UDC 533.9.07

論文

54-A 45

高ベータピンチ実験のための残存磁界のないトロイダル予備加熱プラズマの生成

正員 池田 長 康 (電 総 研)

正員 長 田 昭 義 (名古屋大)

非会員 田 丸 健 (電 総 研)

1. ま え が き

高ベータピンチ実験における予備加熱を考える場合、まず予備加熱プラズマを生成し、加熱する段階とこれに続く主放電が行なわれるまでの間、このプラズマの主放電のための条件を整える段階とに分けて考えるのがよりわかりやすいのではないと思われる。前者の段階を予備加熱プラズマ生成準備段階と呼び、後者を主放電のための初期条件整備段階と呼ぶことにする。予備加熱プラズマの生成準備段階については大電流放電開始特性を中心に生成加熱過程を調べ、前報⁽¹⁾において報告した。次の初期条件整備段階では物理的な要請からくる種々の条件を満たさなければならない。しかし高ベータピンチ実験では、一般に予備加熱プラズマに対し、(1)電離度が十分高い、(2)温度が十分高い、(3)不純物が少なく指定の密度に制御されている、(4)残存磁界がない、(5)電離度、温度、密度が空間的に十分一様である、という条件が満たされれば一応主放電の初期条件が整えられたことになるであろうと考えられる。しかし、これらの条件をすべて一度に整えることは難しく、これらの条件の重要性を主放電後のプラズマの振舞や性質の観点から一つ一つ調べる必要がある。

Formation of Toroidal Pre-Heat Plasma without Residual Magnetic Field for High- β Pinch Experiments. By Nagayasu Ikeda, Member (Electrotechnical Lab., Ministry of International Trade and Industry), Akiyoshi Nagata, Member (Institute of Plasma Physics, Nagoya University) & Takeshi Tamaru. Non-member (Electrotechnical Lab., Ministry of International Trade and Industry).

池田長康：正員，電子技術総合研究所
長田昭義：正員，名古屋大学プラズマ研究所
田丸 健：非会員，電子技術総合研究所

この研究は、まず(4)の条件である残存磁界について実験的に詳しく調べた。ここでは残存磁界を、主放電プラズマを生成する時点における予備加熱プラズマの内部およびその周辺に残っている磁界のことを指すことにする。しかし、比較のためもう少し広い意味にとり、予備加熱プラズマを生成しない場合でも同じ時点での放電管内部磁界を、真空中での残存磁界と呼ぶことにする。従来の予備加熱では、プラズマが生成された時点においてはまだ外部一次振動電流が減衰していないため、半周期ごとにピンチし、器壁へドリフトをし、そして膨張という過程を繰返しており、器壁からの不純物の混入は避けられない。従って、この振動電流が減衰しない前に主放電を行なえば、この電流による磁界が予備加熱プラズマの中に残っており、主放電に際しても閉じ込め磁界を乱し、主放電プラズマの閉じ込めに極めて悪い影響を及ぼす⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。これを避けるため、予備加熱電流が十分に減衰するまで時間を取る必要があり、せっかく生成した高温高密度の予備加熱プラズマも拡散し、アフターグローの状態となり、この低温低密度のプラズマで主放電を行なうという効率の悪い予備加熱となる。これを改めるには十分プラズマ電流が成長し、プラズマの温度が上り、しかもまだ不純物の混入が始まらない時点で積極的に予備加熱用電流をさい断し、残存磁界のない予備加熱プラズマを作り、これを主放電のための初期条件プラズマとすれば良いのではないかと考えられる。

この研究では、まず電流さい断の方法と実験回路と測定法について述べ、次にさい断しない場合とした場合の磁界の比や電流比を、予備加熱プラズマを発生させない場合と発生させた場合のそれぞれにつき調べ、

C_0 : トロイダル磁界用コイル, C_z : 予備加熱用 z コイル, C_l : $l=1$ ヘルカルコイル, P_L : トーラス状プラズマ, t_u : トロイダル放電管, I_z : 予備加熱回路の一次電流, I_p : 同二次プラズマ電流, S_L : 一周電圧測定用ループ

(a) 実験装置の概念図

(a) Schematic diagram of experimental apparatus

C_0, C_2, C_l, P_L は (a) 図と同じ, SW は各回路の始動スイッチ, SW_1, SW_2 : さい断用スイッチ, R_c : 電流減衰用抵抗, C : 予備加熱回路キャパシタ

(b) 実験装置の電源回路図

(b) Whole experimental circuits for pre-heat with current chopping.

