JAEE耐津波工学委員会 第4回委員会 参考資料

3 原子力発電所の地震・津波事故シナリオ

(Accident scenarios at NPPs under earthquake-tsunami actions) 3.1 はじめに

3.2 東日本大震災における原子力発電所の挙動

3.2.1 福島第一原子力発電所

3.2.1.1 福島第一1号機原子炉

地震により、原子炉は自動停止し、また、外部電源が喪失したため、非常用ディーゼル発電機 (EDG) が2台とも自動起動するとともに、主蒸気隔離弁 (MSIV)が閉止した。その結果、原子炉圧力が上昇し、非常用覆水器 (IC) が自動起動して、原子炉水位は維持された。

ICの作動で、設計での想定どおりに原子炉圧力・温度が低下したことから、機器への影響を懸念した運転員は、保安規定の制限値を守るように、ICを間欠的に運転し、急激な温度低下を回避した。

1

3/12

地震後、津波が襲来するまでの間は、外部電源が 喪失した状態ではあったが、必要な安全機能は設 計通り確保され、原子炉は安定的に維持されてい たと考えられる。津波が襲来し、その影響で海水 冷却系が機能を失ったのみならず、敷地高さ 10m にある建屋への浸水があり、1号機では多くの電 源盤の機能が失われた。この結果、中央制御室に おいては非常用照明のみになり、設備の状態を把 握するための計装や警報灯を含めほとんどが使用

できなくなり、何をすべきか、何ができるかが 全く分からない状態であったとされている。後 日の東京電力の調査により、津波による直流電 源喪失の結果、IC の隔離インターロックが作動 して隔離弁が閉止したことが分かっている。す なわち、閉じ込め機能に対する「フェイルセー フ設計|の影響で IC の冷却機能は喪失したこと になる。なお、津波直後は IC の弁状態は把握さ れなかったが、11日18時頃に外側隔離弁の閉止 ランプ(緑ランプ)が点灯していることを運転 員が確認し、開操作を実施している。この時点 では、IC が機能し原子炉水位が維持されている ものと認識されていたが、いずれ注水が必要に なることから、17時過ぎには、発電所長より消 防車を用いた注水方法の検討指示が出されて いる。運転員の認識とは違って、実際には津波



9/12 3/13 3/13 3/14 3/14 3/16 3/16 3/16 3/16 12/00 12/00 12/00 0.00 12/00 0.00 12/00 0.00 12/00 0.00 12/00

図 5.2-3 格納容器圧力(1 F 1)

により IC が機能を喪失したことから、原子炉圧力が上昇して、逃し安全弁(SRV)の安全弁機能が 働き、蒸気が圧力抑制室(S/C)に導かれて凝縮された。この結果として原子炉水位が低下していっ た。なお、1 号機においては直流電源の喪失で津波直後はプラントパラメータが得られていない。 バッテリーをつなぐことで水位が計測できるようになったのは、3月11日21時19分である。図5.2-1 ~3 は、そうして得られたプラントパラメータを参考にして、シビアアクシデント解析コード(MAAP) で推定された水位、圧力等である。

解析の結果からは、3月11日18時過ぎには、 原子炉水位が有効燃料棒頂部(Top of Active Fuel:TAF)を下回り、19時前に炉心損傷が始 まったことが推定されている。一方、20時頃に、 現場指示計にて原子炉圧力が7.0MPa[abs]と確 認されたことから、この段階では、原子炉冷却 材圧力バウンダリは健全であり、原子炉圧力は SRVの安全弁機能により7.0MPa[abs]近傍に維 持されていたと推定される。

21 時過ぎに、TAFより高い原子炉水位が測定さ れているが、解析による推定とは大きな乖離が ある。後日の東京電力や他の機関による検討に よれば、炉心が露出した後では、凝縮槽の基準



図 5.2-4 原子炉からの漏えい経路

面器側の水が蒸発してしまうことにより、水位計の機能が失われることが判明している。原子炉の 実水位がさらに低下していくと、水位計装の炉側配管の水も蒸発し始めることから、その様子が水 位計の指示値に現れているものと考えられている。21時の時点では既に炉心が露出、損傷を開始し ており、その影響で測定水位が実際より高い値となったものと考えられる。

3月12日0時頃には、中操においてドライウェル(DW)の圧力が、最高使用圧力(0.531MPa[abs]) を超える0.6MPa[abs]であったことが判明している。例えば原子炉冷却材喪失事故(LOCA)では、最 大でも0.401MPa[abs]であると評価されることから、原子炉が異常な状態にあることが推定された。 これを受けて、発電所では格納容器ベントの準備に入るよう指示が出されている。2時30分にはDW 圧力の計測値が0.84MPa[abs]にまで上昇し、一方、原子炉圧力はほぼそれと同じ0.8MPa[gage]に低 下した。このような1号機の原子炉及び格納容器の圧力挙動から、この時点では既に原子炉冷却材 圧力バウンダリに何らかの漏洩があったと考えられる。また、この時刻までには既に炉心損傷が進 み、原子炉内の温度が高くなっていたと推測される。

これらを前提とし、東京電力が核計装配管(ドライチューブ)と SRV 管台ガスケットのシール部の 損傷を仮定して(図 5.2-4) MAAP コードを用いて実施した解析によれば、図 5.2-2 に示すように、 原子炉圧力と格納容器圧力とが均圧していく様子が示されている。この解析結果では、3 月 12 日 2 時頃に原子炉圧力容器が炉心溶融デブリの影響で損傷したとされている。

一方、格納容器圧力の測定値は、0.75MPa[abs]程度で維持されており、格納容器からの放射性物質 の漏洩が生じていたものと考えられる。実際、正門付近に配置したモニタリングカーでは、3月12 日の明け方に、線量率の上昇が見られ、1号機からの放射性物質の放出があったことは明らかであ

る。

D/W

3月12日4時頃から、代替注水ラインにつながる連結送水口に消防車が接続され、注水が開始された(図 5.2-5)。注水源は当初、防火水槽の淡水が使用されたが、程なく枯渇したため、引き続き海水が注水された。なお、代替注水ライン(消火系(FP)→復水補給水系(MUWC)→炉心スプレイ系(CS))は、アクシデントマネジメント(AM)としてディーゼル駆動消火系ポンプ(Diesel Driven Fire Pump:

DD-FP)で水を送るとの想定で整備されていたものであり、 一方、消防車は中越沖地震後の対策で用意さていたもので あった。福島第一事故時には DD-FP は燃料切れのために使 えなかったが、AM で整備した注水ラインと消防車のポンプ とを組み合わせて炉心注水がなされた。

増北系

る温水タン

意水的離ない

復水補給水系

一切し時間ボンフ

北京ボン

2015/7

3月85日5

図 5.2-5 原子炉への注水経路



MAAP コードの解析結果からは、この注水は、炉心損傷の防止には間に合わなかったが、既に格納容 器のペデスタル部に移行していた炉心溶融デブリにも達したと推定されている。その結果、コアコ

3

ンクリート反応(MCCI)が抑制され、炉心溶融デブ リはペデスタル床を約70cm程度浸食したところで留 まっていると推定されている(図5.2-6)。 注水の対応と並行して格納容器ベントが図られたが、 交流電源及び圧縮空気が失われていたことから、現 場にて二つの弁を手動で開放する必要があった(図 5.2-7)。

原子炉建屋2階にある電動弁は<u>手動で操作すること</u> によって開操作できたが、空気作動弁の開操作のた めには、地下のトーラス室にアクセスする必要があ った。9時過ぎに運転員がトーラス室に入り、図5.2-8 に示す位置にある空気作動弁に向けてキャットウォ ークを歩いていったが、炉心損傷により S/C に移行 してきた大量の放射性物質によって線量が高く、作 業を断念せざるをえなかった。結果として運転員の うち1名は100mSvを超える被ばくをしている。空気 作動弁を遠隔で操作するためには、駆動用の圧縮空



図 5.2-7 格納容器ベントライン上の弁



図 5.2-8 S/C ベント弁小弁への経路

気と電磁弁作動用の電源が必要である。 しかし、圧縮空気の準備は出来ていな かったため、残圧があることを期待し て、仮設照明用小型発電機により小弁 の開操作を10時過ぎに実施した。この 操作後に正門付近のモニタリングカー の線量率が一時的に上昇したが(図 5.2-9)、格納容器の圧力が低下してい ないことから、十分なベントができて おらず、この時ベントラインにあるラ プチャディスクが開いたかどうかは不明 である。

さらに、仮設コンプレッサーを利用して、 原子炉建屋大物搬入口の外から圧縮空気 を供給し得ることがわかり、14 時過ぎに 仮設コンプレッサーを起動したところ、格 納容器の圧力が低下し、排気塔から蒸気の 放出が確認されている(図5.2-10)。格納 容器ベントができたと判断し得るが、この 時点では、モニタリングカーによる放射線 指示値は上昇していない。





図 5.2-10 1、2号排気塔からの蒸気放出(12日 15時)

3月12日15時36分、1号機の原子炉建屋が爆発した(図5.2-11)。また爆発後にモニタリングカ ーの指示値は一時的に上昇した。

Λ

従来から、格納容器内で起き得る爆発的な現象としては、反応度事故、炉内・炉外の水蒸気爆発、 格納容器直接加熱などが考えられていたが、この爆発のあとも格納容器圧力はある程度、正圧を保 っていたことから、これらの現象が発生したとは考えられない。

一方、炉心損傷に伴いジルコニウム・水反応によって水素が発生することから、この爆発の原因は、 格納容器内に蓄積した水素が何らかの経路で原子炉建屋に移行し、最上階であるオペフロにて爆発 したものと推定される。また格納容器は、最高使用圧力を大幅に超えていた時期があり、格納容器 から原子炉建屋への気体の漏洩経路については、いくつかの可能性があるが現時点で特定すること は困難である。

一方、格納容器ベント操作から1時間程度経過して爆発が発生したことから、このベント操作と水 素ガスの原子炉建屋への放出との関係を明らかにする必要がある。ベント配管は、非常用ガス処理 系(SGTS)と接続され、SGTS入口側は隔離弁により、隔離されるが、SGTSの系統全体では、通常時閉・ 電源喪失時開の弁が多く配置されている(図 5.2-12)。ベント配管からの逆流経路上には、電源喪 失時閉の流量調整ダンパがあり、このダンパにより逆流は制限される。ダンパには完全な気密性は ないが、大流量が流れることは阻止できるものと考えられる。また、仮に SGTSのフィルタートレイ ンを逆流したのであれば、粒子状の放射性物質(以下、FP)の大部分は補足されるため、原子炉建 屋内が広く汚染されていることと矛盾する。従って、SGTSからの逆流を完全に否定することは困難 であるが、SGTSが原子炉建屋内への水素流入の主たる経路とはなっていなかったと推定できる。



図52:12 SGTS逆流の可能性(1F1)

の崩落 全面にわたる損傷図 5.2-11 原子炉建屋の損傷状況(1号機)

天井の崩落



地震により原子炉は自動停止し、また外部電源が喪失したため、EDGが2台とも自動起動するとと もに、MSIVが閉止した。原子炉圧力はSRVにて制御された。原子炉水位は、原子炉隔離時冷却系 (RCIC)は水位低(L2)で自動起動することになっているが、水位がL2まで低下するより前に運転 員が手動起動し、津波により直流電源が喪失するまでの間は、RCICの水位高(L8)トリップと手動 起動を繰り返すことで、水位制御がなされた。津波が襲来し、その影響で海水冷却系のみならず、 敷地高さ10mにある建屋への浸水もあり、2号機ではほとんどの電源盤の機能が失われ、中央操作 室は真っ暗になり、設備の状態を把握するための計装や警報灯を含めほとんど使用できなくなっ た。津波が襲来した頃、運転員はRCICを手動で起動していたが、その後の運転状態を把握するこ とが出来なかった。原子炉水位も把握できなかったことから、11日の21時頃からAMによる注水 の準備に取りかかり、11日中に代替注水のラインが準備されている。一方で、RCICの運転状態を 確認するために12日1時ころ現場に向かった運転員が、RCIC室の扉を開けた際、水が流れ出てき たことから、一旦中央制御室に戻っている。2時過ぎに再度現場に向かい、原子炉圧力5.6MPaに 対し、RCIC 吐出圧力が6.0MPaと上回っていることから、RCIC は運転状態にあることが確認され ている。

2 11日22時頃に、2号機でも1号機同様バッテリーをつなぐことによって原子炉水位が測定されるようになり、TAFよりも高いことが確認された。それ以降は、水位はTAF+3.4~3.9mに保たれた。原子炉水位の測定値をMAAPコードによる解析結果と共に図5.3-1に示す。図に示すように、原子炉水位は3月14日の昼近くまで高い位置に保たれ続けている。一方、原子炉の圧力は、SRVの逃し弁機能が働かない状態であるにもかかわらず、6MPa[gage]前後の低い値となっている(図5.3-2)。直流電源が喪失して、RCICの制御ができなかったにもかかわらず、このようにプラントパラメータが安定していた理由は、後日の分析により、次に述べるようなRCICの特殊な運転状態によるものと推定されている。





まず、原子炉水位は燃料域の水位計にて計測 されている。燃料域水位計は停止時等の原子炉 減圧時(大気圧)で較正されていることから、 6MPa[gage]の高圧状態の指示を実水位に直す補 正が必要である。こうして補正した後の水位は、 水位計凝縮槽ノズル位置に相当する。実水位が このノズルより高い位置にあると、差圧検出を する水位計の原理上、実水位にかかわらず、計 測される水位はノズル位置レベルに留まること から、この間の実水位は水位計凝縮槽ノズル位



置「以上」であったと推定されている。水位がこのようなレベルになると、主蒸気管から二相流が 流出し、RCICタービンが二相流で駆動されることとなる。RCICから見れば、効率の悪い運転状態と なり、注水流量が定格流量より小さくなり、二相流の流出とRCICによる注水がバランスしていたも のと考えられている。一方、原子炉から見た場合、蒸気に比べて単位体積当たりのエンタルピーの 大きい二相流が主蒸気管から流出するため、原子炉の圧力はSRV 作動レベルより低い 6MPa[gage]前 後でバランスしていたものと考えられている。

