

衝撃大電流放電による高温高密度プラズマ生成の基礎研究

Fundamental Investigation of Production of a High-Temperature and High-Density Plasma by Impulsive High Current Discharge

(平成17年9月受理)

山本敏和* (YAMAMOTO Toshikazu)

高橋亜紀生** (TAKAHASHI Akio)

中野兼輔** (NAKANO Kensuke)

綿引順一** (WATAHIKI Junichi)

Abstract

The plasma, which is called the fourth state of the substance, is characterized high temperature and high conductivity. The plasma has been used in many applications such as high current discharge tubes, fluorescent lamps, gas lasers, chemical processing, electrical discharge machining and nuclear fusion research. In early fusion research, high current Z-pinchs were regarded as possible controlled nuclear fusion reactor. However, the magnetohydrodynamic instabilities occurred in the Z-pinch plasma column prevented successful plasma confinement. And other type of the plasma confinement systems such as tokamak system and inertial confinement system had been investigated. The plasma focus device developed as an asymmetric Z-pinch device can produce the high density and high temperature plasma. In recent years, Z-pinch plasmas and focus plasmas are expected as unique sources of X-rays for lithography and X-ray microscopy, for pumping X-ray lasers, for neutron production.

In this work, a plasma focus device was constructed at Fukushima National College of Technology. Optimalization of the discharge condition for the plasma focus device was investigated by using 4 Rogowski coils. The high-temperature and high-density focused plasma was successfully produced at charging voltage of 45 kV and filling gas 10 Torr H₂.

1. はじめに

物質は温度の低い順に固体、液体、気体の状態（物質の3態）をとるが、更に高温になるとイオンと電子に電離してプラズマとなる。このことからプラズマは物質の第4の状態とも呼ばれる。プラズマは、イオンと電子で構成されているため、高い導電性を持つ一方で全体としては中性であり、高温状態にあるという特徴を持っている。プラズマは、高い導電性を利用した大電流放電管、放電に伴う発光を用いた蛍光管等の光源や気体レーザー、高温による化学反応の促進、熱を利用した放電加工等に広く応用されている。また、プラズマ中の核融合反応によるエネルギー源としての応用も研究されている。

プラズマの状態は、電離度の大きさにより弱电離プラズマから完全電離プラズマ、密度の大きさにより低密度プラズマ (10^6 [m⁻³])から超高密度プラズマ (10^{22} [m⁻³])、また温度により低温プラズマ (0.1 [eV]) から高温プラズマ (10^6 [eV]) まで非常に広範囲にわたる。なお、1 [eV] はおよそ 11600 [K] に相当する。

* 福島工業高等専門学校 電気工学科 (いわき市平上荒川字長尾30)

** 福島工業高等専門学校 電気工学科 卒業生

プラズマの人工的な生成法としては、気体放電による気体の電離および加熱が一般的である。プラズマの用途に応じて生成すべきプラズマの電離度、温度、密度があり、それに応じて直流放電、交流放電（低周波、高周波）、衝撃大電流放電が行なわれている。本研究では、高温高密度プラズマの応用研究に着手する手始めとして、作用ガスを選べば極短時間ではあるが核融合反応も起こし得る高温高密度プラズマの生成を目的とした。

核融合に関連するプラズマの研究は第二次世界大戦後にアメリカ、ソ連で始まったが、当初は軍事との関連から非公開であった。1950年代半ば頃から徐々に各国の研究が公開され始め、その他の国々とも国際協力が始まった。当時は高温高密度プラズマを生成するとともに、プラズマと容器壁との接触による熱損失を防ぐためにZピンチ装置が用いられた。この装置の動作原理である「ピンチ効果」、「ピンチ現象」はTonks¹⁾が、アークプラズマ柱に流れる電流により、その周囲に磁界が生じてプラズマが自己収縮することから命名したものである。アメリカ、ソ連ともに重水素ガスを用いた実験の初期段階で、熱核融合反応によると思われる中性子を検出したことから、制御核融合を比較的容易に実現可能と期待したが、詳細な検証の結果、加速された重水素イオンの核反応により中性子が発生していることがわかり、また不安定性の成長によりプラズマの安定した閉じ込めも実現しなかった。その後、高温高密度プラズマを安定に閉じ込める様々な方法の開発研究が進められて現在に至っている。ピンチ装置の発展としては、電流を閉じ込め容器の方位角方向に流す θ ピンチ、プラズマフォーカス、ピンチプラズマのトーラス化などが図られた。現在の核融合プラズマ研究において主流であるトカマク装置やヘリカル装置も、ピンチ装置から発展したのものとも言える。

