同軸プラズマ銃の研究

群馬大学	平野克己
群馬大学	下田勝二
群馬大学	堀江英雄
群馬大学	小森秀夫
群馬大学	佐藤徹

1. ま え が き

高温プラズマ発生法の一つにプラズマ銃による方法がある。高温・高密度プラズマの比較的簡単な発生装置としてのプラズマ銃は、従来より種々の形式のものが開発されてきた。その動作はおおむね次のようである。すなわち、高真空中に瞬間的に注入された中性ガスをコンデンサ放電により短時間に電離させてプラズマとし、そのプラズマ中を流れる電流と、その電流により作られる磁界とで生ずる力を一方向に指向させて加速度を与えるものである。また、中性ガスの瞬間的な注入の代わりに電極内にあらかじめ含浸させたガスを放電により開放し、それをプラズマ化する形式のものもある。⁽¹⁾ 前者のプラズマ銃はその放電形式により直接放電形と誘導放電形に分かれ、幾何学的形状の違いにより同軸形、⁽²⁾ コニカル形⁽³⁾⁽⁴⁾などに分かれる。いずれの形式においても、生成されたプラズマは熱エネルギーに比べ射出方向の運動エネルギーが著しく大であることをその特徴とする。

また最近、同軸プラズマ銃によるプラズマ生成時の諸現象はプラズマ フォーカス⁽⁵⁾実験と関連するので、その方面からも興味をもたれている。

本論文は同軸プラズマ銃に関するものである。同軸プラズマ銃内では適当な動作条件のもとでは放電電流は同軸電極間の円環状空間を軸対称に流れてシート状

のプラズマを生成し、かつ加速するが、従来のこの分野の研究においては、このシート状プラズマの加速機構などに主たる研究目標がおかれていたように思われる。⁽⁶⁾ しかし、銃内では一般にはシート状のプラズマは作られないことが多く、またそのように作られたとしても不安定性のために短時間のうちにスポーク状になってしまうことも多く観測されている。⁽⁷⁾

内部電極の長さを外部電極の長さより短くすると、構造上からはコニカル・リニアピンチ銃⁽⁴⁾と似てくる。この場合には、プラズマの銃からの射出直前にいて内部電極の底面に向かう電流柱が形成されやすく、電流柱はそれ自身の作る方位角方向の磁界のためにピンチし、実験条件によっては切断されることも観測されている。⁽⁸⁾

この形式のプラズマ銃は、同軸部とピンチ部の二段にわたって加速が行なわれるので有利である。

プラズマ銃の研究の第一義的な目的は、どのような操作条件で、どのような温度、密度、射出速度をもつプラズマが得られるかを明確にするものでなければならない。本論文においては、プラズマ銃の構造および操作条件を変えたときの、生成されるプラズマの諸性質を測定するとともに、プラズマの生成、加速時のさまざまな現象について議論している。

第2章ではプラズマ銃の構造、操作法と測定装置について、第3章では実験結果と検討について述べられている。また第4章には全体のまとめが記述されている。

2. 実験装置

本研究で使用した装置の概略を第1図に示す。またプラズマ銃の寸法およびコンデンサバンクの概要は

Study on the Coaxial Plasma Gun. By K. HIRANO, Member, K. SHIMODA, Non-member, H. HORIE, Non-member, H. KOMORI, Non-member & T. SATOH, Non-member (Faculty of Technology, Gunma University).

平野克己：正員，群馬大学工学部電子工学科教授

下田勝二：群馬大学工学部電子工学科

堀江英雄：群馬大学工学部電子工学科（現在，富士通）

小森秀夫：群馬大学工学部電子工学科（現在，富士通）

佐藤 徹：群馬大学工学部電子工学科（現在，国際電気）

第1図 同軸プラズマ銃系統図

Fig. 1. Block diagram of the gun system.

第1表 同軸プラズマ銃と放電回路

Table 1. Geometry of coaxial plasma gun system and the condenser-bank characteristics.

