

# 福島第一原子力発電所事故の経緯

## Outline of the Fukushima-Daiichi Accident

原子力安全基盤機構 小林 正英 Masahide KOBAYASHI Non Member

The outlines of Fukushima-daiichi accident were shown in this report. The outline is composed of two parts. One part is the period from the earthquake to the tsunami, and the other is after the tsunami. First part shows that the mitigation system and the barrier integrity of Fukushima-daiichi unit 1 to 3 were operable during this period. This result shows that the cause of the Fukushima-daiichi accidents were an influence by the tsunami.

**Keywords:** Fukushima-daiichi accidents, earthquake, tsunami, the mitigation system, the barrier integrity

### 1. はじめに

福島第一原子力発電所 1～3 号機は、今回の震災で不幸にも炉心を損傷する事態に至ったが、その概要について、津波の影響が現れる迄とその後の大きく二つに分けて報告する。

### 2. 地震から津波まで

地震発生から津波の影響が現れる迄の約 50 分間は、地震加速度大信号により原子炉が自動停止し、原子炉の冷却をしている期間である。この期間に対して、地震による影響でプラントは致命的なダメージをうけていたかどうかについて評価を行った。

評価は原子炉の安全の基本機能である「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能が正常に働いていたかどうかの観点から行った。

評価に使用したデータであるが、原子力安全・保安院からの報告徴収要求の従って東京電力提出したものを使用した。データは次の url で公開されている。

<http://www.nisa.meti.go.jp/earthquake/houkoku/houkoku.html>

1. 提出データ範囲説明書
2. チャート
3. 警報発生記録等データ
4. 運転日誌等
5. プロセス計算機データ
6. 過渡現象記録装置データ
7. 各種操作実績取り纏め
8. プラント関連パラメータ

このうち主に使用したのは“2. チャート”、“3. 警報発生記録等データ”、“6. 過渡現象記録装置データ”である。

“チャート”は記録計の記録用紙であり、通常は 1 時間で 2cm 程用紙が進んでペンにより信号変化が記録ができる。時間分解能はあまり高いものではないが、原子炉

水位等の重要な信号に関しては原子炉スクラム等の信号によりチャートが早送りとなるものもありこの場合はある程度の時間分解能が期待できる。なお、計器電源の喪失により記録計は停止してしまうので、津波の影響が現れる前まで利用が可能である。

“警報発生記録等データ”は、プラントの様々な信号を入力し、プラントの監視を行ったり、性能計算を行ったりするプロセス計算機の印字記録である。このうち、プラント監視結果を出力するアラームタイパーの印字記録を利用した。

アラームタイパーには、機器の動作記録や制限値の逸脱状況等が印字時間とともに出力されるが、スクラム回路等の重要な論理回路については、動作時間を 10msec の時間分解能で記憶し、打ち出す機能（トリップシーケンス）が付いている。スクラム論理や MSIV 閉論理の状況はこのトリップシーケンスデータを活用した。

“過渡現象記録装置データ”は過渡現象記録装置の記録データであるが、過渡現象記録装置はプラントの主要パラメータ（アナログ及び接点信号）を 10～100msec 間隔で取り込み記録保存する装置である。スクラム等の信号により、その発生前後数分から 30 分程度のデータを自動保存する。

各号機ともこれらデータが全部あるわけではなく、これらのデータの組み合わせによって評価を行った。

#### 2.1 「止める」機能について

「止める」機能に関しては自動スクラムにより制御棒が全挿入し、実際に中性子束が下がって核分裂が停止したかを確認した。

各号機とも、ほぼ地震発生時間にスクラム信号が出ていること、アラームタイパーに“全制御棒全挿入”の打ち出しが確認されていること、中性子束が 0%に低下していることが確認でき、各号機とも自動停止信号により制御棒が全挿入され、確実に原子炉が止まった。

連絡先:小林 正英 原子力安全基盤機構検査業務部  
〒105-0001  
東京都港区虎ノ門 3-17-1 TOKYU REIT 虎ノ門ビル  
E-mail: kobayashi-masahide@jens.go.jp

## 2.2 「冷やす」機能について

「冷やす」機能に関しては、外部電源喪失が発生したが、その際には非常用ディーゼル発電機が自動起動し、冷却に必要な電源が確保できたかどうか、また、実際に冷却を行っていたかどうかを確認した。

1号機と3号機についてはトリップシーケンスからDGが自動起動し非常用母線に給電したことが確認できた。また、2号機については過渡現象記録装置の記録からDGが自動起動し非常用母線に給電したことが確認できた。以上より、原子炉冷却のための電源が確保されたことが確認できた。

