

消防車による 1 号機原子炉注水の注水量に関する検討

1. はじめに

福島第一原子力発電所 1～3 号機では、事故時に作動が期待されていた注水機能を最終的に全て喪失し、臨機の対応として、消防車を用いた原子炉代替注水を実施した。しかしながら、配管図面上の分岐の存在や、主復水器での溜まり水が確認されたことから、消防車から吐出された冷却水は全量が原子炉へ注水されたわけではなく、他系統・機器へ流れ込んでいた可能性が考えられる。

添付資料 1-4 において、消防車による原子炉への注水量を明らかにするための準備として、消防車注水に関連する操作実績や観測情報と注水ラインにおいてバイパス流が生じ得る経路についてまとめている。

本資料では、1 号機について添付資料 1-4 で抽出したバイパス経路からの流出量を定量評価し、原子炉への正味の注水量を推定した結果を報告する。

2. 消防車を用いた原子炉代替注水とバイパス経路について

2.1. 消防車を用いた原子炉代替注水操作について

消防車を用いた原子炉代替注水量の評価の元となる代替注水操作履歴を表 1 に示す。この操作履歴については、当社社内事故調査報告書でとりまとめた運転操作時系列（添付資料 1-4 の表 1）、及び、主な時系列（参考資料[1]）の注水記録を集約した。また、消防車構成については、同じく社内事故調査報告書にて報告した「消防車による原子炉注水の概略図（参考資料[2]）」から、表 1 の各注水操作の時間帯に該当する構成を図 1 の A～D として表記している。

表 1 消防車による代替注水操作履歴

No.	日時	操作	備考	水源	消防車構成
注水 1	3/12 4:00 頃	注水開始		淡水	A
		注水停止	1,300L 注入完了		
注水 2	5:46	注水開始		淡水	A→B
	5:52	注水停止	1,000L 注入完了		
	-	注水開始			
	6:30	注水停止	1,000L 注入完了		
	-	注水開始			
	7:55	注水停止	1,000L 注入完了		
	-	注水開始			
	8:15	注水停止	1,000L 注入完了		
	-	注水開始			
	8:30	注水停止	1,000L 注入完了		
	-	注水開始			
	9:15	注水停止	1,000L 注入完了		
	-	注水開始			
	9:40	注水停止	15,000L 注入完了		
	-	注水開始			
14:53	注水停止	80,000L (累計) 注入完了			
注水 3	19:04	注水開始		海水	C
	21:45	注水停止			
注水 4	23:50	注水開始		海水	C
	3/14 1:10	注水停止			
注水 5	20:00	注水開始		海水	D
	3/19 0:00	(注水継続)			

注) 3/11 20:50 に原子炉代替注水ラインが完成し、ディーゼル駆動消火ポンプ自動起動により、原子炉減圧後に注水可能な状態となった。しかし、3/12 1:48 のディーゼル駆動消火ポンプ停止までに減圧操作が行われていなかったことから、3/12 4:00 頃以前の代替注水はないものとして評価した。