第 1 図

Fig. 1.

終わりにそれぞれの場合の主放電におけるプラズマの影響について調べた。

2. 実験装置および予備加熱プラズマ電流 さい断方法

〈2・1〉 実験装置 我々は小形のトロイダルピンチ装置を用いて、ヘリカルな磁気軸をもつ立体磁気軸系磁界配位⁽²⁾におけるプラズマの平衡と安定性を調べている。この装置は第1図(a)にコイル部の概念図を示すように、トロイダルコイル C_0 がトロイダル面に対し交互に 10 mm だけ上下した位置に配置されており、これにより磁気軸を上下に振っている。また、 $l=1$ ヘリカルコイル C_l を用いてこの軸を主半径方向にも振っている。これらの両コイルが互いに 90° 位相がずれているため、ヘリカルな磁気軸を形成している。このトロイダル方向のヘリカル磁気軸の周期は 24 である。予備加熱用コイル C_* (以後 z コイルと呼ぶ)

第 1 表 装置の特性パラメータ

Table 1. Characteristic parameters of the apparatus.

(a) 幾何学的パラメータ

放電管	大半径 (mm)	250
	小半径 (mm)	25
トロイダル方向ヘリカル磁気軸の周期数		24
波形磁界のコイル軸の振幅 (mm)		10

(b) 電気的パラメータ			
	予備加熱	主磁界	$l=1$ 磁界
電圧 (kV)	30	30	30
静電容量 (μF)	8.8	79.2	35.2
エネルギー (kJ)	4	36	16
PFN の段数	—	3	4
パルス幅 (μs)	—	12.5	11
電流 (kA)	80	359.2 (25 kV)	4.6 (20 kV)
上り時間 (μs)	1.8	3	2
磁界 (kG)	—	4.5 (25 kV)	—

はトロイダルコイルのふところ、トランスの内部に放電管 t_d と同心円状に配備された空心コイルである。このコイルにトロイダル方向に一次電流 I_s が流れると、放電管中のガス（この実験ではヘリウムガス）の放電開始により二次回路としてのプラズマ P_L が発生し、この中にプラズマ電流 I_p が流れ、予備加熱プラズマが生成される。図中の SL は2本のトロイダル方向の電界測定用ワンターンループである。トロイダルコイル、 $l=1$ ヘリカルコイルへの主放電電流源としては、パルス成形回路（PFN 回路）を用い台形波形の電流を放電し、電流の減衰、リップルなどによるプラズマへの悪影響を除いている。この装置の電源回路図を第1図（b）に示す。同図において SW は各回路の始動スイッチを示し、 SW_1 、 SW_2 、 R_c および C はそれぞれ電流さい断回路をもつ予備加熱回路におけるさい断用スイッチと抵抗と電源キャパシタである。第1表にはこの装置の各種パラメータを示す。

〈2・2〉 予備加熱プラズマの電流さい断方法 プ

ラズマ電流をさい断し零にするには、原理的には符号が逆で同じ大きさ、同じ波形の電流を重ね合せれば良い。しかし、この方法はプラズマの効果も考えなければならず技術的にはかなり難しいと予想される。従って、我々は別の方法として、一次電流の制御を通して二次プラズマ電流を制御することを考え、一次電流をできるだけ速く短絡することによりプラズマ電流をさい断する方法をとった。この回路は第1図(b)に示したように、一次コイル C_1 に並列に抵抗 R をもつ短絡回路と電源キャパシタ C に並列にそう入された短絡回路が付加されている回路となっている。前者の短絡回路はスイッチ SW_2 で負荷コイル電流 I_L を短絡し、抵抗で急激に減少させる。同時に、後者の可能な限り小さなインダクタンスで構成されたスイッチ

