

# 福島原発における津波対策研究会・最終報告書

2016/3/8

失敗学会・吉岡律夫、淵上正朗、飯野謙次

## はじめに)

失敗学では、実際に起きてしまった事故の経緯・シナリオを追跡するだけでは不十分で、防ぐ道(成功の道)があったのか等を広く検討することが残された者の使命だと教えている(図A) [1]。

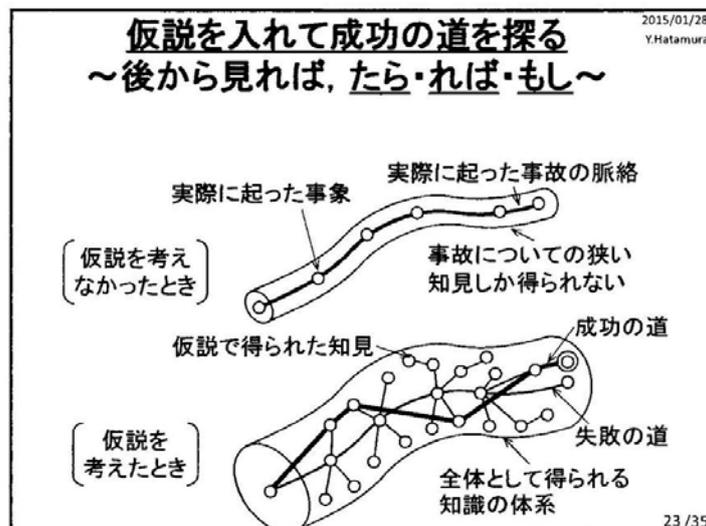
失敗学会では、福島原発事故に関連して、2014年2月以降に4回のフォーラムを開催し、それらを踏まえて、2015年4月と6月に「福島原発における津波対策研究会」を開催した。その目的は下記の2点の解明である。

- |  |
|--|
| ①福島原発において、巨大地震に伴う巨大津波を予測できたか？                |
| ②もし巨大津波が事前に予測されていたら、事前にどのような対策をすれば事故を回避できたか？ |

この内、①については、既に政府事故調査報告書や国会事故調査報告書に記載があるが、更に広く検証した。

②については、原発専門家による研究があつてしかるべきだが、公開資料では見当たらない。失敗学会は原発の専門家集団ではないので、本研究会の開催に当り、原子力学会のメーリングリストで呼びかけた所、十数名の原子力専門家と数名のジャーナリストなどの参加を得ることができた。本報告書は失敗学会有志が著者となっているが、上記の方々の協力でできたものであり、ここに感謝申し上げる次第である。

なお、②の対策については、実際に現場でなされた事故対応については検討対象外としている。即ち、上記のように「事前に巨大津波が予測されていたら」という仮説の下に「防衛策があつたかどうか」を検証することが目的である。



図A 仮説を入れて成功の道を探る[1]

# 第1章：福島原発において、巨大地震に伴う巨大津波を予測できたか？

## 1.1) 文科省・地震調査研究推進本部の予測

巨大津波の予見に関しては、文部科学省・地震調査研究推進本部（以下、推本）が、2002年に「福島沖の更に沖合を含む日本海溝沿いのどこかで、M8.2の大地震が起きる確率は今後30年以内に20%」との見解を出していた（図1-1）[2]。

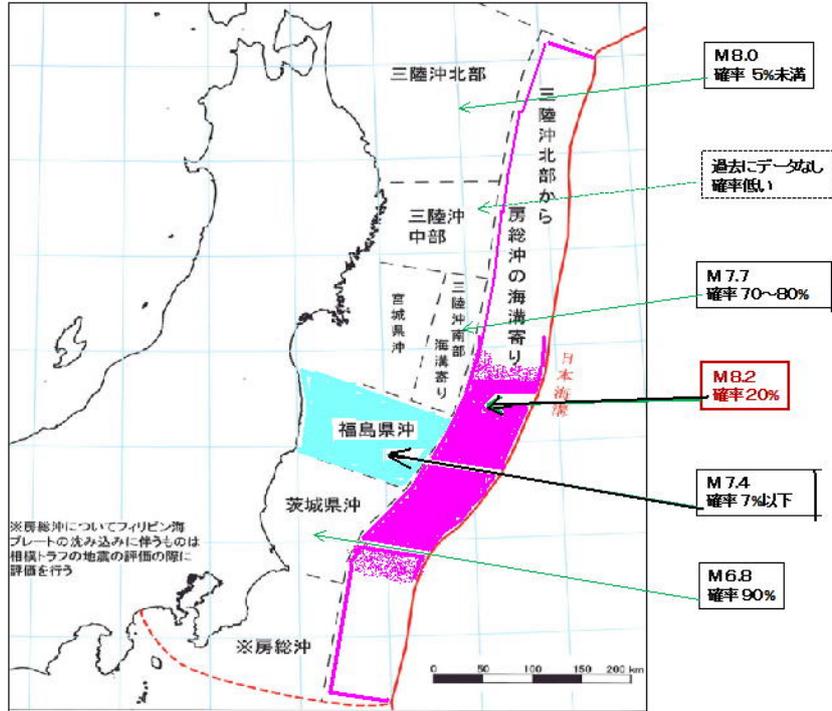


図1-1 地震調査研究推進本部の地震予測域[2]

この見解を基に、東電は2008年3月「福島原発で15.7mの津波が予測される」という結果を得ていた[3,4]。下記に東電が2011年に提出した資料[5]を示すが、基になった2008年の資料自体は不明である（注2参照）。

### 地震調査研究推進本部の見解(2002)

・三陸沖北部から房総沖の海溝寄りのプレート間大地震(津波地震)  
 「1896年の「明治三陸地震」についてのモデルを参考にし、同様の地震は三陸沖北部から房総沖の海溝寄りの領域内のどこでも発生する可能性があると考えた。」

### 「1896年明治三陸沖」で評価

発電所	1F							
号機	1	2	3	4	5	6	北側 (O.P.13m)	南側 (O.P.10m)
津波水位※2(O.P.m)	8.7	9.3	8.4	8.4	10.2	10.2	13.7	15.7

上記の「津波水位」とは、注記に「海水ポンプ位置での水位」とある。用語の定義は注1を参照)。ただし、15.7mについては注2を参照。



を最初の命題にしているのので、本件の差異はここでの問題とはしていない。

なお、後述する通り、福島原発事故の直接原因が、津波によって、交流電源（AC 電源）、直流電源（DC 電源）、最終排熱系の3つが同時に喪失したことにあることから、これらを引き起こすに足る規模の津波が予測できたかが問題の焦点であり、本検討における「巨大津波」とは、交流電源、直流電源、最終排熱系を喪失させることが予測される規模の津波、具体的には、敷地高さ（10m）を越える津波を意味している。

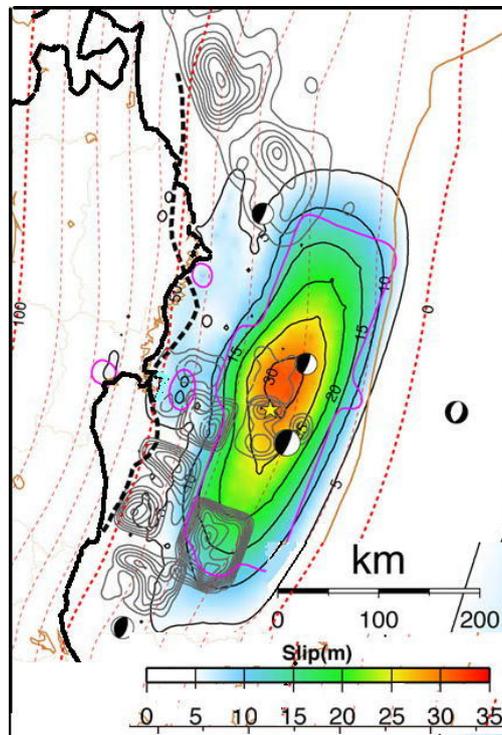


図 1-3 2011 年東北地方太平洋沖地震の滑り量[8]

## 1.2) 七省庁による「地域防災計画における津波対策強化の手引き」

1997 年に、国土庁等の七省庁による「太平洋沿岸部地震津波防災計画手法調査報告書」が出され[10]、1998 年に津波対策として「地域防災計画における津波対策強化の手引き」がまとめられた[11]。それまでの原発は「既往最大の歴史津波と、活断層から想定される最も影響の大きい津波」を想定していたが、上記手引きでは「（既知でなくても）現在の知見により想定し得る最大規模の地震津波を選定する」となった。

1997 年に「通産省より、各電力会社に対し、数値解析に誤差があることを考慮して、解析値の 2 倍の津波高さとなった場合の影響を評価するよう求められた」ことが電事連の場で報告された[12,13]。これを受けて、2000 年に、東電は「この方式で福島第一原発を評価すると、津波高さは 5m となり、解析の不確かさ上限の 2 倍では 10m の津波と予測され、6m で海水ポンプが停止する」との報告書を提出した（下記注および図 1-4 参照）。なお、本件は、電気事業連合会「津波に関するプラント概略影響評価」なる資料に記載されているとのことだが、当該資料は非公開となっている。

本項目については、既に国会事故調査報告書・参考資料[12]で指摘されていたが、文献[13]にも詳細が記載されている。

筆者注：

東電資料[14]によれば「2004 年のスマトラ沖津波によるインド原発での海水ポンプ浸水等を踏まえ、2006 年に溢水勉強会が開催され、同年に保安院から『・・・非常用海水ポンプは機能喪失し炉心損傷となるため・・・具体的な対策を対応して欲しい』との要望を電事連が受けた」とある。つまり、海水ポンプが停止すれば、原子炉からの最終的な排熱が不可能になり、いずれ炉心溶融事故に至ることは関係者には自明であった。

また、多くの非常用ディーゼル発電機（DG）は海水で冷却されており、海水冷却が出来ない場合は DG も稼動不可能になり、更に地震時には外部電源も使用不可能になる可能性が高く、SBO（Station Blackout：全交流電源喪失事故）になる。実際、福島原発事故では、変電所と原発受電設備が地震で機

能を喪失し、外部電源も喪失した。

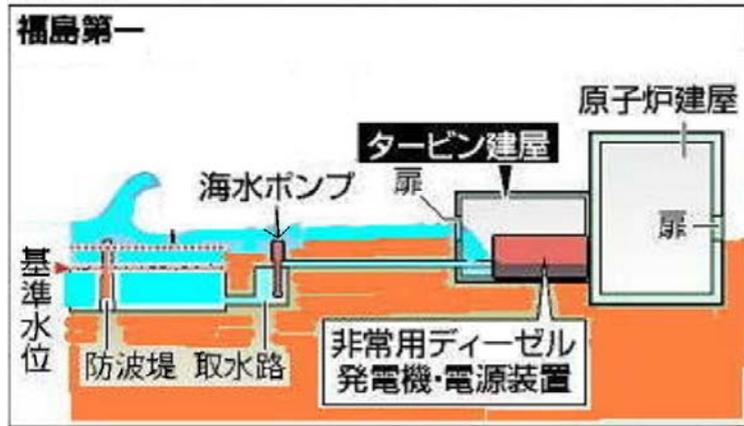


図 1-4 福島第一原発の海水ポンプ配置図

### 1.3) 国土庁・日本気象協会の「福島第一原発の津波浸水予測図」

1999年3月に、国土庁と日本気象協会がまとめていた福島第一原発の津波浸水予測図を図1-5に示す[15]。1号機から4号機まで浸水しており、海側（タービン建屋側）で4-5m、山側（原子炉建屋側）で0-1mの浸水予測となっている。津波は、10m高さの敷地の上に遡上し、原子炉建屋の裏側まで浸水域が広がると予想されていたことが分かる。

この計算手法については2頁の概要論文[16]があるだけで詳細は不明だが「津波高さは最大10mと仮定するが、地震断層モデルから想定される最大津波高さが10mより低い場合はそちらを採用する」と記載があり、10mの予測図がないことから、福島第一原発においては、地震断層モデルから想定される最大津波高さとして8mを採用した、と思われる。なお、津波高さ8mに対し、敷地高さが10mなので、津波の遡上効果を取り入れていると考えられる。

