

750kW アーク加熱風洞の構造と動作特性*

松崎 貴至^{*1} 石田 清道^{*1} 渡辺 泰夫^{*1}
三保 和之^{*2} 板垣 春昭^{*2} 芳仲 敏成^{*2}

Construction and Characteristics of the 750kW Arc Heated Wind Tunnel*

Takashi MATSUZAKI^{*1}, Kiyomiti ISHIDA^{*1}, Yasuo WATANABE^{*1},
Kazuyuki MIHO^{*2}, Haruaki ITAGAKI^{*2}, Toshinari YOSHINAKA^{*2}

ABSTRACT

Arc-heated wind tunnels are essential ground test facilities for the development and evaluation of thermal protection system (TPS) materials which protect the body of space vehicles from severe reentry heating environments. Under an NAL/NASDA joint space program, a 450kW arc-heated wind tunnel was built and operated to test the TPS materials for a planned Japanese space vehicle, HOPE. In 1993, to improve the operational characteristics of the tunnel, such as aerodynamic flow characteristics and heating rates, a complete reconstruction of the tunnel was done. This included the introduction of a multisegment arc heater, improvements in the evacuating system capacity and so on. As a result, the operating range extended up to 750kW and a heating rate of 2.2MW/m² was obtained for a ϕ 50mm flat faced cylinder model. Due to the inclusion of a channel nozzle, the testing ability of a flat panel model of 100mm \times 100mm size was added. This paper describes the structure and function of the 750kW wind tunnel and its components. Operational characteristics of the arc-heater and low density free stream are also delineated.

Keywords: Arc Heated Wind Tunnel, High Enthalpy Flows, Reentry, Aerodynamic Heating, HOPE

概 要

アーク加熱風洞は、宇宙往還機の機体を再突入時の空力加熱から保護する防熱系(Thermal Protection System:TPS)材料の開発、評価に必須の地上試験設備である。日本においても、国産宇宙往還機の開発を目標とした NAL/NASDA 共同研究のもとで 450kW のアーク加熱風洞を 1981 ~ 1982 年に建設、運用して各種耐熱材料の加熱試験を実施してきた。この風洞の気流特性の改良、高加熱率での試験能力の安定化等の試験能力向上を目的として、1993 年にアーク加熱器を大出力化のために交換、ディフューザと排気系の性能向上等を中心とした大改造を実施した。その結果、最大入力 750kW での運用が可能となり、外径 ϕ 50mm の平頭模型で最大加熱率 2.2MW/m² で安定した澱点加熱試験が可能となった。また、チャンネルノズルの装備により 100mm \times 100mm の平板供試体の試験も実施出来るようになった。本論文では、この 750kW アーク加熱風洞の全体構造、各構成要素の性能について詳述する。また、加熱器の放電特性と気流の圧力、加熱率等の運用動作特性を述べる。

* 平成 13 年 5 月 29 日受付 (received 29 May, 2001)

*1 流体科学研究センター

*2 宇宙開発事業団

1. まえがき

アーク加熱風洞は、スペース・プレーンや HOPE-X(H-ロケット打ち上げ型有翼往還機)等の宇宙往還機の大気圏再突入時の熱的飛行環境を地上で試験研究するための設備である。特徴としては、他の高エンタルピー風洞と比べて高エンタルピー流が長時間にわたって得られることである。従って特に空力加熱の研究、熱防護系の材料の開発試験に適している。航技研においては、1960年代から極超音速流体力学研究のための設備として、100kW プラズマ風洞を設置し、次いで実験設備としてのアーク加熱風洞の開発と改良、極超音速飛翔体に関する実験的研究および高エンタルピー流れに関する基礎的研究を進めてきた。

1980年から宇宙開発事業団との共同研究「回収技術の研究」において、本格的な供試体の熱防御評価試験が行えるよう航技研のプラズマ風洞に付加して設備の増強を図るため 450kW アーク加熱風洞付加設備の設置が企画され 1983年に運用が開始された。

450kW アーク加熱風洞付加設備^{1)~4)}は、TT500型ロケットを使用した大気圏への高速突入飛行実験(打込実験)のカプセルのためのアプレータ熱防御性能試験、HOPEの胴体等の比較的低い温度(約 1,300°C 以下)のための耐熱タイル防熱試験、HOPEの極めて高温となるノーズコーン及びリーディングエッジのためのC/C材、炭素繊維強化炭素複合材)防護材及びコーティングの耐酸化性能試験、スペースプレーン等の上昇時および帰還時に遭遇する熱防護材開発のための傾斜機能材料の耐熱性能試験、H-ロケッ

トの上昇時におけるフェアリング防熱材の性能試験、SiCコーティングされたC/C材により製作したHOPE全機形状模型による表面熱伝達の実験⁵⁾、軌道再突入実験機(OREX)の静電プローブや解離再結合センサー及びOREXのノーズキャップやエアロスカートに使用する耐酸化コーティングされたC/C材とセラミックタイルTPS(Thermal Protection System)の熱防護材性能試験等の種々の試験研究に運用されてきた。

この風洞の気流特性の改良、高加熱率での試験能力の安定化等の試験能力向上を目的として、750kWアーク加熱風洞への改修を行った⁶⁾⁷⁾。この750kWアーク加熱風洞は、コニカルノズルを使用した澁み点の試験の他に、100mm×100mmの大型平板供試体の試験ができるようにチャンネルノズルの拡充を行った。アーク加熱器は、効率及び電極損耗度を改善し気流のコンタミネーションを防止するため交換を行った。また直流電源、拡散筒、空気冷却器、ガス供給装置及びNO_x除去器は、性能向上などのため装置の交換を行い、排気装置は試験時の気流のブレイクの防止などを図るため真空ポンプを増設し、能力の向上を行った。測定室は、気流診断用プローブのため供試体射出装置を新たに設けた。HOPEの機首先端部等に適用されるC/C材の表面温度は、図1に示すHOPE標準再突入経路(直径0.4mの機首先端部)から目標温度が約1,700°Cと設定された。アーク加熱風洞の能力は、HOPE標準経路の加熱率、圧力及び時間をほぼ満足する条件で表1に示す基本特性にまとめられた。本報告では、750kWアーク加熱風洞の構造、運転及びノズル気流特性について記述する。

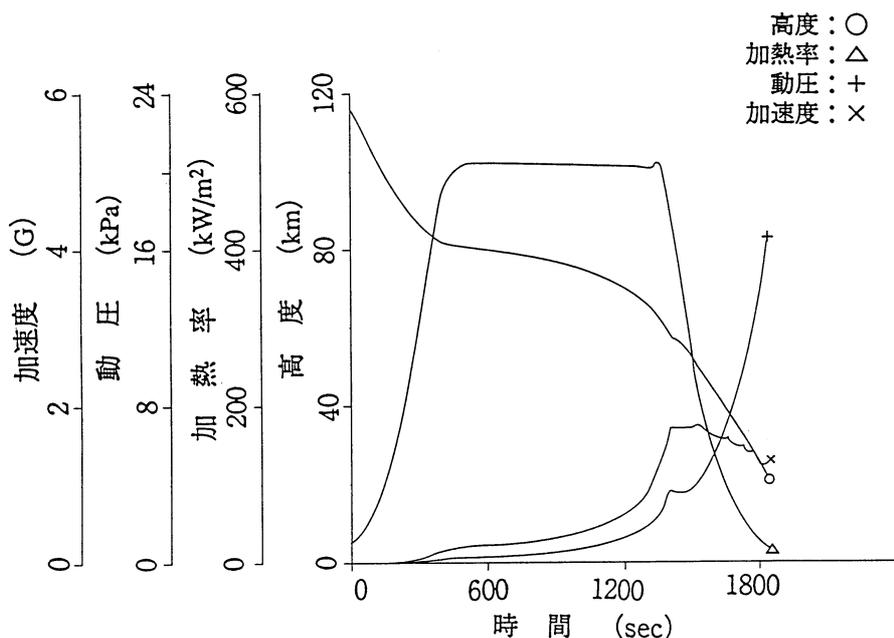


図1. HOPE標準再突入経路(直径0.4mの機首先端部)

表1 風洞の主要な能力

1. 設備能力	
入力電力 (最大)	750 kW
作動ガス	空気、窒素
ガス流量	8~22 g/s
総圧 (最大)	0.11 MPa
総エンタルピ	~ 30 MJ/kg
効率	50% ~
運転時間	20 分以上
2. 試験能力	
1) よどみ試験 (コニカルノズル使用)	
試験体形状	~ ϕ 50mm 円柱
供試体表面温度	1700°C*
動圧	~ 2500 Pa
2) 平板試験 (チャンネルノズル使用)	
試験体形状	100×100 mm 平板
加熱率	~ 300 kW/m ² **
表面圧力	~ 3.3 kPa

注 * 熱損失係数=2.0、放射率=0.9とした場合

** 平板供試体前縁中心点、完全触媒性、冷却壁

2. アーク加熱風洞の構成

図2に750kWアーク加熱風洞の全体図を、図3にアーク加熱風洞のブロック図を示す。750kWアーク加熱風洞は、アーク加熱器、直流電源、ガス供給系、ノズル、測定室、拡散筒、空気冷却器、排気装置、制御装置及び高圧・低圧冷却水装置で構成されている。ガス供給系は、作動ガス供給系と起動ガス供給系の二系統からなっている。作動ガスは空気と窒素が使用できる。起動ガスは、アルゴンガスを使用し、風洞起動時にアークの点火を行う。作動ガスはガスカードルの高圧ガスボンベからガス集合装置に導かれ、流量制御弁を通してアーク加熱器に流入する。アーク加熱器は、交流3.3kVの屋外開閉所を経て、2,000kW直流電源により供給される電流制御されたアーク放電により作動ガスの加熱を行う。加熱された作動ガスは、スロートを通してノズルにより膨張され測定室において高エンタルピの超音速流を発生する。風洞は円錐型のコニカルノズルによるよどみ点試験と矩形断面のチャンネルノズルによる大型平板供試体の試験が行える。気流の条件は、ガス流量とアーク電流の調節によって行う。以後作動ガスは、拡散筒において減速され、圧力回復を行い、空気冷却器で熱交換により約50°C以下に冷却され、メカニカルブースタポンプや油回転ポンプにより連続的に排出される。排気ガスはNO_x除去器によりNO_xを低減した後、大気へ放出する。冷却水装置は高圧と低圧の独立した冷却水装置がある。高圧冷却水装置はアーク加熱器とノズル等を冷却するため導電性

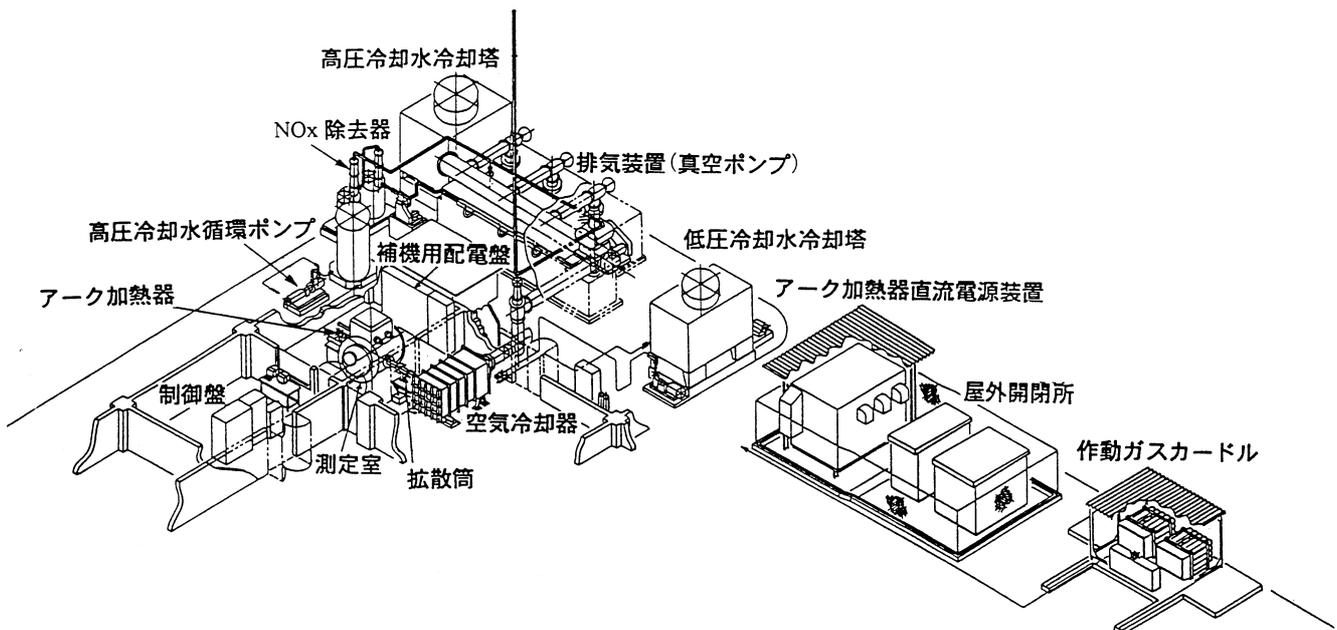


図2. 750kWアーク加熱風洞の全体図

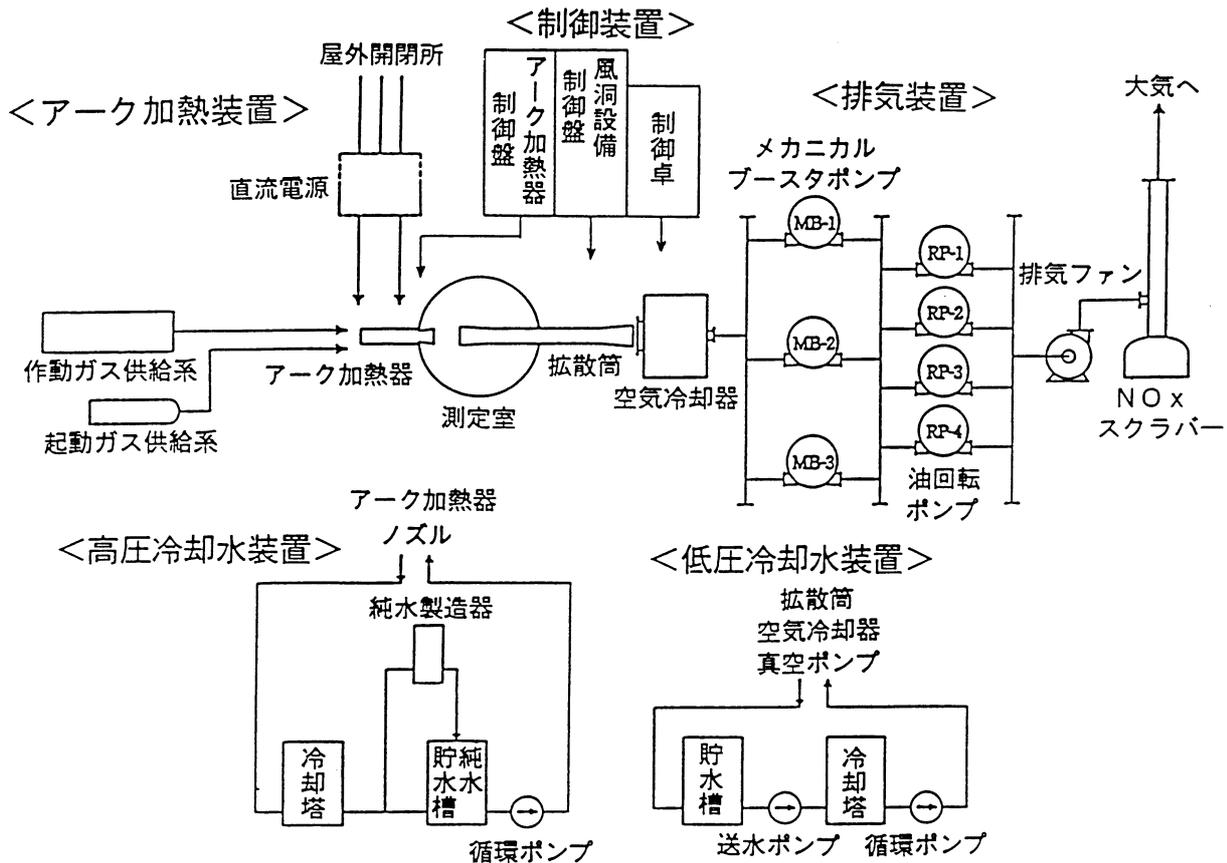


図3. 750kW アーク加熱風洞のブロック図

を持つことがないよう純水を用い、流路が狭いため大きな送水圧力が必要である。低圧冷却水装置は拡散筒、空気冷却器および排気装置等を冷却する。制御装置は、ガス供給系の流量の制御、直流電源の電流制御およびアーク加熱風洞の起動と運転を行うアーク加熱器制御盤、排気装置や高圧と低圧冷却水装置の運転制御を行う風洞設備制御盤および三次元移動装置、試料回転装置および供試体射出装置の運転制御を行う制御卓から構成されている。

3. アーク加熱装置

3.1 アーク加熱器

アーク加熱風洞に使用するアーク加熱方式は種々あるが、高いエンタルピー流、温度分布の均一性、アークの路長が長くなる高電圧、大電力での使用に適した縮流安定型 (segmented constrictor 型) のアーク加熱器を採用した。この 750kW アーク加熱器の概略図を図 4 に、750kW アーク加熱器及び測定室の写真を図 5 に示す。アーク加熱器は、陽極を含む後部シェル部、縮流部、陰極とノズルアイソレータ部から構成され、上流の陽極と下流の陰極との電極間でアークが維持される。陽極と陰極の電極はスピンドル(電磁コイル)を内蔵し、磁場により電極上のアークの足の回転を行っている。作動ガス(一次ガス)は各コラムセ

グメント間等からアーク加熱器内に導入され、アーク放電により加熱され、ノズルから超音速流を発生する。各コラムセグメントや電極などは、個別に絶縁され、個別に水冷されている。

縮流部は、厚さ 10mm、内径 $\phi 25.4\text{mm}$ の無酸素銅のコラムセグメントを 13 枚組合わせた縮流 pack (1 pack)、その上流部および下流部にはコラムセグメントを 8 枚組合わせた縮小 pack と拡大 pack により構成されている。縮流 pack の 1 pack の長さは約 130mm で、最大 3 pack に組立ができ pack 数により運転条件の調整ができる。

電極は、無酸素銅製で、電極に内蔵されたスピンドルにアーク電流を流し、その磁場とアーク電流の電磁力により電極上のアークの足を回転させ電極の損耗の軽減を行っている。電極の形状は、外径が $\phi 100\text{mm}$ 、曲率半径の異なる曲率半径が約 $R=19\text{mm}$ で内径が $\phi 38\text{mm}$ の電極形状 A と曲率半径が約 $R=24.6\text{mm}$ で内径が $\phi 55\text{mm}$ の電極形状 B が準備されている。陽極は電極形状 A のみ用いる。図 6 に示す電極の写真では、左側が電極形状 A で、右側が電極形状 B である。電極の寿命は、アーク電流を上げれば上げるほど電極が損耗し寿命は短くなる。アーク電流が 500A では陰極が約 5 時間、陽極が約 9 時間である。アーク加熱風洞試験で最も加熱時間の長い供試体の試験時間は

