

# 東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故の 検討と対策の提言 (概要版)

平成 23 年 10 月

日本原子力技術協会

福島第一原子力発電所事故調査検討会

## はじめに

本報告書は、平成23年3月11日に発生した東日本大震災による東京電力（株）福島第一原子力発電所（以下「福島第一」という）の事故について、日本の電力、メーカーを含めた原子力産業界の総力を結集し、公表された事実とこれまでに蓄積された運転経験に基づく知識あるいはプラント設計により培われた知識を基に事故を分析し、今後取り組むべき対策と提言をまとめたものである。

これらの対策を実践することにより、原子力発電所のより一層の安全性が確保されるものとする。

## 1. 福島第一原子力発電所および事故の概要

### 1.1 福島第一原子力発電所の概要

福島第一は、日本の東北（北緯37度、東経141度）にあり、東京から北方約225kmの太平洋に面している。

初号機は1971年に運転を開始しており、総電気出力は4,696MWである。各号機の主要緒元を下表に示す。

| 号機 | 電気出力<br>(MW) | 運転開始<br>年月日 | 炉型式   | 格納容器型式  | 主契約者  |
|----|--------------|-------------|-------|---------|-------|
| 1  | 460          | 1971.3.26   | BWR-3 | Mark I  | GE    |
| 2  | 784          | 1974.7.18   | BWR-4 | Mark I  | GE・東芝 |
| 3  | 784          | 1976.3.27   | BWR-4 | Mark I  | 東芝    |
| 4  | 784          | 1978.10.12  | BWR-4 | Mark I  | 日立    |
| 5  | 784          | 1978.4.18   | BWR-4 | Mark I  | 東芝    |
| 6  | 1100         | 1979.10.24  | BWR-5 | Mark II | GE・東芝 |

### 1.2 東北地方太平洋沖地震に伴う事故の概要

福島第一は、1～3号機が運転中、4～6号機は停止中のところ、平成23年3月11日14時46分東北地方太平洋沖地震に見舞われ、1～3号機が「地震加速度大」信号により自動停止した。

原子炉停止に伴い発電機が停止し、さらに地震により外部電源系設備の機能も喪失した。しかし、各号機の交流電源は、非常用ディーゼル発電機（以下「非常用DG」）により供給された。

その後に襲来した大津波により、6号機の空冷式1台を除くすべての非常用DGが停止し、1～5号機は全ての交流電源を喪失した。

さらに、直流電源も1～2号機及び4号機は浸水により機能を喪失し、3号機はバッテリーの消耗により機能を喪失した結果、1～4号機はすべての電源を喪失した。

交流電源喪失により原子炉および使用済燃料プールの既設の冷却機能が喪失し、仮設電源および代替注水による冷却を試みたが、炉心燃料が損傷し放射性物質が環境へ放出される事態へ進展した。

### 1.2.1 地震による影響

地震の観測記録では、一部の周期帯で基準地震動  $S_s$  による応答スペクトルを上回っているものの概ね同程度となっている。また、津波到達前には安全系の機器は機能していた。観測記録に基づき原子炉建屋および耐震安全上重要な機器・配管系に対して東京電力が実施した地震応答解析でも、いずれの安全上重要な機器も機能を保持していたという結果になっている。

### 1.2.2 津波による影響

津波高さは、下図に示すように設計津波水位を上回り、主要建屋の周辺のほぼ全域が浸水した。主要建屋の構造躯体に有意な損傷はないものの、開口部などから建屋内へ海水が流入し、通路や階段室等を介して地下の広い範囲も浸水した。

また、原子炉建屋やタービン建屋の地下階に設置されている非常用 DG 及び電源盤の多くが津波の被害を受け、6 号機を除き非常用電源の機能が失われた。

さらに、全ての冷却用海水ポンプが津波によって被害を受け、炉心等の熱を海へ放出する手段が失われ、安全上重要な機器も、建屋内への海水の浸入により被害を受けている。

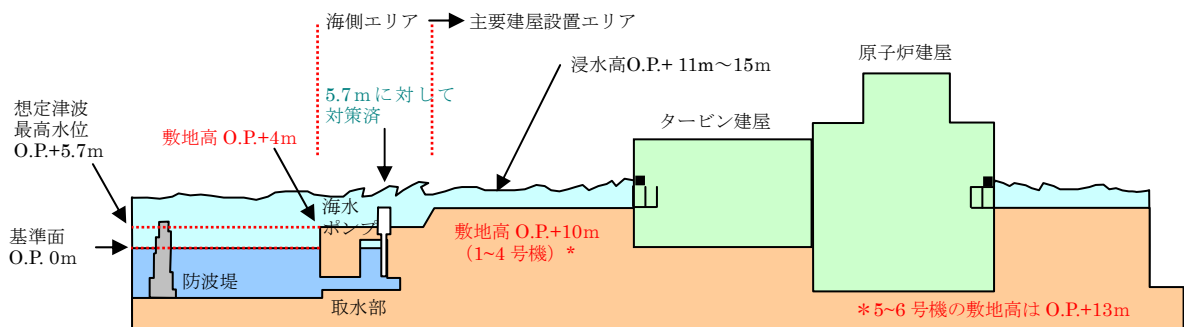


図 1.2-1 津波の状況

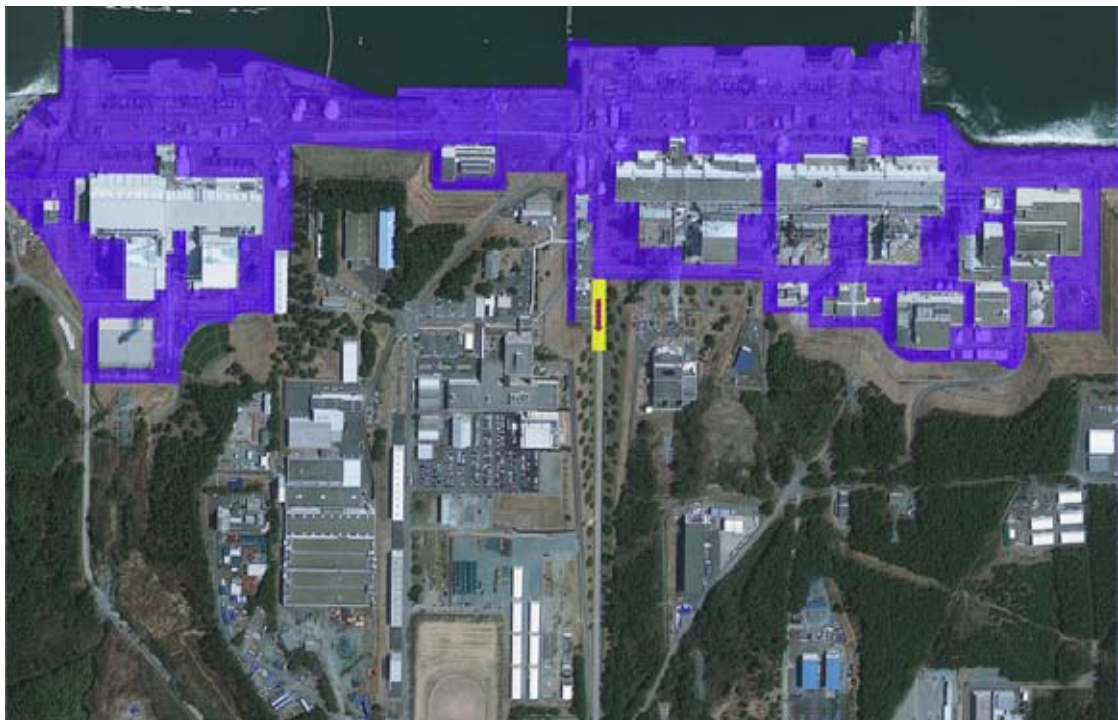


図 1.2-2 発電所構内浸水範囲（紫部：海水浸入エリア、黄色部：遡上箇所）

## 2. 事象原因分析と課題の抽出

### 2.1 事象進展の流れ

1号機の事象進展の流れを図2.1-1に示す。

1号機の原子炉は、停止時手順に従い非常用復水器（以下「IC」）等により冷却され冷温停止状態へ導かれていたが、津波により非常用交流電源及び直流電源が機能を喪失し弁がほとんど閉状態だった可能性がある。

