

# 2023 年度 関西電力大飯発電所 3 号機防災訓練 シナリオに基づく解析

Analysis based on Ohi unit 3 emergency exercise scenario of  
Kansai Electric Power Co., Inc. held in FY 2023

川崎 郁夫 (Ikuo Kawasaki) \*1 高木 俊弥 (Toshiya Takaki) \*1

藤本 敦士 (Atsushi Fujimoto) \*2

**要約** 2023 年度に、関西電力大飯発電所 3 号機防災訓練シナリオ検討用として MAAP 解析を実施した。今回のシナリオでは、1 回目の全交流電源喪失発生後はアクシデントマネジメント策の実施により炉心損傷が回避できたものの、2 回目の全交流電源喪失発生後はアクシデントマネジメント策が実施できず炉心損傷が発生し、原子炉容器破損、格納容器最高使用圧力到達、格納容器最高使用圧力の 2 倍に到達するというものである。MAAP 解析の結果、一部シナリオが成立しない箇所について感度解析を実施し、その結果を反映して再解析を実施し、シナリオが成立することを確認した。解析結果の妥当性確認については、大飯 3 号機と同じ解析条件で高浜 3 号機の解析を実施し、解析結果の比較を実施した。その結果、プラント固有の設計の違いにより 2 回目の全交流電源喪失以降の解析時刻に差が出るが、プラント挙動は概ね一致しており、今回の解析結果が妥当であることを確認した。

**キーワード** 防災訓練, アクシデントマネジメント, シナリオ解析, MAAP

**Abstract** A MAAP analysis was conducted as part of Ohi unit 3 emergency exercise scenario consideration of Kansai Electric Power Co., Inc. held in FY 2023. In this scenario, after the first server-room blackout, the implementation of accident management measures successfully prevented core damage. However, after the second server-room blackout, the accident management measures could not be implemented, resulting in core damage, reactor vessel failure, reaching the maximum allowable pressure of the containment vessel, and eventually reaching twice the maximum allowable pressure of the containment vessel. As a result of the MAAP analysis, sensitivity analyses were conducted on certain scenarios that did not hold true, and the results were reflected in a re-analysis to confirm that the scenarios were valid. Regarding the validation of the analysis results, we conducted an analysis of Takahama Unit 3 under the same conditions as for Ohi Unit 3 and compared the analysis results. As a result, differences were observed in the analysis times after the second server-room blackout due to variations in the plant-specific design; however, the plant behavior was generally consistent, confirming the validity of the current analysis results.

**Keywords** emergency exercise, accident management, scenario analysis, 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<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ている。

訓練は万が一の原子力発電所の事故を想定したもので

あり、あえて設計基準対象施設及び重大事故等対処設備等が故障等により機能せず、原子力災害対策特別措置法<sup>(2)</sup>第 10 条第 1 項（施設敷地緊急事態）および第 15 条第 1 項（全面緊急事態）に該当する事象に至る原子力災害を想定して行うこととしている。関西電力では、原子力防災訓練を美浜、高浜、大飯発電所においてそれぞれ年 1 回実施し、事故への総合的な対応能力について検証および確認を実施している。

\* 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)

## 2. 防災訓練シナリオの概要

今回の大飯 3 号機防災訓練シナリオは、2023 年度に実施された高浜 1 号機防災訓練のシナリオを大飯 3 号機にあうよう検討用として作成されたもので、防災訓練シナリオの概要を表 1 に示す。

起因事象は地震による外部電源喪失、2 回目の全交流電源喪失後にはアクシデントマネジメント策がない状況で事象が進展し、炉心損傷、原子炉容器破損、格納容器最高使用圧力到達、格納容器最高使用圧力の 2 倍到達となるシナリオとしている。