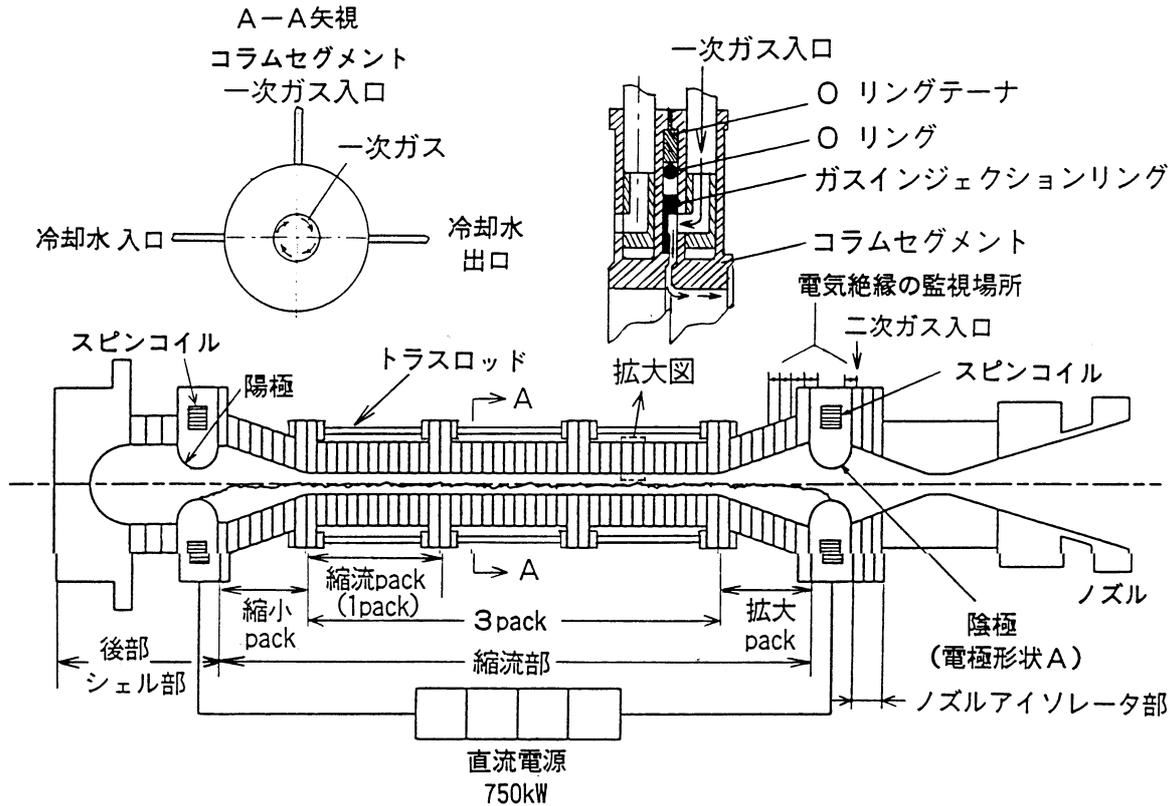


図4. 750kW アーク加熱器の概略図

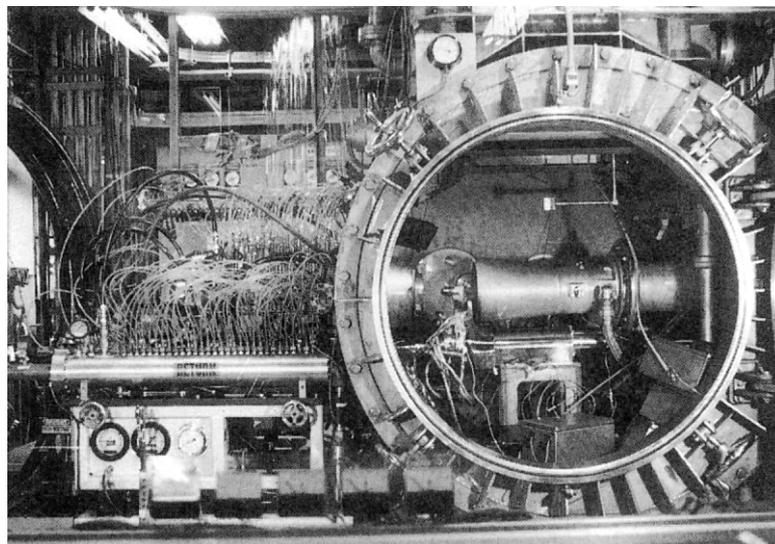


図5. 750kW アーク加熱器及び測定室

約 1,100 秒である。

アーク加熱器の運用の詳細を付録 1 に記述した。

3.2 直流電源

アーク加熱器の直流電源は、負荷電圧 2,000V、電流 1,000A において 2,000kW が得られ、出力は、アーク加熱器と直流電源の整合条件が満足するよう余裕をもたせてある。出力電流は、200 ~ 1,000A の範囲で連続調整が、出

力 1,000kW では 30 分間の連続運転ができる。直流電源の要目を表 2 に、直流電源の写真及び回路の概要をそれぞれ図 7、8 に示す。直流電源の一次側は、交流 3,300V、3 相 3 線式、50Hz を屋外開閉所の遮断器を経て供給し、2 回路の三相変圧器に Y 型で接続している。この三相変圧器の二次側は、独立した Y 型及び Y 型の 2 回路の三相全波整流器ブリッジを直列に接続して使用する。2 回路の三相全波整流器ブリッジと 12 個のサイリスタは、リップルを低



図 6. 750kW アーク加熱器の電極
(左側が電極形状 A、右側が電極形状 B)

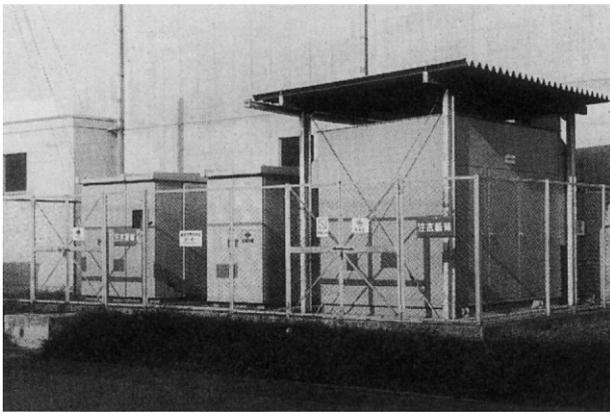


図 7. 直流電源・屋外開閉所

くするために用いられる。また出力に直列に接続されたチョークコイルは、アークを安定されること、トランジェント電流をなめらかにすること、整流された小さなリップルをよりなめらかな直流波形にする機能を有する。電流制御の調節は、サイリスタ制御回路とサイリスタなどにより行なう。制御盤の電流調節用ポテンシオメータの信号と、二次側直流電流検出用器により検出した出力電流の信号は、サイリスタ制御回路によりサイリスタの制御を行い、出力電流値を調節する。即ち、出力電流値の制御は、制御盤上のポテンシオメータによって遠隔制御される。その直流電源の特性を図 9 に示す。直流電源は最大電流 1,000A (図中の 印) 電圧 2,000V において 2,000kW の電力がアーク加熱器に供給が可能であるが、アーク加熱風洞のアーク加熱器の冷却水装置及び空気冷却器が 750kW であるために、直流電源の出力は図中の 印と実線で囲まれた領域内の 750kW に制限されている。図中の 印はアーク起動時の最大無負荷電圧 2,380V を示す。直流電源の効率は、95% であるが、力率は出力電圧の増加により増大する。この力率特性を図 10 に示す。力率特性から、図中の 印で示すアーク電圧に対する力率は、0.307 ~ 0.831 が得られた。

直流電源内は、変圧器などが高温となるので冷却ファン

表 2 直流電源の要目

制御方式	サイリスタ制御
入力	交流3,300V、50Hz、3相3線式
	効率：0.95
最大出力	直流2,000V 1,000Aにおいて2,000kW
連続定格	直流1,000V 1,000Aにおいて1,000kW、30分間
外形	幅：3.66m、奥行：2.44m、高さ：2.79m
重量	12ton

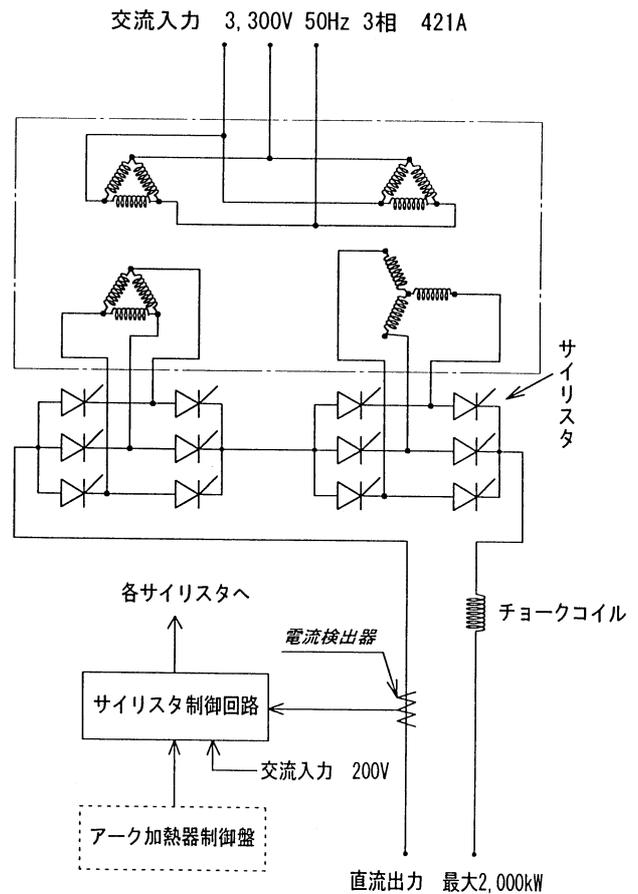


図 8. 直流電源回路の概要図

により強制空冷する。また屋外型のため、サーモスタット付ヒータを常時作動させ、湿気による露結防止を行っている。直流電源は、動作中の異常時に備え、インターロックにより警報及び遮断器の制御を行う。主なインターロックの項目を表 3 に示す。

3.3 アーク加熱器制御盤・風洞運転

アーク加熱器制御盤は、アーク加熱器の電流電圧やガス流量等の監視及び風洞動作特性データの表示を行う。図 11 に制御盤の写真を示す。本制御盤は、高さ 183cm、幅 91cm、奥行 67cm の鋼製自立型で前面上部に警報灯、表示灯、中

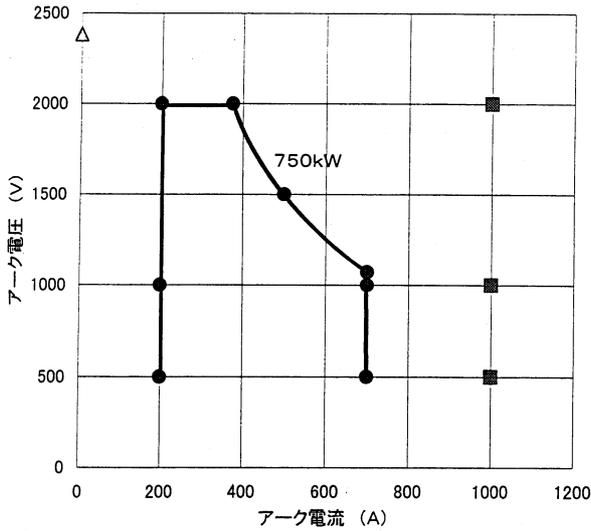


図9. 直流電源の特性

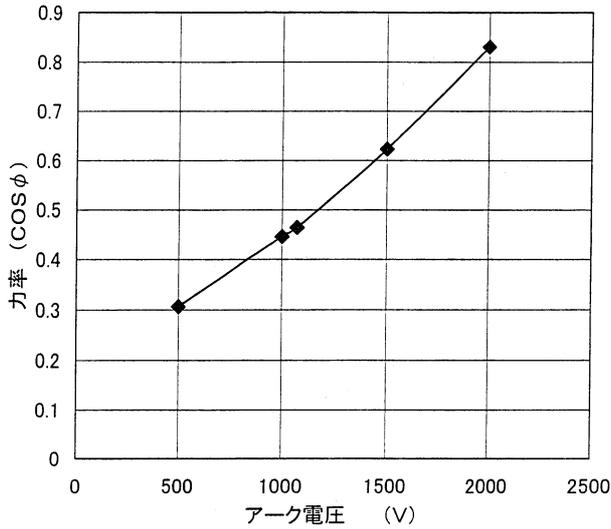


図10. 直流電源力率特性

中央部に計器、下部に操作器類を備えている。表4に制御盤の機能を示す。盤上のランプ表示は、単なる表示については緑、警報表示は黄、特にトリップを必要とする異常事態の警報は赤により表示し、警報ブザーが鳴る。トリップとは直流電源の遮断器を開き、アーク加熱器を停止させることを示す。その他の異常事態が発生した場合、非常停止用押しボタンにより直流電源が遮断できる。

アーク加熱風洞の運転制御は、ガス供給設備の圧力設定、冷却水装置の冷却水の循環、風洞本体の排気、風洞本体の起動、停止等の運転操作からなる。風洞の運転は、付録2に示した運転手順書に従い、指差し確認を行い、手動操作により行う。運転準備は低圧冷却水装置、高圧冷却水装置及び排気装置の運転を行う。風洞本体の排気は、大気圧より6.66Pa(0.05Torr)に排気するまでに約15分程度である。この間にアーク制御盤の全スイッチの初期設定を行い、ガス供給設備と計測装置の準備等を行う。測定室内の圧力が約6.66Paに排気されたのを確認し、アルゴンガス及び作動ガスの一次ガス流量の初期設定を行う。一次ガス流量の初期設定値は、10g/sである。起動ガスであるアル

表3 直流電源インターロック

項目	機能	
過負荷	警報表示	電源遮断器開
冷却ファン故障	〃	〃
サイリスタヒューズ断	〃	〃
扉開	〃	〃
変圧器温度過大	〃	〃
露結防止用ヒータ故障	〃	〃
空冷用空気流量低下	〃	〃

表4 アーク加熱器制御盤の機能の要目

項目	機能
起動ガス 一次ガス	ガス圧力調節、圧力値の表示、弁の開閉、ランプ表示、 ガス流量制御、圧力、温度、差圧値の表示、弁の開閉、ランプ表示、 ガス流量値の表示
直流電源	入切、電流調節、冷却ファンの入切、制御電源入切、ランプ表示、 可飽和リアクトル電流値の表示
アーク加熱器	冷却水（温度差、各電極温度、コイル温度）の表示、プレナム室、 一次ガス及び起動圧力の表示、アーク電圧及びアーク電流値の表示
各ガスポンペ	元弁開閉をランプ表示、各ガス圧力値を表示

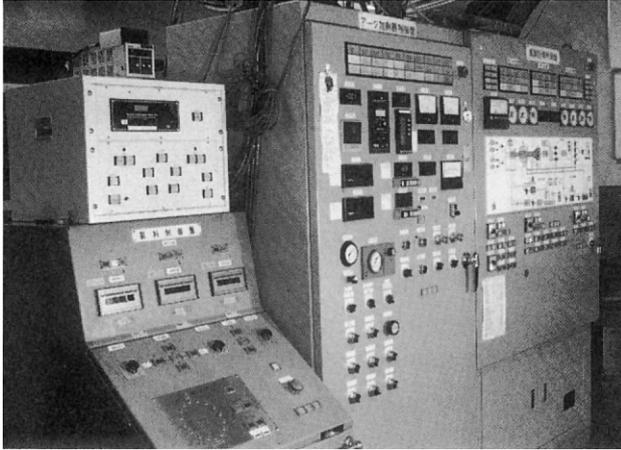


図 11. 制御盤・制御卓（左側から制御卓、アーク加熱器制御盤、風洞設備制御盤）

ゴンガスをアーク加熱器へ導入し、アーク電流の初期設定を行い、運転準備が完了する。アーク電流の初期設定値は、300A である。

風洞の運転は、実験室内無人の確認及び各計測担当者の計測準備完了の確認を行い、責任者の合図とともにアーク加熱器運転押しボタンをONにしてアーク加熱風洞の起動を行う。アークの点火はアルゴンガスで行いシーケンスにより約 0.8 秒後に作動ガスである空気等を導入する。点火の状態は、アーク電流計を監視し、アーク電流が初期設定電流値になったのを確認する。つぎにアーク電流を制御し、アーク電流を目標とした電流値まで増加させる。アーク電流が安定したのを確認後、作動ガスである一次ガス流量を目標とした値に調節し設定する。二次ガスが必要な場合は、目標とした二次ガス流量を導入する。風洞動作の特

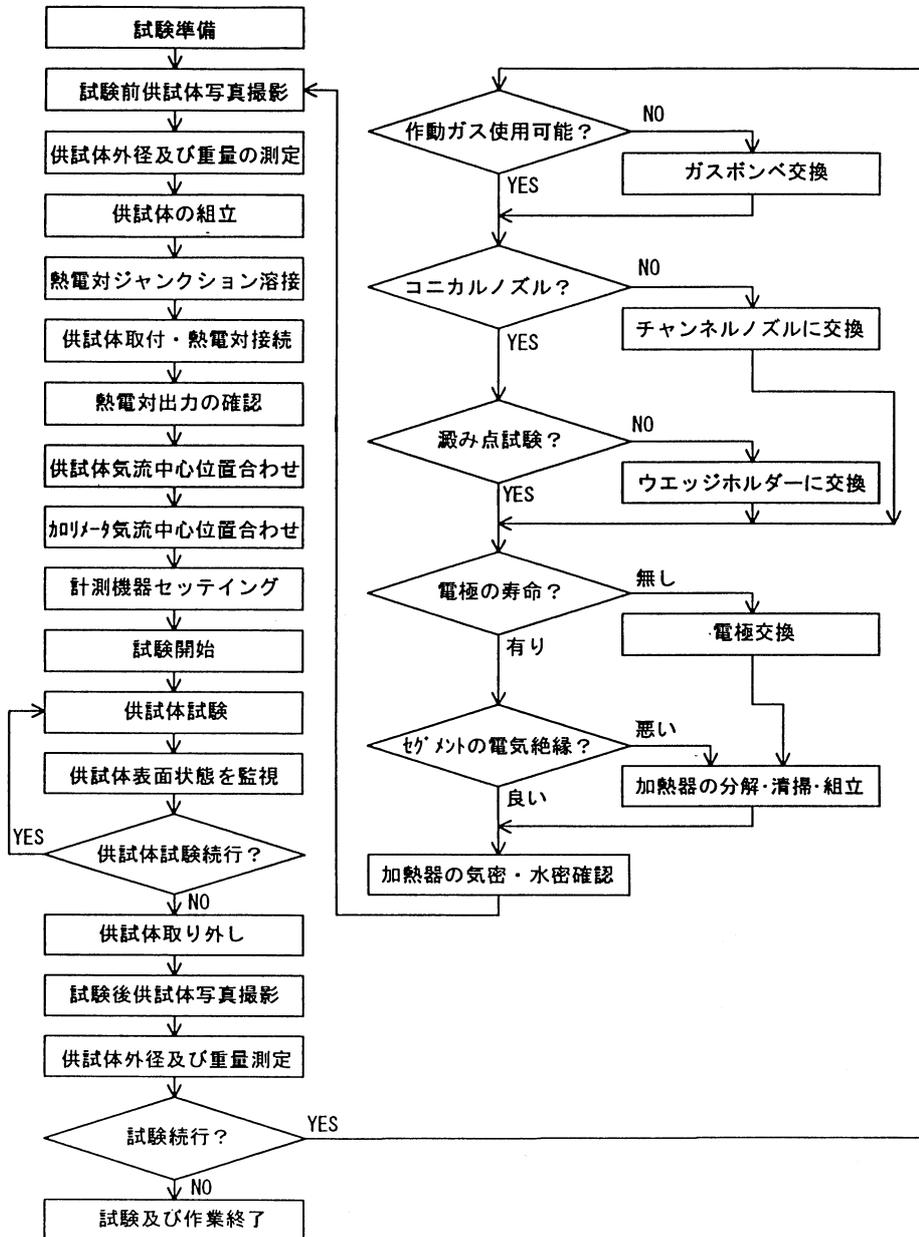


図 12. アーク加熱風洞試験のフローチャート

性データが計測装置により実時間処理され CRT 上に出力される。各データの値が安定したのを確認した後、校正モジュール等により気流の加熱率分布や圧力分布の計測を行う。目標とした気流の加熱率値と澁み点圧力の調節は、アーク電流とガス流量を調節して行う。以後気流の計測や準備した供試体等の試験を順次行う。試験中は測定室観測窓からアーク気流の色や状態、計測装置の CRT 画面から、アーク電流と電圧等の風洞動作特性データの安定性、アーク加熱制御盤から、冷却水温度及びガスポンペ元圧力の確認、風洞制御盤から各部冷却水流量や冷却器出口ガス温度等の監視を行う。

