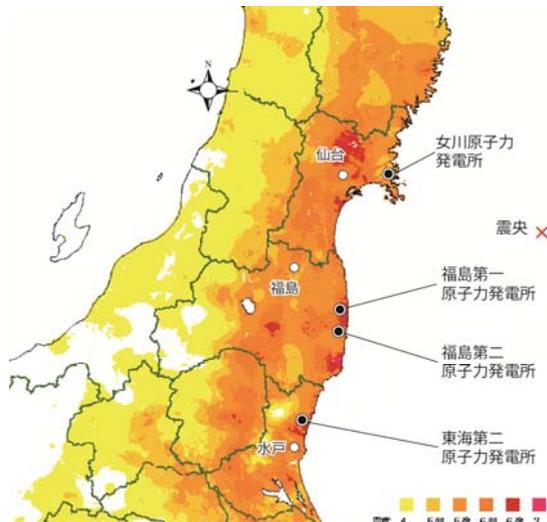


福島第二、女川、東海第二各発電所では、何故シビアアクシデントに至らなかったか？

一般社団法人 日本原子力産業協会



出典：気象庁「推計震度分布図2011年03月11日14時46分 三陸沖 M7.9」

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震を起因とする地震動と津波は、東京電力（株）福島第一原子力発電所だけでなく、同福島第二原子力発電所、東北電力（株）女川原子力発電所、日本原子力発電（株）東海第二発電所も襲った。発電所間で地震動強さと津波高さには差異があったが、福島第一の1～3号機で炉心が熔融するシビアアクシデント(SA)が起きた一方で、福島第二、女川、東海第二の各発電所ではSAを防止できた。ここでは、福島第二、女川、東海第二の各発電所の各号機が、地震・津波によってどれほどの影響であったか、それはどのような安全対策を採ってきた結果なのかを記述する。

I. 地震動

各発電所で観測された地震動は、福島第一と女川で部分的に基準地震動 S_s に対する最大応答加速度を超えた値があったが、概ね最大応答加速値以内であり、それを超えているものも極端な超過ではない。設計で想定していた最大値を超えたものがあるということ自体は、設計での想定が不十分であったことを意味するから、もちろん課題或いは教訓となる事実である。しかし、これまでに得られた情報に基づく限り、施設及び設備への重大な影響はなく、耐震設計における裕度（実耐力）が安全確保に大きく寄与したと言える。

ただし、外部電源系に関しては、これは設計での想定通りであるが、ほとんどの発電所で地震動によって大きな被害が出ている。福島第一では7回線全て、福島第二では4回線（1回線は点検停止中）のうち2回線、女川では5回線のうち4回線、東海第二では3回線全てが喪失している。外部電源が生きていれば、アクシデントマネジメント(AM)策の多くが実施可能であり、また、全てが喪失しなければ、復旧にも大きな役割を果たせる。外部電源系の信頼性向上も含め全体として電源系の信頼性が高くなることが望ましい。（こうした観点から、原子力規制委員会（以下、「規制委」）は既に、新基準による要求としても事業者の自主努力としても、合理的に達成可能な外部電源系の信頼性向上を求めている。）

II. 津波

津波については、従来は明瞭な規制基準がない状況下で、各発電所は新しい知見或いは経験が得られるごとに想定津波高さを高め、必要と考えられる対策を講じてきた。即ち、まずは設置許可申請時に、次いで、2002年に土木学会による津波高さ評価手法が公表された際に、そして、福島第一、福島第二、東海第二については2007年に福島県及び茨城県が県としての防災対策のために津波を独自に想定した際に、必要に応じて見直しを行った。また、それに対応してポンプの嵩上げや熱交建屋の水密化等の津波対策も強化してきた。

しかしながら、福島第一での実際の津波は13.1mと想定定の6.1mをはるかに上回るものであり、安全上重要な設備の故障・損傷は津波によるものであった。（こうした観点から規制委は、新基準において厳格な津波対策を要求している。）

これに対し、福島第二では、5.2mの想定に対し実際の津波は7～8m、女川では、13.6mの想定に対し実際の津波は13m、東海第二では、6.61mの想定に対し実際の津波は5.5mであった。

III. 被害状況

福島第一も含め、各発電所の各施設が地震と津波でどのような損傷を受けたかについては、表に示す。各発電所の被害状況をまとめると次のようになる。

福島第一

1～3号機は定格出力運転中、4～6号機は停止中であつた。1～3号機は東北地方太平洋沖地震に伴うスクラム信号により全号機が自動停止した。地震による変電機器の損傷および送電鉄塔の倒壊のため、全号機で外部電源が全喪失した。津波による非常用ディーゼル発電機(D/G)本体の被水、冷却系の機能喪失、電源盤の水没のため、6号機の空冷D/G1基を除いて全D/Gが機能喪失した。1号機、2号機および4号機では、津波により全直流電源も喪失した。原子炉冷却用の非常用海水ポンプは津波により残留熱の除熱機能を喪失した。結果として、1～3号機で炉心が溶融する事故になつた。4号機は原子炉内に燃料はなかつたが、3号機から流入した水素によって原子炉建屋内で水素爆発が起きた。5号機、6号機は停止中で時間余裕があつた。6号機は生き残つた空冷D/Gの活用によりSAを免れ、5号機はAM策として整備済みの6号機からの電源融通によりSAを免れた。

