

## 報告書案3.2章の作成方針 (東日本大震災における原子力発電所の挙動)

- ・ たたき台として、日本原子力学会安全部会の報告書案(今後更に見直し)より、5章、6章の「発電所の事象の概要」を基に事実関係を抽出し、出来るだけそのままの形で紹介
- ・ 地震工学会の委員会として、必要な指摘を追加するか、あるいはまとめて直すかは今後議論(引用する場合は、日本原子力学会に点差字承諾の手続きを取る予定)
- ・ 東北電力東通発電所あるいは東海再処理施設については記載がない
- ・ 福島第一原子力発電所の使用済み燃料中間貯蔵施設についても記載はわずかである
- ・ 当初は政府事故調や国会等の報告書を基に作成することを想定していたが、今回は学会の報告書を基にするため、報告書同士の比較は削除
- ・ 本パワーポイント資料についても、安全部会の資料から参考となる範囲を抜粋

### 3. 2. 1 福島第一原子力発電所

|                 | 1号機    | 2号機                     | 3号機                                | 4号機         | 5号機        | 6号機                                  |
|-----------------|--------|-------------------------|------------------------------------|-------------|------------|--------------------------------------|
| 電気出力(万kW)       | 46.0   | 78.4                    | 78.4                               | 78.4        | 78.4       | 110.0                                |
| 営業運転開始          | 1971/3 | 1974/7                  | 1976/3                             | 1978/1<br>0 | 1978/<br>4 | 1979/10                              |
| 原子炉型式           | BWR3   | BWR4                    |                                    |             |            | BWR5                                 |
| 格納容器型式          | マークI   |                         |                                    |             |            | マークII                                |
| 炉心燃料集合体数<br>(本) | 400    | 548                     | 548                                | 548         | 548        | 764                                  |
| 冷却<br>設備        | 原子炉隔離時 | IC(2)                   | RCIC                               |             |            |                                      |
|                 | ECCS   | HPCI(1)<br>ADS<br>CS(2) | HPCI(1)<br>ADS<br>CS(2)<br>LPCI(2) |             |            | HPCS(1)<br>ADS<br>LPCS(1)<br>LPCI(3) |
| 地震発生時の状況        |        | 定格出力運転中                 |                                    |             | 定期検査中      |                                      |

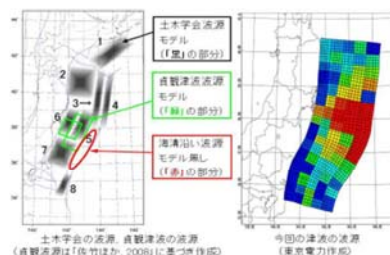
## 東日本大震災による福島第1,2原子力発電所 における津波による被害

【津波の大きさ】

- ・世界観測史上4番目の規模(M9.0)
- ・従来想定されていなかった波源の運動
- ・福島第一では、O.P.+15m程度

【津波による被害】

- ・海水系機器の損傷
- ・建屋浸水による電源盤喪失  
(SBO&直流喪失)
- ・敷地高さの高い5、6号機側は被害小
- ・津波の再現解析からは、津波の重なりで  
大きな高さとなったと評価



|                         |                                                                                   | 観測値 - 平均/海抜高             |      |      |      |      | 観測値 - 平均/海抜高                 |      |      |      |      |   |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|------|---|
|                         |                                                                                   | 2011                     | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2011                         | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |   |
| 主要集排水域エリア<br>(1~4号集排水域) |                                                                                   | 主要集排水域エリア<br>(5号、6号集排水域) |      |      |      |      | 外郭電源                         |      |      |      |      |   |
| ○敷地高 [a]                | OP + 10m                                                                          | OP + 13m                 |      |      |      |      | 市電用アーバン<br>地区(市電線<br>沿い、方式C) | A    | B    | C    | D    | E |
| ○浸水深 [b]                | O.P. 約 + 11.5 / 約 + 15.5m <sup>1)</sup>                                           | O.P. 約 + 13 / 約 + 14.5m  |      |      |      |      | 市電用アーバン<br>地区(市電線<br>沿い、方式C) | A    | A    | A    | A    |   |
| ○浸水深 [b-a]              | 約1.5~約5.5m                                                                        | 約1.5m以下                  |      |      |      |      | 市電用アーバン<br>地区(市電線<br>沿い、方式C) | A    | A    | A    | A    |   |
| ○浸水域                    | 海側エリア及び主要集排水域エリアほぼ全域                                                              |                          |      |      |      |      | 市電用アーバン<br>地区(市電線<br>沿い、方式C) | A    | A    | A    | A    |   |
| 備考                      | ・今回の津波高さ(津波再設計値による推定) 約13m <sup>2)</sup><br>・土木学会公表による評価値(最新評価値)：O.P. + 8.4 - 6.1 |                          |      |      |      |      |                              |      |      |      |      |   |

