

解説

電子ストレージリングの真空

高エネルギー物理学研究所

小林 正典

A Review of Vacuum System of Electron Storage Rings

Masanori KOBAYASHI

Photon Factory, National Laboratory for High Energy Physics,

Subjects of vacuum in the electron storage rings are reviewed. In the space, ion and dust trapping are mentioned, and on the surface of the vacuum duct, photodesorption are explained. Physical understanding of the beam cleaning process is discussed as an evacuation process in the vacuum chamber under photon irradiation. Evacuation problems are also discussed in both systems of antechamber and cold bore. Beam impedance of vacuum components is described, and pressure distribution of the electron storage ring is explained with the pumping system of the ring.

はじめに

放射光を利用するユーザーが光源に要求する性能には、ストレージ電流、ビーム寿命、軌道の安定性、ビーム不安定の除去、より小さいエミッタンス、単バンチ運転等があるが、予め定めた予定表どおりに運転できる高い信頼性も、これらと同等に重要な役割を持っている。この解説では、ビーム電流、ビーム寿命、不安定性に関係の深い電子ストレージリングの真空について紹介する。ビーム寿命はリング内部の空間の気体分子の量と質に関係があり、それらはリング内壁からの放射光による光脱離に強く依存している。気体分子の

量と質を制御しているリング真空系に対する考えと構成について解説する。

1. 空間の問題

1.1 ビーム寿命

リングを周回している電子ビームの寿命には、電子とビーム軌道に存在する気体分子との衝突という真空に起因するものと、真空以外の原因によるものとに大別できる。後者については、Toushek寿命によるもの、6極あるいは8極電磁石によるdynamic apertureの大きさによるもの、上下方向に薄い開口を持つ挿入型光源用真空ダクト等で見

られる geometrical aperture の制限によるもの等がある。ここでは真空に関する寿命に話題を限ることにする。

ダクト内部に残留している気体分子を構成している原子 i を原子番号 Z_i で、それら気体分子の分圧を p_i で表わす。電子と気体(原子)との衝突を含む相互作用には、原子の核外電子による散乱、原子核によるラザフォード散乱、電子が遮蔽した原子による制動放射がある。これらの散乱による効果を加え合わせたものが(1)式の右辺であり、ビーム寿命 τ の逆数を与える¹⁾。

$$\begin{aligned} 1/\tau = & \Sigma [529Z_i/\gamma_c + 1058(Z_i/\gamma\theta_c)^2 \\ & + 2.46Z_i(Z_i+1)\{4/3 \cdot \log_e(\gamma/\gamma_c) - (5/6)\} \\ & \log_e(183/Z_i^{1/3})] p_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここで E_B はビームのエネルギー、 $\gamma = E_B/m_0c^2$ 、 ΔE_B を RF バケットの大きさとして $\gamma_c = \gamma \Delta E_B / E_B$ である。また、 θ_c はこれ以上散乱角が大きくなるとダクトに衝突してしまうという最大散乱角で、ダクトの開口のうち最も小さい開口 A_{\min} とその近傍での β 関数により $\theta_c = A_{\min}/\beta$ と与えられる。この式で最も大きく寿命に影響を及ぼすのは右辺第3

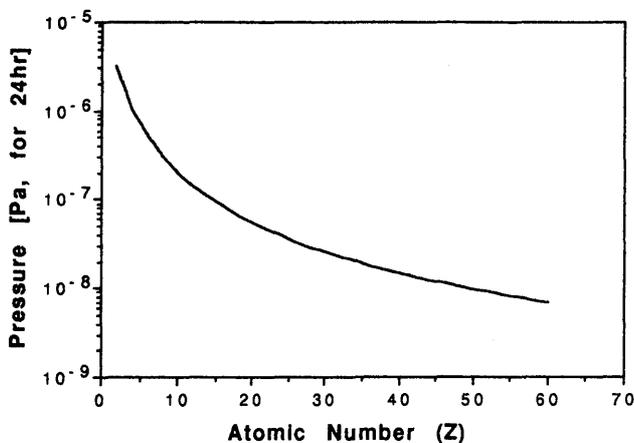


Fig.1 Partial pressures which give 24 hours of beam lifetime in PF electron storage ring. The abscissa indicates atomic number Z and the ordinate shows partial pressures [Pa].

項で表される制動放射で、原子番号 Z_i の大きな原子あるいは分子量の大きな分子がビーム空間に存在すると寿命が短くなる。PFでの値を上式の式に代入しビーム寿命24時間を与える圧力を求めてみると、Fig.1のようになる。したがって、電子ストレージリング真空系は量的(より低い圧力)にも、質的(より低 Z の分子)にも優れたものでなければ、光源の真空として十分とは云えない。

1.2 不安定性とトラッピング

周回している電子ビームの不安定性にはビームが誘起する電界によるもの以外に、真空との関係で起こる不安定性がある。

電子ビームと電子の軌道上に在る気体分子とが衝突すると、気体分子の一部はイオン化される。発生したイオンは、ビームダクト内壁の電氣的ポテンシャル(0Vと考えると良い)よりもさらに低いポテンシャルとなっている電子ビーム自身に引き込まれ、逃れることができなくなる。この状態をイオントラッピングという。イオントラッピング状態では、大きな質量を持った遅いイオンと光速で運動している軽い電子とが相互作用し(+電荷によって電子に対する集束力が変わり、チューンがずれるなど複雑)、電子ビームに不安定性が現れる^{2, 3)}。

一方、ダクト内壁には気体分子が多数吸着しているが、これら分子の中には放射光に照射されイオン化する分子もある。またダクト内壁にはマイクロダストと呼ばれる小さな塵があるが、それらも放射光照射によって光電子を放出して帯電する。これらの帯電したマイクロダストの電荷量が大きくなるにつれ、電子ビームが壁の位置に作り出す電場による引力が大きくなる。やがて引力がマイクロダストに働いている重力に打ち勝つようになり、電荷を持ったマイクロダストは負のポテンシャルとなっている電子ビームに向かって運動エネルギーを大きくしながら近づき、ビームのところで最大速度となった後、ビームを通り過ぎて