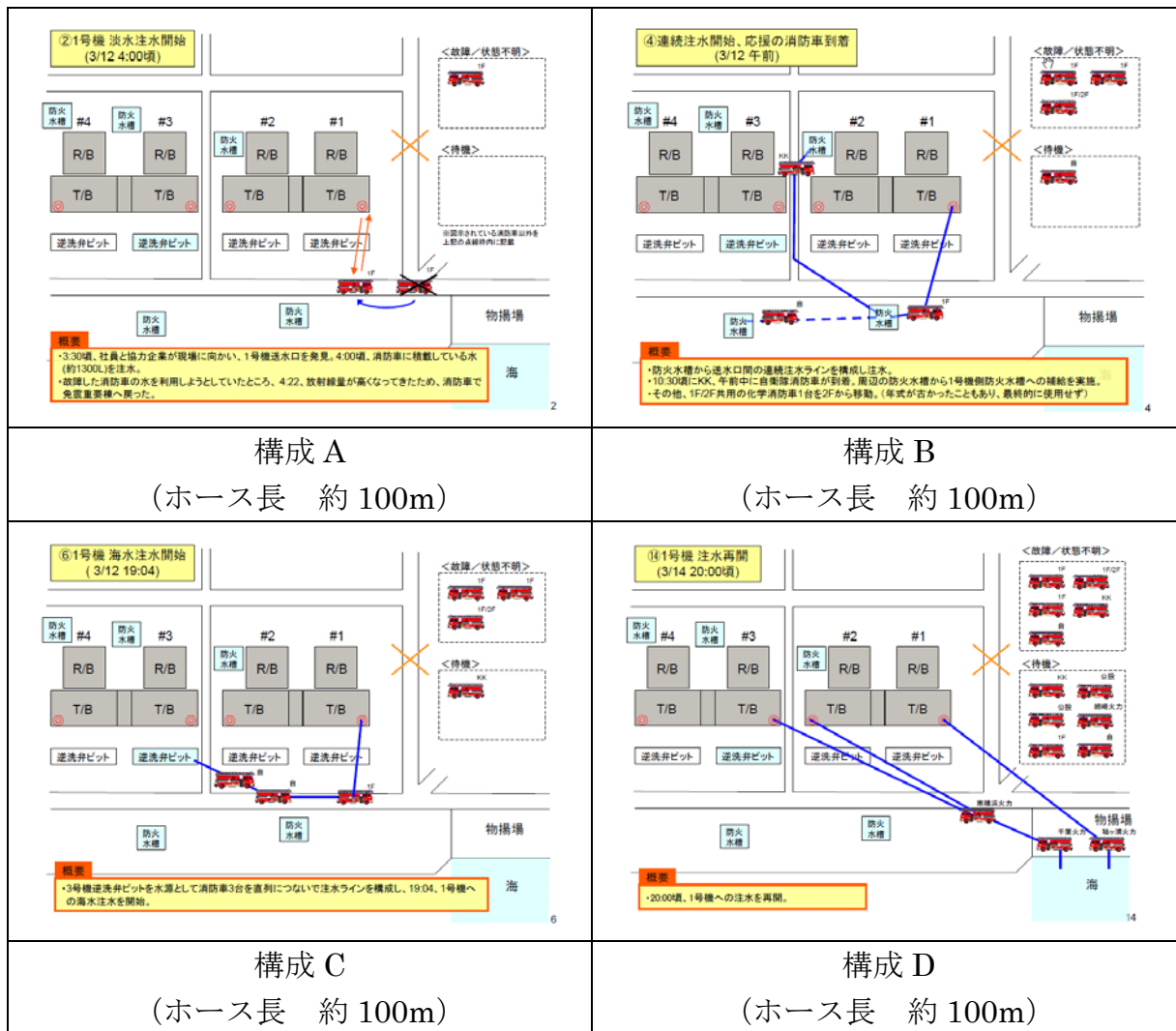


図 1 消防車による原子炉注水の概略図 (抜粋) (参考資料[2])

2.2. バイパス経路について

消防車による原子炉代替注水を開始した当初は、図 2 に示すとおり、消防車を消火系（FP 系）につながるタービン建屋外側の消防車の送水口に接続し、FP 系から復水補給水系（MUWC 系）を経由した後、原子炉へ注水をしていた。

MUWC 系は、プラント内に設置される各種機器の洗浄、封水、ならびに、各タンク、機器への給水など、プラント運転中あるいは停止中に復水を供給する系統である。このため地震直前に本来の用途で MUWC 系から復水の補給を行っていた箇所が存在し、仮に地震後もライン構成が変更されていなかった場合には、その箇所へバイパス流が生じる可能性がある。バイパス流が生じ得る経路については添付資料 1-4 にて抽出しており、これらのバイパス経路について各流出量を評価し、原子炉への注水量を推定した。

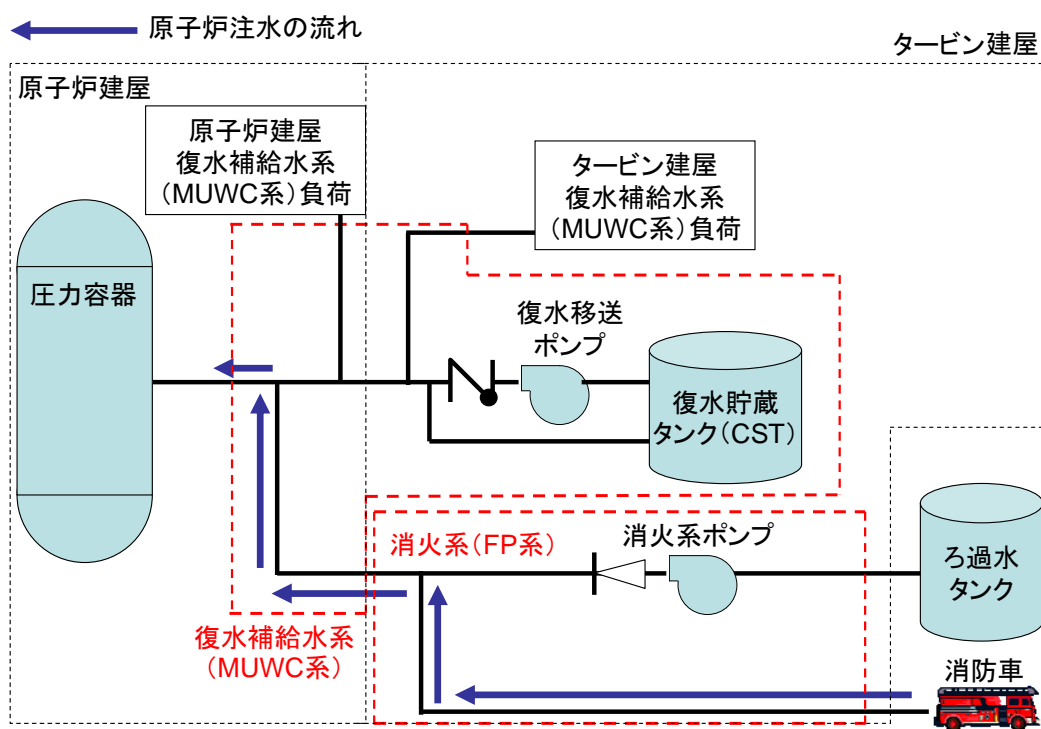


図 2 消防車による原子炉代替注水のラインアップについて
(添付資料 1-4 の図 1)

表 2 1号機バイパス流が発生する可能性がある経路(添付資料 1-4(別表 1-1))

No	漏えい箇所	呼び径	備考
1	復水ポンプのシール水ライン	3/4 インチ	復水器へ流入
2	復水移送ポンプのミニマムフローライン	4 インチ	復水貯蔵タンクへ流入
3	蒸化器補給水ライン	2 インチ	復水器へ流入
4	弁封水ライン	1/2 インチ	配管側へ流入
5	廃液中和ポンプシール水ライン	3/4 インチ	配管側へ流入
6	復水器真空破壊弁のシール水ライン	3/4 インチ	復水器へ流入
7	PLR ポンプのメカシール水ライン	3/4 インチ	機器ドレンサンプへ流入
8	給水ポンプのシール水ライン	1 インチ	復水器へ流入
9	復水脱塩装置	8 インチ	復水脱塩塔へ流入
10	低圧ヒータードレンポンプのシール水ライン	3/8 インチ	機器ドレンサンプへ流入

3. 流出量評価の前提条件

3.1. 代替注水操作に関わる仮定

原子炉への注水量およびバイパス経路への流出量の評価については次の仮定を置き、表 3 に示す代替注水操作履歴に基づき評価した。

<代替注水操作に関わる仮定>

- ・消防車ポンプを 1MPa で運転していたという発話記録と、使用した一般的な屋外消火栓ホースの耐圧がおおよそ 1MPa であることから、消防車吐出圧を 1MPa 一定とした。
- ・「注水 1」の注水開始時刻は、3/12 4:00 と仮定した。
- ・「注水 2」の期間では断続的に注水を行っているが、その注水開始時刻の記録がほとんどないため、一つ一つの注水期間を指定できない。本評価の圧力一定の条件による計算では、求めた注水流量が注水期間にわたって注入されたことになり、注水総量への寄与が大きくなることから、その影響を考慮して注水停止期間を含め平均的に注水が行われたものとした。

