

Investigation of the vacuum system for the SPring-8 upgrade

Yuichi Okayasu*, Kenji Fukami, Takeshi Nakamura, Kouichi Soutome, Takahiro Watanabe and Chikaori Mitsuda
JASRI

1-1-1 Koto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

Abstract

SPring-8 次期計画に向けた、蓄積リング真空系の検討進捗について報告する。次期計画では、蓄積リングの水平方向エミッタンスを、X線領域における解析限界まで縮小することを目標の1つに掲げている。このため1) ラティス構造をマルチバンド化し、光学収束力の極めて高い多極電磁石を直線部に多数導入する必要がある。2) またこの高収束多極電磁石では、その飽和を回避するため、磁石のポア径を狭めざるを得ない($\phi \sim 26$ mm程度)。次期計画における蓄積リングの真空系は、これらの極めて厳しい空間的・構造的条件をクリアすることが要求される。本稿では、現在想定している真空系の概略に加え、検討を行なっている狭クリアランス・低インピーダンスの実現に向けた直線部チェンバーの開発について報告する。

蓄積リング次期計画用真空系の検討

1. 概要

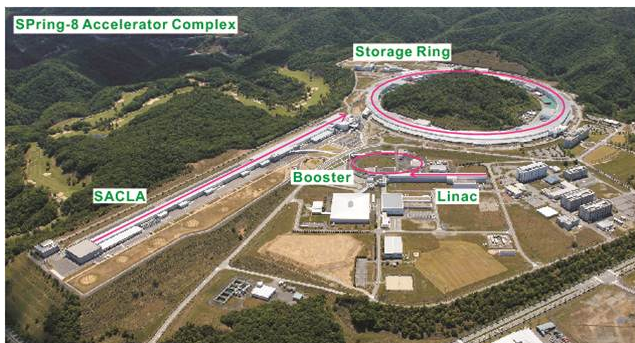


図 1: SPring-8 及び SACLA の全景。

現在、大型放射光施設 SPring-8 (図 1) において、主に蓄積リングの高度化を図る次期計画 (SPring-8 II) を検討している。SPring-8 II の、特に加速器要素の改修概要を以下に挙げる。

- 1) 蓄積リング周回電子のエネルギーを、現行の 8 GeV より下げる。
- 2) 主な改修対象は蓄積リングとし、既存の加速器構成機器を可能な限り有効活用する。
- 3) 蓄積リング周回電子の水平方向エミッタンスを X 線領域における回折限界まで縮小する。
- 4) 入射器は 2011 年 6 月に稼働を開始した SACLA の利用も検討する。

また、既設の SPring-8 と SPring-8 II の蓄積リングパラメータの比較を表 1 に示す。SPring-8 II では、特に水

* okayasu@spring8.or.jp

Diffraction limit of light
in X-ray region
(10 pm²/rad @ 10 keV photon)

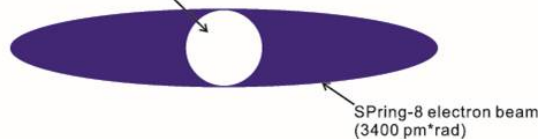


図 2: SPring-8 周回電子ビームと X 線領域における放射光回折限界の断面の相関。

平方方向エミッタンスの縮小を実現するためにラティス構造をマルチバンドアクロマット化し、光学収束力の極めて高い多極電磁石を直線部に多数導入することが必要となる。加えて、これらの高収束多極電磁石における飽和を回避するため、磁石のポア径を狭めざるを得ない。以上の理由から、特に直線部においてクリアランスが極めて狭く、超高真空使用に耐えうる構造を兼ね備え、且つ低インピーダンスを実現する真空チェンバーの開発が喫緊の課題となっている。

2. 蓄積リングの要求圧力

2.1 蓄積リング標準セルの構成

SPring-8 II の蓄積リングは 44 の標準セルと、主に RF ステーション等で構成される 4 つの長直線部からなる、計 48 セルで構成される。図 3 に蓄積リング標準セルの磁石配置案 (セル 32 の例) を示す。現時点の案では、標準セルは 6 台の偏向電磁石、26 台の四極電磁石、23 台の六極電磁石、全長 ~ 500 mm の小型挿入光源 (Mini-ID) 2 台と全長 ~ 3000 mm の挿入光源 (ID) 1 台、といった極めてパッキングファクターの高い構成となっている。尚、本検討では断りがない限り、蓄積リング周回電子のエネルギーは 6 GeV を仮定している。

