

# テータ・ピンチによるプラズマ装置の設計

玉野和保・北山正文・山脇富三

## A Design of Plasma Aparatus by Theta Pinch

By Kazuho TAMANO, Yoshifumi KITAYAMA  
and Tomiso YAMAWAKI

In plasma physics, both the study of the thermonuclear fusion and of the basic theory are being actively carried on. Characteristics and diagnostics of plasma were reported in a previous paper. In our laboratory room, plasma aparatus has been designed for diagnostics in plasma physics at high temperatures. This paper describes the design of the  $\theta$ -pinch device, which will be used for multipurpose experiments. The  $\theta$ -pinch device can induce high tempratur in plasma by means of a strong magnetic field.

### 目 次

|                  |    |
|------------------|----|
| I 緒 言            | 81 |
| II 設 計           | 82 |
| II-1 Theta Pinch | 82 |
| II-2 設計に当っての問題   | 82 |
| II-3 装置の設計       | 83 |
| III 結 言          | 87 |

### I 緒 言

近年 Plasma 物理学の研究においては著しい発達が見られるが、大別して熱核融合炉実現を旨としている研究 Group と Plasma の諸特性を計測する事により、その性質を研究する Group とが考えられる。

熱核融合炉実現に関しては、現在では、Tokamak 型熱核融合装置が最も有力であろうと考えられているが、諸外国共これが熱核融合炉実現に関して適当であるかどうかという判断はなされていない<sup>1)</sup>。

これに対して他の装置での検討も盛んである。例え

ば、高温・高密度での Plasma が小さい容器内に閉じ込められる特徴を持つ Theta-Pinch は米国の Scylla その他で多く検討されているが、一般に Theta-Pinch 方式では不安定性の為、閉じ込め時間が短い。しかし、Plasma 温度については Scylla で  $10^7$  [°K] に達し、しかも中性子の放出も報告されている。しかし、これは熱核融合反応によるものというよりむしろ乱れによる偶発的な加速の為に発生したと考えられている。

現在、他の装置でも同様に、熱核融合反応は確められていない状態にある。

従って、現在ではいかに閉じ込めるかという問題よりも、むしろ Plasma をいかに高温にするかという問

題に関心が集まっていると考えられる。これらについては前報でその概要を示した。

ここでは、その前報で示した現状を基礎として、高温 Plasma における乱流, Shock, 及び不安定性等の機構を解析する為、又計測技術の開発を行う為の多目的に応用できるような Plasma の発生装置の設計及び設計に際しての問題点を述べる。

## II 設 計

### II-1 Theta-Pinch

Theta-Pinch の簡単な模型の縦断面図を Fig. 1 に、横断面図を Fig. 2 に示す。

これは銅板で作った円管の両端の断面積を広くしたもので、Condenser に蓄えた電荷を Switch を入れて急にこの銅の円管に大電流を流す。そうすると両端で密にすばまった磁気鏡型の強磁場ができ、Plasma は軸方向と半径方向の両方から Pinch され、中央部に衝撃的な断熱圧縮がおこり、高温に加熱される。同時に放電管の中央部に逆向き磁場ができる。

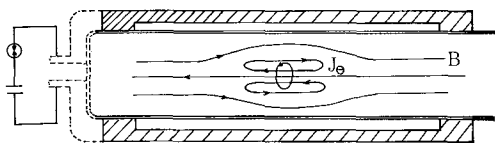


Fig. 1 Longitudinal cross section of theta-pinch apparatus.

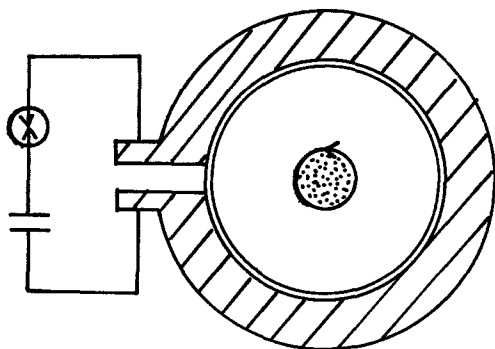


Fig. 2 Transverse cross section of theta-pinch apparatus.

