



講座 今日からはじめる磁場閉じ込めプラズマ実験

1. さあ実験だ！実験やるよ～

1. It's Experiment Time. Here We Go!

稲垣 滋

INAGAKI Shigeru

九州大学 応用力学研究所

(原稿受付：2014年5月7日)

核融合のためのプラズマ実験では、真空装置、電源装置、計測装置、さらにはプラズマそのものに関する広範な知識と技術が要求されます。特に大学の実験室の装置の多くは特注品ないし手作り品であることから、初めて実験研究に触れる学生や研究者にとってその仕組みを正確に理解し、正しく運用することは容易ではありません。本記事では、プラズマ物理実験に新たに参加する学生向けに最低限必要となる知識やノウハウをわかりやすく解説します。実験研究の効率的な推進と安全性向上の一助となることを期待すると同時に、これから新しく実験研究を開始しようとする研究者へのヒントとなるような内容をめざしています。

Keywords:

plasma, magnetic confinement, experiment, guideline

1.1 はじめに

宇宙天体からの光を理解することで人類の宇宙観が急速に変化しています。それにはプラズマ物理学が中心的な役割を果たしています。同時に、現代文明を支える基盤技術はプラズマの活用によって実現しています（半導体集積回路の製造、溶射コーティングによる材料の高機能化、殺菌・医療にいたる迄、プラズマの応用は極めて公汎に及ぶ）。そして将来の基盤技術としてプラズマ核融合の開発が世界的に行われています。自然を理解し文明社会を更に発展させるためには、プラズマ科学の発展が必須です。科学研究手法には実験・理論・シミュレーションと主に3つありますが、プラズマ科学において実験研究が果たして来た役割は非常に大きく、今後も増々重要となると考えられます。このような近年の状況を鑑み、本講座ではプラズマ実験について、これから始めるという大学院生、これから自身のプロジェクトを立ち上げる若手研究者を対象に必要最低限の実験知識とノウハウ、特に「真空関連」「電源関連」「計測関連」および「安全性」について解説します。本講座では特に磁場閉じ込めプラズマ実験を対象としており、例として取り上げる機器が磁化プラズマ実験で標準的に使われているものになりますが、大気プラズマやプロセスプラズマの実験でも同様な、普遍的な部分も多いので参考にしていただければ幸いです。パルスパワーや大気圧プラズマの実験技術に関しては本学会誌での講座[1,2]に優れた解説がありますのでそちらも参照していただければ幸いです。また、以前にも本誌にてプラズマ実験に関する講座がありました[3]。こちらも参考になるとと思います。

1.2 本講座の構成

本講座では真空技術、高圧パルス電源、高周波電源、計測センサー、雑音対策、実験の安全性について取り上げます。本講座で想定している実験装置のポンチ絵を図1に示します。実験装置は主に、真空放電容器、磁場を作るための電磁コイルおよびの電源、プラズマ生成用の高周波電源、計測センサーとアナログ-デジタルコンバータ(ADC)で構成されています。

まず第2章で真空技術について解説します。磁場閉じ込めプラズマの日々の実験で最初に確認し操作を行うのが真空排気システムです。磁場閉じ込めプラズマ実験で用いるステンレス製の真空放電容器は超高真空と呼ばれる 10^{-5} Pa以下の真空度まで排気されます[4]。このような超高真空用のポンプバルブ、シール・フランジについて解説し、真空放電装置の設計の基礎を説明します。研究室で新たな実験を立ち上げる際には、新たな計測器や制御機器

