

Belle II 実験の 2021 年運転期間における電磁カロリメーターで  
のビームバックグラウンド測定

奈良女子大学大学院 人間文化総合科学研究科 数物科学専攻  
修士 2 年 今野つかさ

2022 年 2 月 10 日

## 概要

Belle II 実験は、SuperKEKB 電子・陽電子衝突型加速器と Belle II 測定器により  $B$  中間子対の生成とその崩壊を記録した高統計データを収集し、それを用いて稀崩壊な事情の測定による新物理探索を目的とした実験である。SuperKEKB 加速器の目標ルミノシティ前身の KEKB 加速器の 30 倍にあたる  $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  である。2021 年までの運転で瞬間ルミノシティは  $3.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に達した。また本研究の対象とした 2021 年 3 月から 6 月の運転期間中の積算ルミノシティは  $139 \text{ fb}^{-1}$  である。

Belle II 測定器で  $\gamma$  線の検出を行う、電磁カロリメーターは CsI(Tl) シンチレーターと PIN-PD を組み合わせたカウンターを用いており、入射した粒子のエネルギー損失を測定する。CsI(Tl) シンチレーターの発光時間が約  $1\mu\text{s}$  と長いため、ビームバックグラウンドによるパイルアップ雑音かエネルギー分解能の劣化をもたらす。

Belle II 電磁カロリメーターを構成する CsI(Tl) 結晶シンチレーターが受けたビームバックグラウンドによる放射線被ばく量は、PIN-PD 電流値モニターのデータを用いる。この際に CsI(Tl) 結晶への粒子入射がなくても PIN-PD に流れる暗電流値の算出を注意深く行う必要があり、本研究では、暗電流値の動向を 2021 年 3 月から 6 月の運転期間における CsI(Tl) 結晶の被ばく量をバレル部の前方で  $0.20 \text{ Gy} \sim 0.25 \text{ Gy}$ 、後方で  $0.33 \text{ Gy} \sim 0.39 \text{ Gy}$ 、後方エンドキャップ部の外側で  $0.40 \text{ Gy} \sim 0.55 \text{ Gy}$ 、内側で  $0.73 \text{ Gy} \sim 1.02 \text{ Gy}$  と算出した。

# 目次

<b>第 1 章 Belle II 実験</b>	<b>3</b>
1.1 SuperKEKB 加速器	3
1.2 Belle II 測定器	5
1.2.1 崩壊点検出器 (VXD)	5
1.2.2 中央飛跡検出器 (CDC)	6
1.2.3 バレル部粒子識別: TOP カウンター	6
1.2.4 エンドキャップ部粒子識別: ARICH カウンター	6
1.2.5 電磁カロリメーター (ECL)	7
1.2.6 $K_L^0$ および $\mu$ 粒子検出器 (KLM)	7
1.3 ビームバックグラウンド	8
1.3.1 タウシェック散乱	8
1.3.2 ビームガス散乱	9
1.3.3 シンクロトロン放射	9
1.3.4 Radiative Bhabha 散乱	9
1.3.5 二光子過程	10
<b>第 2 章 電磁カロリメーター</b>	<b>11</b>
2.1 CsI(Tl) シンチレーター	11
2.2 PIN-PD 検出器	12
2.3 PIN-PD 電流値モニターシステム	13
<b>第 3 章 ビームバックグラウンド測定</b>	<b>15</b>
3.1 生データから電流値への換算	15
3.2 暗電流値の算出	16
3.3 暗電流値の取り扱い	19
3.4 CsI(Tl) 結晶被ばく量の算出	24
3.5 Phase-2 から Phase-3 におけるルミノシティとの関係性	24
<b>第 4 章 まとめ</b>	<b>26</b>

# 目次

1.1	SuperKEKB 加速器の概観	4
1.2	ナノビーム方式の概念図	4
1.3	Belle II 測定器概観	5
1.4	VXD 概観	6
1.5	$r$ - $z$ 平面内の VXD 配置図	6
1.6	TOP モジュール概観 (上)、輻射角の差が全反射を繰り返して伝播する時間の違いとなる (下)	7
1.7	ARICH 概観	8
1.8	KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器の超伝導電磁石の配置。SuperKEKB 加速器では独立の超伝導電磁石を持つ	9
2.1	Belle II 実験電磁カロリメーターに使用されている CsI(Tl) カウンター。アルミ製のケース中に PIN-PD とプリアンプを収める	11
2.2	PIN-PD 電流値モニターの前方エンドキャップ、後方エンドキャップを分割した図。	14
2.3	PIN-PD 電流値モニターのパレルを分割した図。	14
2.4	前方エンドキャップ (左)、後方エンドキャップ (右) におけるセグメントの位置とチャンネル番号	14
2.5	パレル前方 (左) と、後方 (右) におけるセグメントの位置とチャンネル番号	14
3.1	2021 年 3 月 1 日の生データの一部。単位は [V]	15
3.2	2021 年 3 月 1 日の測定電流値に換算したデータの一部	16
3.3	2021 年 3 月 2 日の加速器の運転状況。上段は HER( $e^-$ )、下段は LER( $e^+$ ) の状況を表し、ビーム電流が赤い実線で示されている。	16
3.4	Barrel front の 2021 年 2 月 24 日～6 月 30 日までの暗電流値 (nA/cry) の推移。横軸は 2 月 24 日を起点とした日数。	18
3.5	パレル前方 $\phi=0$ のセグメントにおける PIN-PD 電流値 (nA/cry) の推移。横軸は 3 月 1 日午前 0 時を起点とし、単位は時間。階段状の実線は、運転時間に対して最新の暗電流値を該当する定数として取り扱った場合の暗電流値の推移	19
3.6	パレル前方 $\phi=0$ のセグメントにおける PIN-PD 電流値 (nA/cry) の推移。横軸は 3 月 1 日午前 0 時を起点とし、単位は時間	20
3.7	パレル前方における放射線被ばく積算値	21
3.8	パレル後方における放射線被ばく積算値	22
3.9	後方エンドキャップ外側における放射線被ばく積算値	22
3.10	後方エンドキャップ内側における放射線被ばく積算値	23
3.11	Phase-3 におけるルミノシティの増加分布	25

# 第1章 Belle II実験

Belle II実験とは、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）で進行中の高輝度電子・陽電子衝突実験である。前身のKEKB加速器からSuperKEKB加速器による、電子・陽電子衝突で生じる  $B$  中間子、 $D$  中間子、 $\tau$  レプトンの崩壊過程を詳細に調べることが目的である。前身のKEKBファクトリー実験よりも30倍のルミノシティを目標として、積分ルミノシティで50倍に及ぶデータを収集し、新物理探索を行う。

## 1.1 SuperKEKB加速器

SuperKEKB加速器は7 GeVの電子と4 GeVの陽電子を衝突させ、生成した  $B$  中間子・反  $B$  中間子対が実験室系でローレンツブーストされた環境を実現する。地下11 mに掘られた周長約3 kmのトンネル内に設置された非対称エネルギー衝突型円形加速器である。概観を図1.1に示す。SuperKEKBは、電子用と陽電子用の2つのリング型加速器と、リングに電子・陽電子を供給する直線型加速器で構成されており、電子ビームと陽電子ビームが逆方向にそれぞれのリング内で周回する。2つのビームは、リングの一点でのみ衝突するように設計されており、その衝突点にBelle II測定器を設置して衝突によって起こる素粒子反応を検出・記録する。

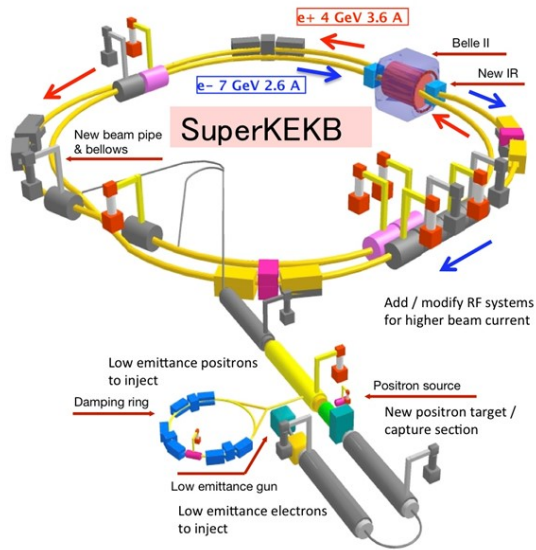
衝突型加速器の事象生成能力を示す性能はルミノシティと呼ばれる量で表される。素粒子反応の起こる頻度を数値化したものであり、反応断面積を  $\sigma$ 、単位時間当たりの事象発生数を  $R$ 、ルミノシティを  $L$  とすると、以下の式で表せる。

$$R [\text{s}^{-1}] = L [\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] \times \sigma [\text{cm}^2]$$

したがって、稀な過程を精密測定する目的で事象発生数を増やすためにはルミノシティを高めることが必然である。ルミノシティは以下の式で表される。

$$L \propto \gamma_{\pm} \left( \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_{y\pm}^*} \right)$$