核融合研究の主流はピンチ装置から離れたが、ピンチ装置は装置の動作原理が簡単であること、比較的小規模な装置でも容易に高温高密度プラズマを生成可能であることから、近年においては次に示すような様々な応用が期待されている。^{2,3)}

- (1) 核融合炉の炉壁材料試験用の中性子源
- (2) 半導体製造工程における高密度リソグラフィのための軟X線、極端紫外線 (EUV) 露光用光源
- (3) X線顕微鏡
- (4) 新材料・物質の合成プロセスへの適用
- (5) ガン治療などの医学分野
- (6) マイクロエレクトロニクス素子の短波長光照射効果
- (7) 軟X線画像技術によるプラズマ診断
- (8) 分光学用光源

軟X線源としては、他にシンクロトロン放射光 (SOR)等の適用も考えられるが、ピンチプラズマの長所は使いやすさと装置のコンパクト性にあり、他の方式では得られない特徴を加えることができる。

2. ピンチ装置

2.1 Zピンチ

Zピンチ装置の概念図を図1に示す。絶縁物でできた放電管に数10 [Pa]の気体を詰め、衝撃放電用コンデンサを充電した後、電極間の低気圧気体中で大電流放電を行うと、まず真空容器である円筒状放電管の内壁に沿って沿面放電が起こりプラズマが生成される。放電電流とそれによって生じた磁界によるローレンツ力のため、中心軸に向かってプラズマは収縮する。衝撃波の通過により、中性粒子はプラズマ層内に入り、電子との衝突による電離、またはイオンと中性粒子間の荷電交換によるイオン化が起こる。したがってプラズマは中性粒子をかき集め、プラズマ化しながら収縮する。電流を閉じ込め容器の軸 (Z軸) 方向に流すことからZピンチと呼ばれている。

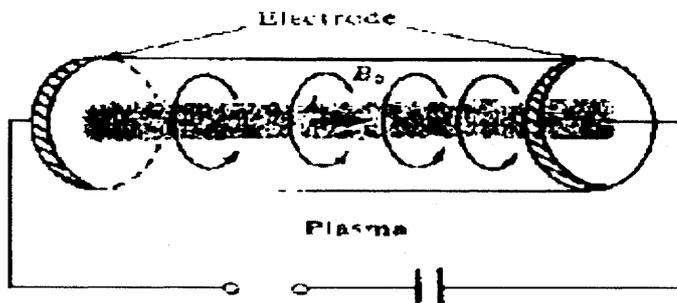


図1 Zピンチ装置の概念図

2. 2 プラズマフォーカス装置

プラズマフォーカス現象は1960年代前半に J. W. Mather⁴⁾, N. V. Filippovら⁵⁾ によって独立に発見された。彼らが用いた特徴的な装置により、プラズマフォーカス装置は Mather型と Filippov型に分けられるが、両者ともに同軸構造非対称Zピンチ装置とも言える。Mather型プラズマフォーカス装置の構造および動作原理を図2に示す。