このため炉心が冷却されず損傷して水素が発生し、格納容器から原子炉建屋へ漏れ、水素爆発に到ったものと推定される。

2～3号機の原子炉は、停止時手順に従い原子炉隔離時冷却系（以下「RCIC」）等により冷却されていた。

津波到来後、2号機は非常用交流電源及び直流電源の喪失後もRCICにより炉心冷却を維持していたが、RCIC停止後は代替注水実施までに時間を要したことや注水量が少なかったことにより、炉心損傷に至ったと推定される。また、圧力抑制室と格納容器の圧力の急減が認められた。その後、原子炉圧力容器及び格納容器から水素が漏えいしたものと推定される。

3号機は非常用交流電源喪失後も、RCIC及び高压注水系（以下「HPCI」）の運転により炉心冷却を確保したが、バッテリーの枯渇により直流電源が喪失しRCICおよびHPCIが機能を喪失した。その後の代替注水実施までに時間を要したことや注水量が少なかったことにより、炉心が損傷し水素が発生し、格納容器、原子炉建屋へ漏れ、水素爆発に到ったものと推定される。

なお、4号機は停止中ですべての燃料が燃料プールに納められ、カメラによる燃料観察結果及びプール水の核種分析結果から、燃料の大きな損傷はないと推定される。4号機で爆発した水素は、3号機で発生した水素が非常用ガス処理系排気管を通じて4号機側へ流入し、原子炉建屋内に滞留した可能性がある。