風洞の試験が終了し、アークを停止させる場合は、直流電源の主遮断器を OFF にする。風洞停止は風洞運転の逆の操作を行う。

アーク加熱風洞の供試体の観察、測定、組立、取付及び試験の種類によるノズル交換並びにアーク加熱器のメンテナンス等の試験準備と、供試体試験のフローチャートを図 12 に示す。

4. 風洞本体

4.1 測定室

測定室の形状は、外径 $\phi 1.6\text{m}$ 、長さ 1.4m の円筒横置形である。図 13 に測定室の形状を図 5 に写真を示す。測定室の側面円筒部上流側は、アーク加熱器に接続されたノ

ズルが、下流側は、吸込筒を経て拡散筒に接続されている。円筒部上流側の左右の 2 箇所と上部 1 箇所には、供試体表面温度計測用観測窓を取り付けた。円筒の一端の鏡板には、観測窓と圧力導管が取り付けられている。観測窓は、分光計測等を行うために材質は石英ガラスを用いている。圧力導管の継ぎ手は、ICF フランジおよびクイックカップリングが取り付けられている。圧力導管は、気流の質量分析や圧力計測に使用する。その他の鏡板には、電圧信号線と熱電対信号線および冷却水配管が取り付けられている。その反対側の鏡板には、直径 $\phi 500\text{mm}$ の観測窓付きの円筒片開き扉が取り付けられている。この観測窓の材質は、耐熱強化ガラスを用い、風洞運転中の気流や供試体の監視に使用する。測定室の上部には、三次元移動支持装置が下部には試料回転装置および供試体射出装置が取り付けられている。三次元移動支持装置は、水冷式ピトー管、及び水冷式カロリメータ等を取り付け、気流の圧力や加熱率の計測を行うことができる。三次元移動支持装置の方向は、左右方向、上下方向および気流中心軸方向をそれぞれ X, Y, Z 軸とし、移動範囲は、X と Y 軸が気流中心から $\pm 150\text{mm}$ 、Z 軸が 500mm である。移動速度はそれぞれ変速可能な $0 \sim 10\text{mm/sec}$ である。試料回転装置は、最高 3 個の供試体を順次効率よく高温気流中に挿入し試験を行うものである。試料回転装置の回転角度は 120° で、回転速度は $0.55 \text{ 秒} / 1 \text{ 本}$ である。供試体射出装置は、供試体をすばやく気流内に投入す

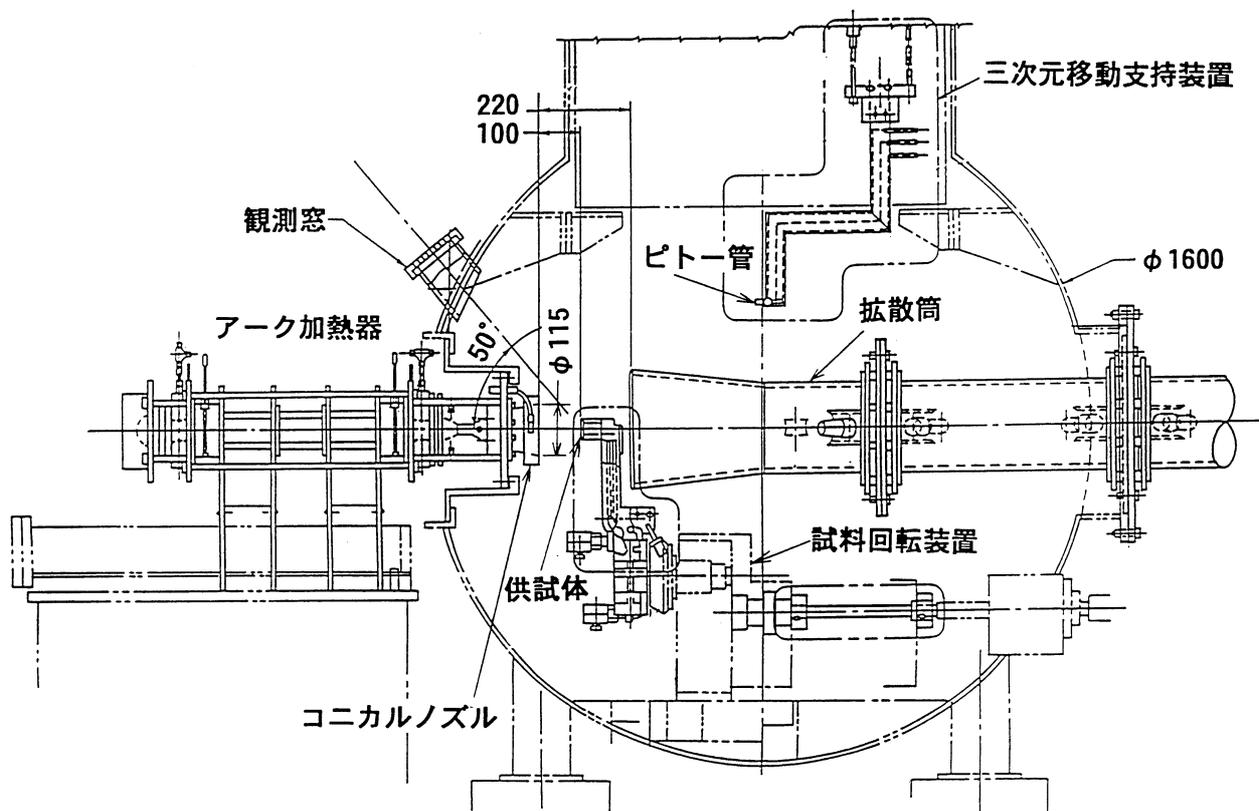


図 13. 測定室の形状 (単位 : mm)

る。その速度は、0 ~ 21.0cm/sec、移動距離は、400mm である。いずれも駆動装置は、パルスモーターである。各装置の要目を表 5 及び表 6 に示す。

この他、測定室壁には、圧力導管及び冷却水配管等の配

表 5 三次元移動支持装置

項目	機能
移動範囲	X軸 300mm Y軸 300mm Z軸 500mm
移動速度	各方向 0~10mm/秒 (可変)
位置検出	エンコーダ (分解能 0.1mm)*
材質	SUS 304

表 6 試料回転装置

項目	機能
試料回転腕数	3本
回転半径	234.5mm
回転速度	0.55秒/1本
回転角度	120° /1本
駆動装置	パルスモータ
位置検出	パルスカウンタ
試料取付	外形φ50mm、φ40mmのフランジ
位置の精度	0.614mm (最小ステップ角0.072°/パルス)
材質	SUS 304

管接続ポート、安全弁、ドレン排出口及びリーク弁が取り付けられている。

4.2 ノズル

ノズルは、アーク加熱器内で加熱された高温気体を膨張させ、測定室に超高速流を発生させる。ノズルは、縮流部、スロート及び拡大部の3要素によって構成され、各部は高圧冷却水により強制冷却が行われる。ノズルは、コニカルノズルとチャンネルノズルを交換装着して使用する。各ノズルの材質は、銅合金である。

コニカルノズルは、スロート直径がφ25mm、ノズル出口直径がφ115mm、開口比が21、半頂角が15°の円錐形で設計マッハ数が約4.8である。コニカルノズルの形状を図14に示す。コニカルノズルを用いた試験は、澱み点試験と平板試験がある。澱み点試験と平板試験は供試体を試料回転腕に装着し気流中心に投入して供試体評価試験を行う。澱み点試験は、ノズル出口から約100mmの位置でφ50mm 平頭円柱ホルダーにφ25mmの供試体を取り付けて試験を行う。φ50mm 平頭円柱ホルダー及びφ25mmの供試体の概略図を図14の右側に示す、澱み点試験では供試体と同形状の平頭円筒型の気流校正モジュールがあり、供試体澱み点試験の直前に気流中心に投入し圧力と加熱率の測定を行うことができる。平板試験は、115mm x 52mm のウエッジホルダーに70mm x 40mm の平板供試体を取り付けて行う。平板試験では、必要な試験条件により、ウエッジホルダーを調整し、気流に対する角度を0°、10°、20°で試験を行うことができる。平板試験用ウエッジホルダーと平板供試体の概略図を図15に示す。

チャンネルノズルは、スロート、出口寸法がそれぞれ

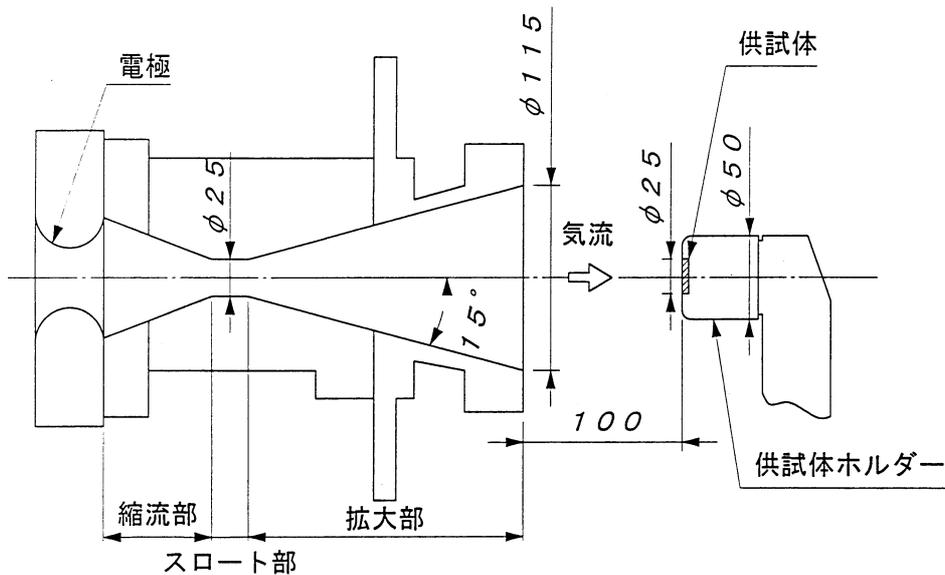


図 14. コニカルノズルと澱み点試験用 50mm 平頭円柱型ホルダー概略図 (単位: mm)

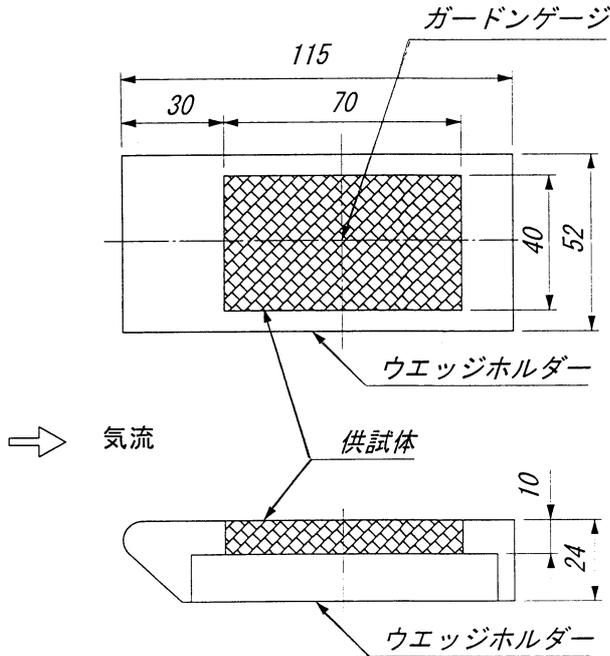


図 15. 平板試験用ウエッジホルダー概略図
(単位：mm)

22mm × 22mm、22mm × 173mm でノズル開き角度が 10° である。チャンネルノズルを用いた試験は、境界層流れ場において 100mm × 100mm の平板供試体を 2 枚装着し、同時に供試体評価試験を行うことができる。低加熱率の供試体加熱試験を行うとき、平板供試体の対面は、冷却した銅板を取り付けて行うことができる。このチャンネルノズルと平板供試体の概略図を図 16 に示す。平板試験には平板供試体と同形状の平板試験気流校正用モジュールがあり、気流の圧力と加熱率の測定ができる。試験は、平板供試体を気流と平行に取り付けて行う。この方法より高い表面圧力(静圧)の試験条件が必要な場合に備えて、平板供試体を気流に対し 4° 傾ける治具が用意されている。

4.3 拡散筒

拡散筒は、測定室で試料を加熱した後の高温気体を、減速させ、圧力回復を行い、冷却器へ導くための装置である。澗み点試験では運転条件や供試体の大きさによって、供試体が気流をブロックするため測定室の壁圧が上昇し、この圧力にバランスするために気流の有効コアが縮小する現象や気流がブレイク(気流閉塞)する現象を無くし、安定した気流の基で試験が行えるように、実験的、或いは、経験的取り扱いを主に拡散筒の設計を行った。この結果、拡散筒の全長は約 3,280mm である。これによりノズル出口から拡散筒までの試験スペースの長さが 220mm になった。拡散筒は、吸込筒、超音速筒、亜音速筒から構成され、材質は SUS304、構造は二重円管方式で、内筒と外筒の熱膨張の差異を吸収するため超音速筒と亜音速筒及び亜音速筒と

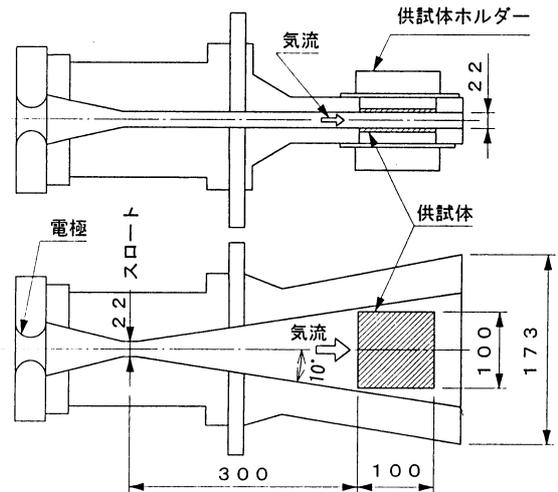


図 16. チャンネルノズル概略図(単位：mm)

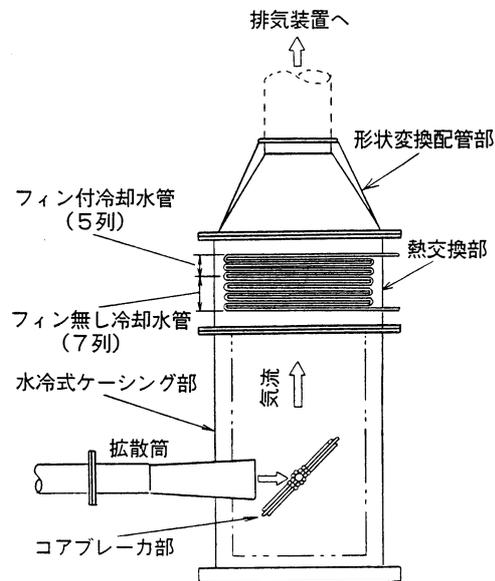


図 17. 空気冷却器の形状

冷却器との間は、ベローズ結合である。拡散筒の冷却は、内筒と外筒の間を低圧冷却水を流すことにより行う。冷却水量は、吸込筒部が $2\text{m}^3/\text{h}$ 、超音速筒が $2.5\text{m}^3/\text{h}$ 、亜音速筒が $3\text{m}^3/\text{h}$ である。

4.4 空気冷却器

空気冷却器は、拡散筒から流入する高温気流を冷却し、排気装置へ導くもので、設計条件は、空気流量 22g/s 、エンタルピ 30MJ/kg において、空気冷却器出口部の気流温度が 50 以下及び空気冷却器内の圧力損失比(圧力損失量/入口圧力)が 15% であることとした。図 17 に空気冷却器の形状を示す。空気冷却器は、コアブレーカ部、熱交換部、水冷式ケーシング部及び形状交換配管部の構造よりなり、低圧冷却水装置を用いて冷却水を強制循環させ気流を

冷却する。最大ガスエネルギーは、アーク加熱器効率 50% に 30% のマージンを加えた 525kW が入るものとし、このうち拡散筒の熱交換量が 15% の 80kW、空気冷却器の所用熱負荷がガスエネルギーの 85% の 445kW あることとした。空気冷却器の交換熱量は、アーク加熱器最大入力電力の 750kW の約 60% である。空気冷却器は長さ約 3m、幅は約 1.5m、高さは約 2m である。その内部のコアプレート部は、冷却水管を束構成にしており、拡散筒からの気流を 90° 偏向させ、かつ、均一な熱量的分布にして、後流側熱交換部の電熱効率を上げるためのものである。熱交換部は、12 列 × 29 段の U 字形伝熱管が替替目配列したシェルアンドチューブ方式である。この冷却水管は外径 $\phi 19.05\text{mm}$ のステンレス管で、1 列から 7 列は圧損性能を考慮しフィン無し裸管形状、8 列から 12 列は高熱交換性能を考慮し伝熱面積を大きくしたフィン付き管形状である。冷却水量は、コアプレート部が $33\text{m}^3/\text{h}$ 、熱交換部が $15\text{m}^3/\text{h}$ 、ケーシング部が $42\text{m}^3/\text{h}$ 、合計 $90\text{m}^3/\text{h}$ である。

5. 付属装置設備

5.1 排気装置

排気装置は、アーク加熱風洞試験時に発生する最大ガス流量 22g/s の高温気流のガスを連続排気し、供試体と供試体支持腕に対する気流断面積のプロクージュ比が 20% 以内になるような排気性能のものである。冷却器を経由した気流は、空圧作動式遮断弁をへて 500A により真空槽に導かれる。750A の真空槽には、排気量が $12,000\text{m}^3/\text{h}$ のメカニカルブースポンプを 3 台接続し、この後段に排気速度が $15,000\text{ //min}$ の油回転ポンプが 4 台接続されている。

設備を運転する際は、制御盤を遠隔、連動に切り換え後、排気装置運転の押しボタンを押すことにより、遠隔連動運転ができる。排気装置運転開始後、4 台の油回転ポンプのモータは、タイマーにより順次起動した後、400Pa(3 Torr) の設定真空度において真空スイッチによりメカニカルブースタポンプの 3 台が順次起動する。風洞を大気圧から 6.66Pa(0.05 Torr) に排気する時間は、約 15 分である。

