

1.はじめに

加速器における真空の最も重要な役割は、加速・蓄積される粒子と粒子が通るビームダクト内の残留気体分子との衝突を減らしてビームの損失を防ぎ、ビームの寿命(Beam Lifetime)を実験に十分使用できるほど確保することである。真空システムとは、ビームダクト内の真空を生成・維持・コントロールするシステムをいう。

この講義では、高エネルギー物理学研究所(KEK)で計画されているB-Factory(KEKB)の蓄積・衝突リングの真空システムの設計について具体的に説明する。加速器真空システム設計の基本的な流れをこの具体例を通して把握してもらえば幸いである。なお、真空の一般的知識はある程度持っているという前提で話を進める[1]。加速器の真空一般については、既に小林がOHO'87にて[2]、またTRISTAN Photon Factory (PF)の真空については堀がOHO'93にて[3]詳しく述べているので参考にさせていただきたい。

KEKBの蓄積・衝突リングは8.0GeVの電子を蓄積するHigh Energy Ring (HER)と3.5GeVの陽電子を蓄積するLow Energy Ring (LER)の二つのリングからなる。両リングの真空システムに関連する主なパラメータを、同じ蓄積・衝突リングであるKEKのTRISTAN AR(Accumuration Ring)、TRISTAN MR(Main Ring)のそれらとともに表1.に示している。これまでのリングに比べ、真空の立場からみて、

- ・ 大きいビーム電流で運転される。

- ・ バンチ長が短い。
- ・ 高いルミノシティー(Luminosity)が要求される。

ということが大きな特徴である。そのため、真空システムの設計に当たっては以下の点に留意する必要がある。

- ・ ビームから発するシンクロトロン放射光(Synchrotron Radiation、SR)のパワーは強く、また光子数も多くなる。また、ビームダクトの外に漏れる放射線(X線)も強くなる。熱的強度が高く、またガス放出率の小さい材料でビームダクトを製作する。
- ・ ビームから見たダクトのインピーダンス(Impedance)を小さくしなければならない。具体的には、ダクト内面の段差を極力なくす必要がある。
- ・ 信頼性の高いシステムを構築しなければならない。

図1.におおまかな設計の流れ(フローチャート)を示している。以下、およそこの流れに沿って説明していく。しかし、実際には各項目は有機的に連結しているので、各項目の評価はほぼ平行して進められる。

設計は現在も進行中であり、ここではリングのアーク部の真空システムについて述べる。アーク部は周長約3000mのうち約2200mを占め、ユニットセル(Unit Cell)と呼ばれる偏向電磁石(Bマグネット、Bending Magnet)2個と四極電磁石(Qマグネット、Quadrpole Magnet)4個を

	LER	HER	AR	MR
ビームエネルギー: E_b [GeV]	3.5	8.0	6.5	30
周長: C [m]	3013		377	3018
ルミノシティー: L [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1×10^{34}		(1×10^{31})	1×10^{31}
ビーム電流: I_b [mA]	2600	1100	40	8×2
バンチ長: σ_z [cm]	0.5		1.5	1.2
バンチ数: n	5106		1	2×2
バンチあたりの粒子数 N/n	3.2×10^{10}	1.4×10^{10}	3.1×10^{11}	2.5×10^{11}
Bマグネットの長さ: [m]	0.85	4.30	2.60	5.86
Bマグネット部の曲率: ρ [m]	16.2	82.1	23.17	246.53
アーク部ユニットセル長: L_n [m]	35.4		28.8	16.12
アーク部ユニットセル数	60		28	116

表1.KEKB(HERとLER)、AR、MRの主なパラメータ。

一組とした35.4mの単位を周期的に配置したものである(図3.参照)。また、説明では便宜的に電子について述べているが、特に指定しない限り陽電子についても同様である。

なお、真空に関する単位として、従来圧力は Torr、体積は l または cm³ が用いられてきた。最近ではSI単位系が推奨されていることもあり、圧力、体積として Pa (=N/m²)、m³ が使用されることが多い。ここでは、圧力としては Pa を使用する。ただし、排気速度が l/s でまだ広く表されていることもあり、体積の単位は l を用いる(やや変則ではあるが)。ちなみに、1 Torr = 133 Pa、1 気圧 = 760 Torr = 1.01×10⁵ Pa である。

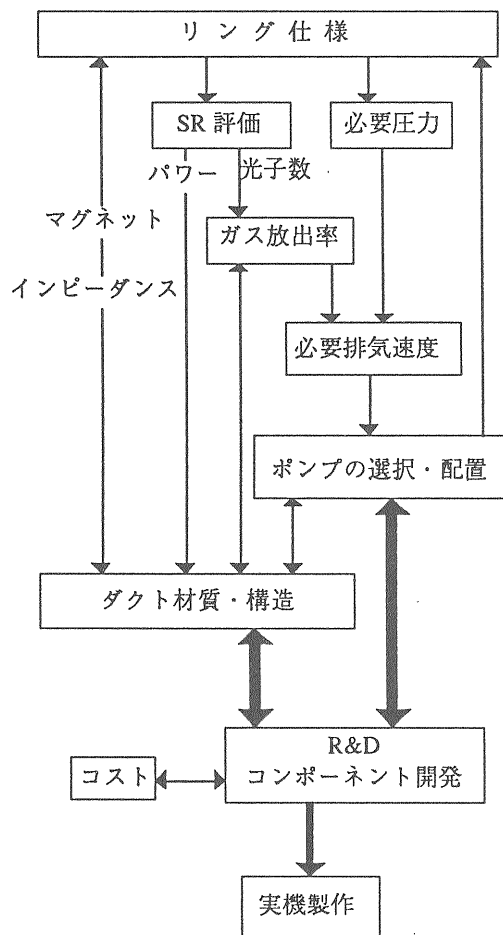


図1. 設計の概略フローチャート。実際には各項目は有機的に連結しており、必要に応じてフィードバックされる。

2. シンクロトロン放射光

以下の説明で重要となるので、シンクロトロン放射光の性質について最初にまとめておく。シンクロトロン放射光の発生機構など詳細は他の解説を参照されたい[4]。

加速度運動する電子は進行方向(接線方向)に電磁波を放射する。これをシンクロトロン放射光(Synchrotron Radiation、SR)という。電磁波の放射される角度は進行方向に対しておよそ $1/\gamma$ の角度範囲である。ここで γ はローレンツ因子(Lorentz factor)とよばれ、

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{E_b}{m_0 c^2} \quad (1)$$

で与えられる。ここで

v : 加速される電子の速度[m/s]

c : 光の速さ=2.998×10⁸ m/s

E_b : ビームのエネルギー[GeV]

m_0 : 電子の静止質量=9.11×10⁻³¹ kg

である。 $m_0 c^2$ は電子の持つ静止エネルギーで、0.511 MeVである。例えば、HER、LERでは γ はそれぞれ 1.57×10^4 、 6.85×10^3 であり、したがって、SRが放射される角度は 6.59×10^{-5} rad、 1.46×10^{-4} rad と非常に狭い範囲となる。

SRで放出される光子の数 N_p とエネルギー W_p はリング一周あたり、

$$N_p = 8.08 \times 10^{17} I_b E_b \quad [\text{photons/s}] \quad (2)$$

$$W_p = \frac{88.4 E_b^4 I_b}{\rho} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

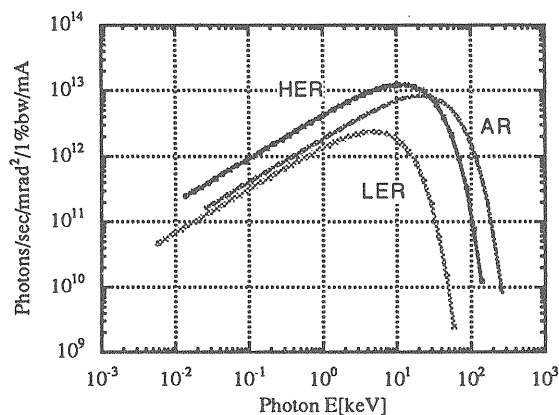


図2. HER、LERおよびARの放射光スペクトル。

ここで、 I_b はビーム電流[mA]、 ρ は電子の曲率半径[m]である。

放射されるSRは、いろいろなエネルギーの光子を含んでいる。図2に一例として、1mA、1%バンド幅、1mrad²あたりに毎秒放射される光子のエネルギースペクトルを示す。このようなエネルギースペクトルを特徴づけるものが臨界エネルギー(Critical Energy): ϵ_c とよばれ、次式で定義される。

$$\epsilon_c = \frac{h}{2\pi} \omega_c = \frac{3}{2} \frac{hc}{2\pi\rho} \gamma^3 \quad (4)$$

$$= 2.22 \times 10^3 \frac{E_b^3}{\rho} \text{ [eV]} \quad (5)$$

ここで ω_c は臨界周波数(Critical Frequency)と呼ばれSRの代表的周波数である。 ϵ_c はSRの全パワーを二分するエネルギーである。すなわち、

エネルギー $E \sim E+dE$ 内のSRパワーを $W_p(E)$ とすれば、

$$\int_0^{\epsilon_c} W_p(E) dE = \frac{1}{2} W_p \quad (6)$$

である。

KEKBのような衝突リングでは、電子を加速するRF空洞部を除いて、電子が加速度を受けるのは主にBマグネット部である。従って、Bマグネット部の下流側で強いSR光が当たることになる。図3(a)(b)には、LERとHERのアーク部ユニットセルの磁石配置と、その部分のパワー密度(kW/m)を示している。また、KEKBリングアーク部のSRに関するパラメータを他のリングと比較して表2.にまとめている。他のリングに比べて、最大パワー密度が大きいのがわかる。光子数密度[photons/m]もパワー密度と同じ分布をしている。平均の光子数密度はPFとほぼ同じである。

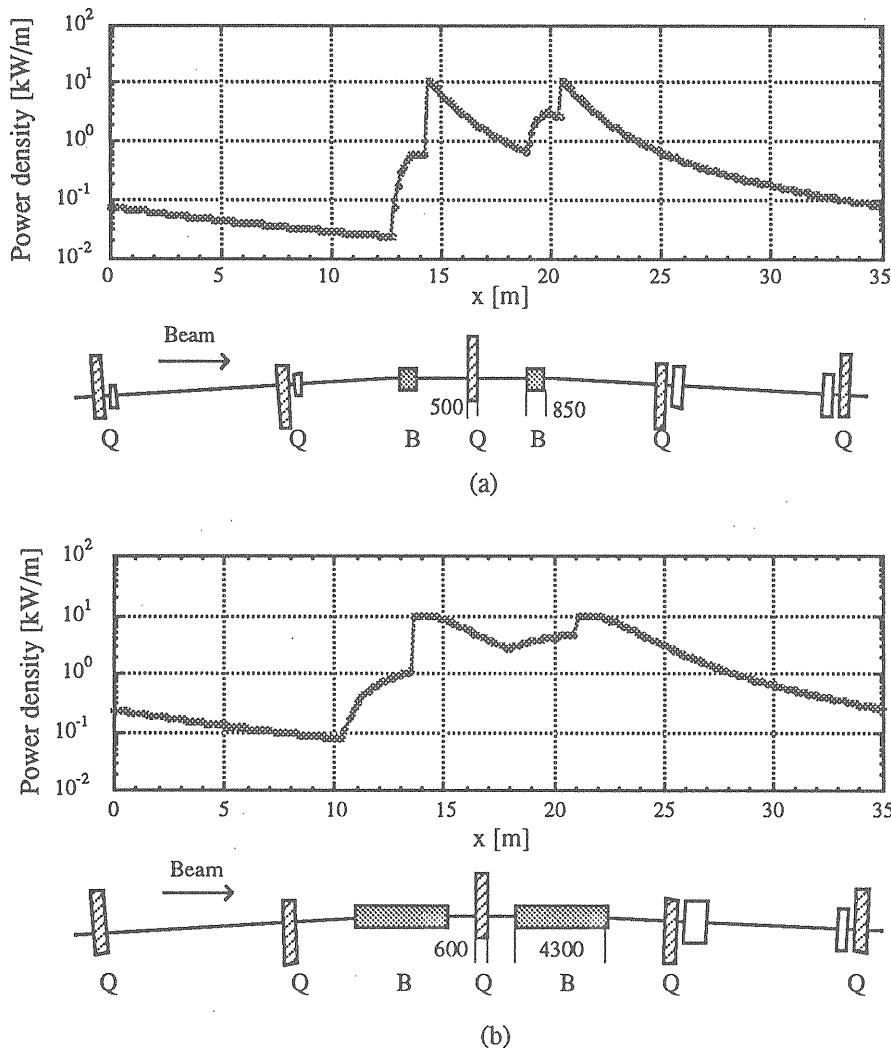


図3. (a)LER、(b)HERのユニットセルと放射光パワー密度(kW/m)分布。QはQマグネット、BはBマグネットを表す。他の四角は補正用マグネットである。B一個でダクトは3度曲がる。光子数密度(photons/m)もパワー密度と同じ形の分布をしている。Bマグネット部でパワー密度が上がっているのは、ダクトが曲がってSRの入射角が大きくなるからである。

	LER	HER	AR	MR	PF
E_b [GeV]	3.5	8.0	6.5	30	2.5
I_b [mA]	2600	1100	40	15	300
ρ [m]	16.2	82.1	23.17	246.53	8.67
C_a [m]	2200	2200	300	2200	140
ϵ_c [keV]	5.9	13.8	26.3	220	4.0
W_p [MW]	2.1	4.9	0.27	4.4	0.12
Max. W_p [kW/m]	11.1	9.6	1.9	2.9	2.2
N_p [Ph/s]	7.4×10^{21}	7.1×10^{21}	2.1×10^{20}	3.6×10^{20}	6.1×10^{20}
Av. N_p [Ph/s/m]	3.5×10^{18}	3.3×10^{18}	8.6×10^{17}	1.7×10^{17}	4.7×10^{18}

表2. 各リングアーク部のSRパラメータ。 C_a はアーク部のおよその長さである。

3. 必要な圧力

リングに要求される圧力は、(1)ビームの寿命、(2)イオントラッピング、(3)測定器へのノイズによってほぼ決まる。

(1) ビーム寿命

最初のビーム電流を I_{b0} とした時、ビーム電流 I_b が時間 t に対して

$$I_b = I_{b0} e^{-t/\tau} \quad [\text{mA}] \quad (7)$$

のように変化するとしたとき、 τ をビームの寿命(Beam Lifetime、ビームライフタイム)という。ビームの寿命については中村がOHO'91にて[5]、またビームの損失機構については鎌田がKEK Reportにて[6]丁寧に述べてあるので、ここでは詳細は省略し、重要な点をまとめる。

さて、ビーム中の電子は、水平、垂直およびビーム軸方向に働く束縛力の中で振動しながら安定軌道上を周回している。水平、垂直方向の振動をベータトロン振動(Betatron Oscillation)、ビーム軸方向の振動をシンクロトロン振動(Synchrotron Oscillation)という。何らかの外力で電子がこの束縛から飛び出すと電子はビームから失われる。電子蓄積リングでのビーム損失の最も重要なファクターはビーム中の電子と残留気体原子との散乱である。

原子に電子が衝突するときの衝突断面積は以下の3つの過程の断面積の和である。

- (1) 残留気体の原子核との散乱
(Rutherford Scattering)
- (2) 残留気体の核外電子との衝突
(Moller Scattering)
- (3) 原子核による制動放射
(Bremsstrahlung)

ビームダクトの断面が十分広い場合、この中で最も効くのは(3)の原子核による制動放射である。原子番号 Z_i の原子核による電子の制動放射によって、その電子が失われる断面積 $\sigma_B(Z_i)$ は、

$$\sigma_B(Z_i) = 4\alpha r_0^2 Z_i(Z_i + 1) \left(\frac{4}{3} \ln \frac{\gamma}{\gamma_c} - \frac{5}{6} \right) \times \ln(183 Z_i^{-3}) \quad [\text{m}^2] \quad (8)$$

