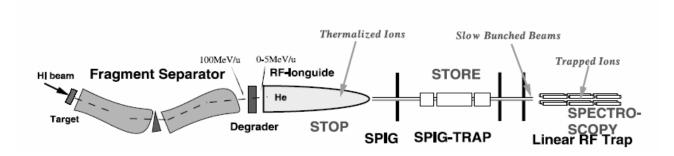
SLOWRI ビームにおけるエネルギー減速後の最適化

量子物質工学科 山田千樫研究室 柴 茂樹

1 序論

1.1 目的

新領域 BigRIPS(RIken Projectile-fragment Separator)で予定されている中重核(核子 Z=100 前後)に対する減速材見積もりである。 大強度 SLOWRI beam を実現するためには、Cyclotron beam からターゲットに透過し入射核破砕反応を経て さまざまな核種を生成し目的の核種を A と Z(A=質量数、Z=原子番号)の関係を指標に選別、高速 RI(Radioactive Isotope)を最終の減速材で停止可能エネルギー領域まで減速させ Helium が充填された RF-ion guide で引き出し SPIG を通し 30kV の静電場で加速しISOL(Isotope Separator On-Line)を通し、不純物イオンを除去する過程を踏み実験のための純粋同位体ビームを得る。大強度ビームを得るためには、効率よく Helium buffer cell で捕獲しなければならない。そのためには、Cell 中で Ru 粒子が壁に衝突する損失を防ぐために減速材を調整して最小限にしなければならない。2 節では、RF-ion guide 法による安定核 Ru 粒子に対する減速材 plexiglas の減速効率の見積もりを行い、3 節では、Cyclotron ion guide 法における安定核 Ru 粒子に対する減速材 Pb の減速効率の見積もりを行った。減速効率の定義は、あるエネルギー以下の領域に入る割合である。



1.2 計算法

SRIM(Stopping and Range of Ions in Matter) というパッケージソフトの中の TRIM(the TRansport of Ions in Matter) code により Ru 粒子 100 個が平板減速材(Plexiglas または Pb)透過後のエネルギー分布を調べ、平板減速材の厚さ、粒子エネルギーそれぞれ変え計算値を Gaussian*でフィットさせた。それらのパラメータを使用し条件により ビームの運動量広がり dp/p、入射角広がり d θ 、ビーム径 dr、倍率を考慮により Monte Carlo simulation により処理する。 BigRIPS(dp/p,dr,d θ)=(0.03,2,5mm,40mrad)というパラメーターが予定されているので、2、3 節では、このパラメーターを考慮し計算がなされている。

*固体中で粒子は、多数回衝突を繰り返すので $\epsilon \gg Q$ となり Gauss 型関数になることが予期される。薄膜 $\epsilon \ll Q$, $\epsilon /Q \rightarrow 0$ Landau 分布に従うだろう。(ϵ ; 総エネルギーロス、Q; 衝突によるエネルギーロス最大値)

2 減速材 Plexiglas の減速効率

2.1 減速材平板の減速効率

 $30 {\rm GeV}$ の運動量広がりをもつ ${\rm Ru}$ 粒子が減速材透過後の ${\rm RF}$ -ion guide $(1m*100 {\rm Torr})$ における停止可能領域は、 ${\rm Trim}$ code の阻止能データから見積もり ${\rm E} \le 1.32 {\rm AMeV}$ というエネルギー領域を得た。そして、この節での減速効率の定義は、 $30 {\rm GeV}$ の ${\rm Ru}$ 粒子が減速材透過後に $132 {\rm MeV}$ 以下に落ちる割合とする。減速効率と運動量広がりの依存性を見るために、 ${\rm Fig}.2a$ のようにパラメーターを設定して、 ${\rm Monte}$ ${\rm Carlo}$ calculation で処理する。

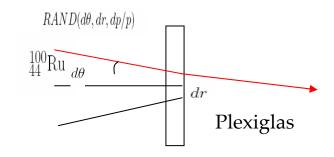


Fig.2a Simplified illustration of Gaussian parameters

2.1.1 結果

単色 30GeV の Ru 粒子は Fig.2b から 100%であった。運動量広がりが生じると減速効率が急激に落ち込むことが理解できる。実際、BigRIPS で予定されるビームは、 $dp/p=\pm0.03$ の運動量広がりを持つので、減速効率は、7.3%となり平板減速材では、運動量広がりには、対応しきれないことが、RIPS により分散させることが可能である。運動量分散させ、適当な厚さに Ru 粒子を当てることによる減速効率の改善が求められるのである。

