

2016年度 修士学位論文

SuperKEKB 電子・陽電子衝突型
加速器の第1期試験運転における
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 15810088

横山 紗依

平成29年3月8日

目次

第1章	序論	3
第2章	Bファクトリー実験の高度化	4
2.1	SuperKEKB 加速器	4
2.2	Belle II 測定器	6
2.2.1	崩壊点検出器	7
2.2.2	中央飛跡検出器	7
2.2.3	粒子識別検出器	9
2.2.4	電磁カロリメータ	9
2.2.5	ミュー粒子・ K_L^0 粒子検出器	9
2.3	コミッショニング計画	10
第3章	ビームバックグラウンド	12
3.1	タウシェック散乱	12
3.2	ビームと残留ガスとの散乱	13
3.3	入射直後のビームロス	13
3.4	シンクロトロン放射	14
3.5	Radiative Bhabha 散乱	14
3.6	二光子過程	15
第4章	プラスチックシンチレータによるバックグラウンドモニター (SCI)	16
4.1	動機	16
4.2	SCI の構成	16
4.3	SCI の読み出し回路 (EASIROC)	16
第5章	宇宙線を用いたバックグラウンド検出器のテスト	21
5.1	セットアップ	21
5.2	実験方法	23
5.2.1	トリガーカウンターの設定	23
5.2.2	Hold 信号のタイミング調整	23
5.2.3	宇宙線の測定	24
5.2.4	ケーブル選定	24
5.3	結果	27
5.3.1	宇宙線とペDESTルの測定	27
5.3.2	ケーブルごとの S/N 比	27

5.4	考察	29
第6章	SuperKEKB 加速器の Phase-1 運転におけるビームバックグラウンド測定	31
6.1	セットアップ	31
6.2	測定データ	31
6.2.1	スケーラの生データ	34
6.2.2	オシロスコープの生データ	34
6.3	シミュレーション	36
6.4	タウシェック散乱の測定	37
6.4.1	タウシェック散乱による寄与の抽出	38
6.4.2	測定結果	39
6.4.3	シミュレーションとの比較	42
6.5	ビームガス散乱の測定	45
6.6	入射直後のビームロス測定	48
第7章	まとめ	50

第1章 序論

高エネルギー物理学とは、物質の基本構成要素と、それらの間に働く力に関する物理法則を実験的に探究する学問である。高エネルギー物理学実験の中でも、B 中間子系での CP 対称性の破れを検証することを第一目的としたものの一つが Belle 実験である。Belle 実験は 2010 年の運転終了までに積分ルミノシティ 1014 fb^{-1} を蓄積し、多くの結果を残した。しかし、新物理の探索のためには数十 ab^{-1} が必要である。そのために、KEKB 加速器・Belle 測定器の 40 倍のルミノシティを狙う SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器のアップグレード工事が行われ、2016 年 2 月より SuperKEKB 加速器では第一期試験運転 (Phase-1 コミッショニング) を開始した。

電子・陽電子衝突実験として前人未到の高ルミノシティにおける Belle II 実験では、ビームバックグラウンドの増加は避けることが難しく、その原因を理解したり、抑制する取り組みが不可欠である。そのためにはバックグラウンドを測定することが必須である。

本研究では、MPPC とプラスチックシンチレータを組み合わせたバックグラウンド検出器を製作し、それを用いて SuperKEKB 加速器の第一期試験運転におけるビームバックグラウンドの測定を行った。第 2 章に B ファクトリー実験の高度化とその動機、また SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器の説明とコミッショニング計画について述べる。第 3 章では、SuperKEKB 加速器で問題となるビームバックグラウンド源について説明し、第 4 章で研究に用いたバックグラウンド測定の動機と、検出器の構成について述べる。次に第 5 章で、宇宙線を用いてバックグラウンド検出器の動作確認と、ノイズに強いケーブルを選定をした結果について記す。第 6 章では、2016 年 2 月から 6 月にかけて行われた SuperKEKB 加速器の Phase-1 試験運転において、ビーム衝突点付近にバックグラウンド検出器を 2 個設置して、タウシェック散乱、ビームガス散乱、入射直後のビームロスの三つのビームバックグラウンドの測定を行った結果について述べる。第 7 章で本研究のまとめと、今後の展望について述べる。

第2章 Bファクトリー実験の高度化

Belle 実験は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われた B ファクトリー実験で、電子・陽電子非対称エネルギー衝突型円形加速器 KEKB を用いて B 中間子と反 B 中間子を大量に生成し、その崩壊過程における CP 対称性の破れの測定や非標準的な新しい物理法則に感度が高い稀崩壊事象を観測することを目的とした実験である。データ収集は 1999 年から 2010 年にわたって行われ、その過程で、2003 年 5 月に設計ルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を記録し、2010 年 6 月 30 日の運転終了までに積分ルミノシティ 1014 fb^{-1} を達成した。その結果、目標であった CP 対称性の破れを種々の崩壊モードで測定することに成功し、「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 実験の可能性を示した測定の中には、標準模型を超える新物理の探索に有利な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 $\mathcal{O}(0.1)$ にとどまっており、新物理の効果を探索するために十分な $\mathcal{O}(0.01)$ の感度を得るためには数十 ab^{-1} のデータ蓄積が必要である。これを目指す加速器と測定器のアップグレード工事が 2010 年から開始されており、2016 年 2 月には SuperKEKB 加速器単体の第一期試運転 (Phase-1 コミッショニング) が行われた。

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

2.1 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 加速器 [1] は、7 GeV の電子と 4 GeV の陽電子を衝突させる、非対称エネルギー衝突型の周長 3 km の円形加速器である。図 2.1 に概略図を示す。SuperKEKB 加速器は、電子用のリング (High Energy Ring、HER) と陽電子用のリング (Low Energy Ring、LER) リングに電子・陽電子を供給する入射器からなる。電子は入射器最上流の RF 電子銃で作られ、7 GeV まで加速された後、HER に入射される。陽電子は 3.5 GeV まで加速した電子を金属標的に当てて作り、ダンピングリングで広がり小さなビームにした後で 4 GeV まで加速され、LER に電子とは逆向きに入射される。こうして作られた電子と陽電子は互いに逆方向に走り、リングの交差点で衝突する。交差点に設置された Belle II 検出器が、その衝突で起こる素粒子反応を検出・記録する。

ルミノシティは、衝突型加速器の衝突の頻度を表す指標であり、ルミノシティ L に対し反応断面積 σ を持つ過程で、その発生頻度 R は $R = L\sigma$ となる。また、このルミノシティの値はビームの電流値やサイズなど、加速器のパラメータとの間に、以下の式が成

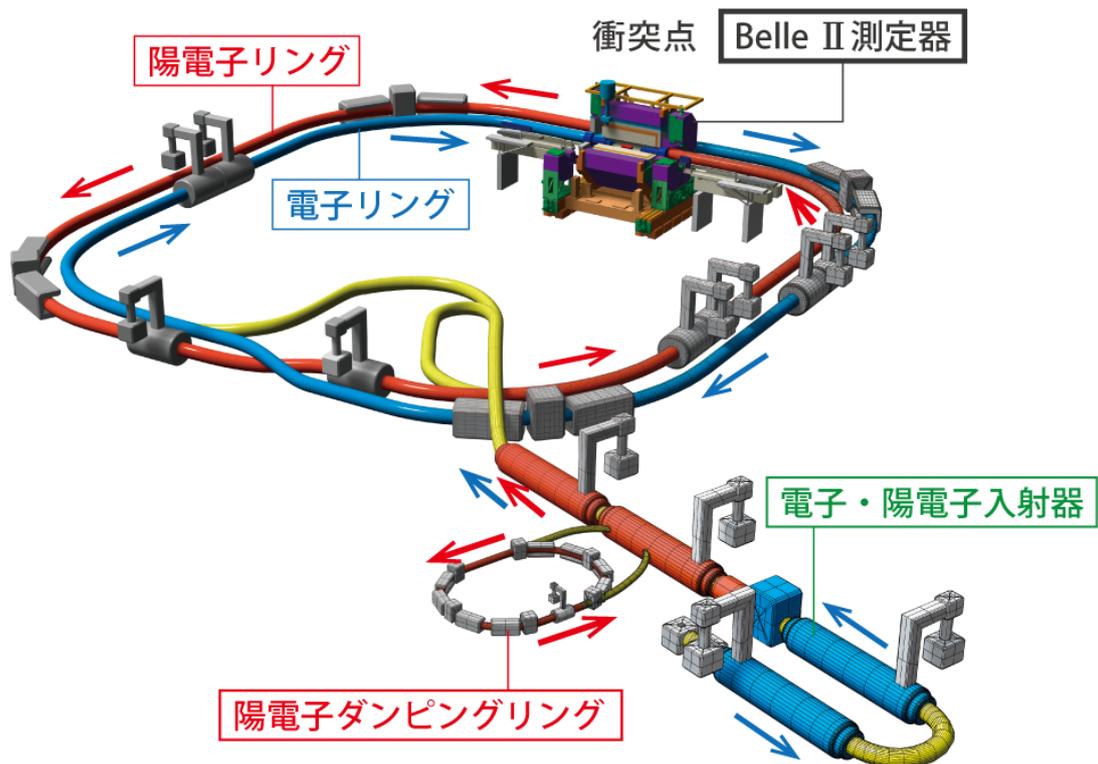


図 2.1: SuperKEKB 加速器の概略図 [3]。前身の KEKB 加速器から比べると、1) 陽電子ビーム入射の低エミッタンスを実現するためのダンピングリングの追加、2) ナノビーム方式に対応した新しい最終収束電磁石系、3) 放射光による電子雲効果によるビーム不安定性を防ぐためのアンテチェンバー構造の陽電子ビームパイプへの置き換え、などといった大幅な改良が加えられている。

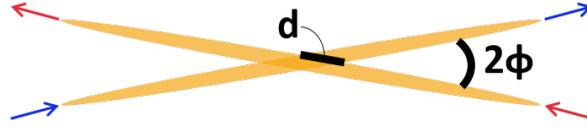


図 2.2: ナノビーム方式の模式図。ビーム交差部における実質的なバンチ長 d は水平ビームサイズを σ_x^* 、交差角を 2ϕ として、 $d = \frac{\sigma_x^*}{2\phi}$ と表せる。

り立つ。

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \frac{I_{\pm} \xi_{y\pm}}{\beta_y^*} \left(\frac{R_L}{R_{\xi_{y\pm}}}\right) \quad (2.1)$$

γ_{\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、 $\frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}$ は衝突点での x 方向と y 方向のビームサイズの比、 I_{\pm} はビーム電流、 $\xi_{y\pm}$ 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。 β_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、中心軌道の周りでいろいろな位相を持った振動の包絡線を表す。 $\frac{R_L}{R_y}$ 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計数である。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より大きいと、バンチ内で衝突点からはなれたところは広がってしまうことを指す。添え字にある \pm は電子-、陽電子+を表しており、*は衝突点での数値を表している。

この式よりルミノシティを上げるにはビーム電流 I を上げる、 β_y^* を小さくするということが本質的に求められることがわかる。SuperKEKB では β_y^* を 20 分の 1 まで小さくして、 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を基本的な設計思想としている。ルミノシティ向上に特に寄与が大きい、20 分の 1 の大きさの β_y^* 達成のため、SuperKEKB 加速器では図 2.2 に示すナノビーム方式を採用した。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 β_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。SuperKEKB 加速器の設計における主要なパラメータを表 2.1 にまとめた。

2.2 Belle II 測定器

Belle II 測定器 [2] は、衝突点の周りを覆う、高さ、幅、奥行きそれぞれ約 8 m の大型汎用粒子測定器システムであり、全立体角 4π の約 90% を覆っている [2]。図 2.3 に Belle II 測定器の概観を示す。電子・陽電子の衝突により発生するさまざまな粒子を Belle II 測定器でとらえ、B 中間子の崩壊を再構成する。加速器の性能向上に伴い後述するビームバックグラウンドも増加するため、Belle II 測定器では高いビームバックグラウンドに対処しつつ、高頻度の B 中間子対生成をはじめとした信号事象データを効率よく収集しなくてはならない。

表 2.1: SuperKEKB 加速器のパラメータ [1]

	LER	HER	単位
エネルギー	4.0	7.0	GeV
電流値	3.7	2.6	A
β_y^*	0.27	0.30	mm
バンチ	2500		
ルミノシティ	8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
ベータトロン振動数 (水平方向/鉛直方向)	44.53 / 44.57	45.53 / 43.57	
シンクロトロン振動数	-0.0247	-0.0280	

Belle II 測定器は、測定器内でおこる反応を可能な限り検出、識別するために、それぞれ役割を持った7つの検出器サブシステムからなる。これらの検出器の構造及び機能について以下にまとめる。

2.2.1 崩壊点検出器 (VerteX Detector、VXD)

VXD は B 中間子の崩壊点を測定するために、ピクセル型検出器 (PXD) とシリコンバテックス検出器 (SVD) の二種類の半導体センサーによって構成されている。これらは、荷電粒子がシリコン板を通過した位置を測定するための検出器である。後述する中央飛跡検出器 (CDC) で再構成した粒子の飛跡と VXD が検出した荷電粒子の通過位置の測定より、ペアで生成する B 中間子と反 B 中間子の崩壊点を再構成する。ビーム軸に沿った Z 軸方向の座標の差 ΔZ から、二つの B 中間子が崩壊した時間差 Δt を算出し、時間依存 CP 対称性の破れを測定することを可能にする。

Belle から Belle II へのアップグレードでは、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 になりブーストファクターが小さくなるが、衝突点ビームパイプの内半径を 15 mm から 10 mm にし、そのすぐ近くに 50 μm 角でセンサーの厚みが 80 μm の PXD を搭載することで崩壊点測定精度を約二倍向上させ、Belle 実験と同等以上の Δt 分解能を得る設計になっている。また、SVD は Belle 当時の最大半径 88 mm から 135 mm へ大型化し、 K_s^0 中間子が π 中間子対に崩壊する過程をその有感体積内で検出する効率を 30% 向上させる。

2.2.2 中央飛跡検出器 (Central Drift Chamber、CDC)

Belle II の中央飛跡検出器は、半径約 1.1 m の円筒形状内に 56,576 本もの細い金属ワイヤーを張り巡らせたガス検出器である。1.5 Tesla の磁場中で荷電粒子はらせんを描くように通過する。その軌道に沿ってガス分子がイオン化され、生成した電子が最寄りの陽極ワイヤーまでドリフトし、ワイヤーのごく近傍で電子雪崩を形成することで陽極ワイヤーから電気信号パルスを得る。陽極ワイヤーの信号パルス形成までのドリフト時間より、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。また、そ

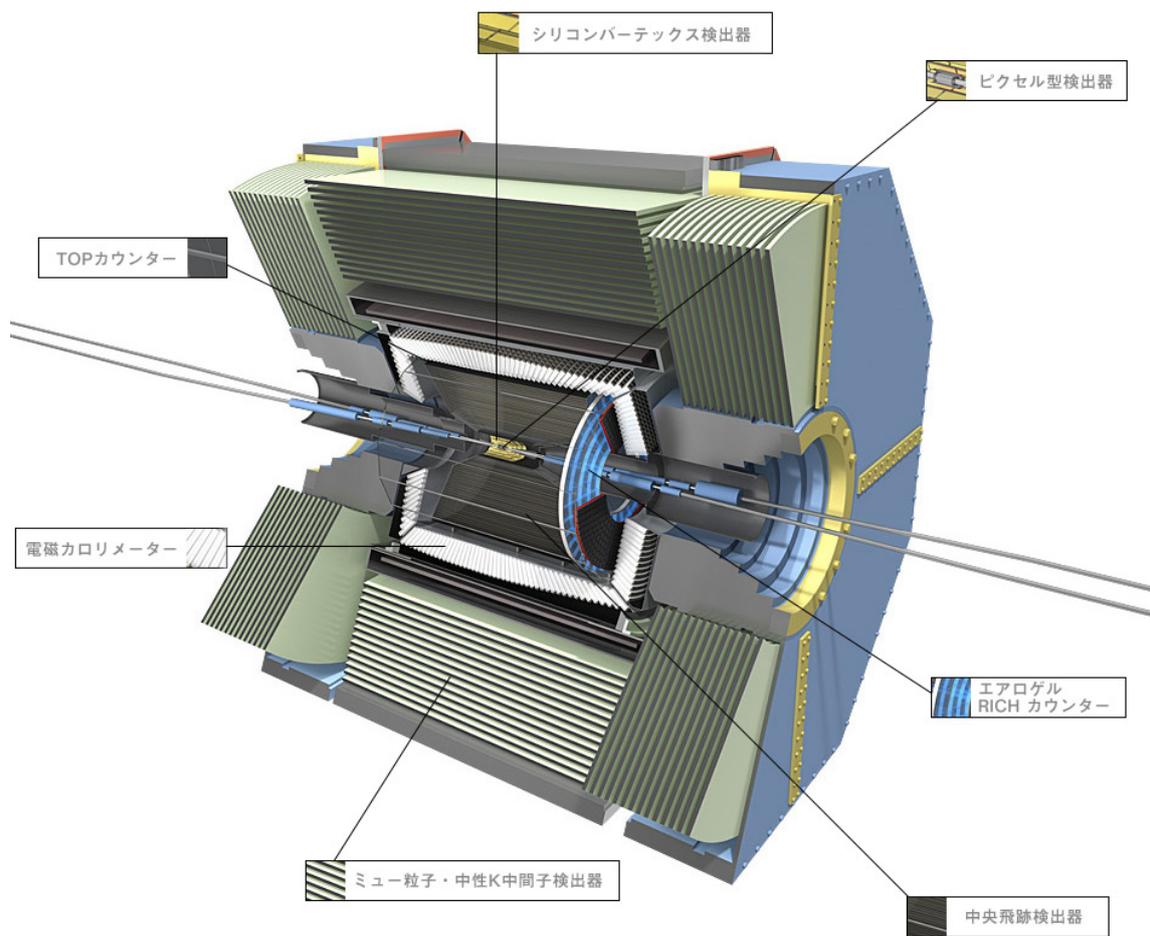


図 2.3: Belle II 測定器 [4]。

の飛跡から精密に運動量を求めることができ、信号の大きさから粒子の識別もできる。金メッキのないアルミニウム合金ワイヤーやヘリウムとエタンを混合したガスを充填するなど、物質量を極限まで抑え、粒子の軌道に影響を与えないよう設計されている。Belle II へのアップグレードでは、ビーム進行方向に対して平行なワイヤーと、 ± 70 mrad の角度をつけたワイヤーの二つを使用することで、荷電粒子の飛跡を 3 次元で再構成することが可能にし、これまで以上にバックグラウンド除去を効率よく行う。

