

1 はじめに

JAERI-KEK 統合計画の陽子加速器は、H⁻リニアック → 3GeV ラップッドサイクルシンクロトロン → 50GeV シンクロトロン、という構成である。この陽子加速器の初段加速器として、高周波四重極線形加速器 (Radio-Frequency Quadrupole Linac、以下 RFQ) が用いられる。大強度陽子リニアックの初段に RFQ を採用することは非常に重要な意味を持つ。すなわち、大強度陽子リニアックでは、空間電荷効果のために、周波数を従来の 200MHz 前後から、300~400MHz 程度に上げるのが望ましいが、そうするとドリフトチューブリニアック (DTL) に入射する前に、DTL の Q-magnet が現実的に製作可能になる程度 (数 MeV) まで加速せねばならない。また、空間電荷効果は低エネルギーほど顕著にあらわれ、従来のコッククロフト型で使われていたような長い低エネルギービーム輸送系 (LEBT) は不可である。また、DTL に入射するビームはバンチングされている必要があるが、H⁻イオン源の性能から考えて、効率の良いバンチング (90%以上) が不可欠である。現在の所、上記の要求を満たす物として、RFQ は最適であり、また、唯一の物である。

本講義で RFQ の一般的なことがらを概説するには、講義時間も紙数も到底足りない。統合計画の RFQ に焦点をしばって解説する。RFQ の基礎知識については Oho'96 の徳田の講義録 [1] に非常に詳しく書かれているので、本講義ではこれを参考書とする。詳しい式のフォローや文献などはこちらを参照して下さい。

現在、KEK において、統合計画のフロントエンド部である 60MeV リニアックの開発が行なわれており、そこでは統合される前の JHF 計画用に準備していた RFQ (以下、便宜的に JHF RFQ または 30mA RFQ と呼ぶ) を用いて加速器のコミッションングを行なう。JHF RFQ についてはすでに KEK にて、ビーム試験まで行なわれている。この RFQ はピークカレント 30mA の設計である。統合計画リニアックの要求をみ

には 50mA の RFQ が必要であり、こちらは現在設計中である。この新しい 50mA RFQ は、JHF RFQ をベースにして設計されるが、将来の高デューティー化に対応するため、空洞の製造方法として、新たな試みであるレーザー溶接による方法を用いる予定である。

本講義では、JHF RFQ の試験と、50mA RFQ の設計の説明を通して、RFQ リニアックの基礎的事項を解説する。

2 基礎知識

一般に、RFQ の機能として、収束、加速、バンチングがある。

RFQ の vane 付近での電位関数は、普通、静電場と時間成分の積として近似する。すなわち、ref. [1] の式 (2) のように表す。

$$E = -\nabla U \times \sin(\omega t + \phi). \quad (1)$$

これは、vane 付近では、静電場で物事を考えて、その後に高周波成分の $\sin(\omega t + \phi)$ を掛ければよいということである。円柱座標での静電場の式、すなわちラプラス方程式をみたす U の解のうち、最低次の 2 項をとった 2 項電位関数が RFQ の基本式だが、まず最初に、収束の部分から考える。以下順に、加速、バンチングと見ていく。

RFQ の収束の原理を説明するために、Figure 1 にあるような静電四重極レンズから始める。 $x^2 - y^2 = r_0^2$ の電極が $+\frac{V}{2}$ 、 $x^2 - y^2 = -r_0^2$ の電極が $-\frac{V}{2}$ に帯電していると、電極間のポテンシャルは

$$U = \frac{V}{2r_0^2}(x^2 - y^2) \quad (2)$$

となる。Figure 1 のような電極が z 方向に続いているとし、これに高周波電圧を加える。式 2 を x 、 y でそれぞれ偏微分して、時間成分を掛けると電場が得られる。(ここでは位相成分 ϕ は省略する。) すなわち、

$$E_x = -\frac{Vx}{r_0^2} \sin \omega t \quad (3)$$

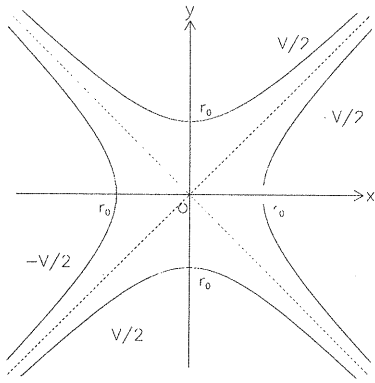


Figure 1: 静電四重極レンズ。

$$E_y = \frac{Vx}{r_0^2} \sin \omega t \quad (4)$$

これは、x収束y発散、x発散y収束が交互に繰り返されることを表す。質量 m_0 の粒子がz方向に進む時のx方向の運動方程式は、(y方向も同じ)

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{eVx}{m_0 r_0^2} \sin \omega t = 0 \quad (5)$$

であるが、ここで、変数 t を z に変換する。すなわち、 $z = \beta ct$ ($\beta = v/c$) であるが、これを $\beta\lambda$ で規格化し (λ は高周波の波長)、 $\eta = \frac{z}{\beta\lambda}$ を変数にすると、

$$\frac{d^2x}{d\eta^2} + B \sin 2\pi\eta \cdot x = 0 \quad (6)$$

となる。ただし、

$$B = \frac{e\lambda^2 V}{m_0 c^2 r_0^2} \quad (7)$$

とおいた。これは、Mathieu 方程式であり、 B がある値以下なら x は収束する。実際のRFQでは収束力の他に、発散力も働くので、 B はある範囲内にある必要がある。この B がRFQの収束強度である。