5.2 NOx 除去器

アーク加熱風洞は、高温の空気を使用するため、解離により高濃度の NOx ガスが発生する。NOx 除去器は、アーク加熱風洞から排出される高濃度の NOx ガスを人体に害を及ぼさない濃度以下に低減する。NOx 除去器は、排気装置の出口に接続し、NOx を低減した排気は建屋の側壁に沿って屋上までステンレスの配管により導き、地上から約 30m の高度にて大気に放出する。NOx 除去器は、第 1 塔が湿式酸化法(苛性ソーダ + 亜鉛素ソーダ)、第 2 塔が湿式還元法(苛性ソーダ + 硫化ソーダ)を組合わせた高濃度 NOx 含有ガスの脱硝装置である。各々の反応は次式のよ

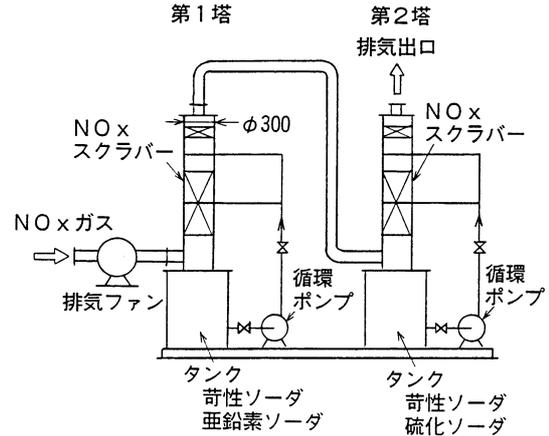
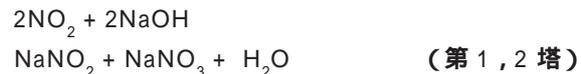
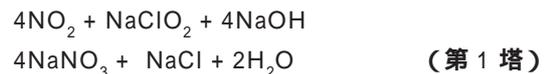
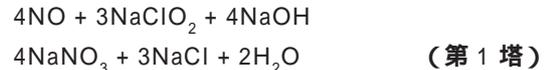


図 18. NOx 除去器の構成システム (単位: mm)

うにすすみ、NOx は NaNO_3 及び N_2 として除去される。



(但し、 $\text{NO}_2 : \text{NO} = 3 : 1$)

薬液は、第1、第2塔のタンクに張り込み循環ポンプでNOx除去器へ送る。

NOx 除去器の構成システムを図 18 に、使用する薬液をつぎに示す。

第 1 塔	苛性ソーダ	10wt%	約 90kg
	亜鉛素ソーダ	8wt%	約 72kg
第 2 塔	苛性ソーダ	1wt%	約 9kg
	硫化ソーダ	1.5wt%	約 13.5kg

薬液は、風洞の運転時間が 20 分 / 試験の条件として、約 30 試験の使用が可能である。NOx 除去器の性能はつぎの通りである。

入口 NOx レベル	想定値が約 40,000ppm
出口 NOx レベル	入口 NOx レベルの 1/300 以下の目標
処理風量	$2\text{m}^3/\text{min}$

5.3 冷却水装置

アーク加熱器の冷却は、所要水流量、交換熱量が大きい上、流路が狭いため大きな送水圧力が必要である。またア

- ク加熱器冷却水は、純水を用いる。他方風洞本体用冷却水は、ゴミの除去等に留意すれば、送水圧力もあまり高くなくて良い。そこで、ア - ク加熱風洞は、ア - ク加熱器装置に高圧の冷却水を供給するための高圧冷却水装置、拡散筒、冷却器及び排気装置等に冷却水を供給するための低圧冷却水装置の独立した2系統を設けた。冷却水装置の要目を表7に示す。

高圧冷却水系はステンレス配管(SUS304)、密閉型冷却塔、循環ポンプ、送水ポンプ、貯水槽、純水器及びフィルター等から構成されている。この冷却水系統は、アーク加熱器各パーツの流路の壁面や水中のゴミ等に付着した空気が核となって沸騰することのないように、また冷却水自体が導電性を持つことのないよう純水を用いる。この純水は、水道水を純水器で純化し、比抵抗を高め導電率 $33 \mu S/cm$ 以下にしたものを、送水圧力約 $20kg/cm^2G$ の高圧冷却水により供給する。貯水槽には冷却水の電気導電度を監視する検出器を取付け、導電度が設定値より高くなった場合、純水製造器(日本練水C-30S型)へ冷却水を循環させ比抵抗の回復をはかる。貯水槽の純水が不足した場合は、純水製造器へ市水を導入することにより補給する。貯水槽の $3m^3$ の純化には約2時間を要する。高圧冷却水装置の交換熱量は、750kW アーク加熱器の効率を50%としてアーク加熱器へ約 $1,402MJ/h$ 、ノズルへ $270MJ/h$ 、試料回転腕へ $54MJ/h$ 、ピトー管へ $27MJ/h$ のマージンも含め合計 $1,758MJ/h$ とした。冷却水流量はア - ク加熱器へ $48m^3/h$ 、ノズルへ $10m^3/h$ 、試料回転腕へ $5m^3/h$ 、ピトー管へ $0.8m^3/h$ の合計 $63.8m^3/h$ を供給する。

低圧冷却水装置の配管は、鋼管、開放型冷却塔、循環ポンプ、送水ポンプ、貯水槽及びフィルター等からなる。低圧冷却水装置は、冷却塔が開放式であり、また拡散筒や排気装置への送水圧もあまり高くないので戻り配管は、自然流下により貯水槽へ戻す方式である。低圧冷却水装置の冷却水流量は、拡散筒へ $22m^3/h$ 、冷却器へ $90m^3/h$ 及び排気装置へ $10m^3/h$ の合計 $122m^3/h$ を供給する。

この他、屋外に設置されている高圧冷却水用冷却塔、低圧冷却水循環ポンプ及び冷却水配管等に対し冬季凍結防止のため水抜き用ドレンバルブを設けた。

5.4 風洞設備制御盤・制御卓

風洞設備制御盤は風洞本体、排気装置及び冷却水装置の各機器の運転制御及び監視を行うための制御盤である。本制御盤は、ア - ク加熱器制御盤と連動させてア - ク加熱風洞の運転制御が行える。排気装置、冷却水装置の各機器は、機側盤により遠隔、機側の切換及び単独運転の操作ができる。機側盤で操作場所を遠隔に選択した後、制御盤で各装置の単独運転や連動運転を行う。連動運転では所定の起動シーケンスに従って起動と停止の押しボタンのみで各装置

表7 冷却水装置の要目

高圧冷却水系	循環流量	70 m ³ /h
	供給水圧	20 kg/cm ² G
	貯水槽	6 m ³
	冷却塔形式	密閉型
	交換熱量	420,000 kcal/h
	導電率	33 $\mu S/cm$ 以下
低圧冷却水系	循環流量	122 m ³ /h
	供給圧力	5 kg/cm ²
	貯水槽	3.5 m ³
	冷却塔形式	開放型
	交換熱量	483,000 kcal/h

遠隔運転が行われる。故障時にはインターロック機能及び異常時のトリップ機能によりア - ク加熱器をトリップさせ、アーク加熱風洞を自動停止させる。

風洞設備制御盤の他に、測定室内に三次元移動装置、試料回転装置及び供試体射出装置を遠隔で操作できる制御卓がある。三次元移動支持装置は、押しボタンにより前後、左右及び上下の移動制御が行える他、各方向の移動速度の制御も行える。三次元移動支持装置は、気流中心軸上に定める基準点から測った移動量を各方向共に $\pm 0.2mm$ の測定精度でデジタル表示を行う。試料回転装置は、押しボタンの操作により1ステップずつ正転もしくは逆転が行え、気流中に挿入した回転腕の識別が行えるよう回転腕の1番から4番までの番号のランプ表示ができる。供試体射出装置は、左右方向の移動制御が押し釦により行え、移動距離は $0.1mm$ の測定精度でデジタル表示される。図11に制御盤及び制御卓の写真を示す。

5.5 受電設備

受電設備は、ア - ク加熱器用直流電源と排気装置と冷却水装置に給電するための設備である。当所の変電設備から屋外開閉所までの約320mは、コンクリートヒューム管等を使用し $3,300V$ 、 3ϕ 、 $3W$ 、 $1C-200 \times 3$ のケーブルを埋設し布設した。屋外開閉所は、ア - ク加熱器用キュービクル、高圧受電盤および補機用キュービクルから構成される。図7に屋外開閉所の写真を示す。キュービクルは鋼板製の屋外形閉鎖自立形の構造である。ア - ク加熱器用キュービクルは $3,300V$ 、 3ϕ 、 $1,700kVA$ を750kW直流電源へ供給する。このキュービクルは、真空遮断機(VCB)を保有し、直流電源の入切りの操作をアーク加熱器制御盤で行うことが出来る。補機用キュービクルは、 $3,300V/200V$ の変圧器を経て屋内の補機用配電盤へ $200V$ 、 3ϕ 、 $400kVA$ を供給する。補機用配電盤は、排気装置や冷却水装置の各電動

機及び制御盤等へ給電する。電動機の所要電力が大きなものについては、Y-起動器を設けた。補機用配電盤は、必要な機器に対して電磁開閉器(MC)が取り付けられ制御盤から遠隔で制御が行うことができる。

6. 計測系

アーク加熱風洞は、供試体試験等に必要な風洞条件としてアーク電流、アーク電圧、ガス流量、アーク加熱器冷却水温度差、アーク加熱器冷却水流量等の風洞基準データを計測し、気流の総エンタルピを求める。また、各種材料試験の評価に必要な基本的な諸量として、供試体表面の表面温度、加熱率、圧力などを計測して加熱条件を確認し、これらの条件下で供試体の試験を行う。供試体の表面温度計測は単色式放射温度計及び2色式放射温度計により行う。2次元の供試体表面温度計測が必要なときは、供試体表面温度計測装置を用いる。単色式放射温度計及び供試体表面温度計測装置は、供試体表面の放射率が必要となるので放射率計測装置により放射率を計測する。熱電対(TYPE:K,R,B)による供試体内部、裏面等の温度計測も行う。加熱率分布、表面圧力分布計測のため供試体と同一形状の校正モジュールが整備されている。この校正モジュールは、多数のカロリメータ、多数の圧力孔を装備している。カロリメータはガードゲージにより、圧力計測はスキャナルブ圧力計測装置等により計測を行う。各種センサーの出力は、計測装置のA/D変換器によりデジタル化し、パ

ソコンによりデータ取得処理される。各計測項目に関連するセンサー、計測機器は、定期的に校正を行い、計測精度の検討を十分に行っている。この他に、化学的、熱的非平衡現象の高エンタルピ流の気流診断は、分光計測装置により気流成分温度計測を行う。これらの計測系のブロック図を図19に示す。

6.1 計測装置

アーク加熱風洞の計測装置は、プログラムの知識がない人でもWindowsの下でメニュー・ドライブ形式によってデータの取得とデータ処理が行える設計にした。計測装置は、アーク加熱風洞の基準データ、供試体試験データ及び気流校正モジュールデータ等のデータ取得とデータ処理に使用する。信頼できるデータを取得するため当風洞の計測器は、国際又は国家標準によって値づけされた二次標準器によって定期的に校正(トレーサビリティ)を行い、電圧計測、圧力計測及び放射温度計測等を行っている。

データ取得処理システムの主な性能をつぎに示す。本計測装置は、太陽計測株式会社がシステム構成及び調整を行った。

制御用計算機

- 型式 : HP Vectra VL2 4/66
- CPU : i486DX2/66MHz
- HDD : 340MB
- FDD : 3.5 インチ、1.44MB

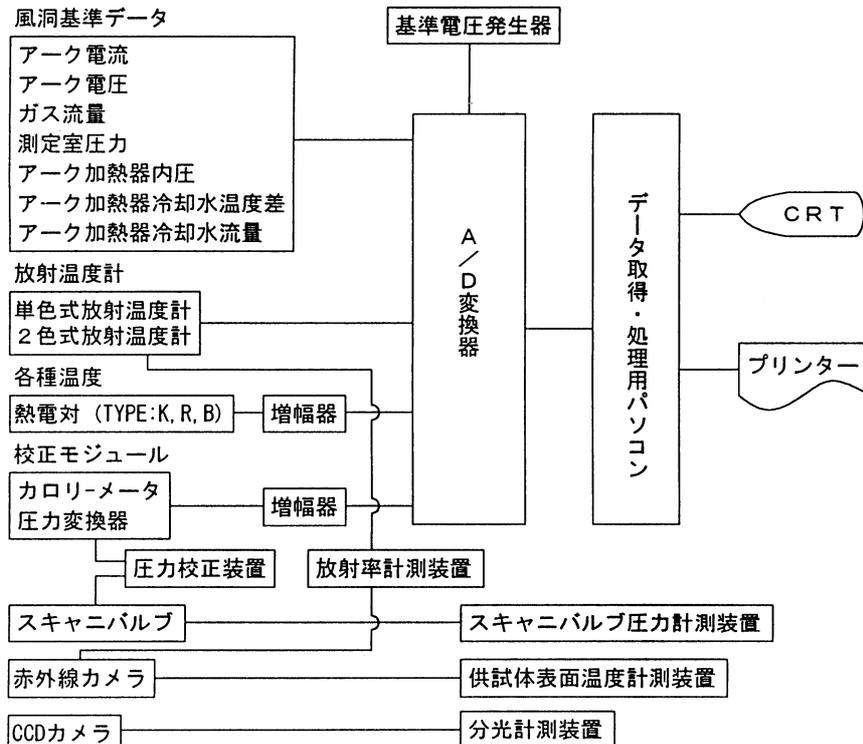


図 19. 計測系のブロック図

メモリ：8MB+8MB(16MB)

モニタ CRT

型式：HP D1193A

画面サイズ：17 インチ

解像度：640 ドット× 480 ライン

表示色：4096 色

プリンター

型式：HP Deskwriter 560J

プリント方式：サーマルインクジェット

高速 A/D 変換器

型式：BURR-BROWN PCI-20098C-2C

分解能：12 Bit

サンプリング速度：最大 100kHz

入力チャンネル数：電圧信号 16、熱電対信号 16

入力方式：シングルエンド

入力：0 ~ ± 5V

熱電対信号変換器

16 チャンネル

(TYPE-K : 6 CH, TYPE-R : 5 CH, TYPE-B : 5 CH)

入力：熱電対出力信号

出力：0 ~ 5V

周波数特性：4Hz

mV 電圧信号変換器

6 チャンネル

入力：0 ~ ± 100mV

入力方式：作動入力方式

出力：0 ~ ± 5V

周波数特性：約 10Hz(入力側ローパスフィルタ)

電圧計測器は、基準電圧発生器をアドバンテスト社において定期的に校正を行い、その基準電圧発生器を用いて風洞試験に使用する電圧計測器等の校正を行っている。基準電圧発生器は、アドバンテスト社製の TR-6141 型を用いている。その主な性能をつぎに示す。

基準電圧発生器

型 TR-6141

電圧範囲 0 ~ ± 11.999V

電圧切換レンジ 10mV, 100mV, 1V, 10V

安定度 ± 0.015%/day

計測装置のアプリケーションは、オペレータがプログラミングせずに必要なデータを容易に収集及び解析表示ができる。ソフトウェアは Windows で動作する BURR-BROWN 社製のチャートストリーム・レコーダ/アナライザ(型式：PCI-20379S-1)と ASTORODESIGN 社製の DADISP(波形解析ソフトウェア)を用いた。

チャートストリーム・レコーダ/アナライザは、最大サンプル100kHzで最大80チャンネルの記録ができる。デー

タはディスクに記録されると同時にリアルタイムで表示形式、ストリップチャート形式、マルチプロット形式、X-Y形式で表示でき、データの最小細部を拡大する機能がある。各チャンネルは別々に 1,10,100 のゲインに設定やスケールリング、オフセット、アベレージ、比率、温度補正、圧力補正ができる。その他に、グラフの強化機能として、タイトルやラベルの表示、標準演算機能、計算パラメータ、スケールリング及び3種のスムージング機能がある。

DADISP は、数値列として扱われるデータを表示・管理・プレゼンテーションするためのグラフィックワークシートである。操作は、メニュー・ドライブ形式で、複素数を含む数値演算、統計処理、マトリクス演算、フーリエ変換、座標変換、論理演算、合成・削除、回帰演算及び条件式による分岐等、約400種類に及ぶ関数をメニューから使用できる。

6.2 風洞基準データの計測

風洞基準データは、供試体試験等における気流の基準データとなるものでアーク電圧、アーク電流、ガス流量、測定室圧力及びアーク加熱器内圧力等がある。この他、冷却水温度差や冷却水流量を計測し気流の総エンタルピを求め、風洞の気流条件に使用する。必要に応じカロリメータ、ピトー管圧力等が付加される。風洞基準データの計測は、風洞運転中の最大約30分間行う。

アーク電圧とアーク電流は最大3.6kVの直流高電圧の計測を行う。このため検出器はそれぞれ直流変圧器(PT)及び直流変流器(CT)を使用して、高電圧側と計測器との電気絶縁を図っている。アーク電圧計及びアーク電流計の測定範囲は、それぞれ0~4,000V、0~1,000Aで、計測精度は共に±1.5% of F. S. である。

ガス流量の計測は、一次ガス流量と二次ガス流量の計測がある。一次ガス流量の計測は、ガスの圧力、温度及び差圧を計測してデジタル演算器によりガス流量を求める。一次ガスは、空気と窒素が使用でき、演算器にガスの種類を入力することにより演算器がそのガスの流量を算出する。二次ガス流量の計測はマスフローコントローラーにより行う。一次ガス流量のガス圧力計と差圧計の測定範囲はそれぞれ0~980.6kPa(10kgf/cm²)、0~25.5kPa(2600mmH₂O)で、計測精度は共に±0.1% of F. S. である。ガス温度計は、測定方式がシース型測温抵抗体、測定範囲が0~100°C、階級がAである。二次ガス流量は、使用ガスが空気、測定範囲が0~10g/s、精度が±1% of F. S. である。

アーク加熱器熱損失量の計算は、冷却水温度差と冷却水流量が必要である。冷却水温度差はアーク加熱器の入口と出口の冷却水温度を熱電対により各2点計測し、各々の冷却水温度の平均値の差から求める。冷却水流量は差圧伝送

器で取得した差圧 ΔP を演算器が $K\sqrt{\Delta P}$ を算出する。但し、 K は補正係数である。差圧 ΔP と冷却水流量 \dot{m}_w の関係は

$$\dot{m}_w = K\sqrt{\Delta P}$$

となる。冷却水流量は、測定範囲が 0 ~ 137kPa (1400cmH₂O)、計測精度が ± 0.2% で、流量表示は、0 ~ 17.10 kg/s である。

この他に風洞基準データとして必要なアーク加熱器内圧力及び測定室圧力がある。測定室圧力は供試体試験時における供試体の大小や供試体の加熱によるアウトガスにより圧力が変動する。またスキャニバルブのセンサー等保護のため測定室圧力値を監視する。アーク加熱器内圧力計の圧力範囲は、0 ~ 196.1kPa である。測定室圧力計の圧力範囲は、0 ~ 1.333kPa、測定精度はそれぞれ読値の 0.15% である。

総エンタルピは、アーク加熱器への入力電力から損失分を差し引いて求める。入力電力の損失は、冷却水への損失量を冷却水の流量 \dot{m}_w (g/s) と温度上昇 DT (°C) から推算する。総エンタルピ及び効率は次式で定義される。

アーク加熱器入力電力 P

$$P = V \times I \quad (W)$$

V : アーク電圧 (V)

I : アーク電流 (A)

アーク加熱器の損失量

$$= C_p \times \dot{m}_w \times DT \quad (W)$$

C_p : 水の比熱 (4.186 J/g × °C)