で与えられる。ここで

$$\alpha: \text{電磁相互作用の結合定数} = e^2/2\epsilon_0 hc$$

$$= 1/137 \quad (e \text{ は電子の電荷} = 1.60 \times 10^{-19} [\text{C}],$$

$$h: \text{プランク定数} = 6.63 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}])$$

$$r_0: \text{古典電子半径} = e^2/4\pi\epsilon_0 m_0 c^2$$

$$= 2.82 \times 10^{-15} [\text{m}]$$

$$\gamma_c: \text{エネルギーロスの限界値} = \Delta E/E \times \gamma$$

(ΔE はRFバケットの高さ)

である。式(8)は、 $\gamma_c \ll \gamma$ を仮定している。式(8)は原子番号 Z_i の大きい気体分子が寿命に大きな影響があることを示している。

原子番号 Z_i の単原子気体が温度 T [K]にて n_i

[m³]の密度で存在するとき、単一散乱過程から決まるビーム寿命 τ_i は、次式で与えられる。

$$\frac{1}{\tau_i} = cn_i\sigma_B(Z_i) \quad (9)$$

$$= c \frac{P_i}{k_B T} \sigma_B(Z_i) \quad [s^{-1}]$$

ここで P_i は*i*種気体原子の圧力[Pa]、 k_B はボルツマン定数= 1.38×10^{-23} [J / K]である。気体は理想気体であるとしている。各種原子番号を持つ単原子気体および多原子分子気体が存在するときのビーム寿命 τ_i は式(9)の和で表せる。

$$\tau_i = \sum_i \frac{1}{\tau_i} \quad [s^{-1}] \quad (10)$$

KEKBでは、ビームライフタイムの目標を10時間以上としている。加熱脱ガス処理(Baking)したビームダクトの運転中の残留ガス成分は、水素(H₂)、一酸化炭素(CO)が主成分で、ついでメタン(CH₄)、二酸化炭素(CO₂)である。そこで、これらのガスについてライフタイムが10時間となる圧力を求めると表3.のようになる($\gamma/\gamma = 1 \times 10^2$ 、 $T=293K$ とした)。

従って、必要なリングの平均圧力は寿命に効く一酸化炭素(CO)と二酸化炭素(CO₂)が同量程度と仮定すると 3×10^{-7} Pa以下となる。

(2) イオントラッピング(電子リングに対して)

ビームがダクト内の残留気体と衝突するとある確率で気体原子・分子を電離する。一方、電子がビームダクト内を通るとき、ビームはアース電位のダクトに比べて負電位となる(KEKBで

はビーム中心でおよそ-300 Vに達する)。したがって、ビームによって電離されたイオンはビームに引きつけられ、あるイオンはビームのポテンシャルに束縛(トラップ)されてしまう。この現象をイオントラッピング(Ion Trapping)という。この現象が起きると、ビーム軸上にイオンが集まっているため、あたかも圧力が悪くなったようになり、ビームライフが短くなる。また、エミッタンス(Emittance、位相空間でのビームの断面積)が大きくなる。イオントラップ現象については、坂中がOHO'86にて解説している[7]。ここでは真空に関連する基本的なパラメータを示しておく。

今、*n*個のバンチが周回しているとすると、質量数 A_c 以上のイオンはビームにトラップされる。この A_c を臨界質量(Critical Mass)といい、

$$A_c = \frac{N r_p}{n n \beta^2 \sigma_y (\sigma_x + \sigma_y)} \frac{\pi R_c}{\sigma_y} \quad (11)$$

である。ここで、

N/n : バンチあたりの粒子数

r_p : 古典陽子半径= $e^2/4\pi\epsilon_0 m_p c^2$
= 1.53×10^{-18} [m]

σ_x, σ_y : ビームの水平、垂直方向の幅 [m]

R_c : リングの平均半径= $C/2\pi$ [m]

である。イオンの質量数が A_c よりも小さいとバンチによってけられる運動量が大きく、次のバンチが来るまでにビーム軌道の外に出てしまうからである。KEKBの場合、 $\sigma_x=1$ mm、 $\sigma_y=0.1$ mm、 $R_c=480$ m、 $\beta=1.0$ 、 $n=5106$ とすれば、 A_c はLERで0.13、HERで0.06となり、すべての気体原子、分子がトラップされる可能性がある。

	σ_B [m ²]	k [Pa·s]	$P(\tau=10h)$ [Pa]
水素(H ₂)	2.56×10^{-29}	5.37×10^{-1}	1.49×10^{-5}
メタン(CH ₄)	2.90×10^{-28}	4.76×10^{-2}	1.32×10^{-6}
水(H ₂ O)	4.26×10^{-28}	3.23×10^{-2}	8.97×10^{-7}
一酸化炭素(CO)	6.39×10^{-28}	2.16×10^{-2}	6.00×10^{-7}
二酸化炭素(CO ₂)	1.04×10^{-27}	1.33×10^{-2}	3.69×10^{-7}
ヘリウム(He)	3.68×10^{-29}	3.75×10^{-1}	1.04×10^{-5}
アルゴン(Ar)	1.79×10^{-27}	7.71×10^{-3}	2.14×10^{-7}

表3. 式(9)で計算した各種気体分子の衝突断面積とライフタイムが10時間となる圧力。定数 k は $P[\text{Pa}] \times \tau[\text{s}]$ の値である。

ARでは A_c は約29となり水素(H_2)、水(H_2O)、一酸化炭素(CO)などはトラップされない。

イオントラップが起きて軌道上にイオンが存在すると、粒子はこのイオンと衝突して失われるため、ビームの寿命は短くなる。イオンが水平、垂直方向にビームと同じサイズのガウス分布をしているとすれば、イオンとの衝突によるビーム寿命 τ_{ip} は

$$\frac{1}{\tau_{ip}} = \frac{N_i \sigma_T c}{4\pi \sigma_x \sigma_y C} \quad [s^{-1}] \quad (12)$$

となる。ここで、 N_i はリング全周にトラップされたイオンの数、 σ_T は全衝突の断面積でイオンを構成するすべての原子について和をとる。 $\sigma_T \sim \sigma_B$ とすれば、式(9)と比較すると、 N_i 個のトラップされたイオンは次式の密度 n_{ion} の残留ガスと等価な寿命を与えることになる。

$$n_{ion} = \frac{N_i}{4\pi \sigma_x \sigma_y C} \quad [m^{-3}] \quad (13)$$

ビーム中の電子数とトラップされたイオン数の比を中性化率(Neutralization factor)といい δ で表す。 δ の最大値は1である。今イオンが $\delta=1$ までトラップされると、LERの場合 $N_i=1.6 \times 10^{14}$ 、 $C=3013$ mであるから n_{ion} は $4.23 \times 10^{16} m^{-3}$ となる。この密度に相当する圧力 P は $1.7 \times 10^{-4} Pa$ である。HERでは、 $n_{ion}=1.8 \times 10^{16} m^{-3}$ 、 $P=7.4 \times 10^{-5} Pa$ となる。トラップされるイオンが一酸化炭素(CO)だとすれば、表3.からHERでライフタイムは約5分となる。

しかしこの話ではトラップされるイオン数が完全に空間電荷で決まることを前提としているが、実際にはトラップされたイオンはさらに電離して2荷以上のイオンになったり、電子と再結合したり、また何らかの不安定領域に入って失われる。トラップされるイオン数にはある平衡値があり、実際には $\delta=1$ とはならない。さらに、イオントラップによる寿命の低下やエミッタンスの広がりに圧力依存性があることも経験的に知られている{8}。したがって、イオントラップがおこらないという明確な圧力の上限をいうのは今の現状では不可能である。しかし、これまでのPFでの運転経験から、圧力が $10^{-7} Pa$ 程度で何らかの回避手段を取れば問題にならな

いと言われている{9}。

イオントラップを回避する手段としては、RFでバンチを振動させる(RF knocking)、バンチを遍在させる(Partial Fill)、チェンバー中の電極(Clearing electrode)に負電位をかけイオンを軌道上から取り除くなどがある。KEKBでもバンチを遍在させて運転することが考えられている。

(3) 測定器へのノイズ

測定器周辺の圧力が悪いと、残留気体分子と衝突した電子や、発生したX線などが測定器へ入りノイズとなる。KEKBでは、衝突点のある直線部で圧力を $10^{-8} Pa$ 台に維持する必要がある{10}。

以上(1)~(3)よりKEKBでは

アーク部では平均 $3 \times 10^{-7} Pa$ 以下
測定器のある直線部では $1 \times 10^{-7} Pa$ 以下

が必要であることになる。

4. 必要な排気速度

4.1 ガス放出量の見積もり

加速器ビームダクトにおけるガス放出源は大きく分けて2種類ある。熱的ガス放出とSRがあたってダクト壁から放出される光刺激脱離である。

(1) 熱的ガス放出 (Thermal gas desorption)

材料の表面に化学的・物理的に吸着していた気体分子は、その熱運動によって表面から脱離する。これを熱的ガス放出という。熱的ガス放出率は、材料、材料の表面状態、排気時間などによって変わる。熱的ガス放出率を下げるためには、系の温度を上げる、いわゆる加熱脱ガス処理(ベーキング、Baking)が効果的である。十分脱ガスされた真空チェンバー内の残留ガス成分は水素(H₂)、一酸化炭素(CO)が主である。ビームダクトによく用いられるステンレス鋼、アルミニウム合金、無酸素銅ではおよそ $1 \times 10^9 \sim 1 \times 10^{10} \text{ Pa} \cdot \text{l/s/cm}^2$ の値が得られる[11]。例えば、ビームダクトの周長を50cmとすると1mあたりのガス放出率は $5 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{l/s/m}$ となる。

(2) 光刺激脱離 (Photon - Stimulated gas desorption, または Photo-desorption, PSD)

シンクロトロン放射光(SR)がビームダクトの壁に当たると二次電子が放出される。この二次電子が表面から放出される際とふたたび表面に衝突する際に表面(層)の気体分子が放出される。

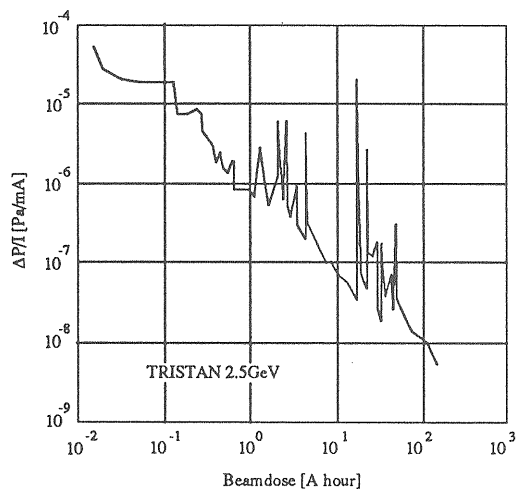


図4. ARの単位電流あたりの圧力上昇のビームドーズに対する変化。

これが光刺激脱離と呼ばれるものである。表面に入射する光子一個あたりに放出される気体分子の数を光刺激脱離係数(Photo-desorption coefficient)とよび、通常 η [mole./photon]で表す。初期の η は、材料、材料の表面状態によって大きく変わり、清浄な表面ほど η は当然小さい。また、SRのエネルギーにも依存し、 ϵ_e が大きいほど η は大きくなる傾向がある[12]。光刺激脱離によって放出される気体は、水素(H₂)、一酸化炭素(CO)、ついで二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)が主である。

η は照射時間(入射光子の積分量)とともに減少する。この現象は'枯れ'と呼ばれている。定性的には、SRが照射されたために、ダクト表面に吸着していた気体分子や、表面層に含まれていた気体原子がはじき出されたものと考えることができる。排気系を設計する際には、ある

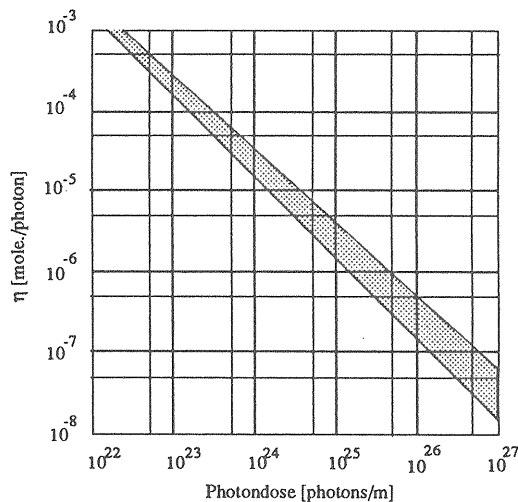


図5. 前図4. から換算した、ARの η の変化。現在はフォンドーズ $\sim 5 \times 10^{24}$ photons/mにある。それ以降の値は予想である。

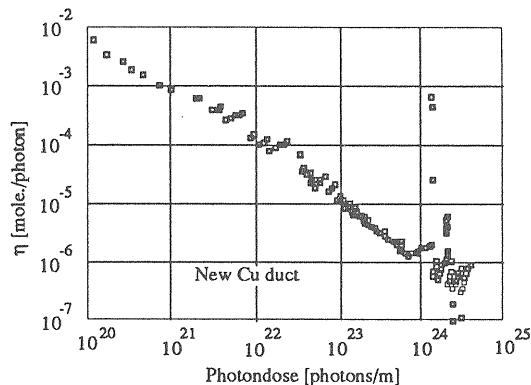


図6. PFに入れた銅ダクトの η の変化

程度枯れた時点でのガス放出率で評価するのが自然である。図4には、ARでの単位ビーム電流あたりの圧力上昇をこれまでの運転時間×ビーム電流(Beam Dose、ビームドーズ)に対してプロットしたものである。ダクトの材質はアルミ合金(AI6063-EX)である。運転とともに圧力の上昇率が減っている、つまりガス放出率が下がっているのがわかる。縦軸、横軸を η と単位長さあたりの入射した光子の積分量(Photon Dose、フォトンドーズ)に換算したものを図5に示している。また、他の例としてPFに入れた銅(無酸素銅)製のビームダクトの η の変化を図6に示している[3]。

KEKBでは、アーク部の光子入射量は平均約 3×10^{18} photons/s/m である。運転開始後100~1000時間後の η を設計で用いることにすると、フォトンドーズ約 $1 \times 10^{24} \sim 1 \times 10^{25}$ photons/m の値を取れば良いことになる。図5、6およびこれまで測定された例などを参考にして、設計では $\eta = 1 \times 10^{-6}$ mole./photon を用いることにした。そうすると単位長さあたりのガス放出率は

$$\frac{3 \times 10^{18} \times 1 \times 10^{-6}}{2.47 \times 10^{17}} = 1.21 \times 10^{-5} \quad [\text{Pa} \cdot \text{l/s/m}] \quad (14)$$

となる。ここで 2.47×10^{17} は $1 \text{Pa} \cdot \text{l}$ の粒子数である ($T=293 \text{K}$)。これからわかるように、ガス放出率としては、光脱離のほうが熱的ガス放出よりも大きい。

4.2 必要な排気速度

上で求めたように、アーク部のガス放出は光刺激脱離によってほぼ決まり、その値は約 $10^5 \text{Pa} \cdot \text{l/s/m}$ である。このガス放出のもとで3.2節で求めた圧力を確保するためには平均 100l/s/m 程度の排気速度が必要となる。この値は後でも述べるように通常の排気ポンプで十分達成できる値である。

5. 排気系

5.1 真空ポンプの種類

一般にビームダクトを排気するのに使用されるのは以下のポンプである。ポンプの排気メカニズムの詳細については真空の専門書を参照されたい[1]。各ポンプのおよその動作範囲を図7にまとめている。

(1) ロータリーポンプ(Rotary Pump)

