

1 GeV リニアック検討資料

1 GEV LINAC DESIGN NOTE

題目(TITLE) RFQの真空排気

著者(AUTHOR) 上野

概要(ABSTRACT)

RF加速空洞の接続部において、真空シールとRFコンタクトの両者を確実にこなう最も良い方法は溶接であろう。しかし、JHP用のRFQの場合、共振周波数が432MHzと高いために空洞のサイズが小さくなる、従って、ヴェイン間距離等の許容誤差の絶対値も共振周波数に比例して小さくなる。また、全長がRFの波長の約4倍の2.7mになるので、RF場の高次モードの周波数が加速モードの周波数に近くなり、ヴェイン間距離等の許容誤差がさらに小さくなる。このため、溶接による歪が許容誤差を越えることが危惧される。さらに、RFQの材料として鍛造した無酸素銅(0.2%銀入り銅)を用いるので、溶接する際の熱が全体に伝わりやすく(電子ビーム溶接であっても)、そのため、材料が焼きなまされ、RFQ据付のための移動時等に変形が生じる可能性も高くなる。一方、接続部にヘリコを用いて、ヴェイン間距離等の精度と真空シールに十分な面圧の両者を制御することもほぼ不可能と考えられる。

そこで、JHP用のRFQでは、RFQ空洞を真空容器の中に入れる二重構造を採用し、真空シール(RFQ空洞内)と真空シール(真空容器)を別々の場所で行なうことにした。これにより、真空シールとRFコンタクトの各々をより信頼性高く行なうことが可能になると考えられる。ここでは、RFQ本体に設置する真空ポートのコンダクタンスやRF場の染みだし、真空容器に要求されるポンプの排気スピードの評価結果を示す。

KEY WORDS: Ion Source, RFQ, DTL, Magnet, Monitor, Beam Dynamics, Transport, Vacuum, Cooling, Klystron, Low Level RF, High Power RF, Modulator, Control, Operation, Radiation, Others

1. 通常のアウトガスとイオン源からのガス流入に関する評価

表面からのアウトガスとイオン源からのガス流入を考慮し、真空容器に取付ける真空ポンプの容量を決定する。この際、真空度としては、真空容器内の平均的な値のみを考え、最も重要なRFQ内の真空度については、次節で評価することにする。

RFQの内表面の面積 A_{RFQI} 、外表面及び合わせ面の面積 A_{RFQO} 、チェンバーの内表面の面積 A_{CH} は、ボルト穴等を見捨るとほぼ次の値となる。

$$\begin{aligned} A_{RFQI} &= \{8 \times 3(\text{内表面})\} \times 4(4\text{ピ-ス}) \times 270(\text{全長}) \\ &= 2.59 \times 10^4 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{RFQO} &= \{36.5(\text{外表面}) + 11 \times 2(\text{合わせ面})\} \times 4(4\text{ピ-ス}) \times 270(\text{全長}) \\ &= 6.32 \times 10^4 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{CH} &= \pi \times 100(\text{チェンバーの内径}) \times 270(\text{全長}) \\ &= 8.48 \times 10^4 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

ボルト穴等の表面積を補正するために1.2倍して、全表面積 A を概算すると次の値になる。

$$\begin{aligned} A &= (A_{RFQI} + A_{RFQO} + A_{CH}) \times 1.2 \\ &= 2.09 \times 10^5 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

従って、全表面からのアウト・ガス Q_A は、次のように計算される。

$$\begin{aligned} Q_A &= A \times 3.5 \times 10^{-10} \\ &= 7.32 \times 10^{-5} \text{ Torr} \cdot \text{l/sec} \end{aligned}$$

ここで、 3.5×10^{-10} (Torr·l/cm²·sec)は、銅の単位面積当たりのガス放出量である(久保田氏に調べていただく)。ガスとしては、酸素(O₂:分子量32)を考えることにする(H₂O:分子量18、または、N₂:分子量28が主なのかも知れないが、安全を見て、これらの中では排気が最も難しいO₂を考えておくことにする)。

次に、イオン源からのガス流量 Q_I について考える。イオン源とRFQの間に直径 $D=1.5\text{cm}$ 、厚さ $h=1\text{cm}$ の穴がある場合を考えると、コンダクタンス C_I は、次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} 1/C_I &= 1/(65 \cdot D^3/h \cdot \sqrt{M}) + 1/(62.5 \times \pi (D/2)^2/\sqrt{M}) \\ &= 1/(65 \cdot 1.5^3/1 \cdot \sqrt{M}) + 1/(62.5 \times \pi (1.5/2)^2/\sqrt{M}) \\ &= \sqrt{M}/219.4 + \sqrt{M}/110.4 \end{aligned}$$