以上の事象進展の要因を明確にするため、事象の収束と拡大を分けた事項を整理し、図2.1-2に示すイベントツリーにまとめた。

地震と津波による①電源機能の喪失状況、②炉心冷却機能の状況③炉心損傷後の事象緩和策の成否などによりその後の事象進展が異なっている。

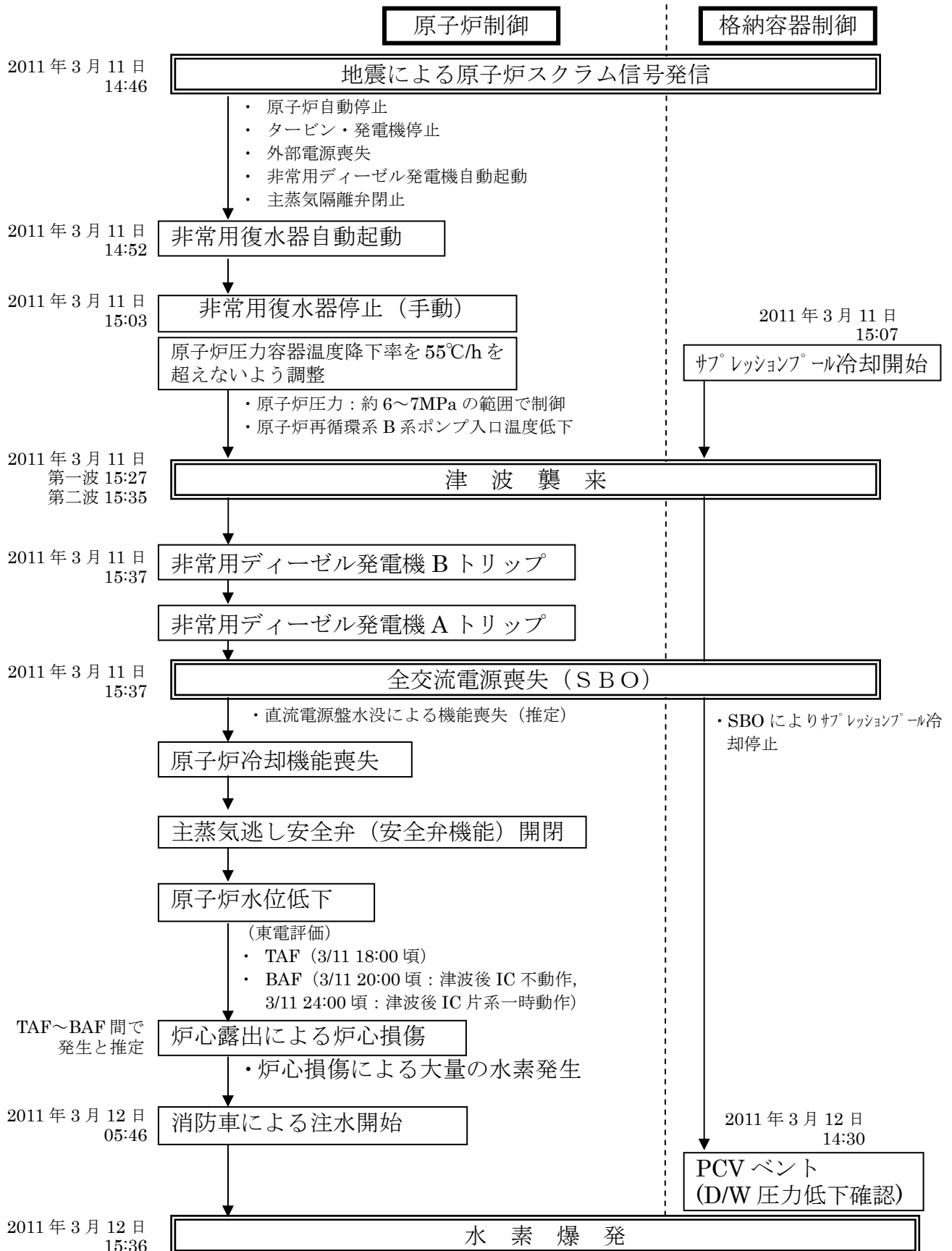


図 2.1-1 福島第一原子力発電所 1 号機 地震後の事故進展の流れ

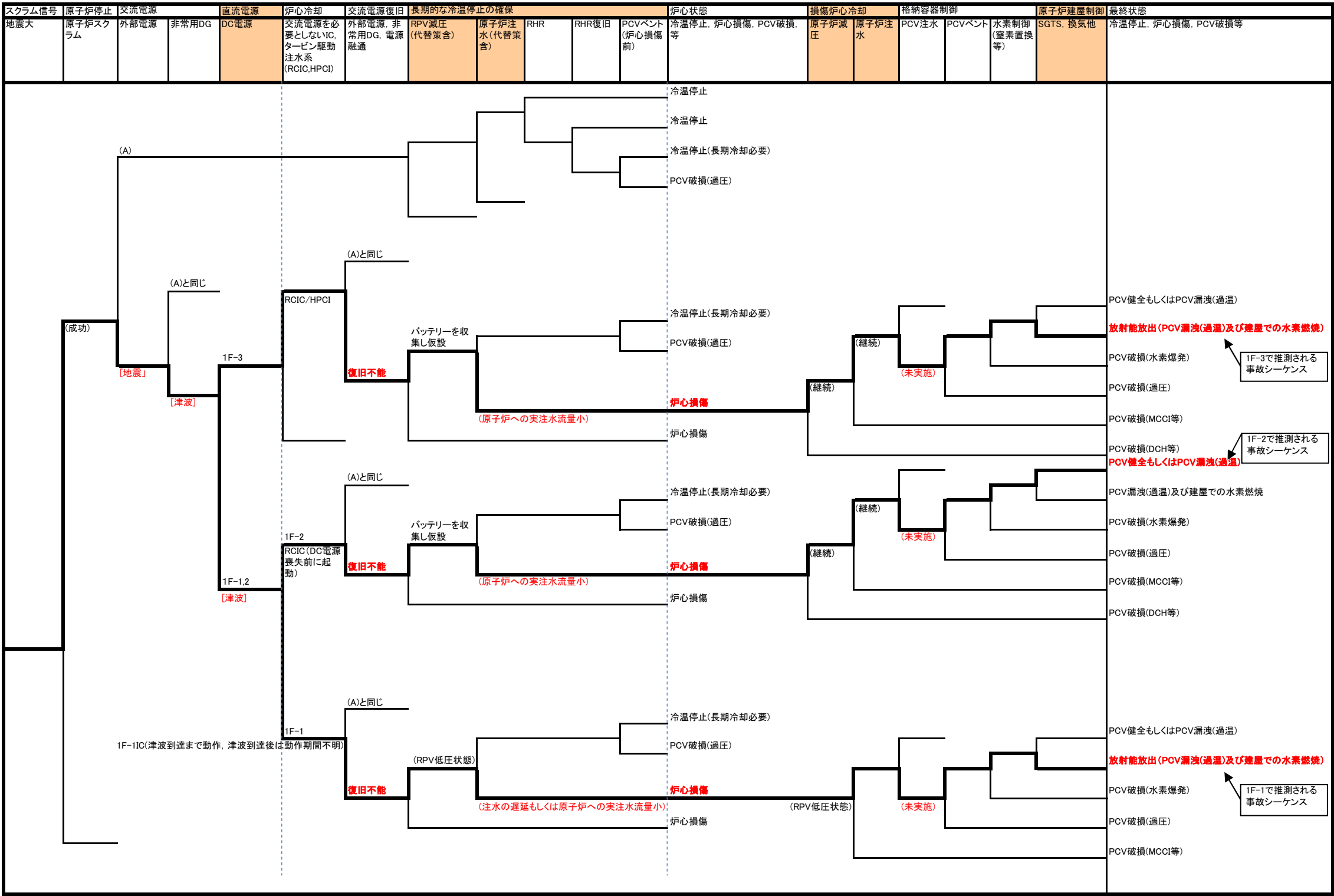


図2. 1-2 福島第一原子力発電所1号機～3号機事象進展イベントツリー

## 2.2 事故事象原因分析と課題の抽出

### 2.2.1 事故事象進展からの原因分析

図 2.1-2 のイベントツリーを用いた事故分析から、事故事象進展の大きな分岐点となっており事故を拡大させた主要な 3 つの要因として①全交流電源の供給不能、②原子炉からの除熱不能、③建屋への水素漏えいと水素爆発を抽出し、これらに対する課題の抽出を行った。

「全交流電源の供給不能」の原因分析結果を図 2.2.1 に示す。

#### (1) 全交流電源の供給不能

交流電源の供給不能の設備面・運用面からの原因は、外部電源による電源供給の不能、非常用ディーゼル発電機による電源供給不能、電源融通不能、及び早期電源復旧不能が挙げられる。

#### (2) 原子炉からの除熱不能

原子炉からの除熱に失敗した設備面、運用面からの原因として、主蒸気逃がし安全弁による減圧不能、炉心スプレイ系及び残留熱除去系による除熱不能、過酷事故対策（アクシデントマネジメント）設備（代替注水設備）による除熱不能、及び格納容器ベント不能が挙げられる。

#### (3) 建屋への水素漏えいと水素爆発

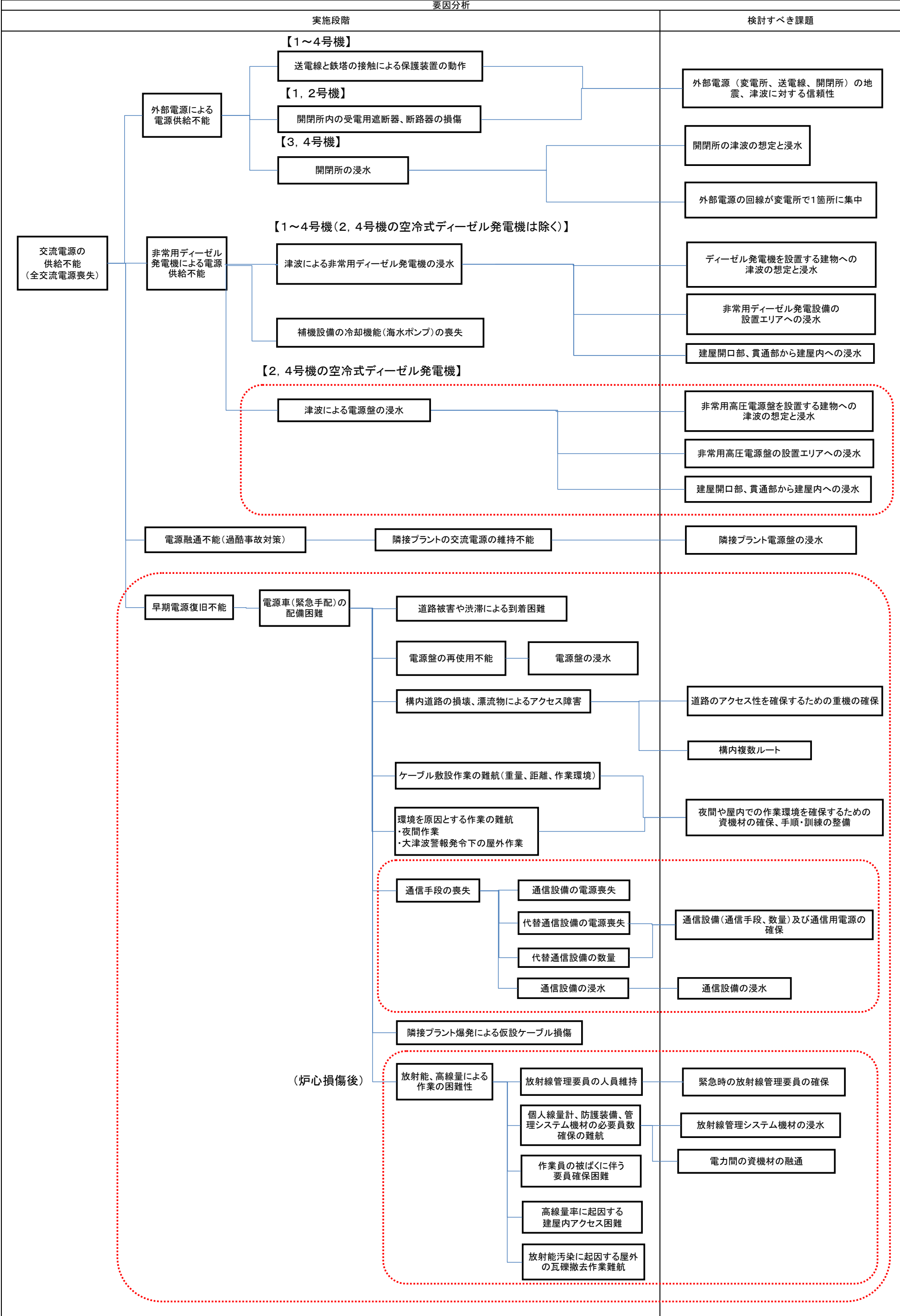
建屋への水素漏えいに至った原因は、格納容器からの漏えい及び共有排気設備の回りこみ、水素爆発の原因のひとつとして原子炉建屋内への水素漏えい検知不能が挙げられる。

### 2.2.2 機能面から確認した課題の整理

原子力発電所の基本的な安全機能は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」であり、それぞれが機能不全に陥った原因を分析した。また、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の運転操作を実施するために必要な基本要件（中央制御室換気空調系、通信連絡設備などの設備環境）についても分析を行った。

