

福島 1 号機の非常用復水器の作動状況について (IC は作動していたのか？炉心熔融は何時おきた？) Rev1

2016/7/2、吉岡律夫

1) はじめに

福島 1 号機の初期の事故進展に関して、政府事故調査報告書[1]とその解説書[2]は、非常用復水器 (IC) は地震発生後から津波来襲までは不連続的に作動していた、津波来襲後は殆ど停止していた、IC が殆ど役立たなかったのが炉心熔融した、吉田所長は IC 不作動に気付くべきであった、と指摘しています。これらの時間的経緯について、検討しました。

2) 結論

地震発生(3月11日 14:46)から津波来襲による電源喪失(15:37)まで、IC はほぼ 100%の能力で冷却していた。

津波来襲 (15:37) から炉心露出 (17:50) まで、IC は約 40%の能力で冷却していた。

炉心露出 (17:50) 後の水素等の発生により、IC は冷却能力を喪失した。18:25 に IC 弁を閉じたが、事故進展には影響しなかった。

17:50 頃に炉心露出し、更に水位は低下して行った。

その後、燃料(ウラン)は下部の滞留水に落下して若干冷却されていたが、完全に空焚きとなった 21:50 頃に炉心熔融を始めた。

20:50 にディーゼル駆動消火ポンプ (DDFP) を起動し、IC タンクへ給水したが、手遅れだった。

21:30 に IC を再作動させたが、炉心熔融後で手遅れだった。

少なくとも 3 月 24 日まで弁は開いていた。但し、開度は不明。

もし津波来襲前の最後の IC 起動が 10 秒早ければ、炉心熔融は起きず、ベントも不要であった。これが福島 1 号機を救う唯一の道であった。

3) 地震発生後から津波来襲まで

最初に、地震発生(3月11日 14:46)から津波来襲による電源喪失(15:37)までの約 50 分間における IC 挙動は下記と推測されます。

事実：

A 系は 14:52 に自動起動し、15:03 に手動停止し、その後 15:37 まで 3 度の起動・停止を繰り返す(後述 1)、B 系は 14:52 に自動起動し、15:03 に手動停止した、とされています。

14:46 ~ 15:37 までに A 系は 20 度から 100 度へ上昇した。

B 系は 20 度から 70 度へ上昇した。

ここで、津波対策報告書[3]に示した下記の換算式を用います。

1MWh の熱量で、8.6 トンの水が 0 度から 100 度へ上昇する

1MWh の熱量で、100 度の水 1.6 トンが蒸発する。(70 気圧の場合は 2.4 トン蒸発)

崩壊熱：

福島 1 号機 (1380MWt) について、日本原子力学会の崩壊熱推奨値を使用します。

スクラム後の 5 分目 = 33MW、15 分 = 26MW、25 分 = 23MW、35 分 = 21MW、45 分 = 19MW、

50 分間の平均値 = 24.4MW なので、50 分間の加熱量 = 20.3MWh です。

一方、IC タンク水の温度上昇から、吸熱量を計算します。ここで、IC タンク保有水量を 100 トン

と仮定します[2]。

A 系の吸熱量：100ton ÷ 8.6x0.8 = 9.3MWh

B 系の吸熱量：100ton ÷ 8.6x0.5 = 5.8MWh

合計 15.1MWh (崩壊熱量より 5.2MWh 少ない)

「津波来襲時点で丁度 100 度に到達し、蒸発が起きていない」と仮定すると、温度上昇だけでは 25% (5.2MWh 分) 足りません。しかし、A 系は津波来襲前に 100 度に到達し、その後、5.2MWh 分つまり 8.3 トン蒸発したとすれば、バランスします。

もう一つの可能性は、炉水が蒸発し、逃し安全弁 (SRV) からサプレッションプール (SC) へ流失したとすると、12.5 トンが流出し、炉水位は 0.9m 低下するはずですが、14:46 ~ 15:37 までの時間帯で、炉水位変動はあるものの、1m も低下したようには見えないので、この可能性は低いと考えます。

