

## 高周波プラズマジェットの実験への応用 (I)

On Application of Induction Plasma Jet to Smelting (I)

—プラズマジェットの特性について—

—On Characteristics of Induction Plasma Jet—

江上一郎\*・明石和夫\*・石塚隆一\*

Ichirō EGAMI, Kazuo AKASHI and Ryūichi ISHIZUKA

## 1. はじめに

プラズマジェットの発生には通常、電極を用いる直流アーク放電方式と無電極型の高周波誘導放電方式とがあり、後者の方法で得られるプラズマは電極物質の汚染がないため清浄なプラズマが得られるのがその大きな特徴として知られている。その他、アーク放電方式とくらべて粉末試料の供給が容易であり、不活性、酸性、還元性などの雰囲気を選択できること、ならびにガス流速が一般に低いので試料の飛散が比較的少ないなど種々の利点が上げられる。高周波プラズマジェットの応用例としては、主に単結晶の製作<sup>1)2)</sup>、高融点金属または酸化物の球状化<sup>3)</sup>、硫化物からの金属の生成<sup>4)</sup>などがあるが、今後さらに研究、応用面が広く開発されることが期待されている。

筆者らは、すでにアークプラズマジェットを高温冶金反応へ応用する一連の研究を行ってきたが、本報告は高周波誘導放電方式によって得られるプラズマジェットを同様な目的で利用する場合の予備実験の一部として、アルゴンプラズマの発生とその安定化につき、主としてプラズマガスと冷却ガス流量および陽極電圧—電流特性の面から調べたものである。

## 2. 実験装置と方法

高周波発振器は日本高周波株式会社製の最大出力 10 kW、発振周波数 5.3 MHz の本体と制御盤およびプラズマ発生部より成り、3相 200V で整流管およびサイラトロンによって全波整流し、直流電圧を発振管に供給して陽極同調方式の発振を行なうものである。

高周波出力は発振管への直流入力（制御盤の陽極電圧×電流）のほぼ 35~45% として与えられ、陽極電圧調整器を加減することによってサイラトロンのグリッド位相が変化し、陽極電圧 0~7 kV まで連続可変できるようにしてある。プラズマ発生部は図 1 に示すごとく、3重の石英管とその取付け治具および巻数が 2 段のソレノイド型コイルを用いた。石英管には不透明石英の内管（外径 20 mm、内径 16 mm）と試料供給管（外径 5.8 mm）を一定とし、外管のみを 3 種類（A 管—透明石英、外径 35 mm、内径 25 mm、B 管—透明石英、外径 35 mm、

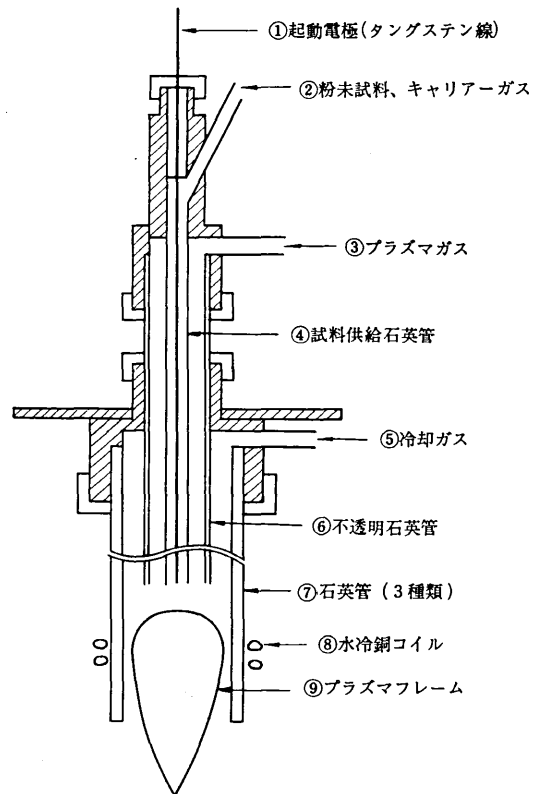


図 1 プラズマフレーム発生部

内径 31 mm、C 管—不透明石英、外径 34 mm、内径 29 mm）に変えて実験を行なった。また、粉末試料の供給管にも主としてノズル径 2.8 mm の毛细管を用いて同時にガスの導入を行なった。プラズマガスおよび冷却ガスは市販の高純度アルゴンを用い、ともに管軸の切線方向へ導入している。

