

原子力規制委員会
原子力規制庁
長官官房参事官 殿

平成 26 年度 研究成果報告書

平成 26 年度原子力施設等防災対策委託費
(スクラビング個別効果試験) 事業

筑波大学

目次

1. 委託業務題目	1
2. 委託業務の目的	1
3. 委託業務の内容	2
3.1 単一気泡による DF 測定試験装置の製作及び試験	2
3.1.1 試験装置のコンセプト	6
3.1.2 計測手法の検討	9
3.1.3 試験装置の製作	11
3.1.3.1 試験部容器	13
3.1.3.2 気相供給系	18
3.1.3.3 エアロゾル供給系	21
3.1.3.4 エアロゾル計測系	27
3.1.3.5 排水処理系	35
3.1.4 計測機器	38
3.1.4.1 高速度カメラ	38
3.1.4.2 PIV	39
3.1.5 試験条件・作動流体・試験パラメータ	40
3.1.6 計測項目	40
3.1.7 まとめ	46
3.2 MELCOR による DF 解析	47
3.2.1 プールスクラビングによる DF 解析の概要	47
3.2.2 プールスクラビングに関する流動モデル概要	49
3.2.3 プールスクラビングに係る除染モデル概要	50
3.2.4 慣性衝突による DF_{II} の感度解析	51
3.2.5 プールスクラビングによる除染係数の評価：解析体系および条件	54
3.2.6 プールスクラビングによる除染係数の評価：解析結果	57
3.2.7 DF に対するノズル内気相速度の影響	66
3.2.8 DF に対する気相流量の影響	67
3.2.9 DF に対するサブマージェンスの影響	68
3.2.10 試験結果と解析結果の比較	69
3.2.11 モデル改良のための検討	71
3.2.12 まとめ	71
3.3 試験データの整理	72
3.3.1 気泡挙動に関する過去文献と試験結果の比較	72
3.3.2 初期気泡形成時の気泡およびエアロゾル挙動	74
3.3.3 気泡上昇時の気泡およびエアロゾル挙動	79
3.3.4 水面における気泡，エントレインメント液滴およびエアロゾル挙動	86
3.3.5 慣性衝突の DF に関する過去文献，解析結果および試験結果の比較	89
3.3.6 まとめ	90
文献目録	91

付録：装置図面.....	93
A. 試験部容器.....	95
B. 気泡注入ノズル.....	99
C. 気相供給系.....	103
D. エアロゾル注入部.....	107
E. 混合部.....	113
F. 注入弁システム.....	117
G. エアロゾル供給系.....	121
H. エアロゾル計測系.....	125
I. 凝縮器.....	139
J. 排水タンク.....	143

図目次

図 3-1	単一気泡による DF 測定試験 試験装置概念図	3
図 3-2	単一気泡による DF 測定試験 試験部概念図	3
図 3-3	原子力発電所におけるスクラビング例	7
図 3-4	プールスクラビングにおけるエアロゾル挙動および二相流挙動	7
図 3-5	研究アプローチ法	8
図 3-6	PIV 計測例	10
図 3-7	終端速度と臨界 We 数の関係	10
図 3-8	スクラビング個別効果試験実験体系	11
図 3-9	スクラビング個別効果試験 実験体系分割図	12
図 3-10	水槽形状の選択	14
図 3-11	連続気泡の振れ幅	15
図 3-12	ノズル内径と気泡直径	15
図 3-13	試験部容器設計図	16
図 3-14	試験部容器写真	16
図 3-15	気泡注入ノズル設計図	17
図 3-16	気泡注入ノズル写真	17
図 3-17	ボイラー及び軟水器	18
図 3-18	コンプレッサ	19
図 3-19	窒素ボンベ	19
図 3-20	気相供給系設計図	20
図 3-21	気相供給系写真	20
図 3-22	エアロゾル注入部概念図	22
図 3-23	混合部概念図	23
図 3-24	注入弁システム概念図	23
図 3-25	エアロゾル注入部設計及び写真	24
図 3-26	混合部設計及び写真	24
図 3-27	注入弁システム設計	25
図 3-28	注入弁システム写真	25
図 3-29	エアロゾル供給系全体設計図	26
図 3-30	エアロゾル供給系全体写真	26
図 3-31	気泡の上昇速度と終端速度	28
図 3-32	直径 5mm 気泡上昇の速度変化	29
図 3-33	直径 5mm 気泡の加速度変化	29
図 3-34	直径 5mm 気泡上昇距離変化	30
図 3-35	直径 5mm 気泡の上昇時の速度変化図	30
図 3-36	カメラ撮影範囲	31
図 3-37	上下動システム速度考察	31
図 3-38	上下動システム下部光学系概念図	32
図 3-39	レーザーシート幅	32

図 3-40	光学系光路図.....	33
図 3-41	上下動システム概念図.....	33
図 3-42	上下動システム設計図.....	34
図 3-43	上下動システム写真.....	34
図 3-44	凝縮器 設計図.....	36
図 3-45	凝縮器写真.....	36
図 3-46	排水タンク設計図.....	37
図 3-47	排水タンク写真.....	37
図 3-48	高速度カメラ写真.....	38
図 3-49	三次元 PIV 計測.....	39
図 3-50	界面又は液面から発生した液滴.....	43
図 3-51	液滴界面の検知と座標.....	43
図 3-52	液滴の軌跡.....	44
図 3-53	液滴の速度変化.....	44
図 3-54	液温温度分布計測法.....	45
図 3-55	エアロゾルの質量分布 [1].....	48
図 3-56	SPARC-90 における流動モデル.....	49
図 3-57	SPARC-90 における気泡モデル.....	49
図 3-58	SPARC-90 における除染モデル.....	50
図 3-59	α_i についての感度解析.....	52
図 3-60	$DF_{II,i}$ についての感度解析.....	52
図 3-61	$DF_{II,i}$ に関する計算チャート.....	53
図 3-62	解析体系.....	54
図 3-63	解析体系の主要なパラメータおよびエアロゾルの入力値.....	55
図 3-64	各部のエアロゾル質量 M および質量流量 G.....	58
図 3-65	プール部水中のエアロゾル質量 (0 ~ 86400 s).....	59
図 3-66	プール部水中のエアロゾル質量 (0 ~ 3000 s).....	59
図 3-67	プール部雰囲気中のエアロゾル質量 (0 ~ 86400 s).....	60
図 3-68	プール部雰囲気中のエアロゾル質量 (0 ~ 3000 s).....	60
図 3-69	環境中のエアロゾル質量 (0 ~ 86400 s).....	61
図 3-70	環境中のエアロゾル質量 (0 ~ 3000 s).....	61
図 3-71	プール部および環境中のエアロゾル質量 (0 ~ 86400 s).....	62
図 3-72	プール部および環境中のエアロゾル質量 (0 ~ 3000 s).....	62
図 3-73	プール部水中における DF (0 ~ 86400 s).....	63
図 3-74	プール部水中における DF (0 ~ 3000 s).....	63
図 3-75	プール部水中における DF (Savitzky–Golay filter, 0 ~ 86400 s).....	64
図 3-76	プール部水中における DF (Savitzky–Golay filter, 0 ~ 3000 s).....	64
図 3-77	DF の比較 (0 ~ 86400 s).....	65
図 3-78	DF の比較 (0 ~ 3000 s).....	65
図 3-79	プール部水中における DF に対するノズル速度の影響.....	66
図 3-80	プール部水中における DF に対するサブマージェンスの影響.....	67
図 3-81	プール部水中における DF に対するサブマージェンスの影響.....	68

図 3-82	α_i についての感度解析	70
図 3-83	$DF_{II, i}$ についての感度解析	70
図 3-84	流動挙動の比較	73
図 3-85	初期気泡形成挙動可視化の範囲	75
図 3-86	エアロゾル模擬物質の仕様	75
図 3-87	初期気泡形成時における気泡およびエアロゾル挙動の時間変化	76
図 3-88	散乱光を無視した気泡体積取得のための画像処理手順	76
図 3-89	気泡体積の時間変化	77
図 3-90	2次元速度場取得のための画像処理手法の検討	78
図 3-91	上昇気泡挙動可視化の範囲	80
図 3-92	エアロゾルを含まない場合の上昇気泡の可視化例	81
図 3-93	エアロゾルを含まない場合の気泡の上昇軌道	81
図 3-94	気泡の楕円近似	82
図 3-95	エアロゾルを含まない場合の上昇気泡の高さ方向速度の時間変化	82
図 3-96	エアロゾルを含まない場合の気泡の長軸および短軸の時間変化	82
図 3-97	エアロゾルを含む場合の上昇気泡の可視化例	83
図 3-98	エアロゾルを含む場合の気泡の上昇軌道	83
図 3-99	エアロゾルを含む場合の上昇気泡の高さ方向速度の時間変化	84
図 3-100	エアロゾルを含む場合の気泡の長軸および短軸の時間変化	84
図 3-101	上昇気泡位置の比較	85
図 3-102	水面近傍の気液およびエアロゾル挙動の概念図	87
図 3-103	エントレインメント液滴撮影時の静止画寸法および可視化例	87
図 3-104	気泡破裂からエントレインメント液滴発生までの挙動	88
図 3-105	水面に到達する気泡挙動	88
図 3-106	水面における気泡および界面に付着したエアロゾル挙動	88
図 3-107	α_i についての感度解析	89

表目次

表 3-1	単一気泡による DF 測定試験基本仕様	4
表 3-2	高速度カメラ仕様	38
表 3-3	$DF_{II,i}$ の評価において使用される係数	53
表 3-4	解析条件	56
表 3-5	実験における $DF_{II,i}$ の計算結果	69

1. 委託業務題目

平成26年度原子力施設等防災対策等委託費（スクラビング個別効果試験）事業

2. 委託業務の目的

現状の PWR プラントでは、蒸気発生器伝熱管破損事故等において、水中に核分裂生成物の混入したガスが流入するため、スクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。また、BWR の重大事故時においてもウェットウェルからの格納容器ベントを実施する際には、プール水中におけるスクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。しかし、福島第一原子力発電所事故においては、高温での急減圧により沸騰が発生し、必ずしも期待された効果が得られず、環境への放出量を増加させた可能性がある。シビアアクシデント発生時の環境へ放出するソースターム量を正確に評価する観点から、高温急減圧条件下等を含む幅広い条件のプール水におけるスクラビングによる核分裂生成物除去効果を定量的に評価する必要がある。一方、現状のスクラビングに関する研究は、前述のプール水の減圧沸騰条件に加え、プール水へ流入するガスの非凝縮性ガス割合の幅広い条件範囲における、エアロゾル挙動及び二相流挙動、さらに双方の詳細な相互関係についての知見が不十分である。このため、スクラビングを解析的に評価する場合に使用するモデルの高度化又は妥当性確認への試験データの活用が困難な状況が続いている。

本委託では、試験を実施して気泡とエアロゾル挙動の相互関係を詳細に調べ、核分裂生成物の除去効果を定量的に評価するための基礎データの取得を目指す。

3. 委託業務の内容

原子炉施設におけるプールスクラビング現象について，小規模試験により，幅広い条件で二相流動とエアロゾル挙動の関係を詳細に把握して整理し，核分裂生成物の除去効果を評価するための基礎データを取得する。

3.1 単一気泡による DF 測定試験装置の製作及び試験

プールスクラビング時における気泡発生からその上昇，液面到達までにおける単一気泡又は少数気泡の挙動及び気泡内外の詳細なエアロゾルの挙動を高い時空間解像度で把握するための試験装置を製作し，試験を実施する。表 3-1 に試験の基本仕様を示す。

図 3-1 に試験装置の概略図，図 3-2 に試験部の概略図を示す。図に示すように，水を溜めた試験部容器内にエアロゾルが混入したガスを流入させ，単一又は少数気泡を発生させる。

その際の気泡と気泡内外のエアロゾル挙動を高速度カメラや PIV 等を使用して詳細に計測する。流体条件は大気圧，常温～100℃とし，ガス流量，ガス成分割合等をパラメータとして幅広い条件での気泡及びエアロゾル挙動の観察を行い，データを採取する。

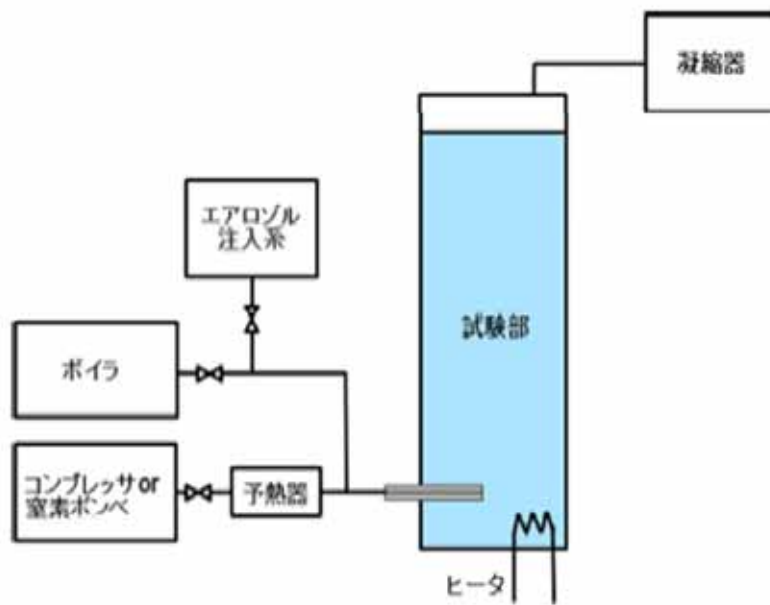


図 3-1 単一気泡による DF 測定試験 試験装置概念図

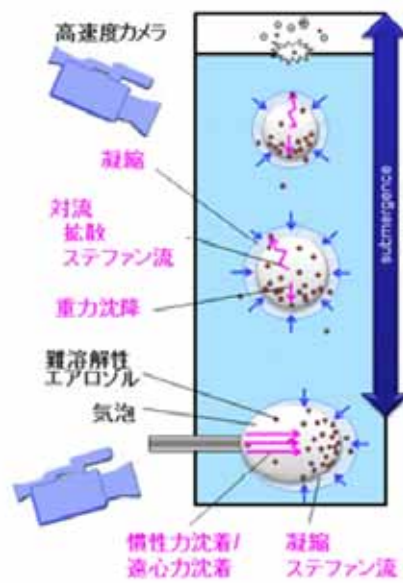


図 3-2 単一気泡による DF 測定試験 試験部概念図

表 3-1 単一気泡による DF 測定試験基本仕様

項目	内容	備考
装置構成	試験部容器, コンプレッサあるいは窒素ポンプ, ボイラ, エアロゾル供給系, エアロゾル計測系, 排水処理系	試験部容器の詳細寸法 は, 発生気泡径やスケール則 等を考慮し, 試験計画により 検討する.
計測機器	高速度カメラ, PIV 等	試験計画及び予備試験により 検討する.
試験条件	大気圧, 常温~100°C	
作動流体	水-空気 (窒素) 水-蒸気 水-蒸気-難溶解性エアロゾル (上記 3 条件はスケーリング特性の確認のため, 水以外の作動流体も考慮可) 水-蒸気-非凝縮性ガス-難溶解性エアロゾル	
試験パラ メータ	<ul style="list-style-type: none"> ・ ガス噴出し方向: 下, 横, 上 ・ 穴形状: 円 (基本), 破損口形状 (適宜, 理想化) ・ 口径: 3 種類 (クエンチャ, ベント管を模擬し, スケーリングを考慮して寸法決定) ・ ガス流出速度: 0.1~1 m/s 弱 ・ 非凝縮性ガス濃度: 0~100% ・ エアロゾルの組成・粒径・濃度 ・ サブクール度: 液温が常温から飽和温度までの範囲 (高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む) ・ サブマージェンス: 100mm 弱~1000mm 強 	

<p>計測項目 (ただし、今年度においては、一部を要開発項目として検討する)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 気泡形状（重心位置，重心軌道，径を評価） ・ 気泡及びエアロゾル粒子の速度分布 ・ エアロゾル濃度及びその変化（気泡内外） ・ 気相体積 ・ 界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布 ・ 液滴内のエアロゾル質量 ・ 液温及び気相温度（試験装置内で複数点，大まかな空間分布） ・ 液相内で温度成層化を形成させる場合には，高さ方向の液温温度分布（詳細分布） 	<p>全て時間変化を計測</p>
--	--	------------------

3.1.1 試験装置のコンセプト

現状の PWR プラントでは、蒸気発生器伝熱管破損事故等において、水中に核分裂生成物の混入したガスが流入するため、スクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。また、BWR の重大事故時においてもウェットウェルからの格納容器ベントを実施する際には、プール水中におけるスクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できる。フィルター付きベントシステムにおいては、格納容器ベント時システム内でも、ベンチュリースクラバーとプール水中におけるスクラビング効果により核分裂生成物の除去効果が期待できるとされている（図 3-3 参照）。しかし、福島第一原子力発電所事故においては、高温での急減圧により沸騰が発生し、必ずしも期待された効果が得られず、環境への放出量を増加させた可能性がある。シビアアクシデント発生時の環境へ放出するソースターム量を正確に評価する観点から、高温急減圧条件下等を含む幅広い条件のプール水におけるスクラビングによる核分裂生成物除去効果を定量的に評価する必要がある。

一方、現状のスクラビングに関する研究は、前述のプール水の減圧沸騰条件に加え、プール水へ流入するガスの非凝縮性ガス割合の幅広い条件範囲における、エアロゾル挙動及び二相流挙動、さらに双方の詳細な相互関係についての知見が不十分である。このため、スクラビングを解析的に評価する場合に使用するモデルの高度化又は妥当性確認への試験データの活用が困難な状況が続いている。

本報告では、試験を実施して気泡とエアロゾル挙動の相互関係を詳細に調べ、核分裂生成物の除去効果を定量的に評価するための基礎データの取得を目指す。

上記の内容を踏まえて、プールスクラビングにおけるエアロゾル挙動および二相流挙動を研究対象とする。原子力発電所において考え得る、これらのエアロゾル挙動および二相流挙動を図 3-4 に示す。格納容器から配管系統を通る排気ガスは、プール中に噴出する。エアロゾルおよび二相流の挙動は、初期慣性衝突した後水蒸気凝縮が生じて凝縮しきれないガスまたは非凝縮ガスにより初期気泡が形成される。さらに初期気泡が分解し、気泡は細分化する。気泡が水面に到達すると気泡がはじけることでエントレインメント液滴の形成およびエアロゾル粒子の再飛散が生じる。水中で気泡上昇する間、気泡内においてエアロゾルの慣性衝突、重力沈降、ブラウン拡散および凝縮・蒸発による水蒸気流が生じることでエアロゾルの気泡内沈着が生じる。これらの挙動を解明するうえで確認すべき現象または素過程を表 1 に示す。気泡・液滴の内外でのエアロゾル挙動として慣性衝突や重力沈降などがあり、気泡・液滴の挙動として気泡・エントレインメント液滴の径および流速の分布や運動、界面形状等がある。これらを踏まえ、単一の上昇気泡に対して気泡内部のエアロゾル挙動、気泡（界面）の挙動、エントレインメント液滴の挙動を詳細に計測し、解明する。

研究アプローチのイメージ図を図 3-5 に示す。まず、気泡・液滴を用いたエアロゾル移行挙動に関して重要な物理量および計測項目を抽出する。解析コードの MELCOR に含まれる物理モデルを調査し、両者の妥当性を確認する。この後、実験および MELCOR を用いた解析を実施し、両者の結果を比較することでプールスクラビングにおける除染係数の支配因子について検討する。さらに必要に応じて物理モデルの式の改良を検討する。

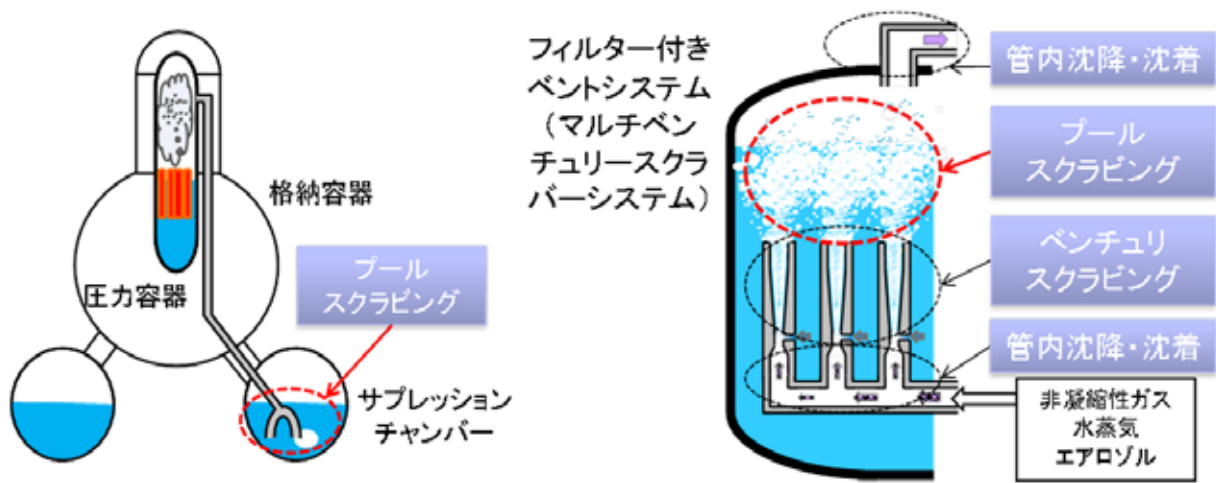


図 3-3 原子力発電所におけるスクラビング例

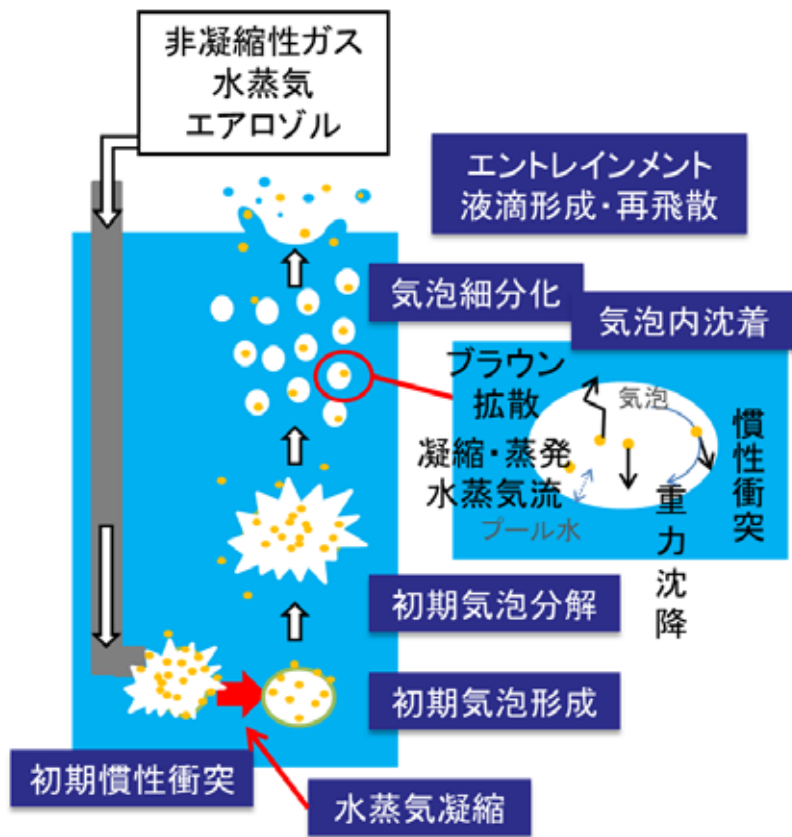


図 3-4 プールスクラビングにおけるエアロゾル挙動および二相流挙動

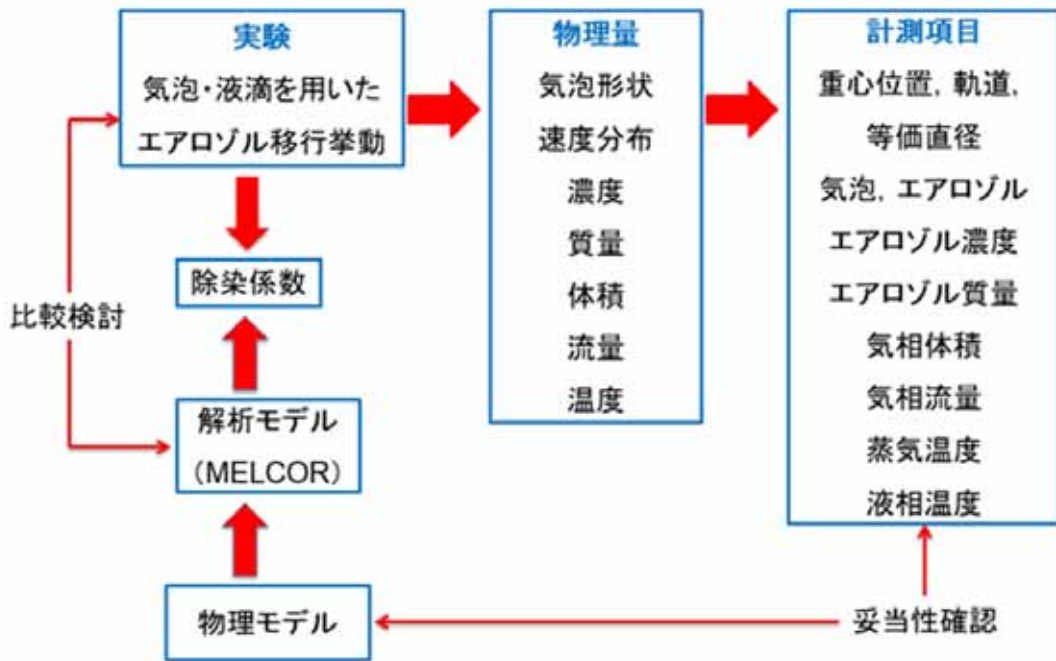


図 3-5 研究アプローチ法

3.1.2 計測手法の検討

計測手法の一例として PIV 計測を検討した。PIV 計測とは気体や液体の流れ場に粒子を混入し、粒子が流れに追従することを前提にし、粒子の移動から流れの 2 次元または 3 次元空間における速度分布を定量計測する技術である。その一例を図 3-6 に示す。ベンチュリー管内の流速を測る実験を行ったもので、ベンチュリー管内に蛍光粒子を入れて PIV 計測を行った。レーザーによって発光した蛍光粒子は、レーザー光のみ遮断するカラーフィルタを通じてハイスピードビデオカメラで撮影され赤色 LED ライトをバックライトとすることで蛍光粒子界面を明確にし、識別可能にする。こうして、撮影された蛍光粒子を基に画像処理を行ってベンチュリー管内の流速を計測する。

上記のような計測を、本研究でも行う。さらに本研究では三次元 PIV 計測を行い流体の動きを二次元的ではなく三次元的に解明する。

このような計測を行うに当たって、計測を行う以前に対象となる物理現象を把握しておく必要がある。本研究では、表 3-1 にも記述があるように気泡及び気泡内のエアロゾル挙動の計測を行うため対象とする気泡の径の検討を行った。

対象とする気泡は以下記述のような検討を行った。基礎実験であるため単一気泡について検討を行い、液面まで到達するまでに分解せず安定した気泡径を特定するため、終端速度と臨界 We 数を用いて予備計算を行った。終端速度 ($500 < Re < 10^5$) と臨界 We 数は以下の式となる。臨界 We 数は 12 と仮定し計算を行った。

$$u_t = \left\{ \frac{4}{3 \times 0.44} \frac{(\rho_L - \rho_G)g}{\rho_L} D_e \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

$$We_c = \rho_L (u_G - u_L)^2 \frac{D_e}{\sigma} \quad (3.2)$$

ここで、等価直径 m : D_e , 重力加速度 m/s^2 : g , 速度 m/s : u , レイノルズ数 : Re , 臨界ウェーバー数 : We_c , 密度 kg/m^3 : ρ , 表面張力 N/m : σ であり、添字は気体 : G , 液体 : L である。

図 3-7 に気泡の終端速度と臨界 We 数の関係を示す。丸のプロットは終端速度を、四角は臨界 We 数による分裂しない気泡の最大径を示す。臨界 We 数の曲線より上側の速度では気泡が分裂を起こすため、気泡径は終端速度が臨界 We 数の曲線より下側となるようにすべきである。従って単一で分裂しない最大気泡径は 5mm 程度だと判断した。

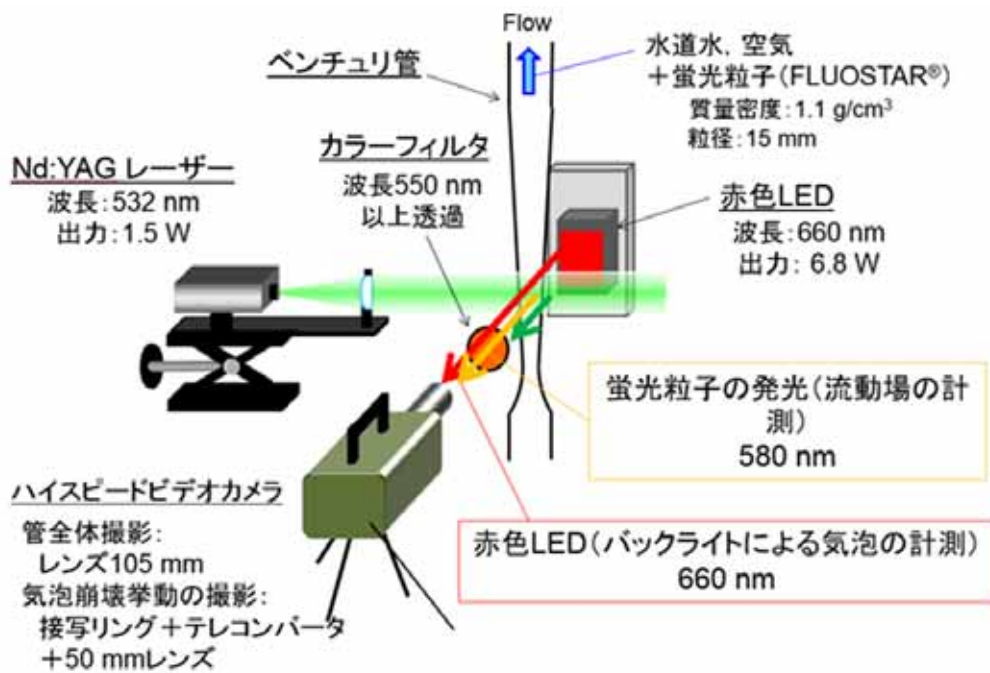


図 3-6 PIV 計測例

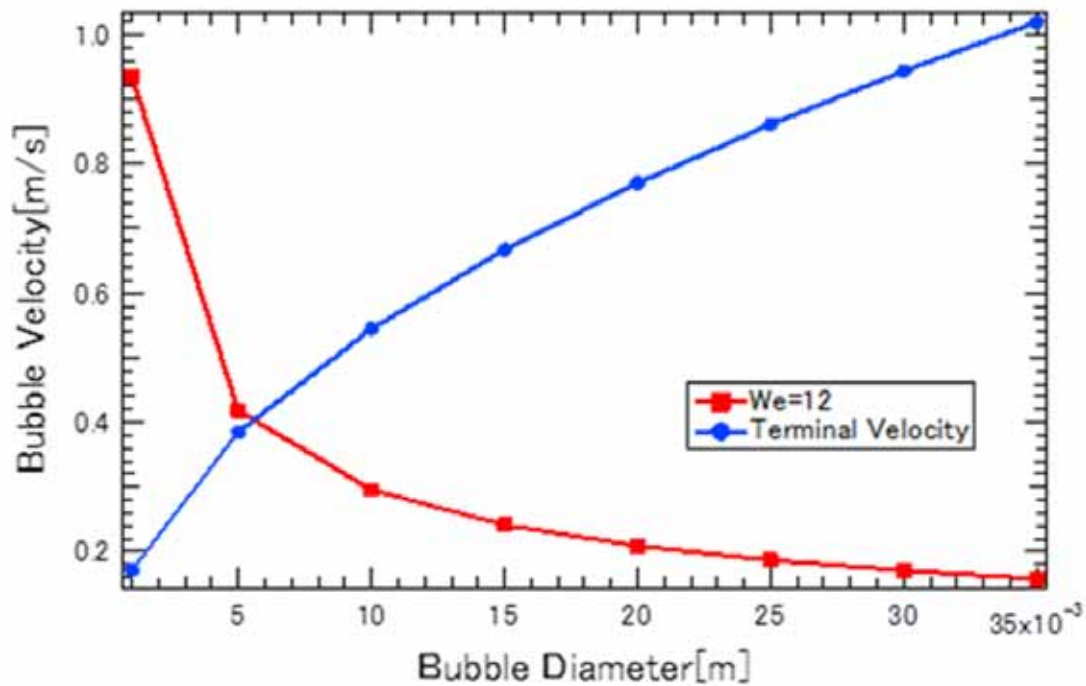


図 3-7 終端速度と臨界 We 数の関係

3.1.3 試験装置の製作

以上の業務内容およびコンセプトを踏まえ図 3-8 に実験体系を示す。装置構成は、コンプレッサ、窒素ボンベ、ボイラーから気相の供給を行い窒素ガス、空気に関しては蒸気と混合する前に予熱を行う。次に窒素、空気、蒸気を二つに分け一方は、エアロゾル注入部に接続されもう一方は混合部に接続される。分けられた気相は混合部にて合流し注入弁システムにて、気相流のうち単一気泡分だけ採取され試験部容器とエアロゾル計測系を含む試験部へと送り計測を行う。試験容器内では、気泡注入ノズルを用意し単一気泡を試験部容器内に放しエアロゾル計測系にて計測を行う。計測を終えた、蒸気、窒素、空気、及びエアロゾルを含む気泡は試験部より凝縮器、排水タンクを含む排気系へと送られ安全に処理される。なお試験部への給水は、試験部容器下部から行き排水も同じく行う。

当報告では、図 3-9 に示すように、コンプレッサ及び窒素ボンベ、ボイラーを含む気相供給を行う箇所を気相供給系、エアロゾル注入部及び混合部、注入弁システムを含む箇所をエアロゾル供給系、試験部容器及びエアロゾル計測系を含む箇所を試験部、凝縮器及び排水タンクを含む箇所を排気系、試験部容器へと給水、排水を行う箇所を給水系とし以下より記述する。

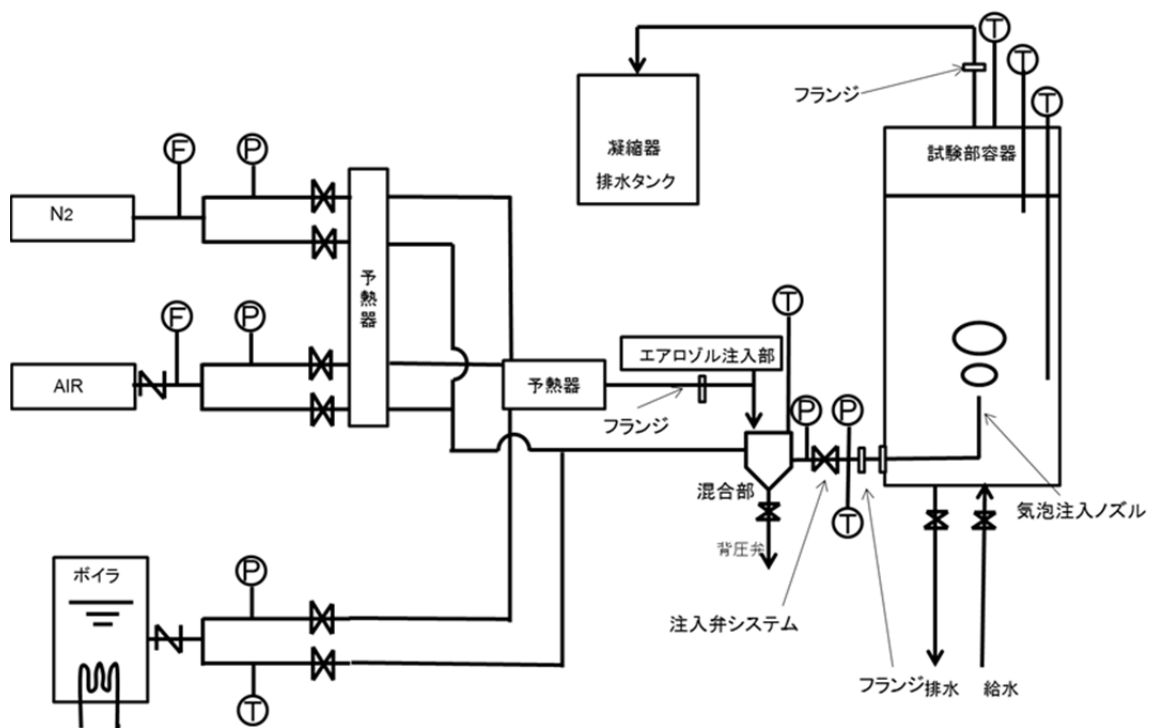


図 3-8 スクラビング個別効果試験実験体系

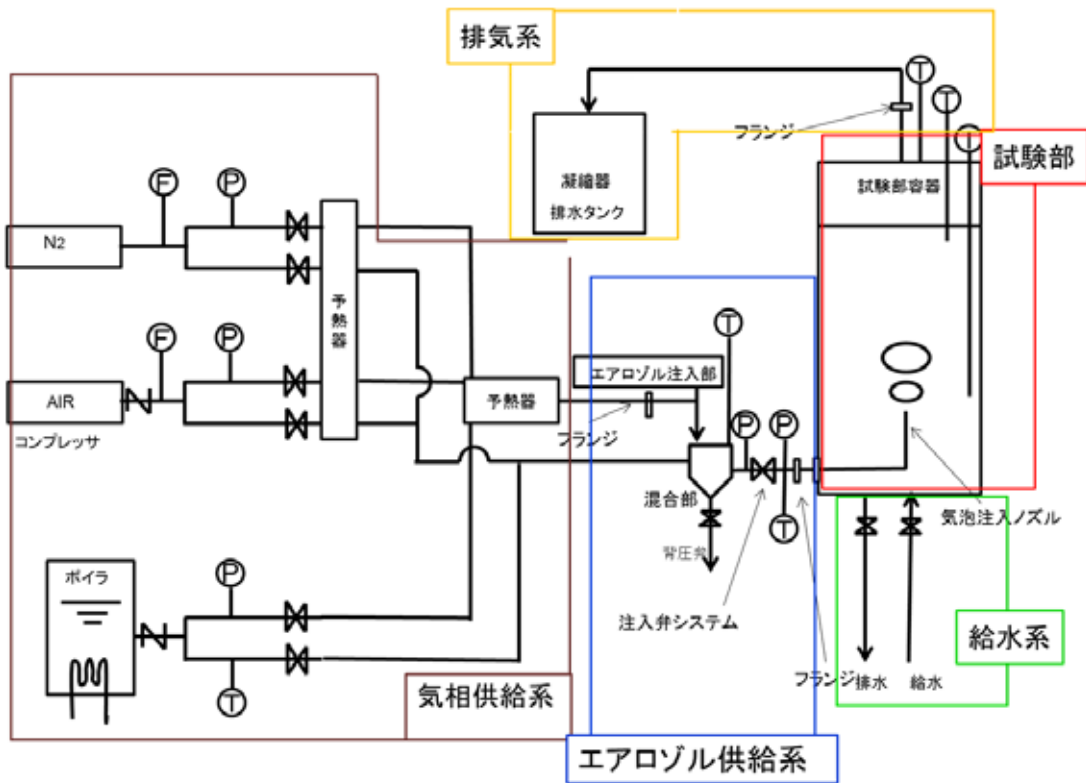


図 3-9 スクラビング個別効果試験 実験体系分割図

3.1.3.1 試験部容器

前述の表 3-1 に示す計測項目を可能とする試験を行うため、試験部容器を考案した。試験部の形状候補として図 3-10 に示す。候補として 1.直方体 2.円柱 3.ウォータージャケット型 4.八角柱 5.八角柱ウォータージャケット型の 5 つがあげられた。計測機器として PIV 計測が仕様に記載されているため PIV 計測を行う上で最適な形状として、平行な面が多い 4.八角柱水槽を採用した。

寸法の決定として図 3-11 に示す、連続的に気泡を生成する予備実験を行いその気泡軌跡を参考に比例によってサブマージェンスを 1m 以上与えた場合の気泡の揺れ幅を考慮し寸法の決定を行った。比例配分で、1次元上昇気泡の振れ幅を予測すると高さ 1m で左右に 62.5mm の振れ幅を持つことが分かった。さらに、気泡上昇時に壁面の影響があるため余裕を持たす必要がある。よって水槽の幅、奥行き共々気泡を中央から出すのであれば 300mm は最低でも必要であると判断した。

