

福島原子力事故調査報告書
(中間報告書)

平成 23 年 12 月 2 日
東京電力株式会社

はじめに

本年3月11日の大震災により被災された方々に、衷心より、お見舞い申し上げます。

福島第一原子力発電所における事故を省みますと、結果して、これまでの原子力災害に対するリスク低減の取り組みが至らず、事故対応に作動が期待されていた機器や電源はほぼ全て機能を喪失し、安全確保の取り組みの前提を大きく外れる事態となりました。その結果、放射性物質を外部に放出させるという大変重大な事故により、発電所の周辺地域そして福島県民の皆さま、更に広く社会の皆さまに、大変なご迷惑とご心配をおかけしていることに対し、心より深くお詫び申し上げます。

避難されている方々の一日も早いご帰宅を実現するとともに、国民の皆さまに安心していただけるよう、福島第一原子力発電所における原子炉の安定的冷却や放射性物質の放出抑制に向け、引き続き、全力で取り組んでまいります。また、廃止措置に向けた中長期的な取り組みも着実に進めてまいります。

当社は、今回の事故の重大性に鑑み、同様の事態を再び招かぬよう、厳正かつ徹底した事故の調査・検証を行い、事故原因を明らかにし、そこから得られた教訓を今後の事業運営に反映していくことが事故の当事者としての社会的責務であるとの認識の下、本年6月に当社内に「福島原子力事故調査委員会」を設置し、調査・検証を進めてまいりました。

具体的には、事故の収束作業を最優先にしつつ、また、放射線量が高い箇所は十分な現地調査ができないという制約の中、各種記録類の調査、解析の実施、延べ250名を超える社員とのディスカッション等を実施してまいりました。

また、「福島原子力事故調査委員会」でとりまとめた調査結果は、社外有識者で構成される「原子力安全・品質保証会議 事故調査検証委員会」にお諮りし、専門的見地や第三者としての客観的な立場から様々な助言をいただいております。

この度、事故に対するこれまでの備え、東北地方太平洋沖地震およびそれに伴う津波により被った設備被害、その後の対応状況と炉心損傷や水素爆発等に至る経緯等について、これまでの調査で得られた事実を整理、評価・検証し、原因と再発防止に向けた主として設備面の対策を中間報告書としてとりまとめました。

なお、今後も調査については継続し、新たに判明した事実や、今回は含まれていないテーマについても、改めて公表する予定です。

これまで多くの皆さまに、原子力発電にご理解を賜り、ご支援をいただいておりますが、今回の事故により、皆さまの信頼を大きく損なうこととなりましたことに対し、改めて、深くお詫び申し上げます。

また、事故の収束に向けてご支援・ご協力をいただいている政府、国内外の関係諸機関、メーカー等の皆さまに心から感謝申し上げます。

平成23年12月2日

東京電力株式会社 福島原子力事故調査委員会委員長
山崎 雅男

－ 事故調査の目的と体制 －

(1) 目的

事故の当事者の立場として、事実を整理・自ら検証することにより、事故原因を明らかにし、そこから得られた教訓を今後の事業運営に反映していくこと。

(2) 体制

【福島原子力事故調査委員会】

(構成メンバー)

委員長	代表取締役副社長	山崎 雅男
委員	代表取締役副社長	武井 優
	常務取締役	山口 博
	常務取締役	内藤 義博
	企画部長	
	技術部長	
	総務部長	
	原子力品質監査部長	計 8 名

【事故調査検証委員会】

「福島原子力事故調査委員会」で取りまとめた調査結果について、専門的見地や第三者としての客観的な立場からご意見をいただく諮問機関として「原子力安全・品質保証会議」の下に社外有識者で構成する委員会を設置

(構成メンバー)

委員長	矢川 元基 氏 (東京大学名誉教授)
委員	犬伏 由利子 氏 (消費科学連合会副会長)
	河野 武司 氏 (慶應義塾大学教授)
	高倉 吉久 氏 (東北放射線科学センター理事)
	首藤 伸夫 氏 (東北大学名誉教授)
	中込 秀樹 氏 (弁護士)
	向殿 政男 氏 (明治大学教授)

(3) 方法

結果を取りまとめるにあたり、以下の調査・確認を実施した。

- ・記録類の確認 (チャート、警報発生記録等データ、運転日誌 など)
- ・解析 (津波のインバージョン解析、地震応答解析、炉心損傷解析 など)
- ・設備目視確認 (屋内外の主要設備について実施)
- ・ヒアリング (ディスカッション)

(発電所の災害対策要員を中心にのべ250名を超える人数を実施)

なお、調査結果については、「福島原子力事故調査委員会」の計4回の審議・検証を経た後、その結果について「事故調査検証委員会」に都度、諮問した。

目 次

1. 本報告書の目的	1
2. 福島原子力発電所事故の概要	1
2. 1 福島第一原子力発電所の概要	
2. 2 福島第二原子力発電所の概要	
2. 3 福島原子力発電所事故の概要	
3. 東北地方太平洋沖地震の概況	4
3. 1 地震及び津波の規模	
3. 2 発電所を襲った地震の大きさ	
3. 3 発電所を襲った津波の大きさ	
3. 4 津波評価について	
4. 事故に対する発電所の備え	15
4. 1 法令全般	
4. 2 設備設計について	
4. 3 新たな知見の取り込みについて	
4. 4 アクシデントマネジメント整備	
4. 5 アクシデントマネジメント策と今回の事故	
5. 災害時の対応態勢	20
5. 1 原子力災害発生時の態勢	
5. 2 事故時の状況	
6. 地震の発電所への影響	22
6. 1 地震発生直前のプラント状況	
6. 2 地震発生直後のプラント状況	
6. 3 外部電源の状況	
6. 4 地震による設備への影響評価	
7. 津波による設備の直接被害の状況	37
7. 1 福島第一原子力発電所の被害状況	
7. 2 福島第二原子力発電所の被害状況	
7. 3 津波による設備被害まとめ	
8. 津波到達以降の対応状況	43
8. 1 福島第一1号機の対応状況	
8. 2 福島第一2号機の対応状況	
8. 3 福島第一3号機の対応状況	
8. 4 福島第一4号機の対応状況	
8. 5 福島第一5号機の対応状況	
8. 6 福島第一6号機の対応状況	
8. 7 福島第二1号機の対応状況	

8. 8	事故進展に伴う福島第一原子力発電所敷地境界の線量率の変動	
8. 9	使用済燃料の貯蔵状況	
9.	プラント水素爆発評価	77
9. 1	地震計による爆発事象の考察	
9. 2	水素爆発の原因	
10.	事故の分析と課題の抽出	85
10. 1	事故時のプラント挙動からの課題	
10. 2	設備・機能上の課題	
10. 3	事故対応を困難にした障害要素からの課題	
10. 4	分析と課題の抽出に関するまとめ	
11.	事故原因を踏まえた今後の対応	117
11. 1	炉心損傷防止のための対応方針	
11. 2	福島第一原子力発電所事故の具体的対策	
12.	結び	130

別紙

福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における対応状況について

補足資料一覧

添 付

【1. 本報告書の目的】

—

【2. 福島原子力発電所事故の概要】

- 2-1 福島第一原子力発電所の概要
- 2-2 福島第二原子力発電所の概要

【3. 東北地方太平洋沖地震の概況】

- 3-1 東北地方太平洋沖地震の概要
- 3-2 福島第一原子力発電所地震観測記録と設計用地震動との比較
- 3-3 福島第二原子力発電所地震観測記録と設計用地震動との比較
- 3-4 福島第一原子力発電所における津波の調査結果
- 3-5 福島第一原子力発電所の屋外浸水状況
- 3-6 福島第一原子力発電所に襲来した津波の状況
- 3-7 福島第一原子力発電所における津波の再現計算結果
- 3-8 福島第二原子力発電所における津波の調査結果
- 3-9 福島第二原子力発電所における津波の再現計算結果
- 3-10 津波の差異に関する分析
- 3-11 津波の安全性評価に係る主な経緯
- 3-12 各研究機関等から提案されている波源及び波源の領域
- 3-13 福島第一原子力発電所建屋敷地高さの設計について

【4. 事故に対する発電所の備え】

- 4-1 工学的安全施設の多重性、多様性、独立性について
- 4-2 「冷やす」「閉じこめる」機能の設置状況
- 4-3 継続的なリスク低減（継続的な改善）－設備改造の例－
- 4-4 アクシデントマネジメント整備の経緯
- 4-5 (1) 「冷やす」機能の強化
- 4-5 (2) 「閉じこめる」機能の強化
- 4-5 (3) 整備した AM 内容－電気供給機能の強化－

【5. 災害時の対応態勢】

- 5-1 原子力防災組織（第1次緊急時態勢発令時）
- 5-2 第3非常態勢

【6. 地震の発電所への影響】

- 6-1 (1)～(14) 福島第一1号機 プラントデータ
- 6-2 (1)～(13) 福島第一2号機 プラントデータ
- 6-3 (1)～(13) 福島第一3号機 プラントデータ
- 6-4 福島第一原子力発電所 外部電源受電状況一覧表
- 6-5 福島第二原子力発電所 外部電源受電状況一覧表
- 6-6 外部電源設備の被災状況

- 6-7 (1) 福島第一原子力発電所 平成23年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた原子炉建屋及び耐震安全上重要な機器・配管系の地震応答解析結果について
- 6-7 (2) 福島第二原子力発電所 平成23年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた原子炉建屋及び耐震安全上重要な機器・配管系の地震応答解析結果に関する報告書(概要)
- 6-7 (3) 「福島第一原子力発電所の原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討に係る報告書」の概要について
- 6-8 (1) 福島第一5号機 設備状況
- 6-8 (2) 福島第一6号機 設備状況
- 6-8 (3) 福島第一1号機 非常用復水器(IC) 目視確認結果
- 6-8 (4) 福島第一1号機, 2号機, 3号機 タービン建屋設備状況
- 6-8 (5) 福島第一1~4号機 屋外設備状況
- 6-8 (6) 福島第一原子力発電所 ろ過水タンク、純水タンク状況
- 6-8 (7) 福島第一原子力発電所 屋外消火系配管状況
- 6-8 (8) 福島第一原子力発電所 防災道路状況
- 6-9 (1) 福島第一5号機 主な設備状況一覧表
- 6-9 (2) 福島第一6号機 主な設備状況一覧表

【7. 津波による設備の直接被害の状況】

- 7-1 福島第一原子力発電所 主要建屋内への浸水経路になったと考えられる開口の位置
- 7-2 福島第一原子力発電所 海側エリア、屋外海水設備
- 7-3 福島第一原子力発電所 電源系津波被害
- 7-4 福島第一原子力発電所 所内電源設備の被害状況
- 7-5 福島第二原子力発電所 主要建屋内への浸水経路になったと考えられる開口の位置
- 7-6 福島第二原子力発電所 電源系津波被害
- 7-7 福島第二原子力発電所 所内電源設備の被害状況
- 7-8 福島第一原子力発電所 非常用炉心冷却系機器等の状況
- 7-9 福島第二原子力発電所 非常用炉心冷却系機器等の状況

【8. 津波到達以降の対応状況】

- 8-1 余震の状況
- 8-2 福島第一1号機の高圧注水系について
- 8-3 福島第一1号機の格納容器ベントについて
- 8-4 ふくいちライブカメラ写真による福島第一1号機の格納容器ベントの排気について
- 8-5 福島第一2号機の格納容器ベントについて
- 8-6 福島第一3号機の格納容器ベントについて
- 8-7 ふくいちライブカメラ写真による福島第一3号機の格納容器ベントの排気について
- 8-8 (1) 使用済燃料プールの水位評価手法について
- 8-8 (2) 福島第一1号機 使用済燃料プールの状況調査
- 8-8 (3) 福島第一2号機 使用済燃料プールの状況調査
- 8-8 (4) 福島第一3号機 使用済燃料プールの状況調査

- 8-8 (5) 福島第一4号機 使用済燃料プールの状況調査
- 8-8 (6) 福島第一5号機 使用済燃料プールの状況調査
- 8-8 (7) 福島第一6号機 使用済燃料プールの状況調査
- 8-8 (8) 福島第一共用プールの状況調査
- 8-8 (9) 乾式貯蔵キャスク保管建屋の状況調査

【9. プラント水素爆発評価】

—

【10. 事故の分析と課題の抽出】

- 10-1 福島第一原子力発電所1号機 プラントデータ推移
- 10-2 非常用復水器について
- 10-3 非常用復水器 電動弁インターロックブロック線図
- 10-4 福島第一1号機 非常用復水器（IC）弁状態経緯
- 10-5 非常用復水器（IC）の胴側水位減少量に関する調査状況について
- 10-6 福島第一原子力発電所2号機 プラントデータ推移
- 10-7 福島第一原子力発電所3号機 プラントデータ推移
- 10-8 福島第二原子力発電所1号機 プラントデータ推移
- 10-9 炉心冷却機能の確保状況
- 10-10 福島第一・第二原子力発電所 事故の進展（概略）

【11. 事故の原因と今後への反映】

- 11-1 福島第一事故を受けた冷温停止に必要な対策
- 11-2 福島第一原子力発電所1～3号機 事象・原因・対策のまとめ

参 考

- 1 (1) 福島第一原子力発電所設備主要諸元
- 1 (2) 福島第二原子力発電所設備主要諸元
- 2 (1) 福島第一原子力発電所工学的安全設備及び原子炉補助設備の比較
- 2 (2) 福島第二原子力発電所工学的安全設備及び原子炉補助設備の比較
- 3 福島第一・二原子力発電所設備構成の概要
- 4 (1) 福島第一原子力発電所 原子炉水位計の指示範囲
- 4 (2) 福島第二原子力発電所 原子炉水位計の指示範囲
- 5 原子力発電所用語集

関連する主要な報告書（既提出）一覧

- (1) 東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所プラントデータについて
(平成 23 年 5 月 16 日 東京電力株式会社)
- (2) 福島第一原子力発電所における平成 23 年東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析に係わる報告 (平成 23 年 5 月 16 日 東京電力株式会社)
- (3) 福島第二原子力発電所における平成 23 年東北地方太平洋沖地震時に取得された地震観測記録の分析に係わる報告 (平成 23 年 5 月 16 日 東京電力株式会社)
- (4) 電気事業法第 106 条第 3 項の規定に基づく報告の徴収に対する報告について
(平成 23 年 5 月 16 日 東京電力株式会社)
- (5) 東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響評価について (平成 23 年 5 月 23 日 東京電力株式会社)
- (6) 福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等に係る記録に関する報告を踏まえた対応について (指示) に対する報告について (平成 23 年 5 月 23 日 東京電力株式会社)
- (7) 福島第一原子力発電所の原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討に係る報告書(平成 23 年 5 月 28 日 1 号機及び 4 号機, 平成 23 年 7 月 13 日 3 号機, 平成 23 年 8 月 26 日 2 号機、5 号機及び 6 号機 東京電力株式会社)
- (8) 福島第一原子力発電所 平成 23 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた原子炉建屋及び耐震安全上重要な機器・配管系の地震応答解析結果に関する報告書
(平成 23 年 6 月 17 日 2 号機及び 4 号機, 平成 23 年 7 月 28 日 1 号機及び 3 号機, 平成 23 年 8 月 18 日 5 号機及び 6 号機 東京電力株式会社)
- (9) 福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所における平成 23 年東北地方太平洋沖地震により発生した津波の調査結果に係る報告 (その 2)
(平成 23 年 7 月 8 日 東京電力株式会社)
- (10) 福島第二原子力発電所 東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について
(平成 23 年 8 月 12 日 東京電力株式会社)
- (11) 福島第二原子力発電所 平成 23 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いた原子炉建屋及び耐震安全上重要な機器・配管系の地震応答解析結果に関する報告書
(平成 23 年 8 月 18 日 東京電力株式会社)
- (12) 福島第一原子力発電所 東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について
(平成 23 年 9 月 9 日 東京電力株式会社)

- (13) 東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所 1 号機における事故時運転操作手順書の適用状況について（平成 23 年 10 月 21 日 東京電力株式会社）
- (14) 東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所 2 号機における事故時運転操作手順書の適用状況について（平成 23 年 10 月 28 日 東京電力株式会社）
- (15) 東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所 3 号機における事故時運転操作手順書の適用状況について（平成 23 年 10 月 28 日 東京電力株式会社）

1. 本報告書の目的

本報告書は、福島第一原子力発電所の事故について、これまでに明らかとなった事実や解析結果等に基づき原因を究明し、既存の原子力発電所の安全性向上に寄与するため、必要な対策を提案することを目的としています。

また、今回提案する対策の立案にあたっては、同様の事態を再び招かぬよう、実際に起こったことから設備や運用の改善につなげていくことが重要との観点から、炉心損傷を未然に防止するための技術課題の検討を中心としています。

なお、現在も調査を継続して進めている段階にあり、今後の調査で新たに判明した事実や、今回の報告に含まれていない「放射性物質の放出」、「放射線管理」、「人的リソース」、「資材調達」、「情報公開・情報提供」等の分野についても順次取り纏めの上、公表してまいります。

2. 福島原子力発電所事故の概要

2. 1 福島第一原子力発電所の概要

福島第一原子力発電所は、福島県太平洋岸のほぼ中央、双葉郡大熊町と双葉町にまたがって位置する。敷地は、海岸線に長軸をもつ半楕円状の形状となっており、敷地面積は約350万 m^2 である。

6基の沸騰水型軽水炉（BWR）が設置されており、1号機～4号機は発電所の南部分に立地し、南から4、3、2、1号機の順に配置され、5号機、6号機は発電所の北部分に立地し、南から5、6号機の順に配置されている。1号機は発電機出力が46万kW、2号機～5号機は各々78.4万kWであり、ともにマークⅠ型の原子炉格納容器を持つ。6号機は110万kWであり、マークⅡ型の原子炉格納容器となっている。総発電設備容量は469.6万kWであり、昭和46年3月の1号機の営業運転開始から昭和54年10月の6号機まで、6基が順次営業運転を開始した。

平成23年3月11日の発災時は、1号機～3号機は定格出力運転中、4号機～6号機は定期検査のため停止中であつた。 【添付2-1】

2. 2 福島第二原子力発電所の概要

福島第二原子力発電所は、福島第一原子力発電所の約12km南、楡葉町と富岡町にまたがって位置する。敷地面積は約150万 m^2 である。

4基の沸騰水型軽水炉（BWR）が設置されており、南から1、2、3、4号機の順に配置されている。発電機出力はすべて110万kWであり、1号機はマークⅡ型、2号機～4号機はマークⅡ改良型の原子炉格納容器となっている。総発電設備容量は440万kWであり、昭和57年4月の1号機の営業運転開始から昭和62年8月の4号機まで4基が順次営業運転を開始した。

今般の発災時は、1号機～4号機ともに定格出力運転中であつた。 【添付2-2】

2. 3 福島原子力発電所事故の概要

平成23年3月11日、福島第一原子力発電所では1号機から3号機、福島第二原子力発電所では1号機から4号機が運転中であったが、同日14時46分に発生した岩手県沖から茨城県沖の広い範囲を震源域とする東北地方太平洋沖地震を受けて、運転中の原子炉はすべて自動停止した。

同時に福島第一原子力発電所では、地震によってすべての外部電源が失われたが、非常用ディーゼル発電機（非常用D/G）が起動し、原子炉の安全維持に必要な電源が確保された。また、福島第二原子力発電所では、外部電源の喪失には至らなかった。

その後、襲来した史上稀に見る津波により、福島第一原子力発電所では、多くの冷却用海水ポンプ、非常用D/Gや電源盤が冠水したため、6号機を除き、全交流電源喪失の状態となり、交流電源を用いるすべての冷却機能が失われた。また、津波による冷却用海水ポンプの冠水のため、原子炉内部の残留熱（崩壊熱）を海水へ逃がすための補機冷却系も機能を喪失した。さらに、1号機から3号機では、直流電源喪失により交流電源を用いない炉心冷却機能までも順次停止していった。

このため、臨機の応用動作として、消防車を用いた消火系ラインによる淡水及び海水の代替注水に努めたが、結果として、1号機から3号機は、それぞれ原子炉压力容器への注水ができない事態が一定時間継続した。このため、各号機の燃料が水に覆われずに露出することで燃料棒被覆管が損傷し、燃料棒内にあった放射性物質が原子炉压力容器内に放出されるとともに、燃料被覆管（ジルコニウム）と水蒸気の化学反応により大量の水素が発生した。

これにより、放射性物質や水素が原子炉压力容器から蒸気とともに格納容器内へ主蒸気逃がし安全弁等を経て放出され、格納容器の内圧が上昇したため、格納容器ベント※を数回行うことを試みた。1号機と3号機ではベント操作によって格納容器の圧力低下が確認されたが、2号機についてはベントによる格納容器の圧力低下は確認されていない。

※ 格納容器破損による放射性物質の放出をコントロールできずに被害を拡大させる事態を避けることを目的に、格納容器内の気体を大気放出する操作

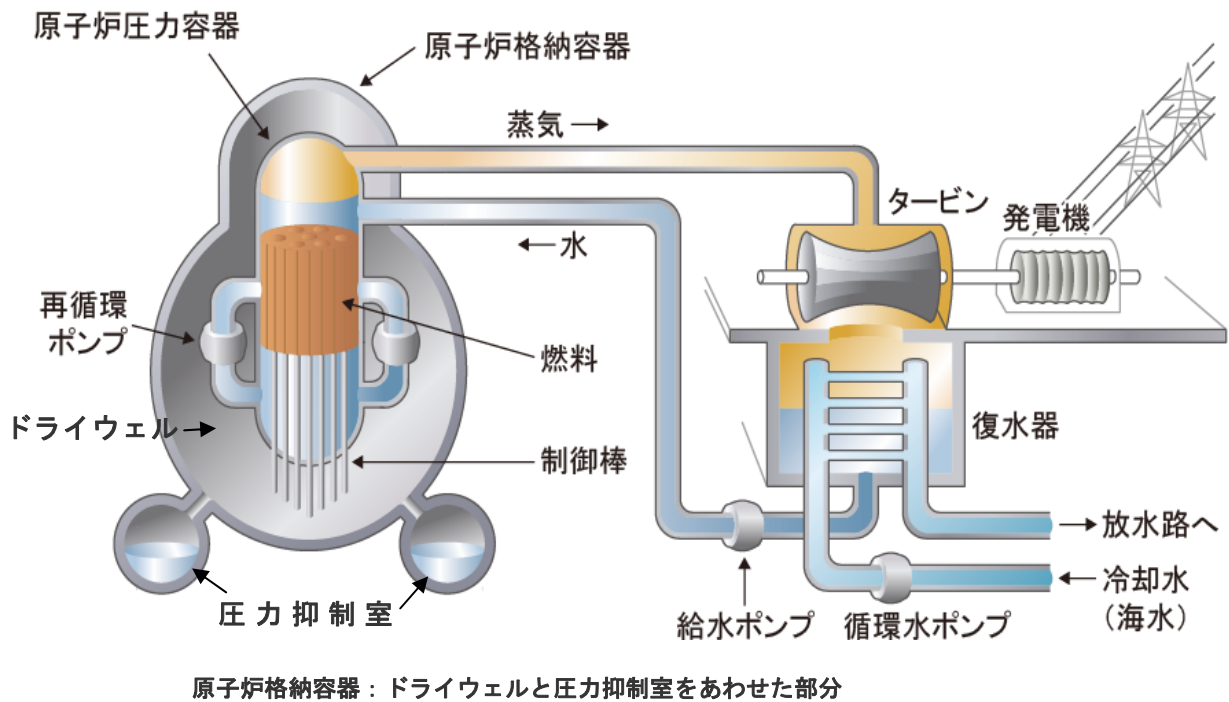
その後、1号機と3号機では、格納容器から漏えいした水素が原因と思われる爆発により、それぞれの原子炉建屋上部が破壊された。

また、燃料がすべて使用済燃料プールへ取り出されていた4号機では燃料の冠水が維持されていたが、原子炉建屋上部で爆発が発生した。

福島第一5号機、6号機においては、6号機の非常用D/Gが機能を維持していたため、その電力を5号機へ融通することにより、5号機、6号機ともに炉心への注水を行うことができ、さらに、原子炉内部の残留熱（崩壊熱）を海水へ逃がすための機能を回復することで冷温停止に至ることができた。また、福島第二原子力発電所においても、外部電源が機能を維持できたこと、さらに津波の規模が福島第一原子力発電所ほど大きくなかったことなどから、非常用海水系の仮設電源の復旧などの迅速な対応が効を奏し、全号機冷温停止に成功している。

しかしながら、福島第一1号機から3号機においては事故が連鎖的に拡大して甚大な原子力災害に発展した。

参考：原子力発電プラントの概要



3. 東北地方太平洋沖地震の概況

3. 1 地震および津波の規模

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、本震規模では日本国内で観測された最大の地震であり、この地震により宮城県栗原市で最大震度7を観測した。また、北海道地方、東北地方、関東地方の太平洋沿岸で高い津波が観測された。

今回の地震の震源域は、岩手県沖から茨城県沖までに及んでおり、その長さは約500km、幅は約200kmで、最大の滑り量は約20m以上であったとされている。本地震は、宮城県沖、その東の三陸沖南部海溝寄り、福島県沖から茨城県沖に至る複数の領域が連動して発生したマグニチュード9.0（世界の観測史上4番目の規模）の巨大地震であり、当社のみならず国の調査・研究機関である地震調査研究推進本部においても過去に事例のある個別の領域の地震動や津波は評価していたものの、これらすべての領域が連動して発生する地震は想定されていなかった。

この地震に伴い発生し、東北地方太平洋沿岸に大規模災害を引き起こした津波は、津波の規模を表す津波マグニチュードで9.1とされ、世界で観測された津波の中で4番目に大きいとされ、日本では過去最大に位置付けられる。【添付3-1】

発 生 日 時	平成23年3月11日14時46分		
震 源	三陸沖（震源深さ 24km）		
マグニチュード	9.0		
福島第一原子力発電所との距離	震央距離 178km、震源距離	180km	
福島第二原子力発電所との距離	震央距離 183km、震源距離	185km	

3. 2 発電所を襲った地震の大きさ

(1) 福島第一原子力発電所での観測結果

福島第一原子力発電所の原子炉建屋基礎版上（最地下階）の観測値は、耐震評価の基準である基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を一部超えたものの、ほとんどが下回った（観測された最大加速度：2号機原子炉建屋地下1階 550ガル）。また、地震観測記録の応答スペクトルについては、一部周期帯において基準地震動 S_s による応答スペクトルを上回ったが、概ね同程度であることを確認した。今回の地震動は設備の耐震評価の想定と概ね同程度のものではあったと言える。

今般の地震は極めて規模が大きいものであった。しかし、福島第一原子力発電所への影響という点では、設計用の基準地震動 S_s が発電所近辺の活断層による地震に基づいて設定しているため、施設へ到達する地震動という点では同程度となった。

【添付3-2】

(2) 福島第二原子力発電所での観測結果

福島第二原子力発電所の原子炉建屋基礎版上（最地下階）の観測値は、基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を下回っており（観測された最大加速度：1号機原子炉建屋地下2階 305ガル）、今回の地震動は設備の耐震評価の想定範囲内にあるものではあった。

【添付3-3】

3. 3 発電所を襲った津波の大きさ

(1) 福島第一原子力発電所での津波観測結果

福島第一原子力発電所に襲来した津波は、主要建屋敷地（1～4号機側でO.P. + 10 m、5、6号機側でO.P. + 13 m）まで遡上し、浸水域は主要建屋敷地エリアの全域に及んだ。浸水高は1～4号機側でO.P. 約+ 11. 5 m～約+ 15. 5 m、浸水深で約1. 5 m～約5. 5 mであり、主要建屋周囲に顕著な浸水が認められた。

(O.P. : 小名浜港工事基準面 (東京湾平均海面の下方 0. 727m)) 【添付 3 - 4】

4号機南側の集中環境施設プロセス主建屋付近で津波襲来時の状況を撮影した写真では、敷地高さ O.P. + 10 m に設置されている高さ約 5. 5 m のタンクが津波により水没していく様子が撮影されている。この付近の建屋周囲の浸水深は、敷地上 5 m 以上に及んでいた。 【添付 3 - 5】

一方、5、6号機側は、浸水高が O.P. 約+ 13 m～約+ 14. 5 m、浸水深が約1. 5 m 以下であり、1～4号機側との比較では相対的には浅くなっているが、主要建屋周囲は浸水していた。

福島第一原子力発電所に襲来した津波の最大高さは、潮位計、波高計が地震、津波の影響を受けたため直接測定できていないが、O.P. + 10 m の防波堤を津波が乗り越えてくる様子が撮影されていることから、津波の高さは10 m を超えるものであった。

【添付 3 - 6】

また、インバージョン解析（津波の再現計算）により波源を推定し、津波高さを評価した結果、福島第一原子力発電所の津波の高さは約 13 m であった。

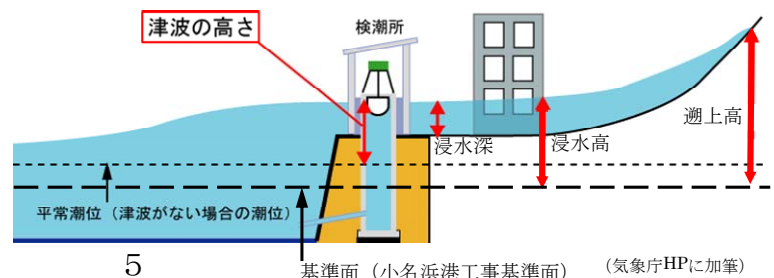
福島第一原子力発電所では、平成 14 年に土木学会から刊行された「原子力発電所の津波評価技術」に基づく評価結果 (O.P. + 5. 4 m～5. 7 m) を踏まえた対策を講じ、その後、平成 21 年に最新の海底地形データ等を用いた再評価結果 (O.P. + 5. 4 m～6. 1 m) を踏まえた再度の対策を講じていたが、今回の津波はそれを大幅に超えるものであった。 【添付 3 - 7】

福島第一原子力発電所の津波浸水高、浸水深さ調査結果		
	主要建屋敷地エリア (1～4号機側)	主要建屋敷地エリア (5号、6号機側)
◇敷地高 a	O.P. + 10m	O.P. + 13m
◇浸水高 b	O.P. 約+ 11. 5～約+ 15. 5m ^{※1}	O.P. 約+ 13～約+ 14. 5m
◇浸水深 b - a	約 1. 5～約 5. 5m	約 1. 5m以下
◇浸水域	海側エリア及び主要建屋敷地エリアほぼ全域	
備考	今回の津波高さ（津波再現計算による推定）；約 13 m ^{※2} 土木学会手法による評価値（最新評価値）；O.P. + 5. 4～6. 1 m	

※1：当該エリア南西部では局所的にO. P. 約+ 16～約+ 17 m（浸水深 約6～7 m）

※2：検潮所設置位置付近

地震による地盤変動量は浸水高及び遡上高に反映していない



(2) 福島第二原子力発電所における津波観測結果

福島第二原子力発電所では、主要建屋敷地エリアへの浸水の様相が福島第一原子力発電所の場合と異なり、O.P. + 4 mの海側エリアでは浸水（浸水深 O.P. 約 + 7 m）が全域に及んでいるものの、海側エリアから O.P. + 12 mの主要建屋敷地エリアへ斜面を越えて遡上した痕跡は認められなかった。

一方、主要建屋敷地エリア南東側では海側から免震重要棟へ向かう道路に沿って集中的な遡上が認められた。この結果、1号機南側は浸水深が深く、2号機及び3号機は1号機側からの回り込みが見られるものの建屋周囲の浸水深はわずかであり、4号機建屋周囲においてはほとんど浸水が認められなかった。

【添付3-8】

福島第二原子力発電所においても潮位計、波高計が地震、津波の影響を受けたため津波の高さは直接測定されていないが、福島第一原子力発電所と同様の再現解析で津波の高さを評価したところ、津波の高さは約9 mであった。

【添付3-9】

福島第二原子力発電所では、平成14年に刊行された土木学会「原子力発電所の津波評価技術」に基づく評価結果を踏まえた津波の高さ5.1～5.2 mに対しての機能確保の対策を講じていた（平成21年に最新の海底地形データ等を用いて再評価した結果では追加の対策は必要ではなかった）が、津波はそれを大幅に超えるものであった。

なお、福島第二原子力発電所では上述の通り主要建屋周囲への浸水が限定的であったため、福島第一原子力発電所と比較して電源設備等への被害が少なく、結果としてその後の事故対応の困難さが大きく異なった。

福島第二原子力発電所の津波浸水高、浸水深さ調査結果		
	海側エリア	主要建屋敷地エリア
◇敷地高 a	O.P. + 4 m	O.P. + 12m
◇浸水高 b	O.P. 約 + 7 m ^{※1}	O.P. 約 + 12～約 + 14.5 m ^{※2}
◇浸水深 b - a	約 3 m	約 2.5 m以下
◇浸水域	<ul style="list-style-type: none"> 海側エリアの全域に浸水 但し、海側エリアから斜面を越えて主要建屋設置エリアへの遡上は認められない 	<ul style="list-style-type: none"> 主要建屋設置エリア南の道路（1号機南側）に集中的に遡上 1号機南側の浸水が著しい 2号機の建屋周辺及び3号機の建屋南側への回り込みが認められるが浸水深さは僅か 4号機の建屋周辺には浸水なし
備考	今回の津波高さ（津波再現計算による推定）；約9 m ^{※3} 土木学会手法による評価値（最新評価値）；O.P. + 5.1～5.2 m	

※1：1号機海水熱交換器建屋外南側面等で局所的な高まりがある。

※2：1号建屋南側から免震重要棟にかけ局所的にO.P. 約 + 15～約 + 16m

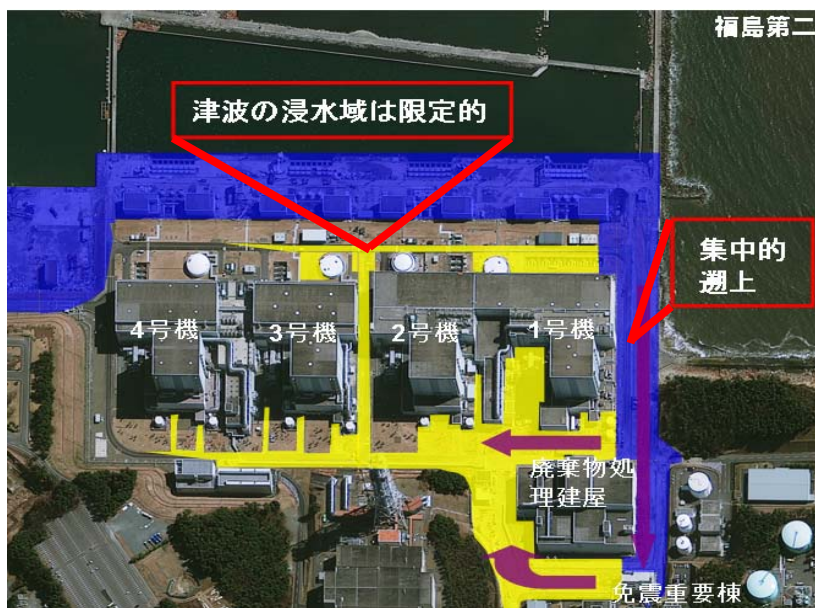
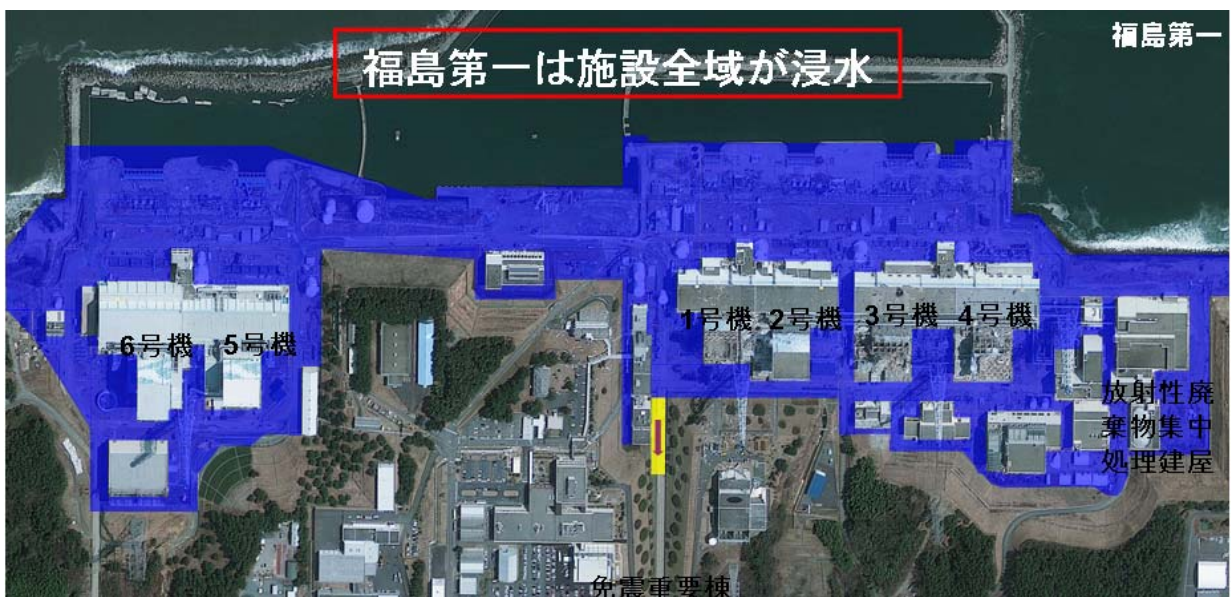
※3：検潮所設置位置付近

(3) 福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所の津波規模の差異について

福島第一原子力発電所に襲来した津波（推定津波高さ：約13m）は、福島第二原子力発電所に襲来した津波（推定津波高さ：約9m）と比較して大きかった。両発電所の間隔は約12kmと近接しており、地形的にも大きな差異が無いにもかかわらず襲来した津波の高さが異なったため、津波規模に差異が生じた主な理由を解析によって評価した。

この結果から、両発電所において津波の高さに差異が生じた理由は、宮城県沖ならびに福島県沖に想定されるすべり量の大きい領域（波源）から発生した津波のピークの重なる度合いが、福島第一原子力発電所では強く、福島第二原子力発電所では弱かったことによるものと考えられる。

【添付3-10】



3. 4 津波評価について

(1) 津波高さの評価について

- ・ 福島第一原子力発電所の各号機は昭和41年～昭和47年に設置許可を取得している。当初、津波に関する明確な基準はなく、既知の津波痕跡を基に設計を進めていた。具体的には、小名浜港で観測された既往最大の潮位として昭和35年のチリ地震津波による潮位を設計条件として定めた。(O.P. + 3. 1 2 2 m)
- ・ 昭和45年に「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」(以下、安全設計審査指針という)が策定され、考慮すべき自然条件として津波が挙げられており、過去の記録を参照して予測される自然条件のうち最も過酷と思われる自然力に耐えることが求められている。同指針を踏まえた国の審査においても、チリ地震津波による潮位により「安全性は十分確保し得るものと認める」として設置許可を取得している。設置許可に記載されているこの津波高さについては、現状でも変更されていない。しかしながら、実際には以下に述べるような様々な機会をとらえて津波評価を行うとともに、その対策も含めた内容を国へ報告している。その意味では、その結果に基づき必要な対応をしており、それらの評価が実質的な設計条件となっている。
- ・ 平成5年10月、国から、北海道南西沖地震津波を踏まえ、最新の安全審査における津波安全性評価内容を基に、改めて既設発電所の津波に対する安全性評価を実施するよう指示があった。これを受けて、平成6年3月、福島第一及び福島第二原子力発電所の津波に対する安全性評価結果報告書を国へ提出した。
- ・ 報告書の主な内容は以下の通りである。
 - ① 発電所周辺に影響を及ぼした可能性のある既往津波を文献調査により抽出したこと
 - ② 簡易予測式により発電所における津波水位を予測したこと
 - ③ 簡易予測式による津波水位が相対的に大きい津波について数値解析をおこなった結果、福島第一及び福島第二原子力発電所における歴史上最大の津波は昭和35年に発生したチリ津波であり、慶長三陸津波(1611年)よりも大きかったこと
 - ④ 津波による水位の上昇、下降に対する発電所の安全性は確保されていること
なお、文献調査から「阿部壽らの論文(1990)」等を踏まえ、貞観津波(869年)は慶長三陸津波(1611年)を上回らなかったと考えられることも記載している。
- ・ また、平成6年3月に国へ報告した後、当時非公開で実施されていた通商産業省原子力発電技術顧問会が同年6月に開催され、当社が報告した内容が了承された旨、口頭で連絡を受けている。
- ・ 平成14年に具体的な津波評価方法を定めたものとしては唯一の基準となる「原子力発電所の津波評価技術」(以下、「津波評価技術」と記す)が土木学会から刊行された。その中では、過去に発生した津波をもとに、津波の発生する領域を設定し、その領域ごとに過去に発生した最大の津波の波源モデルを設定した上で、波源モデルの位置、方向、深さ、角度等の各種パラメータの不確かさを考慮し、多数の数値シミュレ

ーションを実施することにより、想定される最大規模の津波を評価する手法が示されている。以降、この「津波評価技術」が国内原子力発電所の標準的な津波評価方法として定着し、規制当局へ提出する評価にも使用されている。

- 当社は、「津波評価技術」に基づき計算した津波水位を
福島第一原子力発電所：O.P. + 5.4～5.7 m
福島第二原子力発電所：O.P. + 5.1～5.2 m
と評価し、機能維持の対策としてポンプ電動機のかさ上げや建屋貫通部等の浸水防止対策などの対策を実施した。なお、この計算結果については、平成14年3月に国へ報告し確認を受けている。
- 平成19年6月、福島県の防災上の津波計算結果を入手し、福島県が想定した津波高さが当社の津波評価結果を上回らないことを確認した。
- 平成20年3月、茨城県の防災上の津波波源について評価し、算出した津波高さが当社の津波評価結果を上回らないことを確認した。
- 平成18年9月に発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針が改訂され、この新指針に基づき耐震性について再度確認する（以下、耐震バックチェックと記す）よう国の指示が出された。耐震バックチェックにおいては、既に地質調査等を終え、基準地震動を策定するとともに主要設備の耐震評価を中間報告として国へ提出している。津波については、地震随件事象として最終報告書で評価する必要があることから、その最終報告に向けて最新の海底地形と潮位観測データを考慮し、平成21年2月に「津波評価技術」に基づき再評価した結果、津波の水位は
福島第一原子力発電所：O.P. + 5.4～6.1 m
となり、その津波高さに応じて、ポンプ用電動機のシール処理対策等を講じている。また、福島第二原子力発電所の再評価の結果からは追加の対策は必要なかった。

以上のとおり、これまで様々な取り組みを行ってきたものの、今般の津波は当社の想定を大きく超えるものであり、結果的に津波に対する備えが不足し、津波の被害を防ぐことができなかった。

（2）津波に関する関連機関等の主張と当社の対応

当社は上述のとおり、確立された最新の知見に基づき津波の高さを評価しており、平成14年3月に国へ報告して以降現在に至るまで、津波高さについては、土木学会の「津波評価技術」に基づき評価することで一貫しているが、津波に関する知見・学説等が出された場合は、試算も含め、自主的に検討・調査等を行っている。その一環として、津波評価に必要な波源モデル等の知見が定まっていなかったなか、以下の2つの仮定に基づく試算や津波堆積物調査を実施した。以下に地震・津波に関する他機関の主張と当社の対応について示す。 **【添付3-11, 3-12】**

①地震調査研究推進本部の見解

- 平成14年7月に国の調査研究機関である地震調査研究推進本部（以下、地震本部）が、三陸沖から房総沖の海溝沿いのどこでも地震が発生する可能性があるという地震の長期評価（以下、「地震本部の見解」）を公表。地震本部の見解は、有史以来大きな地震が発生していない領域（福島沖から房総沖の海溝沿い）でもM8.2前後の地震が発生する可能性があるとしていた。ただし、地震本部においては、今回のような連動した大規模地震は想定していなかった。また、有史以来大きな地震が発生していない領域の津波評価に必要な不可欠な波源モデルまでは示していなかった。
- 土木学会では、平成15年度から検討することとしていた確率論的評価手法の中で「地震本部の見解」を取り扱うこととし、津波評価を確率論的に実施する先駆的なその成果を平成17年及び19年に論文として発表した。
- 津波の確率論的評価では、専門家による投票意見なども考慮される結果、評価結果に幅が出てくる。このため実際の運用では、これらの評価値をどのように扱うかも問題となる。当社は、土木学会での検討状況を注視するとともに、平成15年～平成17年までの土木学会による検討成果を踏まえ、開発段階にある確率論的津波ハザード解析手法※の適用性の確認と手法の改良を目的として、福島サイトを一つの例とした確率論的津波ハザードの試行的な解析を実施し、津波の高さと年超過確率の関係を整理したもので、平成18年に論文投稿した。
 - ※：津波の確率論的評価手法は、土木学会で平成18～20年度も引き続き検討されている（後述する貞観津波の波源もこの中で確率論的に扱われた）が、現段階でも津波の評価手法として用いられるまでに至っておらず、試行的な解析の域を出ていない。
- さらに、平成20年に、当社は、決定論に基づく耐震バックチェックにおいて、地震本部の「三陸沖から房総沖の海溝沿いのどこでも地震が発生する可能性がある」とする見解をどのように扱うか社内検討するための参考として、次に述べる仮想的な試算を実施した。
- 福島沖の日本海溝沿いでは、過去に大きな地震が発生しておらず、実際に津波評価をするために必要な波源モデルが定まっていない。このため、地震本部で示される地震規模（M8.2）とも合致しないが、福島サイトに最も厳しくなる明治三陸沖地震（M8.3）の波源モデルを福島沖の海溝沿いに持ってきた場合の津波水位を試算した。試算の結果からは、福島第一原子力発電所取水口前面で、津波水位は最大O.P.+8.4m～10.2mの津波の高さが得られた。
- 地震本部の見解の取り扱いについては、
 - ① 電気事業者が津波評価のルールとしている土木学会の「津波評価技術」では、福島沖の海溝沿いの津波発生を考慮していないこと
 - ② 津波の波源として想定すべき波源モデルが定まっていないことから、地震本部の見解に基づき津波評価するための具体的な波源モデルの策定について、土木学会へ審議をお願いすることとした。
- なお、中央防災会議は、平成15年10月に「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」を設置し、2年数ヶ月にわたる審議を経て、平成18年1月に被害想定に関する報告書を取りまとめた。報告書によると、過去に繰り返し発

生している地震を防災対策の検討対象とするとしており、日本海溝沿いについては、三陸沖の地震は想定しているものの、福島～房総沖についての平成14年の地震本部の見解は反映されていない。

②貞観津波

- 貞観津波については、平成20年10月に産業技術総合研究所（当時）佐竹氏から貞観津波に関する投稿準備中の論文について提供を受けた。論文では、仙台平野及び石巻平野の津波堆積物調査結果に基づき、869年貞観津波の発生位置及び規模が推定されていた。波源モデルとしては、2つの案が示されていたが確定には至っておらず、確定のためには福島県沿岸等の津波堆積物調査が必要と指摘されていた。
- 当社は、平成20年12月、佐竹氏の論文には未確定ながら波源モデル案が示されていたことから、この論文の中で提案されている2つのモデル案を用いた試算を実施した。試算の結果では、福島第一、福島第二原子力発電所の取水口前面で0.P.+7.8m～8.9m（満潮位の考慮方法を変更すると0.P.+7.8m～9.2m）程度の津波の高さが算出された。
- 翌平成21年4月、正式に論文が発表される。当該論文には、前述のとおり貞観津波の波源モデルが記載されていたが、仙台平野及び石巻平野での津波堆積物調査結果に基づく波源モデルであり、発生位置及び規模等は未確定とされていた。確定のためには、福島県沿岸等の津波堆積物調査が必要とされていた。
- 平成21年6月、地震本部の見解の扱いと合わせ、津波評価するための具体的な波源モデルの策定について土木学会へ審議を依頼した。
- 当社は、福島第一、福島第二原子力発電所への貞観地震による津波の影響の有無を調査するため、福島県の太平洋沿岸において津波堆積物調査を実施した。調査の結果、福島県北部では、標高4m程度まで貞観津波による津波堆積物を確認したが、南部（富岡～いわき）では津波堆積物を確認できなかった。調査結果と試算に使用した波源モデル案で整合しない点があることが判明したことから、貞観津波についても波源の確定のためには、今後のさらなる調査・研究が必要と考えた。
- 津波堆積物調査の結果については、平成23年1月に論文投稿し、同年5月に日本地球惑星科学連合2011大会で発表を行った。
- なお、現時点でも貞観津波の発生位置及び規模等（波源モデル）は確定されていない。

③まとめ

- 当社は、「地震本部の見解」（平成14年に長期評価として公表）について、社内的な試算などを実施したが、
 - ✓ 電気事業者が津波評価のルールとしている土木学会の「津波評価技術」が、福島沖の海溝沿いでは津波発生を考慮していないこと
 - ✓ 津波の波源として想定すべきモデルが定まっていないことから、試算は、具体的根拠のない仮定に基づくものに過ぎなかった。

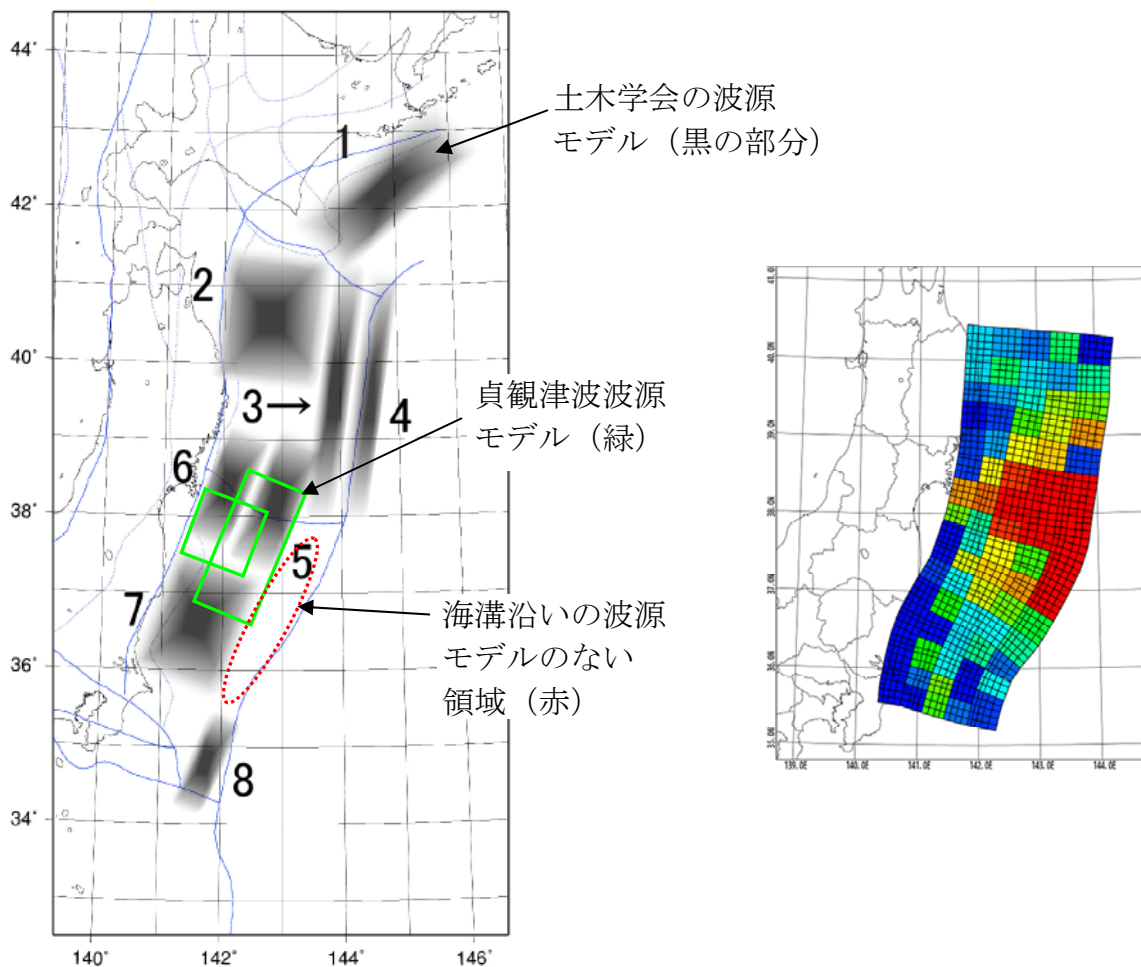
- その後、具体的な根拠のない中、波源を確定していくための活動の一環として電気事業者共同で研究を行うこととし、その研究方針や検討の進め方について専門家へ相談の上、平成 21 年 6 月に土木学会に波源モデル策定について審議を要請した*。
- また、貞観津波についても、津波堆積物調査等の結果から、波源モデルの確定のためには、さらなる検討の必要があるものと考え、原子力発電所の津波評価上の取り扱いを明確にするべく、地震本部の見解と同様、土木学会で専門家に審議していただくこととした*。

※：土木学会原子力土木委員会津波評価部会では、平成 21 年度～23 年度までの期間に、

- ①日本周辺（太平洋側プレート境界沿い、南海トラフ沿い、日本海東縁部）及び外国沿岸の決定論に用いる波源モデルの構築
- ②数値計算手法の高度化
- ③不確かさの考慮方法の検討（確率論的検討を含む）
- ④津波に伴う波力や砂移動の評価手法の構築 等

を目的として、幅広い分野について審議し、平成 14 年 2 月の「津波評価技術」刊行後の知見等を踏まえた改訂を行うこととしていた。上記「地震本部の見解」及び貞観津波の波源モデルについても、①の対象とされ、審議中であった。

- なお、今回の東北地方太平洋沖地震は、「地震本部の見解」に基づく地震でも、佐竹氏により提案された貞観地震でもなく、より広範囲を震源域とする巨大な地震であったことが判明している。



