

SuperKEKB の入射キッカー暴発対策用コリメータの開発

DEVELOPMENT OF A COLLIMATOR TO COUNTERACT ACCIDENTAL FIRE OF THE INJECTION KICKER FOR SuperKEKB

照井真司^{#,A)}, 菊池光男^{A)}, 三増俊広^{A)}, 石橋拓弥^{A)}, ナトチーアンドリー^{B)},
渡邊謙^{A)}, 末次祐介^{A)}, 柴田恭^{A)}, 白井満^{A)}, 飯島和彦^{A)}

Shinji Terui^{#,A)}, Mitsuo Kikuchi^{A)}, Toshihiro Mimashi^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)}, Andrii Natchii^{B)},
Ken Watanabe^{A)}, Yusuke Suetsugu^{A)}, Kyo Shibata^{A)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Kazuhiko Iijima^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{B)} University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822, USA

Abstract

A robust collimator using carbon fiber composite (CFC) as the head material to receive the beam kicked by the accidental fire has been developed. Simulation results have shown that the new CFC collimator can more suppress the temperature rise of the collimator head when the beam hits by an accidental fire than the conventional tungsten collimator. It was also shown that radiation damage to the particle detector can be kept sufficiently low with the new CFC collimator. As a result of copper and CFC first bonding tests, cracks appeared in the CFC. Since the cause of the crack was a stress due to the difference in thermal expansion. In the next bonding test, slits were made in the copper to suppress stress, preventing cracks from occurring in the CFC. The sample with slits in the copper showed no cracks in the CFC.

1. はじめに

SuperKEKB は電子・陽電子衝突型加速器であり、前身である KEKB のルミノシティを飛躍的に向上させることを目指す。衝突点に置かれた Belle II 検出器は標準理論を越えた新しい物理を探索することを目的としている [1]。主リング(Main Ring: MR)は、7 GeV 電子リング(High Energy Ring (HER))と 4 GeV 陽電子リング (Low Energy Ring (LER))から成る。高ルミノシティを実現するため、設計ビーム電流は、LER が 3.6 A、HER が 2.6 A となっており、それぞれ KEKB の約 2 倍に相当する [2]。ビーム寿命が非常に短い(2022 年の運転段階では LER が 10 分程度、HER が 30 分程度)ため、MR のビーム電流を保つためには、頻繁(LER は最大 23 Hz、HER は最大 25 Hz)に入射を行う必要がある。また、Belle II 実験にとっては積分ルミノシティが重要であるため、高いビーム電流で、安定的に加速器運転することが非常に重要になる。

現在 SuperKEKB の運転において問題になっていることの一つに、入射キッカーの暴発(kicker's accidental fire (KAF))によって、最終集束超電導マグネット(QCS) [3] のクエンチや、素粒子検出器の被爆、コリメータが損傷する事象が起きていることがある。これまでの運転で、KAF は 12 回程度起きている。本学会では、入射キッカーの暴発現象が及ぼす加速器運転への影響や、その対応策について報告する。

2. 入射システムの概要

本章では、SuperKEKB の現在の入射システムについての概要を記述する。Figure 1 に示すように、入射時には、蓄積ビームは kicker 2 で蹴られて、bump orbit を通

り、kicker 1 で蹴られてもとの storage orbit にもどる。一方入射ビームは、septum 電磁石で曲げられて bump orbit 傍を通り、kicker 1 で蹴られ、以降リング内でベータトロン振動する[4]。2023 年現在では、kicker 2 と kicker 1 の蹴り角も、ビームパイプの口径も異なっている。また、kicker 2 と kicker 1 は、各々 3 台の独立キッカーからなり、それぞれ別電源となっている。電源内の大電力スイッチとしてサイクロトロンを用いている。サイクロトロンはガス封入型の熱陰極管であり、原理的に暴発をゼロにすることはできない。サイクロトロンの暴発に関しては、過去にもいくつか報告されている[5, 6]。

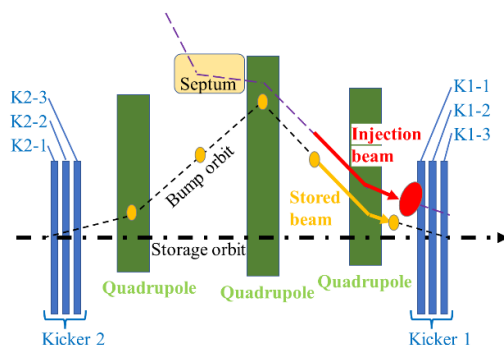


Figure 1: Schematic drawing of current injection system in SuperKEKB.