これは Wilhelm により報告され、続いて同様な現象の観測が Los Alamos Scylla IA を用いて Herold によってなされた。この実験の結果を Fig. 3 に示す。<sup>2) 3)</sup>

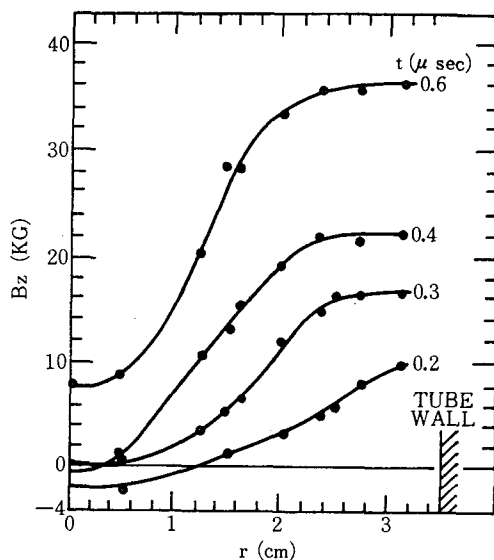


Fig. 3  $B_z(r)$  profiles in Scylla IA by Herold. Conditions were zero  $B_z$  bias, 20 [mTorr] of  $D_2$  filling and 40[KV] on each half of the split pinch coil. Many such runs were made, all of which showed essentially the same result.

この逆磁場によって、Doughnut 型の磁場が生じ、Plasma はこれに閉じ込められる。Plasma は軸を中心に銅板電流と逆向きに角速度  $\theta$  で回転しながら環状電流  $J_\theta$  を流すが、このように Plasma は断熱圧縮で高温に加熱されると共に、放電管の中央部に Doughnut 状に閉じ込められる。<sup>4)</sup>

### II-2 設計に当たっての問題点

設計に当たっては次の様な問題があると考えられる。

まず、目的による問題として、できるだけ簡単で、解析し易い構造にし、又研究対象によって変えていけるよう配置すること等がある。

次に、Plasma に対しての問題についてみると、Plasma 自身、完全導体でなく、Pinch 後抵抗性不安定により、内部磁場と外部磁場は混合してしまい、配位がくずれて粒子損失を招く。長い Pinch 時間ではくずれが遅くなるが、衝撃圧縮加熱が弱くなる。又磁場の不均一による電荷分離が起り、不安定が波動的に引き起こされる現象がみられる。

その他、Plasma 自身のふるまいによる様々な不安定性があるが、不安定性と粒子損失をできるだけ少なくして、Plasma の閉じ込め時間 ( $\tau$ [sec]) を長くすること、又できるだけ高温 ( $T$ [°K]) に加熱するこ

とが重要な課題である。

それには次の事に注意する事が必要である。

- ① Theta-Pinch 方式では断熱圧縮による衝突粒子を閉じ込めるが、強力な外部磁場が必要である。
- ② Plasma 電流 ( $I_p$ ) が大きい為、わずかな不整磁場 ( $\Delta B$ ) が、Lorenz 力  $I_p \times \Delta B$  を作り、平衡を崩し、Plasma の閉じ込め時間は減少する。従って、この不整磁場を極力無くする様にしなければならない。
- ③ 縦磁場は放電管内で閉じていない為、端からの粒子損失が生じる。従って、Mirror 効果を強める様な磁場にしなければならない。
- ④ Plasma の電離度を上げ、中性粒子の磁場からの逸脱の割合を少なくする。
- ⑤ Switch 及び放電管は Pulse 電磁場による力を受けるので、接続部等、装置の機械的強度を考慮しなければならない。
- ⑥ 高電圧、大電流を取り扱う為、接地等を良くし、又漏れ電流を無くし、発熱等に注意し、実験に際して安全でなければならない。
- ⑦ 漏洩磁場をなくし、装置と外部との磁気遮蔽を良くする。
- ⑧ 不純物があると制動放射による熱損失があるので