2.2.3 粒子識別検出器 (Time Of Propagation counter, TOP と Aero-gel RICH counter, ARICH)

高速の π 中間子、K 中間子が物質内を通過すると、チェレンコフ光を円錐状に放射する。この時、同じ運動量でも粒子の違いによって速度が異なり、チェレンコフ光の放射角に差が出ることを用いて荷電粒子の識別を行う。バレル部に使用される TOP カウンターは、石英放射体とマイクロチャンネルプレート型光電子増倍管で構成されている。放射角度の違いは石英板の端までのチェレンコフ光の伝搬時間 (Time of Propagation) の違いになるため、この時間差を 5 psec の高性能で測定し、粒子の識別を行う。前方エンドキャップ部に使用される ARICH は、エアロゲル放射体からのリングイメージをハイブリッドアバランシェ光検出器により再構成する。いずれも π 中間子の検出効率を 97 %、4 GeV の K/π を 4σ で分離する性能を達成する設計となっている。

2.2.4 電磁カロリメータ (Electromagnetic CaLorimeter, ECL)

ECL はタリウムをドープしたヨウ化セシウム結晶シンチレータを用いて電子や光子のエネルギーを測定する。電磁相互作用を起こす粒子は十分厚みのある物質に入射するとエネルギーのほとんどを失う。ECL はこのエネルギー損失によるシンチレーション光の量をフォトダイオードで測定することで粒子の全エネルギーを測定する。結晶は長さ 30 cm、前面が 5.5×5.5 cm² 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おり、透明結晶を用いた全吸収型カロリメータとしてはかなりおおい。

2.2.5 ミュー粒子・ K_L^0 粒子検出器 (K_L^0 and Muon detector, KLM)

KLM は物質を通り抜けやすい μ 粒子と、電氣的に中性で物質と反応するまで検出できない K_L^0 粒子を検出するための検出器であり、鉄製の Belle II 構造体とその隙間に挿入された有感検出器により構成されている。エンドキャップ部ではビームバックグラウンドの影響が大きくなることが予想されるため、高レートに耐えられない既存の Registive Plate Counter (RPC) に代わりプラスチックシンチレータをマルチピクセル光センサー (Multi-Pixel Photon Counter, MPPC) で読みだす検出器に置き換えた。バレル部についても内側から二層は同様に置き換えた。

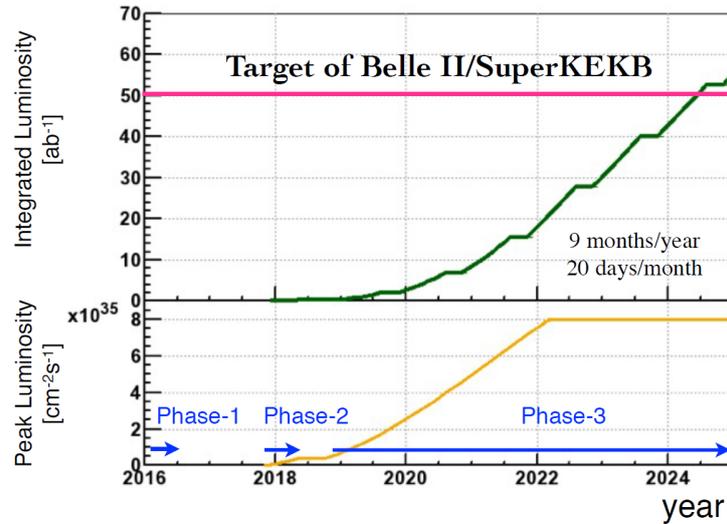


図 2.4: SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器のルミノシティロードマップ [5]

2.3 コミッショニング計画

SuperKEKB 加速器はおよび Belle II 測定器は本格的な物理データの収集を Phase-3 と位置づけ、そこに至るまでの試験運転（コミッショニング）として Phase-1、Phase-2 を設定する。図 2.4 に Phase-1 コミッショニングから最終的に 40 倍のルミノシティに到達するまでのデータ蓄積の目標を示す。

Phase-1

2016 年 2 月 1 日から 6 月 28 日まで、Belle II 測定器はロールアウトされた位置のまま、SuperKEKB 加速器の第一段階の試運転である Phase-1 運転が行われた。この運転の主な目的は加速器の加速空洞、真空チェンバー、電磁石といった各種コンポーネントの動作確認および調整と、目標の真空度を達成するための「真空焼き」である。「真空焼き」とは、新しく設置したビームパイプ内面を蓄積ビームによる放射光にさらし、吸着したガス分子を十分にたたき出してガス放出源を減らす作業のことである。また最終収束電磁石が設置されていないため、電子と陽電子の衝突はしないが、ビームバックグラウンドの基礎データを収集する取り組みが数種類の検出器によって実施された。そのうちのひとつが本研究で設置したプラスチックシンチレータによるビームバックグラウンド測定である。

Phase-2

Phase-2 は 2017 年度後半から行われる、第二段階の試運転である。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するとともに最終収束電磁石の設置により、電子と陽電子の衝突を開始し、VXD 以外の測定器による物理データの取得を始める。

Phase-3

2018 年度後半に開始を予定している Phase-3 では、VXD も加えた完全な Belle II 測定器による物理データの収集を行う。

第3章 ビームバックグラウンド

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トロン振動、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 [6] されている 6 つのバックグラウンド源について説明する。

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の列でできている。図 3.1 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、安定して周回できる軌道のずれの範囲（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頻度は、ビームサイズの逆数 (σ_y)、バンチ電流 (I_{bunch}) の二乗とバンチ数 (N_{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_{Touschek} は

$$R_{\text{Touschek}} \propto \frac{N_{\text{bunch}} \times I_{\text{bunch}}^2}{\sigma_y} \tag{3.1}$$

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。

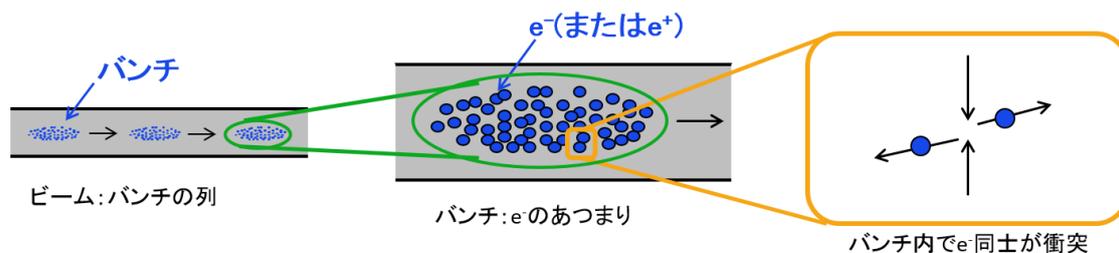


図 3.1: タウシェック効果の模式図



図 3.2: ビームガス散乱の模式図。左がクーロン散乱で右が制動放射。

従って、軌道を外れた粒子を衝突点に到達する前に止めるためのコリメータの数を大幅に増やす予定であり、これにより許容範囲内に抑制できる見込みである。

3.2 ビームと残留ガスとの散乱

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 3.2 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 $R_{\text{beam-gas}}$ は

$$R_{\text{beam-gas}} \propto I \times P \quad (3.2)$$

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新しく両リングに設置する予定である [9]。

3.3 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、継続的に継ぎ足しながらビームを入射して、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チ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、バンチを入射させる。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 3.3 に示す。

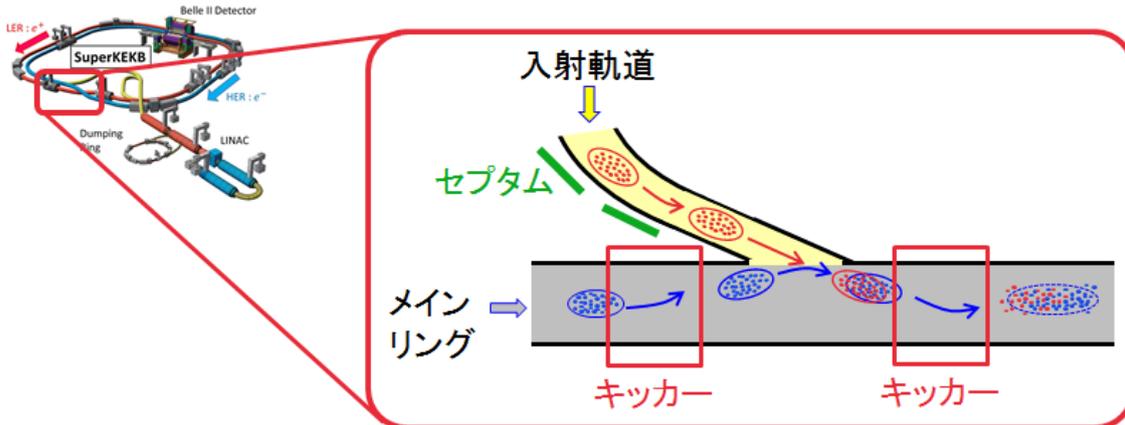


図 3.3: 入射バックグラウンド

3.4 シンクロトロン放射

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 3.4 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、この寄与を減らすことができる。

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。光子を放出してエネルギーを大きく失ったビーム粒子は、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ってロスする。ロス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の主成分である。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層を入れることで抑制できると考えられているが、非常に大きくエネルギーを失ったビーム粒子が QCS に入る手前でロスする成分についてはスペースの関係で遮蔽物を置くことが難しく、TOP 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を通り抜けて電磁石に当たり、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。

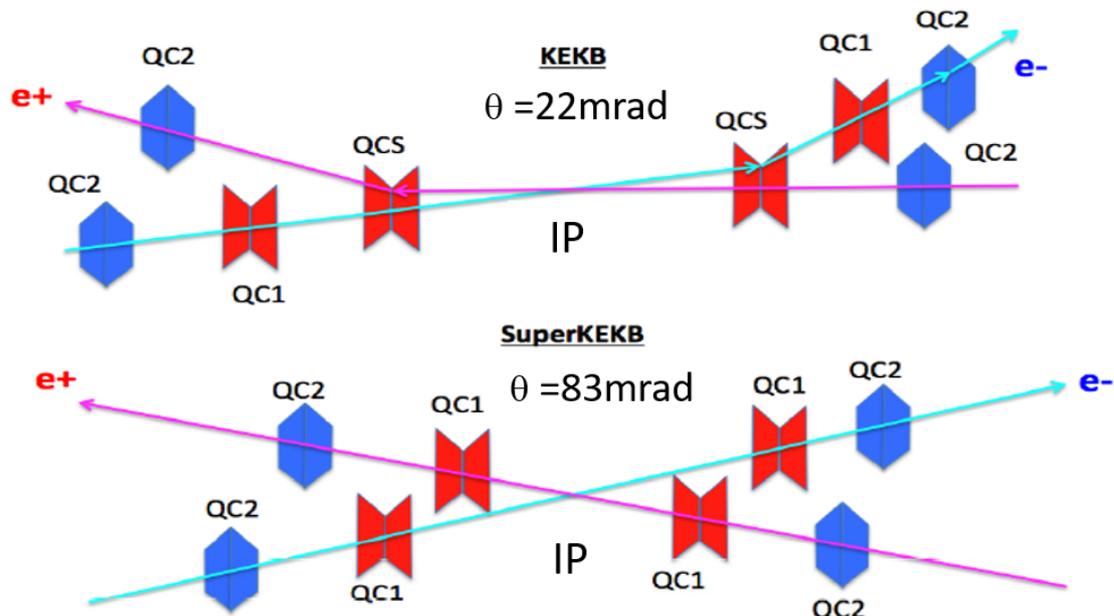


図 3.4: KEKB と SuperKEKB の QCS の配置。KEKB では QCS を上下流で共有していたが、SuperKEKB では独立の QCS を持つ [7]。

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。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。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。生成される電子・陽電子対はエネルギーが低いため、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。QCS の手前でロスする成分は、TOP 検出器などにとって危険なバックグラウンドとなる。

第4章 プラスチックシンチレータによる バックグラウンドモニター (SCI)

4.1 動機

第3章で述べたように、SuperKEKB 加速器では、目標とするルミノシティが KEKB 加速器の 40 倍と非常に高いため、ビームバックグラウンドの増加が避けえないことが予想される。ビームバックグラウンドの量がはなはだしいと、検出器の信号がバックグラウンドに埋もれ、粒子の検出効率を低下させたり、長期的には検出器が放射線損傷によって性能が劣化する。このようなバックグラウンドの原因を理解したり抑制する取り組みのためにはバックグラウンドをモニターする検出器が必要である。

本研究では素粒子実験でよく使われており、取り扱いの簡単なプラスチックシンチレータと、多チャンネルのバイアス電圧供給と信号読み出しが可能なモジュールが入手可能な MPPC を組み合わせて、バックグラウンドを測定するシステムの構築を目指した。以後、簡略化のためにこの検出器を SCIntillator の頭文字をとって SCI と呼ぶ。

4.2 SCI の構成

SCI の概略を図 4.1、外観を図 4.2、包装する前の状態を図 4.3 に示す。100×40×10 mm³ の大きさのプラスチックシンチレータに、集光効率向上のため三本の波長変換ファイバーを埋め込む。プラスチックシンチレータはシーアイ工業製、素材はポリスチレンであり、波長変換ファイバーはクラレ製である。ファイバーを通じて導かれたシンチレーション光を Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) で読み出す。MPPC とは、浜松ホトニクス社が開発した個々のピクセルが独立したガイガーモード・アバランシェ・フォトダイオードであり、シリコン光検出器の一種である。本研究では S12572-050C を使用した。表 4.1 にその仕様を、図 4.4 に外観を示す。

また、板の先端部に設けた穴を利用して、図 4.5 のように台形のアルミ板をビスでシンチレータ端部の固定ブロックに固定し、ケーブルを結束バンドで固定した。図 4.6 のように SCI 全体をアルミマイラーで巻いて、ケーブルのシールドと導通させ一点に接地することで静電遮蔽し、図 4.7 に示すように、その上をブラックシートで遮光した。

4.3 SCI の読み出し回路 (EASIROC)

SCI の信号処理系の中核をなすものとして EASIROC モジュールを使用した。EASIROC とは Extended Analogue Silicon-pm Integrated ReadOut Chip の略称で、フランスで開

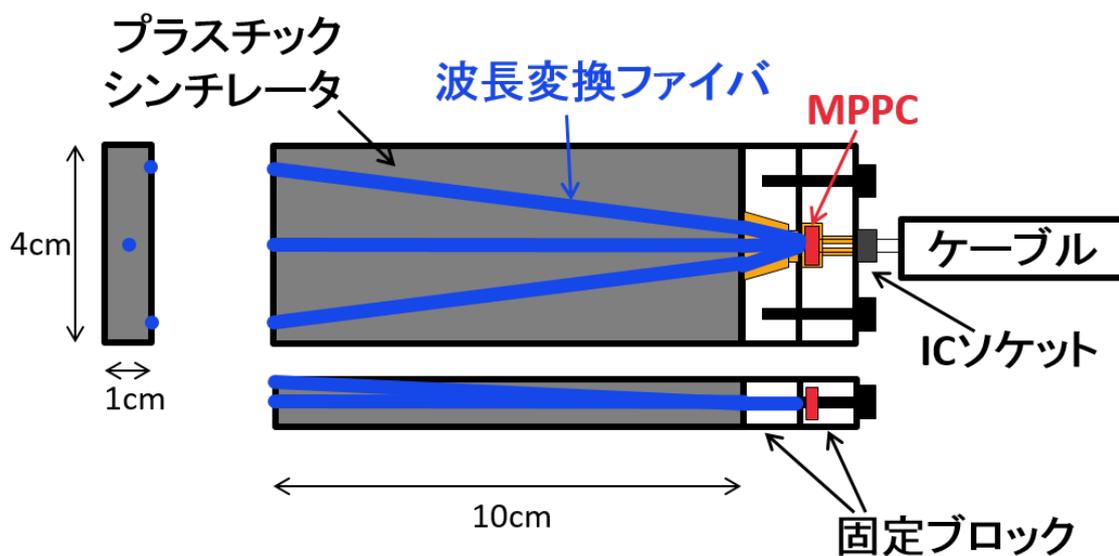


図 4.1: SCI の概略図。第三角法により、断面図も示してある。



図 4.2: SCI の外観

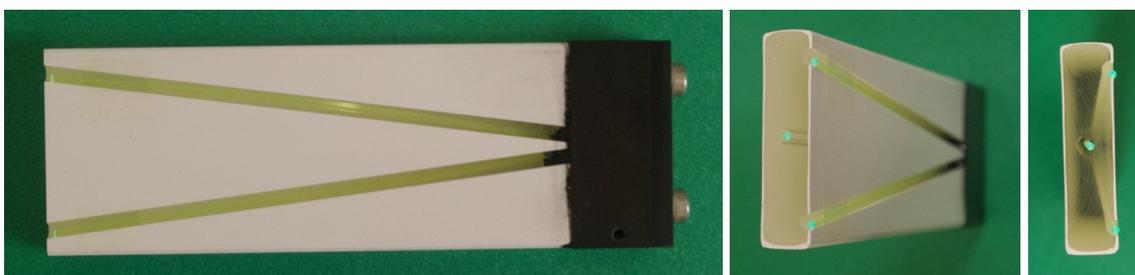


図 4.3: 静電遮蔽と遮光の包装をする前の SCI。左図は正面から、中央は MPPC 取り付け部の反対側からの俯瞰図、右は MPPC が付いていない側の断面図である。