3. KAF 時のビームの挙動と、KAF が及ぼす影響

3.1 KAF 時のビームの挙動

最初に MR のコリメータの設置状況を Fig. 2 に示す [7]。

[#] sterui@mail.kek.jp

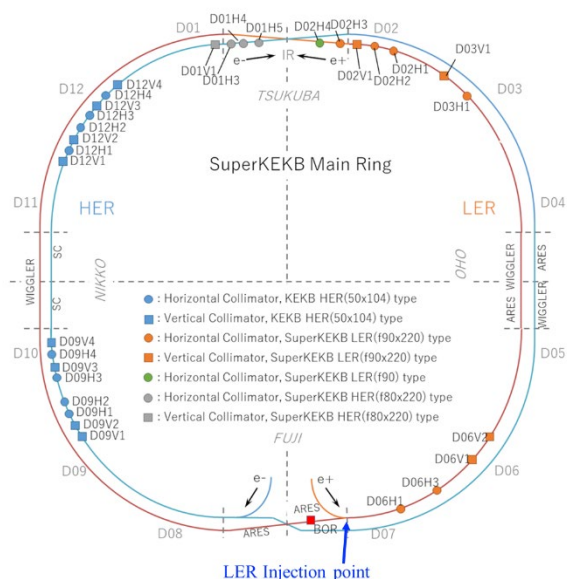


Figure 2: Location of the KEB-type and SuperKEKB-type collimators in the SuperKEKB main ring. Here, H and V in the collimator names represent the horizontal and vertical collimators, respectively.

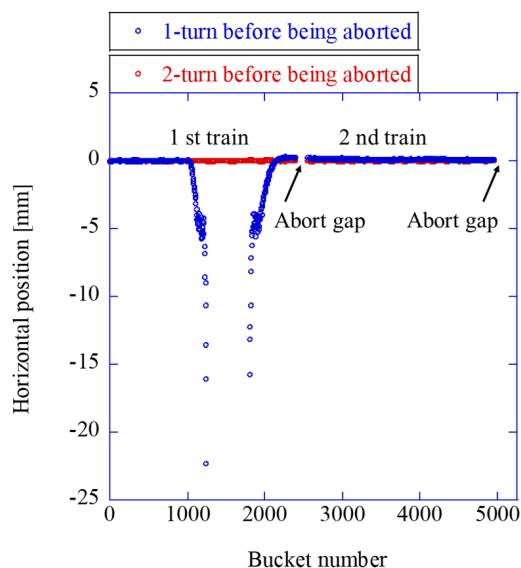


Figure 3: The behavior of the beam during a kicker's accidental fire timing. The horizontal axis of the graph is the bucket number and the vertical axis is the horizontal position from BOR data.

図中の BOR は bunch oscillation recorder[8]、IR は interaction region の略である。IR の中心に素粒子検出器 Belle II[1]が据え付けられている。Figure 2 から、IR と入射点が、ほぼ対角にあり、その間に多数のコリメータがあることがわかる。また、BOR は各バンチの位置を、ターンごとに記録する機能をもつデバイスである。

BORで観測された KAF 時のビームの挙動を Fig. 3 に示す。図は、横軸をバケットナンバーで、縦軸が通常のビーム軌道からの水平方向のバンチ位置を 0 としたときのバンチ位置×電荷である。赤色のプロットは KAF が起きる前 (アボートの 2 ターン前 : 2-turn before being

aborted)、青色のプロットは KAF が起きた後 (1-turn before being aborted)の BOR データを示す。Figure 3 の青色のプロットから、KAF でビームの一部が大きく水平方向に動いていることと、また一部のビームが欠けていることがわかる。欠けた部分は、リング内のチェンバー (コリメータを含む) にぶつかりロスした分である。

