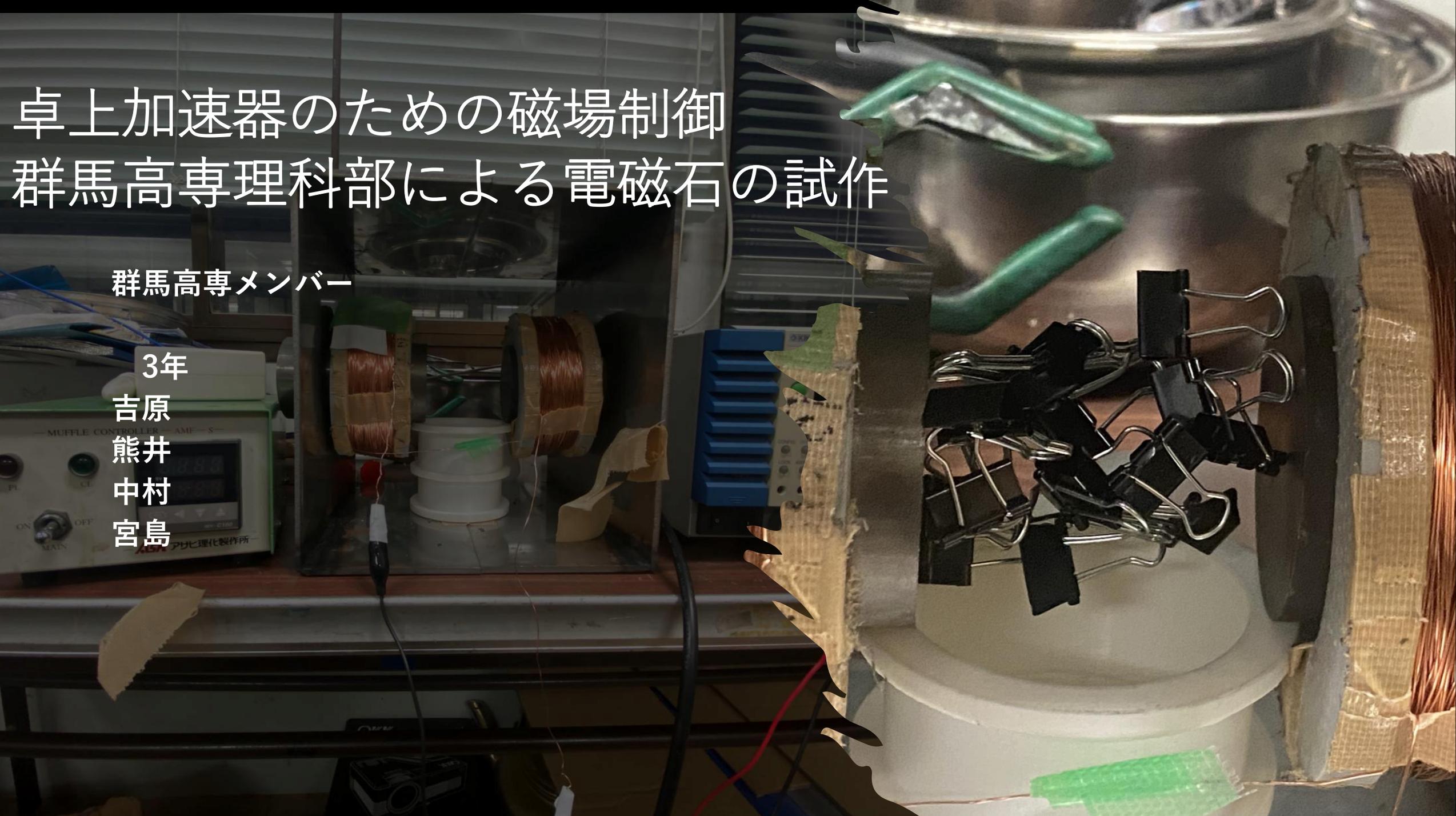


# 卓上加速器のための磁場制御 群馬高専理科部による電磁石の試作

群馬高専メンバー

3年

吉原  
熊井  
中村  
宮島



# 目次

- ・ 電磁石の開発理由
- ・ 電磁石の初期開発 1、 2
- ・ 目標と改善方針
- ・ 改善 1、 2
- ・ 実験、結果と考察 1
- ・ 改善 3
- ・ 実験、結果と考察 2
- ・ 今後の改善、制作

# 電磁石開発の理由

①加速器の規模が電磁石に制限されずにすむ

②他高専でも着手されていない分野である

**比較的入手しやすい材料と高専にある装置を活用して作製  
を心掛ける**

材料： ホームセンターで買えるエナメル線、通販で買える鉄芯

高専の装置： 3Dプリンタ（電磁石の外装、巻き芯）  
レーザーカッター（その他加工）  
アントレプレナーシップ工房  
etc.

