

SuperKEKB 真空システムのための SiC 吸収体の開発

DEVELOPMENT OF SiC ABSORBERS FOR THE SUPERKEKB VACUUM SYSTEM

照井真司^{#, A)}, 石橋拓弥^{A)}, 榎本瞬^{A)}, 渡邊謙^{A)}, 白井満^{A)}, 竹内保直^{A)}

Terui Shinji^{#, A)}, Takuya Ishibashi^{B)}, Shun Enomoto^{A)}, Ken Watanabe^{A)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Yasunao Takeuchi^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The Higher order mode (HOM) is likely to be excited in the SuperKEKB, because the bunch length is very short (about 6 mm). In the SuperKEKB, the intense HOM can be generated at vacuum components. The intense HOM leads to the extra heating of vacuum components. The HOM absorbers will be necessary to avoid this problem caused by the HOM. The promising material of HOM absorber is the ferrite or the SiC. The absorber must not impact the beam in order to preserve the beam stable. We designed the chamber with the absorber, which is the unique by reason of that the installing space is narrow and the bunch length is short. We report the structure of the chamber and the result of the simulation, the high power tests, etc.

1. はじめに

KEKB のアップグレード計画は SuperKEKB 計画と呼ばれ、目標とされるルミノシティは KEBK の約 40 倍 ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) である。この高いルミノシティを実現させるために、SuperKEKB は、4.0 GeV 3.6 A の陽電子ビームと 7.0 GeV 2.6 A の電子ビームを蓄積させ、衝突点垂直ベータ関数を KEBK より約 1/20 にすることを目標としている。

SuperKEKB では、バンチ長が約 6 mm と短く、かつ、バンチ電荷が 10 nC 以上と大きい。その結果、リングに設置された様々な真空機器では、通過するバンチによって高次高周波(Higher Order Modes, HOM)が励起されやすい。特に衝突点付近のチェンバーは特殊な形状をとる必要があり、他の機器に比べて強い HOM が励起され、真空バーストや近隣の真空機器の発熱、ビーム不安定性等を誘発する可能性がある。SuperKEKB では各種真空機器で発生する HOM への対策がこれまでになく重要な課題となっている。対策としては、機器を HOM が発生し難い構造にすることはもちろんであるが、機器の近傍に HOM を吸収する装置を設置するのも有効である。我々は、Phase-2 運転期間に真空バーストを頻繁に起きていたルミノシティモニター(Zero Degree Luminosity Monitor, ZDLM)用チェンバー付近で使用することを想定して、SuperKEKB の RF 空洞区間で実績があり、ガス放出率が非常に低いことで知られる SiC^[1]を用いたチェンバーの設計を現在行っている。本件では、インピーダンスが低いチェンバーの設計方針とロスファクター・チェンバー Q 値等の計算結果、高周波源を使ったハイパワー試験結果等を報告する。

2. 衝突点付近の真空バースト

Figure 1 に、電流を増加させた際の Phase-2 運転時の ZDLM チェンバー付近の真空バーストに示す。青線の電流増加時に赤線の真空バーストが起きていることがわかる。また、時間が経つと真空バーストしたときの圧力上

昇時のピーク値が低くなっていることから、エージング効果があることがわかる。Figure 2 に LER の衝突点下流にある ZDLM チェンバーの写真と計算のためのモデルを示す。計算モデルでは、真空部分のみを表現している。赤丸部分はテーパになっている。

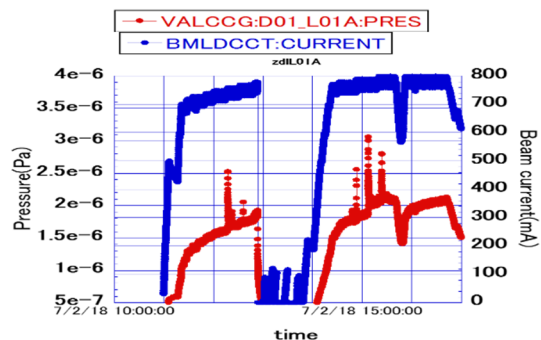


Figure 1: Typical example of a pressure burst near ZDLM chamber while beam current is increasing.