外部電極(銅製)	95 mmφ
内部電極(銅製)	40 mmφ
外部電極の長さ	180 mm
内部電極の長さ	137 および 167 mm
ガスポートの位置	102 mm
コンデンサの容量	8.8 μF
回路のインダクタンス	59.5 nH
放電電流の周波数	225 kHz
最大充電電圧	30 kV

第1表のとおりである。コンデンサバンクは4個の容量 2.2 μF のコンデンサよりなり、それぞれ1個の気中ギャップスイッチと4本の同軸ケーブルにより同軸銃に接続されている。同軸銃の内部電極はガス噴出孔から銃口までの長さが 6.5 cm, 3.5 cm の二とおりで変化できる。真空容器は内径 15 cmφ, 長さ 135 cm のパイレックスガラスで作られ、同軸銃は第1図に示すように銃口部が約 11 cm 真空容器内にはいった位置にある。また、この部分は銃口先端から 2 cm ごとに4箇所直径 2 mmφ の孔があけられ、分光および STL 流し撮りのために使用可能である。

充電電圧 10 kV のときコンデンサバンクにたくわえられるエネルギーは 440 J で、電流最大値は約 80 kA である。ここで用いられた同軸銃の構造を第2図に示す。高速電磁弁は中心電極内に内蔵されている。この高速電磁弁の動作原理は、コイルにコンデンサ放電による衝撃電流を流し、隣接して置かれた導体円板にうず電流を誘起させて、この電流とコイル内電流との反発力により円板を駆動し、弁を開くものである。⁽⁹⁾

プレナム容量は 0.43 cc, 封入気圧は2気圧まで可変であるが、1.5 気圧で用いられた。コイルはリボン状導線 14 巻よりなり、容量 10 μF のコンデンサで駆動される。ガスとしてはヘリウムを用いた。

この同軸銃の操作は、まず高速電磁弁を駆動して中性ガスを噴出させ、同軸電極間に適当な圧力分布が実現するのをまってコンデンサバンクにたくわえられて

第2図 同軸プラズマ銃断面図

Fig. 2. Cross sectional view for the coaxial plasma gun.

いる電荷を同軸銃内の円環状空間で放電させると、プラズマの生成・加熱・加速が行なわれて銃口から射出される。コンデンサバンクは放電開始時に中心電極が負となるように充電されている。手動キー、高速電磁弁、同軸銃の主放電のスタートなどの時間順序は、遅延パルス発生器、高圧パルス発生器などにより系統化されている。この装置の到達真空度は 2.5×10^{-6} Torr である。

この研究に用いられた測定器を列挙すると次のとおりである。

- (1) 高速イオンゲージ⁽¹⁰⁾: 高速電磁弁による中性ガスの圧力分布の時間変化を測定する。
- (2) 磁気探針: 同軸電極間の磁界分布を測定する。長さ 3 mm, 平均巻半径 3.8 mmφ, 100 巻のコイルを用いた。
- (3) イメージコンバータカメラ: 生成射出されるプラズマの形状、速度などを観測する。
- (4) モノクロメータ・電子温度の測定および不純物の検討に用いる。
- (5) マイケルソン干渉計: 電子密度を測定する。He-Ne ガスレーザを光源とする。

ほかに補助的に複探針⁽¹¹⁾も用いた。

3. 実験結果と検討

〈3・1〉 中性ガス圧分布 プラズマ銃点火時の中性ガス圧分布は、以降の放電状態を決定する重大な要因となる。このガス圧分布を決定するのは高速電磁弁の駆動の条件と高速電磁弁から銃の点火までの遅延時間 t_d である。本研究において用いた高速電磁弁は、

第3図 軸方向中性ガス圧分布

Fig. 3. Axial distribution of neutral gas.

第4図 半径方向中性ガス圧分布

Fig. 4. Radial distribution of neutral gas.

