

2018年度 修士学位論文

SuperKEKB 加速器第二期試験運転における  
Belle II 実験電磁カロリメータでの放射線量測定

奈良女子大学大学院 人間文化研究科  
物理科学専攻 高エネルギー物理学研究室

学籍番号 17810083

加納美佳

平成31年3月18日

## 概要

Belle II 実験は、SuperKEKB 加速器で加速された電子と陽電子を衝突させ、発生した粒子の情報を Belle II 測定器で収集し、高統計データによる稀崩壊モードの研究により標準理論を超える新物理を発見することを目的としている。この Belle II 実験の先代にあたる Belle 実験では、1999 年から 2010 年にわたってデータ収集を行い、その間 2003 年 5 月に設計ルミノシティ  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を越え、2010 年 6 月 30 日の運転終了までに積分ルミノシティ  $1014 \text{ fb}^{-1}$  のデータを蓄積した。その結果、B 中間子系での CP 対称性の破れを確認し、「小林・益川理論」がクォークの世代混合と CP 対称性の破れに関する記述として正しいことを証明するなど、多くの成果を上げた。Belle II 実験では前実験である Belle 実験の 40 倍のルミノシティを目指している。その時に問題となるのがビームバックグラウンドの増加である。バックグラウンドの増加は、粒子の検出効率の低下、エネルギーや運動量の分解能劣化をもたらし、甚だしい場合は測定器の故障の原因になる。そのため、常に Belle II 測定器にくるビームバックグラウンドの量を把握することが必要である。

Belle II 測定器のサブシステムの 1 つである電磁カロリメータは CsI(Tl) 結晶+PIN-PD を組み合わせたカウンターを用いており、粒子のエネルギーを測定している。電磁カロリメータは、電源の ON/OFF に関わらずビームバックグラウンドによる被ばくを受け続けて、これが CsI(Tl) 結晶の発光量減少などを引き起こす。また、電磁カロリメータへ入射するビームバックグラウンドの増加は物理解析にも影響する。例えば、 $B \rightarrow \tau\nu$  のようなニュートリノを含む崩壊モードの測定である。この解析は B 中間子が対で出来ることを利用して片方の B 中間子の崩壊について完全再構成を行い、もう一方の B 中間子が  $B \rightarrow \tau\nu$  に崩壊したものを探すが、その時に完全再構成に使用した粒子と  $\tau$  の崩壊から出てきた粒子を除くと、この崩壊モードの場合残った粒子はニュートリノのみになるため、電磁カロリメータに残るエネルギーの分布は 0 に集中し、 $B \rightarrow \tau\nu$  とその他のバックグラウンドとなる崩壊モードとを分離するのにとても有力な情報となる。電磁カロリメータに入射するビームバックグラウンドが増加すると 0 に集中する分布が広がってしまい、効率よく信号を抽出することが難しくなる。

これらの理由から電磁カロリメータにおいてビームバックグラウンドの量を把握できるシステムが必要である。そのため電磁カロリメータの PIN-PD 電流値モニターシステムの構築と運用を行った。PIN-PD に流れる電流のビーム ON/OFF による差はビームバックグラウンドの量に比例することを利用して、CsI(Tl) 結晶が浴びた放射線量を評価することができるためである。本論文では、電流値モニターについての概要と、2018 年の 3 月から 7 月に行われた SuperKEKB 加速器の第 2 期試験運転の期間中にモニターしたデータについて、加速器の運転状況の変化との関係を示すとともに、ビームバックグラウンドにより電磁カロリメータの CsI(Tl) 結晶が受けた放射線量を評価した結果とそれに対する考察を行ったものについて述べる。そして加速器のビーム粒子入射によるバックグラウンドを測定するモニターについての解析方法の検討を行った内容についても述べる。

# 目次

<b>第1章 Belle II 実験</b>	<b>7</b>
1.1 SuperKEKB 加速器	8
1.2 Belle II 測定器	9
1.2.1 崩壊点検出器 (VXD:VerteX Detector)	10
1.2.2 中央飛跡検出器 (CDC:Central Drift Chamber)	14
1.2.3 粒子識別検出器	15
1.2.4 電磁カロリメータ (ECL:Electromagnetic CaLorimeter)	17
1.2.5 $\mu$ 粒子・ $K_L^0$ 粒子検出器 (KLM: $K_L^0$ and Muon Detector)	17
1.3 ビームバックグラウンド	18
1.3.1 タウジェット散乱	18
1.3.2 ビームガス散乱	20
1.3.3 ビーム入射直後のビームロス	20
1.3.4 シンクロトロン散乱	21
1.3.5 Radiative Bhabha 散乱	22
1.3.6 二光子過程	23
<b>第2章 電磁カロリメータ</b>	<b>24</b>
2.1 電磁カロリメータの概要	24
2.1.1 シンチレータ: CsI(Tl)	25
2.1.2 光検出器:PIN-PD	25
2.2 Belle 実験の電磁カロリメータと Belle II 実験へのアップグレード	26
<b>第3章 PIN-PD 電流値モニター</b>	<b>31</b>
3.1 電流値モニターシステムの概要	31
3.2 電流値モニターの原理	34
3.3 電流値モニターシステムのセットアップ	34
3.3.1 生データ	36
3.3.2 電流測定点の配置	37
<b>第4章 Phase-2 運転期間における CsI(Tl) 結晶のあびた放射線量の測定</b>	<b>40</b>
4.1 モニターした電流値の推移	40
4.2 放射線量の算出過程	41
4.2.1 暗電流値の定義	44
4.2.2 バレルおよび後方エンドキャップの放射線被ばく量	46
4.3 前方エンドキャップにおける放射線量の算出	47

4.3.1	暗電流値と温度の相関 . . . . .	47
4.3.2	暗電流値の導出 . . . . .	52
4.4	最終結果 . . . . .	53
<b>第5章</b>	<b>LYSO ビームロスモニター</b>	<b>56</b>
5.1	セットアップ . . . . .	56
5.2	解析方法の検討 . . . . .	59
5.3	結果 . . . . .	61
<b>第6章</b>	<b>まとめ</b>	<b>63</b>
付録A	PIN-PD 電流値モニター用プログラム	65
付録A	Phase-2 期間のゼロ点	68

# 目 次

1.1	SuperKEKB 加速器概観	8
1.2	ナノビーム方式の概念図。2 $\phi$ =83 mrad と大きな交差角をとってバンチ同士の交差する領域を小さくし、これに合わせて $\beta_y^*$ を絞って高いルミノシティを得る。	9
1.3	Belle II 測定器概観	11
1.4	Belle II 測定器断面図	12
1.5	DEPFET 概念図	13
1.6	PXD 概観	13
1.7	DSSD 概念図	13
1.8	SVD 概観	13
1.9	CDC のワイヤー配置	15
1.10	TOP カウンター 1 モジュールの概観	16
1.11	TOP 測定原理	16
1.12	ARICH 測定原理	17
1.13	ARICH 概観	17
1.14	ECL のカウンター概要	18
1.15	エンドキャップ部 KLM 検出器モジュール(上)と WLS ファイバー埋め込みプラスチックシンチレータの構造(下)	19
1.16	タウチェック散乱の概念図 [3]	20
1.17	ビームガス散乱の概念図 [3]	21
1.18	入射時にバンチに対して行う操作の概念図 [3]	21
1.19	KEKB(上)および SuperKEKB(下)における QCS の配置図	22
2.1	ECL カウンターの写真	25
2.2	ECL の断面図 ビーム軸方向に約 3.8 m 高さ 3.2 m であり、 $\theta$ 方向は前方エンドキャップで 12.01~31.36°, バレルで 32.20~128.72°, 後方エンドキャップ 131.5~157.08° を覆っている	27
2.3	波形サンプリングの概念図	29
2.4	Belle II における ECL 用読み出しエレクトロニクスのブロック図	29
2.5	VME クレートの配置図	30
3.1	Belle 実験 10 年間での CsI(Tl) 結晶の浴びた放射線被ばく量 [2] 横軸は時間 [day]、縦軸は放射線被ばく量の積算 [rad] を表している。	32

3.2	Belle 実験 10 年間で CsI(Tl) 結晶の発光量 [2] 横軸は $\theta_{ID}$ (図を参照)、縦軸は Belle 実験開始当時の発光量を 1 としたときの、Belle 実験終了後の発光量を示している。	32
3.3	ECL の $\theta_{ID}$ の定義。 $\theta$ の小さいカウンターから順に 0 68 の番号を割り当てている	33
3.4	CsI(Tl)+PIN-PD カウンターの放射線耐性。横軸は放射線被ばく量の積算 [rad]、縦軸は発光減少量を示している。 [10]	33
3.5	PIN-PD 電流値モニターの概念図	34
3.6	PIN-PD 電流値モニターのブロックダイアグラム	35
3.7	計測アンプモジュール	35
3.8	測定器周辺の VME ステーションにおける設置機器 (左)、エレキハット内の設置機器 (右)	36
3.9	PIN-PD 電流値モニターの分割	38
3.10	Phase-2,Phase-3 における CsI(Tl) 結晶があびる放射線量の予測 [11]	38
3.11	電流値モニターのチャンネル番号とカウンター群の位置の対応。すべて前方側から見た図で、バレルは奥行きを考慮し、後方の半分を外側に配置して描いた。	38
4.1	Phase-2 期間中に測定された Oct1 の 6 チャンネルにおける電流値モニター結果。横軸は時間 [day]、縦軸は結晶 1 本あたりの電流値 [nA/crystal] である。FwdEC は前方エンドキャップ、BwdEC は後方エンドキャップを表す。	41
4.2	2018 年 6 月 17 日の午前 0 時から 24 時間の PIN-PD 電流値モニター出力結果と加速器の運転状況の比較。横軸は時間 [hour]、上の赤枠で囲まれた範囲はビーム電流値 [A]、下の青枠で囲まれた範囲は PIN-PD 電流値モニターの出力結果 [nA/crystal] である。	42
4.3	2018 年 4 月 20 日の 24 時間にわたるバレル前方における PIN-PD 電流値モニター結果。横軸は時間 [hour]、縦軸は PIN-PD 電流値モニターの出力結果 [nA/crystal] である。14 時 39 分は LER の最終収束超伝導電磁石 (QCS) がクエンチしてビームが失われた事象の発生時刻である。	43
4.4	暗電流値 ( $I_{\text{dark}}$ )、ビームが ON 時の電流測定値 ( $I_{\text{meas}}$ )、放射線入射による電流増加分 ( $I_{\text{rad}}$ ) の定義	44
4.5	Phase-2 期間中のビーム OFF の時の暗電流値 横軸は時間 [day]、縦軸は電流値 [nA/crystal]。	45
4.6	4 月 6 日から 7 月 17 日までの期間におけるバレル後方 (左) とバレル前方 (右) の CsI(Tl) 結晶が浴びた放射線量積算値の推移。色は $\phi$ 方向の位置の違いを表している。	47
4.7	4 月 6 日から 7 月 17 日までの期間における後方エンドキャップ外側 (左) と後方エンドキャップ内側 (右) の CsI(Tl) 結晶が浴びた放射線量積算値の推移。色は $\phi$ 方向の位置の違いを表している。	48
4.8	4 月 6 日から 7 月 17 日までの期間における前方エンドキャップ内側での PIN-PD 電流値モニターの結果 [nA/crystal]	49

4.9	4月6日から7月17日までの期間における前方エンドキャップ内側での温度の時間変化 [°C] . . . . .	49
4.10	温度と電流値の相関。電流値モニターの Oct1 内側のチャンネルに対して6個の温度モニターの結果について相関をとっている。横軸は温度 [°C]、縦軸は電流 [nA/crystal] . . . . .	50
4.11	温度と電流値の相関。電流値モニターの Oct1 外側のチャンネルに対して6個の温度モニターの結果について相関をとっている。横軸は温度 [°C]、縦軸は電流 [nA/crystal] . . . . .	50
4.12	ECL の CsI(Tl) カウンター内に設置されているサーミスターの位置。サーミスタは熱伝導性のある接着剤でプリアンプケースの外側に接着されている。 . . . . .	51
4.13	温度と電流値の相関。電流値モニターの Oct1 の内側 (上方) 外側 (下方) である。横軸は温度 [°C]、縦軸は電流 [nA/crystal] . . . . .	51
4.14	4月6日から7月17日までの期間におけるビーム OFF 時の PIN-PD 電流値を温度モニター値の一次関数として補正して得た暗電流値 (赤線) と Phase-2 期間全体にわたる PIN-PD 電流モニター値 (黒線) の比較。横軸は時間 [days]、縦軸は電流 [nA/crystal] である。これは Octant5 におけるものであるが、他のオクタントも同様の傾向を示す。初期の 10 日間ほどの期間は ECL の ON/OFF による急激な温度変化に起因する。 . . . . .	53
4.15	バレル (左) と前方エンドキャップ Octant5 (右) における $\Delta I$ [nA/crystal] の分布。前方エンドキャップの内側は黒、外側は赤のヒストグラムで描いてある。 . . . . .	54
4.16	4月16日から7月17日までの期間における前方エンドキャップ内側 (左) と後方エンドキャップ外側 (右) の CsI(Tl) 結晶が浴びた放射線量積算値の推移。色は $\phi$ 方向の位置の違いを表している。 . . . . .	54
4.17	Phase-2 期間の 4/16~7/17 における放射線被ばく量の $\theta$ 分布。横軸は $\theta_{ID}$ 、縦軸は放射線被ばく量の積算 [Gy] . . . . .	55
5.1	LYSO ビームロスモニターの配置図 . . . . .	57
5.2	データ収集系のブロック図 . . . . .	57
5.3	LYSO ビームロスモニターからの信号のオシロスコープによる出力結果 ch1,ch2 (イエロー、シアン) が後方側であるため LER 由来のバックグラウンドであり、ch3,ch4 (マゼンダ、グリーン) が前方であるため HER 由来のバックグラウンドである。 . . . . .	58
5.4	ch2 の生データをプロットした結果 . . . . .	60
5.5	$time = 0.104 \sim 0.116$ ms の範囲で ch2 の生データをプロットした結果 . . . . .	60
5.6	信号電荷の求め方の概念図 . . . . .	60
5.7	1000 イベント分の電圧値の積算のヒストグラム . . . . .	61
5.8	ch2 について、10 $\mu$ s 幅の時間ビンについて、ビンごとのパルス生成数 (左) とエネルギー損失 (右) の分布。50 事象分の平均をとっている。 . . . . .	61
5.9	0 ms < $t$ < 0.4 ms の範囲を拡大。時間ビンごとのパルス生成数 (左) とエネルギー損失 (右) の分布。 . . . . .	62

# 表 目 次

1.1	SuperKEKB 加速器の主なパラメータ [1]	10
1.2	PXD の仕様	12
1.3	SVD の仕様	14
2.1	主な無機シンチレーターの特性	26
3.1	1 測定点あたりの結晶の本数	39
4.1	放射線量算出に使用する物理量	44
4.2	暗電流の見積りに用いたデータ	46
4.3	暗電流の見積りに用いたデータ	52
4.4	Phase-2 期間の 4/16~7/17 における CsI(Tl) 結晶が浴びた放射線量の積算 [Gy]	55
5.1	PMT の仕様 (R-7761-70)	56
A.1	暗電流値 Octant1	68
A.2	暗電流値 Octant2	69
A.3	暗電流値 Octant3	69
A.4	暗電流値 Octant4	70
A.5	暗電流値 Octant5	70
A.6	暗電流値 Octant6	71
A.7	暗電流値 Octant7	71
A.8	暗電流値 Octant8	72

# 第1章 Belle II実験

Belle II 実験は、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）に建設された、電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 SuperKEKB が生み出す大量の中間子・反 B 中間子対の崩壊事象を検出・記録し、CP 対称性の破れを精密に測定するとともに、標準理論を越えた新物理に感度が高い稀崩壊事象を探索することを目的とする。この Belle II 実験の先代にあたる Belle 実験では、1999 年から 2010 年にわたってデータ収集を行い、その間 2003 年 5 月に設計ルミノシティ  $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を越え、2010 年 6 月 30 日の運転終了までに積分ルミノシティ  $1014 \text{ fb}^{-1}$  のデータを蓄積した。その結果、B 中間子系での CP 対称性の破れを確認し、「小林・益川理論」がクォークの世代混合と CP 対称性の破れに関する記述として正しいことを証明するなど、多くの成果を上げた。Belle 実験が測定した結果の中には、標準模型を超える新物理に感度があるものがいくつもあり、その中で代表的なものは「ペンギン崩壊」と呼ばれる弱い相互作用の 1 ループの振幅が支配的な稀崩壊モードにおける CP 対称性の破れの精密測定である。しかし、統計量の制限から、CP 非保存の測定精度は未だ  $O(0.1)$  にとどまっており、新物理の効果を探るために十分な  $O(0.01)$  の感度を得るためには数十  $\text{ab}^{-1}$  のデータ蓄積が必要である。これらの測定を高統計データにより精密に行うのが Belle II 実験である。加速器を KEKB から SuperKEKB、測定器を Belle から Belle II にアップグレードする工事が 2010 年から開始された。2016 年 2 月 8 日から 6 月 28 日に、SuperKEKB 加速器単体で電子ビームと陽電子ビームを周回させる、第一期試運転（Phase-1 コミッショニング）が行われた。陽電子ビームにおける電子雲対策に導入されたアンテナチャンバーの内側の焼き出し、ビームの位置や運動量のずれを低減するエミッタンス調整、ビームバックグラウンド測定が行われた。次いで 2018 年 3 月 19 日から 7 月 17 日までの期間、第二期試験運転（Phase-2 コミッショニング）が行われた。Phase-2 運転では、崩壊点検出器 (VXD) 以外の検出器を装備した Belle II 測定器を衝突点にインストールした状態で、電子・陽電子ビームの衝突を開始した。この Phase-2 運転では、新たに導入されたビーム衝突方式であるナノビーム方式の検証、Belle II 測定器に対するビームバックグラウンドの理解および低減、ビーム入射システムの確立が行われた。そして 4/26 には初衝突 (first collision) を観測した。first collision 以降、VXD 以外の測定器による物理データの取得が行われた。また、本格的な物理データの取得のために 2019 年 3 月から VXD も含めてフルインストールした Belle II 測定器を用いる Phase-3 運転を開始する予定である。

本章では、SuperKEKB 加速器と Belle II 検出器について概観する。

## 1.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器は、7GeV の電子と 4GeV の陽電子を衝突させ B 中間子・反 B 中間子対を生成する非対称エネルギー衝突型円形加速器である。図 1.1 に SuperKEKB 加速器の外観を示す。SuperKEKB 加速器は、周長 3 km の電子用と陽電子用の二つのリング型加速器と、リングに電子、陽電子を供給する入射器とも呼ばれる直線型加速器から成る。電子は入射器最上流の RF 電子銃で作られた後、直線型加速器で加速され、HER(High Energy Ring)に入射された後、リング内を地図上で見て時計回りの向きに周回する。一方、陽電子は 3.5GeV まで加速された電子を金属標的に当てて作り出し、ダンピングリングでビームのエミッタンスを下げた後、LER(Low Energy Ring)に電子とは逆向きに入射されて、このリング内を周回する。これら二つのリングは加速器トンネル内に並んで置かれており、電子ビームと陽電子ビームはリングが交差する点で衝突する。この衝突点を囲むように Belle II 測定器を設置する。

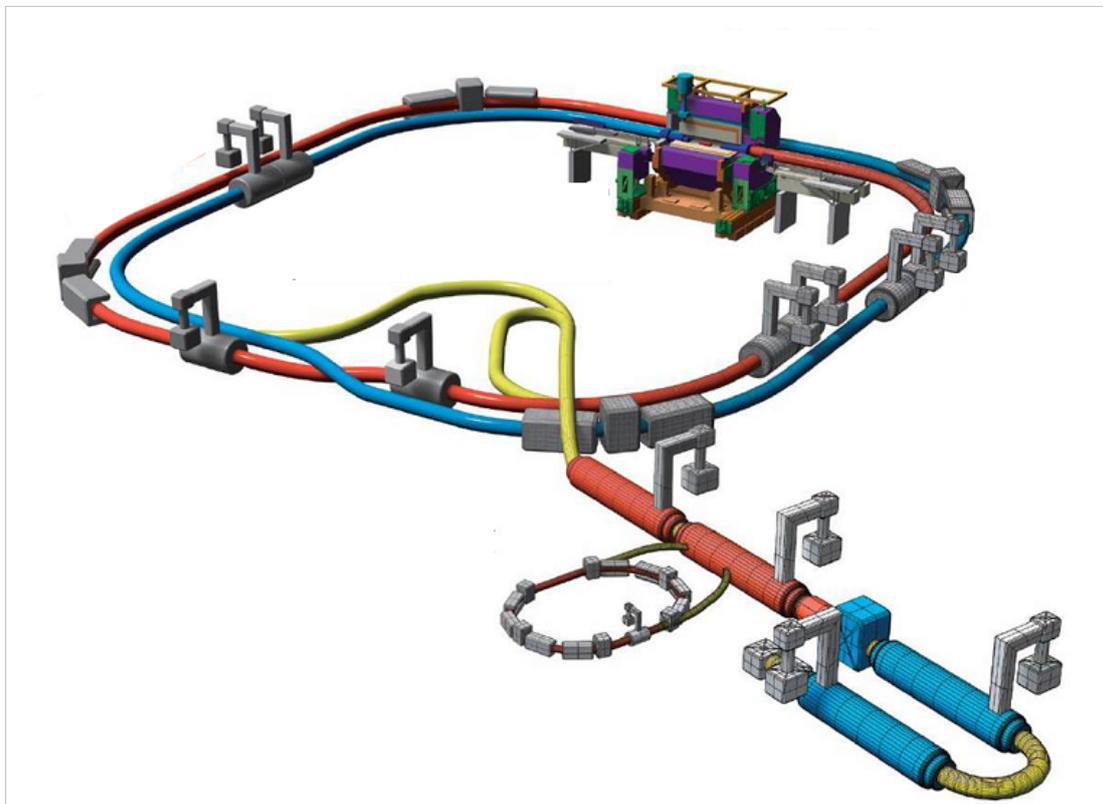


図 1.1: SuperKEKB 加速器概観

加速器の性能はルミノシティという量で評価される。ルミノシティとは衝突型加速器の物理事象発生能力を表す指標であり、ルミノシティ  $L$  に対し、反応断面積  $\sigma$  をもつ過程の発生頻度を  $R$  で表すと、 $R = L\sigma$  となる。つまり、反応の発生頻度はルミノシティに比例するため、稀な物理現象を探索するには、高いルミノシティが必要である。SuperKEKB 加速器は KEKB 加速器でのルミノシティの約 40 倍である  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を達成すべく設計されている。また、このルミノシティの大きさはビームの電流値やサイズなど、加

速器のパラメータから決まり、以下の式が成り立つ。

$$L = \frac{\gamma^\pm}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \frac{I_\pm \xi_{y\pm}}{\beta_y^*} \left(\frac{R_L}{R_{\xi_y^\pm}}\right) \quad (1.1)$$

$\gamma^\pm$  は加速器のビームエネルギーで決まるローレンツファクター、 $e$  は電子の電荷量、 $r_e$  は古典電子半径、 $\sigma_x^*, \sigma_y^*$  は衝突点での  $x$  方向と  $y$  方向のビームサイズ、 $I_\pm$  はビーム電流の値、 $\xi_{y\pm}$  は垂直方向のビーム・ビーム・パラメータと呼ばれる、衝突点でビームが互いに及ぼしあう力の大きさを表す。 $\beta_y^*$  は衝突点での垂直ベータ関数であり、ビームサイズを決めるビーム光学における絞り込みの強さを示す量である。 $R_L/R_{\xi_y^\pm}$  は交差角や「砂時計効果」による幾何学的な要因からくる補正係数である。ここで砂時計効果とは、ビームのバンチのサイズがベータ関数値より大きいと、バンチ内で衝突点からはなれたところはビームサイズが広がってしまう効果である。添え字について\*がついているのは衝突点での数値を表しており、 $\pm$  は+が陽電子、-が電子ビームでの数値を表している。

この式から、ルミノシティを上げるにはビーム電流  $I$  を大きくし、衝突点での垂直ベータ関数  $\beta_y^*$  を小さくすれば良いことがわかる。SuperKEKB 加速器では KEKB 加速器と比べて、 $\beta_y^*$  を 20 分の 1 に小さくしてビームサイズを絞り、ビーム電流  $I$  を 2 倍にすることにより、合わせて 40 倍のルミノシティを実現することが基本的な設計思想である。ルミノシティ向上に特に寄与が大きい、 $1/20$  の  $\beta_y^*$  を実現して有効なものにするため、SuperKEKB 加速器では図 1.2 に示すナノビーム方式と呼ばれる新しい衝突方式が採用された。これは 83 mrad と、KEKB 加速器では 22 mrad であったものより 4 倍近く大きな交差角をとることにより、ビーム交差部における実質的なバンチ長  $d$  を短くして、小さな  $\beta_y^*$  にする際に問題となる砂時計効果を避けて高いルミノシティを得るものである。KEKB ではビームサイズが  $\sigma_z^* = 100 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_y^* = 2 \mu\text{m}$  であったが SuperKEKB では最終的に  $\sigma_z^* = 10 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_y^* = 50 \mu\text{m}$  程度にする。SuperKEKB 加速器の設計における主要なパラメータを表 1.1 に

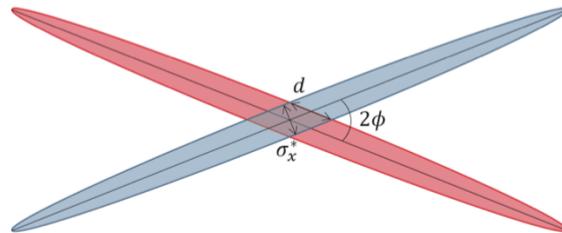


図 1.2: ナノビーム方式の概念図。 $2\phi=83$  mrad と大きな交差角をとってバンチ同士の交差する領域を小さくし、これに合わせて  $\beta_y^*$  を絞って高いルミノシティを得る。

まとめた。

## 1.2 Belle II 測定器

Belle II 測定器とは、SuperKEKB 加速器の衝突点に設置される、高さ、幅、奥行きが約 8m で約 1500 t の総重量の大型汎用粒子測定器システムである。Belle II 測定器はビー

表 1.1: SuperKEKB 加速器の主なパラメータ [1]

	LER	HER	単位
エネルギー	4.0	7.0	GeV
電流値	3.7	2.6	A
$\beta_y^*$	0.27	0.30	mm
バンチ	2500		
ルミノシティ	$8.0 \times 10^{35}$		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
ベータトロンチューン (水平/垂直)	44.53/44.57	45.53/43.57	

ム衝突点から見て全立体角  $4\pi$  の約 90 % を覆っている。電子・陽電子衝突により生成される B 中間子対から崩壊して出てくる粒子の情報を Belle II 測定器で精密に測定することで B 中間子の再構成、すなわち娘粒子の運動量やエネルギーの情報から研究対象とする B 中間子崩壊事象を同定することを行う。Belle II 測定器は増加するイベント頻度 (500Hz から 30 kHz) に対応することに加え、加速器の高輝度化に伴う、高いビームバックグラウンドに耐える必要がある。

Belle II 測定器は、生成した粒子を可能な限り検出、識別するために、別々の役割を持った 7 つの検出器サブシステムから構成される。7 つの検出器の配置を図 1.3、および図 1.4 に示す。以下に各検出器の構造及び機能をまとめる。なお、測定器の座標系としては、設計上のビーム衝突点を座標原点とし、83 mrad の角度で交差する電子ビームと陽電子ビームの二等分線を  $z$  軸、鉛直上向きを  $y$  軸、これらと右手系を構成するように  $x$  軸をとる。 $xy$  平面内の方位角を  $\phi$ 、 $z$  軸からの極角を  $\theta$  とする。