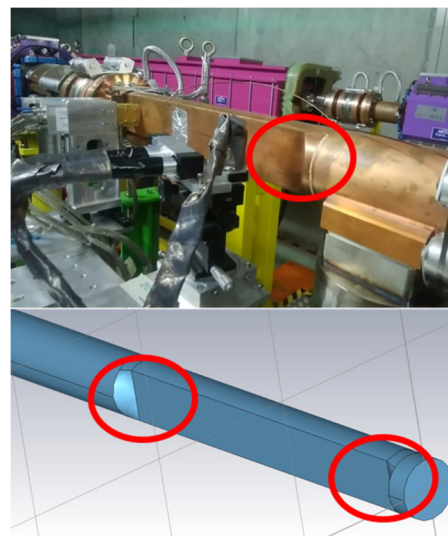


Figure 2: The photograph and the calculation model of ZDLM chamber.

[#] sterui@mail.kek.jp

Particle Studio と Microwave Studio Eigenmode solver にて、インピーダンスとトラップされるモードを計算した。Figure 3 に示すビーム進行方向の Wake impedance から 2~2.2 GHz の間にトラップされるモードがあることがわかり、Fig. 4 の Eigenmode solver の計算からトラップされる場所は、ZDLM チェンバーのテーパ部分とテーパ部分の間であることがわかった。Figure 5 にテーパ部分のビーム下流に、スリット付 SiC を配置したときのモデルを示す。SiC があるとき Q 値は、1.56E1 に対して、SiC がなくときの Q 値は 1.64E4 であったことから、SiC を配置したとき Q 値が劇的に下がっていることがわかった。これは SiC が ZDLM チェンバー内で励起されている HOM を効率的に吸収しているということである。

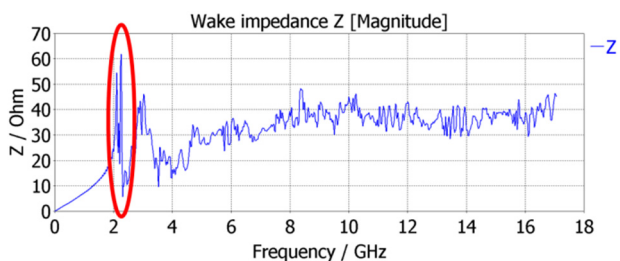


Figure 3: Longitudinal wake impedance in ZDLM chamber.

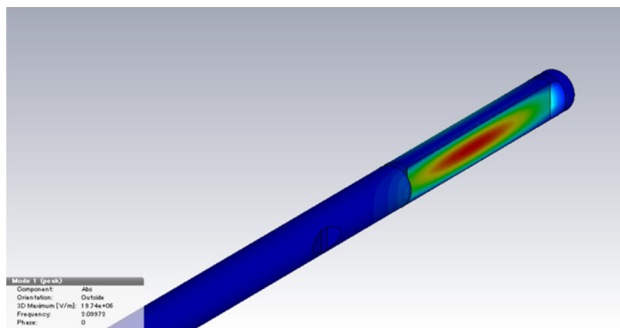


Figure 4: Point of mode trapped in ZDLM chamber.

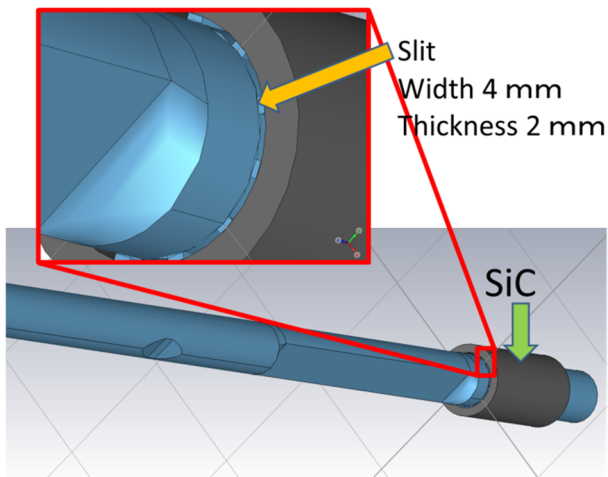


Figure 5: The model to calculate Q value with SiC absorber.

