

1 号機非常用復水器における除熱状況について

1. はじめに

1 号機においては、地震後、非常用復水器（IC、概略図を図 1 に示す）を断続的に運転することで、原子炉を冷却しつつ圧力を制御していた。津波により全電源を喪失する直前においては、IC は一時的に停止している状態であった。全電源喪失後、運転員は中央制御室にて格納容器外側の IC（A系）隔離弁（MO-2A、MO-3A 弁）の閉状態を示すランプが点灯していることを発見し、3 月 11 日 18 時 18 分に、これらの弁を開操作し、蒸気発生音と建屋越しに発生した蒸気を確認している。しかし、このときの蒸気発生量は少なく、しばらくして蒸気の発生がなくなったことから、IC のタンクの水がなくなっていることを懸念し、11 日 18 時 25 分に戻り配管の隔離弁（MO-3A 弁）を閉としている。

IC については、原子炉水位が低下し、水-ジルコニウム反応により非凝縮性ガスである水素が発生した場合、冷却管に水素が混合することによって除熱性能が劣化すると考えられている。これまでの解析結果によると 18 時 18 分時点では、原子炉水位は有効燃料頂部（TAF）を若干下回った程度で、水素が大量に発生していた状況には無い可能性があるが、放射線分解による水素発生の影響等も考慮し、1 号機において、実際にどの程度の除熱劣化があったかについて明らかにする必要がある。

事故後に実施した IC のタンクの水位調査によれば、平成 23 年 10 月 18 日の時点で、A 系のタンク水位は 65%（通常水位：80%）と、IC の停止時にもタンク内の水が十分存在していたことになり、3 月 11 日 18 時 25 分に戻り配管の隔離弁（MO-3A 弁）を開操作しなかった場合、IC による冷却が継続できた可能性がある。そこで、格納容器外側の IC（A系）隔離弁を開操作した後に、蒸気発生量が少なく、かつ、しばらくして蒸気の発生がなくなったことの原因を検討（1 号機-1）するとともに、3 月 11 日 18 時 25 分以降も格納容器外側の IC（A 系）隔離弁を開状態のまま維持した場合の事故進展への影響（1 号機-2）について検討する。

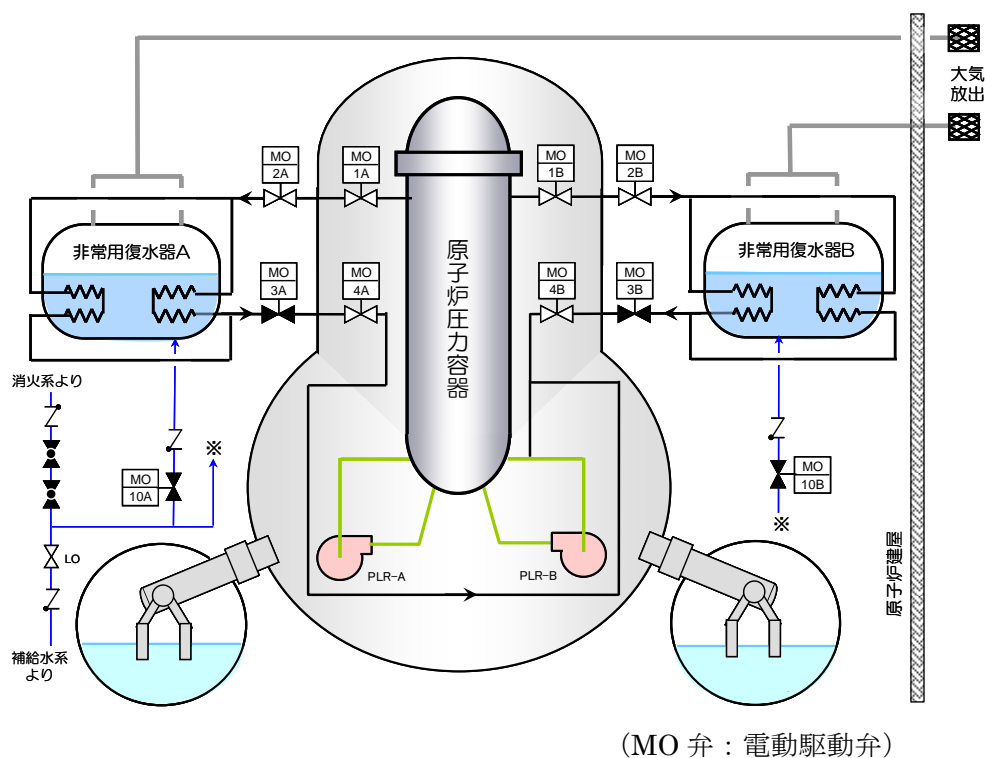


図1 非常用復水器の系統構成概略図

2. 除熱性能評価について

MAAP5.01を用いてICをモデル化し、スクラムから全交流電源喪失までのICの作動状況を考慮した事故進展解析を行った。解析の結果については第2回進捗報告で「添付資料3」にまとめている（以下既報）。

全交流電源喪失以降については、非凝縮性ガスがICの伝熱管内に滞留することによりICの除熱性能が維持できない可能性があったことから、既報の解析では18時18分以降のIC弁操作に関わらず、ICが作動していないものとして評価を行った。

