

小山高専における サイクロトロン加速器の運転

加速器作成メンバー

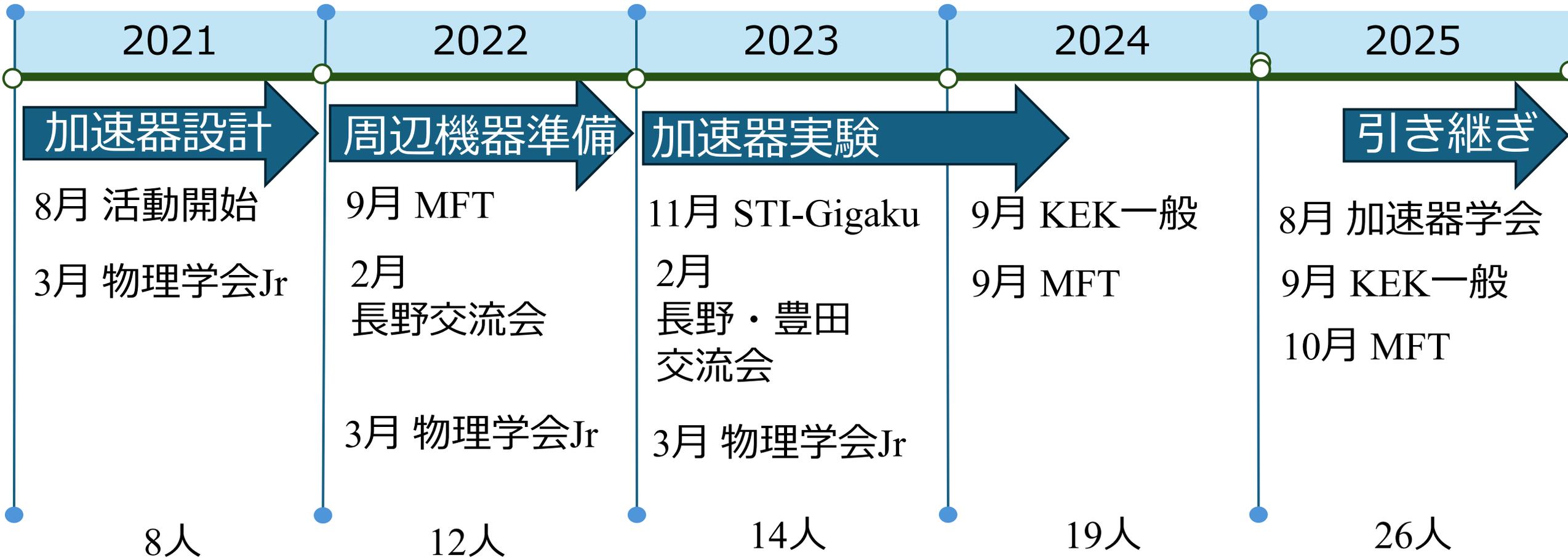
機械工学科 : 小暮聡、五味淵陸、塚原龍壺

電気電子創造工学科 : 福田蒼樹、長澤陽生、片山尋士

物質工学科 : 青木想弥

計7名

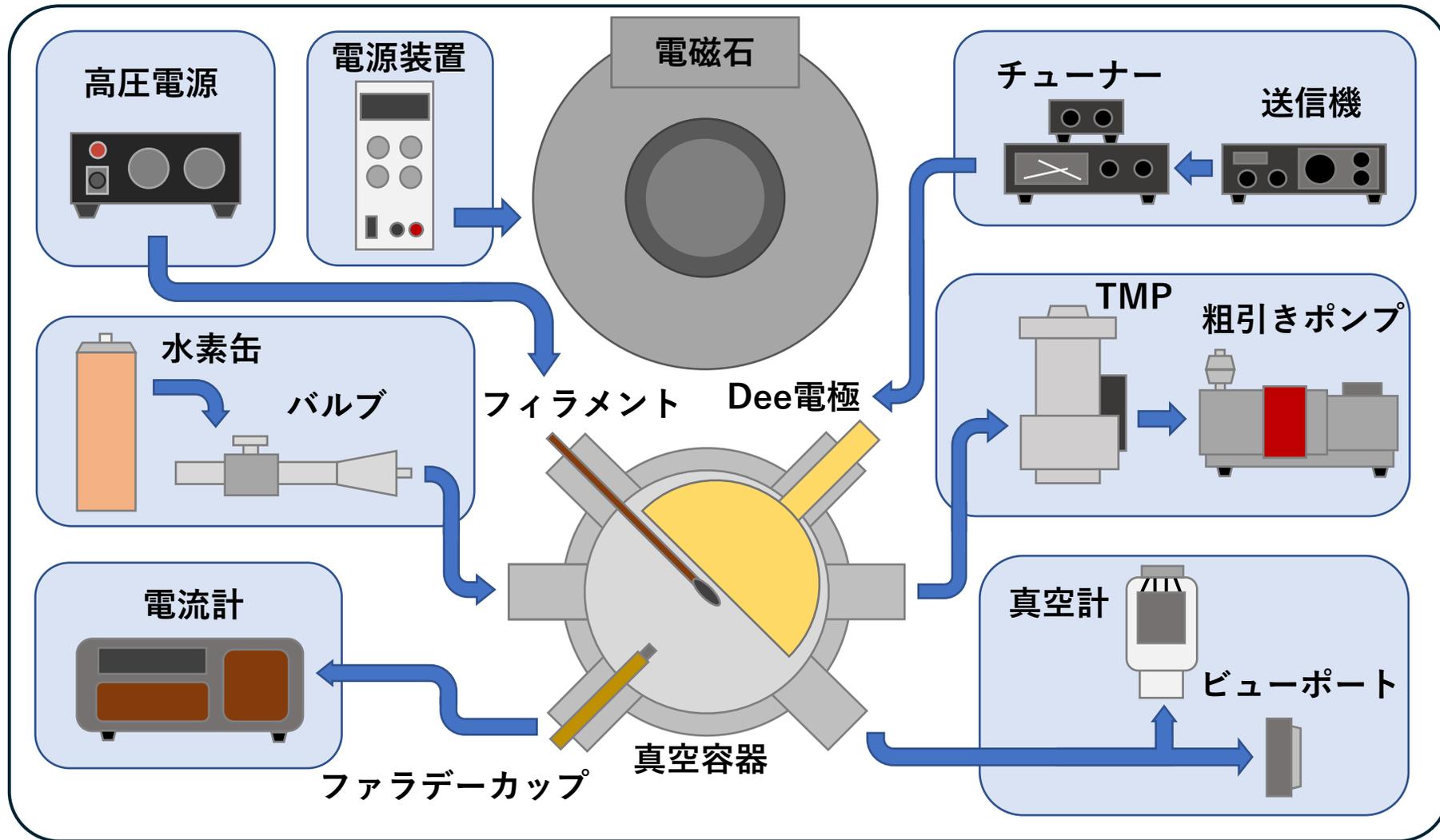
今までの活動の流れ



目次（実験準備）

1. 電磁石関係
2. チェンバ、Dee電極の設計
3. 真空ポンプ関係
4. 計算
5. フィラメントとバイアス電圧

実験の使用機器



必要磁場の確認

陽子の加速に必要な磁場を確認する。

m : 陽子の質量 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

q : 陽子の電荷 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

f : 周波数 $3.5 \times 10^6 \text{ Hz}$

周期 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ より、磁場 $B = \frac{2\pi m}{qT} = \frac{2\pi m f}{q}$

