

SLOWRI後段加速器での異なる電荷質量数比を持つイオンの同時加速

新井重昭

国立研究開発法人理化学研究所 仁科加速器研究センター

1. はじめに

SLOWRI^[1]からのビームを加速する為に、split-coaxial RFQ、Medium Energy Beam Transport (MEBT)、Interdigital-H (IH) linacから成る後段加速器 (2nd Version) が設計された^[2]。後段加速器は電荷質量数比 (q/A) が1/8以上のイオンをRFQで5 keV/uから 0.5 MeV/uまで加速し、MEBTでRFQの出射エミッタンスをIHの入射エミッタンスに整合した後、IHで5 MeV/u まで加速する。後段加速器の概略図が図1に、RFQとIHリニアックの主なパラメータが表1に示されている。実験上の都合から異電荷を持つ同一元素をSLOWRI後段加速器で同時に加速したいという要求がある。そこで、設計電荷質量数比 ($q/A=1/8$) からずれたイオンをSLOWRI後段加速器で加速した時の伝送効率等がビームシミュレーションによって調べられる。RFQのシミュレーションでは計算コードPARMTEQ^[3]が使われ、MEBTとIHリニアックでは計算コードTRACEP^[4]が使われる。本論文では、 $q/A=1/8$ のイオンを設計イオン、設計イオンを加速する電圧を設計電圧、設計イオンを集束する磁場強度を設計磁場強度、加速電圧を設計電圧で割った値を規格化加速電圧 ($V_n=V/V_{\text{design}}$)、4極電磁石の磁場勾配を設計磁場勾配で割った値を規格化磁場勾配 ($B'_n=B'/B'_{\text{design}}$) と称し、これ等を基にして議論を進める。更に、以下のシミュレーションでは規格化エミッタンスが $0.6\pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ である500個の入射粒子が使われる。

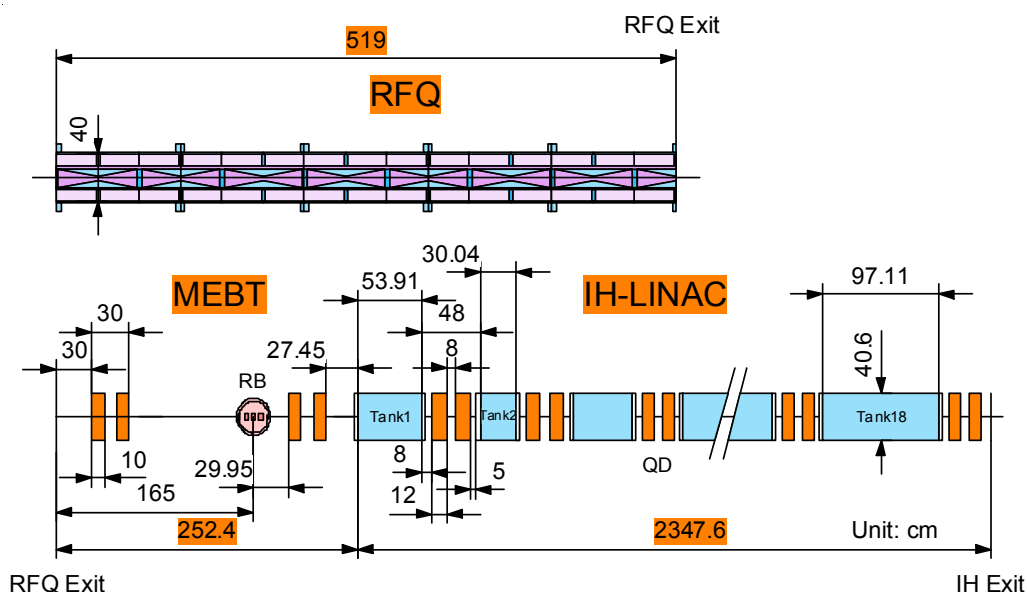


図1.1. 後段加速器の概略図。

表1. RFQとIH linacの主なパラメータ

RFQ		IH linac	
Frequency (MHz)	79	Frequency (MHz)	158
Mass to charge ratio: A/q	8	Mass to charge ratio: A/q	8
Normalized emittance ($\pi \cdot \text{cm mrad}$)	0.06	Normalized emittance ($\pi \cdot \text{cm mrad}$)	0.06
Input and output energy (MeV/u)	0.005 and 0.5	Input and output energies (MeV/u)	0.5 and 5
Output synchronous phase (deg)	-25	Synchronous phase (deg)	-25
Vane voltage (kV)	81.5	Gap voltage (kV)	140-250
Mean bore radius (cm)	0.6415	Gap length (mm)	14-25
Kilpatrick factor	1.6573	Kilpatrick factor	0.74293
Number of cells	244	Drift-tube bore radius (mm)	10-14
Vane length (m)	5.1925	Drift-tube outer radius (mm)	15-22
Cavity diameter (cm)	40	Tank radius (mm)	190-203
Number of cavity modules	15	Tank length (mm)	300-1008
Power loss (kW)	179	Number of tanks	18
		Quadrupole magnet (kG/cm)	3.22-5.05
		Power loss (kW)	1270

