

福島第一原発1号機の非常用復水器（IC）（補足改定版2） 津波がくる前の15:00頃にB系蒸気管破損か？

IC系温度データが強く示唆

- 東電は蒸気流量データを公開すべき —
- 規制委員会は再稼働審査の前に判断を示すべき —

2013. 7. 22(8. 31. 付録2 補足) 小山英之 (美浜の会)

福島第一原発1号機の非常用復水器（IC）系の配管が、津波がくる前に地震で破損したのではないかという疑いは、以前から国会事故調査委員会報告書等で提示されている。別に筆者は、3月11日17:50に原子炉建屋入り口付近に強い放射能が充満していたという事実等に注目して、IC蒸気管の破損を推定した[1]。

実はこれらと別に、東電の2011年11月22日付資料[2]では、2種類の温度データ（戻り水温度と冷却水温度）が公表されていて、3月11日15:00頃のICの異常な挙動を直接表現している。その異常性を具体的に示すのがこの小論の目的である。

ICにはA系とB系があり、圧力は両者で基本的に同等な振る舞いをしているが、温度や蒸気流量等はかなり異なる挙動をしている。B系では、15:00頃を境に伝熱管内温度や蒸気流量が急低下して蒸気管の破損を強く示唆している。A系もB系に追随するような動きをしているが、異なる面もある。圧力では見えない異常性が、温度データを忠実にたどれば自ずと浮き彫りになる。

破損が15:00頃（直前）に起こったとすれば、14:46の地震による蒸気管のひび割れが、温度の急上昇で熱膨張し拡大したせいだと考えられる。他方、今回の地震の耐震解析によれば、IC系配管には破壊しない上限の1/4程度の力しか加わっていない。つまり、現在の耐震解析評価では破損するはずのない配管が、実際に破損したことになる。そうなれば、現在の耐震解析は信頼を失い、耐震解析に依拠している原発の安全性評価が成り立たなくなる。シビアアクシデント評価よりも前段の安全評価が、根本から見直しを迫られることになる（解析の詳細は付録1、炉内平均温度推移の推定は付録2に記載）。

1. 東電のIC系温度データ

東電が公表した温度データは、図1でA系、B系それぞれの冷却水温度と戻り水温度である。原子炉压力容器内から出た高温蒸気は、第1弁(1A, 1B)を通り、ダルマ型の格納容器を貫いて第2弁(2A, 2B)を通り、2つに分かれて復水器に入る。ここまでの蒸気管である。

復水器の中では伝熱管を通る間に冷却水で冷却されて戻り水になり、復水器を出てから合流して第3弁(3A, 3B)を通り、再び格納容器を貫いて入り、第4弁

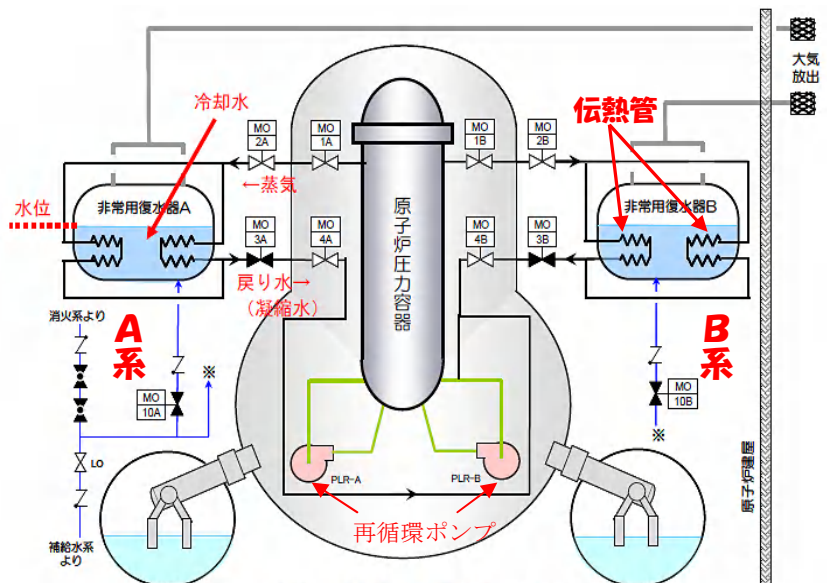


図1：非常用復水器の系統構成 [2]

(4A, 4B)を通してから、A系とB系が合流して、B系再循環ポンプの上流側に注がれる。

復水器から出た付近の2つの戻り水配管に温度計が設置されているらしく、戻り水温度には同時刻にA, Bそれぞれに2つのデータがある(ただし、停止時は1つ)。以下ではその平均値をもって戻り水温度とする。

弁はA系、B系それぞれに4つあるが、第3弁(3A, 3B)以外は通常は開いていて、第3弁で起動・停止操作を行っている(図1では第3弁だけ黒色)。それらの開閉時刻は、右図(図2)で示されている[3](赤い点線囲いは東電が付けたもの)。特に問題の閉じた時刻はA系が約15:03:20、B系が約15:03:40と読み取れる。

冷却水と戻り水の温度データは、東電資料[2]にある下左側図(図3)で示されている。これをミラー反転しさらに180度回転させると、通常の時間軸・温度軸をもつ下右側図(図4)になるので、それから数値を読み取ってグラフをつくることができる。