さらに、各機能達成を阻害した共通要因は、「電源供給不能」及び「補機冷却不能」であり、これらの原因分析と課題の抽出を行った。

1 号機の機能別事故原因分析と課題の整理結果を表 2.2-2 に示す。



### 図 2.2.1 交流電源供給不能 原因分析

表2.2-2 福島第一原子力発電所1号機の事故原因分析と課題の整理

| 安全機能               |                               | 関連設備等                 |                   | 機能喪失又は機能劣化の状況                  |                    | 原因分析                                          |                   | 課題                      |                    |  |      |  |
|--------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|--|------|--|
| 止める                | 原子炉の緊急停止機能                    | 安全保護系、<br>制御棒及び制御棒駆動系 | ○                 | (地震発生時に正常動作)                   |                    | －                                             |                   | －                       |                    |  |      |  |
|                    | 代替反応度制御                       | 再循環ポンプトリップ(AM)        | －                 | (スクラム成功により不要)                  |                    | －                                             |                   | －                       |                    |  |      |  |
|                    |                               | 代替制御棒挿入(AM)           | －                 | (スクラム成功により不要)                  |                    | －                                             |                   | －                       |                    |  |      |  |
|                    | 未臨界維持機能                       | ほう酸水注入系               | －                 | (スクラム成功により不要)                  |                    | －                                             |                   | －                       |                    |  |      |  |
| サポート系              | 電源供給機能                        | 外部電源                  | ×                 | 地震により外部電源喪失                    |                    | 地震による1/2号機開閉所の大熊線1L受電遮断器損傷                    |                   | ① 開閉所遮断器の信頼性            |                    |  |      |  |
|                    |                               | 非常用ディーゼル発電機           | ×                 | 浸水により機能喪失                      |                    | 津波による非常用ディーゼル発電機の浸水                           |                   | ② 非常用ディーゼル発電機の浸水        |                    |  |      |  |
|                    |                               | 6.9kV高压電源             | ×                 | 浸水により機能喪失                      |                    | 津波による6.9kV高压電源盤の浸水                            |                   | ③ 6.9kV高压電源盤の浸水         |                    |  |      |  |
|                    |                               | 480V低压電源              | ×                 | 6.9kV高压電源の喪失により機能喪失            |                    | 津波による6.9kV高压電源盤の浸水                            |                   | ③と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               | 125V直流電源              | ×                 | 浸水により機能喪失                      |                    | 津波による480V低压電源盤の浸水                             |                   | ④ 480V低压電源盤の浸水          |                    |  |      |  |
|                    | 代替電源供給機能                      | 電源融通(AM)              | ×                 | 浸水により機能喪失                      |                    | 津波による125V直流電源盤の浸水                             |                   | ⑤ 125V直流電源盤の浸水          |                    |  |      |  |
|                    |                               | 電源車(緊急手配)             | ×                 | 隣接プラントからの電源融通不能                |                    | 津波による隣接プラント(2号)の所内電源喪失                        |                   | ⑥ 隣接プラント電源盤の浸水          |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 到着困難                           |                    | 道路被害や渋滞による到着困難                                |                   | ⑦ 外部からの代替電源の調達          |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 繋ぎ込み作業難航                       |                    | 1号機交流電源盤浸水による接続不能<br>ケーブル敷設作業の困難性(重量、距離、作業環境) |                   | ③、④と同じ<br>⑧ 代替電源用ケーブル敷設 |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 電源供給不能                         |                    | 断続的な余震及び大津波警報発令の継続<br>交流電源喪失による通信手段の喪失        |                   | －<br>⑨ 交流電源喪失時の通信手段     |                    |  |      |  |
|                    | 補機冷却機能                        | 格納容器冷却海水系             | ×                 | 1号機原子炉建屋爆発によるケーブル損傷及び電源車自動停止   |                    | ⑩ 格納容器冷却海水ポンプの浸水                              |                   | ⑩ 格納容器冷却海水ポンプの浸水        |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 浸水により機能喪失                      |                    | 津波による格納容器冷却海水ポンプの浸水                           |                   | ③と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               | 補機冷却海水系               | ×                 | 交流電源喪失により機能喪失                  |                    | 津波による6.9kV高压電源盤の浸水                            |                   | ③と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 浸水により機能喪失                      |                    | 津波による補機冷却海水ポンプの浸水                             |                   | ⑪ 補機冷却海水ポンプの浸水          |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 交流電源喪失により機能喪失                  |                    | 津波による6.9kV高压電源盤の浸水                            |                   | ③と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 直流電源喪失により機能喪失                  |                    | 津波による125V直流電源盤の浸水                             |                   | ⑤と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    | 原子炉補機冷却水系                     | ×                     | 補機冷却海水系喪失により機能喪失  |                                | 津波による補機冷却海水ポンプの浸水  |                                               | ⑪と同じ              |                         |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       | 交流電源喪失により機能喪失     |                                | 津波による6.9kV高压電源盤の浸水 |                                               | ③と同じ              |                         |                    |  |      |  |
| 直流電源喪失により機能喪失      |                               |                       | 津波による125V直流電源盤の浸水 |                                | ⑤と同じ               |                                               |                   |                         |                    |  |      |  |
| 冷やす                | 原子炉冷却材圧力バウンダリの過圧防止機能          | 主蒸気逃がし安全弁<br>(安全弁機能)  | －                 | (非常用復水器により制御)                  |                    | －                                             |                   | －                       |                    |  |      |  |
|                    | 高压炉心冷却機能                      | 高压注水系                 | ×                 | 直流電源喪失により機能喪失                  |                    | 津波による125V直流電源盤の浸水                             |                   | ⑤と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               | 非常用復水器<br>(本体)        | △<br>(一時的に作動)     | 直流電源喪失により機能劣化(遠隔操作不能)          |                    | 津波による125V直流電源盤の浸水                             |                   | ⑤と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 隔離信号発信により隔離(交流電源喪失により内側隔離弁中途開) |                    | 直流電源喪失による配管破断検知回路動作                           |                   | ⑫ 直流電源喪失に対する隔離信号の設計妥当性  |                    |  |      |  |
|                    |                               | 非常用復水器<br>(サポート系)     | 純水補給水系            | ×                              | 交流電源喪失により機能喪失      |                                               | 津波による480V低压電源盤の浸水 |                         | ④と同じ               |  |      |  |
|                    | 消火系                           |                       | △<br>(一時的に作動)     | 外部電源喪失により電動ポンプ使用不能             |                    | 地震による大熊線1L受電遮断器損傷                             |                   | ①と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    | 代替注水機能<br>(高压)                | ほう酸水注入系(AM)           | ×                 | ディーゼル駆動消火ポンプ停止                 |                    | 機械的故障(推定)                                     |                   | －                       |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 交流電源喪失により機能喪失                  |                    | 津波による480V低压電源盤の浸水                             |                   | ④と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               | 制御棒駆動水系(AM)           | ×                 | 電源復旧操作難航                       |                    | 【復旧不能】1号原子炉建屋爆発によるケーブル損傷及び電源車自動停止             |                   | －                       |                    |  |      |  |
|                    | 交流電源喪失により機能喪失                 |                       |                   | 津波による480V低压電源盤の浸水              |                    | ④と同じ                                          |                   |                         |                    |  |      |  |
|                    | 代替注水機能<br>(低压)                | 原子炉減圧機能               | (逃がし弁機能／自動減圧機能)   | ×                              | 直流電源喪失により機能喪失      |                                               | 津波による125V直流電源盤の浸水 |                         | ⑤と同じ               |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   |                                | 炉心スプレイ系            | ×                                             | 原子炉減圧不能により注水不能    |                         | 津波による125V直流電源盤の浸水  |  | ⑤と同じ |  |
|                    |                               |                       |                   |                                |                    |                                               | 交流電源喪失により機能喪失     |                         | 津波による6.9kV高压電源盤の浸水 |  | ③と同じ |  |
|                    |                               | 直流電源喪失により機能喪失         |                   | 津波による125V直流電源盤の浸水              |                    |                                               | ⑤と同じ              |                         |                    |  |      |  |
|                    |                               | 格納容器冷却海水系喪失により機能喪失    |                   | 津波による格納容器冷却海水ポンプの浸水            |                    |                                               | ⑩と同じ              |                         |                    |  |      |  |
|                    |                               | 代替注水機能<br>(高压)        | 復水補給水系(AM)        | ×                              | 原子炉減圧不能により注水不能     |                                               | 津波による125V直流電源盤の浸水 |                         | ⑤と同じ               |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   |                                | 交流電源喪失により機能喪失      |                                               | 津波による480V低压電源盤の浸水 |                         | ④と同じ               |  |      |  |
|                    |                               |                       | 格納容器冷却系(AM)       | ×                              | 原子炉減圧不能により注水不能     |                                               | 津波による125V直流電源盤の浸水 |                         | ⑤と同じ               |  |      |  |
| 交流電源喪失により機能喪失      |                               |                       |                   |                                | 津波による125V直流電源盤の浸水  |                                               | ⑤と同じ              |                         |                    |  |      |  |
| 直流電源喪失により機能喪失      |                               |                       |                   |                                | 津波による6.9kV高压電源盤の浸水 |                                               | ③と同じ              |                         |                    |  |      |  |
| 格納容器冷却海水系喪失により機能喪失 |                               |                       |                   |                                | 津波による125V直流電源盤の浸水  |                                               | ⑤と同じ              |                         |                    |  |      |  |
| 消火系(AM)            |                               |                       | ×                 | 津波による格納容器冷却海水ポンプの浸水            |                    | ⑩と同じ                                          |                   | ⑩と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               |                       |                   | 原子炉減圧不能により注水不能                 |                    | 津波による125V直流電源盤の浸水                             |                   | ⑤と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    |                               | ディーゼル駆動消火ポンプ停止        |                   | 機械的故障(推定)                      |                    | －                                             |                   |                         |                    |  |      |  |
| 消防車<br>(中越沖地震対応)   |                               | (流量不足、作業難航)           | △<br>(流量不足、作業難航)  | 原子炉減圧不能により注水不能                 |                    | 津波による125V直流電源盤の浸水                             |                   | ⑤と同じ                    |                    |  |      |  |
|                    | 必要注水流量確保困難                    |                       |                   | 水源として使用した防火水槽の容量確保困難           |                    | ⑬ 淡水水源の枯渇                                     |                   |                         |                    |  |      |  |
|                    | 作業難航                          |                       |                   | 地震や津波の影響による障害物                 |                    | ⑭ 地震・津波による障害物                                 |                   |                         |                    |  |      |  |
|                    | 1号機原子炉建屋の爆発による現場退避、高線量の瓦礫     |                       |                   | ⑮ 水素爆発／線量上昇による作業環境悪化           |                    |                                               |                   |                         |                    |  |      |  |
|                    | 1号機原子炉建屋の爆発による海水注入用ホースの損傷、再敷設 |                       |                   | ⑮と同じ                           |                    |                                               |                   |                         |                    |  |      |  |
| 断続的な余震及び大津波警報発令の継続 |                               | －                     |                   |                                |                    |                                               |                   |                         |                    |  |      |  |
| 交流電源喪失による通信手段の喪失   |                               | ⑨と同じ                  |                   |                                |                    |                                               |                   |                         |                    |  |      |  |