### 1.2.1 崩壊点検出器 (VXD:VerteX Detector)

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る。内側 2 層を PXD、外側 4 層を SVD と呼びそれらを衝突点を囲むように配置する。これらは荷電粒子がシリコンを通過する際に作られる電子・正孔対を電気信号として読み出し、荷電粒子の通過位置を測定できる。後述する CDC で再構成された粒子の飛跡と VXD で検出した荷電粒子の通過位置から B 中間子の崩壊点を再構成する。対で生成する 2 つの B 中間子の崩壊点についてビーム軸方向の位置の差 ( $\Delta z$ ) からこれらの崩壊した時間の差 ( $\Delta t$ ) を算出して時間依存 CP 対称性の破れを測定することができる。KEKB から SuperKEKB へのアップグレードでは、ナノビーム方式で安定にビームを蓄積する解を見出すために電子-陽電子のビームエネルギーが 8 GeV-3.5 GeV から 7 GeV-4 GeV になりローレンツブーストが小さくなるが、Belle II 測定器では衝突点でのビームパイプの内径を 30 mm から 20 mm へと細くし、ピクセルピッチ 50  $\mu\text{m}$  で厚み 80  $\mu\text{m}$  と低物質の PXD を搭載することで崩壊点測定精度を約 2 倍程度に向上させ、Belle 実験と同程度以上の  $\Delta t$  分解能を得る。

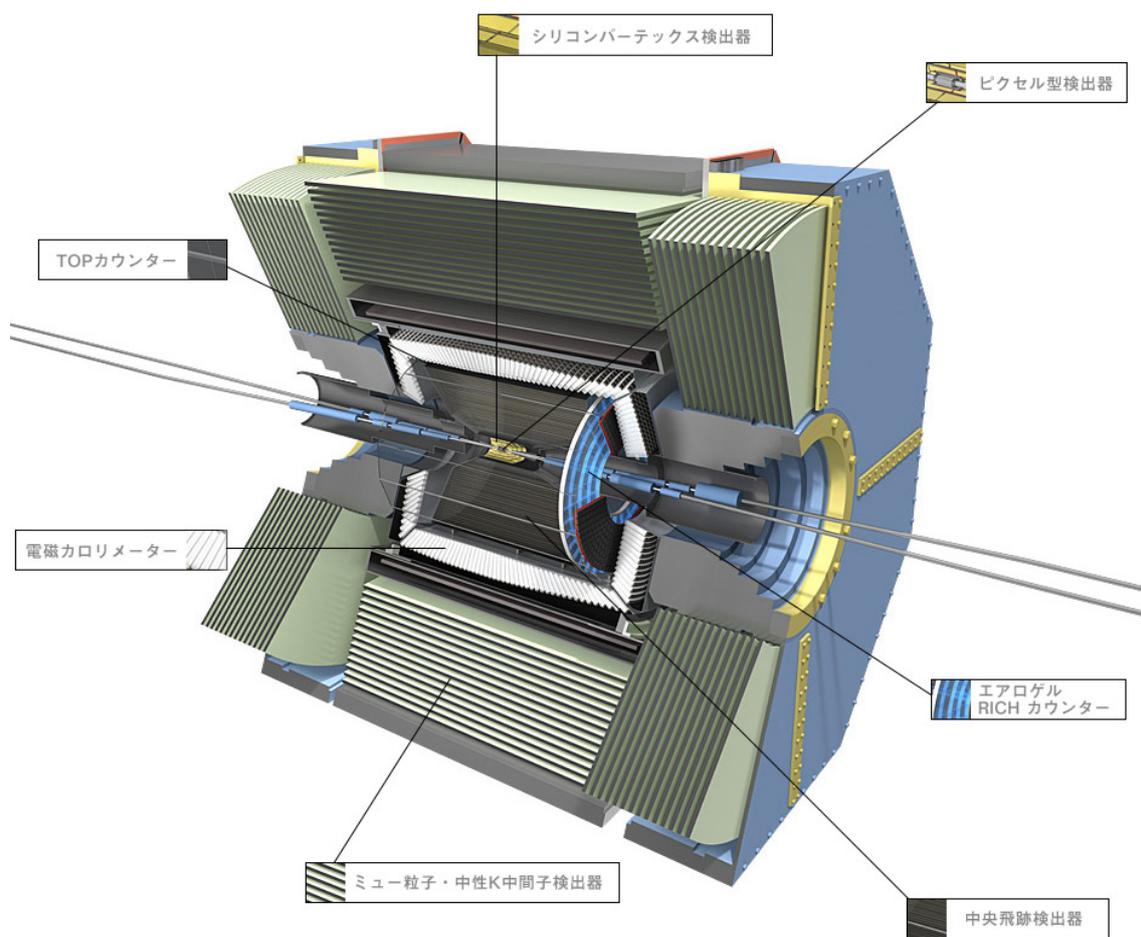


図 1.3: Belle II 測定器概観

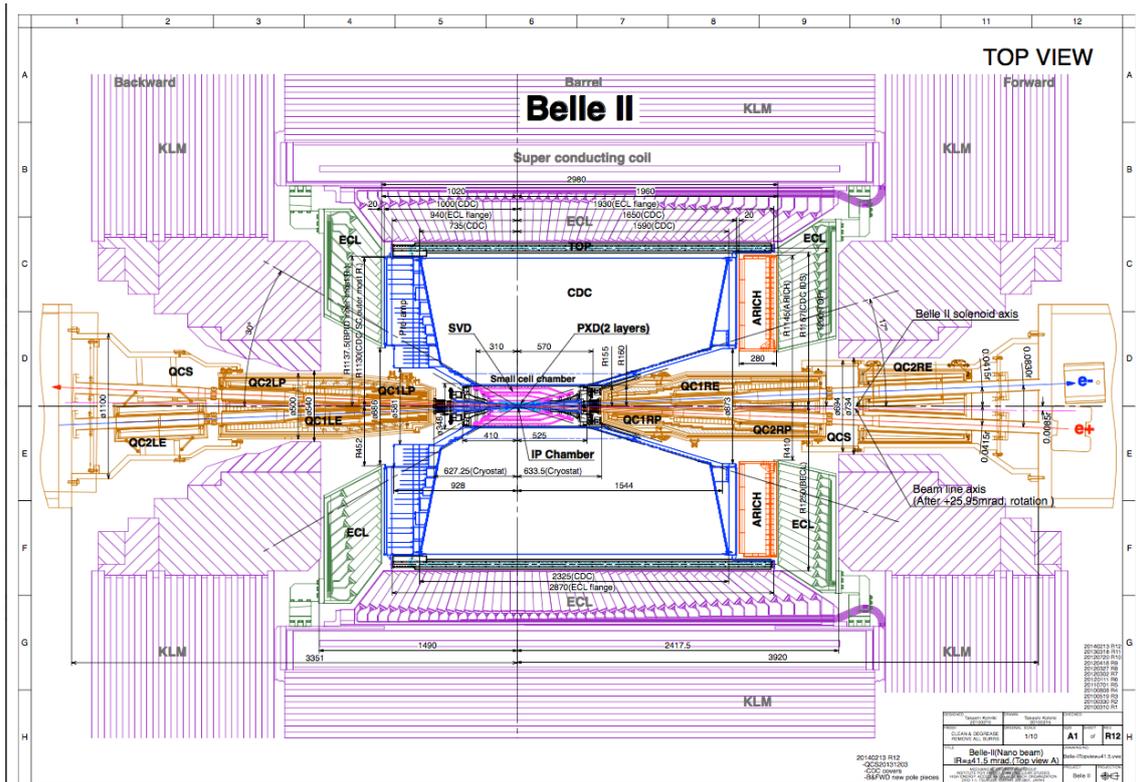


図 1.4: Belle II 測定器断面図

### ピクセル検出器 (PXD:PiXel Detector)

PXDはDEPFET(Depleted P-channel Field Effect Transistor)とよばれる構造を持つピクセル半導体素子を用いており、2層を配置する。DEPFETの概念図を図1.5、PXDの外観を図1.6に示す。

DEPFETでは空乏層で生じた電子はinternal gateに集まりexternal gateを開くと電荷量に比例する電流がsourceからdrainへと流れ、専用の線から読みだされることで荷電粒子の検出を行っている。表1.2にPXD仕様をまとめた。

表 1.2: PXD の仕様

	レイヤー1	レイヤー2
モジュール数	8	12
ビーム軸からの距離	14 mm	22 mm
ピクセルサイズ	$55 \times 50 \mu\text{m}^2$	$70 \times 50 \mu\text{m}^2$
厚さ	75 $\mu\text{m}$	75 $\mu\text{m}$
ピクセル数	3.1M	4.6M

1ピクセルのサンプリング時間は100  $\mu\text{s}$ であり4列(800ピクセル)を同時に読み出す。全ピクセル読み出しに200サイクル(=20  $\mu\text{s}$ )かかる。このPXDの出力はデータが多すぎて常時すべてのピクセルのデータを保存することは出来ない。そこでONSEN(ONline

Slection Nodes) というシステムを用いて、PXD の外側にある飛跡検出器 (SVD と CDC) で再構成された飛跡情報を PXD 上に外挿し、荷電粒子が通った付近 (RoI= Region of interest) のデータのみを保存する。

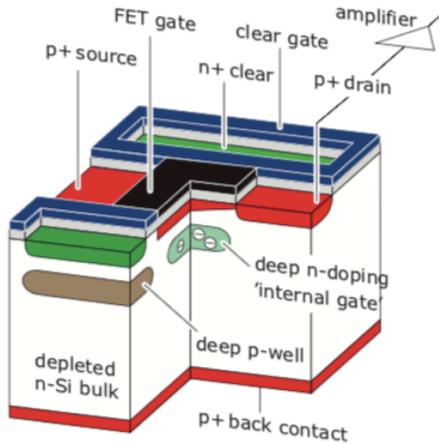


図 1.5: DEPFET 概念図

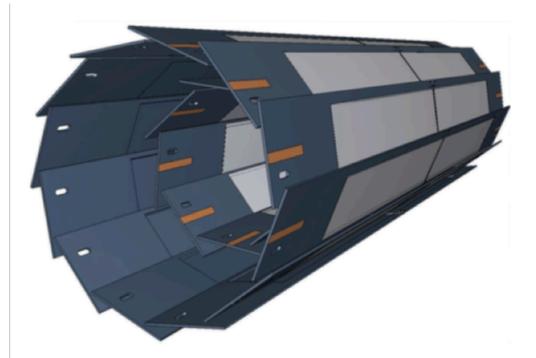


図 1.6: PXD 概観

### シリコンバックス検出器 (SVD:Silicon Vertex Detector)

SVD では DSSD(Double-Sided Silicon Detector) と呼ばれる両面にストリップ構造を持つシリコンセンサーを用いており、4層で構成されている。DSSD の概念図を図 1.7、SVD の外観を図 1.8 に示す。このセンサーはセンサーの各面に、Belle II 測定器における  $\phi$  方向に沿って n 型半導体のストリップ、直行する  $z$  軸方向に沿って p 型半導体のストリップがそれぞれ刻まれており、この2層が中央の n 型半導体を挟んだ形で pin 接合の半導体検出器となっている。この2つのストリップが直行しており、かつ4層のレイヤー構造をもつため三次元の飛跡情報を再構成できる。SVD では小型長方形 (small rectangular)、大型長方形 (large rectangular)、台形 (trapezoidal) の3つの形状のセンサーが層構造の形状に応じて使い分けられている。各センサーの仕様を表 1.3 に示す。

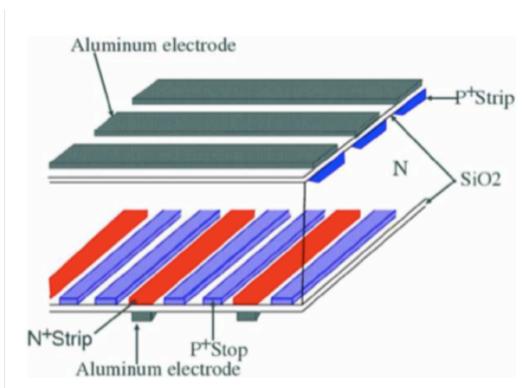


図 1.7: DSSD 概念図

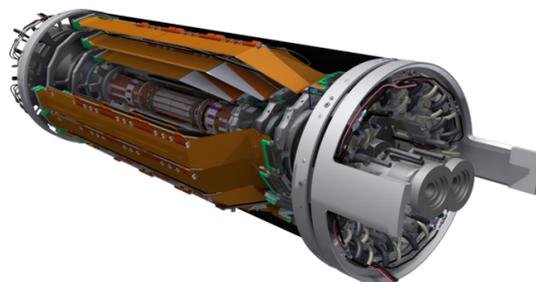


図 1.8: SVD 概観

表 1.3: SVD の仕様

	small rectangular	large rectangular	trapezoidal
レイヤー	3	4,5,6	
ストリップ数 (n 層)	768	512	
ストリップ数 (p 層)	768		
ストリップ間のピッチ (n 層)	160 $\mu\text{m}$	240 $\mu\text{m}$	
ストリップ間のピッチ (p 層)	50 $\mu\text{m}$	75 $\mu\text{m}$	75-50 $\mu\text{m}$
厚さ	320 $\mu\text{m}$		300 $\mu\text{m}$

SVD は検出器がカバーする立体角を大きくするために前方部分は角度を持たせて配置する。同時にこの配置は荷電粒子の DSSD 内の通過距離を短くして多重散乱の効果を低減し、再構成した B 中間子崩壊点の位置分解能低下を抑え、読み出し速度を向上させるとともに、信号の伝達経路を短くしてノイズを低減する効果がある。Belle 実験の SVD は、衝突点からの半径は最外層でビーム軸から 60.5 mm、検出器の長さは最大 365 mm であったが、Belle II では、最外層の半径が 88.0 mm、検出器の長さは最大 662 mm と大型化している。その結果、衝突点に近づいた最内層により、SVD のみでも Belle に比べ崩壊点の位置分解能は 20 % ほど向上するとともに、最外層の半径の増加により  $K_s^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  や  $\Lambda \rightarrow p\pi^-$  のように数 cm 飛行した後に崩壊するストレンジ粒子の崩壊点を SVD の有感領域内で検出する確率を大きくした。また有感領域内の立体角は  $23^\circ < \theta < 139^\circ$  から  $17^\circ < \theta < 150^\circ$  に拡張したほか、読み出し回路の放射線耐性を強化した。

### 1.2.2 中央飛跡検出器 (CDC: Central Drift Chamber)

中央飛跡検出器は荷電粒子の飛跡検出を行うガスワイヤーチェンバーである。荷電粒子がガス中を通過する際に飛跡に沿ってガス分子をイオン化すると、生成された電子が最寄りのセンスワイヤー（高電圧側）までドリフトし、ワイヤーのごく近傍で電子雪崩を生成する。この電子雪崩の形成により大量に生成された陽イオンがセンスワイヤーから離れる際に誘起する電気信号を読み出すことで荷電粒子を検出する。また、ドリフト時間を測定することでワイヤーと通過点との距離が分かり、各ワイヤーの情報から共通に接するらせん軌跡を求めると、これが再構成された飛跡である。また、超電導ソレノイドが作る 1.5 T の磁場中のため荷電粒子は磁場によって軌道が曲げられ、その曲率半径から横運動量を得る。 $(p_t[\text{GeV}/c] = 0.3 B[\text{T}]\rho[\text{m}])$  さらにガス中のエネルギー損失 ( $dE/dx$ ) を測定して運動量 1 GeV 以下の粒子について粒子識別の情報を与える。

Belle II 実験ではヘリウムとエタンを 50 % ずつ混合したガスを用いており、信号読み出しのためのセンスワイヤーと電場形成のためのフィールドワイヤー（グラウンド側）には、それぞれ直径 30  $\mu\text{m}$  の金メッキタングステンが 14336 本、直径 126  $\mu\text{m}$  のアルミニウムが 42240 本使用されている。これらは物質量を極限まで抑え、多重散乱による影響を可能な限り低減することを企図した設計である。ワイヤーにはビーム軸と平行なアキシカルワイヤー 5 層の間に、3次元に飛跡を再構成するため  $\pm 70$  mrad に傾けられたステレオワイヤーが 4 層配置されている。

図 1.9 は CDC のワイヤー配置を表しており、Belle 実験のものより特に内側の層で  $\phi$  方向のセルの分割を細かくしている。これにより、空間的に細分化されるだけでなく最大ドリフト時間が短くなり、ワイヤーのヒットレートとオキュパンシー (一事象中に信号を発生したワイヤーの数が全ワイヤー本数に対して占める割合) を減らすことができる。センスワイヤーの周りをフィールドワイヤーで囲んだ単位をセルと呼ぶが、高いヒットレートが予想される最内層の 8 層 (6-8 mm のスモールセル部) は  $\phi$  方向と半径方向それぞれが外側の 10-18 mm あるノーマルセルの半分程度のサイズとなっている。

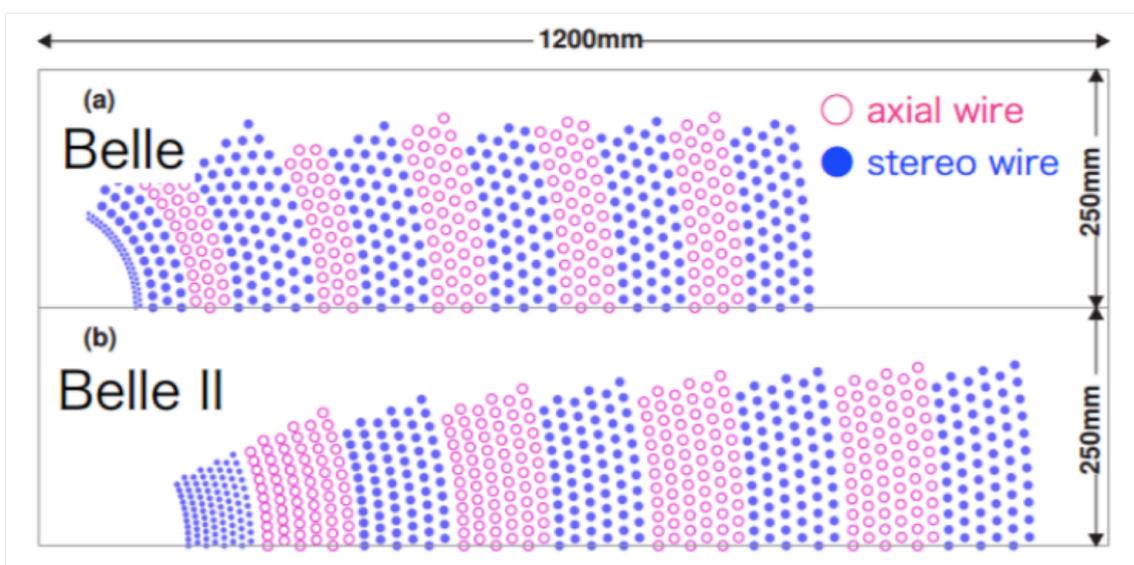


図 1.9: CDC のワイヤー配置

### 1.2.3 粒子識別検出器

CDC の外側には  $K$  中間子と  $\pi$  中間子を識別するための検出器があり、バレルには TOP カウンター、前方エンドキャップには A-RICH カウンターがそれぞれ配置されている。両検出器ともに粒子が輻射体の媒質中の光速を超えた際に発生するチェレンコフ光を利用している。高速の  $\pi$  中間子、 $K$  中間子が適切な屈折率の媒質を通過するとチェレンコフ光を円錐状に輻射する。このとき、同じ運動量でも粒子の種類が違えば質量の差によって速さが異なり、その結果チェレンコフ光の放射角に差が出る。この角度差を用いて荷電粒子の識別を行う。

#### TOP カウンター (TOP: Time Of Propagation counter)

バレル部の粒子識別は TOP カウンターが行う。両面を非常に高い平行度と平滑度で仕上げた合成石英の板を輻射体に用いており、そのチェレンコフ光は全反射を繰り返して、一方の端部に取り付けられた光検出器に達する。この伝搬時間と検出位置がチェレンコフ角に依存する。TOP カウンターではチェレンコフ光の伝搬時間を精密に測定するとともに、光検出器受光面におけるチェレンコフ光の検出位置情報と CDC で再構成した飛跡の情報

により粒子の識別を行う。図 1.10 に TOP の概観、図 1.11 に測定原理の概念図を示す。チェレンコフ輻射体となる合成石英は主輻射体 2 枚 (厚さ 20 mm) を中間で精密な光学接着して必要な長さを確保し、さらに後方のプリズム、前方の集光ミラーで構成されており、長さは 2700 mm ある。またプリズム後端部には光検出器として MCP-PMT(Micro-Channel Plate PhotoMultiplier Tube) を使用している。1 光子検出で 40 ps 以下の高時間分解能と典型値で 28 % の高い量子効率 ( $\lambda = 360$  nm) を持つ。チャンネル径 10  $\mu\text{m}$  の MCP を用いた電子増幅によって磁場中でも動作可能で、マルチアノード (4×4 ピクセル 5.3 mm 幅) での電子検出によりチェレンコフ光の検出位置情報を得る。この合成石英の輻射体と MCP-PMT を組み合わせたカウンターをビーム軸周りを取り囲むように 16 本配置している。

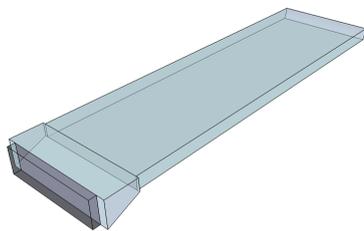


図 1.10: TOP カウンター 1 モジュールの概観

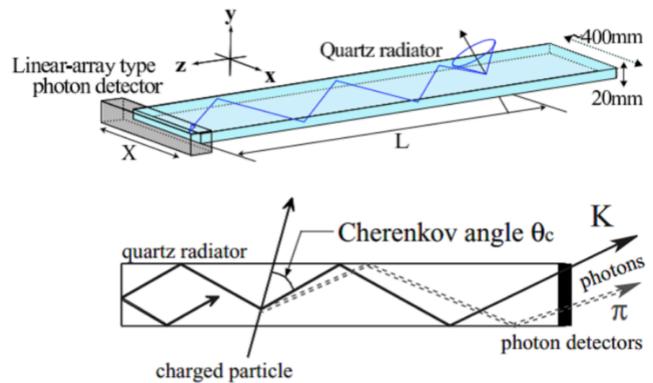


図 1.11: TOP 測定原理

### A-RICH カウンター (A-RICH: Aerogel Ring Image CHerenkov counter)

エンドキャップ部の粒子識別は A-RICH カウンターが行う。ARICH では輻射体から放射されたチェレンコフ光のリングイメージを単光子位置検出が可能な光検出器で直接観測して放射角を測定することで粒子を決定している。放射角と粒子の運動量は  $m = p\sqrt{n^2 \cos^2 \theta - 1}$  で関係づけられている。  $p$  は CDC で求め  $n$  は輻射体の屈折率である。図 1.12 に概念図を示す。A-RICH では輻射体としてシリカエアロゲルを使用している。また角度分解能を上げるために屈折率の異なる輻射体を重ねるデュアルレイヤー方式を採用している。A-RICH では屈折率 = 1.045 と 1.055 を重ねた構造のシリカエアロゲルを用いている。2 枚で厚さ 4 cm である。この輻射体から 16 cm 離れた場所に光検出器として 1 光子検出が可能な HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) を配置する。HAPD ではチェレンコフ光による光子は光電面で光電子に変換され、光電子は光電子加速用電圧により APD に打ち込まれ、さらに APD 中の電子雪崩形成により増幅される。HAPD のピクセルサイズは  $4.9 \times 4.9 \text{ mm}^2$  であり、1 つの HAPD ユニットの 144 チャンネルを持つ。  $\pi$  中間子の検出効率を 97%、4GeV の  $K$  と  $\pi$  を  $4\sigma$  で分離する性能を出す設計となっている。

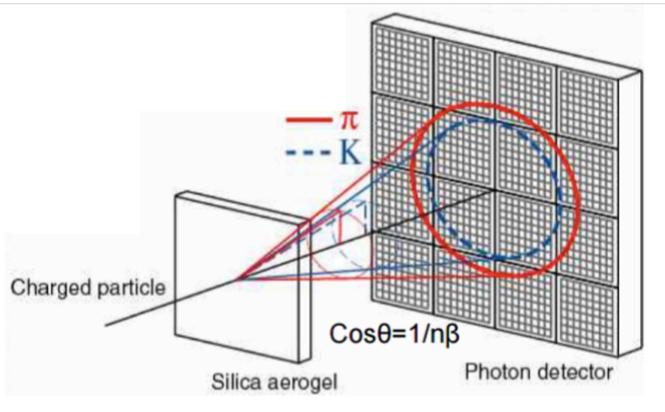


図 1.12: ARICH 測定原理

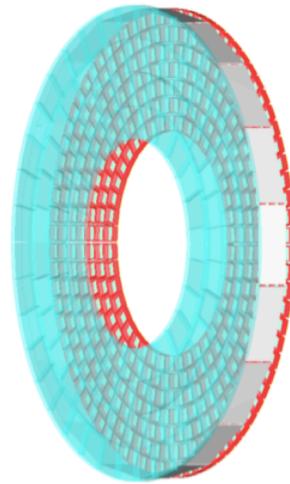


図 1.13: ARICH 概観

### 1.2.4 電磁カロリメータ (ECL:Electromagnetic CaLorimeter)

ECLはシンチレータとしてCsI(Tl)結晶を、光検出器としてPIN-PDを組み合わせたカウンターを用いている。図1.14にカウンターの概要図を示す。高エネルギーの光子や電子は物質に入射すると、制動放射や電子対生成により電磁シャワーを形成し、検出体の厚みが十分大きければそのエネルギーのほとんどを物質中で失う。このエネルギー損失によるシンチレーション光を測定することによって粒子の持っていた全エネルギーを測定することができる。結晶は長さが約30cm(～1.6放射長)、前面が約 $5.5 \times 5.5\text{cm}^2$ の大きさで、粒子の入射位置の算出を可能にするため8,736本で衝突点を囲んでいる。CsI(Tl)は発光減衰時間が約 $1\ \mu\text{s}$ と長いためBelle IIの高レートバックグラウンド環境に対処するため、1.76MHzのサンプリング周波数で動作する18bitのADCを用いてトリガー信号ごとに波形データを31点取得し波形フィットを行う。これにより、結晶ごとに入射粒子のエネルギー損失とタイミングの情報を得ると同時にバックグラウンドの寄与を可能な限り除き、パイルアップノイズを約1/2に減らすとともに、タイミングがずれたものを排除することによりバックグラウンドのシャワーの数を1/7以下に抑えることができる。

### 1.2.5 $\mu$ 粒子・ $K_L^0$ 粒子検出器 (KLM: $K_L^0$ and Muon Detector)

測定器の最も外側に位置するのがKLMである。約4.7cmの鉄板を14枚用いて、ソレノイドの磁場が外に漏れないようになっている。またそれぞれの鉄板の間に隙間が約4.4cm設けてあり、そこに荷電粒子を検出できる検出器を置いたサンドイッチ構造を持つものをKLM検出器と呼んでいる。

$\mu$ 粒子は貫通力に優れているため鉄を突き抜け明確な信号を残す。したがってCDCで検出した荷電粒子の飛跡を外挿したところに何層にもわたって連なる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したものが中性ハドロンであり、飛跡検出器には信号を残さずKLMで検出されれば $K_L^0$

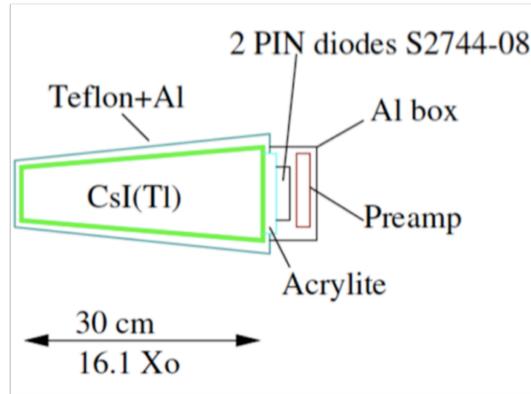


図 1.14: ECL のカウンター概要

と同定できる。KLM はこのようにして  $\mu$  粒子と  $K_L^0$  粒子の識別を行う。バレル部の構造は長さ 220 cm、幅は層により異なり 167~275 cm になる。Belle 実験では RPC(Resistive Plate Counter) というガスチェンバーを用いた。RPC は粒子の入射により信号を形成して一度放電すると、再び粒子を検出可能な状態にもどるのに数秒かかる。そのため、バックグラウンドの増加が予測されている Belle II 実験ではエンドキャップ部全部とバレル部の内側 2 層をプラスチックシンチレータに交換している。プラスチックシンチレータに波長変換ファイバー (WLS ファイバー) を埋め込んでいて光検出器である MPPC(Multi-pixel photo counter) で読みだしている。プラスチックシンチレータは厚み 1 cm、幅はバレルが 4 cm でエンドキャップが 0.7 cm であり、これらを  $z$  方向と  $\phi$  方向に並べたものが 1 セットになっており、通過位置の 2 次元情報が得られる構造になっている。図 1.15 に今回導入されたプラスチックシンチレータの外観を示す。