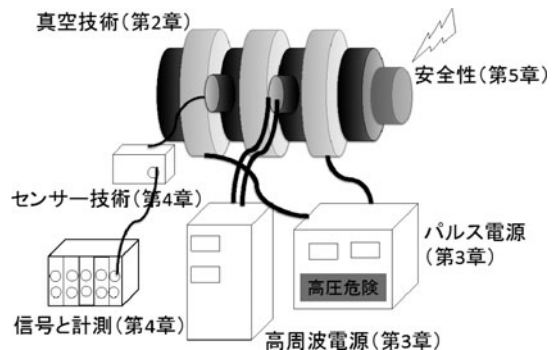


図1 典型的な磁場閉じ込めプラズマ実験装置。

を放電容器に設置する必要があります。安定したプラズマを生成するためには放電容器のバックグラウンドの真空度を非常に高く保つことに加え、放電容器の中に不純物のソースとなるものを持ち込まないことが重要となります。放電容器に取り付ける各種装置の材質や形状には充分注意する必要があります。比較的大きな機器の導入には放電容器の大気開放が必要な場合があります。放電容器を大気開放するとステンレス表面が酸化したり、水が吸着したり、と放電容器内に不純物を持ち込むこととなります。このような“汚れた”容器内壁を“きれい”にする壁洗浄（壁コンディショニング）と呼ばれる手法がいくつか確立されています（ベーキングやグロー放電洗浄等）。壁コンディショニングには多くの時間が費やされることがあります。このため大気開放をいつ行うか、ということが研究室の実験スケジュールを決定する大きな要因となります。今回の講座では取り上げませんが、実験の目的によっては壁やダイバータ板に捕捉された水素等の作業ガスも不純物として徹底的に追い出すことが必要となる場合があります。（まだ因果関係は明らかにされていませんが[5]、壁コンディショニングを徹底的に行うことで、中心部まで閉じ込めが大幅に改善される現象が多くのトカマク装置で観測されています。）壁の状態はプラズマ実験の重要な要素であり、壁の洗浄から壁の制御へと研究が進展しています。

放電容器が真空中に引いたら、いよいよ磁場コイルの励起とプラズマの生成です。磁場閉じ込めプラズマ実験では定常的にプラズマを維持するには熱の除去や計測器のダメージ等のため基礎的な直線磁場装置（例えば九州大学のPANTA装置等）でも困難であり、多くの装置ではパルス運転を行っています。また、プラズマの生成・加熱に関しては、ECR加熱またはRF加熱が用いられることが多いです。このような状況を鑑み、第3章ではパルス高圧電源と高周波電源について解説します。電流は電線を通る、というのは中学で習う理科の常識ですが、高圧、高周波数になると電流は電線を通ってくれなくなります。電線の表面を伝ったり、何か尖った所をめざして流れたりします。このように予想しないところを電流が流れるのは機器の性能云々の前に、非常に危険です。特に磁場閉じ込めプラズマ実験に用いられる電源には大容量のコンデンサが頻繁に使われています。蓄えられた大量の電荷が予期しない所を一気に流れたら大きな事故につながります。本講座では思ったとおりの道筋で電流を流すための技術について解説します。

さあ、プラズマが点きました。ここからは、圧力勾配はどこまで高くできるのか？ 予測された波は観測されるのか？ 目的によって様々な実験法があります。第4章では、その中で共通した“観測”について取り上げたいと思います。プラズマを観測するためにたくさんの計測器が考案され、開発されてきました。本講座では個別の計測器の詳細については述べません。計測器の詳細に関しては本学会誌での講座[3]や解説[6]を参照ください。今回は比較的共同に用いられているセンサー類について、用途に応じた選び方、出力される信号のタイプ等を概説します。セン

サーからの出力は微弱で雑音が多い場合があります。雑音を除去するにはその雑音はどこから来ているのか？ ノーマルモードなのかコモンモードなのか[7]？を明らかにすることが重要になります。雑音対策ではセンサーのアースに特段の注意を払うが必要になります。いくつかのセンサーのアースは放電容器に取ることがありますが、不注意で共通インピーダンスやグラウンドループを作ってしまうことがあります[8]。グラウンドループはパルス運転する装置では事故にもつながるため各種センサーのアースの設計は非常に重要です。このような電気回路的な基礎事項（ノイズ対策、フィルタ、アンプ、回路のインピーダンス）についての実践的な解説をします。センサーから得られた信号は、ひと昔前はオシロスコープで表示し、画面を写真で撮って保存していました。今はアナログ-デジタルコンバータでデジタル信号として保存し、データ解析等の再利用に供することが普通になってきました。この計測信号のデジタル化、という分野はここ20年で大きく進歩し、昔のプラズマ実験と一番大きく変わった点といえます。昔は電源の冷却や充電で次の放電までの時間が決められていましたが、最近ではADCのデータ転送時間で決まることも少なくありません。デジタル機器の高性能化、低価格化は実験の自動化にも貢献しました。手作りディレイパルサーとリレーだらけの制御盤に変わって様々な機器がLANやUSBケーブルでPCにつながるようになりました。実験者はトリガーボタンを指で押す代わりに、labview等の画面上のボタンをマウスでクリックするようになりました。