2. 設計イオンの加速シミュレーション

本加速シミュレーションではRFQの出射粒子の位相空間分布がMEBTの計算に、更にMEBTの出射粒子の位相空間分布がIHの計算に引き継がれる。RFQからMEBT、IHへと引き継がれるデータが表2.1.にまとめられている。設計イオンのRFQ、MEBT、IHでのシミュレーション結果が図2.1に示されている。図中の実線楕円はRFQ、MEBT、IHそれぞれの設計楕円である。粒子の引き継ぎの様子は、RFQの出射粒子の位相空間分布とMEBTの入射粒子の位相空間分布、それにMEBTの出射粒子の位相空間分布とIHの入射粒子の位相空間分布を比較する事によって分かる。但し、MEBT又はIHで粒子が失われる場合には、失われた場所（MEBT又はIH）の入射粒子の位相空間分布上にも失われた粒子はプロットされていないので注意する必要がある。リアック全体の伝送効率はRFQの入射粒子数500個に対するIHの出射粒子数428個の比から85.6%となる。

表2.1. RFQからMEBT、IHへと引き継がれるデータ（計算コードでの表記記号：意味）

NPOINT : RFQへの入射粒子数	COR(1,NP) : x	CORD(1,NP) : x
NP : 粒子の番号 (1~NPOINT)	COR(2,NP) : xp	CORD(2,NP) : xp
	COR(3,NP) : y	CORD(3,NP) : y
	COR(4,NP) : yp	CORD(4,NP) : yp
	COR(5,NP) : 位相	CORD(5,NP) : 位相
	COR(6,NP) : エネルギー	CORD(6,NP) : エネルギー
		CORD(7,NP) : 消失粒子数

右図の説明	RFQ、MEBT、IHの位相空間分布
<p>RFQの入射位相空間分布 (分布粒子数は500個)</p>	
<p>RFQの出射位相空間分布 (分布粒子数は461個) RFQの計算条件は$q/A=0.125$、$V_n=1$である。</p>	
<p>MEBTの入射位相空間分布 (分布粒子数は461個)</p>	
<p>MEBTの出射位相空間分布 (分布粒子数は461個) MEBTの計算条件は$q/A=0.125$、$V_n=1$、$B'_n=1$である。</p>	
<p>IHの入射位相空間分布 (分布粒子数は428個) MEBTからの粒子数は461個であるがIH途中で33個失われるので、428個の粒子だけプロットされている。</p>	
<p>IHの出射位相空間分布 (分布粒子数は428個) IHの計算条件は$q/A=0.125$、$V_n=1$、$B'_n=1$である。</p>	

図2.1. RFQ、MEBT、IHでの設計イオンの加速シミュレーション。

3. 設計イオンと事なる q/A を持つイオンの加速シミュレーション

3.1. RFQのビームシミュレーション

PARMTEQはRFQのヴェインパラメータを固定した状態で、 q/A を変数としたビームシミュレーションを直接する事は出来ないが、ヴェイン電圧を変数としたビームシミュレーションはPARMTEQの入力データ (tape1.dat^{付録A}) の電圧指定パラメータを変える事によって可能である。設計イオン ($q/A=1/8$) を加速する為の設計ヴェイン電圧を V_{design} とすると、規格化ヴェイン電圧は $V_n=V/V_{\text{design}}$ で定義される。RFQの特性から、正規の加速を維持する電荷質量数比と規格化ヴェイン電圧の関係は次式で与えられる。

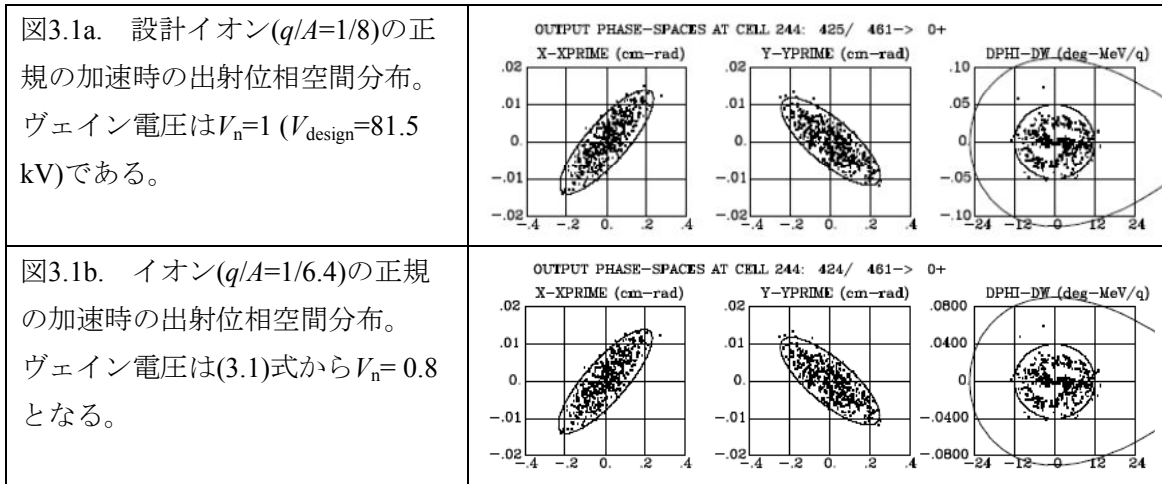
$$V_n \times \frac{q}{A} = \frac{1}{8} \quad (3.1)$$