材質として、試験条件が常温～100℃と仕様書に記載があり耐熱 120℃まで耐えられかつ、PIV などの可視化計測のため透過性に優れたポリカーボネートを用いた。

気泡注入ノズルについては耐熱性に優れたステンレスノズルを用いた。気泡径が 5mm と断定したため、その気泡を生成し得るノズル直径を予備計算によって求めた。以下に計算式を示す。

$$V = \pi D \sigma / \rho g \quad (3.3)$$

ここで、気泡体積 m^3 : V , オリフィス直径 m : D , である。

(3.3)の式を(3.4)のように式変換し予備計算を行った。

$$D = \frac{\rho g}{6\sigma} d^3 \quad (3.4)$$

計算結果を図 3-12 に示す。結果より、直径 5mm の気泡を出すのに適したノズル内径は 2.8mm であると断定した。これより、表 3-1 内の試験パラメータにおいての、ガス噴出し方向：下、横、上、穴形状：円（基本）、破損口形状（適宜、理想化）、口径：3種類（クエンチャ、ベント管を模擬し、スケーリングを考慮して寸法決定）のところを加味し内径 3mm 程度の注入ノズルを中心に内径を 6mm, 10mm と大きくしたものを、L型ノズル、直線ノズルと二種類のノズル型を用意し内径 3mm の L字型、直線型、内径 6mm の L字型、直線型、内径 10mm の L字型、直線型と 6種類のノズルを用意した。

図 3-13 に試験部容器の設計図を示す。概要は、全長 1700mm、試験部容器厚さ 20mm とし単一気泡を注入するノズルを挿入可能にする。ノズル挿入位置は底面より 200mm に位置する。試験部容器の仕様を以下に示す。

- ・ 正八角形(内径 300 mm)
 - ・ 側面厚さ 20 mm
 - ・ 底板厚さ 20 mm
 - ・ 高さ 1700 mm
 - ・ 密閉可能なようにねじで固定する蓋をつける
 - ・ ノズル接続可能なようフランジ接合部をつける
 - ・ 液温 100 °C まで耐熱可能な材質であるポリカーボネートを用いる
- 以上の点を踏まえ図 3-14 に完成した試験部容器の写真を示す。

また、気泡注入ノズルの仕様を以下に示す。

- ・ ステンレス製または、それに代わる耐熱性に優れたもの
- ・ ノズル形状として、曲がりノズル、直線ノズル等数種類のノズルを用意する
- ・ 試験部容器エアロゾル供給系に接合するフランジを含む
- ・ 水槽の中心部分にノズルの噴き出し穴が配置されるよう設計をする

その設計図を図 3-15 に写真を図 3-16 に示す。

1.直方体 2.円柱 3.ウォータージャケット型 4.八角柱 5.八角柱ウォータージャケット型

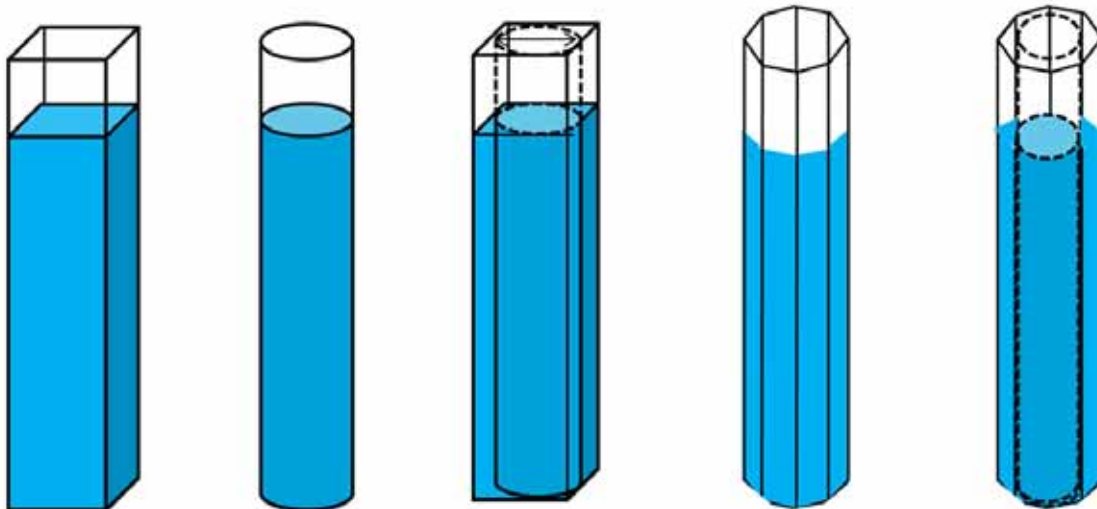


図 3-10 水槽形状の選択

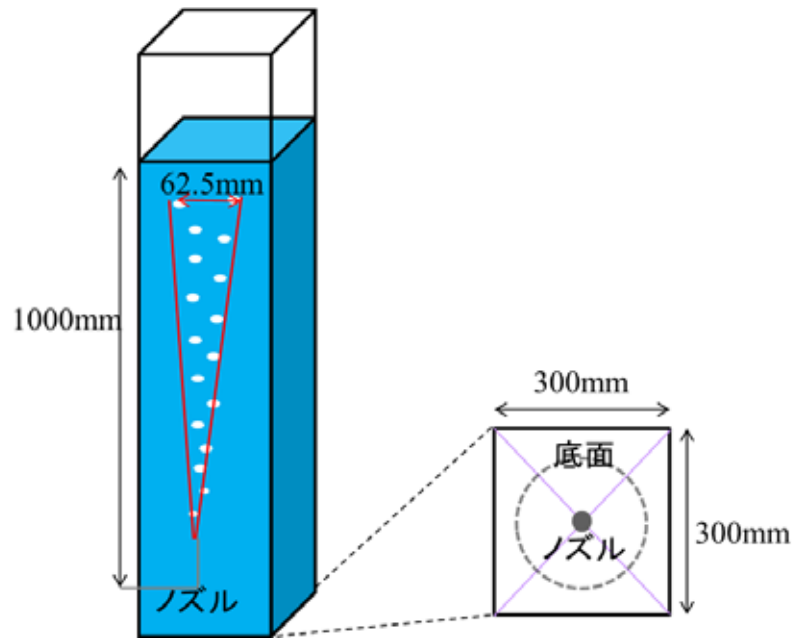


図 3-11 連続気泡の振れ幅

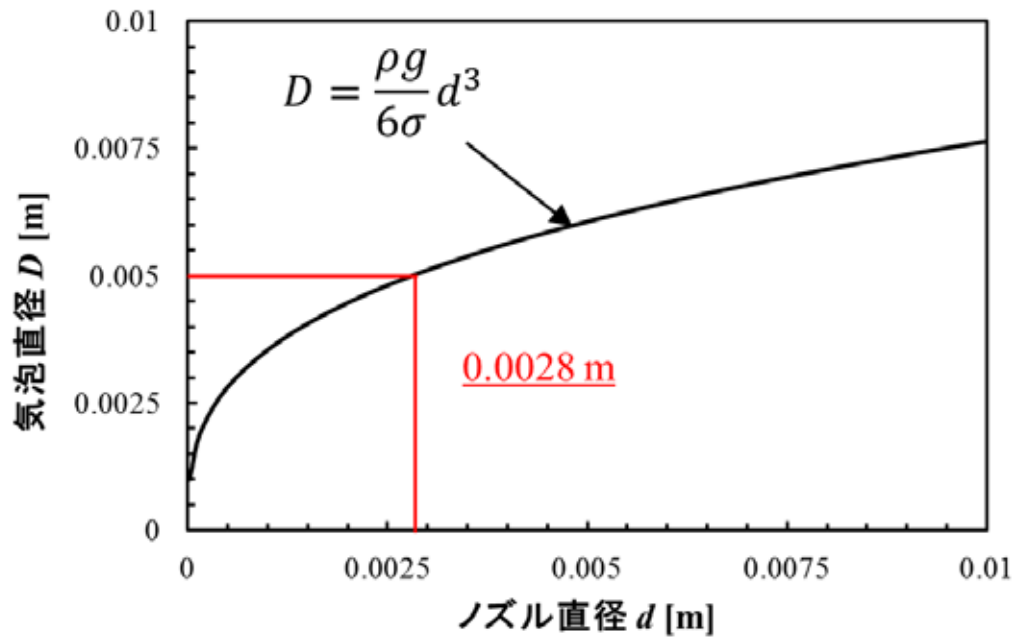


図 3-12 ノズル内径と気泡直径

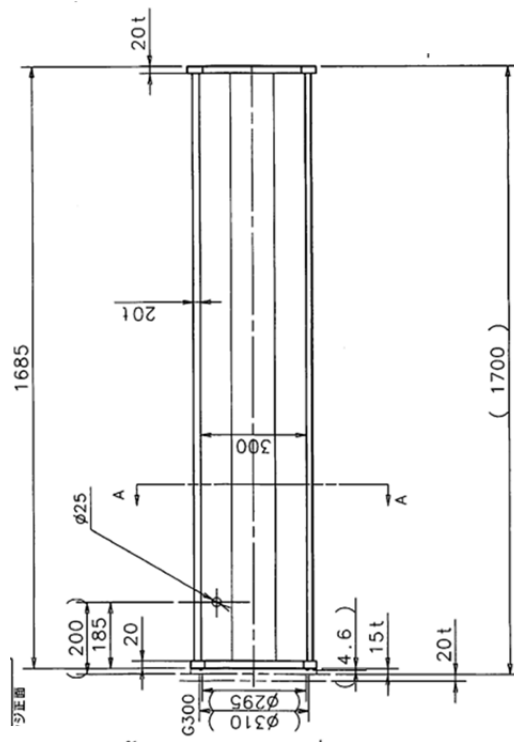


図 3-13 試験部容器設計図



図 3-14 試験部容器写真

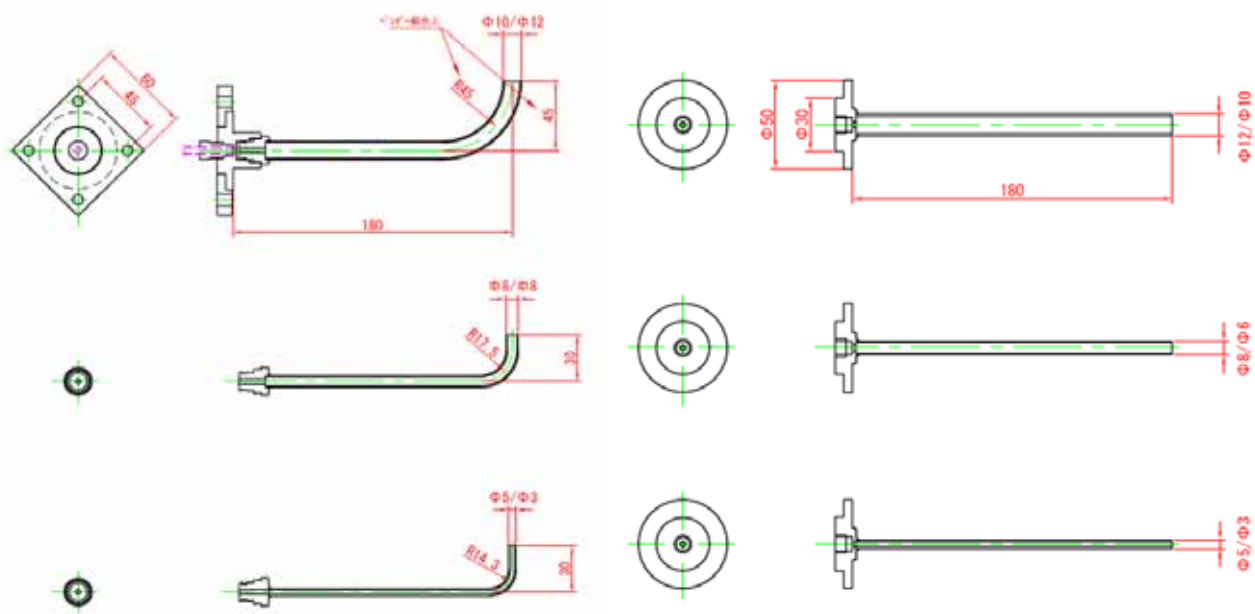


図 3-15 気泡注入ノズル設計図



図 3-16 気泡注入ノズル写真

3.1.3.2 気相供給系

蒸気，窒素ガス，空気からなるエアロゾル粒子を含む単一気泡を生成するための気相供給を行うため気相供給系を製作した．供給源として電気式簡易貫流ボイラー及び軟水器 K-007 図 3-17 参照，オイルフリーレシプロコンプレッサ TFC75C-10-M5 図 3-18 参照，窒素タンク及び窒素ガス図 3-19 参照を用意し気相供給系へと接続した．

気相供給系は耐熱性に優れたステンレス製で配管され予熱器を取り付けた．配管の内径は 10mm とした．図 3-20 に装置の設計図を示す．図 3-21 に装置の写真を示す．



図 3-17 ボイラー及び軟水器



図 3-18 コンプレッサ



図 3-19 窒素ボンベ

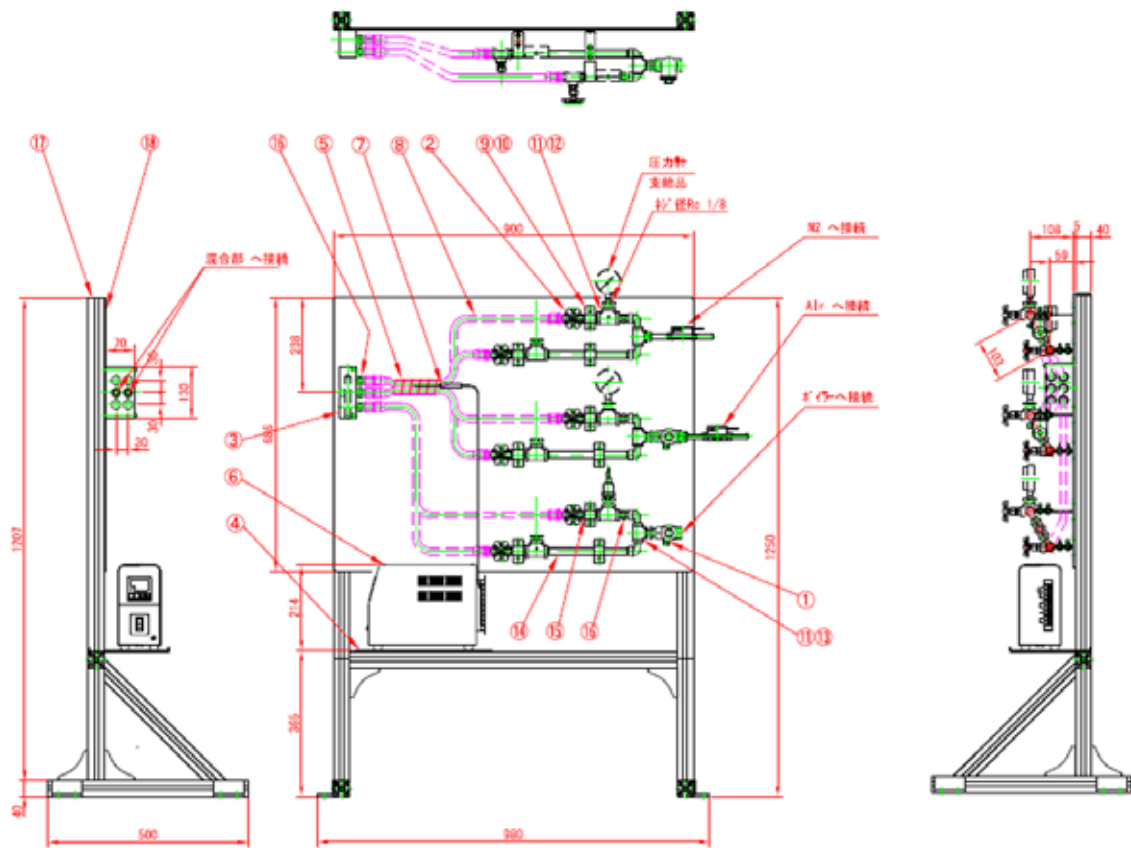


図 3-20 気相供給系設計図



図 3-21 気相供給系写真

3.1.3.3 エアロゾル供給系

エアロゾル粒子と、蒸気、窒素ガス及び空気を混合するエアロゾル注入部、エアロゾル粒子と、蒸気、窒素ガス及び空気を均一に攪拌させる混合部、均一に攪拌したエアロゾル粒子と、蒸気、窒素ガス及び空気から単一気泡分の気相を採取する注入弁システムから成る装置。

エアロゾル注入部では、非凝縮性ガスとボイラーで発生させた水蒸気との二相流にエアロゾル粒子を注入する。注入箇所は、ベンチュリー管の喉部のところで、圧力の低下による自吸を利用してエアロゾルを注入する。また、ベンチュリー管にすることで広がり角が与えられエアロゾル粒子が均一に分散されると考えられる。図 3-22 に概念図を示す。

混合部では、エアロゾル粒子を含んだ水蒸気と非凝縮性ガスを均一に分散するため、渦状の流れによってエアロゾルを均一に攪拌させるサイクロンシステムを考案した。これによりエアロゾルが均一に分散した気相は単一気泡注入弁へと送られる。図 3-23 に概念図を示す。

注入弁システムでは、エアロゾルが均一に分散した気相の流れから単一気泡を生成するために注入弁システムを考案した。サイクロンシステムの側部にテスト部までの管を設置し細孔が開いた鉄板 1 枚を管の中で抜き差しすることで単一気泡を抽出する。図 3-24 に概念図を示す。

エアロゾル注入部の仕様を以下に示す。図 3-25 に設計および写真を示す。

- ・エアロゾルの挙動を確認できるよう可視化可能にする
- ・蒸気を扱うため耐熱性のある材質で製作する
- ・対象粒子の範囲は $0.3 \mu\text{m} - 50 \mu\text{m}$ とする
- ・ベンチュリー管を製作し喉部でエアロゾルを注入し混合させるものとする
- ・気相供給系より接続される
- ・ベンチュリー管の下流でサイクロン混合部に接続させる

混合部の仕様を以下に示す。図 3-26 に設計および写真を示す。

- ・エアロゾルの挙動を確認できるよう可視化可能にする
- ・ベンチュリー管の下流で混合部に接続しエアロゾルと気相を均一に攪拌させる
- ・サイクロン混合部の側面部には注入弁システムにつながる管を設置する
- ・管の位置は調節可能なよう側面に複数細孔をあける必要がある
- ・管はサイクロン混合部の中心部まで延長可能であり採取位置調節可能にする
- ・混合部において回転気流を生じさせる仕組みにする

注入弁システムの仕様を以下に示す。図 3-27 に設計図を示す。図 3-28 に写真を示す。

- ・細孔を開けた板を管の間で前後させ単一気泡分のみ気相を通過させる仕組みとする
- ・生成気泡は直径 5 mm 程度の単一気泡 (0.06 ml)
- ・生成した気泡を気泡注入ノズルへ送る
- ・開閉は電磁シリンダを用いる
- ・開閉前後に圧力計をつける

また、それらを加味したエアロゾル供給系全体設計図を図 3-29 に示す。図 3-30 にその全体写真を示す。

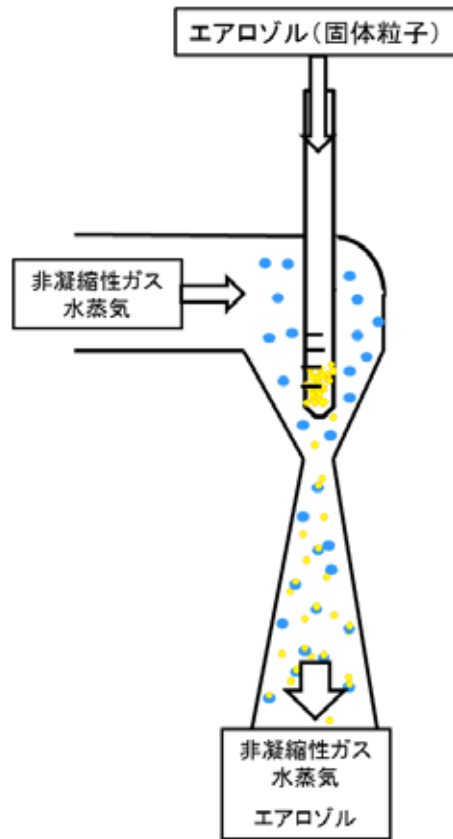


図 3-22 エアロゾル注入部概念図

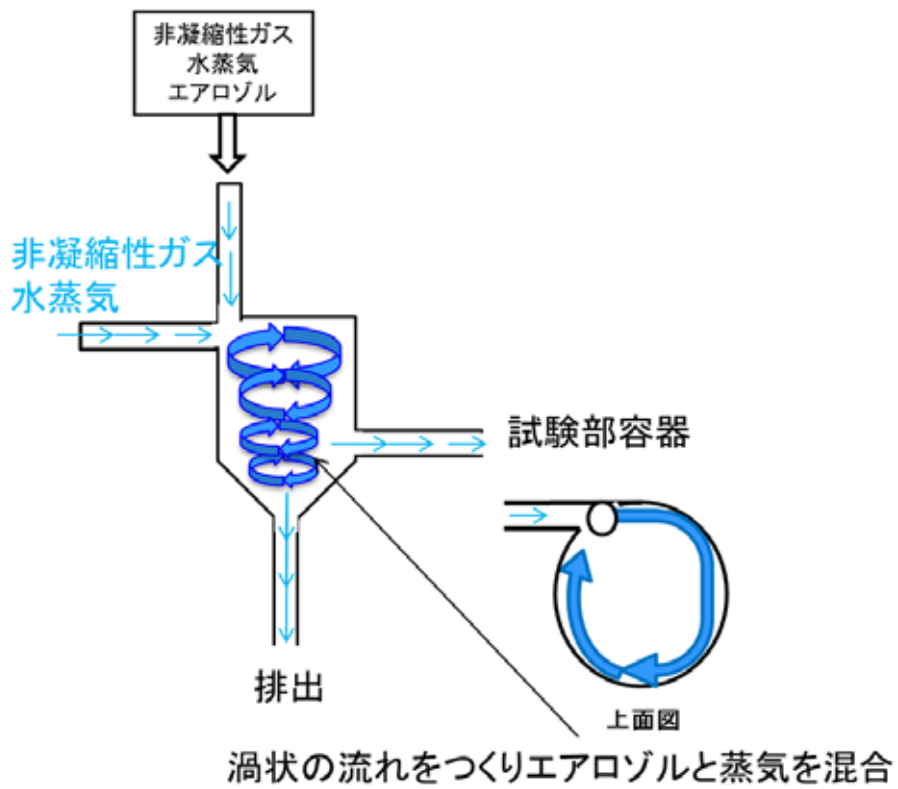


図 3-23 混合部概念図

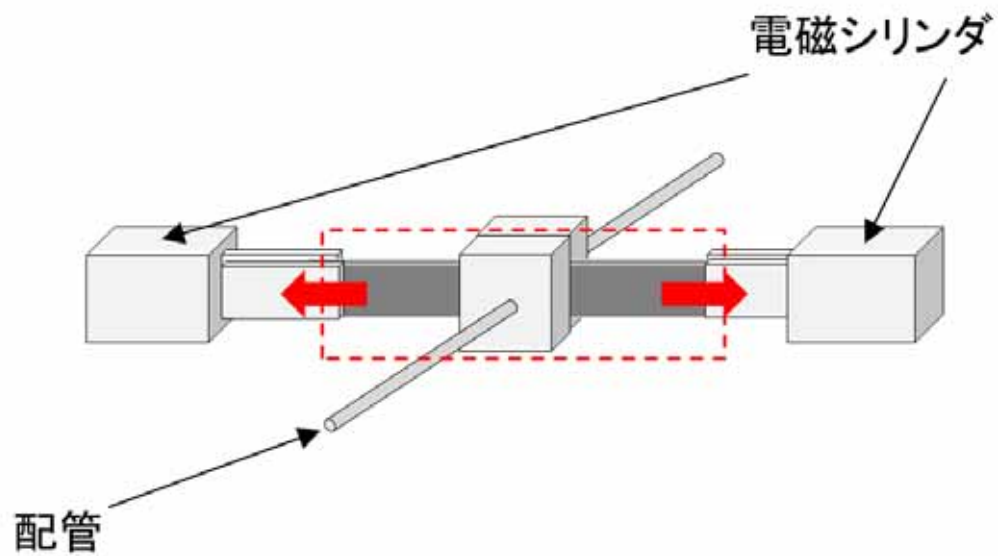


図 3-24 注入弁システム概念図

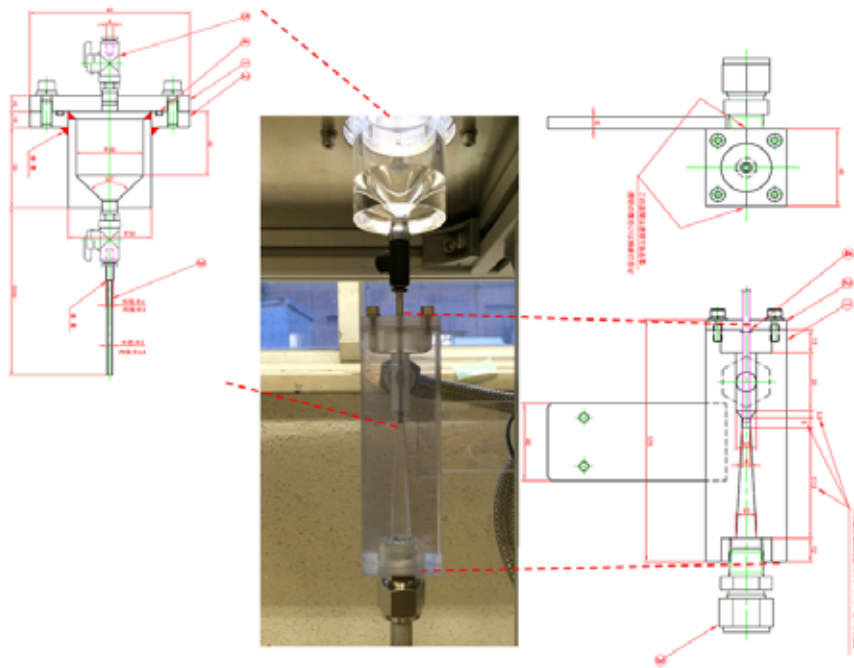


図 3-25 エアロゾル注入部設計及び写真

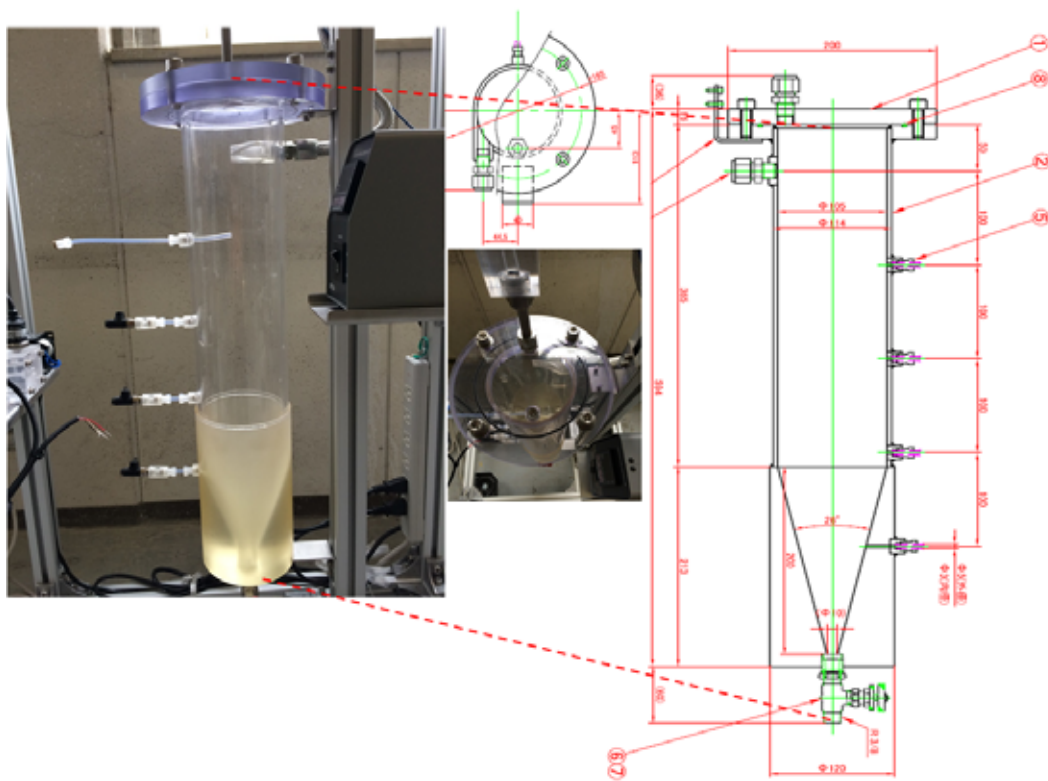


図 3-26 混合部設計及び写真

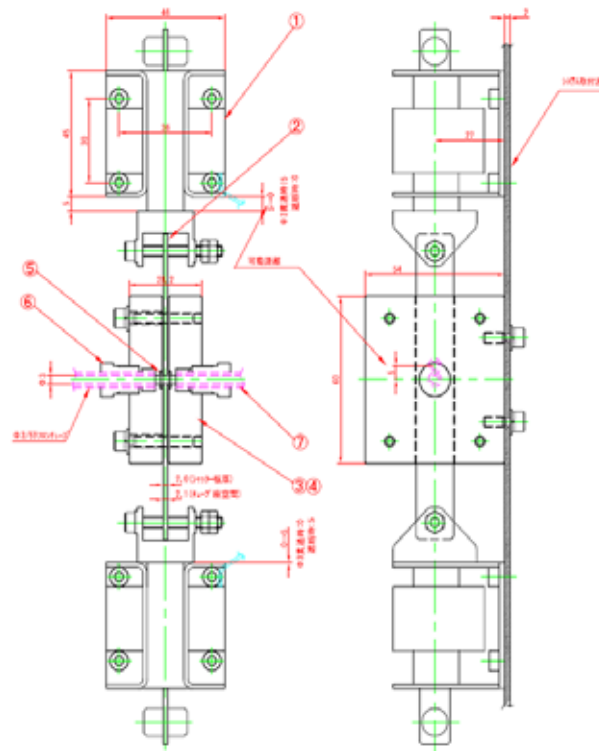


図 3-27 注入弁システム設計

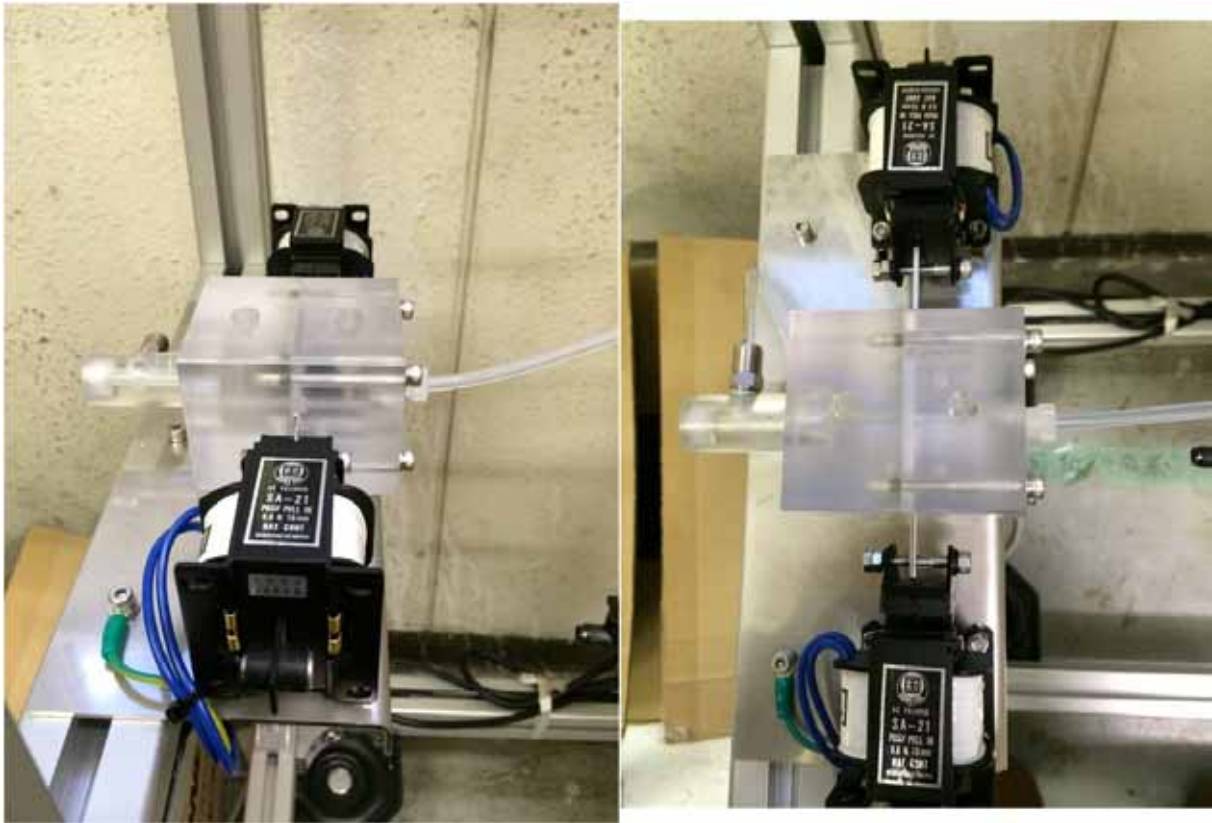


図 3-28 注入弁システム写真

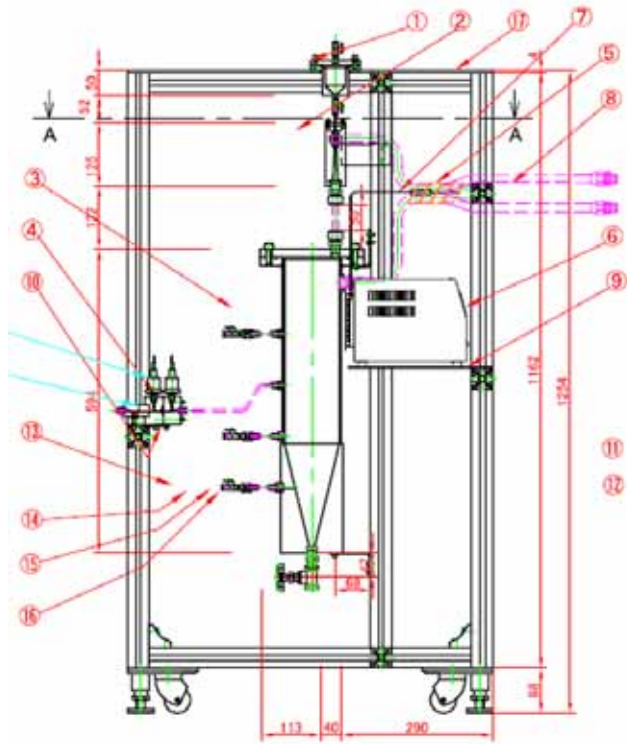


図 3-29 エアロゾル供給系全体設計図



図 3-30 エアロゾル供給系全体写真

3.1.3.4 エアロゾル計測系

表 3-1 に示す計測項目を満たすために、上昇するエアロゾル粒子を含む気泡を追従して画像撮影による PIV 計測を可能とする上下動システム装置を製作した。上下動システムでは PIV 計測等を行うため光学系を乗せた治具を水槽周りで気泡の上昇速度とともに上昇駆動させ、エアロゾルを含んだ単一気泡が液面に到達するまで計測を行う。治具の上昇速度は気泡の上昇速度を予備計算より算出し検討を行った。気泡の運動方程式を元に以下の式を算出した。

$$\frac{dv_b}{dt} \left(m_p + \frac{\rho_L V_p}{2} \right) = \rho_L \frac{\pi}{6} d^3 g - m_p g - \frac{1}{8} \rho_L \pi d^2 C_D V_b^2 \quad (3.5)$$

$$\frac{dv_b}{dt} = 2g - \frac{3}{2d} C_D V_b^2 \quad (3.6)$$

ここで、気泡直径 m : d 、気泡質量 kg : m_p 、気泡体積 m^3 : V_b 、粒子体積 m^3 : V_p 、抗力係数 : C_D 、水の粘性係数 Pa s : μ_L である。

また抗力係数 C_D は、レイノルズ数範囲が $740 < Re < 1340$ の場合、以下の式で算出される。

$$C_D = 7.012 \times 10^{-13} Re^4 \quad (3.7)$$

上記の予備計算を行った結果を図 3-31 に示す。

気泡の上昇速度は分裂しない気泡径 5mm で終端速度は 0.38(m/s) となった。直径 10mm の気泡径では 0.54(m/s) になり、このことから上下動システムの治具の上昇速度は 0~0.54(m/s) 程の上昇速度を出力可能である仕様にした。また、直径 5mm 気泡の速度変化を図 3-32、直径 5mm 気泡の加速度変化を図 3-33、直径 5mm 気泡の距離変化図 3-34 をサブマージェンス 1m 間の気泡速度変化を図 3-35 に示す。図より直径 5mm 気泡はノズルから放出されたのち 0.063m を 0.176s の間加速し、残りの 0.937m を 2.424s かけて一定の速度で上昇することが分かった。カメラの撮影範囲は、予備位実験により撮影条件確認を行い直径 5mm 程の気泡を撮影した。撮影した画像を図 3-36 に示す。これより、撮影範囲は縦横 40mm 程あれば気泡及び内部のエアロゾル挙動も観察可能であると判断した。検討した撮影範囲を基に、一定速度で上下動システムを動かした場合気泡は撮影範囲内に収まるか検討した。結果を図 3-37 に示す。5mm 気泡の場合、終端速度 0.38(m/s) で治具を上昇させればカメラ撮影範囲 40mm×40mm 内に気泡が収まり続けることが分かった。これにより、上下動システムの治具の上昇速度を一定に保って撮影を行えば気泡追従撮影は可能であると断定した。

また、PIV 計測を行うための光学系を上下動システム下部に設置しレーザーシートを作成する。図 3-38 に概念図を示す。レーザーシート幅は、予備実験にて確認した画像図 3-39 より、幅 25mm 程あれば直径 5mm 気泡の PIV 計測は可能であると分かった。レーザーシートの厚さは 1mm として光学系の製作を行った。図 3-40 にレーザーシート作成のための光学系

レンズ配置を示す。上の図が上面方向から、光学系を見た図で厚さ 2mm のレーザー光源は凸レンズを介して厚さ 1mm に変換され凹レンズを介して平行光となる。下の図が側面方向から光学系を見た図で、幅 2mm 光源光は凹レンズを介して幅 25mm まで広がり凸レンズを介して平行光となる。

上下動システムの概念図を図 3-41 に示す。上下させる治具は 4 本の支柱によって支えられ、そのうちの 2 本が駆動モータと接続し、2 本の支柱の回転によって治具が上昇する。治具上には、PIV 計測用のハイスピードカメラ 2 台と、バックライトとなる LED ライト、温度計測用サーモグラフィ、キャリブレーション用 CCD カメラが搭載される。下部光学系ではレーザー光源より出たレーザーが光学系を通ることで幅 25mm、厚さ 1mm のシートにされミラーを介して上部治具上に送られる。

上下動システムの仕様を以下に示す。

- ・水槽内を上昇する直径 5 mm 程度の気泡に追従して可視化可能計測が可能であること
- ・3次元 PIV 計測のためのカメラヘッド 2 台, CCD カメラ及びキャリブレーション用シート, LED 照明 2 台, サーモグラフィを搭載可能であること
- ・カメラ, LED ライト等を乗せるため十分に広い設置面積を保有すること
- ・上昇する治具の速さが, 直径 10mm 気泡上昇速度 0.5 m/s 以上の速度を出すことが可能であること
- ・レールの高さは光学系設置用治具の移動距離を含んで z 軸方向に 1700mm 以上とする
- ・下部に光学系を設置しレーザーシートを製作可能であること
- ・光学系が濡れないよう十分な配慮をすること