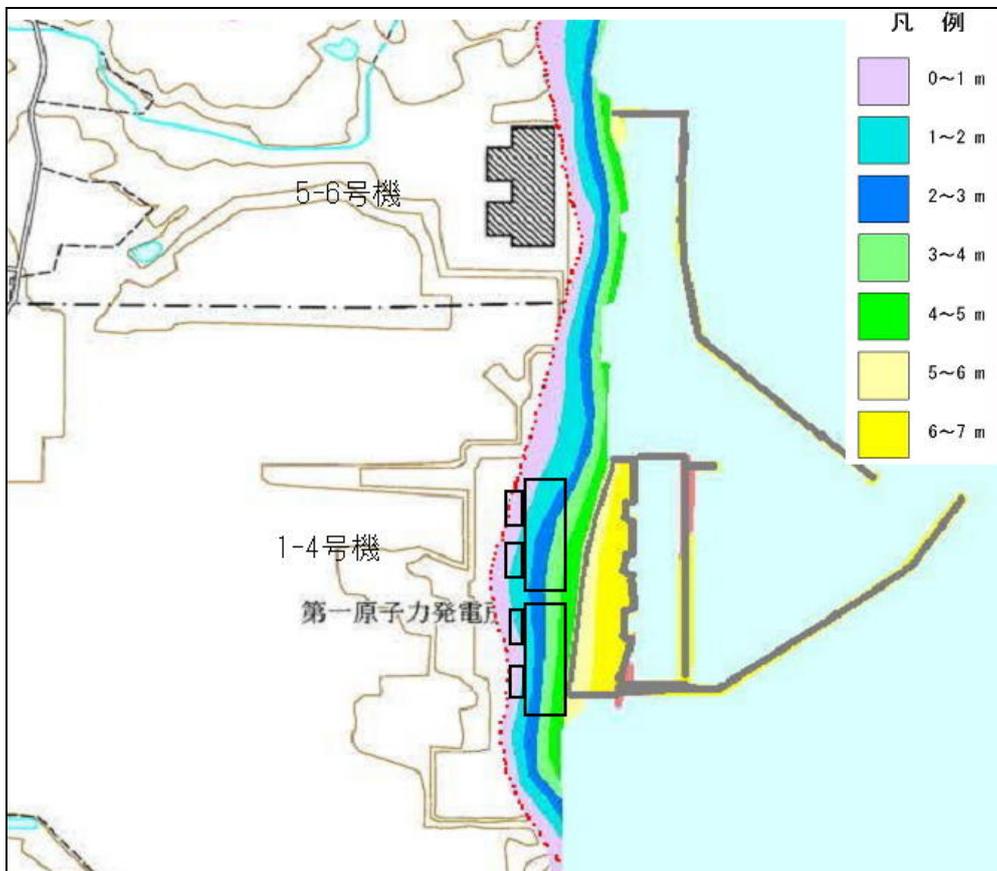


図 1-5 福島第一原発の津波浸水予測図[15]

#### 1.4) 貞観津波に関する研究から、福島での津波を予測できたか？

西暦 869 年の貞観津波は宮城県に大きな被害をもたらしていたことが近年知られるようになり、その研究から福島原発での津波予測が可能であったのではないかと、言われている。しかし、貞観津波を引き起こした地震は M8.4 以上と推定されており、今般の地震 (M9.0) に比べて小さいエネルギーであったこと、及び主に宮城県沖を中心としていたことが異なるので、貞観津波の研究をどのように活かすことができたのかについて、以下に検討した。

また、貞観津波による福島県での堆積物調査は数点あるものの、元々、福島原発が設置された場所は約 35m の台地であり (下記写真参照)、直接的な証拠とすることは出来ない。従って、堆積物調査を基に津波解析を行なった予測となる。

なお、1~4 号機の敷地高さを 10m とした理由については「台地を掘削する費用と、原子炉建屋基礎工事費とを勘案し、最小費用となるように設定した」と報告されている[17]。また、5~6 号機の敷地高さについても、同様の思想で 13m とした模様である。

(写真出典：東電企画映画「黎明、福島原子力発電所建設記録、調査篇」1967 年、より)



元々、東北の三陸海岸は何度も繰り返して大きな津波被害を出したのに対し、宮城県の仙台平野では津波被害が少ないと考えられていた。しかし、古文書の研究などを基にして、1990 年頃に仙台平野の津波堆積物が発見され、その実態が少しずつ、知られるようになってきた[18]。

一方、福島県における貞観津波の堆積物調査も数件、見られる。1つ目は 2001 年の相馬市 (松川浦：福島原発の北約 50km) における貞観津波の堆積物発見である[19]。

2つ目は、2008 年の文部科学省報告書で示されたもので、福島原発の北約 5km の浪江町 (請戸) で貞観を含む津波堆積物が発見された[20]。同報告書の p.122 では、浪江町で標高 4m 程度の場所に津波痕跡があった、と読み取れる。更に、P129 には「これまでの調査結果から、貞観津波の到達域が北は三陸海岸から南は常磐地域までの広い範囲で確認されている (渡邊)」とある。

ここで引用されている渡邊の論文[21]を見ると、下記の図 1-6 のように、貞観津波の伝承がある箇所を示したもので、堆積物の調査ではないが、南福島から茨城県にまで津波伝承があることが示されている。

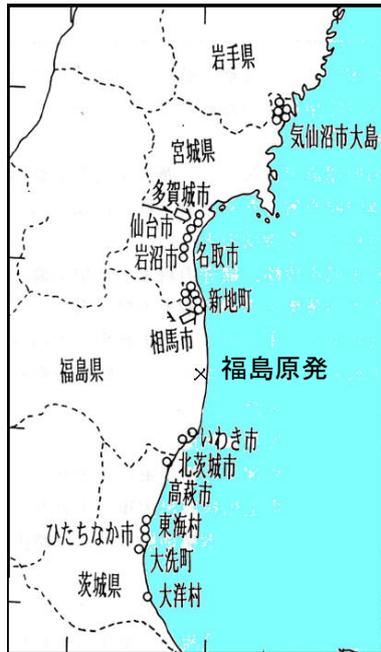


図 1-6 貞観津波の伝承がある箇所[21]

3つ目は、東電が2009年12月から始めた津波堆積物調査で、「1F北側の南相馬市までは見つかったが、1F南側の富岡、広野、いわき市では見つからなかった」としている[22]。しかし、著者らには、この調査は上記2件目と矛盾するように思われるので、現在、東電に元の調査報告書を開示するよう要請しているところである。

いずれにしても、直接的な証拠とすることは出来ないので、堆積物調査を基に津波解析を行なった予測となる。

震災前の波源モデルは、津波堆積物の調査結果を基にした2008年の佐竹論文[23]が最新のものであった。東電が貞観津波の波源「モデル10」で計算した結果(下表,[5])を見ると、6号機の9.2mが最高で、いずれの場所も10m(敷地高)に及んでいないが、この計算は、パラメータスタディ(波源のばらつきを考慮する、土木学会が定めた手法)を含んでいないため、電力業界の標準的な手法であった「土木学会手法で計算すると2~3割、津波水位が高くなる」と欄外注釈で記載されており、敷地高を超えることになる。

ただし、下表自体は2011年3月に提出されたもので、元の資料が不明なので、いつ下記の結果を得ていたかは不明であるが、東電最終報告書[6]によれば「2008年12月に佐竹氏より論文を提供され、津波の影響を試算し・・・2009年4月に論文が公開された」とあるので、その時期と推定される。

佐竹他(2008), 行谷他(2010)									
<ul style="list-style-type: none"> <li>石巻平野, 仙台平野, 福島県沿岸の津波堆積物を再現する断層モデルを複数検討</li> <li>相対的に再現性が高い断層モデルを提示(現状では、「モデル10」)</li> </ul>									
「モデル10」で評価									
発電所	1F						北側	南側	
号機	1	2	3	4	5	6	(O.P.13m)	(O.P.10m)	
津波水位※3(O.P.m)	8.7	8.7	8.7	8.7	9.1	9.2	浸水せず	浸水せず	

それ以前に「6mで海水ポンプが停止する」と分かっている以上、海水ポンプが停止すれば、最終的な排熱が不可能になり、炉心溶融事故に至る事は自明である。

図1-7に、貞観津波を引き起こした地震の震源域(M8.4)と、3.11の地震のものとを比べたものを示すが、貞観津波は今般の地震(M9.0)に比べて小さいエネルギーであったこと、及び、主に宮城県沖を中心としていたことが異なる、ということが分かる[24]。

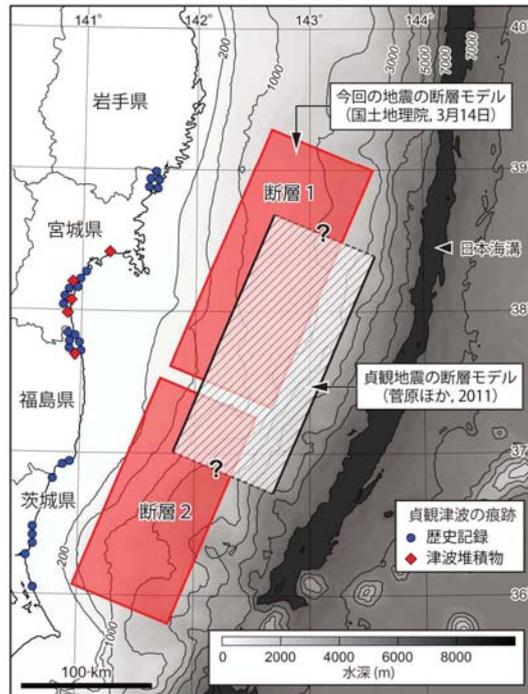


図 1-7 貞観地震津波と今回との比較[24]

### 1.5) IAEA 報告書の結論

2015 年に、福島事故に関する IAEA の報告書[25]が公開されたので、津波の箇所（第 2 分冊）だけ、下記に要約を示す。

- ①福島第一原発の建設時の津波予測は、過去に起きた津波をベースとする、という思想に基づき、1960 年のチリ地震（M9.5）の約 3m であった。
- ②その後、見直されたが、2002 年に 5.7m、2009 年に 6.1m になっただけである。
- ③その後、東電は 2008-2009 年に津波予測の試計算を実施し、文部科学省・地震調査研究推進本部の見解を基に、サイト南側で 15.7m と予測した。
- ④更に、貞観津波に関する佐竹論文を基に、サイト南側で 10m と予測した。津波の遡上を入れれば、これより上がるはずであった。
- ⑤過去に起きた地震・津波のみをベースにする日本の 2006 年までの評価方式は国際基準[26]に違反していた。
- ⑥過去最大の地震を考えるのが国際慣行だった。太平洋では、チリ地震（1960 年、M9.5）と、アラスカ地震（1964 年、M9.2）とがあったのだから、この程度の巨大地震を想定すべきであった。
- ⑦過去が不確かな以上、安全側の立場に立って、上記③～⑥のいずれかがなされれば、2011 年の津波高さは予測できたはずである。
- ⑧規制当局も強く指導すべきであった。

結論において「東電は 15m の津波が来る可能性を認識しており、その対策をしなかった」と述べており、この見解を、日本を含め世界 40 カ国の専門家が認定したことになる。

なお、上記⑥（過去最大の M9 級地震を想定するのが国際慣行であった）に関して、IAEA 報告書は証拠文書を挙げていないので、以下に筆者が補記する。

米国政府機関 NOAA（海洋大気局）は 2006 年に、M9.3 の地震による津波が太平洋岸 18 ヶ所で起きると想定し、NOAA が置かれた真珠湾での津波高さを予測している。そして、震源として日本の南海トラフと日本海溝も図示している（図 1-8）[26]。

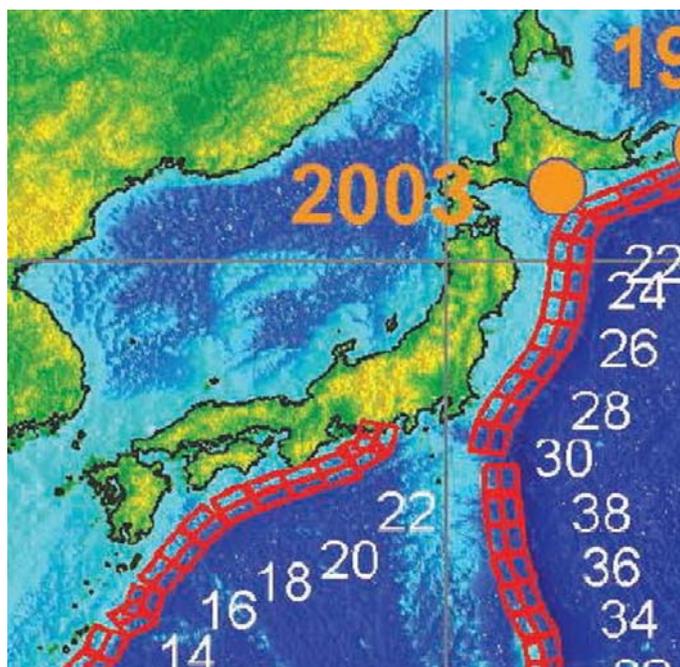


図 1-8 米国政府機関が想定した日本付近の震源図[26]