福島 1 号機の設置許可申請書によれば「IC は 1 系統のみで毎時 100 トンの蒸気を冷却できる」とあり、スクラム後の 5 分目の崩壊熱 (33MW) での蒸発量 (毎時 50 トン) の 2 倍を除熱する能力があります。つまり、運転時間が短くても、温度上昇値が示すように、崩壊熱を吸収する能力があった訳で、IC は地震発生後から津波来襲まで、ほぼ 100% の能力で冷却していたこととなります。

[1 : IC の起動停止] 出典 : [4]

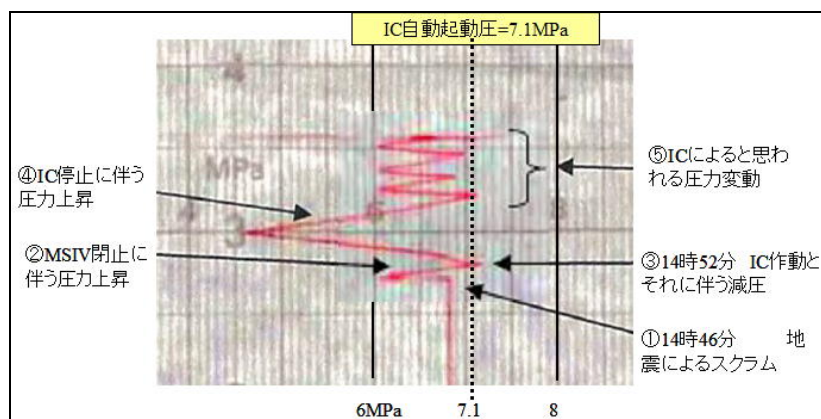
15:17 に IC 起動、15:19 に停止

15:23 に IC 起動、15:25 に停止

15:30 に IC 起動、15:32 に停止

以上から 6~7 分おきに 2 分間の運転を 3 回繰り返しています。しかし、これだと、最後に弁を閉じたことになっており、全電源喪失が起きても、弁は閉じたままです。後述のように、弁が開いた状態であるためには、最後に IC 弁が開いた状態でなければなりません。従って「4 回目の IC 起動を 15:36 ~ 15:37 に開始した時に津波が来て、**弁が開く途中で停止した**」と仮定します。但し「4 回目の IC 起動操作をした」という証言はありません。

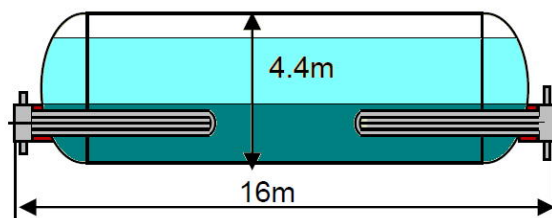
弁が開く途中で停止した状況が起きるもう一つの可能性は、3 回目の IC 停止後に、炉圧が上昇し、IC 自動起動の設定圧(7.1MPa)に達した、というものです。津波来襲前の炉圧の推移は下図で、7.1MPa) に達したようにも見えます。但し、IC が自動起動したとの記録はありません。



[2 : IC タンク保有水量]

福島 1 号機の設置許可申請書に「IC タンク有効保有水量 = 100 トン」とあり、これの定義が不明ですが、IC タンク体積は約 200m³ と大きく、蒸気管より上の体積（例えば 125m³）を 100% と設定し、その 80% つまり 100 トンを保有していた、と仮定しました。

しかし、タンク有効体積が 100m³ であり、その 80% つまり 80 トンを維持していた、という可能性も考えられますが、後述のように、IC タンク水の蒸発量は小さいので、事態の進展には影響しません。



4) 津波来襲 (15:37) から炉心露出 (17:50) まで

政府事故調査報告書は、津波来襲による電源喪失(15:37)の際に「IC はインターロックにより弁が閉じて、IC は殆ど機能を停止した」としています。炉心冷却が停止すると、炉内の水は蒸発し、燃料が水から露出し、最終的には炉心熔融します。この時間は崩壊熱により変わりますが、約 2 時間以下です。

しかし、津波来襲による交流電源喪失が、直流電源喪失より早いと、弁の閉鎖ができなくなります。政府事故調査報告書もこの可能性は否定せず「弁の開度は不明」としています。

