

★地震直後・津波襲来前、「保安規定」を遵守しICを継続作動していれば‥
(=「冷やす」を最優先にしていれば)

【検証】早期の炉心露出・損傷
=“福島原発事故そのもの”を防げた！

以下、独自検証『鳴り砂№314 その3』の解説
<東電・学者からの具体的反論は大歓迎！>

参考資料 JNES(原子力安全基盤機構)

『福島第一原子力発電所1号機非常用復水器(IC)作動時の原子炉挙動
解析』 JNES-EV-2011-9011(2012.3改訂)

1 ICによる除熱量とタンク水の挙動

①自動起動後から、タンク水温が100°Cに到達するまでの「20分間」

②タンク水温が100°Cに到達してから、津波襲来までの「25分間」

★付記 <津波前IC継続作動の“副次的”効果>

2 スクラム後から津波襲来時までの崩壊熱による総発熱量

3 スクラム後から津波襲来時までの熱収支(崩壊熱 vs IC除熱)

① 「Wagnerの式」を用いた「圧力」と「水温」の換算

② 14:48:59から15:03:59までの水温変化(実際)と原子炉全体の熱容量

③ 15:03:59から15:36:59までのIC2系統継続作動による水温低下(推定)

4 津波襲来後の熱収支と、炉水位低下に対する津波前IC除熱の効果

① 津波後の炉水温の再上昇

② 炉水の蒸発とSRV作動による水位低下

(TAF到達=炉心露出開始時刻)

③ 津波前IC除熱冷却による炉心露出・損傷の大幅先延ばし

④ 定量的解析のまとめ

1 ICによる除熱量とタンク水の挙動

< * 以下、温度も温度差(変化)も、「K(ケルビン)」ではなく「°C」で表記>

①自動起動後から、タンク水温が100°Cに到達するまでの「20分間」

- ICタンク1個の総水量は「160t(160 × 10⁶g)」<47回資料2-1、2-2>
(IC起動初期は、ICによる除熱量は全てタンク水の温度上昇に)
- A系では、14:52以降の自動起動および3度の手動操作「計20分間」で、タンク水温「23.0°C」<49回資料2:5頁:3.11の12時測定値>から「ほぼ100°C」に<49回資料2:4頁、47回資料2-1:8頁>
- その間の移動熱量は、中学理科で習った「水量(熱容量) × 温度変化」より、「160 × 10⁶ × (100 - 23) ≒ 1.232 × 10¹⁰ cal」「4.184J/cal」で単位変換すると「5.155 × 10¹⁰J」

* 計算の妥当性:「160 tのタンク水の温度を50 °C分上昇させるために必要なエネルギー量は3.3 × 10¹⁰J」<49回資料2:25頁>より、「50 °C分」でなく「100-23=77°C」を上昇させるエネルギー量を比例計算すると、「5.1 × 10¹⁰J」となることから、適正。

- 100 °C、20 tの冷却水が蒸発するために必要なエネルギーは $4.5 \times 10^{10} J$
- 160 tのタンク水の温度を50 °C分上昇させるために必要なエネルギー量は $3.3 \times 10^{10} J$

非常用復水器(IC)の仕様

* IC1系統の伝熱容量(設置許可申請書記載の「**設計値**」)は「 $36.2 \times 10^6 \text{ kcal/h}$ 」<JNES・3頁>、秒換算すれば「 $10.0 \times 10^6 \text{ cal/s}$ 」で、上記20分間の「 $1.232 \times 10^{10} \text{ cal}$ 」より求めた「 $10.3 \times 10^6 \text{ cal/s}$ 」とも一致。

型式	タンク型
基数	2
蒸気流量	100.6 t/h
蒸気温度	286 °C
復水出口圧力	70.3 kg/cm ² g
復水出口温度	286 °C
伝熱容量	$36.2 \times 10^6 \text{ kcal/h}$
タンク有効保有水量	106 m ³

(設置許可申請書に記載の数値)