## 1.6) 命題 1 の結論

「福島原発において、巨大地震に伴う巨大津波を予測できたか？」という命題 1 に関して、時系列順に記載すると、

- ①1997～1998 年の七省庁による「地域防災計画における津波対策強化の手引き」に基づき、2000 年に、東電は「解析の不確かさ上限の 2 倍では 10m の津波水位（海水ポンプ位置での浸水高さ）と予測され、6m で海水ポンプが停止する」との報告書を提出した。
- ②1999 年に、国土庁等が福島第一原発の津波浸水予測図を示し、タービン建屋側で 4-5m の浸水予測となっていた。
- ③2002 年の文科省・地震調査研究推進本部が「福島沖の更に沖合を含む日本海溝沿いのどこかで、M8.2 の大地震が起きる確率は今後 30 年以内に 20%」との見解に基づき、2008 年に東電は「福島原発で 15.7m の津波（浸水高さ）が予測される」という結果を得ていた。
- ④貞観津波に関する古文書の研究などを基にして、1990 年頃に仙台平野の津波堆積物が発見され、2008 年の文部科学省報告書で、福島原発の北約 5km の浪江町で貞観津波堆積物が発見され、また、北は三陸海岸から南は茨城県にまで貞観津波の伝承があることが述べられている。2009 年初めに東電が貞観津波の波源で計算した結果によると、標準手法で計算すれば敷地高を超える津波が予測されていた。

上記のように、3 回の異なる予測で、敷地高さを超えて建屋が浸水する津波が示されており、貞観津波に関する研究もそれを裏付けていた。また、上記①③④は、東京電力報告書が示すように、関係者に認識されていた。そもそも、敷地高さ云々以前に、6m の津波で海水ポンプが停止すると炉心溶融事故に至ることは関係者に認識されていた。

また、IAEA 報告書も「東電は 15m の津波が来る可能性を認識しており、その対策をしなかった」と結論している。

以上から「福島原発事故以前に炉心溶融事故に繋がる巨大津波を予測できたか」という命題に結論が得られたと考える。

## 第 1 章の参考文献：

- [1] 畑村洋太郎「福島に学び、今後にかさすべきこと」2015/1/28 原子力委員会資料
- [2] 文部科学省・地震調査研究推進本部「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について」2002 年 7 月 31 日

なお、上記資料には「予測値 M8.2 の地震は津波地震とされており、エネルギー的には 1/6 小さい (M で 0.5 程度小さい) 地震と考えられる」との注記がある。

- [3] 政府事故調査報告書 (「東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会、最終報告」) 2012 年 7 月 23 日
- [4] 国会事故調査報告書 (「国会 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会、報告書」) 2012 年 7 月 5 日
- [5] 東京電力「福島第一・第二原子力発電所の津波評価について」2011 年 3 月 7 日
- [6] 東京電力「福島原子力事故調査報告書」2012 年 6 月 20 日
- [7] 東京電力「新潟県中越沖地震を踏まえた福島第一・第二原子力発電所の津波評価委託第 2 回打合せ資料 2 福島第一発電所 日本海溝寄りの想定津波の検討 Rev.1」2008 年 4 月 18 日 (本資料は非公開)
- [8] 海野徳仁「研究報告: 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の概要」2011 年
- [9] 文部科学省・地震調査研究推進本部「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価 (第二版) について」2011 年 11 月 25 日
- [10] 国土庁などの七省庁「太平洋沿岸部地震津波防災計画手法調査報告書」1997 年
- [11] 国土庁などの七省庁「地域防災計画における津波対策強化の手引き」1998 年
- [12] 国会事故調査報告書・参考資料 (P41-48)
- [13] 添田孝史「原発と大津波 警告を葬った人々」岩波新書、2014 年
- [14] 東京電力「溢水勉強会とそれを踏まえた対応状況等について」及び「東京電力からのお知らせ」(いずれも 2012 年 5 月 16 日)
- [15] 国土庁発行・日本気象協会制作「津波浸水予測図」1999 年 3 月。  
下記 URL に示す福島県フォルダは、更に 4 つのサブフォルダに分かれており、上図に示す福島第一の 8m 予測は、サブフォルダ fs002 中のファイル「7.pdf」である。なお、福島 1-4 号機の位置は原図に示されていないので、筆者が他の図から重ね合わせた。URL : <http://1drv.ms/1FpPJ1F>
- [16] 岡山和生ほか (国土庁)「津波浸水予測図の作成とその活用(被害予測と緊急対応その 1)」、地域安全学会梗概集(9), p.50-51, 1999 年
- [17] 小林健三郎「福島原子力発電所の計画に関する一考察」土木施工。1971 年 7 月号。
- [18] 澤井祐紀、岡村行信ほか「仙台平野の堆積物に記録された歴史時代の巨大津波。1611 年慶長津波と 869 年貞観津波の浸水域」地質ニュース 624 号、p.36-41、2006 年
- [19] 菅原大助ほか「西暦 869 年貞観津波による堆積作用とその数値復元」津波工学研究報告。vol.18, p.1-10、2001 年
- [20] 文部科学省・地震調査研究推進本部「宮城県沖地震における重点的調査観測 (平成 19 年度分)」の p.108、2008 年、URL: [http://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/miyagi\\_juten/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/miyagi_juten/index.htm)
- [21] 渡邊偉夫「伝承から地震・津波の実態をどこまで解明できるか、貞観十一年 (869 年) の地震・津波を例として」歴史地震、vol.17、p.130-146、2001 年
- [22] 及川兼司ほか「福島県沿岸周辺における津波堆積物調査」日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿
- [23] 佐竹健治ほか「石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション」活断層・古地震研究報告。No.8、P.71-89、2008 年
- [24] 菅原大助ほか「貞観地震津波と今回との比較」2011 年
- [25] IAEA 「The Fukushima Daiichi Accident, Technical Volume 2, Safety Assessment」2015 年 8 月  
URL : <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/10962/The-Fukushima-Daiichi-Accident>
- [26] IAEA 「Safety Guides. Earthquakes and Associated Topics in Relation to. Nuclear Power Plant Siting」IAEA Safetyseries. No.50-SG-S、1979 年
- [27] L.Tang ほか「Assessment of potential tsunami impact for Pearl Harbor Hawaii」.NOAA Tech. Memo. OAR PMEL-141, 2006 年 8 月

## 第2章：もし巨大津波が事前に予測されていたら、どのような対策をすれば事故を回避できたか？

本報告書では、①福島原発において、巨大地震に伴う巨大津波を予測できたか？②もし巨大津波が事前に予測されていたら、事前にどのような対策をすれば事故を回避できたか？という二つの命題を検討しているが、第1章での検討結果に基づき、2011年以前に、福島原発において巨大地震に伴う巨大津波を予測できたことを前提に、福島原発事故を回避する為の対策について、以下に示す。

始めに)

最初に、福島原発事故の直接原因を簡略化して以下に示す。地震、特に津波により、何か起きたかを確認するためである。

**福島原発事故の直接原因：**

- ①地震により、送電線断線や変電所故障等が生じ、外部電源を喪失した。
- ②地震発生後に津波が原発を襲い、地下の非常用ディーゼル発電機（DG）と配電盤が水没して使用できなくなった（付録1）。
- ③（仮にDGが水没しなくても）原子炉建屋外の燃料オイルタンクが流失し、更にDGの海水冷却系も損傷したので、DGを動かすことは出来なかった。つまり、全交流電源喪失（SBO：Station Blackout）が起きた。
- ④一部の号機は蓄電池も水没し、直流電源も喪失した（付録1）。
- ⑤原子炉の熱を最終的に海に捨てるための海水系冷却設備も原子炉建屋外にあり、津波で破損したので（仮に外部電源またはDGのどちらかが作動できても）炉心を冷却できなかった。

つまり、津波によって、交流電源（AC電源）、直流電源（DC電源）、最終排熱系の3つが同時に喪失したことが直接原因である。

ところで、以下の対策案作成では、原則として、実際の福島原発事故から得られた情報を使わないこととしている。それは、今回の命題2が「3.11以前に、津波が来ると予測されていれば、原発専門家ならこういう対策を取るはずで、その対策により、福島原発事故のような炉心溶融事故を防げたか？」というものだからである。つまり、3.11以前に戻って考える必要がある。

ただし「対策案が有効であるか」という検証には、3.11以降の情報も使用することとする。その理由は以下の通りである。

ここに示した対策案は、いわば仮説である。全ての科学は、実験または実事象観測によって実証され、初めて真実と確認される。しかし、地震や津波を実験することは不可能で、更に地震・津波の影響を原子炉で実験することも不可能であり、唯一の例外が今回の福島原発事故だからである。また、3.11以降に得られた対策案に関する知見として、B5b（航空機テロ対策）の件を参照しているが、これについては付録4で述べる。

さて、敷地高さを越える津波が来ると予測されれば、AC電源、DC電源、最終排熱系の3つが同時に喪失することは、原発専門家なら自明である（付録2、付録3）。従って、これら全てを津波から守れば良いが、最小限、何があれば福島原発事故（炉心溶融事故）を防げたのか、それは実行可能な対策であったのか、を以下に検討する。

なお、津波予測が3.11直前であれば、対策は間に合わない。第1章（命題1：津波予測）での検討から、この時間的余裕は短い場合は2～3年と推測され、防潮堤のような大規模な対策は実行不可能であったと思われる。この点も今回の検討の拘束条件である。以上から、今回の命題2の条件を纏めると、以下の通りである。

- ①AC電源、DC電源、最終排熱系の3つを確保すること。
- ②3.11以前に戻って対策を考えること（福島原発事故情報を使わないこと）。
- ③対策は、2-3年で実行可能であること。
- ④これらの対策により、炉心溶融事故を防げることを示すこと。

## 2.1) 事故直後の対応（直流電源等の復帰までの時間的余裕）

地震発生後、直ちに原子炉は停止し、その後1時間で津波が来襲して[AC+DC 電源喪失]が発生した、と想定した。すなわち、原子炉停止後の1時間は通常の冷却系が作動すると想定した。

原子炉停止後、1時間後の崩壊熱は福島第一3号機の場合、30MWで、蒸発水量は毎時48トン、2時間後は24MWで毎時38トン蒸発なので、合計86トンとなる。なお、原子炉停止後の崩壊熱は日本原子力学会推奨値[1]を使用した。

一方、燃料上端から水面までの高さを5mと仮定すると、燃料の上部にある水は $120\text{m}^3$ で、 $286^\circ\text{C} \cdot 70$ 気圧の水密度は $0.74\text{トン}/\text{m}^3$ なので、約90トンとなる。要するに、津波が来襲して[AC+DC 電源喪失]が発生してから2時間で燃料は水から露出する。図2-1に原子炉停止後の水位低下推移を示す。炉心露出後の数分後には燃料の温度は急上昇し、燃料被覆管が破損する。なお、更に燃料温度上昇は続き、1時間程度でウランが溶融すると推測される。

従って、炉心溶融事故を防ぐには炉心を冷却しなければならないが、そのための安全系として、福島2～5号機の場合、RCIC (Reactor Core Isolation Cooling system: 原子炉隔離時冷却系) と HPCI (High Pressure Coolant Injection system: 高圧注水系) が設置されている。また、1号機にはRCICがなく、IC (Isolation Condenser: 非常用復水器) がある。

上述のように [AC+DC 電源喪失] と分かってから、バッテリーを繋ぎ、RCIC または HPCI を手動で起動するのに2時間しかない。

なお、この間に蒸発した冷却水（蒸気）は、バネ式の安全弁の作動により、SC (Suppression Chamber: 圧力抑制プール) に放出される。従って、圧力容器や格納容器が圧力上昇により破壊されることはなく、また、この仕組みに電源や運転員操作は不要である。ただし、次節で述べるように、安全系 (RCIC または HPCI または IC) を起動して、失われた冷却水を補給する必要がある。

なお、直流バッテリーをRCICやHPCIの弁に接続してそれを開けるといっても、その時、配電盤は浸水しているので単に接続したのではバッテリーをショートさせて使えなくなるだけである。配電盤へのDC接続を断ってから、弁に電圧を供給しなければならない。

また、今回の検討で、ここが最も時間的に厳しいが、事前の機器準備と訓練により、国内の再稼動プラントは全てこの対応が可能と認定されているので、実行可能な案と考えられる。また、米国B5b (航空機テロ対策) に対応済みのプラントは全てこの対応が可能と認定されていることから、実行可能な案と考えられる (付録4)。