真空度を良くする。

- ⑨ 運転するのに機動性のある適当な配置であること。

その他、種々の事柄について注意せねばならないが、特に重要な事は、測定が Plasma を乱さず、しかも精度良く行え、又安全に行なわれなければならないということである。

### II-3 装置の設計

前章では、Plasma 装置設計に当たっての種々の問題点を考えてみた。

本章では、これらのことを基礎として実際に設計した Plasma 装置の設計図とその概説を行う。但し、ここでは設計において主要と思われた Plasma 閉込め装置、真空排気系、放電 Switch、真空 Crowbar switch 及び、電源回路配置図を中心に示す。

#### ① Plasma 閉込め装置

Plasma は Pre-heat によって発生され、 $\theta$ -pinch coil と Mirror-coil に大電流を流すことによって、同時に強く放電管の中央部に圧縮加熱される。 $\theta$ -pinch コイルによって発生した磁場は、放電管の端の部分と中央部での Mirror 比は 2 : 1 である。Mirror-coil による放電管の中心付近での磁場は

$$B = 0.090 \times I [A] \quad [G]$$

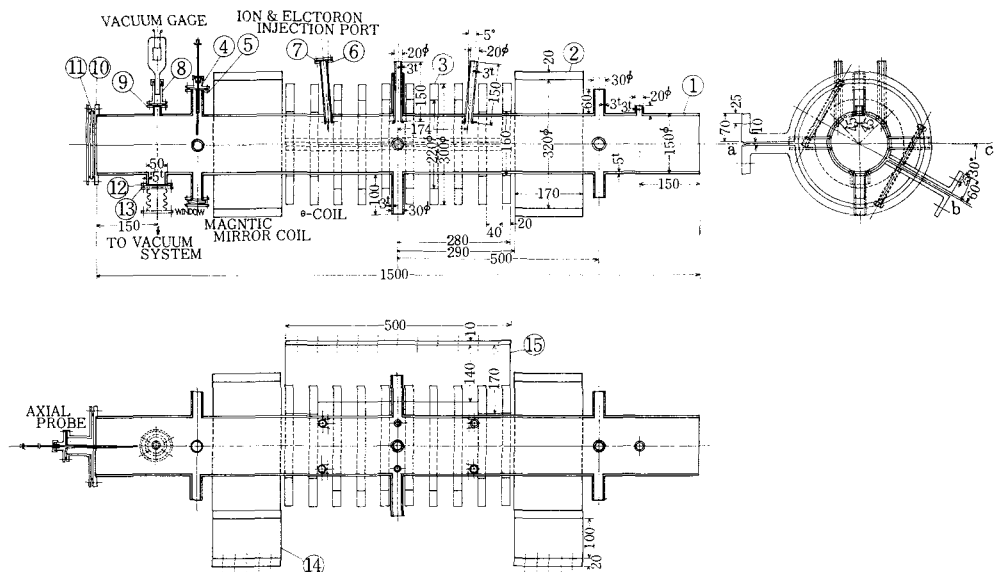


Fig. 4 Plasma Confinement Apparatus

1 discharge tube (pirex glass) 2 single turn mirror coil (CuP) 3 single turn  $\theta$ -pinch coil (CuP) 4, 8 frange (Bs) 7 blind frange (BsP) 5, 6, 9, 10 frange (BsP) 11 window (quartz glass) 12 frange (BsP) 13 bellows (Bs) 14, 15 tab (CuP)

