

先端光源加速器の真空技術

1. はじめに

放射光源加速器は 1980 年代より普及が進み、現在もユーザーの多様なニーズに応えるべく進化を続けている。そして、電子ビームの高品質化に伴い、真空システムに対する要求も厳しいものとなってきている。

本テキストでは、このような先端光源加速器の真空システムを設計したり、運転したりする際に考えるべき項目を解説していきたいと考えている。また、真空担当者のみならず、加速器に携わる多くの方々に、真空システムが加速器の目標性能を達成するためにどのような役割を果たしているかを多少でも理解していただければ幸いである。

しかしながら、筆者の経験や知識の制限から、本テキストでは電子蓄積リングの真空システムに関する解説が主要な割合を占めている。このため、今回の OHO セミナーのテーマである ERL 型光源の基盤技術開発とは必ずしも一致しないことをご容赦いただきたい。

さらに、ERL における真空技術は、電子銃や超伝導加速空洞においても、その性能を活かすために重要な役割を果たしている。そこでは、極高真空や高度な清浄環境といった特殊な真空技術も要求されているが、それらは本講義の対象外とさせていただきます、本講座の山本氏や阪井氏の講義テキストを参照していただきたい。

本テキストは 2 部構成になっており、前半の第 2 章では、真空システムの果たすべき役割という観点から、光源加速器の真空システムを設計したり運転したりする際の基礎的な考え方について解説する。

後半の第 3 章では、ERL 型光源の試験加速器として 2013 年に建設されたコンパクト ERL (cERL) の真空システムの概略に加え、低インピーダンスコンポーネントの開発と比較的新しい真空技術である NEG コーティングについて紹介する。

2. 光源加速器真空システムの役割

ここでは、真空システムの果たすべき役割として、以下の 8 つのテーマで解説を行う。

- 1) ビームと残留ガスとの相互作用の低減
- 2) 放射光の吸収
- 3) ビームの誘起する電磁場の伝送
- 4) 電磁石磁場の伝達
- 5) ビームの高い位置精度と安定度の実現
- 6) 放射線（放射光）の遮蔽
- 7) ダストフリー環境の実現
- 8) 加速器コンポーネントの保護

2.1. ビームと残留ガスとの相互作用の低減

真空システムの果たすべき第一の役割は、何と言っても、ビームダクト内を超高真空に保ち、ビームと残留ガスとの相互作用の結果生じるビームロス許容レベルまで低減させることである。残留ガスに起因する問題には、この他にも、イオントラッピングによるビーム不安定性、放射光ビームラインに向けて発せられる制動放射 γ 線などがある。

本節では、まずビームダクト内の主要なガス放出源である光刺激脱離について解説した後、ビームと残留ガスとの相互作用で生じる問題として、ビームロスとイオントラッピングについて解説する。

2.1.1. 光刺激脱離

脱離のメカニズム

放射光源加速器ではビーム運転中に動的なガス放出が起り、ビームダクト内の圧力が上昇する。自由電子レーザー (FEL) のような直線型加速器を除く光源加速器における主要な動的ガス放出は、放射光照射による光刺激脱離 (Photon Stimulated Desorption; PSD) である。

ビーム運転時の動的ガス放出は、放射光が直接照射する部位だけでなく、反射光や散乱光、光電子が当たる場所からでも生じる。このため、加速器では広義の PSD として、光電子による電子励起脱離 (Electron Stimulated Desorption; ESD) を含む^[1]。一部、放射光照射部の温度上昇による熱脱離

や、場合によってはビームの誘起する高次モード (Higher Order Mode; HOM) 高周波による発熱やマルチパッキングなどで生じるガス放出もある。PSD と区別するのは難しいが、一般に熱脱離ガスは時間的に緩やかな圧力変動として観測される。

さらに、PSD や ESD の脱離機構は非常に複雑で、電子的な励起状態を介する電子遷移誘起脱離 (Desorption Induced by Electronic Transitions; DIET)、赤外光による直接励起やフォノン励起など電子励起を伴わない脱離などがある^[2]。

DIET による脱離機構では、電子励起により表面から電氣的反発力を得ることで脱離に至るモデルが提唱されている。代表的なものとしては、化学吸着した分子が電子励起により基底状態から反結合状態へ遷移 (Frank-Condon 遷移) することで表面ポテンシャルから脱離のエネルギーを得る Menzel-Gomer-Redhead (MGR) モデル、物理吸着した分子がイオン化後に脱励起する際のポテンシャル間遷移で脱離エネルギーを得る Antoniewicz モデル、オージェ電子放出による内殻励起緩和で陽イオン化されて電氣的な反発力で脱離する Knotek-Feibelman (KF) モデルなどがある。

光刺激脱離係数 (PSD yield)

加速器では PSD によるガス放出の程度を表す指標として、放射光の光子 1 個あたりに放出される気体分子数で定義される光刺激脱離係数 η [molecules/photon] が広く用いられている。すなわち、毎秒壁をたたく放射光の光子数 \dot{N}_{ph} [photons/s] と、毎秒壁から脱離する気体分子数 \dot{N}_{PSD} [molecules/s] を用いて、

$$\eta = \frac{\dot{N}_{\text{PSD}}}{\dot{N}_{\text{ph}}} \quad (2-1)$$

で与えられる。

\dot{N}_{PSD} を求めるには、放出ガス流量 Q_{PSD} [Pa·m³/s] を測定して、

$$\dot{N}_{\text{PSD}} = \frac{Q_{\text{PSD}}}{kT} \quad (2-2)$$

から気体分子数に変換すればよい。ここで、 k はボルツマン定数 (1.381×10⁻²³ J/K)、 T はビームダクトの温度 (~300 K) である。

加速器における Q_{PSD} の見積りは、リング全体の実効排気速度 S_{eff} [m³/s] が一様に分布すると仮定すれば、平均圧力上昇 Δp_{avg} [Pa] を測定して、真空ポンプへの流れの釣り合い

$$Q_{\text{PSD}} = \Delta p_{\text{avg}} S_{\text{eff}} R \quad (2-3)$$

から求めることができる。 R は真空計の平均指示値に対するビームダクト内平均圧力の比である。

リング全体の平均 η を見積る場合、 \dot{N}_{ph} として毎秒リング全周にわたって偏向電磁石から放射される光子数を知っておく必要がある。放射光フラックスを臨界エネルギー比

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(\varepsilon_c = \hbar\omega_c = \frac{3\hbar c \gamma^3}{2\rho}, \gamma = \frac{E}{E_0} \right) \quad (2-4)$$

の関数とすると、 $0 \rightarrow x$ までの単位時間当たりの放射光子数は

$$\dot{N}_{\text{ph}}(x) = \frac{\sqrt{3}r_e}{e\hbar c} F(x)EI \quad (2-5)$$

で与えられる^[3]。ここで、

- ε_c : 放射光の臨界エネルギー
- \hbar : 換算プランク定数 (1.055×10⁻³⁴ J·s)
- c : 光速度 (2.998×10⁸ m/s)
- ρ : 偏向電磁石の曲率半径
- E : 電子ビームのエネルギー
- E_0 : 電子の静止エネルギー
- r_e : 古典電子半径 (2.818×10⁻¹⁵ m)
- e : 電気素量 (1.602×10⁻¹⁹ C)
- I : ビーム電流値

である。 $F(x)$ は変形ベッセル関数の積分

$$F(x) = \int_0^x \int_u^\infty K_{5/3}(y) dy du \quad (2-6)$$

で、 $x \rightarrow \infty$ で $5\pi/3$ となる。結果、全光子数は

$$\dot{N}_{\text{ph}} = \frac{5\pi r_e}{\sqrt{3}e\hbar c} EI \quad (2-7)$$

となり、 E と I を実用的な単位にとると、

$$\dot{N}_{\text{ph}}[\text{photons/s}] = 8.083 \times 10^{20} E[\text{GeV}] I[\text{A}] \quad (2-8)$$

から計算することができる。

したがって、リング全体での平均 η は

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\Delta p_{\text{avg}} S_{\text{eff}} R (kT)^{-1}}{8.083 \times 10^{20} E[\text{GeV}] I[\text{A}]} \\ &= 0.2987 \frac{S_{\text{eff}} [\text{m}^3/\text{s}] R}{E[\text{GeV}]} \frac{\Delta p_{\text{avg}} [\text{Pa/A}]}{I} \end{aligned} \quad (2-9)$$

という関係式から求めることができる。

式2-9の最後に現れている $\Delta p_{\text{avg}}/I$ は規格化圧力、あるいは「p over I」と呼ばれ、ビーム電流値が変化してもほぼ一定の値をとる。通常、ビーム蓄積時はPSDによるガス放出が支配的なので、真空計の指示値をそのまま平均化して I で割った p_{avg}/I で近似でき、この値を監視することで現在ビームダクトがどの程度潤れているかを知ることができる。

また、PSD以外の大きなガス放出がある場合、例えばリングのどこかで大きなリークや発熱などの異常がある場合は、ビーム電流の減少に伴って p_{avg}/I が上昇する傾向を示す。ただし、近年の蓄積リングではtop-up入射により I をほぼ一定に保った運転を行う場合があり、このような判定は困難になりつつある。

η はビームダクトの材質や表面状態、施された表面処理などによって異なる。また、照射された積算光子数 (photon dose) のlogスケールで減少するという特徴がある。この放射光照射によるコンディショニングは「光焼出し」、英語では「SR scrubbing」などと呼ばれる。

加速器建設直後の新しいビームダクトの η は $10^2 \sim 10^1$ molecules/photonであり、たとえベーキングを行って 10^{-7} Pa以下まで真空立上げを行った状態でも、ビーム蓄積により $10^{-3} \sim 10^{-4}$ Paまで悪化する。一般に加速器建設後、十分に圧力が下がって、ユーザー運転に必要なビーム寿命が得られるまでに、数ヶ月のコンディショニング期間を要する。光焼出しが順調に進めば、最終的には η が 10^{-6} molecules/photon程度に達し、運転中の圧力も 10^{-8} Pa程度に到達する。また、この強力なコンディショニング効果のおかげで、現場での面倒なベ

ーキングを省くことが可能になるという恩恵もある。

Fig. 1は、2005年のPF-ring直線部改造で大規模にビームダクトが更新された後の潤れの進行と、それに伴うビーム寿命の延びのグラフである。横軸はリングに沿った単位長さ当たりの積算光子数 D [photons/m]であり、

$$\begin{aligned} D[\text{photons/m}] &= \frac{\int \dot{N}_{\text{ph}} dt}{L} \\ &= 2.910 \times 10^{24} \frac{E[\text{GeV}]}{L[\text{m}]} \int I dt[\text{A} \cdot \text{h}] \end{aligned} \quad (2-10)$$

から求められるように、積分電流値[A・h]に比例する量である。

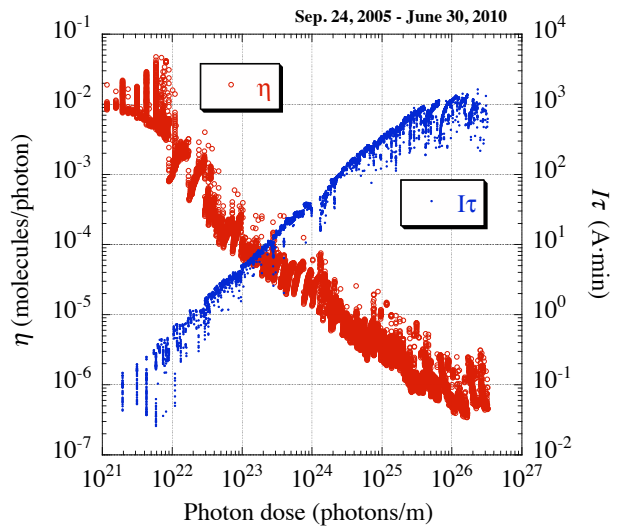


Fig. 1 PF-ring直線部改造後の光焼出し

潤れの予測

真空システムを設計する段階で、このようなコンディショニングの経過をシミュレーションで予測して、ダクト形状やポンプ配置を決める必要がある。そうすることで、順調なビーム蓄積が可能になり、速やかに加速器の目標性能が達成できるようになる。そのためには、使用予定のビームダクト材料に関して、photon doseに対する η の変化を知っておく必要がある。

