

8GeVストレージリングの真空系

理化学研究所・日本原子力研究所 放射光共同チーム
坂本浩幸, 横内茂, 森本佳秀, 李英白, 老川嘉郁, 裏碩喜

1. 序

理研、原研 放射光共同チームが設計を進めている大型放射光施設の構築段階における蓄積リングの主要パラメータを表1に示す。蓄積リングの真空度は、約20時間のビーム寿命を確保するために、電子を蓄積した状態で 10^{-10} Torrかそれ以下にする必要がある。このような超高真空を得るためAl合金(Al6063^{T4})をAr+Ge雰囲気で押し出したもの(特殊押し出し)を真空チェンバー(ストレートチェンバー、ベンディングチェンバー)として採用する。主ポンプとして、直線部領域に使用するストレートチェンバーには非蒸発型ゲッター(NEG)ポンプを、偏向部領域に使用するベンディングチェンバーには分布型イオンポンプ(DIP)をそれぞれ組み込み、放射光(SR)に照射されるクロッチ アブソーバーには集中型NEGポンプ、スパッターイオンポンプ(SIP)、チタンサブリメーションポンプ(TSP)の3種類のポンプを配置し、集中的に排気を行うシステムをとっている。

ここでは蓄積リングにおける真空システム全体について報告する。また、インピーダンスを考慮にいれたベローズ、ゲートバルブ、挿入型光源(ID)の構造についても簡単に述べる。

Table 1. Main parameters of the storage ring

Beam energy	8.0	GeV
Beam current	100	mA
Circumference	1428.87	m
Bending field	0.61	T
Cell No.	48	

2. ビーム寿命と真空

蓄積リングの設計において蓄積電子ビームの寿命を長くすることが大きな課題になっている。蓄積電流がe分の1になるまでの時間を寿命と呼ぶが、電子の寿命を決める要因として、

(1)量子効果による寿命

(2)Touschek効果による寿命

(3)残留気体分子と電子ビームとの衝突による損失によって決まる寿命

が考えられる。

量子効果による寿命とは、シンクロトロン放射の量子効果によって起こる大きな振幅のエネルギー振動により、電子がRF-加速系によって決まるエネルギーアパーチャー内にいることができず真空チェンバー壁に衝突したりまたRF-bucketからの拡散によって失われることによる寿命である。この効果による寿命は、ある程度チェンバー径とRF-bucket heightを確保することによって、他の寿命に比べて十分長くできる。

Touschek効果による寿命とは、1つのバンチ内の電子が運動により互いに弾性衝突し、その結果縦方向の運動量の変化がRF-bucketまたは運動量アパーチャーから散乱によって失われることによる寿命である。この効果による寿命は、通常、低エネルギーの場合に問題になるが、低エミッタリングでは高エネルギーでもこの効果は無視できない。到達できる最小のエミッタンスを決める重要な要因となる。

蓄積リングにおいて実際の寿命は、(3)の寿命によって決まる。そのため電子の残留気体分子との衝突によるビーム損失を防ぎ十分なビーム寿命を確保することが必要である。残留気体分子と電子ビームとの衝突による損失によって決まる寿命には、主に次の2つがあげられる。

(1)制動放射(原子核の電場による弾性散乱)による寿命

電子は、残留気体原子の原子核との衝突により光子を放射し減速を受ける。このときのエネルギー損失がRF-bucket heightより大きい場合電子がRF-bucketから失われることによって決まる寿命。

ビーム損失をもたらす制動放射の断面積(σ_b)¹⁾は

$$\sigma_b = \frac{4r_0^2}{137} Z(Z+\xi) (4/3 \ln(E_0/\Delta E_{rf}) - 5/6) \ln(183Z^{-1/3})$$

で与えられる。但し、 $\xi = \frac{\ln(1440Z^{-2/3})}{\ln(183Z^{-1/3})}$

Z : ガス原子の原子番号

E_0 : ビームエネルギー

ΔE_{rf} : RF-bucket height

r_0 : 古典電子半径

上式は同じ圧力でもZの大きい気体分子程、衝突によって失われ易いことを示す。制動放射による寿命(τ_b)は

$$1/\tau_b = 1.93 \times 10^{22} \sigma_b$$

で与えられる。

(2)原子核との弾性散乱による寿命

電子が、残留気体原子の原子核とのクーロン散乱(Rutherford散乱)のため、真空チェンバーの壁に衝突する程十分大きな角度で曲げられることによって決まる寿命。散乱角がリングの最小アパーチャーでの臨界角 θ_i 以上になる散乱断面積