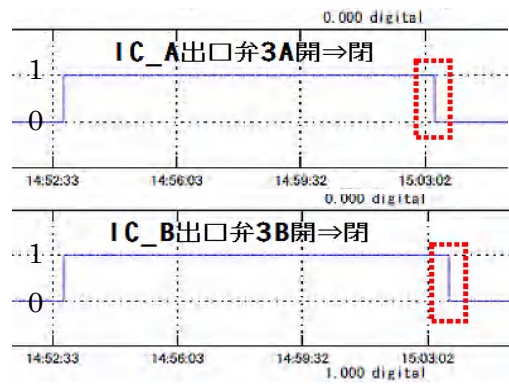


図2. 福島第一1号機 過渡現象記録装置トレンド
2012.5.16 東電報告・添付 6-1(8) (3/4,4/4)[3]より

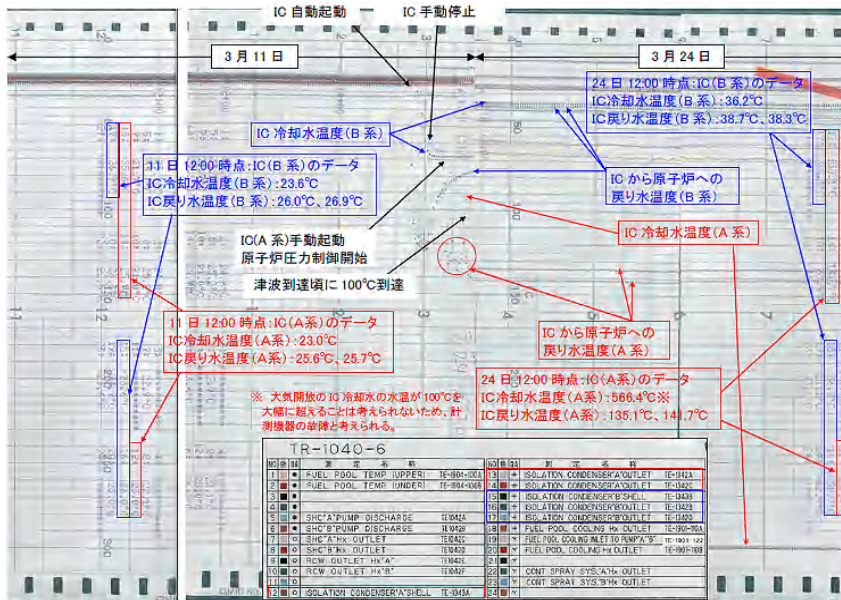


図3. 図2 IC冷却水の温度記録チャート(5月16日公表済)[2]

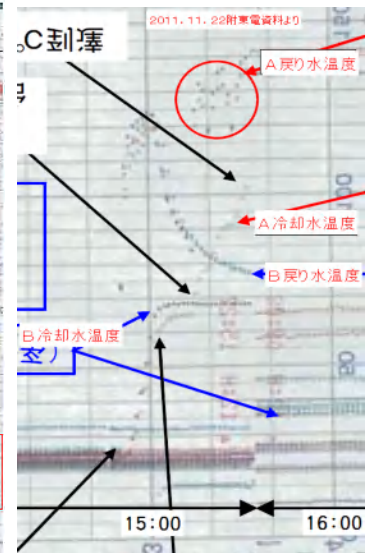


図4. 左図の一部をミラー反転し、かつ180度回転した図

2. 戻り水温度と冷却水温度の挙動—15時頃の急低下に焦点

上記図4のデータをモノサシで読みとってグラフをつくと次頁図5のようになる。戻り水温度データは、第3弁が開るときA, Bそれぞれで上記のように2つあり(点線)、それらの平均値を実線で示している。

ICは14:52頃にA, Bとも自動起動し、15:03頃に手動で停止したと言われている。その後、A系だけを15:17頃に起動しているが、この時刻は東電による解析上の予測でありはっきりしていない[4]。A系の戻り水温度が15:15頃に急上昇した後に上下しているのは、運転と停止を繰り返したためだとされている。他方、B系は15:03頃に手動停止してから、奇妙なことに一度も動かしていない。実は動かすことができなくなったのではないかとの疑いが生じてくる。

ここで、B系の戻り水温度と冷却水温度が、A系と比較して微妙に異なる挙動を示していることに注目しよう。ただし、A, Bが自動起動した14:52頃からAだけ起動させた15:17頃までは、

AとBは基本的に同じ条件に置かれていることに留意しよう（下記の計算の詳細は付録1参照）。

(1) 伝熱量

ここで、冷却水温度の挙動に注目すると、冷却水温度の単位時間の上昇量（グラフの傾き）は、伝熱管から復水器内に単位時間に流入する熱量（伝熱量）に比例する。つまり、冷却水温度グラフの傾きが緩いと熱の流入量が少なくなることになる。B系冷却水温度の傾きは15:00過ぎから急に緩やかになっているが、A系は比較的傾きがある。このように冷却水温度の傾き（微分）から伝熱量を計算できて、その結果は図6のようになる。

この結果を、同じデータを用いて解析したはずの原子力安全基盤機構（JNES）の結果図7[5]と比較しよう。JNESは、温度データに忠実に従ったのではなく、起動と停止という公認の時刻に合うように解析したことが一目瞭然である。

(2) 伝熱管平均温度

次に、伝熱量は伝熱管平均温度と冷却水温度の差に比例するという、熱伝達の基本法則を用いると、伝熱管内の平均温度を計算することができる。その結果を、最初のグラフで示した戻り水及び冷却水の温度とともに描くと次頁図8の細点線となる。