- そこで、まず「設計値」で検証すれば、14:52から**計20分間(1200秒)作動したA系**では、「 $10.0 \times 10^6 \text{ cal/s} \times 1200\text{s} = 12.0 \times 10^9 \text{ cal}$ 」の熱が移動して「160t」のタンク水を加熱するので、温度上昇は「 $12.0 \times 10^9 \div (160 \times 10^6) = 75^\circ\text{C}$ 」となり、事故前のタンク水温「 23.0°C 」を考慮すれば、20分作動後には「**ほぼ100°C**」となり、実際の測定値<47回資料2-1:8頁、49回資料2:4頁>と合致。
- 一方、**B系**でも、自動起動後の**11分間(14:52-15:03、660秒)**の作動で、温度上昇は「 $10.0 \times 10^6 \times 660 \div (160 \times 10^6) = 41.25^\circ\text{C}$ 」と求められ、事故前タンク水温「 23.6°C 」より、作動後は「**65°C**」となり、こちらも測定値「約70°C」<47回資料2-1:8頁>と概ね一致。

- 以上より、14:52に自動起動したIC2系統が、タンク水温が100°Cに達する15:12まで「設計値」で「20分間」作動し続けていたなら、「 $12.0 \times 10^9 \text{ cal} = 50.2 \times 10^9 \text{ J}$ 」の2倍、即ち「 $1.00 \times 10^{11} \text{ J}$ 」の熱が除去されていたと推測できる。【あ】

②タンク水温が100°Cに到達してから、津波襲来までの「25分間」

- 次に、タンク水温が100°Cに到達した15:12以降は、ICによる熱除去分は有効水量(熱交換部より上にある蒸発可能な水量)「106t」<47回資料2-2:1頁>のタンク水の蒸発に使われます。
- ここで、「100°C、20tの冷却水が蒸発するために必要なエネルギーは $4.5 \times 10^{10} \text{ J}$ 」<49回資料2-25頁>とされ、これは【理科年表】の「100°Cの水の蒸発熱 40.7 kJ/mol 」を、水「 18 g/mol 」で変換すれば、「 $40.7 \div 18 = 2.26 \text{ kJ/g} = 2.26 \times 10^3 \text{ J/g} = 540 \text{ cal/g}$ 」となり、水量20t($20.0 \times 10^6 \text{ g}$)の蒸発熱は「 $2.26 \times 10^3 \times 20.0 \times 10^6 = 4.52 \times 10^{10} \text{ J}$ 」と算出され、一致。

- 100 °C、20 tの冷却水が蒸発するために必要なエネルギーは $4.5 \times 10^{10} \text{ J}$
- 160 tのタンク水の温度を50 °C分上昇させるために必要なエネルギー量は $3.3 \times 10^{10} \text{ J}$

- そこで、15:12から津波襲来時15:37までの25分間(1500秒)の1系統の熱移動量を求めると、「 $10.0 \times 10^6 \text{cal/s} \times 1500\text{s} = 15.0 \times 10^9 \text{cal} = \underline{62.8 \times 10^9 \text{J}}$ 」となるので、蒸発するタンク水量は「 $62.8 \times 10^9 \div (2.26 \times 10^3) = 27.8 \times 10^6 \text{g} = \underline{27.8\text{t}}$ 」。これは有効水量「106t」以下なので、25分作動後もタンク水補給は不要。

タンク水枯渇の懸念なし！

- よって、IC2系統がタンク水を蒸発させながら25分間作動し続けたとすれば、「 $62.8 \times 10^9 \text{J}$ 」の2倍、「 $1.26 \times 10^{11} \text{J}$ 」が原子炉内から除熱されたはず。【い】
- 【あ】および【い】より、14:52に自動起動したIC2系統が津波襲来時15:37まで「45分間」作動し続けていたなら、設計値で「 $1.00 \times 10^{11} \text{J}$ 」+「 $1.26 \times 10^{11} \text{J}$ 」=「 $2.26 \times 10^{11} \text{J}$ 」の熱が原子炉内から除去されていたと推定される(ICタンク水での考察)。