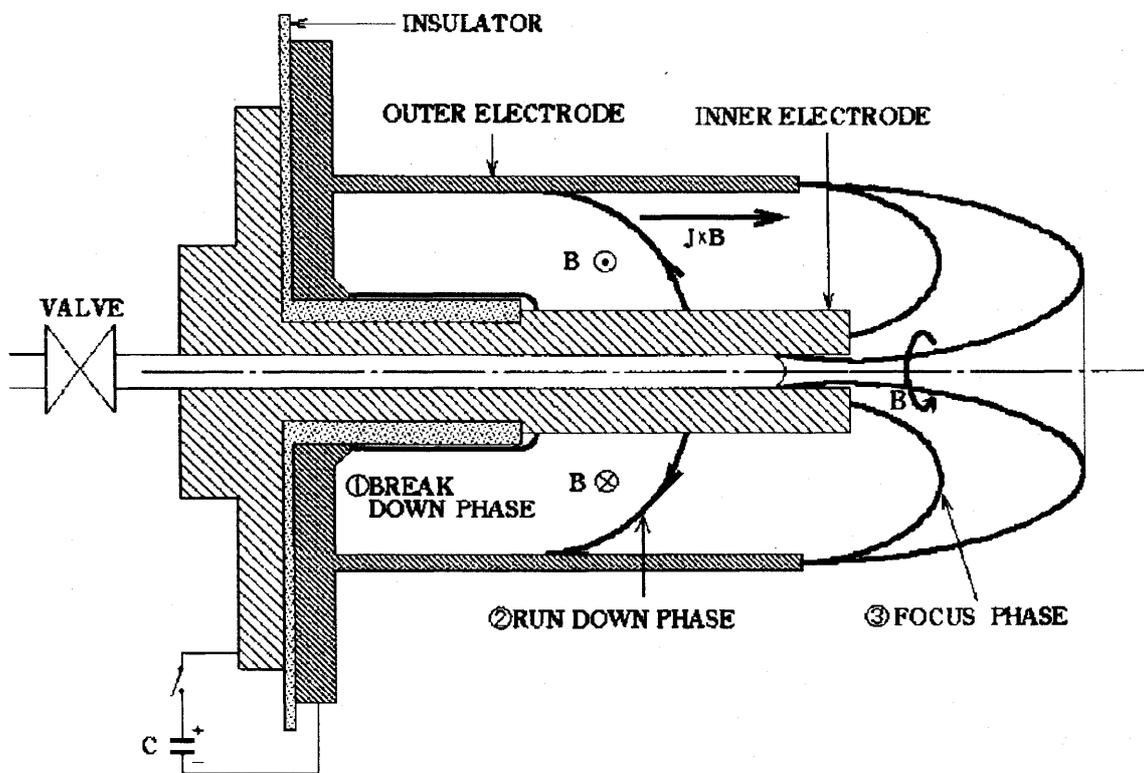


図2 プラズマフォーカス装置の構造および動作原理図

同軸電極間に作用ガスを充填した後、電極間に高電圧を印加すると、まず電極を隔てる円筒状の絶縁物の表面に沿って放電が始まり (Breakdown phase)、次のような経過をたどる。

- (1) 放電電流の増大とともにシート状プラズマが形成される。
- (2) 中心電極の電流による磁界とシート電流との間で働く電磁力 $J \times B$ により、電流シートは電極先端に向かって加速される (Run down phase)。
- (3) 電流シートは電極先端に到達した後、プラズマは軸方向に進行しながら、半径方向では中心軸に向かって自己収縮する (Focus phase)。
- (4) プラズマの内圧によってプラズマが半径方向に膨張し、電磁力と均衡する結果、プラズマ柱と呼ばれる円柱状の形状となる。
- (5) プラズマに不安定性が発生し、それが成長してプラズマ柱の切断および崩壊が起こる。

プラズマフォーカス装置では、上記 (3) の段階で半径方向にピンチを始める時、プラズマはかなりの密度と温度を与えられていることになる。更に、放電電流の最大値とピンチの時刻を一致させるように条件を整えると、非常に立ち上がりの速い電流によるピンチ実験に相当することになり、古典的なZピンチとの大きな違いをもたらす。すなわち、プラズマへのエネルギー転送効率が上がり、強力なピンチが実現できる。フォーカスプラズマの存続時間は、およそ 100 [ns] 程度であるが、プラズマの収縮、膨張、不安定性の成長、崩壊にともない、パルス的に軟X線、硬X線、電子およびイオンビーム、特に充填ガスとして重水素を用いた場合には中性子が発生する^{6,7,8,9)}。

3. 実験装置

3. 1 プラズマフォーカス電極

プラズマフォーカス電極は、同軸状の内部電極および外部電極から成る。プラズマの生成による内部電極の消耗を避け、放電毎のプラズマの再現性を得るために中空内部電極を用意した。外部電極は、円周上に銅製円柱を12本等間隔に設けたリスかご型である。内部電極および外部電極の材料は銅であり、内部電極の底部を覆っているインシュレータは石英ガラスである。

表1 プラズマフォーカス電極の仕様

内部電極外径	35 [mm]
内部電極の長さ	75 [mm]
外部電極内径	80 [mm]
外部電極の長さ	75 [mm]
外部電極の形状	リスかご型
電極材質	銅

3. 2 コンデンサバンクおよびギャップスイッチ

衝撃大電流放電用電源として、公称静電容量 1.0 [μ F]、耐圧 100 [kV] のコンデンサを4個並列接続してコンデンサバンクを構成した。設置したコンデンサ4個の静電容量の実測値は、1.040 [μ F]、1.037 [μ F]、1.047 [μ F]、1.037 [μ F] であった。各コンデンサには、乾燥空気で加圧された3電極スパークギャップスイッチを設けた。図2のような回路においては、放電電流は減衰を伴う正弦波となるので、プラズマへ極短時間にエネルギーを注入するには放電電流の上昇率を高める、すなわち、周波数を高める必要がある。そこで、各コンデンサに設けた1個のギャップスイッチとフォーカス装置を8本の同軸ケーブルで接続し、4組のコンデンサ・ギャップスイッチ・同軸ケーブルの系統をプラズマフォーカス電極の集電板に並列接続することで、回路のインダクタンスを最小とした。

