

高温風洞の加熱方式の高性能化について

Characteristics Study of Performance of Arc Heated Wind Tunnel

保原 充, 北川 一敬

Michiru YASUHARA, Kazutaka KITAGAWA

Abstract: A high enthalpy wind tunnel, with Hüls type DC-arc heater, is constructed and operational characteristics are studied. Many of high power DC-arc heaters for high enthalpy wind tunnels have Hüls, segmented constrictor type or Hybrid type structures, and air etc. are used as working gases. The purpose of the present work is to study operating characteristics of a Hüls type DC-arc heater including stagnation temperatures of heated air, and to investigate the range of applicability of similarity plot proposed by Kindler. Also this similarity plot is extended to another type arc heaters other than Hüls type. These results are compared each other to find dominating factors to operate different kind of arc heater. Results show that all data are given in the form $V/I \propto (I^2/m)^\alpha$ with $\alpha = -0.7 \sim -0.8$ for air.

1. はじめに

溶接, 溶断の手段として, 古くから, 放電によるアーク加熱ガス方式が盛んに研究されてきた。その理由の一つは, 例えば不活性の Ar を用いれば放電で発生した高温ガスが材料を酸化しない事, 又放電電流を増加させる事によって, 厚肉の金属に対しても溶接, 溶断のパワーを大きくする事が出来る事, 等などである(アセチレン等の燃焼ガスを用いると, パワーは燃焼ガスの反応発熱量によってほぼ決まり調節は余りできない)。同じ頃から, このアーク加熱ガス流を超音速ノズルに通して再突入の熱環境をシミュレートさせるべく, 高エンタルピ超音速流を発生させる, 各種の方法が開発されて来た。本稿ではアーク加熱法について初期からの変遷に少し触れ, 次いで愛知工業大学における加熱風洞開発の方向と現状について報告する。

2. 初期の加熱方式

初期の加熱方式は, 水冷式で平面電極又は棒電極と, 孔空き電極間の放電による, ガス流加熱からはじまった。その結果放電による両極の水冷の不完全や, 両極のスポット放電による不均一加熱等, 材料の消耗が常に問題になった。スポット放電の対策は, ガス流に回転を加え, 或いは電磁コイルでスポット足を回転させる等して徐々に改良

がなされて来た。

こうして, 先ずは溶接, 溶断用として加圧アルゴン又は空気を使ったアーク加熱は現在ほぼ実用に達し, 一部電極を交換部品として製品も出回っている。直流電源も, 初期の大型セレン整流器からより小型のサイリスタ制御整流器等へと変わり性能もアップしている。面白い応用例として, アエロスパシアル社のプラズマ・トーチはヒュルス型で出力約数 MW, 航空宇宙用のほか, 医療用注射針等の廃棄物を高温熱分解処理して無害化するために等にも用いられている。

一方, 地球・火星等での大気圏往復飛行における, 超音速飛行にともなう熱環境のシミュレーションはなかなかやっかいである。第一に, 飛行体まわりの極超音速気流に対応した, 高エンタルピガス流中の構造体に関する, 耐熱実験又は試験シミュレーションには, 1m クラスの物体模型に対して 10MW, 100~200mm 程度でも, 400kW を超える桁違いの巨大なパワーが必要で, 先ず動力源確保の問題がある。このため(1)電力をエネルギーとするアーク加熱方式では, 電力の熱への変換効率を著しく上げる事, (2)一方では電極や高温ガス通路等各部の融解消耗を防ぎ, 冷却効率を高める事, 等が強く求められている。(3)その上, 飛翔条件によっては物体前面近傍で生じる高い圧力をもシミュレートする必要があり, これらを全部クリアするのは容易ではない。現在世界の代表的アーク加熱型高エンタルピ風洞で出力数 10MW, 圧力 1

～16.2MPaの組み合わせがあるが, 例えばスペースシャトルの地球再突入条件をすべて満たしたものはまだない. 重点的な目的に応じた, 今後の更なる基礎及び新技術開発が望まれている.

3. 最近のアーキ加熱方式

ところで, 最近の大出力アーキプラズマの発生方式としては, ヒュルス(Hüls)型とセグメンテッド・コンストリクタ(Segmented Constrictor)型がよく開発され, その複合(Hybrid)型もある. それらの原理図を図1-a, 1-b, 1-cに示す.

3.1 ヒュルス型

この方式について歴史は古い. 1909年 Schönherr が窒素固定用に, 空気力学的に安定なアーキプラズマ発生装置を設計したのに始まると言われる. この設計はドイツの化学会社 Hüls AG により 1928年よりアセチレン生成に利用されて(7MW), 広く Hüls design と呼ばれているが 1960年代にユニオンカーバイド社の Linde Division で航空用, 商用に改良利用され, パテントも数多く持っており, そのため Linde design とも呼ばれる.