ここで、イオン源からのガスは、水素分子なので、分子量 $M=2$ とすると、 C_1 は次の値になる。

$$\begin{aligned} C_1 &= 73.4/\sqrt{M} \\ &= 51.9 \text{ l/sec} \end{aligned}$$

従って、ガス流量 Q_1 は、次の式で計算される。

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_1 \times \Delta p = C_1 \times (p_1 - p_{\text{RFQ}}) \\ &= 51.9 \times (1 \times 10^{-6}) = 5.19 \times 10^{-5} \text{ Torr} \cdot \text{l/sec} \end{aligned}$$

但し、 A_{hole} は穴の断面積、 M は水素分子の分子量である。また、イオン源の真空度 p_1 は、 1×10^{-6} Torrを考えている。RFQ側の真空度 p_{RFQ} は、目標値 1×10^{-8} Torrを考え、この計算では無視している。

森氏の話では、イオン源の出口の真空度を 1×10^{-5} Torrと考えて欲しいとのことであった。しかし、RFQ入り口の真空度は、入り口付近の局所的なヴェイン間の真空度を意味し、このRFQのヴェイン間の真空度としては、最低でも 1×10^{-6} Torrは欲しいと考えられる。従って、LEBTが多少長くなっても、RFQの入り口の真空度を 1×10^{-6} Torr以下にしなければならなくなる(LEBTの設計が非常に重要となる)。

以上より、ガス負荷として、酸素 7.32×10^{-5} Torr·l/sec、水素 5.19×10^{-5} Torr·l/secということになる。先ず、単純にこれらの和を全ガス負荷 Q と考えると、

$$Q = Q_A + Q_1 = 1.25 \times 10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/sec}$$

となる。このとき必要なポンプの排気スピード S は、次の式で計算される。

$$S = Q/p_{\text{RFQ}} = 1.25 \times 10^{-4} / 1 \times 10^{-8} = 12500 \text{ l/sec}$$

かなり大きな排気量であるが、不可能な値ではないと考えられる(同様に、RFQ入り口の真空度を 1×10^{-5} Torrとして排気スピードを計算すると、約60000 l/secとなり現実的ではなくなる。しかも、この場合は先に述べたように、RFQ入り口付近の局所的なヴェイン間の真空度は非常に悪いものになってしまう)。尚、到達真空度のみを考えるならば、 $2 \sim 3 \times 10^{-8}$ でも十分であるので、排気スピードも4000~6500 l/sec程度が妥当であるということになる。しかし、排気スピードを決定するには、次節で示す真空引きの時定数についての考察が必要となる。

また、排気量を稼ぐだけなら、クライオ・ポンプが最も有利であるが、クライオ・ポンプは水素分子に弱く、今回のように、酸素分子と水素分子がほぼ同等の割合で存在しそうな場合には、クライオ・ポンプとターボ・ポンプを併用することが賢いであろう。

LANLのGTA用RFQでは、8"のターボ・ポンプ(500 l/sec?)2台と8"のクライオ・ポンプ

(1500~2000 l/sec?)1台を併用するとのことであった。RFQ入り口(イオン源側)の真空度や真空容器の大きさ等は、よくわからないが、外部真空容器の真空度は 1×10^{-8} Torr、RFQ内の真空度は、運転中で 2×10^{-6} Torr、RFのみで 1×10^{-7} Torrを目標にしているとのことであり、RFQ内部の真空度は、外部真空容器の真空度から計算で求めるとのことであった。

2. RFQ本体に取付ける真空ポートのコンダクタンスとRFの染みだし

次の問題は、RFQ本体にどの程度の真空ポートが必要なのかということになる。真空ポートのコンダクタンスを計算するために教科書に示されている次の式を用いる。

$$C(l) = 333 \alpha A^2 / \{H \cdot (1 + 16 \alpha A / 3H) \cdot \sqrt{M}\}$$

この式は、長さ l の不定形のダクトに対する式である。ここで、 α はダクトの断面形状に応じた補正係数であり(円形: $\alpha=1.00$ 、三角形: $\alpha=1.24$ 、長方形:計算結果がグラフで与えられている)、 A と H は断面の断面積と周長である。

まず、RFQの1/4空胴を真空ダクトと考え、そのコンダクタンスを計算する。断面の面積 A と周長 H は、形状から数値計算で求め、各々、次の値を得た。

$$A = 33.8 \text{ cm}^2$$

$$H = 24.1 \text{ cm}^2$$

しかし、この様な複雑な形状の断面に対する補正係数 α は、教科書に示されていないので、断面積と周長が一致する長方形に対する値($\alpha=1.13$)を用いることにする。この時、長さ l のRFQ1/4空胴のコンダクタンスは、次のように計算される。

