

2015 年度 修士学位論文

Belle II 実験電磁カロリメーター用
PIN-PD バイアス電源
モニターシステムの構築

奈良女子大学大学院人間文化研究科博士前期課程
物理学専攻 高エネルギー物理学研究室
学籍番号 14810014

新井智穂

2016 年 2 月 29 日

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	<i>B</i> ファクトリー実験とその高度化	3
2.1	<i>B</i> ファクトリー実験高度化の動機	3
2.2	加速器とビームバックグラウンド	4
2.3	Belle II 測定器	8
第 3 章	電磁カロリメーター	15
3.1	電磁カロリメーターの概要	15
3.2	Belle 実験のカロリメーターと Belle II 実験へのアップグレード	17
第 4 章	PIN-PD 電流モニターシステム	21
4.1	PIN-PD 電流モニターシステムの概要	21
4.2	電流モニターの原理	23
4.3	PIN-PD 電流モニターシステムの設計	23
4.4	計測アンプ動作試験	37
第 5 章	バイアス電源システム	45
5.1	PIN-PD バイアス電源システムの概要	45
5.2	ハードウェアの設計	46
5.3	電源コントロール試験	48
第 6 章	まとめ	53
付録 A	バイアス電源 ON/OFF コントロール用プログラム	55
付録 B	バイアス電源出力電圧・電流モニター用プログラム	63
参考文献		73

目次

2.1	SuperKEKB 加速器の全体図	6
2.2	ナノビーム方式の模式図。 d は衝突点における水平ビームサイズ σ_x^* と交差角 2ϕ で決まる。	6
2.3	Belle II 測定器	9
2.4	PXD と SVD の配置図。内側 2 層が PXD で、外側 4 層が SVD である。	11
2.5	PXD と SVD の配置図。 $x-y$ 平面 (上) と $r-z$ 平面 (下) で見たもの。	11
2.6	Belle 実験と Belle II 実験の CDC ワイヤ配置の比較	12
2.7	TOP カウンターの動作原理の概念図	13
2.8	A-RICH カウンターの動作原理の概念図	13
3.1	Belle の電磁カロリメーター。 Belle II でも初期段階は既存のものを使用するため、配置は変わらない。	19
3.2	カロリメーターの CsI(Tl) 結晶配置の立体図	20
4.1	Belle 実験における CsI(Tl) 結晶の吸収線量。約 10 年間分の積算を表す。	22
4.2	Belle 実験における CsI(Tl) 結晶の発光量の低下度合の θ 分布	22
4.3	CsI(Tl) 結晶の θ_{id} の振り方。前方エンドキャップ最内側から順番に 0~68 まで割り振る。	23
4.4	PIN-PD 電流モニターシステムのブロックダイアグラム	24
4.5	Belle II 実験における CsI(Tl) 結晶の吸収線量のシミュレーション予測 (ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の場合)[10]	25
4.6	Belle II 実験における PIN-PD の中性子被ばく量のシミュレーション予測 (ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の場合)[10]	26
4.7	Belle II 実験における結晶の吸収線量の θ 分布と ϕ 分布のシミュレーション予測。左が θ 分布で右が前方エンドキャップ内で $\theta_{id}=2$ の結晶における ϕ 分布。(フルルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の場合)[10]	28
4.8	前方エンドキャップの CsI(Tl) 結晶の ϕ_{id} の振り方。図中の 0 を始点に反時計回りに 1 周して番号が振られる。図 4.7 の ϕ 分布は図中の赤で示した列における分布である。	28
4.9	図中の赤の領域の吸収線量が多い。	29

4.10	PIN-PD 電流を測定する領域の分割。エンドキャップ (左) およびバレル (右)。	29
4.11	計測アンプ回路図	33
4.12	VME クレート配置図。星マークの部分にバイアス電源が設置される。B はバレル、FE は前方エンドキャップ、BE は後方エンドキャップの VME クレートを表す。	35
4.13	パッチパネル設計図	36
4.14	計測アンププロトタイプ回路図。PIN-PD の代わりに $10M\Omega$ 抵抗をつなぎ、PIN-PD 電流を模擬的に作る。	38
4.15	計測アンププロトタイプ実物	38
4.16	測定の様子	39
4.17	直流電源と抵抗を用いた予備実験の結果	39
4.18	実機 CsI(Tl) カウンターにつないだ測定のセットアップ図	40
4.19	実機 CsI(Tl) カウンターにつないだ測定の様子	41
4.20	計測アンプを接続した場合の Shaper DSP ボード 1ch のペDESTAL 分布	42
4.21	Shaper DSP ボード 1 枚ごとに算出したコヒーレントノイズ	43
5.1	PIN-PD バイアス電源システムのブロックダイアグラム	46
5.2	パッチパネルの実物	47
5.3	パッチパネルのブロックダイアグラム	47
5.4	電源コントロール試験の様子	49
5.5	入力コネクタ No.1 につないだ際の測定結果	50
5.6	入力コネクタ No.1~No.8 の傾きの測定結果	50
5.7	入力コネクタ No.1~No.8 の切片の測定結果	51
5.8	バイアス電源に抵抗をはさんだ様子	52
5.9	電流モニター出力の特性。赤線が公称値通りだったときの値で、青線が測定結果。	52

