

## 3.5 真空系

### 3.5.1 はじめに

ERLの「真空系」について検討する。電磁石をはじめ各要素の設計が検討途中段階にあるため、これまでに手に入れた条件の下で真空系の在るべき姿について検討を試みる。まさにこのレポートの内容はゼロ次ドラフトとしての位置付けにある。そうは云いながら基本的な検討課題を列挙し、そのうちのいくつかについては検討を試みた。

### 3.5.2 ERL 真空の概観

#### 3.5.2.1 負荷

ERL 真空系の負荷は放射光照射による光脱離である。室温での熱脱離、さらにはHOMによる発熱に起因する熱脱離も検討の対象とすべきであるが、最も大きいガス放出の源である光脱離の大きさを見積もることとする。放射光強度は、

$$N_p(\text{total}) = 8.08 \times 10^{17} E_B I_B = 4.04 \times 10^{20} [\text{photons/s}/2\pi\text{rad}] \quad (\text{ERL}) \quad (3.53)$$

と与えられる。ERLを $I_B=100$  mA、 $E_B=5.0$  GeVで運転した場合、アーク部のノーマルセル1個分相当(3.5m直線 B-5° B-10° B-5° 3.5m直線)での照射 photon数は $2.2 \times 10^{19}$  photons/s/349mradである。単位開き角度あたりでは $N_p = 6.43 \times 10^{16}$  photons/s/mradとなる。

比較のためにPFリングを450 mA、2.5 GeVで運転する場合の放射光強度は、

$$N_p(\text{total}) = 8.08 \times 10^{17} E_B I_B = 9.09 \times 10^{20} [\text{photons/s}/2\pi\text{rad}] \quad (\text{PF}) \quad (3.54)$$

である。PFリングのノーマルセル(B-mag数=28台)1個分での放射光照射強度は $3.25 \times 10^{19}$  [photons/s/224mrad]であり、単位開き角度あたりの照射光子数は $N_p = 1.45 \times 10^{17}$  [photons/s/mrad]となる。すなわち、単位開き角度あたりの値としてERLとPFリングを比較すればERLはPFリングの41.6%に相当する放射光がダクトを照射し光脱離によるガス放出負荷となる。

ガス放出量はその単位によっていろいろな表現があり、ダクトの単位長さ当たりで評価する場合には $Q$  [Torr l/s/m]あるいは $Q$  [Pam<sup>3</sup>/s/m]、単位開き角あたりの放出気体分子数として評価する場合には $Q$  [molecules/s/mrad]などがある。

放射光の照射強度から光脱離強度を求めるには光脱離係数を用いる。 $Q$ 値と光脱離係数 $\eta$  [molecules/photon]との関係は、

$$Q [\text{molecules/s/mrad}] = N_p [\text{photons/s/mrad}] \cdot \eta [\text{molecules/photon}] \quad (3.55)$$

である。 $\eta$ の値は、「光照射に対して virgin である」アルミ合金表面ではおよそ $\eta = 1 \sim 0.1$  molecules/photonであるが、積分照射量の増加とともに減少し、十分に「潤れた」ダクト表面では $\eta = 10^{-6}$ 以下と小さくなることが知られている。すなわち、

$$\text{Log } \eta = \text{Const.} - \text{Log} \int N_p dt \quad (3.56)$$

の関係で  $\eta$  の値は減少する。真空系の設計としては初期のガス放出の大きいときを十分に考慮する必要がある。例えば、運転の最初において 10 mA のビームが入射されたとする。virgin ダクト表面での  $\eta$  を  $\eta = 1$  と仮定すると、 $Q$  [molecules/s/mrad]= $6.43 \times 10^{12}$  [photons/s/mrad/10 $\mu$ A]  $\cdot$  1 [molecules/photon]= $6.43 \times 10^{12}$  [molecules/s/mrad/10 $\mu$ A] となる。この値を真空工学で用いる圧力単位 Torr で表すとおよそ  $Q = 1.95 \times 10^{-7}$  [Torr l/s/mrad] である。ERL の偏向電磁石 B-mag の偏向半径  $\rho$  は  $\rho = 17.2$  m であるので、 $Q = 1.13 \times 10^{-5}$  [Torr l/s/m] となる。

### 3.5.2.2 必要圧力（主にアーク部）

ガス放出量  $Q$  [Torr l/s/m] と圧力  $p$  [Torr] の関係は単位長さ当たりの実効排気速度  $S_e$  を  $S_e$  [l/s/m] として、

$$p = Q/S_e \quad (3.57)$$

である。ERL ノーマルセル真空系の実効排気速度については後ほど検討するが、仮に 50 [l/s/m] の実効排気速度を与えるような設計が出来たとして、 $\eta=1$  では 10  $\mu$ A のビームでも、系内の圧力は  $p = 2.3 \times 10^{-7}$  Torr となる（実際にはここでは無視している熱脱離の寄与によるガス放出もあるのでこれより大きな圧力値となると考えなければならない）。これらの数字からは、真空系の実効排気速度 50 [l/s/m] を実現できたとして 100 mA を現実のものとするには  $\eta = 10^{-6}$  以下となつてはじめて  $p = 10^{-9}$  Torr 台が可能となると予想される。真空度がビームロスを決めるなら、許容されるビームロスの範囲で初期調整運転を確保するという視点から真空度は重要となる。

### 3.5.2.3 必要圧力（直線部）

ERL は Energy Recovery にその存在意義があるのではなく、エネルギー分散の小さな且つエミッタンスの小さなビーム軌道に挿入設置された光源からの高品質放射光の発生に意義がある。ERL は基本的にシングルパスであるのでビーム寿命という視点から見れば  $p = 10^{-9}$  Torr でも十分に実用になるように見える。しかしながら、残留気体分子による制動放射としてのガンマ線が挿入光源からの放射光と同一直線上に放射され、ユーザーエリアにまで達する。PF リング真空系の設計においてはこのことに配慮してリングのアーク部が  $1 \times 10^{-9}$  Torr 台であっても挿入光源の設置される直線部の真空はそれより一桁以上小さい  $10^{-10}$  Torr 以下の圧力となるよう配慮して設計した。

