

超高温プラズマの発生

大阪大学工学部 熔接工学教室 西 口 公 之

1. 緒 言

気体の温度が上昇すると気体粒子の運動が盛んとなり、熱電離が起ることはよく知られている。このように何等かの方法で作られたイオンと電子とがおのおのの粒子として運動しながらも、相互に作用し合つて共存し、巨視的にはほぼ完全に電気的中性を保っている気体をプラズマと呼んでいる。いわゆる低温プラズマでは中性原子もかなり含まれているが、高温になるに従つて電離が進み、普通数万～数十万度に達すると完全電離プラズマ（超高温プラズマ）になる。

蛍光灯、放電管（低密度プラズマ）およびアーク熔接（高密度プラズマ）などに見る如く、低温プラズマは既に生活に密接しており、プラズマの特性もかなり明らかにされて来た。しかるに超高温プラズマはごく最近まで天体物理学者によつて主として扱われ、資料も天体プラズマに限られて来た。ところが 1950 年頃より核融合反応の研究を中心に、地上での超高温プラズマ実現に多大の努力が払われ、クルチャトフの発表¹⁾を皮切りにジュネーブ²⁾、ウプサラ³⁾と国際会議が重ねられると共に、超高温プラズマの挙動が次第に明らかになりつつある。

ここでは超高温プラズマの閉じ込め並びに加熱方法の概略を紹介し、かつ筆者らが行つた大電流放電におけるプラズマの電磁力によるピンチ効果の実験結果を報告する。更にかかる放電プラズマの一応用として、プラズマ・ガンを取上げる。

2. 超高温プラズマの閉じ込めと加熱

超高温プラズマを閉じ込めるには現在の所磁場による以外にはない。この閉じ込め方法で問題となるのは、静的平衡、安定性、粒子の拡散などである。

直線ピンチ型放電のような場合には、普通考えている系での粒子の運動の時間 τ が粒子間の衝突時間 t_c に比べて遙かに大であるので、M. H. D. 近似が成立つ。電磁力のみを考えると、プラズマの平衡条件は $\vec{j} \times \vec{B} = \nabla P$ (但し \vec{j} : 電流密度 e. m. u., \vec{B} : 磁場 gauss, P : 圧力 dyne/cm²) で与えられる。それ故後述の大電流放電プラズマ直線ピンチプラズマ) では電流はプラズマ柱の表面のみに流れるから、平衡状態ではプラズマ表面で

磁気圧 $\frac{B_0^2}{8\pi} = \frac{I_0^2}{2\pi a^2}$ (但し B_0 : プラズマ柱表面での自己電流による磁場, I_0 : プラズマ柱を流れる電流 e. mu., a : プラズマ柱の半径 cm) とプラズマ内圧 P_0 とが等しくなる⁴⁾。このように円柱プラズマでは平衡が成立するが、端部の閉じ込めに問題がある。また環状磁場内にプラズマを閉じ込める場合には磁力線の半径方向に ∇B を生じるから、荷電粒子は drift を起し、トーラス管の上下方向に荷電分離を生ずる。これを防ぐには回転変換と呼ばれる方法（磁力線をねじて、トーラスに沿つて閉じた等圧面を作る方法）がある⁵⁾。なお低密度プラズマの場合、 $t_e \gg \tau \gg t_{dy}$ (t_{dy} : ジャイロ周期) が成立せば C-G-L 近似が適用でき、磁気鏡においては、この平衡が成立する。

プラズマに平衡が成立していても、安定であるとは限らない。よく知られている不安定にソーセイジ型、キンク型の不安定がある。これらは直線ピンチ型プラズマにおいて典型的に現れるものである。ソーセイジ型不安定はプラズマ柱に縦磁場 B_z があれば安定になる。キンク型不安定は B_z のみでは長波長のものは除去し得ず、更にプラズマの外部を金属壁で閉むことにより $\frac{\text{金属内壁の半径}}{\text{プラズマ半径}} < 5$ の場合に限り安定化し得る⁶⁾。今一つの不安定に交換不安定がある。これは高圧のプラズマに面して磁力線の形が凹なる場合に起る。この不安定は高圧のプラズマに面して凸な形の磁力線にするか、または等圧面の両側で磁力線に shear を与えることによつて防がれる⁷⁾。

上記の諸条件が満たされても衝突拡散、Bohm 拡散などによつて、プラズマは閉じ込め磁場を横切つて逃げる。磁気鏡ではまた前部の loss cone からの損失がある。