ヒュルス(Hüls)型は図1-aのように放電の両電極を共に中空型にしたもので, 放電足間のアーキ長が, 電力条件に応じて両極の中空間を自由に伸縮でき, 大出力まで実現可能と言われている. 又比較的構造が簡単で頑丈, 高圧作動に適している.

この中空電極構造は電極の水冷が容易である. 又プレナム室へのガス流入を渦状に回転させ, 電極の消耗を減じている. 但し自由アーキ長であるため, エンタルピを上げる目的でアーキを延ばそうとして流量を増すと電圧増とともにガスのエンタルピは薄まり, 強い高エンタルピ向きではない難点もある. 図2-a, 2-b, 2-cは本学(AIT)で設計製作された水冷式 30kW Hüls 型アーキヒータを示す. 作動ガスには, Air, N₂, Ar を用いて実験を行うことができる. また, 上流電極側を陰極, 下流電極側を陽極として接続されている. このアーキヒータによって発生される高エンタルピ流は激み点温度約 2000～3000K, マッハ数 $M=3 \sim 4$ である. 日本では宇宙科学研究所(ISAS)²⁾で初期に採用された. 又ドイツの DLR(Deutsche Luft und Raumfahrt) や, 米国では NASA や USAF(United States Air Force)で採用された. 図3は AEDC(Arnold Engineering Development Center)の 50MW アーキヒータの概要である.

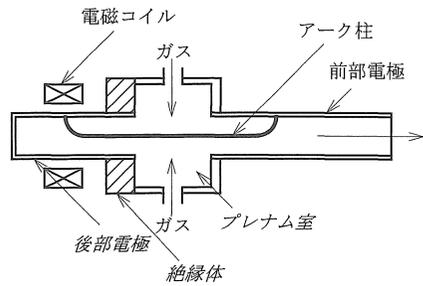


図1-a Hüls 型アーキヒータ

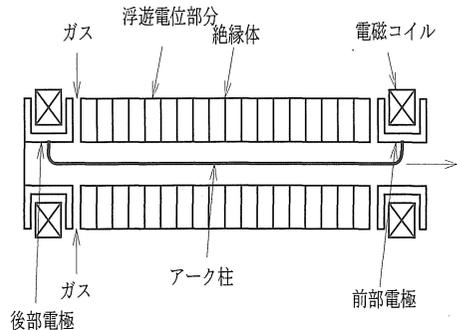


図1-b 分割式コンストリクタ型アーキヒータ

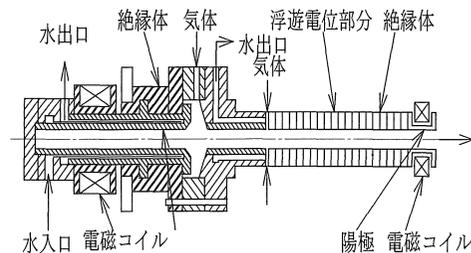


図1-c ハイブリッド型アーキヒータ

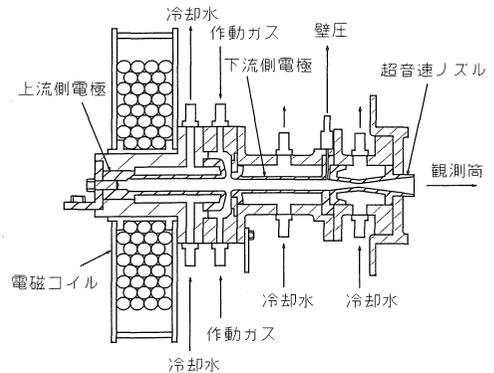


図2-a 愛知工業大学 Hüls 型アーキヒータ

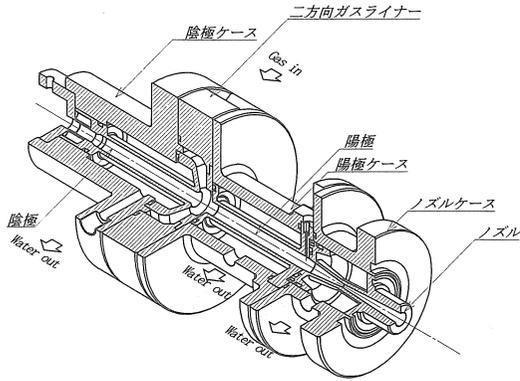


図 2 - b 愛知工業大学 Huls 型アークヒータ (立体図)