3. テストチェンバーの設計

ビームから直接見えるタイプの HOM 吸収体は、ロスファクターの問題や HOM 吸収体自体の発熱の問題があり、SuperKEKB では RF 空洞区間のチェンバー口径が大きい場所か、電流が低いダンピングリングでのみ使用されている。また、KEKB ではコリメータ付近で使用していた Fig. 6 に示すような砲弾型のものは、構造が工夫されていて、ビームから直接見えず、ビームに悪影響を与えにくいという利点がある。しかし、砲弾型の欠点は、構造的にスペースが大きく必要ということである。現在、我々が HOM 吸収体を必要としている衝突点近くの ZDLM チェンバー付近では、チェンバーの径は $\phi 80$ mm と小さく、かつ砲弾型を置けるスペースがないという厳しい環境である。SLAC の PEP-II では、チェンバーにスリットを設けて、その後ろに SiC を配置する方法で、ビームにあまり影響を与えずに HOM を吸収することに成功している[2]。我々は、この方法を採用して HOM 吸収体付チェンバーの設計を行った。

我々は HOM 吸収体テストチェンバーを最初にインストールする場所として、真空バーストが問題になっている衝突点付近ではなく、Fig. 7 の赤丸に示すテスト区間という場所を選んだ。衝突点付近を避けた理由は、テストチェンバーに運転中不具合が出た場合、大気開放を行い現状の確認を行いたい、衝突点付近で大気開放を行うと検出器の background が増大する可能性があるためである。

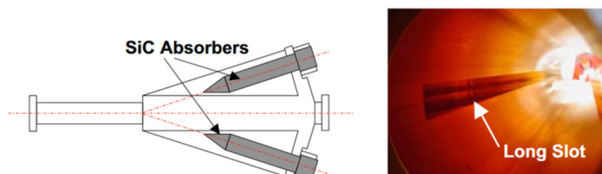


Figure 6: Structure of winged HOM absorber[3].

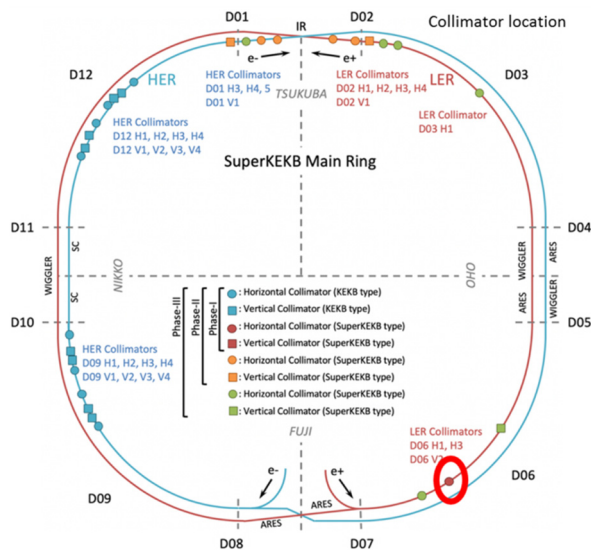


Figure 7: Planned location to install test chamber with SiC absorber[4].

テストチャンバーの配置する場所として、HOM が励起されやすいコリメータのそばを選択した。Figure 8 にコリメータの横にカットした図面を示す。この横方向コリメータは、リング内側・外側の両方向からビームハローを切ることができる。運転時には不均等にコリメータヘッドは閉めるので、コリメータ両脇にたっている主なモードは、TE mode になっていると考えられる。

コリメータ傍の短管が 350 mm で設計されていたため、短管と交換できるようにテストチャンバーは 350 mm の長さで設計した。スリットの幅を決定するために、電磁波シミュレーションとインピーダンスの計算を行った。Figure 9 にチャンバーのビームチャンネル部にたっている mode を示す。上の 2 つが TE、一番下が TM mode になっている。図中には、その mode のカットオフ周波数を記している。Figure 10 に、横軸スリット幅、縦軸にロスファクターと TM010 mode のときの Q 値を示す。また、Figure 11 にビームチャンネルに励起されている TE mode の一番低い周波数の時の S-Parameter を示す。

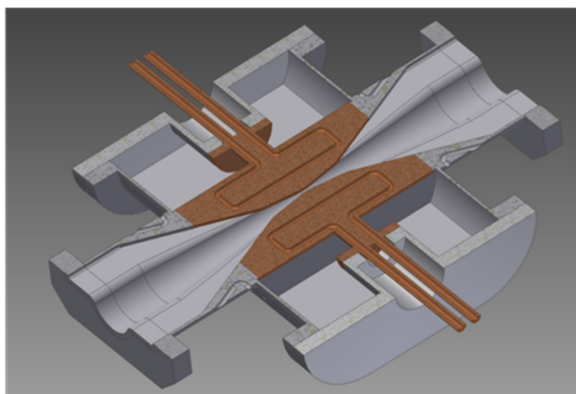


Figure 8: Horizontal collimator for SuperKEKB[5].

