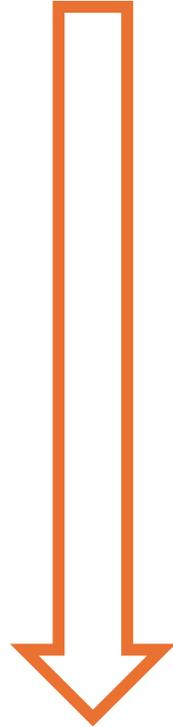


線形加速器の設計 シミュレーション

小山高専 加速器製作チーム
2,3年生

経緯

☆2、3年主導で新しいプロジェクトを始めたい



- ・先輩方が製作したサイクロトロン加速器とは違ったものを作りたい
- ・加速器の種類を挙げ、それぞれの長所短所を踏まえてどの種類を製作したいのかを検討

☆線形加速器を製作する方針が固まる

線形加速器の概要1

☆概要

加速させる粒子：熱電子

加速管にかける電圧 $V = 200[V]$

真空度： $1.0 \times 10^{-3}[\text{pa}] \sim 5.0 \times 10^{-3}[\text{pa}]$ 程度

観測方法：ファラデーカップor蛍光版

電子の速度 $v = 8400[\text{km/s}]$ (加速は1回のみ)

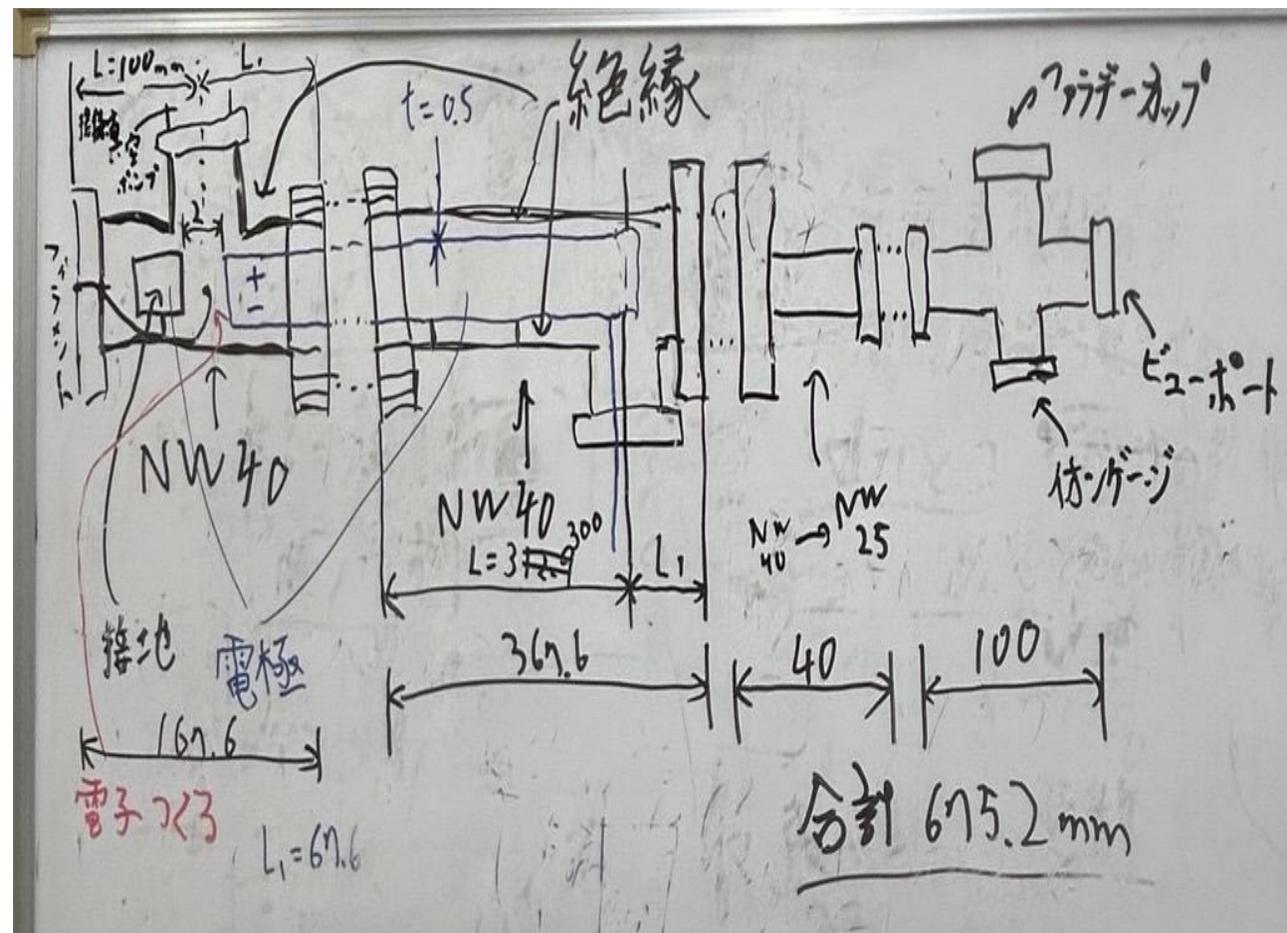
加速管にかける周波数 $f = 21[\text{MHz}]$

☆加速器本体に使用する真空管

→両端溶接真空管 NWフランジ (SUS304)

使用する加速管

→銅管 (リン脱酸銅、防錆油塗布済み)



線形加速器の概要2

☆ 加速させる粒子

加速させる粒子には電子を用いる

☆ なぜ電子を選んだか

陽子と比べて、発生させるのが比較的簡単であると考えたから

☆ 電子の発生方法

加速ギャップ間にフィラメントを通し、バイアスをかける。

線形加速器の概要 3

☆何故電圧を200[V]にしたか

- ・危険すぎない範囲での実験をするため。
- ・昇圧用の機材に触れるとともに、電源についての理解を深めるため。

☆昇圧の方法

昇圧機を使う

線形加速器の概要4

☆実験中の真空度：

目標の真空度は 1.0×10^{-3} [pa]～ 5.0×10^{-3} [pa]

真空度は、実験によって得る結果から、今後の実験結果に差し支えなく、かつ、最も時間効率が良さそうなものを選ぶ。理想は、3～4時間以内で引ける真空度。

理由：

先輩方が作成したサイクロトロンでは、時間をかけることで

10^{-4} [pa]台まで真空を引ける。しかし、線形加速器はサイクロトロンと比べて本体の体積が大きいため、 10^{-3} [pa]台以降は時間を多く消費してしまうと考えたから。

線形加速器の概要5-1

☆電子の測定方法①

ファラデーカップを用いる

→飛んできた電子を内部で吸収し、その電荷を電流として測定

メリット：

電流を直接測れる