今回の評価では、18時18分にIC（A系）隔離弁の開操作によりICが起動するものとし、かつ18時25分のIC弁閉操作後もICが作動し続けているものとして評価を行った（IC作動ケース）。その他の解析条件については、既報と同一とし、格納容器からの気相部漏えいについても原子炉圧力容器破損時に原子炉建屋補機冷却系が損傷し漏えいが発生するものとした（既報「添付資料3」参照）。既報の解析条件および今回のIC作動ケースでのIC起動条件について表1にまとめる。

表 1 IC 起動条件

日時		事象イベント	既報	IC 作動ケース
3/11	14:46	地震発生		
	14:48	原子炉スクラム		
	14:52	IC(A)(B)自動起動		起動
	15:03	IC(A)停止		停止
	15:03	IC(B)停止		停止
	15:17	IC(A)再起動		起動
	15:19	IC(A)停止		停止
	15:24	IC(A)再起動		起動
	15:26	IC(A)停止		停止
	15:32	IC(A)再起動		起動
	15:34	IC(A)停止		停止
	15:37	全交流電源喪失		
	18:18	IC(A) 2A,3A 弁開	停止中	起動
	18:25	IC(A)3A 弁閉	停止中	作動中
	21:30	IC(A)3A 弁開	停止中	作動中

3. スクラムから全交流電源喪失までの評価について

スクラムから全交流電源喪失までの期間については既報及びIC作動ケースは共通である。図2に原子炉圧力の過渡現象記録装置に記録された実測値とMAAP解析値を示す。実測値と比較して、解析値の変化は大きいものの概ね一致している。ICは入口側の原子炉圧力と、蒸気の除熱・凝縮によって圧力降下した出口側との圧力差によって、静的にIC管側に蒸気が流れる構造となっている。従って、ICの各弁が開いてICが作動している間は、ICで冷却されることで蒸気が凝縮し、原子炉へ戻った水が再び崩壊熱を奪って気化することを繰り返すため、熱は原子炉からICの胴側に持ち出され、原子炉圧力は徐々に低下する。原子炉圧力の減少に伴いIC管側へ流れる蒸気流量が減少することから、図3に示すICへの蒸気供給量及び図4に示すICの除熱量のMAAP解析値が示すとおり、徐々に蒸気供給量と除熱量が低下する。

ICの胴側では原子炉蒸気から熱を奪うことにより水温が上昇する。図5に胴側水温の実測値（チャート読み取り値）とMAAP解析値を示す。胴側水温の上昇は実測値と解析値は概ね一致しており、ICでの除熱量はほぼ実機を模擬出来ていると考える。