ERL アーク部とつながる挿入光源直線部において、より低い  $10^{-10}$  Torr の真空を実現するためには、アークの出口付近により大きな排気速度を持つ真空ポンプを配置する必要がある。このためのスペースが不可欠となる。

### 3.5.2.4 ビームロス

ERL での残留気体分子と電子ビームとの衝突の影響は、基本的にシングルパスであるので小さい。5 GeV の電子ストレージリングでは制動放射による散乱断面積  $\sigma_B(Z^2)$  が他の散乱断面積に較べ大きい。したがってビーム寿命  $\tau$  は  $1/\tau = \sigma_B p$  で与えることができ、真空の量 ( $p$ ) と質 ( $Z^2$ ) とがビーム寿命  $\tau$  を決めている。これに対し ERL ではボア 30 mm $\phi$  の四極電磁石が採用され、そこに設置される真空ダクトは内径 23 mm 程度の狭いものにならざるをえない。 $\beta$  関数の大きさにもよるが、残留気体分子と衝突し散乱された電子はその散乱角が小さくても狭い ERL ダクト内では容易にダクト壁に衝突し、失われる可能性が大きい。

電子ストレージリングとの比較においてビームロスの大きさを評価してみる。2003年2月現在、PFリングの平均真空は $2 \times 10^{-10}$  Torrであり、ビーム寿命 $\tau$ は400 mA ストレージ時に3000分である。すなわちこの条件での毎秒当たりのビームの減少率( $-dI_B/dt = -I(t)/\tau$ )は $5.56 \times 10^{-6}$ となる。電流に換算すれば $2.22 \times 10^{-3}$  mA/sが、個数に換算すれば $1.39 \times 10^{13}$  electrons/sの電子がリング(全周で)ロスしている。この程度のビームロスであれば厚さ1 m 弱のシールド壁の外側でユーザーは放射光利用実験を行うことができる環境となっている。

ERL 運転の初期に、 $10 \mu\text{A}$  のビームを連続的に入射して運転調整を行っていると想像すると、 $6.25 \times 10^{13}$  electrons/s の電子のロスがあることになる。すなわち、ERL での  $10 \mu\text{A}$  のビームロスは現状の PF リングでのビームロスより 4.5 倍大きな値 (1800 mA 相当) となる (ロスの評価基準が、加速器全体にわたって一様で、且つ単位長さ当たりであるならば、検討されている ERL の周長約 1200 m と PF リングの周長 187 m を考慮すると ERL での  $10 \mu\text{A}$  のロスは PF のその 70% となる)。調整が上手く進み、10 mA へさらに 100 mA と進む場合でも、ビームロスの絶対値を  $10 \mu\text{A}$  程度とするにはロスの割合としてそれぞれ  $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  と小さな値を実現しなければならないことになる。ビームロスの評価は放射線管理の立場から評価され別章に記される。

### 3.5.3 真空ダクト

電磁石・軌道グループが検討を進めている偏向電磁石のギャップは 19 mm、四極電磁石のボア  $D$  は  $D = 30 \text{ mm}\phi$  と小さく、それらの中に挿入設置される真空ダクトのコンダクタンスは電子ストレージリング用ダクトに較べ小さな値とならざるをえない。真空ダクト全体の構成として、偏向電磁石部ダクト B-duct、四・六極電磁石部ダクト Q-duct、磁石のない直線部ダクト S-duct に分け、それぞれについて検討する。必要に応じて偏向電磁石下流にある Q および S ダクトにビーム進行方向の順に番号を付ける。

#### 3.5.3.1 偏向電磁石部真空ダクト (B-duct)

偏向電磁石 B-mag の断面構造として検討されているものを図 3.47 に示す。磁極の有効幅は 60 mm、長さ 1500 mm および 3000 mm の 2 種類である。偏向半径  $\rho$  は  $\rho = 17.2 \text{ m}$  である。長さ 1500 mm 偏向電磁石用ダクト (B-duct-15) の場合、ダクト外周側を扇形に開いて、議論の対象としている B-mag からの放射光がダクト最下流の内壁を照射することなくダクトの外下流に取り出され、アップソーバーで処理される構造とする。そのためには最下流でのダクトの幅 (スパン) はビーム軌道中心から 66 mm 以上を確保する必要がある。

一方、ダクト内周側には分布排気ポンプ (NEG-module) を内蔵させる。そのスペースの内寸法は  $70 \text{ mm}(W) \times 25 \text{ mm}(H)$  で軌道中心より 50~120 mm とした。磁極部でのダクトの高さはギャップ値 (シムを考慮して) 最大 18 mm しかとれない。これは四極および六極電磁石部真空ダクトの内径 23 mm よりも 5 mm 小さい値である。磁極部の幅  $\pm 35 \text{ mm}$  の範囲ではダクト肉厚を 3 mm とし、それより外の範囲では 10 mm の肉厚とすることで、大気圧によるつぶれを最小にする。この偏向電磁石ダクト外周に冷却水通路を内蔵させる。断面図として上流側を図 3.55(a) に、下流端を図 3.55(b) に示す。

長さ 3000 mm 偏向電磁石用ダクト (B-duct-30) の下流半分部の構造は基本的には 1500 mm 用 B-duct-15 と同じとする。中央部より上流側のダクト外側を放射光照射が無い構造としないのは、最上流を発光点とする放射光 ( $0^\circ$  ライン放射光) が 3000 mm 下流では軌道外側 266 mm を通るので、B-duct-30 の下流部での大気圧によるつぶれ変形が無視できなくなることによる。この偏向電磁石ダクト外周にも冷却水通路を内蔵させる。B-duct-15 と同様に B-duct-30 の内周側に分布排気