$(\sigma_r)^{1)}$ は、

$$\sigma_r = \frac{4\pi r_0^2 \gamma(\gamma+1) \langle \beta_y \rangle}{\gamma^2 \epsilon_y}$$

で与えられる。但し、 $\epsilon_y = (g/2)^2 / \beta_y$

β_y : 最小アパーチャー (undulator gap, g) での最大垂直ベータatron関数

$\langle \beta_y \rangle$: リングの平均垂直ベータatron関数

原子核との弾性散乱による寿命 (τ_r) は

$$1/\tau_r = 1.93 \times 10^{22} \sigma_r$$

で与えられる。

図1に残留気体分子と電子ビームとの衝突によるビーム寿命と真空の関係を示す。ここで、残留ガスの成分比は80% H_2 +20% CO とした。図中の3つの直線はundulatorのgapによる違いを示しており、gapが小さくなるとより低い真空度が必要となることが分かる。undulator gapとして10mm程度を考えると、約20時間のビーム寿命が必要とすれば真空度として数nTorrを維持しなければならない。

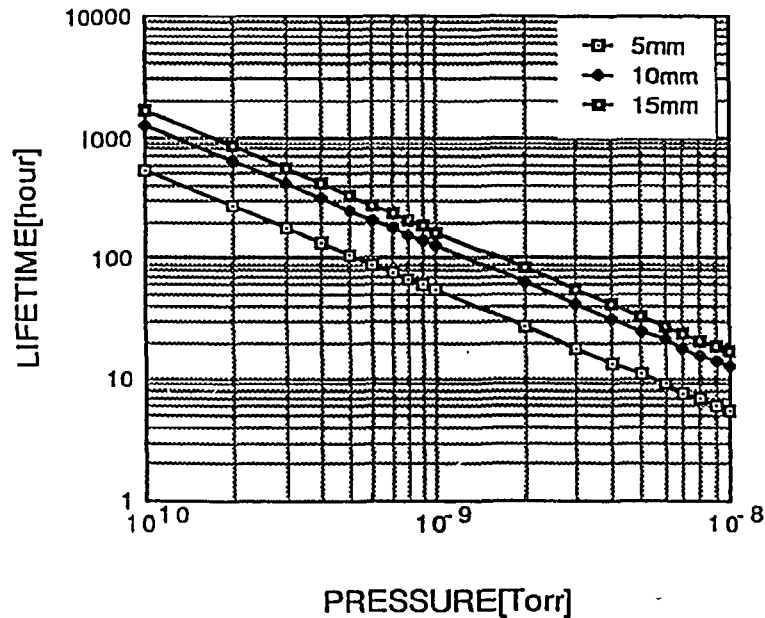


Figure 1. Beam lifetime as a function of pressure

3. 真空チェンバー

3-1 ストレートおよびベンディングチェンバー

チェンバー材としてAl合金を選択した理由は (1)押し出し成形によって複雑な断面形状ができる。(2)熱伝導が良く (3)残留放射能の減衰が早い。(4)軽量である、の他に (5)押し出し成形を $Ar+O_2$ 雰囲気中で行う(特殊押し出し)ことによ

って内表面の酸化被膜をコントロールし表面からの放出ガス量を極めて小さく抑えることができるからである。従って、蓄積リングの真空チェンバーはAl合金 A6063T6 特殊押し出し²⁾を採用する。直線部領域に使用するストレートチェンバーと偏向部領域に使用するベンディングチェンバーの断面をそれぞれ図2(a)(b)に示す。ストレートチェンバーは電子ビームの通るbeam chamber、SRの通るslot、NEGストリップを組み込むpumping chamberとから成る。NEGストリップは両サイドをsus304製のサポートで支えセラミックを介してsus304製のベースプレートと絶縁、固定しベースプレートごとチェンバーに組み込む。ベンディングチェンバーもストレートチェンバーと同様にbeam chamberとslotを有し、スリットを介してbeam chamberを排気できるようにDIPを組み込むpumping chamberを持つ構造としている。どちらのチェンバーも蓄積リング全周にわたって、偏向電磁石(BM)やIDからのSRがチェンバー壁に照射されない構造としている。

