

6MV タンデム型静電加速器におけるビーム輸送設定条件の検討 CONSIDERATION ON SETUP CONDITION OF THE BEAM TRANSPORT SYSTEM FOR THE 6 MV TANDEM ELECTROSTATIC ACCELERATOR

黒尾奈未 ^{*A)}、笹公和 ^{A)}、細谷青児 ^{A)}、松中哲也 ^{A)}
Kuroo Nami ^{*A)}, Sasa Kimikazu ^{A)}, Hosoya Seiji ^{A)}, Matsunaka Tetsuya ^{A)}
^{A)}University of Tsukuba

Abstract

The 6 MV tandem type electrostatic accelerator equipped with five ion sources and twelve beam lines was started in operation since March 2016 at the University of Tsukuba. It will be used to study in various areas of research such as physics, material science, engineering, chemistry and so on. The acceleration voltage can be changed with 1 kV resolution from 1 MV to 6 MV. The 6 MV tandem type electrostatic accelerator can accelerate various kinds of ions with a wider range of ion beam energy. In addition, we must transport ion beams to the complex beam lines with minimal loss. Therefore, it is important to estimate the optimum beam trajectory for the accelerator system. The optimized results of ion beam transport are reported and compared with experimental data in this paper.

1. はじめに

筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門 (UT-TAC) にある 6MV タンデム型静電加速器は、2014 年 3 月に加速器本体が搬入され、2016 年 3 月に本格的な運転を開始した [1]。運転を開始した 6MV タンデム加速器は、加速器質分析法 (AMS)、宇宙環境実験、ナノ材料物質分析などに用いられ、その他にも様々な分野で使用されている。

6MV タンデム加速器は 12 本のビームラインと 5 台のイオン源を有する。加速電圧は 1 MV から 6 MV の範囲で 1 kV 単位で可変である。多種類のイオンを広範囲のエネルギー幅で加速可能であることに加えてビームラインが複数あるため、ビーム輸送の条件設定が複雑化している。迅速なビーム供給を実現するために、ビーム輸送の設定パラメータの最適値を予め計算しておくことが重要となってくる。ここでは、最適パラメータ計算を行った結果について報告する。



Figure 1: 6MV tandem accelerator beam line.

2. 6MV タンデム加速器ビームライン

6MV タンデム加速器の加速は、まず最初に加速器中央にある正の直流高圧ターミナルまで電場により第一段階加速される。そしてターミナルに設置されている荷電変換膜によって電子が剥ぎ取られて多価の正イオンビームになる。ビームが正イオンに変化した後、更に電場によって第二段階加速される。

6MV タンデム加速器のビームラインでは四重極電磁石 (QM)、アインツェルレンズ (EL)、静電四重極レンズ (ESQ) などを使用してビームの収束を行う。加速器中央の荷電変換を堺にしてビームのエネルギーが異なる為、低エネルギー側ではアインツェルレンズ、高エネルギー側では四重極電磁石、ESQ を使用してビーム収束を実現している。

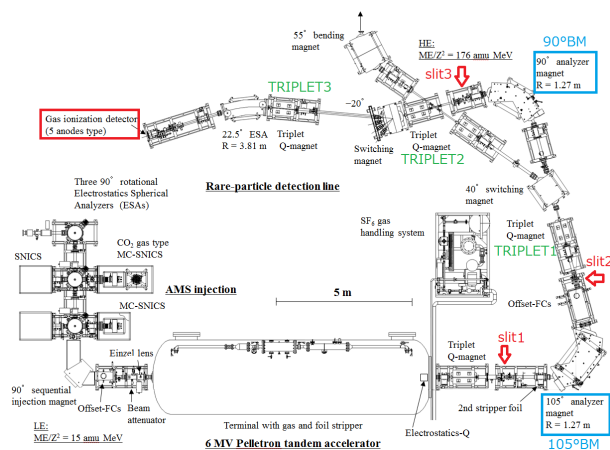


Figure 2: AMS beam line.