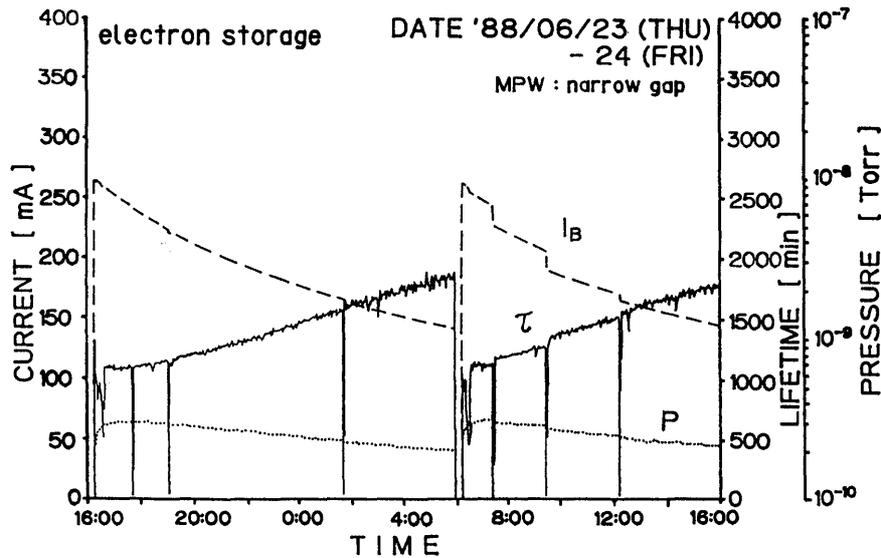


Fig.2 Stored beam current, beam lifetime and average pressures through 24 hours operation of PF. Beam current [mA] decreased smoothly in the left half of the figure, whereas in the right half abrupt decrements were occurred and beam lifetime [min] fell down to almost zero from several thousand minutes. Pressures were measured by 50 BA-type vacuum gauges and averaged. They were changed smoothly and any pressure bursts were not observed which cause the very short beam lifetime.

運動エネルギーがゼロとなるまで進む。質量の大きなマイクロダストの場合には、重力に引き戻され向側の壁に達する前に途中で方向を変え再びビームに向かって引き込まれる振動型の運動となる。このような状況は、マイクロダストトラッピングと呼ばれる^{4, 5)}。マイクロダストトラッピングが起こると、原子数の大きなダストに電子ビームが衝突することになるので、ビーム寿命が突然短くなり、電流値が階段状に減少することがおこる。Fig.2にビーム電流が突然減少したときの様子を示す。

陽電子ストレージでは、ビームのポテンシャルエネルギーがダクトのポテンシャルエネルギーより高いため、上に述べたトラッピングは発生しない。しかし、1.1に示したビームと残留気体との衝突は陽電子ストレージの場合でも問題として残る。

2. 表面の問題

2.1 放射光による光脱離

電子ストレージリングダクト内部の真空を支配するのは、放射光がダクトを照射することによるガス放出(=光脱離)と、それを排気する各種のポンプを含む排気系の能力である。排気系については5.排気系で触れることにして、ここでは放射光照射によるガス放出について述べる。

表面物理の対象になる光刺激脱離(Photon Stimulated Desorption: PSD)実験では、よく制御された単結晶表面上に目的とする気体原子や分子を吸着させ、脱離過程を通して気体と固体表面との相互作用を研究の対象としている。これに対し、電子ストレージリングダクト内部で起こっている「光脱離」には、エネルギーの高い放射光も含まれているため、金属最外層表面からの気体分子の脱離だけでなく、ダクトなどを構成している実用金属の表面層からの脱離も含まれる。また、放射光による直接的な励起による光刺激脱離と、放射光がダクトなどの金属表面層内部に発生させる二次電子によるオージェ電子および空間に飛び出してきた光電子が関係する電子刺激脱離(Electron

Stimulated Desorption: ESD)とが共存している。

ところで、ダクトなどの固体表面に気体分子を結合させているエネルギーは高々数eV程度であり、分子が熱平衡(あるいはそこから少しずれたベーキング)状態でやり取りできるエネルギーは数10~数100meVで、放射光に含まれる光子のエネルギーに比べればはるかに小さい。熱的過程である吸着や拡散におけるエネルギーよりはるかに大きなエネルギーを持つ光子が、吸着気体で覆われている表面や気体を吸蔵している表面層を照射した時に起こる光脱離では、脱離強度が熱的な脱離(Thermal Desorption: TD)よりも大きい強度を持つことになる。

2. 1. 1 照射光子数とパワー

加速度運動をしている電子から放射される放射光のスペクトル、放射パワー、放射光子数等についてはすでにいくつかの解説があるので^{6, 7)}、ここでは簡単にそれらを示しておくだけにする。軌道面から上下方向 ϕ の方向に、単位波長当たり単位角あたりに放射するパワー P_w は次の(2)式で与えられる。

$$P_w = \frac{27e^2c}{32\pi^3\rho^3} \left(\frac{\lambda_c}{\lambda}\right)^4 \gamma^8 \{1 + \gamma^2 \phi^2\} \{K_{2/3}^2(\xi) + \frac{\gamma^2 \phi^2}{1 + \gamma^2 \phi^2} K_{1/3}^2(\xi)\} \quad (2)$$

ただし、 $\gamma = E_B/m_0c^2$ 、 $\xi = (\lambda_c/2\lambda)\{1 + \gamma^2 \phi^2\}^{2/3}$ 、 $\lambda_c = (4\pi/3)\rho/\gamma^3$ 、 $K(\xi)$ は変形された第2種ベッセル関数である。光子数 N_p は、パワーを光子のエネルギーで割ればよい。

$$N_p(\lambda, \phi) = (\lambda/hc)P_w \quad (3)$$

(2)式に示したように水平垂直2種類の偏向面について加え合わせたパワーを、軌道面に垂直方向の発散について積分し、さらに放射の全てのエネルギーについて積分することにより、水平面内の単

位角度あたりの放射パワーを求めることができる。軌道一周あたりに放射される放射パワー W は ρ を偏向軌道半径として

$$W = 88.5 \times E_B^4 I_B / \rho \quad [W/2\pi \text{rad}] \quad (4)$$

である。ここで I_B はストレージ電流で単位はmA、 E_B は電子ビームのエネルギーで単位はGeVである。同じく一周あたりに毎秒当たり放出される全放射光子数 N_p は

$$N_p = 8.08 \times 10^{17} I_B E_B \quad [\text{photon/s}/2\pi \text{rad}] \quad (5)$$