$$B = \frac{2\pi m f}{q} = \frac{2\pi(1.67 \times 10^{-27}) \times (3.5 \times 10^6)}{(1.6 \times 10^{-19})} \doteq \underline{\underline{200 \text{ mT}}}$$

電磁石の性能実験



目的

今後の計算で用いる磁場の値を検証する。

方法

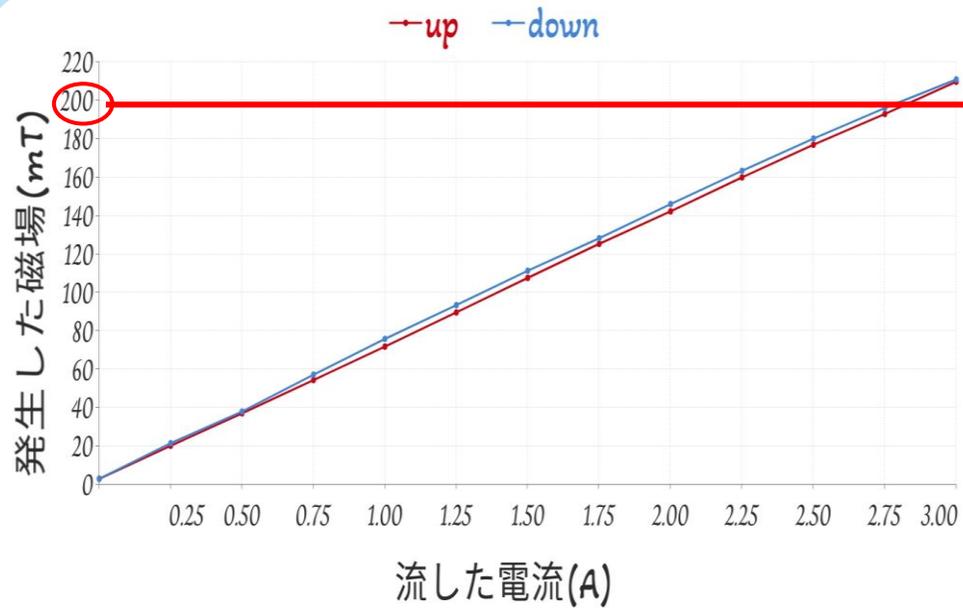
A地点：鉄心中心部

B地点：鉄心側部

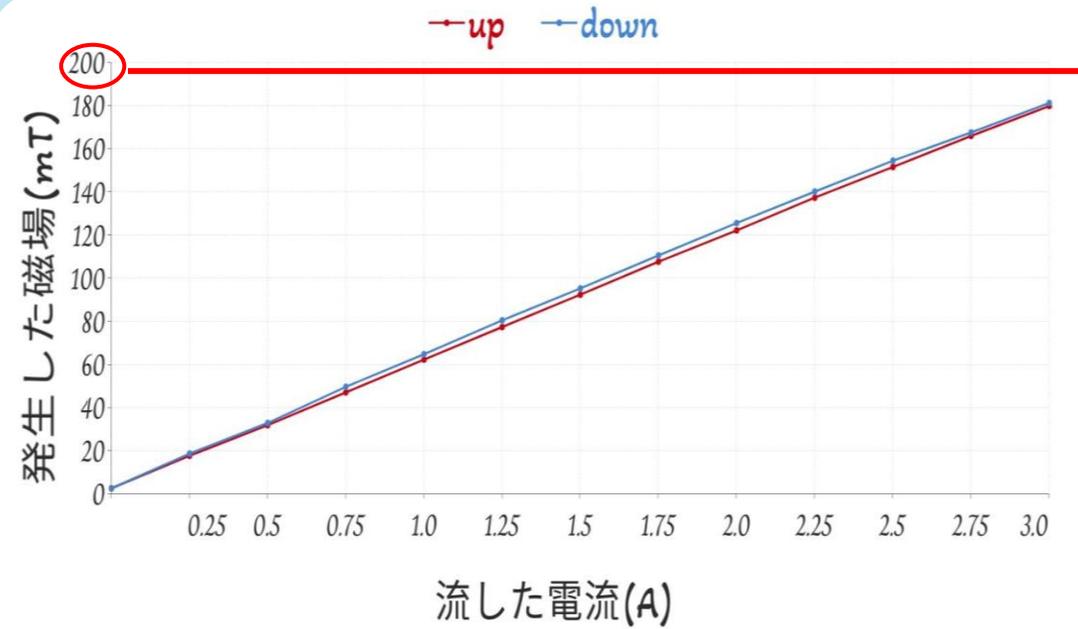
C地点：非鉄心部

各地点で0~3Aまで電磁石に電流を流し磁場の変化を記録する

電磁石の性能実験結果



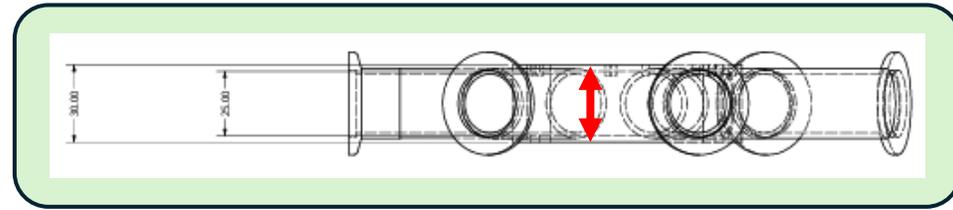
流した電流と発生した磁場の関係 (地点A)



