原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ 安全技術管理官殿

# 平成 28 年度 原子力施設等防災対策等 委託費(スペーサ影響評価 試験)事業

成果報告書

平成 29 年 3 月

一般財団法人 電力中央研究所

原子力技術研究所



# 目次

1. 緒言	
2. 実験装置の設計および製作	5
2.1 実験装置の構成	
2.1.1. 模擬燃料集合体およびスペーサ	10
2.1.2. 試験部	
2.2 計測機器	
2.2.1. 可視化システム	
2.2.2. LDV システム	
2.2.3. 液膜センサ(多点電極フレキシブル基板)	74
2.2.4. 液膜分布計測システム	83
2.3 電源盤·計測盤	85
3. まとめ	

# 表目次

 スペーサ影響評価試験	表 2-1
 試験要求仕様	表 2-2
 試験体組立部品表	表 2-3
 端子配列一覧表	表 2-4

## 図目次

义	2-1	スペーサ影響評価試験装置の配管系統計装図	7
义	2-2	模擬燃料集合体の流路基本寸法	8
义	2-3	付加造形法で製作した模擬燃料集合体	8
义	2-4	製作した丸セルタイプスペーサー写真	9
义	2-5	模擬燃料集合体のセンター体系およびサイド体系	13
义	2-6	製作した模擬燃料集合体の構成	13
义	2-7	透明な側面部をもつ模擬集合体の構成	14
义	2-8	丸セルタイプの形状	15
义	2-9	3D プリンタ DWS-029X (DWS 社製)	16
义	2-10	3D プリンタ ProJet5500X (3D Systems 社)	17
义	2-11	ProJet5500X 用敷板	17
义	2-12	立体造形用ソフトウェア1式(ProJet5500X用)	18
义	2-13	送風定温恒温器及び架台	18
义	2-14	超音波洗浄器	19
义	2-15	無停電電源装置	19
义	2-16	造形用樹脂材料	20
义	2-17	サポート材除去用洗浄剤	21
义	2-18	造形した模擬燃料集合体の各パーツ	21
义	2-19	組立てた模擬燃料集合体(全体写真)	22
义	2-20	試験体組立図	27
义	2-21	製作した試験体の全景と詳細写真	29
义	2-22	計装した空気供給系の配管・流量計および弁スタンドの写真	30
义	2-23	流路内での液滴ノズル穴位置	31
义	2-24	液滴ノズル設置用部品及び治具(位置決め用ピン/キャップ/	位
	置決	そめ治具)	32
义	2-25	液膜測定用樹脂板1寸法図	33
义	2-26	液膜測定用樹脂板2寸法図	34
义	2-27	液膜測定用樹脂板3寸法図	35
义	2-28	液膜測定用樹脂板4寸法図	35
义	2-29	3DCAD データモデル(上部試験流路部)	36
义	2-30	製作した上部試験流路部写真	36

义	2-31	下部試験流路部(液滴放出領域用)寸法図	37
义	2-32	下部試験流路部(液滴発生領域用)寸法図	38
义	2-33	下部試験流路部(液滴発生領域用)断面図	39
义	2-34	下部試験体流路部(液滴発生領域用)ノズルサポート詳細図	40
义	2-35	下部試験体部(液滴発生領域用)矢視図 C(フランジ部)	41
义	2-36	3DCAD データモデル図(下部試験流路部(液滴発生領域用))	42
义	2-37	製作した下部試験流路部(液滴発生領域用)写真	42
义	2-38	丸セルタイプの寸法図	43
义	2-39	3DCAD データモデル(丸セルタイプ)	44
义	2-40	空気マニホールド寸法図	45
义	2-41	空気マニホールド矢視図 A	46
义	2-42	空気マニホールド矢視図 E	47
义	2-43	空気マニホールド断面図	48
义	2-44	空気流入部の詳細図	49
义	2-45	3DCAD データモデル図(空気マニホールド)	50
义	2-46	製作した空気マニホールド写真	51
义	2-47	液滴注入ポート蓋寸法図	52
义	2-48	3DCAD データモデル図(液滴注入ポート蓋)	53
义	2-49	製作した液滴注入ポート蓋写真	53
义	2-50	試験体据付架台断面	54
义	2-51	試験体据付架台	55
义	2-52	試験体回転支持台断面	56
义	2-53	空気出口管寸法図	57
义	2-54	3DCAD データモデル図(空気出口管)	58
义	2-55	製作した空気出口管写真	58
义	2-56	気液分離器製作	59
义	2-57	試験体配置図	60
义	2-58	製作した空気タンクと脱湿装置の写真	61
义	2-59	2D-PIV 計測時の発光側トラバース装置の概要	68
义	2-60	ParticleMaster 計測時の受光側トラバース装置の概要	69
义	2-61	LDV システムの概要	73
义	2-62	製作した液膜センサの写真	75
义	2-63	液膜センサの外形寸法と配置図	76
义	2-64	多点電極基板の寸法図	77
义	2-65	電極対の概略寸法	78
义	2-66	電極対配置の概略寸法	79
义	2-67	基板内部配線の構造	80
义	2-68	フレキシブルクランパ FMG-60-0.5-FX の外観	81
义	2-69	端子部の寸法図(N=60)	81
义	2-70	WMS200 外観	84
义	2-71	計測操作盤の全景写真	87

#### 1. 緒言

BWR 燃料集合体内のスペーサは液滴を被覆管に付着させる効果を有しており, 付着して熱伝達を向上させる.付着量はスペーサの形状と構造により変化する ことから,大気圧での水-空気系の実験を実施し,CFD に必要とされる高時間・ 空間分解能で計測を行い,付着メカニズムの解明と付着量のモデル化に資する 実験データベースの情報を得ることを目的とする.

本研究は,平成28年度から平成30年度までの3年間として計画されている. 初年度に実験装置を設計し製作し,2年目以降に実験を行う.実施体制は当所単 独で,原子力技術研究所が所轄する.

本年度は初年度として,実験装置及び計測系の設計・製作を行う.すなわち鉛 直上向きに冷却水が流れる BWR の燃料集合体内の代表的なサブチャンネルの流 路を模擬した模擬燃料集合体,スペーサ,液滴等発生器,並びに気相流を流す流 動ループ,計測系などからなる実験装置を設計し製作する.

#### 2. 実験装置の設計および製作

表 2-1 に製作したスペーサ影響評価試験装置の基本仕様を示す.実験装置は 気相流を流す流動ループを備え,鉛直上向きに冷却水が流れる BWR 燃料集合体 内のサブチャンネル流路構成を模擬した設計とした.試験実施は平成29年度以 降となり,表 2-2 に試験要求仕様を示す.

#### 2.1 実験装置の構成

図 2-1 に実験装置の配管系統計装図を示す.実験装置の主な構成として,燃料集合体内模擬流路は,図 2-2 に基本流路の水平断面を示す.基本流路として BWR ロッドバンドルの一部を切り出した(サブチャンネルをセンター体系とサイ ド体系を兼ね備えた)流路として製作した.燃料棒やチャンネルボックスなどの 構造物で囲まれた部分を含んでおり,スペーサ構造の違いによる液滴付着の差 を把握できる構造とした.図 2-3 に付加造形法で製作した模擬燃料集合体写真 を示す.模擬スペーサは図 2-4 に示す丸セルタイプ(写真)を製作した.模擬ス ペーサは付加造形法で作成することで今後作成するグリッドタイプ,旋回羽タ イプも容易に造形できる.スペーサによる液滴付着効果を起こすために,液滴等 発生器をスペーサ上流側に設置し,模擬燃料集合体の流路に小流量の噴流を鉛 直上向きに放出させ,液敵群を形成できるように設計した.

以下に実験装置の設計仕様及び製作結果を記述する.