計測された格納容器の圧力トレンドを見ると、RHR による除熱喪失状態で期待されるトレンドよ りも緩やかな上昇となっている(図 5.3-3)。これは、RHR 以外の除熱メカニズムがある可能性を示 唆している。炉心が損傷した1~3号機では、継続的に原子炉への注水を実施していたが、格納容 器内の水位の上昇は確認されず、格納容器から汚染した冷却水がトーラス室に流入し、さらにター ビン建屋に移行していったことが確認されている。一方で、原子炉への注水を実施していない(必 要のない)4号機では、1~3号機のようなメカニズムでトーラス室に水が溜まることはないが、 実際には、4号機トーラス室に水が溜まっていることが確認されている。すなわち、少なくとも4 号機では、津波の影響によりタービン側からトーラス室に水が流入しており、これと同じことが2 号機で起きていれば、トーラスを外部から冷却するメカニズムとなる。このような仮定をおいての MAAP コードによる解析結果は、測定値をほぼ再現できている。

格納容器の計測圧力はベントラインのラプチャディスク開放設定値である最高使用圧力 (0.531MPa[abs])より低かったが、ベントの準備が進められていた。ベントライン上の2つの弁が 13日11時までに開状態とされ、それ以降、空気作動弁の開状態が維持されていたものの、14日の 3号機の爆発の影響で、空気作動弁の電磁弁励磁用回路が外れて空気作動弁が閉止した。

RCICの運転が停止してしまう事態に備えるため、13 日 12 時頃には代替注水の構成を完了し、また、13 日 13 時頃には、バッテリーを中央制御室の SRV 制御盤に繋ぎ込み、減圧・注水ができる状態とされていた。しかしながら、同じく3 号機の爆発の影響で、準備していた消防車・ホースが破損してしまった。なお、1 号機同様、代替注水ライン(消火系(FP)⇒復水補給水系(MUWC)⇒低圧注水系(LPCI))は AM で整備されていたものであり、消防車は中越沖地震後の対策で準備していたものであった。

14 日昼頃から原子炉水位が下がり始め、RCIC の機 能が低下していると判断され、代替注水の再構成と ベントの復旧の取り組みがなされた。当初、S/C ベン ト弁大弁の復旧活動がなされたが、時間がかかる見 込みとなり、SRV による減圧と消防車の注水が優先さ れた。減圧のため、複数の SRV 制御盤にバッテリー を繋なぐ操作がなされたが、なかなか SRV が動作せ ず、18 時過ぎになって減圧に成功した。消防車につ



図 5.3-4 注水実績と解析上の仮定(1 F 2)

いては、現場放射線量が高いため、交代で運転状態が確認さ れていたが、19時20分に当該消防車が燃料切れで停止して いることがわかり、給油の後、20時前に2台の消防車で原子 炉への注水が開始された。その後、SRVが閉止しては開とす る操作を繰り返すこととなり、2号機は不安定な状態となっ ていた。

東京電力が MAAP コードを用いて解析した結果では、減圧 操作に注力していた14日17時頃に原子炉水位がTAFを下回 り、19時20分頃に炉心損傷を開始したとの結果となってい る。これ以降、原子炉水位の計測値が一時的に回復している 時期があるが、炉心損傷後は1号機と同様、原子炉水位の指 示値の信頼性は低いものと考えられる。解析では、炉心損傷 以降の計測水位を信用できないもの

として、消防車で注水した流量の一部 のみが原子炉に注水されたとの仮定 が置かれている(図5.3-4)。なお、1 号機に比べて原子炉水位の低下開始 から原子炉への注水開始までの時間 が相対的に短いことから、解析上は圧 力容器の損傷には至っていない。プラ ントパラメータ等からの検討の結果、 圧力容器に損傷があり、溶融デブリが



図 5.3-5 デブリの状態(1 F 2)



図 5.3-6 モニタリングデータと格納容器圧力(3/14)

一部ペデスタル部に落下して冷却されている状態にあると推定されている(図 5.3-5)。

7

S/C ベント弁大弁は電磁弁の不具合 (地絡)により開不能と推定されたこ とから、同小弁が14日21時頃に微開 とされた。この段階では、計測された DW 圧力が最高使用圧力より低く、ベン トされない状態であったが、21時20分 15.0 155 に原子炉減圧のため追加で SRV が開さ 18911641064 れた後に、正門付近の線量率が一時的 図 5.3-7 地震計記録による爆発位置の推定 に上昇したことから(図 5.3-6)、何ら かの FP 放出があったことは間違いない。しかしな がら、2号機のベントラインのラプチャディスク が開放したかどうかは不明である。この後、DWの 圧力が急激に上昇し、翌 15 日 7 時 20 分まで 700kPa[abs]以上の高い圧力が計測されており、炉 心損傷に伴う水素発生の影響と推定されている。 15日0時過ぎに、DWベント小弁の開操作がなされ ているが、数分後に閉状態であることが確認され ており、DW 圧力も変化が無く、また、このタイミ ングでは、モニタリングカーの線量率に変動が見 られていないことから、DW ベントによる蒸気の放出はな されていないものと考えられる。なお、DW 圧力が急激に 上昇した 14 日 22 時以降、格納容器雰囲気モニタ (Containment Atmosphere Monitoring System:CAMS)の y線最量率が得られるようになり、炉心損傷の進展と同 調してv線線量率が上昇していく様子が捉えられてい る。

15日6時過ぎに、大きな衝撃音と振動があり、ほぼ同じ 時にS/C 圧力計測値が0kPa[abs]になったと報告された。

図 5.3-9 建屋から放出された蒸気 この時点では、2号機のS/Cが損傷した可能性が考えら

図 5.3-8 サプレッションチェンバの状態

4号様から の距離(m)

1200

1000

800

600

411

• P 逆到達時刻 + S 通到達時刻

165 170 -4.0

· piebligestt

155 160 165 17.0 55

近刻温晓

れたことから、必要な要員を除き、免震重要棟に詰めていた要員等は、一時的に福島第二原子力発 電所に待避した。

後日の東京電力の検討では、計測されたS/C圧力は、前日からDW圧力と乖離していたこと、0kPa[abs] は真空であり、物理的にあり得ないことから、計器故障によるものと判断されている。また、衝撃 音に関しては、発電所内に複数設置されていた地震計の記録を用いて、P波、S波の到達時刻と対象 号機との距離のリニアリティの確認がなされたところ、4号機の爆発にともなう衝撃音であると結 論付けられている(図 5.3-7)。後日、東京電力により実施された、ロボットを用いた2号機のトー ラス室調査の映像からも、爆発をしたような形跡は確認されていない(図 5.3-8)。

即ち、事故時には衝撃音と S/C 圧力測定値のダウンスケールがほぼ同時期に起きたことから、この 9

時に S/C に何らかの損傷が起きたと 考えられたのだが、これは誤った認 識であったと結論付けられた。この 問題については、7.7節で再度採り上 げる。

DW 圧力は 15 日 7 時 20 分の段階で 730kPa[abs]と計測され、次に指示が 得られた11時25分には155kPa[abs] に低下していた。福島第一に設置さ れたライブカメラの 15 日 10 時の写 真では (図 5.3-9)、2 号機付近から白い 煙が放出されている様子が見てとれる。 また、この時間帯で正門付近の線量率が 急上昇していることから(図 5.3-10)、 この時期に2号機から大量の放射性物 質が放出されたものと推定されている。 後日の東京電力による調査で、オペフロ のシールドプラグ近傍で高い線量率が 観測されていることや (図 5.3-11)、過 去の試験結果等から考えられている漏 洩ポテンシャルの高い箇所を踏まえ、FP の主たる放出経路は、PCV ヘッドフラン ジのシール部と推定されている。 なお、2号機では、炉心損傷したが、1、





図 5.3-11 原子炉建屋五階の線量分布

3号機と異なり、原子炉建屋で水素爆発が発生していない。これは、1号機の爆発の影響で開放し たブローアウトパネル(4m×6m)から水素を含むガスが放出され、原子炉建屋内で高い濃度の水素 が長時間蓄積することがなかったためであると推定されている。

3.2.1.3 福島第一3 号機原子炉

地震により原子炉は自動停止し、また外部電源が喪失したため、EDG が2台とも自動起動すると ともに、MSIVが閉止した。原子炉圧力はSRVにて制御されており、RCICは水位低(L2)で自動起動す るが、水位が低下する前に運転員が手動起動した。

津波が襲来し、その影響で海水冷却系のみならず、敷地高さ 10m にある建屋への浸水もあり、3 号機では多くの電源盤の機能が失われたものの、1、2号機とは異なり直流電源は残っていた。こ のため、原子炉水位等の監視や RCIC や高圧注入系(HPCI)といった、タービン駆動であって直流電 源で制御できる設備は使用可能な状態にあった。運転員は、津波の影響で EDG が2台ともトリップ し SBO となった後、RCIC により水位を制御した。この際、RCIC ポンプ叶出ラインから水源である復 水貯蔵タンク(CST)に戻すラインの弁も開け、直流電源を節約する運転操作がなされた。

3月12日11時36分にRCICが自動停止し、原 子炉水位が低下、水位低(L2)でHPCIが自動起動し た。HPCIの運転も RCIC と同様、直流電源を節約 するよう、また、大容量の注水で S/C の水位が上 昇しないよう、CST へのテストラインを開放し、 HPCI を連続的に運転することで、原子炉水位が維 持された (図 5.4-1)。

原子炉水位の測定値を MAAP コードによる解析 結果と共に図 5.4-2 に示す。HPCIの連続運転のた め、原子炉の崩壊熱で発生する蒸気が継続的かつ 大量に HPCI タービンに排出されるため、HPCI の 運転中は原子炉圧力が低い状態となった(図 5.4-3)。この間、DW 圧力が、解析結果よりも高 めに推移し(図 5.3-4)、ディーゼル駆動の消火 系ポンプ(DD-FP)で12日12時過ぎにS/Cスプレ イを実施すると、解析結果と同レベルになって いるが、これらの挙動の原因については不明で ある。

HPCI の運転が停止してしまう事態に備えるた め、SRV による原子炉減圧と DD-FP による注水の 準備作業がなされていた。13日2時過ぎに原子







炉圧力計測値が低下したため、運転員が HPCI 設備の損傷による原子炉生蒸気の放出を懸念し、2 時 42 分に HPCI を手動で停止した。そして、2 時 45 分に SRV を開放しようとしたが開動作せず、原子 炉圧力が上昇し、DD-FPによる注水ができない状態となった。車のバッテリーを用い、SRVの電磁弁 を駆動するための電源復旧の作業中であったところ、9時頃に SRV が開き、原子炉の減圧が始まり、 DD-FP と消防車による注水が開始された。解析では、HPCI が手動停止した時刻に注水が停止したと 仮定しており、その結果、9時過ぎに原子炉水位が TAF を下回り、10時40分頃に炉心損傷するとの 結果になっている。HPCI 停止以降の計測された原子炉水位は、MAAP 解析結果より低く推移している 時間があり、実際の水位は解析より早い段階で TAF を割込み、炉心損傷も解析より実際の方が早か



。これ以降、原子炉の水位の計測値が一時的に回 復している時期があるが、炉心損傷後は1号機と 同様、原子炉水位の指示値の信頼性は低いものと 考えられる。解析では、炉心損傷以降の計測水位 を信用できないものとして、消防車で注水した流 量の一部のみが原子炉に注水されたとの仮定が 置かれている (図 5.4-5)。

HPCI による原子炉注水をしている間、DW 圧力 計測値は、ラプチャディスク設定値よりも低かっ たが、格納容器ベントの準備を進め、13 日8時41分にベントラインを構成し、ラ プチャディスクが開放すればベントが開 始される状態とされていた。9時20分頃、 DW 圧力が低下しており、格納容器ベント が機能したと考えられる(図 5.4-6)。こ の最初のベント直後に、正門付近の線量 率が 300 µ Sv/h 程度まで一時的に上昇し ているが、その後のベントでは、このよ うな線量率の増加が見られていない。風向きに より、モニタリングカー配置位置で線量率の上 昇が見られないことも考えられるが、ベントに より排気筒上部に大量の FP が放出されると、風 向きとは関係なく直接線で線量が検知されうる ことを考慮すると、二回目以降では、FP 放出量 は限定的であったと推定されている。なお、一 回目ベントの直前の8時頃にMP-4での線量率の 上昇が見られるが、この時点では、3 号機の DW 圧力は最高使用圧力以下であり、既に炉心が損 傷している1号機からのFP 放出があったものと 推定されている。

1 号機の爆発があって以降、同様の爆発が3 号機でも予見されていたため、原子炉建屋の換 気をすべく、ブローアウトパネルの開放や原子





図 5.4-6 モニタリングデータと格納容器圧力(3/13)



図 5.4-7 原子炉建屋の損傷状況 (3号機)

炉建屋天井の穴開けなどの方法が検討されていた。その中で、原子炉建屋壁への穴開け時に爆発を 誘発する危険性が少ないウォータージェットの手配がなされていたが、機器が発電所に届く前の 3 月14日11時01分、原子炉建屋が爆発した(図5.4-7)。3号機の爆発は、1号機に比べて激しく、 また、発生した煙の色が、水素爆発に特徴的な白であった1号機に対し、3号機では黒かった。原 子炉建屋最上階の壁の構造が、1号機では鉄骨造であり、3号機は鉄筋コンクリートであるとの違い 19

があり、黒い煙は、このコンクリートが粉砕され たものが観測されたと推測されている。また、3 号機の方が爆発性の物質量が多いことに加え、よ り強度が高い鉄筋コンクリートであったことが、 より激しい爆発に寄与したものと推定されてい る。爆発の原因は、1号機と同様、炉心損傷に伴 い発生した水素が何らかの経路で原子炉建屋に 移行し、最上階であるオペフロにて爆発が発生し たものと推定しうる。3号機では、炉心損傷から



原子炉建屋爆発までの間、4回の格納容器ベントを実施しており、初回のベントから爆発までは約1 日経過していること、4回目のベントから爆発までは4時間程度経過していること、などから、ベ ントによりSGTSを逆流して原子炉建屋に水素が流入したとは考えにくい。また、ベント配管からの 逆流経路上には、グラビティダンパがあり(図5.4-8)、このダンパにより逆流は制限されるものと なっているので、完全な気密性は無いが、大流量が流れることは阻止できるものと考えうる。また、 平成23年12月22日に東京電力によりSGTSのフィルタートレインの線量率調査が実施されている。 計測された線量率が高々数mSv/hであり、仮に水素・FPを含むガスが大量に逆流したのであれば、 粒子状のFPの大部分は補足されるため、原子炉建屋内が広く汚染されていることと矛盾する。従っ て、SGTSからの逆流を完全に否定することは困難であるが、SGTSが原子炉建屋内への水素流入の主 たる経路とはなっていなかったと推定できる。