RFQにおいて、高周波電場による粒子の加速を実現するには、 z 方向の電場成分を作り出す必要がある。このために、Figure 2

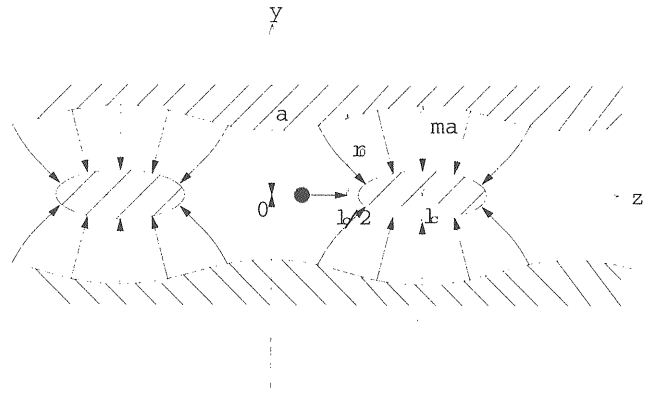


Figure 2: モジュールーション

のように、電極になみなみ (モジュールーション) をつける。最も小さい半径を a 、もっとも大きくなる部分の半径を ma ($m > 1$) とする。 a を最小ボア半径、 m をモジュールーションパラメータと呼ぶ。この間を1セルと定義し、その z 方向の距離を l_c とする。 x と y でモジュールーションの位相を 180° ずらす。このようにすると、図の位置にある粒子が z 方向正の向きの力を受けることは直観的に理解できよう。そこで、もう少しまじめにRFQの中心付近での電場について考えてみる。RFQのモジュールーションの形状は a と m と l_c で parameterize される。ただし、 l_c については、モジュールーションの波数 $k = \frac{\pi}{l_c}$ を用いる。粒子がrfによって加速されるためには、セル長 l_c は、粒子の速度と

$$l_c = \frac{\beta\lambda}{2} \quad (8)$$

なる関係を満たさねばならないので、モジュールーションを特徴づけるパラメータは a と m であると考えて良い。円柱座標 (r, ψ, z) で、 ψ 方向の4回対象性と、 z 方向の l_c に関する周期性を満たすラプラス方程式の解は、三角関数と変形 Bessel 関数を含む多項式で展開されるが、最低次の2項をとったものが2項電位関数

$$U_2 = \frac{V}{2} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \cos 2\psi + AI_0(kr) \cos kz \right] \quad (9)$$

である。(ref.[1]-(19))

電位に関する境界条件 (ref.[1]-(20)、(21))、

$$U_2(a, 0, 0) = U_2(ma, 0, l_c) = V/2 \quad (10)$$

$$U_2(ma, \pi/2, 0) = U_2(a, \pi/2, l_c) = -V/2 \quad (11)$$

から r_0 と A は a 、 m 、 k を用いて、

$$A = \frac{m^2 - 1}{m^2 I_0(ka) + I_0(mka)} \quad (12)$$

$$r_0 = a[1 - AI_0(ka)]^{-1/2} \quad (13)$$

と表される。(ref.[1]-(22)、(23)) これらはそれぞれ、加速効率と平均ボア半径と呼ばれる。

式(9)と式(1)から電場を求め、座標変換すると、

$$E_x = V \left(-\frac{1}{r_0^2} - \frac{k^2 A}{4} \cos kz \right) x \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (14)$$

$$E_y = V \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{k^2 A}{4} \cos kz \right) y \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (15)$$

$$E_z = \frac{kV}{2} AI_0(kr) \sin kz \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (16)$$

となる。ここで注意して欲しいのは、 $m = 1$ の場合、式(14)、(15)は式(3)、(4)に一致し、 E_z は 0、すなわち、 z 方向には力が働かないということである。(あたりまえですが。) 式(16)を見ると、モジュレーションによる z 方向にはたらく力の強さは A によって特徴づけられることがわかる。1セルでのエネルギーゲインは、ref.[1]-(37)のように、

$$\delta T = \frac{\pi}{4} eAV \cos \phi \quad (17)$$

である¹。 A は m にしたがって大きくなるので、加速効率を上げたければ、 m を大きくすれば良いように思われるが、実はそう簡単ではない。式(14)を用いて、式(5)と同様にして運動方程式をつくると、

$$\frac{d^2 x}{d\eta^2} + (B \sin 2\pi\eta + \Delta_{rf})x = 0 \quad (18)$$

¹ref.[1]-(37)にある荷電数対質量比 q/m は (負) 水素イオンの場合 1 なので、本文ではすべて省略する

が得られる。ここで、 B は式(7)と同じであるが、それに加えて、

$$\Delta_{rf} = \frac{\pi^2 eAV}{2m_0 c^2 \beta^2} \sin \phi \quad (19)$$

で表される、モジュレーションを加えたことに起因する発散力 (rf 発散強度) が働くことになる。rf 発散強度は m を大きくすると強くなるので適切な m を探す必要がある。

z 方向に rf 電場による力を受けて加速される粒子の運動は、一般のリニアックと同様に、シンクロトロン振動をする。RFQ における位相振動の式は、

$$\frac{d^2(\Delta\phi)}{dn_c^2} + \frac{\pi^2 eAV}{8T_s} [\cos(\Delta\phi + \phi_s) - \cos \phi_s] = 0 \quad (20)$$

である (ref.[1]-(49))。 n_c はセル番号、 T_s は平衡エネルギー、 ϕ_s は平衡位相である。平衡エネルギーとは、セルの入口での粒子のエネルギーの設計値である。その変化は、式(17)で規定される。エネルギーが初期値から増えていけば、式(8)によってセル長が決まっていく。つまり、式(17)での ϕ が RFQ でのエネルギーの変化のしかた、ひいてはセル長の変化のしかたを規定している。これを平衡位相 ϕ_s とする。平衡位相からずれた粒子は、その位相のずれを $\Delta\phi$ とすると、式(20)を満たすように平衡位相のまわりで振動する。(シンクロトロン振動。) シンクロトロン振動の安定領域をセパトリクスといい、その位相幅は、ref.[1]-(58)にあるとおり、

$$\tan \phi_s = \frac{\sin \Phi_{sep} - \Phi_{sep}}{1 - \cos \Phi_{sep}} \quad (21)$$

と表され、エネルギー幅は、ref.[1]-(60)のごとく、

$$H_{sep} = \frac{\sqrt{32}}{\pi} T_s \Omega_L (1 - \phi_s \cot \phi_s)^{1/2} \quad (22)$$