項目	内容	
装置構成	燃料集合体内模擬流路, 模擬スペーサ (丸セル), 液滴等発生器, 気 相流量調節器, 計測系, 加湿器, 気液分離器など	
計測機器	液膜センサ(模擬被覆管表面上に配置),液滴径及び気相流速の測定 装置(画像解析による)	
流動条件 (仕様値)	<ul> <li>・ 圧力条件:大気圧</li> <li>・ 気相流速: 0~10 m/s</li> <li>・ 作動流体の温度:常温</li> </ul>	
作動流体	気相流:空気 液滴 :水	

表 2-1 スペーサ影響評価試験装置の基本仕様

表 2-2 試験要求仕様

項目	内容	
実験 パラメータ	<ul> <li>気相流速: 3~5 レベル</li> <li>液滴放出量: 3 レベル</li> </ul>	
模擬 スペーサ	<ul> <li>4タイプ</li> <li>グリッドタイプ1(センター体系用,3形状:部材の肉厚を変更)</li> <li>グリッドタイプ2(サイド体系用,3形状:部材の肉厚を変更)</li> <li>丸セルタイプ(部材肉厚3種,チャンファ3種,セル高さ2種)</li> <li>旋回羽タイプ(部材肉厚3種,旋回羽の折曲げ角3種,旋回羽形状3種)</li> </ul>	
計測項目	<ul> <li>局所の液滴付着位置及び付着量,並びに/又は局所液膜厚さ分布</li> <li>液滴の径及び流速</li> <li>気相流速分布</li> <li>気相温度</li> </ul>	

試験実施は平成29年度以降



図 2-1 スペーサ影響評価試験装置の配管系統計装図



図 2-2 模擬燃料集合体の流路基本寸法



図 2-3 付加造形法で製作した模擬燃料集合体



図 2-4 製作した丸セルタイプスペーサー写真

#### 2.1.1. 模擬燃料集合体およびスペーサ

サブチャンネルの流路構成を模擬するために,1段分のスペーサとその上部側, 下部側に模擬燃料集合体を製作した.

模擬燃料集合体は,図 2-5 に示すように横方向に連なる三つのセンターサ ブチャンネルの冷却流路を模擬したセンター体系と一つのサイドサブチャンネ ルおよびその横方向に連なる二つのセンターサブチャンネルの冷却水流路を模 擬したサイド体系の2 タイプがある.製作した模擬燃料集合体は,センター体 系とサイド体系を兼ね備えた流路とし,図 2-6 に流路形状を示す.模擬燃料棒, 模擬チャンネルボックスなどの構造物は,可視化を行うため透明なプラスチッ ク樹脂で設計・製作した.また,スペーサによる液滴付着効果を計測するスペー サ上部側の領域については,液膜センサの設置によりインターフェース部が不 透明になるため,サブチャンネルの中央領域を見通せる透明な側面部を持つ構 成とした.図 2-7 に透明な側面部をもつ模擬燃料集合体の構成を示す.

スペーサは、上述した丸セルタイプを製作した図 2-8 に丸セルタイプの形状 を示す.

模擬燃料集合体およびスペーサの主な仕様を以下に示す.

- ・模擬燃料集合体構成 センター体系とサイド体系を兼ね備える
  - 上部模擬燃料集合体(液膜測定用)×1
    - 下部模擬燃料集合体(液滴放出領域用)×1
    - 下部模擬燃料集合体(液滴発生領域用)×1
- ・模擬燃料集合体寸法 上部模擬燃料集合体(液膜測定用)

外形:縦 82.1 mm×横 44.4 mm×高さ 505 mm 下部模擬燃料集合体(液滴放出領域用)

外形:縦 82.1 mm×横 44.4 mm×高さ 330 mm

下部模擬燃料集合体(液滴発生領域用)

外形:縦 82.1 mm×横 44.4 mm×高さ 260mm (フランジ付)

燃料棒径: φ11 mm, ピッチ: 14.4 mm

燃料棒間ギャップ:3.4mm

・スペーサ 丸セルタイプ 丸セル直径 14.4 mm 肉厚 0.5 mm 高さ 30 mm

本仕様を満足するため模擬燃料集合体とスペーサは、3D プリンタによる3次元 加工で製作した.製作にあたり導入した3D プリンタの仕様を以下にまとめた.

可視化用模擬燃料集合体製作用

- ① 高強度 3 次元立体造形装置本体 1 式
  - 機種 DWS-029X (DWS 社製) (図 2-9 参照)
  - ・ 造形方式 光硬化樹脂の液槽表面に部品の断面パターンの紫外 レーザー光を照射して硬化させ、一層ずつ積層させる

光造形法.

- ・ 造形材料 クリア色の樹脂材料,耐熱性材料が使用可能.
- ・ 最大造形寸法 幅 150 mm,奥行き 150 mm,高さ 200 mm
- ・ 積層ピッチ 15µm以下
- ・ 電源 単相 115V, 15A 以内
- ② 立体造形用ソフトウェア1式
  - ・ 操作・造形用ソフトウェアツール 完備
  - ・ サポート OS

電源

•

Windows 7 以降であること. STL 対応

— ト (#20100091).

- ・ 造形ソフトウェア入力形式③ 付帯機器・付属品等
  - 紫外線硬化装置1式 造形後に二次硬化を必要とする樹脂材料を硬化 処理させる150mm程の造形物が収まる紫外線硬 化装置(UV Curing Unit M 相当).
    - 単相 100V
  - ・ プラットフォーム2式
  - デスクトップパソコン1式
- OS: Windows 7 以降の 64bit
  グラフィックボードおよびメモリ:
  サポート構造を設計する専用のソフト
  ウェアを動作させる能力を有する(メモリ: 32GB 以上, グラフィックボード:
  Quadro M2000).
  接続端子: D-SUB 9pin, 25pin を有する.

ワークエリアに応じた専用の造形プレ

- ④ 造形用樹脂・トレイ
  - ・ 造形材料 DL370:三次元加工に必要な専用のクリア材樹脂(1kg) 12 個
  - ・ 造形材料 DM220:三次元加工に必要な専用の耐熱性樹脂(1kg)8個
  - ・ 造形材料 DC700:三次元加工に必要な専用の鋳造用樹脂(1kg)6個
  - ・ 樹脂トレイ:ワークエリアに応じた専用のトレイ (RT500) 10 個

液膜センサ設置用,液滴発生領域用模擬燃料集合体およびスペーサ製作用

- ① 高精度3次元立体造形装置本体1式
  - ・ 機種 ProJet5500X(3D Systems 社)(図 2-10 参照)
  - ・ 造形方式 プリントヘッドから紫外線硬化樹脂を吹付け紫外線ラ ンプで硬化させ、一層ずつ積層させるインクジェット方 式.
  - ・ 造形材料 クリア色の硬質プラスチックやエラストマー材料が使
     用可能
  - ・ 最大造形寸法 幅 510mm, 奥行き 380mm, 高さ 300mm
  - ・ 積層ピッチ 13µm 以下
  - ・ 電源 単相 115V, 15A 以内
  - インターフェース 10/100 イーサネットインターフェースによるネットワークに対応.