3.2.1.4 福島第一4号機原子炉

4号機は、定検停止中で、使用済み 燃料は全て使用済み燃料プール(SFP) にあった。このため、他号機や共用プ ールに比べると、崩壊熱による総発熱 量が最も高い状態であった(表5.5-1)。 地震により、外部電源が喪失、使用済 み燃料プール冷却系が停止し、EDG(B 系)が自動起動した(A系は点検中)。 津波が襲来し、その影響で海水冷却系 のみならず直流電源及び交流電源が全 て喪失したことから、SFPの冷却機能及 び補給水機能が喪失した。この段階で は、他のプールに比べて相対的に厳し 認続聴家くの魅が損傷も一部残存 4881

大きく損傷 3階は西端が損傷



5階は西側が一部残存するも、その他 は柱も含め損傷、4階は1面のみ損傷

5階壁多くの壁が損傷も一音

図 5.5-1 原子炉建屋の損傷状況(4号機)

いと認識されていたが、崩壊熱で水が蒸発し、燃料が露出するのは3月下旬頃と推定されていたことから、より重篤な状態であった1~3号機の炉心冷却等の対応が優先されていた。3月14日4時頃、SFP水温が推定されていた値に近い84℃であることが確認された。

3月15日6時12分、大きな衝撃音と振動 が発生し、原子炉建屋5階屋根付近に損傷 が確認された(図5.5-1)。4号機は停止中 で、かつ燃料は全てSFPにあり、前日には 水温を確認されていることから、燃料被覆 管の露出に伴う水ー金属反応による水素 の発生は考えにくく、爆発の原因が特定で きなかった。また、爆発によるプールや燃 料への影響の程度もわからず、SFPには水 位計がないことから水位が確保されてい



るかも不明であった。このような中で喫緊の課題として、代替の冷却手段が模索されて

いた。一方で、SFP に水が無ければ、燃料からのスカイシャイン線で4号機周辺の放射線量率が高くなると想定されるが、実際には、作業が可能な程度の線量であったことから、燃料は露出してはいないであろうと考えられていた。 3月16日には、ヘリコプターから4号機のSFP に水位があることが確認され、20日から放水車による淡水放水、22日から



コンクリートポンプ車による海水放水が開始され、30日からは淡水に切り替えられ、7 月 30日には新たに設置された代替冷却系により、冷却が開始された。

爆発の原因については、a.使用済み燃料の過熱に伴う水素、b.気化した油、c.持ち込み 可燃性ガス、d.水の放射線分解による水素、が想定される。a.は水位が確保されていた こと、b.は建屋内の温度が、油が気化する程の温度にはならないと考えられること、c. はボンベ等では可燃性ガスの量が少なく大規模爆発しないこと、d.は爆発に至るほどの 量は発生しないこと、からいずれも否定される。大規模損傷の原因となる可燃性ガスの 発生は、炉心損傷時の水素発生が最も可能性が高く、隣接する3号機からの流入経路が





図 5.5-5 耐震補強工事



図 5.5-6 原子炉建屋の傾斜確認

表 5.5-2 サンプリング結果(1 F 4)

| - | 10.101.002 | .涤度 (Bq/cm ³) | | | | | | | | | |
|-------------|------------|---------------------------|----------|---------|----------------|--------------|--|--|--|--|--|
| Demonstrate | - MA | H23 4/12 | H23 4/28 | H23 5/7 | H23 8/20 | (参考) H24 3/4 | | | | | |
| セジウム 134 | 約2年 | 88 | 49 | 56 | 44 | 快出取界未満 | | | | | |
| ゼシウム 137 | 1/30年 | 93 | 55 | 67 | 61 | 0.13 | | | | | |
| よう第131 | 約8日 | 2:20 | 27 | 16 | 秋出 限界未満 | 検出限界未満 | | | | | |



検討され、3、4 号機で共用されている格納容器 ベント配管からの流入が有力視された(図5.5-2)。 4 号機建屋への流入経路には、SGTS があり、設計 情報から、1 号機や3 号機にある逆流を抑制する ダンパが無いことがわかった。この逆流を裏付け るため、平成23 年 8 月 25 日に、SGTS フィルタ ートレインの線量率測定が実施され、出口側(3 号機側)の線量が高く(図5.5-3)、3 号機からの 逆流が裏付けられた。

原子炉建屋4、5階の現場調査により、5階の 床面が上方に向かって変形している一方で、 4 階の床面は下方に向かって変形し、4 階の 空調ダクトが元の位置にはなく、瓦礫状にな って床に散乱していたことがわかっている (図5.5-4)。これらのことから、爆発は4階 の空調ダクトから発生し、これが階段室等を 経由して建屋全体に伝搬したものと考えら れている。

SFP の下部の2階エリアには、漏水の痕跡は 見られず、また、SFP を支持する構造物に 損傷は見られていないことから、構造上の 健全性は確保されていると考えられる。事 故後の状態で、東北地方太平洋沖地震によ る揺れと同程度の地震動(基準地震動S s)に再度襲われても、使用済燃料プール を含め、原子炉建屋が壊れないことが解析 により確認されている。さらに耐震余裕度 を高めるため、SFP 底部を補強して(図 5.5-5)、20%以上向上させている。また、 原子炉建屋の傾きについては、プール水面 と建屋床との距離測定、建屋壁面の光学機 器による傾き調査が継続的に実施されて おり、有意な傾きがないことが確認されて いる (図 5.5-6)。

SFP 内の写真等からは、これまでのところ使用済み燃料ラックに異常は見られておらず、 取り出された新燃料の検査でも燃料は健全であることが確認されている。また、プール 水の核種分析の結果、よう素、セシウムが検出されているものの、1~3号機よりも2 桁以上低い濃度となっている(表 5.5-2)。事故発生前よりも濃度は高いが、絶対値と して小さいことから、系統的な大量破損は発生しておらず、確認された FP は1~3号 機の炉心由来の可能性が高いと推定されている。

3月16日にヘリコプターから水面を確認して以降、放水車やコンクリートポンプ車からの放水が実施され、4月12日からコンクリートポンプ車を用いて水位測定ができるようになった。この水位測定実績と放水の実績に、地震時のスロッシングや爆発の影響による水位低下、放水の歩留まり(SFPに注入された割合)を仮定し、SFPの水位・温度が評価されている(図5.5-7)。水位が最も低くなった(燃料ラック頂部+1.5m)4月20日頃までは、放水量が十分ではなかった。4月22日の注水でプールゲートが閉じたと推定され、この時期を境に水位が上昇し、4月27日にはスキマーサージタンクの大幅な水位上昇が見られ、満水となったことが確認されている。

1~3 号機の SFP でも同様の評価が実施されており、いずれも 4 号機に比べて崩壊熱が 小さく、温度は 70℃程度で推移し、蒸発に伴う水位低下あるが、水深は十分に確保さ れていたとの結果となっている。1、3 号機は原子炉建屋が爆発しているが、SFP の水位 維持機能は保たれていると考えられる。5、6 号機の SFP 及び共用プールは、4 号機に比 べて崩壊熱が小さく、水温が一時的に 70℃程度まで上昇しているが、代替の冷却設備 の導入により安定した冷却状態が維持された。また、1~3 号機の SFP 水のサンプリン グ結果によると(表 5.5-3)、いずれも原子炉停止後 7 ヶ月以上経過しているにも係わ らず、事故初期に短半減期核種が検出されていること、核種組成がタービン建屋のたま り水の核種組成と類似していることから、SFP 水の汚染は、損傷した原子炉由来と推定 されている。

3.2.1.5 福島第一5、6号機原 子炉

5、6号機は、定検停止中(冷 温停止)であり、5号機は、原 子炉圧力容器(RPV)の耐圧漏え い試験中で原子炉圧力が 7MPa[gage]程度に維持され、6 号機は、RPV ヘッドオンの状態であった。地震 動は、1~4号機と同様、基準地震動と同程度 もしくは若干上回るものであったが、津波高さ は設置許可時の設計基準値のみならず、最新の 評価値をも大幅に上回るものであった。ただし、 5、6号機側は、主要建屋が設置されている敷 地高さが、0.P.(小名浜ポイント)+13m であ り、1~4号機(0.P.+10m)より高く、津波の



▼:主要建屋内への浸水経路になったと考えられる地上の開口マ:主要建屋内への浸水経路になったと考えられる地下のトレンチ・ダクトへ接続する開口

図 5.6・1 主要建屋への浸水状況



被害は甚大ではあったが、相対的には小さいものであった(図 5.6-1)。

5 号機は、地震により外部電源が喪失し、EDG2 台が自動起動した。外部電源喪失により加圧に使 用していた制御棒駆動機構ポンプがトリップし、原子炉圧力が一時的に5MPa[gage]程度まで低下し た。津波の影響で、高圧の電源盤、非常用の低圧電源盤の全てが機能喪失し、SBOとなった。常用の 低圧電源盤の一部は使用可能で、直流電源も使用できる状態であり、プラントパラメータは確認で きた。原子炉は起動前で、新燃料も装荷されていたことから崩壊熱レベルは小さく、原子炉圧力の 上昇は緩慢であった。11日夜から電源系の点検・復旧作業が開始された(図5.6-2)。12日に入って からは、RPV 頂部ベントによる原子炉減圧がなされ、14 日になって、耐圧漏えい試験のために除外 されていた SRV の窒素ガス供給ラインが復旧され、断続的に原子炉の減圧操作がなされるようにな った。また、復水補給水系(MUWC)への電源が復旧し、14日には、原子炉注水が開始され、原子炉水 位が維持された。19日には、仮設水中ポンプが起動し、RHR(C)による SFP 冷却が開始され、20日 には、RHR (C)により原子炉冷却が実施され、冷温停止となった。以降、SFP と原子炉を交互に冷却 する運用がなされた。

6 号機は、地震により外部電源が喪失し、EDG3 台が自動起動した。津波の影響で、一部の高圧電 源盤が使用不能となったが、直流電源は被水を逃れ使用可能であり、EDG1 台(6B)は、その冷却系が 海水系に依存しない空冷であったことから機能を維持し、SBO には至らなかった。13 日から、MUWC による原子炉への代替注水が開始され、一方、崩壊熱の影響により原子炉圧力が徐々に上昇したこ とから、14日からはSRVによる原子炉減圧がなされ、MUWCによる注水が可能な原子炉圧力レベルが 維持された。19日には、仮設水中ポンプが起動し、RHR (B)による SFP 冷却が開始され、20日には RHR (B) による原子炉冷却がなされ、冷温停止となった。以降、SFP と原子炉を交互に冷却する運用がなされ た。

3.2.2 福島第二原子力発電所 1~4 号機

東京電力福島第二原子力発電所(以下、「福島 二」)は福島県双葉郡楢葉町と富岡町に立地し、 カ110万kWのBWRプラントが4基設置されている これらのプラントは昭和57年から昭和62年にか て運転が開始され、原子炉型式・格納容器型式は 1 号機が BWR-5 MARK-II 型、2~4 号機が BWR MARK-II 改良型である。

東北地方太平洋沖地震においては、福島県楢葉町 と富岡町においても震度6強を記録し、 各プラントの基礎版上で観測された最 大加速度は、水平方向が 3 号機の 277Gal、鉛直方向が1号機での305Gal であった(表 6.1-1)。最大加速度は、 いずれも基準地震動Ssに対する応答加

表 6.1-1 地震動観測記録

| 数用 | d | 3 | 観 洞 記 録 最大加速度値 | | 基準地震動Saiに対する 最大応答加速度値 | | | | | | |
|------------|------------|-------|-------------------|-------|--------------------------|------|------|--|--|--|--|
| WTP-MRS | 0.42.7.981 | 南北方向 | 東西方向 | 上下方向 | 南北方向 | 東西方向 | 上下方向 | | | | |
| | 十号模 | 460*1 | 447*1 | 258*1 | 487 | 489 | 412 | | | | |
| | 2号機 | 348*1 | 550 ^{#1} | 302*1 | 441 | 438 | 420 | | | | |
| | 3号槐 | 322*1 | 507*1 | 231*1 | 449 | 441 | 429 | | | | |
| 诸岛第一 | 4号键 | 281*1 | 319#1 | 200*1 | 447 | 445 | 422 | | | | |
| | 6号棍 | 311*1 | 548 ^{®1} | 256*1 | 452 | 452 | 427 | | | | |
| | 6号機 | 298*1 | 444*1 | 244 | 445 | 448 | 415 | | | | |
| | 1号模 | 254 | 230*1 | 305 | 434 | 434 | 512 | | | | |
| | 2号模 | 243 | 196*1 | 232*1 | 428 | 429 | 504 | | | | |
| 18 AL AL - | 3月代 | 277*1 | 216*1 | 208*1 | 428 | 430 | 504 | | | | |
| | 4号模 | 210*1 | 205*1 | 288*1 | 415 | 415 | 504 | | | | |

図 6.1-1 原子力発電所配置と津波

速度より小さかった。 その後に襲った巨大津波 号機南側や免震重要棟付近 上高さ約 15m に達し、特に 敷地高さに配置される海水 換器建屋に大きな被害を与 (図 6.1-1)。これにより 3 を除く3プラントの原子炉 用の海水ポンプが機能喪失 災法10条該当事象(原子炉 機能喪失)が宣言されたが、 にその後、原子炉の熱の逃



免震重要棟に設置された発電所 原子力防災組織によって、大津波警 報が発報される中でのプラントウ オークダウンによる設備被害の確 認、それに基づく復旧に向けてのロ ジスティクスの構築、本店原子力防



図 6.1-2 津波による浸水範囲



図 6.1-3 津波高さの相違の原因

災組織とタイアップした設備調達が行われ、発電所員と協力企業との協働により、海水ポンプモー タ取替とこれらへの仮設ケーブルの敷設を経て、地震から4日後の平成23年3月15日7時15分、 全てのプラントの冷温停止が達成された。

3.2.2.1 東北地方太平洋沖地震及び津波の概況

2011 年 3 月 11 日午後 2 時 46 分頃に発生した世界の観測史上 4 番目の規模(マグニチュード 9.0) の東北地方太平洋沖地震の後、15時30分頃に福島第二に津波が来襲した。後の解析により、福島 第二の沖合で津波高さは約9mと推定された。福島第二の津波の痕跡高調査の結果では、小名浜ポ イント(0.P.)+4mの海側エリアでは浸水(浸水高 0.P.約+7m)が全域に及んでいた(図 6.1-2)。

また、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、0.P.+12mの 敷地まで津波が溯上し、1号機から4号機の方向へと流れた。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浸水が認められていない。