表 1 大飯 3 号機防災訓練シナリオの概要

主要事象
地震発生（震度 6 弱）
原子炉自動停止
外部電源喪失
A,B-非常用 DG 自動起動成功
A,B-CHP 起動
A,B-M/DAFWP 起動
T/DAFWP 起動
B-非常用 DG 故障
*B トレン電源なし
地震発生（2 回目）
一次冷却材漏えい発生
SI 信号発信
ECCS 作動（A トレンのみ）
A-CHP 故障停止
A-SIP 起動失敗
A-RHRP 起動
A-CSP 起動
蓄圧注入開始
蓄圧注入終了
A-RHRP による低圧注入開始
RWSP への水補給開始
RWSP 水位低到達後、
A-RHRP による低圧再循環運転に切替
A-CSP による CV スプレイ再循環運転に切替
A-M/DAFWP 故障停止
A,B-空冷 DG 故障復旧→起動
B 安全系母線電圧確立
B-RHRP 起動
A,B-空冷 DG 受電盤故障
B 安全系母線停電

B-RHRP 停止
A,B-空冷 DG 故障停止
A-非常用 DG 故障停止
*全交流電源喪失発生（1 回目）
A-RHRP 停止
A-CSP 停止
2 次系強制冷却開始
B-非常用 DG 故障復旧→起動
B-RHRP による低圧再循環運転開始
B-CSP による CV スプレイ再循環運転開始
B-非常用 DG 故障
*全交流電源喪失発生（2 回目）
B-RHRP 停止
B-CSP 停止
炉心出口温度 350°C 超過
炉心損傷
原子炉容器破損
CV 最高使用圧力到達
CV 最高使用圧力の 2 倍到達

略語 DG : ディーゼル発電機  
 CHP : 充てんポンプ  
 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  
 SI : 安全注入  
 ECCS : 非常用炉心冷却装置  
 SIP : 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  
 RWSP : 燃料取替用水ピット  
 CV : 格納容器

大飯発電所 3 号機が定格熱出力一定運転中のところ地震が発生し、原子炉自動停止および外部電源が喪失する。この時、A、B 非常用ディーゼル発電機の起動に成功し、A、B 充てんポンプ、A、B 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する。

B 非常用ディーゼル発電機が故障停止し、B 充てんポンプ、B 電動補助給水ポンプが停止する。

再度地震が発生し、1 次冷却系統低温側配管において一次冷却材漏えいが発生する。安全注入信号が発信し、A トレンのみ非常用炉心冷却装置が作動する。この時、A 充てんポンプ故障停止、A 高圧注入ポンプ起動失敗、A 余熱除去ポンプ起動成功となる。その後、蓄圧注入、格納容器ス

プレイポンプ起動による格納容器スプレイ, A 余熱除去ポンプによる低圧注入を開始する。

燃料取替用水ピットへの水補給を開始する。

燃料取替用水ピット水位低到達後, A 余熱除去ポンプによる低圧再循環運転, A 格納容器スプレイポンプによるスプレイ再循環運転に切替える。

A 電動補助給水ポンプがトリップする。

A, B 空冷非常用発電機が復旧し, B 安全系母線電源が確立する。B 余熱除去ポンプを起動する。

A, B 空冷非常用発電機受電盤故障により B 安全系母線が停電し, B 余熱除去ポンプが停止する。

A, B 空冷非常用発電機および A 非常用ディーゼル発電機がトリップし, 全交流電源喪失となる。それにより, A 余熱除去ポンプおよび A 格納容器スプレイポンプが停止する。2 次系強制冷却を開始する。

B 非常用ディーゼル発電機が復旧し, B 余熱除去ポンプによる低圧再循環運転, B 格納容器スプレイポンプによるスプレイ再循環運転を開始する。

B 非常用ディーゼル発電機が故障し, 再び全交流電源喪失となる。

その後, アクシデントマネジメント策がない状況で事象が進展し, 炉心損傷, 原子炉容器破損, 格納容器最高使用圧力到達, 格納容器最高使用圧力の 2 倍到達となる。