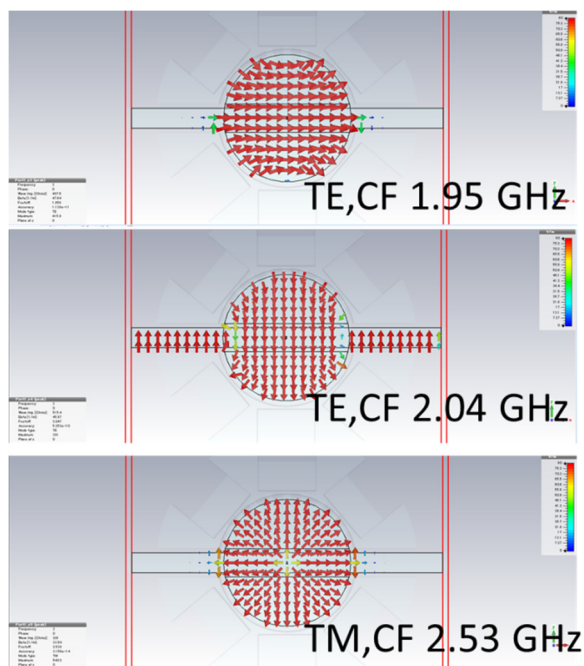


Figure 9: TE, TM mode is excited in beam channels.

テストチャンバーのスリットの幅は、Fig. 10 と Fig. 11 の計算では幅が 3 mm か 4 mm が良いか決定できなかったため、上面を 3 mm、下面を 4 mm とすることにした。加速器運転時には、SiC の HOM 吸収量を冷却水の入口出口の温度変化で見積もる予定である。

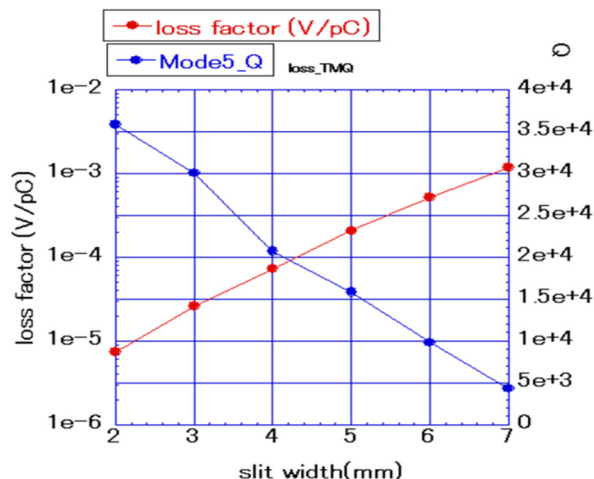


Figure 10: Loss factors and Q value for slit type HOM absorber with the SiCs.