東北地方太平洋沖地震に伴い発生した津波について、東京電力により再現解析が実施され、福 島第一では、図の①、②、③から出た波のピークが重なる度合いが強く、推定津波高さ約 13m と なり、福島第二(約9m)に比べて津波高さが大きくなるとの結果が得られている(図 6.1-3)。

3.2.2.2 地震及び津波の影響

(1) 地震による発電所への影響

東京電力によれば、地震による影響を調査するため、地震直後にウォークダウンが実施され、 耐震安全上重要な施設には外観上の異常は認められず、淡水タンク等、耐震 B、C クラスの機器の 一部に損傷が認められた。また、代表的な設備に対して、実測地震動を基にして地震応答解析が 実施され、各部位に作用する地震荷重が基準地震動 Ss による荷重を下回る、ないしは配管系にお いては発生応力が評価基準値を下回ることが確認された。

一方、新福島変電所では地震後に断路器の損傷が発生したため、500kV 富岡線2号が使用不能と なった。また、66kV 岩井戸線2号では避雷器の損傷が確認されたため、受電を停止した。地震発 生前から66kV 岩井戸線1号が点検停止していたため、4回線の外部電源のうち500kV 富岡線1号 の1回線のみから受電する状態となった。なお、現行の原子力発電所の耐震設計においては、基 準地震動発生時には非常用ディーゼル発電機(D/G)からの受電を想定しているが、福島第一と異 なり電源盤の浸水が限定的であったことに加えて外部電源が残ったことが、その後の復旧活動を 容易にする要因となった。

(2) 津波による発電所への影響

発電所海側の海水熱交換器建屋では3 号機南側建屋を除いて、津波によって大物搬入口が破ら れ建屋内部へ海水が浸水した。大物搬入口の扉は本来外開きであったが、津波の波力によって内 向きに破られており、1 階の残留熱除去冷却系(RHRC) ポンプ、非常用ディーゼル発電設備冷却系 (EECW) ポンプ、残留熱除去海水系(RHRS) ポンプ及び各機器の電源盤が被水した。この際、横 形ポンプである RHRC ポンプ及び EECW ポンプでは縦形ポンプである RHRS ポンプに比べて電動機の 設置高さが低いため、電動機も被水して機能を喪失した。

さらに機器ハッチや建屋内の空調ダクトを通じて、地下階に浸水した。この際、1号機及び3号 機では海水熱交換器建屋内に侵入した海水がコンクリートトレンチを介して3号機のタービン建 屋まで到達し、タービン建屋の地下階を浸水した。

また、主要建屋敷地エリア南東側から道路に沿って遡上した津波は廃棄物処理建屋、免震重要 棟及び1号機原子炉建屋にまで到達した。廃棄物処理建屋、免震重要棟では扉が破られ浸水し、1 号機原子炉建屋では換気用の給気ルーバから浸水し、D/Gの送風機を通じてD/Gに到達した。

津波の設備への影響として特筆すべき点は、偶然にも3号機のB系熱交換器建屋の大物搬入口 だけは津波で破られることが無く、建屋内の設備が健全に保たれたことである。このため、3号機 のみ原災法該当事象を宣言することなく、通常の手順通り早期に冷温停止された。また、2号機及 び4号機のEECWポンプは、A系が1階に、B系が2階に配置され、B系のみが必然的に生き残った のに対し、2号機及び4号機のB系RHRSポンプの2台は、隣り合って配置されていたにもかかわ らず、偶々一方のみが機能を喪失した。

なお、原子炉建屋の非常用電源盤については、浸水した1号機の一部の電源盤を除き被害を受けなかった。また、冷却用海水ポンプの浸水を免れた3号のB系及び高圧炉心スプレイ系(HPCS)のD/G、並びに4号HPCSのD/Gが運転可能な状態を維持した。

3.2.2.3 津波到達以降の対応状況

(1) 地震及び津波後の原子炉注水対

定格熱出力一定運転中であった 1~4 機は、3月11日14時46分に発生した東 地方太平洋沖地震によるスクラム信号 全号機緊急停止した。その約30分後に 来した津波の影響によって非常用機器 却系ポンプが起動出来なくなり、3号機 系を除く残留熱除去系(RHR)は原子炉 除熱する機能を喪失した。これにより18 33分に原災法10条該当事象(原子炉除



機能喪失)と判断された。一方、3 号機については、浸水を免れた RHR の B 系列によって原子炉の 除熱を行うことが出来たため、3 月 12 日 12 時 15 分に冷温停止となった。

津波で除熱機能を喪失した1号機、2号機及び4号機では、事故時運転操作手順書[徴候ベース] (EOP)に従い、主蒸気隔離弁(MSIV)が手動で全閉とされ、主蒸気逃がし安全弁(SRV)にて減圧 操作が開始され、手動起動した原子炉隔離時冷却系(RCIC)の注水によって原子炉の冷却が維持 された。その後、原子炉圧力の減少に伴いRCICタービンを駆動する蒸気圧力が低下して自動隔離 した以降は、AM策である復水補給水系(MUWC)による代替注水が開始され、原子炉の水位が維持 された。これらの EOP に基づく柔軟な対応によって、原子炉の除熱機能が喪失した環境下におい ても、原子炉の冷却が維持された。

(2) 除熱機能復旧までの格納容器冷却対応

原子炉への注水を行っている間、RCIC 運転及び SRV 開によって S/C の水温は上昇し、100℃を超 えた。これにより、3月12日6時7分には全号機で原災法15条該当事象(圧力抑制機能喪失)が 宣言された。S/C を冷却するため、手順書に記載される MUWC による格納容器スプレイが実施され た他、運転員の機転により、通常は用いない可燃性ガス濃度制御系の冷却水排水ラインを利用し た S/C 注水が実施された(図 6.1-4)。これらの操作により、格納容器(PCV)の温度及び圧力の上 昇を一時的に抑制することができ、原子炉除熱機能の復旧への時間的余裕が得られた。

一方、原子炉除熱機能は長期間にわたって回復しない状況に備え、PCV 耐圧ベントのためのライン構成が実施された。MUWC による代替注水と PCV 耐圧ベントによる、いわゆるフィード・アンド・ ブリードのラインを完成させておき、S/C 側の出口弁開操作のワン・アクションを残した状態とさ れた。なお、S/C 圧力が PCV 耐圧ベント実施圧力に至る前に RHR による S/C クーリングが開始され たため、実際には PCV ベントは実施されなかった。

(3) ウォークダウンに基づく復旧計画

福島第二では、東北地方太平洋沖地震発生後、発電所長を本部長とする発電所原子力防災組織 が免震重要棟に即時に立ち上げられ、情報提供や支援要請、事故収束対応を行う体制が整えられ

た。運転員による地震及び津波後の原子炉冷却維持操作と並行して、発電所原子力防災組織では 現場確認によって設備の被害状況を把握し、作業の優先順位付けを行うことを計画した。

しかしながら、現場確認が計画された段階では、余震と大津波警報が継続して発生しており、 照明が無く、大量の瓦礫や開口部が存在する現場は非常に危険な状態であった。津波襲来時の待 避連絡手段としてページングシステムが使えないほか、津波により被害を受けた建物の中ではPHS も使えない状況だったため、現場への復旧班の派遣は直ちには実行されなかった。伝令等も配置 する待避連絡手順が定められ、安全装備を調えて復旧班が海に近い海水熱交換器建屋等の被害現 場の確認が開始されたのは、3月11日の22時頃だった。

復旧班の報告によって現場状況を把握した発電所原子力防災組織は、短時間で効率的に除熱機 能が回復できるよう、海水熱交換器建屋内の非常用機器冷却系ポンプのうち、被水の影響が比較 的小さいものを優先的に復旧する方針を決定した。被水したポンプについては点検・補修が実施 され、被水したモータについては交換することとされた。また、これらのポンプのモータに電気 を供給する電源盤が浸水により機能喪失していたことから、津波の影響を受けなかった廃棄物処 理建屋、3号機海水熱交換器建屋の電源盤や、高圧電源車とモータを直結することにより当該モー タに電気を供給することが計画された。

(4) 物資の緊急調達

福島第二では、ウォークダウンの結果を踏まえて策定された復旧計画に基づき、復旧活動を実 施する上で必要となるモータ、高圧電源車、移動用変圧器、ケーブルについて、東京電力本店の 原子力防災組織や同電力柏崎刈羽原子力発電所(以下、「柏崎刈羽」)に緊急調達が依頼された。 依頼を受けた本店原子力防災組織や柏崎刈羽では関係各所に在庫や予備用の資機材が無いか確認 し、要求仕様が合致した資機材については空輸や陸送等あらゆる手段を講じて福島第二へ輸送す ることを計画した。

これらの資機材は、3月13日6時頃までに福島第二へ順次到着した。1号機 EECW(B)、RHRC(D) のモータは、東芝三重工場より福島空港まで自衛隊機により空輸され、さらに発電所までは自衛 隊が陸送を行った。4号機 RHRC(B)のモータは柏崎刈羽から協力企業のトラックにより輸送され た。また、1号機及び4号機のEECW(B)等の電源として依頼された高圧電源車は、東京電力の各支 店送配電部門所有のものが、各支店の社員によって発電所に持ち込まれた。さらに、東京電力の 倉庫や協力企業の倉庫から調達された仮設ケーブルは4プラント合計で総延長約9kmになった。

今回の陸送に関しては以下の二点において労苦が多く、円滑な輸送が阻害されたと伝えられて いる。

第一に、地震後には道路の陥没や段差等により通行不可能な箇所が多く、発電所周辺の道路の サーベイにより通行可能ルートを早期に把握することが重要である。この情報を輸送者に伝達す る手段の整備も求められる。最も確実なのは、中継点を設けておきそこで輸送者と合流して先導 する方法であるが、専門の組織を設けておかないと円滑な実行は困難である。

第二に、放射能汚染が懸念されるエリア内への輸送に関して、輸送者と事前の合意を得ておく ことが必要である。多くの輸送者は警察により封鎖されたエリア内への立ち入りを拒否されたた め、大型免許を有する発電所員がトラックを引き継いで発電所まで輸送を行った。これも中継点 21 と専門の組織により輸送者に頼らず搬入できるような対策を講じておく必要がある。

(5) 除熱機能復旧と冷温停止の達成

海水熱交換器建屋内の非常用機器冷却系ポンプの復旧作業は、まず、熱交換器建屋へのアクセ スルートの整備から始められた。津波漂流物の散乱と道路のアスファルトの流出により、熱交換 器建屋へのアクセスが困難な状況であったが、他の作業で使用していた重機を当該作業の作業員 が操作し、漂流物の撤去、アスファルト流出地点の砂利による応急復旧等を行い、熱交換器建屋 へのアクセスルートが確保された。

続いて、非常用機器冷却系ポンプのモータ取替とモータへの仮設ケーブル敷設が開始された。 特に総延長約 9km の仮設ケーブルは、配電部門からの応援者を含む東京電力の社員と協力企業の 作業員を合わせた 200 人の手で 3 月 13 日 23 時 30 分頃までに敷設された。

また、ケーブル敷設に並行して、ポンプの機械部品の状態確認、モータの据え付けが行われ、1 号機を始めとして、準備が整ったものから3月13日20時17分より順次起動された。

その後、3月14日1時24分の1号機を皮切りにRHR ポンプ(B)が順次起動され、15時42分に は4号機のRHR ポンプ(B)が起動されたことから、発電所長は原災法第10条該当事象(原子炉除 熱機能喪失)の状態から全号機回復したものと判断した。さらに、S/Cの冷却に加え原子炉水を早 期に冷却するため、RHR ポンプ(B)によってS/CからRHR 熱交換器(B)を介して原子炉へ注水され、 SRV を経由して S/C へ原子炉水を戻す循環ラインによる冷却が応急的に実施された。これにより、 S/C の水温が最初の1号機では3月14日17時00分、最終的に4号機では3月15日7時15分に 100℃未満となったことから、発電所長は全号機が原災法第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。

(6) 冷温停止達成を支えたもの

上記対応の通り、様々な取組みと要因に支えられて福島第二の全号機で冷温停止が達成された。 とりわけ、免震重要棟は本復旧活動における中心拠点となっており、冷温停止を達成する上での 重要な役割を占めていた。免震重要棟は、中越沖地震における知見を踏まえて新たに設置された ものであり、震災の約8か月前の平成22年7月に運用が開始されたばかりであったが、その免震 機能、通信・連絡機能、収納機能等が今回の事故収束対応をより円滑なものにしたと推測される。

また、事故当時は約400名の発電所員が発電所原子力防災組織での復旧に従事しており、限ら れた食料と非衛生的な環境下において、約10日間隔離状態で作業に従事した。所員の多くが地元 の出身であり、津波で家が流され、家族の安否が分からないという状況のもとでの休息のない復 旧作業は、自身を顧みず、原子力安全を最優先として復旧に徹するという所員のプロ意識が成し 得たものであると考えられる。この努力がなければ、冷温停止の達成は困難を極めたものになっ ていたと推察される。

3.2.3 女川原子力発電所

東北電力女川原子力発電所(以下、「女川」)は、宮城県牡鹿郡女川町と石巻市に立地し、沸騰水型軽水炉(BWR)が3基設置されている。1号機はBWR-4 Mark-I型、 定格電気出力52.4万kW、2号機及び3号機はBWR-5 Mark-I改良型、 定格電気出力82.5万kWであり、これらプラントは昭和59年から平成14年にかけて運転が開始されている。

東北地方太平洋沖地震においては、1号機及び3号機が通常運転中、2号機が原子炉起動中のところ、平成23年3月11日午後2時46分頃の地震の発生に伴い、全号機の原子炉が設計どおり自動停止した。

地震発生後、発電所外部から供給されている電源は、全 5 回線のうち1回線が確保され、非常用 電源としての D/G も全て健全であった。その後発生した津波は、発電所構内の主要建屋には到達せ ず、原子炉及び使用済み燃料プール (Spent Fuel Pool: SFP) を冷却する機能も健全であったため、 原子炉は安定した状態で停止し、発電所の安全性は確保された。

震源に最も近い原子力発電所であったが、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込 める」という3つが有効に機能し、環境への放射能の影響はなかった。

本節では、東北地方太平洋沖地震発生後の女川の状況並びに被害状況及び安全機能確保の要因について述べる。なお、女川における事象の詳細については参考資料⁶⁻³⁾に記載されており、セミナーではその要点が紹介された⁶⁻⁴⁾。