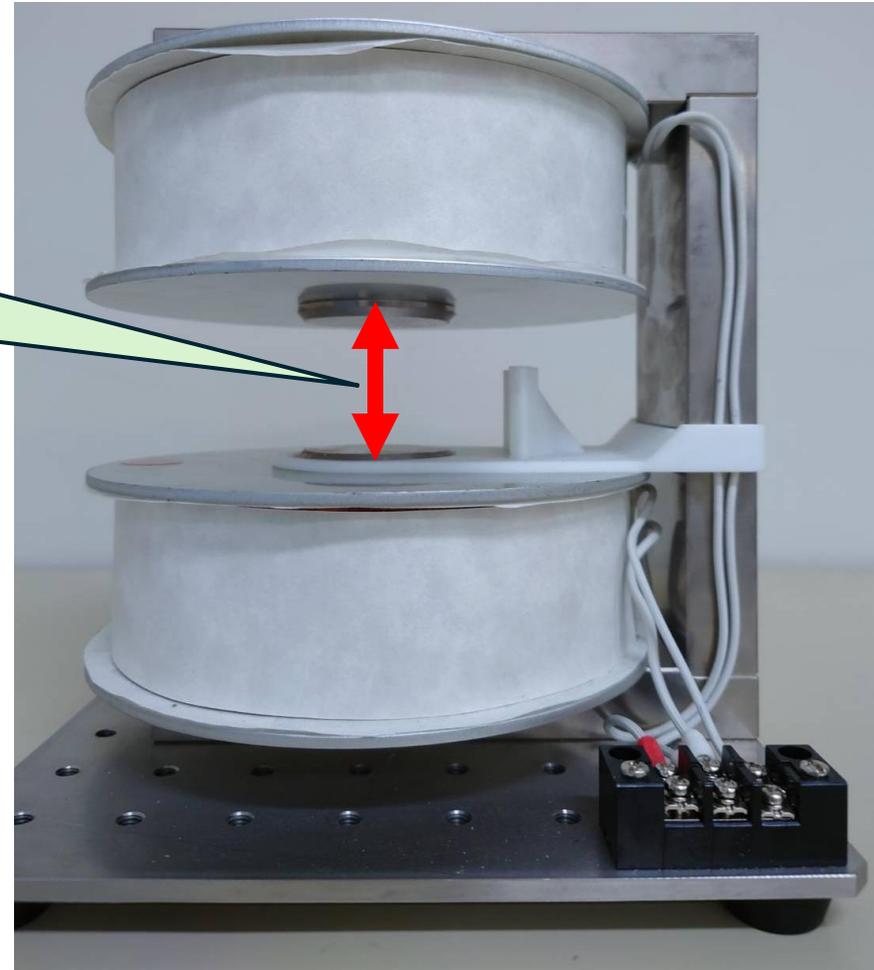
流した電流と発生した磁場の関係 (地点B)

地点Cは電流を流しても磁場の変化が少なく、200mTに達しなかった(3Aで60mT)