土木学会の波源、貞観津波の波源
(貞観波源は「佐竹ほか、2008」に基づき作成)

今回の津波の波源
(東京電力作成)

(3) 建屋敷地高さ・機器設置位置について

- 福島第一原子力発電所の主要建屋は、被害の大きかった1号機～4号機側が0.P. + 10 mのレベルに、5号機及び6号機側が0.P. + 13 mのレベルに設置されている。設置許可段階では、既往の最大津波としてチリ津波を想定しており、その時の津波の高さは0.P. + 3.3 m、現在では土木学会の「津波評価技術」に従って算出している津波の高さ0.P. + 6.1 mが設計上の津波高さであり、建屋設置レベルに遡上するような津波はないと認識していた。
- 設計上の津波高さと主要建屋敷地の関係について、平成23年6月に日本国政府からIAEA閣僚会議に提出された事故報告書に記載されている太平洋岸に位置する東北電力女川原子力発電所、日本原電東海第二発電所のデータに基づき、設計上の津波高さ等と建屋敷地レベルの関係について比較を実施した。
- その結果、福島第一原子力発電所の建屋設置レベルは、土木学会の津波評価技術という同一のルールに基づき算定している設計上の津波高さとの比較において、特段低く設定されていない。【添付3-13】

発電所名	(A) 主要敷地高さ (m)	津波高さ (m)		(A-B)	(A-C)
		設置許可 (B)	土木学会 (C)	A	A
福島第一原子力発電所	+10.0	+3.122	+6.1	68%	39%
原電東海第二発電所	+8.9	記載なし	+5.8	—	34%
東北女川原子力発電所	+14.8	+9.1	+13.6	38%	8%

- 福島第一・福島第二原子力発電所の原子炉建屋の構造は、福島第一6号機及び福島第二1～4号機においては、原子炉棟とその外側に付属棟を設置した複合建屋方式の原子炉建屋を採用しているが、福島第一1～5号機では原子炉建屋付属棟を持たない原子炉棟のみの単独建屋となっている。
- 原子炉建屋が付属棟を持たない福島第一1～5号機の非常用D/G（当初から設置されているもの）は、軽油を燃料とするディーゼルエンジンで発電機を駆動するものであることから気密性の要求される原子炉建屋（原子炉棟）ではなく、タービン建屋地下階に配置されていた。
- このように原子炉建屋が単独建屋で、非常用D/Gをタービン建屋へ配置する設計は、当時の米国の標準的な建屋配置設計と同様である。
- 福島第一1号機が設計されていた頃に米国で建設に着手されたプラントを調査したところ、米国は一般に耐震条件が厳しくなく、原子炉建屋以外の建屋は掘削して基礎を岩着とする必要はなかった。このため、米国で非常用D/Gが設置されている建屋は、ほとんどの場合は地下階を必要としない構造であった。これに対して、日本の建屋は耐震上岩着が要求されるため地下階を有している場合が多い。
このような条件の違いもあり、非常用D/Gについては、大型機器としての耐震性や振動を考慮して基礎の上（最下階）に設置していた。
- 一方、複合建屋方式の福島第一6号機及び福島第二1～4号機の非常用D/Gは、気密性の要求される原子炉棟ではなく、外側の原子炉建屋付属棟の地下階に設置され

ている。

なお、福島第一原子力発電所に増設された非常用D/Gは別棟建屋の1階に配置されている。非常用D/Gの設置場所と津波による浸水状況等を取り纏めた表を次に示す。

非常用D/Gの設置場所と津波被害の状況

		福島第一原子力発電所						福島第二原子力発電所							
		1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	1号機	2号機	3号機	4号機				
津波高さ※1		約+13m						約+9m							
敷地高さ		O.P.+10m				O.P.+13m		O.P.+12m							
主要建屋周り 浸水深 [浸水高]		約1.5~約5.5m [O.P.約+11.5~約+15.5m]※2				約1.5m以下 [O.P.約+13~約+14.5m]		約2.5m以下 (1号機周囲以外はほとんどゼロ) [O.P.約+12~約14.5m]※3							
D/G 設置建屋 [設置階]	A系	タービン建屋 [地下1階]	タービン建屋 [地下1階]	タービン建屋 [地下1階]	タービン建屋 [地下1階]	タービン建屋 [地下1階]	原子炉建屋 付属棟 [地下1階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]				
	B系	タービン建屋 [地下1階]	共用プール 建屋 [1階]	タービン建屋 [地下1階]	共用プール 建屋 [1階]	タービン建屋 [地下1階]	D/G建屋 [1階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]				
	HPCS 系	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f08080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> D/G本体が被水した </div>						<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #90ee90; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> D/G本体が被水していない </div>				原子炉建屋 付属棟 [地下1階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]	原子炉建屋 付属棟 [地下2階]

※1 両発電所の検潮所設置位置における津波高さ。計器損傷のため、検潮所における実際の津波高さは把握できていない。

※2 当該エリア南西部では局所的にO.P.約+16~約+17m[浸水深 約6~7m]

※3 1号機建屋南側から免震重要棟にかけて局所的にO.P.約+15~約+16m[浸水深 約3~4m]

・福島第一5号機のD/Gはタービン建屋に設置
・当該D/G本体は被水していない

・福島第二1号機のD/Gは原子炉建屋付属棟に設置
・当該D/G本体は被水している

- 福島第一原子力発電所では5、6号機より敷地レベルが低く、浸水深さが深い所に設置されていた1~4号機の非常用D/G本体（増設された共用プール建屋の非常用D/G除く）が、福島第二原子力発電所では津波が集中的に遡上してきた側に位置する1号機の非常用D/G本体が浸水した。
- 福島第一・福島第二原子力発電所の非常用D/Gが設置されている建屋は、タービン建屋、原子炉建屋付属棟等に係わらず、非常用D/Gへの外気取入口であるルーバを1階に有している。このルーバは、多くの場合津波の非常用D/G室への主たる侵入口となった。
- 以上のことから、建屋の周りが水に覆われてしまえば、非常用D/Gが設置されている建屋の種類や設置場所に関係なく、ルーバ等の浸水ルートとなり得る開口部と浸水深さの高さ関係で非常用D/G自体の浸水につながるものと考えられる。

4. 事故に対する発電所の備え

4. 1 法令全般

「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下、原子炉等規制法という）では、原子炉の設置の許可を始めとした各種許認可の手続きや許認可の基準等が定められており、実用発電用原子炉の設置にあたっては、同法に基づき経済産業大臣の許可を受けなければならない。

原子炉設置者からの設置許可申請に対する安全審査は、経済産業省が原子炉等規制法に定められた許可基準に適合しているか審査を行い、その審査結果を原子力安全委員会に諮問し、原子力安全委員会でも審査が行われる（ダブルチェック）。これらの審査に際しては、原子力安全委員会が策定した安全設計審査指針等の各種指針類への適合状況が確認されている。

また、プラントの運転保守については、設備の維持等に関し「原子炉施設保安規定」（以下、保安規定という）を定め、経済産業大臣の認可を受け、その遵守状況について経済産業大臣が行う定期的な検査（保安検査）により確認することとしている。

電気事業法では、工事計画の認可、使用前検査及び定期検査の手続き等が定められており、工事の前に経済産業大臣から工事計画の認可を、また原子炉に装荷される燃料体についても、同様に、その設計につき認可を受けることとされているほか、経済産業大臣あるいはその付託を受けた原子力安全基盤機構による使用前検査、燃料体検査、運転開始後の定期検査等を受けなければならない。

4. 2 設備設計について

原子力発電設備の設計にあたっては、人は間違えることがあり、機械は故障することがあるということを前提に、機器の単一故障を想定した事故に対して、多重性や多様性及び独立性を持たせた非常系の冷却設備等を設置してきた。

さらに、原子炉スクラム等の重要な機能については、故障が生じた場合には安全側に動作する設計思想に基づいて、作動信号が発信される設計としている。

【添付4-1】

【添付4-2】に原子炉を「冷やす」機能及び放射性物質を「閉じ込める」（格納容器）機能に関連して設けられた主な設備の設置状況を示す。

事故収束に重要なこれら機能について、故障等により多少の機能喪失があっても問題なく事故収束が図れることを目的に、前述したように多重性や多様性及び独立性を持たせた設備が設置されている。

これらの状況も踏まえ、原子炉施設の構造、設備等が災害の防止上支障がないものとして、法令に基づく設置の許可を得ている。

4. 3 新たな知見の取り込みについて【添付4-3】

運転保守段階では、設計（設置許可）の前提となった設備、機器が常に必要な機能を維持するよう、国の認可を受けた保安規定に従い、日常の状態確認、動作確認等を行っている。

さらには、プラントの設置後も新たに得られる知見（自社・他社プラントの運転経験を含む）をその都度、設備面・運用面の観点から積極的に取り込み、原子力災害リスクの低減に取り組んできた。例えば、

- ・ 原子炉圧力容器に接続されている原子炉再循環系配管で発生した応力腐食割れ対策工事、地中に直接埋設されていた海水系配管をコンクリート製のダクト内に新設する工事、海外プラントでの不適合事例から非常用炉心冷却系吸込ストレーナ目詰まり対策として実施したストレーナの大型化等、「冷やす」「閉じ込める」機能に直接かかる設備の更新を実施してきている。
- ・ プラント全体の信頼性向上に向け、炉心シュラウド取替工事（炉内構造物の応力腐食割れ対策）、給水加熱器取替（磨耗、腐食等対策）、給水制御装置取替（その他経年劣化対策）等の設備更新を実施してきている。
- ・ 地下階に設置された重要機器が、建屋内の配管破断等による溢水により冠水して機能を失わないよう水密化対策等を実施している。

- －原子炉建屋階段開口部への堰の設置
- －原子炉建屋最地下階の残留熱除去系機器室等の入口扉の水密化
- －非常用電気品室エリアの堰のかさ上げ
- －非常用D/G室入口扉の水密化 等

なお、前述のとおり、建屋外からの津波による浸水については、建屋敷地レベルが想定津波高さを上回ることから、津波の遡上が機器に影響を及ぼすとは考えず、建屋内の機器について津波に対する特別な対策を講じていなかった。

- ・ さらに、新潟県中越沖地震被災の教訓の反映も行っており、反映事項は今回の事故においても効果を発揮している。特に、免震重要棟（緊急時対策室の免震化）は、緊急時対策本部として機能を維持し、新たに配備した消防車は本来の目的とは別に原子炉注水用のポンプとして機能した。

以上述べたように自社、他社プラントの運転経験をはじめとする知見を随時発電所の設備、運転に反映し、原子力災害のリスク低減策について継続的に取り組んできた。

次に、アクシデントマネジメントとして取り組んできた内容について述べる。これらの内容については、電気事業者の自主的取り組みとして作業を進めたが、国の指導に基づいて取り組みを開始した。その内容については国に報告し、国の妥当との確認を得ながら一体となって整備を進めてきた。しかし、結果的に今回の事故の拡大を防ぐことはできなかった。

4. 4 アクシデントマネジメント整備【添付4-4】

原子力災害リスクの低減への取り組みの一環として、スリーマイルアイランド（TMI）事故を受け、原子力安全委員会が、その教訓を日本の原子力安全確保対策に反映させるべき事項として52項目を抽出し、国、事業者双方で必要な対応をとってきた。さらに、昭和61年にチェルノブイル4号機の事故が発生すると、TMI事故やチェルノブイリ事故がいずれもシビアアクシデントであったことから、シビアアクシデント対策への関心が世界的に高まった。

そうした動向も踏まえ、原子力安全委員会は昭和62年7月に共通問題懇談会（以下、共通懇）を設置し、シビアアクシデントの安全上の位置づけの考え方等について検討を開始した。共通懇は、検討を重ね中間報告（平成2年2月）等を経て、平成4年に原子力安全委員会に提出した報告書（平成4年2月）にて、国の果たすべき役割について積極的に提言した。すなわち、原子力安全委員会に対しては、事業者のアクシデントマネジメント整備の性格・位置づけ・事業者と国の任務等に関する基本的考え方を示し今後の方向性と枠組みを明らかにすることを求め、アクシデントマネジメント整備に関する国の役割についてコンセンサスを得る必要があるとした。

この報告を受けた原子力安全委員会は「発電用軽水型原子炉施設におけるシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネジメントについて」（平成4年5月）を決定した。それを受けた通産省からのアクシデントマネジメント整備要請（平成4年7月）に基づき、事業者は、平成6年から14年にかけて、多重な故障を想定しても「止める」「冷やす」「閉じ込める」機能が喪失しないよう多重性、多様性の厚みを増すアクシデントマネジメント策を整備した。

アクシデントマネジメント整備の基本的な考え方（原子力安全委員会決定文等）

- ・ 原子炉施設の安全性は、現行の安全規制の下に、設計、建設、運転の各段階において、①異常の発生防止、②異常の拡大防止と事故への発展防止、及び③放射性物質の異常な放出の防止、といういわゆる多重防護の思想に基づき厳格な安全確保対策を行うことによって十分確保されている。
- ・ これらの諸対策によって、シビアアクシデントは、工学的には現実に起こるとは考えられないほど発生の可能性は十分小さいものとなっており、原子炉施設のリスクは十分低くなっていると判断される。
- ・ アクシデントマネジメントの整備は、この低いリスクを一層低減するものとして位置付けられる。
- ・ したがって、当委員会は、原子炉設置者において効果的なアクシデントマネジメントを自主的に整備し、万一の場合にこれを的確に実施できるようにすることは強く推奨されるべきであると考えます。
- ・ アクシデントマネジメントは、原子炉施設の設備を大幅に変更することなく実施可能であり、その実施を想定することによりリスクが効果的に減少する限りにおいて、その実施が推奨又は期待されるべきであると考えます。

設備面においては、既存設備の潜在能力を最大限に活用するため、必要な設備変更を実施した。具体的な設備変更を以下に示す。

- ・ 既設の復水補給水系や消火系から炉心スプレイ系（福島第一1号機）または残留熱

除去系（福島第一 2～6 号機、福島第二 1～4 号機）を通じて原子炉への注水が中央制御室から操作可能となるよう接続ライン及び電動弁を設置（代替注水）

- ・ 格納容器の除熱失敗による格納容器の過圧に備え、耐圧性に優れたベントラインを既設ラインに追設。中央制御室からの操作で格納容器の圧力を逃すことができるよう整備（耐圧強化ベント）
- ・ 非常用 D/G 及び直流電源全喪失に備え、隣接号機からの電源融通確保 等

【添付 4-5】

運用面においても、多重な故障への対応態勢を整備するとともに、アクシデントマネジメントを的確に実施するため従来から制定している手順書等の改訂ならびに事故時運転操作基準〔シビアアクシデント〕（SOP）等の手順書類を制定した。

また、アクシデントマネジメントに関して正しく理解し備えておく必要があることから、運転員、支援組織の要員を対象として教育等を定期的に行うこととし、これを実施してきている。なお、これらの設備、対応態勢、手順書等の整備（アクシデントマネジメント策の整備）は、電気事業者と国が一緒になって整備を進めてきたものであり、整備内容については国に報告し、妥当との確認を得ながら進めてきた。

以上のように、事故の対応に必要な「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能及びその電源系は、多重性や多様性及び独立性を備え、設計想定事象を超えた事故が起きても出来る限り事故時に機能を喪失することがないように強化してきた。また、このような設備を有効に活用し事故対応が的確に行えるよう体制、手順書等を整備し、訓練を実施してきた。

しかしながら、今回の事故はこれらの前提を外れるものであった。

4. 5 アクシデントマネジメント策と今回の事故

以上のように、設計基準事象を超えるような事故に対しても、一定の事故対応の体制、手順書等が整備されていたが、今回の事故は、事前の想定を大きく超える津波の影響により、事故対応の取り組みの前提を外れる事態になったため、事故対応に作動が期待されていた機器、電源はほぼすべてその機能を喪失した。

例えば、原子炉の冷却という観点からは、通常の給復水系の他、原子炉隔離時冷却系を含めた非常用の複数の注水手段、さらには、本来原子炉注水用途ではない制御棒駆動水圧系、復水補給水系、消火系等からも原子炉注水できるよう何重もの備えをしていた。

これら機器のうち、いずれかを使用して原子炉注水を行うことを想定していたが、今回の事故では、津波の影響により電源を喪失したため、電動駆動の原子炉注水設備が機能を喪失した。また、初期段階で機能した蒸気駆動の原子炉隔離時冷却系等についても、制御に必要な直流電源を喪失するなどの理由から機能を喪失し、最終的にはこれらすべての原子炉注水手段を喪失した。

一方、今回の事故対応では、アクシデントマネジメント策として整備された注水手段ではなかったが、中越沖地震の教訓として配備された消防車を用い原子炉への注水手段とした。この際、原子炉への注水経路としては、アクシデントマネジメント策の一つとして設置した消火系からの注水ラインを利用している。これはアクシデントマネジメン

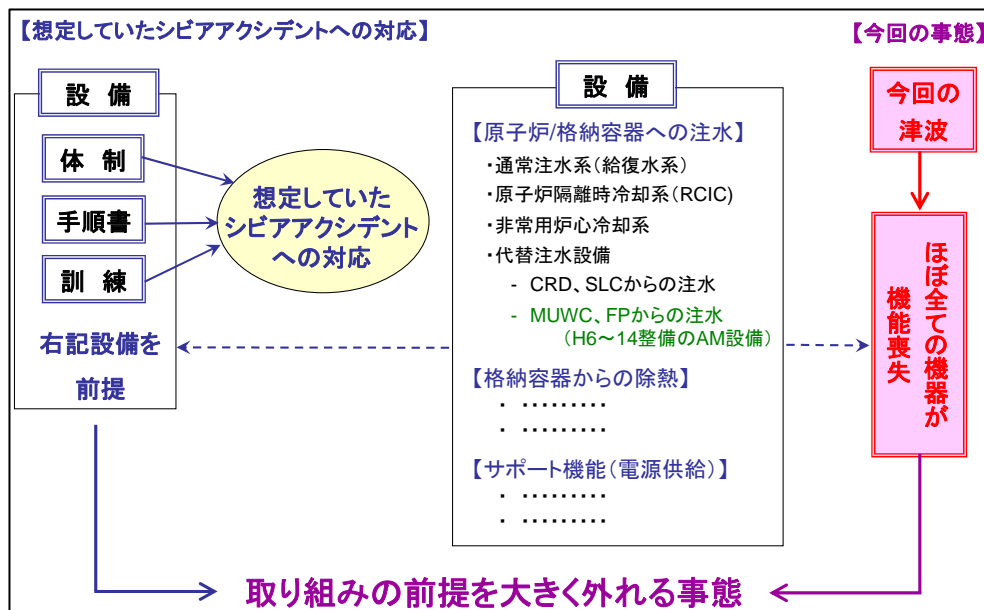
ト策整備の一環である手順書整備、訓練等による知識を活用した臨機の応用動作であった。しかし、結果的に事象進展に追いつけず、炉心損傷の防止までには至らなかった。

電源供給という観点からは、外部送電線からの受電が不能になった場合も想定し、各号機に複数の非常用D/Gを設置していた。さらに、これらの非常用D/Gが故障した場合、すなわち短時間（30分）の全交流電源喪失に対して、安全設計審査指針で原子炉を安全に停止することが求められており、直流電源で制御され、原子炉蒸気で駆動される原子炉隔離時冷却系等により8時間程度の原子炉注水を可能としている。これは、現在の安全設計審査指針においては、短時間に非常用D/G故障の復旧、発電所外部からの受電等、電源設備の修復が期待できることから、長期間の全交流電源を想定する必要がないとしていることによる。

先に述べたアクシデントマネジメントにおいては、さらに交流電源の復旧が遅れる場合や直流電源が使用不能な場合に備え、隣接号機から電源を融通できるよう備えていた。今回の事故では、外部送電線からの受電喪失、被水・浸水による非常用D/Gや所内の電源盤の広汎な使用不能等により短期間での電源復旧ができない状況であった。また、福島第一1～4号機においては、津波による被災以降、すべてのプラントで電源を喪失した状況となったため、隣接号機からの電源融通についても不可能となった。

福島を事故を顧みると、今回の津波の影響により、これまで国と一体となって整備してきたアクシデントマネジメント対策の機器も含めて、事故対応時に作動が期待されていた機器・電源がほぼすべて機能を喪失した。このため、現場では消防車を原子炉への注水に利用するなど、臨機の対応を余儀なくされ、事故対応は困難を極めることとなった。このように、想定した事故対応の前提を大きく外れる事態となり、これまでの安全への取り組みだけでは事故の拡大を防止することができなかつた。結果として、今回の津波に起因した福島第一原子力発電所の事故に対抗する手段を備えることができず、炉心損傷を防止できなかった。

なお、福島第二原子力発電所では、襲来した津波の規模が福島第一原子力発電所よりも小さかったこと、電源喪失を免れたことなどから、これまでに整備してきたアクシデントマネジメント策を有効に機能させることができ、プラントの安定化、冷温停止に至った。



5. 災害時の対応態勢

5. 1 原子力災害発生時の態勢

原子力災害に対する対策の強化等を目的とした原子力災害対策特別措置法（平成11年法律第156号 以下、「原災法」という）は、原子力災害の発生又は拡大を防止するための組織として、原子力事業所ごとに原子力防災組織の設置及びそれを統括管理する原子力防災管理者の選任を義務付けている。

原子力防災組織の具体的な設置及び運営についても、原災法に基づき原子力事業所ごとに原子力事業者防災業務計画（以下、「防災業務計画」）の作成が義務付けられている。

防災業務計画では、原災法第10条に定める特定事象が発生した場合には、第1次緊急時態勢を発令し、発電所及び本店に緊急時対策本部を設置することとしている。【添付5-1】に第1次緊急時態勢発令時の福島第一原子力発電所及び本店の原子力防災組織を示す。

緊急時対策本部が設置された以降は、原災法に基づく原子力防災管理者たる発電所長が発電所対策本部長として、「職制上の権限を行使して活発に原子力災害対策活動を行う。ただし、権限外の事項であっても、緊急に実施する必要があるものについては、臨機の措置をとる」ことが定められている。

一方、本店緊急時対策本部は、本部長たる社長の下で発電所での対策を支援する役割を担っているが、発電所及び本店の対策本部は「互いに綿密な連絡を取り行うこと」としている。

本件事故時においても地震発生直後から、各対策本部を常時TV会議システムで繋ぎ、リアルタイムの情報共有を図りつつ対応してきた。

5. 2 事故時の状況

平成23年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震では、福島県をはじめ、当社サービス区域内の茨城県や栃木県などで震度6弱以上の地震が観測されたことから、本店及び関係店所では、地震等の自然災害発生時における、当社の社内規定に定める第3非常態勢が同時刻に自動発令された。この時点で福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所は本店本部とTV会議システムで繋がれ地震後の対応を連携して行っていた。【添付5-2】に本店及び福島第一原子力発電所の第3非常態勢を示す。

福島第一原子力発電所では、避難場所である事務本館前駐車場に避難するとともに、人員確認を行い、非常災害対策要員及びそれ以外の所員を含め約400名の社員と国の原子力保安検査官並びに協力企業社員らが免震重要棟に入り対応を開始した。

本店では、館内一斉放送ならびに自動呼出システムにより非常災害対策要員の呼集を行い、本店の非常災害対策室に参集した約200名の社員が活動を開始した。

福島第一1～3号機は、地震後の津波により、すべての交流電源を喪失したことから、同日15時42分に原災法第10条該当事象と判断し、同法に基づく通報を行なうとと

もに、防災業務計画に定める第1次緊急時態勢を発令した。

なお、地震発生直後に第3非常態勢を発令していることから、爾後、非常災害対策本部と緊急時対策本部の合同本部に移行した。

同日16時36分、福島第一1、2号機の原子炉水位が確認できず、注水状況が不明なため原災法第15条に基づく事象(非常用炉心冷却装置注水不能)が発生したと判断、同時刻、防災業務計画に基づき第2次緊急時態勢に移行した。

原災法では、第15条に基づく事象が発生した場合に、内閣総理大臣は、原子力緊急事態宣言を発令するとともに、原子力災害対策本部及び原子力災害現地対策本部を設置することとなる。

今回の事故においては、同日19時3分、原子力緊急事態宣言が発令されるとともに、同時刻、官邸に原子力災害対策本部が、現地の緊急対策拠点(以下、「オフサイトセンター」という)に原子力災害現地対策本部が設置されることになった。

オフサイトセンターは、現地における実質的な災害対策を行う重要な拠点である。このため、オフサイトセンターに当社からの要員を派遣することが、防災業務計画に定められているが、今回の事故時においては、オフサイトセンターの原子力災害現地対策本部は、停電等の影響もあって、当初活動ができない状態であった。このため、福島第一原子力発電所緊急時対策本部からの派遣を見合わせていたが、12日未明に活動が開始されたとの情報を受け、まず、10名の派遣要員がオフサイトセンターに入り、当日中には、合計21名が同所での活動を開始した。

また、地震の発生を受けて本店緊急時対策本部から現地に向けて出発し、同日18時頃には福島第二原子力発電所緊急時対策本部に到着してオフサイトセンターの活動開始を待機していた3名の本店の要員についても、活動開始と共にオフサイトセンターに入ることとなった。

なお、当初は福島第一原子力発電所の免震重要棟に詰めていた国の原子力保安検査官は、3月12日朝に全員がオフサイトセンター側に移動し、13日に一旦発電所に戻るが14日夕方以降再度オフサイトセンター側に移動、翌日の原子力災害現地対策本部の移転に伴い福島県庁に移動した。このため、復帰する3月22日まで福島第一原子力発電所では国の原子力保安検査官は不在となった。

オフサイトセンターの当社派遣要員は、地震等による被害を受けず機能が維持されていた当社所有電力保安回線を介するTV会議システムや保安電話等を活用して、発電所及び本店の対策本部との間でリアルタイムの情報共有を図った。

一方、地震発生直後から発電所周辺の公衆回線はほとんど不通状態であったため、防災業務計画で定められたルールどおりに、発電所緊急時対策本部から経済産業省原子力安全・保安院や自治体等に通報連絡することが困難であった。このため、原子力安全・保安院等に派遣した要員とも情報を共有しつつ、上記電力保安回線を使用して、発電所緊急時対策本部から送信された通報連絡を本店緊急時対策本部が受信し、その情報をメールやFAX等で原子力安全・保安院等に連絡するなどの工夫をしていた。

なお、15日5時35分、国の原子力災害対策本部は、当社本店の緊急時対策本部と統合し、菅総理大臣(当時)を本部長とする「福島原子力発電所事故対策統合本部」が発足した。

6. 地震の発電所への影響

6. 1 地震発生直前のプラント状況

(1) 福島第一原子力発電所の状況

地震発生直前の福島第一原子力発電所各号機の状態は、1号機から3号機は定格出力運転中であった。

また、4号機から6号機は定期検査のため停止していた。これらのうち、4号機はシールド取替作業のため、原子炉圧力容器から使用済燃料プールへすべての燃料を移動させ保管・冷却していた状態となっていた。

5号機は、定期検査の終盤にあり、原子炉圧力容器の中に燃料を装荷し、健全性を確認するための水圧による漏えい試験を実施していた。6号機についても、定期検査の終盤にあり、燃料は既に原子炉圧力容器に装荷された状態となっていた。

(2) 福島第二原子力発電所の状況

地震発生直前の福島第二原子力発電所は、1号機から4号機の全基が定格出力運転中であった。

6. 2 地震発生直後のプラント状況

(1) 福島第一1号機の状況

①地震に伴う自動停止

- ・ 1号機は平成23年3月11日14時46分、地震によりスクラム動作し、同47分に制御棒がすべて挿入された。【添付6-1(1)】
- ・ これに伴い平均出力領域モニタ(APRM)の指示値は急減しており、出力低下の正常動作をしていることが確認できる。【添付6-1(2)】
- ・ また、外部電源が喪失したことにより、14時47分に非常用D/G2台が自動起動しており、その電圧は正常に確立している。【添付6-1(3)】
- ・ 一方、外部電源の喪失に伴って非常用母線の電源を喪失したため、原子炉保護系の電源がなくなり、主蒸気隔離弁が自動閉となった。【添付6-1(4)】

②自動停止以降の挙動

- ・ 原子炉水位は、スクラム直後はボイド(気泡)がつぶれることで低下しているが、非常用炉心冷却系の自動起動レベルに至ることなく回復している。【添付6-1(5)】
- ・ 原子炉圧力は、スクラム直後は低下するが、主蒸気隔離弁が自動閉したことにより上昇している。【添付6-1(6)】

警報発生記録データにおいて、主蒸気隔離弁閉の信号に前後して、主蒸気配管破断等に関連する隔離信号が打ち出されているが、主蒸気流量は0（ゼロ）となっており、蒸気流量の増大は見られない。【添付6-1(7)】

このことから、打ち出された隔離信号は、外部電源の喪失によって計器電源が喪失したことで当該信号が発されたものと考えられる。

- 14時52分、非常用復水器が「原子炉圧力高（7.13MPa [gage]）」により自動起動した。これにより、原子炉内の蒸気が冷却され、原子炉圧力は低下した。原子炉圧力の低下が速く、操作手順書で定める原子炉冷却材温度変化率 $5.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ を遵守できないと判断し、約10分後の15時03分頃、戻り配管隔離弁（MO-3A、3B（以降、それぞれ3A弁、3B弁という））を一旦「全閉」とし、非常用復水器を停止、原子炉圧力は再び上昇している。なお、他の弁は開状態で、通常の待機状態とした。【添付6-1(8)】

非常用復水器の操作については、手順書で原子炉圧力容器への影響緩和の観点から原子炉冷却材温度変化率が $5.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ を超えないよう調整することとしている。実際、非常用復水器の作動時に急激に温度が低下した後、停止操作を行っており、その操作は手順書に則って行われている。

- 原子炉圧力を6～7MPa程度に制御するためには、非常用復水器は1系列で十分と判断、A系にて制御することとし、津波の影響で操作が出来なくなる15時30分過ぎまで、3A弁を操作して非常用復水器（A）の手動起動・停止を繰り返すことでこの圧力の範囲で制御していた。【添付6-1(6)】

非常用復水器は、冷却した戻り水が原子炉再循環系配管（B）に流入するが、原子炉再循環ポンプ入口温度と原子炉圧力の変動時期があっているため、非常用復水器により圧力制御していたことがわかる。【添付6-1(9)】

非常用復水器1系列の操作とすることできめ細やかな圧力調整を行っている。

- 格納容器（ドライウェル）圧力は、原子炉スクラム以降上昇している。また、格納容器圧力と圧力抑制室圧力の差圧に変曲点が見られる。【添付6-1(10)】

格納容器の圧力上昇は、格納容器内の温度上昇に伴う圧力上昇の結果と考えられる。

また、差圧の変曲点については、圧力抑制室の冷却を行うために、15時10分前後に格納容器スプレイ系のポンプを手動で起動したことにより、圧力抑制室側の圧力低下が加わり差圧に変曲点が生じたものと考えられる。

- 格納容器温度は、温度上昇が緩やかで、数 10°C の温度上昇にとどまっている。【添付6-1(11)(12)】

格納容器内において急激な温度上昇は認められないことから、配管等の破断はなく、電源喪失による格納容器空調停止に伴うものと考えられる。

- ・ 通常換気空調系は常用電源喪失により停止したが、原子炉水位低（L-3）または安全保護系電源喪失による原子炉格納容器隔離系隔離信号により、非常用ガス処理系が自動起動したことから、原子炉建屋の負圧は維持されたものと考えられる。
【添付6-1（13）】
- ・ 排気筒放射線モニタは、原子炉スクラム以降もノイズはあるものの、記録されている範囲で安定した値を示しており、異常は認められない。
【添付6-1（14）】

（2）福島第一2号機の状況

①地震に伴う自動停止

- ・ 2号機は平成23年3月11日14時47分、地震によりスクラム動作し、同47分に制御棒がすべて挿入された。
【添付6-2（1）】
- ・ これに伴い平均出力領域モニタ（APRM）の指示値は急減しており、出力低下の正常動作をしていることが確認できる。
【添付6-2（2）】
- ・ また、外部電源が喪失したことにより、14時47分に非常用D/G2台が自動起動しており、その電圧は正常に確立している。
【添付6-2（3）】
- ・ 一方、外部電源の喪失に伴って非常用母線の電源を喪失したため、原子炉保護系の電源がなくなり、主蒸気隔離弁が自動閉となった。
【添付6-2（4）】

②自動停止以降の挙動

- ・ 原子炉水位は、スクラム直後はボイド（気泡）がつぶれることで低下しているが、非常用炉心冷却系の自動起動レベルに至ることなく回復している。
【添付6-2（5）】
- ・ その後、14時50分、外部電源喪失による原子炉隔離時（主蒸気隔離弁閉時）の対応手順書に従い、原子炉隔離時冷却系を手動起動している。原子炉隔離時冷却系は原子炉水位の過渡的な変動の中、14時51分に原子炉水位高により停止し、以降、15時02分に手動起動、15時28分に原子炉水位高により停止、15時39分に手動起動している。
【添付6-2（6）】
- ・ 原子炉圧力は、スクラム直後は低下するが、主蒸気隔離弁が自動閉したことにより上昇している。この上昇に対しては、主蒸気逃がし安全弁の開閉により安定的に圧力が制御されている。
【添付6-2（5）（7）】

〔 警報発生記録データにおいて、主蒸気隔離弁閉に前後して主蒸気配管の破断等に関連する隔離信号が打ち出されているが、1号機と同様に外部電源の喪失によって計器電源が喪失したことで当該隔離信号が発されたものと考えられる。 〕
【添付6-2（8）】

- ・ 手順書で原子炉冷却材温度変化率が5.5℃/hを超えないよう調整することとしているが、原子炉水温（PLR（原子炉再循環系）ポンプ入口温度）の記録で確認可能な1時間程度の範囲において数10℃程度の変化で安定している。
【添付6-2（9）】

- 格納容器温度は、温度上昇が緩やかで、数10℃の温度上昇にとどまっている。
【添付6-2(10)】

格納容器内において急激な温度上昇は認められず、原子炉圧力も7MPa程度で制御されていることから、配管等の破断はなかったものと考えられる。格納容器内の温度上昇は、1号機と同様に電源喪失による格納容器空調の停止によるものと考えられる。

- 圧力抑制室温度は、圧力抑制室が原子炉隔離時冷却系ポンプ駆動用タービンの排気や主蒸気逃がし安全弁の排気先となっていることから上昇している。このため、15時00分から07分頃にかけて残留熱除去系ポンプを順次起動し、圧力抑制室の水の冷却を行っている。水温は15時30分頃から上昇に転じているが、津波到達により残留熱除去系ポンプが停止したことによるものと考えられる。【添付6-2(11)】
- 通常換気空調系は常用電源喪失により停止したが、原子炉水位低(L-3)または安全保護系電源喪失による原子炉格納容器隔離系隔離信号により、非常用ガス処理系が自動起動したことから、原子炉建屋の負圧は維持されたものと考えられる。
【添付6-2(12)】
- 排気筒放射線モニタは、1号機と排気筒を共用しているが、1号機で記した通り、原子炉スクラム以降、ノイズはあるものの記録されている範囲で安定した値を示しており、異常は認められない。
【添付6-2(13)】

(3) 福島第一3号機の状況

①地震に伴う自動停止

- 3号機は平成23年3月11日14時47分、地震によりスクラム動作し、同47分に制御棒がすべて挿入された。
【添付6-3(1)】
- これに伴い平均出力領域モニタ(APRM)の指示値は急減しており、出力低下の正常動作をしていることが確認できる。
【添付6-3(2)】
- また、外部電源が喪失したことにより、14時48分に非常用D/G2台が自動起動しており、その電圧は正常に確立している。
【添付6-3(3)】
- 一方、外部電源の喪失に伴って非常用母線の電源を喪失したため、原子炉保護系の電源がなくなり、主蒸気隔離弁が自動閉となった。
【添付6-3(4)】

②自動停止以降の挙動

- 原子炉水位は、スクラム直後はボイド(気泡)がつぶれることで低下しているが、非常用炉心冷却系の自動起動レベルに至ることなく回復している。
【添付6-3(5)】
- その後、15時05分、外部電源喪失による原子炉隔離時(主蒸気隔離弁閉時)の対応手順書に従い、原子炉隔離時冷却系を手動起動している。原子炉隔離時冷却系は原子炉水位の過渡的な変動の中、15時25分に原子炉水位高により停止、16時03分に再度手動起動している。
【添付6-3(6)】

- 原子炉圧力は、スクラム直後は低下するが、主蒸気隔離弁が自動閉じたことにより上昇している。この上昇に対しては、主蒸気逃がし安全弁の開閉により安定的に圧力が制御されている。【添付6-3(5)(7)】

〔 警報発生記録データにおいて、主蒸気隔離弁閉に前後して主蒸気配管の破断等に関連する隔離信号が打ち出されているが、1号機と同様に外部電源の喪失によって計器電源が喪失したことで当該隔離信号が発されたものと考えられる。 〕
【添付6-3(8)】

- 手順書で原子炉冷却材温度変化率が $5.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ を超えないよう調整することとしているが、原子炉水温（PLR（原子炉再循環系）ポンプ入口温度）の記録で確認可能な1時間程度の範囲において数 10°C 程度の変化で安定している。【添付6-3(9)】
- 格納容器温度は、温度上昇が緩やかで、数 10°C の温度上昇にとどまっている。【添付6-3(10)(11)】

〔 格納容器内において急激な温度上昇は認められず、原子炉圧力も 7MPa 程度で制御されていることから、配管等の破断はなかったものと考えられる。格納容器内の温度上昇は、1号機と同様に電源喪失による格納容器空調の停止によるものと考えられる。 〕

- 通常換気空調系は常用電源喪失により停止したが、原子炉水位低（L-3）または安全保護系電源喪失による原子炉格納容器隔離系隔離信号により、非常用ガス処理系が自動起動したことから、原子炉建屋の負圧は維持されたものと考えられる。【添付6-3(12)】
- 排気筒放射線モニタは、原子炉スクラム以降、ノイズはあるものの記録を終了するまで安定した値を示しており、異常は認められない。【添付6-3(13)】

(4) 福島第一4号機の状況

- 4号機は地震発生時、定期検査中で全燃料が原子炉から使用済燃料プールに取り出されていた。
- 地震発生時は、原子炉ウェル側でシュラウド切断作業が実施されており、プールゲートが閉で満水状態であったが、地震後も原子炉ウェル側の大きな水位変動は見られていない。
- 地震により外部電源を喪失したため、待機中の非常用D/G1台が起動した（残り1台は点検中）。

非常用D/Gは、定期検査中でプロセス計算機、過渡現象記録装置の取り替え作業中だったこと等から、起動信号、電圧確立状態等に関する記録は残されていないが、燃料油タンクレベルの低下が確認されていることから正常に起動しているものと考えられる。

また、非常用パワーセンターの負荷として、中央制御室の制御盤に設置されている記録計のチャートに地震以降の記録が残されていることから、非常用D/Gから非常用パワーセンターまで地震後も健全であったことが確認できる。

なお、非常用ガス処理系は、非常用D/Gの電源供給により起動していたものと考えられる。

- 地震前、使用済燃料プールの冷却のため、残留熱除去系ポンプ（D）を運転していたが、地震後、外部電源喪失によって当該ポンプは停止した。なお、地震前に使用済燃料プールの水位が満水であること、プール水温が27℃であったことから、早期に燃料の冷却に支障をきたす状況ではなく、津波到達前に再起動するには至らなかった。
- 排気筒放射線モニタは、3号機と排気筒を共用しているが、3号機で記した通り、ノイズはあるものの記録を終了するまで安定した値を示しており、異常は認められない。

（5）福島第一5号機の状況

- 5号機は地震時、定期検査中で全燃料が原子炉内にあり制御棒はすべて挿入された状態で、圧力容器の耐圧漏えい試験を実施しており、7.2MPaに昇圧・保持されていた。
- 地震発生により、原子炉を加圧していた制御棒駆動水圧系ポンプが電源喪失により停止したため、原子炉圧力は一時的に低下したが、その後は崩壊熱により8MPa程度まで緩やかに上昇した。
- また、外部電源が喪失したことにより、非常用D/G2台が自動起動しており、その電圧は正常に確立している。
- 外部電源が喪失したことにより、使用済燃料プールを冷却していた燃料プール冷却浄化系が運転を停止したが、プールの冷却は、使用済燃料プールの水位が満水であり、プール水温が約24℃であったことから、早期に支障をきたす状況ではなかった。このため、プールの冷却に使用可能な残留熱除去系は待機状態とした。
- 通常換気空調系は常用電源喪失により停止したが、安全保護系電源喪失による原子炉格納容器隔離系隔離信号により、非常用ガス処理系が自動起動し、原子炉建屋の負圧は維持された。
- 排気筒放射線モニタは、原子炉スクラム以降、記録を終了するまで安定した値を示しており、異常は認められない。

（6）福島第一6号機の状況

- 6号機は地震時、定期検査中で全燃料が原子炉内にあり、制御棒はすべて挿入され、圧力容器の上蓋がボルトで締め付けられた状態であった。
- 原子炉圧力は、地震発生後、崩壊熱により緩やかに上昇した。なお、5号機と比較

して停止期間が長かったことにより、その推移はより緩やかであった。

- ・ また、外部電源が喪失したことにより、非常用D/G 3台が自動起動した。
- ・ 外部電源が喪失したことにより、停止時冷却モードで運転中であった残留熱除去系、燃料プール冷却浄化系が運転を停止したが、プールの冷却は、地震前に使用済燃料プールの水位が満水で、プール水温が25℃程度であったことから、早期に支障をきたす状況ではなかった。このため、残留熱除去系及び燃料プール冷却浄化系は待機状態とした。
- ・ 通常換気空調系は常用電源喪失により停止したが、安全保護系電源喪失による原子炉格納容器隔離系隔離信号により、非常用ガス処理系が自動起動し、原子炉建屋の負圧は維持された。
- ・ 排気筒放射線モニタは、5号機と排気筒を共用しているが、5号機で記した通り、ノイズはあるものの記録を終了するまで安定した値を示しており、異常は認められない。

(7) 福島第二原子力発電所の状況

- ・ 福島第二1～4号機は、定格運転中のところ、地震によりスクラム動作し制御棒がすべて挿入された。
- ・ 津波の影響により循環水ポンプが停止し、復水器で原子炉内の蒸気を水に戻すことができなくなることに備え、主蒸気隔離弁を手動で全閉とし、原子炉圧力の制御を主蒸気逃がし安全弁にて行った。
- ・ 原子炉水位は、自動停止した際のボイド(気泡)のつぶれにより「原子炉水位低(L-3)」まで下降したが、原子炉給水系からの給水により非常用炉心冷却系等が起動するレベルに到達することなく回復した。
- ・ 主蒸気隔離弁全閉に伴い、原子炉隔離時(主蒸気隔離弁閉時)の対応手順書に従い、原子炉隔離時冷却系を手動起動し、原子炉水位高による自動停止と手動起動を繰り返して原子炉水位を調整した。
- ・ また、「原子炉水位低(L-3)」に伴い、原子炉格納容器隔離系及び非常用ガス処理系が正常に動作し、格納容器の隔離及び原子炉建屋の負圧維持が行われた。
- ・ 排気筒放射線モニタやモニタリングポストの値に異常な変化はなく、外部への放射能の影響がないことを確認した。

6. 3 外部電源の状況

(1) 福島第一原子力発電所の外部電源状況

- ・ 福島第一原子力発電所の外部電源は、新福島変電所から送電される大熊線1L及び2L(275kV)が1、2号機用の開閉所を経由して1、2号機の所内電源を受電し、大熊線3L及び4L(275kV)も同様に3、4号機用開閉所を経由して3、4号機の所内電源を受電している。
- ・ 号機間については、1号常用高圧電源盤、2号常用高圧電源盤及び3、4号機常用高圧電源盤が相互に接続され、電力融通が可能な回路構成となっていた。
- ・ 5、6号機は、夜の森線1L及び2L(66kV)が5、6号機用の66kV開閉所

を經由して所内電源を受電していた。なお、東北電力からの東電原子力線(66kV)については、1号機常用高圧電源盤に接続できる構成となっていたが、通常は使用していない設備であった。このため、1～4号機は4回線、5、6号機は2回線の外部電源を受電できる構成であった。

- ・ 地震当日の送電状況は、大熊線3Lの受電設備が工事中であったため、福島第一原子力発電所の外部電源は大熊線3Lを除く5回線からの受電であった。
- ・ 今回の地震により、1～4号機については、1、2号機用の開閉所にある受電遮断器等が損傷して大熊線1、2Lによる受電は不可能となり、大熊線4Lは、福島第一原子力発電所と新福島変電所の間に位置する一部の鉄塔と電線にアーク痕を確認しており、これを起因として受電停止に至ったと推定される。通常使用していない設備ではあったが、東北電力からの東電原子力線についても、原因は特定できていないが、ケーブル不具合が発生していたため、1～4号機は受電停止となった。
- ・ 5、6号機については、福島第一原子力発電所と新福島変電所の間に位置する夜の森線送電鉄塔1基(#27鉄塔)が、隣接地の盛土が地震により大規模に崩落したため倒壊に至り、夜の森線1L及び2Lからの受電停止となった。
- ・ 以上のとおり、7回線(東電原子力線含む)すべてが停止したことにより、福島第一原子力発電所では非常用D/Gが起動して所内電源を確保したものの、その後の津波により非常用D/Gや高圧電源盤等が被害を受け所内電源の喪失に至った。福島第一原子力発電所の外部電源被害状況を【添付6-4】に示す。

(2) 福島第二原子力発電所の外部電源状況

- ・ 当発電所における外部電源は、新福島変電所から富岡線1、2L(500kV)および岩井戸線1、2L(66kV)の計4回線で所内電源を受電する構成であった。地震当日は、点検停止していた岩井戸線1Lを除いた3回線で受電していた。
- ・ 地震発生後は、新福島変電所の断路器の損傷により3月11日14時48分頃に富岡線2Lが受電停止となった。なお、岩井戸線2Lにおいては、地震後の設備巡視により避雷器の損傷を確認したので、所内受電が富岡線1Lによって継続できていたことから損傷の拡大防止のために受電停止した。
- ・ このため、外部電源は一時的に1回線による受電となったが、翌日12日13時58分には岩井戸線2L、13日5時15分頃には岩井戸線1Lを仮復旧させ、3回線による受電構成となった。福島第二原子力発電所の外部電源被害状況を【添付6-5】に示す。

(3) 外部電源まとめ

福島第一および福島第二原子力発電所における外部電源設備は、地震により発電所内の開閉所遮断器、新福島変電所内変電設備が損傷、送電鉄塔隣接地の盛土崩落による鉄塔倒壊が発生し、福島第一原子力発電所では、7回線(東電原子力線含む)すべてが停止、福島第二原子力発電所では、4回線中3回線が停止し、1回線のみ供給が継続された。

福島第一および福島第二原子力発電所の外部電源は、安全設計審査指針に定められる2回線以上の送電線により電力系統に接続された設計であることを満足していたものの、上

記のような状況となった。

原子力発電所の設計においては、外部電源系統からの電力供給が失われた場合も考慮されており、実際後述の通り、地震により外部電源が失われた各号機において、非常用 D/G 以下の非常用電源系統が正常に起動し、設計通り電源の確保ができていたことが確認されている。

今回の地震により、原子力発電所の外部電源設備を含む送変電設備は広範に被害を受けた。外部電源設備の被害状況を【添付 6-6】に示す。

6. 4 地震による設備への影響評価

福島第一原子力発電所を襲った津波は地震発生から 1 時間に満たないうちに到達したため、発電所所員が発電所の設備が地震でどの程度の損傷を受けたのか、津波が来るまでの時間で明確には確認できていない。また、事故が炉心損傷や水素爆発にまで至り、建屋内の汚染水の滞留の問題や放射線の問題等から、原子炉建屋内の機器やタービン建屋地下階の機器の状態確認は現在も困難である。

そのため、福島第一原子力発電所について、次に掲げる観点から設備の健全性に関する考察を加え、可能な範囲で損傷原因を究明し、当該地震による安全上重要な機器の機能への影響の有無についての評価を行った。

(1) プラントパラメータによる評価

プラント情報を記録する媒体としては、運転員による記録の他、チャート、警報発生記録、過渡現象記録装置等が挙げられる。これらは、プラントの状態を示すものであり、設備の健全性を評価するための重要な情報となっている。

今回、津波の影響によりほとんどの計器電源等も喪失したため、情報は限定的であるが、その多くは津波までのプラント状態を示している。

地震直後の主たる設備の状況は既に述べたが、高圧注水設備（非常用復水器、原子炉隔離時冷却系等）等、問題なく動作していると判断され、特に異常は認められない。

また、主蒸気流量や格納容器温度のチャートから、配管の健全性についても、異常はないものと考えられる。

なお、福島第一 3 号機の高圧注水系の蒸気配管に関する地震の影響について、原子炉隔離時冷却系が停止し、高圧注水系が起動してから原子炉圧力が約 7 MPa から約 1 MPa まで低下しているため、3 号機の高圧注水系の蒸気配管破断の可能性も含め確認を行った。この結果、運転員からの聞き取りにより、実際に高圧注水系（HPCI）室に入室し異常が見られなかったということが確認されており、高圧注水系の蒸気配管に異常はなかったことが確認された。また、トラス室にも蒸気配管が通っているが、高圧注水系が停止した後の 13 日朝に運転員が入室しており、配管が破断したような異常は認められていない。3 号機の原子炉圧力の挙動は、タービン駆動用に原子炉から引き込む蒸気の消費量が大きい高圧注水系（蒸気駆動）を連続運転したことにより変化したものと考えられる。

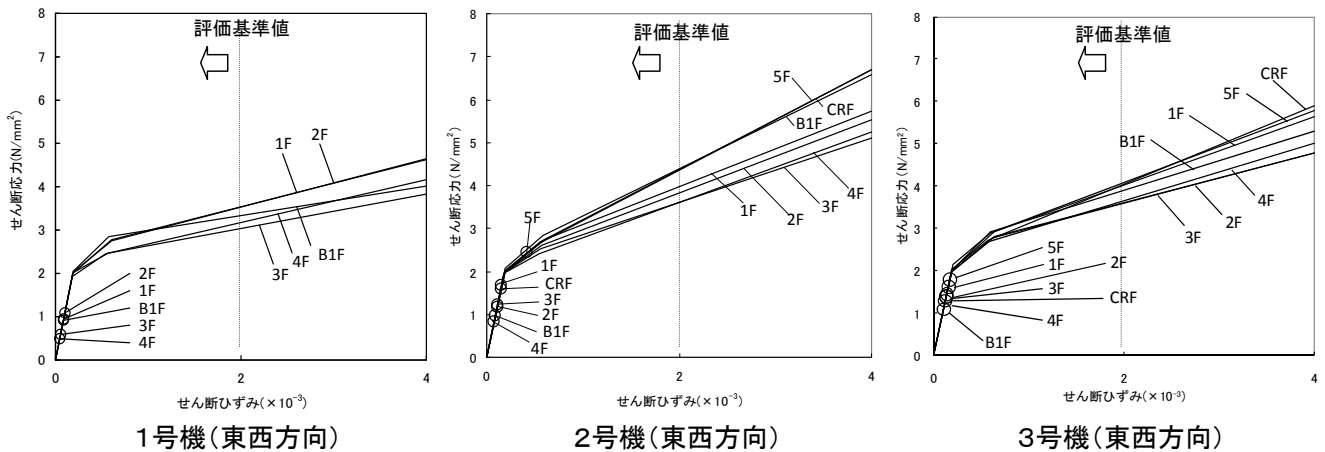
(2) 観測記録を用いた地震応答解析結果

東北地方太平洋沖地震の観測データに基づいた原子炉建屋の地震応答解析を用いて解析的検討を行い、東北地方太平洋沖地震が耐震安全上重要な機器・配管系へ与えた影響を評価した。

影響評価の具体的な方法としては、原子炉建屋の地震応答解析及び原子炉建屋と原子炉等の大型機器を連成させた地震応答解析で得られた応答荷重や応答加速度等を、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析で得られた地震荷重等と比較することにより実施した。

本検討の地震応答解析で得られた地震荷重等が、基準地震動 S_s を用いた地震応答解析で得られた地震荷重等を上回る場合は、安全上重要な機能を有する主要な設備の耐震性評価を実施した。主な評価結果を以下に示す。(詳細は【添付6-7(1)】参照。あわせて、福島第二原子力発電所の各号機の評価結果【添付6-7(2)】、並びに地震・津波被災後の福島第一1~6号機の建屋評価結果を【添付6-7(3)】に示す)

福島第一1~3号機の原子炉建屋評価結果



福島第一1~3号機の主要設備評価結果

単位:MPa

設備	1号機		2号機		3号機	
	計算値	評価基準値	計算値	評価基準値	計算値	評価基準値
炉心支持構造物	103	196	122	300	100	300
原子炉圧力容器	93	222	29	222	50	222
主蒸気系配管	269	374	208	360	151	378
原子炉格納容器	98	411	87	278	158	278
停止時冷却系	ポンプ	8	127			
	配管	228	414			
残留熱除去系	ポンプ		45	185	42	185
	配管		87	315	269	363
その他*	—	—	—	—	113	335

* その他に記載した評価対象設備:(3号機)高圧注水系蒸気配管

結果に示すとおり、今回の地震に対して、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」に係わる安全上重要な機能を有する主要な設備の耐震性評価の計算値は、すべて評価基準値以下であることを確認したことから、これらの設備の機能に地震の影響はないと考えられる。

また、それらの評価結果は、現時点における地震後のプラント挙動の分析結果と整合していることから、安全上重要な機能を有する主要な設備は、地震時及び地震直後において、要求される安全機能を保持できる状態にあったといえる。

(3) 発電所設備の目視確認結果

発電所設備の損傷状況を確認するべく、福島第一1～6号機までの設備状態を可能な範囲で目視によって確認した。汚染水が滞留しているエリアや高線量エリアなど、直接的な確認ができない範囲もあるが、各所の目視結果から以下のような観点での整理ができる。