次頁の★付記 <津波前IC継続作動の“副次的”効果> 参照

【★付記】14:52頃に自動起動したIC（2系統）を継続作動させていれば、タンク水温は「津波前（15:12頃）に100°C」に！ ⇒それ以降は『ブタの鼻』から蒸気噴出+轟音！（誰でもIC作動を認識可能）
⇒15:37津波後の「IC停止」も一目瞭然（吉田所長も認識可能）！

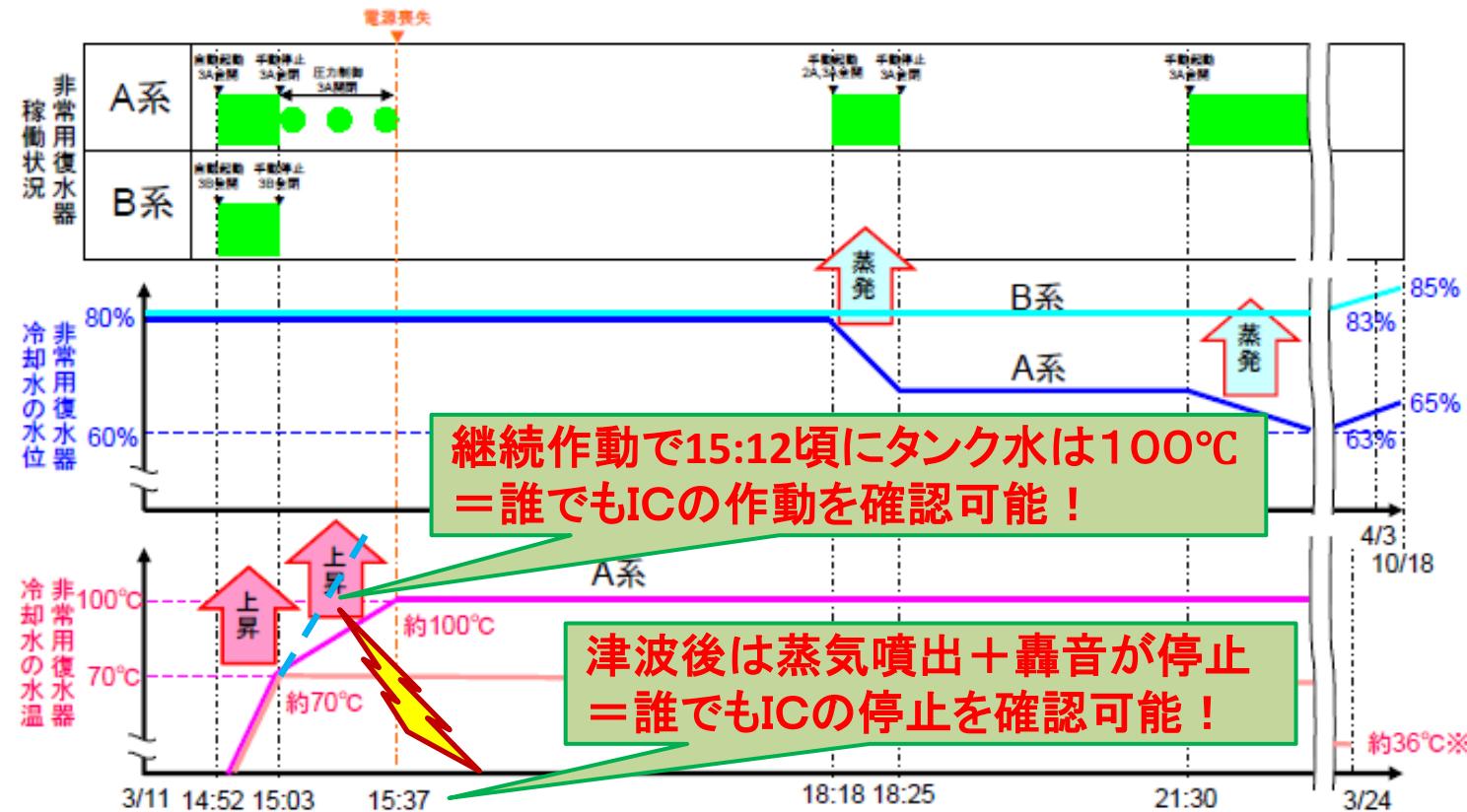


図3 ICの冷却水水位、水温と稼働状況の関係（イメージ）

◆東電「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」(H23.11.22)