その駆動用コンデンサの充電電圧 V_p が 2kV 以上でガスを噴出する。 V_p が 2kV のとき τ_d が 180 μ s 以下ではこの同軸銃は動作せず、 V_p が 2kV 以上でも τ_d は 50 μ s 以下では動作しない。高速イオンゲージからの出力波形は V_p が 2.5kV 以下では再現性が悪く、3kV 以上ではきわめて良い。また、4kV 以上では高速電磁弁のコイルの寿命が短くなるので、本研究においては V_p は 3kV で一定とした。

同軸銃の軸方向のガス圧分布の例を第3図に、方位角方向 (θ) の分布の例を第4図に示す。座標系はプラズマの進行する方向を z 軸の正方向とし、原点をガス噴出孔の中心とする円筒座標を用いている。第3図において中心電極の底面は $z=2.5$ cm にあるので、 $z \geq 2$ cm では時間にかかわらずガス圧はたいした増加

を示していない。Paschen の法則によりこのガス圧分布を用いて放電開始電圧を求めると、ガス噴出孔上で放電は最も起こりやすいことがわかる。第5図によると、この研究で用いた高速電磁弁では $\theta=-45^\circ$ において時間にかかわらず高速電磁弁近傍での気圧が高くなっている。これは高速電磁弁のバルブ用円板がレバ一様運動をするためと推定される。これを避けるためにはガス源が点状とみなせる高速電磁弁⁽¹¹⁾ を用いる必要がある。また、ガス圧の θ 方向分布に前述のように Paschen の法則を適用すると、ここでの実験のすべての τ_d にわたりガス圧の最も高い位置で放電開始電圧が最も低くなる。

後述するように、実際にこの同軸銃内においては、放電開始の z 方向および θ 方向の位置はここで求めたガス圧最大の位置と一致することは、軸方向からのイメージコンバタカメラによるこま撮り写真、磁気探針による測定などで確認された。

〈3・2〉 プラズマ銃内の現象 同軸銃用コンデンサバンクのギャップスイッチ S_2 を投入すると、銃内での放電はまず内外電極を半径方向で一個所ずつないで起こる。放電電流周期は約 4.2 μ s であるが、 S_2 の投入後電流波形はなだらかな立上りを示し、それ以降は減衰正弦波状となる。放電のはじまる位置は、イメージコンバタカメラでのこま撮り写真、磁気探針での測定によると高速電磁弁による中性ガス噴出の著しい位置と一致している。

こま撮り写真の例を第5図に示す。 $\theta=-45^\circ$ の位置で開始された放電は τ_d が大きい場合には 1 μ s 以内に θ 方向に一樣に広がるが、 τ_d が小さいときには内外電極間の直線状放電のままで加速され銃口から射出される。この事実はコンデンサバンクの充電電圧 V_p 、内部電極の長さにはほとんど関係しない。

内部電極の長さが短い場合には、放電電圧にかかわらず放電開始後約 1.5 μ s 以降に点状の強い発光が内部電極の底面に現われ 4~5 μ s の間つづく。これは内部電極面の前方で放電電流がピンチしているためと考えられる。この現象がもっと顕著に起こった場合がプラズマフォーカスに相当すると推定されている。⁽⁶⁾

磁気探針により、同軸銃内の θ 方向の磁界を測定した。波形例を第6図に示す。これよりわかるように、銃底に近い部分における出力波形は、銃に流れる全電流を示すロゴスキークoilの出力波形とほぼ一致している減衰正弦波状となるが、ガス噴出孔から銃口にかけては単一パルス状となる。これは、放電がガス噴出孔付近から始まっていることを示している。

銃をはずれた部分 ($z=13$ cm) でも磁気探針の信号

第 5 図 軸方向からのこま撮り写真

Fig. 5. Framing photograph taken from axial direction.

第 6 図 磁気探針出力波形

Fig. 6. Signals from the magnetic probe.