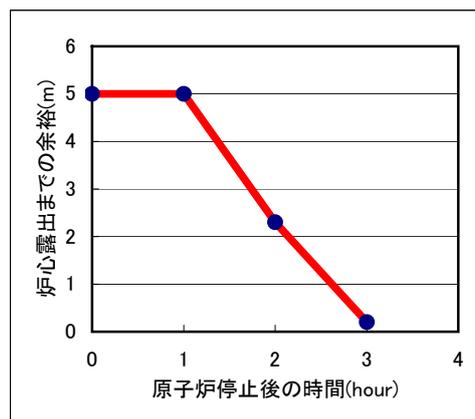


図 2-1. 炉心露出までの余裕（水位低下）の推移

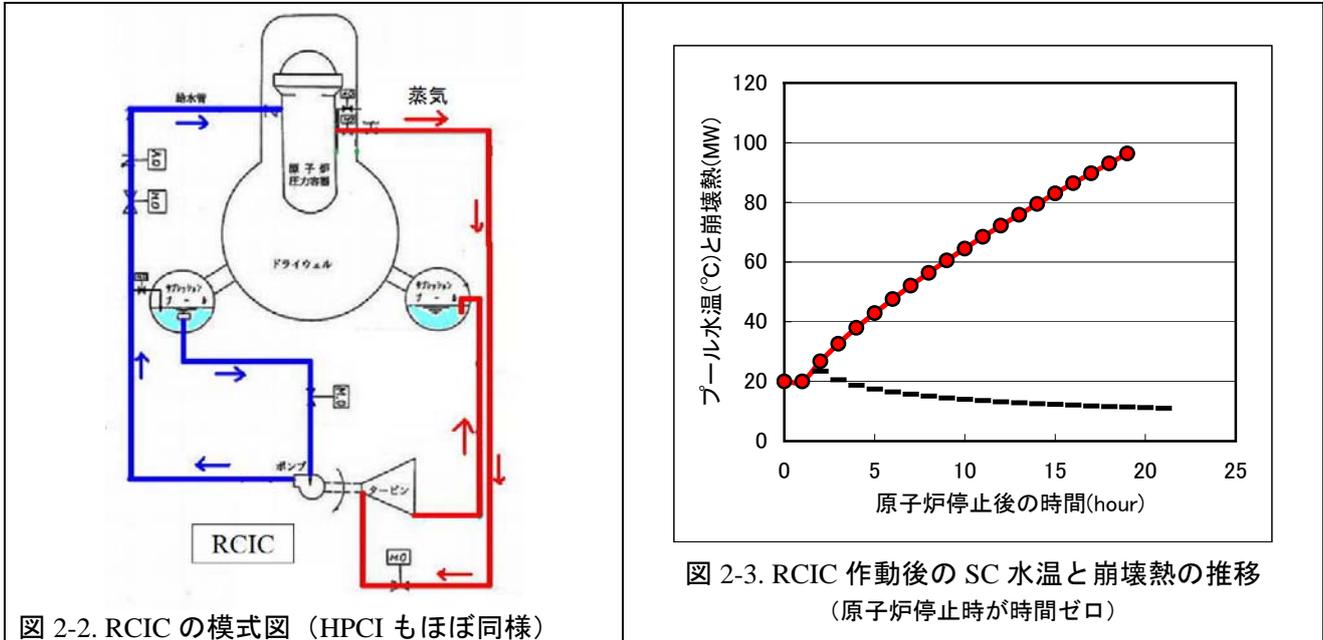
## 2.2) 事故後の炉心冷却（福島2～5号機の例）

事故時に原子炉が隔離され、DC電源が復帰して安全系 (RCIC または HPCI) が作動して、炉心冷却に利用できる水が SC 水の状態になると、炉心の崩壊熱によって、SC 水温は上昇する。それは、図 2-2 の様に、全体が閉じた系になっているからである。なお、RCIC と HPCI は、原子炉蒸気で駆動するので、ポンプモーターは不要であるが、制御と弁操作には DC 電源を必要とする (図では省略)。

福島3号機を例に、SC水量3000トンとし、原子炉停止後1時間はRHR（Residual Heat Removal System：残留熱除去系）が作動したと仮定し、その後に原子炉が隔離され、RCICまたはHPCIによって、SC水のみで冷却がなされた、と仮定する（SC水の初期温度は20℃と仮定）。

なお、本稿ではRCICとHPCIとは水密化されていると仮定しているが、2.8節で後述するように、今回の津波では2号機と3号機のRCICは作動していたので、この仮定は妥当である。

図2-3に計算結果を示すが、約19時間で100℃に達する。実際には、その後、蒸発によって圧力が高くなり、飽和温度も上がるので、水温は150℃程度になるが、以下の計算では保守的に100℃が限界値とした。



つまり、十数時間後には、SC水温が飽和温度（1気圧の下では100℃）になり、もはや原子炉の蒸気をSCで凝縮できなくなり、SC内とPCV(Primary Containment Vessel：格納容器)内に蒸気が充満し、最終的にはPCVが破壊される。

このことを数値的に示すと下記の通りである。即ち、水は蒸気になると体積が増える。体積増加は、100℃の場合は1700倍、150℃の場合は400倍になるので、平均的に1000倍になると仮定する。この時の蒸気圧力は約2気圧（0.2MPa）で、蒸気温度は約120℃である。

例えば、図2-4に示すように、福島3号機の場合、SC気相部とDW（ドライウエル）との合計空間体積は約8000m<sup>3</sup>なので、8トン蒸発毎に1気圧上昇する。20時間後の崩壊熱だと1時間で約20トン蒸発するので、一旦SC水の蒸発が始まると、図2-5のように、1-2時間程度でPCV設計圧力（約4kg/cm<sup>2</sup>-g [2]）に到達する。従って、前記2節の時間（約2時間）と合わせると、事故後（AC・DC電源喪失後）の約20時間には何らかの対策を講じなければ、PCVが破壊されることになる。即ち、事故後の半日程度の内に交流電源と注水系（2.5～2.6節で示す各種注水系、またはRHR）の復帰が必要である。なお、これらが遅れる場合の手段については、2.7節に示す。

また、この時は、原子炉が隔離、つまり閉じた系になっているので、仮に注水ポンプが作動できたとしても、系から排水する仕組みが無いので、このことも考慮しなければならない（2.6節に続く）。

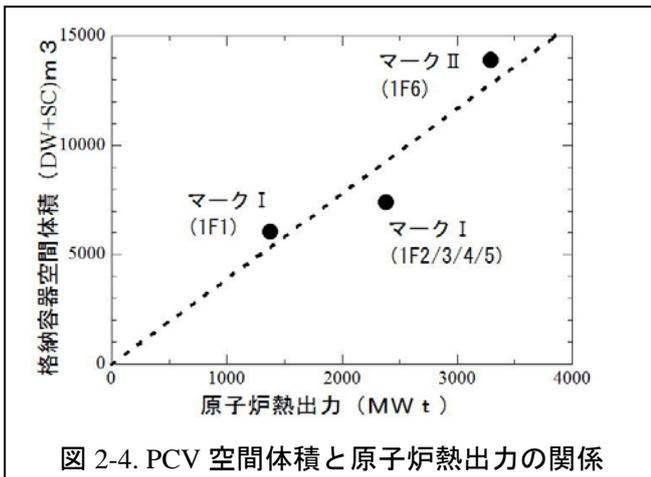


図 2-4. PCV 空間体積と原子炉熱出力の関係

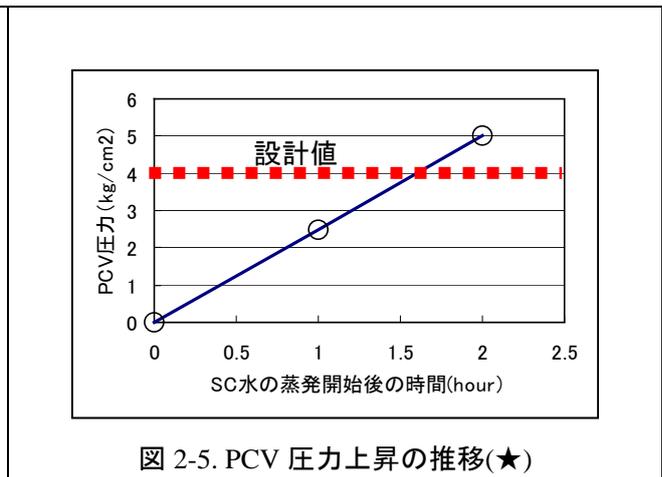


図 2-5. PCV 圧力上昇の推移(★)

(★)：工学上で問題となるのは PCV 内外の圧力差なので、本図は大気圧（1 気圧）をゼロとするゲージ圧を示している。なお、付録 5 に上記計算の検証結果を示すが、プラントにより若干の差異がある。）

### 2.3) 事故後の炉心冷却（福島 1 号機の例）

前記 2.2 節は福島 2～5 号機の例だが、1 号機には RCIC がなく、IC（Isolation Condenser：非常用復水器）が設置されている。つまり、IC と HPCI とが設置されている。この内、HPCI は DC 電源のみで作動するので、前記 2.2 節の説明を HPCI と読みかえれば良い。一方、IC には、循環ポンプがないが、弁は AC 電源と DC 電源の両方を必要とする（図 2-6）。

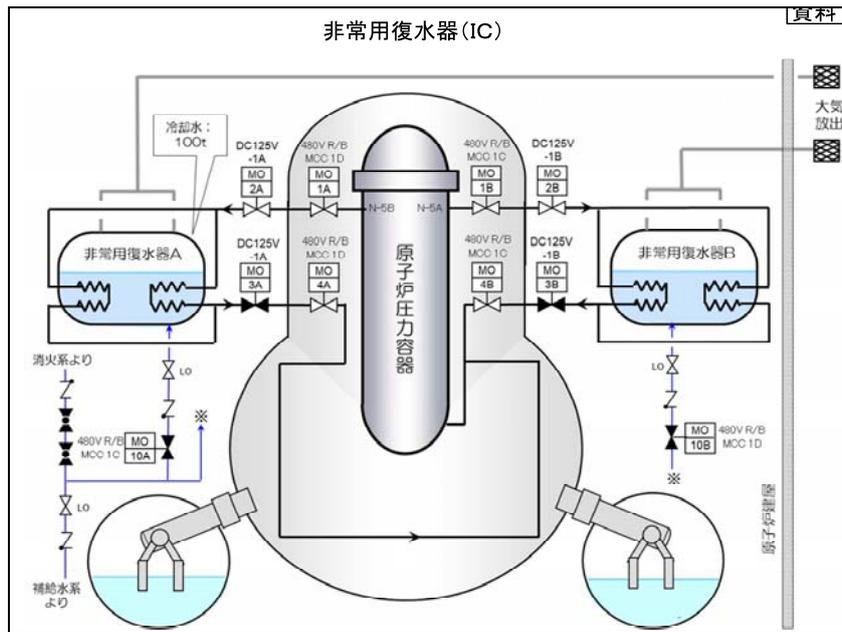


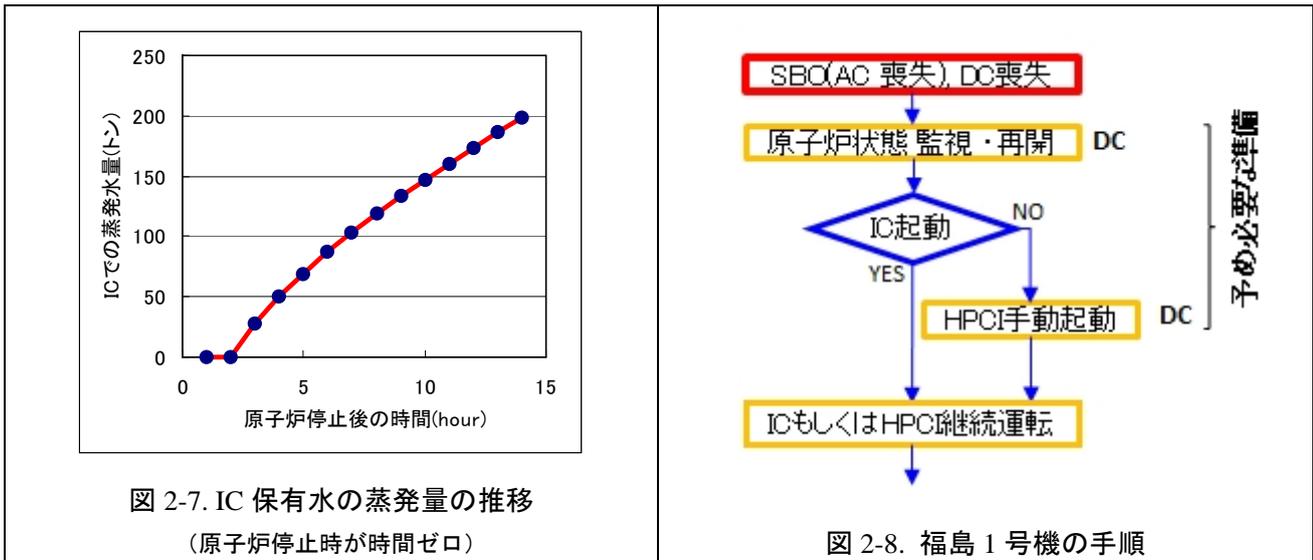
図 2-6. 福島 1 号機の IC（非常用復水器）の仕組み

IC は原子炉の蒸気を熱交換し、IC 内の冷却水を沸騰・蒸発させて外部へ排出するものである。つまり、蒸発を利用するので、炉心冷却に必要な水量が少なくて済む。

原子炉停止後、津波来襲までの 1 時間は SHC（Shutdown Cooling System：原子炉停止時冷却系、RHR 機能を有する冷却系）が作動したと仮定し、津波来襲時に[AC+DC 電源喪失]が発生し、IC が作動開始した、と想定した。

