

ガス中高磁場発生方法の開発

米田研究室 下河原 浩志

1. ガス中での高磁場発生

1.1 ガス中での高磁場発生の目的

高強度レーザーを用い、宇宙で起きている現象の模擬を実験室で行おうとする実験室天文学という研究が大型レーザー施設で行われるようになってきている。宇宙線は無衝突衝撃波によるフェルミ加速によって高エネルギーを得た荷電粒子がその起源ではないかと提唱されている。これを確かめるには無衝突磁場の実験が不可欠であり、ガス中高磁場を発生させることが必要となる。希薄な 1Torr 程度のガス中に数 10Tesla の磁場が印加された状態を初期条件とすることが必要となってきている。

1.2 フェルミ加速

今回の実験のテーマの一つは宇宙線の起源の探求である。宇宙線の起源について実験室で再現するにはガス中で数テスラの磁場を発生させなくてはならない。フェルミ加速とは荷電粒子が無衝突衝撃波面を往復すると加速するというモデルで、これによって高エネルギーを得た荷電粒子が起源であると考えられている。

重い粒子と軽い粒子系が弾性衝突するときエネルギー等分配に向かうので、軽い粒子系の加速となる。今、「重い粒子」が磁場を持つ星間雲とし、軽い粒子を陽子などのイオンとすると正面衝突の場合加速し、追突のとき減速する。雲とランダムで衝突するとき相対速度は大きいので正面衝突の方が多くなり全体として加速になる。これをフェルミ加速という。

1.3 パッシェンの法則

今回、差動チャンバーを作成する際、どの程度の真空度であれば高真空側での放電がないかを考えなければいけない。

図 1 はパッシェン曲線である。パッシェン曲線は電極間絶縁破壊電圧は電極間距離と真空度の積で表せることを実験で求めたものである。

パッシェン曲線から、電極間に 10kV を印加した時、少なくとも 0.2Torr.cm が必要であることがわかる。

今回の実験ではコイルに導波路を通して大電流を流し、磁場を発生させる。10T の磁場を発生させるために電極間距離が 50 μ m の導波路に 10kV 以上印加する。したがって高真空側は最低でも 1.0×10^{-3} Torr は真空度が必要であることが分かる

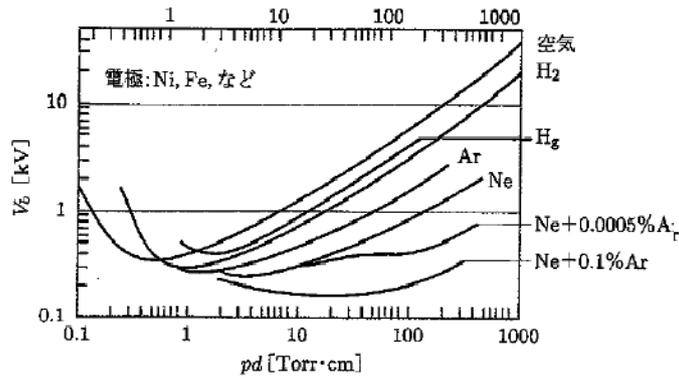


図 1.1 パッシェン曲線

2 実験装置

2.1 差動チャンバー

チャンバーの大きさの都合、導波路は 3m で設計した。導波路は銅板にカプトンを巻いて作成した。1.3 で述べたようにガス中では絶縁破壊が起きやすい。そこでコイル部 20cm を低真空にしそれ以外を高真空にすることでコイル部以外では絶縁破壊が起きないようにした。コイル部では電極間距離を広げることで絶縁破壊を防ぐ。

電極間距離はインダクタンスに影響する。電極間距離が長いと発生する磁場のパルス幅が長くなり、高磁場が発生しない。そのためにも高真空側の電極間距離は短くしなければいけない。低真空側は高真空側よりも長さが短いので電極間距離を広げても無視できる。