- ・ 冷温停止に至った福島第一5号機及び6号機の屋内設備については、原子炉建屋、タービン建屋に設置されている機器の目視確認ができる。これらの機器の一部は、被水、冠水という意味で津波の影響を受けているものの、耐震クラスに係わらず設備に対するほぼ地震のみの影響を確認することができると考える。
- ・ 福島第一1号機～3号機については、原子炉建屋内の設備の確認は難しいが、タービン建屋内に設置されている機器については、地下階を除き目視確認することができる。これらの機器も5号機、6号機と同様に一部は、被水、冠水という意味で津波の影響を受けているものの、ほぼ地震のみの影響を確認することができると考える。
- ・ タービン建屋に設置されている設備については、そのほとんどが常用系の設備であり、耐震クラスが低い機器が多いことから、それらの機器に地震による影響が少なければ、プラントの耐震安全性に関する重要な判断材料になるものと考えられる。
- ・ 屋外設備については、損傷を受けている機器も多くある。後述するが、その多くは津波や津波による漂流物の衝突などによるものと考えられる。しかしながら、厳密には地震による影響を必ずしも否定する判断材料としては使用できない場合も多く見られる。このため、屋外の損傷設備の要因については、損傷形態から原因を特定できるものを除き、参考扱いと考えている。

また、上記目視点検に加えて、回転機器について以下の項目を調査整理している。

- ・ 5号機及び6号機において現在使用中の機器
- ・ 5号機及び6号機において試運転により運転可能なことを確認できている機器
- ・ 運転や試運転を実施するにあたって事前に分解などの点検している場合、点検結果に地震による損傷が認められるか否かの確認

①5号機目視確認結果【添付6－8（1）】

- ・ 5号機原子炉建屋に設置されている設備について、目視により確認したところ、損傷は認められなかった。
- ・ また、タービン建屋内に設置されている設備を目視により確認したところ、非常

用D/Gや電源盤など重要な機器については地震による損傷は認められないが、高圧タービンと低圧タービンの中間にある湿分分離器のドレン配管のサポートがずれており、そのドレン配管に接続されている小口径配管一カ所で破損が認められた。これは破損形態から地震による損傷と判断される。

② 6号機目視確認結果【添付6-8(2)】

- ・ 6号機の原子炉建屋は複合建屋方式を採用しており、原子炉棟の周囲に付属棟が設置された構造になっているが、付属棟に設置されている非常用D/Gも含めて設備に外観上の損傷は認められない。
- ・ タービン建屋に設置されている設備に外観上大きな損傷はないが、給水加熱器(5B)の固定脚基礎に割れが確認されており、これは地震による損傷と思われる。

③ 1号機 非常用復水器目視確認結果【添付6-8(3)】

- ・ 1号機の原子炉建屋に設置されている非常用復水器の本体、主要配管および主要弁に原子炉の冷却材喪失となるような損傷の有無を目視により確認した。なお、格納容器内側には立ち入ることができないため、格納容器外側の本体、配管、弁を確認対象とした。
- ・ 非常用復水器本体が設置されている原子炉建屋4階では、5階での水素爆発の影響で天井の北側に破損開口部が生じ、非常用復水器上部北側で爆風によると思われる保温材の脱落や瓦礫の散乱が認められた。また、非常用復水器本体南側の保温材が激しく脱落しているが、原子炉建屋の機器ハッチ(吹き抜け)側であり、5階で生じた水素爆発の爆風が、吹き抜けを通じて非常用復水器の保温材を損傷させたものと考えられる。なお、3階、2階においては保温材の脱落、飛散は認められなかった。
- ・ 非常用復水器本体の損傷、配管の破断、フランジ部からの漏えい、弁の脱落等は認められなかった。また、配管破断が生じて原子炉内の高圧蒸気が大量に噴出したような状況は認められなかった。
- ・ これらのことから格納容器外側に原子炉の冷却材喪失となるような損傷はないことが確認された。
- ・ この目視による現場確認にあわせ、非常用復水器の弁の開閉状態および非常用復水器の水位の確認を行った。A系の2A弁、3A弁は開であり、B系の2B弁、3B弁は閉であることが確認された。また、非常用復水器への補給水弁はA系、B系ともに閉であることが確認された。非常用復水器の現場水位計(冷却水)は、A系65%、B系85%であり、中央制御室の指示計と一致することが確認された。

④ 1号機～3号機タービン建屋目視確認結果【添付6-8(4)】

- ・ 1号機～3号機のタービン建屋に設置されている設備について、汚染水が溜まっている地下階を除き1階、2階に設置されている設備を目視により確認した。その結果、確認できた範囲で、1階に設置されている機器は津波による被水・浸水の痕跡があるが、地震による損傷は認められなかった。
- ・ なお、4号機については、被災当時定期検査の最中であり、分解されている機器

も多いと考えられたことから、今回の目視確認対象外とした。

⑤ 1号機～4号機側屋外設備目視確認結果【添付6－8（5）】

- タービン建屋海側には、機器の冷却用の海水を送水する海水ポンプが設置されている。これらは津波の影響を受けて機能を喪失したが、主要なポンプについては津波の影響を受けても倒壊することなく、自立している。このことから、地震によるポンプの損傷は基本的にはなかったものとする。
- 津波で流された、または、モータ自体が外れたポンプとしては、点検のために分解点検中のポンプの他、海水の除塵装置に使用されている海藻やゴミなどを洗い流すための小型のポンプである。《写真③中央の小型のポンプ》
- ボイラー用の重油タンクが流されており、地震の影響がどの程度であったかは判断できない。また、非常用D/Gの燃料に使用される軽油タンク、冷却水の水源の一つである復水貯蔵タンクについては、地震の影響と思われる基礎周りの地面の沈降が認められるが、タンクに漏えいなどの損傷は認められない。《写真⑦、⑧、⑨》
- 屋外に設置されている取水設備関係の電源盤は、その形状から津波の圧力を受けやすいためか、なぎ倒されている。このため、地震の影響がどの程度であったかは判断できない。《写真⑬》

⑥ ろ過水、純水タンク他目視確認結果【添付6－8（6）】

- 純水タンクについては、地震による影響で座屈による歪みが生じている（No.1純水タンクの上段中央の写真のタンク下部ふくらみが代表的）。また、No.1純水タンクについては、タンク付きの配管と外部配管を連結するフレキシブルの短管部分から地震時に漏水したことが確認されている。この漏水については、タンク側の弁を閉止することで漏えい量を抑制した。No.2の純水タンクについては、タンク底部が地震により損傷しており、量的には多くないものの継続的に漏水した。
- ろ過水タンクについても、純水タンクと同様に座屈による歪みが発生しているが、漏えいなどの事象は発生していない。
- ろ過水タンクを水源としている変圧器防災用配管において、連結部分が外れ漏水していた。当該防災配管は斜面下部に設置されており、斜面を降りてきている別の配管と斜面下部で交差していた。地震により斜面が崩れ、斜面を降りてきていた配管がサポート部分から変位した。
この傾いたサポートが交差部分に位置する当該防災配管の連結部分に力を加え、連結部分が外れたものと考えられる。地震の二次的な影響を受け、損傷したものと考えられる。

⑦ 屋外消火系配管目視確認結果【添付6－8（7）】

- 屋外消火系配管について損傷状況を調査した。消火系配管は、新潟県中越沖地震の教訓から配管の架空化、溶接構造化などの強化策を実施していた。また、原子力発電所では、消火系配管を原子炉圧力容器への注水に使用できるように設備変更していた。なお、津波や爆発による瓦礫を建屋周辺から除去する過程で、重機により撤去された箇所もあり、すべての場所について確認できてはいない。

- ・ 損傷事例としては、雑用水取り口《写真③》、4号機採水口基礎部《写真⑬》が漂流物等の衝突による損傷事例と考えている。両方ともに地震に対して強固な構造であり、雑用水の取り口先端は地震で荷重がかかるような構造でないこと、4号機採水口は長手方向に基礎が剥がされていることなどから、地震による被害ではなく津波によるものと考えられる。
- ・ 漂流物等が配管上に乗っている事例としては、消火栓《写真⑤、⑥、⑱》、消火栓他《写真⑳》があり、配管が変形している。
- ・ 建屋壁面のサポートにUバンドで固定されていた消火配管《写真㉒～㉔》は、Uバンドが破損し、配管が脱落・変形している。これらは海に面した建屋の壁であり、津波が壁に衝突し、下から配管を突き上げたことで損傷したものと考えている。
- ・ 配管が敷設されている土台部分が損傷し、消火配管が変形した事例《写真⑩》が認められる。土台部分の損傷原因は特定できない。
- ・ 津波の影響を受けにくい奥まった部分《写真⑯》やトレンチ内に設置されている消火配管《写真⑭》に損傷は認められない。また、屋外の海側に設置されていても、防波堤の内側の海に面した配管に損傷は認められず、衝撃が少ない、漂流物が当たらなかったなどの影響が考えられる。

⑧防災道路目視確認結果【添付6－8（8）】

- ・ 発電所構内の道路については、車両が通行するなど、事故対応する上で重要なものである。新潟県中越沖地震でも発電所構内道路に段差が生じたり、道路脇の斜面が一部崩れるなど、車両の移動に支障を与えるような事例が散見された。このような反省から、福島第一原子力発電所では道路の補強工事や道路脇の斜面の強化工事を実施してきた。
- ・ 福島第一発電所構内の防災道路については、各プラント周辺を周回できるように施設されているが、5号機南東側の防災道路に損傷が見られた。ただし、車両1台の通行が可能なように補強しており、補強部分の通行は可能な状態となっていた。
- ・ このように道路について地震の影響は少なかったものの、津波で破壊された物や流された物が通行を阻害しており、大きい物では重油タンクや放置されたクレーンが道路を塞いでいる状況が認められた。

⑨設備の運転状況確認結果【添付6－9（1）（2）】

- ・ 5、6号機においては、非常用D/G、原子炉の冷却に必要な残留熱除去系機器、使用済燃料プールの冷却に必要な燃料プール冷却浄化系、弁作動や水の補給の役割を有する純水補給水系、復水補給水系、計装用圧縮空気系などが機器の運転あるいは運転可能なことを確認して待機した状態となっている。
- ・ これらの機器のうち、気密性の高い原子炉建屋に設置されていたポンプ等の機器については地震の影響もなく、事前の確認の上で運転を行い、健全性を確認している。
- ・ 海水が多く侵入したタービン建屋については、付属する設備に微少な漏えいが認められるなどの不適合はあったものの、機器本体に地震による損傷と思われる影響は認められておらず、点検を実施した上で運転可能な状態となっている。
- ・ 屋外に設置されている海水系のポンプ類については、津波によりモータに付属す

る小口径の配管が破損したり、軸受へ砂が混入したためにモータ取替や軸受交換を行った上で運転を開始しているが、地震で機能を喪失したような事例は確認されていない。

以上、確認できた範囲においては、安全上重要な機器はもとより、耐震クラスの低い機器でも地震によって機能に影響するような損傷を受けたものはほとんど認められなかった。

なお、5号機の原子炉建屋最地下階の地震加速度は5.48ガルであり、最大値が確認された2号機と同等である。

(4) 設備への影響評価まとめ

以上述べたとおり、福島第一原子力発電所においては、プラント運転状況及び観測された地震動を用いた耐震評価の解析結果から、安全上重要な機能を有する主要な設備は、地震時及び地震直後において安全機能を保持できる状態にあったものと考えられる。

また、プラント内の巡視の結果や5号機、6号機の一部の機器では既に使用中、または試運転済みであることから、安全上重要な機能を有する主要な設備に地震による損傷は確認されておらず、耐震重要度の低い機器においても地震によって機能に影響する損傷はほとんど認められなかった。

従って、地震によって外部電源の喪失は生じたものの、地震後の時点においては非常用D/Gによる電源確保に成功しており、プラントとしては地震時及び地震直後の対応を適切に実施できる状態にあったものと考えられる。

なお、福島第二原子力発電所については、地震による原子炉自動停止と同時に起動した非常用機器冷却系のポンプが津波到達まで運転状態に異常が無かったこと、プラントが炉心を損傷することなく安全に冷温停止に成功していること、その後の設備確認においても安全上重要な機器の機能に津波による被害以外は確認されていないことなどから、当該地震による安全上重要な機器の機能への影響はなかったと考えられる。

7. 津波による設備の直接被害の状況

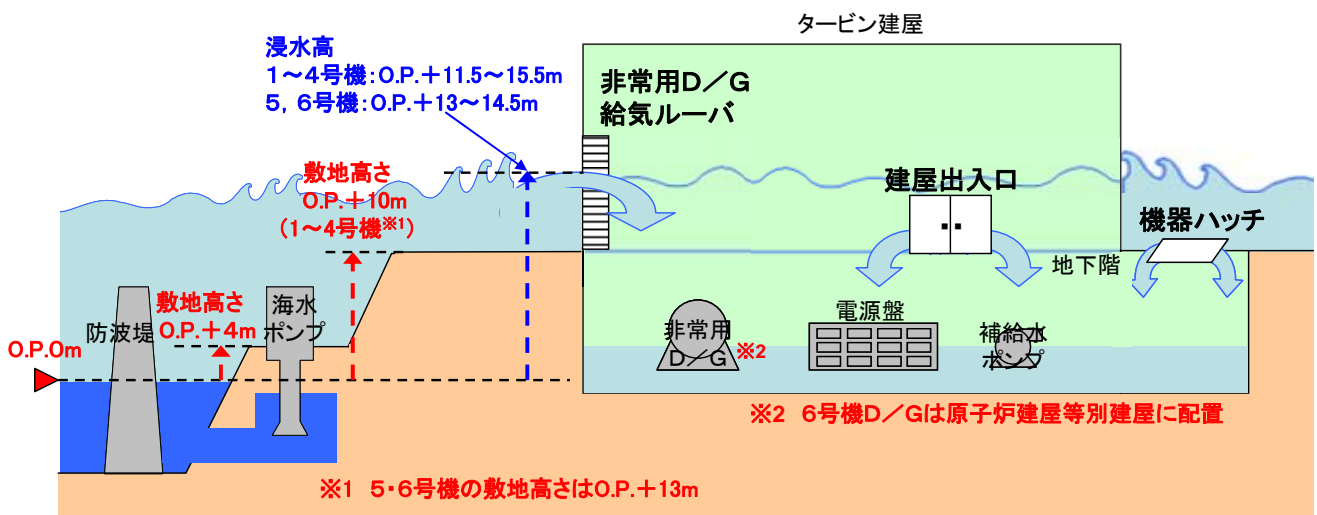
7. 1 福島第一原子力発電所の被害状況

(1) 主要建屋への浸水経路

福島第一原子力発電所の主要建屋（原子炉建屋、タービン建屋、非常用D/G建屋、運用補助共用施設（共用プール建屋）、コントロール建屋、廃棄物処理建屋、サービス建屋及び集中環境施設；1～4号機側はO.P.+10m、5/6号機側はO.P.+13mの敷地高さ）の周囲は全域が津波の遡上により冠水した。冠水は1～4号機側のエリアで厳しく、建屋周囲の浸水深は5.5mにも及んだ。

これらの主要建屋について、外壁や柱等の構造躯体には津波による有意な損傷は確認されていない。一方で、建屋の地上の開口部に取り付けられている建屋出入口、非常用D/G給気ルーバ、地上機器ハッチや、建屋の地下でトレンチやダクトに通じるケーブル、配管貫通部が、津波により冠水、損傷したことを確認した。これら建屋の地上の開口部や地下のトレンチやダクトに通じるケーブル、配管貫通部が、建屋内部への津波の浸水経路になったと考えられる。【添付7-1】

なお、建屋内部の水配管等からの溢水で重要機器が損傷しないように必要な箇所には溢水対策を講じており、隣接するエリアからの浸水防止のため堰や水密扉の設置などを行っている。しかし、今般のようにルーバなど上部から浸水し、その浸水箇所の水密性が高い場合（非常用D/G室など）、浸水が滞留するケースも見られた。



(2) 津波による設備被害

津波の被害を受けた設備のうち、原子炉の冷却に用いられる設備であり、今般の津波による設備被害の特徴を端的に示している設備について被害状況を以下に示す。

①非常用海水系ポンプ

1号機から6号機は海水を利用することで崩壊熱の除去を行う構造になっている。また、一部の空冷式を除き、非常用D/Gも海水を利用して機関の冷却を行う構造である。このため、海側エリアに海水を取り込むための非常用海水系ポンプ*が設置されている。

これらの非常用海水系ポンプを設置している海側エリアの敷地高さはO.P. + 4 mであり、津波高さの評価結果を踏まえ、津波の高さ5.4～6.1 mに対して機能を確保できるよう対策を講じていたものの、津波はそれを大幅に超えるものであったことからこれらのポンプの電動機は冠水し、系統の機能を喪失した。

なお、屋外ヤードエリア設置の非常用海水系ポンプ設備については、設備点検用クレーンの倒壊、漂流物の衝突等によるポンプならびに付属機器の損傷、電動機軸受潤滑油への海水の混入が確認されたものもあったが、点検中で取り外していた4号機の残留熱除去海水系ポンプ（A、C）を除き、いずれも津波を受けた後も据付場所に自立しており、ポンプ本体が流出したものはなかったなど、非常用海水系ポンプの躯体の機械的損傷は限定的であった。例えば、6号機のD/G（6A）冷却用の海水ポンプは平成23年3月18日時点で特段の修理を行わずに起動することができたことから、その後の平成23年3月19日、D/G（6A）を起動することができた。

【添付7-2】

※：非常用海水系ポンプ設備は、格納容器冷却海水系ポンプ、残留熱除去海水系ポンプ、非常用D/G海水ポンプをいう。

②非常用ディーゼル発電機

主要建屋エリア全域が津波の浸水を受け、建屋への浸水が生じた結果、建屋内の電気品の機能喪失が生じた。

5号機及び6号機の水冷式非常用D/G（D/G（5A）、D/G（5B）、D/G（6A）及び高圧炉心スプレイ系D/G）本体は被水を免れたが、1号機から4号機の水冷式の非常用D/G本体はすべて被水により停止している。被水しなかった5号機及び6号機の水冷式非常用D/Gも、非常用海水系ポンプ等が機能喪失したため運転することができず、結果として、水冷式の非常用D/Gはすべて停止した。

一方、2号機のD/G（2B）、4号機のD/G（4B）及び6号機のD/G（6B）は空冷式の非常用D/Gであり、これらについては非常用海水系ポンプがないため津波による冷却系への影響はなかった。D/G（2B）及びD/G（4B）については、4号機原子炉建屋の南西にある運用補助共用施設（共用プール建屋）に設置しており、非常用D/G本体に浸水被害がなかったものの、運用補助共用施設（共用プール建屋）地下の電気品室が浸水被害を受け、非常用D/Gの電源盤が水没し機能を喪失した。

この結果、1号機から5号機ですべての非常用D/Gが停止し、全交流電源喪失となった。6号機は空冷式のD/G（6B）が運転を継続し電源が維持された。

【添付7-3】

③電源盤

外部電源及び非常用D/Gの電力は、高圧電源盤、パワーセンター、低圧電源盤を経由して各機器に供給される。また、交流電源喪失時に最低限の監視機能等を確保するために直流電源盤（バッテリーあり）が用意されている。

今回の津波襲来により、1号機から5号機までは常用系、非常用系の高圧電源盤がすべて被水しており、仮に外部電源や非常用D/Gが機能していたとしても電力を必要とする機器に供給することができない状況であった。

また、パワーセンターについても大半が被水しており、高圧電源車などの接続可能な箇所は限られてしまう状況であった。

直流電源盤の被害については、1号機、2号機及び4号機で被水したが、3号機、5号機及び6号機では被水していない。3号機、5号機及び6号機の直流電源盤は、タービン建屋の中地下階に設置されていたことで浸水被害が及ばなかったものと推定される。

建屋への大規模な浸水が生じた施設では、建屋最地下階の浸水が顕著であり電源盤の被害もこれに対応している。最地下階に設置してあった電源盤は被水の被害を受けているのに対して、中地下階（一部被水の被害を受けているものあり）に設置してある電源盤は、被水を免れた。

また、最地下階に設置してあっても、建屋周囲の浸水高に対して建屋への浸水経路となる非常用D/G給気ルーバ等の最下端が浸水高より上に設置され、浸水経路となるダクト、トレンチ等の貫通部もない箇所では、建屋への浸水がなく、設備も被水していない。5号機及び6号機の非常用D/Gや6号機の非常用電源盤（高圧電源盤、パワーセンター）などがこれに該当した。

なお、6号機については、空冷式のD/G（6B）のみならず、高圧電源盤、パワーセンターといった電源盤（非常用電源系D系）も被害がなかったことから、供給先の機器を作動継続させることができた。【添付7-4】

④屋外の被害状況

福島第一原子力発電所においては、海側エリア（敷地高：0.P. + 4 m）に設置されていたNo.1重油タンク（大きさ：直径11.7 m×高さ9.2 m、重量：32トン）が、津波により1号機原子炉建屋・タービン建屋北側の構内道路（敷地高：0.P. + 10 m）まで漂流するなど、多数の漂流物が確認されている。また、駐車中の車両も多数漂流した。

また、主要建屋設置エリアにおいては、津波によりダクトのハッチの蓋等が流失・損傷し、開口部となったのが1～4号機側（敷地高：0.P. + 10 m）で20箇所、5、6号機側（敷地高：0.P. + 13 m）で5箇所確認されている。

なお、開口部の数については、瓦礫の存在等により状況を確認できなかった箇所が多数存在することから、さらに多かった可能性がある。

7. 2 福島第二原子力発電所の被害状況

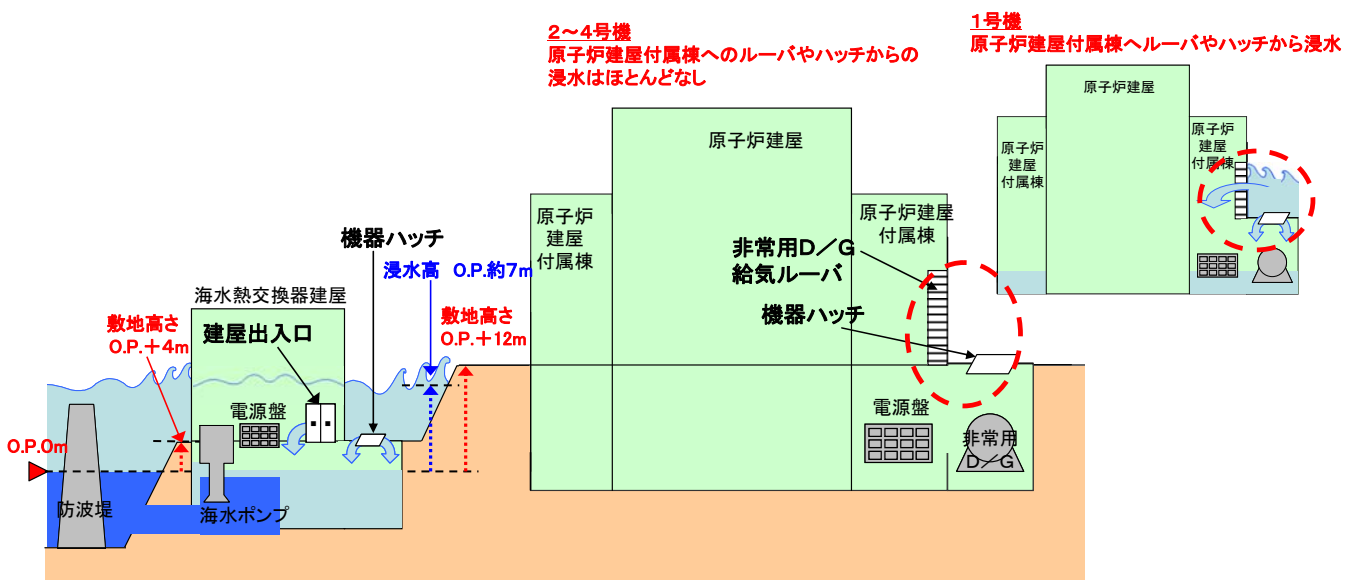
(1) 主要建屋への浸水経路

福島第二原子力発電所の主要建屋周囲（原子炉建屋、タービン建屋；O.P. + 1.2 mの敷地高さ）では、1号機の南側に集中的に遡上したほかは、浸水深は深くなかった。

1号機は、津波が集中的に遡上した1号機原子炉建屋南側に面する地上の開口部（非常用D/G給気ルーバ、地上機器ハッチ）からの浸水が認められ、ここから原子炉建屋（付属棟）へ浸水し、非常用D/G 3台全数、非常用電源（C系及び高圧炉心スプレイ系）が機能喪失した。

2号機から4号機は地上の浸水深さはわずかであったことから、地上の開口部から原子炉建屋やタービン建屋への浸水は確認されなかった。ただし、3号機の原子炉建屋（付属棟）及び1～3号機タービン建屋の地下で浸水が確認され、地下のトレンチやダクトに通じるケーブル、配管貫通部が、建屋内部への津波の浸水経路になったと考えられる。

【添付7-5】



(2) 津波による設備被害

津波の被害を受けた設備のうち、原子炉の冷却に用いられる設備であり、今般の津波による設備被害の特徴を端的に示している設備について被害状況を以下に示す。

①非常用海水系ポンプ

1号機から4号機は海水を利用することで崩壊熱の除去を行う構造になっている。また、非常用D/Gも海水を利用して機関の冷却を行う構造である。このため、海側エリアに海水を取り込むための非常用海水系ポンプ*が設置されている。

これらの非常用海水系ポンプを設置している海側エリアの敷地高さはO.P. + 4 mであり、津波高さの評価結果を踏まえ、津波の高さ5.1～5.2 mに対して機能を確保できるように対策を講じていたものの、津波はそれを大幅に超えるものであったことからこれらのポンプの電動機は冠水し、系統の機能を喪失した。

なお、福島第二原子力発電所の非常用海水系ポンプは、海水熱交換器建屋内に設置されていたものの、海水熱交換器建屋周囲は津波によって3 m程度の浸水深となり、建屋躯体には損傷は認められなかったがドア等の地上開口部が破損し、すべての海水熱交換器建屋が浸水した。

このため、電源盤、ポンプのモータが被水して、残留熱除去海水系は全8系統のうち3号機の1系統を除いて機能喪失した。また、A系、B系、H系の3系統ある非常用D/G海水系は3号機のB系、H系及び4号機のH系の3系統を除きすべて機能を喪失した。

※：非常用海水系ポンプ設備は、残留熱除去海水系ポンプ及び中間ループ循環ポンプ、非常用ディーゼル発電設備冷却系中間ループ循環ポンプ、高圧スプレイ系ディーゼル発電設備冷却系海水ポンプ及び中間ループ循環ポンプをいう。

②非常用ディーゼル発電機

福島第二原子力発電所では、各号機毎に3台（A，B，H）の非常用D/Gを設置している。地上開口部から原子炉建屋（付属棟）に浸水した1号機では、3台ある非常用D/Gのすべてが被水して使用できなくなった。また、非常用D/G本体は被水を免れても津波浸水によって非常用D/G海水系の電源盤・ポンプの電動機が被水したものは、ディーゼル機関の冷却ができなくなり機能を喪失した。非常用D/Gの海水系は3号機（B，H）及び4号機（H）の3系統を除きすべて機能を喪失しており、この結果として1号機非常用D/G（A，B，H）、2号機非常用D/G（A，B，H）、3号機非常用D/G（A）、4号機非常用D/G（A，B）の9台が機能喪失した。

なお、福島第二原子力発電所では、外部電源の受電が継続していたことから、残存した非常用D/Gを使用する必要は生じなかった。

【添付7-6】

③電源盤

福島第二原子力発電所においては、福島第一原子力発電所とは津波規模が異なったことから、主要建屋への浸水状況が異なり、結果として電源盤の被害状況が異なっている。津波の浸水が見られた1号機原子炉建屋（付属棟）において非常用電源盤C系とH系が被水したが非常用電源系D系が残り、他の号機では主要建屋の電源盤に被害はなかった。このため、外部電源から受電した電力を非常用電源系を通じて機器に供給できる状況であり、その後の緊急時対応に必要な設備を使用することができた。（電源は常用系A，B 2系統、非常用系C，D 2系統、高圧炉心スプレイ系電源H系を有する）

一方、海側エリアの海水熱交換器建屋内の電源盤は建屋への浸水の影響を受け、3号機海水熱交換器建屋のパワーセンター1系統を除き、その他7系統すべてが被水した。このため、残留熱除去海水系は全8系統のうち3号機の1系統を除いて機能喪失した。

【添付7-7】

④その他、屋外の被害状況

福島第二原子力発電所においては、主な設備・構造物等が津波により主要建屋設置エリア（敷地高：O.P. + 1.2 m）まで漂流した状況は確認されていない。

また、主要建屋設置エリアにおいては、津波によりダクトのハッチの蓋等が流失・損傷し、開口部となったものが5箇所確認されている。

7. 3 津波による設備被害まとめ

(1) 福島第一原子力発電所のまとめ

福島第一原子力発電所においては、津波による設備被害によって、以下の状況に直面した。

- ① 地震後の津波襲来により全プラントで非常用海水系ポンプ設備の機能を喪失し、炉心の残留熱（崩壊熱）を海水によって冷却することができなくなった。
- ② 1号機から5号機については電源設備の機能喪失から、電動の設備（安全系、並びにその他注水、冷却設備等）はすべて使用できない状態となった。また、電動弁を中央制御室から開閉することができなくなった。
- ③ さらに直流電源を喪失した1号機、2号機及び4号機では中央制御室での計測機器がすべて機能喪失しプラントの状態監視ができなくなり、直流電源が残った3号機及び5号機も計測や状態監視がバッテリー残量の影響を受ける状況となった。
- ④ また、原子炉を減圧する主蒸気逃がし安全弁や格納容器のベント弁（空気作動式）の制御用電磁弁の操作ができなくなった。
- ⑤ 加えて、中央制御室や各建屋内部及び屋外ヤードの照明の停電や通信手段の制約が生じ、対応をさらに困難にした。
- ⑥ なお、屋外ヤードにおいては津波による瓦礫や残留水、再度の津波襲来のリスクなど作業環境は極めて厳しい状態となった。

すなわち、原子炉の熱除去ができなくなり、すべての電動機器は動力源を喪失し、中央制御室の監視機能および操作手段を喪失し、現場との通信手段がなくなり、照明も無い状態で事故対応を始めなければならなくなった。

なお、1～4号機については、代替注水として重要な設備である復水補給水系ポンプは電源の喪失のみならず、電動機の被水のため使用できない状態となった。

以上、津波襲来後の設備状況は、事故収束の対応が困難な状態にあったものと言える。

（安全系等の主要機器の設備被害状況は【添付7－8】参照）

(2) 福島第二原子力発電所のまとめ

福島第二原子力発電所においては、津波規模が異なり設備被害の様相も異なった。地震後の津波襲来により、1号機、2号機、4号機で非常用海水系ポンプ設備の機能を喪失し、炉心の残留熱（崩壊熱）を海水によって冷却することができなくなった。

しかし、全号機とも非常用電源系統が使用可能であったことから、復水補給水系などの代替の低圧注水機能は使用可能な状況であった。また、中央制御室の監視、操作の機能も維持された。

（安全系等の主要機器の設備被害状況は【添付7－9】参照）

8. 津波到達以降の対応状況

通常、運転中に原子炉が自動停止（自動スクラム）した場合、制御棒がすべて挿入され燃料の核分裂による熱の発生はなくなるが、燃料内の核分裂生成物による崩壊熱は発生し続ける。このため、炉心は停止後も冷却し続けなければならないが、冷却を継続できない場合は、原子炉水位が低下し炉心損傷に至るとともに、放射性物質を閉じ込めることができなくなる恐れがある。

今回の事故は、津波を起因として通常的手段での原子炉の冷却ができなくなった事象である。事故対応としては、炉心の冷却を行うための原子炉への注水作業、格納容器の圧力が安全な範囲を超えないようにするためのベント操作が重要になった。特に、注水にあたっては、とにかく原子炉へ水を供給しなければならないことに注力し、淡水のみならず、海水も含めて原子炉への水の補給に努めた。

運転中の福島第一1～3号機は、津波被害による瓦礫の散乱や屋外のトレンチなどに開口部が生じ墜落の危険性などの厳しい環境下で、この対応を開始した。

以降に、延べ250人以上の社員等からの聞き取り調査の結果を踏まえ、現時点で確認されている福島第一1～3号機以外のプラントも含めた福島第一原子力発電所及び福島第二原子力発電所*の事故発生当時の対応操作や作業の状況を記す。なお、聞き取り調査結果の詳細な取りまとめ記録は別紙（「福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所における対応状況について」）に示す。

* 福島第二原子力発電所については、非常用海水系の機能を確保することができた3号機を除く3プラントがほぼ同じような事象経過をたどっていることから1号機の状況を代表例として記載した。

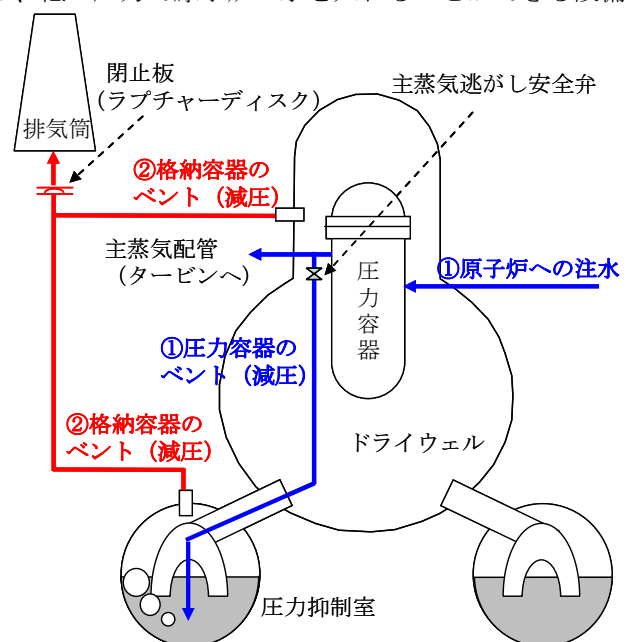
参 考

①原子炉への注水と圧力容器のベント（減圧）

- 運転時の原子炉圧力は高くなっている。
- 一方、原子炉内（圧力容器内）の燃料は、運転を停止しても熱（崩壊熱、残留熱）が発生するため、冷却が必要。
- このため、事故当初は、高い圧力で原子炉へ水を入れることができる設備で注水・冷却する。（高圧注水）
- 原子炉の圧力を大気圧程度まで下げることができれば、低い圧力で原子炉へ水を入れることができる設備で注水・冷却する。（低圧注水）
- なお、低圧での注水が可能となるよう、圧力容器の圧力を減圧する配管を設置。この配管は主蒸気逃がし安全弁を開閉することで圧力容器の蒸気を圧力抑制室へ導く。

②格納容器のベント（減圧）

- 格納容器が破損した場合、放射性物質の放出をコントロールできない状態となり被害が拡大するおそれがある。このような事態を避けるため、格納容器内の気体を大気放出（ベント）することで圧力を減圧するための配管を設置。
- この配管は、圧力抑制室からの配管とドライウェルからの配管を有する。
- 圧力抑制室からの配管を用いると水により放射性物質を減少させることができるため、基本的には当該配管を用いてベントを行う。
- なお、いずれの配管も、配管途中にある弁を開けた上で、閉止板が一定圧力以上で破けると排気筒から気体が放出される。



格納容器：ドライウェルと圧力抑制室をあわせた部分

8. 1 福島第一1号機の対応状況

(1) 主な事故対応の流れ

- 1号機は、3月11日14時46分に地震に襲われ、原子炉が自動停止し制御棒はすべて挿入された。その後、非常用復水器で圧力制御を行いつつ、停止操作を実施していたところ、同日15時30分に前後して津波に襲われた。
- この津波により、すべての直流電源、交流電源を喪失するとともに、機器の冷却に必要な非常用海水系も喪失した。また、余震頻発による津波発生リスクがある中【添付8-1】、津波による漂流物が交通の障害となり、かつ、照明や通信手段がほとんど存在しないなど、厳しい環境下での対応操作を余儀なくされた。

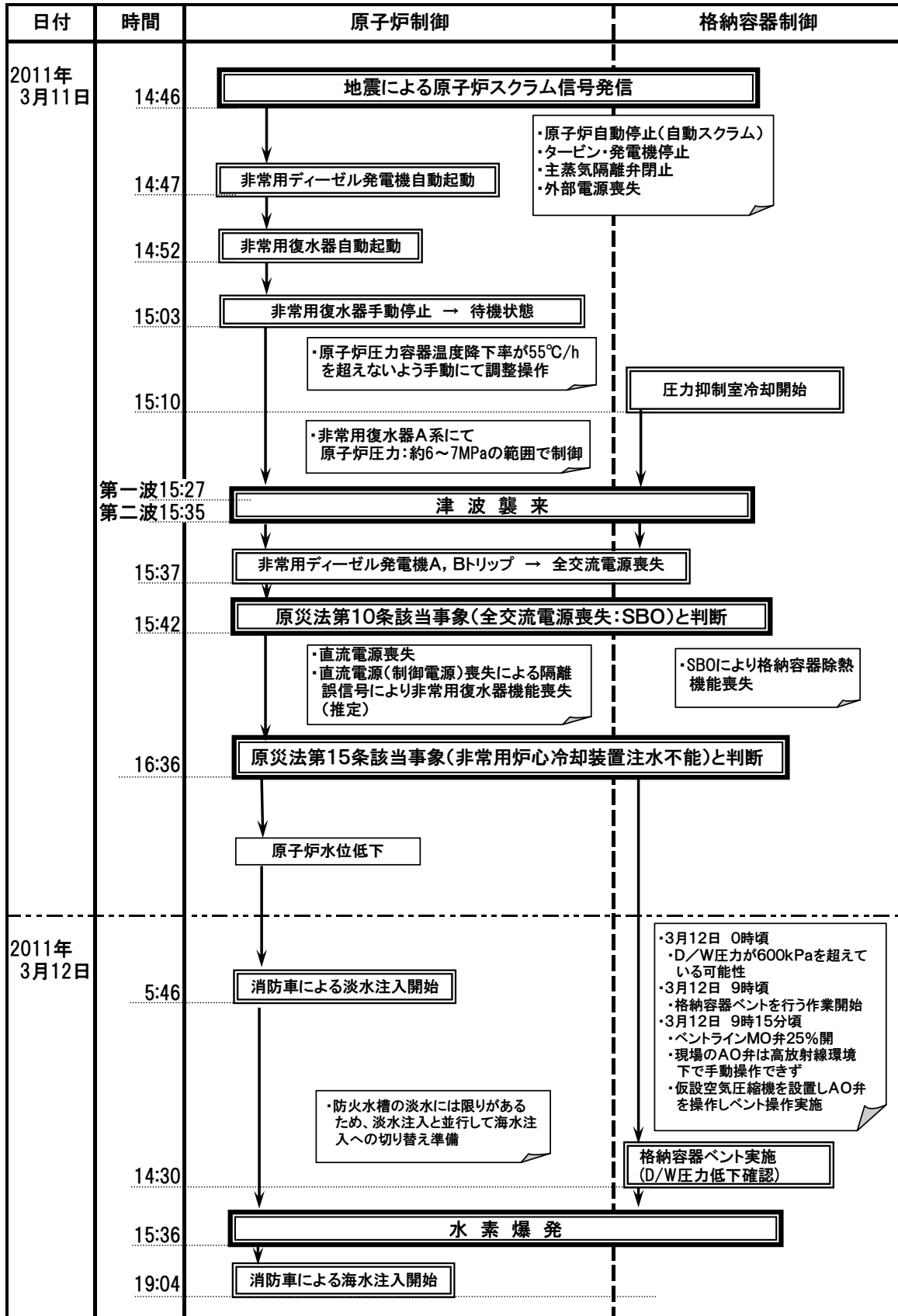


津波で流されて道をふさいだ重油タンク
(直径11.7m×高さ9.2m)

- 津波後、原子炉水位の監視ができなくなっていたが、11日21時19分には仮設バッテリーをつなぎこみ、原子炉水位が監視できるようになった。また、非常用復水器を起動するための弁の操作を18時台と21時台に実施した。なお、同日23時00分、タービン建屋1階北側二重扉前で1.2mSv/h、南側二重扉前で0.5mSv/hを計測した。
- 小型発電機の電力によりドライウエル圧力を確認し、600kPa[abs]を超えている可能性があり、12日0時06分、格納容器ベントの準備を進めるよう発電所長（発電所緊急時対策本部長）が指示を出した。同日0時49分、発電所長は、ドライウエル圧力が最高使用圧力（最高使用圧力528kPa[abs]（427kPa[gage]））を超えている可能性があることから、原災法第15条該当事象（格納容器圧力異常上昇）に該当すると判断した。
- 12日1時30分頃、1号機及び2号機の格納容器ベントの実施について、内閣総理大臣、経済産業大臣及び原子力安全・保安院に申し入れ、了解を得た。
- 12日5時46分から消防車ポンプによる代替注水（淡水）を開始した。
- 12日9時04分からドライウエル圧力を下げるため、格納容器ベントを行う作業を開始したが、既に原子炉建屋内は高放射線量環境下にあった。同日9時15分頃に格納容器ベントラインの電動弁（MO弁）を手順書に従い手動で25%まで開操作を行った。さらに、圧力抑制室からのベントラインにある空気作動弁（AO弁）を手動で開操作するために現場に向かったが、放射線量が高く実施できなかった。そのため、空気作動弁駆動用に仮設の空気圧縮機を設置して格納容器ベントの操作を実施した。
- 12日14時30分、ドライウエル圧力が低下したことから、格納容器ベントが成功したと判断した。
- 12日14時54分頃、発電所長から原子炉への海水注入を実施するよう指示が出された。
- その後、12日15時36分、原子炉建屋上部で水素ガスによると思われる爆発が発生し、屋根及びオペレーションフロア（最上階）の外壁が破損した。この爆発によ

り、海水注入のためのホースが損傷し、現場からの退避、安否確認が実施され、現場の状況が確認されるまで復旧及び準備作業が中断した。これらの過程で放射性物質が環境中へ放出されたため、敷地周辺での放射線量は上昇した。

- 12日19時04分から消火系ラインを用いて海水の注水を開始した。



福島第一発電所1号機 地震後の事故進展の流れ

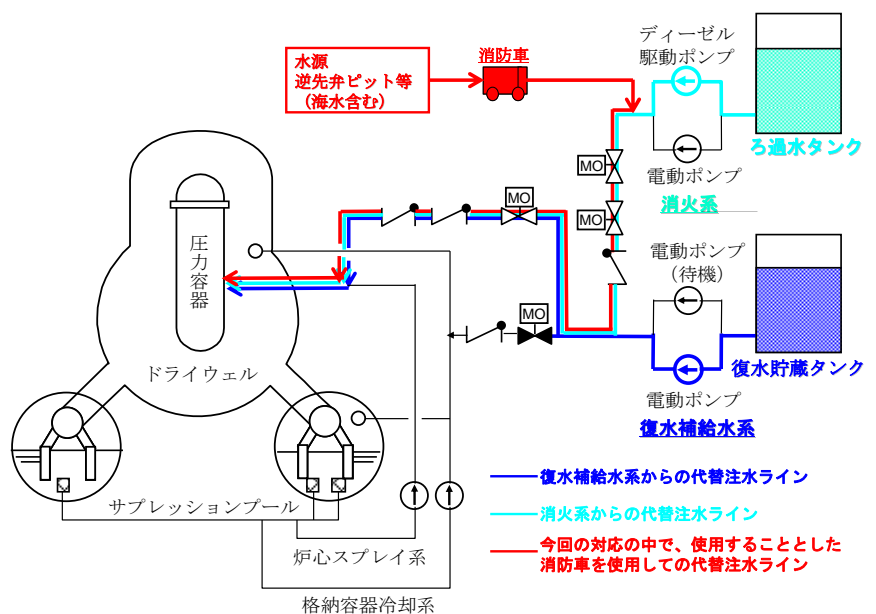
(2) 福島第一1号機の注水に関する対応状況

- 3月11日15時50分頃、原子炉水位が不明な状態となり、原子炉への注水状況を確認できないため、同日16時36分に、発電所長は原災法第15条該当事象（非常用炉心冷却装置注水不能）と判断した。（その後、一旦は原子炉水位計が復旧し水位を確認できたものの、17時07分に再度原子炉水位が不明となった）
- 11日17時12分、発電所長は原子炉への注水を確保するため、消火系、復水補給水系や消防車による代替注水について検討・実施するよう指示した。
- 津波前まで原子炉圧力を手動で制御していた非常用復水器は、弁開閉表示が確認できない状態となった。また、非常用復水器と同様に直流で操作可能な高圧注水系についても制御盤の表示灯が消灯し起動不能と判断した。【添付8-2】
- このため、中央制御室では、原子炉への注水のため電源を喪失した状態で唯一使用可能なディーゼル駆動消火ポンプを使用した代替注水ラインの構成を行った。当該ライン構成は、照明が消えた暗闇の状況で懐中電灯を頼りにライン構成に必要な弁を手動にて開操作を行った。



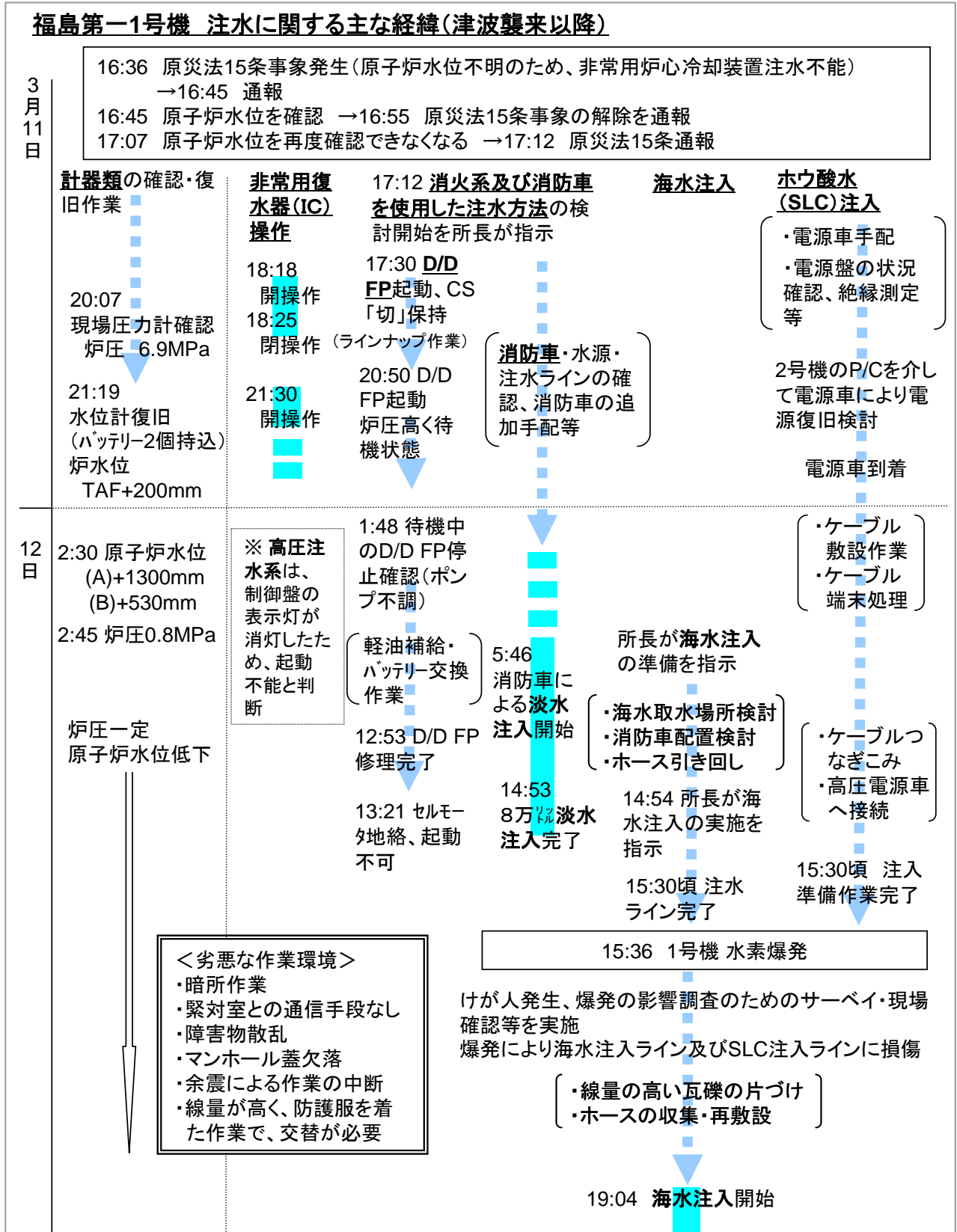
サービス建屋入口の建屋内の状況

- そのような中、一時的に直流電源が復活したためか、非常用復水器A系の表示ランプが点灯したため、運転員は、11日18時18分に非常用復水器の弁の開操作を実施した。（その後、18時25分に蒸気発生が止まったことから閉操作を実施。21時30分に再度、開操作を実施）
- 発電所対策本部復旧班は、中央制御室照明、監視計器類の復旧のため、図面やバッテリー、ケーブルを集め、計器類の復旧作業を行った。その結果、11日21時19分に仮設バッテリーをつなぎこみ、原子炉水位の指示値が有効燃料頂部（TAF）から+200mmであることを確認した。
- 11日21時51分に原子炉建屋内の放射線量が上昇し、23時00分にはタービン建屋内で高い線量（北側二重扉前1.2mSv/h、南二重扉前0.52mSv/h）が確認された。
- 消防車による注水ラインの確保は、津波による道路の損傷や瓦礫の散乱等で困難を極めたが、12日5時46分に消火系ラインを用い、防火水槽を水源とした消防車による注水を開始した。（消防車等の重機を使用した代替注水はアクシデントマネジメント策として考慮されていなかったが、臨機の応用動作として試みたもの）



代替注水ライン（消防車による注水ライン含む）

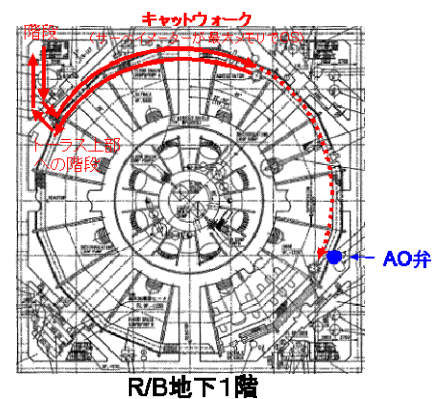
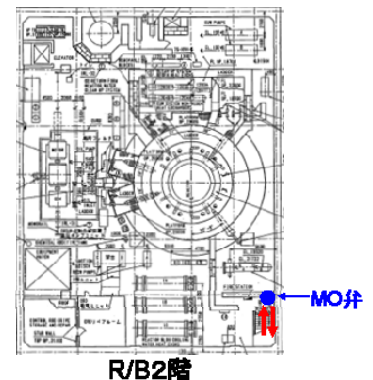
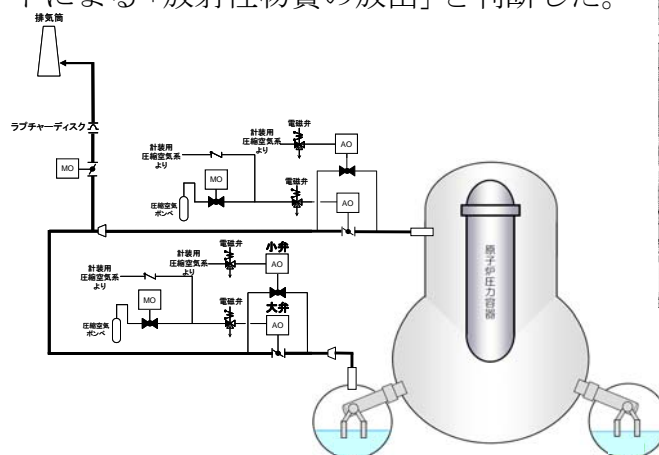
- 防火水槽の淡水には限りがあるため、海水注入の準備を行うとともに、ほう酸水注入系の電源復旧を行っていたが12日15時36分に原子炉建屋で爆発が発生し、海水注入用のホースやほう酸水注入系の電源ケーブルが損傷するなどの被害が生じた。
- その後、海水注入のためのホースの引き直し等の準備を再開し、19時04分に消防車による海水注入を開始した。



(3) 福島第一1号機の格納容器ベントに関する対応状況【添付8-3】

- 津波の影響による全交流電源喪失により、トーラス水冷却モードで圧力抑制室の冷却をしていた格納容器冷却系（A系、B系）が停止し、非常用ガス処理系も停止した。また、計器用の電源が失われたことから、ドライウエル圧力が不明な状態となった。
- 3月11日夕方、計器類の復旧が行われる中、中央制御室ではアクシデントマネジメント操作手順書の確認を実施していた。早い段階で格納容器ベントの準備を進めるべく、バルブチェックリストを用いて格納容器ベントに必要な弁及びその位置の確認を行った。
- 発電所対策本部発電班でも、電源がない状況における格納容器ベント操作手順の検討を開始した。また、ベント操作に必要な弁を手動で開けることが可能かどうか、弁の型式・構造を確認するために、余震が続く中、地震で入室禁止となった事務本館に入室し、空気作動弁の小弁がハンドル操作で開操作可能であることを確認した。
- 11日23時50分頃、中央制御室で発電所対策本部復旧班が、中央制御室の照明仮復旧用に設置した小型発電機をドライウエル圧力計に繋いで指示値を確認したところ、600 kPa [abs]であることが確認され、発電所対策本部へ報告した。
- これを受け12日0時06分、発電所長は格納容器ベント準備を進めるよう指示。
- 12日1時30分頃、ベントの実施について国に申し入れ、了解を得る。
- 12日2時24分、ベントの現場操作に関する作業時間の評価結果が発電所対策本部に報告される。300 mSv/hの雰囲気であれば緊急時対応の線量限度（100 mSv/h）で17分の作業時間と報告。
- 12日3時45分頃、本店対策本部にてベント時の周辺被ばく線量評価を作成、発電所と共有。
- 中央制御室では、ベント操作に向けて、弁の操作順番、トーラス室での弁の配置、弁の高さ等について繰り返し確認。
- 12日9時02分、大熊町（熊地区の一部）の避難ができていることを確認。
- 12日9時04分にベントの操作を行うため運転員が現場へ出発し、9時15分頃に電動弁を手順通り25%開とした。
- その後、原子炉建屋地下1階にある空気作動弁を現場で開操作を試みたが、現場の線量が高く操作できなかったため、仮設空気圧縮機を調達、接続箇所を確認した上で仮設空気圧縮機を設置・起動し、14時30分にドライウエル圧力低下を確認、ベントによる「放射性物質の放出」と判断した。