3. 3 実験系統

今回設置したプラズマフォーカス装置、コンデンサバンク、充電電源、トリガー系を含めた実験系統図を図3に示す。図中の電磁弁2つ、エアシリンダー2つはON状態の場合について描かれており、コンデンサバンクを充電する状態になっている。メインギャップおよびコンデンサ ($1 [\mu\text{F}]$) の部分は実際には4つあるが、図が煩雑になるので簡略化して1組を描いてある。なお、本装置では $50 [\text{kV}]$ 程度の高電圧を扱うので、安全確保を第一として、複数のスイッチ ($S1 \sim S4$) をONにしなければ試験変圧器から高電圧が出力されず、 $S1$ をOFFにすれば試験変圧器の出力断およびコンデンサバンクの残留電荷の放電ができる。

コンデンサバンクの充電終了後、 $S4$ をOFF、エアシリンダー2をOFFとして試験用変圧器の二次側をコンデンサバンクから切り離し、 $90[\text{V}]$ キースイッチによりパルス発生器を順次動作させて、コンデンサバンクからプラズマフォーカス電極に衝撃大電流放電を行なう。

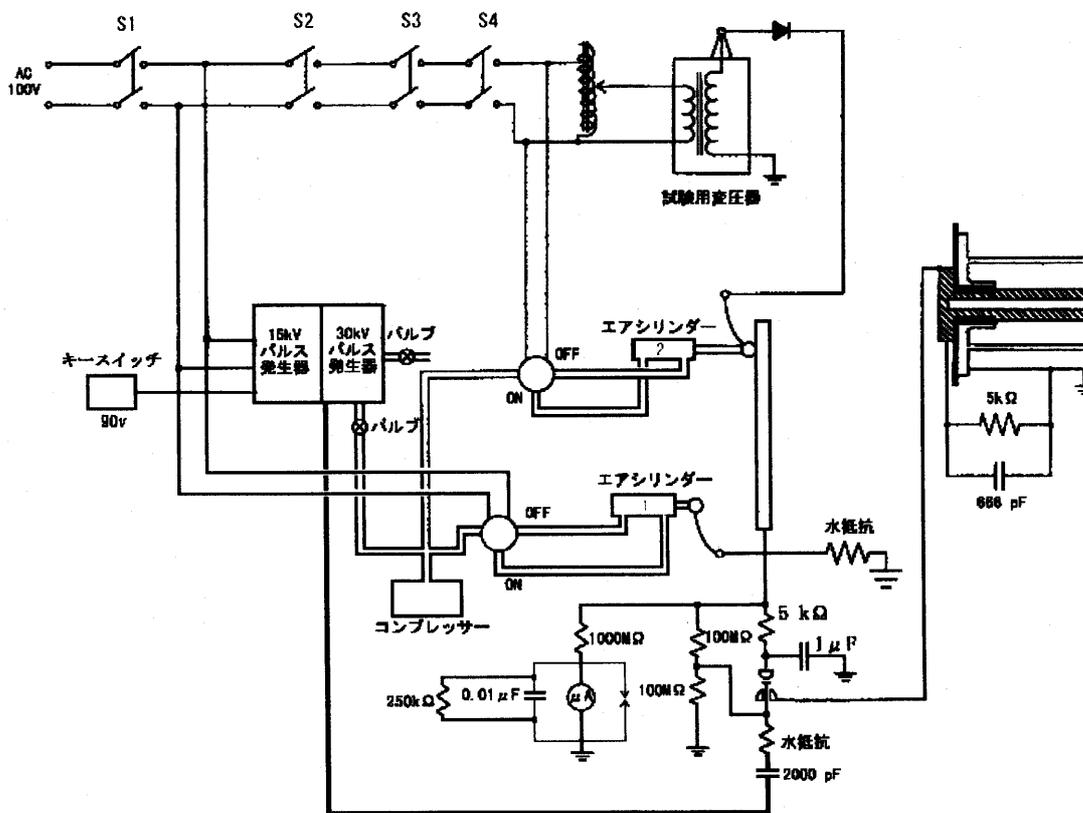


図3 実験系統図

3. 4 作用ガス

本研究室で新たに組み立てたプラズマフォーカス装置においては、作用ガスとして重水素を用いると極短時間であるが核融合反応を起こし、反応生成物として中性子をパルスの発生することも可能である。しかし、可視光から軟X線や硬X線に至る広範囲の電磁波の発生およびその応用について研究するためには必ずしも作用ガスは重水素である必要はない。そこで、組み立てた装置におけるフォーカスプラズマ生成を検証することを第一目的として、水素を作用ガスとして用いた。