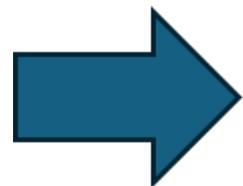
# 電磁石の初期開発 1

## 銅線を巻いてコイルを作製、電流と磁束密度の関係を測定



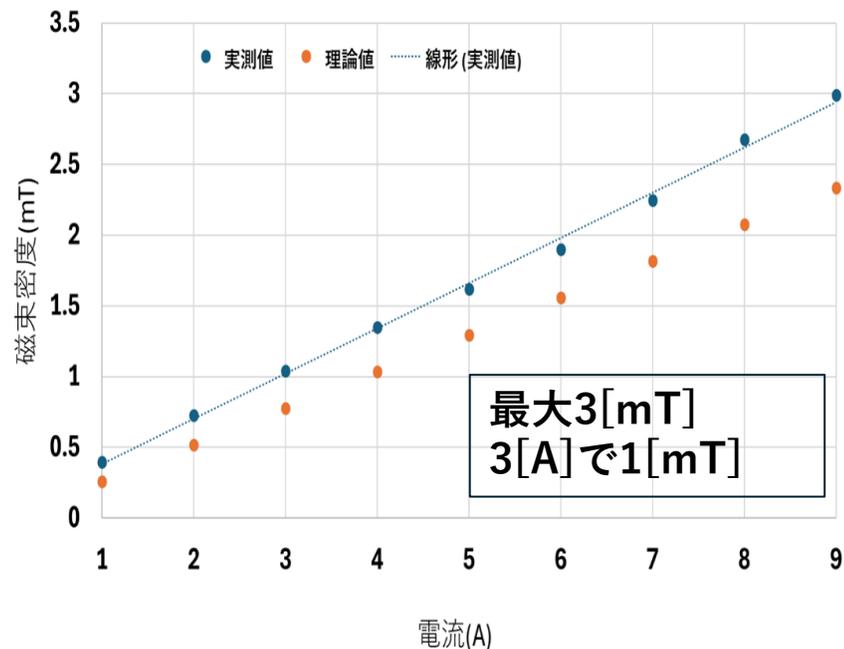
### 円形コイルの詳細

- ・各巻き数 60回
- ・半径 15cm

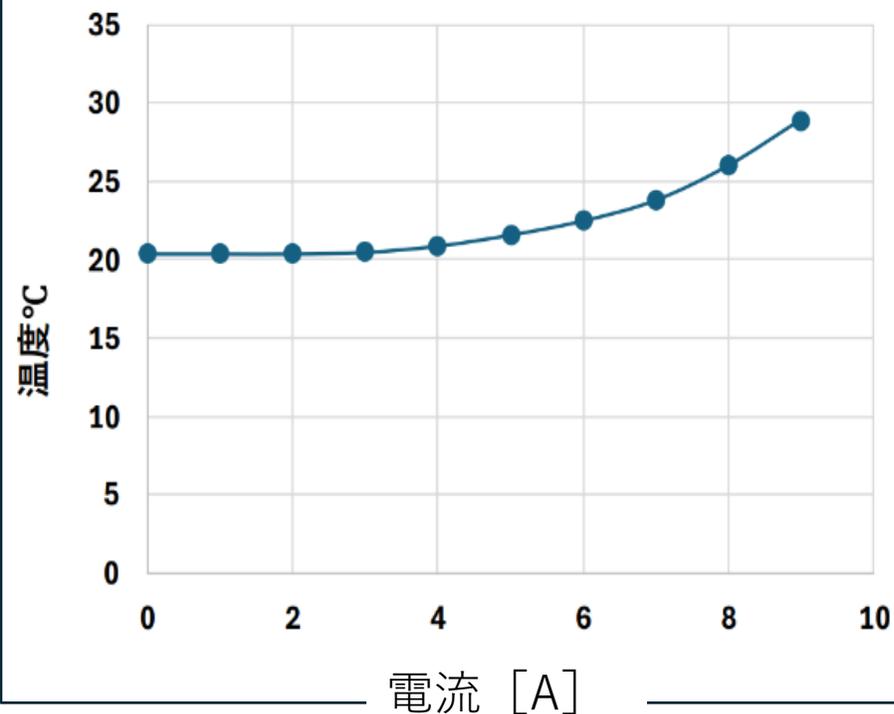


- ・電流に比例して磁束密度は増加した
- ・最大磁束が 3 mT → 微小
- ・電流の増加に伴って温度増加が激しい

### 実測値と理論値の比較

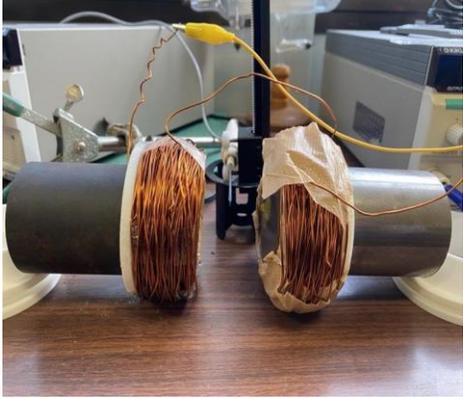


### 電流-温度特性

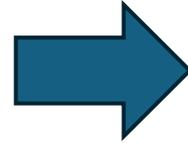


## 電磁石の初期開発 2

巻き数を増加し、半径を縮小、さらに向かい合わせで二つ作る



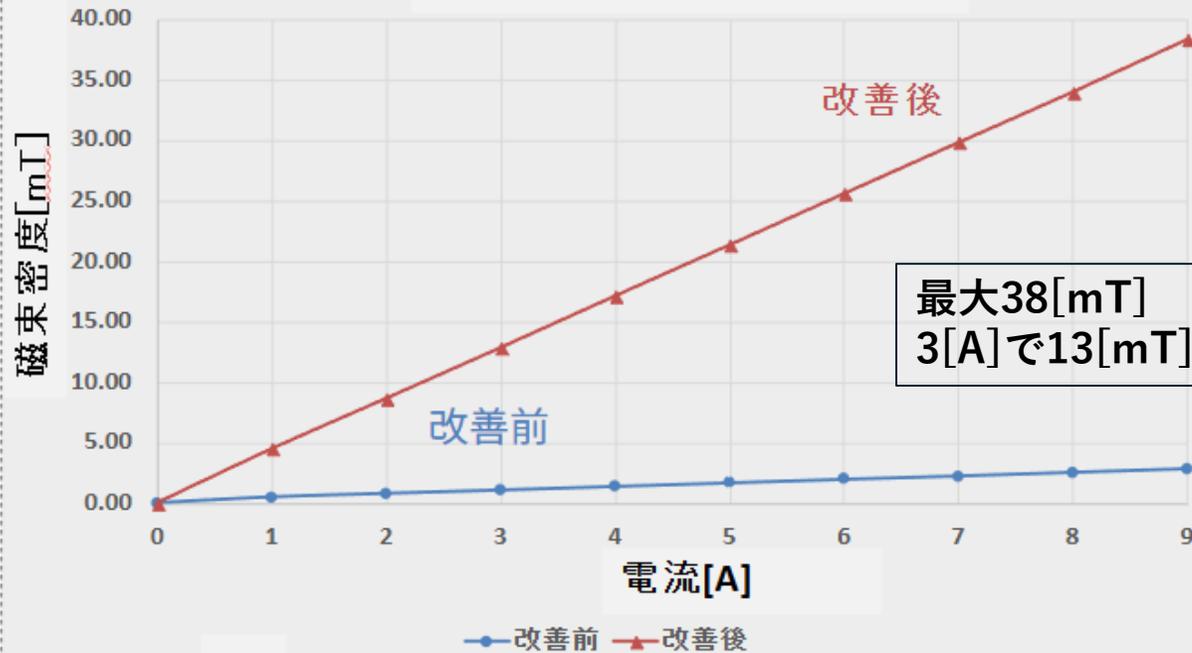
円形コイルの詳細  
 ・各巻き数 75回  
 ・半径 3cm  
 × 2



改善前よりも電流に対する磁束密度の上がり幅が格段に上がった

いずれにしても加速器に使用する電磁石としては磁束密度が微小である

### 測定の比較



## 目標と改善方針

## 目標 電磁石の磁束密度の増加

### 改善方針

#### ・ コイルの層厚を減少させる

作製した電磁石のコイルをソレノイドコイルと考えると次式が考えられる。

$$H = nI$$

H…磁界の強さ [N/Wb]