福島第二

1～4号機は定格出力運転中であつたところ、東北地方太平洋沖地震に伴うスクラム信号により全号機が自動停止した。その後襲つた巨大津波は1号機南側や免震重要棟付近で遡上高さ0.P.約+15mを記録し、特に0.P.+4mの敷地高さに配置される海水熱交換器建屋に大きな被害を与えた。これにより3号機を除く3プラントの原子炉冷却用の非常用海水ポンプは津波により残留熱の除熱機能を喪失し、その後さらに原子炉の熱の逃がし場となつた圧力抑制室の温度が100℃を超え、原子力災害対策特別措置法における原子力緊急事態に該当する事象(原災法第15条該当事象(圧力抑制機能喪失))に至つた。

外部電源は変電所の設備損傷があつたものの、4回線のうち1回線から受電可能であつた。D/Gは津波によるD/G本体の被水、冷却系の機能喪失のため、1号機及び2号機のD/G3基全て、3号機のD/G3基中1基、4号機のD/G3基中2基が機能喪失した。また、直流電源系は健全であつた。

免震重要棟に設置された発電所の原子力防災組織により、大津波警報が発報される中でのプラントウォークダウンによる設備被害の確認と復旧に向けてのロジスティクスの構築、本店原子力防災組織とタイアップした設備調達、そして、発電所員ならびに協力企業の懸命の努力による海水ポンプモータ取替や仮設電源ケーブルの敷設を経て、地震から4日後の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。

女川

1号機及び3号機が定格出力運転中、2号機が原子炉起動中のところ、東北地方太平洋沖地震に伴うスクラム信号により全号機が自動停止した。

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、D/Gも全て健全であつた。また、直流電源系は健全であつた。

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、原子炉及び使用済燃料プールを冷却する機能も健全であつたため、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。1号機及び3号機のD/Gは全て健全であつたが、2号機は津波の影響により補機冷却水系の一部が機能喪失したため、D/Gの3基中2基が機能喪失したが、1基が生き残つた。3月12日1時17分には、全3号機共、冷温停止が達成された。

東海第二

定格出力運転中、東北地方太平洋沖地震に伴うスクラム信号により原子炉が自動停止した。この地震の影響により変電所側の機能喪失のため、外部電源が3回線全てで喪失したもののD/G3台は使用可能であつた。その後の津波の浸水によりD/G冷却用海水ポンプ1基が自動停止したため、D/G1基を手動停止したことにより、残留熱除去系(RHR)の1系統が使用不能となつたが、その他の安全上重要な設備の機能は維持された。非常用蓄電池(RCIC電源)の充電は別電源系から融通し、機能が維持された。直流電源系は健全であつた。この結果、3月15日0時40分に冷温停止を達成している。

IV. 安全機能確保の要因

福島第二

津波で除熱機能を喪失した1、2、4号機では、事故時運転操作手順書に従い、原子炉隔離時冷却系(RCIC)による注水によって原子炉の冷却が維持された。その後、原子炉圧力が減少した以降は、AM策に基づき復水補給水系による代替注水が開始され、原子炉の水位が調整された。

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、ケーブルが、本店や柏崎刈羽原子力発電所に依頼されるなどして緊急調達された。要求仕様が合致した資機材については自衛隊による空輸や陸送などあらゆる手段を講じて福島第二へ輸送された。

特に、中越沖地震を踏まえ設置された免震重要棟は、本復旧活動における中心拠点となり、通信・連絡機能、

収納機能等が今回の冷温停止を達成するための収束対応をより円滑なものにしたと推測される。

女川

敷地の高さについては、1号機の建設計画当初から、津波対策が重要課題であるとの認識が持たれ、東北電力社内に土木工学、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程度と想定されたが、社内委員会において、「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程度とする。」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。以降、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は、その時々最新の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となったが、津波の高さは13mであり、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かった。

東海第二

東北地方太平洋沖地震発生当時も新たな知見に対する対策工事が実施されているところであった。その前提条件は、平成19年に茨城県が公表した「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津波評価の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 まで嵩上げするといったものであった。浸水を防ぐための壁や貫通部を封止する工事が施工中であったため、一部の機器の浸水は免れなかったものの、この対策工事が奏功し、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できた要因となっている。

V. まとめ

福島第二、女川、東海第二のいずれの発電所においても、東北地方太平洋沖地震によるSAを避けることができた。その要因として、以下があげられる。

電源の重要性

全交流電源喪失に至らなかったことである。福島第二では、4回線の外部電源のうち1回線、女川では、5回線の外部電源のうち1回線が生き残った。東海第二では、外部電源の3回線全て喪失したものの、3基の非常用D/Gのうち2基が健全であった。

AM策の整備

福島第二においては、3号機をのぞく3プラントの原子炉冷却系の非常用海水ポンプが機能喪失したものの、交流電源及び直流電源が健全であり、RCICによる注水、その後、AM策である復水補給水系による代替注水により原子炉の水位が維持された結果、炉心溶融を回避できた。

