

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

Plant incident progress scenario analysis for Mihama nuclear emergency exercise of
Kansai Electric Power Co., Inc. 2018

川崎 郁夫 (Ikuo Kawasaki) *¹ 高木 俊弥 (Toshiya Takaki) *¹
尾上 彰 (Akira Onoue) *² 池田 浩之 (Hiroyuki Ikeda) *²

要約 平成30年度に実施された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を実施した。事象発生とその後の工学的安全設備の多重故障、緊急安全対策等を想定した解析を実施し、得られた結果から原子力災害対策特別措置法（原災法）に基づく特定事象発生時刻やプラント応答等の事象進展の評価を実施した。その結果、(1) 事象発生からの時間は、原災法第10条通報事象まで55分、原災法第15条該当事象まで1時間25分であった。(2) 炉心損傷前に、選定したアクシデントマネジメント（AM）策による炉心注入および格納容器スプレイを実施することにより、炉心温度、格納容器圧力および温度の上昇が抑制され、事象が収束することを確認した。(3) 緊急事態事象GE25あるいはGE21発信後にAM策が実施できなかった場合のMAAP解析を実施した結果、GE25のケースでは事象発生から炉心損傷までの時間は7時間23分、格納容器の圧力が最高使用圧力の2倍に到達するまでの時間は34時間07分、GE21のケースでは事象発生から炉心損傷までの時間は2時間34分、格納容器の圧力が最高使用圧力の2倍に到達するまでの時間は32時間35分であった。

キーワード 原子力防災訓練, シビアアクシデント, アクシデントマネジメント, 原子力災害対策特別措置法, MAAP

Abstract A scenario analysis that assumed a severe accident phenomena progression scenario was carried out in FY2018 for the Mihama nuclear emergency exercise of Kansai Electric Power Co., Inc. The analysis assumed event occurrence and subsequent multiple failures of engineering safety equipment, emergency safety measures, etc. From the obtained results, progression of events, such as information of the specific event occurrence time and the corresponding plant response, was identified based on the Nuclear Emergency Response Special Measures Act Evaluation. The following points were seen. (1) It was 55 minutes from the start of the event as defined by Article 10 of the Nuclear Disaster Act, and 1 hour and 25 minutes from the start of the event to the time of declaration of a nuclear emergency situation under the provisions of Article 15 of the Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness. (2) It was confirmed that the core injection and containment spray, which were the selected accident management (AM) measures, were carried out before core damage, and the rises in core temperature, containment pressure and temperature were suppressed and the events converged. (3) As a result of performing MAAP analysis when AM measures could not be implemented after GE25 and GE21 dispatch, in the case of GE25, the time from event occurrence to core damage was 7 hours and 23 minutes, and the time to reach double the maximum working pressure in the containment vessel was 34 hours and 7 minutes. In the case of GE21, the time from event occurrence to core damage was 2 hours and 34 minutes, and the time to reach double the maximum working pressure was 32 hours and 35 minutes.

Keywords nuclear emergency exercise, severe accident, accident management, Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness, MAAP (Modular Accident Analysis Program)

*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

原子力安全の基本的な目的は、放射性物質に起因する危険性を顕在化させない、すなわち放射線による有害な影響から人と環境を守ることにあり、その目的は5層からなる深層防護の考え方により達成される⁽¹⁾。その第5層にあたる災害対応については訓練が実施されなければならないとされる。

原子力事業者においては、原子力災害対策特別措置法（以下、原災法という）⁽²⁾ 第7条第1項の規定に基づき、原子力施設ごとに原子力事業者防災業務計画⁽³⁾を作成し、その第2章第7節では、原子力事業者の原子力防災訓練の実施を規定し、発電所における訓練として、原子力防災管理者は原子力防災要員等に対し、シビアアクシデントを想定した原子力防災訓練を実施するとしている。

関西電力(株)美浜発電所3号機の具体的な防災訓練シナリオを作成するにあたって、美浜原子力防災訓練計画を踏まえて、関西電力(株)および協力会社の原子力防災訓練関係者による原子力防災訓練シナリオワーキングにおいて、安全機器の故障と災害事象の影響を緩和するための措置（以下、アクシデントマネジメント策、AM策という）を考慮し、事象発生から事象収束へのプロセスを検討した。

