

Title	回転プラズマの基礎的研究
Author(s)	早川, 茂
Citation	
Issue Date	
Text Version	none
URL	http://hdl.handle.net/11094/28689
DOI	
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

【15】

氏名・(本籍)	早川茂
	はやかわ しげる
学位の種類	工学博士
学位記番号	第 441 号
学位授与の日付	昭和 38 年 8 月 29 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
学位論文題目	回転プラズマの基礎的研究
	(主査)
論文審査委員	教授 吹田 徳雄
	(副査)
	教授 桜井 良文 教授 犬石 嘉雄 教授 佐野 忠雄
	教授 品川 睦明 教授 伊藤 博

論文内容の要旨

核融合反応の研究において、その方向はプラズマのとじ込めと加熱にあると言える。回転プラズマは半径方向電場とそれに直交する磁場、すなわち直交電磁場中の放電によってプラズマを作り、このプラズマの円周方向へのドリフトによって発生する。従って回転プラズマの反磁性電流によるミラー形磁場の形成によってプラズマのとじ込めが、また回転運動をプラズマに付与することによるプラズマの加熱が可能である。

さらに核融合反応の研究等においては電氣的エネルギーを高速放電する装置として比較的小さな容積に大きなエネルギーを蓄積し、しかもそれを短時間に放出しうるコンデンサの開発が待望され、この目的に沿うものとして上記回転プラズマを誘電体と見做した“プラズマコンデンサ”の実用化が考えられる。

本研究は直交電磁場中でこのような回転プラズマを発生する上において解決しなければならない問題の実験的解明を行なったものである。

この問題点を回転プラズマを作る直交電磁場中の放電と言う立場から要約すると

(1) 回転プラズマを作るために電極間にパルス電圧を印加して火花放電を発生させるが、このような直交電磁場中でしかも強磁場の作用の下での火花放電について各放電電圧特性は明確に与えられていない。

(2) 従来直交電磁場中の放電機構は比較的弱い磁場の範囲内で、しかも空間電荷の効果を無視して考察されてきた。従って回転プラズマを発生させるに要するような強磁場の作用の下で、空間電荷を考慮した放電機構を問題にしなければならない。

(3) 放電機構は一般に放電形式と関聯する。磁場が存在しない場合には各放電形式(例えば Townsend 放電, グロー放電, アーク放電)が定義され、その放電機構に基づいて各形式間の遷移も明かにされているが、磁場が作用するときはその効果がどのような形で各放電形式、また形式間遷移に影響を与えるかは未分明である。

(4) パルス電圧印加によって火花放電を発生させる場合普通放電の遅れ時間が観測される。この遅れ時間は荷電粒子の運動状態によっても影響され、従って磁場の効果が予想される。事実磁場中の瞬間放電によってプラズマを作る一部の核融合反応の実験装置においては多少とも、この遅れ時間に対応するものが観測されている。しかしこの方面の系統的な研究は見られない。

(5) プラズマの測定手段として比較的簡便な方法である電気探針法は従来磁場が存在しない場合について理論的にも確立されている。しかしこの方法で回転プラズマの測定を行なう場合、必然的に磁場中で測定しなければならない。従って磁場の作用の下での探針測定について検討を加えなければならない。

上の各問題点に関連して、本論文の内容を以下に要約して記述する。

強磁場の作用の下における直交電磁場中の火花放電電圧特性については、ガス圧、電極間距離および磁場の放電電圧に対する関係を求めた。これらの実験結果は傾向的には磁場が存在しない場合の放電特性と同じく最小放電電圧の存在を示す特性曲線になり、磁場の存在は等価的にはガス圧の増加に対応すると考えて定性的に説明することが出来た。この等価ガス圧の概念は従来の研究においても実験結果を説明する主流をなす考え方であるが、本論文では探針測定において観測された放電遅れ時間中の空間電位の時間的な変化を考慮して旋回中心の電場方向への変位から等価ガス圧 p_e を通常ガス圧 p に対して近似的に