表 1: SPring-8 と SPring-8 II の蓄積リングパラメータ比較。

	SPring-8	SPring-8 II
1 標準セル当たりの 偏向電磁石の台数	2	6
1 標準セルの長さ [m]	25.91	27.10
周長 [m]	1435.95	1435.95
偏向電磁石の曲率半径 [m]	39.27	28.71
電子ビームエネルギー [GeV]	8	<8
自然エミッタンス [pm-rad]	3400	67
エネルギー拡がり [%]	0.109	0.096
直線部における ディスパージョン関数 [m]	0.107	0
直線部における ベータatron関数 (水平 / 垂直) [m]	22.6 / 5.6	1.1 / 1.4
ベータatron振動数 (水平 / 垂直)	40.14 / 18.35	141.80 / 38.25
自然クロマチシティー (水平 / 垂直)	-88 / -42	-437 / -199
運動量コンパクト因子	1.68×10^{-4}	1.55×10^{-5}
放射損失 [MV]	9	4
蓄積電流 [mA]	100	100 ~ 300
標準セル数	44	44

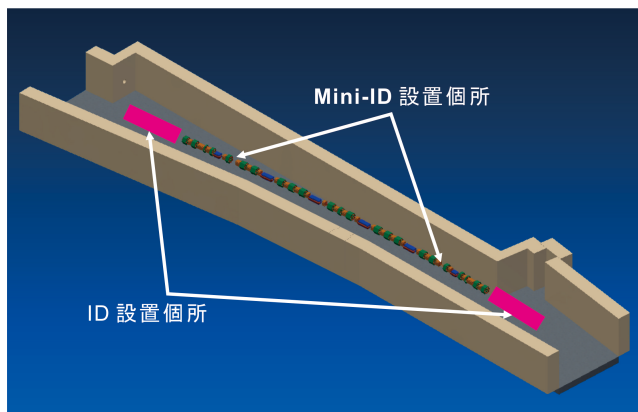


図 3: SPring-8 II 標準セルの磁石配置案 (セル 32 の例)。青、茶、緑の磁石はそれぞれ順に双極、四極、六極電磁石を示す。その他全長 ~500 mm の Mini-ID が 2 台、全長 ~3000 mm の ID が 1 台設置される。

2.2 ビーム寿命

蓄積リングの要求圧力を決定する主な要因は、周回電子のビーム寿命である。蓄積リングのビーム寿命は、真空、すなわち残留ガス衝突による寿命で制限される他に、量子効果や Touchek 効果からも制限を受けるが、一般に量子寿命は真空中で制限されるそれと比較して十分長いとされるため^[12]、本検討では割愛する。周回電子ビームの残留ガス衝突による寿命を評価する際、衝突断面積は 1) 残留気体原子核との散乱 (Rutherford 散乱)、2) 残留気体の核外電子との散乱 (Møller 散乱)、3)

制動放射 (Bremsstrahlung) の 3 つの反応過程の断面積の和として取り扱われる^[1]。リングを周回する電子は、残留気体原子核及び核外電子と衝突することにより、ある角度 (臨界角度: ϕ_c) 以上散乱したり、またある大きさ以上のエネルギー損失 (臨界エネルギー: γ_c) を受けた場合、周回電子はアパーチャー (ダイナミック、メカニカル双方) や RF パケットから外れ、チェンバー内で消失する。 ϕ_c は

$$\phi_c = a\sqrt{\beta_c\beta_{av}} \quad (1)$$

で与えられ、 a 、 β_c は最狭部におけるアパーチャーとベータ関数、 β_{av} はリングのベータ関数の平均である。蓄積リングにおいて ϕ_c が厳しい箇所としては、挿入光源の入口などアパーチャーが極端に狭くなる箇所が挙げられる。また、エネルギー損失の臨界値は

$$\gamma_c = \gamma \frac{\Delta E}{E} \quad (2)$$

で与えられる。 E 、 γ はそれぞれ周回電子のエネルギーとローレンツ因子、 ΔE は RF パケットの高さである。因みに臨界角は SPring-8 の場合で $\sim 4 \times 10^{-4}$ [rad]、SPring-8 II の場合で $\sim 5 \times 10^{-5}$ [rad] と見積もられている。