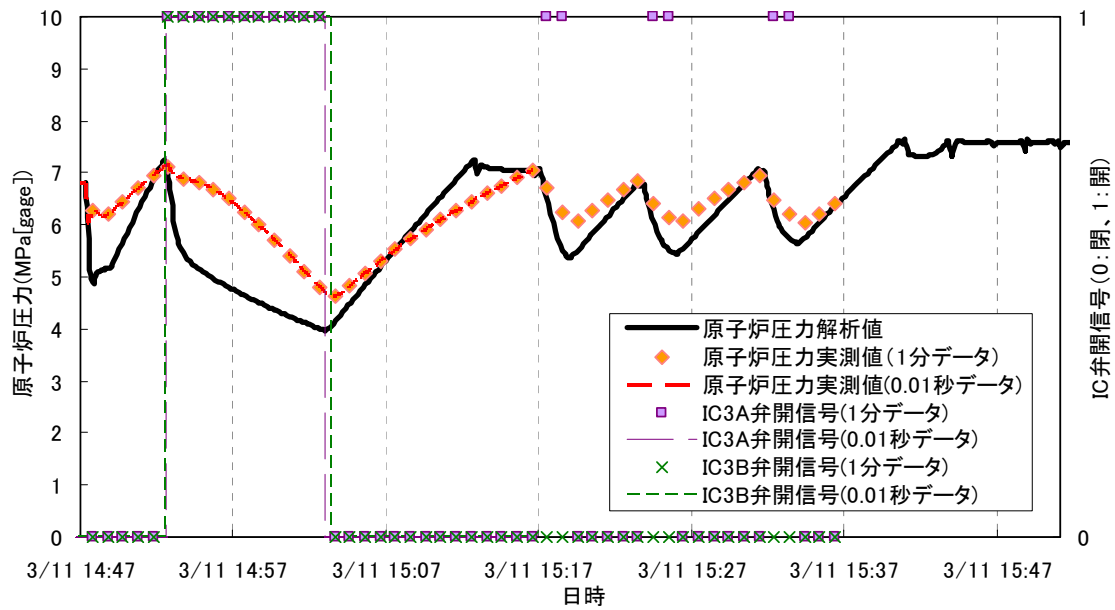


図2 原子炉圧力（過渡現象記録装置に記録された実測値と MAAP 解析値）と IC 弁開信号（過渡現象記録装置）

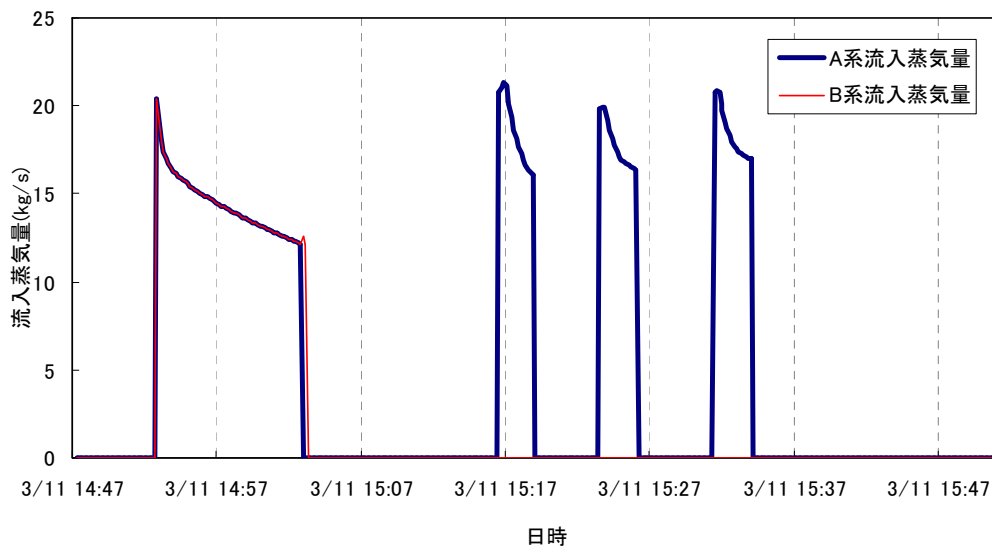


図3 IC への蒸気供給量（MAAP 解析値）

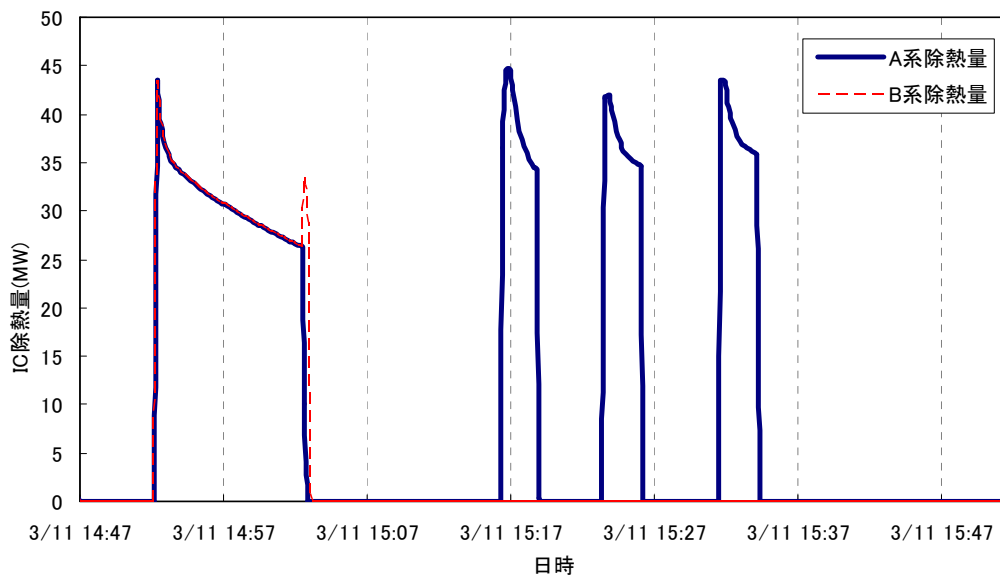


図4 ICの除熱量 (MAAP 解析値)

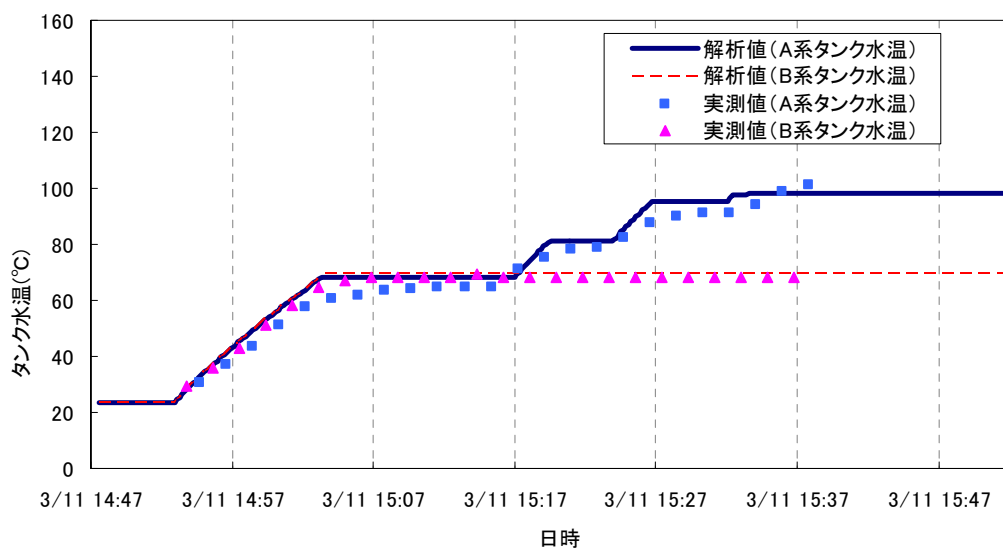


図5 IC 胴側水温 (実測値 (チャート読み取り値) と MAAP 解析値)

