

アークによる超高温の発生・計測・利用技術に関する調査 (その1：アークプラズマ発生技術)

千田 哲也*・植松 進**・天田 重庚*・佐藤誠四郎***

Feasibility Studies on Generation-, Measurement- and Application- Techniques of Ultra-high Temperature Fields by Arc-Discharge

(Part 1 : Generation- Techniques of Arc- Plasma)

By

Tetsuya SENDA, Susumu UEMATSU,
Shigeyasu AMADA and Seishiro SATO

Abstract

This report presents the survey on the present states and the future research trends of the arc-plasma generation techniques. The arc-plasma fields have been utilized for the high temperature heat sources. It is expected that the chemical reactivity and high density energy of arc-plasma can be applied to the synthesis and processing new materials. To realize them, it is urgent to develop the new techniques precisely controlling its density and temperature, densifying the plasma energy and expanding the high temperature region. The present states of the arc-plasma generation techniques are surveyed. Especially, each element such as power supply, electrode, plasma gas and so on, of the generation system is investigated. Finally, the discussion is done for developing such new techniques.

目次

	頁		
1. 緒言	13	4.3 電磁場	24
2. アークプラズマ発生装置の概要	15	4.4 トーチ	25
2.1 電気特性	16	4.5 低圧雰囲気	25
2.2 電極	17	4.6 複合化	26
2.3 プラズマ作動流体	17	4.7 高度化の可能性について	26
2.4 電源・冷却・制御装置	18	5. 結言	27
3. アークプラズマ発生装置の高度化	18	参考文献	28
4. アークプラズマ発生装置高度化の展望	20		
4.1 電源・電圧	20		
4.2 作動流体・外部流体	22		

1. 緒言

本報告は、昭和59年度に実施した「アークによる超高温の発生・計測・利用技術に関する調査」の成果を踏まえ、アークプラズマの発生・計測・利用技術に関する現状を把握し、今後進めるべき研究の方向を明らかにするために行った調査研究結果の報告(その1)である。

超高温を用いて材料の合成及び加工を行う技術は、ファインセラミックス用原料製造、耐熱材料の加工、

* 機関開発部
* * 溶接工作部
* * * 機関性能部

宇宙用機器の精密加工等の分野でその重要性が注目されている。特に、従来の固-液相状態を越える超高温(4,000~10,000K)におけるプラズマ状態の極めて高い化学反応性の利用は、新材料の合成、新加工技術等の大きな可能性が期待される。船舶技術の面でも、機関の高効率化・高信頼度化等のために、耐熱、耐腐食性材料として、あるいは温度や酸素濃度のセンサーとして高機能セラミックスの応用が期待されている。そのための新しい材料創製や加工の技術は重要な開発課題である。

超高温熱源としては、高周波、アークプラズマ、レーザー、電子ビーム等がある。このなかで、アークプラズマは、

- ① 熱容量の大きい高熱源である
- ② 電磁場制御ができる
- ③ ラジカル源として有用
- ④ 雰囲気任意に選べる

という特徴を持っている。特に、アークプラズマは他の熱源と異なり、単位時間当たり変換可能なエネルギー総量の上限がなく、また、流体、磁気等によるピンチ効果を用いたエネルギーの高密度化が可能である。このような特徴を持ったアークプラズマによる超高温場を、長時間、広範囲に安定に発生させるとともに高精度制御することができれば、セラミックス及び金属の微粒子製造、プラズマ溶射コーティング、高温冶金

反応、高温化学反応、高融点物質の精製、材料の切断、溶接等の分野において、画期的な技術革新が可能となる。

しかしながら、アークプラズマを利用したこれらの技術は、試行錯誤的に行なわれているものが多く、現状でははなはだ不十分である。たとえば、微粒子製造、精錬の分野においては、アークプラズマの持つ化学的高活性は、十分に利用されているとはいえない。プラズマ溶射では、国産技術の確立がなされておらず、熱機関等における実用化のためには、厚膜化や接着強度の向上等、多くの課題が残されている。切断、溶接等の加工の分野では、対象が金属材料に限られ、セラミックス等の難加工材への適用はなされていない。

これらを達成するためには、超高温場を長時間安定に発生させるとともに、そのプラズマ組成、温度、流速等を高精度に制御する技術の開発が必要であり、さらにそのためには、アークプラズマの高精度計測法の確立が要求されている。

このような観点から、昭和59年度に科学技術振興調整費課題として「超高温の発生・計測・利用技術に関する調査」が実施された。これは、「超高温」技術の現状を調査分析し、今後の重要研究分野を抽出し、その研究計画を策定することを目的とした調査研究であった。そのなかでアークプラズマを熱源とする技術については、表-1の構成によるワーキンググループを設

表-1 アークによる超高温の発生・計測・利用技術に関する調査ワーキンググループ

佐藤 誠四郎	運輸省船舶技術研究所機関性能部補機研究室長
巖本 巖	郵政省電波研究所衛星計測部第2衛星計測研究室長
植田 至宏	三菱電機株式会社応用機器研究所環境産業機器開発部電気加工機グループ長
宇田 雅広	科学技術庁金属材料技術研究所機能材料研究部第5研究室長
大森 明	大阪大学溶接工学研究所助教授
河村 光隆	通商産業省工業技術院化学技術研究所プロセス開発部第3課長
神沢 淳	東京工業大学工学部化学工学科教授
早崎 英彦	株式会社田中製作所取締役技術部長
松井 繁朋	川崎重工業株式会社技術研究所溶接研究室部長
松岡 一祥	運輸省船舶技術研究所船体構造部主任研究官
大野 悟	科学技術庁金属材料技術研究所機能材料研究部主任研究官
後藤 昭博	通商産業省工業技術院化学技術研究所プロセス開発部第3課主任研究官
永井 裕善	川崎重工業株式会社技術研究所溶接研究室第2研究班長
藤井 俊英	株式会社田中製作所埼玉工場品管グループチーフ
天田 重庚	運輸省船舶技術研究所機関開発部主任研究官
植松 進	運輸省船舶技術研究所溶接工作部
千田 哲也	運輸省船舶技術研究所機関開発部

(所属・役職は1985年3月現在)

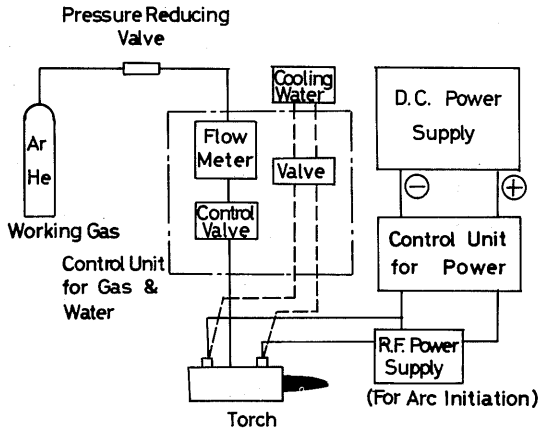


図-3 アークプラズマ発生装置の構成

2.1 電気特性

アークの電圧と電流は、作動ガスの種類と圧力、アーク長(基本的には陰極と陽極の距離)、電極材料等が与えられればその特性が決まる。図-4は、炭素アークの電圧・電流特性である³⁾。このように、通常、アーク電流の増加に伴い電圧が低下するという垂下特性をもつ。このような放電特性には、次のような考察があ

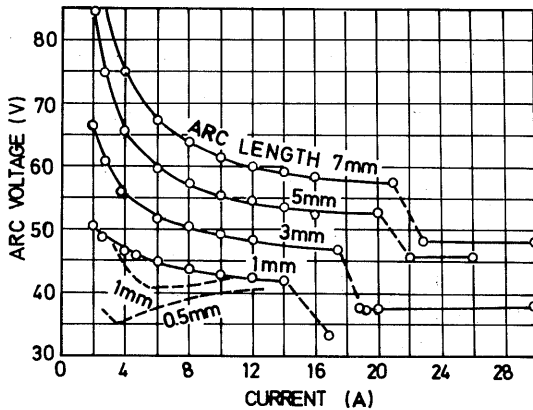


図-4 炭素アークの電圧・電流特性

る^{4),5)}。図-5に示すようなアーク放電回路(電源電圧： V_0 、電流： i 、電源回路抵抗： R 、アーク電圧： v)のアークの放電特性をグラフの曲線(垂下特性)で表し、電源特性を直線で表すと、A点とB点が動作点となる。このような回路においては、カウマンの安定化規準として知られる関係、

$$\frac{dv}{di} + R > 0$$

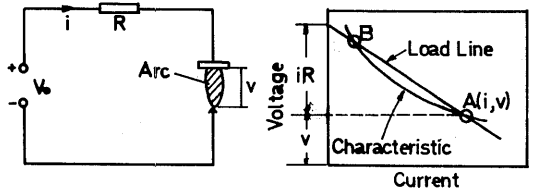
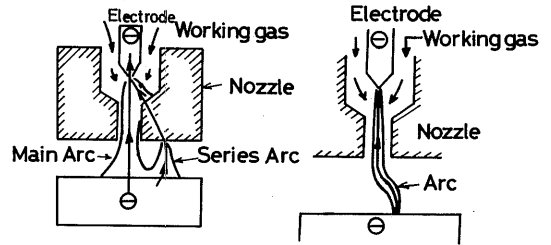