$\beta_{y\pm}^*$  は衝突点垂直方向ベータ関数、 $I$  はビーム電流、 $\xi_y$  は垂直方向ビーム・ビームパラメーター、 $\gamma$  はローレンツファクターである。\*は衝突点での値、 $\pm$  は +が陽電子ビーム、-が電子ビームでの値である。 $\gamma$  は重心系エネルギーを  $B$  中間子・反  $B$  中間子対生成に適した10.58 GeVに設定することにより制約されているので、ルミノシティを上げるためには、 $I$  と  $\xi_y$  を大きくするとともに、 $\beta_{y\pm}^*$  を小さくする。 $\beta_{y\pm}^*$  を小さくすることは、衝突点でのビームを強く絞り込む。しかし、ビーム交差領域のサイズが  $\beta_{y\pm}^*$  より大きいと、焦点位置以外でバンチが膨らむ砂時計効果という効果に妨げられて、ルミノシティ向上につながらない。そこで、図1.2に示したようにナノ・ビーム・スキームという新しい衝突方式を採用した。この方式の特徴はバンチ領域を狭くするため、水平方向に大



80

図 1.1: SuperKEKB 加速器の概観

きな交差角をつけて細いバンチを交差させたものである。図 1.2 の  $d$  がビーム交差領域の幅である。SuperKEKB 加速器では交差角は  $83 \text{ mrad}$  に設定されている。これにより、バンチ交差ごとに発生するルミノシティをバンチ全体が交差領域になっていた KEKB 加速器に比べ最大で 20 倍にすることを目指している。

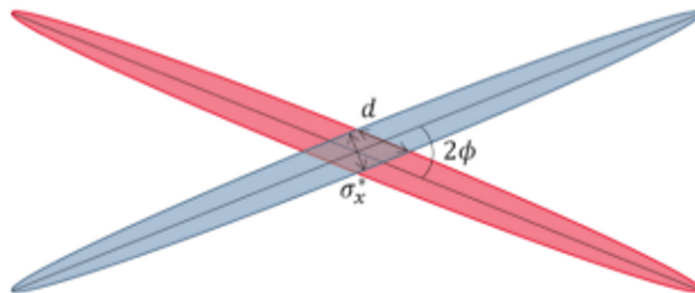


図 1.2: ナノビーム方式の概念図

## 1.2 Belle II 測定器

SuperKEKB 加速器の衝突点に設置し、Belle II 検出器は異なる役割を持った 7つの検出器で構成されており、その概観を図 1.3 に示す。Belle II 測定器は複数の検出器コンポーネントを組み合わせ構成されており、この章では各々の検出器の役割について述べる。

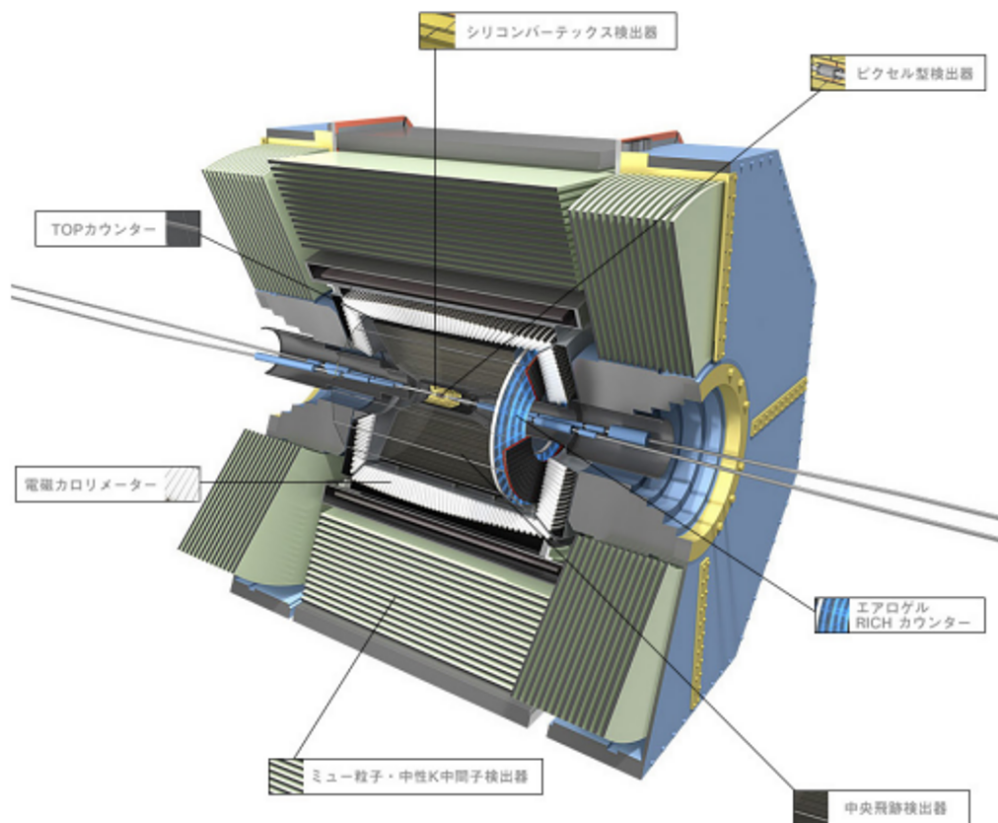


図 1.3: Belle II 測定器概観

### 1.2.1 崩壊点検出器 (VXD)

崩壊点検出器は  $B$  中間子の崩壊点を測定する検出器であり、内側 2 層は DEPFET なる構造を持つ半導体ピクセルセンサーを用いる PXD、外側 4 層は両面シリコンストリップセンサー (DSSD) を用いた SVD (シリコンバーテックス検出器) である。それらは衝突点を囲むように配置されている。概観と配置図をそれぞれ図 1.4、図 1.5 に示す。荷電粒子がシリコン板を通過するとき

られる電気信号から粒子の通過位置を測定する。

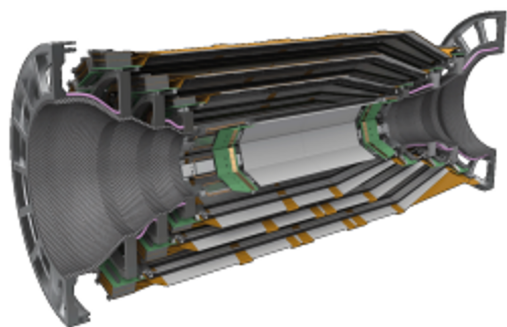


図 1.4: VXD 概観

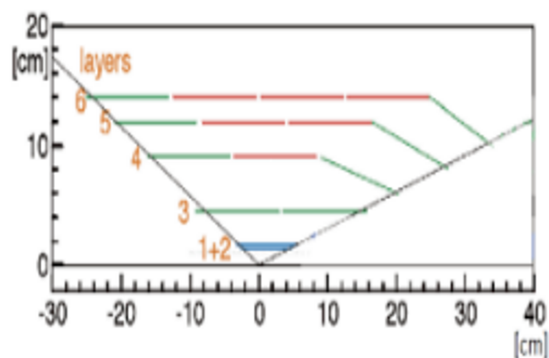


図 1.5:  $r$ - $z$  平面内の VXD 配置図

### 1.2.2 中央飛跡検出器 (CDC)

半径約 1.1 m の円筒形状内に多数の細い金属ワイヤーを張り巡らせたドリフトチェンバーであり、内部はヘリウムとエタンの混合ガスで満たされている。陰極ワイヤーを接地し、陽極ワイヤーに+2.5 kV 程度の高電圧を印加する。荷電粒子が通過すると、ガス分子がイオン化され、生成した電子が近くの陽極ワイヤーまでドリフトし、ワイヤー付近で電子雪崩という加速度的に電子数が増える現象を形成することにより陽極ワイヤーから電気信号パルスを得る。パルス形成までのドリフト時間から、荷電粒子の通過点とワイヤーの距離がわかるのでその情報から飛跡を再構成する。後述する超伝導ソレノイドにより磁場をかけると飛跡がローレンツ力により曲げられその曲率から運動量を求めることができる。また、信号の大きさから粒子識別もできる。

### 1.2.3 バレル部粒子識別：TOP カウンター

Belle II 測定器のバレル部で荷電  $K$  中間子と荷電  $\pi$  中間子の識別をする検出器で、概観と測定原理を図 1.6 に示す。TOP カウンターは合成石英板と光検出器で構成されている。この石英板がチェレンコフ光の輻射体かつ伝搬体としての役割を担う。高速の  $\pi$  中間子または  $K$  中間子が石英板を通過して、チェレンコフ光が円錐状に輻射するとき、粒子の種類が異なると、質量の違いに起因して、輻射角が異なるため、石英板内を全反射を繰り返して進むチェレンコフ光が端部に取付けた光検出器に到達するまでの航路に違いが生じ、光検出器から信号パルスが出るタイミングの差となる。この時間情報からチェレンコフ光の輻射角を再構成して荷電粒子の識別を行う。

### 1.2.4 エンドキャップ部粒子識別：ARICH カウンター

Belle II 測定器のエンドキャップ部で荷電  $K$  中間子と荷電  $\pi$  中間子の識別をする検出器で、測定原理を図 1.7 に示す。TOP カウンターと同様に、チェレンコフ光を用いて粒子識別を行う装置で、