が得られるのは、この部分にも θ 方向の磁界を作る放電電流が存在することを示している。 θ 方向磁界の軸方向分布を放電開始後の時間ごとに整理した結果を第 7 図に示す。

軸対称を仮定すると、このグラフの z に関する微分より半径方向の電流密度 j_r を求めることができる。この場合の円環状電流シートには、従来より議論されてきたような雪かきモデル⁽¹²⁾ が成立しないことがわかる。すなわち、この電流の銃底に面する面の位置は時間的にほとんど変化しないが、銃口に面する面は銃口の向きに時間とともに移動し、したがってシートの

第 7 図 軸方向の磁界分布

Fig. 7. Distribution of magnetic field along the gun axis.

厚さは時間とともに増大し、電流はその間で分布して流れている。内部電極の長短は z 方向の磁界の分布にほとんど影響を与えないが、いずれの場合にも磁界の θ 方向成分は時刻によっては銃口の外にまで存在しているので、同軸銃の銃口より外側においても放電電流が流れていることがわかる。

この場合に、通常いわれているような雪かきモデルが成立しないことは、次のような検討からも納得される。すなわち、 σ を esu で表わした導電率とすると、プラズマ中に磁界が浸透してゆく特性時間 $\tau^{(13)}$ は

$$\tau = \frac{4\pi\sigma L^2}{c^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 c : 光速、 L : プラズマの特徴的長さ

いま、後述の射出されたプラズマの銃口部における電子密度 $2 \times 10^{14}/\text{cc}$ 、電子温度 $5 \times 10^4 \text{K}$ を用いると $\sigma = 1 \times 10^{13} \text{esu}$ となり、これと $L = 1 \text{cm}$ として τ を求めると $\tau = 1.5 \times 10^{-7} \text{s}$ となる。一方、第7図より銃の中でプラズマは $2 \sim 3 \mu\text{s}$ にわたって加速を受けるので、加速時間は τ より1けた大きく、したがって、この間に磁界はプラズマ中に浸透してしまうため、プラズマはシート状では加速されえず、雪かきモデルも成立しないことがわかる。多くのプラズマ銃によるプラズマは電子密度 $10^{14} \sim 10^{15}/\text{cc}$ 、電子温度 10eV 以下であるが、電子温度 10eV としてもこの程度の電子密度のプラズマに対して $\tau \approx 6 \times 10^{-7} \text{s}$ と計算される。ここでは射出されたプラズマの T_e, n_e を用いているが、プラズマの σ は n_e にはほとんど依存せず、また T_e は銃の内外でほとんど変化しない。

〈3.3〉 射出されたプラズマの性質 同軸銃から射出されたプラズマの性質は、主としてイメージコンバータカメラ、He-Ne ガスレーザを用いたマイケルソン干渉計、モノクロメータなどを用いて検討した。

(1) イメージコンバータカメラによる検討 同軸銃および真空容器の中心軸と平行に設けられたスリット (幅 2mm) と、同軸銃の外部電極にあげられた

第8図 横方向からの流し撮り写真 (パラメータ: τ_d)

Fig. 8. Streak photograph taken from the direction perpendicular to the gun axis. (parameter: τ_d)

小孔 (直径 $2 \text{mm} \phi$) を通したイメージコンバータカメラによる流し撮り写真により射出されたプラズマの運動を観測した。 V_0 を一定とし、 τ_d を変化させたときの例を第8図に示す。これより明らかとなることを列挙すると、

(a) τ_d の小さいときプラズマの射出速度 v は大きくなる傾向をもつ。しかし、本研究においては τ_d が小さい場合 (たとえば $85 \mu\text{s}$) には v は大きな値をとるが、プラズマははっきりした塊になっておらず、すなわち先頭部がはっきりした境界を示さず、かつ、かなりの長い時間にわたって射出され続けていることがわかる。

(b) τ_d が大きくなるとプラズマははっきりした先頭部をもつ塊状に射出される。

しかし、(c) この塊の中でもプラズマは複雑な構造をもつことを示す写真が得られている。たとえば、第8図における $\tau_d = 235 \mu\text{s}$ の場合、同軸銃の銃口部においてプラズマ塊は異なった速度成分をもついくつかのプラズマの集団に爆発的に分裂していることが観測される。この現象は中心電極が短く、かつ V_0 の高い場合 (たとえば $V_0 = 19 \text{kV}$) に著しい。