n…1 m当たりの巻き数 [回]

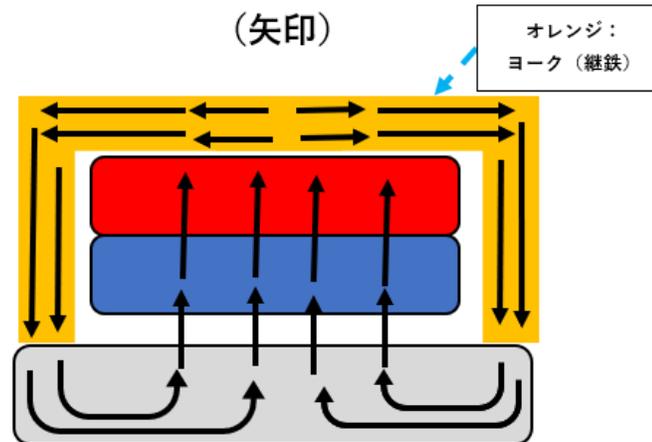
I…電流 [A]

よってコイルの層厚を減少させれば磁束は増加する

#### ・ ヨークの導入する

ヨーク…磁石の一方の極から発生した磁束を他方の極に送るように磁束回路を作り磁束密度を高めるための部品

ヨークを使用した磁束の流れ



引用

[磁石とヨーク - 株式会社 相模化学金属](#)

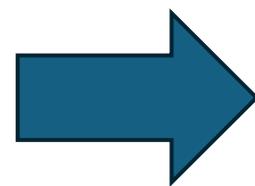
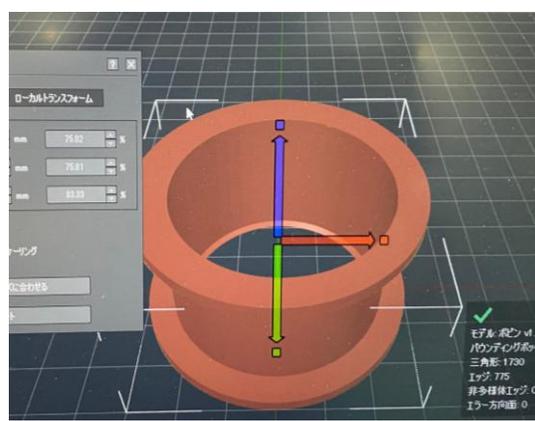
[sagami-magnet.co.jp](http://sagami-magnet.co.jp)

<https://www.sagami-magnet.co.jp/explanation-magnet> > ...

# 改善 1 コイル用ボビンの作製

## 操作

1. 導線の太さ、巻き数を考慮して  
3Dソフト (fusion) で設計

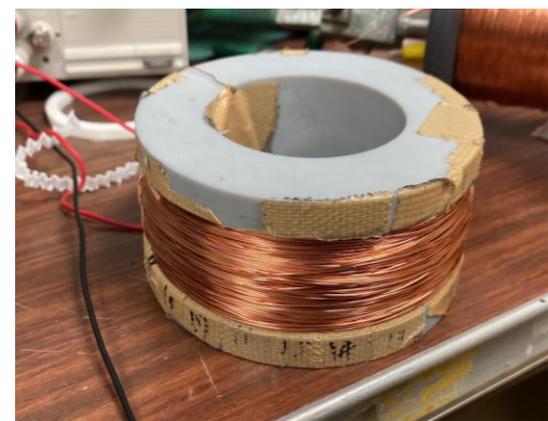
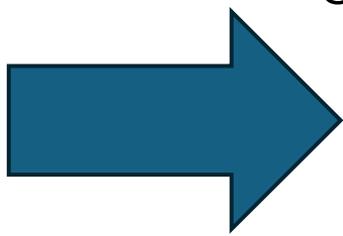


2. 3Dプリンタで立体化



3. 導線を手動で巻く  
向かい合わせで配置

巻き数 1000回  
850回



# 改善 2

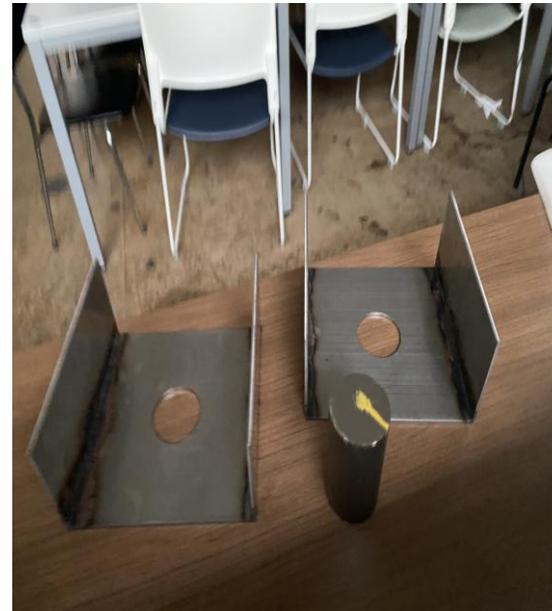
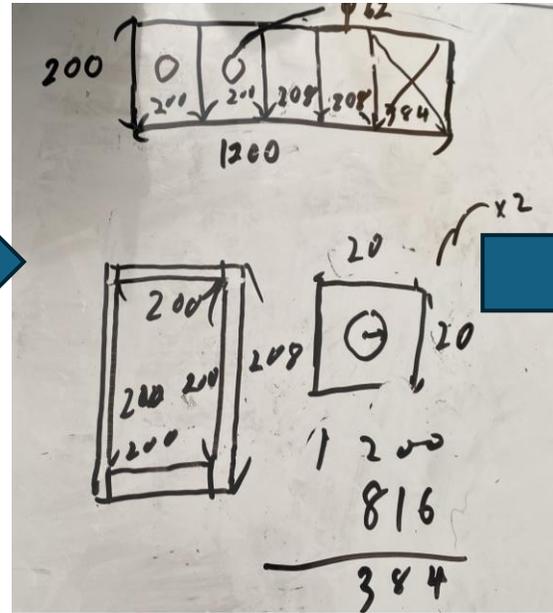
## ヨーク開発