IC 内の冷却水量は 2 系統で約 200 トンであり、IC 作動後 1 時間で 100℃に到達し、その後、蒸発を始めた、と仮定する。図 2-7 のように、原子炉停止後の約 14 時間目まで、IC は作動する。その後、HPCI が起動できれば、更に時間の余裕が生じるが、仮に IC だけが利用可能だとしても、AC 電源などの復帰には半日程度の余裕があり、2～5 号機と同程度の時間余裕がある。

125V/250V 直流バッテリーなどがあつたとして、津波が来襲した直後に行なえた対応は図 2-8 の通りである。



福島 1 号機 IC について、これまでは電源喪失に伴い IC の 4 つの弁が閉じたこと、つまり安全のための閉口ジック(Fail-Close)がいけなかったように書かれることが多かったが、この閉口ジックは原子炉から格納容器の外に配管がつながっている IC 管に搭載された遮断弁のものであり、IC 管からの漏れを検知するセンサーへの電源が喪失されたときに IC 弁を 4 つとも閉じるようになっていた。つまり、プラントの電源喪失ではなく、重大な蒸気漏れを検知するためのセンサーへの電源喪失によるもので、その電源が落ちて IC 管の漏れを検知できなくなったら、IC 弁を閉じるのは当然の考え方である。

なお、2~5 号機の RCIC および HPCI は DC 電源でその弁を開閉できるのでよいが、1 号機 IC は、PCV 内の IC 上流と下流に AC 駆動弁が 1 つずつあり、それらの駆動には AC480V 電源が必要である。原子炉運転中の PCV 内は窒素ガスで充填されており、SBO 発生直後にそこに立ち入ることは実際的ではない。従って、1 号機 IC の PCV 内 2 つの弁は、DC 電源で PCV 外から開閉操作ができるようにしておくか、あるいは、480V 可搬式 AC 発電機による給電が可能ないように事前対策する必要がある。これらの対策の内、DC 電源による PCV 外からの開閉操作には、弁の交換、または、弁を操作するモーターを AC モーターから DC モーターへの交換する工事が必要で、安全系の工事となるため、設置許可変更申請(安全審査)が必要となる可能性があり、数年は掛かると思われるので、今回の対策案としては採用しない。

#### 2.4) 交流電源などの復帰 (最短ケース)

図 2-2 に示したように、RCIC や HPCI が SC (圧力抑制プール) の水を利用して炉心を冷却している状態は、いわば閉じた体系であり、海水ポンプが浸水・破損していると、熱を格納容器から外部に逃がすことができず、崩壊熱が徐々に系全体の水を温めるため、いつまでも原子炉を冷やし続けることはできない。そこで、どうしても必要になるのが、福島第二原発が行なったように、冷却機能を残留熱除去系(RHR)に切り替え、最終的に海へ排熱することである。

事故後の半日の内に、交流電源と注水系(★)が復帰したとし、更に海水系(RHRS)も復旧できれば、RHR を作動させ、冷温停止に移行できる。これが最短・最良のケースである。このケースを図 2-9 に示す。

(★: 2.5~2.6 節で示す各種注水系を指す。なお、これらは交流電源が復帰すれば稼動するはずであるが、RHR が復帰すれば、稼動させる必要はない。)

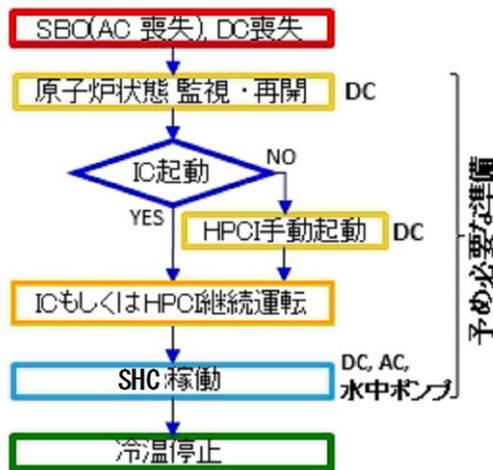


図 2-9. 冷温停止に到達するための最短手順（福島 1 号機の例）

図 2-9 は福島 1 号機の例で、SHC が残留熱除去機能を有している。また、福島 2～5 号機の場合は、IC を RCIC と、SHC を RHR と読みかえれば良い。

福島 2～5 号機の RHR システムは再循環系の再循環ポンプ上流から炉水を導き、熱交換器で冷却した後、再循環ポンプ下流と炉内に水を戻す RHR ループと、その熱交換器に海水を循環させる RHRS ループからなる(図 2-10)。

RHR ループそのものは地震・津波被害を受けない地上階以上にあり、機能損失はそのポンプ駆動用モーターへの AC 電源喪失と考えられる。即ち、RHRS ループは、海面から 4m の高さなので、ポンプを駆動するモーターが冠水して機能損失すると想定される。従って、海水ポンプまたはモーターの冠水への対策が必要である。

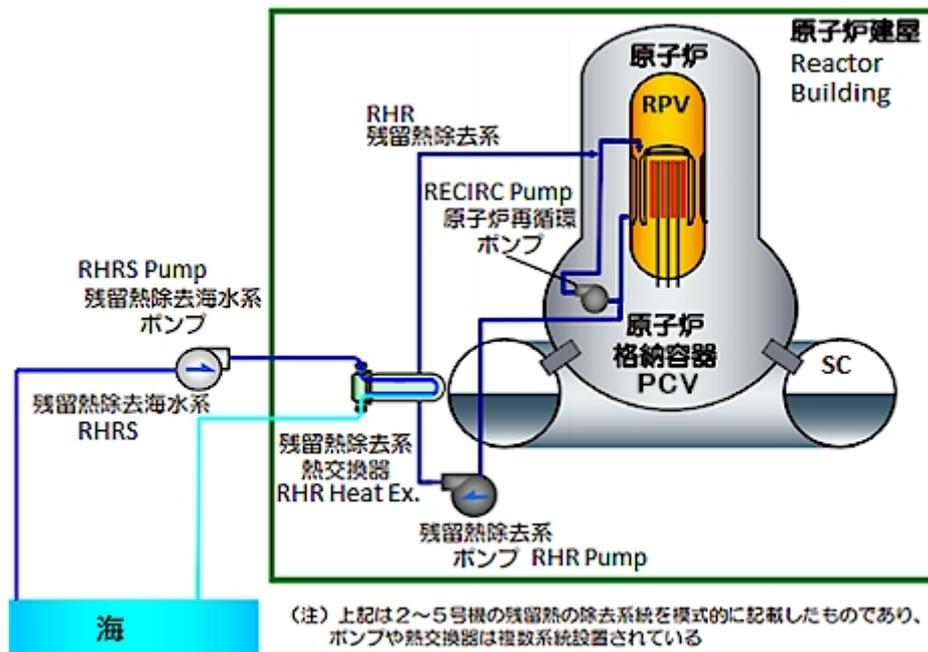


図 2-10. 福島第一の RHR 系（海水系を含めて 2 ループ） [3]

以上より高圧電源車(各原子炉 RHR ループと RHRS ループに配電できるのに必要な台数)と、RHRS ループの予備モーター、あるいはその RHRS ループモーターが大きすぎて、交換が実際的でないなら 5 号機で使用した仮設電源と水中ポンプ[4, p.64]を用意してあれば、RHR 機能は 10 時間程度で回復できると思われる。

なお、この代替用の水中ポンプは、原子炉停止後の残留熱を除去する能力があれば十分である。例えば、原子炉停止後 12 時間目の崩壊熱は約 13MW で、この発熱による蒸気量（約 20 トン）を凝縮するには、

毎時 100 トンの冷却水があれば十分である。実際、2～5 号機の RCIC のポンプ水量も毎時 100 トン程度である。この代替用水中ポンプを駆動できる発電機は、数十 KW 級の工事用発電機で十分と思われるが、原子炉建屋内の RHR には高圧電源が必要なので、結局、高圧電源車により、RHR と代替用水中ポンプの両方に給電することになる。

上記の検討から、以下の地震・津波対策を用意しておけば、福島原発事故は回避できたと思われる。通常、原子炉での改造工事は、安全審査が必要なら 5 年程度を要するものの、今回の対策には安全審査は不要と考えられ、殆どは運転中の対策工事も可能であり、1～2 年で完了できると考えられる。

- ①十分な容量と個数の 125V バッテリーと 250V バッテリー (★)
- ②高圧電源車
- ③水中ポンプ(RHRS 代替用)
- ④交流電源喪失(SBO)、直流電源喪失、海水ポンプモーター喪失を想定した訓練

(★: 250V バッテリーは 2～5 号機の RCIC 用電動弁と HPCI 用電動弁に必要である[5]。バッテリーの総重量は 100-200kg になるが、RCIC 室・HPCI 室に備蓄しておく案のほかに、分解して運搬できるので中央操作室等に予め保管しておく案が考えられる。また、可搬型のガソリン式交流発電機と、直流への変換器を組み合わせる案も考えられる。)

ただし、津波来襲により、海水系は損傷していると予測され、また、海岸付近の瓦礫散乱により、海水系の復旧は、もう少し時間がかかる可能性もあるので、ここでは次のステップとして、まずは交流電源の復旧を考える。

## 2.5) 交流電源などの復旧 (ベントしない場合)

前記 2.2 節に示したように、PCV 内の蒸気を凝縮できれば、ベントをせずに、PCV 内の圧力は抑えられる。その対策が PCV スプレーである。

図 2-11 に示すように、100℃の蒸気を水 (100℃の水) に戻す熱量 (凝縮潜熱) は、100℃の水を蒸発させる熱量 (蒸発潜熱) と同一値で、0℃の水を 100℃にする顕熱の約 5 倍である。つまり、100℃・1 トンの蒸気を凝縮して水に戻すには、5 トンの冷たい水 (0℃の水) が必要、ということである。

(なお、ここでは、蒸気温度を 120℃と想定し、水は 20℃から 120℃までの顕熱とする)

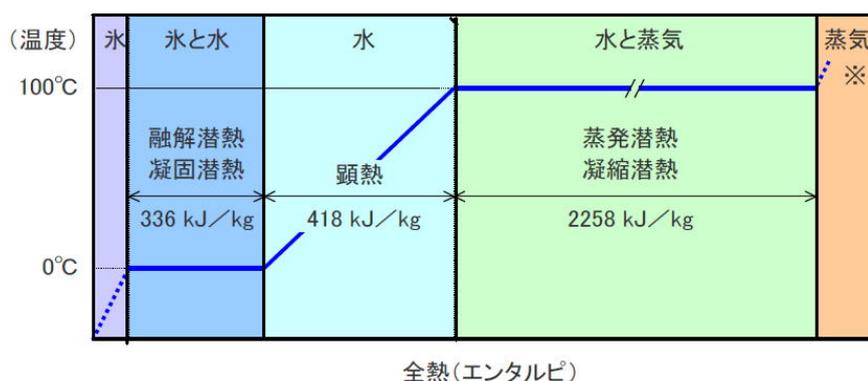


図 2-11. 水と蒸気の温度変化 [6]

福島 2～5 号機の場合、原子炉停止後 20 時間目の崩壊熱だと 1 時間で約 18 トン蒸発するので、これを水に戻すには毎時約 90 トンのスプレー水が必要となる。図 2-12 にその後の推移を示すが、水さえあれば、かなりの時間余裕があるように見えるが、実際にはそうではない。