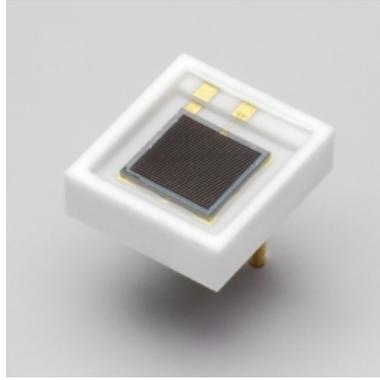


図 4.4: 3 mm 角の浜松ホトニクス社製 MPPC (S12572-050C)



図 4.5: SCI の制作過程でアルミ板の上にケーブルとシンチレーターを固定したところ。



図 4.6: アルミマイラーとケーブルを導通させ、静電遮蔽したところ。



図 4.7: ブラックシートで遮光したところ。

表 4.1: S12572-050C の仕様

項目		単位
有効受光面サイズ	3×3	mm
ピクセル数	3600	
動作温度	-20 ~ +60	°C
感度波長範囲	320 ~ 900	nm
検出効率	35	%
降伏電圧	65 ± 10	V
動作電圧範囲	降伏電圧 ± 2.6	V
時間分解能	250	ps
増倍率	1.25×10^6	

発された MPPC 読み出し用のチップ [8] である。図 4.8 に EASIROC 回路図の概略を示す。また、EASIROC チップを搭載したの NIM モジュール [10] が開発されている。本研究で使用した EASIROC モジュールの内部基板を図 4.9 に示す。EASIROC モジュールは 2 個の EASIROC チップを擁しており、最大 64 チャンネルの MPPC を扱うことができる。MPPC へのバイアス電圧を供給する機能を持ち、チャンネルごとに電圧値の微調整が可能である。MPPC からの信号は Low Gain、High Gain の二系統で増幅および波形整形される。増幅率と時定数は変更可能であり、どちらも各チップにつき一チャンネル分のアナログ波形を出力することができる。High Gain 側には fast shaper があり、与えたいしきい値を超えるとトリガーする機能がある。全チャンネル分のトリガー信号の論理和の信号を LEMO 端子で取り出すことができる。トリガー信号を適切に delay した Hold 信号を入れると、各チャンネルのピーク波高が保持され、ADC で順番に読んでいくことで、各チャンネルの波高値が SiTCP 経由で読み出し可能である。第 5 章では SiTCP 経由で取得した波高値を用い、第 6 章ではアナログ波形を用いた。

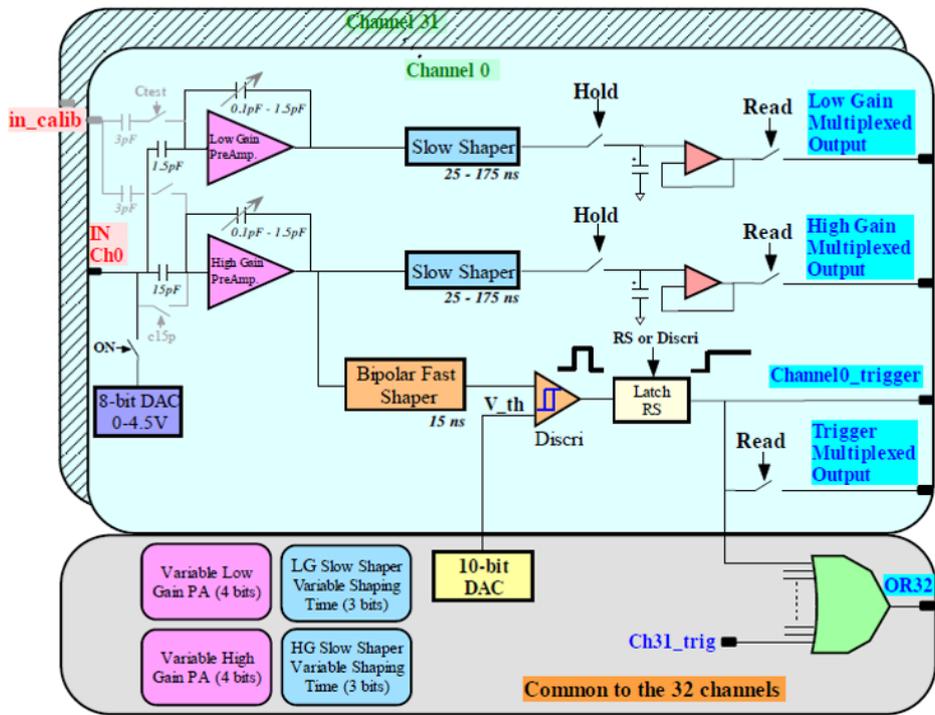


図 4.8: EASIROC 回路の概略。[8] から引用、一部改変

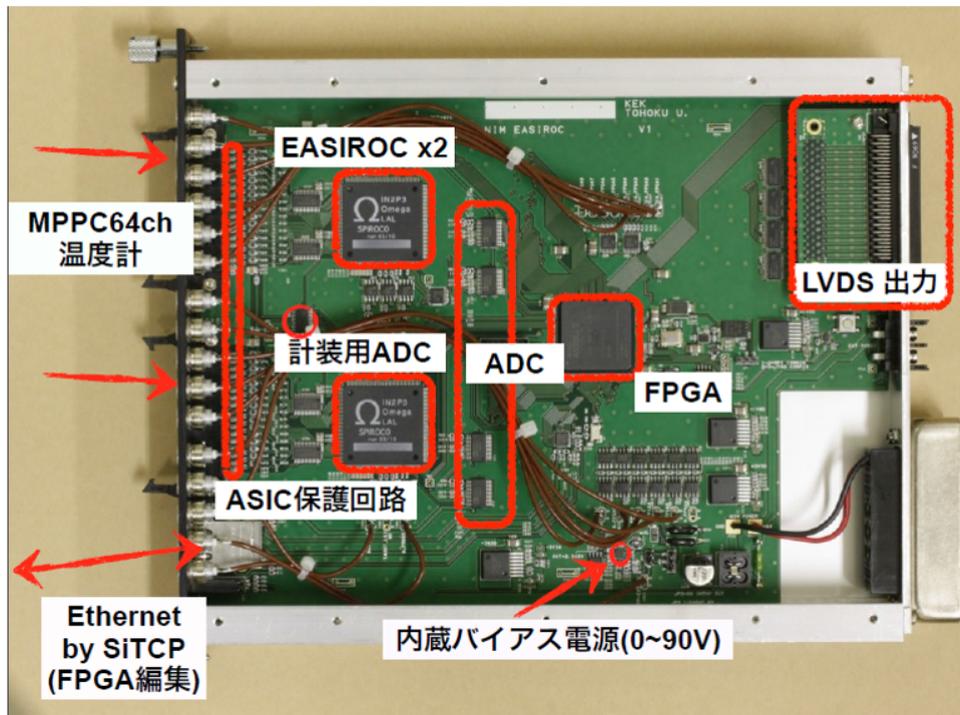


図 4.9: EASIROC モジュールの内部基板 [10]

第5章 宇宙線を用いたバックグラウンド 検出器のテスト

前章で説明した SCI を用いて宇宙線による信号を測定し、具体的な動作確認を行った。

また、加速器運転中の測定セットアップでは SCI から EASIROC モジュールまで 20 m という比較的長い距離をケーブルで結ぶ必要があることから、宇宙線のシグナルとノイズの比 (S/N 比) を三種類のケーブルについて測定して比較し、最もノイズ耐性の強いケーブルの選定を行った。

5.1 セットアップ

図 5.1 に示すように、SCI の上下を別の二つのシンチレータで挟み、宇宙線をトリガーする。上下のシンチレータは、 $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$ で、光電子増倍管 (Photomultiplier, PMT) で読み出す。上下段二つのトリガーカウンターと間に入っている SCI の三つから信号パルスの出力があったときに宇宙線が貫通した事象とした。図 5.2 にデータ読み出しのためのブロックダイアグラムを示す。

EASIROC のデータ収集システムは、Hold 信号を送ったタイミングで図 4.8 の Slow shaper で波形整形した信号の電圧を保持し、電圧値を ADC 変換して読み出す仕組みになっている。図 5.3 に示した模式図のように、ちょうど波高がピークになるタイミングで波形を Hold しなければならない。その調節については次節で詳しく述べる。



図 5.1: 宇宙線測定の実験装置。図中右側にシンチレーションカウンタ有感部を三枚重ねている。

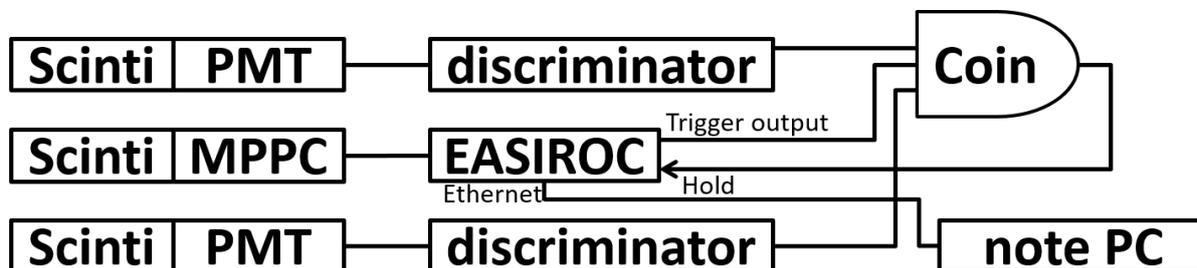


図 5.2: 宇宙線測定のプロックダイアグラム。PMT 読み出しシンチレータと、MPPC 読み出しシンチレータの EASIROC モジュール内の Trigger output のコインシデンスを Hold 信号とした。波高のデータは Hold 信号をトリガーに、Ethernet 経由で PC に送られる。

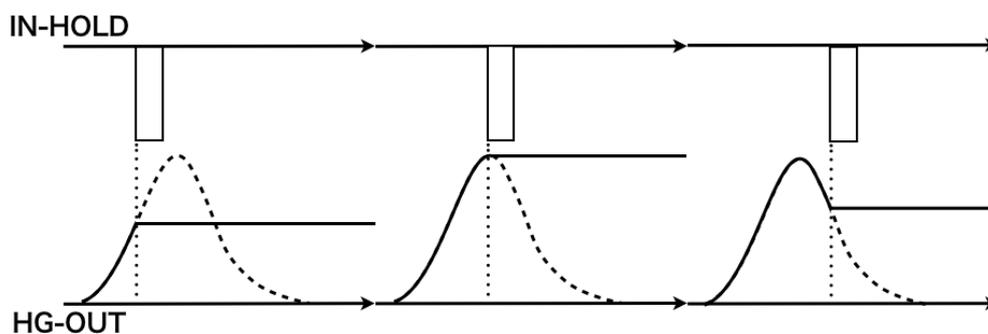


図 5.3: EASIROC による波高測定原理。IN-HOLD に論理信号の矩形波パルスが入力されると HG-OUT には点線で示した信号パルスのその瞬間の電圧が保持され、これを数値化する。従って、中央の図で示した場合のように適切なタイミングで Hold する必要がある。左右の図に示す場合のように Hold が早かったり遅かったりすると数値化した波高は適切な値にならない。[10]

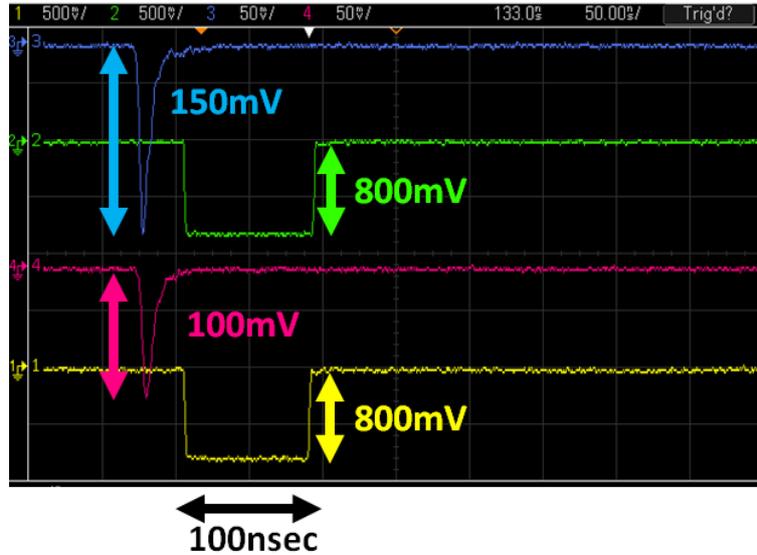


図 5.4: トリガーカウンターの信号のスクリーンショット。青が上段トリガーカウンターのアナログ信号、緑が上段トリガーカウンターのディスクリミネータ出力、赤が下段トリガーカウンターのアナログ信号、黄が下段トリガーカウンターのディスクリミネータ出力である。

5.2 実験方法

以下で説明するトリガーカウンターの設定、Hold 信号のタイミング調整を行ったうえで、宇宙線データを収集した。

5.2.1 トリガーカウンターの設定

図 5.4 にトリガーカウンターとして使用した二個の PMT 読み出しのシンチレーションカウンタの出力信号と、その信号をそれぞれディスクリミネータで NIM レベルのデジタル信号にした信号をそれぞれオシロスコープに出力させたスクリーンショットを示す。ディスクリミネータのしきい値はどちらのトリガーカウンターも 100 mV に設定した。

5.2.2 Hold 信号のタイミング調整

宇宙線測定のために、二つのトリガーカウンターと、EASIROC モジュールの Trigger 出力のコインシデンスをとり、これを Hold 信号とした。この際、前節説明したように、EASIROC モジュールに Hold 信号を送るタイミングがずれると正確な波高測定が行えない。これは、貫通した宇宙線を上下のトリガーカウンターを含めたコインシデンスでトリガーするところで、コインシデンスのタイミングは MPPC 読み出しの検出器自体のパルスで決まるようにすれば解決できる。そこで、図 5.5 に示すようにトリガーカウンターの信号幅を十分長くし、EASIROC からの信号に約 30 ns の delay を挟むことで、電圧を保

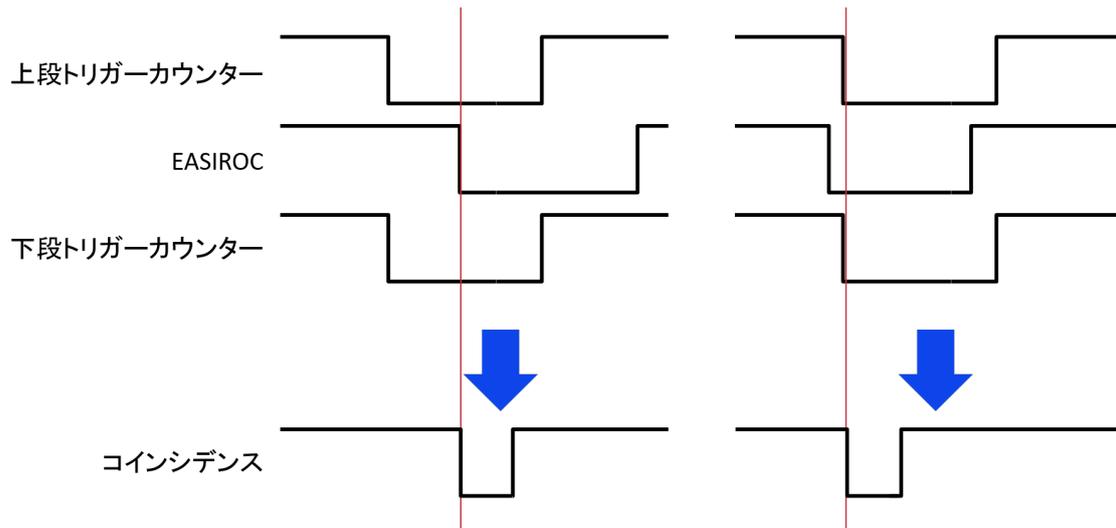


図 5.5: EASIROC に delay を入れず、トリガーカウンターと同じくらいのタイミングのままだと、右図のように、どの段に同期したコインシデンスかわからない。左図のように EASIROC の信号を他の二つより遅らせることで、必ず EASIROC がコインシデンスの基準になるように設定する。

持するタイミングがずれないようにした。図 5.6 に Hold 信号の設定のスクリーンショットを示す。

5.2.3 宇宙線の測定

以上の手順を踏み、図 5.7 における黄線、MPPC 読み出しのシンチレーションカウンタの宇宙線通過時の信号の電圧を測定する。EASIROC の時定数は 50 nsec、増倍率 37.5 倍に設定した。しきい値は 10bit DAC の設定値で与える。設定値が大きいくほど高いしきい値となる。宇宙線測定時は、ペDESTAL よりも十分高く宇宙線事象の波高よりも小さな値として 240 に設定した。ペDESTAL 測定時は、十分に小さな値として 620 に設定し、トリガーカウンターを使わずに測定した。