材料ごとの η の測定は、これまでも多くの放射光施設のビームラインを用いて測定されている。実験室レベルで Q_{PSD} を精密に測定する場合

は、スループット法（オリフィス法）がよく用いられている。すなわち、既知のコンダクタンス C の両端の圧力を測定すれば、

$$Q_{\text{PSD}} = C(p_1 - p_2) \quad (2-11)$$

から、精密に求めることができる。

Fig. 2 はその一例として、NEG コーティングを施したステンレスダクトの η を PF-ring の BL-21 で測定した結果である^[4]。コーティングありなしの2種類のデータがプロットされている。

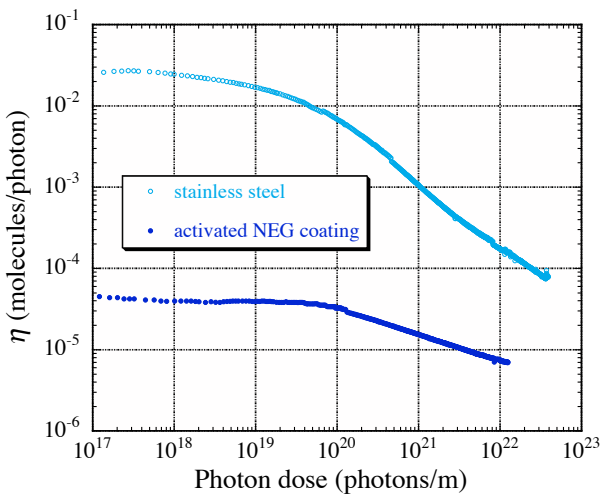


Fig. 2 NEG コーティングの光脱離係数

第3章で詳しく解説するが、NEG コーティングとは、化学吸着作用をもつ非蒸発型ゲッター (Non-Evaporable Getter) 材をビームダクト内面にコーティングして、ダクト自体をポンプに変える画期的な技術である。

このグラフからも分かるように、NEG コーティングの初期 η は 10^{-5} molecules/photon 台であり、このことは、加速器の運転開始直後から通常より3桁も低い圧力が期待できることを意味する。

この NEG コーティングをリング全体にわたって施したスウェーデンの高輝度光源リング MAX-IV が 2015 年に運転を開始する。MAX-IV は電磁石のボア径が 25 mm と非常に小さいため、ビームダクトの内径は 22 mm に制限され、コンダクタンスが非常に小さい。そこで、NEG コーティングが採用された訳であるが、実際の加速器でもこのような真空性能が発揮できるのか、立上げ状況報告が楽しみである。

圧力分布計算

真空システム的设计では、1次元有限要素法^[5,6]などでビーム路に沿った圧力分布を計算し、加速器のコミッショニング期間内に目標の圧力に到達できるように、ポンプの配置などを検討する。最近では、モンテカルロ法を用いた計算コードの高度化が進んでおり、より精密な真空システム的设计が可能になっている。

例えば、CERN で開発が続けられている SynRad+ と MolFlow+ という2つの3次元モンテカルロプログラムを組み合わせれば、運転開始から最終目標に至るまでのビームダクト内の圧力分布を非常に精密に計算することができる。Windows 版と Mac 版が用意されており、以下のサイトからフリーでダウンロードできる。

<http://cern.ch/test-molflow>

大雑把に手順を説明すると、まず、市販の3次元 CAD ソフトで作成したビームダクト図面を STL 形式で出力する。それを SynRad+ に読み込ませ、ビームダクト内面の各メッシュに照射される放射光フラックスを計算する。このとき、Fig. 2 に示されたような η の測定データを用いることで、各メッシュの潤れの進行具合からガス放出が求まる。そのデータを MolFlow+ に読み込ませて、コンディショニング経過に伴う圧力分布を計算する。

MolFlow+ での計算例として、放射光照射中の圧力分布ではないが、ERL 用超伝導加速空洞内の気体分子密度の分布計算結果を Fig. 3 に示す。

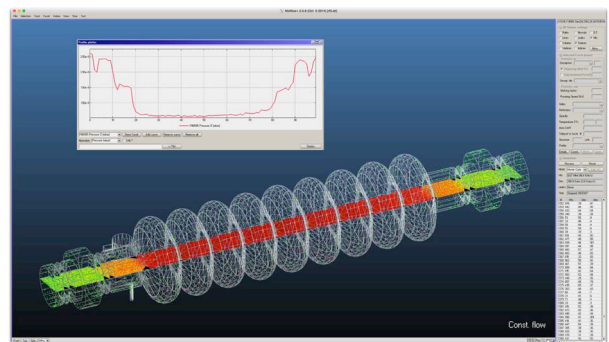


Fig. 3 MolFlow+ での計算例

2.1.2. ビームロスとビーム寿命

ビームロス

加速器内を周回しているビームの総電子数を N_e 、一周する間に残留ガスとの散乱で失われる電子数を ΔN_e すると、ビームロスの割合は

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} = \sum_i \left[\int_L n(Z_i, s) \sigma_g(Z_i, s) ds \right] \quad (2-12)$$

すなわち、残留気体分子の密度 n とビームロスを引き起こす散乱断面積 σ_g の積をリング周長 L にわたって積分し、残留ガスを構成する原子の種類 Z_i の総和をとることで求められる。当然のことながら、分子密度 n は理想気体の状態方程式

$$p = nkT \quad (2-13)$$

から圧力 p に比例するので、ビームロス割合も圧力に比例する。

例えば cERL の場合、放射線安全の観点から、200 MeV、100 mA のビームを周回させるときは、ビームロス割合を 10^{-7} 以下に抑えることが求められている。ビームロスには、後で述べる Touschek 効果や、オブティクスに起因するビームハローやテールなど、真空とは直接関係ない要因もあるが、残留ガスとの散乱で失われる電子を要求以下に抑えるためには、電子ビームのエネルギーが 200 MeV の場合は運転中の圧力を 10^{-5} Pa 以下に下げる必要があり、20 MeV の場合は 10^{-7} Pa 以下に下げる必要がある。

また、ERL のように電子ビームが一度しか周回しない加速器では、たとえ各バンチから失われる電子数が微小でも、常に新しいバンチが入射されるため、ロスした電子がビームダクトなどにぶつかり、放射線を発生させ続けてしまう。さらに、ビームロスが局所的に集中した場合は、ビームダクトや加速器コンポーネントの発熱や破損を引き起こす可能性もある。これらのトラブルを防ぐためには、応答の速いビームロスモニタを用いたインターロックシステムによる保護が不可欠である。

ビーム寿命

蓄積リングの場合は、通常、ビームロス割合の代わりに

$$\frac{dN_e}{dt} = -\frac{N_e}{\tau} \quad (2-14)$$

で定義されるビーム寿命 τ を用いる。先ほどのビームロス割合との関係は

$$\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\Delta N_e}{N_e} \right) = \frac{1}{\tau} \quad (2-15)$$

であるが、式 2-14 と比較する際には ΔN_e が正であることに注意が必要である。 Δt は一周に要する時間

$$\Delta t = \frac{L}{\beta c} \quad (2-16)$$

である。

ビーム寿命の定義式 2-14 を電子数 N_e の代わりにビーム電流値 I を用いて書き直すと

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I}{\tau} \quad (2-17)$$

となり、この微分方程式を初期電流値 I_0 として解くと、ビーム電流値の時間変化式

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2-18)$$

が得られる。このとき、 τ は、 I の指数関数的減衰における時定数で、 $1/e$ になる時間に相当する。実際の加速器の運転では、DCCT (DC Current Transformer) で測定した短時間のビーム電流値変化をこの式にフィッティングして、リアルタイムにビーム寿命を測定している。

再び電子ビームの立場になって、残留ガスとの散乱によるビームロス割合を考えてみよう。ほぼ光の速度 c で進む電子ビームが一様な分子密度 n の残留ガスと散乱断面積 σ_g で散乱されて失われる場合、式 2-12 を式 2-15 に代入すれば、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\Delta N_e}{N_e} \right) &= \frac{c}{L} (n\sigma_g L) \\ &= \frac{c\sigma_g}{kT} p \\ &= \frac{1}{\tau_g} \end{aligned} \quad (2-19)$$

という関係式が得られる。この式からも残留ガスとの散乱で決まるビーム寿命 τ_g が圧力 p に反比例することが分かる。

一方、電子加速器における主要なビームロスには、この圧力で決まる過程以外に、バンチ内の電子どうしが散乱した結果、運動量アクセプタンスを超えた電子がバンチからこぼれてしまう過程がある。そのビーム寿命 τ_T は Touschek 寿命と呼ばれ、バンチ内の電子密度が高いほど短く、ビームエネルギーが高いほど長いという特徴を持つ。

この2過程を考慮すると、ビーム寿命 τ は、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} &= \frac{1}{\tau_g} + \frac{1}{\tau_T} \\ &= \frac{c\sigma_g}{kT} p + \frac{1}{\tau_T} \end{aligned} \quad (2-20)$$

で与えられる。

実際の加速器の運転では、 p の代わりに規格化圧力 p_{avg}/I を用いた

$$\frac{1}{I\tau} = \frac{c\sigma_g}{kT} \frac{p_{\text{avg}}}{I} + \frac{1}{I\tau_T} \quad (2-21)$$

の関係式でビーム寿命を取り扱う。繰り返しになるが、右辺第1項は I が変化してもほぼ一定である。右辺第2項も、 I の減少とともにバンチ内電子密度が減少することから、 τ_T は I に反比例して長くなる。結果、ビーム電流値とビーム寿命の積 $I\tau$ はビーム電流値によらずほぼ一定となる。Fig. 1で、コンディショニングによるビーム寿命の延びを判断するのに $I\tau$ を用いていたのはこのためである。

ただし、このことは、 I の時間変化が式2-18に従わないことを意味する。式2-17の微分方程式を、 τ が一定という条件で解くことができず、 $I\tau$ が一定という条件で解く必要があるからである。この場合、 I は、その時間変化の微分方程式を

$$\frac{dI}{I^2} = -\frac{dt}{(I\tau)} \quad (2-22)$$

と変形させてから解いた

$$I(t) = \frac{I_0(I\tau)}{I_0 t + (I\tau)} \quad (2-23)$$

に従って減衰する。また、 I_0 の時刻から τ だけ経過したとき、

$$I(\tau) = \frac{I_0}{2} \quad (2-24)$$

となるので、短時間で $1/e$ となるように測定している τ が、実は I が大きく減衰する長い時間でみると、半減期を意味していることになる。

Fig. 4は、top-up 運転を行っていないときのPF-ringのある2日間の運転の記録で、ビーム電流の減衰に伴って、ビーム寿命が長くなっている様子が分かる。

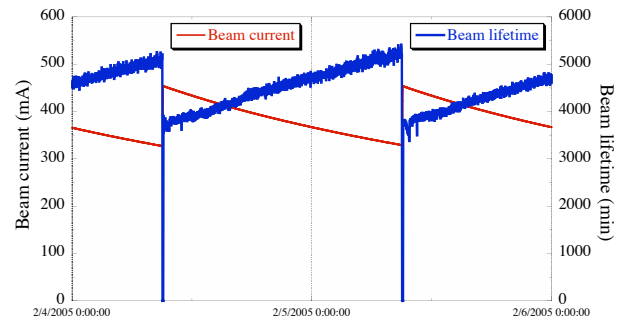


Fig. 4 PF-ringのある2日間の運転の様子

話が少し脱線してしまったが、また視点をビームに戻そう。電子ビームが残留ガスとの散乱で失われるとき、式2-12や式2-21中のビームロスを引き起こす散乱断面積 σ_g は、残留気体分子の原子核によるクーロン散乱 (Rutherford 散乱) の断面積 σ_R 、核外電子との Møller 散乱の断面積 σ_M 、原子核による制動放射の断面積 σ_B の和、すなわち、

$$\sigma_g = \sigma_R + \sigma_M + \sigma_B \quad (2-25)$$

で与えられる。ビームロスは、散乱による角度変化や運動量変化がそれぞれのアクセプタンスを超えた場合に起こり、各ロス過程の断面積は、電子ビームのエネルギー、ビームダクトの開口寸