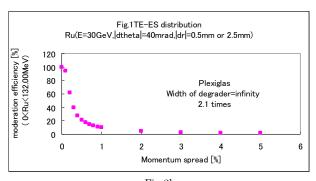
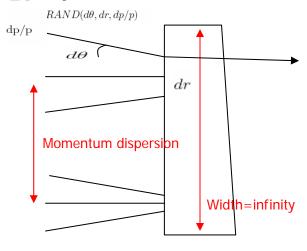


Fig.2b Stopping efficiency versus Momentum spread

2.2 Edge 付き減速材の減速効率

2.1 で述べたように運動量分散をつける事により適当な厚さに粒子を透過させることが重要であることが理解できた。 $\operatorname{Fig.2c}$ のようにパラメーターを設定して再度 Monte Carlo simulation で処理をした。



 $Fig. 2c \\ Simplified illustration of Gaussian parameters$

2.2.1 結果

運動量分散に対しての減速効率依存性を示した Fig.2d より BigRIPS で予定される運動量分散 38mm/%では、dr=2.5mm 92% dr=0.5mm 100% と結果が得られた。それぞれに 0~5mm/%の範囲に極小値がみられる。

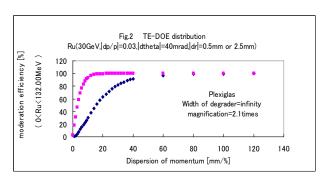


Fig.2d Stopping efficiency versus Dispersion of momentum

2.3 考察

0~5mm/%の範囲では、分散が小さいことから、エッジ角が鋭くビームの入射角広がりと重なってしまい減速効率の低下に至る。よって、運動量分散=0(Fig.2bの運動量広がり=3%にあたる)のときより下がってしまう。小さな運動量分散と、ビームが、ぼやけていることは、減速効率に影響する。

BigRIPS(dp/p,dr.,d θ)=(0.03,2.5mm,40mrad) において運動量分散 38mm/%の Ru 粒子に対して 92%の減速効率が得られた。 減速材厚=3.83mm,幅=230mm

E/ds [MeV/nnn

3 Cyclotron ion guide method

3.1 原理

減速材 (Pb) 透過後、粒子は、AVF(Azimthly varying Field)磁場と Helium ガスが充填されたバッファーに入射し、多数回衝突を繰り返すことにより粒子が減速し螺旋軌道を描きながら 1 価の状態で高周波電場により引き出される。3 節で説明した RF-ion guide (1m*100Torr)とは違い、ガス圧が低く、停止距離の延長、引き出し時間短縮、短寿命核可能 荷電交換化学的最小化大強度という特性をもつ。ここでの軌道計算は、一様な静磁場とし行なった。Plexiglas→高密度 Pb に置換することで減速材の厚さを薄くし、傾けによるEmittance 効果を低減に努めた。

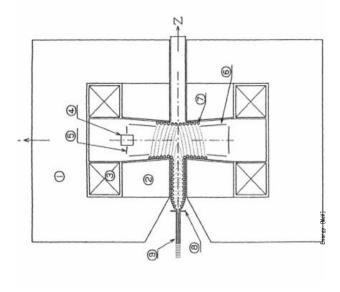


Figure 1. Schematic view of cyclotron ion guide viewed from beam injection direction. Major components are: (1) magnet yoke, (2) magnet pole, (3) magnet coils, (4) energy degrader, (5) and (6) electrodes for electron collector, (7) ring electrodes for ion barrier, (8) molecule dissociator, (9) SPIG: schematic distribution of dc potentials is shown with dotted lines. The z-axis is taken as shown in the figure and y-axis is in r-direction including the degrader.

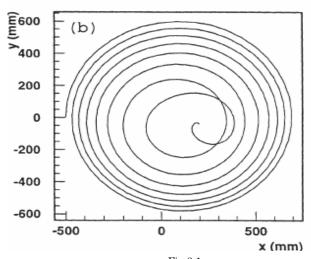


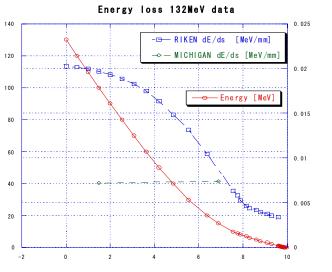
Fig.3.1 Schematic diagram of Cyclotron ion guide

3.2 MSU と RIKEN 実験装置

次年度から MSU(Michigan State University)と RIKEN 合同でが行なわれる。彼等は、薄膜を透過させ高エネルギー入射し、超伝導強力磁場で曲げるという。下記(Table.1)のようなパラメーターの違いがある。