3.2 KAF 対応策を検討する動機

3.2.1 KAF が素粒子検出器に及ぼす影響

KAF 時に、素粒子検出器が浴びた放射線ドーズ量の 1 例を、Fig. 4 に示す。この検出器では、放射線ドーズ増加率が、10 μ sec の積分で 4 mRad を超えた場合に、検出器を守るためにビームアボート信号を発出するシステムになっているが、KAF が起きた時には、400 mRad を超える値が観測された。このような事象が続くと、素粒子検出器自体が破壊されるため、我々は、KAF の影響が素粒子検出器に及ぼさない方策をとる必要が出てきた。この測定装置の設置場所などの詳細は、参考文献[9]に詳しく記述されている。

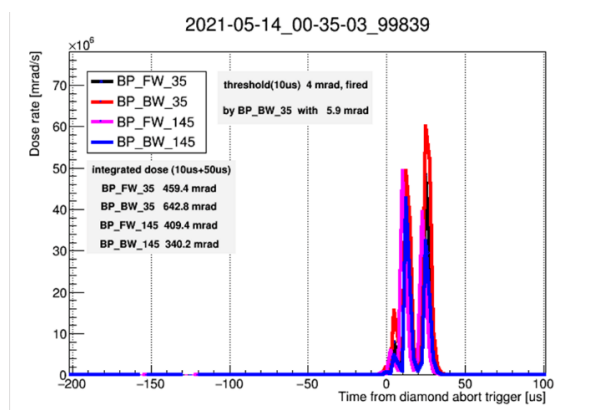


Figure 4: Dose rate observed in the particle detector at interaction point when KAF occurred.

3.2.2 KAF が原因で損傷したコリメータが生み出す放射化したダスト

LER の入射キッカーに一番近い水平方向コリメータは、D06H1 であるが、ベータatron位相の関係により、KAF が原因で蹴られたビームは D06H3 のコリメータに最初に当たる。SuperKEKB タイプのコリメータは、Fig. 5(a)に示す形をしており、運転中はベローズを用いてジョーが可動できるようになっている。このコリメータチェンバーは、ビームラインに据え付けたまま、ジョーのみ交換できる構造になっている。我々は、加速器運転終了後、十分残留放射能が減衰したのち、D06H3 コリメータジョーの交換作業を行った。Figure 5(b)に、損傷したコリメータジョーを示す。コリメータジョー先端のビームをカットする部分は、ヘッドと呼ばれ、タングステンが使用されていた。Figure 5(b)にあるタングステンに生じたクラックは KAF が原因であると考えられる。コリメータチェンバー内に広がったダストは放射化していて、作業者の内部被ばくの恐れがある。このため、放射線センター職員が細心の注意をもって除染作業を行った。真空の観点からは、チェンバーの大気開放作業は短くしたいところだが、除染作業は、3 時間以上かかった。

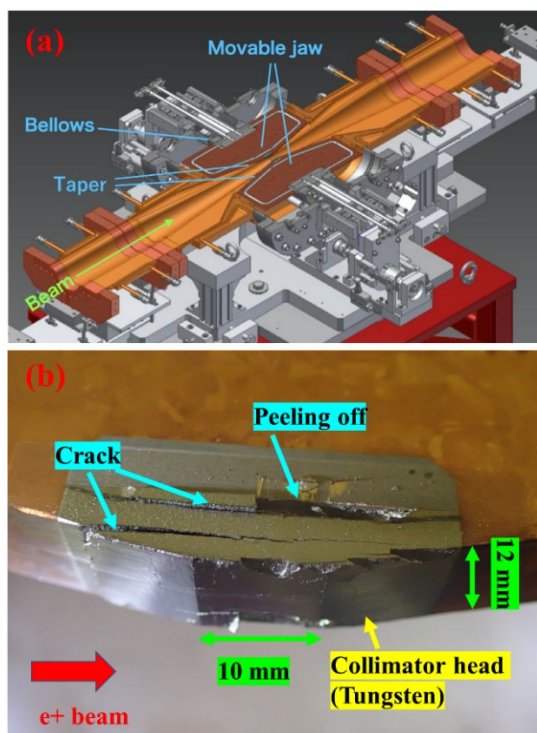


Figure 5: (a) Schematic drawing of SuperKEKB type horizontal collimator, (b) collimator head hit by beam due to kicker's accidental fire.