表 3 本検討で仮定した消防車による代替注水操作履歴

イベント			消防車吐出圧力 (解析)	消防車吐出圧力 (発話記録)	消防車構成
注水 1	注水開始	3/12 4:00	1MPa	ポンプ吐出圧を 1MPa 程度で運用し ていた	A
	注水停止	-			
注水 2	注水開始	3/12 5:46	1MPa	〃	A→B
	注水停止	3/12 14:53			
注水 3	注水開始	3/12 19:04	1MPa	〃	C
	注水停止	3/12 21:45			
注水 4	注水開始	3/12 23:50	1MPa	3/13 4:00 頃 0.46MPa 3/13 5:25 頃 0.65MPa	C
	注水停止	3/14 1:10			
注水 5	注水開始	3/14 20:00	1MPa	3/15 23:00 1MPa 3/16 4:00 1MPa 3/16 8:00 0.7MPa 3/16 12:00 0.7MPa	D
	(解析終了)	3/19 0:00			

3.2. バイパス経路についての設定

代替注水は、消防車～FP 系～MUWC 系とラインナップされている。MUWC 系において、原子炉へ向かう経路と各バイパス経路へと分岐している。分岐点の先でさらに表 4 に示す計 10 種類のラインに分岐するが、分岐ラインのうち口径の小さい配管には配管圧損が大きいため有意な量が流れず、口径の大きい配管から流出することになる。(例えば、④復水器ラインは No.3、7、8、9 に分岐するが、No.3、7、8 は No.9 に比べて圧損が大きいため、水が流れないか流れたとしても少量であり、最大口径の No.9 に④の流量のほとんどが流れることになる。) よって、原子炉への正味の注水量を評価する上では、上流側の上記 3 つのバイパス経路での流量が求めればよく、表 2 で抽出したバイパス経路は表 4 のとおり図 3 に示す 3 つの代表経路 (③CST ミニフローライン、④復水器ライン、⑤弁シール) に集約することができる。

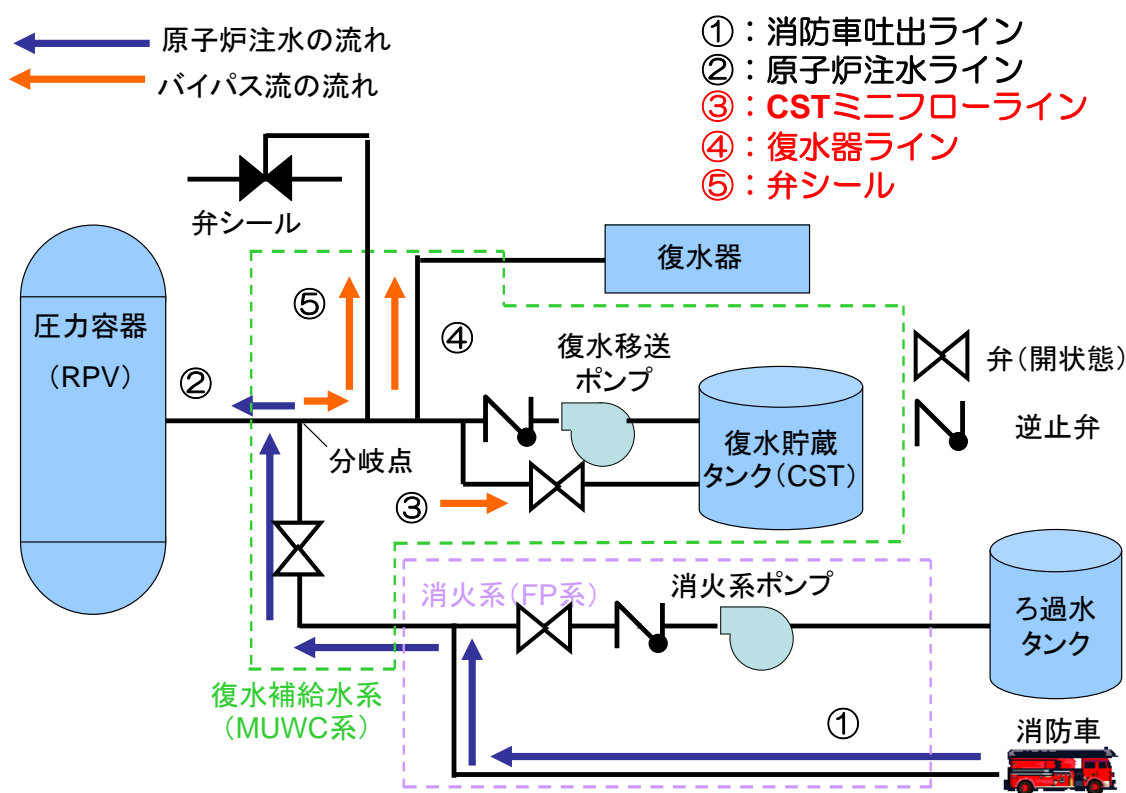


図 3 バイパス代表経路

表 4 バイパス経路の分類

No	漏えい箇所	呼び径	代表経路
1	復水ポンプのシール水ライン	3/4 インチ	⑤：弁シール
2	復水移送ポンプのミニマムフローライン	4 インチ	③：CST ミニフローライン
3	蒸化器補給水ライン	2 インチ	④：復水器ライン
4	弁封水ライン	1/2 インチ	⑤：弁シール
5	廃液中和ポンプシール水ライン	3/4 インチ	⑤：弁シール
6	復水器真空破壊弁のシール水ライン	3/4 インチ	⑤：弁シール
7	PLR ポンプのメカシール水ライン	3/4 インチ	④：復水器ライン
8	給水ポンプのシール水ライン	1 インチ	④：復水器ライン
9	復水脱塩装置	8 インチ	④：復水器ライン
10	低圧ヒータードレンポンプのシール水ライン	3/8 インチ	⑤：弁シール