表目次

2.1	KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器のパラメーター	7
3.1	主な無機結晶シンチレーターの特性。f は fast component で s は slow component を表す。	16
4.1	結晶の吸収線量に対する PIN-PD 電流値を見積もる際に用いる値	25
4.2	PIN-PD の中性子被ばく量 (dose) に対する暗電流増加量 (ΔI)[13]	27
4.3	前方エンドキャップとバレルの結晶 1 本あたりのビームバックグラウンド起因の電流 (ビーム BG) と暗電流の値	31
4.4	前方エンドキャップとバレルの測定点 1 か所あたりのビームバックグラウンド起因の電流と暗電流の値	31
4.5	100k Ω の抵抗を用いた場合の前方エンドキャップとバレルの測定点 1 か所あたりの期待される電圧降下	32

第1章

はじめに

高エネルギー物理学とは、物質の基本的構成要素と、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。加速器を用いて高エネルギーの粒子を衝突させ、新たに散乱あるいは生成された粒子のエネルギーや運動量を測定すると共にその種類を識別し、得たデータを統計処理することにより、極微の世界での法則を定量的に明らかにする。

現在、世界をリードしている高エネルギー物理学実験の一つが、我が国の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において行われる B ファクトリー実験である。この B ファクトリー実験は B 中間子系の CP 非保存の測定を第一目的として、1999 年から 2010 年まで KEKB 加速器および Belle 測定器を運転して 1ab^{-1} に達する高統計データの収集を行った。そして、 B^0 と \bar{B}^0 の $J/\psi K^0$ に代表される CP 固有状態へ崩壊した事象における時間発展の差から CP 対称性の破れを観測するとともに $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 、 $B \rightarrow DK$ における直接的 CP 非保存も観測した。これらの成果は、小林誠・益川敏英両博士が 2008 年ノーベル物理学賞を与えられる上で決定的な貢献であった。KEKB 加速器は ARES 加速空洞やクラブ衝突の導入など新しい技術開発やベータトロンチューンを半整数の直上とするなどの運転パラメーターを最適化する努力の結果、2009 年には $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ におよぶ世界最高のルミノシティを達成した。しかし、小林・益川理論を超えた物理を探索するための B 中間子の稀崩壊過程における CP 非保存現象の精密測定や、 $B^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 崩壊を用いた荷電ヒッグス粒子の間接探索、 τ 粒子の LFV (Lepton Flavor Violation) 事象の探索といった研究テーマの推進には更に高統計データが必要である。そこで、現在 Belle 実験の約 40 倍のルミノシティを目標とした Belle II 実験の計画が進行しており、加速器、測定器ともに性能改良工事の最終段階を迎えている。

ルミノシティの増加に伴いビームバックグラウンドも増加することが予想され、加速器はこれまで以上に運転パラメーターを最適化する努力が必要である。この加速器の運転調整を行う上で、電磁カロリメーターが吸収するビームバックグラウンドの情報を常時フィードバックすることは非常に重要なことである。また、電磁カロリメーター自体の実験期間中の被ばく量をモニターし、これに伴う実験終了時までの放射線損傷の影響を見積もる必要がある。こうした目的でカロリメーターの吸収線量の測定が必要となり、それは光検出器として用いられている PIN フォトダイオード (PIN-PD) の電流値を常時モニ

ターすることで実現できる。Belle 実験期間中も同様のモニターは行われたが、合計 8736 本ある CsI カウンターの PIN-PD の電流測定点の数や配置、電流値を電圧降下として読み出すための抵抗値といった項目を Belle II 実験の環境に適したものに改変する必要がある。また、これと関連して PIN-PD に電圧を供給するためのバイアス電源システムにも必要な変更を行う。

本研究では、この PIN-PD に流れる電流値のモニターシステムとバイアス電源システムの構築を行った結果について報告する。

第 2 章

B ファクトリー実験とその高度化

2.1 B ファクトリー実験高度化の動機

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で行われた B ファクトリー実験は、 $b\bar{b}$ メソンの一種である $\Upsilon(4s)$ の質量 ($10.58\text{GeV}/c^2$) に重心系エネルギーを合わせ、高輝度の電子・陽電子衝突により B 中間子と反 B 中間子の対を大量に生成し、その崩壊過程の詳細な研究を行う実験である。KEK において 1999 年から 2010 年までの約 10 年間にわたり行われた実験は Belle 実験と呼ばれ、 8GeV の電子と 3.5GeV の陽電子を衝突させる KEKB 加速器は、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 日の運転終了までの最終的な積分ルミノシティは 1014fb^{-1} に達した。この良質の高統計データより、Belle 実験は多くの成果を上げた。