SW_1 : 電流さい断用スイッチ, E_H, E_E : 高電圧側および接地側主電極, E_{IH}, E_{IE} : 高電圧側および接地側電極それぞれにそう入されている始動用電極, C_H, C_E : 正および負の始動用キャパシタ, SW_2 : 始動用パルスの始動スイッチ, g_1 : 電圧デイカップリングギャップ, +H.V., -H.V.: 正, 負高電圧線, H.V.L.: 高電圧側線

第 2 図 電流さい断用スイッチ回路図

Fig. 2. Schematic diagram of switch for current chopping.

SW_1 を同時に短絡し、キャパシタの残留電荷が負荷に流れ込まないように考慮した。短絡回路のスイッチ SW_1, SW_2 ⁽³⁾ は、第 2 図に示すような回路からなるクローバスイッチを用いている。すなわち、 SW_1 の両主電極にそう入されている始動用電極 E_{IH} と E_{IE} にそれぞれ高電圧の正および負のパルスを同時に印加し、主電極間 ($E_H E_E$ 間) を導通にする放電路形成形始動方式を用いており、広い動作範囲をもつのが特徴である。同図において、 SW_1, C_H, C_E と g_1 はそれぞれ始動パルス発生回路の始動スイッチ、高電圧正および負パルス発生用キャパシタとデイカップリングギャップである。特に第 1 図 (b) の SW_2 は、環状上下一対の電極 (直径 49 cm) に四対の高電圧正負トリガパルスを印加し、マルチプルアーク状態で動作させている。

3. 測定方法

前報⁽¹⁾と同様、磁気プローブによる磁界の測定、1 ターンループによるトロイダル方向 1 周電圧の測定のほか、新たにログスキーコイルによるプラズマ電流および光学的測定としてイメージコンバータカメラを用いて観測した。

〈3・1〉 磁気的測定 一次電流さい断後の残存磁界、残存電界および残存電流をそれぞれ磁気プローブ、1 ターンループとログスキーコイルで測定した。磁気プローブは心線直径 0.16 mm のテフロン被覆電線 (外径 0.4 mm) を直径 3 mm のボビンに 4 回巻き付けたコイルを、外径 6 mm のガラス管にそう入したものである。信号引出し線はすべて丹念によった線に編組線をかぶせ、雑音を除去した。このようにして取り出した信号を積分器を通し、差動増幅器を用いて測定した。

次に、放電管小断面中心に沿ってトロイダル方向の電界を調べるため、第 1 図 (a) に示す 2 本のループ SL が放電管の内周と外周にそれぞれ赤道面上に巻か

れており、これらに発生する電圧の平均を 1 周電圧とした。これよりトロイダル方向電界を求めた。

残存電流を測定するのにログスキーコイルを用いた。このコイルはテフロン線 (外径 0.9 mm, 心線径 0.45 mm) に外径 0.4 mm のテフロン線を 80 回 200 mm の長さに巻き、巻き付けられた中心のテフロン線の心線を通して巻きもどししているものである。このコイルはテフロン管に入れられ、絶縁耐圧が高められている。そして全く同じコイルを一対にして用い誘導を除去している。

残存磁界が主放電プラズマにどのような振舞をさせるかは興味あるところであり、光学的な観測をイメージコンバータカメラを用いて行なった。プラズマ柱の主半径方向と上下方向の振舞を同時に観測するため、3 枚の平面鏡を用い光路差をなくした光学系を用いた。