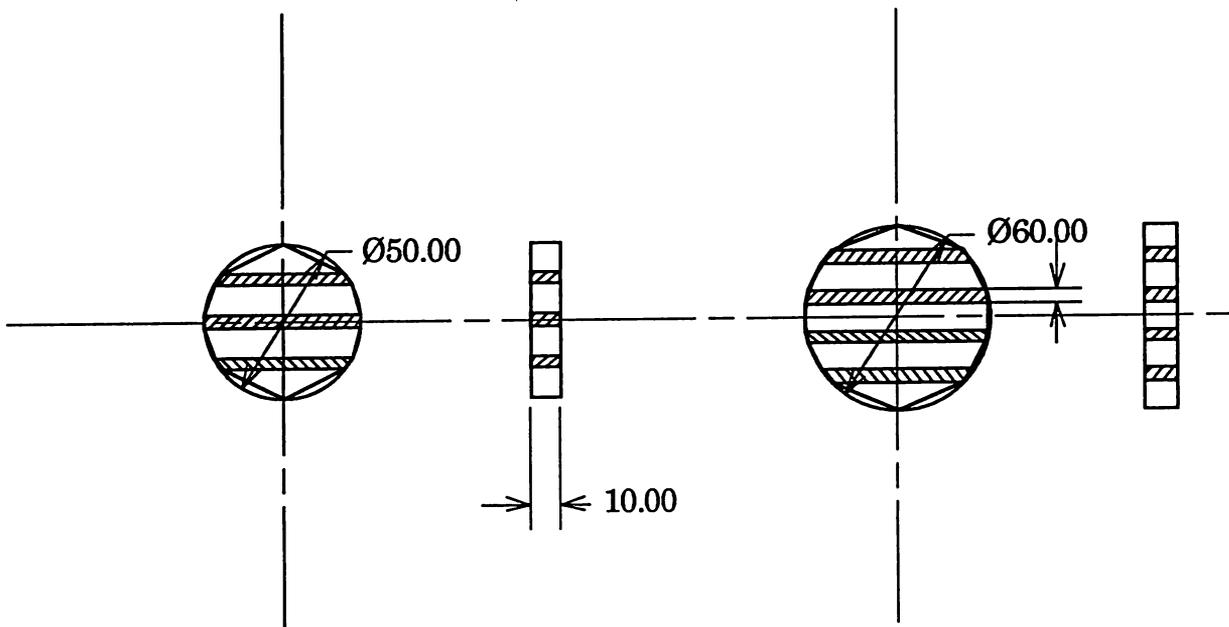
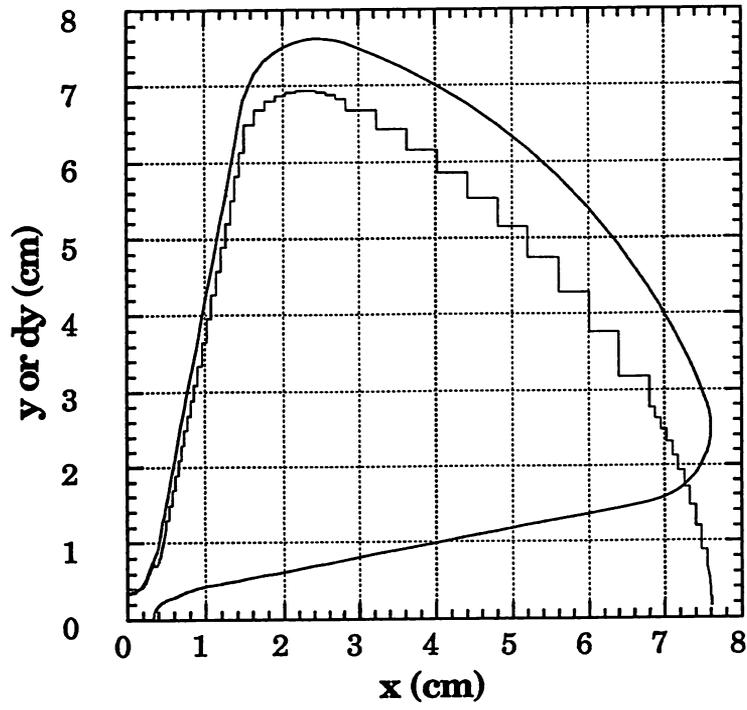
$$\begin{aligned} C(l) &= 333 \times 1.13 \times 33.8^2 / \{24.1 \cdot (1 + 16 \times 1.13 \times 33.8 / 3 / 24.1) \cdot \sqrt{M}\} \\ &= 1.78 \times 10^4 / \{(1 + 8.45) \cdot \sqrt{M}\} \\ &= 3.15 \times 10^3 / (1 + 8.45) \quad \{O_2: M=32\} \end{aligned}$$