今回は AMS ビームライン (L4) における最適パラメータ計算を行った。AMS ビームラインは Figure 2 のようになっている。

筑波大学 AMS グループは、本報告で扱ったビームラインを用いて様々な核種の同位体比を測定している。AMS は同位体比 10^{-15} での超高感度分析で、加速器が

*s1620226@u.tsukuba.ac.jp

ら出てきた放射性核種を 1 個単位で測定可能である。AMS 測定では ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 及び ^{129}I などの長半減期放射性核種の測定が可能であり、核種ごとに最適なパラメータを知ることでビームを迅速かつ効率良く輸送することができる。

2.1 低エネルギービームライン

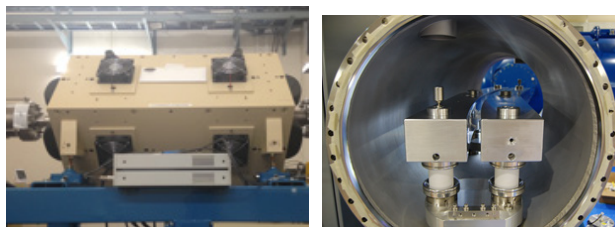
- 90°分析電磁石
イオン源から生成された 1 価の負イオンビームを磁場をかけ選択し、目的のビームを取り出す。
- アインツェルレンズ
電場によりビームを収束させる。三枚の電極から構成され、1 枚目と 3 枚目の電極はアース電位、2 番目の電極に高電圧をかけ、電極の電圧を調節してレンズ作用の大きさを変える。
加速器中央にあるチャンネルでの収束を実現するために、ビームを発散させて加速器に入射させる必要がある。発散させるには一度加速器入射前でビームを収束させる必要があり、アインツェルレンズを加速器手前に設置し、その役割を果たしている。



Figure 3: EL at the low energy beam line.

2.2 高エネルギー側ビームライン

- 偏向電磁石 (Bending Magnet)
高エネルギー側のビームラインではいずれも曲率半径が 1.27m の 105°、90°偏向電磁石があり、荷電変換膜によって様々な価数が混在した正イオンビームから目的のビームを選択する。偏向電磁石の最大磁場は共に 1.5 T であり、ビーム分析は主に 105°偏向電磁石によって行われる。
- 四重極電磁石
偏向電磁石を通過する際、粒子の運動量が異なれば軌道にばらつきが生じ、ビームが広がってしまう。このような効果を抑えるために、偏向電磁石の前後に四重極電磁石を設置し、ビームを収束させている。ビームラインに設置されている四重極電磁石は磁石が 3 つ連なった四重極トリプレットである。
- スイッチングマグネット
90°偏向電磁石を通過後、20°スイッチングマグネットによりビームが曲げられ、AMS 検出器が設置されているビームラインへ運ばれる。
- ESA (Electrostatic Spherical Analyzer)
ESA は電場により粒子を曲げ、特定のエネルギーのみを検出器に運ぶ役割をしている。ESA の曲率半径は 3.81m で、角度は 22.5°である。



(a) Quadrupole triplet lens. (b) ESA.

Figure 4: High energy beam line components.

3. 最適パラメータの算出

AMS ビームラインの再現は、Accelsoft 社が開発した PBO lab 3.0.3 [2] を用いて行われた。PBO lab 3.0.3 は粒子加速器設計用のコンピュータプログラムであり、ビームエンベロップを計算する TRACE-3D を含んでいる。ユーザが入力したパラメータで、多様な加速器ビームラインの要素を作成することが可能である。

6MV タンデム加速器はストリッパーを境とした 2 段階加速である。ストリッパーで荷電変換を行っている為、ストリッパー通過前後で粒子の電荷、エネルギーが異なる。PBO lab ではこのような変化を再現することが出来ない為、低エネルギー側のビームラインと加速後の高エネルギービームラインで別々に再現する。

本報告では、低エネルギー側では EL の最適電圧、高エネルギー側では四重極電磁石の最適磁場勾配を求める。また実験で得られた設定パラメータを用いて再現したビーム軌道とも比較する。

4. 低エネルギービームライン軌道計算

以下に $^{37}\text{Cl}^-$ の結果を示す。軌道計算は Figure 7 に示すように、イオン源から出た直後から EL までである。

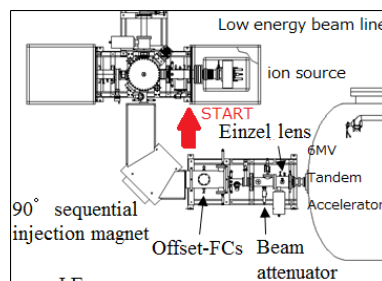


Figure 5: Low energy beam line.