となる。

ダクトを照射する放射光強度は、偏向電磁石部のダクトの内壁の単位長さあたり $N_p(2\pi(\rho + \delta\rho))^{-1}$ となる。ここで、 $\delta\rho$ は軌道中心から測ったダクトの半幅である。また、同じダクトの単位長さあたりに入射する放射パワーは $W(2\pi(\rho + \delta\rho))^{-1}$ となる。放射光実験施設PFの場合を例にとってこれらの値を求めれば

$$N_p = 1.47 \times 10^{18} [\text{photon/s/m}] \quad (400\text{mA}, 2.5\text{GeV}) \quad (6)$$

$$W = 2.91 \quad [\text{kW/m}] \quad (\text{同上}) \quad (7)$$

となる。また高エネルギー物理学研究所などで検討されているB-Factory計画に用いられる加速器は、電子・陽電子の衝突実験用リング型加速器であるが、ビーム電流は2000mA、ビームエネルギーは8GeV程度の強力なものである⁸⁾。この加速器のダクトに入射する光子数と放射光パワーはそれぞれ、

$$N_p = 1.2 \times 10^{18} [\text{photon/s/m}] \quad (8)$$

$$W = 7.68 \quad [\text{kW/m}] \quad (9)$$

となる。照射光子数はPFの場合と同程度である

が、パワーは受けとめる技術が新たに開発されなければならないほど強力なものとなる。

2. 1. 2 電子ストレージにおける光脱離

光脱離がある系での排気過程を説明する前に、現実の電子ストレージの圧力減少を示す。ところで、超高真空領域の圧力測定には電離真空計が用いられ、電離真空計が測定しているものは気体分子密度 n であり、真空計の値づけとして圧力 p が表示されている、ということはすでに知られたことであろう。先に示したように $N_p \propto I_B$ であり、圧力 p は、 N_p に比例し系の排気速度 S_e に反比例するので、電子ストレージの圧力上昇はストレージした電流に比例する。そこで p/I_B というようにストレージ電流値で規格化して系の圧力変遷を表すことが多い。光脱離を伴わない通常の真空装置の圧力の変遷を、排気時間に対して評価するのに対し、光脱離のある系での圧力変遷は、圧力が電子ストレージの運転時間の積分値とともに減少することから、 $\log(p/I_B)$ vs. $\log(\int I_B dt)$ という関係で評価する。電子ストレージ系の「運転に伴う圧力の減少」は、“self cleaning”あるいは“beam cleaning”と呼ばれる。

光脱離強度を評価するのに、光脱離イールド (=光脱離係数) がよく用いられる。考えている系の光脱離による圧力上昇量 Δp と系の排気速度 S_e とから、光脱離による脱離量は、 $\Delta p S_e$ [Pam³/s] となる。この脱離量を用いて光脱離のイールド η [molecules/photon] は

$$\eta = \Delta p S_e k_M / N_p = \Delta n S_e / N_p \quad (10)$$

と定義される。ここで N_p [photon/s] は系への入射光子数、 k_M は単位換算の係数で、 k_M [molecules/Pam³] = $7.242 \times 10^{22} p$ [Pa]/ T [°K] である。したがって、系の排気速度が一定なら、 p/I_B vs. $\int I_B dt$ は、 η vs. $N_p t$ を (間接的に) 表していることになる。

PFを設計していた1978年頃は、電子ストレー

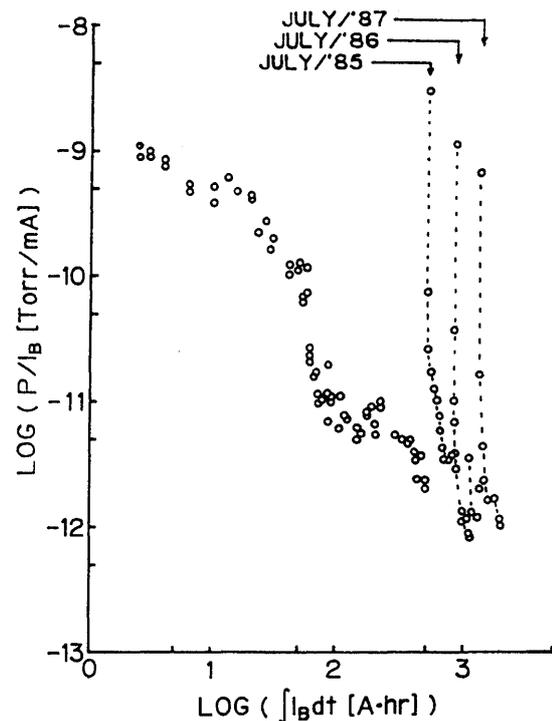


Fig.3 Averaged pressures of PF in the operation during several years. The ordinate indicates logarithmic pressures normalized by stored beam current [Torr/mA], and the abscissa shows logarithm of the integrated beam current [Ahr]. The latest values of the normalized pressure reaches $\cong 5 \times 10^{-13}$ Torr/mA.

ジリングの光脱離の理解において放射光の反射については考慮されていなかった。すなわち、放射光による光脱離は放射光直射部で起り、表面から測った入射角度を θ としたとき、ダクトに沿っての局所的な光脱離強度は $1/\sin \theta$ に比例したものになる、というのが加速器業界での常識であった。このような考えに対し、1984年頃になると加速器ダクト内部での光脱離における反射の役割の重要性が認められるようになり、後で述べる実験によっても⁹⁾、光脱離がある系での排気を記述する式においても、反射光の役割の重要性が示され認識されるに至っている¹⁰⁾。

光脱離をモデル化し数値的に記述することは次の節に示すが、モデルをつかった計算によれば放射光が直射している領域は短い時間で脱離が完了してしまうことが導かれる。一方、実際の系の beam cleaning は短時間では終わらない。このこと

から系の「枯れ」の進行の時定数になっているのは直射部での光脱離ではないことがわかる。

このような枯れの進行のほかに、「放射光照射の記憶」という現象もある。放射光照射による beam cleaning によってガス放出が小さくなったリング真空系を、改造などのために大気にさらした場合、改造後の再排気過程での圧力減少は初回と同じではなく、再排気の方が beam cleaning が速やかに進行する現象がみられた。リングダクトは「放射光照射の履歴」を記憶する、と云っても良い。実験装置内部での光刺激脱離実験では光子のエネルギーは高々 kV 程度であるため、脱離がほぼ表面最外層に限定されていると考えても良い。これに対し、電子ストレージリングダクトを照射している光子には、より高いエネルギーの光子が含まれている。それらのエネルギーの高い光子は表面層内部にまで侵入するので、表面最外層の吸着気体だけでなく、表面層内部からの気体も脱離の対象となってしまう。光脱離が進行した表面層を改造などのために大気に解放した場合、気体分子の吸着吸蔵過程は熱的な過程なので、(光脱離による)脱離速度よりも吸着(吸蔵)速度の方が遅い。したがって、放射光照射を受け光脱離が進行した表面層に(大気圧から)気体分子が吸着しても、3~4ヶ月程度の大気解放では気体分子は表面層内部にまで拡散できず、再排気過程では表面からの脱離が主になる。このため beam cleaning が速やかに進み放射光照射をあたかも記憶したかのように圧力が減少する、と説明されている¹⁰⁾。

