

# 2021 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. 2021

川崎 郁夫 (Ikuo Kawasaki)\*<sup>1</sup> 高木 俊弥 (Toshiya Takaki)\*<sup>1</sup> 山本 治宗 (Yoshinori Yamamoto)\*<sup>2</sup>  
山崎 強 (Tsuyoshi Yamazaki)\*<sup>2</sup> 池田 浩之 (Hiroyuki Ikeda)\*<sup>2</sup> 武部 創 (Hajime Takebe)\*<sup>2</sup>

**要約** 2021 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 50 分、原災法第 15 条該当事象まで 1 時間 20 分であった。(2) 炉心損傷後に、選定したアクシデントマネジメント (AM) 策によるキャビティ直接注水、代替炉心注水および代替格納容器スプレイを実施することにより、炉心出口温度、格納容器圧力および温度の上昇が抑制され、原子炉容器破損および格納容器破損に至らず事象が収束することを確認した。(3) 緊急事態事象 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、事象発生から炉心損傷までの時間は 2 時間 16 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 62 時間 37 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 FY2021 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 50 minutes from the start of the event as defined by Article 10 of the Nuclear Disaster Act, and 1 hour and 20 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 direct cavity water injection and alternative core injection and alternative containment spray, which were the selected accident management (AM) measures, were carried out after core damage, and the rises in core temperature, containment pressure and temperature were suppressed and the events converged without causing damage to the reactor vessel and containment vessel. (3) As a result of performing MAAP analysis when AM measures could not be implemented after GE21 dispatch, 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. はじめに

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であり、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<sup>(1)</sup>。

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）<sup>(2)</sup>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<sup>(3)</sup>を作成し、その第 2 章第 7 節では、原子力事業者の原

\*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)

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は、美浜発電所原子力事業者防災業務計画、美浜発電所原子力防災訓練中期計画および原子力事業本部原子力防災訓練中期計画を踏まえた。関西電力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は、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が検討された。

今回の事象進展シナリオは、関西電力美浜発電所 3 号機において、地震により全交流電源喪失、1 次冷却材漏洩および原子炉冷却機能の喪失が発生し、炉心損傷に至るものの、その後の AM 策により事象が収束するとされた。

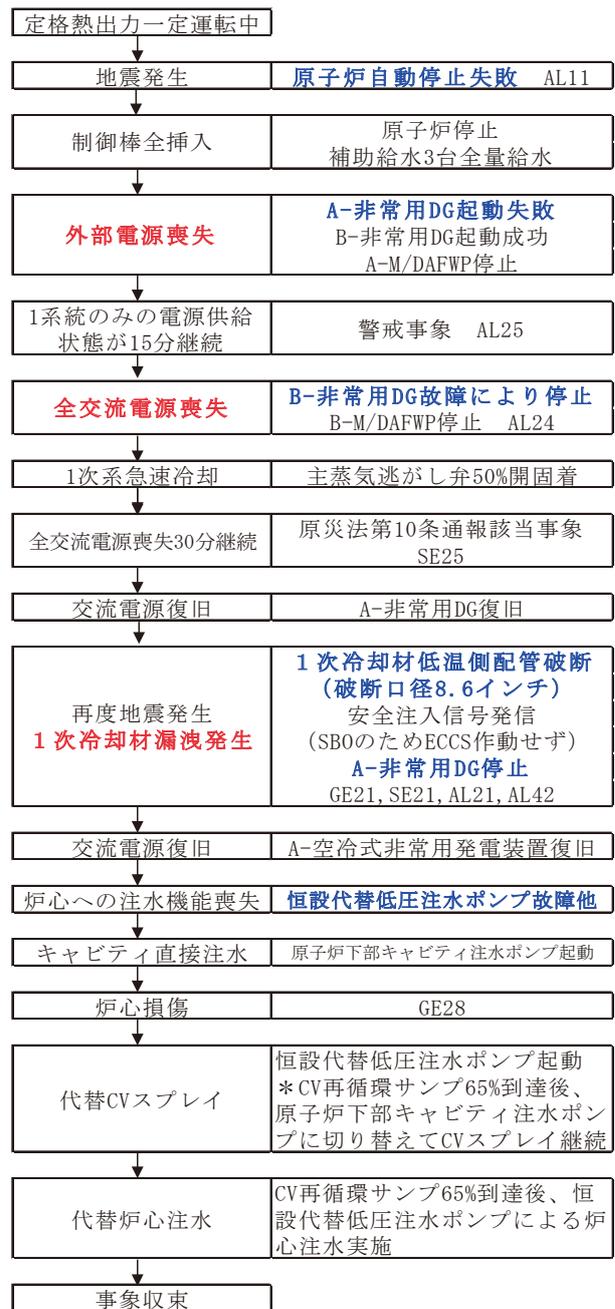
原子力安全システム研究所では、原子力防災訓練シナリオワーキングで決定した訓練シナリオおよび解析条件に基づいて、シビアアクシデント解析コード MAAP4<sup>(4)</sup>を用いて解析を実施しプラント事象進展評価を行った。