プラズマ実験に限らず、“安全”は実験を行うための大前提です。ただし、声高に“実験は安全第一に”と連呼しても、事故はなくなりません。安全確保の知識とヒューマンエラーをなくすシステムが必要です。プラズマ実験では高電圧、高周波を扱います。ぱっと考えただけでも感電には注意が必要です。その他にも磁場閉じ込めプラズマ実験に特有の要素が安全性を考える際には重要になります。第5章ではX線、強磁場、高圧ガス、液体窒素等の取り扱い方や管理法について解説します。

1.3 コラムについて

本誌編集委員会のアイデアで、本講座では各章のトピックについてベテランの先生方を中心に苦勞談・失敗談をコラムとして執筆いただきました。教科書では数行で書かれていることが、実はとんでもなく手間がかかったり、そもそも失敗談は教科書には載っていないかったり、となかなかお目にかかれないコラムです。多くの研究者が苦勞談や失敗談は非常に貴重な情報であると認識していると思います。学生の頃に聞いた失敗談は教科書よりもよく覚えていたりするように教育的効果もあります。従来、このような話は研究室で先生から学生へと口伝されてきましたが、書き物としてまとめたものはこれまでなかったように思います。今回はその一子相伝の奥義の一部を公開して共有することを試みました。コラム執筆を快諾していただいた著者の方々に感謝いたします。

本講座は3ヶ月に渡りますので、目次がわりに各章のタイトルを表1にまとめます。各章にご期待ください。

応用力学研究所共同研究での議論が本章の内容をまとめるのに有益でした。ここに感謝の意を表します。

表1 本講座の目次.

1章	さあ実験だ！実験やるよ～	稲垣 滋 (九大)
2章	プラズマ容器を真空に引くよ！ コラム1 “小リークと見て侮る勿れ”	岡本 敦 (東北大) 鈴木直之 (NIFS)
3章	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！	浅井朋彦 (日大), 郷田博司 (TAE)
3.2	高周波電源を使いこなす！ コラム2 “膜に火が付く” コラム3 “水を得たクーリングタワー” コラム4 “定常の道も1時間から”	笠原寛史 (NIFS) 中村一男 (九大) 熊沢隆平 (NIFS) 熊沢隆平 (NIFS)
4章	プラズマのいろいろなパラメータを測るよ！	
4.1	センサーを使ってプラズマを診る！	山本 聡 (京大)
4.2	信号を正しく伝送する！ コラム5 “一寸の光軽んずべからず” コラム6 “知らぬことは識者に習え” コラム7 “ソフトよくハードを制御す”	江角直道 (長野高専) 北島純男 (東北大) 北島純男 (東北大) 山田琢磨 (九大)
5章	楽しい実験は安全第一の精神から！ コラム8 “3人寄れば責任の穴”	江尻 晶 (東大) 松岡啓介 (NIFS)
6章	おわりに	稲垣 滋 (九大)

参考文献

- [1] 講座「パルスパワー技術入門」, プラズマ・核融合学会誌 87, No.1-4 (2011).
- [2] 講座「大気圧プラズマを点けてみよう」, プラズマ・核融合学会誌 83, No.11~12 (2007); 同 84, No.1 (2008).
- [3] 講座「プラズマ実験入門」, プラズマ・核融合学会誌 71, No.7~12 (1995).
- [4] 講座「プラズマ装置からの真空工学・排気技術」, プラズマ・核融合学会誌 71, No.7~12 (1995).
- [5] 炉心と周辺が長距離相関をもつことはわかってきました. 小特集「プラズマ乱流実験の新展開」プラズマ・核融合学会誌 88, 300 (2012).
- [6] 解説「プラズマ計測のためのマイクロ波反射計」, プラズマ・核融合学会誌 79, 742 (2003).
- [7] ノーマルモードノイズは信号線間に発生するノイズでノイズ電流は逆方向になります. コモンモードノイズは信号線とGNDとの間に発生するノイズでノイズ電流は同方向となります.
- [8] 共通インピーダンスは回路間の配線等によって生まれる各回路に共通したインピーダンス. グランドループはグランド線が長く引き回されていて, ループを作っている状態. どちらも回路の実装によって生まれるので回路図には載っていません.