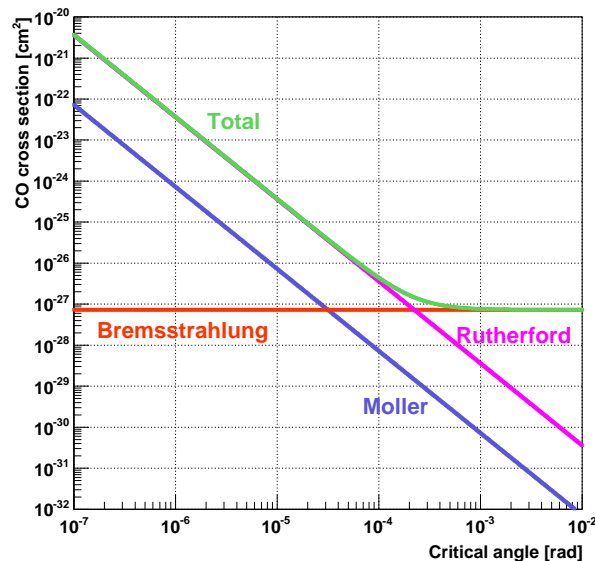


図 4: 電子ビームエネルギー 6 GeV を仮定した場合の、CO ガスによるビーム損失断面積と臨界角の相関。

図 4 に一酸化炭素ガスによるビーム損失の断面積と臨界角の相関を計算した結果を示す。図 4 の結果によれば、臨界角が十分に大きい場合、衝突断面積は制動放射が支配的であり、臨界角に依存しないことが判る。一方、挿入光源などアパーチャーが狭く臨界角の狭い箇所では、Rutherford 散乱のビーム寿命への寄与が無視出来なくなる恐れがある。

次に残留ガス (理想気体と仮定) の圧力とビーム寿命について考察する。圧力 P_i [Pa]、密度 n_i [m^{-3}] の残留ガス原子 Z_i との衝突断面積 $\sigma(Z_i)$ [m^2] と、ガスが寄与す

るビーム寿命 τ_i [s] の関係は

$$\frac{1}{\tau_i} = cn_i \sigma(Z_i) = c \frac{P_i}{k_B T} \sigma(Z_i) \quad (3)$$

で与えられる。ここで k_B はボルツマン定数である。図5に主な残留ガス成分に対する、圧力とビーム寿命の相関を示す。但し、電子ビームエネルギー 6 GeV、エネルギーロス $\gamma_c/\gamma = 0.1\%$ 、温度 303 K、臨界角 5×10^{-5} と仮定した。

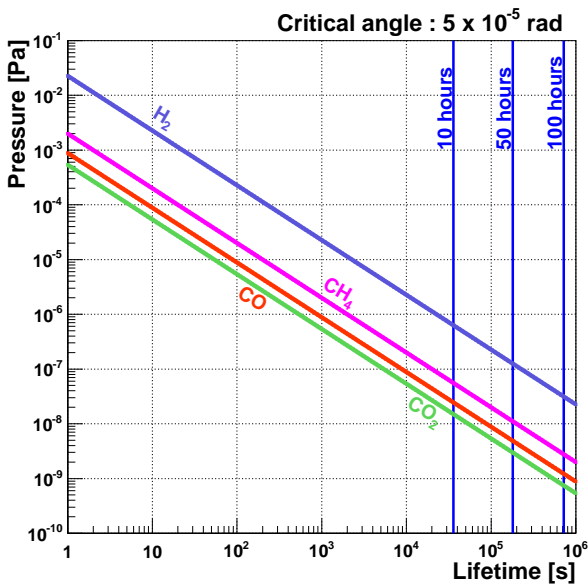


図5: 主な残留ガス成分に対する、圧力とビーム寿命の相関。

一般に、ベーキング処理を施した真空チャンバーの、ビーム運転中の残留ガスの主成分は水素と一酸化炭素である。現在の SPring-8 と同等のビーム寿命 200 時間程度を要求した場合、図5より、残留ガス主成分のひとつである一酸化炭素は、少なくとも 10^{-10} Pa 台まで排気せねばならず、一般的な超高真空の測定限界を勘案すると実現不可能である。現在 SPring-8 で使用している排気装置、真空計を再利用しようとするれば、SPring-8 II における真空系が決定するビーム寿命 (τ_v) は 10 時間程度となる。