初期条件は表 1 に示す通りである。なお、エミッタンスは 6MV タンデム加速器やビームラインの要素を製造している NEC (National Electrostatics Corp) 社が計算した規格化エミッタンス $9.5\pi \text{ mm mrad}$ を参考に算出している。

ビーム軌道結果は Figure 6 に示す。実験とシミュレーションの結果はほぼ一致した。加速器手前で一度 EL によって収束させる必要がある為、シミュレーションでの最終点では twiss パラメータを $\alpha=0$ 、 $\beta=0.1$ とし、

Table 1: Initial Parameters of Experiment and Simulation

Emittance	37.3π mm mrad
Energy (experiment/simulation)	66keV / 65keV
Charge	-1
Twiss parameter α	0
Twiss parameter β	1

Horizontal、Vertical 共に中心軌道からの変位が小さくなるような EL の電圧を求めた。

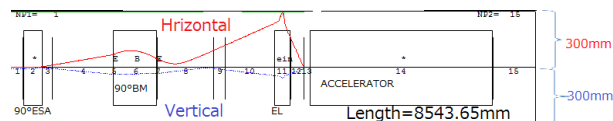


Figure 6: Low energy beam envelope of simulation. This plot shows the beam envelope half-width trajectories in both the horizontal and vertical planes. A red line shows a horizontal plane and a blue line shows a vertical plane.

Table 2 に EL の電圧を示す。

軌道は水平方向、垂直方向共に収束することが出来ており、加速管へビームを発散させて入射させることが可能となるだろう [3]。計算で求めた値を使うことにより、加速器手前での適切な収束を実現することができる。

Table 2: EL Voltage

	EL voltage (kV)
Experimental	-39.1
Simulation	-47.1

5. 高エネルギー側ビームライン軌道計算

5.1 ^{37}Cl の軌道計算結果

Figure8 と Figure9 に ^{37}Cl の実験値を使用した場合の軌道計算と最適磁場勾配を求めた際の軌道計算を示す。軌道計算は Figure 7 中に示してある slit1 から AMS detector までである。初期条件は Table 3 の通りである。規格化エミッタンスは低エネルギー側ビームラインの時と同様に規格化エミッタンス 9.5π mm mrad を参考にしている。

最適磁場勾配は、低エネルギー側で求めたように、AMS 検出器での twiss パラメータが $\alpha=0$ 、 $\beta=0.1$ とし、Horizontal、Vertical 共にビーム口径が小さくなる時の値を求めた。実験値の磁場勾配とシミュレーション結果の磁場勾配は Table 4 に示してある。

実験値を入れた場合の軌道では slit2 では収束しているが、slit3 での収束が実現していない。ビーム口径は約 3mm 未満である。これに対し、シミュレーション結

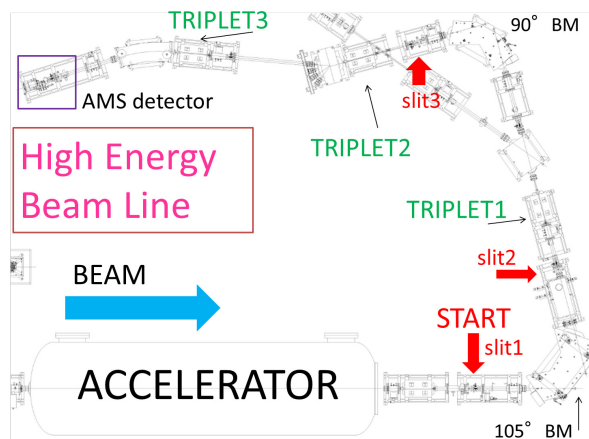


Figure 7: High energy beam line.

Table 3: Initial Parameters

	Experiment	Simulation
Emittance	1.40π mm mrad	1.37π mm mrad
Energy	46MeV	48MeV
Charge	7+	7+
Twiss parameter α	0	0
Twiss parameter β	1	1

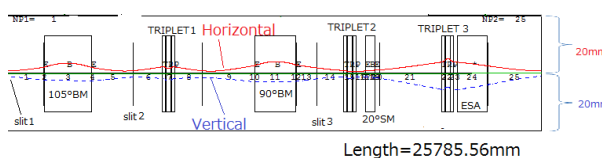


Figure 8: High energy beam envelope of experiment.

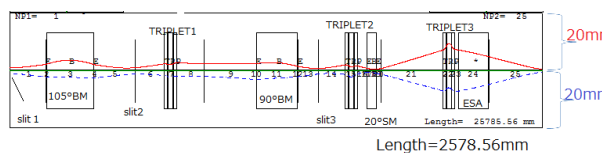


Figure 9: High energy beam envelope of simulation.

