

ESTIMATION OF THERMAL SHOCKS OF EXTRACTION WINDOW FOR SuperKEKB

Shinji Terui^{#A)}, Mitsuo Kikuchi^{A)}, Toshihiro Mimashi^{A)}
^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The beam-abort system is an indispensable element of SuperKEKB to protect the sensitive components of the Belle detectors and the accelerator components from possible damages caused by possible loss of intense beams.

The beam current of the low energy ring at the SuperKEKB is higher than that of the KEKB by a factor of two. In order to relax the power density at the window, a vertical kicker is introduced, which vertically sweeps the beam by 10 mm on the window. When the dumped beam hit the extraction window, maximum temperature rise of the window is estimated to be about 350 degrees. This report estimates the effect of thermal shocks on extraction window.

ビームアポートにおけるビーム取り出し窓の熱衝撃解析

1. はじめに

B ファクトリー加速器 KEKB は、電子ビーム (8 GeV) と陽電子ビーム (3.5 GeV) の 2 リング型衝突加速器であり、これまで B 中間子崩壊における CP 対称性の破れの検証に大きく貢献してきた。そのピークルミノシティの最高値は $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ であり、積分ルミノシティでは目標値である 1000 fb^{-1} を 2009 年 11 月 29 日に突破した。しかし、新しい物理が重いフレーバーの崩壊にもたらす影響を高い精度で調べるためには、その性能を飛躍的に向上させる必要がある。このルミノシティ増強のための高度化作業を行うために、2010 年 6 月 30 日に KEKB の運転は停止された。

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 KEKB 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 加速器では蓄積電流を KEKB の約 2 倍、衝突点垂直ベータ関数を約 1/20 にすることを目標としている。

この SuperKEKB の LER では、KEKB と比較して蓄積電流が大きいため、ビームをアポートしたときに、取り出し窓で落ちるエネルギー密度もまた高くなる。この報告では、窓が受ける応力の解析を示す。図 1 に SuperKEKB のアポートデバイスの配置図を示す。また、図 2 にアポートシステムレイアウト計画図を示す^[1]。

2. 解析の概要

アポート時はリング 1 周分のバンチが取り出されるが、窓の同じ場所にビームが当たり続けると温度上昇のため窓が破壊されるので、ビームを縦方向にスイープしてビーム密度を下げる工夫がなされている。

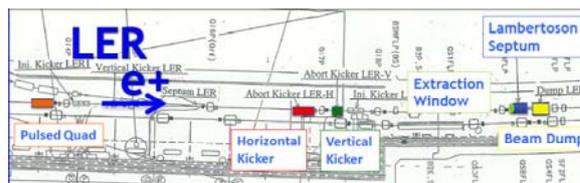


図 1 : SuperKEKB のアポートデバイスの配置図

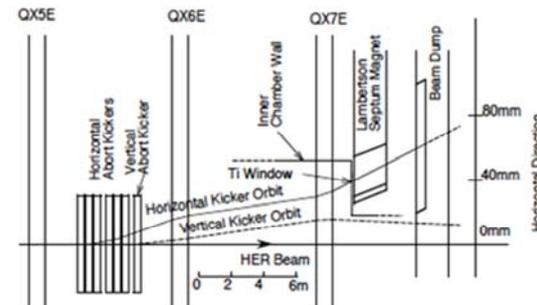


図 2 : アポートシステムレイアウト計画図

SuperKEKB の陽電子ビームは、2500 バンチ列からなり、1 個のバンチには、 0.925×10^{11} 個の粒子が含まれる。バンチ間隔は 4 ns である。ビームが窓に落とすエネルギーは瞬時に熱に変わる。熱応力は、温度上昇が急激なため波として窓物質内を音速度で伝播する。チタン合金の音速を 5990 m/s とすると 10 mm だけ進むに要する時間は $1.7 \mu\text{s}$ となる。よって、バンチ列の先頭部がつくる応力波は後続のバンチがつくる応力波と干渉すると考えられる。この応力波の圧力がチタン合金の破壊限度を超えるか否かが問題となる。