4. 全交流電源喪失以降の評価について

全交流電源喪失以降の IC 起動条件については、2.で示したとおり IC 作動ケースでは 18 時 18 分に IC (A 系) 隔離弁を開操作し、18 時 25 分の IC (A 系) 隔離弁の閉操作は考慮せず、継続して IC が作動していたものとして評価を行っている。18 時 18 分以降に継続して IC が作動していた場合の MAAP 解析結果と既報の結果を図 6～図 12 に示す (図 6 原子炉水位変化、図 7 原子炉圧力変化、図 8 格納容器圧力変化、図 9 炉心温度変化、図 10 原子炉圧力容器内気体温度変化、図 11 格納容器温度変化、図 12 水素発生量変化)。

18 時 18 分 IC 起動に伴い、IC での除熱が開始され原子炉圧力は大きく低下する。ただし、MAAP 解析結果によると IC が起動した 18 時 18 分以前に原子炉水位が TAF を下回り燃料の露出が始まっていたことから、燃料の温度は上昇傾向にあった。IC では除熱は出来るものの外部から原子炉へ水を注入しているわけではないため、水位を回復させ燃料を再冠水させることは出来ない。今回の MAAP 評価では、炉水および蒸気による冷却では燃料の温度上昇を止めることが出来ず、徐々に温度が上昇する結果となっている。燃料温度の上昇が進み、水-ジルコニウム反応により発生する水素が急激に増加し、水素が IC の管内に滞留することで蒸気が流れなくなり、急激に IC の除熱量を低下させ、除熱能力を喪失させる。その後、急激に原子炉圧力が上昇し、既報と同様の事故進展をたどる結果となった。

今回の MAAP 解析においては水の放射線分解の影響を考慮していない。IC 作動ケースにおいて 18 時 18 分から開始する IC での除熱は、水-ジルコニウム反応による水素発生が開始する 19 時 0 分頃から急激に除熱量が低下し、水素が約 20kg 発生した 19 時 5 分頃にはほぼ 0 となる解析結果が得られている。水の放射線分解による非凝縮性ガス (水素、酸素) の発生量は崩壊熱の大きさに比例するが、スクラムから 19 時 5 分までの非凝縮性ガスの発生量は約 1.5kg であり、水-ジルコニウム反応による水素発生量の 1 割に満たない程度である。また、SRV が作動すると蒸気とともに非凝縮性ガスも原子炉圧力容器 (RPV) から排出され、RPV 内に存在する非凝縮性ガスの量はさらに少ないものと考えられる。従って、水の放射線分解による IC の除熱性能劣化への寄与は極めて限定的であり、水-ジルコニウム反応によって除熱能力が喪失するものと考えられる。

IC 作動ケースと既報を比較すると、炉心支持板の破損と RPV 破損のタイミングは IC 作動ケースの方が遅くなる結果となっている。これは IC 作動により除熱が出来る分だけ、事故進展を遅らせたことを意味している。ただし、IC 作動ケースも事故進展を止めるには至っていない。

IC 作動ケースの方が主蒸気配管フランジのガスケットの破損時間が早いのは、既報では RPV 内気体温度が破損を仮定した 450℃に、わずかに到達していないためである。これは核計装ドライチューブ破損時の炉水位や燃料温度といった炉内状況と、モデル

性質上の水・ジルコニウム反応量の差異に起因すると考えている。結果として、主蒸気配管フランジのガスケットの破損タイミングと、それに伴う原子炉圧力降下の起点に時間的な違いが生じているものの、本質的には解析結果は同等のものとなっている。

RPV 内気体温度は IC 作動ケースの方が全体的に値が高めとなっている。これは、IC 作動ケースでは IC で凝縮された水が再び原子炉内で蒸発することが出来るため、発生蒸気による水・ジルコニウム反応が進みやすい状況にあることに起因すると考えられる。ただし、蒸気の発生が停止する原子炉水位が有効燃料底部（BAF）を切る時間に大きな差はなく、やはり事故進展としては既報のケースと大差はないと考えられる。

図 1 3 に IC（A 系）の除熱量と炉内の非凝縮性ガス分圧、図 1 4 に IC タンク水量を示す。核計装ドライチューブ破損、主蒸気配管フランジのガスケットの破損、炉心支持板破損後の原子炉圧力が低下するタイミングで、IC の除熱性能がわずかに回復している。これは解析上 IC に滞留していた水素の一部が RPV 内に戻される結果となったことに起因するが、実際に水素が RPV 内に戻ることが現象として起こりうるかは不明である。しかし、水素が RPV 内に戻るか否かに関わらず、冷却時に消費された A 系タンクの水の量は限定的であり、解析上 A 系タンク水量は最終的に 3～4 割程度消費されるに止まる結果となった。