電子1個の電荷は $e=1.6\times 10^{-19}$ [C]なので、 $I = ne$ から電子数を直接求められる。

線形加速器の概要5-2

☆電子の測定方法②

蛍光板を用いる

ガラスに蛍光体を塗布する。電子が衝突すると発光する。

→ブラウン管テレビと同じ原理

メリット：

位置、収束状態が一目でわかる。

→展示会向き

線形加速器の概要6-1

記号:
運動エネルギー:K[J]
電荷:q[C]
電圧:V[V]

☆ 電子の速度の計算

① 電子が加速電場から得るエネルギー
電子の電荷 : $e = 1.60 \times 10^{-19} [\text{C}]$

$$K = qV$$

より、

$$K = (1.60 \times 10^{-19}) \times 200 = 3.20 \times 10^{-17} [\text{J}]$$

線形加速器の概要6-2

②相対論が必要か？

電子の静止エネルギー

$$mc^2 = 511[\text{keV}]$$

今回のエネルギー

$$200[\text{eV}]$$

$$\rightarrow 200[\text{eV}] \ll 511[\text{keV}]$$

より、実験の粒子の運動は非相対論的なので、ニュートン力学で記述可能

記号：
質量： $m[\text{kg}]$

静止エネルギー：
粒子が静止していても持っているエネルギーを言う。式は $E=mc^2$
相対論では粒子の全エネルギーは
 $E=\gamma mc^2$
運動エネルギーは
 $K = (\gamma - 1)mc^2$
($K/mc^2 = \gamma - 1$)
ここで、
・ $K \ll mc^2$ のとき
 $\gamma \approx 1$
→非相対論的
・ $K \approx mc^2$ のとき
ガンマが明確に1からずれる
→相対論必要

線形加速器の概要6-3

③速度を求める

$$K = \frac{1}{2}mv^2[\text{J}]$$

電子の質量:

$$m=9.11 \times 10^{-31}[\text{kg}]$$

$$v = \sqrt{\frac{2K}{m}}[\text{m/s}]$$

代入:

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{2 \left(3.20 \times 10^{-17} \right) / \left(9.11 \times 10^{-31} \right)} \\ &\approx \underline{8.4 \times 10^6}[\text{m/s}] \end{aligned}$$