4. 原子炉注水量とバイパス経路流出量の評価手法

4.1. 原子炉注水量とバイパス経路流出量の評価手法

3.2.で述べたとおり、消防車からの代替注水は③CST ミニフローライン、④復水器ライン、⑤弁シールの3つのバイパス経路から流出するとし、原子炉への正味の注水量を評価する。図4の評価体系に示すように、消防車から吐出される冷却水(①)は、FP系を介してMUWC系配管の1点で、原子炉へ向かうライン(②)と上記3つのバイパスライン(③～⑤)に分岐するものとして評価を行った。また、3.1.で述べたとおり、消防車吐出圧力を1MPa程度で運用していたという情報に基づき、全評価期間において消防車吐出圧力一定として評価を行った(注 この仮定は表3に示す、一部残されている消防車吐出圧力の測定記録と必ずしも一致していない。これについては6.2.で述べる)。

エネルギー保存則により、図4の各経路のヘッドで示すとおり、配管圧力損失を加えた各経路(②～⑤)のヘッドはMUWC分岐点での圧力ヘッド P' に等しい。分岐点圧力ヘッド P' は消防車の吐出圧力 P_1 と、圧損係数 C_1 、流量 Q_1 と高低差の位置ヘッド ΔH_1 により次式で得られる。

$$P' = P_1 - C_1 \times Q_1^2 + \Delta H_1 \quad (1)$$

ここで右辺第2項は圧力損失を示している。

各経路についても、圧力 P 、圧損係数 C 、位置ヘッド ΔH を用いて同じ式が成り立ち、各々の流出流量について以下のように表現することが出来る。

$$Q_2 = \sqrt{(P' - P_2 + \Delta H_2) / C_2} \quad (2)$$

$$Q_3 = \sqrt{(P' - P_3 + \Delta H_3) / C_3} \quad (3)$$

$$Q_4 = \sqrt{(P' - P_4 + \Delta H_4) / C_4} \quad (4)$$

$$Q_5 = \sqrt{(P' - P_5 + \Delta H_5) / C_5} = 0 \quad (5)$$

各経路からの流出流量の和は消防車から吐出される流量に釣り合うことから、各々の流量は次の流量収支式が成り立つ。

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (6)$$

ここで、 P_1 は消防車吐出圧 1MPa、 P_2 は原子炉圧力、 $P_3 \sim P_5$ は大気圧とした。なお、これまでの MAAP 解析結果（別冊 1）によると注水を開始した時点で既に原子炉圧力容器は破損していると考えられるため、今回の評価に用いる原子炉圧力 P_2 は、原子炉圧力容器と均圧化している D/W の代表的な圧力（「注水 1,2」で 0.65MPa「注水 3,4」で 0.5MPa、「注水 5」で 0.07MPa）を用いることとした。圧損係数はホース（構成 A～D のいずれも 100m）と系統・機器の仕様により、位置ヘッド ΔH は配管据え付け位置の差により算出される既知の値である。従って、式(6)の右辺に式(1)～(5)を用いると、右辺も Q_1 のみの式となり、これを解けば Q_1 の解が得られる。

③CST ミニ ④復水器 ⑤弁シール
 フローライン ライン

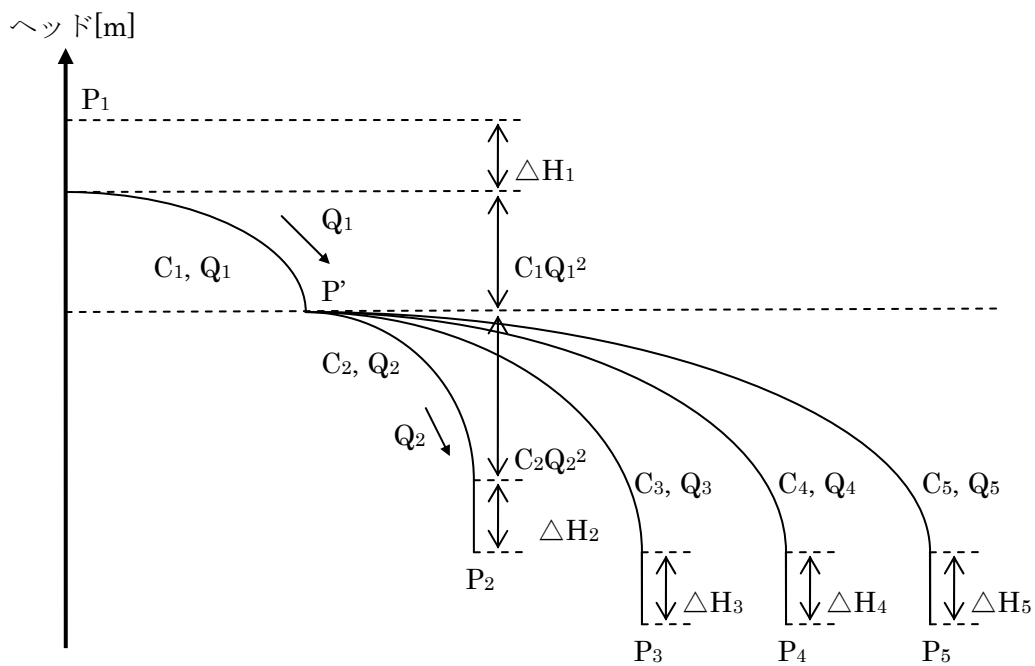
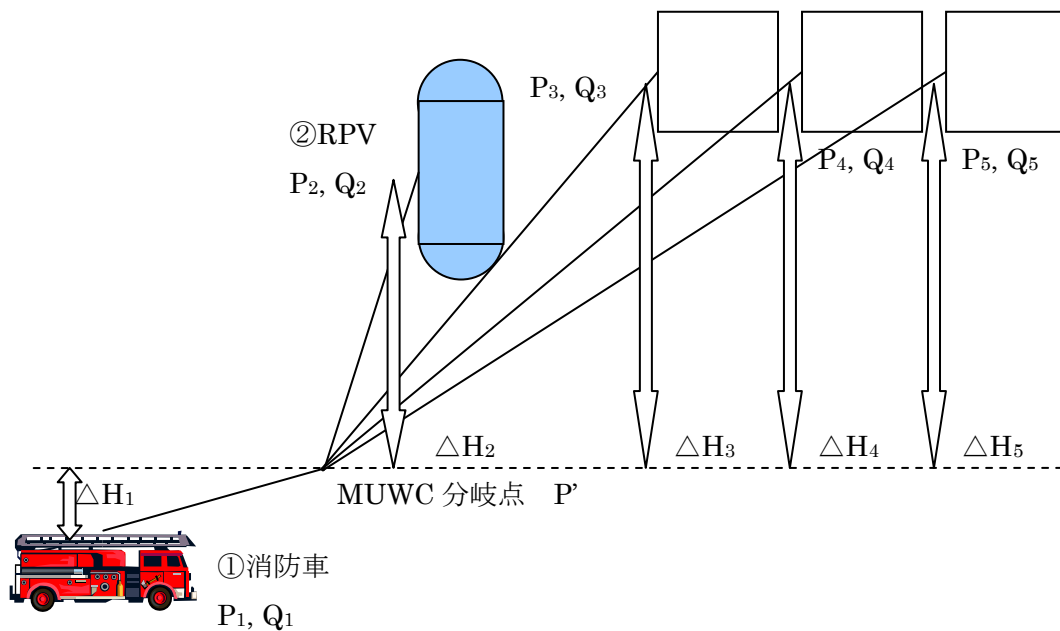