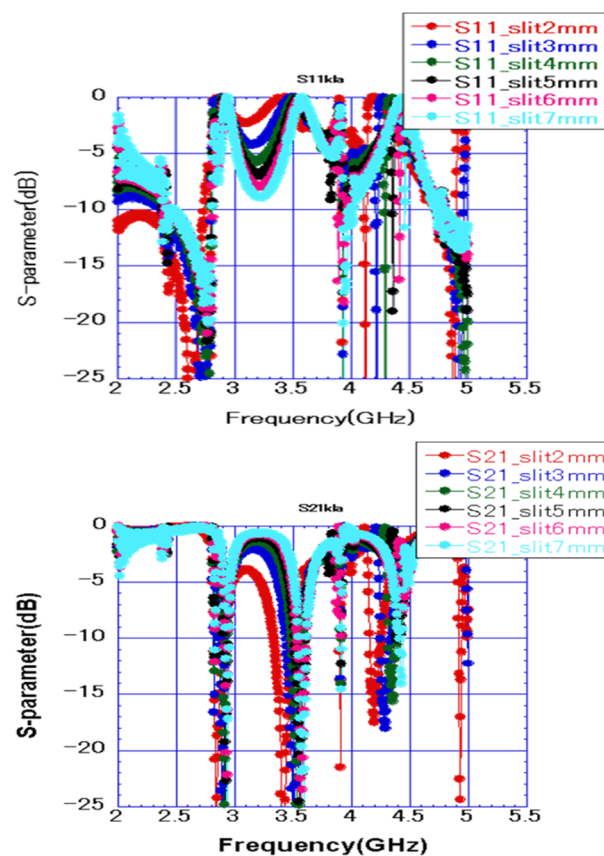


Figure 11: S-parameter for slit type HOM damper with the SiCs.

4. 銅-SiC 接合体のハイパワー耐久試験

HOM 吸収体として、SiC を加速器で使用する場合、HOM を吸収したときのパワーが熱に変わるため、SiC を冷却しなければならない。そのため、熱伝導率が良く、チェンバー材料としてよく使用される銅と接合するのが一般的である。この接合が加速器内で使用することができる性能であるかを試験するために、引張試験とハイパワー耐久試験を行った。この章では、ハイパワー耐久試験のセットアップと試験結果について報告する。

Figure 12 に、ハイパワー耐久試験のシステム図と写真を示す。ハイパワー源として、日本高周波製のマグネトロン発振タイプ(2.45 GHz)を使用した。HOM 吸収体の前後に、方向性結合器を配置して、そこで測定された値を引き算して、吸収パワーを見積もった。

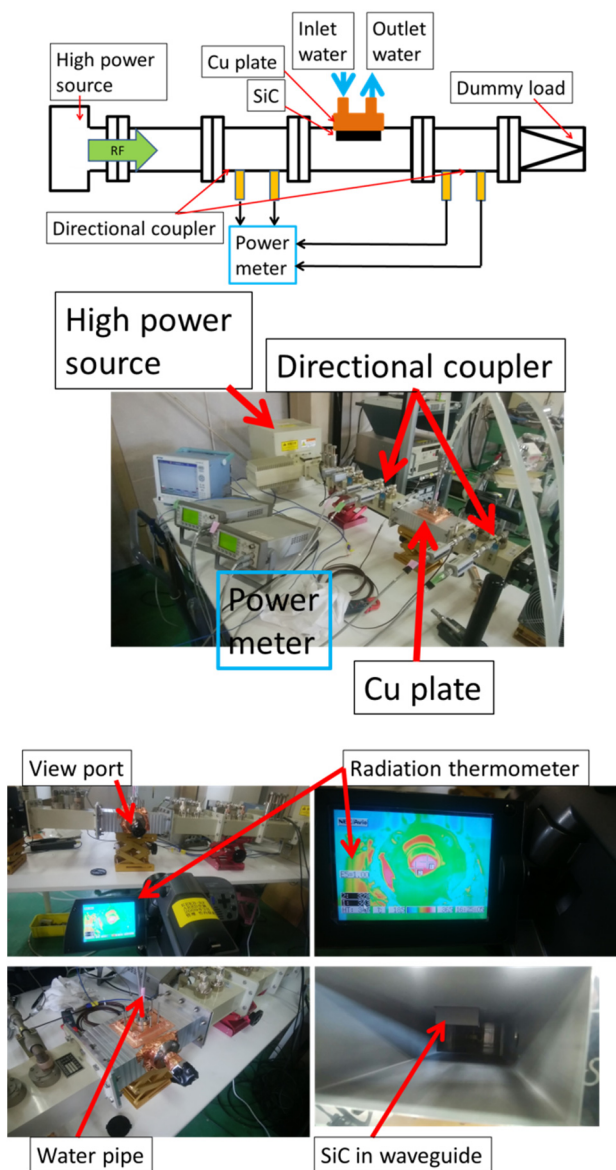


Figure 12: Schematic diagram of the setup for high-power RF test and photograph of the setup and some key Components.