RFQの真空ポートには、RF染みだし防止用のスリットが必要となる。この部分の形状は、真空のコンダクタンスとRFの染みだし量の妥協点として決定される。そこで、まず、RF染みだし量とスリットの形状との関係を示しておく。

遮断周波数より低い周波数のRF電磁場は、導波管内では、次式の様に指数関数的に減衰する(遮断現象による減衰については、「マイクロ波理論入門」のp.73参照)。

$$E(z) = E_0 \exp(-\alpha z)$$

ここで、 E_0 は、導波管の入り口(発信機が導波管内にあればその位置)での電場の強さであ



り、 α は、減衰定数と呼ばれ次式で求められる。

$$\begin{aligned}\alpha &= \sqrt{(k_c^2 - k^2)} \\ &= \sqrt{4\pi^2 \mu \epsilon (f_c^2 - f^2)} \\ &= \sqrt{4\pi^2 (f_c^2 - f^2) / c^2} \quad (\text{真空中})\end{aligned}$$

但し、 c は真空中の光速、 f_c は導波管の遮断周波数、 f はRFの周波数である。遮断周波数は、導波管の形(矩形、円形等)やモード(電磁場の形)により異なるので、代表的なものを遮断定数 $k_c^2 = 4\pi^2 \mu \epsilon f_c^2$ の形で示しておく。

(1). 矩形導波管内の TE_{mn} 波及び TM_{mn} 波(両モードとも同じ式になる)

$$k_c^2 = m^2 \pi^2 / a^2 + n^2 \pi^2 / b^2 \quad (a, b: \text{矩形導波管の断面の2辺の長さ})$$

*ここでは、遮断現象を利用してRFの染みだしを防止することを考えているので、遮断周波数のうち最も低いもの、即ち、 $k_c^2 = \pi^2 / a^2 (m=1, n=0, a \leq b)$ が重要となる。

(2). 円形導波管内

式が複雑なのでTEとTMの各モードで最も周波数の低い2つを示す。

$$TE_{11}: k_c^2 = 1.841^2 / a^2 \quad (a: \text{円形導波管の半径})$$

$$TM_{01}: k_c^2 = 2.405^2 / a^2 \quad (a: \text{円形導波管の半径})$$

スリットは、近似的に矩形導波管(スリットの幅が導波管の短辺 a) と考えられるので、減衰定数は次式のようになる。

$$\alpha = \sqrt{(\pi^2 / a^2 - 4\pi^2 f^2 / c^2)}$$

従って、スリットの奥行きを h とすると電場の減衰率は、次式で計算できる(E_s : スリット出口の電場)。

$$\begin{aligned}E_s / E_0 &= \exp(-\alpha h) \\ &= \exp\{-h \sqrt{(\pi^2 / a^2 - 4\pi^2 f^2 / c^2)}\}\end{aligned}$$

スリットの幅を $a=0.88\text{cm}$ 、 0.95cm 、 1cm とすると、 h の値によって、減衰率は次のようになる。

	$a=0.88$	$a=0.95$	$a=1.00$
$E_s / E_0 (h=0.25\text{cm})$	=0.410	0.438	0.456
$E_s / E_0 (h=0.50\text{cm})$	=0.168	0.192	0.208
$E_s / E_0 (h=0.75\text{cm})$	=0.0688	0.0838	0.095
$E_s / E_0 (h=1.00\text{cm})$	=0.0282	0.0367	0.043
$E_s / E_0 (h=1.25\text{cm})$	=0.0116	0.0160	0.020

$$E_s/E_0(h=1.50\text{cm}) = 0.00473$$

$$0.00702$$

$$0.009$$

さらに、スリットの後にあるRFQ本体に開けた円形ダクトでの減衰率も評価しておく。ダクトの長さをLとすると、スリットの場合と同様に減衰率は次式で計算される。

$$\begin{aligned} E/E_s &= \exp(-\alpha L) \\ &= \exp\{-L\sqrt{(1.841^2/a^2 - 4\pi^2 f^2/c^2)}\} \end{aligned}$$