ICが起動する前には炉からICに至る蒸気管内の水蒸気または水の温度は低下していたであ

図5. 福島第一1号機：非常用復水器(IC)の温度挙動

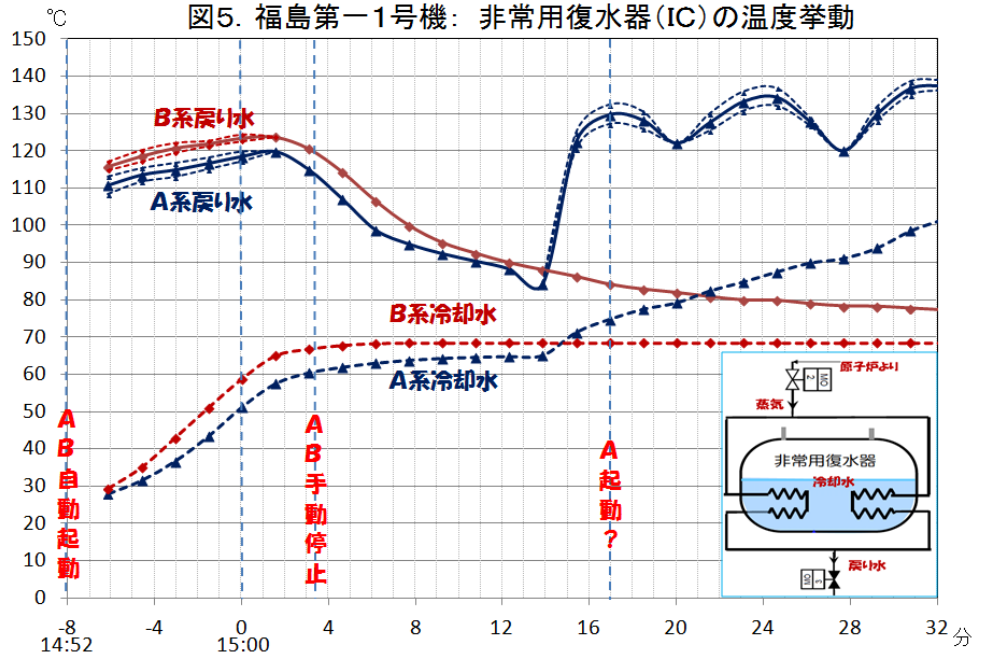


図6. 伝熱管から冷却水への伝熱流量 Q

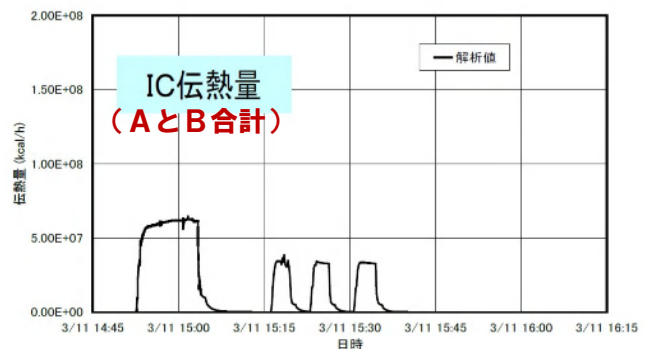
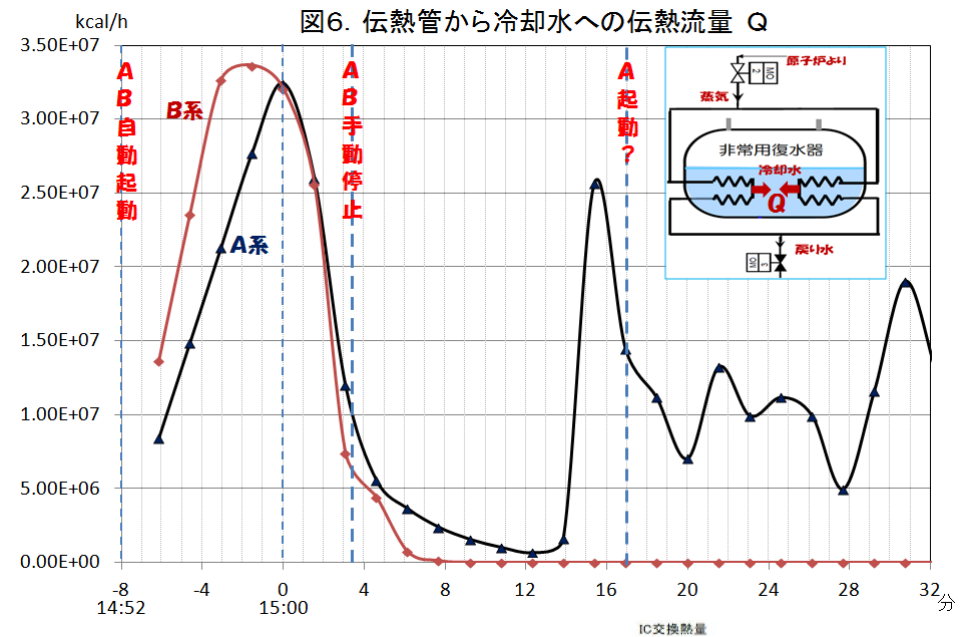
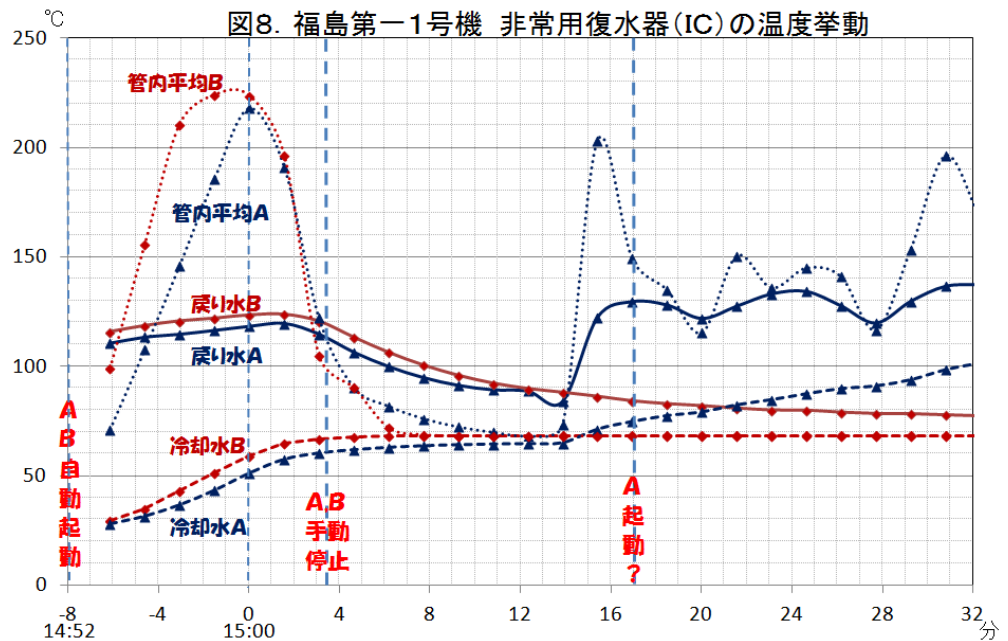


図7. 伝熱量(A+B) - JNESの解析結果[5]

ろうから、最初のうち伝熱管平均温度は急上昇している。その後ピークに達してから急降下し、特にB系では、手

動停止の少し前に戻り水温度よりさえも低下していることが読み取れる。これは極めて異常な事象である。伝熱管内の水は絶えず冷却水で冷やされているが、その冷却を補うだけの伝熱管へ熱の供給（蒸気管からの約286℃の高温蒸気による熱の供給）が低下したこ

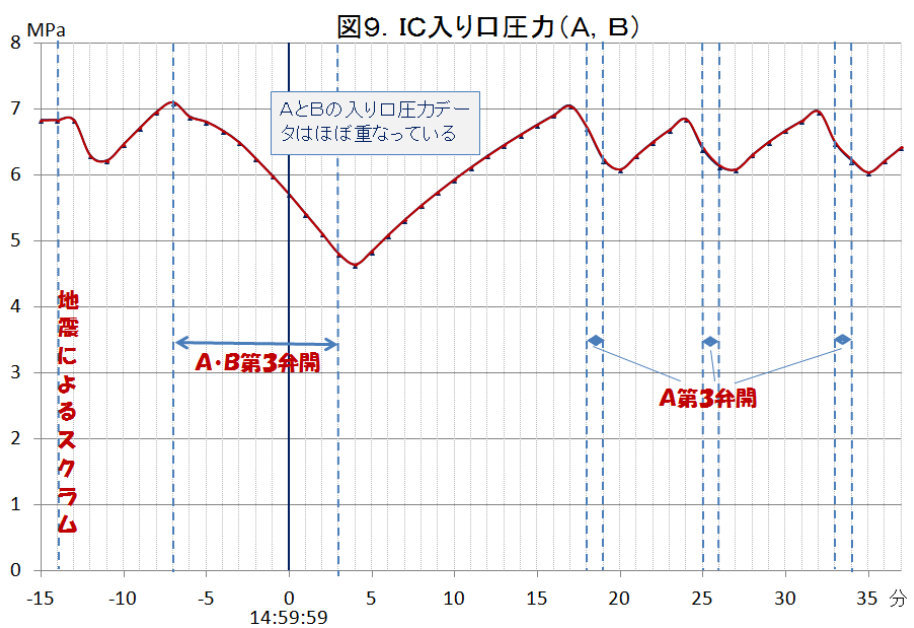


とを、この温度低下は示している。つまり、B系蒸気管の破損を強く示唆しているのである。

3 (補足). IC入り口圧力ー破損は圧力挙動では把握できない(破損口が小さい場合)