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

関西電力より提示された事象進展シナリオの条件は、起回事象は地震による外部電源喪失、その後全交流電源喪失に至るものであった。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を仮定し、炉心損傷に至るものの AM 策を実施することにより事象が収束することを想定した。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 に訓練想定の概要を示す。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しようとするも失敗し警戒事象 (AL11) となるが、その後制御棒全挿入により原子炉停止となることを想定した。



- 略語 SG : 蒸気発生器  
 DG : ディーゼル発電機  
 M/DAFWP : 電動補助給水ポンプ  
 SBO : 全交流電源喪失  
 ECCS : 非常用炉心冷却装置  
 CV : 格納容器  
 原災法 : 原子力災害対策特別措置法  
 AL : 警戒事象に相当する事象  
 SE : 施設敷地緊急事態に相当する事象  
 GE : 全面緊急事態に相当する事象

図 1 訓練想定概要

外部電源喪失が発生し、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。

運転中の非常用ディーゼル発電機が故障により停止することで、全交流電源喪失となり、運転中の電動補助給水ポンプが停止したことにより警戒事象 (AL24) となるため、主蒸気逃がし弁を開放したが、50%開固着の状態での1次系急速冷却を開始する。

全交流電源喪失30分継続により原災法第10条事象 (SE25) となる。

A 非常用ディーゼル発電機電源が復旧するが、その後再度地震が発生し、1次冷却系統低温側配管 (コールドレグ) において1次冷却材漏洩が発生する。また、A 非常用ディーゼル発電機が停止することで、全交流電源喪失による安全注入不可となるため、原災法第15条事象 (GE21) となる。

その後交流電源が復旧するものの、炉心への注水機能が喪失しているため、炉心損傷に至る。

その後炉心への注水および格納容器スプレー手段が回復し、原子炉容器破損および格納容器破損に至らず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。

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
-10分	地震発生 (震度6弱) 原子炉自動停止失敗 (AL11)
0分	制御棒全挿入 補助給水3台全量給水 *ここからMAAP解析実施
5分	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
20分	1系統のみの電源供給状態15分継続 (AL25) B 非常用DG故障により停止 (全交流電源喪失) B-M/DAFWP停止 (AL24) 1次系急速冷却開始 (主蒸気逃がし弁50%開固着)
50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
1時間00分	A 非常用DG復旧

1時間20分	地震発生 (震度5弱) 1次冷却材漏洩発生 (コールドレグ8.6インチ) 安全注入信号発信 (SBOのためECCS作動せず) A 非常用DG故障停止 (GE21, SE21, AL21, AL42) 原災法第15条該当事象
1時間40分	A 空冷式非常用発電装置復旧 恒設代替低圧注水ポンプ故障他
1時間48分	炉心露出
1時間59分	炉心出口温度350℃超過 (SE42)
2時間08分	炉心出口温度650℃超過
2時間09分	燃料被覆管破損
2時間10分	原子炉下部キャビティ注水ポンプ起動 (キャビティ直接注水120m <sup>3</sup> /h)
2時間20分	炉心損傷 (格納容器エリアモニタ (高レンジ) が1×10 <sup>5</sup> mSv/hを超過) (GE28)
2時間45分	恒設代替低圧注水ポンプ復旧 恒設代替低圧注水ポンプによる代替CVスプレー開始
2時間57分	タービン動補助給水ポンプ停止
3時間19分	下部ヘッドへの溶融物移動開始
4時間20分	CV再循環サンプル65%到達 原子炉下部キャビティ注水ポンプの注水先: 下部直接注水→代替CVスプレー 恒設代替低圧注水ポンプの注水先: 代替CVスプレー→代替炉心注水
—	事象収束

