

1. 原子力発電所の安全設計

原子力発電所は、深層防護(Defense In Depth)の概念のもとに安全設計がなされている。第一のレベルが「異常の発生防止」、これが破られても次のレベル「事故への拡大防止」を図り、さらには「放射性物質の異常放出の防止」の第三のレベルを備えている。

この深層防護を達成するための原子力安全の基本的な機能として、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の3つの機能がある。福島事故では、地震後、「止める」、「冷やす」に成功したが、津波により「冷やす」、「閉じ込める」ができなくなった。

「冷やす」機能を有する設備は多重・多段に備えており、通常運転時には給復水系で原子炉水位を一定に維持するように給水流量を制御している。この給復水系が使えなくなった異常状態においては、1号機では、非常用復水器(IC)で原子炉の蒸気を熱交換機により凝縮し、原子炉に戻すことで崩壊熱を除去する。また、2号機以降のプラントでは、原子炉の蒸気で原子炉隔離時冷却系(RCIC)のポンプを駆動し、原子炉に水を補給する。これらで水位が維持できない場合(LOCA等)には、非常用炉心冷却系(ECCS)にて原子炉に注水する設計としており、様々な場合を想定し、種々のポンプ等を設置している。

高圧注水系(HPCI)

自動減圧系(ADS) : HPCI 故障時に原子炉を減圧

炉心スプレイ系(CS) : 2系統

低圧注入系(LPCI) : 2系統

これらのポンプ等は、外部電源が使えない場合に備え、ディーゼル発電機から電源供給可能としている。

それでもなお水位が維持できない場合に備え、アクシデントマネジメント(AM)として代替注水系(復水補給水系、消火系)を準備している。

「閉じ込める」機能は多重の障壁により構成されている。放射性物質の大部分は燃料ペレットに含有されており、このペレットを燃料被覆管に納めている。事故時には、燃料から放射性物質が放出されることが考えられるため、まずは、原子炉圧力容器内に閉じ込めるが、その外側に原子炉格納容器(一次格納施設)があり、BWRではその外側に原子炉建屋(二次格納施設)を有し、五重の壁と呼ばれることがある。

原子炉圧力容器や格納容器には、隔離弁があり、それぞれの容器等のバウンダリを構成している。また、BWRでは、圧力抑制型格納容器となっており、これは、プール水で蒸気を凝縮することで格納容器の圧力上昇を抑制するものである。さらに、事故時に発生する水素による燃焼・爆発を防止するため、窒素を格納容器内に封入(不活性化)している。

原子力発電所の安全設計の基本は、周囲から隔絶されてもスタンドアローンで安全を確保するというものであり、電源に関しては、以下のように備えている。

通常運転時は自らの発電機で発電した電気を所内電源として利用しており、所内電源が使えない場合には、送電系統と2回線以上で接続された外部電源を使用する。これらの電源が確保できない場合に備え、母線電圧低で10秒程度で起動する非常用ディーゼル発電機を2台備えている。このような備えにもか

かわらず、全交流電源喪失（SBO）となった場合には、直流電源（バッテリー）で作動する IC または RCIC で原子炉の水位を確保するようにしており、SBO 時のさらなるバックアップとしてディーゼル駆動ポンプの消火系で原子炉へ注水できる。さらに、交流だけでなく、直流も無くなったら（全電源喪失）隣接プラントからの電源を融通することが出来る設備と手順を備えている。

2. 福島事故の原因となった地震・津波とその影響

平成 23 年 3 月 11 日、福島第一原子力発電所では、1～3 号機が出力運転中、4～6 号機が定期検査中であった。午後 2 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震により、震度 6 強の地震を受け、福島第一原子力発電所の運転中のプラントも原子炉停止し、外部電源が地震の影響で失われたものの、非常用ディーゼル発電機が設計通りに起動し、電源を供給したため、原子炉の冷却には問題は生じなかった。

しかしながら、午後 3 時 30 分過ぎに到達した大きな津波により、原子炉建屋を含む主要建屋の敷地（1～4 号機で O.P.10m、5,6 号機で O.P.13m）をも浸水し、建屋にも海水が侵入、その結果として、電源盤などの多くの安全設備が使用不能となり、1～5 号機で全交流電源喪失（1, 2, 4 号機では直流電源も喪失）した。