•	敷板	有り(積載荷重(約 500kg/㎡)の負荷分散用)
		(図 2-11 参照)
•	配線・コンセント	装備(単独回路 100V40A ブレーカから先用)
$2  \underline{1}$	:体造形用ソフトウェア1	式(図 2-12 参照)
•	操作・造形用ソフトウ:	ェアツール 完備
•	サポート OS	Windows 7 以降
•	造形ソフトウェア入力	形式 STL に対応していること.
③ 付	「帯機器・付属品等	
•	送風定温恒温器1式	造形後に不要となるサポート箇所を除去するた
		め,最大幅 500mm 程度の造形物が収まる恒温器
		(DKN602). (図 2-13 参照)
•	電源	単相 100V. 最大で 250℃程度までの昇温が可能
•	架台	OT62 装備(恒温器を積載用)(図 2-13 参照)
•	超音波洗浄器1式	サポート除去後の洗浄を行う最大幅 500mm 程度
		の造形物が収まる超音波洗浄器(CPX8800H-J
•	電源	単相 100V(温度調整機能有り)(図 2-14 参照)
•	洗浄器専用のインサー	トトレー(穴なし) 有り
•	ステンレス製架台	CSF-D3SU 有り(超音波洗浄器積載用)
•	無停電電源装置1式	瞬停・停電によって電力が経たれた場合,その代
		わりとなって瞬時に電力を供給開始し、機器の
		運転を継続させるための電源装置(SAU-A302)
•	出力電圧	設定可能(図 2-15 参照)
•	昇圧トランス 1 式	ProJet5500X を安定的に動作させるため, 115V に
		昇圧可能(SAT-A3-100-120)
④ 造	形用樹脂・洗浄剤	
•	造形材料クリア:三次元	6加工に必要な専用のクリア材樹脂 (1.75kg) 10 個
•	造形材料エラストマー	ナチュラル:三次元加工に必要な専用のゴムライ
	ク樹脂(2kg)10 個	
•	造形サポート材:三次テ	E加工に必要な専用のサポート材樹脂(2kg)10個

 上記造形用樹脂材料は図 2-16 に示す.
 サポート材除去用洗浄剤
 三次元加工後に不要となるサポート材 を除去・洗浄する溶剤.三次元加工機メ ーカの純正品に限らず,変形・変色無く 洗浄可能.(図 2-17)

上記 3D プリンタで製作した模擬燃料集合体の写真を図 2-18 及び図 2-19 に示す.



図 2-5 模擬燃料集合体のセンター体系およびサイド体系



図 2-6 製作した模擬燃料集合体の構成



図 2-7 透明な側面部をもつ模擬集合体の構成



図 2-8 丸セルタイプの形状





図 2-9 3D プリンタ DWS-029X (DWS 社製)



図 2-10 3D プリンタ ProJet5500X (3D Systems 社)



図 2-11 ProJet5500X 用敷板



図 2-12 立体造形用ソフトウェア1式 (ProJet5500X 用)



図 2-13 送風定温恒温器及び架台



図 2-14 超音波洗浄器



図 2-15 無停電電源装置



造形材料エストラマー ナチュラル (VisJet CE-NT)



造形材料硬質プラスチック クリア (VisJet CR-CL)



造形サポート材 (VisJet S500)

図 2-16 造形用樹脂材料



図 2-17 サポート材除去用洗浄剤



図 2-18 造形した模擬燃料集合体の各パーツ



図 2-19 組立てた模擬燃料集合体(全体写真)

#### 2.1.2. 試験部

試験部は,主に上下部試験流路部,液滴流水系,模擬スペーサなどからなる試 験体と空気出口管、上部気液分離容器及び据付架台から構成される.図 2-20 に 試験体の組立図, 表 2-3 に試験体組立の部品表を示す. また, 製作した試験体の 全景と詳細写真を図 2-21, 計装した空気供給系の配管・流量計および弁スタン ドの写真を図 2-22 に示す.

試験体の模擬流路部は, 全長 1165 mm, 上部から 505 mm 下端に模擬スペーサ を配設したサブチャンネル流路構造となっている.

試験体

•

試験体基本仕様:

- サブチャンネル構造 流路形状
- 基本流路形状 幅;52.1 mm 奥行;14.4 mm
- 模擬ロッド形状 外径; φ11.0 mm (サブチャンネル構造形成)
- 液滴注入ノズル 外径: φ0.55 mm 位置: スペーサ下流側約 300 mm 流路内での液滴ノズル穴位置は図 2-23 参照 液滴ノズル設置用部品及び治具は図 2-24 参照
- · 注入液滴径 10~500 um の範囲
- 試験体の構成:
- 上部試験流路部(液膜測定用) 82.1×44.4×H505 mm
  - 液膜測定用樹脂板(模擬燃料棒部)
  - 液膜測定用樹脂板1寸法図 ;図 2-25 参照 液膜測定用樹脂板2寸法図 :図 2-26 参照 液膜測定用樹脂板(側面部) 液膜測定用樹脂板 3 寸法図 ; 図 2-27 参照 液膜測定用樹脂板4寸法図 ;図 2-28 参照 3DCAD データモデル図 :図 2-29 参照 製作した上部試験流路部写真 :図 2-30 参照 下部試験流路部(液滴放出領域用)82.1×44.4×H330 mm 下部試験流路部寸法図 ;図 2-31 参照 下部試験流路部(液滴発生領域用) 82.1×44.4×H260 mm, 162×122×H20 mm 角フランジ付 下部試験流路部寸法図 ;図 2-32 参照 断面図 :図 2-33 参照 ノズルサポート詳細図 ;図 2-34 参照 ;図 2-35 参照 矢視図 C(フランジ部) X祝図し (レノンショル), 回 2-36 参照3DCAD データモデル図; 図 2-36 参照製作した下部試験流路部写真; 図 2-37 参照 丸セルタイプ 寸法図 スペーサ ;図 2-38 参照 3DCAD データモデル図 製作した丸セルタイプ写真 ;図 2-39参照 ;図 2-4参照
- 空気マニホールド 角フランジおよび液滴注入ポート付、多孔板付

		空気マニホールド寸法図	; 図 2-40 参照
		矢視図 A	;図 2-41 参照
		矢視図 E	;図 2-42 参照
		断面図	;図 2-43 参照
		空気流入部の詳細図	;図 2-44 参照
		3DCAD データモデル図	:図 2-45 参照
		製作した空気マニホールド写真	;図 2-46 参照
•	液滴注入ポート	蓋 51×74×H35mm, PT1/8 ネジ穴付	, , , ,
		液滴注入ポート蓋寸法図	; 図 2-47 参照
		3DCAD データモデル図	;図 2-48参照
		製作した液滴注入ポート蓋写真	;図 2-49参照
•	使用流体	空気,純水(液滴)	
•	流動状態計測	圧力,温度,空気流量など	
•	可視化計測	液滴径分布,液滴速度分布,気液速度分	分布の二次元計測
② 計	、験体据付架台		
• 5	形式	汎用 50mmAl 角材による組立製作	
• 5	形状寸法	外幅 500×500×高さ 1900mm (図 2-50	)参照)
•	据付機器	試験体 75×110×H1100mm/重量;40kg	
		気液分離容器 250A×約 H400mm /重量	; 20kg
• 7	支持台	架台底面より約 500mm 位置(図 2-51	参照)
		回転台に試験体を据付ける据付構造(図	12-52 参照)
		試験体が 90°/180°回転可能な回転構造.	
		回転位置決めピンで2カ所以上固定可能	<u>ц</u>
• •	その他	試験体架台は、床上設置の鋼板固定.	
		試験体据付支持台は,水平調整可能.	
• 1	製作数	一基	
③	至気出口管		
• 5	形状寸法	φ95×高さ 175mm	
		空気出口管寸法図 ;図 2-	53 参照
		3DCAD データモデル図 ; 図 2-	54 参照
		製作した空気出口管写真 ;図 2-	55 参照
•	出口管構造	内流路角穴から丸穴へテーパ加工	
• 7	締結方法	模擬流路接続金具による締結(O リング	シール構造)
④ 衰	〔液分離容器		
•	型式	円筒縦型容器(図 2-56 参照)	
•	設計条件	設計圧力; 0.2 MPa (使用圧;大気圧), 設	計温度;120℃
•	形状寸法	250A×Sch20×H400mm (上端部はフラ	ンジ構造)
•	容器構造	排気北人口部 邪魔管設置(管径 φ120	$\times$ H100mm)
		胴部上部側面 覗き窓形成;φ65mm 覗	.さ窓×2 箇所
		容器上部蓋 排出孔形成;100A	
		容器ト部側面 容器支持板有り.	