### 3. 防災訓練シナリオの試解析結果

今回の防災訓練シナリオについて, シビアアクシデント解析コード MAAP4<sup>(9)</sup>を用いて試解析を実施した。試解析結果は表 2 の通りであり, 事象発生から 5 時間後の全交流電源喪失発生後, B 非常用ディーゼル発電機が復旧する 6 時間 05 分 (全交流電源喪失発生から 65 分後) よりも前の 5 時間 52 分 (全交流電源喪失発生から 52 分後) に炉心損傷してしまうため, 表 1 のシナリオが成立しないことが判明した。炉心出口温度のグラフを図 1 に示す。

表 2 大飯 3 号機防災訓練シナリオの試解析結果

経過時間	主要事象
0:00	地震発生 (震度 6 弱) 原子炉自動停止 外部電源喪失 A,B-非常用 DG 自動起動成功 A,B-CHP 起動 A,B-M/DAFWP 起動 T/DAFWP 起動

0:45	B-非常用 DG 故障 *B トレン電源なし
2:00	地震発生 (2 回目) 一次冷却材漏えい発生 SI 信号発信 ECCS 作動 (A トレンのみ) A-CHP 故障停止 A-SIP 起動失敗 A-RHRP 起動 A-CSP 起動
2:01	蓄圧注入開始
2:02	蓄圧注入終了 A-RHRP による低圧注入開始
2:30	RWSP への水補給開始
3:00	A-M/DAFWP 故障停止
3:16	RWSP 水位低到達 A-RHRP による低圧再循環運転に切替 A-CSP による CV スプレイ再循環運転に切替
4:00	A,B-空冷 DG 故障復旧→起動 B 安全系母線電圧確立 B-RHRP 起動
4:20	A,B-空冷 DG 受電盤故障 B 安全系母線停電 B-RHRP 停止
5:00	A,B-空冷 DG 故障停止 A-非常用 DG 故障停止 *全交流電源喪失発生 A-RHRP 停止 A-CSP 停止 2 次系強制冷却開始
5:33	炉心出口温度 350°C 超過
5:52	炉心損傷
6:05	B-非常用 DG 故障復旧→起動 B-RHRP による低圧再循環運転開始 B-CSP による CV スプレイ再循環運転開始

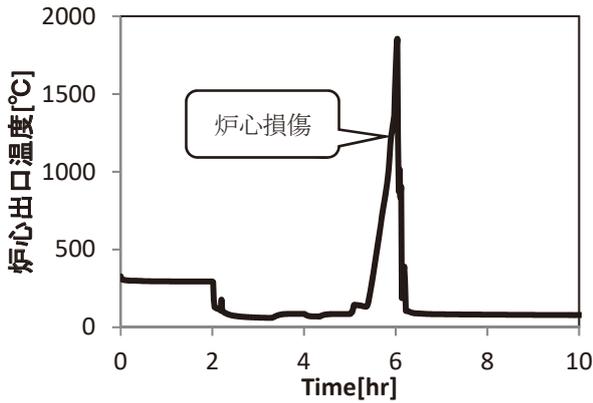


図1 炉心出口温度

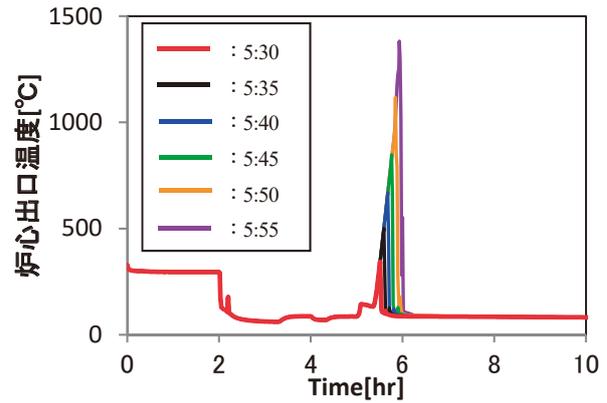


図2 炉心出口温度の比較

#### 4. 感度解析結果

試解析の結果、B 非常用ディーゼル発電機が復旧する前に炉心損傷に至るため、B 非常用ディーゼル発電機の復旧時刻を前倒して炉心損傷を回避するよう調整した。B 非常用ディーゼル発電機復旧時刻変更による感度解析結果を表3、炉心出口温度の比較のグラフを図2に示す。