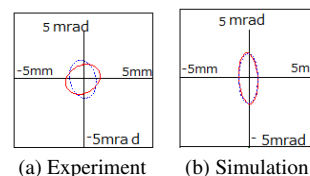


Figure 10: Phase space plot of ^{37}Cl beam at AMS detector.

果では slit2 と slit3 での収束が実現しており、ビーム口径も約 1.4mm 未満であり実験値よりも小さい。

加速器で加速されるとエミッタンスは小さくなるが、

Table 4: Magnetic Field Gradient

	Experiment	Simulation
TLIPILET1	12.4 T/m	9.65 T/m
TRIPLET2	11.6 T/m	17.6 T/m
TRIPLET3	8.32 T/m	8.96 T/m

今回用いたエミッタンスは加速前のものである。今後加速器部を再現し、加速後のエミッタンスを求めることができればビーム口径も小さくなった、より詳細な計算結果を得ることができると考えられる。

5.2 その他の核種の磁場勾配計算結果

^{37}Cl の他に、 ^{41}Ca 、 ^{14}C 、 ^{129}I の計算も ^{37}Cl と同様に行った。初期条件はTable 5に示す通りである。

Table 5: Initial Parameters

核種	^{41}Ca	^{14}C	^{129}I
Emittance $\pi\text{mm mrad}$	1.42	1.73	1.73
Energy(MeV)	44.5	30	30
Charge	7+	4+	5+
α	0	0	0
β	1	1	1

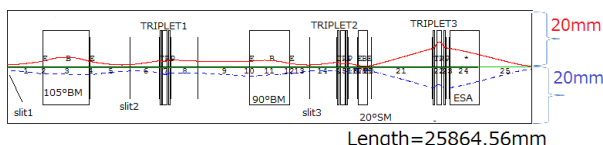


Figure 11: High energy beam envelope calculation of ^{41}Ca .

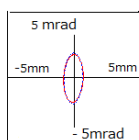


Figure 12: Phase space plot of ^{41}Ca beam at AMSdetector.

^{41}Ca 、 ^{14}C のビーム口径はそれぞれ約2mm、2.4mmであった。水平方向、垂直方向の軌道は対照的な形をしており、共にslitでの収束を実現している。 ^{37}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{14}C の軌道計算結果はエネルギー、電荷共に大きな差はないため同様な形となった。特に最後の四重極電磁石ではビームを一度広げてから収束させており、このような方法を取ることで検出器での良い収束を実現している。

^{129}I は重い核種である為、収束させるには大きな磁場勾配をかける必要がある。他の各種と同じような軌道を通そうとすると四重極電磁石にかかる磁場勾配が大きくなってしまいうため、異なる軌道を通すことにし

た。これに伴い、slit3での収束が実現していない。しかしslitの半径は5.1cmであるが、この中を衝突して損失することなく通過できている。軌道は ^{37}Cl の実験値を入れた場合の軌道と似ており、 ^{129}I のビーム口径は約3mmである。核種ごとの四重極電磁石の磁場勾配計算結果をTable 6に示す。

Table 6: Magnetic Field Gradient of Simulation

	^{41}Ca	^{14}C	^{129}I
TRIPLET1 (T/m)	10.1	25.1	24.9
TRIPLET2 (T/m)	17.6	13.1	22.4
TRIPLET3 (T/m)	7.67	7.68	17.0

6. まとめ

筑波大学にある6MVタンデム型静電加速器ビームラインにおけるビーム輸送設定条件の検討を行った。四重極電磁石の最適磁場勾配の計算結果は、ビームライン中にあるslitに衝突すること無く通過し、実験より小さいビーム口径でAMS検出器まで運ぶことができた。加速器部通過後のエミッタンスを計算し、より正確な最適パラメータの値を求めていく必要がある。

参考文献

- [1] Kimikazu Sasa *et al.*, "筑波大学マルチタンデム加速器施設における6MVタンデム加速器の導入状況", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 9-11, 2014, Aomori, Japan; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/FSP0/FSP007.pdf
- [2] <http://www.ghga.com/accelsoft/>
- [3] T.J.Obnibene *et al.*, "Ion-optics calculations and preliminary precision estimates of the gas-capable ion source for the 1-MV LLNL BioAMS spectrometer" <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X07002121>