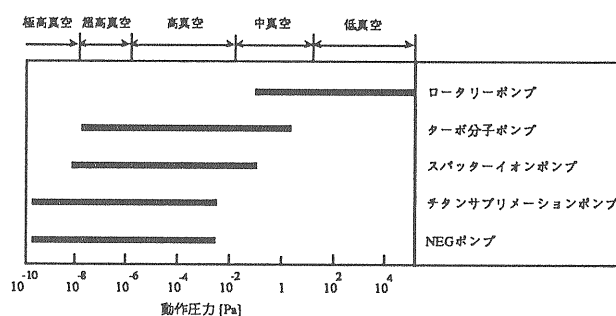
ビームダクトを大気圧から $\sim 10^1 \text{Pa}$ まで排気する、いわゆる粗排気に用いられる。ダクト内の空気を圧縮して大気側に排気するポンプである。多くの加速器で用いられているが、能力をあげるためにオイルを使用しているのが、最近ではオイルフリーのメカニカルポンプ(スクロールポンプ、ダイヤフラムポンプなど)に置き換えられる傾向にある。ロータリーポンプの上流側にオイルトラップを設置するのも効果がある。

(2) ターボ分子ポンプ(Turbo-molecular Pump)

$1 \sim 10^8 \text{Pa}$ の広い範囲で使用できる圧縮型のポンプである。ロータリーポンプなどを補助ポンプにして粗排気に用いられる。ターボ分子ポンプも回転軸を磁気浮上させたオイルフリーのターボ分子ポンプが主流になっている。

(3) スパッターイオンポンプ(Sputter Ion Pump)

磁場中のペニング放電と呼ばれる放電で気体を電離させ、生じたイオンによるスパッタリングでチタンの活性な面を生成しガスを吸着させる、凝縮型のポンプ(Getter Pump、ゲッターポンプ)の一つである。酸素、一酸化炭素、窒素など活性な気体はチタン表面への化学吸着にて、ヘリウム、アルゴンなど希ガスはイオンが



7. 主要なポンプの運転圧力範囲。

陰極に潜り込むことによって排気される。通常希ガスの排気速度は活性ガスに比べて非常に小さい(10%以下)。排気された気体分子は外部に出ないので、大気側とは完全に閉じた系を真空に保つことができ、停電など不慮の事故に対して安全である。ただし、圧力の低下とともに排気速度が低下し、 10^{-7}Pa では 10^{-4}Pa でのおよそ30%になる。主に $10^{-3}\sim 10^{-8}\text{Pa}$ 程度で用いられる。これまで多くの加速器で主ポンプとして採用されてきた。

(4)チタンサブレーションポンプ

(Titanium Sublimation Pump)

チタンをポンプ容器内壁に蒸着させてチタンの活性な面を生成し、活性ガスを吸着させるゲッターポンプである。表面が吸着された気体分子に覆われてくると排気速度が落ちるので、定期的に蒸着する必要がある。希ガス、メタンに対する排気速度はない。通常上記のスパッターイオンポンプと併用し、 10^{-10}Pa 程度の圧力まで排気するのに用いられる。排気速度は圧力に依らないが、当然圧力の高いところで使用すれば蒸着の頻度は上がる。蒸着させるチタンが無くなれば取り替えなければならない。

(5)NEGポンプ(Non Evaporable Getter Pump)

ジルコニウムとアルミ(Zr+Al)、またはジルコニウム、バナジウム、鉄(Zr+V+Fe)の粉末を焼結した物で、高温($400\sim 700^\circ\text{C}$)で活性化(アクティベーション、Activation)することにより、活性な気体を吸着する。ゲッターポンプの一つ。(4)と同じように定期的な再活性化(コンディショニング、Conditioning)が必要である。希ガス、メタンに対する排気速度はない。スパッターイオンポンプと併用し、 10^{-10}Pa 程度の圧力まで排気するのに用いられる。これも排気速度は圧力に依らない。総吸収量に限度がある。

各ポンプは通常ビームダクトのポートに接続されるが、(3)や(5)はダクトに沿ってポンプを置くことも可能である。これを分布型排気と呼び、それぞれ、分布型イオンポンプ(Distributed Ion Pump、DIP)、分布型NEGポンプ(Distributed NEG Pump、DNP)と言われる。分布排気とした場合、ビームが通る部屋(ビームチャンネル)の

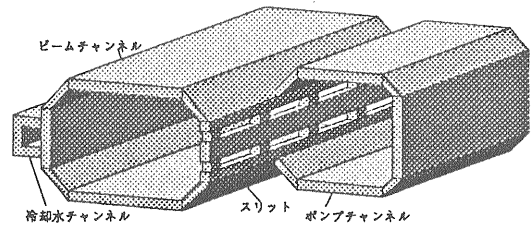


図8. 分布型ポンプを採用したビームダクトの断面形状(ビームチャンネルは八角形としている)。Qマグネット部ではポンプチャンネルはない。

隣にポンプが入る部屋(ポンプチャンネル)を多数のスリットを通して取り付ける(図8.参照)。DIPの磁場はBマグネットの磁場を利用する。この方法は、Bマグネット部など、ポートがつけられない部分に用いられるが、付録で計算しているように、ポートにポンプを取り付けるより効率的な排気が可能である。これまで加速器に用いられたイオンポンプやNEGポンプの多くは、分布型として採用されている。

5.2真空ポンプの選択・配置

どのポンプを主ポンプとするかは、加速器によって異なる。TRISTAN AR、MRはDIPを主ポンプとして採用している。PFでは分布型イオンポンプが主ポンプであるが、さらに低い圧力を必要とするため、チタンサブレーションポンプも多数設置している。

KEKBでは、図3に示すようにマグネット間隔が広いのでポンプを多数のポートに取り付けることも可能である。しかし、排気効率、製作の面から分布型の排気とした。ビームダクトの断面は図8.に示すような形状となる。Bマグ

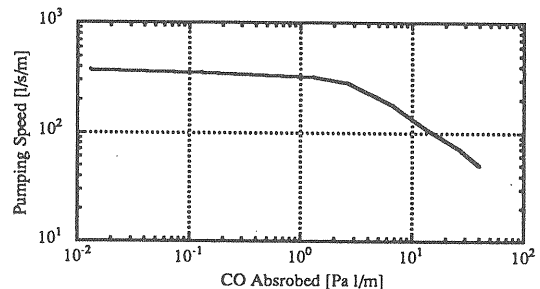


図9. ST707NEGポンプのCOに対する排気速度{13}。

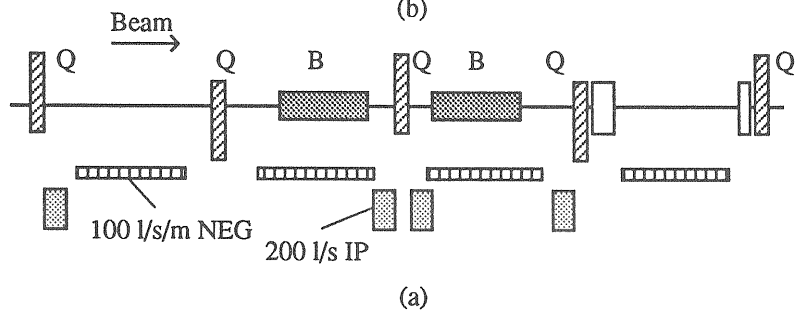
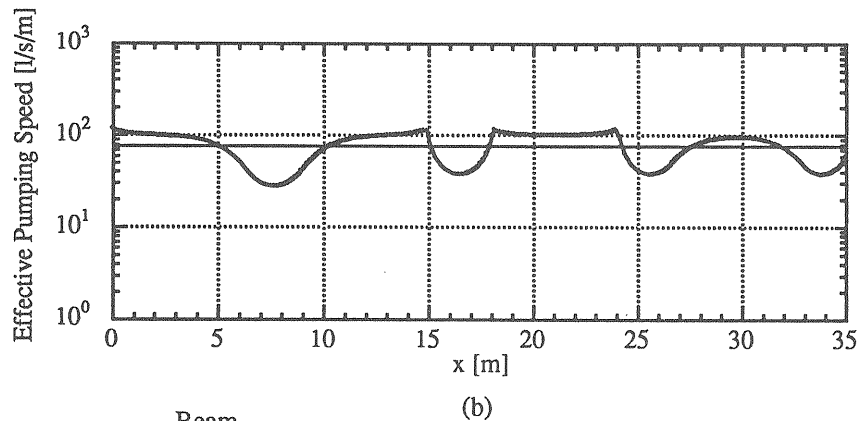
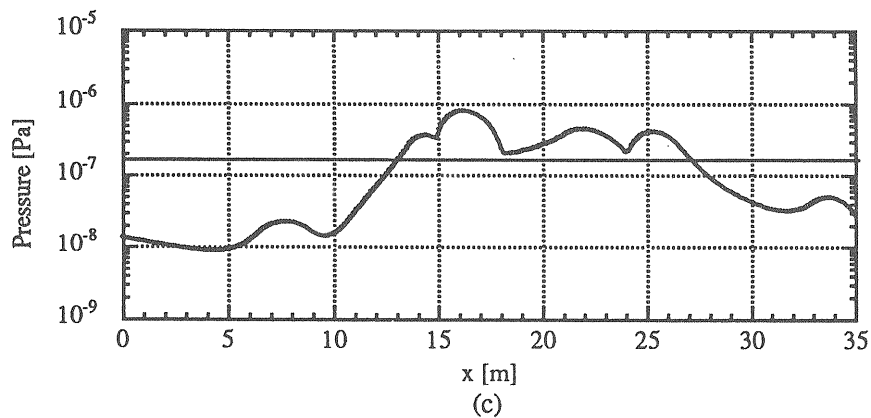


図11.(a) HERリングのポンプ配置例。(b)実効排気速度。平均80 l/s/mの排気速度が得られている。(c) $\eta=1 \times 10^{-6}$ mole./photonを仮定して図3の光子密度分布に対して(b)の排気速度で得られる圧力。平均 1.7×10^{-7} Paが得られる。LERでもほぼ同じポンプ配置を考えている。

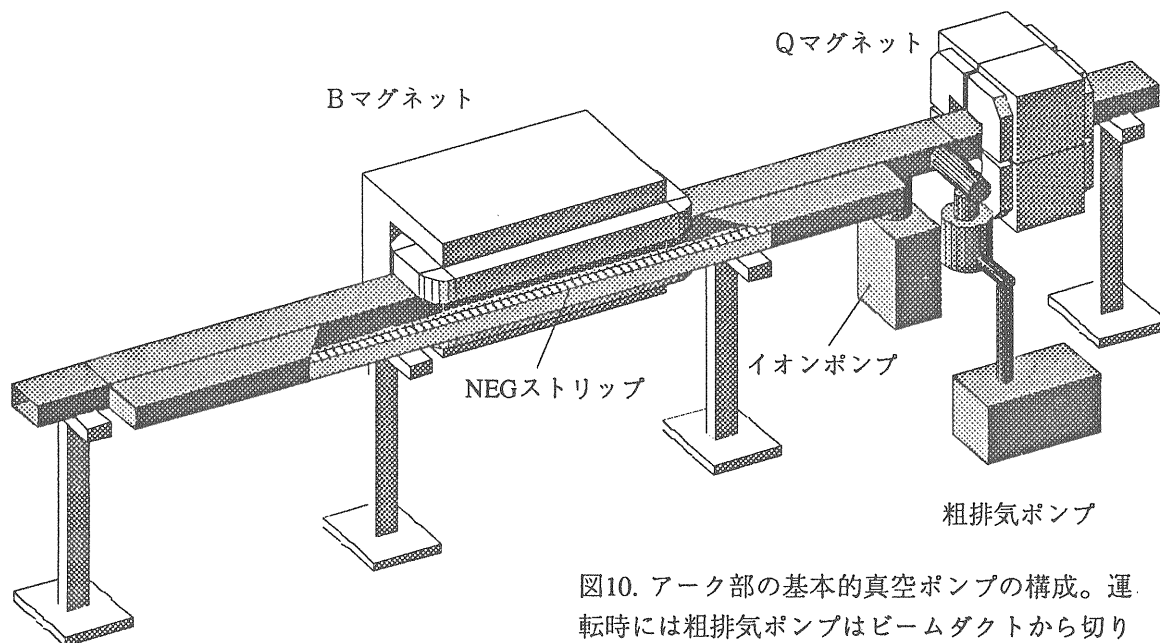


図10. アーク部の基本的真空ポンプの構成。運転時には粗排気ポンプはビームダクトから切り離される。

ネットが短いので、分布型のNEGポンプを主ポンプとして採用する。補助ポンプにはイオンポンプを用いる。NEGストリップはST707と呼ばれる商品で[サエスゲッターズジャパン(株)]、吸収したガス量に対して図9のような排気速度を持つ[13]。約30回のコンディショニングまで可能と言われている(毎回大気にさらしたとして)。粗排気は、ターボ分子ポンプとオイルフリーの補助ポンプを予定している。運転時には粗排気系はビームダクトから切り離される。アーク部ビームダクトの排気ポンプの基本的構成を図10.に示している。

ビームダクト内のガス負荷は、4.1で示したように光刺激脱離である。ダクトに当たる光子の数はダクトの場所によって変わるので、真空ポンプはガス放出の大きい場所に置くのが効果的である。図11.にHERでのポンプの配置例と、ダクトのコンダクタンスを考慮したダクト内の実効排気速度、および圧力分布の計算例を示している。実効排気速度の計算は付録のGreen関数を用いた方法で行っている[14]。平均80 l/s/m程度の排気速度が得られている。

5.3排気系のシミュレーション

KEKBでは前述したようにNEGポンプを主ポンプとして採用する。NEGポンプは、図9.に示すように、排気とともに排気速度が減少する。ある程度排気速度が下がったらコンディショニングを行う必要があるが、回数に制限がある。一方、光刺激脱離係数 η は図5、6のようにSRの照射時間によって減少し、したがってガス負荷は下がる。これらのことを考慮に入れて、圧力、ビーム寿命が運転とともにどうかかわるか、

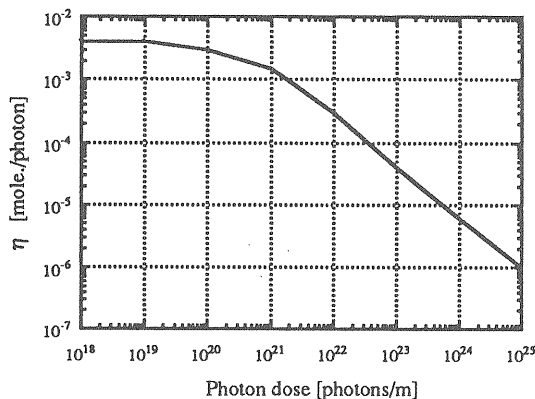
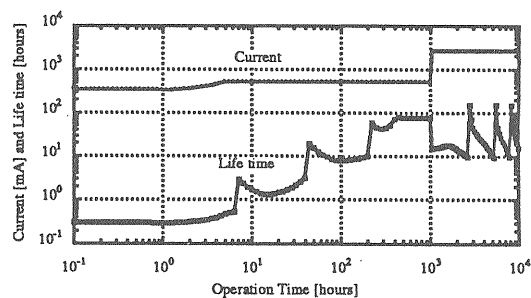


図12. シミュレーションに仮定した η の変化。後述するR&Dで得られた値である。

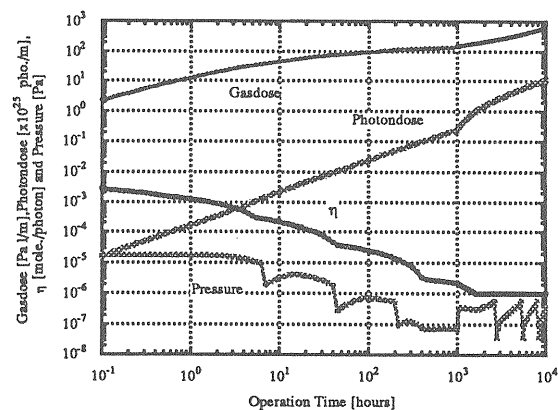
NEGの活性化の頻度はどの程度かなど検討・確認する必要がある。ここでは、LERについて、実際の運転をシミュレートしてみる。

シミュレーション計算では、図9.に示すようなNEGポンプ排気速度を仮定した。また、 η は図12.に示すように変化するとした。この値は、銅で製作したテスト用ビームダクトで得られた結果から予測される値である(後節参照)。また以下の条件で計算を行った。

