



## 講座 今日からはじめる磁場閉じ込めプラズマ実験

### 3. プラズマを発生・維持するための電源を整備するよ!

#### 3.1 パルス電源を組もう!

#### 3.1 Introduction to a Pulsed Power Supply

浅井 朋彦, 郷田 博司<sup>1)</sup>

ASAI Tomohiko and GOTA Hiroshi<sup>1)</sup>

日本大学理工学部, <sup>1)</sup>Tri Alpha Energy, Inc.

(原稿受付: 2014年5月27日)

比較的小規模な実験室や、マイクロ秒オーダーの高速・大電流放電でよく用いられる、コンデンサバンクを用いた単パルス放電回路によるプラズマ実験について、具体例を交えて解説します。特に、負荷やスイッチのインダクタンスを低減した高速放電では、使用される回路素子をはじめ、絶縁や接地などさまざまな点で、直流回路や低速放電とは異なったセンスが要求されます。放電回路の基本的な構成、コンデンサ放電に特有のノイズや事故対策などについて紹介します。

#### Keywords:

pulse discharge, crowbar circuit, spark gap

##### 3.1.1 パルス放電とは

ここでは、おもにコンデンサバンクの充放電による単パルス放電について、その特徴や安全に実験する上での注意点などについて解説する。

大学の研究室規模のプラズマ実験では、コンデンサによるパルス放電で磁場配位の形成やプラズマの生成を行うのが一般的である。コンデンサ放電のおもな利点は、短時間に極めて大きな電力を発生できることである。特に、放電回路のインダクタンスを低減した高電圧コンデンサ放電では、コンデンサの蓄積エネルギーを、数マイクロ秒の時間スケールで磁場のエネルギーに変換することができる。磁場反転配位 (Field-Reversed Configuration: FRC) プラズマの生成に用いられるシートピンチ装置などでは、コンデンサ放電による大電力 (例えば Tri Alpha Energy Inc. の C-2 装置 [1] では蓄積エネルギー > 200 kJ, 立ち上がり時間 ~ 4 μs) をプラズマに注入することにより、短時間に高温 (> 1 keV)・高密度 (> 10<sup>21</sup> m<sup>-3</sup>) のプラズマを生成している。このようなコンデンサを用いたパルス大電流の発生は、必要なエネルギーが特に大きい場合を除きエネルギーあたりのコストが小さく、また、放電回路の構成が比較的単純で耐久性が高く保守が容易であることも利点の一つである。

##### 3.1.1.1 コンデンサによるパルス放電回路

コンデンサによる放電回路は、図1のように、充電器、遮断器、コンデンサ、スイッチ、放電ケーブル、および負荷などから形成される。このような放電回路において、放電用のケーブルと負荷であるコイルや電極は、一般にイン

ピーダンスが異なる。多くの実験では、放電ケーブルのインピーダンスに比べ負荷側のインピーダンスが大きく、ケーブル側から伝わってくるパルスに対して、負荷との接続点 (負荷端) は近似的に開放端とみなされる。したがってパルスは負荷端で反射され、負荷端には充電電圧の最大2倍の短時間パルス電圧 (サージ) が発生する。負荷系全体の耐電圧はこのサージを考慮して決める必要があるが、多くの場合、抵抗を負荷と並列に接続することで、負荷端においてケーブルと負荷コイルのインピーダンスをできるだけ整合させ、反射を減じることでサージを吸収するのが一般的である。この抵抗の値は、放電条件などに合わせて最適値を求める必要がある。

##### 3.1.1.2 コンデンサ放電の基本回路

磁場形成コイルを負荷としたコンデンサ放電の基本回路を図2に示す。L<sub>p</sub> はコンデンサ、始動スイッチおよびケーブルのインダクタンスであり、放電開始時の電流上昇率を大きくするためには、負荷のインダクタンス L<sub>L</sub> に比べて十分に小さくする必要がある。また R<sub>L</sub> は負荷、R<sub>p</sub> はコンデンサ、スイッチおよびケーブルの抵抗である。これらの抵抗は、電流の最大値を制限するため、極力小さくなるよう

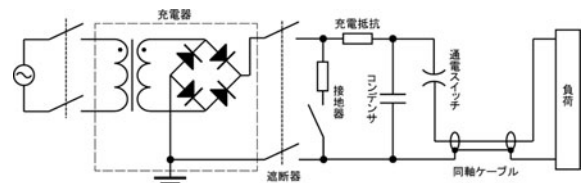


図1 コンデンサ放電回路の例。

に設計される。

図2の回路において、コンデンサを  $V_C$  に充電後スイッチ  $S$  を始動すると、コンデンサに蓄えられた静電エネルギーは、ケーブルを介して負荷へと流れる。スイッチの始動時刻を時間原点とすると、回路を流れる電流  $i$  は

$$i = \frac{V_C}{2\pi f(L_L + L_P)} \exp\left\{-\frac{R_L + R_P}{2(L_L + L_P)}t\right\} \sin(2\pi f t), \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_L + L_P)C} - \frac{(R_L + R_P)^2}{4(L_L + L_P)^2}}, \quad (2)$$

で与えられる。このとき、スイッチ始動時の電流上昇率は、

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t=0} = \frac{V_C}{L_L + L_P}, \quad (3)$$