2 スクラム後から津波襲来時までの崩壊熱による総発熱量

Heat-Transfer Control Lab. Report No. 1, Ver. 4 (HTC Rep. 1.4 2011/04/13)

原子炉内が崩壊熱のみによって加熱されている場合に
必要な水の投入量の推定

<公表データに基づく福島第一原発の燃料データのまとめ>

東北大学 流体科学研究所 圓山・小宮研究室

- 原子炉停止「t秒後」の崩壊熱P(t) [W]の式を積分し、さらに、原子炉停止(スクラム)時「 $t_1 = 0$ 」から「 t_2 経過後」までの総発熱量「 $Q(t_2)$ 」を求める式に変換して、

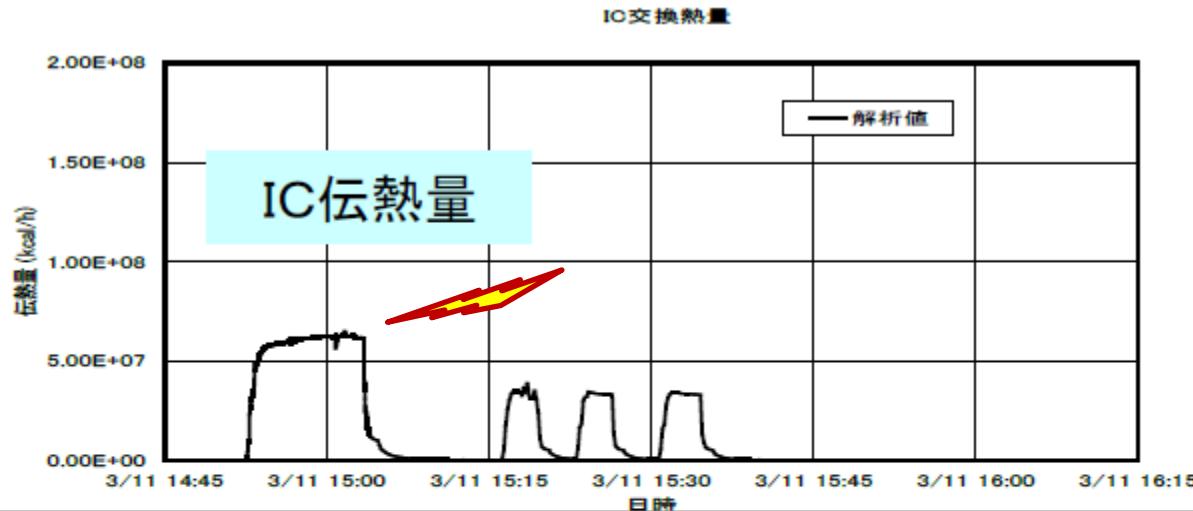
★ $Q(t_2) = 0.0825P_0[t_2^{0.8} - (ts + t_2)^{0.8} + ts^{0.8}]$ を使用(エクセル計算)
<* 同論文では [] 内の後ろ2項の正負が逆。単純ミス>

1号機は「 P_0 」(通常運転時の原子炉熱出力)が「 $1380\text{MW} = 1.38 \times 10^9 \text{W}$ 」、「 ts 」(燃料棒使用時間)が「1.74年」とされ、1年を365.25日とすると「54,910,224秒」。

3 スクラム後から津波襲来時までの熱収支 (崩壊熱 vs IC除熱)

IC伝熱量は、実条件を反映させた解析で得られた、2系統起動時に「 6.3×10^7 kcal/h = 17.5×10^6 cal/s」という「JNES解析値」を用いる。