【添付8-4】



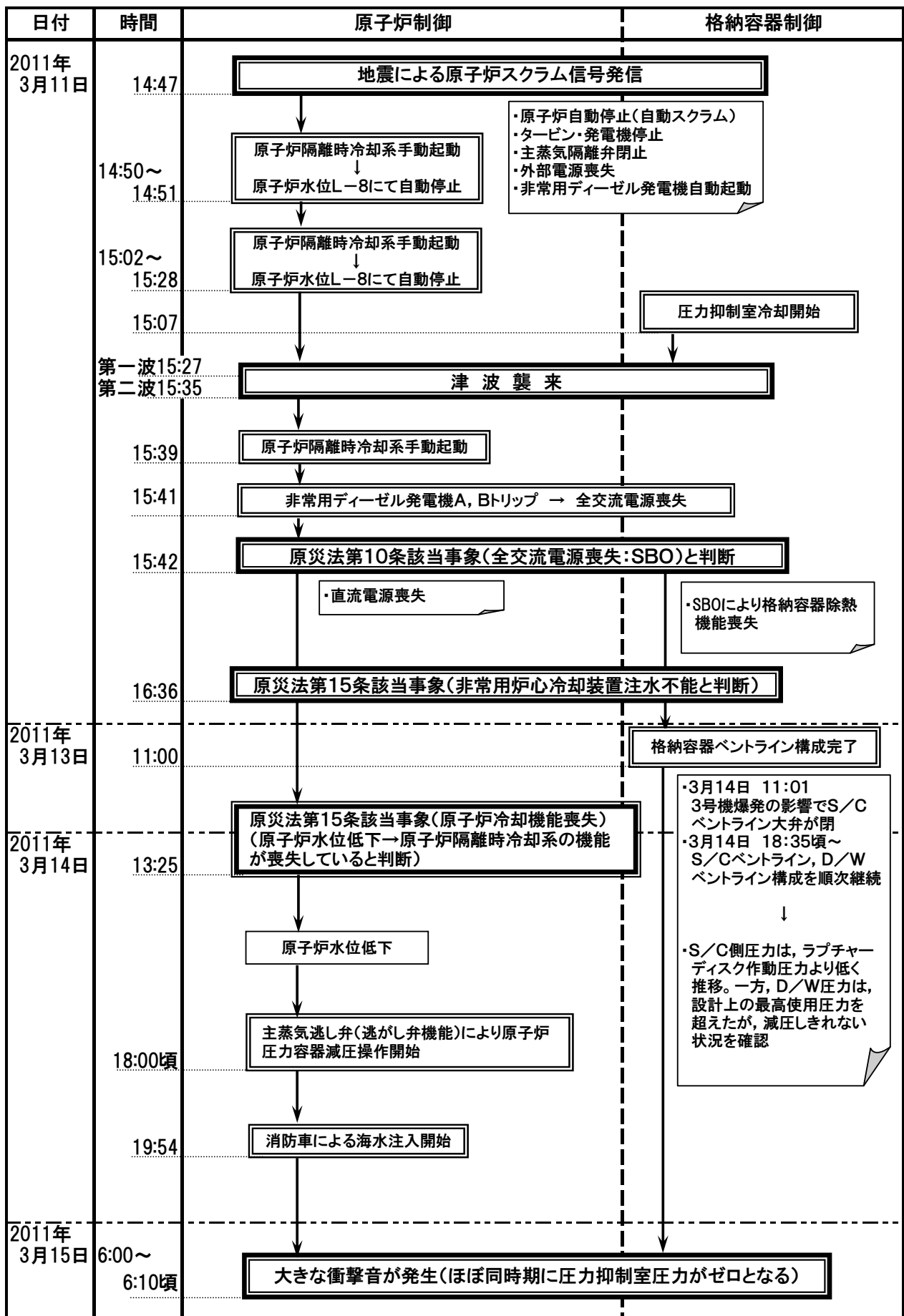
福島第一1号機 格納容器ベントに至る主な経緯

<p>3月11日</p>	<p>16:36 15条事象発生(非常用炉心冷却装置注水不能)</p> <p>【プラント挙動】</p> <p>21:51 原子炉建屋の線量上昇</p> <p>23:00 タービン建屋の線量上昇</p> <p>23:50頃 D/W圧力が600kPaであることを確認</p>	<p>【ベントの検討・操作】</p> <p><u>ベントに向けた事前準備を開始</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・AM操作手順書、バルブチェックリストの確認 ・電源がない場合のベント操作手順の検討 ・余震が続く中、事務本館での図面収集、暗い中央制御室での検討 	<p>発災直後からベントの必要性を認識し、事前準備</p>
<p>12日</p>	<p>2:30 D/W圧力が840kPaに到達したことを確認</p> <p>〔その後、750kPa前後で、圧力安定〕</p> <p>5:44 国が半径10km圏内の住民に避難指示</p> <p>10:40 正門、MPの線量上昇</p> <p>11:15 線量が低下</p> <p>14:30 D/W圧力低下</p>	<p><u>0:06 D/W圧力が600kPaを超えている可能性がありベントの準備を進めるよう発電所長指示</u></p> <p>弁の操作方法や手順など具体的な手順の確認を開始</p> <p><u>1:30頃 ベントの実施を国に申し入れ・了解</u></p> <p>2:24 ベントの現場操作に関する作業時間の確認(緊急時対応の線量限度で17分の作業時間)</p> <p>3:06 ベント実施に関するプレス会見</p> <p>3:45頃 ベント時の周辺被ばく線量評価を実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子炉建屋二重扉を開けたら白い“もやもや”。線量測定できず ・中央制御室では、弁の操作の順番等を、繰り返し確認。 <p>作業に必要な装備を可能な限り収集。</p> <p>4:45頃 100mSvセットのAPDが中央制御室に届く</p> <p>6:33 地域の避難状況確認(大熊町から移動を検討中)</p> <p>8:03 ベント操作を9:00目標で行うよう発電所長指示</p> <p>8:27 発電所南側近傍の一部の地区が避難できていないとの情報</p> <p>9:02 発電所南側近傍の地区が避難できていることを確認</p> <p><u>9:04 ベントの操作を行うため運転員が現場へ出発</u> (9:15頃に第1班がMO弁開、第2班が現場へ向かうが線量が高くAO弁は開できず)</p> <p>10:17～ AO弁の遠隔操作実施(3回)。並行して仮設コンプレッサーの接続箇所検討(11:00頃まで)</p> <p>12:30頃 仮設コンプレッサー確保、ユニック車を用いて移動。接続用アダプタの搜索</p> <p>14:00頃 仮設コンプレッサーを原子炉建屋大物搬入口外に設置・起動</p> <p><u>14:30 ベントによる「放射性物質の放出」と判断</u></p>	<p>D/W圧力が高まったためベントの準備を開始し、ベントを国に申し入れ</p> <p>手動での手順の確認 作業時間の確認 周辺被ばく線量の評価 現場の線量確認</p> <p>住民避難を考慮する必要があり、避難状況を確認</p> <p>高線量、暗闇、通信機能を喪失した中での作業</p>

8. 2 福島第一2号機の対応状況

(1) 主な事故対応の流れ

- ・ 2号機は、3月11日14時46分に地震に襲われ、原子炉が自動停止し制御棒はすべて挿入された。その後、主蒸気逃がし安全弁で圧力制御を行い、原子炉隔離時冷却系を手動起動するなど、原子炉水位・原子炉圧力を安定させながら停止操作を実施していたところ、15時30分に前後して津波に襲われた。
- ・ この津波により、すべての直流電源、交流電源を喪失するとともに、機器の冷却に必要な非常用海水系も喪失した。また、津波による漂流物が交通の傷害となり、かつ、通信手段がほとんど存在しないなど、厳しい環境下での対応操作となった。
- ・ 津波後、原子炉水位の監視ができなくなっていたが、3月11日21時50分には仮設バッテリーをつなぎこむことで原子炉水位を監視できるようになり、指示値がTAF（有効燃料頂部）+3400mmであることを確認した。
- ・ また、原子炉隔離時冷却系の作動が確認できなかったが、3月12日2時55分に原子炉隔離時冷却系の作動を現場で確認した。
- ・ 12日4時20分から5時にかけて、復水貯蔵タンクの水位減少が確認された。復水貯蔵タンクの水位確保及び圧力抑制室の水位上昇の抑制を目的として、現場にて弁を手動操作することで原子炉隔離時冷却系の水源を復水貯蔵タンクから圧力抑制室に切り替えて原子炉隔離時冷却系による注水を継続した。
- ・ 14日13時18分、原子炉水位の低下が認められた。このことから、同日13時25分に原子炉冷却機能を喪失している可能性があるため、発電所長は原災法第15条該当事象（原子炉冷却機能喪失）と判断した。
- ・ 14日17時17分には原子炉水位が0mm（有効燃料頂部（TAF））まで低下した。その後、主蒸気逃がし安全弁により原子炉圧力を減圧し、消防車（同日19時54分、19時57分に各1台起動）による海水の注水を開始した。
- ・ 格納容器圧力を下げるため、13日11時頃、14日21時頃及び15日0時頃からラプチャーディスクを除く格納容器ベントラインの系統構成を実施したが、ドライウエルの圧力低下は確認されず高めのまま推移し、ベントの効果は現れなかった。
- ・ 15日6時00分から6時10分頃、大きな衝撃音が発生した。ほぼ同時期に圧力抑制室の圧力指示値が0MPa [abs]であることが確認された（「9. プラント水素爆発評価」で記述するが、衝撃音は4号機の爆発によるものと考えられる）。
- ・ 一方、ドライウエル圧力は15日7時20分時点で730kPa [abs]を維持していたが、次の測定である11時25分時点でのドライウエル圧力は155kPa [abs]に低下しており、この間に格納容器内のガスが何らかの形で大気中に放出されたと考えられる。なお、この頃に正門付近のモニタリングカーでの測定値が大幅に上昇した。

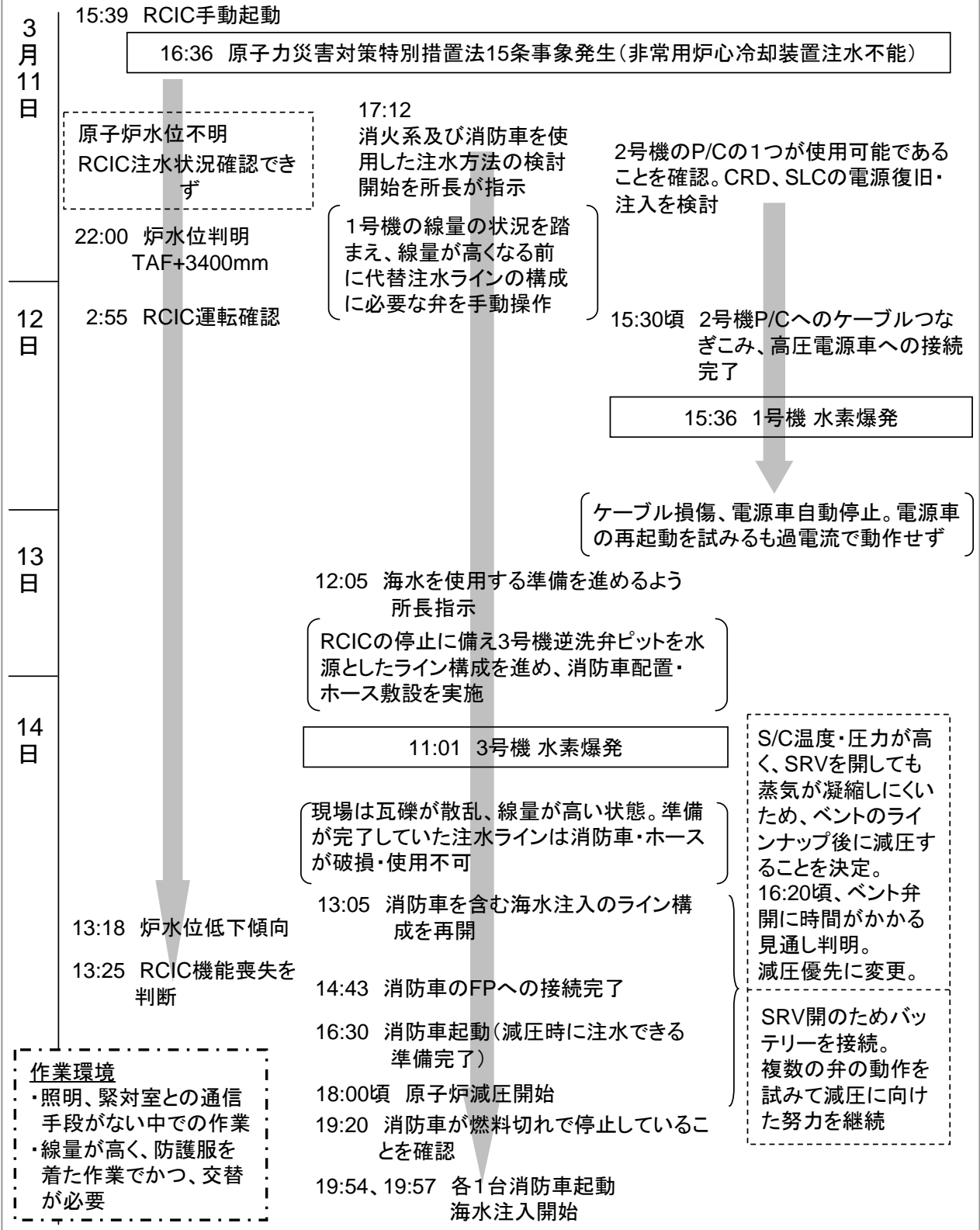


福島第一発電所2号機 地震後の事故進展の流れ

(2) 福島第一2号機の注水に関する対応状況

- ・ 3月11日15時50分頃、計器用の電源が喪失し、原子炉水位が不明な状態となり、原子炉水位が確認できないことから、非常用炉心冷却系を含めた原子炉への注水状況が不明なため、同日16時36分、発電所長は原災法第15条該当事象（非常用炉心冷却装置注水不能）と判断した。
- ・ 原子炉水位が不明な状況が続き、原子炉隔離時冷却系による原子炉への注水状況についても確認できないことから、有効燃料頂部（TAF）に到達する可能性があることを11日21時02分に官庁等へ連絡した。さらにTAFへの到達時間を21時40分と評価した。
- ・ 計器類の復旧作業の結果、11日21時50分に原子炉水位がTAF+3400mmと判明した。また、12日3時頃、運転員が原子炉隔離時冷却系のポンプ吐出圧力が高いこと（起動していること）を現場で確認した。
- ・ 2号機のパワーセンターの一部が利用可能であることを確認したため、高圧で注水可能な制御棒駆動水圧系ポンプ、ほう酸水注入系ポンプの電源復旧を進めたが、12日15時36分の1号機の爆発により、敷設したケーブルが損傷し高圧電源車が停止した。
- ・ 13日12時05分、発電所長（発電所緊急時対策本部長）は、原子炉隔離時冷却系の停止に備え、原子炉への海水注入の準備を開始するよう指示した。
- ・ 14日11時01分、3号機の爆発により、準備が完了していた海水注入ラインの消防車及びホースが破損し、使用不可能となった。
- ・ その後、瓦礫の散乱状況から、水源を当初考えていた3号機逆洗弁ピットから物揚場へ変更することとした。
- ・ 原子炉への注水は原子炉隔離時冷却系で行っていたが、14日13時18分、原子炉水位が低下傾向となり、13時25分、発電所長は原災法第15条該当事象（原子炉冷却機能喪失）と判断した。
- ・ 消防車によって原子炉へ注水するためには、消防車の吐出圧力が低いため、主蒸気逃がし安全弁による原子炉圧力の減圧が必要となる。しかし、原子炉内の蒸気の逃がし先となる圧力抑制室の圧力・温度が高く減圧しにくい可能性があったため、格納容器ベントの準備を行ってから減圧することとしたが、空気作動のベント弁の空気の加圧が十分にできず、主蒸気逃がし安全弁による減圧を優先することとした。
- ・ 主蒸気逃がし安全弁を開けるためにはバッテリーが必要であることから、社員の自動車からバッテリーを集めて中央制御室へ運んでつなぎ込んだが、弁がなかなか動作せずバッテリーの接続位置を変えるなどして対応し減圧を行った。
- ・ なお、圧力抑制室の温度、圧力が高く、原子炉からの蒸気が凝縮しにくかったため、主蒸気逃がし弁を開操作してからも減圧に時間を要した。
- ・ 一方、注水に必要な消防車については、14日16時30分、消防車を起動し、原子炉減圧時に海水の注水ができるよう準備を行ったが、14日19時20分に起動していた消防車が燃料切れで停止していることを確認した。その後、消防車を起動し（19時54分、57分に各1台起動）、消火系ラインから原子炉内へ海水注入を開始した。

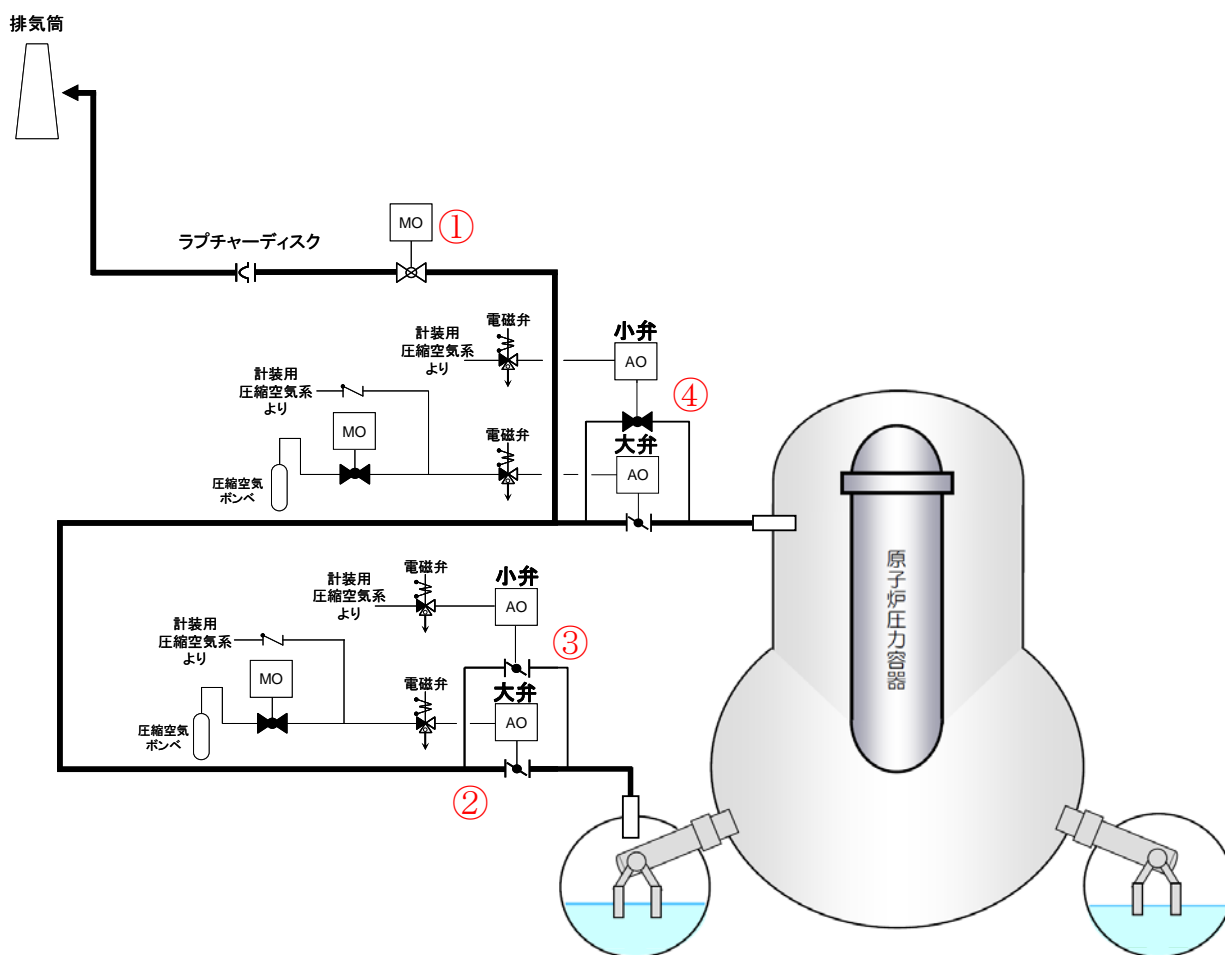
福島第一2号機 注水に関する主な経緯(津波襲来以降)



(3) 福島第一2号機の格納容器ベントに関する対応状況【添付8-5】

- ・ 原子炉隔離時冷却系による原子炉への注水を継続し、ドライウェル圧力は約200～300 kPa [abs]と安定していたが、いずれ格納容器ベントが必要となることが予想されたことから、12日17時30分、発電所長は2号機格納容器ベント操作の準備を開始するよう指示した。
- ・ 格納容器ベントラインの電動弁を手動で開操作するため、現場（原子炉建屋内）に出発し、13日8時10分、手順書通り格納容器ベントラインの電動弁《①》を手動で25%開とした。
- ・ 13日10時15分、発電所長は、2号機格納容器ベント操作を実施するよう指示した。
- ・ 13日11時00分、圧力抑制室からのベントラインにある空気作動弁（大弁《②》）を開にするため、中央制御室仮設照明用小型発電機からの電源を用いて電磁弁を強制的に励磁させ開操作を実施し、ラプチャーディスクを除く格納容器ベントライン系統構成が完了（ラプチャーディスク開放待ちの状態）した。
- ・ 13日15時18分、ベントを実施した場合の被ばく評価結果を官庁等へ連絡した。（なお、これ以前の12日3時33分にもその時点での評価結果を連絡している）
- ・ 3号機爆発の影響により当該弁の電磁弁励磁用回路が外れて閉となったため、3号機爆発後の退避指示解除後、14日16時頃から開操作を実施したが、16時20分頃、仮設空気圧縮機からの空気が十分でなく、開操作ができなかった。（当該弁は左記により開操作できないものと思われたが、電磁弁の不具合により開不能になったと推定）
- ・ ドライウェル圧力に低下が見られないことから、14日18時35分頃、空気作動弁（大弁）だけでなく、空気作動弁（小弁《③》）を対象とした格納容器ベントラインの復旧作業を実施し、21時頃、ラプチャーディスクを除く格納容器ベントラインの系統構成が完了（ラプチャーディスク開放待ちの状態）した。
- ・ 14日22時50分、ドライウェル圧力が最高使用圧力427 kPa [gage]を超えたことから、発電所長は原災法第15条該当事象（格納容器圧力異常上昇）が発生したと判断した。
- ・ ドライウェル圧力は上昇傾向にある一方、圧力抑制室の圧力は約300～400 kPa [abs]で安定し、圧力が均一化されない状況が発生した。圧力抑制室の圧力はラプチャーディスクの作動圧力よりも低く、一方でドライウェル圧力が上昇していることから、14日23時35分頃、ドライウェルからのベントラインにある空気作動弁（小弁《④》）を開けることにより格納容器ベントを実施する方針を決定した。
- ・ 15日0時02分頃、ドライウェルからのベントラインにある空気作動弁（小弁《④》）の開操作を実施したが、数分後に閉状態であることを確認した。ドライウェル圧力は約750 kPa [abs]から低下せず高めのまま推移し、ベントの効果は現れなかった。

- ・ 同日6時00分～10分頃、大きな衝撃音が発生した。ほぼ同時期に圧力抑制室の圧力が0 MP a [abs]を示していた（「9. プラント水素爆発評価」で記述するが、衝撃音は4号機の爆発によるものと考えられる）。
- ・ 一方、ドライウェル圧力は7時20分時点で730 k P a [abs] を維持していた。
- ・ 次の測定である11時25分時点でのドライウェル圧力は155 k P a [abs] に低下しており、この間に格納容器内のガスが何らかの形で大気中に放出されたと考えられ、正門付近のモニタリングカーでの測定値が大幅に上昇した。

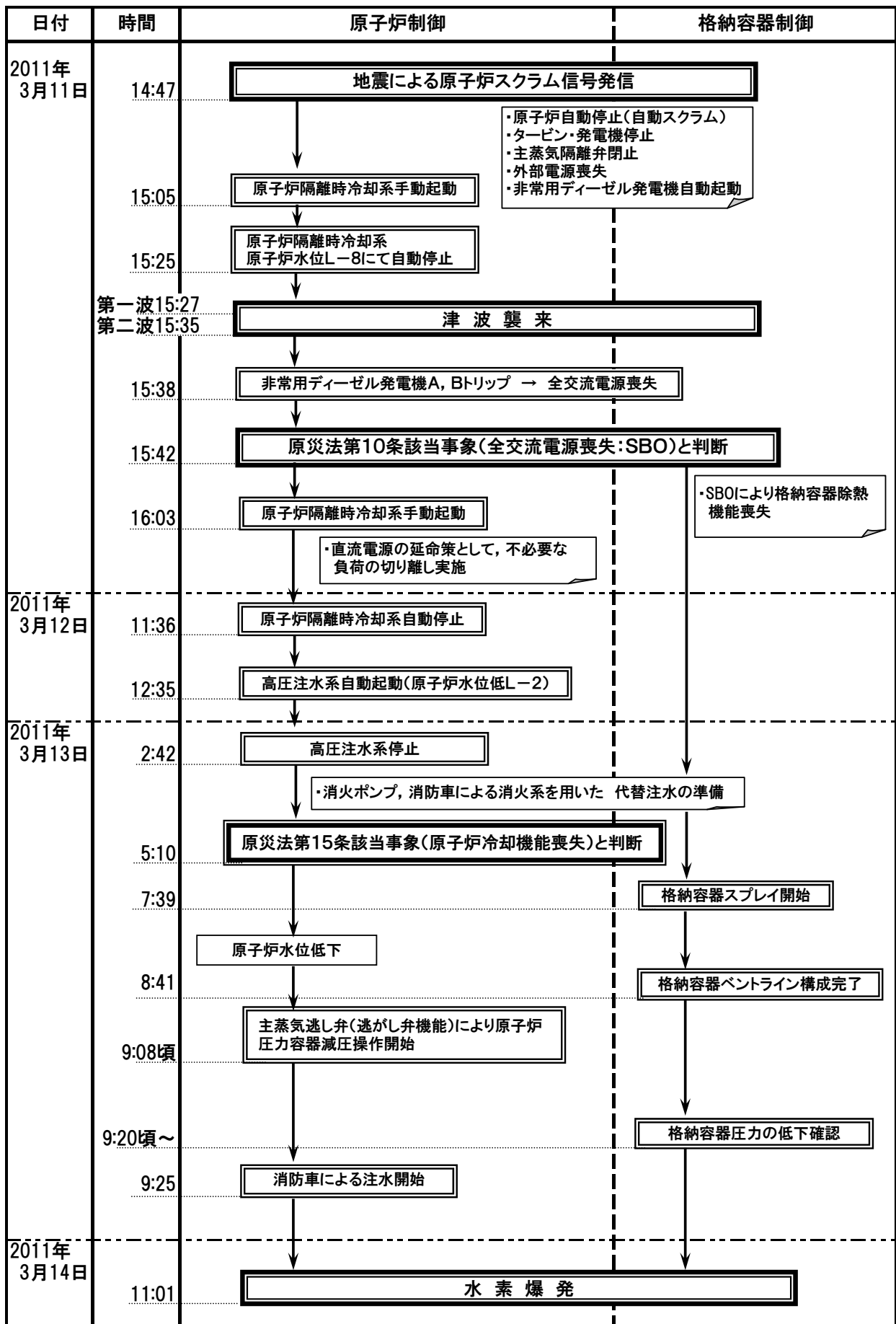


福島第一2号機 格納容器ベントのライン構成のために操作を行った弁

8. 3 福島第一3号機の対応状況

(1) 主な事故対応の流れ

- ・ 3号機は、3月11日14時46分に地震に襲われ、原子炉が自動停止し制御棒はすべて挿入された。その後、主蒸気逃がし安全弁で圧力制御を行い、原子炉隔離時冷却系を手動起動するなど、原子炉水位・原子炉圧力を安定させながら停止操作を実施していたところ、15時30分に前後して津波に襲われた。
- ・ この津波により、すべての交流電源を喪失するとともに、機器の冷却に必要な非常用海水系も喪失した。直流電源は、充電ができないためバッテリーが枯渇するまでの期間ではあったが、その機能を確保していた。また、津波による漂流物が交通の障害となり、かつ、通信手段がほとんど存在しないなど、厳しい環境下での対応操作となった。
- ・ 津波襲来後、11日15時25分の原子炉隔離時冷却系停止に伴い原子炉水位が低下したが、同日16時03分に原子炉隔離時冷却系を手動起動した。その後、12日11時36分に原子炉隔離時冷却系が停止したが、原子炉水位の低下(TAF+2950mm)により高圧注水系が同日12時35分に自動起動した。高圧注水系は13日2時42分まで運転を継続した。
- ・ 高圧注水系停止後、原子炉隔離時冷却系の手動起動を試みたが、起動できなかった。13日5時10分、原子炉冷却機能を喪失していることから、発電所長は原災法第15条該当事象(原子炉冷却機能喪失)と判断した。
- ・ その後、主蒸気逃がし安全弁により原子炉圧力を減圧し、13日9時25分頃から消防車により消火系ラインからホウ酸を含む淡水注水を開始、同日13時12分には海水注水に切り替え注水を継続した。
- ・ また、13日2時42分の高圧注水系停止後、格納容器圧力を低下させるため、同日8時41分、及び14日6時10分にも格納容器ベントのライン構成を行った。
- ・ その後、14日11時01分、原子炉建屋で水素爆発が発生し、オペレーションフロアから上部全体とオペレーションフロア1階下の南北の外壁が損壊した。これらの過程で放射性物質が環境中へ放出されたため、敷地周辺での放射線量が上昇した。
- ・ なお、1号機と同様に原子炉建屋内に水素が溜まっている可能性が考えられたため、原子炉建屋の水素を抜く方法として、「ブローアウトパネルの開放」「原子炉建屋天井の穴開け」などの方法について検討がなされたが、照明などない中での高所作業になり、現場が高線量であることや火花が散り爆発を誘発する可能性が高いこと等により実現に至らなかった。また、爆発を誘発する危険性が低い「ウォータージェットによる原子炉建屋壁への穴開け」については、機器の手配はすんでいたものの、3号機の爆発までに発電所へ到達しなかった。

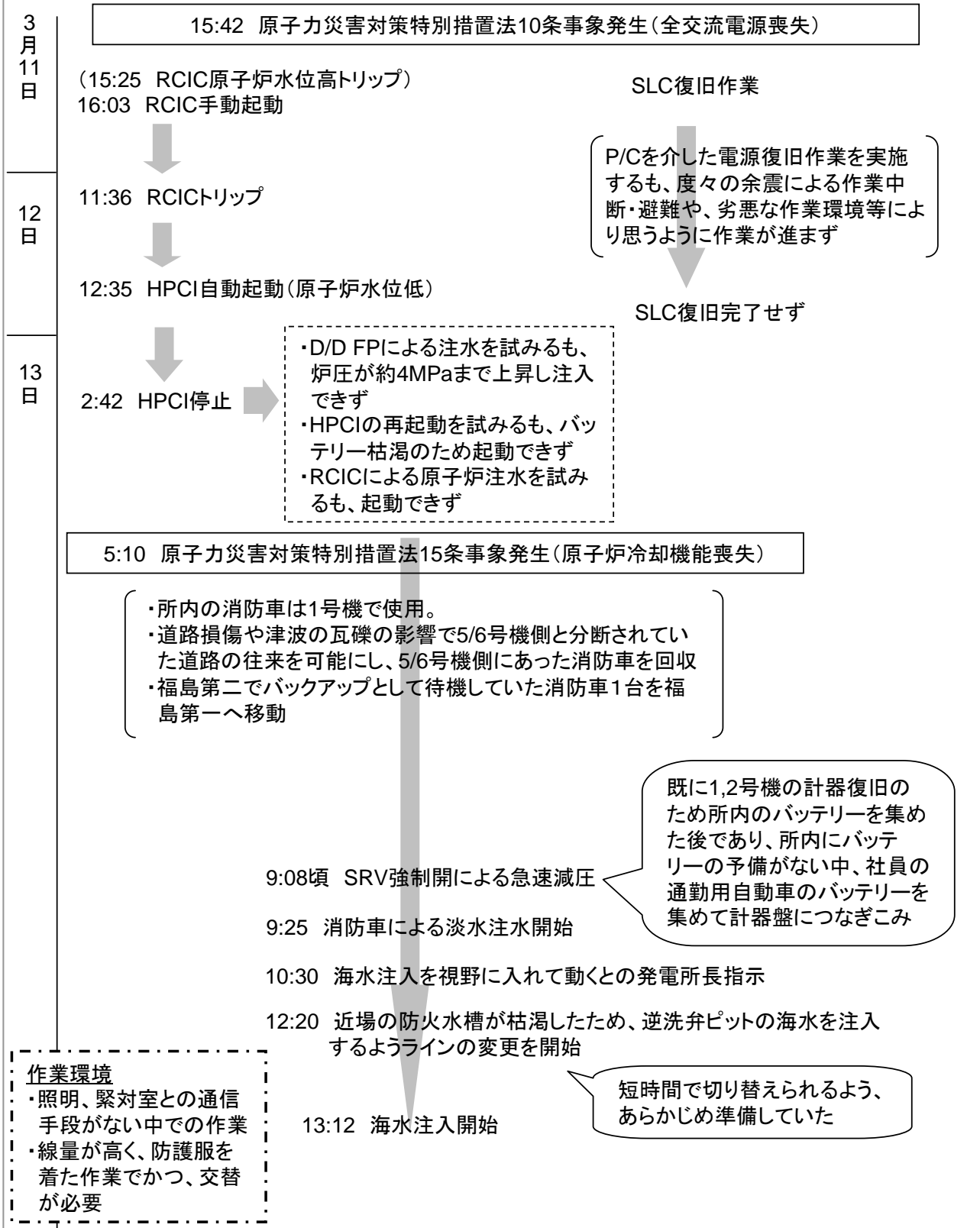


福島第一発電所3号機 地震後の事故進展の流れ

(2) 福島第一3号機の注水に関する対応状況

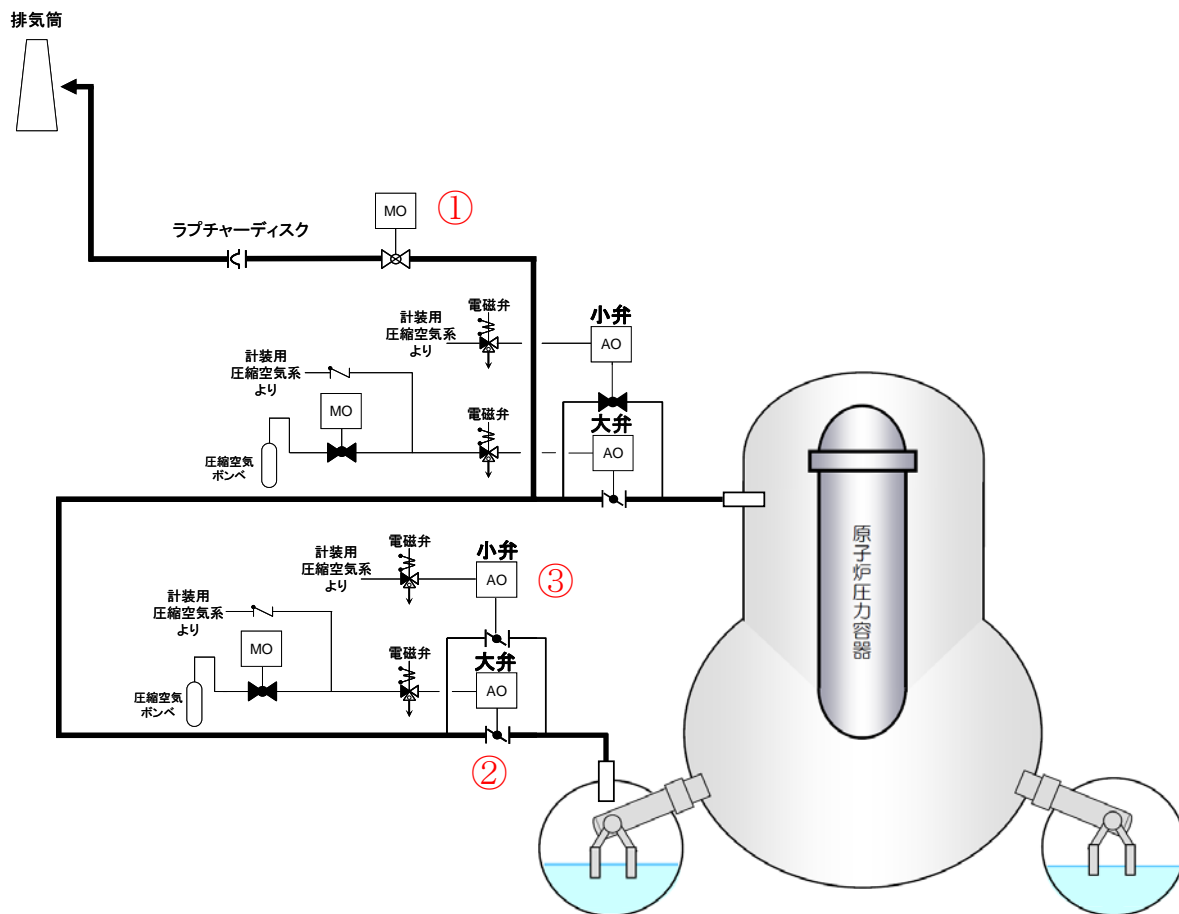
- ・ 津波到達後、直流電源で操作可能な設備である原子炉隔離時冷却系及び高圧注水系については使用可能な状態にあり、3月11日16時03分には、原子炉水位維持のために原子炉隔離時冷却系を手動起動し、原子炉水位は維持されていた。
- ・ 12日11時36分に原子炉隔離時冷却系が停止し、12日12時35分に原子炉水位低(L-2: TAF+2950mm)により高圧注水系が自動起動した。
- ・ 高圧注水系は13日2時42分に停止したため、アクシデントマネジメント策である代替注水手段としてディーゼル駆動消火ポンプによる注水を試みたが、一時低下していた原子炉圧力が約4.1MPa [gage]まで再び上昇し、注水できなかった。
- ・ その後、タービン駆動である原子炉隔離時冷却系及び高圧注水系を再起動して原子炉への注水を試みたが、高圧注水系は電源となるバッテリーの枯渇により起動できず、また原子炉隔離時冷却系も起動できなかった。
- ・ 原子炉隔離時冷却系による原子炉注水ができなかったことから、13日5時10分、発電所長は原災法第15条該当事象(原子炉冷却機能喪失)と判断した。
- ・ 一方、発電所対策本部は、11日17時12分の発電所長(発電所緊急時対策本部長)の指示以降、原子炉への代替注水について検討していたが、消防車は発電所に配備していた3台のうち、1台は1号機の海水注入に使用しており、1台は津波の影響により使用不能、5,6号機側の消防車1台については5,6号機側との通路が分断されていたことから移動が困難な状況であった。
- ・ その後、構内道路の復旧を進め、5,6号機側との往来が可能となったことから、5,6号機側の消防車を1~4号機側に移動した。さらに、福島第二原子力発電所で緊急時のバックアップとして待機していた消防車1台も福島第一原子力発電所へ移動した。
- ・ 消防車によって原子炉へ注水するためには、消防車の吐出圧力が低いため、主蒸気逃がし安全弁による原子炉圧力の減圧が必要となる。また、この主蒸気逃がし安全弁を開けるためにはバッテリーが必要であったが、1,2号機の計器復旧等のために所内のバッテリーを集めた後だったこともあり、必要な電源が確保できず主蒸気逃がし安全弁を操作できない状態であった。
- ・ このため、発電所対策本部の社員の自動車のバッテリーを取り外して集め、中央制御室に運んで主蒸気逃がし安全弁の駆動電源としてつなぎ込みを行い、13日9時08分に主蒸気逃がし安全弁を開き、原子炉の急速減圧を実施した。
- ・ この減圧作業により、原子炉圧力が消防車ポンプの吐出圧力を下回ったことから、13日9時25分、防火水槽(淡水)にほう酸を溶解し、原子炉への注水を開始した。
- ・ 13日12時20分、防火水槽の淡水が枯渇したため、逆洗弁ピットの海水を注入するよう注水源の系統変更を行い、13時12分に海水注入を開始した。

福島第一3号機 注水に関する主な経緯(津波襲来以降)



(3) 福島第一3号機の格納容器ベントに関する対応状況【添付8-6】

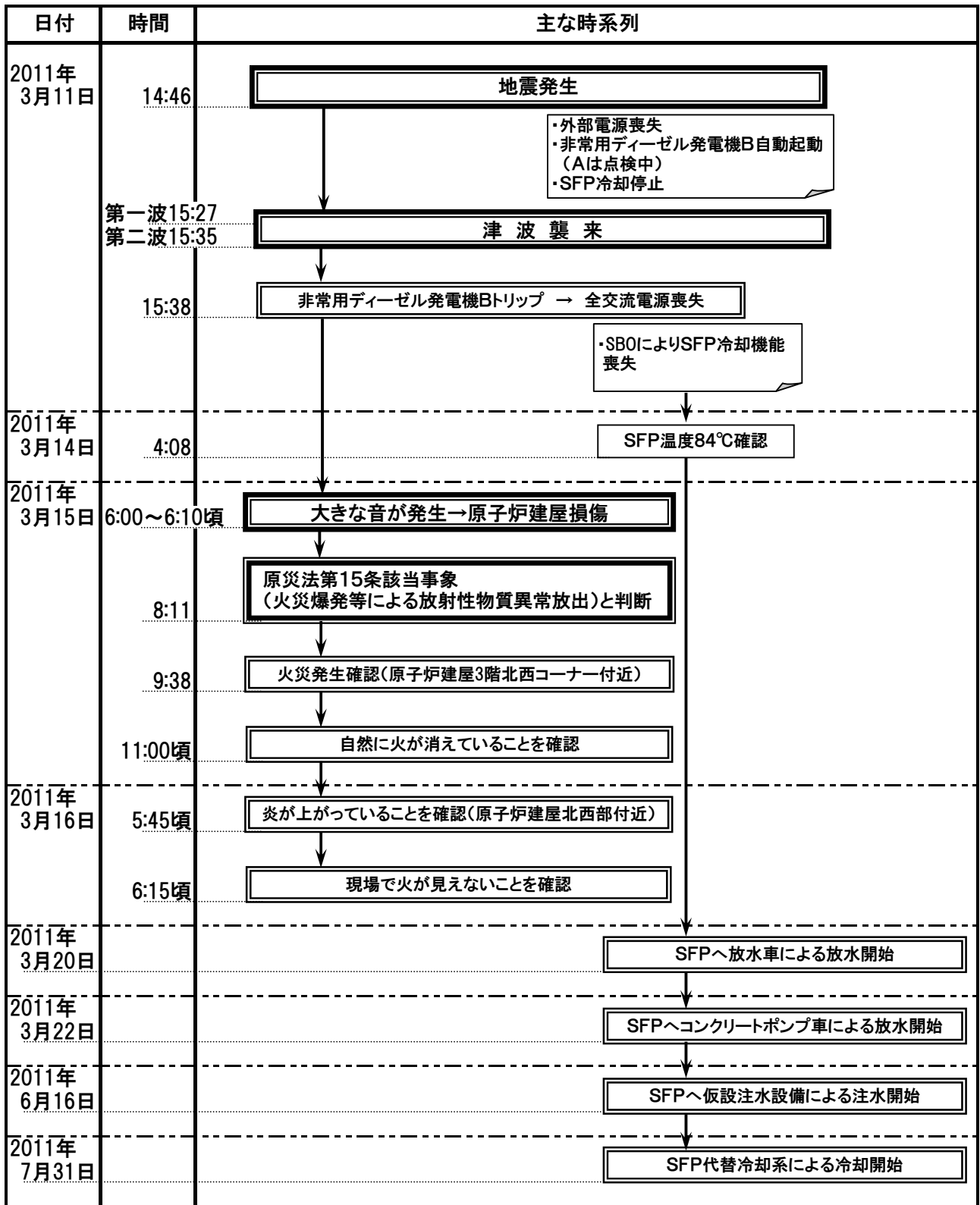
- 3月12日17時30分、発電所長は格納容器ベントの準備を開始するよう指示した。(手順の検討や必要な弁の設置場所の確認等を実施)
- 13日4時50分頃、圧力抑制室からのベントラインにある空気作動弁(大弁)を開けるために、中央制御室仮設照明用小型発電機からの電源を用いて、当該弁の電磁弁を強制的に励磁させた。
- 13日5時15分、発電所長はラプチャーディスクを除く、格納容器ベントの系統構成を完成させるよう指示した。
- 運転員がトーラス室(圧力抑制室が設置されている部屋)に行き、当該弁の開度を確認したところ全閉であった。このため、13日5時23分頃より、当該弁を駆動させる空気ポンベの交換を行った結果、当該弁が開となった。
- 13日5時50分、格納容器ベント実施に関するプレス発表を実施し、7時35分、格納容器ベント実施時の発電所周辺への被ばく評価結果を官庁等に連絡した。
- 13日8時35分頃、格納容器ベントラインにある電動弁を現場で手動にて15%開状態とした《①》。手順書では25%開が標準的な調整開度であるが、格納容器圧力の下がりすぎを考慮し、若干絞った15%開度に設定した。
- 13日8時41分にラプチャーディスクを除く格納容器ベントライン構成を完了し、ドライウエル圧力がラプチャーディスク作動圧力(427kPa [gage])よりも低く、格納容器ベントされない状態(ラプチャーディスク開放待ち)で、格納容器ベントを系統構成する弁《②》の開状態を保持し、ドライウエル圧力の監視を継続した。
- 13日9時24分、ドライウエル圧力の低下(同日9時10分: 0.637MPa [abs]→同日9時24分: 0.540MPa [abs])が確認されたことから、9時20分頃格納容器ベントが実施されたと判断した。【添付8-7】
- 13日11時17分、ポンベの圧力低下により上記空気作動弁(大弁《②》)が閉となったため、ポンベを交換して開操作を再度実施し、12時30分当該弁が開になっていることを確認した。
- その後、当該弁を開状態で保持する必要があったが、当該弁が設置されているトーラス室に行ったものの、室内が熱く、作業が困難な状態であったことから、開で保持するための措置は実施できなかった。
- 13日17時52分頃、タービン建屋大物搬入口に仮設コンプレッサーを設置するために現場へ出発、計装用圧縮空気系に接続し、21時10分頃にドライウエル圧力が低下したことから、圧力抑制室からのベントラインにある空気作動弁(大弁)が開になったと判断した。《②》
- 14日2時頃よりドライウエル圧力が上昇傾向となったことから、圧力抑制室からのベントラインにあるもう一つの空気作動弁(小弁)についても、5時20分開操作を開始し、6時10分に開になったことを確認した。《③》



福島第一3号機 格納容器ベントのライン構成のために操作を行った弁

8. 4 福島第一4号機の対応状況

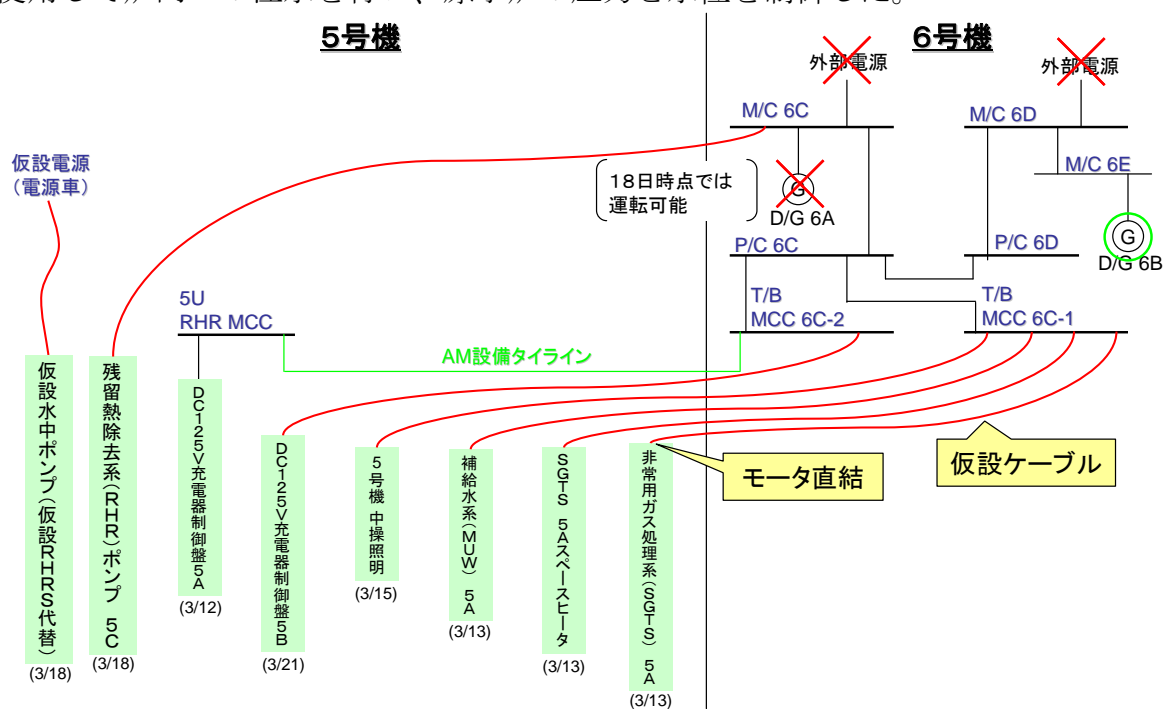
- ・ 3月11日14時46分に地震に襲われた時点で、4号機は定期検査中であり、シールド取替工事のため原子炉内から全燃料を使用済燃料プールに取り出され、使用済燃料プールには燃料集合体1535体が貯蔵されていた。
- ・ 11日15時30分に前後して津波が襲来し、直流電源及び交流電源がすべて喪失するとともに、使用済燃料プールの冷却機能及び補給水機能が喪失した。
- ・ 14日4時08分には使用済燃料プール水温が84℃であることを確認した。
- ・ 15日6時00分～6時10分頃、大きな音が発生し、その後、原子炉建屋5階屋根付近に損傷を確認した。
- ・ さらに、15日9時38分には原子炉建屋3階北西コーナー付近で火災が発生していることが確認されたが、同日11時頃、自然に火が消えていることを確認した。また、16日5時45分頃にも、原子炉建屋北西部付近で火災が発生しているとの連絡があったが、同日6時15分頃、現場での火災は確認できなかった。
- ・ 使用済燃料プールの注水・冷却の対応状況については「8. 9 使用済燃料の貯蔵状況」に、原子炉建屋上部の爆発に関する考察については「10. 2 水素爆発の原因」に記す。