感度解析の結果、炉心損傷の判断基準である炉心出口温度 350°C以上、格納容器高レンジエリアモニタ指示値  $1 \times 10^5 \text{mSv/h}$  以上を踏まえ、B 非常用ディーゼル発電機復旧時刻は事象発生から5時間30分後（全交流電源喪失発生から30分後）を採用する。

表3 B 非常用ディーゼル発電機復旧時刻変更による感度解析結果

B 非常用ディーゼル発電機復旧時刻	炉心出口温度 (最大)	格納容器高レンジエリアモニタ
5:30	343.6°C	○
5:35	500.5°C	○
5:40	669.0°C	○
5:45	847.1°C	△ (燃料被覆管破損)
5:50	1117.1°C	△ (燃料被覆管破損)
5:55	1382.3°C	× (炉心損傷)

#### 5. 感度解析結果を反映した再解析結果

感度解析結果を反映して大飯3号機防災訓練シナリオの再解析を実施した。大飯3号機防災訓練シナリオ再解析結果を表4、主要なプラントパラメータの挙動について1次冷却材圧力、原子炉容器水位、炉心出口温度、格納容器圧力 (20時間)、格納容器圧力 (100時間) のグラフをそれぞれ図3~7に示す。

表4 大飯3号機防災訓練シナリオの再解析結果

経過時間	主要事象
0:00	地震発生 (震度6弱) 原子炉自動停止 外部電源喪失 A,B-非常用 DG 自動起動成功 A,B-CHP 起動 A,B-M/DAFWP 起動 T/DAFWP 起動
0:45	B-非常用 DG 故障 *B トレン電源なし
2:00	地震発生 (2回目) 一次冷却材漏えい発生 SI 信号発信 ECCS 作動 (A トレンのみ) A-CHP 故障停止 A-SIP 起動失敗 A-RHRP 起動
2:01	蓄圧注入開始 A-CSP 起動
2:02	蓄圧注入終了 A-RHRP による低圧注入開始

2:30	RWSP への水補給開始
3:00	A-M/DAFWP 故障停止
3:16	RWSP 水位低到達 A-RHRP による低圧再循環運転に切替 A-CSP による CV スプレー再循環運 転に切替
4:00	A,B-空冷 DG 故障復旧→起動 B 安全系母線電圧確立 B-RHRP 起動
4:20	A,B-空冷 DG 受電盤故障 B 安全系母線停電 B-RHRP 停止
5:00	A,B-空冷 DG 故障停止 A-非常用 DG 故障停止 *全交流電源喪失発生 (1 回目) A-RHRP 停止 A-CSP 停止 2 次系強制冷却開始
5:30	B-非常用 DG 故障復旧→起動 B-RHRP による低圧再循環運転開始 B-CSP による CV スプレー再循環運 転開始
11:15	B-非常用 DG 故障 *全交流電源喪失発生 (2 回目) B-RHRP 停止 B-CSP 停止
12:21	炉心出口温度 350°C超過
12:58	炉心損傷
16:41	原子炉容器破損
55:03	CV 最高使用圧力到達
84:52	CV 最高使用圧力の 2 倍到達