ポンプ (NEG-module) を内蔵させる。

押し出し素管を曲げ加工して製作することも考えられるが、ダクト肉厚が一様でなく中心部が相対的に薄いために曲げ加工工程において予期せぬ変形が起こるおそれがある。素材のアルミ合金ブロックを機械加工で製作する方法も候補となる。ダクト全体を水平面内で上下に2分割して素材とし、ダクト内側および外側を切削機械で切削加工をすることによりハーフピースを製作する。加工後、上下のピースを溶接で合わせ一体としてダクトとする。この方法はPF-AR用無酸素銅ダクトに対して採用された方法である。素材はアルミ合金A5052が候補となろう。この方法はダクト内周内側に用意する排気スリットの工作が容易であるというメリットがある。ダクト内径が小さいために設置エラーは相対的に大きくなる。位置決めホールをB-duct-15で2箇所、B-duct-30では3箇所用意することになろう。

リング全周で発生する放射光パワーは、 $E_B = 5 \text{ GeV}$ 、 $I_B = 100 \text{ mA}$ 、 $\rho = 17.2 \text{ m}$  であるので

$$W = 88.5 \times E_B^4 I_B / \rho = 321.77 \quad [\text{kWatt}/2\pi\text{rad}] \quad (3.58)$$

しがたって、それぞれの偏向電磁石で発生した放射光パワーは、B-duct-15下流では4.47 kw、B-duct-30下流では8.94 kwである。B-duct-15からの放射パワーの大部分はB-duct-15直下流外側に用意される放射光アブソーバーで処理される。B-duct-30においては、上流半分にある軌道を光源とする放射光が上流半分のダクト壁を照射するので、約30 W/cmのパワーをダクト外周側に内蔵された冷却水水路で吸収処理する。一方、B-duct-30の下流半分の軌道を光源とする放射光のパワーはB-duct-15下流と同様に外に取り出し、直下流外側に用意される放射光アブソーバーで処理する。しかしながら、偏向電磁石下流端近くでの軌道を光源とする放射光は下流端外側アブソーバーで処理できず、より下流の四極および六極電磁石部の真空ダクト内壁を照射するパワーとなる。

### 3.5.3.2 四極および六極電磁石部真空ダクト (Q-duct-1, Q-duct-2)

#### シングルセルダクト

四極電磁石のボアは $D = 30 \text{ mm}\phi$ と考えられているので、電磁石とダクトのクリアランスを $\pm 1 \text{ mm}$ とすると、外径は $28 \text{ mm}\phi$ となる。肉厚2.2 mmのアルミ合金A6063を用いた押し出し管を想定すると、内径は $23.6 \text{ mm}\phi$ となる。断面を図3.56に示す。リングに設置した際の外周側となる横壁には、放射光パワーを吸収するための水冷アブソーバーあるいは水路を内蔵させる。

直径 $D$  [cm]の円形断面を仮定すると、端部の効果を無視して長さ $L$  [cm]当たりのコンダクタンス $C$  [l/s]は、

$$\begin{aligned} C_1 &= 3.87 \times D^3 (T/M)^{1/2} / L \\ &= 132.4 / L \text{ [l/s] for CO at 300 K} \end{aligned} \quad (3.59)$$

長さ50 cmの四極電磁石部を貫通しているダクトのコンダクタンスは、 $L = 50 \text{ cm}$ として、 $C_1 = 2.6 \text{ l/s}$ と非常識と言えるほどに小さい。ちなみに高輝度化されたPFリングの $L = 50 \text{ cm}$ 当たりのコンダクタンスは $C_{PF} = 41 \text{ l/s}$ である。このERL用ダクトのコンダクタンスは高輝度化PFリングダクトのコンダクタンスの6.3% (~1/15)と異常に小さい値しか確保できないことになる。したがって、ダクト断面構造として「円形断面 (シングルセル)」ではなく「楕円断面」あるいは「円形断面 + サイドチャネル付き」という構造を検討せざるをえない。

### サイドチャンネル付きダクト

一般断面に対するコンダクタンス  $C_2$  は、

$$C_2 = (4/3)(8RT/\pi M)^{1/2} / \int (b/A^2) dx \quad (3.60)$$

で与えられる。ここで  $A$  は一般断面の管の断面積 [ $\text{cm}^2$ ]、 $b$  は断面の周長 [ $\text{cm}$ ] であり、長さ  $x$  での断面を考慮しながら長さ  $L$  までの範囲で積分を行なうことで求めることができる。断面が長さ  $L$  に対して変わらなければ (3.60) 式は、

$$C_2 = 19.4(A^2/b/L)(T/M)^{1/2} \quad [l/s] \quad (3.61)$$

となる。

仮に、 $D = 30 \text{ mm}$  の円形断面シングルセル構造を楕円断面に変えてもコンダクタンスの改善には寄与しないことが見て取れる。基本的にアパーチャが小さいことがその理由である。図 3.56(a) に示すようなサイドチャンネルを軌道内側のみ付加した円断面構造のダクトのコンダクタンス  $C_2$  を (3.61) 式により求めると

$$C_2 = 1101/L [l/s] \text{ for CO at 300 K} \quad (3.62)$$

を得る。 $L = 50 \text{ cm}$  とすると、 $C_2 = 22 \text{ l/s}$  となり、PF リングコンダクタンスの 1/2 程度まで改善される。有限要素法によって正確な応力やつぶれを解析しなければならないが、四極・六極電磁石磁極近傍の肉厚が薄いことからこのままでは大気圧によってつぶれ変形を起こすことは明らかである。肉厚が薄い約 30 mm 幅の近傍には何らかの補強材をダクト内側に挿入してつぶれに対抗しなければならないと考える。このことは、気体分子にとって進行方向に障害物を挿入したことに相当するので、ようやく獲得した上記のコンダクタンスを小さくすることになる。実際に採用する構造でのビームダクト軸方向のコンダクタンスを十分なだけ確保するのは難しい。