と表される。さて、一般の陽子リニアックと同様に、式(17)によって粒子が加速され、かつシンクロトロン振動が発散しないための平衡位相の条件として、

$$\frac{\pi}{2} < \phi_s < 0 \quad (23)$$

を満たさねばならないが、式 (21) から、 ϕ_s が -90° に近い場合、 Φ_{sep} は 360° になり、すべての粒子が安定であることになる。一方、式 (17) から、 ϕ_s が 0 に近いほど加速効率が良いことが分かる。もっとも、あまり 0 に近過ぎると、セパトリクスがなくなってしまうので、通常 -30° 程度とする。つまり、 ϕ_s を -90° から最終位相まで断熱的に変化させると、ほとんどの粒子はセパトリクスからとりこぼすことなく加速できることになる。これが、RFQ におけるバンチングの原理である。

3 統合計画リニアック用 RFQ の概要

Table 1 に統合計画用 RFQ の要求仕様を示す。KEK では、長年大強度陽子加速器建設

Table 1: 統合計画用 RFQ の要求仕様

周波数	324 MHz
入射エネルギー W_i	50 keV
出射エネルギー W_f	3 MeV
ピーク電流	50mA
duty	3%

を提唱し続けており、そのための技術開発を続けてきた [2, 3, 4]。RFQ に関しても、最も初期の JHP 用の 432MHz、20mA RFQ に始まり、現在、KEK において、JHF 計画用に開発されたの 324MHz、30mA RFQ のテストが行なわれている。JHP の研究開発開始当初、大強度陽子加速器用の RFQ として問題になったのは、空間電荷効果を適切に取り扱った効率の良い設計方法の確立と、全長の長い高デューティの RFQ の電磁場の安定性の問題であった。これらの問題は、セルパラメータの設計コード KEKRFQ の開発と、4 重極電場を安定化させる π -mode stabilizing loop (PISL) の発明により克服された [5]。このような技術的蓄積をふまえ、統合計画の要求仕様を満たす RFQ を現在設計中

である。Table 2 に、JHF の 30mA RFQ と、設計中の 50mA の諸元を示す。JHF RFQ

Table 2: 30mA RFQ と 50mA RFQ の諸元

	30mA RFQ	50mA RFQ
周波数	324 MHz	←
W_i	50 keV	←
W_f	3 MeV	←
ピーク電流	30mA	50mA
duty	3%	←
規格化 エミッタンス	1.0 π mm·mrad	←
vane 長	3.115 m	4.285 m
vane 間電圧	82.9 MV	80.7 MV
最大表面電場	31.6 MV/m	31.0 MV
平均ボア半径	3.7 mm	3.6 mm
vane 先端形状	0.89 r_0	←
透過率*	96 % 36mA 入射	98 % 60mA 入射
縦方向 rms エミッタンス*	0.078 MeV·deg	0.10 MeV·deg
空洞構造	4-vane ボルト締め 真空容器別体	← レーザー溶接

*PARMTEQM 計算値

と今回の RFQ の要求仕様で異なっているのはピーク電流のみであるが、RFQ にとってピーク電流の許容値は非常に重要なパラメータである。バンチングが終わった時点での平衡位相やエネルギーを高くせねばならず、そこでの横方向のビームの広がりも大きくなるため、あまり大きなモジュレーションをつけられなくなるため、許容電流値が大きくしようとするとうとう全長が長くなる。JHFRFQ は、3.115m の vane 長を持つ空洞を、長手方向には、無酸素銅の削りだし一体物として作られている。空洞を形成する 4 つの部品を RF コンタクタを介してボルト締めし、それを大きな真空容器に入れている。4m を越えるとそのような作り方はもはや難しく、いくつかの空洞を継ぎ合わせていく構造になる。各々の空洞はそれ自体で真空を保持せねばならない。

また、統合計画の将来の高デューティー化への対応という観点からも、金属接合による組み立てを採用することにした。このような製作方法として、ろう付けによる方法が一般的だが、今回はレーザー溶接による接合を試みることにした。これは原研において、CW RFQの研究開発の一貫として準備されてきたものである。現在、試作要素として、3分割空洞の最上流部を製作中である。これは、テストがうまくいけば実機として使えるようにモジュレーションなども設計している。

4 50mA RFQ の設計

4.1 cell parameter の設計

50mA RFQ の設計方針として、後で述べるように、30mA RFQ の試験が非常に順調であるので、基本的にはこれを踏襲する。

cell parameter の設計で、大前提になるのは、加工の容易性から、vane の加工を総形カッターを用いて行なうということである。すなわち、 $\rho_t=0.89r_0$ の一定 ρ_t vane を採用する。vane 形状に関する議論は、詳しくは [1] および、[8] を参照されたい。

cell parameter は KEKRFQ[5] を用いて設計する。できた cell parameter で PARMTEQM[9, 11] によってビームシミュレーションを行ない、透過率やエミッタンスを確認する。PARMTEQM は一定 ρ_t vane による、ポテンシャル関数の高次の効果を考慮に入れたプログラムであり、式 (9) の 2 項電位関数を仮定して作られた cell parameter を、高次効果を考慮に入れたモジュレーションの補正をしてくれるプログラムが PARI である²。Table 3 は、50mA RFQ の PARMTEQM への input file の一部で、cell parameter を指定している部分である。左から順に、z 座標 (cm)、収束強度 B、同期位相 ϕ_s (degrees)、モジュレーション m、

²PARI は PARMTEQ(M) や RFQUICK などとともに、Los Alamos の RFQ design code に含まれる。

ベイン間電圧 V(MV) を示している。逆に言うと、これだけの parameter を決めれば、RFQ の cell parameter は設計出来たということである。