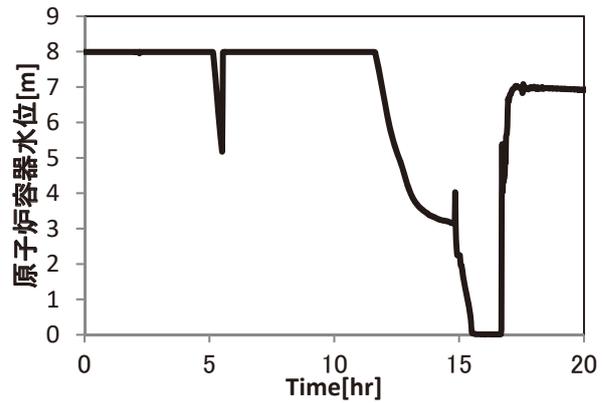


図4 原子炉容器水位

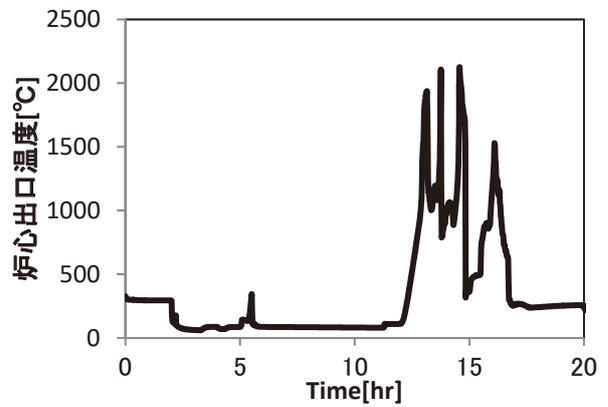


図5 炉心出口温度

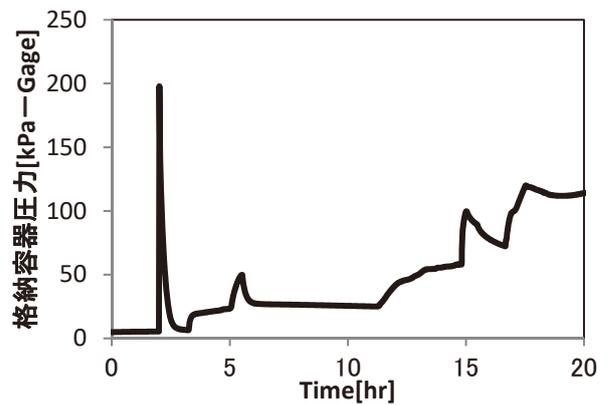


図6 格納容器圧力 (20 時間)

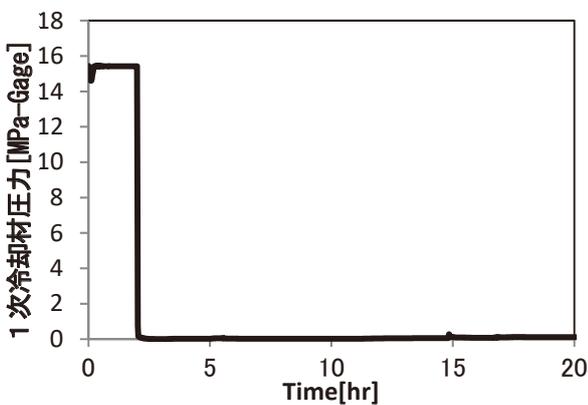


図3 1次冷却材圧力

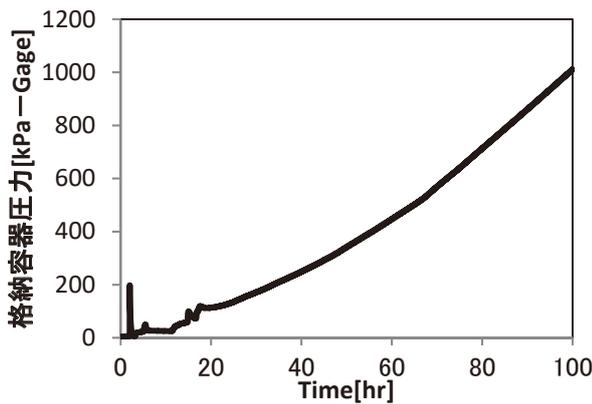


図7 格納容器圧力 (100 時間)

再解析結果の概要は以下の通りである。

大飯発電所 3 号機が定格熱出力一定運転中のところ地震が発生し、原子炉自動停止および外部電源が喪失した。この時、A、B 非常用ディーゼル発電機の起動に成功し、A、B 充てんポンプ、A、B 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。

