

## 資料 3 - 1 に関する補足説明資料

使用済燃料ピットへの注水・放水設備による流量設定の考え方について

### 1. はじめに

本資料ではSFPからの大量の水の漏えい時の対応として整備される各手順によりSFPへ注水・放水される流量およびその根拠について説明する。なおSFPへ水を供給する行為のうち、直近まで施設された配管等を用いるもの（燃料取替用水ポンプ等）を注水、スプレイヘッドまたは放水砲によるものを放水と呼称する。

### 2. SFP注水手順にて使用する設備の流量設定の考え方および根拠

SFPからの大量の水の漏えいが発生した際に実施する、SFPへの注水に係る手順の実施判断フローを第1-1図に、SFP注水設備の構成を第1-2図に、各注水手順における水源、送水ポンプおよびポンプ台数を第1表に示す。

各手順における放水によるSFPへの流入流量設定の考え方は以下の通り。（手順番号は第1表の番号と整合）

#### （1）恒設設備を使用する手順

a. 実際の施設ラインで通水した実測値があるものについては実測値を使用する。

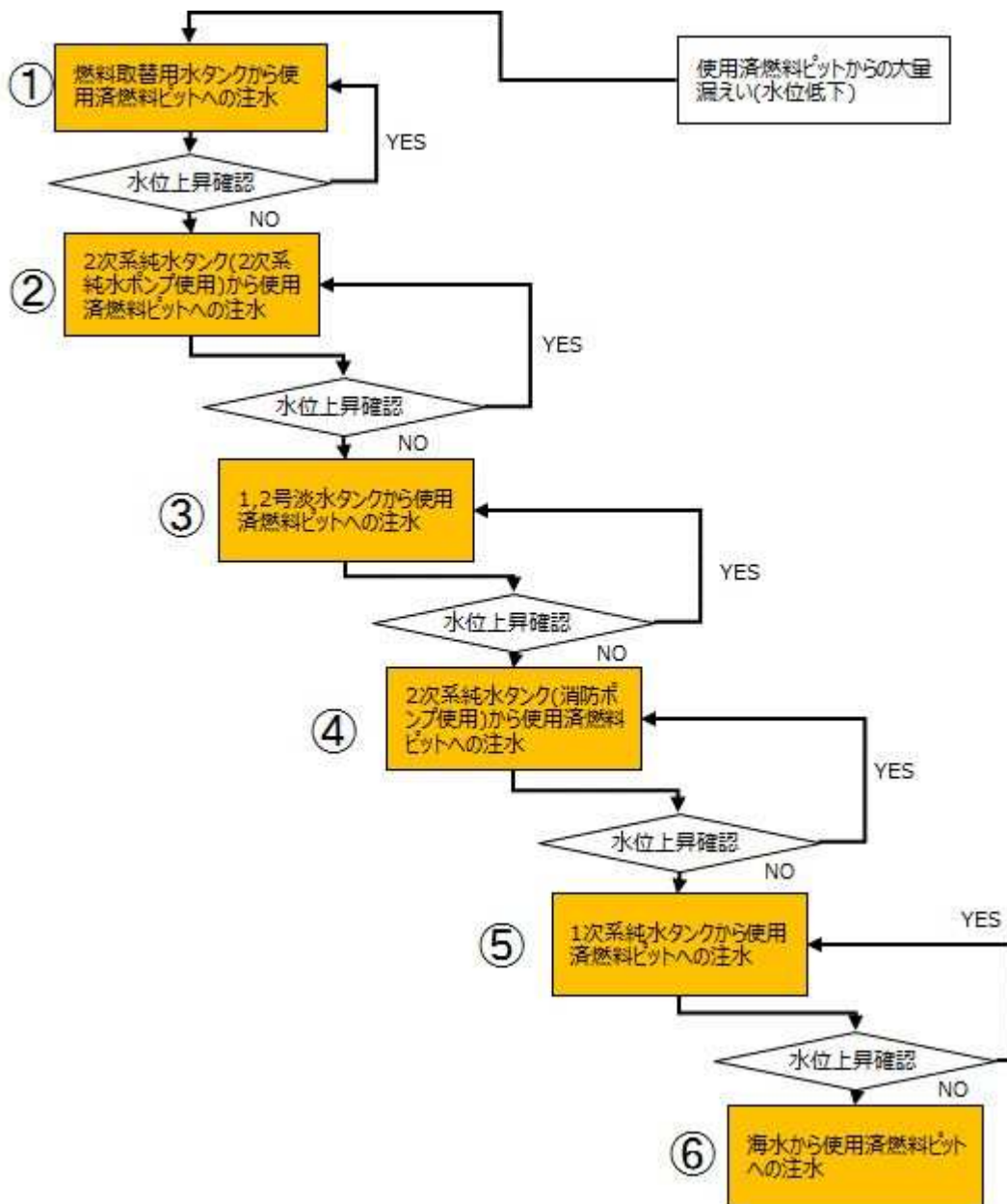
（対象手順：②-1、③）

b. 実際のラインで通水した実測値が無いものについては、ポンプ揚程曲線設計上の上限値とする。（①、②-2、⑤）

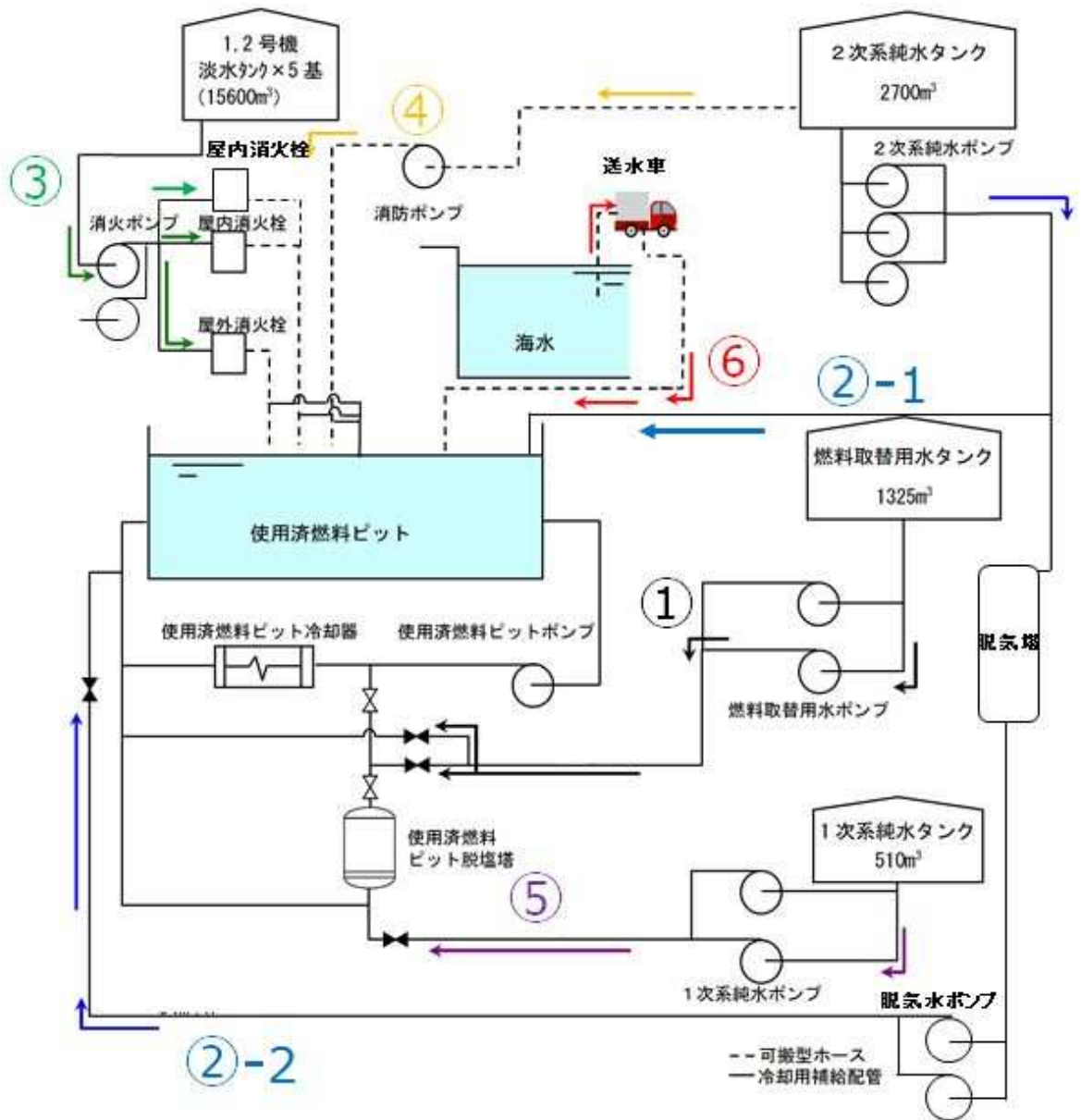
#### （2）可搬型設備を使用する手順

ポンプの揚程曲線から得られる最大値（ホースの圧損は考慮しない）とした。

（対象手順：④、⑥）



第1-1図 SFPからの大量の水の漏えい発生時の手順判断フロー（SFPへの注水）



第1-2図 SFP注水設備の構成

第1表 SFPへの注水手順における水源、送水ポンプ、台数および流量根拠

手順番号 (第1図の 番号に同じ)	水源	送水ポンプ	ポンプ 台数	送水ポンプ 1台当たりの流量	流量根拠
①	燃料取替用水タンク	燃料取替用水ポンプ	2台	□ m <sup>3</sup> /h	揚程曲線設計上の最大値 (第2図参照)
②-2	2次系純水タンク	2次系純水ポンプ	3台 <sup>*1</sup>	□ m <sup>3</sup> /h <sup>*2</sup> (脱気塔経由)	揚程曲線設計上の最大値 (第3-2図参照)
③	1,2号淡水タンク	ディーゼル消火ポンプ または電動消火ポンプ	各1台	22 m <sup>3</sup> /h <sup>*3</sup>	実測値 (第4図参照)
④	2次系純水タンク	消防ポンプ	1台	□ m <sup>3</sup> /h	揚程曲線設計上の最大値 (第5図参照)
⑤	1次系純水タンク	1次系純水ポンプ	2台	□ m <sup>3</sup> /h	揚程曲線設計上の最大値 (第6図参照)
⑥	海水	送水車	1台	□ m <sup>3</sup> /h	揚程曲線設計上の最大値 (第7図参照)

※1 脱気水ポンプは2台

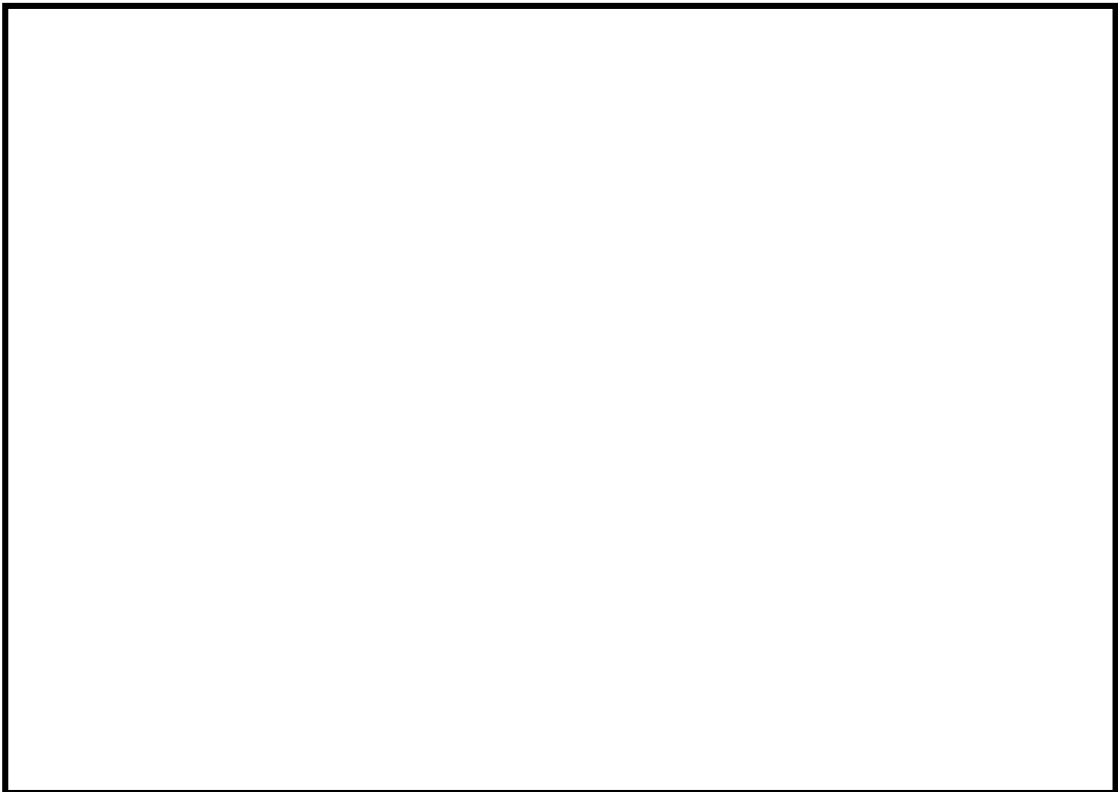
※2 脱気水ポンプの値

※3 使用する消火栓（屋内消火栓：2箇所、屋外消火栓：1箇所）のうち、流量が大きい屋外消火栓の値

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

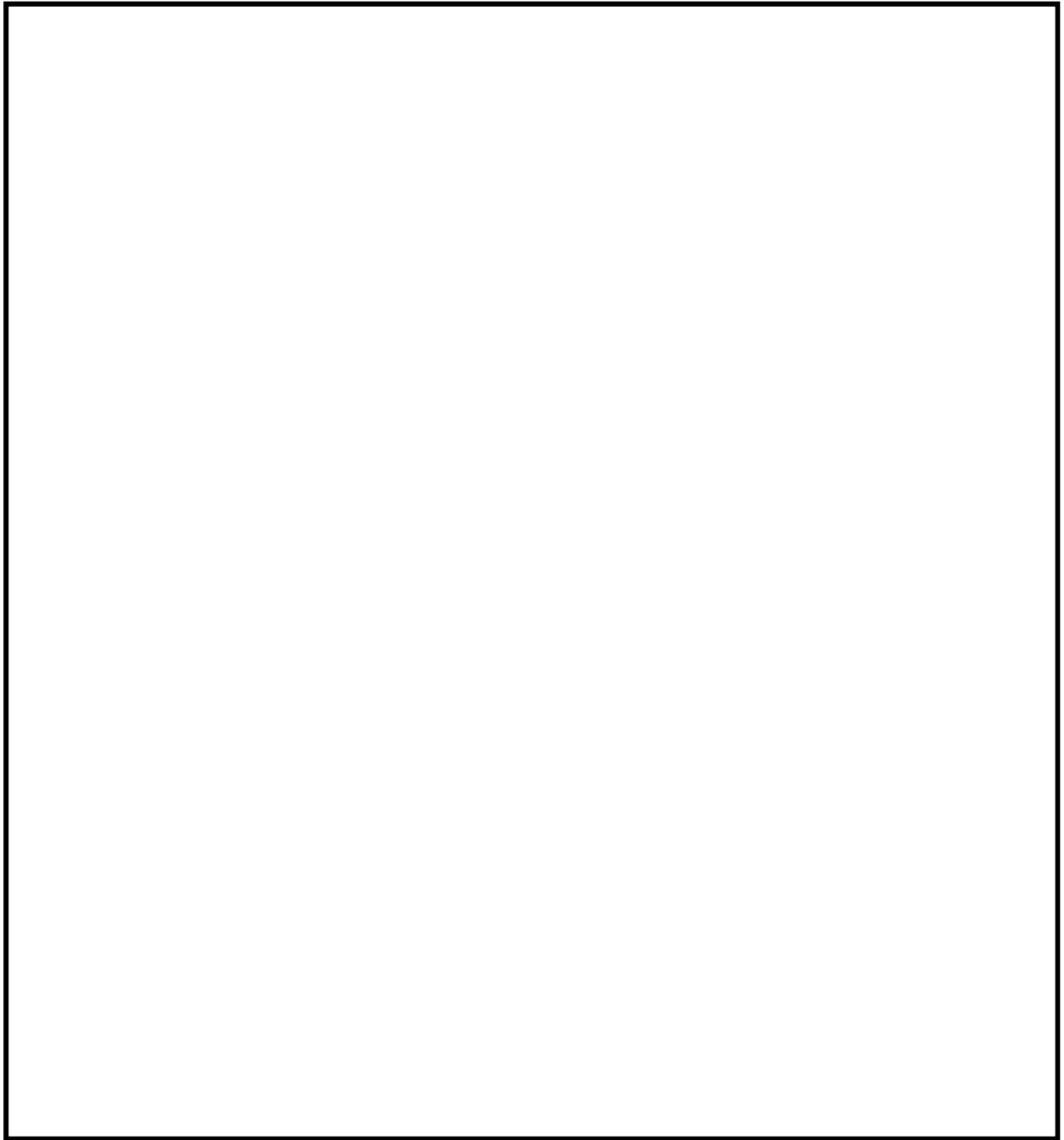


第2図 燃料取替用水ポンプ 流量出典



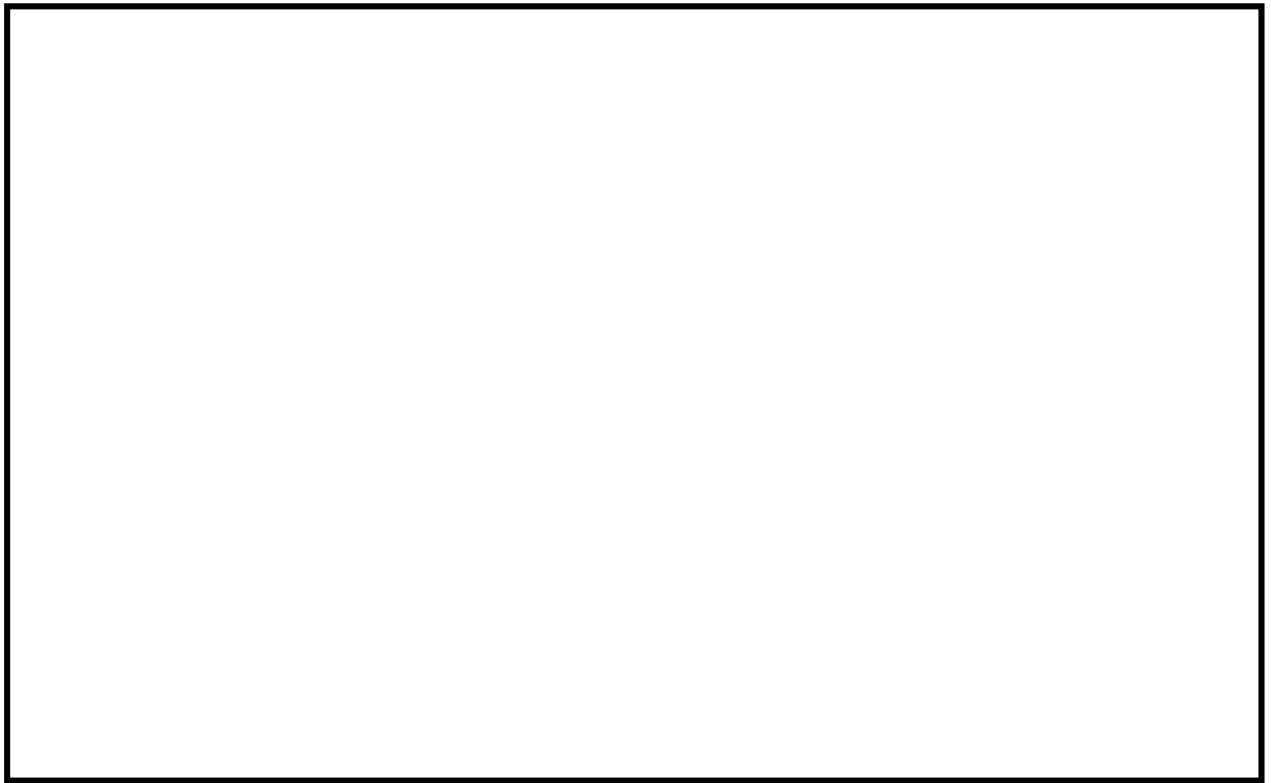
第3-1図 2次系純水ポンプ 流量出典（水張ライン使用時の実測値）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