### 3.2.2.1 福島第一1号機原子炉



【地震の影響】

- ・外部電源喪失(非常用DG起動)、原子炉スクラム
- ・非常用復水器(IC)で冷却維持
- ・原子炉安全に係る影響は限定的

### 【津波の影響と注水】

- ・SBO、直流電源喪失
- ・直流喪失でIC隔離信号発信⇒注水、冷却不能(当初気づかず)
- ・炉心損傷に伴い、水位計が誤指示(バッテリーつなぎ込みで確認した際はTAF以上)
- ・消防車による注水で、MCCI抑制

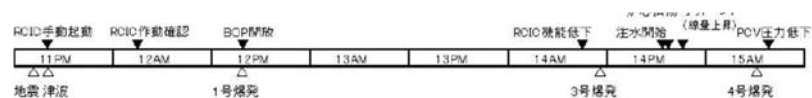
【格納容器ベント】

- ・現場操作等でベント成功(小井操作時にモニタリング値上昇、大井では反応せず)

【水素爆発】

- ・原子炉建屋への水素漏えいによる燃焼・爆発は、すぐには理解できなかった

### 3.2.2.2 福島第一2号機原子炉



#### 【地震の影響】

- ・外部電源喪失(非常用DG起動)、原子炉スクラム
- ・原子炉隔離時冷却系(RCIC)で冷却維持
- ・原子炉安全に係る影響は限定的

#### 【津波の影響と注水】

- ・SBO、直流電源喪失、RCIC継続運転(二相流駆動)
- ・RCICトリップ後、SRVによる原子炉減圧に難儀
- ・消防車による原子炉減圧、注水開始すれど炉心損傷(バイパス流)

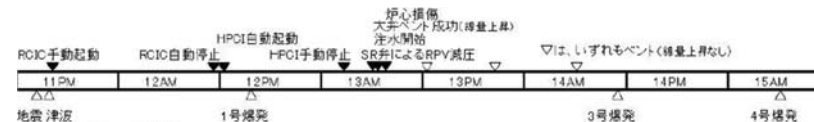
#### 【格納容器ベント】

- ・ベント準備は3号爆発で無効に
- ・小弁ベント操作後にモニタリング値上昇したが、DW圧力は下がらず

#### 【放射性物質の放出】

- ・3月15日7時～11時にDW圧力が大幅減少、FP大量放出＋降雨で北西方向汚染

### 3.2.2.3 福島第一3号機原子炉



#### 【地震の影響】

- ・外部電源喪失(非常用DG起動)、原子炉スクラム
- ・原子炉隔離時冷却系(RCIC)で冷却維持
- ・原子炉安全に係る影響は限定的

#### 【津波の影響と注水】

- ・SBO、直流電源は維持され、RCIC継続運転
- ・RCICトリップ後、HPCIが自動起動
- ・原子炉圧力低下を受け、機器損傷の影響を懸念し、HPCI手動停止
- ・DD-FP、消防車による注水準備するも、原子炉圧力上昇で注水途絶
- ・SRVによる原子炉減圧、注水開始すれど炉心損傷(バイパス流)

#### 【格納容器ベント】

- ・ベント成功(1回目はモニタリング値上昇、2回目以降は反応せず)

#### 【水素爆発】

- ・ウォータージェットによる原子炉建屋穴開けの手配中に爆発

### 3.2.2.4 福島第一4号機原子炉

#### 【状態】

- ・4号機の使用済み燃料は全てプールにあり、崩壊熱が相対的に大

| 号機      | 使用済み燃料体数<br>(新燃料体数) | 崩壊熱(MW)<br>3/11時点 | プール水量(m <sup>3</sup> ) |
|---------|---------------------|-------------------|------------------------|
| 1号機     | 292(100)            | 0.18              | 990                    |
| 2号機     | 587(28)             | 0.62              | 1390                   |
| 3号機     | 514(52)             | 0.54              | 1390                   |
| 4号機     | 1331(204)           | 2.26              | 1390                   |
| 5号機     | 946(48)             | 1.01              | 1390                   |
| 6号機     | 876(64)             | 0.87              | 約1450                  |
| 共用プール   | 6375(—)             | 1.13              | 約4000                  |
| キャスク保管庫 | 408(—)              | —                 | —                      |