チェンバーの設計

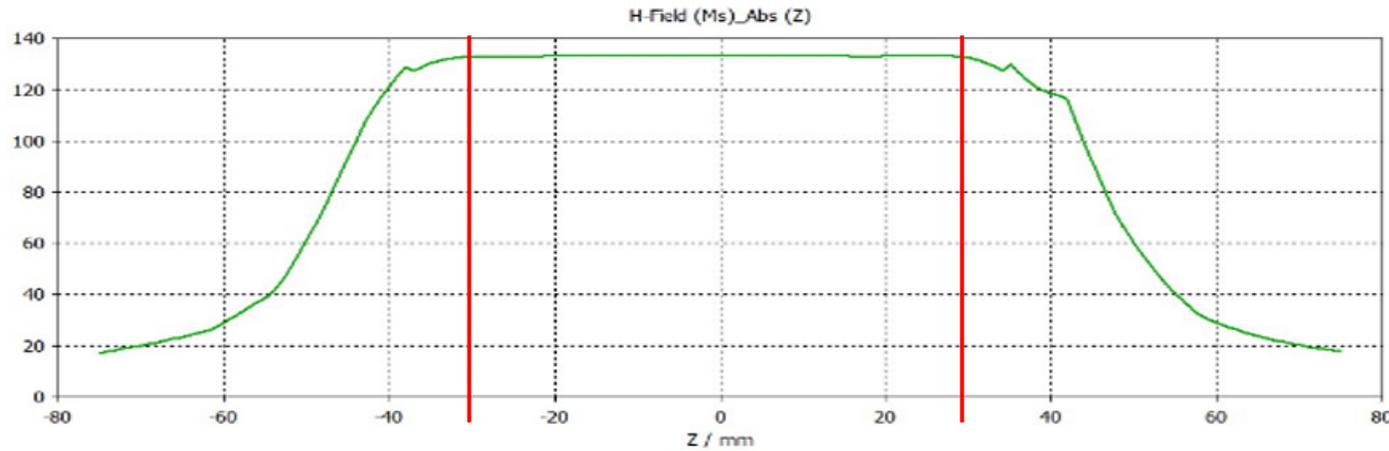


チェンバーの厚み
は電磁石の鉄心部
分の空間の幅から
設計

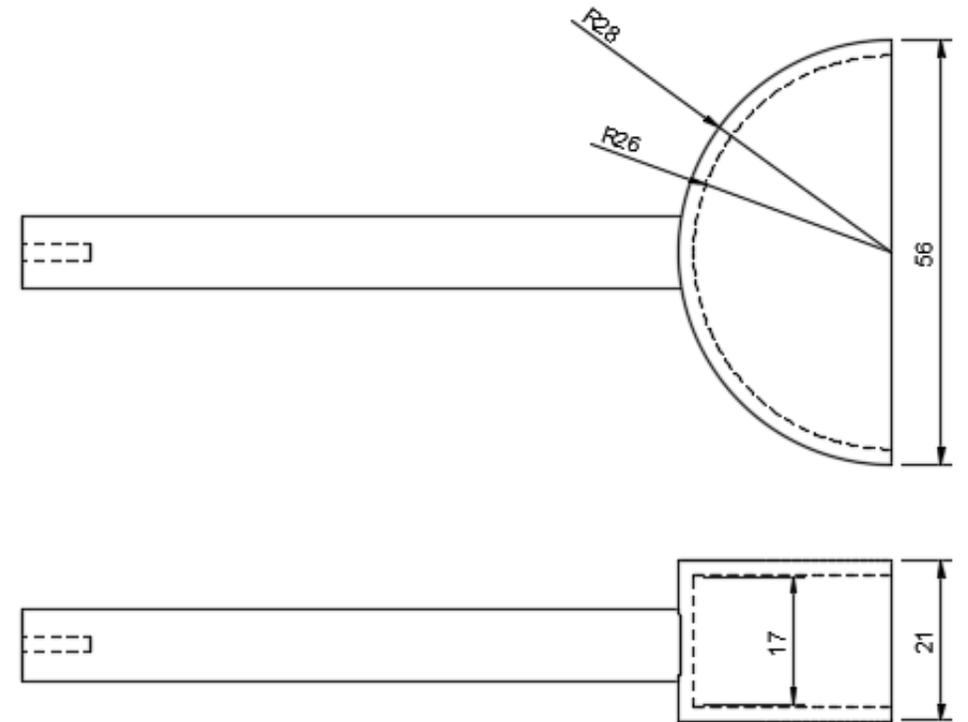


Dee電極の設計

CST での解析の結果



D電極直径



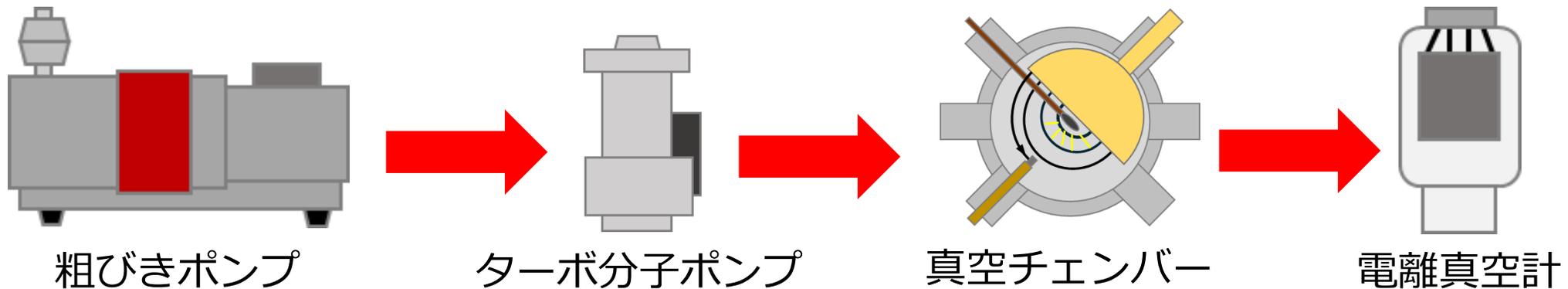
実験時の真空度測定実験

目的

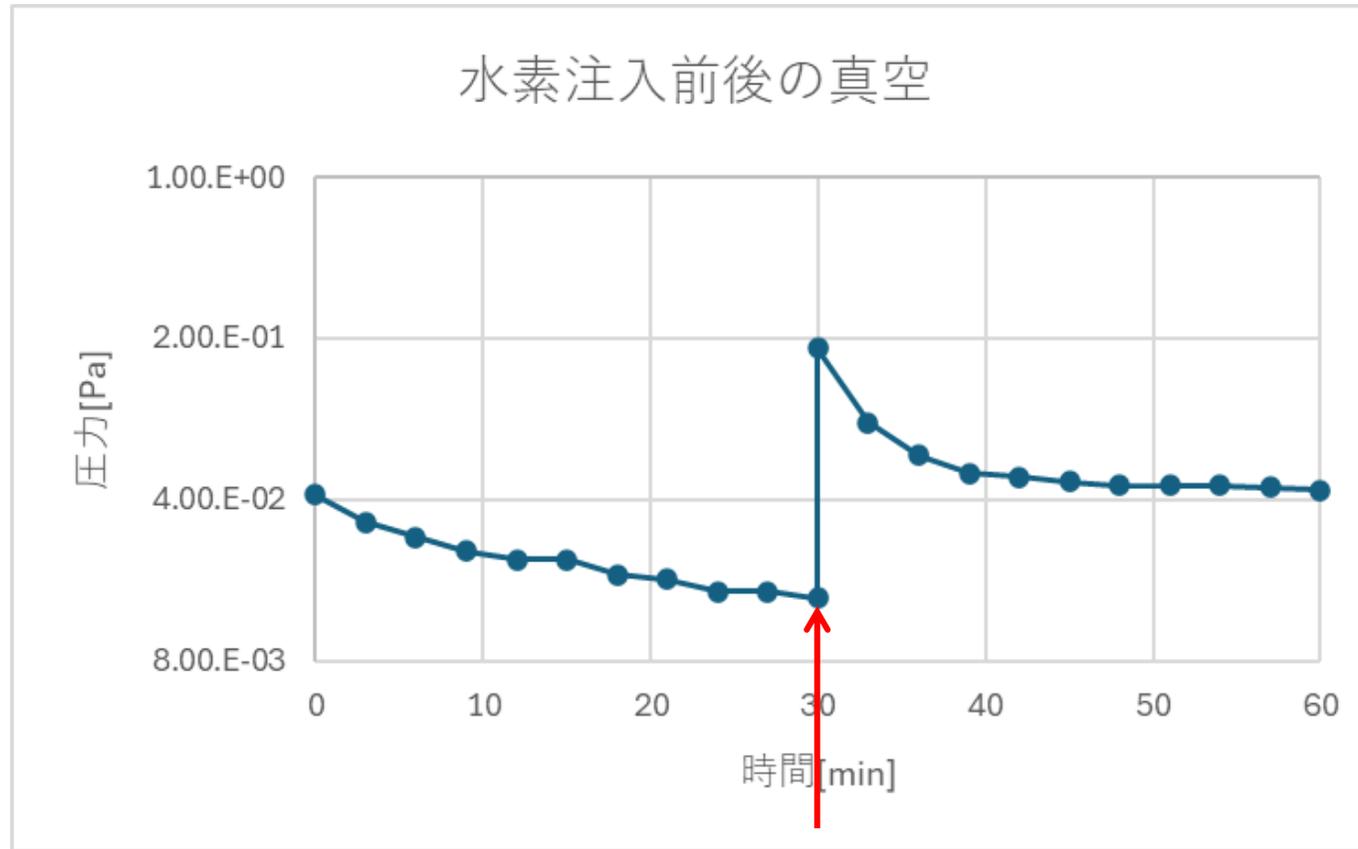
平均自由行程の計算のため、実験時の真空度の基準を定める

方法

1. 粗びきポンプを起動して、10分後にターボ分子ポンプを起動
2. 分子ポンプの最大値(800rps)で運転しているタイミングを基準($t = 0$ 分)とする。
3. 基準から3分ごとに真空度の計測を行う。基準から30分後に ($t = 30$ 分) 水素の注入を開始する。その後、60分まで ($t = 60$ 分) まで計測を行う。



真空度測定実験の結果



水素注入

真空度を $4.5 \times 10^{-2} \text{Pa}$ として計算を行う

平均自由工程の計算

平均自由行程

λ : 平均自由行程[m]