解析は、衝撃解析ソフト LS-DYNA を用いた。

3. 解析条件

最初に、アポート窓のような薄いターゲット中で、電子 (陽電子) が失うエネルギーについて考え

[#] sterui@mail.kek.jp

る。物質中で電子がエネルギーを失う過程には電離及び励起によるものと、制動輻射によるものがある。ターゲットの厚さが放射長より十分に薄い場合には、電磁シャワーが十分に発達せず、制動輻射で発生した γ 線及び電子陽電子対は大部分が標的から抜けてしまい、標的に与えるエネルギーは非常に少ないと考えられる。入射電子が電離及び励起により単位長さあたりに失うエネルギーを $-dE/dx$ を衝突阻止能とよぶ。電子(陽電子)の衝突阻止能は、軌道電子の速度より十分に大きいとき次の Bethe の式で与えられる。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = K \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \frac{(mc^2)^2 \beta^2 \gamma^2 (\gamma-1)}{2I^2} + f^{\pm}(\gamma) - \delta \right] \quad (1-1)$$

$$f^-(\gamma) = 1 - \beta^2 - \frac{2\gamma-1}{\gamma^2} \ln 2 + \frac{1}{8} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)^2 \quad (1-2)$$

$$f^+(\gamma) = 2 \ln 2 - \frac{\beta^2}{12} \left\{ 23 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3} \right\} \quad (1-3)$$

K: $2\pi r_e mc^2 N_a$

ここで、 ρ は金属密度、 γ はローレンツ因子、 r_e は電子古典半径、 mc^2 は電子質量、 N_a はアボガドロ数である。 I は電子の平均励起エネルギーであるが、計算で求めるのは難しく、実際には実験から求められる。 δ は密度効果補正で、物質の偏極により入射電子の電場が弱められる効果を表している。有限の γ に対しては Sternheimer の式が用いられて計算される。しかし、今回チタンの場合の係数が見つかることができなかったため、参考文献^[2]からの銅の係数を用いて δ を算出した。Ti($Z=22, A=47.9$)の場合 I は 233 eV である。以下の計算はエネルギーを 3.5 GeV として計算した。Ti の場合について衝突阻止能を γ の関数として描くと図 3 のようになる。ここで、チタンの衝突阻止能は $1.98 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$ になる^[3]。

前で計算した衝突阻止能上を利用して最大温度を求める。まず、アポートキッカーの平坦部のリップルも考慮に入れ、ターゲット上ではビームの軌跡が近似的に正弦波形をなすと仮定する。図 4 にビームの軌跡のイメージ図を示す。正弦波形の 1 周期の間に N 個のバンチが当たるものとする。全入熱を Q 、粒子数を $N=0.925 \times 10^{11}$ 、密度を $\rho=4.6 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、厚さを $d=1.4 \text{ mm}$ 、窓材の熱容量 $c=0.54 \text{ J}/\text{K}/\text{g}$ 、水平方向のビームサイズ $\sigma_x=1.0 \text{ mm}$ 、垂直方向のビームサイズ $\sigma_y=20 \mu\text{m}$ 、 h を 1 周期あたりの移動量、バンチ間隔を $\Delta t (=4 \text{ ns})$ 、窓上での y 方向の移動量 $\Delta y=6 \mu\text{m}/\text{bunch}$ とすると全入熱は式(2)として表せる。ビームの分布を式(3)として表すと、シングルバンチでの温度上昇 ΔT は式(4)となる。マルチバンチ(2500 bunch)がスイープ($H=10 \text{ mm}$)したときのビームの分布を式(5)として表すと、温度上昇 ΔT は式(6)となる^[4]。また、飽和温度の近似式は式(7)になる。図 5 は式(5)から横軸に時間をとり、縦軸に温度上昇 ($y=0, 6, 12 \mu\text{m}$ スイープさせたものと、最大温度に達するまでのスイープさせたもの) のグラフである^[4]。

$$Q = N \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \rho \quad (2)$$

$$\psi_0(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (3)$$

$$\Delta T = \frac{Q}{c\rho d} \psi_0(x, y) = \frac{N}{c} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \psi_0(x, y) \quad (4)$$

$$\Delta T(0,0) = 43 \text{ K}$$

$$\psi(x, y, t) = \sum_{n=0}^{2500-1} \psi_0(x, y - n\Delta t) Y(t - n\Delta t) \quad (5)$$

$$Y(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t \leq 0 \end{cases}$$

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{N}{c} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \psi(x, y, t) \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{N_{total}}{c} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x H} \quad (7)$$