#### 【地震・津波の影響】

- ・地震により、外部電源喪失(非常用DG起動)、SFP冷却系停止
- ・津波によるSBO等で、最終ヒートシンク喪失・注水喪失
- ・SFP水位がTAFに低下するのは4号機で3月下旬と予測
- ・4号機原子炉建屋爆発で、SFPや燃料の状態が疑われたが、水位は維持されていた
- ・消防車、コンクリートポンプ車による注水、代替冷却系の導入でSFP冷却維持

#### 【4号機水素爆発】

- ・設計情報、SGTSフィルタートレイン線量調査から、3号機ベントで水素流入
- ・現地調査から、原子炉建屋4階ダクトで爆発が生じたものと推定

#### 【4号機以外の使用済み燃料プール等】

- ・1、3号機では爆発を経験しながらも、SFPの構造健全性は確保
- ・時間余裕があり、消防車、コンクリートポンプ車、代替冷却設備で注水・冷却
- ・乾式キャスクは浸水すれど、健全

### 3.2.2.5 福島第一5、6号機原子炉

#### 【状態】

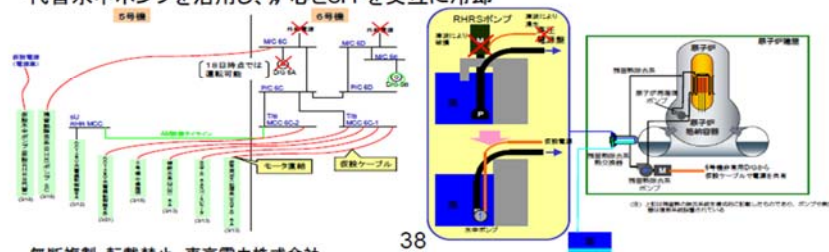
- ・主要建屋はo.p.+13m(1～4号機はo.p.+10m)
- ・運転停止中、長期停止等により炉心の崩壊熱は低い状態

#### 【地震の影響】

- ・外部電源喪失(非常用DG起動)、SFP冷却系停止

#### 【津波の影響と注水・冷却】

- ・6号機空冷DGは運転継続、5号機はSBO、直流電源は維持
- ・AMで準備した電源融通ライン、MUWCによる注水で原子炉冷却
- ・代替水中ポンプを活用し、炉心とSFPを交互に冷却





### 3.2.2 福島第二原子力発電所1～4号機

#### 発災後のプラント進展

|          | 1号機                                                                                                                                                                                    | 2号機        | 3号機        | 4号機       |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|-----------|
| 地震発生時の状態 | 運転中                                                                                                                                                                                    | 運転中        | 運転中        | 運転中       |
| 停止       | 自動停止(地震動)                                                                                                                                                                              | 自動停止(地震動)  | 自動停止(地震動)  | 自動停止(地震動) |
| 地震・津波被害  | 6. 4(3/3)表参照                                                                                                                                                                           |            |            |           |
| 冷却・減圧策   | ・RCICにより原子炉に注水し、SRVにより圧力制御<br>・原子炉圧低下後は、復水補給水系により代替注水<br>・復水補給水系等によるPCVスプレイでPCVを冷却し、時間余裕を確保(併行してPCVベントを準備するも、実施せず)<br>・所外から電源車・電動機を緊急調達、アクセスルート確保、人員によるケーブル敷設等で、各号機のRHRポンプを順次復旧し、原子炉冷却 |            |            |           |
| 冷温停止     | 3/14 17:00                                                                                                                                                                             | 3/14 18:00 | 3/12 12:15 | 3/15 7:15 |