2. 1. 3 電子ストレージリングにおける光脱離のモデル化

光脱離のある系での脱離と再吸着を含む排気過程をより正しく理解するには、反射光による照射面の役割、脱離した気体の再吸着、表面層からの拡散などを考慮しなければならない¹¹⁾。前節で紹介した放射光照射の記憶は、表面層での拡散現象

を含み複雑となるので、ここでは省略することにする。一方、反射光の効果はエネルギーの低い電子ストレージリングでも問題となるので、反射した放射光による脱離も含めて、光脱離がある真空系における排気過程を数式で表すことにしよう。

系を単純化したモデルとして表し、その概念図を Fig.4 に示す。熱的な脱離は光脱離に比べ桁違いに小さいとして無視して、ダクトの内部を、放射光が直接照射している部分(添字1)と、反射光が照射している部分(添字2)とに分け、近似的に表わすことにする。

系の内表面の単位面積当たりに吸着している分子数 N_s [molecules/cm²] の時間的変化は

$$\begin{cases} \frac{dN_{s,1}}{dt} = \frac{1}{4} \bar{v} s(\theta_1) n - N_{p0}(1-R)Y_e \sigma N_{s,1} & \text{(直射光照射部)} \quad (11) \\ \frac{dN_{s,2}}{dt} = \frac{1}{4} \bar{v} s(\theta_2) n - N_{p0} R Y_e \sigma N_{s,1} & \text{(反射光照射部)} \quad (12) \end{cases}$$

と表すことができる。ここで、右辺の n は気相の分子密度、 \bar{v} は気体分子の熱的平均速度、 $s(\theta)$ は

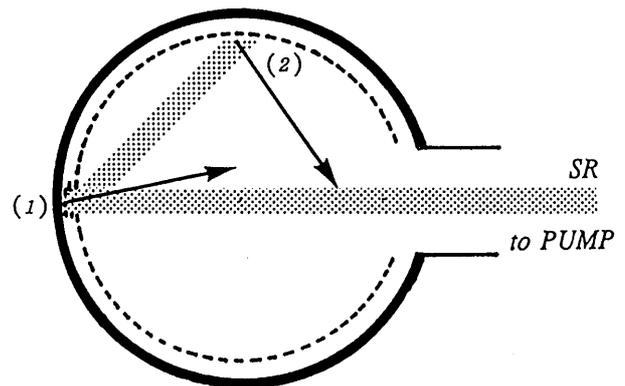


Fig.4 Schematic view of the model of photodesorption in the chamber. Synchrotron radiation SR which comes in through an inlet aperture. SR irradiates directly at the region (1), and some parts of SR are reflected and irradiate the other inner wall designated as the region (2). Some of gas molecules desorbed from the two regions can re-absorb on the chamber wall, and the rest of desorbed gas molecules is reflected and exhausted through the inlet aperture to the outside of the system.

脱離した気体分子が再吸着する確率を表す。 θ は吸着分子の被覆率である。単位面積あたりの入射光子数を N_{p0} [photon/s/cm²]で表す。反射率 R は放射光のエネルギーによって変るが、ここでは系内での代表的な値として用いることにする。また、光刺激脱離よりも光電子による電子衝撃脱離の方が効果的であるとし、光電子イールド Y_e (=量子効率) [photoelectron/ photon]と光電子による脱離断面積 σ [cm²/ photoelectron]を用いて脱離強度を表してある。

系の排気を排気速度 S_e のポンプで行っている場合、系内の分子数の減少は

$$V \frac{dn}{dt} + A_1 \frac{dN_{s,1}}{dt} + A_2 \frac{dN_{s,2}}{dt} = -nS_e \quad (13)$$

と表すことができる。ここで V は考えている系の容積、 A_1 は直射光が照射している面の面積、 A_2 は反射光が照射している面の面積である。一般に、 $A_1 \ll A_2$ である。また、ここでは熱脱離は無視したので、光のあたらない部分からの熱脱離の項は省いてある。光脱離のある系での排気は、(11)～(13)の式を連立方程式として解き、 $n(t)$ を求めることである。結果の詳しい解説は文献¹¹⁾に譲ることにして、ここでは、最も簡単な近似を使って、Fig.3に示したような圧力変化が現れる理由を考えてみよう。

上の連立方程式を $s(\theta) = \text{定数}$ 、という最も簡単な近似で解いた場合、

$$n(t) \doteq N_s(0) N_{p0} Y_e \sigma S_e^{-1} \exp(-\alpha S_e^{-1} N_{p0} t) \quad (14)$$

と求めることができる。 α は $s(\theta)$ 等を含む定数である。したがって、光脱離のある系の排気過程を、Fig.3のような $p(t)/I_B$ vs. $\int I_B dt$ の関係に表すことは、 $n(t)/N_{p0}$ vs. $N_{p0} t (= \int N_p dt)$ という関係を理解しようということに対応する。但し、この例は近似が簡単すぎるために、図にみられるようなlog-logプロットではほぼ直線という関係ではなく、

semi-logプロットで直線という関係を与えてしまうことになるが、物理的に内容を把握することはできる。近似を改善して、 $s(\theta) = s_0(1-\theta)$ としたり、あるいは解離吸着を考慮して $s(\theta) = s_0(1-\theta)^2$ とすると、 $p(t)/I_B = [\int I_B dt]^{-m}$ 、 $0.5 < m < 1$ という関係を得ることができ、観測した現象をおおよそ説明できる。

2.2 光脱離の実験結果

光照射をダクトが記憶しているという事情のため、beam cleaning過程を明らかにするための光脱離実験をリングダクトそのものを用いて、「繰り返して」行うことはできない。ダクトの表面処理の条件を変えた場合の光脱離の測定を行うには、常に新しいテストダクトを用いて白色光を照射して測定を行う必要がある。テストダクトを用いて表面処理と材質を変えた場合の光脱離の結果をFig.5に示す¹²⁾。このような材質や処理に関する測定結果の積み上げは、使える光源が限られているため、PF以外にNSLSのグループ、CREAN-Orsayグループによるものに限られているといっても良いほど少ない。

3. ダクトの構造からみた系の問題

3.1 光脱離とダクト構造

電子を加速し放射光がリングダクトを照射する加速器のダクト断面形状を大別すると次のFig.6ようになる。

図において、従来型と呼ぶものがDESYやSSRL、PFで採用されているダクトの断面形状で、ビームの通るスペースと放射光が照射する場所が同一となっている。放射光照射による光脱離で放出された気体分子を、隣接された分布型排気ポンプを用いて取り除く設計となっている。単位長さあたりの光脱離量を単位長さあたりの排気速度で割った値が、おおよそその系の圧力となる。このような型のリングは数多くある。これに対して、アンテチャンバー型と呼ばれるものは新しい考え方のダクト断面形状である¹³⁾。放射光照射領