σ : 理想気体の粒子の数密度[m⁻³]

T : 温度[K]→293K(20℃)

P : 圧力[Pa]→4.5×10⁻²Pa

R : 気体定数 = 8.31

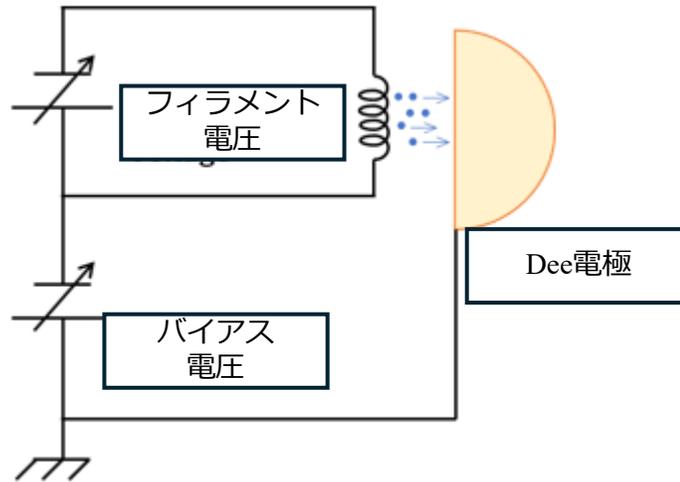
r : 空気分子半径[m]→(185×10⁻¹²)m

※ここでは窒素分子で計算している

$$\sigma = 6.02 \times 10^{23} \times \frac{P}{RT} = 6.02 \times 10^{23} \times \frac{4.5 \times 10^{-2}}{8.31 \times 293} = 1.1126 \times 10^{19}$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi r^2 \sigma} = \frac{1}{\sqrt{2} \times \pi \times (185 \times 10^{-12})^2 \times 1.1126 \times 10^{19}} = 0.59\text{m}$$

フィラメント電源について



粒子を加速させる際、フィラメントからの熱電子を水素と衝突させてイオン化させる。

熱電子の発生にはフィラメント電圧が、熱電子の放出には、バイアス電圧が必要である。

目次 (実験)

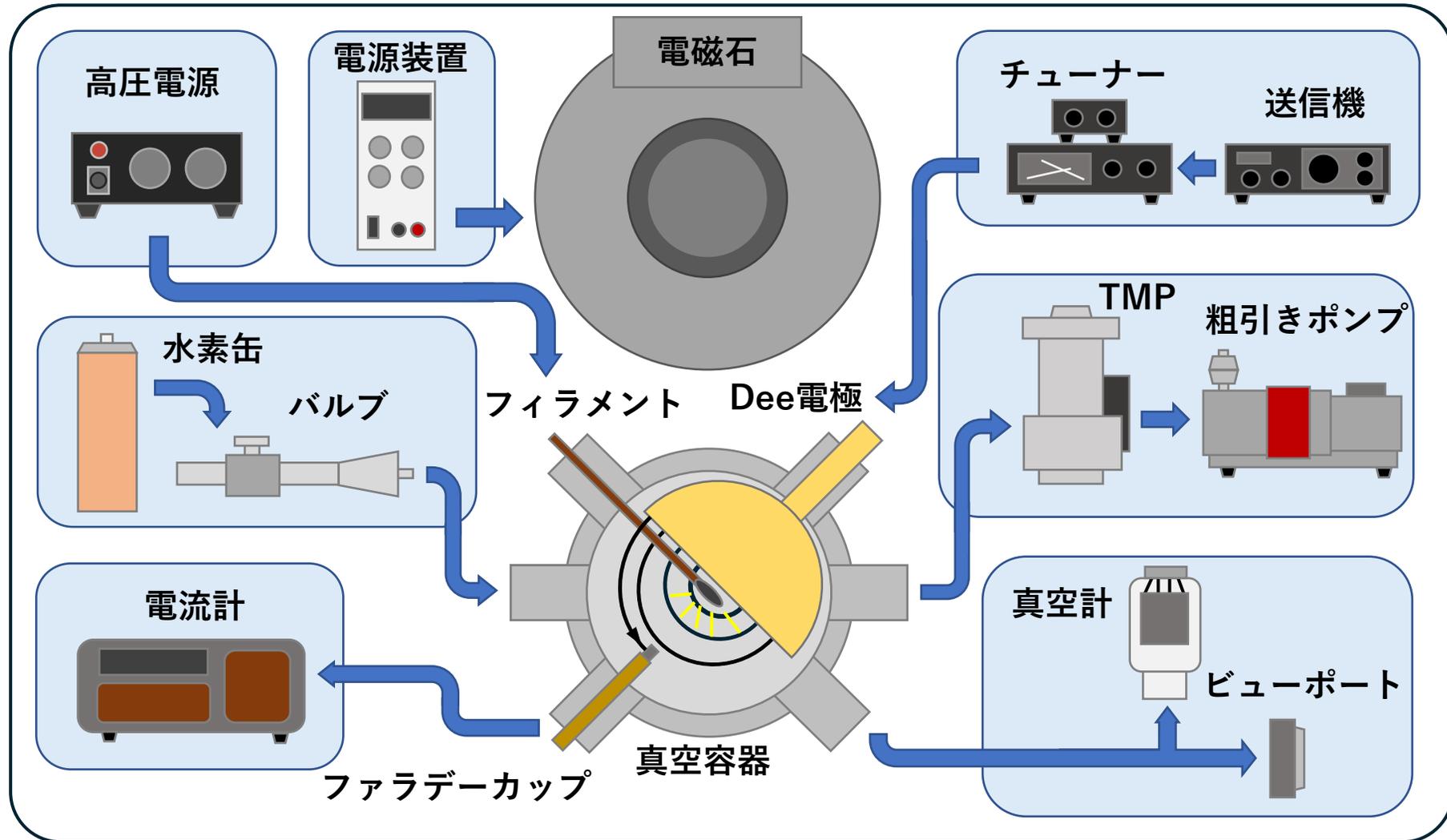
加速器実験

- | | |
|--------|---------|
| 1 目的 | 5 結果 |
| 2 使用機器 | 6 まとめ |
| 3 方法 | 7 今後の展望 |
| 4 条件 | |