この関係が維持される正規の加速では出射粒子の位相空間分布や核子当たりのエネルギーは同じになる。

この事は、設計イオン ($q/A=1/8$) の加速シミュレーション結果 (図3.1a) とGENRFQ^[5]とPARMTEQの両方を使って独立に計算された $q/A=1/6.4$ イオンの正規の加速シミュレーション結果 (図3.1b) を比較する事によって確認される。 $q/A=1/6.4$ イオンのシミュレーションは次のように行われた。RFQの設計で最終的に決められたGENRFQの制御ファイルgen.shの入力データの内、 q/A とヴェイン電圧のKilpatrickファクター^[6] 付録Bだけを正規の加速を維持する値に変えて計算する。この計算で作られたtape1.datに基づいてPARMTEQで計算する事によって、図3.1b に示す様な $q/A=1/6.4$ イオンのシミュレーション結果が得られる。GENRFQの制御ファイルgen.shの入力データが表3.1に示されている。表の左のコラムにはRFQの設計で最終的に採用されたデータが、右のコラムには $q/A=1/6.4$ イオンの正規の加速に必要なデータが示されている。ラベルLINACの黄色で塗られた2番目の値が q/A の値で、8番目の値がヴェイン電圧を決めるKilpatrickファクターである。これ等の値は(3.1)式の関係を満たしている。この時、左右のコラムの入力値に対して別々にGENRFQを走らせ、作られたtape1.datでPARMTEQを走らせると、計算されたヴェインパラメータはそれぞれ同じになる。

表3.1. gen.shの入力データ

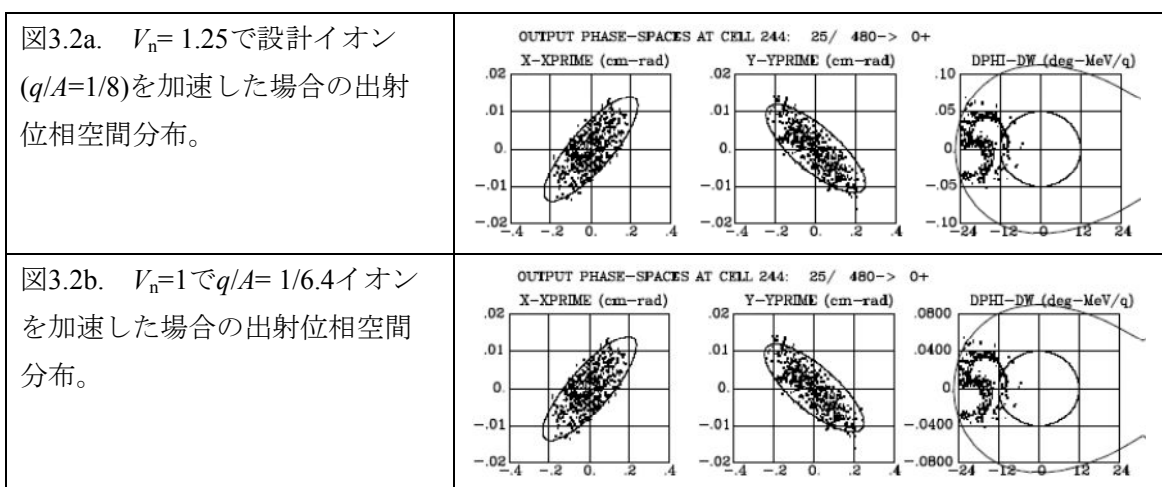
RUN 1 : Version-2 final q/A=1/8	RUN 1 : Version-2 final q/A=1/6.4
TITLE	TITLE
** SRI (79.0 MHZ) **	** SRI (79.0 MHZ) **
LINAC 79.0 0.125 0.06 0.005 0.5 -90 -25 1.6573	LINAC 79.0 0.15625 0.06 0.005 0.5 -90 -25 1.32584
SHAPER 12.3881	SHAPER 12.3881
RMATCH 30	RMATCH 30
PREBUNCHER 2 1.0423 0.17095	PREBUNCHER 2 1.0423 0.17095
BUNCHER 3.8 -0.075	BUNCHER 3.8 -0.075
BOOSTER 1.15	BOOSTER 1.15
OUTPUT 10 0	OUTPUT 10 0



一方、正規の加速からずれた加速の場合でも、次式の関係が維持される加速では出射粒子の位相空間分布や核子当たりのエネルギーは同じになる。

$$(V_n)_1 \times (q/A)_1 = (V_n)_2 \times (q/A)_2 \quad (3.2)$$

この事は、設計イオン ($q/A=1/8$) を $V_n=1.25$ で加速した場合のシミュレーション結果 (図3.2a) と $q/A=1/6.4$ イオンを $V_n=1$ で加速した場合のシミュレーション結果 (図3.2b) を比較する事によって確認される。後者のシミュレーションは、ヴェインパラメータが変わらないように、前述した正規の加速での計算と同じ方法で、GENRFQとPARMTEQの両方を使って独立に計算される。



上記議論に基づいて、規格化ヴェイン電圧を変数として設計イオンの加速を計算する事によって^{付録C}、間接的に q/A を変数としたビームシミュレーションが行われた。例えば、 $V_n=1$ で $q/A=1/6.4$ のイオンを加速した場合の出射位相空間分布は $V_n=1.25$ で設計イオンを加速した場合の出射位相空間分布から間接的に求められる。

3.2. 後段加速器全体のビームシミュレーション

設計イオン ($q/A=0.125$) を加速するように設定された後段加速器で設計イオンと異なるイオンを加速した場合のビームシミュレーションは次のように行われた。1) V_n を変数として計算されたRFQの出射粒子の位相空間分布と V_n に相当する q/A がMEBTシミュレーションの為の入力データとして使用される。2) MEBTの出射粒子の位相空間分布と q/A がIHシミュレーションの為の入力データとして使用される。上述したシミュレーション方法によって、後段加速器の q/A による伝送効率の変化が $0.1125 \leq q/A \leq 0.1525$ の範囲で調べられた。この一連の計算では、MEBTとIHの加速電圧や4極マグネットの磁場の値は設計イオンを加速する場合の設計値に固定されている。代表的なシミュレーション結果として、0.115、0.125、0.135、0.145の q/A を持つイオンに対して得られたRFQ、MEBT、IHの出射位相空間分布の変化の様子が図3.3から図3.6に示されている。