法、RF バケットの高さ、残留ガスの成分などによって変わる。

ここではその詳細は省くが、各散乱断面積の計算式は、Touschek 寿命も含め、過去の多くの OHO テキストなどに書かれており、加速器のパラメータを用いて見積ることができる。各過程がどの程度ビームロスに影響するかを知っておくことは、効率的な真空システム的设计、例えばビームダクト形状や真空ポンプ配置を決定する際にとっても役に立つ。

Fig. 5 は、Fig. 1 と同じ PF-ring 直線部改造後の観測データを、横軸にビーム位置での CO 当量の p_{avg}/I 、縦軸に $I\tau$ をとってプロットしなおしたものである。比較のため、式 2-21 に従って計算した予測カーブも示している。ビームダクトの潤れに伴って、ビーム寿命が延びている様子が分かる。

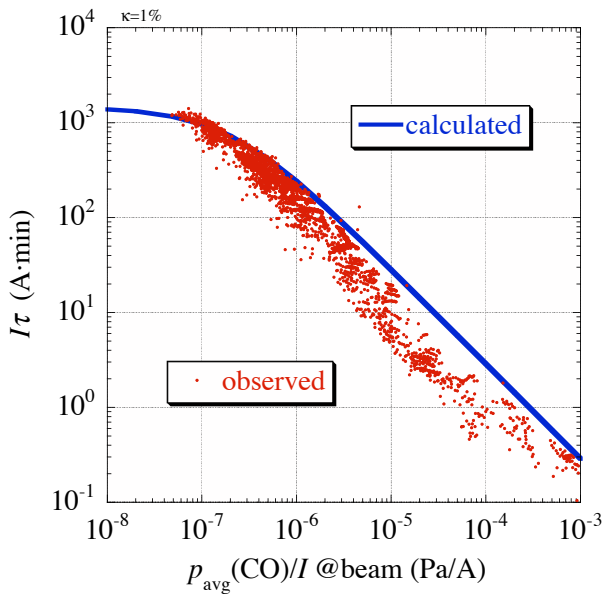


Fig. 5 平均圧力とビーム寿命の関係

この図からさらに分かることは、圧力が低くなると Touschek 効果が支配的となり、あるところからビーム寿命の延びが頭打ちになってしまうということである。逆に言えば、この圧力を目指すことが真空システム的设计の一つの目安となる。PF-ring の場合は、 p_{avg}/I で 1×10^{-7} Pa 程度、すなわち、450 mA 蓄積時で 5×10^{-8} Pa 程度である。

近年の低エミッタンスリングでは、ビームサイズの縮小化により Touschek 寿命が短く、過度に圧力を下げてもそれに見合う効果が得られる訳ではない。ただし、真空封止型アンジュレータのように物理的にアパーチャを大きく制限する機器がある場合は、運転条件によっては角度変化を伴う残留ガスとの散乱の効果が大きくなり、ビーム寿命が短くなることがある。さらに、超低エミッタンスリングでは、残留ガスとの散乱によるビームの拡がりを抑えるために、より低い圧力 ($< 10^{-8}$ Pa) が要求される^[7]。

2.1.3. イオントラッピング

残留ガスが電子ビームに及ぼすもう一つの影響にイオントラッピングと呼ばれる現象がある。ビームダクト内には、電子ビームと残留ガスとの相互作用で生じた正イオンや、PSD で壁から脱離した正イオンが存在している。イオントラッピングは、それらの正イオンが電子ビームのつくるポテンシャルにトラップされる現象で、チューンシフトや fast ion instability などのビーム不安定性の要因となる。

イオントラッピングの起こりやすさの判断基準として、トラップされたイオンの横方向の運動に関する安定条件から、イオンの臨界質量を求めることができる^[8]。横方向のうち、水平方向 (x 方向) の運動は偏向電磁石磁場のある場所では縦方向の運動と結合するため、ここでは単純な鉛直方向 (y 方向) の運動について考えてみる。

y と \dot{y} をそれぞれイオンの位置と速度とすれば、ほぼ光速 c で通過するバンチからの収束力によるイオンの運動は近似的に次式で記述される。

$$\begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -a & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}_0 \quad (2-26)$$

ここで、

$$a = \frac{2N_b r_p c}{\sigma_y (\sigma_x + \sigma_y)} \frac{z}{A} \quad (2-27)$$

はキックパラメータと呼ばれる量であり、 N_b はバンチ内の電子数、 r_p は古典陽子半径 (1.54×10^{-18} m)、

σ_x と σ_y はそれぞれ x 方向と y 方向の rms ビームサイズ、 z はイオンの価数、 A はイオンの質量数である。

さらに、バンチ通過後の時間的間隔 τ_b でのイオンのドリフト運動は次の式で記述される。

$$\begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}_2 = \begin{pmatrix} 1 & \tau_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}_0 \quad (2-28)$$

バンチの間隔と強度がともに一定 (uniform fill) の場合、バンチが m 回通過にすることによるイオンの運動は、行列

$$\begin{aligned} M &= \begin{pmatrix} 1 & \tau_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -a & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 - \tau_b a & \tau_b \\ -a & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2-29)$$

を m 回かけることで求められる。そして、その場合でも (y, \dot{y}) が発散しない条件は、 M の固有値の絶対値が 1 以下であることである。そこで、 M の固有値を λ_1, λ_2 ($\lambda_1 \neq \lambda_2$) とすると、固有方程式

$$|M - \lambda I| = \lambda^2 - (2 - \tau_b a)\lambda + 1 = 0 \quad (2-30)$$

から

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 = \det(M) = 1 \quad (2-31)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \text{Tr}(M) = 2 - \tau_b a \quad (2-32)$$

という 2 つの関係式が得られる。重解でない固有値それぞれの絶対値が 1 以下で、かつ互いの積が 1 であるという条件式 2-31 を満たすものは

$$\lambda_{1,2} = e^{\pm i\mu} \quad (2-33)$$

で表される共役複素数である。すなわち μ が実数であればともに絶対値は 1 となり、固有値を何回かけても有界となる。このとき、式 2-32 から

$$2 \cos \mu = 2 - \tau_b a \quad (2-34)$$

すなわち、

$$|2 - \tau_b a| \leq 2 \quad (2-35)$$

という条件式を得る。これをさらに変形すれば、イオンの運動に関する安定条件

$$A \geq \frac{N_b r_p c \tau_b z}{2\sigma_y (\sigma_x + \sigma_y)} \quad (2-36)$$

が得られる。この右辺を臨界質量 A_c と呼び、その質量以上のイオンが安定にトラップされることになる。

例えば、PF-ring の 450 mA マルチバンチ運転で 312 全 RF バケットに蓄積した場合 $N_b = 5.6 \times 10^9$ electrons/bunch であり、ビームサイズを $\sigma_x = 0.42$ mm、 $\sigma_y = 0.062$ mm とすれば、1 価のイオンに対して $A_c = 0.087$ となる。したがって、すべての質量数のイオンがトラップされることになる。

PF-AR は常時シングルバンチ運転でバンチ間隔が長いので、 $A_c = 470$ 程度であり、イオントラッピングは問題にならない。

ERL 光源の場合は、繰り返し周波数 1.3 GHz、ビーム電流 100 mA ($N_b = 77$ pC/bunch = 4.8×10^8 electrons/bunch)、 $\sigma_x = \sigma_y = 10$ μ m を想定すれば、1 価のイオンに対して $A_c = 0.42$ となり、すべての質量数のイオンがトラップされる。

イオントラッピングを抑制するための有効な対策には、1) ビームダクト内の圧力を下げる、2) バンチトレインにギャップを開ける、3) クリアリング電極を設置する、などがある。

PF-ring の運転では、312 バケットに対して 220 ~ 280 バンチの partial fill を採用し、バンチ毎フィードバックを併用することで、イオントラッピングによるビーム不安定性を解決している。リングの改造を行った後の立上げ時、圧力が $\sim 10^{-5}$ Pa 以上の場合にイオントラッピングが原因と考えられるビーム不安定性が観測されるが、 $\sim 10^{-6}$ Pa 以下に下がれば解消される。これは、圧力が下がることでイオン生成の頻度が下がり、イオンの捕獲と消散の均衡が崩れるためと考えられている。消散の過程としては、例えば多重電離で価数 q が増えることで、式 2-36 の安定条件から外れやすくなることが考えられる。

2.2. 放射光の吸収

電子ビームからの放射光の大部分はユーザー実験に使用されず、ビームダクト内で吸収することになる。このため、真空システムは非常に大きな放射光熱負荷に対応しなければならない。

一個の電子がリングを一周する間の偏向電磁石による放射損失は

$$U_0 = \frac{4\pi}{3} \frac{r_e}{E_0^3} \frac{E^4}{\rho} \quad (2-37)$$

であり、ビーム電流値が I のときの放射光パワーは

$$P = U_0 \frac{I}{e} = \frac{4\pi}{3} \frac{r_e}{eE_0^3} \frac{E^4 I}{\rho} \quad (2-38)$$

で与えられる。これらを実用的な単位で書き直すと、

$$U_0 [\text{keV}] = 88.46 \frac{E [\text{GeV}]^4}{\rho [\text{m}]} \quad (2-39)$$

$$P [\text{kW}] = 88.46 \frac{E [\text{GeV}]^4 I [\text{A}]}{\rho [\text{m}]} \quad (2-40)$$

となる。例えば PF-ring (2.5 GeV) の場合、 $\rho = 8.663 \text{ m}$ であり、 $E = 2.5 \text{ GeV}$ 、 $I = 450 \text{ mA}$ のビーム蓄積時の放射光パワーは、偏向電磁石光だけで 180 kW になる。このうち、ビームライン基幹部に取り出される光は 10%弱で、残りの 160 kW 程度をリングの真空システムが受け止めている。

放射光が照射する部位には、必ず銅やアルミ合金といった熱伝導に優れた金属を使用し、熱除去のための水冷パスを設ける。

発光点近傍の高密度の放射光パワーの吸収はクロッチアブソーバと呼ばれる銅ブロックが担い、一本のクロッチアブソーバに照射する放射光のパワーは数 kW に及ぶ。名前の由来は、ビームダクトと光取り出しポートの分岐部（クロッチ部）に設置して、放射光ビームラインへの光を切り出す目的に使用されるためである。クロッチアブソーバの設計では、ANSYS などによる熱構造解析を行い、照射による温度上昇や発生応力、変位をシミュレーションし、堅牢性や耐久性を確かめる必要がある。材料には、高温下でも高い機械

的性質を有するアルミナ分散強化銅 (GlidCop) を用いることが多い。

クロッチアブソーバより下流側では、発光点から離れていくに従い、単位長さ当たりの放射光のパワーが下がるので、無酸素銅製の小型アブソーバやビームダクト壁で放射光を吸収する。直線部に設置されたゲートバルブ (GV) やベローズなど放射光を直接照射させられない機器の手前には、必ず放射光アブソーバを設置して保護する。

放射光照射部は熱負荷以外にも、PSD ガスがなるべくビームに影響しないような対策が必要である。例えば、クロッチアブソーバ近傍などガス放出の大きいところには、良いコンダクタンスで真空ポンプを配置する。

放射光照射部からの反射光や散乱光により、その先でのガス放出や発熱、放射線損傷が問題となることがある。クロッチアブソーバの照射面を工夫して、反射光まで受け止めるのも一つの方法である。また、アンテチェンバと呼ばれる副チェンバ内に放射光を照射させて、ビーム路への気体分子や散乱光の逆流を低減させるビームダクトも多く採用されている。この構造は、ビーム路における電子雲の生成に対しても効果があり、SuperKEKB の陽電子リングでも採用されている。ちなみに、電子雲の抑制に対しては、ビームダクト内面に TiN や NEG、カーボンといった 2 次電子放出係数 (Secondary Electron Yield; SEY) の小さいコーティングを施すことも有効である。