• 試験体空気出口管挿入部

試験体空気出口管挿入孔 φ132mm

二重管構造による液溜まり漏れ防止構造

- 計測孔 PT1/4 ネジボス 容器側面2カ所
- ・ ドレーン孔 PT3/8 ネジボス 容器底部1カ所
- その他 排気孔出口にエルボ管有り(排気蛇腹管接続用)
- 容器材料;塩ビ,覗き用閉止板;ポリカーボ 材料
- 製作数 1 基
- 空気タンク仕様 (5)
  - · 型 式 円筒縦型式(市販品)
  - 仕様 最大圧力; 1.0 Mpa, 最大温度 60 ℃
  - 貯蔵容量 120ℓ~150ℓ •
  - 形状寸法 概略; φ600×H1400mm
  - 20A~25A/Rc3/8~Rc1 ネジ,止弁付 入出力孔 •
  - ドレーン孔 15A/Rc1/2 ネジ,止弁付
  - ・ 圧力計接続孔 10A/Rc1/4 ネジ,止弁付
  - ・ 付属品 安全弁
    - 1 基
      - 製作した空気タンクの写真:図 2-58 参照
- 脱湿装置仕様 (6)

製作数

- 型 式 空冷式ドライヤー(市販品) ・ 空 へ
   ・ 使用流体 圧縮 上 へ
   ・ 一 空量 最大 800 Nℓ/min
   ・ <sup>1</sup><sup>-</sup> <sup>1</sup><sup>-</sup> <sup>1</sup><sup>-</sup> <sup>2</sup>00x60
  - E縮空気 (圧力;0.3~0.6MPa,温度;50℃以下)
- 形状寸法 概略;幅200x600xH600mm
- 入出力孔
   20A/Rc3/4 ネジ,止弁付
- ドレーン孔 8A/オートドレーン付
- ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・

   ・ 単相 100V
- 製作数 1 基

製作した脱湿装置の写真:図 2-58 参照

⑦ 計装品

図 2-1 のスペーサ影響評価試験装置の配管系統計装図をもとに試験体を 配置した試験体配置図を図 2-57 に示す.また,配置に使用した、計装品の 仕様を以下に示す.

1) 試験体流入部

T 1 H. M.D.			
•	試験部入口圧力	ディジタル式圧力計	接続 ; PT1/8 ネジ込
•	試験部入口温度	φ1.6mm シース熱電対	接続; PT1/8 ネジ込
2) 気液	友分離器容器		
•	容器内圧力	圧力指示計	接続; PT1/8 ネジ込
•	容器内温度	φ1.6mm シース熱電対	接続 ; PT1/8 ネジ込

3) その他

圧力の計装配管;φ6mm SUS 管,接続口に止弁有り. •

・ 熱電対の取り付け;継ぎ手使用による取り付け



309	12	ばね座金 M8	SLWB	ミスミ
308	24	平座金 M8	SPWF8	ミスミ
307	8	平座金 M5	PWF5	ミスミ
306	4	六角ナット M8	SLBNR8	ミスミ
305	4	六角穴付ボルト M8×85	CAHHNB-SUS-M8-85	ミスミ
304	4	六角穴付ボルト M8×40	SBE8-40	ミスミ
303	12	六角穴付ボルト M8×30	SBE8-30	ミスミ
302	8	六角穴付ボルト M5×25	SBE5-25	ミスミ
301	6	十字穴付サラ小ねじ M4×20-SUS		モノタロウ
201	1	試験体 (ポリカーボネート樹脂)		
5	1	ターンテーブル		
4	1	回転支持台上板		
3	1	回転支持台下板		
2	1	試験体据付架台(アルミ)		
1	1	気液分離容器組立		
項目	数量	名前	形式	説明

表 2-3 試験体組立部品表



図 2-21 製作した試験体の全景と詳細写真

## 液膜計測中継基板ボックス



図 2-22 計装した空気供給系の配管・流量計および弁スタンドの写真



図 2-23 流路内での液滴ノズル穴位置







図 2-24 液滴ノズル設置用部品及び治具(位置決め用ピン/キャップ/位置決め治具)



図 2-25 液膜測定用樹脂板 1 寸法図



図 2-26 液膜測定用樹脂板 2 寸法図










図 2-29 3DCAD データモデル(上部試験流路部)



図 2-30 製作した上部試験流路部写真



図 2-31 下部試験流路部(液滴放出領域用)寸法図



図 2-32 下部試験流路部(液滴発生領域用)寸法図



図 2-33 下部試験流路部(液滴発生領域用)断面図



図 2-34 下部試験体流路部(液滴発生領域用)ノズルサポート詳細図





図 2-36 3DCAD データモデル図(下部試験流路部(液滴発生領域用))



図 2-37 製作した下部試験流路部(液滴発生領域用)写真



図 2-38 丸セルタイプの寸法図



図 2-39 3DCAD データモデル (丸セルタイプ)



図 2-40 空気マニホールド寸法図



位置決め用ピンφ6





図 2-42 空気マニホールド矢視図 E



図 2-43 空気マニホールド断面図



図 2-44 空気流入部の詳細図



図 2-45 3DCAD データモデル図(空気マニホールド)



図 2-46 製作した空気マニホールド写真



図 2-47 液滴注入ポート蓋寸法図



図 2-48 3DCAD データモデル図(液滴注入ポート蓋)



図 2-49 製作した液滴注入ポート蓋写真



図 2-50 試験体据付架台断面



図 2-51 試験体据付架台



図 2-52 試験体回転支持台断面





図 2-54 3DCAD データモデル図(空気出口管)



図 2-55 製作した空気出口管写真



補強板 十15

£20

5

<u>C20</u>

¢267

400

〔矢視





12	12	六角ボルト _ M20x75	HXNH-SUS-M20-75		2,7,2
11	8	六角穴住ボルト _ M6x25	SCB6-25		2,72
10	â	六角穴付ボルト _ M6x20	SC86-20		171
9	- 4	六角大甘ボルト _ M5×12	SCB6-12		2,7.2
8	2	板金丸プレート	BFHBF-AM-A100-T13	-D60-080-N6	३ <b>२३</b>
7	2	透明増脂円形ブレート	ENJAC4H10-100-80-8	6	<b>२</b> ,२३
6	2	ゴムパッキン加工品	FRC4A3-A100-V60-0	80N7	2,73
5	1	フランジパッキンJIS5K全	CR-250A-5K ( 017)		モノタロウ
4	1	ステンレスカップ登加工	17201B-0004		
3	1	分開着	17201B-0003		
2	1	気液分離容響フランジ	17201B-0002		
1	1	気液分離容響	17201B-0001		
項目	お量	名の	國面著육	材質	設明

図 2-56 気液分離器製作







図 2-57 試験体配置図



図 2-58 製作した空気タンクと脱湿装置の写真

## 2.2 計測機器

スペーサによる液滴付着効果の解明とモデル化に必要な計測データを取得す るために、高感度カメラとレーザー等を用いた画像解析速度計測器(PIV)、画 像解析液滴径計測器(PM)さらにレーザードップラー流速計(LDV)の計測器 を導入した.液膜センサは、スペーサ効果による液滴付着位置及び局所液膜厚さ 分布を計測するため、多点電極対を模擬燃料棒表面の円周方向とスペーサ直上 部から下流側にわたって多数配置した.PMは液滴の径及び流速,PIVは気相流 速分布,LDVは液滴群の流速分布を計測するため、高感度カメラ、レーザー本 体及びLDVプローブは、試験体に隣接してトラバース機構に固定した.