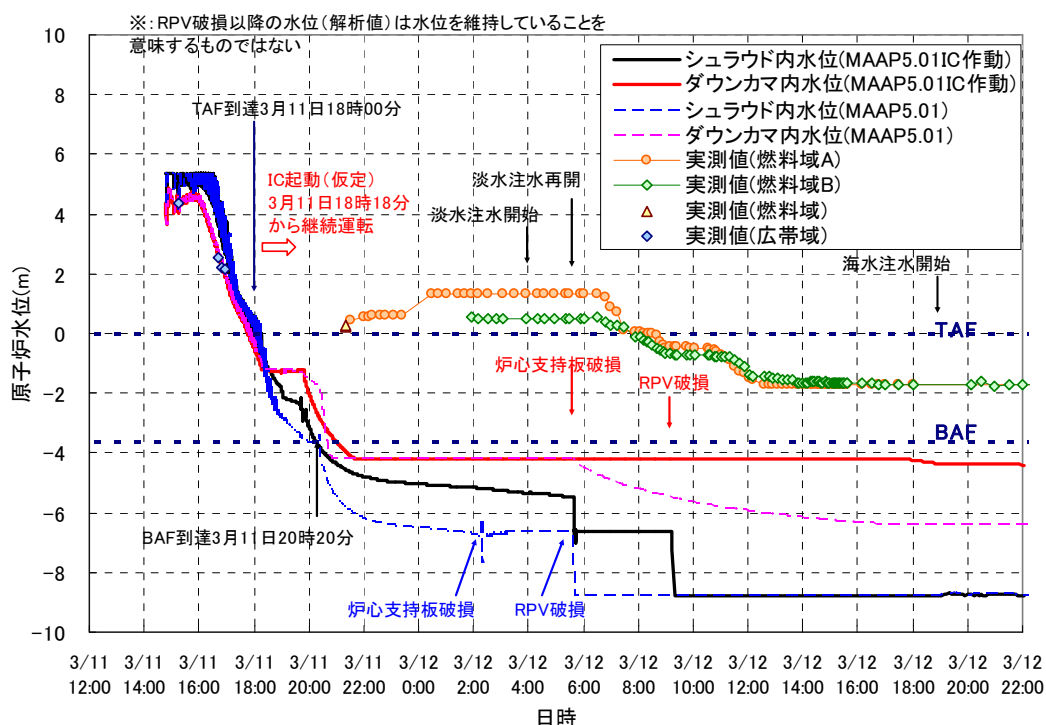


図 6 原子炉水位変化（IC 作動ケースと既報の比較）（青字：既報、赤字：IC 作動ケース）

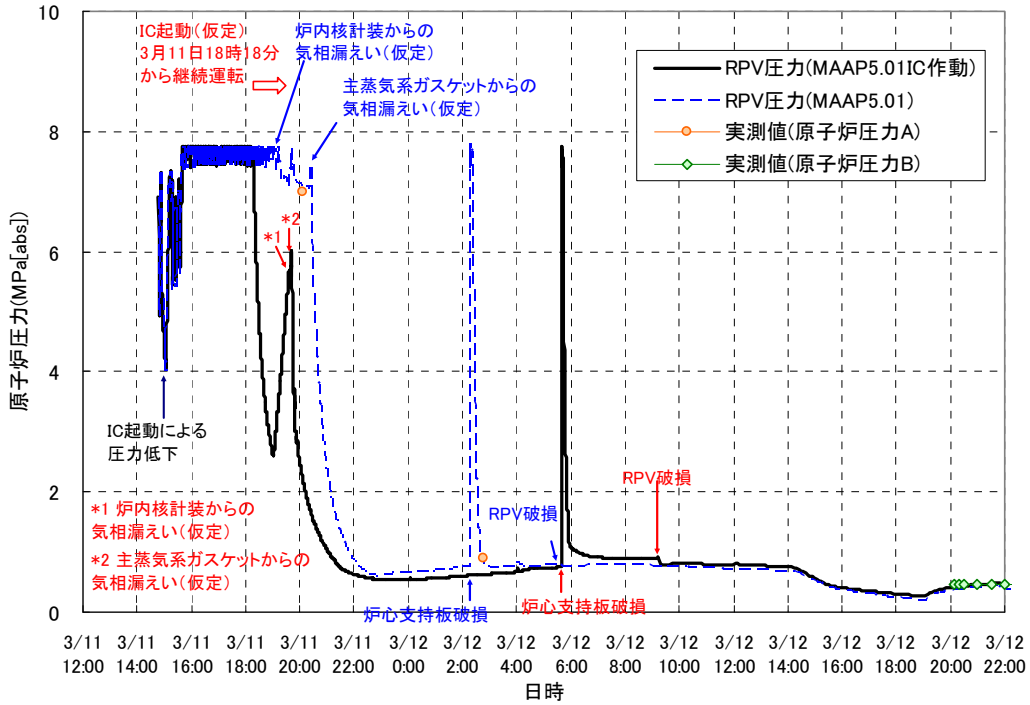


図7 原子炉圧力変化 (IC 作動ケースと既報の比較) (青字：既報、赤字：IC 作動ケース)

