約39分後に1次冷却系圧力が蓄圧タンク作動設定圧力に到達したため、蓄圧タンクが作動した。

約1.3時間後に空冷式非常用発電装置により交流電源が復旧した。約5.8時間後より、主蒸気逃がし弁による冷却を再開した。約15.7時間後には1次冷却系圧力が0.7MPaに到達し、低温停止状態に向けた操

作が可能な状態となった。

以後、復水タンクへの機動的な給水によりタービ電動補助給水ポンプによるS/Gへの給水機能が確保され、主蒸気逃がし弁からの蒸気放出によって、S/Gの除熱機能が維持される。また、交流電源の復旧によりプラント監視機能は維持される。最終的に炉心の冷却は脅かされることなく事象は収束した。

【事象進展シナリオの解析結果(大飯3号機)】

大飯発電所3号機定格熱出力一定運転中のところ、若狭湾沖にて大地震が発生し、地震加速度大により直ちに制御棒が全挿入されて原子炉が自動停止した。また、地震により外部電源を喪失したため、非常用ディーゼル発電機ならびに電動補助給水ポンプ、タービ電動補助給水ポンプが自動起動した。

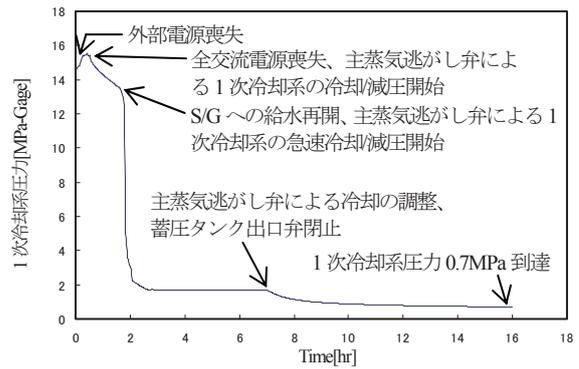
約30分後に発電所を含む一帯に大津波が襲来し海水ポンプが故障したため、非常用ディーゼル発電機が自動停止し、全交流電源喪失状態となった。全交流電源喪失に伴って電動補助給水ポンプが停止したため、

*4 原子炉の運転中にすべての交流電源が喪失し、且つ、その状態が5分以上継続した。

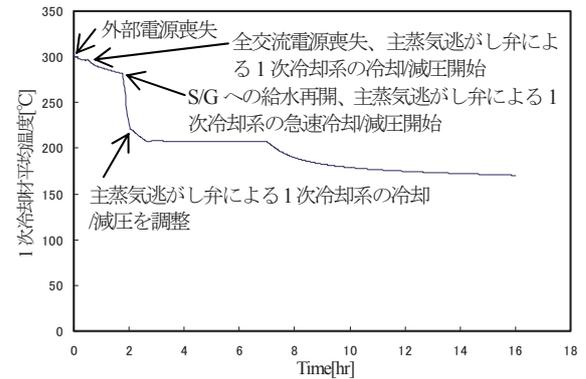
表2 主要事象の発生時刻 (大飯3号機)

経過時間	主要事象
事象発生前	定格熱出力一定運転中
0分	[大地震発生] ・地震加速度大による原子炉トリップ ・外部電源喪失 ・A, B 非常用ディーゼル発電機自動起動 ・A, B 電動補助給水ポンプ自動起動 ・タービン動補助給水ポンプ自動起動
30分	[津波襲来] ・海水系統の機器故障 ・A, B 非常用ディーゼル発電機停止, 全交流電源喪失 ・A, B 電動補助給水ポンプ停止 ・タービン動補助給水ポンプへの切替失敗 ・主蒸気逃がし弁による1次冷却系の冷却/減圧開始
35分	・全交流電源の喪失 (5分継続) 原災法第10条通報該当事象
50分	S/G 狭域水位 0% 未満 原災法第15条該当事象
1.3時間	・空冷式非常用発電装置により交流電源復旧
1.3時間	A, B 電動補助給水ポンプ起動失敗 (復旧作業継続)
1.8時間 (1:45)	・A 電動補助給水ポンプ起動成功, S/G への給水機能確保 ・主蒸気逃がし弁全開, 1次冷却系の急速冷却/減圧開始 ・S/G 除熱機能の維持
1.8時間	・加圧器圧力低, 安全注入信号発信
1.9時間	・蓄圧タンク作動
2.0時間	・主蒸気逃がし弁による冷却の調節
7.0時間	・主蒸気逃がし弁による冷却の調節
15.9時間	・余熱除去系接続可能な状態に到達
—	解析終了

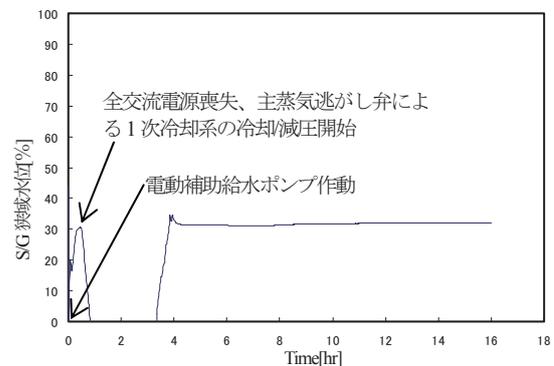
直後にタービン動補助給水ポンプへの切り替えを試みるも失敗した。このとき、電源復旧操作を試みるも失敗し、4号機も全交流電源喪失となり電源融通ができないため、SBO対策を開始するとともに主蒸気逃がし弁を調整開とし、炉心崩壊熱を除去した。この操作により、図5に示すように、1次冷却系圧力は緩やかに低下し、また、1次冷却材平均温度(図5-(b))とS/G圧力(図5-(d))も同様の傾向を示した。約35分後には全ての交流電源を喪失した状態が5分継続し、原災法第10条通報該当事象に至った。S/Gへの給水機能の喪失によりS/G水位が低下傾向を示し、図5-(c)に示すように約50分後には狭域水位0%未満に低下し