4. KAF の対応策の検討

3.2 節で記述した問題に対応するために、我々は、KAF の対応策として、3 つの案を検討した。

1 つ目の対策案は、KAF が起きた際にもビーム軌道が閉じるように、kicker1 と kicker2 の電源を共通化するというものである。この方式は、他の加速器でも実績がある。しかし、SuperKEKB の LER では、この方式を採用しなかった。理由は、現状では以下の2つの制約を満たすオプティクスを設計できなかったためである。1つ目の制約は、kicker1 と kicker2 はチェンバー口径も、蹴り角も違うということである。kicker1 と kicker2 を同一電源にした場合は、kicker1 と kicker2 の蹴り角に制限が加わる。2つ目の制限は、LER 入射点近くに、ビームダンプがあるというものである。大電流ビームを安全に、アボート窓を通してビームダンプするには、ビームダンプ付近(入射点も含む)のオプティクスにある一定の制限がかかってしまう。

2 つ目の対策案は、入射キッカー用電源を、サイクロンを用いずに半導体スイッチにするというものである。しかし、コストの問題で大きいハードルがあるため断念した。

3 つ目の対策案は、KAF が起きても、被害が出ないように、キックされたビームを受け止める丈夫なコリメータジョー(KAF コリメータ)を製作するというものである。この案は、KAF が起きる原因には、手を付けられないものであるが、開発コストの安さと、開発期間が短いことが理由で採用された。開発コストを抑えるために、コリメータのチェンバーは再利用して、ジョーのみを交換することになった。チェンバーは既存ものを使うため、ジョーの長さは既存ものと同じ長さ(358 mm)にする必要がある。ジョーの長さが固定された場合、ヘッドの長さが長くなるとテーパ部

(Fig. 5(a)参照)は、短く、角度を急にする必要がある。この対策案では、KAF で蹴られたビームは、ヘッド素材に carbon-fiber-composite (CFC)を用いた KAF コリメータに最初に当たる。CFC は、密度が低いため電磁シャワーが起きにくく、かつ、融点が高いため丈夫である。CFC に当たったビームの一部は、角度散乱され、かつ、エネルギーがわずかにずれる。エネルギーがずれ、ビームサイズが増大したビームは、bending magnet を通った後にチェンバーに当たるとするのがシナリオである。ビームサイズが増大しているため、チェンバーに当たっても安全である。製作炉の関係で長さ 200 mm 以上の CFC の場合、納期が長いから、CFC の最大長さを 200 mm 以内にするものとして開発を行った。また、インピーダンスの問題からテーパ部が必要になるため、ヘッド先端の長さ(ヘッド長)を 160 mm 以上とすることはできなかった。

5. KAF コリメータ設計のための計算と測定

5.1 KAF で蹴られたビーム衝突時の熱シミュレーション

KAF コリメータのヘッドの素材が CFC で問題ないのか確認するために、KAF で蹴られたビームがカーボン(C)に衝突した時の電磁シャワーが引きこす熱シミュレーションを行った。CFC のデータは乏しいため、カーボンのデータを用いた。比較のために、ヘッド素材がタングステン(W)の場合の計算結果も示す。計算は参考文献[10]に記載されている方法で行った。計算モデルと計算結果を Fig. 6 に示す。計図において、ビーム進行方向を Z、コリメータジョーの稼働方向を X と定義している。また、Z の原点は最も振幅の大きいバンチがコリメータに当たった点と規定している。計算結果(W の最大温度変化が 3857 °C、C の最大温度変化が 27 °C)から、カーボンに当たったときに発生する熱量がタングステンに比べて非常に低いことがわかる。したがって、KAF で蹴られたビームを受け止める素材としては、溶けにくいという点については、タングステンよりカーボンが優れていると言える。

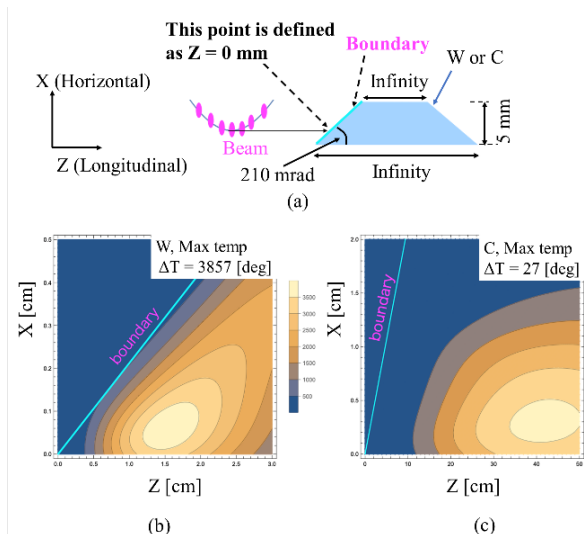


Figure 6: (a) Schematic drawing of model for thermal simulation. Temperature distribution of collimator made of (b) W and (c) C due to electromagnetic shower by KAF.