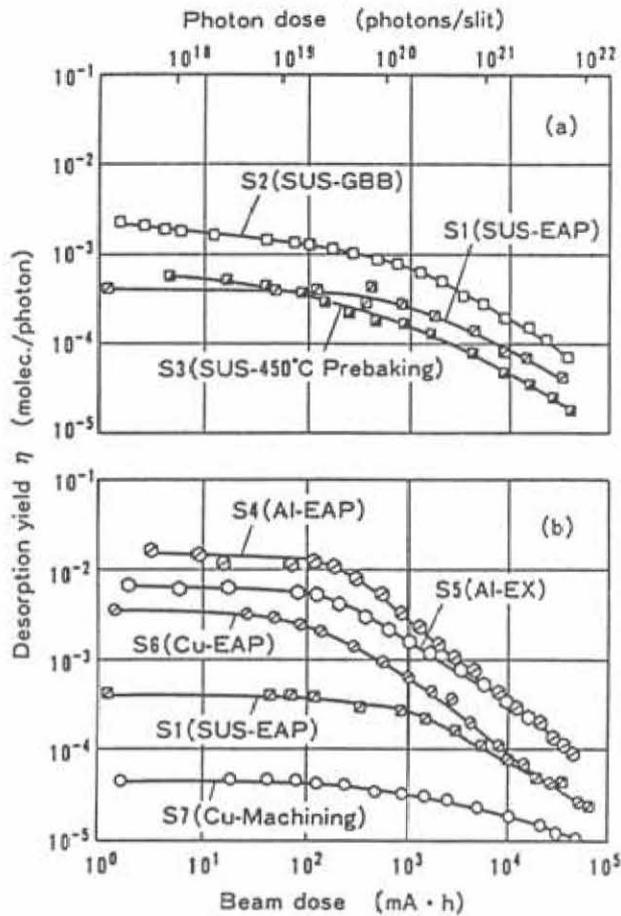


Fig.5 Experimental photodesorption yields of aluminum alloy (Al), stainless steel (SUS) and oxygen free high conductivity copper (Cu). They are plotted against the integrated beam current [mAh] which corresponds to integrated photon dose [photon/slit]. Materials and surface preparations are shown in the Table. All samples are ducts which have same geometrical conditions and SR irradiates on the side wall of the ducts in normal incidence.

Preparation of all test chambers		
Sample	Material	Surface treatment
S1	SUS316	Electrolytic-abrasive polishing
S2	SUS316	Glass beads blast
S3	SUS316	Electrolytic polishing and 450°C × 48 h prebaking
S4	A6063	Electrolytic-abrasive polishing
S5	A6063	Extrusion
S6	OFC C-1	Electrolytic-abrasive polishing
S7	OFC C-1	Machining

域をビームの通るスペースから分離して前室(antechamber)内部に限定し、ビームスペース内部では光脱離が起らないようにしようとするものである。これら二つのスペースは、真空的にはコンダクタンスが小さく、一方、放射光通過にとっては大きなコンダクタンスとなるような、上下に薄い幅広の板で挟まれた隙間でつながれる。小さな断面開口をもつ細いビームスペースは真空に必要な大きなコンダクタンスの確保が困難なので、このスリットを通して antechamber側のコンダクタンスを活用することによって、系の実効排気速度を確保する。この antechamberは興味深い構造ではあるが、もし、 antechamberダクトの内壁を放射光が照

射した場合には、ビームスペース内部の圧力は antechamber内部の圧力と「淀み圧の関係」になるので、真空工学的メリットはほとんど無い。最近の設計では、 antechamberの側壁を放射光が照射しないようなダクト構造とし、 antechamber内部に局所的に放射光を受け止めるアブソーバーを配置した設計としている。ALSと同様のダクト構造は米国のAPS計画⁽⁴⁾、日本でのSpring-8計画⁽⁵⁾において見られる。欧州ESRF計画のダクト断面は antechamber というような膨らんだ部屋を持たせずに従来型ダクトに偏平な放射光取り出し管を取付け、放射光照射領域をビームスペースから遠い場所限定する構造をとっている⁽⁶⁾。

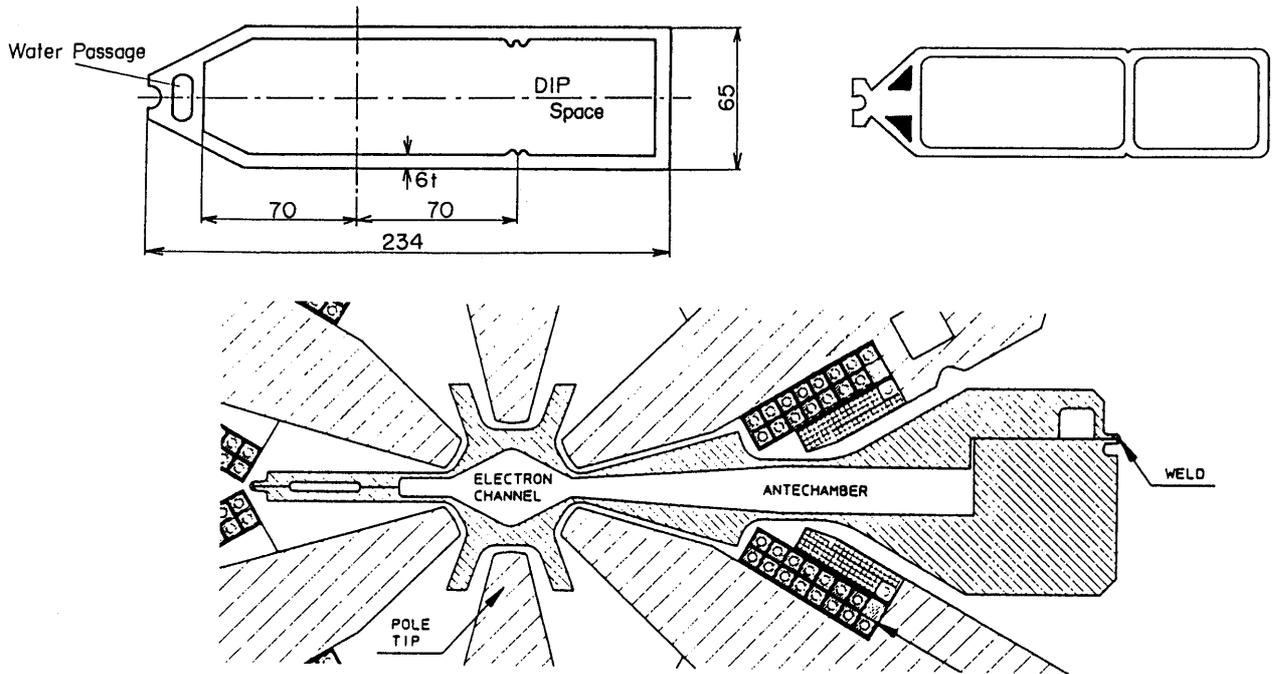


Fig.6 Cross sectional views of vacuum duct. Vacuum duct in the bending magnet section (B-duct) of PF (top-left) and B-duct of X-ray ring of NSLS of BNL (top-right). These are traditional type and have the beam space and the pumping space. Antechamber in the sextupole magnet section of ALS of LBL (bottom). This is a new-fashioned vacuum duct of the electron storage ring.