4. 計測法

衝撃大電流放電によるプラズマ生成実験においては、基本的に放電電流あるいは電圧の測定、生成されたプラズマの挙動観測が必要である。ここでは、高電圧の測定と比べてより安全である放電電流の測定を行なうと共にプラズマの挙動を可視光によって観測した。衝撃大電流放電では必然的に大きな電氣的ノイズを瞬間的に生じることによる測定系への妨害や破損、大電流放電による各所の金属部の電位変動による人体への危険をさけるために、始動用トリガースイッチ、波形記録用のオシロスコープ等をシールドルームに収め、実験者もシールドルーム内でコンデンサバンクの充電や放電始動の操作を行なった。使用したシールドルームの遮蔽能力の規格は、周波数 250 [kHz] ~ 500 [MHz] において -60 [dB] である。

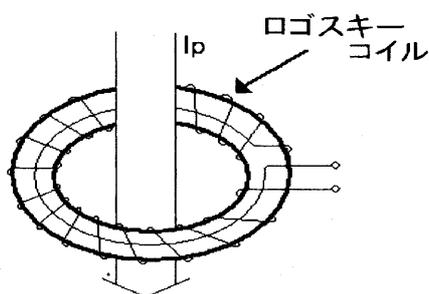
4. 1 全放電電流の測定法

全放電電流の波形観測には下記のような利点を持っているロゴスキーコイルを用いた。ロゴスキーコイルはトロイド状巻棒に一樣なピッチで巻かれたものであり次のような特徴を有する

- (1) 構造が簡単で容易に製作でき安価である。
- (2) 電流が流れている導体に対して非接触で電流測定が可能である。
- (3) 大きさや電流感度の各種のものが容易に製作できる。

また、ロゴスキーコイルはトロイド状巻棒に沿って1巻きコイルをつくと、被測定電流がつくる磁束に直交する磁束（被測定電流と同方向のもの）も検出してしまうので、これをさけるために、巻き戻しを施し、トロイドを貫通する電流のみによる信号を取り出せるようにしている。

図4にロゴスキーコイルによる全放電電流測定概念図を示す。ここで、被測定電流を I_p [A]、ロゴスキーコイルのトロイド状巻棒の半径を R [m]、巻棒に巻いたコイルの1巻の面積を S [m²] とする。 I_p がつくる磁界の強さ H [A/m] はアンペールの周回積分の定理より



$$\oint H dl = I_p \quad (1)$$

$$2\pi RH = I_p \quad (2)$$

$$H = \frac{I_p}{2\pi R} \quad (3)$$

図4 ロゴスキーコイル

コイル1巻の半径に比べて R が十分大きくて、コイル1巻の平面内における磁界の強さがほぼ一定とみなせる場合、磁束密度 B [T]、ロゴスキーコイル (N 巻) の鎖交磁束 ϕ [Wb] は以下ようになる。ここで μ_0 は真空の透磁率 $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] である。

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0}{2\pi R} I_p \quad (4)$$

$$\phi = BNS = \frac{\mu_0}{2\pi R} NSI_p \quad (5)$$

図5に放電電流測定回路を示す。放電電流は減衰を伴う正弦波形となるので放電電流の周波数を f [Hz]、角周波数を $\omega = 2\pi f$ [rad/s] とする。また、ロゴスキーコイルとCR積分器の間は同軸ケーブルで結ぶので、信号の反射による波形のひずみを防ぐため、ロゴスキーコイルの出力インピーダンスおよび同軸ケーブルの終端抵抗 R [Ω]、同軸ケーブルの特性インピーダンス Z [Ω] を等しくした。

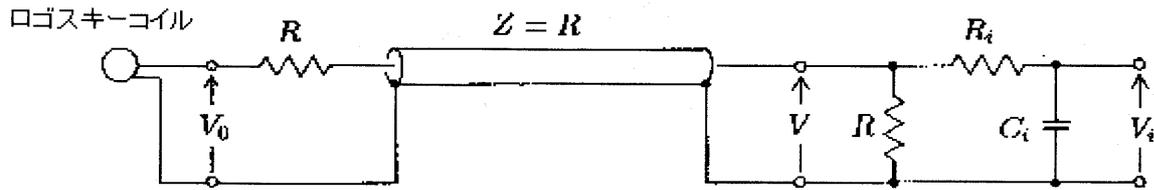


図5 放電電流測定回路

被測定電流 I_0 によるロゴスキーコイルの出力電圧 V_0 と CR 積分器の入力電圧 V は次式で表わされる。

$$V_0 = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 NS}{2\pi R} \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

$$V = \frac{1}{2} V_0 = \frac{\mu_0 NS}{4\pi R} \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