5.2.4 ケーブル選定

外部ノイズに強く、ケーブル長による減衰が少ないケーブルを選ぶため、以下の三種類のケーブルについて測定を行った。

フラットシールドタイプ

フラットシールド型オキフレックス FS-FLEX-B 34-7/0.127。図 5.8 に示すように、耐ノイズ、クロストーク対策のためにフラットケーブルの周囲を静電遮蔽の役割を担うアルミラミネートテープで包んだ構造になっている。

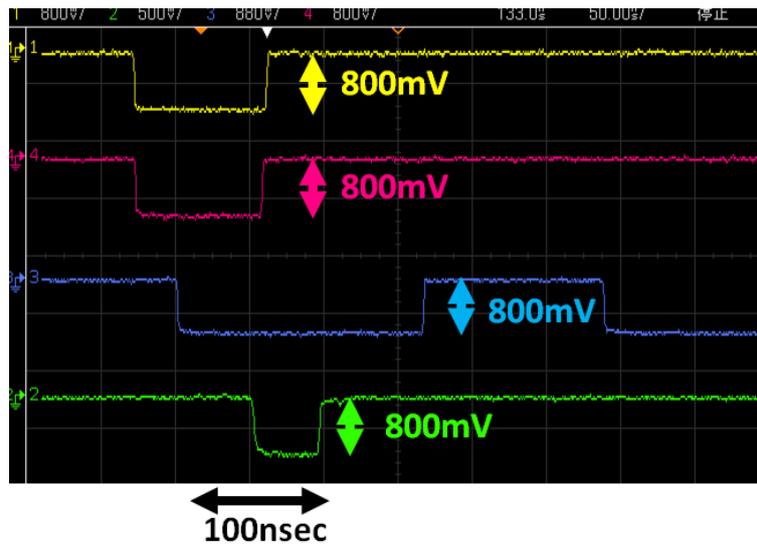


図 5.6: Hold の設定のスクリーンショット。青が上段トリガーカウンターのディスクリミネータ出力、赤が下段トリガーカウンターのディスクリミネータ出力、青が EASIROC のトリガー出力、緑が Hold 信号である。

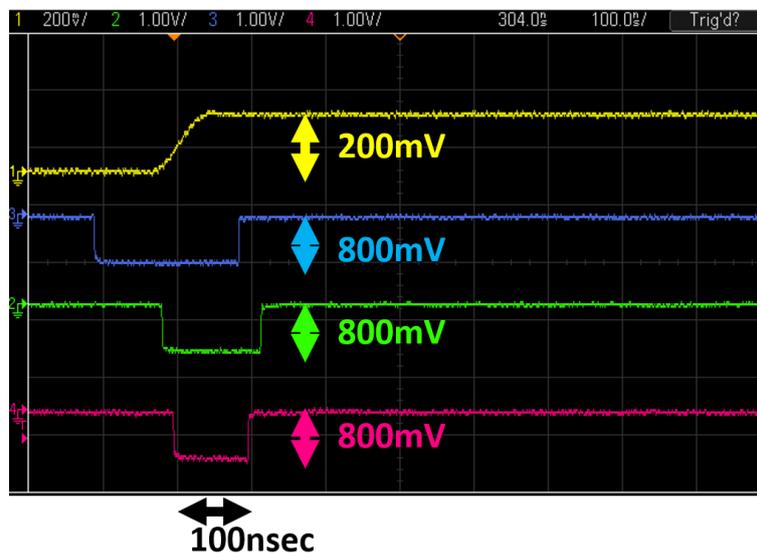


図 5.7: 宇宙線測定時のオシロスコプのスクリーンショットである。黄がトリガー信号で Hold された EASIROC モジュールの出力信号であり、保持された電圧値が ADC で読み取られる。青は上段トリガーカウンターのディスクリミネータ出力、緑が EASIROC のトリガー出力、赤が Hold 信号である。

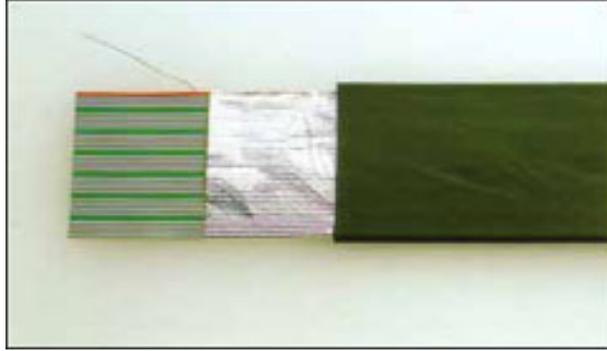


図 5.8: フラットシールド型オキフレックス [12]

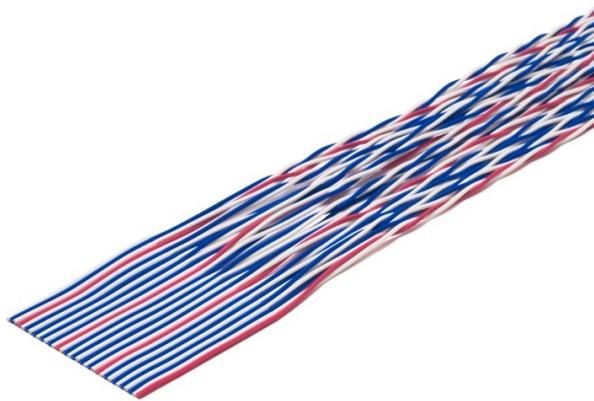


図 5.9: 日立フラットエース・ツイストタイプ [14]

ツイストタイプ

日立フラットエース・ツイストタイプ 20012-TW LF[13]。図 5.9 に示すように、ノイズに強く、長距離を伝送した場合でも信号の減衰を少なくする目的で、二心線をより合わせた構造になっている。

CAT7 ケーブル

カテゴリ 7 LAN ケーブル KB-T7-30WN。信号転送に用いられるツイストペアケーブルの規格であり、図 5.10 のように、4 対のペアを一对ずつシールドした上で、さらに外周をシールドした構造を持ち、外部ノイズへの耐性が非常に強いケーブルである。

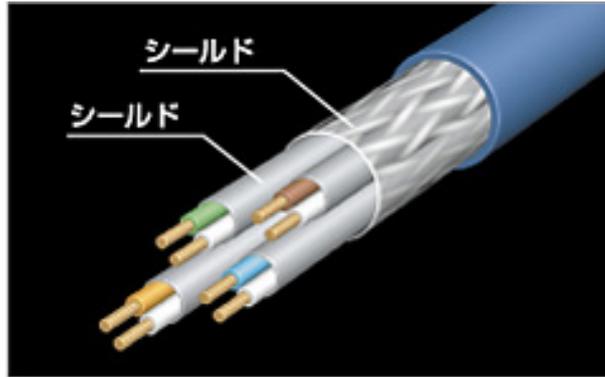


図 5.10: cat7[15]

5.3 結果

5.3.1 宇宙線とペDESTALの測定

まず、0.85mのフラットケーブルを用いて宇宙線信号とペDESTAL信号を測定した。図 5.11 は宇宙線信号の ADC カウントの分布、図 5.12 はペDESTAL信号の ADC カウントの分布で、それぞれガウシアン関数でフィットしてある。

ADC カウントと波高の換算計数は図 5.13 で与えられる。この図は、ディスクリメータのしきい値をさまざまに変化させたときの、オシロスコープで観測される波形の波高値の最小値を縦軸に、ADC カウントのヒストグラムの最小値を横軸にプロットしたものである。このプロットはよく直線に乗っており、直線フィットして得られたパラメータから、

$$\text{波高 [mV]} = 0.223 * (\text{ADC カウント} - 700) \quad (5.1)$$

という換算式が得られる。

式 5.1 より、図 5.11 の宇宙線信号の波高の平均値は約 275mV に相当すると考えられる。今後、このように求めた電圧値をこのケーブルを用いた際の 1 MIP と定義することにする¹。

また、このケーブルの宇宙線の波高は EASIROC モジュールの ADC 値から対応する電圧に換算する計数は図 5.13 に示した直線の傾きで与えられ、これを用いて $275 \pm 5 \text{ mV}$ となり、これを 1 MIP とする。ここで MIP とはシンチレータに垂直に入射した荷電粒子 (Minimum Ionizing Particle、MIP) で電離損失が最小のものが起こすエネルギー損失に対応する波高のことである。

5.3.2 ケーブルごとの S/N 比

三種類のケーブルそれぞれについて S/N を測定した結果を表 5.1 と図 5.14 にまとめる。ケーブルの S/N 比を算出する際には、宇宙線の波高のヒストグラムをガウス分布でフィッ

¹Minimum Ionizing Particle (MIP) とは、本来の意味では、単位厚さあたりのエネルギー損失が最小に近い領域のエネルギーをもつ荷電粒子を指す。宇宙線ミュオンは MIP である。ここでは MIP の粒子そのものではなく、粒子が SCI を通過した時の信号に相当する波高を 1 MIP と定義することにする。

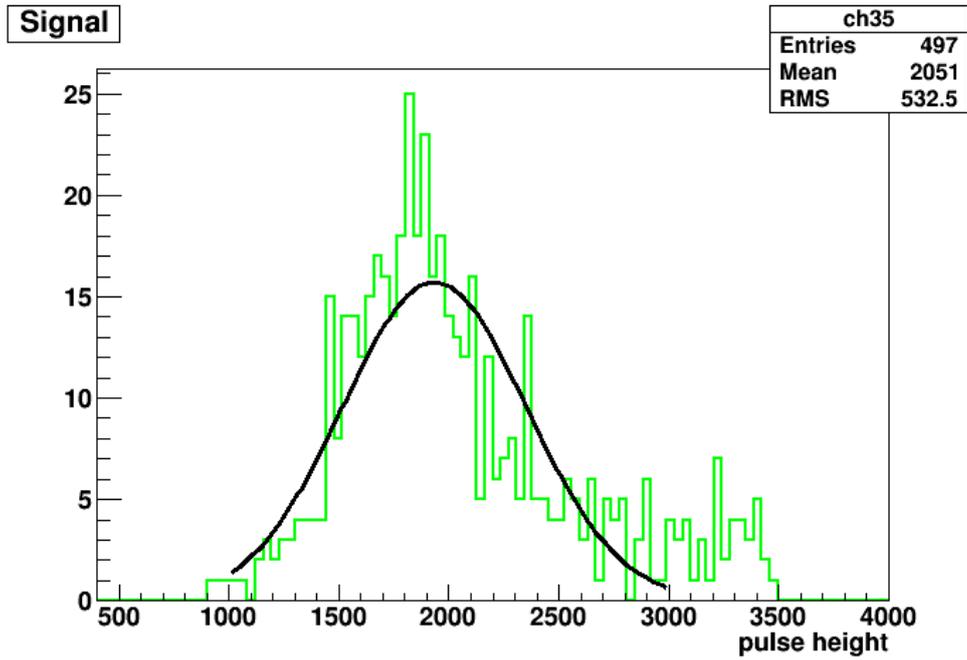


図 5.11: フラットシールド 0.85 m で宇宙線を測定した際の波高のヒストグラム。

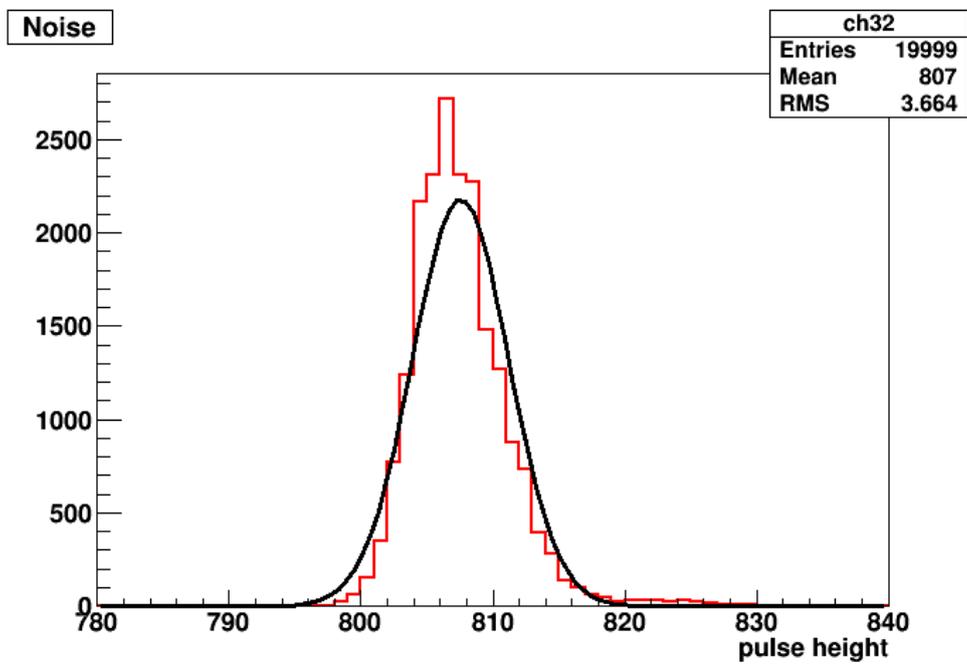


図 5.12: フラットシールド 0.85 m でペDESTALを測定した際の波高のヒストグラム。

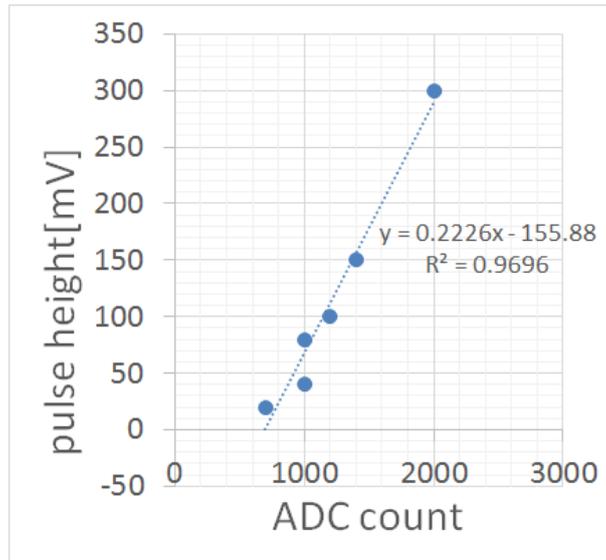


図 5.13: 波高値と ADC カウントの関係。ディスクリミネータのしきい値を変えながら、オシロスコープで観測される波高の最小値と、ADC カウントのヒストグラムの最小値をプロットした。波高 0mV に相当するのは 699.9 カウントである。

トした時の mean からペDESTALのヒストグラムをガウス分布でフィットした時の mean を引いた値を Signal (S) とし、ペDESTALのヒストグラムをガウス分布でフィットした時の sigma を Noise (N) と定義した。

表 5.1: 三種類のケーブルの S/N 比

	長さ [m]	Signal	Noise	S/N
フラットシールド	0.85	1118±21	9.17±0.19	121.9±3.4
	10	1063± 6	15.93±0.09	66.7±0.5
	20	912±14	41.60±0.28	21.9±0.4
ツイストペア	10	1236± 7	34.22±0.19	36.1±0.3
	cat7	0.5	1070±45	11.29±0.06
	20	1094±16	26.21±0.14	41.8±0.6

5.4 考察

SCI を使って宇宙線貫通時の波高のヒストグラムが得られた。また、これよりケーブルごとの 1 MIP の値を測定できた。次章におけるマシンスタディの測定では、この MIP の値を基準にしきい値を適切に設定することで、ペDESTALノイズを拾うことなく、ビームバックグラウンド事象による信号だけを検出するようになった。表 5.14 より、長さ 20 m において三種類のケーブルの中で一番 S/N が高いこと、またケーブルを長くしたことによる減衰率が低いことより、cat7 ケーブルを採用することに決定した。

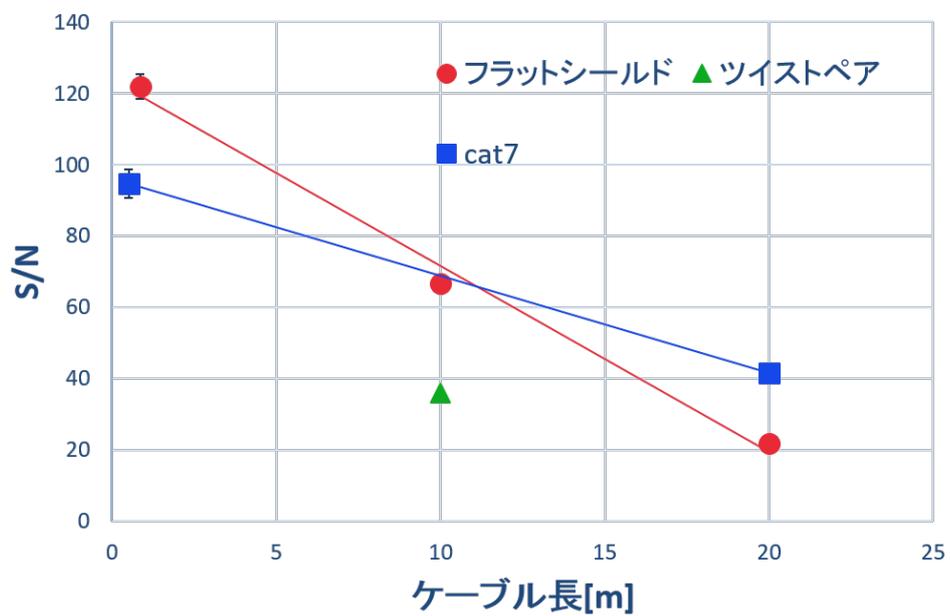


図 5.14: 三種類のケーブルの S/N の比較。図中のエラーバーは S と N それぞれのガウシアンフィットの mean のエラーを伝搬させたものである。

第6章 SuperKEKB 加速器の Phase-1 運転におけるビームバックグラウンド測定

SCI を用いてさまざまなビームパラメータを変えながら SuperKEKB 加速器の運転をして、計数率の変化を調べた。本章では、第3章で記述したタウシェック効果、ビームガス散乱、入射直後のビームロスについて Phase-1 試験運転中に測定した結果について述べる。

