

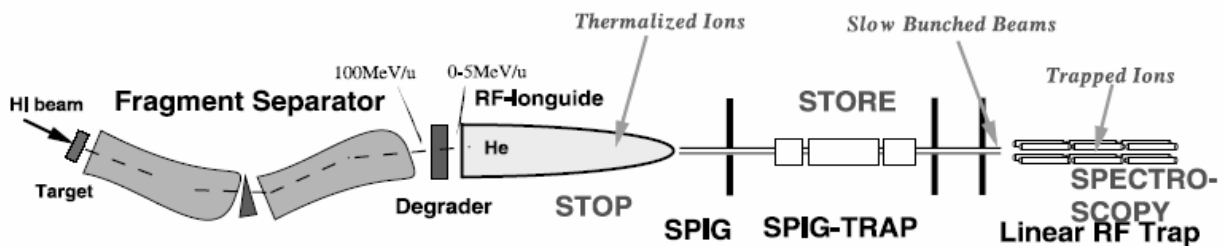
SLOWRI ビームにおけるエネルギー減速後の最適化

量子物質工学科 山田千櫨研究室 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碎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 $d\theta$ 、ビーム径 dr 、倍率を考慮により Monte Carlo simulation により処理する。BigRIPS($dp/p, dr, d\theta$)=(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

30GeVの運動量広がりをもつRu粒子が減速材透過後のRF-ion guide(1m*100Torr)における停止可能領域は、Trim codeの阻止能データから見積もり $E \leq 1.32 \text{ A MeV}$ 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、30GeVのRu粒子が減速材透過後に132MeV以下に落ちる割合とする。減速効率と運動量広がり依存性を見るために、Fig.2aのようにパラメータを設定して、Monte Carlo calculationで処理する。

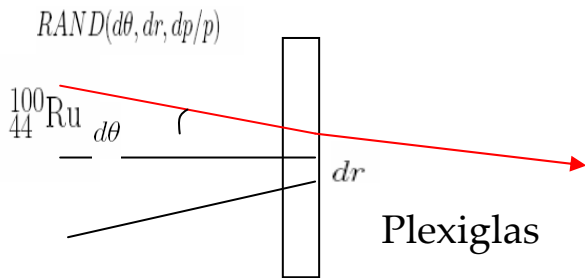


Fig.2a

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。運動量広がりがあ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、 $dp/p = \pm 0.03$ 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分かるであろう。運動量広がりをもつビームは、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。

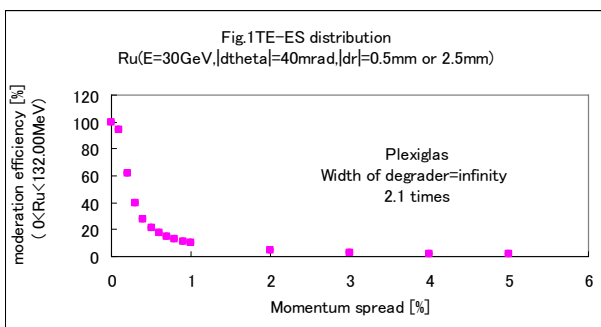


Fig.2b

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。Fig.2cのようにパラメータを設定して再度Monte Carlo simulationで処理をした。

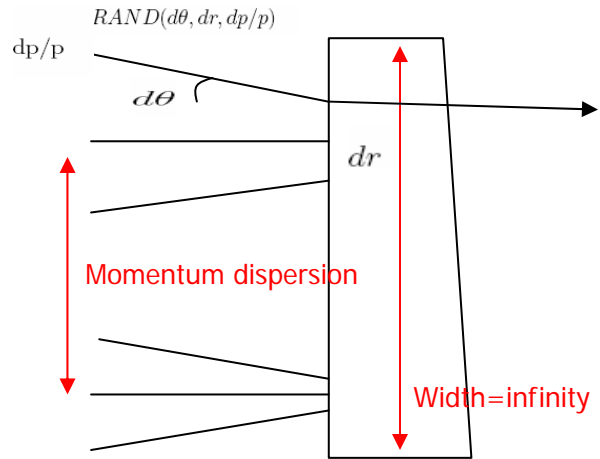


Fig.2c

Simplified illustration of Gaussian parameters

2.2.1 結果

運動量分散に対する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、 $dr=2.5\text{mm}$ 92% $dr=0.5\text{mm}$ 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。

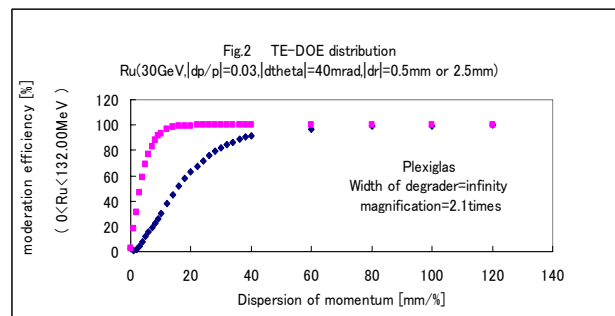


Fig.2d

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($dp/p, dr, d\theta$)=(0.03, 2.5mm, 40mrad)において運動量分散38mm/%のRu粒子に対して92%の減速効率を得られた。