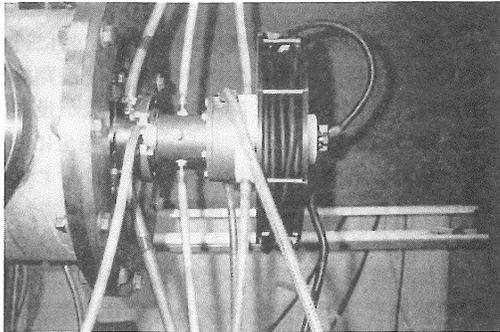


図 2 - c 愛知工業大学 Huls 型アークヒータ (写真)

3.2 分割縮流型

分割縮流型(Segmented Constrictor)型は、図 1 - b 図のように両電極を離れた位置に固定し、その間は絶縁体で分割して電位浮遊した、多数の分割ユニットで接続される方式である。

固定アーク長方式のプラズマ発生装置は、ヒュルス型の自由アーク長方式よりも高いエンタルピのガスを生成する能力を持っている。電力、電圧、流量の調節は安定して行え、電流の変化に対してはヒュルス型程敏感でない。その理由は以下の通りである。

まずガスの電気抵抗は温度上昇と共に減少する。今図 4 - a に示すように、自由アーク長方式を考えると、アーク線に沿って加熱されたガス領域が下流に行くに従って断面一杯に広がる。さらにアークと壁間のガスが充分熱くなって伝導性が高く電気抵抗が低くなって、アーク足が壁にぶつかるが、その時のアーク・パスは、アーク間の全電気抵抗が最低になる電気経路をとる。このアークスポット点以後は、アーク熱はガスに

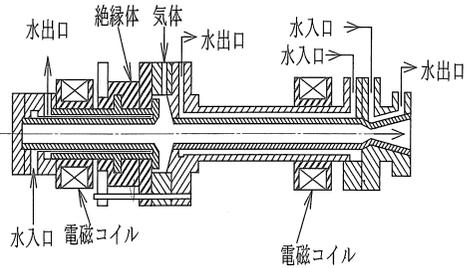


図 3 AEDC Huls 型アークヒータ

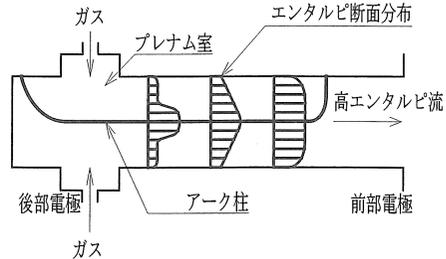


図 4 - a 任意長さアーク(Huls 型)の通り道 最も抵抗の少ない所

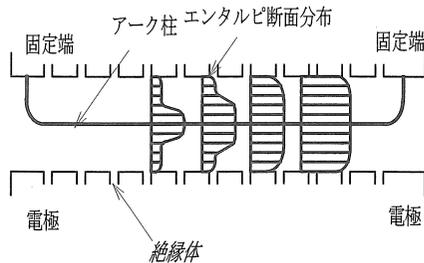


図 4 - b 固定長さアーク(分割式) この点を通り過ぎたガスはエネルギーを増加し続ける

加わらないので、チャンネルを延長してもエネルギーはガスから熱伝導等によって逃げてしまうことになる。

一方図 4 - b に示すような固定長アーク方式にすると、アークのスポット位置は下流側電極点にまで引き伸ばされ、従って下流電極までガスへのエネルギー附加が続けられる事となり、その結果、自由アーク長方式よりも高いエンタルピのガスが生成される理屈である。この方式は 1960 年代から米国 NASA や Acurex 社等で開発されて来ており、アークの拡散を防ぐ縮流型であり壁面を電氣的に安定化させる。その手法は、一連の水冷銅片を薄い絶縁片で分離した形で並べた、浮遊ポテンシャル型縮流チャンネル方式である。NASA Ames に

は分割縮流型で, 60MW の Space Shuttle Interaction Heating Facility, 100MW の Giant Planet Facility 等がある. 航空宇宙技術研究所 (NAL, 0.75MW)⁴⁾, 宇宙科学研究所 (ISAS, 1MW) の装置は, この方式に対応する.

尚図 1-c の様にヒュルス型と分割縮流型を接続併用した複合 (Hybrid) 型も設計されているが, 数は少ない.

4. アーク加熱の特性について

アークヒータは通常直流を使用するが, アークの平均的電気抵抗 Ω を放電電圧 V と放電電流 I の比 V/I と考え, 又質量流量 m 当たり I^2 の値, 即ち I^2/m に対する V/I を対数値で比較した関係は, AIT, ISAS, DLR, Ud. Bw Munich (Universität der Bundeswehr in Munich) のヒュルス型及び NAL, 神戸製鋼所の分割縮流型⁵⁾ の実験資料によると, 図 5 のようにヒータの構造と小型・大型ヒータの出力に依らずそれぞれほぼ勾配の等しい一直線に乗り, 指数法則に従っている⁶⁾. 即ち