管壁近くでは

$$B = 0.561 \times I [A] \quad [G]$$

この閉込め装置によって生成される Plasma の予想される温度は  $10^7 [^{\circ}K]$  を越すが、実際は、Plasma の不安定、エネルギー吸収状態を考えると Plasma を  $10^7 [^{\circ}K]$  以上の加熱は、Plasma のふるまいから困難であり、多くの実際例を参照すると、数百万度になると思われる。

### ② 真空排気系

放電管内を真空に引くために Rotary pump, Titanium sublimation pump 及び Ion pump を用いるが、真空に引くに当っては、清浄で真空度が高いほど良い。又、放電管が大きい事から排気速度が早いことが望まれる。

これらの事から、Fig. 5 に示す様な真空排気系が考えられる。これによって、 $10^{-7} \sim 10^{-8} [Torr]$  までの真空が可能であろうと思われる。

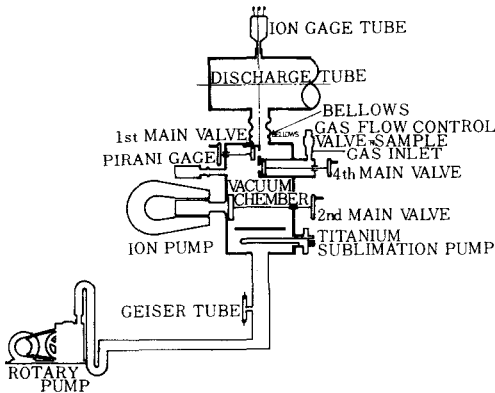


Fig. 5 Schematic diagram of vacuum system.

### ③ 放電 switch

Coil に大電流を流す際に、Switch が必要であるが、これには、Switch を投入した際の立上りが早いこと、電極の Gap の Jitter が少ないこと、ON 状態になる時間が正確であること、そして寿命が長い等の条件が要求される。<sup>5) 6) 7)</sup>

Switch にはいろいろあるが、上記の条件を満たすものとして Mechanical Switch よりも放電 switch を選んだ。

放電 switch においては、高電流容量で、低indactance でなければならず、gap の問題に注意せねばならない。ここで電極の材料として、圧延鋼が使われているのは、電極表面に発生する粉末が少なく、損耗が少ないからである。

### ④ Vacuum crowbar switch

この crowbar switch は、L. M. Goldman, H. C. Polloch, J. A. Reynolds 及び W. F. Westendorf の論文を参考にして設計した。<sup>7)</sup> Fig. 8 に電源から放電 switch を通って  $\theta$ -pinch coil に致る簡単な回路図と、coil に流れる電流、電圧そして温度上昇の時間依存を示す。

但し  $C : 1000 [\mu F], 20 \sim 50 [KV]$

$s_1$  : 放電 switch

$s_2$  : 真空 crowbar switch

$$a = (r_1 + r_2) / (L_1 + L_0)$$

$$b = 1/c(L_0 + L_1)$$

$$\omega = 1/2 \sqrt{4b - a^2} \quad (\text{参照})$$

この図において、 $t = t_0$  で放電 switch  $s_1$  を投入すると、Condenser の両端の電圧は下り、Pinch coil に電流が流れる。 $t = t_1$  で  $s_2$  を投入すると Pinch coil 部  $L_0, r_1$  の電流は、実線の如く流れて急減するのが緩和されている。すなわち、Pinch coil を流れる電流は、

$$I = -CVb/\omega \cdot e^{-\frac{a}{2}t} \cdot \sin \omega t \quad (0 \leq t \leq t_1)$$

$$I = -CVb/\omega \cdot e^{-(c_1 + r_2/L_0 + L_1)t} \quad (t_1 \leq t)$$

と示される。

### ⑤ 電源回路導板配置図

電源回路導板には、導電率の良い銅を用いた。Inductance は、Lead 部を短かく、しかも、入出部を互いに接近することによって小さくなるよう設計した。計算によると、Lead 部と Coil 部を合計して、 $3.3 \times 10^{-7} [H]$  となる。銅板の抵抗、Inductance から  $1000 [\mu F], 50 [KV]$  の電源から最高で  $1000 [KA]$  の電流が流れることとなる。