SiC の温度は、放射温度計を使用して測定した。放射温度計で精密に温度測定することは、環境からの反射やカメラの向きや測定物の温度変化する放射率の関連があり難しい。今回の測定では、ハイパワー源で測定する前に、ハイパワー測定するときと同様の条件にできるだけなるようにして、セラミックヒーターで SiC を温めて、5 °C 毎に熱電対と放射温度計の差を測定して、キャリブレーションファクターを調べてから行った。

Figure 13 の水平軸に Input power(W)を、垂直軸に Output power(W)と SiC の温度を示す。Figure 14 に Microwave Studio で計算した S-parameter を示す。S11 と S21 から約半分が吸収されていることがわかる。これらから測定と計算が良くあっていることが確認できた。

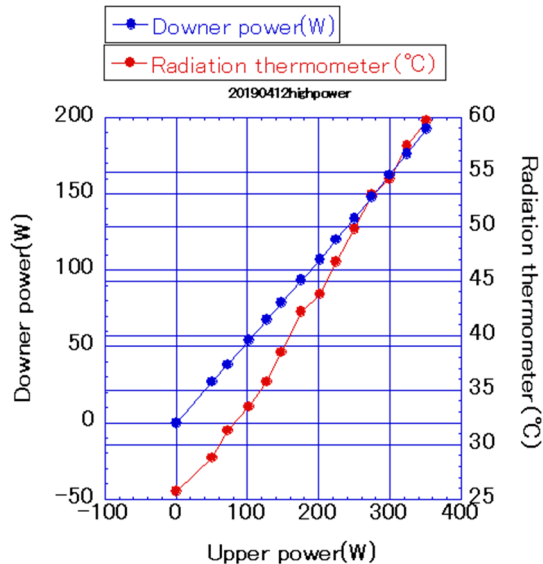


Figure 13: The downer power and the temperature of the SiC surface.

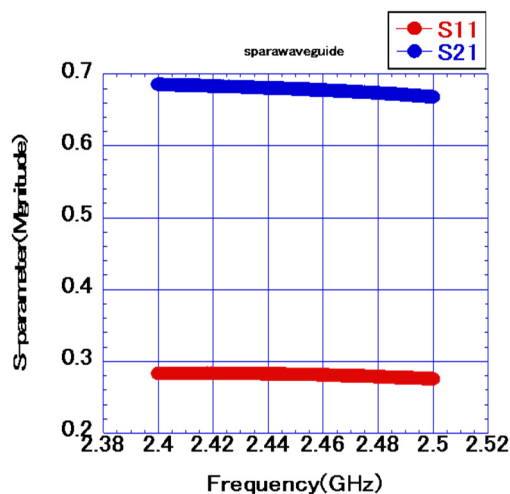


Figure 14: S-parameters for the waveguide with the SiC located at E-plane.

5. 結論と今後の展望

以下の点を結論として述べる。

1. 衝突点付近の電流増加時の真空バーストはルミノシティモニター用のチェンバーで励起される HOM が原因だと考えられる。そして、その HOM は、SiC 吸収体で大幅に減らすことができる。
2. HOM 吸収体付のテストチェンバーの検討を行い、ビームに悪影響を及ぼさない設計をすることができた。
3. 使用する SiC 吸収体のハイパワー耐久試験を行い、放電や接合部での剥離がないことを確認した。また、吸収量が測定結果と計算結果が合っていることがわかった。

今後の予定として、2019 年冬に完成予定のテストチェンバーをインストールして、ビーム運転中の SiC 冷却プレート冷却水入口出口温度と大電流運転時に HOM が原因で熱くなると予測されているベローズの温度と付近の圧力をモニターする予定である。

謝辞

協力を頂いた KEKB 加速器グループの皆様、実験機器の製作にご協力いただいた機械工学センターの皆様
に深謝致します。

参考文献

- [1] Y. Takeuchi *et al.*, “HOM ABSORBER FOR THE ARES CAVITY”, Proceedings of Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, May. 12-16, 1987, pp. 2986-2988.
- [2] M. Kosovsky *et al.*, “A NEW HOM WATER COOLED ABSORBER FOR THE PEP-II B-FACTORY LOW ENERGY RING”, Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland, 2006, pp. 1499-1501.
- [3] K. Shibata, “Improvement of Movable Mask System for High Beam Current Operation in 2002”, KEKB Accelerator Review Committee (2003).
- [4] T. Ishibashi, “Vacuum system Status”, KEKB Accelerator Review Committee (2019).
- [5] T. Ishibashi *et al.*, “DESIGN OF COLLIMATOR FOR SUPERKEKB POSITRON RING”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 1191-1195.