目的

- 作成を行った加速器の動作確認
- 改良点の洗い出し
- 加速器の出力の確認

実験の流れ



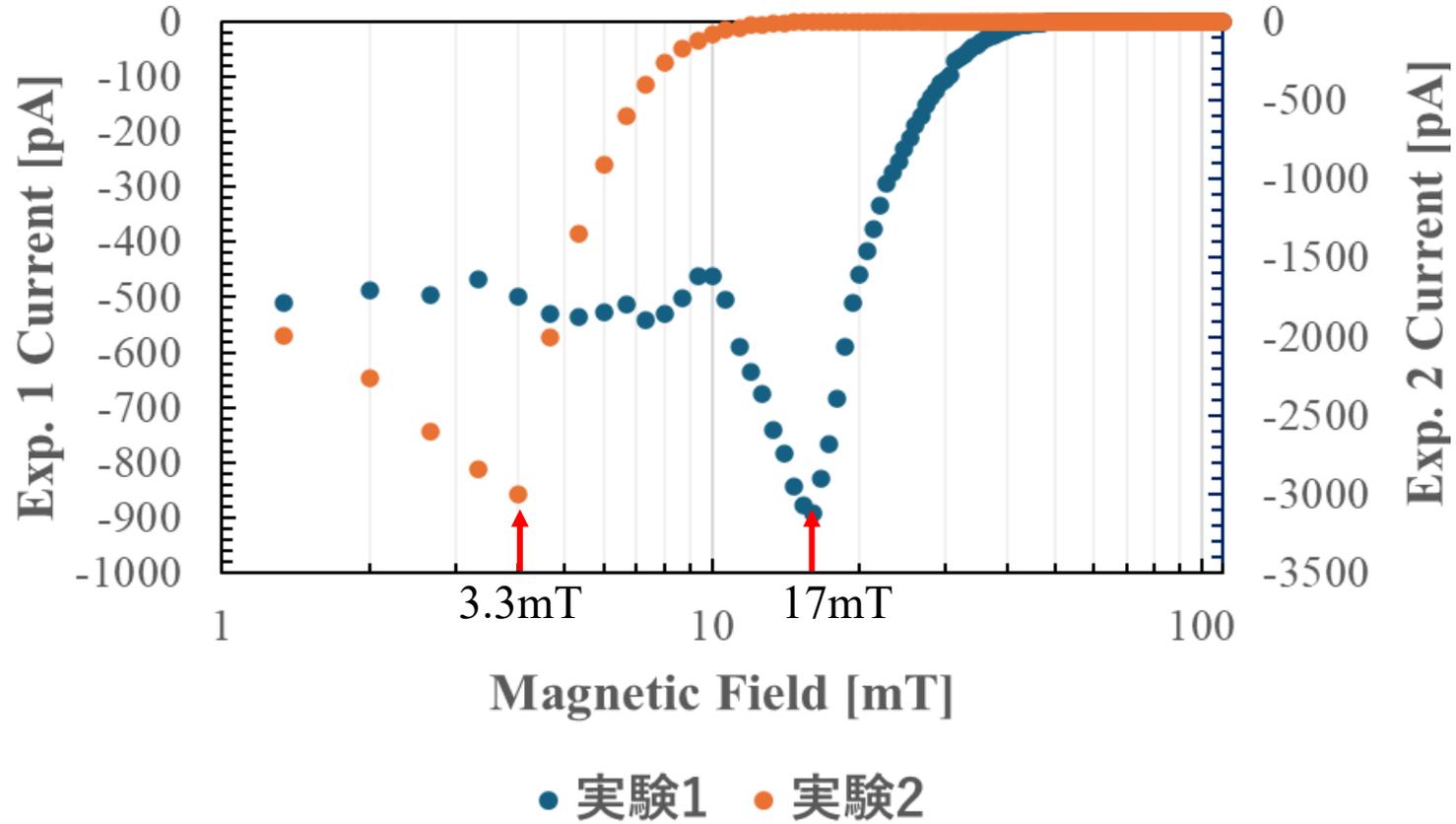
実験の条件

本実験では周波数とフィラメントにかける電圧の条件を以下のように変えて実験を行う。

	D電極 周波数	フィラメント 電圧	バイアス 電圧
実験1	3.5MHz	12V	12V
実験2	3.5MHz	20V	100V
実験3	1.9MHz	12V	12V