6.1 セットアップ

SuperKEKB 加速器のビーム交差点から、図 6.1 に示すように電子ビームの進行方向 +55 cm と -55 cm、水平方向 19.5 cm、鉛直方向 27.4 ~ cm の位置に SCI を設置し、ビームバックグラウンドの中で荷電粒子の検出を行った。+55 cm に置いた検出器を Forward SCIntillator (FSCI)、-55 cm に置いた検出器を Backward SCIntillator (BSCI) と以下では記す。

図 6.2 にビームバックグラウンド測定のためのブロックダイアグラムを示す。EASIROC のアナログ出力には約 600 mV の直流成分の正のオフセットがあり、一般的によく使用される NIM モジュールのディスクリミネータは負のしきい値しか設定できないため適合しない。そこで、正電圧のしきい値を設定でき、Trigger 出力機能のあるパルスジェネレータである Wavetek 801 と LeCroy 9211 をディスクリミネータとして使用し、必要な役割を果たすようにした。スケーラには CONTEC 社製 CNT24-2(USB)GY を使用した。このスケーラの最大応答周波数は 500 kHz であるとともに、入力部は図 6.3 のように指示されているため、図 6.4 と 6.5 に示す回路を作成してスケーラ入力部を形成した。波形データの収集のために USB オシロスコープ PicoScope 6402C を使用した。関連ソフトウェアがサポートされた Windows 10 搭載ノート PC を用いて、スケーラとオシロスコープは USB バス経由で、EASIROC は Ethernet 経由で制御・データ収集する構成とした。

6.2 測定データ

ビームバックグラウンドに対してスケーラによる SCI の計数率と、オシロスコープによるサンプル・アンド・ホールドした波形データの二種類のデータを収集した。前者はマシンスタディで加速器パラメータを変化させたときの計数率の比較的ゆっくりした応答を

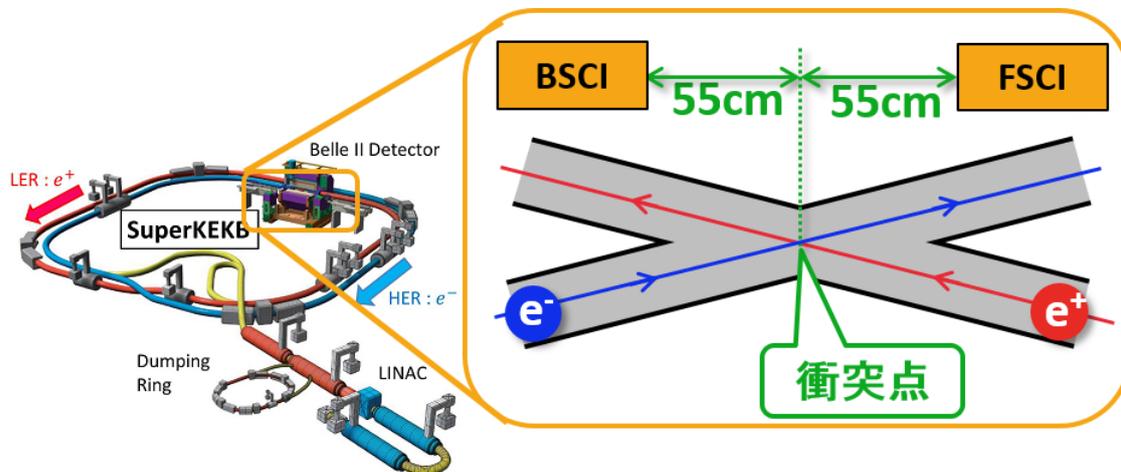


図 6.1: 橙色の場所に検出器を設置した。電子ビーム軸に対して前方に設置した検出器を FSCI、後方に設置した検出器を BSCI とする。

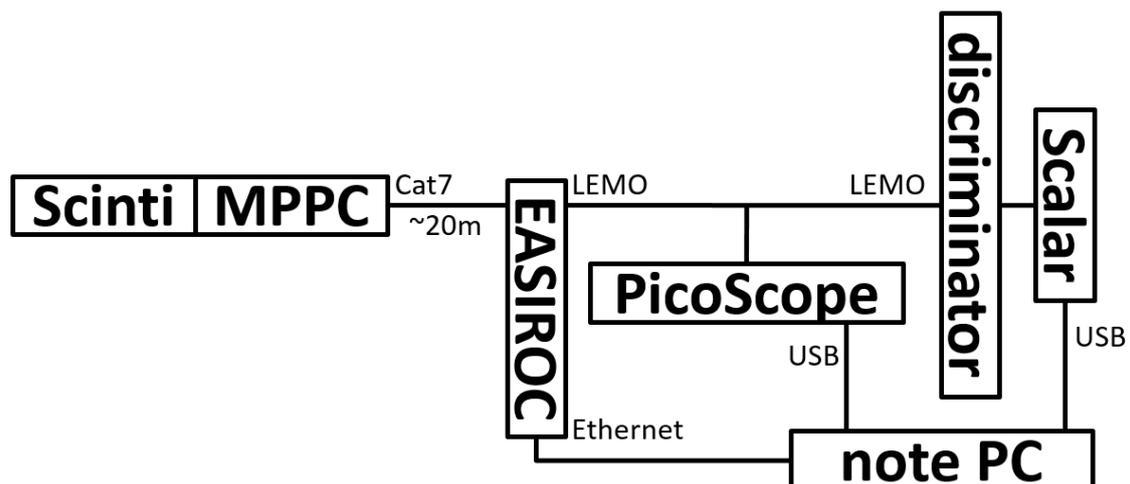


図 6.2: ビームバックグラウンド測定のプロックダイアグラム。シンチレーションカウンタから出た信号を、オシロスコープとスケーラの二つを使い、データ収集を行う。

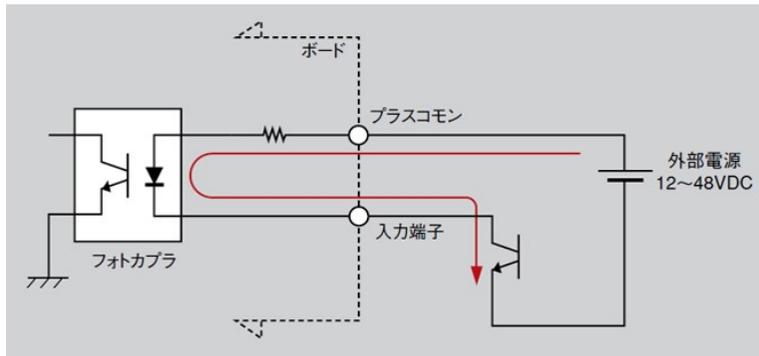


図 6.3: スケーラの入力部 [17]

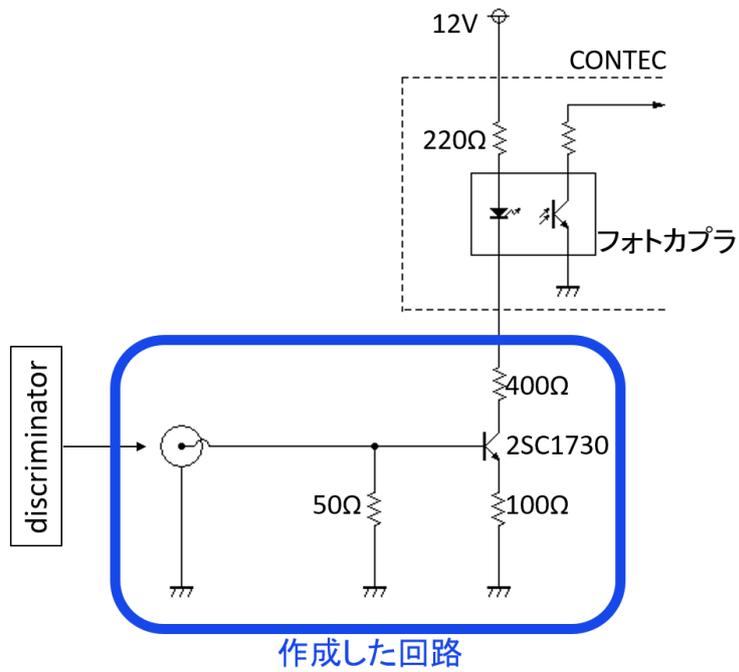


図 6.4: スケーラの入力部を構成する回路図。

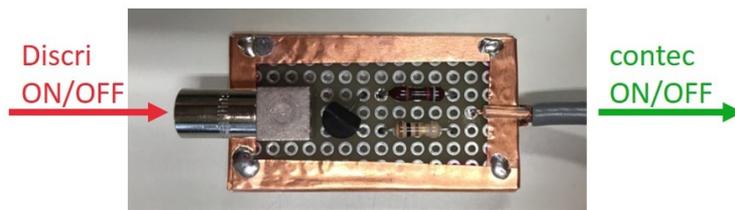


図 6.5: 作成した回路の写真

見るため、後者はバンチ入射によるバックグラウンドレートの早い時間変化を記録するためである。

6.2.1 スケーラの生データ

スケーラにより 10 秒ごとのパルスのカウントを

曜日 月 日 時間 年

FSCI の 10 秒間のパルスカウント BSCI の 10 秒間のパルスカウント

のフォーマットで記録する。以下に記録したデータの例を示す。

```
Tue Jun 21 18:37:26 2016
25215 32145
Tue Jun 21 18:37:36 2016
24886 32270
Tue Jun 21 18:37:46 2016
25238 32201
Tue Jun 21 18:37:56 2016
25143 31759
Tue Jun 21 18:38:06 2016
24878 32370
.
.
.
```

データをリアルタイムで図 6.6 のようにプロットし、SCI の運転状況を確認しながらデータ収集を行った。

6.2.2 オシロスコープの生データ

バンチ入射信号をトリガーに、5 ms にわたり、約 50 ns の時間間隔で

時間 [msec] 電圧 [mV]

のフォーマットで記録する。以下に記録したデータの例を示す。

```
0.00003787 0.00000000
0.00008907 0.01574803
0.00014027 -0.01574803
0.00019147 0.00000000
0.00024267 -0.01574803
0.00029387 -0.01574803
0.00034507 0.01574803
0.00039627 0.01574803
0.00044747 0.00000000
0.00049867 0.00000000
```

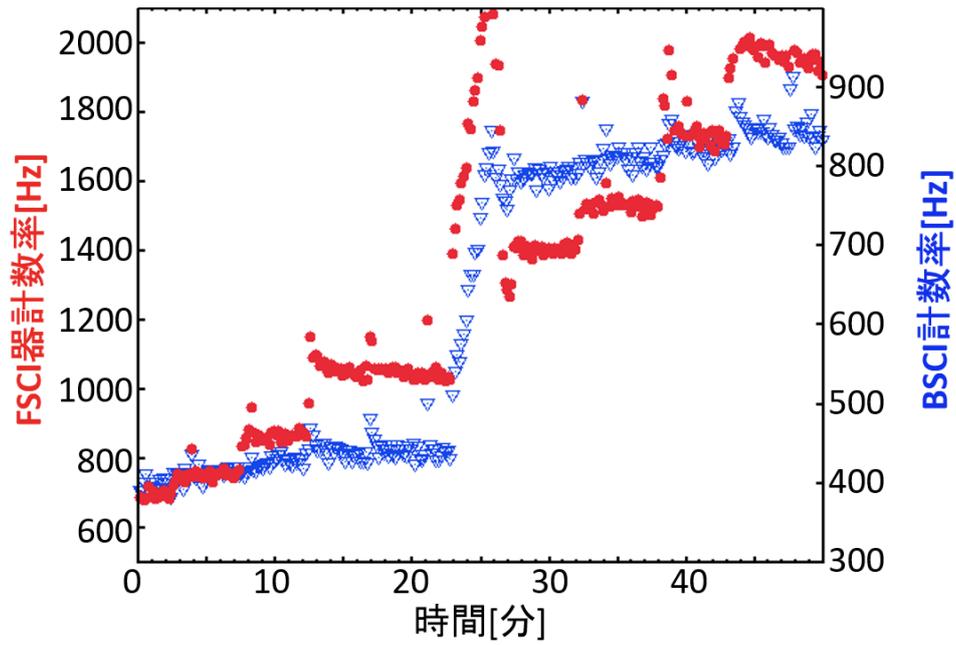


図 6.6: スケータのリアルタイムデータの例。赤色の丸い点が FSCI の計数率。青色の下向き三角で示されている点が BSCI の計数率である。

・
 ・
 ・

図 6.7 にデータ収集中のオシロスコープのスクリーンショットを示す。

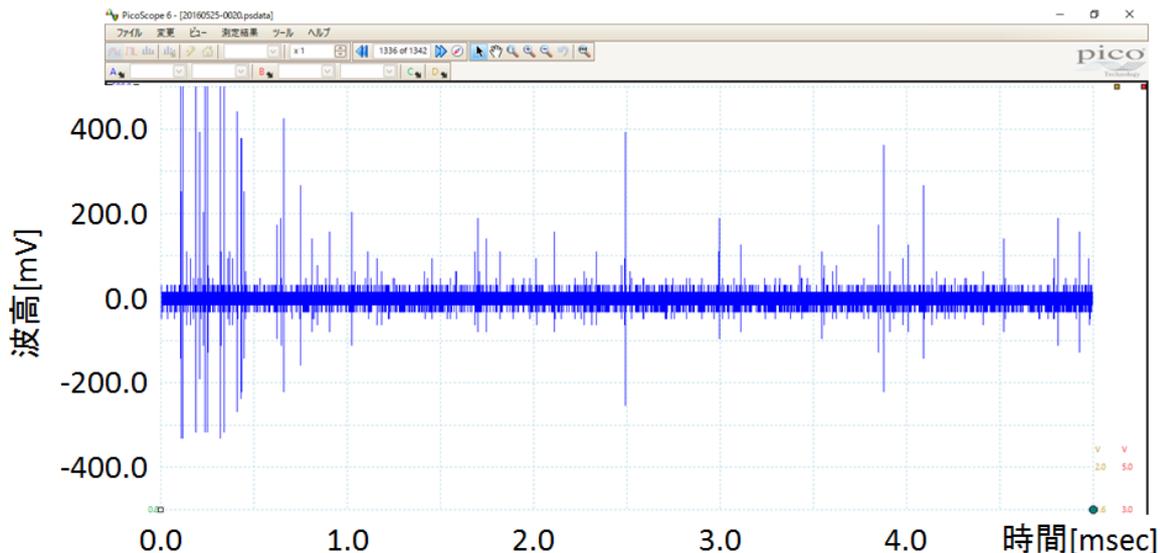


図 6.7: バンチ入射信号をトリガーにした際の FSCI の出力波形

6.3 シミュレーション

マシンスタディで測定したバックグラウンド計数率は、シミュレーションによる予測値と比較することでシミュレーションの信頼性をチェックすることができる。Phase1 における測定値とシミュレーションの比較によって、Phase2 以降の運転の見通しを立てる際の参考とする¹。

バックグラウンドのシミュレーションで用いる手法は以下のとおりである。ビームがパイプに当たってロスするレートを見積もるには、SAD[?] とよばれるプログラムを使用する。SAD は KEK 加速器グループによって開発されたビーム光学計算用プログラムであり、KEKB の設計・運転および SuperKEKB の設計・運転に用いられている。SAD によるシミュレーションでは、まずリング上の各点においてタウチェック散乱やビームガス散乱によってエネルギーまたは進行方向のずれた粒子を生成する。それらの粒子に対して、加速器リングの電磁石の配置に対応した転送行列を演算することでトラッキングを行い、ビームパイプ内壁またはコリメータに当たってロスするまでそれを繰り返す。ビーム交差点付近でロスした粒子の位置と 4 元運動量を SAD からアスキーデータに書き出す。それ以降のシミュレーションは GEANT4²が担当する。GEANT4 上で、ビーム交差点付近のビームパイプや構造体、バックグラウンド検出器やそれらの応答を実装しておく、アスキーデータからビームロス粒子の情報を読み込んで初期粒子とし、電磁シャワーの生成などの full simulation を行う。

シミュレーションでは、特定の加速器パラメータ (バンチ電流、バンチ数、ビームサイ

¹ただし、Phase2 以降では最終収束磁石が設置され、衝突点の光学設計が大幅に変わる。したがって、Phase1 におけるシミュレーションの信頼性は、Phase2 以降に向けたシミュレーションの信頼性と直ちにリンクするわけではないことに留意する必要がある。また、Phase2 以降ではビーム衝突によって生成するルミノシティに比例するバックグラウンド成分が存在し、それらは Phase1 では測定できない。Phase3 でフルルミノシティに到達した際はこの成分が支配的なバックグラウンドになるため、Phase2 における更なるマシンスタディが必須である。