### 1.3 ビームバックグラウンド

SuperKEKB では、ルミノシティの向上に伴ってビームバックグラウンドも大幅に増加する。加速器のビーム中の粒子は、すべてが同じ軌道を通るわけではなく、中心軌道のまわりに振動しながら様々な軌道を通っている。進行方向と垂直な向きの振動をベータatron 振動、進行方向の振動をシンクロトロン振動と呼ぶ。何らかの要因で中心軌道からのずれが大きくなり、安定に周回できなくなったビーム粒子はやがてビームパイプに衝突してロスし、多数の電磁シャワーに起因する二次粒子を生成する。シャワー粒子が検出器に到達するとビームバックグラウンドとなり、検出器の検出効率を悪化させたり、長期的には放射線損傷によるダメージを与える。この章では、SuperKEKB 加速器で主に問題となると予想されている 6 つのバックグラウンド源についてまとめる。

#### 1.3.1 タウシェック散乱

加速器のビームは、バンチという電子または陽電子の集まりでできている。図 1.16 に示したように、タウシェック散乱とは同一バンチ内でのビーム粒子同士の散乱のことである。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により、バンチ中のビー

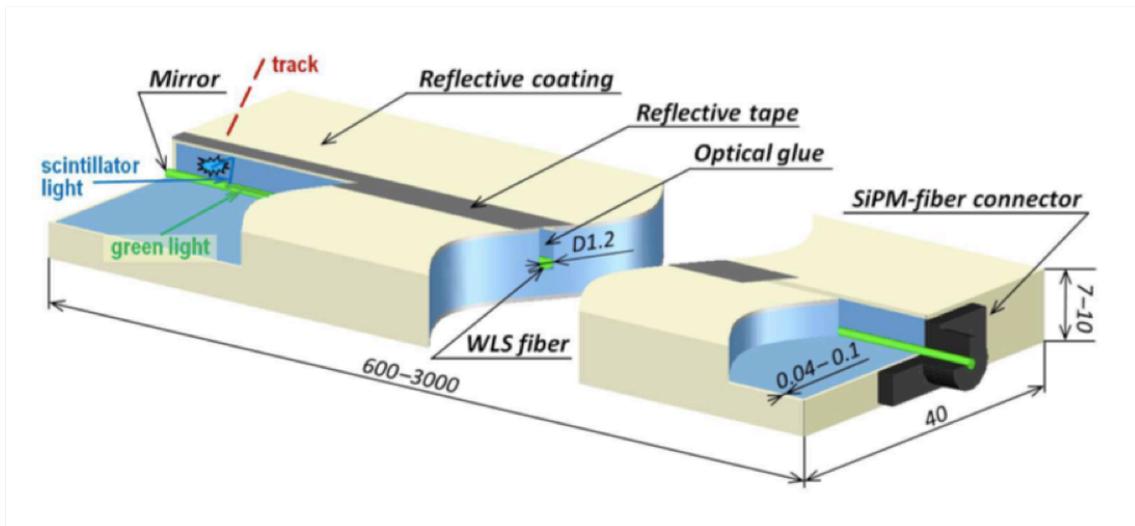
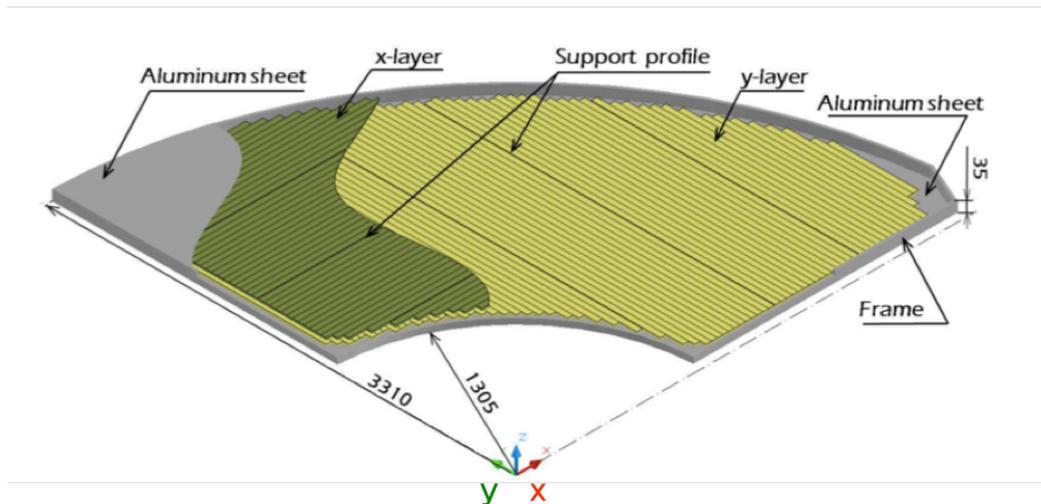


図 1.15: エンドキャップ部 KLM 検出器モジュール (上) と WLS ファイバー埋め込みプラスチックシンチレータの構造 (下)

ム粒子の運動量の増減が起き、安定して周回できる軌道や運動量のずれの範囲（力学口径）を外れるとバックグラウンドになる。タウシェック散乱によるバックグラウンド発生の頻度は、ビームサイズの逆数 ( $1/\sigma_y$ )、バンチ電流 ( $I_{\text{bunch}}$ ) の二乗とバンチ数 ( $N_{\text{bunch}}$ ) に比例する。すなわち、タウシェック由来のバックグラウンドの発生頻度  $R_{\text{Touschek}}$  は  $R_{\text{Touschek}} \propto N_{\text{bunch}} I_{\text{bunch}}^2 \sigma_y$  と書ける。SuperKEKB へのアップグレードでビームサイズを大幅に絞り、電流値も二倍になるため、タウシェック由来のバックグラウンドは何も対策をしなければ大幅に増えてしまう。そのため、軌道を外れた粒子を衝突点に到達する前にコリメータで停止させる。本研究の対象である Phase-2 運転と比べて、2019 年 3 月に開始する Phase-3 運転ではこのコリメータの数を増やして、これにより許容範囲内に抑制を図る。

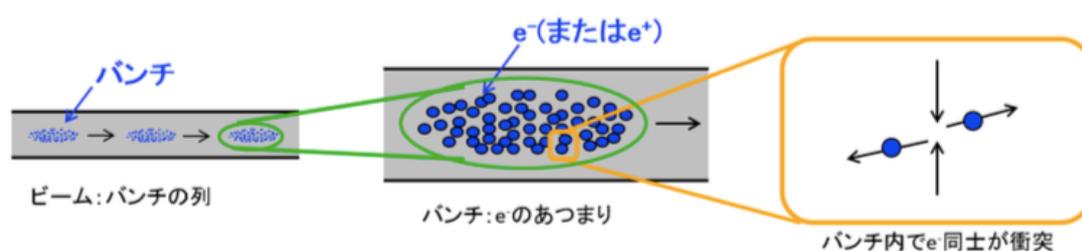


図 1.16: タウシェック散乱の概念図 [3]

### 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散乱することにより、バックグラウンドとなる。これをビームガス散乱と呼ぶ。ビームガス散乱の模式図を図 1.17 に示す。ビームガス散乱には、ビーム粒子の方向を変えるクーロン散乱と、エネルギーを低下させる制動放射の二種類がある。ビームガス散乱によるバックグラウンド発生の頻度は、ビーム電流 ( $I$ ) と残留ガスの圧力 ( $P$ ) の積に比例する。すなわち、ビームガス由来のバックグラウンドの発生頻度  $R_{\text{beamgas}}$  は  $R_{\text{beamgas}} \propto I \times P$  と書ける。SuperKEKB へのアップグレードで、制動放射由来のバックグラウンドは水平コリメータによる抑制が可能な見通しである。衝突点付近のビームパイプの口径が小さくなり、最終収束系の垂直ベータ関数が非常に大きくなることから、クーロン散乱由来のバックグラウンドの衝突点領域でのロスが大幅に増加することが予想される。この対策として、非常に狭い垂直コリメータを phase3 までに新しく両リングに設置する予定である。

### 1.3.3 ビーム入射直後のビームロス

SuperKEKB 加速器では、KEKB 加速器でもそうであったように、継続的にビームを入射して、ビーム電流を一定に保ちながら運転する。メインリングを周回するバンチに入射バンチを合流させるには、メインリングの入射地点付近の軌道にキッカー磁石でバンプ



図 1.17: ビームガス散乱の概念図 [3]

を作って入射バンチの軌道に近づけ、その軌道に入射軌道を重ね合わせるようにセプタム磁石を調整して、入射バンチを導く。このビーム操作は加速器の力学口径の範囲内で行うものであるが、入射は該当するバンチに揺動を与えるものであるため、それが減衰するまでの間は入射されたバンチがリングを周回して検出器を設置した区間を通過するたび、 $10 \mu\text{s}$  ごとにバックグラウンドの増加が生じる。また、リング周回の周期よりも長い時間スケールで、揺動のシンクロトロン振動やベータトロン振動の周期でバックグラウンドが増減する。模式図を図 1.18 に示す。

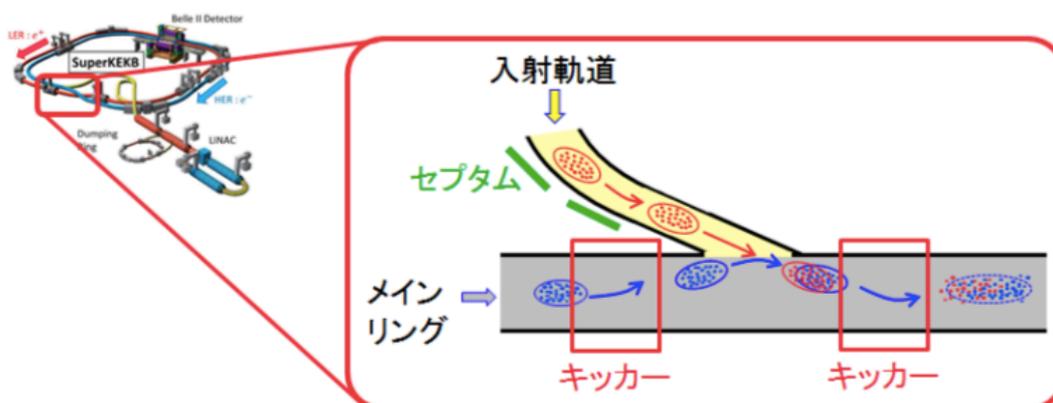


図 1.18: 入射時にバンチに対して行う操作の概念図 [3]

### 1.3.4 シンクロトロン散乱

ビームが磁場により曲げられる際に発生する放射光が、ビームパイプの検出器内部を通過する区間に当たるとバックグラウンドとなる。シンクロトロン放射のパワーは一般的にビームエネルギーの二乗と磁場の平方根に比例する。また、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磁石の配置と密接な関連がある。図 1.19 に示すように、KEKB 加速器は最終収束電磁石 (QCS) を HER と LER で共有していたため、衝突点通過後の軌道が四極電磁石の中心から離れた位置を通ることで強く曲げられ、発生するシンクロトロン光が後方散乱して検出器に入ってくるがあった。SuperKEKB では各リングに専用の最終収束電磁石を持つため、この寄与が少ない。図 1.19 に SuperKEKB 加速器の QCS の配置を示す。ビームが磁場によって曲げられることで放射光を出す。衝

突点の手前の最終収束電磁石で発生した放射光(数~数十 keV) がビームパイプのベリリウム部分を貫通して内層の検出器(PXD/SVD)にあたるとバックグラウンドになる。

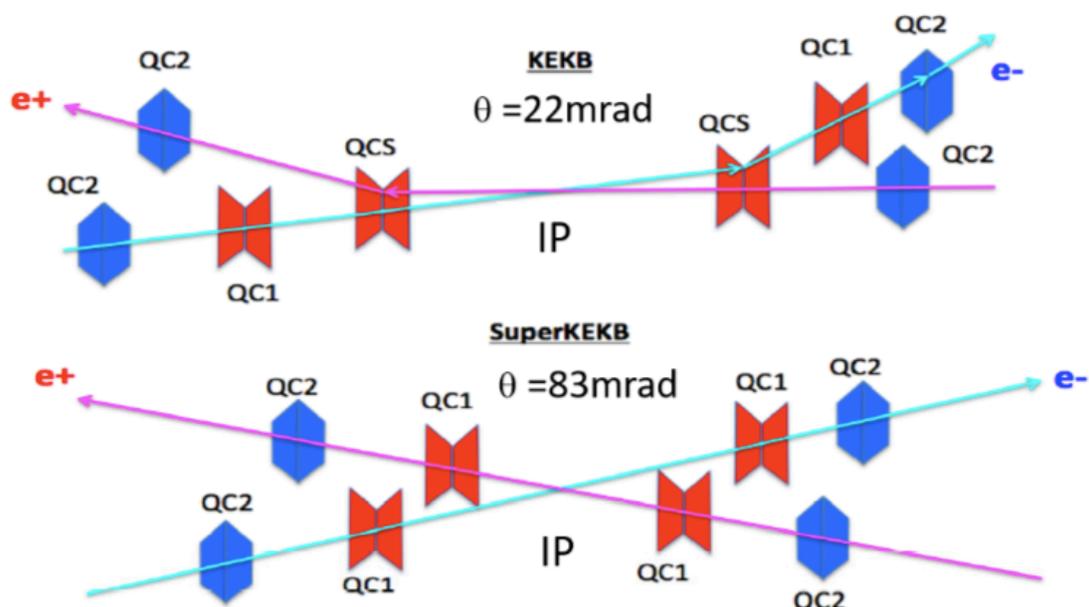


図 1.19: KEKB(上) および SuperKEKB(下) における QCS の配置図

### 1.3.5 Radiative Bhabha 散乱

$e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$  の光子放出を伴う Bhabha 散乱(電子・陽電子の散乱)であり、次に述べる二光子過程と同様、ルミノシティに比例する成分である。電子または陽電子のうち、この散乱で光子を放出してエネルギーを失ったものが、ソレノイド磁場や最終収束系の磁場で本来よりも大きく曲げられ、ビームパイプ内壁に当たる。これによって生じる電磁シャワーがこの過程に起因するバックグラウンドである。SuperKEKB 加速器が設計値ルミノシティである  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を達成した際には、他の成分を圧倒して支配的なバックグラウンドになると考えられている。QCS 内部でロスする分の寄与については、QCS の冷却装置内部に厚いタングステンの遮蔽層を入れることで抑制を図ることができる。非常に大きくエネルギーを失ったビーム粒子が衝突点通過後の QCS に入る手前でロスする成分については遮蔽物を置くことが難しく、TOP や ECL 検出器などにとって最も危険なバックグラウンドとなる。放出された光子は、10m 以上下流でビームパイプまたはその外側の物質に当たって形成するシャワーの中で、巨大双極子共鳴によって中性子が生成する。この中性子はトンネル内の放射線レベルを上げ、散乱されて検出器側にもどってくると外層のエンドキャップ KLM 検出器にとってのバックグラウンドとなり得る。

### 1.3.6 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、粒子生成が起きるものであるため衝突点で生じる、ルミノシティに比例するバックグラウンド源である。。生成する粒子としてはハドロンもあるが、 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-e^+e^-$  のような QED 過程が大きな断面積を持つ。生成される電子・陽電子対はエネルギーが低いいため、ソレノイド磁場に巻き付いて内側の検出器にのみヒットを残す。電子・陽電子のペアを放出してエネルギー失ったビーム粒子は、Radiative Bhabha 散乱のときと同様に、大きく曲げられてロスする。衝突点通過後の QCS の手前でロスする成分は、やはり TOP 検出器をはじめとする外側の検出器サブシステムにとって危険なバックグラウンドとなる。

## 第2章 電磁カロリメータ

### 2.1 電磁カロリメータの概要

電磁カロリメータとは、電子や $\gamma$ 線のエネルギー測定を行う検出器である。高エネルギーの電子または陽電子は物質中で制動放射により $\gamma$ 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、陽電子の対生成を起こす。これらを繰り返すことにより多数の光子、電子、陽電子を含む電磁シャワーが発生する。この電磁シャワーを利用してエネルギー損失を光に変換し、その光を検出器で電気信号に変換することにより、入射した $\gamma$ 線あるいは電子または陽電子の全エネルギーを測定する。Belle/Belle II 実験では、数十 MeV $\sim$ 10 GeV にわたる非常に広いダイナミックレンジでの高い分解能が要求される。そのためエネルギー分解能に優れた全吸収型のカロリメータが必要であり、限られた体積の中でシャワーを形成するために、高い密度の素材である無機結晶シンチレータを使用する。Belle/Belle II の ECL では CsI(Tl) 結晶と使用している。一本の CsI(Tl) 結晶のサイズは長さが 30 cm、断面が約  $5.5 \times 5.5 \text{ cm}^2$  となっている。この長さは  $16.1X_0$  ( $X_0$ : 放射長) に対応し、幅はモリエール半径 ( $R_m$ ) の 1.5 倍強の値に対応する。結晶 1 本当たりの重さは約 5 kg である。また、光検出器として  $1 \times 2 \text{ cm}^2$  の受光面を持つ浜松ホトニクス製 S2744-08 型 PIN-PD が結晶一本あたり二個使用されている。この PIN-PD は Belle 実験の設計段階において磁場中でも特性が変化しないデバイスとして安定供給が可能な唯一の解であった。PIN-PD の感度波長範囲は 340 nm $\sim$ 1100 nm であり、540 nm で 85% の量子効率を示し、発光ピーク波長が 560 nm である CsI(Tl) 結晶との組み合わせは相性が良い。また、PIN-PD の増幅率は 1 であるため出力信号の温度依存や印加電圧依存は非常に小さい代わりに発光量の大きいシンチレータと組み合わせる必要がある。そのため 1MeV あたり 5 万光子出る CsI(Tl) 結晶と相性が良い。これらの特徴により、Belle 実験では CsI(Tl) 結晶の PIN-PD 読み出しを採用した。図 2.1 に ECL に用いられているカウンターの写真を示す。ここで、シンチレータ: CsI(Tl) 結晶と光検出器: PIN-PD について説明する。

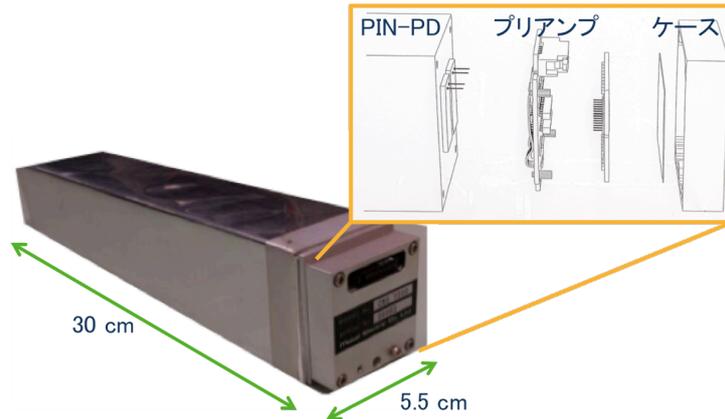


図 2.1: ECL カウンターの写真

### 2.1.1 シンチレータ : CsI(Tl)

シンチレータとは、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で、このとき発生する光をシンチレーション光とよぶ。シンチレータは無機物質の結晶と有機物質に大別できる。無機結晶シンチレータは、入射した放射線のエネルギー損失により励起した結晶中の電子が脱励起する際にシンチレーション光を放出する。

表 2.1 に無機シンチレータの例を示す。無機シンチレータは有機シンチレータに比べ、原子番号の大きな元素を含んで密度の高いものが多いため、 $\gamma$ 線の検出効率を高くできる。また、発光量が大きいものが多く、高いエネルギー分解能を実現可能であるという利点があり、Belle/Belle II 実験のような高いエネルギー分解能が要求される実験の電磁カロリメータとして向いている。Belle/Belle II 実験では CsI 結晶に不純物としてタリウムをドーピングした CsI(Tl) 結晶を使用している。この結晶シンチレータは約  $5 \times 10^4$  photons/MeV に達する非常に豊富な発光量を持つため、数十 MeV という低いエネルギーでもノイズと分離することが可能である。また、発光波長は 560nm 前後であるので後述する PIN フォトダイオード (PIN-PD) に代表される半導体光検出器が良好な量子効率を示す領域と合致しており、電磁カロリメータを磁場中に設置することが可能となる。しかし、発光の減衰時間が長いこと、ハイレートでビームバックグラウンドが入射するとパイルアップノイズを起こす。特にバックグラウンドの量が多い前方エンドキャップ部において純 CsI 結晶を用いることも検討されている。

### 2.1.2 光検出器:PIN-PD

PN 接合のダイオードでは P 層側が N 層側より低い電位になるように電圧を印加する (逆バイアスをつける) と、電子-正孔対の電子は N 層に、正孔は P 層に集まる。このためダイオードの内部で電子または正孔のいずれのキャリアも存在しない空乏化した領域が形成され、素子内の電流が止まる。この空乏層に光子が入射し、光電効果を起こして電子-正孔対が生成されると、素子内部の電位差により電子が N 層に、正孔が P 層に向かって流れて電流が発生するので、これを信号パルスとして取り出す。これが、フォトダイオードの基本的な原理である。このフォトダイオードにシンチレータを組み合わせること

表 2.1: 主な無機シンチレーターの特性

	BGO	LYSO	純 CsI	CsI(Tl)
密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	6.63	7.4	4.51	4.51
放射長 [cm]	1.12	1.16	1.86	1.86
発光量 [photon/MeV]	60000	33000	370f 1200s	56000
蛍光減衰時間 [ns]	88	40-44	6f 35s	1300
発光波長 [nm]	520	420	310f 420s	560

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、フォトダイオードを利用して電気信号として検出することが可能である。実際のダイオードでは逆バイアス電圧を印加した状態でもごくわずかに逆方向電流が流れる。これは一般的に漏れ電流 (暗電流) と呼ばれ、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る。Belle 実験では CsI(Tl) 結晶のシンチレーション光を読み出すための光検出器として PIN フォトダイオード (PIN-PD) を使用した。この PIN 接合とは p 型半導体と n 型半導体の間に真性半導体 (i 型半導体) という絶縁体を挟んだ構造を指す。i 層を設けることで、電場はほとんど i 層にかかるため p 層と n 層にかかる電場が少なくなり電極からのキャリアの流入を抑えることができるため暗電流を減らすことが可能である。また、両端にかける電圧を小さくでき、空乏層を大きくして量子効率を上げることもできる。

## 2.2 Belle 実験の電磁カロリメータと Belle II 実験へのアップグレード

Belle 実験のカロリメータの断面図を図 2.2 に示す。合計 8736 本のカウンターで構成され、前方エンドキャップ部に 1152 本、バレル部 6624 本、後方エンドキャップに 960 本設置されている。1 本 5 kg の結晶が 8736 本使用しているため、ECL は総重量が約 40 トンにも及ぶ重い検出器である。ここで衝突点 (IP) からみて電子ビームの進行方向側を前方、陽電子ビームの進行方向を後方とよび、円柱上の ECL の底面部分をエンドキャップ、側面をバレルと呼ぶ。これら 8736 本の CsI(Tl) 結晶の位置を示す番号付のルールの一つが  $\theta_{ID}$  である。 $\theta$  は Belle II 測定器の  $z$  軸 (電子ビームが進む向きを+とする) からの極角で、前方エンドキャップのもっとも内側に並んでいる CsI(Tl) 結晶の  $\theta_{ID}=0$  とし、 $\theta$  の増加とともに層ごとに一つずつ増やすもので、詳細は後述する。

PIN-PD への集光効率を上げるため結晶は厚み 200  $\mu\text{m}$  の白色テフロンシート (Goretex) で包み、さらにその上からアルミナイズドマイラー (アルミニウム層 25  $\mu\text{m}$ 、PET 樹脂層 25  $\mu\text{m}$ ) で包むことにより静電遮蔽した構造になっている。そして PIN-PD の信号を増幅して取り出すためのプリアンプを、結晶に固定したアルミニウム製ケース内に設置している。Belle 実験での電磁カロリメータの読み出しエレクトロニクスでは、時定数 1  $\mu\text{s}$  の

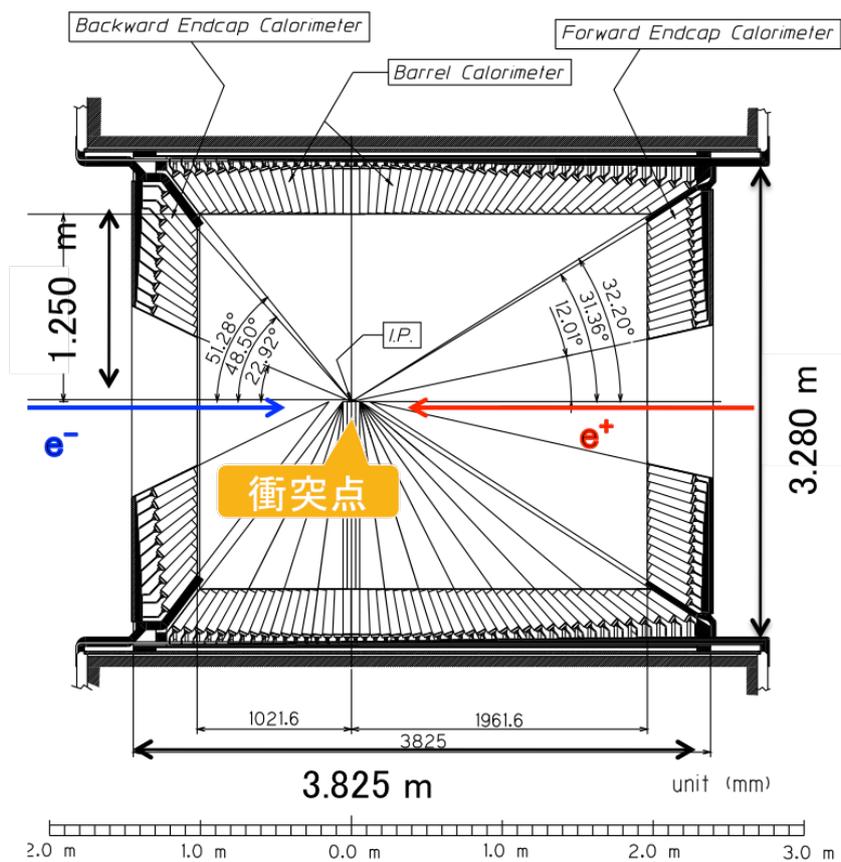


図 2.2: ECL の断面図 ビーム軸方向に約 3.8 m 高さ 3.2 m であり、 $\theta$  方向は前方エンドキャップで  $12.01 \sim 31.36^\circ$ 、バレルで  $32.20 \sim 128.72^\circ$ 、後方エンドキャップ  $131.5 \sim 157.08^\circ$  を覆っている