- 略語 SG : 蒸気発生器
- DG : ディーゼル発電機
- M/DAFWP : 電動補助給水ポンプ
- SBO : 全交流電源喪失
- ECCS : 非常用炉心冷却装置
- CV : 格納容器
- 原災法 : 原子力災害対策特別措置法
- AL : 警戒事象に相当する事象
- SE : 施設敷地緊急事態に相当する事象
- GE : 全面緊急事態に相当する事象

### 3.1 解析結果の概要

関西電力美浜発電所3号機定格熱出力一定運転中のところ地震が発生したが、原子炉自動停止が失敗し、制御棒全挿入不能となり警戒事象 (AL11) となった。10分後に原子炉トリップしゃ断器開放により制御棒全挿入となった。ここまでは関西電力にてシミュレータを用いた事象把握が行われた。そのアウトプットを用いて、ここから原子力安全システム研究所にてMAAP解析を行った。

制御棒全挿入から5分後に外部電源が喪失した。この時、A 非常用ディーゼル発電機の起動に失敗、B 非常用ディーゼル発電機の起動に成功した。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にて各蒸

気発生器へ 100m<sup>3</sup>/h で給水を開始した。

解析開始 20 分時点で、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) となった。B 非常用ディーゼル発電機が故障停止したことにより、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ことにより警戒事象 (AL24) となった。また、主蒸気逃がし弁を開放したが 50%開固着の状態での 1 次系急速冷却を開始した。

解析開始 50 分時点で、全交流電源喪失 30 分継続したことにより原災法第 10 条通報該当事象 (SE25) となった。

1 時間後に A 非常用ディーゼル発電機電源が復旧した。

1 時間 20 分後に地震が発生し、1 次冷却系統低温側配管 (コールドレグ) において 1 次冷却材漏洩 (漏洩口径 8.6 インチ) が発生した。また、A 非常用ディーゼル発電機が故障停止し、再度全交流電源喪失となった。安全注入 (SI) 信号が発信したが、全交流電源喪失のため非常用炉心冷却装置が作動せず、原災法第 15 条該当事象 (GE21) となった。

1 時間 40 分後に A 空冷式非常用ディーゼル発電機が復旧したが、恒設代替低圧注水ポンプ故障等により炉心への注水が不可となった。

2 時間 10 分後に原子炉下部キャビティ注水ポンプを起動し、キャビティへの直接注水を開始した。

2 時間 20 分後に炉心損傷に至り、原災法第 15 条該当事象 (GE28) となった。

2 時間 45 分後に恒設代替低圧注水ポンプが復旧し、恒設代替低圧注水ポンプによる代替格納容器スプレイを開始した。

格納容器再循環サンプル 65%到達後、キャビティへの注水が完了したため、原子炉下部キャビティ注水ポンプによる代替格納容器スプレイ、恒設代替低圧注水ポンプによる代替炉心注水を開始し、溶融炉心への直接注水を開始した。これにより、炉心出口温度、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、炉心出口温度の経時変化を図 3 に、格納容器圧力の経時変化を図 4 に、格納容器雰囲気温度の経時変化を図 5 に示す。

