

レーザー駆動イオン加速における 炭素イオンのビーム特性診断

DIAGNOSIS FOR CARBON BEAM CHARACTERISTIC IN LASER DRIVEN ION ACCELERATION

宮武 立彦^{#, A)}, 小島 完興^{B)}, 榊 泰直^{B)}, 岩田 佳之^{C)},
近藤 康太郎^{B)}, 西内 満美子^{B)}, 白井 敏之^{C)},
神門 正城^{B)}, 近藤 公伯^{B)}, 渡辺 幸信^{A)}

A) 九州大学大学院, B) 量研 関西研, C) 量研 放医研

量子メスプロジェクト

目的：**レーザー駆動イオン加速**と**超電導電磁石**を組み合わせた**超小型重粒子線(炭素イオン)治療装置**の実現

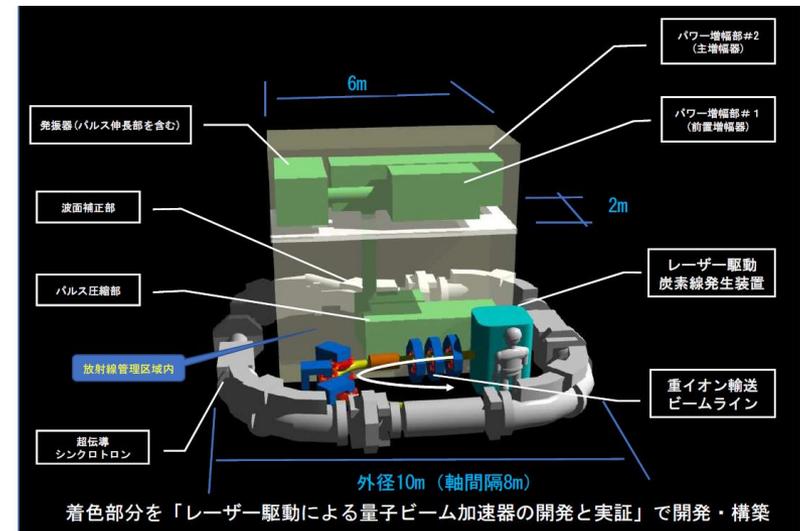
- **C⁶⁺イオン**を数MeV/uで直接超電導シンクロトロンに入射

サイズ・コスト面で病院に併設困難



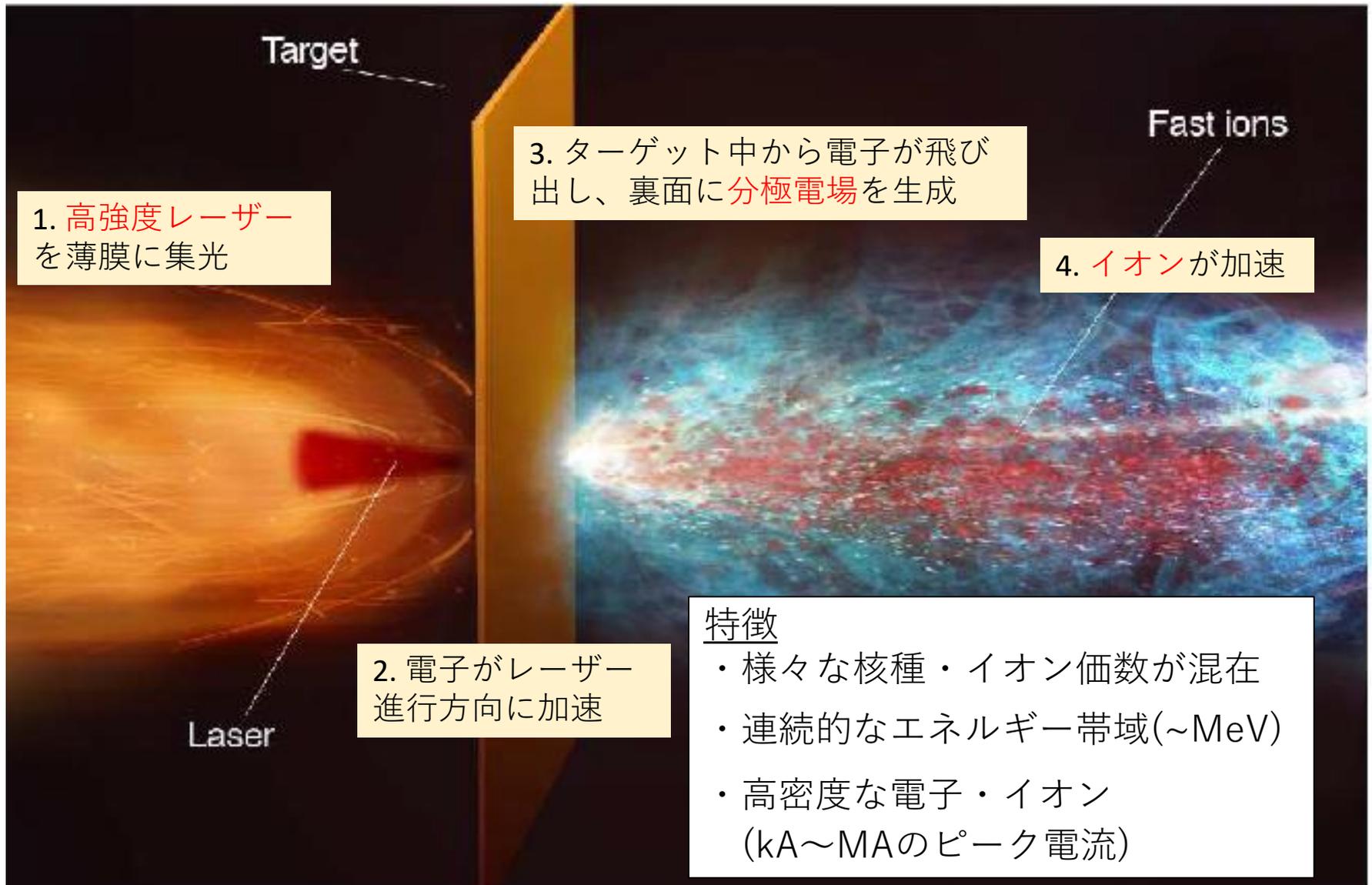
群馬大学重粒子線照射施設*

10m×10mのサイズで実現



量子メス概要図

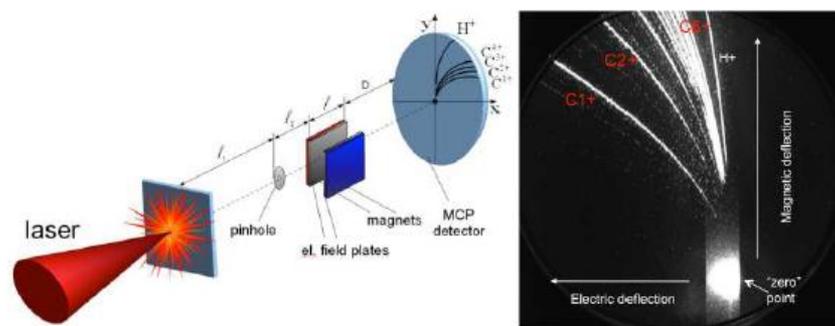
レーザー駆動イオン入射器の実現



特徴

- 様々な核種・イオン価数が混在
- 連続的なエネルギー帯域(\sim MeV)
- 高密度な電子・イオン
(kA \sim MAのピーク電流)