他方、SPring-8 II での Toucek 寿命 (τ_t) は 3 時間程度と見積もられている^[3] ことから、SPring-8 II でのビーム寿命 (τ) が真空系と Toucek 効果のみで決定されると仮定すれば

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_t} \Rightarrow \tau \approx 2 \text{ 時間} \quad (4)$$

となる。

2.3 要求到達圧及び排気速度

はじめに、直線部における真空チャンバーのアウトガス放出量について検討する。真空チャンバー表面からのアウトガス放出過程は

- 熱的ガス放出
- 光刺激脱離

の2つが挙げられる。

1) 熱的ガス放出

加速器の真空チャンバーに用いられる代表的な材質として、ステンレス合金、アルミニウム合金、無酸素銅、チタン合金が挙げられるが、これらの材質の一般的なベーキング処理後のアウトガス放出速度は $1.2 \times 10^{-10} \sim 1.8 \times 10^{-9}$ Pa·l/s/m² と報告されている^[4]。現在の SPring-8 蓄積リング (ボア径 40 mm) の場合、直線部のチャンバー断面の内周長は 6.7×10^{-1} m である。SPring-8 II の場合、ボア径を 20 mm とすれば、直線部チャンバー断面の内周長は、半分の 3.4×10^{-1} m である。チャンバー材質に上述の一般的な材質を採用するとすれば、単位長さの直線部チャンバーからのアウトガス放出量は $4.1 \times 10^{-11} \sim 6.1 \times 10^{-10}$ Pa·l/s/m となる。

2) 光刺激脱離

加速器用真空チャンバーの代表的な材質に対する光刺激脱離係数 η の測定は、KEK^[5]、CERN^[6, 7]、BNL^[8, 9] で系統的に行われている。楽観的ではあるが、それらの測定に基づき、本検討では通常運転における η を 1.0×10^{-6} molec./photon と仮定して議論を進める。まず、蓄積電流が 100 mA の場合、SPring-8 II の 1 標準セルにおける平均入射光子量 N_p は表1記載のパラメータと併せて、

$$N_p = 8.08 \times 10^{17} I_b E_b \frac{1}{44 \times 27.10} \approx 4.0 \times 10^{17} \text{ [photons/s/m]} \quad (5)$$

と見積もられる。従って、1 標準セルにおける単位長さ当たり真空チャンバーからのアウトガス放出量は

$$\frac{4.0 \times 10^{17} \times 1.0 \times 10^{-6}}{2.4 \times 10^{17}} \cong 1.7 \times 10^{-6} \text{ [Pa·l/s/m]} \quad (6)$$

となる。ここで 2.4×10^{17} は $T = 293$ K における 1 Pa·l 当たりの粒子数である。

以上の考察から、SPring-8 II における蓄積リングの、4 つの長直線部を除いた各標準セルに要求される、真空度及び排気速度をビーム寿命、蓄積電流ごとに表2にまとめる。

表2: SPring-8 II 蓄積リングに要求される到達圧と排気速度。

蓄積電流 [mA]	100	300
N_p /cell	4.0×10^{17}	1.2×10^{18}
[photons/s/m]		
アウトガス放出量 [Pa·l/s/m]	1.7×10^{-6}	5.1×10^{-6}
$\tau = 2.3$ h		
要求圧力 [Pa]	1×10^{-8}	1×10^{-8}
要求排気速度 [l/s/m]	17	51