波形整形回路 (Shaper)、MQT300A 型 QtoT コンバーター、FASTBUS 規格の TDC を用いて信号電荷=検出エネルギーを記録することにより、18bit に相当するダイナミックレンジを実現した。この読み出しエレクトロニクスと PIN-PD の組み合わせでは、CsI(Tl) カウンター 1 本あたりの雑音レベルは電子数で約 1000 個であった。CsI(Tl) 結晶に取り付けられた PIN-PD への集光効率は約 10% で、1MeV あたり約 5000 個の電子・正孔対を PIN-PD で得る。したがって、電子数約 1000 個の雑音レベルはエネルギーに換算すると約 0.2 MeV となる。ビームバックグラウンドに起因するパイルアップによるノイズがこれに加わり、エンドキャップ部ではカウンター 1 本あたり 0.5 MeV から 1 MeV に達している。このパイルアップによるノイズは、ルミノシティが SuperKEKB 加速器での設計値である  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  の状況下でさらに増大すると予想される。最新の見積もりでは、カウンター 1 本あたりエンドキャップ部で数 MeV、バレル部でも 1~2 MeV に達すると予想される。これはルミノシティの向上に伴い、物理的な散乱過程によるビームバックグラウンドが増加し、除去が困難な Radiative Bhabha 散乱 (第 1 章参照) に起因するものがほとんどの割合を占める。このような問題に対処するために、Belle II 実験では波形サンプリング読み出しを行い、波形フィットによって CsI(Tl) カウンターごとの検出エネルギーに加え信号パルスのタイミングを求めることでパイルアップによるノイズを 2 倍程度抑制するとともに、タイミングの情報を活用して当該事象の物理過程に起源がある CsI(Tl) カウンターの信号パルスを選別する。図 2.3 に波形サンプリングの概念図を示す。この波形フィットは、Shaper と 1.76MHz サンプリングで 18bit の Digitizer に加えて波形フィットを担う FPGA を搭載した Shaper DSP ボードで行う。このボードは VME9U 規格のフォームファクターで作成され、一枚につき 16 チャンネルを接続する。この Shaper DSP ボードは VME クレート 1 台につき 12 枚設置され、合計 52 台の VME クレートを Belle II 測定器構造体の周辺に配置する。読み出しエレクトロニクスの概念図と VME クレートの配置図を図 2.4 図 2.5 に示す。

一方パイルアップノイズ対策として純 CsI 結晶の導入が検討されているが、純 CsI は CsI(Tl) と比べ早い発光成分の波長が 310nm と短く、発光量も 1000 photons/MeV と少ないため PIN-PD では全く必要な性能は出ない。そこで、増幅機能を持つ半導体検出器である浜松 S8644 型をはじめとした APD またはファインメッシュ型ダイノード 3 段を持つ電子管であるフォトペンロードを光検出器として使用することが現在検討されている。

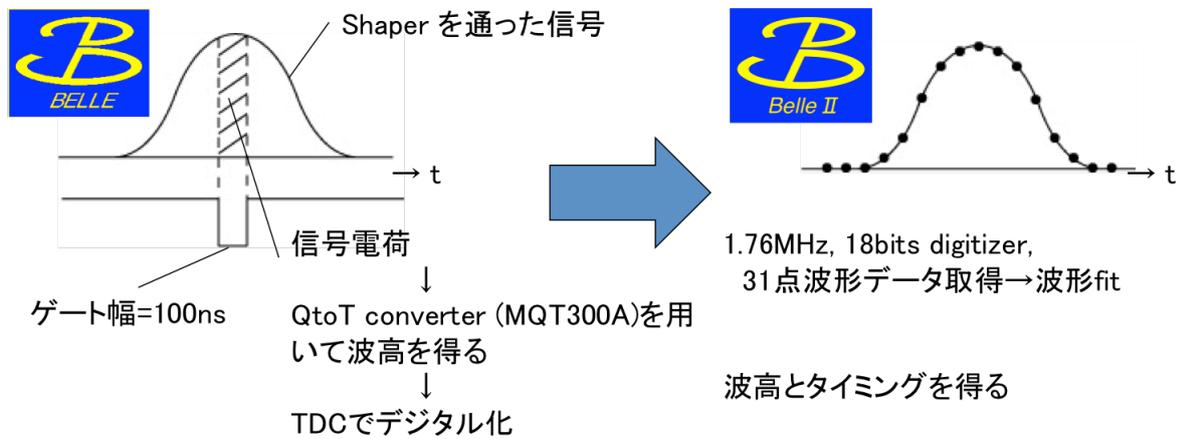


図 2.3: 波形サンプリングの概念図

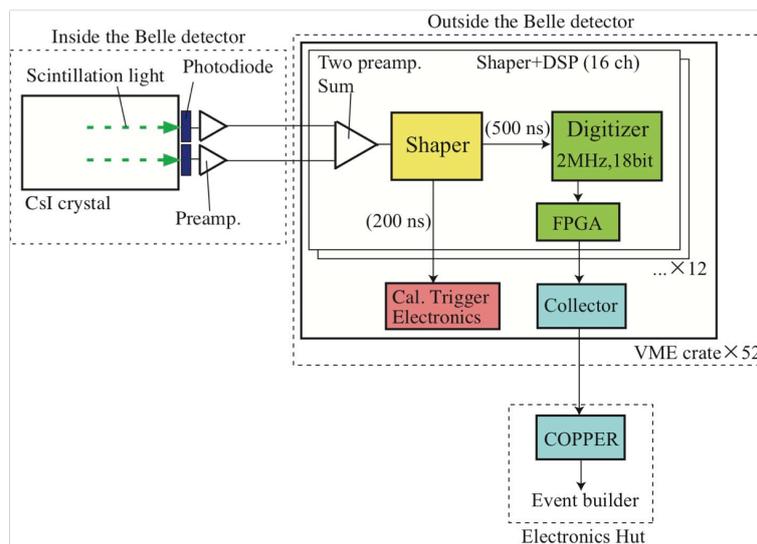
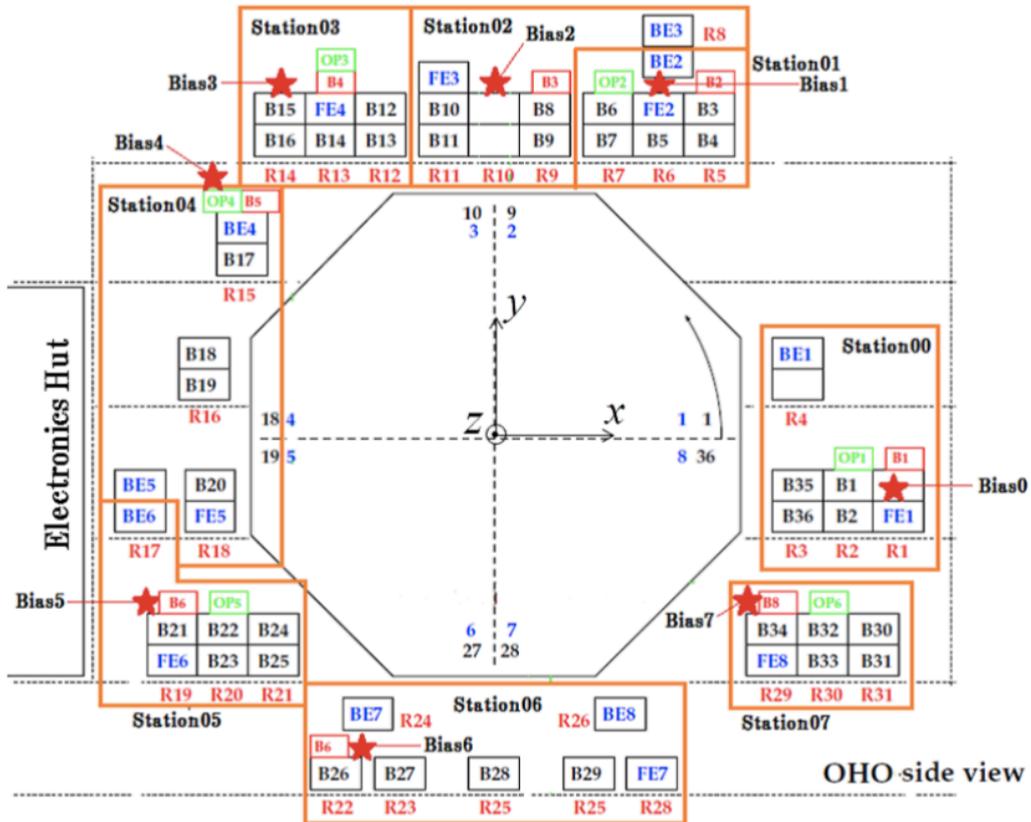


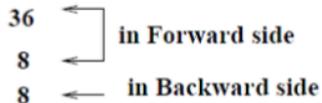
図 2.4: Belle II における ECL 用読み出しエレクトロニクスのブロック図

### Layout of VME crate



#### Crate naming convention.

B	Barrel
FE	Forward Endcap
BE	Backward Endcap



Barrel: 184 x 36 = 6624 ch.  
 Forward Endcap: 144 x 8 = 1152 ch  
 Backward Endcap: 120 x 8 = 960 ch

図 2.5: VME クレートの配置図

## 第3章 PIN-PD 電流値モニター

PIN-PD 電流値モニターとは Belle II 実験電磁カロリメータ用の周辺機器の 1 つであり、PIN-PD に流れる電流を常時モニターする。本章では電流値モニターの概要、原理、セットアップについて述べる。

### 3.1 電流値モニターシステムの概要

PIN-PD 電流値モニターは次節に述べる原理で CsI(Tl) 結晶に入射したビームバックグラウンドの変化を 5 秒ごとの時間スケールでリアルタイムに測定する機能を持つシステムである。加速器のルミノシティの向上に伴ってビームバックグラウンドが増加することは避けられないと見込まれ、検出器に入射するバックグラウンド量をリアルタイムで知るのには加速器の運転調整を行う際に重要な情報となる。このバックグラウンド測定値を積算することにより CsI(Tl) 結晶がビームバックグラウンドによって浴びた放射線被ばく量も評価することができる。ECL においては他の検出器とは異なり測定器の電源を切ついても CsI(Tl) 結晶はビームバックグラウンドによるダメージを受け続ける。結晶の発光量減少等のカウンターの性能評価を行う際にトータルの放射線被ばく量を把握することは重要になる。ECL にきたビームバックグラウンド量の見積りは PIN-PD 電流値モニター以外でも可能である。たとえば、CsI(Tl) 結晶は光り終わるまでの時間 (発光減衰時間) が長いため、高頻度にビームバックグラウンドが入射するとパイルアップを起し、このパイルアップノイズの大きさからも被ばく量の見積もりは可能である。しかし、この情報は Belle II 測定器が収集した実験データの解析によってのみ得ることができるもので、加速器には蓄積したビームがあるのにデータ収集を行っていない時間帯については知見を得られない。またビームのバンチを入射した直後の数ミリ秒はビームバックグラウンド量が多いためベトをかけるため、その間の状況もわからない。いずれにせよ、ビームバックグラウンドによる放射線被ばく量を正しく評価するには Belle II データ収集システムの走行・停止と独立にバックグラウンドを測定できるシステムが必要でこの電流値モニターの役割が重要である。

図 3.1 および図 3.2 は Belle 実験の 10 年間でカウンターの浴びた放射線被ばく量と発光量を示している。図 3.1 の横軸は時間、縦軸は放射線被ばく量の積算値であり、ここで図 3.2 は横軸が  $\theta_{ID}$ 、縦軸は 1999 年の発光量に対する 2009 年の発光量の割合である。 $\theta_{ID}$  の定義は図 3.3 に示す。100 rad=1 Gy であるので、Belle 実験の 10 年間で前方エンドキャップでは 4 Gy、バレルでは 1 Gy であり発光量減少は前方エンドキャップで 10% であり、バレルで 5% であることがわかる。こうした測定は Belle II 実験でも継続する必要があるが、SuperKEKB 加速器が KEKB 加速器よりも大きな有限角度衝突を行うことと関連して予期されるビームバックグラウンドの分布が異なるため、その状況に対応して改変を行う。

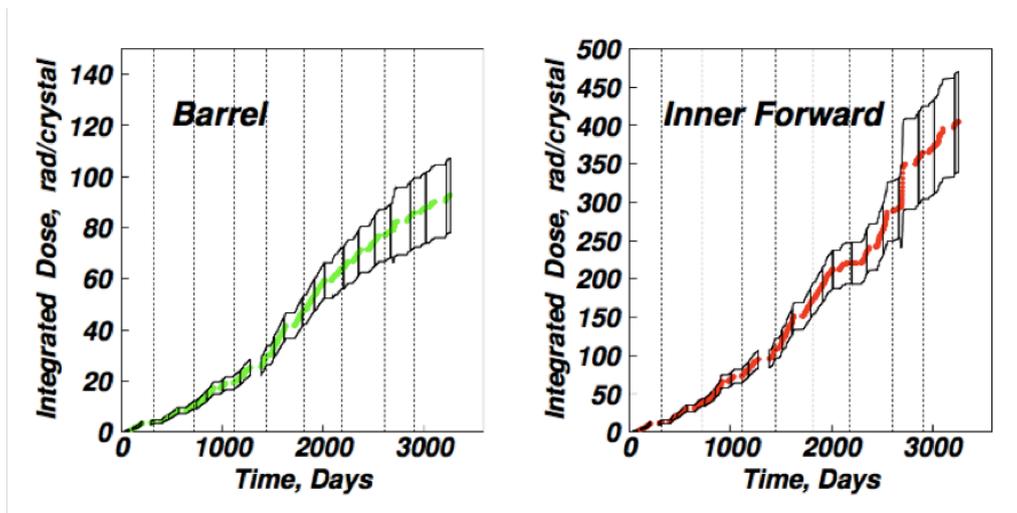


図 3.1: Belle 実験 10 年間で CsI(Tl) 結晶の浴びた放射線被ばく量 [2] 横軸は時間 [day]、縦軸は放射線被ばく量の積算 [rad] を表している。

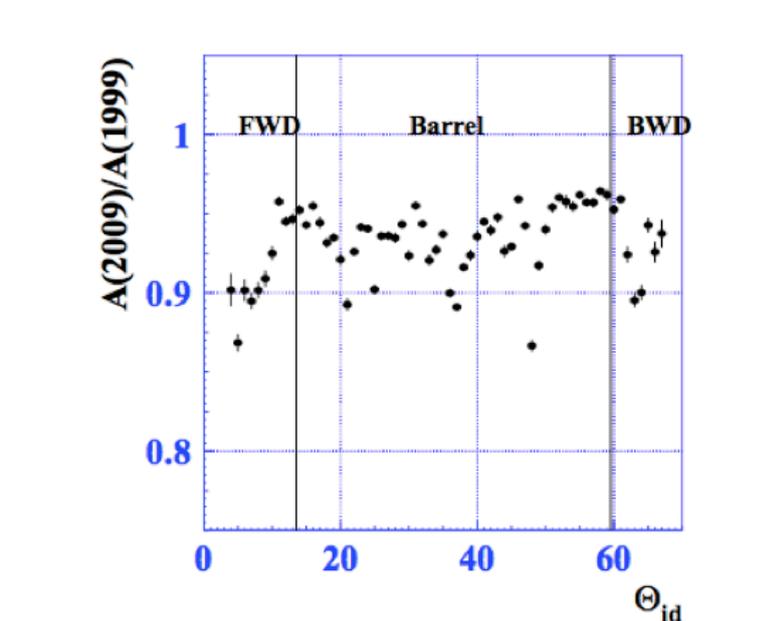


図 3.2: Belle 実験 10 年間で CsI(Tl) 結晶の発光量 [2] 横軸は  $\theta_{ID}$  (図を参照)、縦軸は Belle 実験開始当時の発光量を 1 としたときの、Belle 実験終了後の発光量を示している。

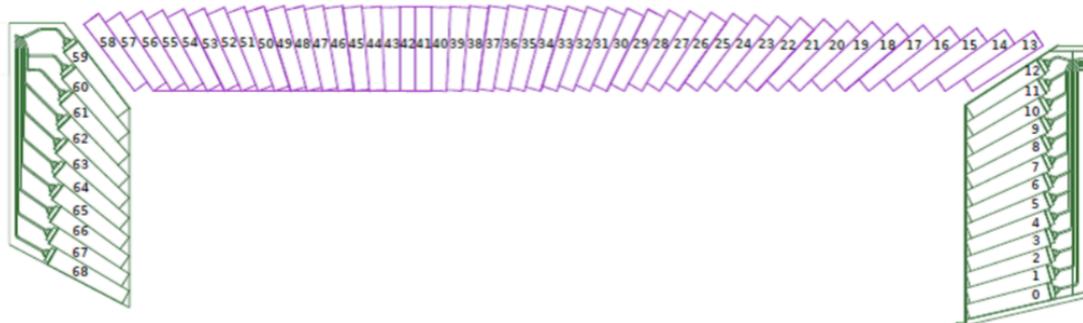


図 3.3: ECL の  $\theta_{ID}$  の定義。  $\theta$  の小さいカウンターから順に 0 68 の番号を割り当てている

Belle 実験で使用したカウンターは全てそのまま Belle II 実験でも使用されている。 Belle および Belle II で使われているカウンターと同じ設計のカウンターを用いて放射性耐性の study を行った論文の結果によると浴びた放射線量に対する発光量減少は図 3.4 のようになる。ここで Belle II 実験 10 年間で浴びる放射線被ばく量は 100 Gy (=10 krad) と予測されているため、 Belle II 実験の終盤では発光量は 20% ほど低下し、カウンターによっては 40% 程低下するものもあるという結果になっている。 Belle 実験の時 1 MeV あたり PIN-PD は 5000 electron-hole 放っていたが、その時のエレクトロニクスノイズは約 300keV であった。 40% 発光量が減少した際のノイズは 500 keV まで上昇すると考えられている。一方 2~5 MeV 程度のビームバックグラウンド起源の光子によるパイルアップノイズはエレクトロニクスノイズ (1 < MeV) 以上であるため、発光量の低下による分解能の低下よりビームバックグラウンドによるパイルアップノイズの方が問題になると予想されている。

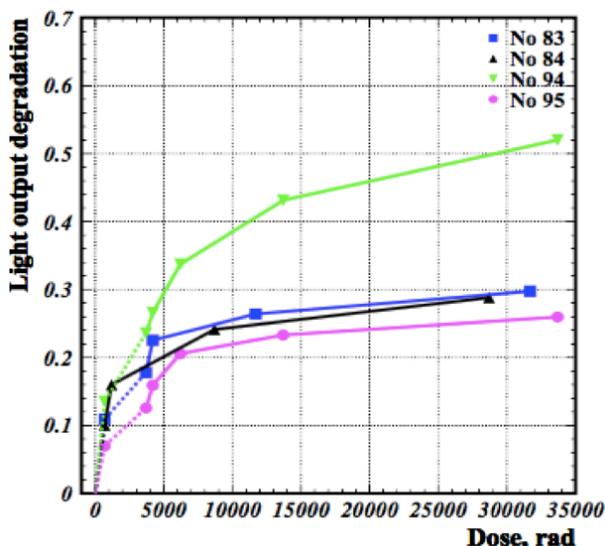


図 3.4: CsI(Tl)+PIN-PD カウンターの放射線耐性。横軸は放射線被ばく量の積算 [rad]、縦軸は発光減少量を示している。 [10]

### 3.2 電流値モニターの原理

PIN-PDには逆バイアスをかけた際に、光の入力がない時も熱励起によって生成される電子とホールのペアがキャリアとなって流れる暗電流がある。この暗電流を常時モニターするのがPIN-PD電流値モニターである。ビームがONになりビームバックグラウンドがCsI(Tl)結晶に入射すると、それに起因するシンチレーション光をPIN-PDが検出することによりPIN-PDに流れる電流が増加する。つまりこの増加電流はビームバックグラウンドの量に比例する。図3.5にPIN-PD電流値モニターの概念図を示す。これを利用して、ビームバックグラウンドによりCsI(Tl)結晶が浴びた放射線量を評価することができる。また、一方でPIN-PDは中性子被ばくによりバルク損傷が起こる。この損傷は格子欠陥の増加をもたらし、その格子欠陥が熱励起を起こしやすいためPIN-PDに流れる暗電流が増加する。そのためBeamがOFFの時の暗電流値の増加から中性子被ばく量を見積ることも出来る。

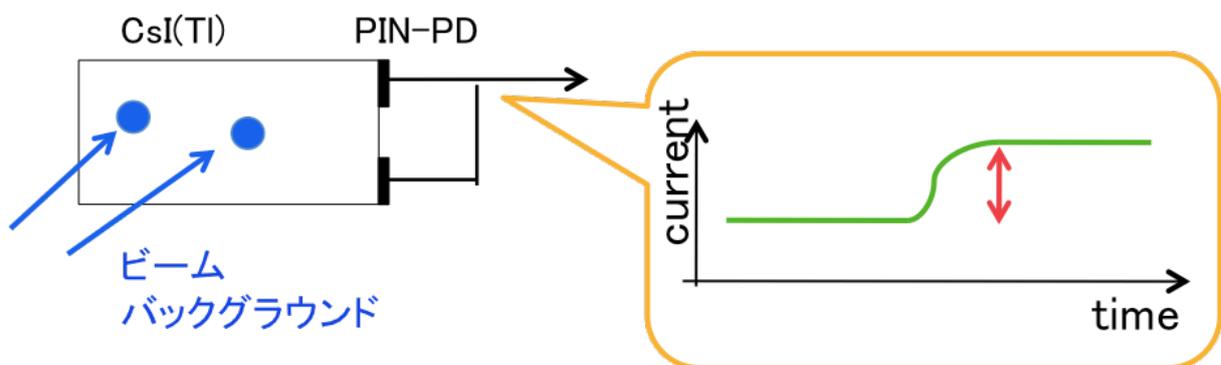


図 3.5: PIN-PD 電流値モニターの概念図

### 3.3 電流値モニターシステムのセットアップ

図3.6に電流値モニターのブロックダイヤグラムを示す。電流値はCsI(Tl)カウンター数十本または数百本のブロックごとにもにたーするため、逆バイアス電源から各カウンターに分岐する上流に抵抗(10 k $\Omega$ )をはさみ、その両端で生じる電圧降下として測定する。計測アンプモジュールを用いて電圧降下をDC電圧信号として出力し、データロガーで数値化する。数値化したデータをSCPIコマンドで制御してデータをControl PC上に保存する。このサイクルを5秒間隔で行いデータ収集を行う。計測アンプモジュールは、絶縁型DC-DCコンバーターで給電する高入力インピーダンスのオペアンプを用いてデータロガー、Control PCなどのモニターシステムのデジタル部のノイズがECLの入射粒子のエネルギー測定を行う側のエレクトロニクスにのらないよう遮断する設計にしている。[13] Belle II 測定器の周囲には図2.5に示すように8つのステーションごとにバイアス電源1台を使用し、合計8台の電源を用いて電圧を供給している。これに合わせて全部で8台の計測アンプモジュールをこのバイアス電源とフロントエンドエレクトロニクスのVMEクレートの間に接続・配置した。

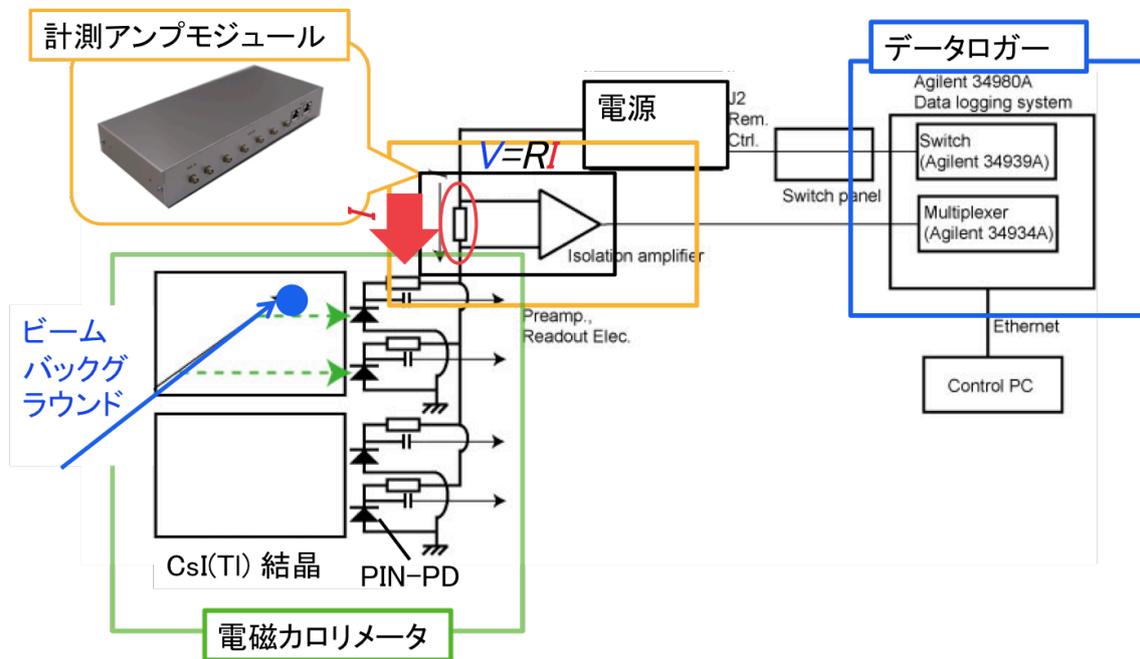


図 3.6: PIN-PD 電流値モニターのブロックダイアグラム



図 3.7: 計測アンプモジュール

図 3.7 に計測アンプモジュールの実機の写真を示す。一番左の LEMO ケーブル用の端子は PIN-PD にかける +50 V の電源電圧に接続する。このモジュールは逆バイアス電圧のディストリビューター (分配器) を兼ね、6 つの LEMO ケーブル用端子は該当する VME クレータのコレクターモジュールまたはそこから Shaper-DSP ボードへ接続されるデージーチェーンケーブルの端につながれ、デージーチェーンケーブルを介して Shaper-DSP ボードを経由し、各 PIN-PD に 50 V の電圧を分配している。右端に 2 つ設けた RJ45 コネクター用端子で 8 対の接続を収容し、6 対は各チャンネルの電圧信号出力、2 対は回路内のオペアンプに必要な +12 V と -12 V の電源供給に割り当てている。計 16 ピン 8 対を約 20m の Cat5e ケーブル 2 本を経由しエレクトロニクスハット内にあるパッチパネルに接続する。計測アンプモジュールの回路構成についての詳細は文献 [13] を参照。データロガーは Agilent 34980A メインフレームに 34934A 型 70ch マルチプレクサを装着して用いた。Belle II 測定器周りに設置した PIN-PD 電流値モニターのセットアップの写真を図 3.8 に示す。

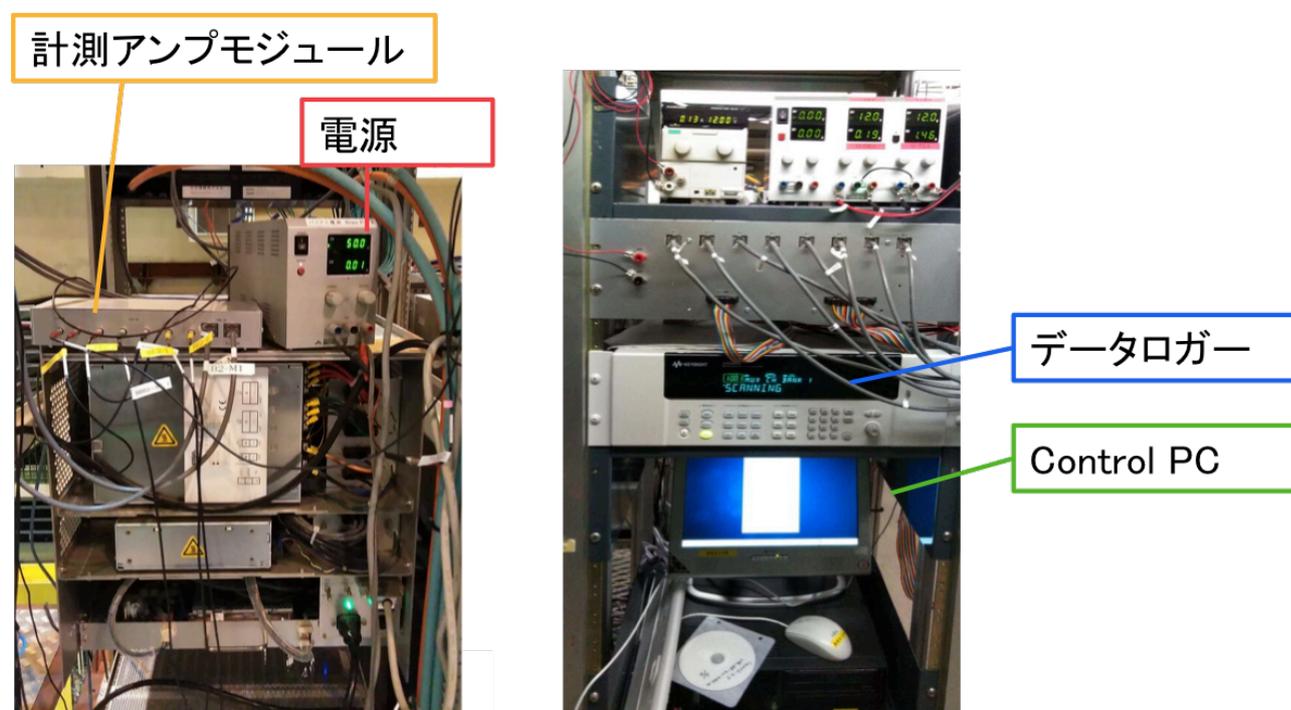


図 3.8: 測定器周辺の VME ステーションにおける設置機器 (左)、エレキハット内の設置機器 (右)