ERL のように短いバンチ長 (~2ps 以下) のビームを周回させる場合は、バンチ長と同程度の波長 (遠赤外) のコヒーレントな放射光 (Coherent Synchrotron Radiation; CSR) が発生し、その対策も必要となる。通常のインコヒーレントな放射光と比べて発散角が大きいので、アブソーバの設計に工夫が必要になる。さらに、低エネルギー光子によるガス放出は、前節で述べた PSD ガスの放出機構と異なる可能性があり、今後検討が必要である。

2.3. ビームの誘起する電磁場の伝送

バンチは電磁場を誘起しながら通過するため、ビームダクトは良好な導波管としての役割も果たさなければならない。特に高電荷・短バンチビームになるほど、ビームダクトに対して低インピーダンス性が要求される。

ビーム路に段差やギャップがあると、バンチ通過に伴ってウェーク場が励起され、バンチは一部パワーを失う。ウェーク場がトラップされやすい構造であれば、異常発熱や放電を引き起こしたり、後続のバンチに影響を及ぼしたりすることがある。

ウェーク場の励起でバンチが失うパワーは

$$P[W]=k[V/C]q[C]I[A] \quad (2-41)$$

で与えられる。ここで、 q はバンチの電荷、 k は(縦方向)ロスファクタと呼ばれ、バンチ長が短くなるほど大きくなるという特徴を持つ。低インピーダンスの視点でコンポーネントを設計する際の指標となり、複雑な形状でも MAFIA や GdfidL などのシミュレーションコードを用いて計算が可能である。

例えば、PF-ring に設置されたロスファクタ $0.1V/pC$ のコンポーネントにおけるパワーロスは、バンチ数 $N_{\text{bunch}}=220$ 、周回周波数 $f_{\text{rev}}=1.6$ MHz であるから、

$$P=kqI=k\frac{I^2}{N_{\text{bunch}}f_{\text{rev}}} \quad (2-42)$$

より、 $P=57$ W と計算される。

また、ERL の場合、繰り返し周波数 $f_{\text{rf}}=1.3$ GHz で 100mA のビームを周回させる場合、ロスファクタが 10 V/pC のコンポーネントでは、

$$P=kqI=k\frac{I^2}{f_{\text{rf}}} \quad (2-43)$$

より、 77 W のパワーロスとなる。

ビーム路には、GV やベローズ、フランジ、ストリップライン型 RF キッカー、ビームスクレーパ、真空封止型アンジュレータの磁石列など、段差や突起物が多く存在しており、ギャップや段差を RF シールドで隠すなどの対策を施している。

ポンプポートにはビーム進行方向を向いた排気スリットを設けている。また、開口形状の異なる機器どうしは、テーパを用いて極力なだらかに接続させている。

HOM により機器が損傷した例として、PF リングの GV で異常発熱によりシール材のエチレンプロピレンゴム (EPDM) が破損した様子を Fig. 6 に示す。2011 年の震災直後に発生したため、RF フィンガーが地震で損傷し、シールド性能が低下したことが原因と推察された。

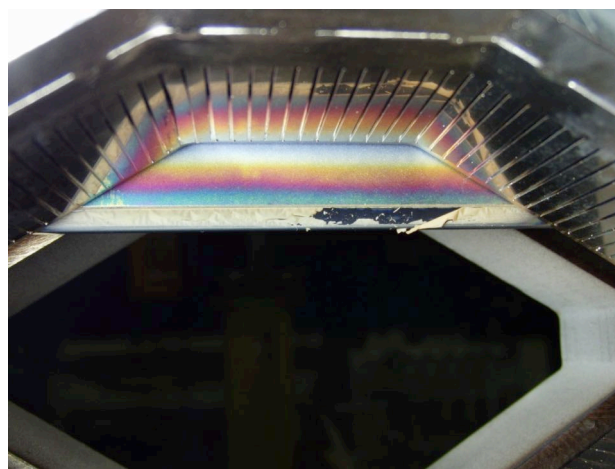


Fig. 6 ゲートバルブシール材の破損

また、PF-AR において、ポンプポートの排気スリットが損傷した例を Fig. 7 に示す。高周波加速空洞の近傍に設置されていたもので、対策として、空洞との間に形状変換部を設けて HOM の伝搬を低減させ、スリットの間隔を小さくした。



Fig. 7 排気ポートスリットの破損

縦方向に段差やギャップのないコンポーネントでも、小さい電気伝導度や、壁がビームに近い場合は、その抵抗壁との相互作用によってウェーク場を生じやすく、ビーム不安定性を引き起こすことがある。

PF-ring の長直線部に設置した挿入光源のステンレス製ビームダクトや接続管で、上下方向のアーチャーが 15 mm と小さいビームダクトには、電気伝導率を上げる目的で内面に銅メッキを施してある。このビームダクトの設置後も、抵抗壁に起因するバンチ結合型ビーム不安定性は観測されていない。

ERL のように高繰り返しで大電流のビームを周回させる加速器では、Resistive-Wall Beam Breakup (RWBBU) を引き起こす可能性があるが^[9]、設計時の検討では、ステンレス製のビームダクトでも内径が 50 mm あれば大きな問題とはならないとの計算結果が得られている。

最近では、特にアーチャーの小さいビームダクトに対して、数 100 nm 以下の面粗度が要求される場合があり、それを実現する表面処理として、精密化学研磨や Abrasive Flow Polishing (AFP) と呼ばれる砥粒流動研磨技術が幾つかの加速器で採用されている。

2.4. 電磁石磁場の伝達

電磁石の磁場を減衰させたり、乱したりせずビームに届けるために、ビームダクトは磁場に対して透明でなければならない。このため、ビームダクトは非磁性であることが要求される。

アルミ合金や無酸素銅、チタンであれば問題ないが、ステンレスの場合は注意が必要である。加速器で通常使用されるステンレスは、非磁性の SUS316L や SUS304 などのオーステナイト系であるが、加工により応力誘起マルテンサイト変態を起したり、フェライト組織を含む溶接棒を使用したりすると磁化する可能性がある。実際に幾つかの加速器で問題となっており、例えば、2014 年にコミッションを開始した台湾の TPS では、ブースターシンクロトロン用ステンレスダクトの

比透磁率が最大で 1.8 までになっていたため、ビームをうまく周回させられなかった。そこで、ビームダクトを一旦取り外し、大型炉内で 1000°C 程度の加熱消磁を行って対処している^[10]。

その他、セラミックダクトやビーム位置モニタ (BPM) 用フィードスルーなどの金属接合部に、セラミックやガラスの熱膨張率に近い磁性体のコバルト (29Ni-17Co-Fe) を使用する場合は注意が必要である。

電磁石やビームダクトの架台については、通常、磁場の有効領域から数 10 cm 以上離れていれば、鉄を使用しても問題にはならない。

10MeV オーダー以下の比較的低エネルギーの電子加速器では、コールドカソードゲージ (CCG) やスパッタイオンポンプ (SIP) の永久磁石からの漂遊磁場がビームに影響を及ぼす場合があり、cERL や SACLA の入射部に設置された CCG には専用に設計された磁気シールドを施している^[11] (Fig. 8)。

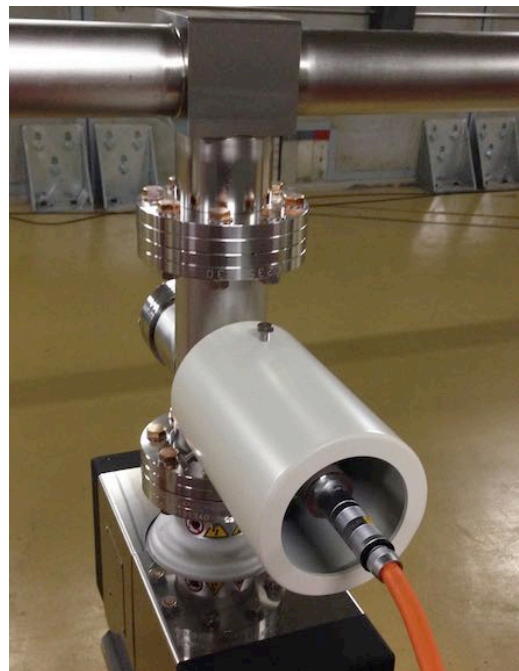


Fig. 8 cERL の CCG 用パーマロイ磁気シールド

速く変化する磁場をビームに伝えなければならない装置では、電気伝導度の大きなアルミ合金や無酸素銅のビームダクトは、渦電流が流れて、磁場波形が鈍り、また発熱の問題があるので適さない。

このため、例えば、ブースターシンクロトロンには通常、薄肉のステンレスビームダクトが用いられ、また、J-PARC の RCS ではセラミックダクトが使用されている。2014 年に運転を開始した NSLS-II の fast corrector 用ダクトには、ステンレスの約 1.8 倍電気抵抗率の大きいインコネル（厚さ 1 mm）が用いられている。また、TPS では out-vacuum 型のセプタムマグネットが採用され、0.4 mm の薄肉ステンレスダクトが使用されている^[12]。

2.5. ビームの高い位置精度と安定度の実現

光源加速器の低エミッタンス化に伴い、ビーム位置精度やその安定度に対する要求が増してきている。このため、ビームダクトには高い機械加工精度と設置精度、および運転時の安定性が要求されることになる。

しかしながら、すべてのビームダクトやコンポーネントを可能な限り高い精度で加工し、設置するのは、非常にコストや労力のかかる作業となる。したがって、加速器の性能を満たす範囲で許容値を決めることになる。その際、ビーム軌道の安定化を担う BPM や、放射光路を決めるクロッチアブソーバなど、放射光位置の安定化に寄与するコンポーネントが重要視される。

ビームダクトの典型的な横方向設置精度は、±100 μm 程度が現実的であろう。したがって、加工精度もその辺りが目標になる。

2015 年より運転を開始する MAX-IV では、電磁石磁極とビームダクトとのクリアランスが 0.5 mm しか許容されず、長尺ダクトに対する高い加工と設置精度が求められている。

一方、位置の安定度に対する要求も、加速器の性能向上に伴って増してきている。例えば、NSLS-II では、vertical emittance が $\epsilon_y = 8 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ であり、low- β 直線部 ($\langle\beta_y\rangle \sim 0.85 \text{ m}$) でのビームサイズは

$$\sigma_y = \sqrt{\epsilon_y \beta_y} = 2.6 \mu\text{m} \quad (2-44)$$

となる。このため、BPM には 1 μm 以下の測定精度と、100 nm 程度の安定度が求められている。

多くの場合、BPM の固定用架台には、温度変動による変位を防ぐ目的で、熱膨張係数の小さいインバーやカーボンファイバが用いられる。また、先端加速器では、加速器室内の空調や冷却水の温度に対しても、厳しい安定化が求められることになる。

電磁石内のビームダクトの固定に関しては、電気伝導度の高いビームダクトの場合、冷却水による振動で渦電流が発生し、ビーム変動を引き起こすことがある。過去に SPring-8 のアルミ合金ダクトでこの問題が発生し、ビームダクトの固定強化と冷却水の調整で解決させたとのことである。

2.6. 放射線（放射光）の遮蔽

ビームダクトを透過したエネルギーの高い放射光（X 線）は、周辺のケーブルや機器を損傷させる。このため、加速器トンネル内で使用するケーブルや機器には耐放射線性が求められる。具体的には、ケーブルの絶縁材としてテフロンは使用できず、ポリエチレンや PEEK を使用する必要がある。放射線の影響で計測機器の電気信号にノイズを場合もある。このような問題を低減させるためには、ビームダクトが放射線遮蔽能力に優れている方が好ましい。

ビームダクトの設計では、材質や厚さがどのように放射光の遮蔽に効くかを検討しておくことが重要である。このとき、偏向電磁石からの放射光スペクトルにおける代表的なエネルギーである臨界エネルギー ϵ_c は、最も重要なパラメータである。式 2-4 の括弧内にある臨界エネルギーの式を実用的な単位で書き換えると

$$\epsilon_c [\text{keV}] = 2.218 \frac{E[\text{GeV}]^3}{\rho[\text{m}]} \quad (2-45)$$