また比較のために、現在運転中の SPring-8 蓄積リングの場合の排気速度についても、設計の要求圧力、現在の到達圧力の双方について評価し、表 3 に示す。

表 3: SPring-8 蓄積リングの設計・測定到達圧と排気速度。

蓄積電流 [mA]	100
N_p/cell [photons/s/m]	5.6×10^{17}
アウトガス放出量 [Pa-l/s/m]	2.3×10^{-6}
* $\tau = 200$ h 要求圧力 [Pa]	1×10^{-8}
要求排気速度 [l/s/m]	230
* $\tau = 200$ h 実測到達圧力 (平均 ¹) [Pa]	1.8×10^{-7}
実効排気速度 [l/s/m]	13

3. 蓄積リング直線部真空チェンバーの設計

以上の議論を踏まえ、現在空間的な制限が最も厳しい直線部 (図 6) ストレートチェンバーの構造検討を行っている。

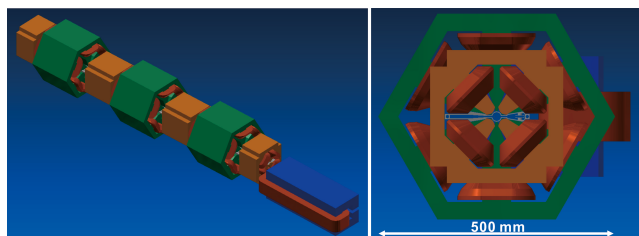


図 6: SPring-8 II 蓄積リングの直線部における磁石配置の (左) と断面図 (右)。

チェンバー内部に設置する排気方式にあたっては、昨今他の放射光加速器施設 (例として SOLEIL^[10]) でも導入されはじめている、NEG コーティングの採用も検討したが、1) チェンバー構造が細分化され (締結箇所が増加)、一旦大気開放を行った場合、補修対象のチェンバーと隣接する箇所も広範囲にわたってベーキングを行わねばならず、メンテナンスが煩雑になること、2) コストが未だ高いこと、の主に 2 点の理由から、チェンバーの基本構造は、現行の SPring-8 と同様のストリップ型 NEG ポンプを導入するアンテ型チェンバーを採用し、検討を進めている。

図 7 に直線部アンテ型チェンバーの断面図を示す。アンテ型チェンバーは放射光室、電子ビーム室とストリップ型 NEG ポンプを格納する NEG 室からなり、断面両脇に冷却水を流すための経路を設ける。肉厚は最も薄い箇所でも 2 mm であるが、電磁石間のチェンバーとの干渉がない箇所については、肉厚を増やす。チェンバーの材質選

¹但し、2010/2/8 時点における蓄積リングすべての真空計の平均値。

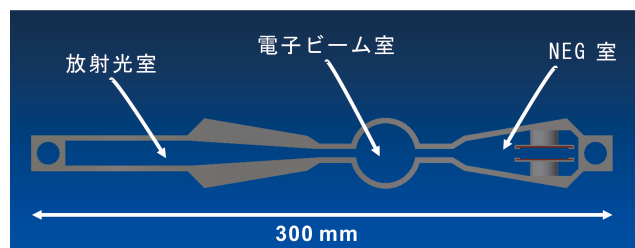


図 7: 直線部アンテ型チェンバーの断面図。但し、多極電磁石と空間的に干渉しない箇所については、肉厚は増やす。

別にあたっては、SPring-8 と同様のアルミ合金 (A5052) に加え、無酸素銅 (C1020)、ステンレス鋼 (SUS316L) を候補に上げ、チェンバーの 3 次元モデル (1/2 モデル) に対して標準大気圧の負荷を仮定した有限要素法計算を行い、3 つの材質について応力を評価・比較した。図 9 にチェンバー材質に SUS316L を仮定した応力評価の例を示す。計算の結果、現時点では压力容器に対する応力基準を満たす材質は SUS316L のみであった。