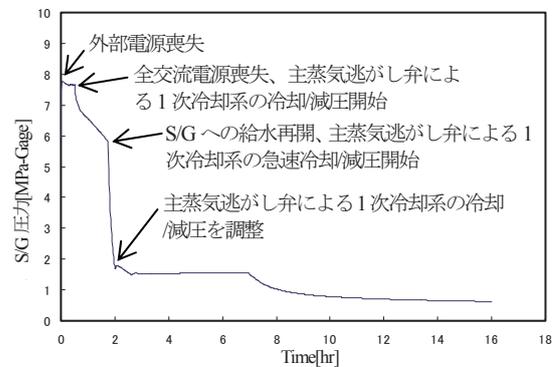
(a)1次冷却系圧力



(b)1次冷却材平均温度



(c)S/G狭域水位



(d)S/G圧力

図5 大飯3号機プラント内部の各種パラメータの挙動

た（原災法第15条通報該当事象*5）。

約1.3時間後に空冷式非常用発電装置により交流電源が復旧し電動補助給水ポンプの起動を試みるも失敗したため復旧作業を継続した。約1.8時間後にA電動補助給水ポンプの起動に成功しS/Gへの給水を再開した。同時に主蒸気逃がし弁を全開とし、1次冷却系の急速冷却/減圧を開始した。約1.9時間後に1次冷却系圧力が蓄圧タンク作動設定圧力に到達したため、蓄圧タンクが作動した。その後、主蒸気逃がし弁による冷却/減圧を調節することで、1次冷却系温度、圧力を一定に保持し、約2.0時間後に1次冷却系圧力が約1.7MPaとなったことから蓄圧タンク出口弁を閉止した。約7.0時間後より、1次冷却系圧力が0.7MPaに到達するよう主蒸気逃がし弁による冷却を調節した。約15.9時間後には1次冷却系圧力が0.7MPaに到達し、低温停止状態に向けた操作が可能となった。

以後、交流電源の復旧によりプラント監視機能は維持され、復水タンクへの機動的な給水によりA電動補助給水ポンプによるS/Gへの給水機能の確保と主蒸気逃がし弁からの蒸気放出によって、S/Gの除熱機能が維持されることから事象は収束した。

4. 結言

平成24年3月18日に関西電力(株)大飯発電所を対象として実施された、複数機同時発災及び全交流電源喪失に対する関西電力の緊急安全対策を考慮した、防災訓練に関するプラント事象進展シナリオの解析をMAAP4コードを使用して行った結果、以下の知見を得た。

[大飯発電所1,2号機]

事象発生から原災法10条該当事象発生まで35分であった。タービン動補助給水ポンプによるS/Gへの給水機能の確保と主蒸気逃がし弁からの蒸気放出によって、S/Gの除熱機能が維持されること、水源である復水ピットが枯渇する前に注水が開始されることから、炉心の冷却は脅かされることなく事象は収束した。

[大飯発電所3号機]

事象発生から原災法10条該当事象発生まで35分、原災法15条該当事象発生まで50分、A電動補助給水ポンプによるS/Gへの給水再開まで1.8時間であ

った。なお、本シナリオにおいては、S/Gへの全給水手段を喪失する故障想定により一時的にS/G水位が低下するもののA電動補助給水ポンプによるS/Gへの給水機能が回復することで1次冷却材システムの冷却が維持できること、水源である復水ピットが枯渇する前に注水が開始されることから事象は収束した。

以上より、MAAP4コードの解析結果によれば、想定したシナリオに対して大飯1,2及び3号機のプラント冷却に成功し事象収束することを示した。

文献

- (1) 関西電力, “東京電力福島第一原子力発電所事故等を踏まえた取組み状況について”, 越前若狭のふれあい, 関電トピックス, 第31号, (2011), http://www1.kepco.co.jp/wakasa/tanpou/k_topics/31k_topics.html
- (2) 関西電力, “福島第一原子力発電所事故を踏まえた安全性向上対策実行計画の実施状況について”, 第69回福井県原子力安全専門委員会, (2012).
- (3) 関西電力, “大飯発電所3,4号機における更なる安全性・信頼性向上のための対策の実施計画”, (2012)
- (4) 関西電力, “越前若狭のふれあい”, 特別号 No. 13, http://www1.kepco.co.jp/wakasa/wakasa_topics/tanpou_s_201203_1.html
- (5) 吉原健介, “福島第一原子力発電所事故を踏まえた関西電力における安全確保対策の取り組み状況”, 日本原子力学会2012年「春の年会」, 福島第一原子力発電所事故特別セッション, (2012).
- (6) 建部 恭成, 南 則敏, 吉田 至孝, “平成21年度福井県原子力防災総合訓練のプラント事象進展シナリオ解析”, INSS Journal, Vol. 17, pp. 308-316, (2010).
- (7) Electric Power Research Institute (EPRI), “Modular Accident Analysis Program, MAAP User's Manual”, (1994).

*5 原子炉の運転中にすべての交流電源を喪失し、且つ、S/Gへのすべての給水機能を喪失した。