であり、電流値が最大に達するまでの時間  $\tau_r$ 、電流の最大値  $I_M$  は

$$\tau_r = \frac{1}{2\pi f} \tan^{-1} \frac{4\pi(L_L + L_P)f}{R_L + R_P}, \quad (4)$$

$$I_M = \frac{V_C}{2\pi f(L_L + L_P)} \exp\left\{-\frac{R_L + R_P}{2(L_L + L_P)}\tau_r\right\} \sin(2\pi f \tau_r), \quad (5)$$

となる。上式で得られる放電波形を図2(b)に示す。回路を流れる電流は減衰振動波形となる。

コンデンサに蓄えられた静電エネルギーに対する負荷に供給される磁気エネルギーの比を電源の利用効率  $\eta$  とすると、回路全体のインピーダンスに対して抵抗  $R_P$  および  $R_L$  が十分に小さい場合、

$$\eta \sim \frac{L_L I_M^2 / 2}{C V_C^2 / 2} \sim \frac{L_L}{L_L + L_P}, \quad (6)$$

と書け、電源のインダクタンスを小さくすることで、利用効率が上がることがわかる。

### 3.1.1.3 クローバー回路

放電初期に、電離や加熱などの目的で大きなエネルギーを注入するためには、立ち上がり時間  $\tau_r$  を短くし、また電源の利用効率  $\eta$  を高くする必要があるが、同じ負荷コイルを用いてプラズマを長時間閉じ込める場合などには、図2(b)に示したような減衰振動波形は好ましくない。このため、放電回路に図3(a)に示すようなクローバー回路を設け、波形を整形することがある。クローバースイッチ  $S_C$  を負荷に並列に接続し、これを電流が最大となる時刻に閉じると、 $L_L$  を流れる電流はクローバー回路を通り再び負荷へと還流し、図3(b)のような振動しない単方向電流となる。

実際の放電波形では、3.4節にも示すように、クローバー後の電流には周波数の高い振動成分が現れる。この周波数  $f_R$  は

$$f_R = \frac{2\pi}{\sqrt{C(L_P + L_C)}}, \quad (7)$$

となり、またこの振動成分の振幅  $I_R$  の最大電流  $I_M$  に対す

る割合  $\delta$  は

$$\delta = I_R / I_M \sim 2L_L / (L_P + L_C), \quad (8)$$

であらわされる。

クローバーされた電流の減衰時間は、クローバー回路と負荷の抵抗およびインダクタンスにより決まり、

$$\tau_C = (L_C + L_L) / (R_C + R_L), \quad (9)$$

と書ける。ただし、 $L_C$  および  $R_L$  はクローバー回路のインダクタンスと抵抗である。

(8)式より、振動成分の影響を低減するには、クローバー回路のインダクタンス  $L_C$  を負荷のインダクタンスに比べて十分に小さくする必要があることがわかる。また、電流の持続時間を長くするためには、クローバー回路の抵

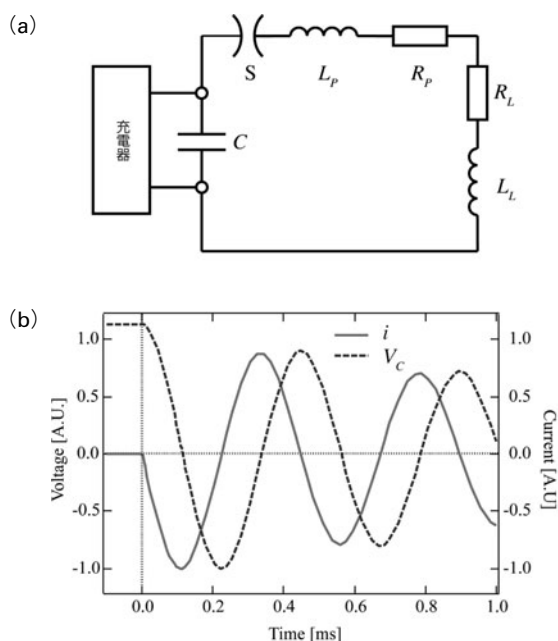


図2 典型的なコンデンサ放電回路(a)と放電波形(b)。

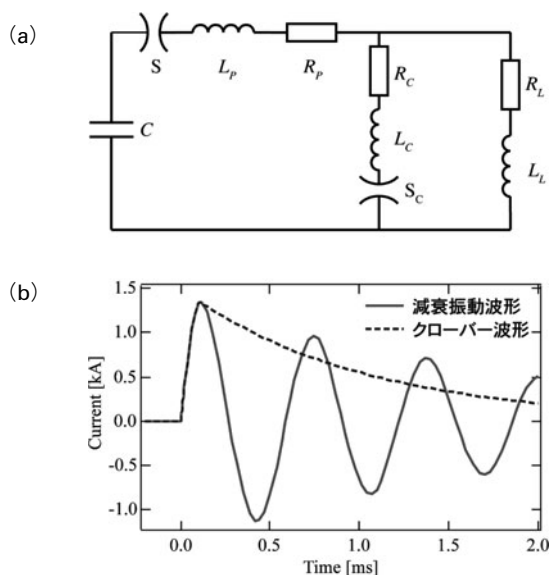


図3 クローバー回路を含むコンデンサ放電回路(a)と典型的な放電波形(b)。

抗  $R_C$  を  $R_L$  に比べて十分に小さくする必要があり、クローバースイッチも、スタートスイッチと同様に並列運転するのが一般的である。スイッチの並列運転が確実に行われるためには、始動時間のばらつき（ジッタ）が同軸ケーブル中の進行波の伝達時間より小さいことが必要である。使用されるケーブルが 10 m であれば、スイッチに許されるジッタは 100 ns のオーダーとなる。