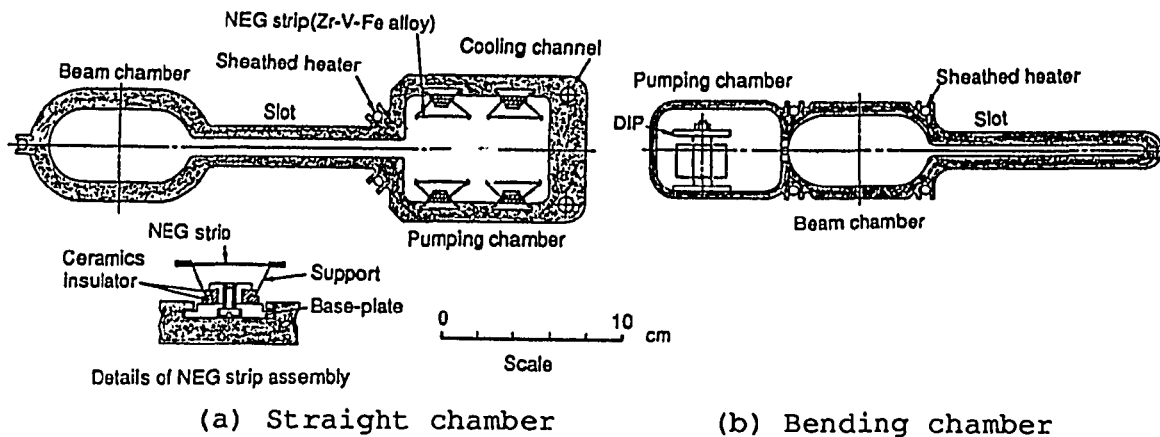


Figure 2. Cross-sectional view of the vacuum chamber

3-2 チェンバーの応力解析

ストレートチェンバーを排気した時の変形と応力の計算結果を図3に示す。

これより、最大変位 (Δy) はslot中央部で0.45mm、最大応力はslot先端部で2.6kg/mm²であることが分かる。最大応力はA6063T6の許容応力である6.8

kg/mm²より十分小さいため許容できるが、

変位はビーム位置モニター(BPM)の

据え付け精度(～0.1mm)より非常に大きい。このことはBPMの電極を直接チェンバーに取り付けることができず、従って変位が十分小さくなるようなBPM用の特別なチェンバーが必要であることを意味している。

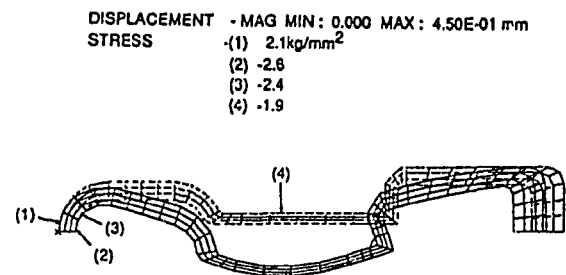


Figure 3. Calculation results of stress analysis

3-3 真空コンポーネント

蓄積リングにおいて、達成可能な最大蓄積電流は真空チェンバー、真空コンポーネントやRF空洞のインピーダンスに大きく影響を受けるためbeam chamberの断面形状の変化を最小限にしなければならない。

図4にRFコンタクト付ベローズを示す。RFのフィンガー同士を接触させた構造ではベローズの動きによってはフィンガー同士の接触が明かでなく電気的な結合の信頼性が期待できないため、今回スリットを設けたRFコンタクトの両端をフランジか真空チェンバーにスポット溶接で固定し電気的に結合させている。従って、RFコンタクトはベローズの動きに対して追従できる。また、RFコンタクトとbeam chamberとは同形状をしていてインピーダンスの影響を小さくしている。

ベローズと同様なRFコンタクト付オールメタルのゲートバルブ(GV)を図5に示す。このゲートバルブはシート部分を除いて本体はAl合金製である。また、ダブルゲートシールおよび排気ポートを有し、中間排気が可能な構造と成っている。GVが開の状態ではRFコンタクトとbeam chamberとの段差がなくしかも電気的に結合している。

図6はRFコンタクト付IDで真空チェンバーの高さ方向が可変な構造である。しかし、約5mのレーストラック状のベローズの製作性、ベローズと真空チェンバーとの溶接性などの問題が残っている。