$$\frac{p_e}{p} \approx \frac{v_d}{v_r}$$

として求めた。ここには v_d , v_r はそれぞれ旋回中心の円周方向および半径方向の速度である。

さらに火花放電の遅れ時間については、その印加電圧または過電圧率、磁場、ガス圧および電極間距離に対する関係を求め、またこの遅れ時間中の電気探針による空間電位の測定を行ない、これらの遅れ時間は主として火花形成の遅れ時間に対応し、電圧印加に次いで漸次空間電荷が集積されて、空間電位分布が時間的に変化してゆく過程を示した。特に主放電電流流入による電極間の火花放電は陰極前方における空間電位の上昇にともなって発生することを明らかにした。この遅れ時間の各放電パラメータに対する関係は強磁場においては移動度の極度に減少する電子の電極間移動時間に基づいて考察し、各実験結果を解釈することが出来た。

放電機構を明らかにするためには放電電流を数 mA に制限した自続放電をとりあげた。

従来この領域の研究は主として平行平板形電極配置におけるグロー放電形式に限定されていた。また近來核融合反応への応用としてプラズマの実験が、磁場によるプラズマのとじ込めと言う方向に進められるに従って磁場を横切る拡散が重要な問題としてとりあげられ、それに関連して理論的実験的研究も精力的に行なわれてきたが、それらのほとんどは所謂“縦方向 (longitudinal)”磁場の作用の下で、本実験におけるようなどちらかと言えば“横方向 (transverse)”磁場の効果はとりあげられていない。

実験した各放電パラメータの範囲では、放電状況、放電電流電圧特性、空間電位分布、イオン密度分布、分光測定から明らかに3つの放電形式が存在し、この各放電形式間の遷移は電流、磁場、ガス圧の変化によっておこることを示す。実験に使用したすべてのガス(ヘリウム、アルゴン、窒素、空気)について、この一般的な傾向は同じである。

“放電形式Ⅰ”は通常のグロー放電に対応するもので、顕著な陰極降下の存在、電流の増加による正規グローから異常グローへの移行等グロー放電の一般的な性質を示す。“放電形式Ⅲ”は強磁場特有のもので実

験ならびに考察からこの放電形式では電離は主として陽極降下部で行なわれることを明かにする。電流の増加と共に陰極近傍の空間電位が上昇し、この部分での電離が可能になって“放電形式Ⅱ”に移行する。形式Ⅱは間欠火花放電で、その放電断続の周期は放電電流（平均値）に逆比例し、磁場の存在しないときの間欠放電の一般特性と一致する。電流をさらに増加すればⅡは上記放電形式Ⅰに移行し陰極降下部で放電が自続される。

本論文では各放電形式における放電定数（空間電位，電子温度，イオン密度）を主として Langmuir 形平面探針によって測定し，それぞれの半径方向，軸方向分布を得た。これらの実験結果は各放電形式の分類定義に有用であったばかりでなく，回転プラズマの損失機構に関連する軸方向への損失について情報を供した。この電気探針による測定を検討する意味で行なった圧電素子による回転プラズマの運動量測定の結果はイオン密度に対する探針測定の結果とよい一致を示した。

すでに述べたように放電形式Ⅲは強磁場に特有であって，その陽極降下電位 V_a は，陽極前方に形成される電子の空間電荷（電子さや）の長さが磁場 B によって変化することを考慮して

$$V_a = \left(\frac{2eV_i}{m} \right)^{\frac{1}{2}} d_0 B^{\frac{2}{3}}$$

で示し，この関係から形式Ⅲの放電特性を定量化し，実験結果とほぼ妥当な一致を得ることが出来た。また探針特性における電子飽和電流とイオン飽和電流の比および衝突によるエネルギー損失の平均比率は衝突拡散を前提として求めたものが実験値を満足することから，形式Ⅲでの電子の磁場を横切る電場方向への移動は古典的な衝突拡散と考えられ，このことに関連して形式Ⅲの強磁場側での消滅は，異常拡散をひきおこす何等かの不安定性によるものと考えられる。