次に τ_d を一定として V_0 を変化させた場合の観測結果の例を第9図に示す。これより、(i) V_0 が小さ

第9図 横方向からの流し撮り写真 (パラメータ 放電電圧)

Fig. 9. Streak photograph taken from the direction perpendicular to the gun axis. (parameter: discharge voltage)

第 10 図 射出されたプラズマの速度とコンデンサバンクのエネルギーの関係

Fig. 10. Relations of plasma velocity vs. energy of condenser bank.

場合、たとえば 10kV 程度の場合には単一パルス状のプラズマ塊の射出が行なわれている。これは磁気探針による測定結果と一致している。(ii) V_g が 16kV 以上になると、上述した銃口付近でのピンチ現象が著しくなるため、射出されるプラズマは複雑な構造をもつようになり単一パルス状でなくなる。射出されるプラズマを単一パルス状にするために、放電電流をクローパすることで電流自身を単一パルス状とし、その電流により生成されるプラズマを単一パルス状とすることが従来より行なわれてきたが、⁽¹⁴⁾ この方法は本研究によると低い V_g に対して、かつ放電電流の第 2 波目以下で作られるプラズマを除去することにのみ有効であり、高い V_g ではプラズマはやはり複雑な構造をもってしまうことがわかる。

流し撮り写真より求めた V_g に対するプラズマの射出速度 v を第 10 図に示す。横軸はコンデンサバンクの充電エネルギーにして整理されている。この図からは、中心電極が短い場合には長い場合に比べて大きな v が得られていることがわかる。中心電極が短く、かつ $\tau_d = 85\mu s$ の場合には v はコンデンサバンクの充電エネルギーにはよらずほぼ一定値 ($3.7 \times 10^7 \text{ cm/s}$) となり、ほかの τ_d と異なる傾向を示す。これはおそらくほかの場合と異なる加速機構によりプラズマが加速を受けているためと考えられる。たとえば、放電開始直後の放電電流の小さい位相における電界 E と磁界 B による $E \times B$ の力でプラズマが加速されることによっても考えられるが、しかし、ここでは E は測定されていない。一方、Thom 氏ら⁽¹⁵⁾ はプラズマが銃内で加速を受ける場合、プラズマと同軸電極との間に摩擦が存在するため、その速度は上限をもつことを示した。その議論に従い v の最大値を求めると $2.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$ となり、測定結果よりやや小さい値をとり良い一致を示さないで、本実験結果がこの機構により一定速度

第 11 図 射出されたプラズマの速度と τ_d の関係

Fig. 11. Relations of plasma velocity vs. τ_d .

を示しているとはいえない。

τ_d による v の変化の様子を第 11 図に示す。 τ_d が大きくなるに従い v は小さくなり、ほかの報告と一致した結果を示している。⁽¹⁶⁾ また、これらの結果より内部電極が外部電極に比べ短い場合のほうが、 v は明らかに大きくなっていることがわかる。

(2) 電子密度の測定 He-Ne ガスレーザを光源とするマイケルソン干渉計により電子密度の測定を行なった。レーザ光がプラズマを横切ることにより、プラズマが存在しない場合とは光路に差が生ずるが、その光路差に基づく干渉しまのフリンジ数 F と電子密度 n_e の間には

$$\int_0^{l_0} n_e dl = 1.6 F \times 10^{17} \text{ cm/cc}$$

なる関係がある。⁽¹⁷⁾ ここで l_0 はレーザビームがプラズマを横切った長さを示す。これを用いて射出されたプラズマの直径方向平均値 $\bar{n}_e$ を求めた。測定結果を第 12 図に示す。図には放電電流の第 1 半周波で生成されたプラズマの $\bar{n}_e$ の最大値のみが示されている。測定は銃口から 2cm 距った位置でなされた。結果に

第 12 図 プラズマの電子密度、電子温度

Fig. 12. Electron density and temperature of ejected plasma.