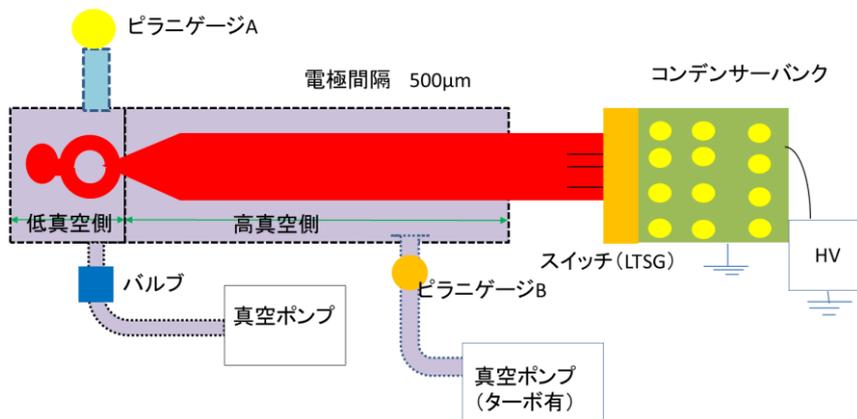


図 2.1 チャンバー全体図

差動部は図 3 のようにした。

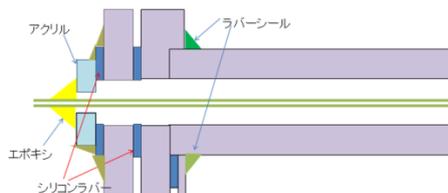


図 2.2 差動部

2.2 コイル・導波路

今回実験で使用する導波路の先端に装着するコイルは幅 2.5mm、内径 2mm、外径 8mm のスパイラルコイルとした。コイルのインピーダンスは、

$$\omega L_{coil} = 0.90\Omega \quad (2.1)$$

であり、電源側のインピーダンスも約 1Ω にしなくてはならない。導波路のインピーダンスは次式で示される。

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon}} \left[\frac{W}{d} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{d} + 1.444 \right) \right]^{-1} \quad (2.2)$$

W は導波路の幅、d は厚みである。ε は電極間の誘電率でありカプトンの 3.4 とした。Z₀ を 0.91Ω にすれば W = 33mm、d = 0.15mm で作ればよい。

2.3 スイッチ

電源はコンデンサーバンクに蓄えられたエネルギーを高速な立ち上がりで扱う必要がある。このため本研究ではレーザー光をトリガーとしたスパークギャップトリガー(Laser Trigger Spark Gap:LTSG)を用いた。

LTSG の原理は図のように半球状の電極間にレーザーを照射し、部分的に絶縁破壊を起こしてそれをトリガーとして電極間の絶縁破壊を起こさせるスイッチである。LTSG はジッタが小さいため、複数のスイッチを同期して動作することが可能である。そのため、並列接続したコンデンサーバンクを同時にスイッチすることで大電流をコイルに与えることができる。本研究で用いた LTSG はギャップ間隔 10mm、トリガを入れない状態時の絶縁破壊電圧は 25KV であった。

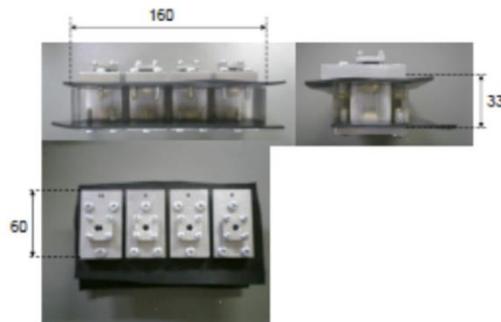


図 2.3 LTSG

3 実験結果

3.1 差動チャンバーの動作確認

作成した差動チャンバーの確認を行った。高真空側と低真空側の真空度の変化を図 3.1, 3.2 に示す。低真空側が 5Torr でも 5 分間高真空側は変化しなかった。