### 3.3.1 生データ

マルチプレクサで受けた計測アンプモジュールの出力はデータロガーのメインフレームが数値化する。合計で 48 チャンネル分のデータを Control PC にブロック転送し、テキストファイルに保存する。この生データはテキスト形式で年月日\_pdcrr.txt (例: 20180717\_pdcrr.txt) というファイル名にして保存する。5 秒に 1 回測定サイクルが走り、1 サイクルのデータは 時:分:秒

48 個の電圧値

というフォーマットになっている。

```
0:0:0
0.990586 1.282059 0.655654 0.778596 0.286908 1.101725 1.046410 1.289332 0.890584 1.142901
0.374396 1.227148 0.968080 1.140378 0.851427 0.905209 0.357410 1.157519 0.825567 0.948305
1.023299 1.166654 0.321269 1.076438 0.851067 0.984510 0.677424 0.930029 0.252137 0.915228
0.813735 0.971411 0.853193 1.003658 0.238786 0.900750 0.885993 1.066421 0.647846 0.801272
0.238662 0.910964 0.912997 1.170752 0.799794 0.972060 0.260752 1.015841

0:0:5
0.990071 1.281878 0.654541 0.778806 0.286888 1.101387 1.046344 1.289356 0.891268 1.144228
...
```

### 3.3.2 電流測定点の配置

PIN-PD 電流値モニターは、8736 本あるカウンターをそれぞれ測定するのではなく、セグメントごとにまとめて読み出しを行う。図 3.9 に示すように 48 分割している。すなわちビーム軸 ( $z$  軸方向) に垂直な  $xy$  平面における方位角  $\phi$  方向に 8 分割、 $z$  軸からの極角  $\theta$  方向に 6 分割である。 $\theta$  方向は前方後方エンドキャップをそれぞれ内側と外側に分け、バレルは前方と後方に分けた。1/8 の単位をオクタント (Octant) と呼ぶことから、 $\phi$  方向の分割については今後  $\phi$  が小さいブロックから順に Oct1, Oct2, Oct3... と称する。図 3.10 は Phase-2, Phase-3 運転中に CsI(Tl) 結晶が浴びる放射線量のモンテカルロシミュレーション結果による見積もりである。このシミュレーションは KEK 加速器グループが開発した SAD プログラム [12] により、軌道を外れたビーム粒子の運動を追跡し、その情報を GEANT4 プログラムでジオメトリを設定した Belle II 測定器シミュレータに渡して測定器中のエネルギー損失を計算する手法に基づいている。

Phase-2 (ルミノシティ  $L = 2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ではルミノシティが低いため、LER つまり陽電子由来のクーロン散乱とタウシェック散乱が主なバックグラウンド源となるのに対して、Phase-3 以降で設計値のルミノシティを達成した場合 ( $L = 8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) では物理的過程である Radiative Bhabha 散乱と二光子過程が主なバックグラウンド源となり、ルミノシティに比例するこれらの寄与が支配的になる。その結果、バレル部では 1.5 Gy/yr、エンドキャップ部では最大 6 Gy/yr に達することがわかる。このように、放射線量は角度依存があると予測されているため、この角度依存を測定できるような分割を行っている。図 3.11 に電流値モニターのチャンネル番号とカウンターの位置の対応を示す。この分割を行なった際に各測定点あたりの結晶の本数を表 3.1 に示す。ここでバレルの 2 つの数字は VME クレートが 4 台の Octant1,3,5,7 の場合とクレートの数が 5 台の Octant2,4,6,8 の場合である。

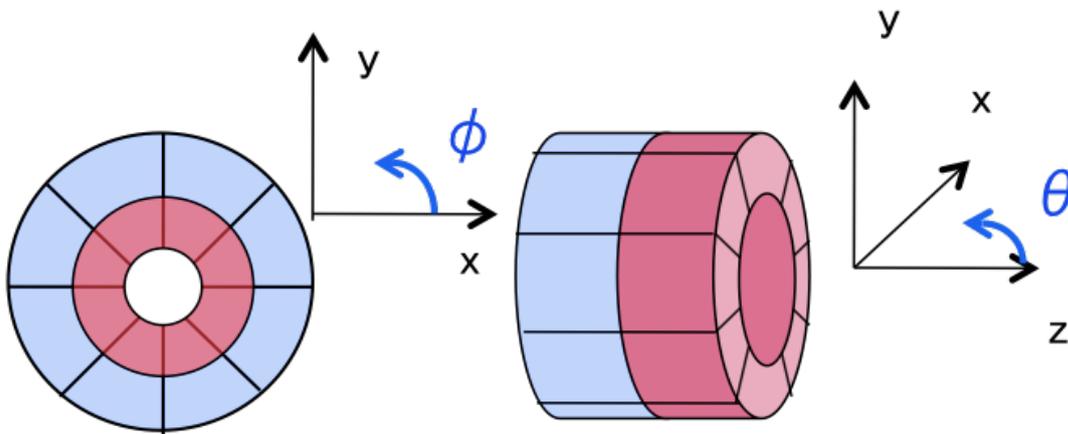


図 3.9: PIN-PD 電流値モニターの分割

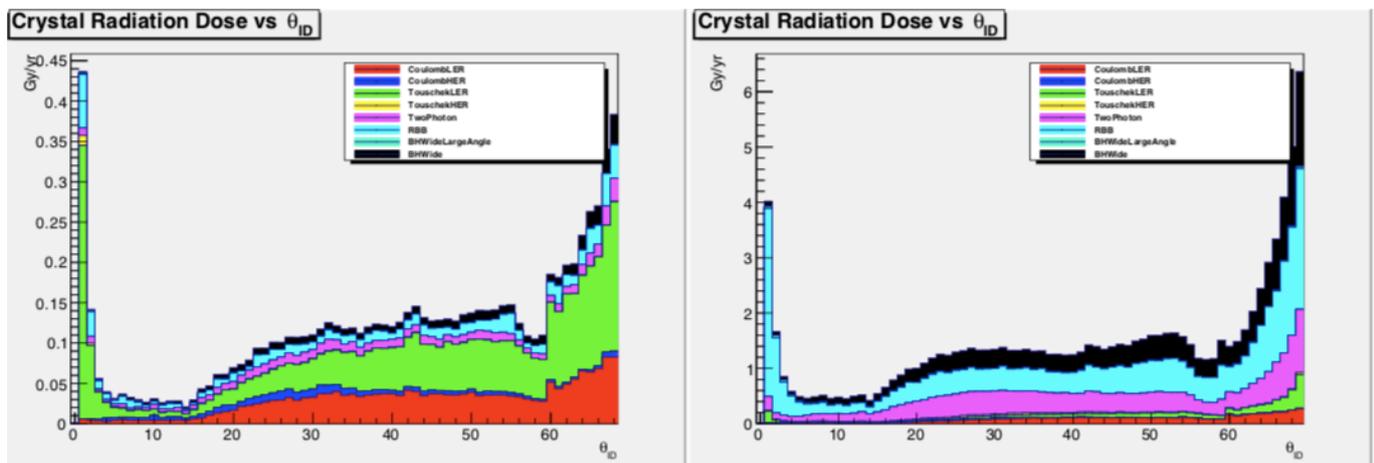


図 3.10: Phase-2,Phase-3 における CsI(Tl) 結晶があびる放射線量の予測 [11]

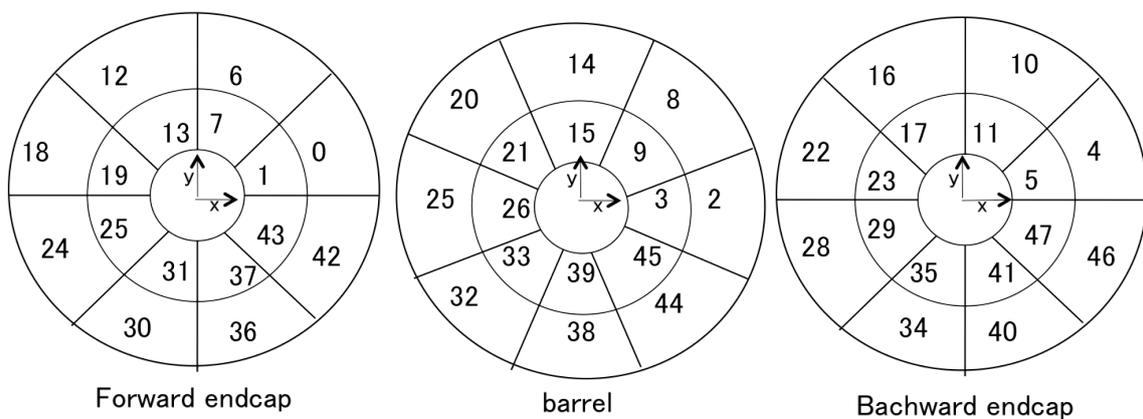


図 3.11: 電流値モニターのチャンネル番号とカウンター群の位置の対応。すべて前方側から見た図で、バレルは奥行きを考慮し、後方の半分を外側に配置して描いた。

表 3.1: 1 測定点あたりの結晶の本数

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

# 第4章 Phase-2 運転期間における CsI(Tl) 結晶のあびた放射線量の 測定

SuperKEKB 加速器の第二期試験運転、すなわち Phase-2 運転は 2018 年 3 月 22 日から 7 月 17 日まで行われた。本章では、Phase-2 期間中に収集した電流値モニターの結果についてとそこから算出した放射線量の結果について述べる。

## 4.1 モニターした電流値の推移

電流値モニターの生データは挿入した 10 k $\Omega$  の電圧降下が計測アンプで 10 倍に増幅されたものを記録したものである。ただし、各セグメントごとに含まれる結晶の本数が異なるので、結晶 1 本当たりの電流値 [nA/crystal] に換算する。

$$I = \frac{V}{10R \cdot N_{\text{cry}}} \quad (4.1)$$

ここで  $N_{\text{cry}}$  は表 3.1 に示した当該セグメント中に含まれる結晶の本数である。Phase-2 期間中に測定した Oct1 の 6 チャンネル分のモニター結果を図 4.1 に示す。

暗電流の値が前方エンドキャップ内側 (~450 nA) > 後方エンドキャップ内側 (~200 nA) > 前方エンドキャップ外側 (~80 nA) > 後方エンドキャップ外側 (~40 nA) > バレル (~20 nA) となっている。これは Belle 実験期間中にエンドキャップ部分が中性子被ばくを多く受けバルク欠陥が生じたためである。次に Phase-2 運転中の 6 月 17 日の加速器の運転状況と PIN-PD の電流値モニター結果の比較を図 4.2 を示す。12 時から 15 時のように HER と LER がともにビーム電流 0、つまりビームが OFF の時には PIN-PD の電流値は一定であるのに対して、ビームが ON になると PIN-PD 電流値の増加が見られ、特にビームが入射された際に増加が大きい。このことから PIN-PD の電流値モニターはビームバックグラウンドを検出しており、特にビーム入射時のバックグラウンド増加にも感度があることが分かる。

加速器の運転状況やパラメータによってバックグラウンド量は変化する。典型例として、図 4.3 に 2018 年 4 月 20 日のバレル前方の PIN-PD 電流値モニターの結果を示す。暗電流値は 20 nA 程度であるのに対して、14 時 39 分にごく短時間に電流値が最大 200 nA ほど上昇したことが分かる。このタイミングは LER 側で最終収束超電導電磁石の QCS がクエンチしてビームが失われたタイミングであり、軌道を外れて QCS に入射したのち Belle II 測定器にバックグラウンドが入射したことが分かる。このように電流値モニター

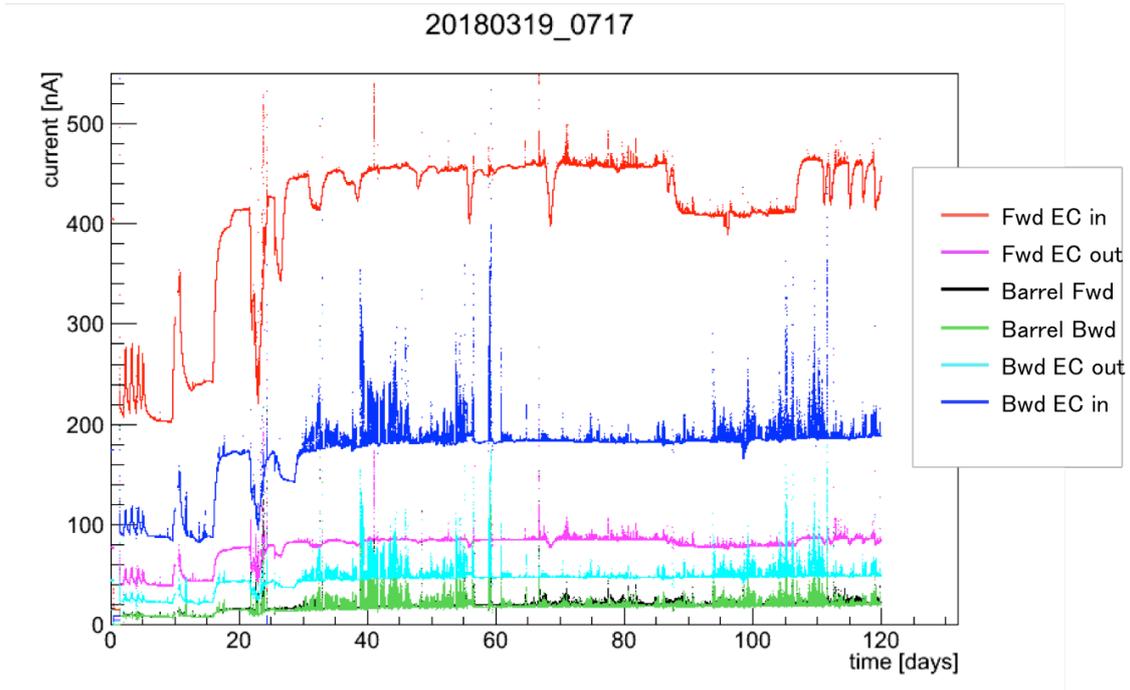


図 4.1: Phase-2 期間中に測定された Oct1 の 6 チャンネルにおける電流値モニター結果。横軸は時間 [day]、縦軸は結晶 1 本あたりの電流値 [nA/crystal] である。FwdEC は前方エンドキャップ、BwdEC は後方エンドキャップを表す。

を用いてビームバックグラウンドの状況が把握できることを確認した。Phase-3 ではこの電流値モニターの値を NSM2(Network Shared Memory)[9] により Belle II のデータ収集システムおよび加速器制御系の計算機ネットワークに送信して、他の計算機ノードが随時これを受信して表示や演算ができる。

## 4.2 放射線量の算出過程

このモニター結果を用いて ECL の結晶があびた放射線被ばく量の積算を求める。電流値モニターの測定値を  $I_{\text{meas}}$ 、暗電流値の値を  $I_{\text{dark}}$  とすると、ビームバックグラウンドにより増加した電流  $I_{\text{rad}}$  は  $I_{\text{rad}} = I_{\text{meas}} - I_{\text{dark}}$  と書ける。図 4.4 にこれらの変数の定義を示す。表 4.1 に示すパラメーターの値を用いて、1 秒あたりに結晶が浴びた放射線被ばく量 ( $dD/dt$  [Gy/sec]) は PIN-PD の増加電流 ( $I_{\text{rad}}$  [nA]) を用いて

$$\frac{dD}{dt} = 4.0 \times 10^{-8} I_{\text{rad}} \quad (4.2)$$

と表すことができる。この  $dD/dt$  を時間で積分してやるとある期間に CsI(Tl) 結晶のあびた放射線量の積算が分かり、

$$D = \int \left( \frac{dD}{dt} \right) dt = \Sigma 4.0 \times 10^{-8} I_{\text{rad}} \Delta t \quad (4.3)$$

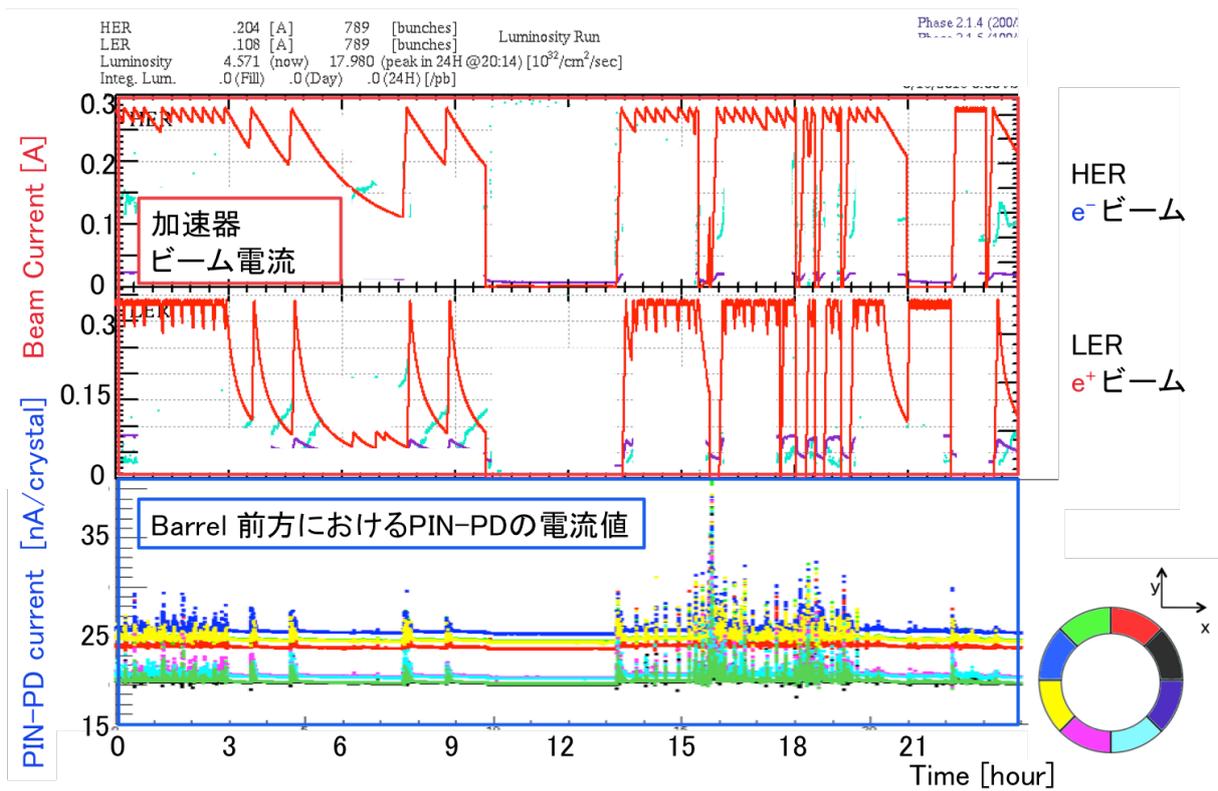


図 4.2: 2018 年 6 月 17 日の午前 0 時から 24 時間の PIN-PD 電流値モニター出力結果と加速器の運転状況の比較。横軸は時間 [hour]、上の赤枠で囲まれた範囲はビーム電流値 [A]、下の青枠で囲まれた範囲は PIN-PD 電流値モニターの出力結果 [nA/crystal] である。

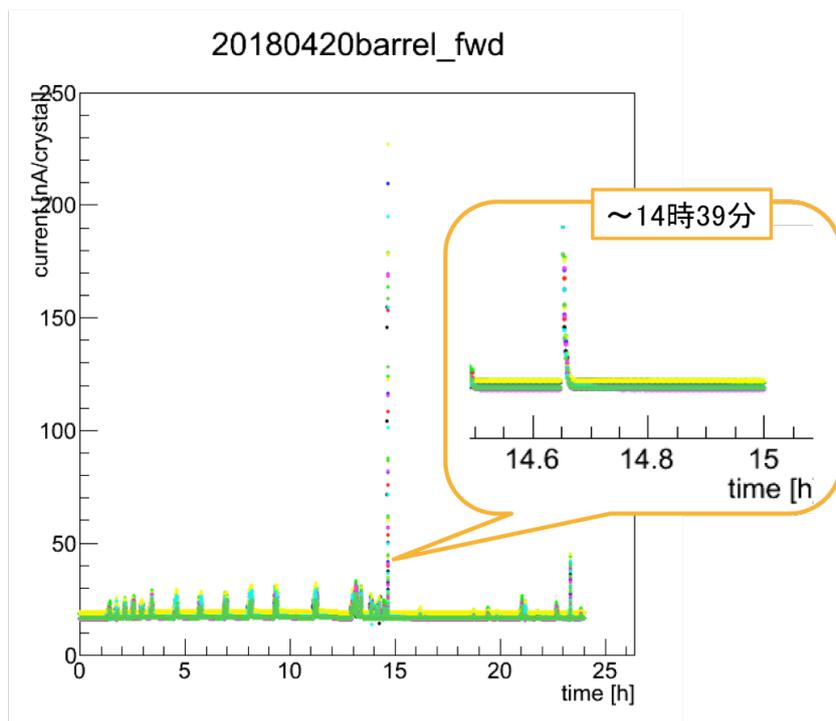


図 4.3: 2018 年 4 月 20 日の 24 時間にわたるバレル前方における PIN-PD 電流値モニター結果。横軸は時間 [hour]、縦軸は PIN-PD 電流値モニターの出力結果 [nA/crystal] である。14 時 39 分は LER の最終収束超伝導電磁石 (QCS) がクエンチしてビームが失われた事象の発生時刻である。

と書ける。ここで  $\Delta t$  は電流値モニターのデータサンプリング周期 5 sec であり、 $\Sigma$  は測定を行なった期間中を通じて和をとることを意味する。この式を用いて放射線量の積分値を求める。

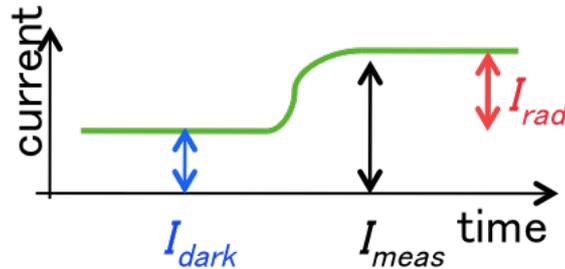


図 4.4: 暗電流値 ( $I_{\text{dark}}$ )、ビームが ON 時の電流測定値 ( $I_{\text{meas}}$ )、放射線入射による電流増加分 ( $I_{\text{rad}}$ ) の定義

表 4.1: 放射線量算出に使用する物理量

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

#### 4.2.1 暗電流値の定義

暗電流とはビーム OFF 時の電流値である。本研究で暗電流値の算出に用いたビーム OFF のデータを表 4.2 にまとめる。SuperKEKB 加速器は 2 週間に 1 日のメンテナンス日にビームを停止するため原則としてメンテナンス日のデータからその時点での最新の暗電流値を見積もることができる。それ以外にも加速器の運転記録に基づいて、ビーム OFF になった時間帯があれば、そのデータを暗電流値の見積もりに利用した。該当する日の PIN-PD 電流値モニター結果について時間平均をとり、日付ごとにファイルに保存した。図 4.5 に表 4.2 の時刻のデータから得た、Beam OFF の時の暗電流値の時間変化を示す。時間とともに暗電流の値が変化するためビーム OFF の時期が来るたびに暗電流の値を更新する必要がある。バレルと後方エンドキャップについては表 4.2 に示す 13 回のビーム OFF の時間のデータより暗電流の値をその都度更新して放射線量の算出を行った。前方エンドキャップは暗電流値の変化が Phase-2 期間中を通じてバレル部および後方エンドキャップ部よりも格段に大きく、さらに工夫が必要であったので次章に詳しく述べる。

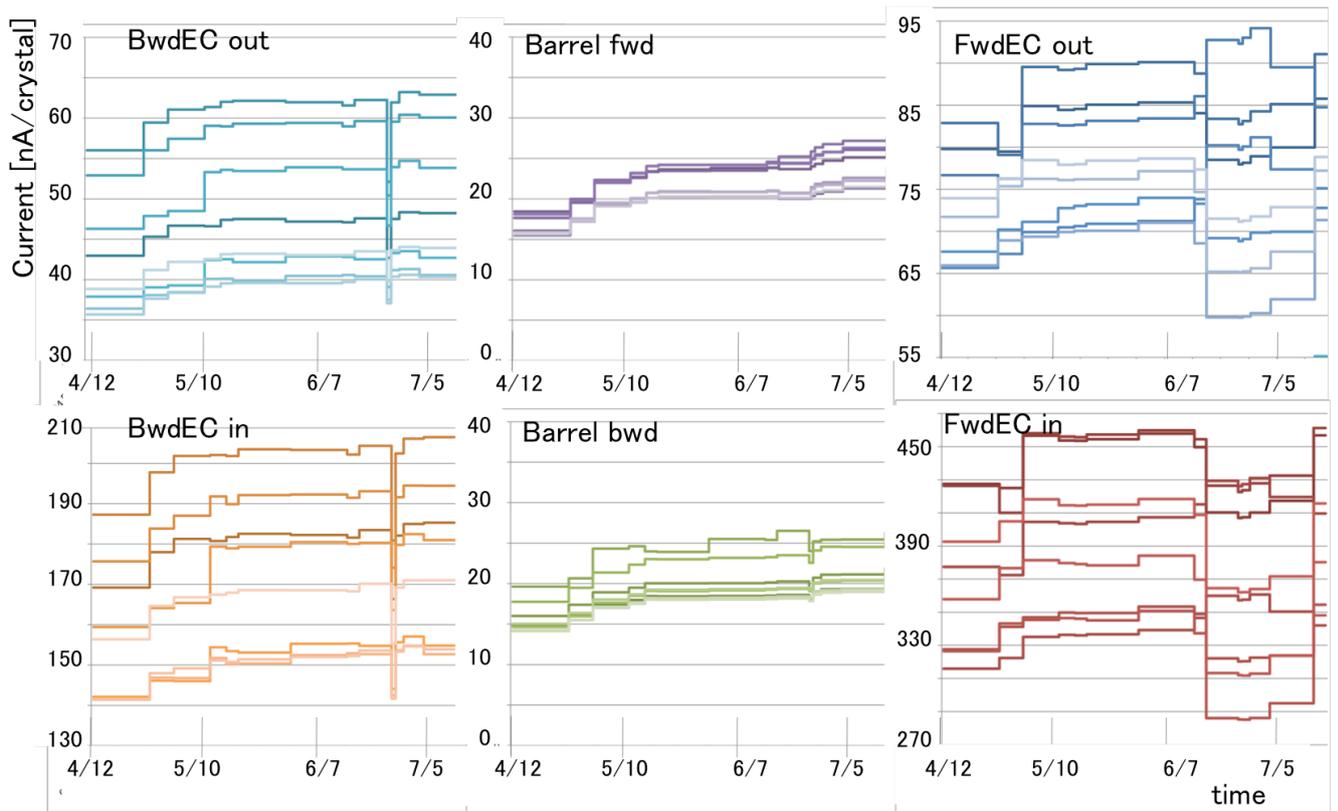


図 4.5: Phase-2 期間中のビーム OFF の時の暗電流値 横軸は時間 [day]、縦軸は電流値 [nA/crystal]。

表 4.2: 暗電流の見積りに用いたデータ

日付	時間
4/12	9:00~20:00
4/26	9:00~20:00
5/2	12:00~16:00
5/11	11:00~16:00
5/15	0:00~24:00
5/18	0:00~15:00
5/31	9:00~19:00
6/14	9:00~18:00
6/17	10:00~13:00
6/28	9:00~20:00
7/3	13:00~17:00
7/14	15:00~24:00