表2.2-2 福島第一原子力発電所1号機の事故原因分析と課題の整理

| 安全機能  |                                     | 関連設備等                       | 機能喪失又は機能劣化の状況          |                     | 原因分析                                       | 課題                       |
|-------|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
| 閉じ込める | 格納容器隔離機能                            | 主蒸気隔離弁                      | ○                      | (正常動作)              | —                                          | —                        |
|       | 格納容器からの除熱機能                         | 格納容器冷却系                     | ×                      | 交流電源喪失により機能喪失       | 津波による6.9kV高圧電源盤の浸水                         | ③と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        | 格納容器冷却海水系喪失により機能喪失  | 津波による格納容器冷却海水ポンプの浸水                        | ⑩と同じ                     |
|       |                                     | 停止時冷却系                      | ×                      | 交流電源喪失により機能喪失       | 津波による6.9kV高圧電源盤の浸水                         | ③と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        | 直流電源喪失により機能喪失       | 津波による125V直流電源盤の浸水                          | ⑤と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        | 補機冷却海水系喪失により機能喪失    | 津波による補機冷却海水ポンプの浸水                          | ⑪と同じ                     |
|       | 代替除熱機能                              | 復水補給水系による<br>代替格納容器スプレイ(AM) | ×                      | 交流電源喪失により機能喪失       | 津波による480V低圧電源盤の浸水                          | ④と同じ                     |
|       |                                     | 消火系による<br>代替格納容器スプレイ(AM)    | ×                      | 外部電源喪失により電動ポンプ使用不能  | 地震による1/2号機開閉所の大熊線1L受電遮断器損傷                 | ①と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        | ディーゼル駆動消火ポンプ停止      | 機械的故障(推定)                                  | —                        |
|       |                                     |                             |                        | 代替格納容器スプレイに向けた操作未実施 | 非常用復水器への給水及び代替注水を優先(推定)                    | —                        |
|       |                                     | 耐圧強化ベント(AM)                 | △<br>(交流電源喪失により時間を要した) | ベント操作難航             | 津波による125V直流電源盤の浸水<br>(空気作動の格納容器ベント弁遠隔操作不能) | ⑤と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        |                     | 外部電源喪失による計装用空気の圧力低下                        | ⑯ 圧縮空気の確保困難              |
|       |                                     |                             |                        |                     | 交流電源喪失及び線量上昇によるポンペライン電動弁開操作不能              | ④及び⑮と同じ                  |
|       |                                     |                             |                        |                     | 線量上昇によるアクセス困難                              | ⑮と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        |                     | 交流電源喪失による通信手段の喪失                           | ⑨と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        |                     | AO弁の空気圧、電源の維持困難                            | —                        |
|       |                                     | ドライウェルクーラ(AM)               | ×                      | 交流電源喪失により機能喪失       | 津波による480V低圧電源盤の浸水                          | ④と同じ                     |
|       |                                     | 原子炉冷却材浄化系(AM)               | ×                      | 補機冷却海水系喪失により機能喪失    | 津波による補機冷却海水ポンプの浸水                          | ⑪と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        | 交流電源喪失により機能喪失       | 津波による480V低圧電源盤の浸水                          | ④と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        | 補機冷却海水系喪失により機能喪失    | 津波による補機冷却海水ポンプの浸水                          | ⑪と同じ                     |
|       | 放射性物質の放出低減機能                        | 非常用ガス処理系                    | ×                      | 交流電源喪失により動作不能       | 津波による480V低圧電源盤の浸水                          | ④と同じ                     |
|       | その他                                 | 原子炉格納容器                     | ×                      | 漏えい発生               | 格納容器からの除熱機能喪失によるフランジ部のガスケット及び貫通部のシール劣化     | ⑰ ガスケット及び貫通部シールの耐熱性及び耐圧性 |
|       |                                     | 原子炉建屋                       | ×                      | 水素爆発により損傷           | ジルカロイ-水反応による水素発生                           | —                        |
|       |                                     |                             |                        |                     | 格納容器貫通部からの水素漏えい                            | —                        |
| その他   | 安全上特に重要な関連機能<br>事故時のプラント状態の<br>把握機能 | 中央制御室換気空調系                  | ×                      | 交流電源喪失により機能喪失       | 津波による480V低圧電源盤の浸水                          | ④と同じ                     |
|       |                                     | 事故時監視計器                     | ×                      | 直流電源喪失により機能喪失       | 津波による125V直流電源盤の浸水                          | ⑤と同じ                     |
|       | 異常状態の把握機能                           | 通信連絡設備                      | ×                      | 交流電源喪失により機能喪失       | 津波による480V低圧電源盤の浸水                          | ④と同じ                     |
|       |                                     | 非常用照明                       | ×                      | 交流電源喪失により機能喪失       | 津波による480V低圧電源盤の浸水                          | ④と同じ                     |
|       |                                     |                             |                        | 直流電源喪失により機能喪失       | 津波による125V直流電源盤の浸水                          | ⑤と同じ                     |

○:正常動作 △:動作不十分 ×:動作不能 —:動作不要  
(注)AM: アクシデントマネジメント(過酷事故対策)

## 2.3 原因分析のまとめ

福島第一の事故が拡大した一番の要因は、安全系機器を駆動するための電源が喪失したことにより、従属的に多くの安全系機器の機能が喪失したことである。

電源に関しては、発電を停止した場合、まず外部電源により電力を供給する。外部電源が機能喪失した場合には非常用 DG で安全系機器への電源供給を行う設計となっている。今回は、外部電源が地震により機能を喪失し、その後津波による非常用 DG の水没に加え電源盤が浸水した。盤の浸水で電源の接続先が失われたため迅速な復旧ができなかったことが事故拡大に繋がった。

津波の襲来により引き起こされる事態を想定した備えが弱かったことが問題の本質である。「津波が敷地内まで浸入すると電源盤を始め種々の安全上重要な機器が水没する。それに対して必要な対策を特定し、予め必要な設備を備えておく。更にそれも機能しなかった場合に備えて必要な準備をしておく」といった、事故拡大のシナリオを想定し準備をしておくという、安全確保のための対策を厚みのあるように備えておくことが事故拡大防止のために必要であった。

外部電源、非常用 DG や電源盤など電源に係る設備が機能を失ったこと、また、これらの施設が津波で機能喪失した場合の備えが弱かったことが、事故拡大の大きな要因であると考えられる。