$V_g=10\text{ kV}$, $V_p=3\text{ kV}$, $\tau_d=192\text{ }\mu\text{s}$
(上): 放電電流, (下): プローブ信号
掃引速度: $5\text{ }\mu\text{s/div}$

第 13 図 静電複探針出力波形

Fig. 13. Signals from the electrostatic double probe.

は内部電極の長短の影響はほとんど認められないが、(i) $\bar{n}_e$ の最大値は $5 \times 10^{14}/\text{cc}$ の程度であり、(ii) τ_d が大きくなると $\bar{n}_e$ はわずかに増加する傾向をもち、(iii) ここで測定した範囲では $\bar{n}_e$ は V_g にあまり関係しない。

(3) 電子温度の測定 モノクロメータを用いて He I $5,876\text{ \AA}$, He II $4,686\text{ \AA}$ の強度比を測定することにより電子温度を求めた。電子密度 $n_e \leq 10^{18}/\text{cc}$ であるとき、コロナモデルを用いてヘリウムプラズマのスペクトル線強度比から電子温度を求めることができる。⁽¹⁸⁾ その結果、(i) V_g に対する依存性はほとんど認められない。この傾向は著者の一人により以前に複探針を用いてなされた測定結果と一致している。⁽¹⁹⁾ (ii) τ_d が大きくなると T_e もわずかに増加する。これと同じ傾向を示す報告もなされている。⁽¹⁶⁾ 結果は第 12 図に $\bar{n}_e$ とあわせて示されている。測定は $\bar{n}_e$ と同じく銃口から 2 cm の点でなされている。

(4) 複探針による検討 複探針によりイオン飽和電流を観測すると、同軸銃の動作後早い時刻に現われる信号と、それよりはかなり遅れて現われる信号とがあることがわかる。観測波形例を第 13 図に示す。この早い成分はイメージコンバータカメラによる流し写真と同じものを示すが、遅い成分は発光は弱く、撮影できていない。また早い成分は明りょうとはいえないが、プローブ特性を示し、それより求めた T_e はスペクトル線の強度比から求めた結果とだいたい一致している。しかし、遅い成分はプローブ特性を示さず、測定した範囲ではその波高値は探針印加電圧にほぼ比例している。

(5) 不純物について 射出されたプラズマ中にはプラズマとするために高速電磁弁により導入したガスのイオンのほかに、電極、電極間絶縁物、放電管の材質および真空ポンプの拡散油の分解物などの原子、イオンが不純物として含まれていることが予想され

る。モノクロメータを用いた検討によると、Cu I, Si II, C II などの存在が認められる。ただし、本研究においては粒子分析は行なわれていない。

(6) 再現性について 内部電極を短くすると、長い場合に比べモノクロメータ、複探針の出力波形、STL こま撮りおよび流し撮り写真の再現性は高くなり、マイケルソン干渉計による n_e の測定値もばらつきは小さくなる。これは、内部電極前面でピンチをしやすい条件になるためと推定される。また、両者とも τ_d が大きい場合に再現性が高い。

4. む す び

以上に述べられた実験的研究により、第 1 表に示されている特性をもつ同軸プラズマ銃の放電電圧 $10 \sim 19\text{ kV}$ 、遅延時間 $85 \sim 375\text{ }\mu\text{s}$ の範囲の動作により次のことが明らかにされた。

(1) ここで用いた高速電磁弁は θ 方向に不均一に中性ガスを噴出する。これが、放電が軸対称に開始されない原因となる。しかし、 τ_d が $235\text{ }\mu\text{s}$ 以上では放電は $1\text{ }\mu\text{s}$ 以内に θ 方向に一様に広がる。