事象発生から 45 分後に、B 非常用ディーゼル発電機が故障停止し、B 充てんポンプ、B 電動補助給水ポンプが停止した。

事象発生から 2 時間後に、再度地震が発生し、1 次冷却系統低温側配管において一次冷却材漏えいが発生した。安全注入信号が発信し、A トレンのみ非常用炉心冷却装置が作動した (B トレン電源なし)。この時、A 充てんポンプ故障停止、A 高圧注入ポンプ起動失敗、A 余熱除去ポンプ起動成功となった。

事象発生から 2 時間 01 分後に、蓄圧注入を開始した。また、格納容器圧力が格納容器スプレイ作動設定値到達により、格納容器スプレイポンプが起動し格納容器スプレイを開始した。

事象発生から 2 時間 02 分後に、蓄圧注入が終了し、A 余熱除去ポンプによる低圧注入を開始した。

事象発生から 2 時間 30 分後に、燃料取替用水ピットへの水補給を開始した。

事象発生から 3 時間後に、A 電動補助給水ポンプがトリップした。

事象発生から 3 時間 16 分後に、燃料取替用水ピット水位低に到達したことにより、A 余熱除去ポンプによる低圧再循環運転、A 格納容器スプレイポンプによるスプレイ再循環運転に切替えた。

事象発生から 4 時間後に、A、B 空冷非常用発電機が復旧し、B 安全系母線電源が確立したので、B 余熱除去ポン

プを起動した。

事象発生から 4 時間 20 分後に、A、B 空冷非常用発電機受電盤故障により B 安全系母線が停電し、B 余熱除去ポンプが停止した。

事象発生から 5 時間後に、A、B 空冷非常用発電機および A 非常用ディーゼル発電機がトリップし、1 回目の全交流電源喪失となった。それにより、A 余熱除去ポンプおよび A 格納容器スプレイポンプが停止した。また、2 次系強制冷却を開始した。

事象発生から 5 時間 30 分後に、B 非常用ディーゼル発電機が復旧し、B 余熱除去ポンプによる低圧再循環運転、B 格納容器スプレイポンプによるスプレイ再循環運転を開始した。

事象発生から 11 時間 15 分後に、B 非常用ディーゼル発電機が故障し、2 回目の全交流電源喪失となった。

その後、アクシデントマネジメント策がない状況で事象が進展し、事象発生から 12 時間 58 分後に炉心損傷、16 時間 41 分後に原子炉容器破損、55 時間 03 分後に格納容器最高使用圧力到達、84 時間 52 分後に格納容器最高使用圧力の 2 倍到達となった。

再解析の結果、事象発生から 5 時間後の 1 回目の全交流電源喪失発生後、B 非常用ディーゼル発電機の復旧時刻を 5 時間 30 分 (全交流電源喪失発生から 30 分後) に変更することにより炉心損傷を回避し、シナリオが成立することが確認できた。

## 6. 解析結果の妥当性確認

解析結果の妥当性確認については、大飯 3 号機と同じ解析条件で高浜 3 号機の解析を実施し、解析結果の比較を実施した。大飯 3 号機と高浜 3 号機の解析結果の比較を表 5 に示す。また、主要なプラントパラメータの挙動について 1 次冷却材圧力、原子炉容器水位、炉心出口温度、格納容器圧力 (20 時間)、格納容器圧力 (100 時間) の比較グラフをそれぞれ図 8~12 に示す。

大飯 3 号機と高浜 3 号機の解析結果を比較した結果、2 回目の全交流電源喪失から原子炉容器破損までは、ループ数、燃料集合体数の違いにより原子炉容器水位、炉心出口温度については高浜 3 号機に比べて大飯 3 号機の事象進展が早く進み、原子炉容器破損以降は格納容器の大きさの違いにより格納容器圧力は高浜 3 号機に比べて大飯 3 号機の事象進展が早く進む。なお、MAAP 解析では格納容器最高使用圧力の 3 倍到達で格納容器破損を想定しているため、高浜 3 号機は当該圧力到達による格納容器破損に