従って、IC は作動していたと推測されますが、弁の開度は不明です。もしも、弁の開度が小さければ早期に炉心熔融に至るので、ここでは最初に作動していなかった、と仮定します。そして、炉水位の低下量を実測値と比較します。

幸いにも「16:42 に水位計が復活し、燃料の上端から 2.5m に水面があり、津波来襲前の 4.2m より低くなっていた。更に 16:56 に 1.9m に低下した」との記録があります。

水位計に一度蒸気が混入すると正しい水位が測定できなくなることは以前から知られていますが、ここまででは正常な冷却がなされており、水位は正しいと考えられます。但し、後述写真のように、水位計の目盛は 20cm 刻みなので、上記の水位は多少の読み取り誤差があるかも知れません。

圧力容器(RPV)内径 4.8m と、70 気圧の水密度 0.74ton/m³ を用いて、炉水位の低下を評価すると、下表・下図になります。IC 不動作を仮定すると、実測値より急激に減少していることから、IC がある程度、作動して、水位の低下を緩和したと考えられます。一方、IC が 100% 作動していれば、蒸発量の合計は炉水の蒸発量と同程度なので、IC タンク水はまだ残っており、炉水位は低下しないはずで

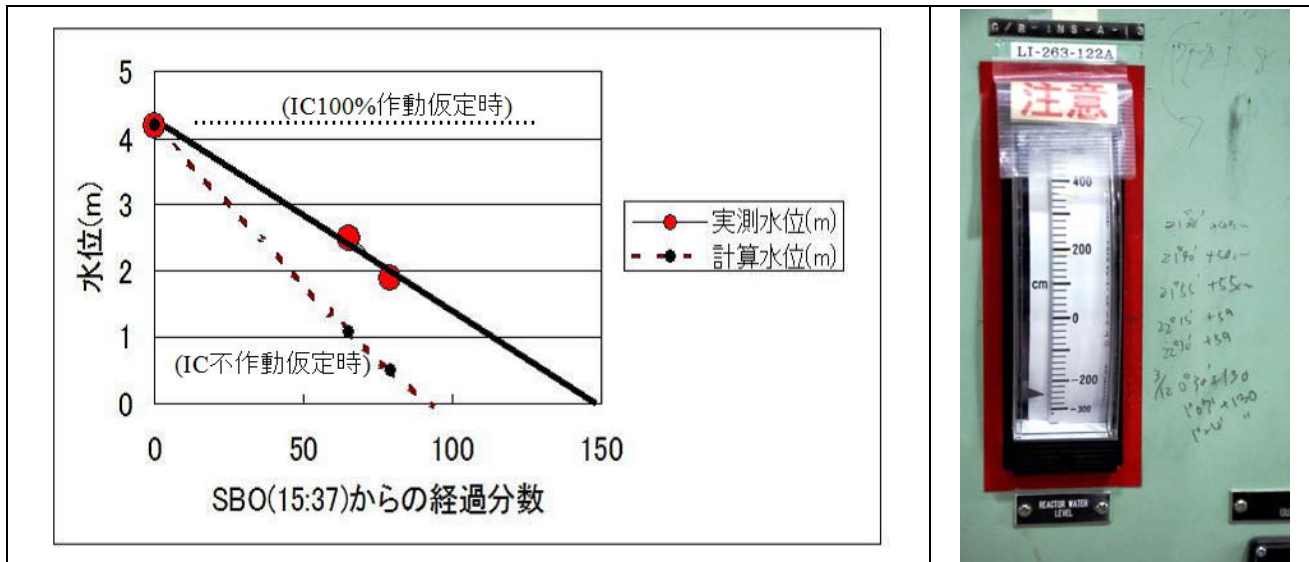
す。実測値は両者の中間なので、ある程度 IC は作動していた、ということを示唆しています。そこで、下図から 4 割程度、IC が作動していたと仮定します。そうすると、IC タンク水の蒸発量は 100% 作動であれば 37.9 トンなので、40% なら 15 トンとなります。偶然にも、IC タンク残存量の実測値から算出した消費量と同じです。