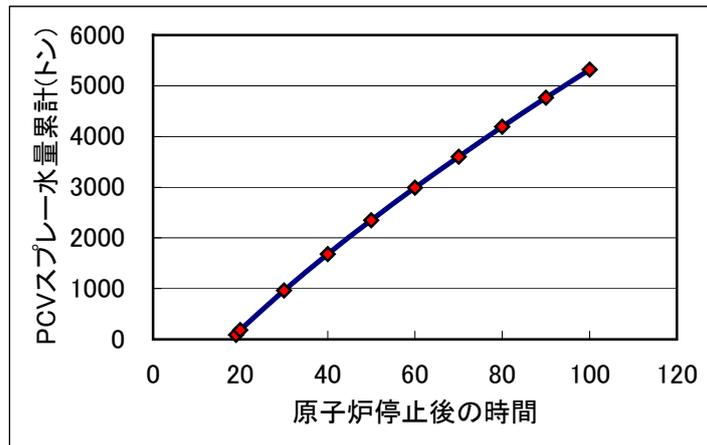


図 2-12. PCV スプレーの累計水量

即ち、ここで課題が2つある。1番目はベントをしないので「系から溢れた水はどこへいくか？」であるが、SC 気相部および DW に溜まっていく。ところが、1F3 の気相部の体積は約 8000m<sup>3</sup> なので、図 2-13 のように、事故後の3日目には、気相部の半分が冠水することになり、更に PCV 圧力を高めてしまうので、PCV スプレーは1-2日が限界である。なお、PCV スプレー用のポンプは交流電源を必要とする。

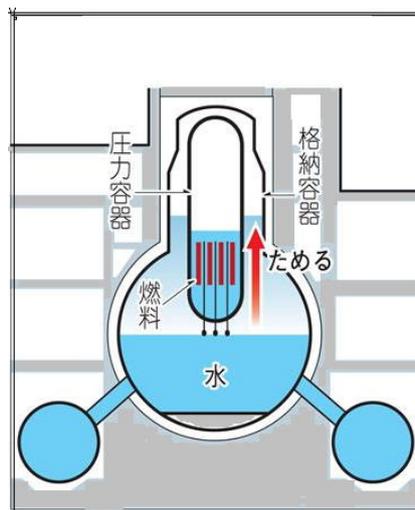


図 2-13. PCV の冠水 [7]

2番目の課題は、SC 水が飽和温度になっていて使えないので「冷たい水をどこから持ってくるか？」であるが、復水貯蔵タンクや純水タンク（または濾過水タンク）が利用できる。ただし、これらの水をスプレーするポンプ（MUWC：Make-Up Water System Condensate：復水補給水系）は AC 電源を必要とするが、PCV 内は低圧なので、逃し安全弁（Safety and Relief Valve：SR 弁）開放による炉心減圧は必須ではない（はずであるが、福島第二の例では各号機とも実施した）。

なお、SR 弁を開いて、炉心を減圧した後に、直接に炉心注水できれば、熱量的には上記の PCV スプレーと等価である。実際、今回の津波来襲時に、福島第二・4号機では、DW スプレーも実施したが、MUWC 系を使用して、復水貯蔵タンクから炉心に2日間程度、注水し、その後、RHR を起動して冷温停止できた[8]。この場合、原子炉から溢れた水は、SC 経由で PCV を冠水したと考えられる。以上から、ベントを実施しない場合は、高圧電源復帰後、PCV スプレーで対応できる期間、あるいは、SR 弁を開いて炉心減圧後に炉心スプレーで注水できる期間は、1-2日が限界である（事故後、2~3日目まで）。即ち、この時点までに RHR を復旧しなければならない。

## 2.6) 交流電源などの復帰（ベントする場合）（2.2 節の続き）

事故後の約半日後の時点では、既に SC 水は飽和しており、炉心からの蒸気は、もはや SC では凝縮できないので、PCV に出て行き、PCV 圧力が高くなり、いずれ設計限界圧力に達するので、何らかの対策が必要である。また、前記 2.2 節の最後に述べたように、原子炉が隔離された状態で外部から注水するには、系から蒸気を外部に放出する仕組みが必要で、この仕組みが PCV からのベントである（図 2-14）。図から明らかなように、ベントを実施するには、電動弁（MO 弁）、空気作動弁（AO 弁）、ラプチャーディスク（圧力開放板）の 3 つが作動する必要がある。

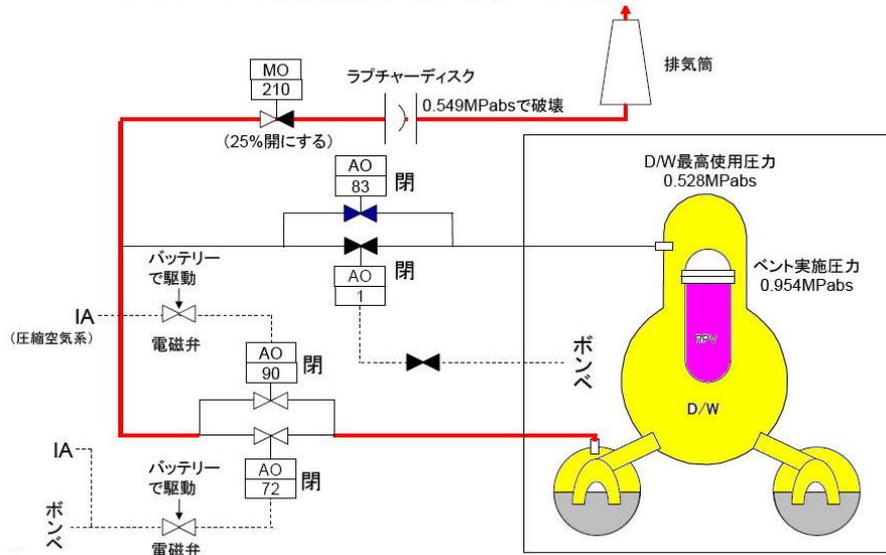


図 2-14. ベントの仕組み（福島 1 号機）

ここまでの過程では燃料は大きく破損しないと考えられ、ベントによる放射能拡散は余りないと期待できる(★)。従って、SC からのウェットベントでも、DW からのドライベントでも、結果は同じである。ベント後の SC 水の蒸発量を図 2-15 に示すが、この蒸発量は、原子炉内の冷却水の蒸発量と等しい。SC 水量の 2/3 の 2000 トンが炉心の冷却に利用できるとすると、本図の計算のように、1 週間程度の時間的余裕がある。その間に RHR を復旧させ、冷温停止に移行することになる。

なお、その後、復水貯蔵タンク等の水を利用するなどすれば、原理的には更に炉心冷却を続けることも可能であるが、RHR 復旧には 1 週間程度を見込めば十分と思われる。

炉心へ注水するシステムとしては幾つかの選択肢がある。即ち、減圧成功後に、炉心スプレーと復水補給水系、またはディーゼル駆動消火ポンプ（DDFP）や消防車で注水する案があり、1 週間以上は炉心の冷却が可能と考えられる。

(★：本稿では、これらの対応策により、過酷事故（炉心溶融事故）を防ぐことを目的としている。従って、長期の炉心冷却の場合も純水を利用することが望ましいが、河川水などを利用した場合は、炉心溶融は防げるものの、燃料被覆管が破損する可能性があり、希ガスなどがベントにより原発外へ広く拡散するというリスクがある。しかし、これらは人体には吸収されず、大気に拡散するので、被曝は限定される。)

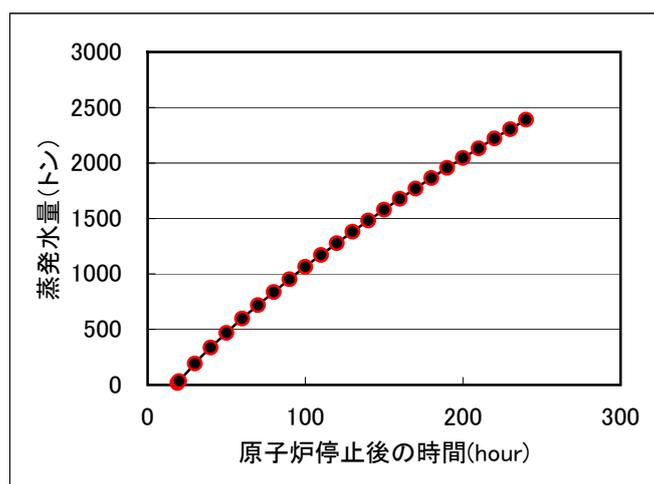


図 2-15. ベント後の SC 水蒸発量の時間推移

### 2.7) 交流電源などの復帰が遅れる場合 (2.2 節の続き)

前記 2.2 節で述べたように、交流電源と関連安全系 (RHR など) の復帰は、津波来襲後の半日程度の間に行う必要がある。事前に高圧電源車を準備すれば、この程度の時間で可能と考えられるが、これらが遅れた場合は、以下の手順が考えられる。

即ち、まず SR 弁を開いて炉心減圧を計ると共に、ベントを実施する。その後、交流電源を必要としない DDFP や消防車で注水することにより、1 週間以上は炉心冷却が可能である。その間に交流電源と関連の安全系 (RHR) を復旧させ、冷温停止に移行することになる。

### 2.8) 第 2 章のまとめ

- 1) 直流電源復帰と、安全系 (RCIC または HPCI または IC) の起動は、2 時間以内でなければならない。
- 2) 直流電源のみで作動する RCIC または HPCI で、炉心の蒸気を SC で凝縮し、炉心冷却できるのは半日程度までである。即ち、高圧電源復帰とこれを使用する安全系の起動 (下記 3,4,5,6 のいずれかの手順の開始) は半日以内でなければならない。
- 3) 最短ケースとして、高圧電源復帰と安全系 (RCIC または HPCI または IC) 起動が成功した半日以内の時点で、更に RHR (特に RHR の海水系) も復旧していれば、冷温停止できる。RHR の復旧に更に時間がかかる場合は、2 ケースに分かれる。
- 4) ベントをしない場合は、高圧電源復帰後、PCV スプレー、または、SR 弁を開いて炉心減圧後に炉心スプレー (MUWC 系) で注水することになるが、いずれ PCV が冠水するので、これらが実行できる期間は 1-2 日が限界であり、それまでに RHR を復旧させなければならない。
- 5) ベントをした場合は、ベントで蒸気を排出することができる。即ち、まず SR 弁を開いて炉心減圧を計ると共に、ベントを実施する。その後、炉心スプレー (MUWC 系) または DDFP (ディーゼル駆動消火ポンプ) や消防車で注水することにより、1 週間以上は炉心の冷却が可能である。その間に RHR を復旧させ、冷温停止に移行することになる。
- 6) 上記 2 項の高圧電源復帰と安全系の起動が遅れる場合は、ベントを実行し、DDFP や消防車で注水すれば 1 週間以上は耐えられるので、その間に RHR を復旧させ、冷温停止に移行することになる。
- 7) RCIC および HPCI 等は被水しても (水をかぶっても) 作動する可能性が高いが、水密化が妥当と考えられる (後述)。

以上のまとめを図 2-16 に示す。直流電源の復帰がクリティカル・パスであるが、それ以降は、幾つかの選択肢があり、時間的にも余裕がある。

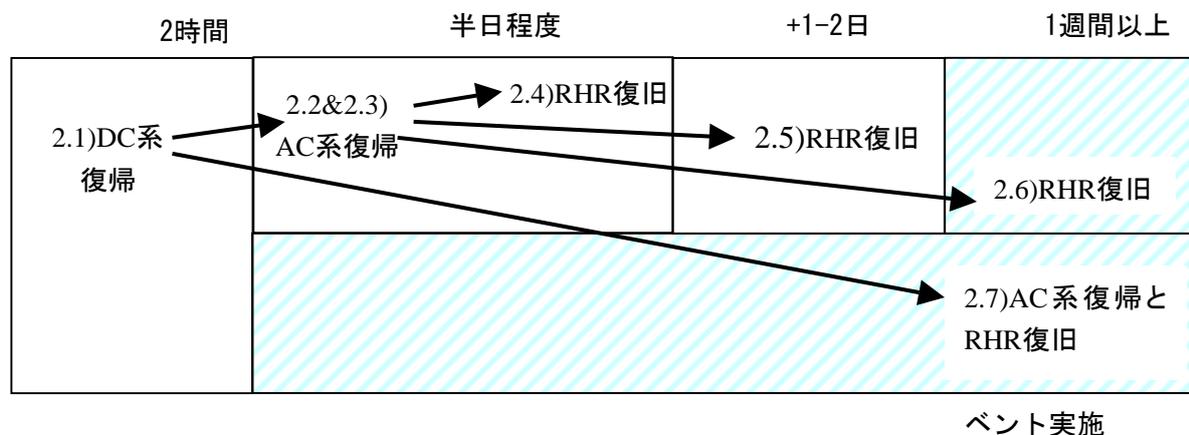


図 2-16. 事故後の対応手順案（数字は本章の節番号）

従って、以下の地震・津波対策を用意しておけば、福島原発事故は回避できたと考えられる。また、今回の対策には安全審査は不要で、殆どは運転中の対策工事も可能であり、1～2年で完了できると考えられる。