となり、例えば、PF-ring ($E = 2.5 \text{ GeV}$, $\rho = 8.663 \text{ m}$) の場合は 4.00 keV の X 線、PF-AR ($E = 6.5 \text{ GeV}$, $\rho = 23.708 \text{ m}$) の場合は 25.7 keV の硬 X 線となる。

X 線のエネルギーやビームダクトの材質によって、それらがどのような相互作用を起こし、また、

どの程度透過するかが異なる。詳細なシミュレーションは Geant4 や FLUKA などを用いて行うことができるが、大雑把には、アルミの場合で 60 keV 辺りまで、ステンレスと銅の場合で 100 keV 辺りまでは光電効果が主体で、それより高くなるとコンプトン散乱が主体になってくる。

ここでは、3 種類の材料の質量吸収係数を用いて、ビームダクトの遮蔽能力を比較してみる。簡単のため、放射光がビームダクトに垂直に照射する場合のみを考える（実際の加速器では、放射光は斜めに入射するため、実効的な厚みは増していると考えられる）。

ビームダクトに入射する放射光のフラックスが F_0 [photons/s] のとき、厚さ d [cm] のビームダクトを透過した後のフラックス F [photons/s] は次式で与えられる。

$$F = F_0 \exp(-\mu_m \rho d) \quad (2-46)$$

ここで、 μ_m [cm^2/g] は質量吸収係数、 ρ [g/cm^3] は密度である（直前の式の曲率半径と紛らわしいが）。

PF-ring と PF-AR のそれぞれの偏向電磁石からの放射光スペクトルに対して、式 2-46 を用いて透過フラックスを計算した結果を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。ビームダクト材料として、アルミ、鉄（ステンレスの）、銅の 3 種類を想定した。PF-ring の典型的なビームダクトは 4.5 mm 厚のアルミ合金、PF-AR は 6 mm 厚の無酸素銅である。

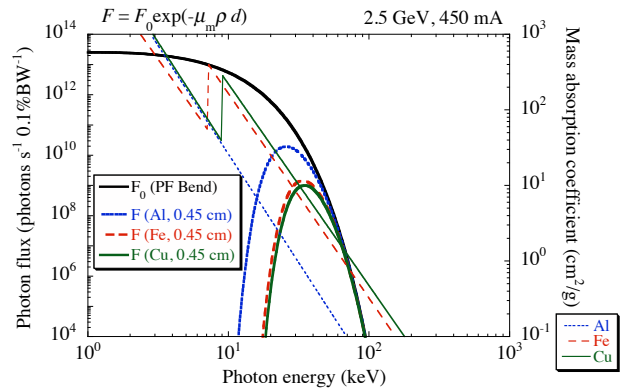


Fig. 9 PF-ring ベンド光の透過フラックス比較

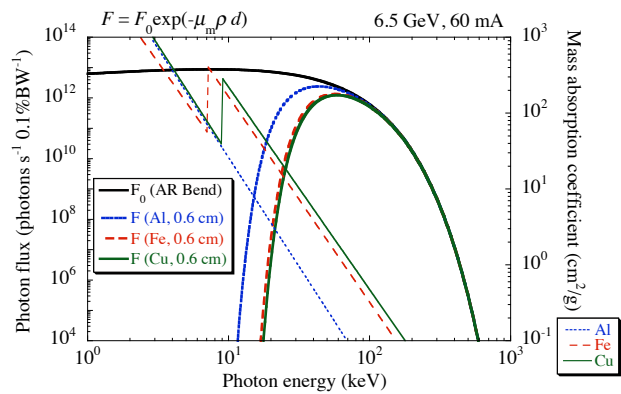


Fig. 10 PF-AR ベンド光の透過フラックス比較

3 種類の材料で透過フラックスを比較すると、アルミに対する鉄と銅の遮蔽能力の高さが、ある程度定量的に分かる。また、2 つのリングで比較すると、PF-ARの方がはるかに透過放射光の強度が大きく、エネルギーも高いことが分かる。いずれの場合も、透過放射光のほとんどは数 10 keV 以上の硬 X 線である。

3 種類の材料がどのような加速器のビームダクトに採用されているか、各材料の利点と欠点とともに Table 1 に示す。

Table 1 ビームダクト材料の比較

	利点	欠点	採用例
アルミ合金	加工性（機械加工・押出成形） 高電気伝導率・高熱伝導率 非磁性 低残留放射能 軽量	高度な溶接技術 放射線透過 フランジ接続 低ベーキング温度 高熱膨張率	アジア：PF-ring, SPring-8, TLS, TPS, PLS-II, SKEKB LER 欧州：SOLEIL, PETRA III 米国：ALS, APS, NSLS-II
ステンレス	加工性（機械加工・溶接） 低ガス放出 強度 フランジ接続	低熱伝導率 低電気伝導率 加工後の透磁率	アジア：SSRF, ASP, UVSOR-III, cERL 欧州：BESSY II, DIAMOND, ELLETRA, ESRF, SLS, ALBA, ANKA, CANDLE, 北南米：CLS, LNL5
無酸素銅	高電気伝導率・高熱伝導率 加工性（ロウ付け・押出成形） 低ガス放出 非磁性 放射線遮蔽	フランジ接続 低ベーキング温度 高価 変形しやすさ	アジア：PF-AR, SKEKB HER 欧州：MAX IV, LHC 直線部 米国：SPEAR-3

話を X 線の透過に戻そう。透過放射光は真空機器にも幾つかの悪影響を及ぼす。例えば、電離真空計のコネクタに透過放射光が当たり、電離された空気がイオン電流として測定され、正確な圧力測定ができなくなる。この事例は SPring-8 で発生し、真空計やケーブルに鉛遮蔽を追加することで改善したとのことである^[13]。

また、比較的放射線量の高いところでは、スパッタイオンポンプ (SIP) の高圧コネクタ部で腐食が発生することがある。原因の一つとして、コネクタ内の密閉空間にある空気が放射線より活性化され、腐食性の NO_x やオゾンが生成されることが考えられる。また、印加電圧を下げると改善することから、コロナ放電との相関も考えられる。

高エネルギーの電子がビームダクトに当たってロスする場合は γ 線や中性子を発生させる。ビームダクトはそれらに対する遮蔽能力はなく、ビームロスの大きいところには、鉛ブロックなどの遮蔽体が必要になる。また、ビームダクトの放射化の問題が発生するので、低放射化材料のアルミ合金やチタンを使用するのも有効な対策となる。

2.7. ダストフリー環境の実現

ビームダクト内にダストが存在すると様々な悪影響を及ぼすので、すべてのコンポーネントはできる限りクリーンな環境で製造、管理、設置する必要がある。

電子ビームに対しては、ダストトラッピングと呼ばれる突然の激しいビームロス（ビーム寿命の急落）を引き起こすことがある。

高電界を利用する加速空洞や電子銃にダストが混入してしまうと、電界集中による暗電流放出や放電の源になり、性能を著しく低下させる。多くの場合、装置にとって致命的な問題となるので、クリーンルーム内での組み立てに加えて、設置の際にも現場にクリーンブースを置いて、徹底したクリーン環境で作業を行わなければならない。

これらの装置での暗電流や放電については、本セミナーの阪井氏や山本氏や講義で詳しく説明されるので、ここではビームとダストとの相互作用

用であるダストトラッピングについて簡単に解説する。

ダストトラッピングは正に帯電したミクロンサイズの微粒子が電子ビームのつくるポテンシャルにトラップされる現象で、ビーム寿命の急激な低下を引き起こす。また、ダストとの相互作用でビーム進行方向に制動放射 γ 線を発生させるので、放射光実験に多大な支障をきたす。

Fig. 11 に PF-AR で意図的に発生させたダストがビームにトラップされて、移動している様子を示す。トラップされた状態でダストは発光しているので、高温 (1000 K 以上) の熱平衡状態に達していると考えられる^[14]。

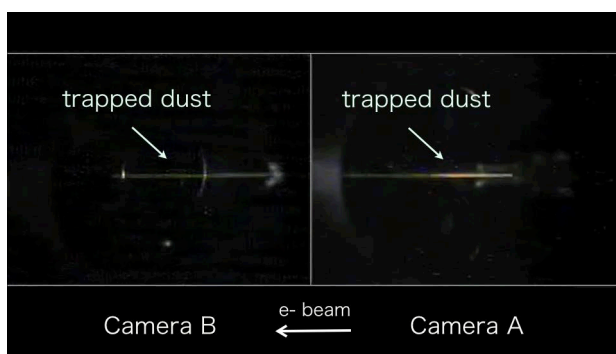


Fig. 11 電子ビームにトラップされているダスト

ダストの発生源としては、ビーム路に沿って配置された分布型イオンポンプ (Distributed Ion Pump; DIP) や、ビームの誘起する電磁場で放電を起こしやすい複雑な形状、または可動機構を持つコンポーネントが確かめられている。

ダストトラッピングは 1980 年代に建設された多くの電子蓄積リングで問題となっていたが、幸いなことに、1990 年代以降に建設された第 3 世代光源や KEKB など大電流電子陽電子コライダーでは問題となっていない。その理由は、低エミッタンス化や大電流化によってビームフラックスが増大し、ダストをトラップしても瞬時に蒸発させししまうためと考えられている。

したがって、ダストの正体に関しては、長時間にわたり”安定に”トラップされる場合、高融点で低蒸気圧のシリカ (SiO_2)、アルミナ (Al_2O_3)、チタンなどが有力な候補となる。

ダストは正の電荷を持つので、陽電子ビームにはトラップされない。また、ダストトラッピングとはいえないが、ダストが陽子ビームと相互作用してビームロスやビームダンプを引き起こす問題が CERN の LHC で発生していた。正体不明であったことから UFO イベントと名付けられた。入射用キッカーマグネットの近傍で多発していたので、セラミックの帯電などによる放電でダストが発生していた可能性が考えられる。

2.8. 加速器コンポーネントの保護

加速器は大型の真空装置であり、真空リークが発生した場合に対処が遅れると、多くの機器に被害を及ぼしてしまう。大気や水がリークした場合は、広い範囲でベーキングが必要になる場合もある。被害を最小限に食い止めるためには、常時真空計で圧力監視を行い、異常検出後、瞬時にビームを落として GV を閉じることのできる信頼性の高いインターロックが不可欠である。

圧力の監視は通常、Bayard-Alpert 型熱陰極電離真空計 (BAG) か、冷陰極電離真空計 (CCG) で行う。CCG の場合はペニング放電を利用するため、不安定になりやすい 10^{-8} Pa 台でも放電の持続する超高真空対応型でなければならない。

多くの場合、真空計コントローラからの信号をシーケンサ (PLC) に集めて、PLC 内のプログラムに従って、GV を閉じるなどのインターロック制御を行う。

即断バルブ (Fast Closing Valve; FCV) を除き、通常の GV の閉動作時間は数秒なので、異常信号の検出がそれ以下にできるように真空計を配置するのが好ましい。光源リングの場合、通常 5 m に 1 個程度、ビームライン基幹部にはさらに密に配置している。

Fig. 12 は、ダクトの一端からバースト状のリークが発生した後、ダクト内の圧力分布が時間とともにどのように変化するかをモンテカルロ法で計算した結果である。

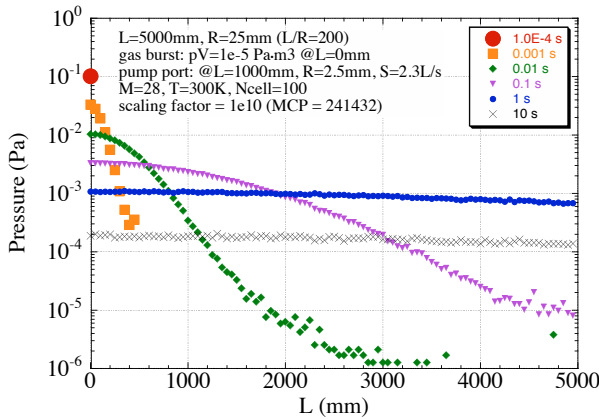


Fig. 12 パイプ内のリークガスの伝搬

ビームダクトは長さ 5 m、内径 50 mm の円筒形で、リーク源の反対側の端に 2.3 L/s の真空ポンプを置いてある。リークは、0.1 Pa で 0.1 L ($pV = 1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$) の窒素が一度に漏れ入った場合を想定している。