Parameter	MSU	RIKEN
Ion species	$_{35}^{78}Br$	¹⁰⁰ ₄₄ Ru
Magnetic field	$2\mathrm{T}$	1.5T
Helium pressure	7.5 Torr	10Torr
Ion kinetic energy	$610 \mathrm{MeV}$	$E \leq 200 \text{MeV}$
	20%	
Injection radius	0.8m	0.4m
	5mm	5.25mm
Beam half divergence	10mrad	19mrad
Relative energy spread Injection radius Beam half width Beam half divergence	0.8m	5.25mm

Table.1
Parameters used in the simulation



 $Fig. 3.2 \\ Energy or Stopping power-distance distribution \\ MSU versus RIKEN$

distance [m]

MSU の手法は、Table.1 から分かるように、高エネルギー入射である。Fig.3c から1周目の阻止がが小さいことから dR を稼ぐことが困難なたロスネルギーへとから dR を稼ぐことが困難なたロスネーとで減速効率をしてしまうので減速が率をのエネルをしている。とので減速が変をしている。とので減速が変をした。とので減速がある。とのでは、大きないさいたが、入射エネルギーがいるとで、大きながある。入射エネルギーがある。とで、大きなどで、大きながある。これにより減速がでの阻止能はでのといたとくはRを5cm程度稼げるほどで配置さいた。とを踏まえの衝突を防ぐことに対応がりをもつどし、大きないギー広がりをもつどし、大きない、できる。によれば一広がりをもつどしない。

3.3 計算原理

Thomas-Fermi model を拡張した Bohr 理論によ り 10Torr σ He ガスが充填されたバッファー平均 平衡電荷 < Q>を使用し減速材透過後の粒子速度は、 $v \ll c$ であれば、実際問題として、 $0.2c \ge v$ では、 $p = \sqrt{2mE}$ で十分正確な近似であり、非相対論として扱える。

$$R = \frac{p}{\langle Q > B}$$

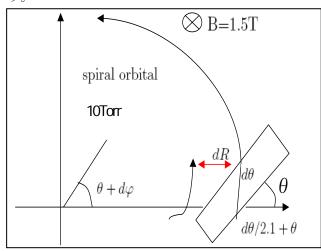


Fig.3.3 Simplified illustration of Ru particles orbital

3.4 結果

傾け角度 θ +d ϕ =63. 0deg において Stopping efficiency (E≦200MeV) $52\%(\pm 40 \text{mrad}*\pm 2.5 \text{mm})$ $60\%(\pm 20 \text{mrad}* \pm 5.0 \text{mm})$ ビームをぼやけさせることによって高効率を得られた。 *d $\theta \times dr = constant$

3.5 考察

減速材 Plexiglas \rightarrow 高密度 Pb に置換することにより厚さがより薄く Emittance 効果が低減された。配置角度 θ =61.81deg, 中心厚=2.12mm, 幅=502mm(理論値では、電荷価数が単調減少する場合は、幅の長さに関係なく衝突はしないはずで ある。)

このシミュレーションによる On-Line でのビーム作りの重要性と減速材配置傾けによる減速効率損失が理解できた。ここでのプログラム計算は、乱数出現率は、等確率としているので、実際のビームの減速効率は、高まるであろう。減速材幅は、無限としてしまっている。節 2 で論じた RF-ion guideでの窓は有限(ϕ 40cm)であるので、運動量分散を大きくするとビームを逃し減速効率に影響するであろう。 このシミュレーションによる On-Line でのビーム作りの

5 謝辞

1年間という短い期間研究環境を与えて下った大谷先生山田先生中村先生には、感謝致します。理化学研究所山崎泰規主任研究員には、研修生として受け入れて頂き、和田道治先生および和田グループの方々には、貴重な体験とご指導頂いたことに感謝致します。そして、山崎原子物理研究室の皆様、またない。 なりました。

6 参考文献

- [1] 岡田晋一"高周波イオンガイド法による高速 不安定核捕集機構の研究"修士論文 1999 上
- [2]G.Bollen ,D.J.Morrissey,S.Schwarz,Nucl.Inst r.and
 - Meth.A550(2005)27-38
- [3]I.Katayama,et al., Hyperfine Interactions 115 (1993) 253
- [4] Harry J. Whitlow and Heiko Timmers" Charge
- exchange and electron stripping"
 [5]J.F.Ziegler,SRIM-1998,http://www.srim.org/s
- [6]Richard J.Mathar and Matthias Posselt Phys Rev B51,107(1995)
- [7] Victor Varentsov, Michiharu Wada, Nucl. Instr. and Meth.A 532 (2004) 210-215