ダクト全体を極低温に冷却するコールドボア型はSSC計画にみられる¹⁷⁾もので、光源用電子ストレージリングのものではないが、光脱離から見ると問題点がある。米国のSSC計画では10~20TeVの陽子を加速し衝突させることを考えているが、陽子もこのようなエネルギー領域では放射光を放射し臨界エネルギーが数百eVとなる。Eq.(10)で定義した光脱離イールドは、「問題としている系から排気により運び去られ除かれた気体量」をもって脱離分子量としているので、工学的脱離イールドと呼ぶべきものである。1個の光子で何個の分子が脱離するかという物理的脱離過程を表す脱離イールド η^* [molecules/photon]ではないことに注意を払わなくてはならない。表面への再吸着の確率 $s(\theta)$ を用いて η^* を表せば、

$$\eta^* = \{1 + s(\theta) A K_c^{-1} A_p^{-1}\} \eta \quad (15)$$

となる¹¹⁾。ここでAは再吸着が起る表面の面積、 A_p は系の外に気体分子を運び去る能力を持つポンプの排気孔の面積、 K_c はこの排気孔からポンプまでのコンダクタンスを考慮したクラウジング係数である。この関係式から明らかなように、再吸着がない場合($s(\theta) = 0$)にのみ、 $\eta^* = \eta$ となるので工学的脱離イールドを用いて脱離の素過程を吟味できることになる。SSC計画では超伝導磁石の内部に置かれたビームダクトの壁温が極低温になることを利用して、ダクト内壁そのものをクライオポンプ面とする構造となっている。したがって、ダクト内面はクライオポンプ面であるとともに放射光照射面でもあるという構造となる。しかし、ここに見られるクライオ面は「系の外に気体分子を運び出す排気系」ではない。このような系でのbeam cleaningの過程がどのようなものになるのか、という興味深い問題の理論的な解析は、

同種の問題を抱える欧州 CERN の LHC 計画においても議論されている。しかし、光脱離と真空系の beam cleaning についての理解が十分でない現在、まだほんの一握りの人々の間での問題にされているにすぎない。

3.2 製作と構造

リング真空系の大部分を占めるビームダクトは、大型の電子ストレージリングではアルミニウム合金が、また小型の電子ストレージリングではステンレス鋼が素材として用いられることが多い。大型の電子ストレージリングでは放射パワーも大きく、それを受けとめるためには水冷されたダクト構造が不可欠となる。また偏向半径も大きく、ダクトは緩やかに曲っている必要がある。このような構造はアルミニウム合金を押し出し成形することにより、比較的容易に製作できる。PF は勿論、PF 以前に作られた DESY や SSRL のダクトはアルミニウム合金の押し出し成形法を採用している。PF 以降作られた高エネルギー物理学研究所トリスタン計画の AR と MR と呼ばれる二つのリング、CERN の LEP 計画でもアルミニウム合金の押し出し成形法を採用している¹⁸⁾。光源用リングとしての APS や SPring-8 もまた同じ製法を用いてダクトを製作している。

小型のリングでは、放射光パワーも小さく自然冷却のままで破損することもないので、特に冷却の工夫はなされていない。また、押し出し成形したダクトを小さな偏向軌道半径に合わせて曲げ加工することは困難となるので、アルミニウム合金を使うメリットはなく、従来は、ステンレス鋼を用いて板金加工でリングダクトを製作している。しかし、最近の antechamber 構造に似たダクトをステンレス鋼で製作するにはそれなりの困難があるために、鍛造アルミニウム合金の厚手の板から、機械加工による削り出しによって製作することが行われるようになってきた。ダクトを上半分と下半分とに分け、下半分のダクトの内側にな

る部分と外側になる部分とをそれぞれ削り込み、同じようにして製作した上半分の部分とを溶接によって接合して上下を一体化してダクトとする手法である¹⁹⁾。この方法では半径の小さなものや内部構造が複雑なものも製作できるメリットがある一方、溶接による歪を最小にする設計製作技術が要求される。ALS や台湾で建設中の電子ストレージリングダクトはこの手法で製作されている。

先に紹介した antechamber 構造のダクトでは、ダクトの幅が従来型のダクト幅に比べ大きい。このため、真空中に排気した場合に大気圧によってダクトにつぶれの変形が起りやすい。このつぶれの変形が大きくなる場所は 6 極電磁石の磁極や 4 極電磁石の磁極の位置で、変形を防ぐためにダクトの肉厚を大きくできない箇所である。一方、断面内側は放射光通過のためのスリット部であるので支えなどを挿入するわけにはいかない。また、4 極電磁石の付近にはビーム位置検出のためのモニター BPM が設置されることが多いが、ダクトにフローのような時間的にゆっくりした変形が生ずると長時間のモニターの性能を確保することが困難となる。変形を最小するためにベーキング温度は極力低くする必要が生ずる。antechamber と磁石が干渉するので、電磁石にとっても従来のようなリング内周側と外周側とが対称という構造をとるというわけにはいかず、外周が開いた片持ち梁の構造をとらざるを得ない。このような問題を抱えながらも世界各地で antechamber 構造のダクトを採用したリングが建設されている。どのような性能を示すのか、興味深い。

3.3 インピーダンスと構造

PF の通常のユーザーモードは、全てのバケットに陽電子が入っている状態の運転で、多バンチ (multi-bunch) 運転とよばれている。これに対して単一のバケットにのみ (陽) 電子が入っていて他のバケットは「空」という状態 (single bunch) の運転もある。この単バンチ運転はパルス状の放射光

