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

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 1.32AMeV 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の依存性を 見るために、Fig.2a のようにパラメーターを設定 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 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。



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

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.



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	$^{78}_{35}Br$	$^{100}_{44}Ru$
Magnetic field	$2\mathrm{T}$	$1.5\mathrm{T}$
Helium pressure	7.5Torr	10Torr
Ion kinetic energy	$610 \mathrm{MeV}$	$\mathrm{E}\!\leq\!200\mathrm{MeV}$
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



dE/ds

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、

3.3 計算原理

Thomas-Fermi model を拡張した Bohr 理論によ 10 Thomas Fermi model を払張した Donr 理論により 10 Torr の 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。

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

ー様な静磁場 B=1.5T として、上記の式を指標に して、dR を見積もりを行ない、減速材に衝突さ せない減速材配置角度を決定する。そして2節と 同様 BigRIPS で予定されるパラメーターで、傾 け配置による減速効率を Monte Carlo simulation 処理を行い算出した。ここでの減速 対率の完美は、減速は透過後の Pa、乾子が PS い HL LE に よ 0 (風 速 刻 準 を Monte Carlo simulation 処理を行い算出した。ここでの減速 効率の定義は、減速材透過後の Ru 粒子が E \leq 200MeV に落ちる粒子の割合である。つまり 200MeV より大きい Ru 粒子は、無視している。 なぜならば、それらの粒子を相手にすることは、 減速材配置角度を大きくし大幅に減速効率に効 いてくるからである。10Torr の Helium buffer に対しての阻止能 dE/ds は 2.0AMeV 付近が高く 減速材は、この領域での減速材設計が妥当であろ う。 う。



Fig.3.3 Simplified illustration of Ru particles orbital

3.4 結果

傾け角度 θ+dφ=63.0deg において Stopping efficiency ($E \leq 200 MeV$) $52\%(\pm 40 \text{mrad}^{*}\pm 2.5 \text{mm})$ $60\%(\pm 20$ mrad* ± 5.0 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 θ ×dr=constant

3.5 考察

減速材 Plexiglas→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。)

4 総括

このシミュレーションによる On-Line でのビーム作りの 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。

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、たした 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 智大学
- [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]HarryJ.Whitlow and Heiko Timmers"Charge exchange and electron stripping" [5]J.F.Ziegler,SRIM-1998,http://www.srim.org/s
- rim
- [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