

# 福島第一原子力発電所 1・2・3号機の 原子炉冷却及び代替注水の対応について

平成23年11月25日  
原子力安全・保安院

# 目次

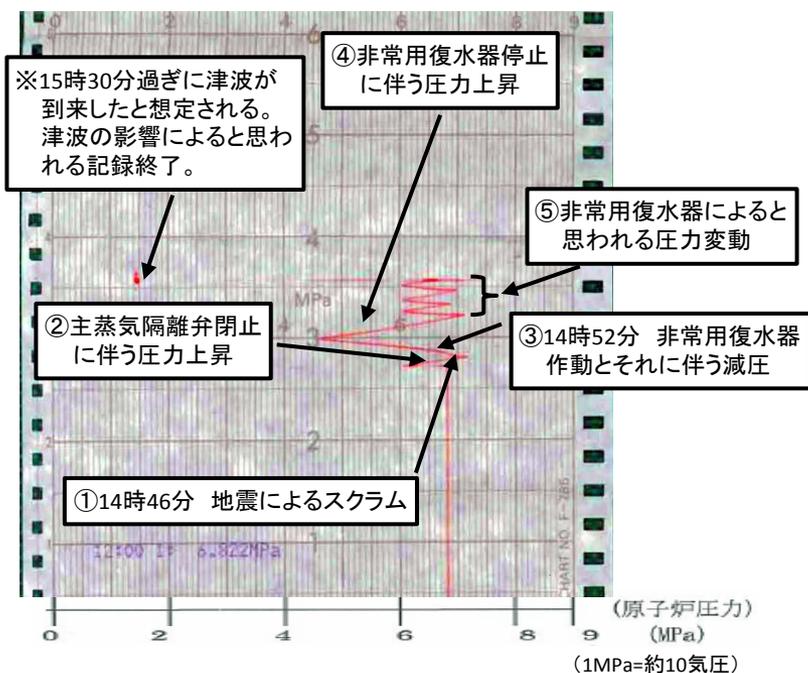
1. 福島第一原子力発電所1号機の 冷却機能喪失及び代替注水の状況	2
2. 福島第一原子力発電所2号機の 冷却機能喪失及び代替注水の状況	10
3. 福島第一原子力発電所3号機の 冷却機能喪失及び代替注水の状況	15
4. まとめ	19

# 1. 福島第一原子力発電所1号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ①地震・津波後の状況

- 原子炉は地震を検知して自動停止。
- 地震により外部電源が喪失。これに伴い、給水ポンプ停止の他、主蒸気隔離弁が閉止し、原子炉圧力が上昇して非常用復水器(IC)が自動起動。その後ICの操作により原子炉圧力を調整。
- 津波襲来により、非常用ディーゼル発電機が機能喪失して電動ポンプが使用できなくなり、さらには直流電源も機能喪失して、高圧注水系(HPCI)も使用できなくなり、ICは作動状況が不明となった。
- ただし、緊急時対策所において状況把握が十分でなく、通報連絡上ではICは作動中とされていた。

図：地震後の原子炉圧力の変化



出典：9月9日(9月28日一部訂正)東京電力(株)「福島第一原子力発電所東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について」に加筆

表：1号機の冷却系の一覧

冷却系	設置場所	電源	ポンプ冷却機器	津波襲来以降の使用可否	備考
炉心スプレイ系(CS)	R/B地下	交流	CCSW	×	電源・冷却機器ともに喪失
格納容器冷却系(CCS)	R/B地下	交流	CCSW	×	電源・冷却機器ともに喪失
補機冷却用海水系(CCSW)	屋外	交流	-	×	本体冠水 電源喪失
高圧注水系(HPCI)	R/B地下	直流 (弁操作・補機駆動源)	-	×	電源喪失
非常用復水器(IC)	R/B4階	直流 (格納容器外側弁操作) 交流 (格納容器内側弁操作)	-	不明*	電源喪失 *一時的に電源回復が見られて弁操作を実施している

R/B: 原子炉建屋

# 1. 福島第一原子力発電所1号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ②ICに関する操作(保安調査結果の概要)

- 地震及び津波発生を受けて対応にあたった東電職員にヒアリングした結果、津波襲来による全電源喪失までは原子炉スクラム事故でMSIV閉の場合に対応した手順に沿った対応が進められていたものと考えられる。
- 東京電力の「事故時運転操作手順書」では、中央制御室で監視や操作を行うことを基本としており、今回の全電源喪失後の対応としても、現場の状況がわからない中、まず中央制御室での状況確認を進めたとしている。
- その後、建屋内での状況確認等の作業を進めたが、暗闇の中、建屋内も侵水した状況で、現場での作業には時間を要したようである。ICについては、線量上昇が確認され、胴側水位の確認はできなかったとのことであった。
- ほとんどの注水系が使えない状況であり、使えるものを探し、消火(FP)系による原子炉への注水ライン構成を進め、IC胴側への注水についてライン構成はしていないとのことであった。

地震及び津波発生を受けて対応にあたった東電職員にヒアリングした主な結果は以下のとおり。

(詳細は参考資料参照)

- ・地震によりしばらく立ってられない状況であったが、スクラムによる制御棒の全挿入は確認できたため、地震の揺れが収まった段階で全体的な確認を行った。その中で、ICの弁が開いていること、原子炉圧力が低下していたことを確認したため、原子炉圧力調整としてICを操作(まずはMO-3A、3Bを閉として、原子炉圧力に応じて開閉操作を継続)。
- ・大津波警報発令は電話連絡を受けたが、影響が出るような津波が来るとの認識はなかった。
- ・整備されている手順では、基本的に中央制御室で監視や操作を行うことを想定しており、全電源喪失後の対応は、中央制御室のランプ表示が次々に消える中で、何が機能しているかわからなくなり、原子炉建屋やタービン建屋などの現場で何が起きているかわからなかったため、まずは中央制御室での状況確認を進めた。
- ・建屋内での確認を行っていたところ、線量の上昇を確認したため、ICについては胴側水位の確認ができなかった(ホワイトボードの記録から17時台に作業を実施)。
- ・緊急時対策所へは逐一連絡していたと思うが、具体的な内容は覚えていない。

### ICの操作に関する時系列

- 14:52 IC自動起動(2系列)
- 15:03頃 IC手動停止(2系列)  
その後、原子炉圧力を6~7MPa程度に調整するために、A系の起動・停止(MO-3Aの開・閉操作)を繰り返し(3回)
- (15:37 全交流電源喪失)
- 18:18 A系の2弁(MO-2A, 3A)を開操作、蒸気発生を確認
- 18:25 MO-3Aを閉操作
- 21:30 MO-3Aを開操作、蒸気発生を確認

# 1. 福島第一原子力発電所1号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ③ 敦賀発電所1号機におけるIC作動状況の例(参考)

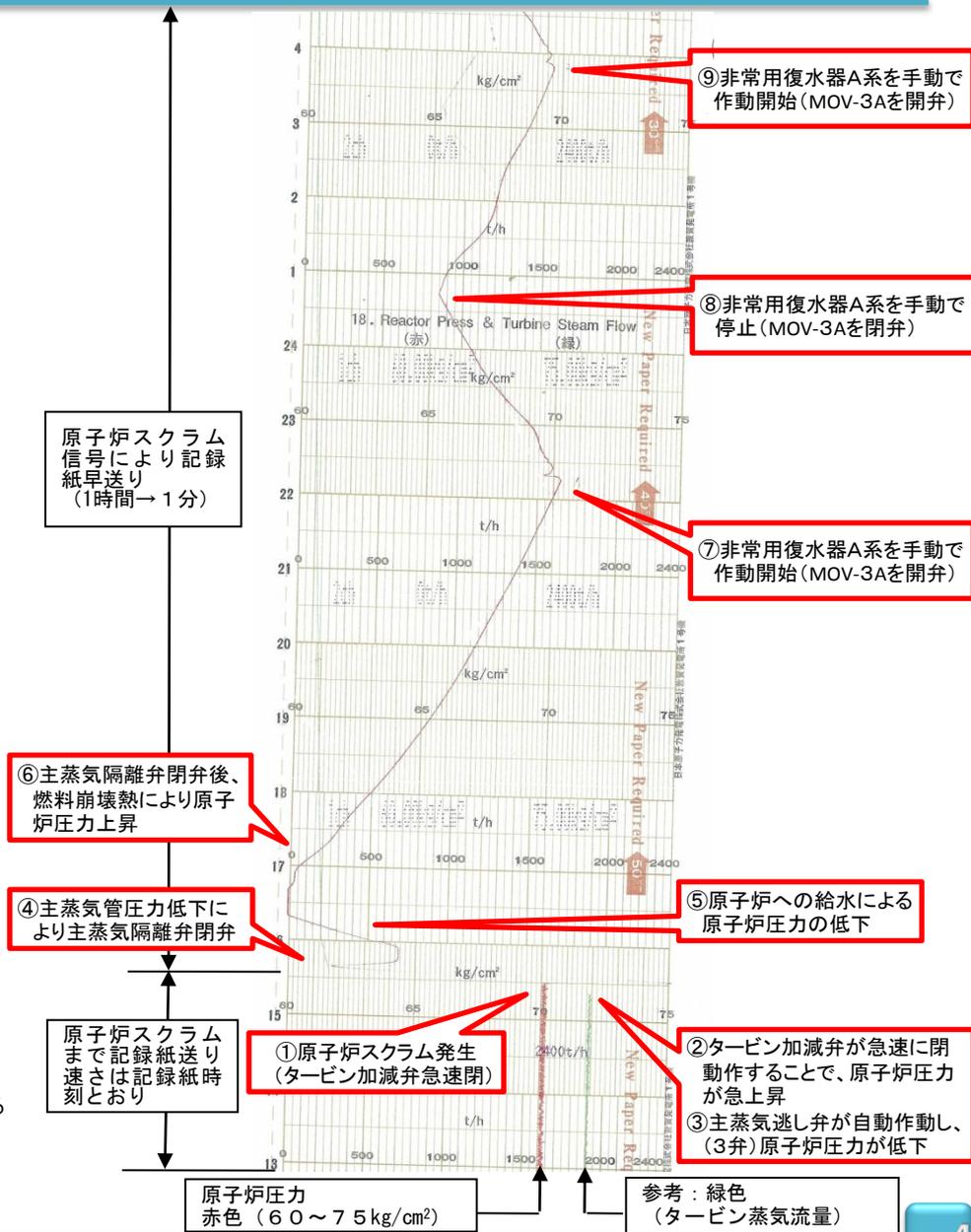
○敦賀発電所1号機での過去10年間の運転実績において、送電系統の影響やタービン設備の不具合の影響を受けて原子炉自動停止とMSIV閉止が発生した際、ICを手動操作により使用した事例が2件あった。