今回想定した事象進展シナリオは、関西電力(株)美浜発電所3号機において、地震により全交流電源喪失および原子炉冷却機能の喪失が発生するが、交流電源復旧により炉心注入が間に合い炉心損傷に至らず事象が収束するとした。

(株)原子力安全システム研究所では、原子力防災訓練シナリオワーキングで決定した訓練シナリオおよび解析条件に基づいて、シビアアクシデント解析コードMAAP4⁽⁴⁾を用いて解析を実施しプラント事象進展評価を行った。

本報では、関西電力(株)美浜発電所3号機を対象として実施された事象進展シナリオの結果から、AM策を講じた場合のプラント事象進展の評価および緊急事態事象（GE）発信後にAM策を講じなかった場合のプラント事象進展の評価について報告する。

2. 事象進展シナリオの作成

関西電力(株)より提示された事象進展シナリオの条件は、起因事象は地震による外部電源喪失、その



略語	DG	ディーゼル発電機
	M/DAFWP	電動補助給水ポンプ
	T/DAFWP	タービン動補助給水ポンプ
	SG	蒸気発生器
	CH/SIP	充てん/高圧注入ポンプ
	RHRP	余熱除去ポンプ
	CSP	格納容器スプレイポンプ
	CV	格納容器
	原災法	原子力災害対策特別措置法
	AL	警戒事象
	SE	特定事象
	GE	緊急事態事象

図1 訓練想定概要

後全交流電源喪失に至るものとした。また、実践的な訓練を実施するため、工学的安全設備の多重故障および全交流電源喪失による不作動として、充てん/高圧注入ポンプ、余熱除去ポンプ、格納容器スプ

レイポンプ等の不作動，タービン動補助給水ポンプ等の故障を仮定し，炉心損傷に至る前にAM策を実施するという事象を想定した．これらの条件を基にMAAP4コードを用いて解析を実施した．

図1に訓練想定概要を示す．訓練は，美浜発電所3号機定格熱出力一定運転中のところ地震により原子炉自動停止，外部電源喪失および1次冷却材漏洩が発生する．非常用ディーゼル発電機が1台起動するが，もう1台は起動に失敗し，1系統のみの電源供給状態が15分継続したことにより警戒事象（AL25）となる．その後運転中の非常用ディーゼル発電機が故障により停止し，全交流電源喪失となり，30分継続により原災法第10条事象（SE25），1時間継続により原災法第15条事象（GE25）となる．また，余震により1次冷却材配管が大破断となるが，全交流電源喪失により安全注入不可となる．その後，交流電源復旧により，炉心注入および格納容器スプレイ手段が回復し，炉心損傷に至らずに事象が収束するという想定である．赤字は起因事象，青字は失敗（故障）を想定した設備である．

3. 事象進展シナリオの解析結果

MAAP4コードを用いて事象進展シナリオ解析を実施した結果，主要事象の発生時刻は表1の通りであり，以下解析結果の概要を説明する．

3.1 解析結果の概要

関西電力(株)美浜発電所3号機は定格熱出力一定運転中のところ地震が発生し，地震加速度高により原子炉が停止し，同時に外部電源が喪失した．このとき，A非常用ディーゼル発電機の起動に失敗し，B非常用ディーゼル発電機のみが起動した．補助給水系はB電動補助給水ポンプおよびタービン動補助給水ポンプが起動した．また，1次冷却材低温側配管に亀裂が発生して1次冷却材漏洩（0.23m³/h）が発生した．

25分後にB非常用ディーゼル発電機の故障により全交流電源喪失となり，B電動補助給水ポンプが停止した．55分後に全交流電源30分継続により原災法第10条事象（SE25），1時間25分後に全交流電源1時間継続により原災法第15条事象（GE25）となった．