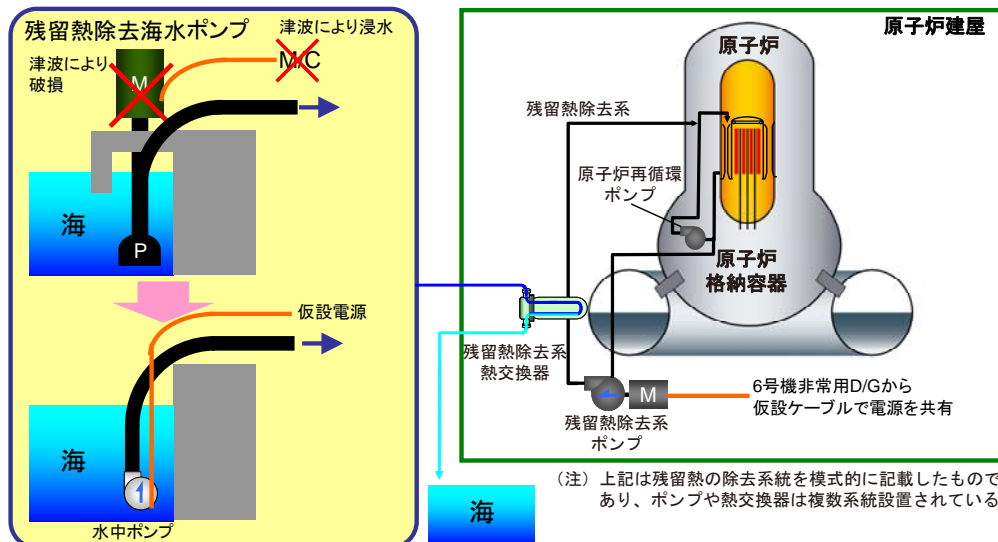
福島第一発電所4号機 地震後の事故進展の流れ

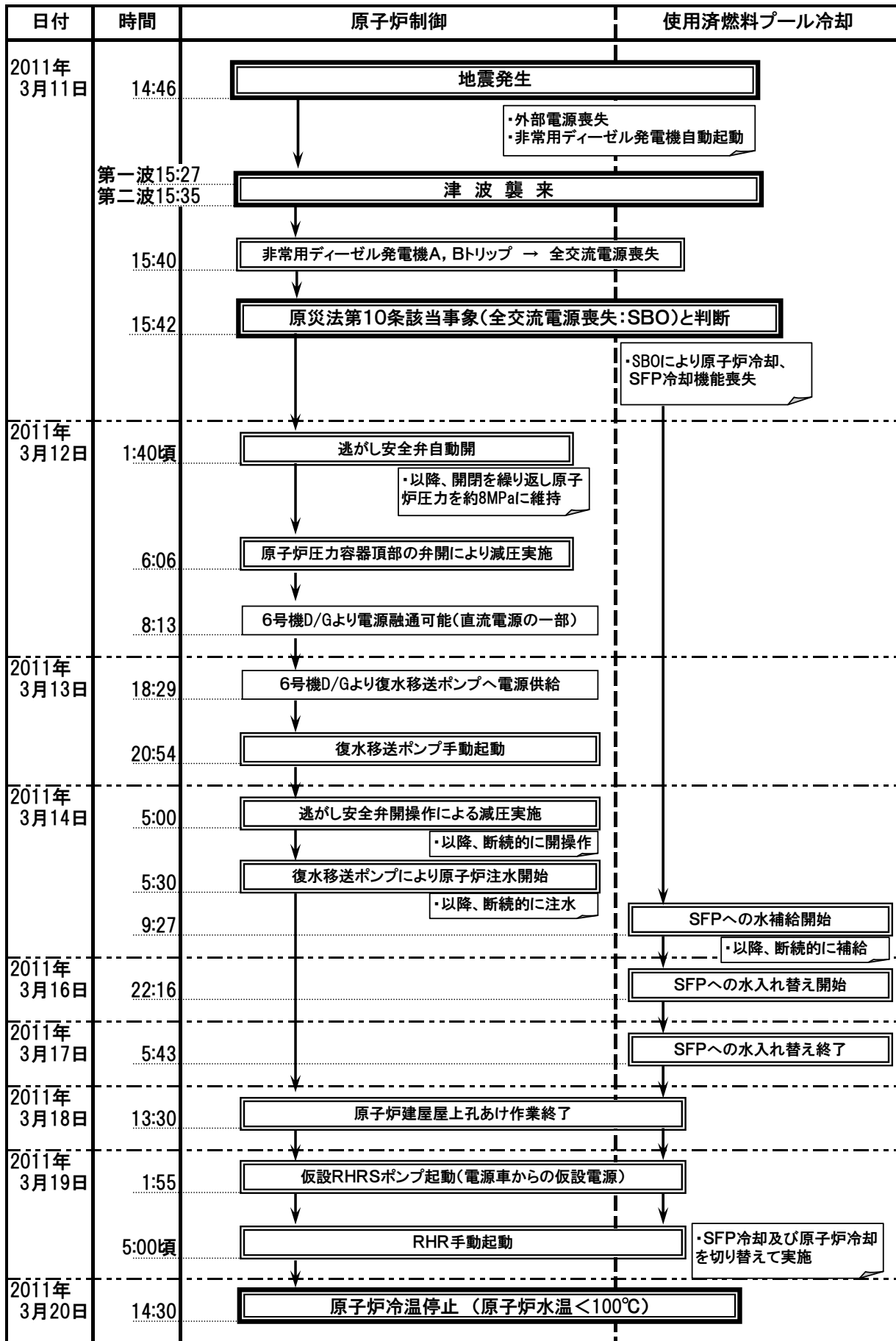
8. 5 福島第一5号機の対応状況

- 3月11日14時46分の地震発生時点で、5号機は定期検査中であり、原子炉に燃料を装荷し、原子炉圧力容器の耐圧漏えい試験を実施していた。津波後、全交流電源が喪失し、原子炉及び使用済燃料プールの冷却機能及び補給水機能が喪失した。
- このため、燃料からの崩壊熱により原子炉圧力が上昇傾向にあったが、原子炉へ注水を実施するためには、原子炉圧力を下げる必要があることから、現場で原子炉圧力容器頂部ベント弁の駆動空気供給ラインを構成後、12日6時06分に中央制御室から当該ベント弁を手動操作して、原子炉圧力の減圧を実施し、大気圧程度まで降下させた。
- その後、崩壊熱の影響により原子炉圧力は上昇するが、6号機から電源融通を受けて、主蒸気逃がし安全弁で原子炉圧力を調整するとともに、復水補給水系のポンプを使用して炉内への注水を行い、原子炉の圧力と水位を制御した。



- 仮設の残留熱除去海水系ポンプを設置することで、残留熱除去系を起動できたことにより、20日14時30分に原子炉冷温停止状態とするとともに、使用済燃料プールについても継続的に冷却を行い、安定な状態となった。

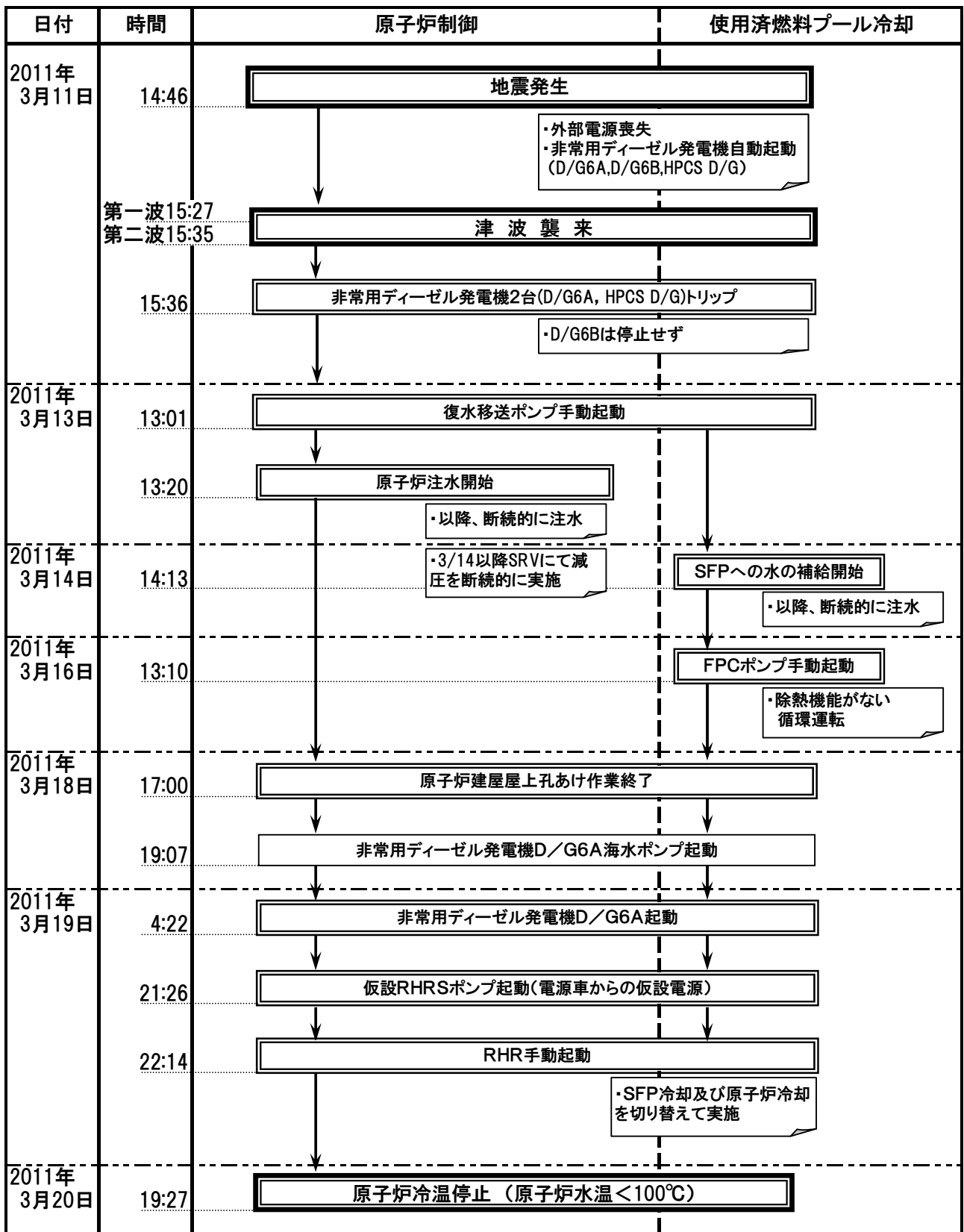




福島第一発電所5号機 地震後の事故進展の流れ

8. 6 福島第一 6 号機の対応状況

- 3月11日14時46分に地震に襲われた時点で、6号機は定期検査中であり、原子炉に燃料が装荷され、冷温停止状態であった。津波後、非常用海水系による冷却の必要がない空冷式の非常用D/G 1台が、その電源設備等を含め、津波による被水を免れたため、機能喪失に至らず電源供給を継続できたが、海水ポンプ及び残留熱除去海水系ポンプはすべて機能を喪失し、原子炉及び使用済燃料プールの冷却機能が喪失した。
- このため、燃料からの崩壊熱により原子炉圧力が緩やかな上昇傾向にあったが、主蒸気逃がし安全弁で原子炉圧力を調整するとともに、復水補給水系のポンプを使用して炉内への注水を行い、原子炉の圧力と水位を制御した。
- その後、仮設の残留熱除去海水系ポンプを設置することで、残留熱除去系を起動できたことにより、20日19時27分に原子炉冷温停止状態とするとともに、使用済燃料プールについても継続的に冷却を行い、安定した状態となった。

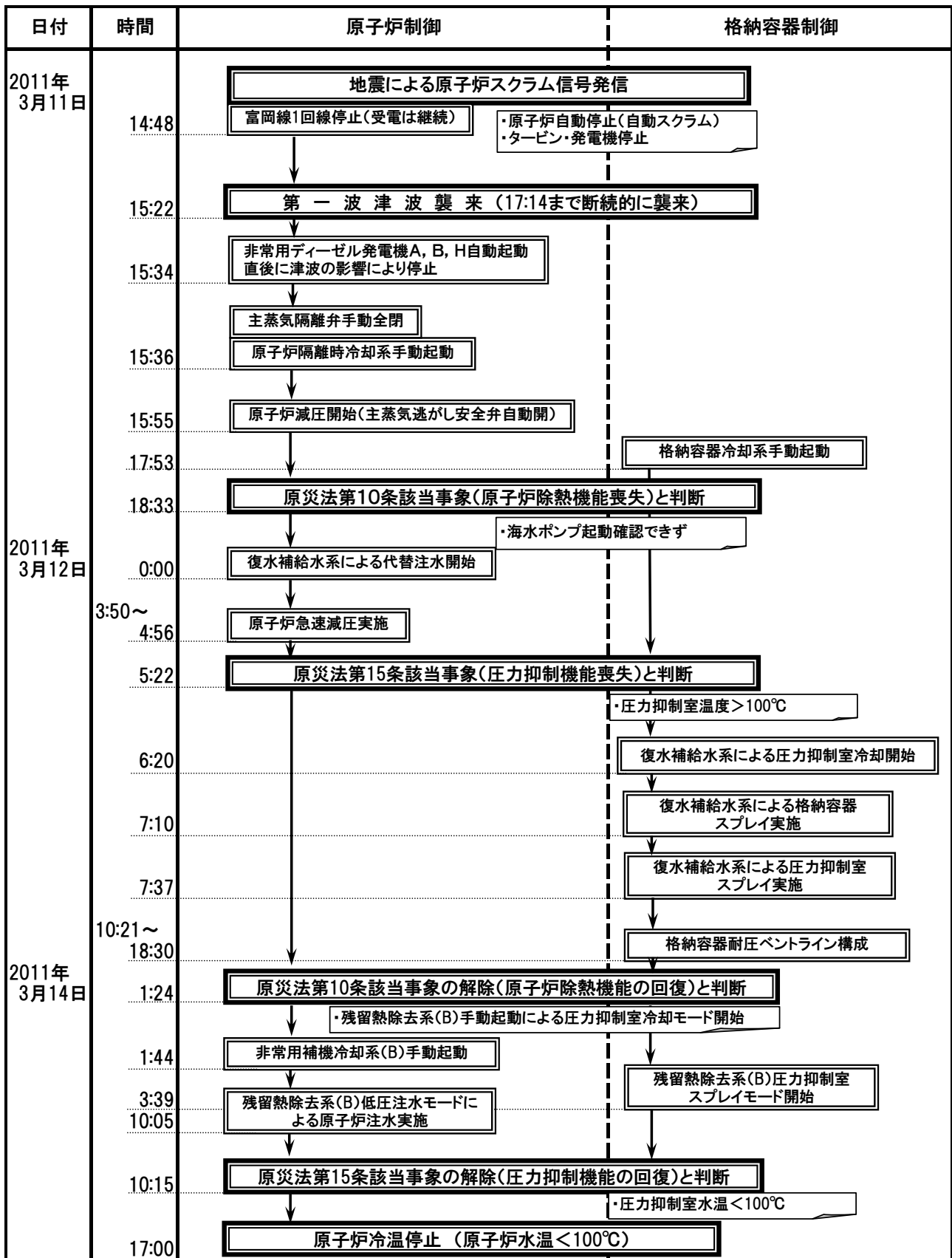


福島第一発電所6号機 地震後の事故進展の流れ

8. 7 福島第二1号機の対応状況

(1) 主な事故対応の流れ

- ・ 1号機は、定格熱出力一定運転中のところ、3月11日14時46分に発生した三陸沖を震源とする地震により、同日14時48分、原子炉が自動停止した。
- ・ 原子炉自動停止直後に全制御棒全挿入及び原子炉の未臨界を確認し、原子炉の冷温停止及び使用済燃料プールの冷却に必要な設備は、健全で安定した状態であることを確認した。
- ・ しかし、当該地震後の津波（同日15時22分、第一波到達目視確認）により、原子炉の冷温停止及び使用済燃料の冷却に必要な設備が被水するなどし、使用不能となった。これにより原子炉の除熱ができなくなったことから、11日18時33分、発電所長は原災法第10条該当事象（原子炉除熱機能喪失）と判断した。
- ・ また、原子炉の除熱機能の喪失により圧力抑制室の冷却ができなくなり、徐々に圧力抑制室水温が上昇し100℃以上となったことから、12日5時22分、発電所長は原災法第15条該当事象（圧力抑制機能喪失）と判断した。
- ・ 原子炉の冷温停止及び使用済燃料プールの冷却に必要な設備の一部を使用可能な状態とするため、被水した設備の点検・補修を行うとともに、仮設電源による電源供給を実施した。原子炉の除熱機能を復旧したことにより、14日1時24分、発電所長は原災法第10条該当事象（原子炉除熱機能喪失）の状態から回復したと判断した。
その後、圧力抑制室の冷却を行うことにより圧力抑制室の水温が100℃未満となったことから、同日10時15分、発電所長は原災法第15条該当事象（圧力抑制機能喪失）の状態から回復したものと判断した。
- ・ これ以降、残留熱除去系1系統により原子炉の除熱を継続し、14日17時00分に原子炉水温100℃未満の冷温停止状態にするとともに、使用済燃料プールについても継続的に冷却を行い、現在においてプラントは安定な状態を維持している。



福島第二発電所1号機 地震後の事故進展の流れ

(2) 福島第二1号機の注水に関する対応状況

- ・ 地震発生以降、3月11日15時36分に主蒸気隔離弁を手動全閉とし、主蒸気逃がし安全弁にて原子炉の圧力制御を行うとともに、原子炉隔離時冷却系を同日15時36分に手動起動し、原子炉へ注水を行った。(以降、原子炉隔離時冷却系の「原子炉水位高(L-8)」に伴う自動停止と手動起動を繰り返し、原子炉水位を調整)
- ・ 津波による原子炉建屋付属棟の浸水により、非常用電源(M/C 1C及び1HPCS)が使用不能となったことから、低圧炉心スプレー系ポンプ、残留熱除去系ポンプ(A)及び高圧炉心スプレー系ポンプが起動できない状態となった。
- ・ また、海水熱交換器建屋が浸水したこと、運転/停止表示ランプなどから、すべての非常用機器冷却系のポンプ*が起動できない状態(一部モータ及び非常用電源(P/C 1C-2、1D-2)被水のため使用不能によるものと後日現場にて確認)と判断した。このため、すべての非常用炉心冷却系ポンプが起動不可能な状態となり、原子炉から残留熱を除去する機能が喪失したことから、11日18時33分、発電所長は原災法第10条該当事象(原子炉除熱機能喪失)と判断した。

※ 非常用機器冷却系のポンプ

- ・ 残留熱除去系ポンプ(A、B、C、D)
 - ・ 残留熱除去海水系ポンプ(A、B、C、D)
 - ・ 非常用ディーゼル発電設備冷却系ポンプ(A、B)
 - ・ 高圧炉心スプレー系ディーゼル発電設備冷却系ポンプ
 - ・ 高圧炉心スプレー系ディーゼル発電設備冷却海水系ポンプ
- ・ 原子炉への注水は、当初、原子炉隔離時冷却系にて行っていたが、12日0時00分よりアクシデントマネジメント策として導入した復水補給水系による代替注水と併用し行った。
 - ・ 12日3時50分、原子炉圧力と圧力抑制室の水温の関係から熱容量制限における運転禁止範囲に入ったため、原子炉圧力の急速減圧を開始した。
 - ・ 原子炉隔離時冷却系については、急速減圧に伴う原子炉隔離時冷却系タービン駆動用蒸気圧力低下のため同日4時58分に手動停止し、これ以降は復水補給水系による代替注水により原子炉の水位を調整した。
 - ・ 12日5時22分に圧力抑制室の水温が100℃以上となったことから、発電所長は原災法第15条該当事象(圧力抑制機能喪失)と判断した。なお、当該水温は最大で約130℃(13日11時30分)まで上昇した。
 - ・ 圧力抑制室の冷却のために、12日6時20分より可燃性ガス濃度制御系の冷却器から圧力抑制室への冷却水排水ラインを利用して、冷却水(復水補給水系)を圧力抑制室へ注水するとともに、復水補給水系による原子炉への代替注水を同日7時10分よりドライウェルスプレー、同日7時37分より圧力抑制室へのスプレーに適宜切替え、格納容器の代替冷却を実施した。
 - ・ 圧力抑制室への冷却と並行して、残留熱除去機器冷却系ポンプ(D)、残留熱除去海水系ポンプ(B)及び非常用ディーゼル発電設備冷却系ポンプ(B)の点検・補修(残留熱除去機器冷却系ポンプ(D)及び非常用ディーゼル発電設備冷却系ポンプ(B)については、モータを交換)を実施した。

- ・ また、海水熱交換器建屋が浸水し非常用電源（P/C 1C-2, 1D-2）が被水したため、所外から緊急手配した高圧電源車や仮設ケーブルを使用し、外部電源系から受電されている放射性廃棄物処理建屋の電源（P/C 1WB-1）からの仮設ケーブル敷設・受電や、高圧電源車からの受電により残留熱除去機器冷却系ポンプ（D）、残留熱除去海水系ポンプ（B）及び非常用ディーゼル発電設備冷却系ポンプ（B）を起動可能な状態に復旧し、13日20時17分より順次起動した。
- ・ 14日1時24分に残留熱除去系ポンプ（B）を起動したことにより、発電所長は原災法第10条該当事象（原子炉除熱機能喪失）の状態から回復したものと判断した。
- ・ また、残留熱除去系ポンプ（B）にて圧力抑制室の冷却を実施した結果、徐々に圧力抑制室水温が低下し、14日10時15分に圧力抑制室の水温が100℃未満となったことから、発電所長は原災法第15条該当事象（圧力抑制機能喪失）の状態から回復したものと判断した。
- ・ さらに、圧力抑制室の冷却に加え原子炉水を早期に冷却するため、あらかじめ定められた事故時運転操作手順書を参考に実施手順書を作成し、14日10時05分より残留熱除去系ポンプ（B）にて低圧注水ラインより圧力抑制室の水を原子炉へ注水を開始するとともに、主蒸気逃がし安全弁を経由して圧力抑制室へ原子炉水を流入させ、圧力抑制室の水を残留熱除去系熱交換器（B）で冷却して再度低圧注水ラインより原子炉に注水する循環ライン（圧力抑制室→残留熱除去系ポンプ（B）→残留熱除去系熱交換器（B）→低圧注水ライン→原子炉→主蒸気逃がし安全弁→圧力抑制室）による冷却を応急的に実施した。これにより、同日17時00分には原子炉水温度が100℃未満となり冷温停止となったことを確認した。

（3）福島第二1号機の格納容器ベントに関する対応状況

- ・ 3月11日14時48分、原子炉が自動停止した際に発生した「原子炉水位低（L-3）」に伴い、原子炉格納容器隔離系及び非常用ガス処理系は正常に動作し、格納容器の隔離及び原子炉建屋の負圧維持が行われた。
- ・ その後、格納容器圧力が上昇傾向にあり、原子炉除熱機能の復旧に時間がかかることを想定し、12日10時21分から同日18時30分にかけて、格納容器耐圧ベントのためのライン構成（圧力抑制室側の出口弁開操作のワン・アクションを残した状態）を実施した。
- ・ なお、格納容器圧力は最大で約282 kPa [gage]（圧力抑制室側）まで上昇したが、格納容器最高使用圧力310 kPa [gage]には達しなかった。

8. 8 事故進展に伴う福島第一原子力発電所敷地境界の線量率の変動

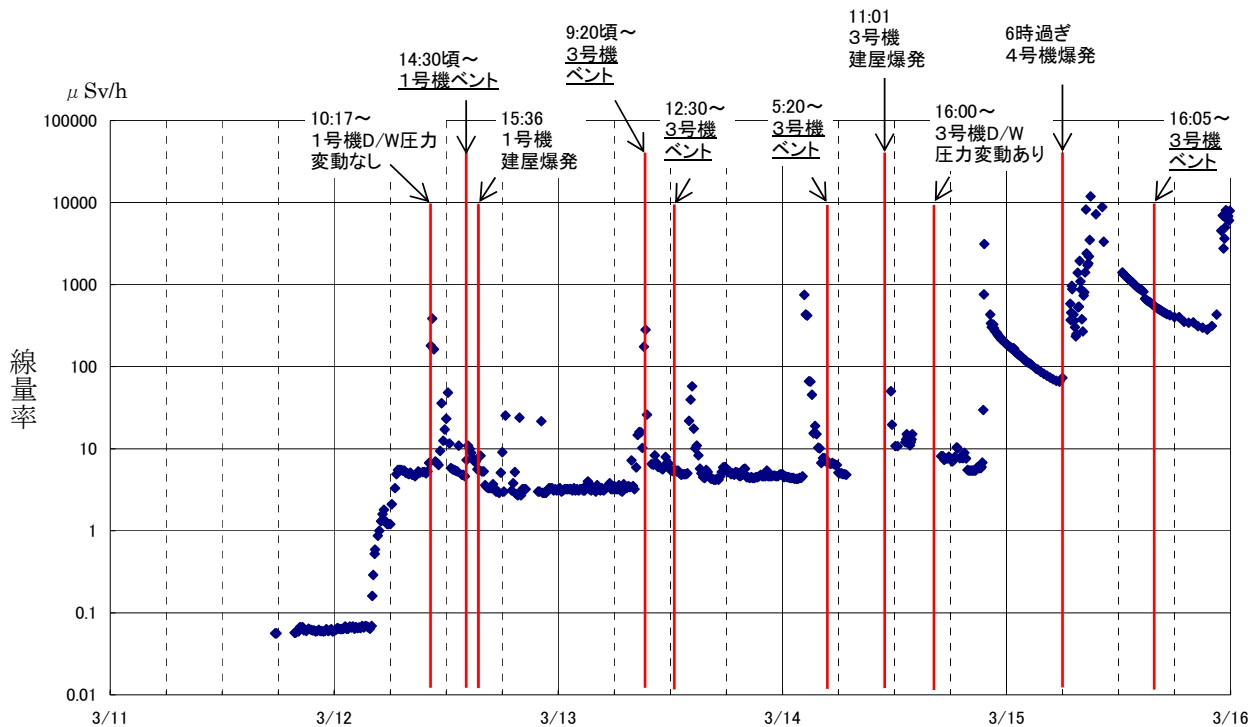
被災後、発電所周辺に設置しているモニタリングポストは停止しており、線量率の測定ができなかったことから、モニタリングカーにより線量率を測定してきた。

格納容器ベントや建屋爆発といった、環境への放射性物質に密接に関連すると考えられる事象が発生した期間の正門付近のモニタリングカーによる測定結果を下図（福島第一原子力発電所 正門付近の線量率）に示す。

3月11日から12日の明け方までは、線量は平常値近辺であったが、12日5時頃から線量率が上昇してきている。これは、既に炉心損傷が発生していたと推定されている1号機からの放射性物質の放出の影響によるものと考えられる。

1号機の格納容器ベントのラインナップが整った12日10時頃に線量率のピークが見られているが、この際には格納容器圧力の低下は見られておらず、その原因は明確ではない。その後、1号機の格納容器ベント（圧力抑制室側）、建屋爆発があったが、特段のピークは見られていない。13日には3号機で複数回、格納容器ベント（圧力抑制室側）を実施し、ピークが見られるものの、線量率は10 μ Sv/h未満であり、バックグラウンドの上昇は見られていない。

2号機で炉心損傷が生じたと推定される14日夜以降、バックグラウンドの上昇が見られる。特に、15日7時20分にドライウェル圧力が730 kPa [abs]であったが、11時25分には155 kPa [abs]へ低下しており、この2号機におけるドライウェル圧力の減少の時期に、線量率が1,000 μ Sv/hを超えて最大で10,000 μ Sv/hに達し、バックグラウンドレベルの大幅な上昇が見られる。

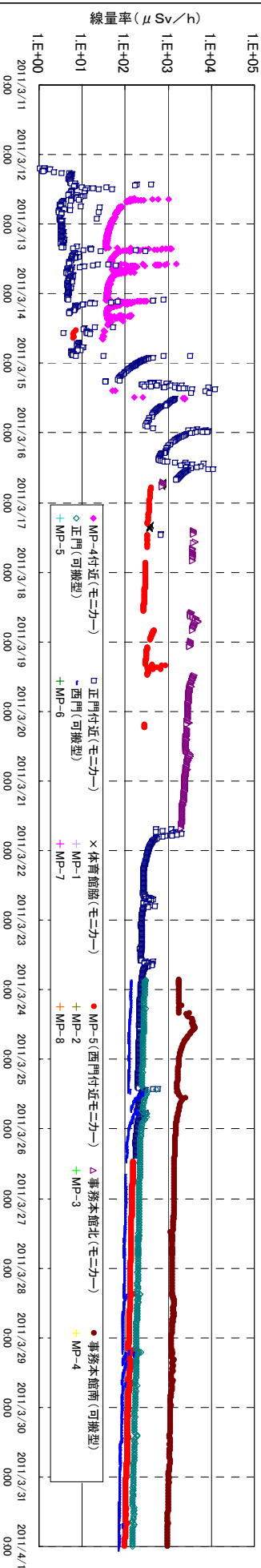
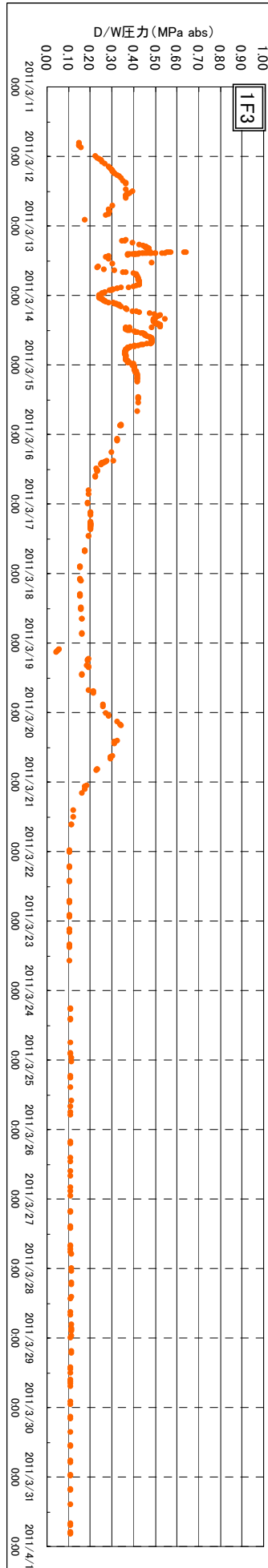
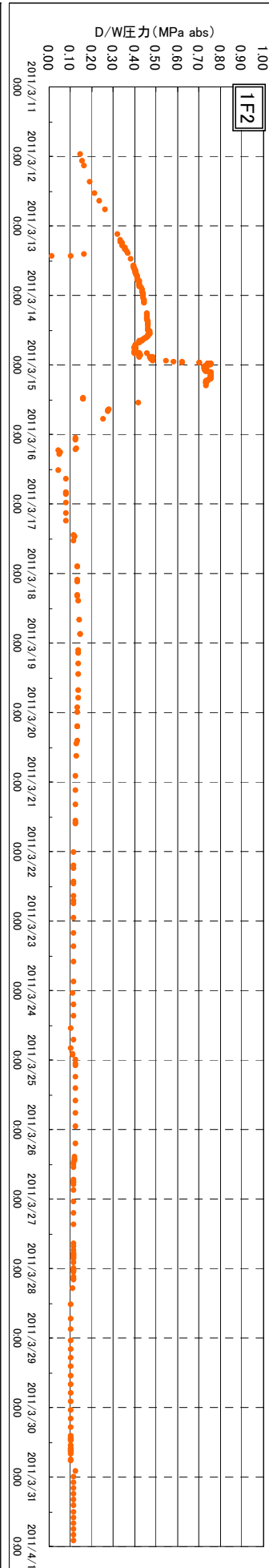
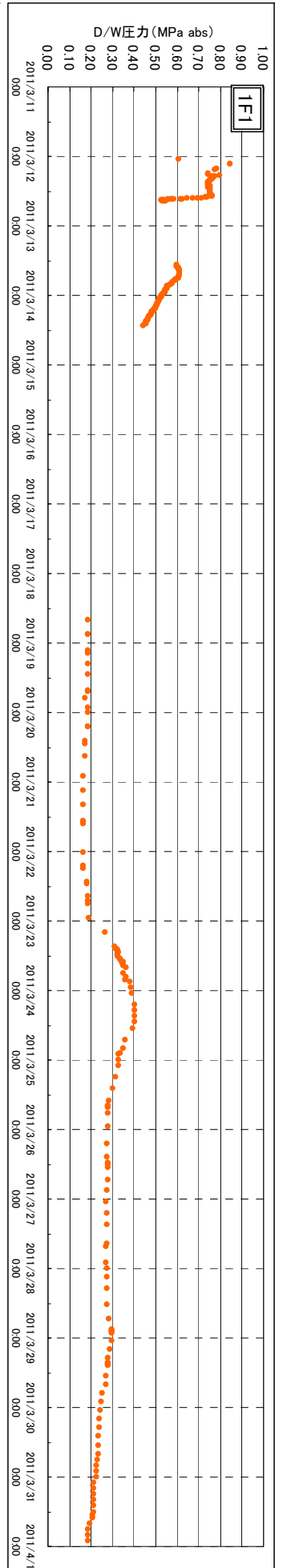


福島第一原子力発電所 正門付近の線量率

ドライウェル圧力は放射性物質放出に関連する重要なプラントパラメータであることから、3月31日までのドライウェル圧力の推移を発電所内外で測定された線量率と共に次頁の図（ドライウェル圧力と発電所内外のモニタリングデータ）に示す。

先に述べたように、3月16日までの間に、放射性物質の放出があり、バックグラウンドレベルが高い状態になったが、それ以降は若干のピークが見られるところはあるものの、総じて徐々に線量率が低下している。この線量率の低下傾向は、ヨウ素131の半減期（約8日）に相当するものとなっている。

これらのことから、事故当初に放出された放射性物質が地面等にフォールアウトしたことでバックグラウンドレベルの上昇があり、それ以降は、地面等に付着した放射性物質の崩壊によりバックグラウンドレベルが低下していったものと推定される。



トライウエル圧力と発電所内外のモニタリングデータ

8. 9 使用済燃料の貯蔵状況

(1) 福島第一原子力発電所の使用済燃料貯蔵状況【添付8-8】

3月11日の時点の使用済燃料貯蔵体数は以下の通りである。

号機	使用済燃料体数	新燃料体数
1号機	292	100
2号機	587	28
3号機	514	52
4号機	1331	204
5号機	946	48
6号機	876	64
共用プール	6375	0
キャスク保管建屋	408	0

東北地方太平洋沖地震により引き起こされた津波の影響を受け、1～5号機と共用プールは全交流電源が喪失したため、使用済燃料プールの冷却機能及び補給水機能が喪失した。また、6号機については、D/G(6B)が機能維持したものの、海水ポンプの機能が喪失したため、使用済燃料プールの冷却機能が喪失した。

なお、キャスク保管建屋も全交流電源が喪失したが、乾式貯蔵キャスクは自然対流により空冷される設計となっている。

以下に、1～6号機の使用済燃料貯蔵プール、共用プール及び乾式貯蔵キャスクの冷却状態について述べる。

- 1号機：3月12日に原子炉建屋上部が爆発により損傷したため、3月31日からコンクリートポンプ車で放水を行っている。
その後、5月28日からは燃料プール冷却浄化系配管を用いて注水、8月10日から代替冷却系による冷却を開始した。
- 2号機：3月20日から燃料プール冷却浄化系配管を用いて注水を開始、5月31日から代替冷却系による冷却を開始した。
- 3号機：3月14日に原子炉建屋上部が爆発により損傷したため、3月17日にヘリコプターによる放水、3月17日から放水車、屈折放水塔車により放水、3月27日からコンクリートポンプ車による放水を行っている。
その後、4月22日から燃料プール冷却浄化系配管を用いた注水を開始、6月30日から代替冷却系による冷却を開始した。
- 4号機：3月15日に原子炉建屋上部が爆発により損傷したため、3月20日から放水車による放水、3月22日からコンクリートポンプ車による放水を行っている。
その後、6月16日から仮設の燃料プール注水設備による注水を開始、7月31日から代替冷却系による冷却を開始した。
- 5号機：3月19日に残留熱除去系ポンプを手動起動し、非常時熱負荷モードで冷却を開始、6月25日から燃料プール冷却浄化系による冷却を行っている。

6号機：3月19日に残留熱除去系ポンプを手動起動し、非常時熱負荷モードで冷却を開始した。

共用プール：外部電源の復旧に伴い、共用プールの電源について仮設電源設備を経由して受電し、3月24日に仮設の冷却設備による冷却を開始した。

キャスク保管建屋：津波の影響により、大量の海水、砂、瓦礫等が流れ込み、ルーバや扉等が損壊したが、自然空冷で期待している空気の流れが阻害される状況にはなく、冷却上問題がないことを確認した。キャスクの外観からも健全性に関する異常は確認されていない。

以上より、水冷式の1～6号機使用済燃料プール、共用プールともに30～50℃の水温で安定した状態であり、また空冷式の乾式貯蔵キャスクの冷却状態にも異常は認められない。

また、地震発生以降の1～6号機使用済燃料プール及び共用プールの水位に関して評価した結果、いずれも使用済燃料を覆うのに十分な水位があり、燃料の露出はなかったと推定している。

なお、4号機については、原子炉内のすべての燃料を使用済燃料プールに移動していた状態で、原子炉建屋上部が爆発により損傷している。

原子炉から水素が発生する可能性はないため、使用済燃料プールの漏えいによる燃料破損が懸念されたが、ヘリコプターにより上空から確認したところ（3月16日）、当該プールに水が満たされており燃料が露出していないことが確認できている。また、プール水の核種分析を行った結果からも、燃料の損傷を示すデータは認められなかった。

現在のところ、プールに水を張って冷却を行っており、プール水位も維持できていることから、プール自体に損傷はないと考えられる。

（2）福島第二原子力発電所の使用済燃料貯蔵状況

福島第二1～4号機ともに、使用済燃料プールの冷却機能が一時的に失われたものの、原子炉施設保安規定で定める運転上の制限（使用済燃料プール水位：オーバーフロー水位付近、水温：65℃以下）を満足することができた。

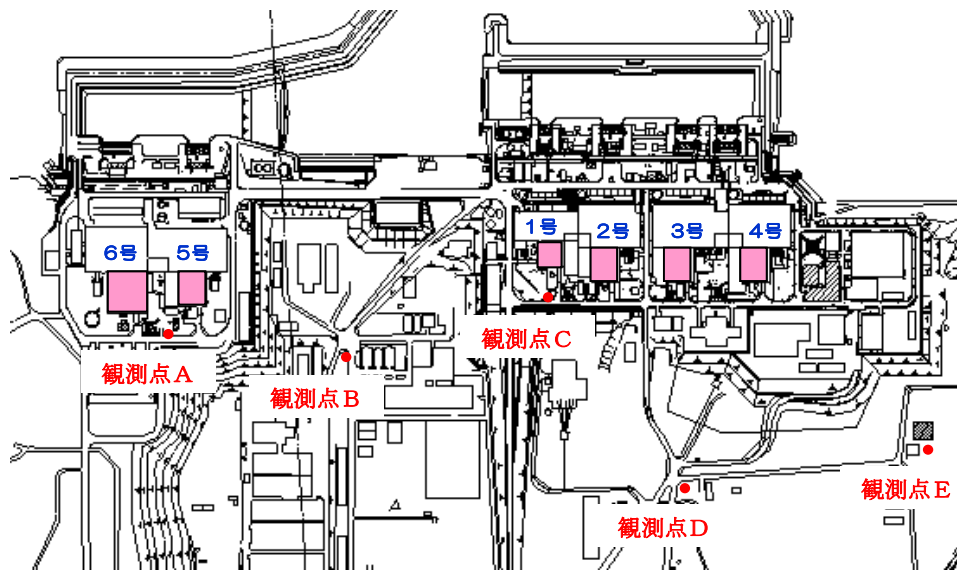
9. プラント水素爆発評価

9. 1 地震計による爆発事象の考察

福島第一1号機及び3号機の原子炉建屋での爆発は、メディア映像に残されており、爆発発生時刻が特定されている。一方、2号機と4号機に関しては、ほぼ同時刻（3月15日の6時～6時10分頃）に大きな音が確認されており、2号機では圧力抑制室の圧力指示値が0 MP a [abs]まで低下していること、4号機では原子炉建屋最上階が損傷していることが確認された。

このため、2号機は圧力抑制室で、4号機では原子炉建屋上部で爆発が発生した可能性があるとの見方も出ていた。

今回、2号機及び4号機の爆発発生状況を把握するため、福島第一原子力発電所敷地内に設置されている仮設の地震観測記録計のデータを分析した。



福島第一原子力発電所 振動観測データ回収地点

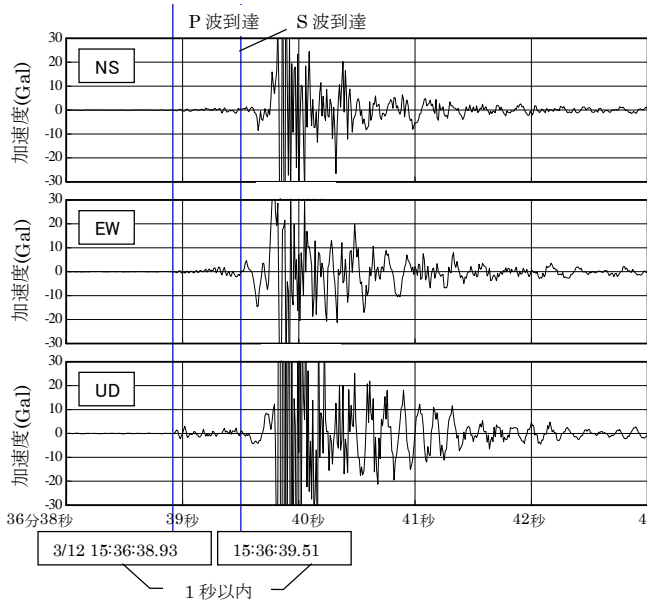
地震、爆発に係わらず、振動にはP波（縦波）とS波（横波）があり、両方の伝達速度は異なっている。一般にP波に比べてS波の伝達速度は遅く、同じ振動源から発せられた振動は、P波よりS波の方が遅れて到達する。このため、振動源の位置が観測点の位置より離れているほど、P波とS波の到達時刻には大きな差が生じることとなる。

このような原理を応用して、敷地内に設置されている地震計の振動を分析すれば、発電所構内での爆発を起因とする振動ではP波とS波の到達時間の差は1秒以内と小さく、震源が遠い地震動の場合には到達時刻の差は数秒となること等から、地震による振動と爆発による振動を区別することができる。

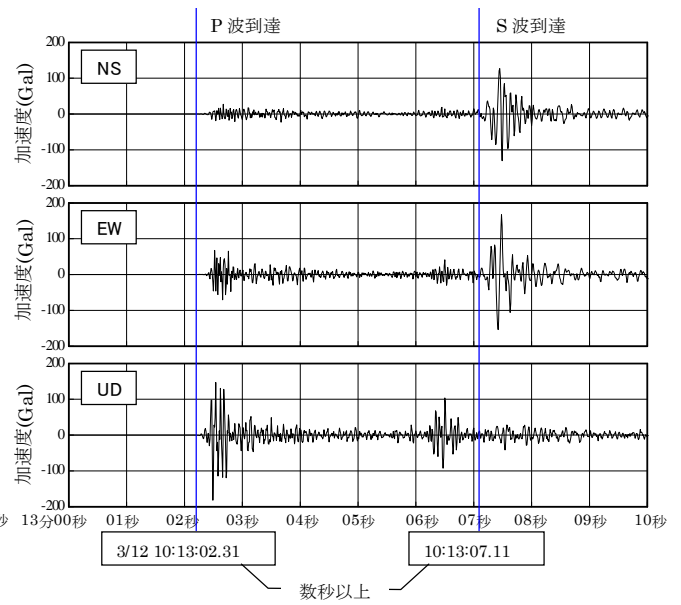
2号機、4号機でほぼ同時期に大きな音が確認された3月15日6時～6時15分の間の振動をこのような手法で差別化したところ、爆発による振動は6時12分に記録されているものだけであることが判明した。

一方、発生が明確に確認されている1号機、3号機の爆発事例において、各号機から地震計までの距離を縦軸に、そこまでのP波、S波の到達時刻を横軸にして、P波とS波の観測記録を整理すると、それぞれ精度よく線形となり、発生源の特定ができることが確認された。

【1号機爆発時の加速度波形例】

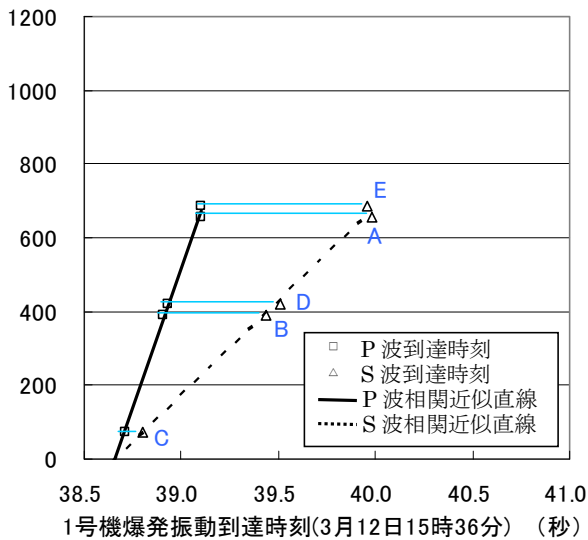


【地震の加速度波形例】



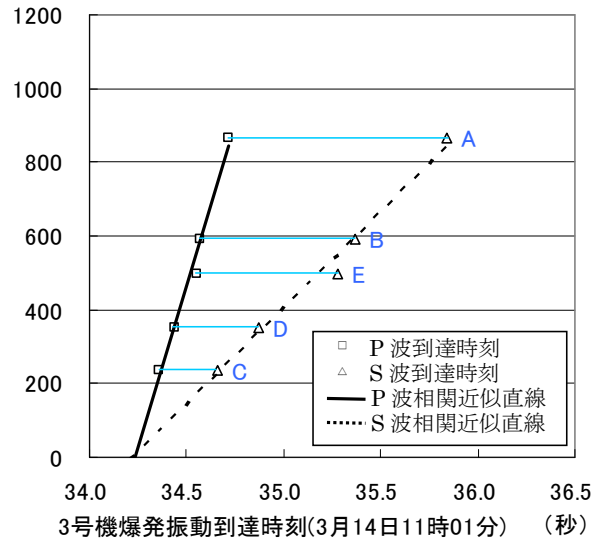
爆発と地震の加速度波形例（観測点D）

1号機からの距離(m)



1号機

3号機からの距離(m)

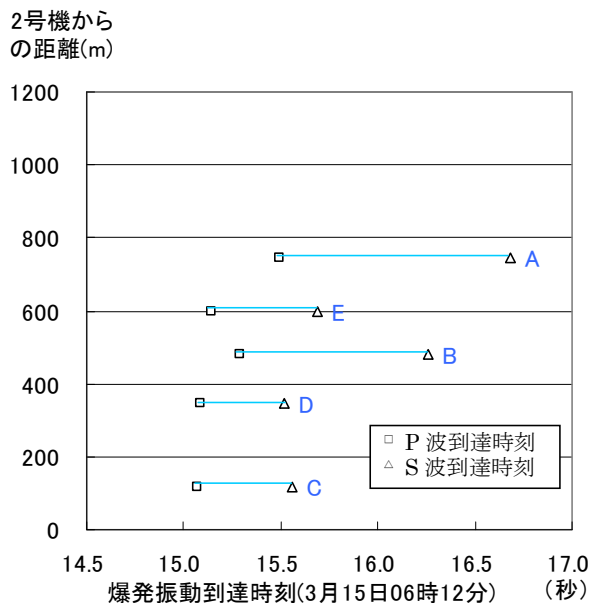


3号機

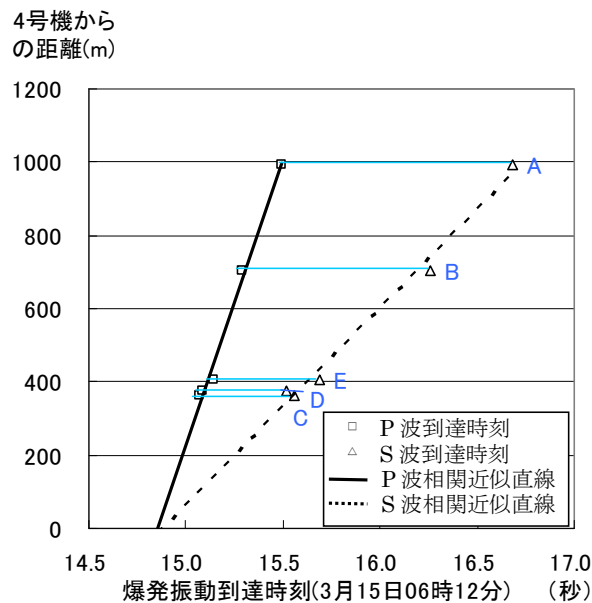
1号機、3号機の爆発時のP波、S波到達時刻と1号機、3号機との距離相関図

3月15日6時12分に記録されている振動について、2号機と4号機におけるそれぞれの距離と到達時刻の関係を同じ方法で整理したところ、2号機からの距離で整理した場合はデータに関連性を見いだせないが、4号機からの距離で整理した場合はP波、S波ともに精度良く線形になることを確認した。したがって、当該の振動は4号機の爆発によるものと推定される。

なお、2号機については、念のために、今回の調査範囲である6時～6時15分前後の時間帯におけるデータの精査も行ったが、これまで確認された爆発以外に、爆発的な事象で発生したと思われる振動は確認されなかった。



2号機



4号機

6時12分の地盤振動のP波、S波到達時刻と2号機、4号機との距離相関図

以上のことから、福島第一原子力発電所における爆発は、メディア映像でも確認されている1号機、3号機と今回地震計による観測記録で確認された4号機の3回と推定される。このため、3月15日6時10分頃に確認された大きな音（爆発）は、正確には6時12分に4号機で発生した爆発音と判断した。

2号機については、4号機の爆発音に前後して発生した圧力抑制室の圧力指示値が0 MP a [abs]に低下したため、2号機の圧力抑制室付近で爆発的な事象が発生した可能性があるとして誤って認識したものと考えられる。

圧力抑制室の損傷は大気開放を意味するため、絶対圧力で0 MP a [abs]というのは物理的にはあり得ないが、計器誤差まで考慮し、何らかの損傷が発生して圧力抑制室の圧力が低下した可能性は否定できない。

ただし、本来ほぼ同様な圧力であるはずの格納容器圧力と3月14日夜から異なる挙動をしていること、解析結果やCAMS（格納容器雰囲気モニタ）のデータから判断して、その時刻から炉心損傷が進行していることを考え併せれば、格納容器圧力は上昇局面にあると想定され、圧力抑制室の圧力計が0 MP a [abs]（真空）に低下した原因は、圧力計が故障していた可能性が高いと考えられる。

なお、他の号機と同様に炉心損傷に至ったものの、2号機で水素爆発が発生しなかった要因の一つに、原子炉建屋最上階のブローアウトパネルの開放が挙げられる。ブローアウトパネルの開放は1号機の水素爆発の衝撃で偶然発生したものと推定しているが、この開放により水素が建屋外に放出され、建屋内に滞留する水素が抑制された可能性は高いと考えられる。



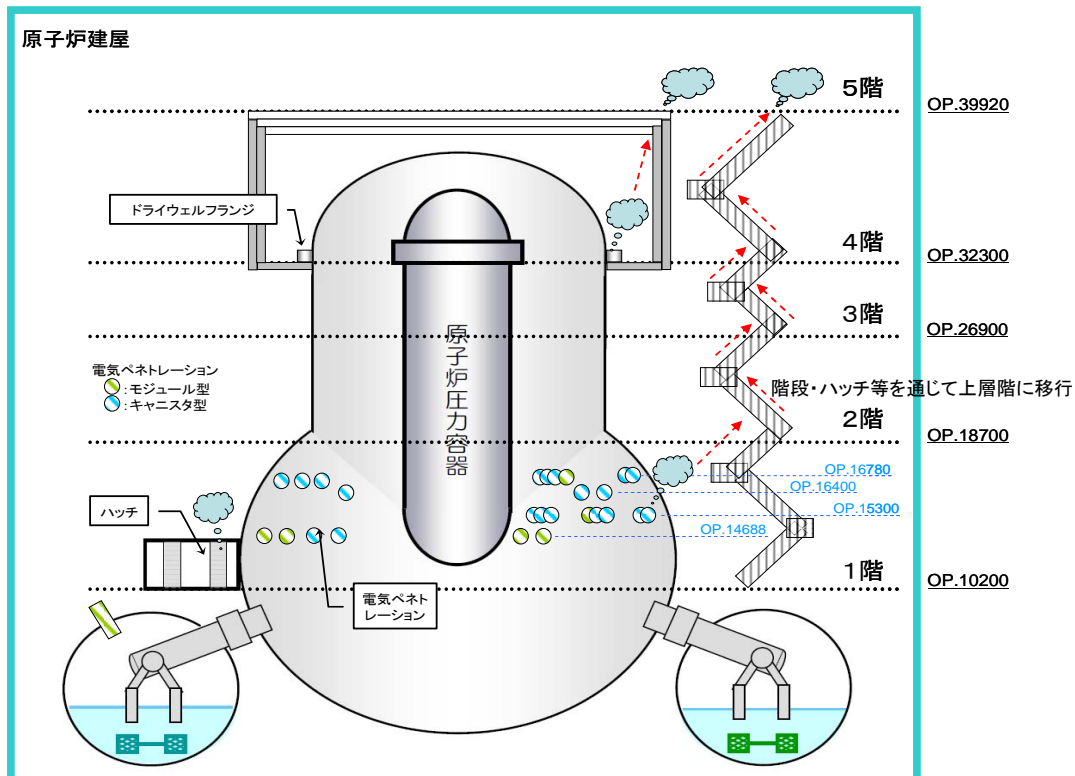
2号機ブローアウトパネルの開放状況

9. 2 水素爆発の原因

(1) 1号機、3号機水素爆発の原因について

1号機、3号機については、原子炉内の燃料損傷に伴い、水-ジルコニウム反応等による水素が発生したものと考えられる。

明確な水素流出経路は不明であるものの、格納容器上蓋の結合部分、機器や人が出入りするハッチの結合部分等、漏れ止めのためにシリコンゴム等を使用しているシール部分が高温に晒され、機能低下した可能性があると考えられる。水素はこれらのような場所から原子炉建屋内へ漏えい・滞留し、水素爆発に至ったものと推定される。



推定漏洩経路はシステム構成の違いにより、1号機と3号機で若干異なる可能性あり。

(2) 4号機水素爆発の原因について

以下に4号機の爆発に関する調査・確認結果を示すが、これらの結果から4号機の爆発は、3号機のベント流の回り込みにより水素が原子炉建屋に蓄積し発生したものと考えられる。