○2件の実績を見ると、原子炉圧力を6.37～6.86MPaの範囲に調整するように1系統のICの弁開閉を手動で行っており、福島第一1号機の津波襲来までの手動操作と同様であった。

○ICによる原子炉圧力調整は、MSIVの復旧までの間、非常用復水器胴側への水補給を行い、7、8時間継続されていた。

○IC胴側温度は4、5回のIC作動で沸騰状態に到達していた。

出典：11月18日日本原子力発電(株)「敦賀発電所1号機の非常用復水器の作動実績に係る運転記録等に関する提出について(要請)」(平成23年11月11日付 平成23・11・10原院第2号)に対する報告について」に加筆



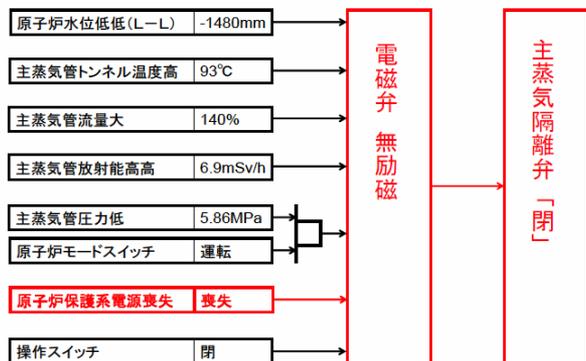
# 1. 福島第一原子力発電所1号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ④電源喪失に伴うフェールセーフ動作

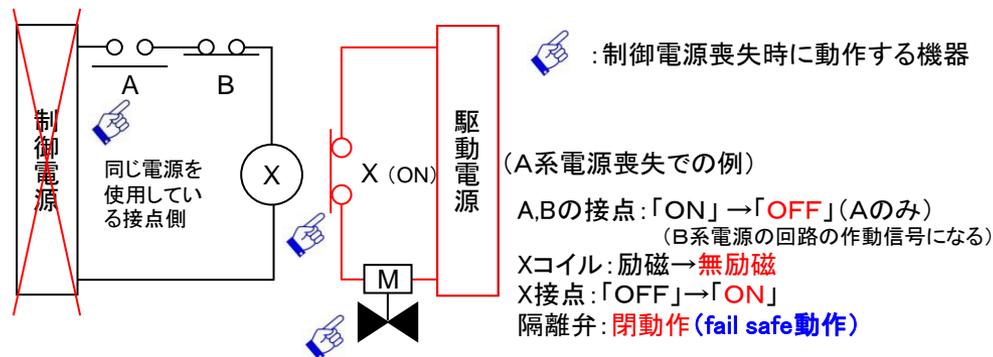
○地震発生に伴う外部電源喪失により、非常用発電機による給電が立ち上がるまでの間で原子炉保護系の電源が一時的に停止し、MSIV「閉」などの回路でフェールセーフ動作している。

○ICの格納容器内外の隔離弁についても、直流電源喪失によって隔離動作したものと推定されている。(他の発電所でのインターロックを確認したところ、注水設備であるECCS, RCICでは制御電源喪失時は開維持であり、隔離に至るのは注水設備ではないICや格納容器隔離弁等であった。)

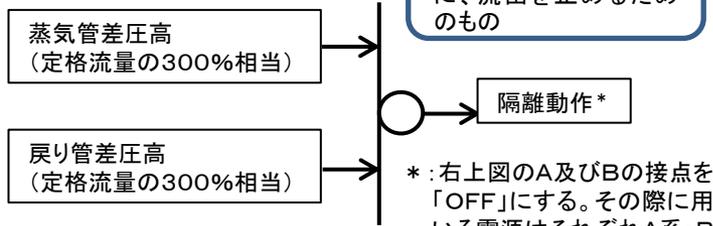
### MSIV「閉」のインターロック



### 制御電源喪失時にfail safe動作する隔離信号回路の例(IC,格納容器隔離弁等)



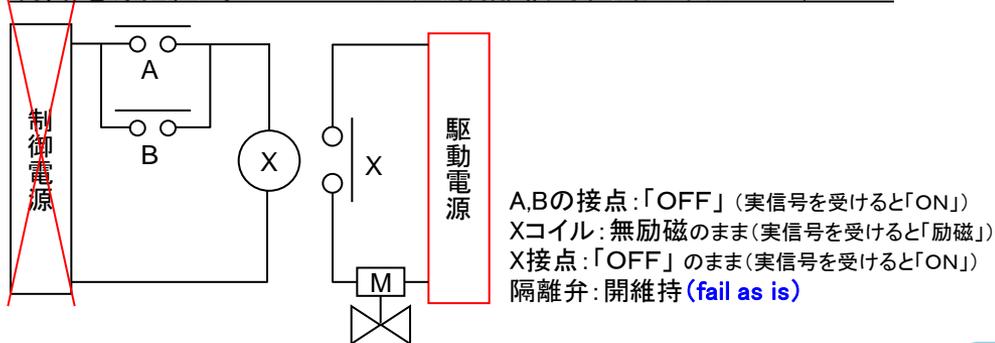
### IC隔離動作のインターロック



ICの系統で原子炉冷却材の流出があった場合に、流出を止めるためのもの

\*:右上図のA及びBの接点を「OFF」にする。その際に用いる電源はそれぞれA系・B系の125V直流電源となっており、電源喪失時にも「OFF」になる。

### 制御電源喪失時にfail as isとなる隔離信号回路の例(RCIC,HPCI)



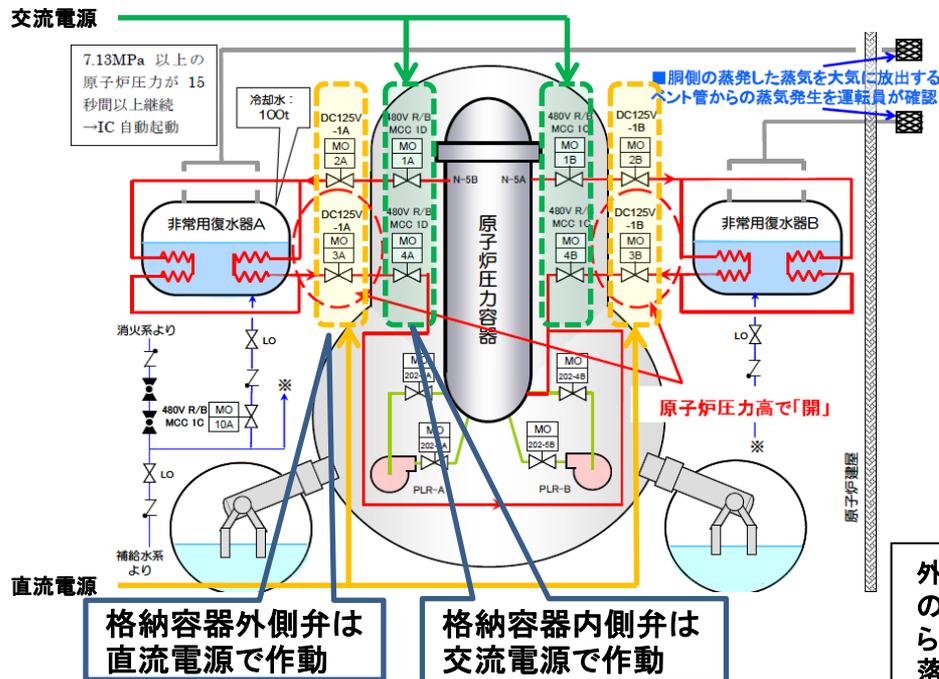
# 1. 福島第一原子力発電所1号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ⑤非常用復水器(IC)の津波襲来時の状況

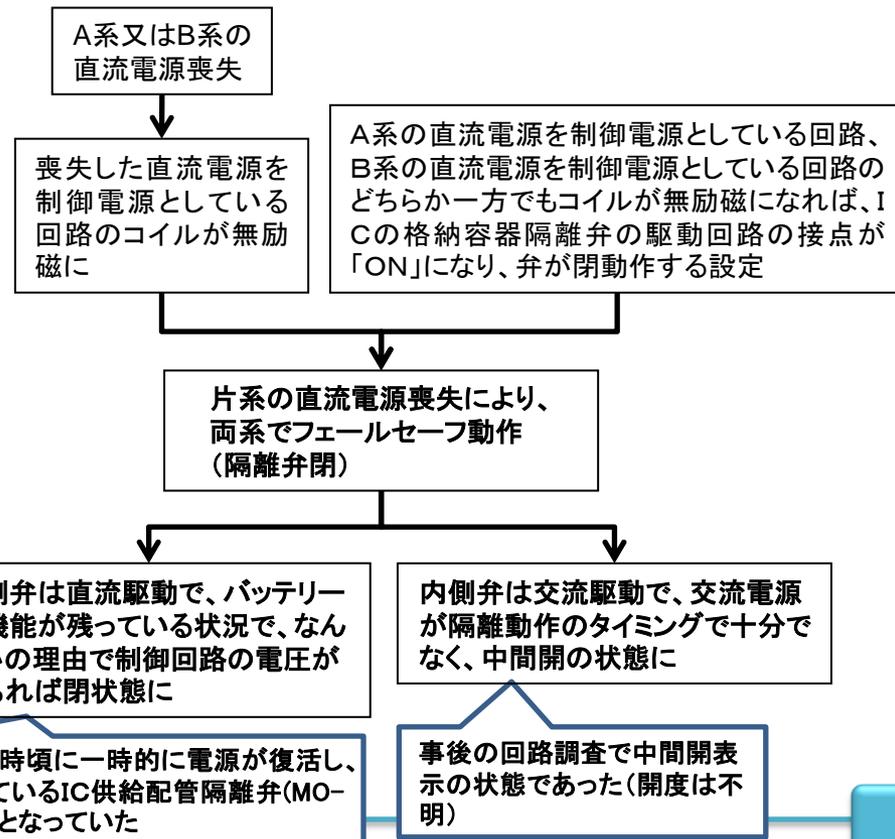
9月9日東京電力提出の事故報告によるとICの作動状況は以下のとおり。

- 津波襲来後の直流電源喪失により、弁の開閉状況の表示が消えるとともに、操作不能となった。
- 直流電源喪失で隔離弁作動のインターロックがフェールセーフ動作し、ICの弁も閉動作する仕組みとなっており、弁の動作だけで使用可能なICが機能しなかった可能性あり。
- さらに格納容器内側弁が交流電源作動であったため、直流電源が一時的に復活した際にも状況確認と操作ができなかった。