### 3.2.2 福島第二原子力発電所1～4号機(2)

#### 発電所安全確保の要因(プラント状態、プラント操作)

- 地震直後の点検では、耐震安全上重要な施設には外観上の異常は認められず、耐震B、Cクラスの機器の一部に損傷がある程度だった
- 外部電源4回線のうち、1回線が使用可能だった。→これによりその後の復旧活動が容易になった。
- 3号機B系熱交換器建屋の大物搬入口だけが、津波に破られることなく、3号機だけが津波後も余熱除去系が使用できた。
- 余熱除去機能の喪失により、圧力抑制室の水温が100℃を超え、圧力抑制機能が喪失した。  
→ 圧力抑制室の冷却のため、手順に基づき復水補給水系によるS/Pスプレイ、運転員の機転による可燃性ガス処理系の冷却水排水ラインを利用したS/P注水も行い、格納容器圧力・温度の一時的な抑制を行った。
- これらの操作と並行して、除熱機能が長期間回復しない事態に備え、格納容器耐圧ベントのラインを構成し、いつでもベント可能な状態にした。(結果的に、ベントは実施せず)

### 3.2.2 福島第二原子力発電所1～4号機(3)

#### 発電所安全確保の要因(復旧活動)

- 復旧にあたっては、ウォークダウンにより設備被害状況と作業の優先順位付けを行った。余震・大津波警報が継続し、照明・通信手段が無い中で、待避連絡手段を定め、11日22時頃から実施し、機器の津波被害の程度、電源盤の被害状況等を把握し、復旧計画を立案した。
- 除熱機能の回復のため、電動機、高圧電源車、移動用変圧器、ケーブル等を、柏崎刈羽原発、メーカ工場等から緊急調達した。輸送において、道路の通行不能箇所や、放射能による封鎖エリアへの輸送業者の対入り拒否等の阻害事項が見られた。
- 重機によりアクセスルート確保し、ポンプ等を取替えた。また、電源供給のため、延べ9kmのケーブルを200人で1日で敷設した。
- 400名以上の所員が、限られた食料と非衛生的な環境下で、約10日間隔離状態で作業に従事。
- 中越沖地震の知見を踏まえて設置した免震重要棟の通信・連絡、収納機能等は事故収束対応を円滑にしたと推測。

### 3.2.3 女川原子力発電所

#### 発災後のプラント進展

|            | 1号機                                                                        | 2号機                  | 3号機                                                      |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------|
| 地震発生時の運転状態 | 運転中                                                                        | 起動中<br>(未臨界、炉水<100℃) | 運転中                                                      |
| 停止         | 自動停止(地震動)                                                                  | 自動停止(地震動)            | 自動停止(地震動)                                                |
| 地震・津波被害    | 6. 4(3/3)表参照                                                               |                      |                                                          |
| 冷却・減圧策     | ・地震による起動変圧器の停止に伴い給復水系が使用不可となったためRCICで原子炉への給水を行い、SRVにより圧力制御<br>・RHRにより原子炉冷却 | —                    | ・地震後は給復水系、津波後はRCICで原子炉への給水を行い、SRVにより圧力制御<br>・RHRにより原子炉冷却 |
| 冷温停止       | 3/12 0:58                                                                  | 3/11 14:49           | 3/12 1:17                                                |

### 3.2.3 女川原子力発電所(2)

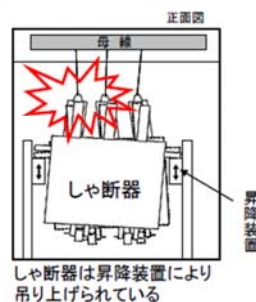
#### 主な発電所の被害状況(1/2)

- 1号機高圧電源盤火災

地震により、タービン建屋地下1階の常用系高圧電源盤が損傷し発煙。道路の寸断により、消防署員は到着できず、自衛消防隊による消火活動により消火。



→ 原因は、接続位置に吊り下げられていたしゃ断器が、地震で揺れて断路部が破損し、周囲と接触して発生した火花により、ケーブルの絶縁被覆が溶けたことと推定。



47

### 3.2.3 女川原子力発電所(3)

#### 主な発電所の被害状況(2/2)

- 2号機原子炉補機冷却水B系ポンプ、高圧炉心スプレイ補機冷却水ポンプ浸水

原子炉建屋地下3階の非管理区域内の補機冷却系海水熱交換器室に海水が流入、原子炉補機冷却水B系ポンプ、高圧炉心スプレイ補機冷却水系ポンプが浸水し、機能喪失。(ただし、A系ポンプは健全であったため冷却機能は維持)