また、1では「ICタンク水の挙動(水温上昇・蒸発)」に注目したが、ここからは炉心損傷に係る「原子炉水の挙動(同)」に注目。



- 2台のIC起動時に実測値は、約7.2MPa → 約4.6MPa[gage]、約2.6 MPa低下、解析値もほぼ同様の変化を示した。
- 伝熱容量は2台のIC起動時に約 6.3×10^7 kcal/h、1台のIC起動時に約 3.3×10^7 kcal/hとの解析結果となった。

その際の蒸気流量はそれぞれ約110t/h及び約60t/hであり、設置許可申請書記載値(100.6t/h/台)とは一致していないが、これは「付録3」に示すように、作動時の条件が設定条件とは異なっていることによるものと考えられる。

① 「Wagnerの式」を用いた「圧力」と「水温」の換算

IC 熱収支計算のため、実測値の「A系のIC入口圧力[MPa]」【東電追加公表データ(1分間隔)「f1_6_Katogenshotsuika1-05.csv」】を原子炉(主蒸気)圧力と見做し、「原子炉水温変化」と「熱移動量」を推計します(「時刻表記」は同データに準拠)。

その際の「圧力」と「水温」の換算には、JNES論文「ICの仕様」記載の「蒸気温度286°C」と「復水出口圧力70.3kg/cm²」が対応すると見做して、試算で「285°C」に対し「6.92MPa(=70.6kg/cm²)」となった、温度t[°C]における飽和水蒸気圧e(t) [hPa]の関係式『Wagnerの式』を用いる(以前は『tetensの式』を使用)。

«式は、 $e(t) = P_c \times \text{Exp}\{(A \times X + B \times X^{1.5} + C \times X^3 + D \times X^6) / (1-X)\}$ [hPa] というもの。

ここで、式中の各値は【表】のとおりで、「t」は「X」中に含まれる。また、実際には、圧力データから「t」を算出するのではなく(筆者は逆関数にできず)、「t」を代入(エクセル計算)し、圧力データに近い値を与えた「t」を“漸近的に=力づくで”求めた。»

Pc	221200.0	hPa
Tc	647.3	K
X	1-(t+273.15)/Tc	
A	-7.76451	
B	1.45838	
C	-2.77580	
D	-1.23303	

- 14:46地震スクラムから15:37津波襲来時まで「 $t_2 = 51\text{分間} = 3060\text{秒間}$ 」の崩壊熱総発熱量は、「Q(51分間) = $0.621 \times 10^{11}\text{J}$ 」。
- この総発熱量は、1【あ】+【い】の除熱量(設計値)「 $2.26 \times 10^{11}\text{J}$ 」よりも、また、JNES解析値を用いた除熱量「 $17.5 \times 10^6 \times 45 \times 60 \times 4.184 = 1.98 \times 10^{11}\text{J}$ 」(calをJに変換)よりも、「かなり小さい」。
- よって、自動起動後から津波襲来時まで(45分間)IC2系統が継続作動されていたら、「総発熱量」<<「除熱量」より、原子炉が‘かなり冷却’された(定性的表現ですが)のは明らか。
(★「津波襲来時の保有熱量(隔離後の原子炉一次冷却系全体)」
=「地震時の保有熱量 + 地震後の総発熱量 - ICによる除熱量」)
 <この部分が「負の値」>
- 以下、定量的に検証。