## 2.1.1. 可視化システム

可視化用覗き窓からアクセスし,各サブチャンネル領域内での液滴径分布,液 滴速度分布および気相速度分布の2次元計測を実施する可視化システムの製作 仕様を以下にまとめた.

$\bigcirc$	高机	感度カメラ	
	•	型式	LaVision 社/Imager Pro X 2M
	•	数量	1式
	•	寸法	W84 mm $\times$ L175 mm $\times$ H66 mm
	•	センサ	プログレッシブスキャン CCD
	•	有効画素数	1600×1200 pixel
	•	ダイナミックレンジ	14 bit
	•	ピクセルサイズ	$7.4 \times 7.4 \ \mu m$
	•	最小フレーム切替時間	110 ns (ダブルシャッターモード時)
	•	フレームレート	14 フレーム/sec (ダブルシャッターモード時)
	•	カメラメモリ	1GB
	•	レンズマウント	Fマウント,Cマウント
2	② 局所撮影用レンズ		
	•	焦点距離	50 mm
	•	f值	1.4
	•	フィルタロ径	52 mm
	•	数量	1
3	全伯	本撮影用レンズ	
	•	焦点距離	105 mm
	•	f值	2.8
	•	フィルタロ径	62 mm
	•	数量	1
4	ス	テップダウリング	
	•	型式	ステップダウリング 62mm→52mm
	•	数量	1
5	ベ	ローズ	
	•	最小倍率	1.6(FOV 7.4mm 角) *
	•	最大倍率	8.7 倍(FOV 1.4mm 角)*

	*カメラレンズ 105mm 使用時での計算値
・数量	1
<ul><li>⑥ 対物レンズ</li></ul>	
光学倍率3倍:	
・数量	1
· 作動距離	77 mm
· 空間分解能	3.06 µm
· 開口数	0.09
· 焦点深度	34 µm
・質量	55g
・ その他	カメラ直付け用のアダプタチューブ付属
光学倍率 10 倍 :	
・数量	1
· 作動距離	51 mm
· 空間分解能	1.31 μm
· 開口数	0.21
· 焦点深度	6.2 μm
・質量	95g
・ その他	カメラ直付け用のアダプタチューブ付属

⑦ 光源

液滴径および液滴流速は、バックライト照明で、液滴の影絵を直接撮影する粒子径二相流計測(PM: ParticleMaster)を、気相流速に関してはシート光源による2次元粒子画像流速法(PIV: Particle Imaging Velocimetry)を採用し可視化計測を実施する.2次元2成分計測系の光源として、最小想定液滴径10µmまでの可視化を十分に可能とする強度を有するレーザー光源を導入.また、PIV機能を有する.

, –		
•	型式	ダブルパルス YAG レーザー EverGreen70
•	出力	70 mJ/Pulse
•	キャビティ構造	告 ダブルキャビティ
•	最大繰り返し	15 Hz/cavity
•	波長	532 nm
•	パルス幅	$\leq 10$ nsec
•	ビーム発散	<4 mrad
•	ビーム径	<5 mm
•	動作温度範囲	18∼28 °C
•	電源	100-240 VAC, 50/60 Hz, 6.5A
•	寸法	ヘッド部 151.1mm×102.7mm×399.7mm (突起部除く)
		電源部 236.2mm×406.1mm×500.1mm(突起部除く)
•	質量	ヘッド部 7kg
		電源部 15.9kg(冷却水無し), 18.1kg(冷却水あり)
•	その他	レーザーヘッドは密閉設計
		インターロックおよびキースイッチの機能を有する.

出力調整可能

⑧ ディフューザユニット

ダブルパルス YAG レーザーの前に取り付け,レーザーの可干渉性を完全に失わせることで,粒子周囲からのスペクトルノイズを防ぐためにディフューザユニットを導入.非常に高い変換効率を持ち,低いレーザーパワーで効率良く計測可能.

- · 入射波長 532±5 nm
- ・ レーザー出力径
   120 mm 程度
- ・ 出力波長 550~600 nm
- 発光時間 5 nsec 入射時 20nsec
- ・ 寸法 約 140mm×225mm×350mm
- ⑨ ライトシートユニット (シート式 PIV)

ダブルパルス YAG レーザーの先端に装着してシート光を生成するために導入.

- シート厚とビーム発散をコントロールでき、シート厚は連続的に調整が可能.
  - ・ シリンドリカルレンズ f=-20 mm, -10 mm
  - ・ 焦点距離 300~2000 mm
  - ・ 対応波長 532 nm
- 10 プログラマブルタイミングユニット (PTU)

高感度カメラ,ダブルパルス YAG レーザーのタイミングをコントロールする ために導入.

- PTU Version Standard
- ・ 最小パルス幅 最小 10 nsec (resolution)
- ・ 繰返し周波数 最小 10 nsec (resolution)
- ・ ジッター <1 nsec
- ・ 出力チャンネル数 16 Ch
- ・ TTL 入力 4 Ch (オプトカップリング)
- ・ トリガ入力 TTL5V, ポジティブエッジ, 50Ω
- ・ 周波数レンジ
   0.01 Hz~1 MHz
- ・ 電源 100-230VAC, 2A
  - 約 W254 mm×H80 mm×D189 mm
- 11 キャリブレーションプレート

寸法

所望の計測撮影対象面にカメラの焦点を調整するためのキャリブレーション プレートを導入.

- ・ 外形寸法 50 mm×50 mm×1.5 mm
- ・ ドット径 10 µm~2 mm
- ・ ドット間隔 70 µm~10 mm
- ・ その他 ホルダー付属
- ① DsVis 基本ソフトウェア
  - Flow Master PIV の基本ソフトウェア DiVis を導入.
  - ・型式 LaVison 社/DaVis8
    ・数量 1
  - ・ ハードウェア制御 レーザー;パルス間隔(dt),出力,ON/OFF

カメラ;撮影周期,撮影枚数

トラバース;移動量

 ・ 画像前処理 構造の違いによる2相分離 マスキング;円形,楕円,四角形,任意の多角形,ハイ パス・フィルター,n×nフィルタ アルゴリズムマスク;時間的に変化する背景や反射光な ど,解析の障害となる部分に対し自動でマスクデータを 生成し各々の画像に対して自動でマスク処理すること が可能.

・ 画像補正 画像の歪み補正; 2D-PIV(斜位撮影)

・ 自動処理 解析処理でユーザが指定した一連の処理(最大9種)が 可能.また,一連の解析処理を自動で実行可能.

ファイル AVI, TIFF, VC7, im7 の読み込みが可能.
 表示 マルチディスプレイによる分割表示
 インタロゲーションエルアの担閉係数な2次=グラコ

インタロゲーションエリアの相関係数を3次元グラフィ ックス表示

 データ出力 原画像や解析結果,ポスト処理結果を画像ファイル (AVI,BMP,JPG,PNG)やテキストファイルとして生成す る機能を有する.原画像とベクトルマップ,渦度など, 複数の画像を任意の配列で1つの画像ファイルとして出 力することが可能.

 強化機能
 CLマクロ;ユーザインターフェイスを変えることなく
 同一ソフト上で,ユーザがプログラミングしたマクロ(C
 言語)を組み込むことでユーザ独自の処理が可能.
 分散処理:ネットワークで接続された複数台の PC で分 散処理が可能.

13 液滴径・液滴流速解析用ソフトウェア

レーザー光原でバックライト照明を行い、シャドウイメージから各種粒子サ イズ計測が可能. 高倍率イメージングによりミクロン粒子の計測が可能.