2.3項で述べるが、各号機とも主蒸気隔離弁（MSIV）は地震発生後まもなく全弁閉鎖していた。

1号機でMSIVが閉鎖している場合には、原子炉の冷却は主に非常用復水器（IC）により行われる。ICは原子炉の蒸気を熱交換器により凝縮する装置で、2次側は大量の水で冷却するものであり、8時間冷却できる水の容量を備えている。

1号機のICは地震後のMSIV閉鎖に伴う原子炉圧力上昇に伴い2系統が自動起動し、その後は運転員が炉水温度変化率を制御するため手動で起動・停止していたことが確認できた。

2/3号機でMSIVが閉鎖した場合、原子炉の冷却は、原子炉の蒸気を逃し安全弁（SRV）を経由して大量の水を蓄えたサプレッションチェンバーに導いて凝縮させ、温度の上昇したサプレッションチェンバース水を残留熱除去系（RHR）のトーラスクーリング機能によりRHR熱交換器を使用して行う。RHR熱交換器の2次側は海水で冷却しているので、原子炉の熱を最終的には海水に逃すことになる。

SRVは原子炉水の温度変化率を見ながら間欠的に開閉操作を行う。なお、原子炉停止直後は崩壊熱が大きいためSRVの自動開設定値に達するため自動開し、すぐ吹き止まり圧まで低下して自動閉することを繰り返す。

原子炉からサプレッションチェンバーへ水が移動するが、タービン駆動の原子炉隔離時冷却系（RCIC）によりその補給をし原子炉水位を維持する。

2/3号機では、MSIV閉鎖に伴う原子炉圧力の上昇によりSRVが自動開閉を繰り返していたこと、運転員がRCICにより原子炉水位を制御していたこと、RHR系の起動等が確認でき、MSIV閉鎖時に通常に行われる原子炉冷却が行われていたことが確認できた。

## 2.3 「閉じ込める」機能について

「閉じ込める」機能に関しては、主蒸気隔離弁（MSIV）が地震後まもなく主蒸気管が破断したとの信号で自動閉鎖しているがその原因の確認と格納容器の健全性の確認を実施した。前者については、主蒸気隔離弁論理回路の動作状況を詳細に確認した。後者については、格納容器の健全性が損なわれた場合には格納容器圧力は大気圧と同じになるので、格納容器圧力の挙動により確認した。

1号機及び3号機のトリップシーケンスでは、主蒸気流量高、主蒸気管放射能高等主蒸気管破断を示す信号が多く出てきて、MSIV全弁全閉に至っている。あたかも、地震により主蒸気管の破断が発生しているように見えるが、各信号を時系列で整理すると次のことがわかった。

- ・MSIV隔離・格納容器隔離に至る全要因信号が発生していること
- ・各要因信号はA、B系それぞれ2信号ずつあるが、A系統の各要因信号はほぼ同時に発生していること、B系統も同様であること（各系統とも10msec以内に発生）
- ・MSIV隔離・格納容器隔離に至る全要因信号が発生は、DGの自動起動中で非常用母線の電源のない時間帯で発生していること
- ・各要因信号は格納容器外での破断、格納容器内での破断を示すものが同時に発生していること

以上より、MSIV閉信号はA系、B系毎にほぼ同時に発生し、格納容器内の破断を示す信号も格納容器外の破断を示す信号もほぼ同時に発生しているが、これは物理的にはありえないことであり、実現象とは考えられない。MSIV閉信号の発生が1、3号機ともDGの自動起動中で丁度非常用母線の電源のない時であることを考えると、DG起動中にMSIV閉論理回路の電源がなくなり、MSIV閉論理回路がフェールセーフの設計のため電源断字にはトリップ信号が発生することからこのような事象が発生したものと考えられる。

冒頭に示したように、格納容器の健全性を確認するために各号機の格納容器圧力の変化を確認したところ、各号機とも地震発生後1~5KPa程と僅かに上昇していることがわかった。

これは常用電源で駆動されているドライウェルクーラーが外部電源喪失により停止し、ドライウェル内温度上昇してドライウェル内雰囲気（ほぼN<sub>2</sub>）の熱膨張により圧力が上昇しているものと考えられる。

従って、格納容器の健全性はこの段階では問題なかつ

たものと考えられる。

## 2.4 地震から津波までのまとめ

2.1 項から 2.3 項に示したように、1～3号機の「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」機能は健全に保たれていたこと、その他特に異常なパラメーターの動きは見られなかったことより、地震発生から津波の影響が現れる前まではプラントの主要な設備は健全に保たれていたものと考えられる。