プラズマジェットの発生方法としては、同軸に固定された外管の下端よりコイルの位置を約 40~55 mm に、また内管の下端とコイルのそれを 15~35 mm に適宜変えて所定のガスを導入する。そしてプラズマの発生に必要な入力を与え、同時に起動電極として用いるタングステン棒 (1.5 mmφ) をコイルの中心部に挿入することによってプラズマが得られる。プラズマフレームは、主と

\* 東京大学生産技術研究所 第 4 部

して陽極電圧調整器によって入力を変えるか、またはプラズマガス (5 l/min, 10 l/min), 冷却ガス (5~20 l/min) の流量調節を行なって観察し、同時に陽極電圧, 電流の測定を行なった。

3. 実験結果と考察

高周波プラズマジェットの発生とその安定化については、たとえばコイルの形状と巻数, 高周波出力, 出力インピーダンスまたはガスの種類と流速など種々の要素が影響される<sup>5)</sup>。筆者らの経験した実験範囲内においても、プラズマガスと冷却ガス流速並びに入力との相関性の影響は大きく、また内管と高周波コイルの設定位置の問題などかなり複雑な条件が要求されるようである。

安定したプラズマジェットを、石英反応管中に保持することはきわめて重要であることは今さら述べるまでもない。Reed らが、出力 10 kW, 周波数 4 Mc で 5 巻のコイルを用いて得たアルゴンプラズマフレームの各部から輻射される Ar-7635 Å 線の強度を測定、解析して推定した温度分布は、フレームの中心部が最高であり、ほぼ 16,000~10,000°K の範囲を示し、また電源出力の 52~57% がプラズマの熱エネルギーに変わったと報告している<sup>6)</sup>。本実験では温度の測定は行っていないが、ある範囲内ではほぼプラズマガス流量の増加と入力の増加に従って上昇するものと思われる。

内管を通るプラズマガス流量を 5 l/min, 10 l/min とし、外管を変えて冷却ガス流量と入力との関係をフレームの安定化領域として示したのが図 2, 図 3 である。

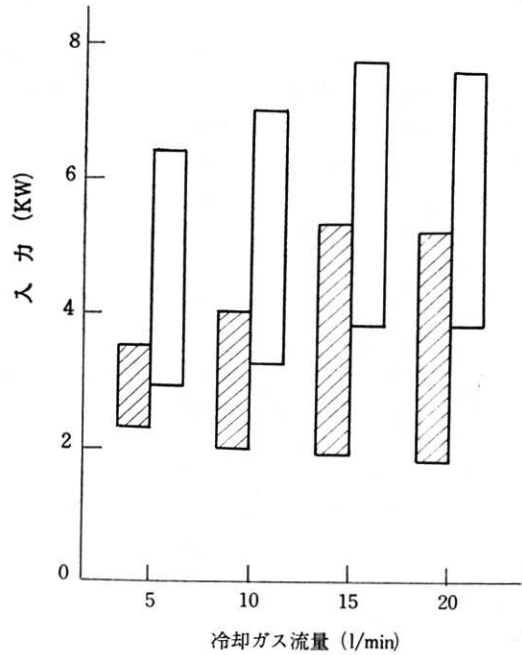


図3 フレームの安定化範囲 (B管使用)

一般にプラズマガス流量が多い程、フレームの安定化領域が入力の高い方へ移動する傾向が見られ、これは気体のイオン化速度による影響と思われる。また、A管はB管にくらべて冷却ガス流速が早い、この場合はその安定化領域がかなり制限されるようである。このように冷却ガス流速と入力との相関性は特に重要なものと思われる、C管の場合もほぼ同様にその領域が帯状に変化することがわかった。