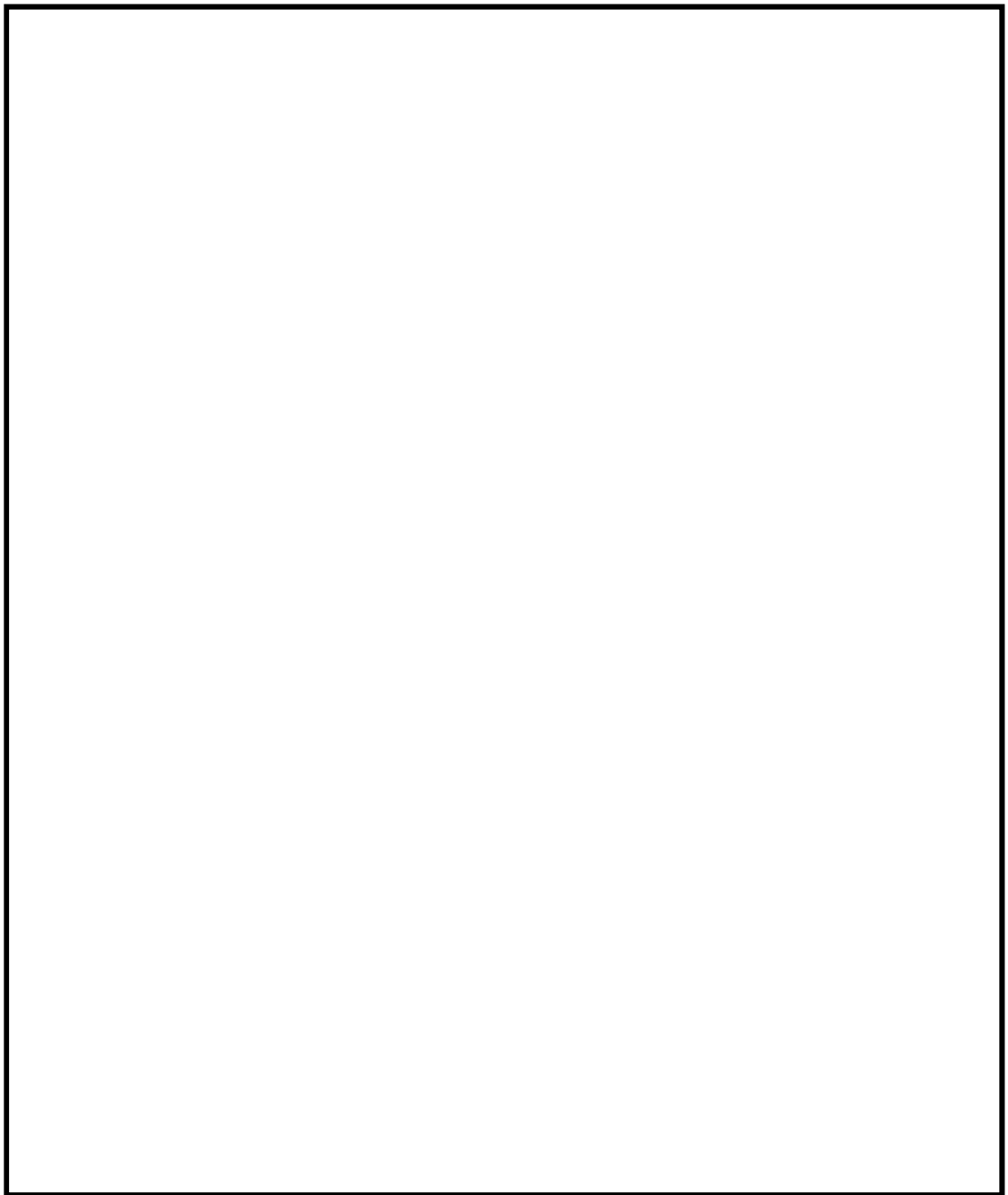
第 3-2 図 脱気水ポンプ 流量出典

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第4図 消火栓を用いた注水 流量出典

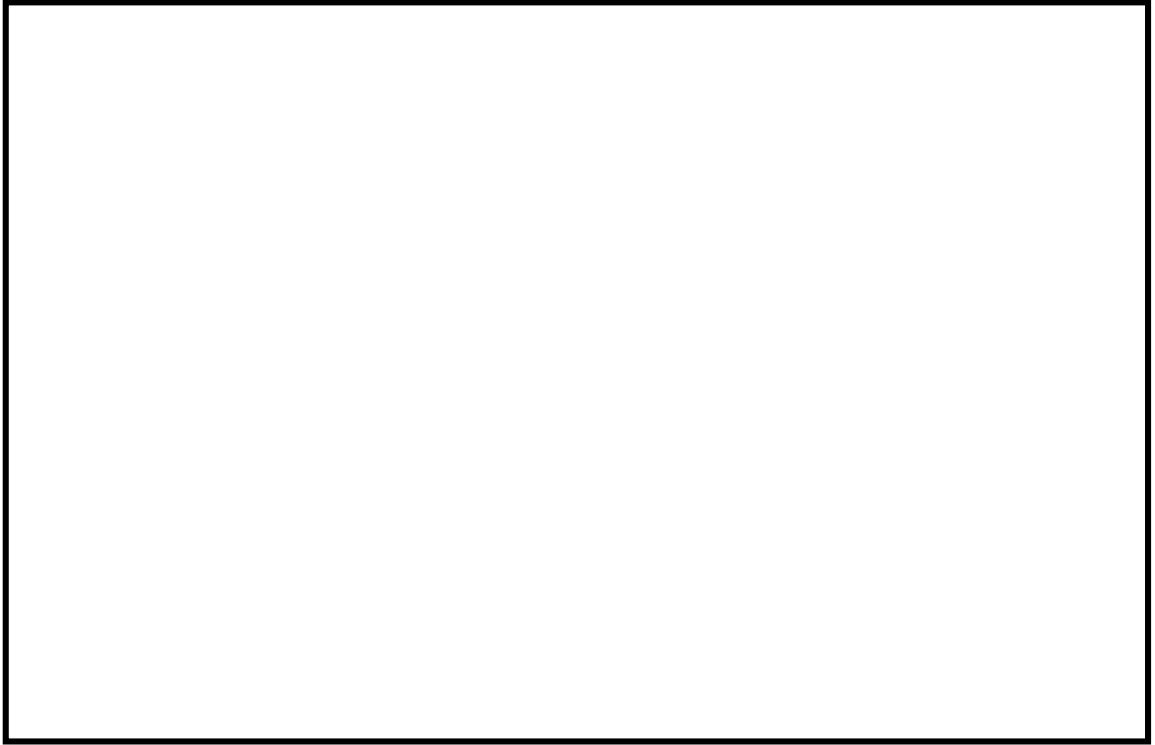
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 5 図 消防ポンプ 流量出典

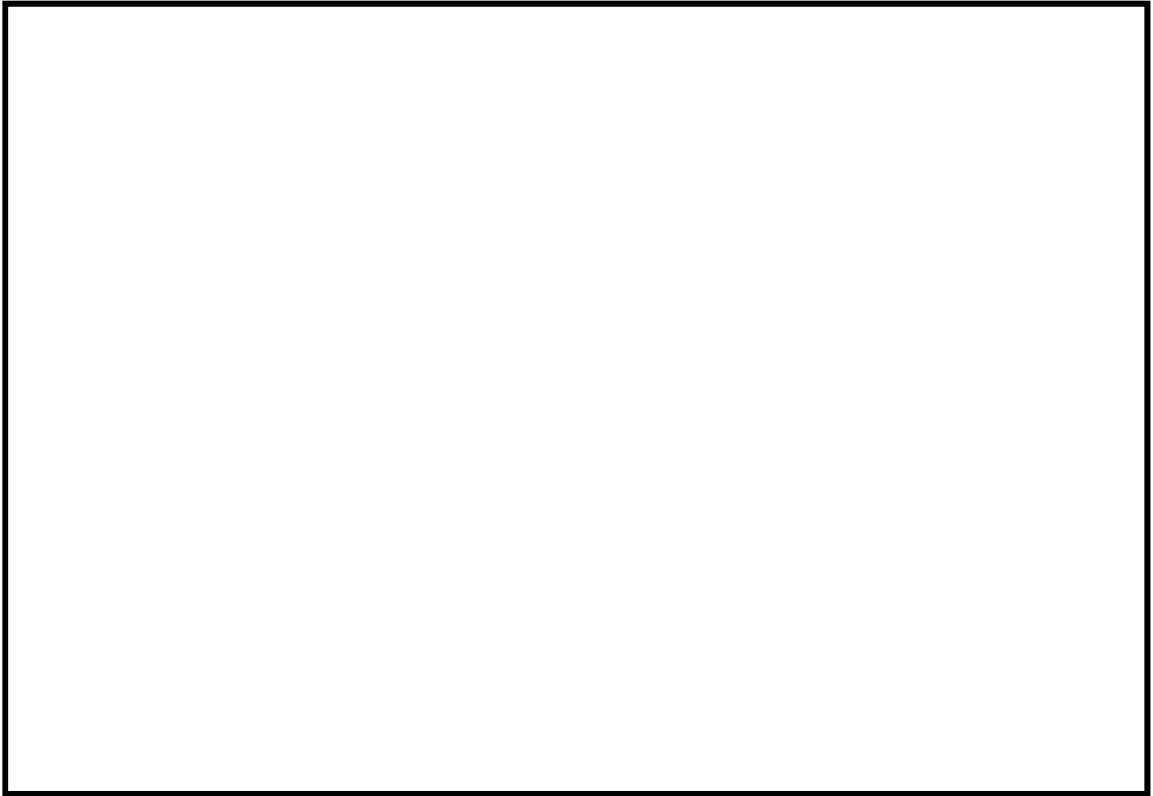
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。





第6図 1次系純水ポンプ 流量出典

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第7図 送水車 流量出典

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

### 3. SFP 放水手順にて使用する設備の流量設定の考え方および根拠

SFP からの大量の水の漏えいが発生した際に実施する、SFP への放水に係る手順の実施判断フローを第8図に、各放水手順における水源、送水ポンプおよび放水設備を第2表に示す。

各手順における放水によるSFPへの流量設定の考え方は以下の通り。（手順番号は第2表の番号と整合）

#### a. スプレイヘッドを用いて放水する手順

化学消防自動車によるスプレイ手順は送水車が起動できない場合の手順であり、且つスプレイヘッドの配備台数は各号炉に1台であることから、化学消防自動車と送水車によるスプレイを同時に実施することは想定せず、最大流量はスプレイヘッドの仕様上限値である  $\square$  m<sup>3</sup>/h とした。

（対象手順：手順①or②）

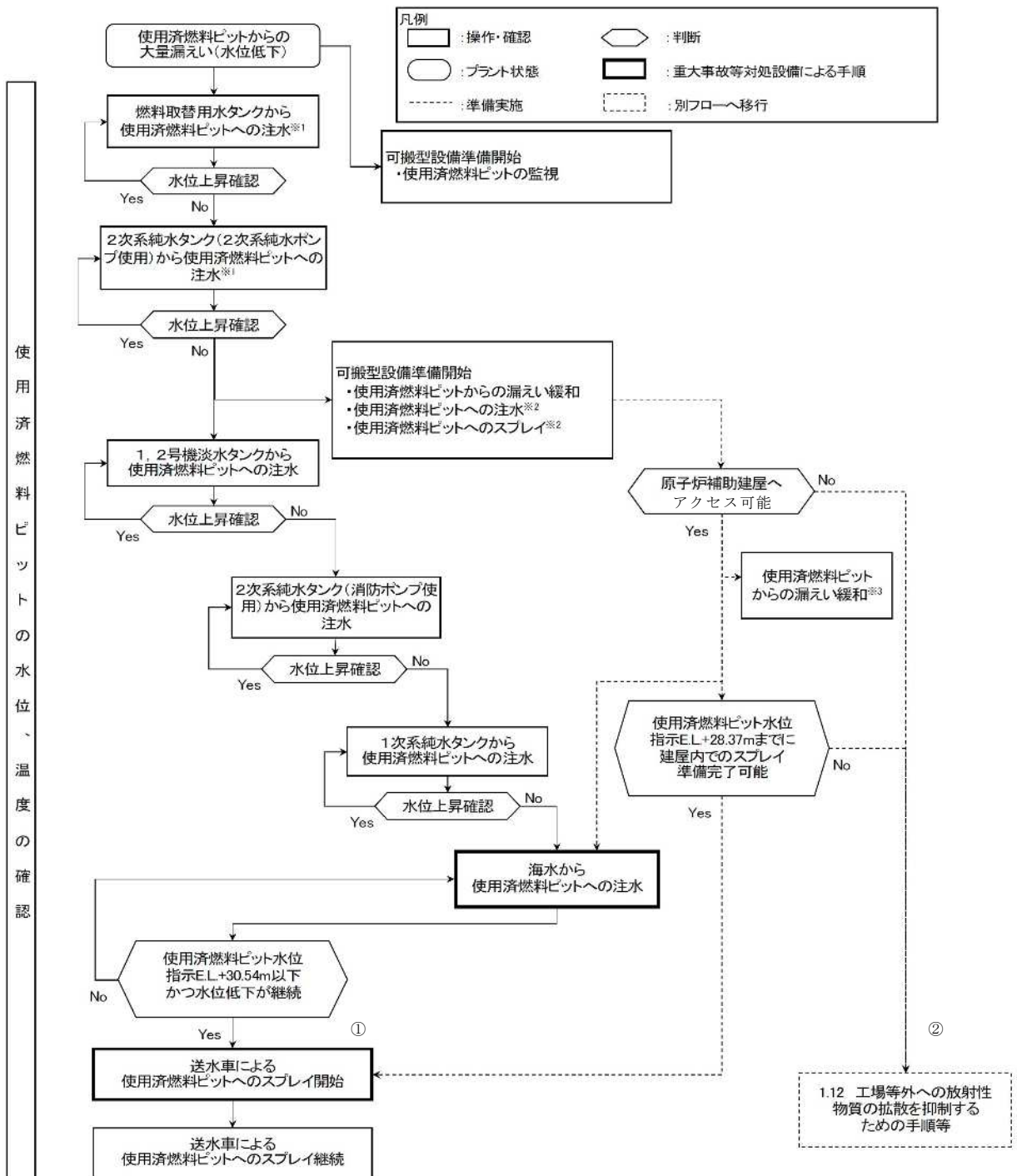
#### b. 放水砲を用いて放水する手順

大容量ポンプ（放水砲用）による放水は、大容量ポンプを2台直列に1ライン敷設し、2台目の大容量ポンプ（放水砲用）の出口から分岐管により各号炉向けへ2ラインに分岐させ放水砲を接続する。最大流量としては保守的に、配備されている型式の異なる3種類の大容量ポンプ（放水砲用）のうち、最も容量が大きいポンプと2番目に容量が大きいポンプを直列することを想定し、各号炉へは大容量ポンプ（放水砲用）による流量が2等分された状態で放水されるとした。また、容量は各種類のポンプの揚程曲線上の最大値を想定する。

具体的には、大容量ポンプ（放水砲）の各型式の最大流量は揚程曲線よりそれぞれ  $\square$  m<sup>3</sup>/h（型式：HS900）、 $\square$  m<sup>3</sup>/h（型式：HS900N）、 $\square$  m<sup>3</sup>/h（型式：HS1200）であり、これらを直列に2台接続する場合の最大送水量は  $\square$  m<sup>3</sup>/h（HS900およびHS1200を用いる場合に送水量が最大となる。送水量は、ポンプを2台直列に接続する運用であることから容量の低い方のポンプと同値になる。）となることから、放水砲からの流量は  $\square$  m<sup>3</sup>/hを2等分した  $\square$  m<sup>3</sup>/hとなる。

（対象手順：手順③）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



(注1) 本フローに記載の注水手段については、複数の手段の準備又は注水を平行して実施することがある。また、水源の使用可否等に応じて手順を飛ばして対応することがある。

※1: 使用済燃料ピットの注水機能喪失の場合は使用不可

※2: 可搬型設備については、「送水車による使用済燃料ピットへのスプレー」の準備を優先する。

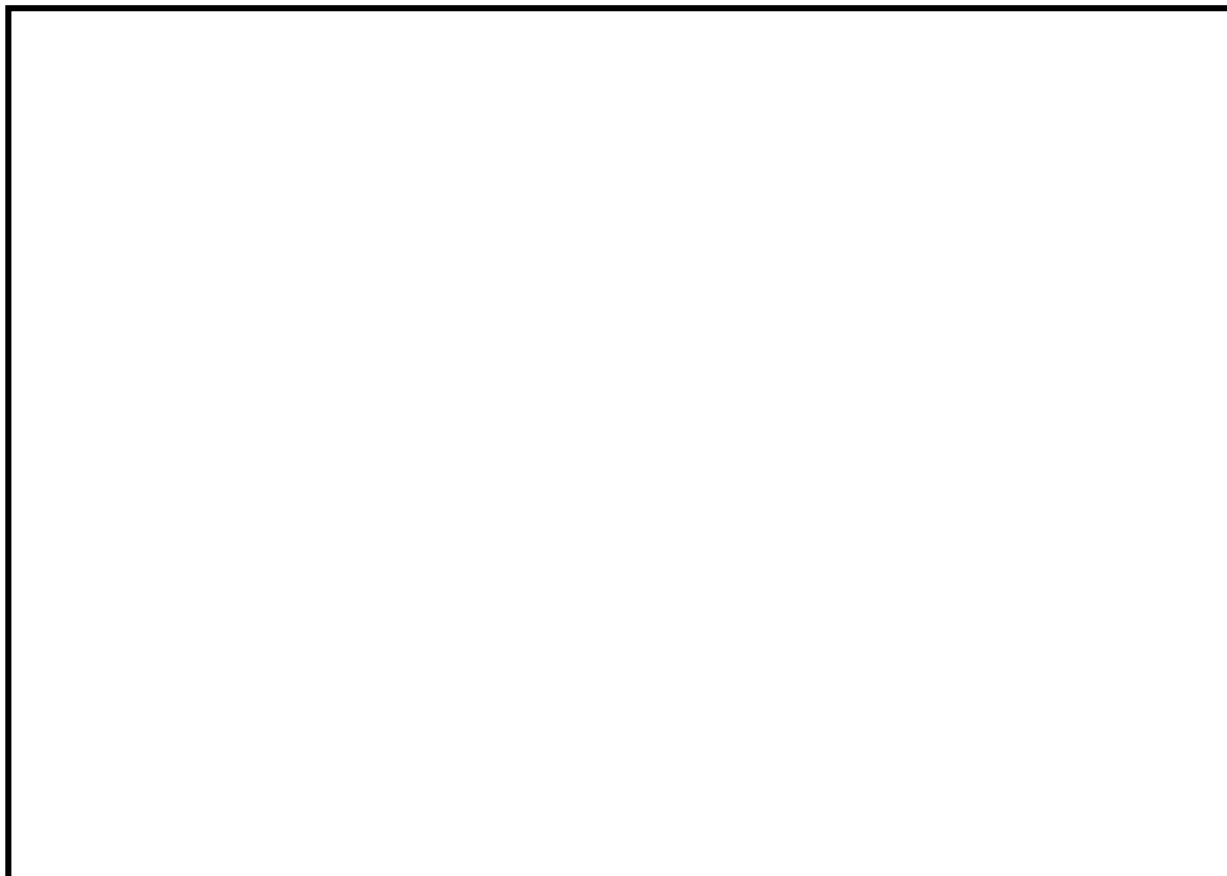
※3: 使用済燃料ピット水位指示EL+30.54m以下、かつ水位低下が継続する場合。

第8図 SFPからの大量の水の漏えい発生時の対応手順 (SFPへの放水)

第2表 SFPへの放水手順における水源、送水ポンプ、放水設備および流量根拠

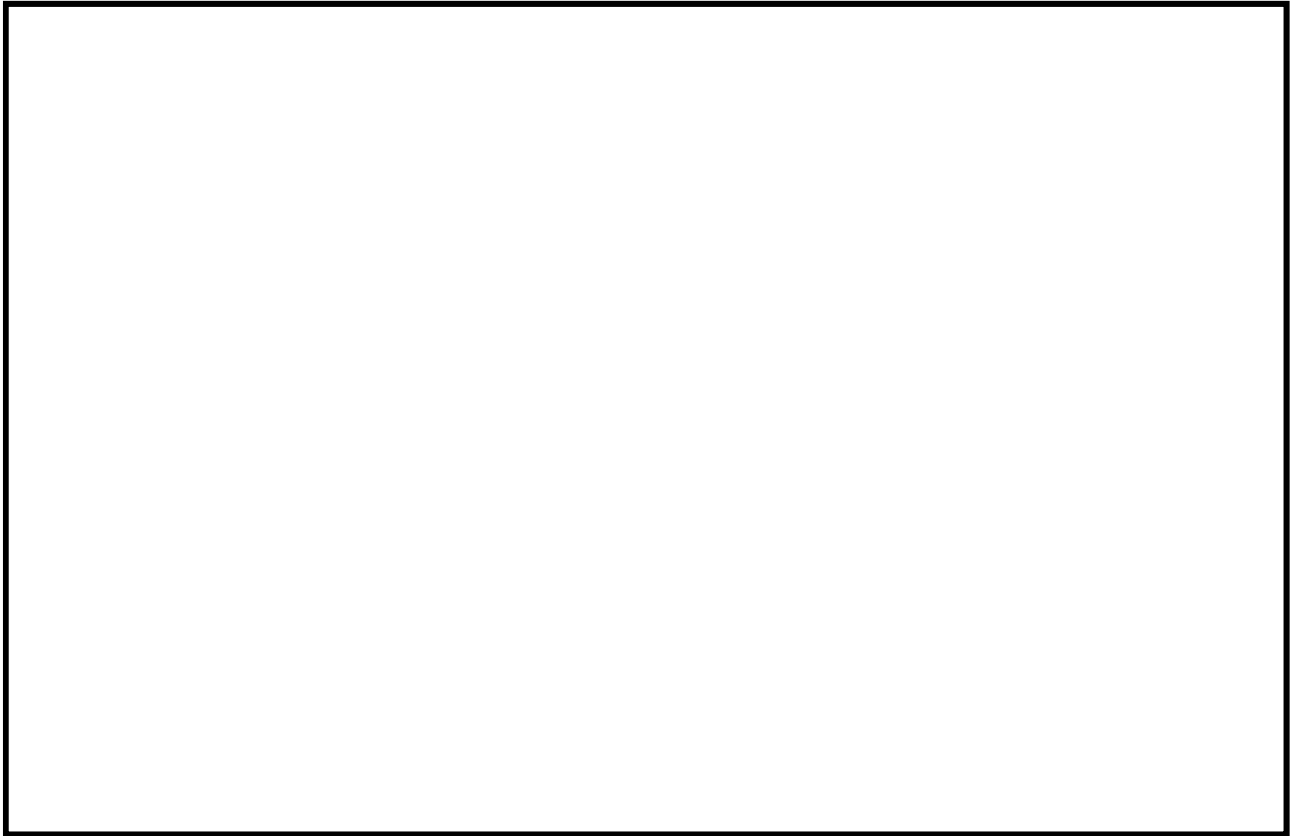
放水 手順	手順番号 (第8図の 番号に同 じ)	水源	送水ポンプ	ポンプ 使用台数	放水設備	流量	流量根拠
放水 手順	①	海水	送水車	1台	スプレーヘッド	□ m <sup>3</sup> /h	スプレーヘッド 仕様上限 (第9図参照)
	②		大容量ポンプ (放水砲用)	2台	放水砲	□ m <sup>3</sup> /h	揚程曲線設計上の最大値 (第10-1図～ 第10-3図参照)