Table 3: cell parameter の例。ジェントルバンチャー以降、アクセラレーター途中まで。

4.29604	5.67483	-90.0000	1.00000	0.080675
57.77757	5.67483	-86.0000	1.08829	0.080675
72.72757	5.67483	-86.0000	1.08995	0.080675
93.32292	5.67483	-83.0000	1.09057	0.080675
105.39103	5.67483	-79.9000	1.09436	0.080675
118.97212	5.67483	-74.8000	1.10287	0.080675
129.33169	5.67483	-69.7000	1.11507	0.080675
134.92115	5.67483	-66.5000	1.12512	0.080675
140.10748	5.67483	-63.3000	1.13762	0.080675
145.63647	5.67483	-59.7000	1.15552	0.080675
150.71264	5.67483	-56.2000	1.17780	0.080675
155.23416	5.67483	-53.0000	1.20410	0.080675
160.07814	5.67483	-49.6000	1.24138	0.080675
164.23266	5.67483	-46.7000	1.28384	0.080675
167.54164	5.67483	-44.4000	1.32741	0.080675
171.04341	5.67483	-42.0000	1.38640	0.080675
174.76846	5.67483	-39.5000	1.46970	0.080675
177.39440	5.67483	-37.8000	1.54648	0.080675
180.15053	5.67483	-36.0000	1.65302	0.080675
181.58286	5.67483	-35.0000	1.72900	0.080675
181.58286	5.67483	-35.0000	1.72900	0.080675
186.09496	5.67483	-35.0000	1.76900	0.080675
190.92455	5.67483	-35.0000	1.79900	0.080675
197.84439	5.67483	-35.0000	1.83900	0.080675
207.23759	5.67483	-35.0000	1.86900	0.080675
217.41888	5.67483	-35.0000	1.89900	0.080675
244.84786	5.67483	-35.0000	1.91300	0.080675

KEKRFQ では、全体を次の 4 つのセクションに分割する。

1. ラディアルマッチングセクション (RMS)
時間に依存しない入射エミッタンスと時間に依存する RFQ のアクセプタンスとのマッチングをとるため、B を 0 から最終値まで少しずつ増加させていく。
2. シェイパー (SP)
 m 、 ϕ_s を次のバンチャーの始めの値まで直線的に変化させる。
3. ジェントルバンチャー (GB)

ϕ_s を最終位相まで少しずつ増やしてい
き、バンチングする。

4. アクセラレーター (AC) ϕ_s 一定で加速する。

Table 3 をみて分かるように、 V が一定なのは当然として、 B も一定になっている。ふつう、RFQ の設計では RMS 以外では B を一定にする。これはすなわち、式 7 より、平均半径 r_0 が一定ということである。 r_0 は、空洞の消費電力や、放電耐性にかかわる非常に重要なパラメーターであり、あまり自由に変えられるものではない。JHP、JHF での経験から、50mA RFQ では、3.6mm とした。これは、最終的には PARMTEQM の結果から、出口でのビームのエネルギーの広がり小さくなる所に決定した。 r_0 を決めると、表面電場強度の放電限界から V が決まる。放電限界は Kilpatrick による経験式、

$$f = 1.643 E_K^2 \exp(-8.5/E_K) \quad (24)$$

から求まる。統合計画のような高デューティな RFQ の場合、一つの目安として、 E_K の 1.8 倍以下というのがあがる。50mA RFQ の場合、PARI による表面電場強度の最大値は 31.04MV/m であり、324MHz での E_K は 17.82MV/m である。

次に、 ϕ_s であるが、まず GB 出口での値から決めていく。50mA の場合、 $r_0=3.6$ mm 辺りだと、 $\phi_s=-30^\circ$ では電流限界を越えてしまうので、 $\phi_s=-35^\circ$ とした。KEKRFQ では、位相振動の方程式は、

$$\frac{d^2(\Delta\phi)}{dz^2} = -\frac{2\pi q}{\lambda m_0 c^2 \beta^3 \gamma^3} \times \left[\frac{\pi AV I_0(kr)}{4} \{ \cos(\phi_s + \Delta\phi) - \cos\phi_s \} - E_{sc} \right] \quad (25)$$

を用いる。 ϕ_s は平衡位相、 $\Delta\phi$ は平衡位相からの位相差である。ここで、 E_{sc} は、空間電荷による電場を表し、

$$E_{sc} = \frac{\rho_{sc} f(p) \beta \lambda}{2\pi \epsilon_0} \Delta\phi \quad (26)$$

$$+ \frac{\pi I}{\epsilon_0 c \beta^2 \lambda} \sum_{i=-n, i \neq 1}^n \left\{ \frac{1}{(\phi_s + \Delta\phi - \phi_c + 2\pi i)} \times \frac{1}{|\phi_s + \Delta\phi - \phi_c + 2\pi i|} \right\}$$

と表される。1項目は、同じバンチ内の粒子から感じる電場で、2項目は他のバンチからの影響を表し、 ϕ_c はバンチ中心の位相である。 ρ_{sc} は、バンチの形を3次元の回転楕円体とした時の電荷密度であり、

$$\rho_{sc} = \frac{3I\lambda}{4\pi a_T^2 a_L c} \quad (27)$$

と表される。 (a_T, a_L) はそれぞれ横方向と長手方向のバンチの大きさである。 $f(p)$ ($p = a_L/a_T$) は、形状因子である。詳しくは、[10] を見よ。位相振動の式 (26) からセパトリクスの高さが求まるので、これを縦方向のアクセプタンスとする (位相幅とエネルギー幅の積で定義する)。空間電荷効果はお互いの粒子を遠ざけるように働くので、空間電荷を考えない場合に比べ、不安定となり、セパトリクスは小さくなる。GB 出口でのエネルギー W_G はもう一つのパラメーターであるが、加速効率という点では小さい方が望ましい。ただ、エネルギーを下すぎると、セパトリクスの高さは小さくなるので透過率も下がり、縦方向のエミッタンスも大きくなる傾向にある。(アクセラレーターでは縦方向のアクセプタンスが増大するので、ここでセパトリクスを小さくし過ぎるとその後の挙動が不安定になる。) 50mA RFQ では 450keV とした。GB 出口での ϕ_s と W_G を決めたら、z 方向逆向きに計算していく。拘束条件として、縦方向のアクセプタンスを一定とする。cell parameter を一意に決めるにはもう一つ、 m の変化の仕方を規定せねばならない。これは Δ_{rf} を、

$$\Delta_{rf} = \Delta_{rf} + (\Delta_{rfG} - \Delta_{rfi}) \left(1 - \left| \frac{\beta - \beta_G}{\beta_G - \beta_i} \right|^n \right)^{\frac{1}{n}} \quad (28)$$