4. 予備加熱プラズマの電流さい断特性

トロイダル予備加熱プラズマの一次電流をさい断し、種々の実験パラメータ、すなわち電流さい断時点、予備加熱プラズマが存在しない場合と存在する場合などについて残存磁界、残存電流の大きさを調べ、更に予備加熱プラズマおよび主放電プラズマの振舞についても詳細に調べた。

予備加熱回路はいわゆる π 放電であるため、磁界はポロイダル磁界のみである。この磁界を測定する際、放電管内 10 mm の位置に設けられた磁気プローブの積分信号をもって、便宜的に放電管小断面中心付近のポロイダル磁界とみなすことにする。予備加熱プラズマが存在しない場合、プローブで測定したこの磁界はトラス中心から 25 cm, π コイルから 10 cm とそれぞれ離れている。従って、小断面中心とプローブ位置による誤差は 20% 程度となる。一方、予備加熱プラズマが存在する場合、このポロイダル磁界はプローブとプラズマ電流の相対位置により大きく異なる。しかし一次電流をさい断した後では、発生した予備加熱プラズマの温度も低く高々 1 eV 程度であり、外部磁界も拡散により $1 \mu s$ 以下でこのプラズマの中心まで入り、プラズマ内外の磁界はほぼ一様とみなすことができる。しかし、必ずしも放電管中心磁界を測定しているとは言えないので、この実験では相対値を調べた。すなわち、磁気プローブの位置での電流をさい断しないときのポロイダル磁界 $B_{\pi 0}$ とさい断したときのポロイダル磁界 $B_{\pi h}$ の相対的大きさ (これを残存磁界の比と呼ぶことにする) を調べた。

〈4・1〉 残存磁界のさい断時点依存性 まず予備

B_{no} : さい断しない場合の磁界, B_{ch} : さい断した場合の磁界, 添字 V はプラズマを生成しない場合を示す。
○印および ●印はさい断後, 第二半波および $50 \mu s$ 前後における B_{ch}/B_{no} 比を表わす。

第3図 残存磁界のさい断時点 t_{ch} の依存性

Fig. 3. Dependence of the chopping time t_{ch} on residual magnetic field.

的な実験として, 第1図(b)におけるスイッチ SW_1 のみによるさい断を行ない, さい断時点の依存性を調べた。予備加熱プラズマを生成しないでキャパシタ充電電圧を $20 kV$ に固定し, さい断時間を変数として残存ポロイダル磁界の比 B_{ch}/B_{no} を調べた。これを第3図に示す。同図において, ●印はさい断後のリップル波の第二半波におけるそれぞれの信号の最大振幅の比である。○印は同様に, 電流さい断後 $50 \mu s$ 前後におけるリップル波の最大振幅の比である。これらの予備実験からさい断時点がクローバモードよりダイバートモードのほうが少ない残存磁界となることが明らかとなった。

〈4・2〉 残存ポロイダル磁界へのさい断の効果

前節の予備実験において電流さい断が不完全であることがわかり, これをより正確に行なうためスイッチ SW_1 のほかスイッチ SW_2 と抵抗 R_c ($\sim 1 \Omega$) をそう入し, 残存ポロイダル磁界の減少を図った。以後, 「さい断」と言う場合にはスイッチ SW_1 および SW_2 の両方を用いたさい断を指すものとする。さい断動作モードとしては予備実験で明らかとなった各半周期ごとのダイバートモードを用い, 予備加熱プラズマを生成しない場合と生成した場合につき残存磁界の比を求めた。

(1) 予備加熱プラズマを生成しない場合の残存ポロイダル磁界 予備加熱プラズマを生成しない場合, 一次電流さい断によりいかに残存ポロイダル磁界が減少するかを各半周期をさい断パラメータとして測定した。この結果を第4図(a)(b)に示す。(a)図は測定波形例で, (I)はさい断なしの場合, (II)は第

(I)および(II)はそれぞれさい断しない場合, 第三半波でさい断した場合である。 t_{ch} : さい断時点, V_{ph} : $20 kV$, V_{ch} : $25 kV$

(a) プラズマを生成しない場合のポロイダル磁界波形一例
(a) Examples of wave form of poloidal magnetic field in vacuum.