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

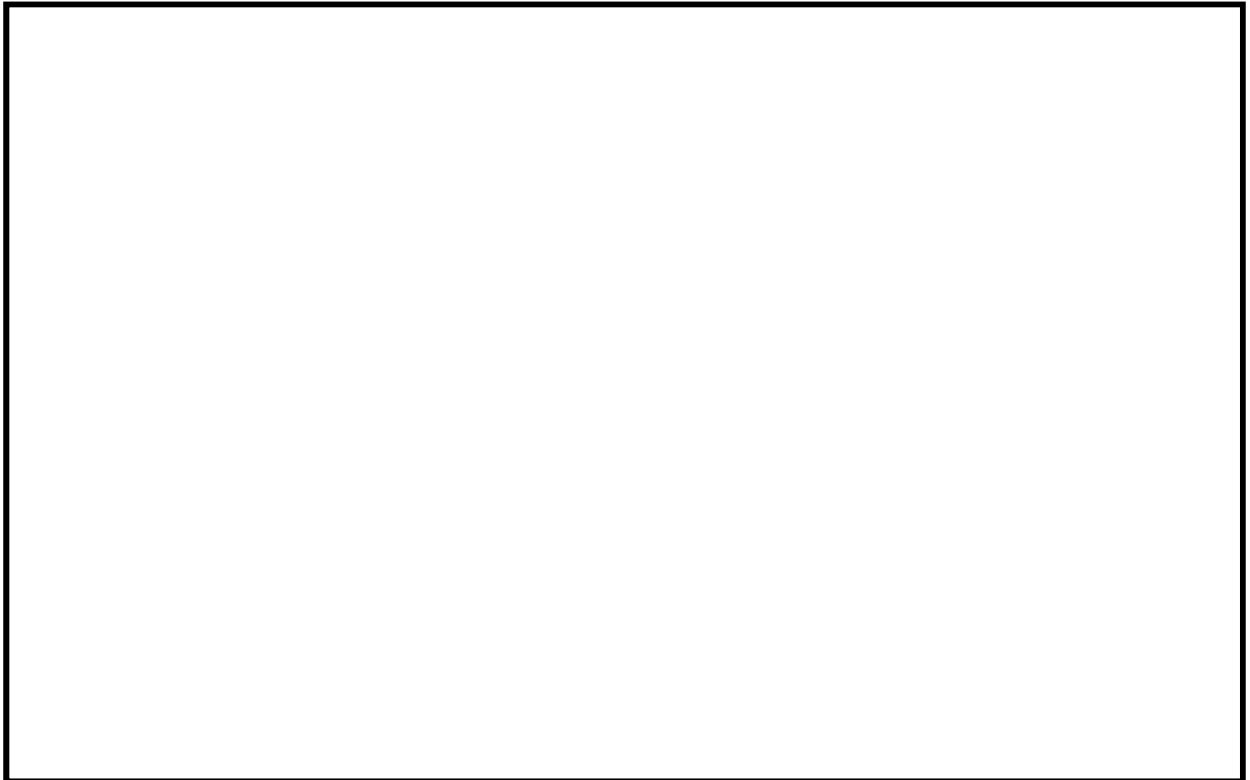


第9図 スprayヘッド使用時の流量上限

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

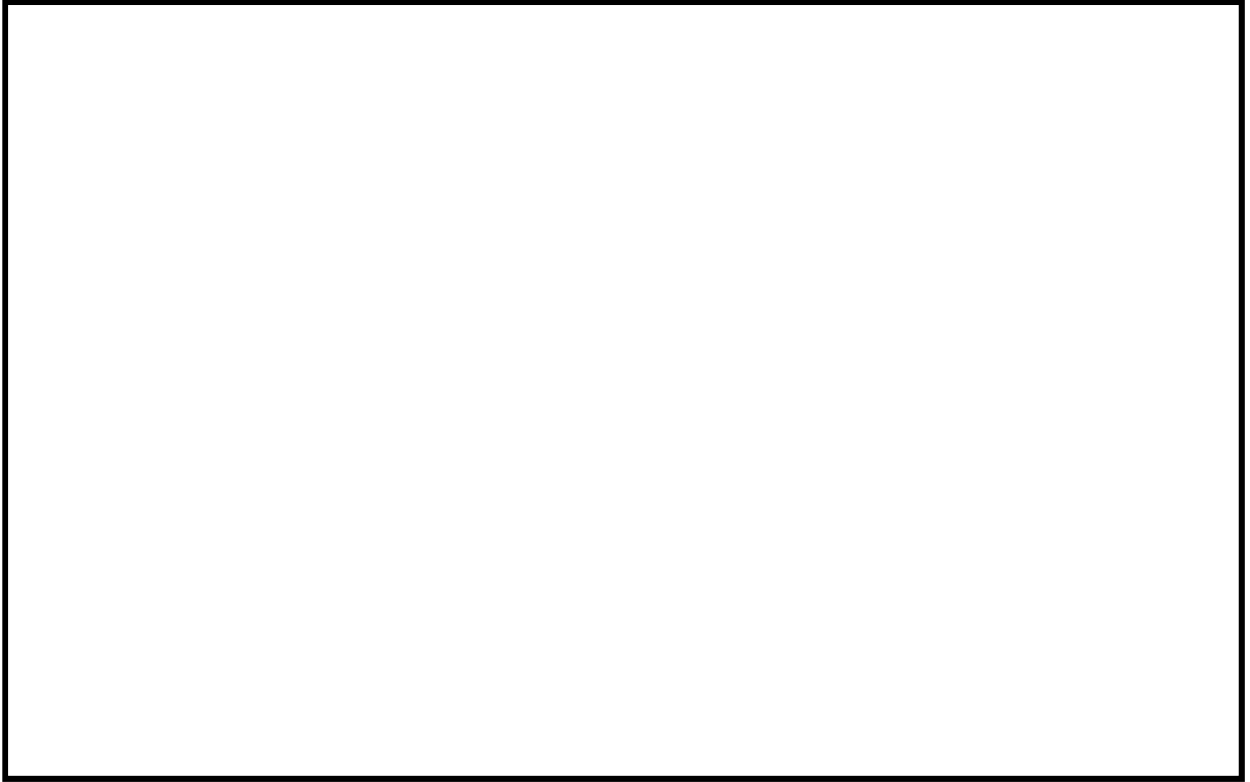


第 10-1 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900）



第 10-2 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS900N）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第 10-3 図 大容量ポンプ（放水砲用） 流量出典（HS1200）

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



#### 4. 系統に複数台設置されるポンプの起動台数の考え方について

流量の基本ケース条件の設定に当たっては原則最確値を設定する観点から、1手順につき1台の起動を想定している。手順によっては系統内に複数台のポンプが設置されているものがあるが、それらは事故時の対応に多重性を持たせるため、あるいは点検や故障等のため使用できない場合におけるバックアップの位置づけであり、またポンプの複数台起動は系統やポンプ自体への設備保全の観点からも推奨はされていない。なお第11図に実際の事故時に使用する手順書の例を示すが、注水ラインの形成に当たっては片側ラインずつ形成する前提としており、ポンプ起動台数は記載していない。以上のことから、基本ケース条件において複数設置されているポンプの起動台数を1台とすることは妥当と判断している。

なお、不確かさを考慮した条件には、ポンプを全数起動することを想定した値を設定する。

【空冷式非常用発電装置の起動手順（抜粋）】

両機並列運転時の起動手順については、別表を参照してください。

両機並列運転時の起動手順については、別表を参照してください。

No.	担当	作業要領	確認および注意事項	確認
【空冷式非常用発電装置 現地起動（中央制御室より起動できない場合の処置）】				
1	発電所長	当直係長からの指示により、発電所長は電気保修課長へ、3A、B空冷式非常用発電装置の現地での起動を指示する。	空冷式非常用発電装置制御盤および給油用弁、タンクローリー等の鍵束を準備する。（鍵を保管場所にて準備する）	
2	電気保修課長	電気保修課員は、以下の手順により接続状態の健全性の確認を行う。 (1) 中継・接続線の外観確認を行う。 (2) 中継・接続型にてケーブルコネクタが正常に接続されていることを確認する。	添付図-1 使用できる状態であることを。 赤マーカー赤マークで接続：4箇所 白マーカー白マークで接続：4箇所 青マーカー青マークで接続：4箇所 【3相×2条×2台分】	
3	電気保修課長	電気保修課員は、3A、B空冷式非常用発電装置の起動前点検を行う。 (1) 2台の空冷式非常用発電装置の同期ケーブル接続を確認する。 (2) 2台の空冷式非常用発電装置の本体接地を確認する。 (3) 水漏れ・油漏れ等の確認 (4) ディーゼル発電機制御盤に警報が発信していないこと。	確実に接続されていること。 確実に接続されていること。 異常のないこと。 伏表示灯で「HEAVY FAULT」および「CPU ERROR」が点灯していないこと。	
4	電気保修課長	電気保修課員は、3A（B）空冷式非常用発電装置を現地にて起動する。 (1) 3号機A、Bのメタクラ条件の切替しが完了していることを運転員等に確認する。 (2) 空冷式非常用発電装置の制御盤を開け、「READ」ボタンを押し、画面を起動する。	長時間操作しない場合には、部保「READ」ボタンを押し、画面を起動する。	

No.	担当	作業要領	確認および注意事項	確認
		(3) キースイッチを「AUTO」から「MANUAL」位置にする。	操作前にキーを挿入する	
		(4) 「START」ボタンを長押し（1秒以上）、空冷式非常用発電装置を起動する。		
		(5) キースイッチを「MANUAL」から「AUTO」位置にする。	操作後にキーを抜く。	
		(6) 定格電圧6600V、定格回転数1800rpmになることを確認する。	空冷式非常用発電装置制御盤にて電圧・周波数等確認。 「FUN」ボタンを1回押すと、定常周波数60Hzを確認でき、4箇所押すと元の画面に戻る。 起動後に電圧、周波数が確立すれば、出力シャ断路が自動投入される（「COB」表示「緑消灯、赤点灯」）。	
		(7) 発電所長の指示により、3B（A）空冷式非常用発電装置を（2）から（6）の手順で起動させる。	空冷式非常用発電装置は、2台同時待機で1台目との同期をとる。出力シャ断路が自動投入される。	
5	電気保修課長	電気保修課員は、発電所長へ3A、B空冷式非常用発電装置の起動が完了したことを報告する。 また、当直係長へ連絡する。		
6	電気保修課長	電気保修課員は、3A、B空冷式非常用発電装置の点検を行い、異常のないことを確認する。		
7	当直係長	運転員等は、受電後の負荷の自動起動を防止するため、各負荷の中央制御室で操作スイッチを「切」または「引掛」とする	【事故時操作手順（第2部）（第3部）にて対応】	
8	当直係長	運転員等は、形様の安全確認開始前室において必要なパワーセンタおよびコントロールセンタ負荷の切り替えを行う。	【事故時操作手順（第2部）（第3部）にて対応】	
9	当直係長	運転員等は、3号機安全確認開始前室にて空冷式非常用発電装置受電断路部を投入し、メタクラの受電を確認する。	【事故時操作手順（第2部）（第3部）にて対応】	

片ラインを起動させることを「A（B）」と記載したうえで、他方のラインも起動させる場合は「B（A）」と記載している。

【SFP への水補給手順（抜粋）】

両機並列運転時の起動手順については、別表を参照してください。

別表

高圧3号機 1次系純水タンクからの水補給のための操作

1. 1次系純水タンクからの注水準備ラインアップ

場所	弁番号	弁名称	状態	注意事項	確認
A/B 17m	3V-WS-018	3号機使用済樹脂スルスポン出口弁	×		
A/B 17m	3V-SF-026A	3号機使用済燃料ピット脱塩塔入口弁	×		
A/B 17m	3V-SF-026B	3号機使用済燃料ピット脱塩塔入口弁	×		
A/B 10m	3V-WS-027	3号機使用済樹脂スルスライン止め弁	○		

2. 1次系純水タンクからの注水操作

順序	確認および注意	注意事項等	確認
1	3号機A（B）使用済燃料ピット脱塩塔樹脂逆洗移送水止め弁（SF-032A（B））を開く。		
2	3号機使用済樹脂スルスライン絞り弁（WS-022）を全開にする。		
3	3号機A（B）1次系補給水ポンプを起動する。		
4	3号機使用済樹脂スルスライン補給水止め弁（WS-017）を開く。		
5	3号機使用済燃料ピットの水位（LI-652）を確認する。		
6	3号機使用済燃料ピットへの水補給が完了すれば、使用済樹脂スルスライン補給水止め弁（WS-017）を閉じる。		
7	3号機使用済樹脂スルスライン絞り弁（WS-022）を調整する。		

片ラインのみ起動する記載となっている。  
(B (A) のポンプを起動する、とは記載していない。)

第11図 事故時の対応（抜粋）

5. 不確かさを考慮した流量による全手順同時実施の成立性確認

不確かさを考慮した流量の設定に当たっては、系統に設置されるポンプの複数台起動を想定し、かつ流量増加に伴う圧損の影響を無視した保守的な流量を設定しているが、各手順で使用する水源の容量や手順実施に必要なとなる人員の数および手順毎の所要時間を踏まえ、全手順同時実施の成立性を確認した。なお不確かさを考慮した流量での成立性を確認することで、基本ケース条件での同時実施成立性の確認を兼ねる。

海水以外を水源とする手順における水源の容量を第3表に示す。またSFPからの大量の水の漏えい発生時における対応フローおよび手順の有効性確認において使用されている各手順の所要時間を踏まえ、各手順を順に実施した場合の想定タイムチャートを第12図に示す。不確かさを考慮した流量で各水源を使用したとしても、放水砲による放水を実施するまで連続で水を補給することが可能である。また、より人員が必要となる放水砲による放水手順を、他手順を実施したのちに実施する想定としており、要員数の観点からも想定タイムチャートは成立しうるものである。

よって、不確かさを考慮した流量による全手順の同時実施は、要員や水源容量を踏まえても成立しうる。

第3表 使用済燃料ピットへの水補給において使用する水源の容量について

水源	容量 (補給可能水量)	不確かさを考慮した流量 での連続補給可能時間 <sup>※3</sup>	補給開始から放水砲による放水までの時間 (第12図より)
燃料取替用水タンク	1325m <sup>3</sup> <sup>※1</sup>	約17時間	約9時間
2次系純水タンク	2700m <sup>3</sup> <sup>※2</sup>	約13時間 <sup>※4</sup>	約9時間
1, 2号機淡水タンク	15600m <sup>3</sup> (3120m <sup>3</sup> <sup>※2</sup> × 5基)	約118時間	約6時間
1次系純水タンク	510m <sup>3</sup> <sup>※2</sup>	約4時間	約3.5時間

※1:保安規定値。 ※2:有効水量として評価した値。 ※3:容量をSFP内に全量補給可能な水量として計算した値。

※4:DB向けの手順および消防ポンプ使用手順の流量合計を使用し計算した値。



第12図 全手順同時実施を想定したタイムチャート

6. 圧力損失を踏まえた流量設定の妥当性について

流量の基本ケース条件設定に当たっては全手順が同時に実施されるとしたうえで、実際のラインを用いた実測値が無いものについてはポンプ揚程曲線設計上の最大値を使用し、不確かさを考慮した条件としては、系統に複数あるポンプの全数起動を考慮して基本ケース条件にポンプ台数を掛けた値としている。

一方でSFPへの水補給手順の一部は注水ラインを共有しているが、流量が増加すると系統の圧損は流量の2乗に比例し大きくなることから、手順の組み合わせやポンプ起動台数等の条件により各手順の流量は変化する。

ここでは、SFPへ注水する手順について、不確かさを考慮した条件である全手順同時実施かつ系統内ポンプの全数起動を想定した状況下における配管圧損を踏まえた流量値を評価し、不確かさを考慮した流量が54条2項の手順を踏まえた場合に流入しうる最大値となっていることを示す。なお、海水を放水する手順で使用する大容量ポンプについては、ポンプの回転数を上昇させることで多量の水を送水することを可能としているが、これらは軸負荷低減の観点から今回設定している流量となった場合にポンプが停止するようインターロックが設けられている。

6-1. SFP注水配管を使用する手順について

SFP注水配管を使用する手順は第1－2図に示すとおり①、②－2、⑤であるが、今回検討においては①と⑤の手順は同時に実施されるとして計算し、②－2の手順は単独で実施されるとして評価した。本仮定は、ライン共有部の圧力損失増加に伴う各手順の流量低下を無視することとなるため保守的な設定となる。

【手順①、⑤の同時実施時における配管圧損を踏まえた評価】

・評価条件

第4表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第4表 水源と移送先の静水頭差（手順①および⑤）

静水頭差		手順①	手順⑤	備考
		-10.53 m	-0.43 m	
内訳	取水源 E.L			タンク100%水位E.L
	移送先 E.L			SFP戻り配管放出端

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

取水源から移送先までの配管及び弁類圧損等は、以下に示すダルシーの式に基づき算出する。

$$H = \sum f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} \quad \dots (1) \quad \text{ここで } f : \text{摩擦係数(-)} \quad Re : \text{レイノルズ数(-)}$$

$$Re = \frac{Dv}{\nu} \quad \dots (2) \quad \begin{array}{ll} L/D : \text{等価直管長(-)} & D : \text{配管内径(m)} \\ v : \text{流速(m/s)} & \nu : \text{流速(m/s)} \\ g : \text{重力加速度(m/s}^2\text{)} & \nu : \text{動粘性係数(m}^2\text{/s)} \\ k : \text{抵抗係数(-)} & \epsilon : \text{絶対粗度(m)} \end{array}$$

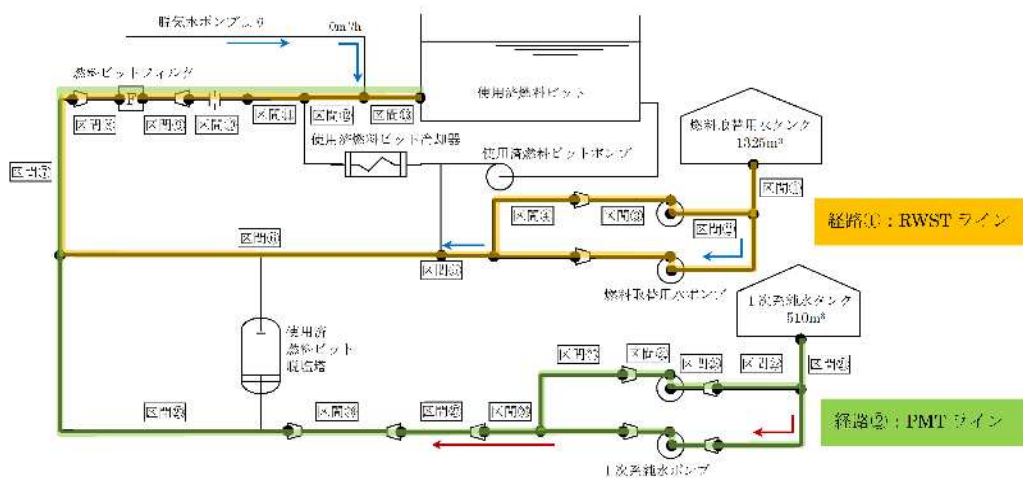
摩擦係数fについてはレイノルズ数および相対表面粗度を用いてムーディー線図より求める。系统中的エルボ、ベンド等の配管形状抵抗や弁の抵抗については、第5表の通り与えられる等価直管長にて考慮する。また抵抗計数kは抵抗の大きさを示す無次元数でありレジューサ（拡大／縮小）部や配管出入口部の配管形状による抵抗を与える。

なお配管の圧損評価は第13図に示す区間ごとに評価した。

第5表 各配管要素の等価直管長\*

配管要素	等価直管長 L/D	備考
90° エルボ	20	
45° エルボ	16	
ティー（ラン）	20	流れの方向が変わらない場合
ティー（ブランチ）	60	流れの方向が変わる場合
仕切弁	13	弁メーカーによる設計値を使用
逆止弁	135	弁メーカーによる設計値を使用