高さ約2.5mまで浸水



→ 原因は、津波による水位上昇により、海水ポンプ室に設置していた常用の水位計設置箱(後付設備)の上蓋を海水が押し上げ、ポンプエリアに流入し、ケーブルトレイおよび配管貫通部を通じ熱交換器室内に流入。



### 3.2.3 女川原子力発電所(4)

#### 発電所安全確保の要因(当初設計、その後の対策)

- 敷地高さの安全側の設定

1号機計画当初から津波対策を重要課題と認識。敷地高さをもって津波対策とすることとし、敷地高さをO.P.+14.8mとした(当時の想定津波高は3m)。今回の津波でも、主要構造物が設置されている敷地高さを超えることはなかった。

- 防潮堤の強化

2号機増設時、想定津波高さを9.1mに見直し、津波引き波時の安定性を考慮し、法面に対し防護工事を実施。

- 海水ポンプ室のピット化

海水ポンプを、敷地高さから13m掘り下げたピット内に設置(海面に近い港湾部には設置していない)し、敷地を超えなければ冠水しない構造。

- 耐震裕度向上工事の実施

配管、電路等の補強等の耐震補強工事を実施。

### 3.2.3 東海第二原子力発電所

#### 発災後のプラント進展

| 地震発生時の状態 | 運転中                                                                                                                                                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 停止       | 自動停止(タービントリップ)                                                                                                                                                                                |
| 地震・津波 被害 | 6.4(3/3)表参照                                                                                                                                                                                   |
| 冷却・減圧方法  | <ul style="list-style-type: none"> <li>地震による自動停止後HPCS,RCIC起動。</li> <li>HPCS, RCICにより原子炉注水(高圧)</li> <li>SRVにより原子炉圧力維持</li> <li>RHR(B)により格納容器冷却</li> <li>外部電源復旧を待って、RHR(A)により冷温停止に移行</li> </ul> |
| 冷温停止     | 3/15 0:40                                                                                                                                                                                     |



### 3.2.3 東海第二原子力発電所(2)

#### 発電所安全確保の要因

##### (地震動)

- 地震に対しては、耐震B,Cクラスタービン設備等の一部に損傷が認められるが、耐震設計上重要な施設(Sクラス)での損傷は認められない。
- 耐震設計上重要な機器・配管の、地震による床応答スペクトルが、一部周期帯で工認設計波の床応答スペクトルを超えているが、重要な設備の固有周期では、工認設計波の床応答スペクトル以下であることを確認。

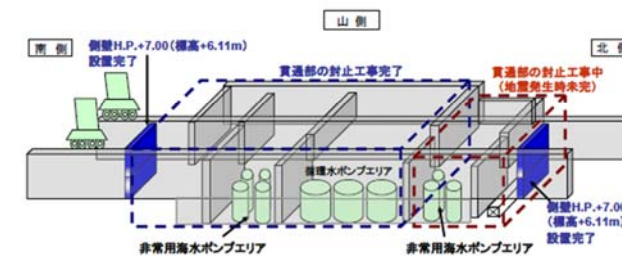
##### (津波想定と対応)

- 建設当時は、津波に関する明確な基準が無く、近隣の最高潮位(H.P.+2.35m)を想定。
- その後、平成14年の土木学会の「原子力発電所の津波評価技術」、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、新知見として反映し、津波評価及び対策工事を講じてきた。

### 3.2.3 東海第二原子力発電所(3)

#### 発電所安全確保の要因(津波影響)

- 津波影響による、北側非常用海水ポンプ室の浸水により、非常用D/G冷却水海水ポンプ2Cが停止し、残留熱除去系Aも機能喪失。  
発災時は、当該エリアの津波対策として側壁の嵩上げ工事を実施中だったが、壁貫通部の封水工事が未完了だった北側エリアは、貫通部から浸水。(工事完了していたエリアの設備は被害が無かった)