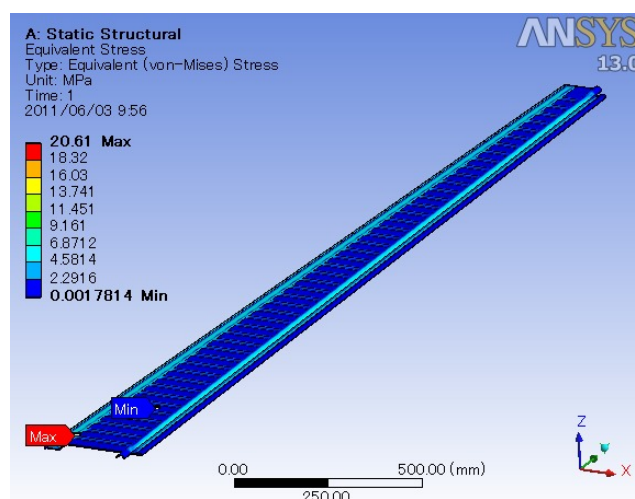


図 8: 直線部チェンバー (1/2 モデル) に対し標準大気圧を負荷した場合のミーゼス応力評価の例。

一方、チェンバー材質をステンレス鋼とした場合、チェンバー内部での発熱が懸念される。SPring-8 II 蓄積リングでは、ビームの不安定性 (縦方向) が最も強くなる周波数は 73 kHz と見積もられ^[11]、現行の蓄積リングでの不安定性共鳴の最低周波数 136 kHz に比べ、かなり低い。また、表皮厚は周波数が低いほど厚くなることから、インピーダンスを低減するためには、適切な表皮厚 ($\sim 200 \mu\text{m}$) に相当する電気伝導度の高い材質でチェンバー内部を保護する必要がある。そこで、縦方向インピーダンスによる、チェンバー内部の発熱を GNU Octave を用いて評価した。計算では、パンチ長を 17 ps (σ) とし、蓄積電流は 100 mA と 300 mA について比較した。またチェンバー形状は、真円のダクト (内径 b 、肉厚 d) とした。はじめに、表皮厚 δ はチェンバー材質の

電気伝導度 σ と真空における透磁率 μ_0 、周回電子ビームの角振動数縦成分 ω を用いて

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\mu_0|\omega|}} \quad (7)$$

で与えられる。この表皮厚を用いて、縦方向インピーダンスの厳密解 $Z_{//}(\omega)$ は

$$Z_{//}(\omega) = \frac{-i}{2\pi\epsilon_0bc \left\{ \left(\frac{\omega}{\lambda c} + \frac{\lambda c}{\omega} \right) \alpha_l - \frac{b\omega}{2c} \right\}} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{i + \text{sgn}(\omega)}{\delta} \quad (9)$$

$$\alpha_l = \frac{J_1(\lambda b)N_0(\lambda(b+d)) - N_1(\lambda b)J_0(\lambda(b+d))}{J_0(\lambda b)N_0(\lambda(b+d)) - N_0(\lambda b)J_0(\lambda(b+d))} \quad (10)$$

で与えられる^[12]。ここで、 ϵ_0 は真空中の誘電率、 c は光速、 J_0, J_1 は 0 次、1 次の第 1 種 Bessel 関数、 N_0, N_1 は 0 次、1 次の第 2 種 Bessel 関数を示す。最終的に、単位長さあたりの真円ダクトの発熱 (寄生損失) P は

$$P = \frac{kI^2}{f_b} \quad (11)$$

$$k = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \text{Re} \{ Z_{//}(\omega) \} \exp \{ -(\sigma_t \omega)^2 \} d\omega \quad (12)$$

で表される。ここで、 I は平均蓄積電流、 σ_b は電子ビームの縦方向の電子分布がガウス分布であると仮定した場合のバンチ長 (標準偏差)、 f_b はバンチ繰り返し周波数である。

図 9 に、縦方向インピーダンスによる単位長さあたりの円形ダクトの発熱量を、異なる 3 つのダクト材質：ステンレス鋼、無酸素銅、ベリリウム銅及び、蓄積電流 100 mA と 300 mA について比較した。電子バンチ長は 17 ps (σ) とし、ダクトの肉厚は 2 mm とした。ポア径 $\phi 26$ mm (ダクト内半径 11 mm)、蓄積電流 100 mA、ダクト母材をステンレス鋼にした場合、発熱量は 30 W/m 程度と見積られる。他方、母材に無酸素銅を採用した場合、発熱は 5 W/m 程度と評価される。従って、アンテナ型チェンバー電子ビーム室の天地面に、200 μ m 程度の銅鍍金を施し、必要に応じて冷却チャンネルを設ける。現在電子ビーム室に鍍金を施した、より現実的なモデルで、電熱構造連結解析を行い、チェンバーの応力を評価している。