3. 福島第一原子力発電所 1～4 号機の事故進展の概要

3. 1 1 号機

地震の揺れにより、原子炉は緊急停止し、外部電源が喪失した影響で、主蒸気隔離弁が閉止し、原子炉が隔離された状態となった。この状態で、原子炉圧力が上昇し、原子炉圧力高の信号を受けて非常用復水器(IC)が自動起動し、その後、原子炉圧力容器(RPV)の温度低下率が適正な範囲となるよう運転員が手動で起動・停止操作を実施し、原子炉水位を維持していた。

11 日 15 時 30 分に前後して津波が襲来し、設計基準を大幅に超える津波であったことから、電源供給の動脈にあたる電源盤を含め、電源設備全般が使用不能となり、交流だけでなく直流も含めた全電源が喪失した。全電源の喪失に備えて、隣接プラントからの電源融通手段（高圧、低圧）をアクシデントマネジメント策(AM 策)として整備していたが、隣接プラントの電源も喪失し、かつ、電源盤の機能も失われていたため、短時間での電源復旧は不可能な状態となった。このとき、津波の影響でほとんどの安全機能を有する設備が使用不能となっていたが、プラント設備の状態を把握することは極めて困難な状態にあり、また、プラント状態の把握のための計装設備も使用できなくなったことから、何が出来るか、何をなすべきか、といったことすら分からない状態に陥っていた。

全交流電源喪失時には、IC にて原子炉水位を維持する手順としていたが、IC が機能せず、また、そのような場合に手順として用意されている低圧ポンプによる原子炉注水のための原子炉減圧もできない状態となっており、炉心水位が低下し、炉心損傷に至った。18 時過ぎに、直流電源が一時的に戻った際に IC を作動させたが、解析上では既に水位が有効燃料頂部(TAF)を下回っており、また、IC の効果も限定的であった。11 日 21 時過ぎに、原子炉水位が確認できるようになり、TAF 以上の指示となっていたが、後日の調査により、このとき既に水位計が誤指示を出していたと推定している。

原子炉圧力は、11 日 20 時過ぎに約 6.9MPa[gage]であることが分かったが、次に測定できた 12 日 3 時前には約 0.8MPa[gage]となっていた。

MAAP コードによる解析によれば、12 日 2 時前には RPV が損傷し、溶融した炉心のほぼ全量が RPV

下部のペDESTAL領域に落下している。この間、逃し安全弁(SRV)の操作はしていないが、炉心損傷の影響で、核計装束管の損傷や主蒸気管フランジ部からの漏洩などが生じ、RPV 破損に先立ち、原子炉圧力が低下したものと推定している。

一方、ドライウェル (DW) 圧力は、12 日 0 時頃に初めて指示が得られ、事故の状態を考慮しても過大と考えられる 600kPa[abs](最高使用圧力 427kPa[gage])を示した。その後、DW 圧力は 840kPa[abs]まで上昇し、上記の原子炉圧力の値と比較すると、その時点で RPV と DW とは均圧していたものと考えられる。

消防車による注水ができたのは 12 日 4 時頃であり、炉心が損傷した後ではあるものの、ペDESTALに落下した溶融炉心とコンクリートとの反応(MCCI)の進展は抑制でき、コンクリート浸食は約 70cm と評価している。

DW 圧力が 600kPa[abs]であることが分かって以降、S/C ベント操作に入り、全電源が喪失していたことにより現場操作を余儀なくされ、作業が難航したが、周辺住民の避難終了を確認後、12 日 10 時過ぎに小弁操作を実施し正門付近の線量が一時的に上昇した。12 日 14 時過ぎに大弁を操作し、この段階で DW 圧力が低下し、ベントに成功したが、正門付近の線量は上昇していない。なお、当時の風向を考慮した場合、当該ベント等による FP の拡散経路上では、周辺と比べて相対的に線量が高くなっている部分は見あたらない。

12 日 15 時過ぎに原子炉建屋が爆発し、当初、原因が直ぐには判明しなかったが、炉心損傷にもなう水-金属反応で生じた水素が原子炉建屋に漏洩し、これが爆発したものと推定した。1 号機の爆発は、原子炉建屋オペレーティングフロアの壁が横方向に抜ける形となり、天井部分はそのままオペレーティングフロアに落下したため、外観上は床が見えない状態となっている。これは、1 号機のオペレーティングフロア壁の構造が鉄骨構造であり、爆発による過圧で早い段階で損傷し、爆圧が直ぐに抜けたことで生じたものと考えられる。