$$V/I \propto (I^2/m)^\alpha$$

$$\alpha = -0.7 \sim -0.8$$

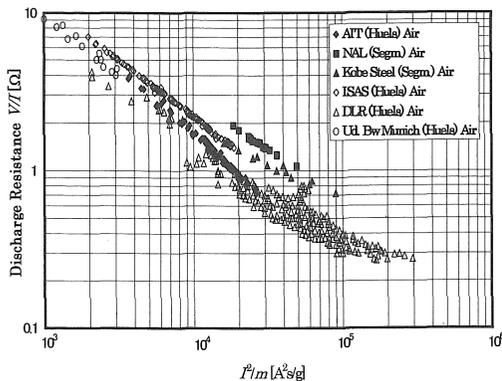


図 5 加熱装置のアーク抵抗と I^2/m の関係
(m : 加熱ガス質量流量)

上の関係によれば, 大型化して質量流量 m を更に増大させるには, 一定の電流で作動させる条件に対しては, 電圧 V の範囲を可能な限り拡大上昇させる必要がある事になる.

更に, 得られた高温ガスを超音速流にノズル加速した際には, 通常熱力学的に非平衡で, 殆ど凍結流状態に近い事も考慮しなければならない.

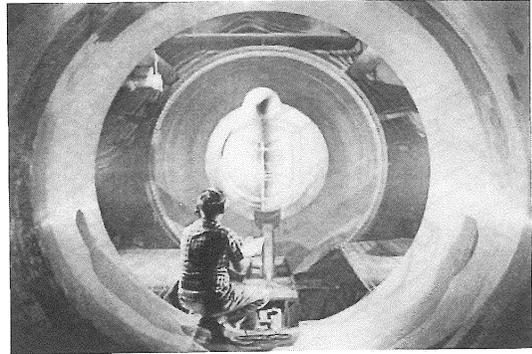


図 6 NASA 8ft 高エンタルピメタン風洞

5. おわりに

アーク加熱方式の歴史は古いが, 特に近年大気圏離脱や再突入時における極超音速飛翔体の, 耐熱材料研究や開発に関連した設備数が世界的に増加しつつある. 一方で飛翔条件を完全にシミュレートする風洞の実現は, 現在でも尚きわめて困難で, 重点目的に応じた風洞の高性能化を今後も進める事が必要と思われる.

以上, 高激み圧環境下で高温 (2000~2500K 程度) の状態をシミュレートする極超音速高エンタルピ風洞を実現するのは容易ではないのが現状である. 又加熱法も, アーク加熱方式のほか, 高周波 (RF) アーク加熱方式, レーザー加熱方式の付加等も計画されている. NASA の Langley⁷⁾ ではスペースシャトル耐熱タイル開発用のシミュレーション実験に, 激点圧力 27.4MPa, マッハ $M=7$, 試験断面直径 8 フィート (2.4m) の高エンタルピ風洞を実現する為に, 百万馬力の高圧 (27.4MPa) で作動させるメタン・トーチ燃焼方式を用いた (図 6). 発生した高温ガスが高温空気の成分と異なる事, マッハ数が $M=15\sim 25$ の条件より低い事, 等問題も色々あるが, 結局タイル開発実験・試験に最も多用した由である. 参考に値すると考えられる.

参考文献

- 1) 保原 充, 水谷 充: アーク加熱風洞の方法について, 日本航空宇宙学会誌, 1995, Vol.43, No.499, pp.441-445
- 2) Hinada, M., Inatani, Y., Yamada, T. and Hiraki, K.: Performance Characteristics of the ISAS Hüls-Type Arc Heater, Proc. 9th International Symposium on Space Technology and Science, 1994, pp.383-390

- 3) Spitzer, L. : Physics of Fully Ionized Gases, Interscience Publishers, N.Y., 1956.
- 4) 渡辺泰夫, 松崎貴至, 板垣春昭, 長谷川清一 : 750kW アーク加熱風洞の基本特性, 第 26 回流体力学講演会講演集, 日本航空宇宙学会ほか, 1994, pp.113-116
- 5) 田頭成能, 織田 剛, 満田正彦, 鷺田孝史, 進俊彦, 吾郷健二, Stahl, T.J. : 風洞用アークヒータの諸特性, 第 26 回流体力学講演会講演集, 日本航空宇宙学会ほか, 1994, pp.109-112
- 6) Yasuhara, M., Kitagawa, K., Suzuki, M. and Yamada, H. : Similarity Study of Operating Characteristics of Arc Heated Wind Tunnel, Proc. International Conference on Fluid Engineering, Tokyo, Japan, 1997, Vol.III, pp.1479-1483
- 7) Baals, D.D. and Corliss, W.R. : Wind Tunnels of NASA, NASA Washington, D.C., 1981, pp.95-96.

(受理 平成12年3月18日)