- ・ 型式 LaVison 社/Davis Particle Master
- ・ 数量 1
- 機能 粒子位置,粒子径,長軸径,短軸径,球形度,粒子速度(Vx,Vy,|V|)

統計量(D10, D32, 10%径, 50%径, 90%径, RMS)

⑭ DaVis PIV ソフトウェアパッケージ

FlowMasterPIV の基幹ソフトウェアである DaVis8 に実装. 2 次元の粒子画像 を高精度に解析する.

- ・ 型式 LaVison 社/2D-PIV
- ・ 数量 1
- ・機能 自己相関,相互相関機能(標準 FFT,正規化相関,

再帰的相関法)

PIV+PTVアルゴリズム (2D)

二次相関(高精度演算) 複数画像の相関面合計によるベクトル計算 インタロゲーション窓の微小シフト(バイアス 除去, ピークロッキング排除) マルチ・パス演算(高分解能,高安定性) Adaptiv PIV 機能:ダイナミックレンジ、フォー カス, 粒子径, ビームオーバーラップなどの計測 パラメータがリアルタイムに表示され計測パラ メータの最適化が可能.可変インタロゲーショ ン窓を有し、計測パラメータを自動で最適化す ることが可能. インタロゲーション窓を円形に し、相関演算の精度を向上、インタロゲーション 窓のアスペクト比を変更させることで、特定方 向への空間解像度を向上.速度勾配に応じて 個々のインタロゲーション窓の大きさと形状 (アスペクト比)が自動で最適化可能. バリデーション;相関ピーク値比較フィルタ, 二次選択ベクトルへの置換を含む、局所および 領域のメディアン・フィルター,ベクトル値フィ ルター,スムージング,補間機能を有する. ポストプロセッシング ベクトル解析の結果について、局所的な不確か

さを見積もることが可能.

- ① 計測解析用 PC
  - 数量 1式
  - CPU Intel, six core processor •
    - メインメモリ 12GB
  - 1TB (C ドライブ), 1TB (D ドライブ) HDD •
  - 光学ドライブ **DVD** Writer •
  - OS Windows7 (English), 64bit •
  - モニター 27inch 液晶モニター •
  - ネットワーク 10/100/1000Mbps •
  - · 外形寸法 約 W180mm×H450mm×D530mm
  - キーボード、光学マウス、バックアップ用メディア、 付属品 • 取扱説明書, MS OFFICE2013 以降(WORD.EXCEL.PPT 含)

以下,トラバース装置(発光側)の基本仕様を示す.

(16) 発光側トラバース装置

PIV.ParticleMaster 計測時のレーザー系を搭載する支持機構. DaVis から電動ト ラバースを制御可能. 図 2-59 に 2D-PIV 計測時の発光側トラバース装置の概要 を示す.

- 1) レーザー支持部
  - 1式 数量

•	光学台	寸法 W500×1	$H500 \times L800$
		質量 約160 k	g
		天板 M6 251	mmマトリックスに標準加工,
		着磁性, 無塗装	長梨地仕上げ.
•	レール(水平方向)	長さ	750 mm
•	レール(垂直方向)	長さ	約 1300 mm
•	レーザーマウント	微調方向	$\pm 50$ mm
•	電動トラバース	長さ	約 1300 mm
		稼動距離	1000 mm
		最小分解能	$\pm 20 \ \mu m$
以下,	受光側トラバースの仕様	兼を示す.	

① 受光側トラバース装置

PIV, Particle Master 計測時のカメラ系を搭載する支持機構. DaVis から電動トラ バースを制御可能. 図 2-60 に ParticleMaster 計測時の受光側トラバース装置の 概要を示す.

・数量	1 式	
<ul> <li>光学台</li> </ul>	寸法 W500	×H500×L500
	質量約 160	kg
	天板 M6 2	25mm マトリックスに標準加工,
	着磁性,無塗	診装梨地仕上げ.
・ レール(水平力	5向) 長さ	500 mm
・ レール(垂直丸	5向) 長さ	約 1300 mm
・ カメラマウント	、 微調方向	$\pm$ 50mm
<ul> <li>・ 電動トラバース</li> </ul>	、 長さ	約 1300 mm
	稼動距離	1000 mm
	最小分解能	$\pm 20~\mu{ m m}$
<b>⑧</b> 暗幕		
· 数量	1式	

- (18
  - 数量
  - フレームサイズ
  - 暗幕サイズ 約 W910×H1810 •
  - カーボンファイバー (難燃性), アルミフィル 素材 ムラミネート,上部にハトメ穴加工済両サイド にマジックテープ付き クラス4レーザーまで使用可 耐久性 •

W1980×D1780×H1822~1870



図 2-59 2D-PIV 計測時の発光側トラバース装置の概要



## 

## 2.1.2. LDV システム

計測用覗き窓からアクセスし,各サブチャンネル領域内で液敵群の流速分布の2次元計測実施するLDV(レーザードップラー流速計)システムの製作仕様を以下にまとめた. 図 2-61にLVDシステムの概要を示す.

① 空冷 Ar イオンレーザー

レーザビームを発生. 電源を内蔵した小型・軽量の一体型ボディタイプ.

- ・ 種類 アルゴンイオンレーザ
- · 数量 1式
- ・ 出力 150 mW (マルチライン)
- ・ ビーム径 0.65 mm
- ・ ビーム広がり角 0.95 mrad
- · 冷却方式 空冷
- 外形寸法 約 330×193×129 mm
- ・ 電源 単相 100~265V, <1500W
- ② 光学テーブル
  - 2次元光学ユニット(MODEL8835)と空冷 Ar イオンレーザーを設置する.

・ 光学ベース 寸法 L800mm×W500mm×H500mm
 重量 約80kg
 着磁性ステンレス/無塗装梨子地仕上げ/タップ加工
 M6-25XY(端面 25 mm 残し).

③ 2次元 FLV ユニット

Arイオンレーザーのビームから2色のビームにフィルタで分離しFLV プロー ブへ導く送光系と,2色のビームの散乱光を各々光電変換する受光系から構成さ れる.

a) 光学系・ 型式

•	使用可能レーザー	水冷または空冷アルゴンイオンレーザ
•	シフト方式	ダブルブラッグセル(80MHz)
•	外形寸法	L420×W130×H230 mm(突起物は除く)
•	質量	約 10kg
b)	FLV ドライバユニット	
•	光電変換器	フォトマルチプライヤ
•	量子効率	約 19% (at 51405 nm)
•	周波数応答	50MHz
•	出力インピーダンス	50 オーム
•	フォトマルゲイン	$0 \sim 1000 V$
•	シフト周波数	10, 20, 50, 100, 200, 500kHz, 1, 2, 5MHz
•	電源	AC100~240V, 50/60Hz
•	外形寸法	L364×W152×H363 mm(突起物は除く)
•	質量	約 7kg
④ 2次元 FLV プローブ

分光されたレーザー光を光ファイバで伝送しレンズを介して測定点へ照射. また,測定点からの散乱光を光学ユニットへ入射可能. プローブは,焦点距離 200mm と 60mm の 2 本を有する.本プローブは,XY 微動ステージ上に固定さ れ,2.1 可視化システムのトラバース装置へ取付けて照射する.

a) 2 次元 FLV プローブ 焦点距離 200 mm

•	数量	1
•	測定次元数	2次元
•	ファイバケーブル長	10 m
•	ビーム間隔	30 mm
•	ビーム径	1.2 mm
•	フリンジ間隔	約3.4 µm
•	測定点寸法	約φ0.11 mm×1.41 mm
•	送光用ファイバ	偏波面保存型単一モードファイバ コア径 3µm
•	受光用ファイバ	GIマルチモードファイバ コア径 50µm
•	使用波長	488.0nm(青色), 514.5 nm(緑色)
•	外形寸法	φ45 mm×250 mm
b)	2 次元 FLV プローブ 焦	点距離 60 mm
•	数量	1
•	測定次元数	2 次元
•	ファイバケーブル長	10 m
•	ビーム間隔	30 mm
•	ビーム径	1.2 mm
•	焦点距離	60 mm
•	フリンジ間隔	約 2.2 µm
•	測定点寸法	約 φ0.03 mm×0.27 mm
•	送光用ファイバ	偏波面保存型単一モードファイバ コア径 3 µm
•	受光用ファイバ	GIマルチモードファイバ コア径 50 µm
•	使用波長	488.0 nm(青色),514.5 nm(緑色)
•	外形寸法	φ45 mm×250 mm
(5)	LDV 信号処理器	

コンピュータの拡張スロットに挿入可能. LDV の受光器からのドップラ信号 を A/D 変換しコンピュータで FFT 演算を行ない,周波数の測定・信号の質の 判定を行う.