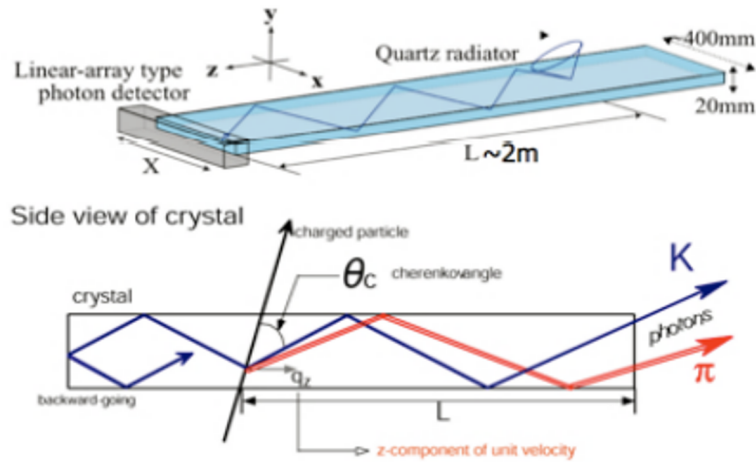


図 1.6: TOP モジュール概観 (上)、輻射角の差が全反射を繰り返して伝播する時間の違いとなる (下)

輻射体であるシリカエアロゲルとチェレンコフ光が到達した位置を検出する機能を持つ HAPD 光検出器から構成されている。

### 1.2.5 電磁カロリメーター (ECL)

Belle II 実験の電磁カロリメーターは、 $\gamma$  線と電子のエネルギー測定を行うとともに、トリガー情報の生成も行う。CsI(Tl) シンチレーターと光検出器 (PIN-PD(フォトダイオード)) を組み合わせたカウンターを 8736 本用いている。CsI(Tl) 結晶は長さ約 30 cm、前面が約 5.5 cm $\times$ 5.5 cm の大きさである。シンチレーターに  $\gamma$  線や電子が入射すると、制動放射や電子対生成により、電磁シャワーを作り、これにより生じたエネルギー損失をシンチレーション光に変換し、PIN-PD で読み出すことにより測定する。電磁カロリメーターに関しては第 2 章で詳しく述べる。

### 1.2.6 $K_L^0$ および $\mu$ 粒子検出器 (KLM)

Belle II 測定器の最も外側に位置し、貫通力の高い荷電粒子である  $\mu$  粒子と、中性で寿命が長い  $K^0$  中間子を検出する。この検出器は鉄板と荷電粒子を検出できる検出層を交互に重ねたサンドウィッチ構造になっている。 $\mu$  粒子は何層にもわたって、鉄を突き抜けて信号を残すことができる。したがって CDC で検出した荷電粒子の飛跡を外挿したものと一致し複数の層に連なる KLM の信号があれば  $\mu$  粒子と同定できる。 $K_L^0$  は鉄と衝突し強い相互作用によるハドロンシャワーを形成するので、そこに KLM 検出器ヒットのクラスターとして検出される。

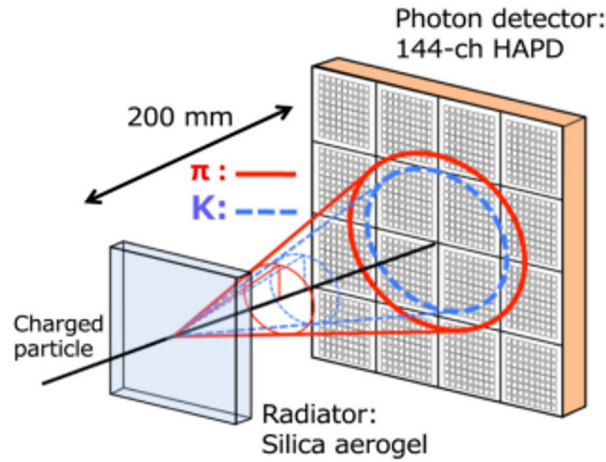


図 1.7: ARICH 概観

### 1.3 ビームバックグラウンド

ビーム中の粒子は中心軌道のまわりで振動しながらリング型加速器を周回している。振動には、軌道の周りを進行方向に対して垂直な水平・鉛直方向に振動するベータトロン振動と、高周波加速装置の周波数に同期したときの位相に対して、進んだり遅れたりして振動するシンクロトロン振動がある。中心軌道または基準となるエネルギーからのずれがある程度を超えて大きくなった粒子は、安定に周回できなくなりビームパイプ内側に衝突して失われる。こうして発生する放射線が Belle II 測定器に入るものをビームバックグラウンドと呼び、これにより検出器の検出効率を下げる運動量やエネルギーの分解能の悪化、長期的には放射線損傷による検出器の劣化を与える。また、SuperKEKB 加速器からのビームバックグラウンドには、入射直後のビームロスによるものに加え、ビーム衝突由来のもの（Radiation Bhabha 散乱、二光子過程）と、ビーム周回によって発生するもの（タウシエック散乱、ビームガス散乱、シンクロトロン放射）があり、以下、これらの各々について簡潔に述べる。

#### 1.3.1 タウシエック散乱

同一バンチ内でのビーム粒子同士の散乱のことを指す。同一バンチ内のビーム粒子同士がクーロン散乱することで、安定して周回できる軌道の範囲（光学口径）を外れるとバックグラウンドになる。タウシエック散乱による発生頻度  $R$  は、ビームサイズ  $\sigma_y$ 、バンチ電流  $I$ 、バンチ数  $N$  を用いて、

$$R \propto \frac{N \times I^2}{\sigma_y}$$

と表すことができる。

### 1.3.2 ビームガス散乱

ビームパイプ内に残ったガスとビーム粒子が衝突し、クーロン散乱により角度が変わる、または、制動放射によってエネルギーが減少することで力学口径を外れバックグラウンドになるものである。ビームガス散乱による発生頻度  $R$  はビーム電流  $I$  と残留ガスの圧力  $P$  の積に比例するため、

$$R \propto I \times P$$

で表せる。

### 1.3.3 シンクロトロン放射

高エネルギーの電子がその進行方向を磁石などによって変えられた際に発生する電磁波をシンクロトロン放射光といい、その放射光がビームパイプの検出器内部を通過する区間にあたると、バックグラウンドとなる。検出器に放射光由来のバックグラウンドが入射するかどうかは衝突点付近の超伝導電磁石の配置と密接な関係がある。QCS はいずれも、ビームを集束させるための QCS と呼ばれる収束用四極電磁石である。レンズの役割を果たすため中心では磁場がなく、中心部から遠ざかるほど磁場が強くなるよう双曲線形の磁極を持つ。図 1.8 に示すように、KEKB 加速器では超伝導電磁石を HER と LER で共有していたために、衝突点通過後の軌道が中心から離れた位置を通るために強く曲げられ、その結果、発生したシンクロトロン放射光が後方散乱して検出器に入ることがあったが、SuperKEKB 加速器では、各リングごとに超伝導電磁石が設置して、この寄与を減らす設計になっている。

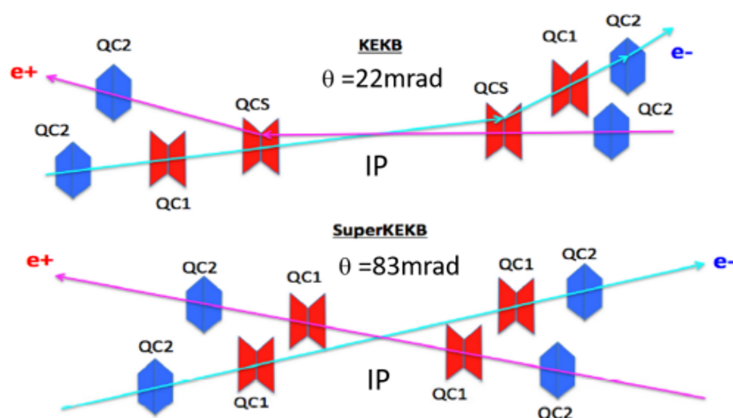


図 1.8: KEBB 加速器と SuperKEKB 加速器の超伝導電磁石の配置。SuperKEKB 加速器では独立の超伝導電磁石を持つ

### 1.3.4 Radiative Bhabha 散乱

Radiative Bhabha 散乱、すなわち  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  過程において  $\gamma$  の放出によりエネルギーを失った  $e^+$  または  $e^-$  のいずれかが、磁場により軌道をそれて曲がり、ビームパイプ内壁にあたっ

て、生じる電磁シャワーがバックグラウンドとなる。このバックグラウンドは物理的な散乱過程によるためルミノシティに比例して増加する。電磁シャワー中では、 $\gamma$ と原子核の相互作用による巨大双極子共鳴が起きて中性子が生成される。電磁カロリメータのPIN-PDをはじめ半導体素子はこの中性子を浴びることによって結晶中に格子欠陥ができ、暗電流の増加をもたらす。

### 1.3.5 二光子過程

二光子過程とは、電子と陽電子の両方から同時に放出された仮想光子同士の衝突により、粒子生成が起きることをいう。Radiative Bhabha 散乱同様に、反応後の $e^+$ または $e^-$ はエネルギーが下がっているため、QCSで大きく曲げられ失われる。これも物理過程に起因するためルミノシティに比例する。