①使用済燃料プールの状態

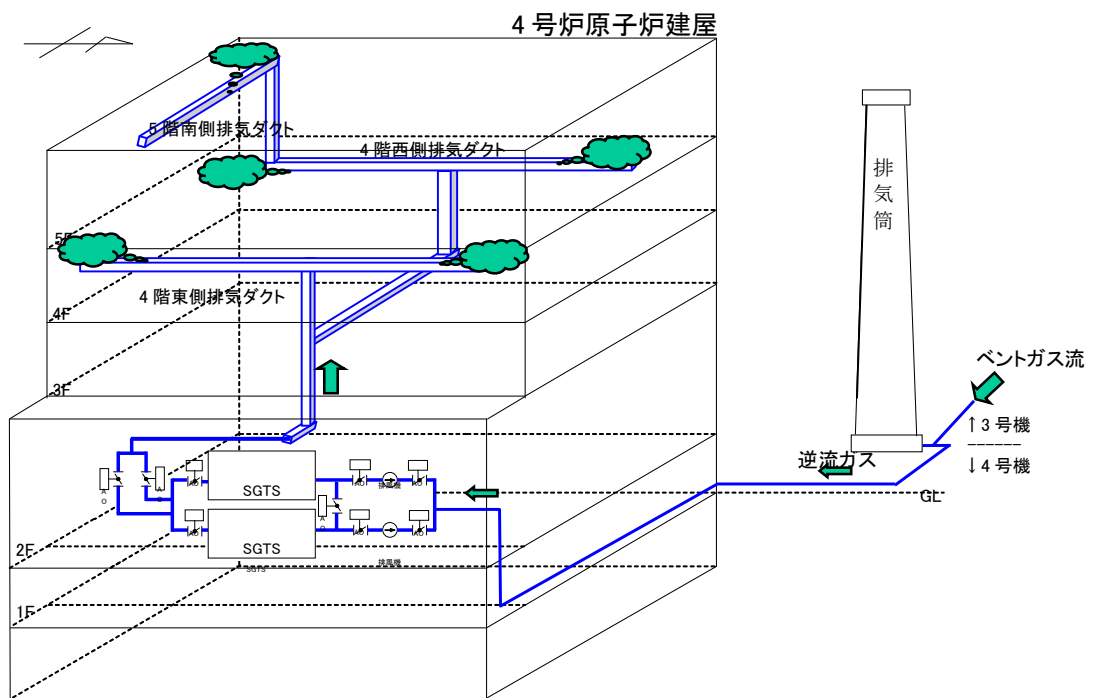
3月15日に発生した爆発が4号機におけるものであったことについては、「9. 1 地震計による爆発事象の考察」で特定したが、4号機は定期検査期間中であり、原子炉の燃料はすべて取り出されていたことから、原子炉からの水素発生の可能性はなかった。

また、「8. 9 (1) 福島第一原子力発電所の使用済燃料貯蔵状況」に記載した通り、4号機の使用済燃料プールにおいて燃料は露出していないこと、水の分析結果からも燃料破損の兆候がないことが確認されている。

このため、4号機においては、4号機保有の燃料から水-ジルコニウム反応による水素発生が起こったとは考えられない。加えて、使用済燃料プール内の水の放射線分解による水素発生はごくわずかであり、このことも爆発の原因とは考えられない。

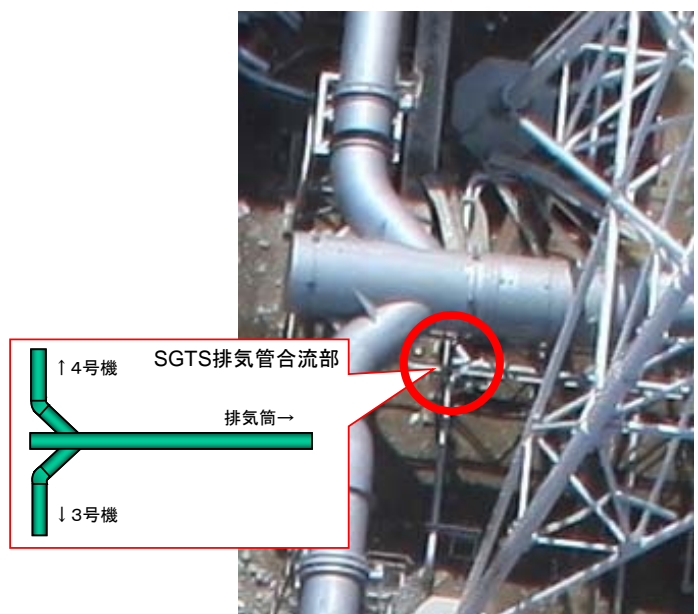
② 4号機への水素流入経路

このような状況から、4号機の爆発の原因を調査したところ、3号機の水素ガスを含むベント流が排気筒合流部を通じて4号機に流入した可能性があると考えられた。4号機の格納容器ベント配管は、4号機の非常用ガス処理系配管に接続され排気筒に導かれるが、排気筒付近で3号機の非常用ガス処理系配管に合流している。



3号機から4号機への格納容器ベント流の流入経路

通常、非常用ガス処理系は待機状態で停止しており、系統に設置されている空気式の弁も閉止している。このため、3号機側から格納容器のベントガスが流れてきたとしても4号機にベントガスが流れ込むような事象は発生しない。しかしながら、今回の福島第一原子力発電所で発生した事故は、隣り合う複数の号機で全交流電源喪失が長時間継続するというアクシデントマネジメントの前提を超えた事故であり、全交流電源を喪失した中で3号機の格納容器ベントが行われた。同じく、4号機も全交流電源を喪失しており、非常時にも作動できるように設計されている非常用ガス処理



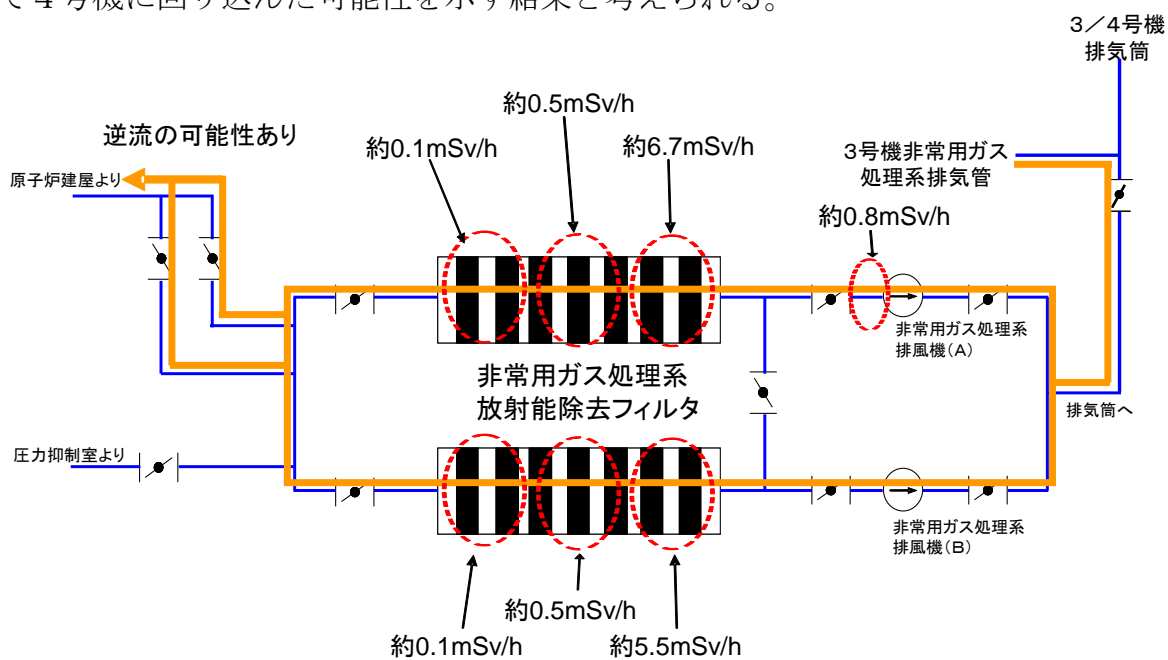
非常用ガス処理系 (SGTS) 配管

系の弁は、電源を喪失することで開状態となり、3号機からの格納容器のベントガスが非常用ガス処理系配管を通じて4号機に流入できるラインが構成された。このような経路から、3号機の原子炉で発生した水素が4号機に流入し、蓄積・爆発した可能性は十分にあるものと考えられる。

③非常用ガス処理系フィルタの線量測定

非常用ガス処理系には、放射性物質を除去するフィルタ類が収納されており、通常は汚染空気の流れてくる上流側（設置されている号機の原子炉建屋から気体が流入してくる側）のフィルタの方が汚染度合いは高くなる。一方、非常用ガス処理系フィルタを3号機の格納容器ベント流が逆流した場合は、下流側のフィルタの汚染度合いが高くなることとなる。この事実関係を確認すべく、4号機の非常用ガス処理系フィルタが収納されているトレインの放射線量測定を実施した。（平成23年8月25日実施）

調査の結果、通常と異なり、非常用ガス処理系フィルタトレイン出口側（下流側）の放射線量が高く、入口側（上流側）に行くに従い放射線量は下がっていくことが確認された。これは、汚染された気体が4号機の非常用ガス処理系配管を下流側から上流側に流れたことを意味しており、3号機の格納容器ベント流が非常用ガス処理系配管を経由して4号機に回り込んだ可能性を示す結果と考えられる。



4号機非常用ガス処理系（SGTS）放射線量測定結果
（平成23年8月25日実施）

④原子炉建屋内の調査

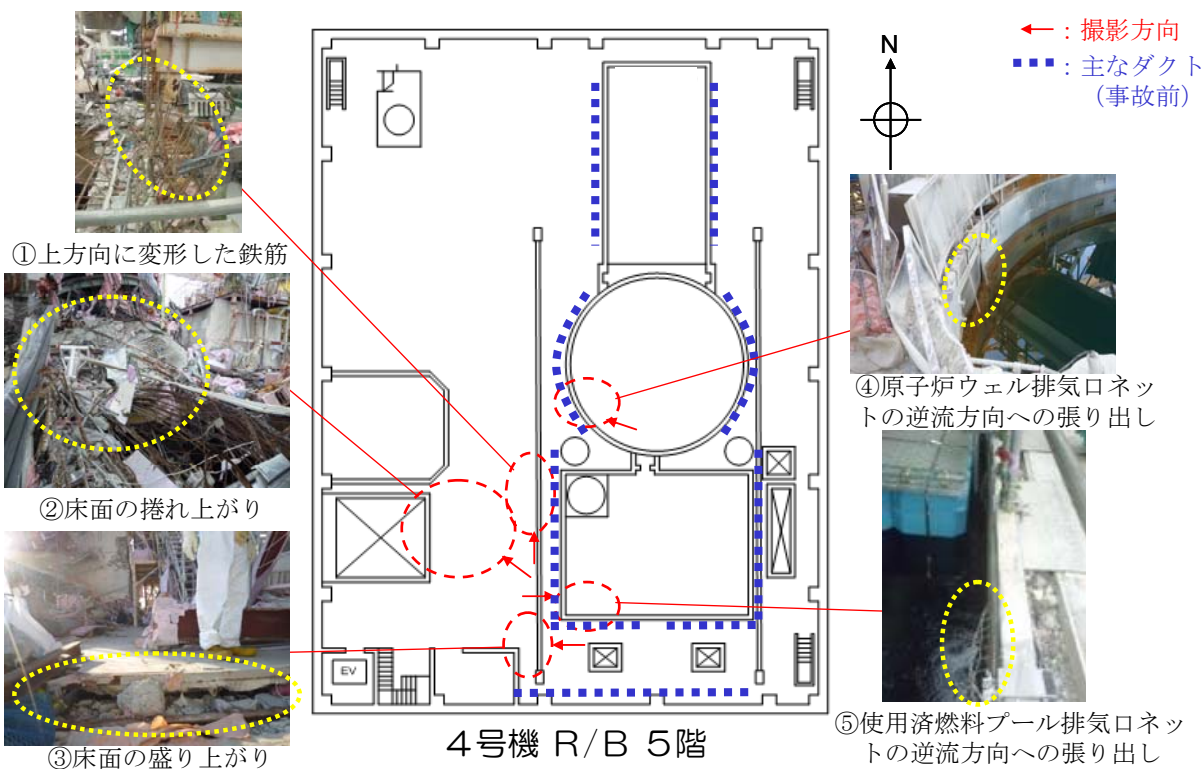
4号機原子炉建屋の現場調査を行ったところ、以下が確認された。

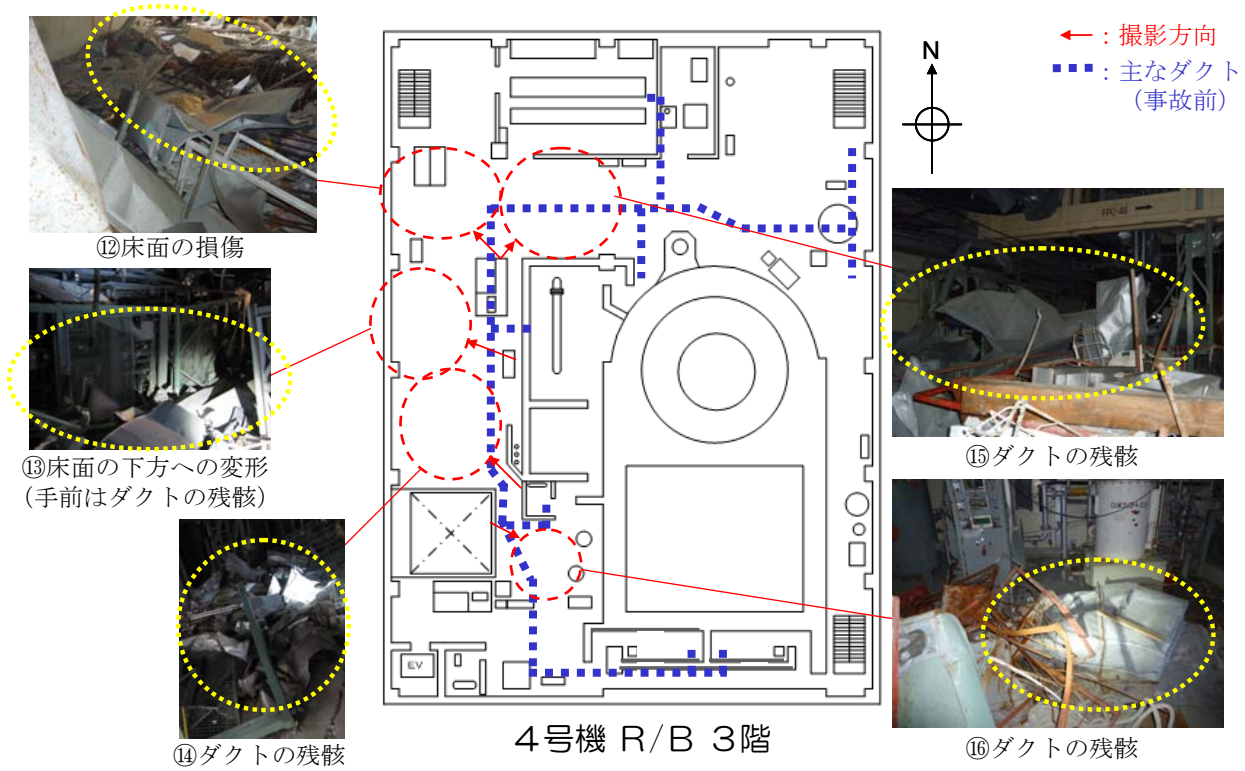
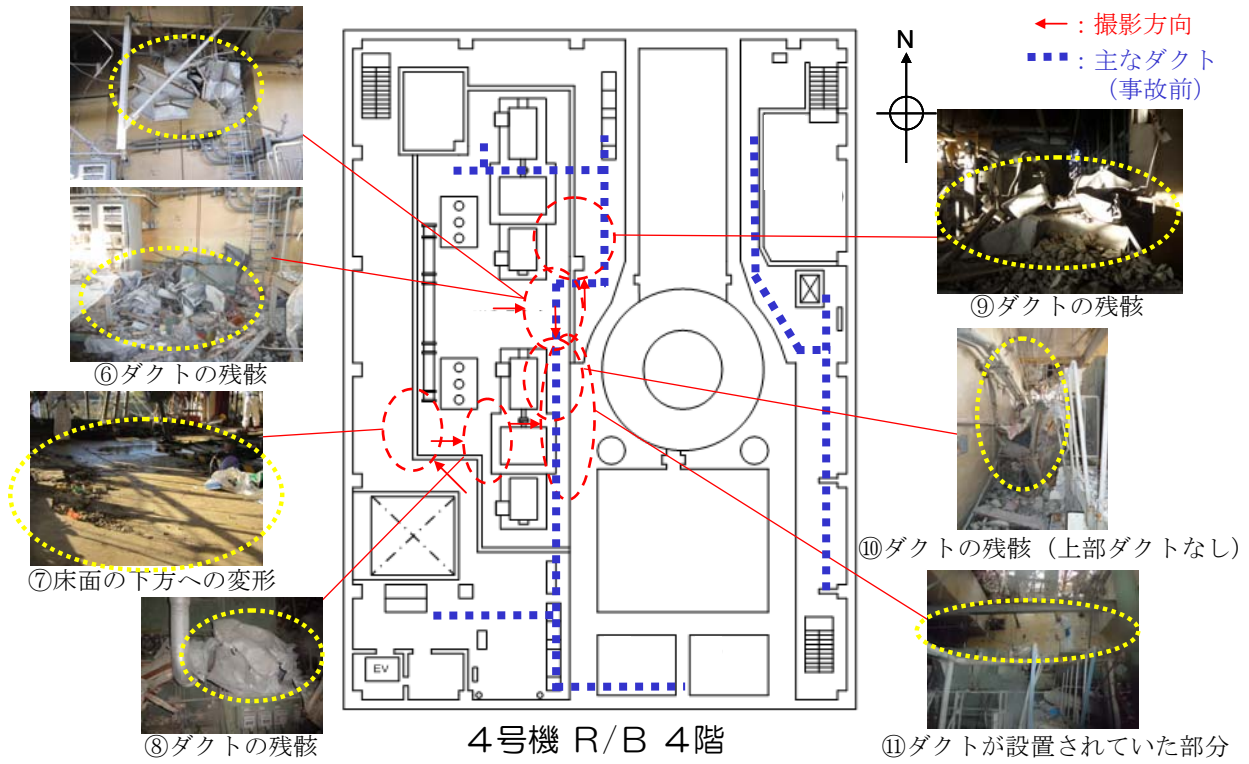
- ・ 非常用ガス処理系の排気ダクトは原子炉建屋2階から3階を経由し、4階の天井中央西寄りの部分を南側へ向かって通り、南壁面付近で5階へ通じる設計となっていた。

- ・ 5階フロアの排気ダクトが設置されていた南壁面は、ほとんどの部分が抜け落ち、ダクトの残骸も認められなかった。
- ・ 5階フロア南西部では、床面が大きく損傷し、鉄筋が上方方向に曲げられていた(①)。また、1区画はオペフロ側に捲れ上がるとともに、下からの力による変形(床面、クレーンのレールなど)が認められた(②、③)。
- ・ 4階から通じる、原子炉ウェル及び使用済燃料プールの排気口ネットは逆流方向への張り出しが認められた(④、⑤)。
- ・ 原子炉建屋4階西側エリアでは、5階フロア床の損傷が大きい箇所の近傍で、床面が下方に変形していたほか、排気ダクトの残骸と推定される瓦礫が多数存在していた(⑥～⑪)。
- ・ 原子炉建屋3階西側エリアでは、4階同様、床面が下方に変形していたほか、北西エリアでは床面の大きな損傷が認められ、付近には排気ダクトの残骸と推定される瓦礫が多数存在していた(⑫～⑯)。

これらのことから、5階フロア床面は、4階で発生した爆発の圧力により、上向きの力を受けて破壊したものと考えられる。また、原子炉建屋4階南西部では、本来の設置位置にダクトは存在せず、ダクトの残骸と推定される瓦礫が散乱していたことから、爆発による主な圧力の発生場所は4階南西部のダクト付近である可能性が考えられる。また、排気ダクトを通じて回り込んだ水素により、3階および5階でも爆発が生じ、その圧力で建屋等の破損を生じたものと考えられる。

以上より、爆発が発生した現場の状況は、3号機のベント流が回り込み、4号機の原子炉建屋2階から非常用ガス処理系配管・ダクトを経由して建屋の各所に流れ込んだとの推定と一致するものと考えられる。





10. 事故の分析と課題の抽出

10.1 事故時のプラント挙動からの課題

本項では、プラント挙動からの課題を抽出するために、現時点で収集できた情報及びそれらの情報を基にした事後的な解析結果も含めて整理している。対象としたプラントは、炉心損傷に至った福島第一1～3号機、及び非常用海水系の仮設電源の復旧などの迅速な対応により冷温停止に成功した福島第二1号機とした。

なお、福島第一1～3号機については、地震発生初期の設備状態や運転操作等に関する情報を踏まえて、事故解析コード（Modular Accident Analysis Program、以下「MAAP」という。）を用いて炉心状態を評価した。

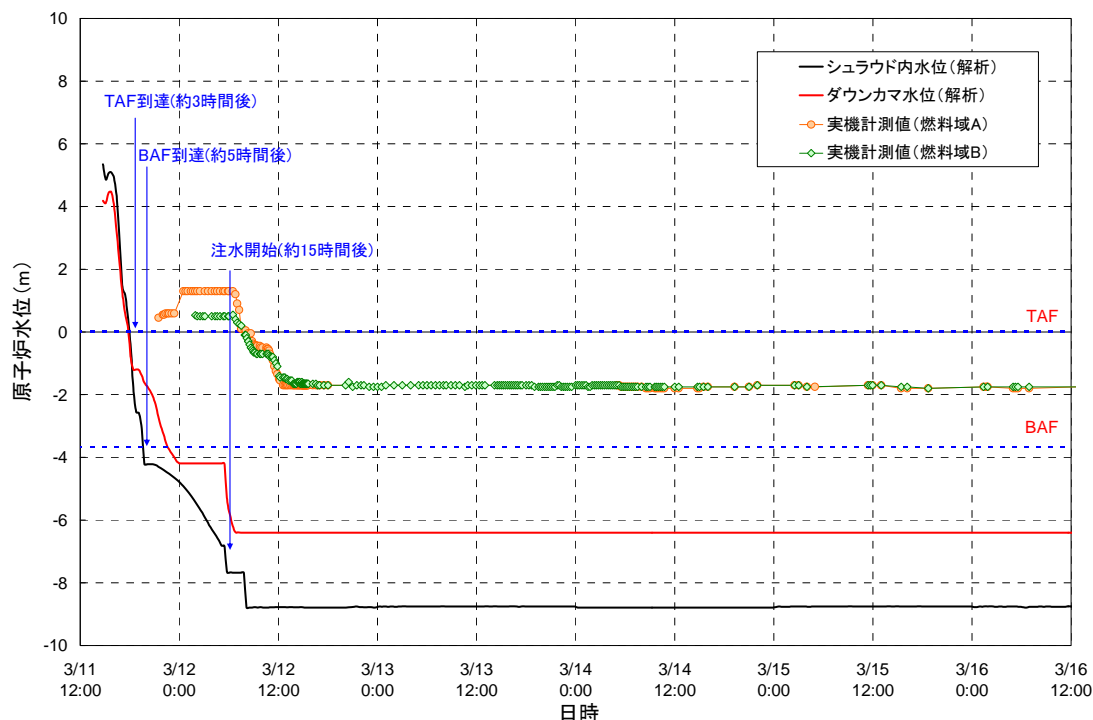
(1) 福島第一1号機のプラント挙動

①解析による挙動の評価

MAAP解析による福島第一1号機の原子炉水位、原子炉圧力、水素発生量に関する解析値及び実機計測値（実際に計測された値）の事象進展の様子を以下に示す。

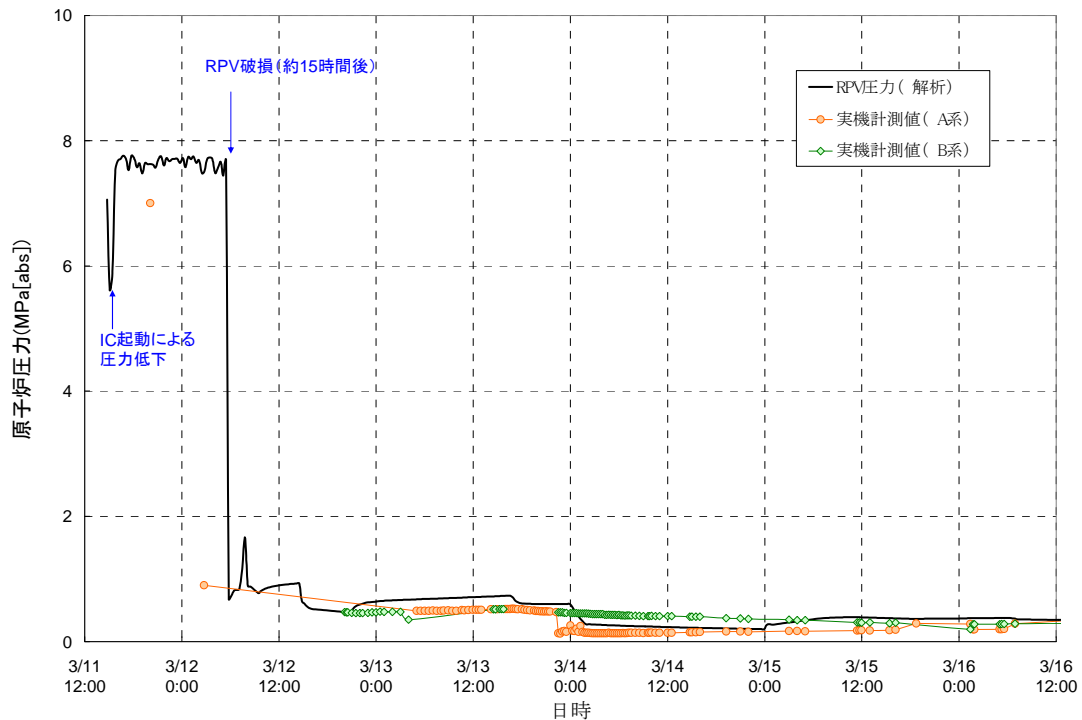
解析では、津波到達までは非常用復水器を原子炉圧力の変動にあわせて間欠動作させていたものとし、津波到達以降、非常用復水器は動作していないものと仮定している。そのため、原子炉冷却材は蒸発し、主蒸気逃がし安全弁から圧力抑制室へ排気されることとなり、原子炉水位の低下が始まる。

解析において、原子炉水位が有効燃料頂部（TAF）に到達する時刻は、地震発生（11日14時46分）から約3時間後であり、燃料温度が1200℃を超え炉心損傷が開始する時刻は、地震発生から約4時間後である。その後さらに水位は低下し、11日20時頃には有効燃料底部（BAF）に到達する。



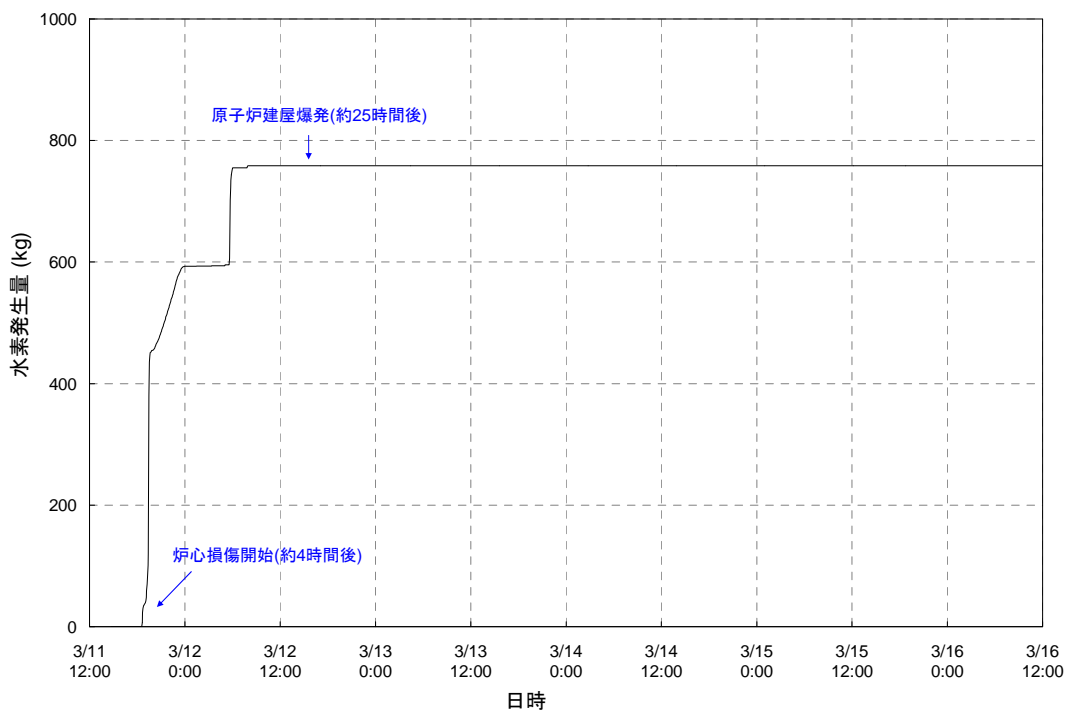
1号機 原子炉水位変化

この間、原子炉圧力は主蒸気逃がし安全弁の動作により 8 MP a 近傍で維持され、主蒸気逃がし安全弁から排気された蒸気は圧力抑制室で凝縮される。その後、解析では、地震発生（11日14時46分）から約15時間後、圧力容器に何らかの漏えいが生じたことで、8 MP a 近傍に維持されていた原子炉圧力が大きく低下している。



1号機 原子炉圧力変化

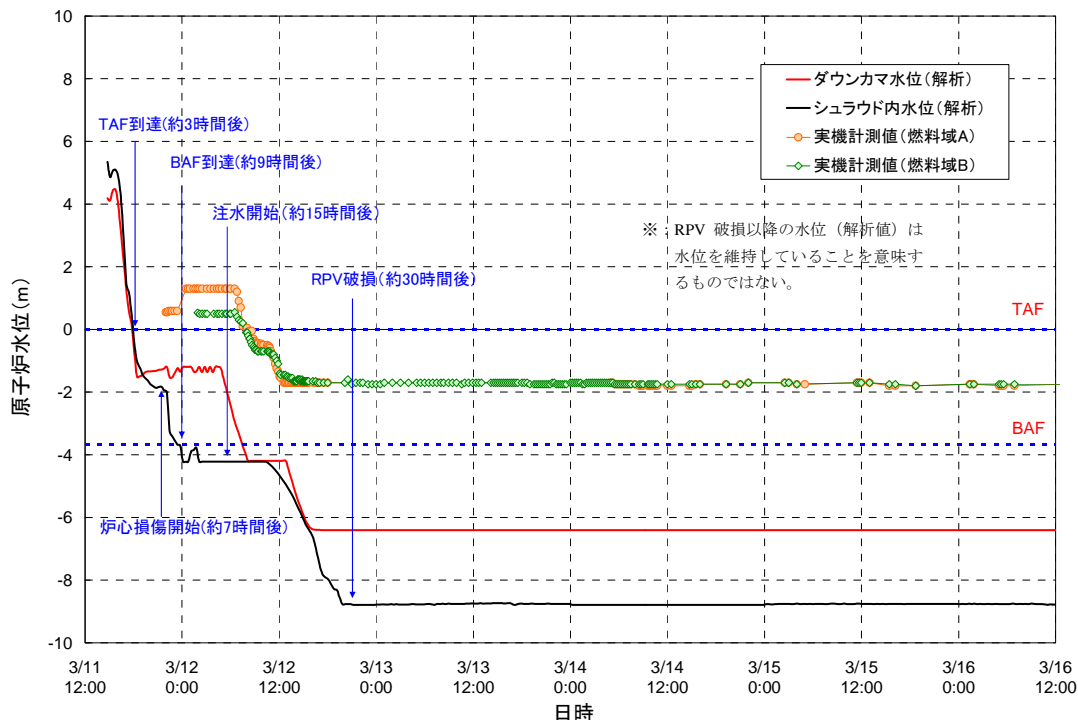
また、炉心損傷が始まるなど、燃料温度が上昇することに伴って、水-ジルコニウム反応により非凝縮性ガスである水素が発生する。なお、原子炉建屋で水素によるものと思われる爆発が発生した12日15時36分までの水素発生量は、約750 kgである。



1号機 水素発生量変化

なお、津波到達以降の非常用復水器の動作に関するパラメータスタディとして、非常用復水器が津波到達以降も一時的に動作していたものとした場合の感度解析を行ったところ、炉心損傷や炉心溶融のプロセスが若干遅れる程度の影響はあるものの、最終的な炉心の状態が有意に変わる結果とはならなかった。

(津波到達以降、3月11日18時頃まで機能喪失、18時頃から3月12日2時頃までの間、片系の非常用復水器の動作を仮定した解析を実施)



1号機 原子炉水位変化 (非常用復水器が一時的に機能していたと仮定)

②実機の挙動に関する評価

1号機の事故発生時の原子炉水位、原子炉圧力、ドライウェル圧力等のプラントパラメータのトレンドを【添付10-1】に示す。プラントの挙動の特徴として以下のポイントがあげられる。なお、《A》等の記号は、添付資料中のグラフの着目点を示す。

- 11日16時40分から17時頃にかけて、それまで見えなかった原子炉水位(広帯域)が一時的に確認できるようになり、津波襲来前に確認されていた水位より低下していることを確認したが、その後は、津波の影響により、プラントパラメータが得られない状態が続いていた。11日20時頃、原子炉圧力が定格圧力付近にあることがわかったため、この段階では原子炉冷却材圧力バウンダリ(注;原子炉圧力がかかる圧力境界)は健全であったと考えられるが、原子炉水位は不明であり、炉心の状態は把握できていなかった。《A》
- 同日21時過ぎに原子炉水位(燃料域A系)の指示が得られ、有効燃料頂部(TAF)を若干上回るレベルであったため、この時点では炉心が健全であると考えていた。その後、23時頃にはタービン建屋線量の上昇が確認され、炉心の状態に疑義を抱かせる状態となったが、原子炉水位は特に変化が見られず、有効燃料頂部以上を指示していた。《B》

- ・ 津波発生からおよそ8時間半後の11日23時50分頃、津波後初めてドライウエル圧力が測定できたが、その時点で既にドライウエル圧力は設計圧力を大幅に超えており、原子炉建屋内の線量が増加していた状況も踏まえると、この時点では既に炉心損傷が発生していた可能性が高いと思われる状態となっていた。《C》
- ・ 原子炉水位計を仮復旧してからこの時点までの原子炉水位の指示は継続して有効燃料頂部以上で安定しており、その後も水位指示値は安定していたものの、この状態は上述した建屋内の線量やドライウエル圧力などから推察されるプラント状況と矛盾しており、津波発生からおよそ6時間後の11日21時台に仮復旧された水位計で測定された原子炉水位は、プラントパラメータやプラント状態に即しておらず、正しい値を示していない状態にあったと考えられる。《B》
- ・ 原子炉水位計は原子炉内の水頭と原子炉の外に設置された凝縮槽の基準水面の水頭との差圧から水位を計測するものである。炉心損傷による温度上昇で基準水面側が蒸発して低下すると実際の水位と異なった値を示すが、5月11日に校正作業を行ったところ、燃料域内に水位がないことが判明していることから、炉心損傷後に測定された水位は信頼性が低く、解析による水位の方が実態に近かったものと考えられる。
- ・ 原子炉圧力は、津波発生からおよそ4時間半後の11日20時頃に確認された際には運転中と同等であったが、12日3時頃では1MPa以下に減圧していた。この間、原子炉の減圧操作を行っておらず、何らかの理由で原子炉冷却材圧力バウンダリから格納容器への漏えいが生じたと考えられるが、その経路については明確ではない。この格納容器への漏えいが、先に測定されているドライウエル圧力の増大につながったと考えられる。《A》, 《C》, 《D》
- ・ 以上の状況から、津波直後のプラントパラメータの測定が困難である間に事象が進展していたと考えられる。《E》
- ・ ドライウエル圧力は12日2時過ぎに約0.8MPa [abs]のピークを示して以降、増加することなく、ほぼ横ばい、若しくは若干の低下傾向が見られており、この段階で、格納容器から放射性物質及び炉心の水—ジルコニウム反応で生じた水素を含むガスが漏えいしていたと考えられ、このことが4時過ぎの発電所構内の線量上昇につながったものと推定される。
- ・ 12日5時過ぎにアクシデントマネジメント策である消火系ライン経由で消防ポンプを利用し、原子炉への淡水注入を開始した。このときは既に炉心の損傷が進んでおり、炉心損傷を防止できなかったものの、この操作（作業）は、その後の進展の抑制に寄与したものと考えられる。
この頃は、炉心損傷に伴い、大量の水素が格納容器内に充満しており、格納容器圧力や温度が高かったことから、原子炉建屋に放射性物質及び水素が漏えいしたものと推定される。《F》
- ・ 格納容器内の圧力を低下させるため、圧力抑制室ベントの操作を実施し、12日14時過ぎに格納容器内の圧力低下が確認されたことから、ベントは成功したものと判断している。《G》
- ・ その後、12日15時36分、原子炉建屋が爆発したが、これは、炉心損傷に伴い発生した水素が原子炉建屋に蓄積し、何らかの理由で着火したことで発生したものと考えられる。
- ・ 圧力抑制室ベント時に、正門付近のモニタリングカーで測定した線量が一時的に上昇したが、バックグラウンドレベルの上昇は、14日以後の大きな値に比べれば

大幅に小さかったことから、線量の一時的な上昇は主として希ガスによるものと推定される。

③非常用復水器に関する考察

前項に示すプラント挙動の経緯を踏まえると、炉心の損傷は津波到達以降、短時間で進展していると考えられ、停止後の初期段階において原子炉の冷却を行う設備である非常用復水器の状態が事象進展に影響を与えた可能性が考えられる。

非常用復水器に着目してまとめた経緯は以下の通りである。

参考：非常用復水器の概要（構成は【添付10-2】参照）

- ・ 非常用復水器は原子炉が隔離された際に原子炉を冷却するもので、原子炉から蒸気を取り出し、非常用復水器内に貯めた冷却水と熱交換することで蒸気を冷却して水にして原子炉に戻す設備で、福島第一1号機のみ設置されている。
- ・ 非常用復水器は、2系統（A系、B系）設置されており、原子炉の蒸気が循環する配管は4つの弁で構成されている。これらの弁は、非常用復水器入口側と出口側で格納容器を挟む形で各2弁ずつ設置されており、格納容器内側2弁は交流電源で駆動、外側2弁は直流電源で駆動する。
- ・ 通常、非常用復水器出口側にある格納容器外側の1弁（3A弁、3B弁）が閉まっており、残りは全開した状態で待機している。非常用復水器の起動・停止は、この3A弁、3B弁を開閉することによって行う。
- ・ 原子炉圧力は、当該弁を開閉操作して断続運転を行うことで制御される。

<非常用復水器に関する操作経緯>

3月11日、14時52分；非常用復水器の自動起動

外部電源の喪失に伴い非常用母線の電源が喪失したため、主蒸気隔離弁が自動閉し、非常用復水器2系統が「原子炉圧力高（7.13MPa [gage]）」により自動起動し、原子炉の減圧・冷却を開始するとともに原子炉圧力が下降を開始した。

15時03分頃；非常用復水器の手動停止

非常用復水器起動に伴う原子炉圧力の低下が速く、操作手順書で定める原子炉冷却材温度変化率55℃/hを遵守できないと判断し、非常用復水器の戻り配管隔離弁（MO-3A、3B）を一旦「全閉」とした。他の弁は開状態で、通常の待機状態とした。これにより原子炉圧力は再び上昇している。

その後、原子炉圧力を6～7MPa程度に制御するためには、非常用復水器は1系列で十分と判断、A系にて制御することとし、戻り配管隔離弁（MO-3A）を開閉することにより、原子炉圧力制御を開始している。

15時37分；電源の喪失

津波の浸水によって、1号機はすべての交流電源を喪失。また、直流電源も喪失した。このため、中央制御室の照明の他、監視計器や各種表示ランプも消灯し、非常用復水器は弁開閉表示の確認や操作ができない状態となった。

1 6 時 4 2 分頃；一時的な水位系復帰

1 6 時 4 0 分頃から 1 7 時頃にかけて、それまで見えなかった原子炉水位（広帯域）が一時的に確認（1 6 時 4 2 分 T A F（有効燃料頂部）+ 2 5 0 c m 相当）できるようになり、津波来襲前の水位より低下していることを確認した。

1 7 時 1 9 分；非常用復水器の現場確認の試み

中央制御室から非常用復水器に関する確認ができないため、非常用復水器の設置されている現場にある非常用復水器の冷却水である胴側の水の水位計レベルなどを確認することとなり、運転員が現場に向かったが、現場（原子炉建屋入口）の線量レベルが通常より高かったことから、1 7 時 5 0 分、一旦引き返した。

1 8 時 1 8 分；A系外側隔離弁用の直流電源の復帰／A系外側隔離弁の開操作

津波の影響で直流電源が一時的に不安定な状態にあったのか、その後、一部の直流電源が復活し、非常用復水器（A系）の供給配管隔離弁MO-2 A、戻り配管隔離弁MO-3 Aの「閉」を示す緑ランプが点灯（直流）していることを運転員が発見した。通常、開である非常用復水器の供給配管隔離弁（MO-2 A）が閉となっていたことから、「非常用復水器の配管破断」を検出するための直流電源が失われたことに伴い、安全側への動作として、「非常用復水器の配管破断」信号が発信され、非常用復水器のすべての隔離弁が閉動作したことが考えられたが、運転員は格納容器の内側隔離弁（MO-1 A、4 A）が開いていることを期待し、1 8 時 1 8 分、非常用復水器の戻り配管隔離弁（MO-3 A）、供給配管隔離弁（MO-2 A）の開操作を実施したところ、状態表示灯が閉から開となった。

運転員は、電源がなく監視計器が作動していないため、非常用復水器が動作していることを確認する手段がなかったことから、開操作後に非常用復水器ベント管から蒸気が発生したこと（原子炉の蒸気を冷却したクリーンな水が気化して大気に放出されていること）を、蒸気発生音と原子炉建屋越しに見えた蒸気により確認した。

1 8 時 2 5 分；A系外側隔離弁の閉操作

しばらくして蒸気が発生が停止したため、非常用復水器の戻り配管隔離弁（MO-3 A）を閉とし、非常用復水器を停止した。

また、中央制御室で操作可能な対応として、消火系による原子炉注水ラインの構成を進めた。

予想できない事象が次々と起こる中、運転員は蒸気発生が停止した原因として、格納容器の内側隔離弁（MO-1 A、4 A）が隔離信号により閉となっていることを考えたが、非常用復水器の冷却水である胴側の水が何らかの原因でなくなっている可能性を懸念した。運転員は非常用復水器が機能していないと考えるとともに、胴側への水の補給に必要な配管の構成ができていなかったことも考え合わせて、戻り配管隔離弁（MO-3 A）を一旦閉操作した。

2 0 時 5 0 分頃；消火系による原子炉注水ラインの構成

消火系による原子炉注水ラインの構成が完了し、ディーゼル駆動の消火ポンプを起動した。これにより、非常用復水器の胴側へ冷却水を補給できる見通しを得た。その後、運転員が非常用復水器の運転状態を確認したところ、非常用復水器の戻り配管隔離弁（MO-3 A）の閉状態表示灯が不安定で、消えかかっていることを確認した。

21時19分；原子炉水位計の仮復旧

今まで見えなかった原子炉水位がTAF（有効燃料頂部）+200mmを指示していることが判明した。

21時30分頃；3A弁の開操作（A系起動）

原子炉水位は燃料より上にあるものの、蒸気駆動の高圧注水系ポンプ（HPCI）の電源が消え起動ができない状況になっており、この時点で非常用復水器は作動が期待できる唯一の高圧系の冷却装置であった。通常であれば、胴側給水がなくても非常用復水器は10時間程度運転できること、ディーゼル駆動の消火ポンプが起動していることで非常用復水器胴側への給水にも対応できるようになったことから、胴側の水の不足の懸念は減ずる一方、非常用復水器が次はいつ操作できるか分からない状況であることも踏まえ、高圧系の冷却装置である非常用復水器が動作することを期待し、一旦は閉止した戻り配管隔離弁（MO-3A）を21時30分頃に再度開操作したところ弁は開動作し、蒸気の発生を蒸気発生音と原子炉建屋越しに見えた蒸気により確認した。なお、蒸気発生については、発電所対策本部発電班も免震重要棟の外に出て、確認している。

3月29日；非常用復水器の胴側水位計の復旧

非常用復水器の胴側水位計を復旧した。

4月1日；非常用復水器の弁の制御回路による弁開閉状態の確認

復旧作業の一環として非常用復水器の弁の制御回路の導通状態から弁の開閉状態の確認を実施した。格納容器の内側の弁については、事故時の加熱等の影響もあり確認できなかったが、格納容器の外側の弁については開閉状態を判定することができた。非常用復水器(A系)の3A弁、2A弁は開状態、非常用復水器(B系)の3B弁、2B弁は閉状態であった。

4月3日；非常用復水器、胴側水位の確認

中央制御室で非常用復水器の水位計の指示値を確認したところ、A系63%、B系83%であった。

10月18日；現場調査

現場における目視確認によって、非常用復水器の格納容器外側の状態を確認した。本体、主要配管に破損は認められず、弁状態は4月1日の回路調査の結果と同様であった。なお、非常用復水器の現場水位計がA系65%、B系85%であることが確認され、同じ日に中央制御室で確認した計器指示値と一致することが確認された。

以下に、上記経緯と先に述べた解析結果を踏まえた考察を記す。

<非常用復水器の地震直後の動作に関する評価>

- 「6.2 地震発生直後のプラント状況」で述べた通り、手順書で圧力容器保護の観点から原子炉冷却材温度変化率が $5.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ を超えないよう調整することとしており、また、手順書に基づき手動で適切な圧力制御を行っていることから、設備・操作ともに問題はないと考える。

<津波襲来後の非常用復水器の弁の状態>

- ・ 津波襲来時までの操作経緯から津波襲来時の弁の状況は、非常用復水器（A系）の3A弁は閉と考えられ、その他の3つの弁は全開であったと考えられる。B系については、3B弁が閉であり、その他の3つの弁は全開であった。
- ・ また、A系については、18時18分頃に操作していない2A弁が全閉であったことが確認されている。また、B系についても、4月1日に行った弁の回路調査結果から同じく操作をしていない2B弁が全閉である事が確認された。（このことは10月18日に現場の当該弁の開度計によっても確認されている。）以上、2A、2B弁ともに、津波到達前には開の状態であり、その後に操作していないにもかかわらず閉となっていたことが確認された。
- ・ 2A弁、2B弁の動作については過渡現象記録装置の開閉記録から最初の停止操作の時点まで確認でき、運転員が誤って操作した可能性は考えられない。一方、ロジック回路の構成から、ロジック回路の直流電源が喪失した場合には、インターロックが作動し、非常用復水器1系統あたり4弁あるすべての弁が両系統ともに自動的に全閉動作する仕組みとなっている。今回の場合、津波によってロジック回路の直流電源が喪失し、当該インターロックにより弁の閉動作要求が働いたと考えられる。【添付10-3】
- ・ なお、弁の全開から全閉間での動作に要する時間は、外側弁は15秒以内、内側弁は20秒以内である。津波による被水で直流電源が喪失したが、計測用の直流電源が津波浸水によって影響を受け、インターロックが作動してから、動力用の直流電源が喪失するまでの間に弁は自動的に閉動作する。
- ・ 閉動作中に動力用の直流電源が喪失した場合は中間開度となるが、前述の通り、2A弁、2B弁は全閉であることが確認できているため、津波の浸水により電源盤が被水したことで、非常用復水器の弁へ隔離信号が入り、動力用の直流電源が喪失する前に自動で全閉した蓋然性は高い。
- ・ また、格納容器内側の弁は動力が交流電源であるが、これらの弁は計測用の直流電源と交流電源の喪失したタイミングによって開閉状態が定まることとなる。格納容器内側弁の開閉状態を特定することはできないが、全開から全閉までのすべての可能性があり得る。
- ・ したがって、津波前の非常用復水器の運転状態が津波後の非常用復水器の運転状態を決定するものではない。【添付10-4】

<炉心損傷との関連について>

- ・ 非常用復水器は、津波に起因する電源喪失によって非常用復水器の自動隔離インターロックが作動し、操作もできなくなったことから、その機能を喪失した。事故解析コード（MAAP）の解析結果によれば、崩壊熱が大きい原子炉停止直後であったため短時間で原子炉水位が低下、炉心が露出（17時46分頃、有効燃料頂部へ到達）に至ったと考えられる。

- その後、非常用復水器（A系）の直流電源が復帰し、18時18分、非常用復水器（A）の隔離弁（3A弁、2A弁）を開け、蒸気が発生したことを確認、蒸気発生が止まったことから、18時25分に3A弁を閉止している。事故解析コード（MAAP）の解析結果から、この時点では既に炉心は露出しており、18時18分以降の非常用復水器の運転継続の有無に関わらず結果的には炉心は損傷するに至ったものと評価される。

<津波後の内側隔離弁の状態の推定>

- 10月18日に非常用復水器の現場確認を行い、現場に設置されている水位計によってA系65%、B系85%の水位であることが確認された。一方、中央制御室の指示計も同じ値であることが確認された。
- 中央制御室の水位計で読み取った非常用復水器の水位は現場の指示値と一致していることから、データ伝送は正確に行われていると考えられる。このことから、過去に読み取った中央制御室での指示値も現場計器の出力を示していると考えられる。
- したがって、4月3日に確認した中央制御室の指示値（A系63%、B系83%）も現場計器の指示を反映したものと考えることができる。これらの値は、10月18日の現場確認で確認された水位と異なっているが、4月以降、何らかの理由で計器指示値が2%程度変動したと思われる。
- 非常用復水器は、津波後の18時18分から18時25分、21時30分以降は3A弁を開けている。計器指示値の誤差等もあり厳密な推計は困難ではあるが、A系の水位計が示している水位からは、地震から津波襲来までの原子炉の発熱量に相当する水量以上を消費していると評価される。したがって、A系の内側弁は開度の特定はできないが開いていると考えられる。津波後の非常用復水器運転時にある程度の除熱が行われており、その結果として、指示値65%水位まで減少したものと考えられる。
- このことは、18時18分および21時30分に非常用復水器の3A弁を開けた際に非常用復水器ベント管から蒸気が発生したとの聞き取り結果とも整合する。
- しかしながら、胴側に相当量の水量が残っていることが示す通り、A系の非常用復水器による除熱は、結果として限定的なものであったと考えられる。

【添付10-5】

④プラント挙動に関するまとめ

- 非常用復水器は、津波に起因する電源喪失によって非常用復水器の自動隔離インターロックが作動し、その機能を喪失した。その後、短時間で原子炉水位が低下、炉心が露出（有効燃料頂部へ到達）して炉心損傷に至った。この間、電源喪失によりプラント状態の把握は困難な状況であった。
- 非常用復水器（A）の弁操作を11日18時18分、21時30分に実施しているが、解析結果より18時18分以降の非常用復水器の運転継続の有無に関わらず結果的には炉心は損傷するに至ったものと評価される。
- 一方、11日21時過ぎに仮設の電源により水位計を仮復旧したところ、原子

炉水位が有効燃料頂部を上回っているとの指示が得られたが、その時点ではこれが誤指示であることを総合的に判断するに足る情報が得られてない。緊急時対策本部（発電所、本店）では、この時点では非常用復水器が停止していたとの認識に至ることがなかった。11日23時頃に原子炉建屋二重扉前での放射線量の上昇、12日0時頃に初めて得られたドライウェル圧力の測定値が異常に高いことから、炉心損傷の可能性が認識された。

- 12日3時頃、原子炉の減圧操作を実施していないにもかかわらず原子炉圧力が減少しているが、これは炉心の損傷を起因として原子炉冷却材圧力バウンダリに損傷を生じた可能性を示しており、短時間で炉心の損傷が相当程度進展していたことを示唆している。
- なお、事後の事故解析コードによる解析結果によれば、地震後、有効燃料頂部到達まで3時間程度、炉心損傷開始まで4時間程度であり急速に炉心損傷まで進展するが、これは得られた実事象の動きと整合している。
- 圧力抑制室ベント時にはモニタリングカーの線量が一時的に上昇したが、バックグラウンドレベルの上昇は限定的であった。炉心損傷に伴い発生する水素が格納容器内で完全には保持されず、原子炉建屋に漏えいし、原子炉建屋の爆発の原因となったと推定される。

（2）福島第一2号機のプラント挙動

①解析による挙動の評価

MAAP解析による福島第一2号機の原子炉水位、原子炉圧力、水素発生量に関する解析値及び実機計測値（実際に計測された値）の事象進展の様子を以下に示す。

原子炉隔離時冷却系の運転期間中、解析では、原子炉隔離時冷却系が原子炉水位高（L-8）の自動停止と原子炉水位低（L-2）の自動起動を繰り返すことで水位を維持している。