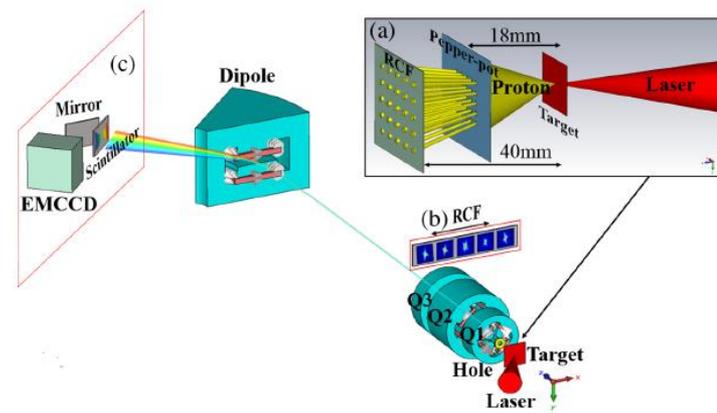
トムソンパラボラ分光器によるイオン計測実験



- イオンのエネルギースペクトル
- 加速されたイオンをサンプル抽出的に計測

Ref) A. Macchi *et.al.*, Rev. Mod. Phys. 85, 751 (2013)

プロトン計測実験



- プロトンのエミッタンス計測
- ペッパーポット、Qスキャンなどを用いてエミッタンス成長を実測

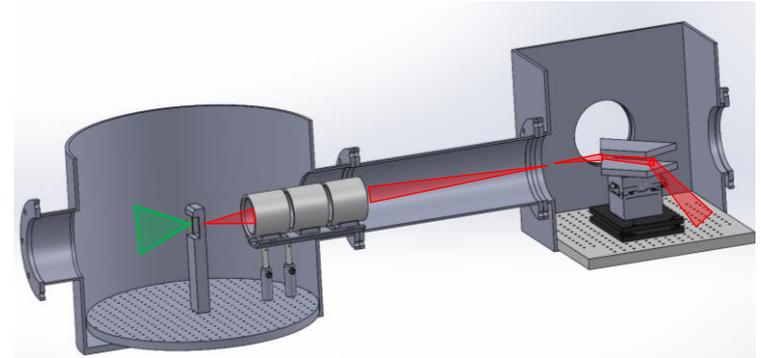
Ref) M. J. Wu *et.al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 23, 031302 (2020)

課題

ビーム輸送系の設計に必要なレーザー駆動イオン加速における炭素イオンビーム特性の理解が進んでいない

レーザー駆動イオン加速で生成される炭素イオンビームの特性計測

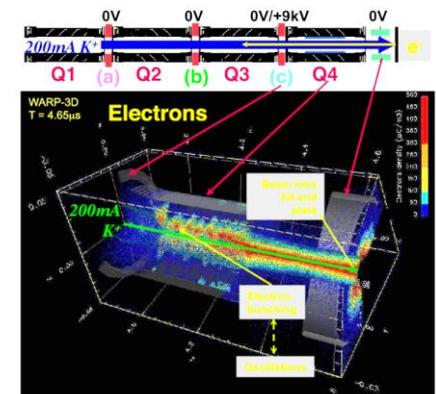
- ・ 炭素ビーム輸送による純化
- ・ ビーム品質の実測
(エミッタンス、電流量など)



提案される診断系概略図

Particle In Cellシミュレーションによるビーム物理の解析

- ・ 輸送時のビーム挙動(空間電荷、輸送系によるビーム品質劣化など)の把握



Alex Friedman et al., IEEE Transactions on Plasma Science, Volume 42 , Issue 5 ,1321-1334 (2014)