5.2 KAF コリメータをインストールした場合のトラッキングシミュレーション

KAF コリメータのヘッド長が何 mm 以上あれば、重要な機器がインストールされている D02 エリア(IR を含む)にビーム粒子が届かないのか、を調べるためにトラッキングシミュレーションを行った。計算はK1-2かK2-2でKAF起きたと仮定して、SAD[11]と GEANT4[12,13,14]を用いて行った[15]。シミュレーション結果を、Fig. 7 に示す。

Figure 8 は、横軸に KAF コリメータのヘッド長を、縦軸に D02 と D06 エリアでロスした粒子の数をとったグラフである。図の黒塗り丸から、K1-2 と K2-2 の両方の場合で KAF が起きた時、ヘッド長が 120 mm 以上では、D02 エリアでロスした粒子の数がそれほど減少しなくなることと、D06 エリアの粒子が頭打ちになっていることがわかるこのことから、ヘッド長は 120 mm 以上必要なことがわかった。

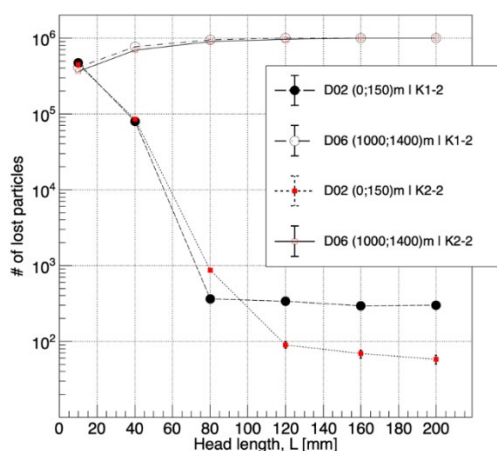


Figure 7: Plot of the number of particles loss in the D06 and D02 areas when K1-2 or K2-2 KAF occurred.

5.3 KAF コリメータのインピーダンス

先述のように KAF コリメータは、ヘッド長が普段のものより長い。テーパの角度が急であることと、導電体がビーム近傍にある長さが長くなるため、普段のコリメータよりインピーダンスが高くなる。インピーダンスを低減する

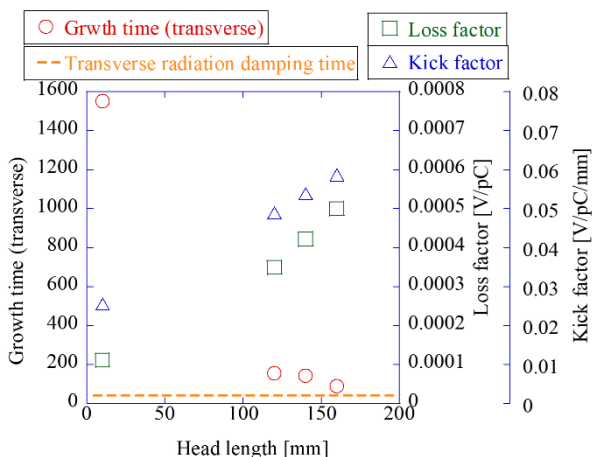


Figure 8: Growth time (transverse), loss factor, kick factor of CFC collimator versus head length.