より格納容器圧力が低下する。

プラント固有の設計の違いにより事象進展に差が出るが、プラント挙動は概ね一致しており、今回の解析結果が妥当であることが確認できた。

表5 大飯3号機と高浜3号機の解析結果の比較

主要事象	大飯3号機	高浜3号機
地震発生(震度6弱)	0:00	0:00
原子炉自動停止 外部電源喪失 A,B-非常用DG自動起動成功 A,B-CHP起動 A,B-M/DAFWP起動 T/DAFWP起動		
B-非常用DG故障 *Bトレン電源なし	0:45	0:45
地震発生(2回目) 一次冷却材漏えい発生 SI信号発信 ECCS作動(Aトレンのみ) A-CHP故障停止 A-SIP起動失敗 A-RHRP起動	2:00	2:00
蓄圧注入開始 A-CSP起動	2:01	2:01
蓄圧注入終了 A-RHRPによる低圧注入開始	2:02	2:02
RWSPへの水補給開始	2:30	2:30
A-M/DAFWP故障停止	3:00	3:00
RWSP水位低到達 A-RHRPによる低圧再循環運転に切替 A-CSPによるCVスプレイ再循環運転に切替	3:16	2:55
A,B-空冷DG故障復旧→起動 B安全系母線電圧確立 B-RHRP起動	4:00	4:00
A,B-空冷DG受電盤故障 B安全系母線停電	4:20	4:20

B-RHRP停止		
A,B-空冷DG故障停止 A-非常用DG故障停止 *全交流電源喪失発生(1回目) A-RHRP停止 A-CSP停止 2次系強制冷却開始	5:00	5:00
B-非常用DG故障復旧→起動 B-RHRPによる低圧再循環運転開始 B-CSPによるCVスプレイ再循環運転開始	5:30	5:30
B-非常用DG故障 *全交流電源喪失発生(2回目) B-RHRP停止 B-CSP停止	11:15	11:15
炉心出口温度350°C超過	12:21	13:41
炉心損傷	12:58	14:18
原子炉容器破損	16:41	18:05
CV最高使用圧力到達	55:03	39:09
CV最高使用圧力の2倍到達	84:52	61:59