ダクトの半径が2.5cmと3cmの場合、Lの値によって、減衰率は次のようになる。

	a=2.5	a=3.0
$E/E_s(L=1.0\text{cm})$	=0.482	0.545
$E/E_s(L=2.5\text{cm})$	=0.161	0.219
$E/E_s(L=5.0\text{cm})$	=0.026	0.048
$E/E_s(L=7.5\text{cm})$	=0.0042	0.0105
$E/E_s(L=10.0\text{cm})$	=0.0007	0.0023
$E/E_s(L=12.5\text{cm})$	=0.0001	0.0005

従って、幅1cm、奥行き1cmのスリットと半径3cm長さ7.5cmのダクトがあれば、外部に漏れるRF電場の強さの減衰率は、 $0.043 \times 0.0105 = 4.5 \times 10^{-4}$ となる。ここで、外部に漏れだすRFのパワーを粗く評価しておく。RFQ空胴の外壁の表面積(磁場の強い部分)は、大雑把に $A_o = 16\pi \times 270 = 1.36 \times 10^4 \text{cm}^2$ 、真空ポートの面積 $A_v = \pi 3^2 = 28.3 \text{cm}^2$ である。従って、RFQ内部の電磁場のパワーPを1MW、真空ポートの数を20個とすると、外部に漏れだすパワーpは、次式で計算される。

$$\begin{aligned} p &= P \times (E/E_0)^2 \times n A_v / A_o \\ &= (1 \times 10^6) \times (4.5 \times 10^{-4})^2 \times (20 \times 28.3) / (1.36 \times 10^4) \\ &= 0.0084 \text{ W} \end{aligned}$$

よって、RFの外部への漏れだしは問題ないと考えられる(?)が、電磁場の染みだしによる空胴の共振周波数の変化、及び、電磁場分布に与える影響は評価しておかなければならない。

さて、本題の真空ポートのスリット部のコンダクタンスに話を戻すことにする。真空ポートは、円形の部分に等間隔のスリットを開けて作ることにする。スリットの幅は1cm程度かつ1cm以下、スリットの奥行きは1cm、スリット間に残す導体の部分の幅は0.4cmとする。直径5cmと6cmの場合を図示しておく。直径5cmの場合のスリットの幅は $(5 - 0.4 \times 3) / 4 = 0.95 \text{cm}$ であり、直径6cmの場合のスリットの幅は $(6 - 0.4 \times 4) / 5 = 0.88 \text{cm}$ である。スリットの各領域(形状が一定ではないのでコンダクタンスを個別に計算し、合計してスリット部のコンダクタンスを求める。各領域のコンダクタンスは、1/4空胴のコンダクタ

ンスと同様の方法で求める。

(1). 直径5cmの場合

$$\begin{aligned}
 C_s(5) &= \sum 333 \alpha A^2 / \{H \cdot (1 + 16 \alpha A / 3H) \cdot \sqrt{M}\} \\
 &= [333 \times 1.38 \times 1.86^2 / \{8.28 \times (1 + 16 \times 1.38 \times 1.86 / 3 / 8.28) \times \sqrt{32}\}] \times 2 \\
 &\quad + [333 \times 1.30 \times 4.48^2 / \{11.4 \times (1 + 16 \times 1.30 \times 4.48 / 3 / 11.4) \times \sqrt{32}\}] \times 2 \\
 &= 12.8 \times 2 + 36.2 \times 2 \\
 &= 97.9
 \end{aligned}$$

(2). 直径6cmの場合

$$\begin{aligned}
 C_s(6) &= \sum 333 \alpha A^2 / \{H \cdot (1 + 16 \alpha A / 3H) \cdot \sqrt{M}\} \\
 &= [333 \times 1.41 \times 1.87^2 / \{8.84 \times (1 + 16 \times 1.41 \times 1.87 / 3 / 8.84) \times \sqrt{32}\}] \times 2 \\
 &\quad + [333 \times 1.35 \times 4.69^2 / \{12.6 \times (1 + 16 \times 1.35 \times 4.69 / 3 / 12.6) \times \sqrt{32}\}] \times 2 \\
 &\quad + 333 \times 1.37 \times 5.22^2 / \{13.6 \times (1 + 16 \times 1.37 \times 5.22 / 3 / 13.6) \times \sqrt{32}\} \\
 &= 12.7 \times 2 + 37.8 \times 2 + 42.4 \\
 &= 143.3
 \end{aligned}$$