### サイドチャンネル付きダクト (分布排気ポンプ内蔵)

次に、図 3.56(b) に示すように、サイドチャンネル内部に NEG (モジュールあるいはストリップ) を内蔵させることで分布排気速度を持たせ、軸方向のコンダクタンスは十分でなくとも実効排気速度を確保することについて検討する。

放射光が照射しないリング内側のサイドチャンネルに、ビームからサイドチャンネルを見たとき、例えば幅 20 mm、高さ 4.6 mm、奥行き 25 mm のつぶれ補強材を 70 mm ピッチで挿入する。このサイドチャンネル奥に 30 mm 幅のストリップを折りたたみ高さ 23 mm とした NEG モジュールを必要数挿入する。市販品のモジュールは折りたたみ高さ 50 mm であるが製作可能と思われる。NEG モジュールへ向かっての窓 (50mmW×4.6mmH×39mmDepth の矩形形状) のコンダクタンスは、

$$\begin{aligned} C_3 &= 30.9K_j(H, W)W^2H^2(W+H)^{-1}(T/M)^{1/2}/\text{Depth} [l/s], \\ &= 43.21 \times (T/M)^{1/2}/\text{Depth} = 36.23 [l/s], \quad \text{この場合 } K_j(H, W) = 1.444. \end{aligned} \quad (3.63)$$

ここで  $K_j(H, W)$  は幾何学的形状に対する実験に基づく補正值である。このような窓が長さ 50 cm の四極電磁石部には 6 個内蔵することが可能なので、 $L = 50$  cm 当たりの窓コンダクタンスとして 217  $l/s$  を用意できることになる。仮に、NEG モジュールの排気速度として  $L = 50$  cm 当たり 100  $l/s$  程度を用意できれば、この部分での実効排気速度を 60~70  $l/s$  程度を期待できる。これは電子ストレージリングと比較しても十分な値である。

#### ダクト外周側の構造（放射光アブソーバー内蔵）

放射光が照射する軌道外側のダクト壁を水冷する必要があるが、四・六極電磁石部では磁極間のスペースが小さく、必要な冷却水量を確保できる水路を設けることは困難である。軌道外側にも内側と同様のサイドチャンネルを付加し、水路が確保できる位置にアブソーバーを挿入したい。この場合にもサイドチャンネルのつぶれ防止の補強材が必要となる。しかしながらこの補強材には放射光照射があるので、水冷されたアブソーバーの一部がつぶれ防止構造材となるように設計する必要がある。放射光パワーは、偏向電磁石下流から Q-mag(No.1) までの直線部 ( $L = 600$  mm) の範囲には 1230 W、Q-mag(No.1) 内部 500 mm の範囲には 462 W と推定できる。したがって補強材の材質としては熱伝導が大きく、かつ温度上昇によっても耐力が落ちない無酸素銅が候補となる。ビームスペースからサイドチャンネルへと続く部分は内法高さが 4.6 mm しかとれないことから、この狭い範囲の構造材に、力学的耐力を確保しながら、且つ冷却水水路を設けようとしても水路の壁厚を十分なだけ確保することはほとんど不可能である。したがって、冷却水を通すことが可能な位置はビーム中心から 65 mm 以上離れた位置となる。

偏光電磁石下流端から 1.5 度から 5 度さかのぼった位置にある光源から放射されるパワーは 3.2 kW である。このパワーを受け止めるためのアブソーバーは、幾何学的制約条件から、5 度 ~ 3.5 度を受けもつアブソーバーと 3.5 度 ~ 1.5 度を受けもつアブソーバーに分けて、偏向電磁石下流端から Q-mag(No.1) 上流部までの直線部ダクトに内蔵する。アブソーバーでのパワー密度を下げるため、受光面は少なくとも 1:5 に傾ける必要がある。この部分の排気はアブソーバー近傍（上下位置）に配置するポンプで排気する。

短パンチによる HOM が排気用スリットを通して侵入することを防止するために、小さな穴径の小穴を採用することになる。しかも、内径わずか 23 mm の円形ビームダクトに排気に必要なコンダクタンスを確保するには小穴を多数開けることが必要となる。しかし、イメージ電流が流れるビームダクトに多数の小穴を穿つことは望ましくない。シミュレーションによる検討が必要であるが、サイドチャンネル内部に排気スリットを設けるほうがこれに較べ自由度が多く、HOM 発熱を防ぎながら実効排気速度を確保することが容易と予想される。

#### 3.5.3.3 直線部ダクト (S-duct)

##### B-mag 下流ダクト (S-duct-1)

直線部ダクトの断面を図 3.57 に示す。材質はアルミ合金 A6063 とし、押し出し加工により成形する。内形状は円形断面で、内径 23.6 mm $\phi$  として四極・六極電磁石部ダクトと同一形状とする。3.5.3.2 節に示したようにこのダクト区間のコンダクタンスは小さい。このダクト内の実効排気速度を確保するために、軌道内側に NEG を挿入できるサイドチャンネルを設けたい。NEG モジュールのためのスペースは 40 mm(W)  $\times$  26 mm(H) 程度必要である。

偏向電磁石下流の Q-mag(No.1) までの直線部には原則として補正電磁石以外の長い磁石は配置されない。外側サイドチャンネル内に放射光アブソーバーを設置することで、アブソーバー区間及び下流区間にあるダクト内壁を保護する。この間の放射光パワー 1230 W を処理するアブソーバー

の構造と配置については3.5.3.2節に述べた(図3.57(a)参照)。構造上の制限のためアブソーバーと排気ポンプの配置については最適化を行いながら設計を進めることになる。図3.57(a)断面と図3.56(b)断面図を、HOM発生を防ぐため断面を滑らかに接続する。