以下の理由から、空間での分子どうしの衝突は考慮していない。圧力 $p[\text{Pa}]$ 、温度 $T[\text{K}]$ のとき、気体分子の平均自由行程 λ は

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} = 3.108 \times 10^{-24} \frac{T}{d^2 p} [\text{m}] \quad (2-47)$$

で与えられる。ここで、 $d[\text{m}]$ は分子直径で、窒素の場合 0.375 nm なので、300 K、0.1 Pa のとき、 $\lambda = 66 \text{ mm}$ となる。平均自由行程 λ がダクトの内径 D よりも大きいので、分子流条件（クヌーセン数 $K_n = \lambda/D = 1.3 > 0.5$ ）が成り立っている。したがって、気体分子の流れは、空間中での分子どうしの衝突を考慮しなくてもよい分子流として扱うことができる。

また、壁面での吸着や滞在時間も考慮していない。

さらに、平衡状態にある気体分子の速度は Maxwell-Boltzmann 分布に従うが、ここでは、すべての気体分子がその平均速度

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 145.5 \sqrt{\frac{T}{M}} = 476 \text{ m/s} \quad (2-48)$$

で飛び交っているとしている。ここで、 m は気体分子 1 個の質量で、窒素の分子量 $M = 28.01 \text{ g/mol}$

とアボガドロ数 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ 個/mol}$ から、 $m = 4.65 \times 10^{-26} \text{ kg}$ である。

Fig. 12 の計算結果より、この量のリークがあった場合、5 m 以内に真空計があり、インターロックレベル（セットポイント）を $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ に設定していれば、0.1 秒で異常を検出できることが分かる。

また、分子速度は約 500 m/s なので、1 ms で約 0.5 m まで進んでいるが、5 m に到達するのに 100 倍以上の時間がかかっている。これは、気体分子が壁に衝突したとき、入射角の情報を忘れ、余弦則に従って散乱されるためである。

3. cERL 真空システム

3.1. 概要

cERL の真空システム^[15]は、2.1 節で解説したように、ビームロス割合を 10^{-7} 以下に抑えるという要請から、到達圧 1×10^{-7} Pa 以下を目標に設計された。ただし、3.3 節で述べるように、超伝導加速空洞周辺は NEG コーティングダクトを設置することで、 1×10^{-8} Pa 以下を目標とした。

ビームダクトの径は、ビームロスを考慮すると大きい方がよいが、125 MeV のビームを無理なく周回できる電磁石のボア径 60 mm に無難なクリアランスで収まるよう、内径 50 mm で検討を開始した。そして、2.3 節で解説したように、抵抗壁による BBU が問題とならないこと確認して 50 mm に決定した。ビームダクトの厚みを 1.5 mm とし、クリアランス 3.5mm を確保した。

アーク部のビームダクトのアパーチャは、 x 方向の軌道を変えて周長を補正できるように、 70×40 の横長八角形とした。

減速後のビームが偏向した後に通過するダンプリン線は、ビームの拡がりやが想定されるので、ビームロスが問題とならないように、ビームサイズの 5σ 以上となる内径 85 mm とした。ちなみに、電子蓄積リングの場合、ビームダクトのアパーチャは、十分に長い量子寿命を確保するという観点から、最低 6σ 以上、通常 10σ 以上となるように決定される。

Fig. 13 に、直線部からアーク部に入ったところの偏向電磁石に設置する B ダクトの例を示す。

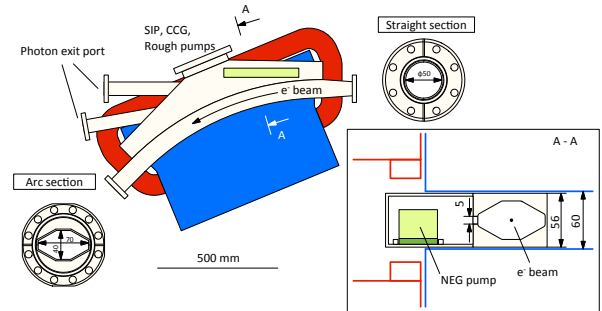


Fig. 13 cERL 用 B ダクト

cERL はビームエネルギーが低く、放射光熱負荷対策の必要がないことから、ビームダクト材料としてステンレスを採用した。125 MeV、100 mA のビームからのインコヒーレントな放射光パワーは全周で 2.2 W しかなく、CSR のパワーも 125 MeV、10 mA、バンチ長 0.3 mm (1 ps) の場合、全周で 77 W 程度である。

ただし、放射光による光焼出しが期待できないので、目標圧力を得るためには、すべての真空機器を現場でベーキングする必要がある。このため、電磁石内のビームダクトには、厚さ $250 \mu\text{m}$ のカプトンフィルムヒータを貼付してある。

cERL の機器レイアウトを Fig. 14 に、真空・モニタ機器リストを Table 2 に示す。

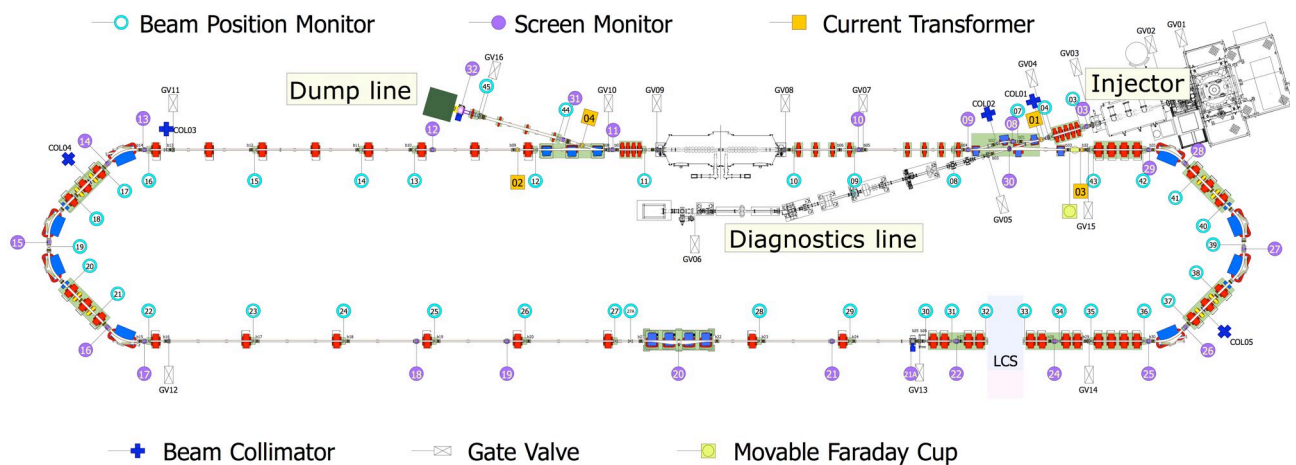


Fig. 14 cERL 機器レイアウト

Table 2 cERL 真空・モニタ機器リスト

Sputter Ion Pump (SIP)	1 (300SC) 32 (75SC) 18 (55SC)	RF-shielded Screen Monitor (MS)	16 (φ50) 6 (octagon) 2 (φ100, dump line) 2 (chicane duct)
Non-Evaporable Getter (NEG) Pump	52 (D200) 12 (WP38/950) 3 (coating)	Beam Position Monitor (BPM)	27 (φ50) 2 (φ50, button, LCS) 10 (octagon) 2 (φ85, dump line)
Rough Pump (RP)	9 (fixed) 6 (movable)	Beam Collimator	5
Cold Cathode Gauge (CCG)	37 (IKR070) 14 (IKR060)	Current Transformer (CT)	4
Residual Gas Analyzer (RGA)	3	DC Current Transformer (DCCT)	1
RF-shielded Gate Valve (GV)	8 (φ50) 1 (φ100, dump line) 2 (φ60, main cavity)	RF-shielded Movable Faraday Cup (MFC)	1
RF-shielded Bellows	36 (φ50) 3 (φ100, dump line)	Main Beam Dump	1

3.2. 低インピーダンスコンポーネント

概要

cERL は高電荷 (77 pC/bunch) で短バンチ ($\sigma_z < 2$ ps) のビームを高繰り返し (1.3 GHz) で周回させるように設計されている。このため、2.3 節で述べたように、ビームダクトには低インピーダンス性が要求され、内面の段差やギャップをなくす対策を施さなければならない。

ベローズ、GV などの可動機構を有する真空コンポーネントは、十分な強度の RF シールドをダクト内面が滑らかに繋がるように配置する必要がある。高性能の RF シールドとしては、大電流ビームを蓄積する KEKB において楕歯型の RF シールドが開発されて^[16]、台湾の TPS でも採用されるなど、光源加速器でも応用されている。

ここでは、低インピーダンスコンポーネントの開発例として、ギャップのないフランジ (ゼロギャップフランジ) と RF シールド付き可動ファラデーカップ (MFC) を紹介する。MFC と同様な構造の RF シールドは、スクリーンモニタにも採用されており、高井氏の講義で詳しく解説されている。

ゼロギャップフランジ

ビームダクトを繋ぐフランジは、通常の ICF フランジでは締結後もギャップが残るため、PF-ring ではギャップを埋めるために BeCu 製の RF コンタクトを取り付けている。PF-AR では、ビームダクト断面と同じ形状のヘリコフレックスを用いて、真空シールと RF シールドを両立させている。

また、KEKB や SuperKEKB の MO 型フランジ^[17] や SACLA の ADESY 型フランジ^[18] など、銅ガスケットが真空シールと RF シールドを兼ねる特殊フランジも開発されている。

Fig. 15 に cERL で採用した特殊フランジの構造を示す。このタイプの特殊フランジは、KEK の超伝導空洞でも使用実績がある^[19]。

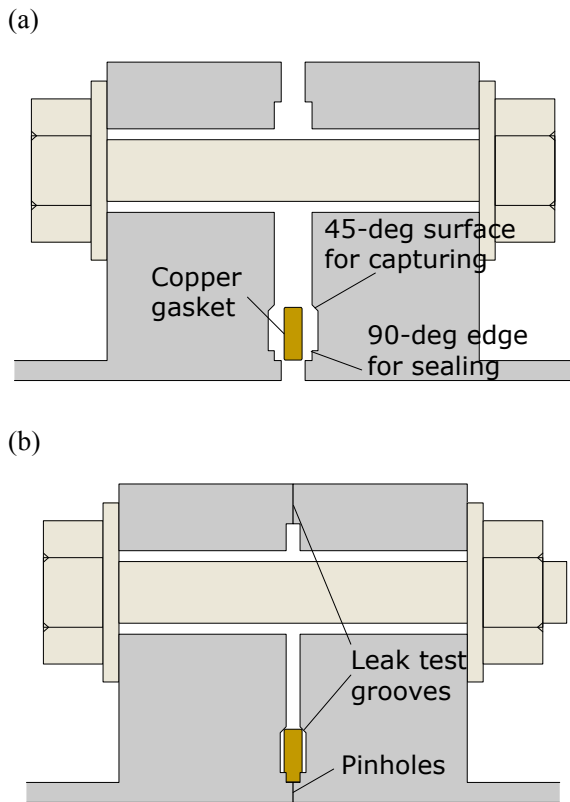


Fig. 15 cERL 用特殊フランジのシール機構
(a: 締結前、b: 締結後)

cERL 用特殊フランジの特徴は以下のとおりである。

- 1) ビームからギャップや段差が見えない
- 2) ICF ガスケットと同様な 2 mm 厚の円形銅ガスケットを使用する
- 3) 90 度のエッジがガスケットに食い込むことで、良好なシール性能を得る
- 4) 45 度のテーパ部がガスケットをキャプチャし、応力を保持することで、ベーキングの繰り返しによるガスケットの塑性変形を防ぐ
- 5) 円形以外の断面形状にも対応できる
- 6) ガスケット溝の平滑面を利用して、メタル O リングでも使用できる
- 7) ガスケット溝部の真空側にできる空間は、2 つのピンホールを通してビームダクト側に排気される