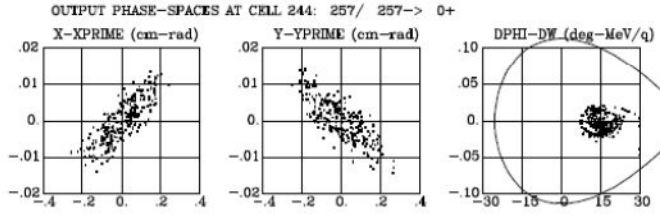
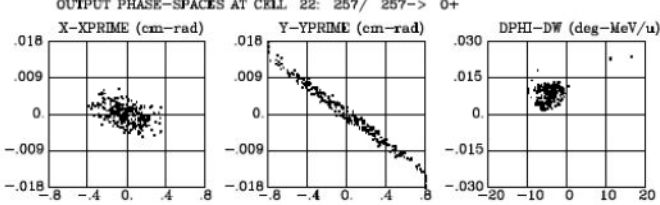
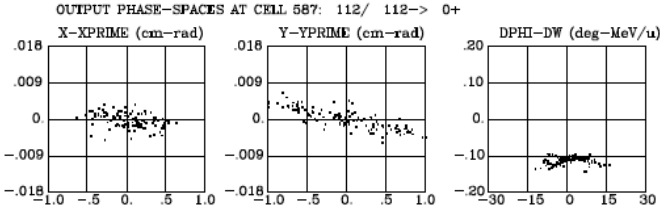
右図の説明	RFQ、MEBT、IHの出射位相空間分布
<p>RFQの出射位相空間分布 (分布粒子数は257個) これは$q/A=0.125$、$V_n=0.92$で計算された結果で、$q/A=0.115$、$V_n=1.0$の結果に相当する。</p>	
<p>MEBTの出射位相空間分布 (分布粒子数は257個) これは$q/A=0.115$、$V_n=1.0$、$B'_n=1$で計算された結果である。</p>	
<p>IHの出射位相空間分布 (分布粒子数は112個) これは$q/A=0.115$、$V_n=1.0$、$B'_n=1$で計算された結果である。 全体の伝送効率=112/500=22.4%</p>	

図3.3. $q/A=0.115$ イオンの加速シミュレーション。

右図の説明	RFQ、MEBT、IHの出射位相空間分布
<p>RFQの出射位相空間分布 (分布粒子数は461個) これは$q/A=0.125$、$V_n=1.0$で計算された結果である。</p>	
<p>MEBTの出射位相空間分布 (分布粒子数は461個) これは$q/A=0.125$、$V_n=1.0$、$B'_n=1$で計算された結果である。</p>	
<p>IHの出射位相空間分布 (分布粒子数は428個) これは$q/A=0.125$、$V_n=1.0$、$B'_n=1$で計算された結果である。 全体の伝送効率=428/500=85.6%</p>	

図3.4. $q/A=0.125$ イオンの加速シミュレーション (図中の実線は設計楕円)。

右図の説明	RFQ、MEBT、IHの出射位相空間分布
<p>RFQの出射位相空間分布 (分布粒子数は479個) これは$q/A=0.125$、$V_n=1.08$で計算された結果で、$q/A=0.135$、$V_n=1.0$の結果に相当する。</p>	
<p>MEBTの出射位相空間分布 (分布粒子数は479個) これは$q/A=0.135$、$V_n=1.0$、$B'_n=1$で計算された結果である。</p>	
<p>IHの出射位相空間分布 (分布粒子数は297個) これは$q/A=0.135$、$V_n=1.0$、$B'_n=1$で計算された結果である。 全体の伝送効率=297/500=59.4%</p>	