減速材厚=3.83mm,幅=230mm

3 Cyclotron ion guide method

3.1 原理

減速材(Pb)透過後、粒子は、AVF(Azimuthly 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価の状態を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。

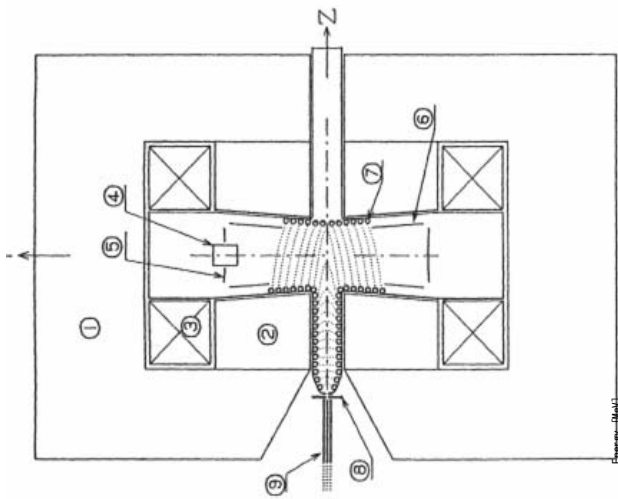


Figure 1. Schematic view of cyclotron ion guide viewed from beam injection direction. Major components are: (1) magnet yoke, (2) magnet pole, (3) magnet coils, (4) energy degrader, (5) and (6) electrodes for electron collector, (7) ring electrodes for ion barrier, (8) molecule dissociator, (9) SPIG; 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.

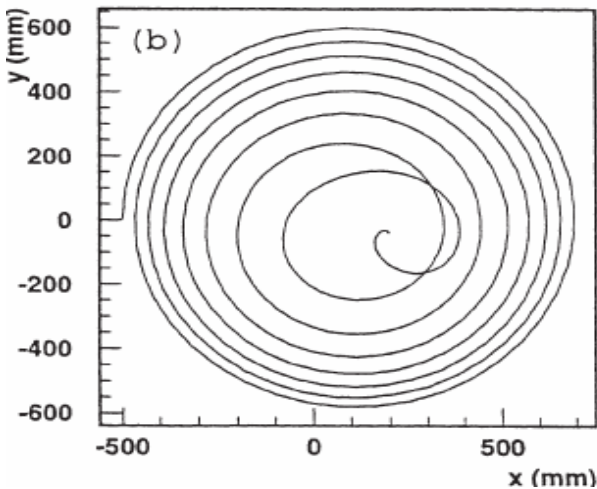


Fig.3.1 Schematic diagram of Cyclotron ion guide

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ふ。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	⁷⁸ ₃₅ Br	¹⁰⁰ ₄₄ Ru
Magnetic field	2T	1.5T
Helium pressure	7.5Torr	10Torr
Ion kinetic energy	610MeV	E ≤ 200MeV
Relative energy spread	20%	
Injection radius	0.8m	0.4m
Beam half width	5mm	5.25mm
Beam half divergence	10mrad	19mrad

Table.1 Parameters used in the simulation

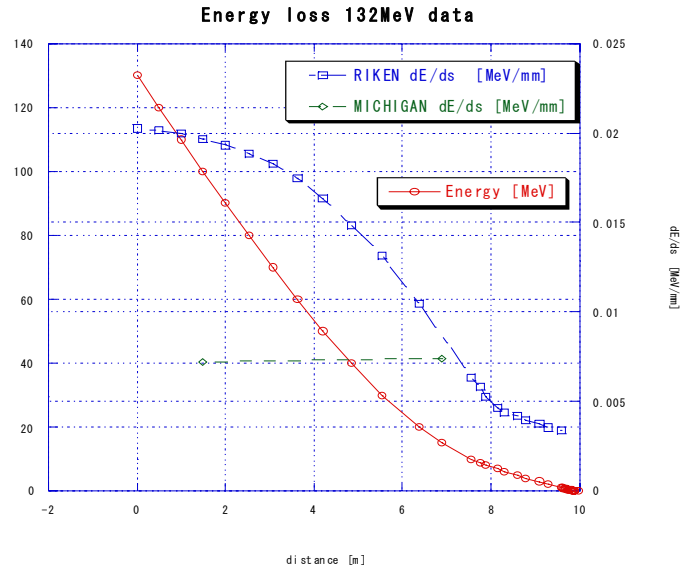


Fig.3.2 Energy or Stopping power-distance distribution MSU versus RIKEN

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周目の阻止能が小さいことからdRを稼ぐことが困難なため減速材に衝突をしてしまうので減速効率をロスしてしまう。結果的に、回避策として単色のエネルギー粒子を必要とされる。しかし、エネルギー広がり20%をもつビームを単色にすることは、困難であろう。一方、我々のサイクロトロンイオンガイドは、磁場強度が小さく、磁石自体もMSUと比べると遥かに小さいため、入射粒子エネルギーを小さくする必要がある。入射エネルギーが小さいことで、Helium 10Torrでの阻止能dE/dsは、大きくdRを5cm程度稼げるほどである。これらのことを踏まえて、減速材を傾けて配置することにより減速材への衝突を防ぐことができ、そして、エネルギー広がりをもつビームに対応ができる。