アーク加熱器の効率

$$= (1 - \text{損失} / P) \times 100 \quad (\%)$$

総エンタルピ h

$$h = \frac{P}{\dot{m}_g} \times 10^3 \quad (J/kg)$$

\dot{m}_g : ガス流量 ($\dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2}$) (g/s)

6.3 供試体表面温度の計測

供試体表面温度計測装置は、測定室内部の試料回転装置に取り付けた供試体の表面温度を、測定室外からサファイア窓を通して測定し、リアルタイムに画像表示及びデータの収録を行う。この装置は、2次元走査機構を用いて測定できる検出器、画像処理により温度を求める画像処理器及び画像解析用のパーソナルコンピュータ等により構成される。供試体表面温度計測装置による温度計測は、1秒1フレームの速度で供試体の試験中の約20分間、画像データとして収集される。このデータは、リアルタイム熱画像表示される他、ゾーンモードによりそのゾーン内の最高温度をデジタル値で表示を行うことができる。本装置の仕様を以下に示す。なお本装置はチノー(株)製である。

検出器

形式	IR-W5T-SP	
測定視野	縦 8° × 横 8°	
瞬時視野	2mm × 2mm	
赤外線検知器	HgCdTe (SPRITE 素子)	
測定波長領域	3 ~ 5μm	
冷却方式	電子冷却方式 (ペルチェ素子)	
測定温度範囲	500 ~ 2,000°C	
測定精度	500 ~ 1,499°C	指示値の ± 1%
	1500 ~ 2,000°C	指示値の ± 2%

表示部

表示画素数	水平 256 × 垂直 252
フレームタイム	130msec

この他に放射温度計は、スポット型放射温度計の単色放射温度計と2色式放射温度計が準備されている。表8にスポット型放射温度計の主な仕様を示す。スポット型マイクロン社製 M90V は、性能が良く安定しているため標準放射温度計として使用している。

表8 スポット型放射温度計の主な仕様

測定方式	単色放射温度計		2波長比例演算方式2色放射温度計	
				ファイバー式
機種	マイクロン社製 M90V	チノー社製 IR-AH3SU	チノー社製 IR-CQS21C	チノー社製 IR-FBQS
測定波長	0.65 μm	0.65 μm	0.85/1.00 μm	0.85/1.00 μm
検出素子	シリコン	シリコン	シリコン	シリコン
測定範囲	800~3,000°C	900~3,000°C	900~1,800°C	800~1,600°C
分解能	1°C	1°C	0.5°C	1°C
精度定格	指示値の ± 0.25%	1,500°C未満 測定値の ± 0.5% 1,500~2,000°C 測定値の ± 1.0% 2,000°C以上 測定値の ± 2.0%		
応答時間	0.5 sec	0.5 sec	20 msec	20 msec
測定径・測定距離	φ 3.3mm/1 m	φ 3.3mm/1 m	φ 5.0mm/1 m	φ 1.0mm/100mm

標準放射温度計のM90Vのトレサビリティ(校正)は、マイクロン社に於いてNIST(NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY)により行っている。この標準放射温度計を用いて試体表面温度計測装置及びスポット型放射温度計等の校正を定期的に行っている。放射温度計の校正方法は、当所の放射率計測装置を疑似黒体炉として標準放射温度計と被放射温度計を比較法により行う。

6.4 放射率の計測

単色放射温度計による材料表面温度計測には、材料表面の放射率を正確に知る必要がある。放射率を試料移動法により計測する高温放射率計測装置(Thermogage社製 Emissiometer)が平成5年度に導入された。この高温放射率計測装置の構造と性能の詳細は文献(8)に、放射率計測については文献(6)に、概略図を図20に示す。高温放射率計測装置は、48kW電力供給装置、黒鉛炉、エアシリンダ、銅サイトチューブ、温度制御用高温温度計、供試体温度計測用高温温度計、放射エネルギー計等の本体部、空気及び窒素ガス供給装置、冷却水循環装置から構成されている。測定方法は黒鉛炉の内部に置かれている疑似黒体供試体をエアシリンダにより黒体空洞から急速に引き離し、供試体を疑似黒体状態から孤立状態へと瞬間的に移動させ、孤立状態で

の放射エネルギー(R1)と疑似黒体状態の供試体から放射エネルギー(R2)を計測し、その比($R2/R1$)により放射率を求める方法である。加熱は、48kW電力供給装置より銅電極を介して黒鉛炉(グラファイト材)に電流を流し、そのジュール熱により行う。黒鉛炉内、チューブ内、射出ロッド及び供試体ホルダーは、酸化防止のため不活性ガス窒素を流している。エンドキャップ、電極、冷却水リフレクタ銅サイトチューブ等の高温にさらされる各部は、冷却水循環装置により冷却を行っている。

高温放射率装置の性能と基本特性を次に示す。

- ・計測方法 : 試料移動法
- ・測定温度範囲 : 800 ~ 2,500°C
- ・測定波長 : 0.2 μ m ~ 9 μ m
- ・測定雰囲気 : 窒素ガス雰囲気
- ・供試体寸法(標準) : D=43.0mm、t=3.5mm
- ・計測精度 : $\pm 2\%$

放射率計測は、本装置に付属されたPOCO製グラファイト標準供試体を用いて試験温度範囲1,073K ~ 2,473Kまで200K間隔で行い、アメリカでの計測結果(サーモゲージ社の結果)と比較した。その結果、同一温度での両者の値は、ほぼ目標値の $\pm 2\%$ に入り良く計測できることが示された。

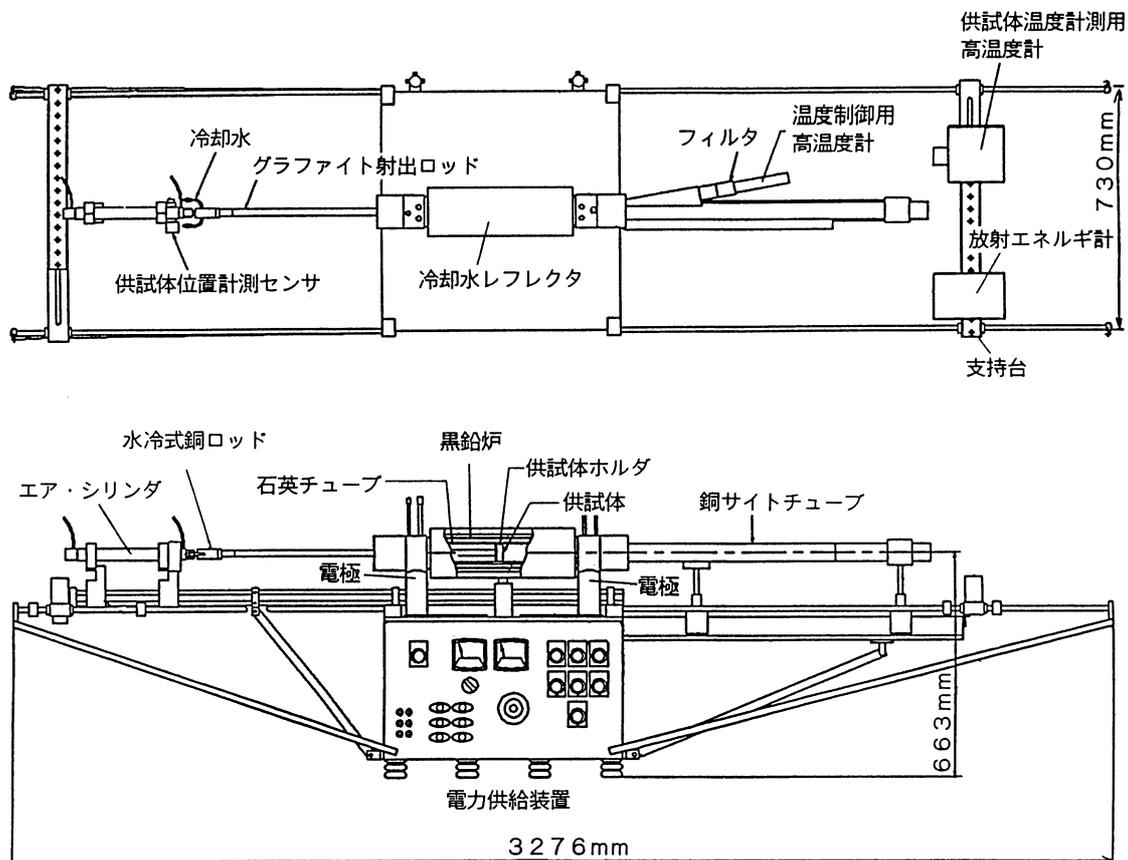


図20. 高温放射率計測装置の概略図

6.5 熱流束計測

アーク加熱風洞の超音速高エンタルピ流は、解離・電離等を伴う反応性平衡流れである。カロリメータによるアーク加熱気流の熱流束計測はプローブ表面の触媒性、放射率等が種々の影響を及ぼすために非常に困難を伴う。750kW アーク加熱風洞では、ガードンゲージ⁷⁾を標準的に使用している。この他にカロリメータは熱容量式(スラグ)⁹⁾およびヌルポイントカロリメータが準備されている。アーク加熱試験パラメータのうち圧力の測定は比較的問題が少ないが、カロリメータプローブを用いて計測する加熱率計測は問題点が多く、データの評価についてはセンサの運用解析技術等の基礎知識や経験を確立しておく必要がある。カロリメータは、材料評価試験時の加熱条件評価のために材料供試体と形状、寸法が一致するものを使用する必要がある。現用のガードンゲージを使用したカロリメータプローブは次の4種類である。

- (1) 直径 ϕ 40mm 平頭円柱型プローブ(GP1)
前面と側面にゲージを7個分布
- (2) 直径 ϕ 40mm 半球円柱型プローブ(G2)
前面と側面にゲージを5個分布
- (3) 直径 ϕ 40mm 平頭円柱型プローブ(G3)
澱み点1点のみ
- (4) 直径 ϕ 12mm 半球円柱型プローブ(G4)
澱み点1点のみ

直径 ϕ 40mm 平頭円柱型プローブ(GP1)の構造を図21に示す。GP1 および G2 のプローブはプローブ周りの加熱率分布を計測するもので、GP1 は7箇所、G2 は5箇所ゲージを装着している。使用ゲージは、いずれも Thermogage 社製で、側面に装着したゲージは、前面に装着したものに比べより高感度のゲージを使用している。G3 および G4 は、澱み点加熱率計測専用プローブで、G3 は Hy-Cal 社

製、G4 は Medtherm 社製である。G4 は、気流内の加熱率分布計測用プローブである。ガードンゲージは、校正により求められた校正定数 K により熱流束値 $\dot{q} = KE$ により表される。 E はゲージの出力電圧である。校正定数は、納入時に放射熱源を用いて校正され感度校正値 (MW/m^2)/mV が提供されている。熱流束と出力電圧の線形性は、ゲージの温度が228 ~ 508Kの間に保たれば保証される。従って高エンタルピ流のように高温、高加熱率環境で使用する際には水冷が必要となる。

6.6 圧力計測

高エンタルピ流の圧力計測プローブは次の5種類である。

- (1) ϕ 40mm 頭円柱型プローブ(GP1)
前面と側面に圧力孔を4個分布
- (2) ϕ 40mm 半球円柱型プローブ(P2)
前面と側面に圧力孔を4個分布
- (3) ϕ 40mm 平頭円柱型プローブ(P2)
澱み点1点のみ
- (4) ϕ 12mm 半球円柱型プローブ(P4)
澱み点1点のみ
- (5) ϕ 19mm 半球円柱型プローブ(P5)
澱み点1点のみ

(1)の平頭円柱型プローブ GP1 は熱流束プローブ GP1 と同一のもので、プローブ GP1 には圧力分布を同時に計測するための圧力孔が4点配置されている。プローブ GP1 と P2 はプローブ周りの圧力分布を計測するために使用される。P3、P4、P5 は、気流内の圧力分布計測プローブである。プローブ P3 は、主に質量分析用気体採集管として使用する。このためにプローブ内の圧力配管は解離した原子が再結合しないよう石英管を用いている。これらのプローブ

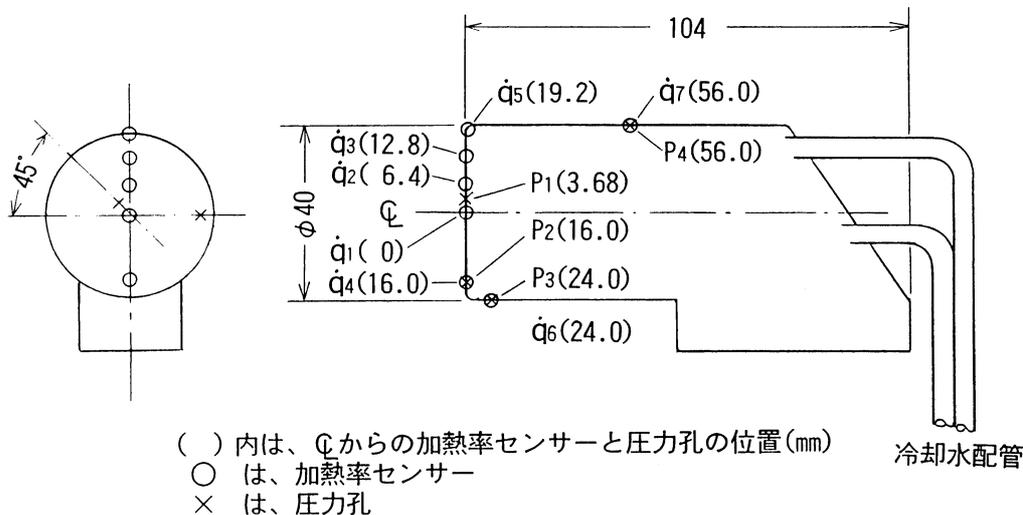


図21. 気流校正モジュール (フラット型、単位: mm)

ブは高エンタルピ流に溶融されないよう冷却水で冷却する構造になっている。

圧力計測に使用する圧力計は、スキャニバルブ・校正モジュールやピトー管等に使用する風洞試験用圧力計とこれらの圧力計を校正する標準圧力計がある。標準圧力計は、MKS 社(日本エム・ケー・エス)において定期的にトレサビリティ(校正)を行っている。風洞試験に用いる圧力計は、標準圧力計を使用して当風洞に整備されている圧力校正装置によって校正を行っている。

標準圧力計は、高精度圧力計測ができ、周囲温度変化の影響を最小にするため通常 45°C に制御されている MKS 社製バラトロンの隔膜静電容量型・絶対圧型を使用している。センサーの材質はインコネルを使用し、絶対圧型センサーは、リファレンス側が 0.013mPa の高真空で排気、密封し高真空状態を保持している。標準圧力計の性能をつぎに示す。

標準圧力計

測定方式	隔膜静電容量型(絶対圧型)
測定圧力範囲	0 ~ 13.33 kPa(100Torr)
測定精度	読み値の 0.08%
分解能	0.0133 Pa

風洞の圧力計測に使用する圧力計は、エドワーズ社製 Barocel 590 型と 600 型で、測定方式は、隔膜静電容量型(絶対圧型)、圧力範囲は、高レンジ用が 0 ~ 13.33kPa (100Torr)、低レンジ用が 0 ~ 1.333kPa(10Torr)である。これら圧力計の主な性能を表 9 に示す。この他に圧力計は 24 ポートのスキャニバルブ圧力計がある。その圧力範囲は、高レンジ用が 0 ~ 17.33kPa(精度: ± 0.06% of F. S.)、低レンジ用が 0 ~ 2.40kPa(精度: ± 0.15% of F. S.)である。

風洞用圧力計の圧力校正は圧力校正装置を用いて行う。圧力校正装置は、標準圧力計、圧力タンク、圧力調整弁及び真空ポンプ等からなり、標準圧力系となる圧力タンク及び配管等は全て SUS 材を、真空配管継ぎ手は“O”リン

グを使用してアウトガス及び漏れの量を最小限にした。圧力校正時には、圧力校正の精度を 0.1% 以上にするために、被圧力計のレンジの 3 桁以下の圧力値以下で圧力計の電気系のゼロ調整を取る必要がある。圧力計の電気系のゼロ調整は、高レンジ用の圧力計の場合が油回転ポンプ、低レンジ用の圧力計の場合が、油拡散ポンプを使用して行う。圧力校正は、標準圧力設定を圧力調整バルブにより任意に設定し、この設定圧を標準圧力計により測定し、この値と被校正圧力計の出力値から一次回帰解析によって感度係数及びオフセットを求める。

コニカルノズルを使用した澱み点試験に必要な気流の計測は、ピトー管と校正モジュールによる。ピトー管は、三次元移動装置に取り付け気流分布の測定に使用する。その形状は、円筒部の外径が φ19mm、圧力孔が内径 φ0.3mm である。

6.7 校正モジュールによる計測

校正モジュールは、澱み点試験に使用する供試体と同形状のものを用い、試料回転装置に取り付け、供試体試験と同条件の気流内に投入し、校正モジュール周りの圧力分布及び加熱率分布を計測する。平頭円柱型の校正モジュールの形状及び加熱率センサーと圧力計測ポートの位置を図 21 に示す。加熱率計測に使用するカロリメータは、ガードン型を用いている。

大型平板試験片試験用チャンネルノズル内部気流状態量等の計測や試験片表面観測等は、加熱率及び圧力計測に使用する校正モジュール CNCM1(CHANNEL NOZZLE CALIBRATION MODULE NO.1)と試験片表面観察等に使用する校正モジュール CNCM2 がある。校正モジュール CNCM1 は、平板(縦 100mm × 横 100mm)上にガードン型カロリメータを 5 点、圧力孔を 4 点等間隔に組み込んである。校正モジュール CNCM2 は、平板(縦 100mm × 横 100mm)上に観測窓を 3 点、ガードン型カロリメータを 2 点組み込んである。観測窓は、気流試料の採集、分

表 9 圧力計

圧力計	標準圧力計	圧力計	圧力計	圧力計
形式	MKS 390HA	エドワーズ 590型Barocel	エドワーズ 600型Barocel	スキャニバルブ PDCR23D
測定方式	隔膜静電容量型 絶対圧型	隔膜静電容量型 絶対圧型	隔膜静電容量型 絶対圧型	隔膜型 差圧型
測定圧力範囲	0~13.33kPa	0~13.33kPa 0~1.333kPa	0~13.33kPa 0~1.333kPa	0~17.33kPa 0~2.40 kPa
測定精度	読み値の0.08%	読み値の0.15%	読み値の0.15%	±0.06% of F.S.
分解能	0.0133Pa	0.00001 of F.S.	0.0001 of F.S.	
応答時間	25 msec	8 msec	8 msec	

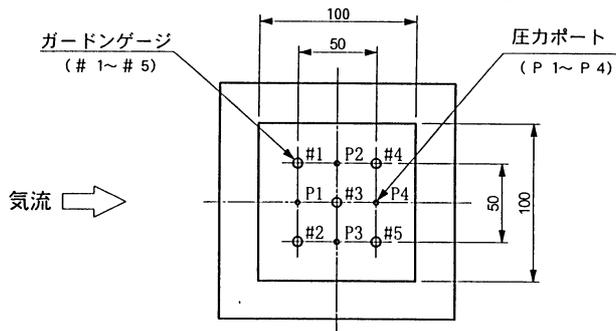


図 22. 校正モジュール CNCM1 (単位 : mm)