### 操作

1. 模型を3Dソフトで設計  
3Dプリンタで立体化

2. 発注した  
鉄板の採寸を考えて  
設計

3. 高専の加工施設に  
依頼して加工





自作コイル

直流安定化電源によって電圧を0～50V発生させその時の磁束密度、電流、温度をそれぞれ測定する。（温度に関しては安全性に配慮するために測定したものである。）

得たデータをもとに電圧、電流に対する磁束密度特性をグラフにプロットする。



テスラメータ



熱電対

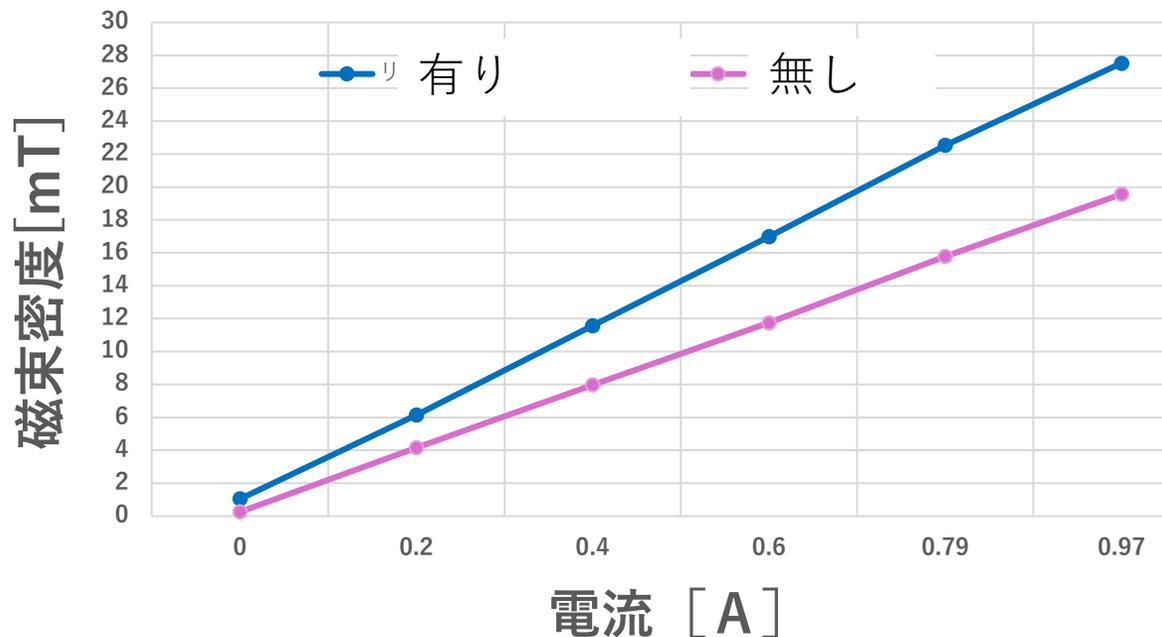
### 電磁石の詳細

- 巻き数…それぞれ1000回、850回
- 磁極半径…6cm
- 磁極間距離…6cm（真空チェンバーを入れることを考慮）
- ヨークの厚さ…4mm

## 結果

- ・ 作製したリターンヨークを取り付けた場合、リターンヨークのないものと比較して、**約1.4倍の磁束密度を得た。**
- ・ 3 Aで13mTから**1 A以下の電流でも28mT**の磁束密度を得た。  
ただし50Vほどの**高電圧**をかける

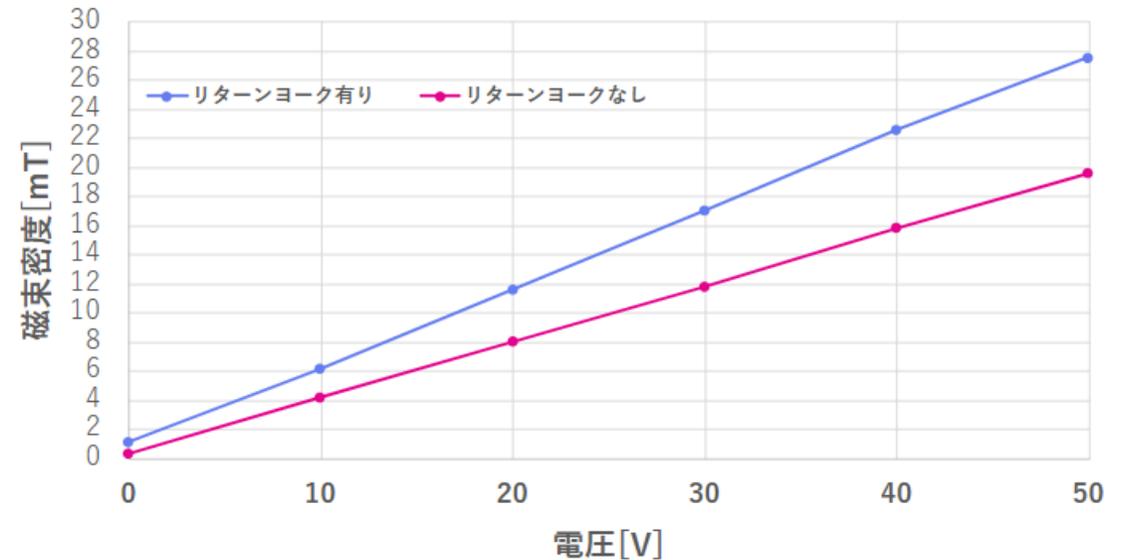
電流－磁束密度特性



## 考察

- ・ 巻き数の増加による磁束密度の増加は確認できた。
- ・ リターンヨークにより磁束密度が増加したことは確認できた。
- ・ 導線の長さがかなり長くなったため、抵抗が増加してしまった。