図-5 垂下特性をもつアークの安定性

があり、これを満足するA点においてのみ安定である。なお、図-4の右下にある不連続部は、低電離域で此章アーク(雑音を発生)に移行するときに起こる現象で、金属電極を用いると起こらない。

ノズル形状を持つ発生装置では、電流を増加させると、図-6⁶⁾に示すようなダブルアークや不安定アークが生じるため、電流の限界値が存在する。図-7⁷⁾は、プラズマ切断機について、ダブルアーク発生限界電流を求めたもので、ノズルの直径や作動ガスの種類により限界値が異なっている。このような限界値の存在は、装置の大出力化をはかる場合に特に考慮する必要がある。



(a) ダブルアーク (b) 不安定アーク

図-6 不整アーク

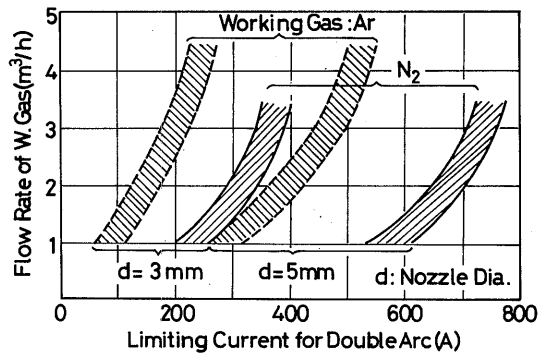


図-7 ダブルアーク発生限界電流値

け、「アークによる超高温の発生・計測・利用技術に関する調査」として調査研究を行った。

これらの調査結果¹⁾を踏まえ、船舶技術研究所において実施する予定の分野に重点をおいてさらに検討を加えた。本報告は、これらの調査結果を4編にわけてとりまとめたものなかのアークプラズマ発生技術に関する部分の調査結果である。以下の報告は、次のように構成される予定である。

- その2：アークプラズマ場の解析
- その3：アークプラズマ計測技術
- その4：アークプラズマの利用

本報告の構成は、次のとおりである。まず、アークプラズマ発生装置の構成とその諸特性の概要について調査した(第2章)。次に、新材料合成のような新しい分野への利用のためには、発生技術の高度化が必要であるという観点から、その方向の提示を行い(第3章)、最後にその技術開発の可能性の検討を行った(第4章)。

2. アークプラズマ発生装置の概要

この章では、アークプラズマ発生装置の概要を述べる。発生装置の詳細は、その装置の使用目的により異なるが、ここでは、各装置に共通する基本的な部分について概観した。

アークプラズマは、大気圧程度の圧力の下で二つの電極の間の主として直流の放電場に不活性ガスや水等の作動流体を流し、プラズマ化された作動流体あるいは放電そのもののエネルギーにより形成される超高温場で、現在、金属の切断・溶接・溶解、溶射、熱分解、微粒子製造等の分野で用いられ、あるいは用いる試みがなされている。図-1に、アークプラズマ発生装置の例としてプラズマ溶射用のトーチと金属精錬用のプラ

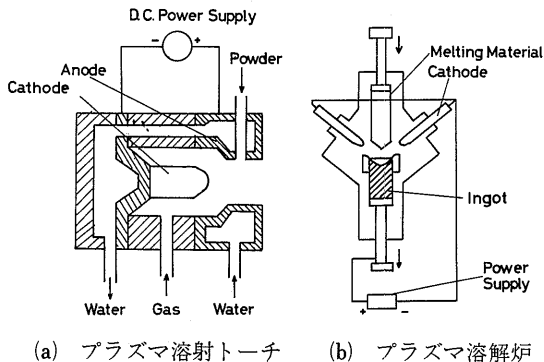


図-1 アークプラズマ発生装置の例

ズマ炉の模式図を示す。

アーク発生方式は、図-2に示すように、三種類に分類される²⁾。(a)は開放アークで、加工物と電極間のアークを収束する手段はとられていない。このためアーク電流を増加するにしがたいアークはひろがり、アーク柱の電流密度は増加せず、放電場の温度はせいぜい10,000K程度である。またプラズマ流の流速も低い。図-1の(b)は、これに相当している。(b)と(c)はガス流型とよばれ、アークを狭い流路に閉じ込めてひろがらないようにしているため、高速流が得られ、中心温度も2~30,000Kに達するといわれている。(b)は、移行型アークとよばれ、加工物を陽極としており、棒状の陰極との間のアークはノズルで絞られ、さらにアークの周囲の流体(ガス)で収束されている。加工物が金属のように電気伝導性の良いものに適用され、熱効率が高い。(c)は、非移行型で、ノズルの出口が陽極になっており、ノズルからはプラズマ化されたガス(プラズマジェット)が噴出される。図-1の(a)は、これに相当している。切断、溶接、溶射等の分野で用いられてい

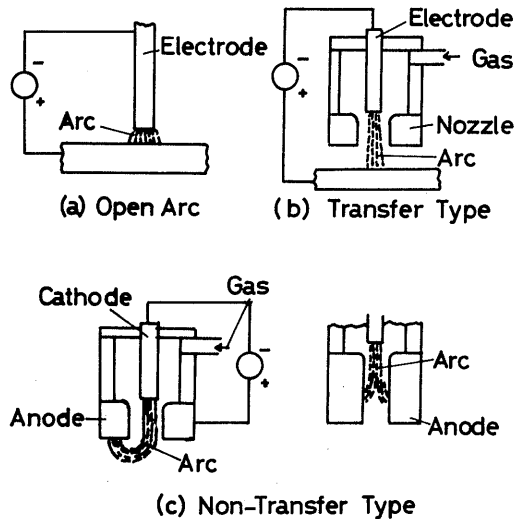


図-2 アーク発生形式

る装置は、(b)または(c)で、溶解や微粒子製造の分野で用いられている装置では(a)のタイプのものもある。

主な構成要素は、図-3に示すように、アーク用直流電源、始動用高周波電源、トーチ(またはガン、ノズルと電極等から構成される)、作動流体(通常はガス)とその供給系(減圧弁、流量計等)、冷却系統及びこれらを制御するコントローラーである。

2.2 電極

高温のアークプラズマ発生用の電極については、陰極には高融点でかつ熱電子の放出が容易な材料が要求され、タングステンまたはトリウム入りタングステンが広く用いられており、非移行型トーチの陽極には、水冷された銅が用いられている。

陰極の形状は、図-8にプラズマ切断機の例を示すように、二つの種類がある。(a)はアークの発生点を固定したもので、タングステン棒を水冷ホルダーに取り付

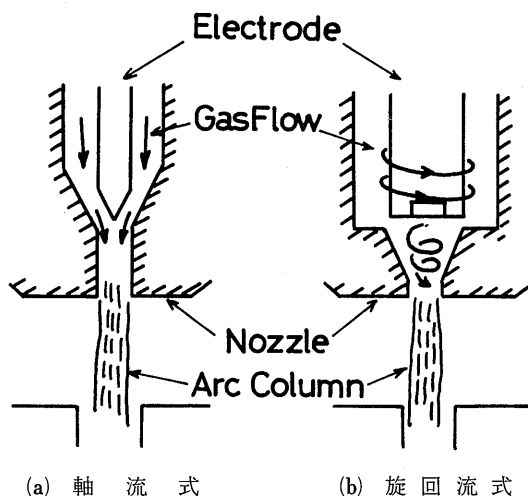


図-8 電極(陰極)の形状

けて使用する方式が多い。この場合は、アークはその延長方向(軸方向)に発生しやすい。このため、トーチの中心軸方向に作動流体を流してもアークは安定する。一方、(b)は水冷された銅棒の先端面に円板または円柱状のタングステンを埋め込んでおり、効率良く冷却できるので大電流に適している。しかし、アークの安定性は(a)ほどではなく、通常は作動流体を旋回流にして熱ピンチ効果によりアークを安定させている⁹⁾。

2.3 プラズマ作動流体

作動流体(主にガス)の役割は二つある。一つは、放電場でプラズマ化し、プラズマジェットとしてエネルギー(運動と熱)を運搬すること、もう一つは、電極、特に陰極の冷却である。一般に作動流体として用いられているのは、アルゴン、ヘリウム等の不活性ガスや窒素、水素等である。用途によっては、酸素、空気等の酸化性ガスや、水、アルコール等の液体も用いられる。