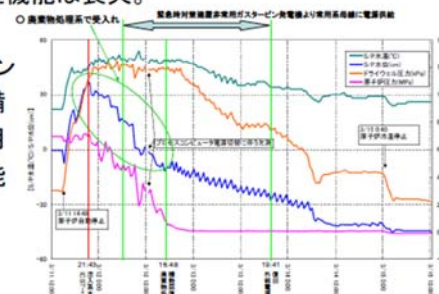


### 3.2.3 東海第二原子力発電所(4)

#### 発電所安全確保の要因(プラント操作)

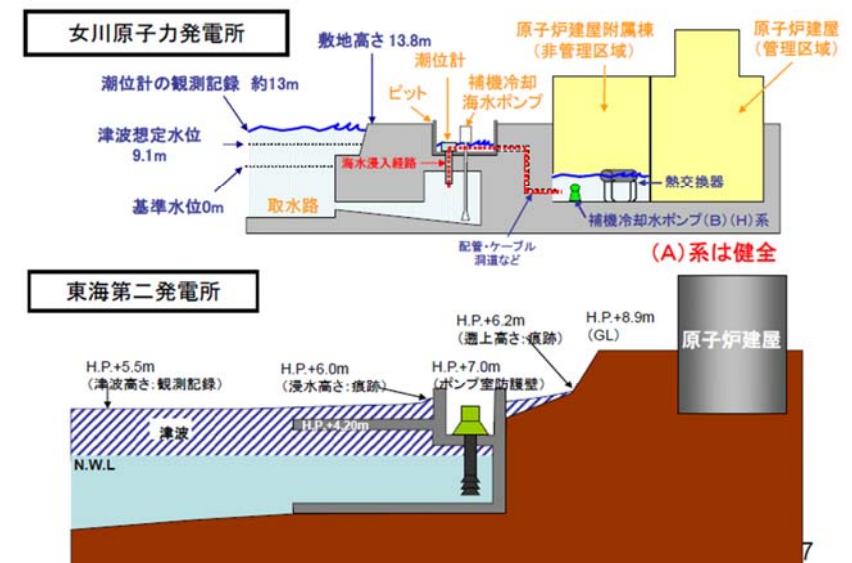
- 初期段階で、復水貯蔵タンクを水源として原子炉への注水をしたため、サプレッションプール水位が上昇。水は、液体廃棄物処理系で受け入れたが、外部電源喪失のため、処理機能は喪失。

→ 緊急時安全対策所のカスタービン発電機から、既存および仮設備を経由して、廃棄物処理系の常用電源盤に電力を供給し、処理機能を復活させた。

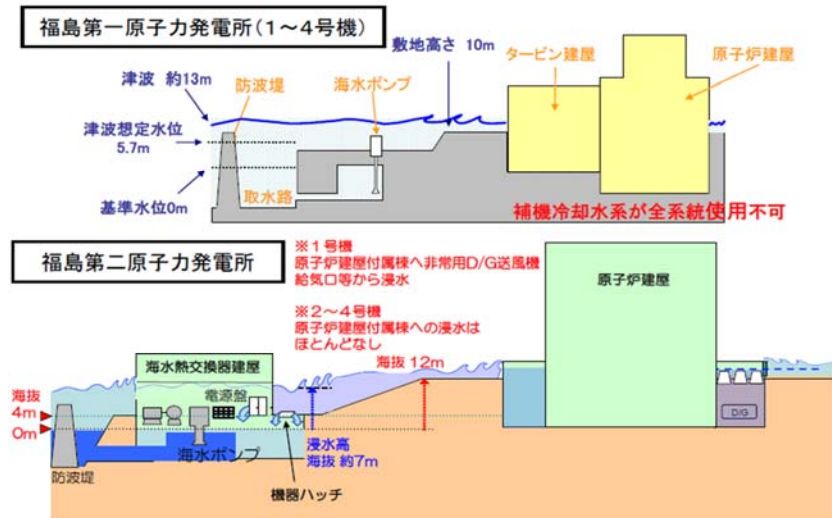


- 喪失していた外部電源の復旧の目途が立っていたこと、発電所のパラメータが安定していたこと、外部電源喪失状態での非常用D/Gの負荷切り替えや原子炉格納容器の冷却系の停止等のリスクを総合的に考慮し、外部電源の復旧を待って、冷温停止に移行した。

### 参考1



## 参考2



## 参考3:各発電所の地震動の比較

| 観測点<br>(原子炉建屋再下層) |         | 観測記録 |     |     | Ssに対する最大応答加速度 |     |     |
|-------------------|---------|------|-----|-----|---------------|-----|-----|
|                   |         | 南北   | 東西  | 上下  | 南北            | 東西  | 上下  |
| 福島第二              | 1号機     | 254  | 230 | 305 | 434           | 434 | 512 |
|                   | 2号機     | 243  | 196 | 232 | 428           | 429 | 504 |
|                   | 3号機     | 277  | 216 | 208 | 428           | 430 | 504 |
|                   | 4号機     | 210  | 205 | 288 | 415           | 415 | 504 |
| 女川                | 1号機     | 540  | 587 | 439 | 532           | 529 | 451 |
|                   | 2号機     | 607  | 461 | 389 | 594           | 572 | 490 |
|                   | 3号機     | 573  | 458 | 321 | 512           | 497 | 476 |
| 東海第二              | 一(地下2階) | 214  | 225 | 189 | 393           | 400 | 456 |