電圧－磁束密度特性



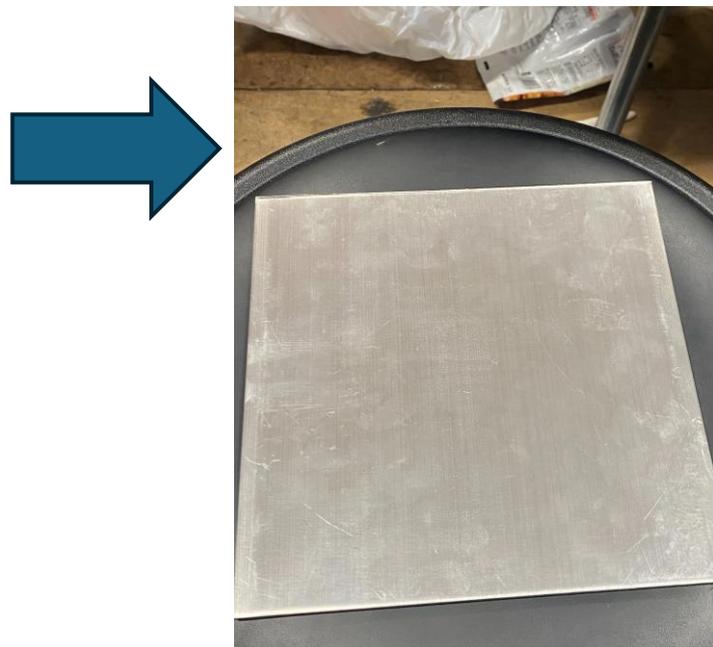
理論より、リターンヨークの板をより厚くすれば、反対の極に送れる磁束が増えると考えられ、**より高い磁束密度を期待できる**

## 操作

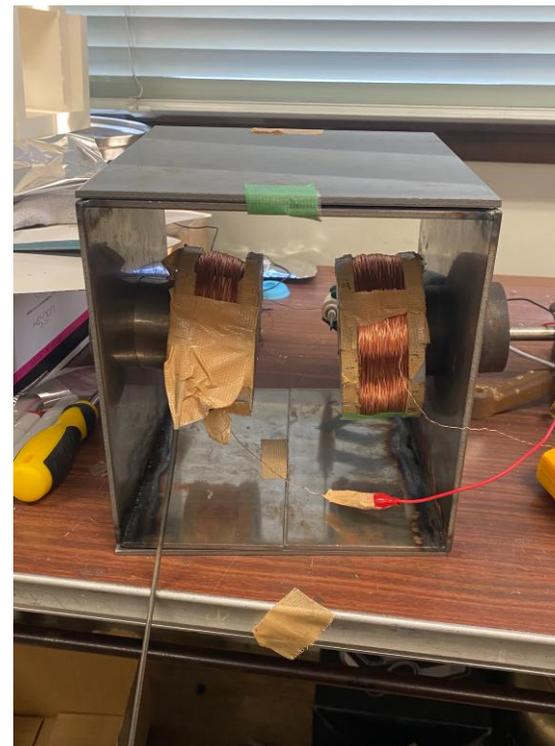
1. 鉄板の発注



2. 発注した鉄板を切断



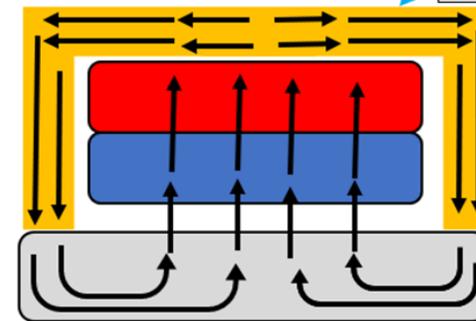
3. ヨークに重ねる



ヨークを使用した磁束の流れ

(矢印)

オレンジ:  
ヨーク (継鉄)



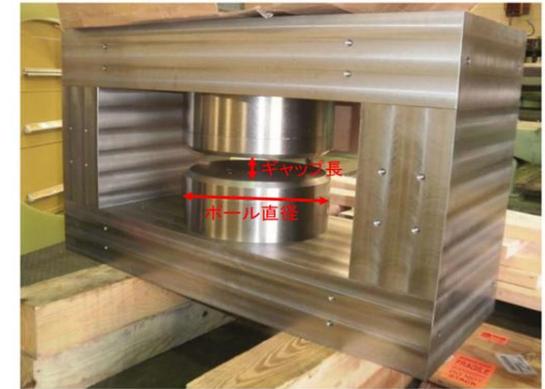
## 結果と考察 2

### 結果

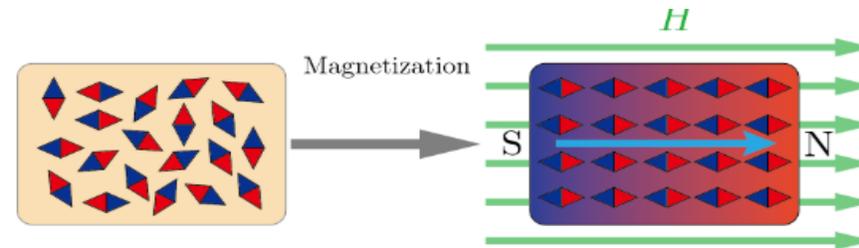
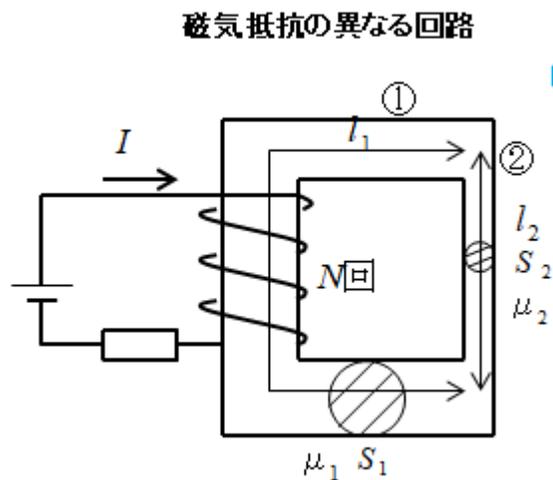
磁束密度は変化しなかった

### 原因の考察

- ・ 鉄板とヨークの間の空間によるもの。
- ・ 鉄板の磁化する向きが統一できていない。
- ・ 磁気回路的に問題がある。
- ・ 厚さの変化が微小である。



高崎量子技術基盤研究所  
倉島さんからの資料



K.I.T.

