

非常用炉心冷却機能に関する論点

平成23年11月25日
原子力安全・保安院

I. 非常用炉心冷却機能に関する議論の目的と前提

東京電力株式会社福島第一原子力発電所においては、地震により外部電源が喪失し、更に1～3号機のD/G、M/C、P/C、MCC、DCバッテリー等電気系統の殆どが海側のタービン建屋地下階に設置されていたため、津波による水没・被水でほぼ全てが機能喪失した。この結果、交流に加え直流電源も失う完全な電源喪失状態に陥った（3号機は非常用直流電源のみ機能維持）。このような状況下で先ず取り組むべきは炉心冷却の確保であるが、種々の対応にも関わらず、最終的に1～3号機全てが炉心冷却機能の喪失及び炉心溶融に至った。

今回の非常用炉心冷却機能に関する議論は、炉心冷却機能を喪失しシビアアクシデントに至った今回の事故の教訓を踏まえ、こうした事態を確実に回避するための対策を講じることを目的とする。

議論の前提としては、前回議論した電源対策により、直流電源は機能維持している（外部からの繋ぎ込みを含む）ものの、何らかの原因により、①全交流電源喪失（SBO）、②既設の最終ヒートシンクの喪失（LUHS）が発生・継続したと想定する。

基本的には、直流電源により高圧での冷却を維持し、その間に交流電源を確保し逃し安全弁と格納容器スプレー等により原子炉圧力容器を減圧し、代替ヒートシンクへ熱を輸送することにより冷温停止に至らしめるには何が必要かを議論する。ベントによる除熱・減圧は、次々回に議論予定。

なお、本稿では規制として要求すべきものを議論の対象としており、「シビアアクシデント対策」とは、規制要求すべき対策と整理している。

II. 非常用炉心冷却機能に関する論点

（注）☆は対策の方向性。

1. 高圧での冷却

(1) 1号機について

1号機には、非常用復水器（IC）が設置されており、原子炉停止後の除熱機能として事故時の影響緩和のため考慮されている。ICは、原子炉から抽出された蒸気が凝縮し原子炉に戻る仕組みであるため駆動源を必要としない。

ICは、地震後に起動し、弁の開閉により作動・停止を繰り返した後、津波が来襲した

時点で停止していた。直流電源及び交流電源が喪失しシビアアクシデントに至るような場合は、ICの作動が可能であれば状況を緩和させることが可能であったと推定できるが、その時点で既に全ての電源が喪失していたため有効な対策が取ることができなかった。

仮に、津波来襲時に IC が作動していたとしても、直流電源喪失に伴い IC 配管の内側隔離弁の閉動作が行われるロジックとなっている。従って、直流電源が喪失した時点で同弁は閉動作したものと考えられ、東京電力のその後の調査では中間閉状態にあることが確認されている。なお、他の事業者を含め IC 以外の高圧での注水機能の隔離弁は、全てのプラントで故障時の状態を維持 (As is) するロジックとなっている。

津波来襲後の IC の作動状況に関し、本部では IC が作動しているものと誤認するなど現場との意思疎通が難しい状況があった。IC を巡る混乱の原因のひとつは、電源喪失による中央制御室での表示の喪失であり、改めて電源の必要性が認識された。

- ☆1 : シビアアクシデント (その前兆を含む) など、炉心冷却を最優先すべき状況の判断基準を明確化すべきではないか。この判断を可能とするために、ハード (計装系、状況を確認に行くための装備 (線量計、マスク等)) と、ソフト (その際の操作を明記した手順書等) が必要ではないか。
- ☆2 : 隔離弁のうち事故後に閉状態が維持される可能性があるものについて、事故後の注水を可能とするために、逆止弁の採用、弁の撤去、外部から強制的に開とするシステムなどが考えられるが、どのような対策が適切か。
- ☆3 : ICに限らず、シビアアクシデントを防止・緩和するために重要な系統 (圧力容器の除熱機能、注水機能) については、必要な時に強制的に確実に動作させることができるメカニズム (外部から個別に電動弁に給電するなど) を導入する必要があるのではないか。
- ☆4 : シビアアクシデントでは、格納容器内の水素濃度が上昇しており、内側隔離弁の電動弁は着火源となる危険性はないか。
- ☆5 : 中央操作室での計装を維持するための電源対策に加え、中央指揮所、事故対策本部などで中央操作室と同じ情報が得られるシステムの強化が必要である。