② 14:48:59から15:03:59までの水温変化(実際)と原子炉全体の熱容量

* 注:「崩壊熱による加熱」と「IC2系統作動による除熱冷却」が、「炉内の圧力・水温」にすぐに反映されるものとする(実際には時間差(タイムラグ)が生じるはず)。

- **水温変化**: 14:48:59「①6.2210MPa」に対応する水温は「277.910°C」で、(MSIV閉後の緩慢な圧力上昇14:52:59「7.1015MPa」後の)IC2系統自動起動(7.13MPa超 × 15秒)による除熱により低下した15:03:59手動停止時の圧力「②4.6415MPa」に対応する水温は「259.285°C」なので、15分間で差引「18.625°C」低下したことが分かる。
- その15分間の**崩壊熱**は「27.63GJ」で、14:52:59から15:03:59までのIC2系統による11分間の**除熱量**(JNES解析値)は「 $17.5 \times 10^6 \times 11 \times 60 \times 4.184 = 48.33GJ$ 」なので、「 $48.33 - 27.63 = 20.7GJ$ 」の除熱で「18.625°C」の水温低下が生じたことになる。
- すると、**原子炉全体(炉水+容器・配管等)の熱容量をXと置けば**、「 $X \times 18.625 = 20.7 \times 10^9 \div 4.184$ 」となり、「 $X = 2.66 \times 10^8$ 」と算出される。

③ 15:03:59から15:36:59までのIC2系統継続作動による水温低下(推定)

- 15:03:59に手動停止せず、15:36:59津波襲来時まで(23分間)IC2系統が継続作動したなら、崩壊熱発生量「34.45GJ」に対し、IC除熱量(JNES解析値)は「 $17.5 \times 10^6 \times 33 \times 60 \times 4.184 = 144.98\text{GJ}$ 」なので<* ICタンク水側で水温上昇・蒸発のいずれに転換されるかは、原子炉側には無関係>、「 $144.98 - 34.45 = 110.5\text{GJ}$ 」の除熱による水温低下tは、「 $X \times t = 110.5 \times 10^9 \div 4.184$ 」に上記Xを代入して $(2.66 \times 10^8 \times t = 110.5 \times 10^9 \div 4.184)$ 、「 $t = 99.3^\circ\text{C}$ 」と求められる。
- 従って、津波襲来の15:36:59には、②15:03:59の水温「259.285°C」から「99.3°C」低下した水温「約160°C」(圧力「0.61866MPa」)になると推定される【JNES解析図1Aの左下点線】。

* 時刻表記の関係で、IC作動は、ここでは14:52:59～15:03:59～15:36:59の「 $11 + 33 = 44\text{分間}$ 」となっており、1での14:52～15:37の「45分間」とは差が1分あるが、結果自体に大きな影響はない。

4 津波襲来後の熱収支と、 炉水位低下に対する津波前IC除熱の効果

① 津波後の炉水温の再上昇

IC2系統の継続作動により津波襲来時には水温は「約160°C」に低下するので、15:36:59津波・冷却手段喪失後の崩壊熱は、まず“炉水温の再上昇”に用いられる。

温度(=圧力)が上昇すれば、いずれSRV(バネ式の安全弁機能)が「7.64MPa(2個)」で作動する【東電最終報告・添付書類 参考1(2)】ため、同圧力に対応する「291.76°C」が水温上昇の上限となる。

従って、津波後にはまず「 $291.76 - 160 = 132^{\circ}\text{C}$ 」の水温上昇が生じ、それ以降はSRV自動作動により除熱・減圧されると考える。

- 温度「132°C」を上昇させる津波後の崩壊熱「Q GJ」は、前出の「 $X = 2.66 \times 10^8$ 」を用いて、「 $2.66 \times 10^8 \times 132 = Q \times 10^9 \div 4.184$ 」より「Q=146.9GJ」と求められ、その値に達するのは「スクラムから約247分後」の「18:54頃」と推定される【JNES解析図1A】

② 炉水の蒸発とSRV作動による水位低下(TAF到達=炉心露出開始時刻)

原子炉水の総量は、「地震後から(SRVが作動する)18:54頃まで増減なし」(ICの最大の長所)と考える。

水温が「291.76°C」に達した「18:54頃」以降の崩壊熱は、全て“炉水の蒸発”に用いられ、発生した蒸気はSRVによりS/Pへ放出され(蒸発量=放出量)、原子炉が除熱減圧(実際には、【JNES解析図1A、初期3時間】上の細かなジグザグ(圧力増減)のように、SRVが間欠的に開閉を繰り返し減圧)される一方、炉水は不可逆的に喪失すると考える。