図4 評価体系（上）と各経路のヘッド（下）

5. 原子炉注水量評価結果

5.1. 原子炉への注水量

本検討で得られた原子炉への注水量を図 5 及び表 5 に示す。3.1.で述べたとおり、3/12 4:53~14:53 の「注水 2」の期間については断続的にポンプ操作が行われたため、消防車吐出圧力 1MPa で得られた注水流量を「注水 2」の期間にわたり平均したものを注水流量としている。

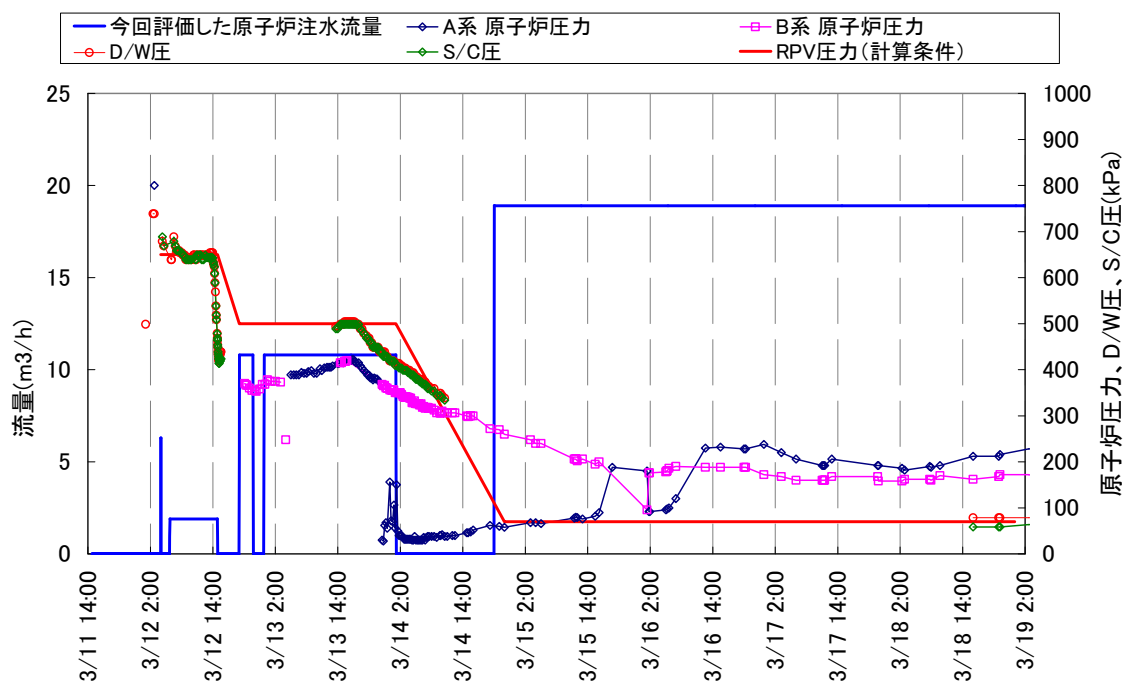


図 5 今回評価した原子炉注水流量と原子炉圧力および格納容器圧力実測値

表 5 各経路への流出量評価結果

イベント(*1)			注水流量 (MAAP 解析入力値)	①消防車 吐出流量	②R P V 注水流量	③C S T 注水流量	④復水器 注水流量	原子炉圧力 (計算条件)
			kg/s	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	m ³ /h	MPa
注水 1 (淡水)	注水開始	3/12 4:00	1.75	28.5	6.3	5.3	16.9	0.65
	注水停止	3/12 4:02(*2)						
注水 2 (淡水)	注水開始	3/12 5:46	0.53	8.8(*3)	1.9(*3)	1.6(*3)	5.2(*3)	0.65
	注水停止	3/12 14:53						
注水 3 (海水)	注水開始	3/12 19:04	3.00	32.4	10.8	5.2	16.5	0.50
	注水停止	3/12 21:45						
注水 4 (海水)	注水開始	3/12 23:50	3.00	32.4	10.8	5.2	16.5	0.50
	注水停止	3/14 1:10						
注水 5 (海水)	注水開始	3/14 20:00	5.25	39.3	18.9	4.9	15.5	0.07
	(解析終了)	3/19 0:00	-	-	-	-	-	-