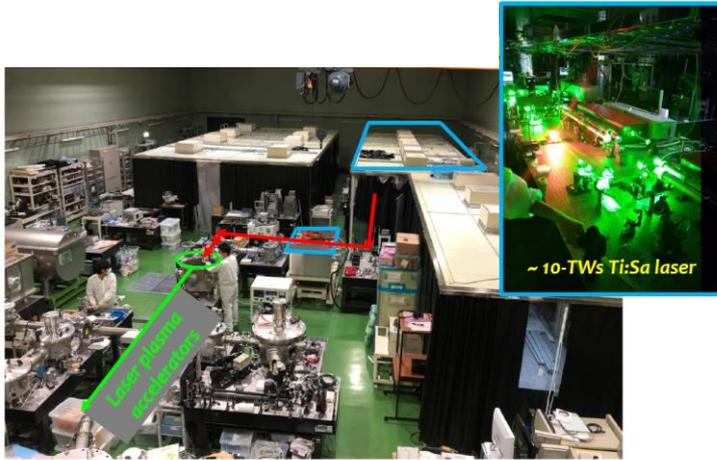
レーザー・
ターゲット照射条件

体系化

炭素イオン特性
エミッタンス・電流量

量子メス実現に向けたレーザー開発

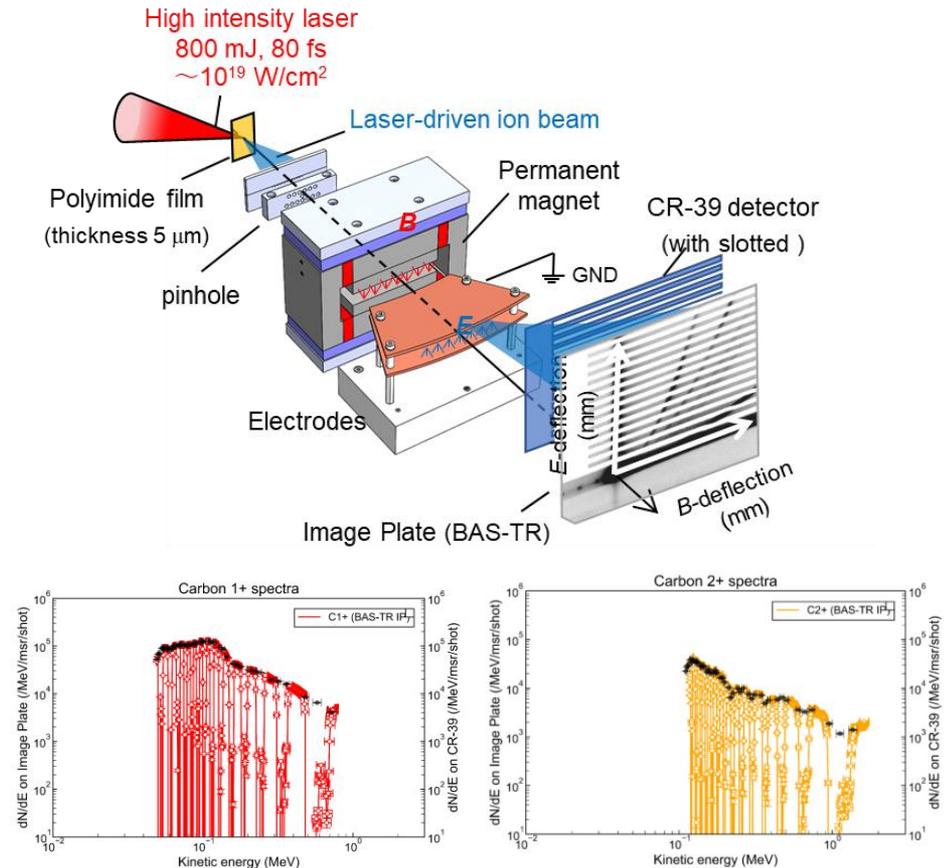
プラットフォームレーザー



- 繰り返し：10_{Hz}
- パルス幅:80_{フェムト秒}
- 集光強度：10¹⁹W/cm²

- 高繰り返し、安定供給
- 段階的にレーザー強度を上昇
- マシントイムの自由度が高い

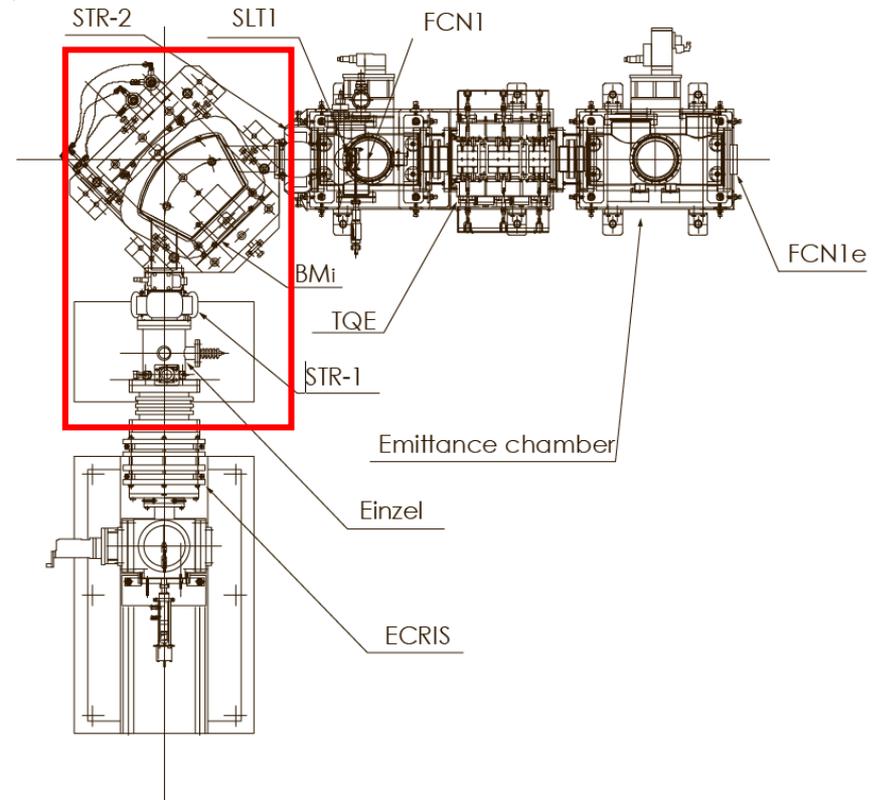
トムソンパラボラ分光器による 立体角当たりの個数推定



数keV～数十keV/uのイオン個数が多い

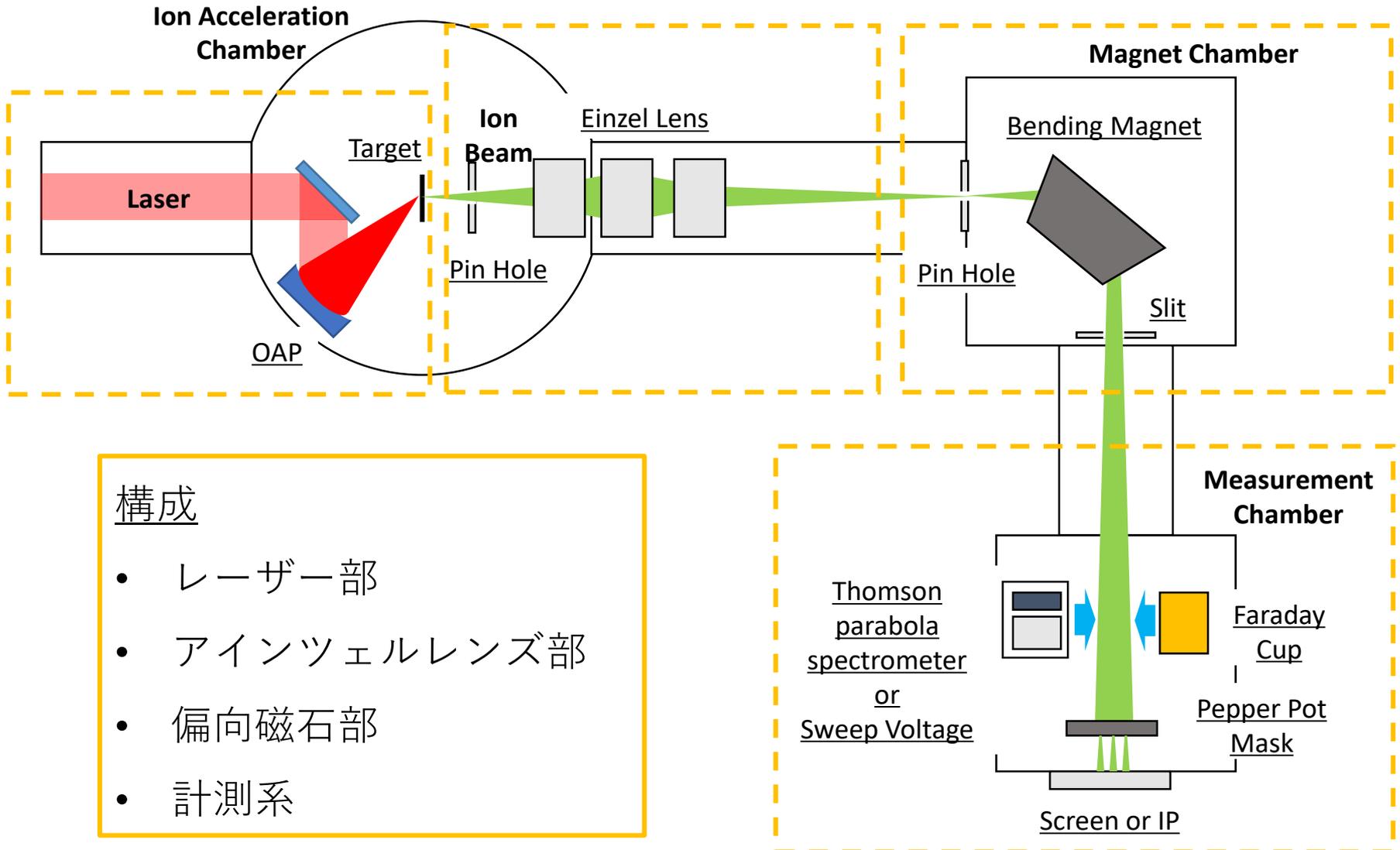
レーザー駆動イオン加速で生成される **C⁴⁺, 10keV/uビームの特性診断**を行う

- 静電レンズ、偏向磁石を用いてイオン種、エネルギー弁別しC⁴⁺, 10keV/uを純化
- 純化したビームの特性 (エミッタンス、電流量)を計測
- 計測値をHIMACイオン源と比較、品質評価