14日13時25分に原子炉隔離時冷却系の停止を仮定したことから、以降、原子炉水位が低下する結果となっている。

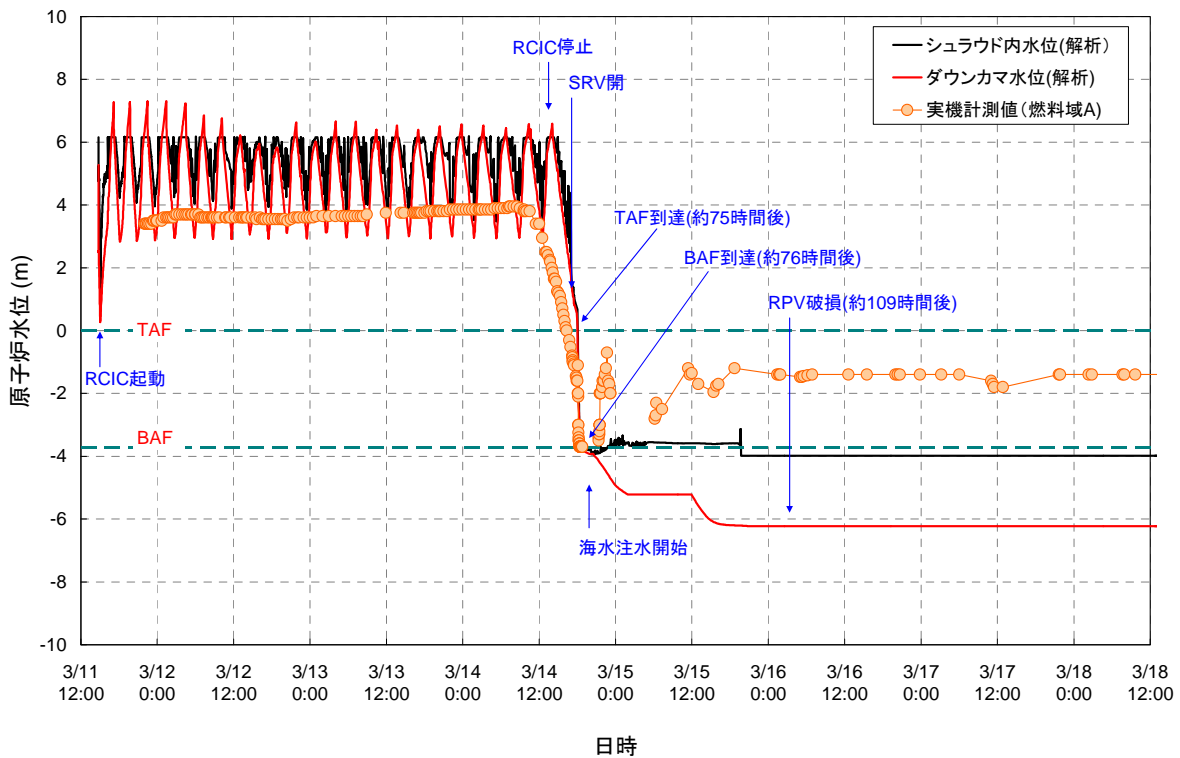
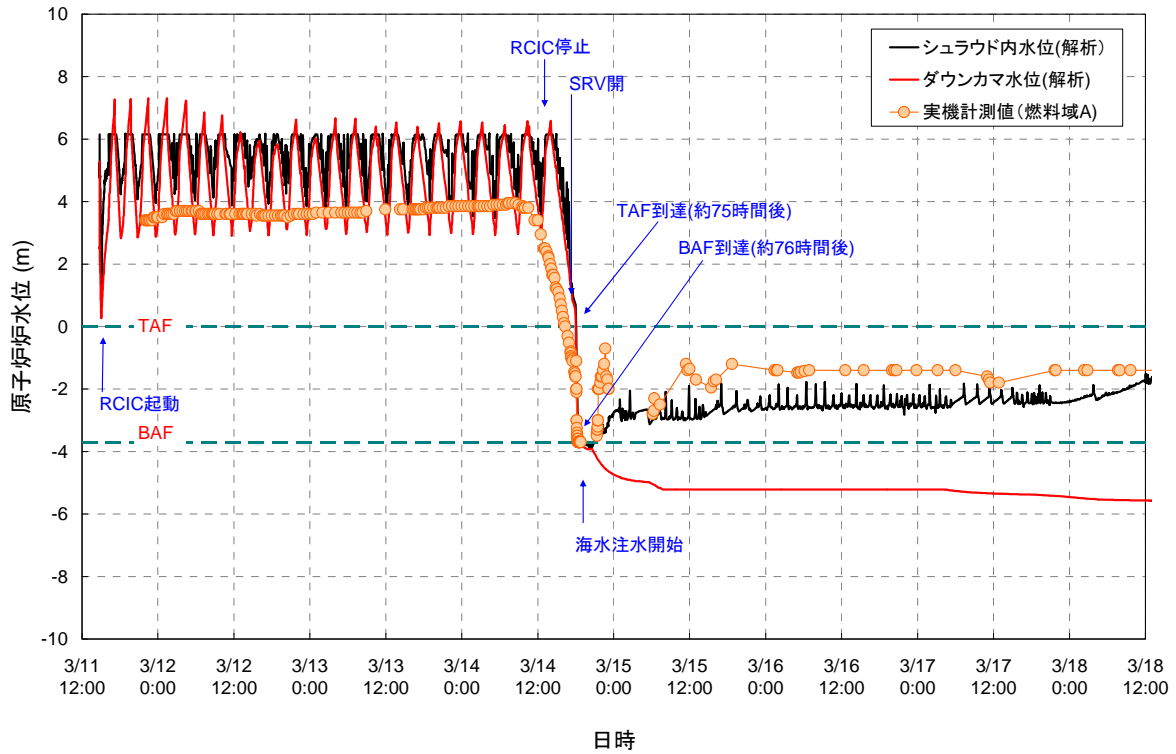
原子炉水位が有効燃料頂部（TAF）に到達する時刻は、地震発生（11日14時46分）から約75時間後であり、約76時間後には有効燃料底部（BAF）に到達する。

なお、14日19時54分に開始した海水注水について、水位計装の信頼性が確認できていないことから、次の2つのケースの解析を実施した。

【ケース1】原子炉水位の計測値は、燃料を半分程度水で浸す位置を指示していたため、解析で求まる原子炉水位が実機計測値と同等になるよう、原子炉への注水量を消防ポンプの吐出側流量計の指示値より少なめに調整したケース。

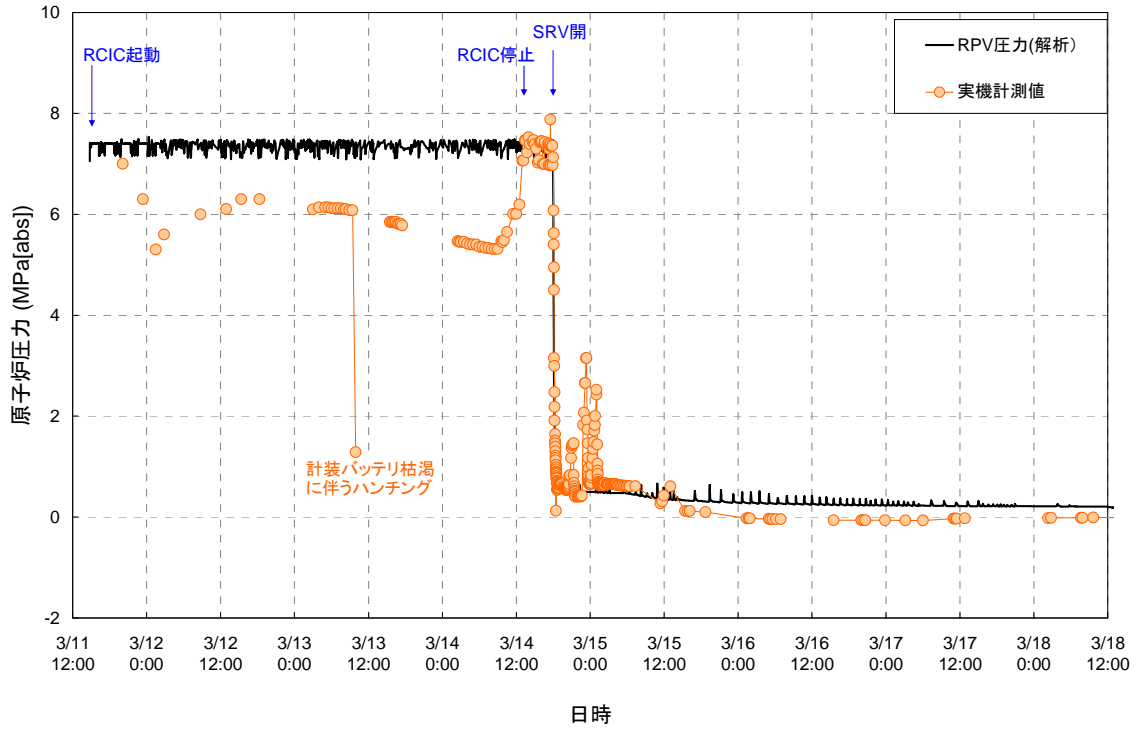
【ケース2】原子炉水位の計測値は、燃料を半分程度水で浸す位置を指示していたが、実際の水位はさらに低いものとして、燃料が完全に露出するよう、原子炉への注水量を消防ポンプの吐出側流量計の指示値より少なめに調整したケース。

燃料の露出がより多いケース2では、16日4時頃に圧力容器が損傷する。

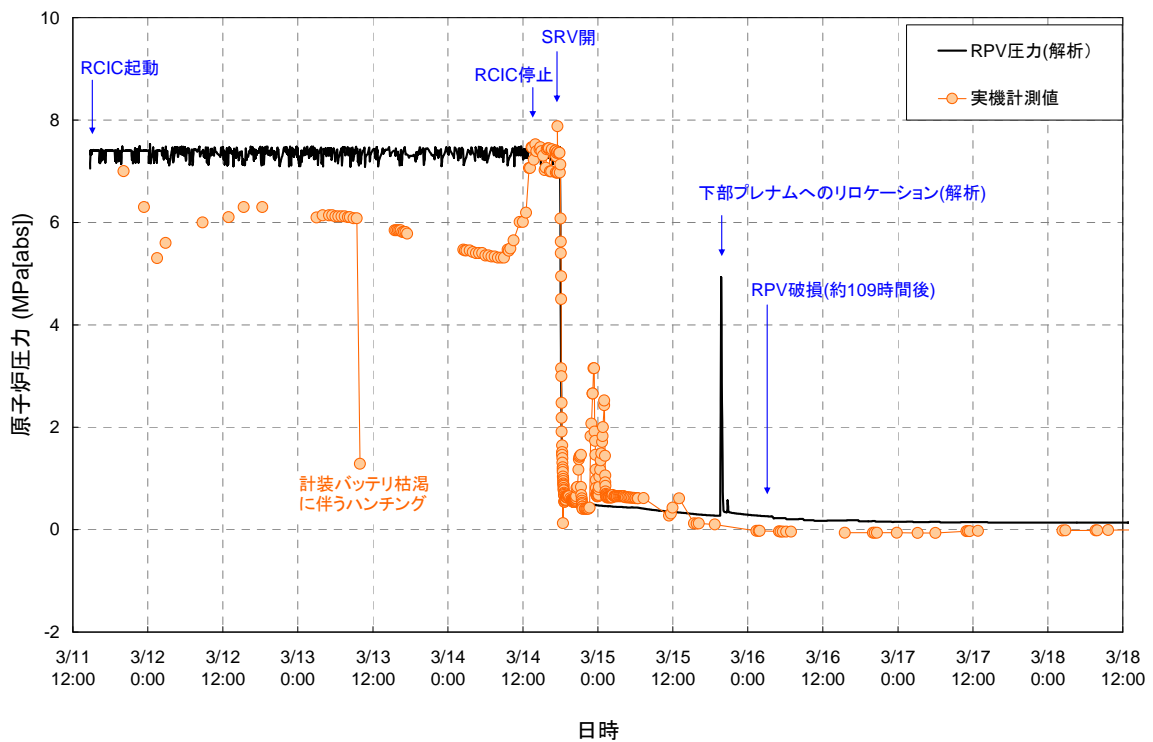


原子炉圧力の実機計測値は、原子炉隔離時冷却系の運転期間中、6 MP a [abs]程度の低い値を指示しているが、解析ではこの挙動を模擬できておらず、計測器の問題を含め現段階では原因は不明である。

実機において、14日18時頃に主蒸気逃がし安全弁を開操作していることにより、原子炉圧力は急速減圧され、1 MP a [abs]以下となった。解析においても原子炉圧力は同様の推移を示している。



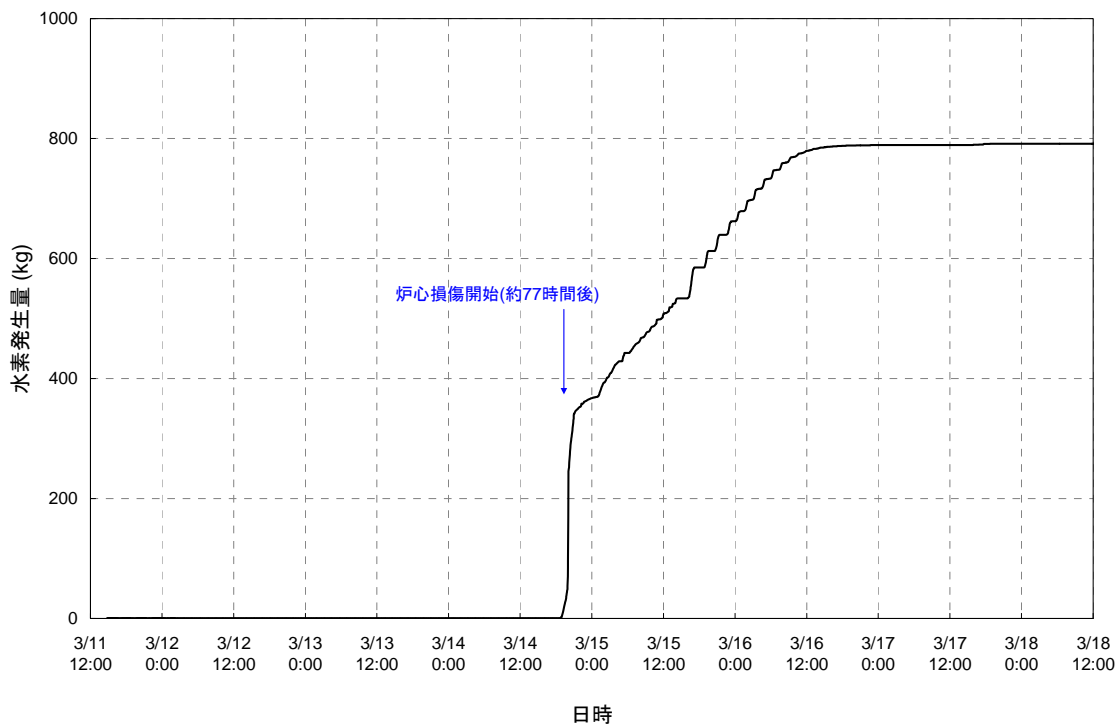
2号機 原子炉圧力変化【ケース1】



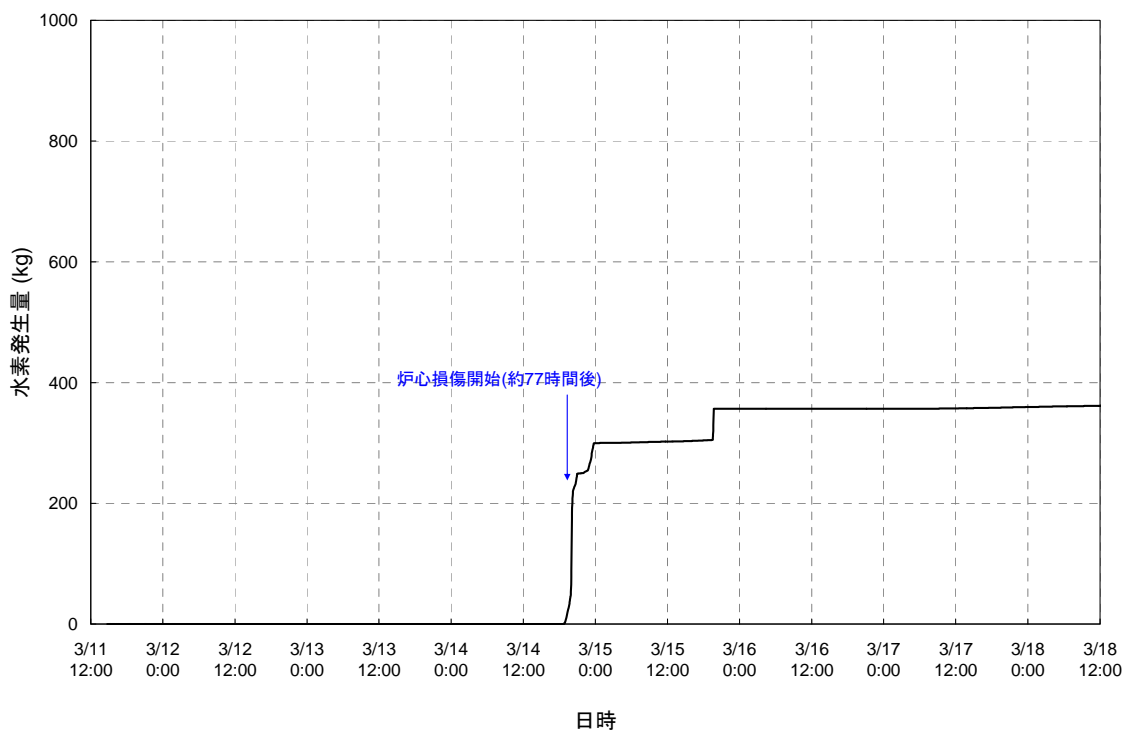
2号機 原子炉圧力変化【ケース2】

燃料温度が1200℃を超え炉心損傷が開始する時刻は、地震発生（11日14時46分）から約77時間後である。炉心損傷が始まるなど、燃料温度が上昇することに伴い、水-ジルコニウム反応により水素が発生している。

水素は、過熱した燃料被覆管等の形状がある程度維持されたところに水・蒸気が供給されると発生量が多くなることから、解析で算出された水素の発生量はケース1で約800kg、ケース2で約350kgとなっている。



2号機 水素発生量変化【ケース1】



2号機 水素発生量変化【ケース2】

②実機の挙動に関する評価

福島第一2号機の事故発生時の原子炉水位、原子炉圧力、ドライウェル圧力等のプラントパラメータのトレンドを【添付10-6】に示す。プラントの挙動の特徴として以下のポイントがあげられる。なお、《A》等の記号は、添付資料中のグラフの着目点を示す。

- 原子炉隔離時冷却系が津波後長時間機能したことから、14日朝まで原子炉水位は維持されている。《A》
- その後、原子炉隔離時冷却系の機能低下に伴って原子炉圧力は主蒸気逃がし安全弁（安全弁機能）の作動圧まで上昇している。
- この間に、14日11時頃から原子炉水位は低下し、その後、主蒸気逃がし安全弁から圧力抑制室に蒸気が逃げることで炉内の保有水量が減少し、さらに原子炉水位が低下して有効燃料頂部（TAF）を下回るに至っている。《B》、《C》
- その後、主蒸気逃がし安全弁を作動させて原子炉を減圧したが、低圧の注水が直ちに成功していないこと、また、原子炉の減圧に伴う圧力抑制室への蒸気流出によって生じる保有水量の急減で、結果として冷却が一段と悪化したことから、炉心の損傷が始まり14日22時頃からCAMS（格納容器雰囲気モニタ）の測定値が急昇している。また、ほぼ同時期にドライウェル圧力が上昇し始め、水素発生が始まっていることを示唆している。《D》、《E》、《F》
- 水位低下開始（14日11時頃）から、炉心損傷（14日20時頃）までの動きが比較的穏やかであるのは炉心の崩壊熱が減少しているためと考えられる。
- なお、原子炉水位計は原子炉内の水頭と原子炉の外の基準水面の水頭の差圧から水位を計測するものであり、炉心損傷による温度上で基準水面側が蒸発して低下すると実際の水位と異なった値を示すが、2号機も1号機と同様、6月23日に水位計の校正作業を行ったところ、燃料域内に水位がない可能性が示唆されており、炉心損傷後はMAAP解析結果の方が現実に近い挙動を模擬していることが考えられる。
- 14日22時頃より、ドライウェル圧力と圧力抑制室の圧力が乖離しており、これらの圧力の値に関する信頼性が疑われていたところ、15日6時過ぎに圧力抑制室の圧力が0 kPa [abs]（真空）を指示し、一方、ドライウェル圧力は7時20分時点で730 kPa [abs]を維持していた。なお、圧力計はダイヤフラム式等のシンプルな構造で測定の実験性は高いが、ドライウェルと圧力抑制室の圧力はほぼ同じ値になるものであり、圧力抑制室の圧力計の故障の可能性が考えられる。
- 次の測定である11時25分時点でのドライウェル圧力は155 kPa [abs]に低下しており、この間に格納容器内のガスが何らかの形で大気中に放出されたと考えられ、正門付近のモニタリングカーでの測定値が大幅に上昇した。

③プラント挙動のまとめ

- 2号機は、原子炉隔離時冷却系が比較的長時間機能していたため、炉心の崩壊熱は停止直後より小さくなっていたものの、高圧系（原子炉隔離時冷却系）の機能停止とともに原子炉水位の低下が始まった。

- 原子炉隔離時冷却系が停止した1時間20分程度後に消防車のポンプは起動しており低圧注水の用意は整っていたが、原子炉の減圧操作において主蒸気逃がし安全弁が直ちに動作しなかった。また、主蒸気逃がし安全弁が動作し原子炉の減圧が行えた時点で低圧注水が直ちに機能しなかったこと、また、原子炉の減圧に伴う圧力抑制室への蒸気流出によって生じる保有水量の急減で、結果として冷却が一段と悪化したことから炉心損傷を生じたものと考えられる。
- なお、事故解析コード(MAAP)を用いて解析を行ったところ、原子炉隔離時冷却系の機能低下に伴う原子炉水位低下により、炉心損傷が開始するという結果が得られている。
- この進展パターンは次に述べる3号機も同様である。また、15日7時過ぎから11時頃までの間に、格納容器内のガスが放出され、バックグラウンドレベルの上昇につながっている。

(3) 福島第一3号機のプラント挙動

①解析による挙動の評価

MAAP解析による福島第一3号機の原子炉水位、原子炉圧力、水素発生量に関する解析値及び実機計測値(実際に計測された値)の事象進展の様子を以下に示す。

原子炉隔離時冷却系及び高圧注水系の運転期間中、解析では原子炉隔離時冷却系が原子炉水位高(L-8)の自動停止と原子炉水位低(L-2)の自動起動を繰り返すことで水位を維持している。

なお、実機と解析とでは、原子炉隔離時冷却系、高圧注水系の動作及び原子炉圧力の挙動が異なっているが、いずれも原子炉水位は維持されており、炉心の状態変化を評価する観点から差異はない。

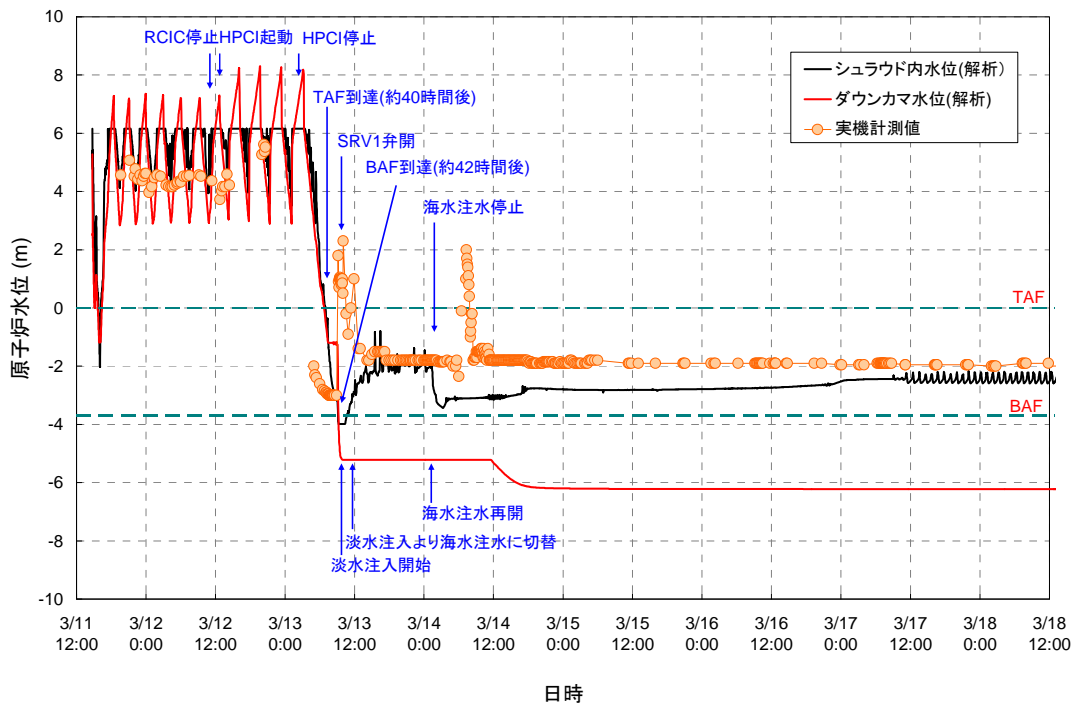
13日2時42分の高圧注水系停止に伴い、解析値、実機計測値ともに水位は低下している。解析によれば、原子炉水位が有効燃料頂部(TAF)に到達する時刻は、地震発生(11日14時46分)から約40時間後であり、約42時間後には有効燃料底部(BAF)に到達する。

なお、13日9時25分に開始した淡水注水およびそれ以降の海水注水について、水位計装の信頼性が確認できていないことから、次の2つのケースの解析を実施した。

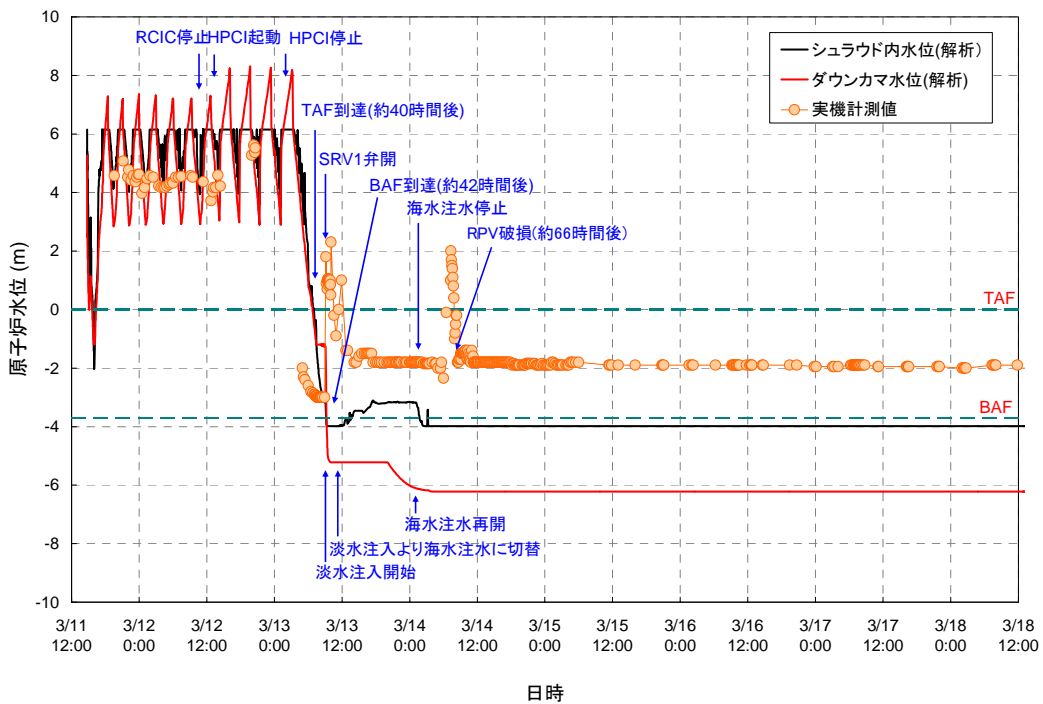
【ケース1】原子炉水位の計測値は、燃料を半分程度水で浸す位置を指示していたため、解析で求まる原子炉水位が実機計測値と同等になるよう、原子炉への注水量を消防ポンプの吐出側流量計の指示値より少なめに調整したケース。

【ケース2】原子炉水位の計測値は、燃料を半分程度水で浸す位置を指示していたが、実際の水位はさらに低いものとして、燃料が完全に露出するよう、原子炉への注水量を消防ポンプの吐出側流量計の指示値より少なめに調整したケース。

燃料の露出がより多いケース2では、14日8時頃に圧力容器が損傷する。

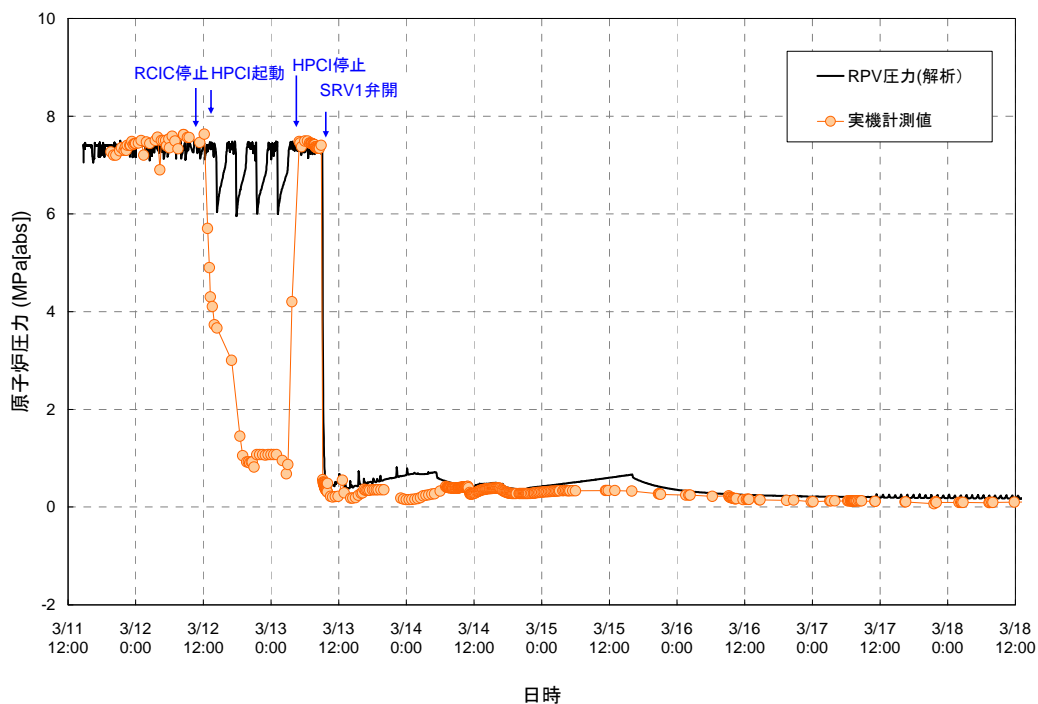


3号機 原子炉水位変化【ケース1】

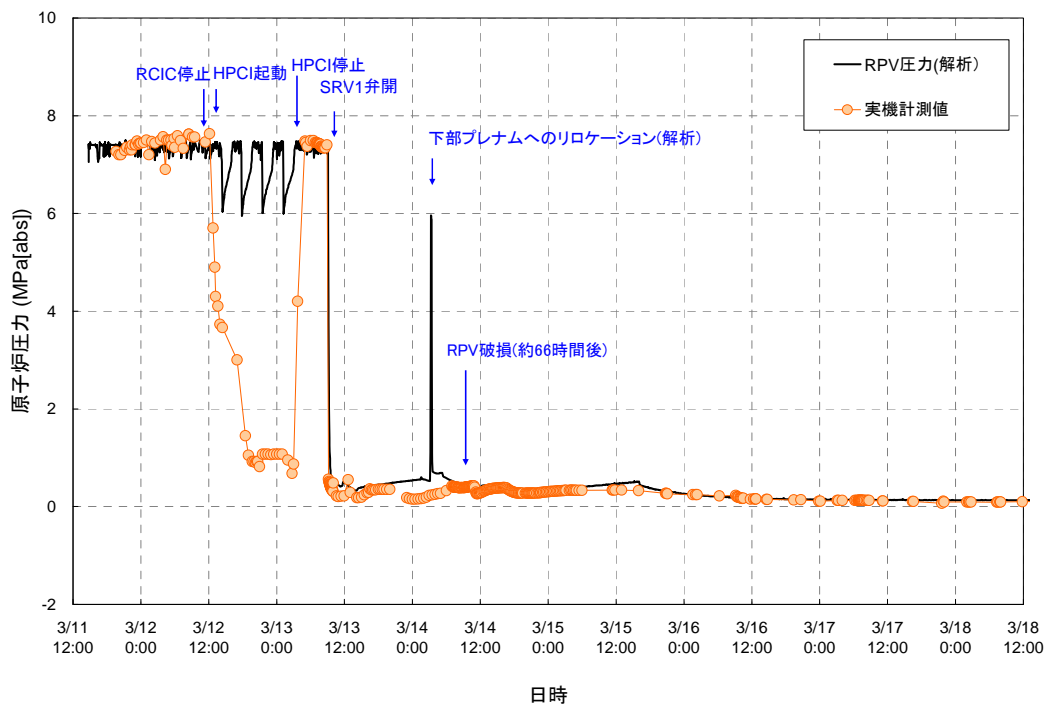


3号機 原子炉水位変化【ケース2】

13日9時08分頃、主蒸気逃がし安全弁を開操作しており、解析値、実機計測値とも原子炉圧力は急速に低下している。



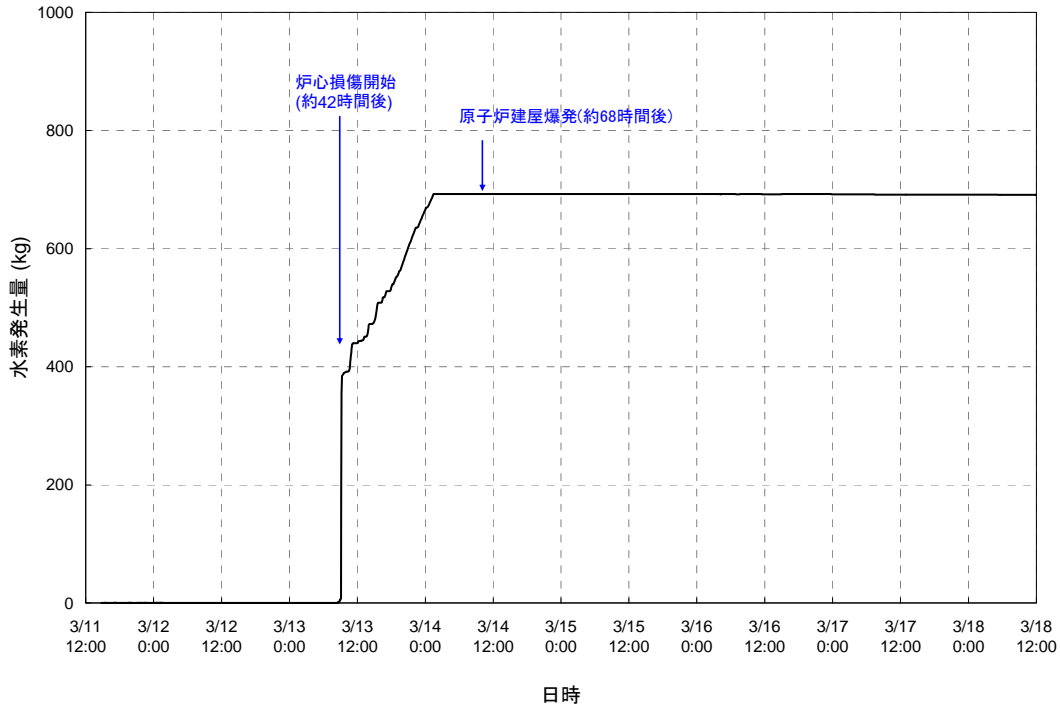
3号機 原子炉圧力変化【ケース1】



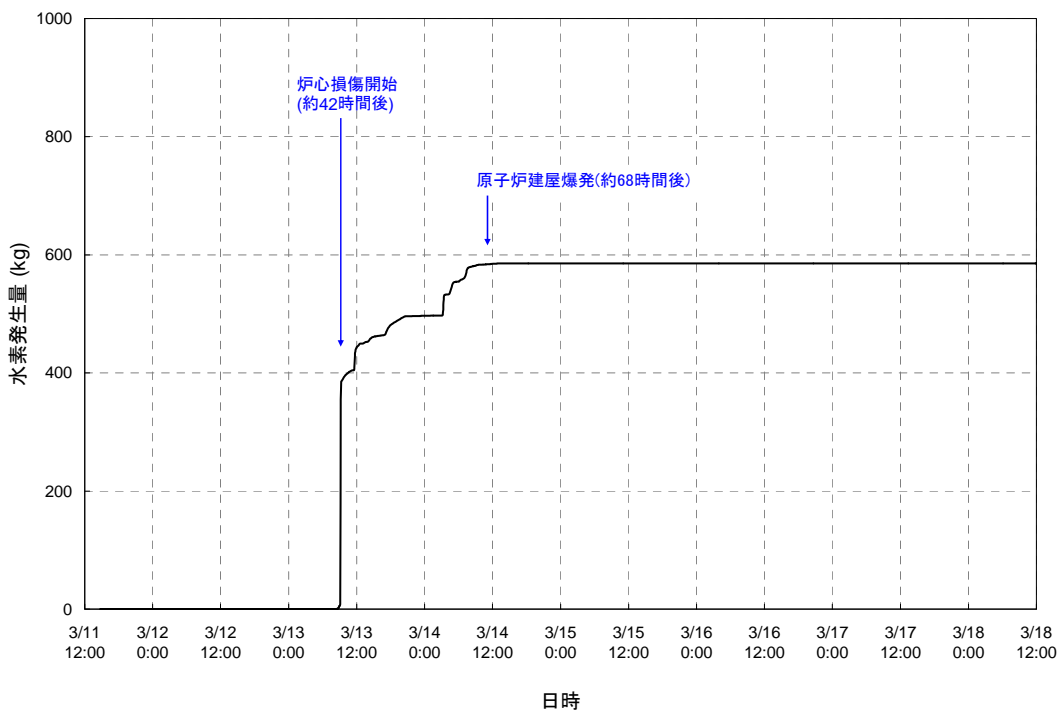
3号機 原子炉圧力変化【ケース2】

燃料温度が1200℃を超え炉心損傷が開始する時刻は、地震発生（11日14時46分）から約42時間後である。解析では、炉心損傷が始まるなど、燃料温度が上昇することに伴い、水-ジルコニウム反応により水素が発生している。

14日11時01分に原子炉建屋で水素によるものと思われる爆発が発生している。水素は、過熱した燃料被覆管等の形状がある程度維持されたところに水・蒸気が供給されると発生量が多くなることから、解析で算出された水素の発生量はケース1で約700kg、ケース2で約600kgとなっている。



3号機 水素発生量変化【ケース1】



3号機 水素発生量変化【ケース2】

②実機の挙動に関する評価

福島第一3号機の事故発生時の原子炉水位、原子炉圧力、ドライウェル圧力等のプラントパラメータのトレンドを【添付10-7】に示す。プラントの挙動の特徴として以下のポイントがあげられる。なお、《A》等の記号は、添付資料中のグラフの着目点を示す。

- ・ 事象初期において、1号、2号機の場合と異なり直流電源が機能していたことから原子炉水位（広帯域）が計測可能な状態であった（添付10-6の広帯域の原子炉水位計測値は有効燃料頂部（TAF）を基準（0mm）として換算表記している）。12日20時過ぎに電源が枯渇して計測が途絶えたが、13日に電源を仮復旧し計測（広帯域および燃料域水位計）を再開している。
- ・ 原子炉水位は、原子炉隔離時冷却系が12日11時半頃まで作動したこと、原子炉隔離時冷却系トリップ後に原子炉水位低（L-2）で高圧注水系が自動起動したことによって、揺らぎはあるものの有効燃料頂部（TAF）に対して十分な余裕を維持している。《A》
- ・ 原子炉圧力に関しては、高圧注水系の作動によって蒸気の消費量が増大したことなどにより低下しており、その後、13日2時42分の高圧注水系停止によりおよそ2時間で主蒸気逃がし安全弁の作動圧まで増加している。《B》
- ・ 高圧注水系が停止する直近の原子炉水位は電源が無く不明である。また、電源の仮復旧後は広帯域水位計、燃料域水位計（A）および（B）がそれぞれ異なった値を示しておりこれ以後の水位の判定は難しい。この時期の原子炉水位は事故解析結果の方が現実に近い挙動を模擬していることが考えられる。《C》、《D》
- ・ 13日9時過ぎに主蒸気逃がし安全弁を作動させて原子炉を減圧したが、高圧注水系の停止後に低圧の注水への切替えが直ちに成功していないことから、結果として冷却が悪化し、炉心損傷が始まったものと考えられる。また、原子炉の減圧に伴う圧力抑制室への蒸気流出によって生じる保有水量の急減で、結果として冷却が一段と悪化したことも考えられる。同時期に、ドライウェル圧力が上昇しており炉心損傷による水素発生が始まっていることを示唆している。《E》
- ・ なお、高圧注水系停止によって注水が停止したと仮定した事故解析コードによる解析結果では、およそ13日7時前に有効燃料頂部へ到達、9時前に炉心損傷開始との解析結果であり、ドライウェル圧力の測定値が9時頃に急増して炉心損傷開始を示唆していることと概ね整合した結果を得ている。
- ・ 13日9時頃に圧力抑制室からのベントを実施して以後、複数回の当該ベントを実施しており、正門付近のモニタリングカーの指示が一時的に上昇したものの、バックグラウンドレベルに大きな上昇は見られていない。
- ・ その後、14日11時頃、原子炉建屋が爆発したが、これは、炉心損傷に伴い発生した水素が原子炉建屋に蓄積し、何らかの理由で着火したことによるものと考えられる。

③プラント挙動のまとめ

- ・ 3号機は、ディーゼル駆動消火ポンプを起動して低圧注水の用意を整えていたが、原子炉圧力が注入圧力を上回り、高圧系（高圧注水系）の停止後に低圧の注水への切替えが直ちに成功していないことから、結果として冷却が悪化し、炉心の損傷に至った。
- ・ なお、圧力抑制室からのベントを実施して以後、複数回の当該ベントを実施しており、正門付近のモニタリングカーの指示が一時的に上昇したが、バックグラウンドレベルに大きな上昇は見られていない。
- ・ さらに、炉心損傷に伴い発生する水素が格納容器内で完全には保持されず、原子炉建屋に漏えいし、原子炉建屋の爆発の原因となったと考えられる。

(4) 福島第二1号機のプラント挙動

①実機の挙動に関する評価

福島第二1号機の事故発生時の原子炉水位、原子炉圧力、ドライウェル圧力等のプラントパラメータのトレンドを【添付10-8】に示す。プラントの挙動の特徴として以下のポイントがあげられる。なお、《A》等の記号は、添付資料中のグラフの着目点を示す。

- ・ 津波後、原子炉隔離時冷却系によって原子炉水位が維持されている。《A》
- ・ その状態で主蒸気逃がし安全弁によって、原子炉圧力を徐々に低下させ並行して低圧の注水系である復水補給水系を起動して待機させている。《B》
- ・ 主蒸気逃がし安全弁によって原子炉圧力を徐々に低下させることで復水補給水系が注水可能な圧力まで低下させ、復水補給水系によって原子炉水位維持ができる状態にして、原子炉隔離時冷却系を停止させている。《C》
- ・ この結果、原子炉水位は、通常水位付近を維持しており、シームレスに低圧系の注水に切り替えを行うことができている。《A》
- ・ ドライウェル圧力は、非常用海水系による除熱機能を喪失しているため徐々に上昇しており、3日目にはドライウェルの設計圧力に到達している。《D》
- ・ 3日目には非常用海水系の復旧がなされたため、ドライウェル圧力は減少に転じている。《E》
- ・ 仮に非常用海水系の復旧が更に延びた場合には、格納容器ベント操作によって格納容器圧力を下げることになるが、その準備は既に整えてあった。

②プラント挙動のまとめ

- ・ 福島第二1号機は炉心の健全性を維持でき冷温停止に成功しているが、同1号機の場合は、高圧注水（原子炉隔離時冷却系）が機能している間に低圧注水（復水補給水系）の運転を開始した。
- ・ その後、高圧注水によって水位を維持しつつ、減圧操作を徐々に行って低圧注水

が可能な圧力まで原子炉圧力を減圧し、低圧注水系からの注水を開始した。この間、原子炉水位を維持しつつ、シームレスに注水機能の切替えを行うことができている。

- ・ その後、残留熱除去海水系の電源復旧等により最終的な除熱先を確保し、冷温停止に至った。
- ・ なお、福島第二2、4号機の場合も基本的に同じ進め方で冷温停止に成功している。福島第二3号機は非常用海水系が1系統残ったため、通常の手順で冷温停止に至っている。
- ・ 以上、福島第二原子力発電所では、これまでに整備してきたアクシデントマネジメント策を有効に機能させることができプラントの安定化、冷温停止に至った。

(5) プラント挙動からの課題

全体の事象進展から以下のような特徴が明確であることから、炉心の冷却、損傷防止を確実に達成していくためには、これらの課題に取り組むことが重要と考える。

- ① 原子炉停止後の早期に高圧系の冷却・注水機能が喪失すると原子炉水位は急速に低下する。冷却・注水機能の喪失が炉停止後数時間以内の場合には、機能喪失後2時間程度で有効燃料頂部（TAF）に至る。高圧系の冷却・注水手段を喪失した後の事象進展は非常に早い。

高圧注水手段は事故発生後直ちに機能する必要があるとあり、本設設備で対応できることが重要となる。

→速やかに高圧注水設備による注水手段を確保すること

- ② 高圧系が作動している間のドライウェル圧力は緩やかに上昇するが、炉心の損傷が開始すると水素が発生することから、ドライウェル圧力の上昇は急速になる。2号機では格納容器雰囲気モニタの測定によって炉心損傷が開始した時点を特定できるが、ドライウェル圧力の急上昇の開始と整合している。また、原子炉圧力の減圧が行われた後にドライウェル圧力の急上昇が開始している。これは、減圧沸騰によって炉内の保有水量が急減するために、炉心の冷却が一段と悪化し、炉心損傷に至ったと考えられる。

したがって、原子炉圧力の減圧までに信頼できる低圧系を準備し、減圧による水位低下と注水量のバランスをとりながら低圧系へスムーズに切替えできることが重要となる。また、この際、主蒸気逃がし安全弁による減圧操作の操作性確保も重要である。

→高圧注水機能を喪失する前に減圧手段を確保すること

→減圧段階では、安定した低圧の注水手段が確保できていること

- ③ 先にも述べたが、福島第二1号機では高圧注水（原子炉隔離時冷却系）が機能している間に低圧注水（復水補給水系）の運転を開始し、高圧注水によって水位を維持しつつ、減圧操作を徐々に行って低圧注水が可能な圧力まで原子炉圧力を下げ、シームレスに注水機能の切替えを行うことができている。また、低圧の注水手段を確保して注水を維持している間に非常用海水系による除熱機能を復旧している。

福島第二1号機では、結果的に実施することはなかったが、ドライウェル圧力が高くなった場合に低圧注水とベント操作で格納容器から除熱（フィード・アンド・ブリード）が可能な状態にあった。このような対応が、悪条件下でも実現できることが重要である。

→**確実な格納容器ベント手段(熱の大気放出による除熱)を確保すること**
→**海水による冷却機能の復旧手段を確保すること**

- ④ 以上の操作を的確に実施するためには、プラントの状態を正確に把握することが重要である。福島第一1号機の場合、重大な状態変化の進行中に監視装置が機能喪失している。福島第一3号機においても高圧注水系の停止前の数時間直流電源の枯渇によって原子炉水位の監視ができていない。プラント状態の把握のみならず、注水系の切替え操作においても監視機能は重要である。

したがって、原子炉水位等の計測機能の確保が重要である。

→**以上の操作および状態監視に必要な計測ができる手段を確保すること**

10.2 設備・機能上の課題

(1) 機能喪失の状況【添付10-9, 10】

これまでに示した事故進展の過程から以下の進展ステップ毎に設備・機能上の課題を抽出する。

- ① 地震後の冷却の維持
- ② 高圧注水（冷却）の維持
- ③ 原子炉減圧による低圧注水系への切り替え
- ④ 非常用海水系による崩壊熱の除熱
- ⑤ ベントによる格納容器の除熱
- ⑥ 水素爆発の防止
- ⑦ 監視機能の維持

①地震後の冷却の維持

福島第一原子力発電所の場合は、外部電源が喪失しているが全号機との非常用D/Gによって電源供給が確保されている。また、福島第二原子力発電所の全号機とも外部電源が確保されている。したがって、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所のどちらについても、地震後の交流電源は確保されており、炉心の冷却機能は維持されている。

この段階においては、炉心損傷につながる要因は生じていない。

②津波後の高圧注水（冷却）の維持

福島第一1号機は、津波直後に非常用復水器の機能を喪失し短時間で炉心損傷に至ったと考えられる。非常用復水器は運転中に動的機器を必要としない設備であるため、故障停止の確率が小さい信頼度の高い設備であるが、直流電源の喪失によって機能が十分に発揮できない状態となった。また、バックアップのために高圧の注水手段である高圧注水系（HPCI）を起動することができなかった原因も直流電源の喪失である。直流電源が喪失した原因は津波の浸水によって電源盤が被水したことによる機能喪失である。

福島第一2号機は、津波襲来前に起動した原子炉隔離時冷却系が運転を継続したため高圧状態での注水が維持できている。しかし、直流電源は喪失しており、高圧注水系によるバックアップはできない状態であった。直流電源が喪失した原因は津波の浸水によって電源盤が被水したことによる機能喪失である。

福島第一3号機は、原子炉隔離時冷却系が機能し高圧注水が維持された。直流電源が残存していたことから、原子炉隔離時冷却系が機能喪失したことによる水位低下を検出して、高圧注水系がバックアップで起動し注水が継続された。ただし、高圧注水系が停止した以降、直流電源が枯渇し、原子炉隔離時冷却系や高圧注水系を再度起動させることはできなかった。直流電源が枯渇した原因は、バッテリーを充電するための交流電源が喪失していたためであり、交流電源喪失は電源盤の被水によって機能を喪失した。

以上、非常用復水器、原子炉隔離時冷却系、高圧注水系といった交流電源を必要としない高圧注水（冷却）機能の維持のためには、直流電源が必要であり、その確保が重要である。

なお、福島第一1号機の非常用復水器が、津波の影響で直流電源を喪失し隔離された事例については、結果として今回冷却機能を失うこととなったことから、在り方を整理・検討し、より柔軟な運用が可能か慎重に検討をする必要があるものとする。

③原子炉減圧による低圧注水系への切り替え

福島第一2号機は、高圧注水手段を喪失した時点において、原子炉を減圧し低圧の注水手段に切替える必要があった。しかしながら、本設の低圧系の注水設備は交流電源の喪失によって運転することができず、大型機器で冷却のために非常用海水系を必要とするものも、容易に使用できる状況ではなかった。さらに、単独での運転が可能な小型の復水補給水ポンプなども交流電源の喪失や当該設備の被水によって使用することができなかった。交流電源を喪失した原因は、津波によって電源盤が被水したことによる機能喪失である。

また、主蒸気逃がし安全弁による減圧操作が滞り、タイムリーな原子炉圧力の減圧が困難であった。操作が困難となった原因は、直流電源喪失により制御用の電磁弁の操作ができなかったためである。福島第一3号機の場合も、上記と同様である。

なお、ディーゼル駆動消火ポンプは電源によらない低圧の注水設備であるが、1号機、2号機の場合は、起動したものの津波浸水のため短時間で機能喪失した。3号機につい

ては、運転可能であったが原子炉圧力の減圧が困難であり、原子炉への注水はできなかった。

このため、仮設バッテリーの使用や消防車の使用といった代替操作が必要となった。

以上、主蒸気逃がし安全弁の機能確保のためには、直流電源の確保が重要である。また、信頼性の高い低圧の注水設備の確保が重要である。

④非常用海水系による崩壊熱の除熱

非常用海水系の除熱機能は、非常用海水系ポンプの本体モータへの津波の被水による機能喪失や、交流電源の喪失によって機能を喪失している。交流電源が喪失した原因は、津波によって電源盤へ被水したことによる機能喪失である。

福島第一1号機～3号機については、非常用海水系の復旧まで至る前に事故が進展し、炉心損傷に至っている。低圧注水の段階まで至ることに成功した福島第一5号機、6号機、福島第二1号機～4号機においては、非常用海水系のモータ復旧、仮設ポンプによる仮復旧および仮設電源による電源の復旧を行っている。低圧注水に成功し炉心の冷却が確保されたことによって、非常用海水系を復旧する時間的な余裕を確保できたためと考えられる。

以上、まず、低圧の原子炉注水を確実にして対応の時間的な余裕を確保すること、その上で非常用海水系の仮復旧の手段を予め用意することで対応の信頼性を上げることが重要である。

⑤ベントによる格納容器の除熱

炉心損傷に至った福島第一1号機～3号機については、格納容器の内圧の上昇のためベント操作が必要になった。ベント操作には、2つの弁を開ける必要があり、一つは電動駆動、もう一つは空気圧駆動である。電動駆動の弁は、交流電源喪失のため中央制御室から操作することができなかった。交流電源喪失の原因は、津波によって電源盤が被水したことによる機能喪失である。また、空気圧駆動の弁は、駆動用空気圧が低下したこと、および、駆動用空気を送り込む電磁弁操作の交流電源を喪失したため中央制御室から操作することができなかった。駆動用空気圧が低下した原因は、交流電源喪失による本設の空気圧縮機の機能停止によるものである。交流電源を喪失した原因は、津波によって電源盤が被水したことによる機能喪失である。なお、空気圧縮機の運転には冷却が必要であり、海水系による冷却機能も必要である。

以上、ベント経路の確保のためには、交流電源の確保、および、駆動用空気圧の確保を含む代替手段によるバルブ操作方法を予め用意することが重要である。格納容器ベントは、格納容器からの除熱機能を持つことから、炉心損傷防止のための低圧注水手段が確保された時点から、非常用海水系の除熱機能を復旧するまでの間の除熱機能として活用することが重要である。

なお、上記対策の実施により、確実に格納容器ベント操作はできると考えるが、低圧注水機能・除熱機能をより確実に確保するためには、ラプチャーディスクを積極的に作動させる方策についても検討する必要があるものとする。ただし、不用意な放出につながる可能性もあることから、慎重に検討を進める必要がある。

⑥水素爆発の防止

炉心損傷に至ったプラントは、原子炉内で水-ジルコニウム反応によって大量発生した水素が格納容器内に滞留した。この水素が何らかの経路で原子炉建屋へ漏えいし、建屋の爆発が発生したと考えられる。格納容器内は不活性ガスである窒素が満たされており、格納容器で爆発が生じていないことから、格納容器への窒素封入は機能したものと考えられる。一方、放射性物質の吸着フィルタを通して建屋換気を行う非常用ガス処理系（SGTS）も交流電源の喪失によって機能を失ったことから、原子炉建屋内に蓄積した水素を積極的に排出することができなかった。交流電源を喪失した原因は、津波によって電源盤が被水したことによる機能喪失である。