### 3.1.2 コンデンサ

#### 3.1.2.1 コンデンサの種類と特徴

パルス放電に用いられるコンデンサは、内部インダクタンスが小さく、また複数台のコンデンサを組み合わせることが多いため、動作が安定していて、個体間の特性のばらつきが少ないことが要求される。同様の特徴は、後に述べるスイッチにも要求される。高耐圧かつ大容量で、上記の条件を満たすコンデンサバンクとしては、オイルコンデンサ（図 4）が一般的である。オイルコンデンサは、絶縁油を含浸させた紙を誘電体とした物で、耐電圧 100 kV、電気容量 10 mF 程度の物も製品化されている。

比較的パルスが長く（数ミリ秒）、低電圧の放電には、エネルギー密度の高さから、ケミカルコンデンサ（図 5）が用いられることが多い。しかしケミカルコンデンサには正負の極性があり逆方向電圧がかかると破損するため、保護回路が必要となる。さらにオイルコンデンサと比べて寿命が短いことから、放電回路に用いる場合には注意が必要である。

#### 3.1.2.2 コンデンサを充電する

充電回路は、コンデンサバンクに対して図 1 のように構成される。高圧発生用の電源は、100 kV 程度以下であれば、図 1 のように昇圧トランスと高電圧整流ダイオードおよび平滑回路で構成できる。また、充電電圧が高くなく、充電時間や通電容量がさほど問題にならない場合には、サイリスタなどの半導体スイッチング素子を用いたスイッチ



図 4 インダクタンスを抑えるため、スイッチと一体となった高速放電用コンデンサバンク（ファストバンク）。

ング電源を使用することも可能である。一方、非常に高い電圧が必要な場合には、コッククロフト・ウォルトン回路などが用いられるが、これについては、過去の解説記事を参照されたい[2]。また、マルクスジェネレータと同じように、コンデンサを並列に接続して充電し、直列に放電を行うような充放電回路も用いられる。

直流高圧電源で生成する電流によりコンデンサは充電されるが、最初から高い電圧をかけるとコンデンサへの充電電流が過大になり、充電器等を損傷する可能性がある。そのため、コンデンサを高電圧に充電する時には、充電電流を制限する必要がある。

スイッチング電源の場合には、昇圧トランスへの入力交流電流の位相幅制御により電流を制限することができる。スイッチング素子を用いず昇圧トランスと整流器だけを用いる場合でも、一次側の AC 入力電圧を、電動スライダックで徐々に増加させることにより、出力電圧をゆっくりと上昇させ、過大な充電電流の発生を防止することができる。

このような入力電圧の制御を行わず、最初から高電圧をかける場合には、電流制限用の抵抗（充電抵抗）を用いて充電電流を制限する。この場合、充電電流の大きさは、電源の出力電圧とコンデンサの充電電圧の差に比例するため、短時間で大容量のコンデンサを充電する場合には、充電電圧の上昇に合わせて抵抗値を小さくするように切り替えるなどの措置が必要である。後述するシータピンチ装置では、充電抵抗を用いた上で、ステップアップトランスを介して電源電圧を段階的に昇圧することで、電圧上昇率が一定に近くなるように制御している。

コンデンサの充放電実験を頻繁に繰り返して行う場合には、充電電流による充電抵抗の加熱が放電間隔を制限することがあるので注意が必要である。

#### 3.1.2.3 遮断器・接地器

通常、負荷系に電流を流す放電実験時には、コンデンサと負荷系からなる放電回路と、充電や制御のための回路や充電装置とが、電氣的に切り離されるように設計される（図 1）。充電回路とコンデンサを遮断するためには、高速である必要はないが、耐電圧が十分に高く、また、コンデンサに蓄えたエネルギーが接地ラインへと放電される「地絡」と呼ばれる事故を避けるために、信頼性の高いスイッチが必要である。さらにコンデンサと直流的に接続された

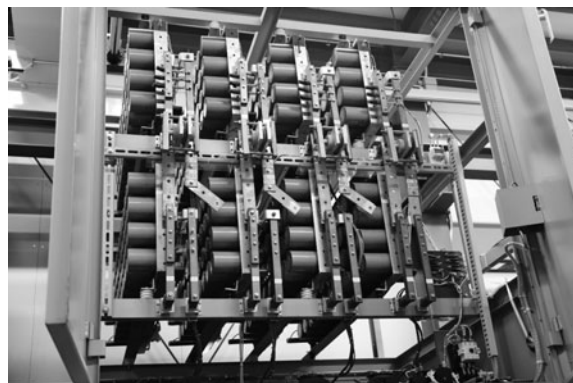


図 5 ケミカルコンデンサによる低速放電用コンデンサバンク。

回路を遮断するため、発生するアーク放電を遮断できる物理的に十分長い接点間距離を確保する必要がある。電磁スイッチを用いたもの(図6(a))も多く使われるが、充放電回路とACラインの電気的な絶縁のため、筆者の研究室では、図6(b)のような、圧縮空気により接点電極の動作を駆動する方法を用いている。