ERL加速器の特性を活かした放射光利用は挿入光源からの放射光利用である。挿入光源はアーク部ノーマルセル(3.5m直線 B-5° B-10° B-5° 3.5m直線)の上流直線部(3.5m×2)に配置されるので、ノーマルセル最上流偏向電磁石ダクト(B-5° B-duct-15)からその放射光を取り出すことになる。下流外側に用意される放射光吸収アブソーバーに放射光取り出し窓を開け、S-1ダクトにビームラインへの接続管を設けて取り出す。

#### 磁石間直線部ダクト(S-duct-2~4)

図3.57(b)に示すように、ビームダクトは外側形状を八角とし、斜め45°方向にビーム位置モニタ(BPM)を取り付けるようにする。この区間への放射光照射強度は低くパワー密度も小さいので、ダクト外側に設ける冷却水水路で冷却することで問題はない。

### 3.5.4 排気系

ERL真空系全体の排気系として、上流から順に、電子銃部、バンチャー、超伝導リニアック部、アーク部、直線部とに分けて検討することになる。超伝導リニアック部はKEKで開発・発展させてきた超伝導加速空洞とその周辺技術の蓄積から加速空洞セルの極低温の表面状態を如何に長時間維持するかを目標に設計することになる。加速空洞前後の真空の量(圧力)と質(水素以外はほとんど無視できる分圧に制御)の制御が求められるが、現状の技術で達成可能と思われる。バンチャー部は、アーク部とは異なり収束電磁石のボアを大きくとる事も可能である。また、磁石間の自由空間長やビームダクト断面形状の自由度も大きいので、ビームブローアップを起こさない程度の真空を実現させるのに必要な排気系を設計するにあたって特に困難はないと思われる。

#### 3.5.4.1 電子銃部

ERL用電子銃から取り出されるビームには、低エミッタンスであり、かつ横方向にも進行方向にもハローが無視でき、電子電流が長時間安定であることが求められる。電子の放出が安定であるためには、残留ガスによる再吸着で表面仕事関数が変化しないこと、ウェネルト電極などから電子衝撃脱離したイオンやイオン化した残留ガスイオンが陰極表面を衝撃し、陰極面をスパッタするなどして電子放出特性が変化しないことなどが要求される。これらの要求を充たすための「雰囲気真空」に関する条件として、チップ状陰極から高電界によって電子を取り出す実験の実情が参考になると考える。カーバイド系金属を用いたチップ陰極での高電界電子放出特性が安定であるには、学会発表によれば $10^{-11}$  Torrでは不十分で $10^{-12}$  Torrが必要であった。仮に $10^{-12}$  Torr台の真空を実用にする場合、日本真空協会会誌「真空」1994年9月号「極高真空特集号」が真空を創り出すうえでの材料選択、排気系の選択、また計測技術においても参考となる。電子の取り出し方式に付いてはいろいろな提案がなされているので、それぞれにおいて最適な真空材料と排気系を検討することになる。なお、カーボンナノチューブCNTあるいはカーボンナノファイバーCNFを陰極に用いた場合の安定性と真空の関係については、現在各種の実験が各地で行なわれているので調査が必要である。

ERL用超伝導リニアックではパルスではなく直流の電子加速が行なわれる。したがって直流の優れた電子放出特性が検討対象となる。直流で100 mAという電子電流を限られた特定の面からと

り続けることは可能であろうか。電子電流をとり続けても安定な表面とはどのようなものであるか。真空と固体表面の視点からも大きな興味がある。(参考: 熱陰極真空計ではタングステンが陰極材として用いられ、その表面積は陰極形状にもよるがおよそ  $0.5 \text{ mm}\phi \times 70 \text{ mm} = 1 \text{ cm}^2$  である。  $10^{-10}$  Torr 台の真空において 5 mA 程度の電子電流を年の単位で安定に取り出し、  $5 \text{ mA/cm}^2$  の電流密度を実用としている。 ERL 電子銃に必要な電流密度は (参考: 面積で 1/100 以下、電流値で 20 倍を考慮してタングステンからの熱電子放出に較べ  $10^4$  倍という大きな値である)  $\text{CeB}_6$  からの熱電子では、また CNT ではどの程度になるのか今後調査が必要である。)

### 3.5.4.2 アーク部

ERL アーク部 (偏向電磁石および四・六極電磁石部) での排気についてはダクトの構造の節 3.5.3.2 で設計方針を述べた。

基本的にはダクト内周側には分布排気ポンプを内蔵させる。偏向電磁石部では、偏向半径  $\rho$  は  $\rho = 17.2 \text{ m}$  であるので、NEG ストリップを張るにあたってダクトの内周側を直線となるようにダクトを製作しなければならない。偏向電磁石がセクター構造をとった場合には、NEG ストリップの代わりに 25 cm 長の NEG モジュールを連結して用いることにする。長さ当たりの排気速度も NEG モジュールのほうが大きい。 B-duct-15 ではダクトを放射光が直射しない構造とし、直下流外側に設けるワイド型放射光アブソーバーからの放出ガスをアブソーバー部に設ける排気ポンプにより排気する。排気ポンプとして、イオンポンプ、チタンサブレーションポンプ、(加えて NEG) から構成される。

これに対し B-duct-30 では下流側半分は (上流半分を光源とする) 放射光の直射を受ける構造となる。この部分の排気には B-duct-30 外周側から放射光アブソーバーとその陰に隠れたチタンゲッタポンプで排気を強化する。偏向電磁石の下流半分を光源とする放射光は B-duct-30 下流の外側に取り出す設計なので、B-duct-15 の場合と同様の構成とする。すなわち、下流外側に設けるワイド型放射光アブソーバーとそこからの放出ガスを排気ポンプにより排気する。