図3.5. $q/A=0.135$ イオンの加速シミュレーション。

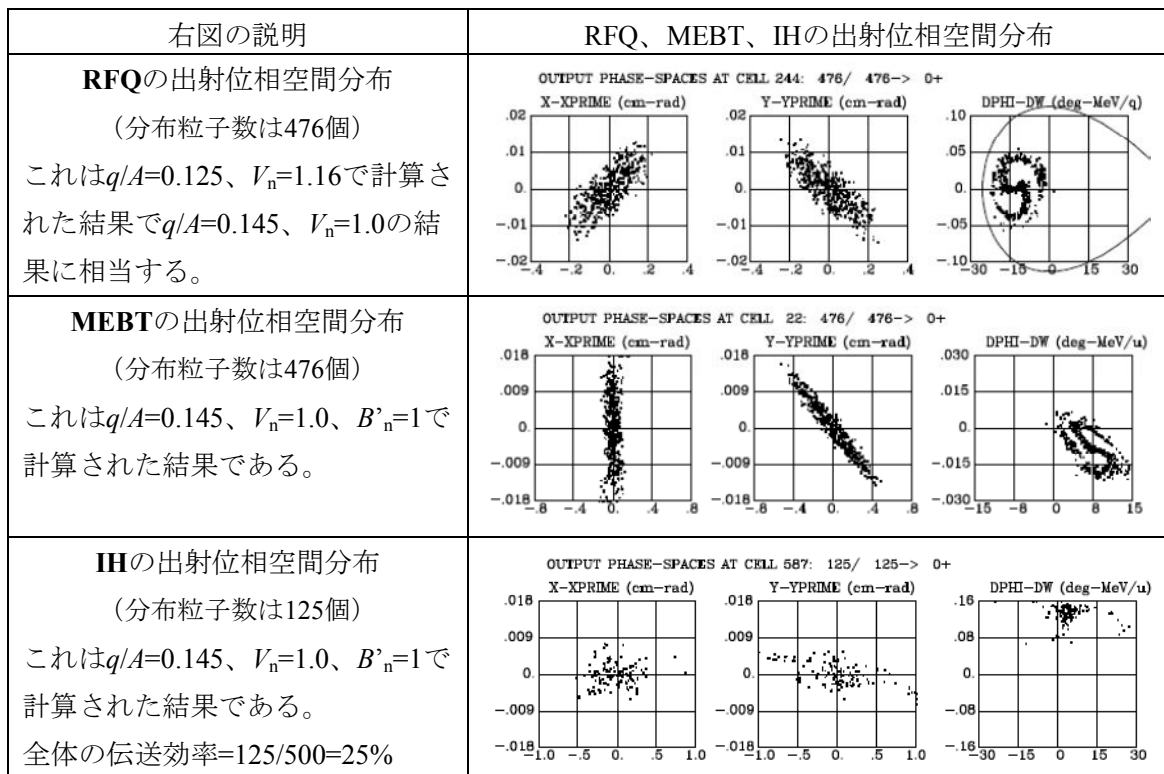


図3.6. $q/A=0.145$ イオンの加速シミュレーション。

4. 後段加速器でのビーム伝送効率と電荷質量数比の関係

前節で行われた加速シミュレーションによって、設計イオンと事なる電荷質量数比を持つイオンを加速した時の、後段加速器でのビーム伝送効率（IH出射粒子数のRFQ入射粒子数に対する割合）が q/A の関数として求められた。それ等の結果が表4.1と図4.1に示されている。図の赤線で示された伝送効率の山の左斜面はヴェイン電圧に関係したRFQの加速特性^{付録C}によって決められている。

表4.1. 後段加速器での異なる電荷質量数比を持つイオンの伝送効率

q/A	Transmission (%)	q/A	Transmission (%)
0.1125	0	0.1350	57.0
0.1150	22.4	0.1375	45.2
0.1175	38.0	0.1400	46.2
0.1200	68.0	0.1425	37.8
0.1225	82.6	0.1450	25.0
0.1250	85.6	0.1475	16.8
0.1275	88.0	0.1500	6.0
0.1300	69.4	0.1525	0.6
0.1325	56.8		

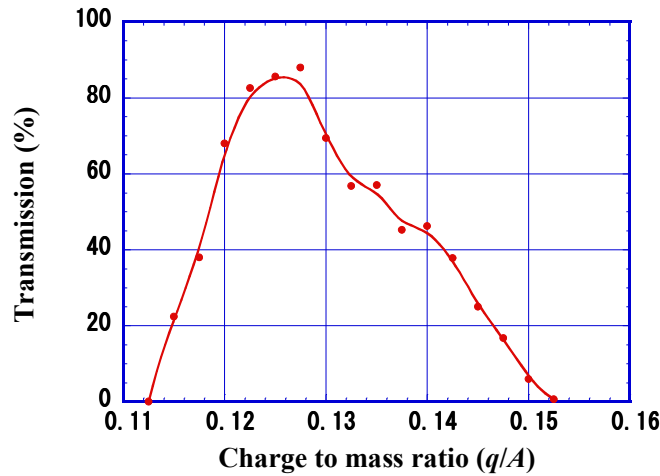
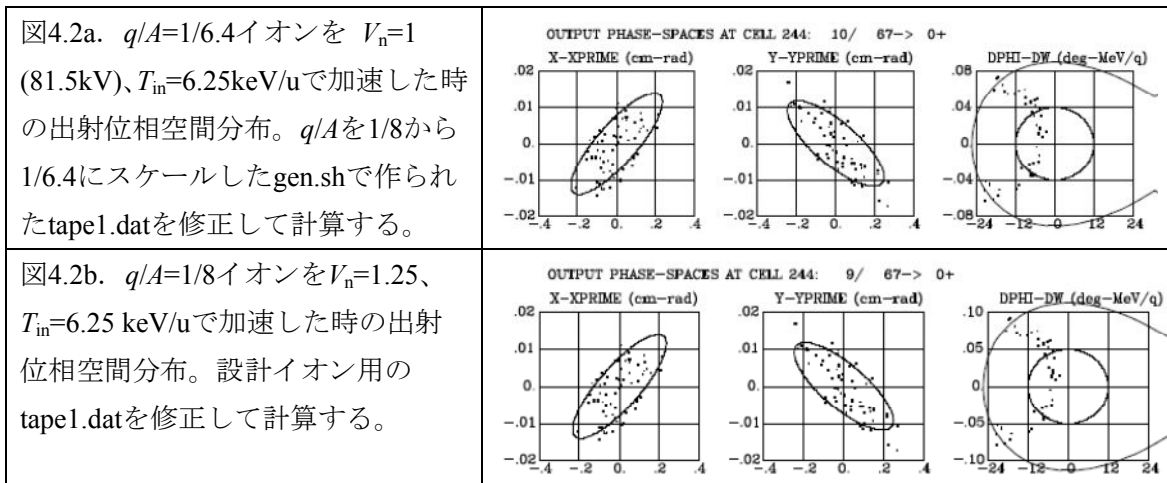