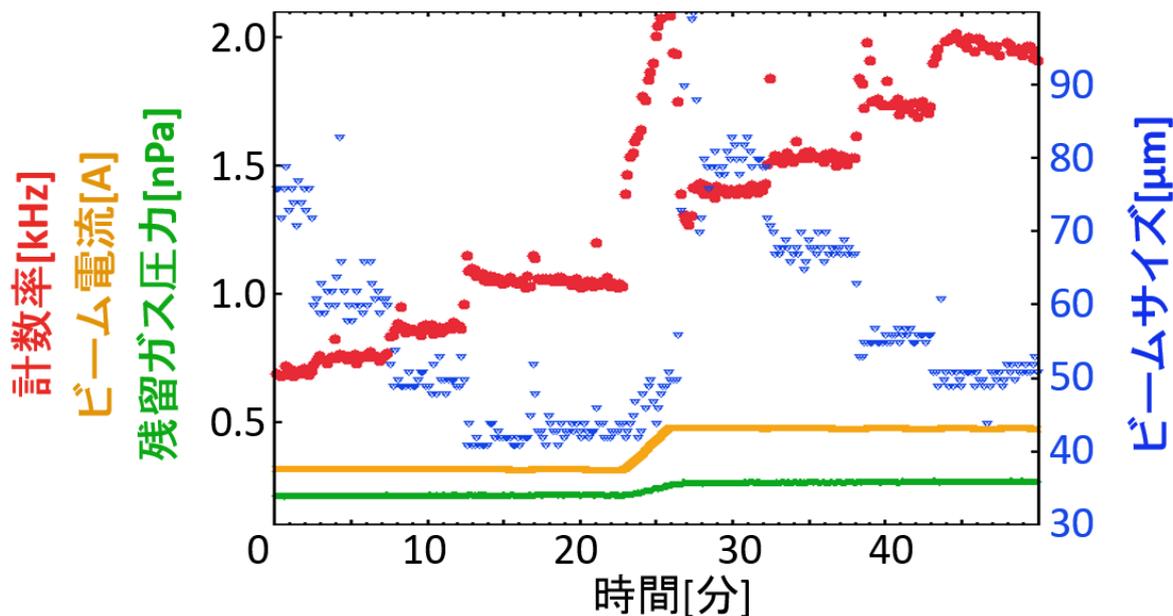


図 6.8: 電流値とビームサイズを変化させた際の SCI の計数率の時間変化

ズ、真空度)でバックグラウンド検出器の計数率を見積もっておき、測定時の加速器パラメータに応じてスケールした後の値を、マシンスタディにおける測定値と比較する。

6.4 タウシェック散乱の測定

タウシェック散乱由来のビームバックグラウンドは式(3.1)より、ビーム電流の二乗とビームサイズの逆数に比例する。そこで、電流値とビームサイズ(鉛直方向)を変化させ、SCIの計数率を測定して、その変化に着目することにした²。

図 6.8 に、SCI の計数率と、ビーム電流、ビームサイズ、残留ガス圧力の時間変化を示す。ビームに関するパラメータは、加速器グループが測定して EPICS という計測や制御に関係したコンピュータがネットワーク上でコマンドの送受信や情報の共有を行うプロトコルで配信する。図 6.8 に示した期間の運転では、測定開始から 25 分前後でビームの入射があり電流値が 160 mA から 320 mA に上昇している。160 mA のときは、SCI の計数率は 1.0 kHz 程度であるが、320 mA になると 1.5 から 2 kHz 程度まで上昇しており、電流に伴って、SCI の計数率が上昇していることがわかる。また、電流値が 320 mA のとき、ビームサイズが 80 μm では SCI の計数率は 1.5 kHz 程度だが、ビームサイズを 50 μm まで絞ると計数率は 2 kHz 程度まで上昇している。

²この測定は 2016 年 6 月 21 日から 22 日にかけて行った。

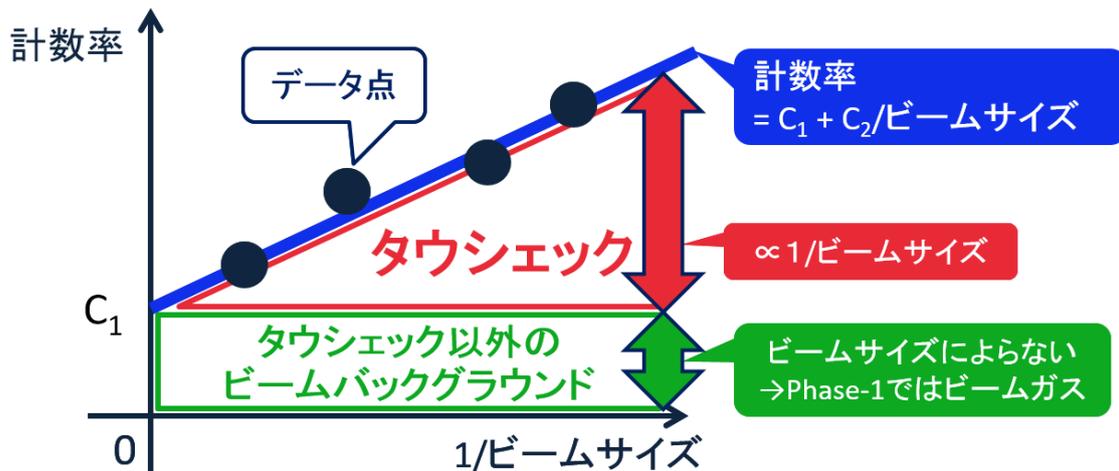


図 6.9: タウシェック散乱と他の過程の寄与を分離する解析方法の原理

6.4.1 タウシェック散乱による寄与の抽出

既述したように、タウシェック散乱によるビームバックグラウンド量は、式 3.1 に従うと考えられる。ビーム電流をある一定の値に保った時、パラメータ C_1 と C_2 により

$$\text{シンチ計数率} = C_1 + \frac{C_2}{\text{ビームサイズ}} \quad (6.1)$$

という関係式が成り立つと考えられる。

すると、図 6.9 に示したように、ビームサイズの逆数に比例して増える計数率をタウシェック由来のバックグラウンドと考えることができる。ここで、 $1/\text{ビームサイズ} = 0$ 、つまりビームサイズ $= \infty$ の極限では、粒子間の距離も ∞ であるため、タウシェック散乱は発生しないと考えることができる。したがって、y 軸の切片 (C_1) はタウシェック散乱以外の過程に由来するものを表していることになる。Phase1 の運転では、これはビームガス散乱によるものが支配的だと考えられる。

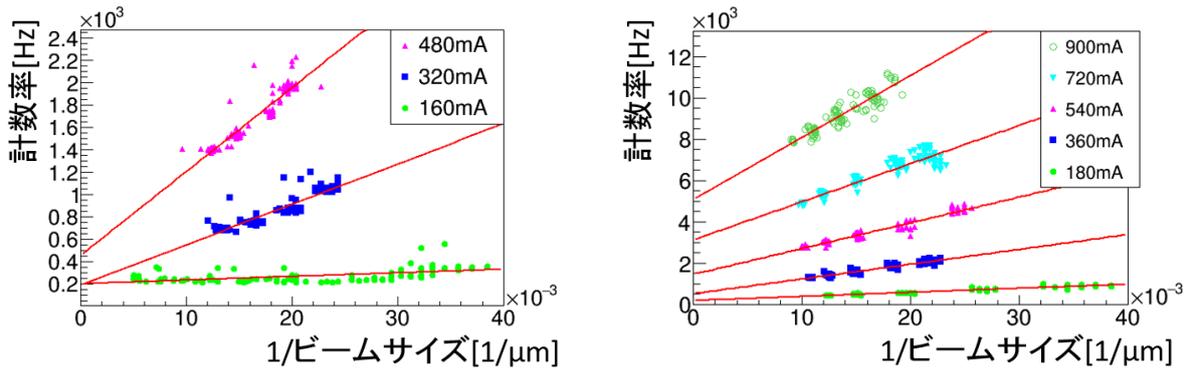


図 6.10: FSCI における計数率。左が電子ビームのみ蓄積した時の結果。右が陽電子ビームのみ蓄積した時の結果。

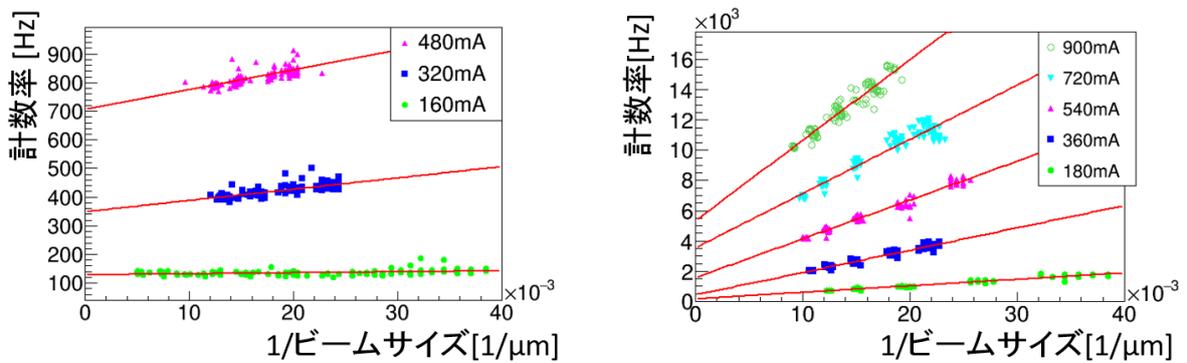


図 6.11: BSCI における計数率。左が電子ビームのみ蓄積した時の結果。右が陽電子ビームのみ蓄積した時の結果。

6.4.2 測定結果

図 6.10 に電子ビームのみを蓄積し、電流値が 160 mA、320 mA、480 mA の場合について、鉛直方向にビームサイズを変化させ、FSCI で計数率を測定した結果と、同様の測定を陽電子ビームのみを蓄積して、電流値を 180 mA から 900 mA まで 180 mA ずつ電流値を変化させた場合の測定結果を示す。BSCI による測定結果を図 6.11 に示す。

EASIROC の時定数は 50 nsec、増倍率 18.8 倍、ディスクリミネータのしきい値は FSCI では 160 mA、BSCI は記録がないが、FSCI と BSCI で同程度の計数値になるよう設定した。

いずれの場合も、ビームサイズの逆数に比例して計数率が上昇する成分があると考えることで、測定結果がよく説明できる。そこで、図 6.9 で既述したように、タウチェック散乱とそれ以外のバックグラウンドを分離して、バックグラウンド全体に対するタウチェック散乱の寄与する割合を算出できる。例として、図 6.10 の 480 mA の電子ビーム蓄積、ビームサイズ $\sigma_y = 50 \mu\text{m}$ 時の FSCI におけるタウチェック散乱の寄与を抽出した結果について述べる。計数率のビームサイズ逆数に対する依存性を式 6.1 でフィットすると、 $C_1 = 458.40$ 、 $C_2 = 74863$ を得る。 $\sigma_y = 50 \mu\text{m}$ の場合は、その逆数が $0.02 \mu\text{m}^{-1}$ と

表 6.1: $\sigma_y = 50 \mu\text{m}$ におけるタウチェック散乱のバックグラウンドに占める割合

ビーム種別	ビーム電流 [mA]	FSCI, f_T	BSCI, f_T
電子	160	$24.0 \pm 2.6 \%$	$5.2 \pm 1.0 \%$
	320	$78.9 \pm 2.2 \%$	$18.4 \pm 1.0 \%$
	480	$76.6 \pm 1.7 \%$	$16.2 \pm 1.0 \%$
陽電子	180	$67.7 \pm 1.6 \%$	$84.7 \pm 1.8 \%$
	360	$73.3 \pm 1.1 \%$	$87.3 \pm 1.1 \%$
	540	$62.8 \pm 1.0 \%$	$76.6 \pm 0.9 \%$
	720	$54.1 \pm 1.2 \%$	$66.9 \pm 1.1 \%$
	900	$54.1 \pm 1.3 \%$	$66.6 \pm 1.1 \%$

なるので、 $0.02 \times C_2 = 1497 \text{ Hz}$ がタウチェック散乱の寄与で、 C_1 がそれ以外の和であると解釈できる。従って、ビームバックグラウンド全体に対するタウチェック散乱の占める割合 f_T を

$$f_T = \frac{\text{タウチェック散乱による計数率 [Hz]}}{\text{全計数率 [Hz]}} \quad (6.2)$$

と定義すると、 $f_T = 76.6 \pm 1.7 \%$ を得る。同様に、電子ビーム蓄積時の $\sigma_y = 50 \mu\text{m}$ における f_T を、異なるビーム電流での測定、電子ビームと陽電子ビーム、FSCI と BSCI のすべての場合にわたって算出した結果を表 6.1 に示す。

さらに、こうして抽出・分離したタウチェック散乱とそれ以外の寄与について、これまでに述べたモデルで説明可能か検討した。SCI の計数率がビームサイズの逆数に対して示す傾き（増加率）はタウチェック散乱の性質に起因してビーム電流の二乗に比例すると期待される。また、計数率をビームサイズの逆数の関数としたときの切片、すなわちビームサイズを無限大とした時の極限の値はタウチェック散乱以外の過程の寄与の合計であり、SuperKEKB 加速器の Phase-1 運転では、ビームガス散乱が支配的であると考えられるため、電流と残留ガス圧力の積に比例することが期待される。

計数率のビームサイズ依存性を直線でフィットした場合の傾きとビーム電流の二乗の関係と、切片をビーム電流と残留ガス圧力の積の関数で表した結果について、電子ビームのみ蓄積時の結果を図 6.12 に、陽電子ビームのみ蓄積時におけるそれを図 6.13 に示す。傾きについては、タウチェック散乱がビームサイズの逆数とビーム電流の二乗にすると期待と一致した傾向を示す。また切片は、電流と残留ガス圧力の積と一致する傾向を示したため、Phase-1 ではタウチェック散乱以外のバックグラウンドは、ビームガス散乱が支配的であると確認できた。

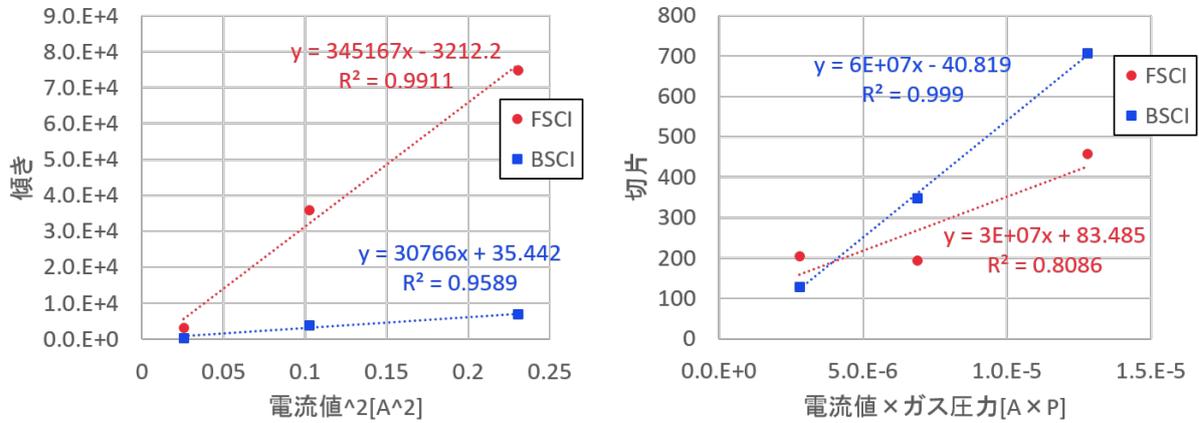


図 6.12: 電子ビーム蓄積時に FSCI と BSCI で測定した計数率のビームサイズ逆数依存性を直線でフィットした場合の、傾きとビーム電流の二乗の関係（左）と切片とビーム電流・残留ガス圧力の積の関係（右）を示す。

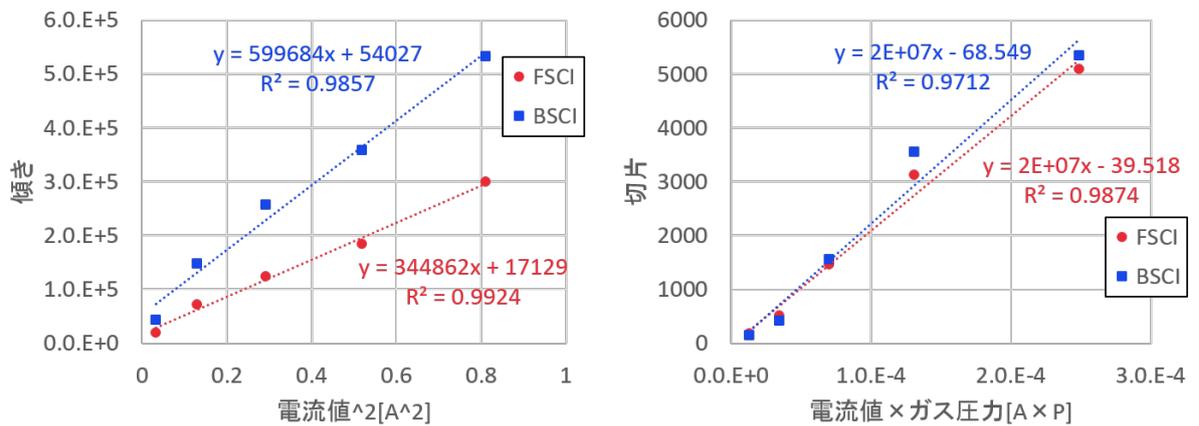


図 6.13: 陽電子ビーム蓄積時に FSCI と BSCI で測定した計数率のビームサイズ逆数依存性を直線でフィットした場合の、傾きとビーム電流の二乗の関係（左）と切片とビーム電流・残留ガス圧力の積の関係（右）を示す。