•	数量	1式
•	信号処理方式	FFT
•	周波数帯域	1kH~40MHz
•	サンプリング周波数	80MHz, 20MHz, 10MHz, 2MHz,
		1MHz, 200MHz, 100MHz, 20MHz
•	BPF	HPF — LPF
		4MHz – 40MHz
		1 MHz - 10 MHz

500MHz - 5MHz 100MHz - 1MHz 50MHz - 500MHz 10MHz - 100MHz 5MHz - 50MHz 1MHz - 10kHz アンプ  $\times 37 \text{ dB}$ • 0~-30 dB, -2 dB ステップで可変 アッテネータ • データレート 5000 burst/s (CPU による) • 処理 SNR -5 dB 以上 入力 ドップラ信号 (20 mV~1V) • 外部トリガ入力 フィルタ通過後の出力(BNC コネクタ) 出力 • 8ビット • A/D トリガ レベルトリガ、外部トリガ • ・ 各パラメータ設定 コンピュータによる. ⑥ 計測解析用 PC 数量 1式 CPU Corei7 3517UE 1.7GHz • 拡張スロット • PCIフルサイズ (2CH) Windows 7 Professional (32bit) (日本語) OS • メモリ 2GB • 起動デバイス • HDD (1TB)光学ドライブ DVD スーパマルチドライブ • 筐体 PCI2スロット(フルサイズ) • AC アダプタジャック (AC アダプタ添付) 電源タイプ インターフェース ディスプレイ用ポート DVI-I×1 • LAN×2 ポート搭載 (1Gbps×2) USB×5ポート搭載(前面1,背面4) 付属品 キーボード、マウス、バックアップメディア **MS-OFFICE** 寸法 W110.3×D235×H155 mm (突起部含まず) • 2次元ソフトウェア

 $\overline{7}$ 

信号処理器のコントロールおよびデータ収録を行う.操作は、コンピュータ画 面上で信号を確認しながら行うことが可能. 取り込まれたデータは, 流速値への 変換・平均流速・標準偏差・乱流強度の演算・表示を行うことが可能.また、ト ラバース装置をコントロールすることが可能で、測定点の座標位置と速度デー タを対としたデータセットを得る.

•	数量	1式	
	王山一	0000	,

 型式 8800 - 0



図 2-61 LDV システムの概要

# 2.1.3. 液膜センサ(多点電極フレキシブル基板)

液膜センサは、模擬燃料棒の表面の円周方向に多点電極フレキシブル基板を 配置し、鉛直方向にはスペーサの下流側でスペーサ直上部から 500mm の長さの 範囲にわたって覆うようにした. 図 2-62 に製作した液膜センサの写真を示す. また, 図 2-63 には液膜センサの外形寸法と模擬燃料集合体への配置を示した.

液膜センサの主な仕様を以下に示す.

•	基板寸法	:約50×500mm(図 2-64参照)
•	材質	: FPC
•	層構成	:3 層
•	外層銅箔厚	: 12µm
•	表面処理	: 全面無電解金メッキ
		(Au0.03µm 以上,Ni3-5µm)
•	電極対数	: 12×128 対 正方配列(図 2-65 参照)
•	外部接続端子	: 60 ピン×3 箇所
		フレキクランパ
		FMG-6000.5-FX(1-60)60P
•	数量	: A1・C1 タイプ   24 枚
		A2・C2 タイプ   24 枚
		B1・D1 タイプ 24 枚
		B2・D2 タイプ 24 枚
		合計 96枚
•	回路構造	電極対は正方格子状に配列し、計測電極が列方
		向、励起電極が行方向にそれぞれ基板内部で連
		結した (図 2-66 参照). 長手方向の回路は 500m
		mと長尺のため、基板中央にて分岐する回路構
		造とした.
•	外部接続端子部	フレキクランパ FMG- 60-0.5- FX(1-60) 60P を接
		続 (図 2-67 に示す端子①②③). FMG-60-0.5-FX
		の外観を図 2-68 に示す.
•	端子部寸法	図 2-69 を参照.
•	端子配列は	表 2-4 参照.
•	励起電極配線	12本
•	計測電極配線	128本 (16×8)
•	その他	長手方向・下方の電極対配置は基板縁に極力寄 せて設計した.



図 2-62 製作した液膜センサの写真



図 2-63 液膜センサの外形寸法と配置図



図 2-64 多点電極基板の寸法図





電極形状		円形
電極直径 D(n	1.0	
電極ピッチ P1	2.0	
X方向電極対ピ	ッチ P2 (mm)	1.45
Y方向電極対ピッ	チ P3 (mm)	3.5
絶縁領域幅 W	(mm)	0.15
電極対傾きθ(°)		90
	電極対傾きθ=90°	

図 2-65 電極対の概略寸法



図 2-66 電極対配置の概略寸法





図 2-67 基板内部配線の構造



図 2-68 フレキシブルクランパ FMG-60-0.5-FX の外観



No.	端子①	端子(2)	端子③	E1-E23	励起電極(E13-E23は予備)
1	GND	GND	GND	M1-M128	計測電極
2	M1	E1	M71	GND	接地電極
3	M2	GND	M72		
4	M3	E2	M73		
5	M4	GND	M74		
6	M5	E3	M75		
7	M6	GND	M76		
8	M7	E4	M77		
9	M8	GND	M78		
10	M9	E5	M79		
11	M10	GND	M80		
12	M11	E6	M81		
13	M12	GND	M82		
14	M13	E7	M83		
15	M14	GND	M84		
16	M15	E8	M85		
17	M16	GND	M86		
18	M17	E9	M87		
19	M18	GND	M88		
20	M19	E10	M89		
21	M20	GND	M90		
22	M21	E11	M91		
23	M22	GND	M92		
24	M23	E12	M93		
25	M24	GND	M94		
26	M25	E13	M95		
27	M26	GND	M96		
28	M27	E14	M97		
29	M28	GND	M98		
30	M29	E15	M99		
31	M30	GND	M100		
32	M31	E16	M101		
33	M32	GND	M102		
34	M33	E17	M103		
35	M34	GND	M104		
36	M35	E18	M105		
37	M36	GND	M106		
38	M37	E19	M107		
39	M38	GND	M108		
40	M39	E20	M109		
41	M40	GND	M110		
42	M41	E21	M111		
43	M42	GND	M112		
44	M43	E22	M113		
45	M44	GND	M114		
46	M45	E23	M115		
47	M46	GND	M116		
48	M47	M59	M117		
49	M48	M60	M118		
50	M49	M61	M119		
51	M50	M62	M120		
52	M51	M63	M121		
53	M52	M64	M122		
54	M53	M65	M123		
55	M54	M66	M124		
56	M55	M67	M125		
57	M56	M68	M126		
58	M57	M69	M127		
59	M58	M70	M128		
60	GND	GND	GND	1	

表 2-4 端子配列一覧表

# 2.1.4. 液膜分布計測システム

本節では、スペーサ影響評価試験において液膜分布の計測に必要となる計測 システムの仕様について記載する.