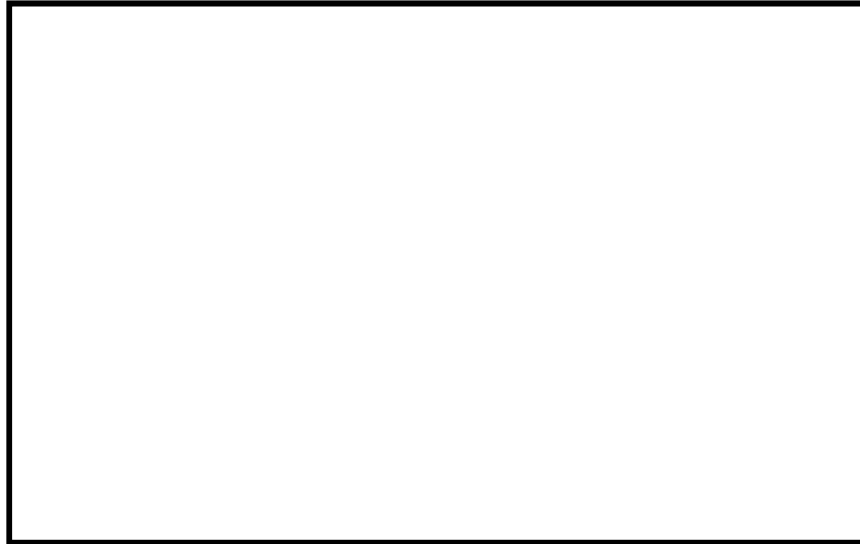
\*「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, FITTINGS, AND PIPE Technical Paper No. 410」(CRANE CO, 1999)



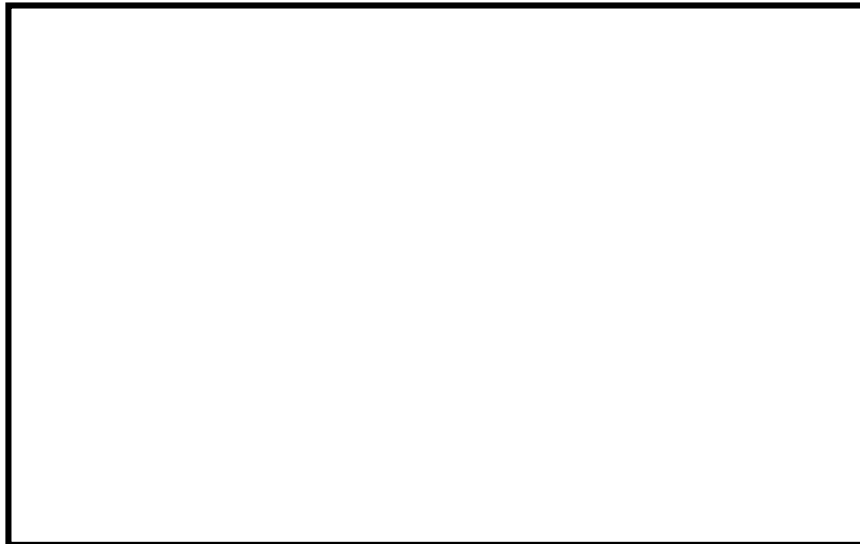
第13図 配管圧損評価時の区間設定

・評価結果

ポンプ揚程及びポンプ性能曲線との関係を第14図に示す。揚程が一致した流量は手順①では約52m<sup>3</sup>/h、手順⑤については約31m<sup>3</sup>/hであり、不確かさを考慮した流量条件（それぞれ□m<sup>3</sup>/h、□m<sup>3</sup>/h）を下回っている。なお高浜1, 2号炉はミラープラントであるため、各号炉どちらも流量評価結果が同等となることを確認している。



第14-1図 手順①におけるポンプ揚程および性能曲線との関係



第14-2図 手順⑤におけるポンプ揚程および性能曲線との関係

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

【手順②-2 実施時における配管圧損を踏まえた評価】

・評価条件

第6表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第6表 水源と移送先の静水頭差（手順②-2）

静水頭差		手順②-2	備考
		10.41 m	
内訳	取水源 E. L.		タンク100%水位E. L
	移送先 E. L.		SFP戻り配管放出端

本評価における配管圧損では（1）式の第1項のみを考慮し、また管摩擦係数に対する表面粗度の影響は保守的に無視する。等価直管長さについては第5表に示す配管要素のうち90°エルボおよび45°エルボのみを考慮し、管摩擦係数  $f$  は（3）式のとおり  $Re$  数の関係により求める。

$$\left\{ \begin{array}{ll} f = 0.3164Re^{-1/4} & (3 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^5) \\ f = 0.0032 + 0.221Re^{-0.237} & (1 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6) \end{array} \right. \dots (3)$$

また計算に使用した系統情報を第7表に示す。

第7表 系統内配管情報

配管仕様 [インチ]	2	3	4
内径 [mm]	52.5	80.7	105.3
総配管長さ [m]	51.2	96.5	5.45
90°エルボ数 [個]	9	10	4
45°エルボ数 [個]	0	6	0

・評価結果

系統内流量と配管圧損および使用ポンプの複数台起動を考慮した場合のポンプ揚程の関係を第8表に示す。2台起動時のポンプ揚程と全損失ヘッドが重なるのは約72m<sup>3</sup>/hであり、不確かさを考慮した流量条件  m<sup>3</sup>/h を下回っている。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

第8表 系統圧損評価結果およびポンプ揚程との関係（手順②-2）

流量[m <sup>3</sup> /h]	60	72	84	96
配管損失ヘッド[m]	59.6	83.0	109.9	140.2
全損失ヘッド[m] (配管損失ヘッド+水頭差)	70.0	93.5	120.4	150.6
ポンプ揚程[m] (2台起動時)	約100	約95	約85	約75

6-2. SFP注水配管を使用しない手順について

【手順④実施時における配管圧損を踏まえた評価】

・評価条件

第9表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第9表 水源と移送先の静水頭差（手順④）

静水頭差		手順④	備考
		-14.27 m	
内訳	取水源 E.L		タンク100%水位E.L
	移送先 E.L		SFPフロアE.L

本評価における配管圧損は、手順②-2の配管圧損評価と同じとする。計算に使用した系統情報を第10表に示す。なおホース敷設長さは、1号および2号炉それぞれへの敷設ルート of 最短ルート（1号炉東側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

第10表 系統内配管情報

ホース情報		備考
敷設ホース仕様		—
内径[mm]		当該ホース仕様における省令上の内径上限値
敷設長さ [m]		最短敷設ルートでの敷設長さ

・評価結果

系統内流量と配管圧損および使用ポンプの複数台起動を考慮した場合のポンプ圧力の関係を第11表に示す。ポンプ圧力と全圧損が重なるのは約95m<sup>3</sup>/hであり、不確かさを考慮した流量条件（m<sup>3</sup>/h）を下回っている。

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第11表 系統圧損評価結果およびポンプ圧力との関係（注水手順④）

流量[m <sup>3</sup> /h]	94	95	96
配管圧損[MPa]	0.67	0.68	0.69
全圧損[MPa]（配管圧損＋水頭圧差）	0.53	0.54	0.55
ポンプ圧力[MPa]	約0.53	約0.50	約0.55

【手順⑥実施時における配管圧損を踏まえた評価】

・評価条件

第12表に取水源および移送先（SFP）のエレベーションを踏まえた静水頭差を示す。

第12表 水源と移送先の静水頭差（注水手順⑥）

静水頭差		手順⑥	備考
		-28.8 m	
内訳	取水源 E.L		送水車設置位置
	移送先 E.L		SFPフロアE.L

本評価における配管圧損は、手順②－2の配管圧損評価と同じとする。計算に使用した系統情報を第10表に示す。なおホース敷設長さは、1号および2号炉それぞれへの敷設ルート of 最短ルート（1号炉西側シャッターからの敷設ルート）の長さとした。

第12表 系統内配管情報（注水手順⑥）

ホース情報		備考
敷設ホース仕様		—
内径[mm]		当該ホース仕様における省令上の内径上限値
敷設長さ [m]		最短敷設ルートでの敷設長さ

・評価結果

系統内流量と配管圧損およびポンプ圧力の関係を第13表に示す。ポンプ圧力と全圧損が重なるのは約260m<sup>3</sup>/hであり、不確かさを考慮した流量条件（ m<sup>3</sup>/h）を下回っている。

第13表 系統圧損評価結果およびポンプ圧力との関係（注水手順⑥）

流量[m <sup>3</sup> /h]	250	260	270
配管圧損[MPa]	0.64	0.69	0.74
全圧損[MPa]（配管圧損＋水頭圧差）	0.92	0.97	1.02
ポンプ圧力[MPa]	約0.95	約0.92	約0.89

枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

液滴径設定（基本ケース条件:1.5mm、不確かさを考慮した条件:1.0mm）の妥当性について

1. はじめに

SFP未臨界性評価における水分条件である気相部水密度の算出に必要な放水中液滴の落下速度については、スプレーヘッドおよび放水砲による放水の液滴径より計算している。今回評価では、スプレーヘッド実機を使用した試験により取得した液滴データを踏まえた値を、放水砲由来の液滴にも設定することとしている。本資料では、スプレーヘッド実機を用い実施した液滴径計測試験について、および試験結果を踏まえた基本ケース条件および不確かさを考慮した条件の設定について説明する。

2. スプレーヘッド実機を用いた液滴径取得試験

2-1. 試験目的

気相部水密度の算出式( $Q/A \cdot V$ ) [ $g/cm^3$ ] ( $Q$ : 流量 [ $g/s$ ]  $A$ : 面積 [ $cm^2$ ]  $V$ : 液滴下降速度 [ $cm/s$ ])により評価するが、液滴の下降速度を算出するには放水中の液滴径が必要となることから、スプレーヘッド実機を用いた試験によりスプレー時の液滴径データを取得する。

2-2. 試験方法

第1図に示すように、SFP類似設備にてスプレーヘッドにより放水を行い、燃料ラック頂部高さ相当位置での液滴径を測定した。測定点の配置（平面図）を第2図に示す。

スプレー時の液滴を、シリコンオイルで満たされた容器に捕獲し、シリコンオイル表面に浮かんだ液滴を画像処理によりサンプリングし、液滴径分布を取得した。液滴捕獲装置の概要を第3図に示す。

流量等の諸条件は、スプレー設備の運用を踏まえ第1表に示す通り設定した。また本試験は計2回行った。

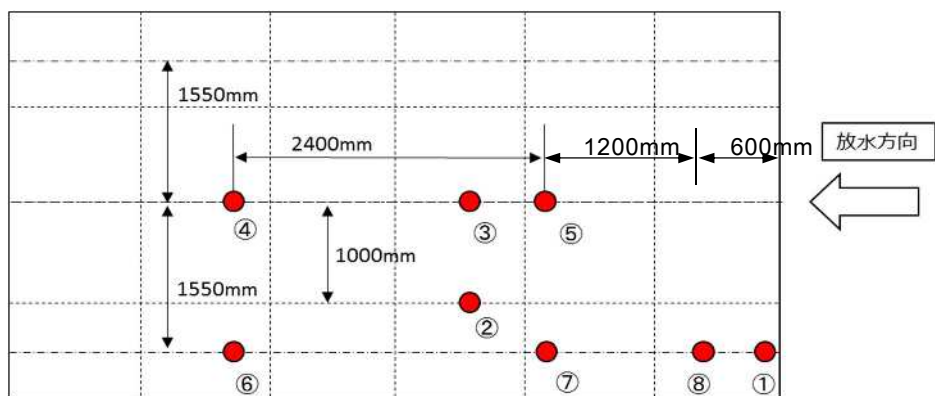
第1表 試験条件

使用設備	スプレーヘッド 可搬型消防ポンプ
流量等	
水	水道水（常温）

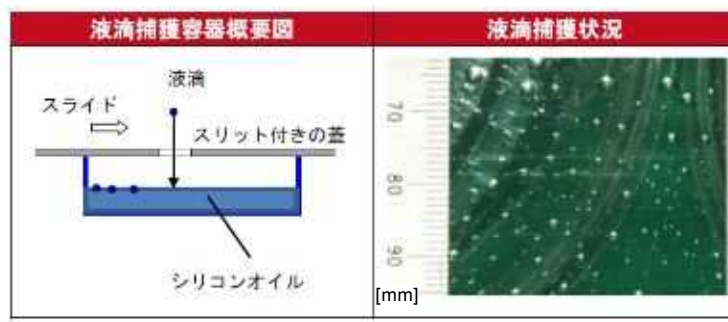
枠囲みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



第1図 液滴径測定試験 試験体系および試験の様子



第2図 液滴径分布測定位置（平面図）



第3図 液滴捕獲装置の概要および取得液滴の様子

### 3. 試験結果および考察

#### 3-1. 試験結果

2回の試験で得られた液滴径毎の個数割合をグラフにしたものを第4-1図および第4-2図に示す。使用済燃料ラック上部におけるスプレイ水は、液滴径0.2～0.4mmの液滴が個数としては支配的であり、液滴径が大きくなるにつれ、徐々に個数が減少していく傾向にある。

一方で、液滴径毎の個数割合に液滴の体積を乗じて体積分率に換算した結果を第5-1図および第5-2図に示す。また第5-1図および第5-2図には体積分率の累計を併記しているが、各図において体積分率累計値が0.5となる液滴径の範囲は、第2表に示すとおり全ての測定点において1.0mmを上回っていることを確認した。

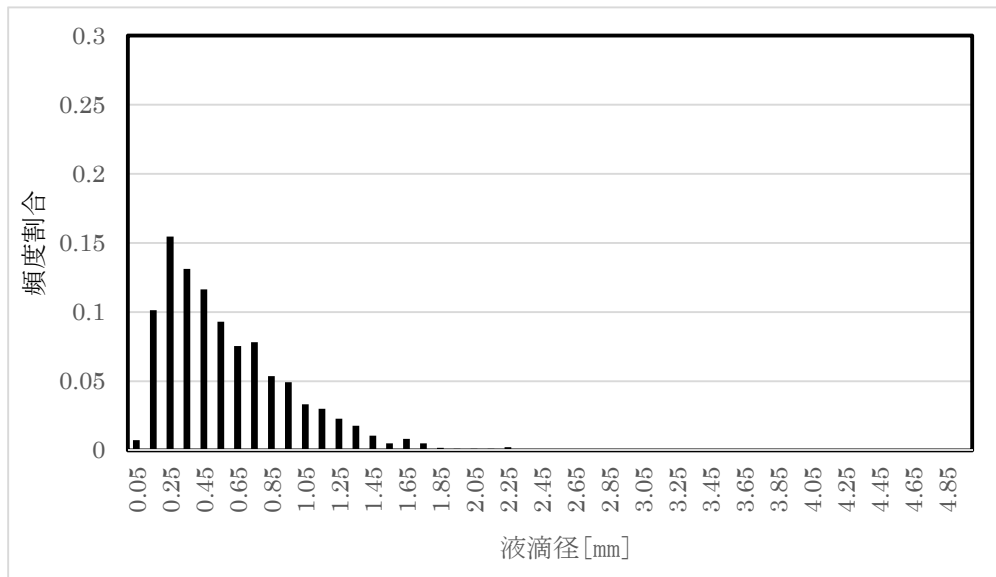
第2表 液滴径計測試験結果（平均液滴径）

	第1回目（平成27年度実施）	第2回目（平成28年度実施）
測定点①	1.15 ～ 1.25	1.35 ～ 1.45
測定点②	1.65 ～ 1.75	1.05 ～ 1.15
測定点③	1.95 ～ 2.05	1.85 ～ 1.95
測定点④	1.35 ～ 1.45	1.15 ～ 1.25
測定点⑤	1.75 ～ 1.85	2.45 ～ 2.55
測定点⑥	1.00 ～ 1.05	1.05 ～ 1.15
測定点⑦	1.05 ～ 1.15	1.55 ～ 1.65
測定点⑧	1.85 ～ 1.95	1.05 ～ 1.15