### 非常用復水器(IC)の系統概要図



### IC隔離動作のメカニズム(推定)



出典: 9月9日(9月28日一部訂正)東京電力(株)「福島第一原子力発電所東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について」

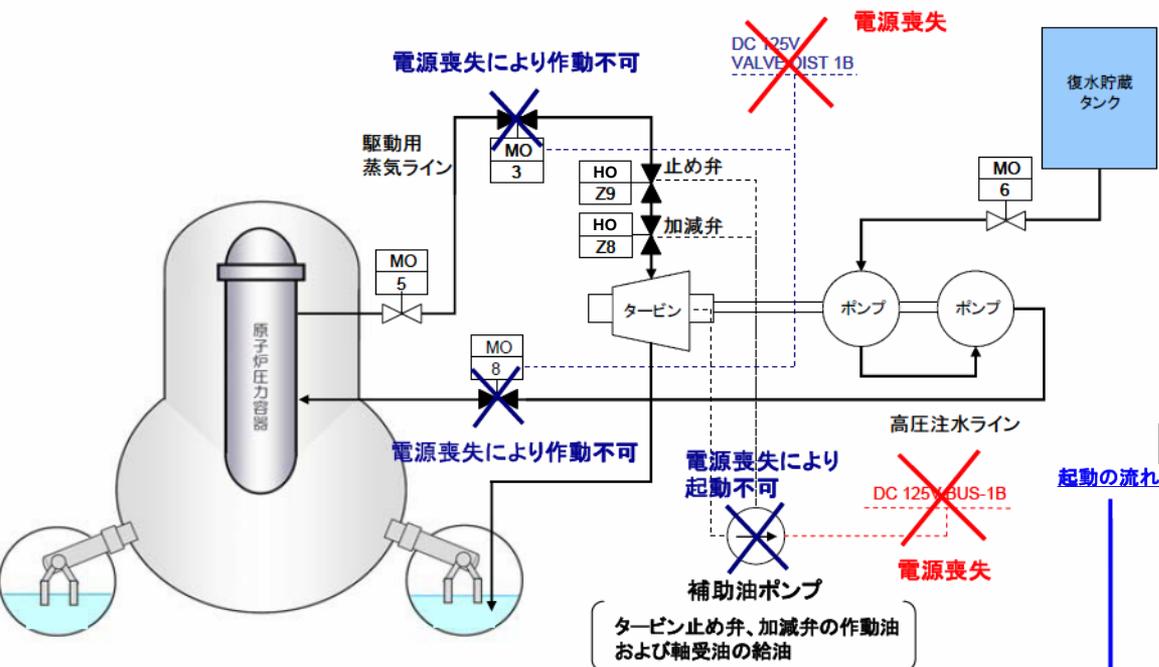
3月11日18時頃に一時的に電源が復活し、通常は開いているIC供給配管隔離弁(MO-2A)が閉表示となっていた

事後の回路調査で中間開表示の状態であった(開度は不明)

# 1. 福島第一原子力発電所1号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ⑥高圧注水系(HPCI)の津波襲来時の状況

- 地震発生後、津波襲来までは、給水ポンプにより原子炉水位が回復し、MSIVが閉止した後は、ICの作動により原子炉の水位・圧力が制御できており、HPCIは作動していない。
- 津波襲来以降は、直流電源喪失により、HPCI起動に必要な機器(補助油ポンプ、電動弁等)が作動できず、使用できない状況となった。



高圧注水系の系統概要図

出典：9月9日(9月28日一部訂正)東京電力(株)「福島第一原子力発電所東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について」

### 高圧注水系の起動可否の状況

- HPCI自動起動信号**
- ~~補助油ポンプ起動~~ → タービン止め弁【HO-2301-Z9】、加減弁【HO-2301-Z8】の開動作不能
  - ハロメトリックコンデンサ真空ポンプ起動
  - HPCI蒸気供給隔離弁(内側【MO-2301-4】、外側【MO-2301-5】)「開」
  - HPCIタービン入口弁【MO-2301-3】「開」
  - 復水貯蔵タンクからの吸込弁【MO-2301-6】「開」
  - 注入弁【MO-2301-8】「開」
  - 最小流量バイパス弁【MO-2301-14】「開」
  - 冷却水弁【MO-2301-240】「開」
  - テストバイパス弁【MO-2301-15, MO-2301-10】「開」

起動の流れ



# 1. 福島第一原子力発電所1号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

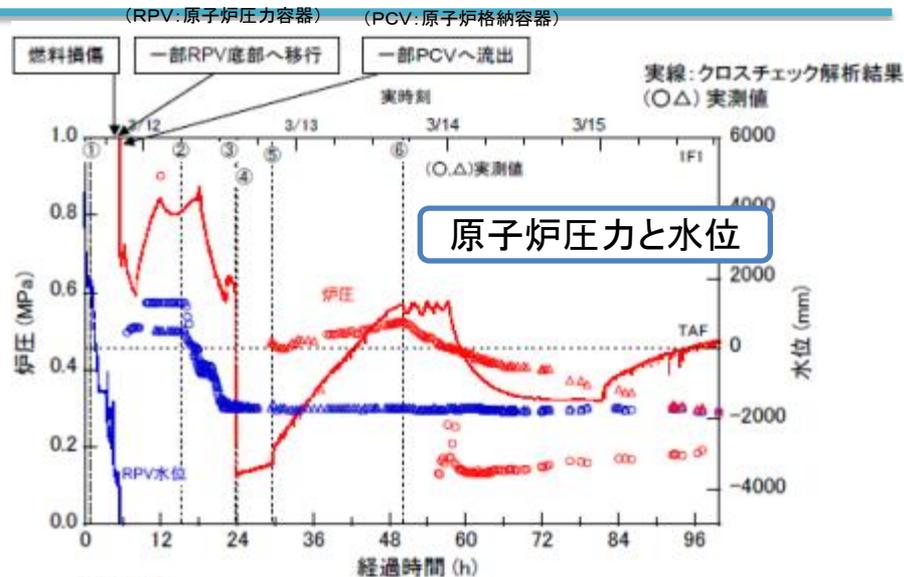
## ⑦1号機の事象の進展

日時	主要事象
3/11 14:46	<b>地震発生</b> → 原子炉自動停止 → 外部電源喪失 → 非常用ディーゼル発電機起動
14:52	非常用復水器自動起動 (その後、手動で弁開閉操作)
15:37	<b>津波襲来</b> → 海水冷却系の機能喪失 → 非常用ディーゼル発電機停止 → 直流電源(バッテリー等)停止 → 非常用復水器の機能喪失(推定)
17:00頃	燃料露出(推定) → 炉心溶融(推定)
3/12 05:46	消防ポンプによる淡水注水
14:30	ベント(原子炉格納容器圧力低下)
15:36	原子炉建屋で水素爆発と思われる爆発
19:04	海水注入

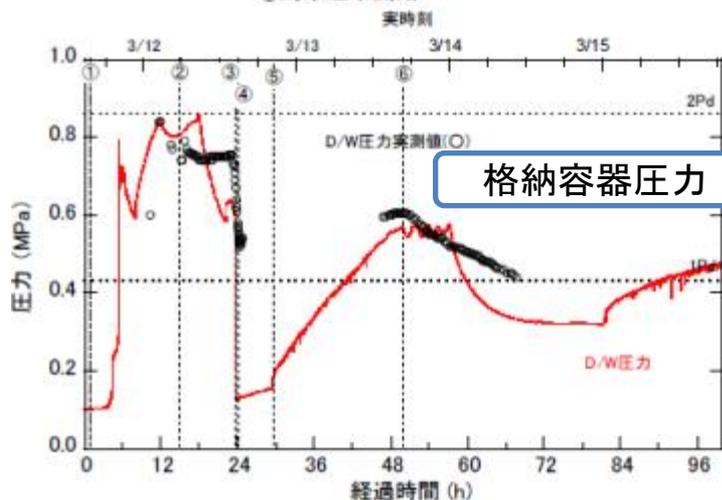
14時間9分間注水停止

### 【事象進展のポイント】

- 初期段階で冷却機能が十分に確保できなくなり、事象が進展。(非常用復水器の機能喪失)
- 解析結果では11日17時頃には露出し始めたものと考えられ、原子炉圧力容器の破損により格納容器圧力が上がったものと推定している。
- 津波の影響によるガレキ散乱などで消防ポンプによる注水開始が12日5:46となった。



- ① IC停止 (IC:非常用復水器)
- ② PCVリーク(仮定)
- ③ W/Wベント(PCV圧力低下)
- ④ W/Wベント閉(仮定) (W/W: ウェットウェル)
- ⑤ 海水注水開始
- ⑥ PCVリークの拡大(仮定) (PCV: 原子炉格納容器)