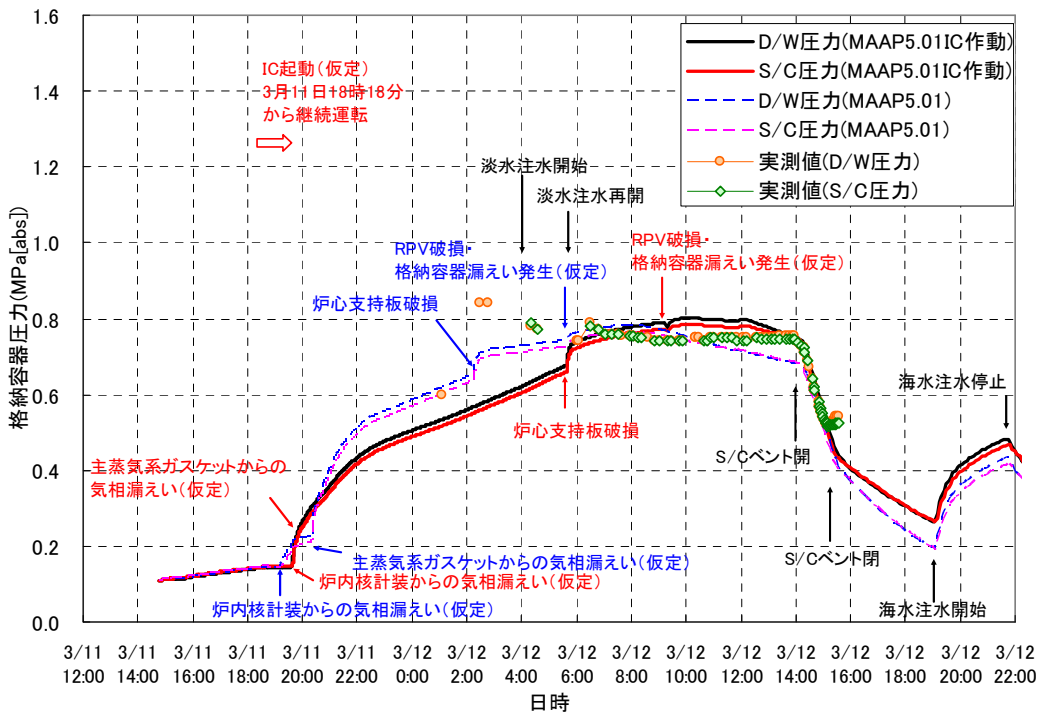


図8 格納容器圧力変化 (IC 作動ケースと既報の比較) (青字：既報、赤字：IC 作動ケース)

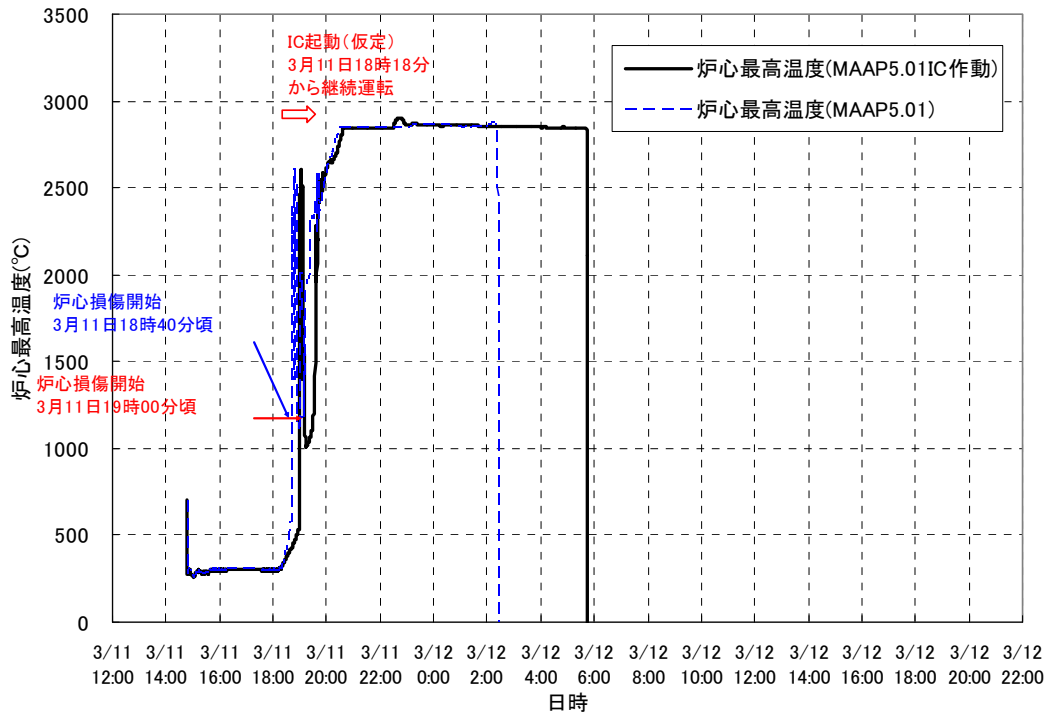


図9 炉心温度変化 (IC 作動ケースと既報の比較) (青字：既報、赤字：IC 作動ケース)

