

## 加速器科学インターンシップ報告書

令和5年12月22日

大阪市立大学理学部物理学科  
宇宙・素粒子実験物理学研究室  
久保田 友和  
上村 恒介  
吉田 聖稀

(1)件名：令和5年度加速器科学インターンシップ

(2)日時：2023年12月4日～2023年12月8日

(3)場所：高エネルギー加速器研究機構

(4)概要：運転に先駆けた加速器のレクチャー  
教育加速器（KETA）でのビーム運転実習

(5)内容

1日目

1日目ではLINACの基礎内容、RF源、LINACの構成、測定技術に関する講義を受けた。以下ではその講義内容の概略を記す。

### ① LINACの基礎

電子線形加速器の加速管はマイクロ波を伝搬させる導波管であるが、一般に導波管内を伝搬するマイクロ波の進行方向の位相速度は光速度より速いため加速に使用できない。そのため、加速するためにまずは位相速度を光速度まで落とす必要がある。そこで導波管として遅波回路が用いられる。遅波回路としては主に以下のようなものが用いられる。また導波管の場合と加速管内での波の伝搬の違いを、分散特性を通じて比較し、加速管内の伝搬特性と位相速度、群速度などを学習した。さらに加速管の諸パラメータも学習した。

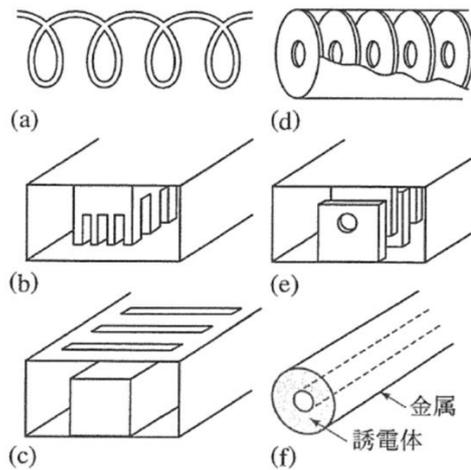


図 1-1 遅波回路

加速器においてマイクロ波は重要な役割を果たす。マイクロ波とは波長が cm~mm 帯の電磁波のことである。マイクロ波は加速器だけでなく、放送やレーダーなどにも使用されている。

## ② RF 源

線形加速器での主役は加速管であるが、エネルギーを供給するマイクロ波源は主役に劣らず重要である。マイクロ波源の技術が進歩を遂げたことで実用的な LINAC が実現することとなった。通常の LINAC の RF 源の構成はクライストロン電源、クライストロンを組み合わせたものが主流となっている。クライストロンにおいては、電圧電流特性・寿命特性、RF の入出力や電圧と位相特性が重要なパラメーターとなる。特に RF の位相は加速器のエネルギーに関係して特に重要である。クライストロンの中の電子のスピードはクライストロンにかけられる電圧で決まる。RF 入力で電子が変調されても、平均速度はそれで決まる。

## ③ LINAC の構成

現代加速器はマイクロ波加速器と言われ、それに関する加速管と RF 源が必須の項目であるが、LINAC を運転するためにはそれだけでなく、電子ビームの発生源、ビームの輸送系、ビームのモニターは重要である。また裏方で支える技術として真空系が重要であり、制御系も重要である。RF 部でバンチを加速位相に乗せるために、前もってバンチを作る必要がある。この部分は電子の速度が遅い場合には空間電荷による発散力が無視できない。電圧が高く電流が小さい方が有利である。加速器の電子銃、電子管の電子銃ともに層流の電流が望ましい。陰極温度の変化でも電流が変動しないように空間電荷制限領域で使う。一方で電子管はマイクロ波の電力を発生させるために大電流、大電力が必要である。陰極から取り出せる電流密度は限られているために、大きい口径のカソードから電流を集める。

#### ④ 測定技術

加速器実験を進めていくためには様々な測定技術が必要となってくる。非接触型電流測定には電流トランスが使用される。フェライトなどのコアに線を巻き、シャント抵抗を通じて出力する。測定される電流はコアの中心を通るので非接触で測定が可能である。高電圧パルスを測定するには抵抗分割器と容量分割器が使用される。抵抗分割器は基本的にオームの法則に従うが、抵抗の特性、周囲の高周波成分の影響に注意が必要である。マイクロ波電力の測定にはクリスタル検波器が使用されている。電圧の小さいところでは出力は  $V$  の二乗に比例し、次第に線形に近づく。大電力 RF の測定では減衰器で電力を小さくする。減衰量が大きいと誤差につながるのでカロリメトリックな方法もよく使われる。最近は検波器単体ではなくピーク電力計などが使用可能である。

#### 2 日目

加速器に関する演習を用いて行った。

##### ・電子銃の設計

電子銃の電極設計をコンピュータシミュレーションによって行った。今回は DGUN を用いて演習を行った。

シミュレーションではビーム収束電極の角度を変化させることで、またアノードとカソードの距離を変化させることで電子ビームの収束にどのような違いが出るかを確認した。また、そのほかにも例題として受け取っていたファイルからシミュレーションを行い、電子銃設計に関する理解を深めた。