## 3. 津波以降

津波の影響により、各号機の非常用 DG が海水ポンプの被水の影響より停止したため、1～3号機の交流電源が喪失した。また、交流電源が喪失しても使えるはずであった直流電源（バッテリー）も3号機を除いてバッテリーそのものが被水したため喪失した。このため、「冷やす」機能が奪われた結果、炉心を損傷し、その際発生した水素の爆発により建家や格納容器の一部を破壊したと見られている。この結果、「閉じ込める」機能も完全なものではなくなり、放射性物質を環境に放出した。

原子炉で事故が発生したときに必要となる計測装置については、最重要計器は直流で、重要な計器は交流の非常用母線から給電される設計としているので、重要な計器は津波の影響を受けた以降はほとんど喪失した。この後、重要な計器には仮設のバッテリーを接続して計測を開始したり、RPV 表面温度等の熱電対はデジタルで起電力を測定するなどして測定を開始したが、測定信号数、測定頻度とも限られたものになった。仮設バッテリーをつなぎ込んだ状況の写真を示す。以下、各号機毎に津波の影響を受けた後の経過を示す。

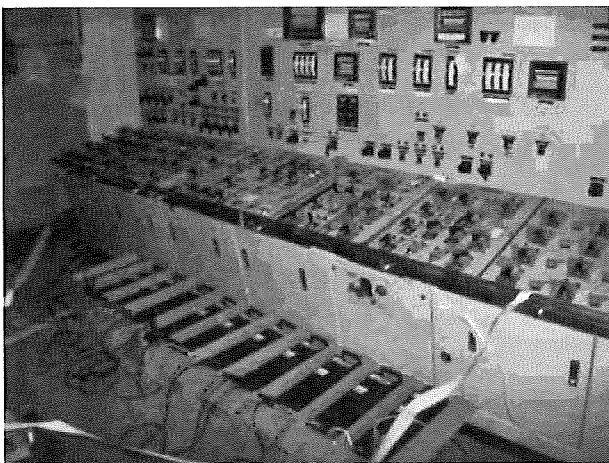


Fig.1 The temporary battery for measurement

### 3.1 1号機の場合

津波の影響を受ける前に、原子炉圧力（＝温度）は運

転員が IC を起動・停止して制御していたが、丁度 IC が停止中に津波の影響を受け始めた。

1号機では直流電源も津波により被水し、IC の起動・停止を行う弁の電源が喪失した。運転員は IC を起動しようと努力はし蒸気の流れは確認できたようだが、効果的には活かすことは出来ず、原子炉の冷却機能は失われた模様である。

このため、原子炉水位が低下し、燃料が露出して炉心損傷に至ったと考えられる。

パラメーターの計測は仮設のバッテリーをつないで夜に計測を開始しているが、原子炉圧力は 3 月 11 日 20:07 に 6.9MPa、3 月 12 日 2:45 に 0.8MPa の測定値が残っている。また、ドライウエル (D/W) 圧力は 3 月 12 日 1:05 に 0.6MPa、2:30 に 0.84MPa と既に設計圧力 0.43KPa を超えた記録が残っている。

また、現場の放射線が高いためと思われるが、3 月 11 日 21:51 には 1 号機の原子炉建屋 (R/B) が立入禁止となっている。

以上より、次のように進展したと考えられる。

- ・3 月 11 日 21:51 に R/B 立入禁止となっており、この時間には炉心損傷が始まり現場の放射線が上昇していたと考えられる。
- ・3 月 12 日 2:45 に原子炉圧力は 0.8MPa、その 15 分前の 2:30 に D/W 圧力は 0.84MPa であり、この時点で原子炉圧力と D/W 圧力はほぼ同じであり、原子炉圧力容器 (RPV) が既に損傷し原子炉圧力と D/W 圧力がほぼ同じになっていたと考えられる。
- ・上記の約 1 時間半程前の 3 月 12 日 1:05 には D/W 圧力は 0.6MPa となっており、RPV の損傷はこれより以前と考えられる。

この後、格納容器 (PCV) の破損による放射性物質の大量放出を避けるため、PCV ベントを実施しようとしたが、放射線が高くアクセスが出来なかったり、弁を動作させるエアがなかったりして、PCV ベントを実施し効果が確認できたのは 3 月 12 日 14:30 であった。

この間、炉心を冷却する努力も続けられた。3 月 12 日 5:46 から消防ポンプを原子炉系の配管に接続して淡水注入を開始し、その後 14:53 まで断続的に 80t/h 注水が行われている。

しかし、3 月 12 日 15:36 に 1 号機の R/B で水素爆発が発生し R/B を損壊した。炉心損傷した際に燃料被覆管のジルコニウム (Zr) と水が反応した際に発生した水素が、PCV から R/B に漏洩して R/B の最上階に大量に蓄積

し、何らかの原因により発火・爆発したものである。

炉心の冷却であるが淡水が底をついたため、3月12日19:04から海水注水に切り替えている。当初はコアスプレイ（CS）系の配管に消防ポンプを接続して、炉心上部から海水注水をしていた。