のように変化させることで行なう。添字、 i と G は GB の始まりと終りを表し、 n はパラメーターである。 Δ_{rf} を決めると、式 (19) よ

り A が決まり、さらに r_0 が一定という条件から、式 (12)、(13) より、 m 、 a が決まる³。 A が決まると縦方向のアクセプタンスも求まるので、これが GB 出口での値と等しくなるまで ϕ_s を小さくする。このようにして順に前に戻っていくが、最後までこのプロセスを行なおうとすると、RFQ が無限に長くなってしまふので ($m=1$ でのセパトリクスの高さは 0 である。) ϕ_s がある値まで GB は終りとして、それ以前は m を 1 まで直線的に変化させる。(SP。) 50mA RFQ では SP で ϕ_s を -86° まで直線的に変化させ、その後しばらく -86° のままの区間を設けている。こうすると、多少縦方向のエミッタンスを小さくできるようである。AC では横方向のアクセプタンスを一定にする。縦方向のアクセプタンスは大きくなっていくが、すでにバンチングが終っているので問題ない。

Figure 3 に 50mA RFQ の cell parameter を、Figure 4、5 に PARMTEQM の結果を示す。

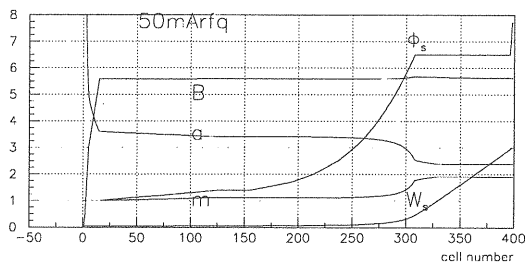


Figure 3: 50mA RFQ の cell parameter

4.2 空洞構造の設計

RFQ が RFQ として働くためには、

- 電場は横断方向、磁場は長手方向。
- r 方向は、空洞外周部は固定端、中心部は自由端で振動

³ a は、PARMTEQ の入力 file では、Table 3 で、他のパラメータから一意に決まることになるのであらわに書かれていない。

- ψ 方向は 2 回振動
- z 方向に一様

を満たさねばならない。このようなモードは、 TE_{210} である。実際の空洞では、Figure 6 のように、 TE_{210} 以外にも様々なモードが励起される。

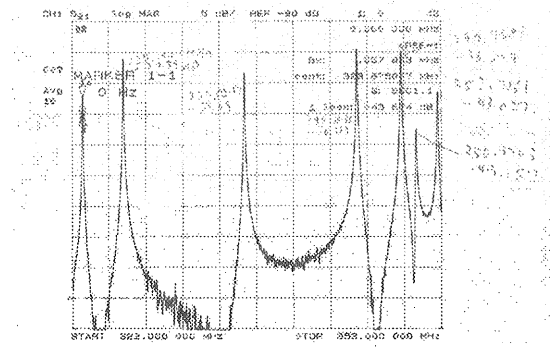


Figure 6: 実際の RFQ 空洞に励起される様々なモード。30mA RFQ の例。一番左が、 TE_{210} モード。横軸の幅は、20MHz である。

ここで問題になるのは、他のモードの共振周波数が TE_{210} モードに近い場合、モードの混合が起こり得ることである。 TE_{210} モードの断面に着目すると、Figure 7-a) のように四重極モードである。ところが、Figure

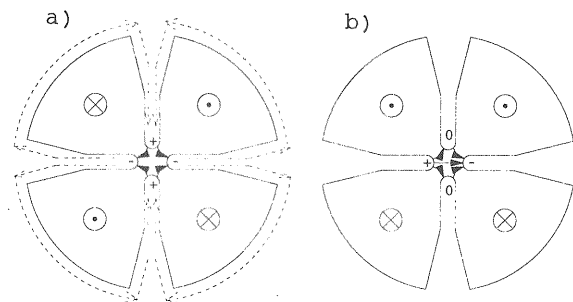


Figure 7: a) 四重極モード。点線は空洞外壁表面に流れる電流の向きを示す。b) 二重極モード。電流は省略。

7-b) のような 2 重極モードもあり得、これが混ざるとビームが曲げられてしまうことになり、きわめて有害である。

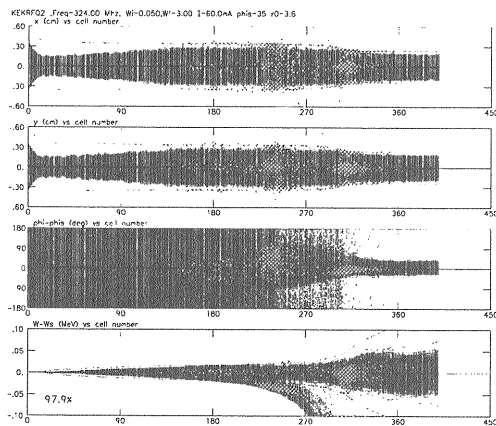


Figure 4: 50mA RFQ の PARMTEQM の結果。

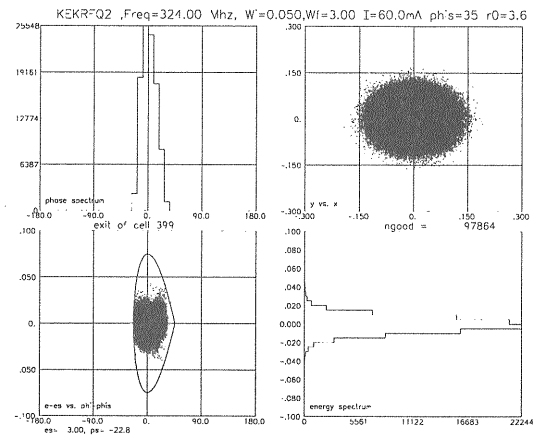


Figure 5: 50mA RFQ の PARMTEQM の結果。出口でのエネルギーと位相の分布。

この2重極モードの混合をさけるため、KEKの上野によって π -mode stabilizing loop (PISL) が考案された。PISLは Figure 8 のように空洞にロッドを突き刺した形をしている。こうすることで、加工、取り付け性