## 第2章 電磁カロリメーター

Belle II 実験の電磁カロリメーターは、 $\gamma$  線と電子のエネルギー測定を行うとともに、トリガー信号の生成も行う。

Belle II 実験では 1 GeV 以下のエネルギー領域にも分解能が要求されるため、全吸収型のカロリメーターを必要とする。また限られた体積中でシャワーを形成するため、高い密度の素材として無機シンチレーターである、CsI(Tl) シンチレータを用いている。電磁カロリメーターに用いられているカウンターの写真を図 2.1 に示す。Belle II 実験では CsI(Tl) シンチレーターと PIN-PD を組み合わせたこのカウンターを 8736 本用いている。高エネルギーの電子または陽電子は主として物質中で制動放射によって、 $\gamma$  線を放出してエネルギーを失い、高エネルギーの  $\gamma$  線は電子・陽電子の対生成をする。この過程を繰り返し、多数の  $\gamma$  線・電子・陽電子の集団である電磁シャワーを形成する。電磁シャワー中の電子・陽電子がシンチレーター中で電離損失により失ったエネルギーがシンチレーション光に変換される。これを PIN-PD (PD = フォトダイオード) と呼ばれる光検出器で光の量を電気信号に変えて読み出し、入射した粒子のエネルギーを測定する。

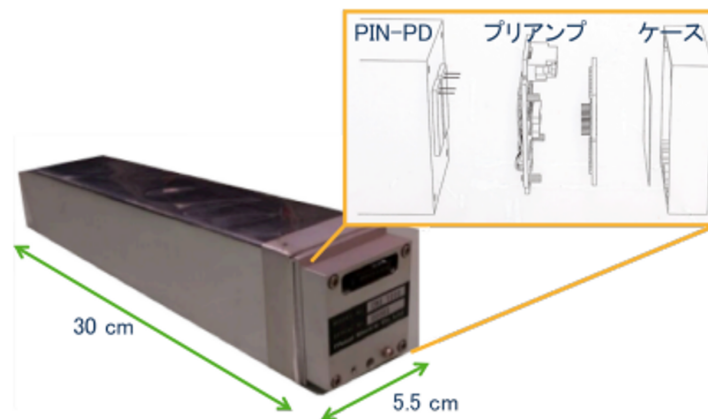


図 2.1: Belle II 実験電磁カロリメーターに使用されている CsI(Tl) カウンター。アルミ製のケース中に PIN-PD とプリアンプを収める

### 2.1 CsI(Tl) シンチレーター

シンチレーターとは、粒子が入射してエネルギー損失を起こしたときに蛍光を発する物質のことを指す。シンチレーターには無機と有機に分けられ、無機シンチレーターは有機シンチレーター

に比べ、原子番号が比較的高く密度も高いことから、 $\gamma$ 線を検出しエネルギーを測定することに適している。 $\gamma$ 線が入射すると、光电吸収やコンプトン散乱を起こし、その結果生じた電子が結晶中で電離損失をおこした結果、励起された原子が脱励起するときにシンチレーション光を発する。これまでに素粒子実験で全吸収型カロリメーターに採用された無機シンチレーターにはBGO、純CsI、CsI(Tl)といったものがあり、その特性を比較したものを表2.1に示す。Belle II実験の電磁カロリメーターはBelle実験のCsI(Tl)カウンターとそれを収めた構造体を受け継いでいる。CsI結晶にタリウムを数百ppm程度ドーピングしたCsI(Tl)結晶を使用している。磁場中に設置するため、光検出器としてPIN-PDを用いているため、量子効率の良い560nmの波長で発光量の多い素材であることから選択した。

表 2.1: 無機シンチレーターの性能比較。f は fast component、s は slow component を表す。

	BGO	純 CsI	CsI(Tl)	
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	7.13	4.51	4.51	
放射長 [cm]	1.12	1.86	1.86	
モリエール半径 [cm]	2.23	3.57	3.57	
発光量 [photon/MeV]	6400	330f	1100s	50000
蛍光減衰時間 [ns]	300	6f	35s	1300
発光波長 [nm]	480	310f	420s	560

## 2.2 PIN-PD 検出器

PD (フォトダイオード) とは、p 型半導体と n 型半導体を接合した半導体素子であり、pn 接合部付近では電子と正孔が打ち消しあいキャリアが存在しない空乏層と呼ばれる領域が形成される。光検出器としてダイオードを使用する場合、p 側に負電圧、n 側に正電圧の逆方向にバイアスがかかる。このときに、n 型半導体内部の自由電子および、p 型半導体内部の正孔は電極側に引き付けられ、空乏層が大きくなる。空乏層に光を照射すると電子と正孔が発生し、電子は n 型半導体、正孔は p 型半導体の電極へ移動し電気信号パルスが生じる。これにシンチレーターを組み合わせることでシンチレーターに素粒子が入射したときに発生するシンチレーション光を電気信号として検出することができる。

実際のダイオードでは逆方向にバイアス電圧を印加した状態でもわずかに電流が流れる。これは空乏層中で熱励起により発生した電子・正孔対の移動によるものであり、暗電流と呼ばれる。

Belle II 実験の電磁カロリメーターで CsI(Tl) 結晶が発するシンチレーション光を読み出すには 1 cm×2 cm の受光部を持つ浜松ホトニクス製 S2744-08 型 PIN-PD (PIN 型フォトダイオード) を用いている。p 型と n 型の間に真性半導体である i 型半導体を挟んだ構造を持ち、空乏層を拡大し、応答速度が向上、p 層および n 層にかかる電場が少なくなり、暗電流を減らすことができる。

## 2.3 PIN-PD 電流値モニターシステム

PIN-PD 電流値モニターは CsI(Tl) 結晶のシンチレーション光を読み出す PIN-PD 電流値を測定・記録する。測定は 5 秒ごとに行う。リングに蓄積したビームが ON のときと OFF のときの PIN-PD に流れる電流値の差は、CsI(Tl) 結晶が吸収する放射線量に比例し、その積算値をもって CsI(Tl) 結晶の被ばく量を見積もることができる。したがって、ビーム ON/OFF や Belle II 測定器のデータ収集を実行中か否かを問わず常時モニターするよう、独立に動作可能なシステムになっている。

PIN-PD 電流値モニターシステム内に計測アンプがあり、その回路 [1] は、セグメントごとにバイアス電源の陽極との間に抵抗 (10 kΩ) を挿入し、それに電流が流れるときに発生する電圧降下を入力インピーダンスが大きなオペアンプ (テキサスインスツルメンツ社 OPA124 型および INA117 型) を使用して、シングルエンド電圧信号に変換するという構成になっている。また、非反転増幅回路を用いて電圧降下の増幅率を 10 倍としている。そして変換された電圧信号をエレクトロニクスハット内のデータロガーへつながらる長さ 20 m の Cat5e ケーブル 2 本を用いて、ボルテージフォロアーで送る。そしてエレクトロニクスハット内のデータロガー (キーサイトテクノロジー 34980A 型) で数値化する。数値化したデータは LXI/VXI11 プロトコルに基づき制御を行い、使用するソフトウェアで Linux PC に取り込み、そのストレージ上のファイルに保存する。

PIN-PD 電流値モニターは 8736 本あるカウンターをセグメントごとにまとめて読み出しを行う。図 2.2 と図 2.3 に示すように、ビーム軸に垂直な  $xy$  平面における方位角  $\phi$  方向に 8 分割、 $z$  軸から極角  $\theta$  方向に 6 分割し、総計 48 セグメントに分割してある。 $\theta$  方向は前方エンドキャップ、後方エンドキャップのそれぞれを内側と外側に分けて (図 2.2)、バレルは前方と後方に分けている (図 2.3)。この分割としたのは、CsI(Tl) 結晶が浴びるビームバックグラウンド量がビーム軸からの角度  $\theta$  に依存するのはもちろん、83 mrad と大きなビーム交差角をとっているため、方位角  $\phi$  に依存して、角度によってビームバックグラウンド量が異なりうると考えられるためである。電流値をモニターしたセグメントの位置と、データロガーに接続したチャンネル番号の対応を図 2.4 と図 2.5 に示す。また、各セグメントの結晶の本数を表 2.2 に示す。ここで、バレルの 2 つの数字は、前方のチャンネル 17,19,21,23 では 384 本、18,20,22,24 では 480 本、同様にバレル後方のチャンネル 25,27,29,31 では 352 本、26,28,30,32 では 440 本で結晶の本数が異なっている。これは、CsI(Tl) 結晶カウンターの信号を読み出すフロントエンド電子回路を装備する VME クレートがバレル部では全部で 36 台あるが、4 台を集めているところと 5 台を集めているところがあるためである。

表 2.2: 測定点あたりの結晶の本数

前方エンドキャップ	内側	28 本
	外側	116 本
バレル	前方	384 本または 480 本
	後方	352 本または 440 本
後方エンドキャップ	内側	60 本
	外側	60 本

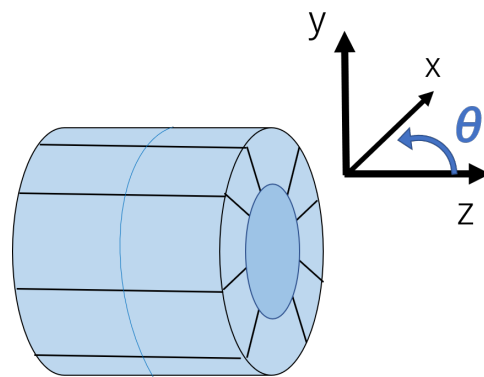
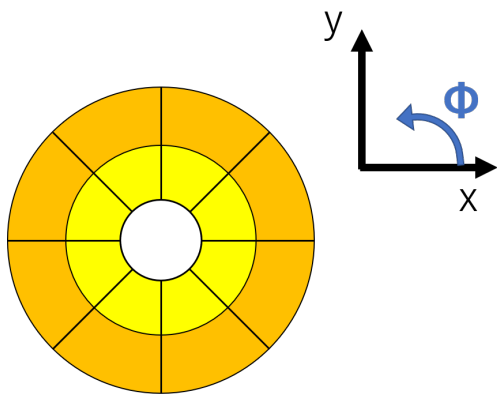