(2) 内部電極の短い場合には、軸方向から撮影したこま撮り写真では中心電極の底面上に輝点が観測される。これは底面前方における電流のピンチを示していると思われる。

(3) 雪かきモデルは成立しない。すなわち、円環状空間の r 方向の放電電流の銃底に面する面は放電の開始した位置から時間的にほとんど移動しないが、銃口に面する面は時間とともに銃口方向に進行し、電流層の厚さは増大する。これは、本研究における n_e , T_e の測定値を用いたプラズマ中への磁束の浸透の特定数の計算からも支持される。一方、従来の報告においては、雪かきモデルが成立するかどうかの検討はほとんどなされていないようである。

(4) 放電電圧の低い場合 (13 kV 以下) には、プラズマは銃口から単一パルス状に射出される。しかし、複探針での観測によると、この場合においても単一パルス状プラズマによる信号に後続する信号が得られている。一方、放電電圧が高くなると (16 kV 以上) 複数個のプラズマが射出されるばかりでなく、第 1 波目のプラズマ塊も複雑な構造をもつようになる。すなわち銃口部においてさまざまな速度成分をもついくつかの塊に爆発的に分裂する。このような観測結果はほかの文献には見いだされないように思われる。

(5) 射出されたプラズマの速度は $2 \sim 35 \times 10^6\text{ cm/s}$ の範囲にあり、一般に τ_d 大きくなると小さくなる傾向を示す。実験範囲でのその最大値は $3.5 \times 10^6\text{ cm/s}$

(6) 銃口部での電子密度、電子温度は同軸銃の操作条件にあまり関係せず $4 \times 10^{14}/\text{cc}$, $5 \times 10^6 \text{K}$ の程度である。

(7) 不純物としては Cu I, Si II, C II などの存在が確認された。

(8) 従来用いられたプラズマ銃⁽¹⁴⁾⁽¹⁹⁾ に比べ、内部電極を短くした場合には放電ごとの再現性はかなり改善された。

終わりにあたり、本研究に用いられたイメージコンバータカメラは名古屋大学プラズマ研究所のご好意によることを付記し、関係の方々に感謝の意を表する。

(昭和 46 年 7 月 5 日受付, 同 47 年 1 月 28 日再受付)

文 献

- (1) W. H. Bostik: *Phys. Rev.* **104**, 292 (1956)
- (2) J. Marshall: *Phys. Fluids* **3**, 134 (1960)
- (3) F. Waelbroeck, et al.: *Nuclear Fusion, Supplement Pt 2*, 675 (1962)
- (4) F. R. Scott, et al.: *Phys. Fluids* **4**, 600 (1961)
- (5) J. W. Mather: *Phys. Fluids, Supplement S 28* (1964)
- (6) I. M. Zototrubov, et al.: *Soviet Phys. Tech. Phys.* **9**, 773 (1964)
- (7) T. J. Gooding, et al.: *AIAA J.* **1**, 1289 (1963-6)
- (8) Y. Nakano, et al.: *Japan J. Appl. Phys.* **5**, 732 (1966)
- (9) B. Gorowitz: *Rev. Sci. Instrum.* **31**, 144 (1960)
- (10) J. Marshall: *Plasma Acceleration* ed. S. W. Kash (Stanford Univ.), 66 (1963)
- (11) D. H. Birdsall, et al.: *Rev. Sci. Instrum.* **36**, 1777 (1965)
- (12) J. P. Hart: *Phys. Fluids* **5**, 38 (1962)
- (13) A. Simon: *An Introduction to Thermo-nuclear Research* (1959) Pergamon Press Inc.
- (14) K. Hirano, et al.: *Japan J. Appl. Phys.* **8**, 108 (1969)
- (15) K. Thom, et al.: *Phys. Fluids, Supplement S 67* (1964)
- (16) G. N. Aretov, et al.: *Soviet Phys. Tech. Phys.* **9**, 923 (1965)
- (17) J. Dyson, et al.: *Plasma physics* **6**, 105 (1964)
- (18) H. Griem: *Plasma Spectroscopy* (1964) McGraw-Hill
- (19) 平野, 他: 電学誌 **90**, 117 (昭 45-6)