50分後に主蒸気逃がし弁を開放し，2次系強制

表1 主要事象の発生時刻

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	地震発生 原子炉自動停止 外部電源喪失 A非常用DG自動起動失敗 B非常用DG自動起動成功 B-M/DAFWP自動起動 T/DAFWP自動起動 1次冷却材漏洩発生 (1次冷却材低温側配管0.23m ³ /h)
15分	1系統のみの電源供給状態15分継続 (AL25)
25分	B非常用DG故障により停止 (全交流電源喪失) B-M/DAFWP停止
50分	2次系強制冷却開始 (主蒸気逃がし弁開：開度100%)
55分	全交流電源喪失30分継続 (SE25) 原災法第10条通報該当事象 T/DAFWP故障により停止 (AL24)
59分	SG狭域水位0%未満 (SE24) 主蒸気逃がし弁開度調整 (開度30%)
1時間25分	全交流電源喪失1時間継続 (GE25) 原災法第15条通報該当
1時間30分	余震発生 1次冷却材漏洩口径拡大 (1次冷却材低温側配管両端破断) 安全注入不能 (AL42,SE21,GE21)
1時間45分	空冷非常用発電装置起動 (交流電源復旧)
2時間05分	恒設代替低圧注水ポンプ起動 (炉心注入) 原子炉下部キャビティ注水ポンプ起動 (CVスプレイ)
2時間25分	B非常用DG復旧
2時間35分	B-CH/SIP起動
2時間40分	B-RHRP起動 恒設代替低圧注水ポンプ停止
2時間47分	原子炉下部キャビティ注水ポンプ停止 B系CSP起動
2時間49分	CV再循環サンプ水位59%以上
3時間10分	燃料取替用水タンク水位低 (32.2%) 再循環モード切替
-	事象収束

略語 DG : ディーゼル発電機
M/DAFWP : 電動補助給水ポンプ
T/DAFWP : タービン動補助給水ポンプ
SG : 蒸気発生器
CH/SIP : 充てん/高圧注入ポンプ
RHRP : 余熱除去ポンプ
CSP : 格納容器スプレイポンプ
CV : 格納容器
原災法 : 原子力災害対策特別措置法
AL : 警戒事象
SE : 特定事象
GE : 緊急事態事象

冷却を開始したことにより，1次冷却材圧力が約15MPaから約4MPaまで低下したため，59分後に1次冷却材圧力を安定させるため，主蒸気逃がし弁の開度を30%に調整した。

55分後にタービン動補助給水ポンプが故障停止したため，59分後に蒸気発生器狭域水位が0%未満(SE24)となった。

1時間30分後に余震が発生し，1次冷却材低温側配管の亀裂が一気に拡大して両端破断となった。この時，全交流電源喪失により非常用炉心冷却装置は作動しなかった(AL42,SE21,GE21)。

1時間45分後に空冷非常用発電装置によって交流電源が復旧した。2時間5分後に恒設代替低圧注水ポンプによる炉心注入，原子炉下部キャビティ注水ポンプによる格納容器スプレイを実施した。

2時間25分後にB非常用ディーゼル発電機が復旧し，2時間35分後にB充てん/高圧注入ポンプによる炉心注入，2時間40分後にB余熱除去ポンプによる炉心注入を実施して，恒設代替低圧注水ポンプを停止した。また，2時間47分後に原子炉下部キャビティ注水ポンプを停止し，B系格納容器スプレイポンプによる格納容器スプレイを実施した。

格納容器再循環サンプル水位が59%以上および燃料取替用水タンク水位が32.2%に達すると再循環モード切替を実施し，炉心注入および格納容器スプレイを継続し，1次冷却材高温側温度(炉心温度)，格納容器圧力，格納容器雰囲気温度が低下傾向となり事象は収束した。

プラント主要パラメータである1次冷却材圧力の経時変化を図2に，1次冷却材高温側温度の経時変化を図3に，蒸気発生器広域水位の経時変化を図4に，格納容器圧力の経時変化を図5に，格納容器雰囲気温度の経時変化を図6に示す。