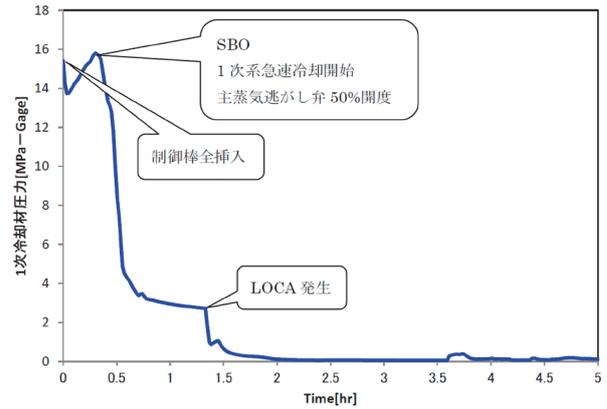


図 2 1 次冷却材圧力の経時変化

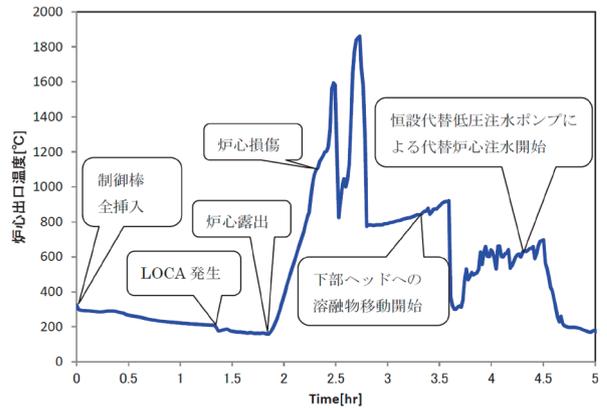


図 3 炉心出口温度の経時変化

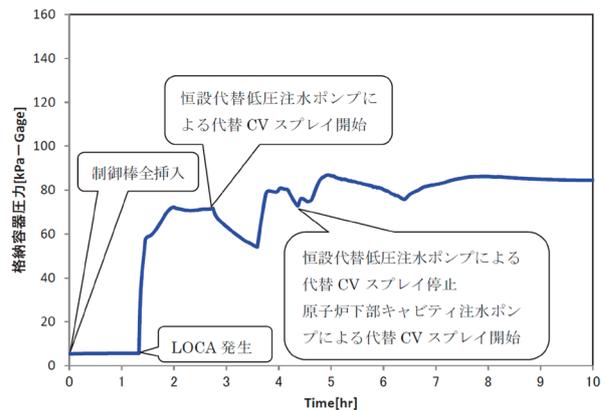


図 4 格納容器圧力の経時変化

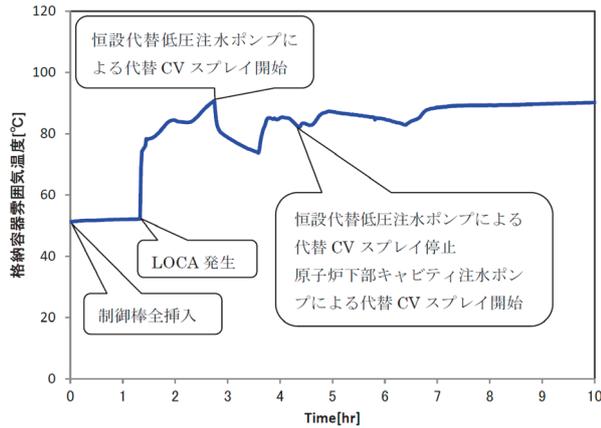


図5 格納容器雰囲気温度の経時変化

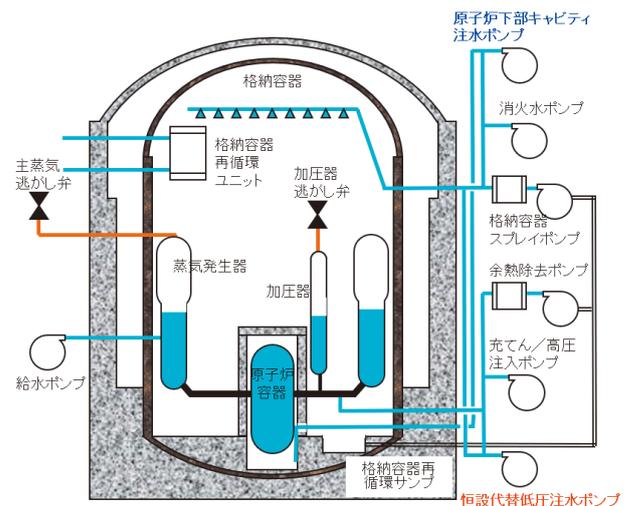


図6 AM策に用いられる設備の模式図

### 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、1次冷却材漏洩発生以降AM策が間に合わず炉心損傷に至るものの、その後のAM策により原子炉容器および格納容器は損傷しない想定である。

そのため、炉心損傷後に熔融物がコンクリートを侵食し、可燃性ガスを発生するとともに、床を貫通する恐れがある熔融炉心コンクリート相互作用（以下、MCCI という）防止を目的として、原子炉下部キャビティ注水ポンプの優先用途をキャビティ直接注水側で実施し、原子炉容器破損までにキャビティへの直接注水を最優先としている。

また、キャビティへの直接注水完了後、代替炉心注水による原子炉容器破損防止、代替格納容器スプレイによる格納容器破損防止に移行している。

なお、非常用ディーゼル発電機故障による非常用炉心冷却装置および格納容器スプレイの使用不能を想定したことにより、今回用いられたAM策は、空冷式非常用発電装置を起動して交流電源を復旧して、原子炉下部キャビティ注水ポンプによるキャビティ直接注水、恒設代替低圧注水ポンプによる代替炉心注水および代替格納容器スプレイ、原子炉下部キャビティ注水ポンプによる代替格納容器スプレイを実施することである。