(*1)赤枠は最新の MAAP5 解析 (添付資料 3) で用いる条件。

(*2)「注水 1」の注水停止時刻は、注水開始を仮定した 3/12 4:00 から 28.5m³/h の消防車吐出流量で 1,300L 注水し終えた時刻とした。

(*3)「注水 2」の注水中の消防車吐出流量評価値自体は「注水 1」と同じであるが、断続的に注水を行っていたため停止時間を含めた期間全体の平均値とした。

5.2.各バイパス経路への流出割合

各経路への流出割合について図6に示す。原子炉への注水に要するヘッドが原子炉圧力により増減するため、原子炉圧力が高いところでは、原子炉への注水割合が小さく、原子炉圧力が低いところでは原子炉への注水割合が大きくなる結果となった。また、今回の消防車吐出圧力 1MPa 一定の条件下では、観測された原子炉圧力値の範囲では、他系統への流出があるものの全く原子炉へ入っていないとの結果にはならなかった。

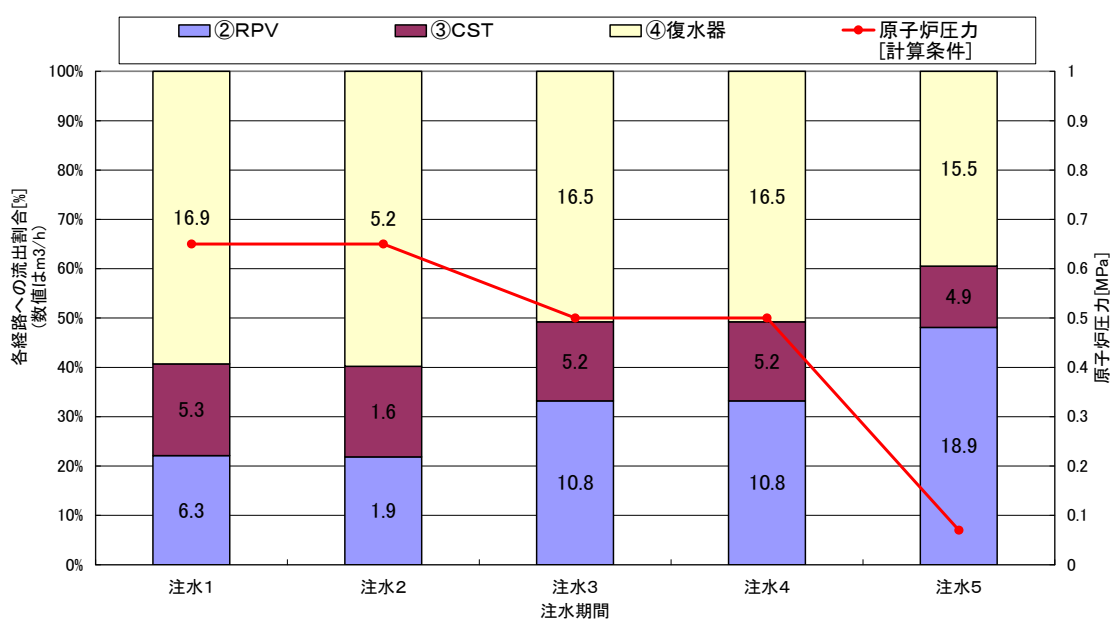


図6 原子炉圧力と各経路への流出割合

5.3. 本評価の原子炉注水流量と従来の注水流量の比較

本評価の原子炉注水流量、従来の MAAP 解析で入力として設定した注水流量、添付資料 1-4 の「図 5 1号機 消防ポンプの吐出流量」で報告した消防車吐出流量を図 7 に示す。本評価の原子炉注水量は、従来の MAAP 解析入力注水量及び添付資料 1-4 の消防車吐出流量を概ね (※) 上回っていることが確認された。また、3/14 20:00～の「注水 5」の期間においては、添付資料 1-4 の消防車吐出流量の約 1.5 倍以上の流量で原子炉へ注水されると評価された。

(※) 3/12 5:46～14:53 の「注水 2」の期間に関しては、本評価の原子炉注水量は添付資料 1-4 に記載した消防車吐出流量を下回っている。添付資料 1-4 の消防車吐出流量は、表 1 に記した 14:53 での時点の消防車累積注水量 80,000L を「注水 2」の期間で除したものであるため、同じく累積注水量からバイパス分を考慮した本評価の原子炉への注水流量が消防車吐出流量を下回るのは必然である。従来の MAAP 解析においても、添付資料 1-4 の消防車吐出流量が全量は原子炉へ注水出来ていないと考え、低めの注水量を設定していた。本評価の原子炉注水流量は、この MAAP 解析の原子炉への設定注水流量より大きい結果となったため、従来の MAAP 解析はより保守的な厳しい条件で計算されていたことになる。