段差をなくすためには、フランジどうしが同心軸上に繋がる必要がある。当初、フランジ端面に位置決めピンを埋め込むタイプを試験したが、十分な精度が得られなかったため、精度良く加工したフランジ外周を利用することにした。締結時に外から筒状ジャケットを被せて、フランジの芯を合わせる。このため、回転フランジは使用できず、ボルト穴径を 8.4mm から 10mm に拡げることで、多少の回転は吸収できるようにした。八角形ダクトは回転も許されないため、外周の上下左右に切り欠きを施し、その面を利用して位置決めを行う。

Fig. 16 と **Fig. 17** は、それぞれ直線部用円筒フランジと、アーク部用八角形フランジの写真である。cERL の建設では 160 か所以上のフランジ締結を行い、リークは検出されなかった。

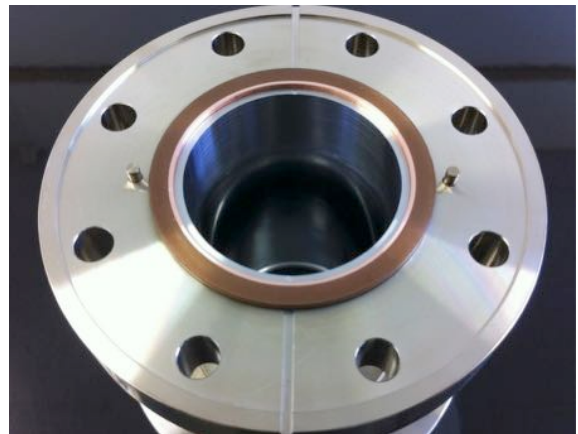


Fig. 16 直線部ダクト用特殊フランジ

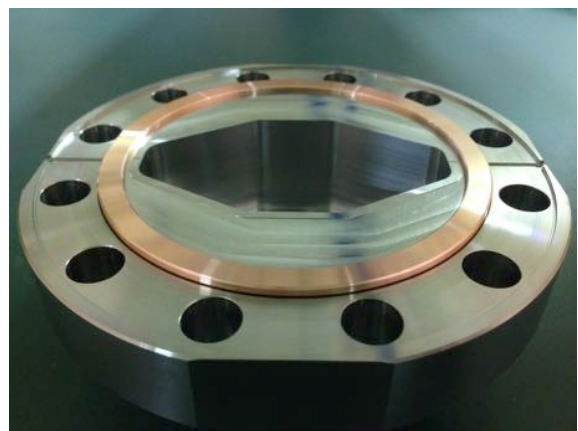


Fig. 17 アーク部ダクト用特殊フランジ

RF シールド付き可動ファラデーカップ

cERL には、加速ビームの周回後、主空洞に再入射する前の電荷量を測るために、RF シールド付き可動ファラデーカップ (MFC) が設置されている。約 30 台のスクリーンモニタにも同じ構造の RF シールドが採用されている。

この構造は、Jlab や BNL で既に採用されていたもので、cERL ではそれを応用して、より精密な RF シールドを開発した。測定をしない状態では、両側に V 型のテーパ面をもつ RF シールドが、両端のビームパイプに 0.1 mm の精度で収まる。

位置の再現性を得るために、加工時に溜まった応力を 800°C 熱処理で除去した。

cERL 用スクリーンモニタのロスファクタは、バンチ長 1 mm を想定した場合、GdfidL により、10 mV/pC と計算された。RF シールドがない場合の 1/100 以下に低減される^[20]。

Fig. 18 と Fig. 19 に、それぞれ電荷測定時とビーム通過時の写真を示す。

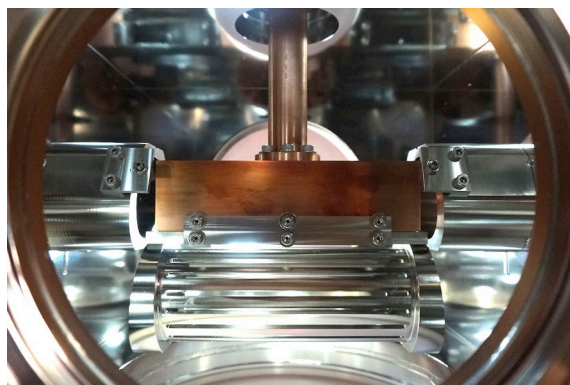


Fig. 18 可動ファラデーカップ (測定時)

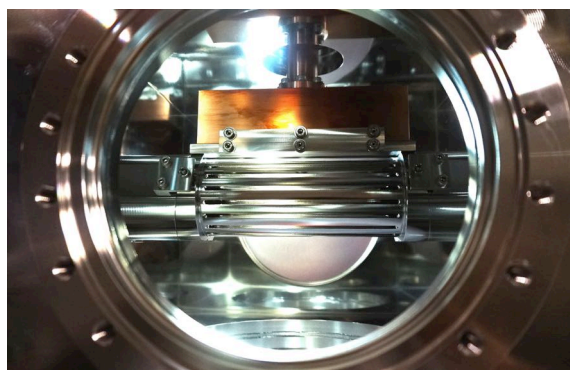


Fig. 19 可動ファラデーカップ (不使用時)

3.3. NEG コーティング

概要

光源加速器で用いる真空ポンプは、排気性能に加え、操作性やメンテナンス性、省電力性を兼ね備える必要があり、通常、ため込み式のスパッタイオンポンプ (SIP) とゲッターポンプの組合せで超高真空を長期間安定に維持する。ゲッターポンプには、チタンサブレーションポンプ (TSP) や NEG ポンプが採用される。

最近では、特に欧州の光源加速器において、ビームダクトの内面に TiZrV の NEG 材をマグネトロンスパッタリングでコーティングした NEG コーティングと呼ばれる手法が採用されてきている。本来ガス放出源であるビームダクト内壁を真空ポンプとして利用できることから、ポンプポートの設置が困難である箇所でも効果的に排気速度をもたせることが可能になる。また、2.1 節でも触れたように、数ヶ月を要するダクトのコンディショニングが大幅に短縮される可能性を有する。

NEG コーティングは 2000 年頃に CERN において LHC の真空システム用に開発された技術で^[21, 22]、現在は CERN 以外でも、KEK を含む幾つかの研究所や企業がライセンスを取得して、NEG コーティングを行うスパッタリング装置を所有している。

排気のマカニズム^[23]

NEG コーティングはゲッター作用で活性ガス (CO、N₂、O₂、CO₂ など) を化学吸着させて排気する。このため、希ガスは排気できず、メタンも常温ではほとんど排気できない。

表面の吸着サイトが飽和するにしたがい、排気能力が低下し、すべて飽和してしまうと排気作用を持たなくなる。

Fig. 20 は、時間とともに排気速度が低下していく様子をモンテカルロ法でシミュレーションした結果である。 $L = 1000$ mm、 $R = 25$ mm の円筒 NEG コーティングダクトの一端から $Q_{inj} = 4.1 \times 10^{-9}$ Pa·m³/s のガス流入がある場合の、NEG コーティングダクトの平均排気速度、および、入射

された気体分子の末路として、ダクトを通過する確率、ダクトに吸着される確率、ダクトから戻ってくる確率の時間変化をプロットしてある。NEG 表面では最大吸着密度 $\sigma_{ML} = 1 \times 10^{19}$ molecules/m² で飽和に至るとした。

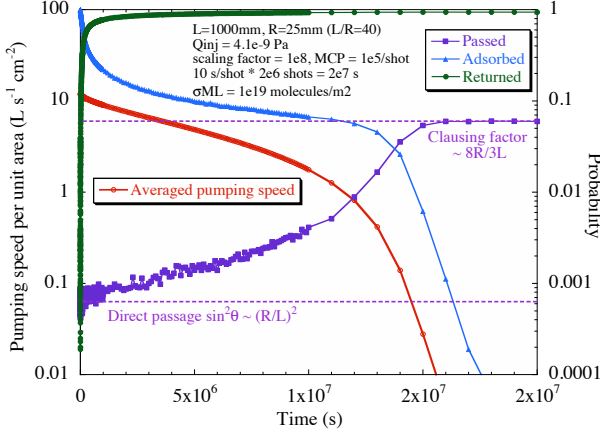


Fig. 20 NEG コーティングの飽和

このシミュレーションでは、まず、ダクトを長手方向に 100 等分し、時刻 t の経過とともに変化する各セルの被覆率 $\theta_i(t)$ を計算した。初期被覆率は $\theta_i(0) = 0$ で、吸着に伴って上昇し、飽和状態で 1 となる。このとき、解離吸着はしないものとした。また、各セルをたたく気体分子の吸着は、ラングミュア型の吸着モデルを仮定し、吸着確率

$$s_i(t) = 1 - \theta_i(t) \quad (3-1)$$

で NEG に排気されるとした。

次に、単位面積当たりの平均排気速度を以下の手順で計算した。

一般に、排気作用を持つ表面の単位面積当たりの排気速度は、

$$\begin{aligned} S &= \frac{Q_{\text{pump}}}{p} \\ &= \frac{\Delta \dot{N}_{\text{pump}} kT}{p} \\ &= \frac{(s\Gamma_{\text{imp}} - \Gamma_{\text{des}})kT}{p} \end{aligned} \quad (3-2)$$

で与えられる。 Γ_{imp} と Γ_{des} はそれぞれ入射と脱離のフラックス (molecules s⁻¹ m⁻²) で、

$$\Gamma_{\text{imp}} = \frac{1}{4} n \bar{v} = \frac{1}{4} \frac{p}{kT} \bar{v} \quad (3-3)$$

$$\Gamma_{\text{des}} = \frac{\sigma}{\tau} = \frac{\theta \sigma_{ML}}{\tau} \quad (3-4)$$

で与えられる。 \bar{v} は式 2-48 で与えられた気体分子の平均速度で、300K での CO の値、476 m/s を用いた。 σ [molecules/m²] は吸着密度、 τ [s] は平均滞在時間であるが、ここでは τ は非常に長いものとして、 $\Gamma_{\text{des}} = 0$ とした。

以上により、単位面積当たりの平均排気速度 \bar{S} は、平均吸着確率 \bar{s} を用いて、

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \frac{\bar{s} \Gamma_{\text{imp}} kT}{p} = \frac{1}{4} \bar{v} \bar{s} \\ &= 119 \bar{s} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \\ &= 11.9 \bar{s} \text{ L s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \end{aligned} \quad (3-5)$$

から計算することができる。

あるいは、脱離を考えない場合は、もっとシンプルに、吸着確率が 1 であるポンプの単位面積当たりの理想排気速度 $S_{\text{ideal}} [\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}]$ が体積入射頻度 Γ_v に等しいことから、

$$S_{\text{ideal}} = \Gamma_v = \frac{1}{4} \bar{v} \quad (3-6)$$

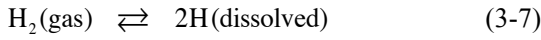
を用い、それに \bar{s} をかけて求めてもよい。

Fig. 20 から分かる通り、NEG コーティングは、飽和に近づくとき大きく排気速度が低下する。当然のことながら、できる限り低い圧力で使い続けることが重要である。

排気作用が低下した表面は、活性化を行うことで復活させることができる。通常、ビームダクトに対して、180~200°C で 24 時間のベーキングを行う。この温度は従来のバルク型の NEG ポンプの活性化温度 (~450°C) よりも低く、この活性化温度の低温度化が NEG コーティング開発のキーポイントであった。そのおかげで、アルミ合金や低 Ag 無酸素銅のダクトに対してもコーティングが可能となった。