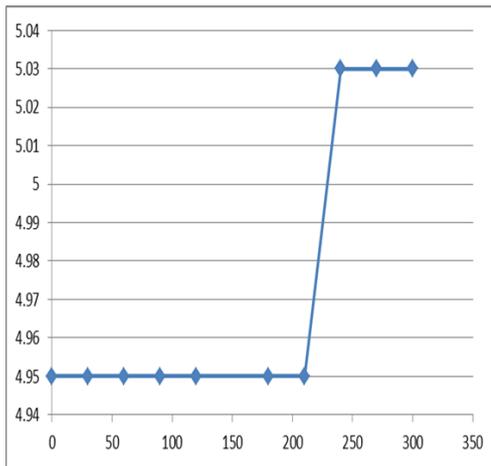


図 3.1 低真空側の真空度

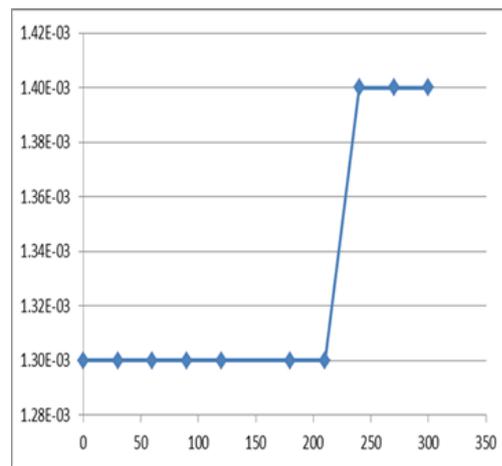


図 3.2 高真空側の真空度

低真空側と高真空側の真空度の関係を図 3.3 に示す。

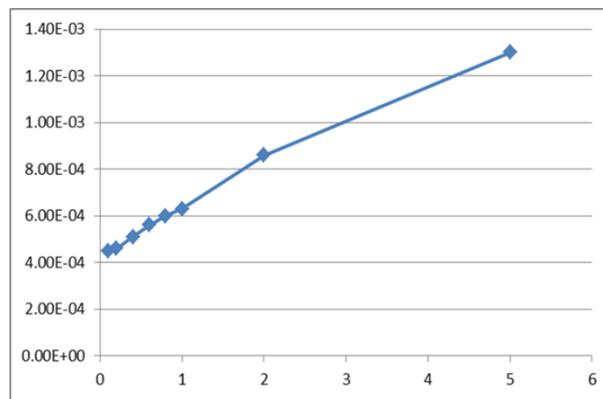


図 3.3 低真空側と高真空側の関係

4 今後の課題

実際に磁場を作成しピックアップコイルを用いて測定したところ、パルス幅は $2.3 \mu\text{m}$ であった。過去の実験結果から 10T の磁場を作成するにはパルス幅は $1.5 \mu\text{m}$ より短くある必要がある。今回は確実に絶縁させるために過去の実験で使ったカプトンよりも $5 \mu\text{m}$ カプトンを使ったがそのせいで電極間距離が許容できないほど広がっていることが考えられる。

5 参考文献

[1] Sarri G, Macchi A, Cecchetti CA, Kar S, Liseykina TV, Yang XH, Dieckmann ME, Fuchs J, Galimberti M, Gizzi LA, Jung R, Kourakis I, Osterholz J, Pegoraro F, Robinson AP, Romagnani L, Willi O, Borghesi M..

Dynamics of self-generated, large amplitude magnetic fields following high-intensity laser matter interaction.

[2] 大道博之 超短パルス超高強度レーザーと物質との相互作用

[3] 三浦登 強磁場の発生と応用 共同出版株式会社

[4] 有馬宏和 高出力レーザー圧縮による超高磁場発生の研究、修士論文 2006

[5] 長嶺和慶 高出力レーザーを用いた磁場圧縮ターゲットの研究 卒業論文 2012