図 2.2: PIN-PD 電流値モニターの前方エンドキャップ 図 2.3: PIN-PD 電流値モニターのバレルを分割した図。  
 プ、後方エンドキャップを分割した図。

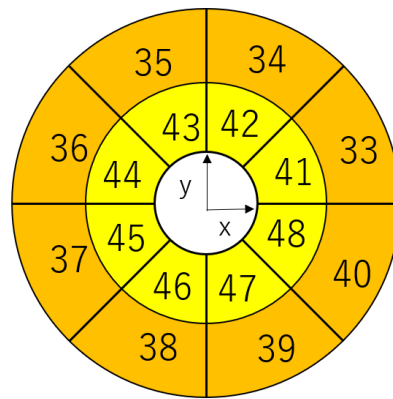
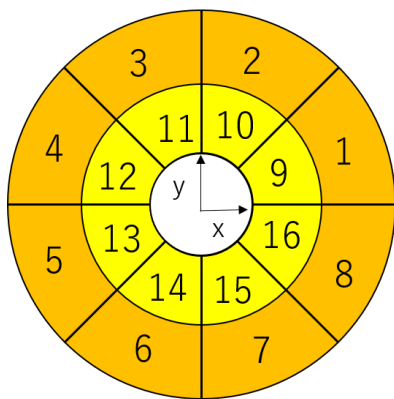


図 2.4: 前方エンドキャップ (左)、後方エンドキャップ (右) におけるセグメントの位置とチャンネル番号

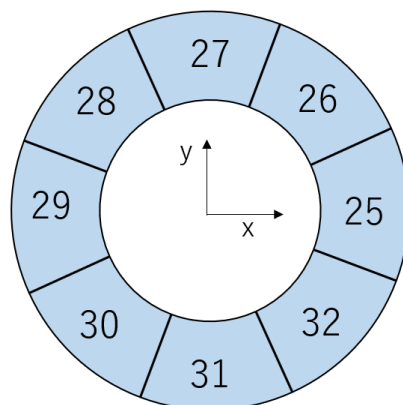
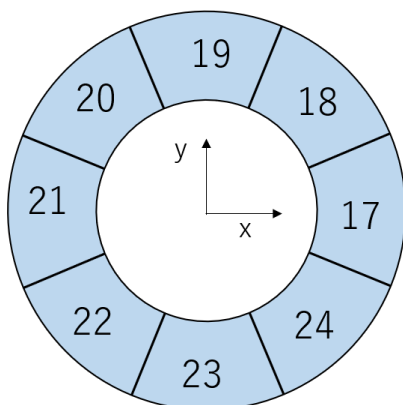


図 2.5: バレル前方 (左) と、後方 (右) におけるセグメントの位置とチャンネル番号



## 第3章 ビームバックグラウンド測定

SuperKEKB 加速器の第3期試験運転 (Phase-3 運転) に収集した電流値モニターの結果についてそこから算出した2月24日～6月30日までのビームバックグラウンド量の結果について述べる。

### 3.1 生データから電流値への換算

電流値モニターの生データは、セグメント毎に配置した10 kΩの電圧降下を計測アンプで10倍に線形増幅したものを記録している。各セグメントに含まれる結晶の本数が異なるため、結晶一本あたりの電流値  $I$  nA/crystal に換算するための式は

$$I = \frac{V}{10000 \cdot N_{\text{cry}}}$$

となる。ここで  $N_{\text{cry}}$  は表の各セグメント中に含まれる結晶の本数を示し、 $V$  は生データである電圧値 (V) を示す。そしてPIN-PD 電流値モニターで得られた生データの例を図3.1に示す。

```
0:0:0
1.101486 1.262939 1.041925 1.270624 0.321785 1.176590 1.059585 1.209289 1.434270 1.809400
0.392800 1.257753 1.020743 1.086299 1.451625 1.584436 0.390932 1.219348 0.893451 0.918777
1.649942 2.047086 0.346629 1.099186 0.864958 0.908455 1.102566 1.588509 0.293334 0.992972
0.809820 0.876676 1.370841 1.718004 0.273377 0.973267 0.868083 0.955378 1.043788 1.325139
0.268638 0.978261 0.954905 1.104067 1.263615 1.642719 0.283854 1.065365

0:0:5
1.101758 1.262931 1.043029 1.270558 0.321874 1.177406 1.059627 1.209504 1.442276 1.807965
0.393168 1.258520 1.020521 1.086307 1.452029 1.582259 0.391292 1.220057 0.893283 0.918591
1.652110 2.049947 0.347366 1.100250 0.865335 0.908518 1.103259 1.589284 0.294117 0.994110
0.808571 0.876515 1.371493 1.719694 0.274197 0.974390 0.868394 0.955702 1.044258 1.325444
0.269390 0.978930 0.954877 1.104042 1.261909 1.643857 0.284177 1.065687
```

図 3.1: 2021 年 3 月 1 日の生データの一部。単位は [V]

データ処理の第一段階では電圧値である生データから結晶一本当たりの電流値 (nA/crystal) に変換するとともに、データロガーのチャンネル番号順に並んでいるデータを電磁カロリメーター内の幾何学的配置に従った順番に並べなおす。ここまで処理したデータの例を図3.2に示す。

図3.2は5秒ごとに実行される測定の2回分のデータを示す。0:0:0は0時0分0秒と0:0:5は0時0分5秒の測定であることを示し、そのあとに48個の実数が並ぶものが電流値である。最

```

0:0:0
451.049622 431.888916 387.963898 328.134644 324.448212 313.098572 341.206421 394.309631 94.955688
91.343529 87.995087 77.021637 74.565346 69.812065 74.834740 82.319397 33.089169 37.695831 41.261356
42.647625 41.367420 35.791748 34.508831 34.223312 29.600142 32.597046 41.239346 37.498684 31.322897
31.155478 29.653067 28.718523 53.630833 65.466667 65.155334 57.771500 48.889000 45.562832 44.773003
47.309002 196.098328 209.625504 203.224655 183.197662 165.495331 162.211166 163.043503 177.560822
0:0:5
451.046783 431.965729 387.966797 328.068237 324.470734 313.041046 341.322144 394.300720 94.979141
91.347160 87.975952 77.007156 74.597847 69.704391 74.861557 82.316986 33.087448 37.665939 41.204662
42.707230 41.387604 35.826958 34.516769 34.247021 29.631504 32.778999 41.250824 37.547955 31.342585
31.170296 29.666420 28.679750 53.645664 65.528000 65.215332 57.894333 49.019501 45.699501 44.898331
47.362835 196.234329 209.753342 203.342834 183.375000 165.684998 162.398331 163.154999 177.614487

```

図 3.2: 2021 年 3 月 1 日の測定電流値に換算したデータの一部

初の 8 個の値が 前方エンドキャップ内側 (Fwd EC inner)、9 番目から 16 番目が前方エンドキャップ外側 (Fwd EC out)、17 番目から 24 番目がバレル前方 (Barrel front)、25 番目から 32 番目がバレル後方 (Barrel back)、33 番目から 40 番目が後方エンドキャップ外側 (Bwd EC out)、41 番目から 48 番目が後方エンドキャップ内側 (Bwd EC inner)、を表している。各々のデータブロック中では、 $\phi$  が若いものから 8 つのデータが並ぶ。

### 3.2 暗電流値の算出

ビーム OFF のときの電流値を暗電流値という。図 3.3 は SuperKEKB の、2021 年 3 月 2 日午前 0 時から 24 時間の加速器の運転状況を例として示したものである。17 時～20 時は HER、LER ともにビームが OFF になっている。この時間帯に PIN-PD 電流値モニターで測定した電流値をこの日の暗電流値とする。

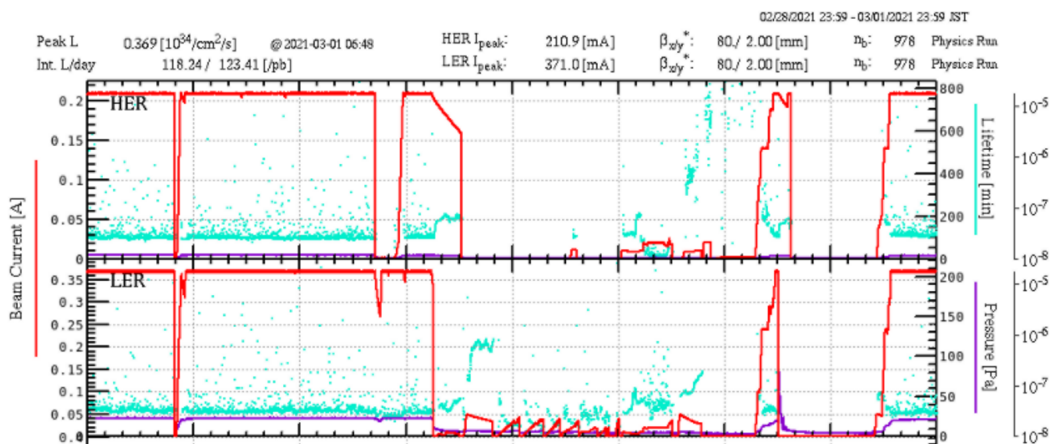


図 3.3: 2021 年 3 月 2 日の加速器の運転状況。上段は HER( $e^-$ )、下段は LER( $e^+$ ) の状況を表し、ビーム電流が赤い実線で示されている。