図6にAM策に用いられる設備の模式図を示す。図中の赤字で示した設備が恒設代替低圧注水ポンプ、青字で示した設備が原子炉下部キャビティ注水ポンプである。

#### 【キャビティ直接注水】

キャビティ直接注水は、原子炉下部キャビティ注水ポンプにより燃料取替用水タンクから原子炉下部キャビティに注水を実施し、原子炉容器破損時にMCCIを防止するものである。

このAM策で期待される正の効果は、キャビティへの注水によるMCCIの防止および原子炉容器の冷却である。

一方、懸念される負の効果は、注水に伴い重要な設備・機器・計器類が水没する可能性である。

事象発生から1時間40分後に空冷式非常用発電装置によって交流電源が復旧し、2時間10分後に原子炉下部キャビティ注水ポンプによる注水を開始した。その後4時間20分後に規定水位である格納容器再循環サンプル水位65%に到達したので、注水を停止した。これにより原子炉容器破損時のMCCIを防止した。

#### 【代替炉心注水】

代替炉心注水は、高低圧注入系に接続した恒設代替低圧注水ポンプにより燃料取替用水タンクから1次冷却系統へ注水し、原子炉容器を冷却し、炉心熔融進展を抑制するものである。

このAM策で期待される正の効果は、1次冷却系統への注水による原子炉容器および炉心の冷却である。

一方、懸念される負の効果は、注水継続による1次冷却材の漏えいとそれに伴う格納容器内圧力の上昇である。

事象発生から1時間40分後に空冷式非常用発電装

置によって交流電源が復旧し、4 時間 20 分後に格納容器再循環サンプル水位が 65%に到達後、恒設代替低圧注水ポンプによる代替炉心注水を実施した。これにより、原子炉容器水位は回復し、炉心出口温度は 200°C 以下で安定した。

【代替格納容器スプレイ】

代替格納容器スプレイは、格納容器スプレイ系に接続した恒設代替低圧注水ポンプおよび原子炉下部キャビティ注水ポンプにより格納容器上部からスプレイを実施するものである。

この AM 策で期待される正の効果は、原子炉容器の冷却、格納容器圧力および温度上昇の抑制である。

一方、懸念される負の効果は、スプレイ実施に伴い重要な設備・機器・計器類が水没する可能性である。

事象発生から 1 時間 40 分後に空冷式非常用発電装置によって交流電源が復旧し、2 時間 45 分後に恒設代替低圧注水ポンプによる格納容器スプレイを実施した。また、4 時間 20 分後に格納容器再循環サンプル水位が 65%に到達後、恒設代替低圧注水ポンプから原子炉下部キャビティ注水ポンプに切り替えて、格納容器スプレイを継続し、格納容器圧力および格納容器雰囲気温度の上昇が抑制された。

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、1 次冷却材漏洩発生以降 AM 策が間に合わず炉心損傷に至るものの、その後の AM 策により原子炉容器および格納容器は損傷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、AM 策が実施できなかった場合について MAAP 解析を実施した。

事象発生から 1 時間 20 分後、1 次冷却材漏洩発生により 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 次冷却材圧力の経時変化を図 7 に、炉心出口温度の経時変化を図 8 に、格納容器圧力の経時変化を図 9 に、格納容器雰囲気温度の経時変化を図 10 に示す。

また、GE21 以降の主要事象の発生時刻は表 2 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 16 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 62 時間 37 分であった。

表 2 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 20 分	1 次冷却材漏洩発生 (GE21)
1 時間 48 分	炉心露出
1 時間 59 分	炉心出口温度 350°C 超過
2 時間 08 分	炉心出口温度 650°C 超過
2 時間 09 分	燃料被覆管破損
2 時間 16 分	炉心損傷
3 時間 28 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
10 時間 46 分	CV スプレイ作動設定値到達
27 時間 38 分	CV 最高使用圧力到達
62 時間 37 分	CV 最高使用圧力 2 倍到達