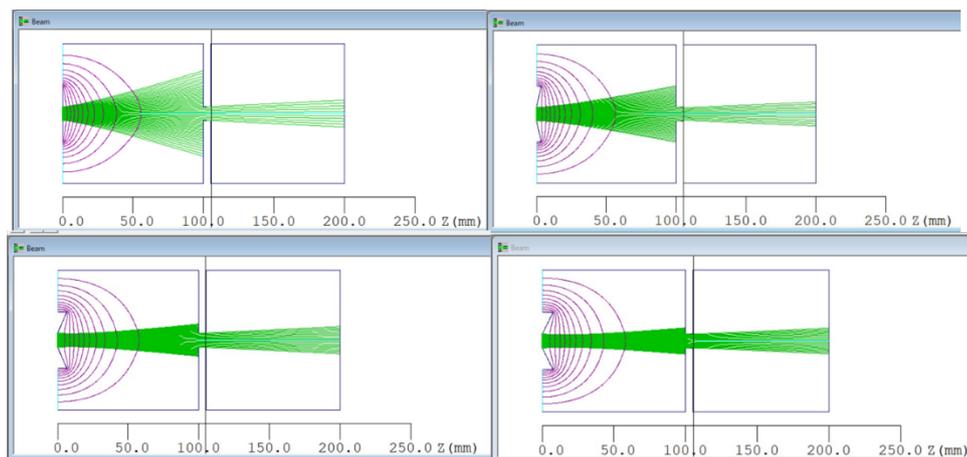


図 2-1 ビーム収束電極の角度の変化によるビームの収束具合の変化

##### ・加速管モード測定/空洞測定

加速管内のマイクロ波の伝搬を理解するためにシミュレーションが必要である。今回

は Superfish を用いてシミュレーションを行う。

まず、基本となる Pill-box 空洞のモードのシミュレーションを行った。

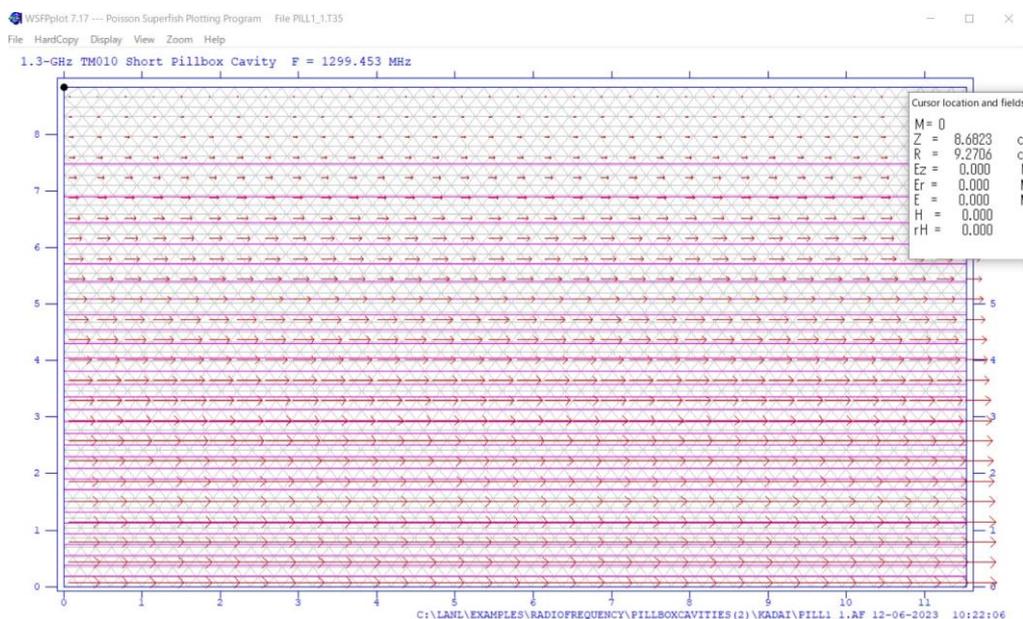


図 2-2 Pill-box 計算結果