上式より、 V は I_0 の微分値に比例するので、これを積分することにより放電電流としてオシロスコープで観測することができる。したがって、図5の V_i により放電電流を観測することができる。ここで、CR積分器の入力電圧 V を交流信号としたときの出力電圧 V_i は

$$V_i = \frac{V}{1 + j\omega C_i R_i} \quad (8)$$

となるので、 $\omega C_i R_i \gg 1$ の条件のもとに積分する必要がある。この条件を満たしているとき、

$$V_i = \frac{\mu_0 NS}{4\pi R} K I_p \quad (9)$$

$$I_p = \frac{4\pi R}{\mu_0 NS K} V_i \quad (10)$$

となるので、放電電流波形をオシロスコープで観測できる。ロゴスキーコイルで測定している放電電流 I_p は、フォーカス装置とコンデンサ間を結ぶ32本の同軸ケーブルのうちの1本に流れる電流であるので、全放電電流 I_z を求める場合は I_p を32倍する。

プラズマフォーカス装置において、充電電圧 V_c 、コンデンサ C_0 に蓄えられた静電エネルギーと回路のインダクタンス L_c に蓄えられた磁気エネルギーとが時間的に交互に変換されるとすると、放電前の静電エネルギーと電流のピーク時の磁気エネルギーが等しくなる。最大電流値を I_0 とすると、

$$\frac{1}{2} C_0 V_c^2 = \frac{1}{2} L_c I_0^2 \quad (11)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{C_0}{L_c}} V_c = \sqrt{\frac{C_0^2}{L_c C_0}} V_c = \frac{1}{\sqrt{L_c C_0}} C_0 V_c \quad (12)$$

となる。ここで、 L_c と C_0 の共振周波数 f およびその角周波数 ω はそれぞれ次式で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_0}} \quad (13)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_c C_0}} \quad (14)$$

$$I_0 = \omega C_0 V_c \quad (15)$$

I_0 は回路の抵抗を無視した場合のピーク電流値であるが、実際には有限の抵抗があるので、放電電流は減衰する。そこで実際に放電電流を記録してその包絡線を取り、放電開始時刻の縦軸と交わる点の電流値を求めると、それが I_0 である。よって、 I_0 とそれに対応する電圧とから定数Kが求められる。以上により、放電電流の瞬時値を評価できる。

5. 実験結果

5. 1 ログスキーコイルおよび積分器による電流測定系の較正

プラズマフォーカス放電電流値を知るためには、製作したログスキーコイルおよび積分器からなる電流測定系(4組)の較正を行なう必要がある。そこで、1個のコンデンサに取り付けたギャップスイッチのリターン電流ポスト(8本)の内の1本に、ログスキーコイル1個を取り付けて図5の測定系の出力をオシロスコープで記録した。なお、プラズマを生成させずに放電電流を電極に集中させるため、フォーカス電極先端をショートして実験を行なった。コンデンサバンクの充電電圧は 40 [kV]としたので、 $I_0=84.3$ [kA] である。放電電流波形から得た周期 $T=3.1$ [μ s]、および I_0 に相当する振幅500 [mV] より、オシロスコープ画面上に表示される電流信号の振幅 1 [mV] が 169 [A] に相当する。

5. 2 フォーカスプラズマ生成実験

フォーカスプラズマを生成するには、4個のギャップスイッチが同時に導通する必要がある。そこで、各ギャップスイッチの機械的な整備、乾燥空気による加圧調整、複数回の放電による電極のコンディショニングの後、本実験を行なった。コンデンサバンク充電電圧 40 [kV]、水素ガス 9 [Torr] での放電電流波形を図6に示す。この波形においては、ギャップスイッチの導通開始時刻が約 100 [ns] の時間内にばらついているが、放電電流の第一ピーク付近にディップが現われている。これは、電極先端においてプラズマがピンチした事を示している。

ギャップスイッチ4個の動作が完全に同期すればより良いピンチが期待できるので、コンデンサバンクの充電電圧を高め、ギャップスイッチのジッターを減らすことにした。一方、充電電圧を上げると、放電電流が増加してプラズマを電極軸方向に駆動する電磁力がより強くなり、電流が最大値に達する前にピンチが始まると予想される。そこで、駆動されるプラズマの質量を増すため充填圧力を上げた。このような操作により動作条件の最適化を図った。例として、充電電圧 45 [kV]、水素ガス 10 [Torr] での実験結果を図7に示す。図7では4個のギャップが同時に導通し、電流の最大値付近においてディップがより顕著に現われている。