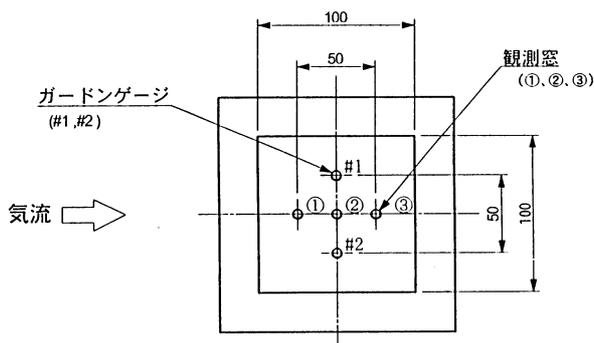


図 23. 校正モジュール CNCM2 (単位 : mm)

析による気体成分質量分析、ノズル内部気流発光の分光計測、試験中の CCD カメラによる材料表面状態の観察、ファイバー 2 色式放射温度計による材料表面温度の計測等に使用する。校正モジュール CNCM1 及び CNCM2 の形状及び加熱率センサー及び圧力孔並びに観測窓の位置をそれぞれ図 22、図 23 に示す。ガードン型カロリメータの使用ゲージはいずれも Medtherm 社製で、冷却は CNCM2 のゲージが水冷型で、CNCM1 のゲージがプロ - プ本体の冷却を共用している。

校正モジュールやピトー管等は、高エンタルピ流の中で測定を行うため水冷式、材料は熱伝導率が良い銅を用いている。

7. 風洞動作特性

7.1 一般動作特性

一般動作特性試験は、アーク電圧、アーク電流、一次ガス流量、アーク加熱器内圧、アーク加熱器の効率及び気流の総エンタルピなどの風洞データや、拡散筒、排気装置及び冷却器が性能を満足しているか、風洞運転中の約 20 分間安定して動作しているかなどの性能を確認することである。電極間隔が 3pack、アーク電流 I が 700A、一次ガス流量 \dot{m}_g が 18.0g/s 及び作動ガス(一次ガス)が空気の風洞試験条件における、アーク電圧 V 、アーク加熱器内圧 P_o 、冷却水流量 \dot{m}_w 、冷却水温度差 DT の風洞基準データおよび演算処理された総エンタルピ h 、入力電力 P 、アーク加

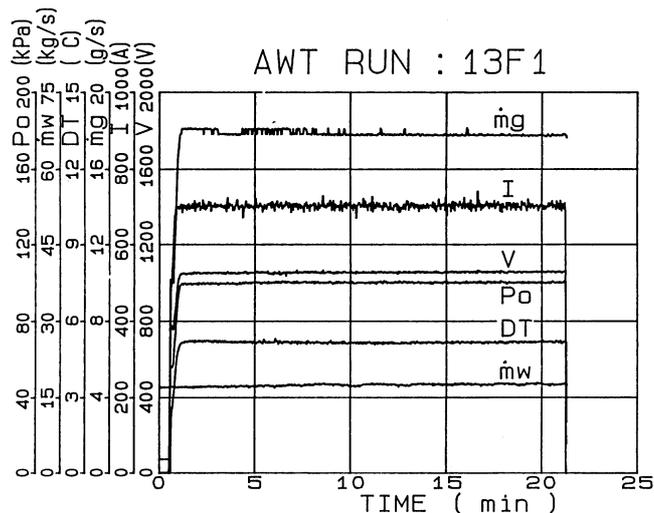


図 24-A. アーク加熱風洞動作特性データ

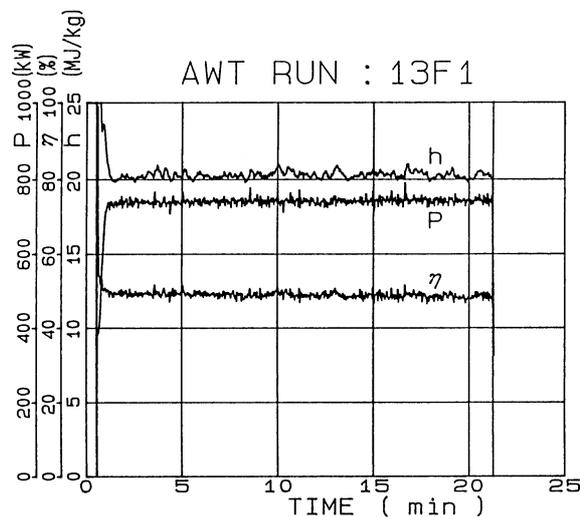


図 24-B. アーク加熱風洞動作特性データ

熱器効率 のデータの試験結果をそれぞれ図 24 の A と B に示す。この結果から、アーク電流は実験開始から 20 分間ほぼ一定であることから直流電源の電流制御が良く行われていることを示している。アーク加熱器内圧 P_o が約 100kPa、入力電力 P が約 750kW、総エンタルピ h が約 20MJ/kg 等の値も 20 分間安定していることから、アーク加熱風洞の性能が満足された。この他に制御盤上の表示データから風洞本体冷却器出口の気流の温度は、風洞起動開始の 20°C から 20 分後の風洞停止時に約 28.5°C であることから空気冷却器が有効に機能していることが示された。図 25 に測定室内のノズルから噴出した気流内における平頭円柱型供試体(SiC コーティング付き C/C 材)の試験中の写真を示す。気流は作動ガスとして空気を使用するときはピンク色、窒素では赤色である。気流が緑色のときは、漏水その他の異常の場合である。このように気流は発光しているため高エンタルピ流や供試体の衝撃波を直接可

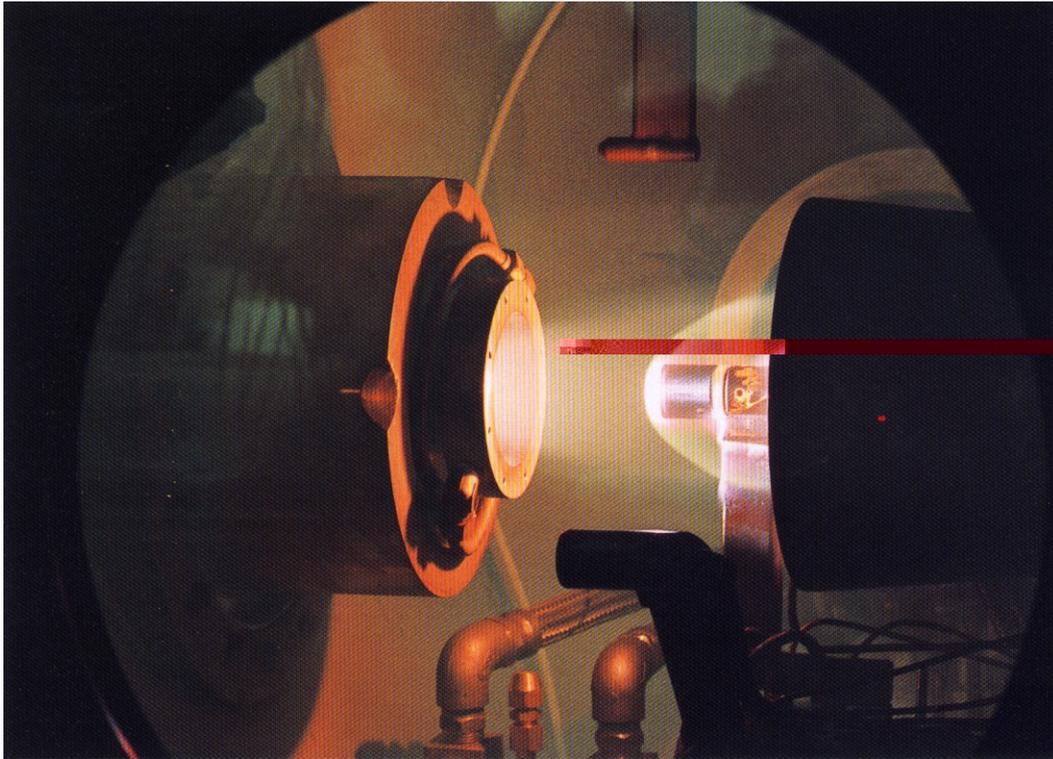


図 25. 澱み点試験状況

視化をすることができる。拡散筒と排気装置の性能は、澱み点試験において外径 ϕ 50mmの平頭円柱型供試体を気流の中に投入したときの写真から確認を行った。風洞試験条件は、電極間隔が 3pack、一次ガス流量が 20g/s、二次ガス流量が 0g/s、アーク電流が 673A、総エンタルピが 18.3MJ/kg、アーク加熱器内圧力が 99.3kPa である。この試験からノズル出口から供試体先端部の間隔が 100mm の位置での供試体の大きさに対する気流断面積のプロクージュ比は 19.8% が得られた。また供試体を気流に投入する前と投入時の写真から気流の有効コアが縮少することや気流がブレイクすることがないことが確認できた。このことから拡散筒及び排気装置の性能が確認された。

7.2 アーク加熱器作動特性・ノズル気流特性

アーク加熱器作動特性及びノズル気流特性試験の目的は、アーク加熱器が、性能を満足するか、総エンタルピ、加熱率及び圧力についての作動範囲を確定すること、風洞試験等に資することである。作動特性試験は、総エンタルピ、効率、加熱率および圧力が、運転条件であるアーク電流とガス流量等のパラメータによりどのように変化するかを調べることである。作動特性試験は、アーク電流、ガス流量、電極間隔の 3 つパラメータを変えて行った。作動ガスである一次ガスは空気、二次ガス流量は 0g/s である。陽極と陰極の電極形状は形状 A を用いた。作動特性試験のパラメータ及びその値をつぎに示す。

アーク電流	I	: 300 ~ 800A
一次ガス流量	\dot{m}_{g1}	: 8 ~ 22 g/s
電極間隔	G	: 1,2,3 pack

コニカルノズルを用いた作動特性試験からアーク電流 I - アーク電圧 V 特性、入力電力 P - アーク加熱器内圧 P_{to} 特性、入力電力 P - 効率 特性、入力電力 P - 総エンタルピ h 特性、入力電力 P - 加熱率特性 \dot{q} 、総エンタルピ h - 加熱率 \dot{q} 特性、平頭円柱型模型表面に沿った加熱率分布特性、入力電力 P - 澱み点圧力 P_{t2} 特性が得られ、それぞれの特性結果を図 26 ~ 図 33 に示す。チャンネルノズルを用いた作動特性試験から入力電力 P - 加熱率 \dot{q} 特性、入力電力 P - 表面圧力 P_w 特性、平板の加熱率分布特性、平板の圧力分布特性が得られ、それぞれの特性結果を図 34 ~ 図 37 に示す。図中の \square 、 \triangle 、 \circ 印はそれぞれ電極間隔が 1pack、2pack、3pack を示す。これらのデータは、1 点につき約 3 分間計測し、そのうち定常に達した約 2 分間のデータを平均したものである。但しデータ上の実線や点線は目視により描いたものである。作動特性試験は、C/C 材供試体の予備試験や本試験のアーク加熱風洞データの結果も加えた。アーク加熱風洞の運転パラメータは、アーク電流とガス流量である。このため図中には、アーク電流とガス流量の値をパラメータとして示した。

試験結果から一般的な傾向として、

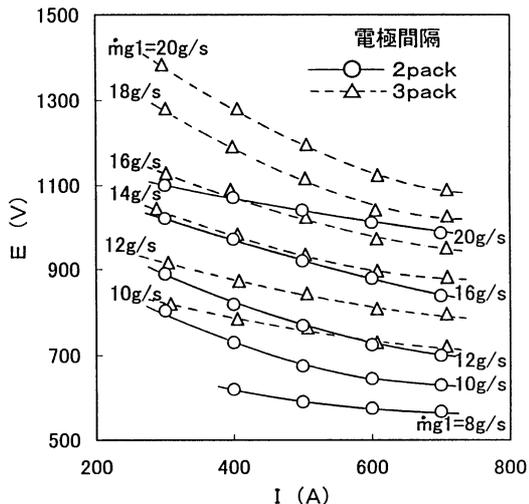


図 26. アーク電流-アーク電圧特性 (コニカルノズル)

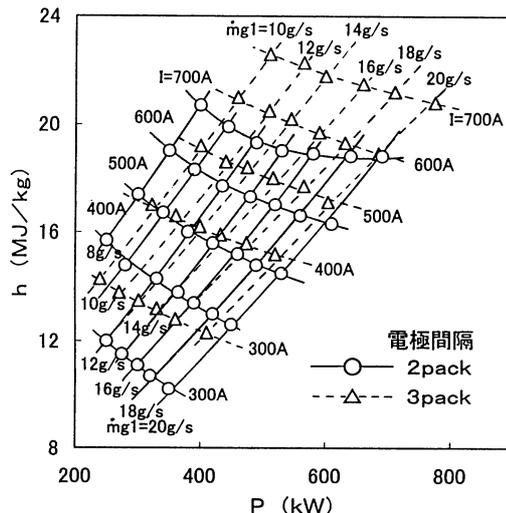


図 29. 入力電力-総エンタルピー特性 (コニカルノズル)

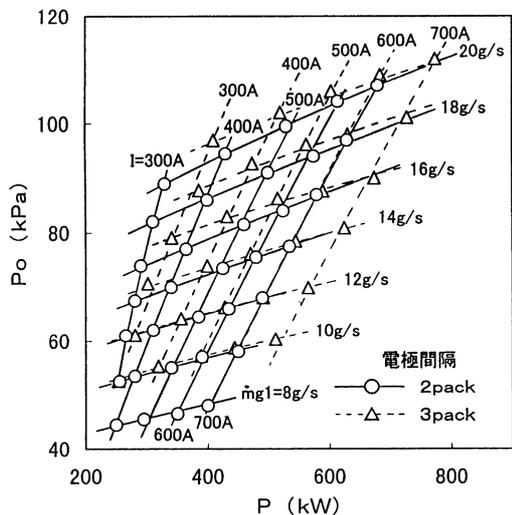


図 27. 入力電力-アーク加熱器内圧力特性 (コニカルノズル)

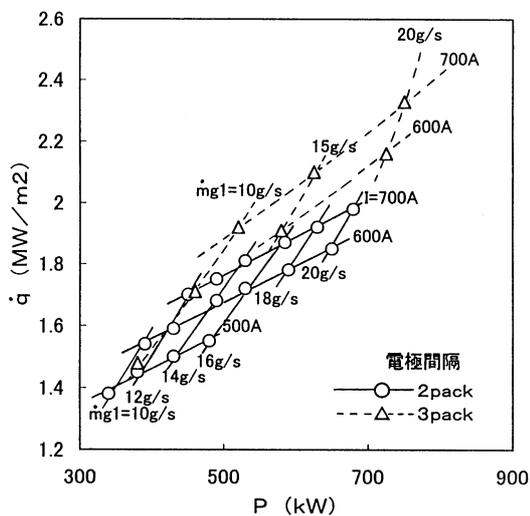


図 30. 入力電力-加熱率特性 (コニカルノズル)

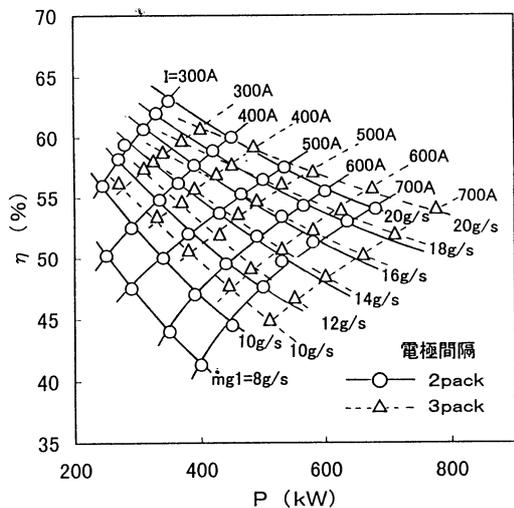


図 28. 入力電力-効率特性 (コニカルノズル)

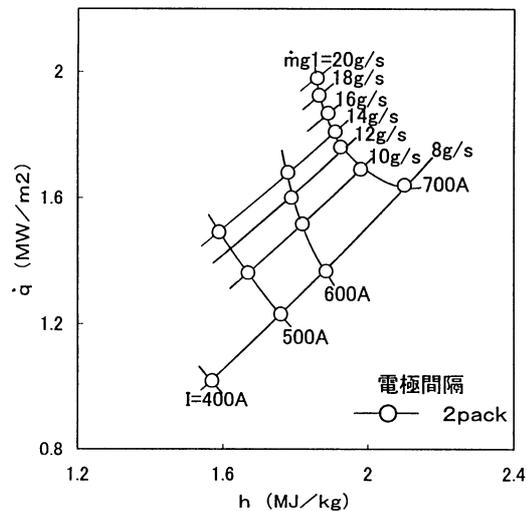


図 31. 総エンタルピー-加熱率特性 (コニカルノズル)

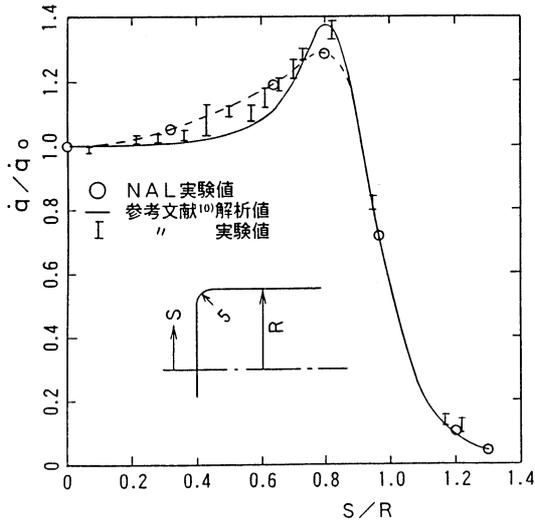


図 32. 平頭円柱型模型表面に沿った加熱率分布特性 (コニカルノズル、単位：mm)

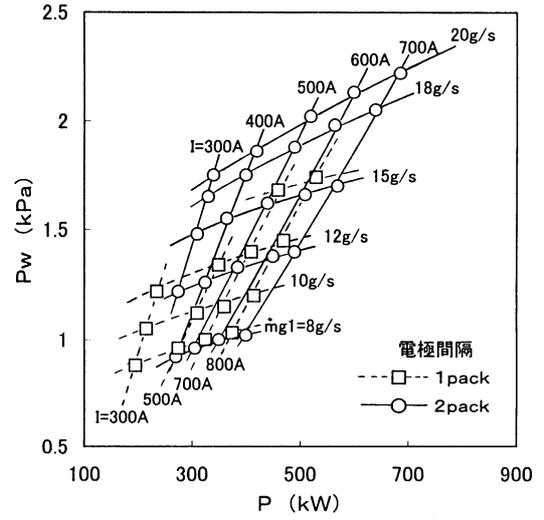


図 35. 入力電力-表面圧力特性 (チャンネルノズル)

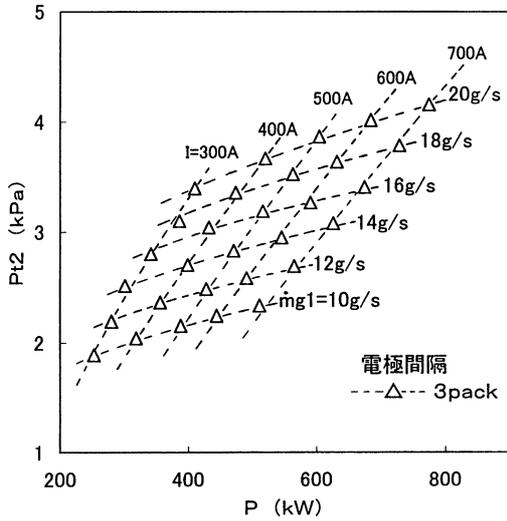


図 33. 入力電力-滞り点圧力特性 (コニカルノズル)