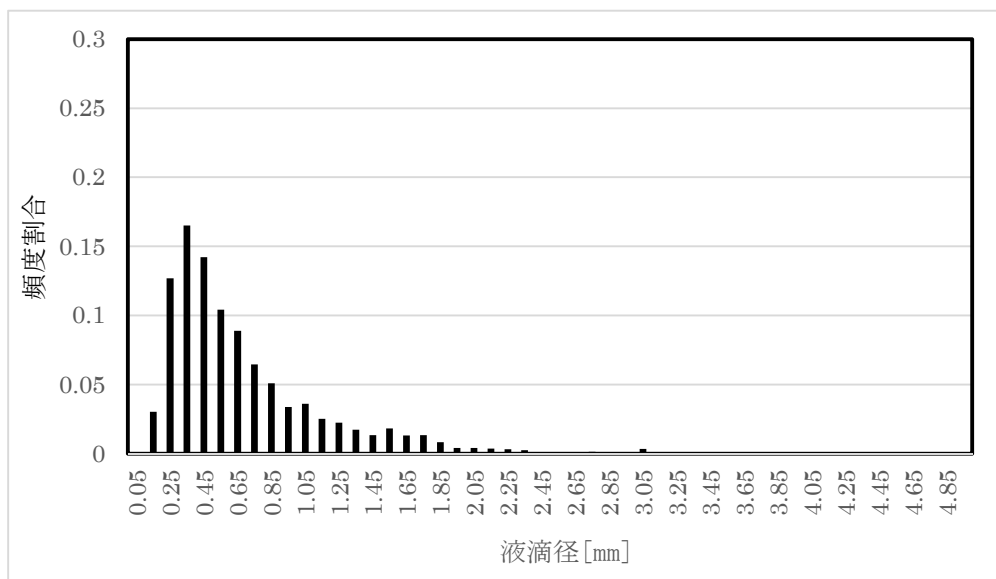
（単位：mm）

上記液滴径の大きさの範囲内で体積分率累計値が0.5となる。

測定点①

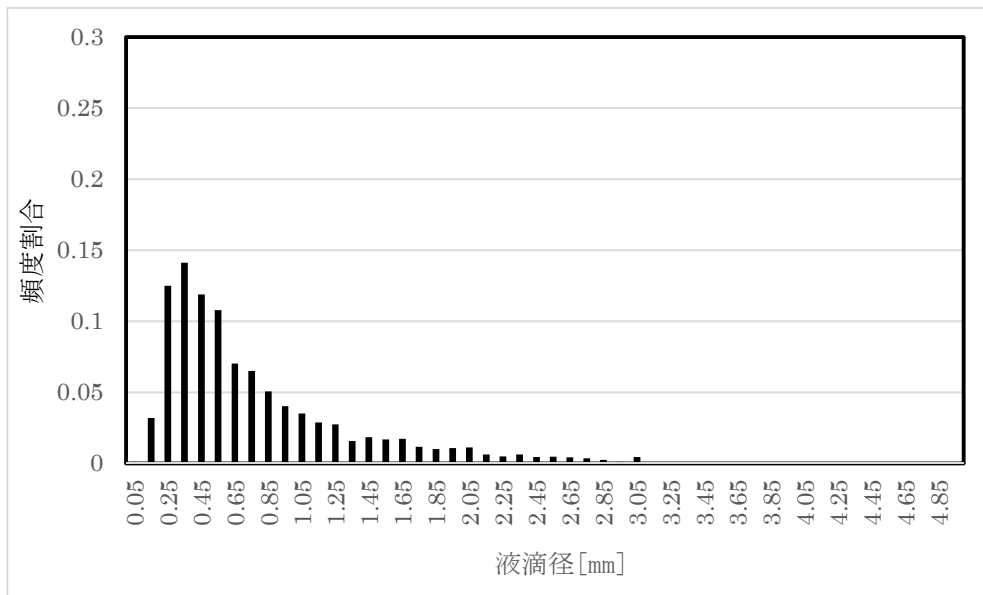


測定点②

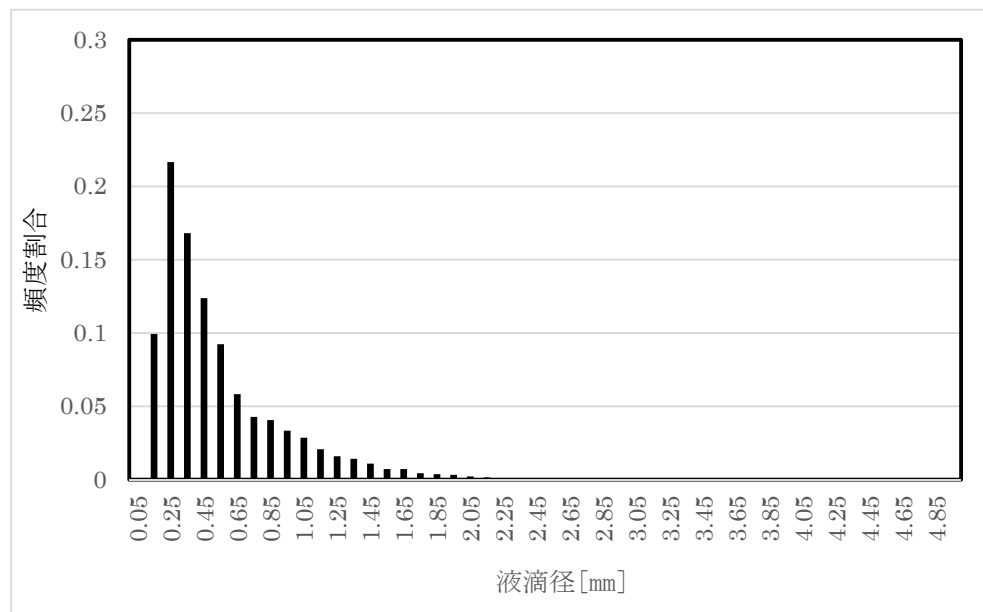


第4-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

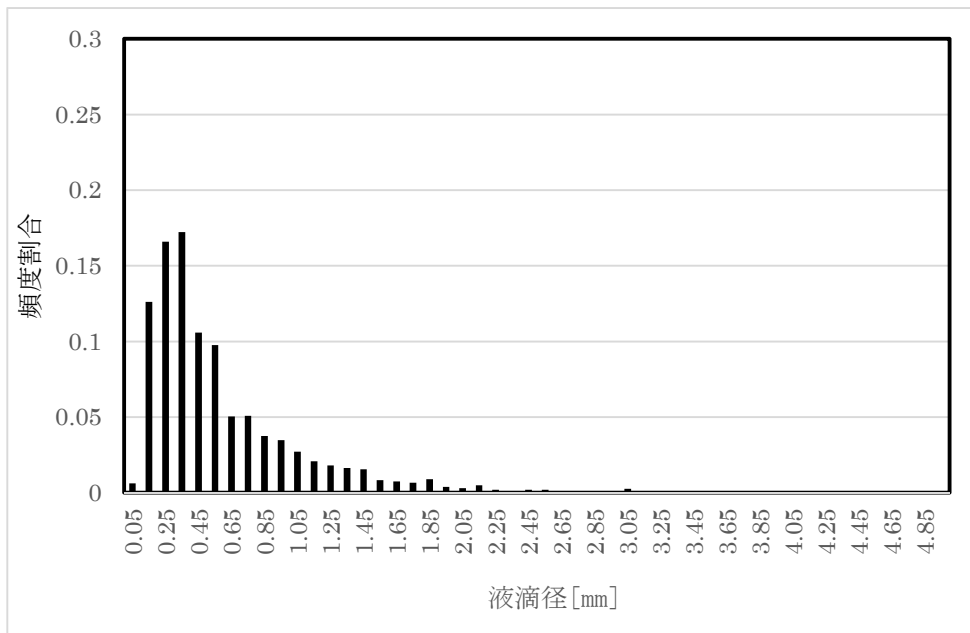


測定点④

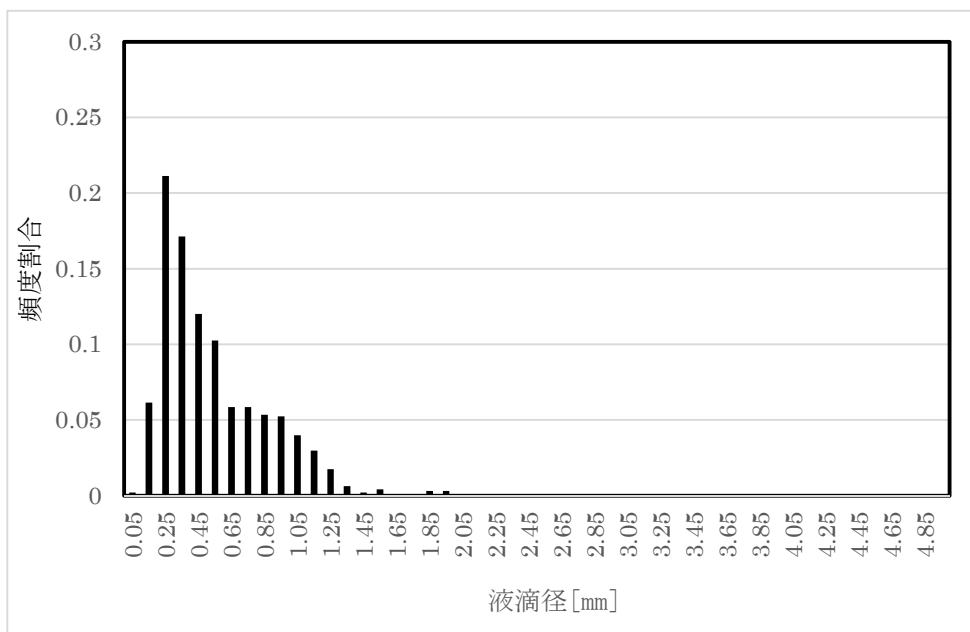


第4-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑤

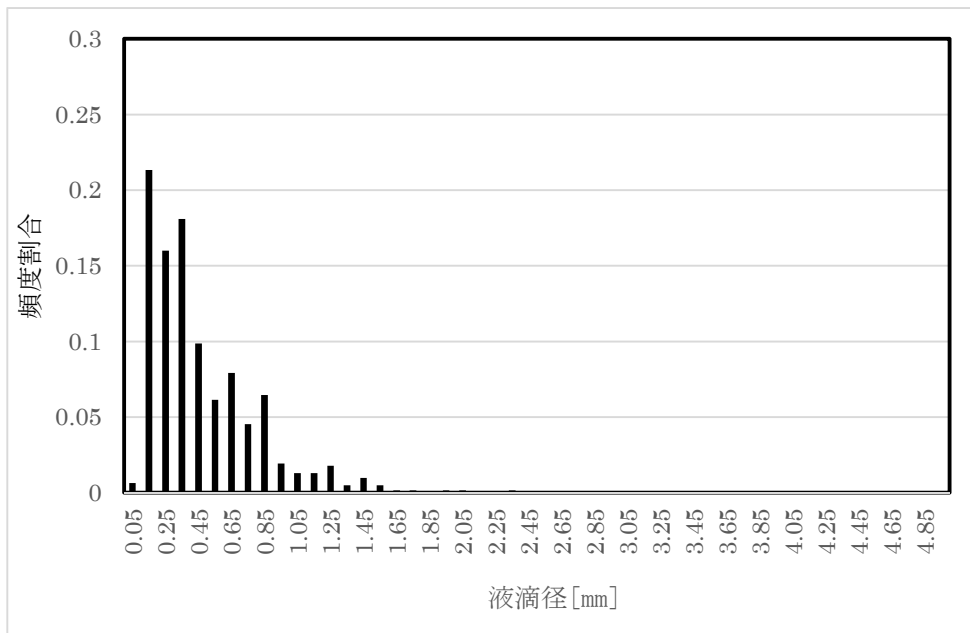


測定点⑥

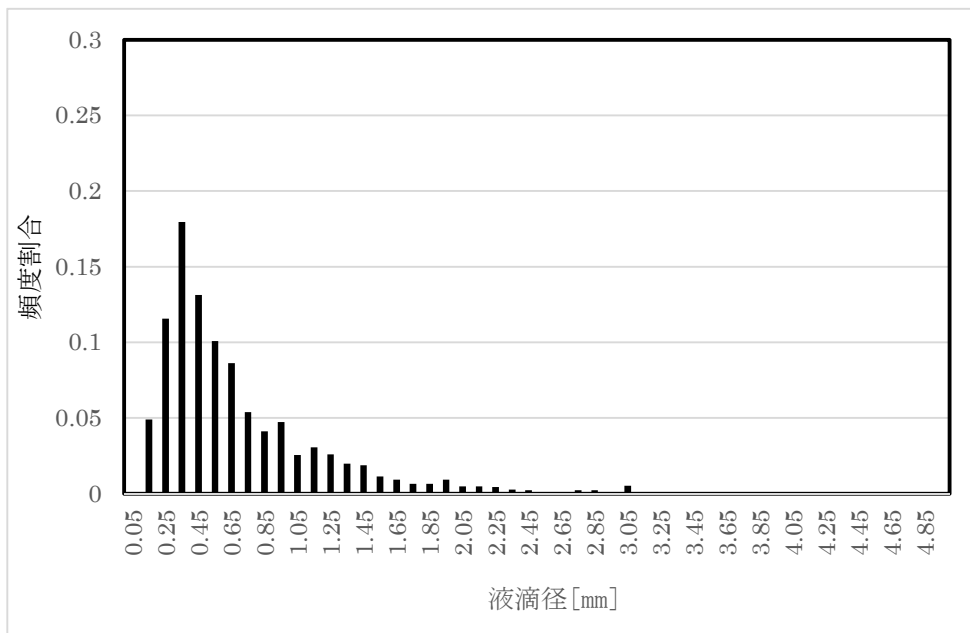


第4-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点⑦



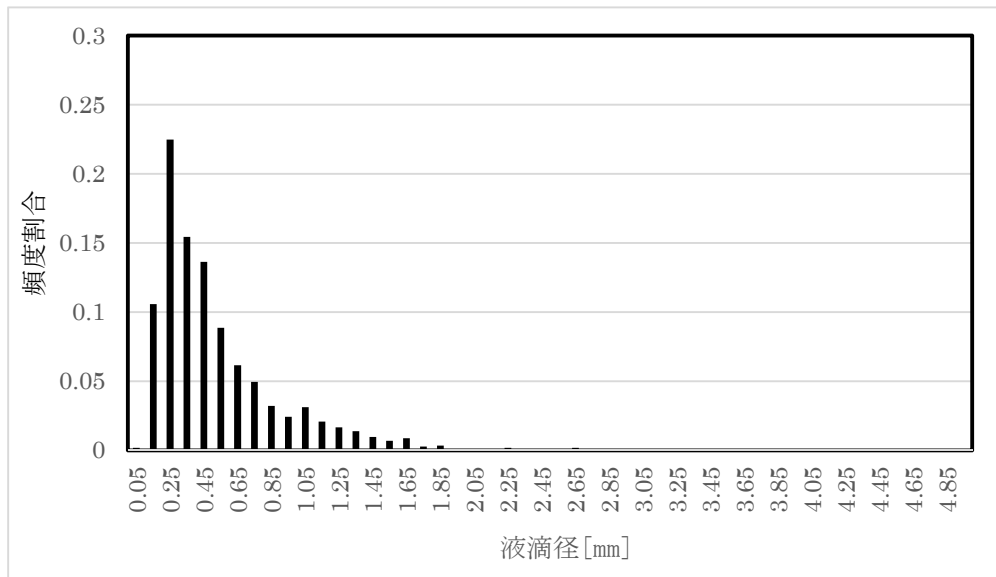
測定点⑧



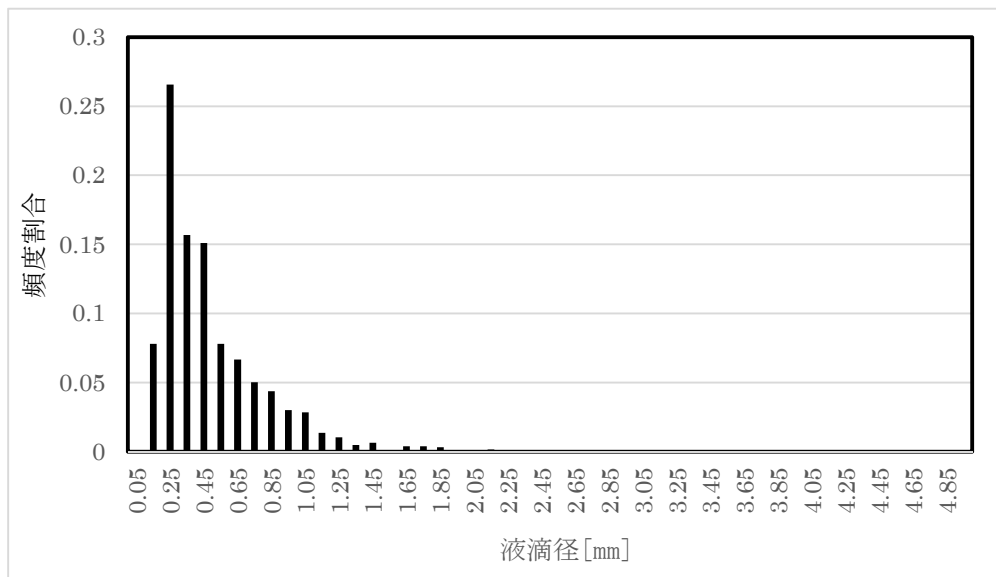
第4-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)