- ①十分な容量と個数の 125V バッテリーと 250V バッテリー
- ②高圧電源車
- ③水中ポンプ(RHRS 代替用)
- ④全交流電源喪失(SBO)、直流電源喪失、海水ポンプモーター喪失を想定した訓練

上述のように、IC (RCIC)、HPCI による高圧冷却が限界まで来たとき、何らかの理由で RHR 稼働の緊急対応までに時間がかかる場合も想定しなければならない。この場合は SR 弁を開いて減圧後、外部からディーゼル駆動消火ポンプ(DDFP)や消防車で注水、または格納容器スプレー(CCS)使用やベント実施で時間を稼ぐことが考えられる。この外部注水による冷却は、水源がある限り何日でも継続できる。

また、今回の津波では、2号機と3号機の RCIC は作動していた。付属図 A1 に示すように、原子炉建屋の地下階なので、水が入ってきた可能性があるが、独立した部屋だったので、浸水は免れたと考えられる。従って、水密化は必須ではないが、今回の対策を確実に実施するためには採用するのが妥当である。具体的には、シール等による入口扉の防水工事、または水密扉への交換等で十分である。更に、万一、水が侵入しても大丈夫なように、電気系統を防水ケースに入れる等の対策も考えられる。

従って、以上の対策案を確実に実施して冷温停止に到達するには、以下の準備も必要である。

- ⑤RCIC と HPCI の水密化
- ⑥1号機については、IC の PCV 内交流駆動弁用の可搬式交流発電機
- ⑦ベント用 AO 弁駆動用圧縮空気が無くなった時のための小型コンプレッサー
- ⑧消防車

以上のまとめとして、考えられる延命手段をフロー図に書き込むと図 2-17 のようになる。図は福島 1号機の例であり、福島 2～5号機の場合は、ICをRCICと、SHCをRHRと読みかえれば良い。

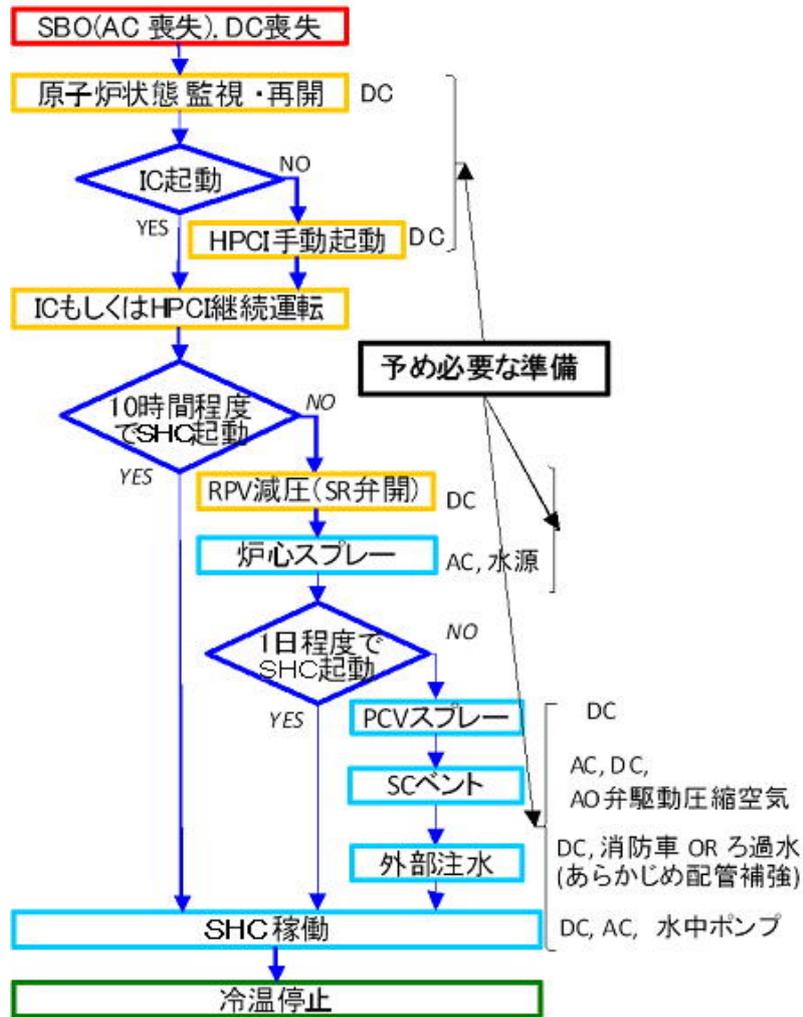


図 2-17. 冷温停止するための準備と手順（福島 1号機の例）

そのほか、共用プール建屋 1 階の DG 本体は無事だったが、共用プール建屋地下の直流電源と配電盤とが水没し、DG が使用できなかった。従って、これらの部屋の水密化をするか、地上階へ移設しておけば、DG は空冷式だったので、1/2/3/4 号機とも（原子炉側の受電状況にもよるが）一定の AC/DC 電力を供給できた可能性がある。これらの工事の実施は比較的容易であり、本稿での対策案と組み合わせることにより、津波対策の効果を高められると考えられる。

なお、津波による漂流物の危険性については、防波堤があるので、巨大な船が衝突することはないとしても、小型船舶・自動車・小型タンク・小屋などの漂流は想定される。しかし、今回の検討では  
 ①タービン建屋は防衛しない（壁が薄く防衛できない）。  
 ②原子炉建屋は壁が厚いので防衛できる。また、1Fサイトは海側にタービン建屋がある。  
 ③海水ポンプは浸水して稼働できないことは織り込み済み。  
 としており、漂流物に対しても防衛できると考えられる。

どこまで備えるかは、地震、津波、SBO、直流電源喪失後対応の成功確率等を計算する必要がある。また、この対応は福島第一発電所に限定された考察であり、現在再稼働を待っている他の原発でも、これだけの準備をすれば大丈夫というものでもない。他の原発では今回の福島事故に学び、津波に対する防護壁を準備して終わるのではなく、どんな防護壁であれ、それを乗り越えて津波がやってきたときに対応できる準備があるかどうか、評価することが必要であろう。

## 最後に)

第1章、第2章の結論を纏めると、

- ①福島原発において、少なくとも2~3年前、早ければ約10年前に、巨大地震に伴う巨大津波を予測する資料が存在していた。
- ②巨大津波が事前に予測していた場合は、交流電源、直流電源、最終排熱系の3つが同時に喪失することは自明で、その対策は、上記の期間内で比較的容易に実施できるものである。

「今まで起きたことがない事故は考えなくても良い」という思想は、近代化・高度化された産業システムにおいては許されない。特に被害が甚大となる原子力施設では、今まで起きていなくても、合理的に予測される事故に防衛しなければならない。

欧米の安全工学においては、安全文化が最重要目標とされているが「安全文化とは用心深さである」というのが共通認識である[9][10]。「組織と個人が用心深い」のであれば、今まで起きていない地震・津波についても考慮すべきという推本などの3件に対応すべきであったし、起きたことが分かっている貞観津波にもとづいた津波予測にも対応すべきであった。1986年のチェルノブイリ事故後、原子力関係者は安全文化を唱えてきたが、福島原発事故が起きた以上、不十分であったことは明らかである。従って、関係者は、今回の失敗を真摯に反省し、今後は、組織と個人が用心深いことを目標としなければならない。

## 第2章での引用文献：

- [1] 日本原子力学会「原子炉崩壊熱とその推奨値」1989年。  
なお、平均的に2年運転のウラン燃料を対象とし、原子炉停止後の崩壊熱を計算した。
- [2] General Electric, “Boiling Water Reactor GE BWR/4 Technology Advanced Manual Chapter 6.0”  
PCV設計圧はTable 6.5-1に「Mark1:56psig、Mark2:45psig」とあるので、Mark1の値を採用した。
- [3] RHRループ構成図の出典：東京電力「東日本大震災における原子力発電所の影響と現在の状況について」([http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/pdf/f12np-gaiyou\\_1.pdf](http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/outline/pdf/f12np-gaiyou_1.pdf))
- [4] 東京電力「福島原子力事故調査報告書(中間報告)」2011年12月2日。  
URL:[http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11\\_j/images/111202c.pdf](http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_j/images/111202c.pdf)
- [5] 東京電力「3号機RCICの停止原因について」2015年5月20日
- [6] 水と蒸気の温度変化。出典：<http://www.ohnishi.co.jp/pdf/varioustopics/9.pdf>
- [7] PCV冠水の図。出典：2011年4月27日、共同通信社記事。
- [8] 原子力安全委員会「福島第二のヒートシンク復旧までに要した時間、復旧までに実施したこと」、2011年/12月13日。
- [9] ナンシー・G・レブソン(原著)「セーフウェア 安全・安心なシステムとソフトウェアを目指して」翔泳社、2009年
- [10] ジェームズ・リーズン(原著)「組織事故とレジリエンス 人間は事故を起こすのか、危機を救うのか」日科技連出版社、2010年

**付録1) 非常用ディーゼル発電機 (DG) と蓄電池の設置場所 [A01]**

DG 設置場所 : (6号機 1階の空冷式 DG 以外は全滅。なお、5/6号機は定検中で、消費電力が少なかったため、DG1台で電力共有できた)

1号機	タービン建屋地下1階に2台
2号機	タービン建屋地下1階に1台、共用プール建屋1階に1台(空冷★)
3号機	タービン建屋地下1階に2台
4号機	タービン建屋地下1階に1台、共用プール建屋1階に1台(空冷★)
5号機	タービン建屋地下1階に2台
6号機	原子炉建屋地下1階に2台、D/G 建屋1階に1台(空冷)

★ : DG本体は無事だったが、共用プール建屋地下の直流電源と配電盤の水没で使用できなかった。従って、これらの部屋の水密化をしておけば、DGは空冷式だったので、1/2/3/4号機とも（原子炉側の受電状況にもよるが）一定のAC/DC電力を供給できた可能性がある。

直流電源(蓄電池)は、地下階に設置していた1・2・4号機は水没したが、中地下階に設置していた3・5・6号機では被水・水没を免れた。

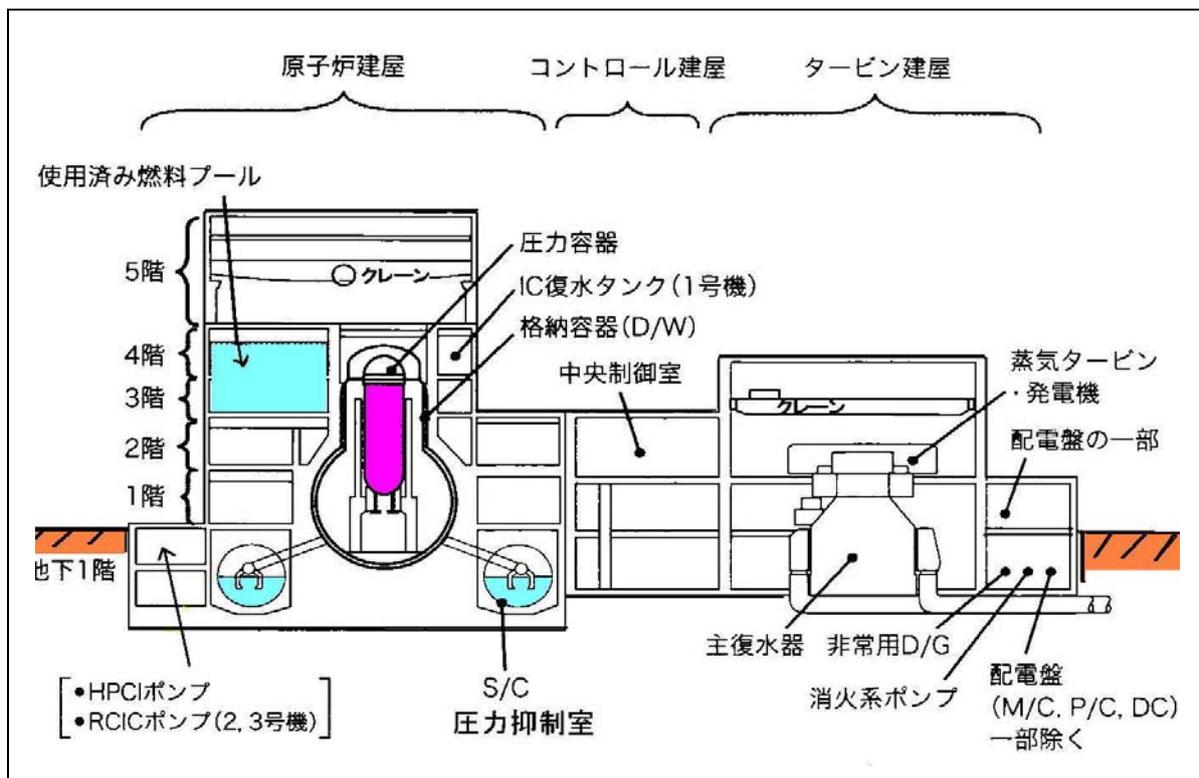


図 A1、福島原発の立面図 (文献[A02]の図を一部訂正)