SuperKEKB 運転状況のモニター記録から HER、LER ともビーム OFF の時間が 10 分以上にわたる時間帯を見出し、その間の平均値をもって該当日を暗電流値とした。この手法により、暗

電流値のリストを表 3.1 に示す。図 3.4 は横軸を 2 月 24 日を起点として経過した日数とし、バレル前方部の暗電流値を縦軸にして示す。そして、約 4 か月にわたる実験期間中に、バレル・後方エンドキャップそれぞれで得られた暗電流値の増加量を表 3.2 に示す。この結果より、約 10 nA/cry の暗電流の増加が見られる。これは約  $10^{10}$  n/cm<sup>2</sup> の中性子積分フラックスを被ばくしたと考えられる。

表 3.1: 見積もりに用いた暗電流値の日付と時刻

2月24日	9:00 ~ 15:00	5月6日	11:00 ~ 13:00
3月1日	20:00 ~ 22:00	5月9日	8:30 ~ 9:30
3月2日	17:00 ~ 21:00	5月10日	15:00 ~ 17:00
3月10日	12:00 ~ 17:00	5月12日	10:00 ~ 17:00
3月11日	10:30 ~ 11:00	5月14日	1:00 ~ 1:30
3月13日	21:00 ~ 21:20	5月16日	18:00 ~ 21:00
3月15日	14:00 ~ 14:30	5月17日	10:00 ~ 11:00
3月20日	19:00 ~ 24:00	5月21日	14:00 ~ 15:00
3月23日	9:00 ~ 20:00	5月23日	9:00 ~ 10:00
3月24日	5:00 ~ 18:00	5月26日	9:00 ~ 18:00
3月25日	13:30 ~ 14:00	5月28日	4:00 ~ 14:00
3月28日	17:00 ~ 21:00	6月2日	20:30 ~ 22:00
3月29日	4:00 ~ 10:00	6月6日	16:30 ~ 17:30
3月31日	22:00 ~ 22:20	6月7日	10:00 ~ 16:00
4月7日	9:00 ~ 18:00	6月8日	0:00 ~ 24:00
4月12日	4:00 ~ 4:10	6月9日	0:00 ~ 18:30
4月13日	10:30 ~ 11:00	6月11日	13:50 ~ 14:30
4月14日	19:00 ~ 20:30	6月16日	13:40 ~ 14:30
4月19日	1:30 ~ 3:00	6月18日	12:00 ~ 14:00
4月21日	9:00 ~ 17:00	6月22日	1:30 ~ 1:50
4月22日	14:00 ~ 18:00	6月23日	9:00 ~ 18:00
4月25日	22:00 ~ 23:00	6月25日	4:30 ~ 5:30
4月26日	11:00 ~ 14:00	6月29日	20:00 ~ 20:30
5月1日	10:30 ~ 10:40	7月5日	9:00 ~ 24:00

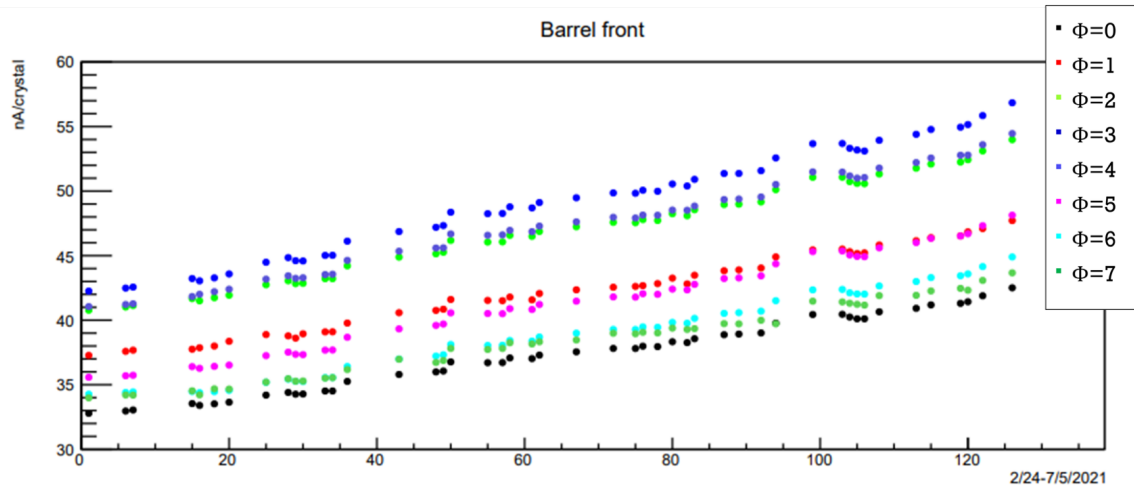


図 3.4: Barrel front の 2021 年 2 月 24 日～6 月 30 日までの暗電流値 (nA/cry) の推移。横軸は 2 月 24 日を起点とした日数。

表 3.2: ビームバックグラウンド測定に使用した暗電流値の増加量

[nA/crystal]	Barrel front	Barrel back	Bwd EC out	Bwd EC inner
$\phi = 0$	8.9	8.0	8.5	25.2
$\phi = 1$	9.5	8.2	9.1	25.8
$\phi = 2$	12.1	9.9	8.1	20.5
$\phi = 3$	13.4	10.0	6.9	17.6
$\phi = 4$	12.4	8.6	5.8	14.8
$\phi = 5$	11.6	8.5	5.7	15.1
$\phi = 6$	9.7	7.8	6.4	18.2
$\phi = 7$	8.9	7.8	7.5	22.3

### 3.3 暗電流値の取り扱い

先行研究 [2] で採用されていた既存の手法では、図 3.5 に示すように、ある運転時間に対して最新の暗電流値を設定する定数として取り扱っていた。既述したように暗電流値は時間の経過とともに増加しているため、既存の方法ではビームバックグラウンドによる放射線被ばく量を過大評価することになる。

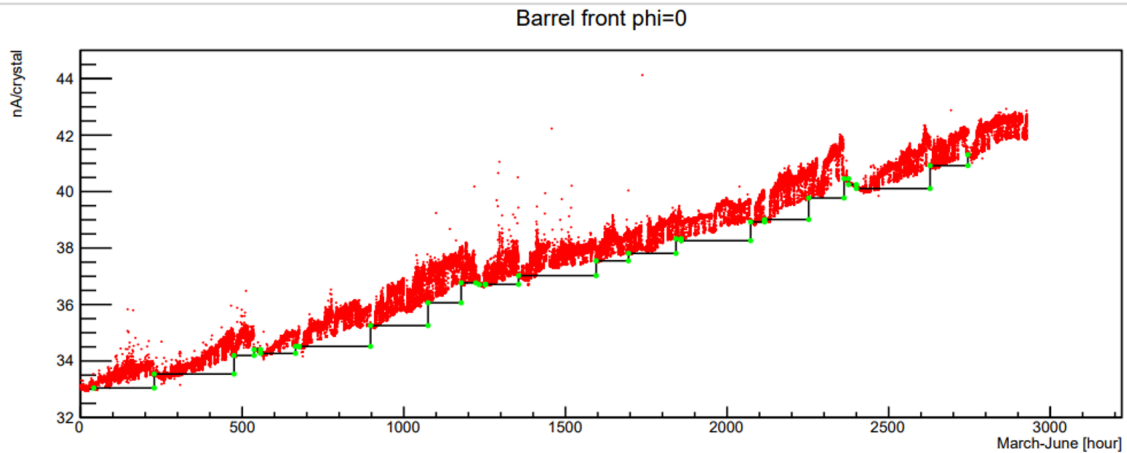


図 3.5: バレル前方  $\phi=0$  のセグメントにおける PIN-PD 電流値 (nA/cry) の推移。横軸は 3 月 1 日午前 0 時を起点とし、単位は時間。階段状の実線は、運転時間に対して最新の暗電流値を該当する定数として取り扱った場合の暗電流値の推移

そこで、既述したように、HER と LER がともにビーム OFF の時間帯が 10 分以上あれば暗電流値を算出しそれらを時間的に近接したデータの間を直線で補完した。そのときの暗電流値のふるまいを図 3.6 に示す。最終的に暗電流値は 2 月 24 日から 7 月 5 日まで計 48 点取った。また、前方エンドキャップに関しては、上記の見積もりの仕方ではうまくいっていないことがわかったため、今回は見積もりの対象外とした。