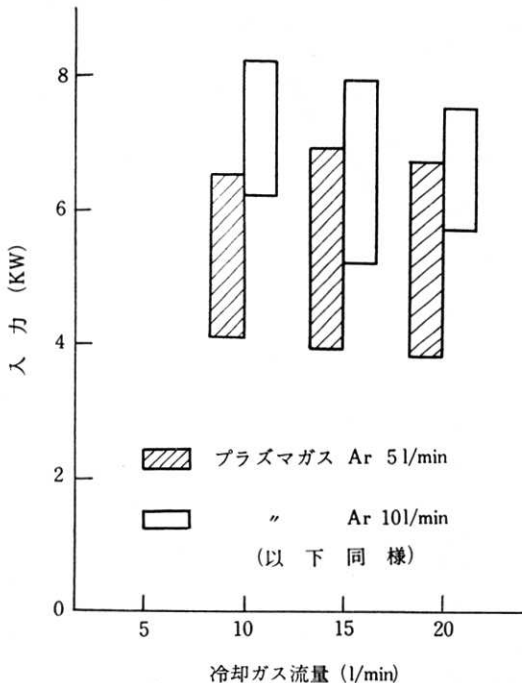
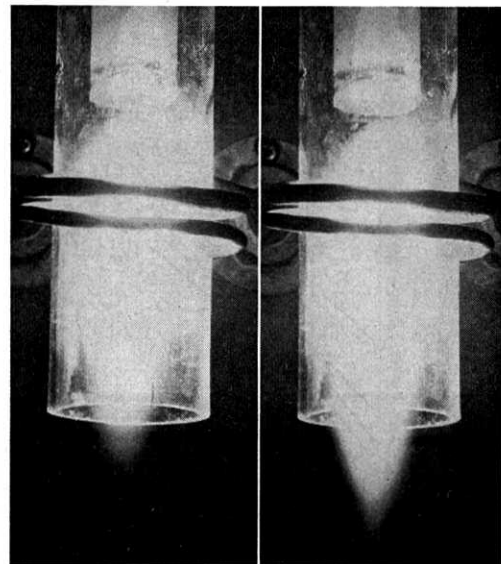


図2 フレームの安定化範囲 (A管使用)



a) 冷却ガス 10 l/min    b) 冷却ガス 20 l/min  
(プラズマガス Ar 5 l/min, 出力約 1.6 kW)

写真1 プラズマフレーム

写真 1 は陽極電圧<sup>3</sup>3.5 kV, プラズマガス流量 5 l/min で冷却ガス流量は a) では 10 l/min, b) では 20 l/min であるが, フレームの位置および形状の変化が見られる. a) のフレームの長さはほぼ 79 mm, b) では 92 mm であった. プラズマガスを管軸の切線方向に導入する場合は, 管内をうず巻状に下降し, 流速を増してもガスのイオン化の効率は管の軸方向へのガス導入にくらべて高いものと思われ, したがってプラズマフレームの安定化も前者の方がよいものと考えられる. しかし, 粉末試料を供給する場合は後者の方がその収率からは有利であるとの報告<sup>7)</sup>もある. プラズマフレームの安定化には, この他各管が中心軸にその対称性を持って位置することがきわめて重要である. 軸の多少の傾きによってもフレームが中心軸より離れて不安定となり, 管の消耗または破損が著しく長時間の保持は困難であった.

しかし, 上述のことを考慮すれば外管内壁の多少の消耗程度で 30~40 分の連続的な安定したフレームの保持が可能であった. また, コイルが外管の下端よりほぼ 25 mm 以上離すことが必要で, それ以下ではフレームの発生が困難であり, また起動電極とコイル間の放電によって管の破損をまねく結果となる. 内管の下端とコイル間は同じく 20 mm 以上の間隔が必要でそれ以下では内管の下端がフレームの上部でおおわれて石英管が溶けてしまう. A 管を用いてプラズマガス流量を 5 l/min, 10 l/min に変え, フレームの安定状態における冷却ガス流量の変化と陽極電圧, 電流の測定を行なった結果を図 4 に示す. 同じく B 管を用いてプラズマガス流量を 5