3.2.3.1 東日本大震災の概要及びプラントの対応状況

(1) 地震・津波の概要

| 発 | 生 日 | 時 | : 平成 23 年 3 月 11 日 (金) 14 時 46 分頃 |
|-----|-------|-----|--------------------------------------------|
| 震 | 源 | 地 | : 三陸沖約 130km 深さ約 24km |
| 発電〕 | 所との距 | Ī離 | : 震源距離 125km、震央距離 123km |
| マグ | ニチュー | - ド | : 9.0 |
| 発電房 | 斤内観測震 | 夏度 | :6弱 |
| 地 震 | [加速] | 度 | :567.5 ガル(保安確認用地震計:1号機原子炉建屋地下2階) |
| | | | (過去最大地震加速度:251.2 ガル(平成 17 年 8 月 16 日)) |
| 津波: | 最大波高 | iঽ | :約13m (潮位計による観測値) |
| 津波最 | 大波到達明 | 寺刻 | : 平成 23 年 3 月 11 日 15 時 29 分(地震発生から 43 分後) |

a. 地震観測記録の分析結果

東北地方太平洋沖地震時に女川1号機、2号機及び3号機の原子炉建屋各階で観測された最大 加速度値は、耐震設計審査指針の改定(平成18年9月)を踏まえて策定した基準地震動Ssに 対する最大応答加速度値を一部上回っていたものの、ほぼ同等であった。(表6.2-1参照)

また、敷地地盤の地震観測記録の応答スペクトルは、基準地震動 Ss の応答スペクトルを一部 上回った(地震計より上部の地盤の影響を含む)ものの、ほぼ同等であった。

地震観測記録に基づき地震応答解析を実施し、1号機、2号機及び3号機原子炉建屋の耐震壁の変形及び各階の耐震壁に作用したせん断力を評価した結果、原子炉建屋の機能が維持されて 93 いることが確認された。

b. 津波の調査結果

女川の潮位計で観測された津波の高さは、女川ポイント(0.P.)^{*1}+約13mであり、敷地海側の一部において海水の浸入痕が確認されたが、主要な施設が設置されている敷地高さ(0.P.+約13.8m^{×1})を超えていないことが確認された。

※1:0.P.とは、女川原子力発電所工事用基準面で 0.P.±0m は東京湾平均海面-0.74m の高さである。津波及び 敷地の高さは、東北地方太平洋沖地震後に公表された国土地理院による女川発電所周辺における地殻変動 (-約1m)を考慮した値である。たとえば、地震以前の敷地高さは 0.P.+約14.8m であったが、本報告書で は地震後の敷地高さである 0.P.+約13.8m との記載にしている。

表 6.2-1 地震観測記録と基準地震動 Ss に対する最大応答加速度値の比較

| | | | 観測記録 | | 基準 | 地震動 Ss に | 対する | | | | | |
|----------|--------------------|-------|--------|------|------|----------|------|--|--|--|--|--|
| | 観測位置 | 最大 | 、加速度(ガ | ル) | 最大応 | 答加速度值 | (ガル) | | | | | |
| | | 南北方向 | 東西方向 | 鉛直方向 | 南北方向 | 東西方向 | 鉛直方向 | | | | | |
| | RI | 200 | 163 | 138 | 220 | 220 | 1900 | | | | | |
| | 座上 | 0 * 2 | 6 | 9 | 2 | 0 | 1388 | | | | | |
| 1 🗆 🕬 | 始 約時時中(61%) | 130 | 000 | 118 | 128 | 144 | 1001 | | | | | |
| 1 万侬 | 於科取省/木 (5 陌) | 3 | 998 | 3 | 1 | 3 | 1001 | | | | | |
| | 1 階 | 573 | 574 | 510 | 660 | 717 | 527 | | | | | |
| | 基礎版上 | 540 | 587 | 439 | 532 | 529 | 451 | | | | | |
| | BL | 175 | 161 | 109 | 302 | 263 | 1001 | | | | | |
| | 座上 | 5 | 7 | 3 | 3 | 4 | 1091 | | | | | |
| 0 11 14% | 佛和臣若古(21世) | 127 | 000 | 749 | 122 | 111 | 0.00 | | | | | |
| 2 方機 | 於科取省床 (3 陌) | 0 | 830 | 743 | 0 | 0 | 908 | | | | | |
| | 1 階 | 605 | 569 | 330 | 724 | 658 | 768 | | | | | |
| | 基礎版上 | 607 | 461 | 389 | 594 | 572 | 490 | | | | | |
| | ₽ L | 186 | 157 | 100 | 225 | 234 | 1064 | | | | | |
| | 座上 | 8 | 8 | 4 | 8 | 8 2 | | | | | | |
| っ旦地 | <i>謝料</i> 雨井古(9 階) | 056 | 017 | 000 | 120 | 120 | 028 | | | | | |
| こ方院 | 於科取省床 (3 陌) | 900 | 917 | 000 | 1 | 1 0 | | | | | | |
| | 1 階 | 657 | 692 | 547 | 792 | 872 | 777 | | | | | |
| | 基礎版上 | 573 | 458 | 321 | 512 | 497 | 476 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

※2:当該地震計の最大設定値(2000ガル)を上回っているため参考値。

(2) 各号機の冷温停止までの対応操作

a. 1 号機

14時46分、地震の強い揺れを検知し、原子炉は自動停止。全制御棒は正常に挿入され、15時05分に未臨界を確認。地震発生直後は外部電源が確保されていたが、地震により常用系の高圧 電源盤(Metal-Clad Switch Gear: M/C)内で短絡・地絡が発生し、外部電源を受電する起動用 変圧器が停止した。これにより給復水系のポンプが使用できなくなったことから原子炉への給 水は RCIC によりなされ、原子炉の圧力制御は SRV によりなされた。その後原子炉の冷却は RHR によりなされ、3月12日0時58分、冷温停止となった。(図 6.2-1 参照)



図 6.2-1 地震発生後の原子炉水位及び炉水温度(1号機)

b. 2 号機

原子炉起動を開始したところであり、地震発生直前の状態は原子炉未臨界かつ炉水温度 100℃ 未満であったことから、原子炉自動停止後の3月11日14時49分、原子炉モードスイッチ「停 止」操作により冷温停止となった。

c. 3 号機

1 号機と同様、原子炉自動停止により全制御棒は正常に挿入され、14 時 57 分に未臨界を確認。 原子炉自動停止後の原子炉への給水は給復水系により行われていたが、津波により海水ポンプ エリアに侵入した海水の影響でタービン補機冷却水系ポンプが停止したことにより、冷却水の 供給がなくなった原子炉給水ポンプが手動停止され、RCIC による給水が実施された。原子炉の 圧力制御はSRVによりなされた。その後原子炉の冷却はRHRによりなされ、3 月 12 日 1 時 17 分、 冷温停止となった。(図 6.2-2 参照)



図 6.2-2 地震発生後の原子炉水位及び炉水温度(3号機)

3.2.3.2 プラントの被害状況

地震発生後に確認された主なプラント被害状況は以下のとおりである。

(1)1号機重油貯蔵タンクの倒壊

地震後のパトロールにて、港湾部に設置していた補助ボイラーの燃料用の重油貯蔵タンクが倒 壊し、1 号機取水口(海洋)側に重油が流出していることが確認された。このため吸着マットによ り重油の吸着回収がなされるとともにオイルフェンスによる湾外への重油拡散防止措置が実施さ れた。なお、タンク倒壊時、補助ボイラーは既に停止しており重油の供給は行われていなかった。 このタンクは発電所構内の主要設備が設置されている敷地高さ(0.P.+13.8m)より低い、 0.P.+2.5mの場所に設置されていたことから、津波の影響により倒壊したものと判断された。

(2) 1号機高圧電源盤の火災

地震発生後、中央制御室で火災報知器が発報したため、運転員が現場確認に向い、15時30分、 タービン建屋地下階からの発煙を確認した。当初は発煙による視界不良により発煙箇所の特定が できなかったが、その後の現場確認でタービン建屋地下1階の常用系のM/Cが焼損し発煙してい ることが確認された。地震及び津波の影響により、牡鹿半島内の道路は寸断され、消防署員の到 着が困難なことから、自衛消防隊による消火活動が行われ、同日22時55分に消火が確認された。

火災の原因は、M/C内で接続位置にて吊り上げられていたしゃ断器が地震による振動で大きく揺 れたため、このしゃ断器の断路部が破損し、M/C内で周囲の構造物と接触して短絡等が生じ、これ に伴い発生した火花により、M/C内ケーブルの絶縁被覆が溶け発煙したものと推定されている。(図 6.2-3 参照)火災が発生した M/C については、横置き型で固定する機構があり耐震性の高い構造と なっているしゃ断器への取替えが行われた。



図 6.2-3 女川 1 号機 高圧電源盤火災発生推定メカニズム

(3)2号機原子炉補機冷却水B系ポンプ及び高圧炉心スプレイ補機冷却水系ポンプの浸水 地震後のパトロールにて、原子炉建屋地下3階の非管理区域にある補機冷却系熱交換器室に海 水が流入しており、原子炉補機冷却水B系ポンプ及びHPCS補機冷却水系ポンプが浸水しているこ とが確認された。浸水によりこの2系統のポンプは機能喪失したが、A系のポンプは健全であった ため、原子炉及びSFPの冷却は問題なく行われた。

海水が浸水した原因は、津波により水位が上昇し、海水ポンプ室に設置している水位計設置箱 の上蓋が押し上げられ、そこから流入した海水がケーブルトレイ及び配管の貫通部を通じて配管 等の地下通路に流入した後、配管の貫通部を通じて原子炉補機冷却系熱交換器室等に浸水したも のと推定されている。(図 6.2-4 参照)

水位計設置箱はその後取り外され、開口部に閉止板の取り付けが行われた。



図 6.2-4 女川 2 号機 原子炉建屋付属棟への海水流入のメカニズム

3.2.3.3 女川原子力発電所の安全機能確保の要因

女川が震度6弱、最大波高13mの津波に襲われながらも「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」という3つの機能を達成できた要因について主なものを以下に記す。

(1)敷地高さの設定

敷地の高さについては、1 号機の建設にあたり、計画当初から津波対策が重要課題であるとの認 識から、東北電力内に土木工学、地球物理学の外部専門家を含む社内委員会が設置され、議論が 重ねられた。当時の文献調査や聞き込み調査による評価では、発電所敷地付近における津波高さ は 3m 程度と想定されていたが、社内委員会における議論の結果、「①敷地の高さをもって津波対 策とする。②敷地の高さは 0. P. +15m 程度で良い。」と集約され、屋外重要土木構造物と主要建屋 1 階の高さは 0. P. +15m、敷地の高さを 0. P. +14. 8m と決定された。1 号機設置許可申請以降も、2・3 号機設置許可申請時や土木学会による津波評価技術が開発された際にその時々の最新知見を踏ま えて津波評価が実施されており、いずれの場合においても想定される津波高さが敷地高さ以下で あることが確認されている。地震に伴う地殻変動により、敷地は 1m 程度沈下し、0. P. +約 13. 8m となっていたが、津波は主要構造物が設置されている敷地の高さを越えることはなく、プラント の安全機能は維持され、冷温停止することができた。

(2) 防潮堤の強化

女川 2 号機の設置許可申請時、津波については数値シミュレーション技術の適用により、想定 津波の高さがそれまでの 3m 程度から 9.1m に見直された。これを受け敷地地盤の法面に対し、津 波引き波時の安定性等が考慮され、9.7m の高さまでコンクリートブロックによる防護工事が実施 された。この工事が事前に実施されていたことにより、津波の第1 波だけでなく、第2 波以降に ついても耐え、健全性を維持することができたと考えられる。

(3) 海水ポンプ室のピット化

女川では、海水を汲み上げるポンプを海面に近い港湾部に設置するのではなく、13.8mの高い敷 地に深さ約 13m のピットと呼ばれる穴を掘って設置しており、津波が敷地高さを乗り越えないと 被水しない構造にしている。東日本大震災では高さ 13m の津波が襲来したが、敷地高さを超える ことはなかったので非常用の海水ポンプは冠水することは無かった(浸水による一部ポンプの機 能喪失は前述のとおり)。

(4) 耐震裕度向上工事の実施

女川では更なる耐震安全性の向上に資するため、自主的に設備の耐震裕度向上工事を行ってき ている。工事は配管、電路類の支持構造物への補強等であり、工事箇所は3プラント合わせて約 6600箇所で平成22年6月までに実施されていた。

今回、発電所設備の被害が比較的少なかったのは、事前にこれらの工事が実施されていたこと も要因の一つであったと考えられる。

3.2.3.4 まとめ

- ・地震発生後、外部電源は全5回線のうち1回線が確保されていた。また、D/Gも全て健全な状態で あった。
- ・襲来した津波の高さは 0.P.約+13.0m であり、発電所の主要建屋が設置されている敷地高さ 0.P. 約+13.8mには到達しなかった。(津波高さ、敷地高さとも、地震による地盤沈下後の値)
- ・津波に伴う浸水により2号機の原子炉補機冷却水B系ポンプ及びHPCS補機冷却水系ポンプが機能 を喪失したことから、D/G-B号機及びHPCSのD/Gが使用不能となったが、原子炉補機冷却水A系 ポンプは健全であった。
- ・原子炉の停止から炉心並びに SFP の冷却に必要な安全機能は健全であり、発電所の安全性が確保 された。

3.2.4 東海第二原子力発電所

日本原子力発電(以下、「日本原電」)東海第二発電所(以下、「東海第二」)は、茨城県東海村に 立地し、PCVにMARK-II型が採用された電気出力110万kWの沸騰水型(BWR-5)原子力発電所で、昭 和48年から建設を開始し、昭和53年に運開した発電所である。

東北地方太平洋沖地震においては、地震の揺れによる「タービン軸受振動大」により主発電機が 自動停止し、その後原子炉が自動停止した。この地震により、発電所が立地する東海村では震度 6 弱を記録している。

この地震の影響によって、外部電源系からの受電が喪失すると共に、津波の浸水により D/G 冷却 海水ポンプ3台のうち1台が使用不能となったが、その他の安全上重要な設備の機能が維持され、 地震発生から4日後の平成23年3月15日0時40分に冷温停止を達成している。