図中の序数はそれぞれの半波でさい断した場合を示す。no chop: さい断しない場合の残存磁界の減衰率, 添字 V はプラズマを生成しない場合を示す。

(b) プラズマを生成しない場合の残存ポロイダル磁界の減衰率
(b) The ratio of poloidal residual magnetic field in vacuum.

第4図

Fig. 4.

三半波直後さい断の場合の磁気プローブ積分波形である。(b)図は各半波でさい断を行なったとき, 残存ポロイダル磁界の減衰率, すなわちさい断を行なわない場合の各半波ごとの磁界の, 最大振幅 B_{no} に対するさい断後のその半波における残存磁界の最大振幅 B_{ch} の比を示す。ここで, 予備加熱プラズマを作らない場合と作った場合とを区別するため, これらの比にそれぞれ V と p の添字を付けることにする。これから, さい断しなければ $60 \mu s$ 後でも初期磁界の $\sim 50\%$ と残存磁界は大きい。これに対して, さい断すれば第三半波さい断のとき $50 \mu s$ 後には $\sim 4\%$ と著しく減少している。さい断前の初期磁界に比べれば更に半分の 2% となる。同図には他の半波でのさい断による減衰率も示しているが, 大体同じ傾向ではほぼ同じ値に収まっ

(I)および(II)はさい断しない場合、第三半波さい断の場合をそれぞれ示す。 t_{ch} : さい断時点, p : 60 mTorr, ヘリウムガス

(a) プラズマ生成時におけるポロイダル磁界波形の一例
(a) Examples of wave form poloidal magnetic field at plasma formation.

添字 p はプラズマ生成の場合を示す。
3rd-chop- p , 4th-chop- p はそれぞれ第三半波, 第四半波でのさい断の場合を示す。3rd-chop- V , 4th-chop- V はそれぞれプラズマを生成しない場合で対応する場合を比較のために示す。

(b) プラズマ生成時における残存ポロイダル磁界の減衰率
(b) The ratio of poloidal residual magnetic field at plasma formation.

第5図

Fig. 5.

ている。そして、より後の半波でのさい断のほうが残存磁界が小さくなっている。なお、第五半波さい断の場合、さい断用スイッチの動作が不確実なためデータにばらつきが生じた。

(2) 予備加熱プラズマ生成後の残存ポロイダル磁界 第5図(a)に、ヘリウムガス(初期圧 $p=60$ mTorr)を用いて予備加熱プラズマを生成した場合の波形例を示す。(I)はさい断しない場合、(II)は第三半波でさい断した場合でそれぞれの磁気プローブ積分波形である。同図(b)は第4図(b)と同様に、残存ポロイダル磁界の減衰率を示す。ここで各半波ごと

I_p , I_{pch} はそれぞれさい断しない場合およびした場合のプラズマ電流, no chop: さい断しない場合, 図中の序数はそれぞれの半波でさい断した場合を示す

第6図 さい断によるプラズマ電流の残存減衰率

Fig. 6. The ratio of residual plasma current with the current chopping.

の最大振幅は各半波の両端に現われる2個のピークの平均をとり最大振幅としている。また同図にはプラズマを生成しない場合も比較のためのせてある。この図からわかるように、予備加熱プラズマを作らない場合の残存磁界の減衰率より更に良い減衰率を示している。しかし、これは各半波ごとに現われる急激なスパイク状波形の波高値が大きいため、数値が小さくなったとも考えられる。これらのピークについては更に詳しく調べなければならないが、プラズマの不安定性とドリフトによるものと推察される。このように、プローブ信号はプラズマの動きに敏感なため、プラズマを生成しない場合の残存磁界と直接比較するには問題がある。しかし、大体の目安は得られるであろう。