尚、断面積Aや周長Hは、図示したように三角形や台形で近似して求めている。

最後に、RFQ本体に加工する円形のダクトのコンダクタンスを計算しておく。ダクトの半径をa、長さをLとするとコンダクタンスは、次の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 C_c(L) &= 333(\pi a^2)^2 / \{2\pi a \cdot (L + 16(\pi a^2) / 3 / (2\pi a)) \cdot \sqrt{M}\} \\
 &= 333(\pi a^2)^2 / \{2\pi a \cdot (L + 8a/3) \cdot \sqrt{M}\} \\
 &= 523a^3 / \{(L + 2.67a) \cdot \sqrt{M}\} \\
 &= 523a^3 / \{(L + 2.67a) \cdot \sqrt{32}\} \\
 &= 92.5a^3 / (L + 2.67a)
 \end{aligned}$$

従って、半径2.5cmと3.0cmの場合、Lによりコンダクタンスは次のようになる。

	a=2.5	a=3.0
Cc(L= 2.5cm)	=157.6	237.8
Cc(L= 5.0cm)	=123.8	192.0
Cc(L= 7.5cm)	=102.0	161.1
Cc(L=10.0cm)	=86.69	138.7
Cc(L=12.5cm)	=75.38	121.8

最後に、真空ポートの直径を5cmと6cmした場合に、RFの染みだしと真空のコンダクタンス両方を考慮して適当と思われる形状についてトータルのコンダクタンスを計算しておく(2つの場合についてRFの染みだし量は一致させることにする)。尚、真空ポートは、

等間隔で計16個ある場合を考える。

(1). 直径6cmの場合

スリットの奥行きを1cm、ポートの長さを7.5cmとすると、RFの減衰率は次の様になる。

$$\begin{aligned} E/E_0 &= E/E_s \times E_s/E_0 = 0.0282 \times 0.0105 \\ &= 2.96 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

この時、コンダクタンスは、次の3つの部分が直列になっているとして計算される。

a. RFQ空腔内

$$\begin{aligned} C(l=270/8) &= 3.15 \times 10^3 / (33.75 + 8.45) \\ &= 74.64 \end{aligned}$$

真空ポートには、このコンダクタンスのダクトが2つ並列に(T字型に)つながっているの
で、実効的なコンダクタンスは、2倍になる。

$$\begin{aligned} C_{\text{RFQ}} &= 74.64 \times 2 \\ &= 149.3 \end{aligned}$$

b. スリット

$$C_s(6) = 143.3$$

c. 真空ポートのダクト

$$C_c(7.5) = 161.1$$

従って、1ポート当たりのコンダクタンスは、次のようになる。

$$\begin{aligned} C(6) &= 1 / (1/C_{\text{RFQ}} + 1/C_s(6) + 1/C_c(7.5)) \\ &= 50.3 \end{aligned}$$

真空ポートの数は、16なので、トータルのコンダクタンスは16倍になる。

$$\begin{aligned} C_{\text{total}}(6) &= 50.3 \times 16 \\ &= 804.7 \text{ l/sec} \end{aligned}$$

尚、ガスの主成分が酸素分子(M=32)ではなく水分子(M=18)であればコンダクタンスは少
し大きくなる。

$$\begin{aligned} C_{\text{total}}(\text{H}_2\text{O}) &= 804.7 \times \sqrt{(32/18)} \\ &= 1072.9 \text{ l/sec} \end{aligned}$$

(2). 直径5cmの場合

スリットの奥行きは上記の場合と同様に1cmとすると、ポートの長さを6.1cmとした
ときにRFの減衰率とポートの面積を掛けたもの(染みだし量に比例)がほぼ同じ値になる。

$$\begin{aligned} E/E_0 \times A_s/A_6 &= E/E_s \times E_s/E_0 \times 0.694 = 0.0367 \times 0.0116 \times 0.694 \\ &= 2.96 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

コンダクタンスは、上記の場合と同様に次の3つの部分が直列になっているとして計算さ
れる。

a. RFQ空腔内

$$C_{\text{RFQ}} = 149.3$$

b.スリット

$$C_s(5) = 97.9$$

c.真空ポートのダクト

$$C_c(6.1) = 113.1$$

従って、1ポート当たりのコンダクタンスは、次のようになる。

$$C(5) = 1/(1/C_{RFQ} + 1/C_s(5) + 1/C_c(6.594)) \\ = 38.8$$

真空ポートの数は、16なので、トータルのコンダクタンスは16倍になる。

$$C_{total}(5) = 38.8 \times 16 \\ = 620.5 \text{ l/sec}$$

従って、真空ポートの径を6cmにする場合と、5cmにする場合とで、コンダクタンスに20%以上の違いが出ることになる(RFの染みだし量は同等でも)。

3. RFQ内の到達真空度と放電により生ずるアウトガスの排気する場合の時定数

イオン源から流入するガスは、全てRFQ内を通過することになる。このガス負荷は、第1節で述べたように次の値である。

$$Q_i = 5.19 \times 10^{-5} \text{ Torr} \cdot \text{l/sec}$$

次に、RFQの内表面からの通常のアウトガスは、第1節で行なった計算と同様にして、次のような値が得られる。

$$Q_{AI} = A_{RFQI} \times 3.5 \times 10^{-10} \\ = 2.59 \times 10^4 \times 3.5 \times 10^{-10} \\ = 9.07 \times 10^{-6} \text{ Torr} \cdot \text{l/sec}$$