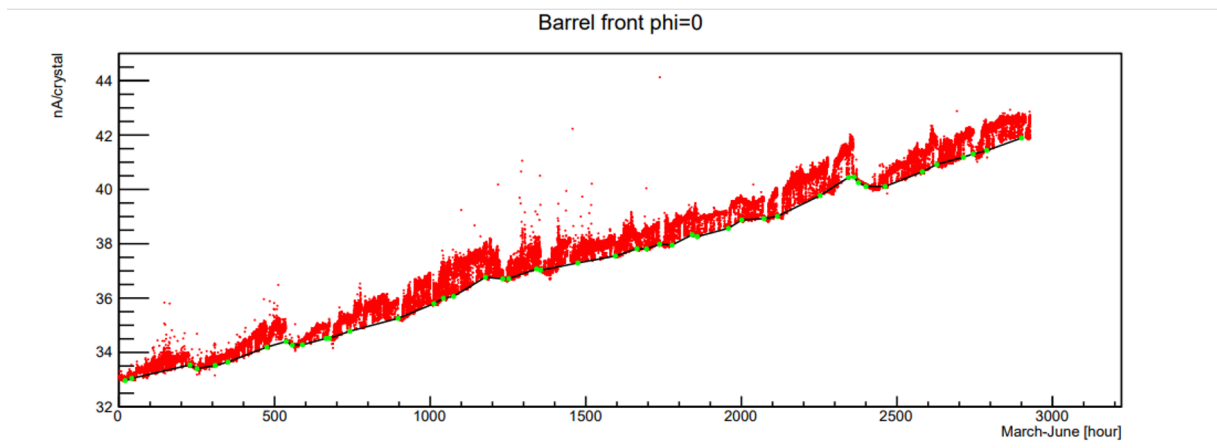


図 3.6: バレル前方  $\phi=0$  のセグメントにおける PIN-PD 電流値 (nA/cry) の推移。横軸は 3 月 1 日午前 0 時を起点とし、単位は時間

以上のことから、2021年2月24日～6月30日までに電磁カロリメータ内でうけたビームバックグラウンドを表3.3に示す。また、この期間中の放射線量の積算値の推移を図3.7～図3.10に示す。

表 3.3: CsI(Tl) 結晶の被ばく量

[Gy]	Barrel front	Barrel back	Bwd EC out	Bwd EC inner
$\phi = 0$	0.21	0.35	0.41	0.82
$\phi = 1$	0.21	0.33	0.42	0.83
$\phi = 2$	0.22	0.36	0.51	0.92
$\phi = 3$	0.25	0.39	0.54	1.02
$\phi = 4$	0.25	0.39	0.55	0.96
$\phi = 5$	0.24	0.39	0.54	0.99
$\phi = 6$	0.21	0.36	0.50	0.88
$\phi = 7$	0.22	0.33	0.39	0.73