図4.1. 電荷質量数比の関数として表された後段加速器での伝送効率。

上記結果は、RFQへの入射エネルギーは異電荷イオンでも設計イオンと同じ5 keV/uであると仮定して得られた。しかし実際には、イオン源の引き出し電圧は40 kVで一定であるから、同一イオン源から出てくる核子当りのエネルギーは $T_{in}=40 \times q/A$ （単位はkeV/u）で与えられ、イオン価数によって違ってくる。この様に入射エネルギーが変わろうとも、第3節で述べたように、設計イオンと異なる q/A を持つイオンを $V_n=1$ で加速した場合のビームシミュレーション結果は、 $q/A=1/8$ イオンを $V_n=8 \times q/A$ の電圧で加速した場合のシミュレーション結果と同じになる。この事は、GENRFQとPARMTEQを使って計算した、 $q/A=1/6.4$ イオンを $V_n=1$ (81.5kV)、 $T_{in}=6.25$ keV/uで加速した場合のシミュレーション結果 (図 4.2a) が、PARMTEQだけを使って計算した、 $q/A=1/8$ イオンを $V_n=1.25$ 、 $T_{in}=6.25$ keV/uで加速した場合のシミュレーション結果 (図 4.2b) によって良く再現される事から確認できる。



核子当りの入射エネルギーが q/A によって変わる事を考慮して計算した伝送効率が表4.2と図4.3に示されている。図4.3では入射エネルギーが変わる場合の伝送効率の変化（緑の線）が入射エネルギーが一定（5 keV/u）の場合の伝送効率の変化（赤い線）と比較されている。異電荷イオンの入射エネルギーが変わると、後段加速器での伝送効率が40%以上になる q/A の幅は入射エネルギー一定（5 keV/u）の場合より狭くなる。図から分かる様に、質量数160で電荷数20のイオンを加速した場合、伝送効率40%以上で一緒に加速出来るのは電荷数19、21のイオンだけである。図の緑の線で示された伝送効率の半値全幅はイオンの入射エネルギーに関係したRFQの加速特性^{付録D}によって決められている。

表4.2. 異なる電荷質量数比と入射エネルギーを持つイオンの後段加速器での伝送効率

RFQ simulation		Transmission			
q/A	T_{in} (keV/u)	RFQ (particle)	MEBT (particle)	IH (particle)	Total (%)
0.115	4.6	5	5	2	0.4
0.120	4.8	351	351	256	51.2
0.125	5.0	461	461	428	85.6
0.130	5.2	465	465	334	66.8
0.135	5.4	324	324	119	23.8
0.140	5.6	100	100	49	9.8
0.145	5.8	236	236	57	11.4
0.150	6.0	89	77	14	2.8

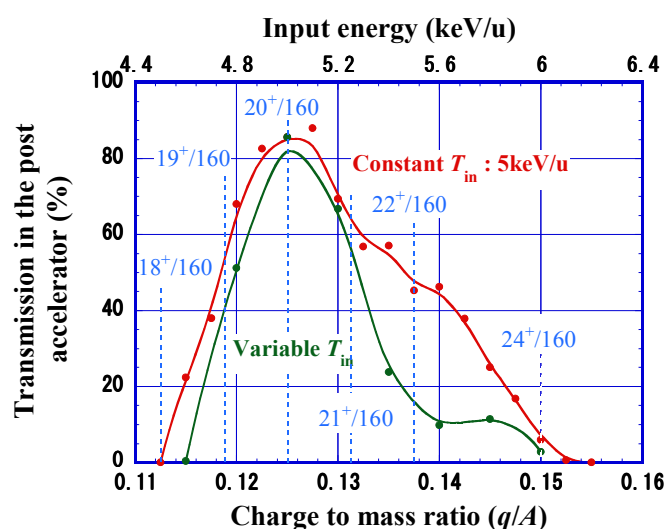


図4.3. 入射エネルギーが一定（5 keV/u）の場合と変わる場合の伝送効率の比較。

5. まとめ

SLOWRI後段加速器による設計イオンと異なるイオンの同時加速の可能性が計算コードPARMTEQとTRACEPによるビームシミュレーションによって調べられた。RFQのビームシミュレーションで使われるPARMTEQでは、出射ビームの特性を q/A を変数として直接調べる事が出来ないので、 q/A を変数とした出射ビームの特性は規格化ヴェイン電圧を変数として間接的に調べられた。規格化ヴェイン電圧を変数として計算されたRFQの出射位相空間分布とその規格化ヴェイン電圧から換算された q/A をTRACEPに入力し、MEBT、IHのビームシミュレーションが行われた。その結果、後段加速器は電荷質量数比が0.1188から0.1330の範囲に入る異電荷イオンを設計イオン ($q/A=1/8$) と同時に40%以上の伝送効率で加速できる事が分かった。この範囲を広げるには加速器の設計を根本的に見直さなければならない。RFQに関しては、設計イオンを加速できるRFQのヴェイン電圧の幅をマイナス方向にも広くする事と、RFQが受け入れ可能な入射エネルギーの幅を何らかの方法で広くする事が必要である。

謝辞

和田道治氏の本研究に対する支援に対し、そして上垣外修一氏のRFQの特性に関する有益な議論に対し、著者は深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Wada et al.: Hyp. Int. 199 (2011) 269-277.
- [2] 新井重昭, “SLOWRI 後段加速器の概念設計 (2nd Version) ”, RIKEN-NC-AC-3, 2016. 09.
- [3] 徳田 登, “PARMTEQ-2 (Sun-4/1000 (inssrv)版) ”, 1995年11月17日, unpublished.
- [4] 山田 聡, “TRACEP”, NIRS HIMAC Program manual No.1, May 1990, unpublished.
- [5] S. Yamada, “BUNCHER SECTION OPTIMIZATION OF HEAVY ION RFQ LINACS”, Proc. of the 1981 Linear Accelerator Conference, Santa Fe, New Mexico, USA, P. 316.
- [6] W. D. Kilpatrick, “Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both RF and DC”, Rev. Sci. Instr., Vol. 28, No. 10 (1957) 824.