〈4・3〉 残存電流へのさい断の効果 前節(2)項と同じ条件で予備加熱プラズマの電流波形 I_p をログスキークoilで測定した。この波形の一例を第8図(b), (d)に、さい断しない場合と第三半波さい断の場合のそれぞれについて示す。第6図には、これに対応した、さい断しない場合の各半波ごとにおける I_p の最大振幅に対するさい断後の電流 I_{pch} のその半波における最大振幅の比の絶対値、すなわち電流減衰率を示す。残存電流は、予備加熱プラズマを生成しない場合のさい断時における残存ポロイダル磁界と同じ傾向でほぼ同じ値を示し、さい断後急激に10%程度まで減少し、以後10~15μsで数%にまで更に減少する。

このように、一次電流を急激に減少させることによ

(a)および(b)図はそれぞれさい断しない場合および第三半波さい断の場合を示す, p : 60 mTorr, ヘリウムガス, SS は衝撃波波形を示す。

第 7 図 プラズマ生成時における主トロイダル磁界の波形例

Fig. 7. Examples of wave forms of toroidal main field at the presence of plasma.

りプラズマ二次電流を $5 \mu\text{s}$ 程度の時間で急速に減衰させることができ, 残存磁界を非常に効果的に制御し減衰させることが可能であることが明らかとなった。

〈4・4〉 さい断の主放電トロイダル磁界への影響

この実験では〈2・1〉節で述べたように, 予備加熱プラズマをはしご形回路で構成された電源を用いた主放電でシートピンチを行なっている。この電流の立上り部分でより高温, 高密度の主放電プラズマを加熱生成し, 平坦部でこのプラズマを閉じ込めている。第 7 図(a), (b)は, さい断しない場合と行なった場合それぞれについて, ヘリウムガス 60 mTorr における主放電プラズマ生成時の放電管中心部におけるトロイダル磁界波形を示す。(a)図のさい断しない場合, 立上り部 SS で激しい振幅の強い衝撃波波形を示す。更に, これに続くプラズマのラジアル振動も不規則な振幅を示し, 磁界に大きなひずみが生じ, 主放電プラズマが強く乱されていると考えられる。一方, 電流をさい断した場合, (b)図の波形から予備加熱放電の悪影響は認められず, 立上り部 SS も典型的な衝撃波波形と規則正しいラジアル振動がこれに続いており, 前者に比べ静かな主放電プラズマが予想される。これらの事からは光学的観測とも一致している。

〈4・7〉 プラズマの光学的振舞 前節までは磁気的測定により予備加熱電流のさい断効果を調べたが, ここでは流し写真による光学的観測によってさい断効果を調べた。まず, 予備加熱放電のみの場合につき,

第 8 図 予備加熱プラズマの振舞とその電流波形
Fig. 8. Behaviours and current wave forms of pre-heat plasma.

次に予備加熱放電後に主放電を行なった場合のそれぞれにつき, さい断した場合としない場合について比較検討した。

(1) 予備加熱プラズマの振舞 第 8 図(a), (c)に He ガスを用い, 前節と同様の条件で生成した予備加熱プラズマの流し写真を示す。(a)図はさい断しない場合で, (c)図は第三半波で裁断した場合である。これらの流し写真にそれぞれ対応したプラズマ電流波形を (b), (d) 図に示す。この結果, 電流をさい断することにより後続のプラズマ発生を防ぐことができる。しかし, いずれの半波においても主半径方向外側へのドリフトが観測される。またプラズマの発光の度合いから, 予備加熱プラズマは第二半波で十分成長し終わっていると考えられる。さい断しない場合には, 第三半波以後ともなれば電流零通過時点でもわずかに消えるのみで発光し続けるということがわかった。