一方、電流を流したときの温度上昇は、次式で表わせる。

$$T = \frac{C}{60} e^{-\frac{t^*}{60}} + 20(1 - e^{-\frac{t^*}{60}}) \quad [^{\circ}C/m]$$

但し、 $C$  は Lead 板に単位 m 当り、単位秒間に上昇する温度である。

すると、 $I = 100 [KA]$  のとき

$$C = 1.5 \times 10^4 [^{\circ}C/m \cdot \text{sec}]$$

$$t^* = 88.2 [\mu s]$$

で、 $T = 0.3 [^{\circ}C/m]$  となる。

又、 $I = 1000 [KA]$  では

$$C = 1.5 \times 10^6 [^{\circ}C/m \cdot \text{sec}]$$

$$t^* = 88.2 [\mu s]$$

で、 $T = 30 [^{\circ}C/m]$  となる。

この計算によると、Pinch coil、電源回路板には、

発熱の問題はないと思われるが、漏洩電流には、注意  
 する必要がある。Lead 導板から Pinch coil に接続  
 される部分は、電流分布をよくするため電流の Lens  
 効果を使った Tab の理論を応用したものである。

以上の如く一部ではあるが設計の概略を示した。実

際は、設計通りにはならないと思われるが、予想とし  
 てこの閉込め装置を使って生成される Plasma は、  
 かなり高温となると考えられ、高温 Plasma の研究  
 に対しては標準的な装置であると思われる。

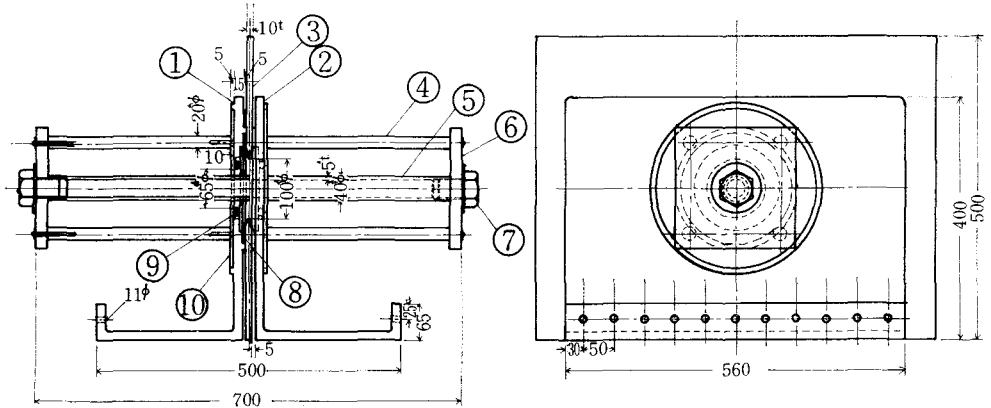


Fig. 6 Discharge switch

1, 2 electrode (CuP) 3 insulator (glass cloth) 4 electrode susponder (mycalex) 5 triggering electrode (SS) 6, 10 insulator (acrilan) 7 bolt (Bs) 8 insulator (silicon rubber) 9 edge of electrode (SS)