ここでは補足として、IC入り口圧力の挙動を確認しておきたい。IC入り口圧力の数値データが2013年7月17日付東電報告として原子力規制委員会から同日に公表された[6]。それをグラフで表すと図9となる。A系とB系の違いはグラフ上では見えないほどで、かつこれら圧力は炉内の圧力ともほぼ一致している。このことは、炉内とIC入り口に何らかのつながりがある限り（つまり上流側の第1弁と第2弁が完全に閉じていない限り）、圧力の性質から当然の結果である。ただし、第1弁か第2弁がある程度閉じた場合、圧力は低下しないが蒸気流量は低下し、伝熱管内の温度も冷却によってより低下する。

グラフにはA・B弁が開になっていた時間とAだけが開になっていた時間をも表示している。これも同じ資料[6]に基づいた。後の3つの場合の開時間がグラフの挙動とあまり合っていないし、前記の温度挙動で示した「A起動」の推定時刻とも合っていないことに留意しよう。



さて、J N E Sによれば[5]、管の破損面積が少なくとも 0.3cm^2 以下であれば、圧力挙動に影響しない（J N E Sの解析では破損面積が 0.3cm^2 の次は 3cm^2 の場合に飛んでいる）。それゆえ、たとえばおよそ 0.3cm^2 程度の面積の破損が蒸気管に起こった場合、圧力は低下しないが蒸気流量が低下して破損信号がでる可能性がある（破損信号は蒸気流量の検知で出るとされている。後の記述）。

いずれにせよ、ひび割れなど破損面積が小さい場合、圧力挙動では破損は把握できなくて、温度や蒸気流量に目を付ける必要があるということになる（炉内平均温度推移の推定は付録2）。

4. 温度等の急低下が強く示唆するB系蒸気管の破損—東電の説明なし

上記の温度挙動等からすれば、B系蒸気管が15:00頃（直前）に破損したのではないかということが、次のように強く示唆されることを示そう。ただし、この論点には矛盾が含まれているが、それは後で論じるとして、まずはもっぱら温度挙動と蒸気流量の変化に目を向けることにする。

- ① A・B両系とも、伝熱流量と伝熱管平均温度は15:00頃（直前）にピークになった後急速に低下している。このことは、その頃に蒸気管から伝熱管への熱の供給が低下したことを明確に示している。しかし、この重要な現象について、東電からは何の説明もなされていない。
- ② しかもその低下はB系の方がA系よりわずかに早い。つまり、まずB系で熱の供給が低下し、続いてA系でも低下したと見なされる。
- ③ これらの現象はAとBを手動停止するより3～4分前に起こっている。
- ④ 次に、ちょうどその頃に蒸気流量の低下が起こっていることを示す。まず、伝熱管平均温度がほぼピークを迎えた15:00頃の伝熱管内の流量（蒸気流量）を計算すると、A系が約60t/h、B系が約63～60t/h（付録）。この値はJ N E Sの解析値（合計最大約120t/h）と一致しているが、奇妙なことに仕様による値の半分程度でしかない。

次に、15:00に続く2つの時刻（約15:01:30と15:03）での蒸気流量は最大でも、A系が48t/h、22t/hと低下し、B系は48t/h、14t/hと低下している（付録）。

- ⑤ この低下傾向は、破損による蒸気の喪失だけによって起こったとは考えられない。仮に破損口面積が 1cm^2 程度だとしても、破損口からの漏洩率は蒸気流量約60t/hの数%程度にしかないからである。それゆえ蒸気流量低下の原因は、蒸気流量の小さな低下を検知して、上流側の弁がある程度閉じたからではないだろうか。
- ⑥ B系が破損したことは、次のデータからも裏付けられる。A、B停止後（15:03以降）の伝熱管内の水の重量を温度データから計算すると、A系が約13.4tであるのに対し、B系はわずか2.9tしかない（付録）。伝熱管内水量のデータが公表されていないので、これらの数値がまともかどうか分からないが（満杯時の伝熱管内水重量が13.4t以上であればつじつまは合う）、同じ計算方法でもA系に比べてB系が異常に少ないという結果になる。これはB系蒸気管が破損してそこから蒸気が噴き出し、伝熱管内から破損口に向かう逆流が生じたせいではないかと考えられる。
- ⑦ 以上のように、I C系の温度、冷却水への伝熱量及び伝熱管への蒸気流量の挙動から見ると、少なくともB系は15:00頃（直前）に破損したことが強く示唆されている。この頃には図9が示すように、蒸気管内の圧力はむしろ低下気味だが、温度は急上昇して伝熱管内平均でも 230°C 以上になっている（図8）。地震で生じた蒸気管のひび割れが熱膨張によって拡大したと考えればつじつまが合う。

5. A系挙動への疑問—弁の開閉状況について

以上の考察からすれば、B系蒸気管に地震によって生じたひび割れが15:00頃（直前）に熱膨

張で拡大したと推測できる。ただし、破損口面積は圧力に影響を及ぼさない程度だったに違いない。では、このときA系の挙動はどのように理解できるのだろうか。

① なぜA系がB系に追従するような挙動をしているのか

A系は温度挙動や蒸気流量の挙動が、B系にわずかに遅れて同様の挙動を示しているが、他方、上記で示したように伝熱管内の水量はB系ほどには減っていない(4. ⑥)。これには2つの場合が考えられる。第1は、A系もB系ほどではないが破損した場合、第2はB系破損の信号がA系にも伝わってA系の上流側弁(第1A弁または第2A弁)が半ば閉じた場合である。

② 弁の閉信号について

2012年6月20日付東電報告書・添付資料[7]の添付8-6(1)(2/4)頁には、「万一、IC配管等に破断が生じた場合、ICの流量の異常から破断を検出し隔離弁がインターロックで閉止する設計としている」と書かれている。つまり、蒸気流量に異常が起これば隔離弁が閉止されるという。ちなみに、この機能が働くためには、蒸気流量が恒常的に測定されていなければならないが、蒸気流量データは未だ公表されてはいない。ぜひ公表される必要がある。