放医研HIMACの低エネルギー輸送部

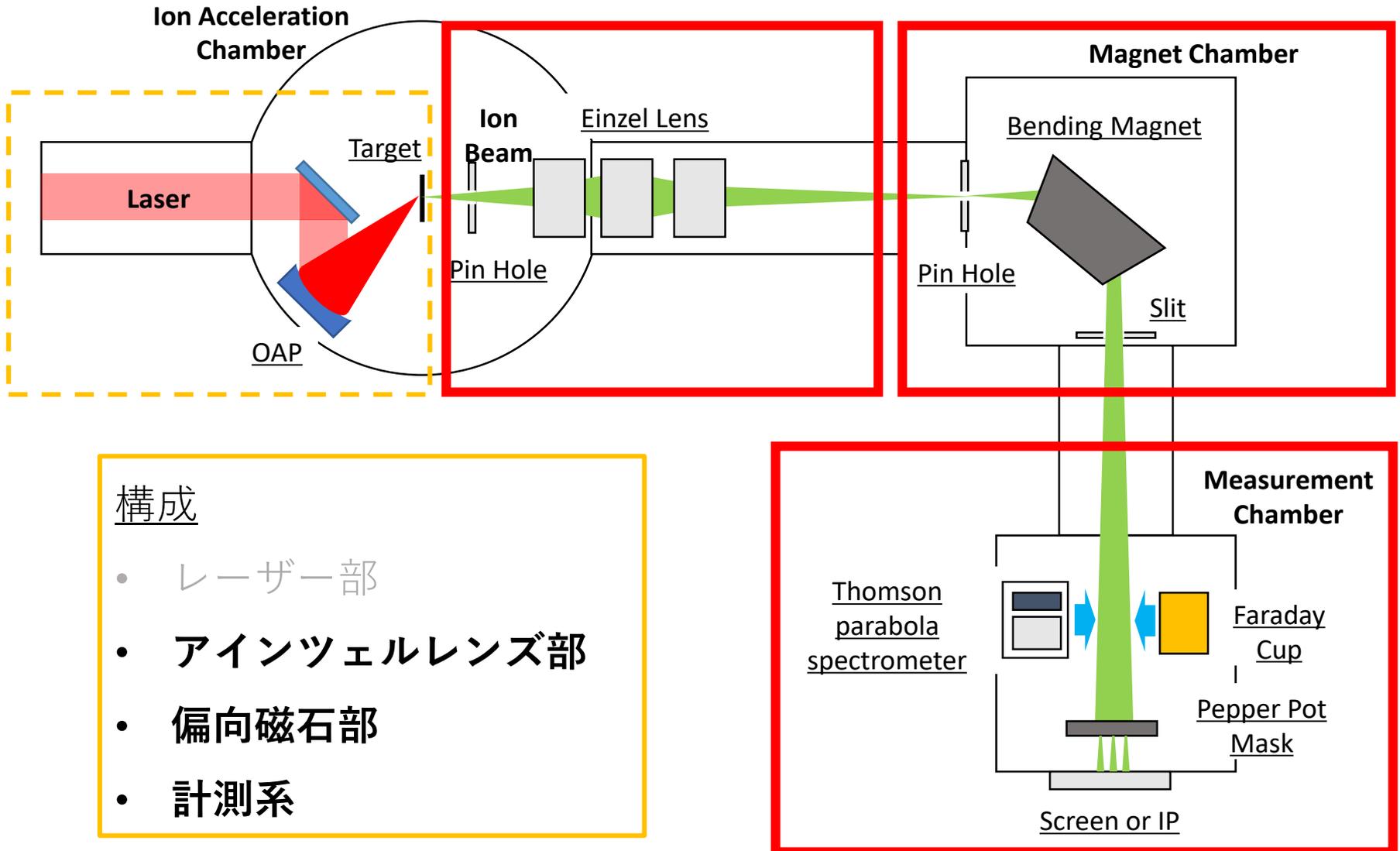
開発したビーム純化輸送系・計測系の概要図



構成

- レーザー部
- アインツェルレンズ部
- 偏向磁石部
- 計測系

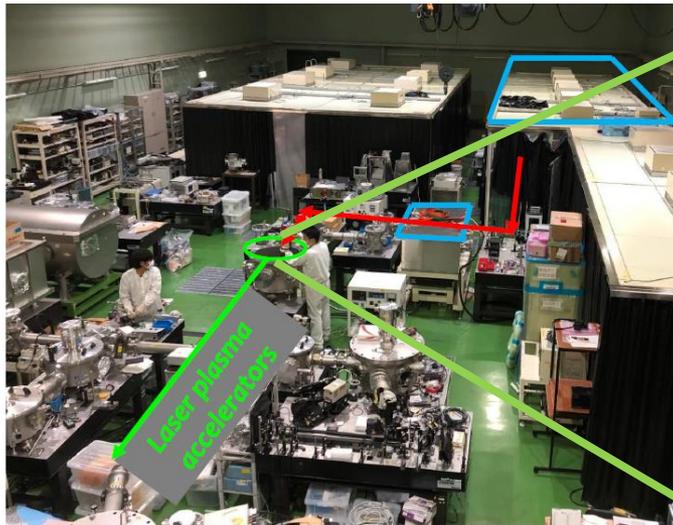
開発したビーム純化輸送系・計測系の概要図



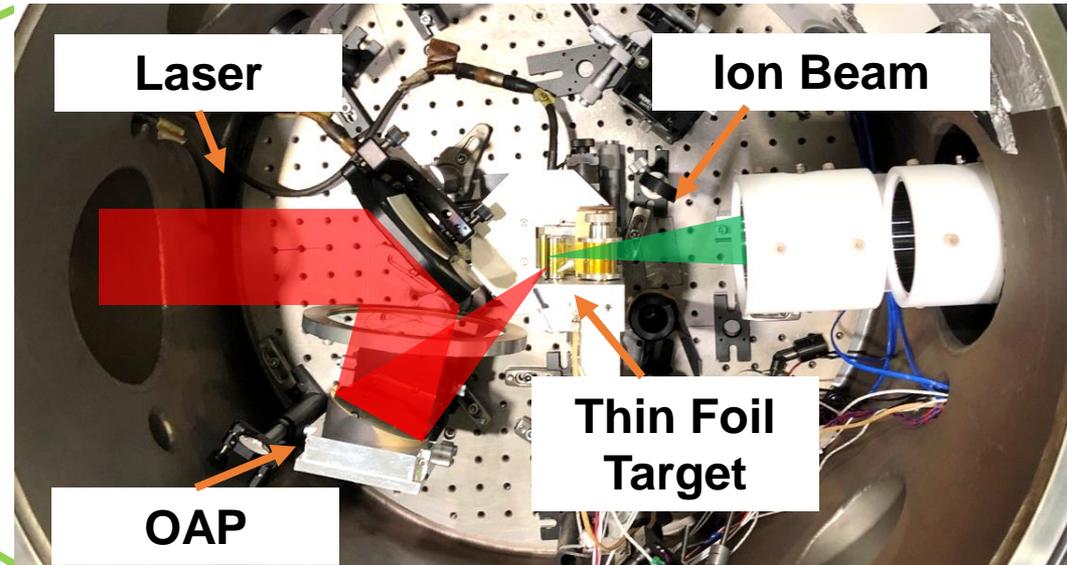
構成

- レーザー部
- アインツェルレンズ部
- 偏向磁石部
- 計測系

イオン加速用プラットフォームレーザー



Laser plasma accelerators



Ion acceleration chamber

◆ レーザーパラメータ

- エネルギー : 約800mJ (on target)
- コントラスト : $1e-8$
- 繰り返し : **10Hz**
- パルス幅 : 80fs
- 集光強度 : $10^{19}W/cm^2$