加速管で用いられるディスクと円筒を組み合わせた周期境界的な構造を持つ空洞を計算する。3cell のモード計算を行い、分散カーブを描いた。

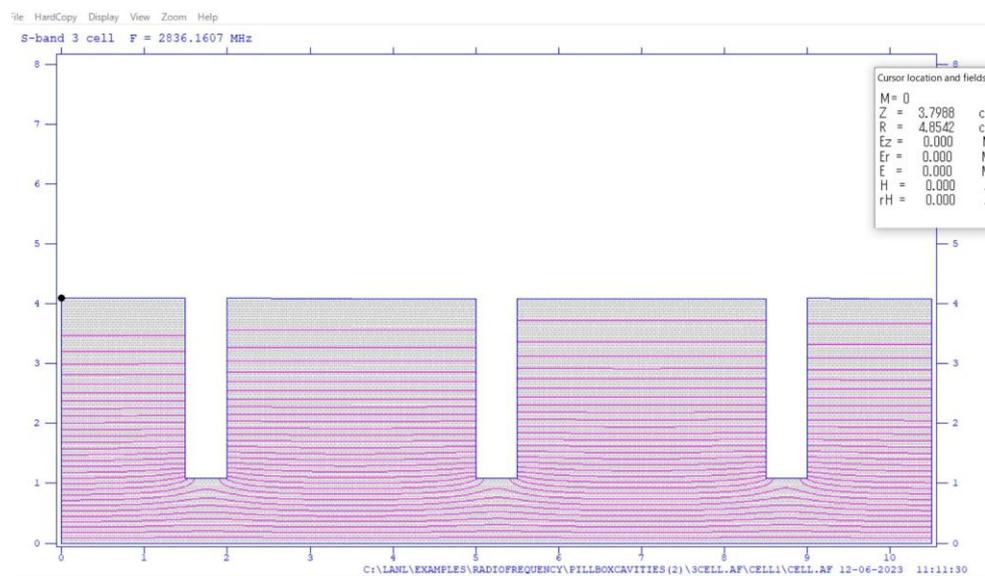


図 2-3 3cell 0モード計算結果

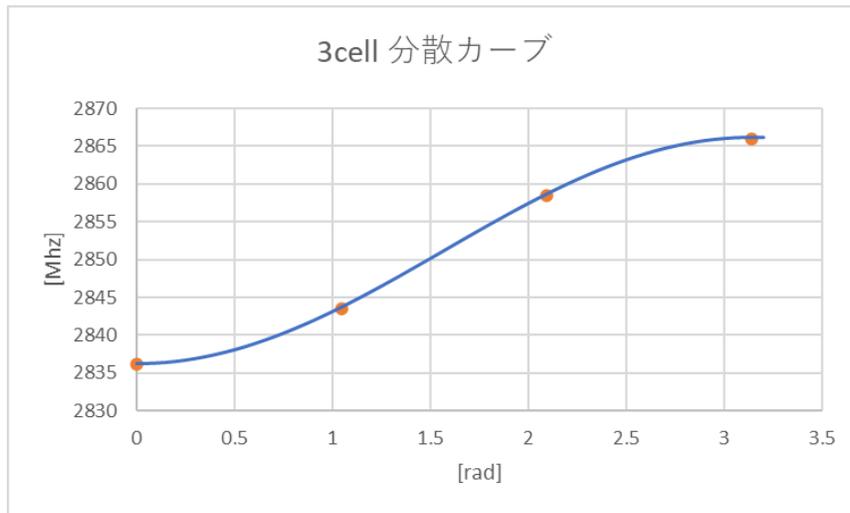


図 2-4 3cell 分散カーブグラフ

6cell のモード計算を行った後、実際に 6cell を持つ空洞を組み立て、ネットワークアナライザを用いて実際に加速管のモード測定を行い理論値と測定値を比較した。