3 月 11 日 17:50 に原子炉入口扉で放射線が観測された事実から「この時点で炉心露出し、水の遮蔽効果が失われ、高放射線量となった」と政府事故調解説本は説明しています。

下図を直線状に外挿すると、炉心露出は 18:07 となりますが、水位が 2m 近辺のデータでは、勾配が大きく、もう少し早い時間に炉心露出した可能性が高いと考え、17::50 に炉心露出した、と仮定します。

炉心露出すると、燃料被覆管が高温になり、破損（例えばピンホール破損）し、中の希ガス（キセノン等の放射性ガス）が放出されます。上記の高放射線量は、この効果かも知れません。

また、高温蒸気中では被覆管（ジルコニウム）が酸化し、水蒸気が水素に分解されるので、水素発生により、ICの機能が失われます。元々、4割しか機能していない状態が更に悪化するので、これ以降はICの機能は完全に喪失したと考えられます。



時刻	経過時間(分)	実測水位(m)	計算水位(m)	崩壊熱(MW)	蒸発量(t)
15:37	0	4.2	4.2	18.4	0.0
16:42	65	2.5	1.1	13.8	41.9
16:44	「IC 方向からのモヤモヤが見えた」との証言あり				
16:56	79	1.9	0.5	13.4	7.6
17:10	93		0.0	13.0	7.4
17:50	原子炉建屋入口で高放射線量観測(炉心露出と仮定)				
18:07	150	(0:直線外挿)			

5) 炉心露出(17:50)後の状態

炉心露出すると、燃料被覆管が殆ど冷却されないため、被覆管温度は上昇し、被覆管は破損します。下図のように、被覆管温度が1200度に達すると、被覆管は数十秒で破損することが示されています。被覆管が破損すると、内部の放射性ガス（キセノンなど）が放出され、更に破損が進むと、中の燃料（ウラン）はRPV底部に落下していくと考えられます。

(図の出典：[5])

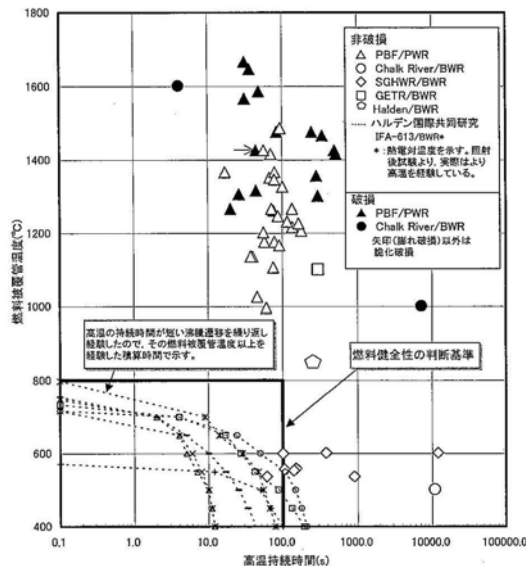


図2. 炉内ドライアウト試験結果

6) 炉心露出 (17:50) から炉心熔融 (21:50) まで

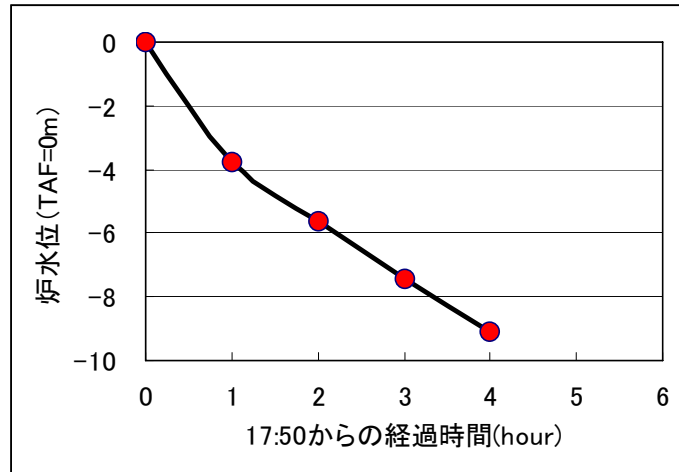
18時頃に「A系ICの2A弁と3A弁について、全閉を意味する緑ランプが点灯した」との証言がありますが、前述のようにIC弁の開操作途中であれば、赤ランプ(全開)とならないと考えられます。