では、どの隔離弁が閉止されるのかに関しては、同(3/4)頁中程に「IC配管等の破断が検出された場合にはインターロックによって自動的にICの全隔離弁を閉止動作する設計としている」と書かれている。これを文字どおり受け取ると、破断が検出された場合、ICのA、B全ての弁が閉止されることになる。

ところが他方、添付8-7(2)「隔離信号回路図(待機時の状態)」では、たとえばB系で破断信号が発した場合は、B系にあるB1、B2、B3、B4が閉になるとされていて、上記(2/4)頁の記述と矛盾している。ただし制御電源喪失時には、A系の4つの弁とB系の4つの弁すべてが閉になるとされている。

結局、B系だけに閉信号が出た場合、A系の弁も閉じるのかどうかははっきりしない。

③ 15:03頃のA・B第3弁手動停止は事実なのか

AとBの第3弁を手動停止したという確たる証拠はないようだ。AとBの閉時刻にわずかなズレがあることをもって手動停止の証拠としているが、弁の開閉時刻には図9に見られる不確かさがあることも含めて、状況がはっきりしているとは言えない。図2のトレンドグラフでも、その後の時間帯における開閉グラフが存在しない。

④ 後の弁開閉度調査結果

弁の開閉状態は後になっても明確には把握できていない。右の表は、後で調査した弁の開閉状態であるが、2B弁は全閉になっている。2A弁は全開になっているが、後の時刻に開にしたせいであろう。1Aと4Aは開度が不明である[2]。

表1 ICを構成する弁の開閉状態

A系の弁	1A	2A	3A	4A
開閉状態	開*	全開	全開	開*
B系の弁	1B	2B	3B	4B
開閉状態	不明	全閉	全閉	不明

※ 開度は不明

〔B系の弁のうち2B弁、3B弁については、現場調査(10月18日)時に全閉であることを確認している。1B弁、4B弁は格納容器内にあるため現場で確認することができていない。〕

⑤ 後の時刻にA系はまともに働かなかった

3月11日18:18(or 18:10)に、「M02A弁開操作」とホワイトボードに書かれている[4]。つまりそれまでになぜか上流側の2A弁が閉じていたことになる。そのときA系を起動したが、復水器から外部に出るはずの蒸気が一瞬見えてすぐ消えた。そのためICは働いていないと判断されている[7]。A系も破損しているか、上流側弁が閉止していたのではないだろうか。

⑥ 以上の考察からの結論

A系でも温度や流量が15:00頃に急低下したことは事実である。その原因は、B系破損の影

響で上流側弁が半ば閉じたか、あるいはA系も破損したかのどちらかであろう。いずれにせよ、異常が起こったため、A・Bの閉まりきらなかった第3弁を手動で閉じたのではないだろうか。

6. 結論：B系蒸気管は15:00頃(直前)に格納容器外で破損した

以上のように、B系蒸気管は15:00頃(直前)に破損した、あるいは地震によるひび割れが拡大したと推定できる。ただし、なぜA系もそれにつられるような挙動をしたのかの理由は明確ではなく、この問題は残された課題である。

I C蒸気管の破損はLOCA(冷却材喪失事故)の発生を意味している。この事態を重視すれば、15:03頃に炉心溶融の危険を冒してでもI Cを停止せざるを得ないと判断したのではないかと推察される。

このような異常を検知したからこそ、「I C組」が1号機の現場に派遣されたのであろう。そして、17:50頃にはもはや、原子炉建屋入り口の二重扉を開けて中に入れないうちに、放射能が建屋内の格納容器外に充満していたのである[1]。

さらにこのことは、15:29に1号機から1,500メートル離れたモニタリングポストMP3でHi-Hi警報が発せられたこととも符号している[8]。このときの風向・風速からすれば、放射能は1号機建屋から15:25頃に出たことになるからである。このような破損がなければ、MP3で警報がなるはずはない。また別に、A.Stohlたちの逆モデルによる解析結果でも、15:00頃にキセノン133が放出されたと結論している[8]。

このI C系配管が地震で破損したのではないかという問題は、原発の安全評価上ずっと垂れ込めている暗雲である。最近も原子力規制委員会は現地立ち入り調査を行ったが、その調査結果は明らかにされていない。I C蒸気管のひび割れの実態など、立ち入り検査してカメラで写しただけでは分かるはずがない。切り出してラボに送り詳細な検査をすることが不可欠である。

現在、配管の詳細調査が無理だとしても、I C系温度という直接的にI C配管の状態を示すデータをを用いてそれに忠実な解析を行えば、I C系配管の実態をかなりの程度に把握できる。このことをこの小論では具体的に示した。さらに、少なくとも存在するはずの蒸気流量データを東電は公開すべきである。

他方では、まるで地震による破損など何もなかったかのようにして、原発の再稼働審査が始まっている。その審査では、福島原発では地震による配管等の破損はなかったし、今後も耐震解析で保証される限り、配管の破損等は絶対にあり得ないという仮定に立っている。本当にそれでいいのだろうか。ここで提起した解析結果の示唆する問題について、原子力規制委員会は自らの見解を、再稼働審査に先立って示すべきである。

引用文献

- [1] 福島第一原発では地震で配管が破損したー1号機と3号機の検証、2011.10.5 小山英之
http://www.jca.apc.org/mihama/fukushima/1flic_hasonron_20111005.pdf
- [2] 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 2011.11.23, 東電
<http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/shingikai/800/28/003/sankou3-4.pdf>
- [3] 過渡現象記録装置データ 2011.5.16 東京電力
http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/houkoku/files/6_gensyou/f1_6_Katogensho1.pdf
- [4] 東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響評価について 2011.5.23 東京電力 別紙1
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu11_jimages/110524a.pdf

- [5] 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
 [付録3] IC蒸気流量の検討 2011.12.9 別添4 (2012.6.1 一部改訂)
 原子力安全基盤機構 (JNES)
<http://www.meti.go.jp/press/2011/12/20111220009/20111220009-4.pdf>
- [6] 「東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所プラントデータについて」におけるプラントデータの追加・訂正について 2013.7.17 東京電力株式会社
<http://www.nsr.go.jp/activity/bousai/NEP/data/25/07/20130717-1.pdf>
- [7] 福島原子力事故調査報告書 2012.6.20 東京電力 添付資料
http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120620j0306.pdf
- [8] 海外の論文が示す津波の前の放射能放出 2011年11月14日 美浜の会
http://www.jca.apc.org/mihama/fukushima/discharge_btsunami.pdf