福島第一1号機と3号機の場合、水素爆発により建屋が損傷したが、福島第一2号機の場合は建屋での爆発は生じていない。建屋最上階のブローアウトパネルが1号機の爆発の際に開放されたことによって、2号機建屋内の換気が促進されたためと考えられる。

また、福島第一4号機では当該プラントでの水素発生は考え難いが、隣接する3号機のベント時に水素ガスが非常用ガス処理系配管を通じて回り込んで滞留し、これが爆発したものと考えられる。

水素爆発の防止については、原子炉建屋への漏えい経路等について更に検討する必要があると考えるが、福島第一2号機の事例から換気を促進することは爆発防止に効果があると考えられる。なお、炉心損傷を防止して水素発生自体を防止することが第一である。

⑦監視機能の維持

今回の事故では、原子炉水位、原子炉圧力など事故時の炉心の状態把握に必要な監視機能が喪失した。監視機能を喪失した原因は、直流電源と交流電源を喪失したことによるものであり、電源が喪失した原因は津波浸水によって電源盤が被水したことによる機能喪失である。

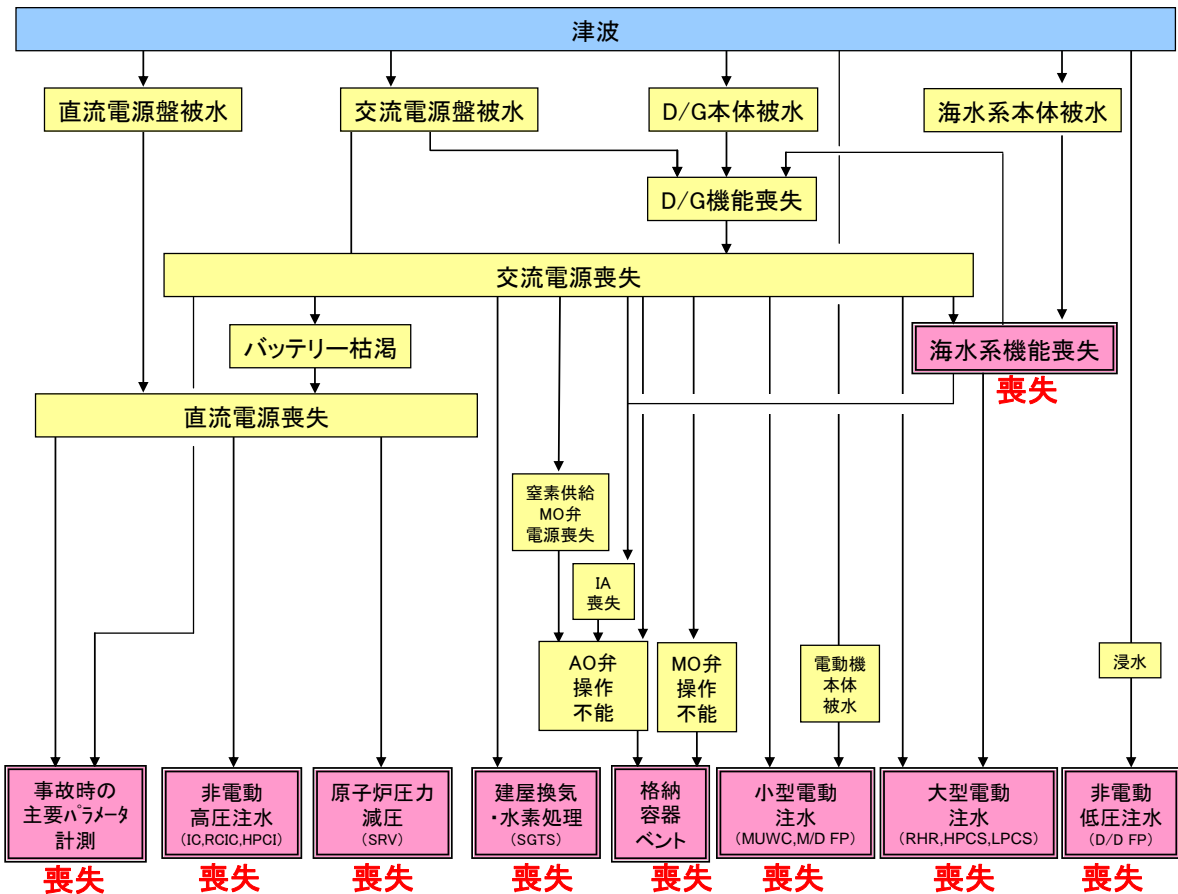
このため、事故時に重要なパラメータの監視に用いる計器の機能維持のためには、計器用電源を確保するための方策が重要である。

更なる安全性向上のためには、例えば今回炉心損傷後の原子炉水位計で実際と大きく指示が異なっていた事例を考慮し、単に水位計の精度の向上だけを目指すのではなく、事故時に必要な目的に応じた計測装置を研究、開発することで多様性を持たせていくことが必要であるとする。

(2) 設備・機能上の課題のまとめ

今般の事故進展をふまえた重要な機能の喪失に至る要因の相関を以下に示す。今回の事故は津波による浸水を起因として、多重の安全機能を同時に喪失したことによって発生しており、「長時間におよぶ全交流電源と直流電源の同時喪失」と「長時間におよぶ非常用海水系の除熱機能の喪失」がその要因である。

なお、交流電源や直流電源が使用不能な場合に備え、隣接号機から電源を融通できるよう備えていたが、今回の事故では、津波の直接被害は広範囲に及び隣接号機も同様の状況であった。



炉心の損傷防止・影響緩和に重要な機能の喪失に至った要因

従って、事故から抽出される設備・機能上の課題については、上述の「10.2 設備・機能上の課題」における②から⑦の機能確保を確実にするとの観点から以下のように整理できる。津波に対しての設備への浸水防止による機能維持の対策、電源や除熱機能を長時間喪失した場合の機能確保のための代替策を検討する必要がある。

- ・ 施設周囲への津波浸水の防止によって重要施設・機能への影響を低減する。
- ・ 高圧注水機能、必要な監視計器を維持するために、直流電源盤、バッテリー設備を確保する。
- ・ 主蒸気逃がし安全弁による原子炉の減圧機能を維持するために、直流電源盤、バッテリー設備を確保する。

- ・ 低圧の注水機能を維持するために、非常用電源設備（非常用D/G、非常用電源盤（交流））および必要な低圧注水設備を確保する。
- ・ 格納容器ベント操作に必要な弁の駆動源を維持するために、非常用電源設備（非常用D/G、非常用電源盤（交流））、駆動用空気圧を確保する。
- ・ 崩壊熱除去、補機の冷却を維持するために、非常用電源設備（非常用D/G、非常用電源盤（交流））、非常用海水系の冷却設備を確保する。
- ・ 非常用ガス処理系の機能を維持するために、非常用電源設備（非常用D/G、非常用電源盤（交流））を確保する。
- ・ その上で、「直流電源」、「交流電源」および「非常用海水系の除熱機能」を喪失した場合でも炉心損傷を防止できるための機能の代替策

10.3 事故対応を困難にした障害要素からの課題

津波によって福島第一原子力発電所では建屋設置エリア全域にわたって浸水した。それによって、照明、プラント監視計器、通信連絡手段、原子炉冷却のための機器等、事故対応に不可欠な機能がほぼ完全に喪失した。

このような事態は事前の想定（対応体制、手順書等の前提）を大きく外れる事態であり現場対応（オペレーション）は困難を極めた。また、複数の号機で同時にプラント状態が刻々と悪化し、作業の障害が増加するという緊迫した状況に直面した。

そのような中、発電所はこれまでに培ってきた知識、経験等を背景に、プラントの安定化に向けて原子炉への注水、格納容器ベント操作等に関し臨機な対応策を考案し、劣悪な現場環境下でそれらを遂行した。以下に対応上の重要操作である原子炉への注水、格納容器ベントに関連して、発電所が直面した課題（作業障害の増加等）を整理する。

（1）原子炉冷却、注水機能喪失

津波による電源、海水（冷却）系喪失等により、通常の給復水系はもとより、非常用炉心冷却系、復水補給水系等の代替注水系に至るまで、原子炉の冷却、注水に使用可能なほとんどすべての機器が機能喪失した。

事故発生初期（事故発生から数時間～数日）においては、非常用復水器（1号機）、原子炉隔離時冷却系（2号機）、原子炉隔離時冷却系、高圧注水系（3号機）が稼働したものの、その後は消防車等を利用した代替注水が実質的に唯一の注水手段となった^{注)}。

消防車からの原子炉注水を行うためには、原子炉を1MPa程度以下に減圧する必要があったが、減圧に使う主蒸気逃がし安全弁についても電源（直流）喪失により開けられない状況であった。消防車を利用しての注水、バッテリーやコンプレッサー、窒素ボンベなどの調達、接続による主蒸気逃がし安全弁の開操作での原子炉減圧などはいずれも臨機の対応であった。

注) 3月27日（2号機）、28日（3号機）、29日（1号機）以降、仮設電動ポンプで注水実施

(2) 格納容器除熱機能喪失（ベント不能）

アクシデントマネジメントとして整備していた格納容器ベントのためのライン構成を行うには電動弁と空気作動弁の操作が必要であったが、電源喪失及び空気作動弁駆動用圧縮空気の喪失によりこれらの弁が駆動できず、通常の操作ではベントラインの構成が不能な状況であった。そのため、電動弁については現場で手動により開操作を実施した。

また、空気作動弁については、発電所員が工夫を凝らして仮設の交流発電機、空気圧縮機またはポンペを接続して開操作（ベント操作）を実施した。

(3) 臨機の対応

上記のとおり、事前に整備されていた手順書を記載通り遂行したのでは対応できない状況に直面し、臨機の対応策を考案しつつ原子炉注水、格納容器ベント等、必要なプラント操作を実施する必要が生じた。

(4) プラント監視機能（放射線監視、気象観測含む）（監視機能喪失）

プラント監視： 中央制御室には原子炉水位等のパラメータ毎に複数の監視計器が備えられていたが、津波によって、直流電源も含めほとんどすべての電源を喪失したことでこれらを利用したプラント監視ができなくなった。

また、弁の開閉表示等の機器状態表示も失われたことから、中央制御室での機器状態の把握が困難になった。

原子炉水位、原子炉圧力、格納容器圧力等、一部の計器についてはバッテリー等を接続して指示を確認できるようにしたが、読み取り作業自体に手間がかかり、得られる情報は種類、頻度共に限定的であった。さらに、通常の使用環境条件を大幅に超えている状況で使用されている計器もあったことから、単独の計器指示からはプラント状況の把握が困難なケース（原子炉水位計等）もあった。

放射線監視： 津波後の電源喪失により主排気筒モニタ、プラント建屋内のエリアモニタ、発電所敷地境界付近に設置されたモニタリングポスト等の放射線モニタ設備は稼働不能となった。このため、放射線測定車、可搬式放射線測定器を活用し線量把握につとめた。

主排気筒放射線モニタが機能を失っていたために、格納容器ベント成功（ラプチャーディスク開放）についてタイムリーでかつ感度の高い情報が得られない状況であった。

気象観測装置： 風向、風速等を観測し、オンラインで表示するシステムが設置されていたが、津波後の電源喪失により稼働不能であった。

このため、格納容器ベントに際しての線量予測・評価にあたっては風向、風速等に関し代替値（例えば福島第二原子力発電所データ）を使用する必要があった。

(5) 通信連絡設備（通信連絡手段喪失）

発電所構内連絡用として一般に使用されていたPHS、有線ページング設備（プラント内固定通話装置、拡声装置）とも、地震直後は使えていたが、その後の電源喪失等の影響で使用不能となった。このため、現場との情報連絡（中央制御室と現場、免震重要棟（発電所対策本部）と現場間の連絡）が困難な状況となった。

消防車搭載無線機等が使えた一部の場合を除き、現場に出向した対応者が戻って状況報告するまでは情報が得られない状況となった。

さらに、事故時にプラント状況を伝達する緊急時対応情報表示システム（SPDS）については、プラント側の電源喪失により伝送すべきパラメータが無いため機能しなかった。中央制御室と免震重要棟間も使用できた連絡手段はホットラインと固定電話のみであった。

このため、現場から得られる情報（プラント情報、操作状況）が大きく制限されただけでなく、限られた情報の入手にも時間を要した。

(6) 作業環境の悪化（津波瓦礫、照明喪失、放射性物質放出、爆発の被害）

余震、津波のリスク、津波瓦礫による屋外作業の障害のほか、全交流電源の喪失によって、中央制御室、建屋内、ヤードの照明が喪失したことにより、作業の困難性が増加した。また、放射性物質の放出の影響で中央制御室、建屋内外の作業環境が加速度的に悪化していく状況であった。

また、建屋の爆発により負傷者がでた他、敷設した送水ホースやケーブル等が損傷し手戻りが生じるなど対応作業は極限的状況下で行われた。

10.4 分析と課題の抽出に関するまとめ

福島第一1号機～3号機が炉心損傷に至った原因を総括すれば、号機間で若干の差違はあるものの、概略以下のように取り纏めることができるものと考えられる。

- ・ 原子力発電所の設計にあたっては、機器の単一故障を想定した事故に対して、多重性や多様性及び独立性を持たせた非常系の冷却設備等を設置してきた。
一方、津波に対しては、その時々最新の知見を設計に反映しながらも、建屋敷地の高さには十分な余裕があるものと考え、建屋敷地レベルに津波が遡上し、機器の多重故障を起こす要因になり得るとは考えていなかった。
- ・ このような状況下において、マグニチュード9.0の世界の観測史上4番目の規模となる巨大な地震が発生し、それに伴って高さが13mにもおよぶ高い津波を発生させた。この津波は福島第一原子力発電所の建屋敷地レベルにまで遡上し、建屋の空気取入口や搬入口等を破壊し、機器の設置されている建屋内に流入してきた。

これにより、屋外に設置されていた機器はもとより、建屋内に設置されている機器、特に非常用D/Gや電源関係の機器がその機能を喪失した。さらに、制御や計測等に必要の直流電源についても、3号機を除いて失うこととなった。

- このように、1号機～3号機は、電源を喪失したため、安全への備えとしてきたすべての電動機駆動の機器がその機能を喪失した。
- 安全への備えとしては、この他にも蒸気を駆動源とする高圧注水系、原子炉隔離時冷却系や非常用復水器があったが、制御に必要な直流電源の持続時間の問題や浸水による機能喪失の問題から、蒸気を駆動源とする注水系を使った対応時間にも限度があったため、それまでに原子炉圧力の減圧や原子炉圧力が低い状態時に使用する低圧注水設備が必要となった。なお、最終的には原子炉内の崩壊熱を除熱・冷却するための設備が必要となる。
- 本来の目的を低圧注水設備として整備した機器は、全交流電源喪失により機能を喪失したが、更なるプラントの安全性向上を目的に、いわゆるアクシデントマネジメント策としてその能力を活用すべく整備したディーゼル駆動消火ポンプも、原子炉への注入ポンプ（代替注水）として利用を図ったが、屋外配管が津波により損傷を受けていたことや浸水等により、十分な機能を発揮することなく機能を喪失した。
- このように今回の津波は、発電所の安全への備えの機能をことごとく奪ったために、発電所の対応を行った当社社員や関係企業の方々は、満足な設備の無い中での対応を余儀なくされ、結果的に事象の進展に追いつけず、炉心損傷に至ってしまった。
- なお、アクシデントマネジメントで整備した設備を利用しつつ、消防車による原子炉への注水や仮設の空気圧縮機や自動車用のバッテリーを活用して格納容器ベントを行うなど、臨機かつ直接的に安全設備を操作する応用動作により、炉心やプールの冷却を行ったが、この対応はその後の事故の更なる拡大を防止する観点で、対応それ自体としては、その方向性は正しかったものとする。
- 一方、福島第二原子力発電所の各プラントは電源喪失を免れ、原子炉隔離時冷却系で原子炉へ注水しつつ、主蒸気逃がし安全弁で原子炉を減圧し、津波浸水による機能喪失を免れた復水補給水系ポンプで原子炉へ注水することができた。
- また、福島第一5号機及び6号機は、定期検査期間中であり崩壊熱が小さかったことに加え、6号機の電源を有効活用でき、低圧注水できる復水補給水系ポンプが津波浸水の影響を免れた。これらのプラントは、運転状態から停止した福島第一1～3号機に比較して事象進展の速度が相対的に遅かったこともあり、燃料の冷却に成功している。
- このように、これらのプラントが燃料冷却等に成功した要因は、代替注水、電源融通を含めた電源の確保等、ほぼ事前に想定した事象の対応の考え方に沿って対応できたことや、新潟県中越沖地震の教訓として免震重要棟を当社のすべての原子力発電所に設置していたことなどが挙げられる。

- 特に免震重要棟は、緊急時対応のために設置した免震構造の施設で、震度7クラスに耐える設計としており、通信設備、TV会議システム、自家発電設備や高性能のHEPAフィルタ付きの換気装置などを装備し現地事故対応の拠点となったが、仮に本施設がなければ福島第一原子力発電所の対応は、継続不可能であった。



免震重要棟外観



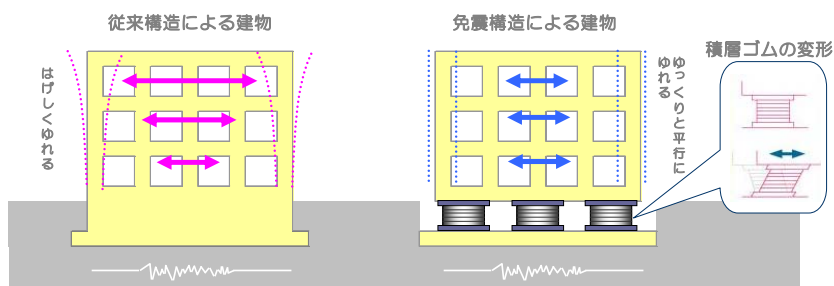
免震重要棟内



免震重要棟入口



積層ゴム



これまで国と一体となって安全確保の整備を行ってきたが、以上述べてきたように、今回の事故は津波を起因として全電源の喪失が長時間に及び、これまでの安全確保の取り組みの前提を大きく外れる事態に至ったことで発生した。この結果、多重に備えていた安全機能がほぼすべて喪失した。

今般、想定を超える津波による浸水被害で多重の機能喪失に至ったことを踏まえ、今回と同様の事故を起こさないためには、今回の事故時の挙動と現場対応の困難さから得られた対応を具体化した津波対策を徹底することが重要である。

《11章の対応方針1へ》

また更に、津波以外の何らかの要因によって、崩壊熱除去が困難となる場合に対しても対応策を検討し備えを講じることが既存の原子力発電所の安全性向上にとって重要であると考えられる。

今般、全電源の喪失が長時間に及びこれまでの安全確保の取り組みの前提を大きく外れる事態に至ったことを踏まえ、「長時間におよぶ全交流電源と直流電源の同時喪失」と「長時間におよぶ非常用海水系の除熱機能の喪失」による多重の機器故障や機能喪失があったとしても、炉心損傷に至ることを未然に防止する応用性・機動性を高めた対策を講じておくことが必要である。

《11章の対応方針2へ》

事故進展の状況及びプラント挙動から見て、炉心・燃料の損傷へ事故を進展させていく物理的な駆動力は燃料の崩壊熱であり、これは停止後の時間とともに減少するものの、停止後も発生し続ける。従って、事象進展を停止するためには、崩壊熱に応じた注水・冷却手段を復旧する以外に対策はない。一旦炉心損傷が生じると影響の広がりや速度は速く、

また、予想できない事態を生じることとなり、放射性物質・水素ガスの拡散・滞留が復旧作業自体を困難にしていくため、第一義的に炉心損傷に至らないようにすることが重要である。

また、実績から示される事項として、津波後の炉心冷却の成否については高圧注水設備による燃料冠水維持の有無、減圧し低圧注水に切替える状態であったか否か、これらの運転操作に必要なパラメータを運転員が利用できたか否かが重要なポイントとなる。すなわち、高圧注水設備が機能している間に準備を整え、低圧注水設備で安定した注水に持ち込めたか、これらで原子炉の安定を維持している間に最終的な除熱・冷却の設備を復旧する対応をとることができたか等が最終的な結果に影響することとなる。今回の場合には、津波による被災後でも、結果的に注水機能等を維持または復旧できたプラントにおいてはプラントの冷温停止に成功し、様々な悪条件により注水機能等を準備できなかったプラントは炉心損傷に至った。

従って、当社が対応策を整備するにあたっては、対応のための環境条件が悪い場合であっても、炉心の注水・冷却が切れることなく確実に実行できるようにしなければならない。すなわち、以下が達成すべき事項である。

- ① 速やかに高圧注水設備による注水手段を確保すること
- ② 高圧注水機能を喪失する前に減圧手段を確保すること
- ③ 減圧段階では、安定した低圧の注水手段を確保できていること
- ④ 確実な格納容器ベント手段（熱の 대기放出による除熱）を確保すること
- ⑤ 海水による冷却機能の復旧手段を確保すること
- ⑥ 以上の操作および状態監視に必要な計測ができる手段を確保すること

1 1. 事故原因を踏まえた今後の対応

1 1. 1 炉心損傷防止のための対応方針

本報告書は、福島第一原子力発電所の事故をふまえ、既存の原子力発電所の安全性向上に寄与するために、必要な対策を提案することを目的の一つとしている。

今回提示する対策は、炉心損傷の結果として様々な厳しい事象が発生したことに鑑み、同様の事態を再び招かぬよう、炉心損傷を未然に防止するための技術課題への対応を中心としている。

安全確保の考え方としては、異常の発生防止、拡大の防止、影響の緩和という目的で整備された既存の安全設備が津波を起因として多重故障に至ったという事実をふまえ、先ず多重故障の要因となった津波による電源喪失や非常用海水系の除熱機能喪失に対する徹底した設備防御の対策を検討する。

また、津波に限らず何らかの理由で多重故障の要因となり得る電源喪失や非常用海水系の除熱機能喪失が発生したとした場合でも、炉心の損傷を防止するための対応力を備えるという観点からの対応方針を検討する。この際には、今回の事故時の経過からも示された炉心損傷を防止するためのサクセスパスを実現するという観点から検討する。

更に、炉心損傷防止策に留まることなく、安全性向上の継続的改善の観点から炉心損傷発生を敢えて仮定した上で、その際の影響を緩和するための技術課題も検討していく。

なお、津波等の「外部事象」の想定のある方に関しては、今後十分な検討が必要な課題と認識しているが、ここでは自然現象に含まれる大きな不確定性を考慮し、設計想定を超える福島第一原子力発電所に襲来した津波規模を念頭に検討を進めた。

以上を踏まえ、以下の対応方針のもとで対策を立案することとした。

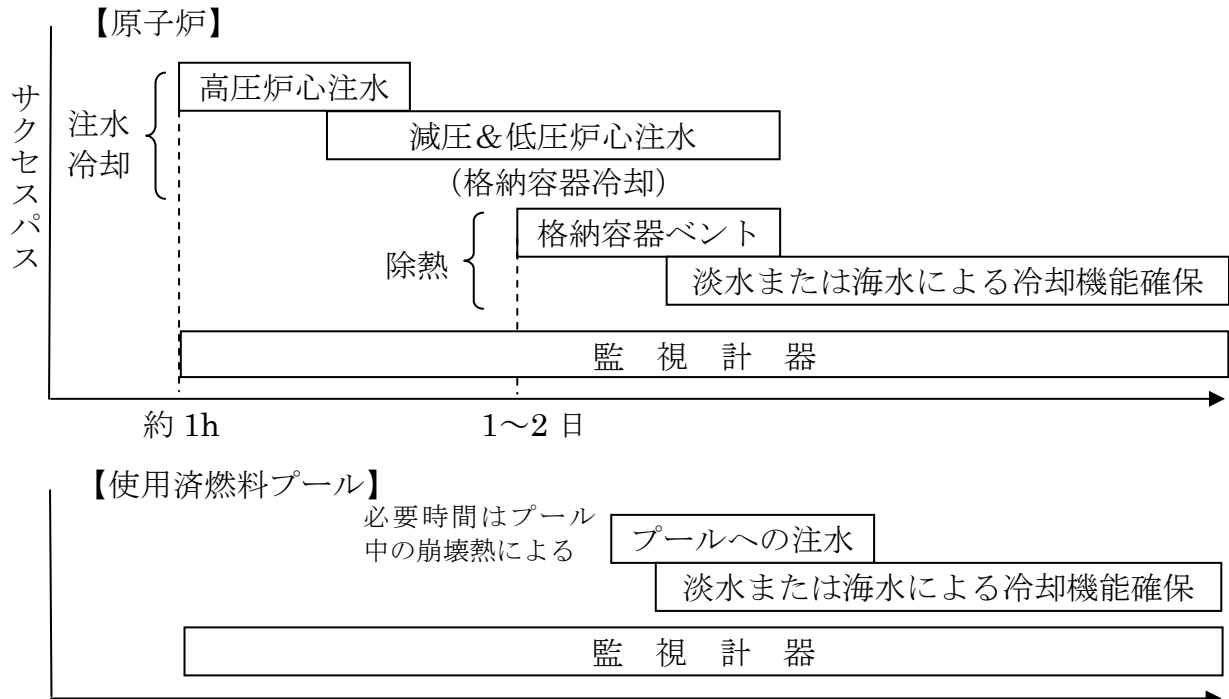
対応方針 1：事故の直接原因である津波に対して、津波そのものに対する対策のほか、今回の事故への対応操作やプラント挙動からの課題を踏まえた原子炉注水や冷却のための重要機器に対する徹底した津波対策を施すこと

対応方針 2：今回の事故のような（「長時間におよぶ全交流電源と直流電源の同時喪失」や「長時間におよぶ非常用海水系の除熱機能の喪失」による）多重の機器故障や機能喪失を前提に、炉心損傷に至ることを未然に防止する応用性・機動性を高めた柔軟な機能確保の対策を講じること

対応方針 3：更なる対策として、炉心損傷防止を第一とするものの、なおその上で炉心が損傷した場合に生じる影響を緩和する措置を講じていくこと

対応方針1に関して、上記「10.4 分析と課題の抽出に関するまとめ」の通り、事故時の挙動の考察から重要なことは崩壊熱を除去する注水を切らすことなく確実に行うことである。このときの時間軸も考慮した冷却までのステップは以下の通りである。

原子炉及び使用済燃料プールの冷却・除熱に関するサクセスパス



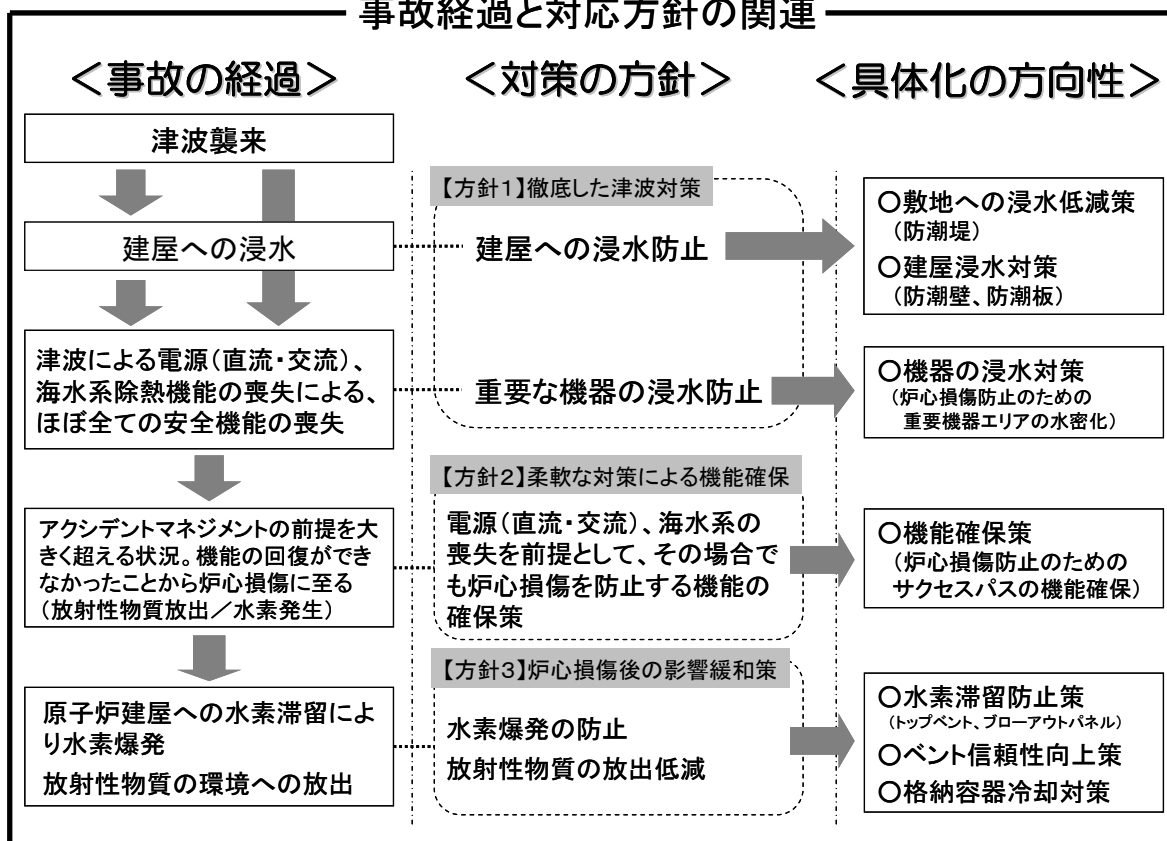
対応方針2については、今回の津波で引き起こされたような多重の故障や機能喪失があったとしても、炉心損傷に至ることを未然に防止し、冷温停止が可能となるよう、上記ステップを成し遂げることが必要である。したがって、これについても津波対策を踏まえた上で、さらに応用性や機動性を高めた柔軟な対策の検討が必要である。

具体的には、福島第一原子力発電所の対応で利用した消防車、電源車等のように、原子力プラントの非常用の設備としてはこれまで期待していなかった機器について、プラント設備が故障した場合の機動的な後備えとして、プラントに思わぬ事態が生じた場合においても原子炉への注水・冷却が有効に機能するよう配備することを検討する。ここで取り上げた諸対策は、炉心損傷防止のための安全機能の厚みを増す観点から、他の外部事象の発生時にも有用なものになると考えている。

対応方針3については、深層防護の観点から炉心損傷防止対策を講じた上で、なおその上で炉心損傷が生じた場合においても、建屋への水素滞留の防止や放射性物質の放出抑制の対策を講じるとの観点で検討する。

事故の経過と対応方針の関連の概略は次図の通りである。

事故経過と対応方針の関連



次項にそれぞれの対応方針に対する具体的な対策を述べる。

1 1. 2 福島第一原子力発電所事故の具体的対策

今回の経験を今後の原子力発電所の運転に生かしていくためには、徹底した建屋への浸水対策を講じるとともに、炉心損傷を未然に防止するための必要要件から対策を立案することが重要と考える。

津波への備えのほか、先に述べた冷却成功までのステップ毎に、具体的な対応策を以下に検討・整理した。検討結果については、【添付1 1-1, 2】参照。なお、ここでは炉心損傷を未然に防止することに目的を限定した設備的な対策を中心に記載したが、実際に有効活用するためには、手順、訓練などソフト面の充実を確実に図っていく必要がある。また、万一に備えた炉心損傷後の対策についても整理したが、今後も更なる検討を進め改善を図っていく。

(1) 徹底した建屋への浸水対策

今回の事故はこれまで述べてきたように、津波が主要建屋に流れ込み、重要設備（電源設備等）の浸水により機器の多重故障や機能喪失したことが原因であることから、中長期的に整備するものも含め、重要な設備及び炉心損傷防止に有効な設備を設置するエリアの浸水防止対策が必要である。

[方針1：敷地への浸水対策]

発電所敷地内への浸水を防ぐことは、津波の衝撃緩和及び広範囲に一斉に津波の被害を受けるような事態を防止することに寄与することから、防潮堤の設置を実施する。

[方針1：建屋への浸水対策]

津波の浸水経路となった建屋外壁に設けられた空調設備の空気取り入れ口等の開口部に防潮板、防潮壁を設置することにより、外部からの水の侵入を防止する。加えて、建物内部への水の侵入を防ぐために、扉の水密化を図るとともに、配管・ケーブルを通すために設けられた壁貫通部からの浸水を防ぐための止水処理を実施する。

(2) 高圧注水設備

プラント運転状態から事故停止した場合、当初は原子炉圧力容器の圧力が高いために高圧で注水できる設備の機能が求められる。また、今回の事故において、電動機で動く高圧注水用のポンプについてはすべての交流電源が喪失し使用できなかったことから、蒸気駆動の高圧注水設備が重要となる。具体的には、1号機の非常用復水器（非常用復水器の場合冷却機能のみ）や高圧注水系、2号機及び3号機の原子炉隔離時冷却系や高圧注水系が挙げられる。今回、2, 3号機については原子炉隔離時冷却系の長時間運転に成功したが、原子炉隔離時冷却系や高圧注水系を確実に起動するためには、直流電源の確保が必要となる。

[方針1：機器の浸水対策]

したがって、前項で述べた徹底した津波対策に加えて、高圧注水設備本体や起動に必要な直流電源（バッテリー室、主母線盤など、供給ルート）を水から守る（被水・浸水させない）ため、設置場所の止水対策を確実に実施する。ポンプ等の機器本体の場合、設計上の制約から水源との位置関係等、設置位置を変更することは根本的な難しさを伴うが、電源等については移設が可能な場合も想定できることから、止水処理に代わって高い場所への移設も選択肢の一つに挙げられる。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（蒸気駆動高圧注水設備の強制起動）]

応用性・機動性を高めた柔軟な対策としては、蒸気駆動の高圧注水設備（高圧注水系または原子炉隔離時冷却系）が起動しない場合を想定し、人が現場で強制的に起動させる方法を確立しておくことが挙げられる。高圧注水設備については、即座に対応すべき設備であることから、短時間で対応できることが第一に求められる。従って、高圧注水設備が中央制御室から起動できない場合に、現場で、かつ、人力で高圧注水設備の蒸気入口弁等を開操作し、強制的に駆動用の蒸気タービンを起動させることでポンプを動かし、原子炉に注水する方策を考えておくことが有効と考える。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（電動駆動高圧注水設備の活用）]

更なる柔軟な対策としては、電源車などプラントに直接関連しない設備を、通常は安全な場所に保管・充電しておき、本設の電源設備から給電できない場合に当該プラントに緊急で移動させ給電することで、数少ない高圧注水設備を起動させる方策が必要と考える。

対象となる機器の条件としては、起動条件の少ない設備、すなわち関連する設備が少ない高圧注入設備を選択して起動させることが有効と考える。（例えば、あるポンプを起動させるために、別のポンプで冷却水を送る必要があるような設備は避ける。）

具体的には、ほう酸水注入系（または制御棒駆動水压系）の系統をできるだけ早期に起動させる手段を講じることが有効と考える。これらの機器にも、水により直接ポンプ本体が機能喪失しない状態を作り出す対策（ポンプ設置エリアの止水）を考慮する必要があるが、特にほう酸水注入系は気密性の高い原子炉建屋原子炉棟にあることから、津波対策の意味でも最も有利と考えられる。

これらを活用するために、非常用D/Gを含む電源設備の止水に加え、プラント内の電源設備から電気が供給できない場合に備え、外部からの速やかな電源車の持ち込みにあたって、単に電源車を送るだけでなく、トランス、遮断器、機器までのケーブルをセットしたものを事前に準備しておき、手順等も含めた交流電源の確保対策を立案しておくことが必要である。また、非常用D/Gの多様化として建屋外の高台に相応の電源を確保する。なお、ほう酸水注入系については、系統として保有する水の量が少ないことから、補充を含めた水源の確保方策まで事前に確立しておく必要がある。

(3) 減圧装置

プラントの除熱、冷却まで最終的に移行するためには、原子炉压力容器の減圧操作が必要不可欠である。今回、プラントによっては、原子炉压力容器の減圧装置である主蒸気逃がし安全弁の開操作を円滑に実施することが困難な状況が生じた。これは、電源喪

失により主蒸気逃がし安全弁の操作に必要な直流電源が不足したことが挙げられる。

[方針1：機器の浸水対策]

このため、直流電源の確保対策（バッテリー室、主母線盤等設置場所の止水（または配置見直し））が必要と考える。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（主蒸気逃がし安全弁の駆動源の確保）]

応用性・機動性を高めた柔軟な対策としては、バッテリーが不足した場合に備えて、補充用のバッテリーを通常はプラントから離れた安全な場所で充電、保管し、必要な時には緊急で搬送し電気を供給できるように配備しておく必要がある。

なお、福島第一原子力発電所の事故における減圧操作では主蒸気逃がし安全弁を作動させるために必要な窒素ガスが不足することはなかったが、空気作動弁での作動用空気圧の低下なども想定し、窒素ポンベの予備を配備しておくことが必要と考える。

（4）低圧注水設備

低圧注水設備としては、非常系の低圧注水設備の他、復水補給水系、消火系が挙げられる。今回の事例では、すべての交流電源を喪失していたため、本来期待していた電動機駆動の非常系低圧注水設備は機能しなかった。いわゆるアクシデントマネジメント設備として、原子炉への注水を可能とするべく配管連結した復水補給水系もまた、電動機が被水したことで機能を喪失した。

このため、起動可能な低圧注水設備はディーゼル駆動消火ポンプのみであったが、その能力も前述したように十分に発揮することはできなかった。したがって、低圧注水設備として活用したのは本来、別の目的で配備していた消防車であり、事前に原子炉への注水として十分な手法の検討がなされていなかったこと、厳しい環境下に晒されていたこと等から、安定して確実に注水できる低圧注水設備を短期間に用意することが困難となり、スムーズな低圧注水への切替えを阻んでいた。

低圧注水設備については、高圧注水設備で対応する時間があることから、注入体制を整えるまでには多少の時間的な余裕が生じることとなる。

[方針1：機器の浸水対策]

低圧注水系の確保対策としては、本設設備であるディーゼル駆動消火ポンプを含めた消火系ポンプや復水補給水系ポンプを冠水から守り、燃料切れや電源喪失から復旧することが第一優先と考える。このため、消火系ポンプに対しては設置箇所の止水、ディーゼル駆動消火ポンプには燃料確保（燃料の配送方法含む）、電動機駆動消火ポンプには電源車等による電源の確保、制御用バッテリー設置場所の止水が必要と考える。

また、復水補給水系については、ポンプの設置エリアの止水、非常用D/Gを含む電源設備の止水または電源車等による交流電源の確保対策が必要と考える。

ディーゼル駆動消火ポンプの場合、交流電源の喪失では優先的にその使用を考慮されるべきと考えるが、交流電源が確保できた段階では復水補給水系ポンプの方が燃料補給がない等、安定した給水が可能と思われる。低圧注水系の場合、高圧注水と比較して確

保までの時間に若干の余裕があることから、状況を見極め、より安定した注入方法を選択することが重要と考える。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（代替注水設備の電源確保）]

更なる備えとなる柔軟な対策としては、上記ディーゼル駆動消火ポンプの制御用バッテリーの能力低下に備えて、別の安全な場所での予備バッテリーの充電と保管を行い、いつでも搬送できるよう事前に検討・準備しておくことが必要と考える。

また、復水補給水系ポンプ等の電源を喪失した場合については、「高圧注水設備」の項でも述べたように電源車の配備や非常用D/Gの多様化として建屋外の高台に相応の電源を確保することで対応する。

[方針2 柔軟な対策による機能確保（消防車による注水手段確保）]

加えて、本設の低圧注水設備がすべて使用できない場合は、消防車による原子炉注水を基本とする。通常は、消防車を安全な場所に待機させ、本設のポンプが使用できないような事態が発生する恐れがある場合には、当該プラントに緊急で移動させ、外部連結口に注水することで原子炉への注水を可能とする設備を構成する。

なお、低圧注水設備に共通の問題として、水源確保の問題がある。福島第一の事故の場合には、原子炉注水に使用できるポンプがディーゼル駆動消火ポンプと消防車に限定され、まとまった淡水水源を確保できなかったこと、初期段階では高低差の問題から近くの海から直接海水を汲み上げることができなかったことが、原子炉注水に時間を要した一因でもあると考える。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（水源の確保）]

低圧注水設備は多様であり、使用するポンプに応じて水源も異なる。このため、水源確保において重要なことは、消防車を利用して、事前に海から海水を汲み上げることが可能であることを確認し、その手順を確立しておくこと、発生する状況によって、対応できるポンプが限定される可能性があることから、水源となり得るタンク間の水の融通についても事前に手順を確認しておく必要がある。

また、今回の事故において、消火系の配管が津波や漂流物の衝突の影響で損傷している事例が散見されていることを考慮し、消火系配管のルート図を配備し、損傷箇所を把握することを容易にしておくことも重要と考える。

(5) 除熱・冷却設備

①格納容器ベント（圧力抑制室ベント）

低圧注水段階では、原子炉の圧力を主蒸気逃がし安全弁で圧力抑制室へ逃がし、原子炉の水位低下については低圧注入設備で水を補給するが、やがて圧力抑制室は圧力、温度ともに上昇してくる。このような状況において、海水を冷却源とすることができない場合は、大気を冷却源とするため圧力抑制室のベント操作を実施し、圧力抑制室内の圧力と熱を大気に逃がすことが必要である。

今回の事故では、福島第一2号機で圧力抑制室の圧力が設計圧力付近まで上昇し、圧

力抑制室の温度が100℃以上となった。これは原子炉の熱を圧力抑制室に逃がしたものの、除熱ができないことにより、熱がこもってしまったものである。この段階のベントに限らず、今回の事故では格納容器ベント操作で開操作が思うようにできず、対応が長引くなど困難が生じていた。

炉心損傷が起きていない段階での圧力抑制室からのベントは、基本的に放射性物質の放出のない、積極的なベント操作を意味しており、原子炉の冷却のみならず、格納容器の健全性を維持する意味でも重要な役割を持つ。圧力抑制室のベントラインを完成するには、電動弁を開することと、空気作動式の弁を開することが必要となる。

[方針1：機器の浸水対策]

したがって、除熱の観点で圧力抑制室ベントを確実に行うことができるよう、作動用の交流電源確保と作動用の空気の確保を第一の対策とする。具体的には、非常用D/Gを含む電源設備の止水と作動用の空気としての可搬式空気圧縮機（またはボンベ）の確保が必要となる。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（空気作動弁の開操作の多様化）]

柔軟な対策としては、電源に関しては前述のように電源車を配備するとともに、空気作動弁用の電磁弁に対する可搬式発電機を安全な場所に備え、緊急時には即座に搬入して利用できるような方法を確立しておく必要がある。また、最終的に人力により対応するため、電動弁に加えて空気作動弁も手動で操作することができる構造に設計変更を実施する。

②停止時冷却モード（残留熱除去系）による除熱

今回の最終的に冷温停止に到達した福島第一5, 6号機、福島第二1, 2, 4号機においても、その途中段階においては、最終的な除熱装置である残留熱除去系の海水系等が機能喪失している。

これについては、電源を確保するとともに、代替ポンプの設置やモータ修理・交換などを行って最終冷却源である非常用海水系を復旧している。

[方針1：機器の浸水対策]

残留熱除去系ポンプは気密性の高い原子炉建屋原子炉棟内に設置され、立型ポンプである点を考慮すれば津波に対して強いことから、津波対策（止水等）により非常用D/Gを含む電源系を確保するとともに、非常用海水系や中間冷却系のポンプを作動させることができるように、交換用の予備モータを設置することが対策になると考える。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（残留熱除去系の電源確保）]

柔軟な対策としては、電源の喪失に備えて、非常用D/Gの多様化として相応の電源を建屋外の高台に確保する。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（熱交換設備の多様化）]

さらに、応用性・機動性を高めた対策としては、これらの復旧をより速やかに行うため、電源や冷却設備を一体で移動式とした可動式熱交換設備（ポンプ、熱交換器一式）の配備を検討する。

③使用済燃料プールの除熱

[方針1：機器の浸水対策]

燃料プール冷却浄化系（FPC）は原子炉建屋の中に設置されており津波に対して基本的には強いが、横型ポンプであることから、ポンプ室と電源系の津波対策（止水）を基本とする。なお、電源については、電源車等の配備を後備えの対策として考える。

なお、現在は水位が低下すると水位及び温度の測定が困難となることから、冷却をより確実に実施できるようにするため、プール内に深部の水位及び温度が計測可能な装置を設置する。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（注水方法の多様化）]

今回の事例から使用済燃料プール内の燃料損傷防止対応には時間的に余裕があると考えられることから、応用性・機動性を高めた柔軟な対策としては、注水機能の後備えとして消防車の配備並びに消火系配管の活用を検討する。

(6) 監視計器の電源確保

今回の事故では、交流電源とともに直流電源も喪失し、炉心損傷に至った1, 2号機は監視計器が機能喪失した。また、直流電源が使用できた3号機においても、不要な計器電源を切るなど、できる限り長時間使用するための工夫を要した。各機器の運転状態の監視機能を喪失したことは、判断や対応に誤りや遅れを生じさせる恐れがあるため、これに対し、仮設バッテリーを持ち込み計器の復旧を行ったが、いずれもかなりの時間を要している。

[方針1：機器の浸水対策]

したがって、冷温停止に向けて必要な計器については、計器に必要な電源を津波から保護するための対策（バッテリー室、主母線盤等設置場所の止水または配置見直し）が必要である。

[方針2：柔軟な対策による機能確保（計器用電源の多様化）]

また、応用性・機動性を高めた柔軟な対策として、直流電源については可搬式バッテリーの配備を、さらには、長時間使用するために電源車並びに可搬式の充電器を設備することが必要と考える。

(7) 炉心損傷後の影響緩和策

今般の事故では、炉心損傷の結果、水素や放射性物質が大量に格納容器内に放出され、これらが、建屋に漏えいし、環境への放射性物質の放出につながった。

また、格納容器から建屋に漏えいしたと考えられる水素の爆発によって放射性物質の閉じこめ機能の喪失のみならず、復旧活動自体が著しく困難となった。

炉心損傷を契機に生じた悪影響の防止は、炉心の損傷自体を防止することが第一であるが、深層防護の観点から、炉心損傷が生じた場合における更なる対策を講じておくことが肝要である。

なお、炉心損傷後の影響緩和策については、今後の事故調査を踏まえ、改善していくこととする。

①水素滞留の防止

炉心損傷が生じて水素が発生した場合においても、建屋への水素滞留を防止して水素爆発を防ぐ対策を講じることが重要である。

福島第一2号機の場合は建屋の爆発は発生していないが、これは建屋最上階のブローアウトパネルが開放されていたことで換気が促進されたためと考えられる。

[方針3：炉心損傷後の影響緩和策]

従って、水素滞留を防止して原子炉建屋の水素爆発を防止するために、原子炉建屋の換気促進の対策が必要である。

必要な場合には原子炉建屋屋上へ穴を開ける措置（トップベント）や原子炉建屋最上階のブローアウトパネルを開放する措置で原子炉建屋内の水素滞留を防止する。

②放射性物質の放出抑制

[方針3：炉心損傷後の影響緩和策]

炉心損傷前の格納容器ベントでは、放射性物質が大量に放出することはないが、福島第一1, 3号機では、炉心損傷が発生した中でウェットウェル（圧力抑制室）ベントにより放射性物質を水フィルタを介して放出することで、放射性物質放出の低減を図った。

対応方針2において、ベント実施の確実性を向上する対策を講じていることは炉心損傷後においても効果を持つものと言える。

また、格納容器を冷却するため、消防車等による原子炉への注水手段に加え、格納容器への注水が可能となる手順を準備する。

(8) 共通的事項

以上、今回の事故を踏まえた津波に対する具体策を記載したが、これらを有効なものとするためには、これまで述べた設備的な対応のほか、対応する人が安全に安心して効率的に動けるように、作業を支援する装備や補助設備を充実する必要がある。

具体的には以下に述べる。

①外部電源

外部電源の喪失は、今回事故の直接の原因ではなく、福島第一原子力発電所は、安全設計審査指針に定められる2回線以上の送電系統で接続されていたが、地震によってすべての外部電源が喪失した。今回の地震では送変電設備が広範囲に被害を受けたことと合わせ、原子力発電所の外部電源の信頼性の向上という観点から設備設計および電源系統設計について以下の検討を進めていく。

- ・ 変電設備に対して、遮断器、断路器などのがいし形の変電機器に多くの被害が発生していることから、これらの損傷原因の分析評価を行っている。この評価結果を踏まえ、今後の耐震性向上方策を検討していく。
- ・ 送電鉄塔に対しては、夜の森線のNo. 27鉄塔が隣接地の盛土の大規模な崩落により倒壊したことを踏まえ、原子力発電所の外部電源送電線について、このような二次的被害を引き起こす3項目（盛土の崩壊、地滑り、急傾斜地の土砂崩壊）について評価を行っている。
- ・ 地震時における原子力発電所の外部電源の信頼度確保の観点から、1変電所の全停電という過酷なケースにおいても外部電源が喪失しないレベルの十分な供給信頼度を確保するため、異なる2つの変電所から受電を行うか、大元が1つの変電所となっているため、外部電源は喪失するが、送電系統の切替えによる早期復旧を可能とする設備形成の検討を進めていく。

②瓦礫撤去設備

今回の事故対応の中では、津波や爆発による瓦礫が散乱し、消防車等の移動や対応活動の阻害要因になったことから、事前に瓦礫撤去用の重機を配備する必要があるものと考えられる。なお、駐車車両の漂流が重要施設に影響を与えないように施設内の駐車場の位置については留意が必要である。



例：ホイールローダやショベルカーの配備

③通信手段の確保

今回の事故対応の中では、PHSなどの通信手段が使えなくなり、スムーズなプラント情報の交換や対応動作に支障を与えている。電源の問題など整理し、状況に応じた通信手段の確立を検討する。

例：移動無線、衛星電話の配備や、電源としての蓄電池等の配備

④照明用設備の確保

今回の事故対応では、電源の喪失により、対応動作に必要不可欠な照明を失った。安全、迅速、確実な対応を行うためには、両手を使えるようなヘッドライトタイプの照明の他、より広範囲を照らせるような照明設備の配備を実施する。

例：ヘッドライト、LEDライト、バルーン投光器の配備



⑤防護設備（防護服、マスク、APD、可搬式空気清浄機、非常用中操換気設備）

現場での対応を余儀なくされる人々、特に運転員はプラントの異常の影響をいち早く受ける立場にあり、防護服、マスク、中操の環境を改善する可搬式空気清浄機等、常日頃から様々な装備品等を余裕をもって配備しておく必要がある。

また、中央制御室の非常用換気設備については、最前線の拠点である中央制御室の環境を守る上で重要な設備であり、電源車等により優先的に機能回復を図るべき設備であると考えられる。

（9）中長期的技術検討課題

今回の事故を踏まえ、津波を念頭に、炉心損傷防止のための安全機能の厚みを増す観点で、他の外部事象の発生時にも有用なものとなる対策を以上の通りとりまとめたが、対応の信頼性をより向上させるためには、以下について検討を進める必要があると考える。

まず、事故直後に必須となる高圧注水設備に関して、今回の事故では福島第一1号機の非常用復水器が津波の影響で直流電源を喪失し隔離され、結果として冷却機能を失うこととなった。

[高圧注水設備の信頼性向上に資する検討]

この結果を踏まえ、非常用復水器の隔離信号のインターロックも含め、高圧注水設備の信頼性向上に資する考え方を整理・検討し、より柔軟な運用が可能か慎重に検討することが必要である。

次に、格納容器ベントに関して、ベントを確実に実施するための対策は既に述べたが、その除熱機能として放射性物質を大幅に除去する形での格納容器ベントをより有効なものとするための検討を進めていく必要がある。

[ベントラインの信頼性向上に向けた検討]

このため、ラプチャーディスクを積極的に作動させる方策やベントラインの信頼性向上についても検討する必要があるものとする。ただし、不用意な放出につながる可能性もあることから、慎重に検討を進める必要がある。

[フィルタベントの検討]

なお、炉心損傷後においても、格納容器ベント時の放射性物質の放出を低減するため、放射性物質をフィルタを介して放出するフィルタベントの設計検討を行う。

また、今回の事故において、監視計器が直流電源喪失により監視不能となったことから、対策として電源を確実に確保するための対策を立案した。

一方、原子炉水位計に関して、炉心損傷後、実際と大きく指示が異なっていたという事例が発生していることを踏まえ、これを考慮した事故時の計測に関する検討が必要である。

[事故時の計測装置の研究開発]

このため、単に水位計の精度の向上だけを目指すのではなく、事故時に必要な目的に応じた計測装置を研究、開発することで多様性を持たせていくことが必要であると考えられる。

12. 結び

当社はこれまで、原子力災害に対するリスク低減に、様々な観点から取り組んで参りました。しかしながら、本報告書でまとめた通り、結果として、これまで整備してきた取り組みが至らず、放射性物質を外部に放出させるという、大変な事故を引き起こしたことに對し、深くお詫び申し上げます。

本報告書では、事故当事者として、体験したこと、集約したデータ等を基に、教訓を得るべく努め、まずは、現時点までで整理できた調査事実の摘示や炉心損傷を未然防止するための対策を中心に、取りまとめを行いました。これらについては当社の原子力プラントにおいて着実に具体化してまいります。多くの原子力関係者の方々にもご一読いただき、国内外BWRプラントの安全性向上にご活用いただきたいと考えております。

今後、引き続き、今回検討したテーマだけでなく、「放射性物質の放出」、「放射線管理」、「人的リソース」、「資材調達」、「情報公開・情報提供」等の新たなテーマについて、更なる調査・検証を行い、教訓を得て参りたいと考えております。

改めまして、今回の事故により、発電所の周辺地域そして福島県民の皆さま、更に広く社会の皆さまに、大変なご迷惑とご心配をお掛けしておりますことを、心よりお詫び申し上げますとともに、事故の収束に向けてご支援・ご協力を頂いている政府、関係諸機関、メーカー等の皆さまに、感謝申し上げます。

以 上