$10^\circ$  偏向区間での放射光強度は最大  $1.1 \times 10^{19}$  photons/s/ $10^\circ$  である。比較的初期の段階として 1 mA と仮定し、そのときの光脱離係数  $\eta$  の値を  $\eta = 10^{-3}$  molecules/photon と仮定すると、光脱離によるガス放出量  $Q(10^\circ)$  は、

$$Q(10^\circ) = 1.1 \times 10^{17} \times 10^{-3} = 1 \times 10^{14} \text{ [molecules/s]} = 3 \times 10^{-6} \text{ [Torr l/s]} \quad (3.64)$$

となる。500 l/s という排気速度をこの区間に配置して、ようやく  $1 \times 10^{-8}$  Torr 以下の真空をえることができる。これが初期運転を可能にするに必要な排気速度の見積もりである。放射光強度の分布に見合うために、この排気速度の 2/3 以上を S-duct-1 から S-duct-2 間での区間に配置する。したがって、経路全周では  $360^\circ/10^\circ$  として約 20,000 l/s の排気速度を用意しなければならない。実際には直線部の真空を一桁以上改善することが必要なので、ERL 真空系全体では、この数倍の排気速度を用意することが必要となる。

### 3.5.4.3 直線部

直線部には挿入光源が設置される。制動放射を極力少なくするには挿入光源の前後および挿入光源内部の残留ガス圧力を運転中でも  $10^{-10}$  Torr としたい。今後、挿入光源の構造や寸法が決まれば、必要な排気系を設計することにする。挿入光源の前後には排気ポンプを置くことができる約 50 cm 程度のスペースがあるので排気は可能と考えている。



### 3.5.5 製作上の課題

#### 3.5.5.1 ビーム位置モニターに対する考え方

内径 23.6 mm $\phi$  のボアに挿入設置される真空ダクトに取り付けることが可能なボタン型 BPM 電極のサイズは、4~5 mm $\phi$  とならざるをえない。電極とビームの距離は 11 mm となるが、この小さなサイズの電極で 10  $\mu$ A のビームをハンドリングできる信号を取り出せるであろうか。BPM は S-duct-1~4 までのダクトに配置するが、電極配置は水平・垂直から 45° 方向に 4 電極を配置することを考えている。従って、ダクトの上下には BPM を固定のための取り付け具を配置する。

特にリニアックからアーク部へつながる領域では、ビーム軌道を正しく制御しその先にあるアーク部でビームをロスしないようにハンドリングする必要がある。キッカー・セプタムを用いないリニアックからのビームは電子ストレージリングへの入射ビームとは異なり水平方向に大振幅とはならないので、例えばノーマルセル 3 個分程度の領域（全アークの数%相当）において軌道を正しく制御できれば、その後のアークではビームロスを起こさない程度に軌道を確保することが出来ると期待される。最初の偏向電磁石 3~4 個分程度の領域にはボタン電極型 BPM よりも感度が大きいストリップライン型 BPM も併設することが望ましいのではないかと。しかし、ストリップライン型 BPM を内蔵する円形断面ダクトの内径はどのようなものとなるか。ストリップラインとダクト内径はどれほどの距離を離すべきか。膨らんだ形のストリップライン部ダクトでのインピーダンスはどれほどと評価されるのか。ダクト壁面にセラミックスを溶射しその絶縁膜上にスパッタリングでストリップライン電極を形成するなど、従来の方式にこだわらないあらたな試みがなされてもよい。今後の検討課題である。

ERL ではビームサイズが 10  $\mu$ m 程度であるので、BPM の設置制度は、電子ストレージリングでの BPM 設置精度よりも高精度であることが望まれる。また、BPM の位置分解能もビームサイズの 10%程度は必要となるであろう。これらのことから、ビーム位置モニターの運転中の力学的振動を如何に小さく出来るかが設計上の重要課題となる。振動の源は、冷却水冷凍機および空調機器などの施設機器からの振動、冷却水が流れることによって引き起こされる振動などが考えられる。小さなボア径の故に薄肉にならざるを得ない真空ダクトは特に低周波の振動に弱い。ビーム位置モニター部に誘起される力学的振動を小さくするには質量の大きな電磁石に設置固定することが必要であるだけでなく、「軟らかなベローズ」のような振動吸収体を BPM の前後に配置することが必要となる。HOM 抑制の RF シールドをもつベローズは、振動を吸収する「軟らかな」構造とは両立しがたく、BPM 部に及ぶ力学的振動を抑制するにはあまり有効ではなくなる可能性がある。このような理由から BPM 近傍において力学的振動を吸収するベローズなどの構造体に期待するのは正しくない。建物構造および施設の設計において振動源を隔離するなど振動の抑制に配慮すべきである。

#### 3.5.5.2 HOM 誘起の基になるダクト内段差

ERL ビームはバンチ長がピコ秒あるいはサブピコ秒となることが期待され、この高輝度短バンチ電子ビームをアンジュレータに導き、極短パルス X 線をコヒーレントに発生させることが新光源計画の目的である。このような短バンチビームが誘起する HOM ロスはビーム自体にとっても真空系の発熱という視点からも重要な検討事項である。バンチ長に対するロスパラメータはバンチ長が 3~4 mm 以下になれば急激に増加することが容易に想像できる。正しくはシミュレーションによる事前評価が必要であるが、ピコ秒あるいはサブピコ秒バンチが内径 23 mm 程度の真空ダクトを通過することになるので、ダクト壁段差、RF コンタクト部段差、形状変換部などにおいて誘起する HOM はリング型加速器などでは経験していないほどの大きさになると恐れる。ダクトの

要素（ダクト本体、ベローズ、フランジなど）の組み立ての際、現場でダクト相互を接続する際、さらに設置における予期せぬ不整合など、いろいろな原因があっても段差を 0.2 mm 以下に抑えこめるように考慮した設計や製造方法を現実のものとするにはかなりの労力と費用が必要となる。