出典:6月6日原子力安全・保安院「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について」

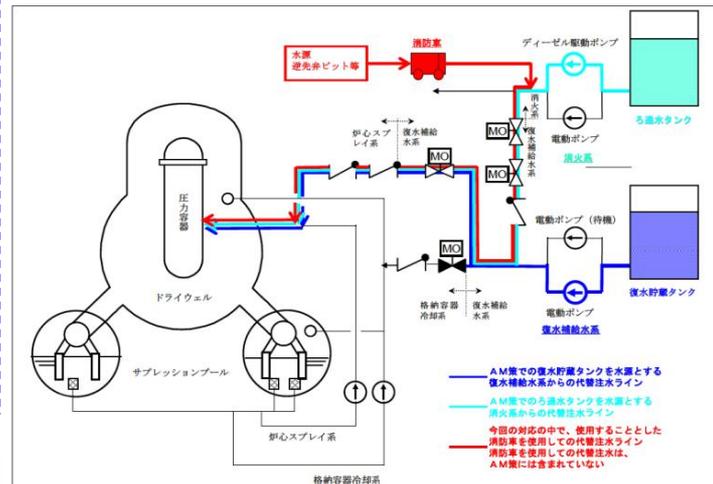
# 1. 福島第一原子力発電所1号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ⑧代替注水の状況

○冷却機能の早期の喪失や、直流電源喪失や圧縮空気枯渇等の弁操作に係る不具合により原子炉減圧やPCVベントに時間を要したこと、さらに注水機能も消防車に依存することとなり、水源確保も含めて時間を要したことから、炉心損傷の防止には至らなかった。

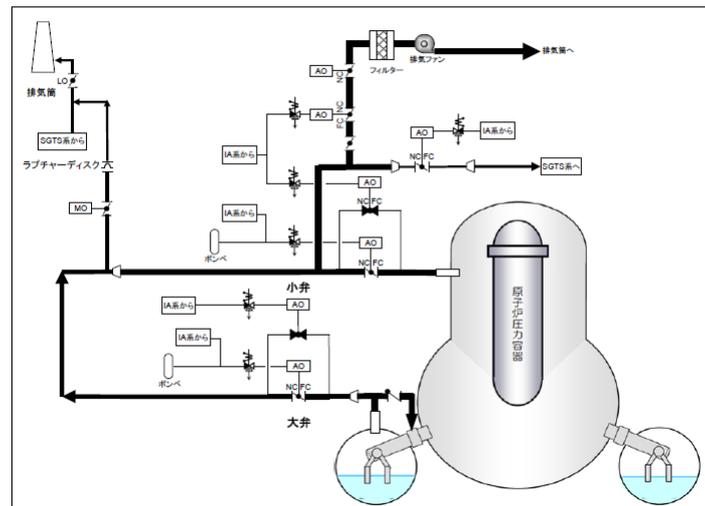
○そのうち、原子炉建屋内の作業においては、既に線量が高くなった以降の作業になったために現場作業が困難になった。タービン建屋地下にあるD/D-FPは、燃料の枯渇、セルモータ地落等で使用できなかった。

○屋外作業においては、津波によるがれき等により作業が円滑にできなかった。



1号機 PCVベント図 (3月11日地震発生前)

原子炉注水関係	PCVベント関係	その他
3月11日(金) 17:12 FPライン及び消防車使用の検討開始 17:30 DD-FP起動(待機状態)		21:51 R/B線量上昇(R/Bへの入域禁止) 23:00 T/B内放射線量上昇(北側二重扉前1.2mSv/h等)
3月12日(土) 1:48 不具合によるDD-FP停止を確認 5:46 FPラインから消防車による淡水注入開始 14:53 消防車による淡水注入、80トン(累計)注入完了 14:54 海水注入準備開始 15:30頃 電源車をを用いたSLCによる注水準備完了 18:30頃 SLCの電源設備や注入ホースが損傷、使用不可能であることを確認 19:04 FPラインから消防車による海水注入開始 20:45 ほう酸を海水と混ぜて注入開始	0:06 D/W圧力が600kPa[abs]を超えている可能性確認→PCVベント検討開始 2:30 D/W圧力が840kPa[abs]に到達(作業計画立案、装備準備等) 9:15頃 PCVベント弁(MO弁)を手動開 9:30頃 S/Cベント弁(AO弁)小弁の現場操作断念(高線量のため) 10:17 S/Cベント弁(AO弁)小弁を中操にて開操作 14:00頃 S/Cベント弁(AO弁)大弁操作のため仮設の空気圧縮機を設置 14:30 D/W圧力低下確認	4:23 構内の放射線量上昇(正門付近0.59μSv/h) R/B内に入域した東電社員1名の線量が100mSvを超過(106.30mSv) 15:36 R/Bで水素ガスによると思われる爆発発生 16:27 モニタリングポストで500μSv/hを超える線量(1,015μSv/h)を計測



ラプチャーディスク作動圧: 448kPa[gage]

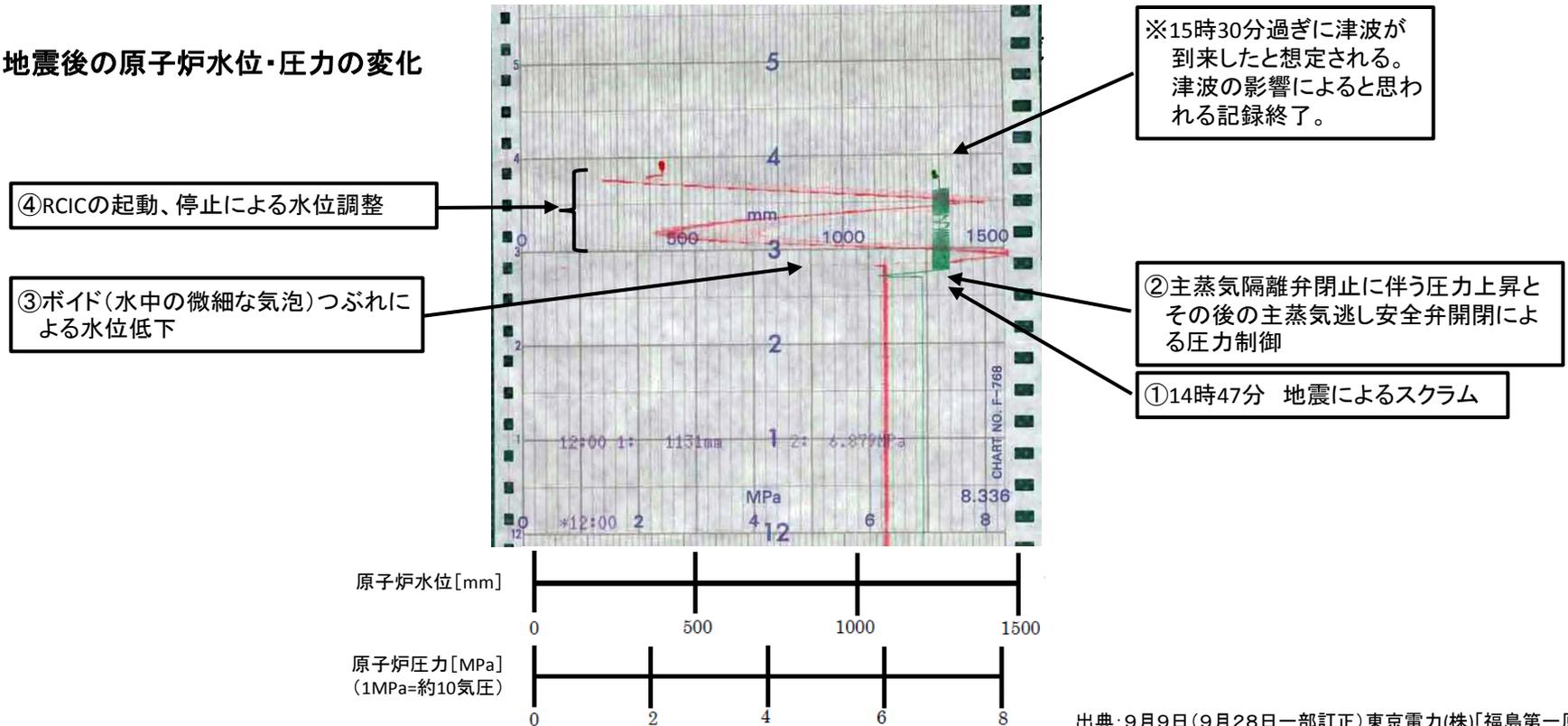
出典:9月9日(9月28日一部訂正)東京電力(株)「福島第一原子力発電所東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について」

## 2. 福島第一原子力発電所2号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

### ①地震・津波後の状況

- 原子炉は地震を検知して自動停止。
- 地震により外部電源が喪失。これに伴い、給水ポンプ停止の他、主蒸気隔離弁が閉止し、原子炉圧力が上昇したため原子炉隔離時冷却系(RCIC)を手動起動。
- 津波襲来により、非常用ディーゼル発電機が機能喪失して電動ポンプが使用できなくなり、さらには直流電源も機能喪失して高圧注水系(HPCI)も使用できなくなった。(ただし、起動していたRCICは運転が継続されていた。)

図：地震後の原子炉水位・圧力の変化



LR/PR-6-97

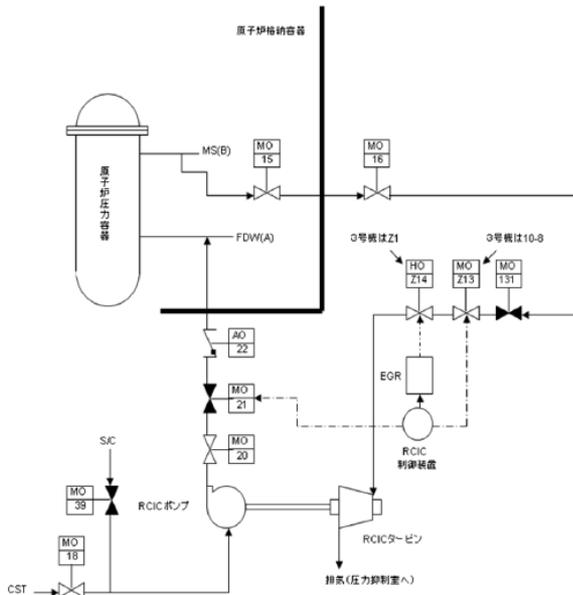
赤 原子炉水位  
緑 原子炉圧力

出典：9月9日(9月28日一部訂正)東京電力(株)「福島第一原子力発電所東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について」に加筆