ために、CFC には銅コーティングを行うが、その場合でも KAF コリメータのインピーダンスがビーム運転に及ぼす影響が大きくないことを確かめる必要がある。インピーダンスの計算は、コリメータヘッド頂点とビームとの距離を 11 mm、パンチ長を 6 mm として、GdfidL[16]を用いて行った。Figure 8 は、横軸にヘッド長をとって、縦軸に beam instability (transverse)の成長時間[17]と、loss factor と kick factor をとったグラフである。ここから、ヘッド長が 160 mm の KAF コリメータの loss factor と kick factor は、標準的なヘッド長さ(10 mm)のコリメータの 5 倍と 3 倍程度であることがわかる。また、beam instability (transverse)の成長時間は、transverse の radiation damping time より長く、運転に影響しないということがわかる。

5.4 Synchrotron radiation (SR)刺激による CFC からのガス放出

SuperKEKB では、CFC を垂直方向コリメータに採用した経験はあるが、水平方向コリメータに採用した例はなかった。水平方向コリメータに採用した場合、CFC に SR が照射された際のガス放出が、運転に問題を与えない値であるかを調べる必要がある。我々は、photon factory (PF)の BL21 で、CFC の photon stimulated desorption (PSD)を測定した。PSD 測定装置の概念図を、Fig. 9 に示す。SR は、scraper で成形して、サンプルに照射される。

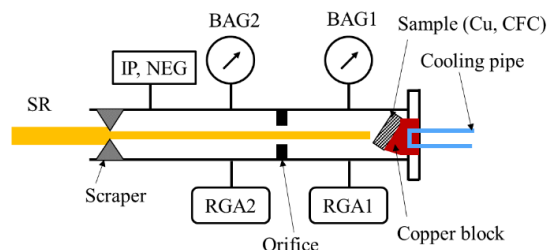


Figure 9: Schematic drawing of PSD measurement system at PF BL21.

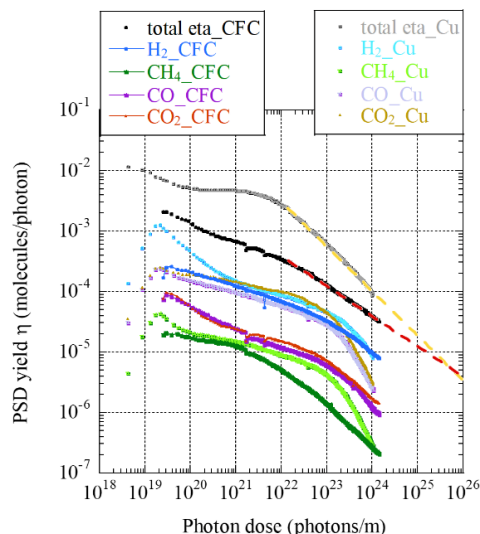


Figure 10: The result of copper and CFC of PSD measurement.

サンプルが高温にならないように、冷却水でサンプルは冷却されるシステムになっている。SR 照射試験の結果を Fig. 10 に示す。Figure 10 は、横軸に photon dose をとって、縦軸に PSD yield (η)をとったものである。全圧を銅と比較した場合、1024 photons/m までの測定結果では、CFC のほうが η は低く、また、傾きから 10^{26} photons/m のときに、銅と CFC の η は、同等になると推定される。したがって、CFC からのガス放出は、運転に悪影響を与えないと予想される。

6. KAF コリメータの接合試験

我々はできるだけ、ヘッド長を長くしたかったので、ヘッド長を 160 mm とした。CFC とコリメータジョー胴体の銅とは、ろう付けで接合している。SuperKEKB のバンチ長が短く、ねじ止めなどの接合法では、放電のリスクがあるためである。先述のように SuperKEKB では、CFC を垂直方向コリメータに採用した経験がある。垂直方向コリメータ採用時は、ヘッド長が 60 mm であった。ヘッド長が 160 mm の場合でも、ろう付けでの接合が可能か否か、サンプルを用いて試験した。最初の接合試験の結果を、Fig. 11(a)に示す。最初の試験では CFC でクラックが発生した。クラックがあると、運転中に剥がれるなどのトラブルが想定されるため、対応策として銅にスリットを入れることで、熱膨張差が原因で起こる応力を緩和する設計にした。2 度目の接合試験では、CFC にクラックが発生しなかった(Fig. 11(b))ことから、我々は銅にスリット加工を行う工法を採用することにした。