付録1：IC温度挙動の解析

本文図4に基づく図5のデータを用いてIC温度等の解析を行う。

1. データの準備

図5のデータに、番号*i*を時刻順に打っておく(右図：図10)。*i*=1は右図にはなくて、*i*=2から27まであり、15:00を基点とするデータ点の時刻 t_i との関係は次式で与えられる。

$$t_i = \Delta t(i-6); \Delta t = 1.538 \text{ (分)}$$

次に、冷却水温度 T_p は、A、B手動停止後には明らかに飽和的な挙動を示している(一定値に近づいている)。そのため、次式の形を仮定して *i*=9, 10のデータからパラメータ *a*, *b*を決める。

$$T_p = d - \exp(-at+b) \quad (\exp(x) = e^x; i \text{ の範囲は、Aでは } 9 \sim 14, B \text{ では } 9 \sim 27)$$

その結果、 $(d, a, b) = (65.2, 0.273, 2.421)$ for A; $= (68.4, 1.164, 4.855)$ for B と決まる。

この近似式が当てはまる *i* の区間では、冷却水温度データをこれらの式による計算値と置き換えるが、モノサシで測った元のデータとの間に目に見えるほどの差はない。

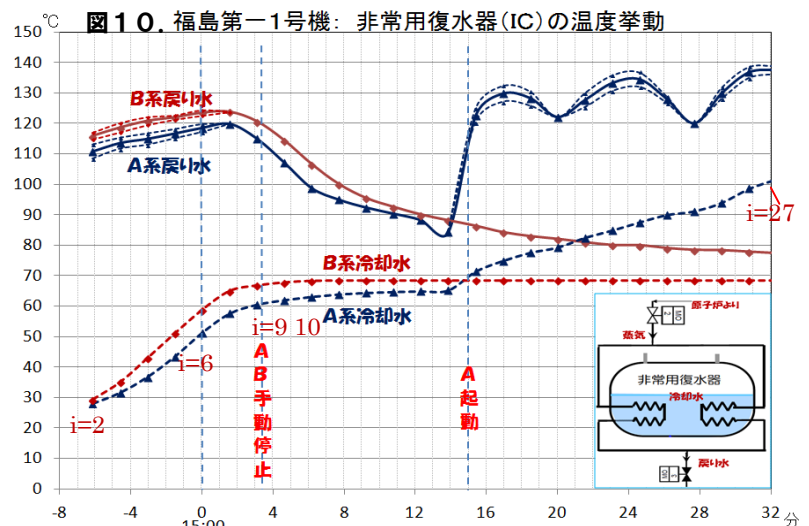
2. 基本方程式

評価のための基本方程式としてA、Bそれぞれに以下の3つの式を立てる(AとBの区別はたとえばQA, QBなどのように添え字で表す)。

(1) 伝熱量 Q [kcal/h]と冷却水温度 T_p

冷却水温度 T_p は、単位時間あたりに伝熱管から冷却水プール(タンク)に流れ込む伝熱量 Q に応じて上昇する。すなわち次式が成り立つ。

$$(Eq. 1) \quad Q = c_p M_p \frac{dT_p}{dt}$$



ここで、 c_p は比熱、 M_p (=密度×水量) はタンク内水の重量である。温度はそれほど高くないので、ここでは簡単のため $c_p=1$ 、密度=1 とする。また水量は水位 80% のとき仕様にあるタンク有効保有水量 106m³ となるが、東電報告書や J N E S ではこの値を採用しているのでここでもそれに従う。結局 $M_p=106t$ (トン) となる。この式の微分を後退差分 ($[T_p(t) - T_p(t - \Delta t)] / \Delta t$) で近似して計算した結果を本文図 6 に示す(ただし、前記 i の区間では近似式を用いた)。

J N E S の解析結果は本文図 7 に示しているが、図 4 (または図 5) の測定データに忠実に従えば、このような挙動にならないことは明らかである。ある観念が先行しているとしか考えられない。しかも A と B の挙動の違いが問題になるのに、合計の伝熱量しか示していない。

非常用復水器(IC)の仕様

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 × 10 ⁶ 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)
(文献[5]より)

(2) 熱伝達方程式

伝熱量 Q については、熱伝達の基本法則により次式が成り立つ。

$$(Eq. 2) \quad Q = kA(T_{av} - T_p); \quad T_{av} = \alpha T_g + (1 - \alpha)T_{out}, \quad \alpha = (1 + \lambda_1)/2$$

ここで、 T_{av} は伝熱管平均温度、 T_p は冷却水温度である。 T_g は伝熱管に入る蒸気温度、 T_{out} は戻り水温度である。 A は全伝熱面積 (伝熱管の表面積) で、そのうち $A_1 = \lambda_1 A$ の部分は蒸気 (温度 $T_g = 286^\circ\text{C}$) と飽和水 (温度 $T_f = T_g$) で、残りの伝熱面積部分 $A_2 = (1 - \lambda_1)A$ では平均温度が $(T_f + T_{out})/2$ であるとした。比例係数 k は熱伝達係数であるが、これは仕様に合わせて次のように決める。

設計仕様では、伝熱管全体に渡って温度は 286°C、冷却水温度は 100°C で、そのとき伝熱量は 3.62E07[kcal/h]だとされている (上記仕様表の「伝熱容量」)。それゆえ、 $3.62E07 = kA(286 - 100)$ となるので、

$$kA = 1.946E05 \text{ [kcal/h}^\circ\text{C]}$$

が得られる。実際の伝熱面積は設計伝熱面積より多少大きいのではないかとの議論もあるが (J N E S [5]) ここではこの値を採用する。

この方程式(Eq.2)より、管内平均温度が求まり次式となる。

$$T_{av} = Q/kA + T_p$$

この計算結果は本文図 8 の細点線で示されている。

(3) 伝熱管への蒸気流量及び伝熱管内水量

仕様では定常状態を扱っていて、次の関係が成り立つことを J N E S は確かめている [5]。

$$0 = W(h_g - h_f) - Q$$

ここで $W = 100.6 \text{ t/h} = 1.006E05 \text{ kg/h}$ は蒸気流量 (伝熱管内を単位時間に流れる蒸気量)、 $h_g = 662 \text{ kcal/kg}$ は温度 286°C のときの蒸気の比エンタルピ (単位重量当たりの熱量)、 $h_f = 302 \text{ kcal/kg}$ は同じ 286°C の飽和水の比エンタルピである。これらを代入して計算すると、確かに $Q = 3.62E07 \text{ kcal/h}$ となって仕様表にある伝熱容量 (伝熱量) と一致する。