## 2. 福島第一原子力発電所2号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

### ②RCICの運転状況について

- RCICの系統構成は、ICと同じく隔離信号回路があるものの、制御電源喪失時には弁の状態は維持される。
- RCICの蒸気加減弁は油圧制御であるが、RCICタービンで油圧を昇圧するため、運転している限り油圧は確保される。
- 制御用電源(直流)が喪失しており流量調整はできないことから、運転が継続したメカニズムが依然として明らかになっていないが、例えば駆動蒸気に水分が混入してタービン効率が落ち、注入流量が低下して原子炉水位の上昇が抑制され、運転が継続した可能性が考えられる(引き続き検討が必要)。



※1: 通常運転時(待機状態)、MO-15, 16, 18, 20, Z13弁およびHO-Z14は「開」、MO-131, 21弁は「閉」、起動時131弁, 21弁「開」。  
※2: MO-15弁はAC電源、電源喪失にて動作不能(as is)。  
※3: MO-16, 18, 20, 21, 131弁はDC電源(隔離論理回路とは別電源)、電源喪失にて動作不能(as is)。  
※4: DC電源喪失時は隔離(閉)論理回路作動。  
その時、各弁駆動電源(※2、※3に記載)が活きていれば各弁閉。既に各弁駆動電源が喪失していれば動作不能(as is)。

### 原子炉隔離時冷却系の系統概要図

- 9月9日東京電力提出の事故報告によるとRCICの作動状況は以下のとおり。
- 津波襲来後の直流電源喪失により、作動状況が分からなくなったが、ポンプ吐出圧力と原子炉圧力を確認し、吐出圧力が高かったことから、運転しているものと判断した。
- 12日5時頃には、水源である復水貯蔵タンク(CST)の水位減少を確認し、CST水位確保及びS/C水位上昇抑制のため、水源をS/Cに切り替えた。
- 14日13:18に原子炉水位が低下傾向にあり、13:25に原子炉冷却機能喪失と判断した。

出典：6月7日日本国政府「原子力安全に関するIAEA閣僚級会議に対する日本国政府の報告書  
—東京電力福島原子力発電所の事故について—」

# 2. 福島第一原子力発電所2号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

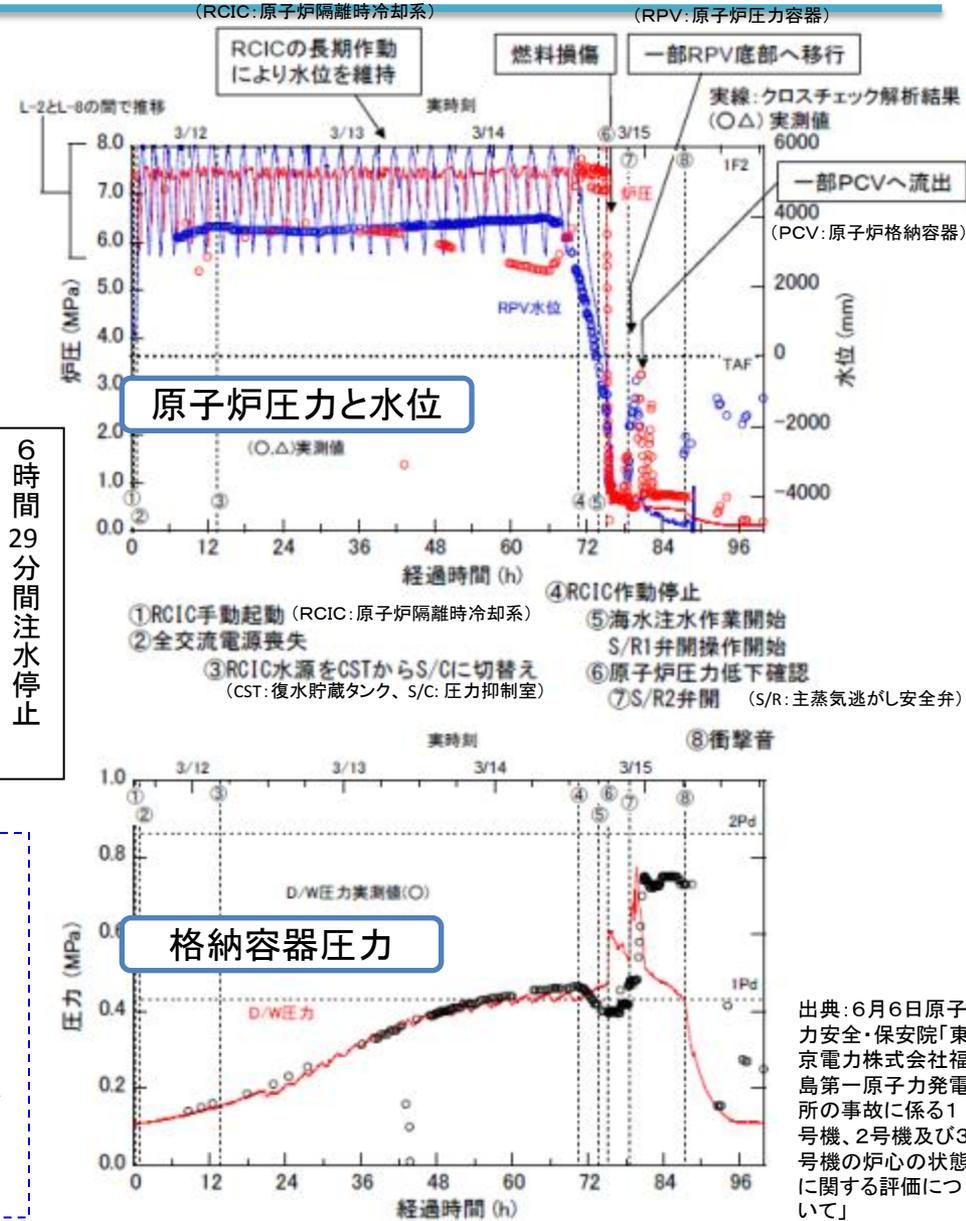
## ③2号機の事象の進展

日時	主要事象
3/11 14:47	<b>地震発生</b> → 原子炉自動停止 → 外部電源喪失 → 非常用ディーゼル発電機起動
14:50	原子炉隔離時冷却系手動起動
15:41	<b>津波襲来</b> → 海水冷却系の機能喪失 → 非常用ディーゼル発電機停止 → 直流電源(バッテリー等)停止
3/13 11:00頃	ベント操作(原子炉格納容器圧力低下せず)
3/14 13:25	原子炉隔離時冷却系停止(推定)
18:00頃	原子炉減圧(主蒸気逃がし安全弁開操作) → 燃料露出 → 炉心溶融(推定)
19:54	消防ポンプにより海水注入
3/15 06:10頃	衝撃音発生

6時間29分間注水停止

### 【事象進展のポイント】

- ORCICの運転により14日11時頃まで水位を維持。
- ORCICの運転によるPCV圧力の上昇が設計圧力程度に留まっており、12日12時頃までに**PCVからの漏えいが考えられる。**
- 〇ラプチャーディスク以外の弁の開操作(ベント操作)を13日以降実施したものの**圧力低下が見られず、事象が進展。**



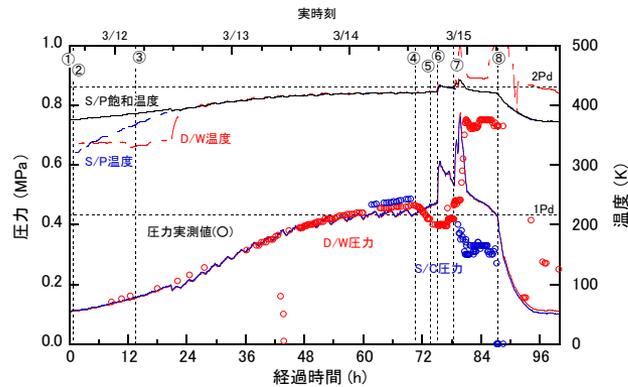
出典: 6月6日原子力安全・保安院「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について」

## 2. 福島第一原子力発電所2号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

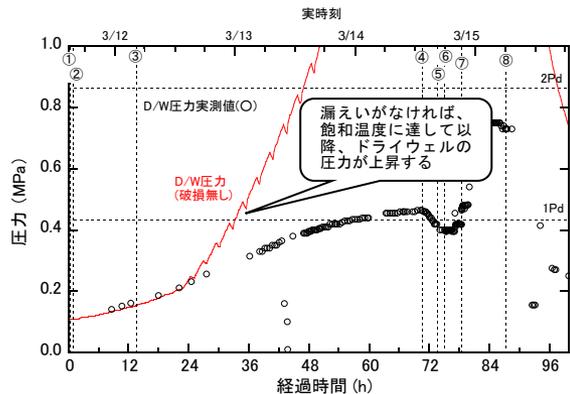
### ④PCV圧力の推移

○炉心状態解析の結果からは、PCVからの漏えいがない前提では、RCICのS/Cを水源とした継続運転において測定されているPCV圧力の挙動は再現できない。PCVの上蓋のフランジガスケットや貫通部等のいずれかで漏えいがあった可能性がある。

○RCICのS/Cを水源とした継続運転では、S/C水温が飽和温度に達するため、PCVスプレイやS/C冷却なしに圧力抑制機能を12～24時間以上の期間は維持できない。(復水貯蔵タンクを水源としてもS/C満水の問題がある。)