やさしい電気回路  
磁気

<https://hegtel.com/jiki-kairo.html>

磁場制御

ヨーク

- ・ 厚い鉄板を用いて製作する。
- ・ ヨークと鉄板の間を溶接する。
- ・ 磁化の向きや磁気回路などを再度検討する。

回路

- ・ 電源を増やす、並列にする。
- ・ 各電圧時のコイルの温度平衡を測定し、電圧の大きさ、稼働時間の目安にする。
- ・ 巻き数を増加させるが、抵抗が大きくなり高電圧が必要になる場合は度合いを考える。
- ・ 磁場のシミュレーションによる検証。

真空

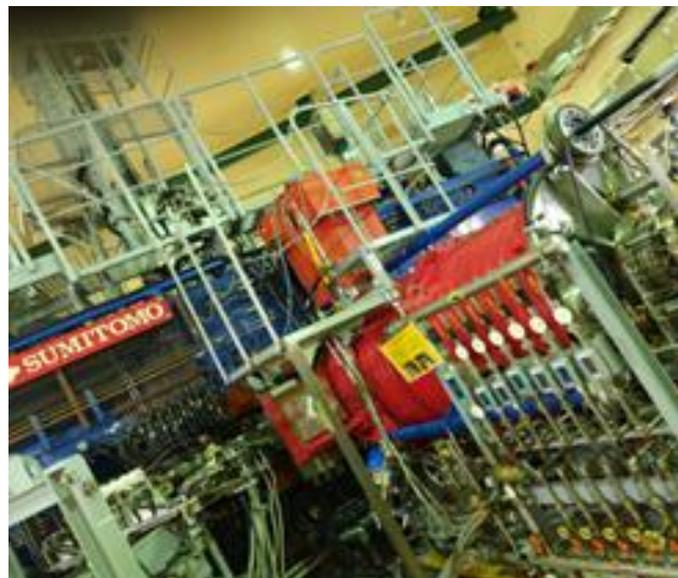
- ・ 真空チャンバーの設計







# 高崎量子技術基盤研究所の見学



TIARAサイクロトロン



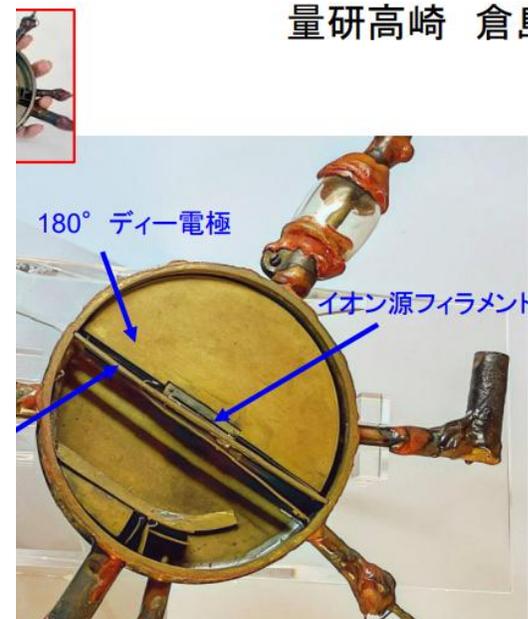
ビームライン

## 感想

実際に稼働する円形の加速器をどのように制御しているのかや、放射線対策、放熱対策をどれくらい行っているのかを知り、今後の開発の参考になりました。また磁極の形が波打っていることも知り、電磁石の磁束密度制御の工夫も知ることができました。

## 高専で作るサイクロトロンについて

量研高崎 倉島 俊



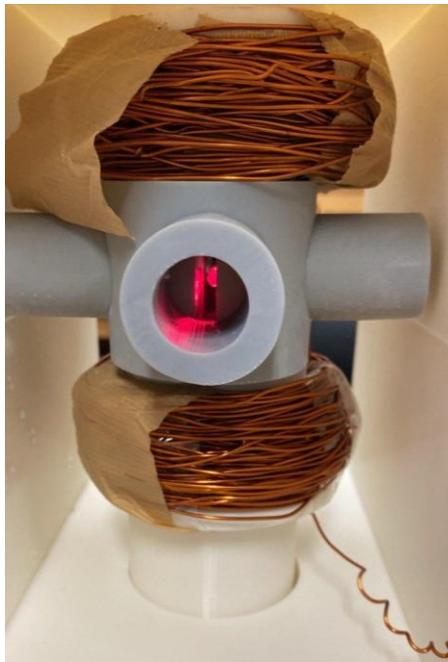
左の写真は、サイクロトロンの生みの親であるローレンスが初めて加に成功した直径が4インチ(約10cm)の“手のひらサイズ”サイクロトロン。磁束密度は1.3T, 加速電圧1kV, 加速周波数10MHz, 加速回数は40ターンで、最終エネルギー180keV。加速したのは水素イオン(プロトン(H<sup>+</sup>))ではなく、水素分子イオン(H<sub>2</sub><sup>+</sup>)。プロトンよりも、水素分子イオンのほうが電流を10倍程度多く流されたようだ。加速周波数を2倍、

## 倉島さんからの助言

高崎量子技術基盤研究所の倉島さん

助言をいただいたり、卓上加速器の設計を具体的に考えてくれたりと私たちの加速器開発を支えてくれました

# 成果発表1 文化発表会



## 3Dプリンタによるモデルの作製、展示

### 感想

加速器を知らない人に説明することが、難題だと実感しました。また自分たちの成果を記したグラフなどもポスターに添付したが、実際に伝えるときは、より分かりやすい例やたとえを添える必要があると感じました。

しかし、伝わったとき、おもしろかった、ためになったと言ってもらい、やってきてよかったと嬉しく思いました。

**群馬高専 加速器制作班**

粒子加速器とは、粒子を超高速に運動させる装置のこと

磁場と電場によって電子を円運動&加速させる。

大規模化 シンクロトロンへ応用

KEK (茨城) スーパーKEKB CERN (スイス) LHC

それぞれのKEK, CERNのホームページより引用

**加速器の可能性**

**新たな粒子の発見**

2012年にCERNのLHCでヒッグス粒子が発見される

Q 何が凄い?