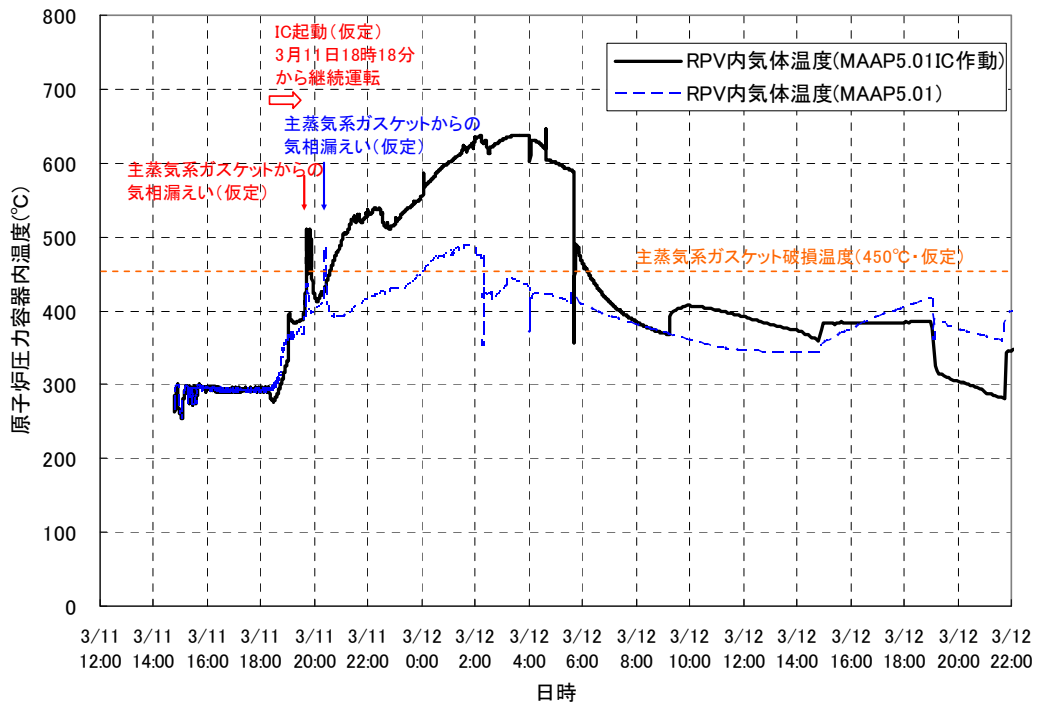


図10 原子炉压力容器内気体温度変化 (IC 作動ケースと既報の比較) (青字：既報、赤字：IC 作動ケース)

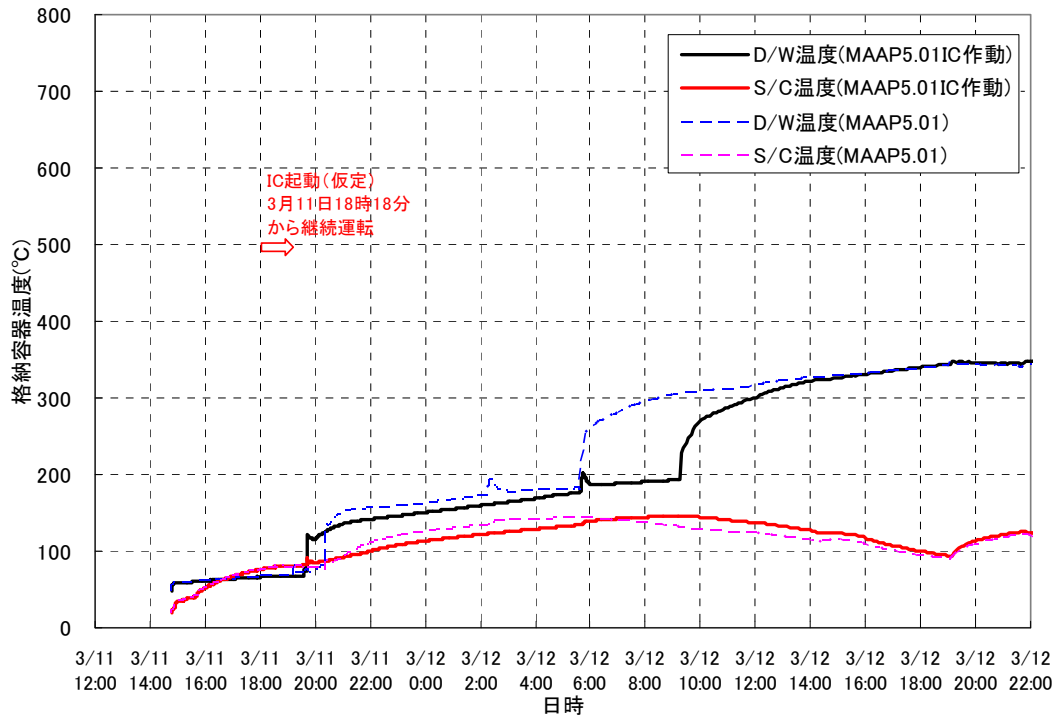


図 1 1 格納容器温度変化 (IC 作動ケースと既報の比較) (青字：既報、赤字：IC 作動ケース)