4. まとめ

現在、SPring-8 次期計画に向けた、蓄積リングの真空系の検討を行なっている。次期計画では、蓄積リングの水平方向エミッタンスを X 線領域における解析限界まで縮小することを目標の 1 つに掲げている。このためラティス構造をマルチバンド化し、光学収束力の極めて高い多極電磁石を直線部に多数導入する必要がある。またこの高収束多極電磁石ではその飽和を回避するため、磁石のポア径を狭めざるを得ない。次期計画における蓄積リングの、特に直線部における真空系は、これらの極めて厳しい空間的・構造的条件をクリアすることが要求

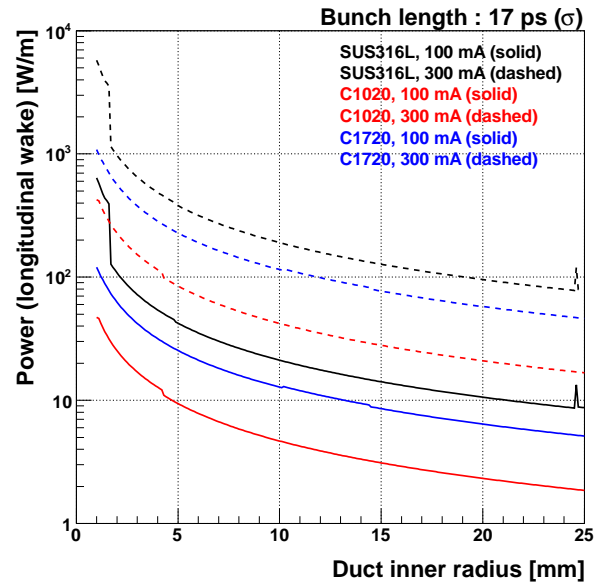


図 9: 電子バンチ長 17 ps (σ , SPring-8 II で想定)、ダクト材質にステンレス鋼、無酸素銅、ベリリウム銅を仮定した場合の、縦方向インピーダンスによる単位長さあたりの発熱量比較・評価。ダクトの肉厚は 2 mm と仮定。蓄積電流 100 mA の場合は実線、300 mA の場合は点線で示した。

される。現在検討を進めている直線部チェンバーの構造は、現行の SPring-8 蓄積リングの構造を踏襲し、アンテナ型を採用している。標準大気圧を負荷した条件で、有限要素法による構造計算を行い、応力評価を行いながらチェンバー材質を選別した結果、ステンレス鋼が有力である。しかしながら、インピーダンスによるチェンバー内部の発熱が懸念されることから、電子ビーム室の天地面に表皮厚に相当する厚さ 200 μ m 程度の電気伝導度のより高い銅で鍍金を施し、必要に応じて冷却チャンネルを加える構造を検討している。

参考文献

- [1] 末次祐介, 高エネルギー加速器セミナー OHO'94.
- [2] 中村典雄, 高エネルギー加速器セミナー OHO'91.
- [3] SPring-8 Upgrade Plan Preliminary Report, January 2012, http://www.spring8.or.jp/en/about_us/whats_sp8/spring-8.II
- [4] 真空ハンドブック, ULVAC, 2010.
- [5] 堀洋一郎, 高エネルギー加速器セミナー OHO'93.
- [6] A. G. Mathewson, J. Vac. Sci. Technol., **A5**, 2512 (1987).
- [7] A. G. Mathewson, et al., API Conf. Proc., **236**, 313 (1990).
- [8] C. L. Foerester, et al., J. Vac. Sci. Technol., **A8**, 2856 (1990).
- [9] H. J. Halama, API Conf. Proc. **236**, 39 (1990).
- [10] C. Herbeaux, et al., in Proceedings of EPAC08, Genova, Italy, 3711 (2008).
- [11] Y. Shimosaki, et al., in Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, 942 (2011).
- [12] N. Nakamura, in Proceedings of PASJ2009, Ibaraki, Japan, 104 (2009).