◆ ターゲットパラメータ

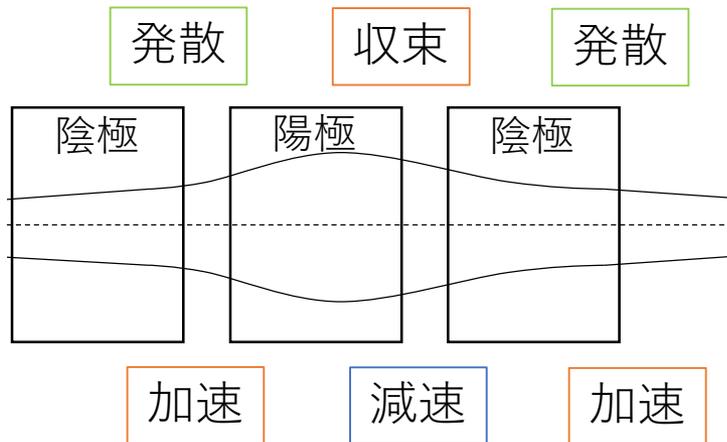
- 素材 : ポリイミド
- 厚み : $5\mu m$

QST関西研の研究者・レーザー
運転員の方協力のもと、施設内
のレーザーシステムを利用

プロトン、**炭素イオン**、
酸素イオンが支配的に加速

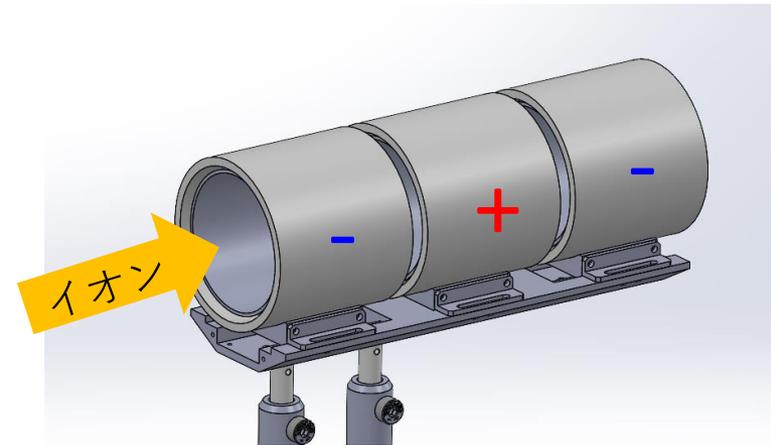
アインツェルレンズ

役割 : C^{4+} , 10keV/uのビーム収束を行い、エネルギーで弁別



設計基準

- メインチェンバー内に配置
- 発散角を大きく取得
- 集光後の発散角 : $\pm 1[^\circ]$ 等



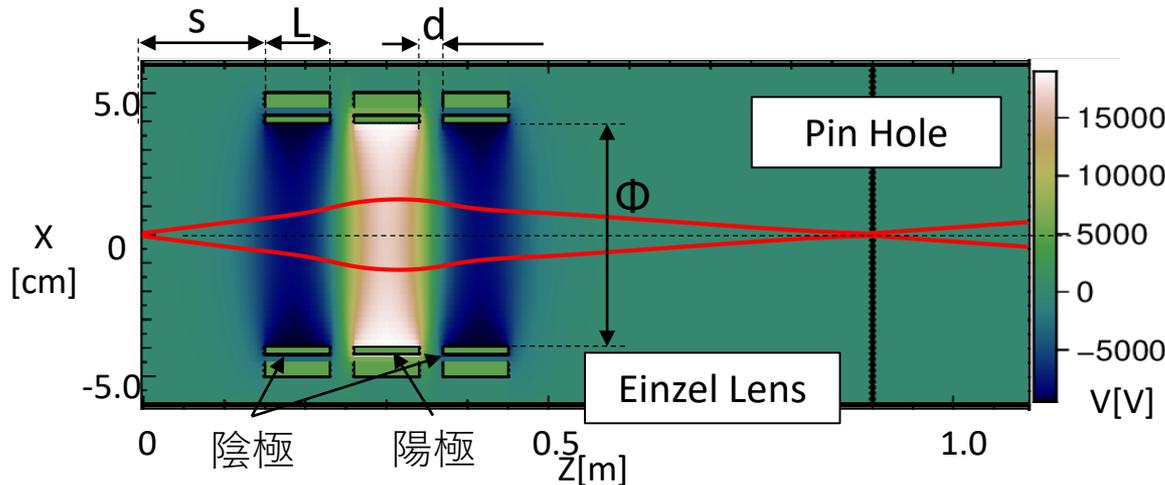
- 全体としてエネルギー変化なし
- 収束型

アインツェルレンズ設計図面

設計基準をもとにレンズサイズ、印加電圧の**最適値を探索**
 C^{4+} , 10keV/uビームの収束レンズを設計

設計レンズのビーム軌道解析結果

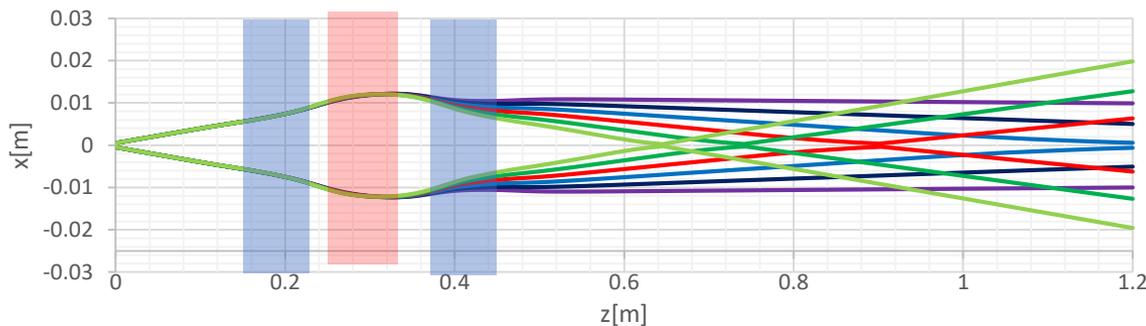
- PICコード(WARP)によってレンズポテンシャル分布を3次的に計算
- C^{4+} , 10keV/uビームの軌道解析計算
→ **レンズ径・長さ・間隔および電圧を決定**



設計値

- 直径 Φ : 8cm
- 長さ L : 8cm
- 間隔 d : 3cm
- レンズ開始位置 s : 15cm
- 陽極電圧 : 19kV
- 陰極電圧 : 9.5kV
- 取得発散角 : $\pm 2^\circ$
- 集光後の発散角 : $\pm 1^\circ$

C^{4+} 10keV/u 集光軌道とレンズ電圧



- +16kV, - 8kV
- +17kV, - 8.5kV
- +18kV, - 9kV
- **+19kV, - 9.5kV**
- +20kV, - 10kV
- +21kV, -10.5kV