ところが今の対象は、仕様と違って定常状態ではなく時間変動するので、伝熱管内の全熱量を H とすると、次式が成り立つ。

$$(Eq. 3) \quad dH/dt = W(h_g - h_{out}) - Q$$

この式を用いて、本来なら蒸気流量 W を求めたいところなのだが、情報不足で困難である。そこ

で、次の2つの特別な場合を考察する。

① 全熱量がピークするとき ($dH/dt \sim 0$) の W 、及びその直後の W の上限

この $dH/dt \sim 0$ となる定常的状态は、本分の図8より $t=15:00$ 頃 (番号 $i=6$ 付近) で実現している。このとき、

$$W=Q/(h_g - h_{out})$$

となる。比エンタルピを $h_g=660$ 、 $h_{out} = cT_{out}$ とし、比熱 $c=1$ ととって計算すると、

$$WA=59.9 \text{ t/h (} i=6 \text{),}$$

$$WB=62.6 \text{ t/h (} i=5 \text{), } =59.8 \text{ t/h (} i=6 \text{)}$$

となる。 $WA+WB$ は、右図に示す JNES の解析結果[5]とほぼ一致している。ただし、JNES

Sの結果は、ちょうどおさまりの時刻に流量を急変させるなど、いかにも恣意的である。

次に、その直後 ($i=7,8$) における蒸気流量を考察する。(Eq. 3)より

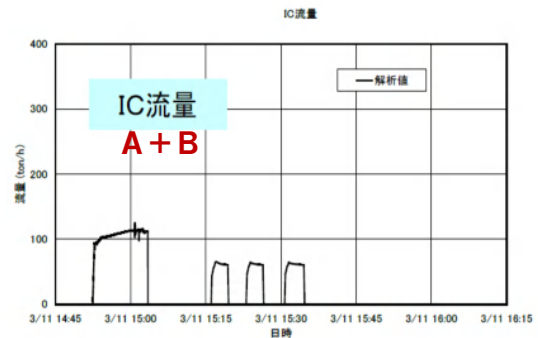
$$W=(Q + dH/dt)/(h_g - h_{out})$$

となるが、このときは熱量の低下傾向より $dH/dt < 0$ となるので、 $Q/(h_g - h_{out})$ は W の上限を与える。上記のように計算すると、

$$WA \text{ の上限} = 48.1(i=7), \quad 22.0(i=8)$$

$$WB \text{ の上限} = 47.8(i=7), \quad 13.8(i=8)$$

となって蒸気流量は急低下している。



JNESによる伝熱管蒸気流量 (A+B) [5]

② AとB手動停止後の伝熱管内水量

AとBが下流にある第3弁の閉止によって手動停止された15:03以降では、間違いなく蒸気流量 $W=0$ である。このときは蒸気管からの高温蒸気の流入はないため、伝熱管内は水の状態にあると考えられるので (それゆえ (2) で定義した $\lambda_1=0$)、全熱量 H は次式となる。

$$H=cM T_{av}; \quad T_{av} = Q/kA + T_p$$

ただし、 $c=1$ は水の比熱、 M は伝熱管内の水の重量である。 $W=0$ より (Eq.3) は次式となる。

$$cM dT_{av} / dt = -Q$$

ここで、最初に手動停止後のデータとして定義した $T_p = d - \exp(-at+b)$ を用いると、水重量 M が時刻に関係なく次式で決まる。

$$M=1/[c\{ a/(kA) - 1/(c_p M_p) \}]$$

これまでのデータを用いて計算すると、以下となる。

$$MA=13.4t, \quad MB=2.9t$$

ピークの15:00頃には、BではAとほぼ同量の蒸気が伝熱管内を流れていたが、そこから急激に伝熱量や管内平均温度が低下し、第3弁を閉止した直後にはBでは伝熱管内水量がAより大幅に減少している。これはB系の蒸気管でひび割れが拡大して、伝熱管内の蒸気が破損口に逆流し流出したからではないだろうか。そのひび割れはすでに地震によって入っていたとしか考えられない。ICを働かせるために高温の蒸気を蒸気管内に導いた結果、温度が急上昇し熱膨張でひび割れが拡大したに違いない。また、おそらくA系でも比較的軽度ではあれ、同様の事象が起こった可能性がある。

付録2. 炉内水平均温度の推移

ICをなぜ早期に停止させたのかが従来から問題になっているが、それについて東電は次のように記述している。「⑨非常用復水器の操作については、手順書では原子炉圧力容器温度降下率が $55^{\circ}\text{C}/\text{h}$ を超えないように調整することを求めており、作動時には急激な温度低下をしていることから、操作は妥当であると考える」として資料 1-11 を挙げている (2011 年 5 月 23 日報告、p.1F-1-2)。その資料 1-11 とは図 1 に示すように、PLR ポンプ (再循環ポンプ) B の入り口温度の挙動である。確かに B 温度は右から左へ、約 260°C から約 115°C へと急激に下がっている。実はこれは図 2 から分かるように、炉全体の温度を示すのではなく、ほぼ IC からの戻り水温度を示しているものと考えられる。IC の A 系と B 系からの戻り水は合流して再循環ポンプ B の上流側に注入されているからである。その温度挙動は図 3 の「再循環ポンプ (B) 入口温度」グラフが示すように、 260°C から 130°C 程度まで、わずか数十秒で急激に下がっているが、その後はほぼ IC の戻り水温度に近い温度で横ばいになっている。

では、原子炉内冷却水の全体的な平均温度は IC 作動の影響を受けてどのように変化したのだろうか。その点をこの付録 2 では推定したい。

炉内の熱は、IC 内の冷却水による冷却により、図 4 に示す伝熱量 (Q_A+Q_B) だけ炉内から IC 冷却水に移行する。他方では、炉内放射能の崩壊熱によって熱が供給される。