3-4 ベーキングと冷却

熱の損失を防ぐためにチェンバーにはディンプル付で表裏にAlを蒸着させたカプトンフィルムを3層巻き付け図2(a)(b)に示すシースヒーターによって、またゲージ、ベローズ、バルブなどのコンポーネントについてもリボンヒーターによ

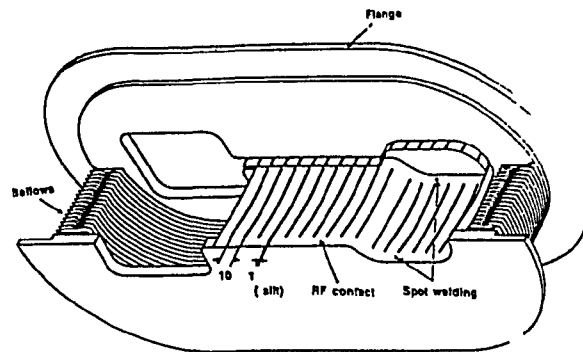


Figure 4. Bellows with RF contact

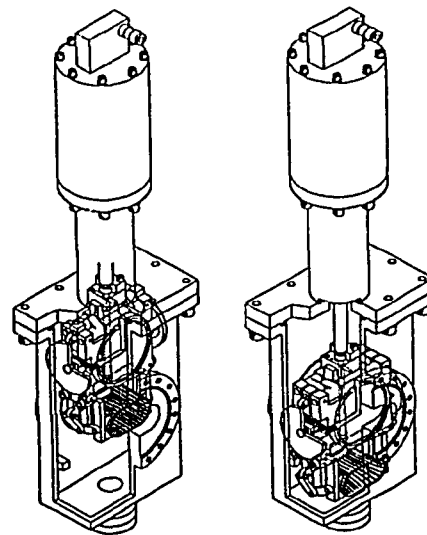


Figure 5. All metal gate valve with RF contact

って150°Cまでのベーキングが可能である。

一方、ストレートチャンバーに組み込んだNEGストリップを活性化および再生するため450°C(St707の場合)の高温に保持しなければならないが、チャンバーの強度を保つためにチャンバーを冷却し温度を150°C以下にする必要がある。活性に必要な電力は4x345w/mであり、約2m/sの流速では直径10mmの冷却チャンネル2本で十分冷却可能である。

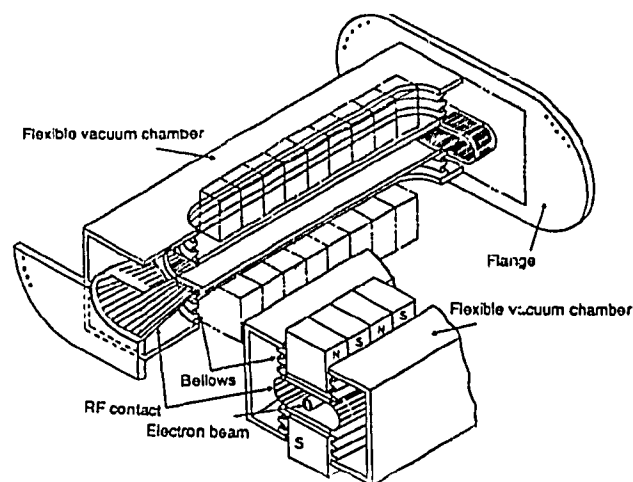


Figure 6. Flexible vacuum chamber for ID with RF contact

4 SRによる熱出力および放出ガス量

SRによる熱出力(P_g , kW)は $P_g = 26.6 \times E^3 \times B \times I$ で与えられる。ここでEは電子のエネルギー(GeV)、BはBMの磁場(T)、Iは蓄積電流(A)である。従って、表1からBMからのSRの全出力は約831kWとなり、BM1台当たり約8.65kWのSRを発生することになる。