C^{4+} , 10keV/uビーム収束用のレンズ条件を決定し、設計・製作

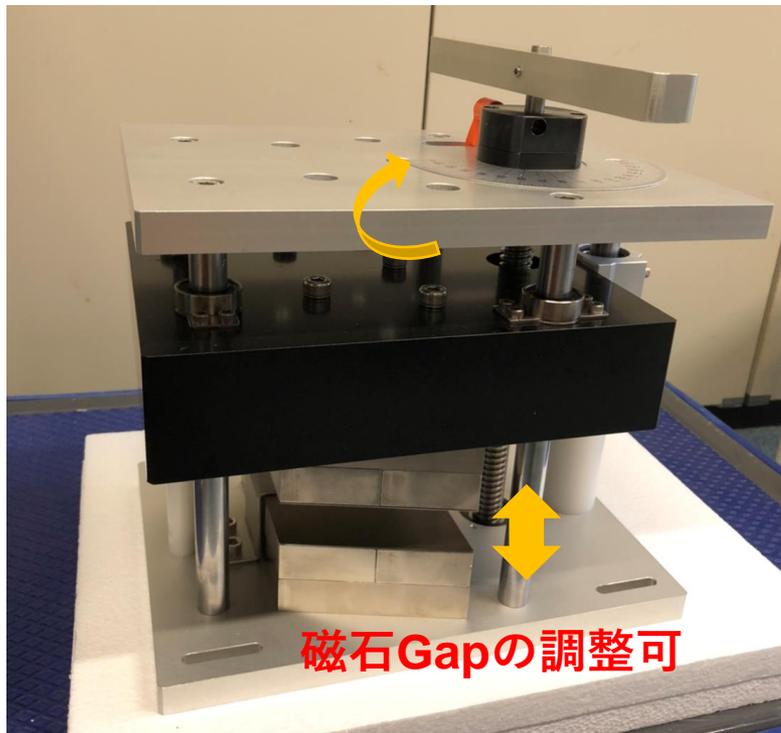
磁石によるビーム収束軌道解析

永久磁石

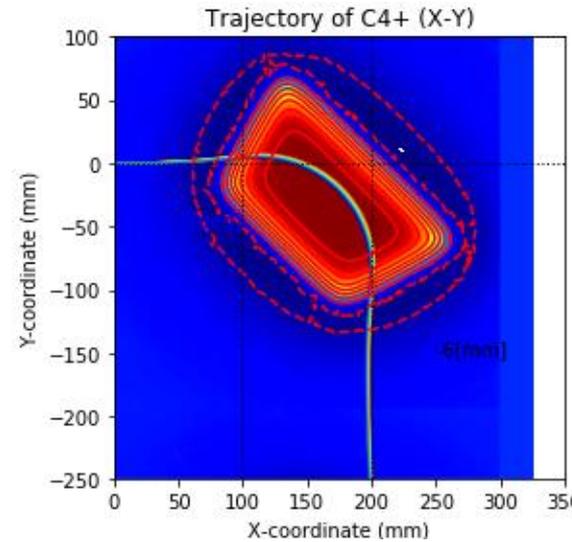
ピーク磁場:430~500mT

偏向角:90°

Gap幅:18~50mm(可変)