付録

A) PARMTEQの入力データtape1.dat

PARMTEQの入力データであるtape1.datはGENRFQによって作られる。設計で採用されたtape1.datが表A.1に示されている。ヴェインパラメータを変えないで運転モードを変える事が出来るパラメータには、ヴェイン電圧、入射ビームエネルギー、入射ビームエミッタンス等が含まれる。設計ヴェイン電圧はラベルTANK 1の3番目の値0.0815（単位はMV）で与えられているが、この電圧を10%上げる場合には、表A.1で緑色に塗られた同じラベルTANK 1のゼロの値を1.1に変えれば良い。入射ビームエネルギーの設計値はラベルLINAC 1の最初の値0.040（単位はMeV/q）で与えられているが、このエネルギーを設計値より1 keV/q下げるとは、表A.1で水色に塗られたラベルINPUTの2行目の最後のゼロの値を-0.001にすれば良い。入射ビームの粒子数、エミッタンス楕円はラベルINPUTの1行目の2番目の値、3番目からの値を変える事によって決められる。

表A.1. RFQの設計で最終的に採用されたtape1.dat

```

RUN      1
TITLE
** SRI (79.0 MHZ) **
LINAC 1 0.040 79.00 8.00
TANK 1 4.000 0 0.0815 0 0 0 0 0 0 0 16 0 0 0 0 0
RMATCH  30  3.8000
ZDATA -4  0.000  3.8000 -90.000  1.0000
          12.388  3.8000 -88.000  1.0154
          17.656  3.8000 -85.226  1.0183
          20.758  3.8000 -81.513  1.0231
          23.246  3.8000 -76.334  1.0316
          27.005  3.8000 -64.894  1.0674
          28.275  3.8000 -61.560  1.0884
          29.560  3.8000 -59.969  1.1044
          54.995  3.8000 -44.881  1.1263
          71.848  3.8000 -35.604  1.1774
          82.809  3.8000 -30.274  1.2444
          91.298  3.8000 -26.576  1.3310
          94.400  3.8000 -25.321  1.3747
          96.009  3.8000 -25.000  1.4007
          110.483 3.8000 -25.000  1.5939
          118.910 3.8000 -25.000  1.7485
          125.822 3.8000 -25.000  1.9137
          133.285 3.8000 -25.000  2.1520
          138.588 3.8000 -25.000  2.3809
          141.343 3.8000 -25.000  2.6403
          201.684 3.8000 -25.000  2.5824
          497.791 3.8000 -25.000  2.5467  -1
RFQOUT 10
START 1
STOP -1
ELIMIT 0.1000
INPUT 6 500 0.941 14.346 0.01838 0.941 14.346 0.01838 180 0
      0 0 0 0 0 0
OUTPUT 3 1 0 0 0 1 1
OUTPUT 2 1 0 0 0 1 10 450 10
OUTPUT 4 1 0 0 0 1 1
SCHEFF 0.000 0.09070 0.06194 10 20 5 10
BEGIN
END

```

B) Kilpatrickファクター

ヴェインの最大表面電場 E_{\max} は、Kilpatrickによって与えられた放電限界電場 E_{KL} を基準にして、しばしばKilpatrickの何倍という風に表される。

$$E_{\max} = F_{KL} \times E_{KL} \quad (\text{B.1})$$

この F_{KL} がKilpatrickファクターと呼ばれる。この放電限界電場はギャップに無関係な周波数だけの関数として次式によって与えられる。

$$f = 1.64E^2 e^{-8.5/E} \quad (\text{B.2})$$

ここで f は周波数(MHz)、 E は放電限界電場(MV/m)である。我々が設定するRFQのヴェイン電圧 V_{vane} とヴェインの最大表面電場 E_{\max} の関係は次式で与えられる。

$$E_{\max} = \kappa \frac{V_{\text{vane}}}{r_0} \quad (\text{B.3})$$

ここで κ はセル中央のヴェイン先端の電場を基準にした高揚ファクターで、我々の場合1.36である。そして、 r_0 は平均開口半径である。

ヴェイン電圧とKilpatrickファクターの関係は(B.1)、(B.3)式から次式で与えられる。

$$\kappa \frac{V_{\text{vane}}}{r_0} = F_{KL} \times E_{KL} \quad (\text{B.4})$$

本文の表1のヴェイン電圧とKilpatrickファクターの関係は、(B.2)式から求めた周波数が79MHzの時の放電限界電場 $E_{KL}=10.425$ MV/mと $r_0=0.006415$ mを(B.4)式に代入すると、次のようになる。

$$V_{\text{vane}} = \frac{10.425 \times 0.006415}{1.36} \times F_{KL} = 0.049174 \times F_{KL} \quad (\text{B.5})$$