SRは平面的に全角度方向に発生するため実験用として利用する以外は熱を吸収する構造が必要となる。図7に1セル当りのSRの吸収体であるクロッチとアブソーバーの配置と熱出力および最大熱出力密度を評価した結果を示す。Cr(1)、Cr(2)はBMの直後に、Ab(1)、Ab(4)はBMの直前に、Ab(2)、Ab(3)はIDの前後に配置している。但し、SRの広がり片側 $1/\gamma$ ($\gamma = E/m_0c^2$)、エネルギー依存性はないとして、直線部に垂直な面で熱出力密度を評価した。図7からCr(1)はBM1からの59.4%(5.1kW)を、Cr(2)はBM2からの48.3%(4.2kW)の熱出力を吸収し、最大熱出力密度はそれぞれ26.1、21.9kW/cm²と非常に高い。Ab(1)はBM1からの31.0%(2.7kW)、Ab(2)はBM2からの40.4%(3.5kW)の出力を吸収するが光源からの距離が長いため最大熱出力密度は2.2、3.1kW/cm²とクロッチに比べて約1桁低い値となっている。さらに光源からの距離が長いAb(3)、Ab(4)は熱出力、熱出力密度共に低い。また、BM1、BM2からのSRの一部は次のクロッチに吸収されるがその出力は非常に低い。以上の結果からSRは全てクロッチ、アブソーバーに吸収され、チャンバー壁に照射されることはない。

ストレージリングでは熱脱離による放出ガスに加えて光脱離による放出ガスが大きな問題となる。光脱離はSRによる直接的な光刺激脱離とSRによって発生した光電子による電子刺激脱離とに分けられる。光脱離による放出ガス速度(dN/dt)は次式で表せる。

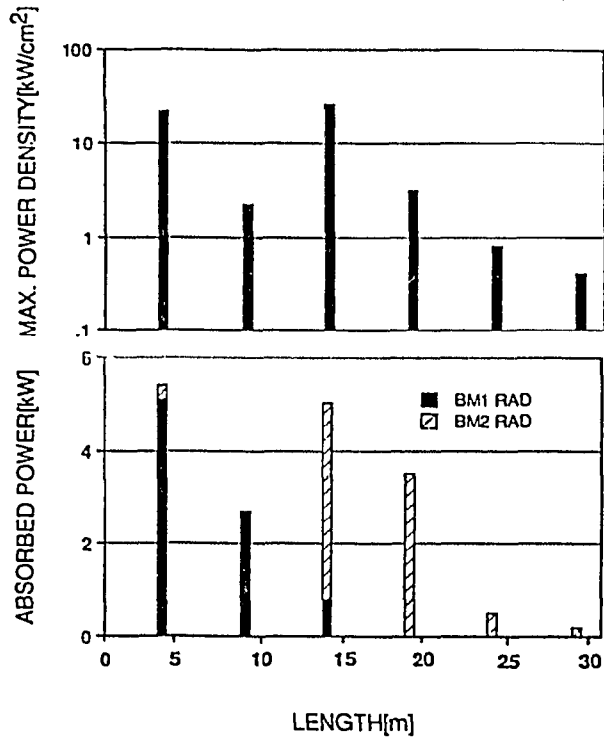
$$dN/dt = 2nMK \quad (\text{Torrl/sec})$$

n :光子束(photon/sec) ($=1.0 \times 10^{18} \times E(\text{GeV}) \times I(\text{mA})$)¹⁾

M :光脱離係数(molecule/photon) ($=5.0 \times 10^{-6} \times D^{-2/3}(\text{Ah})$, D :積分蓄積電流)²⁾

$K=3.11 \times 10^{-20}(\text{Torr l/molecule})$

上式から分かるように光脱離による放出ガス速度は積分蓄積電流に大きく影響し積分蓄積電流が大きくなれば、いわゆる”枯れた”状態になれば、光脱離による放出ガス速度は小さくなる。積分蓄積電流が100Ahの場合光脱離による放出ガス速度は $1.15 \times 10^{-5} \text{Torr l/s}$ となりSRが照射するクロッチ、アブソーバーでのみ発生する。但し、光脱離係数はSRの照射する材料や入射角度によって大きくことなるためこの値が絶対的な値とはいえない。



5 真空系

5-1主ポンプ

Figure 7. Absorbed power and power density

図8に1セル当りのポンプ配置を示す。BM部に使用するベンディングチェンバーにはDIPを周長約1400mの9割を占めるストレートチェンバーにはNEGストリップを、またSRが照射し光脱離による放出ガス速度が大きいクロッチ、アブソーバーには集中型NEGポンプ、SIP、TSPの3種類のポンプを配置している。真空排気およびIDの増設を考慮して、1セル当りのGV数はIDの前後に2台設置する。1セル当りのC0に対する有効排気速度を表2に示す。ストレージリングの全有効排気速度は $5100 \times 48(1/s)$ で、積分蓄積電流が100Ahでの全放出ガス速度($1.15 \times 10^{-5} \text{Torr l/s}$)と熱脱離による全放出ガス速度($7.20 \times 10^{-5} \text{Torr l/s}$)から期待できる平均圧力は 3.4nTorr (C0換算)となる。