PCV から水素が漏洩する経路としては、ベント-非常用ガス処理系(SGTS)ラインの逆流の可能性を完全には否定できないが、電源喪失時閉の流量調整ダンパがあること、それにも係わらず原子炉建屋が著しく汚染していること、PCV ヘッドフランジのシールは漏洩ポテンシャルが高いことから、このシール部から漏洩したものが支配的と考えている。

3. 2 2号機

地震の揺れにより、原子炉は緊急停止し、1 号機と同様に原子炉が隔離された状態となった。運転員は手順に従い原子炉隔離時冷却系(RCIC)を手動起動することで原子炉水位を確保し、原子炉圧力は SRV の自動開閉により安定的に維持されていた。原子炉水位高(L8)で RCIC が自動停止したが、12 日 15 時 39 分に手動で再起動した。

津波により直流電源を含む全電源が喪失し、プラントパラメータの監視ができず、RCIC の制御もできなくなったが、津波による影響が出る前に RCIC を再起動したことから、その後、約 3 日間にわたり RCIC により原子炉水位を維持できていた)。この間の RCIC の運転状態については、電源喪失していることで RCIC が L8 でトリップせず、原子炉水位が主蒸気管付近まで上昇していることから、RCIC タービンが二相流で駆動されていたものと推定している。このような運転状態では、単位体積当たりのエンタルピーが高い冷却材が流出することになるので、これを仮定することで、原子炉圧力が低めに維持さ

れたことを説明できる。

また、この間、DW 圧力が通常予想される圧力より低く推移したが、類似プラントである 4 号機では、S/C 外側のトラスルームに津波によるものと思われる水位が形成されていることを踏まえ、2 号機でも津波により海水がトラスルームに進入したことを模擬し、S/C からの除熱に寄与したとの評価を実施したところ、実機の DW 圧力の挙動を再現できた。

14 日 13 時頃には原子炉水位が低下したため、RCIC による注水が停止したと判断しており、自動車のバッテリーを用いて SRV により減圧し、消防車による注水を開始したが、注水が十分ではなく、炉心が損傷した。

炉心損傷以降、炉心部分での水-金属反応による水素が発生し、DW 圧力が上昇しているが、14 日 21 時過ぎに S/C ベント小弁の操作を実施したところ、正門付近の線量が一時的に上昇した。ただし、この操作でラプチャーディスクが開放したか否かは不明である。

15 日 6 時過ぎに、衝撃音を確認され、同時期に 2 号機の S/C の圧力が絶対圧でゼロ（真空）を示したことで、2 号機の S/C が大きく破損した可能性が指摘されていた。しかしながら、地震計の記録から、同時間帯の衝撃音は 4 号機の原子炉建屋爆発起因であることがわかり、また、2 号機の DW 圧力は 15 日 7 時 20 分に 730kPa[abs]を指示していたこと、14 日夕刻から DW-S/C の圧力に、物理的には考えにくい乖離が見られていたことから、S/C の圧力計の指示が不良である可能性が高いと見ている。15 日 7 時以降、特段の操作はないものの、DW 圧力が大幅に低下し、正門付近の線量が大きく上昇したことから、この段階以降で大量の FP の放出があったものと推定している。

なお、1,3 号機と異なり、2 号機で水素爆発は発生していないが、これは、原子炉建屋オペレーティングフロアのブローアウトパネルが 1 号機の爆発の影響で開放していたことで、原子炉建屋に漏洩してきた水素が換気されたことによるものと考えられる。

3. 3 3号機

地震の揺れにより、原子炉は緊急停止し、他号機と同様に原子炉が隔離された状態となった。運転員は手順に従い RCIC を手動起動することで原子炉水位を確保し、原子炉圧力は SRV の自動開閉により安定的に維持されていた。