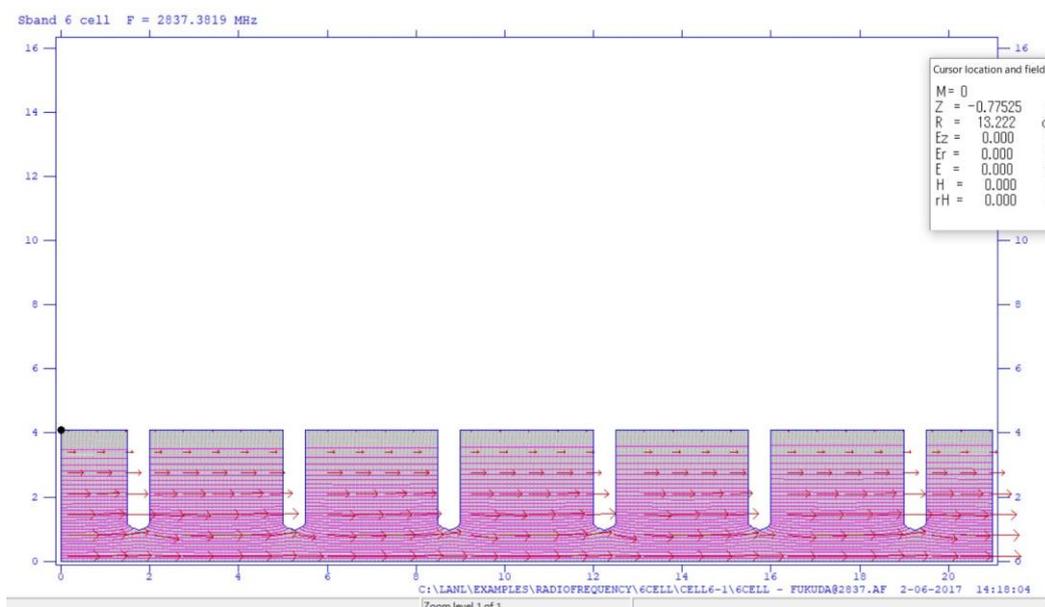


図 2-5 6cell 0モード計算結果



図 2-6 ディスクとリングを組み立てた実験装置

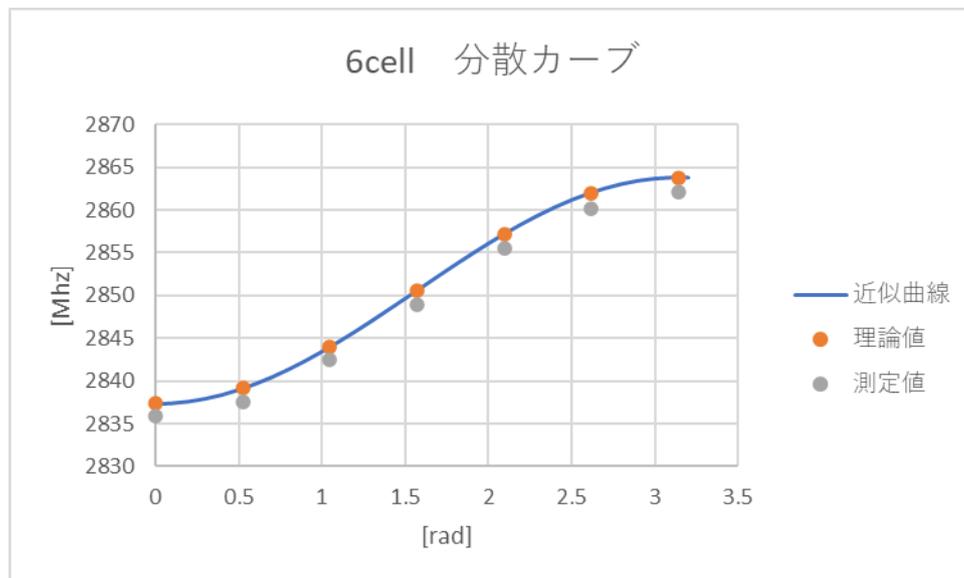


図 2-7 6cell 分散カーブグラフ

また、Pill-box 空洞についてもシミュレーションと測定の比較を行った。

・ KETA 説明

3日目に行われる KETA 実習に向けての説明が行われた。加速器の構成要素について学習した。図 2-8 が教育加速器 (KETA) の構成である。主ダンプモードでは、電子銃エミッション特性、クライストロンの入出力特性、クライストロンの印加電圧と電流の関係の測定を行う。副ダンプモードでは偏向電磁石を用いてビームエネルギーの測定を行う。照射モードではアクリルキューブにビームを照射しリヒテンベルグ像が現れることを確認する。それぞれのモードでの最大エネルギー、最大出力は図 2-9 の通りである。