略語 GE：全面緊急事態に相当する事象  
CV：格納容器

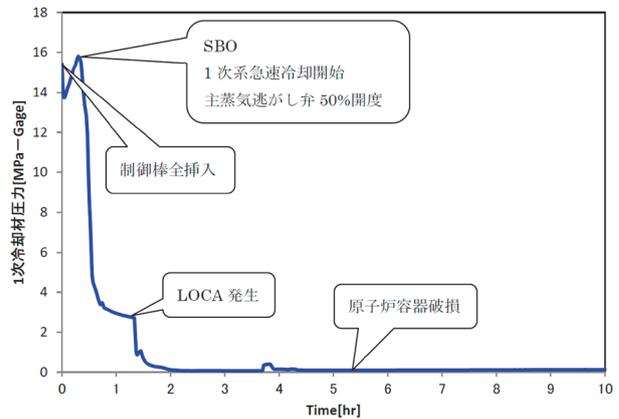


図 7 1 次冷却材圧力の経時変化

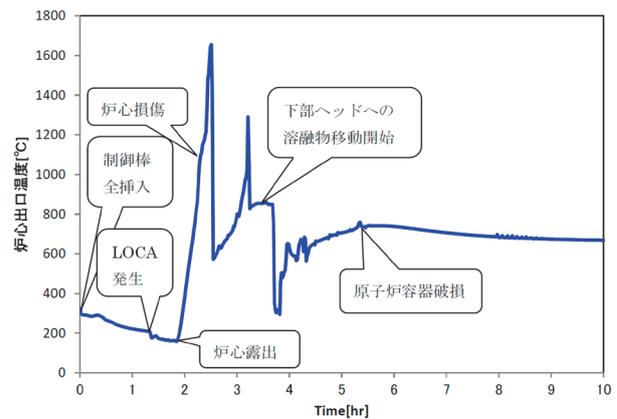


図 8 炉心出口温度の経時変化

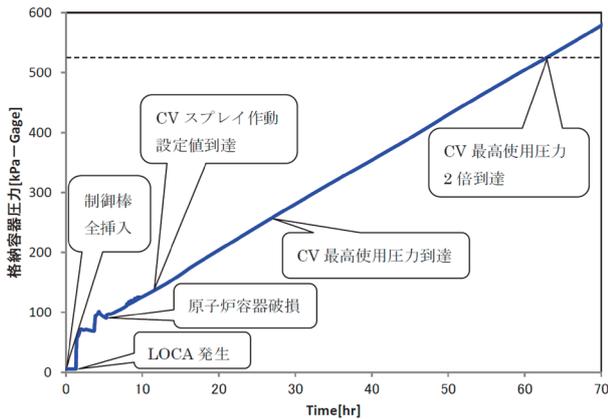


図9 格納容器圧力の経時変化

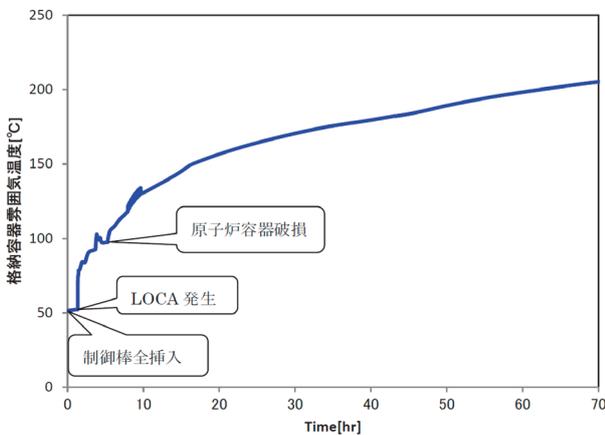


図10 格納容器雰囲気温度の経時変化

## 5. 結論

2021 年度に実施された関西電力美浜発電所 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 50 分、原災法第 15 条該当事象まで 1 時間 20 分であった。
- (2) 炉心損傷後に、限られた設備状況の中、MCCI 防止の観点からキャビティへの注水を最優先に対応し、その後代替炉心注水および代替格納容器スプレーを実施することにより、炉心出口温度、格納容器の圧力と温度の上昇も抑制され、原子炉容器破損および格納容器破損に至らず事象が収束することを確認した。
- (3) 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、事象発生から炉心損傷までの時間は 2 時間 16 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 62 時間 37 分であった。

## 引用文献

- (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>.
- (3) 関西電力(株), "美浜発電所 原子力事業者防災業務計画", (2021).
- (4) Electric Power Research Institute (EPRI), "Modular Accident Analysis Program, MAAP4 User's Manual", (2007).