図-9⁹⁾に示すように、作動流体は同じ温度であってもその種類により保有エネルギーが異なる。これは、流体の種類により比熱や解離・電離エネルギーが異なるためである。表-2¹⁰⁾には気体の解離エネルギーを、表-3¹¹⁾には電離エネルギーを示す。また、表-4¹²⁾には、四種類の気体について、所定の温度に加熱するのに要するエネルギーの値を示している。10,000K以上の高温では、解離・電離エネルギーの割合が高くなっている。作動流体はプラズマ場中でエネルギーを与えられ、解

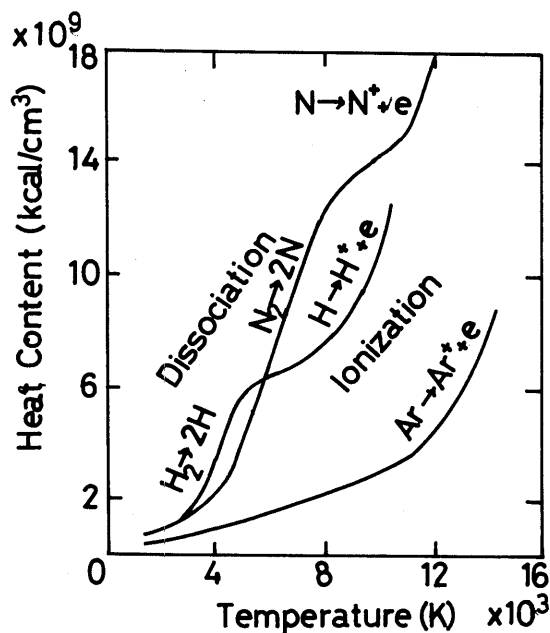


図-9 ガス温度と保有エネルギー

表-2 気体の解離エネルギー

Dissociation	Energy(eV)
$H_2 \rightarrow H + H$	4.4
$N_2 \rightarrow N + N$	9.1
$O_2 \rightarrow O + O$	5.1
$H_2O \rightarrow OH + H$	4.7
$NO \rightarrow N + O$	6.1
$CO \rightarrow C + O$	10.0
$CO_2 \rightarrow CO + O$	5.5

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

離および電離するのであるが、単原子分子の場合には電離のみであり、このため一般に、二原子分子は単原子分子より保有エネルギーが大である。表-4でも、窒素はアルゴンの数倍のエネルギーを持っていることがわかる。また、液体（主として水）は気体よりエンタルピーが大きく、大出力の装置に用いられることがある。

電極（陰極）の冷却能率は、作動流体の種類だけでなく流れの方向によっても異なる。旋回流は軸流より冷却能率が高く、大電流に適している。

表-3 各種元素の電離エネルギー

元素	U ₁ (eV)		元素	U ₁ (eV)	
	I	II		I	II
Al	5.984	18.823	N	14.54	29.605
Ar	15.755	27.62	O	13.614	35.146
Ca	6.111	11.87	Pt	(8.9)	18.5
C	11.264	24.376	K	4.399	31.81
Ce	3.893	25.1	Si	8.149	16.34
He	24.580	54.400	Ag	7.574	21.48
H	13.595		Na	5.138	47.29
Fe	7.90	16.18	Sr	5.692	11.027
Kr	13.99	24.56	Ti	6.83	13.63
Mg	7.644	15.03	W	7.94	
Hg	10.44	18.8	Xe	12.13	21.2
Nb	6.77	14			

I, IIは原子から1個、2個の電子をもぎとるためのエネルギー

表-4 1ℓ（標準状態）のガスを昇温するのに必要なエネルギー（1気圧保持）

アルゴン				
温度 (K [*])	解離エネルギー (k Joule)	電離エネルギー (k Joule)	粒子エネルギー (k Joule)	合計エネルギー (k Joule)
5,000	/	1.02×10 ⁻³	4.66	4.66
10,000	/	1.36	9.51	10.9
15,000	/	39.5	22.1	61.6
20,000	/	66.7	36.7	103.4

窒素				
温度 (K [*])	解離エネルギー (k Joule)	電離エネルギー (k Joule)	粒子エネルギー (k Joule)	合計エネルギー (k Joule)
5,000	21.8	-	9.28	31.1
10,000	22.0	2.35	19.0	43.4
15,000	22.0	57.6	41.7	121
20,000	22.0	112	72.7	207

2.4 電源・冷却・制御装置

電源としては、電流値の上昇にともない電圧の低下する垂下特性または定電流特性の直流電源が用いられている。出力は、溶接、切断等に用いられるものでは、200kw以下（電流は50~1,000A程度）である。溶解炉等では、数MWに達するものもあるが、それらは、図-2(a)に示すような開放アーク型であり、温度やエネルギー密度は一般に低い。

電極とノズルの冷却水循環装置は、電極とノズルの溶融消費を防ぐため必要であり、大出力化のためには冷却能率の向上が重要である。また、ノズル部の冷却温度は、プラズマ流の熱ピンチ効果に影響を与えるため、冷却水の温度管理も重要である。

制御装置は、作動流体の流量調整、電圧の印加と高周波の重量によるパイロットアークの発生、冷却系統のチェックおよび電流値の保持等を行う。現在のところ、プラズマ場の温度・流速等を数値的に制御することは不可能で、ガス流量や電流値を一定に保持することや起動時のシーケンスを自動化するという程度である。

3. アークプラズマ発生技術の高度化

この章では、アークプラズマ発生装置に関する今後の技術開発の方向について述べる。

これまでのアークプラズマの実用化された分野は、溶接、切断、溶射、精錬（溶解）等である。これらの分野において、アークプラズマは、比較的簡単に生成することのできる高温熱源としてのみ用いられている。

窒素				
温度 (K [*])	解離エネルギー (k Joule)	電離エネルギー (k Joule)	粒子エネルギー (k Joule)	合計エネルギー (k Joule)
5,000	6.68	-	7.64*	14.3
10,000	38.9	3.48	19.1	61.5
15,000	39.3	75.4	44.8	160
20,000	39.3	123	73.9	236

水素				
温度 (K [*])	解離エネルギー (k Joule)	電離エネルギー (k Joule)	粒子エネルギー (k Joule)	合計エネルギー (k Joule)
5,000	18	3.7×10 ⁻⁴	9.08	27.1
10,000	19	2.46	19.0	40.5
15,000	19	23.1	33.5	75.6
20,000	19	103	69.9	192

る。一方、超高温の利用技術に関する調査結果によれば、アークプラズマのもつ化学的高活性の利用、すなわち、アークプラズマ場の中での化学反応を積極的に利用した新材料創成技術が、今後きわめて重要であると考えられる。たとえば微粒子の製造、新物質（新組成、新構造）の合成等の材料創成の分野、溶射においては、ファインセラミックス等の高機能材料の溶射による表面改質または膜合成技術の分野等である。また、熱源としての利用においても、セラミックスや複合材料のような難加工性材料の接合・切断への適用が望まれている。

このような観点から、アークプラズマ発生装置に望まれる技術開発の目標としては、次のようなものがある。

① 高精度制御技術の開発

図-10¹³⁾は、水素、炭素、窒素の割合が4:1:2の場合の高温での平衡関係を表している。プラズマ場での化学反応の制御のためには、このような平衡関係をもとに、所定の反応が得られるようにプラズマ場の温度、圧力等を制御しなければならない。また、溶射においては、形成される皮膜の強度や細孔構造等が温度やプラズマ流速に大きく影響されるため、これらの制御が必要である。アルゴン-水素プラズマを用いた石炭からのアセチレンやカーボンブラック等の生成においては、水素プラズマ濃度により生成物の割合が変化する¹⁴⁾ことから、プラズマ組成の制御が必要である。