を発生させることを目的としている。単バンチ運転では、マルチバンチでは問題にならなかったリングを構成しているダクトやベローズ、フランジ、排気孔などの開孔のある部分で発生する電磁場(wake field)が問題となる。電磁場はビームに力を及ぼし、ビーム不安定性の一因となると同時に、結局はダクト内でオーム損失となって熱に変る。高周波損失は、ダクトなどの問題とする空間やその前後において幾何学的な凸凹があると発生する。次のバンチが来るまでに発生した電磁場が減衰する場合、損失パワー P は $P = kt_b I_b^2$ と表せる。ここで、 k はロスパラメータ、 t_b はバンチ間隔、 I_b は平均ビーム電流である。リングを構成している各要素の高周波損失が、ロスパラメータを用いて評価されている。ロスパラメータを実測する方法や計算方法については参考文献に詳しいので²⁰⁾、ここでは要素のうちのいくつかを例として取り上げることにする。表1にロスパラメータの値を3種類のバンチ長に対して求めた値を示す。凸凹や隙間のある構造は損失を増やすが、損失の程度はバンチ長が短いほど(狭い空間により多くの電荷が集中しているほど)損失が大きくなるのが見て取れる。単バンチ運転を考慮したリング真空の設計では、ベローズの内側(ビームから見える範囲)を電氣的に滑らかにする工夫や、溶接による接合やフランジ接合において凸凹や隙間を最小にする設計製作技術が要求される。放射光を取

り出すスリットや antechamberでのロスパラメータは、まだ十分に検討されていない。

4. リングダクトに沿っての圧力分布

電子ストレージリングダクト内部の圧力はどの様になっているのであろうか。ダクトに沿って間隔を細かに真空計を配置し圧力分布を実測できれば良いが、現実には電磁石に阻まれて真空計を設置することができず、理論的計算によって圧力分布を求めざるを得ない。ダクトを単位長さをもつ z 個の要素に分け、要素毎の実行排気速度 $S_0(z)$ と負荷 $q(z)$ を求め、それらの加算から圧力分布を求める^{21, 22)}。積分形式で書けば、 $p = \int p(z) dz = \int q(z) S_0(z)^{-1} dz$ と記述でき、 $1/S_0(z)$ は系の排気性能を示すグリーン関数に相当するものとなる。ガス放出として光脱離を考える場合は、 $q(z)$ をダクトに沿っての放射光の単位長さ当たりの入射強度に比例する量として考え、比例係数として η をとる。

PFのノーマルセル部での圧力分布の計算例をFig.7に示す。図の一番上の曲線はダクトに沿っての放射光照射強度で、系の負荷分布を与えている。中間の曲線はダクトに沿っての実効排気速度 $S_0(z)$ を表している、すなわち、この系が持っている排気能力の分布である。一番下の曲線は負荷と排気能力から求めたダクトに沿っての圧力分布で、ビーム電流 I_b と光脱離イールド η で規格化し

Table 1 List of Loss Parameters of Ring Components

component	quantity	bunch length		
		26.7ps	45.2ps	78.3ps
gate valve (std)	2	1.296	0.689	0.300
tapered tube	2	0.130	0.122	0.037
bellows (Q-type)	98	23.699	5.876	1.148
ICF flange (G3)	39	2.262	1.482	0.780
ICF flange (G1)	20	0.700	0.440	0.220
RF cavity	4	1.612	1.100	0.679

(G1 and G3 show that the flange gap is 1mm and 3mm, respectively.)

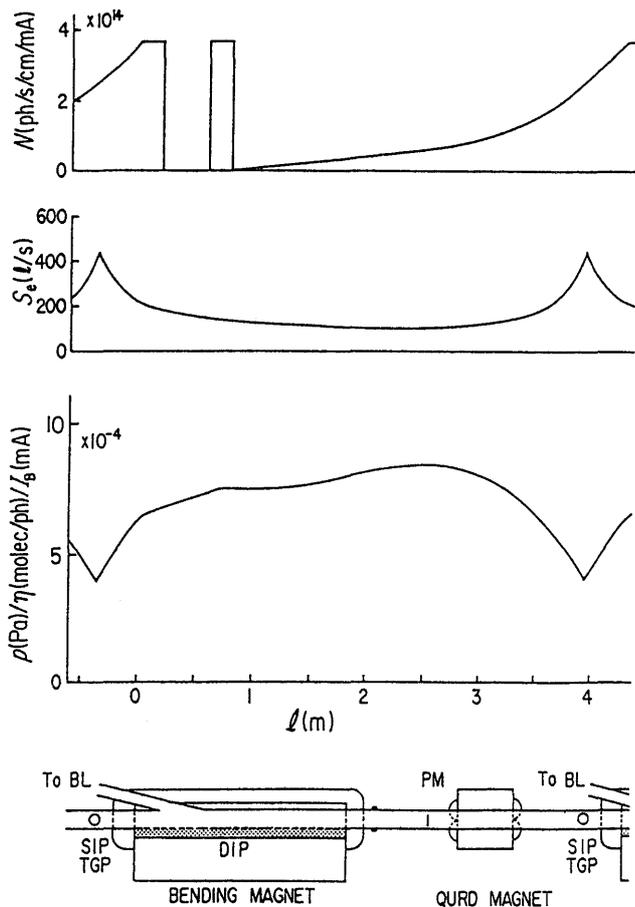


Fig.7 Photon incidence, effective pumping speed and pressure along the ring vacuum duct in the normal cell of PF. In the figure, the ring components are shown schematically, and beam runs from right to left. Top view shows the intensity of photon incidence, which is strong in the bending magnet section and falls down to zero at the window to the beam channel. The middle shows effective pumping speed, which includes pumping speed of the pump and conductance of the vacuum duct. Bottom shows local pressures normalized by beam current and photodesorption yield.

て表してある。この圧力分布は、異なる電子ストレージリング真空系の性能評価を公平に行うことができる。すなわち、等しいビーム電流と等しい η （あるいは等しい表面状態）での系の圧力を表現しているので、この規格化された圧力分布曲線は、電子ストレージリング真空系の性能を見きわめることができる真空系の「特性曲線」とみなせる。

ここで示した計算手法によれば、真空計の「取

付位置での圧力」と「ビームが通る場所での圧力」との関係も求めることができる。PFでのビーム寿命 τ から求めた「ビームが感じている圧力」とこの計算によって求めた「平均圧力」とが等しい、として η の値を求めてみると、PFでは beam cleaningが進み、 $\eta < 10^{-6}$ ($\approx 6 \times 10^{-7}$) [molecules/photon]となっている。

この評価手法を用いて、PFと同時に設計製作された米国 NSLS の X-ray リングおよび高エネルギー物理学研究所トリスタンのARとMRの二つのリングの性能を評価してみたが、それぞれのリングの真空に関する特徴が見て取れた。また、中規模計画として提案されている電子ストレージリングの一つについて、この手法で真空系の設計性能を評価し、PFと同程度の圧力となる可能性のある設計か否かも調べた²³⁾。