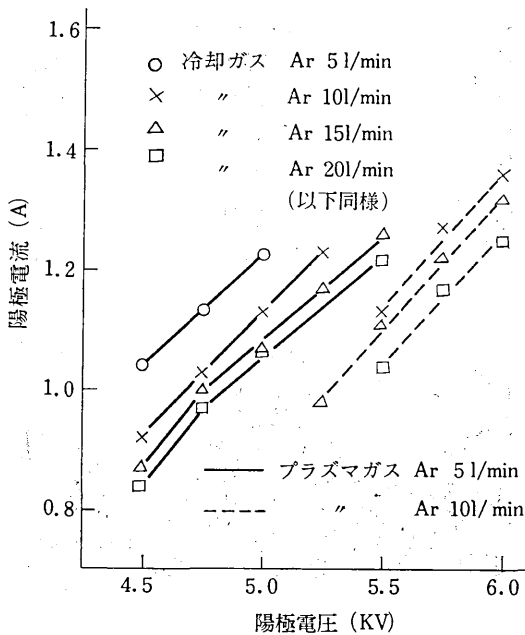


図 4 陽極電圧—電流特性 (A 管使用)

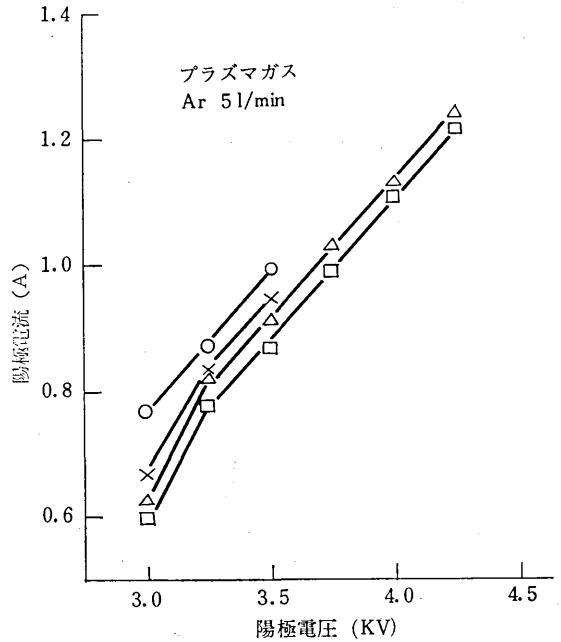


図 5 陽極電圧—電流特性 (B 管使用)

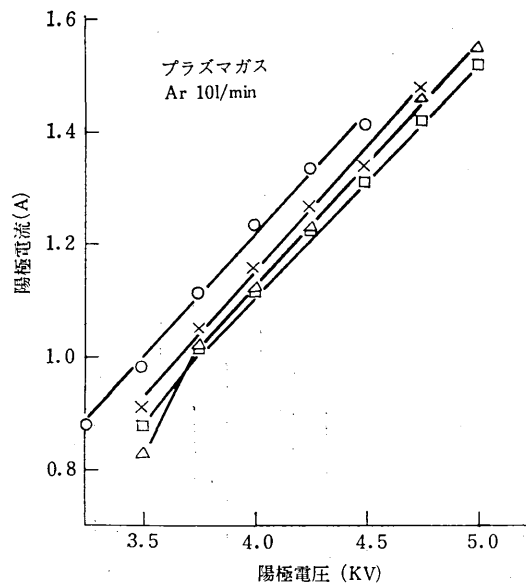


図 6 陽極電圧—電流特性 (B 管使用)

l/min, 10 l/min に変えた場合, また C 管で 5 l/min としたときの特性値を示したのが図 5, 図 6, 図 7 である. プラズマガス流量が一定のとき, 何れの管を用いても冷却ガス流量が多い程入力が低下し, またプラズマガス流量が多い程より大きな入力が必要であることがわかった. 粉末試料をフレーム中へ供給する場合には, キャリアーガスとして同時に試料管へのガスの導入も必要と思われるが, 試料の供給速度とキャリアーガス流量がフレームの安定化に与える影響も大きいようである.