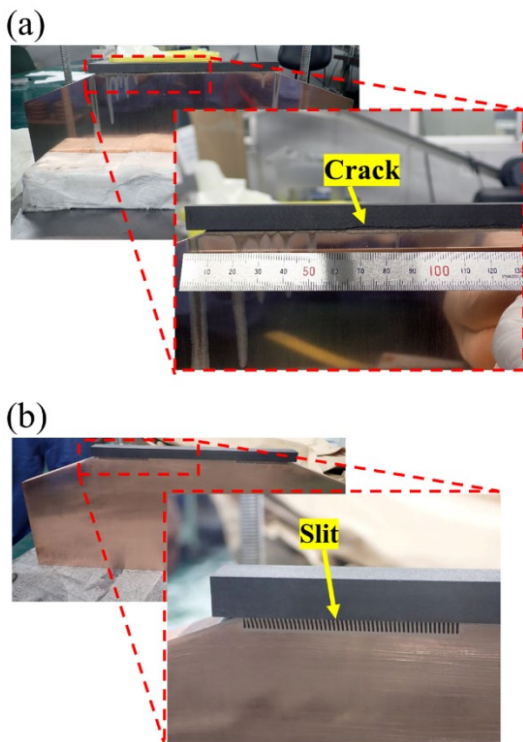


Figure 11: Photographs of the (a) first and (b) second bonding test between CFC and copper.

7. まとめ

以下に、本論文のまとめを箇条書きで述べる。

- KAF が及ぼす影響として、素粒子検出器が浴びたドーズ量や、放射化したダストを生み出す損傷したコリメータヘッドの状況について記述した。
- KAF の対応策として、ヘッド素材に CFC を用いたコリメータをインストールすることに決定した。
- CFC を垂直方向コリメータに用いる場合に危惧される、重要コンポーネントの損傷、インピーダンス増加、SR によるガス放出などについて、シミュレーションと測定を行い問題がないことを確認した。
- CFC を用いたコリメータの製作のために、要素試験を行った結果、CFC にクラックが見つかった。これは、銅と CFC の熱膨張差から応力が原因であると考えられ、その対策として銅にスリットをつけることにした。

参考文献

- [1] Z. Doležal, S. Uno, “Belle II Technical Design Report”, KEK Report 2010-1, October 2010, H, <https://www-superkekb.kek.jp/documents/B2TDR.pdf>
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, “Accelerator design at SuperKEKB”. Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2013, Issue 3, March 2013, 03A011, <https://doi.org/10.1093/ptep/pts083>
- [3] N. Ohuchi *et al.*, “SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system”, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1021 (2022) 165930.
- [4] Y. Funakoshi, K. Furukawa, SuperKEKB Commissioning Group, “SuperKEKB Design Report”, <https://www-linac.kek.jp/linac-com/report/skb-tdr/>
- [5] M. Akemoto *et al.*, “THYRATRON PERFORMANCE IN THE KEK 8GEV LINAC”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, July, 12-14, 2000, Himeji, Japan, pp. 213-215.
- [6] K. Masuda *et al.*, “COUNTERMEASURE OF THYRATRON RELATED TROUBLES AT SACLA”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 9-11, 2014, Aomori, Japan, pp. 654-657.
- [7] T. Ishibashi, S. Terui, Y. Suetsugu, K. Watanabe, M. Shirai, Movable collimator system for SuperKEKB. Physical Review Accelerators and Beams, 23 (2020) 053501.
- [8] M. Tobiyama, J. W. Flanagan, Development of bunch current and oscillation recorder for SuperKEKB accelerator, in: Proceedings of IBIC’12, Tsukuba, Japan, 2012, MOPA36pp.
- [9] S. Bacher *et al.*, “Performance of the diamond-based beam-loss monitor system of Belle II”. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 997 (2021) 165157.
- [10] G. Grindhammer *et al.*, “The Parameterized Simulation of Electromagnetic Showers in Homogeneous and Sampling Calorimeters”, arXiv:hep-ex/0001020v1 10Jan2000.
- [11] <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [12] J. Allison *et al.*, Recent developments in Geant4, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 835, 186 (2016).
- [13] J. Allison *et al.*, Geant4 developments and applications, IEEE Trans. Nucl. Sci. 53, 270 (2006).
- [14] S. Agostinelli *et al.*, Geant4—A simulation toolkit, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 506, 250 (2003).
- [15] A. Natchii *et al.*, Improved simulation of beam backgrounds and collimation at SuperKEKB. Physical Review Accelerators and Beams, 24 (2021) 081001.
- [16] GdffdL; <http://www.gdffdL>
- [17] Handbook of Accelerator Physics and Engineering, 3rd Printing (2009).