真空系の設計が正しければビーム寿命が長いので、入射から入射までのビーム電流値を高く保つことができ、したがって、積分電流値の値は速やかに大きくなる。積分電流値の増加は beam cleaningの速やかな進行を意味し、ますますビーム寿命が延びるというポジティブフィードバックがかかることになる。言い替えば、最初の設計が不十分な電子ストレージリング真空系は、運転を積み重ねてもなかなか満足できる性能に達することがむずかしく、優れた設計のリング性能に追いつけないということになる。

5. 排気系

2. 1. 2および4. で示したような圧力を得るための排気系の能力は、「リング全体での放出ガス量を全排気速度で割った値が、必要とする圧力以下となること」、という条件で考えれば近似的に正しい。すなわち、 $Q_{total}/S_{total} = 8.08 \times 10^{17} I_B E_B \eta \times (1/k_M) / S_{total} = p$ という関係から 300°K では、 $S_{total} [m^3/s] = 3.346 \times 10^{-3} I_B E_B \eta / p$ をえる。PFの場合、 $I_B = 400mA$, $E_B = 2.5GeV$, $p = 10^{-7} Pa$ となるのに必要な排気速度を求めてみる。 η の値として 10^{-5} [molecules/pho-

Table 2 Pumps and Pumping Speeds (designed values)

pumps	quantity	pumping speed (ℓ/s)		
		nominal (N_2)	designed (effective)	
Roughing Pump				
Rotary pump	6	220 (ℓ/min)		
Turbomolecular pump	6	270		
Main Pump			(H_2)	(CO)
Distributed ion pump	28	—	119	
Sputter ion pump	50	128	76	34
Ti sublimation pump	50	—	618	360

ton]を仮定すると、 $S_{total}=334.6[m^3/s]$ となる。 $\eta=10^{-6}$ であれば排気速度は一桁小さくてよく、現実的な値(3346 ℓ/s)となる。ここで要求されている排気速度の値 S_{total} は実効排気速度であって、カタログに記載されてある公称値ではない。ビームダクトの排気孔とポンプの取付位置との間にコンダクタンスや、超高真空領域でイオンポンプの排気速度が公称値の30%程度にまで落ち込むことなどを考慮した実効的な値でなければならない。PFでは設計時の現実的な実効値として、およそ $S_{total}=39500\ell/s$ for H_2 , 20400/s for CO という値を選び、次の表2に示すポンプの種類、台数、排気速度を用意した。

超高真空での残留ガスは、水素が主成分で次に多いのが一酸化炭素であることが多い。1.1で示したようにビーム寿命に影響を与えるのは水素ではなく一酸化炭素や二酸化炭素であるので、排気速度は第2の主成分である一酸化炭素に対して評価してある。

ターボ分子のように系外に気体分子を運び出す「移送型ポンプ」を使う場合には、超高真空となるべきリングがポンプを通して大気圧と常につながっているため、停電などに備えたインターロック系が必要となる。蒸発型ゲッターポンプTSPや非蒸発型ゲッターNEGのように真空系内部の限定された表面に気体分子をため込む「ため込み型ポンプ」の場合には、大気からのリークのように大きな流量となる気体量があればポンプが排気しきれ

ない事態が生じるので、徹底的にリークハンティングとその対策をとる必要があるだけでなく、排気すべき気体の総量と種類を制御することを設計の段階で取り込まなければならない。

おわりに

電子ストレージリング真空系の問題点を紹介した。放射光実験施設電子ストレージリングPFの個々の具体的な問題と云うよりは、電子ストレージリング真空系に共通な問題を列挙し、考え方を示したつもりである。電子ストレージリング真空系の設計は、真空部品を集合するという意味での設計ではなく、光源の性能を決めるラティス設計と並行して行われるべき「系」の設計であることに関心を持ってもらえれば幸いである。

文献

- 1) 鎌田進: KEK Report 79-20, 1(1979).
- 2) H. Kobayakawa, K. Huke, M. Izawa, Y. Kamiya, M. Kihara, M. Kobayashi & S. Sakanaka: Nucl. Instrum. Methode A248, 565(1986).
- 3) S. Sakanaka, M. Izawa, H. Kobayakawa & M. Kobayashi: Japan. J. appl. Phys. 27(6), 1031(1988).
- 4) P. Marin: LURE RT/90-1 Orsay, March(1990).
- 5) H. Saeki, T. Momose & H. Ishimaru: Rev. Sci. Instrum. 62(4), 874(1991).
- 6) J. Schwinger: Phys. Rev. 75, 1012(1949).

- 7) 菊田惺志：日本結晶学会誌, **18**(2), 65(1976).
- 8) Report on Mini-Workshop on KEK B-factory (held on Oct. 31 - Nov. 1, 1991).
- 9) M. Kobayashi, M. Matsumoto & S. Ueda: J. Vac. Sci. Technol. **A5**(4), 2417(1987).
- 10) M. Kobayashi: AIP Conference Proceedings No. 171, 155(1988).
- 11) M. Kobayashi: AIP Conference Proceedings No. 236, 332(1990).
- 12) S. Ueda, M. Matsumoto, T. Kobari, T. Ikeguchi, M. Kobayashi & Y. Hori: Vacuum **41**(7-9), 1928(1990).
- 13) Conceptual Design Report July(1986), LBL, Univ. California.
- 14) R. B. Wehler & R. W. Nielsen: AIP Conference Proceedings No. 171, 60(1988).
- 15) S, H, Be, Y. Morimoto, H. Sakamoto & S. Yokouchi: ibid No. 171, 73(1988).
- 16) B. A. Trickett: ibid No. 171, 81(1988).
- 17) Interim Report by SSC Central Design Group June(1985).
- 18) O. Gröbner: Atomkernenergie Kerntechnik **46**(3), 182(1985).
- 19) Y. C. Liu & J. R. Chen: ibid No. 236, 173(1990).
- 20) T. Kiuchi, M. Izawa, S. Tokumoto, Y. Hori, S. Sakanaka & M. Kobayashi: KEK Report 92-4.
- 21) 小林正典: OHO'87 Textbook, III-1(1987).
- 22) K. Knazawa: J. Vac. Sci. Technol. **A6**(5), 3002(1988).
- 23) 飛山真理, 谷口雅樹, 小林正典: KEK Report 89-2, 100(1989). Proc. 7th Meeting on Ultra High Vacuum Techniques for Accelerators and Storage Rings, (Mar. 27-28, 1989, KEK).