測定点①

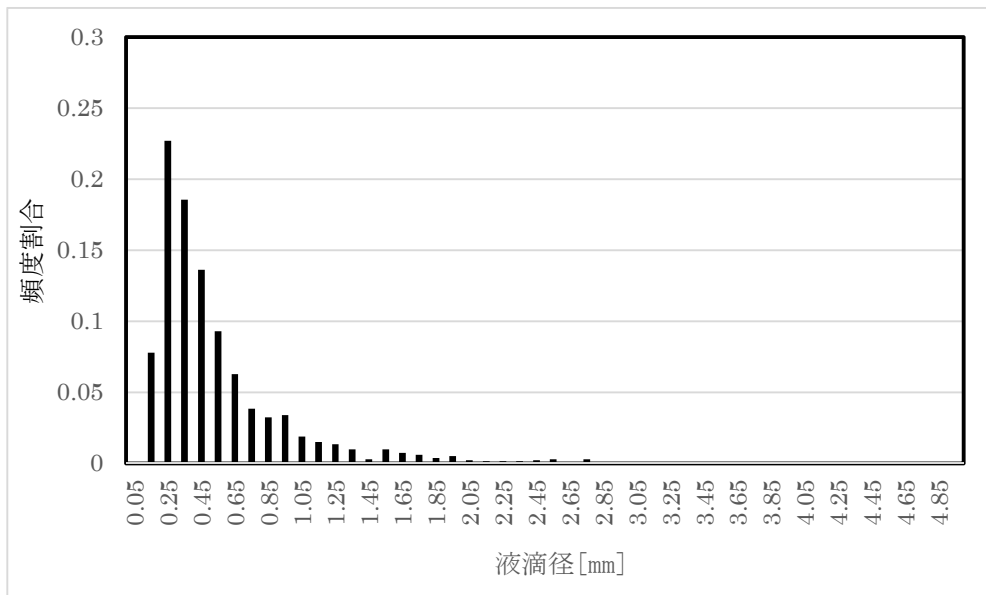


測定点②

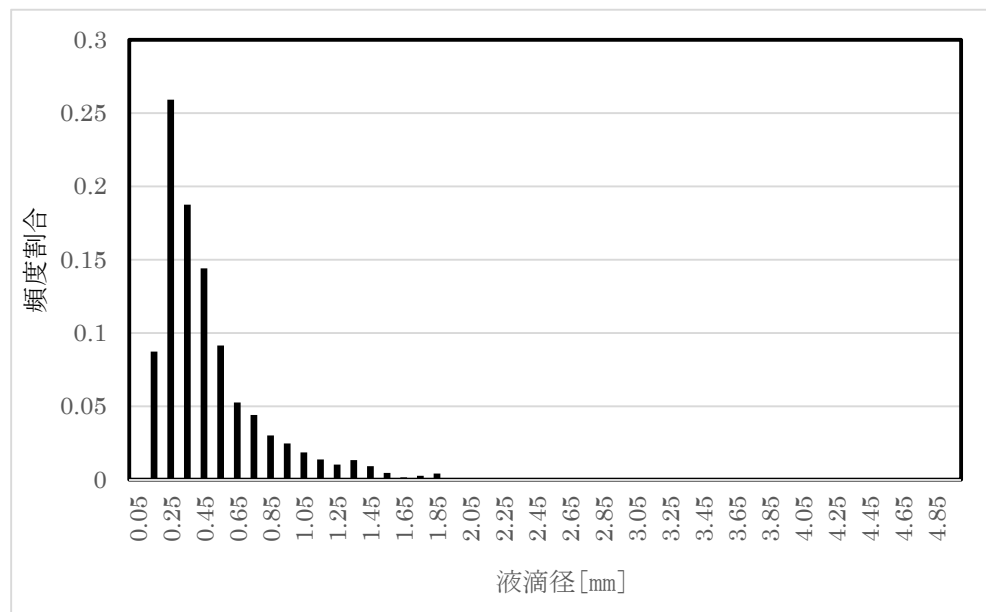


第4-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

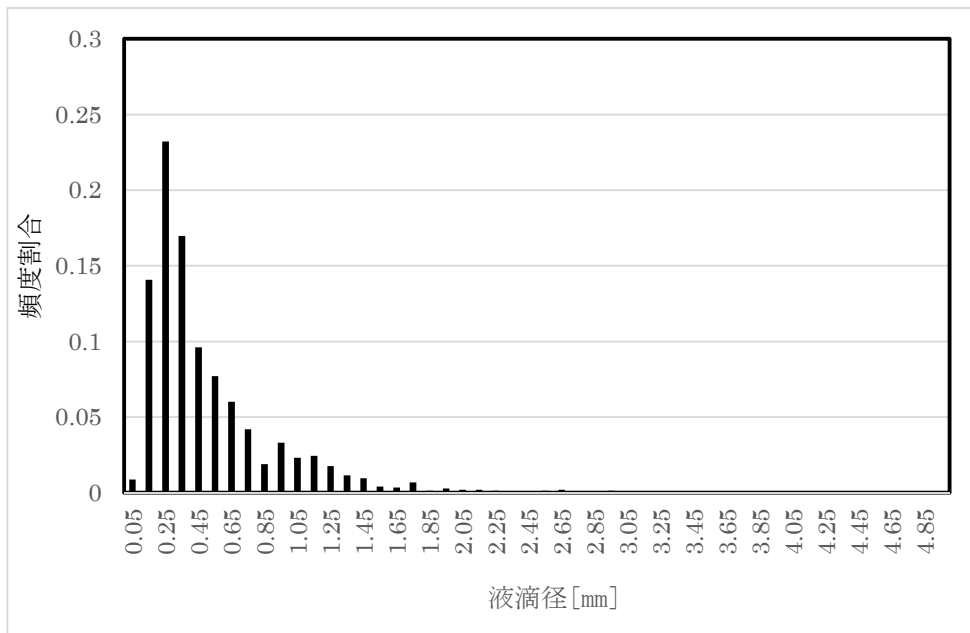


測定点④

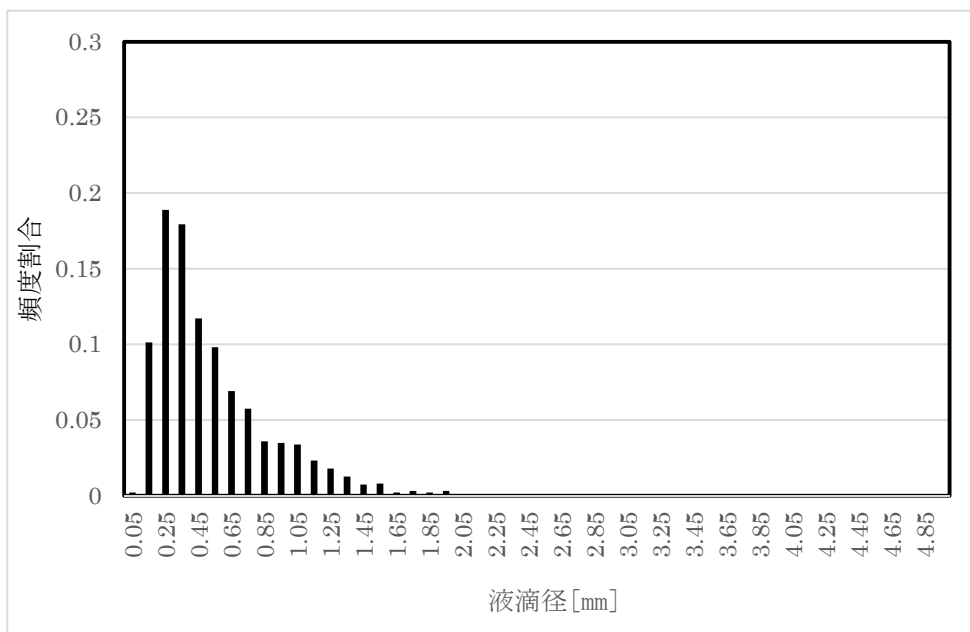


第4-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑤

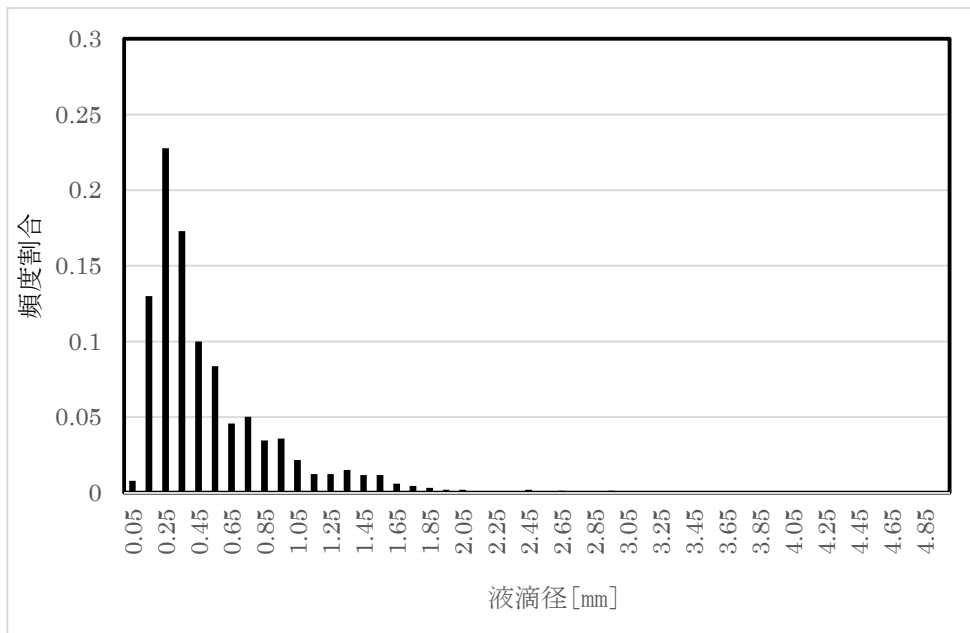


測定点⑥

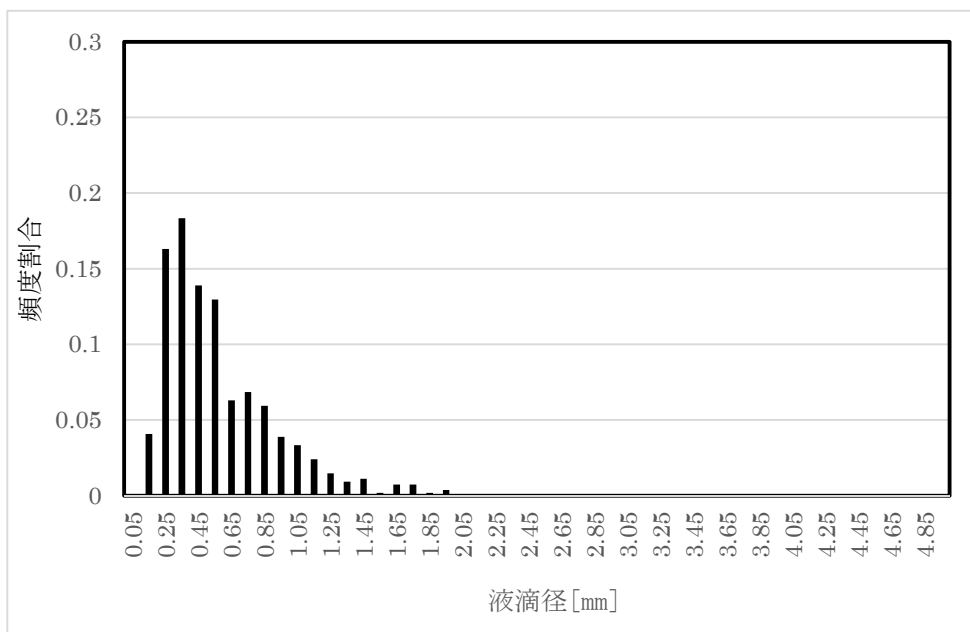


第4-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

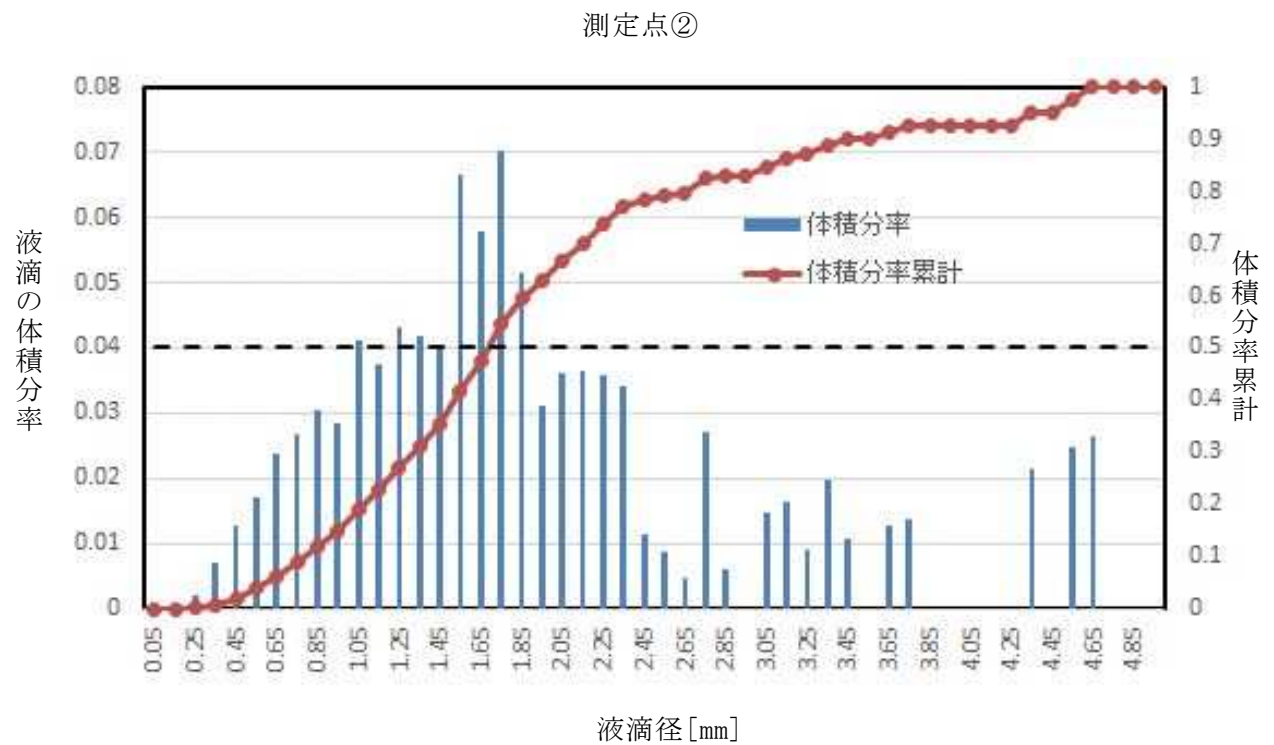
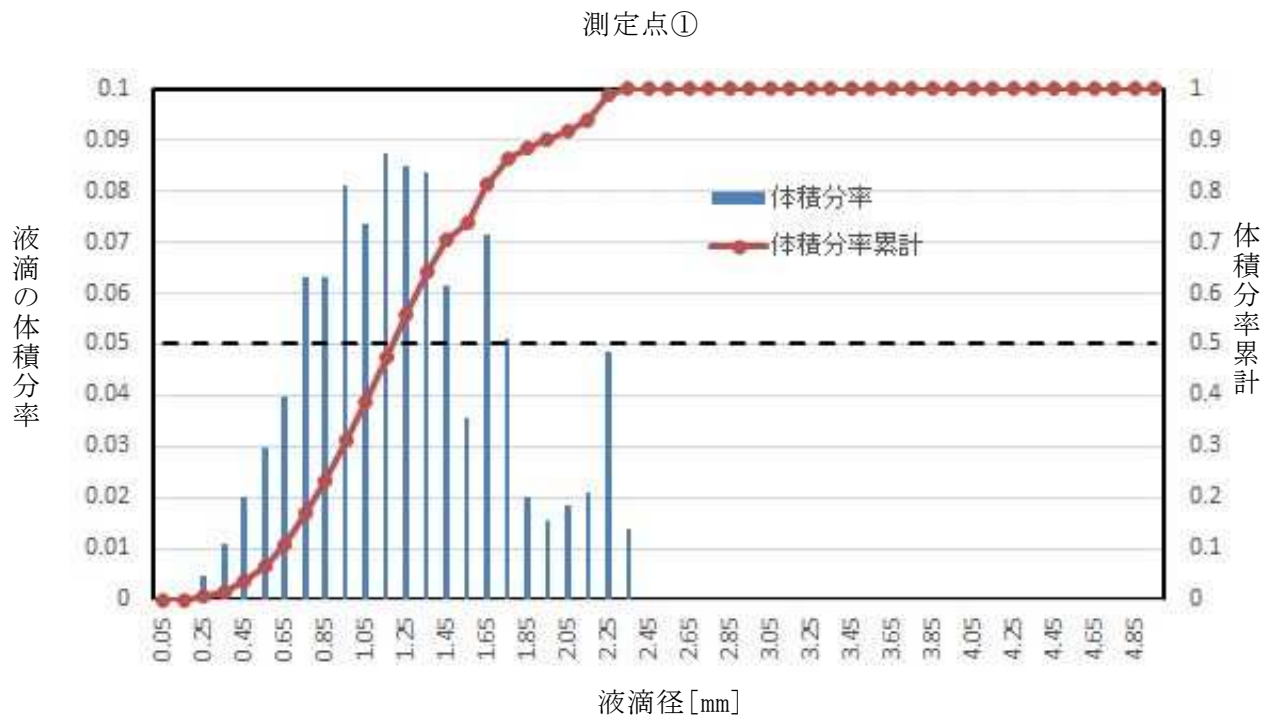
測定点⑦



測定点⑧

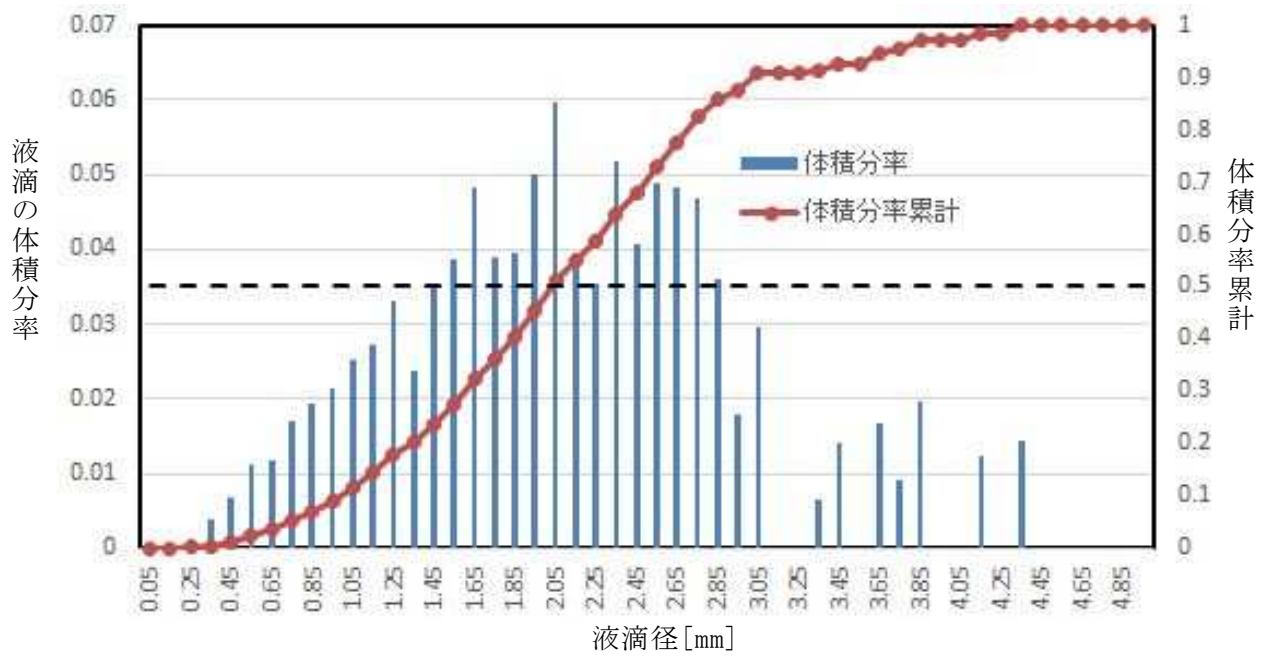


第4-2図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

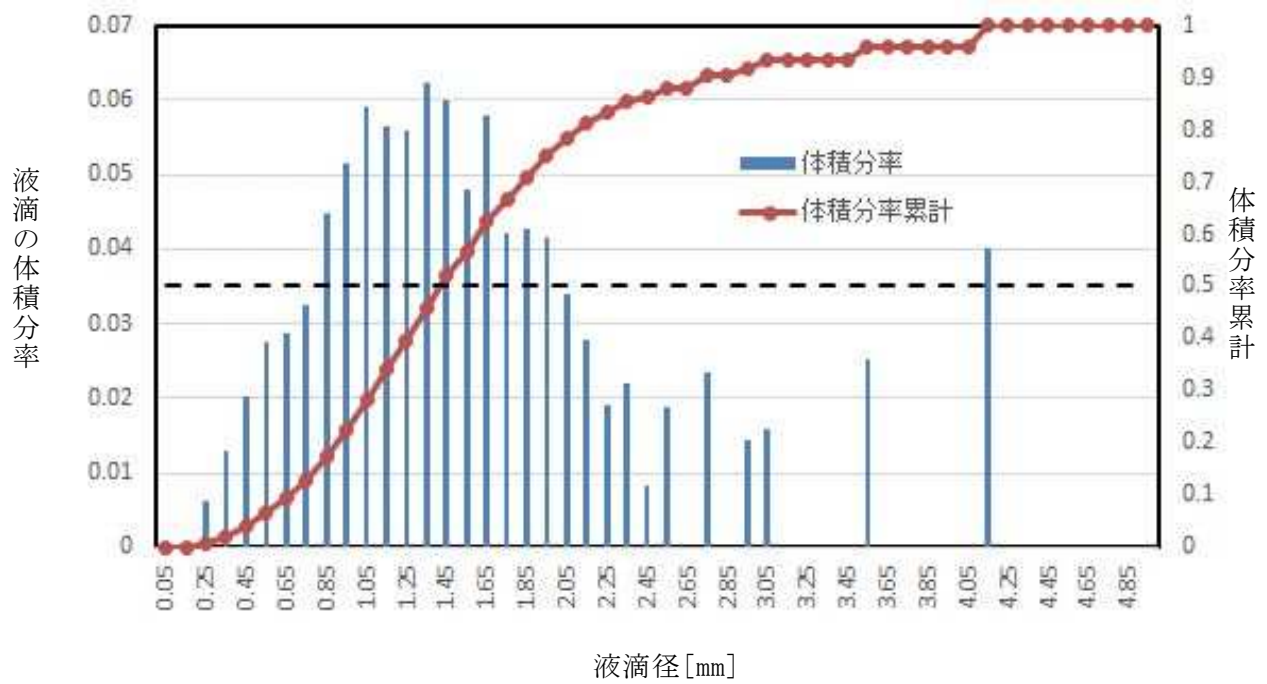


第5-1図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

測定点③

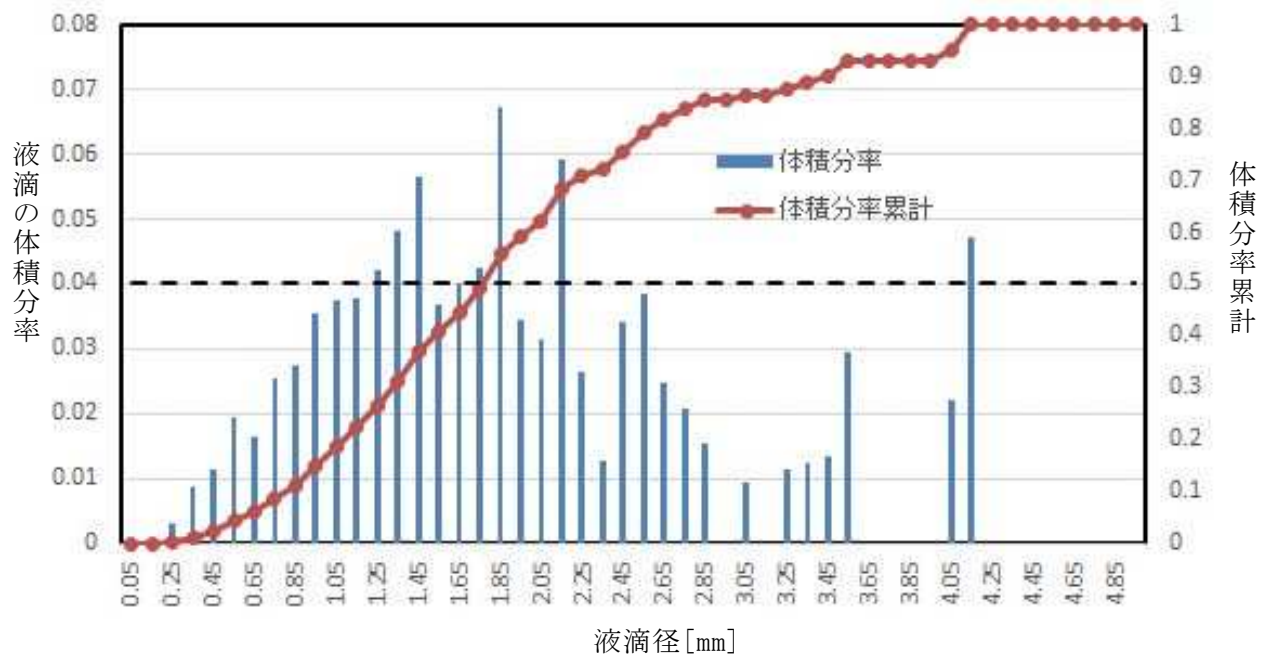


測定点④

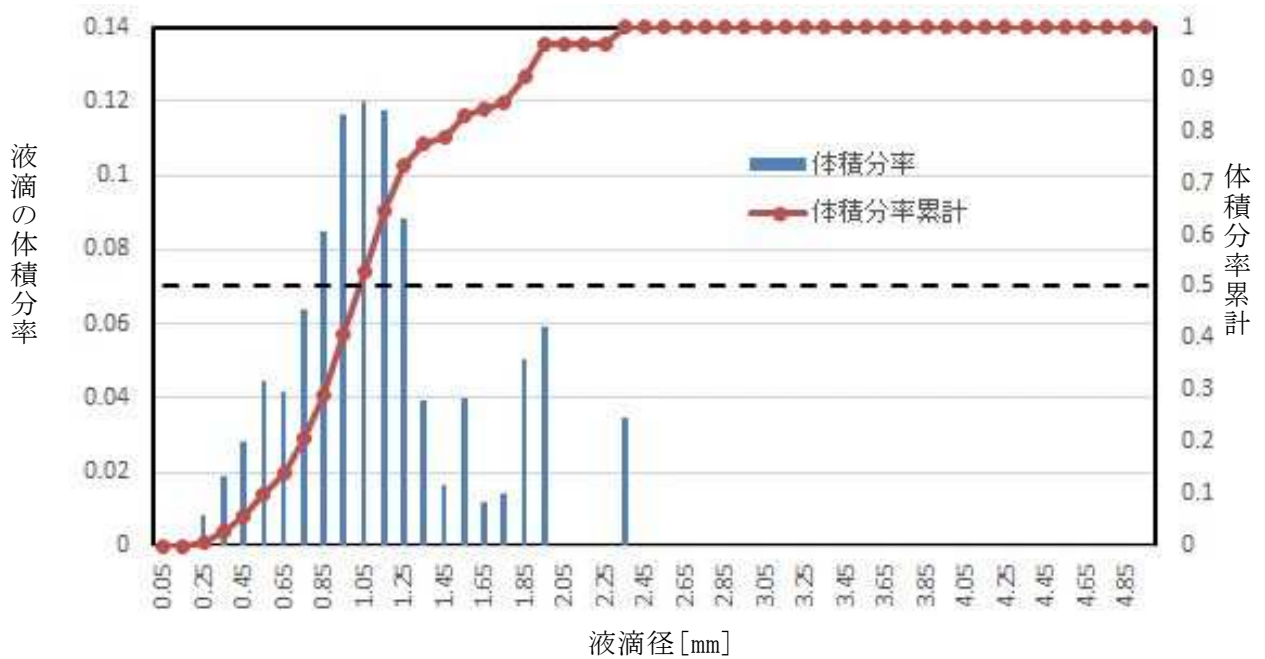


第5-1図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)