このように、プラズマ場の化学反応を利用した材料合成等のためには、温度、流速、化学組成等のプラズマ場の状態量が高精度に制御されなければならない。

図-11は、アークプラズマの高精度制御の概念を示したものである。高精度制御は、状態量を計測する

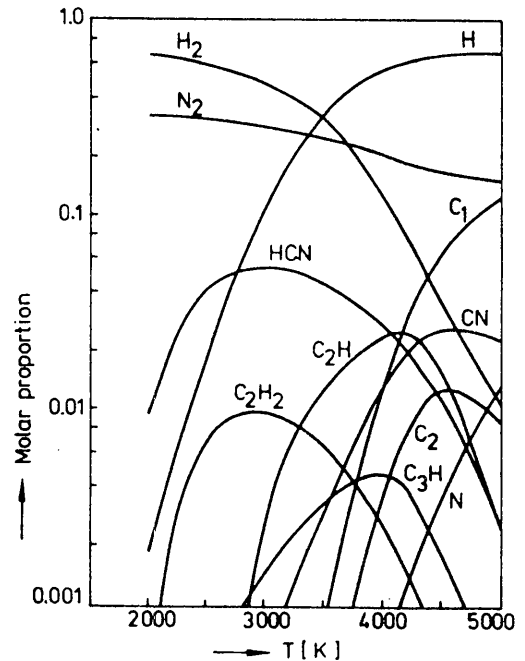


図-10 平衡組成と温度 (T) の関係

系、入力を制御する系及び計測データを処理し制御信号を出す処理系とから構成される。制御すべきプラズマ場の状態量としては、温度とその分布、エネルギー密度とその分布、プラズマ流の速度と方向（軸流か旋回流か）、プラズマ組成（化学種、電離度）等がある。これらを制御するために操作できるパラメータは、アーク電圧と電流、パルス電源の場合にはパルス間隔、プラズマ作動流体の流量と方向（軸流、旋回流）及び組成、ピンチ等のための外部流体の流量、方向、組成、外部から印加する電磁場、反応器内部の圧力やガス組成等がある。処理系は、計

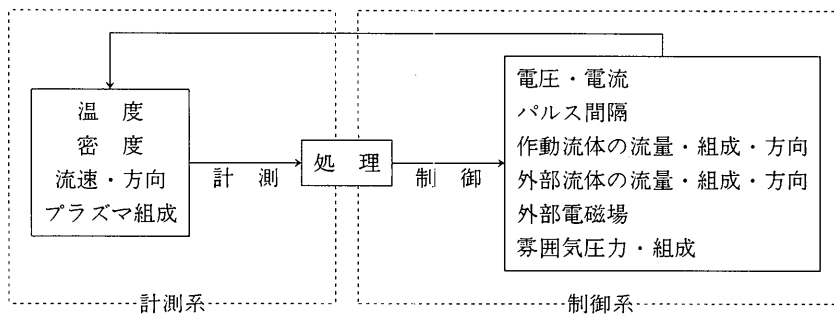


図-11 アークプラズマ制御の概念

測系から得られたデータをもとに電磁流体力学的手法を用いてプラズマ場の解析処理を行い、必要なパラメーター操作を行うものである。

② エネルギーの高密度化

高融点材料の合成や加工等のためには、高効率の加熱を行う必要がある、このためエネルギー密度の向上をはかる必要がある。

たとえば、溶接の分野では、エネルギー密度を高めることにより、高融点材料や厚板の溶接が可能となる。鋼板の例でいえば、溶接ビームのエネルギー密度が $100\text{kW}/\text{cm}^2$ では、溶け込み深さが数 cm であるのに対し、 $2,500\text{kW}/\text{cm}^2$ では、 30cm にも及ぶ¹⁵⁾。装置の小型化のためにもエネルギー密度の向上が必要である。切断用マイクロプラズマ装置の開発が試みられている¹⁶⁾。

③ 高温領域の拡大

高温領域を拡大することは、プラズマ場の中での反応時間を長くすることや、単位時間当たりの処理量の増大のために重要である。このためには、装置の出力を増大する技術とプラズマフレームを広げる技術が必要である。たとえば、①で述べた石炭のガス化では、アセチレン生成の効率を上げるためには、石炭粒子を効率よくプラズマ場に導入し、十分な分解反応が進行するだけの時間滞留させることが必要である¹⁴⁾。

4. アークプラズマ発生装置高度化の検討

この章では、前章で述べた「高度化」のための技術開発について検討した。高精度制御、エネルギー高密度化および高温領域の拡大化の三つの開発目標を達成するためには、装置の構成要素の開発だけでなく、システム化が必要であるが、計測技術が未確立であることもあり、現状ではこのような総合的な制御を考えることは難しい。そこで、発生装置を構成する各要素がプラズマ場の温度、流速等の状態量とどのような関係を持つかを検討し、高度化の達成の可能性について考察した。

4.1 電源・電極

プラズマジェットに与えられるエネルギーの総量は、電圧と電流の積で決まる。出力向上のためにはこれを大きくとればよいのであるが、電極の熔融消耗やアークの安定性の面から限界値が存在する。このため、出力の向上をはかるためには、電極の消耗をおさえ、かつアークの安定性を確保することが必要である。電

(20)

極の消耗をおさえるためには高能率冷却法を開発することおよび高融点電極材料の開発等が考えられる。高能率冷却法としては、現在水が使われている冷却媒体に液化ガスのような低温流体を用いることや、電極形状の改良等が考えられる。電極材料としては、タングステン系の他には、ジルコニウムやハフニウム等が用いられることがあるが、より優れた材料の開発が待たれる。

通常、アークの出力は、電流値で制御される。このため、出力を精度良く制御するためには、電流値に関して安定性と応答性の良い電源が必要である。このためには、電源をパルス化することにより制御性を良くすることができると考えられる。パルス電源は、同じ冷却効率でも電流の実効値を上げることができるため、大出力化にも有力であると考えられる。

電極間の距離を大きくし、アーク長を長くすることにより、電圧が高くなり出力を大きくできるが、アークが不安定になりやすいという問題がある。このため、たとえば図-12¹⁷⁾に示すように通常の陽極のほかに下流に第2陽極を設けてアーク長を延ばす方法がとられ

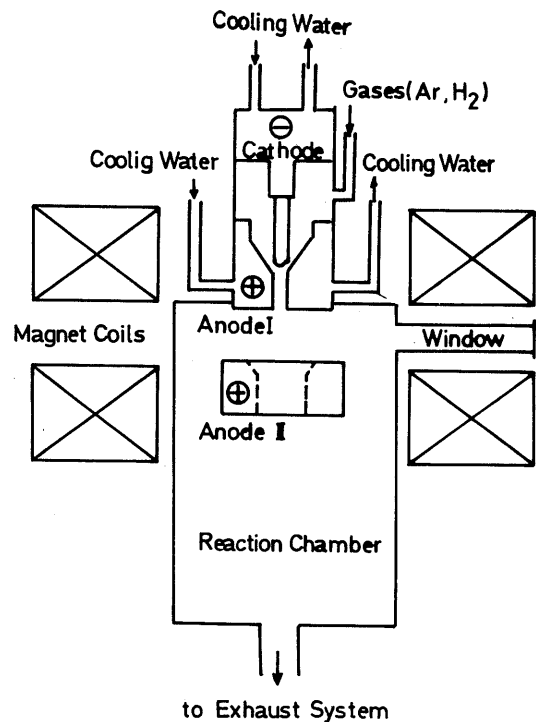


図-12 第2陽極をもつプラズマトーチ

る。この場合、電極間隔の短い第1陽極によりアークの安定性が確保される。なお、この装置は、磁場発生用コイルを備え、磁場によるプラズマフレームの方向の制御(4.3節参照)を行っている。また、図-13¹⁸⁾は、第1陽極と第2陽極の間に水冷した銅リングを直列に並べ、その間に絶縁物をはさんで構成したトーチの例である。第2陽極まで伸長されたアークは、水冷壁による熱ピンチ効果により中心軸に拘束され、安定化がはかられている。

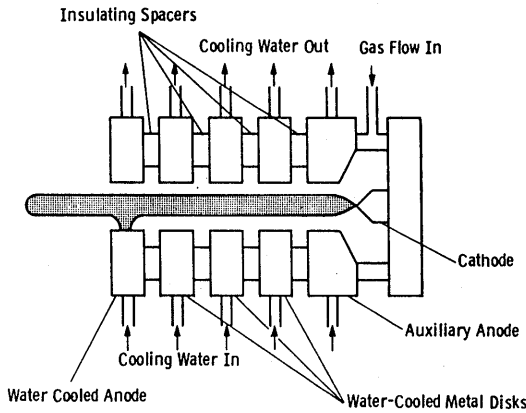


図-13 熱ピンチ部を加えたプラズマ装置

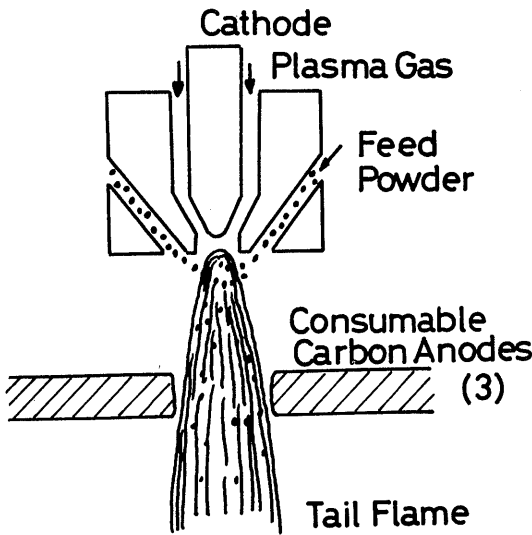


図-14 複数の消耗電極を用いたプラズマトーチ

一つの電極当たりの電流値には、先に述べたように電極消耗やアークの不安定化による限界があるため、独立の回路からなる複数の電極を配置することによりアーク発生点を分散して、大出力化をはかっている例がある。図-14¹⁹⁾は、陽極側に3本の消耗黒鉛電極を用い、容量の大きなフレームを発生できるようにしたプラズマトーチ炉である。陰極と陽極を円周上に6組並べ、それぞれの対の間で放電させ、その中を作動ガスを流して高密度で安定なフレームを得ている例を図-15に示す²⁰⁾。電極間隔を50mmまで離しても一様で強い放電が得られているという。