遮断器は、図1のように、充電回路系とコンデンサの間に接続されるのが一般的である。コンデンサによるパルス放電では、前述の地絡事故などを避ける目的で、放電回路の高圧側および低圧側の両者ともに充電装置と遮断する。これにより、充電器を介して放電ノイズが商用電源に放射されることを避ける効果も期待できる。放電終了後は、残留電圧などを放電するために、接地器を用いてコンデンサを接地する。試験運転時やスイッチの動作トラブルの発生時には、コンデンサに蓄えられたすべてのエネルギーを、接地器を介して放電する場合があるため、放電回路の設計や抵抗器の選定には注意を要する。

### 3.1.3 放電回路の構成要素

コンデンサバンクによるパルス放電回路は、前節で解説したコンデンサに加え、放電を開始するためのスイッチ、電流を伝送するケーブル、負荷となるプラズマ生成のための電極や磁場形成コイル、それらを接続するコネクタから成る。本節では、これらの要素のうち、スイッチとケーブルおよびコンデンサについて解説する。



図6 電磁式遮断器(a)および圧縮空気制御による遮断器(b)の例。

#### 3.1.3.1 スwitchの種類と特徴

コンデンサによるパルス放電には、イグナイトロンスイッチや電極ギャップ間隔により動作電圧を調整するギャップスイッチが用いられることが多い。また近年は、大電力の制御が可能な半導体スイッチの開発が進み、BJT(Bipolar Junction Transistor)などによる置き換えも進んでいる。各種スイッチの特徴を表1に示す。

シートピンチ実験などでは、ピーク電流値が数百kA~1MAオーダーで、立ち上がり時間が数 $\mu$ 秒という高速放電が必要であり、特に内部インダクタンスの小さいスイッチを必要とする。また先にも述べた通り、スイッチの並列運転が必要であることが多い。このためには始動特性のよいスイッチやスイッチの制御のための高電圧トリガーパルスの発生が必要である。ギャップスイッチは比較的安価で、始動電圧が可変であるなどの利点から、特に高速バンクでは頻繁に用いられる。半導体スイッチについては、本誌でも多数の解説記事[3]が掲載されていることから紹介は避け、ここではギャップスイッチについてその原理を簡単に解説する。

#### 3.1.3.2 ギャップスイッチ

高速なコンデンサ放電には、耐電圧が高く、低インダクタンスで、始動特性のよいスイッチが必要であり、また、後に述べるクローバースイッチの適用に優れているものが望まれる。ギャップスイッチの基本原理は、対向した電極間の絶縁物(多くの場合気体)の絶縁破壊を利用して、高速な通電を実現するものである。制御性を高めるため、トリガトロンのように電極間にパルスを印加して火花を発生し、始動させるものも使われる。

しかし、これらのスイッチは電極の耐久性や始動特性に問題があり、おもに図7に示すような電界歪型ギャップが使用されている。このギャップスイッチは、主電極間に中間電極を設け、これに高電圧パルスを印加することで主電極間の絶縁を破るものである。図7の例では、後述のクローバースイッチへの適用のため、高気圧ギャップと低気圧ギャップを組み合わせている。

#### 3.1.3.3 ケーブルとコネクタ

コンデンサ放電では、電源と負荷の間の大電流の伝送に、同軸ケーブルを使用することが多い。同軸ケーブルのおもな利点は、比較的インダクタンスを小さくできること、外部にノイズを漏らしにくいこと、また、可撓性があり、実験室内における取り回しが容易であることが上げられる。特に高速放電の場合には、低インダクタンスの負荷

表1 スwitchの種類と特徴。

種類	応答時間 (ns)	電流領域 (kA)	電圧領域 (kV)	周波数 (Hz)	寿命
ギャップスイッチ	~10	100	100	~10	長寿命 (要保守)
イグナイトロン	~10	$10^2 - 10^3$	10 - 100	1 - 10	$10^4 - 8$ 秒
半導体スイッチ	1 - 10	1 - 10	1 - 10	~ $10^3$	長寿命

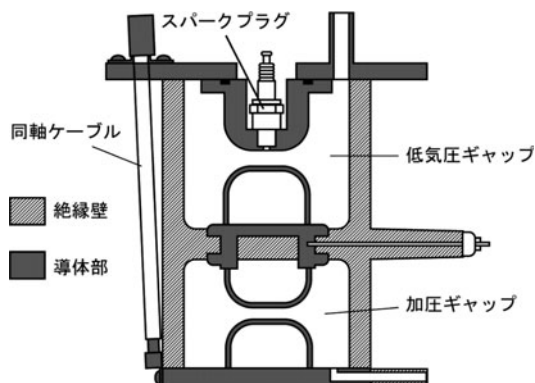


図7 電界歪型ギャップの概略図。

に対して、できるだけ損失なくエネルギーを送送するため、バンクの内部インダクタンスを極力小さくすることが必要である。放電回路を形成する要素のうち、一般的に伝送ケーブルが最もインダクタンスが大きく、これを低減するため、図8に示すように多数の同軸ケーブルを並列に接続して使用する。

同軸ケーブルの接続や集電には、通過電流量、クーロン数が十分大きく、また、絶縁耐圧の高い構造が要求される。多数のケーブルを接続し、またインピーダンスを低く抑えるため、負荷コイルとケーブルの間に、次節に具体例を示すように集電板を設ける。この集電板には、負荷端で発生する反射によるサージの抑制のために、サージ吸収抵抗が接続される。