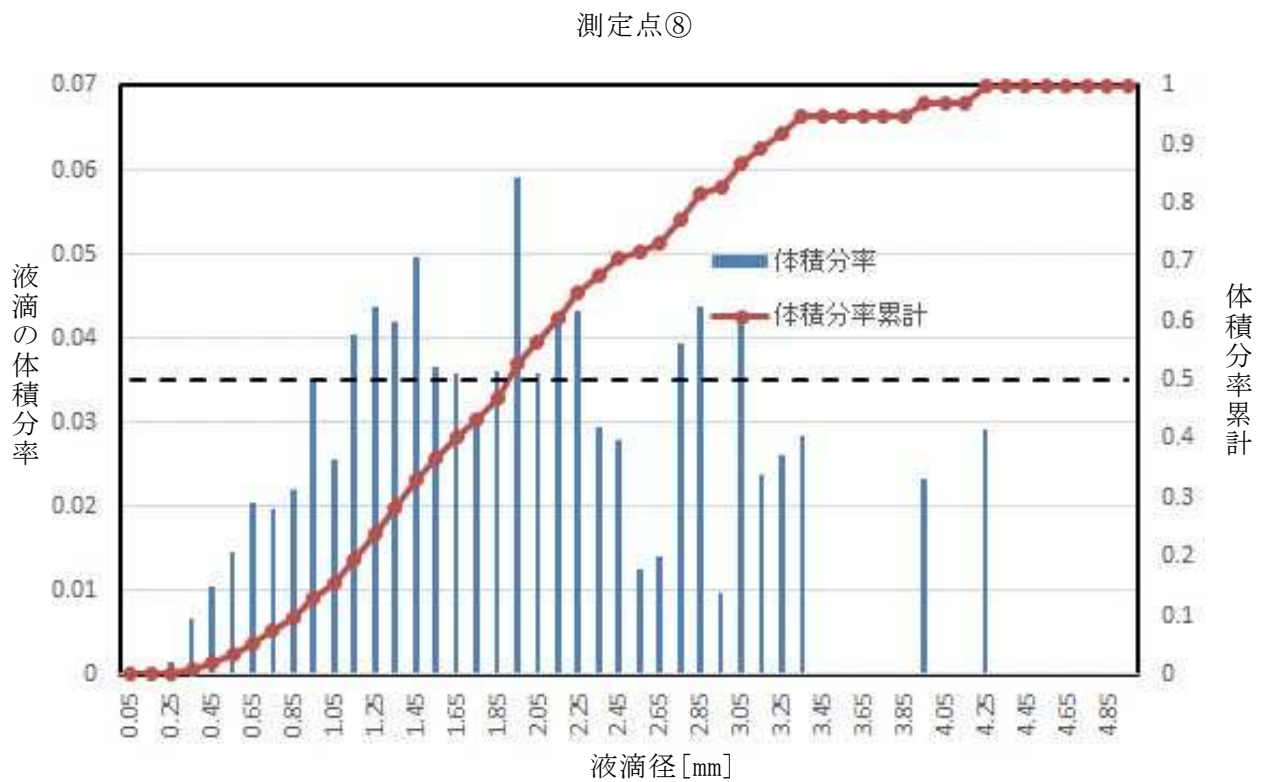
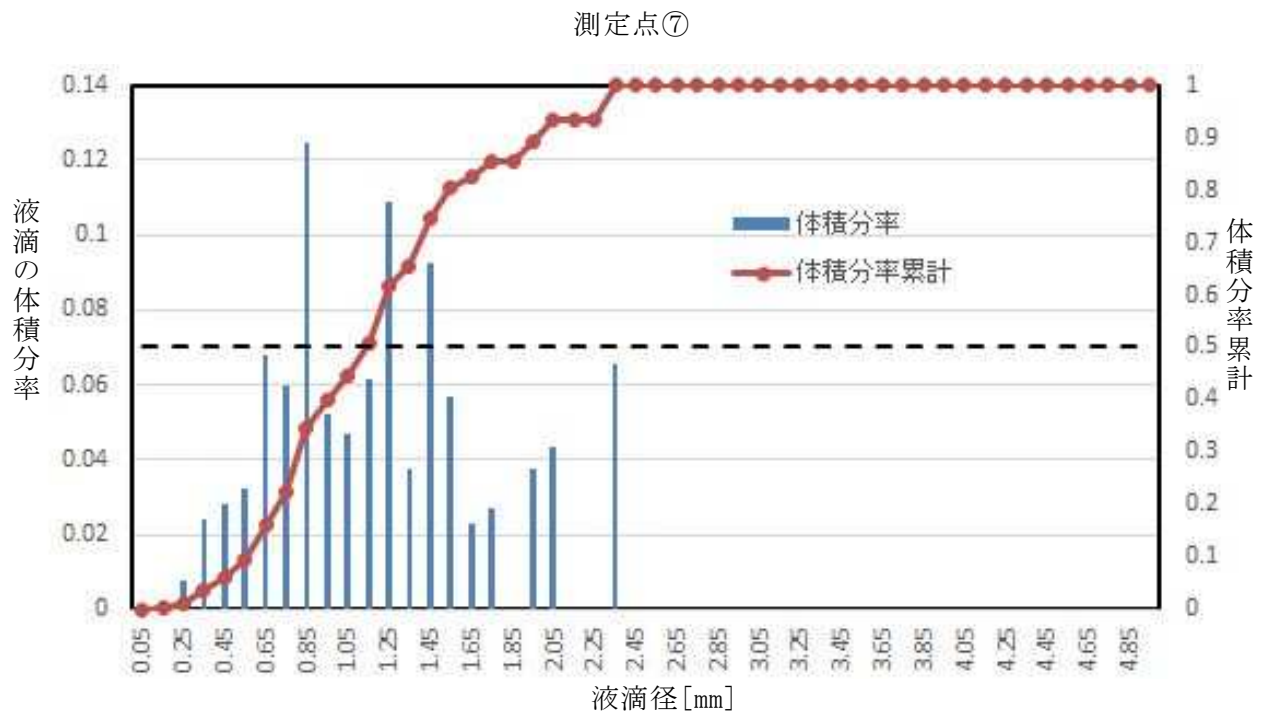
測定点⑤



測定点⑥



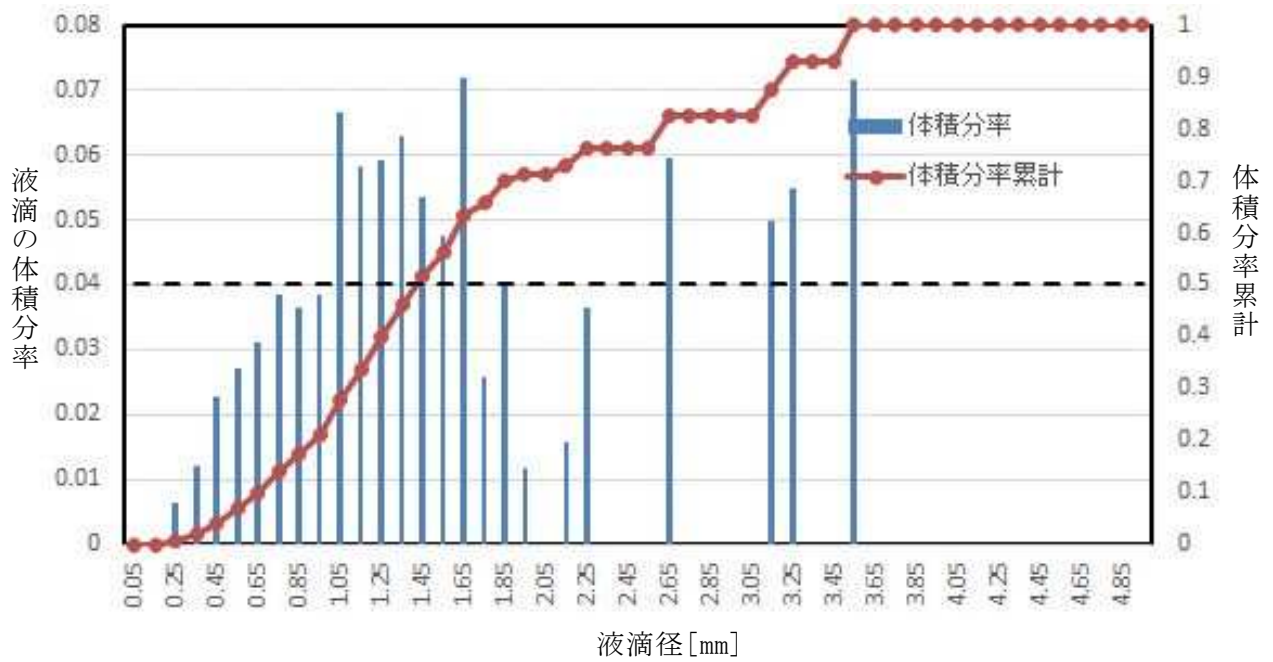
第5-1図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)



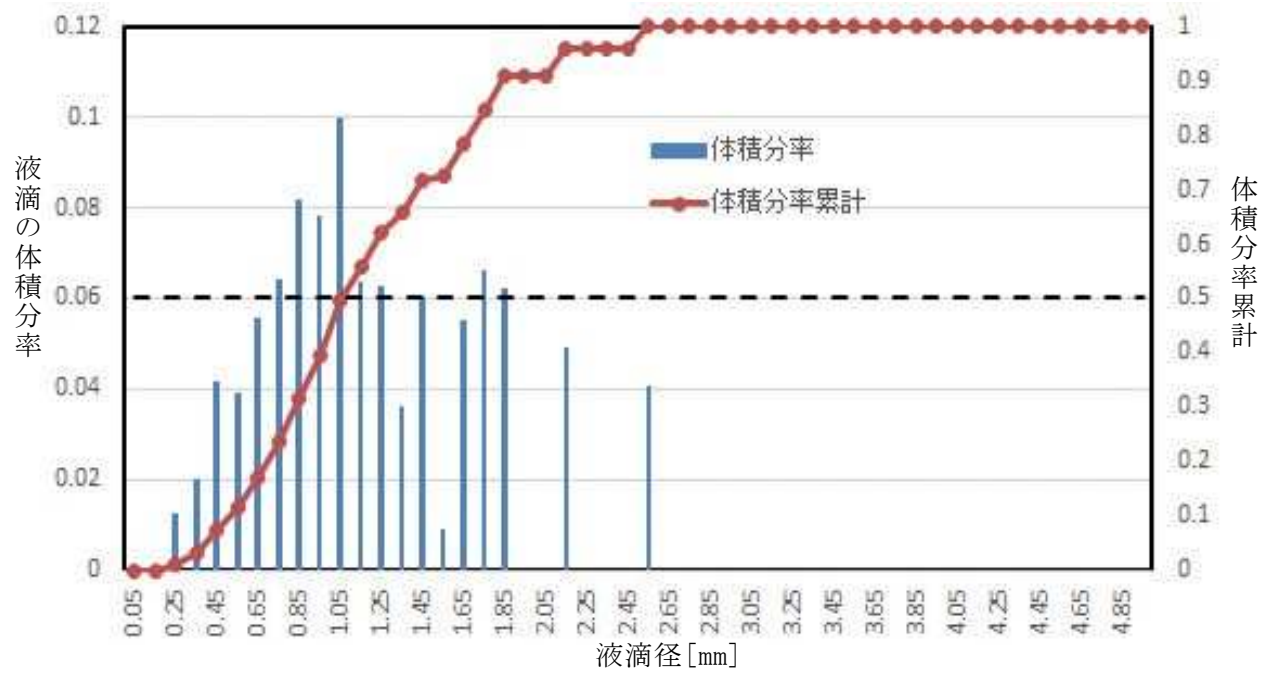
第5-1図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (1回目)