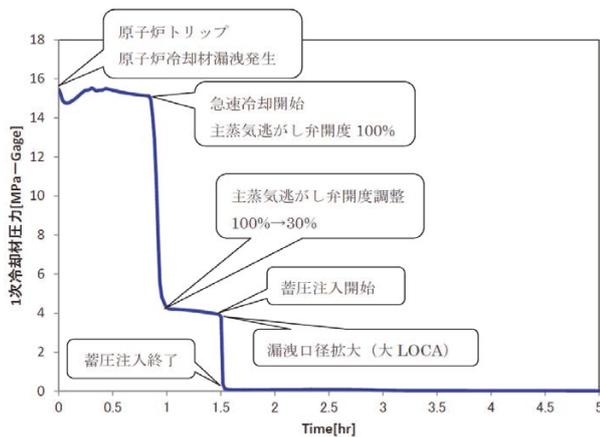


図2 1次冷却材圧力の経時変化

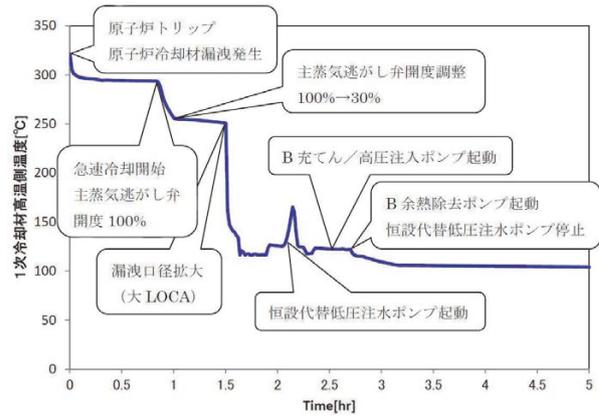


図3 1次冷却材高温側温度の経時変化

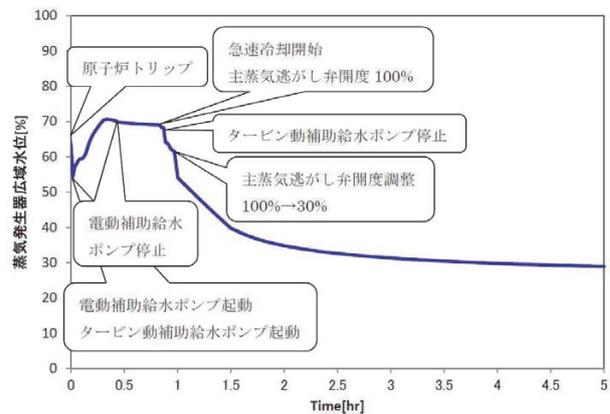


図4 蒸気発生器広域水位の経時変化

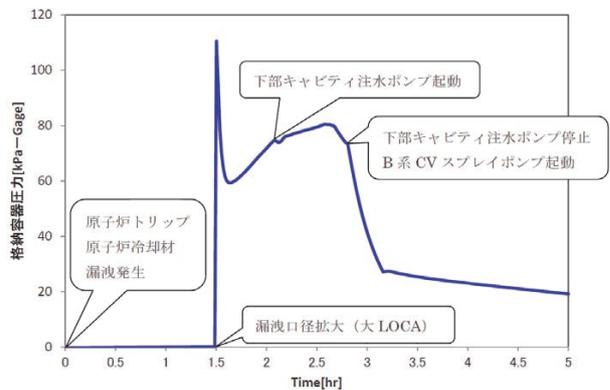


図5 格納容器圧力の経時変化

3.2 選定したAM策の妥当性評価

今回の訓練シナリオでは，炉心損傷に至る前に炉心注入が成功する想定であり，交流電源を復旧して炉心注入をする必要がある。また，1次冷却材低温側配管両端破断による格納容器圧力，格納容器雰囲気温度の上昇抑制のため，格納容器スプレイを実施する必要がある。

非常用ディーゼル発電機故障による非常用炉心冷

4. AM策なしのケースの解析結果

今回の訓練シナリオでは、炉心損傷が発生しないシナリオとしているが、訓練時には緊急事態事象 (GE) の発生を受けて、このままAM策が実施できなかった場合の炉心損傷予測、格納容器最高使用圧力の2倍到達予測が求められる。そのため、以下の2ケースについてMAAP解析を実施した。