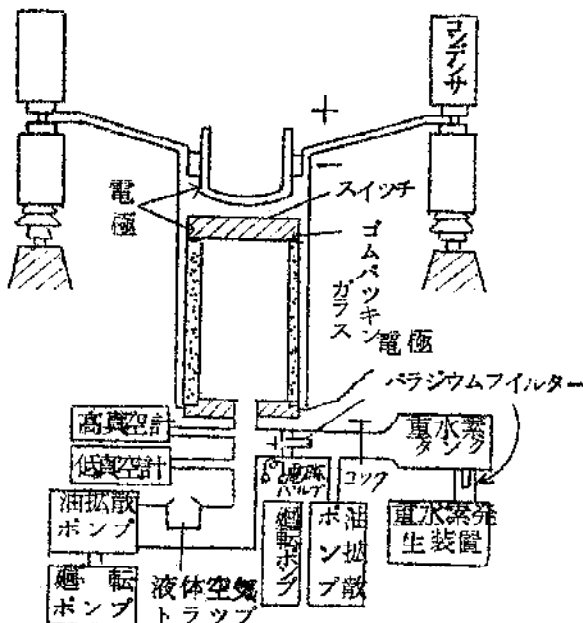
プラズマの加熱法としては、低温から出発する形式と高速荷電粒子流を磁気容器に打込んで熱化する形式の 2 者がある。前者には衝撃圧縮、断熱圧縮、ジュール加熱および slow compression がある。衝撃圧縮法は直線ピンチプラズマでよく使われ、衝撃電流によつてプラズマがピンチする時の大きな圧縮の運動エネルギーを熱に変換するものである。断熱圧縮法は磁気容器を準静的に圧縮加熱するものである。ジュール加熱はプラズマに電場をかけて行ふ。即ちこの電場から得たエネルギーは先づ電子の熱運動に与えられ、ついで電子、イオン間の衝突によつ

てイオンに伝えられて加熱される。slow compression は磁場の周期的変化によつて、磁力線と垂直な円周方向に生ずる電場で加熱する方法で、イオン・サイクロトロン共鳴はこれに属する。後者の高速粒子流としてはイオン流、プラズマ集団が用いられる。

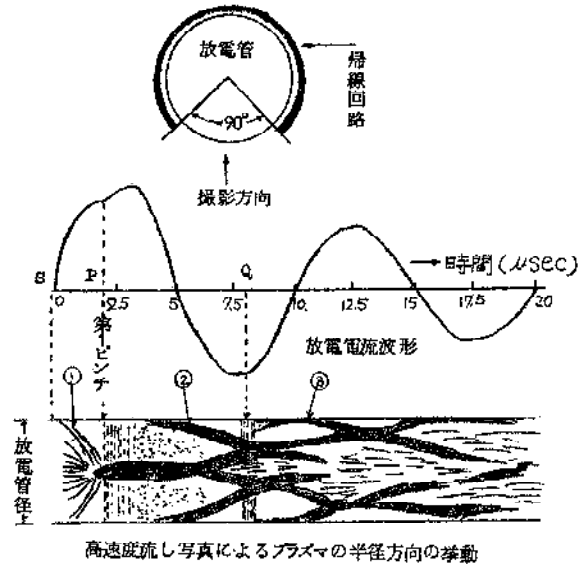
実際のプラズマ発生装置では上述の種々の閉じ込めおよび加熱方法が巧みに組合されており、プラズマの基礎的特性の研究が進められている。

3. 直線状大電流放電プラズマのピンチ過程^{8),9)}

筆者らは直線状放電管において、大電流の放出により急激な自己ピンチをひき起し、衝撃加熱によつて超高温プラズマを発生させる装置（直線状大電流放電装置を建設して、プラズマのピンチ過程を調べている。第1図は装置の構造を示すものであり、コンデンサ100kW-sec）、集電板、スイッチ、放電管、放電ガス制御系よりなつてゐる。効果的に衝撃加熱をし、閉じ込め磁場を強くするには、電流立ち上りの早い大電流が要求される。そのためには放電回路のインダクタンスを低減せしめることが必要であり、密接して配置した同軸往復回路にして目的を達している。本装置における回路のインダクタンスは約0.1μHであり、充電電圧10~50kV、コンデンサ容量20μFおよび80μFの条件で実験している。使用放電ガスはH₂、D₂、N₂、Aの各単一ガスであり、充填ガス圧力は10⁻¹~10⁻³mmHgである。放電初期条件によつて多少の差異はあるが、放電プラズマの定性的な挙動は類似しており、プラズマのピンチ過程を流し写真を中心に追跡している。