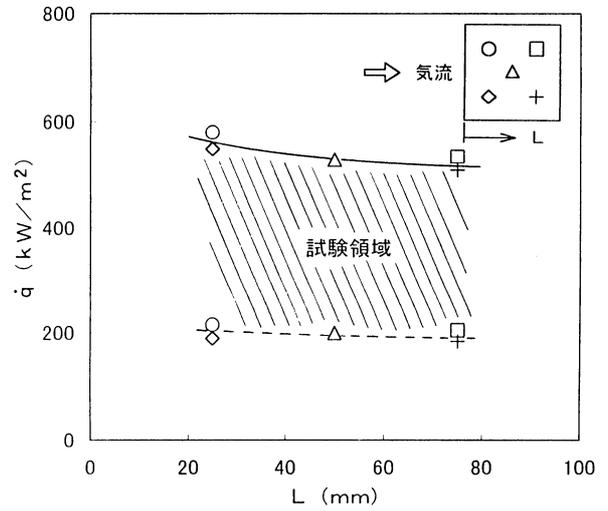


図 36. 平板の加熱率分布特性 (チャンネルノズル)

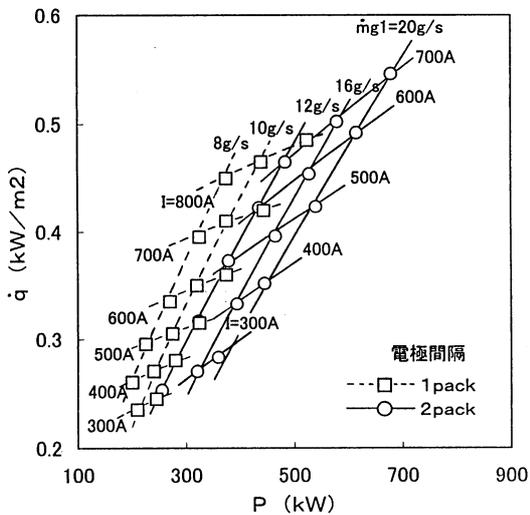


図 34. 入力電力-加熱率特性 (チャンネルノズル)

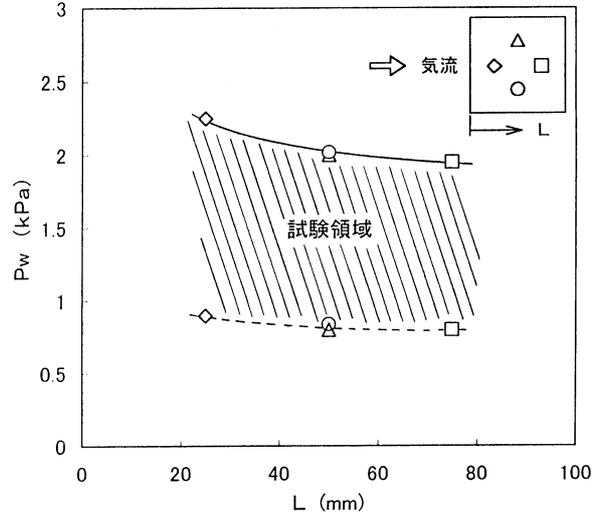


図 37. 平板の圧力分布特性 (チャンネルノズル)

入力電力 P の増大に対してエンタルピ h 、アーク加熱器内圧 P_0 、加熱率 \dot{q} 、ピトー圧 P_{t2} 、静圧 P_w は増大するが、効率は低下する。入力電力 P が増大した場合の効率の低下は、主要な熱損失がアーク加熱器壁への放射であり、入力電力の増大と共に放射損失が増すためと考えられる。

ガス流量 \dot{m}_g の増大に対してエンタルピ h は低下するが、アーク加熱器内圧 P_0 、効率、加熱率 \dot{q} 、ピトー圧 P_{t2} 、静圧 P_w は増大する傾向がある。

アーク加熱器の pack 数の増大に対してエンタルピ h 、アーク加熱器内圧 P_0 は増大するが、効率は低下する傾向がある。アーク加熱器の pack 数を増大させると同一電流であっても電極間電圧が高くなり、入力電圧が増大する。アーク電圧はアーク長が長いほどガス流量が多いほどアーク電圧が高くなることから、大電力を入力する場合には電極間隔を長くしガス流量を増大すればよいことが結果から示される。

本設備の最大アーク電流値は 1,500A を流すことが可能であるが電流を増加すればするほど電極の損耗が増加する。電極の損耗はスラグとなり気流へのコンタミネーションとなる。気流へのコンタミネーションを考慮して 750kW アーク加熱風洞の常用最高アーク電流値は約 700A、短時間の運転での最大アーク電流値は約 800A とした。試験結果から効率は 35% ~ 約 68% が得られた。効率を大きくする場合は可能な限り冷却を少なくすればよく、750kW アーク加熱風洞はプレナム室がないこと、ノズルスロート径が大きいことから効率が良いことが考えられる。図 24 の試験結果から入力電力が 750kW、ガス流量が 20g/s、アーク電流が 680A 及び電極間隔が 3pack の性能試験条件において効率は、約 51% が得られ設計値である 50% 以上を満足した。また、総エンタルピ流は、ガス流量 8g/s、アーク電流 800A、3pack の性能試験条件において最大総エンタルピ 27MJ/kg 得られ、目標の性能を満足した。

(1) コニカルノズル気流特性

熱防護材試験等に用いられる澱み点試験は、コニカルノズルを使用して行う。気流特性試験における気流の加熱率や圧力の測定は図 21 に示す平頭円柱型(外径: ϕ 40mm)の校正モジュール等を使用して行った。図 30、31、33 の試験データは、校正モジュール先端中心部に取り付けた加熱率センサーと圧力孔により澱み点領域を測定した値を示す。このカロリメータは水冷されており冷却壁条件での値である。校正モジュール先端部の澱み点計測位置は、通常行われる供試体試験と同じ位置のノズル出口から 100 mm である。

図 31 に電極間隔 2pack における総エンタルピ h - 加熱率 \dot{q} 特性の試験結果から加熱率は同一ガス流量において

総エンタルピの増大に伴い総エンタルピにほぼ比例して上昇していることが示されている。

図 21 に示す平頭円柱型校正モジュールに埋め込んだ 7 点のガードン型カロリメータによって加熱率を計測することにより校正モジュール表面に沿った加熱率分布を求めた。試験は一次ガス流量が 16g/s、アーク電流が 750A、総エンタルピが 21.8MJ/kg の条件により行った結果を印で図 32 に示す。図に参考文献 10) の解析値を実線で実験値を示す。横軸は校正モジュールの澱み点中心から表面に沿った長さ S を校正モジュール半径 $R = 20\text{mm}$ で、縦軸は加熱率 \dot{q} を澱み点加熱率 $\dot{q}_0 = 2.62\text{MW/m}^2$ でそれぞれ無次元化した値である。試験結果の加熱率は文献の解析値と校正モジュールの平頭の肩近方でやや値が異なるが印で示す文献の実験値とは良く一致している。これにより特性試験で得られた平頭円柱型校正モジュールの加熱率分布特性は良好なものと考えられる。

図 38 に電極間隔 3pack におけるウエッジホルダーの入力電力 P - 加熱率 \dot{q} 特性を示す。ウエッジホルダーの先端部の位置はノズル出口から 80mm の位置に、加熱率を計測するガードン型カロリメータは、ウエッジホルダーの先端部から 65mm のウエッジホルダーの中心位置に取り付けた。試験は、一次ガス流量 \dot{m}_{g1} が 10, 14, 16, 18, 20g/s、アーク電流 I が、500, 600, 700A、気流に対する角度 α が 0° 、 10° 、 20° で行った。加熱率は、気流に対する角度及び入力電力の増加に伴い増大すること、 $\alpha = 0^\circ$ 、 10° のような気流に対する角度が小さい場合の加熱率は、一次ガス流の増加に対しては殆ど変化が無いことが示されている。

ノズル出口から拡散筒の間の高エンタルピ流れ場のピ

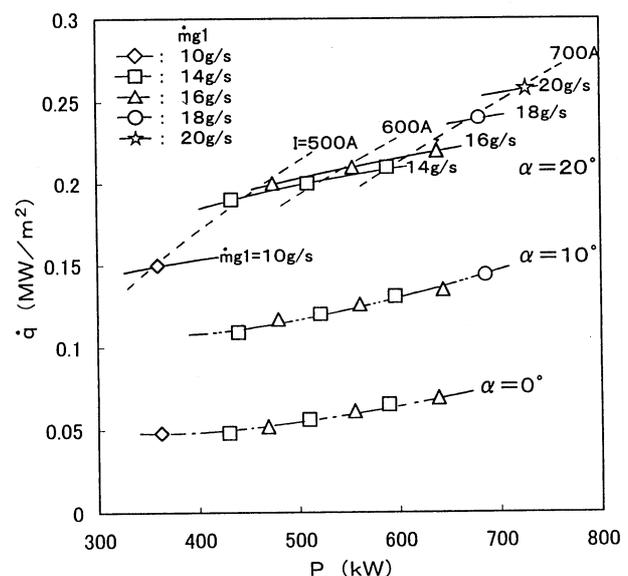


図 38. 入力電力-加熱率特性
(コニカルノズル)

トール圧分布及び加熱率分布の計測を行った。使用したプローブはφ12mm 半球円柱型ピトー管(P4)及びφ12mm 半球円柱型カロリメータ(G4)である。気流の計測は、三次元移動支持装置に取り付けたプローブによりノズル出口から下流140mmまで(X軸:気流中心) 気流中心から半径方向±120mmまでの範囲を行った。アーク加熱器は3packを使用し、作動ガスは空気を用いた。試験条件はガス流量 \dot{m}_{g1} を8.0,12.0,16.0g/sとし、ガス流量 \dot{m}_{g1} の各々に対し

アーク電流Iを400,500,600Aで行った。これらの条件で得られたアーク加熱器入力電力P、アーク加熱器内圧力 P_o 及びエンタルピhを表10に示す。ピトー圧分布及び加熱率分布の座標軸は、ノズル出口から下流の気流中心軸方向をX(+)とし、気流中心から半径方向をY(+) Y(-)とした。アーク加熱器内圧86.6,66.1,45.6kPaをそれぞれ、○、△、□印とした半径方向のピトー圧分布、気流中心方向のピトー圧分布、半径方向の加熱率分布、気流中心方向の加熱率分布、

表10 ピトー圧分布・加熱率分布の試験条件

1次ガス流量	アーク電流	アーク電力	アーク加熱器内圧	エンタルピ
\dot{m}_{g1}	I	P	P_o	h
(g/s)	(A)	(kW)	(kPa)	(MJ/kg)
8.0	400	287	45.6	17.8
12.0	500	440	66.1	18.4
16.0	600	607	86.6	19.2

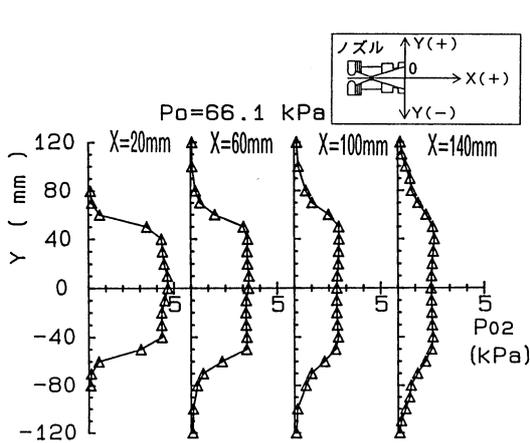


図39. 半径方向のピトー圧分布 (コニカルノズル)

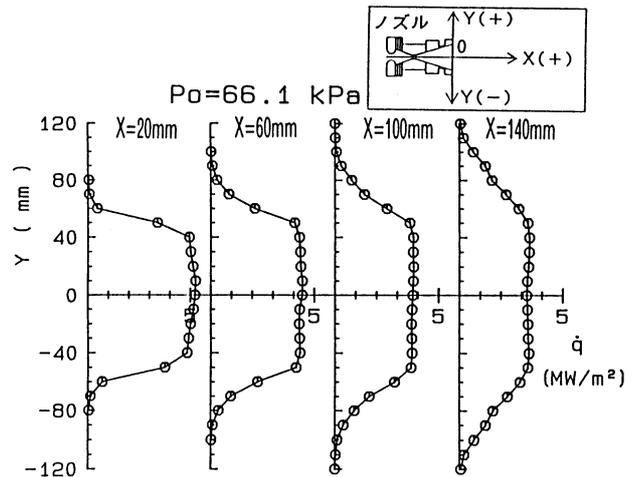


図41. 半径方向の加熱率分布 (コニカルノズル)

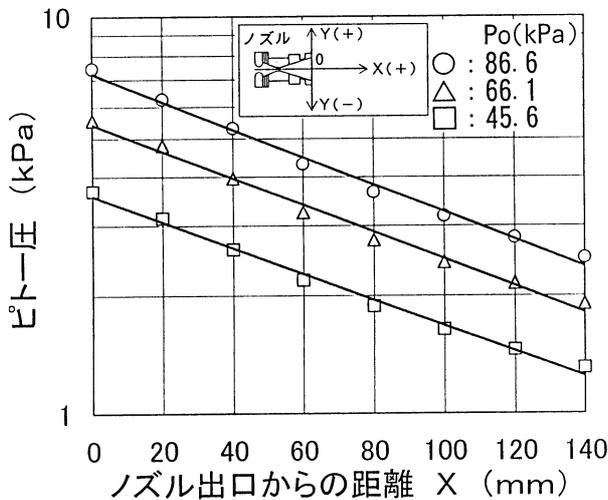


図40. 気流中心方向のピトー圧分布 (コニカルノズル)

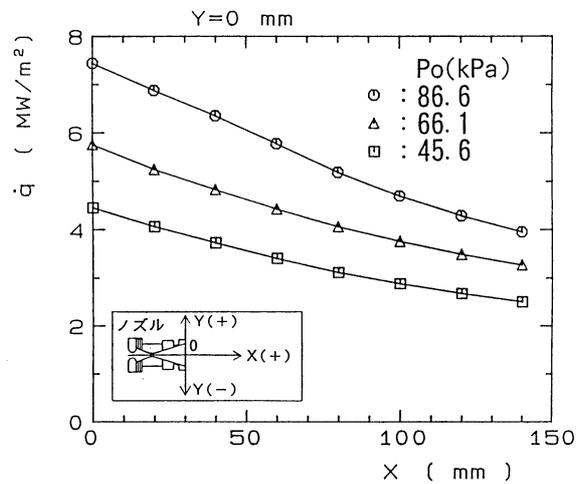


図42. 気流中心方向の加熱率分布 (コニカルノズル)

の加熱率分布の結果をそれぞれ図 39 ~ 図 42 に示す。図 39 の半径方向のピトー圧分布は、自由噴流のように単調に減少するのではなく、ノズル出口から 100mm での半径方向のピトー圧分布は、気流中心から約 $\pm 53\text{mm}$ まで、ほぼ一様であることが示されている。ノズル出口 20mm の半径方向のピトー圧分布は、コニカルノズルの形状から、気流中心が高く、半径方向へは緩やかに減少していることが示されている。図 43 は、図 39 の半径方向圧力分布の周辺部の最大傾斜が半径方向座標軸と交わる点の噴流軸方向に沿っての変化を印で示したもので、主流のおよその目安となる。また、ピトー圧と測定室圧が等しい点を印で示した。この印と印との間が境界層の厚みである。通常の供試体試験が行われるノズル出口から 100mm の位置では、主流の断面積の直径が約 $\phi 106\text{mm}$ 、境界層の厚み 66.5mm が得られた。この位置で $\phi 40\text{mm}$ 供試体とほぼ一様流の主流とのブロック比は、約 14% が得られた。図 40 の噴流の気流中心軸上のピトー圧分布は、ノズル出口からの距離と共に単調に減少することがわかる。減少の様子は真空中への自由噴流の場合のように必ずしも距離の 2 乗で減少せず、それよりゆるやかである。図 41 と図 42 の加熱率分布はピトー圧分布とほぼ同じ傾向を示している。

(2) チャンネルノズル気流特性

チャンネルノズル気流特性試験は、校正モジュール CNCM1 を用いて静圧分布及び加熱率分布を計測することにより行った。図 22 に示した校正モジュール CNCM1 は、外形 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の水冷式銅製平板に加熱率分布計測用のガードン型カロリメータを 5 点 (# 1 ~ # 5) 及び圧力分布計測用の圧力孔 4 点 (P1 ~ P4) を等間隔 (25mm) に組み込んである。試験は、校正モジュール CNCM1 を気流と平行に取り付け、対面には間隔 20mm の場所に校正モジュール CNCM1 と同じ大きさの冷却した銅板を平行に取り付けて行った。校正モジュール CNCM1 先端部の位置は、ノズルスロートから 300mm の位置である。

入力電力 P - 表面加熱率 \dot{q}_w の特性を図 34 に示す。図示した、印は校正モジュール前縁部の加熱率 2 点の平均値をプロットした値である。加熱率は冷却したガードン型カロリメータを使用したことによりデータは冷却壁条件である。試験結果から加熱率は約 $200 \sim 570\text{kW/m}^2$ が得られた。

図 35 に入力電力 P - 表面圧力 P_w の特性を示す。図示した、印は校正モジュール前縁部中心点の表面圧力 (静圧) 値である。試験結果から表面圧力値は約 $0.8 \sim 2.3\text{kPa}$ が得られた。

校正モジュール CNCM1 による加熱率分布及び表面圧力分布をそれぞれ図の 36、図 37 に示す。ガードン型カロ

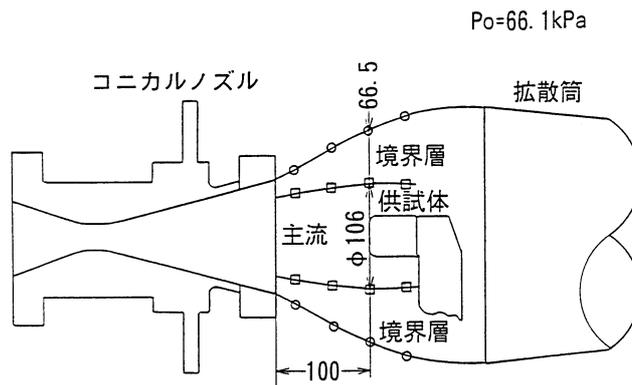


図 43. コニカルノズルから噴出した気流 (単位: mm)

リメータの位置 # 1 ~ # 5 の加熱率データはそれぞれ、
、
、
、
、
+ で示す。加熱率は校正モジュール CNCM1 の前縁部 2 点 (、印) と後縁部 2 点 (、印) のそれぞれ中心から対称の位置で計測を行ったが前縁部及び後縁部ともに上部 (、印) の方が下部 (、印) よりも高い値が得られた。圧力ポートの位置 P1 ~ P4 の圧力データは、それぞれ、
、
、
、
、
で示す。表面圧力は校正モジュール CNCM1 中央部 2 点 (、印) において計測を行ったがほぼ同じ値が得られた。加熱率分布及び表面圧力分布ともに実線は風洞試験最高条件で、点線は風洞試験最低条件である。また、各々の実線と点線で囲まれた領域は風洞運転可能な試験領域を示す。