これら両方を考慮すると、炉内の熱量は次の法則に従って変化する。すなわち、炉内の熱量を $H=H_f+H_g$ (H_f :水の熱量、 H_g :蒸気の熱量) とすると、

$$dH/dt = -Q + P$$

$$\cdot Q = Q_A + Q_B \quad (\text{IC 冷却水への伝熱量})$$

$$\cdot P = 0.066P_0(t^{-0.2} - (t_s + t)^{-0.2}) \quad (\text{崩壊熱})$$

$$P_0 = 3.297E05 \text{ kcal/s}, \quad t_s = 2.7 \text{ y}$$

時間 t は秒単位で $t=0$ は 14:46 頃 (スクラム時刻) に相当。

蒸気の比エンタルピは温度によらずほぼ一定

図 1. 再循環ポンプ入口温度

【1号 PLR ポンプ入口温度】

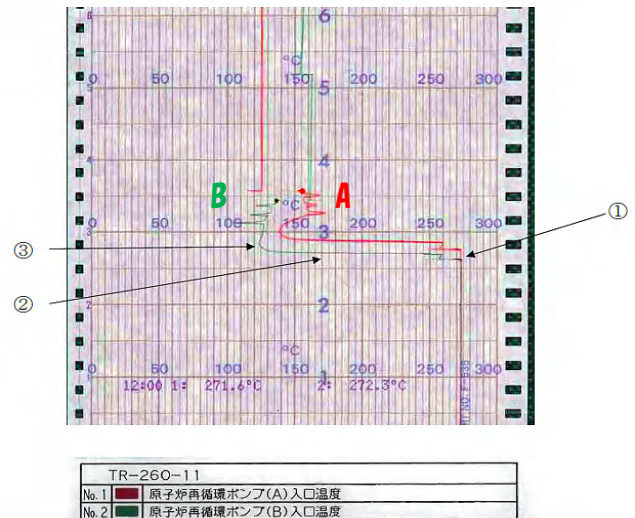


図 2. 再循環ポンプ B 入口

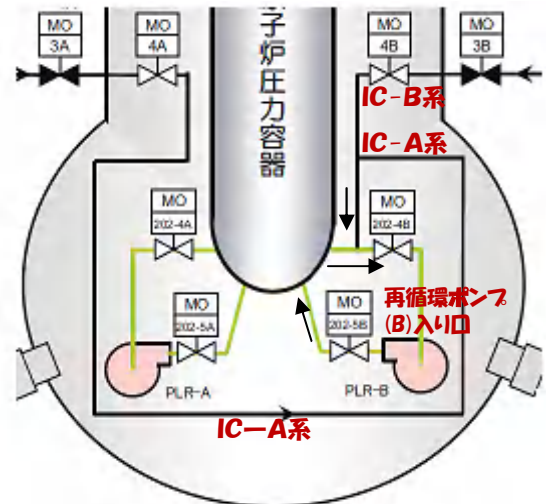
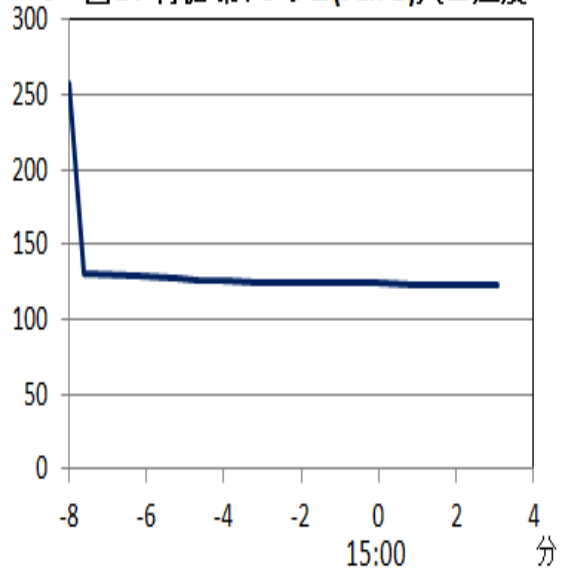


図 3. 再循環ポンプ B (PLR-B) 入口温度



であり(図6)、蒸気重量もほぼ一定であると仮定すると、熱量 H_g は時間的に一定となるので、 $dH/dt = dH_f/dt$ となる。

炉内の水の熱量を

$$H_f = cMT$$

とする。ただし、温度を T 、比熱を $c=1\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ (図6よりほぼ妥当)、炉内の全水の重量を $M=250\text{t}$ とした。また、温度の初期値を 260°C とし、 $Q=Q_A+Q_B$ は本文で求めた結果を用いる(図5)。

その結果は図4で示されている。ICが作動しない場合と比較すると、確かにICによる冷却の効果があることが分かる。炉内水の平均温度は、IC冷却水への伝熱量(Q_A+Q_B)に対応して、15:00頃をピークにその後は低下がにぶっている。

図4のIC作動時の温度低下量は約10分間で 20°C 弱であるので、単純に6倍すれば1時間での低下量(低下率)は 50°C を大きくオーバーすることになり、東電の言い分もいちがいに間違っているとは言えないかもしれない。しかし、東電の判断材料はあくまでも再循環ポンプ入口温度だったのであり、これだけで炉内状態を判断したことになる(3月11日の炉内温度を示す公表データは、再循環ポンプ入口温度しかない)。

それよりも、IC冷却水温度の挙動に目を向けていれば、炉内の全体的な冷却状況が把握できて、15:00頃をピークにしてICの冷却効果が急速に衰えていることが分かるので、ICを止めるという判断には至らなかったかも知れない。

実は運転員は、このIC冷却水温度の動きを把握していて、炉内冷却状態よりはIC配管系の異常を感知したために、急遽ICを止めたのではないだろうか。このように考える方が、本文の結論で述べたような放射能の状況や「IC組」が現場に調査に向かった事実とつじつまが合うのである。

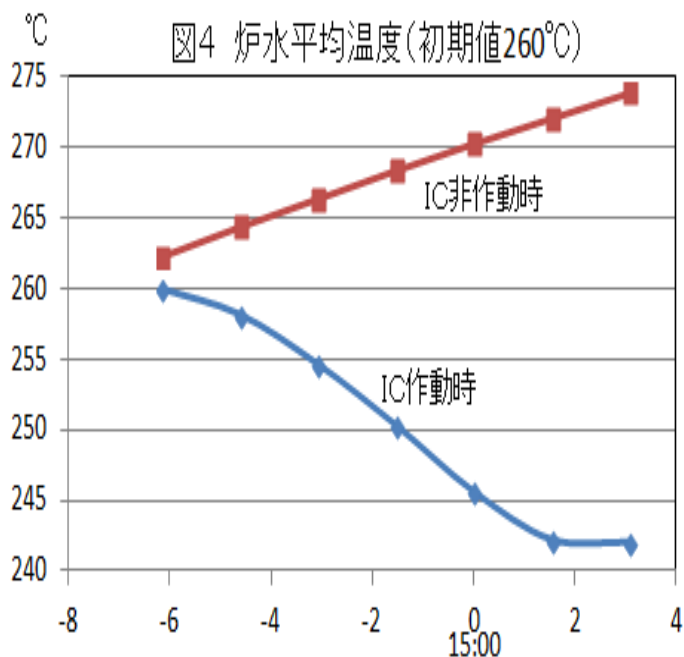


図5. IC冷却水への伝熱量(Q_A+Q_B)