3.2.4.1 地震・津波の状況

東北地方太平洋沖地震における発電所の原子炉建屋の基礎版上で観測された最大加速度は、水平 方向(EW)225 ガル、鉛直方向189 ガルで基準地震動Ssによる応答値より小さく、また応答スペク トルにおいても概ね基準地震動Ss及び設計時の応答スペクトルを下回る規模のものであった。原子 炉建屋の最大加速度値を表6.3-1に示す。

| 毎 別 占 | N | 地震観 | 測記録(の | em/s^2) | 当初建 | 書設時 | 基準地震動 Ss ^{**} (cm/s ²) | | | | | | |
|-------|------|-----|-------|------------|-----|-----|---------------------------------------------|-----|-----|--|--|--|--|
| 観側黒 | NO. | NS | EW | UD | NS | EW | NS | EW | UD | | | | |
| 6 階 | RB04 | 492 | 481 | 358 | 932 | 951 | 799 | 789 | 575 | | | | |
| 4 階 | RB03 | 301 | 361 | 259 | 612 | 612 | 658 | 672 | 528 | | | | |
| 2 階 | RB02 | 225 | 306 | 212 | 559 | 559 | 544 | 546 | 478 | | | | |
| 地下2階 | RB01 | 214 | 225 | 189 | 520 | 520 | 393 | 400 | 456 | | | | |

| 表 6 | 3 - 1 | 原子恒建屋観澜 | 「「」」「「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「 | -タに 基づく | 最大加速度储 |
|------|-------|---------|-----------------------------------------|---------|--------|
| 1X U | | | | | |

※:解放基盤表面[標高(E.L.)-370m]で設定された基準地震動Ss(600 ガル)による、原子炉建屋各階の最大応答 加速度値。 また、この地震により発生した津波については、3月11日16時50分頃に最大水位約日立ポイン ト(H.P.) *+5.5m*(標高+4.6m)が確認されている。発電所敷地内の痕跡高及び浸水域の調査で は、水準測量による精度向上及び GPS 測量等を踏まえた地殻変動を考慮した結果、H.P.+5.7m(標 高+4.8m)~H.P.+6.2m(標高+5.3m)であり、遡上高はH.P.+6.2m(標高+5.3m)程度であった と評価されている。

※:H.P.±0.00mは日立港工事用基準面で東京湾中等潮位下 0.89m

3.2.4.2 地震・津波の影響

(1) 地震による発電所への影響

今回の地震による被害については、耐震重要度が低い(耐震 B、C クラス)タービン設備等の一部の機器に損傷が認められているが、耐震設計上重要な設備(耐震クラスが As、A (新耐震指針 S クラス)の設備)の損傷は認められていない。

原子炉建屋で取得された各階の地震観測記録を用いた、耐震設計上重要な設備の耐震安全性への影響について日本原電が検討した結果では、耐震設計上重要な建物である原子炉建屋の地震観 測記録における最大加速度は、建設時の設計用地震波(以下、「工認設計波」という)及び基準地 震動 Ss による最大応答加速度を下回っていることが確認されている。

また、耐震設計上重要な機器・配管系では、原子炉建屋における地震観測記録の床応答スペク トルは、地下2階~6階において一部の周期帯(約0.65秒~約0.9秒)で工認設計波による床応 答スペクトルを上回っているが、耐震設計上重要な機器・配管系のうち主要な設備の固有周期で は、地震観測記録が工認設計波による床応答スペクトル以下であることが確認されている。なお、 耐震設計上重要な機器・配管系は工認設計波に対して弾性状態を確保する許容値を用いて設計し ていることから、機器・配管系は概ね弾性状態にあったと評価されている。

(2) 津波による発電所への影響

津波の影響については、地震発生から約5時間後の19時52分に津波の影響による北側非常用 海水ポンプ室の浸水により、D/G 冷却用海水ポンプ2C が自動停止している。D/G 冷却用海水ポン プ及び RHR 冷却海水ポンプは、多重性を有しており、南北の非常用海水ポンプ室に分離して配置 されていたため、海水が侵入した北側の非常用海水ポンプ室に設置されていた D/G 冷却海水ポン プ 2C が水没し自動停止したことが確認されている。

非常用海水ポンプ室については、津波対策として側壁の嵩上げ工事(H.P.+5.80m(標高+4.91m)の既設側壁の外側にH.P.+7.00m(標高+6.11m)までの側壁を新たに設置)や、壁の貫通部の封止 (浸水を防ぐ)工事が実施されていたが、北側の非常用海水ポンプ室は、地上部に埋設されてい るケーブルピットの蓋の水密化工事(ケーブルピット蓋の浮き上がりを防止し水密化を図る工事) が施工中であったこと、ケーブルピット周辺が掘削されていたことにより、地盤が浸水し易い状 況になっており、新たに設置した側壁と従来の仕切り壁の間に海水が流入し従来から設置してあ る仕切り壁を乗り越え、北側非常用海水ポンプエリアへ浸水したものとしている。

非常用海水ポンプ室への貫通部の封止工事の実施状況を図 6.3-1 に示す。

また、浸水した D/G 冷却用海水ポンプ 2C の復旧は、被水後 10 日後に復旧された。



図 6.3-1 非常用海水ポンプ室の貫通部の封止工事の実施状況

3.2.4.3 地震発生後の発電所の運転状態

東海第二は、地震発生直後にタービン軸受け震動大により主発電機が自動停止し、主蒸気止め弁の閉により原子炉が自動停止した。また、発電所停止中に所内に交流電源を供給する3系統の外部 電源(275kV:2系統、154kV:1系統(予備))も同時に喪失したが、3台のD/Gが自動起動し、発電 所の安全停止に必要な設備への電源供給に成功している。

原子炉自動停止後の原子炉からの崩壊熱の除熱については、外部電源系が喪失している状態であり、復水器による除熱が期待できないため、主蒸気管に取付けられた SRV から、S/P へ高圧の蒸気を 導き、S/P 水を2系統の RHR により冷却することにより原子炉からの崩壊熱の除去が実施された。

原子炉への注水については、主発電機のトリップによる主蒸気止め弁の閉止と給水喪失により、 原子炉停止直後に原子炉水位が急激に低下し、HPCS 及び RCIC が自動起動している。その後も原子炉 圧力容器 (Reactor Pressure Vessel: RPV)の水位、圧力の調整を RCIC ポンプ及び SRV により継続 し、原子炉の減圧操作が実施された。

その後、3月11日の19時25分に津波の影響によりD/G冷却海水ボンプ2Cが自動停止したことに 伴い、S/Pの冷却に用いていた RHR-A系を停止すると共に、D/G-2Cを停止している。

D/G-2C が機能喪失したものの、健全な D/G からの電源供給により、原子炉からの崩壊熱除去に必要な機器への電源供給が維持され、原子炉の減圧操作は継続された。

地震直後に喪失した外部電源系3系統のうち、1系統(154kV)については、地震直後の3月12日 から復旧作業が進められ、3月13日19時41日には発電所への受電が完了し、津波の影響により停止していた残留熱除去系の機能回復を待って、3月15日0時40分に冷温停止を達成している。 地震直後から冷温停止に至るまでの原子炉関係パラメータを図6.3-2に示す。



図 6.3-2 地震直後から冷温停止に至るまでの原子炉関係パラメータ

次に、PCVの冷却については、地震直後に外部電源が喪失したものの、D/G により発電所の安全停 止に必要な機器への電源供給が維持されており、2 系統の RHR により S/P の冷却、PCV の圧力、温度 の維持が実施されている。また、地震直後の原子炉への注水は HPCS ポンプ及び RCIC ポンプにより 実施され、初期段階のポンプ水源を復水貯蔵タンク (Condensate Storage Tank: CST) としていた ため、S/P の水位が地震直後に上昇している。S/P の水位は、RHR ポンプから廃棄物処理系に送水さ れていたものの、外部電源の喪失により処理機能が喪失していたため、継続的な受け入れ、受け入 れ水の処理が課題とされた。また、地震直後に原子炉へ注水したことによる CST の水位回復のため にも廃棄物処理系への電源融通が求められた。廃棄物処理系の電源融通には、地震直後に手配した 低圧電源車、東海発電所の廃止措置のための空冷式 D/G 及び中越沖地震の知見反映として設置した 緊急時安全対策建屋 (免震) 用のガスタービン発電機の利用が考えられたが、設備の配置、電源盤 との接続の利便性等を考慮し、緊急時安全対策建屋の屋上に設置されていたガスタービン発電機よ り供給することにより、廃棄物処理系の電源融通が実施された。地震直後のPCVパラメータを図6.3-3

に示す。

○ 廃棄物処理系で受入れ 緊急時対策建屋非常用ガスタービン発電機より常用系母線に電源供給



図 6.3-3 地震直後の原子炉格納容器パラメータ

東海第二は、津波の影響で D/G1 台を停止したことにより、PCV 除熱機能(RHR)の1系統が停止し たが、多重性を有する系統であり、その安全機能は維持された。原子炉の冷温停止への移行につい ては、外部電源喪失及び D/G1 台停止の状況下において、発電所のパラメータが安定した状態で維持 されていたこと、外部電源の復旧の目途がたっていたことを勘案した上で、原子炉への高圧注水系 の確保、健全な D/G から停電した非常用母線に電源融通する場合の二次的トラブルの発生等、早期 に冷温停止に以降する場合のリスクを検討し、最も安全に冷温停止へ導く方法として外部電源復旧 後の RHR 停止時冷却モード運転への切替を選択したことにより、3 月 15 日 0 時 40 分に冷温停止を達 成している。

また、非常用ディーゼル発電機冷却海水ポンプ1 台が停止したことを受け、大津波警報が発報さ れる中で海水ポンプ室の設備被害の状況を確認し、北側の海水ポンプ室の浸水を確認すると共に、 南側の海水ポンプ室への浸水が無いことが確認されたため、浸水した海水ポンプ室の排水作業を実 施し被害の拡大防止に努めると共に、原子炉の冷却のための急速な手順への変更のリスクを検討し 冷温停止までの作業手順を決定している。

3.2.4.4 津波想定に関する経緯とその対策

東海第二の津波評価とその対策については、原子炉設置許可申請以降、当時の知見、国内の津波 評価に関する動向を踏まえ、その都度自主的な評価を行うと共に、対策が講じられてきている。東 海第二の設置許可申請当時は津波に関する明確な基準がなく、既往の文献、近隣の最高潮位の記録 等を基に設計が進められており、想定津波は、既往最大として昭和 33 年の狩野川台風による潮位 H. P. +2. 35m であった。

その後、平成5年の北海道南西沖地震に伴う津波の発生を契機に、省庁により津波防災に関する ガイドラインの検討が進められ、これらの検討状況を踏まえて平成9年に日本原電社内の自主的な 検討として H. P. +5.3mの津波評価結果が得られたため、北側の非常用海水ポンプ室に H. P. +5.8mの 防護壁を追加設置している。更に、平成14年には、土木学会により「原子力発電所の津波評価技術」 が発刊され、これに対する津波評価で H. P. +5.75mの評価結果を得ると共に防護対策に問題がないこ とを確認している。

また、平成19年には茨城県が公表した「県沿岸における津波浸水想定区域図等」に用いられた津 波規模を耐震安全性評価に新知見として反映し、津波評価を行いH.P.+6.61mの評価結果を得ると共 に、非常用海水ポンプ室の側壁をH.P.+7.00mまで嵩上げする対策を講じたことが、東北地方太平洋 沖地震に伴う津波から安全上重要な機器を防ぐことが出来た要因となった。

3.2.4.5 地震発生後の状況のまとめ

- (1) 地震発生後、発電所の接続される3系統の外部電源が全て喪失したが、原子炉のスクラムに成 功し、3台のD/Gによる原子炉の安全停止に必要な機器への電源供給に成功している。
- (2) 更に、地震発生後、建設時の設計想定(H.P.+2.35m)を超える H.P.+6.2mの津波が来襲したが、 津波評価に係る新たな知見や評価結果が得られる都度、自主的に対策工事を実施してきたこと により、一部浸水工事が未完であった海水ポンプ室へ海水が浸入し、D/G-2Cの冷却用海水ポン 33

プを浸水させることとなったが、その他のD/G は津波の浸水による被害を免れることができた。 (3) その結果、原子炉への注水機能の維持、残留熱除去系1系列の機能維持が図られ、安定して原 子炉の減圧、減温操作が実施され、最終的に冷温停止が達成された。

3.2.5 東通原子力発電所 (原子力学会安全部会の報告書に記載なし)

3.2.6 福島第一原子力発電所核燃料中間貯蔵施設

乾式貯蔵キャスクが保管されている建屋には、津波 により大量の海水、砂、瓦礫等が流入し、床面浸水、 ルーバや扉等の損壊が見られる。しかしながら、放射 線場はバックグラウンド程度であり、乾式貯蔵キャス クは空冷され、密封性能は維持されているものと考え られている。 (未完)



図 5.5-8 乾式キャスク外観

*マルチユニットに係わる事項、敷地外施設に係わる事項についてもここで述べる

3.2.7 これまでにまとめられた報告書における事故シナリオの特徴(違い)

(ここで、各帆酷暑の違いを述べるのではなく、それぞれの節で、地震工学会として追記すべき 事項について記載することとしたい。)

- 3.3 津波を起因として想定される事故シナリオ
- 3.3.1 全体シナリオ
- (1) 我国で運転開始後の軽水型原子力発電所に地震後の津波が来襲し、外部電源が喪失することを想定する。その際の原子炉の安定的な冷却状態を確保するための方策は多層化・多様化され、津波の到達する範囲の拡大に対応して各段階で対策が整備され、また、津波に起因して発生する事象の進展に対応して各段階で対策が整備される。
- (2) 対象とする原子力発電所

運転開始後の軽水型原子力発電所(BWRとPWR)

(3)対象とする事象

地震による津波で発生する事象のうち、原子炉および使用済燃料プールの冷却

(4) 津波対策の全体概要

津波対策は燃料の冠水および安定的な冷却状態を確保するため、下図に示す手順で実行される。



(5) 津波対応に必要な条件

津波に対応するには下記の条件が必要である。

①原子炉および使用済燃料プールの安定的な冷却が可能な下記条件を確保する。

*原子炉および使用済燃料プールへの注水および冷却設備

35

* 上記を駆動する駆動源(電源等)

*冷却を可能とする水源、ヒートシンク

② 原子炉および使用済燃料プールの状態を監視できる計装や監視設備等の手段を確保する。

③ 原子炉および使用済燃料プールの状態を監視する中央制御室等の作業環境を維持する。

④ 発電所内の通信および発電所外との通信を確保する。

(6) 深層防護の考え方の導入

深層防護的考え方には下記の2つがある。

① 津波の到達する範囲の拡大に対応してその各段階で対策をとる。(空間軸に沿った対応)

② 波に起因して発生する事象の進展に対応してその各段階で対策をとる。(時間軸に沿った対応)

(7)想定する津波高さ

シナリオの検討に当たり、各発電所で設定している津波の高さを第一段階の津波の高さとし、さら に、プラント毎に、施設高さおよび施設防水性に基づいて、電源/ヒートシンンクの使用可否を左 右する津波の高さを段階的に設定してシナリオを検討する。