4.1 GE25発信後AM策なしのケース

事象発生から1時間25分後、全交流電源喪失1時間以上継続によりGE25が発信する (表1参照)。この後、全てのAM策が実施できないという想定でMAAP解析を実施した結果について、プラント主要パラメータである1次冷却材圧力の経時変化を図8に、1次冷却材高温側温度の経時変化を図9に、格納容器圧力の経時変化を図10に、格納容器雰囲気温度の経時変化を図11に示す。

また、GE25以降の主要事象の発生時刻は表2の

表2 主要事象の発生時刻 (GE25発信後AM策なし)

経過時間	主要事象
1時間25分	全交流電源喪失1時間継続 (GE25)
2時間50分	SG広域水位10%未満
3時間59分	SGドライアウト
4時間55分	加圧器逃がしタンクラブチャディスク破損
5時間22分	炉心出口温度350℃超過
5時間49分	炉心露出
6時間52分	被覆管破損
7時間23分	炉心損傷
7時間23分	1次冷却材配管クリーブ破損
10時間46分	下部ヘッドへの溶融物移動開始
12時間32分	原子炉容器破損
13時間53分	CV最高使用圧力到達
34時間07分	CV最高使用圧力2倍到達

略語 SG : 蒸気発生器
 CV : 格納容器
 GE : 緊急事態事象

通りであり、事象発生から炉心損傷までの時間は7時間23分、格納容器の圧力が最高使用圧力の2倍

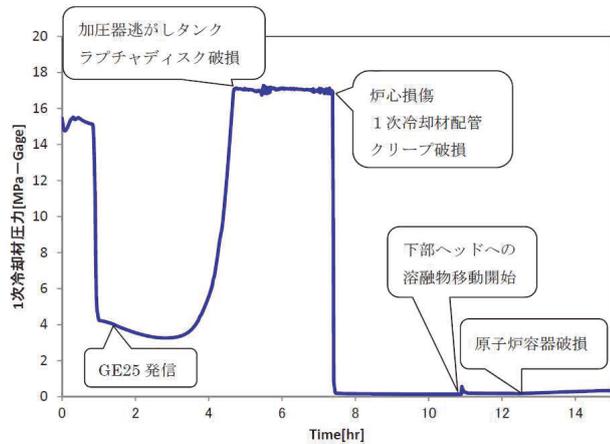


図8 1次冷却材圧力の経時変化

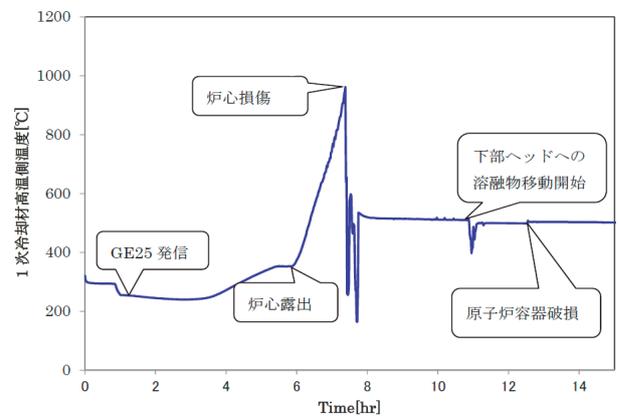


図9 1次冷却材高温側温度の経時変化