#### 4.2.2 バレルおよび後方エンドキャップの放射線被ばく量

本節では、バレルと後方エンドキャップについて放射線被ばく量の積算を求めた結果について述べる。図 4.6 にバレル部における放射線被ばく量の積算結果、図 4.7 に後方エンドキャップ部における放射線被ばく量の積算結果を示す。アポートされるなど一時的にビームが無くなったり、ビーム電流が小さい時、モニターの測定精度により前節で求めた暗電流値に比べて読み出した PIN-PD の電流が小さくなった場合は放射線量の積算が  $<0$  になってしまうので、 $I_{rad} < 0$  の場合は  $I_{rad} = 0$  と計算して放射線量の算出を行った。バレルについては前方は  $0.22 \sim 0.29$  Gy、後方では  $0.35 \sim 0.43$  Gy であり、総じて後方がビームバックグラウンドによる放射線被ばく量が多いという結果となった。陽電子ビーム由来のビームバックグラウンドが電子ビーム由来のものより多い可能性がある。また、後方エンドキャップについては、外側で  $0.43 \sim 0.66$  Gy、内側で  $0.87 \sim 1.28$  Gy であり、バレルよりさらに放射線被ばく量が多く、また、内側の方が外側に比べて大きいことが分かった。これはビームバックグラウンドの起源となる物理過程の反応断面積がビーム進行方向から小角度の場所で大きいことと、バックグラウンドのフラックスは距離の 2 乗に反比例することから、ビーム衝突点からくるビームバックグラウンドのフラックスは内側の方が大きくなるためであると考えられる。

Belle 実験の 10 年間で浴びた放射線被ばく量を図 3.1 に示したが、バレルで約 1 Gy、つまり 1 年あたり約 0.1 Gy であった。そのため、Phase-2 期間中に Belle 実験での数年分の放射線被ばくがあったと言える。KEKB 加速器のピークルミノシティが  $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であったのに対して Phase-2 でのピークルミノシティは  $5.55 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であった。そのため今回測定されたビームバックグラウンドは衝突事象由来ではなく、タウシエック効

果やビームガス散乱由来である。Phase-2 では初めてナノビーム方式によるビーム衝突を成功させたが、ビームバックグラウンド低減のための加速器の運転調整やコリメータの調整などがさらに必要である。

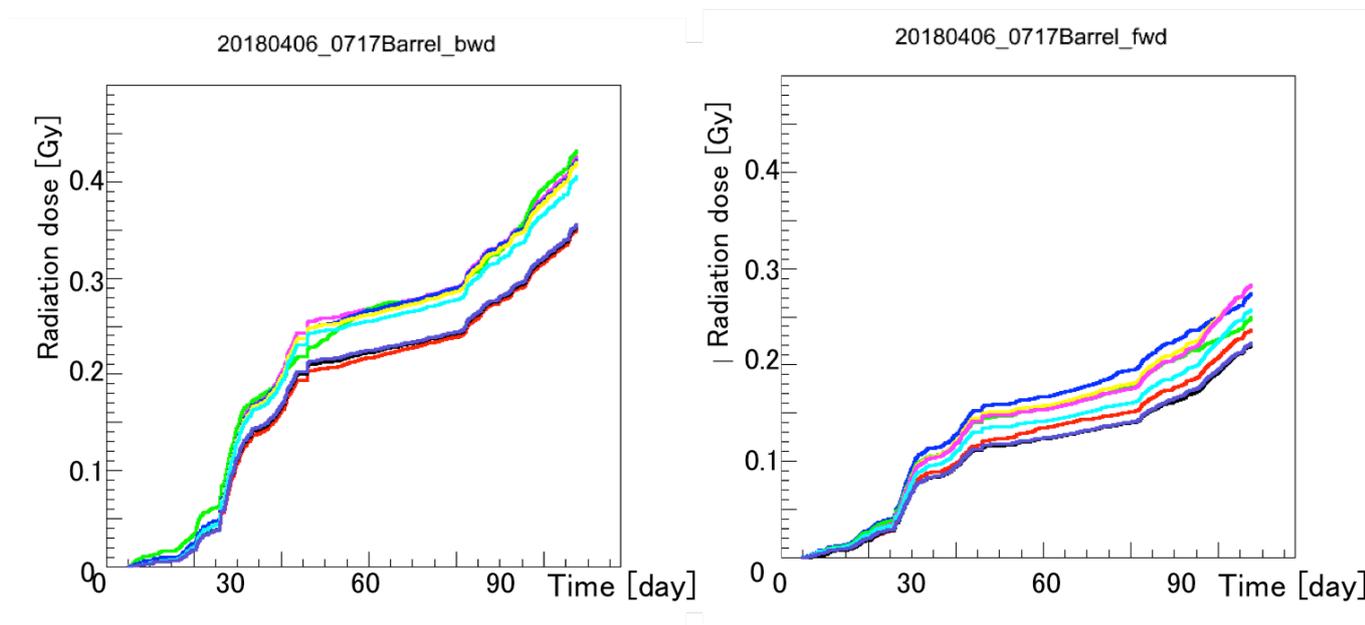


図 4.6: 4月6日から7月17日までの期間におけるバレル後方(左)とバレル前方(右)のCsI(Tl)結晶が浴びた放射線量積算値の推移。色は $\phi$ 方向の位置の違いを表している。

## 4.3 前方エンドキャップにおける放射線量の算出

### 4.3.1 暗電流値と温度の相関

前方エンドキャップにおける暗電流値の増減について述べる。図 4.8 に Phase-2 期間中の前方エンドキャップ内側における PIN-PD 電流値モニターの結果、図 4.9 に前方エンドキャップ内側における温度モニターの結果を示す。温度の変化と相関して PIN-PD の電流値が変化している。暗電流は熱励起により発生した電子・正孔対の移動によって起こるため、温度が下がると伝導帯に熱励起される電子が減ってキャリア密度が下がるため暗電流が減少し、温度が上昇した時はその逆になる。温度変化の要因としては、PIN-PD の近くに取り付けられているプリアンプがジュール熱を発生するが、ECL 用のエレクトロニクスの電源を落とすとプリアンプからの発熱がなくなり、冷却水により冷やされて温度が下がるが、エレクトロニクスの電源を投入すると温度が上昇し、ある温度で熱平衡状態になる。図 4.8 の最初の 15 日までの間に見られる温度変化はこのためである。そのあとは継続して電源入で運転した。

前方エンドキャップカロリメータは ARICH 検出器と結合してインストールされている。この ARICH 検出器の冷却は Phase-2 期間中不十分で、連続して運用すると温度が 60 °C まで上がるという問題があり、温度上昇の顕著なところは一時的に電源断とする措置が行

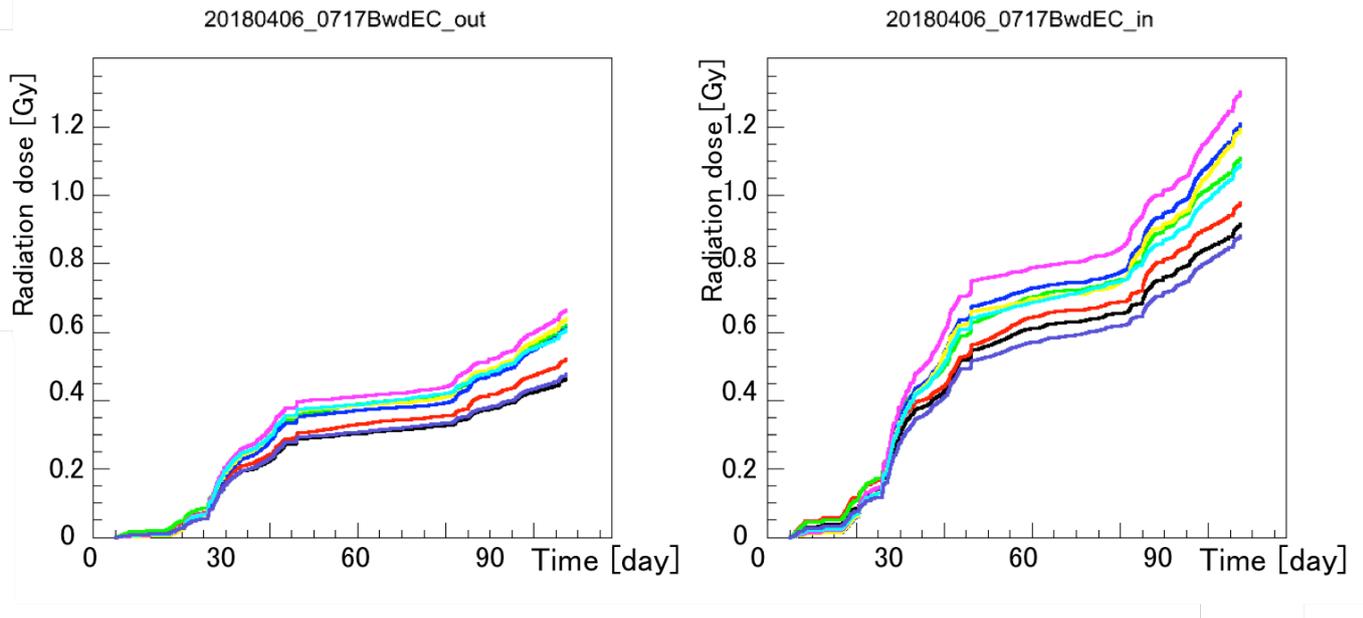


図 4.7: 4月6日から7月17日までの期間における後方エンドキャップ外側(左)と後方エンドキャップ内側(右)のCsI(Tl)結晶が浴びた放射線量積算値の推移。色は $\phi$ 方向の位置の違いを表している。

われた。15日目以降の温度変化はこの要因による。これによりチャンネルによって温度の傾向が異なることも説明できる。ここで図4.9の75日目の温度変化について着目してみると、ch5(黄色)は内側でも外側でも約 $0.8^{\circ}\text{C}$ 変化している。その時のPIN-PD電流値は外側で約 $35\text{ nA/crystal}$ 、内側で約 $7\text{ nA/crystal}$ 変化していて、同じ温度変化しても暗電流値の変化量が違うことがわかる。そこで、次に温度と電流値の相関を見た。

温度モニターのチャンネルのうち、PIN-PD電流値モニターの暗電流値への影響を最も的確に示すものを選別した。前方エンドキャップにおいて図4.8のようにビームバックグラウンドの入射による増加電流が6月の半分程度である5月のデータを用いて温度と電流値の相関をとった。内側のチャンネルの結果を図4.10に、外側の結果を図4.11示す。前方エンドキャップは $\phi$ 方向に16セグメントに分けてカウンターが配置されており、各セグメントごとに3箇所サーミスターが取り付けられていて合計48チャンネルで読み出しを行っている。電流値モニターの1つのOctantの内側と外側を合わせた単位につきあたりサーミスターは6つ設置されている。16チャンネルあるPIN-PDモニターのチャンネル各々について、最も強い相関を示した温度モニターのチャンネルを選び出した結果を表4.3に示す。また、温度が上昇するときと下降するときで同じ温度で電流値が異なるヒステリシスを示した。図4.12に示すように、温度モニター用のサーミスターは熱源となるプリアンプの近くに取り付けられており、該当カウンターの温度は正しく測っているが、冷却配管の経路に依存した温度分布があり、PIN-PD電流をモニターしているブロックの平均温度とは必ずしも一致しないためである。

表4.3のチャンネルの組み合わせを使って温度相関をとり、内側と外側で比較をおこなった。図4.13は4~7月のビームOFF、Octant1の内側と外側のデータを用いて温度相関の比較を行い、一次関数でフィットしたものである。傾きは内側が $52.85 \pm 0.18$ 、外側が

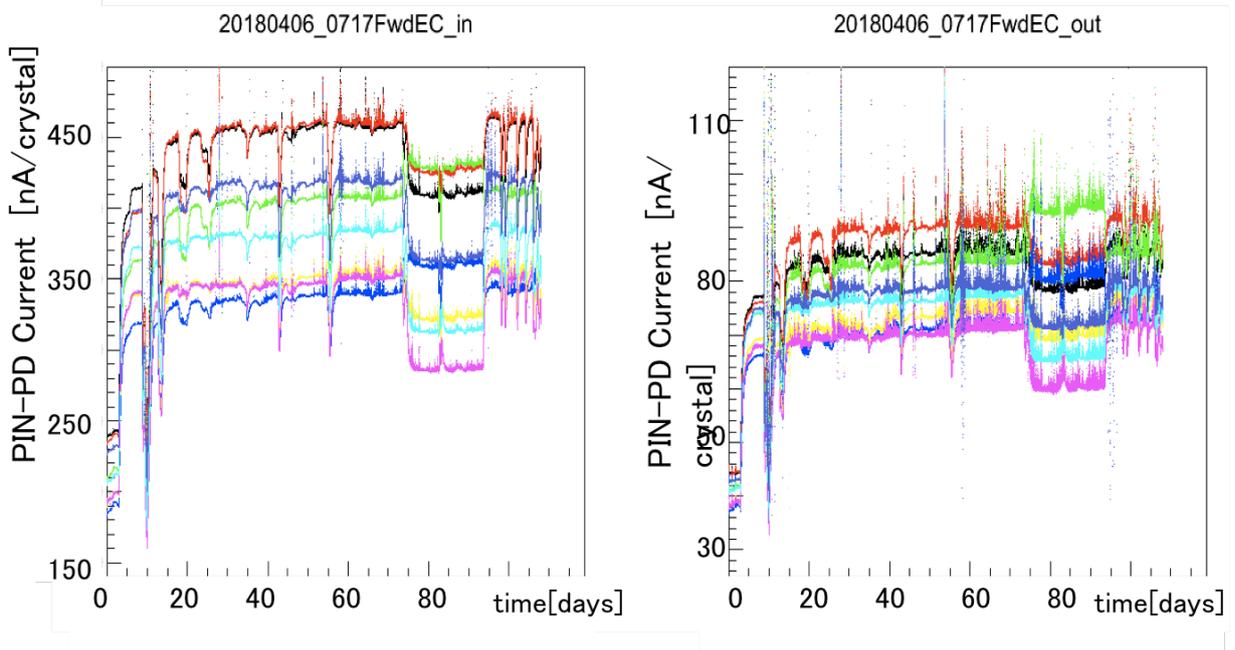


図 4.8: 4月6日から7月17日までの期間における前方エンドキャップ内側でのPIN-PD電流値モニターの結果 [nA/crystal]

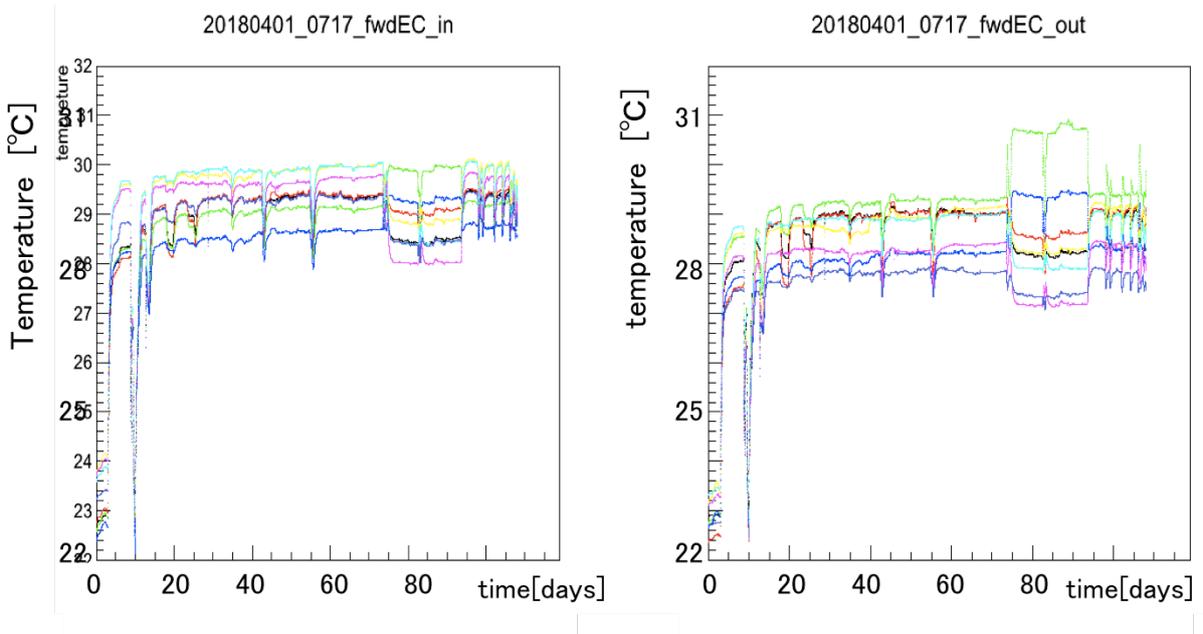


図 4.9: 4月6日から7月17日までの期間における前方エンドキャップ内側での温度の時間変化 [°C]

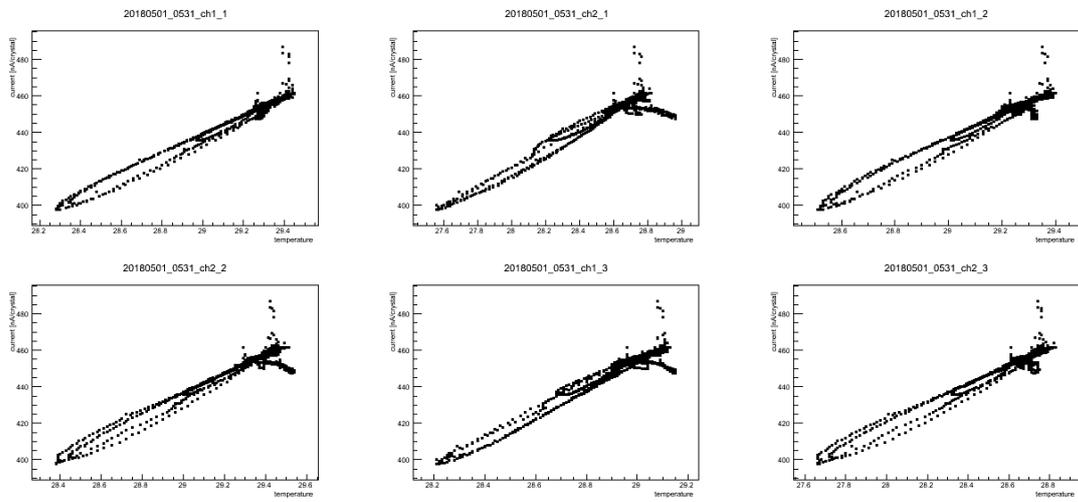


図 4.10: 温度と電流値の相関。電流値モニターの Oct1 内側のチャンネルに対して 6 個の温度モニターの結果について相関をとっている。横軸は温度 [°C]、縦軸は電流 [nA/crystal]

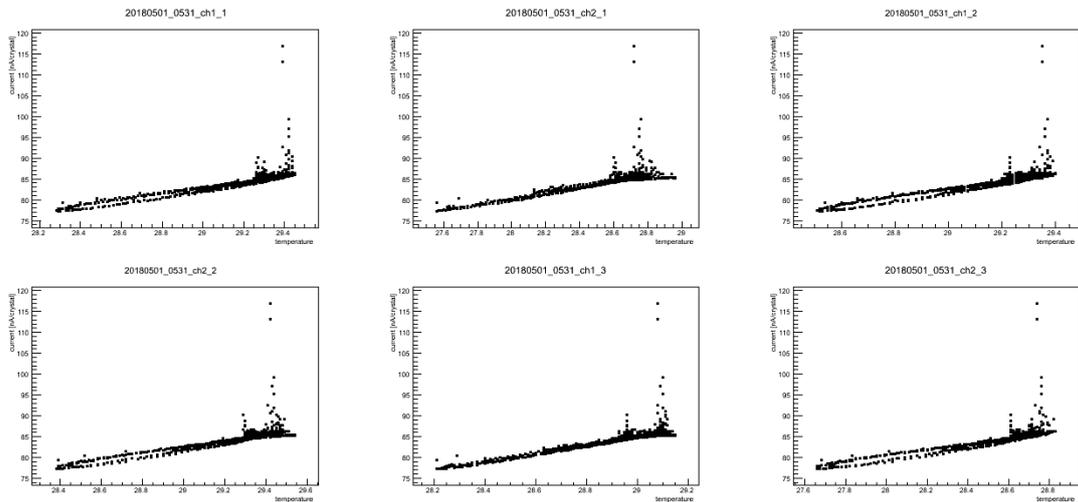


図 4.11: 温度と電流値の相関。電流値モニターの Oct1 外側のチャンネルに対して 6 個の温度モニターの結果について相関をとっている。横軸は温度 [°C]、縦軸は電流 [nA/crystal]

9.14±0.08 であり、温度係数 (=傾き) は外側に比べて内側の方が約6倍ほど大きいことが分かった。同様のことを他のチャンネルについてもおこなった結果を表 4.3 にまとめる。これらの結果から、温度係数は、1°C あたり PIN-PD 暗電流値の相対値で約 12% であり、Belle 実験中に中性子被ばくをあげて暗電流値が大きい内側の方が温度係数が大きくなることが分かった。熱励起されて暗電流となるキャリアは主にバルク損傷による格子欠陥から放出されると考えることと無矛盾である。この結果を用いて、温度で補正をして暗電流値の見積もりを行う。

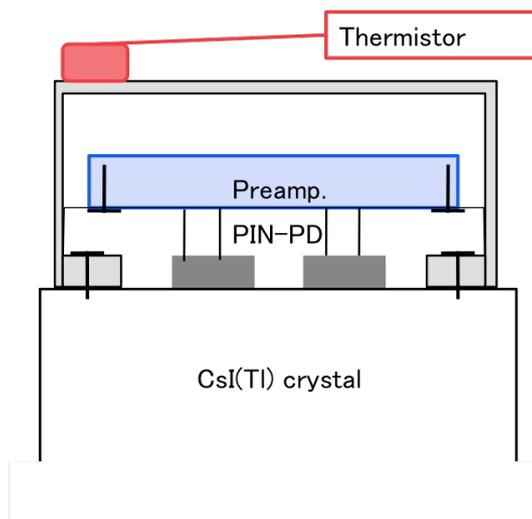


図 4.12: ECL の CsI(Tl) カウンター内に設置されているサーミスタの位置。サーミスタは熱伝導性のある接着剤でプリアンプケースの外側に接着されている。

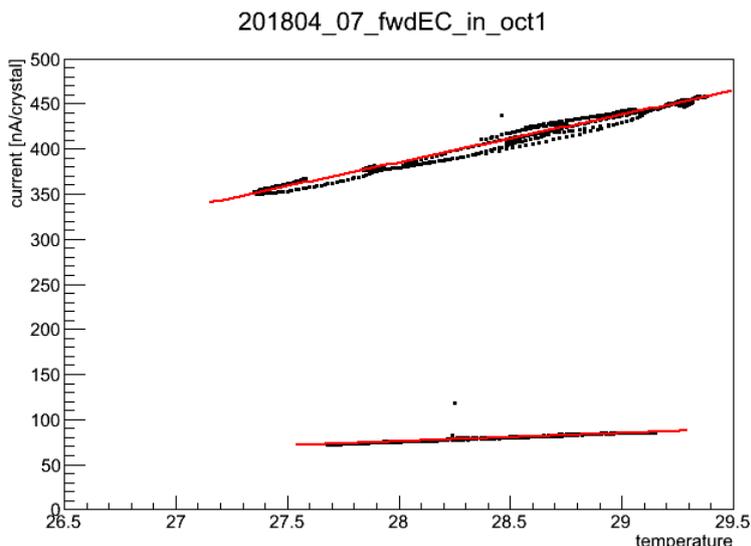


図 4.13: 温度と電流値の相関。電流値モニターの Oct1 の内側 (上方) 外側 (下方) である。横軸は温度 [°C]、縦軸は電流 [nA/crystal]

表 4.3: 暗電流の見積りに用いたデータ

oct	位置	電流値のチャンネル	温度のチャンネル	傾き	切片
1	in	1	0	$52.85 \pm 0.18$	$-1095 \pm 5$
	out	0	32	$9.14 \pm 0.08$	$-180 \pm 2$
2	in	7	2	$53.0 \pm 0.2$	$-1101 \pm 6$
	out	6	34	$8.67 \pm 0.02$	$-162.1 \pm 0.7$
3	in	13	4	$48.8 \pm 0.2$	$-1018 \pm 6$
	out	12	36	$9.19 \pm 0.04$	$-186.8 \pm 1.2$
4	in	19	6	$46.0 \pm 0.23$	$-984 \pm 6$
	out	18	38	$8.28 \pm 0.03$	$-162.7 \pm 0.7$
5	in	25	8	$38.08 \pm 0.11$	$-788 \pm 3$
	out	24	40	$8.24 \pm 0.05$	$-165.6 \pm 1.6$
6	in	31	10	$40.65 \pm 0.09$	$-859 \pm 2$
	out	30	42	$9.65 \pm 0.04$	$-202.9 \pm 1.3$
7	in	37	12	$45.28 \pm 0.07$	$-974 \pm 2$
	out	36	44	$10.49 \pm 0.04$	$-227.0 \pm 1.2$
8	in	43	14	$50.04 \pm 0.16$	$-1050 \pm 4$
	out	42	46	$11.18 \pm 0.05$	$-232.6 \pm 1.4$

### 4.3.2 暗電流値の導出

ビーム OFF 時の PIN-PD 電流を温度の一次関数として補正して得た暗電流値と Phase-2 期間全体にわたる一次関数でフィットした結果 (表 4.3) を用いて暗電流値を見積もった。図 4.14 に Octant5 内側の、見積った暗電流と PIN-PD 電流値モニター結果を時間の関数として示す。75 日目から 95 日目の期間は、見積もった暗電流値と PIN-PD の電流値に乖離がある。そのためこの期間についてのみ暗電流値の見積りに追加の補正が必要だと考えられる。そこで PIN-PD の電流値と見積もった暗電流値の差

$$\Delta I = I - I_0 \quad (4.4)$$

に着目した。分布を図 4.15 に示す。これによると安定して暗電流の算出ができていないバレル部はゼロ付近にピークがあり、ビームが来た時のバックグラウンドの増加が高い方のテールとして現れている。それに対して前方エンドキャップ Octant5 内側では約 12 nA 離れたところにピークがあり、これは 75 日目から 95 日目にかけての期間 (6 月 14 日 ~ 7 月 4 日) の暗電流の見積もりがこれまでに述べた措置では依然として不完全なためと考えられる。 $\Delta I$  分布を正規分布でフィットし、その平均値  $\mu$ 、標準偏差を  $\sigma$  として  $\mu - 3\sigma$  の値

を暗電流値としてこれに対する残差を積算して放射線被ばく量の算出を行った。その結果を図 4.16 に示す。

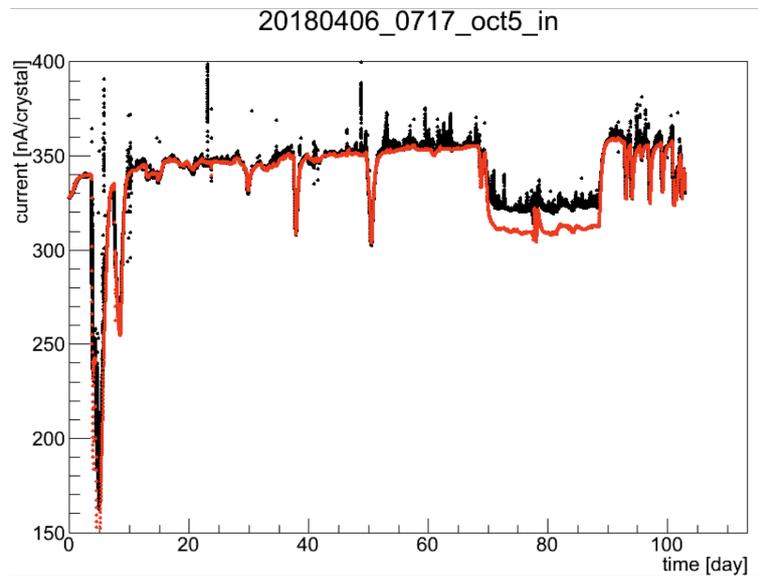


図 4.14: 4月6日から7月17日までの期間におけるビーム OFF 時の PIN-PD 電流値を温度モニター値の一次関数として補正して得た暗電流値 (赤線) と Phase-2 期間全体にわたる PIN-PD 電流モニター値 (黒線) の比較。横軸は時間 [days]、縦軸は電流 [nA/crystal] である。これは Octant5 におけるものであるが、他のオクタントも同様の傾向を示す。初期の 10 日間ほどの期間は ECL の ON/OFF による急激な温度変化に起因する。