従って、合計のガス負荷は、次の様になる。

$$Q = Q_i + Q_{AI} \\ = 6.10 \times 10^{-5} \text{ Torr} \cdot \text{l/sec}$$

真空容器内の真空度を 1×10^{-8} Torrとした場合と 5×10^{-8} Torrとした場合のRFQ内の平均の真空度は次のようになる。

$P_{out} = 1 \times 10^{-8} \text{ Torr}$	$P_{out} = 5 \times 10^{-8} \text{ Torr}$
$P_{RFQ} = 1 \times 10^{-8} + 6.10 \times 10^{-5} / 804.7$	$5 \times 10^{-8} + 6.10 \times 10^{-5} / 804.7$
$= 8.58 \times 10^{-8} \text{ Torr}$	$1.26 \times 10^{-7} \text{ Torr}$

よって、到達真空度に関しては、真空容器内の真空度が 1×10^{-7} Torr以下にできれば問題ないと考えられる。

しかし、RFQでは表面電場が非常に強いので、ある時間間隔で定常的に放電が起こっていると考えなければならない。放電が生じた場合には、表面が加熱されて多量のアウトガスが生じることになる。このアウトガスの量がどの程度かは実際にRFQの運転を行って見なければわからないが、このアウトガスを十分な排気速度で真空引きをしなければ放電が持続することになる。

LANLで集めた情報では、GTA様のRFQでは、RFQの真空ポートの排気速度をRFQ空胴の容積の10倍にしているとのことであった。GTA様のRFQの繰り返し率は10Hzなので、このことは、パルスの間隔(10Hzなら0.1sec)で真空度が $1/e$ になるように真空ポートの排気速度を決定していることになるようである。パルスの間隔で真空度がどの程度改善されればよいのかは、現時点では彼らの経験を頼りにするしかないであろう。これをJHP用RFQにあてはめるとRFQ空胴の容積の50倍の排気速度が必要になることになる。

JHP用RFQの空胴の容積を次に示す。

$$\begin{aligned} V &= S \times L \\ &= 33.8 \times 4 \times 270 \text{ cc} \\ &= 36.5 \text{ l} \end{aligned}$$

従って、要求される排気速度は、次のような値となる。

$$\begin{aligned} C &= 36.5 \times 50 \\ &= 1825 \text{ l/sec} \end{aligned}$$

直径6cmの真空ポートを20個設ければ、排気速度は次のようになる。

$$\begin{aligned} C &= 50.3 \times 20 && = 1006 \text{ l/sec (酸素分子)} \\ &= 1006 \times \sqrt{(32/18)} && = 1341 \text{ l/sec (水分子)} \end{aligned}$$

LANLの基準からすると少し排気速度が不足しているが、真空ポートを20より増やすことは、難しいと考えられる。但し、真空ポートはヴェイン間電圧が高くなりそうなところに多く配置することは考えることにする。

3. 真空容器からの真空排気速度

直径100cmのチェンバ(JIS1000)を真空容器として考えている。この時の有効容積は、次式のようにRFQの外容積を差し引いたものになる。

$$V = V_{100} - V_{RFQ}$$

$$\begin{aligned}
&= \pi 50^2 \times 270 \cdot 36.5^2 \\
&= 2.1 \times 10^6 \text{ cc} \\
&= 21001
\end{aligned}$$

6500 l/secの真空ポンプを真空容器に取付けるとすると、約1/3sec程度で真空度が1/eになることになる。

真空システム全体を考えて、RFQの真空排気を評価し直してみる。まず、定常運転での各部の平均の真空度の目標値は、前述したように次のようなものである。

- a. 真空容器内: 2×10^{-8} Torr(真空ポンプの排気速度6500l/sec)、RFQ空洞内: 1×10^{-7} Torr

次にヴェイン間で放電が生じた後、RFQ空洞内全体の真空度が 1×10^{-5} Torrになる程度のアウトガスが放電により追加されたとする。この時、放電によるアウトガスに対するRFQ空洞部の真空排気を無視すると、各部の真空度は当然次のようになる。