- 電子の最大入射率 1×10^{11} particles/s。
- 最初の1000時間は最大電流の1/5(520mA)で運転する。
- NEGのコンディショニングの条件:
ビームのライフタイムが10時間を切り、かつ、排気速度が70l/s/mより小さくなった時。ビームチャンネルとポンプチャンネル間のコンダクタンスは500 l/s/m。
- 壁に入射する光子数は 3.4×10^{18} photons/s/m。



(a)



(b)

図13.(a) 運転時間に対するビーム電流とビームライフタイムの変化。(b) 運転時間に対するガスドーズ(放出ガスの積分量)、フォトンドーズ、 η 、圧力の変化。圧力に段差が有るのは NEGの再活性化のため。

- ・ η の最低値は 1×10^{-6} mole./photon。
- ・放出ガスは一酸化炭素(CO)。

結果を図13.(a)、(b)に示す。(a)には運転時間に対してビーム電流とライフを、(b)には運転時間に対して η 、圧力、放出ガスの積分量、フォトドーズの変化を示している。圧力に段差があるのは、NEGの活性化をおこなったためである。 η が 1×10^{-6} mole/photonまで下がるのに約1500時間かかるのがわかる。それまでに必要なNEGのコンディショニングの回数は約3回である。初期の η を小さくすれば、この回数は小さくなる。 η が 1×10^{-6} mole/photonまで下がった後は約3000時間に1回の割合でコンディショニングが必要である。これは現実に十分可能な値である。このシミュレーションから、前節まで考えた排気システムが十分機能する事がわかる。

6. ビームダクト

6.1 断面の大きさ

ビームチャンネルは、その中をビームが周回するのに十分な広さ(アパーチャ、Aperture)を持つ必要がある。すなわち、ビームステイクリア(Beam Stay Clear, BSC)よりも大きくなければならない。一方ダクト外寸法はマグネット(Bマグネット、Qマグネット、六極マグネットなど)の磁極内に収まる必要がある。真空システムの立場からはコンダクタンスを大きくし、またビームの損失を少なくするためにもアパーチャは大きい方がよい。ここでは必要最小限のアパーチャを与えるBSCを見積もる。

水平方向(x方向)、垂直方向(y方向)のBSC、すなわち BSC_x 、 BSC_y はそれぞれ以下のように与えられる。

$$BSC_x = 10 \sqrt{\varepsilon_{x0}\beta_x + D^2(\sigma_E/E)^2} + COD_x \quad [m] \quad (15)$$

$$BSC_y = 10 \sqrt{\varepsilon_{y0}\beta_y} + COD_y \quad [m] \quad (16)$$

ここで、

ε_{x0} : 最大水平エミッタンス [m]

ε_{y0} : 最大垂直エミッタンス [m]

β_x : 最大水平ベータ関数 [m]

β_y : 最大垂直ベータ関数 [m]

D : 最大ディスパージョン [m]

σ_E/E : 最大エネルギー広がり

COD_x : 水平方向COD許容値 [m]

COD_y : 垂直方向COD許容値 [m]

である。ここでは下の値を用いる。

$$\varepsilon_{x0} = 2 \times 10^{-8} [m], \quad \varepsilon_{y0} = 1 \times 10^{-8} [m]$$

$$\beta_x = 25 [m], \quad \beta_y = 25 [m]$$

$$D = 1 [m], \quad \sigma_E/E = 1 \times 10^{-3}$$

$$COD_x = 10 [mm], \quad COD_y = 5 [mm]$$

結果は

$$BSC_x = 22 \text{ mm} \quad BSC_y = 10 \text{ mm}$$

となる。したがって、ビームダクトの幅、高さはそれぞれ44 mm、20 mm以上でなければならない。

実際には、ビーム入射の時ビームが振動するためさらに大きなアパーチャが必要で、KEKBでは水平垂直方向とも50 mm程度が必要と見積もられている。

6.2 断面形状

ビームチャンネルの断面は多くの種類があるが、上で述べたようにまずはマグネットに収まらなければならない。アーク部では、上でみたようにx方向にディスページョンがあるためx方向のBSCが広い。また、Bマグネットも磁極間のギャップが狭い方が強い磁場を容易に作れる。したがって、アーク部のダクト断面は水平方向に広いものが一般に使用される。直線部のダクトは円でもかまわない。通常使用されるアーク部ダクトの断面としては、図14.に示すように、(1)長方形、(2)八角形、(3)レーストラック(Race Track)、(4)楕円がある。図14.はチャンネル幅が110mm以内、高さが54mm以内でQマグネットに収まるという条件で描いたものである。幾つかの条件についてこれらの形状を比較した表を表4.に示す。KEKBのHERでは、コンダクタンスが大きくとれ、ビームポジションモニターの取り付けも容易であることを

重視して、レーストラック型を採用する。

もう一つ決めなければならないのは、冷却水管の形である。加速器ビームダクトのリング外側壁には、SR光が照射される。壁に吸収されたSRパワーは熱となりダクトは加熱される。ダクトの温度が高くなると、熱膨張によりダクトが歪む、強度が落ちる、熱的ガス放出が大きくなるという問題が生じ、また周囲のコンポーネントにも悪影響がある。従って、ダクトの外側には冷却水を通す冷却水管(Cooling Channel)が設けられる(図8.参照)。KEKBの場合には入射するSRパワーが最大10kW/mに達するため十分な検討が必要である。図15.には、考えられる幾つかの冷却水管のモデルを示している。これらのモデルについて、図16.に示すように幅2mmの10kW/mのパワーを持つSR光が入射したとして、最高温度を有限要素法で計算した結果を表5.に示している。ダクトはアルミニウムである。冷却水の温度は25°C、流量は約4m/s、熱伝達率は約2W/m²Kを仮定している。冷却水を通るチャンネルが多いほど、つまり、冷却水と金属が接触する面積が多いほど温度が低くなるのがわかる。ここでは計算していないが、冷却水チャンネル内にひだを設けるのも有効である。また、冷却水とビームチャンネル壁との距離を短くすることもまた有効である。ただし、冷却水管の製作のことも考え最終的に判断すべきである。KEKBの設計では、ダクト材料として銅を想定していることもあり(銅の方がアルミより熱伝導率が良い、表6.参照)、[A][B][C]の形が望ましいが製作上の観点から[D]の形を採用している。

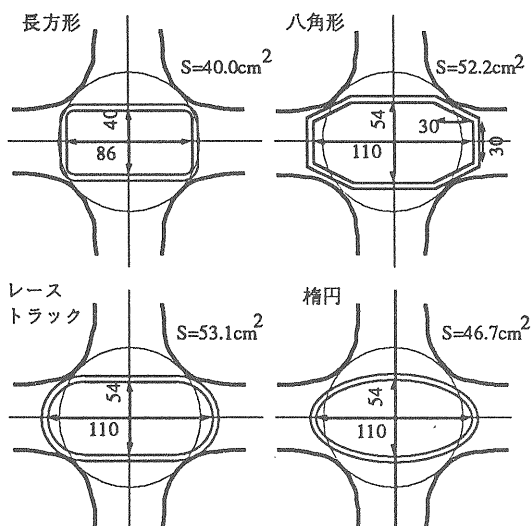


図14.代表的アーク部ビームチャンネル形状。

	コンダクタンス	歪み	応力	BPM取付	RFコンタクト構造
長方形	△	△	△	○	△
八角形	○	△	△	○	△
レーストラック	○	○	○	○	△
楕円	△	○	○	△	○

表4. 代表的ビームチャンネルの形状の比較。歪み、応力は真空に引いた場合のもの。BPMはビームポジションモニター。RFコンタクトは7節を参照。

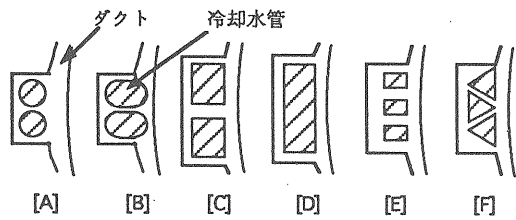


図15. 代表的冷却水管構造。

	[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]
最高温度[°C]	101	91	96	126	88	83

表5. 10kW/mのSRパワー入力時の各冷却水管構造での最高温度。

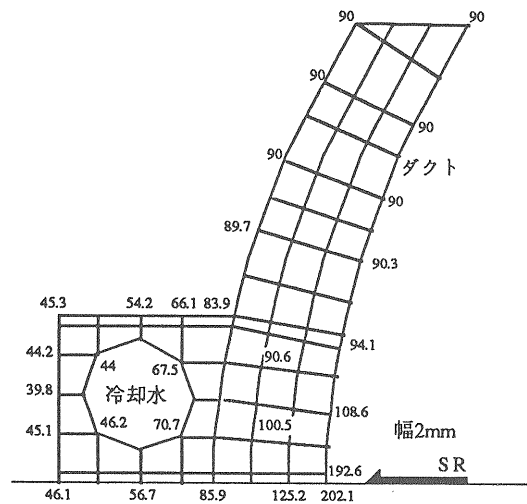


図16. 計算に用いたダクトの断面。計算は2次元有限要素法で行った。

6.3 材質

- ビームダクトの材質として必要な条件は、
- ・シンクロトロン放射光のパワーに耐え得る熱的強度を持つこと。
 - ・ガス放出率が小さいこと。
 - ・製作(加工、溶接)が容易であること。
 - ・量産が可能で、廉価であること。
- などが上げられる。さらに、特にKEKBではシンクロトロン放射光が強いために、
- ・X線シールド特性が良いこと。

が望まれる。

ビームダクトとして従来使用されてきたのは、ステンレススチール(Stainless Steel、普通SUSで表す)、アルミニウム合金(Aluminum Alloy)、銅(特に無酸素銅、Oxygen Free Copper、OFC)である。これらの物理、機械的特性、および、上記の点について比較した表を表6.に示す。以下熱的強度、ガス放出率、X線シールド特性、製作性について比較してみる。

	銅(無酸素銅)	アルミ(Al6063-T6)	ステンレス(SUS304)
密度[g/cm ³]	8.9	2.7	8.0
比熱[J/(gK)]	0.38	0.88	0.50
融点[°C]	1080	650	1450
熱伝導率[J/(°Ccms)]	3.87	1.80	0.17
体積抵抗率[Wm]	1.72×10 ⁻⁸	3.25×10 ⁻⁸	78.4×10 ⁻⁸
線膨張率[°C]	16.8×10 ⁻⁶	23.4×10 ⁻⁶	17.5×10 ⁻⁶
縦弾性係数E[N/m ²]	11.7×10 ¹⁰	6.89×10 ¹⁰	19.9×10 ¹⁰
横弾性係数G[N/m ²]	4.83×10 ¹⁰	2.57×10 ¹⁰	7.64×10 ¹⁰
引っ張り強さ[N/m ²]	2.06×10 ⁸	3.10×10 ⁸	5.68×10 ⁸
耐力[N/m ²]	0.44×10 ⁸	2.75×10 ⁸	2.45×10 ⁸
ガス放出率(PSD)	○	△	○
熱的強度	○	△	△
製作性	○-△	○	○
コスト	△	○	○
X線シールド特性	○	△	○-△
経験	△	○	○

表6. 銅、アルミ合金、ステンレスの物理的、機械的特性およびダクトに必要な条件についての比較。

(1) 熱的強度

KEKBビームダクト壁に入射するSRパワーは、図3.で示したように、最大10kW/mに達する。前節でも使用した図16.のモデルを用いて、アルミ(Al6063)、銅(OFC)、SUS(SUS304)について10kW/m時の最大温度を計算した。冷却水管の形は図15.の[A]である。結果は、

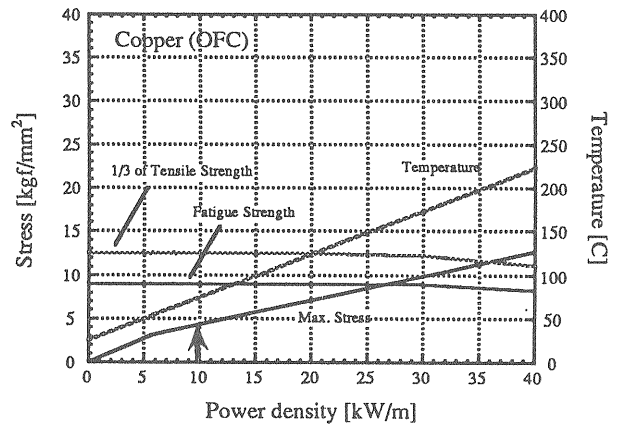
アルミ ----- 120 °C
 銅 ----- 70 °C
 SUS ----- 700 °C

である。ダクト周囲への影響やガス放出率を考えるとSUSは使用できないことがわかる。

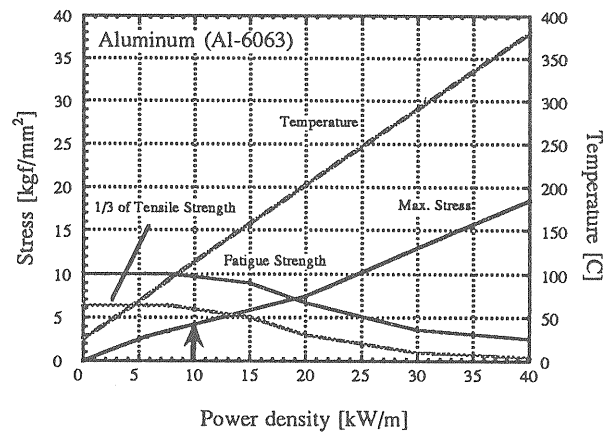
最も重要な熱的強度についてアルミと銅でさらに詳しく調べるために、入力パワーに対して、最高温度、最大応力と許容応力(引っ張り強度の1/3)、許容疲労強度を比較したものが図17.(a)(b)である。最大応力が各許容値よりも小さい範囲で使用可能である。入力10kW/m(図中の矢印)に対して、アルミでも一応許容範囲に入っているが、銅では十分余裕をもって使用できるのがわかる。

(2) ガス放出率

加速器運転中に問題となるのは、4.節でも述べたようにSRがダクトに当たったときに放出されるガス(光刺激脱離)である。光刺激脱離の目安となる η [mole./photon]は、材質にも依存する。図18.はこれまでいろいろな加速器を利用して行われた、アルミダクトと銅ダクトに対する一酸化炭素(CO)の η 測定結果をまとめたものである[15]。 ϵ_e は0.5~26 keV、SRの入射角は8.7~100 mradの範囲にある。 η は表面処理、照射するSRの特性に依存するので、同じ材質でもかなりばらついてはいるが、アルミ(実線)よりも銅(破線)の方が η は小さいのがわかる。PFリングに入れられた銅ダクトについても、アルミよりも低いガス放出率であることがわかっている[16]。また、図6にも示されているように、銅ダクトでは η が約 1×10^{-6} mole/photonまで下がることPFで実験的に確かめられている。銅とアルミの差は、表面層の酸化膜構造の違いが原因と考えられている。



(b)



(a)

図17.(a)アルミと(b)銅の熱的強度の比較。入力パワーに対する温度、最大応力とその温度での許容応力を示す。クリーブ強度は疲労応力とほぼ同じである。

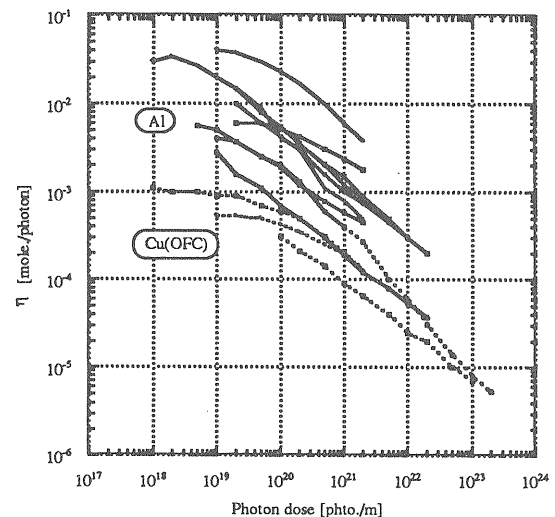


図18. いろいろな装置で行われたCOの η 測定結果。試料はすべてダクトである[17]。

(3) X線のシールド特性

図19.にいくつかの金属について、SR光に対する吸収長(Attenuation Length)を示している。吸収長は、材質の質量数(原子番号)に大きく依存し、一般に重いほど吸収長は短い。アルミと銅では、一桁以上の差があり、X線のシールド特性は銅の方が優れている。より实际的に比較するために、LERについて、計算コード'EGS4'を用いてダクトの外に漏れてくるX線が水に吸収される線量を計算した。'EGS4 (Electron Gamma Shower)'は各エネルギーの光子を、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の効果を取り入れて追跡する計算コードである[17]。結果を図20.(a)(b)に示す。図は材質の厚みを横軸にとり、年間5000時間運転するとして年間あたりの線量(rad/year)を計算したものである。マグネット絶縁材などのダクト周辺材料の影響から、 3×10^9 radが限界と考えられている[18]。吸収する材質が異なるので正確には言えないが、アルミでは厚さ2mm程度の鉛をダクト外側に巻く必要がある。一方銅では、厚さ6~7mm程度以上では鉛が不要である(10年近くもつ)。銅ダ