2号機の格納容器温度の変化

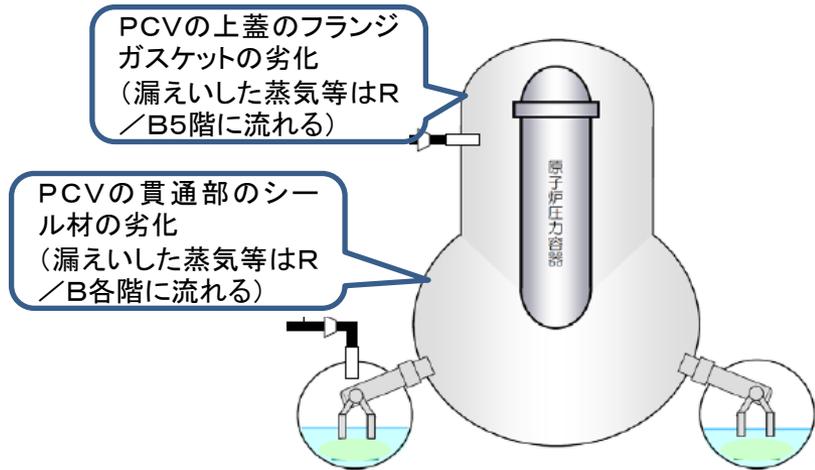


2号機において漏えいがない場合のD/W圧力の変化

- ①RCIC手動起動、
- ②全交流電源喪失、
- ③RCIC水源をCSTからS/Cに切り替え、
- ④RCIC作動停止、
- ⑤海水注水作業開始、
- ⑥RPV圧力低下確認、
- ⑦S/R2弁開、
- ⑧爆発音

出典：6月6日原子力安全・保安院「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について」

### 漏えい原因の推定



○原因の想定(具体的には次回以降検討予定)

- ・PCVの上蓋のフランジガスケットや貫通部等のシール材が劣化(ただし設計温度程度であり、200℃までシール性能が確認されているデータもある。)
- ・現状の線量測定結果では5階が一番線量が高く、蒸気の確認もされており、上蓋のフランジガスケットからの漏えいの可能性が高い(ただし原子炉圧力容器破損時の圧力上昇で漏えいが始まったものによることも考えられる。)

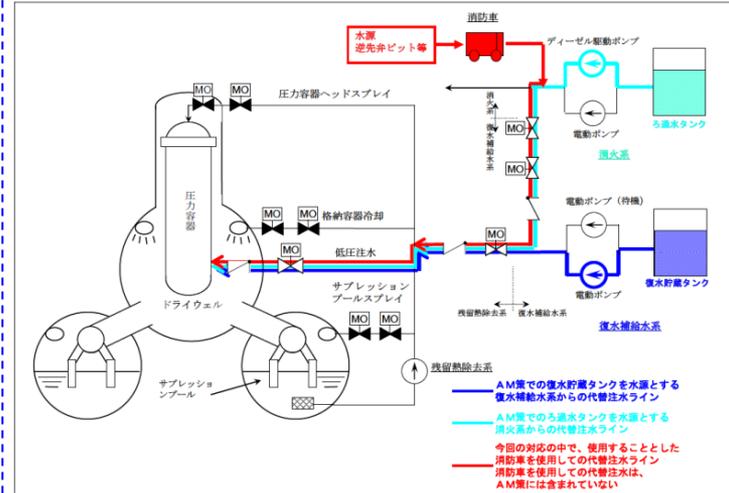
# 2. 福島第一原子力発電所2号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ⑤代替注水の状況

○1号機と同様、直流電源や圧縮空気の枯渇等の弁操作に係る不具合の他、2号機においてはPCV圧力が設計圧力近辺にあり、ラプチャーディスクが開かなかったためにPCV弁が機能しなかった。この結果、格納容器内に圧力が残存したため原子炉減圧が十分にできず、消防車による注水が十分に機能せず、炉心損傷の防止には至らなかった。

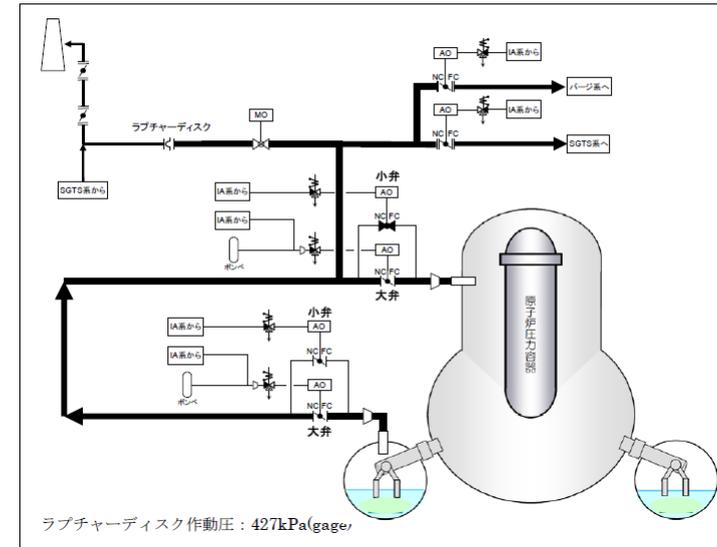
○ORCICの機能喪失に対応するために準備を行っていた制御棒駆動水圧系(CRD)ポンプやほう酸水注入系(SLC)ポンプへの電源車つなぎ込みについては、1号機の爆発の影響でケーブルが損傷し、電源車が自動停止したため、これらのポンプを使用した注水はできなかった。

○海水注入のためのライン構成も3号機の爆発の影響により破損し、作業中断もあった。



2号機 PCV vent図 (3月11日地震発生前)

	原子炉注水関係	PCV vent関係	その他
3月11日(金)	17:12 FPライン及び消防車使用の検討開始		
3月13日(日)		8:10 PCV vent弁(MO弁)開 11:00ラプチャーディスクを除く、PCV ventライン構成完了	8:56 モニタリングポストで500 $\mu$ Sv/hを超える線量(882 $\mu$ Sv/h)を計測
3月14日(月)	11:01 準備が完了していた注水ラインは、消防車及びホースが破損して使用不可能 13:05 消防車を含む海水注入のライン構成を再開 16:30 海水注入を行うため消防車を起動 19:20 海水注入のための消防車が燃料切れで停止していることを確認 19:54 消火系ラインから消防車(19:54、19:57)に各1台起動)による海水注入開始。	11:01 3号機R/Bの爆発により、S/C vent弁(AO弁)大弁が閉となる。開不能を確認 18:00頃 原子炉減圧開始(原子炉圧力5.4MPa[gage]→19:03 O. 63MPa[gage]) 21:00頃 S/C vent弁(AO弁)小弁開操作。ラプチャーディスクを除く、ventライン構成完了	21:35 モニタリングカーで500 $\mu$ Sv/hを超える線量(760 $\mu$ Sv/h)を計測
3月15日(火)		0:02 D/W vent弁(AO弁)小弁開操作。ラプチャーディスクを除く、ventライン構成完了(数分後に弁が開であることを確認)	6:00~6:10頃 大きな衝撃音が発生 6:50 正門付近で500 $\mu$ Sv/hを超える線量(583.7 $\mu$ Sv/h)を計測



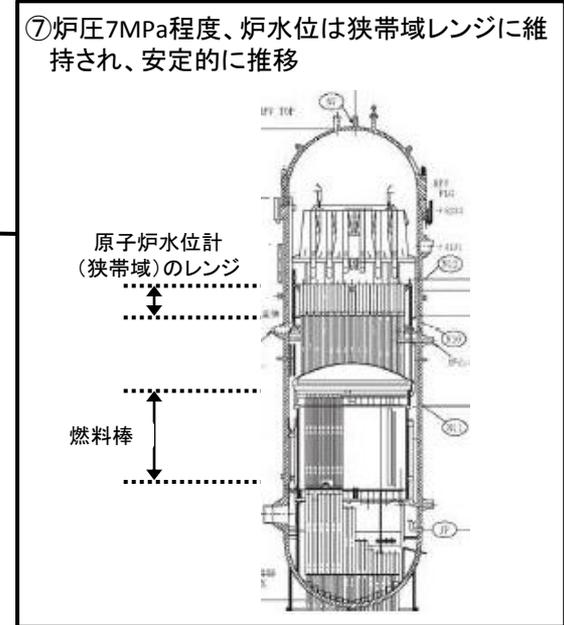
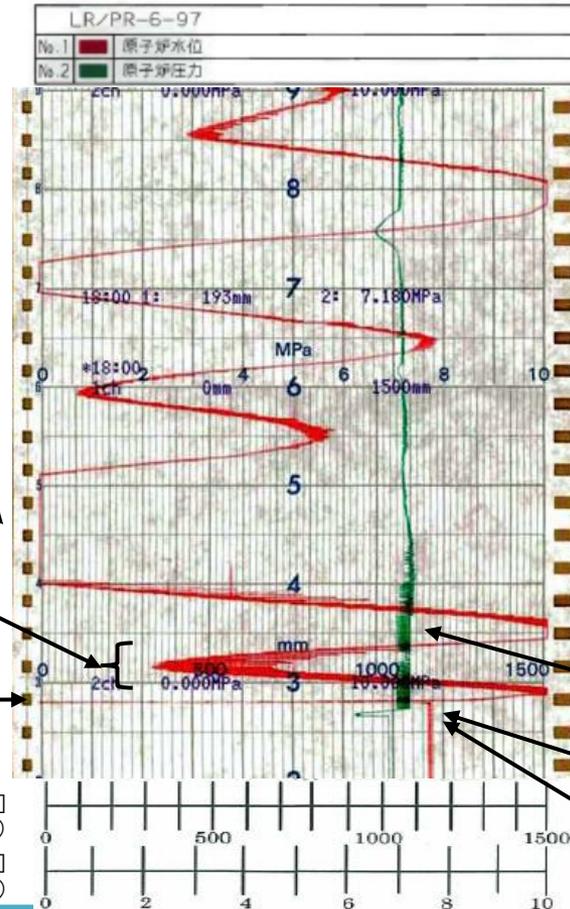
ラプチャーディスク作動圧: 427kPa(gage)