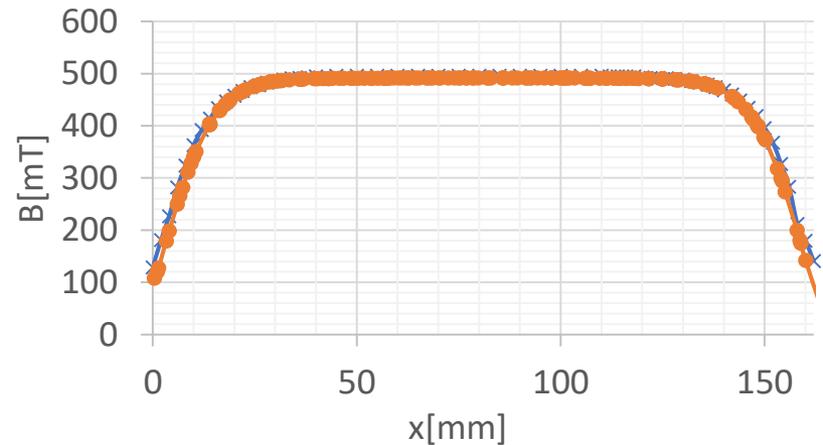
製作した偏向磁石



磁石条件

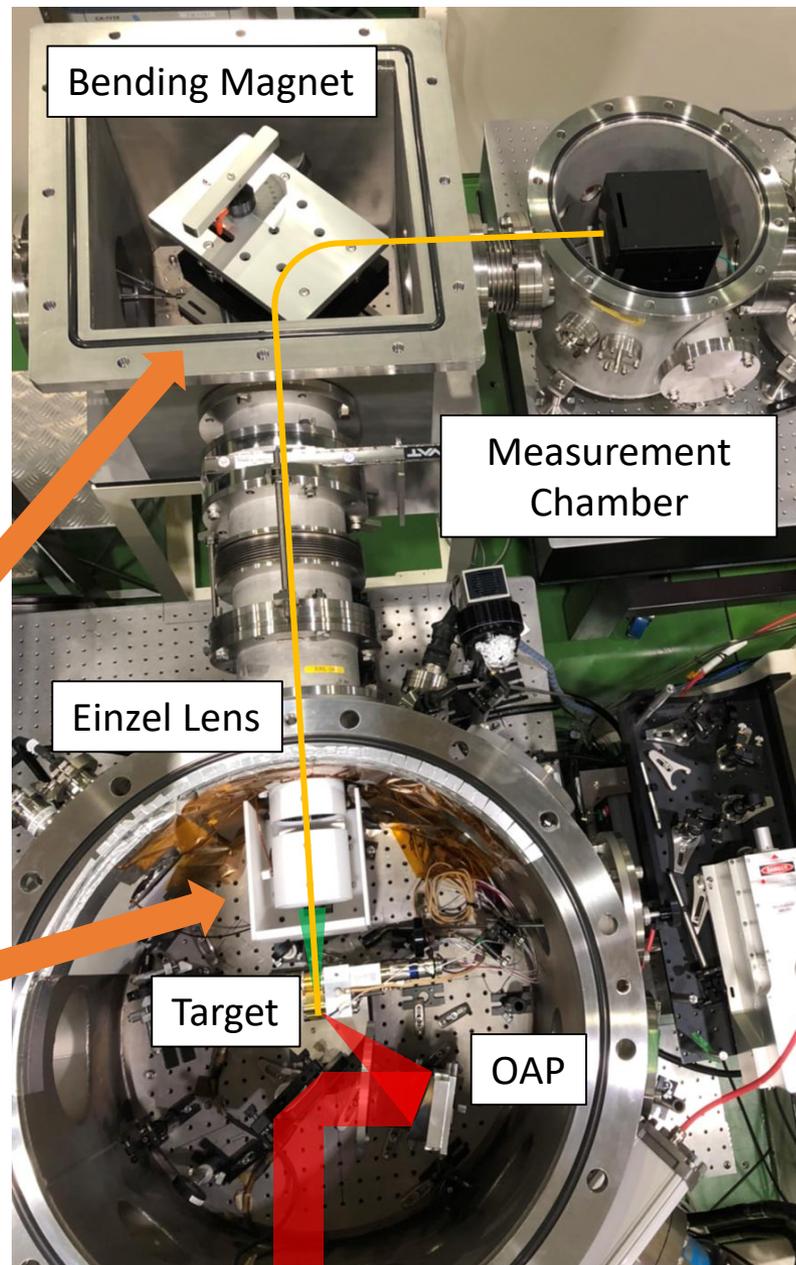
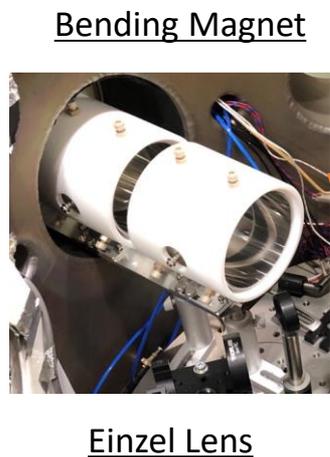
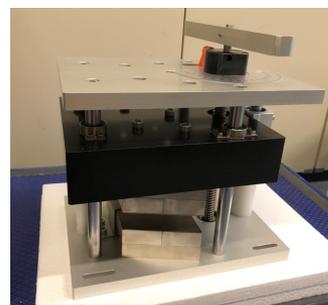
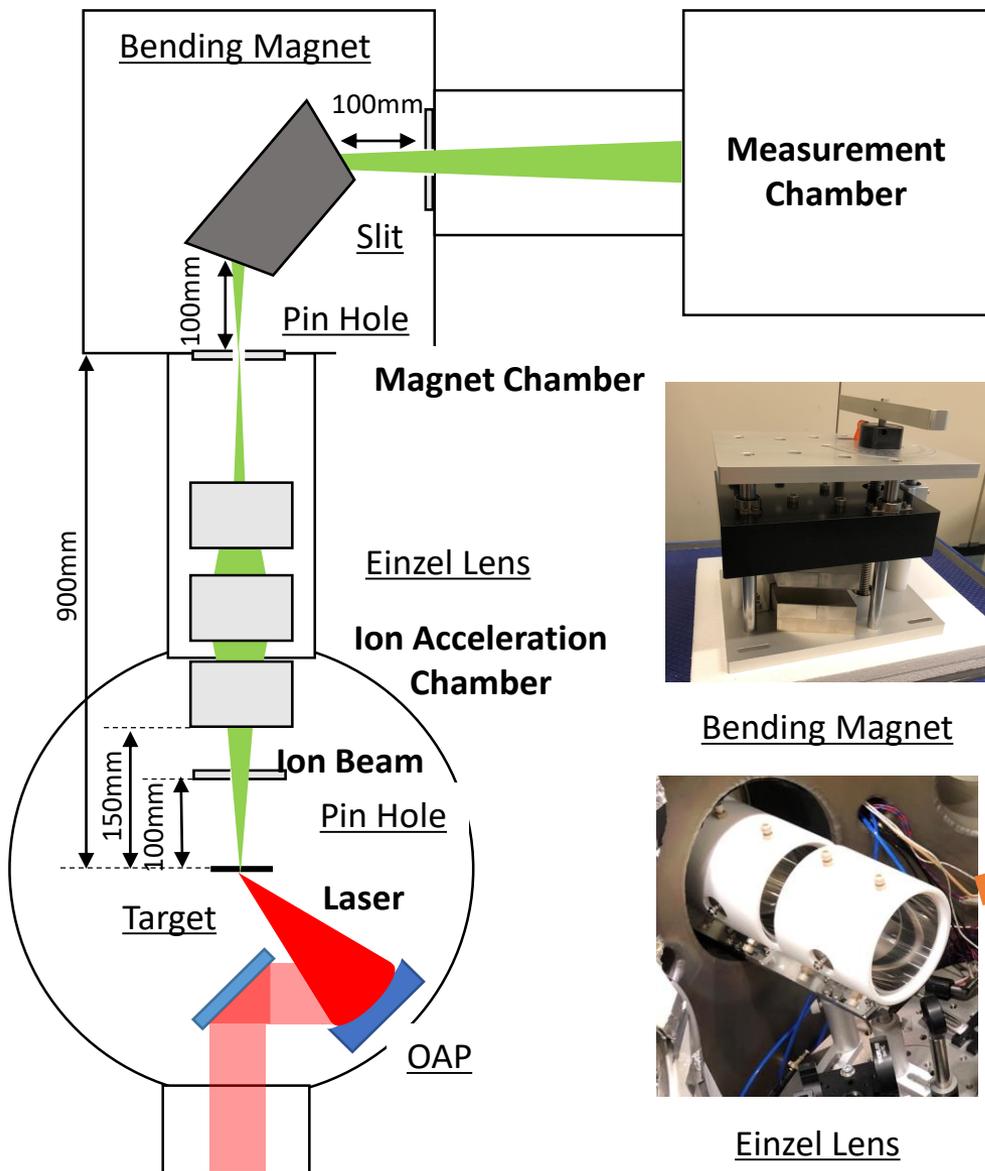
- B:490mT
- 偏向角:90°
- Gap幅:22mm