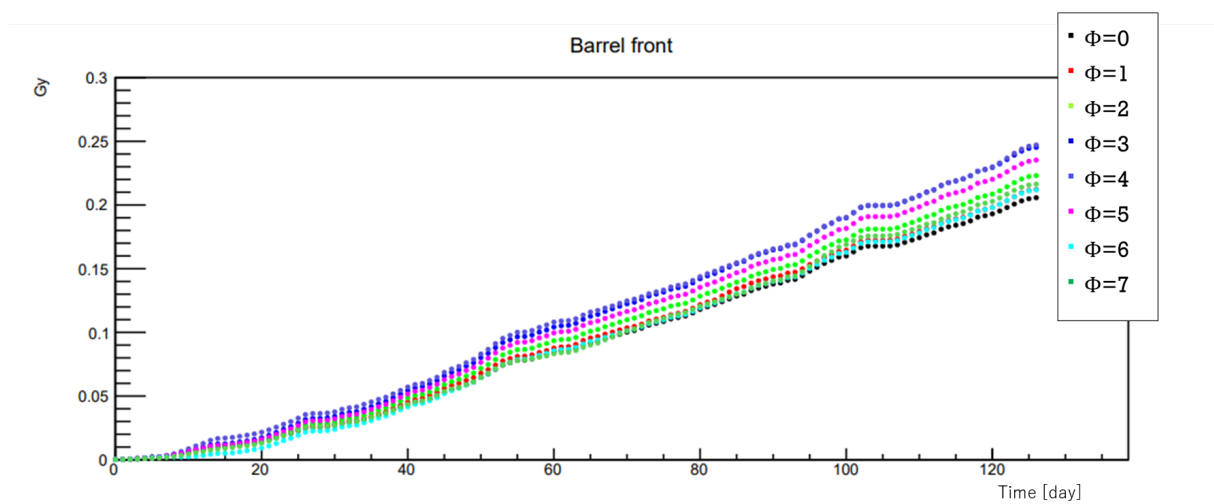


図 3.7: バレル前方における放射線被ばく積算値

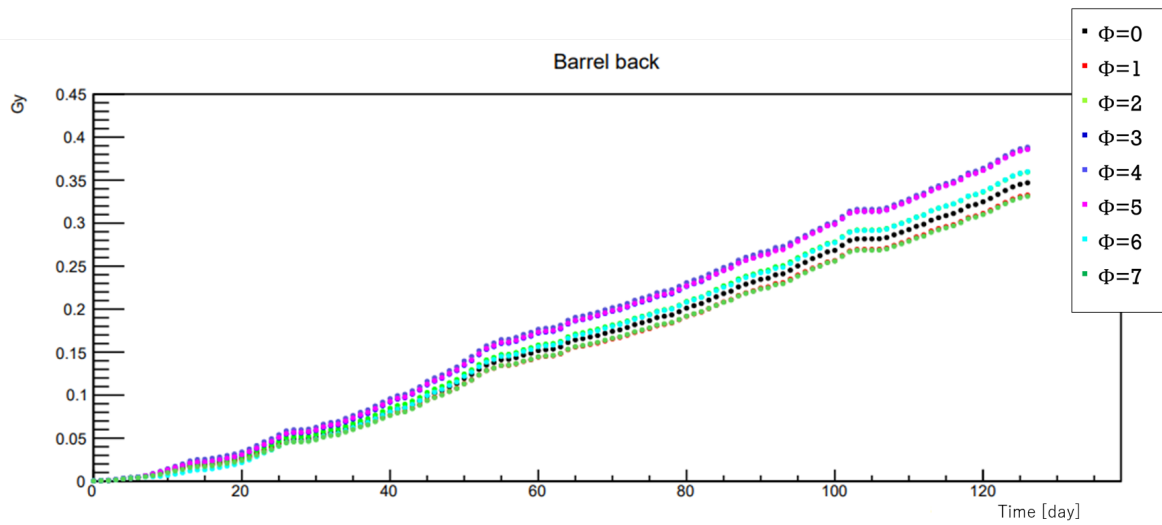


図 3.8: バレル後方における放射線被ばく積算値

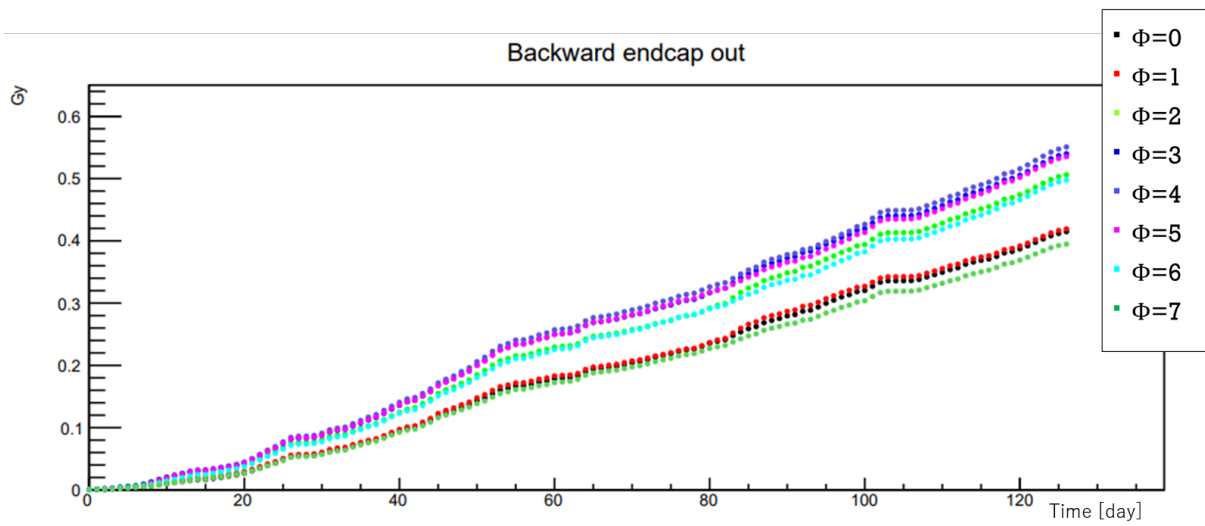


図 3.9: 後方エンドキャップ外側における放射線被ばく積算値



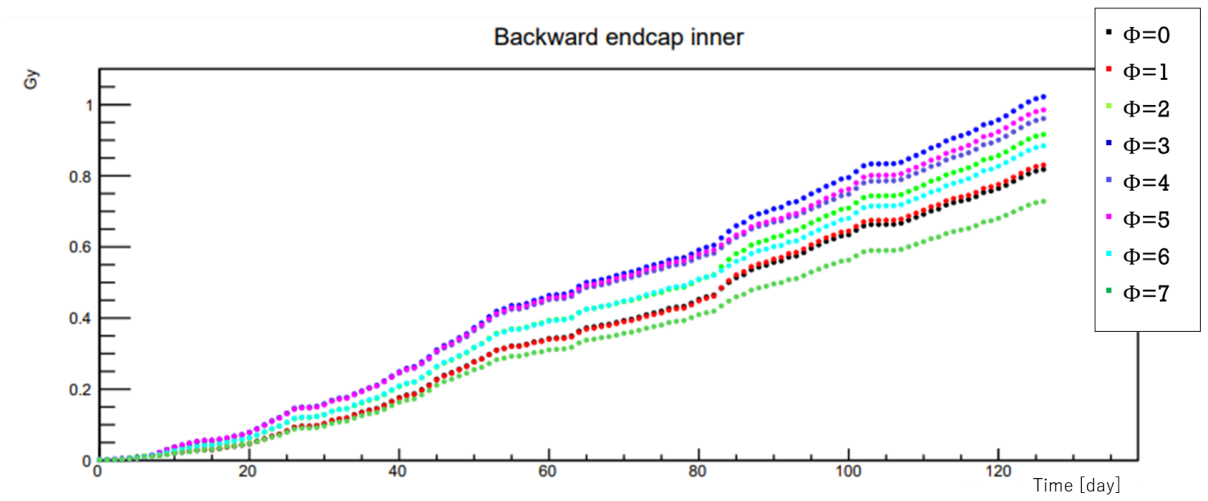


図 3.10: 後方エンドキャップ内側における放射線被ばく積算値

### 3.4 CsI(Tl) 結晶被ばく量の算出

運転中の PIN-PD 電流値と既述した取り扱いで求めた暗電流の差を  $I_{\text{rad}}$  として、これを時間で積分することによりビームバックグラウンドによる CsI(Tl) 結晶の放射線被ばく量を求める。これに用いた結晶一本当たりの質量、CsI(Tl) 結晶に入射した粒子のエネルギー損失 1 MeV あたり PIN-PD で発生する電子正孔対の数など、関連する定数を表 3.4 に示す。これにより 1 秒あたりに結晶が浴びた放射線被ばく量は、

$$\frac{dD}{dt} = 4.0 \times 10^{-8} I_{\text{rad}}$$

と表すことができる。さらに、この  $dD/dt$  を時間で積分するとある期間に CsI(Tl) 結晶が受けた放射線被ばく量の積算が求まり、

$$D = \int \left( \frac{dD}{dt} \right) dt = \Sigma 4.0 \times 10^{-8} I_{\text{rad}} \Delta t$$

と書ける。ここで  $\Delta t$  は電流値モニターの測定周期 5 sec を指し、 $\Sigma$  は測定を行った期間中の和を表す。

表 3.4: 放射線算出に使用する物理パラメータ

1 J	$6.24 \times 10^{18}$ eV
結晶一本当たりの重さ	5 kg
エネルギー 1 MeV あたりの電子正孔対の数	5000
電気素量	$1.6 \times 10^{-19}$ C

### 3.5 Phase-2 から Phase-3 におけるルミノシティとの関係性

Phase-2(2018年4月-7月)運転における放射線被ばく量 [2] はバレル部前方で約 0.2 Gy、後方で約 0.3 Gy であり、本研究で調べた Phase-3(2021年3月-7月)と概ね同じであった。それぞれの運転期間中における積分ルミノシティは、 $0.5 \text{ fb}^{-1}$  [3] と  $140 \text{ fb}^{-1}$  [図 3.11] であり、約 280 倍に増加している。2021 年の運転では 2018 年に比べ、ルミノシティあたりのビームバックグラウンド量は 2 桁の改善を示している。運転期間の積算値の増加により、ビームバックグラウンドが顕著に減少するのは、SuperKEKB 加速器へのアップグレードのため、LER の真空チェンバーが全て新製されたことと関連している。新製した真空チェンバーの内壁は設置前に洗浄しているが、大気に触れていたため多数のガス分子が付着している。運転開始直後はビームが発する放射光により、内壁に付着しているガス分子がたたき出されて真空の劣化をもたらすため、ビームガス散乱が多い。こうして真空チェンバー内壁から放出されたガス分子は、ビーム通路を高真空に保つ NEG ポンプにより取り除かれる。これを繰り返すうち、内壁が清浄になってガス分子の放出が減少し真空が改善することがビームバックグラウンドの低下となって現れる。

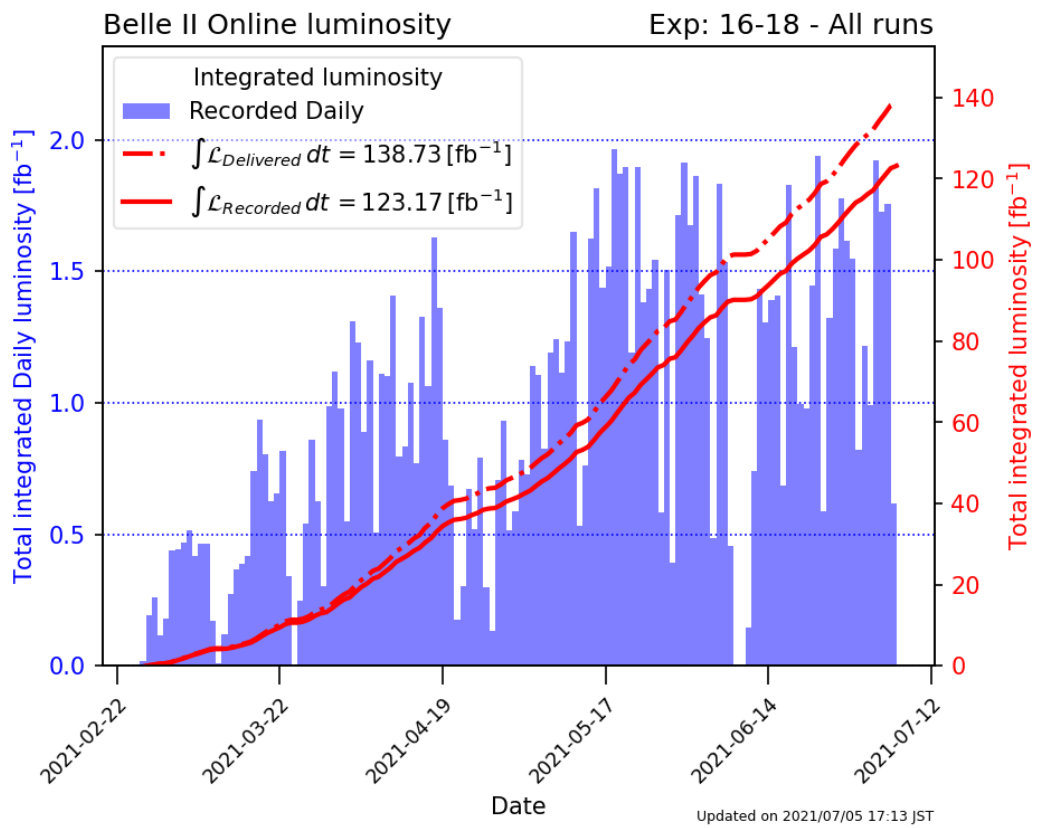


図 3.11: Phase-3 におけるルミノシティの増加分布

## 第4章 まとめ

2021年の3月から7月に行われた SuperKEKB 加速器の Phase-3 運転の期間中にモニターした結果について、SuperKEKB 運転状況モニターを記録して、ビーム OFF の時間が10分以上の時間帯を見出しその間の平均をとって暗電流値を定めた。

暗電流値が時間とともに増加していることを確かめた。そして時間的に近接したデータの間を直線で補完した暗電流値と PIN-PD 電流値との増加量を求め、時間で積分し CsI(Tl) 結晶の放射線被ばく量を求めた結果、バレル部の前方で 0.20 Gy~0.25 Gy、後方で 0.33 Gy~0.39 Gy、後方エンドキャップ部の外側で 0.40 Gy~0.55 Gy、内側で 0.73 Gy~1.02 Gy を得た。また、前方エンドキャップに関しては、今回おこなった見積もりではうまくいかなかったことが分かった。

Phase-2 と Phase-3 運転における放射線被ばく量を比較した結果、運転期間中の積分ルミノシティは 280 倍に増加しているにも関わらず、概ね同じ結果であったことがわかった。これは、SuperKEKB 加速器へのアップグレード時に LER の真空チェンバーが新製されたことと関連している。

## 謝辞

本研究にあたり、終始ご指導いただいた指導教官の宮林謙吉先生に心より感謝申し上げます。また、ミーティングの時などに意見をいただいた林井久樹先生、下村真弥先生、蜂谷崇先生にも感謝申し上げます。短い期間で成果をまとめることができたのは本研究に携わってくださった方々のおかげです。感謝の意を持って謝辞にかえさせていただきます。

## 参考文献

- [1] 新井智穂・奈良女子大学大学院 修士論文 (2015)
- [2] 加納美佳・奈良女子大学大学院 修士論文 (2019)
- [3] Measurement of the integrated luminosity of the Phase 2 data of the Belle II experiment (2020)
- [4] D.V.Matvienko,E.V.Sedov,B.A.Shwartz and A.S.Kuzmin, "Radiation Hard-ness Study of CsI(Tl) crystals for Belle II Calorimeter" (2017) DOI: <http://dx.doi.org/10.23727/CERN-Proceedings-2017-001.55>
- [5] 中村勇、Radiation Hardness of ECL Components (Summary)
- [6] 原田健太郎、小林幸則、"パルス 4 極電磁石を用いた新しい入射システム" (2005) <https://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F2%2Fp305.pdf>
- [7] 横山紗依・奈良女子大学大学院 修士論文 (2016)