 基準

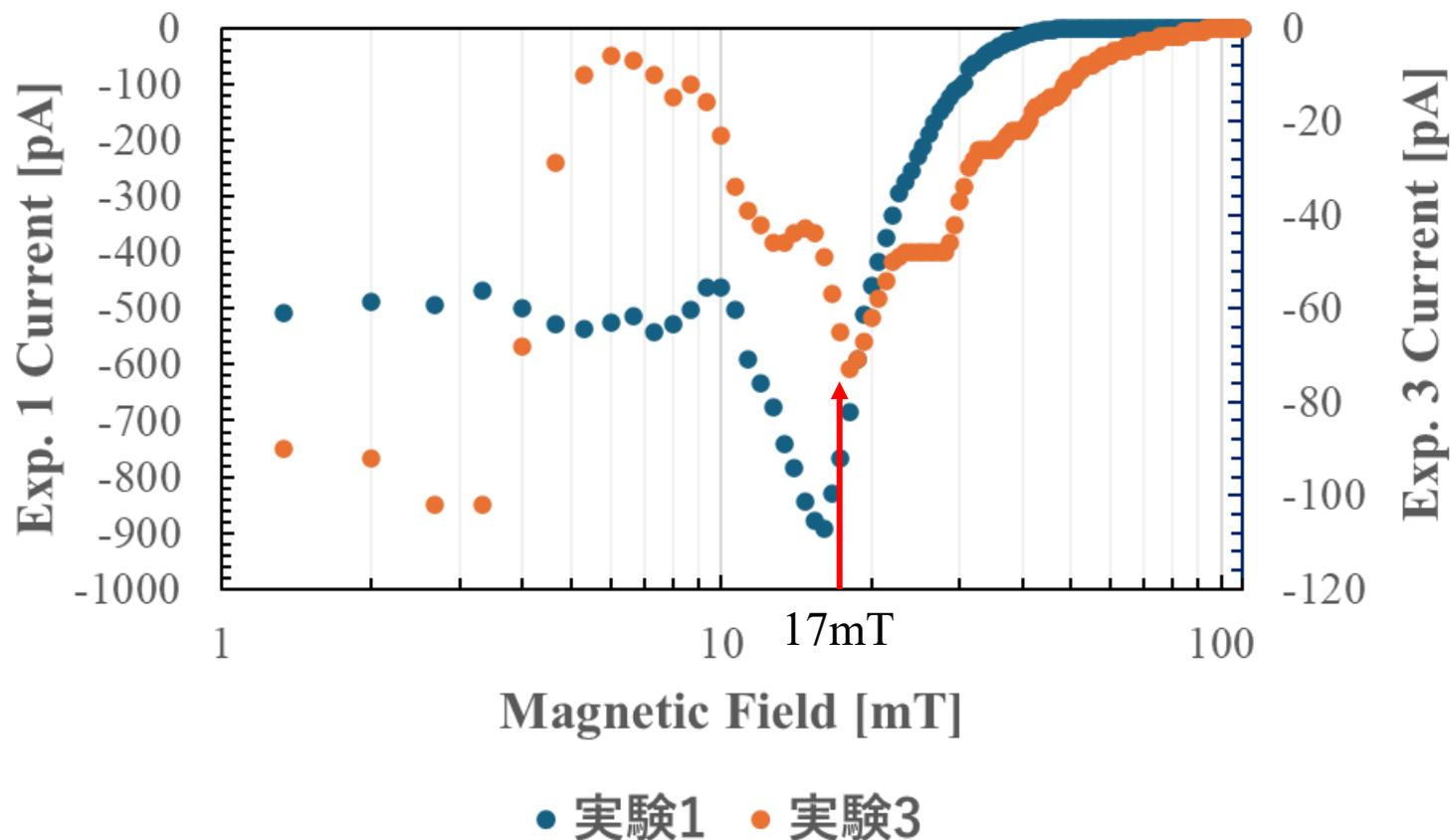
実験1,2の結果



実験1
フィラメント:12V
バイアス:12V
実験2
フィラメント:20V
バイアス100V

□フィラメントにかける電圧を変化させると、電流のピークが変化している。

実験1,3の結果



実験1
3.5MHz
実験3
1.9MHz

□ 周波数を変化させても、軌道に変化がない

どちらも近い磁場に山ができています

電子の場合の計算

必要磁場の計算
電子の場合

m : 電子の質量 $9.12 \times 10^{-31} \text{kg}$

f : 周波数 $3.5 \times 10^6 \text{Hz}$

q : 陽子の電荷 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$

$T = \frac{2\pi m}{qB}$ より、 $B = \frac{2\pi m}{qT} = \frac{2\pi m f}{q}$ となる

$$B = \frac{2\pi m f}{q} = \frac{2\pi(9.12 \times 10^{-31}) \times (3.5 \times 10^6)}{(1.6 \times 10^{-19})} \doteq \mathbf{0.125 \text{mT}}$$

出力エネルギー
電子の場合

$$E = \frac{r^2 q^2 B^2}{2m} = \frac{(22.5 \times 10^{-3})^2 \times (1.6 \times 10^{-19})^2 \times (0.125 \times 10^{-3})^2}{2 \times (9.12 \times 10^{-31})} \\ = 1.11 \times 10^{-19} \text{J} = \mathbf{0.7 \text{eV}}$$

追加実験の目的

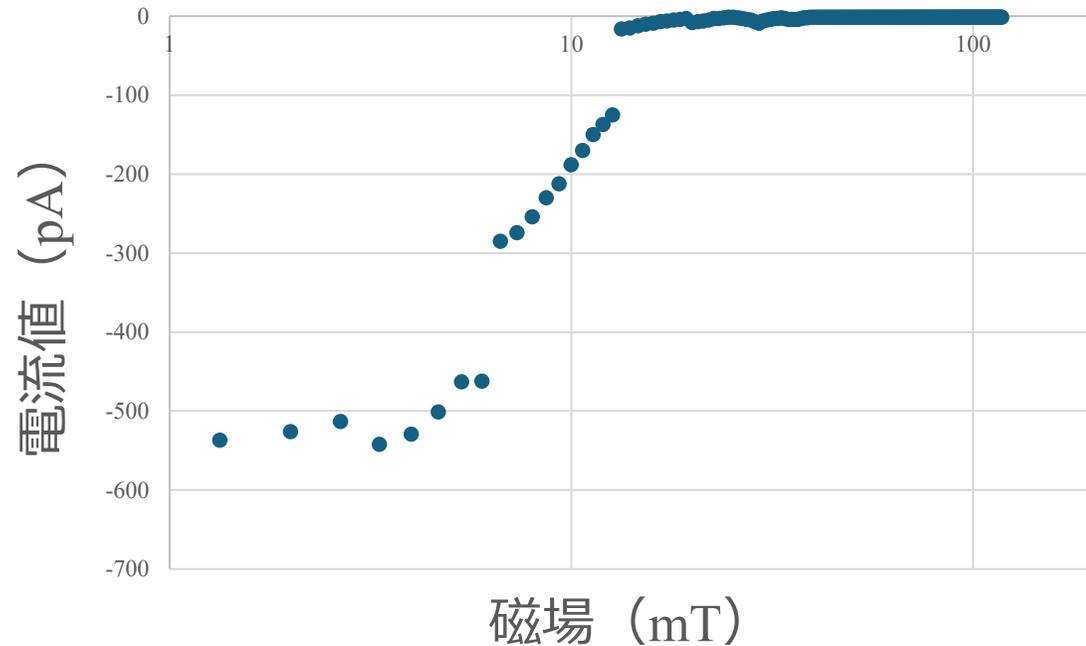
目的

観測された電子が

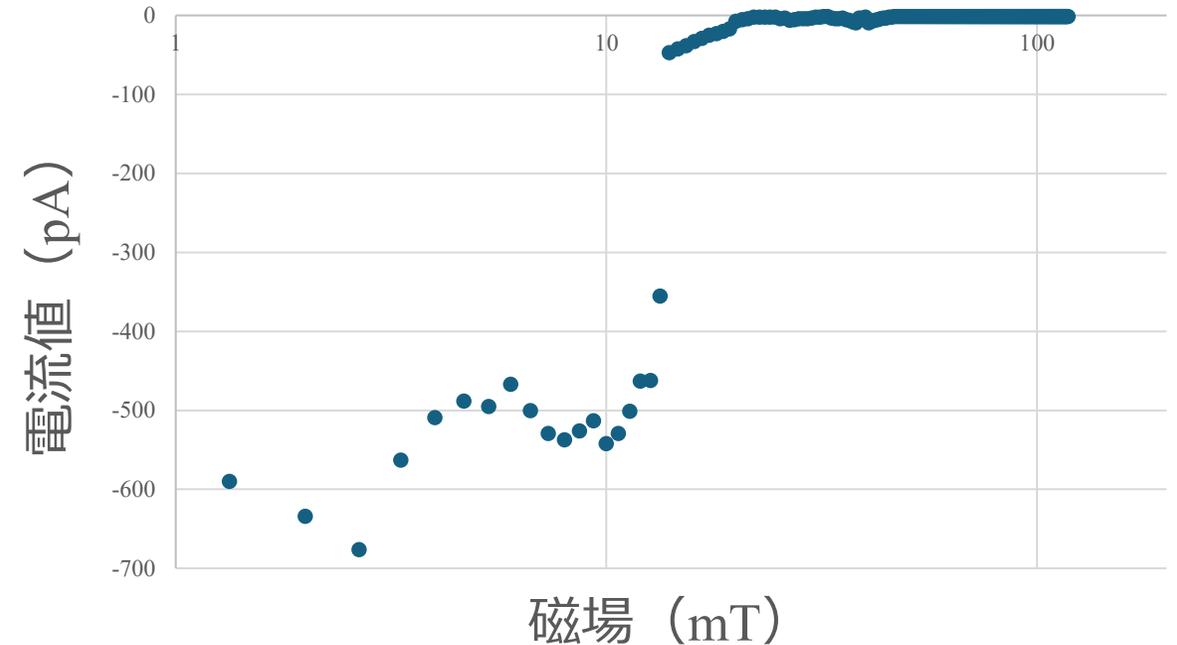
- ① フィラメントから放出された熱電子が加速されたものなのか
- ② 水素がイオン化され、生じた電子が加速されたものなのか