(8) 冷却系の確保

シナリオの検討に当たっては、設備、動力源および水源/ヒートシンクの組合せで冷却機能が確保 されることを考慮する。

(6) 可搬式設備の確保

シナリオの検討に当たっては、本設設備の他、可搬式設備(電源車、ポンプ車、空冷装置、予備バ ッテリー等)による機能付加も有効な手段であることを考慮する。また、可搬式設備の保管場所、 即応性などについても考慮する。

- (7)緊急用予備品(予備の機器、部品など)の確保 非常用機器の電動機などの予備品の確保状況、保管場所、即応性(移動、設置の手段)などについ て考慮する。
- (8) 実施訓練の実施

計画された津波対策が有効であることを実施訓練で実証することが重要であることを考慮する。

- (9)発電所構内における津波到達範囲が順次拡大した場合のシナリオ(空間軸に沿った検討) 発電所構内における津波到達範囲が順次拡大した場合、津波の影響を受ける系統、機器の機能が、 それぞれの段階で機能がどの程度維持できるか、浸水対策が実施されているかどうかで津波の浸入 が防止され機器の機能が確保されるかどうかのシナリオが決まる。
 - ① 取水口設備冠水(取水口設備の被害想定)
 - ② 発電所敷地冠水(屋外設置設備の被害想定)
 - ③ タービン建屋内浸水 (タービン建屋内設備の被害想定)
 - ④ サービス建屋等の建屋内浸水(補助設備が設置されている建屋内の設備の被害想定)
 - ⑤ 原子炉建屋内浸水(原子炉建屋内設備の被害想定)

(10)津波来襲から発生する事象の進展に沿ったシナリオ(時間軸に沿った検討) 津波来襲から発生する事象の進展に沿って、津波の影響を受ける系統、機器がそれぞれの段階で機 能がどの程度維持できるかどうかでシナリオが決まる。

[BWR]

- ① 地震発生(外部電源喪失、EDG 起動)
- ② 津波来襲(取水口設備の機能喪失、タービン建屋内電源冠水)

③ SBO (外部電源喪失、EDG 起動失敗、DC 電源喪失)

- 冷却システム喪失(設備、駆動源、水源/ヒートシンクのいずれかの喪失)
- ④ ヒートシンク喪失(サプレッションチェンバー水温上昇、格納容器ベント失敗)
- ⑤ 原子炉空炊き/燃料損傷(淡水源枯渇、海水注入)
- ⑥ 原子炉空炊き/燃料損傷(海水注入、水素発生)

(PWR)

- ① 地震発生(外部電源喪失、EDG 起動)
- ② 津波来襲(取水口設備の機能喪失、タービン建屋内電源冠水)
- ③ SBO(外部電源喪失、EDG 起動失敗、DC 電源喪失)
- 冷却システム喪失/蒸気発生器除熱機能喪失(設備、駆動源、水源/ヒートシンクのいずれか の喪失)
- ④ ヒートシンク喪失(淡水源枯渇、海水注入)
- ⑤ 原子炉温度上昇/燃料損傷(海水注入、水素発生)
- 3.3.2 発電所構内における津波到達範囲が順次拡大した場合の想定シナリオ(空間軸に沿った検討)と対応策
- 3.3.3 津波来襲から発生する事象の進展に沿ったシナリオ(時間軸に沿った検討)と対応策
- 3.3.4 原子力発電所の通常運転中に地震が発生し、その後、津波が来襲し、発電所機器に影響を与えた場合に事象が進展するシナリオの例

| ● 第 第 第 第 第 第 第 第 第 第 第 1 1 1 1 1 1 1 1 | 津波到達想定範囲と対応策の検討(原子炉) | /准述未達 B. 商水ボンプ室商さまで冠水 C. 敷地商さ以上の冠水 D. 建墨林設備浸水 E. 建墨内浸水の可能性 批 市水インプ室商さまで冠水 C. 敷地商さ以上の冠水 D. 建墨林設備浸水 E. 建墨内浸水の可能性 非常用市本 市水インプ室商さまで冠水 C. 敷地高さいしの冠水 D. 建墨林設備浸水 E. 建墨内浸水の可能性 非常用市本 市水市の備能積失の可能性 屋外空水の可能性 屋茶門浸水の可能性 建屋内浸水の可能性 ● 市上モータ (建屋内浸水 ・素常用モータ用電路 ● 非常用モーク用電路 ● キャージ ● 同上モータ ● 「素常用モーク用電路 ● 素常用モーク用電路 ● キャージ ● 同上モータ ● 「上モータ ● 「素常用モーク用電路 ● キャージ 建築 ● 「上モータ ● 「上モータ ● 「上モータ ● 「上モーク SRV ● 「上モーク ● 「上モータ ● 「上モータ ● 「二モーク ● 「「日モーク」 ● 「「日モーク」 ● 「「日田 ● 「二モーク ● 「「日モーク」 ● 「「日田< ● 「日ビージ SRV ● 「日モーク」 ● 「日田 ● 「日ビージ ● 「日 「HR RUR RUR ● 「日 ● 「ビージ ● 「日 「RIH 電源 非 ● 「日 ● 「日 ● 「日 ● 「日 本合加 電源 ● 「日 ● 「日 | シンパー CST CST CST サプレッションチェンパー サプレッションチェンパー サプレッションチェンパー 海の:大気(IC) 一の:大気(IC) 一の:大気(IC) 商の:大気(IC) 海の:大気(IC) 油の:大気(IC) 商水浸入経路の水密性対策 建屋への海水浸入経路の水 非常用油水ポンプモーグ等、取水口電策策 第 | 本設設備 本設設備 可搬式設備 いする設備 水ンプ車+電源車 SRV (ADS 機能含む) ポンプ市+電源車 SRV (ADS 機能含む) ポンプ市 RCIC or IC ポンプ 高田 RCIC ポンプ | 加入を供給する設備 加入金 前人本 電源車 枢動力を供給する設備 自乃信 電源車 電源車 超力 自刀信 ($\gamma_{1} - \overline{\nu} J_{W}$) ($\gamma_{2} - \overline{\nu} J_{W}$) ア ア ($\gamma_{2} - \overline{\nu} J_{W}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U}$) ア ($\overline{\rho} J_{U} - \overline{\nu} J_{W}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{J} - \overline{\nu} J_{W}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{J} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{W}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{J} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{J} - \overline{J} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\nu} J_{U}$) ($\overline{\rho} g_{2} - \overline{\nu} J_{U} - \overline{\mu} J_{U} - \overline$ | 地震発年以降の時間軸に沿った重象准行と対応筈の検討(原子位) | 津波高さ又は到達範囲 1.1.) 2. 原子短隔離時冷却 3. 進波來聽 | 山山 小能電源喪失 と. 0.1 10 (EDG 兵牧-SB0) 人能電源喪失 2. 0.1 0 (EDG 兵牧-SB0) RCIC IC 配管 配管 和子子子 ADS+指火系 ボンプ 配管 ボンプ ボンプ ボン ボンプ ボン ボンプ ボン ボンプ ボ ボンプ ボ ボンプ ボ ボンプ ボ ボン ボ ボン ボ ボン ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ ボ |
|-----------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | 既在/津波未達 B. 海水ボンブ の可能性 取水口設備の機能薄 の可能性 取水口設備の機能薄 直変の各変圧器損壊 ●同上モータ たの各変圧器損壊 SRV 電源車 電源車 ベブ、モータ、熟交換器、 ● | ンチェンバー ンチェンバー ンチェンバー (CST サプレッションチェ 前 or 大気 (IC) 南本浸入経路の水密 非常用海水ボンプ | を注入する設備 を除去する設備 | 備の駆動力を供給する設備 水源 ートシンク | ン サ 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 | 自動停止) | BADG 起動 - EDG 起動 - EDG 起動 - RCIC - (EDC - (EDC - (EDC - (EDC - (EDC |



電源車 ディーゼル機関

直流電源 or 手動操作 or 可搬式電源車 IC 三次側水 (ろ過水、消火水、淡水源)

大気

大気

痍

最終ヒートシンク

不要

嶣

確保する水源

က

確保する駆動力源

5

| | | | 5 | 失 玉水 | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 連波高さ又は到達範囲 6. 原子炉空炊き (燃料溶融) (燃料溶融) (燃料溶融) (燃料溶融) (燃料溶融) (燃料溶融) (燃料溶融) (燃料溶融) (燃料溶融) (燃料溶融) (一) (一) () () () () () () () () () (| SCTS+原子炉建屋ブ n-70/h ⁻ 补開 ダクト ファン チ デ n-70 h ⁻ 弁 普源車 (SRV, ファン、弁) 手動操作 (格納容器ペント弁) 商水 同左 一 安定的冷却状態 | 10 | €行と対応策の検討(使用済燃料プール) (1) | 津波高さ又は到達範囲 2.原子炉隔離時冷却 3.津波来襲 外部電源喪失 5.トロ記備の機能喪 5.トロピン建屋内電源 | IPPC 空冷冷地装置(水) 同点 配管 ンブ、モータ付き) 同点 ボンプ モータ 可搬式注水装置 ボンプ モータ 「ボンブ、モータ付き) 第交換器 (ボンブ、モータ 「ボンブ、モータ 熱 「ボンブ、モータ 「北 第 「ボンブ、モータ 「ボンブ、モータ 第 「ボンブ、モータ 「北 第 「 「ボンブ、モータ |
| 5.原子炉空炊き (燃料損傷) (燃料損傷) 液水源枯渇 液水注入、 商左 格納容器冷却系 格納容器冷却系 格納容器ベント系 | 同左 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 | | 地震発生以降の時間軸に沿った事象進 | 1. 地震発生(自動停止) 外部電源喪失→EDG 起動 | - - - - - - - - - - |
| 4. ビートシンク喪失 サブレッションチェンパー、海への サブレッションチェンパー、海への 株約容器ペント、 格約容器ペント系 格約容器ペント系 | (保する駆動力源) (同左 (保する水源) (日本 (保する水源) (日本 (保する水源) (日本 (保する設備) (安定的冷却状態) (日本) (日本) | | | ブラント状態 | I PPC 間子 一人 離死 一人 一、 一 一 一 一 、 一 、 一 、 一 、 一 、 一 一 、 一 、 |



| プラント名 | OO発電所△△号機 | | - | F | | | | |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------|--------------------|----------------|-----------------------------|
| 対象機器 | | 仕様 | 備考 | 評価対象 | 使用不可となる津波 高さ(m) | 【復旧までの予想時間 (時間) | 機能喪失最小津波 高さ | 備考 |
| 1. 電源系 | 1)非常用 DG | 台数 | 3台 | 発電機(設置場所・水 率性等) | 5 | 8 | | |
| | | 容量 | 1 800KVA | 割はます。 数 後 後 システム (海 チ ポンプ・ む ふ 蟲 吊) | 3 | 1週間 | | |
| | | 稼働時間 | 1週間 | 制御系 | 9 | 8 | e | |
| | 2)直流バッテリー | 台数 | 3合 | 本体 | 5 | 8 | | |
| | | 容量 使用可能時間 | 1 200AH 1 4時間 | 制御系 | 9 | 8 | 5 | |
| | 3)可搬式電源 | 台数 | 1台 | 電源車(待機場所) | 30 | - Н П | | |
| | | 松量 | 1500KVA | 電源車(稼働時) | 12 | 1 | | |
| | | 稼働時間 | 200日 夜間訓練の無い 場合には | 電源受け入れ部 | 15 | 18 | 12 | 予備電源車がある場合には稼 働時の高さは考えない |
| | | 訓練時の開始までの時間(屋) | 4時間 電源供給まで0 時間の | 6 | | _ | | |
| | | 訓練時の開始までの時間(夜) | | ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~ | | _ | | |
| | | 津波監視体制 | あり 津波監視体制の 無い場合には | | | _ | | |
| | | 電源供給までの時間 | 12時間 | ÷ | | _ | | |
| | 4)予備可搬式電源 (全庫I- トス津は対策) | 配備の有無 面部 備またの み に 時間 | あり 1 日 | 電源車(待機場所) 诸欧+4-10 | | | | |
| 2. 炉心残留熱 2 | 1) RCIC (or IC) | 14日間にあって、1.4月1日 必要電源 | - L 直流1200AH | 「よっ」 | 25 | 8 | | |
| 年センイナム | | | | + | | | | |
| | | 稼働時間 | 3日 + J_「」、+・ | 制御糸 | 20 | 8 | 20 | |
| | | ビートシンク | いい いい こう | | | | | |
| | | 炉心温度 | <100°C | | | | | |
| | 2) 残留熱除去系 | 必要電源 | 文 浜 ぐ kw・直 浜 º トw | 海水ポンプ | 5 | 4日 | | |
| | | 熱交換容量 | | 制御系 | 20 | 3日 | 5 | 海水ポンブ流出 |
| | | 炉心温度 | | 回畿共海 キボンレ(年 繊 場 売) | 20 | _ | | |
| | | 回搬式海水ポンプ台数 | | 回穂式海水ポンプ(設置調算) | 10 | _ | 10 | 予備可搬式ポンプがある場合 |
| | | 回搬式海米ポンプ熱交換容量 | | | | | | |
| | 「「「「」」の「「」」。」 | アラ道政 西洋ら右重 | | (中18年1日) | | | | |
| | 3) 予備 当飯 丸油 小ホーノノ (余震による津波対策) | 部 開い 日 無 再 配 備 ま で の 予 定 時 間 | のツ 1日 | 付破场 仍 道路状況 | | _ | | |
| 3. 淡水注入 | 注入システムの装備 | | | | | | | |
| | 1) 仮設ポンプ | 必要電源 | 交流1200KVA・ 直流1200AH | 仮設ポンプ(待機場所) | 20 | 3か月 | 20 | |
| | | 注入可能となるまでの予定時間 | 2日 | | | _ | | |
| | | 淡水量からの注水可能継続時間 淡水注入終了時からの切替時間 | 100日 3時間 | | | | | |
| | 9) 消防ポンプ | | | 当(防 亩 (| 30 | ЦС | 20 | |
| 4. 海水注入 | | | | 1月19月十八1寸185-約1717 | 07 | | 07 | |