記号:
速度: $v[\text{m/s}]$
電圧: $V[\text{V}]$

加速回数を1回にした理由

☆計算結果より、電子の速度がとて大きく、2回目以降の加速につき、電子の追跡が困難であると考えたから。

また、粒子 $q[\text{C}]$ が電場 $E[\text{N/C}]$ から受ける力
 $F=qE[\text{N}]$
一様電場と仮定すると、 $E=V/d[\text{V/m}]$ より、
 $F=qV/d$
だから、仕事とエネルギーの関係から
 $qV/d \cdot d = 1/2 \cdot mv^2$
 $\therefore v^2 = (2qV/m)$
 $\therefore v = \sqrt{2qV/m}[\text{m/s}]$

線形加速器の概要 7-1

記号：
時間:t[s]
周期:T[s]
速度: v_n [m/s]
加速度: a [m/s²]
ギャップ間距離:d[m]

☆ 加速管の周波数を求める

① 電子がギャップ間を移動する速さから周期Tを求める。

$$v^2 - v_0^2 = 2ax$$

また、 $a = \frac{v}{t} = \frac{2v}{T}$ だから、

$$v^2 = \frac{2 \times 2v}{T} \times d$$
$$T = \frac{4d}{v} = \sqrt{\frac{16d^2}{\frac{2qV}{m}}} = 2d \sqrt{\frac{2m}{qV}} = d \sqrt{\frac{8m}{qV}}$$

線形加速器の概要7-2

☆ 数値代入

先の式に条件を代入すると、

$$T=4.76 \times 10^{-8}[\text{s}]$$

$$\therefore \underline{f=21 \times 10^6[\text{Hz}]}$$

条件：

電子の質量： $m=9.11 \times 10^{-31}[\text{kg}]$

電子の電荷(絶対値をとる)： $q=1.62 \times 10^{-19}[\text{C}]$

加速管の電圧： $V=200[\text{v}]$

線形加速器の概要8

☆ 加速度の計算

半周期でギャップ→ギャップに移動させるのにかかった時間

$$t = \frac{T}{2} [s]$$
$$v_1 = v_0 + at$$

より、

$$a = \frac{v_1}{t} = \frac{2v_1}{T} = \frac{2\sqrt{\frac{2qV}{m}}}{d\sqrt{\frac{8m}{qV}}} = \frac{qV}{dm} [m/s^2]$$

作業の進捗

- ☆本体となるフランジ、加速管用の銅管は購入済
- ☆購入した同軸RFケーブルについて
 - 用途：フィラメントに電流を流す
 - 銅管に加速電場を発生させる
 - ファラデーカップ用
 - 1kV,3A対応
 - 50Ω伝達用
- ☆RFケーブル、クランプ、ビューポートなどは購入手配済
 - 3月の中旬に届く予定(クランプ、ビューポートは届いた)
- ☆製作、実験は部品が全て揃ってから行う予定



左2つ：NWフランジ
右：銅管（加速管）

線形加速器を用いた実験予定

☆ 本体を高真空状態までもっていけるかの確認



☆ 真空の引き具合をグラフ化し、実験開始までにかかる時間を明確にする



☆ フィラメントにかけるバイアスについて対照実験を行い、最も効率よく加速、観測、測定できる条件を探す



☆ 4極電磁石を作成し、ビームの収束に挑戦する

フィラメントにかけるバイアス調整実験 の手順

- ① 目標真空度まで真空を引く。
- ② 加速RF用銅管にかける電圧を200[V]、周波数を21[MHz]で固定する。
- ③ フィラメントにかけるバイアスを1.0[V]ずつ変化させ、ファラデーカップによる電流値を測定する。
- ④ 最も大きい電流値を測定したバイアスの値に決定する。