測定点①

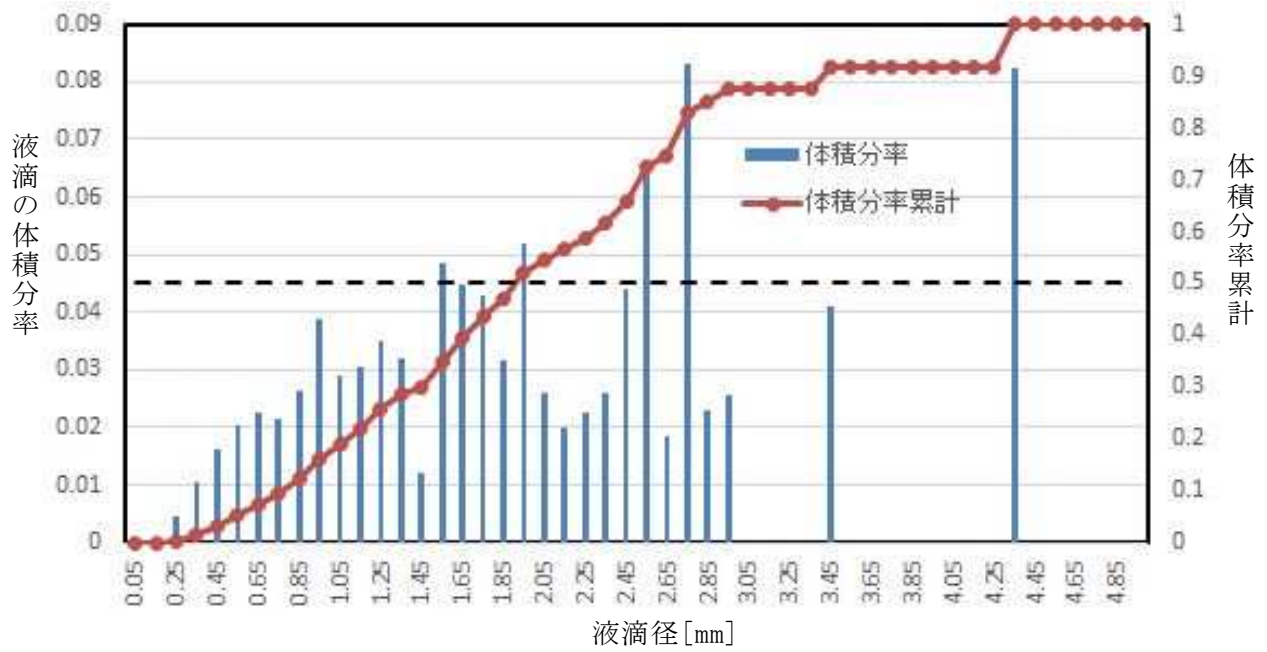


測定点②

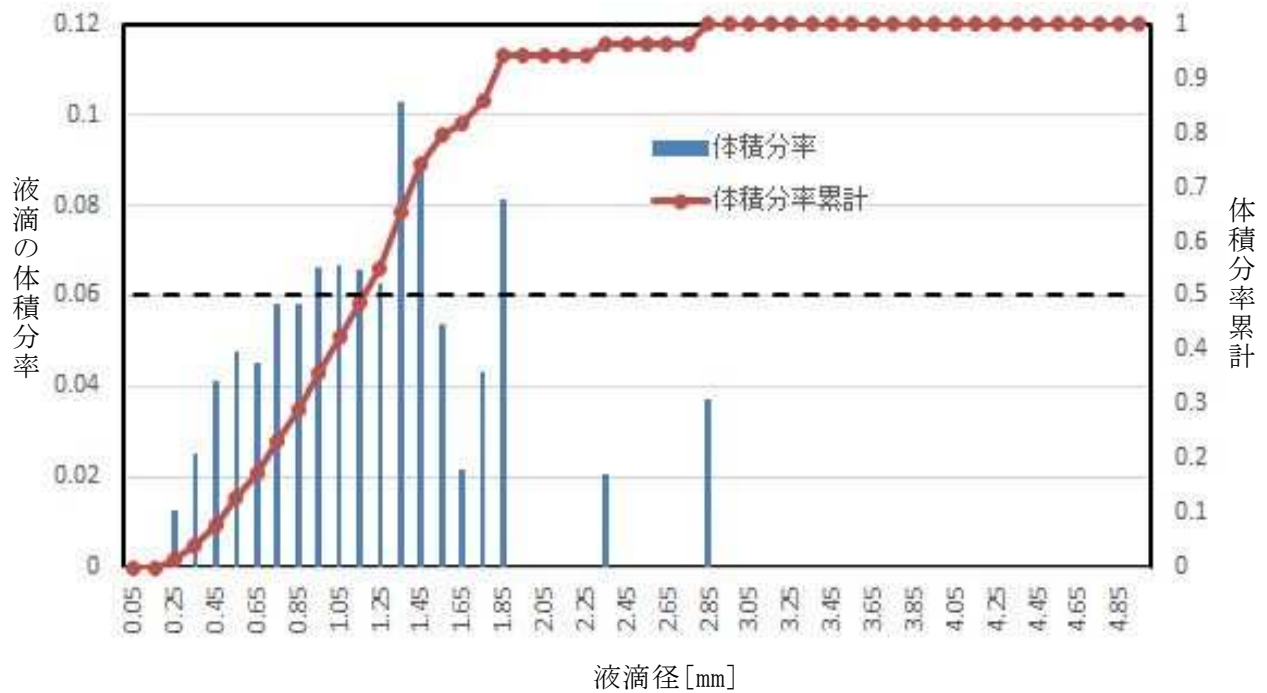


第5-2図(1/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点③

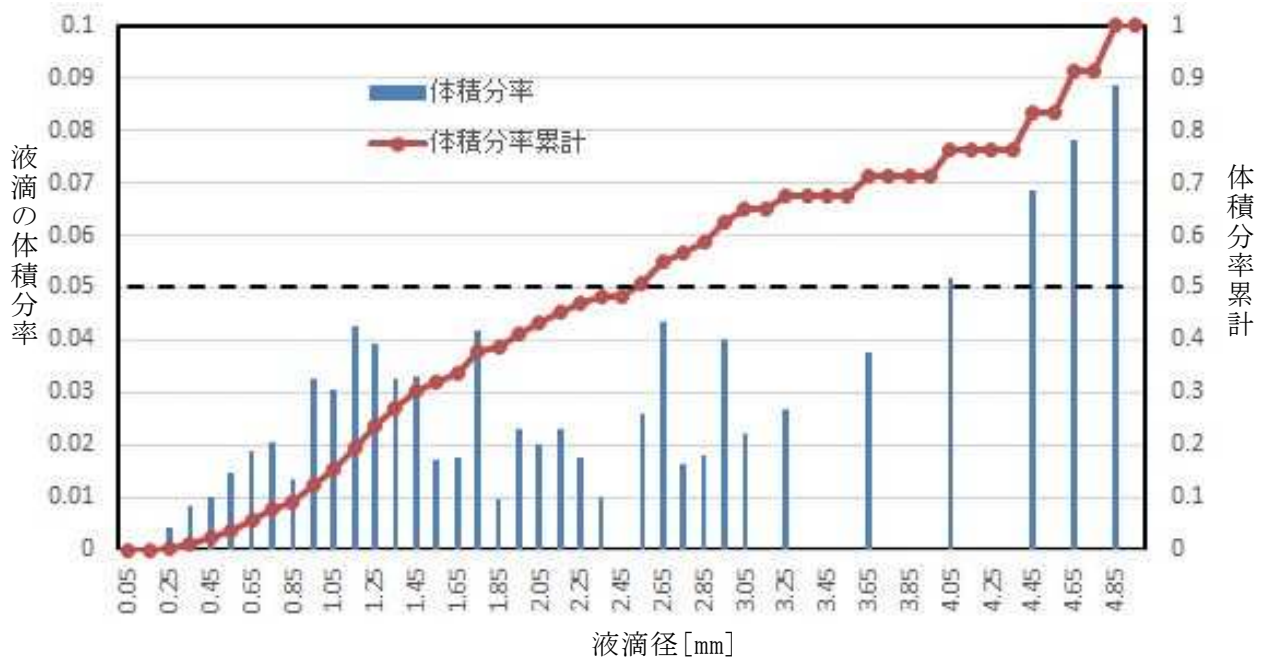


測定点④

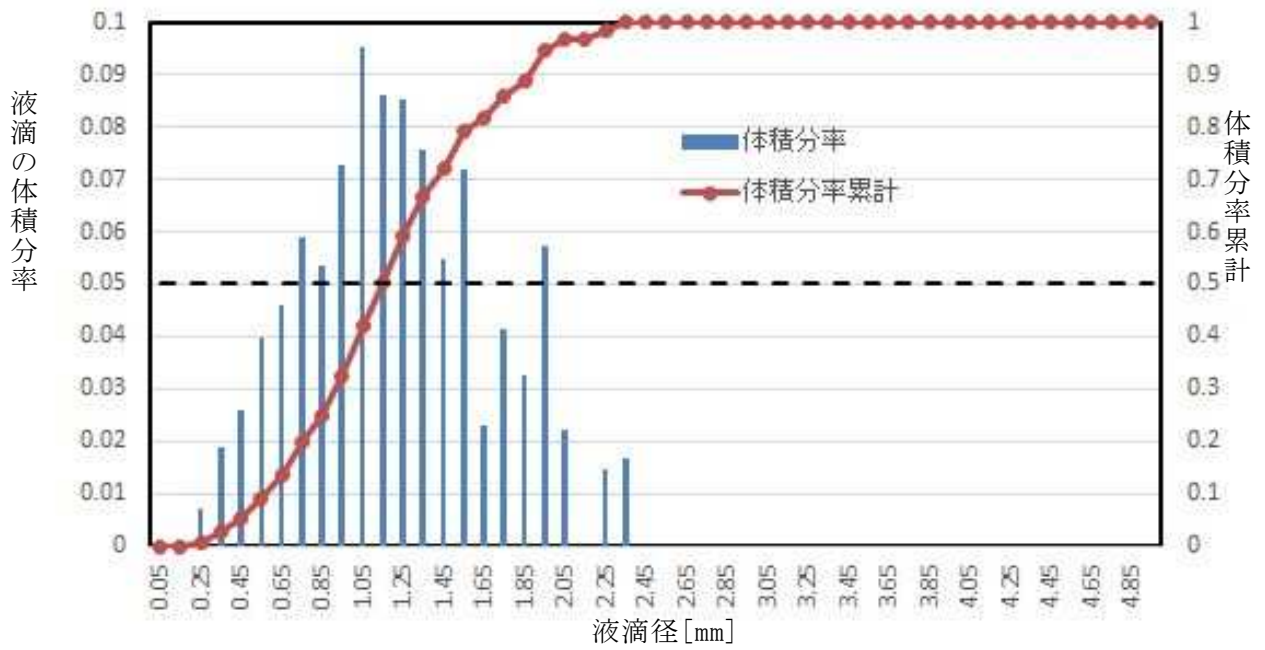


第5-2図(2/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑤

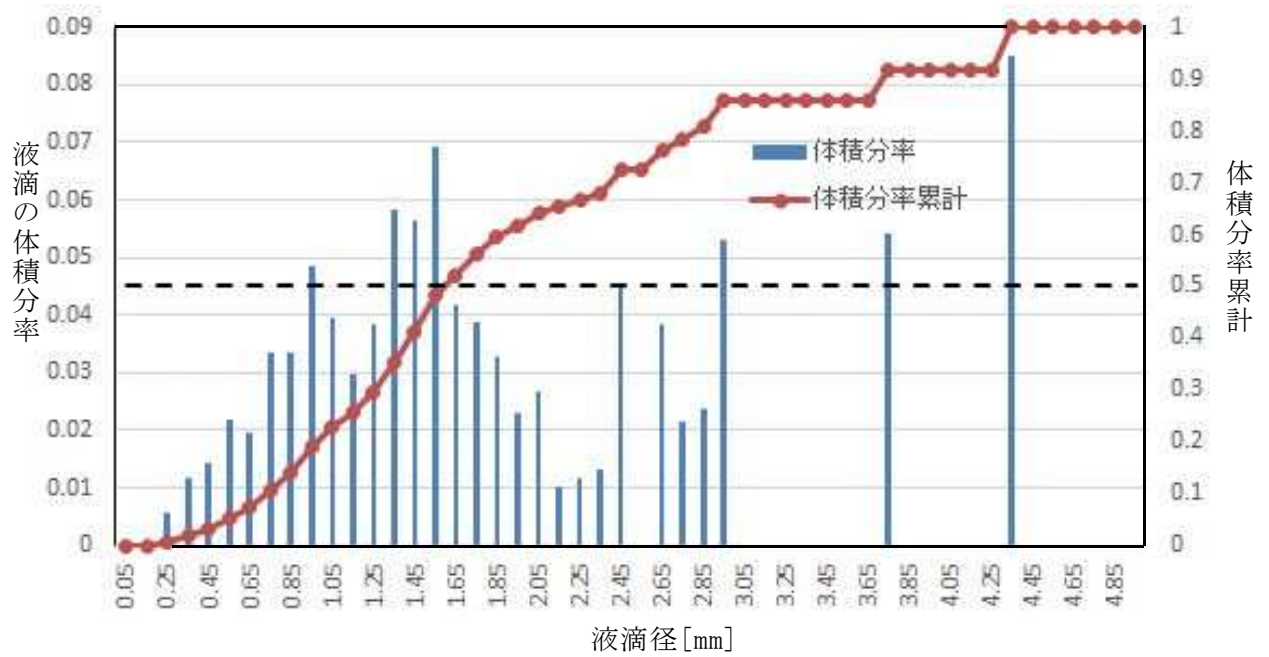


測定点⑥

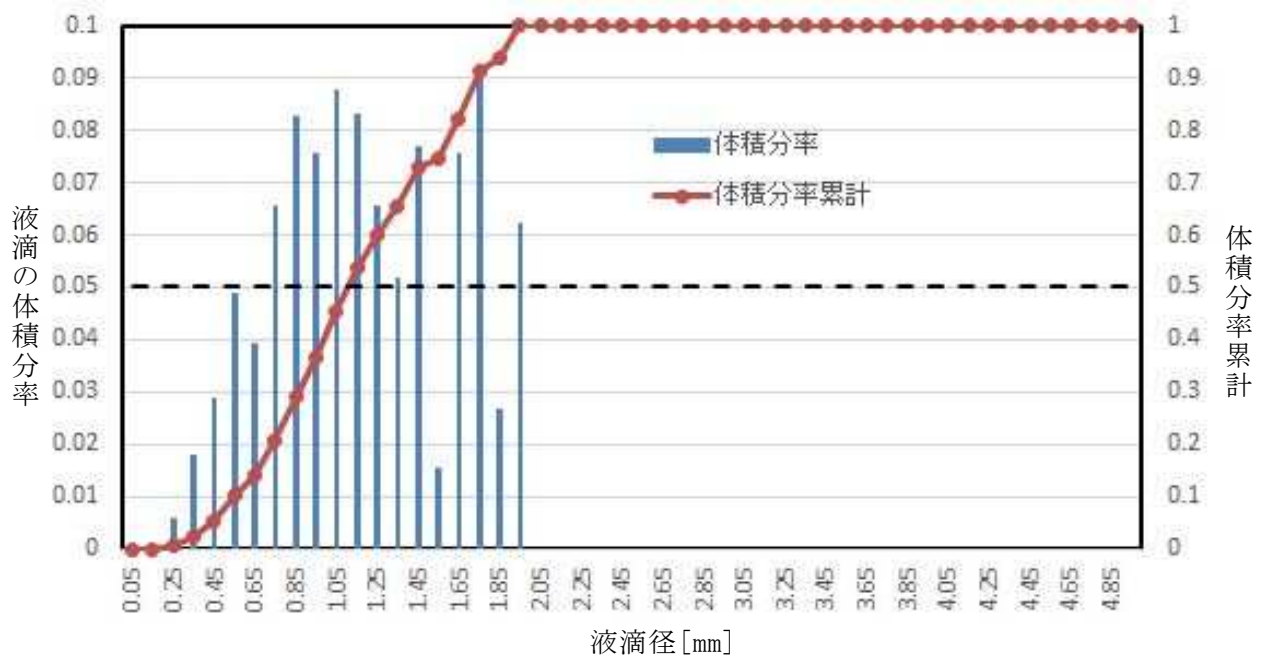


第5-2図(3/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

測定点⑦



測定点⑧



第5-2図(4/4) 液滴体積分率の取得結果 (2回目)

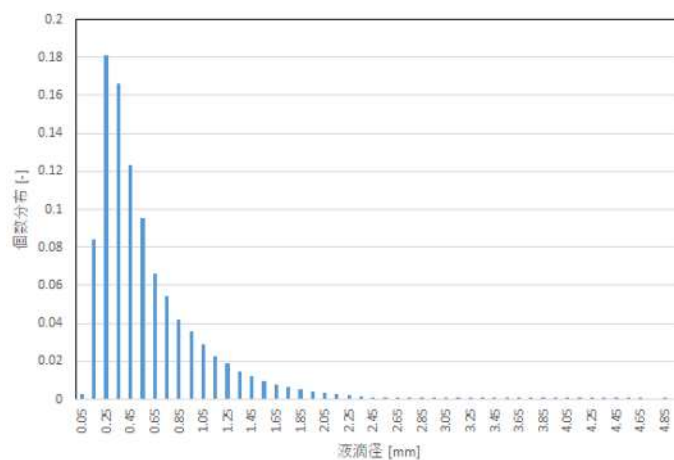
### 3-2. 試験結果の考察

第4-1図及び第4-2図に示す試験データ（第1回目と第2回目）の試験結果より、試験毎に8点計測した全ての計測点において、数百個以上取得された液滴の個数割合分布が0.2~0.4mmで支配的となっていることから、試験回数を増やしたとしても液滴個数割合の分布形状は大きく変わることはなく、また測定点以外の箇所であっても同様の液滴径の分布をとることが推定される。

液滴や周囲の気体の流れは、条件が一定であっても変動を伴うことから、結果として生じる液滴径にはばらつきが生じる。加えて、実際のスプレーでは飛程のなかで衝突/分裂等も生じる可能性があり、これらもばらつきの要因となる。

本試験では上記のばらつきの分布を把握できるように各計測点においてそれぞれ数百個以上の液滴を計測した。これら多数のデータについて正規確率プロット（詳細は以下参照）を用いて正規性の確認を行ったところ、各計測点とも対数正規分布に近い液滴径分布を得た。計測結果に正規性があるということは、一般に自然現象としてのばらつきを再現したサンプリングと捉えることができる。

また、試験データがスプレーヘッドの液滴の特徴を代表した液滴データを取得できているかを確認するため、全測定点のデータを合算したもの（第6図）と、放水方向の直線上に位置する点のうち放水分布図の中心付近に位置し計測点を代表している⑤点（第1回試験及び第2回試験）について個数割合取得結果に対する検定を有意水準5%として実施した。検定に当たっては各測定点での個数割合取得結果には対数正規性があることを踏まえ個数割合を対数変換し、F検定により等分散性を確認したうえで、「等分散を仮定したt検定」を実施した。結果を第3表および第4表に示すが、2群間の分散および平均に差が無いとする仮説を棄却しない結果となったことから、試験で取得した液滴個数割合は、スプレーヘッドの液滴の特徴を代表できていると言える。



第 6 図 液滴径毎の個数分布(全測定点データ合算)

第3表 ⑤点と全測定点データ合算値に対するF検定

帰無仮説  $H_0$  : 2群間の分散に差がない (等分散である)

対立仮説  $H_1$  : 2群間の分散に差がある (等分散ではない)

検定対象	第1回⑤	全測定データ
分散	0.001703	0.001531
自由度	41	48
F値	1.1123	
P値 (片側)	0.3594	
F境界値 (片側)	1.6395	
判定	P>0.05 より、帰無仮説 $H_0$ を採択	

検定対象	第2回⑤	全測定データ
分散	0.001867	0.001531
自由度	48	48
F値	1.219	
P値 (片側)	0.2476	
F境界値 (片側)	1.615	
判定	P>0.05 より、帰無仮説 $H_0$ を採択	

二つのサンプルにおいて、カイ二乗変数に従う変数の比は「F分布」に従う。F値とは二つのサンプルの分散の比であり、F境界値とはF分布において上側確率が優位水準0.05となる数値を示しており、F値<F境界値であれば帰無仮説が棄却されない。

P値は、帰無仮説が正しいという仮定のもと、今回得られた値が偶然ではないとする確率のことであり、F分布におけるF値に対する外側確率である。P値が優位水準0.05よりも小さい場合、得られた値は偶然ではないという確率は小さいと判断される。すなわち、P値が0.05より大きい場合、2群間の分散に差がないという仮説は棄却されない。

第4表 ⑤点と全測定点データ合算値に対する t 検定

帰無仮説  $H_0$  : 2 群間の平均に差が無い

対立仮説  $H_1$  : 2 群間の平均に差がある

検定対象	第1回⑤	全測定データ
自由度	89	
t 値	0.3846	
P 値 (両側)	0.7014	
t 境界値 (両側)	1.9870	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 $H_0$ を採択	

検定対象	第2回⑤	全測定データ
自由度	96	
t 値	-0.0215	
P 値 (両側)	0.9829	
t 境界値 (両側)	1.9850	
判定	P > 0.05 より、帰無仮説 $H_0$ を採択	

t 値は平均値や自由度に基づく関数である。これは確率密度関数である「t 分布」に従うものであり、母平均を推定する問題に使用される。t 境界値とは t 分布において外側確率が優位水準 0.05 となる t の値で、自由度によって決定される。すなわち、 $|t \text{ 値}| < t \text{ 境界値}$  であれば帰無仮説が棄却されない。

P 値は F 検定と同様に、t 分布における t 値に対する外側確率であり、P 値が優位水準 0.05 よりも小さい場合、得られた数値が偶然ではないという確率は小さいと判断される。すなわち、P 値が 0.05 より大きい場合、2 群間の平均に差が無いという仮説は棄却されない。

#### <正規確率プロットについて>

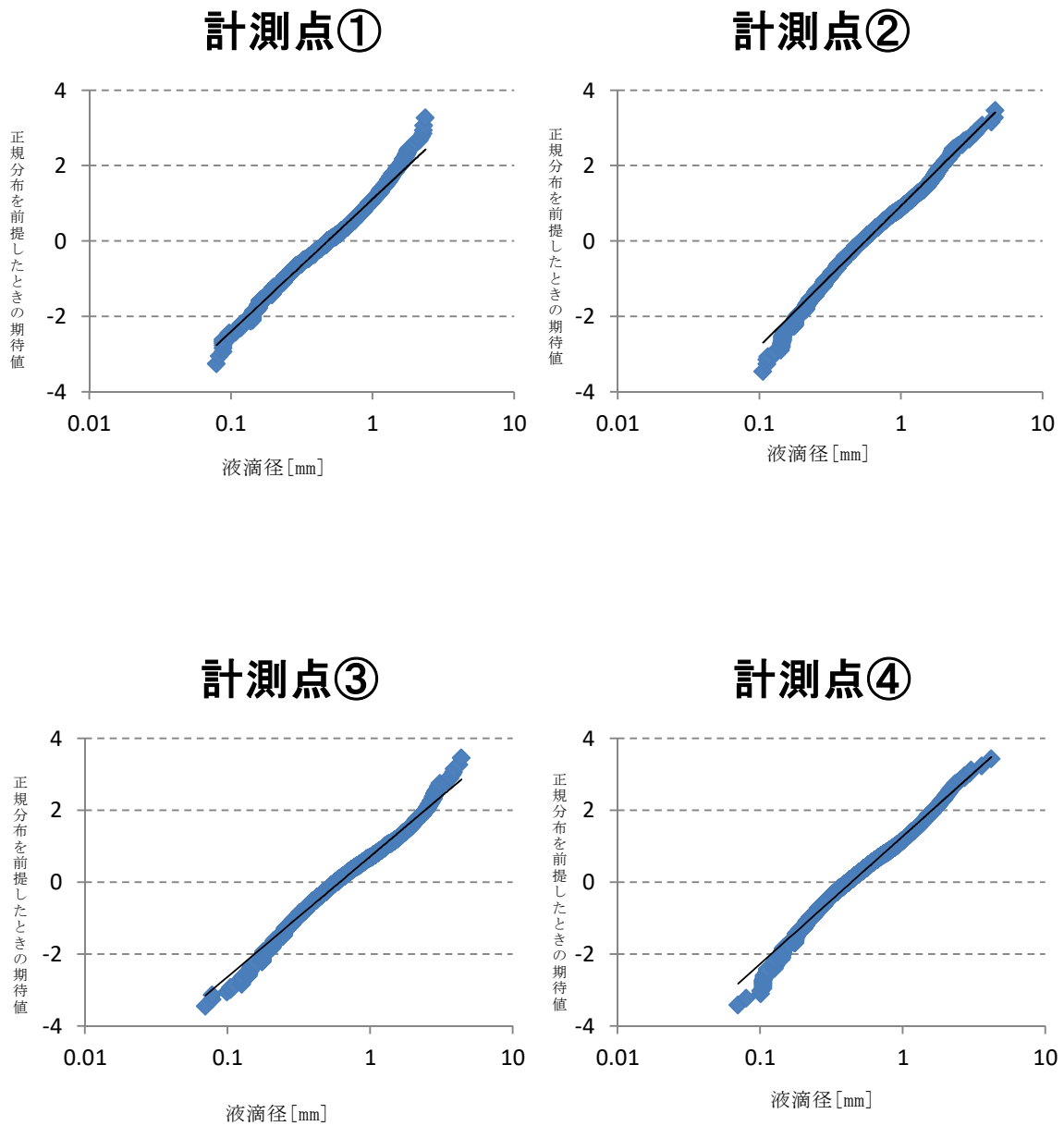
データが正規分布しているかどうかを目視判断するための手法であり、測定値を累積度数分率で整理し、そのプロットが直線状に並べば正規性有りとは判断できる。

具体的には、取得されたデータについて累積比率（確率 $P_i$ ）を求め、 $P_i$ に対して正規分布の累積分布関数の逆関数を用いて求めた値をプロットし、正規分布なら直線、対数正規分布なら片対数グラフ上の直線に沿うかどうかを判断するものである。

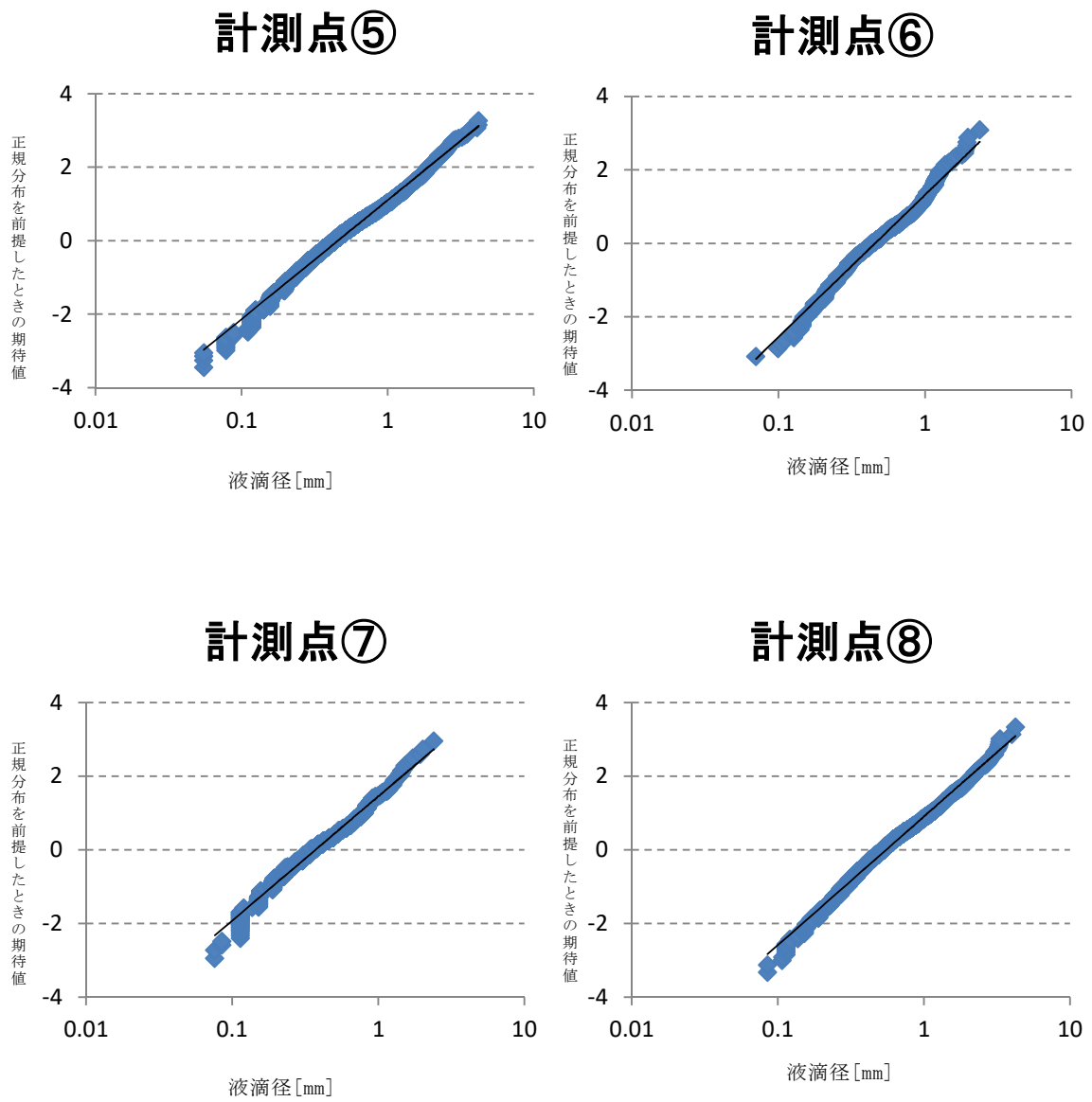
この意味は、標準正規分布に従う $x$ に対応する累積比率（確率 $P_i$ ）を求める関数を逆算しているもので、測定値が正規分布に従うならば散布図を描くと直線状にプロットされることとなる。すなわち、正規性が無い＝正規分布に沿わない＝直線から外れるとして、目視にて正規性の有無を確認できる。

本試験結果の正規確率プロットを第7-1図および第7-2図に示す。横軸に対数をとるとプロット結果は全点で概ね直線状となることから、本計測結果は対数正規分布に従うと判断できる。





第 7-1 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点①~④)

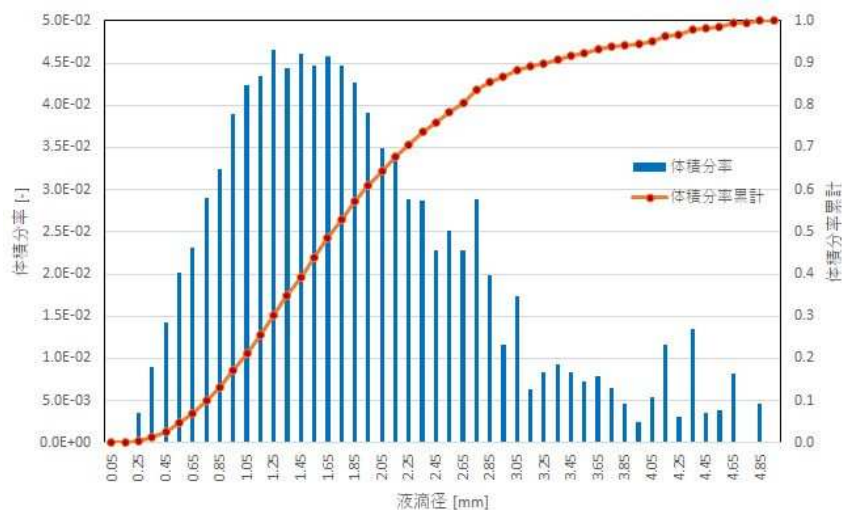


第 7-2 図 対数正規確率プロット (第 1 回試験 測定点⑤~⑧)

#### 4. 液滴径の基本ケース条件の設定

3-2.での検討より、各測定点のデータにおいて自然現象のばらつきを示す正規性を有する分布であることが得られたことから、基本ケース条件の設定に当たっては全測定データを合算することにより液滴径を評価する。全測定点の合算データについては、全計測点を代表していると考えられる放水方向の直線上に位置する点（点⑤）との比較検定において有意な差が見られないことから、スプレイヘッドの特徴を代表するデータであり、基本ケースの条件として妥当であると言える。

第6図にて得られた個数分布に対し液滴径毎の体積を乗じた体積分率で整理した結果、体積分率50%出現値は第8図の通り1.65～1.75mmとなったことから、基本ケース条件は当該結果を踏まえ保守的に1.5mmを設定する。



第8図 液滴径毎の体積分率

#### 5. 液滴径の不確かさを考慮した条件の設定

不確かさを考慮した条件としては、第8図に示す体積分率における両側5%を切り捨てた際の下限值、すなわち体積分率2.5%出現値（0.4mm～0.45mm）を踏まえ、0.4mmを設定する。

なお放水される流量の大部分は、スプレイヘッドではなく放水砲が占めることとなるが、放水砲由来の放水を特徴づける液滴径は2.9mm（文献<sup>※1</sup>）とされており、スプレイヘッドの液滴径を放水砲由来の液滴に適用することは大幅な保守性を有することになる。

※1：宮下達也、石油タンク火災消火時における大容量放水及び泡放射軌跡の予測モデルの構築（2014）

以上