1つのトーチの中に複数の陰極を取めた金属溶解炉の例を図-16に示す。これは移行式アーク(図-2参照)

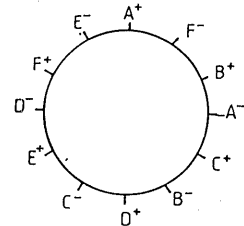


図-15 円周アーク反応器とその電極配置

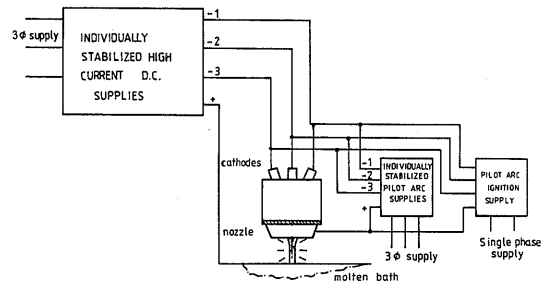


図-16 多電極プラズマ装置

によるもので、主電源の他にパイロットアーク電源をもち、各電極の軸上で渦流により安定化したアーク柱がノズル手前で合体し、陽極である炉床面へと導かれている²⁰⁾。このように、電極の数を増やすことや、電極間の距離を大きくすることによって大出力化がはかれるが、電極の消耗を防ぐこととアークの安定性を確保することが重要である。アークの安定性確保、すなわち2.1節で述べたダブルアークや不安定アークの防止には、以下の節でみるようないくつかの方法が考えられるが、電極消耗の防止は、冷却法と材料の両面からの開発が待たれる。電極の消耗は、材料合成を行う場合には不純物の原因となるので、利用の面からみても重要な問題である。

4.2 作動流体、外部流体

作動流体は、2.3で述べたように、その種類により、同じ温度であっても保有エネルギーが異なる。このため、流体の組成を変えることにより、プラズマ場のエネルギー密度を制御できる。エネルギー密度を増加させるためには、液体または二原子分子ガス (N₂, H₂) が適し、高温を得るためには、単原子ガス (Ar, He) が有利である。

作動流体は、陰極の周囲から導入される。その際、軸方向に流すものと接線方向に旋回させて流すものがある(図-8参照)。前者は、大きなプラズマ流速が得られ、後者は電極の冷却能が大きくまた熱ピンチ効果も大きく、大出力化や高エネルギー密度化に適してき

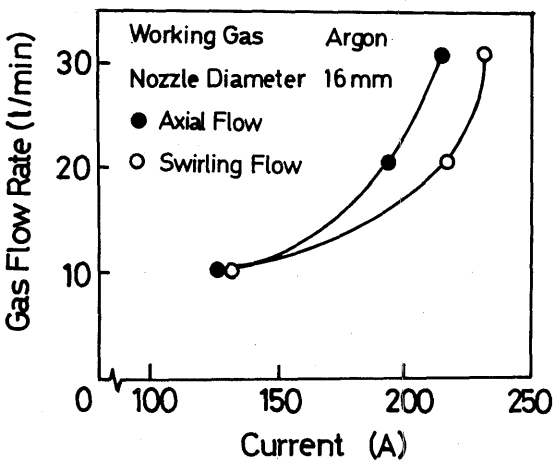


図-17 作動ガスの流れ方向とダブルアーク発生限界電流値の関係

(22)

とした場合と旋回流とした場合について、不整アークを起こす限界電流値を調べたものである。同一流量であれば、旋回流の方が限界電流値が高くなっており、大出力化が可能であることを示している。

図-18²²⁾に示すように、作動流体として用いるガスの種類により、熱伝導度が異なる。水素やヘリウムのように軽いガスは、運動速度が大で熱伝導度が大きい。このため冷却能率が良く、大出力化に適している。

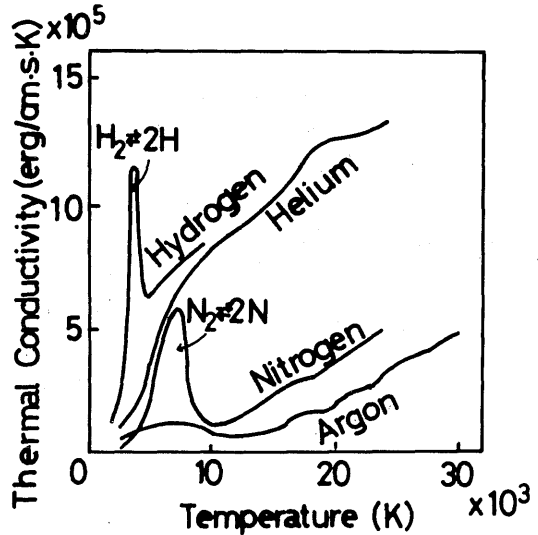
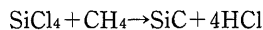


図-18 気体の熱伝導度

このようなことから、一般には出力あるいはエネルギー密度を上げるためには、軸流が適しており、低出力で温度を上げるためには軽原子ガスを用い、旋回流とする方法が適している。アークの安定化を確保しつつ出力向上をはかるため、多種類の流体を混合する方法も有効である。また、作動流体の流量も一つの制御要素である。図-19²³⁾は、作動ガス流量とアーク柱の直径および平均電流密度との関係で、流量を増せばアーク柱が収縮しかつ平均の電流密度が増加することを示している。このように、作動流体の種類や流量、流れの方向を変化させてプラズマ場のエネルギーや温度を制御できる。

プラズマ場での化学反応を利用した材料合成を行うためには、作動流体を原料ガスとして用いることも可能である。ガスを原料として高温化学反応を利用する方法は、高周波プラズマ炉による微粒子製造等で試みられている。たとえば、



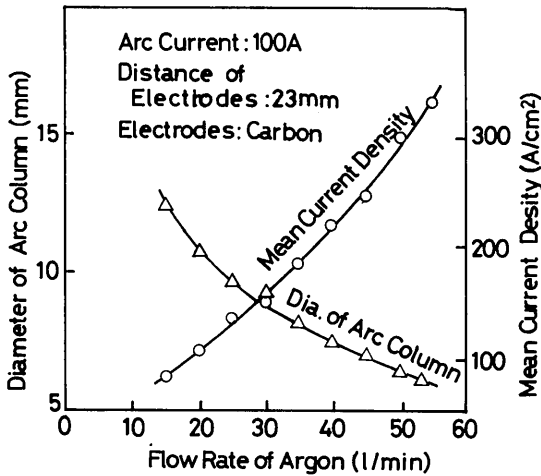
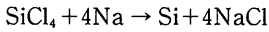


図-19 作動ガス流量と電流密度



のような反応を利用して、炭化けい素微粒子¹⁸⁾²⁴⁾や高純度金属シリコン¹⁸⁾の製造等の例がある。

一方、プラズマ溶射のように粉体で原料を供給する場合においても、作動ガスと原料粉体との反応を利用

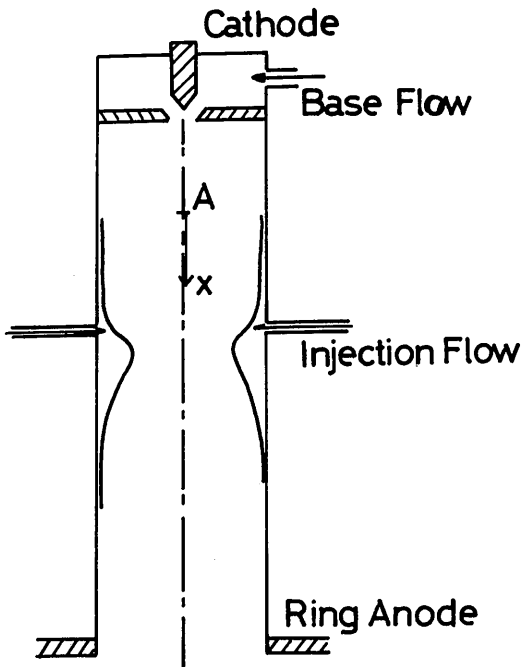
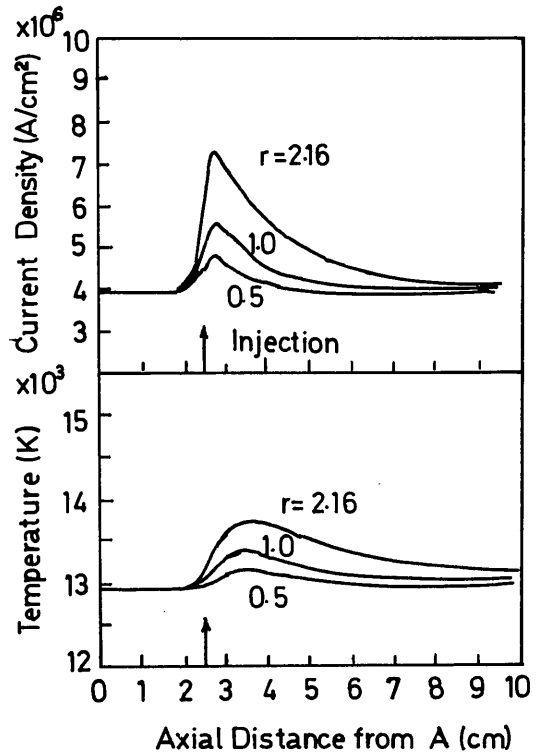