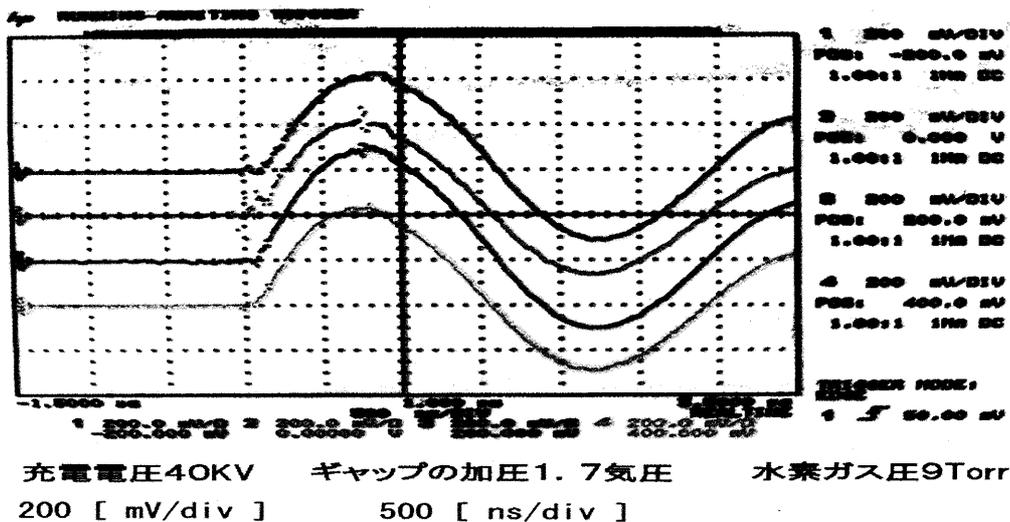


図6 コンデンサ4個の放電電流波形 (40kV, 9Torr H₂)

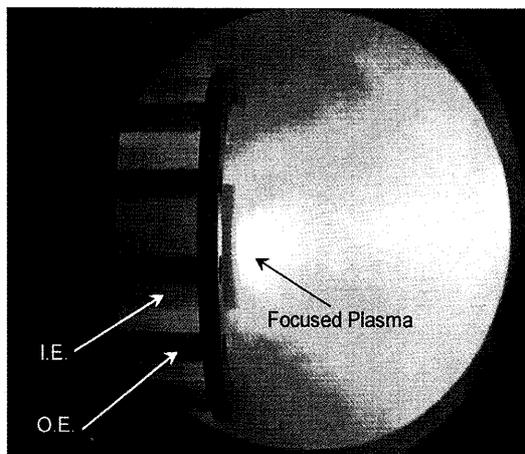
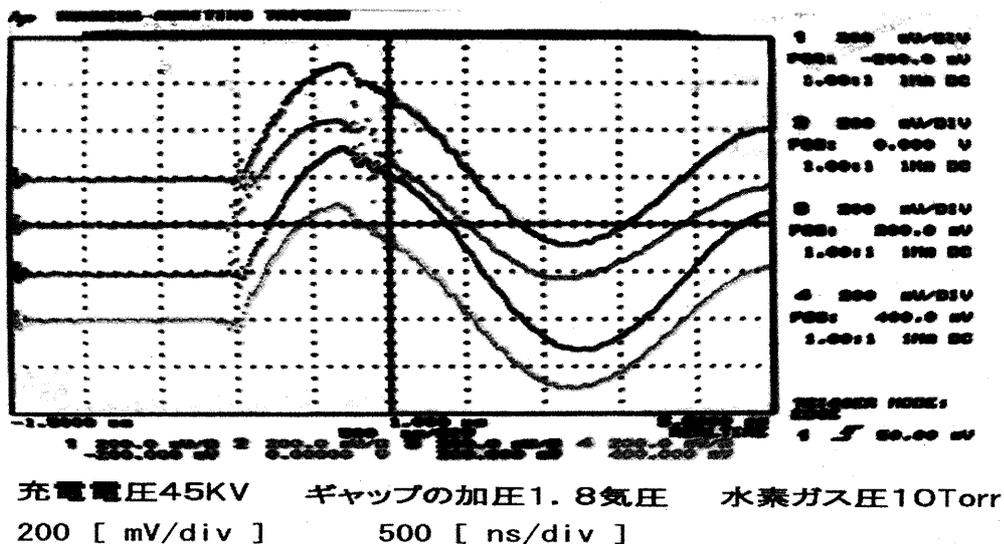