設計図を図 3-42 に示す。完成した装置の写真を図 3-43 に示す。

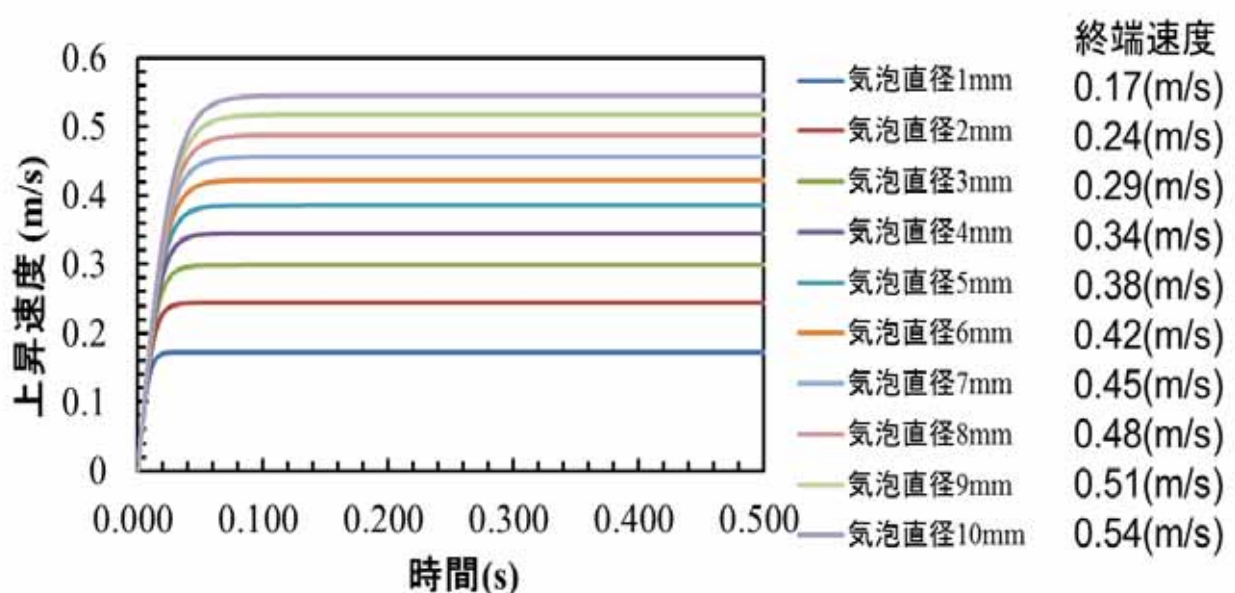


図 3-31 気泡の上昇速度と終端速度

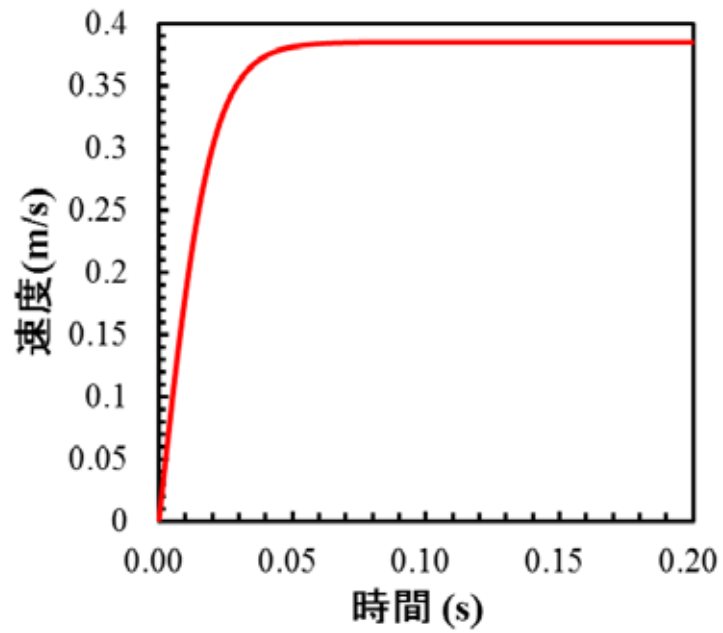


図 3-32 直径 5mm 気泡上昇の速度変化

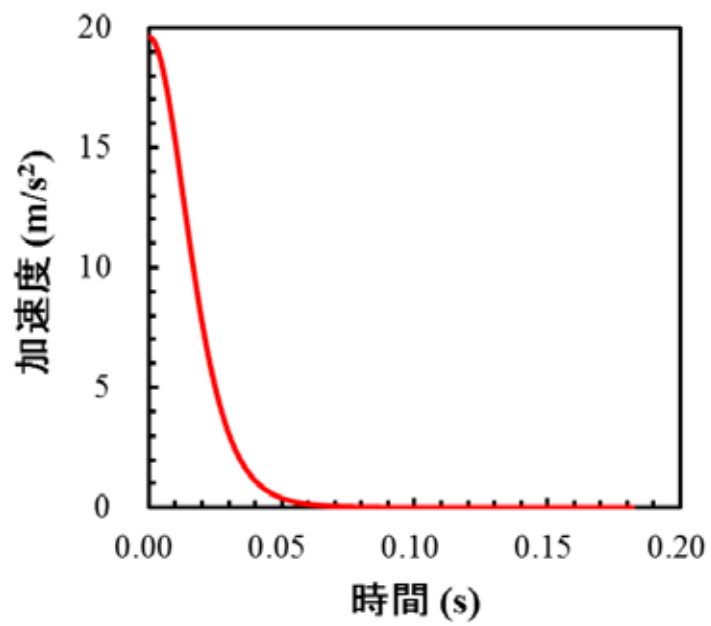


図 3-33 直径 5mm 気泡の加速度変化

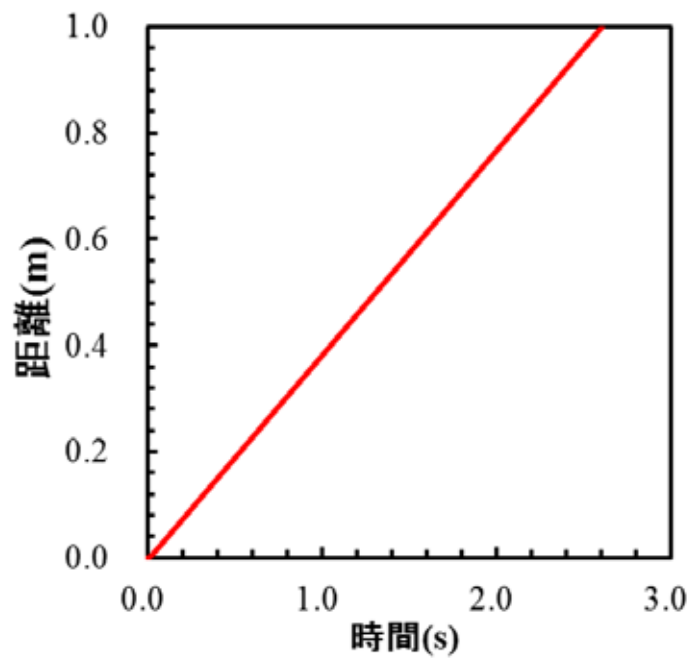


図 3-34 直径 5mm 気泡上昇距離変化

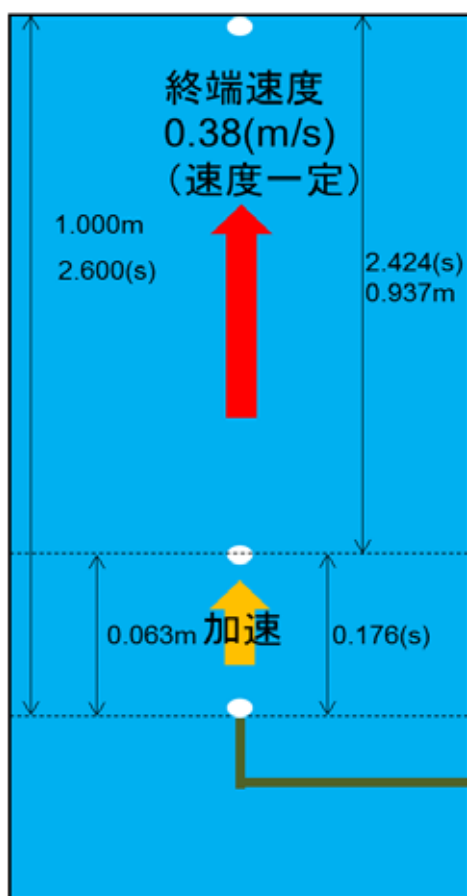


図 3-35 直径 5mm 気泡の上昇時の速度変化図

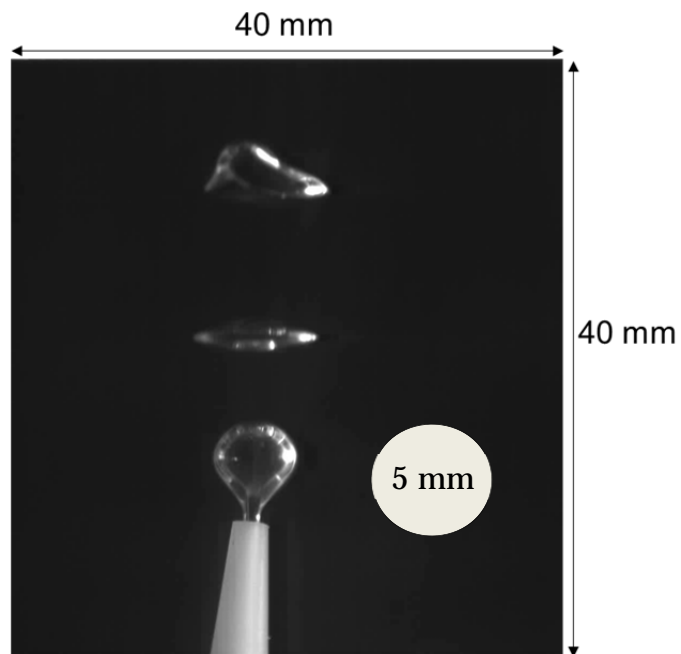


図 3-36 カメラ撮影範囲

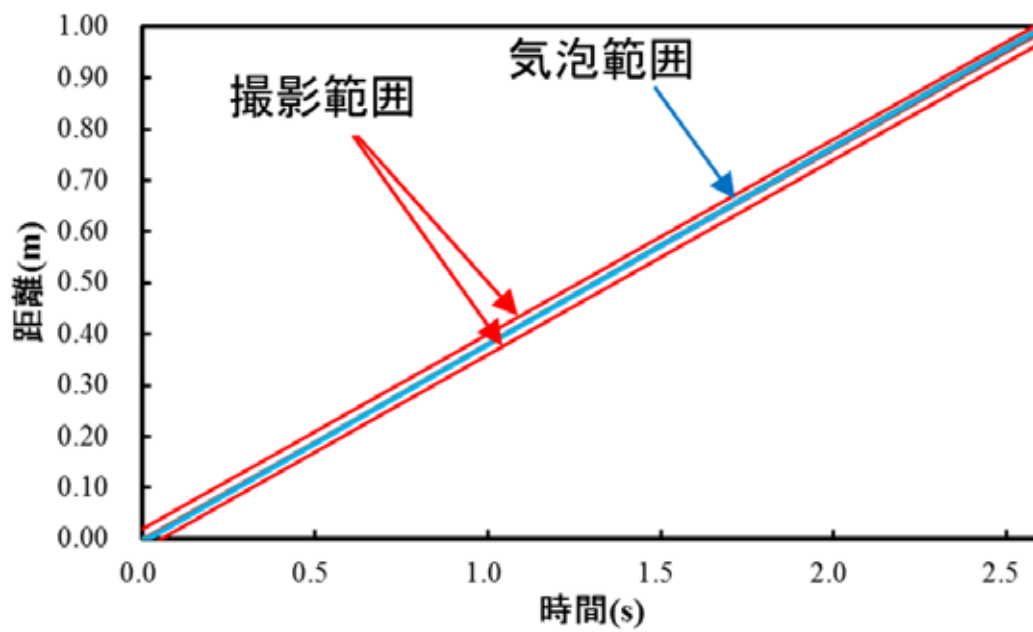


図 3-37 上下動システム速度考察

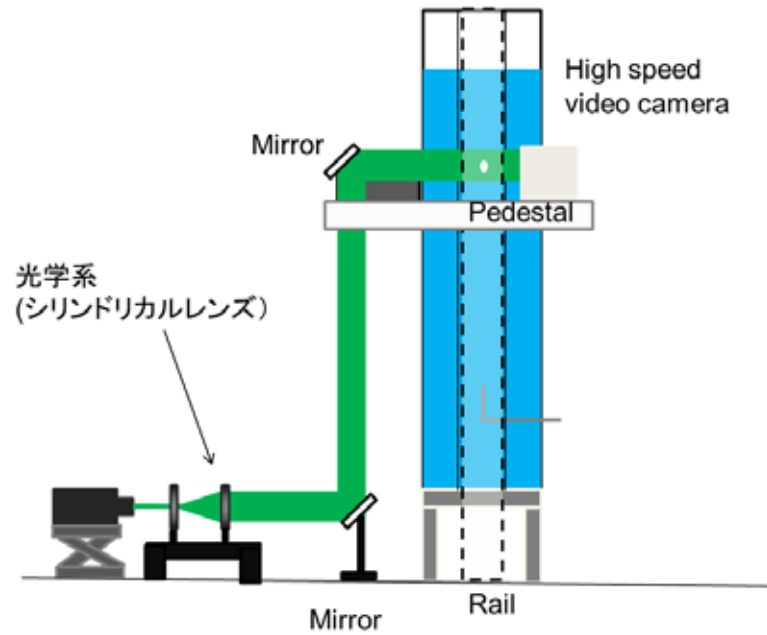


図 3-38 上下動システム下部光学系概念図

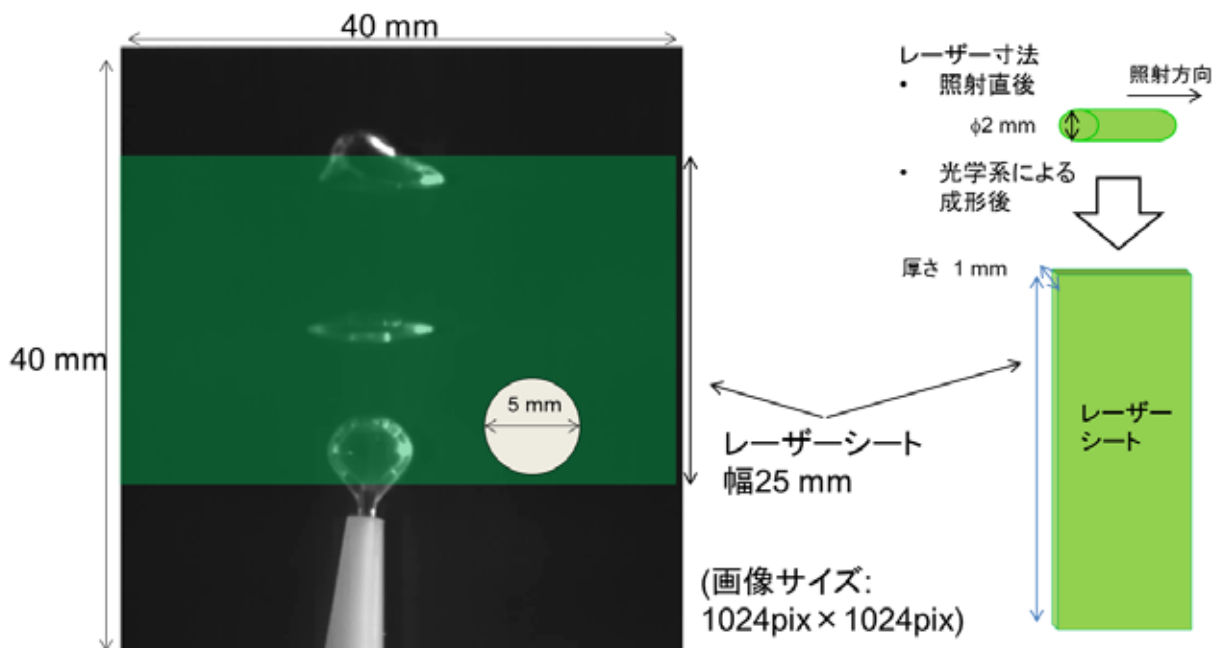


図 3-39 レーザーシート幅

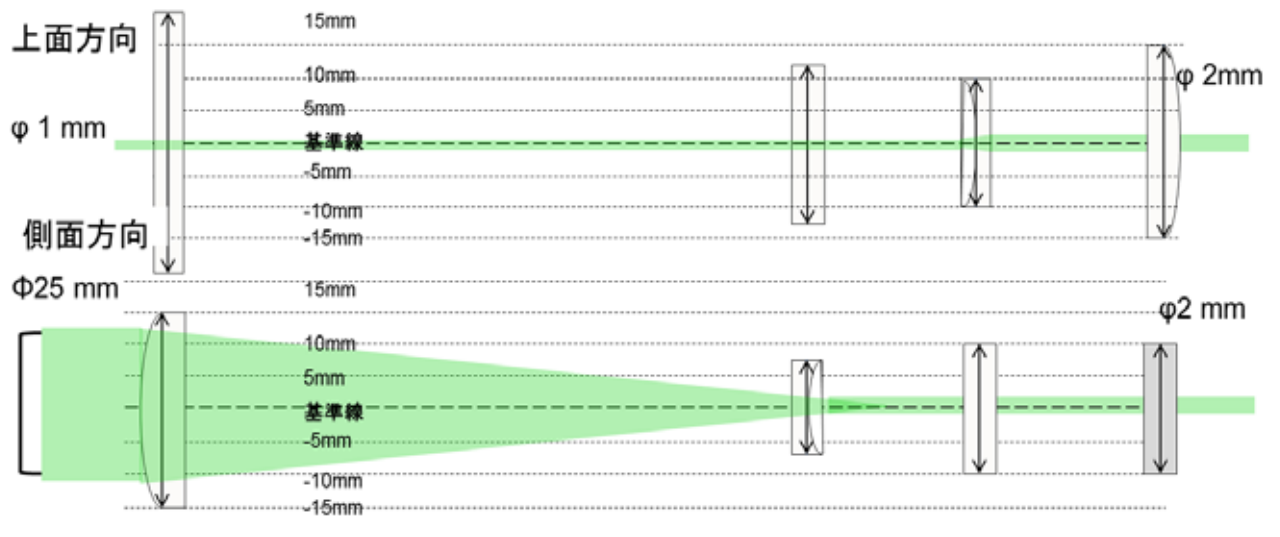


図 3-40 光学系光路図

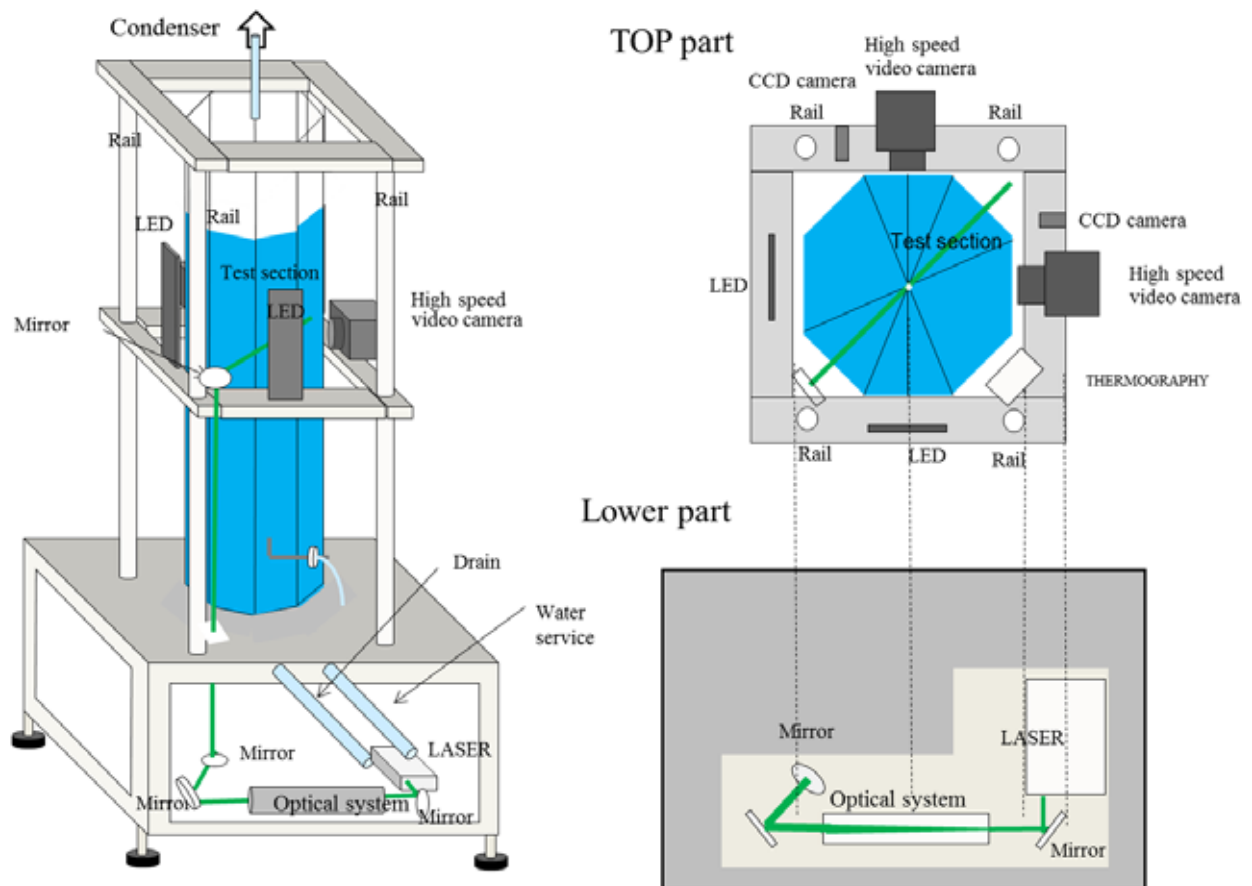


図 3-41 上下動システム概念図

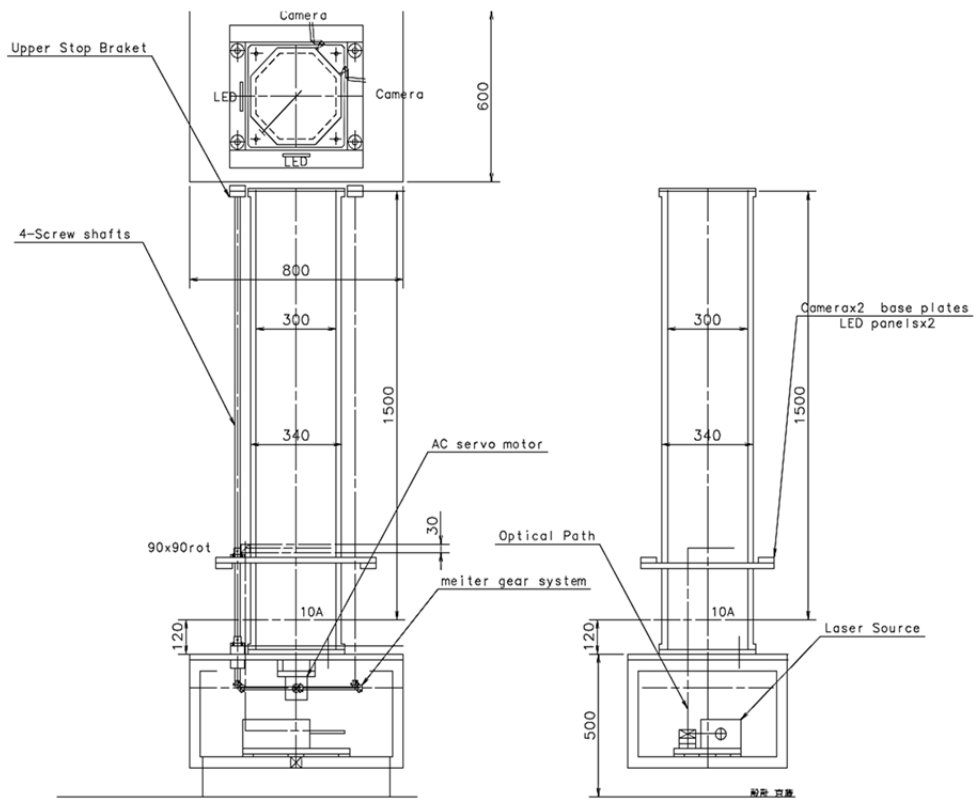


図 3-42 上下動システム設計図



図 3-43 上下動システム写真

3.1.3.5 排水処理系

試験部容器に給水及び排水を行うため、実験室の給排水系の設置及び実験室外の下水道への排水系の設置を行った。

排気系に関しては、凝縮器と排水タンクを用意した。仕様を以下に示す。

凝縮器仕様

- ボイラー7.4 kg/h の蒸気を凝縮させる性能を保持すること
- 凝縮する蒸気に粒子が混合されているため、閉塞を防ぐ仕様にする

凝縮器の設計を図 3-44 に示す。完成した凝縮器の写真を図 3-45 に示す。

排水タンク仕様

- ボイラーで凝縮させた蒸気を溜める性能を保持すること
- 30 l 以上の液体貯水性能を保持すること
- 蒸気を扱うため耐熱性に優れたもの

排水タンクの設計を図 3-46 に示す。完成した排水タンクの写真を図 3-47 に示す。

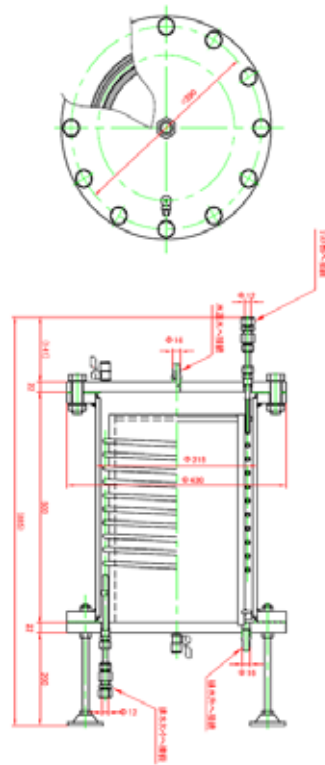


图 3-44 凝缩器 设计图



图 3-45 凝缩器写真

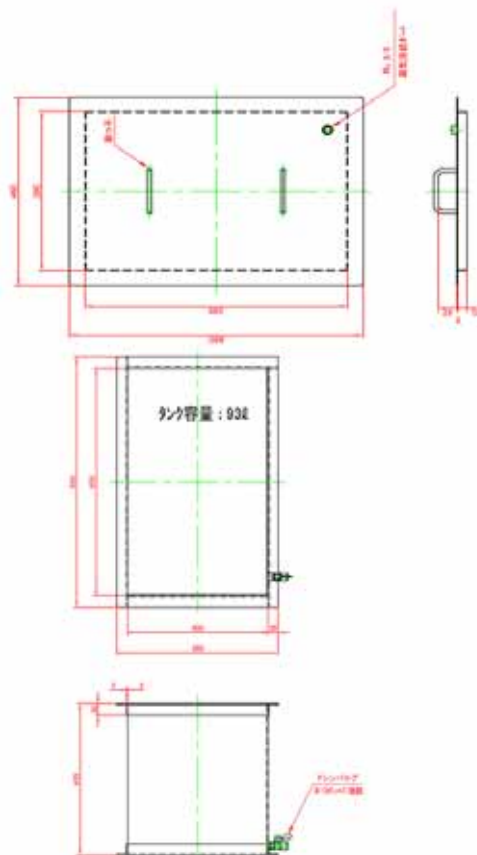


図 3-46 排水タンク設計図



図 3-47 排水タンク写真

3.1.4 計測機器

表 3-1 より計測機器にて高速度カメラ, PIV と記述があるため概要を示す.

3.1.4.1 高速度カメラ

PIV 計測用に高速度カメラ FASTCAM mini UX 4k を購入した. 図 3-48 にカメラの写真を示す. カメラの仕様を表 3-2 に示す.



図 3-48 高速度カメラ写真

表 3-2 高速度カメラ仕様

フル解像度	1280x1024
最高撮影速度(フルフレーム)	4,000fps
最高撮影速度(分割フレーム)	800,000fps
最短露光時間	1 μ s*
濃度階調	モノクロ:AD 変換 12bit/カラー:AD 変換 36bit(RGB 各 12bit)
レンズマウント	F マウント(Gタイプレンズ対応)、C マウント
トリガーモード	スタート、センター、エンド、マニュアル、ランダム
各種信号入出力	入力:トリガ(TTL/接点)、同期信号、レディ信号、イベント信号、IRIG 出力:トリガ、各種同期信号、レディ信号
外部機器同期	5Vp-p 負極/正極(切替可) 可変周波数同期が可能
メモリ分割	最大 64 分割
デジタルインターフェイス	ギガビットイーサネット
カメラ制御ソフト「PFV」	複数言語対応(日、英、仏、中)、DAQ オプションとカメラを同時制御可能 画像の撮影・保存・再生、各種画像処理、ファイル変換機能を搭載
寸法/質量	120x120x90mm/1.5Kg(突起物、付属品除く)
保管温度/湿度	-20°C~60°C/85%以下(結露無きこと)
動作温度/湿度	0°C~40°C/85%以下(結露無きこと)
標準付属品	AC アダプタ×1、AC ケーブル×1、延長電源ケーブル(2m)×1、 F マウント・C マウントプレート×各 1、マウント交換用六角レンチ×1 式、 LAN ケーブル×1、制御ソフト PFV インストール DVD×1、マニュアル類×1 式
オプション	専用ケース、動画像解析ソフト、波形測定(DAQ)オプション

3.1.4.2 PIV

前述にも記載があったように、本研究では三次元 PIV 計測手法を用いる。本研究の三次元 PIV 計測では、エアロゾル粒子に蛍光粒子を用いてレーザーにより発光させ挙動を計測する。図 3-49 に本実験での三次元 PIV 像を示す。蛍光粒子を含んだ上昇気泡にレーザーを当てると、蛍光粒子である気泡内のエアロゾル粒子が発行しその挙動を二台の高速度カメラにより撮影する。この時強い光を示すレーザー光はカメラのフィルターによって除去され、LED と蛍光粒子の発光のみ撮影される。LED ライトは気泡の界面を明確にし、その中の粒子の挙動も可視化可能となる。PIV 計測により、エアロゾル粒子の速度等をこの手法を用いて測定する。

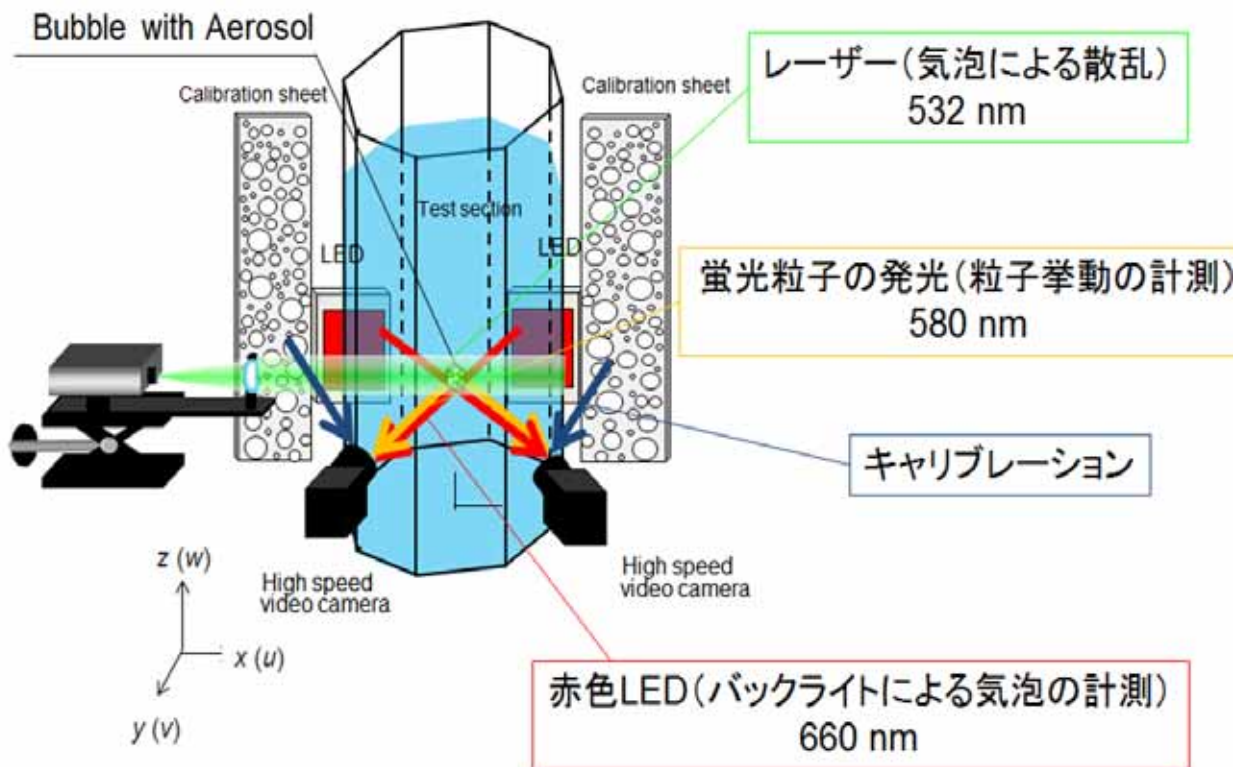


図 3-49 三次元 PIV 計測

3.1.5 試験条件・作動流体・試験パラメータ

表 3-1 を参照に、試験条件は大気圧で行い、試験部容器内の液温及び気泡内の蒸気の温度範囲は常温～100℃とする。

作動流体は、水－空気（窒素）、水－蒸気、水－蒸気－難溶解性エアロゾル（上記 3 条件はスケーリング特性の確認のため、水以外の作動流体も考慮可）水－蒸気－非凝縮性ガス－難溶解性エアロゾルで行う。

試験パラメータは、ガス噴出し方向：下，横，上・とし穴形状は円（基本）、破損口形状（適宜，理想化）とする。口径は、3 種類（クエンチャ，ベント管を模擬し，スケーリングを考慮して寸法決定）用意した。ガス流出速度は、0.1～1 m/s 弱で非凝縮性ガス濃度：0～100% まで調整可能である。エアロゾルの組成・粒径・濃度も計測方法を検討し計測を行う。サブクール度は液温が常温から飽和温度までの範囲とする（高さ方向に大きな温度勾配を設定する実験条件も含む）。サブマージェンスは 100mm 弱～1000mm 強まで試験部容器内で調整可能である。
する。

3.1.6 計測項目

表 3-1 に記載されている計測項目は次の通りである。項目ごとに実施した計測手法および結果について順次報告する。

- (a) 気泡形状(重心位置, 重心軌道, 径)
- (b) 気泡及びエアロゾル粒子の速度分布
- (c) エアロゾル濃度及びその変化(気泡内外)*計測方法要検討
- (d) 気相体積
- (e) 界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布
- (f) 液滴内（エントレインメント）のエアロゾル質量
- (g) 液温及び気泡中の温度 *計測方法要検討
- (h) 液相内で温度成層化を形成させる場合高さ方向の液温温度分布
全て時間変化を計測

(a) 気泡形状（重心位置，重心軌道，径）気泡の速度分布

LED ライトと高速度カメラを用いたバックライト法により上昇気泡の可視化を実施し、取得した画像から気泡形状および気泡の速度分布を取得した。

ノズルから出た気泡は、はじめまっすぐに上昇していきノズル頂点から 300 ~ 400 mm の高さ位置でジグザグ運動へ移行した。取得した画像を処理することで、気泡の平均の体積等価直径と高さ方向への上昇速度を定量的に取得した。気泡ははじめ直線的に速度上昇するが、途中から落ち着くように減速し、またその速度は周期的に変動した。これを定量的に評価するため、気泡形状を楕円で近似できると仮定して画像処理を行い、その楕円の中心位置を気泡の重心位置とみなし、その時間変化を追うことで気泡の上昇速度を求めた。

予備試験では、エアロゾルを含む場合と含まない場合で比較実験を行い気泡直径および速度分布を求めた。まずエアロゾルを含まない場合の結果について述べる。

エアロゾルを含まない場合、楕円近似による体積等価直径は 3.87mm となり、気泡の高さ方向への速度変動は 0.15m/s から 0.35m/s 間であり、終端速度は 0.26m/s であった。

エアロゾルを含む場合、楕円近似による体積等価直径は 3.97mm となり、気泡の高さ方向への速度変動は 0.14m/s から 0.25m/s 間であり、終端速度は 0.21m/s であった。

(b) エアロゾル粒子の速度分布

レーザーを光源とし高速度カメラでエアロゾルを含む気泡の管出口の初期気泡形成時の可視化観測を行った。エアロゾル粒子はノズルからリリース後界面上部に衝突しそのまま付着して界面に沿って広がる様子が観測できた。画像よりピクセル数から粒子の移動距離を測定し高速度カメラの撮影速度から粒子速度の算出を行った。

予備実験にて、撮影画像よりエアロゾルを含む気泡の管出口の初期気泡形成時の粒子速度を求めた結果、粒子速度は 4.6m/s であった。

(c) エアロゾル濃度及びその変化（気泡内外）*要開発項目

エアロゾル濃度においては要開発項目とする。現段階では LIF 計測法を用いての計測可能性を検討している。LIF 計測とは、流体に混入された物質が温度や濃度に依存した明るさや色を示し、それらを画像として捉えることで温度や濃度の分布を計測することができる計測法である。また、他にも水に触れることで色が変化する薬品によりエアロゾル粒子を模擬することで、エアロゾルの水中への溶解に伴う気泡周りの色調変化を撮影し、画像処理により濃度を求める方法やホログラフィー計測によってエアロゾルの溶解により気泡周囲に生じる濃度差を、干渉縞として撮影して、画像処理により求める方法など多方面から検討している。

(d) 気相体積

気相体積は、レーザーを光源とし高速度カメラでエアロゾルを含む気泡の管出口の初期気泡形成時の可視化観測を行い、気泡の体積を取得するため画像処理を実施した。画像処理により定量的に気泡体積のデータを取得することができた。予備試験より気相体積を画像処理にて求めたところ、気相体積は直線的に増加しノズル内流速は2.68m/sとなった。

(e) 界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布

LEDをバックライトとし、界面又は液面から発生する液滴の撮影高速度カメラを用いて行った。図3-50に撮影画像を示す。撮影画像を画像処理により液滴界面を検知し液滴を楕円近似することで体積等価直径を計測した(図3-51参照)。同時に液滴の速度も画像処理にて計測を行った。その結果液滴の径の測定に成功し、径は1.04mmとなった。図3-51より液滴が発生した箇所を原点とした液滴の軌跡を図3-52に示す。この時発生した液滴は、原点より高さ方向12mmまで上昇しその後下降した。液滴の速度変化を図3-53に示す。液滴は、発生後0.05sまで上昇し頂点に達すと減速していった。これらのことから、界面又は液面から発生する液滴の径及び速度の分布の計測に成功した。

(f) 液滴内のエアロゾル質量*一部要開発項目

レーザー光または、LEDを光源として高速度カメラを用いてエアロゾル粒子を含む界面又は液面から発生する液滴の可視化実験を行った。実験により、粒子を含んだ液滴が液面に到達し、弾ける様子が確認できた。また、弾けた時の衝撃によって気泡内のエアロゾル粒子が空気中に飛散する様子が確認できた。

(g) 液温及び気相温度(試験装置内で複数点、大まかな空間分布)*要開発項目

試験容器内に熱電対を設置し液温を測る。気相温度はサーモグラフィを用いて測る。液相内で温度成層化を形成させる場合には、図3-54に示すように、高さ方向の液温温度分布が必要であるため長さの異なる熱電対を試験部容器蓋より内部へ吊り下げ、水試験部容器内液温分布を測定する。なお、試験部容器内の蓋には全部で八カ所熱電対を設置可能である。