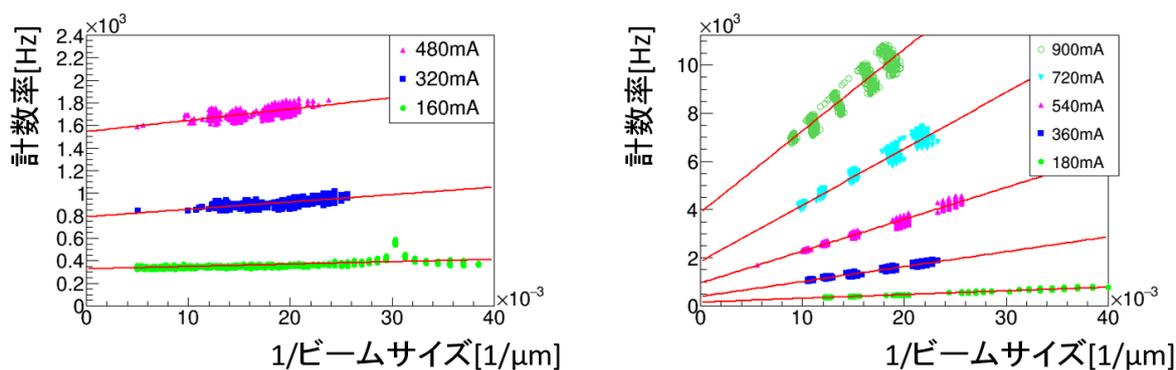


図 6.14: FSCI シミュレーションの計数率の期待値。左が電子ビームのみ蓄積した時の結果。右が陽電子ビームのみ蓄積した時の結果。

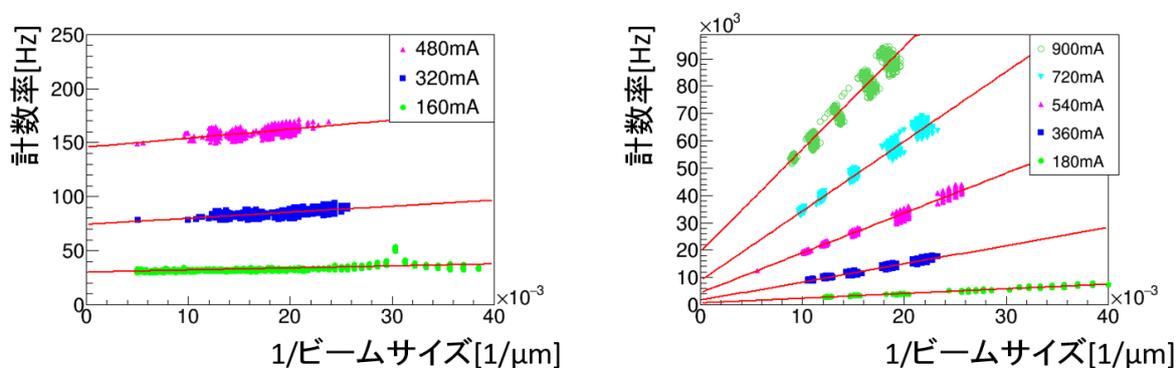


図 6.15: BSCI シミュレーションの計数率の期待値。左が電子ビームのみ蓄積した時の結果。右が陽電子ビームのみ蓄積した時の結果。

6.4.3 シミュレーションとの比較

6.3 節で説明した手法を使ったシミュレーションによる FSCI での計数率の期待値を図 6.14、BSCI を図 6.15 に示す。図 6.10 と図 6.11 で示した測定値と比較すると、バックグラウンド計数率のオーダーはおおよそ再現できていることがわかる。

また、これらのプロットを直線フィットして得られた傾き (タウチェック成分) と y 切片 (ビームガス成分) について、測定値をシミュレーションの値で割った比をスタディごとにプロットしたものを図 6.16 と図 6.17 に示す。シミュレーションが完全に現実を再現していればこの比は 1 になるはずだが、実際には数倍オーダーのずれが見られた。このずれについて、以下で考察する。

タウチェック成分に関するずれの要因としては、X 線ビームサイズモニタの測定値の誤差が挙げられる。Phase1 の運転において、光学系の誤差測定などの他の手法で得られたデータから予想されるビームサイズより、X 線ビームサイズモニタが示す測定値が数倍程度大きすぎる可能性が指摘されていた。詳細はビームサイズモニタの担当者が調査中であるが、仮にこの指摘が正しいとすると、本研究でシミュレーションをスケールする際に用いたビームサイズが大きすぎることになり、シミュレーションのタウチェック成分は本来

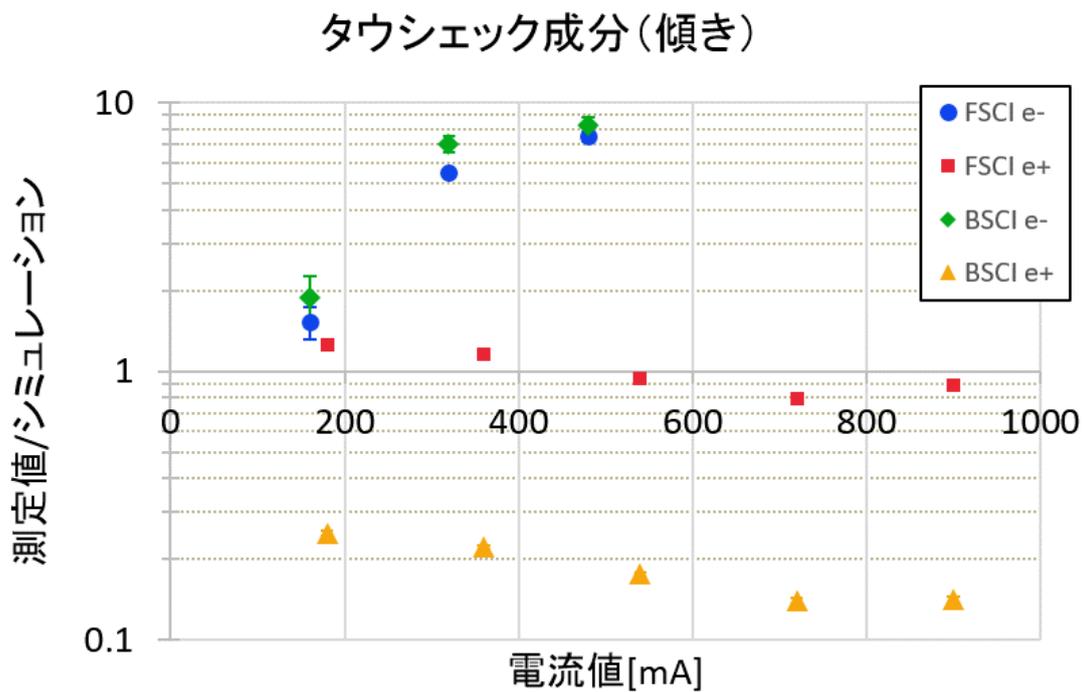


図 6.16: フィットで得られた傾きについて、測定値をシミュレーション値で割った比

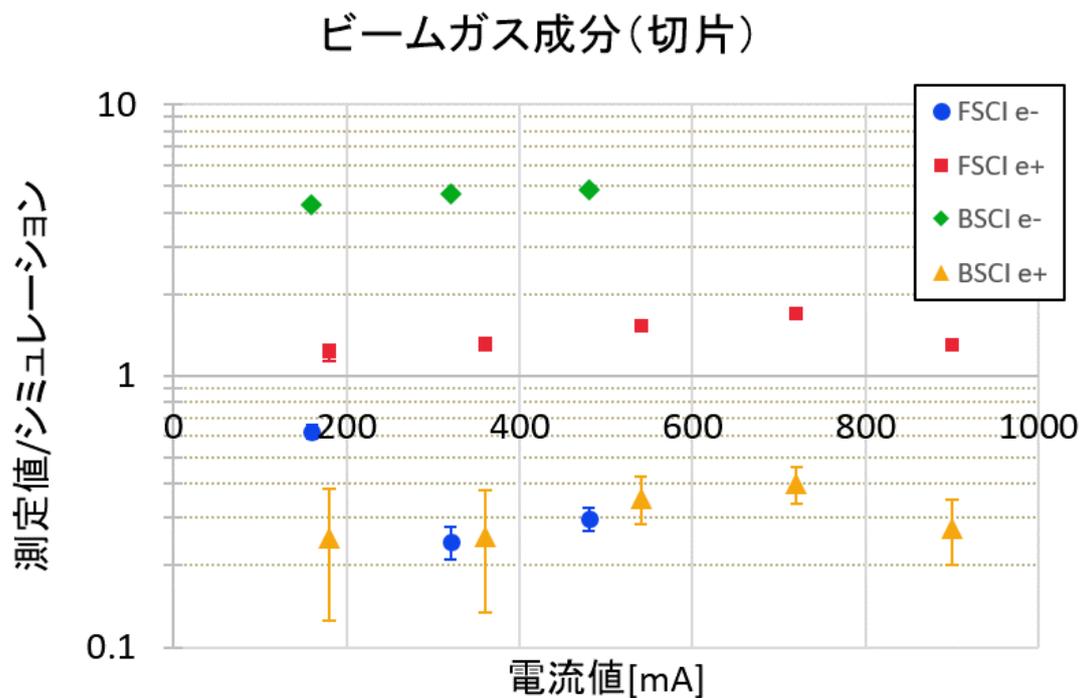


図 6.17: フィットで得られた切片について、測定値をシミュレーション値で割った比

より小さく見積もられている。したがって、タウチェック成分の測定値/シミュレーション比は1よりも大きくなる方向に数倍程度ずれている可能性がある。

ビームガス成分に関するずれの要因としては、残留ガス圧力の測定値の誤差が考えられる。SuperKEKBの真空グループ担当者によると、真空度の測定値には常にファクター2倍程度の不定性を見積もる必要があるという。これは、真空計がメインのビームパイプとは接続パイプを介してつながっており、ビームが通るパイプ中心での真空度と真空計の位置の真空度には数倍の差があること、この差を補正する際にコンダクタンス計算による一律の補正計数を用いるが、途中の接続パイプ形状や真空ポンプの設置場所による真空計ごとの違いが考慮されていないこと、残留ガスのガス種によってコンダクタンスが変わること、真空計の感度がガス種に依存すること、そもそも真空計が精密に較正されていないこと等によるものである。したがって、ビームガス成分の測定値/シミュレーション比は1よりも大きくなる方向、小さくなる方向のどちら側に2倍程度のずれがあってもおかしくない。

また、シミュレーションでは、残留ガスが全てCOであると仮定しており、平均の原子番号 $Z=7$ を用いて Z^2 に比例する散乱確率を計算している。実際にはCO以外のガスの成分も存在するので、LERではリング2箇所に設置されたガス分圧計で測定したガス種ごとの分圧比で平均した実効的な原子番号 Z_{eff} を用いてシミュレーションをスケールしている。HERでは分圧計が設置されていないのでこのようなスケーリングが行えず、 $Z=7$ のままの値を用いているが、実際には軽いガス種の存在により、 Z はおよそ5程度に小さくなると予想されている。したがって、HERのビームガス成分の測定値/シミュレーション比は1よりも小さくなる方向に2倍程度ずれている可能性がある。

その他にも、タウチェック・ビームガス共通の要因としては、SCIの設置誤差、ビームパイプの設置誤差によるビームロス位置のずれなどが原因で、SCIに到達するバックグラウンド粒子の数が測定とシミュレーションで異なる可能性、SCIのゲインやしきい値などの検出器応答がシミュレーションで正確に実装されていない可能性などが考えられる。

これらの要因から総合的に判断して、本研究による測定結果から、現在のシミュレーションは約5倍の範囲内で実際のバックグラウンドを理解できていると考えられる。

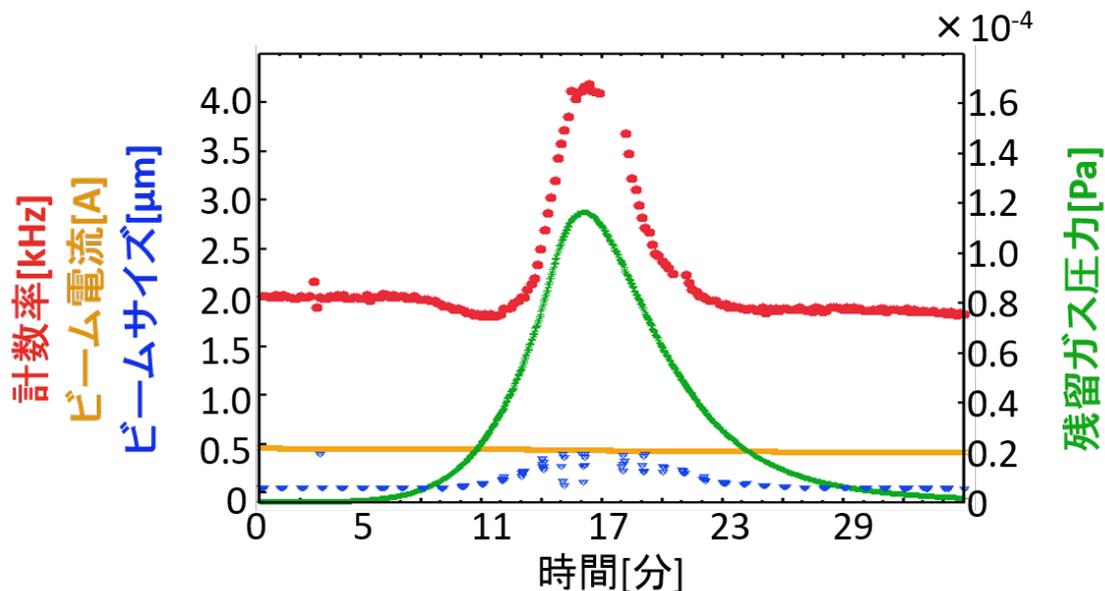


図 6.18: 残留ガスの圧力を変化させた際の FSCI 計数率の時間変化

6.5 ビームガス散乱の測定

ビームガス散乱によるバックグラウンド成分を調べるために、HER および LER のいくつかの点で真空を意図的に悪くし、FSCI の計数率を見た³⁴。EASIROC の時定数は 50 nsec、増倍率 18.8 倍、ディスクリミネータのしきい値は 160 mA に設定した。図 6.18 に電子ビームを約 500 mA 蓄積し、真空を悪化させた際の FSCI の計数率、残留ガス圧力、ビームサイズの時間変化を示す。真空度すなわち残留ガス圧力は定常的には 10^{-8} Pa 程度であったものを図示したように 10^{-3} Pa 程度まで上昇させた。真空の悪化とともに FSCI の計数率が上昇すること、またビームガス散乱の増加がエミッタンスの増加を引き起こし、結果としてビームサイズが数倍になったことがわかった。

図 6.19 に、SuperKEKB のコリメータの設置箇所を示す。この図中の D01、D02 などでリング中の場所を示す。図 6.20 に四カ所で真空を悪くしたときの、電流値 × 残留ガスの圧力と FSCI 計数率の関連の実験結果とシミュレーション結果を示す。

実験結果では、どの部分の真空を悪くしても、衝突点付近に設置した FSCI の計数率の増加と電流値 × 真空度の増加の関係はほぼ同じであった。また、シミュレーション結果のように、線形に FSCI 計数率も増加すると考えられていたが、 $I \times P$ (ビーム電流と残留ガス圧力の積) が 0.02 以下の範囲では FSCI の係数率が $I \times P$ に比例せずほぼ一定の値になることが観測された。このような挙動になる原因は今のところ不明である。

同様に陽電子ビームのみ蓄積した時の結果について、図 6.21 に FSCI 計数率と $I \times P$ の関連の実験結果とシミュレーション結果を示す。実験結果では、衝突点に至る直前の直線部では、計数率の増加が真空が悪化した場所に強く依存しているが、シミュレーションで

³このとき BSCI はまだ設置されていなかった。

⁴HER での測定は 2016 年 5 月 23 日に、LER での測定は 2016 年 5 月 24 日に行った。

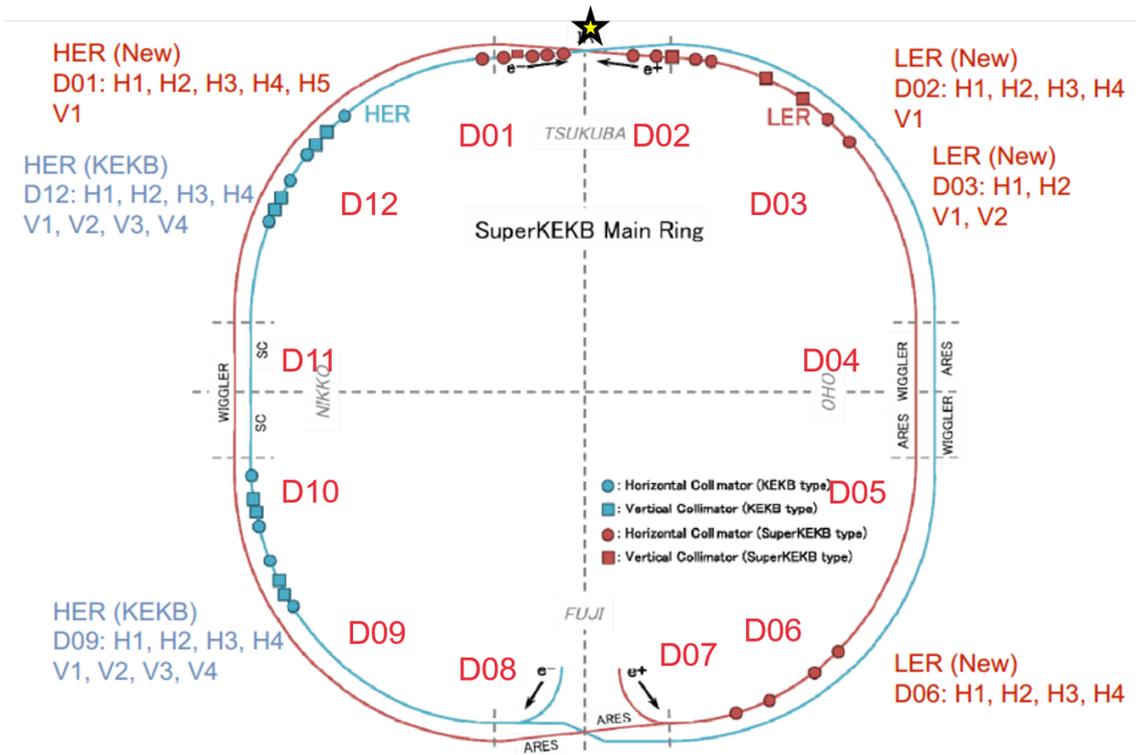


図 6.19: SuperKEKB 加速器のコリメータの設置箇所。この図中における D 領域で場所を説明する。

は、そのような依存性がみられていない。ただし、現在のシミュレーションでは、圧力を D02 領域全体の平均で計算しているため、圧力の場所依存をより細かく取り入れて、再度シミュレーションを行う予定である。