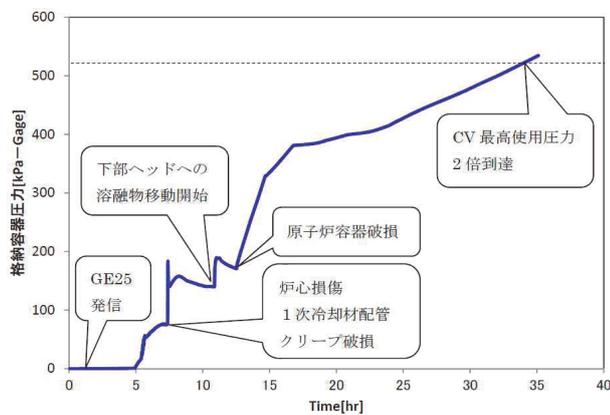


図10 格納容器圧力の経時変化

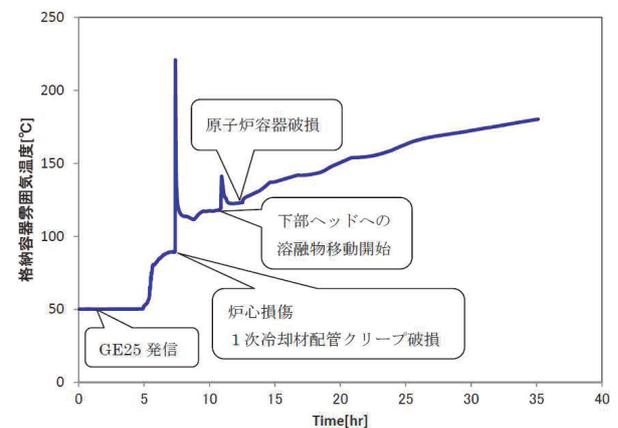


図11 格納容器雰囲気温度の経時変化

に到達するまでの時間は34時間07分であった。

事象発生から1時間30分後、余震発生により1次冷却材低温側配管が両端破断となるが、全交流電源喪失により非常用炉心冷却装置による安全注入不能によりGE21が発信する(表1参照)。この後、全てのAM策が実施できないという想定でMAAP解析を実施した結果について、プラント主要パラメータである1次系圧力の経時変化を図12に、1次冷却材高温側温度の経時変化を図13に、格納容器圧力の経時変化を図14に、格納容器雰囲気温度の経時変化を図15に示す。

また、GE21以降の主要事象の発生時刻は表3の通りであり、事象発生から炉心損傷までの時間は2時間34分、格納容器の圧力が最高使用圧力の2倍に到達するまでの時間は32時間35分であった。

表3 主要事象の発生時刻 (GE21 発信後 AM 策なし)

経過時間	主要事象
1 時間 30 分	余震発生 1次冷却材漏洩口径拡大 (1次冷却材低温側配管両端破断) 安全注入不能 (AL42,SE21,GE21)
1 時間 30 分	炉心露出
2 時間 16 分	炉心出口温度350℃超過
2 時間 26 分	被覆管破損
2 時間 34 分	炉心損傷
3 時間 37 分	下部ヘッドへの溶融物移動開始
5 時間 18 分	原子炉容器破損
8 時間 54 分	CV 最高使用圧力到達
32 時間 35 分	CV 最高使用圧力 2 倍到達