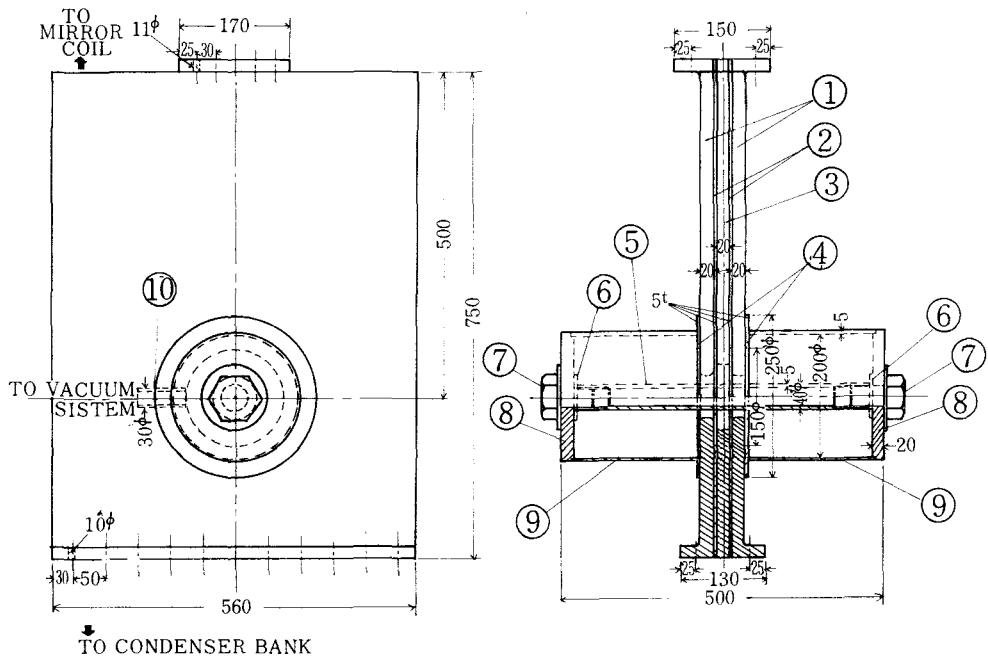
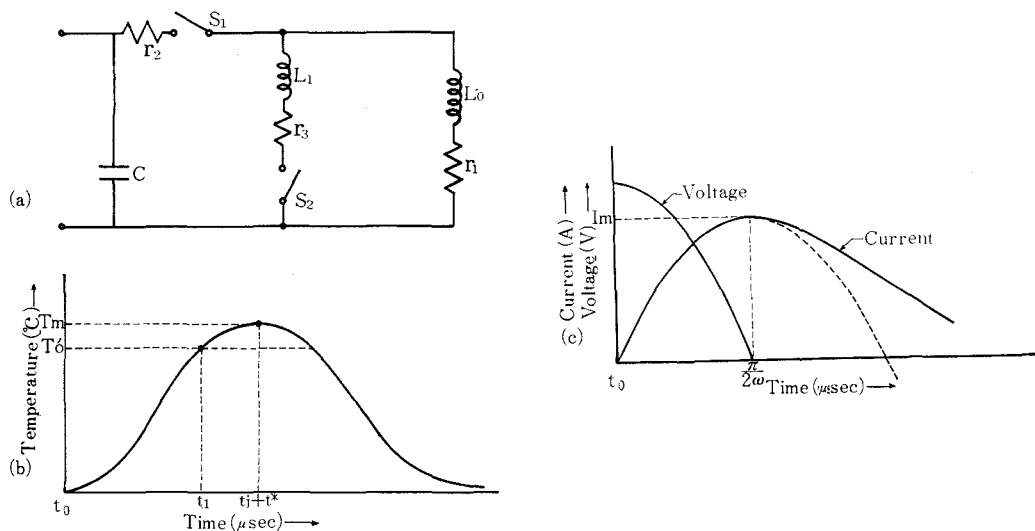
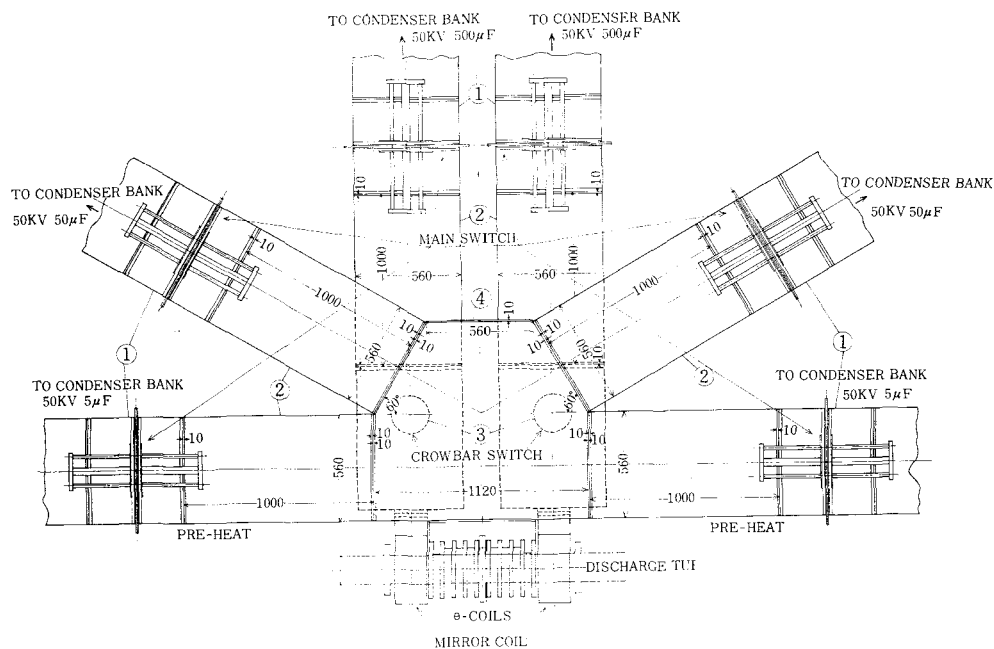