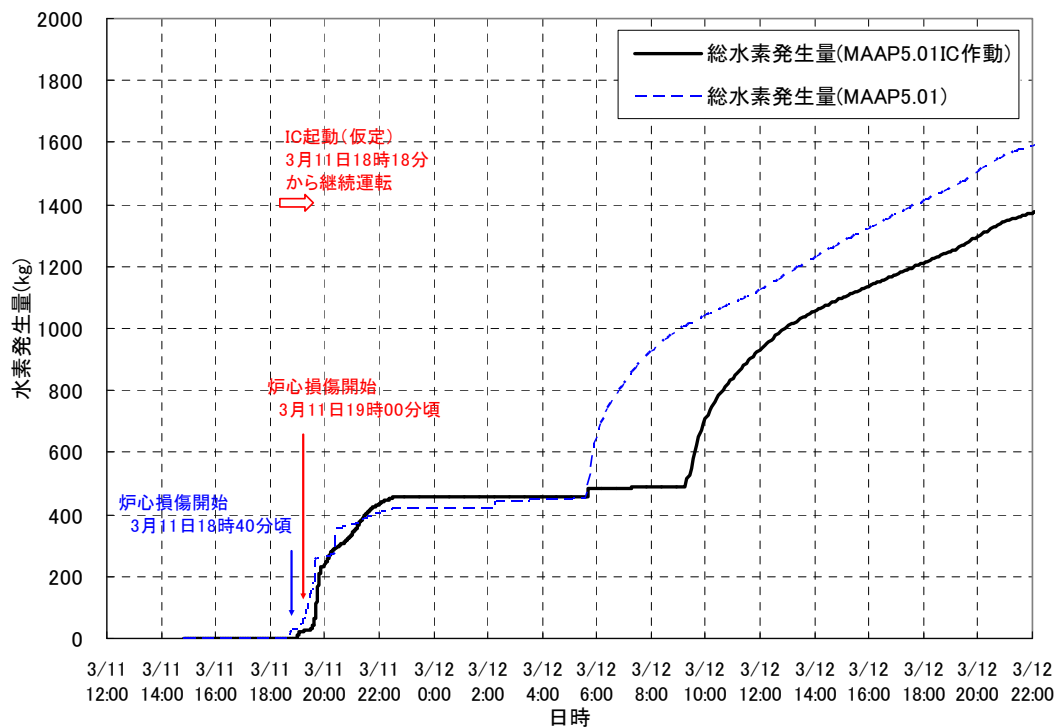


図 1 2 水素発生量変化 (IC 作動ケースと既報の比較) (青字：既報、赤字：IC 作動ケース)

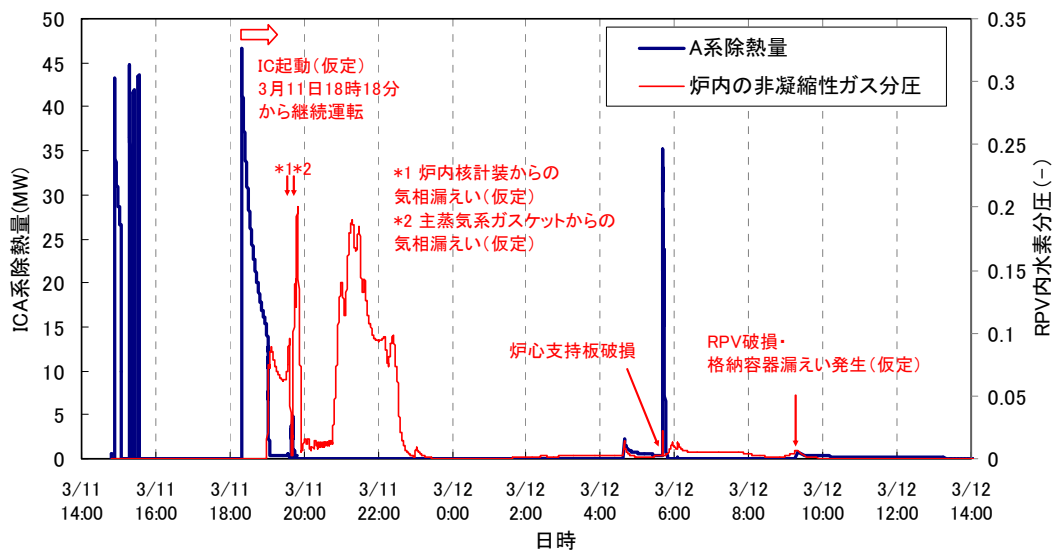


図 1 3 IC (A 系) の除熱量と炉内の非凝縮ガス分圧 (IC 作動ケース)

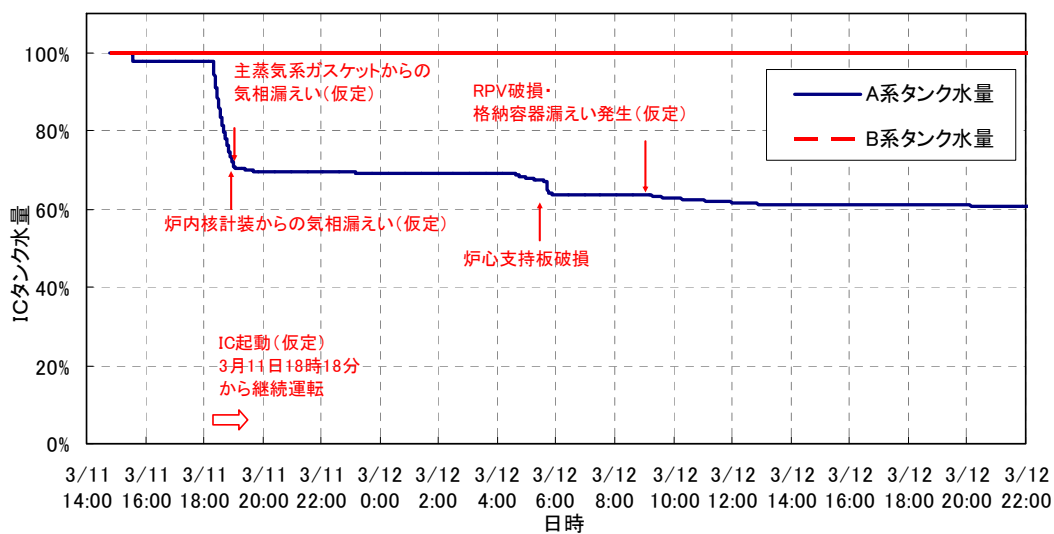


図 1 4 IC タンク水量 (IC 作動ケース)

5. まとめ

全交流電源喪失後、18時18分にICを起動し、その後18時25分にICを閉操作せず開維持した場合の事故進展挙動について検討を行った。その結果、ICが起動し続けていたとしても、水-ジルコニウム反応によって発生する水素がICの管内に滞留することによりICは除熱能力を喪失することが示唆された。IC作動ケースでは、RPV破損タイミングを遅らせる結果となったが、事故進展の大きな流れからすると現在の1号機の状況と比較して大きな差は生じなかったと考える。