ちなみに、実際の「SRV開閉」開始(推定)は「15:40頃」【JNES解析図初期3時間】なので、IC継続作動で「炉水喪失開始」を3時間以上先延ばしできる。

<計算の前提>

- 「1MWh=3.6GJ=860 × 10⁶cal」で「水2.4t=2.4 × 10⁶g」が蒸発するので【吉岡律夫「福島1号機の非常用復水器の作動状況についてRev1」2016.7.2】、(70気圧での)気化熱は「358.5cal/g」と算定。
- 圧力容器内径は4.8m【東電最終報告・添付書類 参考1(1)】なので、断面積($\pi r^2 = 3.14 \times 2.4^2 \approx 18.1 \text{m}^2$)を考慮すれば、単純に「水位1m」が「水量約18.1t(18.1 × 10⁶g)」に相当するため、その蒸発(気化)には「 $18.1 \times 10^6 \times 358.5 \times 4.184 = 27.15 \text{GJ/m}$ 」が必要。

② 炉水の蒸発とSRV作動による水位低下(TAF到達=炉心露出開始時刻)

<計算の前提:続き>

地震前の通常水位は、燃料上部「TAFから435cm」【2013.7.17東電公表「6. 過渡現象記録装置データ」7、8枚目等】。

- SRV作動(炉水減少)の結果、水位が「435cm=4.35m」低下してTAFに到達するには、「18:54頃(スクラム247分後)」以降の崩壊熱が「27.15 × 4.35 = 118.1GJ」になることが必要。
- その時刻は「22:12頃(スクラム445分後)」と算出され、これが炉心露出開始時刻となる。<SRV2個が「445-247=198分間(3.3時間)」間欠作動した時点>

<*これは【JNES解析図1A、初期3時間】の「17:20頃」の炉心露出時刻を4時間50分程度遅らせたことになる。>

なお、上記水位低下「435cm」に対応する蒸気放出量(水量)は「 $4.35 \times 18.1 = 78.7\text{t}$ 」で、「 $445 - 247 = 198\text{分間(3.3時間)}$ 」のSRV2個の間欠作動で生じるので、放出速度は「 $78.7 \div 3.3 = 23.9\text{t/h}$ 」となり、2個の容量(設計値)「約500t/h」【東電最終報告・添付書類 参考1(2)】に照らして、特に問題なし。

また、S/P水量は「 $1750\text{m}^3 = 1750 \times 10^6\text{g}$ 」【東電最終報告・添付書類 参考1(1)】なので、「118.1GJ」の熱移動による温度上昇Tは、「 $1750 \times 10^6 \times T = 118.1 \times 10^9 \div 4.184$ 」より「 $T = 16.1^\circ\text{C}$ 」でしかなく、これも特に問題なし。(水量増加も)

③ 津波前IC除熱冷却による炉心露出・損傷の大幅先延ばし

- JNESや東電の解析結果によれば【表3-4:JNES-RE-2011-0002「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」2011.9 (JNES炉心評価) *津波後IC不作動を仮定】、「炉心露出開始」は「16:40頃:地震発生後約2、3時間」、「炉心損傷開始」はその約1時間後の「18:00頃:地震発生後約3、4時間」。

表 3-4 事業者解析ケースでの解析結果取り纏め(1号機)

項目	解析結果		事業者が実施した解析結果
炉心露出開始時間	3月11日16:40頃	地震発生後約2時間	地震発生後約3時間
炉心損傷開始時間	3月11日18:00頃	地震発生後約3時間	地震発生後約4時間
原子炉圧力容器破損時間	3月11日20:00頃	地震発生後約5時間	地震発生後約15時間

- 津波前に“IC2系統の継続作動(除熱冷却)”がなされていたら、炉心露出開始は「22:12頃(地震スクラム後445分=7時間25分)」で、炉心損傷開始はさらに1時間後(上記JNES炉心評価に基づけば)の23時以降と、(【JNES解析:初期3時間】の炉心露出開始推定「17:20」と比較し)5~6時間も“大幅に先延ばし”できたはず!