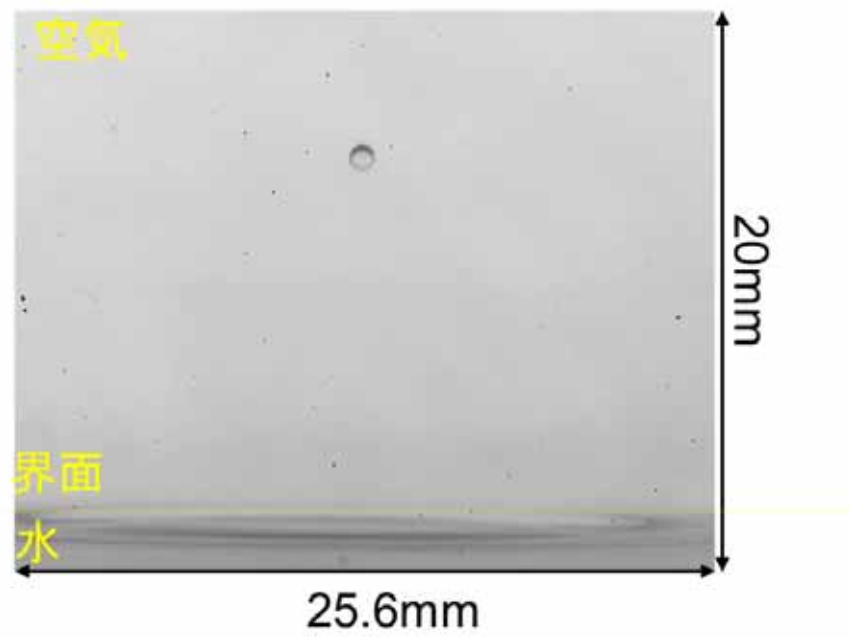


図 3-50 界面又は液面から発生した液滴

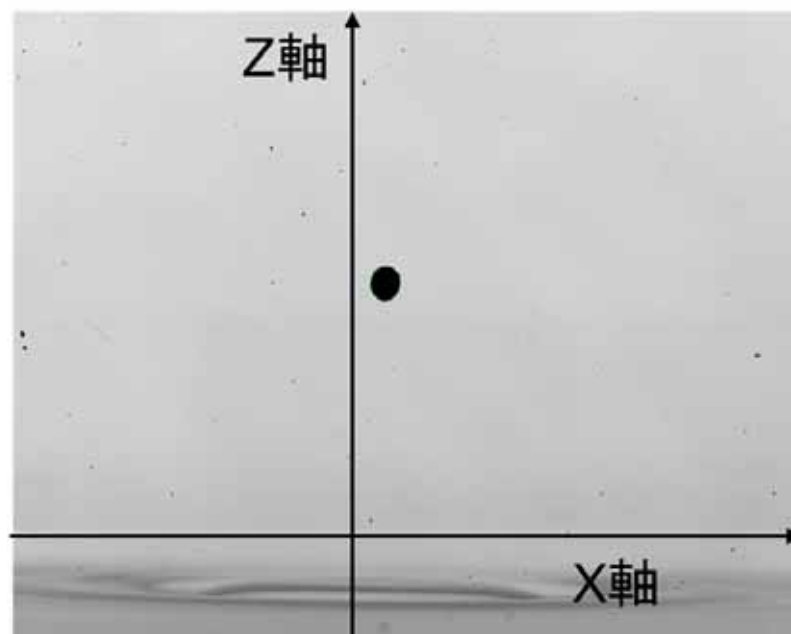


図 3-51 液滴界面の検知と座標

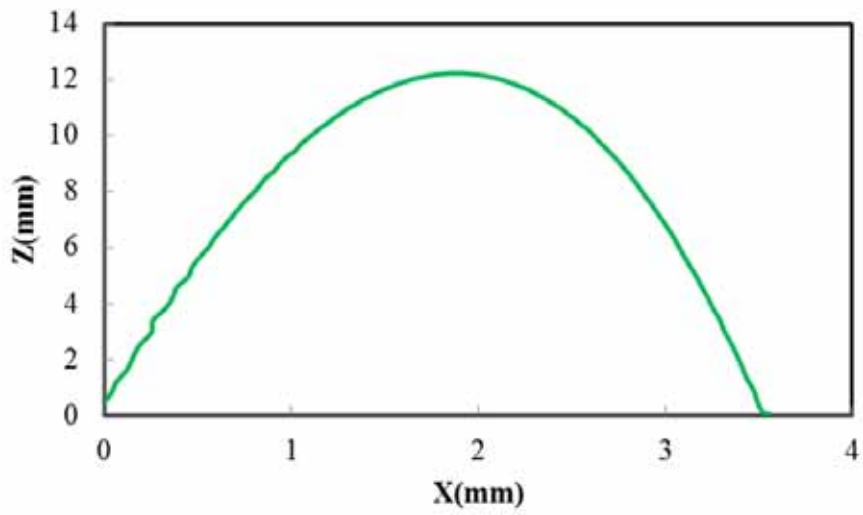


図 3-52 液滴の軌跡

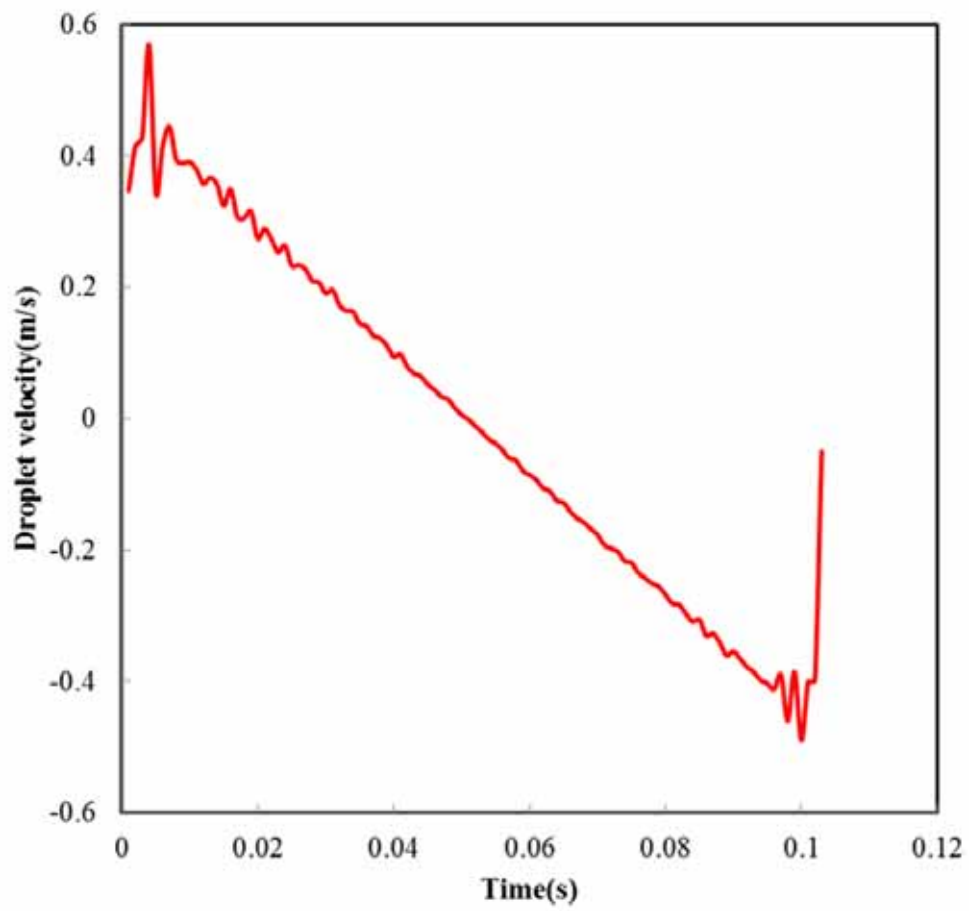


図 3-53 液滴の速度変化

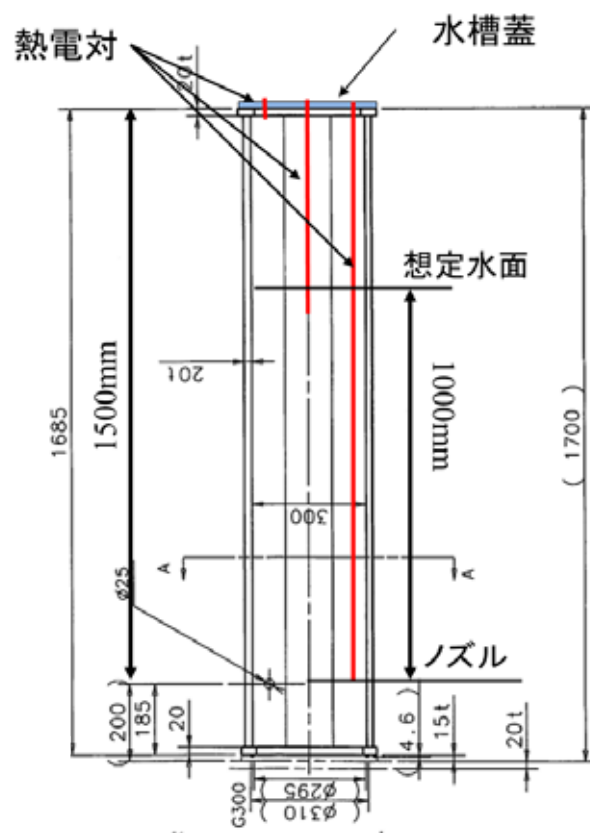


図 3-54 液温温度分布計測法

3.1.7 まとめ

単一気泡による DF 測定試験装置の設計・製作及び試験を行った。装置の設計・製作および計測システムの構築について、以下を実施した。

実験装置の設計・製作

- ・試験を行う試験部容器を製作した。
- ・蒸気，窒素ガス，空気を供給する気相供給系を製作した。
- ・エアロゾル粒子を含んだ単一気泡を生成するためエアロゾル供給系を製作した。
- ・上昇中の気泡及びエアロゾル粒子を計測するためエアロゾル計測系を製作した。
- ・実験への給水及び排水を確立するため排水処理系を製作した。

計測システムの構築

- ・可視化観測可能な試験部容器を構築した。
- ・実験に用いる蒸気，窒素ガス，空気を調節して供給する気相供給系を構築した。
- ・エアロゾル粒子を含む単一気泡を生成するためエアロゾル供給系を構築した。
- ・エアロゾル計測系では，気泡に追従した三次元 PIV 計測システムを構築した。

実験データの取得

予備試験より以下の実験結果の取得を行った

- ・エアロゾルを含む気泡の上昇挙動を可視化し上昇速度のデータを取得した。
- ・エアロゾルを含む気泡の管出口の初期気泡形成時の可視化観測を行い，画像処理を実施し気泡の体積変化のデータを取得した。
- ・エアロゾルを含む気泡の管出口の初期気泡形成時の可視化観測を行いエアロゾル粒子の速度データを取得した。
- ・界面又は液面から発生する液滴の可視化観測を行い，液滴の径及び速度のデータを取得した。
- ・界面又は液面から発生するエアロゾル粒子を含む液滴の可視化実験を行った。

3.2 MELCOR による DF 解析

本項目では、原子力規制庁から無償貸与を受ける解析コード（MELCOR コード）を用いて、前節で実施のエアロゾル混入試験条件における DF の評価を行う。試験結果と解析結果の比較により、モデル改良のための検討を実施する。なお、解析ケースは代表的な試験条件で5 ケース程度とした。解析を実施する試験条件はで明示している。

具体的には、まず MELCOR コードにおいてプールスクラビング時に対象となる DF の種類を把握した後、支配的と予想される慣性衝突による DF_{II} について取りうる値を把握するべく、MELCOR 内で用いられる評価式を対象とした感度解析を実施した。これらの知見を踏まえた上で MELCOR による DF 解析を実施した。DF 解析によりノズル内気相流速、気相流量、サブマージェンスの影響について検討した。慣性衝突による DF_{II} について試験結果と解析結果の比較を実施した。

3.2.1 プールスクラビングによる DF 解析の概要

MELCOR コードにおいてプールスクラビング時に対象となる DF の種類を把握する。

除染対象となる気中のエアロゾル粒子は、図 3-55 に示すように、径の違いによる質量分布を持つものとして扱われる。このため、プールスクラビングによる全体の除染係数である $DF_{OV,part}$ は次式から求まる。

$$DF_{OV,part} = \frac{\sum_{i=1}^{NBINS} \dot{m}_{part,i}}{\sum_{i=1}^{NBINS} \left(\frac{\dot{m}_{part,i}}{DF_{OV,i}} \right)} \quad (3.9)$$

また、 $DF_{OV,i}$ はベント管出口領域においては拡散泳動および蒸気の蒸発・凝縮による DF_{EC} 、慣性衝突による $DF_{II,i}$ 、遠心拡散・重力沈降による $DF_{ER,i}$ およびスウォーム流上昇領域においては遠心拡散およびブラウン拡散による $DF_{SR,i}$ により求まる。この詳細については 3.2.2 および 3.2.3 にて後述する。

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{ER,i} \times DF_{SR,i} \quad (3.10)$$

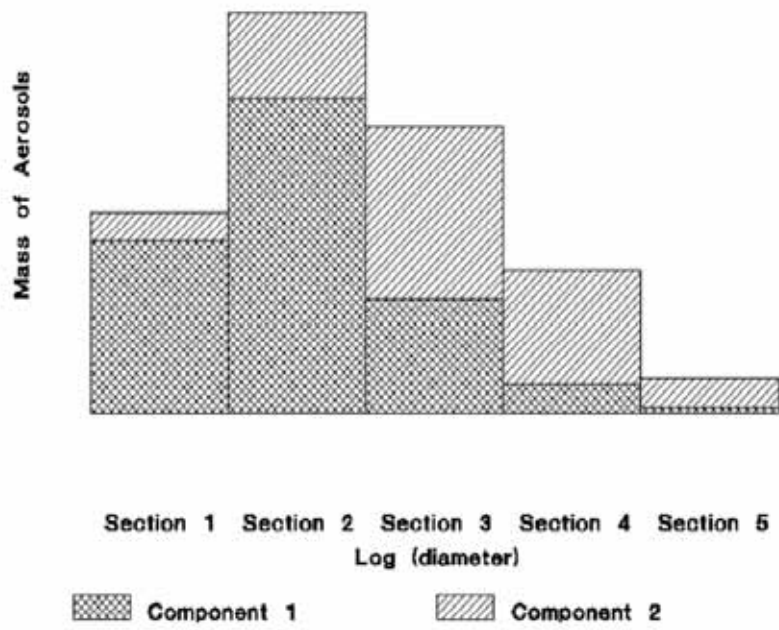


図 3-55 エアロゾルの質量分布 [1]

3.2.2 プールスクラビングに関する流動モデル概要

CVH パッケージ内に記述される流動モデルについて調査を実施した。

MELCORにおける流動モデルはSPARC-90のものをクローニングしたものであると記述があり、SPARC-90における流動モデルは図である。放射性物質を含む汚染ガスはベント管出口から放出され、まずグロービュールを形成する。このグロービュールは小さな気泡にすぐさま分裂し、気泡群を構成しスウォーム流として上昇する。スウォーム流中の気泡は水面に達すると破裂し、エントレインメント液滴が発生する。

スウォーム流は同一の寸法形状の気泡により構成されるものと扱われており、この気泡モデルは図の通りである。気泡は長軸および短軸を持つ楕円体として扱われる。

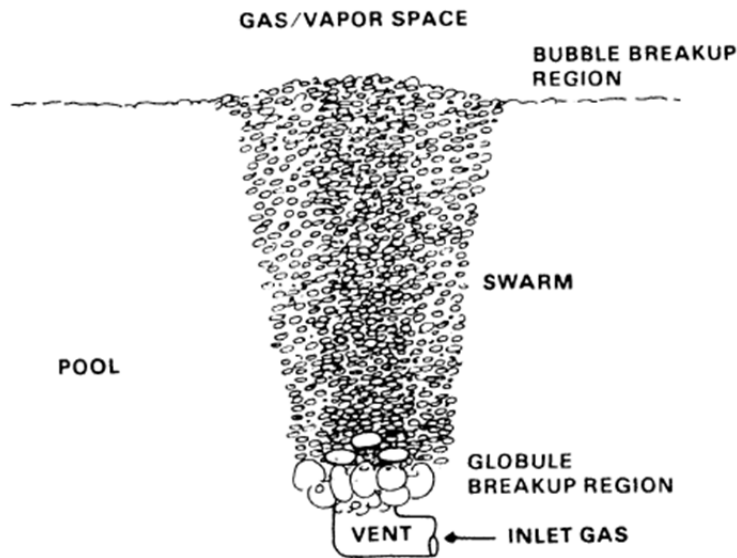


図 3-56 SPARC-90 における流動モデル

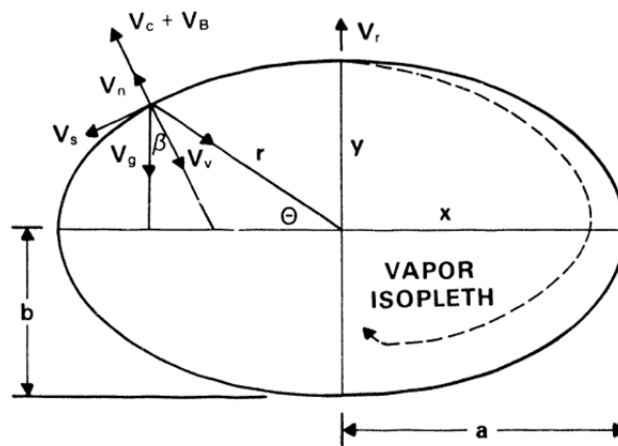


図 3-57 SPARC-90 における気泡モデル

3.2.3 プールスクラビングに係る除染モデル概要

除染対象となる気中のエアロゾル粒子は、図に示すように、径の違いによる質量分布を持つものとして扱われる。このため、プールスクラビングによる全体の除染係数である $DF_{OV,part}$ は次式から求まる。

$$DF_{OV,part} = \frac{\sum_{i=1}^{NBINS} \dot{m}_{part,i}}{\sum_{i=1}^{NBINS} \left(\frac{\dot{m}_{part,i}}{DF_{OV,i}} \right)} \quad (3.1)$$

また、プールスクラビングにおける除染モデルは、流動モデルのベント管出口領域、スウォーム流上昇領域それぞれに対して次のように考慮されている。

ベント管出口領域においては拡散泳動および蒸気の蒸発・凝縮による DF_{EC} 、慣性衝突による $DF_{II,i}$ 、遠心拡散・重力沈降による $DF_{ER,i}$ が考慮され、スウォーム流上昇領域においては遠心拡散およびブラウン拡散による $DF_{SR,i}$ が考慮されている。なお、水面における気泡崩壊領域で本来発生するエントレインメント液滴については、その量がプール全体の量と比較して微小であるため DF に係らないものとして無視されている。

以上の4つの DF を合わせて、あるエアロゾル質量範囲におけるプールスクラビングによる $DF_{OV,i}$ が次式により求まる。

$$DF_{OV,i} = DF_{EC} \times DF_{II,i} \times DF_{ER,i} \times DF_{SR,i} \quad (3.2)$$

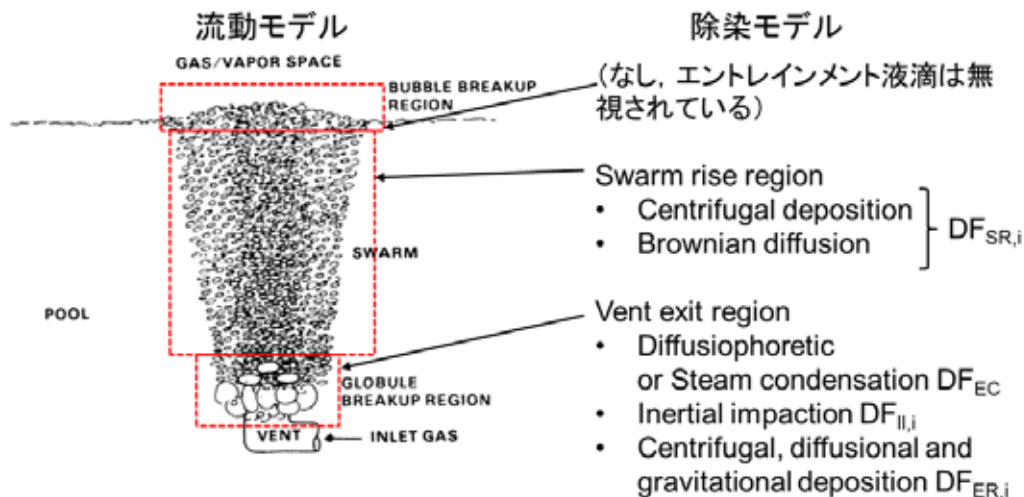


図 3-58 SPARC-90 における除染モデル

3.2.4 慣性衝突による DF_{II} の感度解析

プールスクラビング中の除染において、気相およびエアロゾルは高速で水中に放出され、気泡形成時に気相は急速に減速する。この時、エアロゾル粒子が気泡界面へ慣性衝突すると考えられ、蒸気による凝縮の効果がない場合、除染の大半がこの慣性衝突により行われると考えられる。そこで、まず MELCOR 内で用いられる慣性衝突に係る評価式を用いて、慣性衝突による DF_{II} がどのような値を取りうるか把握すべく、感度解析を実施した。

MELCOR のリファレンスマニュアルにおいて慣性衝突による DF_{II} は以下のように求められる。まず粒子挙動に係る無次元数であるストークス数は次式で与えられる。

$$Stk_i = \frac{\rho_i V_e d_i^2}{9\mu D_o} \quad (3.11)$$

なお、これは $Re < 1$ の低レイノルズ数の流動場において Conningham の補正係数を無視した場合、粒子の運動方程式から求まるものである。

また、慣性衝突による DF_{II} は次式で与えられる。

$$DF_{II,i} = \frac{1}{1 - \alpha_i} \quad (3.12)$$

ここで、 $\sqrt{Stk_i} \leq 0.65868$ のとき

$$\alpha_i = 1.79182 \left(3.3473 \times 10^{-11} \right)^{\left(5.9244 \times 10^{-3} \right) \sqrt{Stk_i}} \quad (3.13)$$

$\sqrt{Stk_i} > 0.65868$ のとき

$$\alpha_i = 1.13893 \left(1.4173 \times 10^{-6} \right)^{\left(4.25973 \times 10^{-3} \right) \sqrt{Stk_i}} \quad (3.14)$$

また、 α_i の最小は 0、最大は 0.99 に制限されている。

ここで、 Stk_i に対する α_i の感度解析を実施した結果を図に示す。 α_i は Stk_i の値に対して 4 つの領域に区分けされる形で式が作られており、最小の 0 から急激に立ち上がり、最大 0.99 に緩やかに近づくような性質を持つ。

さらに Stk_i に対する $DF_{II,i}$ の感度解析を実施した結果を図に示す。 Stk_i の増加に伴い $DF_{II,i}$ は急激に立ち上がるが、100 より大きくなることはないことがわかる。これより、MELCOR での慣性衝突による $DF_{II,i}$ は最大値が 100 となるよう制限されていることが確認できる。

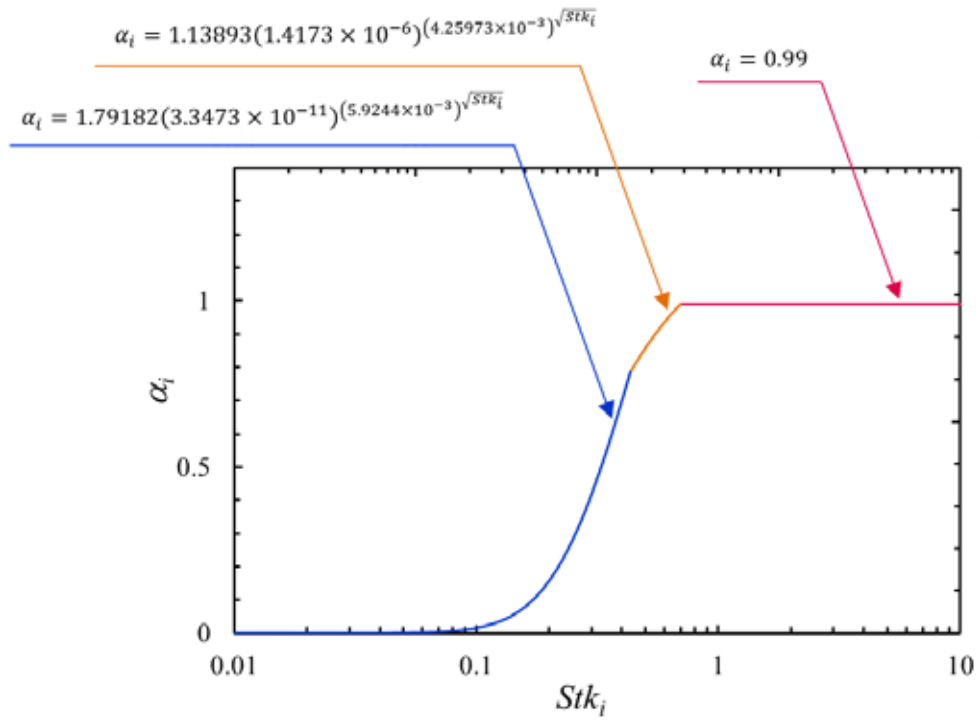


図 3-59 α_i についての感度解析

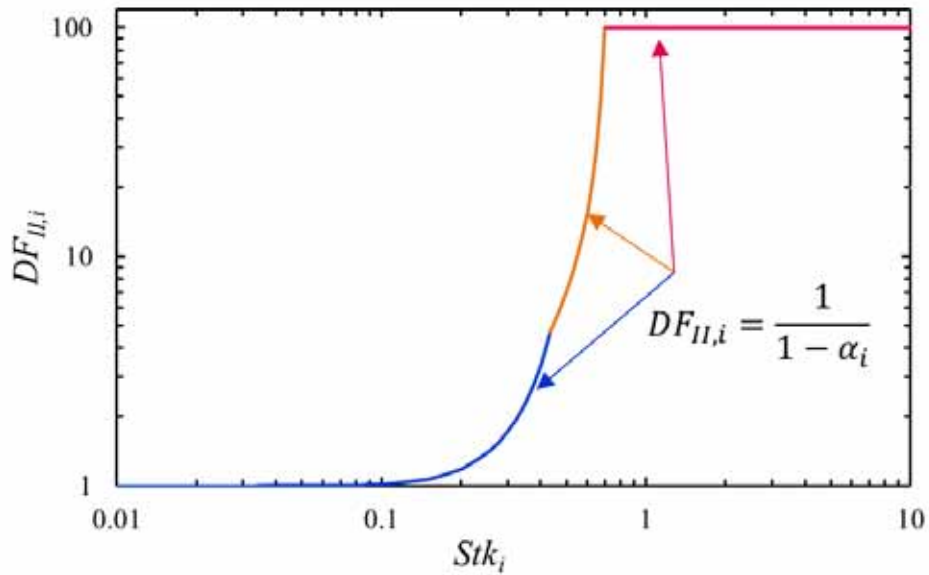


図 3-60 $DF_{II,i}$ についての感度解析

表 3-3 $DF_{L,i}$ の評価において使用される係数

$C7155(1) = 1.79182D0$
$C7155(2) = 3.3437D-11$
$C7155(3) = 5.9244D-3$
$C7155(4) = 0.65868D0$
$C7155(5) = 1.13893D0$
$C7155(6) = 1.4173D-6$
$C7155(7) = 4.2597D-3$
$C7155(8) = 0.99D0$

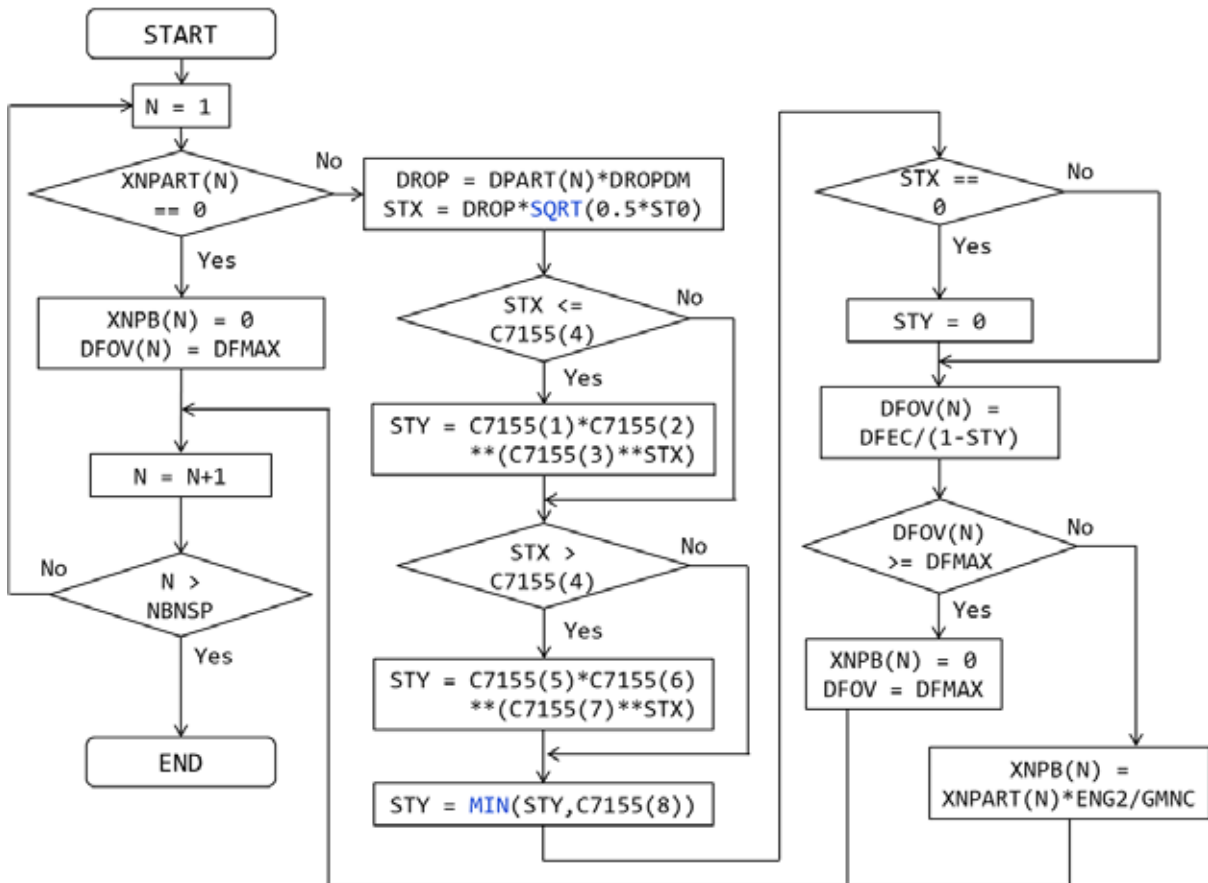


図 3-61 $DF_{L,i}$ に関する計算チャート

3.2.5 プールスクラビングによる除染係数の評価：解析体系および条件

図 3-62 に解析体系を示す。体系はタンク部、プール部、環境の三つのボリューム領域とこれらをつなぐパスにより構成されている。詳細な寸法は図に示す通りである。ただしサブマージェンスはその影響を見る際にパラメータとして変更した。プール部におけるエアロゾルの噴出口となるノズル部は、プール部中央底面から突き出す形を想定しており、その長さは水槽底面から 320mm である。解析体系の主要なパラメータおよびエアロゾルの入力値を図 3-63 に示す。解析において、このノズル部の流量を調整することで実験体系と条件を一致させた。試験流体は水および空気とし、各領域内の温度、圧力は常温、常圧とした。気相に混じって流れるエアロゾルはセシウムとし、崩壊熱は 0.0W として熱の発生はないものとした。

解析条件を表 3-4 に示す。まず解析番号 No.1 により DF 解析の基礎的な挙動を把握した。続いてノズル内気相流速、気相流量およびサブマージェンスの影響を検討した。

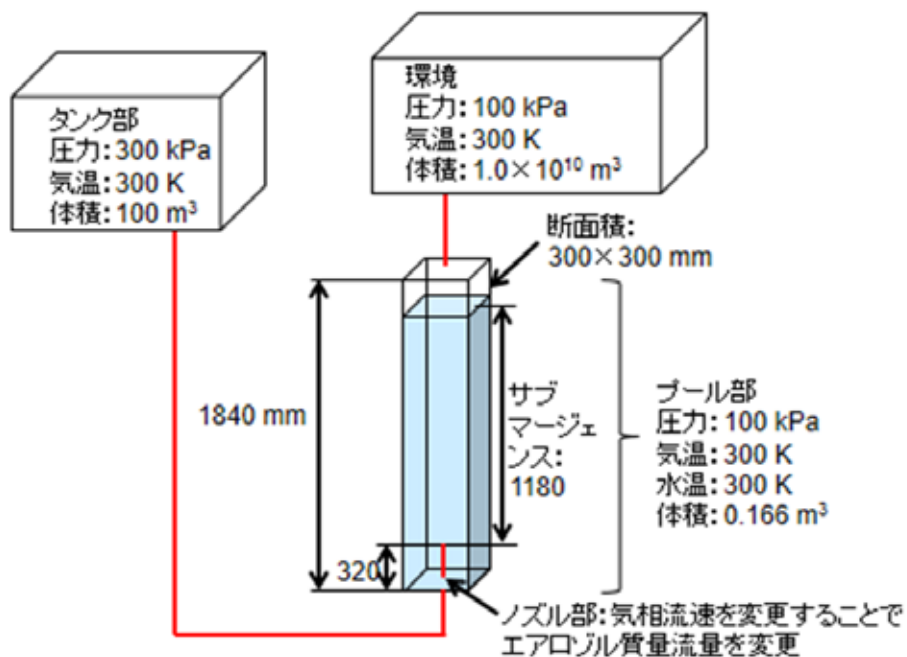


図 3-62 解析体系

各ボリューム主要パラメータ				
	体積 [m ³]	圧力 [kPa]	気温 [K]	水温 [K]
タンク部	100	300	300	-
プール部	0.166	100	300	300
環境	1.0×10 ¹⁰	100	300	-

エアロゾルの入力	
核種	Cs
粒径 [μm]	1.0~2.0
粒径分布	一様分布
初期インベントリ [kg]	0.2(タンク部のみ)
崩壊熱 [W]	0.0

図 3-63 解析体系の主要なパラメータおよびエアロゾルの入力値

表 3-4 解析条件

番号	検証内容	試験流体	ノズル直径	ノズル部流速	体積流量	サブマージェンス	計算時間	環境の体積	プール上部の体積
			[mm]	[m/s]	[L/min]	[mm]	[s]	[m ³]	[m ³]
No. 1	計算時間の影響	空気-水	3	1	0.424	900	86400	10 ¹⁰	0.0558
No. 2	ノズル内気相流速・気相流量の影響	空気-水	3	1	0.424	1180	1000	10 ¹⁰	0.0558
No. 3	ノズル内気相流速の影響	空気-水	0.5	36	0.424	1180	1000	10 ¹⁰	0.0558
No. 4	ノズル内気相流速の影響	空気-水	6	0.25	0.424	1180	1000	10 ¹⁰	0.0558
No. 5	ノズル内気相流速の影響	空気-水	10	0.09	0.424	1180	1000	10 ¹⁰	0.0558
No. 6	気相流量の影響	空気-水	3	0.01	0.004	1180	1000	10 ¹⁰	0.0558
No. 7	気相流量の影響	空気-水	3	0.1	0.042	1180	1000	10 ¹⁰	0.0558
No. 8	サブマージェンスの影響	空気-水	3	0.09	0.424	300	1000	10 ¹⁰	0.0558
No. 9	サブマージェンスの影響	空気-水	3	1	0.424	600	1000	10 ¹⁰	0.0558
No. 10	サブマージェンスの影響	空気-水	3	1	0.424	900	1000	10 ¹⁰	0.0558

3.2.6 プールスクラビングによる除染係数の評価：解析結果

まず、解析条件 No.1 における各部のエアロゾル質量の解析結果を示す。各質量の取得位置を図 3-64 に示す。まずプール部水中のエアロゾル質量、プール部雰囲気中のエアロゾル質量、環境中のエアロゾル質量およびこれを合計したプール部および環境中のエアロゾル質量を図 3-65, 図 3-67, 図 3-69, 図 3-71 に示す。それぞれの 0 -3000s 間を抜き出したものを図 3-66, 図 3-68, 図 3-70, 図 3-72 に示す。まず、プール部水中に捕集されたエアロゾル質量は、緩やかに増加し始め、時間経過とともに一定の割合で増加するようになる。プール部雰囲気中に残存するエアロゾルは、一定値に落ち着くように増加していく。また、環境中に放出されたエアロゾルは、緩やかに増加していく様子が確認できた。これらのプール部水中、雰囲気中、環境の三か所のエアロゾルの質量を比較すると、プール部水中に最も多くエアロゾルは捕集され、環境中が最も少ないことが分かった。タンク部から放出された、プール部と環境中のエアロゾル量は時間変化に対して線形に増加しており、一定流量がタンク部から流れ出ていることが確認できる。

各部における質量を元に、プール部水中における DF を求める。DF は次の式で定義する。

$$DF = \frac{\text{プール部水中への流入量}}{\text{プール部水中からの流出量}} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{d}{dt}(M_1 + M_2 + M_3) \bigg/ \frac{d}{dt}(M_2 + M_3) \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(M_1 + M_2 + M_3) &= (G_1 - G_2) + (G_2 - G_3) + G_3 = G_1 \\ \frac{d}{dt}(M_2 + M_3) &= (G_2 - G_3) + G_3 = G_2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

この式によりプール部水部分による DF は図 3-73 のように得られた。DF は立ち上がった後、一定値に落ち着くことが確認され、時定数を持つと考えられる。0-3000 s 間を抜き出したものを図 3-74 に示す。DF は時間経過とともに上昇していく様子が観察され、また振動する様子が確認された。この振動は、各部における質量の出力結果中に含まれていた、打切り誤差による微小な変動分が、質量の時間微分として DF を計算したことで現れたものであると考えられる。

振動は物理的なものでないと考えられることから、Savitzky-Golay filter [2]により重み付けして DF をなめらかに出力する。この結果を図 3-75 に、さらに 0-3000 s 間を抜き出したものを図 3-76 に示す。このフィルターにより DF の振動が比較的抑えられつつ、時間経過とともに上昇していく様子が観察できた。以降はフィルターをかけた DF について報告する。

さらに MELCOR によりもともと出力される DF を加えた結果を図 3-77 に、0-3000 s 間を抜き出した結果を図 3-78 に示す。MELCOR により出力される DF は本手法により得られる DF に対して、同じ初期値を持ち、その後上昇する点で一致するが、上昇する幅は比較的小さく、上昇後は変動なく一定値を保つ様子が確認された。DF は本来、3.15 式のように流入したエアロゾル質量に対する流出したエアロゾル質量の割合で定義されるが、MELCOR においては 3.10 式により定義されており、異なる定義が用いられていることがわかる。これら 2

種類の DF がそれぞれ妥当性を持つか確認する必要がある。そのためには今後、3.11 式に示されるような現象毎の DF にも着目し、それぞれがどのような計算課程を経て、またどの DF は支配的であるか明らかした上で検討していく必要がある。

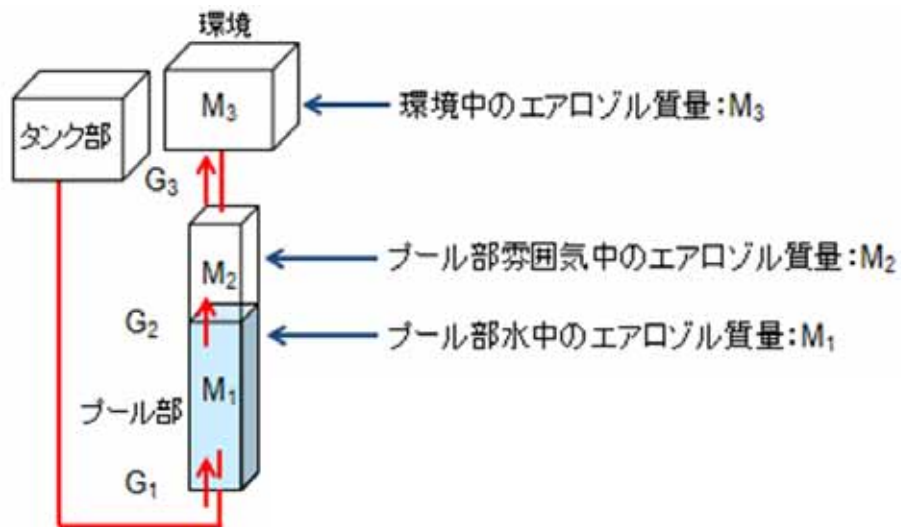


図 3-64 各部のエアロゾル質量 M および質量流量 G

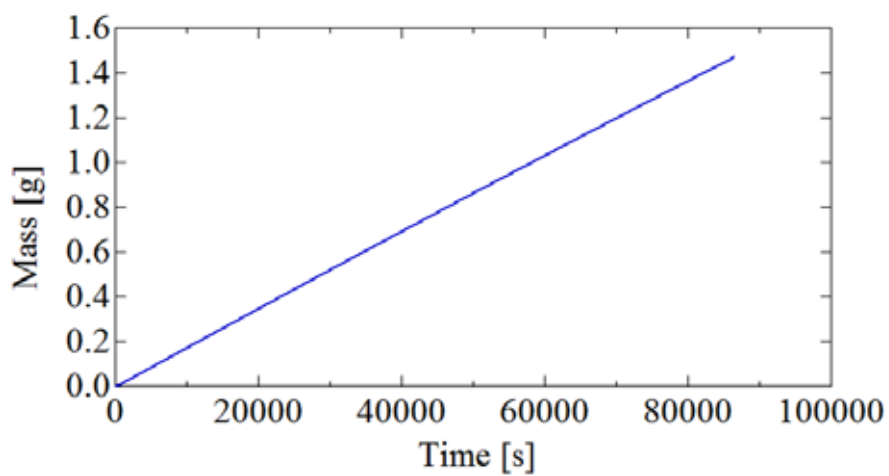


図 3-65 プール部水中のエアロゾル質量 (0 ~ 86400 s)

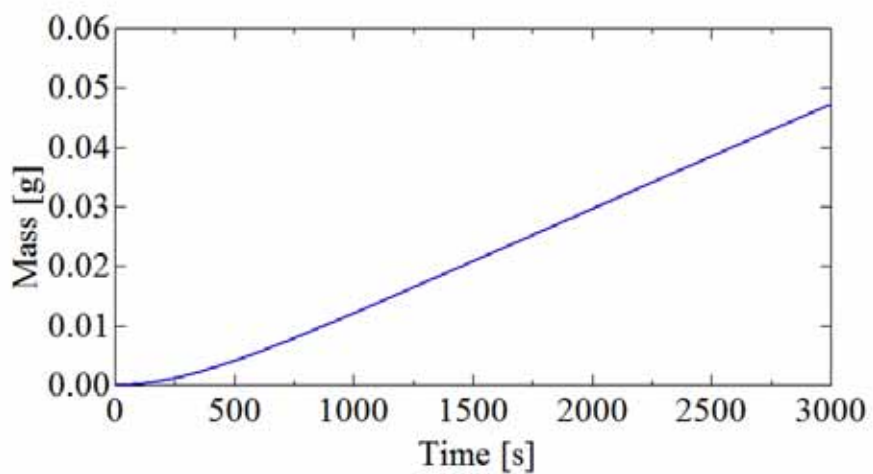


図 3-66 プール部水中のエアロゾル質量 (0 ~ 3000 s)

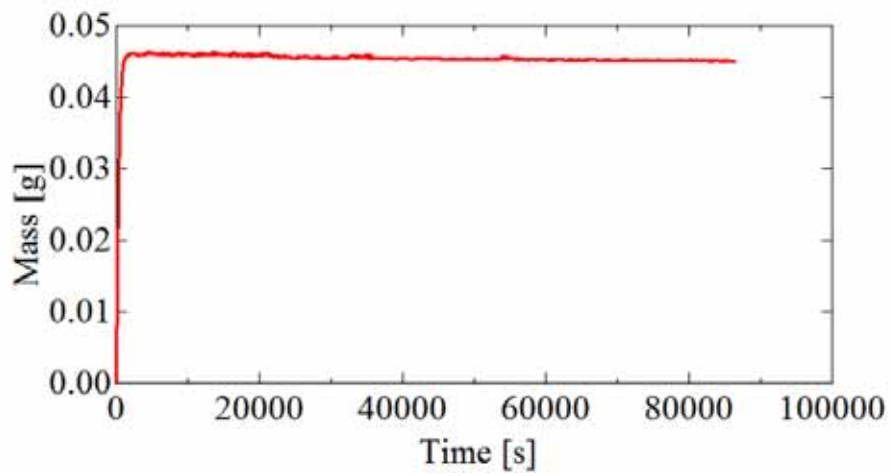


図 3-67 プール部雰囲気中のエアロゾル質量 (0 ~ 86400 s)