NEGポンプにはSt101(84%Zr-16%Al)とSt707(70%Zr-24.6%V-5.4%Fe)の2種類があり、最も大きく違うのは加熱温度である。蓄積リングでは以下に示す理由からSt707を候補にあげている。St707の活性化および再生温度が 450°C と、St101の 700°C より低いため (1)ストレートチェンバーに組み込んだ場合チェンバーへの熱影響を小さくすることができる。(2)St101では熱サイクル数(寿命)に限界がある。(3)St707の方がSt101より使用電力が少なくすむ。(4)熱膨張を最小限に

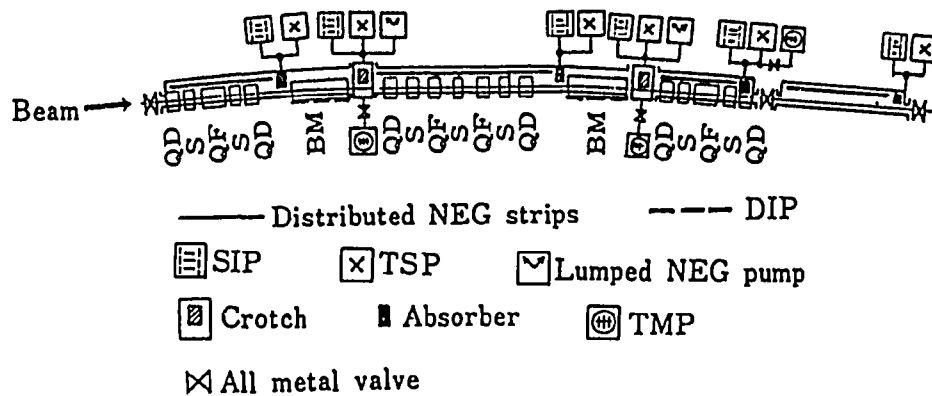


Figure 8. Pumping system per unit cell of the storage ring

することができpumping chamber内での取り付け方法が簡単になる。NEGポンプはH₂ガスに対しては再生により可逆的であり、寿命という問題はないが、COガスに対してはゲッター内部に収着されるため排気には限界がある。また、不活性ガスやCH₄に対しては排気能力がない。従って、クロッチ、アブソーバーに設置したSIPは光脱離による放出ガスの排気に加えてこれらのガスの排気をかかえている。

5-2 粗引きポンプ

NEG、SIP、DIP、TSPの主ポンプを働かせるまでの粗引きポンプとしてはターボ分子ポンプ(TMP)を使用する。さらに、チェンバーのベーキングおよびH₂ガスが多量に放出されるNEGポンプの活性時においてもTMPを働かせる。

5-3 圧力分布

図8におけるポンプ配置と図7におけるSRの出力分布に基づいて1セル当りの圧力分布の計算結果を図9に示す。この計算では光脱離による放出ガスはクロッチやアブソーバーにおけるSRの熱出力の割合に比例し、残留ガスの成分比は80%H₂+20%COと仮定した。さらに、残留ガスは全てbeam chamber内で発生するものとしコンダクタンスを考慮したポンプの有効排気速度を持って計算を行った。クロッチはbeam chamberとあるコンダクタンスを持って接続され、アブソーバーは直接beam chamberと接続されているものとした。ポンプとしてはNEGポンプとSIPによる排気を考え、TSPによる効果は計算には含まれていない。図中の3つの曲線はそれぞれ積分蓄積電流が、1、10、100Ahでの圧力分布を示している。図からストレージリングの平均圧力が積分蓄積電流の増加と共に下がっていることが分かり積分蓄積電流が100Ahでは平均圧力が約0.5nTorrとなり、ビーム寿命と

して約20時間以上は期待できる。また、光脱離による放出ガスの発生がクロッチ、アブソーバーに限られるためベンディング、およびストレートチャンバーの圧力は積分蓄積電流にはほとんど影響せず熱脱離による放出ガス量によって決定されている。