18:18に弁を開操作し「少量の蒸気を見た。その後、直ぐに見えなくなった」との証言があり「ICタンク水が枯渇して機能しなくなったと考え、18:25にA系のICを停止した」との記録があります。前章で書いたように、ICは水素と希ガスの流入で、機能を失っていたことを、上の証言は裏付けています。

従って、炉心露出した17:50以降、更に水位は低下していきます。この間に、破損した燃料被覆管から燃料(ウラン)が細粒状となってRPV底部に落下し、滞留します。そして、約4時間後、つまり、21:50頃にはRPVは完全に空焚き状態になります。

炉心熔融の明確な定義はありませんが、ここまでを「炉心損傷」あるいは「炉心崩壊」とし、以降のウランが熔融する状態を「炉心熔融」と定義すると、21:50に炉心熔融が始まったこととなります。

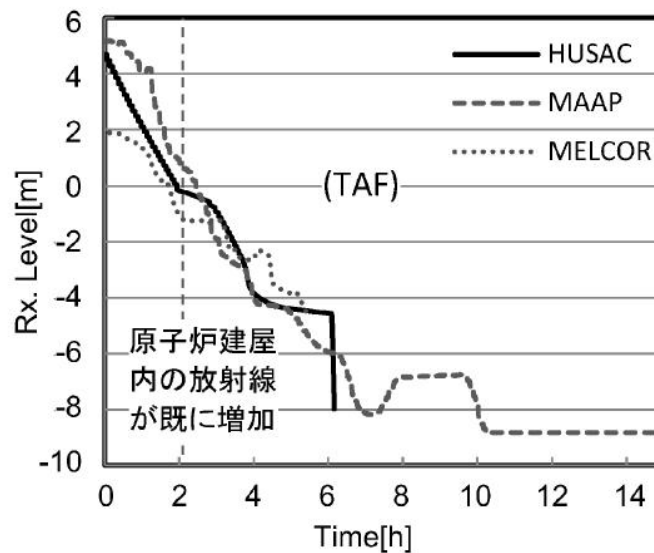
炉心が空焚きになると、燃料(ウラン)は、1~2時間で融点に達し、液体状となりますが、それ以前に、燃料に含まれる沃素やセシウムが揮発し、また、遮蔽となっていた水が完全に無くなったことにより、原子炉建屋が高放射線に曝されることになりました。また、液体状となった燃料(ウラン)はRPVを破損させ、RPV下部の格納容器(PCV)へ落下したと考えられます。



時刻	17:50 からの経過時間	計算水位(m)	14:46 からの経過時間	崩壊熱(MW)	計算蒸発量(t)	合計蒸発量(t)
17:50	0	0.0	3	12.1	0.0	0.0
18:50	1	-3.7	4	11.0	27.7	27.7
19:50	2	-5.6	5	10.2	25.4	53.2
20:50	3	-7.4	6	9.6	23.8	76.9
21:50	4	-9.1	7	9.1	22.4	99.4

(なお、-3.7m までは燃料領域なので、m 当たりの水量は約 1/2 とした)

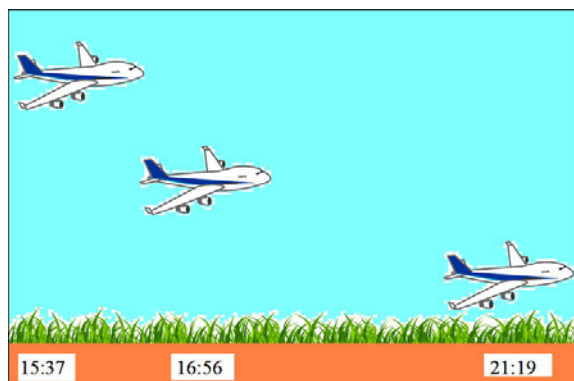
なお、水位の経過については、幾つかの論文[6 他]があり、本メモの結果と類似しています。