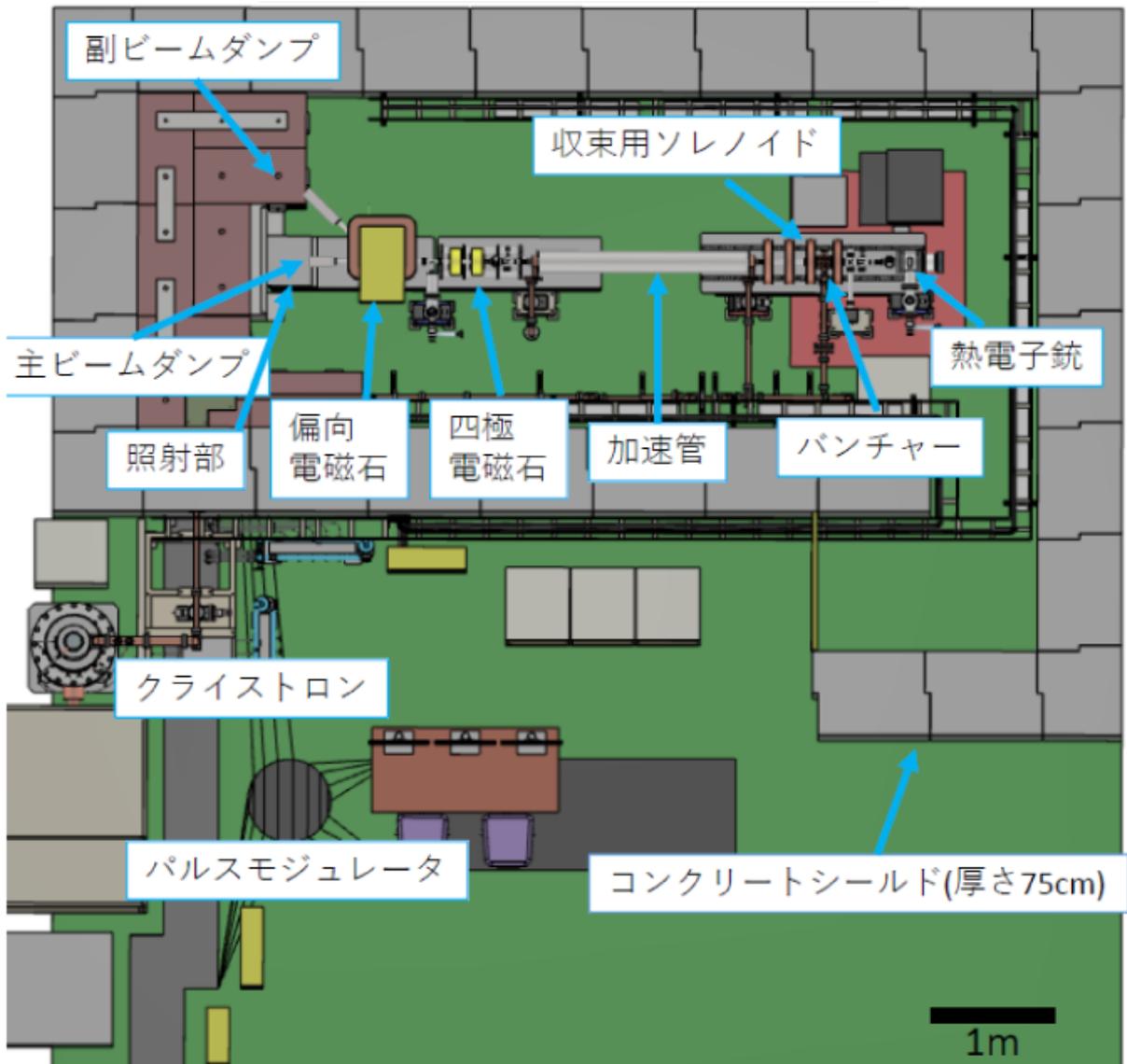


図 2-8 KETA 全体俯瞰図

	最大エネルギー[MeV]	最大出力 [MeV・nA]
主ダンプモード	25MeV	2500
副ダンプモード	25MeV	25
照射モード	11MeV	1100

図 2-9 各モードでの最大エネルギー、最大出力

### 3 日目

#### 教育加速器を用いたビーム実習

ビーム実習では、教育加速器（KETA）を用いて、加速器の立ち上げ、ビーム輸送調整、ビームエネルギー測定、アクリルキューブへの電子ビームの照射、電子銃のエミッション特性の測定、クライストロンの入出力特性の測定、クライストロンの印加電圧と電流の関係の測定などを行った。

#### 1, 加速器の立ち上げ

加速器の立ち上げを行う。手順としては以下の通りに行った。

- ・冷却システム（A 系統、C 系統）の立ち上げ
- ・各種ブレーカー立ち上げ
- ・バンチャー用チラー ON
- ・モジュレーター（クライストロン電源）立ち上げ、LV ON
- ・電子銃立ち上げ、ヒーター ON、バイアス電源 ON、HV 電源立ち上げ
- ・電磁石電源立ち上げ
- ・ゲートバルブ開栓
- ・電子銃の準備
- ・クライストロンの暖気が終わるまで待機
- ・待避を確認して、運転を開始
- ・電子銃の HV 立ち上げ
- ・クライストロン立ち上げ
- ・RF 立ち上げ
- ・主ダンプモードでビーム ON 準備

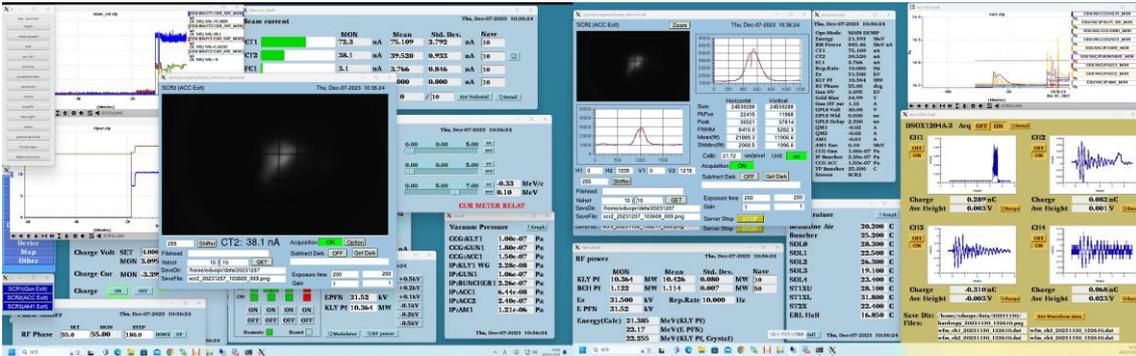


図 3-1 操作画面

## 2, ビーム輸送調整

加速管出口の電流値が最大になるようにソレノイドコイル、ステアリングコイルの調整を行った。その後、2つの四極電磁石を用いて、ビームサイズが小さくなるように調整を行った。ソレノイドコイルはビームをある直径内に収束させる働きを行い、ステアリングコイルは、上下または左右にビーム軌道を補正する働きを行う。四極電磁石はビームを収束させる。