を明らかにする。

追加実験の結果



水素を注入しない場合(左)



水素を注入した場合(右)

- 2つのグラフの概形はほぼ一致していると言える。
- ⇒ 水素による影響はない。
- ⇒ 水素のイオン化は行われていない可能性が高い

実験のまとめ

- 今回行った実験から電子と陽子共に加速されていない
- バイアスによって円運動をしている可能性も考えたが計算を行った結果、その可能性はない。
- 従って、なんらかの形で電子がファラデーカップに当たっているが現段階では分からない

今後の展望

- ・ ダミー-D電極を使用した実験を行い比較する
- ・ 後輩達へのサイクロトロン実験の引き継ぎ

Q この活動を始めたきっかけは？

A KEKの大谷先生達が学生に加速器を理解して貰うために始めた活動です。
参加学生の理由は様々です。物理を得意になりたい、KEKや加速に興味がある、ガクチカが欲しいなど。

Q 活動に必要なお金はどうしてるの？

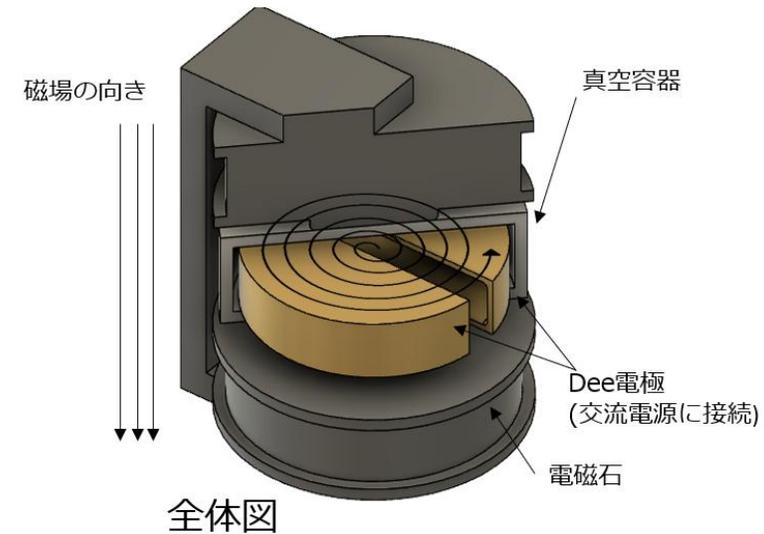
A KEKや総研大からお金を出していただいたり、担当教員が予算を確保したりしてくれている。

Q 加速器を作るのにはどのくらいの時間がかかった？

A 形になるまでに2年ほどかかった。
チェンバー、Dee電極の設計に、6~8ヶ月程で、そこから外注を行ったり、周辺機器をそろえて校正等を行うのに、1年程。

チューナーと無線機の操作方法

- ①POWERをおす
- ②MOXを押す
- ③TR TUNEを4.2
- ④X TUNEを3.9
- ⑤小さいinductanceを適当
- ⑥X Tuneをまわしてなるべく緑(低い点)に調整
- ⑦5WにMICを回す
- ⑧緑のところに交点がいけるようにする。



追加スライド

日本加速器学会発表資料
豊田高専さんより

粒子の速度 v より周回半径 r は r より粒子が一周するときの距離 l は

$$r = \frac{mv}{qB}$$

$$l = 2\pi r$$
$$L = \sum_{n=1}^N 2\pi r_n$$

回転数	速度		半径		1 周の距離		合計の距離	
n	v[m/s]	v[km/s]	r[m]	r[mm]	l[m]	l[mm]	L[m]	L[mm]
0.5	1.20E+05	119.85	6.27E-03	6.26616729	3.94E-02	39.3714903	3.94E-02	39.3714903
1	1.70E+05	169.50	0.0088617	8.86169877	0.0556797	55.6796955	0.09505119	95.0511858
1.5	2.08E+05	207.59	0.01085332	10.8533201	0.06819342	68.1934215	0.16324461	163.244607
2	2.40E+05	239.71	0.01253233	12.5323346	0.07874298	78.7429805	0.24198759	241.987588
2.5	2.68E+05	268.00	0.01401158	14.011576	0.08803733	88.0373286	0.33002492	330.024916
3	2.94E+05	293.58	0.01534891	15.3489125	0.09644006	96.4400616	0.42646498	426.464978
3.5	3.17E+05	317.11	0.01657872	16.5787203	0.10416717	104.167172	0.53063215	530.63215
4	3.39E+05	339.00	0.0177234	17.7233975	0.11135939	111.359391	0.64199154	641.991541
4.5	3.60E+05	359.56	0.0187985	18.7985019	0.11811447	118.114471	0.76010601	760.106012
5	3.79E+05	379.01	0.01981536	19.8153608	0.12450358	124.503584	0.8846096	884.609596
5.5	3.98E+05	397.51	2.08E-02	20.7825258	1.31E-01	130.580461	1.02E+00	1015.19006
6	4.15E+05	415.19	0.02170664	21.7066402	0.13638684	136.386843	1.1515769	1151.5769
6.5	4.32E+05	432.14	0.02259299	22.5929875	0.14195593	141.955927	1.29353283	1293.53283
7	4.48E+05	448.46	0.02344585	23.4458511	0.14731463	147.314627	1.44084745	1440.84745

計算してみた結果
回転数は3.5回が限界っぽい？

追加スライド



追加スライド

長岡技術科学大学2名

九州大学

東北大学

栃木県内企業2名

群馬大学