図-20 冷却ガス導入部をもつアークプラズマ装置

することが考えられる。たとえば、窒素を作動ガスとしてチタン粉体を溶射して窒化チタンの皮膜を形成する試みがある²⁵⁾。ただし、アークプラズマの場合には、作動ガスは、電極の周囲を通過するため、電極とガスとの反応に注意する必要がある。

また、プラズマ流の周囲に、作動流体とは別に低温の流体を流すことにより、ピンチ効果が得られ、アーク電流の密度を増加させることができる。図-20はアーク放電場に冷却用ガスを導入することによりアーク柱を絞るようにした装置である。このモデルを解析したところ、ガス導入部でアークの断面積が減少し、図-21に示すように電流密度と中心温度が上昇するという結果が得られている²⁶⁾。このような外部流体によるピンチ効果は、外部流体の温度が低いほど強いため、たとえば液体ヘリウムのような極低温流体を用いれば大きな効果が得られ、エネルギーの高密度化がはかれるであろう。



Pressure: 1atm, Gas: Ar, Current: 200A
Base Flow: 0.165 g/s, r: Injection F./ Base F.

図-21 冷却ガス導入の中心温度と電流密度への影響

このように、作動流体や外部流体は、エネルギー密度、温度、速度、化学組成等のプラズマ場のすべての状態量に重要な関係を持っている。現在のところ、プラズマ場内の電離、解離、伝熱等の現象が正確に把握できておらず、このためモデル化が困難で解析の精度も不十分である。したがって、これらの関係を定量的に把握することは難しいが、発生装置の高度化をはかるうえで非常に重要な要素である。

4.3 電磁場

プラズマは、導電性流体であるから、電磁場と相互に作用する。このため、たとえば外部から磁場を印加することによりプラズマ流を磁気ピンチにより絞ったり、その方向等を制御したりすることができる。

アーク柱は、エネルギー最小原理に従って円柱断面をとるが、これに図-22のようなカस्प型磁場を与えると、断面を偏平化することができる。この場合のエネ

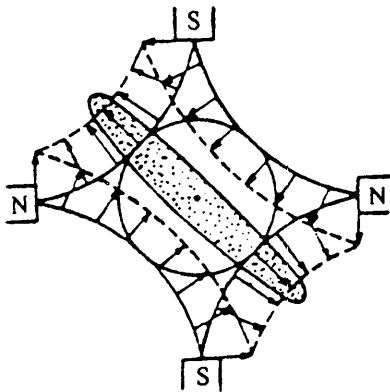
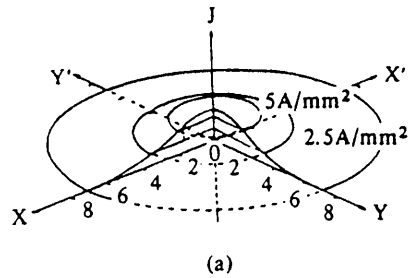


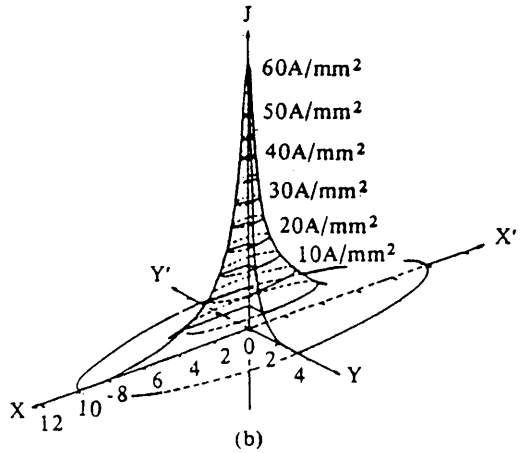
図-22 カस्प型磁場

ルギー密度を磁場のない場合と比較すると、図-23に示すように10倍以上になっている²⁷⁾。また、図-24は、陽極の周囲にコイルを置いて、陽極近傍の流れに周方向のローレンツ力を生じさせて回転アーク場を形成させたトーチである²⁸⁾。図-25は、溶解炉として用いられているアーク発生装置であるが、磁界により発生アークを広い電極面で高速移動させ、アークをこう着させないようにし、電極損傷を防ぎ大出力化をはかっている例である²⁹⁾。

図-26に、プラズマ流の方向制御に磁気を用いた例を示す。これは、イオンプレーティング用の低圧プラズマ (24)



(a)



(b)

図-23 磁場による電流密度の変化

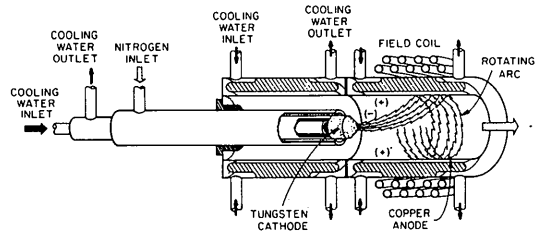


図-24 磁場による回転アークトーチ

マ装置であるが、図中の3、4と14の3組の磁石または磁気コイルによりプラズマ流を曲げ、7のハースに収束させている³⁰⁾。アークプラズマのような高気圧(大気圧)プラズマでは、イオンや荷電粒子の電磁界による運動が、他の粒子との頻繁な衝突により持続されなくなるため、低圧プラズマの手法をそのままは使えない。しかし、4.1節の図-12に示す装置では、磁気によりプラズマにねじれをおこさせて高温領域を拡大させているわけで、方向の制御が可能であることを示している。

電磁場による制御は、核融合炉のプラズマ封じ込めにも応用される有力なプラズマ制御法である。しかし、その有効性は電離度に依存し、アーク放電場のような高電離領域において効果が大きい低電離度の領域では使えないという点に注意する必要がある。

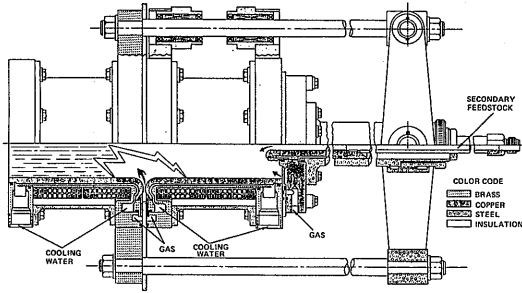
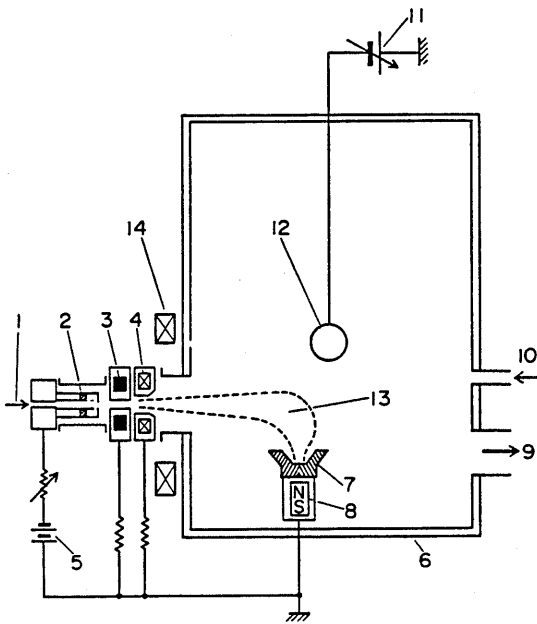


図-25 高速移動アークによる大出力アークプラズマ装置



1. Gas for discharge. 2. Cathode. 3. Circular ferrite permanent magnet. 4. Magnetic coil. 5. Discharge power supply.
6. Vacuum chamber. 7. Hearth. 8. Magnet. 9. Vacuum pump.
10. Reactive gas. 11. Negative bias power supply. 12. Sample for ion plating. 13. Bended plasma flow. 14. Large diameter magnetic coil.