Fig. 7 Crowbar switch

1 conductor sheet (CuP) 2 insulator (butyl rubber) 3 insulator (teflon) 4, 6 seal (butyl rubber)  
 5 toriga (SS) 7 nut (Bs) 8 insulator (acrilan) 9, 10 pipe (acrilan)



**Fig. 8** (a) Circuit diagram for storage and discharge system, (b) Temperature waveform in power supply conductor, (c) Current and voltage waveform in  $\theta$ -pinch coil.



**Fig. 9** Arrangement of power supply conductor

1 main dischang switch (CuP, SS, teflon) 2 copper lead (CuP) 3 crowbar switch (CuP, butyl-Rubber) 4 electrode tab (CuP)

### Ⅲ 結 言

今まで、Plasma 研究の現状を把握すると共に、 $\theta$ -pinch 方式による Plasma 発生装置を設計してきた。設計に際しては、発生磁場強度及び配位等が理論通りにならず又抵抗による発熱等、困難な問題があった。これ等は、装置の製作を行う際に再度検討する必要があると考えられる。今後の方針といえば、まず放電 Plasma 又は、Plasma gun 方式によって発生した Plasma の乱流、Shock、不安定性等を、Probe 及び、CO<sub>2</sub> Laser によって解析し、あわせて装置等の修理、検討を加え、高温 Plasma の解析に向う。

尚、本論文を書くに当って、本学電子工学科榎道義、小田茂樹、及び米田守君に設計図等の複写を手伝っていただいた事に厚く感謝いたします。

### Reference

- 1) T. Ito; 日本原子力学会会誌, **13**, 51 (1971)
- 2) R. Wilhelm; Inst. Plasma Phys., Garching, Report, IPP, 1/87 (1968)
- 3) R. L. Morse and E. J. Stovall, J.; Phys. Fluids, **13**, 2867 (1970)
- 4) K. Goto; “プラズマ物理学”, (共立出版, 1967)
- 5) H. Zwicker und M. Kaufmann; Z. Phys., **180**, 225 (1964)
- 6) H. P. Furth, M. A. Levine and R. W. Waniek; Rev. Sci. Instr., **28**, 949 (1957)
- 7) L. M. Goldman, H. C. Polloch, J. A. Reynolds, and W. F. Westendorf; Rev. Sci. Instr., **33**, 1041 (1962)