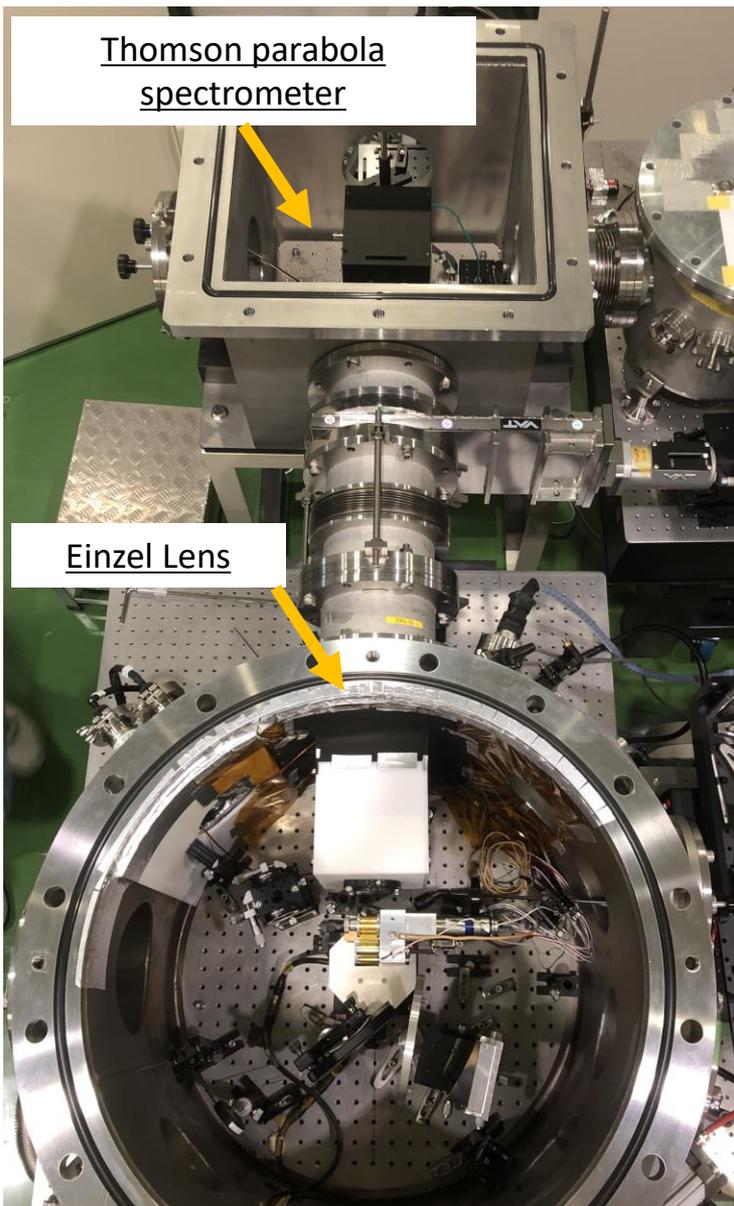
磁場分布とビーム軌道解析結果



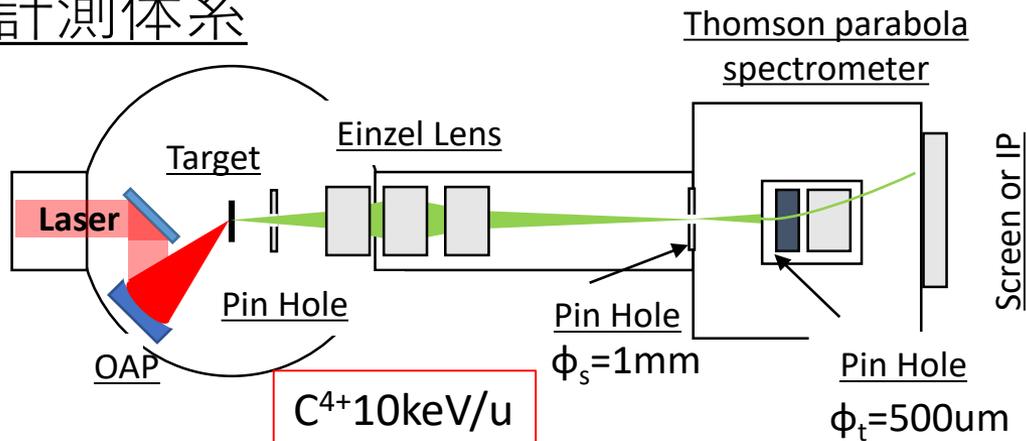
最適化したギャップ幅(22mm)での磁場分布計測結果とシミュレーション値の比較

輸送系の全体図

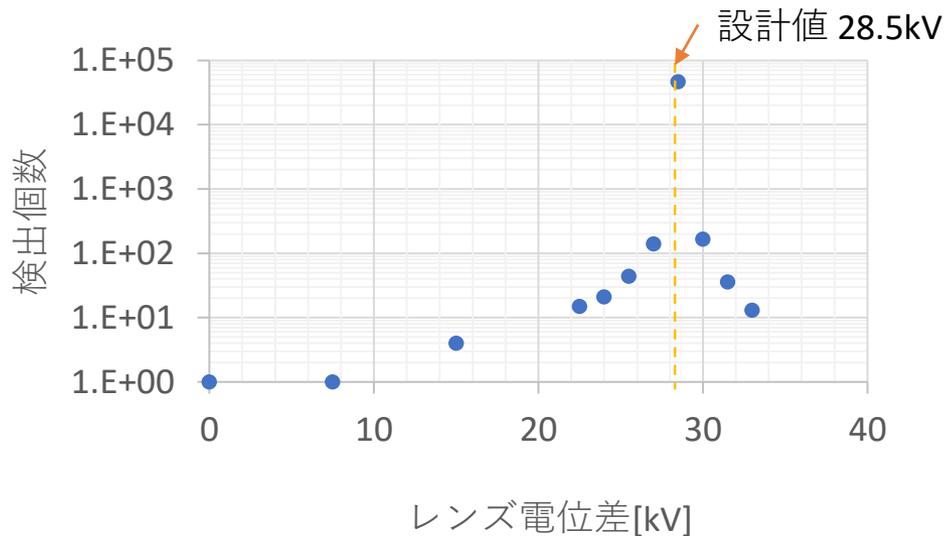




計測体系



レンズ電圧を変化させた場合の
トムソンパラボラ分光器での検出個数



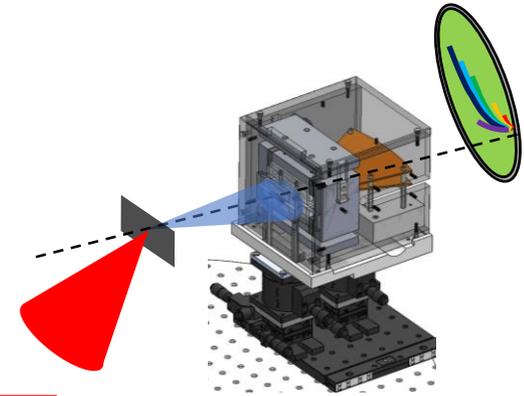
イオン検出個数からレンズ集光を確認可能

- ◆ レーザー駆動イオン加速機構を用いた炭素ビーム入射器の実現を目指し、 C^{4+} , 10keV/uビームの純化輸送系を提案・設計を行った
- ◆ 静電レンズ及び偏向磁石について、シミュレーションベースで C^{4+} , 10keV/uの軌道解析を行い仕様を決定した
- ◆ 実機を製作し輸送ラインを組上げ、設計基準を満たすコンポーネントの配置を行った

炭素ビーム計測実験

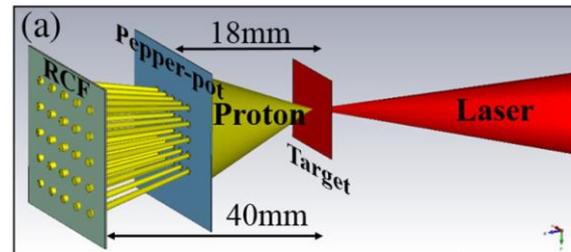
1. 純度計測

トムソンパラボラ分光器でエネルギー・ q/m で分離し、純度を評価



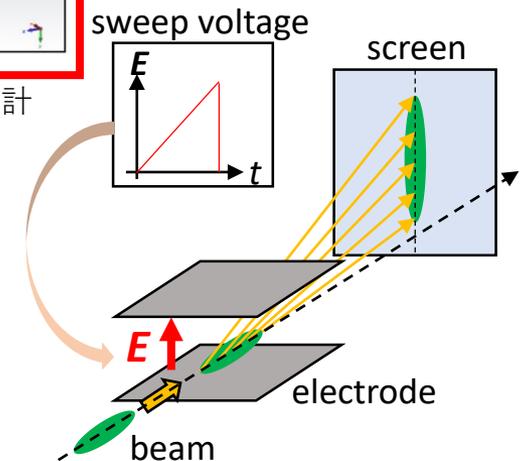
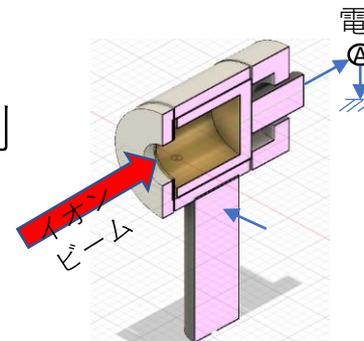
2. エミッタンス計測

ペッパーポット法をもとにエミッタンスを評価



3. 電流量計測

ファラデーカップで電荷量を計測
掃引電場でビームをキックし、
ビームの時間構造を計測



HIMACイオン源(C^{4+} , 10keV/u)と比較し、ビーム品質を評価