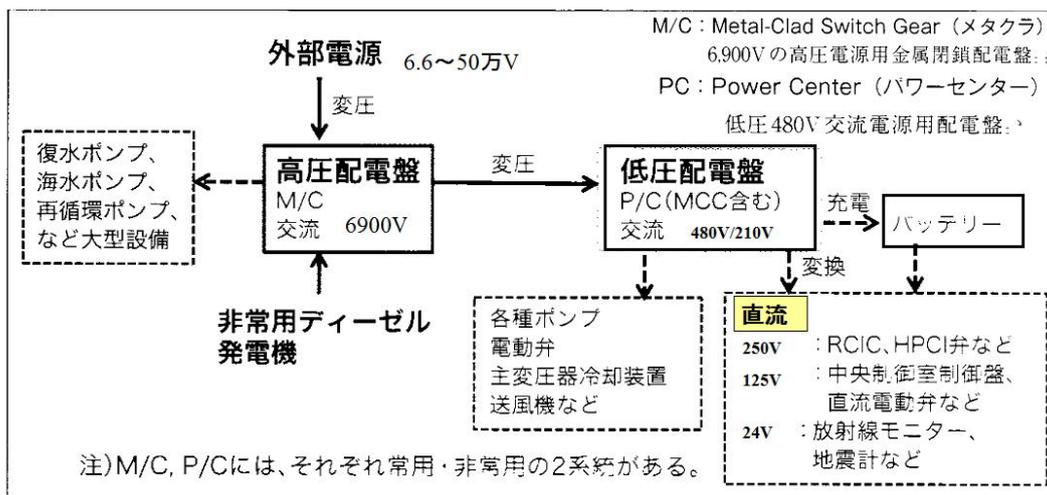


図 A2、福島原発の電源構成図 [A02]

### 付録2) 津波来襲時の原発状況予測

経産省傘下の原子力安全基盤機構が、原発に津波が来襲した場合の状況を予測した研究結果を2008年に公開しており「全電源喪失で炉心冷却が出来ないと、炉心が熔融し、大量の放射能が流出する」との結果を示していた[A03]。

具体的には、下記7項目が起きると予測し、福島原発事故では、⑦番を除く全てが起きた。

①取水塔/海水ポンプの損傷	⑤原子炉建屋への海水浸入
②屋外設置の起動変圧器の損傷	⑥タービン建屋への海水浸入
③軽油タンク等のDG燃料供給設備等の損傷	⑦引き波時のリスク
④全交流電源喪失の発生	

また、全電源喪失が起きた場合の対策も検討し、原子力安全基盤機構が2009年に公開していた[A04]。

### 付録3) 溢水勉強会における海水ポンプの議論

東電資料[A05]によれば「2004年のスマトラ沖津波によるインド原発での海水ポンプ浸水等を踏まえ、2006年に溢水勉強会が開催され、同年に保安院から『・・・非常用海水ポンプは機能喪失し炉心損傷となるため・・・具体的な対策を対応して欲しい』との要望を電事連が受けた」とある。つまり、海水ポンプが停止すれば、原子炉からの最終的な排熱が不可能になり、いずれ炉心溶融事故に至ることは関係者には自明であった。

また、多くの非常用ディーゼル発電機(DG)は海水で冷却されており、海水冷却が出来ない場合はDGも稼働不可能になり、更に地震時には外部電源も使用不可能になる可能性が高く、SBO(Station Blackout: 全交流電源喪失事故)になる。実際、福島原発事故では、変電所と原発受電設備が地震で機能を喪失し、外部電源も喪失した。

### 付録4: B5b(航空機テロ対策)の件

2001年9月11日に米国で航空機テロが発生したことを受けて、2002年に、米国・原子力規制委員会(NRC)は原発テロへ対応するよう行政命令を出した。B5bとは、この命令の要求事項をさしている[A06]。B5b自体は、2015年現在も非公開である。

しかし、上記の行政命令で「全米の約100基の原発に対し、20日以内の対応計画提出を命令した」ことは公開されており、各電力の対応状況は調査すれば把握できたとと思われる。また、上記命令に

「9.11 航空機テロがあったことに鑑み、原発へのテロ攻撃に対し、強化・準備すること」と明記されており、原発の専門家なら、要求項目 B5b 自体が不明でも、対応策は立てられたであろう。上記の行政命令を受けて、米国の全電力事業者は 2006 年に対応指針を提出し、その内容が 3.11 以降に開示された[A07]。なお、この対応指針は、2006 年の NRC レター[A08]に引用されており、その存在自体は 2006 年には知りえたと思われる。

B5b は[AC 電源喪失・DC 電源喪失・冷却系損傷]を想定した要求なので、上記の対応指針を見れば、この要求を満たす解答が分かるが、本稿で検討した津波対策のうちの[AC+DC 電源喪失]とほぼ同等である。下表に、B5b に対する BWR での対策を示す。

ただし、B5bは原子炉建屋への航空機衝突を想定しており、海水系の損傷は想定していない模様だが、本稿での検討によれば、海水系の復旧には最長で1週間程度の余裕がある。

**B5b に対する BWR での対策：**

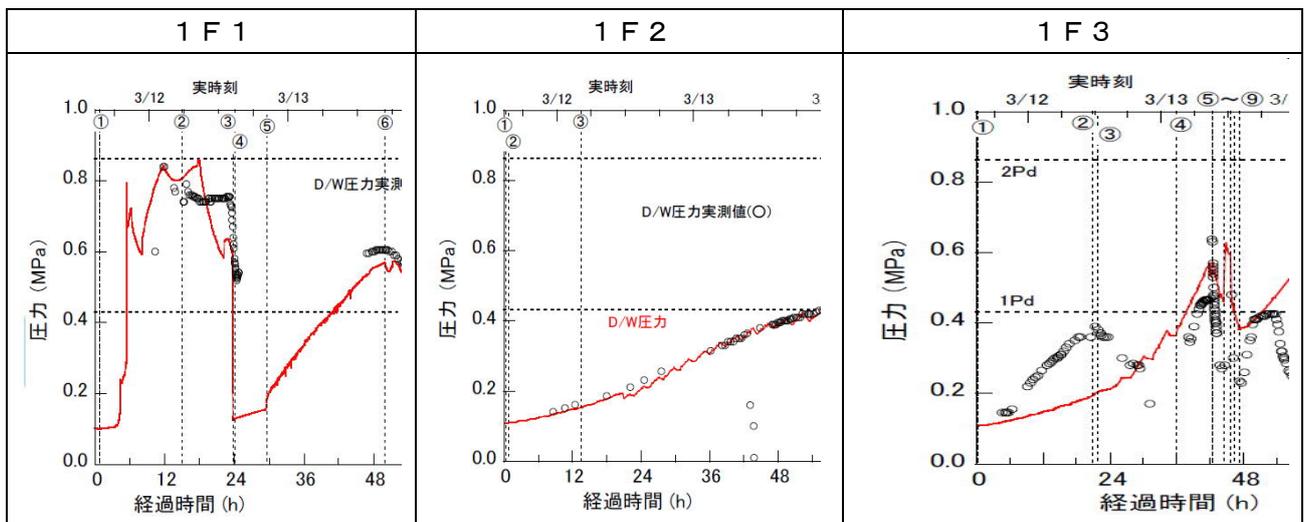
①RCIC または IC の AC/DC 電源無しでの手動操作化	⑥復水貯蔵タンク CST への水補給
②RPV 減圧のための DC 電源準備	⑦制御棒駆動系水量の最大化
③移動式ポンプによる注水のための DC 電源準備	⑧原子炉水浄化系 RWCU の隔離手順
④給水と凝縮の利用	⑨格納容器ベントの手動操作化
⑤復水器ホットウェルへの水補給	⑩ドライウェルへの注水移動式スプレー

**付録 5) 温度計算の検証**

前記 2.2 節の単純な計算からすると、PCV 圧力は 18 時間までは上昇しないはずである。しかし、実際の事故時の PCV ドライウェル (DW) 圧力データは下記の通りである[A09]。

特に福島 3 号機は事故後 6 時間の時点で圧力が上昇し始めている。また、実線 (赤線) は、保安院の解析値と思われるが、これらのデータからすると、SC に吹き込まれた原子炉からの蒸気は、SC 水で完全に凝縮するのではなく、一部分は SC の気相部に抜けて、PCV 圧力を上昇させたと推測される (見直した計算結果を次頁に示す)。

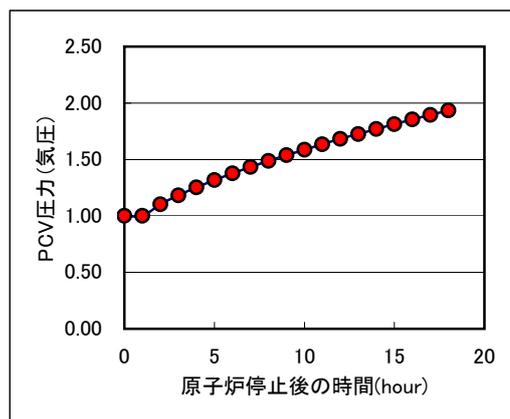
一方、福島 2 号機は、48 時間目にやっと設計圧 (0.4Mpa) に達しているが、この理由は、SC 外側のトーラス室に津波による海水が浸入し、SC からの除熱に寄与したため、と推測されている[A10]。



一般に、SC での凝縮効果は 99.9%とされているので、蒸気の 0.1%が SC の気相部に抜けて、PCV 圧力を上昇させた、と仮定する。

そうすると、右図のように、19 時間で+1 気圧、上昇する結果となり、上記の福島 3 号機の解析結果（赤線）と合致する。

なお、実測値は解析値よりも更に急激に増加しているが、SC 内での温度不均一があるため、と推測されている [A11]。



#### 付録における引用文献：

- [A01] 中部電力資料「東北地方太平洋沖地震を踏まえた浜岡原子力発電所の対応について」2011 年 4 月 6 日。
- [A02] 淵上正朗,笠原直人,畑村洋太郎「福島原発で何が起こったか」日刊工業新聞社、2012 年。
- [A03] 原子力安全基盤機構「地震に係る確率論的安全評価手法の改良」JNES/SAE08-006、2008 年  
URL: <http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/atom-library/seika/000010427.pdf>
- [A04] 原子力安全基盤機構「改良型軽水炉のシビアアクシデント対策に係る検討」、JNES/SAE09-022、2009 年  
<https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/atom-library/seika/000010529.pdf>
- [A05] 東京電力「溢水勉強会とそれを踏まえた対応状況等について」及び「東京電力からのお知らせ」（いずれも 2012 年 5 月 16 日）
- [A06] US-NRC 「Order for Interim Safeguards and Security Compensatory Measures」2002年2月25日(非公開)
- [A07] NEI(Nuclear Energy Institute) 「NEI 06-12, Revision 2, B.5.b Phase 2&3 Submittal Guideline (B5b 対応指針)」2006 年 12 月発行。
- [A08] NRC命令「Order for Licenses for Operating Power Reactors」2006年6月20日  
「火災・爆発による広域での設備機能喪失への対応」を要求している。
- [A09] 原子力安全保安院、2011 年 6 月 6 日資料
- [A10] 東電資料「福島第一原子力発電所事故の概要」2012 年  
URL: <http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~soken.editorial/sokendenshi/vol13/nbp2012/8-8-P2-KM-S.pdf>
- [A11] 原子力安全基盤機構「圧力抑制室保有水の温度成層化による原子炉格納容器圧力等への影響等の検討」JNES-2012。2012 年。