前方エンドキャップ外側のチャンネルについてはビーム OFF 期間の PIN-PD 電流値と温度の平均を求め、それぞれ  $I_0$  と  $T_0$  として、温度モニターの結果  $T$  を用いて

$$I = a(T - T_0) + I_0 \quad (4.5)$$

の計算式により暗電流値  $I$  を見積もったここで係数  $a$  は表 4.3 に示した傾きの値である。ビーム OFF のデータについては表 4.2 のデータのうち温度が大きく変化していた 7 月 3 日のデータは排除し、6 月 29 日から 7 月 13 日の間のデータを処理するには 6 月 28 日のデータで得る  $I_0$  と  $T_0$  を用いた。95 日目から 105 日目までのデータは、内側の 75 日目から 95 日目に見られたのと同様の問題があることが判明したので、既述した同じ手順にしたがって暗電流値の値を得た。

## 4.4 最終結果

前節までに記述した手法により、前方エンドキャップカロリメーターの内側および外側の被ばく量積算を Phase-2 実験開始からの日数の関数として、図 4.16 に示す。また、最終的な積算値を表 4.4 に示す。8 つあるオクタントの被ばく量を平均した値を  $\theta$  の関数として図 4.17 に示す。図 3.10 に示したビームバックグラウンドシミュレーションによる予測と傾向は一致していることがわかる。

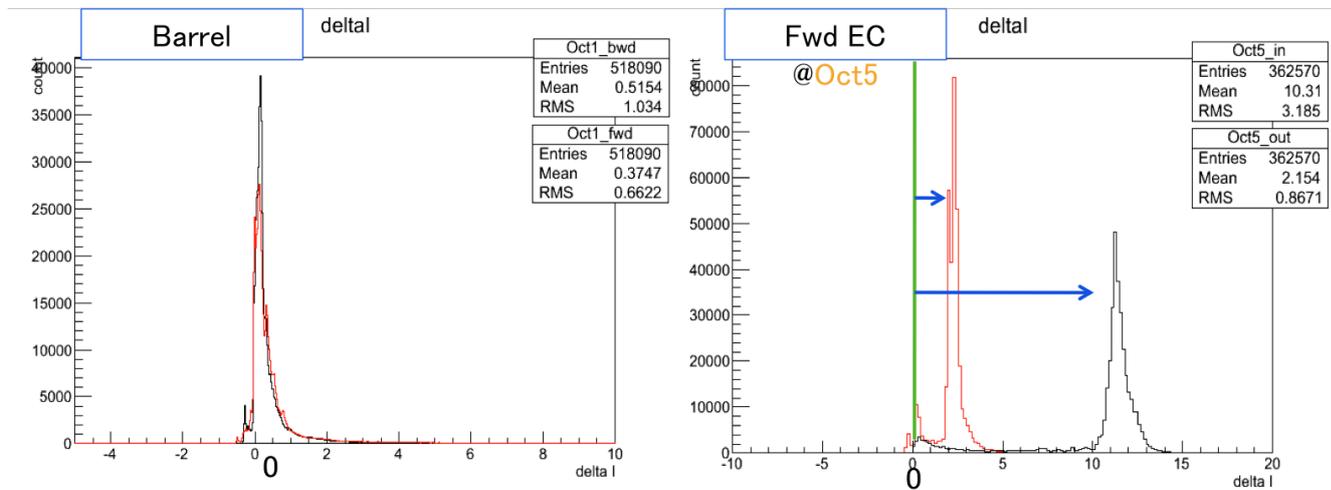


図 4.15: バレル(左)と前方エンドキャップ Octant5(右)における  $\Delta I$  [nA/crystal] の分布。前方エンドキャップの内側は黒、外側は赤のヒストグラムで描いてある。

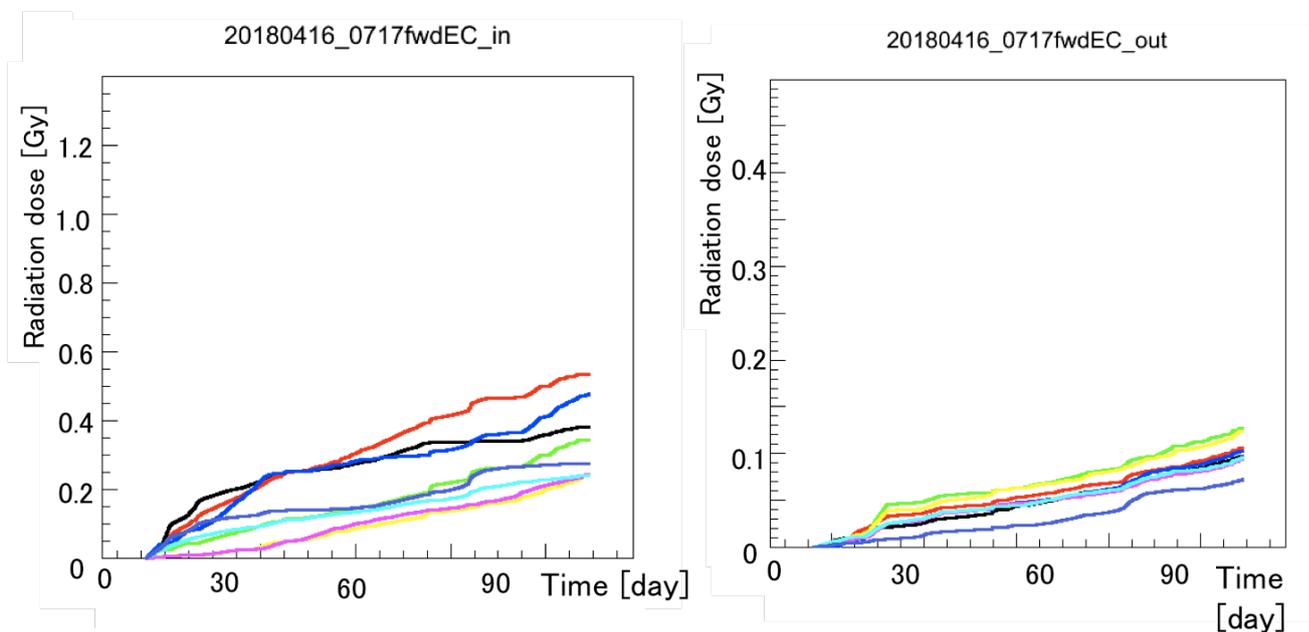


図 4.16: 4月16日から7月17日までの期間における前方エンドキャップ内側(左)と後方エンドキャップ外側(右)のCsI(Tl)結晶が浴びた放射線量積算値の推移。色は $\phi$ 方向の位置の違いを表している。

表 4.4: Phase-2 期間の 4/16~7/17 における CsI(Tl) 結晶が浴びた放射線量の積算 [Gy]

	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	in	out	Fwd	Bwd	out	in
oct1	0.38	0.097	0.21	0.35	0.45	0.88
oct2	0.54	0.11	0.22	0.34	0.50	0.92
oct3	0.34	0.13	0.23	0.42	0.60	1.1
oct4	0.48	0.10	0.26	0.41	0.61	1.2
oct5	0.24	0.12	0.27	0.41	0.64	1.1
oct6	0.24	0.094	0.27	0.42	0.66	1.3
oct7	0.24	0.096	0.25	0.40	0.60	1.1
oct8	0.28	0.072	0.21	0.35	0.47	0.85

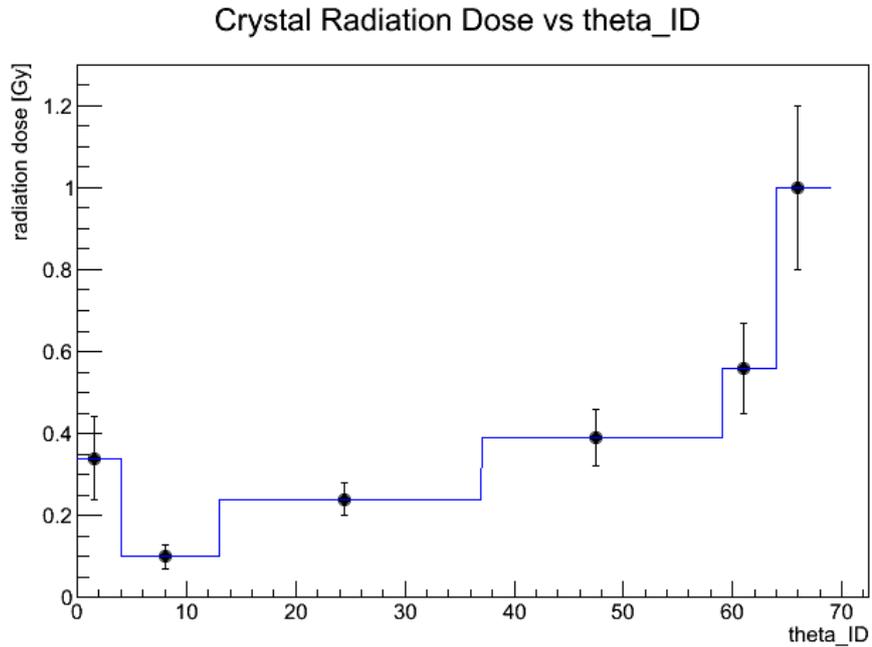


図 4.17: Phase-2 期間の 4/16~7/17 における放射線被ばく量の  $\theta$  分布。横軸は  $\theta_{ID}$ 、縦軸は放射線被ばく量の積算 [Gy]

## 第5章 LYSO ビームロスモニター

電流値モニターは5秒のデータサンプリング間隔であり遅いビームバックグラウンド成分は検出可能だが、ビーム入射した直後にビームが Belle II 測定器周辺を周期  $10 \mu\text{s}$  で周回するたびに到来するバックグラウンドの数ミリ秒から数十ミリ秒の間のふるまいを測定することはできない。このような短い時間スケールで変化するバックグラウンドの測定方法について検討を行った。ECL の外側のシールドにカナダのマギル大学およびモントリール大学のグループが LYSO ビームロスモニターを Phase-2 の終盤に設置した。この LYSO モニターの信号を分岐し、PC オシロスコープで高速波形サンプリング読み出しを行い、取得したデータに適切な処理を与えることで、Belle II 測定器で短い時間スケールで変化するバックグラウンドの時間構造を可視化する手法について検討を行った。

エンドキャップ ECL 内筒内側、すなわちビームラインに面した側にはシールドが配置されている。この円錐面に沿うよう製作されたシールドに前方後方 2 本ずつ、計 4 本のカウンターが設置された。これは LYSO シンチレータと PMT を組み合わせたカウンターである。LYSO は直径 30 mm 高さ 30 mm の円筒形で反射材として白色のテフロンフィルムでおおわれている。PMT は浜松ホトニクス製の R-7761-70 を使用している。PMT と結晶は銅/真鍮に覆われて静電遮蔽している。LYSO の基本的な性能については表 2.1、PMT(R-7761-70) の性能を表 5.1 にまとめる。

表 5.1: PMT の仕様 (R-7761-70)

項目	単位	
有効受光面サイズ	直径 27	mm
最大感度波長	420	nm
増倍率	$1.0 \times 10^7$	
増倍率 at 1.0 T	$1.5 \times 10^5$	

### 5.1 セットアップ

このカウンターが設置された位置を図 5.1 に示す。データ収集用のセットアップのブロックダイアグラムと写真を図 5.2 にまとめる。この 4 本のカウンターの信号は Belle II 測定器横にあるエレクトロニクスハット内オシロスコープに接続され、 $50 \Omega$  で終端されていた。このオシロスコープは、バンチが入射される際に配られるビーム入射信号でトリガーしている。オシロスコープの出力結果の一例を図 5.3 に示す。

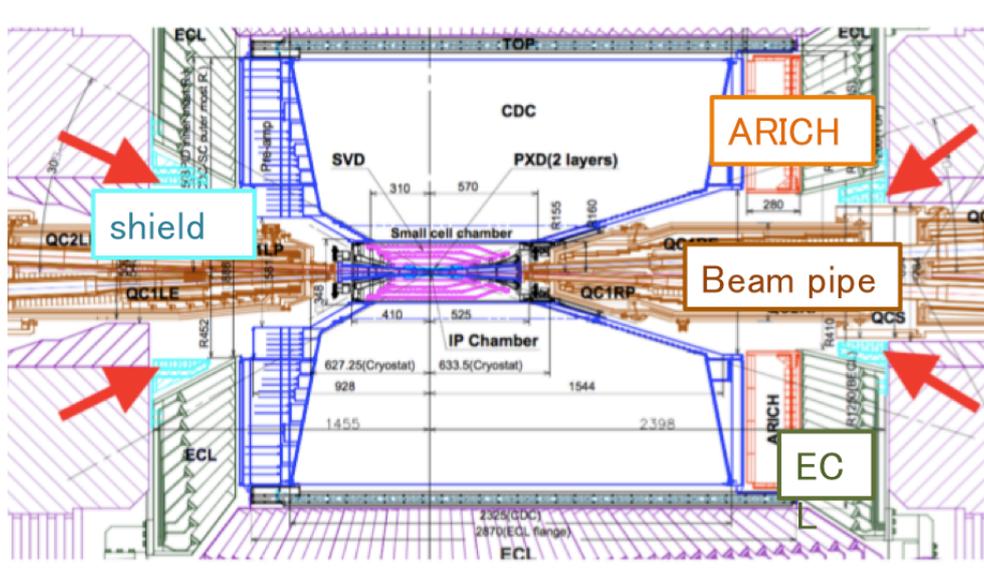


図 5.1: LYSO ビームロスモニターの配置図

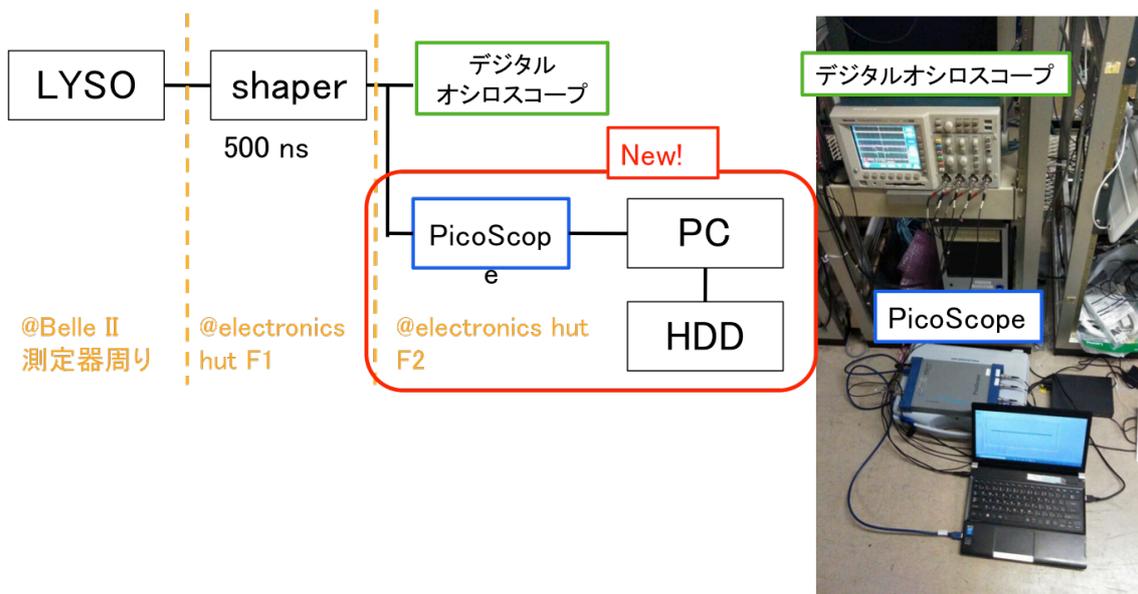


図 5.2: データ収集系のブロック図

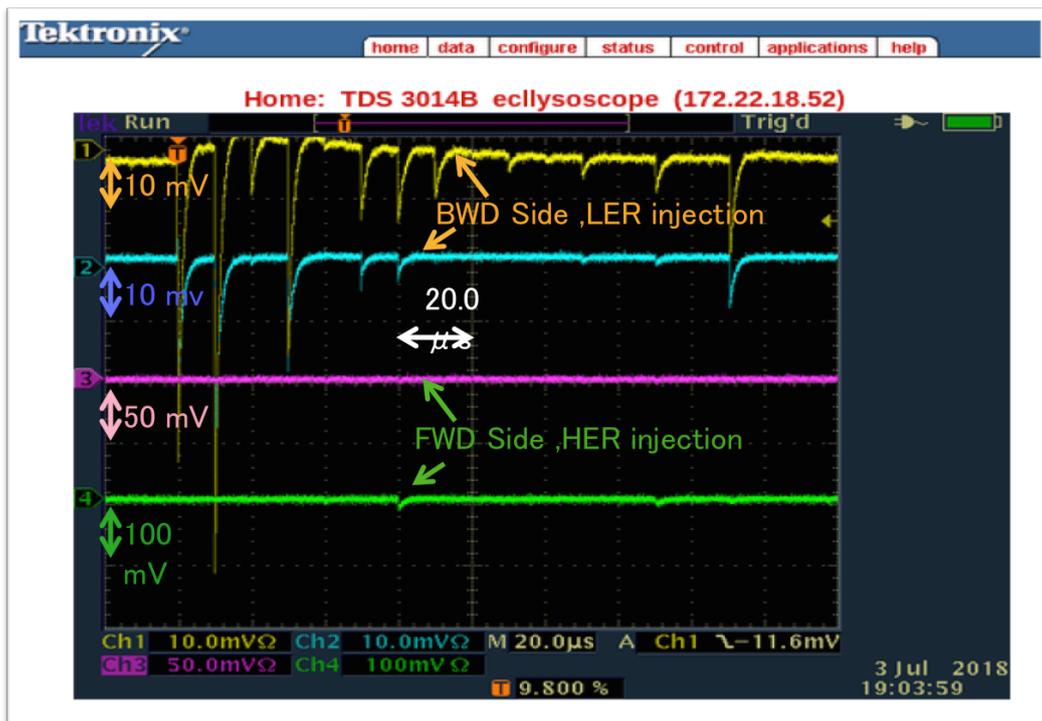


図 5.3: LYSO ビームロスモニターからの信号のオシロスコープによる出力結果 ch1,ch2(イエロー、シアン)が後方側であるため LER 由来のバックグラウンドであり、ch3,ch4(マゼンダ、グリーン)が前方であるため HER 由来のバックグラウンドである。

この 4channel 分の信号を分岐して PC オシロスコープ (PicoScope 6404C) に接続し、データ収集を行った。収集したデータは以下のようなフォーマットでテキストファイルに保存する。トリガータイミングを時刻 0 として -0.5~4.5 ms の範囲でデータを収集し、サンプリングの時間間隔は 25.6 ns、電圧値の最小は 0.078 mV である。この 1 イベントがビーム入射を 1 回行った時のビームバックグラウンドの時間変化を記録したものに対応する。データ収集は 7 月 12 日から 7 月 13 日にかけて行った。

時間チャンネル				
A チャンネル	B チャンネル	C チャンネル	D	
(ms)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)
-0.50004479	-1.57480300	-0.39370070	-51.96850000	0.39370070
-0.50001919	-1.57480300	-0.39370070	-52.75591000	0.00000000
-0.49999359	-0.78740150	-0.78740150	-52.75591000	0.39370070
-0.49996799	-1.57480300	-0.78740150	-52.75591000	-0.39370070
-0.49994239	-1.57480300	-0.39370070	-52.75591000	0.00000000
-0.49991679	-0.78740150	-0.39370070	-52.75591000	0.00000000
-0.49989119	-0.78740150	0.00000000	-52.75591000	0.39370070
-0.49986559	-0.78740150	0.00000000	-52.75591000	0.39370070
...				

## 5.2 解析方法の検討

ピコスコープで記録した内 ch2 のイベントの一例を図 5.4 に示す。同一イベントの  $Time = 0.104 \sim 0.116$  ms の 12  $\mu s$  の間のデータを図 5.5 に示す。1 回の粒子入射による、信号パルスの立ち上がりから終了までに 4~5  $\mu s$  がかかることがわかる。このパルスについて、来たタイミングと、信号電荷の情報を得る。パルス  $t < 0$  の範囲のデータを 1000 イベント分確認して決め、今回のセットアップでは優位な信号パルスを確認できた 3 チャンネルについて、ch1=-3 mV、ch2=-2 mV、ch3=-57 mV をそれぞれ threshold とした。

threshold を超えたタイミングから次に threshold の値まで戻るのに 5  $\mu s$  程度かかる。そのため threshold を超えたタイミングを  $t_0$  として  $-0.25 \mu s < t - t_0 < 4.75 \mu s$  の範囲で電圧値の積算を求める。ゼロ点は  $-2.25 \mu s < t - t_0 < -0.25 \mu s$  の範囲のデータの平均値とし、これを  $V_0$  として、 $\int_{t=t_0-0.25\mu s}^{t=t_0+4.75\mu s} V_0 - V(t)$  により該当する信号パルスの電荷を求めた。(図 5.6) そして  $t > t_0 + 4.75 \mu s$  以降のデータに次のパルスを探す。こうして得たパルスごとの信号電荷分布を図 5.7 に示す。この分布のピークの位置を基準にする。この基準値は ch1=136、ch2=211、ch3=304 となった。ある時間領域について、threshold をこしたパルスの数を勘定する方法と、この基準値を単位として検出したエネルギーの積分値を評価する方法を比較した。

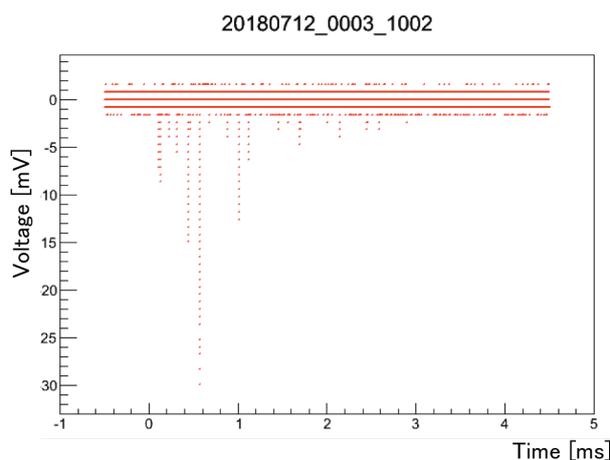


図 5.4: ch2 の生データをプロットした結果

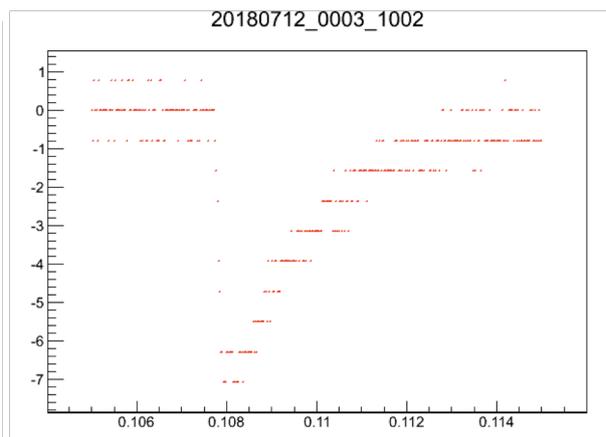


図 5.5:  $time = 0.104 \sim 0.116$  ms の範囲で ch2 の生データをプロットした結果

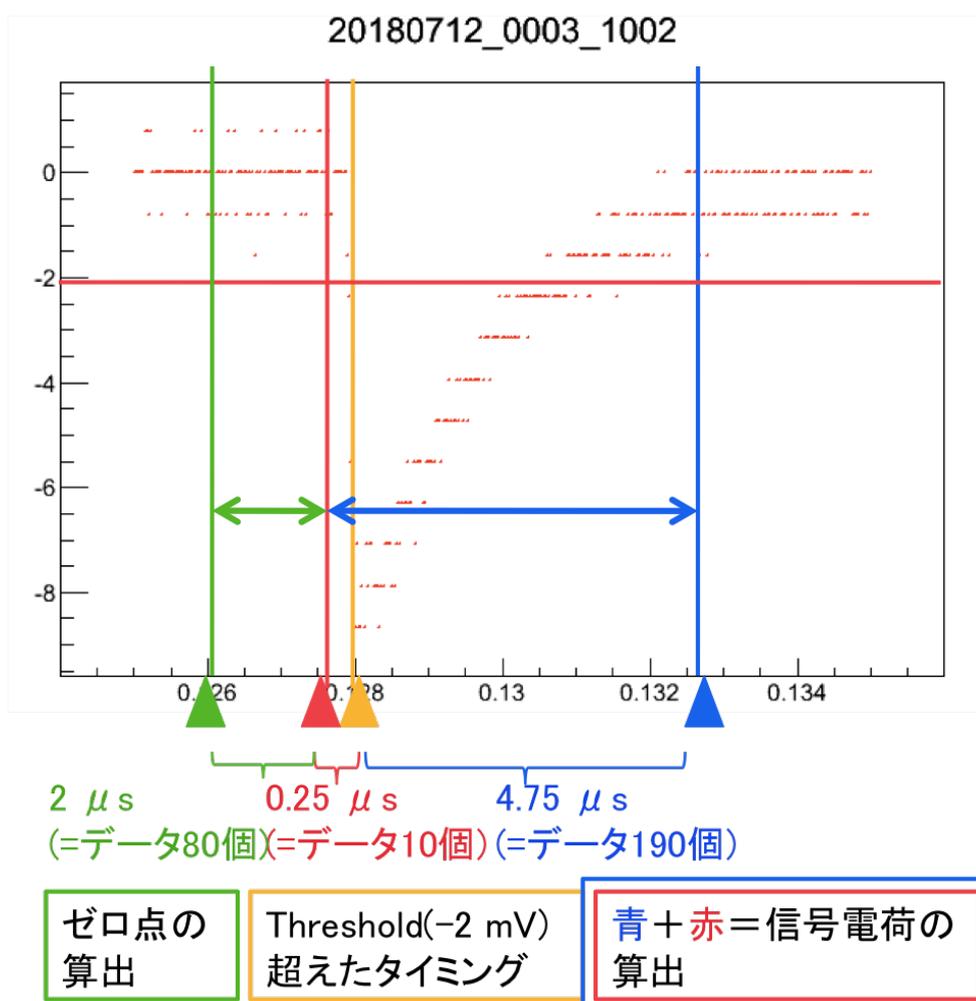


図 5.6: 信号電荷の求め方の概念図

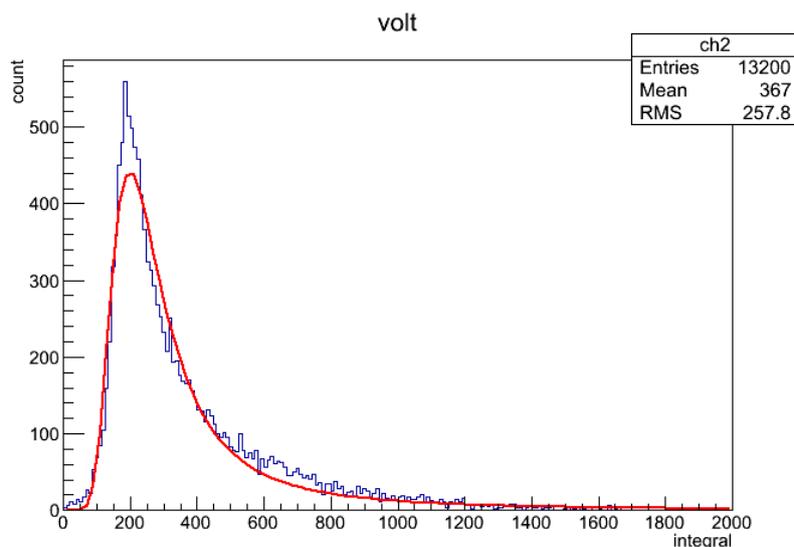


図 5.7: 1000 イベント分の電圧値の積算のヒストグラム

### 5.3 結果

データをビーム入射信号でトリガーされたタイミングを基準に  $10 \mu\text{s}$  の幅で時間ビン分割し、その分割内でパルスがあった場合は上記のようにして求めた電圧値の積算、なければ0と定義した値と各分割内でのパルス数を各分割ごとに50 イベント分平均した結果を折れ線グラフで表したものを図 5.8 に示す。またこれの  $0 \sim 0.4 \text{ ms}$  の範囲を出力したものを図 5.9 に示す。