2.2 において抽出された課題を整理して、下記の 5 項目に集約した。

- ・ 地震・津波（自然ハザード）に対する備え
- ・ 電源の準備
- ・ ヒートシンク喪失対策
- ・ 水素対策
- ・ 緊急時に対する準備

| 項目          | 抽出された課題                                                                                                                                                                                                      |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 地震・津波に対する備え | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 外部電源の地震・津波による機能喪失</li> <li>・ 開閉所の津波による機能喪失</li> <li>・ 海水設備の津波による機能喪失</li> <li>・ 海水ポンプ室の浸水</li> <li>・ 非常用 DG の津波による機能喪失</li> <li>・ 建屋開口部からの海水の浸入</li> </ul>          |
| 電源の準備       | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 外部電源の回線の受電が 1 箇所</li> <li>・ 電源設備の津波による水没</li> <li>・ 直流電源の枯渇</li> <li>・ 蓄電池容量の確保</li> <li>・ 外部からの電源調達（電源車など）</li> <li>・ 交流電源供給確保対応</li> <li>・ 代替電源用ケーブル敷設</li> </ul> |
| ヒートシンク喪失対策  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 海水ポンプの浸水</li> <li>・ 津波に対して一度に全ての設備が被害を受けない</li> </ul>                                                                                                               |

| 項目        | 抽出された課題                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | <ul style="list-style-type: none"> <li>こと</li> <li>・津波による被害に備えて、津波の影響を受けない手段が準備されていること</li> <li>・直流電源喪失に対する非常用復水器隔離信号の発信</li> <li>・弁の駆動源喪失対応資機材の確保</li> <li>・手順、訓練の整備</li> <li>・淡水水源の枯渇</li> <li>・消火系配管の地震・津波に対する機能維持</li> <li>・消防車の燃料調達</li> <li>・耐圧ベントライン弁の駆動源強化</li> <li>・低圧でのラプチャーディスクの不作動</li> <li>・格納容器ベント弁の開状態維持のための圧縮空気の確保</li> </ul> |
| 水素対策      | <ul style="list-style-type: none"> <li>・格納容器ガスケット、貫通部シール強化</li> <li>・耐圧強化ベントラインから建屋への回りこみ</li> <li>・排気筒を共有する号機間での回りこみ</li> <li>・原子炉建屋内での水素滞留</li> <li>・水素検知</li> </ul>                                                                                                                                                                        |
| 緊急時に対する準備 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射線管理員の確保</li> <li>・放射線管理設備の津波対策</li> <li>・地震津波による障害物</li> <li>・交流電源喪失時の通信手段</li> <li>・夜間や屋内作業の支援のための資機材</li> <li>・道路のアクセス性確保のための資機材</li> <li>・構内複数ルート確保</li> <li>・電力間での融通体制</li> <li>・水素爆発、線量上昇による環境悪化</li> </ul>                                                                                    |

上記課題のうち、格納容器ガスケット、貫通部シール強化、蓄電池容量の確保、直流電源喪失に対する非常用復水器隔離信号の発信などについては、対策の実現性や有効性を考慮して直接対応する対策ではなく、他の課題に対する対策によってカバーすることとしている。

### 3. 対策の提言

抽出された課題を見据えた上で、同じ事象進展のフローに従って再度事実を整理し、課題を踏まえた対策の抽出を行った。

抽出された全ての対策を図に整理して図 2.4-1 に示す。

また、表 2.4-1 に示すように、安全機能、すなわち電源、ヒートシンク（注水・冷

却)、水素爆発対策、並びに使用済燃料プール (SFP) の水位維持等の機能確保に直接関係する対策を深層防護の考え方に従って整理し、全ての対策の中で優先度が高い対策を選定した。事故の再発防止の観点 (事故拡大のシナリオを想定した準備に厚みを持たせる) から第4層に係る対策がより多くなっている。

対策はプラント全体の安全性を考えて組合せて選定するものであり、それぞれの発電所の状況、安全確保の戦略に依拠して様々な対策の組合せが考えられる。

その際、設計・建設段階から考慮している対策に加えて、今回の各種対策を組み合わせることで、用意していたものが次々に機能喪失した場合においても、安全性を確保しうる重層的な対策とし、過酷事故を防止・緩和するのに十分有効な対策とする必要がある。

上記の点も念頭において、以下の対策について各社に採用することを特に提言するものである。

#### ー電源

- ・ 安全上重要な設備には防潮堤や防波堤を設置する
- ・ 安全上重要機器設置区画の浸水防止
- ・ 浸水高さに応じた給気口等の開口部、貫通部に対するシール性向上等の浸水防止
- ・ 受電用変圧器と開閉所の配置箇所の水密化又は機器の浸水対策
- ・ 直流電源設備の設置区画の水密化又は機器の浸水対策
- ・ 電源車又は大容量電源 (ガスタービンやディーゼル発電機) の配備、非常時の手順整備
- ・ バックアップ電源による直流電源充電ルートの整備
- ・ 号機間電源融通設備 (過酷事故対策) の浸水対策による信頼性向上

#### ーヒートシンク (注水・冷却)

- ・ 海水ポンプの周りに防水壁等の浸水防止措置
- ・ 海水ポンプモータ予備品の配備
- ・ 移動式海水ポンプの配備
- ・ 非常用炉心冷却系等安全系機器に関する設置区画の浸水防止
- ・ 過酷事故対策設備の浸水防止
- ・ SRV 駆動用のバックアップ電源及び予備の空気ポンプ等の準備 (BWR)
- ・ 主蒸気逃し弁による SG を介した炉心冷却の確保 (PWR)
- ・ ベント操作用バックアップ電源と駆動源の配備 (BWR)
- ・ バックアップ電源車又は大容量電源の配備による既設注水系の信頼性向上
- ・ 既存設備に依存しない可搬式動力ポンプ及びホース等
- ・ 水源の確保
- ・ 格納容器ベントによる大気への熱逃し (BWR)

一水素

- ・ 滞留水素の放出、低減
- ・ 耐圧強化ベントラインからの回りこみ防止
- ・ 排気筒を共有する号機間での水素回りこみ防止

なお、福島第一事故後、各社では既に種々の対策を講じてきており、表 2.4-1 に代表プラントでの取組み状況も合わせて表示している。現段階で、深層防護の観点からも各層において必要な対策が講じられており、既に実質的な安全性の向上が図られていることが確認できる。