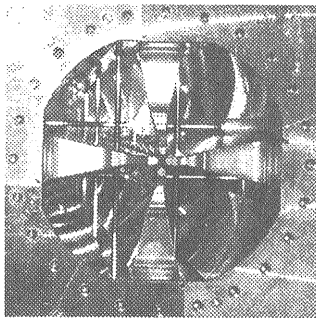


Figure 8: 30mA RFQ の空洞内部。縦横に走っているロッドがPISL。

が良く、水冷も容易になっている。Figure 9 にPISLの原理を示す。いま、図の平面内で考える。導体で囲まれた部分に対して、ファラデーの法則より、

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (29)$$

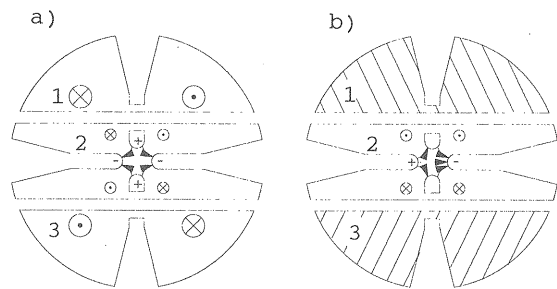


Figure 9: PISL の原理。

であるが、電場は導体表面に対して常に垂直であるので、左辺は0である。すなわち、Figure 9-b)において、1と3の領域では、磁場の積分値が変化する Figure 7-b) のようなダイポールな振動は出来ないことになり、磁束は2のせまい領域を通らざるを得なくなり、周波数が上がる。逆に Figure 9-a) のように、四重極モードでは通過可能な面積はほとんど減らず、むしろPISLによる静電容量の増加によって、周波数は下がる。このように、四重極と二重極モードの分離が良くなる。Figure 9-b) では第(1,2)-(3,4)象

限での二重極モードだが、(1,4)-(2,3)の場合にはPISLを縦にすれば良い。実際の空洞では縦、横のPISLが交互に取り付けられる。

共振周波数は、空洞の断面形状で決まる。2次元の断面形状から、その高周波特性を計算してくれるプログラムで良く使われるのがSUPERFISHである[11]。Figure 10は50mA RFQのSUPERFISH計算の例である。RFQ空洞は4回対象性を持つので、1/4だけ計算すれば十分である。RFQ空洞内で、

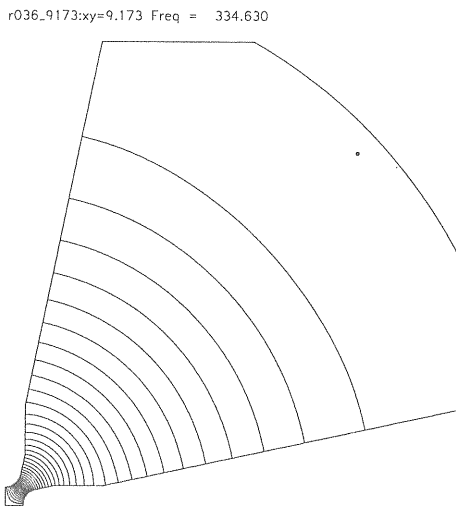


Figure 10: 50mA RFQのSUPERFISH計算の例。等高線は電気力線であり、その密度は電場の強さを表す。

磁場は軸方向に走るが、空洞の端部ではとなりの象限に回り込む。この、磁場の通り道の形状は2次元の計算では出来ない。また、PISLの効果についても3次元のコードでなければ計算することが出来ない。このような3次元の電磁場を計算してくれるコードとしてMAFIAを用いる[12]。Figure 11は空洞出口部分のMAFIA計算である。磁場が隣の象限に回り込んでいる様子が良くわかると思う。

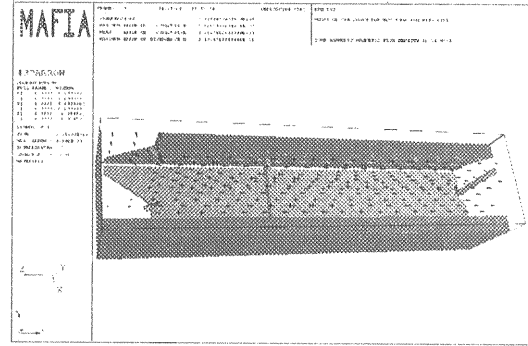


Figure 11: 50mA RFQのMAFIA計算の例。

一般に、計算値の絶対値に関しては、計算時のメッシュ荒さに依存するため、2次元の計算の方が、3次元よりも精度は高い⁴。そこで、実際に空洞の断面形状を決定する際には、まずSUPERFISHで周波数を決め、PISLによる周波数の下がりがたをMAFIAで求め、それを引いたものが324MHzになるように決めた。50mA RFQの場合、PISLによる周波数変化は10.455MHzであったので、SUPERFISHで334.444MHzになるような断面形状とした。引き算すると、323.989MHzになる⁵。空洞端部については、この断面で、切り欠き部の形状を、電磁場の長手方向の一様性にも留意して、周波数が324MHzになるようにMAFIAで決めた。