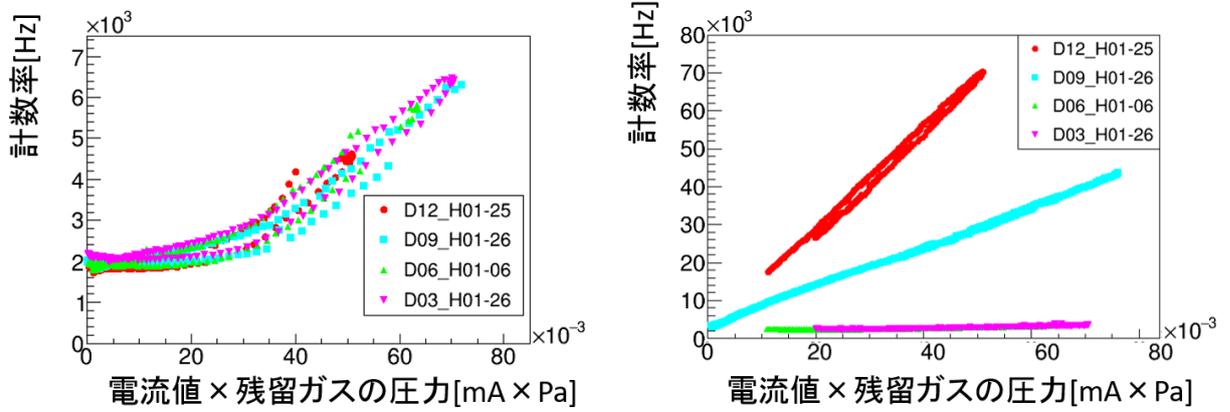


図 6.20: 電子ビーム蓄積時の FSCI 計数率とビームガス散乱の相関について、左に実験結果、右にシミュレーション結果を示す。

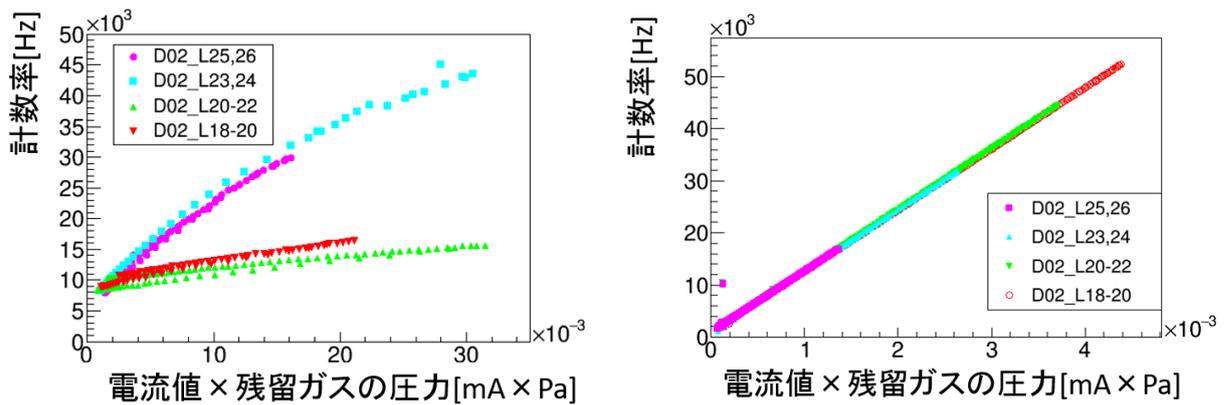


図 6.21: 陽電子ビーム蓄積時の FSCI 計数率とビームガス散乱の相関について、左に実験結果、右にシミュレーション結果を示す。

6.6 入射直後のビームロス測定

バンチ入射直後のビームバックグラウンドが時間とともにどのように増減するかを調べるため、以下のような測定を行った。メインリングに入射器からバンチを入射する場合、そのタイミング情報は実際のバンチ入射が行われる約 $106 \mu\text{s}$ 前に加速器リング全体に配られる。これを入射タイミング信号と呼ぶ。FSCI からの信号を EASIROC で増幅・波形整形したアナログ信号をデジタルオシロスコープで観測し、上述の入射タイミング信号をトリガーに用いて、長さ 5 ms 分の波形を約 50 ns の時間分解能で記録した。このとき、EASIROC の時定数は 50 nsec 、増倍率は 18.8 倍に設定した。得られた波形は図 6.22 のようになった。

得た波形データを $10 \mu\text{s}$ の時間幅で分割し、各々の時間ビン中で 0.5 MIP を上回る波高のパルス数を数える。こうして、 $10 \mu\text{s}$ 幅のビンごとに、数えたパルスの数を波形データ 50 事象分について平均をとる。結果として得たものを図 6.23 に示す。 0.1 ms のところに立っているピークは、入射されたバンチが最初にビーム交差点付近を通過した際のものである。 0.65 ms 付近のピークは、LER の RF 電圧 7.6 MV から計算されるシンクロトロン振動の周期 $505 \mu\text{s}$ とよく合致しているため、シンクロトロン振動によって再び入射バンチの振動が大きくなったことによるピークと考えられる。 0.5 ms までに見られる複数のピークは、シンクロトロン振動より早い周期をもつベータトロン振動によるもの可能性がある。LER の 1turn 当たりのベータトロンチューンは水平方向 44.59 、垂直方向 44.63 で、 $8\sim 11\text{turn}$ 程度の周期をもつと考えられる。

こうして、デジタルオシロスコープで取得した波形データに適切な処理を施すことにより、ビームバックグラウンドの時間構造を見やすい形で可視化できることが分かった。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。たとえば、シンクロトロン振動によるピークが大きく見えているときは、入射位相を調整することで入射効率を改善させ、バックグラウンドを抑制することができる。ベータトロン振動によるピークが大きく見えているときは、セプタム磁石や垂直ステアリング磁石の蹴り角を調整することで同様の改善につながる可能性がある。図 6.23 では、50 波形分の平均をとることで十分になめらかな分布が得られている。 25 Hz でバンチ入射を行う場合には、2 秒間隔で更新されるリアルタイムモニタとして使用でき、これは実用上十分な更新頻度である。

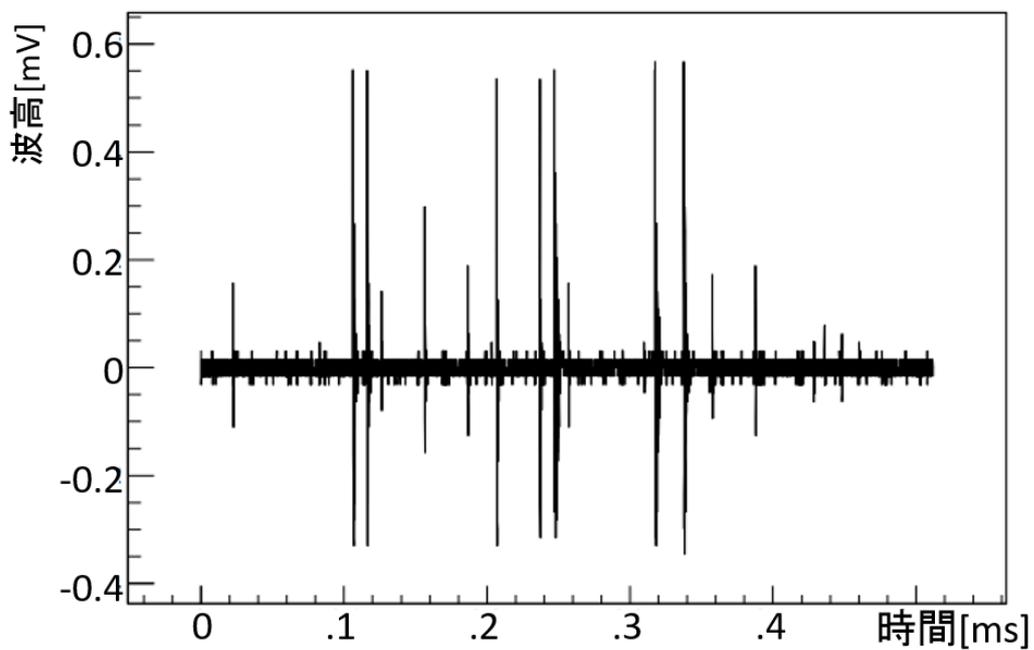


図 6.22: オシロスコープから記録した生波形

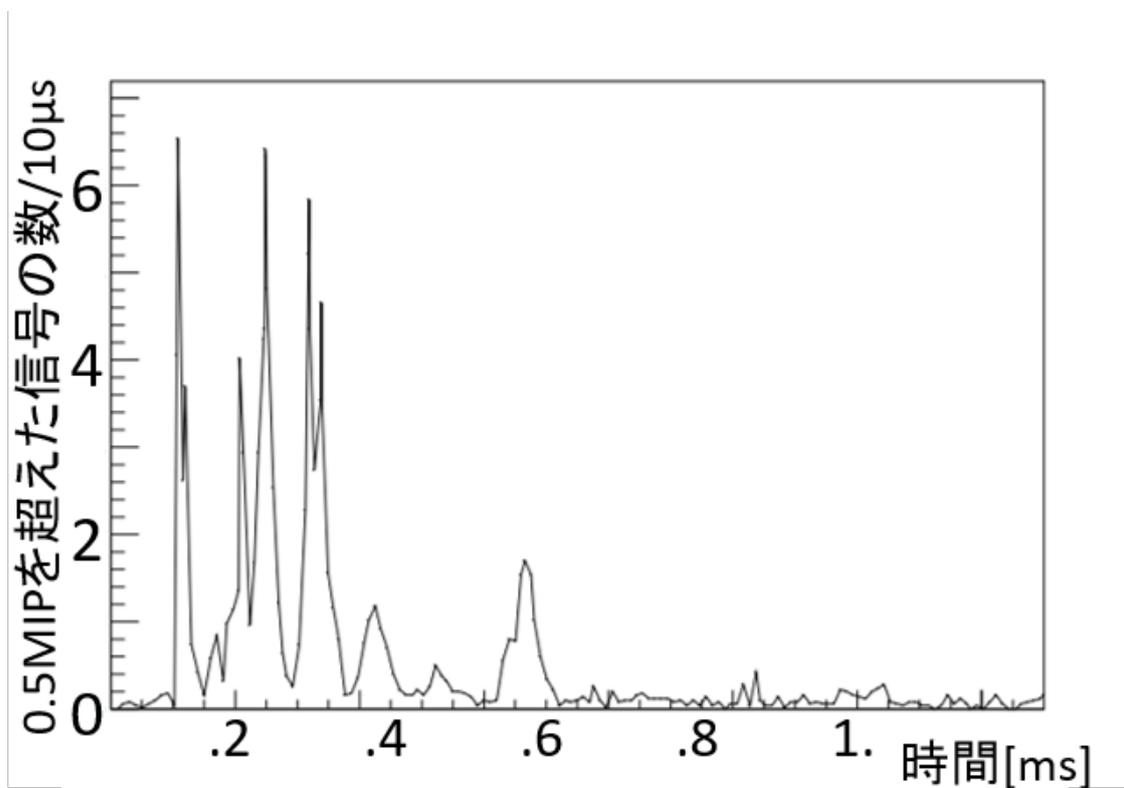


図 6.23: 10 μ s 幅のビンごとに 0.5MIP を超えたパルス信号の数をカウントし、それを 50 波形分平均したものの。

第7章 まとめ

KEKB 加速器の 40 倍のルミノシティを狙う SuperKEKB 加速器では、ルミノシティの上昇に伴い、ビームバックグラウンドの増加が避けられないため、原因を理解し、抑制する取り組みが不可欠である。そのためには、詳細なシミュレーションによる見積もりを行うとともに、SuperKEKB 試験運転の各段階でバックグラウンドを実際に測定し、シミュレーションとの比較を行うことが重要である。そういった背景から、本研究では MPPC とプラスチックシンチレータを組み合わせたシンチレーションカウンタ (SCI) を製作し、SuperKEKB 加速器の第一期試験運転におけるビームバックグラウンド測定を行った。

最初に、宇宙線を用いて SCI の動作確認を行った。その際、20 m の長さのケーブルのうち、伝送中のノイズに強いケーブルの選定を行った。cat7 ケーブルが最も良い S/N を示したため、これを採用した。

2016 年 2 月から 6 月にかけて行われた SuperKEKB 加速器の Phase-1 試験運転では、ビーム衝突点付近に SCI を 2 個設置して、タウチェック散乱、ビームガス散乱、入射直後のビームロスの三つのビームバックグラウンドの測定を行った。タウチェック散乱の測定では、ビームサイズと電流値を変化させ、タウチェック散乱由来のビームバックグラウンドがビーム電流値の二乗とビームサイズの逆数に比例する振る舞いを示すことを確認した。また、バックグラウンド計数率全体に占めるタウチェック散乱由来の量の抽出を行い、電子ビームのみ蓄積時、電流値 480 mA、鉛直方向のビームサイズ $50 \mu\text{m}$ においてタウチェック散乱由来のバックグラウンドの量は $76.6 \pm 1.7 \%$ と測定された。ビームガス散乱の測定では、リング中の幾つかの点で意図的に真空度を悪化させ、それに応答するバックグラウンドの増加を SCI で測定できた。タウチェック散乱、ビームガス散乱の両方について、Phase-1 のジオメトリを実装したシミュレーションと比較し、バックグラウンド計数率のオーダーは再現されていることがわかった。また、入射直後のビームロスについてデジタルオシロスコープの波形データを収集して適切な処理を施すことにより、ビームの入射直後の時間構造を観測できた。これにより、ビーム入射調整のツールとして使用可能なことがわかった。

今後の Phase-2 以降では最終収束電磁石 (QCS) と Belle II 測定器が設置された状態での運転となる。その際にビームバックグラウンドの測定と表示をリアルタイムで行うセットアップを実現することが必要である。

謝辞

本研究では沢山の方々にお世話になりました。はじめに、高エネルギー物理学研究室の林井久樹教授、宮林謙吉教授、下村真弥助教、KEK の中山浩幸助教に大変感謝いたします。また、理化学研究所の蜂谷さん、KEK の坪山さん、原さん、克朗さん、佐藤さん、勇さん、森田さん、後田さん、堺井さん、宇野さん、田中秀治さんにも大変お世話になりました。研究室の新井先輩、長谷川先輩、武田さん、池田さん、伊藤さん、坂本さん、B4 のみなさん、B2JS のみなさんのおかげで毎日楽しく過ごせました。最後に、この研究を行う上でお世話になったすべての皆さま、そして家族に心より感謝申し上げます。

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 *et al.* [Belle-II Collaboration], “Belle II Technical Design Report,” arXiv:1011.0352 [physics.ins-det].
- [3] この図は KEKB プレスリリースより引用
「SuperKEKB 加速器のビーム周回・蓄積成功」
<https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160302163000/>
- [4] この図は Belle II 実権 HP より引用
<http://belle2pb.kek.jp/Detector/>
- [5] この図は Y. Onishi., “Start of SuperKEKB,” 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP 2016) : Chicago, IL, USA. の発表スライドより引用
<https://indico.cern.ch/event/432527/contributions/2255497/>
- [6] H. Nakayama *et. al.*, “SuperKEKB Background Simulations, Including Issues for Detector Shielding,” 110-113, Proceedings of HF2014, Beijing, China.
- [7] この図は [6] の発表スライドより引用
<http://indico.ihep.ac.cn/event/4221/other-view>
- [8] S. Callier, C. D. Taille, G. Martin-Chassard and L. Raux, “EASIROC, an Easy & Versatile ReadOut Device for SiPM,” Phys. Procedia **37**, 1569 (2012). doi:10.1016/j.phpro.2012.02.486
- [9] H. Nakayama *et. al.*, “Small-Beta Collimation at SuperKEKB to Stop Beam-Gas Scattered Particles and to Avoid Transverse Mode Coupling Instability,” Conf. Proc. C **1205201**, 1104 (2012).
- [10] 石島直樹、EASIROC MODULE User Guide (2014)
- [11] KEKB Operation Manual and Trouble Shooting
<http://www-acc.kek.jp/kekb/Support%20Group/support.group.html>
- [12] OKI、フラットシールド型オキフレックス
http://www.okidensen.co.jp/jp/prod/cable/flat/flat_okiflex.html

- [13] Hitachi Cable、フラットエース
<https://www.hitachi-metals.co.jp/>
- [14] オイヤデ電気、ツイストダレ フラットケーブル
<http://oyaide.com/catalog/products/p-686.html>
- [15] サンワサプライ、CAT7
https://www.sanwa.co.jp/seihin_joho/cat7/
- [16] BEAST run information
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1HvRu3DQxDIPI72nDBp_YY658nrSSToI7d4HQdIJgXrQ/edit#gid=0
- [17] CONTEC
<http://www.contec.co.jp/index.html>
- [18] Strategic accelerator design
<http://acc-physics.kek.jp/SAD>
- [19] S. Agostinelli *et al.* [GEANT4 Collaboration], “GEANT4: A Simulation toolkit,”
Nucl. Instrum. Meth. A **506**, 250 (2003). doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8