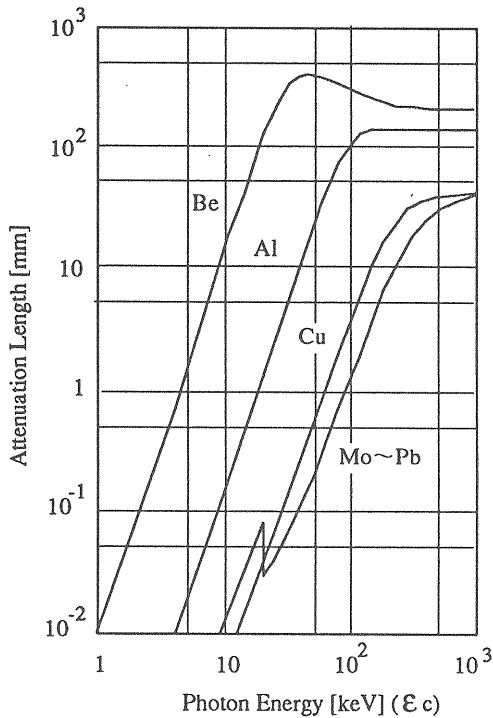
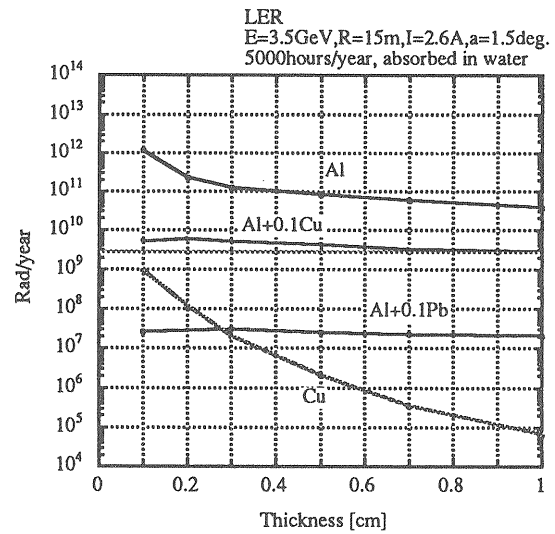


図19. 各種金属のSR光に対する吸収長。

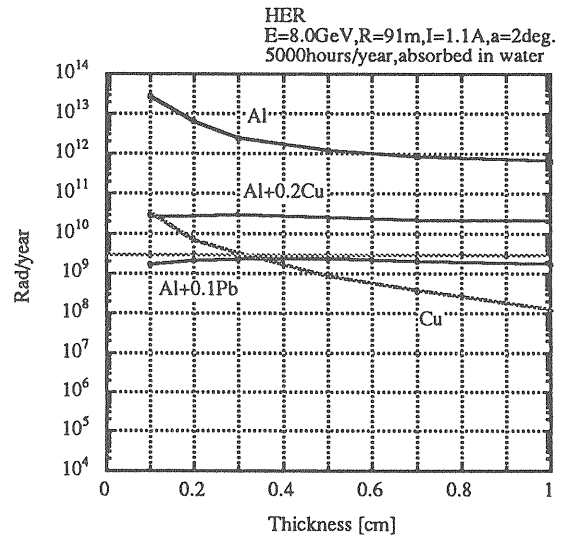
クトの強度を保つためには6mm程度の肉厚が必要なので、そのまま良好なX線シールド特性が得られる。

(4) 製作性

ビームダクトの断面は、分布型排気を採用しているので、図8.にみるようにポンプチャンネル、ビームチャンネル、冷却水チャンネルからなる、三つ穴の形をしている。アルミの場合、約500°C(融点は約600°C)の高温の軟化した状態からの押し出しで直接真空中に密着したこの三



(b)



(a)

図20.(a) HER、(b) LERに対するEGS4によるダクト外側の照射線量の計算結果。横軸はシールドを除いたダクト本体(AlまたはCu)の厚さである。

穴のパイプを製作することができる。しかし、銅では、既存の押し出し機の温度が低いことと、押し出し直後に表面の酸化が進むことから、二穴以上の穴を持つパイプをいっきに製作することは困難と言われている。したがって、銅では各チャンネルをそれぞれ押し出し・引き抜き加工で製作し、後で溶接するという工程となる。また、アルミ、ステンレスでは比較的容易に大気中の溶接でポートなど接合できる。一方銅では、熱伝導率が良いため高い熱入力が必要で、大気中の溶接では材料が広い範囲で酸化・軟化したり、また歪みが大きくなる。銅では通常真空容器中で電子ビーム溶接(Electron Beam Welding, EBW)やロー付けが行われる。長いダクトでは当然長い真空容器が必要となる。このように、銅ではアルミに比べて製作性は悪く、コストもかかりやすい。

以上の議論から、KEKBでは、基本的にアーク部ビームダクトは銅(無酸素銅)で製作する予定である。ただし、図3.からわかるようにSRパワーが10kW 近くまで達するのは一部であるから、その付近以外の部分については、コスト、製作性の面からアルミ合金を使用するという選択もある。

6.4 表面処理

ダクト内面の表面処理はガス放出に大きな影響を与える。製造メーカーで押し出し・引き抜きしたままのパイプ表面や大気に放置したままの材料の表面は、有機物や酸化物の厚い層がある。この層内の炭素(C)、酸素(O)、水素(H)が光刺激脱離の大きな原因と考えられている。従って、何らかの表面処理によって表面の不純物を取り除く必要がある。一般的な表面処理は、機械研磨、化学研磨、脱脂洗浄、放電洗浄、ドライエッチング、ベーキングなどがある。

(1) 機械研磨

フライスなどを使用して物理的に表面を削る。削る際には潤滑油は使用しない(アルコールなどを使用)。これまでの測定では、非常に低い η の値が得られている[19]。しかし、ビームダクトのような長い真空容器内面を削るのは非常に困難である(手間がかかる)。また、削った後の保存に特に注意する必要がある。

(2) 化学研磨

酸(塩酸、硝酸、硫酸、燐酸など)やアルカリ(水酸化ナトリウムなど)の溶液に浸し、表面金属を溶かして同時に不純物を除去する。最も一般的な処理方法である。効率を上げるため、溶液中に電極を挿入しダクトとの間に電圧をかける、電解研磨もよく行われている。浸漬時間や液の濃度によって表面状態が変わるので作業工程の細かい管理が重要である。処理後の洗浄、乾燥方法にも注意が必要である。

(3) 脱脂洗浄

有機溶剤(アセトン、トルエン、アルコールなど)に浸し、油脂成分を溶かして除去する。効率を上げるため、超音波をかけながら行う(超音波洗浄)こともある。手軽な方法であるが、完全には不純物を除去できない。本処理の前処理としては一般に行われる。

(5) 放電洗浄

アルゴン、窒素などを1~0.1 Pa程度チェンバー内に流し、チェンバー内にいれた電極とチェンバーとの間で放電を起こして、生成されたイオンのスパッタリングによってチェンバー表面を物理的に削る。 η を下げるのには有効である。ただし、使用したガス分子が表面に残る可能性がある。また、スパッタリングされた金属がセラミック部品に付着しないよう注意する必要がある。

(5) ドライエッチング

チェンバー内に反応性・腐食性の気体(塩素ガスなど)を流し、表面の不純物を化学的に除去する。液に浸漬する必要が無いので、水酸化物などが生成される恐れは無い。半導体の分野ではかなり行われているが、一般の真空チェンバーに対してはまだ研究途中である。後処理や設備に注意する必要がある。

(6) 高温ベーキング

普通真空中で高温(500~700°C)までチェンバーを加熱し、表面の不純物をとばす。表面だけでなく、金属内部の気体も減少する。表面を清浄にするのには非常に有効である。ただし、金属はなまってしまう。

KEKBでは、銅ダクトの場合、最も一般的で実績のある酸洗いを採用する。さらに、酸化の進行を防ぐため、防錆処理(クロム酸処理)を施す(次節参照)。アルミダクトの場合はこれまでの実験例からアルカリ洗浄が有効と考えている

がドライエッチングについても検討する予定である。

表面処理と同じく重要なのは、表面の管理である。表面処理でいくら表面を清浄にしても、その後の保管が不十分であれば表面処理の意味がない。ガス放出率は最終段階の表面状態で決まるからである。処理した後のダクトは、乾燥窒素封入した袋に入れて保管し、工程間の移動時にも雰囲気汚れないように保護する。また、作業はクリーンハウス内で行い、ほこりが入り込まないようにしなければならない。

ところで、SRはダクトのリング外側内壁に直接当たる。それでは、直接当たる所だけ、例えば機械研磨などによって清浄にすればよいのだろうか。実際には、SRは壁で反射しダクト内に散乱していく。また、生じた2次電子も磁場が無ければ周囲の壁に衝突する。したがって、SRが直接当たらない場所のガス放出も重要だろうと予想される。事実、長時間使用されていたビームダクトの表面の軽元素を分析したところ、リング内側の壁でも不純物元素が減少している('枯れている')のが観測された[20]。図

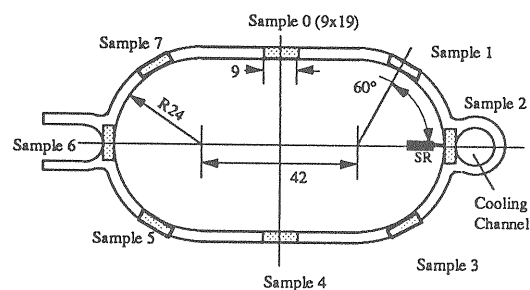
21は、ARのQマグネット部に使用されていたダクト壁8箇所の表面軽元素(水素、炭素、酸素)の数を示している。測定はERDA(Elastic Recoil Detection Analysis)と呼ばれる方法で行われた。この方法は、表面の軽元素の数を定量的に測定できる。SRが直接当たったところ(Sample 2)が最も少ないが、反対側(Sample 6)もかなり減っているのがわかる。つまり、SRが直接当たる場所をいくら清浄にしても、反射光が当たる場所が汚れていれば、全体のガス放出率は汚れている場所のガス放出率で決まることになる。したがって、表面処理はダクト内面全体に行う必要がある。

6.5 インピーダンス

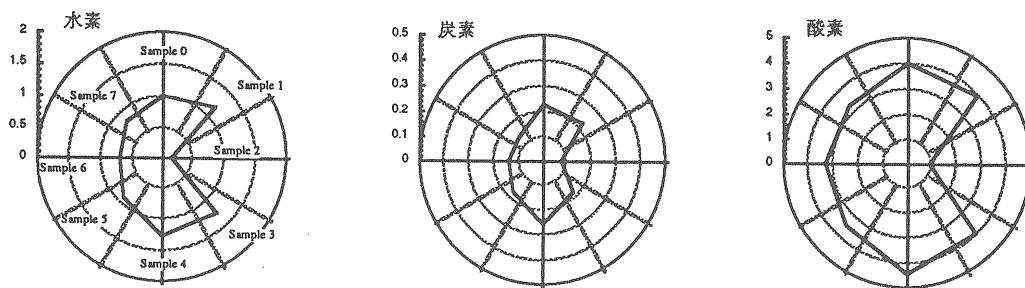
ビームダクトのインピーダンス(Impedance)はビームの不安定性に強く関わっており、詳細を述べるのはこの講義の範疇を超える(詳しくは文献[21]などを参照)。ここでは、真空コンポーネントに密接なパラスチックモードロスインピーダンス(Parastic Mode Loss Impedance)について触れる。

バンチがビームダクトのコンポーネント(RFキャピティ、ベローズ、ステップなど)を通過すると、その後に電磁波が励起される。この電磁波をウェイクフィールド(Wake Field)という。この電磁波は、コンポーネントが比較的小さい場合励起したバンチ自身に力を及ぼし、その結果バンチのエネルギーが失われる。失われるパワーをPとすればPは

$$P = I_0^2 Z_p \quad [W] \quad (17)$$



(b)



(a)

図21.(a) 八つのサンプル表面の水素、炭素、酸素原子の量。各サンプルのダクトでの位置は(b)に示されている。Sample 2は放射光が直接当たっていた場所、Sample 6はその反対側である。

と書け、この Z_p [Ω]をパラステックモードロスインピーダンスという。 I_0 はビームの平均電流[A]である。コンポーネントをバンチが一回通過した時失われるエネルギー W [J]をバンチの電荷 q [C]の2乗で除したものをロスファクター(Loss Factor) : $k = W/q^2$ [V/C]というが、バンチ間の時間を T_b [s]とすれば、 $I_0 = q/T_b$ であるから

$$P = \frac{W}{T_b} = \frac{q^2 k}{T_b} = I_0^2 k T_b \quad [W] \quad (18)$$

となり、 $Z_p = k T_b$ と Z_p を k で表すことができる。

Z_p は以下の点で加速器にとって重要である。

- ・バンチが失ったエネルギー P はコンポーネントの加熱に費やされ、ガス放出源となる。
- ・必要なRFパワーが増える。
- ・ Z_p は縦方向結合インピーダンス(Longitudinal Coupling Impedance) $Z_{||}$ と深く関連している。 $Z_{||}$ は結合バンチ不安定性(Coupled Bunch Instability)やバンチ長の増大(Bunch Lengthening)に大きく影響する。

KEKBのビームダクトは運転時のビーム電流が大きく、またバンチ長も短いため、 Z_p つまり k を十分小さくする必要がある。 k は単純な形状では解析的に求まるが、一般には専門の計算機コードで計算される。また、ワイヤを用いて測定も行われている。

一例として図22(a)に示すような軸対称のギャップのある円筒ビームダクトの中心をバンチが通っている場合を考える。フランジ間のギャップやベローズを想定したものである。ギャップの長さ g と深さ d を変えた場合の k を、計算機コード"TBCCI"で計算した例を図22(b)に示している。バンチ長は5mm、ダクト半径は25mmとしている。ギャップ長が長いほど、またギャップの深さが深いほど k は大きくなるのが分かる。例えば、 $k=0.01$ V/pCとすれば、バンチ数5106では $T_b=2 \times 10^{-9}$ secであるから $Z_p=20\Omega$ となる。失われるパワーは $I_0=2.6$ Aとすれば $P=135$ Wとなる。やや過大評価となるが、失われたパワーが全てICF203SUSフランジ内面に吸収されたとする。フランジの表面積を600cm²、外気温度を25°Cとし、層流による自然冷却を考えると熱伝達率は約 5×10^{-4} W/cm²/°C となるか

ら、フランジの温度は約475 °Cになる。 P を10W以下に抑さえるためには、 k は0.001V/pC以下でなければならない。すると、図から長さ2mmのギャップでは深さは1mm程度以下にする必要がある。

ビーム不安定性の観点からどの程度までギャップやステップが許されるかは、励起される電磁波の詳細な構造を知る必要があるが、今の設計ではステップは0.5mm以下に抑さえるようにしている。ダクト断面が変わる部分(特殊なチェンバーやSRアブソーバー)では、45度以内の緩やかなテーパで連続的に断面を変えなければならない。