| 補光 | | | 訓練実態: | | 10 は自然循環による蒸発 熱で冷却 | 海米ポンプ流出 モーター交換不可のため | | | | | | | | 田 田 | _ |
|---------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------|-----------------|--------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 15. 7m(想定+10m) | ×××××××××××××××××××××××××××××××××××× | × (冠水) × | | ×I | ・ 大要 0 70時間 | 援×8 | | × 弦 | | (1 / 3 | · 球動 · 待機 | ł | 備考 | 倒壊を想定 ドンプ使用不可 テリーが枯渇⇒電源復旧により使用 | こより使用不可⇒電源復旧により使用可 ドンプ使用不可 |
| 10. 7m(想定+5m) | | 0 0 | | × | 木要 0 70時間 | í 衣×8 | | × 弦 | | | | 電源 | 後 | 期間 地震により, 送電線 津波により海水系引 津波により海水系引 8時間で, 直流パッ | 直流バッテリー枯渇に津波により海水系オ |
| €の検討(原子炉) 5. 7m(審査時想定) | | 0 0 | | × | 不要 0 70時間 | 茶O I | | × 茶 | | イナリオ例(対策前) | | | 3日 1 通間 復旧 | 防急 | |
| 津波到達範囲と対応第 | ((設置場所・水密性等) ミンステム(海水ポンプ・空冷場所) に 否 「否 | 目時時 | 侍機場所の標高・アクセス性) 2現体制 総までの時間(地震・津波、余震の影響) 間 | ▶ ううまでの予定時間 | 減 システム F間 | 源(外部電源、非常用電源) ビンステム 1までの想定時間 1までの想定時間 | | 源 能となるまでの予定時間 [からの注水可能継続時間 | | 44 標準的な仮想 BWR のシ | | | 地震 津波到達 1時間 8時間 1日 | × | × |
| 電所△号機 高さ | JE用 DO 発熱そ使容稼復 機校の用量輸出 | 電源(パシテリー) 本体 容量 使用可 | 犬 電源 | 可動式電源 こよる津波対策) 再配備の | S(or IC) | 熱除去系 交流 一次 一次 一次 一次 一次 一次 一次 一次 一次 二二 一 二 二 二 二 | 式冷却装置 | Aテムの装備 式ポンプ 外部電 浜入 が 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 | ポンプ | | 〇〇原子力発電所 〇〇m | | 時間(津波以降) | (1)外部電源 (2)非常用DG (3)直流パッテリー | (1)RCIC (1)RCIC (2)確留黏险≠丞 |
| 00発 [津波の] | | 2)直流 | 3) 發 顧 | 4)予備 (余震に | 余去システム 1) RCIC | 2)残留 | 3)回费 | 浜 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) | 2)消防 | | プラント名 想定津波高さ | 【対策以前】 | | 電源 | 循環型冷却系 |
| プラント名 対象機器 | 1. 電源系 | | | | 2. 炉心残留熱影 | | | 3. 淡水注入 | 4. | | | | | | |

| 電源喪失により使用不可⇒電源復旧により使用可 電源喪失により使用不可⇒電源復旧により使用可 | | | | 備考 | 地震により、送電線倒壊を想定 | 津波により海水系ポンプ使用不可 |
|--------------------------------------------------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|-----------------|
| | | 温度維持 | | 外部電源 復旧後 | 応急復旧 | |
| | | PCV 破 損 | | 1週間 | | |
| | | RPV 破 損 | | 3 H | | |
| | | 炉心浴 融 | | Ш Т | | |
| | | 高温停止 | | 1時間 8時間 | | |
| ×× | | スクラム | | 震 津波到達 | | × |
| | | | | 臣 | × | |
| (1)ECCS (2)AM 代替注水ポンプ | | | 策以前】 | 時間(津波以降) | (1)外部電源 | (2)非常用DG |
| 注水型冷却系 | 注入型冷却系(海水) | 原子炉炉心状態 | 【使用済燃料プール 対 | | 電源 | |

| る停止⇒電源喪失により使用不可 | 皮用不可⇒電源車により使用可 使用不可⇒電源車により使用可 | 後全燃料取出しした場合 | | | : ************************************ | 4 | 備方 | 地震により、送電線倒壊を想定 きょせららにきょるよう、よんのアンゴ | ☞波にや90年かポイノンで出イリ 電源車からの電源供給により継続使用可能 | 接続時間:約3時間 | 바라 '아'나 다 그 것 수 다 다 다 한 번 다 나 것 같 다 다 가 가 다 다 가 가 다 다 가 가 다 다 가 가 다 다 가 가 다 다 다 가 다 다 가 다 다 가 다 다 다 가 다 다 다 다 가 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 다 | EML////~~mentres//waraの/wa ロ/まではたら、 津波により海水系ポンプ使用不可 | 直流バッテリー充電により使用可能 | 直流パッテリー充電により使用可能 窒素ポンベによる手動による代替操作 |
|-----------------|----------------------------------|-------------------|----|-----------|----------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| 地震の揺れによ | 電源喪失により 信源喪失により | ※定検開始に直 | | | | 。外部電源 | 這復旧後 | 応急復旧 | | | 1 1 1 | | | |
| | | 溶 冷却 | | 林策後) | | | 3日 1週 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 | | | | 파파부 | | こ切り替え | |
| | | 林 | | シナリオ例 (5 | | | 8時間 1日 | | | ● (より使用可 | - デート - デー | 小派『生レンジ | 小饭枯渴前 | |
| | | 寻⇒水位低下⇒燃 ∦ | 40 | 反想 BWR のう | | | 1時間 8 | | | ● | | 5 • (| · · | |
| | × × | プール水温度上 | | 標準的な化 | | + | 也震 津波到達 | × . | < | | | × | | |
| × | | 令却 | | | | | A | | | | | | | |
| (1)FPC | (1)MUWP (2)FPMUW | | | | 〇〇原子力発電所 〇〇m | | 時間(洋波以降) | (1)外部電源 | (2)非品用口G(3)直流/ベッテリー | (4)電源車 | | (2)残留熱除去系 | (3)主蒸気逃がし弁 | (4)格納容器ベント弁(電動) (手動) |
| 小市 | 关 世 | 使用済燃料プール状態 | | | プラント名 想定津波高さ | 【対策以後】 | 電源 | | | | 循環型冷却系 | ヒートシンク機能: | •(1)or(3)+(2)or(4) | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

電源喪失により使用不可 電源喪失により使用不可⇒電源車により使用可 電源喪失により使用不可⇒電源車により使用可 注水準備時間:約5時間 上端時 安定的冷却 + × x x スクラム (1)ECCS (2)AM代替注水ポンプ(MUWC) (消火ボンプ) (3)消防車(淡水) (海水) 原子炉炉心状態 注水型冷却系

【使用済燃料プール 対策以後】

| | 時間(津波以降) | 地震 | 津波到達 | 1時間 | 8時間 | 1日 | 3日 1 | 週間 | 外部電源 復旧後 | 備考 |
|----|----------|----|------|-----|-----|----|------|----|-------------|------------------------|
| 重源 | (1)外部電源 | × | | | | | | | 応急復旧 | 地震により、送電線倒壊を想定 |
| | (2)非常用DG | | × | | | | | | | 津波により海水系ポンプ使用不可 |
| | (3)電源車 | | | | • | | | | | 接続時間 :約2. 5時間 |
| | | | | I | | | | | | |
| 冷却 | (1)FPC | × | | | | | | | | 地震の揺れによる停止⇒電源喪失により使用不可 |
| 注水 | (1)MUWP | | × | | | | | | | 電源喪失により使用不可 |
| | (2)FPMUW | | × | | 1 | | | | | 電源喪失により使用不可⇒電源車により使用可 |
| | | | | | 47 | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| 電源喪失により使用不可→電源車により使用可 注入準備時間:約1時間 | | - · · · · · · · · · · · · · · · · · · · | 備考 地震による送電線倒壊を想定するも2回線確保で対応。 津波により海水系ポンプ使用不可後、モータ取替復旧 電源車からの電源供給により継続使用可能 | 接続時間:約3時間 直流バッテリー延命により水源枯渇(約5日)まで使用可 津波により海水系ポンプ使用不可後、モータ取替復日 直流バッテリー充電により使用可能 直流バッテリー充電により使用可能 窒素ポンベによる手動による代替操作 | 上記電源喪失対策により使用可 上記電源喪失対策により使用可、電源車でも使用可 上記電源喪失対策により使用可、電源車でも使用可 上記電源喪失対策により使用可、電源車でも使用可 注水準備時間:約5時間 | 備考 地震による送電線倒壊を想定するも2回線確保で対応。 津波により海水系ポンプ使用不可 接続時間:約2.5時間 | 地震の揺れによる停止⇒上記電源喪失対策により使用可 上記電源喪失対策により使用可、 上記電源喪失対策により使用可、電源車により使用可 上記電源喪失対策により使用可、電源車により使用可 注水準備時間:約1時間 | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| X 通行部署 85 | 標準的な仮想 BWR のシナリオ例(理想的対策後) | | 地震 津波到達 1時間 8時間 1日 3日 1週間 外部電源 * × × × × × × × × × × × × × × × × × × × | ● ● 通信 ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● | × × × × × × × × × × × | 地震 津波到達 1時間 8時間 1日 3日 1週間 外部電源 ※ × × | | 「日本」 道及上半 はいねんにしゃり派をはほしい」 |
| (3) た替注 大 ボンブ (MUWC) (4) 当 切 時 (淡 光) ((角 次) | | 〇〇原子力発電所 〇〇m | 時間(津波以降) (1)外部電源 (1)外部電源 (2)非常用DG(水冷) 非常用DG(次冷) (3)直流、ベッテリー | (4)電源単 (1)RCIC (1)RRIC (2)残留熱除去系(本設、海水冷却) 残留熱除去系(仮設、海水冷却) 残留熱除去系(空治) (3)主蒸気逃びし弁 (4)格納容器ベント弁(電動) (4)物約容器ベント弁(重動) | (1)ECCS (2)AM代替注水ポンプ(MUWC) (2)AM代替注水ポンプ) (消火ポンプ) (3)消防車(淡水) (海水) | 第以後】 時間(津波以降) (1)外部電源 (2)非常用DG(水冷) 非常用DG(空冷) (3)電源車 | (1)FPC 空冷式除熱システム 空冷式除熱システム (1)NUWP (1)NUWP (2)FPMUW (3)代替注水ボンブ(MUWC) (4)消防車(淡水) (第水) | |
| 使田済続粋プレン大感 | | ブラント名想定津波高さ 想定津波高さ 【対策以後】 | 「对策以後」 電源 | 循環型 冷却系 ドートシング機能: ・(1)or(3)+(2)or(4) | 注水型冷却系 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一 | 【使用済然料プール 対気電源 | 治却 注水 庙田珍被 <u>料式</u> —…牙能 | |
| | 1 | | | | | | | |

地震発生後、津波が来襲し、原子力発電所の設備が影響を受けて炉心損傷にまで至るシナリオ



・通常の運転状態

(1) 圧力容器内で発生した蒸気が主蒸気配管を通りタービンへ送気される。

(2) タービンで仕事をした蒸気が復水器で水となり、給水配管を通って圧力容器内へ戻る。



・地震発生

- 事象1 地震により、外部電源が遮断される。
- 事象2 外部電源喪失により、非常用ディーゼル発電機に電源が切り替わる。
- 事象3 原子炉隔離時冷却系(手動起動またはL2で自動起動)と残留熱除去系が起動する。

上記は地震時の資料と同様で、正常動作である。

(4 / 5)



・津波襲来

- (1) 津波襲来
 - 事象1 原子炉補機海水ポンプの電動機が浸水して、機能喪失する。
 - 事象2 建屋内に浸水し, ディーゼル発電機が機能喪失する。 電源喪失により, 残留熱除去系の機能が喪失。原子炉隔離時冷却系はバッテリー の電源が喪失するまでの8時間程度稼動するが, その後, 制御不能となる。



「冷やす」機能喪失

事象1 原子炉補機海水系,非常用ディーゼル発電機および残留熱除去系が機能喪失して原子炉 格納容器の圧力が上昇する。圧力を逃がすために安全弁が作動し,原子炉圧力容器 内の蒸気は圧力抑制室に導かれる。圧力抑制室の温度・圧力も上昇する。



【燃料棒損傷】

- 事象1. 原子炉隔離時冷却系は、圧力抑制室温度上昇による原子炉隔離時冷却系タービンの 背圧上昇による機能喪失あるいは直流電源枯渇(8時間程度)による制御不能(流 量制御不能:現状維持)となる。(原子炉隔離時冷却系は背圧上昇による自動停止か、 現場で止めるしか手段がなくなる。)
- 事象2. 注水停止および安全弁による圧力抑制室への蒸気移行により,原子炉圧力容器の水 位が低下して燃料棒が露出して過熱により損傷する。
- 事象3. 原子炉格納容器の圧力を下げるため、格納容器ベントラインを経由してベントを実 施する。

ベントのタイミングは原子炉格納容器が427MPa(最高使用圧力)とすること が手順で定められている。

軽水型原子力発電所における津波対策例



地震・津波対策

以上を踏まえて, 主な対策として5つ実施する。

対策1 高圧発電機車等の電源確保

外部電源およびディーゼル発電機機能が喪失した場合でも,安全に停止する機器を動 作させるために十分な容量の電源を確保する。予備分岐盤からは注水手段確保のための機器

(復水輸送ポンプ,原子炉隔離時冷却系制御電源等)や原子炉圧力容器・原子炉 格納容器の監視に必要な電源を供給する。

対策2 注水機能維持の確保

電源喪失した場合にも電源を確保し、注水機能を維持する。

対策3 冷やす機能の確保

海水ポンプ電動機が浸水した場合に備えて,予備電動機確保や電動機洗浄装置確 保により冷やす機能を早期に復旧させる。

対策4 代替注水機能の確保

注水機能が喪失した場合に備えて、外部の代替注水機能を維持する。

対策5 建物の浸水防止対策の強化

津波が建物内に侵入して機器を浸水させないように、建物扉の水密性を高める。



| | Θ | 3 | 3 | 4 | | | 9 | |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 化白色的 | 非常用 | 非常用 | 林雪光 | 復水輎 | 谕送系 | 耀 幽 | 時冷却系 |
| | 王乂司 | ロードセンター | ディーゼル発電機 | 司用 | コントロール センター | ポンプ | ーቆベヰ៕ーロጘሩ⊏ | ポンプ |
| Aプラント | T.P. +17m (C/B:4FL) | T.P. +24m (R/B:2FL) | T.P. +3m (R/B:B2FL) | T.P. +13m (C/B:3FL) | T.P. +9m (R/B:B1FL) | T.P. +12m (R/B:B1FL) | T.P. +11m (R/B:B1FL) | T.P. +21m (R/B:B2FL) |

R/B:原子炉建物 1/B:タービン建物 C/B:制御建物