線形加速器の設計

☆設計

引継ぎを前提としたプロジェクトのため、部員が入れ替わっても問題なく作業を進められるようにする。

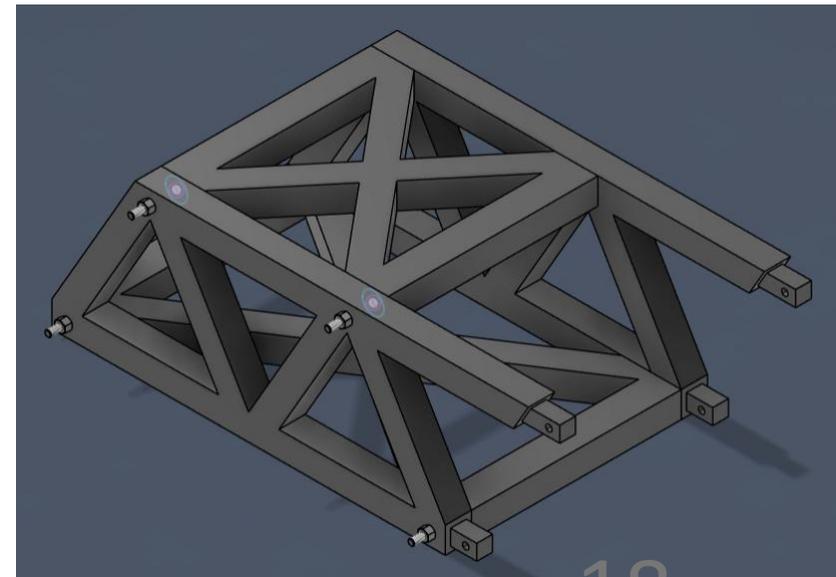
☆現状

FusionやCADの使い方を学びながら線形加速器の全体像の設計を行っている。

真空管を支える土台を作成している。

☆今後の改善

真空管の模型を図の点線部で分けられるようにし、中の構造を確認できるようにしたい。



線形加速器の計算

☆シミュレーション

加速器の中で粒子がどのように運動をしているかを理解する
基本的なシミュレーション方法を理解する

☆現状

Unity内のシミュレーションの土台は完成(仮)。特定の数値では理想値に近い値がでた。
実際の数値でできれば尚よい…といった感じ。

☆今後の改善

- ・理想値と実際の値の一致。
- ・実際の数値で動かすこと。

計算概要と結果

- ・ 電子の質量(仮)の 9.1×10^{-31} [kg] と電荷 1.6×10^{-19} [C] に対して

$$\frac{9.1 \times 10^{-31}}{9.1 \times 10^{-31}} = 1[\text{C}]$$

$$\frac{1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-31}} = 1.75 \times 10^{11}[\text{C}]$$