また、排気ポート面には、壁電流をなるべくスムーズに流すために、ビーム軸方向に長い長穴のスリットを設ける必要がある(コンダクタンスはやや犠牲になる)。

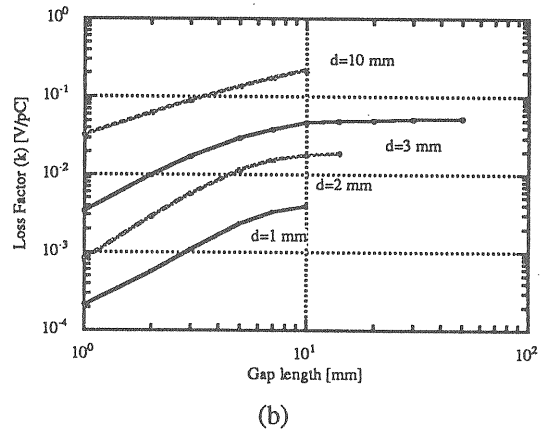
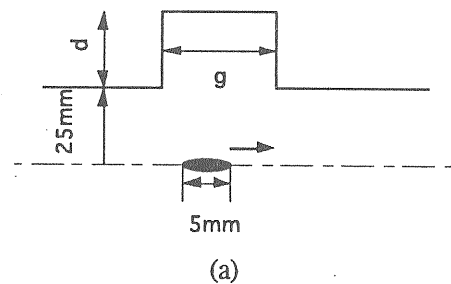


図22. (a)ダクトにある同軸ギャップのモデル図と(b)ギャップ長さ g と深さ d を変えて計算したロスファクター k 。

7.銅製ビームダクトのR&D

上で述べたように、KEKBでは、銅製のビームダクトを採用する。しかし、これまで国内では銅製ビームダクトの例は無く、海外でもドイツDESYのHERA電子リングなど少数である。KEKBの真空システムにおいて銅ダクトの製作、評価は最も重要なR&D項目である。ここでは、システムの設計とはほぼ平行して続けてきた、銅製ビームダクトのR&Dを紹介する。

7.1ダクト製作

まず、国内の既存の技術で銅製ビームダクトが製作可能かどうかを見るために、実際のビームダクトの断面を持つ長さ3.7mの長尺ビームダクトを製作した。構造図を図23.に、完成写真を図24.に示す。ダクト本体の材質は無酸素銅(OFC)である。無酸素銅を採用したのは、溶接性が良いからである。フランジはステンレス(SUS304)である。ビームチャンネルは幅100mm、高さ50mmの八角形をしている(図8)。肉厚は6mmである。冷却水チャンネル、ビームチャンネル、ポンプチャンネルは、それぞれ丸パイプで押し出された後、引き抜き加工でそれぞれの形に成形された。ビームチャンネル側面には、コンダクタンス約600 l/s/mのスリット穴がオイルフリーの機械加工で開けられた。機械加工の後、各チャンネルは有機溶剤(フレオン)槽にて超音波洗浄をうけた。化学研磨は行っていない。

各銅チャンネルは電子ビーム溶接(EBW)で接続された。長さ3.7mというのは、電子ビーム溶

接用真空容器の大きさで制限されている。電子ビームを採用したのは、・溶接の信頼性が高いこと、・熱入力が少ないため、歪みや軟化が最小限に押さえられることによる。実際、ダクトの表面硬度が落ちたのは、溶接部周辺1cmの範囲であった。銅の排気用ポートのパイプはTIG溶接で、フランジ(SUS)とはインコネルを挟んだTIG溶接で接合された。製作されたダクトは150°Cまで数回ベーキングされたが、真空リークは見られず、既存の技術で十分製作可能であることがわかった。

製作された銅ダクトを使って、熱的ガス放出率を評価した。ダクトの3ヶ所のポートに排気速度300 l/sのターボ分子ポンプ1台と、NEGカートリッジ付き230 l/sイオンポンプ2台で排気したときの排気曲線を図25.に示している。圧力はダクト上部とポンプ入り口の2ヶ所に取り付けられたエクストラクターゲージ(Extractor Gauge)[ライボルト(株)]で測定した。残留ガス成分を見るために、四重極質量分析器

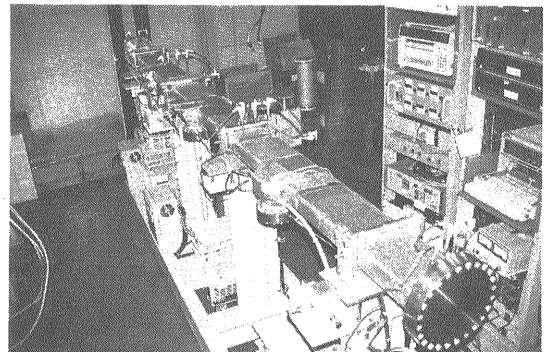


図24. 製作した銅ダクトの全体写真。

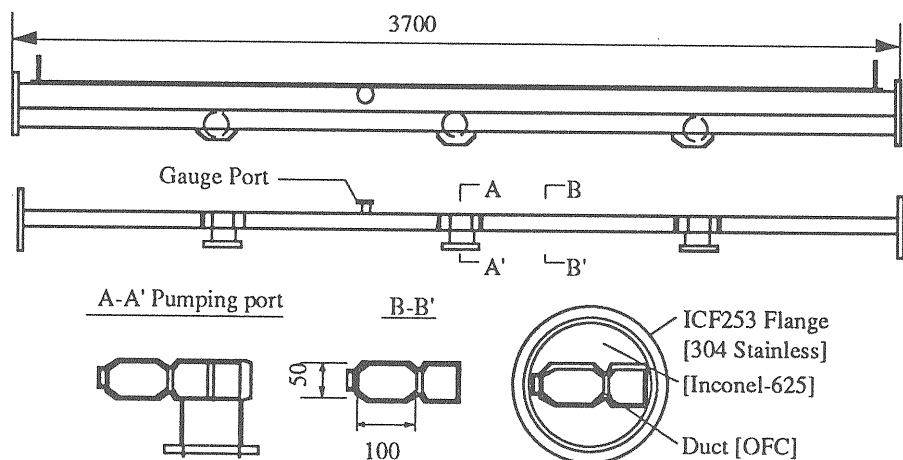


図23. 製作した銅ダクトの構造図。

(Quadrupole Mass Analyzer)を取り付けた。150°C24時間のベーキング後、圧力は二桁ほど低くなり、ゲージポートで 5.3×10^{-8} Pa、ポンプ入り口で 1.3×10^{-8} Paであった(いずれも窒素換算)。残留ガスはほとんど水素であった。到達圧力付近でのポンプの全排気速度を約300~500 l/sとすれば、ダクト内面積がおよそ20000 cm²であるから、ガス放出率は窒素換算で約 $2 \sim 3 \times 10^{-10}$ Pa·l/s/cm²となる。ゲージの水素に対する感度を0.5とすれば、水素換算のガス放出率は約 $4 \sim 6 \times 10^{-10}$ Pa·l/s/cm²である。

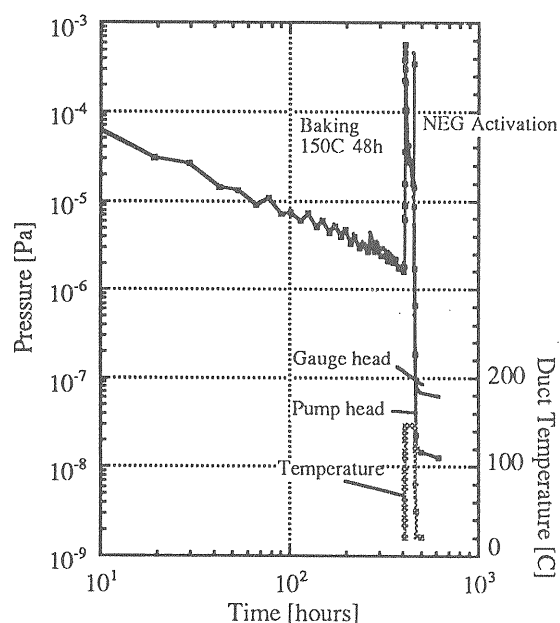


図25. 試作した銅ダクトの排気曲線。

7.2 光刺激脱離係数 η の測定

上で試作したダクトを用いて、光刺激脱離係数 η を測定した。上でも述べたように、このダクトの表面処理は脱脂洗浄のみである。測定はトリスタンARのBマグネット部から生じる、クリティカルエネルギー $\epsilon_c = 26.3$ keVのSRを用いた。図2.のスペクトルからわかるように、ARの光子スペクトルはLER、HERのそれをほぼカバーしている。ただし、単位長さ毎に毎秒入射する光子数はビーム電流30 mAの時約 1.5×10^{16} photons/s/mである。一方LER、HERの平均光子密度は最大電流で約 3×10^{18} photons/s/mである。したがって、ARでの実験では、実機運転での初期の η の変化がわかるのみである(2週間の測定で約 2×10^{21} photons/m)。しかし、これまで報告された多くの実験では、初期の η が低ければ高いフォトリードでの η も低いので、ARの実験でもある程度の評価は可能である。

測定系のセットアップ図を図26.に示している。ダクトはARのNE#9と呼ばれるビームラインの最下流に傾けて取り付けられた。SRはダクトに14.8 mradの角度をもってダイレクトに入射する。全長3.7 mのダクトのうち、約3 mにわたって約8 mmの幅で照射された。単位電流あたり毎秒入射する光子数 N_p は約 1.54×10^{15} photons/s/mAである。オリフィス(Orifice)の両サイドには、エクストラクタゲージ(EXG1,2)と四重極質量分析器(QMA1,2)が取り付けられている。 i 種気体の光刺激脱離係数 η_i は次式で求められる。

$$\eta_i = 2.47 \times 10^{17} \frac{C_i \Delta P_i}{N_p I_b} \quad [\text{molc./photon}] \quad (19)$$

ここで、 ΔP_i はオリフィス両サイドの圧力差

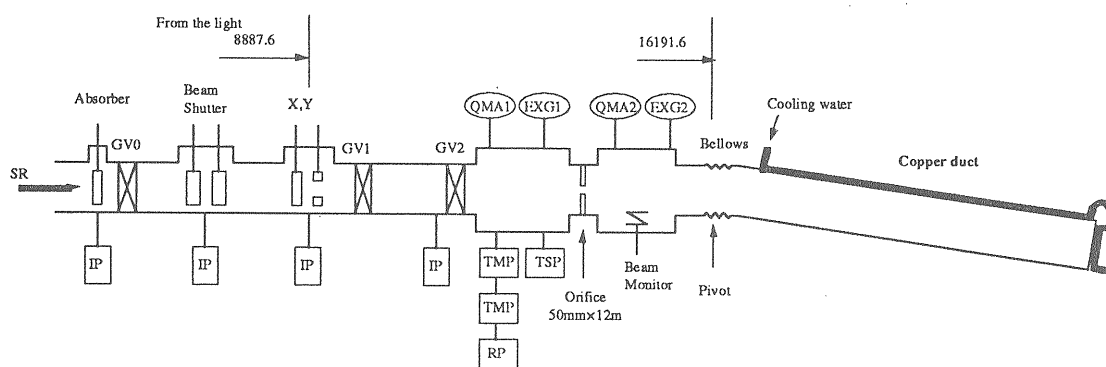


図26. AR NE#9ビームラインでの光刺激脱離係数測定セットアップ。

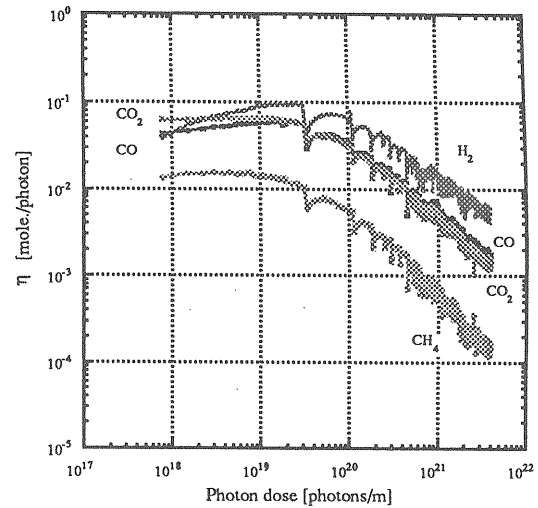
[Pa]、 C_i は*i*種気体に対するオリフィスのコンダクタンス [l/s]、 N_p は単位電流あたり毎秒入射する光子数である。ビームライン上でのダクトの到達圧力は130°C 24時間のベーキング後、約 1×10^{-7} Paであった。

観測された主な気体は水素(H_2)、メタン(CH_4)、一酸化炭素(CO)および二酸化炭素(CO_2)であった。フォトンドーズに対する η の変化を図27.(a)に示している。初期の η は 10^{-2} mole/photon台である。 η は照射量と共に減少し、フォトンドーズ 1×10^{20} photons/m以降は-2/3~-1の傾きで減少する。しかし、同フォトンドーズでの放出されたガス量が100 Pa·l/mに達する(図26.(b))。測定した η の値は図18.と比較してもわかるように、これまで他で行われた銅ダクトでの測定結果よりも大きい。原因は、表面処理が脱脂洗浄のみで不十分だったためである。

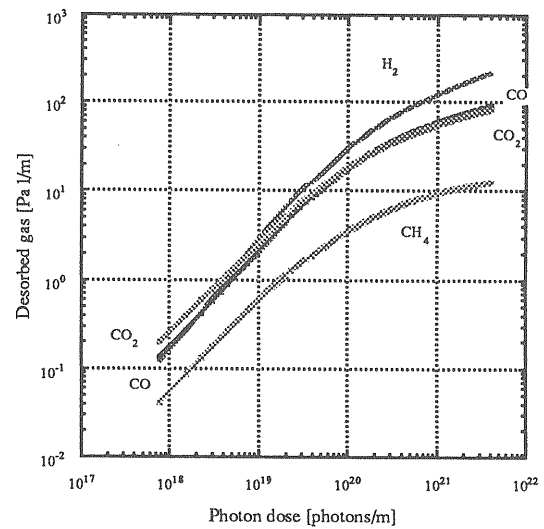
7.3表面処理

7.2の測定にて脱脂洗浄のみでは表面処理としては不十分なことがわかった。そこで、量産でも適用できる実用的な表面処理方法を探るために、表面処理の異なるいくつかの銅ダクトを製作し、光刺激脱離係数 η を測定して比較した。また、接合方法もいくつか変えてその実用可能性も同時に調べた。製作したダクトの接合方法と表面処理を表7.にまとめている。ダクトの材質はすべて同じClass1の無酸素銅である。製作したダクトの例を図28.に示している。

光脱離係数 η は図26.とほぼ同じセットアップで測定された。最も良かった表7.中の[C]の結果を図29.(a)(b)に示す。[C]はキリンス処理(硝酸、硫酸溶液)後、クロム酸にて防錆処理(クロ



(a)



(b)

図27. 試作した銅ダクトで得られた(a) η と(b)ガス放出量のフォトンドーズに対する変化。

	ダクト材料	Cu-Cu接合	Cu-SUS(Al)接合	銅の表面処理
[A]	Cu	EBW ハンダ	トランジション	酸洗い ($H_2SO_4, HNO_3, 1/4$ density)
[B]	Cu	ロー付け	トランジション	酸洗い ($H_2SO_4, HNO_3, normal$ density)
[C]	Cu	EBW	TIG溶接	酸洗い (H_2SO_4, HNO_3) + 防錆処理(Cr_2O_3, H_2SO_4)
[D]	Cu	EBW	ロー付け	酸洗い (H_2SO_4, HNO_3, H_2O_2) + 防錆処理(BTA=benzo-triazole)
[E]	Cu	ロー付け	ロー付け	電解研磨 (P_2O_5, CrO_3, H_2O)
[F]	Cu	EBW	トランジション	酸洗い (有機アンモニウム塩)
[G]	Al + Cu	TIG溶接 EBW	トランジション	機械研磨(オイルフリー)