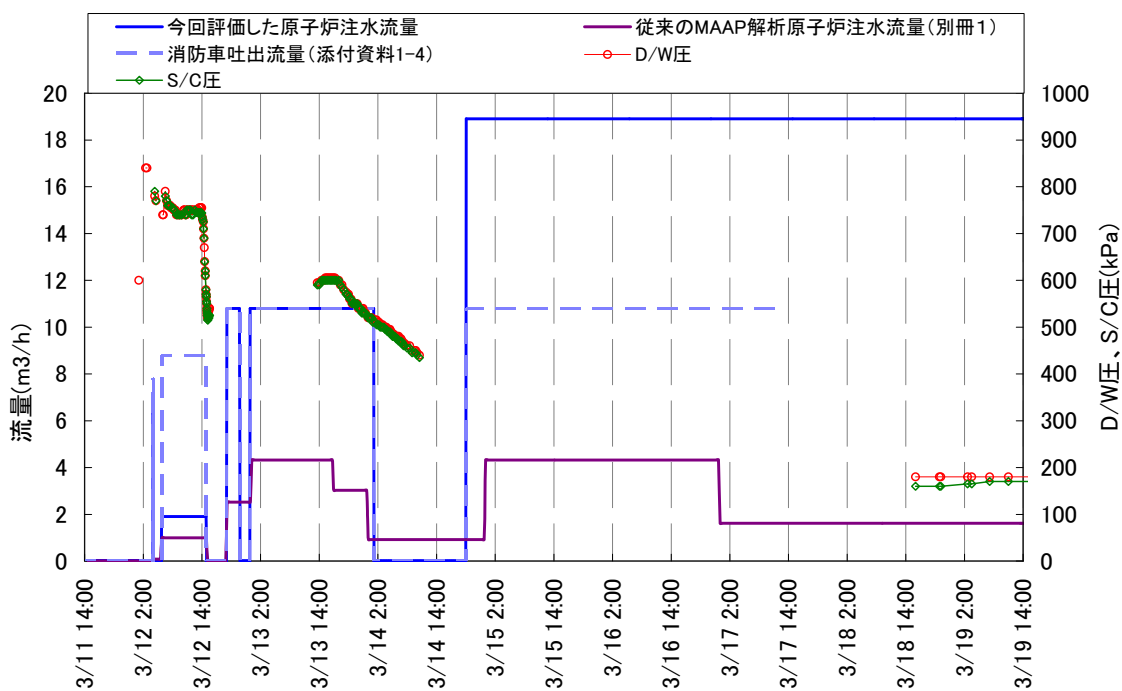


図 7 注水流量の比較

6. 考察

6.1. 消防車運転記録との整合性

表 6 に 3/12 5:46～14:53 の「注水 2」における記録から算出した消防車吐出流量と本評価による消防車吐出流量を示す。参考資料[1]に記載されたとおり [a] の期間については注水開始／停止操作の時刻の記録が残っており、この記録に基づく消防車吐出流量は $10\text{m}^3/\text{h}$ と算出できる。[b]～[h] の期間は注水開始時刻の記録がなく、吐出流量を計算できない。そこで、直前操作である注水停止の時刻と同時刻に注水が開始された（つまり、連続的に注水が行われた）と仮定して、消防車吐出流量を求めた。この値は注水時間を最大とした値であるため、消防車吐出流量はこれより大きな値となると考えることができる。

「注水 2」の期間は、図 5 および図 7 で示した D/W 圧力実測値は約 0.65MPa から大きく変化していないため、消防車の運転状態が一定であれば消防車吐出流量は一定になると考えられる。表 6 に示す記録に基づく消防車吐出流量は、[a] の流量 $10\text{m}^3/\text{h}$ に対して [b]～[f] はより少ない流量を示していることから、上記の仮定より短い時間で注水されたと考えると整合がとれている。しかし、[a] の流量より大きな [g] の $36\text{m}^3/\text{h}$ 以上、[h] の $11\text{m}^3/\text{h}$ 以上では辻褄が合わない。このことから、実際の操作時刻と免震重要棟の発話までの間隔は一定ではないと考えられ、注水記録から算出した消防車吐出流量には不確かさを含んでいると推定される。一方、解析による消防車吐出流量 $28.5\text{m}^3/\text{h}$ で注水した場合、[a] で約 2 分間、[g] で約 32 分間注水が行われたことになる。表 6 の最大注水時間と比較してもその差は数分程度であり、事故対応の最中（この時間はベント操作対応に奔走している時）ではその程度の時間のずれが現場と免震重要棟の連絡で生じていたとしても不自然ではない。従って、本評価により求めた消防車吐出流量は、注水開始／停止の記録に対して大きく矛盾していないと考えられる。

表6 「注水2」における記録から算出した消防車吐出流量と
本評価上の消防車吐出流量

イベント				最大注水時間 (*1)	注水量 (記録)	最低消防車吐出流量 (積算注水量から算出)	解析消防車吐出流量 (吐出圧力1MPaから算出)
No.	日時	操作	備考	(min)	(L)	(m ³ /h)	(m ³ /h)
注水2	[a]	3/12 5:46	注水開始	6	1,000	10	28.5 (注水中)
		5:52	注水停止				
	[b]	5:52	注水開始	(38)	1,000	>1.6	
		6:30	注水停止				
	[c]	6:30	注水開始	(85)	1,000	>0.7	
		7:55	注水停止				
	[d]	7:55	注水開始	(20)	1,000	>3	
		8:15	注水停止				
	[e]	8:15	注水開始	(15)	1,000	>4	
		8:30	注水停止				
	[f]	8:30	注水開始	(45)	1,000	>1.3	
		9:15	注水停止				
	[g]	9:15	注水開始	(25)	15,000	>36	
		9:40	注水停止				
9:40		注水開始					
[h]	14:53	注水停止	80,000L (累計) 注水完了	(313)	59,000	>11	

(*1)()内の時間は、注水時間が最大となるよう前操作（注水停止）と同時刻と仮定した。

6.2. 消防車の吐出圧力について

表 3 のとおり、消防車吐出圧力は 1MPa で運用されていたとの情報があったことから、本検討においては消防車吐出圧力を 1MPa 一定と仮定した。消防ポンプの特性上、ポンプの回転数が不変であるとする、約 30m³/h 以下の低流量域でのポンプ運転点は吐出流量によらず吐出圧力はほぼ不変である。従って、ポンプの回転数調整等を行っていないければ、圧力一定というのは妥当な仮定と考える。

しかし、表 3 の記録のとおり、3/12 23:50～3/14 1:10 の「注水 4」および 3/14 22:00～3/19 0:00 の「注水 5」の期間には、消防車吐出圧 1MPa より低い圧力で運転していたという記録もある。すなわち、1MPa 程度で運用されていたという情報が、どの期間を指すのかも明確ではないため、1MPa ではない吐出圧力で運転していた期間がある可能性が十分考えられる。