図-26 磁場制御を行っているイオンプレーティング装置

4.4 トーチ

トーチそのものを複数個並列に配置する(多トーチ)は、大出力化のための簡便で有力な手段である。この場合、単一トーチを大出力化する場合に生ずる電極等の冷却やアーク安定化等の問題が少ないという点でも有利である。このため、高融点金属溶解用に3~6本のトーチを有する炉が稼動している³¹⁾。

図-27³²⁾は、石炭ガス化を効率良く行うために、複数のトーチを用いて、フレームの合流点に試料を供給している例である。これは、単に大出力化をはかるだけでなく、三組のトーチからのプラズマ流を一本にすることにより流れの方向を変え、原料の石炭粉を効率良く導入することをねらったものである。複数トーチを用いる場合、軸対称のフレームを作るためには、各トーチの出力のバランスが重要である。

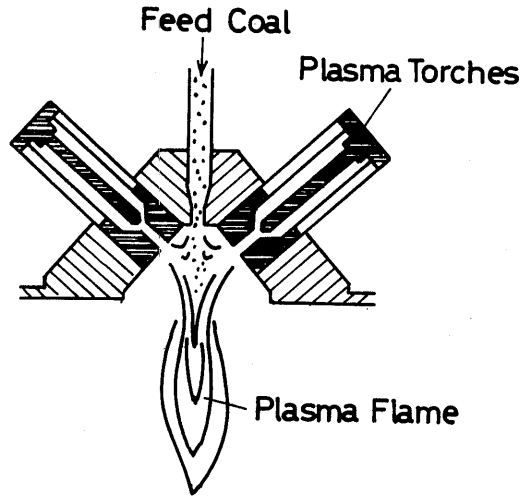


図-27 三対のトーチをもつ石炭のガス化装置

4.5 低圧雰囲気

プラズマトーチ後流の反応器チャンバー内の圧力は、プラズマ場の形成に影響を与える。アークプラズマを水冷ノズルから減圧した雰囲気中に放出すると、大気圧下にくらべプラズマ流はその速度エネルギーを大きく減少することなくトーチから噴出する。このため、外観上はプラズマフレームが長く伸びたように認められる。このときのプラズマ炎の温度分布を調べると図-28のようになっており、高温領域が拡大されていることがわかる³³⁾。ここでは、流速が大きくなっているた

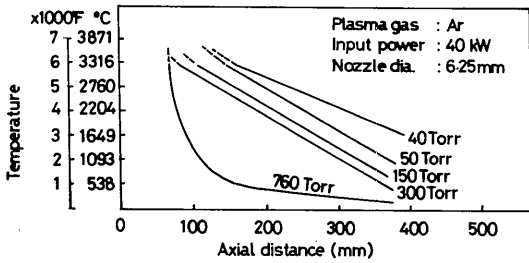


図-28 低圧雰囲気プラズマジェットの温度分布

め、見掛け上高温領域が拡大されているようでもプラズマフレーム内の粒子の滞留時間はそれほど長くないことに注意する必要がある。

このように、チャンバ内の圧力を変えることにより温度分布や流速を変化させることができる。特に、高速流を得るためには有力と考えられる。

4.6 複合化

アークプラズマと他の熱源との複合化についても検討した。レーザーは高密度のエネルギー源である。切断・溶接加工への応用において、局所的に非常に高密度なエネルギーの場を得るためにはレーザーとの複合化が有力である。アークプラズマは高温・高速のガス流であるためレーザー光線が乱されることもありうることから、同時に用いるのではなく、アークプラズマを予熱源として用いる方法も考えられる。

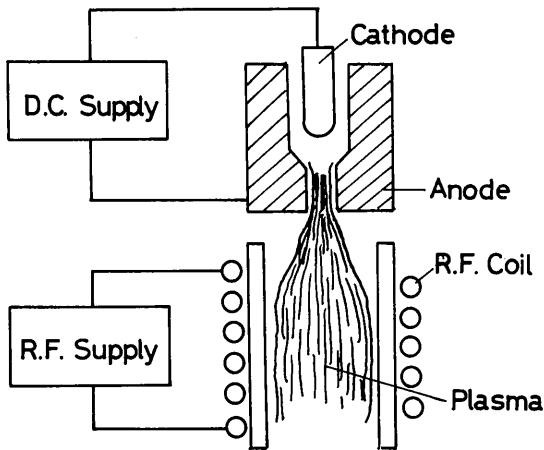


図-29 アークプラズマと高周波加熱の複合化装置

また、図-29に示すような、プラズマジェットの再熱・再活性化のために、下流に高周波コイルを配置させる方法があり、種々の研究が行なわれている³⁴⁾。高周波による加熱は、温度分布が断面方向に比較的均一であるため、高温領域の断面方向への拡大には有力な手段である。

このほかにも、電子ビームやイオンビーム等との複合化も概念的には考えられるが、これらのビームは通常高真空雰囲気が必要であり、大量のガス流を伴うアークプラズマとの複合化は困難であろう。

4.7 高度化の可能性について

これまでに、アークプラズマ発生装置の高度化としてあげた三つの開発目標に対して、装置を構成する各要素がどのように寄与できるかについてみてきた。ここでまとめてみると、まず、高精度制御については、作動流体、外部流体により温度とその分布、エネルギー密度、プラズマ組成、流速が、また電磁場によりエネルギー密度、プラズマ流の方向が、さらに雰囲気圧力により流速がそれぞれ制御できる。特に、作動ガスは、エネルギー媒体であるとともにプラズマ組成を決定づけるものであるため、きわめて重要な制御要素である。

エネルギー高密度化のためには、渦流または低温の流体やカスプ型等の磁場による緊縮化によるほか、作動流体として多原子分子ガスや水等の液体を用いる方法もあり、また高密度エネルギー源であるレーザーとの複合化も有力である。

高温領域の拡大化は、基本的には多トーチ、多電極による大出力化で達成可能であろう。しかし、プラズマ場での化学反応の利用のためには、比較的均一な温度場が望ましく、また十分な反応時間の確保も必要である。このためには、高周波加熱との複合化もまた有力である。

最後に、このような高度化をはかる方向での新技術の一例として、図-30に多電極化による大出力化と旋回ガス流による高エネルギー密度化をはかっている装置を示す³⁵⁾。この装置は、通常のアークプラズマ発生装置（非移行型アークプラズマ発生装置）の後流に第2陽極を設け、陽極間に強力な渦流のガスを導入することにより「ガストネル」を形成し、そのサーマルピンチ効果により高エネルギー密度のプラズマジェットを発生させるものである。図-31に示すように、通常のアークプラズマ発生装置では電流値の増加にともない電圧が下がるのに対し、この装置では、逆に直線的に増加している。

すなわち大出力化が達成されている。一方、図-32に示すように、電流値の増加、すなわち出力の増加により、ジェットの種類はそれほど変化せず長さが伸びていることから、高エネルギー密度で長いプラズマジェットが得られていることがわかる。