### 3.1.4 パルス放電によるプラズマの生成

パルス放電によるプラズマ生成の一例として、FRC生成に用いられる逆バイアスシータピンチ装置の放電回路の構成を概観する。

#### 3.1.4.1 逆バイアスシータピンチ装置

本節で取り上げる逆バイアスシータピンチ装置[4]は、負荷として、内径0.34 m、幅0.055 m、厚さ0.01 mの銅製コイル素子28本からなる一巻きのソレノイドを有する。これらのコイル素子は、アルミニウム製の集電板(図9)により並列に接続されている。集電板は、縦0.45 m×横2.89 mの平行平板構造で、厚さ0.3 mmの低密度ポリエチレンシート3枚と0.1 mmのポリエステルシート2枚で絶縁されている。負荷コイルのインダクタンスは $5.4 \times 10^{-2} \mu\text{H}$ 、集電板は9.7 nHである。

集電板の他端には、高速コンデンサバンクによる主放電回路をはじめとして、3つの放電回路が接続されている。主放電回路は40 kV–3.75  $\mu\text{F}$ の高速放電用オイルコンデンサを18台並列に接続することで形成される。バンクの残留インダクタンスは35 nHであり、スタートスイッチ、クローバースイッチのインダクタンスはそれぞれ20 nH、25 nHである。集電板にはこれに加えて、逆バイアス印加のためのバイアス磁場回路と予備電離回路が並列に接続されている。バイアス回路は比較的低速のため、5 kV–400  $\mu\text{F}$ の低速オイルコンデンサを5台並列に接続しており、トリガatron型のギャップスイッチで始動される。予備電離回路は

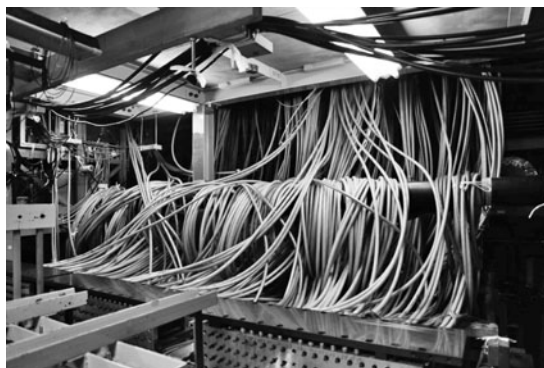


図8 一巻きコイルの励磁のために並列接続された同軸ケーブル。

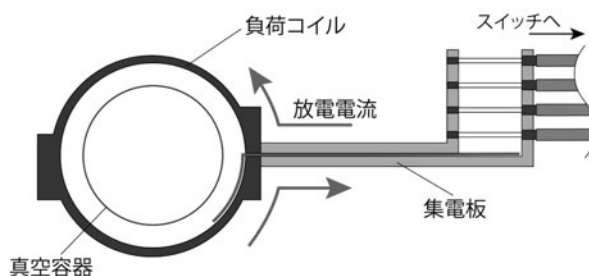
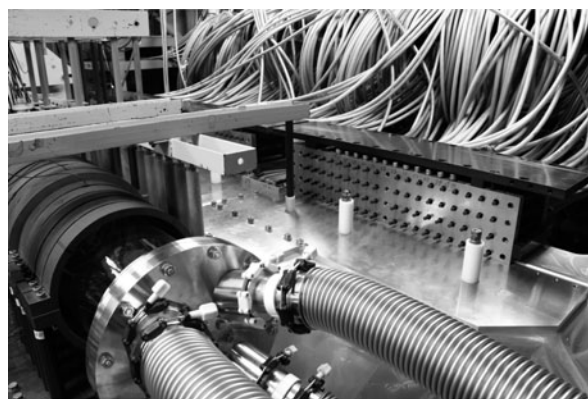


図9 集電板に接続されたシータピンチコイルと負荷ケーブルの写真(上)および概略図(下)。

主放電と同じ40 kV–3.75  $\mu\text{F}$ の高速放電コンデンサが3台使用されている。ただしコイルに印加される振動波形により予備電離を行うため、クローバースイッチは使用されていない。

#### 3.1.4.2 パルス回路の接続

バイアス磁場回路には、主圧縮磁場回路やシータ予備電離回路から流入する電流を抑制するためのデカップル用のインダクターが直列接続されている。各回路と集電板は、耐電圧50 kVの同軸型負荷ケーブル(断面積22 mm<sup>2</sup>、静電容量260 pF/m、インダクタンス0.16  $\mu\text{H}/\text{m}$ 、特性インピーダンス25  $\Omega$ 、外径 $\phi$ 18 mm、全長8 m)で接続されており、低インダクタンスであることが要求される主圧縮磁場回路では、216本(コンデンサバンク1台あたり12本)のケーブルが並列接続されている。

主圧縮磁場回路の同軸ケーブルと集電板は、円筒型の大電流用コネクタ(図10)で接触接続され、絶縁破壊防止やケーブルバンク防止用のビニル(PVC)製のブッシングで保護されている。ケーブルのサイズに対して接触面が小さ