表7. いろいろな表面処理で製作したダクト

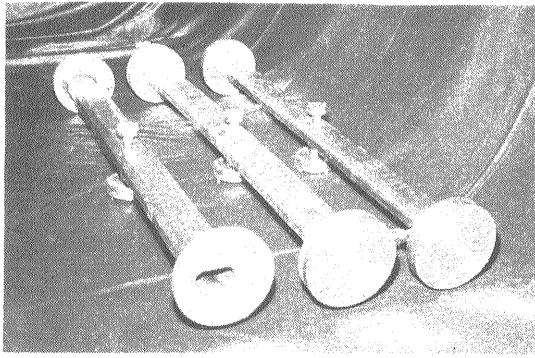
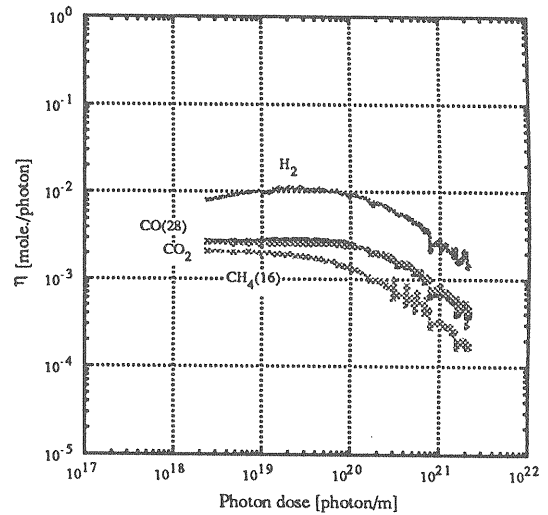


図28.表面処理と接合方法を調べるために製作した銅ダクト。

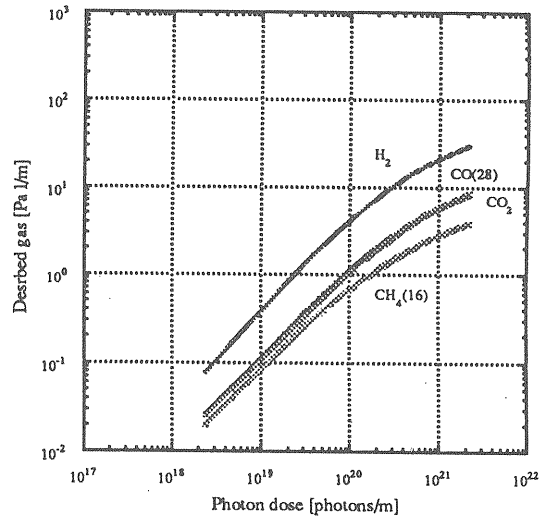
メート処理)を施したものである。図27.と比べると初期の η は約一桁下がっている。また、放出ガス量も光子ドーズ 1×10^{20} photons/mにてCO、CO₂合わせて約 $10 \text{ Pa} \cdot \text{l/m}$ とこれも約1/10となった。同ドーズでのCO+CO₂の η は 1×10^{-3} である。 η が光子ドーズに対して-3/4の傾きで減少するとすれば、 η はフォトドーズ 1×10^{25} photons/mで 1×10^{-6} mole./photonの目標値に達する。放出されるガス量についても、5.3節のシミュレーションで見たようにほぼ問題ない。したがって、[C]の表面処理で十分であることがわかった。ただし、図18.に示した銅ダクトの値よりはまだ高い。ARのSRの ϵ_c が高いこともあるが、表面処理後のダクトの保管状態など検討の余地が残っている。

[A]、[C]～[F]の銅ダクトでもほぼ同じ結果が得られた。電解研磨[E]の効果は顕著ではなかった。[G]のダクトはSRが直接当たる所のみ銅(機械加工)で、後はアルミという銅-アルミの複合チェンバーであるが、測定した η は7.2節の結果と[C]の結果のほぼ中間となった。これは6.節で議論した反射光の影響である。

脱脂処理した銅と酸洗いした銅の表面の軽元素の量をERDAで測定した結果を図30.に示している。酸洗いした表面の酸素(O)の量は明らかに減っている。これが一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO₂)の η の減少に反映していると考えられる。



(a)



(b)

図29.酸洗い+クロメート処理した銅ダクトの(a) η と(b)放出ガス量。

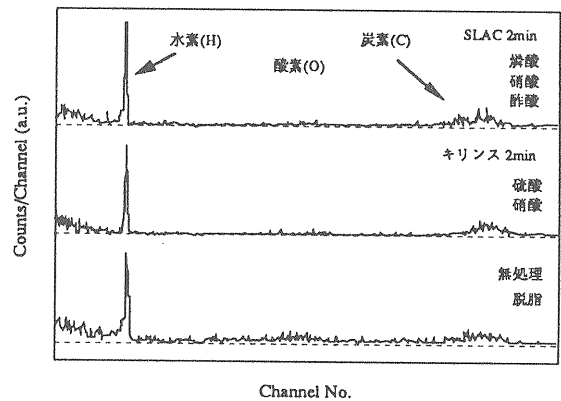


図30.ERDA で測定した各種酸洗い表面の軽元素の量。

8.コンポーネント開発・その他

8.1.NEGポンプ

NEGポンプはKEKBの主ポンプとなるもので、その開発は重要なポイントである。7.1節で製作した銅ダクトのポンプ室に、幅30mm長さ3.5mのNEGストリップ(ST707)を組み込み、排気特性を調べた。粗引きは300 l/sのターボ分子ポンプをダクトの端に取り付けて行った。希ガスを排気するために排気速度120 l/sのイオンポンプをポートの一つに1台取り付けた。150°C 48時間のベーキング終了直前に、450°Cで40分NEGポンプを活性化した。粗引き系をL型バルブで切り離れた後の到達圧力は、ゲージポートで 1.7×10^{-8} Pa、250°C20分の再活性化後、圧力は 1.4×10^{-8} Paとなった。QMAで見た残留ガスはほとんど水素であった。ダクト内表面積を20000cm²、熱的ガス放出率を7.2で得た $2 \sim 3 \times 10^{-10}$ Pa・l/s/cm²とすれば、NEGの排気速度として窒素換算で約80~120 l/s/mが得られる。水素換算では約160~240 l/s/mとなる。

ダクトの一端から窒素ガス(N₂)を流し、窒素に対する排気速度も評価した。ガス入り口とゲージポートでの圧力を、付録で述べている粒子追跡法で計算した圧力分布にフィットさせて排気速度を求めた。ただし、排気速度は一定と仮定した。粒子追跡法を用いたのは、ポンプチャンネルのコンダクタンスも考慮に入れるためである。得られた排気速度は約130~150 l/s/mであった。NEGでは一酸化炭素(CO)の排気速度は窒素の2~3倍であるので、図9.で示した値とほぼ同じ排気速度が得られたことになる。

8.2 RFコンタクター付きベローズ

Qマグネット部やBマグネット部のダクトは長いもので一本7m程度であり、これらはフランジで接合されてリングを形成する。ダクトとダクトとの間には、取り付け作業を容易にするためと、ベーキング時・運転時のダクトの熱膨張・熱歪みを吸収するために、図31.に示すようなベローズ(Bellows)という薄肉のひだを持ったチェンバーが取り付けられる。ベローズは、ダクト間のオフセットや曲がりもある程度吸収できる。ベローズの長さはダクトの伸縮量できる。7mの銅ダクトが150°Cまで加熱された場合の伸びは約15mmであるから、少なくとも20mmの収縮量は必要である。

ベローズは多数のひだを持っているので、このままでは6.4節で述べたようにインピーダンスが高い。そのため、ベローズ内部には、ビームチャンネルと同じ断面を持ったRFコンタクター(RF Contactor)が通常取り付けられる。RFコンタクターはビームが誘起する壁電流をスムーズに流す働きをし、ベローズのひだをビームから見えなくする。つまり、ビームチャンネル断面の形状を連続的にし、高周波の生成を押しやる。RFコンタクターはベローズの伸縮に対応し、かつ電流を流すためダクトと十分強く接触しておく必要がある。ビーム平均電流を

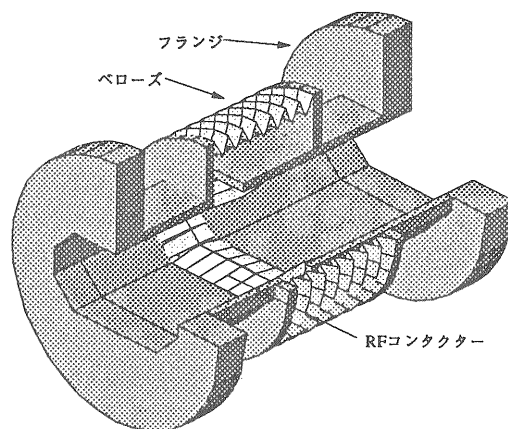


図31.ベローズチェンバー模式図。

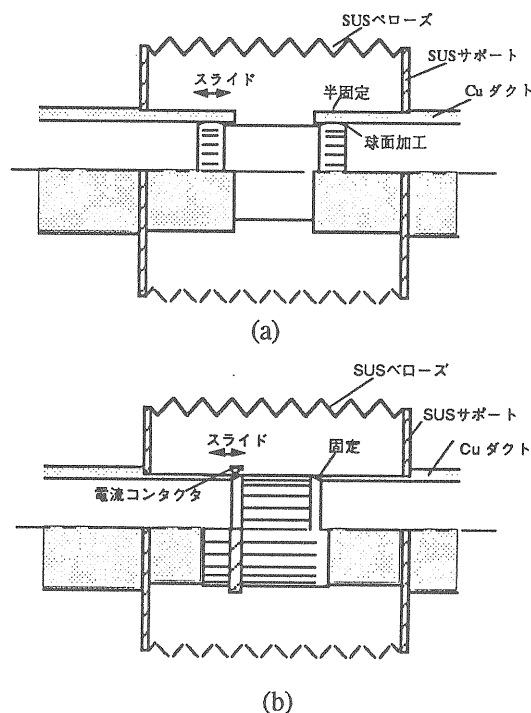


図32. RFコンタクター付きベローズの2構造案。

2.6A、バンチ数を5106、バンチ長を5mmとすると、ピーク電流は約300Aに達し、RFコンタクターのフィンガーの数を約50本としても、平均一本あたり6Aの電流を流す必要があるからである。ペローズの数は1リングでおよそ500個使用されるので、高い信頼性が要求される。

KEKBではRFコンタクター付きのペローズの構造として図32(a)、(b)の2種類を検討している。(a)型はユニバーサルジョイント型であり、ペローズ内部のRFコンタクターは両サイドとも曲げ方向には半固定となっている。そのため、RFコンタクターとダクトの曲がり角はダクト間の曲がり角の1/2に緩和される。ダクト断面が円の場合には、ダクトが曲がってもRFコンタクターとダクトの接触圧が変わらないという利点がある。(b)型は、従来の形を継承した構造であるが、RFコンタクターのフィンガーを外側のスプリング金具でダクトに押さえ付け、接触圧を得るようにしている。この型は、レーストラックのように非円形でかつ平面を持つダクトにも使用できる。現在のところ、A型は直線部のダクトに、B型はアーク部のダクトに使用する予定である。ビームチャンネル断面の段差はいずれも0.5mm程度に押さえなければならない。

RFコンタクターはペローズ部だけではなく、フランジどうしの接合部やゲートバルブ(Gate Valve)にも必要である。フランジは真空封止のためガスケット(Gasket)を挟んで締め付けられるが、その際フランジ間に2~3mmの

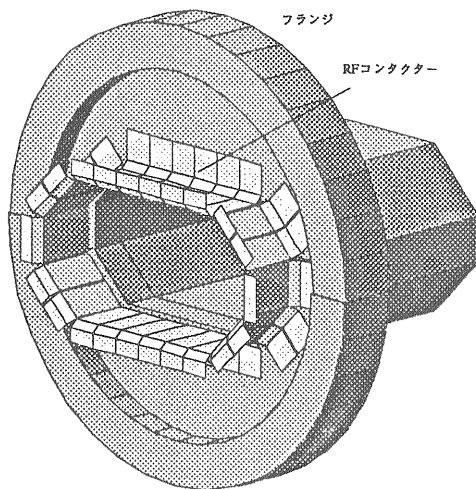


図33.RFコンタクター付きフランジの模式図。

ギャップが生じる。図33.にRFコンタクター付きフランジの模式図を示す。ゲートバルブは、作業時や緊急時にリングを幾つかの部分に分けるバルブである。運転時はオープンの状態であるが、その際壁電流をスムーズに通す必要がある。RFコンタクター付きのゲートバルブは既に市販されている。

8.3 真空計

加速器で通常用いられる真空計としては、ピラニー(Pirani)真空計、熱陰極電離真空計、冷陰極電離真空計、質量分析器などがある。各真空計の詳細は参考文献[1]などを参照。

(1) ピラニー真空計

熱伝導真空計の一種で、ある圧力以下では気体の熱伝導が圧力に依存することを利用した真空計である。大気圧~ 10^{-1} Paの範囲で用いられる。

(2) 熱陰極電離真空計

熱陰極から放出された電子は陽極に入射するまでの間に気体分子と衝突し電離する。電離して生じたイオンの電流は電子電流が一定であれば気体の密度すなわち圧力に比例する。通常使用されるのはB-A (Bayard-Alpert)ゲージと言われているもので、 10^{-8} Pa程度までは信頼できる値が得られる。電極やイオンコレクタを工夫すれば 10^{-10} Pa程度まで測定することができる。ただし、測定するイオン電流は 10^{-7} PaでpAのオーダーであり、加速器に取り付ける場合は、反射したSRや二次電子によるノイズに注意が必要である。また、高い圧力で使用した場合フィラメントが切れやすい。

(3) 冷陰極電離真空計

ペニング(Penning)放電中で電離したイオンの電流を測定する。ある圧力以下では放電領域中の電子密度はほとんど圧力によらないので、イオン電流はおよそ圧力に比例する。(2)に比べると、廉価で高い圧力でも使用できるが、一方、放電現象を利用しているため再現性が乏しい、圧力に対して非線形である、排気速度が大きいという欠点がある。 10^{-8} Pa台までは何とか測定できる。

(4) 質量分析器

電離で生じたイオンを、磁場や四重極電極によって質量/電荷に応じて分離し、それぞれの

イオン電流を測定する。上記の全圧を測定する真空計と違って、残留気体の種類とその圧力(分圧)を知ることができる。

KEKBでは、(3)の冷陰極電離真空計をリングに沿って配置し、全体の圧力分布を見る。(2)、(4)は圧力の較正と調査用に、リング数カ所に設置する。(1)は粗排気時のモニターとインターロック用に用いる。

8.4 ダストトラッピング

7.3にてイオントラップにふれたが、イオンの代わりに電荷を持ったダスト(Micro Dust)が電子ビームにトラップされる場合があり、これをダストトラッピング(Dust Trapping)という。これまでも、DESYのHERA電子リング、コーネル大学のCEASR、PFの電子ビーム運転、そして、ARの電子ビーム運転で観測されている[22]。主な特徴は、

- ・ダストトラッピングでは、イオントラップと同じくライフが短くなるが、エミッタンスの増大は少ない。図34.にARでライフが減少した例を示している。
- ・ダストトラッピングでの寿命の減少には、図34.に見るように短い寿命が長く続きビームを棄てない限りビーム寿命が回復しない場合と、一時的に寿命の減少が起こり、短い時間内で寿命が回復する場合がある。前者はAR、HERA、CESARでよく見られ、後者はPFで見られる。後者の場合トラップされた

ダストがビームによって溶けたものと推定され、運転とともに頻度は小さくなる。

- ・寿命が短くなるビーム電流にしきい値があるわけではなく、確率的におこる。大きいビーム電流の方が起こる確率は高い。
- ・リング内の一部分にとどまっている場合と、ビーム軸方向に動く場合がある。
- ・陽電子で運転した場合には寿命の減少は観測されない。

ダストトラッピングについては、まだ十分解明されていない。HERにとっては重要な問題であり、KEKでもPFやARを利用した実験を行って調査を進めている。おもな項目は、