5 30mA RFQの試験状況

KEKにおいて、30mA RFQ (Figure 12)の試験が行なわれている。以下に現在までの試験状況をまとめる。

5.1 低電力試験

実際に空洞が出来上がると、まず低電力試験を行なった[13]。その目的は、

⁴3次元ではメッシュの数が増えるため、あまり細かくできない

⁵324MHz ちょうどでないのは、断面形状を10μmきざみで変化させたためである。

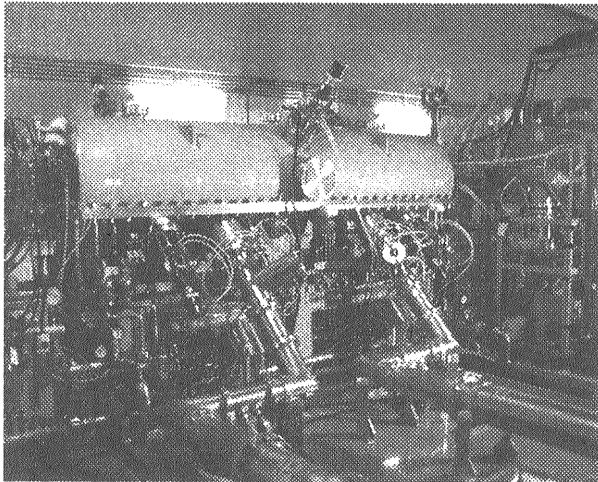


Figure 12: 30mA RFQ。

- 設計どおり空洞が出来上がっているか確認する。
- 共振周波数、長手方向の電磁場強度分布を調整する。
- 高周波カップラーのカップリングを調整する。

ことである。

最善をつくして加工したとしても、加工精度には限界があるので、共振周波数は設計値から若干ずれ、また、象限ごとに電磁場強度にばらつきが出る。例えば、最も敏感な所で vane 先端の $10\mu\text{m}$ の狂いは、周波数にして 30kHz 程度のずれとなる。また、モジュレーションの影響などにより、長手方向の電磁場強度は不均一となる。設計上は vane 間電圧 V が軸方向に一定であるとしているのでこれを調整する必要がある。調整は、空洞外壁から金属製のスタブを挿入し、インダクタンスを変化させることで行なう。このようなチューナーが長手方向にいくつかある。

Figure 13 に調整前後の電磁場強度分布をしめす。測定は、空洞内に金属のビーズを挿入したときの周波数変化を測定することで行なった。(ビーズ摂動法) 調整後の電磁場強度⁶の一様性は 0.6% 以内であった。調整後

⁶ここでは、空洞外壁に近い部分にビーズを通してあるのでほとんど磁場の強さを見ている。

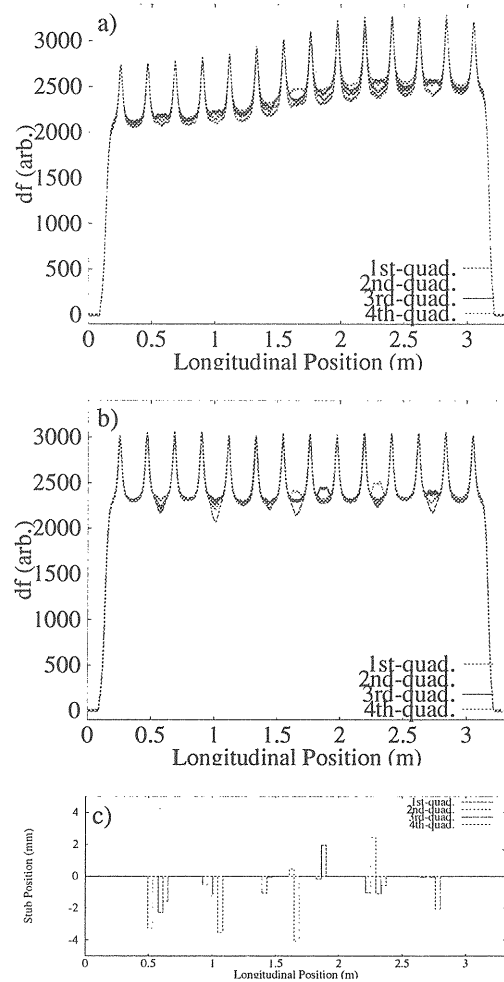


Figure 13: 電磁場強度分布。a) は調整前、b) は調整後。c) はチューナーの挿入量を表す。

の共振周波数は、真空を引いた時に 324MHz になるように 323.9MHz に設定した。Q 値の測定結果は 8960 で、これは SUPERFISH の計算値の 79% であった。

5.2 高電力試験

出来上がったままの空洞は、表面状態が良くないのですぐには高電力を投入することができず、低い電力、低いデューティーから少しずつコンディショニングをする必要がある。Figure 14 に高電力試験の概念図を示す。クライストロンからの RF 電力は、2分割されそれぞれのカップラーに伝送され

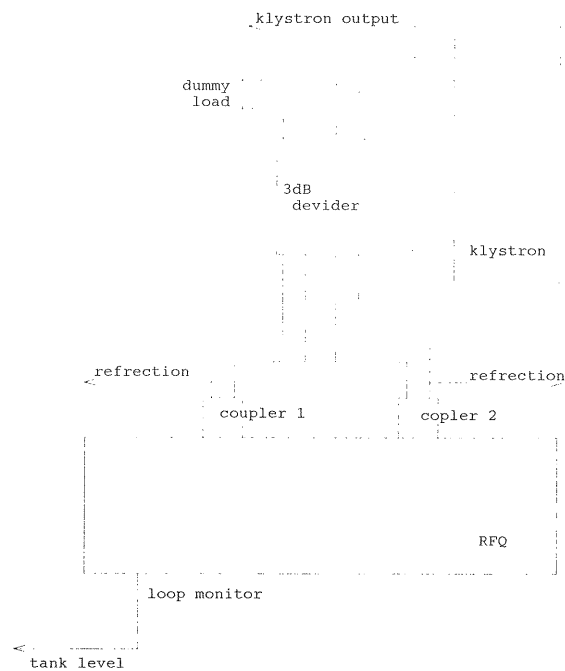


Figure 14: ハイパワーテスト概念図

る。カップラーの手前には方向性結合器が取り付けられており、カップラーからの反射波を観測することができるようになっている。RFQのタンクレベルは50dBのループモニターで測定する。