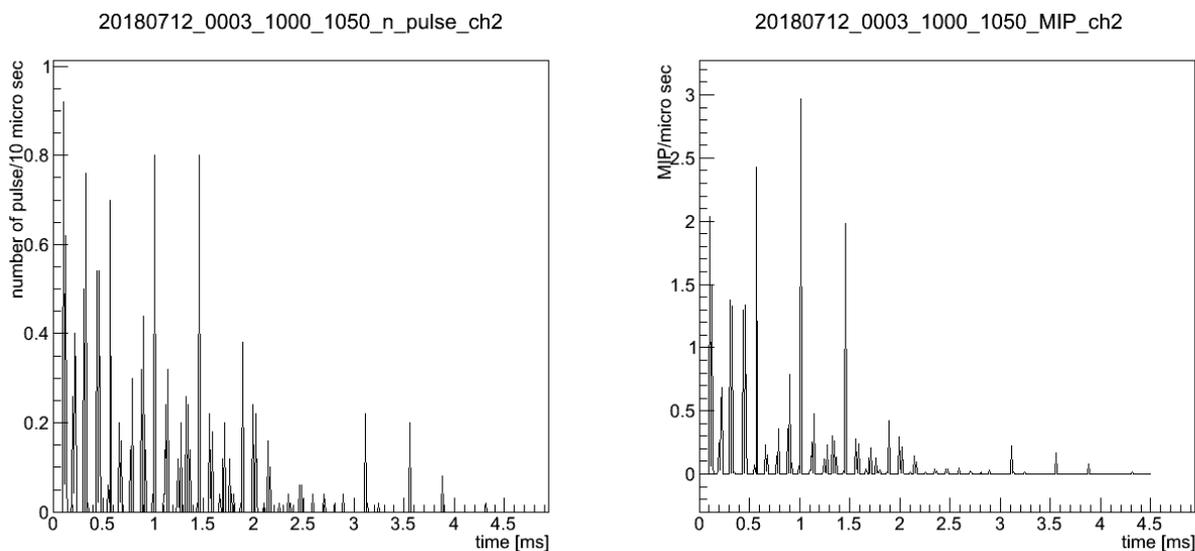


図 5.8: ch2 について、 $10 \mu\text{s}$  幅の時間ビンについて、ビンごとのパルス生成数 (左) とエネルギー損失 (右) の分布。50 事象分の平均をとっている。

周期的なバックグラウンドの増減があることがわかった。これらは周期が約  $505 \mu\text{s}$  の

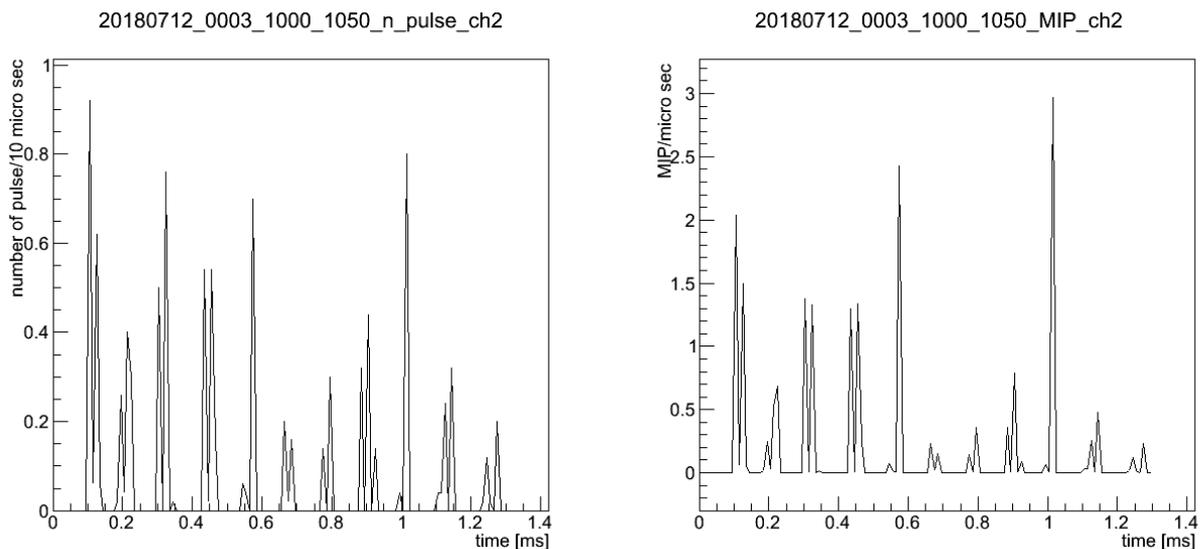


図 5.9:  $0 \text{ ms} < t < 0.4 \text{ ms}$  の範囲を拡大。時間ビンごとのパルス生成数 (左) とエネルギー損失 (右) の分布。

シンクロトロン振動や約  $100 \mu\text{s}$  程度の周期を持つベータトロン振動と関係していると考えられる。シンクロトロン振動が問題になる時は入射バンチの位相調整、ベータトロン振動が問題になる時はセプタムやステアリング磁石の蹴り角の調整で対処する。このような情報を加速器コントロール室の入射調整オペレータのパネルで表示すると、入射効率の向上・入射バンチによるバックグラウンドの抑制にとって非常に有用である。また、この LYSO ビームロスモニターは Phase-3 以降、ECL の外側にある前方後方シールドそれぞれに  $\phi = 0, 90, 180, 270^\circ$  の 4 箇所合計 8 本配置することが予定されている。

## 第6章 まとめ

SuperKEKB 加速器のアップグレードによりビームバックグラウンドの増加が問題となり、Belle II 測定器の1つである電磁カロリメータにおいてビームバックグラウンドの量を評価するシステムが必要であった。その解決を目的として本研究では、電磁カロリメータの電流値モニターシステムの構築と運用を行った。電流値モニターがデータを収集できるように Belle II 測定器周りやエレクトロニクスハット内の機器への配線作業を行い、またデータ収集用のプログラムの作成を行った。データロガーと PC とのデータのやりとりにかかる時間を考慮してデータサンプリング間隔は5秒に設定して運用を行った。2018年の3月から7月に行われた SuperKEKB 加速器の第2期試験運転の期間中にモニターした結果、電流値モニターはビームバックグラウンドの検出を行うことができ、またビームを入射した時に多くのビームバックグラウンドがばらまかれていることが分かった。ビームバックグラウンドにより電磁カロリメータの CsI(Tl) 結晶が受けた放射線量を評価した結果、バレルについては前方は 0.22~0.29 Gy、後方では 0.35~0.43 Gy であり、総じて後方側の方が放射線被ばく量が大きく、ビームバックグラウンドが多いという結果になった。つまり陽電子ビーム由来のビームバックグラウンドが電子ビーム由来のものより多いということが分かり、また、phase2 期間中に Belle 実験での1年で浴びた放射線量の約2~4倍放射線被ばくを浴びたことがわかった。また、後方エンドキャップについては、外側で 0.43~0.66 Gy、内側で 0.87~1.28 Gy であり、総じてバレルより放射線被ばく量が多く、また、内側の方が外側に比べて大きいことが分かった。前方エンドキャップでは温度変化による暗電流値の変化が大きいためバレルとは別の対処が必要であることが分かった。温度係数が暗電流値の大きさに依存することが分かり、そのため温度モニター結果を用いて暗電流値の見積もりを行った結果前方エンドキャップについても放射線被ばく量を評価することに成功した。結果として内側で約 0.25~0.53 Gy であり、外側では 0.07~0.12 Gy であることが分かった。以上の結果から放射線被ばく量の  $\phi$  分布を作成し、MC シミュレーション同様  $\phi$  による違いを測定した。

また、LYSO ビームロスモニターから入射後すぐのビームバックグラウンドの増減を取得したデータに適切な処理を与えることで可視化することができることが分かった。これらのモニターは Phase-3 以降もデータを収集しビームバックグラウンドの理解を深めるために活用される予定である。

# 謝辞

まず、本研究に関しまして終始ご指導ご鞭撻いただきました、指導教官の宮林謙吉教授に心より感謝を申し上げます。拙い私を研究の方針や現場での作業、B2GMでの発表についてなど様々な面でサポートいただきました。また宮林先生と研究に関する議論をする中で、データの見方や考え方、着目するポイントなどたくさんの事を学ぶことができました。2年間この研究を続け、まとめることができたのは宮林先生のおかげです。ありがとうございました。また、ミーティングの時などに様々なコメントやアドバイスを下さった、林井久樹教授、下村真弥助教、蜂谷崇助教に感謝申し上げます。そして、たくさんのご意見や助言、励まして下さった先輩方、2年間一緒に過ごしてきた同回生の皆様、そして後輩にも感謝申し上げます。皆様のおかげで楽しく研究室で過ごせました。

本研究を進めるにあたって外部の方にもたくさんのご協力をいただきました。まずECLグループ、Beastグループの皆様方にはミーティングやB2GMなどでたくさんの有用なコメントやアドバイスを頂きました。特にBINPのAlexander S.Kuzminさんには電流値モニターのハードウェア面について意見を下さったり作業をしていただいたりなど様々な面で大変お世話になりました。また進捗を報告するたびに優しくアドバイスや労いの言葉をいただけたことが研究の励みになりました。心より感謝申し上げたいと思います。また、KEKの中村勇さんには電流値モニター用のケーブル改変作業時にお手伝いいただきました。作業の方法などを一緒に作業を進める中で学ぶことがたくさんありました。中村さんと作業したことでこの作業についてはかなり早く進んだと感じております。ありがとうございました。またKEKの田中秀治さんにはビームロスモニターについてとても丁寧に指導していただき、加速器のこともたくさん教わりました。心より感謝申し上げます。また、Belle IIの学生の皆さまにも感謝申し上げます。勉強会やB2GM期間などで学生同士で活発に議論できる時間が私にはとても大切な時間でした。また、研究熱心で、B2GMでの発表や現場での作業も積極的に行って頑張っている皆さんがいたからこそ、私はこの2年研究活動を頑張ることができたと思います。特に同期の皆さんと過ごす時間がとても励みになりました。ありがとうございました。

最後に、大学院まで通わせてくれて、急なKEKへの出張などにも予定を工面して送り出し、また私が研究にくじけそうになった時に励まし支えてくれた家族・親戚にも心より感謝申し上げます。たくさんの方々のご支援とご協力により、修士論文を完成させることができました。皆様への深い感謝の意を表して、謝辞と致します。

# 付録A PIN-PD電流値モニター用プログラム

```
/ Original pdrcurrmon1.cc was composed by Mika Kano. 2018 Feb. 14th
// NSM2 functionality is added.
#include <iostream>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <time.h>
#include <math.h>
#include "vxi11_user.h" // to use vxi11 software to access Datalogger.
#include "belle2nsm.h" // to use NSM2.
#include "nsmplib2.h" // to use NSM2.
#include "ecl_current.h" // struct ecl_current is defined.

CLINK *clink=0; // clink is the object to have a network connection.
float mon_data[48]; // 8 isolation amplifier modules, each has 6ch.

time_t tloc; // for the time system call.
struct tm *lt;
int year, month, day, hour, minu, sec;

struct ecl_current ecl_current_raw; // Raw value just read out.
struct ecl_current ecl_current_base; // Dark current to be subtracted.
struct ecl_current *ecl_current_napx = 0; // Current nA per crystal.
struct ecl_current *dataptr; // Pointer for NSM2.

// Number of crystals in each block.
// Fwd(Out) Fwd(In) Barrel(F) Barrel(B) Bwd(Out) Bwd(In).
const float nx[48] = {116., 28., 352., 384., 60., 60., // octant 1
116., 28., 440., 480., 60., 60., // octant 2
116., 28., 352., 384., 60., 60., // octant 3
116., 28., 440., 480., 60., 60., // octant 4
116., 28., 352., 384., 60., 60., // octant 5
116., 28., 440., 480., 60., 60., // octant 6
116., 28., 352., 384., 60., 60., // octant 7
116., 28., 440., 480., 60., 60.}; // octant 8

// conversion factor Vread [V] -> I [nA]
// division by 10kOhm and x10 by amplifier, multiply 10-9 by A -> nA.
const float v2na = 10000.;

// The string *str is separated by the separator *delim
int split( char *str, const char *delim, char *outlist[]){
char *tk;
int cnt =0;
tk = strtok( str, delim );
while( tk !=NULL ){
outlist[cnt++] = tk;
tk = strtok(NULL, delim );
}
return cnt;
}

//=====
// main function entry point.
//=====
int main(){
```

```

// IP address is reserved on the router.
clink = new CLINK;
static char* serverIP =(char*)"192.168.1.11";

// Open logger, if it fails, exit with returning 1.
if (vxi11_open_device(serverIP,clink) !=0){
printf ("Couldn't open logger\n");
exit(1);
}

FILE *fp;
char filename[50];
int yesterday;
tloc = time(NULL);
lt = localtime(&tloc);
year = lt->tm_year+1900; month = lt->tm_mon+1;
day = lt->tm_mday; hour = lt->tm_hour;
minu= lt->tm_min; sec= lt->tm_sec;

yesterday=day;
//orig. sprintf(filename,(char*)"d%d%d_pdcurr.txt",year,month,day);
int idate = year*10000 + month*100 + day; // KM.
sprintf(filename,(char*)"d_pdcurr.txt",idate); //KM.
fp=fopen(filename,"a");

int freq=5;//mesurment one cycle 5 sec.

const int blen = 10000;
char buf[blen];
const int clen = 1000;
char com[clen];

int rets=0; // Return value for send.
int retr=0; // Return value for receive.

// Status clear.
rets = vxi11_send(clink,(char*)"*cls");

//--- Cobnfigure to measure DC voltage at the selected channel.
rets = vxi11_send(clink,(char*)"CONF:VOLT:DC (@1021:1068)");

// NSM2 initialization
if( ! b2nsm_init("eclpinpd") ){
printf("b2nsm_init error: %s\n", b2nsm_strerror());
}
// NSM2 memory allocation.
ecl_current_napx
= (struct ecl_current *)b2nsm_allocmem("eclpin_napx",
"ecl_current",
ecl_current_revision,
5);
if( ! ecl_current_napx ){
printf("b2nsm_allocmem error : %s\n", b2nsm_strerror() );
return 1;
}
//--- start of the infite loop. ---
while(1){
// time.
tloc = time(NULL);
lt = localtime(&tloc);
year = lt->tm_year+1900; month = lt->tm_mon+1;
day = lt->tm_mday; hour = lt->tm_hour;
minu= lt->tm_min; sec= lt->tm_sec;
//      std::cout << tloc <<std::endl

if(sec % freq ==0 ){ // Once per 5 sec taking DataLogger access speed.

if(yesterday!=day){ // If the date change,
fclose(fp); // close the file written so far,
yesterday=day; // update clonicle.
}
}
}

```

```

//orig. sprintf(filename,(char*)"d%dPdcurr.txt",year,month,day);
int idate = year*10000 + month*100 + day; // KM.
sprintf(filename,(char*)"dPdcurr.txt",idate); //KM.
fp=fopen(filename,"a");
}
fprintf(fp,"%d:%d:%d\n",hour,minu,sec);
// printf("%d:%d:%d\n",hour,minu,sec);

// Date and time in the target struct.
ecl_current_napx->date = year*10000 + month*100 + day;
ecl_current_napx->time = hour*10000 + minu*100 + sec;

// Do one cycle measurement.
for (int j=0; j<8; j++){ // Loop over Isolation amplifier modules.
// Multiplexer ch. no., start and end for one Isolation amp. module.
const int ch1 =1021+6*j;
const int ch6 =1026+6*j;

//--- Scan the selected channels.
sprintf(com,(char*)"rout:scan (@%4.4d:%4.4d)",ch1,ch6);
rets= vx11_send(clink,com);

//--- Read out.
rets = vx11_send(clink,(char*)"read?");
memset(buf,0,blen); // Put 0 to all the byts of buf.
retr = vx11_receive(clink,buf,blen); // Receive result.

// printf("%s\n",buf); // For debug.
//-- 6 ch. results are returned as char string sequentially, split it.
char* volt[50]; //return value
int nent = split(buf, " , " ,volt);

// Sort 6 ch. results into the array mon_data[48].
for (int i =0; i<nent ;i++){
int i_pdcurr = j * 6 + i;
mon_data[i_pdcurr] = atof( volt[i] );
//KM std::cout<<mon_data[i_pdcurr]<<" ";
}
//KM std::cout<<std::endl;
} // End of loop on one Isolation amplifier module.

// Write results into the file on the disk and the NSM2 memory block.
for(int k=0;k<48;k++){
//ecl_current_raw.value[k]=mon_data[k]; // copy to the struct.
fprintf(fp,"%f ",mon_data[k]);

ecl_current_napx->value[k] =v2na*mon_data[k]/nx[k]; // nA per crystal.
}
fprintf(fp,"\n\n");
// Send results to the NSM2 proper memory block.

//KM std::cout<<std::endl;
}

} // End of infinite loop.

// --- Close logger.
vx11_close_device(serverIP, clink);
return 0;
}

```

## 付録B Phase-2期間のゼロ点

表 B.1: 暗電流値 Octant1

日付	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	out	in	Bwd	Fwd	out	in
4/12	79.794317	427.489538	14.815351	16.058394	42.966103	169.200438
4/26	79.488028	425.005439	16.037982	17.286703	45.313972	177.974894
5/2	84.903333	456.645027	17.445851	19.153818	46.682338	181.268096
5/11	84.439736	453.678947	17.967687	19.587953	46.611055	180.735118
5/15	84.559160	453.546977	18.456126	20.113706	47.402077	181.744014
5/18	85.062229	454.436797	18.430666	20.233526	47.506664	182.537473
5/31	85.327727	457.835530	18.469812	20.235209	47.186495	182.241376
6/14	84.053261	449.723970	18.520132	20.291162	47.099684	181.568883
6/17	78.504346	410.253683	18.600642	20.044406	47.585845	183.463034
6/28	78.926684	410.179191	19.315542	20.921760	48.350030	184.970646
7/3	79.979996	417.315017	19.369082	21.315982	48.230347	185.292282
7/14	85.772172	456.807815	20.010131	22.270697	48.930167	187.451289

表 B.2: 暗電流値 Octant2

日付	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	out	in	Bwd	Fwd	out	in
4/12	82.888372	426.304263	16.008864	18.452271	56.016686	187.277512
4/26	79.094579	410.094087	17.388712	19.984935	59.447754	197.769707
5/2	89.541245	458.087746	18.930387	22.313893	61.058816	201.831245
5/11	89.191612	456.060553	19.502262	22.711816	61.375665	202.069492
5/15	89.320328	455.696984	20.047343	23.407026	62.021209	201.813369
5/18	89.887685	457.284053	20.044956	23.647150	62.145185	203.477421
5/31	90.125322	459.820958	20.058333	23.815834	61.969038	203.324268
6/14	88.763291	454.438240	20.145182	23.875882	61.571541	202.176232
6/17	83.385061	426.420009	20.264814	23.684835	62.245984	204.351422
6/28	84.270232	427.839470	21.108575	24.733116	63.221786	206.119347
7/3	85.134912	432.533989	21.135927	25.138726	62.898979	206.496540
7/14	91.065677	461.220404	21.849827	26.187388	63.851935	208.775574

表 B.3: 暗電流値 Octant3

日付	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	out	in	Bwd	Fwd	out	in
4/12	76.683039	377.398804	19.632903	17.656580	52.909743	175.688713
4/26	76.264158	372.447947	20.655853	19.536517	56.015378	183.828492
5/2	82.781067	404.599975	24.323871	22.000248	57.445248	187.014925
5/11	82.595892	403.806013	24.618633	22.599725	59.050498	191.808898
5/15	82.673171	403.376590	23.976790	23.351010	58.977917	189.878319
5/18	83.139933	404.636224	23.914438	23.464010	59.316621	192.120306
5/31	83.433026	407.334368	25.511332	23.505844	59.412387	192.281329
6/14	86.070648	415.142012	25.395145	23.818880	58.977973	191.471376
6/17	92.752534	429.369737	26.518541	24.456485	59.635323	193.088209
6/28	94.156909	431.082582	25.423565	25.812431	60.418729	194.488735
7/3	89.505693	419.572468	25.452737	26.070540	60.075437	194.457831
7/14	84.755356	409.631121	26.261206	26.499106	61.078211	196.826210

表 B.4: 暗電流値 Octant4

日付	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	out	in	Bwd	Fwd	out	in
4/12	65.652726	315.910310	17.751955	17.657845	46.296253	159.423364
4/26	67.326358	322.351761	19.490104	19.750642	47.879062	164.126443
5/2	69.923222	335.050687	21.371282	22.355030	48.497025	165.376726
5/11	70.483640	336.326978	22.346448	23.166106	53.314944	179.346865
5/15	70.633939	335.990750	23.034097	24.050004	53.597411	178.922753
5/18	70.906226	336.633775	23.008973	24.214017	53.450245	179.310123
5/31	71.234226	339.189723	23.184213	24.210891	53.905536	180.485823
6/14	73.833125	346.512207	23.268857	24.583916	53.664598	180.009265
6/17	80.237532	359.942873	23.507977	25.236217	53.667406	180.297747
6/28	81.180666	360.700750	24.560041	26.766731	54.709598	182.454712
7/3	77.378860	350.431867	24.537058	27.177409	53.843731	180.969686
7/14	72.789143	341.982478	25.361016	27.664858	55.133225	184.294086

表 B.5: 暗電流値 Octant5

日付	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	out	in	Bwd	Fwd	out	in
4/12	67.599783	327.596740	14.633127	18.108901	37.884849	142.120982
4/26	70.217221	341.117827	15.960301	19.854272	39.031169	146.123820
5/2	71.133892	346.874138	17.652347	22.132886	39.267625	146.000930
5/11	72.774588	349.819733	18.496635	23.217356	42.435612	154.386737
5/15	73.033647	349.544800	19.094987	24.061672	42.529214	153.444678
5/18	73.229421	349.614304	19.068923	24.197547	42.164365	153.078896
5/31	73.998919	353.434354	19.163112	24.187764	42.880322	155.257219
6/14	73.289787	348.905615	19.253597	24.385109	42.812199	155.326577
6/17	69.204059	322.113948	19.352637	24.353308	42.517713	154.747163
6/28	69.851271	322.555359	20.269770	25.762910	43.529192	157.056988
7/3	69.967216	323.777524	20.357561	26.321665	42.703832	154.813124
7/14	75.132327	354.585604	21.155140	27.426382	43.882252	158.544856

表 B.6: 暗電流値 Octant6

日付	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	out	in	Bwd	Fwd	out	in
4/12	65.956417	326.445211	15.041732	15.467795	36.402494	141.436961
4/26	68.937205	343.132111	16.370534	17.225020	38.065257	146.859434
5/2	69.373957	345.314813	18.037164	19.352142	38.376421	146.760258
5/11	69.926682	346.394682	18.686891	20.032239	40.095937	151.726372
5/15	70.066657	346.003356	19.259241	20.768018	40.116395	150.206513
5/18	70.077850	345.012319	19.253417	20.930426	39.855555	150.376785
5/31	71.036942	350.840221	19.317780	20.882189	40.467259	152.444755
6/14	68.588164	337.216912	19.368734	21.022151	40.575648	152.904028
6/17	59.784790	286.075756	19.468196	20.757826	40.414145	152.684116
6/28	60.278159	286.176877	20.414085	22.054907	41.306535	154.772519
7/3	61.928559	295.019406	20.457465	22.603695	40.562995	152.660689
7/14	71.352227	348.121626	21.254638	23.880243	41.663846	156.282074

表 B.7: 暗電流値 Octant7

日付	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	out	in	Bwd	Fwd	out	in
4/12	71.730495	357.865167	14.142803	15.880523	35.676365	141.452030
4/26	75.367325	376.607106	15.492773	17.581463	37.626290	147.979410
5/2	76.251487	381.381944	17.107461	19.543807	38.450837	149.179778
5/11	76.107600	379.653850	17.677098	20.101317	39.124744	151.128533
5/15	76.197107	379.053746	18.236751	20.735376	39.524650	150.740448
5/18	76.206814	378.252489	18.224928	20.841354	39.583274	151.406262
5/31	77.161551	384.116844	18.272758	20.830104	39.552735	152.008262
6/14	74.676383	369.688689	18.341510	20.932278	39.707841	152.239180
6/17	65.206193	313.285584	18.416273	20.667055	40.026377	153.590479
6/28	65.607567	312.936464	19.200242	21.749185	40.593336	154.632066
7/3	67.597697	323.849472	19.337100	22.243019	40.333812	153.907313
7/14	77.225049	380.191180	20.089499	23.392625	41.239858	156.813208

表 B.8: 暗電流値 Octant8

日付	Fwd EC		Barrel		Bwd EC	
	out	in	Bwd	Fwd	out	in
4/12	73.945208	392.690800	14.256704	15.869048	38.827173	156.359494
4/26	76.291876	404.913014	15.521177	17.321671	41.189191	164.658150
5/2	78.470745	418.200269	16.991519	19.103649	42.197723	166.800582
5/11	77.915849	414.618314	17.497925	19.558082	42.555851	167.443634
5/15	77.986803	414.367541	18.014352	20.110825	43.152854	167.940482
5/18	78.423634	414.993677	18.003688	20.224061	43.212708	168.558930
5/31	78.656216	418.373749	18.035099	20.198356	43.019541	168.536089
6/14	77.361264	408.797538	18.085611	20.294877	43.028482	168.269056
6/17	71.513772	364.532740	18.153187	20.127117	43.513487	170.157418
6/28	71.779360	364.020027	18.881922	21.054116	44.049726	170.992269
7/3	72.881955	371.673664	18.992348	21.470963	43.925101	171.011275
7/14	78.847236	415.696329	19.644654	22.353349	44.709700	173.519852

## 参考文献

- [1] Y. Ohnishi et al., “Accelerator design at SuperKEKB,” PTEP 2013, 03A011 (2013). doi:10.1093/ptep/pts083
- [2] T.Abe *etal*, ” BelleII Technical Design Report ”
- [3] 横山紗依・奈良女子大学大学院 人間文化研究科 修士論文 (2016) より図を引用
- [4] 森井友子、樋口岳雄, ” BelleII シリコン崩壊点検出器 (SVD) ”, 高エネルギーニュース Vol.35 No.2 2016/07.08.09
- [5] 谷口七重, ” BelleII CDC ”, 高エネルギーニュース Vol.32 No.4 2014/01.02.03
- [6] 鈴木一仁、居波賢二、松岡広大, ” BelleII 実験 TOP カウンターのインストール完了報告 ”, 高エネルギーニュース Vol.35 No.23 2016/10.11.12
- [7] 宮林謙吉, ” BelleII 電磁カロリメーター ”, 高エネルギーニュース Vol.33 No.2 2014/07.08.09
- [8] 住澤一高, ” BelleII KLM ”, 高エネルギーニュース Vol.33 No.1 2014/04.05.06
- [9] NSM2 マニュアル <https://confluence.desy.de/pages/viewpage.action?spaceKey=BI&title=DAQ+>
- [10] D.V.Matvienko,E.V.Sedov,B.A.Shwartz and A.S.Kuzmin,”Radiation Hardness Study of CsI(Tl) crystals for Belle II Calorimator” (2017) DOI: <http://dx.doi.org/10.23727/CERN-Proceedings-2017-001.55>
- [11] Andrea Fodor, ”16th Background campaign: ECL”, 28th B2GM Background Parallel
- [12] SAD ホームページ <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [13] 新井智穂・奈良女子大学大学院 人間文化研究科 修士論文 (2015)