[gal]

## 参考4:各発電所の津波による影響の比較

|      | 敷地高                                           | 設置許可申請                                                   | その後の想定                                                                                                               | 3.11津波高観測値                             | 主要建屋<br>周り浸水高             | 海水P設置<br>場所                           |
|------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 福島第二 | O.P.+12m                                      | 1号建設時(1966)<br>O.P.+3.122m<br>3/4増設(1978)<br>O.P.+3.705m | 土木学会手法 (2002)<br>O.P.+5.2m<br>茨城県想定 (2007)<br>O.P.+4.7m<br>福島県想定(2007)<br>O.P.+5m<br>海底地形、遡上条件見直し(2009)<br>O.P.+5.0m | 津波高<br>O.P. +7～8m<br>浸水高<br>O.P.+14.5m | 約2.5m以下<br>(1号機周囲以外は殆どゼロ) | 海岸部熱交換器建屋内に設置<br>(1台を除き浸水)            |
| 女川   | O.P.+14.8m<br>(地震後の地盤沈下を考慮した場合<br>O.P.+13.8m) | 1号建設(1970)<br>O.P.+2～3m<br>2号増設(1987)<br>O.P.+9.1m       | 土木学会手法 (2002)<br>O.P.+13.6m                                                                                          | 津波高<br>O.P. +13.0m                     | 浸水なし                      | 敷地高さからピットを掘り設置(1系統2台浸水、トリン等經由で建屋内に流入) |
| 東海第二 | H.P.+8.9m                                     | —                                                        | 土木学会手法 (2002)<br>H.P.+5.75m<br>茨城県想定 (2007)<br>H.P.+6.61m                                                            | 津波高<br>H.P. +5.5m<br>遡上高<br>H.P. +6.2m | 浸水なし                      | 海岸部に設置し、津波対策で設置エリアを側壁で囲む。(一浸水)        |

※: O.P.±0.00mは、女川(女川原子力発電所工事用基準面)で東京湾平均海面下方 0.74m、福島(小名浜港工事用基準面)で東京湾平均海面下方 0.77m、H.P.±0.00mは、日立港工事用基準面(東京湾平均海面下方 0.89m)

## 参考5:各発電所の非常用設備への影響の比較

・ 地震・津波によるサポート系設備被害状況 一部被害:(健全な数)/ (全数)

|      |     | 外部電源          | 非常用DG | 非常用M/C | 常用M/C | 非常用P/C | 常用P/C | 直流電源 | 海水ポンプ           |
|------|-----|---------------|-------|--------|-------|--------|-------|------|-----------------|
| 福島第二 | 1号機 | 500kV:<br>1/2 | ×     | 1/3    | ○     | 1/4    | ○     | 3/4  | ×               |
|      | 2号機 | 66kV:<br>×    | ×     | ○      | ○     | 2/4    | ○     | ○    | ×               |
|      | 3号機 | ×             | 2/3   | ○      | ○     | 3/4    | ○     | ○    | 1/2             |
|      | 4号機 |               | 1/3   | ○      | ○     | 2/4    | ○     | ○    | ×               |
| 女川   | 1号機 | 275kV:<br>1/4 | ○     | ○      | 1/2   | ○      | ○     | ○    | ○               |
|      | 2号機 | 66kV:<br>×    | 1/3   | ○      | ○     | ○      | ○     | ○    | 2/4             |
|      | 3号機 | ×             | ○     | ○      | ○     | ○      | ○     | ○    | ○               |
| 東海第二 | —   | 275kV:<br>×   | 2/3   | ○      | ○     | ○      | ○     | ○    | D/G用:<br>2/3    |
|      |     | 154kV:<br>×   |       |        |       |        |       |      | RHR用:<br>○(4/4) |

D/G:ディーゼル発電機 M/C:高圧電源盤 P/C:低圧用電源盤