津波により全交流電源が喪失したが、直流電源が残存していたことから、プラントパラメータを監視しながら RCIC、高圧注水系(HPCI)により原子炉水位を維持した。RCIC 停止後、HPCI が水位低(L2)で自動起動して以降、原子炉圧力が約 1MPa 程度に低下していたが、これは、原子炉水位を安定的に維持するため、運転員が HPCI の運転を止めないよう操作したため、HPCI タービンへの駆動用蒸気が継続的に供給されたことで生じたものである。

13 日 3 時頃、HPCI の停止に伴い、原子炉水位が低下したため、2 号機と同様、SRV により減圧し、消防車による注水を開始したが、注水が十分ではなく、炉心が損傷した。

DW 圧力が最高使用圧力を超えたため、PCV の損傷を回避すべく S/C ベントを複数回実施した。この間は DW 圧力の上昇を繰り返していることから、格納容器の損傷はないか、限定的であったと考えられる。

なお、1 回目のベント時には、直接線等により正門付近のモニタリング値が一時的に上昇したものの、2 回目以降のベント時にはモニタリング値の有意な上昇はみられず、また、放出された FP の拡散経路

上では、周辺と比べて相対的に線量が高くなっている部分は見あたらない。

1号機での爆発を受け、3号機での爆発を回避するため、高い放射線環境や火花発生回避など、厳しい作業環境のもとにブローアウトパネルの開放などの準備を進めていたが、14日11時過ぎに原子炉建屋が爆発した。1号機と同様、炉心損傷にともなう水-金属反応で生じた水素が原子炉建屋に漏洩し、これが爆発したものと推定した。水素が漏洩する経路も1号機と同様と考えており、SGTS チャコールフィルターの線量調査の結果からも、線量が比較的小さいことから、逆流の影響は小さかったものと考えている。

3. 4 4号機

4号機は定検停止中であり、全燃料がSFPにある状態で、津波により直流電源を含む全電源が喪失し、プール水温が上昇していった。他のSFPに比べて相対的に崩壊熱が大きく、当初、プール水位の低下により3月下旬には燃料が露出していくことが懸念される中、3月15日6時過ぎに建屋が爆発した。懸念された水位に関しては、3月16日にヘリコプターで上空から目視したところ、水面が確認でき、燃料が露出していないことがわかった。後日の調査で、プールゲートが開き、原子炉ウェル（当時満水）から水が流入したことで、燃料の冷却に寄与し得る水量が増加したと評価した。その結果、水位低下の進行は緩やかになったと考えられる。3月20日以降、SFPへの放水、さらには注水を開始したことで、SFPの水位を維持することができた。また、4月以降、複数回のSFP水サンプリングを実施しており、いずれの結果からも燃料の大幅な損傷を示すデータは認められていない。

4号機の炉心には燃料が無く、上述のようにSFPでも燃料が過熱するようなことはなかったものの、水素爆発が発生した。この水素は、SGTS チャコールフィルターの線量調査の結果から、フィルタートレインの出口側の線量が高いことから、3号機ベント流が流入したと推定した。また、原子炉建屋内の爆発状況の調査結果から、5階床面が上方に向かって変形していることや4階のダクトが散り散りになっていたこと等から、4階のダクトが爆発源になっていたと推定している。

4. 放射性物質の大気放出量評価

福島第一原子力発電所の1～3号機で炉心損傷が発生し、大量の放射性物質が放出された。この放出量は、プラント内外に多数設置している放射線モニタが機能していれば、直接的に精度良く評価することが出来るが、全電源を喪失したプラント内の設備だけでなく、敷地外周に設置しているモニタリングポストの機能も喪失したため、限られたモニタリングデータからその量を推定した。

その結果、総放出量は、希ガスで約500PBq、ヨウ素131で約500PBq、セシウム137で約10PBq、セシウム134で約10PBqと評価した。これはチェルノブイリ原子力発電所事故で放出された数値（希ガスで約6500PBq等）より小さいが、それでもなお、大量の放出であったことがわかる。

3月15日7時過ぎから2号機のDW圧力が低下し、ブローアウトパネルから大量の白煙が観測されたこと、当時の風向きや降雨の状況から、北西方向で大きな汚染を生じうる状況であったことから、この2号機からの放射性物質の放出の寄与が最も大きかったものと考えている。

また、格納容器ベント時には、希ガスは放出されたものの、ヨウ素やセシウムの放出は相対的に小さかったものと推定している。

以上