研 究 速 報

4. ま と め

高周波プラズマジェットの冶金反応への応用に関する予備実験の一部として、プラズマフレームの発生条件とその安定化についての検討を行なった。

粉末試料の供給とフレーム発生管の冷却を考慮して 3 重の石英管を用い、外管のみを 3 種類に変えて実験を行なった結果次のことが明らかとなった。

各管は常に同軸上に極めて正確に位置することが重要であり、プラズマガスおよび冷却ガス流速と入力には相関性があるてフレームの安定化範囲を制限する。中心軸にできたきわめて安定したフレームなら、ほぼ 30 分以上の保持も可能である。しかし、粉末試料を扱う場合には試料の供給速度およびそのキャリアーガスの流量などの影響もあって、さらにフレームの安定化条件とその保持時間には制約が加わるものと思われる。

(1971 年 1 月 20 日受理)

文 献

- 1) T. B. Reed; J. Appl. Phys. 32, 12, 2534 (1961)
- 2) 近藤正之: 日本物理学会誌 19, 16, 367 (1964)
- 3) H. J. Hedger, A. R. Hall; Powder Metallurgy. No. 8, August (1961)
- 4) P. A. Huska, C. W. Chump; Ind. Eng. Chem. Process Design and Develop, 6, 238 (1967)

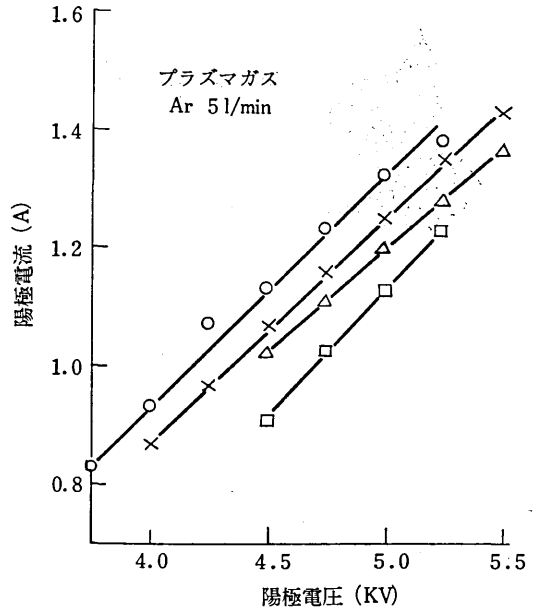


図7 陽極電圧—電流特性 (C管使用)

- 5) 岡田実, 荒田吉明: プラズマ工学, 日刊工業新聞社, 392 (1965)
- 6) T. B. Reed; J. appl, Phys, 32, 821 (1961)
- 7) 松村温: 固体物理, 2, 6, 25 (1967)

東京大学生産技術研究所報告 刊行予告

第 20 卷 第 6 号

(英文)

中 村 輝 男 著

Foundation of the Geometrically Nonlinear Theory of the Continuum  
based on Kirchhoff-Love Assumption

キルヒホッフの仮定に基づく連続体の幾何学的非線型論

シェル, 平板, アーチ, 梁のような一方向の寸法が他に比較して微小な構造体は, 歪に関しての Kirchhoff の仮定と応力についての Love の仮定により理想化され, 曲面論の適用を可能とする。本論は, これらの仮定の再検討をもとに, 矛盾のない幾何学的非線型理論を提出するものである。その骨子は Kirchhoff の仮定に基づく歪に関する条件を付帯条件とする汎関数の停留条件として, すべての基本式を統一的に導くことにある。従来の理論が十分な検討を経ずに省略していた非線型項の検討も行ない, 矛盾のない基礎式を誘導した。

さらに, 最も簡単な非線型現象 (梁の大たわみ) について, 厳密な解析を行ない, 大たわみ現象に付随する基本的な性状を明らかにしている。

この結果, 当初曲げ応力主体の釣合状態が荷重を漸増させるにつれて, 軸力主体の釣合状態に移り変わって行く。その変曲点の存在が確かめられた。この点を越えると, 荷重を漸増させているにもかかわらず, 曲げ応力は減少するという事実が確かめられた。この時軸力の増加が加速され, 釣合状態が梁から Membrane Cord に移り変るように示しているといえよう。

(1971 年 3 月末発行予定)