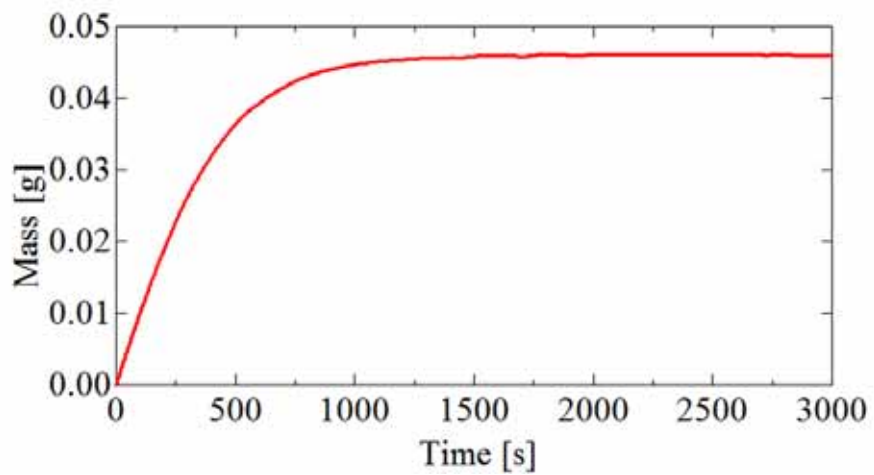


図 3-68 プール部雰囲気中のエアロゾル質量 (0 ~ 3000 s)

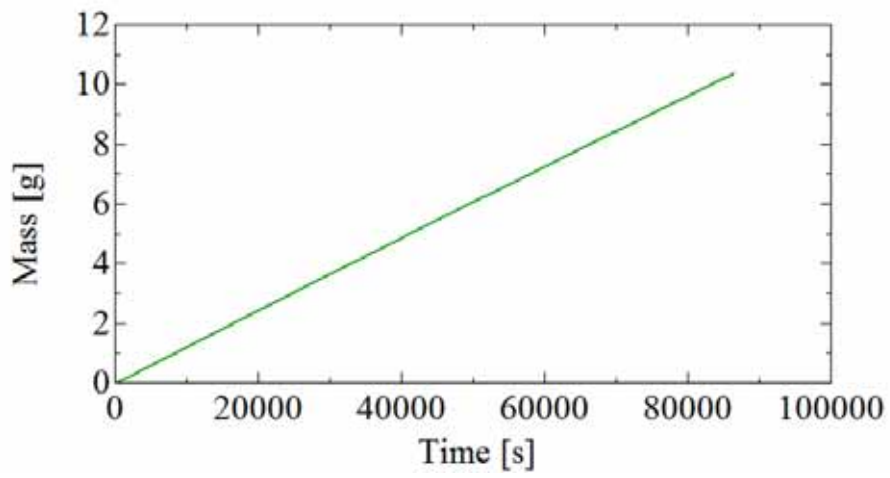


図 3-69 環境中のエアロゾル質量 (0 ~ 86400 s)

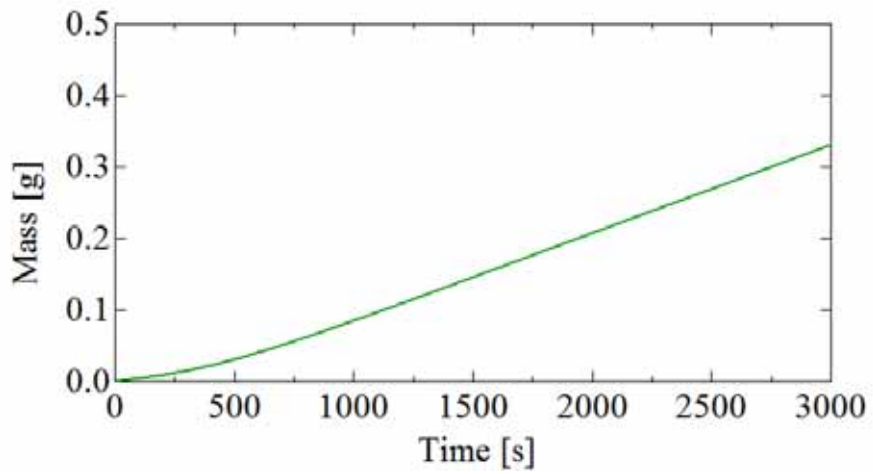


図 3-70 環境中のエアロゾル質量 (0 ~ 3000 s)

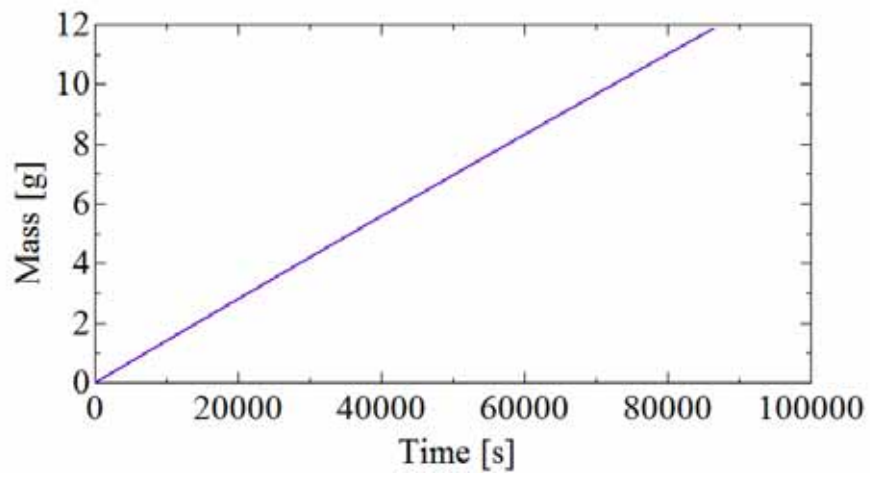


図 3-71 プール部および環境中のエアロゾル質量 (0 ~ 86400 s)

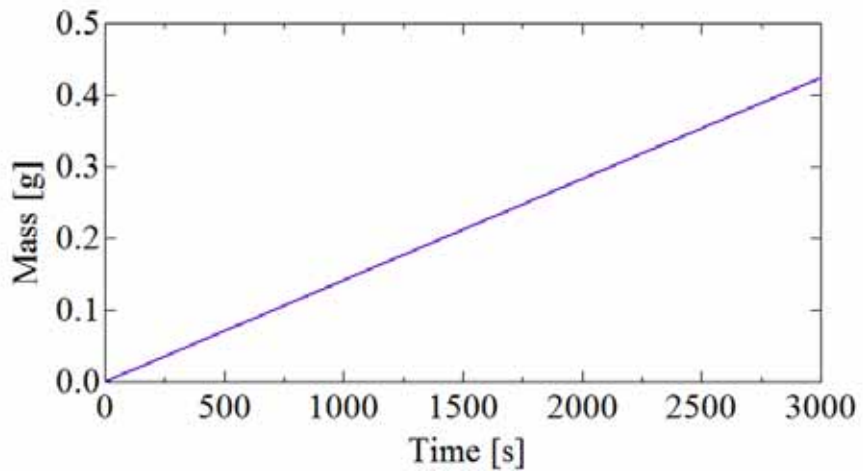


図 3-72 プール部および環境中のエアロゾル質量 (0 ~ 3000 s)

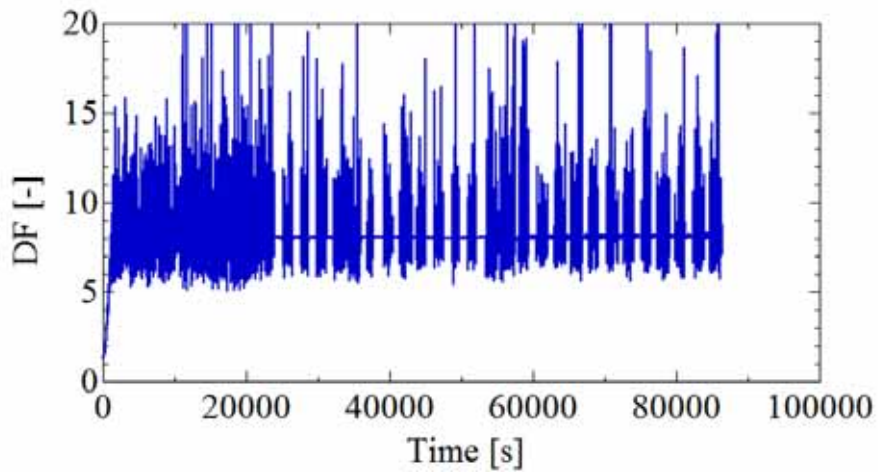


図 3-73 プール部水中における DF (0 ~ 86400 s)

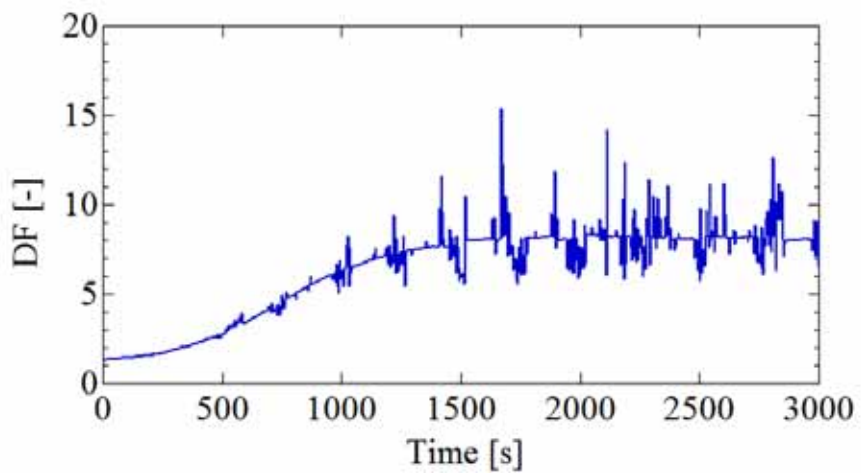


図 3-74 プール部水中における DF (0 ~ 3000 s)

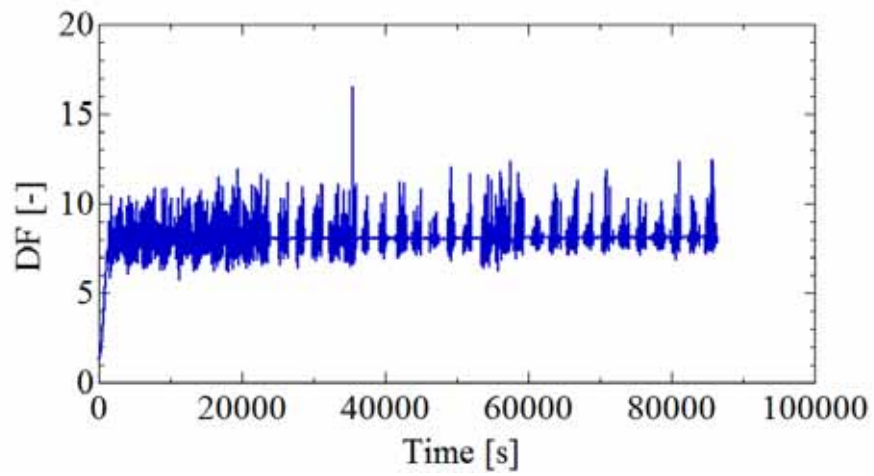


図 3-75 プール部水中における DF (Savitzky-Golay filter, 0 ~ 86400 s)

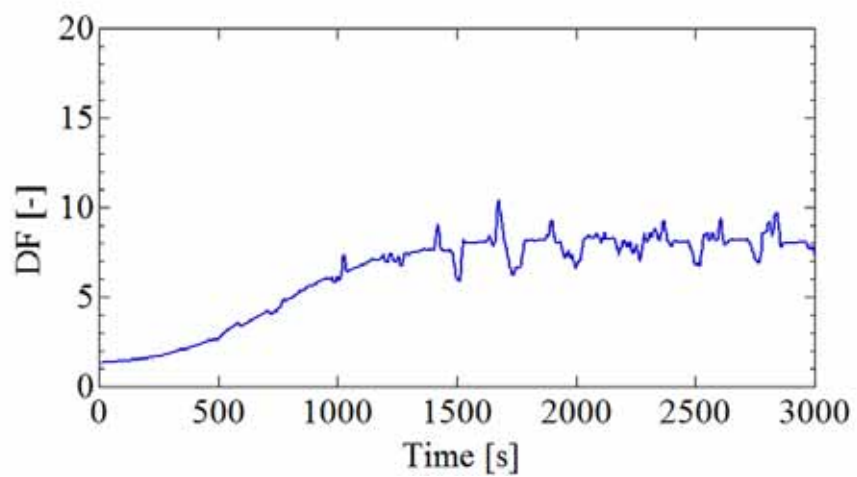


図 3-76 プール部水中における DF (Savitzky-Golay filter, 0 ~ 3000 s)

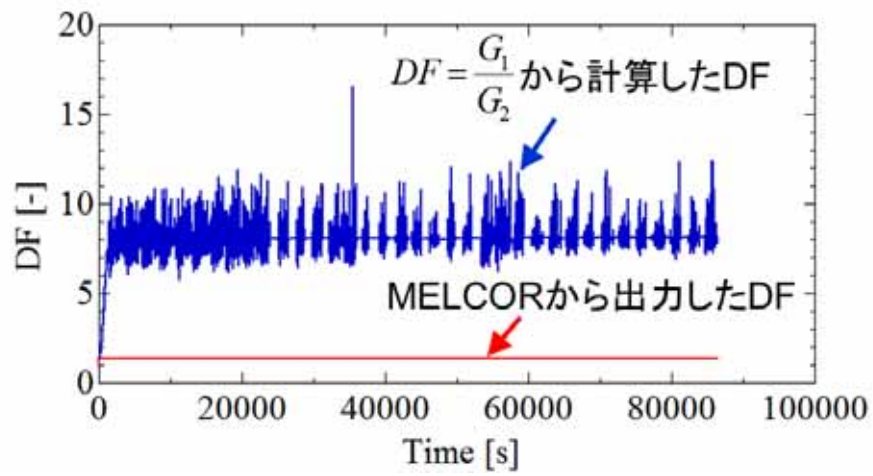


図 3-77 DF の比較 (0 ~ 86400 s)

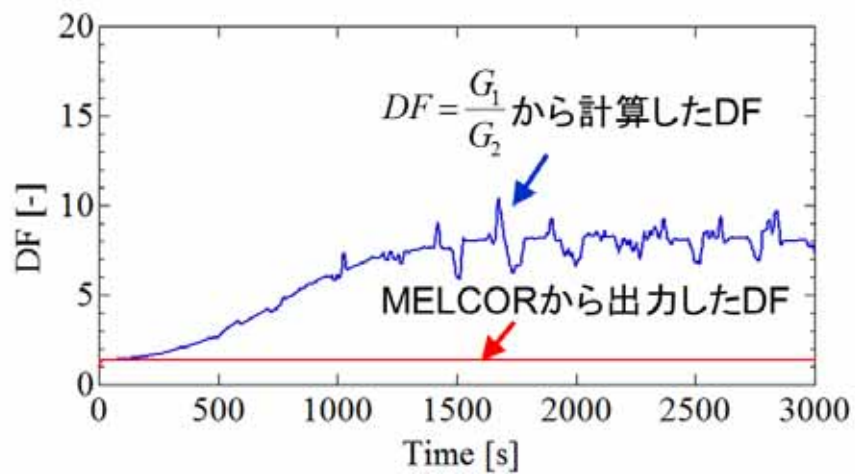


図 3-78 DF の比較 (0 ~ 3000 s)

3.2.7 DF に対するノズル内気相速度の影響

続いて、DF に対するノズル内気相速度の影響を把握する。気相速度の変更範囲は 0.09 ~ 36 m/s とした。解析条件は表 3-4 の No.2 から No.5 である。気相速度の変更は、気相流量を一定とし、ノズル径を変更することで実施した。図 3-79 に 0 ~ 1000 s 間の DF 解析結果を示す。

時間経過とともに DF は上昇を続けており、いずれの結果も定性的に大差なく推移することが確認できる。気相速度の違いから、慣性衝突による DF が変わること予想されたが、結果的に本気相速度範囲では DF が変わらないため、慣性衝突による DF も影響を受けていないか、そもそも慣性衝突による粒子除去が支配的でない可能性が考えられる。

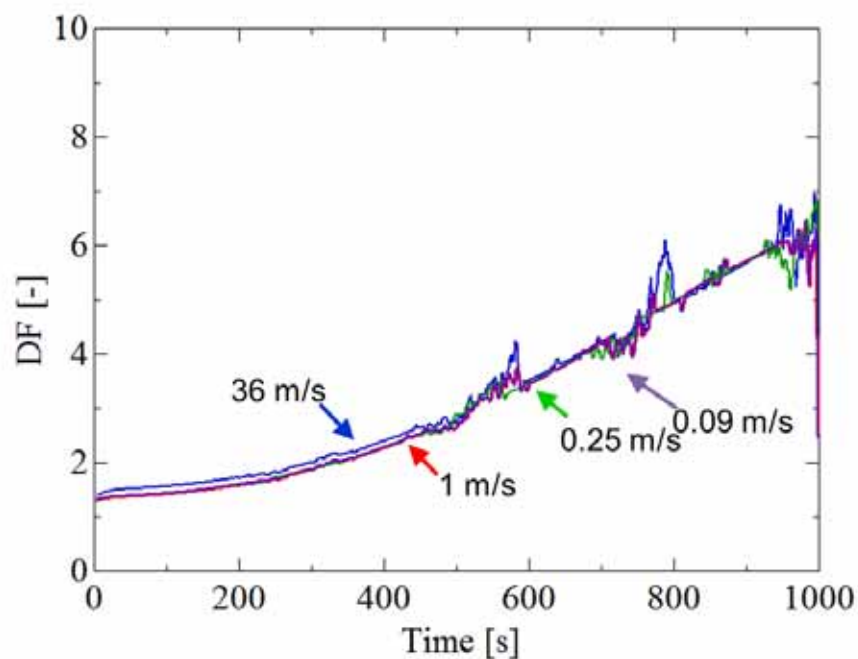


図 3-79 プール部水中における DF に対するノズル速度の影響

3.2.8 DF に対する気相流量の影響

DF に対する気相流量の影響を把握する。気相流量の変更範囲は 0.004 ~ 0.424 L/min とした。解析条件は表 3-4 の No.2, No.6 および No.7 である。気相流量の変更は、ノズル径を一定とし、気相流速を変更することで実施した。図 3-79 に 0-1000 s 間の DF 解析結果を示す。

時間経過とともに 0.424 L/min の条件で DF は上昇を続けているが、0.042 L/min, 0.004 L/min と気相流量が小さくなるにつれて上昇量は小さく、すぐに一定値に落ち着くことが確認できる。これらのことから、DF は定常状態に落ち着くものの、気相流量が大きくなるにつれて時間がかかることが確認できる。

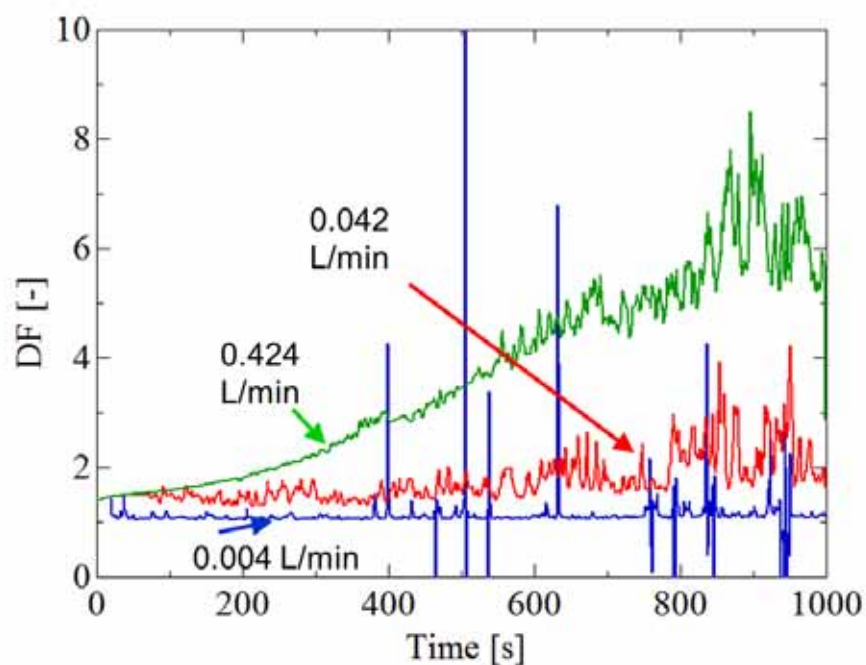


図 3-80 プール部水中における DF に対するサブマージェンスの影響

3.2.9 DF に対するサブマージェンスの影響

DF に対するサブマージェンスの影響を把握する。サブマージェンスの変更範囲はノズルの頂点位置から 300~900 mm とした。解析条件は表 3-4 の No.8 から No.10 である。気相流量の変更は、ノズル径を一定とし、気相流速を変更することで実施した。図 3-79 に 0~1000 s 間の DF 解析結果を示す。

いずれの条件においても時間経過とともに DF は上昇を続けているが、サブマージェンスが大きくなるにつれ DF の上昇の度合いが大きくなる様子が確認できる。

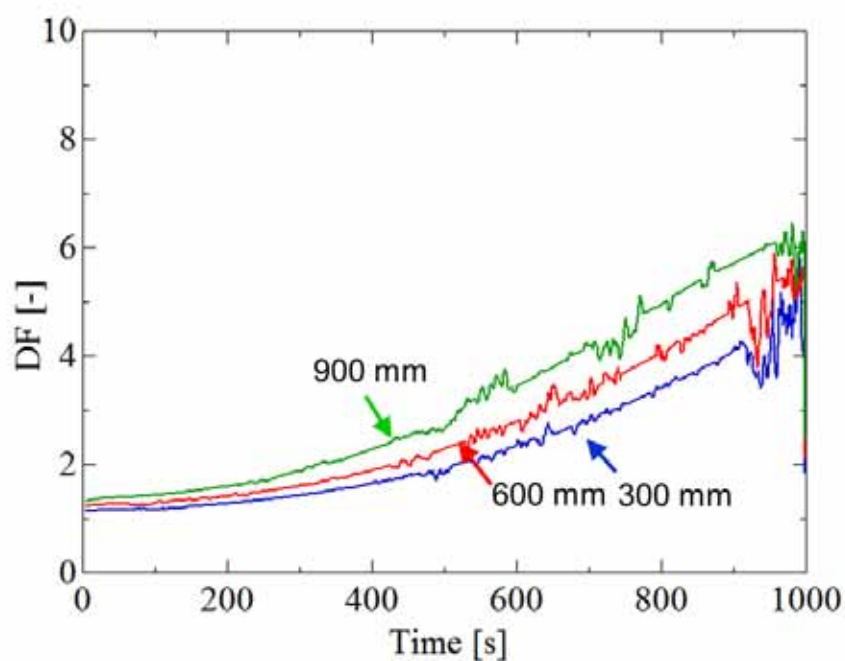


図 3-81 プール部水中における DF に対するサブマージェンスの影響

3.2.10 試験結果と解析結果の比較

慣性衝突による DF_{II} について試験結果と解析結果の比較を実施した。図 3-82 および図 3-83 は、それぞれ図 3-59 および図 3-60 に実験結果から計算した DF_{II} を加えたものである。

実験結果からも求めた DF_{II} は、後述する 3.3.2 の結果および 3.11 ~ 3.14 式を用いて計算した。用いた数値および計算結果を表に示す。MELCOR のリファレンスマニュアルおよびユーザーズガイド [1] から、3.2.4 に示す通り、スクラビング時の慣性衝突による DF の計算式を抽出し、感度解析によりこの DF の取りうる値を解析した。これに試験結果から得られたデータを本計算式に代入することで、試験で得られる慣性衝突による DF を評価した。これらの試験結果と解析結果を比較した結果について述べる。

図 3-82 および図 3-83 から、MELCOR の解析範囲に対して本試験におけるストークス数は低い値であったことが確認できる。また、3.2.7 の図 3-72 において同様の速度条件においても MELCOR では DF を 1~6 ほどの値で取っておりオーダーで合うことから、MELCOR による解析が試験を模擬できている可能性が見られる。

表 3-5 実験における $DF_{II,i}$ の計算結果

			緩めの見かけ密度	固めの見かけ密度
粒子の見かけ密度	ρ_i	kg/m ³	90	150
粒子径	d_i	μm	3.79	3.79
ノズル内気相流速	V_e	m/s	2.68	2.68
水の粘性係数	μ	Pa s	1.8×10^{-6}	1.8×10^{-6}
ノズル直径	D_0	mm	1	1
ストークス数	Stk_i	-	0.21	0.36
	α_i	-	0.18	0.59
除染係数	$DF_{II,i}$	-	1.21	2.43

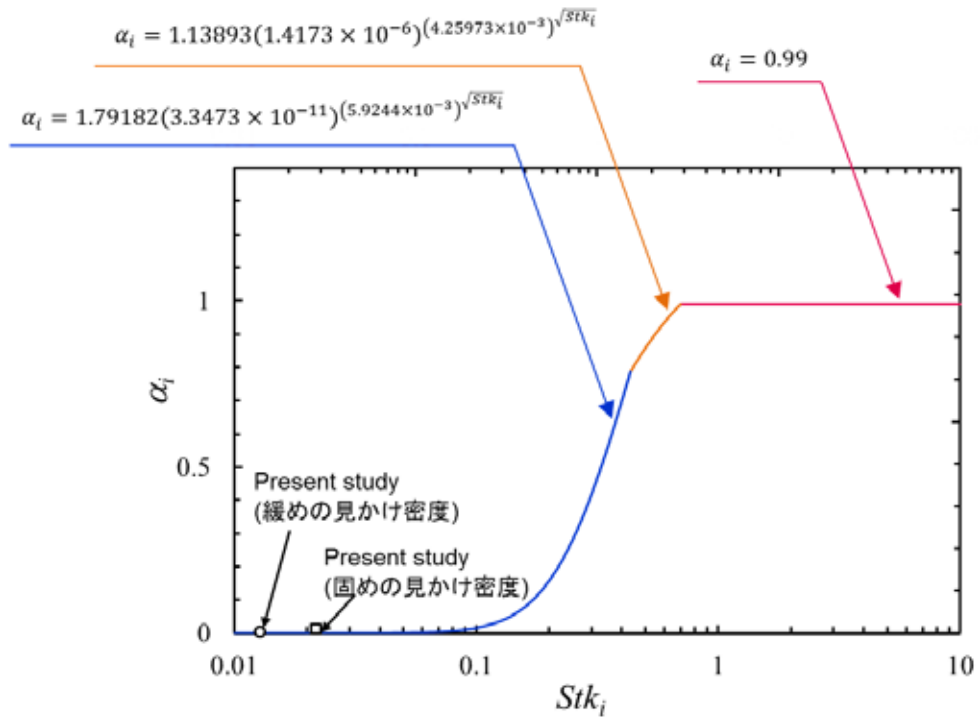


図 3-82 α_i についての感度解析

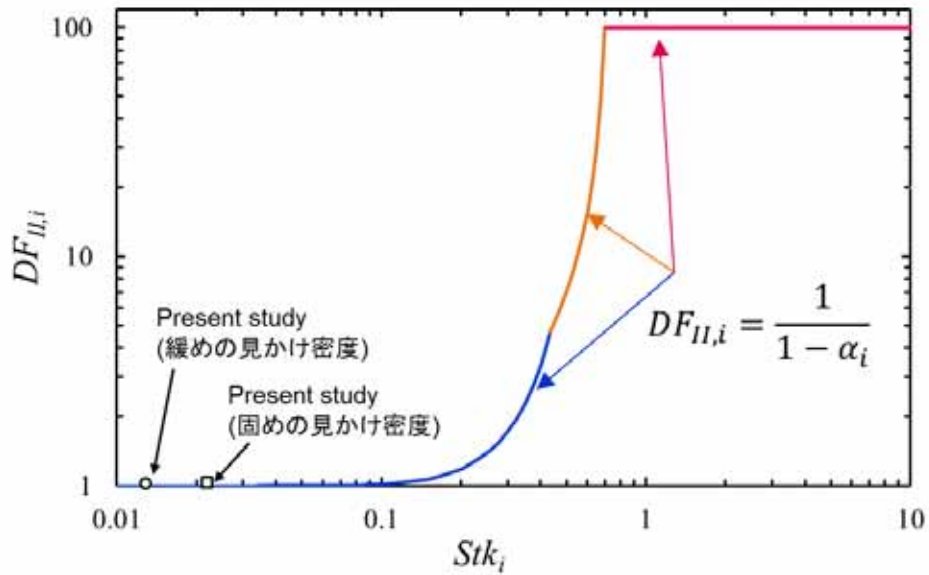


図 3-83 $DF_{II,i}$ についての感度解析

3.2.11 モデル改良のための検討

今回実施した DF の評価は、特に慣性衝突が卓越する条件と範囲に関するものであり、他の現象が DF に支配要因となる条件に対しての評価は行っていない。3.2.2 に記載した、MELCOR による解析は、この慣性衝突による粒子除去が DF に対して支配的でない可能性を示唆しているが、この事が実現象に対応するか否か更にどのようなモデル改良が必要となるかについては、今後さらに詳細に検討する必要がある。

本報告の結果より、実験に基づきまず DF の小さな領域に着目すればよいことが分かったことから、MELCOR のモデル式に対する着眼点が得られた。今後その観点で実験結果との比較に基づいて検討を進める。

3.2.12 まとめ

MELCOR による実験解析に関して、以下の知見を得た。

- MELCOR コードを用いて、エアロゾル混入試験条件における DF 評価を実施した。
- 解析結果と試験結果の比較により、解析は試験条件を模擬できている可能性が確認された。
- また、試験条件は MELCOR の解析範囲内でも比較的ストークス数の低い条件であることを確認した。
- MELCOR において質量の時間変化から DF 算出した場合、MELCOR で本来出力される DF と異なる値が取得されることを確認した。
- ノズル内気相流速の違いによる DF への影響は確認されなかった。
- 気相流量増加に伴い DF は増加の度合いが高く、また時定数も大きくなる様子を確認した。
- サブマージェンスの増加に伴い DF が増加することを確認した。

3.3 試験データの整理

スクラビング解析モデルの高度化又は妥当性確認への試験データの活用を念頭に置き、取得データから、二相流動とエアロゾル挙動に関する各種パラメータのエアロゾル除去効果への影響を整理し、貸与した解析コード中の物理モデルなどを念頭に、スクラビングにおけるエアロゾル除去効果に大きく影響するパラメータを明らかにする。また、過去文献等との試験結果の比較を行い、試験データの検証を行う。

なお、この作業においては原子力規制庁の担当者と適宜協議しながら進めることとする。

3.3.1 気泡挙動に関する過去文献と試験結果の比較

気泡挙動について図 3-84 に仕様書、実験および過去文献で得られたデータを示す。(a)は仕様書にて記載された気泡およびエアロゾル挙動である。(b), (c), (d)は実験データであり、それぞれ(a)中の図に対応しており、管から放出される気泡およびエアロゾルの観察結果、上昇気泡およびエアロゾルの観察結果、水面での気泡の破裂、エントレインメント液滴の生成およびエアロゾルの飛散の観察結果である。(e), (f)は過去文献である SPARC-90 [3]で採用されている流動モデルおよび気泡モデルである。なお、同様の流動モデルが MELCOR で採用されている。

まず、仕様書および実験は単一気泡を対象としている。また、試験結果では単一気泡の生成、少数気泡の上昇、および水面での破裂やエントレインメント液滴の生成が観察された。これに対し、SPAEC-90 [3]で想定されている流動モデルはベント管出口でのグローブールから小さい気泡への分裂、スウォーム流の形成、水面での気泡の破裂およびエントレインメント液滴の生成である。実験結果と過去文献においては、管から気相が放出されること、気泡を形成しこれが上昇すること、水面で破裂することで一致しているが、生成する気泡量や形態において定性的に大きくことなる様子が確認できる。

本報告の実験結果から、単一気泡およびその内部のエアロゾル挙動の可視化可能性が確認できた。今後は SPARC-90 [3]と同様のスウォーム流を対象とし、スウォーム流の可視化を実施し、過去文献と比較検討していくことが必要である。

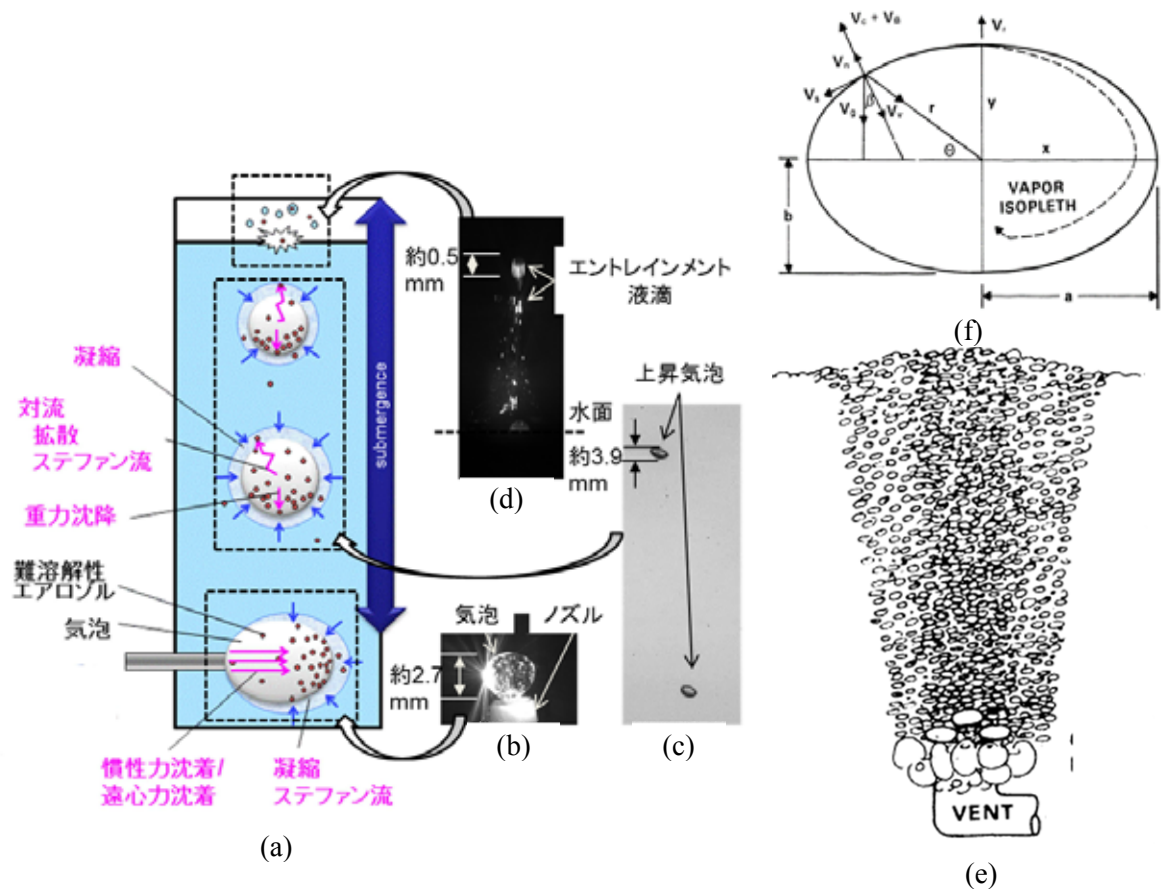


図 3-84 流動挙動の比較

3.3.2 初期気泡形成時の気泡およびエアロゾル挙動

得られた試験データを整理し、図 3-84 における管出口の初期気泡形成時について述べる。

図 3-85 に示す範囲で、エアロゾルを含む場合における初期気泡形成時の可視化撮影を実施した。エアロゾル模擬粒子として図 3-86 に示す粉末シリカを用いた。

エアロゾル粒子自体は平均粒子径 $3.79 \mu\text{m}$ と非常に小さいため、撮影範囲にミリオーダーである気泡を含めようとする、カメラの解像度が粒子径よりも大きくなる。このため本来は気泡と同時にエアロゾル粒子の挙動を取得することは非常に困難である。これに対し本実験では側方からレーザーを照射し、粉末シリカに反射する散乱光を取得することで、エアロゾル挙動の取得を行った。粒子から得られる散乱光は本来の粒子サイズよりも大きい、サブピクセルより大きく撮影することが可能である。このため粒子がサブピクセル以下の場合でも粒子挙動を追うことができると考えられる。

図 3-87 に取得した初期気泡形成時の気泡及びエアロゾル挙動の時間変化を示す。ノズルから射出された気泡が離脱していく様子が確認できる。エアロゾル粒子はノズルから直線的に射出され、進行方向上の気液界面に衝突した後、界面に沿うようにして四方に広がっていく様子が観察された。これはエアロゾル粒子が慣性を持ってノズルから射出され、気液界面に慣性衝突しているものと見られ、これにより除染が促進されると考えられる。

また取得画像から気泡の体積を取得するため画像処理を実施した。この過程を図 3-88 に示す。レーザー照射により気泡側面で大きな範囲を占める散乱光が生じていたため、ノズル中心軸から反対側の領域に着目した。この領域を切り取った後二値化して面積を取得する。気泡はノズル中心軸に対象であると仮定し、軸を中心に面を回転させることで気泡体積を取得した。この取得した結果を図 3-89 に示す。気泡注入開始直後を 0 s としたグラフであり、気泡体積が直線的に増加していることが確認できる。この体積の時間変化およびノズル断面積から、ノズル内気相流速は 2.68 m/s であると求まる。

さらに、取得画像から気液界面およびエアロゾルの二次元速度分布を取得するための画像処理を検討した。この画像処理過程を図 3-90 に示す。PIV 処理により取得することを目指し、まず界面における散乱光の除去を実施した。閾値を設定し、その値より輝度値の高い領域を黒くする処理を行うことで散乱光を除去し (図 3-90 の(a)→(b))、さらに閾値を設定して画像の二値化を行った (図 3-90 の(b)→(c))。この画像に PIV 処理をかけたが、エラーにより処理を完了できなかった。今後は問題点を精査し対処していくことが必要であるが、現段階で界面の散乱光が強すぎるため微小な界面形状の変化でも大きく散乱光の見え方が変わるため、処理が追いきれずエラーが出ていると予想される。このことから、対策の一つとしてまずレーザー強度の最適化が必要であると考えられる。

スクラビングにおけるエアロゾル除去効果に大きく影響するパラメータに関しては、上記にて得られた知見より、ノズル出口部での気泡成長過程において、エアロゾルが既に気泡界面に付着している様子が見られたことから、初期のグローブの大きさ及びこれにかかわる気相流速の影響がエアロゾル除去効果に影響を及ぼすものと考えられる。

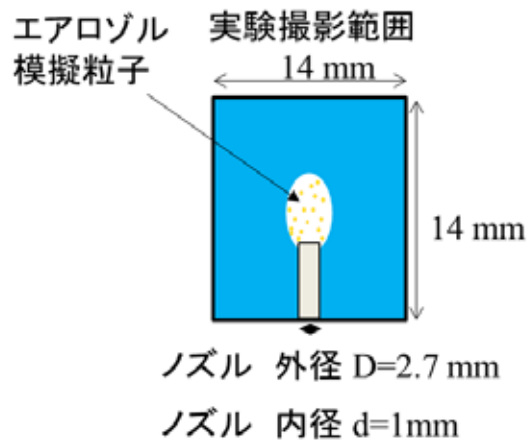


図 3-85 初期気泡形成挙動可視化の範囲

微粉末シリカ粒子 SYLOPHOBIC 200



空気流れのPIVにも用いられる物質

特徴:

- 高い比表面積
- コントロールされた粒子系/粒度分布
- 優れた分散性
- 高い吸油量
- **優れた疎水性**

外観⇒流動性白色粉末

平均粒子径⇒ $3.79 \mu\text{m}$

白色度⇒98.9

見かけの密度(緩め) 90 kg/m^3

見かけの密度(固め) 150 kg/m^3

図 3-86 エアロゾル模擬物質の仕様

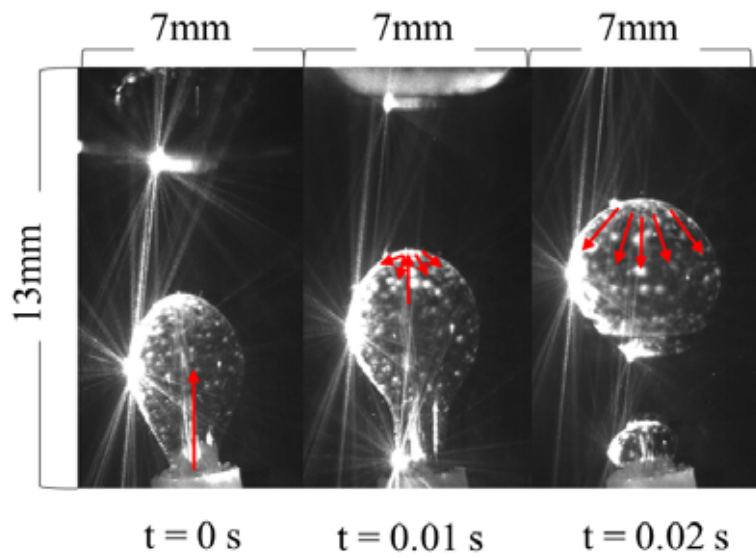


図 3-87 初期気泡形成時における気泡およびエアロゾル挙動の時間変化

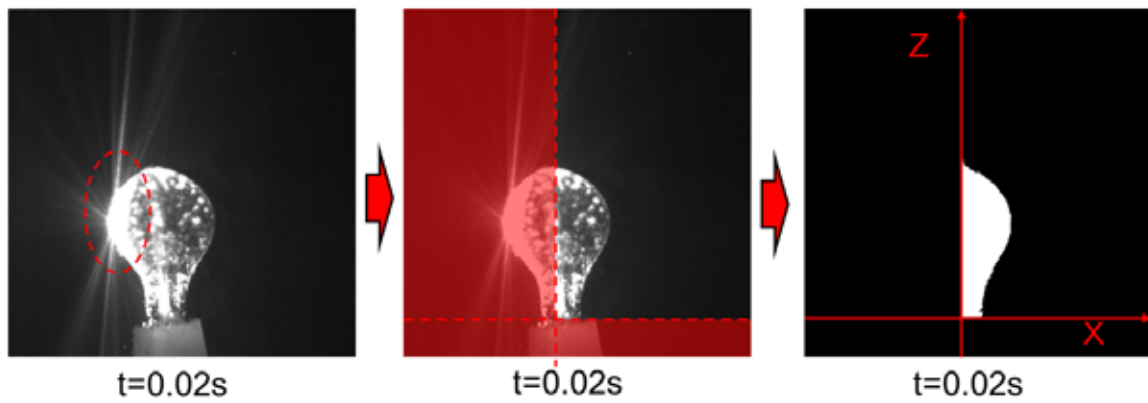


図 3-88 散乱光を無視した気泡体積取得のための画像処理手順

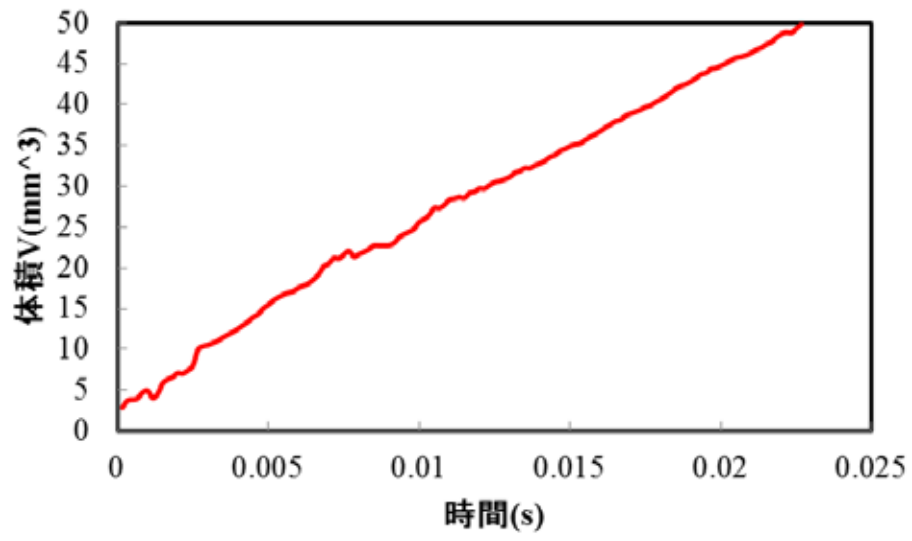


図 3-89 気泡体積の時間変化

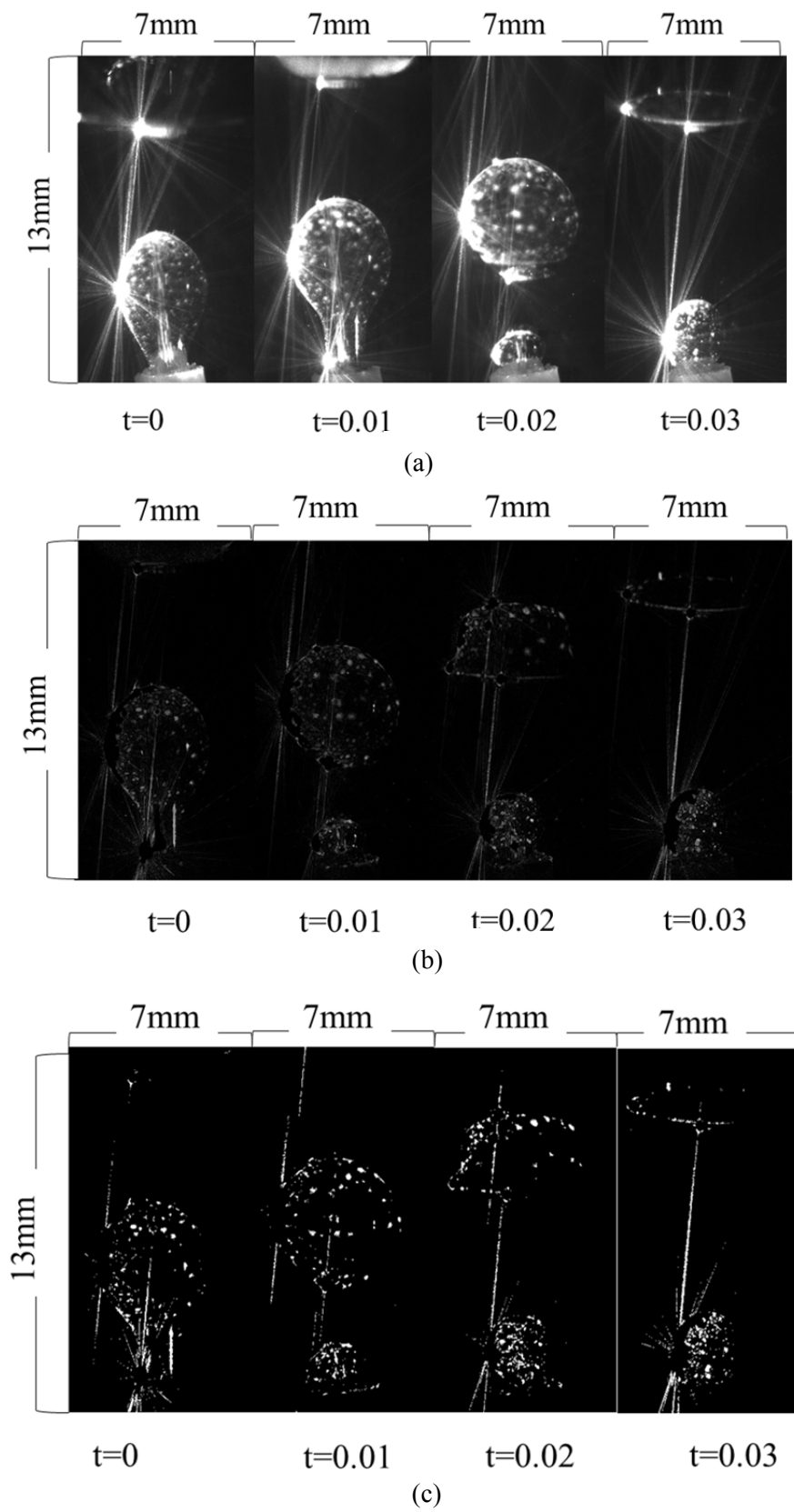


図 3-90 2次元速度場取得のための画像処理手法の検討

3.3.3 気泡上昇時の気泡およびエアロゾル挙動

得られた試験データを整理し、図 3-84 における気泡上昇時の挙動について述べる。

図 3-91 に示す範囲で、エアロゾルを含まない場合と含む場合に分けて、初期気泡形成時の可視化撮影を実施した。エアロゾル模擬粒子として図 3-86 に示す粉末シリカを用いた。LED ライトと高速度カメラを用いたバックライト法により上昇気泡の可視化を実施し、取得した画像から気泡形状および気泡の速度分布を取得した。

まずエアロゾルを含まない場合について述べる。上昇気泡を可視化した一例を図 3-92 に示す。さらに、この気泡の上昇軌道を図 3-93 に示す。ノズルから出た気泡は始め真っ直ぐに上昇していき、ノズル頂点から 300~400 mm の高さ位置でジグザグ運動へ移行した。

取得した画像を処理することで、気泡の高さ方向への上昇速度を定量的に取得した。まず図 3-94 のように気泡形状を楕円で近似できると仮定して画像処理を行い、その楕円の中心位置を気泡の重心位置とみなし、その時間変化を追うことで気泡の上昇速度を求めた。この結果を図 3-95 に示す。気泡ははじめ直線的に速度上昇するが、途中から落ち着くように減速し、またその速度は周期的に変動した。この時の平均速度は 0.27 m/s、速度変動は 0.15 から 0.35 m/s 間であり、終端速度は 0.26 m/s であった。

また、上昇中の気泡はウォブリングをしていた。この気泡形状の変動を、楕円近似した気泡の長軸および短軸の変動から評価した結果を図 3-47 に示す。気泡形成後の長軸は 3.7~4.8 mm の間で周期的に変動した。短軸は気泡形成時直線的に大きくなり、その後 2.5~3.5 mm の間で周期的に変動した。この時の平均の体積等価直径は 3.87 mm であった。

続いて、エアロゾルを含む条件での可視化の一例を図 3-97 に示す。さらに、この気泡の上昇軌道を図 3-98 に示す。ノズルから出た気泡ははじめまっすぐに上昇していき、ノズル頂点から 200~300 mm の高さ位置でジグザグ運動へ移行した。取得した画像を上述のエアロゾルを含まない場合と同様の処理することで、高さ方向への上昇速度、気泡の長軸及び短軸の時間変化を取得した。これらの結果をそれぞれ図 3-99 および図 3-100 に示す。エアロゾルを含まない場合と同様に、気泡ははじめ直線的に速度上昇するが、途中から落ち着くように減速し、またその速度は周期的に変動した。この時の平均速度は 0.27 m/s、速度変動は 0.14 から 0.25 m/s 間であり、終端速度は 0.21 m/s であった。

また、エアロゾルを含まない場合と同様に上昇中の気泡はウォブリングをしていた。気泡形成後の長軸は 3.7~4.8 mm の間で周期的に変動した。短軸は気泡形成時直線的に大きくなり、その後 2.5~3.5 mm の間で周期的に変動した。この時の平均の体積等価直径は 3.87 mm であった。

以上より得られたデータを比較して、エアロゾルの有無による上昇気泡挙動への影響を検討する。図 3-101 はエアロゾルを含む場合と含まない場合それぞれの気泡の位置の時間変化をまとめたものである。この結果より粒子を含まない気泡の方が早い時間で長い距離を移動していることがわかり、エアロゾルを含んだ場合よりも速度が速いことが確認できる。

この原因の一つとして気泡界面の性状の変化が考えられる。エアロゾルを含まない気液のみの場合は、通常気泡がスリップして水中を進むことが知られている。しかし固体であるエアロゾルが混入し界面に付着することで、界面が一種の固体壁面のように働き、その局所における気液の速度が 0 m/s となりスリップを妨げることで、結果的に気泡の上昇速度が遅く

なると考えられる。

また、図 3-96 および図 3-100 を比較するとエアロゾルを含む場合は気泡の形状変動が抑えられる傾向にあり、気泡表面にエアロゾルが付着することで界面が殻のように振る舞うものと考えられる。

スクラビングにおけるエアロゾル除去効果に大きく影響するパラメータに関しては、上記にて得られた知見より、気泡上昇過程における気泡の長軸・短軸の変動データに基づいて、気泡形状の変化が、気泡上昇過程におけるエアロゾルの拡散沈着等の過程に影響を及ぼす可能性があり、気泡形状の変化に着目する必要があると考えられる。同じく、気泡形状の変化とともに、気泡上昇速度及び横方向の流速に振動的な挙動が見出され、上昇過程においても、慣性衝突の可能性も検討する必要があると考えられる。結果として、エアロゾル含有の有無により気泡上昇速度に相違が見られたことから、気泡上昇速度についても、エアロゾル濃度との関連で調べる必要があると考えられ、以上三点の課題を抽出することができた。

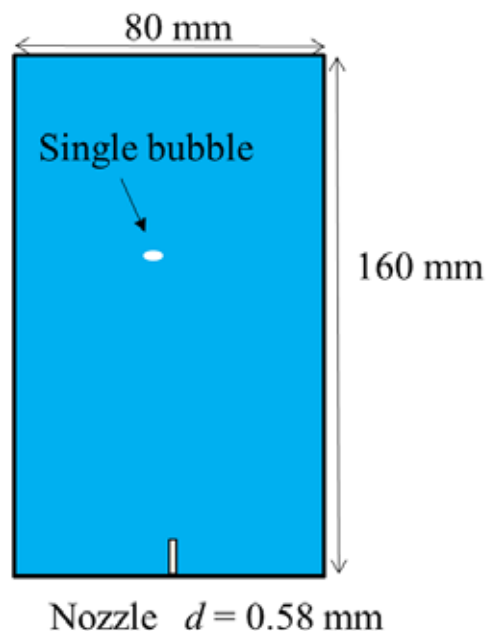


図 3-91 上昇気泡挙動可視化の範囲

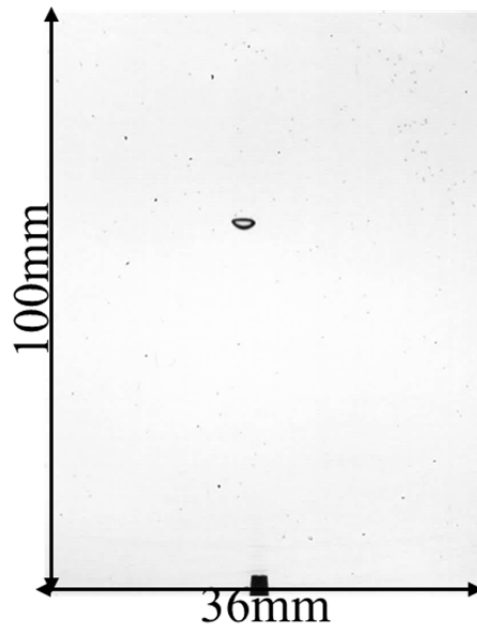


図 3-92 エアロゾルを含まない場合の上昇気泡の可視化例

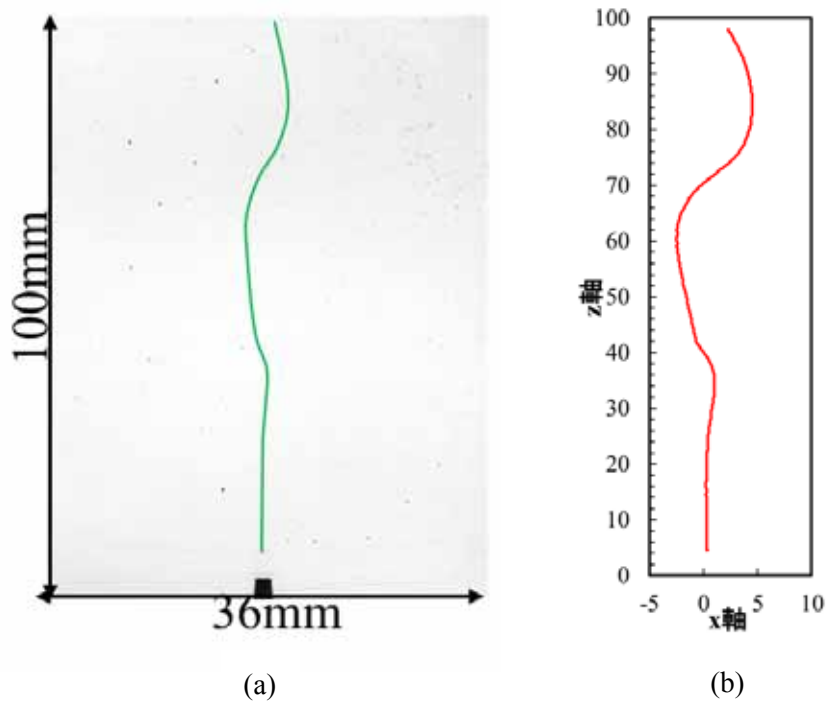
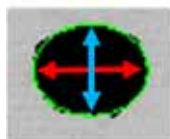


図 3-93 エアロゾルを含まない場合の気泡の上昇軌道



a: 近似楕円の短軸長さ
b: 近似楕円の長軸長さ

図 3-94 気泡の楕円近似

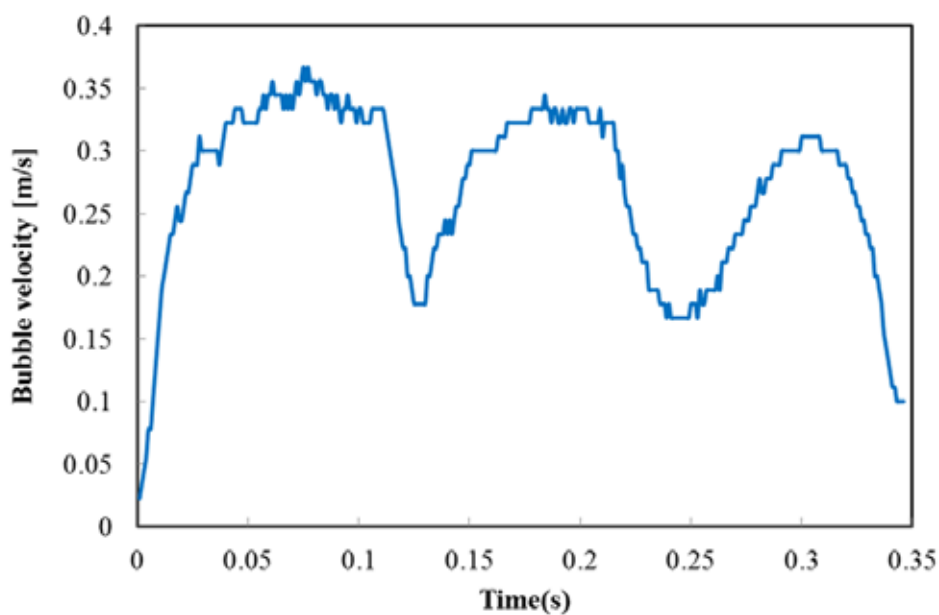


図 3-95 エアロゾルを含まない場合の上昇気泡の高さ方向速度の時間変化

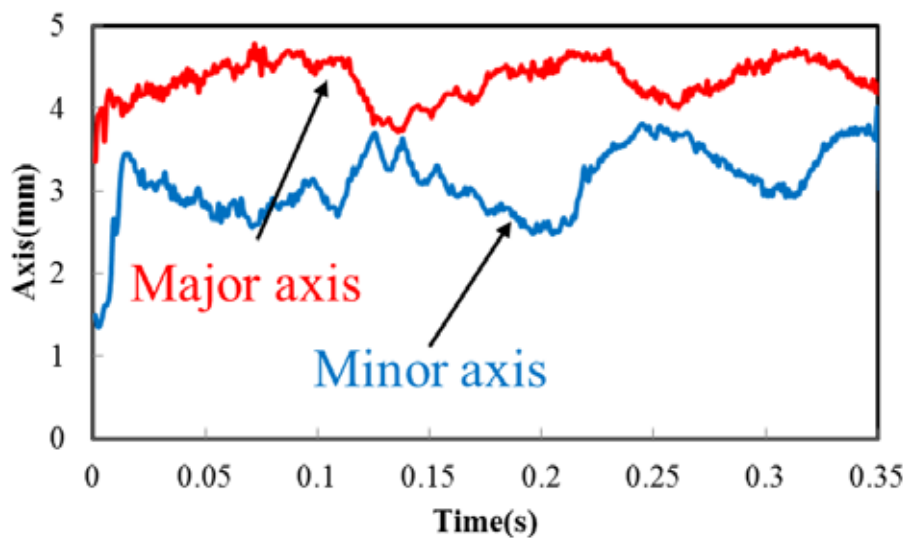


図 3-96 エアロゾルを含まない場合の気泡の長軸および短軸の時間変化

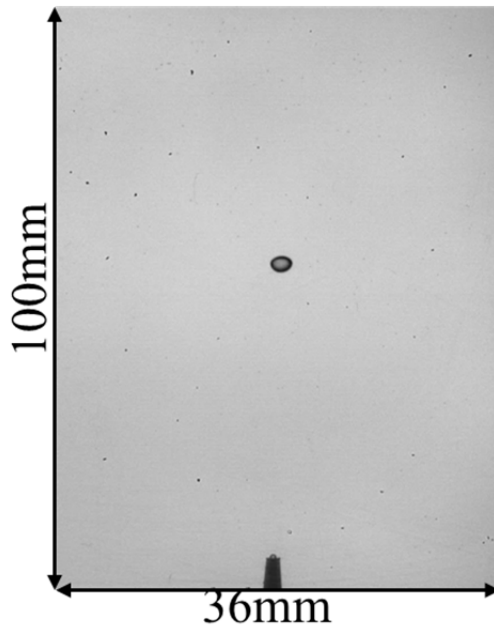


図 3-97 エアロゾルを含む場合の上昇気泡の可視化例

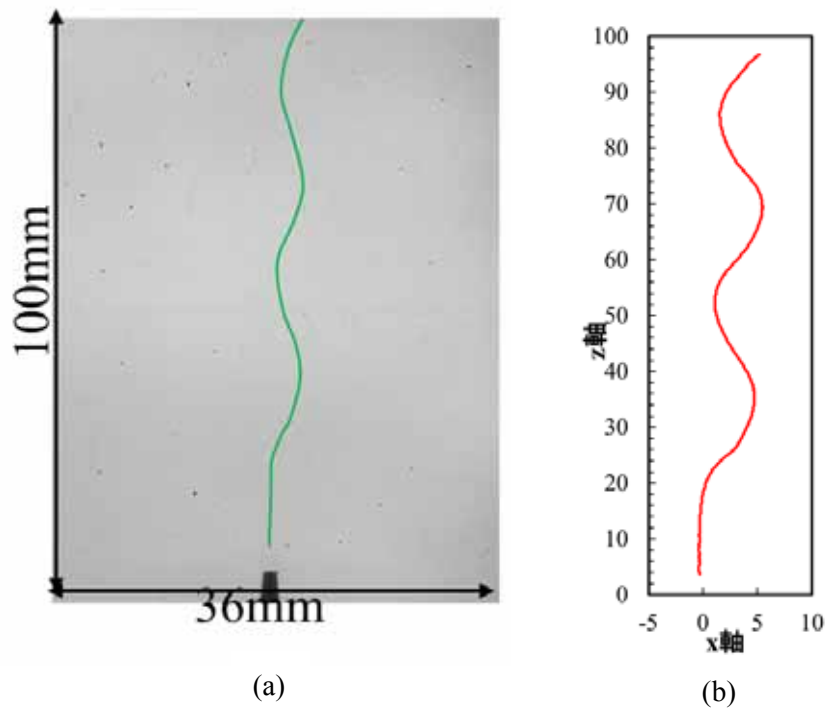


図 3-98 エアロゾルを含む場合の気泡の上昇軌道

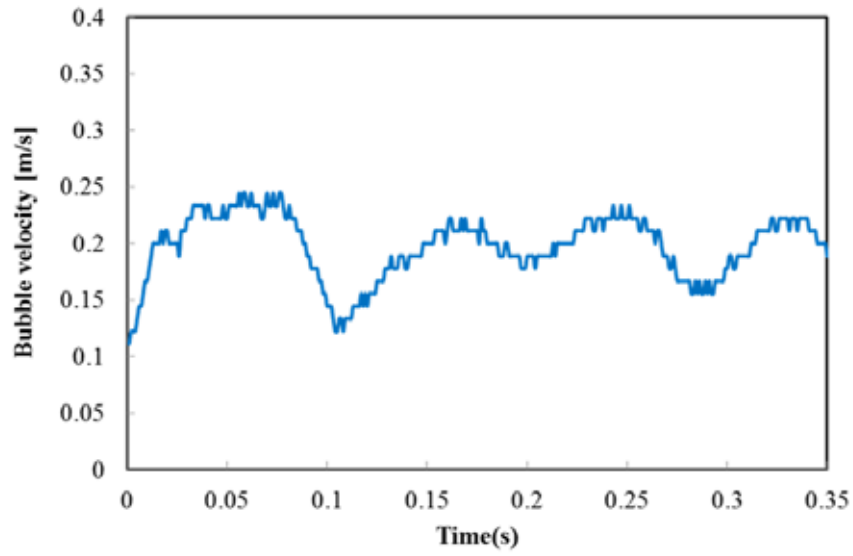


図 3-99 エアロゾルを含む場合の上昇気泡の高さ方向速度の時間変化

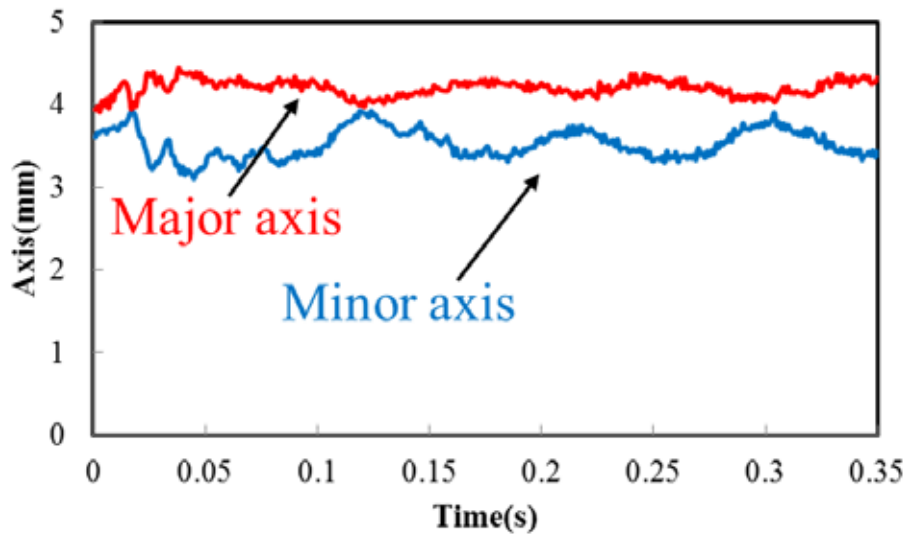


図 3-100 エアロゾルを含む場合の気泡の長軸および短軸の時間変化

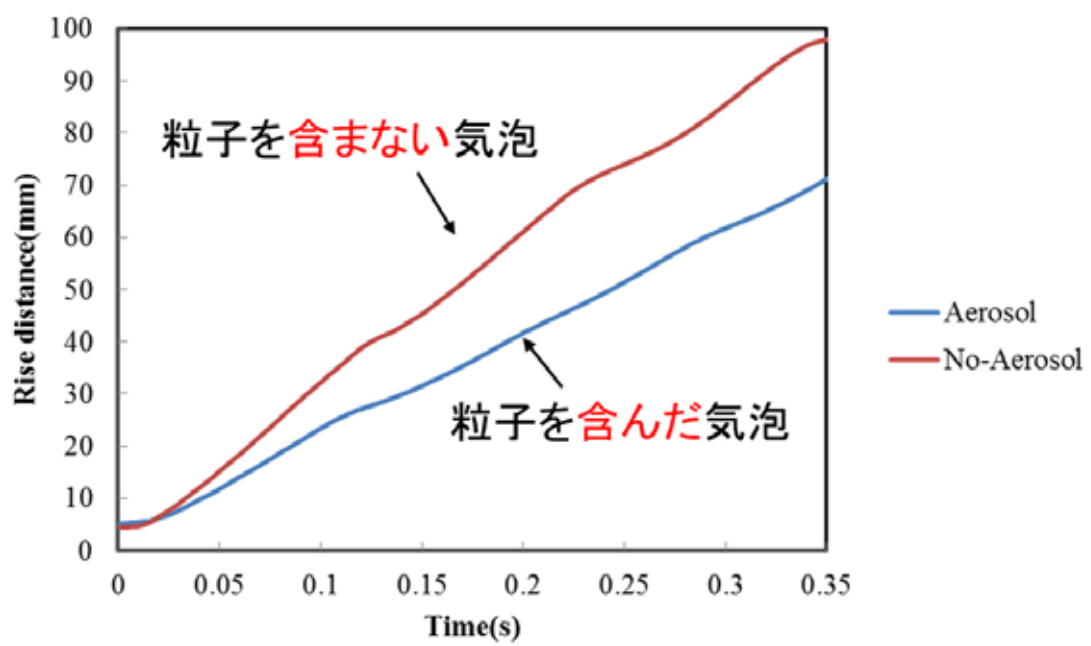


図 3-101 上昇気泡位置の比較

3.3.4 水面における気泡，エントレインメント液滴およびエアロゾル挙動

水面における気泡の破裂およびエントレインメント液滴の生成，エアロゾルの再飛散を可視化した。

得られた試験データを整理し，図 3-84 における水面で気液およびエアロゾル挙動について述べる。水中から上昇してきた気泡は，図 3-102 に示すように水面で破裂し，その衝撃でエントレインメント液滴が発生，気泡中に含まれていたエアロゾル粒子が飛散すると考えられる。

そこでまず，水面における気泡の破裂挙動を観察した。この時生成したエントレインメント液滴や飛散したエアロゾルの挙動は散乱光により観測できるようにレーザーを側方から照射した。この一例を図 3-103 に示す。図中では直径 1 mm 未満のエントレインメント液滴が水面から発生して飛び出している。その周囲に気泡中に含まれていたエアロゾル粒子が飛散している。図 3-104 に気泡の水面到達からエントレインメント液滴生成後までの挙動を時系列に並べて示す。水面に到達した気泡は破裂して，0.033 s 後にはエントレインメント液滴が生成している。また，エントレインメント液滴にはエアロゾル粒子が含まれている様子も観察された。同時に微小なエントレインメント液滴またはエアロゾルが空中に飛散している様子が確認できる。

また，水中の上昇気泡に着目した結果を図 3-105 に示す。上昇してきた気泡は水面に到達するとすぐさま破裂するのではなく，バウンドして押しつぶされるように扁平形状になった後破裂する様子が観察された。

図 3-106 に水面に到達した後の気泡およびエアロゾル挙動を観察した結果を示す。水面に複数の気泡が浮かび，その界面にエアロゾル粒子が付着している様子が確認できる。気泡同士は次第に合一し，一つの大きな気泡となった後破裂した。この時界面にエアロゾル粒子が滞留していることから，界面における表面張力が変化し，気泡が破裂しにくくなっている可能性が考えられる。

スクラビングにおけるエアロゾル除去効果に大きく影響するパラメータに関しては，上記にて得られた知見より，水面からの気泡破裂にともなう雰囲気中へのエアロゾルの放出が観察されたことから，MELCOR のモデル中に含まれていないエントレインメントの効果を検討する必要が見出された。

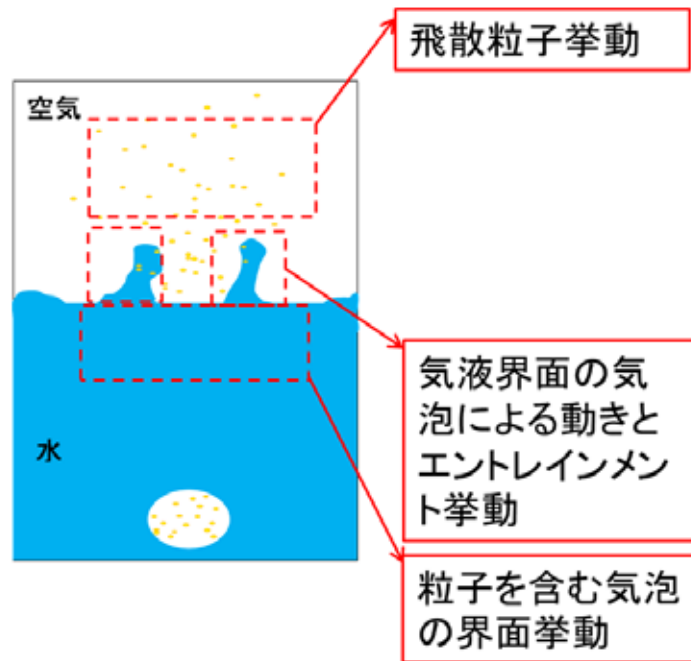


図 3-102 水面近傍の気液およびエアロゾル挙動の概念図

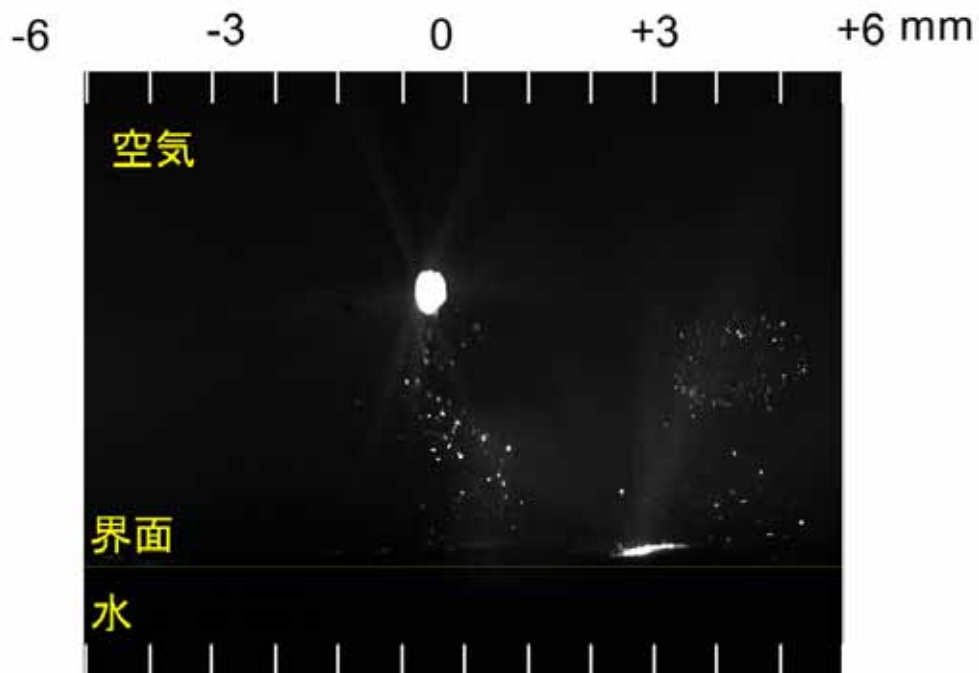


図 3-103 エントレインメント液滴撮影時の静止面寸法および可視化例

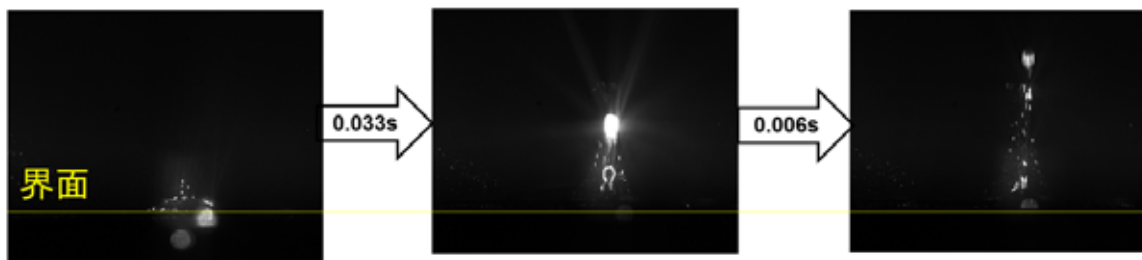


図 3-104 気泡破裂からエントレインメント液滴発生までの挙動

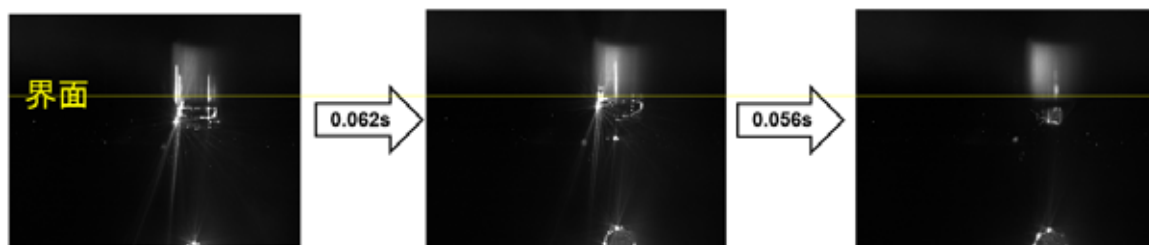


図 3-105 水面に到達する気泡挙動

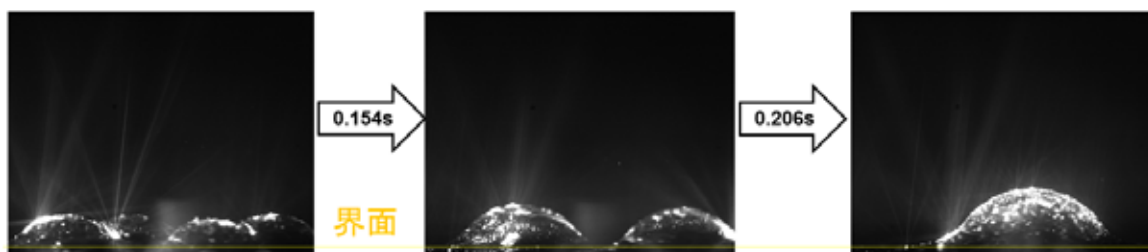


図 3-106 水面における気泡および界面に付着したエアロゾル挙動

3.3.5 慣性衝突の DF に関する過去文献，解析結果および試験結果の比較

3.2.10 で得られた慣性衝突の DF について，過去文献を調査により類似の体系において得られる α_i の値を取得した．図 3-82 にこの結果を追加したグラフを図 3-107 に示す．なおこの調査結果は慣性衝突に関する MELCOR リファレンスマニュアル [1]にて慣性衝突の参照元である SPARC-90 [3]，さらにその参照元である Fuches [4]が参照していた結果である．

Ranz & Wong's experiment [5]はストークス数が 0.06 から 1 の範囲における結果であり，本試験での結果と範囲が異なる．

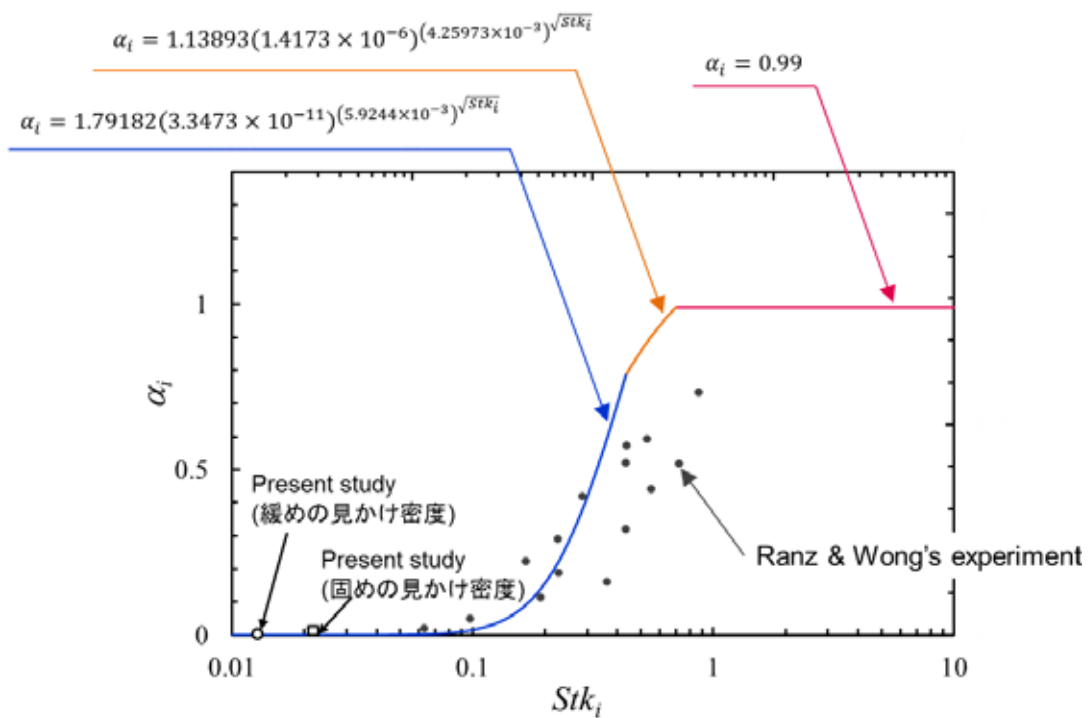


図 3-107 α_i についての感度解析

3.3.6 まとめ

試験データの整理を行い，以下の知見を得た

- スクラビング解析モデルの妥当性確認のため，単一気泡上昇試験と MELCOR の流動モデルと比較し，流動挙動の違いを検討した．
- 二相流動とエアロゾル挙動に関して，エアロゾル除去効果に対するパラメータの一つであるノズル内気相流速の影響について検討した．
- 過去文献，解析結果および試験結果について比較を行うことで，MELCOR の解析範囲に対して本試験のストークス数範囲は低い条件であることを確認した．
- 本実験装置により，プールスクラビング時における気泡およびエアロゾル挙動の実験データ取得が出来ることを確認した．

文献目録

- [1] MELCOR Computer code manuals(1.8.5), NUREG/CR-6119.
- [2] 南 茂夫, 科学計測のための波形データ処理, CQ 出版社, 1986.
- [3] P. C. Owczarski, “SPARC-90: A code for calculation fission product capture in supression pools,” NUREG/CR--5765, 1991.
- [4] N. A. Fuches, The mechanics of aerosols, Pergamon Press, 1964.
- [5] W. E. Ranz , J. B. Wong, “Impaction of dust and smoke particles,” Ind. Eng. Chem., 1952.
- [6] M. E. Berzal, M. J. M. Crespo, M. Swiderska-Kowaiczuk, M. M. Esougares , J. L. Jimenez, “State-of-the-art review on fission products aerosol pool scrubbing under severe accident conditions,” EUR 16241, 1995.