# 3. 福島第一原子力発電所3号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ①地震・津波後の状況

- 原子炉は地震を検知して自動停止。
- 地震により外部電源が喪失。これに伴い、給水ポンプ停止の他、主蒸気隔離弁が閉止し、原子炉圧力が上昇したため原子炉隔離時冷却系(RCIC)を手動起動。
- 津波襲来により、非常用ディーゼル発電機が機能喪失して電動ポンプが使用できなくなったが、直流電源が機能しており、RCICの運転が継続された。

図：地震後の原子炉水位・圧力の変化



⑥原子炉隔離時冷却系の起動に伴う水位変動  
16時03分 原子炉隔離時冷却系起動

⑤主蒸気逃し安全弁開閉、原子炉隔離時冷却系の起動・停止に伴う水位変動  
15時05分 原子炉隔離時冷却系起動  
15時25分 同型トリップ(水位高)

④ボイド(水中の微細な気泡)つぶれによる水位低下

③主蒸気逃し安全弁による炉圧制御(5回前後/5分間の頻度)

②出力低下による炉圧低下とそれに続く主蒸気隔離弁閉による炉圧増加

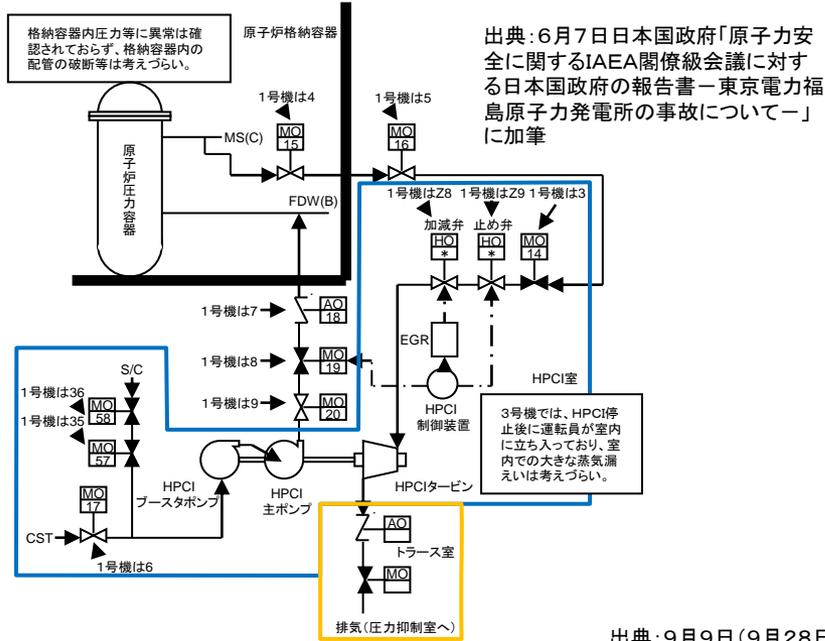
①14時47分 地震によるスクラム

出典：9月9日(9月28日一部訂正)  
東京電力(株)「福島第一原子力発電所東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について」に加筆

# 3. 福島第一原子力発電所3号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

## ②HPCIの自動起動・機能喪失について

- ORCICの停止後、RCICに使用されたものとは別系統の直流電源により、原子炉水位低でHPCIが自動起動。
- HPCIの起動後、原子炉圧力は徐々に低下し、約1MPaで推移し、HPCIがトリップすると再び約7MPaに戻っている。
- HPCIが定格流量で注水していた場合には原子炉水位が上昇し原子炉水位高でトリップするが、運転が続いており、運転状態については引き続き検討が必要。
- なお、HPCI運転中にPCV圧力の上昇は確認されておらず、HPCIトリップ後13日5時までには冷却機能復旧のためHPCI室に運転員が入室しており、さらに5時頃にはPCVベントの系統構成のためトラス室にも入室していることから、HPCI系統での大きな蒸気漏れは考えづらい。(地震による影響については次回検討予定)
- なお、HPCIはその後バッテリー枯渇で再起動できなかったものと考えられている。



※1: 通常運転時、MO-15, 16, 17, 20弁およびHO弁は「開」、MO-14, 19弁は「閉」。起動時14弁、19弁「開」。

※2: MO-15弁はAC電源、電源喪失にて動作不能(as is)。

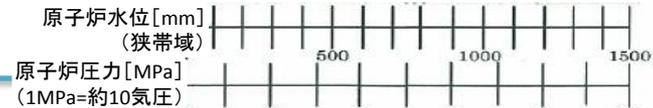
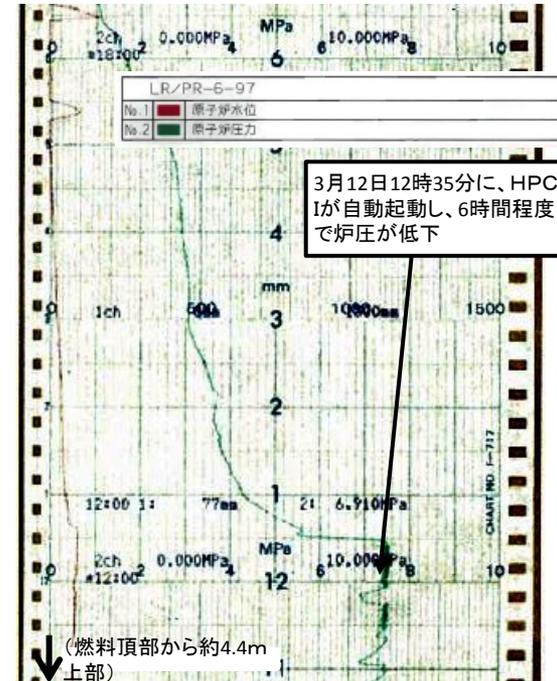
※3: MO-14, 16, 17, 19, 20弁はDC電源(隔離論理回路とは別電源)、電源喪失にて動作不能(as is)。

※4: DC電源喪失時は隔離(閉)論理回路動作。その時、各弁駆動電源(※2, ※3に記載)が活きていれば各弁開。既に各弁駆動電源が喪失していれば動作不能(as is)。

出典: 6月7日 日本国政府「原子力安全に関するIAEA閣僚級会議に対する日本国政府の報告書—東京電力福島原子力発電所の事故について—」に加筆

出典: 9月9日(9月28日一部訂正) 東京電力(株)「福島第一原子力発電所東北地方太平洋沖地震に伴う原子炉施設への影響について」に加筆

### 高圧注水系作動時の原子炉圧力・水位

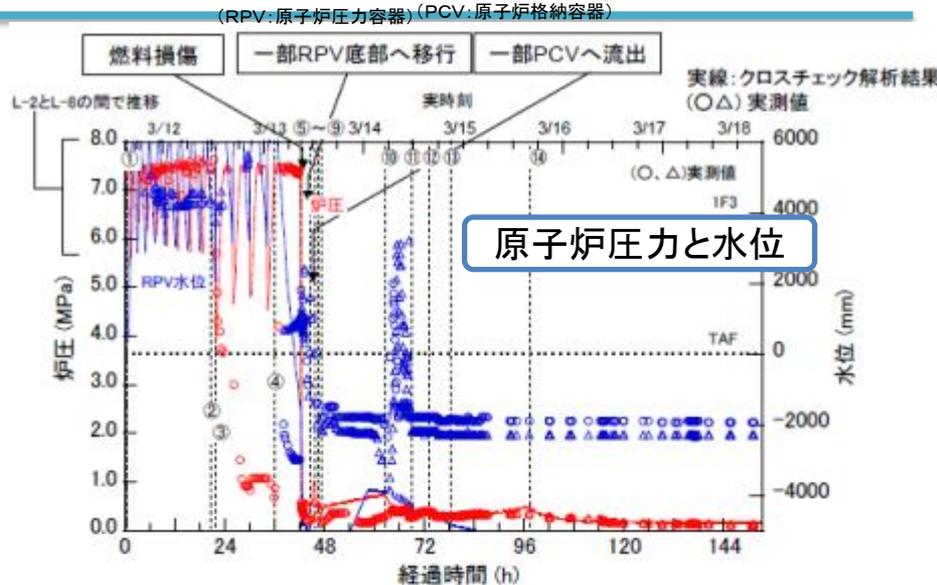


# 3. 福島第一原子力発電所3号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

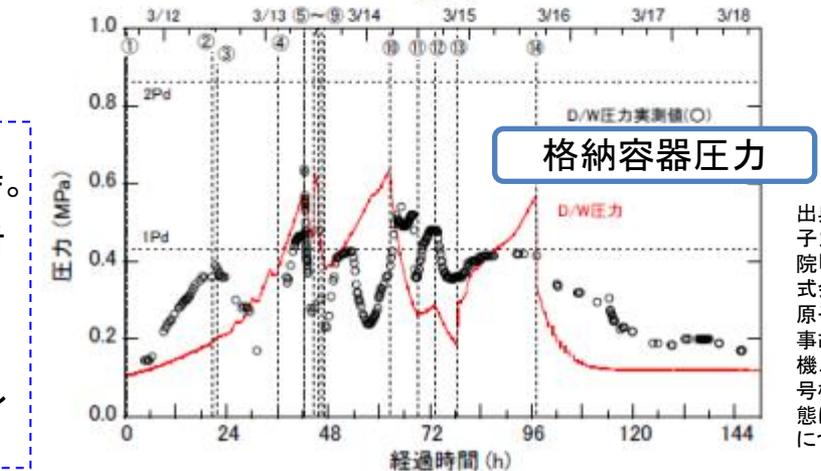
## ③3号機の事象の進展

日時	主要事象
3/11 14:47	<b>地震発生</b> → 原子炉自動停止 → 外部電源喪失 → 非常用ディーゼル発電機起動
15:05	原子炉隔離時冷却系手動起動
15:42	<b>津波襲来</b> → 海水冷却系の機能喪失 → 非常用ディーゼル発電機停止
3/12 11:36	原子炉隔離時冷却系停止
12:35	高圧炉心注水系自動起動
3/13 02:42	高圧炉心注水系停止
08:00頃	燃料露出(推定) → 炉心溶融開始(推定)
08:41	ベント操作
09:20頃	→ 原子炉格納容器圧力低下
09:25	消防ポンプにより海水注入
3/14 11:01	原子炉建屋で水素爆発と思われる爆発