挿入光源、ゲートバルブ、ダクトのフランジ接合部、ストリップライン型 BPM 部では四極・六極電磁石部あるいは偏向電磁石部ダクトの断面形状と異なる形状となることが予想される。緩やかな形状変換（例えば  $10^\circ$  程度の拡り）が可能な「長さの余裕」をあらかじめ見こんで、真空系に關係する要素を配置できるようにすべきである。

ダクト内表面の凹凸や表面電気伝導度にも注意を払い HOM 発生の原因を極力取り除く工法を用意する必要がある。

### 3.5.6 まとめ

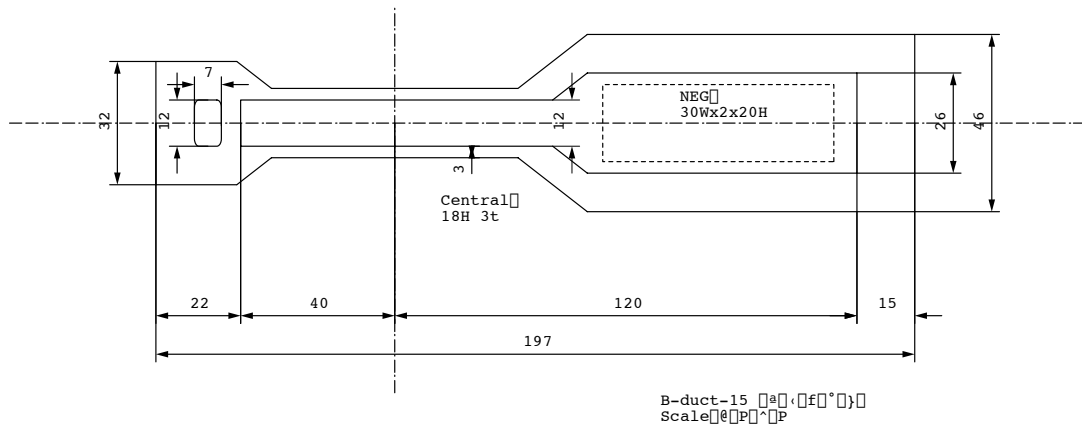
ERL リング真空系は、提案されている電磁石の寸法ならびに配置の条件の下でも、その成り立ちが全く困難というシステムとはならない。放射される放射光強度はユーザー運転中の PF リングの 50% 以下であり、パワーは 1.8 倍である。これらは設計によって処理できる量である。光脱離が主たるガス放出である。さらに短バンチによって誘起される HOM による発熱や熱脱離があるので、設計の初期から考慮に採り入れなければならない。四極電磁石ポアが  $D = 30 \text{ mm}\phi$  と小さいためコンダクタンスが小さく、そのままでは実効排気速度を確保することはかなり困難である。これを解決するために特に上流の四極電磁石ビームダクトはサイドチャンネル付きの構造とし、つぶれ変形防止の構造材を分布させ内蔵させる。このダクトのリング内周側に排気用「窓」を配置し NEG モジュールによる分布排気ポンプを内蔵させる。この分布排気ポンプを内蔵させることにより、実用に耐える実効排気速度を確保できる。また、つぶれ防止構造材と放射光アブソーバーを兼ねる構造をリング外周側に配置する。短直線部ダクトは放射光の照射量に応じて、サイドチャンネル付き円形内断面ダクトとする。光脱離と HOM に起因するガス放出と小さなコンダクタンスの結果、運転当初の圧力上昇は電子ストレージリングのそれよりも大きいと予想され、イオントラップによるビーム不安定性、制動放射によるガンマ線の発生が大きくなると危惧される。

ビーム位置モニターなどは短直線部ダクト（外径八角形）に設置する。各種付属装置に付いては、それらの担当者による設計と真空系設計の擦りあわせが必要である。ERL システムの最大の問題は電子銃である。電子を取り出す方式の検討とともに、陰極の長寿命化を当初から重要視して電子銃およびその真空系を検討し設計しなければならない。100 mA は現状では過大な要求に見えるので、電子放射の物理的機構を含め基礎から研究を進めることが重要である。

今後、各部の設計が具体的化するに合わせて真空系の設計を進める。ERL 真空系の全容が見えてきた段階で、真空系（冷却水系も含む）全体のインターロック系（真空計測系を含む）を検討する設計する。

小林正典（KEK・PF）

(a)



(b)