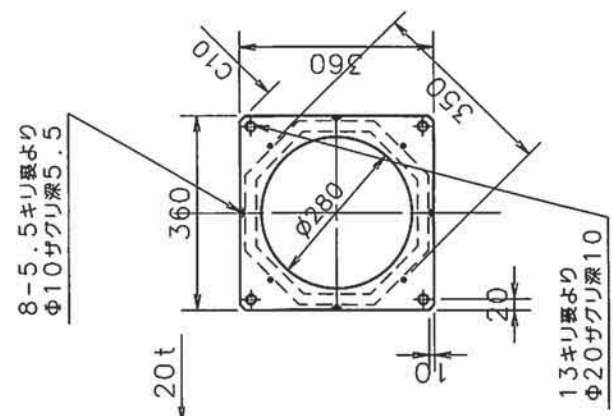
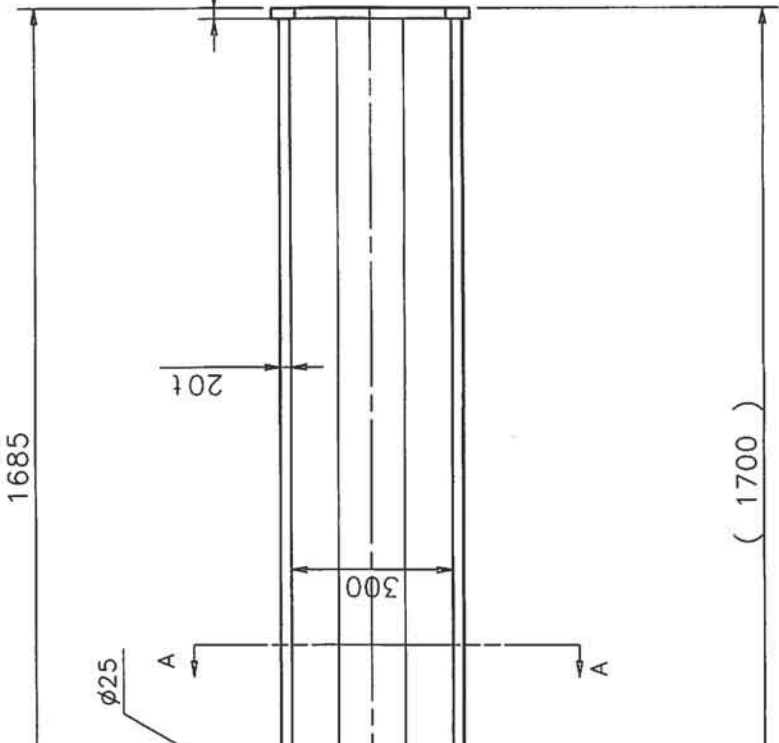
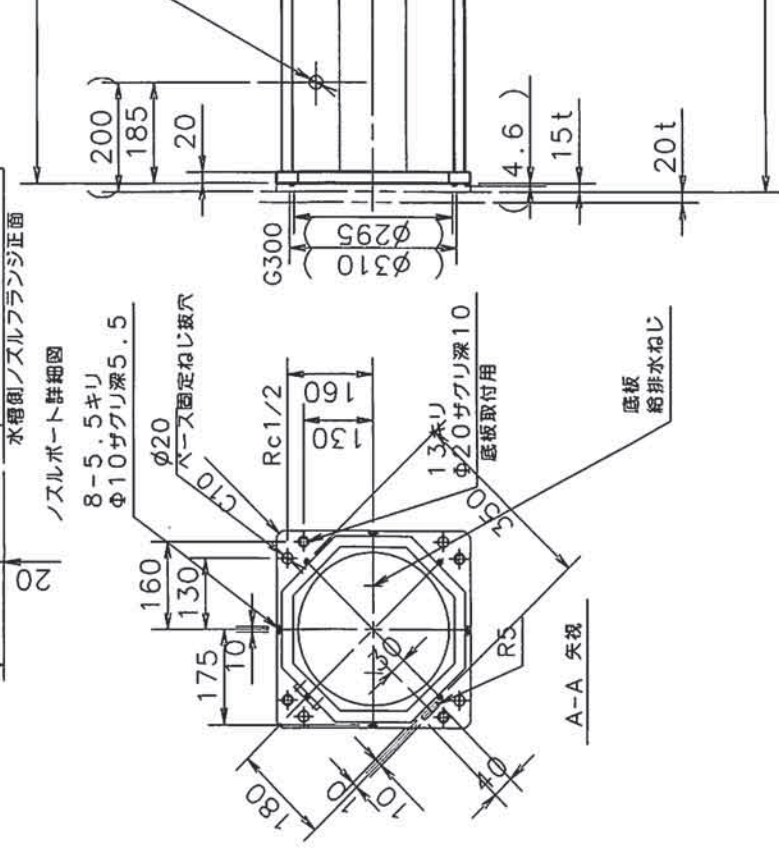
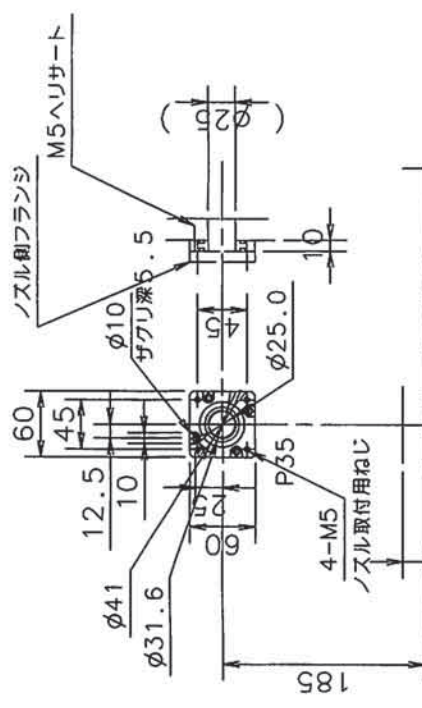
付録：装置図面

- A. 試験部容器
- B. 気泡注入ノズル
- C. 気相供給系
- D. エアロゾル注入部
- E. 混合部
- F. 注入弁システム
- G. エアロゾル供給系
- H. エアロゾル計測系
- I. 凝縮器
- J. 排水タンク

A. 試験部容器

不 能 付 け

許容寸法公差	
寸法区分	許容差
L ≤ 6	±0.1
6 < L ≤ 30	±0.2
30 < L ≤ 120	±0.3
120 < L ≤ 400	±0.5

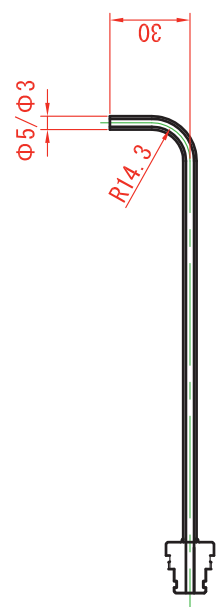
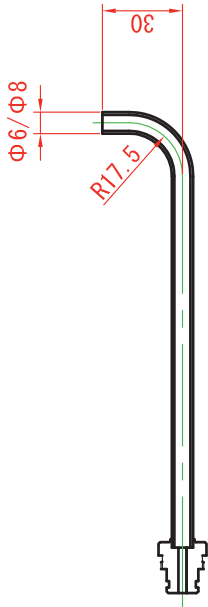
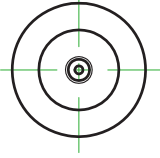
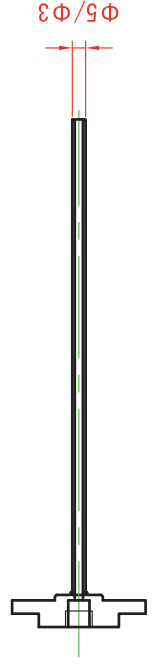
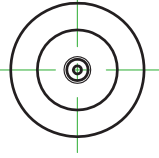
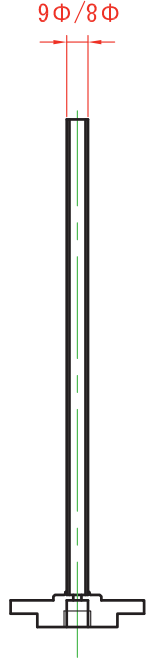
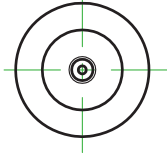
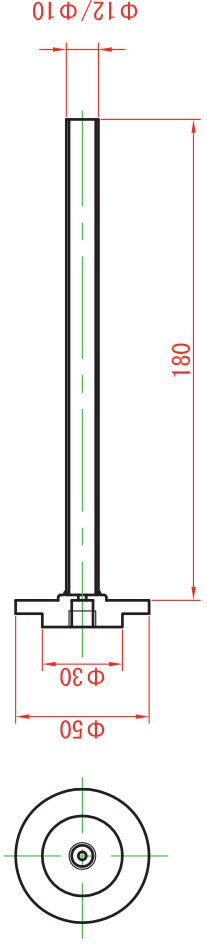
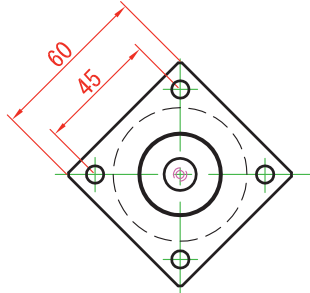
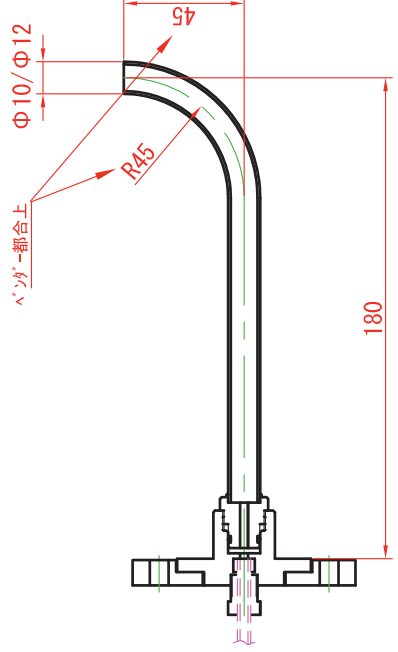


八角水槽本体		*2014.12.22	
種別	PC	図番	YKSCR14-S01-02
技術士事務所 京藤設計			

上側フランジに径ぐり穴追加
設計 京藤

B. 気泡注入ノズル

真数	番号	部品名	材質・仕様	備考
	A			
B	1			

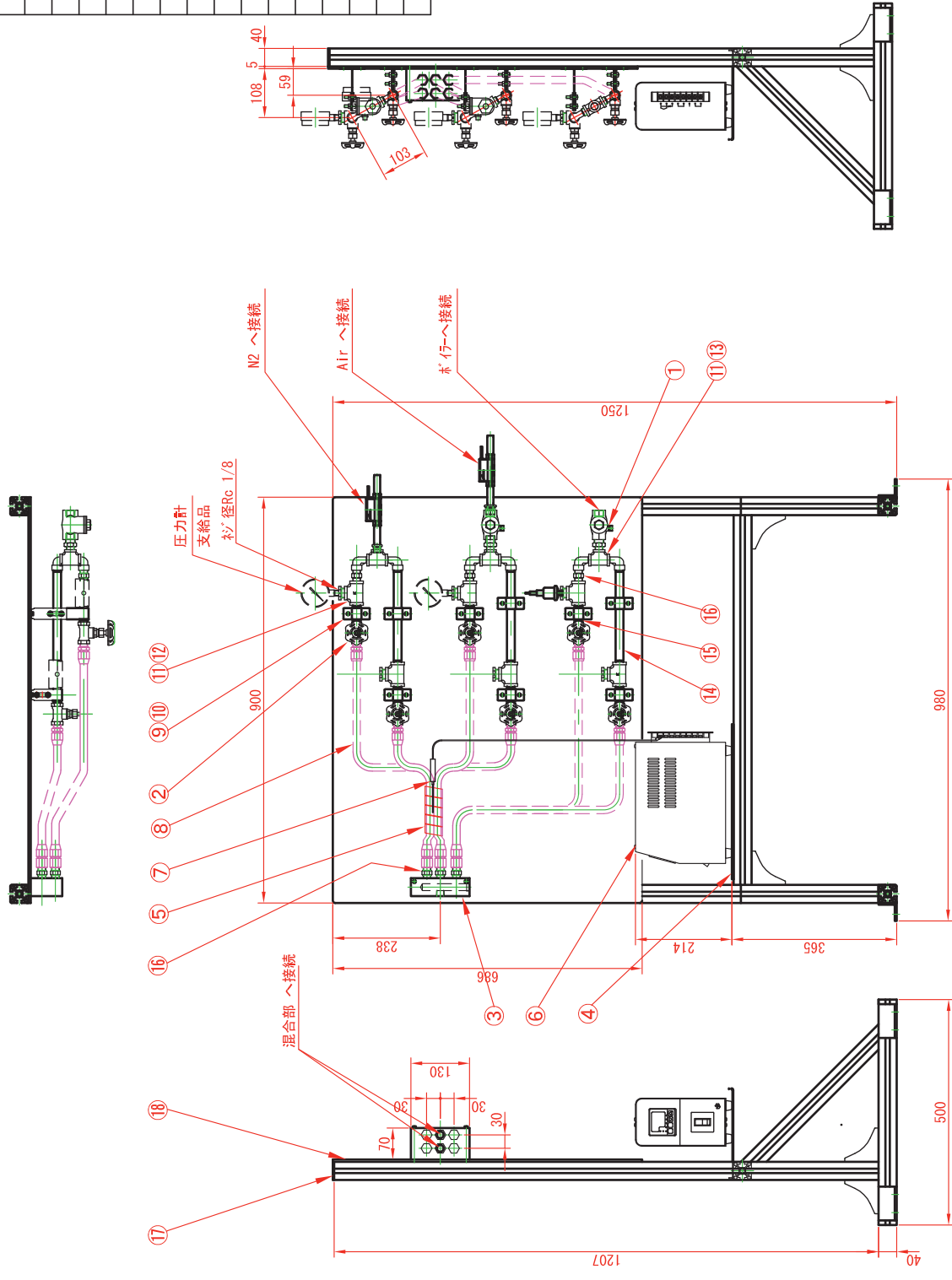


設計	和田	14.11.21	三角法	製図縮尺	1:2	ノズル
審査						ハンガ-部会上
承認						EP3-1794

株式会社イーピーテック

C. 気相供給系

員数	番号		部品名	材質・仕様	備考
	B	A			
	2	①	チツネパイル*	SCS13A・他	ミタ THKB15A
	6	②	グロブパイル*	SCS13A・他	ミタ GBUL10A
	1	③	ユニボルト	SUS304	EP4-0954①
	1	④	コントローラ	SUS304	EP3-1795①
	1	⑤	リレーヒーター	100V, 200W, L=2m	ミタ MRBH2
	1	⑥	温度コントローラ	100V, 20A	ミタ MTC5
	1	⑦	温度センサー	K型, Φ1.6	ミタ MSND1.6-50
	6	⑧	リレーケーブル	SUS304, 10A	ミタ HREJF10A-1~2m
	9	⑨	立配管バンド	SUS304	ミタ KENDS10A
	9	⑩	T字型足	SUS304	ミタ TGASIS及び3
	9	⑪	チズ	SCS13A	ミタ SUJPT10A
	6	⑫	ブッシング*	SCS13A, Rc3/8・1/8変換	ミタ SUJPB13
	6	⑬	ス・オールド*	SCS13A	ミタ SUJPEL10A
	3	⑭	両長コイル(短)	SUS304	ミタ SUJNPR10A-50
	3	⑮	両長コイル(長)	SUS304	ミタ SUJPI0A-215
	8	⑯	鋼管用コイル	SCS13A	ミタ SUCNR10A
	1	⑰	架台	AL40mm柱・他	
	1	⑱	パッド	A L	EP3-1796①



設計	和田	14: 8: 7	三	製図縮尺	1:10	気相供給系
審査			角			
承認			法			

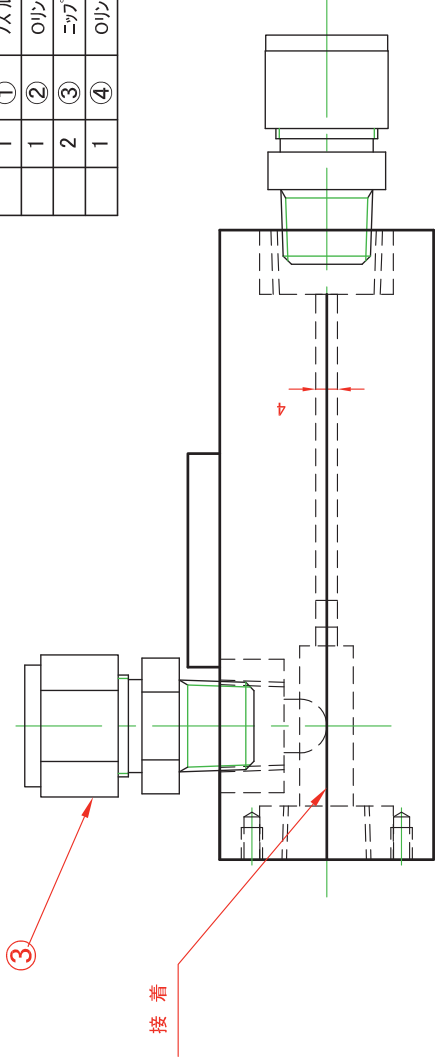
株式会社イーピーテック EP3-1764

記号	来歴	年・月・日	訂正	製番
	全面的変更			04631

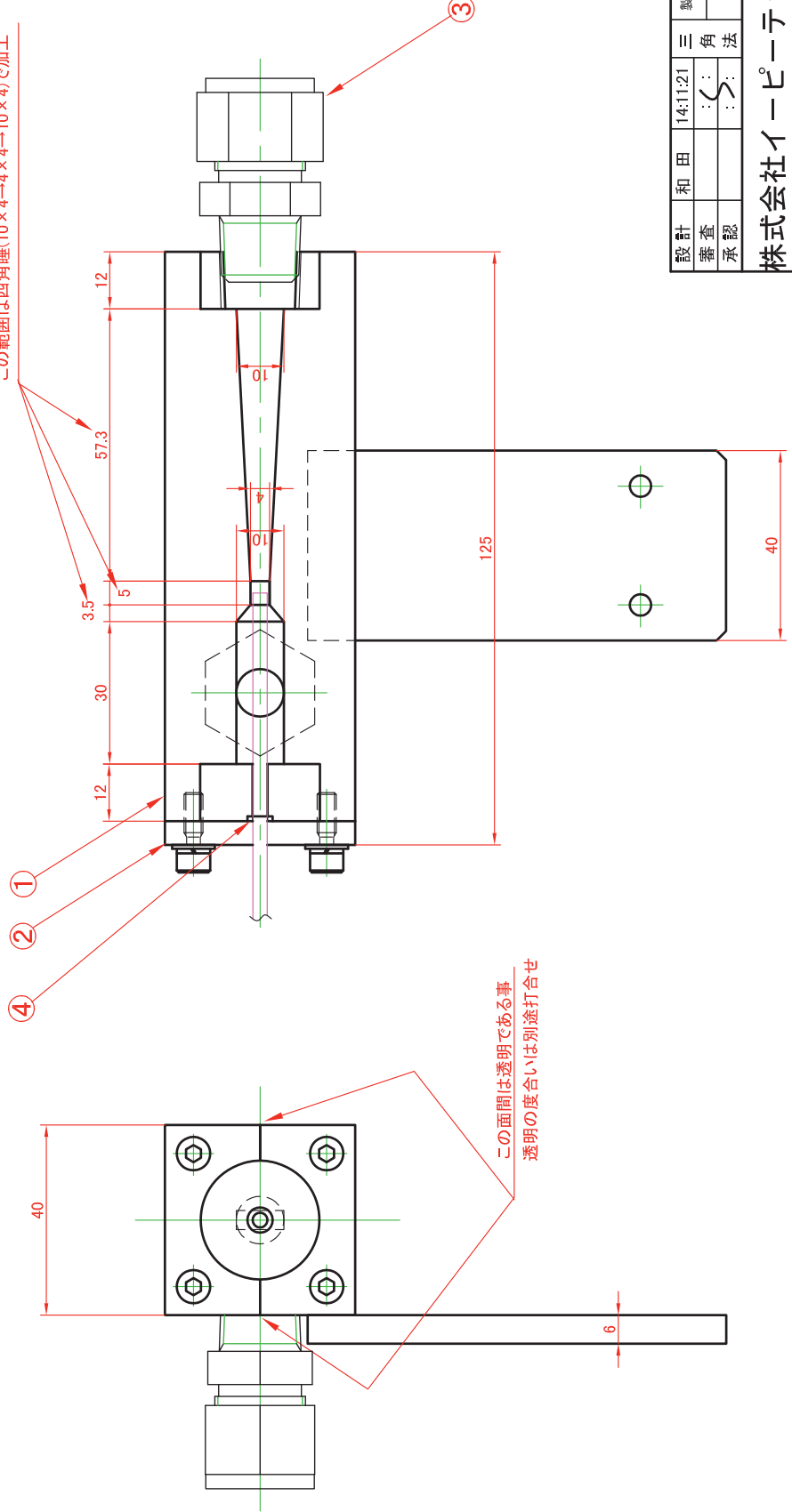
D. エアロゾル注入部

記号	来歴	年・月・日	訂正	製番
				04631

員数		番号	部品名	材質・仕様	備考
B	A	①	ノズル	ポリカーボネート	EP3-1772①
		②	オリング座	ポリカーボネート	EP3-1772②
		③	コップル(Φ12用)	SUS316	ミクスSKTGK12-3
		④	オリング	シリコン50°	S3



この範囲は四角睡(10×4→4×4→10×4)で加工



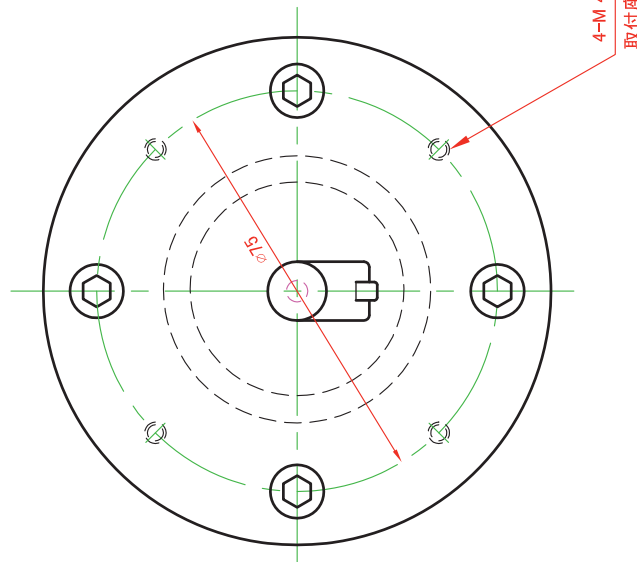
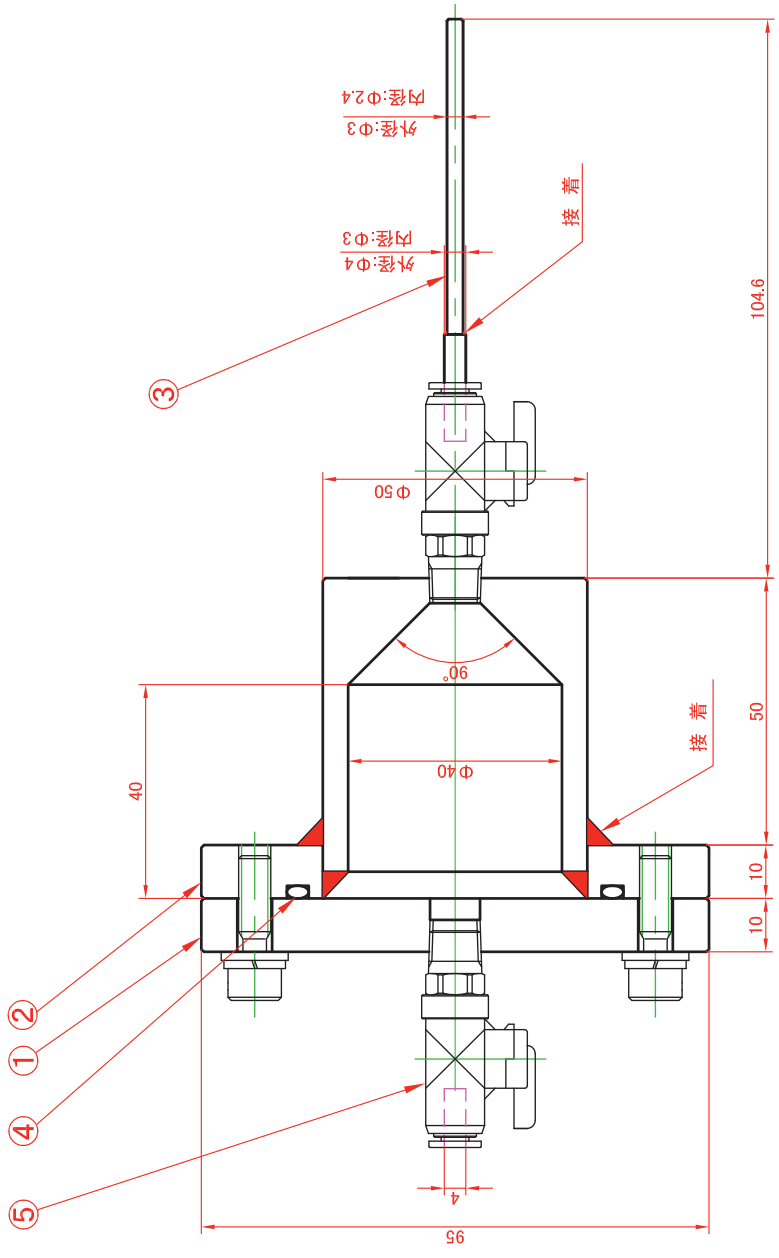
設計	和田	14.11.21	三	製図縮尺	1:1	ノズル
審査			角			
承認			法			カビンガハブル実験装置部品

株式会社イーピーテック EP3-1789

E. 混合部

記号	来歴	年・月・日	訂正	製番
				04631

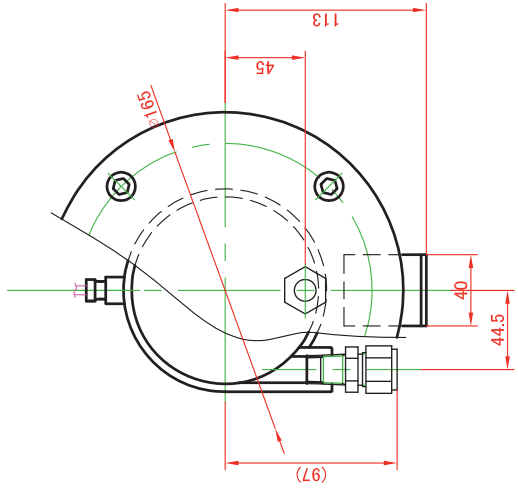
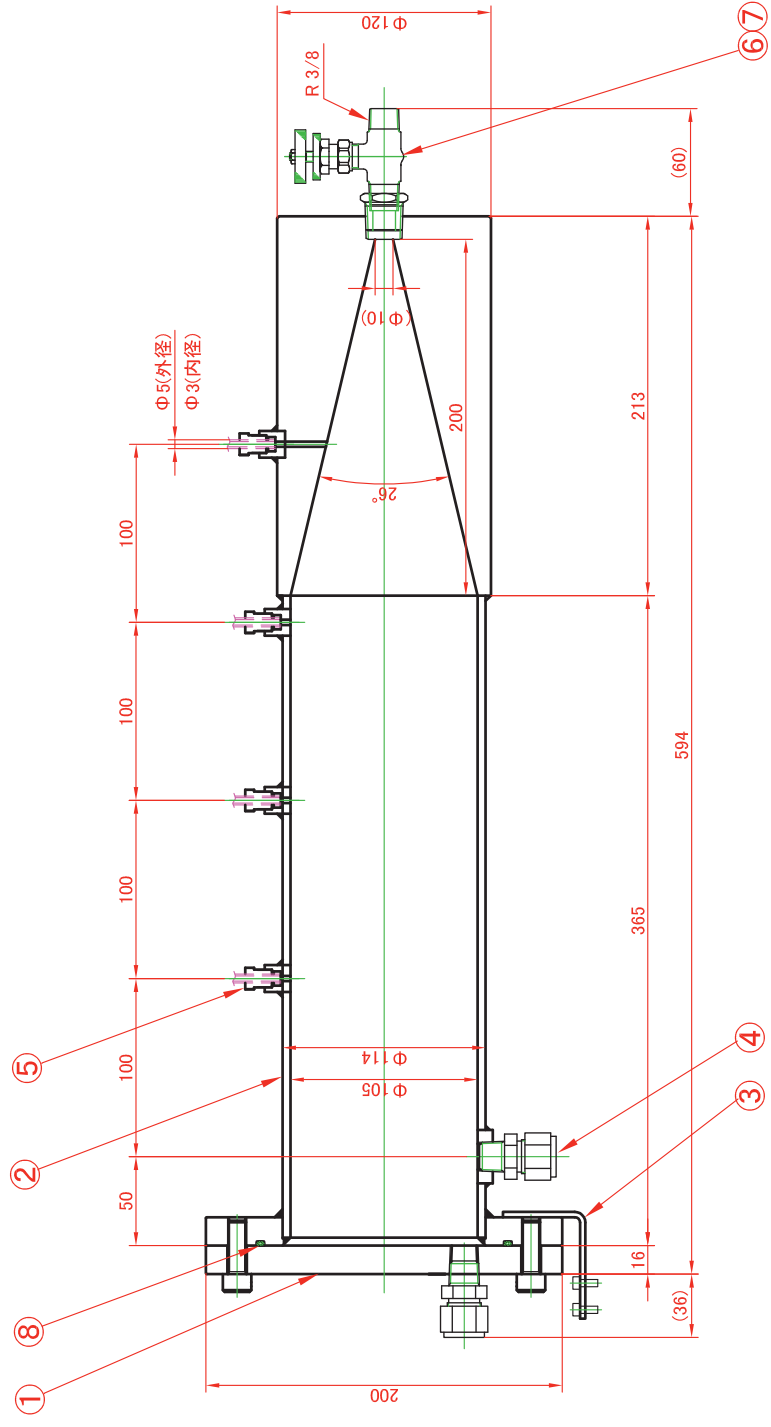
員数		番号	部品名	材質・仕様	備考
B	A				
	1	①	容器蓋	ポリカーボネート	
	1	②	容器	ポリカーボネート	
	1	③	ノズル	SUS304	
	1	④	ボールバルブ	ポリアセチレン・他	
					ミスミBVUS4



設計	和田	14.11.21	三	製図縮尺	1:1	粉体タンク
審査			角			気相・エアノズル注入部品
承認			法			

株式会社イーピーテック EP3-1788

員数		番号	部品名	材質・仕様	備考
B	A				
	1	①	容器蓋	ホリカーホネット	EP3-1773①
	1	②	容器	ホリカーホネット	EP3-1773②
	1	③	取付具	SUS304	EP*****
	2	④	ニップル(Φ12用)	SUS316	ミズSKTGK12-3
	4	⑤	ニップル(Φ5用)	ホリカーホネット・他	東京理器機器減液ノズル
	1	⑥	ニードルバルブ	SUS304・他	ミズNBPPS33
	1	⑦	ブッシング	SUS13A	ミズSUTPB34
	1	⑧	Oリング	ハイトン	S 140



設計	和田	14.11.21	三	製図縮尺	1:3	サイロシステム
審査			角			スクラビングバル実験装置部品
承認			法			

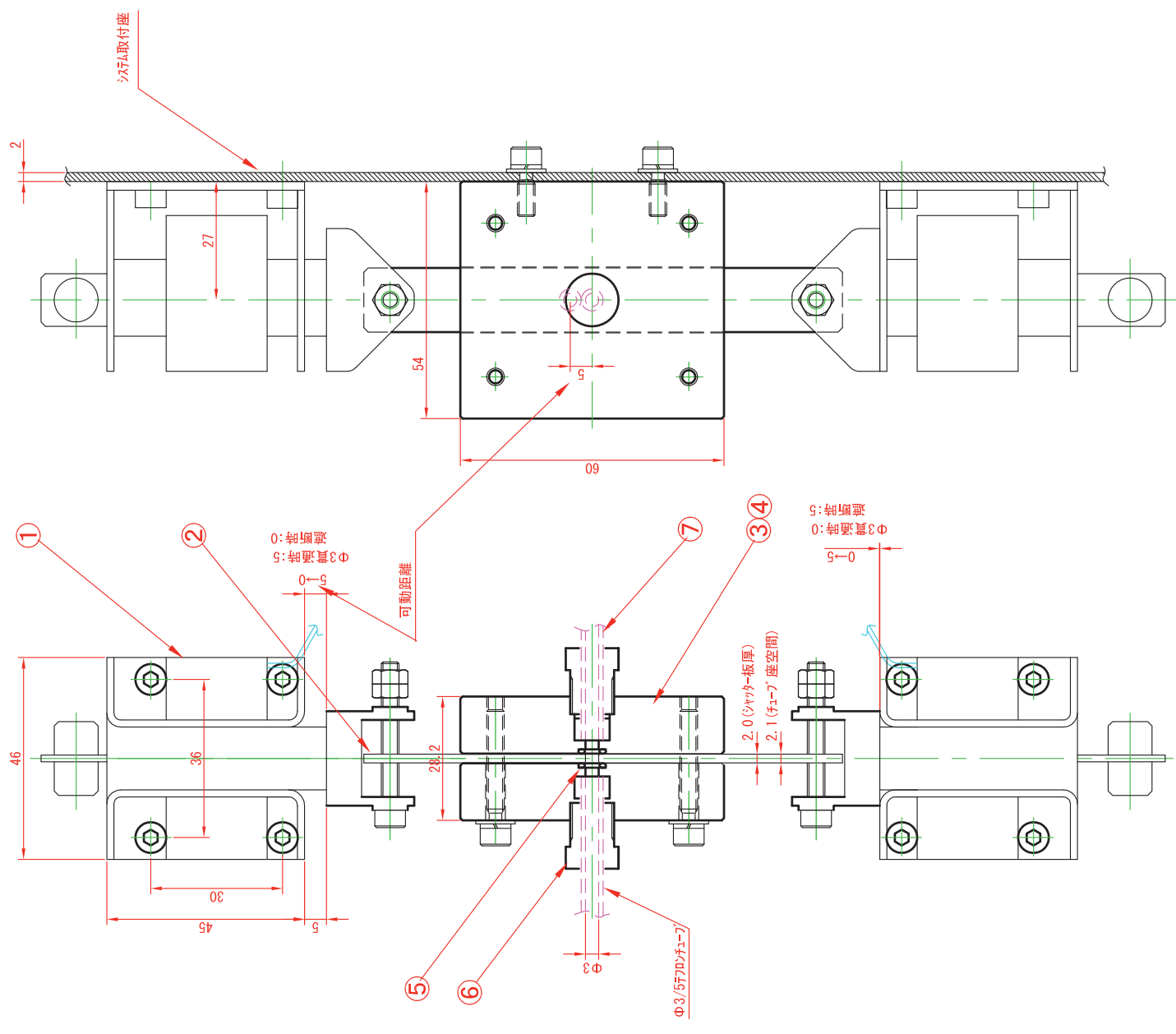
株式会社イーピーテック
EP3-1790

記号	来歴	年・月・日	訂正	製番
				04631

F. 注入弁システム

記号	来歴	年月日	訂正	製番
				04631

真数	番号	部品名	材質・仕様	備考
B	2	リライド	吸引材:0.8N, スリット:10mm	国際電業機SA-21
A	1	仕切り板	アクリル	EP3-1779③
	1	フェープ 接続板1	ホリカーホート	EP3-1779①
	1	フェープ 接続板2	ホリカーホート	EP3-1779②
	2	01ソグ	シリコン, 硬度:50°	S 4
	1	コア	ホリカーホート・他	東京理科大学機械液加工ラボ
	1	フェープ	テフロ (PFA, 透明)	ハビテックΦ3/Φ5



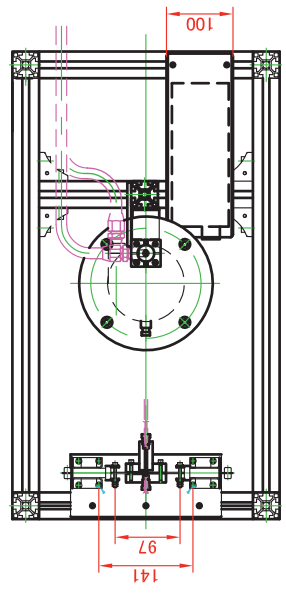
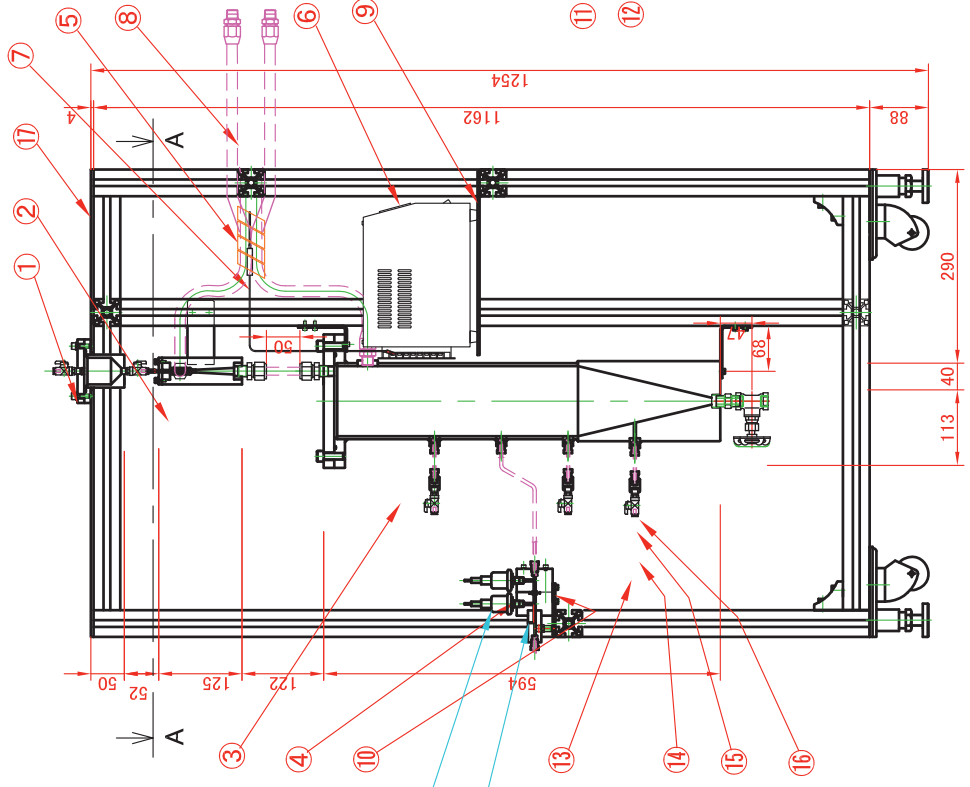
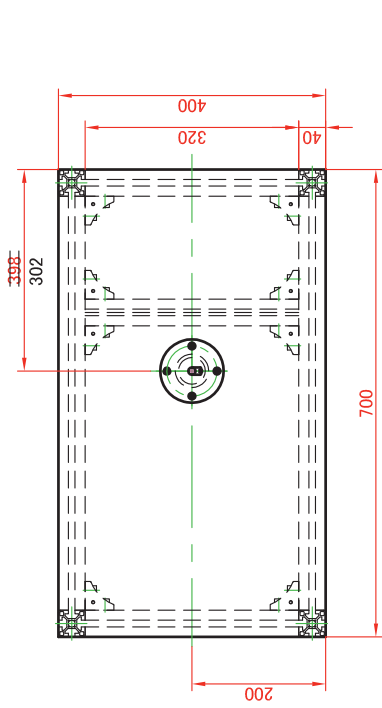
設計	和田	14.11.21	三	製図縮尺	1:1	注入弁システム
審査			角			ハビテック実装部品
承認			法			