Table 2. Effective pumping speed for CO per unit cell (1/s cell)

section	NEG strip	DIP	SIP	lumed NEG pump	total
straight chamber	1080	—	—	—	1080
bending chamber	—	460	—	—	460
Crotch	—	—	680	2200	2880
Absorber	—	—	680	—	680
total	1080	460	1360	2200	5100

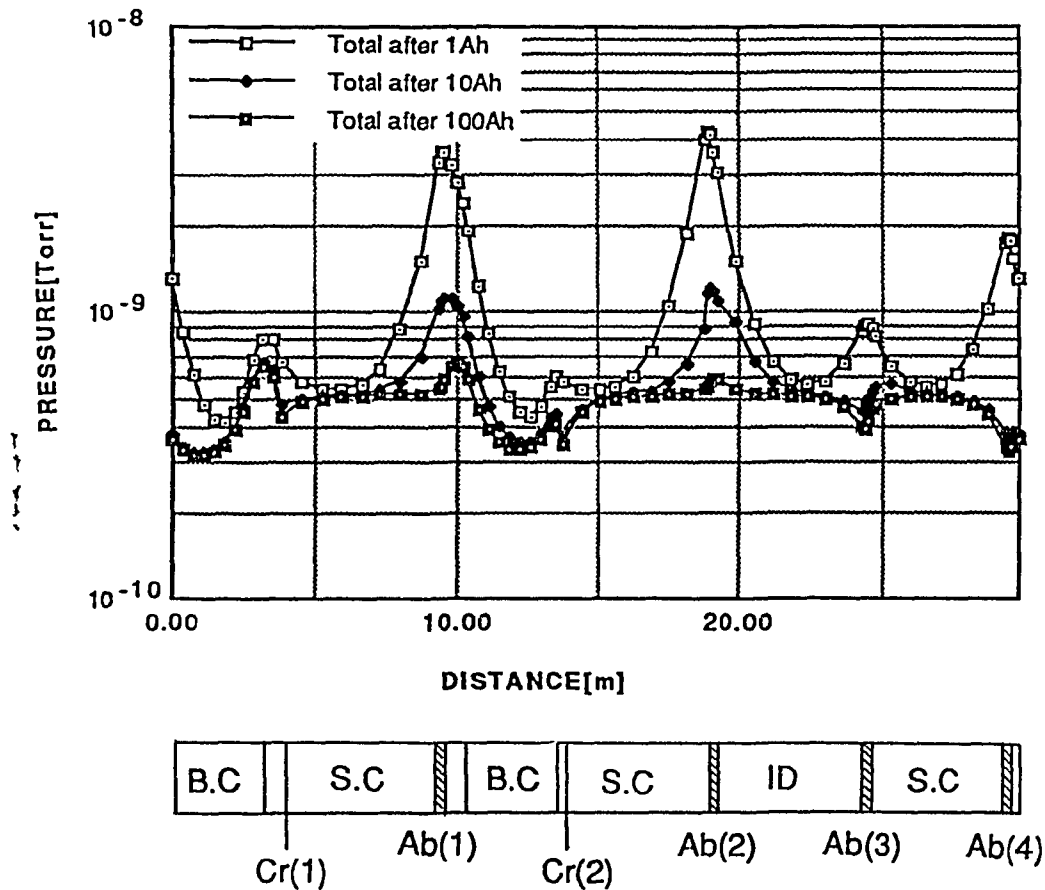


Figure 9. Pressure gradient profile per unit cell

6 今後の課題

現在、ベンディングおよびストレートチャンバーを特殊押し出しで、またクロッチと集中型NEGポンプも実機のものを作成中であり、来年度に実験を行い評

価する予定である。

今後、真空システムを設計する上での課題を以下に示す。

- (1) シンクロトロンからの入射のためのチェンバー形状
- (2) Al合金による大型フランジの設計とシール性能評価
- (3) インピーダンスを考慮したコンポーネントの設計
- (4) 異種金属の溶接方法 (Cu-Be合金とAl合金)
- (5) DIPの設計
- (6) 基幹チャンネルとそのコンポーネントの設計

参考文献

- 1) 7GeV Advanced Photon Source: Conceptual Design Report, ANL87-15, April (1987)
- 2) 成島勝也、他: アルミニウム合金真空チェンバーのガス放出(1)、真空 (1983.5)
- 3) European Synchrotron Radiation Facility: Foundation Phase Report, Feb. (1987)