6時間43分間注水停止



- ① RCIC手動起動 (RCIC: 原子炉隔離時冷却系)
- ② RCIC作動停止
- ③ HPCI起動
- ④ HPCI停止 (HPCI: 高圧注水系)
- ⑤ S/R弁開 (S/R: 主蒸気逃がし安全弁)
- ⑥ W/Wベント(圧力低下) (W/W: ウェットウェル)
- ⑦ 淡水注水開始
- ⑧ W/Wベント閉
- ⑨ 海水注水開始
- ⑩~⑭ W/Wベント開⇄閉



### 【事象進展のポイント】

- 直流電源が使用可能で、RCIC及びHPCIで水位を維持。
- ベント操作の作動用空気圧が足りず、ポンプを用いて対応したものの、**ベントが十分維持できず、事象が進展。**
- **HPCIの作動時に原子炉圧力が低下**しており、東電は流量調整により炉内の蒸気が継続して送られたためとしている。

出典: 6月6日原子力安全・保安院「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について」

# 3. 福島第一原子力発電所3号機の冷却機能喪失及び代替注水の状況

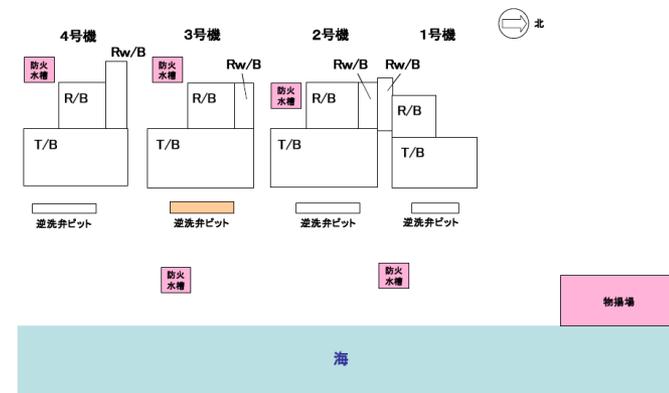
## ④代替注水の状況

- 1、2号機と同様、直流電源喪失や圧縮空気枯渇等の弁操作に係る不具合により原子炉減圧やPCVベントに時間を要した他、特にPCVベントが十分に系統構成を維持しなかった。この結果、原子炉減圧時に燃料が露出することとなり、消防車による注水を開始したものの、炉心損傷の防止には至らなかった。
- また、注水の水源は、当初は防火水槽(淡水)にホウ酸を溶解していたが、枯渇したため逆洗弁ピットの海水を注入することとし、さらにその他の水源を模索しつつ、消防車の応援を受け、物揚場で海から逆洗弁ピットへの送水を行うなど、水源確保を図った。
- その間、余震での作業中断などがあった他、R/B爆発の影響で逆洗弁ピットも使用できなくなり、海から直接注水する系統構成として注水を再開した。

逆洗弁ピット:  
復水器細管を洗浄するために、細管内の海水の流れを逆にするための弁が設置されている場所

原子炉注水関係	PCVベント関係	その他
3月12日(土)		4:23 構内の放射線量上昇(正門付近0.59 $\mu$ Sv/h)
3月13日(日)	8:35 PCVベント弁(MO弁)開 8:41 S/Cベント弁(AO弁)大弁開により、ラプチャーディスクを除く、PCVベントライン構成完了 9:25 FPラインから消防車による淡水注入開始(ほう酸入り) 9:36 PCVベント操作により、9:20頃よりD/W圧力が低下していることを確認 11:17 S/Cベント弁(AO弁)大弁の閉確認(作動用空気ポンベ圧低下のため) 12:20 淡水注入終了 12:30 S/Cベント弁(AO弁)大弁開(作動用空気ポンベ交換) 13:12 FPラインから消防車による海水注入開始	8:56 モニタリングポストで500 $\mu$ Sv/hを超える線量(882 $\mu$ Sv/h)を計測  14:15 モニタリングポストで500 $\mu$ Sv/hを超える線量(905 $\mu$ Sv/h)を計測
3月14日(月)	5:20 S/Cベント弁(AO弁)小弁開操作開始 6:10 S/Cベント弁(AO弁)小弁の開確認	2:20 正門付近で500 $\mu$ Sv/hを超える線量(751 $\mu$ Sv/h)を計測 2:40 モニタリングポストで500 $\mu$ Sv/hを超える線量(650 $\mu$ Sv/h)を計測 4:00 モニタリングポストで500 $\mu$ Sv/hを超える線量(820 $\mu$ Sv/h)を計測 9:12 モニタリングポストで500 $\mu$ Sv/hを超える線量(518.7 $\mu$ Sv/h)を計測 11:01 R/Bで爆発発生
1:10 逆洗弁ピット内への海水補給のために消防車を停止  3:20 消防車による海水注入再開  9:20 物揚場から逆洗弁ピットへの海水の補給を開始  11:01 消防車やホースが損傷し、海水注入停止 16:30頃 消防車とホースを入れ替えて物揚場から原子炉へ注入する新しいラインを構築し、海水注入を再開		

注水時における水源の位置関係図



## 4. まとめ

### 【高圧の状態で機能するシステムの確保について】

- RCIC, HPCIともに起動・運転継続には原則直流電源が必要であり、直流電源の確保が重要。
- ICでは格納容器の内側・外側の隔離弁で直流電源喪失により閉動作したものと考えられ、駆動電源も喪失したことから、閉まった弁を開くことができなかった。(IC以外にフェールセーフ動作の内側隔離弁はないが、交流駆動の弁は他の系統でも見られる。)  
⇒直流電源の信頼性向上で高圧の状態で機能する系統(IC, RCIC, HPCI)の確保を図るとともに、交流電源喪失時の格納容器内側隔離弁の操作方法を確保。ICの隔離動作インターロック回路は制御電源喪失の際にアズイズとなる形への変更を検討する。  
なお、RCIC, HPCIは地下階に設置されているため、溢水対策にも十分配慮する必要がある。

### 【初期対応の迅速性について】

- 中央制御室での監視・操作機能が喪失し、また現場が劣悪な環境にあったため、状況把握に時間を要し、ICの状況確認・対応操作などが早期に対応できなかった。
- 整備されている手順では、全電源喪失などの状況を想定したものはなく、高線量作業等を踏まえた装備の確保等で時間を要するなどの運転員への負荷も大きかったものと考えられる。  
⇒全電源喪失時などで対応時間に余裕の少ない状態、特に崩壊熱の大きい初期の対応において、まずはそのような危機的状況にならないよう設備対応(電源強化、計装系・操作系の信頼性向上等)を図り、あわせてソフト面でも、炉心冷却を最優先にした手順を再構築するとともに、運転員が躊躇することなく対応が図れるよう、十分な装備(防護具、線量計等)を適切に保管することが必要。  
また、前兆事象を確認した時点での事前の対応(例えば大津波警報発令時の原子炉停止・冷却操作)などができる手順の整備や、緊急時対策所における確実なプラント状況把握のための方策についても検討していく。

### 【全体的な冷却機能の確保について】

- 津波により注水設備等のポンプ本体には被害がほとんどなかったものの、電源や、ポンプの冷却に必要な補機冷却系の海水ポンプが機能喪失するなど冷却機能の多くが喪失した。
- 水源が限定され、水源確保に時間を要した。  
⇒個々の冷却設備ではなく、補機等の関連機器や水源を含めた全体の多重性・多様性(配置、溢水対策等)が必要。具体的には、非常用発電設備の信頼性向上に加えて、補機冷却系の多重性・多様性確保。水源については水槽や配管などそれぞれの信頼性向上を含めて検討。

## 4. まとめ(つづき)

### 【減圧操作の確実な実施について】

- 福島第一1号機ではICの復旧作業が間に合わず、福島第一2、3号機では直流電源喪失や圧縮空気枯渇等の弁操作に係る不具合により原子炉減圧やPCVベントに時間を要するなど、炉心損傷防止に至らなかった。
- 交流電源の復旧に時間を要する中、空気駆動弁の開維持に必要な直流電源はバッテリー収集、小型発電機設置で時間がかかった。  
⇒直流電源の信頼性向上に加えて、圧縮空気等の供給設備の信頼性向上を検討する必要がある。(PCVベントラインのラプチャーディスクの要否・破裂圧力の設定などは閉じ込めの観点と併せて検討。)

### 【シビアアクシデント対応機器の信頼性確保について】

- 交流電源が不要な代替注水方法であったD/D-FPもタービン建屋地下の設置であり、最終的には使用できなかった。
- 燃料切れで注水が停止することもあった。
- 消火系の配管からの漏えいなどによる圧力低下を防止するための隔離作業などが必要であった。  
⇒シビアアクシデント時に迅速に対応できるよう設計上十分に考慮した設備とすることが必要。電源に依存しない注水方法を確保し、全体的に多重性・多様性について配慮する。その際、原子炉の減圧操作との関係で余裕をもって対応できるように、高い吐出圧力のものを用意することも検討する。

### 【残留熱除去機能の確保について】

- 高圧系の注水設備が機能していても残留熱除去等の設備が機能していなかったことから、格納容器の圧力抑制機能が喪失し、また低圧系への移行が円滑にできなかった。  
⇒12～24時間以上の期間を高圧系の注水設備で対応する場合には、S/C冷却等の格納容器の温度上昇防止も必要であり、そのため交流電源の確保、熱を格納容器外に排出するためのバックアップ設備を水源容量等と併せて検討する必要がある。(なお、当面はPCVベントで熱を逃がすこととしており、閉じ込めの観点と併せて検討が必要。)