A 50年以上前から存在が予想されていたものが見つかったから!

Q なぜ加速器で発見できるの?

A 超高速、つまり巨大なエネルギーを持った粒子を衝突させることにより自然には発生しえない粒子を発生させることができる。

超高速度である最高の押出を再現しようとしている

そんな加速器を机の上で、KEK主催 **アクセラトゥーン**

アクセラトゥーンとは、高専を中心に**加速器を制作し、実際に見て触れるワークショップ**を展開していく事業

現在参加している高専

長野高専  
富田高専  
群馬高専  
小山高専  
沖繩高専

水尾津高専さん もぜひ!

今年の夏には、第22回日本加速器学会で特で特別公演、ポスター発表

今日明日の文発では他の高専も加速器を発表してるかも、☆☆

**2024年**

11月: 活動開始、小山高専訪問  
電磁石設計開始

**2025年**

2月: KEK主催、交流会参加

7月: 高崎粒子研究所訪問

8月: 加速器学会発表

**様々な訪問と発表**

○小山高専さん

小山高専で開発された加速器を拝見!  
加速器の構成、仕組み、原理を知る!

○OKEKさん

実際に実用されている加速器を拝見!  
群馬高専の活動を初めて発表

○高崎粒子研さん

実用されているサイクロトロン加速器を見学  
加速器開発の手順を知る

□加速器学会発表□

大学生、教授の前で実際にプレゼン!  
ポスターの展示も!

磁場と電場によって電子を円運動&加速させる!

群馬高専の電磁石の開発

電磁石の開発を行う理由

- 今後開発する加速器の規模に電磁石の制限をかけずに済むから
- 加速器でどれだけ加速してエネルギーを生み出せるかは大きさと磁場に依存するから
- 他高専でまだ着手されていない分野だから

これまでの開発、実験

色々分らないことが多いのでとりあえずコイル巻いて電流してみたい!

円形コイルの詳細

- 各巻き数 60回
- 半径 15cm

実際に磁束密度と温度を回ると、

円形コイルがN回巻の場合

$$B = N \frac{\mu r^2 I}{2(r^2 + y^2)^{3/2}} [T]$$

そこで巻き数を増加し、半径を縮小、さらに向かい合わせて二つ作ることで、改良を試みた

円形コイルの詳細

- 各巻き数 150回
- 半径 3cm

その結果、

測定の比較

最大3[mT] 3[A]で1[mT] → 最大38[mT] 3[A]で13[mT]