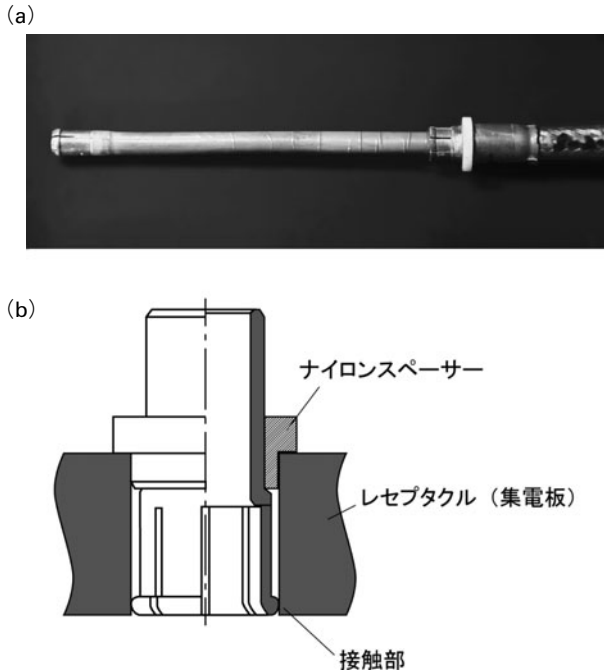


図10 同軸ケーブルのコネクタ部の写真(a)および高压用プラグの例(b).

く感じるが、高周波放電では表皮効果により電流は導体表面に集中するため、圧着端子のような面接触であっても、電気的には線接触に近い状態となる。このほか集電板部には、前述のように、インピーダンスの不整合により発生するサージの吸収のため、サージ吸収抵抗 ( $18\ \Omega$ ) が12本並列に取り付けられている。

また、各放電回路の低压側線路は、 $1\ \text{k}\Omega$  の抵抗で、コンデンサ、スイッチ、充電器などの回路素子ごとに筐体に接地されており、また、各筐体は主圧縮磁場回路の筐体に接続され、一点で接地されている。このように、抵抗を介して高インピーダンスで接地し、商用ラインへの地絡などの事故を避ける接地の方法は、パルス放電実験では頻繁に用いられる。

### 3.1.4.3 放電回路の制御

各回路のトリガーパルスは、タイミング制御のための遅延パルサーの出力パルス  $25\ \text{V}$  を段階的に  $250\ \text{V}$ 、 $10\ \text{kV}$  と昇圧し、最終的には、主圧縮磁場回路では  $60\ \text{kV}$ 、バイアス磁場回路では  $7\ \text{kV}$  のトリガーパルスがギャップスイッチに入力される。主圧縮磁場回路では、シャープナーギャップにより直流的には絶縁され、スイッチへと接続される。スイッチのタイミングのモニタには、このシャープナーギャップの発光を用いている。

図11に、この装置で用いられるコンデンサ放電の典型的波形を示す。立ち上がり時間  $90\ \mu\text{s}$  のバイアス回路に続き、 $30\ \mu\text{s}$  後に予備電離回路 (周期  $14\ \mu\text{s}$ ) が始動、バイアス磁場が極大になる時刻に、立ち上がり  $4\ \mu\text{s}$  の主圧縮磁場回路が放電され、電流のピーク時にクローバースイッチが動作し減衰時間  $150\ \text{ms}$  の閉じ込め磁場が生成される。このように各回路に必要なパルス長が大きく異なり、また使用されるスイッチのジッタにも差があることから、主放電のトリガは、バイアス回路の始動時刻を基準に現象同期さ

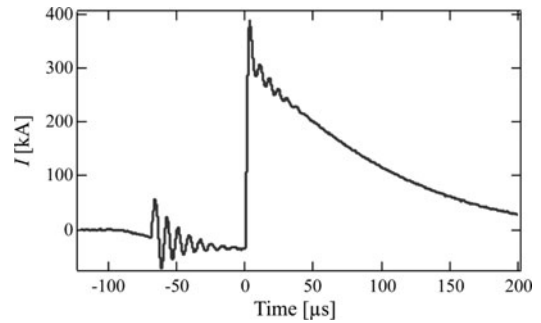


図11 シータピンチ装置の典型的放電波形。

れている。具体的には、ログスキーコイルによりバイアス電流をモニタし、これをトリガ信号として主放電回路を始動する。モニタされた電流は、パルストランスで電氣的絶縁された上で、光リンクにより遅延パルサーに入力される。

### 3.1.4.4 電流・電圧の測定

高電圧パルス放電回路では、充電電圧の測定にも、電氣的な絶縁が必要となる。この装置では、充電器出力側に取り付けられた無誘導高圧抵抗 ( $100\ \text{M}\Omega$ ) を流れる電流を、マイクロアンペア電流計 (光電式無接点メータリレー) で測定している。充電完了時には、電圧計測回路は遮断器によって放電回路と切り離され、また充電制御系内では電磁リレーにより他の制御回路と絶縁される。充電電流は、充電器の一次入力電流を、トランスを介して計測し電流計でモニタしている。

各放電回路の電流についても、ログスキーコイルによって非接触にモニタされている。これらのコイルは、LCR放電の減衰振動波形を用いてあらかじめ較正されている。

### 3.1.5 ノイズ対策

コンデンサ放電を用いたプラズマ実験における主なノイズは、遮断器や放電電極の影響で発生する静電ノイズ、制御系や充電系の回路に用いる電磁リレーの断続時の接点ノイズ、高周波放電に起因する電磁ノイズ、またコイルの漏れ磁場による磁気ノイズに大別される。このような電磁氣的なノイズを避けるためには、一般的なノイズ対策と同様に、計測器や信号線に適切なシールドを設けるとともに、回路にループをつくらないことが基本的な対策となる。