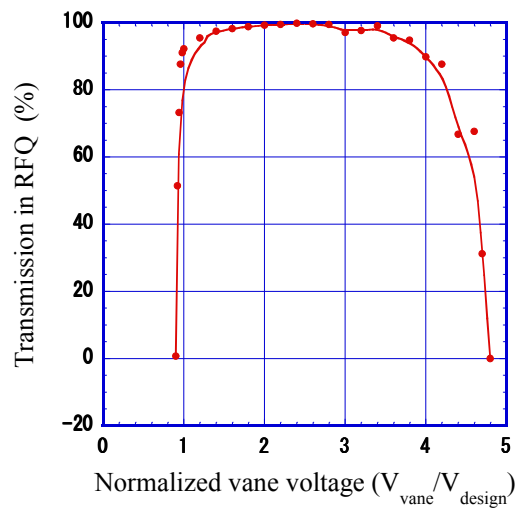
この関係からヴェイン電圧0.0815MVの時、Kilpatrickファクターは1.6573になる。

C) RFQでの規格化ヴェイン電圧による伝送効率の変化

規格化ヴェイン電圧を変えた時の設計イオン ($q/A=1/8$, $T_{in}=5$ keV/u) の伝送効率の変化がRFQで調べられた。結果が表C.1と図C.1に示されている。表C.1では、500個の入射粒子数で計算された伝送効率が、出射粒子数と出射粒子数の割合 (%) で表されている。

表C.1. $q/A=1/8$ イオンの規格化ヴェイン電圧による伝送効率の変化

V_n	Transmission		V_n	Transmission	
	particle	%		particle	%
0.90	4	0.8	2.6	498	99.6
0.92	257	51.4	2.8	497	99.4
0.94	366	73.2	3.0	485	97.0
0.96	438	87.6	3.2	488	97.6
0.98	455	91.0	3.4	495	99.0
1.00	461	92.2	3.6	477	95.4
1.20	477	95.4	3.8	474	94.8
1.40	487	97.4	4.0	449	89.8
1.60	491	98.2	4.2	438	87.6
1.80	494	98.8	4.4	334	66.8
2.00	496	99.2	4.6	338	67.6
2.20	497	99.4	4.7	156	31.2
2.40	499	99.8	4.8	0	0



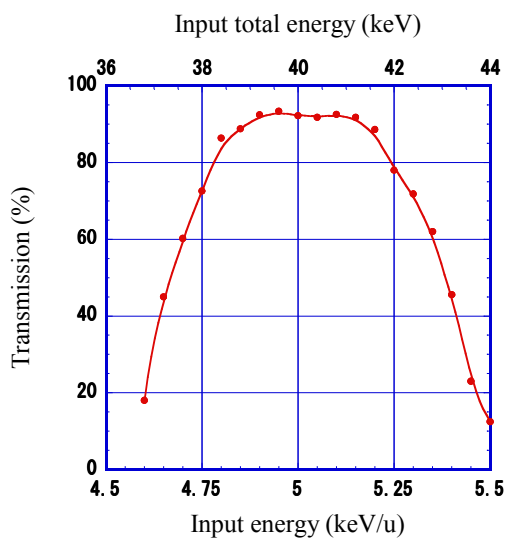
図C.1. 規格化ヴェイン電圧の関数としてプロットされた $q/A=1/8$ イオンの伝送効率。

D) RFQでの入射エネルギーによる伝送効率の変化

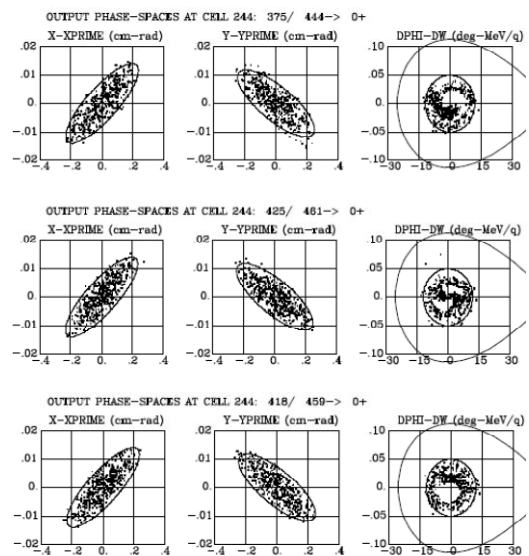
イオン源から引き出された500個の $q/A=1/8$ イオンの、入射エネルギーを設計値5 keV/uから変えた時の、RFQでの伝送効率の変化(表D.1と図D.1)と出射粒子の位相空間分布の変化(図D.2)が調べられた。この時、RFQは $q/A=1/8$ イオンに対する設計ヴェイン電圧に固定されている。図を見ると、設計入射エネルギーの±2.5%の範囲では伝送効率はほぼ一定で、出射ビームの位相空間分布もほぼ設計楕円の中に納まっている。

表D.1. $q/A=1/8$ イオンの入射エネルギーによる伝送効率の変化

T_{in}	Transmission		T_{in}	Transmission	
keV/u	Particle	%	keV/u	particle	%
4.60	90	18.0	5.10	463	92.6
4.65	225	45.0	5.15	459	91.8
4.70	301	60.2	5.20	443	88.6
4.75	363	72.6	5.25	390	78.0
4.80	432	86.4	5.30	359	71.8
4.85	444	88.8	5.35	310	62.0
4.90	462	92.4	5.40	228	45.6
4.95	467	93.4	5.45	115	23.0
5.00	461	92.2	5.50	62	12.4
5.05	459	91.8			



図D.1. $q/A=1/8$ イオンの入射エネルギーによる伝送効率の変化。



図D.2. 上から T_{in} が4.85、5、5.15 keV/uで得られた出射ビームの位相空間分布。