- b. 真空容器内: 2×10^{-8} Torr、RFQ空洞内: 1×10^{-5} Torr

パルスの間隔にRF場が無くなると放電が止むので、次のパルスの直前(約1/50sec後)には、真空度は、ほぼ次のようになる。ここで、放電によるアウトガスに対する真空容器からの真空排気は無視している。

- c. 真空容器内: $2 \times 10^{-8} + 1 \times 10^{-5} (1 - e^{-1006/36.5/50}) \times 36.5$ (RFQ空洞内容積)/2100= 9.37×10^{-8} Torr、
RFQ空洞内: $1 \times 10^{-5} \times e^{-1006/36.5/50} = 5.8 \times 10^{-6}$ Torr

この真空度で次のパルスでも放電が止ったままであれば、さらに時間が経過して、RFQ空洞内と真空容器内の真空度が一致した時、真空度は次のようになる(放電によるアウトガスに対する真空容器からの真空排気を無視)。

- d. 真空容器内=RFQ空洞内: $(2 \times 10^{-8} \times 2100 + 1 \times 10^{-5} \times 36.5) / 2136.5 = 1.90 \times 10^{-7}$ Torr

放電により追加されるアウトガスの量とRFQ内の真空度がどの程度なら持続放電が起きないのかわからないので、この計算はほとんど意味がないかも知れない。しかし、とにかくこの計算結果について考察してみる。この計算では、RFQ空洞内の真空度がもう少し良くなって欲しい感じがする。RFQの真空度は十分良さそうなので、RFQの真空度で持続放電が起きさえしなければ、真空容器に取付ける真空ポンプの排気速度は十分であろう(もう少し減らしてもよいかも知れない)。しかし、ヴェイン間での放電は局所的に起こるものであり、真空ポートを放電の起こりそうな所の近くに分布させることにより、実効的な真空の排気速度は少し高くなると期待される。これによりパルスの間隔の時間内にRFQ空洞内の真空度が 10^{-6} Torrの良いところになれば、持続放電は起きないのではないかと

(起きないことを祈りたい)。

最後に、真空容器の直径を80cmにした場合の同様な計算も示しておく。

a. 真空容器内: 2×10^{-8} Torr(真空ポンプの排気速度6500l/sec)、RFQ空洞内: 1×10^{-7} Torr

次にヴェイン間で放電が生じた後、RFQ空洞内全体の真空度が 1×10^{-5} Torrになる程度のアウトガスが放電により追加されたとする。この時、放電によるアウトガスに対するRFQ空洞部の真空排気を無視すると、各部の真空度は当然次のようになる。

b. 真空容器内: 2×10^{-8} Torr、RFQ空洞内: 1×10^{-5} Torr

パルスの間隔にRF場が無くなると放電が止むので、次のパルスの直前(約1/50sec後)には、真空度は、ほぼ次のようになる。ここで、放電によるアウトガスに対する真空容器からの真空排気は無視している。

c. 真空容器内: $2 \times 10^{-8} + 1 \times 10^{-5} (1 - e^{-1006/36.5/50}) \times 36.5$ (RFQ空洞内容積)/1360= 1.45×10^{-7} Torr、
RFQ空洞内: $1 \times 10^{-5} \times e^{-1006/36.5/50} = 5.8 \times 10^{-6}$ Torr

この真空度で次のパルスでも放電が止ったままであれば、さらに時間が経過して、RFQ空洞内と真空容器内の真空度が一致した時、真空度は次のようになる(放電によるアウトガスに対する真空容器からの真空排気を無視)。

d. 真空容器内=RFQ空洞内: $(2 \times 10^{-8} \times 1360 + 1 \times 10^{-5} \times 36.5) / 1396.5 = 2.81 \times 10^{-7}$ Torr

真空容器の直径が80cm程度でも100cmの場合と同様になんとかなるのではないかと考えられる。但し、真空容器の直径をさらに小さくしていく場合には、その容積を瞬時に(1/50sec間に)十分真空排気しなければならなくなる。この場合は、RFQと真空容器との間のコンダクタンスも悪くなると予想されるので、これらの計算もしなければならなくなるであろう。もっとも、RFカップラ等のボルトを真空容器の外側から手を挿入して行なおうと考えているので、こちらからの要請で真空容器がそんなに小さくはならないであろうが。

4. まとめ

真空容器の直径80~100cm程度、RFQ本体に設置する真空ポート(直径6cm)20箇所で大丈夫であろう。