3月23日2:33に注入ラインは給水系からに切替えたが、これによりRPV温度は低下を始めた。また、3月25日15:37から再び淡水注入に切り替えた。

4月7日1:31から、水の放射線分解により発生した水素及び酸素による再爆発を防止する目的で、PCVへの窒素注入が開始された。

### 3.2 2号機の場合

RCICを手動起動中に津波の影響を受け始めた。RCICは3月14日13:25迄動作したと推定されている。

3月14日16:34に、原子炉圧力を原子炉逃し安全弁（SRV）を開いて降圧し、同時に消防ポンプによる注水（海水）を実施する操作を実施した。

しかしながら原子炉水位の低下を抑えることは出来ず、3月14日17:17には燃料頂部まで低下し、燃料が露出し損傷したものと考えられる。

この後、PCVベント等を試みているが、3月15日6:00～6:10頃に圧力抑制室付近で水素爆発とみられる大きな衝撃音があり、PCVを損傷した模様である。

この後は、3月26日に海水注水から淡水注水に切替えて冷却を継続している。

### 3.3 3号機の場合

3号機はバッテリーが被水しなかったため、直流を電源としているRCIC及び高圧注入系（HPCI）の動作が可能であった。

このため、3月12日11:36迄はRCICにより注水、12:35からはHPCIによる注水を実施していたが、3月13日5:10にバッテリー枯渇によりHPCIが停止し、原子炉冷却機能を喪失した。

この後、3月13日9:08にSRVを開いて原子炉を降圧し、同9:25から消防ポンプによる淡水注入を開始した。

しかしながら、原子炉水位は低下し燃料が露出して炉心を損傷したと考えられる。3月14日7:44にはD/W圧力が0.46MPaと設計圧力0.427MPaを超えていた。

3月14日11:01に3号機のR/Bで水素爆発が発生し、R/Bを損壊している。1号機と同様、炉心損傷した際に燃料被覆管のジルコニウム（Zr）と水が反応した際に発生した水素が、PCVからR/Bに漏洩してR/Bの最上階に大量に蓄積し、何らかの原因により発火・爆発したもので

ある。

この後は、3月25日に海水注水から淡水注水に切替えて冷却を継続している。

### 3.4 4号機の場合

4号機は3月15日に水素爆発とみられる爆発によりR/Bを損壊している。

4号機は停止中であり、シュラウド取替のために燃料は全て使用済み燃料プールに移動しており、合計体の燃料が使用済み燃料プールに保管されていた。

当初、使用済み燃料プールに保管されていた燃料が露出して水素ガスが発生したと思われていたが、その後、使用済み燃料プール水の水質、保管されている燃料のVTRなどから保管されていた燃料の損傷はなく、現在では保管燃料からの水素ではないと考えられている。

爆発の原因として、3号機の水素ガスの回りこみ、シュラウド工事にアセチレンガス等が大量にあったのではないかと、MGセットの油が蒸発してガス状になり爆発したのではないかと等諸説が出ているが、現在のところ決定的な原因は特定されていない。

4号機の使用済み燃料プールは外部からの注水により冷却している状況であり、52～62mクラスのコンクリートポンプ車を使用しての注水による冷却がほぼ毎日行われている。

## 4. まとめ

地震から津波までと津波以降のまとめを以下に示す。

#### ●地震から津波まで

- ・地震加速度大によりスクラムし確実に停止
- ・外部電源は喪失したが、非常用DG起動成功により冷却機能を確保
- ・原子炉圧力、原子炉水位とも運転員がコントロール
- ・主蒸気隔離弁閉鎖状態で通常に行われる原子炉冷却過程であった

#### ●津波以降

- ・津波により全電源喪失、全冷却系喪失となり、結果として「冷やす」「閉じ込める」に失敗
- ・燃料棒と水の反応で生成した水素が爆発し、建屋や一部格納容器を破壊したと見られる
- ・放射性物質である核分裂生成物を環境に放出した
- ・今のところ放射線障害による人的被害は無いが、国民の財産と環境に被害を与えている
- ・燃料を冷やすための作業と、放射性物質を閉じ込めるための作業が続けられている

## 参考文献

- [1] 5月16日に、東京電力株式会社から受領した、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第67条第1項及び電気事業法第106条第3項の規定に基づく報告
- [2] Effects of the Earthquake and Tsunami on the Fukushima Daiichi and Daini Nuclear Power Stations  
(2011.5.24 東京電力株式会社)
- [3] 東京電力ホームページの公開データ（東日本大震災後の福島第一・第二原子力発電所の状況：プラント関連パラメータ：プラントの水位・圧力データ／プラントの温度データ）  
(平成23年9月13日)