本システムでは,励起信号の送信及び計測信号取得のためにワイヤメッシュ センサの信号処理システム WMS200 を活用する.液膜センサ上に配置した電極 対の一方の電極をバイポーラパルス信号で励起し,もう一方の電極で電位を計 測する.得られた時系列データに対して電位と液膜厚さの相関式を用いて液膜 分布に換算する.

## 信号処理システム WMS200

本試験は、液膜センサ(多点電極フレキシブル基板)を配置した模擬燃料集合体の液膜測定部においてスペーサ効果における液膜を観察する必要がある.以下に液膜計測で用いる信号処理システム WMS200 の仕様をまとめた.図 2-70 にWMS200 の外観を示す.

•	トランスミッタ(励起)電	極数 128	
•	レシーバ(計測)電極数	128	
•	計測周波数	10 kHz (トランスミッタ電極数	女:16)
		1.25 kHz (トランスミッタ電極	数:128)
•	内部メモリ	8×8GB	
•	最長測定時間	30 分	
•	PCインターフェース	USB2.0	
•	トランスミッタアンプユ	ニット(耐電圧 40V 以上)	8個
•	プリアンプユニット(雨	†電圧 40V 以上)	8個
•	接続ケーブル(本体-ト	ランスミッタアンプ)	1個
•	接続ケーブル(トランス	、ミッタ間)	7 個
•	接続ケーブル(本体-プ)	リアンプ)	8個
•	ターミネータ		1個
•	USB ケーブル		1個
•	電源ケーブル		1個
•	ID-chip ディアクティベ	ーション	1式



図 2-70 WMS200 外観

# 2.3 電源盤·計測盤

本節では,試験体状態計測のための検出器・計器および計測操作盤の設計に関してまとめる.

検出器・計器

図 2-1 の配管系統計装図に示す検出器,計器のうち以下の検出器・計器について仕様を示す.

- ① 圧力検出
  - ディジタル圧力指示計 仕様 計測範囲; FS500kPa/外部出力有,接続; PT1/4 ネジ×2 台
     ブルドン管圧力指示計
    - 仕様 型式; φ75mm/FS0.25MPa, 接続; PT1/4 ネジ×2 台
    - 仕様 型式; φ75mm/FS1.0MPa, 接続; PT1/4 ネジ×2 台
- 流量検出
  - 空気流量計測センサ(キーエンス; 100ℓ/min/Rc1/4)×1台
  - 空気流量計測センサ(キーエンス:250ℓ/min/Rc1/2)×1台
  - 空気流量計測センサ(キーエンス;600ℓ/min/Rc1/2)×1台
- ② 温度検出
  - K型シース熱電対 (φ1.6mm/継ぎ手付; Rc1/8/ケーブル長 5m) ×4本

# 計測操作盤

試験体計測のデータ収録,状態監視および時刻歴表示等を PC 画面上に表示, 警報出力させるシステムの仕様を示す.また,図 2-71 に計測操作盤の全景写 真を示す.

- ① 計測盤仕様
  - ・ 形 式 計装ラック付作業机
  - ・ 概略寸法 W1500×B600×H700mm/サイド机付
    ・ ラック取付 下段前面 PC 本体 上段前面 収録計器(キーエンス) ラック背面 入出力接続端子,計装電源など

## ② データ収録器仕様

- ・ 電源入出力
  ・ 電源入力 盤入力電源 AC100V×20A
  ・ 電源出力 盤内計器/収録機器 AC100V×10A PC/外部コンセント AC100V×15A
- ・ データ収録 収録計器 型名 キーエンス収録計器
  入力 電圧入力 DC1-5V×8ch
  温度入力 K型熱電対×8ch

# 警報出力 ×4ch

 PC/CRT 標準 CRT (24in 程度), HDD; 1T, 主メモリ;8~16G

インターロック

警報表示(グラフィック画面);

装置圧力異常,空気圧力上限/空気量上限,D/L 警報について,監視画面に警 報表示,ブザーを鳴らす.リセットにてブザー停止が可能.

試験体監視表示

装置状熊監視画面:

試験装置の概略系統を表示させ、圧力、温度、空気量など計測値の表示およ び装置状態を監視可能なグラフィック画面を有する.

電気計装配線

•	電源容量	AC100V×20A	計測盤/PC 電源	×1 回線
		$AC100V \times 20A$	トラバース装置/照明	×1 回線
		$AC100V \times 20A$	脱湿装置	×1 回線
		AC200V 単相×	20A レーザー計器	×1回線

- 計装配線
  - ・ 圧力計測 4 芯シールド/0.5mm2 ×2回線
    ・ 温度計測 K型補償導線シールド付/0.5mm2 ×3回線

  - 流量計測 4 芯シールド/0.5mm^2 ×3 回線
- 液膜センサ計装線
  - 液膜計測配線(W/M と同等/D-Sub25in フコネクタ×10m を二分)
  - 架台に端子台を取り付けて、多芯ケーブルを接続配線。 (受信側; 26 端子台×8 個, 発信側; 26 端子台×8 個)
  - 液膜センサ側の配線は、専用ケーブルにて端子台に接続。
  - ・ W/M 計測の発信/受信アンプは、羽子板状の受け台座にて支持.
- 保護管の設置

レーザー機器からトラバース装置間を接続するファイバケーブルの 保護として, φ50mm 程度のフレキ保護管を布設.



図 2-71 計測操作盤の全景写真

## 3. まとめ

BWR燃料集合体内の燃料棒を整列支持するスペーサによる液滴付着効果に着 目し,種々のタイプ・形状のスペーサに対して同効果に関する現象の解明および モデル化のために,大気圧での水ー空気系の実験を可能し,CFD レベルでの詳 細かつ基礎的な実験データの取得を目的としたスペーサ影響評価実験装置を設 計製作した.

## (1) 模擬燃料集合体とスペーサ

サブチャンネルの流路構成を模擬するために、1 段分のスペーサとその上流側、 下流側に 500mm の流路長さをもつ模擬燃料集合体を製作した. 模擬燃料集合体 は、センター体系とサイド体系の 2 タイプのどちらも実現できる単一の模擬燃 料集合体の構成とした. 構造物は、可視化を行うため透明なプラスチック樹脂と し、スペーサによる液滴付着効果を計測するスペーサ下流側の領域については、 サブチャンネルの中央領域を見通せる透明な側面部を持つ構成とした. スペー サは、センター体系に対してグリッドタイプ、丸セルタイプおよび旋回羽タイプ の 3 種類、サイド体系に対しては、グリッドタイプでかつそのサイドバンド部 にフロータブを設置したものについて試験する計画であるが、今年度は丸セル タイプを製作した.

## (2)試験部

試験部は,製作した模擬燃料集合体(可視化部模擬流路部,上下部試験流路部) とスペーサ,液滴流水系,および上部気液分離容器と組み合わせて試験体を製作 した.試験部の模擬流路部は,全長1165 mm,上部から505 mm 下端に模擬スペ ーサを配設したサブチャンネル流路構造となっており,東西南北側に高さ方向 の可視化用覗き窓を設け,可視化範囲は模擬スペーサを起点に,上流側300 mm 程度,下流側500 mm 程度とした.

# (3) 可視化計測システム

可視化用覗き窓からアクセスし,各サブチャンネル領域内での液滴径分布,液 滴速度分布および気相速度分布の2次元計測を計測するために PIV, PTV を, また,液敵群の流速分布の2次元計測するために LDV を導入した. 高感度カメ ラ,レーザー本体,2次元プローブをトラバース機構に固定して据付した.

## (4)液膜センサ

スペーサ下流側の液膜分布を計測するために、模擬燃料棒の表面の円周方向 に多点電極フレキシブル基板を配置し、スペーサの下流側でスペーサ直上部か ら 500mm の長さの範囲にわたって覆うようにした.