ノイズ対策については4.2章で解説されるので、ここでは詳解は避けるが、特に高速パルス放電に関連する対策について以下に概説する。

#### 3.1.5.1 ノイズ対策の実例

ノイズ対策の基本的な考え方は、発生源を絶つことと発生源からの伝播を遮断することである。これまでに述べたパルス放電回路では、扱う電圧が高く、また電流も大きいことから、多くのノイズ源が存在する。例えば実験装置から制御系や計測系へのノイズの流入防止には、前述の通り充電完了後、充電回路と放電回路を切り離すことが必要であるが、この遮断器で発生するアークは、電磁ノイズを誘起し、計測器や放電制御系の誤動作の原因となり得る。このため、コンデンサバンク、放電スイッチなどを電磁シールドボックス内に収めてノイズを遮断した上で、計測系や



制御系とは電氣的に切断しておく必要がある。また、計測器側を放射ノイズから遮蔽するため、シールドルームを設置することも多い。

また、強いパルス磁場を用いた実験に特有の対策として、コイルボビン、装置架台など導体で製作される構造物については、電磁誘導により起電力が発生するため、絶縁物によってループをつくらないように電氣的に切断しておく必要がある。

誘導ノイズの発生および影響を避けるため、放電ケーブルには同軸ケーブルを用いるのは言うまでもないが、信号ケーブルについて、同軸ケーブルの場合、周期がミリ秒オーダーの比較的low周波の磁気ノイズについては誘導ノイズを拾うため、必要に応じてツイストペアケーブルを用いたり、磁気シールドのため、ケーブル自体を鉄管などに入れて敷設するなどの対策がとられる。弱電回路では、銅やアルミを用いたシールドが一般的であるが、low周波の磁気ノイズに対しては効果がないことにも注意が必要である。

電源からのノイズの流入やグラウンドループの形成を避けるため、商用電源はラインフィルタを通して高周波ノイズをカットした後、絶縁トランスを介して直流的に絶縁し機器に接続する。また、遅延パルサーなどの起動パルスは、パルストランスやフォトカプラを用いたり、光ファイバを用いて伝送するなど、電氣的に絶縁する。

トランスは構造から、一般的に3種類に分類される。1次側と2次側の絶縁耐圧を大きくし、2次側を1次側から高電圧に浮かせて使用する耐圧トランス、1次側と2次側の静電容量を小さくして静電結合を小さくした低静電容量トランス、1次側と2次側の間が遮蔽された静電遮蔽トランスである。これらのトランスは、静電結合を低減し電源からのlow周波／低帯域のコモンモードノイズを減らす効果がある。前述のシートピンチ実験でも用いられている低容量耐圧トランス（耐圧2kV-0.5kVA）の一例を図12に示す。AD変換器や充電器は、ACラインとの間にそれぞれ消費電力に応じたトランスを有し、電氣的に絶縁されている。

パルストランスは、AD変換器のトリガや遅延パルサーの入出力を電氣的に切り離すために使われる。市販のEI型やトロイダル型のフェライトコアを用いて容易に製作できる（図13）。巻数比を変更することで昇圧、減圧トランス

にもなることから、トリガパルスの形成などにも便利である。また、同軸ケーブルをフェライトコアに巻き、外部導体を1次、内部導体を2次巻線にすると、簡単にバイファイラ型チョークコイルを作ることができ、コモンモードのノイズを低減できる。

### 3.1.6 事故を避けるために

#### 3.1.6.1 実験装置の接地

コンデンサによるパルス放電回路を用いた実験装置は、放電時に発生する高周波電圧により接地電位がパルスのに上昇するため、充電回路や制御回路、さらには計測装置などを破損するおそれがある。これは、寄生インダクタンスや回路のミスマッチングなどにより、サージ電圧が発生するためである。一般的に、弱電回路などのノイズ対策では、できるだけ容量の大きな接地ラインに、低インピーダンスで接地（ハードグラウンディング）することが基本であるが、パルス放電では、高電圧のサージ発生は避けがたいため、その外部への影響を避けるため、放電回路や計測回路の低圧線側を、直接接地ラインにつなぐず、高周波的には変動する浮動電位とすることが一般的である。

一方で、低圧回路を完全に接地電位から絶縁すると、放電回路系が帯電して危険であるため、低圧路線を1k $\Omega$ 程度の抵抗（あるいは抵抗と低インダクタの組み合わせ）を用いて高インピーダンスで接地（ソフトグラウンディング）する方法が用いられる。これによって、短い放電時間内は、回路全体が電氣的に浮いた状態となり、また、充放電サイクルの間の比較的長い時間スケールでは、回路や筐体は接地された状態となる。したがって、放電時には高電圧回路系は言うまでもなく、低電圧回路系も接地ラインに対して高電圧になる可能性があることに注意が必要である。一方で、各放電回路の筐体は、抵抗とインダクタンスが極力小さくなるように接続・接地される。複数の放電回路を動作させる場合には、各放電回路の接地系を整理して、放電回路の間にサージ電圧による電位差が極力発生しないように、接地点を選択し1点接地点とする。

接地ラインの断面積や長さは、抵抗とインダクタンスが極力小さくなるように選択する。また、実験室のコンクリート（抵抗率 $1\sim 1.5\times 10^2\Omega\text{m}$ ）はパルス放電実験のス



図12 低容量耐圧トランスの例.