株式会社イーピーテック **EP3-1787**

G. エアロゾル供給系

記号	来歴	年月日	訂正	製番
△	全面的変更	14.10.8	和田	04631

員数	番号		部品名	材質・仕様	備考
	B	A			
	1	①	粉体ホウ	ホリカーホ-ネット・他	EP3-1788A
	1	②	ノズル	ホリカーホ-ネット・他	EP3-1789A
	1	③	サイフォン	ホリカーホ-ネット・他	EP3-1790A
	1	④	注入弁システム	ホリカーホ-ネット・他	EP3-1787A
	1	⑤	リボソーター	100v,200w,L=2m	ミシ MRBH2
	1	⑥	温度コントローラ	100v,20A	ミシ MTCS
	1	⑦	温度センサー	K型, Φ1.6	ミシ MSND1.6-50
	2	⑧	フレキチューブ	SUS304,10A	ミシ HOEJF10A-1~2m
	1	⑨	コントローラ	SUS304	EP3-1795①
	1	⑩	ソケット	SUS304	EP3-1795②
	2	⑪	配管座	SUS304	ミシ SGPLKSA
	4	⑫	配管押え	SUS304	EP3-1795④
	3	⑬	ボールバルブ	PBT、他、Φ4用	ミシ BVUSA
	3	⑭	ユニオン継手	ホリカーホ-ネット	EP4-0953①
	3	⑮	チューブ	770φ, Φ3/Φ5	半透明チューブ
	9	⑯	液カク用コップ	ホリカーホ-ネット・他	東京理化器械F-50
	1	⑰	架台	AL40mm柱・他	EP3-1800A



断面 A-A

テジナル圧力計
Φ1.1 穴

設計	和田	14.8.7	三	製図縮尺	1:8	気相・エマル注入部
審査			角			
承認			法			

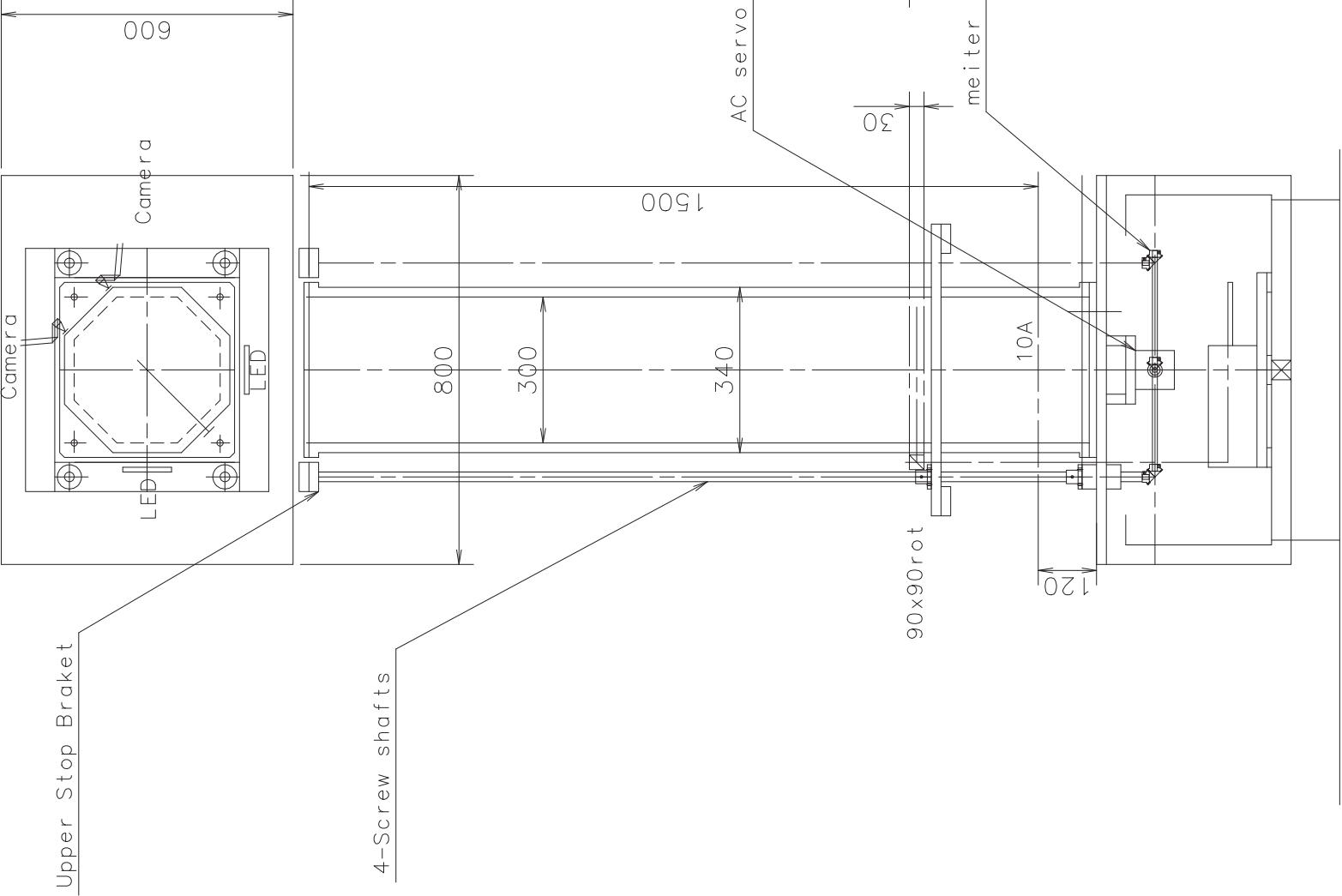
株式会社イーピーテック

EP3-1766

H. エアロゾル計測系

寸法区分	許容差
L ≤ 6	±0.1
6 < L ≤ 30	±0.2
30 < L ≤ 120	±0.3
120 < L ≤ 400	±0.5

普通寸法公業



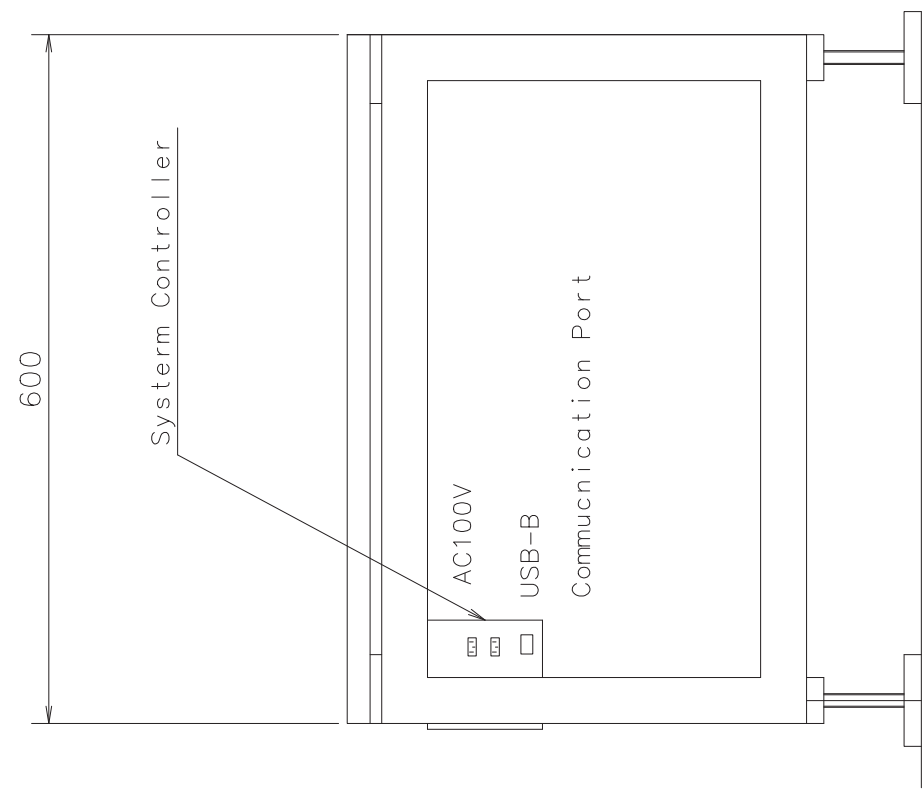
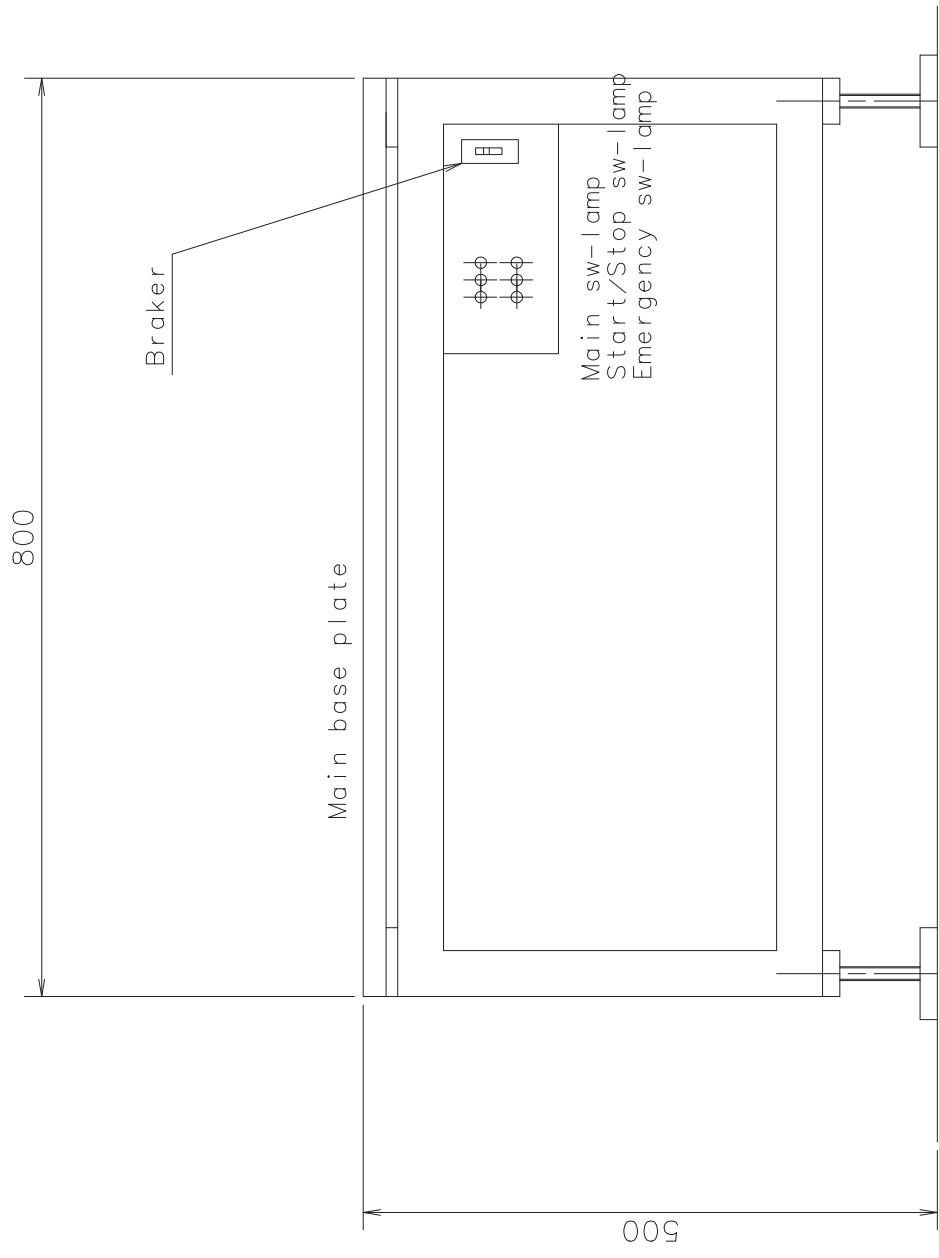
材質	-
表面処理	-
図番	YKSCR14-S04-01
試験部上下動システム	2014.10.16

設計 京藤

技術士事務所 京藤設計

普通寸法公差

寸法区分	許容差
L ≤ 6	±0.1
6 < L ≤ 30	±0.2
30 < L ≤ 120	±0.3
120 < L ≤ 400	±0.5



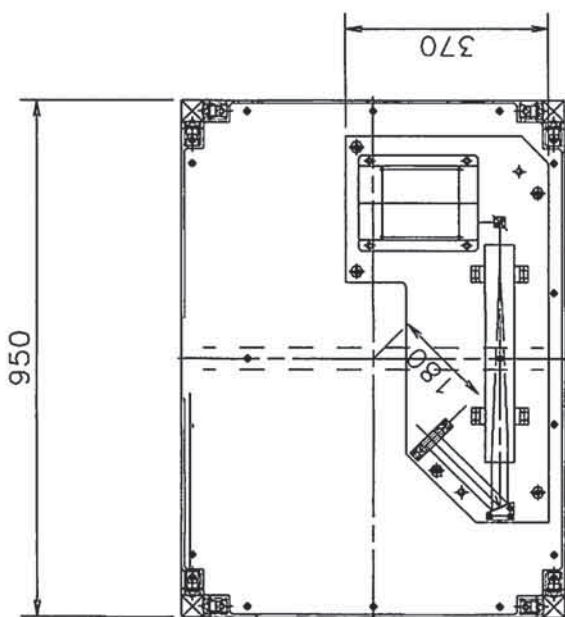
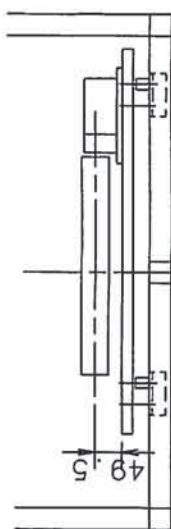
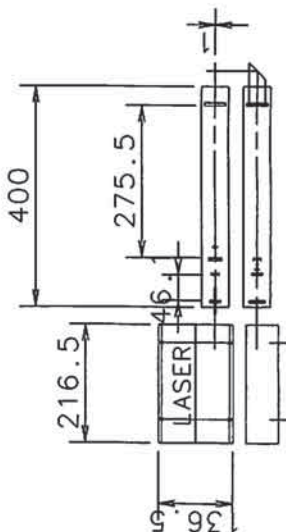
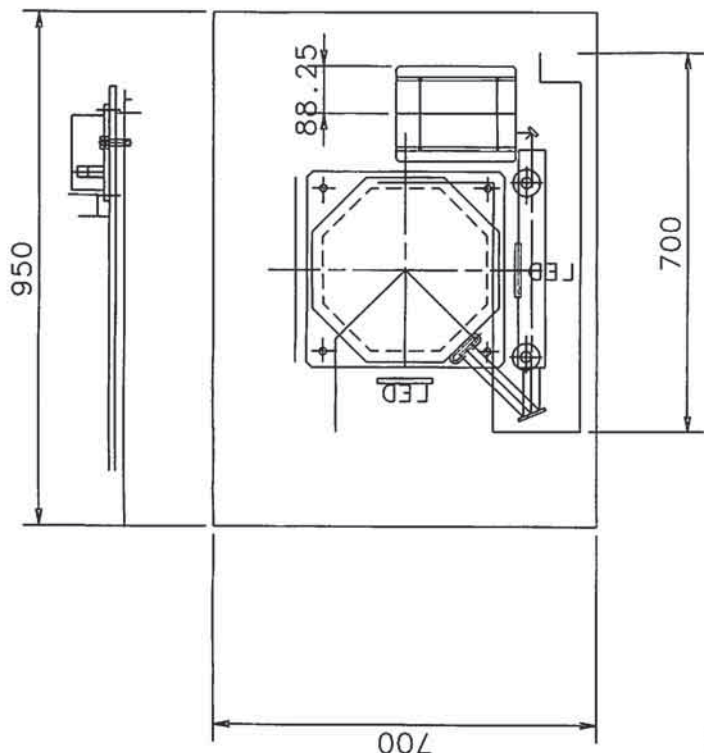
試験部架台		°2014.10.16
材質	-	図番
表面処理	-	YKSCR14-S03-01

設計 京藤

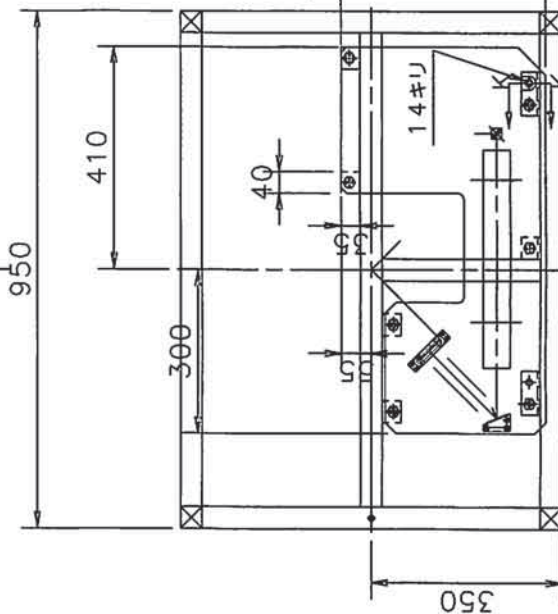
技術士事務所 京藤設計

久しハート株式会社

寸法区分	許容差
L ≤ 6	±0.1
6 < L ≤ 30	±0.2
30 < L ≤ 120	±0.3
120 < L ≤ 400	±0.5



スリールン鏡筒アルミフレーム方式



溶接対応構造

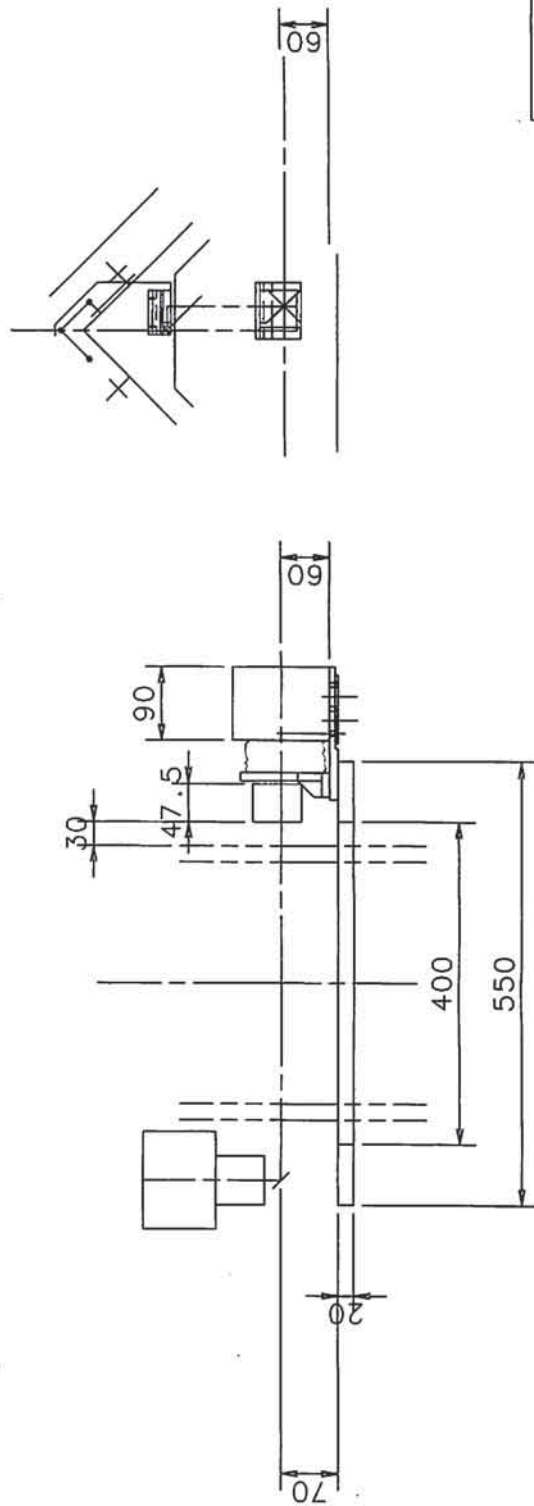
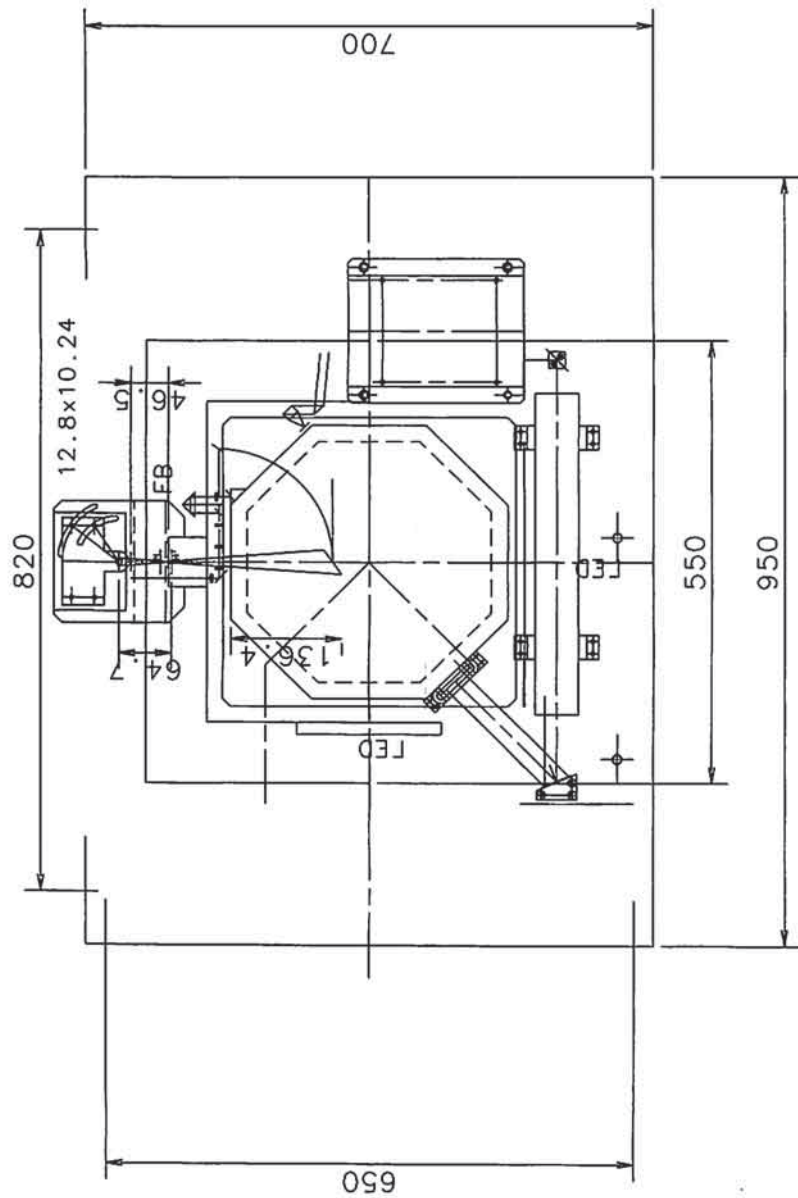
設計	PC	試験部八角水槽	2014.11.21
承認			
YKSCR14-S04-01		技術士事務所 京藤設計	

設計 京藤

▽ Ra1.6

③
上下動ベース部
光学系集

寸法区分	許容公差
L ≤ 6	±0.1
6 < L ≤ 30	±0.2
30 < L ≤ 120	±0.3
120 < L ≤ 400	±0.5



上下動ベース光学系 ・2014.12.09	
図番 A5052	図名 YKSCR14-S04-01

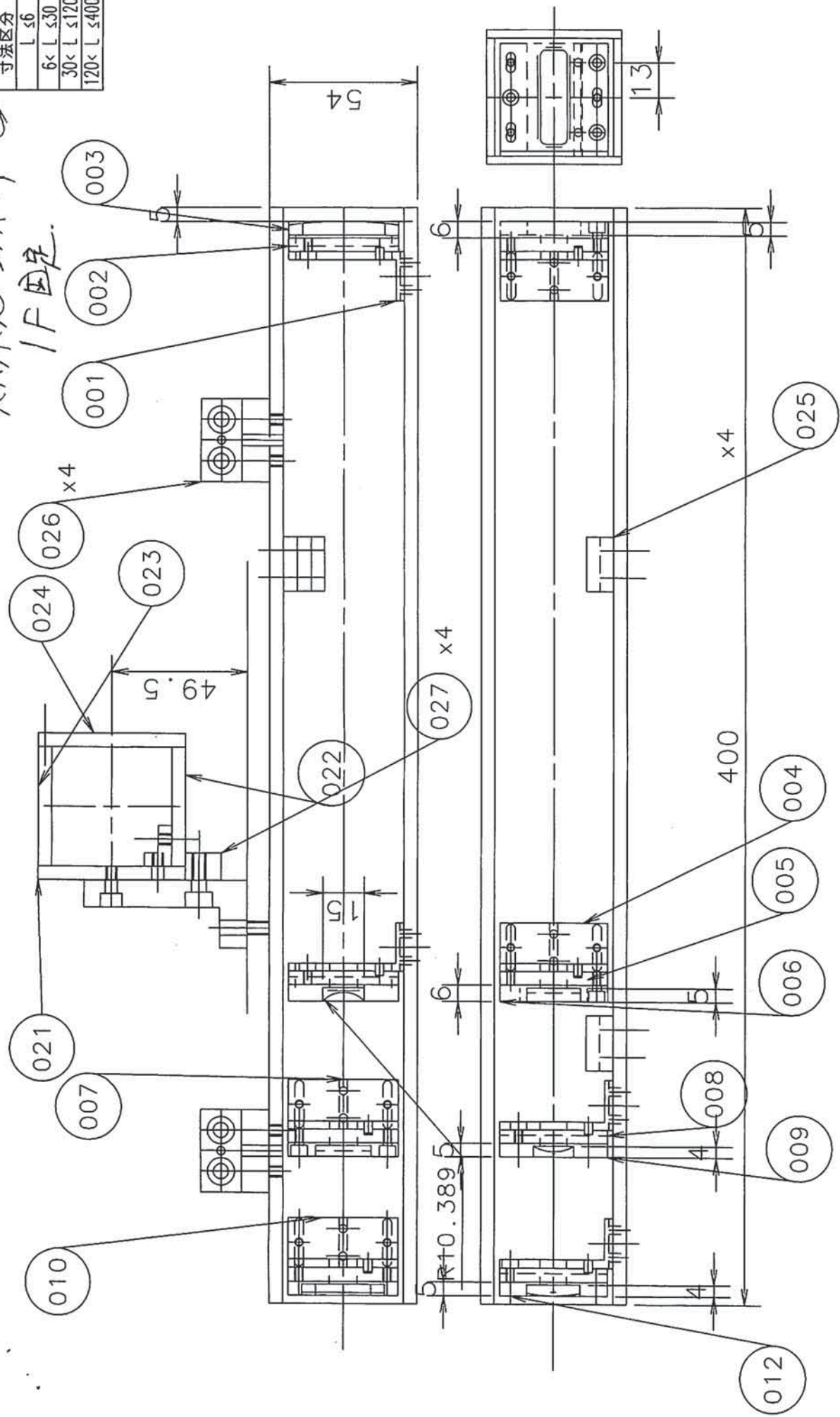
黒色アルマイト処理
設計 京藤

技術士事務所 京藤設計

別添図紙④
IF固定

普通寸法公差

寸法区分	許容差
L ≤ 6	±0.1
6 < L ≤ 30	±0.2
30 < L ≤ 120	±0.3
120 < L ≤ 400	±0.5



光学ビーム変換部
2014.11.10

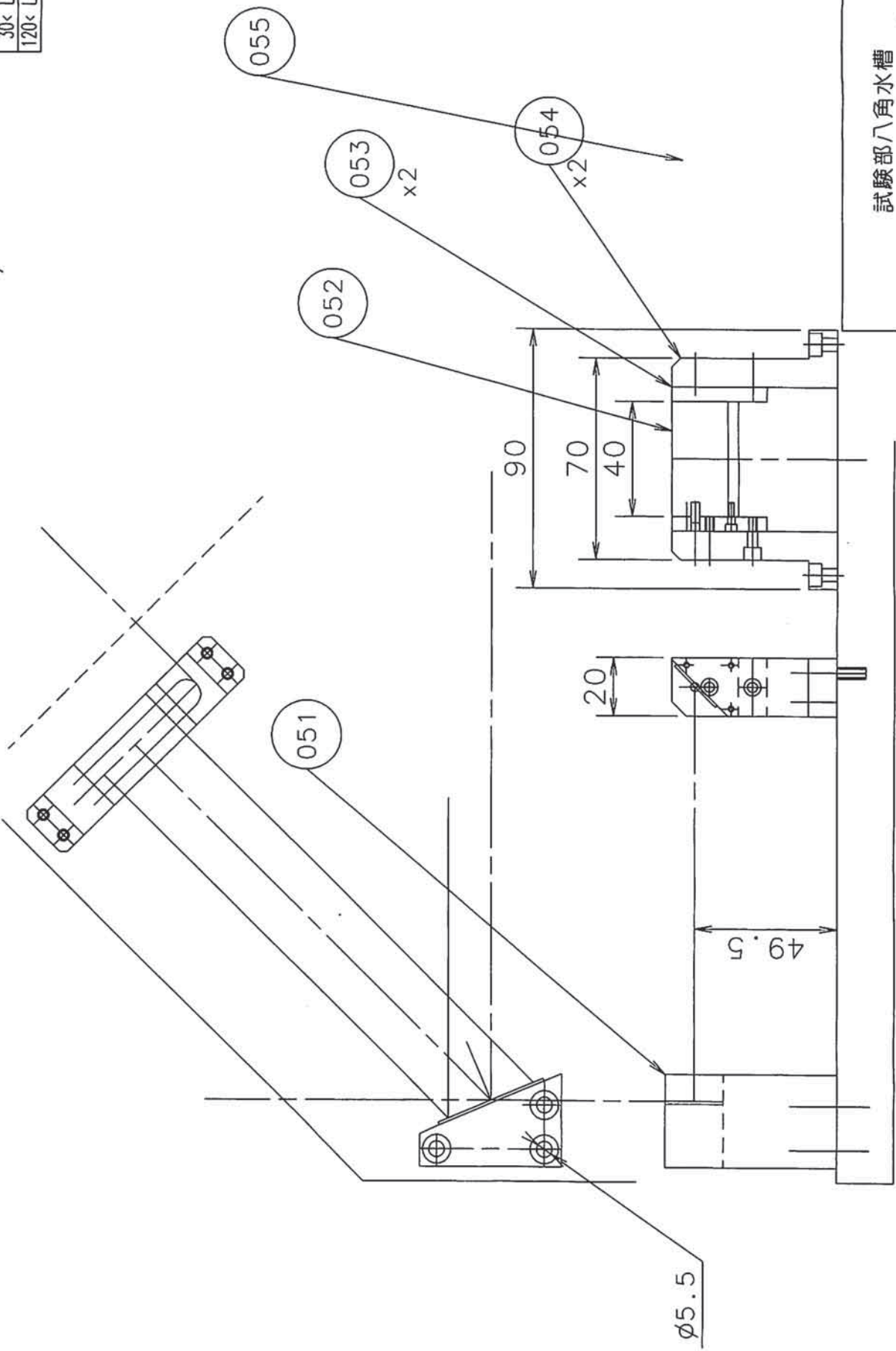
材質	A5052
表面処理	図番
SCR14OPT-000-01	

設計 京藤 技術士事務所 京藤設計

▽ Ra1.6

リフト光立上ゲ" 5" 部

普通寸法公差	
寸法区分	許容差
L ≤ 6	±0.1
6 < L ≤ 30	±0.2
30 < L ≤ 120	±0.3
120 < L ≤ 400	±0.5



試験部八角水槽

2014.11.10

材質 A5052

表面処理

図番 YKSCR14-S04-0C

黒アルマイト処理

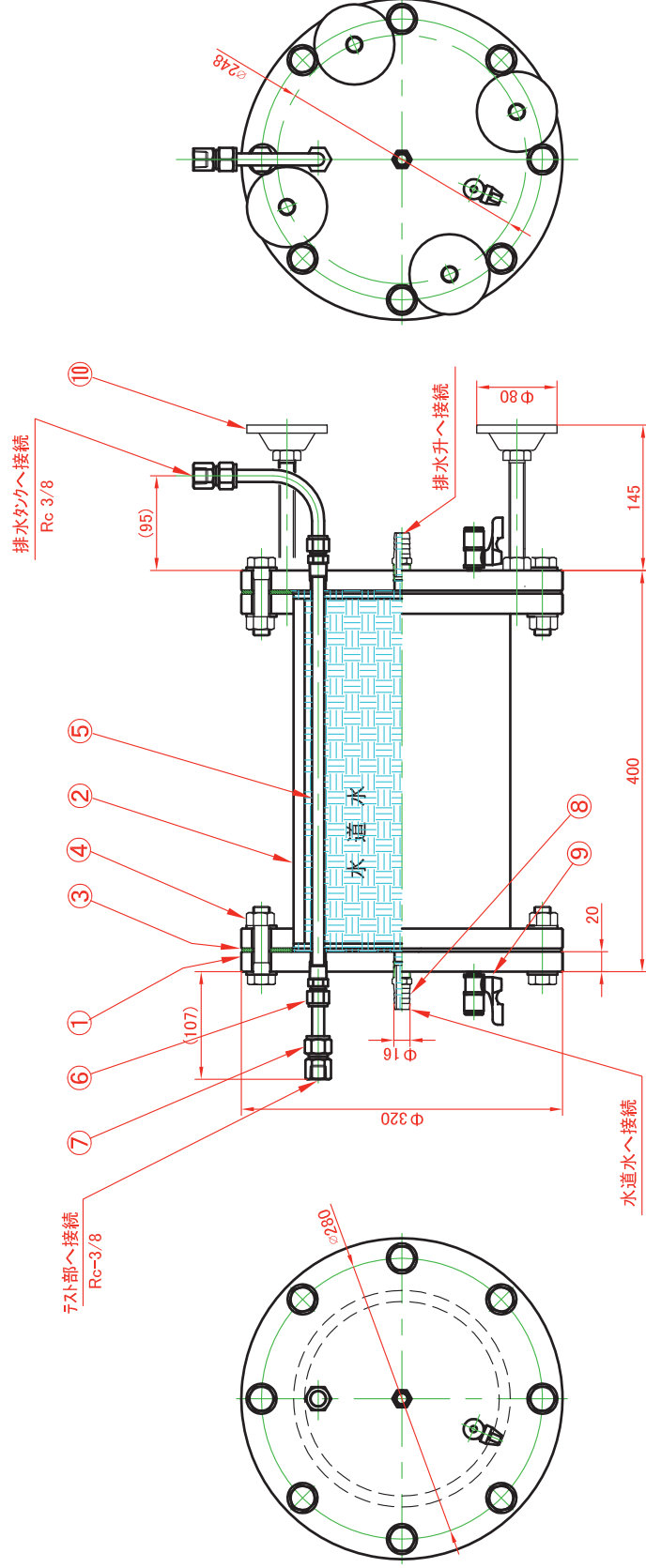
設計 京藤

技術士事務所 京藤設計

I. 凝縮器

記号	来歴	年月日	訂正	製番
				04631

員数		番号	部品名	材質・仕様	備考
B	A				
	4	①	フランジ	塩ビ、200A 5k	
	1	②	胴	塩ビ、200A VP管	
	2	③	ハッケン	EPDM・他、200A 5k	
	16	④	ボルト	塩ビ、M16	
	1	⑤	熱交換管	銅、Φ12×Φ10	
	2	⑥	メスユニオン継手	SUS316	メス SKUF12
	2	⑦	管用継手	SUS316	メス SKTGK12-3
	2	⑧	ホース用ニップル	SUS304	メス HOSNS153
	2	⑨	ドレンバルブ	黄銅・他	メス BBPC102-B
	4	⑩	アジャスタハット	SUS304,塩ビゴム	メス FJGMS16-180-S



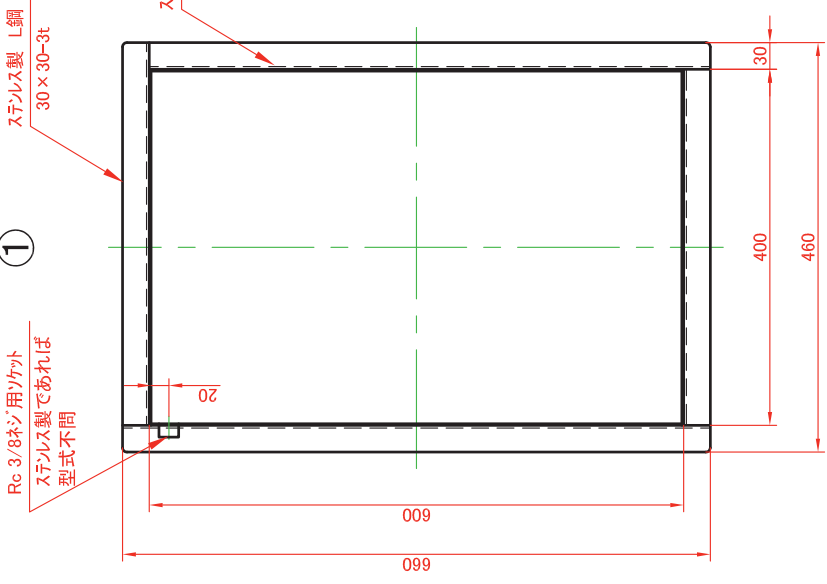
設計	和田	14.11.21	三	製図縮尺	1:5	凝縮器
審査			角			
承認			法			カワチンガハブル実験装置部品

株式会社イーピーテック EP3-1793

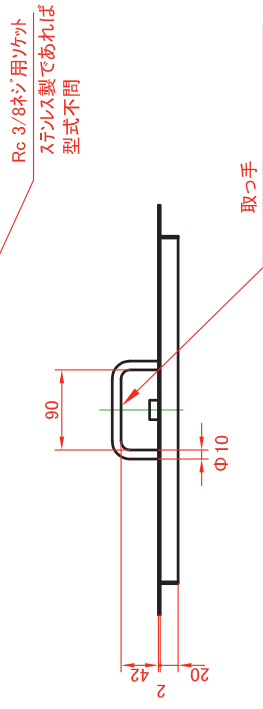
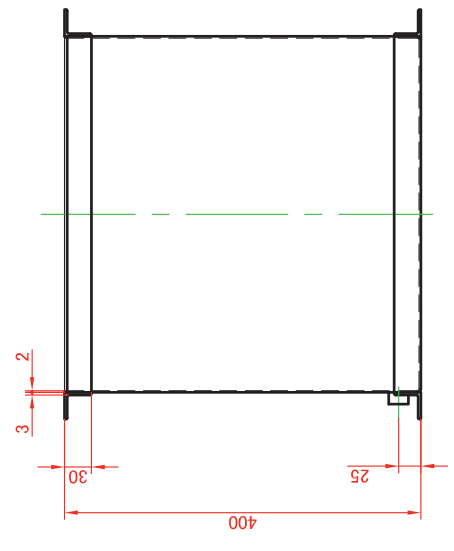
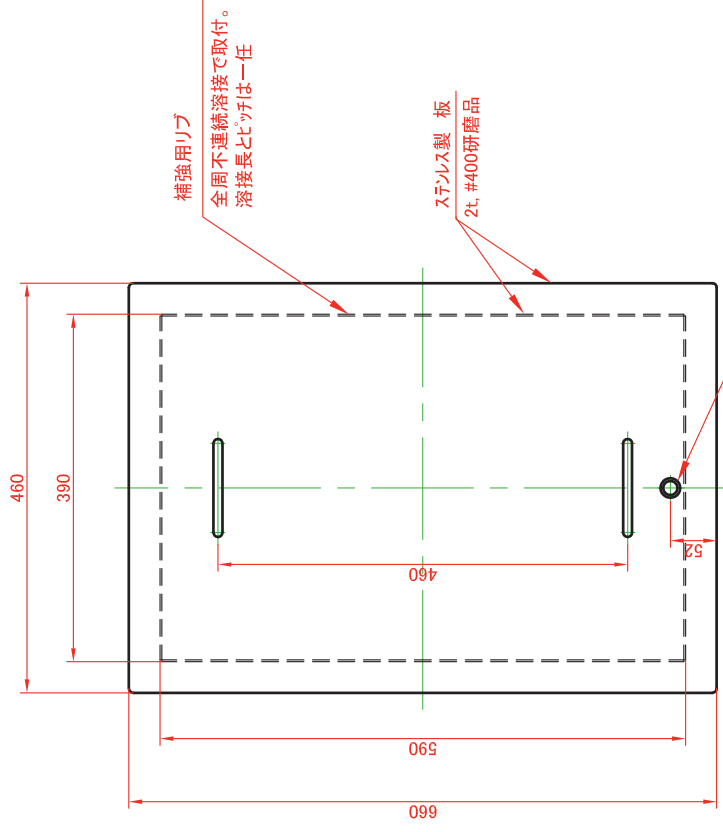
J. 排水タンク

記号	来歴	年月日	訂正	製番
				04631

員数		番号	部品名	材質・仕様	備考
B	A				
	1	①	容器	SUS304	
	1	②	蓋	SUS304	



②



注記
 1、本品は蒸気トレン回収タンクに使用するもので、溶接部は水を満たして漏れが無い事
 2、②蓋は、①容器に嵌合できる事

設計	和田	14.11.21	三	製図縮尺	1:6	排水タンク
審査			角			
承認			法			

株式会社イーピーテック
 EP3-1791
 カビンガハブル実験装置部品

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。