一方、福島第一においてもAM策が整備されていたが、地震、津波による全交流電源喪失、残留熱の除去機能の喪失の結果、「原子炉の減圧」と「原子炉への注水」の遅れから、炉心損傷を引き起こした。特に、津波による直流電源の喪失、電源盤の浸水は、あらゆるAM策を阻害することとなった。

免震重要棟

福島第二の免震重要棟は、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ヶ月前の平成22年7月に運用が開始されたばかりであったが、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た。

福島第一においても、免震重用棟は現地事故対応の拠点となり、仮に本施設がなければ、事故対応の継続は不可能であった。

なお、女川の免震構造の事務本館及び東海第二の免震重要棟は、当時は建設中であり、緊急対策室として運用開始されていなかった。

津波に対する備え

女川や東海第二においては、余裕を持った敷地の高さや新知見に基づく浸水防止工事により、土木学会手法相当の津波の襲来に対し安全機能の維持につながった。

一方、福島第一や第二においては、土木学会手法相当の津波を大幅に上回る津波の襲来のため、新知見に基づく対策が功を奏することはなかった。

※本稿は、一般社団法人 日本原子力学会原子力安全部会発行の「「福島第一原子力発電所事故に関するセミナー」報告書」をもとに、一般社団法人 日本原子力産業協会がまとめたものです。

表 福島、女川、東海各サイト・各プラントにおける地震・津波による設備被害状況

(一部被害設備は「健全な数/全数」で表示)

サイト	号機	形式	出力	外部電源※1	D/G (地震による 喪失はなし)	直流電源	電源車	海水 冷却系※6	M/C (高圧電源盤) (()内は工事中系統)		P/C (低圧電源盤) (()内は工事中系統)		大規模な 燃料損傷	
									非常用	常用	非常用	常用		
福島 第一	1号機	BWR3	460	275kV : × 66kV : × (全7回線)	×※2	×	一部活用	×	×	×	×	×	損傷	
	2号機	BWR4	784		×※2	×		×	×	×	2/3	2/4		健全
	3号機	BWR4	784		×※2	○→枯渇		×	×	×	×	×		
	4号機	BWR4	784		×※2	×		×	×	×	1/2(1)	1/1(1)		
	5号機	BWR4	784		×※2	○		×	×	×	×	2/7		
	6号機	BWR5	1,100		1/3※2	○		×	○	×	○	×		
福島 第二	1号機	BWR5	1,100	500kV : 1/2 66kV : × (全4回線)	×※3	3/4	一部活用 (外電、D/G 確保)	×	1/3	○	1/4	○	健全	
	2号機	BWR5	1,100		×※3	○		×	○	○	2/4	○		
	3号機	BWR5	1,100		2/3※3	○		D/G(H)用 : ○ RHR用 : 1/2	○	○	3/4	○		
	4号機	BWR5	1,100		1/3※3	○		D/G(H)用 : ○ RHR用 : ×	○	○	2/4	○		
女川	1号機	BWR4	524	275kV : 1/4 66kV : × (全5回線)	○	○	(外電、D/G 確保)	○	○	1/2	○	○	健全	
	2号機	BWR5	825		1/3※4	○		D/G(H)用 : × RHR用 : 1/2	○	○	○	○		
	3号機	BWR5	825		○	○		○	○	○	○	○		
東海第二	BWR5	1,100	275kV : × 154kV : × (全3回線)	2/3※5	○	予備で確保 (D/G 確保)	D/G用 : 2/3 RHR用 : ○	○	○	○	○	健全		

※1 : 福島第二、女川、東海第二では1日~数日で外部電源の一部が復旧。福島第二の66kVの1回線は点検停止中。

※2 : 1、4号機の1/2、5号機はD/G本体の被水ではない(間接的要因(補機冷却系、M/C等関連機器水没)による喪失)、2、4、6号機B系は空冷

※3 : 1号では原子炉建屋付属棟のDG送風機給気口等から浸水しD/Gの送風機を通じてD/Gに到達、2~4号では原子炉建屋付属棟への浸水は殆どなし(間接的要因(補機冷却系、M/C等関連機器の水没)による喪失)

※4 : A系は健全、海水ポンプ室内開口部(潮位計)からの浸水による原子炉補機冷却水B系ポンプ及びHPCS補機冷却水系ポンプ喪失

※5 : 海水ポンプ室への浸水によりD/G冷却用海水ポンプ2Cが自動停止、D/G-2Cを手動停止

※6 : 海水系統の機能喪失(補機冷却水系ポンプの機能喪失を含む)

海水ポンプ設置場所: 福島第二は湾岸部熱交換器建屋内(大物搬入口等から浸水(3号機南側建屋を除く))、女川は敷地高さから掘ってピット化した海水ポンプ室(配管、ケーブル洞道経由で原子炉建屋付属棟(非管理区域)内に浸水)、東海第二は湾岸部の側壁を津波対策で嵩上げた海水ポンプ室(一部工事未完の壁貫通部より浸水)に設置