今回の注水量評価は当該期間についても 1MPa として評価しており、添付資料 1-4 の消防車吐出流量よりも本評価の原子炉注水流量の方が大きい結果となっていることから、この評価結果が過大評価であり、実際にはより低い流量でしか注水できていない可能性がある。

6.3. 格納容器圧力変化との関係について

図 8 に 3/12 23:50～3/14 1:10 の「注水 4」におけるポンプ停止前後の注水流量と D/W 圧力を示す。ポンプ停止のタイミングで原子炉内への注水は直ちに 0m³/h となるが、D/W 圧力変化については停止前後で変わりなく単調に減少している。つまり、D/W 圧力の推移は、ポンプを停止しても炉内の状況に大きな変化を与えていないことを示しており、実際の注水流量は本評価のように急激に低下していない可能性がある。表 3 にも示したとおり、仮定した 1MPa より低い吐出圧力でポンプを運転していた発話記録もあり、この吐出圧力が正しいとすれば原子炉への注水流量は今回の評価値より少なく、また消防車のポンプを停止する以前に注水量が 0m³/h になっていた可能性がある。

さらに、本検討では 5 つの注水期間に区切って、その期間のおおよその D/W 圧力 1 点を用いて原子炉注水量を評価しているため、事象進展する炉内状況からのフィードバックを考慮していない。具体的には、実際には注水した水が蒸気発生に寄与し、D/W 温度と圧力を上昇させる事が考えられるため、注水量は減少すると考えられる。逆に、注水量が減少することで D/W は逆の応答を示し、今度は注水量が増加することが考えられる。このバランスにより D/W 圧力および原子炉への注水量が決まると推測されるが、現時点ではそこまでの詳細検討には至っていない。

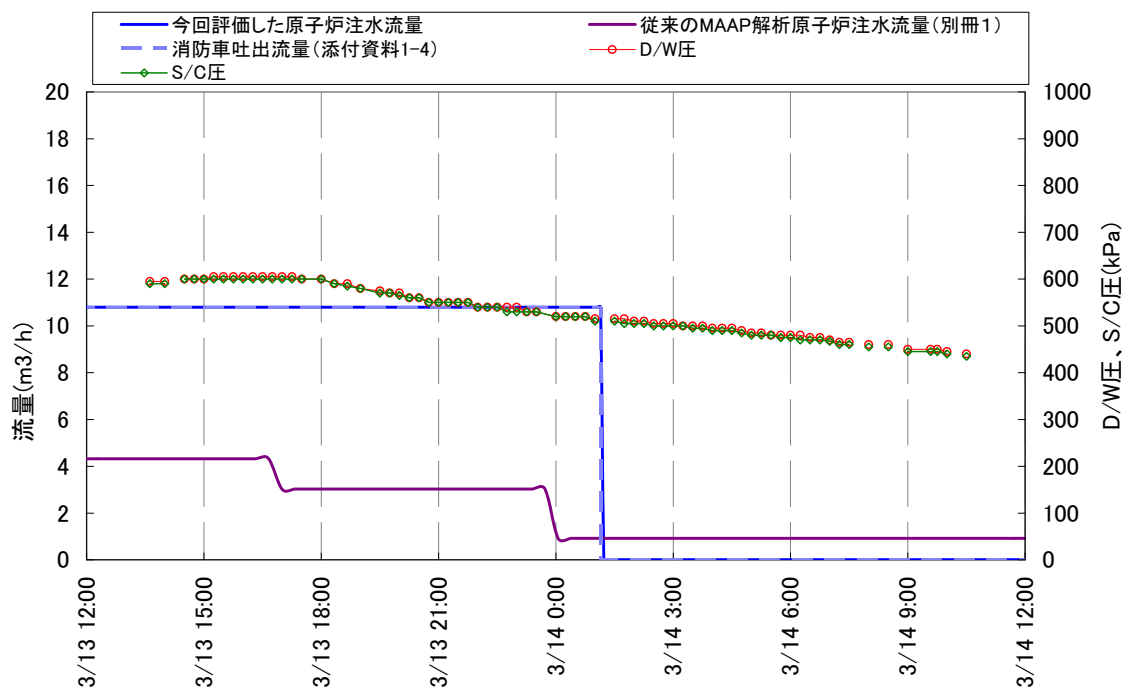


図8 「注水4」ポンプ停止時の挙動

7. まとめ

消防車代替注水時における他系統への流出を考慮した原子炉注水流量の評価を行った。本検討ではポンプの運転記録に基づき、消防車の吐出圧力を1MPa一定と仮定し、添付資料1-4において抽出した10のバイパス経路を3つの代表経路に集約して評価した。本評価での原子炉への注水流量は、従来のMAAP解析の原子炉注水流量（別冊1）と添付資料1-4の「図5 1号機 消防ポンプの吐出流量」の消防車吐出流量を概ね上回る結果となった。

ただし、評価の特性上、消防車の吐出圧力の設定値に原子炉への注水量が大きく依存するが、一部の吐出圧力記録には本評価で仮定した1MPaを下回るものもあり、実際の注水量は今回の評価よりもさらに少ない可能性がある。また、消防車ポンプ停止のタイミングで、D/W 圧力等のプラントパラメータ推移に変化が見られないことから、消防車ポンプ停止より前に原子炉への注水量が十分少ないか、あるいは既に原子炉への注水が途絶えていた可能性も考えられる。これらの過大評価部分についてさらに検討を進め、原子炉への注水によるD/W 圧力変化と、その変化した圧力を反映した原子炉への注水量の詳細検討についても実施していく必要がある。

今後、MAAP 解析により得られた炉心の状態も確認しながら、本検討で得られた結果を基に、事象進展についての検討を深めていく必要がある。また、並行して本検討をベースに2、3号機の消防車による原子炉代替注水についても検討を進めていく。

参考資料

[1] “福島原子力事故調査報告書”，別紙2，p33-35，東京電力株式会社，Jun. 20，2012

[2] “福島原子力事故調査報告書”，添付資料，添付10-4（3），東京電力株式会社，Jun. 20，2012