20:50 にディーゼル駆動消火ポンプ (DDFP) を起動し、IC タンクへ給水しましたが、手遅れでした。給水量は不明ですが、単純に考えれば、満水になるまで給水したのではないのでしょうか。なお、DDFP 起動は、IC タンクへの給水が目的だったという解説と、炉心への注水が目的だったという2説があります。

21:19 に水位計が復帰し、燃料上端より 0.2m の値を示しました。最後の測定は 16:56 の 1.9m でしたから「この間に炉心露出しなかった」と誤認した訳です。

吉田所長は、右図のように認識したのでしょう。



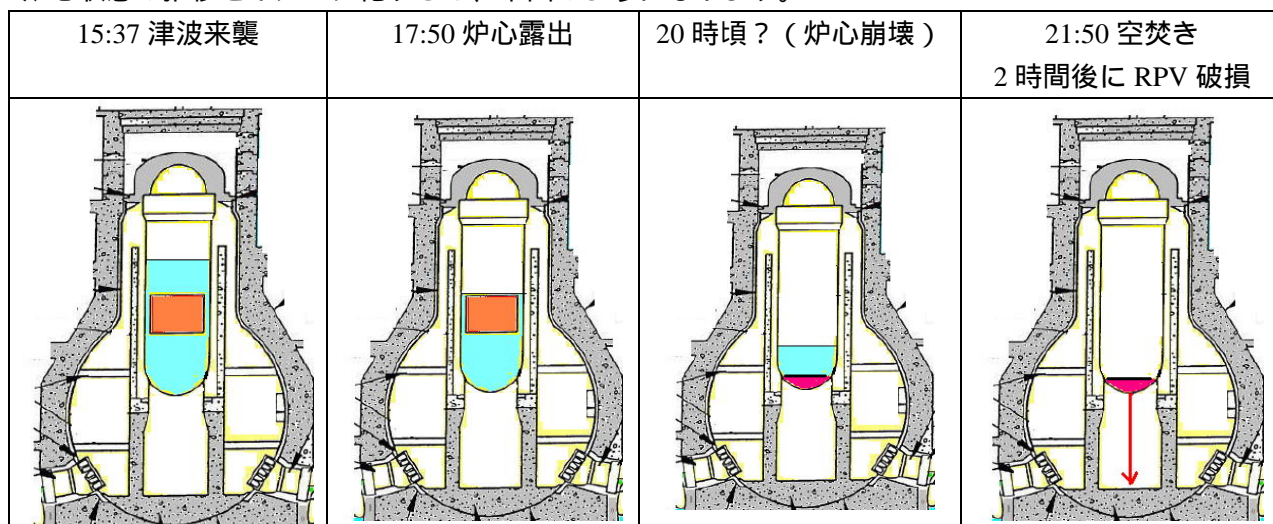
この 0.2m の値は水位計の誤作動によるものでした。しかし、後述のように、IC が 50% 開度なら炉心露出しないので、17:50 に墜落していたとは知る由もなく、この誤認を過ちというのは、下衆の後知恵でしょう。

21:30 に、IC を再作動し「IC から蒸気が出ているのを免震重要棟から確認した」という証言があります。水素は殆ど出てしまい、RPV 下部に僅かに残った滞留水から出た蒸気が、IC で冷却されたと考えられます。また、この時点では、炉圧は低下しており、IC への噴出圧力が低かったことも寄与していると思います。つまり、IC 弁は完全に開いていたが、流入蒸気が少なかった、という可能性もあります。

21:51 に、原子炉建屋内で毎時約 300 ミリシーベルトという非常に高い放射線量が観測され、原子炉建屋への入域が禁止されました。前述のように、この時点から炉心熔融が始まり、燃料(ウラン)は、1~2 時間で融点に達し、液体状となった燃料(ウラン)は RPV を破損させたはずです。