(2) 主放電プラズマの振舞 第 9 図(a), (c)に上述と同様, ヘリウムガスで予備加熱放電後主放電を行なった場合, 生成された主放電プラズマの流し写真を示す。(a)図はさい断しない場合であり, (c)図は第三半波でさい断した場合である。これらの流し写真に対応したプラズマ電流波形を (b), (d) 図に示す。さい断しない場合はまだ予備加熱電流が十分大きく, 極めて不安定な乱れた様子を示し, 予備加熱用トロイダル磁界の大きな影響を受けていることが観測される。(b)図の第五半波における小さな凹みは, 主放電によりプラズマがピンチしインダクタンスが増したため, 電流が制限されたことで生じたものである。これ

(a) さい断しない場合の流し写真 (b) (a)図の場合の電流波形
(c) 第三半波さい断の場合の流し写真 (d) (c)図の場合の電流波形

第 9 図 予備加熱後の主放電プラズマの振舞とその電流波形

Fig. 9. Behaviours and current wave forms of main plasma after pre-heating.

第 10 図 (a) と (c) に対応
 z_1 軸は z 軸と平行に放電管小断面中心から上下方向にとった軸である。軌跡上の数字は時間 (μs) を示す。(a) および (b) はそれぞれ第三半波でさい断した場合としない場合を示す。

第 10 図 プラズマ位置の二次元軌跡

Fig. 10. Two-dimensional locus of plasma.

らに対して、予備加熱電流をさい断した場合には主放電プラズマは極めて安定に電流パルス幅の間、閉じ込められているのが観測される。

この流し写真から、主放電プラズマ柱が時間と共に

この図の時間は予備加熱電流のさい断時間と主放電開始時間の間隔を示す。

第 11 図 予備加熱プラズマの
残存磁界の影響

Fig. 11. Effect of residual magnetic field of pre-heat plasma.

いかなる動きをするか、この軌跡を調べる。第 10 図において、それぞれ予備加熱電流をさい断した場合 (a) 図) としない場合 (b) 図) の軌跡を示す。同図で軌跡上の数字は時間 (μs) を示す。さい断しない場合は $7 \mu\text{s}$ 程度で器壁にぶつかるような大きな動きをするが、さい断した場合には閉じ込め磁界がなくなるまで、すなわち $9 \mu\text{s}$ 程度まで、平衡位置と思われる比較的小さな範囲にとどまっている。

次に、予備加熱電流さい断時点と主放電との時間間隔依存性を調べる。これは残存磁界の影響と予備加熱電流で生成加熱され、かなり乱れていると予想される予備加熱プラズマが空間的にもある程度緩和され、一樣なプラズマになるのに必要な時間がある程度調べることができる。

第 11 図 (a), (b) には、この時間間隔を十分とった場合 ($4.5 \mu\text{s}$) と、乱れが現われ始める場合 ($1.5 \mu\text{s}$) の流し写真を示す。この (b) 図の場合より、長い時間間隔ではほとんど主放電プラズマの振舞に変化は見られず、この $1.5 \mu\text{s}$ で初めて振舞に変化が観測された。この (a), (b) 両図とを比較すると、(b) 図の主放電プラズマのほうが太く、密度が高いことが予想される。また、この時点では残存ポロイダル磁界もまだ 15% 程度存在すると考えられ、しかも空間的一様性への緩和も十分進んでいるか疑問である。しかし、流し写真からは少しの影響しか見られない。従って、この時間間隔が $3 \mu\text{s}$ 程度以上になれば主放電プラズマの予備加熱放電の影響は非常に小さいと考えることができる。

5. 電流さい断回路をもった予備加熱回路について

既に準備された予備加熱プラズマは主放電が行なわれる時点で、密度、温度が所定の値に制御され、不純物の混入がなく、残存磁界も極めて少なく、空間的に一様であるなどの条件を満たす必要がある。この電流さい断回路をもつ予備加熱回路がこれらの条件を満たし得るかを検討してみる。すなわち、

(1) 密度については、初期ガス圧の制御と電流さい断時刻と主放電時刻との時間間隔を制御することにより、従来の予備加熱回路より高密度の範囲まである程度制御可能であろう。また温度についても、充電電圧、初期ガス圧などの制御である範囲内で可能であろう。