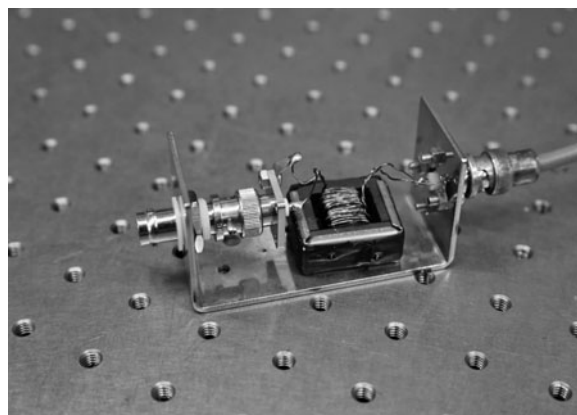


図13 パルストランスの製作例.

ケールでは導体として考える方がよく、装置や回路と絶縁する必要が生じる場合もある。また、木材なども高電圧では、導体と考えたほうが良い場合などもあることに注意が必要である。

### 3.1.6.2 接地棒の使用

高電圧装置における作業で、最も重要なことは、必ず全ての電源を落とし、高電圧および低電圧（交流電源）の電圧がゼロであることを確認することである。コンデンサ電源は、低電圧側の入力を落とし、充電のための高電圧直流電源を停止しても、コンデンサに電荷が残っている可能性が高い。このため、コンデンサの端子電圧がゼロであることを確認し、さらに接地棒などで高電圧端子が接地され続けていることを確認することが重要である。コンデンサ放電実験で使用される接地棒の一例を図14に示す。接地棒は、前述の接地器などと同様に、電流を制限するための抵抗を持つ必要がある。一般にインダクタンスを含まない無誘導抵抗を用いるが、水抵抗（抵抗値の調整には、チオ硫酸ナトリウム、硫酸銅などの電解質を用いる）などを使っても簡単に作ることができる。対象となる電圧によって、適正な抵抗値が異なることにも留意する必要がある。

作業終了時は、接地棒を確実に取り外し、また、短絡事故の原因となる工具やボルト・ナットなどの置き忘れがないか確認する。この他、充電制御系のメータの誤指示や接地投入器の動作不良なども重大事故の原因となるため、作業時には注意を要する。また、万が一の事故の際の対応のため、必ず二人以上で作業・実験を行うことが重要である。

### 3.1.6.3 絶縁破壊耐力と装置の絶縁

高電圧発生装置やプラズマ生成装置を製作したり、運転する際に、絶縁破壊耐力は重要な知見である。表2に、一般的に回路の絶縁に用いられる絶縁体の絶縁耐力をまとめた。

ポリエチレンやカプトンといったポリマーのシートは、絶縁耐力が高く、またカプトンに至っては400℃程度の耐熱性をもつことから、頻繁に回路や装置の絶縁に用いられる。一方で、これらの材料は空気よりも高い誘電率をもつため、高周波では、直流的な絶縁を確保したために、放電線路と周辺の構造物との静電的なカップリングを増してしまうこともあり、注意が必要である。

また、高電圧部からの隔離距離は、労働安全衛生法で定められている（表3）。各大学などの安全マニュアルに記載されている距離は、この距離の1.5倍に定められているものが多い。これらの空気距離に加え、実際の装置では絶縁物の表面に沿って樹枝状に放電路が形成される沿面放電が問題となるため、「沿面距離」を保つことが重要な要素となる。絶縁物自体やほこりなどの汚染物が、放電により炭化し放電路を形成する（トラッキング）こともあり、必要な沿面距離は、絶縁物の耐トラッキング性や汚染度にも

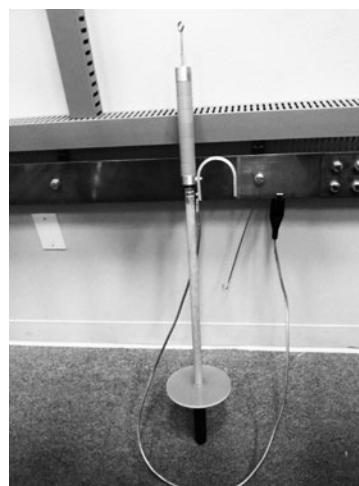


図14 接地棒と銅板製の接地ライン。

表2 各種絶縁体の絶縁耐力。

絶縁体	絶縁耐力 (kV/cm)
空気	30
水	200
セラミックス	120
絶縁オイル	270
石英ガラス	300
真空	860
ポリエチレン	1500
カプトン	2800

表3 接近限界距離。

充電部の電圧 (kV)	接近限界距離 (cm)
<22	20
22~33	30
33~66	50
66~77	60
77~110	90

影響される。特に高压に充電されたコンデンサやその周辺では、集塵機と同様の原理で絶縁材料の表面にホコリが付着し、沿面放電に対する絶縁耐力を下げることもあるので注意が必要である。絶縁破壊などの前駆現象としてコロナ放電などが発生することがあり、充電中の異常音などで認知できることも多いので、実験中は注意を払う必要がある。

## 参考文献

- [1] M.W. Binderbauer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 045003 (2010).
- [2] 例えば、プラズマ・核融合学会誌 **87**, 202 (2011).
- [3] 例えば、プラズマ・核融合学会誌 **81**, 350 (2005).
- [4] T. Asai *et al.*, Phys. Plasmas **13**, 072508 (2006).