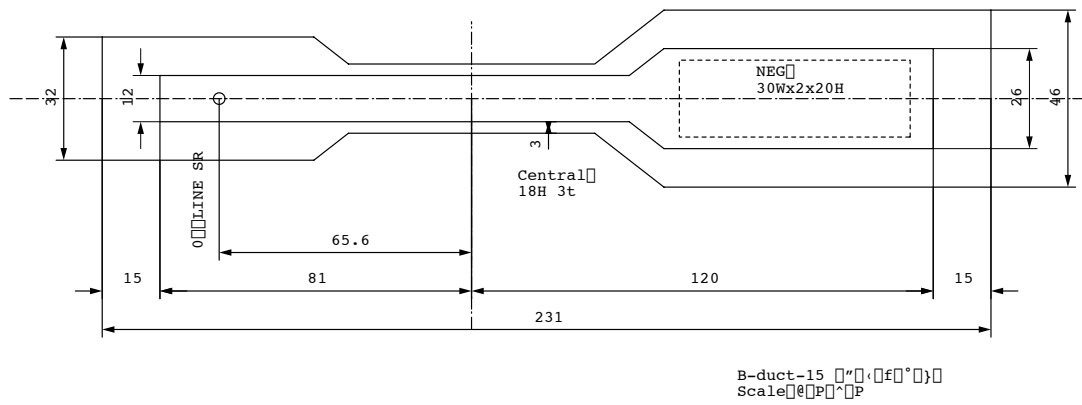
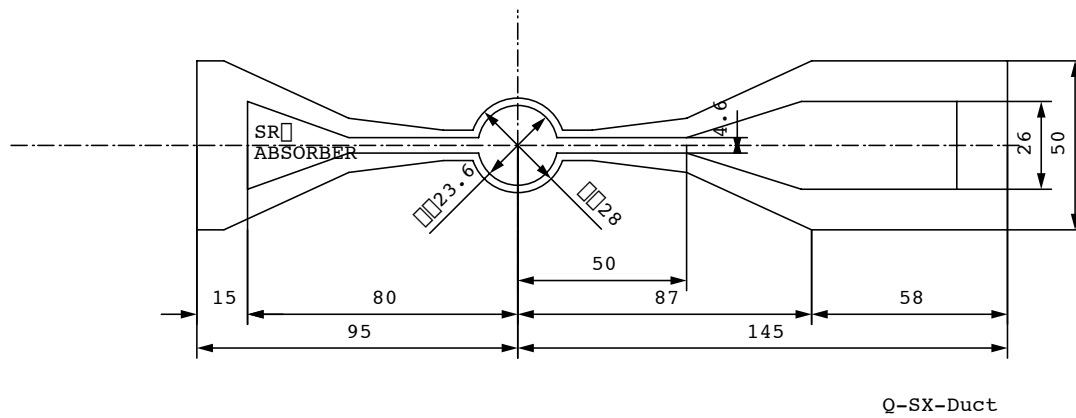


図 3.55: (a) 偏向電磁石部ダクト上流断面。(b) 偏向電磁石部ダクト下流断面。

(a)



(b)

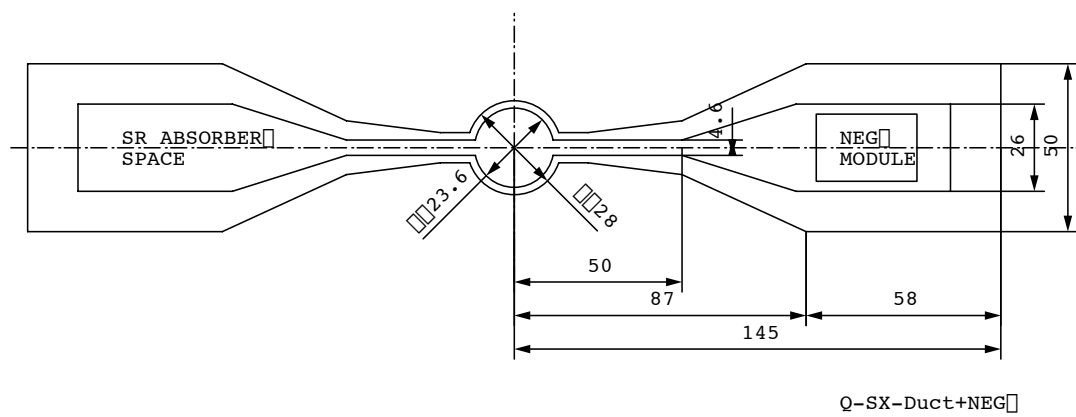
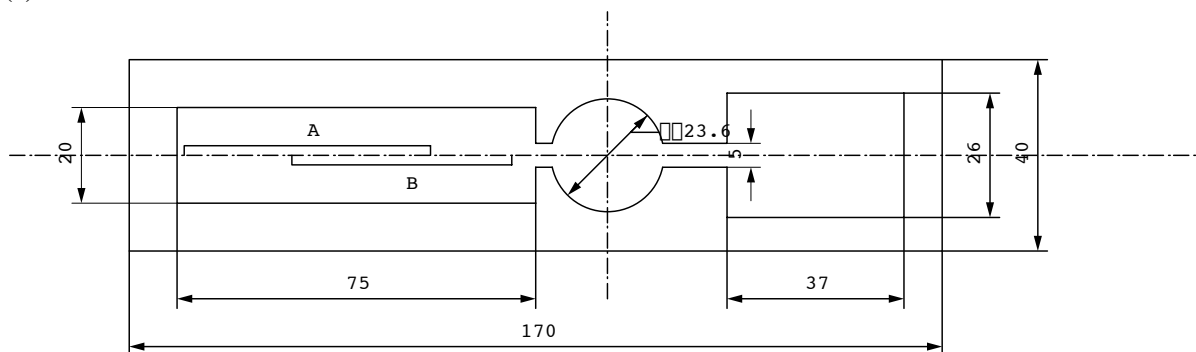


図 3.56: (a) 四極電磁石部ダクト断面。(b) 四極電磁石部ダクト断面 (NEG モジュール内蔵)。

(a)



(b)

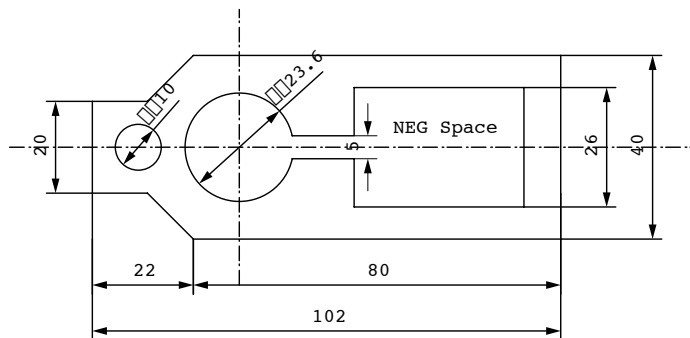


図 3.57: (a) 直線部ダクト断面 (S-duct-1)。図中 A は、上流側用放射光アップソーバ配置位置を、B は下流側用放射光アップソーバ配置位置を示す。(b) 直線部ダクト断面 (S-duct-2~4)。