Figure 15にコンディショニングの経過を示す。まず、繰返し50Hz、パルス幅25 μ sec

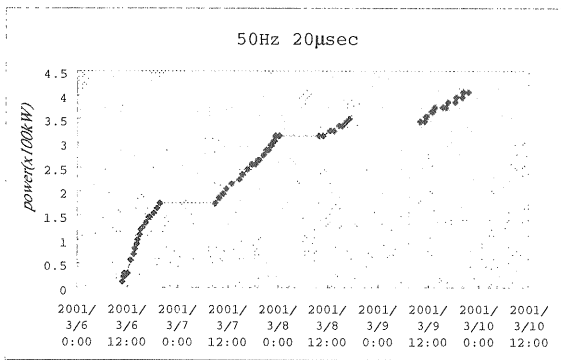


Figure 15: コンディショニング。繰返し50Hz、パルス幅25 μ sec（デューティー0.125%）。横軸は時刻である。

で徐々にパワーを上げていった。4日後には415KWに達した。（定格は315KW。30mA

のビームロードは88.5kW。）JHPの20mA RFQでは、途中で、ある電力を越えるのに非常に苦労するポイントがあったが、そのような今回はそのようなことはなくスムーズに電力をあげられた。これは、空洞加工後の酸化防止として、空洞表面にクロメート処理を施したのが功を奏した物と考えている。その後、パルス幅を広げ、2日後には500 μ secまで達し、415kW、3%デューティーを達成した。

5.3 ビーム加速試験

安定にrfパワーが入るようになったら、いよいよビームの加速試験である。

Figure 16にRFQ入口と出口でのビームの波形を示す。電流はファラデーカップを用

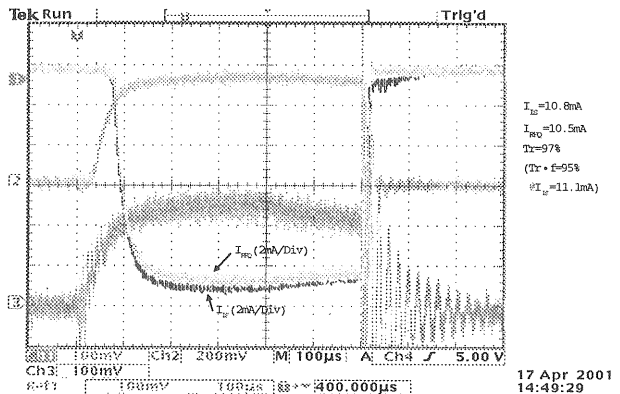


Figure 16: ビームの波形。ch1: RFQ出口での電流（黄色）RFQ入口での電流（黒）ch2: イオン源のアーカ電流。ch3: イオン源のアーカ電圧。

いて、50 Ω 終端での電圧値で測定した。RFQ入口での電流の測定中はRFQに入射できないので、まず入口電流を測定し、ファラデーカップを退避させ、出口での電流を測る。KEKで開発中のH⁻イオン源[14]から、10.8mA⁷のH⁻ビームを入射した。出口での電流値は、10.5mAで、透過率は97%であ

⁷現在のところ、最大電流はイオン源で制限されている。

った。エミッタンスは、Q-magnetを2つ通過した後のエミッタンスモニターでの測定で、x方向は 0.17π 、y方向は 0.19π (mm·mrad規格化rmsエミッタンス)であった。これらは、ほぼこの電流値でのシミュレーションどおりの結果である。

今後は、MEBTのインストール後に正確なエネルギーやパンチシェイプなど、ビームの性質をより詳しく測定する予定である。

6 おわりに

ここまで見てきたように、30mA RFQについては順調にきている。設計値の30mAのビーム加速もおそらく問題無いであろう。50mA RFQについては、最大の懸念は、レーザー溶接によって、寸法精度やrf的要求を満たす空洞の製作がうまくいくかということであるが、これについては年内にはなんらかの結果が出ると思う。

最後に、KEKおよび原研の一連のRFQの実例を通して、RFQに関してわかりやすく解説しようと思って書き始めたが、筆者の力量不足で[1]の出来の悪い抜粋になってしまった感がなきにしもあらずである。これを読んでRFQに関心を持ったならば、まず[1]を読んで勉強してみることをお勧めします。また、最近のSNSやLEDAなどの類似のRFQに関する情報はLinac conferenceのプロシーディング[15]を見て下さい。

References

- [1] 徳田登, “RFQ線形加速器”, 高エネルギー加速器セミナー Oho'96.
- [2] “大型ハドロン計画陽子リニアックワーキンググループ報告I”, KEK Internal 88-8, 1988.
- [3] “大型ハドロン計画陽子リニアックワーキンググループ報告II”, KEK Internal 90-16, 1990.
- [4] “JHF Accelerator design study report”, KEK Report 97-16, 1998.
- [5] 上野彰, “RFQリニアック”, 大型ハドロン計画陽子リニアックワーキンググループ報告II, KEK Internal 90-16, 1990.
- [6] D. Schrage, et al., “A New Fabrication Technique”, Proc. LINAC94, p152, 1994.
- [7] A. Ratti, et al., “Conceptual Design of the SNS RFQ”, Proc. LINAC98, p276, 1998.
- [8] K. R. Crandall, “Effects of Vane-Tip Geometry on the Electric Fields on Radio-Frequency Quadrupole Linacs”, Los Alamos National Laboratory Technical Note, LA-9695-MS, 1983.
- [9] K. R. Crandall et al., RFQ Design Codes, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1836.
- [10] T. P. Wanler, “Space-Charge Limits in Linear Accelerators”, Los Alamos National Laboratory Technical Note, LA-8338, 1980
- [11] Los Alamos Accelerator Code Groupe, <http://laacg1.lanl.gov/>
- [12] MAFIA4, CST GmbH, Darmstadt, Germany.
- [13] A. Ueno et al., “RF-Test of a 324-MHz, 3-MeV, H⁻ RFQ Stabilized with PISL's”, 2000 Linear Accelerator Conference.
- [14] A. Ueno et al., “First beam test of a volume production H⁻ ion source with a LEBT”, 2000 Linear Accelerator Conference.
- [15] <http://accelconf.web.cern.ch>