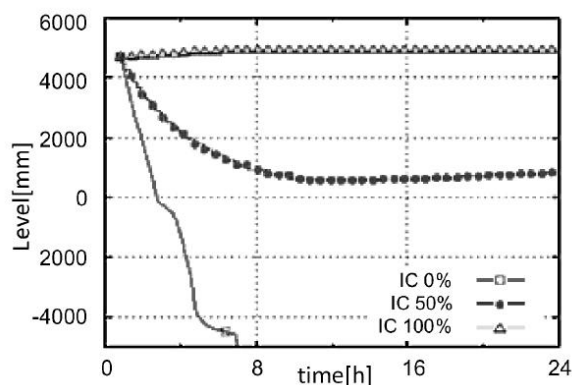
23:50 に仮設電源で格納容器(PCV)の圧力を測定し、6 気圧となっていたことから、この時点で RPV が破損していた、と考えられます。

炉心状態の推移をイメージ化すると、下図のようになります。



40% 開度がどういう意味を持つかについて、少し説明します。

北大論文[6]では「50%開度なら、炉水位は低下するものの、炉心熔融しなかった」という解析結果を載せています。



つまり 40%開度だったので、炉心熔融から水素爆発に至った訳ですが、50%開度なら、炉心熔融もせず、ベントも不要でした。そしてその後、冷温停止できる可能性が高かったという結果です。生死を分けたのが、40%と50%だったことになります。

なぜ 40%開度だったかは不明ですが「弁を開きかけた所で津波が来た」ということが考えられます。もしそうなら、10秒早く弁を操作していれば、生き延びたことになります。また、仮に IC 現場へ行けたとしても、IC の不十分な弁開度を知る手段はありません。従って、この 10秒が、福島 1号機を救う唯一の道でした。

結局は炉心熔融した訳なので、政府事故調分析の大きな流れが変わった訳ではありません。しかし、40%開度を採用することにより、津波来襲後の水位低下の推移、17:50の放射線検出、21:50の原子炉建屋の高放射線量、15トンの IC タンク水蒸発理由の可能性、の説明ができたことになります。

6) 21:30 以降の IC 状況

市井の元プラント技術者から「A系の IC 戻り水の温度が3月24日でも140度となっている。ICが作動していたのではないか？」との指摘がありました(次頁の図)。このデータが正しいとすると、弁が完全に閉まっておらず、若干の蒸気の流入で、3月11日からの13日間に、ICタンク水の蒸発が起きたのかも知れません。

この間の炉圧は数気圧なので、仮に8気圧とすれば飽和温度は約170度で、この炉心蒸気が流入していたとしか考えられません。そうでなければ、B系 IC のように、13日も経てば、蒸気側もタンク側も30度に戻ってしまうはずですが、従って、弁は開いており、ICは作動状態にあったと考えられます。また、東京電力資料[7]も、その可能性を書いています。

なお、ICタンク水の残量から逆算すると、蒸発量はICへの給水がなければゼロ、満水なら35トン程度と推測されます。

参考文献：

- [1] 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
- [2] 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-政府事故調技術解説」2012年
- [3] 吉岡律夫、淵上正朗、飯野謙次「福島原発における津波対策研究会・最終報告書」2016年
<http://www.shippai.org/shippai/html/index.php?name=news881>
- [4] 奥山俊宏「福島第一原発1号機の時系列、非常用復水器はなぜ誤認されたか」2016年
時系列などについて参照した。<http://judiciary.asahi.com/data/2016030600002.html>
- [5] 日本原子力学会「BWRにおける過渡的な沸騰遷移後の燃料健全性評価基準」2003年
- [6] 小林正英ほか「福島第一原子力発電所1号機の事故分析」2015年
https://www.jstage.jst.go.jp/article/taesj/14/1/14_J14.003/_pdf

[7] 東京電力「福島第一原子力発電所1号機非常用復水器の動作状況の評価について」2011年
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_111122_02-j.pdf