IC は、タンクの胴側に給水できている限り、電源がない状況下でも長時間に亘り炉心冷却が可能である。アクシデントマネジメント (AM) 策として整備されたディーゼル駆動消火ポンプ (DD/FP) は IC 胴側への給水が可能であるが、タービン建屋地下階に設置されていたため被水し、セルモータが地落して稼働できなかったものと推定される。また、DD/FP は原子炉への代替注水にも使用できるよう準備されていたが、結局これもできず、消防車による給水に頼らざるを得なかった。

なお、DD/FP 等の消火系は 1~4 号機で共用されており、消火ラインは建屋全体に張り巡らされていることから、地震によるリーク等で機能を喪失するリスクがある。

- ☆6 : シビアアクシデント対策としての位置づけられた給水設備の駆動源は、電動と電動以外に多様化する必要がある。また設備の被水を避けるため、津波の恐れが

ない別建屋とするか、既存建屋で地下に置かなければならないのであれば建屋及び部屋の水密化、排水設備の設置を行う。発電所内で複数台あるのであれば位置的分散を図るべきではないか。

- ☆7：その一環として、消火系設備を、シビアアクシデント対策としての位置づけるのであれば、設備の信頼性の向上が必要。例えば、被水しない対策に加え、IC 胴側への給水及び原子炉への代替注水のためのラインについては、通常の消火系のラインから簡易に切り替えられるようにする。また、地震時における信頼性を向上させるため、耐震性の強化を行う必要が生じる。

(2) 2号機及び3号機について

2号機には高圧下で炉心を冷却するため、隔離時冷却系(RCIC)及び高圧注水系(HPCI)が設置されている。RCIC及びHPCIとも、直流電源により起動し、原子炉からの蒸気でタービンを回し、その駆動力を利用したポンプで冷却水を原子炉に注水することができる。

2号機においても、津波により直流及び交流電源が喪失した。RCICの作動には蒸気流量を制御するための直流電源が必要であるが、津波の到達前に起動していたRCICは、約3日間に亘り直流電源の喪失後においても作動し炉心の冷却を継続した。直流電源なしでRCICが作動し続けたことについては、何らかの理由で駆動タービンへの蒸気量が注水量とバランスしていたと推定される。今後、解明のための更なる検討が必要である。

また、全ての交流電源が喪失した場合はRCIC等による炉心の冷却が最優先であるが、津波の来襲前に起動していたRCICが作動しているか把握できず、11日夜中になって作動していることが判明した。炉心冷却を最優先すべき状況においては、RCIC等の作動状況を現場で直ちに確認する等の対応を予め決めておく必要があったと考えられる。

- ☆8：シビアアクシデント(その前兆を含む)など、炉心冷却を最優先すべき状況の判断基準を明確化すべきではないか。この判断を可能とするために、ハード(計装系、状況を確認に行くための装備(線量計、マスク等))と、ソフト(その際の操作を明記した手順書等)が必要ではないか。(再掲：☆1)

- ☆9：一方、ABWR-I Iでは、駆動タービンで同時に発電機を廻して直流電源の充電を行うことができるAdvanced RCICが提案されている。このように電源などを他に依存しない設備は有効ではないか。

交流電源を必要としない蒸気駆動式ポンプである高圧注水系(HPCI)を有しておきながら、直流電源の喪失によってHPCIを作動できなかったことは事象進展に影響を与えた。なお、SCを水源とする場合があるHPCI及びRCICは、原子炉建屋地下階のSCの近傍に設置されており、津波等による水没のリスクがある。

- ☆10：津波の来襲時においてもHPCI及びRCICの作動を確保するためには、これらを水没・被水させないための建屋、ポンプ室の水密化、排水設備が必要である。

また、これらを起動し相当の期間に亘り適切に制御するための直流電源が必要である（前回議論）。

3号機にも、2号機と同様に、高圧下で炉心を冷却するため、RCIC及びHPCIが設置されている。

3号機では、RCIC及びHPCIを作動させるのに必要な直流電源が水没を免れたことから、RCICを起動させたが12日に停止した。RCICが停止した原因は、制御を行うために必要な直流電源の枯渇による可能性があるが、2号機では同様の状態で更に長期間作動しており、更なる原因の解明が必要である。