略語 CV : 格納容器
A : 警戒事象
SE : 特定事象
GE : 緊急事態事象

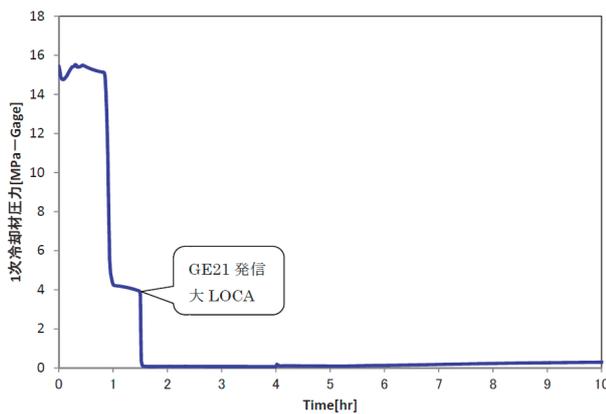


図12 1次冷却材圧力の経時変化

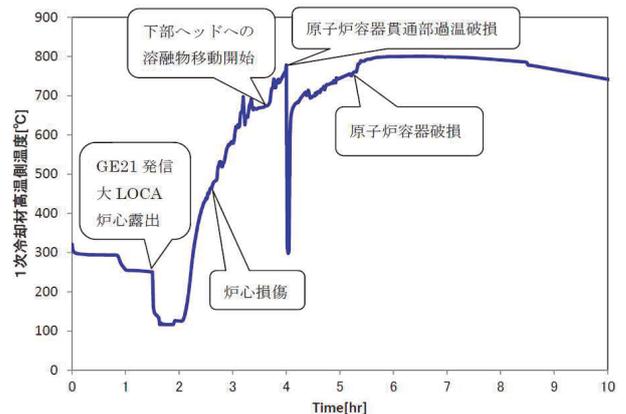


図13 1次冷却材高温側温度の経時変化

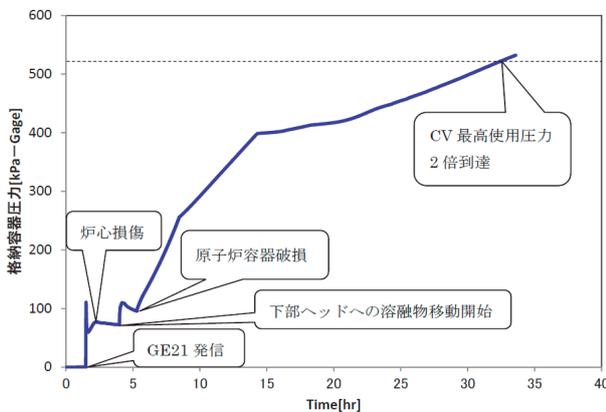


図14 格納容器圧力の経時変化

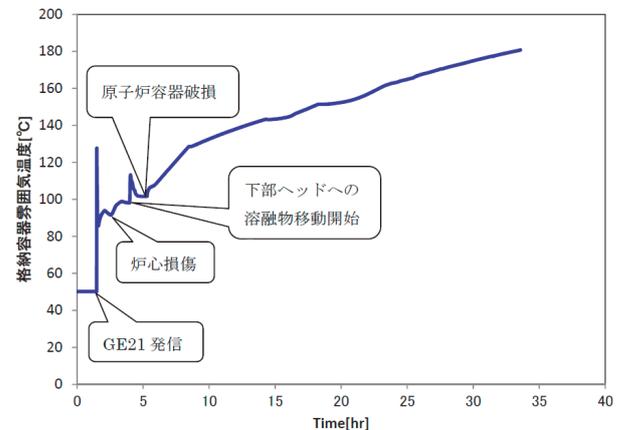


図15 格納容器雰囲気温度の経時変化

5. 結 言

平成30年度に実施された関西電力(株)美浜発電所3号機を対象とした訓練シナリオ解析の結果から、災害事象進展ならびにAM策が実施できなかった場合のプラント応答について評価を実施した。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) 事象発生からの時間は、原災法第10条通報事象まで55分、原災法第15条該当事象まで1時間25分であった。
- (2) 炉心損傷前に、選定したAM策である恒設代替低圧注水ポンプ等による炉心注入および原子炉下部キャビティ注水ポンプ等による格納容器スプレイを実施することにより、1次冷却材高温側温度（炉心温度）、格納容器の圧力と温度の上昇も抑制され、事象が収束することを確認した。
- (3) GE25あるいはGE21発信後にAM策が実施できなかった場合のMAAP解析を実施した結果、GE25のケースでは事象発生から炉心損傷までの時間は7時間23分、格納容器の圧力が最高使用圧力の2倍に到達するまでの時間は34時間07分、GE21のケースでは事象発生から炉心損傷までの時間は2時間34分、格納容器の圧力が最高使用圧力の2倍に到達するまでの時間は32時間35分であった。

文 献

- (1) IAEA, "Basic Safety Principles Nuclear Power Plants 75-INSAG-3 Rev.1", INSAG-12, (1999).
- (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/shiryou/houritsu/002-1.html>, (2019).
- (3) 関西電力(株), "美浜発電所 原子力事業者防災業務計画", (2019).
- (4) Electric Power Research Institute (EPRI), "Modular Accident Analysis Program, MAAP4 User's Manual", (2007).