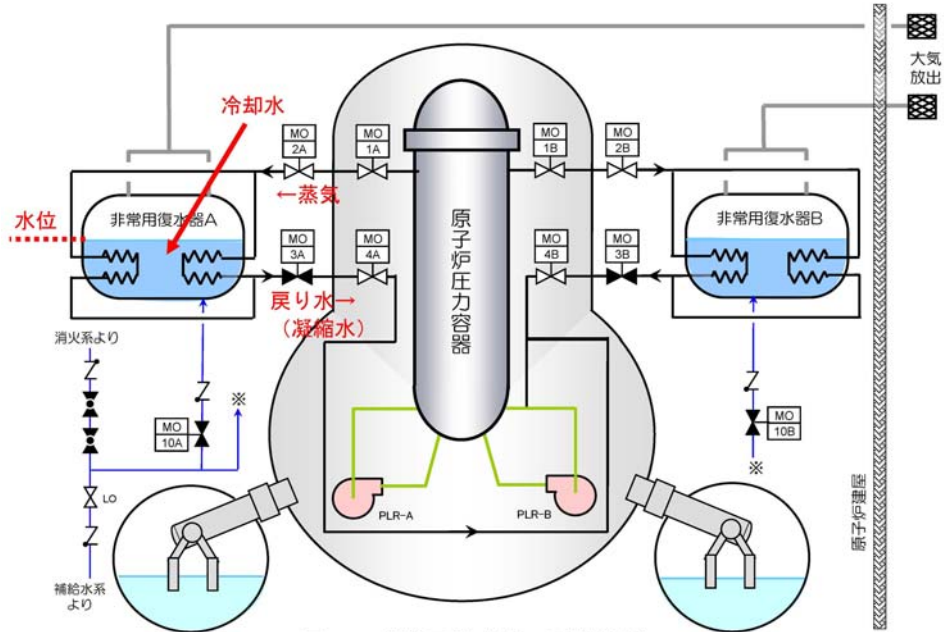


図1：非常用復水器の系統構成

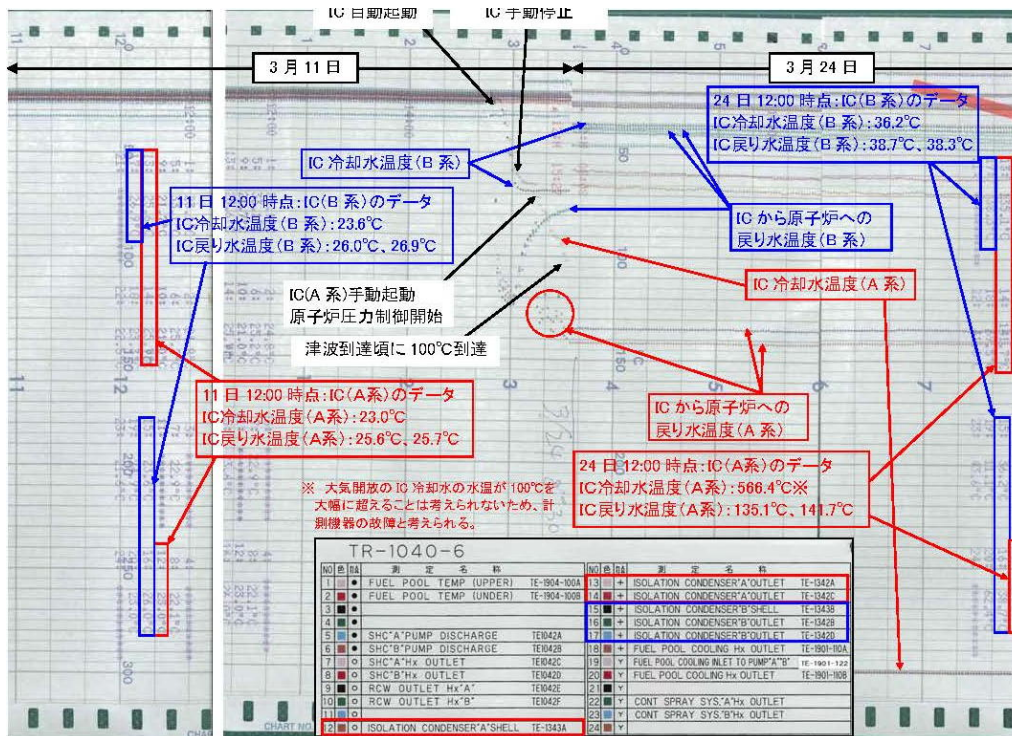


図2 IC冷却水の温度記録チャート(5月16日公表済)

図1,2の出典:[7]