RCICの停止後、RCICとは別系統の直流電源によりHPCIが自動起動したが、原子炉圧力低下により13日に停止した。その際、原子炉圧力は0.8MPaまで低下していたが、交流電源等の喪失により低圧注水系（3.1MPa以下で作動可）が利用できなかった。

2. 低圧注水

今回の事故において、高圧での冷却機能が維持されている間に、原子炉の減圧操作、低圧注水系が適切に作動する必要があったが、常設の低圧注水システムは津波により機能喪失していた。

具体的には、2号機においては、RCICの長時間運転により圧力抑制室（SC）の温度が上昇したが、SC冷却のために必要な残留熱除去系（RHR）は、津波により、ポンプ用交流電源に加え、残留熱除去海水系（RHRS）及び残留熱除去冷却系（RHRC）の機能が喪失した。SCの熱除去ができなければ、SCはいずれ圧力抑制機能を喪失することになる。（注：福島第二では交流電源があったため格納容器スプレーで熱除去し圧力上昇を抑制。また、緊急安全対策では、ベントによる蒸気放出で熱除去しSCの圧力抑制機能を維持することを想定）

☆11：防潮壁やスクリーンなどによりRHRS、RHRC等のヒートシンクを確保するための機器の耐性強化が必要である。

☆12：可搬型代替RHRSの導入や空冷によるヒートシンクなどの多様性を検討する必要がある。（この論点は次々回の「格納機能の喪失」と併せて議論）

3. 代替注水について

(1) 代替高圧注水について

制御棒駆動系（CRD）からの注水、ホウ酸注水系（SLC）の使用が代替高圧注水として考えられていたが、これらを作動させるためには交流電源が必要であり、全交流電源喪失の状況下では機能しなかった。

☆13：事故時に簡易に交流電源が供給できる対策が必要である。（電源の供給口については前回議論）

(2) 原子炉圧力容器の減圧及び代替低圧注水について

AM 策として整備されていた復水補給水系（MUWC）や消火系などの原子炉への代替注水手段の吐出圧は低いため、原子炉圧力容器の減圧が必要であるが、今回の事故のように劣悪な環境下において圧力容器の減圧と注水ラインの構成及び注水実施を適時に行うことは難しかった。また、消火系の DD/FP は、津波による被水で停止し活用できなかった。

特に、全ての電源が喪失するなどの事態において、炉心損傷に至るまでの時間が短いシーケンスでは、圧力容器減圧、代替低圧注水の準備を短時間で行わなければならない。また、6～7 気圧の消防車ポンプ等で原子炉に注水するためには、原子炉圧力をそれ以下に下げなければならないが、原子炉圧力が低下すれば RCIC や HPCI が停止し、原子炉への注水が停止することから、代替注水への切替えを迅速に行う必要がある。

☆14：圧力容器の減圧を行うための逃し安全弁の機能喪失（圧力室素切れ、直流電源喪失）があったことを踏まえ、弁の蓄圧タンクのバックアップシステム（可搬型コンプレッサー等）、直流電源の確保が必要である。

なお、ベント弁について次々回に議論予定。

☆15：シビアアクシデント対策としての位置づけられた代替注水設備の駆動源は、電動と電動以外に多様化する必要がある。また設備の被水を避けるため、津波の恐れがない別建屋とするか、既存建屋で地下に置かなければならないのであれば建屋及び部屋の水密化、排水設備の設置を行う。発電所内で複数台あるのであれば位置的分散を図るべきではないか。（再掲：☆6）

☆16：注水までの時間を短縮化するため、できるだけ吐出圧力の高いポンプ、耐震強化された注水ライン及び建屋外の注水口の整備、注水手順の整備・訓練が必要ではないか。

Ⅲ. その他

今回の議論は、福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、BWR に特化して行ったが、PWR についても同様の検討が必要である。PWR は炉心冷却の仕組みが BWR とは大きく異なることから、BWR の対策を参考にしつつ PWR の仕組みに合った対策を別途検討する。