7.3 定格枠外での運用による加熱率測定

特性試験により 750kW アーク加熱風洞の動作領域が得られた。瀬み点試験では目標とした材料表面温度レベル達成等のため、この動作範囲の領域以上での加熱率試験、又は領域以下での加熱率試験等が要請される。これら定格特性外加熱率拡張を図るため、新たにガスインジェクションリングを製作して、二次ガスを導入することにより対処した。即ち、アーク加熱器により加熱された直ぐ下流の電極とセグメント間のガスインジェクションリングのスリットから空気を導入することによって行った。定格枠外運用による加熱率化の概略図を図 44 に示す。実線矢印は加熱された一次ガス気流方向、点線矢印は定格以上加熱率化による二次ガス気流方向、太線矢印(⇒)は定格以下加熱率化による二次ガス気流方向を表す。図 44 の左側に示す A-A 矢視のガスインジェクションリングは、定格以上加熱率化用と定格以下加熱率化用の 2 枚製作した。各々のリングの説明のため A-A 矢視の図では、点線矢印で示すスリットのリングが定格以上加熱率化用、太線矢印で示すスリットのリングが定格以下加熱率化用である。

定格以下加熱率化は、電極形状 B 及び定格以下加熱率化用ガスインジェクションリングを使用して行った。このリ

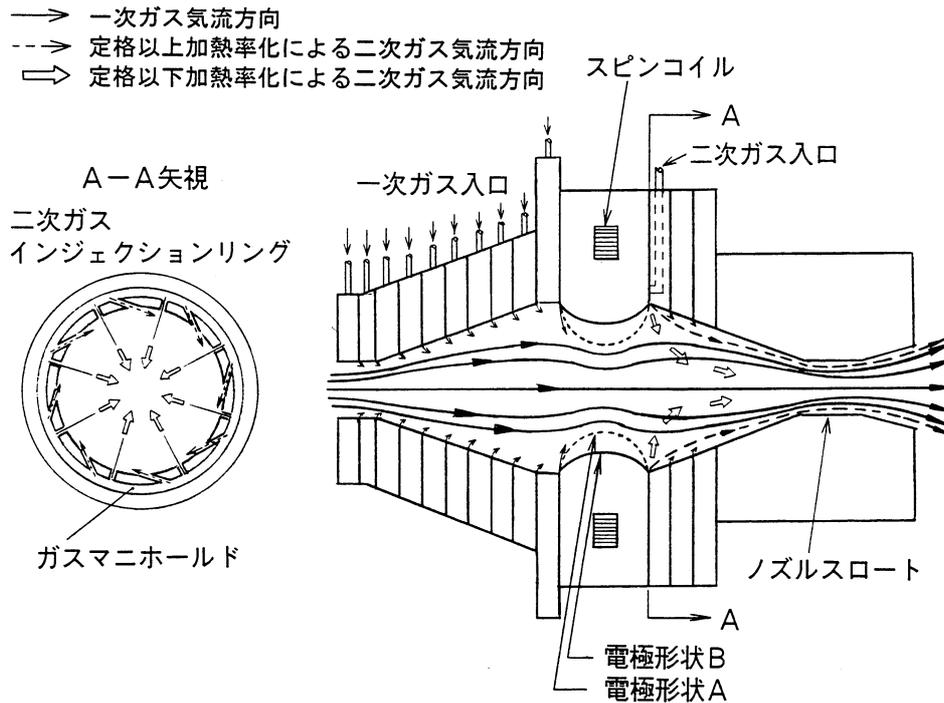


図 44. 定格枠外運用による加熱率化の概略図

リングの二次ガス導入スリットの形状は、 $1.0\text{mm} \times 1.5\text{mm} \times 8$ 個である。二次ガスは、加熱された一次ガスの直ぐ下流の気流中心へ向かって、常温の二次ガスを噴出し高温の気流に混入する方法をとった。試験は電極間隔が 2pack、アーク電流が 350A の条件により行った。試験により得られたガス流量に対する加熱率特性を図 45 に示す。試験結果から加熱率は同一の一次ガス流量において二次ガス流量の増大に対し顕著に減少していることが示される。その値は、同一の一次ガス流量 12g/s において二次ガス流量を 0g/s から 7g/s に変えたときに加熱率が約 1.35MW/m^2 から 1.02MW/m^2 へ減少していることが得られた。特性試験で得られたデータの他に、耐熱タイル試験等は低い加熱率が要請される。そこで、本風洞での最低の加熱率試験条件を求めた。その結果、定格以下加熱率化による最低加熱率は、電極間隔が 1pack、アーク電流が 300A、一次ガス流量が 8g/s 、二次ガス流量が 6.4g/s において加熱率 0.5MW/m^2 が得られた。電極形状の違いによる定格以下加熱率化は形状 B のほうが形状 A よりいっそうの効果があつた。

定格以上加熱率化は、電極形状 A 及び定格以上加熱率化用ガスインジェクションリングを使用して行った。このリングの二次ガス導入スリットの形状は $1.2\text{mm} \times 1.5\text{mm} \times 8$ 個である。二次ガスは加熱された直ぐ下流の一次ガス気流に対し常温の二次ガスを螺旋状に導入し高温の気流を縮流させさせる方法により行った。これは、気流の広がり制限して加熱量を集中させることによる方法である。試験は電極間隔が 3pack、アーク電流が 300A の条件により

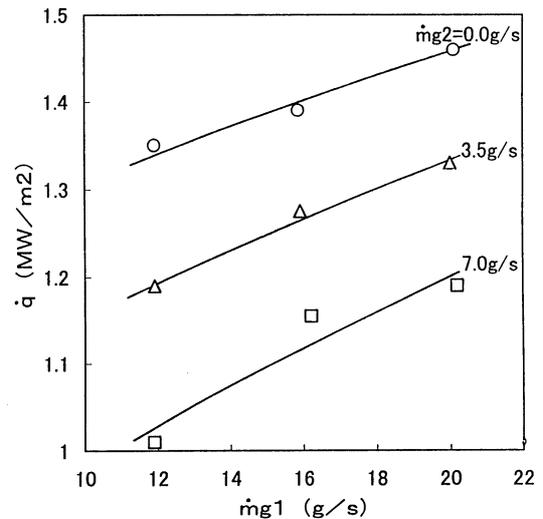


図 45. 定格以上加熱率化のガス流量－加熱率特性 (コニカルノズル)

行った。試験により得られたガス流量に対する加熱率特性を図 46 に示す。試験結果から加熱率は同一の一次ガス流量において二次ガスの増加により増大していることが示されている。加熱率は、同一の二次ガス流量において一次ガス流量の増加に対して減少している。これは一次ガス流量に対する二次ガス流量の比が小さくなるためであり、この比を大きくすればするほど加熱率は増加する傾向にある。加熱率は一次ガス流量 12g/s において二次ガス流量を 0g/s から 6g/s へ変えたとき加熱率は約 2.15MW/m^2 から 2.69MW/m^2 へ増加していることが得られた。電極形状 B

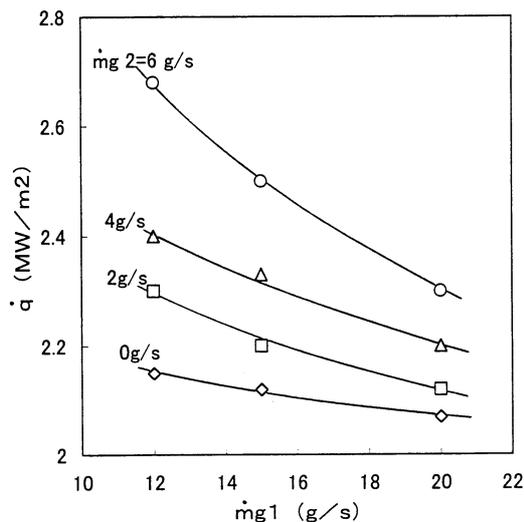


図 46. 定格以下加熱率化のガス流量－加熱率特性 (コニカルノズル)

により定格以上加熱率化を試みたが効果は得られなかった。

8. まとめ

750kW アーク加熱風洞は、性能改善整備の直後から HOPE 熱防護系の材料の開発試験計画に従って TPS 再使用性評価試験や C/C 材の耐酸化コーティング評価試験等の開発試験が進められている。風洞特性試験は、上記の開発試験の合間に行ったものである。風洞特性試験の結果から 750kW アーク加熱風洞のアーク加熱器作動領域、漑み点試験領域や平板試験領域が得られた。また総エンタルピ、加熱率や圧力についての作動範囲及び風洞の性能が満足された。ノズル出口下流の約 100mm の位置(通常供試体試験が行われる位置)で、半径方向約 ± 53mm のピトー圧及び加熱率は、ほぼ一様であることがわかった。本アーク加熱器は作動ガスが空気の場合に安定した運転が行えた。しかし、作動ガスが窒素の場合には、銅材の電極から溶融した酸化されていないスラグが多く発生し、アーク加熱器を破壊する恐れがある。このため、今後、作動ガス窒素による安定した試験を行う場合には、電極の材料を変える等の対策を行う必要がある。現在、アーク加熱風洞は、プラズマ流の質量分析及び分光分析等の気流の診断を行い、一様流の熱化学的状態量の同定を進める一方、防熱材料表面触媒効果の研究にも用いている。

750kW アーク加熱風洞システムの整備に関わる設計、製作は住友重機械工業株式会社が行った。整備の完成に努力された方々に対して謝意を表します。また実験に協力された(株)エイ・イー・エスの浜村修氏及び長井遵正氏に対して感謝します。

参考文献

- 1) 航空宇宙技術研究所・宇宙開発事業団、共同研究成果報告書、回収技術の研究、昭和 56 年 3 月
- 2) 航空宇宙技術研究所・宇宙開発事業団、共同研究成果報告書、回収技術の研究、昭和 57 年 6 月
- 3) 航空宇宙技術研究所・宇宙開発事業団、共同研究成果報告書、回収技術の研究、昭和 59 年 6 月
- 4) 松崎貴至、平林則明、渡辺光則、伊藤哲一、高野晃、高塚均；450kW アーク加熱風洞の特性()、航技研資料、TM-545、1985 年 6 月
- 5) 松崎貴至、松崎利一、宮馬浩、秋元敏男；アーク加熱風洞による表面熱伝達の実験、航技研報告、TR-1048、1989 年 12 月
- 6) 渡辺泰夫、松崎貴至、板垣春昭、弓立浩三、芳仲敏成、滝口和欽、庄田幸夫、長谷川清一；アーク加熱風洞の改修と放射率計測、日本航空宇宙学会誌、第 42 巻、第 482 号、P141 ~ P149、1994
- 7) Watanabe, Y., Matsuzaki, T., Ishida, K., Itagaki, H., Yudate, K., Yoshinaka, T.; Characteristics of the 750kW Arc Heated Wind Tunnel, ISTS 94-d-36, 1994
- 8) 石田清道、佐野政明、松崎貴至、三保和之、濱村修；高温放射率計測装置の構造と性能、航技研資料、TM-715、1997 年 7 月
- 9) 渡辺泰夫、松崎貴至、石田清道、三保和之、福井利夫、濱村修；集中熱容量式(スラグ)カロリメータによるアーク加熱気流の熱流束計測、航技研報告、TR-1388、1999 年 6 月
- 10) Joseph, G., Marvin and A., Richard Sinclair; Convective Heating in Regions of Large Favorable Pressure Gradient, NASA Ames Research Center, Moffett Field, Calif./AIAA JOURNAL

付録 1

アーク加熱器の運用

アークの起動は、アーク加熱器内に電気絶縁破壊の良いアルゴンガスを陽・陰極の上流から導入し、アーク加熱器内圧力約 8kPa の雰囲気、電極間に直流電源の電圧を印加することにより行う。作動ガスである空気等はシーケンスによりアーク点火後に導入する。アーク加熱器起動後は電極の上流からそれぞれ約 0.2g/s のアルゴンガスを導入して両電極の酸化保護を行う。作動ガスは、空気または窒素が使用できる。一次ガス流量 \dot{m}_{g1} は 8 ~ 22g/s をガス圧力約 9.9kg/cm² により供給する。調圧されたガスは、流量調整弁により流量が調節され、ガス流量計測用オリフィスの前後で差圧、温度と圧力を検出し、各々変換器を経て、制御盤上の流量計算器により演算され、実用単位でガス流量値が表示される。起動ガスのアルゴンガスはアーク加熱器の起動の際に使用され、起動後に作動ガスである一次ガスを導入する。二次ガスは、必要に応じて、陰極下流のガスインジェクションリングから導入する。二次ガス流量 \dot{m}_{g2} は、0 ~ 10g/s である。

風洞運転中は、アーク加熱器の電極から発生したスラグが電極とセグメント間及び各セグメント間に付着する。スラグは殆ど酸化されているが一部酸化されていない電極の材料である銅がある。この酸化されていないスラグは電極とセグメント間等の電気抵抗値を低くし、場合によっては電極間で飛んでいたアークが電極とセグメント間へ移ることがある。セグメントはアークの温度約 2 万 K に耐えられるよう製作はされていない。このためセグメントは一瞬のうちに溶融、そして破壊してしまう。アークによる電極の温度は陽極に比べ陰極のほうが著しく高い。このため風洞運転中は、陰極とセグメント間の電気抵抗の監視を行う。電気抵抗の監視は、各セグメント間及び電極間の電気絶縁が満足されていると、電極間のアーク電圧が約 1,000V の場合、各セグメント間等のアーク電圧の分圧値は約数十 V となる。電気絶縁が悪くなると同時に、この電圧値も下がり電圧値が 2V 以下になったときにブザーによる警報を行う。アーク加熱器の構造上スラグが付着しやすい陰極と下流のセグメント間 3 箇所はブザーによる警報、他の 2 箇所はメータによる監視を行う。図 3 アーク加熱器概略図の拡大パック部に電気絶縁の監視場所を示す。アーク加熱器は、セグメント間の電気絶縁が悪くなった場合、電極から発生したスラグを取り除くために加熱器内の清掃を行うことが必要である。また、電極は、電極の寿命時間で交換を行う。電極交換はアーク加熱器を分解し、電極の交換及び各部品を分解し部品内面に付着している電極からでたスラグを取り除き清掃を行った後、アーク加熱器を組み立てる。これに要する日数は、2 人で約 2 日を要する。このア

ーク加熱器の組立において特に大切なことは、各部品間の気密を確保するための“O”リングの組み込みである。アーク加熱風洞運転中アーク加熱器の内圧力は 110kPa 以下で行われるが、アーク加熱器にガスの洩れがあるとアークにより加熱されたガスが噴出し、部品を一瞬のうちに破壊してしまう。このためアーク加熱器を組立完了後、気密検査を行い定めた洩れ以内におさめなければならない。本アーク加熱器のガスの洩れの基準値は、アーク加熱器内圧力を 407kPa(4.15kg/cm²)に加圧封入し、1 分後の圧力値を読み取りその差が 6.86kPa(0.07kg/cm²)以下であれば合格である。こ他、組立時に大切なことは、アーク加熱器の運転時に、最大直流電圧約 2,000V の高圧電圧が印加される(最大無負荷電圧値 = 2,380V)、各セグメント間の電気絶縁及びケーブルの配線等は細心の注意が必要である。各セグメント間の電気絶縁の基準値は 500k 以上あることが必要である。試験前には必ず各セグメント間の抵抗値を測定し、電気絶縁値が満足されるまでセグメントの清掃を行わなければならない。各部品は高圧冷却水により強制冷却を行うため水洩れにも注意しながらアーク加熱器の組立を行わなければならない。

図 4 に示すアーク加熱器の縮流部は、厚さ 10mm、内径 25.4mm の無酸素銅のコラムセグメントを 13 枚組合わせた縮流 pack(1pack)、その上流部および下流部にはコラムセグメントを 8 枚組み合わせた縮小 pack と拡大 pack により構成されている。縮流 pack の 1pack の長さは約 130mm で、最大 3pack に組立ができ pack 数により運転条件の調整ができる。コラムセグメント全体は絶縁されたトラスロッドにより“O”リングに圧縮力を与え、フランジを結合して構造的な支持を与えている。一次ガスは、全てのコラムセグメントとガスインジェクションリングを経て各コラムセグメント間及びコラムセグメントと電極の間から導入する。一次ガスの導入は、図 4 の右上部拡大図に示すガスインジェクションリングの 4 個のスリットから図 4 の A-A 矢視に示すコラムセグメントの中心(アーク加熱器の中心)に向かって螺旋状に回転するように行い、アークの放射により加熱されるコラムセグメント内面のフィルム・クーリングや一次ガスの均一加熱化を行う。この一次ガスの回転方向は気流の上流から下流をみて右回転で、スピンドルによるアークの足の回転方向と同方向である。

一次ガス及び二次ガスに使用するガスは、7Nm³、150 気圧の高圧ガス容器 20 本を 1 組としたガスカードルにより供給を行う。その他にガスカードルは 1 組を待機として用いる。ガスカードル 1 組は、ガス流量 16g/s の試験条件において約 5 回(20 分/回)の試験が行える。アルゴンガスは 7 Nm³、150 気圧の高圧ガスポンプ 2 本により供給する。

アーク加熱器本体は、レールの上を軸方向、軸に対して

上下方向及び左右方向の3軸方向に移動可能な、架台の上に取り付けられている。その移動範囲は、左右方向が±5cm、軸方向が30cmである。架台には冷却水マニホールド、圧力計、冷却水温度センサー等が取り付けられている。

付録 2

アーク加熱風洞運転手順

起動運転手順

1. 高・低圧冷却水装置のドレーン弁を閉にする。
2. 低圧冷却水装置「運転」
3. 高圧冷却水装置「運転」
4. 測定室リーク弁「閉」確認
5. 排気装置「運転」
6. アーク加熱器各セグメント間の絶縁抵抗「チェック」
7. 運転準備確認釦「ON」
8. アルゴンガス始動弁「開」にして、アルゴンガス流量チェック後、再び「閉」
9. 作動ガス流量制御弁、作動ガス流量「10g/s に初期設定」
10. アルゴンガス入口弁「開」
11. アルゴンガス始動弁「自動」
12. 作動ガス入口弁「自動」
13. 主電源ファン「ON」
14. 主電源リセット「ON」
15. アーク電流「300A に初期設定」
16. 主電源安全保持器「ARM」
17. 主電源遮断機「投入」
18. 試料回転装置「中立」
19. 運転準備完了「点灯確認」
20. アーク加熱器運転押釦「ON」
21. アーク加熱風洞プラズマ発生「確認」
 - a. アーク電流「設定値まで調整」
 - b. 一次ガス流量「設定値まで調整」
 - c. 二次ガス流量「設定値まで調整」
22. 実験中、次の事項について異常の有無を確認する
 - ・アーク加熱器セグメント間「電圧値」
 - ・プラズマ流「状態、色」
 - ・アーク電流、アーク電圧「安定性」
 - ・一次ガス流量、二次ガス流量及び元圧力
 - ・冷却水流量及び各部水温・温度差
 - ・各部圧力

風洞停止手順

1. 風洞停止釦「ON」
2. 主電源安全保持器「SAFE」
3. アーク電流設定ダイヤル「O」
4. 作動ガス入口弁「閉」
5. アーク加熱器停止一分後、主電源用補助電源「OFF」
6. アルゴン始動弁「閉」
7. アルゴン入口弁「閉」
8. 主電源ファン「OFF」
9. アーク加熱器「帯電処理」
10. 測定室NOx除去
測定室に大気を導入し、測定室圧力 665Pa(5Torr)にて排気装置運転
11. 高圧冷却水装置停止「ON」
12. 排気装置停止「ON」
13. 測定室リーク弁「閉」
14. 低圧冷却水装置停止「ON」