改善策

高電流を流す代わりに熱処理を行う  
or  
低い電流値でも高い磁束密度を発生させる

今後の予定

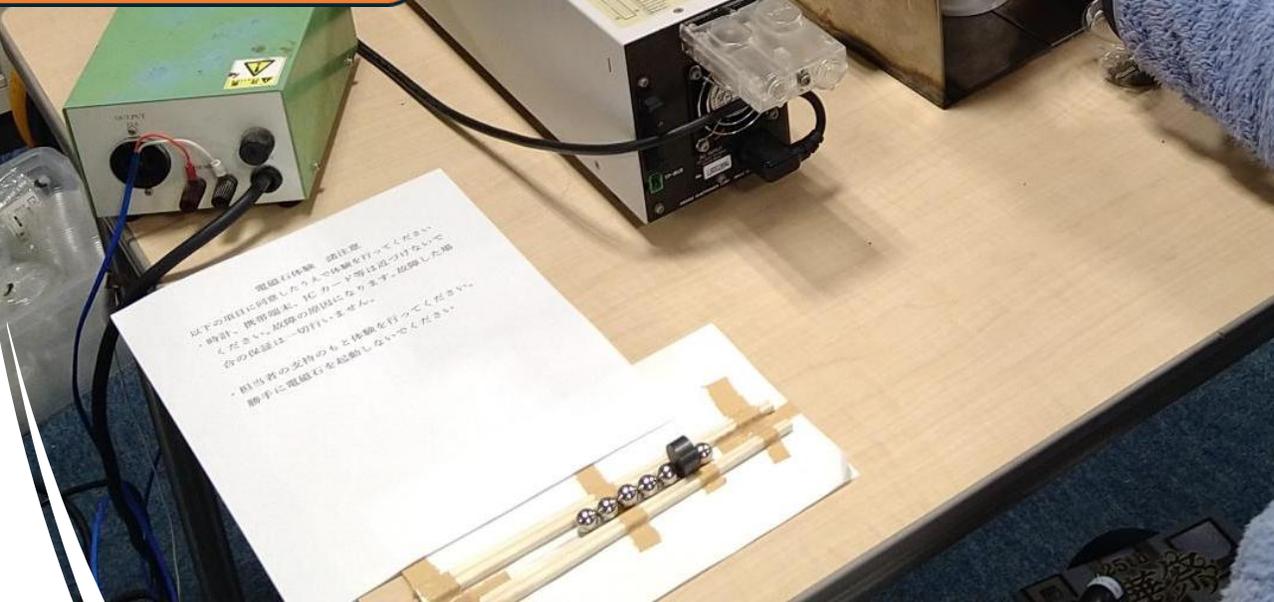
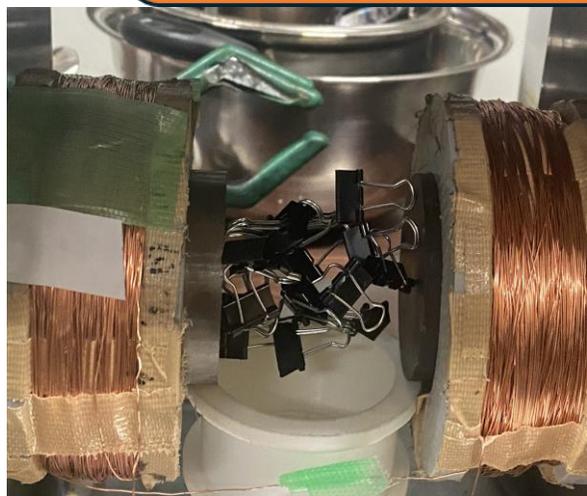
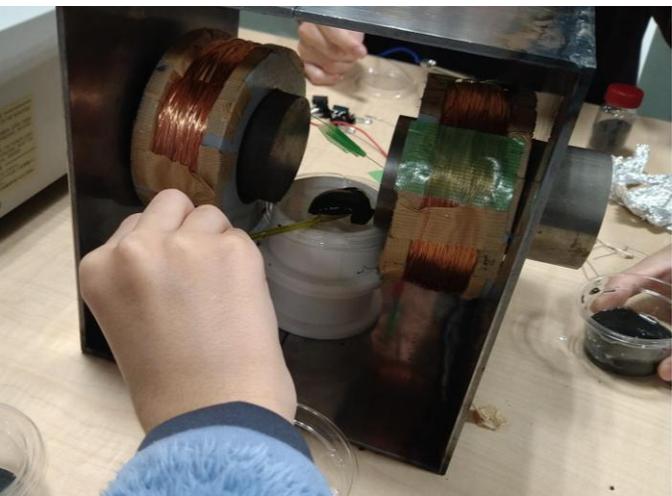
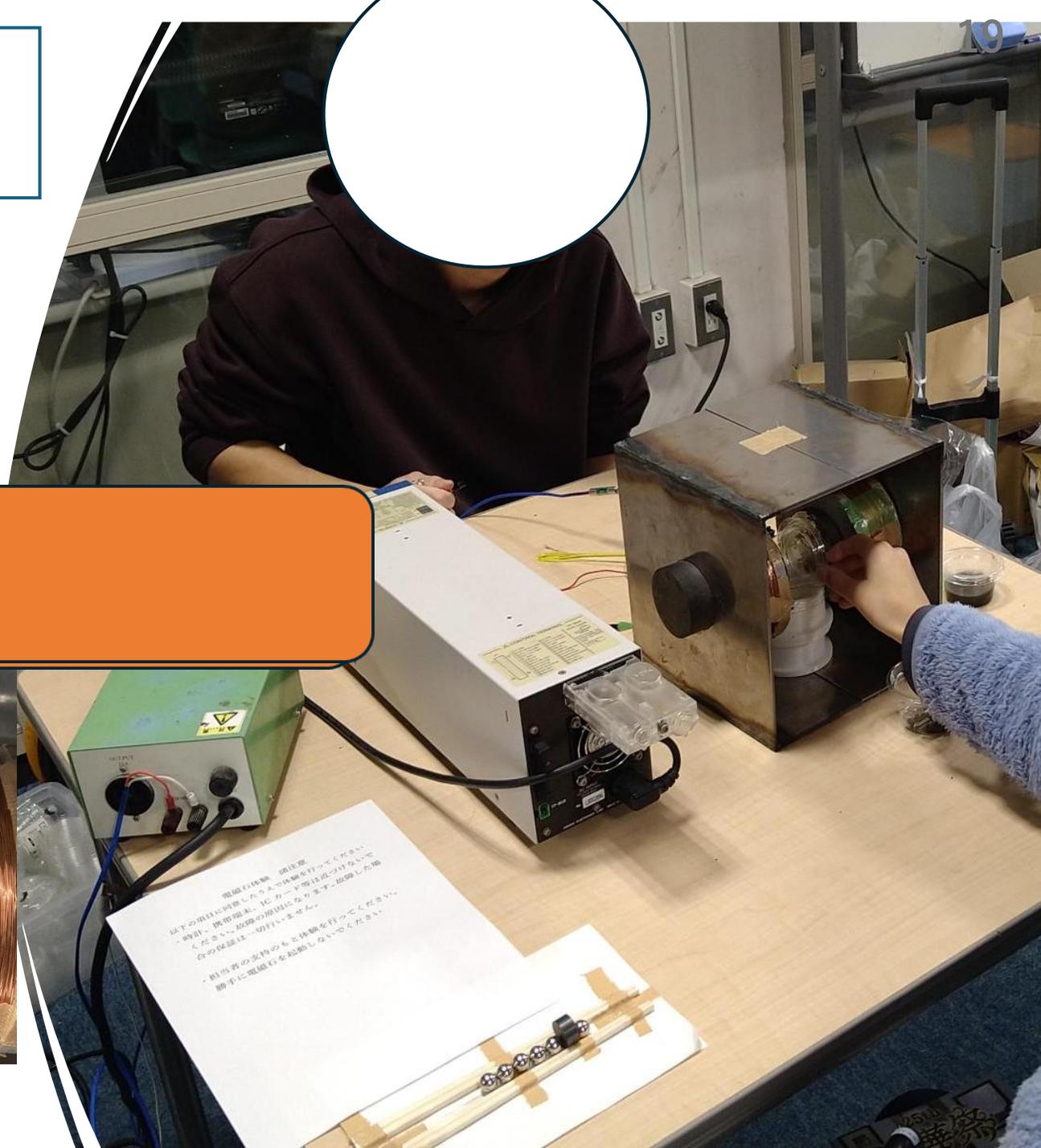
- より磁束密度を高めて、実用化を目指す
- 真空チェンバーやD電極による加速空間、加速電場の設備を設計する

## ポスターの展示

# 電磁石の展示

自作した電磁石と  
ジム磁石の違い  
を体験してもらいました

感想  
電磁石が初めての人にも電磁石の面白さを伝えることができよかったです。  
また温度管理を実際に人に見せられ  
安全に展示できました。



電磁石体験 注意事項  
以下の項目に留意し、安全に体験を行ってください。  
- 時計、携帯電話、ICカード等は近づけないでください。故障の原因になります。脱離した場合は保証は一切行いません。  
- 目や顔の支障のある体験を行っていただき、勝手に電磁石を触動しないでください。