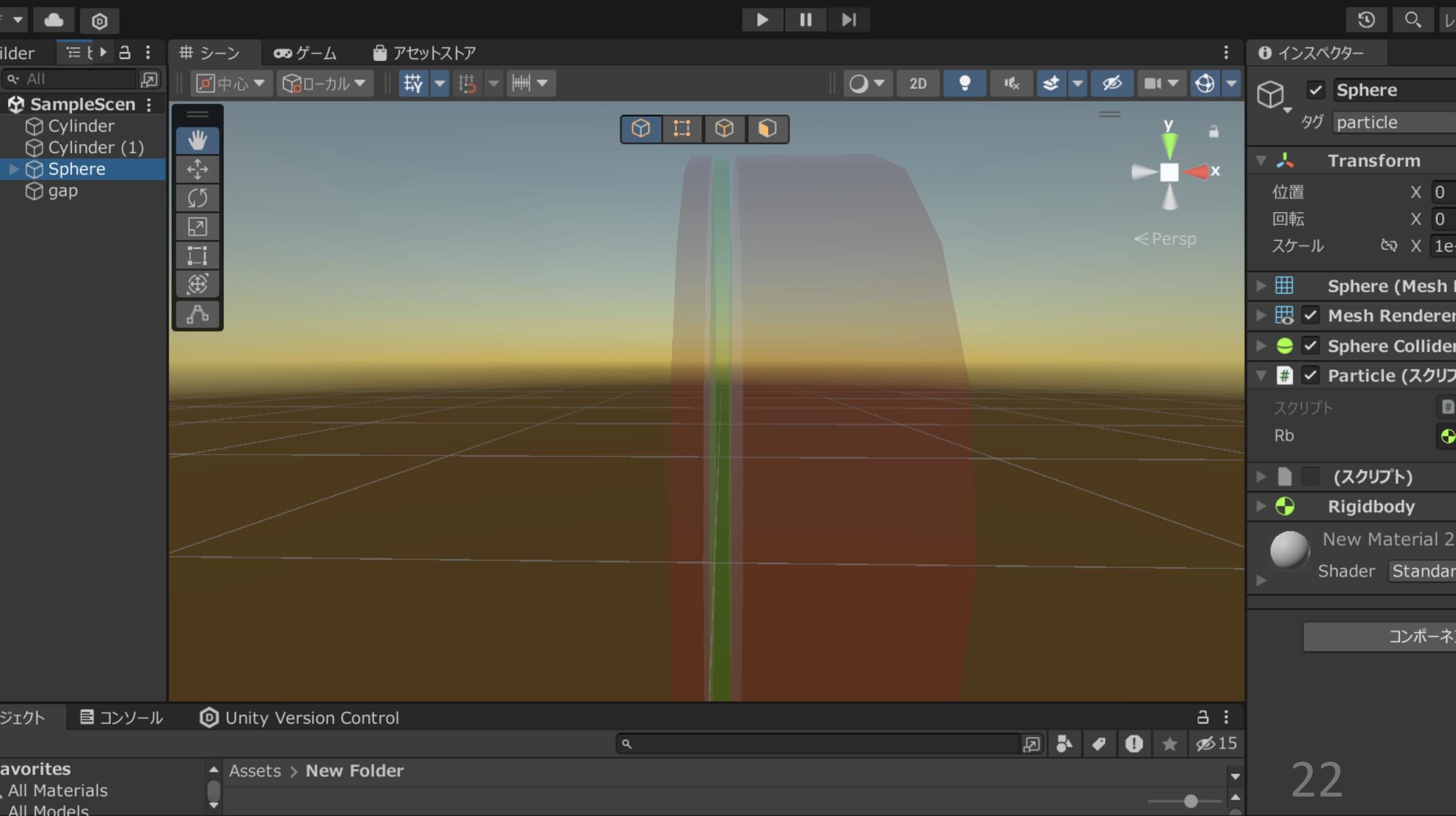
で計算する。20

$$\text{速度: } v = v_0 + at \quad (v_0 = 0, a = F = 1.75 \times 10^{15})$$

$$1.75 \times 10^{15} \times 0.01 = 1.75 \times 10^{13}$$

```
[11:20:55] 現在の速さ3500000000000.0000000000  
UnityEngine.Debug:Log (object)  
[11:20:55] 現在の速さ3500000000000.0000000000  
UnityEngine.Debug:Log (object)  
[11:20:55] 現在の速さ3500000000000.0000000000  
UnityEngine.Debug:Log (object)  
[11:20:55] 現在の速さ3500000000000.0000000000  
UnityEngine.Debug:Log (object)
```

⇒どこかで想定できていない計算が発生している？



Inspector

- Sphere
 - タグ particle
- ▼ Transform
 - 位置 X 0
 - 回転 X 0
 - スケール X 1e
- ▶ Sphere (Mesh)
- ▶ Mesh Renderer
- ▶ Sphere Collider
- ▼ # Particle (スクリプト)
 - スクリプト #
 - Rb
 - ▶ (スクリプト)
 - ▶ Rigidbody
 - New Material 2
 - Shader Standard

```
Assembly-CSharp | gap | OnTriggerEnter(Collider collision)
Unity スクリプト (1 件のアセット参照) 10 個の参照
public class gap : MonoBehaviour
{
    [SerializeField] float time = 0.0f;
    [SerializeField] float max_volt = 200.0f;
    [SerializeField] float gap_width = 0.002f;
    [SerializeField] float mass = 1f;

    // Start is called before the first frame update
    Unity メッセージ 10 個の参照
    void Start()
    {
    }

    // Update is called once per frame
    Unity メッセージ 10 個の参照
    void Update()
    {
        time += Time.deltaTime;
    }

    Unity メッセージ 10 個の参照
    void OnTriggerEnter(Collider collision)//接触したとき
    {
        if(collision.gameObject.CompareTag("particle"))
        {
            var gapq = mass * 1.75f * 1e11f;
            var force = new Vector3(gapq * max_volt/gap_width, 0, 0);//x方向に(電荷×電圧÷ギャップ間)
            collision.gameObject.GetComponent<Rigidbody>().AddForce(force,ForceMode.Force);//x方向に上の力を与える
        }
    }
}
```

今後の予定

☆ 本体を高真空状態までもっていけるかの確認



真空の引き具合をグラフ化し、実験開始までにかかる時間を明確にする



フィラメントにかけるバイアスについて対照実験を行い、最も効率よく加速、観測、測定できる条件を探す



4極電磁石を作成し、ビームの収束に挑戦する

☆ 線形加速器の土台の印刷を完了させ、完成検査前検査を行う。

本線形加速器は、

- ・ 2025年度ミスミ学生ものづくり支援による物品支援
- ・ パルスパワー技術研究所様からの支援を得ています

 **MISUMI**  **学生ものづくり支援**

 **株式会社パルスパワー技術研究所**
Pulsed Power Japan lab.