(2) 不純物の除去、混入の防止のため、ガス導入系、排気系に注意をはらうことはもちろんであるが、発生したプラズマがドリフトを起し、器壁にぶつかり、そこからたたき出される不純物の混入も防がねばならない。このため、電流の周波数、さい断時点や主放電の時点を中心の注意をはらって決めなければならない。不純物が混入しないためには、ドリフトによって壁にぶつかる以前に電流が減衰しなければならない。従って、ドリフト時間を t_{drift} とすると周波数 f は第 12 図からわかるように、

$$f \geq \frac{3}{4} \frac{1}{t_{\text{drift}}}$$

の関係を満たさなければならない。同図において、 V_{ID} 、 I_p 、 CB は二次側の電圧、電流および放電開始時点である。我々の装置では放電管小半径が 25 mm あり、流し写真の観測から、この t_{drift} はほぼ $3.5 \mu\text{s}$ である。従って、壁にぶつからないためには 214 kHz 以上の周波数が必要となる。

(3) 残存磁界の主放電への影響は極めて大きく、これを極力避けなければならない。この研究では新しい試みとして、一次電流のさい断によるプラズマ内のポロイダル磁界の減衰という方法を採用し、極めて有効なことが確かめられた。この方法におけるさい断時点はダイバートモードが良く、プラズマの生成過程から見て第三半波後のさい断が適当であると考えられる。しかし、初期ガス圧の低い場合はもう一半波遅らせたほうが確実である⁽¹⁾。

(4) 空間的に一様なプラズマを発生、生成するため一定の緩和時間が必要であり、この間主放電を待たなければならない。我々の実験ではさい断後 $4 \sim 5 \mu\text{s}$ 程度の時間待てば主放電への影響は無視できる。

V_{ID} : 誘起電圧, I_p : プラズマ電流, CB : 二次回路に大電流放電が開始する時点

第 12 図 二次プラズマ回路の電圧、電流の位相関係

Fig. 12. Schematic diagram of phase relations between voltage and current in secondary plasma circuit.

6. 結 論

この研究では、前報⁽¹⁾のプラズマ準備段階に続く予備加熱プラズマの主放電への初期条件整備段階の一つ、残存ポロイダル磁界の影響について詳しく調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 予備加熱回路の一次電流を放電開始後、 $3 \sim 4$ 半波において急速にさい断することにより、ポロイダル磁界を $5 \mu\text{s}$ 以内に数 % までに減少させることができた。その結果、残存磁界のない予備加熱プラズマを発生することが可能である。

(2) このプラズマを発生させた後、すなわち一次電流さい断後、数 μs ($4 \sim 5 \mu\text{s}$) の後に主放電を行ない主放電プラズマを発生させても、このプラズマには光学的観測からは何ら不安定性は見られなかった。

(3) 新しく試みた電流さい断方法により残存磁界の制御は可能となった。一方、密度、温度、不純物の混入についてもさい断時点の制御によってある程度制御することが可能となった。しかし、これらについては今後、より詳細に調べなければならない。

この研究にあたり、電子技術総合研究所エネルギー部長 等々力 達博士、東北大学工学部 長尾重夫教授の御指導、御べんたつをいただき深く感謝いたします。また、プラズマ研究室各諸氏との有意義な御討論にも深く感謝いたします。

(昭和 53 年 1 月 25 日受付, 同 53 年 9 月 5 日再受付)

文 献

- (1) 投稿中
- (2) Y. Kondoh, et al.: *J. Phys. Soc. Japan*, **36**, 852 (1974)
- (3) N. Ikeda, et al.: *Rev. Sci. Instrum.*, **41**, 1669 (1970)
- (4) H. A. B. Bodin, et al.: *Nuclear Fusion*, Suppl. Pt. 2, 521 (1962)
- (5) H. L. Jordan: *ibid.*, Suppl. Pt. 2, 589 (1962)
- (6) R. Bono, et al.: *Plasma Phys.*, **14**, 553 (1972)