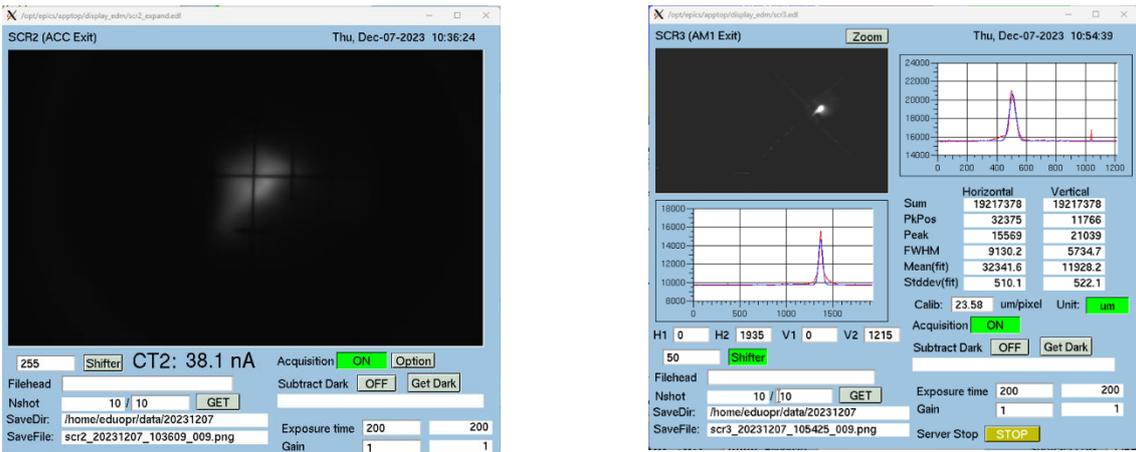


図 3-2 スクリーンモニターで測定したビームの様子

左はソレノイドコイルとステアリングコイルで調整を行った後のビームであり、右は四極電磁石で調整を行った後のビームの様子である。最終的な電子銃出口のビームの電流値と、加速管出口のビームの電流値はそれぞれ、79.6nA と 38.8nA であった。



図 3-3 四極電磁石の様子

四極電磁石の様子

画面中央の黄色の円筒が2つ連なったものが、四極電磁石である。

### 3、アクリルキューブへのビームの照射

加速器の運転モードを照射モードに切り替え、ビーム輸送調整を行った後、アクリルキューブにビームを 5 分間照射した。その後照射したアクリルキューブに、アースに接続した杭を使って衝撃を与えると、リヒテンベルク像が得られる。



図 3-4 リヒテンベルク像

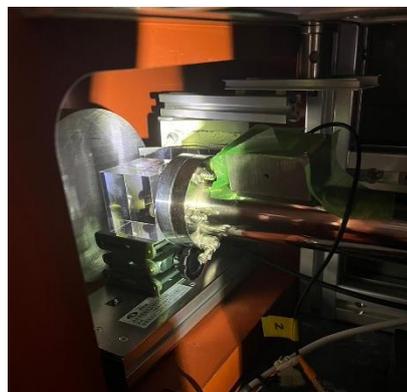


図 3-5 アクリルキューブを照射部にセットした様子

### 4、ビームエネルギー測定

加速器を副ダンプモードへ切り替え、ビームのエネルギーを調べる。副ダンプモードでは、ビームはアナライザーマグネットの磁場によって 45 度曲げられ、副ダンプへ捨てられる。副ダンプにはフォトダイオードが設置されており、電子ビームが来ると信号を出すようになっている。その時の磁場の強さからビームのエネルギーを調べる。