活性化によって、表面に吸着していた O や C が内部に拡散することで、再び新鮮な表面が得られる。

水素の排気メカニズムは他の活性ガスと異なり可逆的である。すなわち、NEG 表面で H 原子に解離吸着して、常温でも内部に拡散し、



のように、NEG 材中の含有濃度 c_H と気相中の圧力 p_{H_2} が平衡状態となる。その平衡定数

$$K_S = \frac{c_H}{\sqrt{p_{H_2}}} \quad (3-8)$$

は、ジーベルツ定数 (Sieverts' constant) と呼ばれる。この吸着過程でのギブスエネルギーの変化を考えると、

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3-9)$$

$$\Delta G = -RT \ln K_S \quad (3-10)$$

から、水素の吸着等温式

$$\ln p_{H_2} = 2 \left(\ln c_H - \frac{\Delta S}{R} + \frac{\Delta H}{RT} \right) \quad (3-11)$$

が得られる。この関係式はジーベルツ則 (Sieverts' law) と呼ばれている。ここで、エントロピーとエントタルピーの変化量はそれぞれ

$$\Delta S = -100 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \quad (3-12)$$

$$\Delta H = -54.0 \text{ kJ mol}^{-1} \quad (3-13)$$

であることが、CERN のグループによって実験的に求められている^[24]。

Fig. 21 は式 3-11 をグラフに表したものである。 $\Delta H < 0$ なので、定圧下で温度を上げると c_H が下がる。NEG 活性化では、水素の平衡圧が高い状態でターボ分子ポンプによって系外へ排出し、NEG 中の水素含有濃度 c_H を低下させる。

ちなみに、CERN で使用するステンレスチェンバは、バルク中の水素除去を目的として、950°C で 2 時間の真空高温熱処理 (vacuum firing) が施されている。ステンレスの場合は $\Delta H > 0$ であるが、高温に上げることでバルク中の水素の拡散が大きく促進され、その際に圧力を下げれば c_H が下がる。 $\Delta H > 0$ は吸熱反応であり、一度低下させた c_H は通常の使用では戻りにくい。

NEG コーティングの使用上の注意として、F や Cl を含むハロゲン系のガスを吸着させないように

にしなければならない。これらは活性化でも除去できないので、例えば、テフロン製チップシールを使用するスクロールポンプの使用もできれば避けた方がよいとのことである。

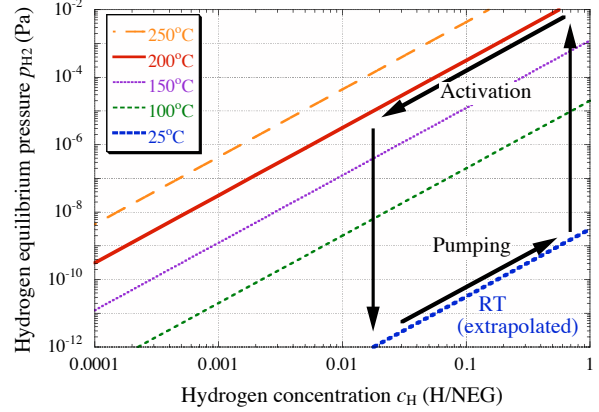


Fig. 21 NEG コーティングでの水素の吸着等温線

cERL での使用例

cERL には入射空洞と主空洞の 2 台の超伝導空洞 (SCC) があり、その内表面はクライオポンプとして働くので、周辺のビームダクトから流入するガスを凝縮し続けると考えられる。そこで、空洞周辺部の圧力を下げる目的で、NEG コーティングを採用した。

Fig. 22 に 1 次元有限要素法による cERL 周回部の圧力分布計算結果を示す。SCC の上下流にそれぞれ約 1 m の NEG コーティングダクトを設置して、空洞周辺の圧力を 10^{-9} Pa 台に下げる設計となっている。

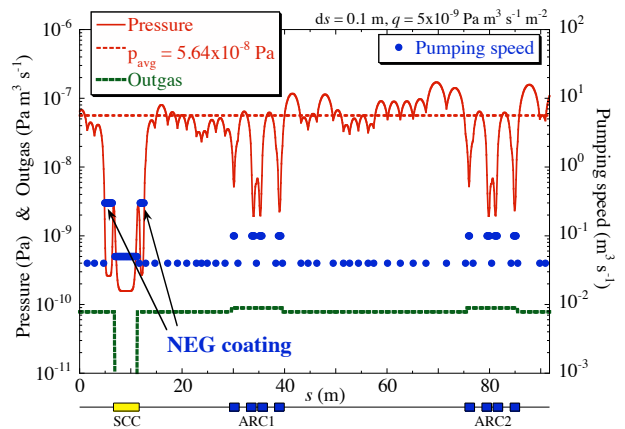


Fig. 22 cERL 周回部の圧力分布計算

Fig. 23 は設置風景で、ダストの混入を抑えるため、クリーンブース内で設置を行った。ブース内に持ち込むものは工具類も含め、予めクラス 10 のクリーンルーム内でパーティクル計測をしながら、イオンガンによるガス噴射を行った。



Fig. 23 NEG コーティングダクトの設置

Fig. 24 は、入射空洞下流側の 5 連四極電磁石の中に設置した NEG コーティングダクトの写真である。磁極との隙間は 3.5 mm しかなく、200°Cでの活性化のためのカプトンフィルムヒータを貼付してある。

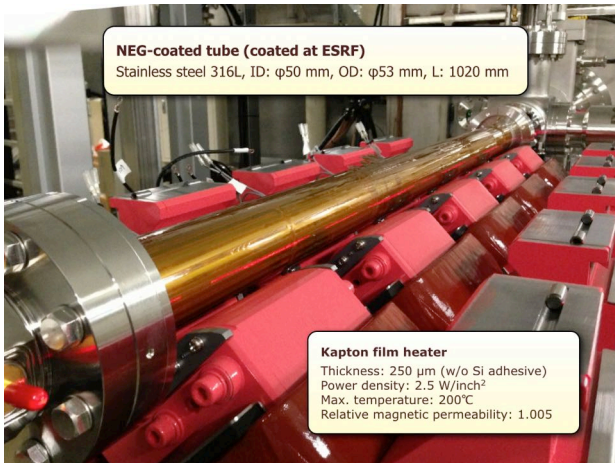


Fig. 24 設置後の NEG コーティングダクト

NEG コーティングの活性化の様子を **Fig. 25** に示す。活性化に先立ち、周辺のコーティングされてないチェンバを 200°Cで 64 時間ベーキングし

た。このとき NEG コーティングは活性化されてしまうのを防ぐため 80°Cにキープしてある。その後、ポンプやゲージのガス出しを行い、NEG コーティングを 200°Cで 24 時間キープして活性化した。最終的な到達圧は、真空計位置で 1×10^{-8} Pa であった。

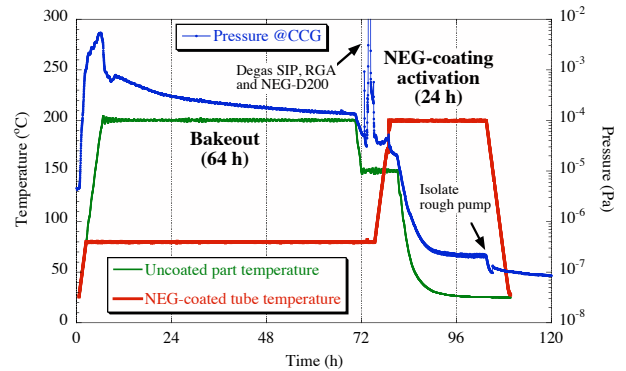


Fig. 25 NEG コーティングの活性化

Fig. 26 は、その NEG コーティング活性化中の残留ガス分析結果で、主要なガス放出は水素である。Fig. 21 の吸着等温線に沿って活性化が進んだとすると、活性化中に水素の分圧が約 2 桁低下しているため、NEG 内の水素含有量が約 1 桁低下したと考えられる。

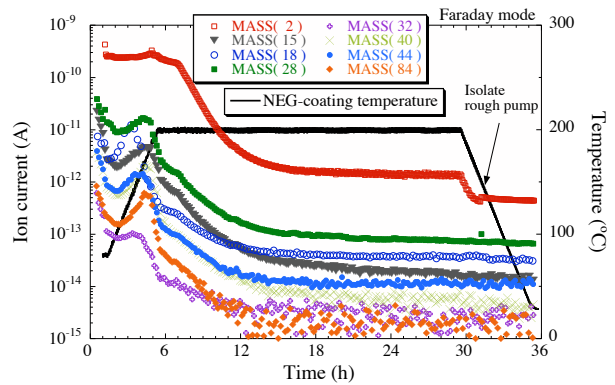


Fig. 26 NEG コーティング活性化中のガス放出

4. おわりに

光源加速器の真空システムは、ビームや放射光を受けとめる受け皿としての役割を果たしつつ、なるべくビームに迷惑をかけないようにすることが求められている。

さらに、真空システムに対する要求は、ビームの高品質化に伴い、ますます厳しくなっている。とりわけ電磁石の密集化により、真空ポンプやフランジ、ベローズ、GV の設置スペースは制限され、ビームダクトはますます細く、長くなっている。そして、ビームダクト内面の平滑化は不可欠となり、ダストフリーなクリーン環境も強く要求されてきている。

このような流れは今後も続いていくと思われるが、これまでに蓄積されてきた実績のある技術をベースとして、低インピーダンス性能、NEG コーティングなどの表面改質技術、精密加工や設置技術、精密シミュレーション、クリーン化技術を発展させていくことで、困難ではあるが様々な課題も解決していけるだろうと考えている。

参考文献

- [1] 小林, 真空 27 (1984) 255.
- [2] K. Fukutani, J. Vac. Soc. Jpn. 49 (2006) 605.
- [3] O. Gröbner, Vacuum 33 (1983) 397.
- [4] M. Ady et al., Proc. IPAC15, WEPHA011.
- [5] 小林, OHO87 講義テキスト
- [6] 堀, OHO93 講義テキスト
- [7] 金澤, OHO91 講義テキスト
- [8] Y. Baconnier and G. Brianti, CERN/SPS/80-2 (DI) (1980).
- [9] N. Nakamura, Proc. Particle Accelerator Society Meeting 2009, p.104.
- [10] I. C. Sheng, et al, Proc. IPAC15, WEPHA049.
- [11] T. Hasegawa et al., Proc. Particle Accelerator Society Meeting 2011, p.997.
- [12] C.K. Chan, et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 763 (2014) 388.
- [13] M. Oishi et al., J. Vac. Soc. Jpn. 51 (2008) 386.
- [14] Y. Tanimoto, T. Honda, and S. Sakanaka, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12 (2009) 110702.
- [15] Y. Tanimoto et al., Proc. IPAC13, p.3315.
- [16] Y. Suetsugu et al., Rev. Sci. Instrum. 78 (2007) 043302.
- [17] Y. Suetsugu, M. Shirai, M. Ohtsuka, J. Vac. Soc. Jpn. 58 (2015) 150.
- [18] T. Bizen, J. Vac. Soc. Jpn. 52 (2009) 271.
- [19] K. Saito, F. Furuta, T. Konomi, Proc. IPAC'10, p.3359.
- [20] R. Takai et al., Proc IBIC14, p.7.
- [21] C. Benvenuti, J. Vac. Sci. Technol. A 19 (2001) 2925.
- [22] P. Chiggiato, P. Costa Pinto, Thin Solid Films 515 (2006) 382.
- [23] Kimo M. Welch, Capture Pumping Technology
- [24] A. Rossi, Proc. EPAC06, p.1444.

上記以外にも本講義テキストの執筆にあたり、以下の文献を大いに参考にさせていただいた。

羽島他,コンパクト ERL の設計研究,
KEK Report 2007-7, JAEA-Research 2008-032
坂中, OHO86 講義テキスト
中村, OHO91 講義テキスト
加藤, OHO93 講義テキスト
末次, OHO94 講義テキスト
齋藤, OHO01 講義テキスト
金正, OHO01 講義テキスト
柴田, OHO04 講義テキスト
金澤, OHO09 講義テキスト
魚田, OHO10 講義テキスト
第 55 回真空夏季大学テキスト