第1図 直線状大電流放電装置



第2図 直線状大電流放電プラズマの半径方向の典型的な挙動

第2図は直線状大電流放電プラズマの半径方向の典型的な挙動を示す解説図である。図の①に見る如く、先づ浴面絶縁破壊Sに続いて放電管壁に沿つてプラズマ円筒が形成され、電流の増加と共に管軸の方に向つて収縮を始める。プラズマ円筒の収縮速度が音速を越えると、収縮プラズマ円筒の前面に衝撃波を伴ない、これがプラズマ円筒より早く進行して管軸部で衝突するため、第1ピンチ時より早い位相で輝度の高いプラズマ模様を生ずるのである。第1ピンチPで放電管全域に渡つてしばらく続く発光が見られる。これはピンチ時に発生するX線および紫外線などのエネルギーを収縮時に取り残された中性粒子が吸収して励起されるから起るのであると推察される。この発光模様が続いて、①のピンチしたプラズマ柱があるのに拘らず、②のプラズマ円筒が管壁附近に形成される。この発光現象に引続いて形成されるプラズマ円筒はピンチ時の電流位相に殆んどよらない。このことは中性粒子の励起が起つてゐるため、低い管電圧でも容易に管壁部で絶縁破壊を起し得るのであると解釈される。一度管壁部でこのようなプラズマ円筒が形成されるが、電流は表皮効果によつて表面のみに集中することになり、ピンチ時に起つた管全域に渡る発光も②の部分の外は減衰することになる。プラズマ柱の電流測定の結果はこのことを明らかに示している。ピンチ時に①のプラズマ柱を流れてゐた電流は、その大きなインダクタンスに蓄えたエネルギーを除去に②のプラズマ及び外部回路を通して放出するためゆるやかに減少する。(回路電流と①のプラズマ電流の位相はかなり異なる。①、②の電流の合成が図に示す回路電流になるのは云うまでもない。②のプラズマ円筒も電流の増加につれてピンチしP点で見たと同様な現象がQ点で起る。また①

の収縮速度が小で電流の第1半波内でピンチしない場合にも放電電流の零位相附近で第2プラズマ円筒を生ずる。これは電流零位相附近で管電圧が新たに絶縁破壊を起すに十分な高さに達するからである。このようにして多重プラズマ円筒が形成されるが、これにはプラズマの有するインダクタンスが主要な役割をなしていることを種々の実験によつて実証している。

4. 直線放電によるプラズマ・ガン¹⁰⁾

対峙する2つのコイルに逆向きの電流を通ずることによつて出来るカスプ磁場内のプラズマは2項で述べた如く、電磁流体力学的に安定である。かかるプラズマをカスプ磁場内に作るには高密度で高速のプラズマ集団を投入して、熱化せしめるのがよい。直線放電では高密度プラズマを作るのは比較的容易であり、大電流を流すことによりプラズマ圧力もピンチ時に相当高くなる。一端の電極を環状にしておくと、ピンチ時の高い圧力のため、プラズマの一部は管軸方向に押し出される。現在この型の小型モデル実験ではあるが射出されたプラズマ集団の速度 10^6 cm/sec 以上 (Aガス使用) を得ている。直線放電管部の初気圧は $5 \cdot 10^{-1} \sim 10^{-2}$ mmHg である。プラズマ集団の整形は1或は2個のリミターによつて行

つている。カスプ磁場への導入過程はサーチ・コイル、流し写真によつて調べているが、比較的安定に飛行する。この空間でのイオン化の程度は分光電測光によつており、A II が頭著に認められる。

以上超高温プラズマの特性とピンチ効果の利用の一例について略述した。

文 献

- 1) I.V. Kurchatov : Atomnaya Energiya ; 1, (3) 65 (1956)
- 2) Proc 2nd Geneva Conf ; 31, 32 (1958)
- 3) Proc. 4th International Conf on Ionization Phenomena in Gases ; I, II (1959)
- 4) R.F. Post ; Review of Modern Physics ; 28, 338 (1956)
- 5) L. Spitzer : Proc. 2nd Geneva Conf ; P/2170 (1958)
- 6) R.J. Tayler ; Proc. Phys. Soc. ; B70, 1049 (1957)
- 7) 早川幸雄, 林忠四郎 : 岩波講座現代物理学 ; V K 82 (1959)
- 8) K. Nishiguchi, Y. Arata & M. Okada: Technol. Reports Osaka Univ ; 10, 423 (1960)
- 9) 同 上 ; 10, 593 (1960)
- 10) 阪大超高温研究グループ : 日本物理学会第16回年会発表 (1961)