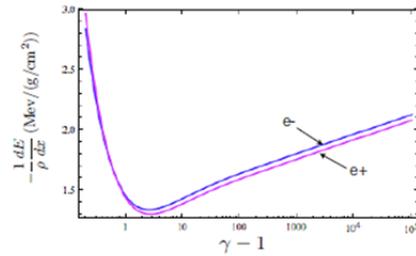


図 3 : Ti に対する衝突阻止能

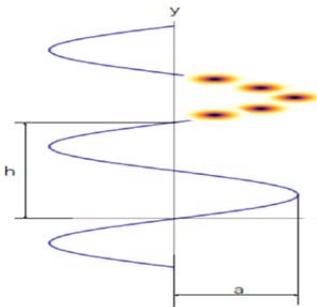


図 4 : ビーム軌跡のイメージ図

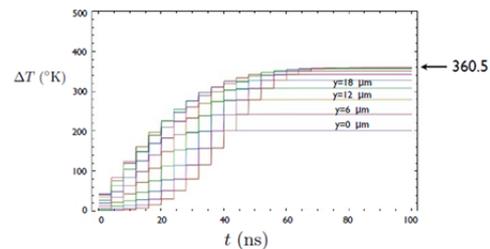
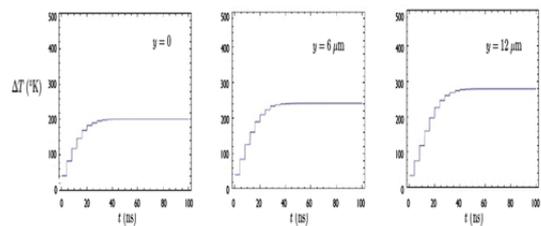


図 5 : スイープさせたときの温度上昇のグラフ

解析では、幅 2 mm、高さ $20 \mu\text{m}$ のビームが、 $6 \mu\text{m}/4\text{ns}$ の掃引速度で、窓にぶつかる考えた。また、単一バンチの分布は一様分布とした。モデルは、チタン合金 (熱膨張係数 $8.4 \times 10^{-6} \text{ m}/\text{K}$ 、ポアソン比

0.345、ヤング率 115.7 GPa、熱容量 540 J/kg/k、密度 4600 kg/m³ で、窓の幅 (X 軸方向) $w=2.4$ mm、窓の長さ (Y 軸方向) $h=0.6$ mm、窓の厚さ (Z 軸方向) $d=1.4$ mm とした (実際の窓は、もっと大きい PC のメモリの関係でこの大きさに決定した)。境界条件は、長さ、幅方向を固定、厚さ方向を固定なしとした。温度の境界条件は、全て断熱とした。

図 6 に解析のイメージ図を示す。ビームは 2 ns (本当は、もっと短い時間だが、これもまたメモリの関係で 2 ns とした) の間、窓に熱量を与え、その後 2 ns の時間間隔を挟んで次のパンチが、窓に熱量を与えるその繰り返しとした。

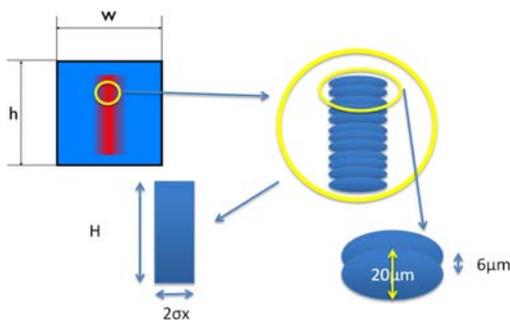


図 6 : 解析のイメージ図^[1]。

4. 解析結果と考察

最初に、図 8 にモデル (YZ 平面で切断して表示) 内の温度の時間変化の様子を示す。図 9 に Y 方向に 6 μm 毎ずらした温度上昇の時間変化のグラフを示す。最大温度変化は 366 k となった。