自続放電における放電定数の測定に主として使用した電気探針法については，強磁場が作用している場合の探針測定に対する基本的な考え方を，磁場が存在しない場合の探針理論と関連して考察した。その結果少なくとも低ガス圧でイオンのラーマ半径が探針の大きさより大きい時には，磁場の存在しない場合の探針特性のうち負探針特性はそのまま通用すると考えられ，空間電位，電子温度，イオン密度は求められる。これらの単探針法による実験結果を検討する意味で，磁場の効果が比較的少いと考えられる複探針法をとりあげ，単探針法による測定値と妥当な一致を示すことを明らかにした。

遷移するプラズマにおける探針測定については空間電位の測定に限定し，その結果の妥当性を実験的に検討した。

一般に大きなエネルギーパルスの発生回路に使用され真空火花ギャップスイッチについてはプラズマコンデンサの充放電回路に挿入すると言う面からスイッチの動作特性，特に消弧特性を問題にした。始動特性としては始動の遅れ時間は始動電圧よりもトリガパルス電圧に依存し，始動時間のばらつきは逆に始動電圧によって大きく影響されること，これらの始動はトリガパルスのギャップに与えるエネルギーが一定値に達した時におこることを示す。消弧特性としてこの種のスイッチは消弧時間は数 $100\mu\text{sec}$ に達し，速い消弧を要する場合不適當であることを示す。

最後に回転プラズマの応用としてプラズマコンデンサ以外に高耐圧大電流整流器，磁気点弧器が考えられること，および本論文の主な結論ならびに今後の問題点を示した。

論文の審査の結果要旨

本論文はプラズマのとじ込めと加熱およびプラズマコンデンサに関連した直交電磁場中の放電機構を実験的に研究したもので、本文6編よりなっている。

第Ⅰ編は序論であって、回転プラズマを作るためには直交電磁場中に放電を発生させることが必要であるが、従来の研究は比較的弱い磁場の範囲内に限定され、プラズマのとじ込めと加熱を目的とするような数キロガウス以上の強磁場での放電機構の研究は発表されたものが少ない。このような見地から本論文は数種の気体について最高磁場 13,500ガウス、最大電流 3,000アンペアまでの範囲で、放電電圧特性、電圧印加時の放電の遅れ、放電形式等を中心に回転プラズマの基礎的研究を行なったものであることを述べている。

第Ⅱ編では、軸方向に磁場の作用する同軸円柱状電極間にパルス電圧を印加したときに発生する火花放電の放電電圧特性、放電の遅れおよび空間電位分布について得た実験結果と磁場の影響を論じている。

第Ⅲ編では、放電現象に対する磁場の影響を明らかにするために放電電流を数ミリアンペアに制限した自続放電をとりあげ、磁場のない場合の放電形式と比較検討している。

第Ⅳ編では、本研究のプラズマ定数測定に使用した電気探針法について磁場のある場合の問題点を検討している。

第Ⅴ編はプラズマコンデンサの充放電回路に挿入される真空火花ギャップスイッチについてその動作特性を吟味している。

第Ⅵ編は結論として、本研究によって明らかにされた点を要約して述べている。

要するに本論文はプラズマのとじ込めと加熱およびプラズマコンデンサに現われる直交電磁場中の放電発生機構を究明したもので、その結果、強磁場の作用する場合の火花放電特性の空間的、時間的変化の過程を明らかにし、また自続放電に関して、磁場のある場合の放電形式の分類を提案し、プラズマコンデンサの損失機構、プラズマの異常拡散に通ずる不安定性を指摘した。これらはプラズマ工学上寄与するところが大きい。

よって本論文は学位論文として価値あるものと認める。