図 3-6 副ダンプの様子

写真中央に見える黄色の四角い物体が、アナライザーマグネットであり、写真中央右に見えるものが、副ダンプである。

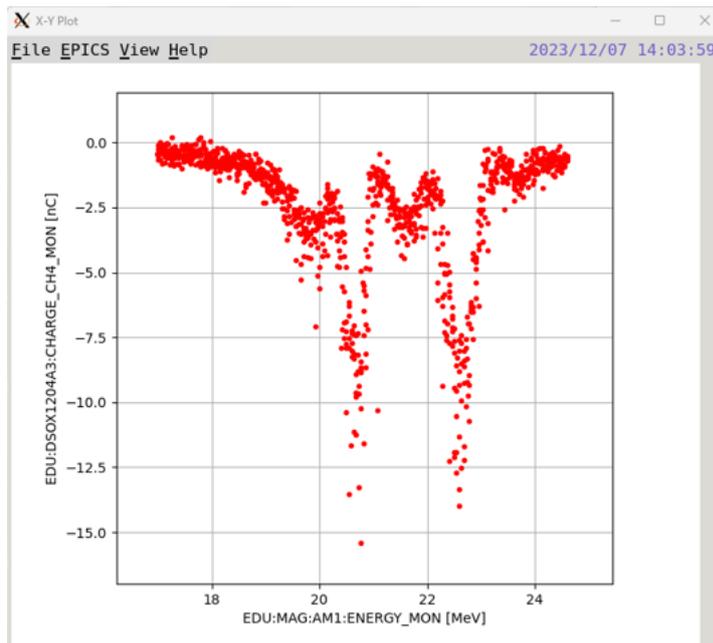


図 3-7 ビームのエネルギーとフォトダイオードの信号の変化

横軸が、アナライザーマグネットへ流した電流から計算したビームのエネルギーであり、縦軸が、フォトダイオードの信号である。山が3つあるのは、ビームがビームパイプに当たることによって電磁シャワーができ、それがフォトダイオードに当たっているからである。よってビームによる信号は3つの山のうち真ん中にあるものであり、そのエネルギーは、約21.55MeVである。

また、アナライザーマグネットへ流れた電流からビームのエネルギーを求める際には、ローレンツの式より、次のような計算式を使った。

$$p[\text{GeV}] = 0.3 \cdot B[\text{T}] \cdot \rho[\text{m}]$$

p:ビームの運動量, B:コイルの磁束密度,  $\rho \cong 0.5572\text{m}$  :曲率半径

$$B[\text{T}] = 0.02658 \cdot I[\text{A}] - 0.00184$$

I: 測定電流

$$E[\text{MeV}] = \sqrt{(p \times 10^3)^2 + 0.511^2} - 0.511$$

E: ビームのエネルギー

## 5、電子銃のエミッション特性の測定

電子銃のヒーター温度を変化させながら、ビームカレントを測定することで、適切なヒーター電流を調べた。

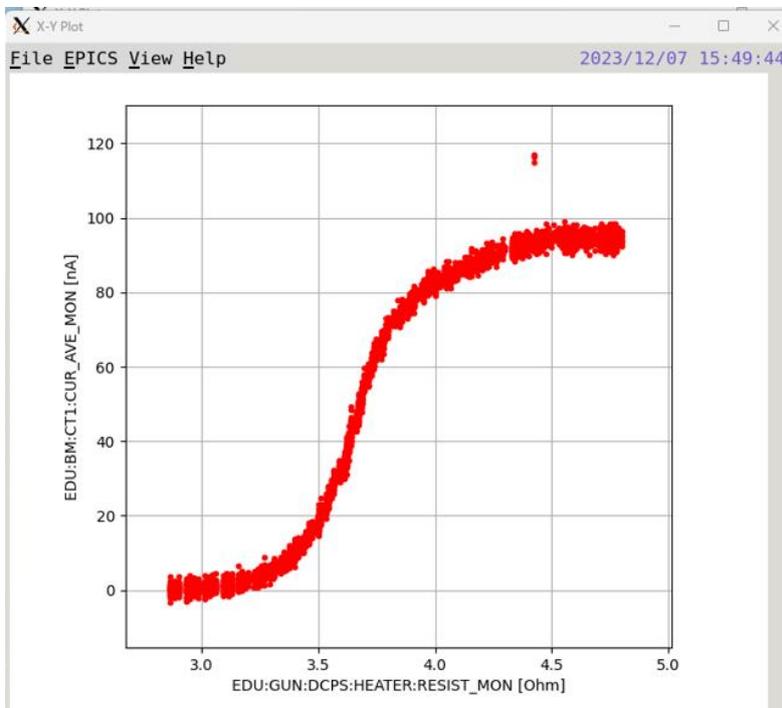


図 3-8 ヒーターの温度とビームカレント

横軸がヒーターの抵抗値であり、ここではヒーターの温度に相当する。縦軸は、ビームカレントである。上のグラフから、ヒーターの抵抗がおよそ 4.5Ohm 以上になるとビームカレントの値が変化しなくなることが分かる。