- ・現象の理解。そのためにダストの質量と電荷を何らかの手段で独立に測定することが重要である。それによって、ダストの同定、トラップ機構の解明が可能となる。現在のところ、ライフタイムやトラップされる条件などから、質量は $10^{12} \sim 10^{13} \times m_p$ 、電荷は $10^7 \times q_e$ 付近と言われている(m_p は陽子質量、 q_e は電子の電荷)。ダストの半径は $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ と推定される。
- ・発生源を突き止めなければならない。最近のHERAの調査では、分布型イオンポンプがダスト源ではないかという見解が出されている。ダクトの底辺にあるダストがピックアップされるのかという点を見極めなければならない。

現段階の対策としては、製作時にダクト内にダストを極力持ち込まないようにする事が一番であり、クリーンな環境を保つ技術の確立が必要である。

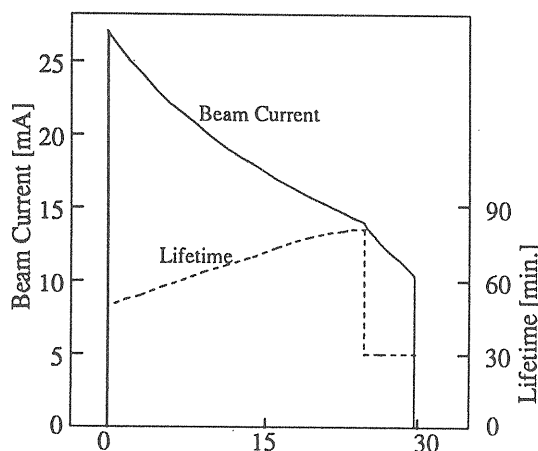


図33.ARでのビームライフ減少の例。

9.おわりに

本稿は7月中旬にまとめたものである。最初にも述べたように、KEKB真空システムの設計は現在も進行中であり、その後パラメータなど変更される可能性も大であることを断っておく。また、コントロール、入射部、衝突点付近などは説明しなかった(できなかった)。まだR&Dの段階の項目も多い。しかし、設計手順は基本的には変わらないはずである。

最後に、教科書的なものを書くには能力的にも時間的にもできなかったので、多分にレポートのようになった感がある。真空にあまりなじみのない方にはわかりにくい点が多々あったと思うが容赦願いたい。

参考文献

- {1} 例えば、
熊谷 寛夫、富永 五郎、'真空の物理と応用'、裳華房(1970).
富永 五郎、辻 泰 訳、'超高真空の物理'、岩波書店(1977) [原著:P.A.Readhead et al., 'The Physical Basis of Ultra High Vacuum', Chapman & Hall, London (1968)].
堀越 源一、'真空技術'、東京大学出版会(1976).
- {2} 小林 正典、'加速器の真空'、OHO'87.
- {3} 堀 洋一郎、'リング真空'、OHO'93.
- {4} 例えば、'シンクロトロン放射光'、講習会テキスト、日本物理学会(1985).
- {5} 中村 典雄、'ビーム寿命'、OHO'91.
- {6} 鎌田 進、KEK Report 79-20 (1979).
- {7} 坂中 章吾、'ストレージリングにおけるイオントラップ現象'、OHO'86.
- {8} 坂中氏との私信.
- {9} 尾崎 均 他 編、KEK Report 90-7.
- {10} S.Kurokawa et al. ed., KEK Report 90-24.
- {11} 上記{1}または、
'真空ハンドブック'、日本真空技術株式会社編、オーム社(1992).
- {12} A.Mathewson, in Int. Workshop on Vac. System for B-Factorys & High Energy Sync. Light Source, Cornel Univ., Jan 16-18 (1992).
J.Gomez-Goni et al., Vacuum Technical Note 93-01, CERN (1993).
- {13} H.J.Halama et al., J. Vac. Sci. Technol.A (1991) 2070.
- {14} K.Kanazawa, J. Vac. Sci. Technol.A (1988) 3002.
- {15} Ota et al., to be published in J. Vac. Sci. Technol.A.
A.Mathewson, J. Vac. Sci. Tech.A (1987) 2512.
J.Gomez-Goni et al., Technical Note 9-9, CERN (1991).
O.Grobner et al., in Proceedings of EPAC-92, Berlin (1992).
H.J.Halama et al., Vacuum (1991) 185.
C.L.Foerester et al., in Proceedings of Vac. Designe of Synchrotron Light Source, AVS Series 12 (1990).
- {16} 小林 正典 他、in Proceedings of the 9th Meeting on Ultra High Vec. Technol. for Acc. and Storage Rings, KEK, March 3-4 (1994).
- {17} W.R.Nelson et al., SLAC-265 (1985).
- {18} 'An Asymmetric B Factory Based on PEP', SLAC-372 (1991).
- {19} M.Kobari et al., Vacuum (1990) 1928.
- {20} K.Kanazawa et al., Vacuum (1993) 7.
- {21} 鈴木 敏郎、'ビーム不安定性の理論'、OHO'86.
久保 浄、'ビーム不安定性'、OHO'91.
伊澤 正陽、'ビーム不安定性と抑制'、OHO'93.
- {22} H.Saeki et al., Rev. Sci. Instrum. 62 (1991)874.
H.Saeki et al., Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 2558.
O.Grobner et al., CERN ISR-VA/77-23 (1877).
P.Marin, LURE RT/93-04 (1993).
F.Zimmermann, PEP-II AP Note No.8-94 (1994).
K.Kanazawa, in Proceedings of the 9th Meeting on Ultra High Vec. Technol. for Acc. and Storage Rings, KEK, March 3-4 (1994).

付録 ダクト内圧力分布の計算方法

排気系の評価に必要なビームダクト内圧力分布の計算方法について述べる。

ビームダクトからの放出ガスが場所によらず一定の場合には、ダクト内の圧力分布は解析的に求めることができる。しかし、実際にはSRの量は一樣ではなく、またダクトの形状も単純でない場合がある。このような系では解析解を求めることは困難である。

ダクト内圧力分布の計算方法としては、有限要素法を用いた方法が知られているが[2]、ここではグリーン関数を用いる方法と粒子追跡法を用いる方法を簡単に紹介する。

(1) グリーン関数を用いる方法

この方法は周期的な一次元の真空系の圧力分布を求めるのに適した方法である。一般に一次元の真空系の圧力分布は次式で表される。

$$Q(x) = -\frac{1}{r(x)} \frac{dP(x)}{dx} \quad (\text{A-1})$$

$$-\frac{dQ(x)}{dx} + q(x) = P(x)S(x) \quad (\text{A-2})$$

ここで、

$P(x)$: 圧力 [Pa]

$r(x)$: 単位長さあたりの抵抗(コンダクタンスの逆数) [s/l/m]

$Q(x)$: ガス流量 [Pa·l/s]

$q(x)$: 単位長さあたりのガス放出率 [Pa·l/s/m]

$S(x)$: 単位長さあたりの排気速度 [l/s/m]

x : ビーム軸方向距離 [m]

である。式(A-1)は通常の排気の式、式(A-2)は質量保存の式である。 $r(x)$ 、 $q(x)$ および $S(x)$ は与えられているとする。上の式を組み合わせると、

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{1}{r(x)} \frac{dP(x)}{dx} \right] - S(x)P(x) = -q(x) \quad (\text{A-3})$$

となる。 $dR=r(x)dx$ で定義される R を使うと、上式は

$$\frac{d}{dR} \left[\frac{dP(R)}{dR} \right] - \frac{S(R)}{r(R)} P(R) = -\frac{q(R)}{r(R)} \quad (\text{A-4})$$

と書くことができる。ここで、 S と r は

$S(R+R_0)=S(R)$ 、 $r(R+R_0)=r(R)$ を満たすものとする。ここで R_0 はリング一周の抵抗である。

上式は、右辺を0と置いた解を用いて、

$$\frac{d}{dR} \left[\frac{dG(R,R')}{dR} \right] - \frac{S(R)}{r(R)} G(R,R') = -\delta(R-R') \quad (\text{A-5})$$

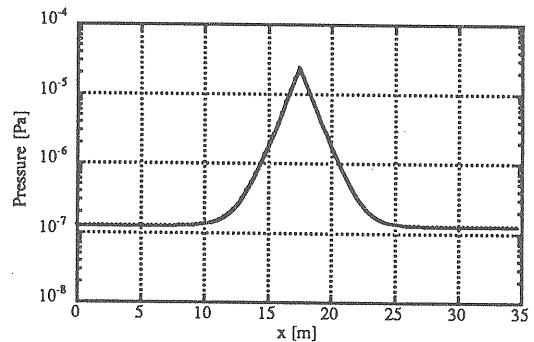
を満たすグリーン関数 $G(R,R')$ を求めることにより、

$$P(R) = \oint dR' \frac{G(R,R')q(R')}{r(R')} \quad (\text{A-6})$$

を求めることができる。ここで積分はリング一周にわたって行う。

アーク部はノーマルセルと言われるマグネットの組み合わせが周期的に並んでいるので、アーク部の圧力を評価するのに非常に有効な方法である。本文で述べた圧力分布はこの方法で計算したものである。

もう一つの例として、リングに配置する真空計はどのような間隔で設置すればよいのだろうか、ということを考えてみる。リングのある場所で真空リークが発生した場合、その位置を真空ゲージで特定する必要がある。コンダクタンスの限られたビームダクトで、かつ排気速度が分布している場合、ゲージの間隔が大きいと、リーク時の圧力ピークを見逃す可能性がある。図A-1は、図8.の断面のダクトにおいて、排気速度が80l/s/mで分布しているとき、ある一ヶ所でリークが発生した時の圧力分布例である。



図A-1. 一樣な分布排気速度を持ったリングの一点でリークが発生した場合の圧力分布。

3ヶ所の真空計で測定すればある程度ピーク的位置を検知できるので、約10mに一個の割合で設置すれば良いことになる。

(2)粒子追跡法による計算方法

ある真空チェンバーにおいてガス放出 Q [Pa·l/s]があるとき、そのチェンバー内の体積 V_j [l]を持つ領域 R_j の圧力 P_j [Pa]を求める。

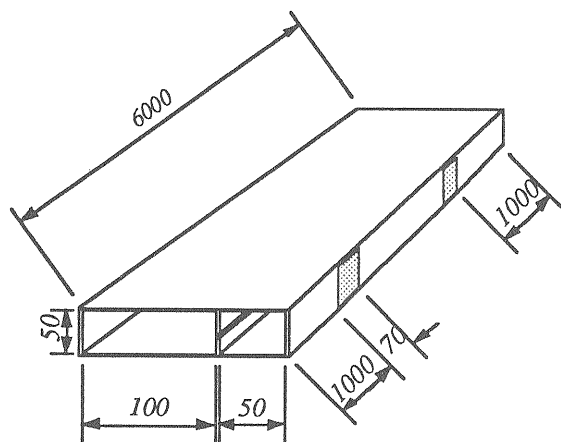
今、 $t=0$ [s]から Δt [s]間だけガス放出があったとする。 $t=k \times \Delta t$ にて領域 R_j 内の気体分子の数を $N_{j,k}$ とすれば、このときの圧力 $P_{j,k}$ は単純に

$$P_{j,k} = \frac{1}{2.47 \times 10^{17}} \frac{N_{j,k}}{V_j} \text{ [Pa]} \quad (\text{A-7})$$

となる。ここで、 2.47×10^{17} は293Kにて1Pa·l内にある分子の数である。ガス放出が $t=0$ [s]で始まりその後一定の割合 Q で続いた場合の、 $t=l \times \Delta t$ [s]での圧力 $P_{j,l}$ は上の $N_{j,k}$ を用いて

$$P_{j,l} = \frac{1}{2.47 \times 10^{17}} \sum_{k=0}^l \frac{N_{j,k}}{V_j} \text{ [Pa]} \quad (\text{A-8})$$

とかける。ガス放出が常にある場合の圧力 P_j は、上式の積分を無限大まで持っていけばよい($l \rightarrow \infty$)。したがって、 $N_{j,k}$ が求まれば、ガス放出が始まって任意の時間の圧力 P_j を得ることができる。チェンバー内にポンプ口があれば、 $N_{j,k}$ はいずれゼロとなるので上式の積分は収束する。粒子追跡法では、文字どおり、ガス放出源からでた分子一個づつを時間的にポンプ口に入るまで追跡していき、上式の $N_{j,k}$ を求める。しかし、実際には Δt を現実的な範囲で小さくし

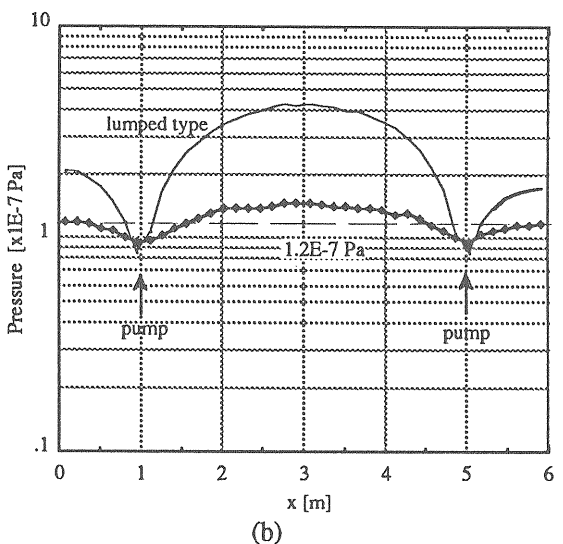
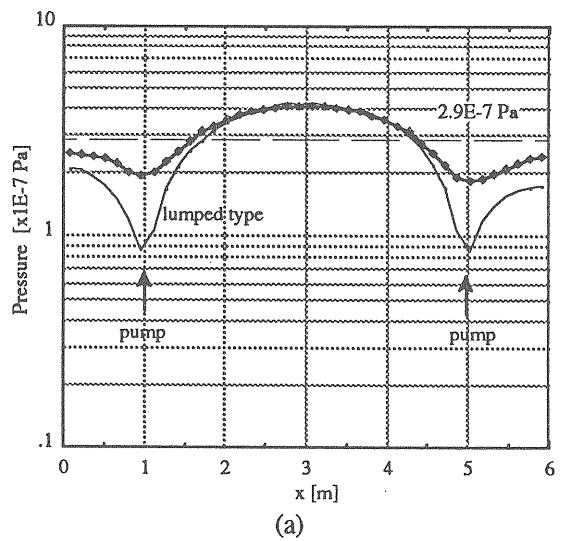


図A-2. ポンプチャンネルを持つダクトのモデル。

ても放出されるガス分子の数は非常に大きな数になるので、計算ではいくつかの気体分子を集合したものと等価のモデル粒子で計算する。

この計算法は、ガス放出が始まってからの圧力分布の時間的変化やコンダクタンスが求めにくいチェンバー内の圧力分布計算に適している。

一例として、図A-2.に示すようなビームが通るビームチャンネルと、ポンプを入れるポンプチャンネルがスリットを通して接続されている場合の、両チャンネルの圧力分布を計算してみる。ガス放出率はビームチャンネル側から一様



図A-3. (a)400 l/sのポンプ2台で排気した場合の圧力分布。実線はポンプチャンネルが無い場合。(b)70l/s/mの分布型ポンプと200 l/sのポンプ2台で排気した時の圧力分布。

に 1×10^{-5} Pa·l/s/mとした。モデル粒子の数は10000個である。ポンプは400 l/sのものが2台取り付けた場合と200 l/sのものが2台とポンプチャンネル内に70 l/s/mの排気速度を持つゲッターポンプを入れた場合で行った。スリット幅を5mmにした場合の結果を図A-3.(a)(b)に示す。この計算方法ではビームチャンネルとポンプチャンネルの圧力分布を同時に求めることができる。図A-3.(a)中の実線はポンプチャンネルがない場合のビームチャンネルの圧力分布である。ポンプチャンネルのためビームチャンネル内の圧力分布がなめらかになっているのがわかる。また図A-3.(b)から全排気速度がほぼ同じであっても、ポンプを分布させて排気させた方が、コンダクタンスが小さいダクトでは効率が良いことがわかる。