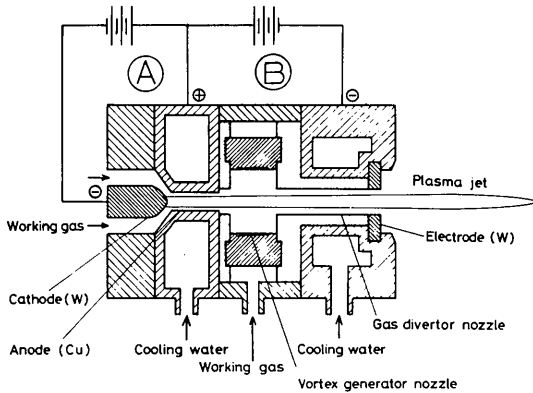


図-30 ガストネル型プラズマジェット装置

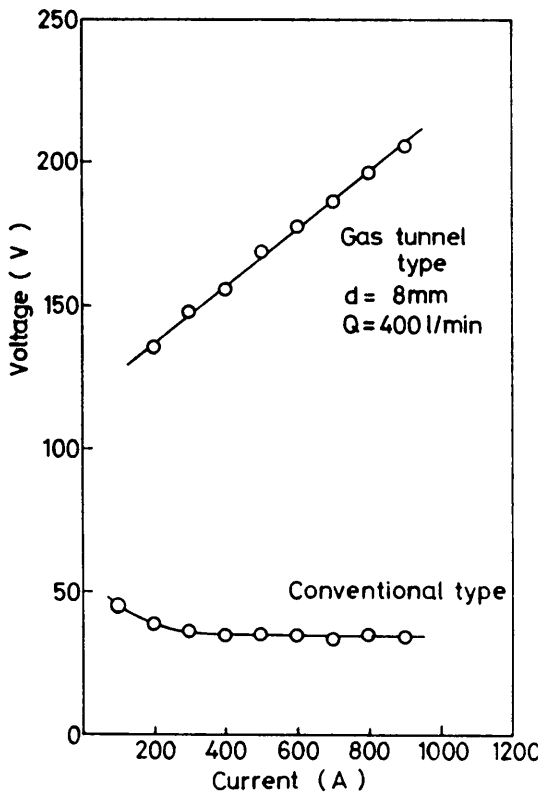


図-31 プラズマジェットの電流・電圧特性

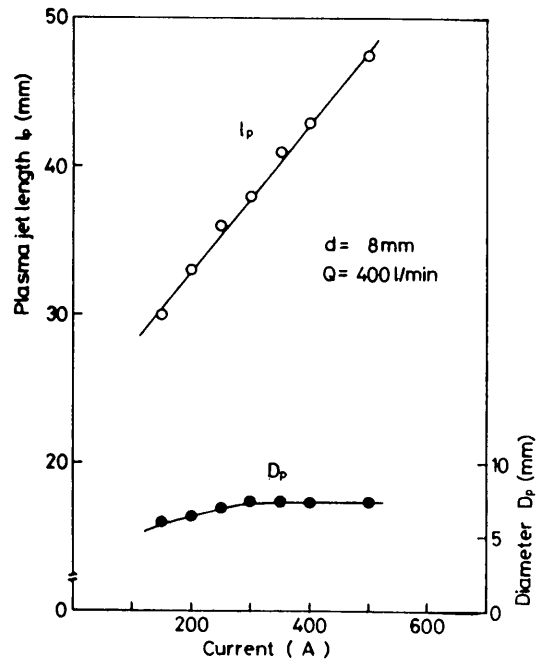


図-32 プラズマジェットの長さとの電流値との関係

5. 結 言

溶接、切断、溶射、金属精錬等の分野で用いられている装置の現状の調査をもとに、アークプラズマ発生装置の今後の開発の方向について考察した。その結果、次のように結論できる。

- (1) アークプラズマ場のもつ化学的高活性を利用した材料合成や難加工材料への応用のためには、
 - ① アークプラズマ場の高精度制御技術
 - ② エネルギー高密度化技術
 - ③ 高温領域の拡大化技術
 の開発が必要である。
- (2) プラズマ場の温度、流速、化学組成等を制御するための重要な要素としては、作動流体、電磁場、雰囲気気圧力等がある。
- (3) エネルギー密度の向上のためには、作動流体や外部流体による緊縮化、電磁場による緊縮化、レーザーとの複合化等が有力である。
- (4) 高温領域の拡大化をはかる方法には、多電極化、多トーチ化による大出力化、高周波加熱との複合化等があり、大出力化のためには、電極消耗の防止が必要である。

(2)から(4)で検討した技術の多くは、要素技術としては既に実用または試作段階にあり、実現は困難ではない。しかし、これらを総合化し、制御を精度良く行うには、制御要素とプラズマ場の状態量との関係を定量的に把握する必要がある。また、同時に温度・流速等の計測法の確立、プラズマ場での伝熱、加速過程の解明、高温での化学反応の解明、材料合成におけるクエンチング技術等の超高温計測・利用技術の開発が必要である。

本報告は、「アークによる超高温の発生・計測・利用技術に関する調査」のなかのアークプラズマ発生技術に関する部分をもとにしている。ワーキンググループでの調査は、川崎重工工業株式会社技術研究所溶接研究室の松井繁朋、永井裕善、山下清司の各氏、三菱電機株式会社応用機器研究所の植田至宏氏、株式会社田中製作所の藤井俊英氏らとの共同で行った。このため、この報告のなかには、各氏の執筆部分を引用させていただいたところもある。調査におけるご協力と引用についてのご快諾に対してここに感謝の意を表します。

また、「超高温の発生・計測・利用技術に関する調査」を行うにあたり、神尾(溶接工作部)、塚田(機関開発部)両部長には、種々のご配慮をいただいたことに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 科学技術庁研究調整局：「超高温の発生・計測・利用技術に関する調査報告書」(1986)286
- 2) Browning, J. A.: "Plasma-A Substitute for the Oxy-Fuel Flame" *Welding J.*, Vol. 38, No. 9 (1959)870
- 3) 電気学会放電専門委員会編：「放電ハンドブック」(1961)電気学会, 177
- 4) Pfender, E.: "Plasma Generation" *Materials Research Society Symposia Proc.* Vol. 30 (1984) 13
- 5) 玉河 元編：「放電」(1975)共立出版, 37
- 6) 西口公之ほか：「プラズマアーク溶接における電流密度とシリーズアークの発生」*溶接学会誌*39巻4号(1970)269
- 7) Shapiro, I. S. et. al.: "Improving the Reliability of Plasma-Arc Cutting Equipment" *Welding Proc.* Vol. 18, No.3(1971)59
- 8) 日本溶接学会編：「プラズマ切断の基礎と実際」(1973)広済堂産報出版, 16
- 9) 蓮井 淳：「溶射工学」(1969)養賢堂, 20
- 10) 安藤弘平, 長谷川光雄：「溶接アーク現象」(1962)産業図書, 19
- 11) Condon, E. V., et. al.: "Handbook of Physics" (1958) McGraw-Hill
- 12) 西口公之：「アークプラズマへの供給エネルギー」*溶接学会誌*35巻3号(1966)215
- 13) Dembovsky, V.: "Plasma Metallurgy" (1985) Elsevier, 93
- 14) 菊川伸行ほか：「アルゴンまたはアルゴン-水素プラズマによる石炭のガス化」*日本化学会誌*(1980) No.6, 981
- 15) 荒田吉明：「超高エネルギー密度熱源に関する最近の研究」*高温学会誌*12巻1号(1986)3
- 16) 館野晴雄：「微細・精密加工用のマイクロプラズマ装置」*機械技術*32巻8号(1984)115
- 17) 牧野光男ほか：「石炭ガス化用回転アークプラズマ装置の試作とその特性の検討」*公害資源研究所彙報*12巻2号(1982)1
- 18) Heberlein, J. V. R.: "Research Needs in Arc Technology", 4)と同じ, 101
- 19) 三村耕司, 南條道夫：「プラズマ製錬の最近の動向」*高温学会誌*9巻3号(1983)88
- 20) Harry, J. E., Knight, R.: "Multiple Arc Discharges for Metallurgical Reduction or Metal Melting", 4)と同じ, 245
- 21) 藤井俊英(田中製作所)による
- 22) Ludwig, H. C.: "Plasma-Energy Transfer in Gas-Shielded Welding Arcs" *Welding Research Supplement*(1959)296-S
- 23) 岡田 実, 丸尾 大：「プラズマジェットとその応用(1)」*溶接学会誌*33巻11号(1964)953
- 24) 近藤次郎, 斎木五郎：「プラズマ法によるSiC粉体の合成とその性質」第33回窯業基礎討論会講演要旨集(1985)129
- 25) 朝日直達, 児島慶享：「減圧雰囲気中プラズマ溶射の応用」*高温学会誌*10巻Suppl(1984)249
- 26) Chen, D. M., et. al.: "The Effect of Cold Gas Injection on a Confined Arc Column" *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol. PS-8, No. 4 (1980)425
- 27) 荒田吉明：「プラズマビームの高エネルギー密度化」*高温学会誌*11巻6号(1985)210
- 28) Boldman, D. R., et. al.: "Electrode Configurations for a Wind-Tunnel Heater Incorporating the Magnetically Spun Electric Arc" NASA

- TN D-1222(1962)
- 29) Fey, M. G., et. al.: "A. I. Ch. E. Plasma Chemical Processing Symposium" (1976)
- 30) 浦本上進: 「イオンプレーティングのための放電プラズマ流の曲げ方」真空27巻2号(1984) 64
- 31) たとえば平竹 進: 「プラズマの原理と応用について」日本熱処理技術協会講演予講集(1984)71
- 32) 牧野光男ほか: 「複数トーチをもつプラズマ反応装置によるアセチレンの製造(II)」燃料協会誌, 61巻667号(1982)1013
- 33) 蓮井 淳: 溶接技術(1982) 8月号, 75
- 34) Yoshida, T., et, al.: "Characterization of a Hybrid Plasma and its Application to a Chemical Synthesis" J. of Applied Physics, Vol. 54, No. 2(1983)640
- 35) 荒田吉明, 小林 明: 「ガストンネル型大出力プラズマジェットの開発に関する研究」高温学会誌, 11巻3号(1985)124