## 6、クライストロンの入出力特性の測定

クライストロンの電圧を一定にし、クライストロンの入力に対する出力特性を測定する。入力は PF AMP の出力付近にあるアッテネーターのダイヤルで調節する。

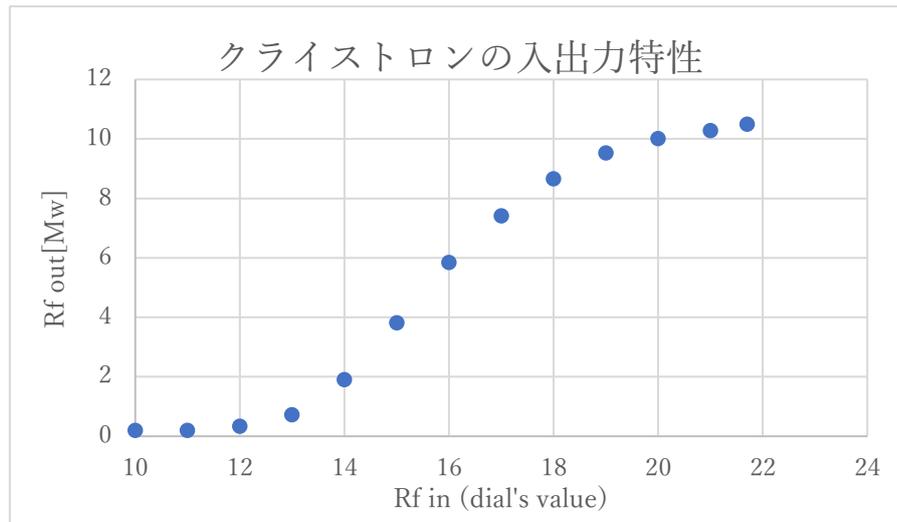


図 3-9 クライストロンの入出力特性

横軸がダイアルの値(入力)であり、縦軸が出力である。ダイアルの値を約 20 以上の飽和点近くに設定することで、rf 入力に変化しても rf 出力の変化を最小にできる。今回の実習では、運転時のダイアルは 21.7 である。

#### 7、クライストロンの印加電圧と電流の関係

クライストロンの電圧を変化させ、その時の電流の値を測定する。電流と電圧は、オシロスコープのパルス幅を読み取ることで測定した。

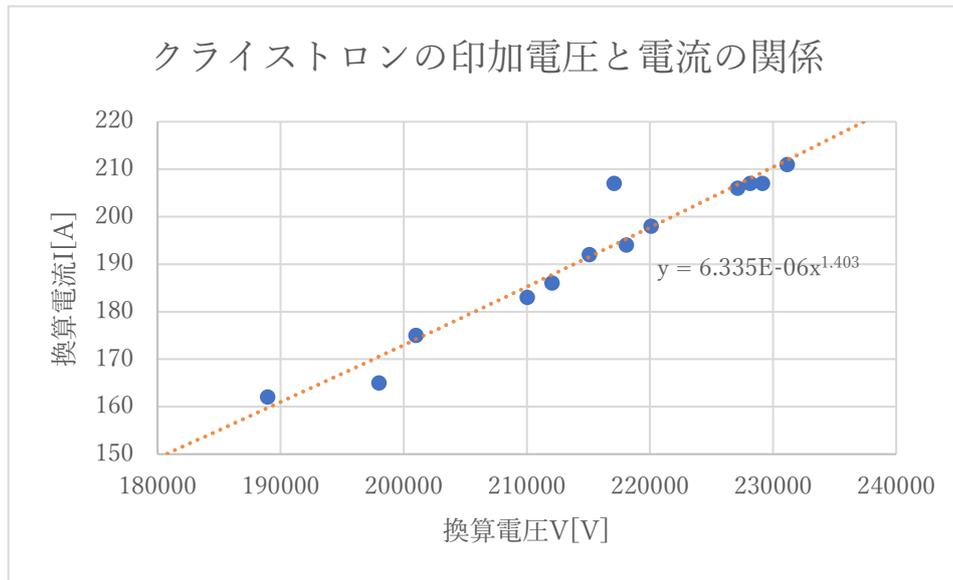


図 3-10 クライストロンの印加電圧と電流の関係

空間電荷領域であるので、チャイルド・ラングミュアーの法則より、電荷と電圧の間には、

$$I = P_{\mu} V^{\frac{3}{2}} \quad P_{\mu}: \text{パービアンズ}, I: \text{電流}, V: \text{電圧}$$

の関係が成り立つ。上で測定した値の近似曲線は、

$$I = 6.335 \times 10^{-6} \cdot V^{1.403}$$

となった。

## 8、加速器の立ち下げ

立ち上げの時と逆の手順で加速器の立ち下げを行った。

### (6)まとめ

今回の加速器インターンシップを通して、実際に教育加速器 KETA の立ち上げから照射まで操作できたことは非常に大きな経験となった。加速器に関する詳細な内容や、シミュレーションソフトの使い方、KETA の各装置の使い方など最初は分からないことが大半であったが、受け入れ担当となった全ての教員、研究者の方々の丁寧なご指導のおかげで、実験に必要な基礎知識を身につけることができ、安全に加速器運転を行うことができた。皆様に厚くお礼を申し上げたい。今後の卒業研究、大学院での研究を進めていく上でも、今回のインターンシップで得た知識と経験を存分に活かしていきたい。

参考文献：講義資料

<https://www2.kek.jp/accl/topics/20221117.html>