— 地震・津波に対する備え 1、6、7、9 、電源の準備 3、5 、 ヒートシンク喪失対応 (BWR) 2、4、8、10、11 —

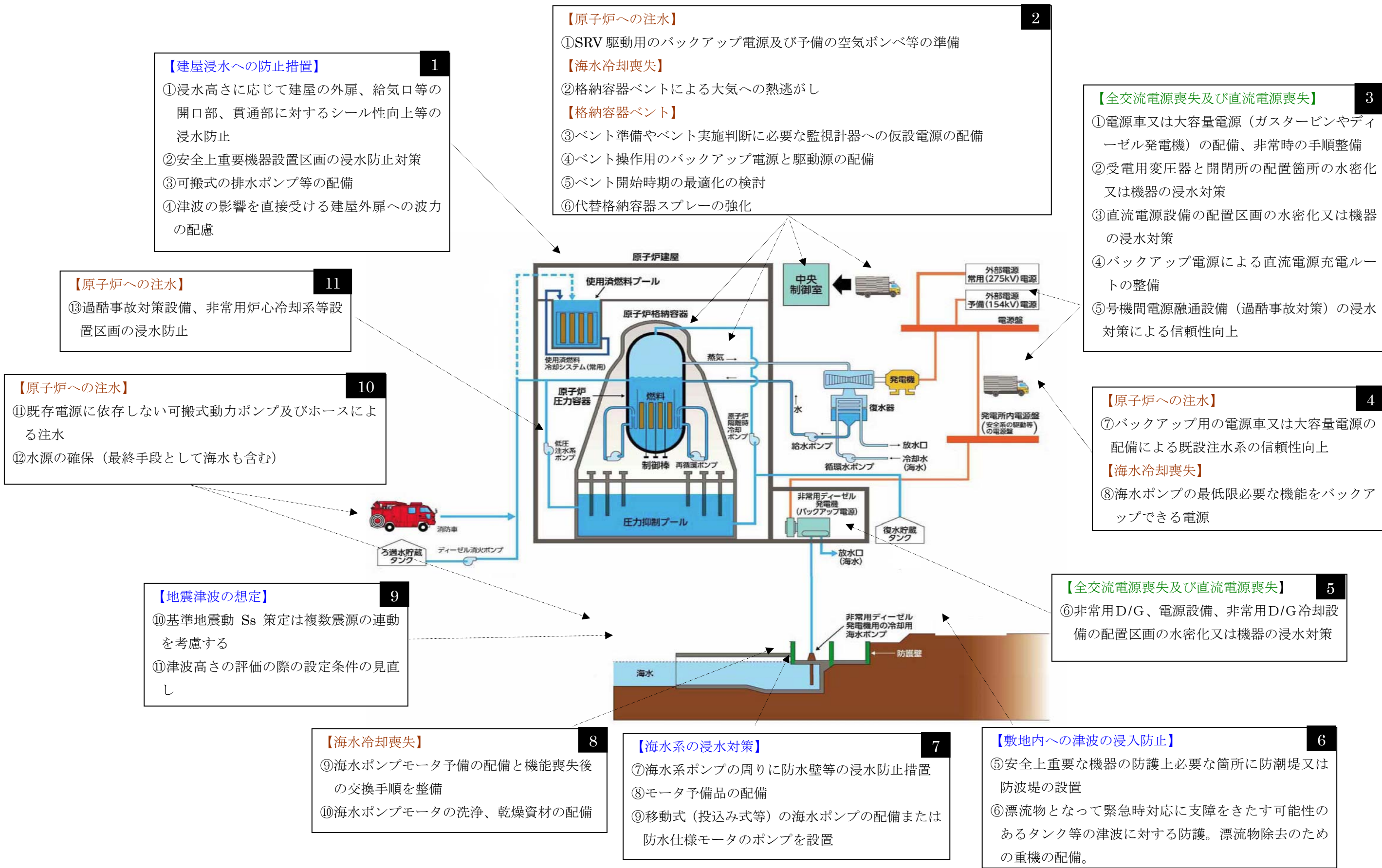


図 2.4-1 対策例 1/3

— 水素対策 14 、 緊急時に対する準備 12、15、16、17、18、20、21 、 使用済燃料の健全性確保 13、19 —

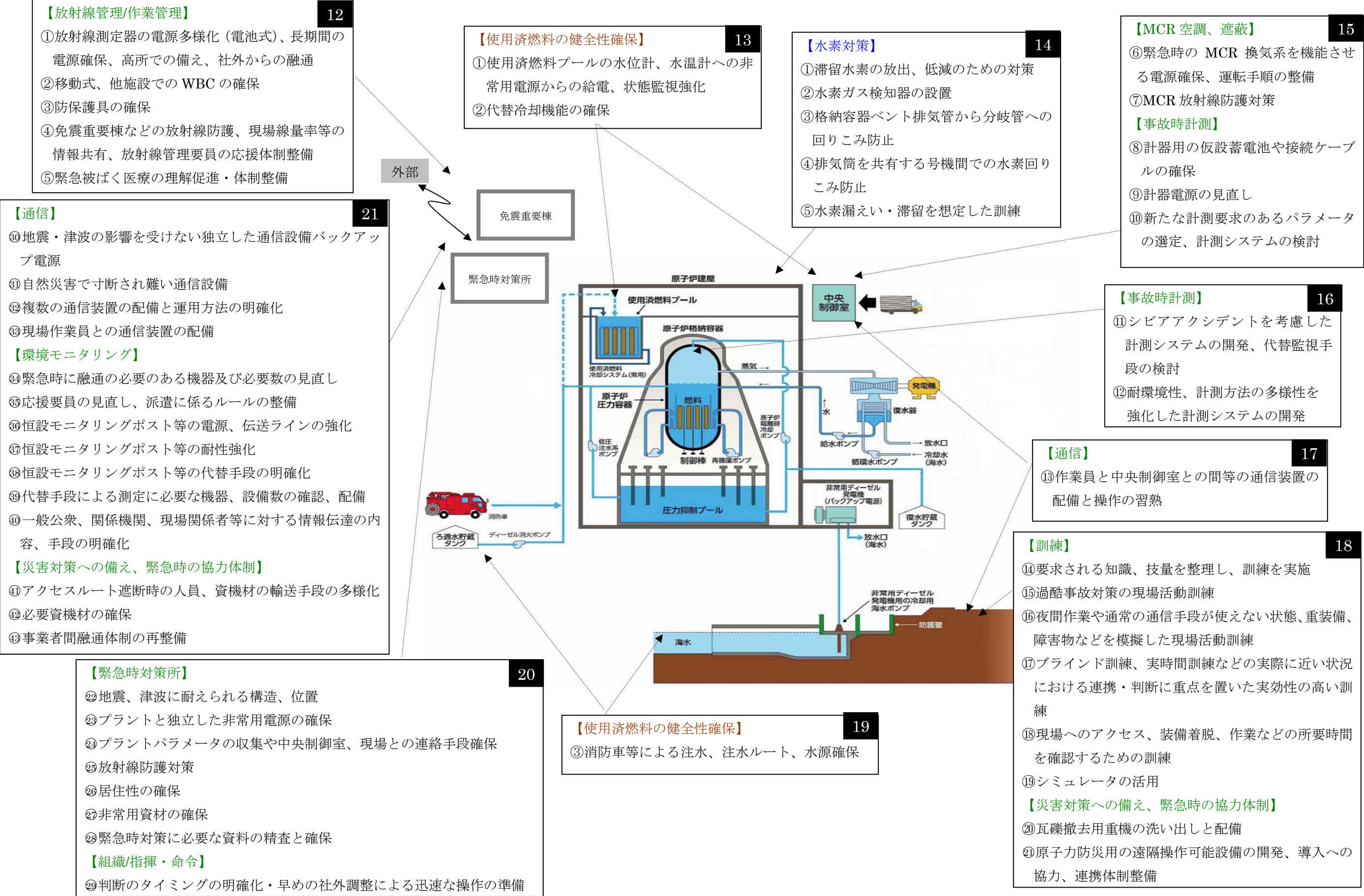


図 2.4-1 対策例 2/3

— ヒートシンク喪失対応（PWR） 1、2、3 —

他の対策（地震、津波に対する  
備え、電源の準備、水素対策  
など）は BWR の例と同じ

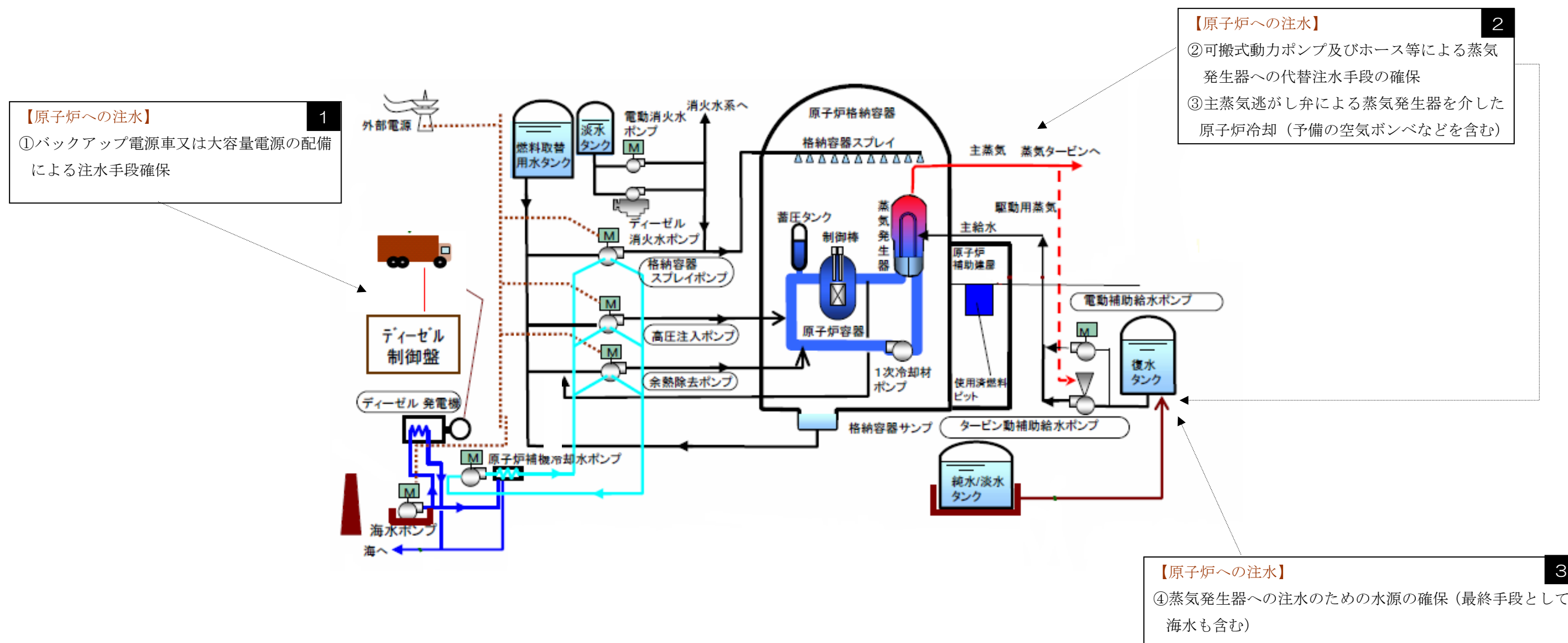


図 2.4-1 対策例 3/3

表 2.4-1 深層防護の観点で整理した確認表（代表プラントでの取組み状況）

|         |                   |     | 事故発生防止                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                          | 事故影響緩和                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                |                                                 |
|---------|-------------------|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 多重防護レベル |                   |     | 第一層<br>(異常の発生防止)                                                                                                                                                                                                                                           | 第二層<br>(異常の拡大防止と事故への発展の防止)                                                                                                                                               | 第三層<br>(放射性物質の異常な放出の防止)                                                                                                                                                                           | 第四層<br>(シビアアクシデントの発生防止)                                                                                                                                                                        |                                                 |
| 目的      |                   |     | 異常運転及び故障の防止                                                                                                                                                                                                                                                | 異常運転の制御及び故障の検出                                                                                                                                                           | 設計基準内への事故の制御                                                                                                                                                                                      | 事故の進展防止                                                                                                                                                                                        |                                                 |
| 必須手段    |                   |     | 保守的設計及び建設<br>運転における高い品質                                                                                                                                                                                                                                    | 制御、制限及び防護系                                                                                                                                                               | ECCS及び事故時手順                                                                                                                                                                                       | 補完的手段及び過酷事故対策                                                                                                                                                                                  |                                                 |
| 炉心      | 電源                | 震災前 | ・過去の記録を基とした十分保守的な設計前提によって耐震クラスを設定し、2倍程度の余裕を見込んで敷地高さを設計<br>・津波により建屋給排気口などの開口部から浸水することを考慮していない。<br>・プラントの発電停止の際は外部電源で電力供給する<br>・冗長性のある非常用DGを設置し、外部電源が喪失した場合は非常用DGでバックアップする<br>・停電しても短時間で復旧すると想定<br>・外部電源系統、非常用DG、直流バッテリーによる多様な電源を複数系統配備することによって電源の多様性・多重性を確保 | ・高圧電源母線の電圧低信号を検出し非常用DGが自動起動する<br>・非常用DGの自動起動にあわせ関連する機器がシーケンシャルに起動する                                                                                                      | ・ECCSポンプの自動起動信号を受け、外部電源の供給に係らず非常用DGが自動起動<br>・冗長性を有する非常用DGと直流バッテリーでの電源確保                                                                                                                           | ・早期(8時間程度)に交流電源が回復することを見込んでおり、長期停電を想定していない<br>・交流電源喪失後は直流駆動の設備による炉心冷却を行い、交流電源の復旧を期待<br>・復旧手順の整備                                                                                                | ・過酷事故対策として号機間での電源融通を整備。ただし、複数号機同時の電源喪失は想定していない。 |