次に、図 10 に Y 方向応力が音速で広がっていく様子を示す。図 11 に 3 方向の最大応力の時間変化のグラフを示す。約 30 ns 位から干渉して最大値が変化していることがわかる。25 ns にはサチレーション状態になっていることがわかる。この計算で得られた引張り応力の最大値 650 MPa を用いて以下の評価をしていく。

現在、掃引距離 H を 15 mm に、ビーム幅 σ_x を 1.2 mm にするように軌道やアボートキッカーの立ち上がりを検討している。これを考慮に入れると式(7)から最大値は 361 MPa となる。チタンの応力限界を 980 MPa とすると、安全率は 2.71 ある。実際の条件は、ガウシアンビームであることを考えると安全率はさらに上がる。

5. まとめ

本報告では、以下の 2 つを示した。

- (1) ビームの熱衝撃による応力波の圧力の干渉を LS-DYNA で計算できることを示した。
- (2) SuperKEKB の LER では、アボート窓をチタン合金にしたとき破壊限度を超えないことを示した。

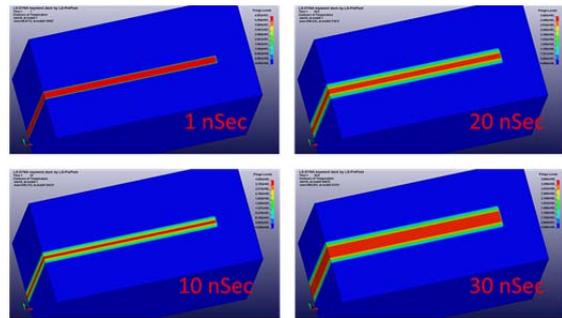


図 8 : 温度の時間変化。

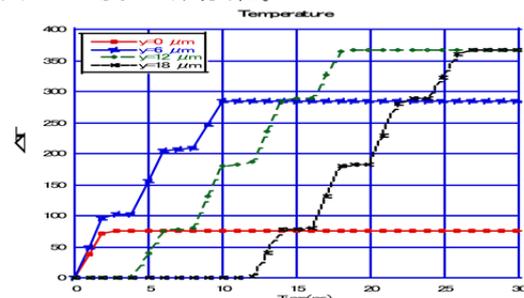


図 9 : 温度上昇の時間変化のグラフ。

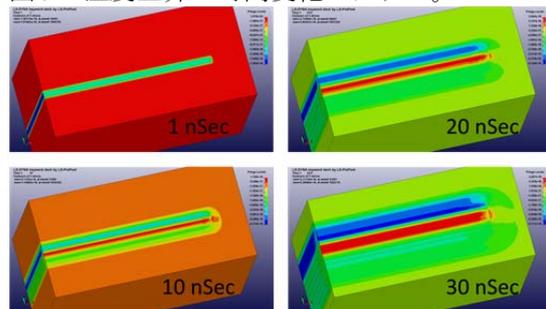


図 10 : Y 方向応力の時間変化

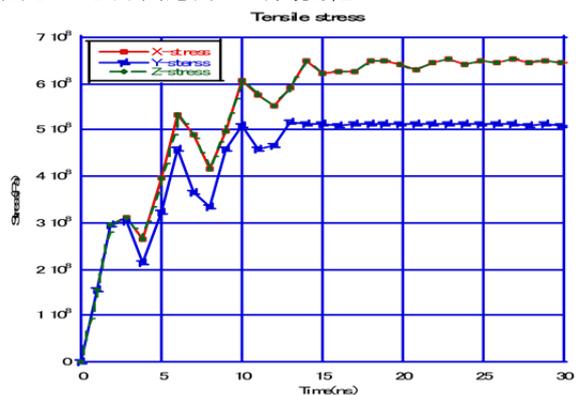


図 11 : 最大応力の時間変化のグラフ

参考文献

- [1] T.Mimashi. "Beam Abort System",KEKB Review (2012)
- [2] M. Berger and S. M. Seltzer, "Tables of energy losses and ranges of electrons and positrons", NASA SP-3012, (1964)
- [3] M.Kikuchi."The temperature rise at the abort window"
- [4] M.Kikuchi."The supplement of the thermal shock simulation", Commissioning meeting of KEKB