図7 コンデンサ4個の放電電流波形およびプラズマの時間積分写真 (45 kV, 10 Torr H₂)

I.E. : 内部電極、O.E. : リスカゴ型外部電極。

充電電圧 40 [kV] および 45 [kV] での放電電流波形におけるパラメータを表2に示す。

表2 コンデンサバンク充電電圧40 [kV]、45 [kV] での放電電流パラメータ

	充電電圧 [kV]	
	40	45
V_p [mV]	425	480
I_p [kA]	287.32	324.48
T_b [ns]	100	100
V_b [mV]	50	80
I_b [kA]	33.8	54.1

V_p ; コンデンサ1個の放電電流信号波形のピーク電圧値

I_p ; プラズマフォーカス装置に流れ込むピーク電流値 $I_p=169 \times V_p \times 4$

T_b ; ディップの時間幅 V_b ; ディップによる電圧降下値 I_b ; ディップによる電流減少値

放電波形には明らかにディップが見られ、実際の I_p に対する I_b の割合を計算すると充電電圧 40 [kV]のとき、12 [%]、45 [kV]のとき 17 [%]という顕著な電流減少が見られた。プラズマのインダクタンスは、(プラズマの軸方向の長さ) \times (1 n (電流の帰路の半径/プラズマ柱の半径)) に比例するので、放電電流に生じたディップはプラズマの急激なピンチによって放電回路のインピーダンスが急激に増加した結果である。また、ディップの時間幅はピンチの始まりからプラズマの崩壊までの時間に相当するので、本実験で生成されたフォーカスプラズマの存続時間は 100 [ns] 以下である。

6. まとめ

新たにプラズマフォーカス装置 (プラズマフォーカス電極、コンデンサバンク、充放電系、ギャップスイッチおよびトリガー系、真空系) と測定系 (シールドルーム、ログスキーコイル4系統) を設置し、安全かつ正常に運転する事ができた。また、コンデンサ4個で構成されるコンデンサバンクの放電電流をログスキーコイル4系統でモニターすることにより、メインギャップスイッチ4個の同期動作および放電条件の最適化が達成された。その結果、高温高密度プラズマを生成することができた。本装置は今後のプラズマ応用研究に役立つものと期待される。

謝辞

本研究を行なうに当たり御指導ならびに、プラズマフォーカス装置設置のためのコンデンサバンク、真空機器、シールドルーム等の資材を管理換えして下さいました群馬大学工学部電気電子工学科 平野克己教授に心より感謝申し上げます。また、同学科の下田勝二技官には資材搬出、技術支援を頂きました事に感謝申し上げます。また、装置の設置に尽力をして下さった山本研究室の卒研各位に感謝致します。

参考文献

- (1) L. Tonks : Phys. Rev. **56** 360.
- (2) 横山昌弘 : 「プラズマ理工学～大電流プラズマ現象とその応用～」 日刊工業新聞社 (1988) .
- (3) S. Katsuki, T. Sakugawa, T. Namihira and H. Akiyama : Z-Pinch Discharge Plasma Based EUV Sources, J. Plasma Fusion Res. **81** (2005) 231.
- (3) J. W. Mather : Phys. Fluids, Supple **7** (1964) S28.
- (4) N. V. Filippov, T. I. Filippova and V. P. Vinogradov: Nucl. Fusion Suppl. Pt. 2 (1962) 577.
- (6) H. Kitaoka, A. Sakurai, T. Yamamoto, K. Shimoda and K. Hirano : Enhanced Soft X-Ray Emission in a Plasma Focus with Additional High Z Gas Puff, J. Phys. Soc. Jpn, **64** (1995) 4191.

- (7) K. Hirano, K. Asami, M. Shindo and T. Yamamoto : Time-Resolved Electron Energy Analyzer, Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) 2903.
- (8) K. Hirano, T. Yamamoto, K. Shimoda and H. Nakajima : Production of a Highly Ionized Ion Beam by a Plasma Focus, J. Phys. Soc. Jpn. **58** (1989) 3591.
- (9) T. Yamamoto, K. Shimoda, K. Kobayashi and K. Hirano : Correlation between Plasma Dynamics and Emission of Deuteron Beam, X-Rays and Neutrons in a Plasma Focus Discharge, Jpn. J. Appl. Phys. **23** (1984) 242.