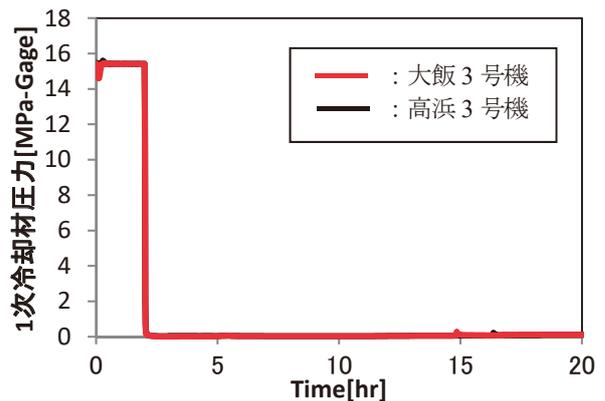


図8 1次冷却材圧力の比較

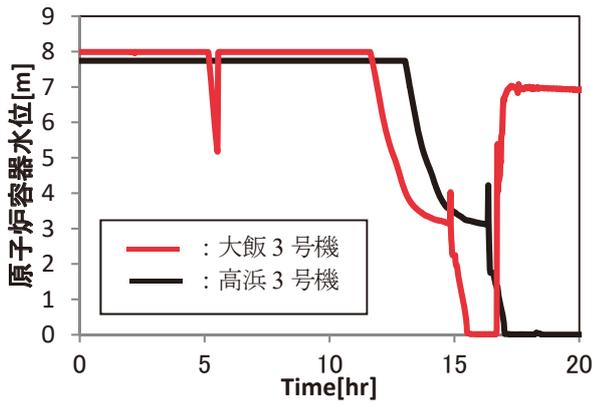


図9 原子炉容器水位の比較

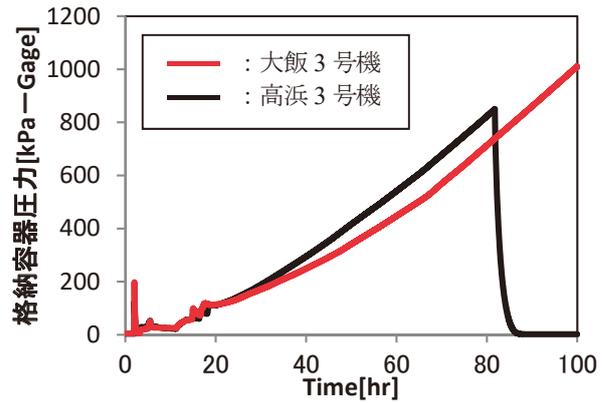


図12 格納容器圧力（100時間）の比較

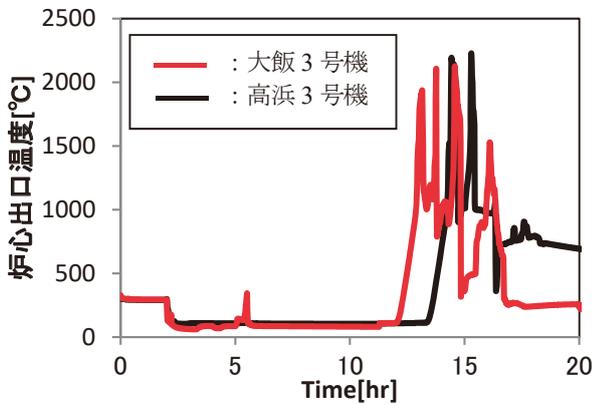


図10 炉心出口温度の比較

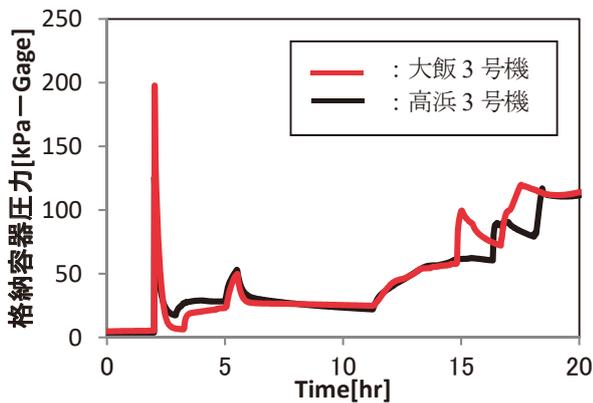


図11 格納容器圧力（20時間）の比較

## 7. おわりに

2023年度に、関西電力大飯発電所3号機防災訓練シナリオ検討用としてMAAP解析を実施した。今回のシナリオでは、1回目の全交流電源喪失発生後はアクシデントマネジメント策の実施により炉心損傷が回避できたものの、2回目の全交流電源喪失発生後はアクシデントマネジメント策が実施できず炉心損傷が発生し、原子炉容器破損、格納容器最高使用圧力到達、格納容器最高使用圧力の2倍に到達した。

MAAP解析の結果、一部シナリオが成立しない箇所について感度解析を実施し、その結果を反映して再解析を実施し、シナリオが成立することを確認した。

解析結果の妥当性確認については、大飯3号機と同じ解析条件で高浜3号機の解析を実施し、解析結果の比較を実施した。その結果、プラント固有の設計の違いにより2回目の全交流電源喪失以降の解析時刻に差が出るが、プラント挙動は概ね一致しており、今回の解析結果が妥当であることを確認した。

## 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", <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=411AC0000000156>.
- (3) Electric Power Research Institute (EPRI), "Modular Accident Analysis Program, MAAP4 User's Manual", (2007).