|         |                   | 対策案 | ○安全上重要な設備には防潮堤や防波堤を設置する<br>●安全上重要機器設置区画の浸水防止<br>○浸水高さに応じた給気口等の開口部、貫通部に対するシール性向上等の浸水防止<br>●受電用変圧器と開閉所の配置箇所の水密化又は機器の浸水対策<br>●直流電源設備の設置区画の水密化又は機器の浸水対策                                                                                                        |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                   | ●電源車又は大容量電源(ガスタービンやディーゼル発電機)の配備、非常時の手順整備<br>●バックアップ電源による直流電源充電ルートの整備<br>●可搬式の排水ポンプ等の配備                                                                                                         | ○号機間電源融通設備(過酷事故対策)の浸水対策による信頼性向上                 |
|         | ヒートシンク<br>(注水・冷却) | 震災前 | ・過去の記録を基とした十分保守的な設計前提によって耐震クラスや敷地高さを設計<br>・冗長性を有する除熱系を設置<br>・除熱系の多重性または多様性及び独立性を確保                                                                                                                                                                         | ・過渡事象に対しては、ECCSなどの安全系の機器を期待しなくても運転操作で対処可能<br>・海水ポンプや電源盤の浸水による全台機能同時喪失は想定していない<br>・海水ポンプがトリップした際は予備機が自動起動する<br>・原子炉の安全に係る検出器は、原子炉の運転中であっても試験を行えるように設計され、健全性及び多重性の維持を確認できる | ・ECCSなど安全系を複数系列設置<br>・外部電源が利用できないときであっても非常用DGから電源を供給<br>・短期間の交流電源喪失時でも直流バッテリーからの電源供給で機能する系統(IC,HPCI,RCIC)を設置<br>・蒸気駆動の機器の設置による駆動源に対する多様性を確保<br>・油や軸受の冷却に海水冷却系が不要のHPCIやRCICがあるものの、直流電源がなくなれば機能喪失する | ・過酷事故対策(アクシデントマネジメント)を整備。代替注水設備として既存の設備を必要に応じて使用、格納容器耐圧強化ベントを整備済み。<br>・長期間の電源喪失、浸水は想定していない<br>・弁類の各種代替駆動源なし                                                                                    | ・消火系配管への接続口の整備                                  |
|         |                   | 対策案 | ○海水ポンプの周りに防水壁等の浸水防止措置<br>●非常用炉心冷却系等安全系機器に関する設置区画の浸水防止                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                          | ●バックアップ電源車又は大容量電源の配備による既設注水系の信頼性向上<br>●SRV駆動用のバックアップ電源及び予備の空気ポンペ等の準備(BWR)                                                                                                                         | ○海水ポンプモータ予備品の配備<br>●海水ポンプモータの洗浄、乾燥資材の配備<br>●移動式海水ポンプの配備<br>○過酷事故対策設備の浸水防止<br>●既存電源に依存しない可搬式動力ポンプ及びホース等<br>●水源の確保(最終手段として海水も含む)<br>○ベント操作用バックアップ電源と駆動源の配備(BWR)<br>●主蒸気逃がし弁によるSGを介した炉心冷却の確保(PWR) | ●格納容器ベントによる大気への熱逃がし(格納容器の健全性担保)(BWR)            |
|         | 水素                | 震災前 |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                          | ・可燃性ガス濃度制御系を設置し、冷却材喪失事故時に発生する水素と酸素の濃度を抑制する<br>・ECCSなどによる炉心冷却により水素発生防止<br>・PCV内に窒素を封入することにより、不活性化環境とすることにより、事故環境時の格納容器内の水素・酸素濃度を可燃限界以下に抑制                                                          | ・号機間でのガスの回りこみを考慮していない                                                                                                                                                                          | ・炉心損傷すれば格納容器からの水素漏えいは起こりえる。                     |
|         |                   | 対策案 |                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                   | ●滞留水素の放出、低減<br>●耐圧強化ベントラインからの回りこみ防止<br>●排気筒を共有する号機間での水素回りこみ防止                                                                                                                                  | ●滞留水素の放出・低減                                     |

《代表プラントにおける対策状況説明》  
対策例欄における凡例：●⇒実施完了or サイト固有の要因により当初から考慮されている事項  
○⇒実施中 or 対応計画中の事項

## おわりに

本報告書は、原子力発電所のより一層の安全性を確保するため、日本の電力・メーカーからなる原子力産業界が、津波襲来後、福島第一原子力発電所で炉心溶融を防ぎ得なかった要因分析と、その対策立案を中心に検討を行った。

事故要因は、津波の襲来によって、所内電気設備、特に非常用交流電源盤、直流電源盤の浸水により冷却、制御・監視機能が失われたこと、恒設電源によらない炉心冷却手段確立に時間を要し、炉心の冠水状態が維持できなかったことである。

今回の検討では、事故の進展に沿って、各段階で期待される機能が働いたかどうかに着目し、原因・要因を分析し、課題と対策を抽出した。既設の設備・対策とあいまって対策全体をみて、安全性を確保できるか深層防護の観点から対策を整理し、重層的な対策となるよう優先度の高いものを抽出した。

また、各社で実施済みの緊急安全対策により、実質的な安全性の向上が図られていることを確認した。

今後、事故に関する新たな情報が得られれば、更に検討を加えて報告書の見直しを行う予定である。