その最大の成果は、 B 中間子における CP 対称性の破れを発見し小林・益川理論を多面的に検証して、これをクォークセクターの弱い相互作用の記述として確立したことである。この CP 対称性の破れに関して最も重要な B 中間子の崩壊モードは $b \rightarrow c\bar{c}s$ 型の遷移で生じる $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ である。ツリーダイアグラムと呼ばれる弱い相互作用の最低次の項が支配的に寄与する崩壊モードで、 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合に含まれる複素位相のため、 CP 対称性が破れるものである。この崩壊モードにおける B^0 中間子と反 B^0 中間子の崩壊までの時間分布には明らかな違いがあることが確認され、 B 中間子系における CP 非保存の最初の証拠となった。これを皮切りに互いに相補的な種々の CP 非保存測定が実行された。また、Belle 実験ではこれに加えて、 $D^0 - \bar{D}^0$ 振動や $D\bar{D}^*$ の質量領域に $X(3872)$ 、 $Y(4260)$ 、 $Z(4430^+)$ などの新種のハドロン共鳴 (エキゾチック・ハドロン) を相次いで発見するなど、非常に多くの成果を上げた。そして 2010 年 6 月に、SuperKEKB にむけた加速器と Belle II 実験へのアップグレード工事を開始するため、Belle 実験でのデータの収集を終了した。

Belle 実験が得た測定結果の中には標準理論を超える新物理の探索に有利なものがあり、その中で代表的なものは「ペンギン崩壊」における CP 対称性の破れの測定である。ツリーダイアグラムの $b \rightarrow c\bar{c}s$ 遷移で生じる $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$ における CP 対称性の破れを基準として、ペンギンダイアグラムは $b \rightarrow s\bar{s}s$ 型の遷移で起こる弱い相互作用の 1 ルー

プの振幅で、標準模型だけが関与しているのであれば該当する CP 非対称性度はツリーダイアグラムで起こるそれとほぼ等しくなるが、新粒子があり、かつ小林・益川理論と異なる複素位相を含めば、それがペンギンループにのみ寄与し CP 非対称度が変化する。この研究に適したペンギンダイアグラムの崩壊モードとして $B^0 \rightarrow \phi K^0$ 、 $B^0 \rightarrow \eta' K^0$ 、 $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0 K_S^0$ などがあげられ、これらは稀崩壊過程であり統計量の制限から CP 非保存の測定精度はいまだ $O(0.1)$ にとどまっている。新しい物理の効果を探るためには $O(0.01)$ の感度を得る必要があり、そのためには数十 ab^{-1} のデータの蓄積が必要である。また、荷電ヒッグスの間接探索を可能とする $B^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ と $B \rightarrow D^{(*)} \tau^+ \nu_\tau$ の高精度測定や τ 粒子のレプトン数保存を破る崩壊の探索など、大量データの蓄積を必要とする重要な物理過程がいくつもある。この大量データ蓄積を目的としたアップグレード工事は 2010 年から開始されており、2016 年はその最終段階を迎えている。本章では $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を目標とする高度化後の SuperKEKB 加速器とそれに対応する Belle II 測定器について概観し、ルミノシティ向上に伴うビームバックグラウンドの増加についても述べる。

2.2 加速器とビームバックグラウンド

2.2.1 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加速器であり、8GeV の電子と 3.5GeV の陽電子を衝突させていた KEKB 加速器をアップグレードしたものである。SuperKEKB は、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、陽電子を供給する直線型加速器(入射器)から成り立っており、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、電子用のリングである HER(High Energy Ring)に入射される。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広がりを小さくした後、陽電子用のリングである LER(Low Energy Ring)に電子とは逆向きに入射される。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、光速に近いスピードで逆方向に走る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し、衝突点に設置された Belle II 測定器がこの衝突によって起こる素粒子反応を検出、記録する。

SuperKEKB 加速器では KEKB 加速器でのルミノシティ $2.11 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の約 40 倍である $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を目指す。ここで、ルミノシティとは衝突型加速器の衝突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 をもつ過程の場合、その反応の発生頻度を R で表すと、 $R = L\sigma$ となる。また、このルミノシティの大きさはビームの

電流値やサイズで決まり、以下の式が成り立つ。

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

γ_{\pm} は加速器のビームエネルギーで決まる Lorentz factor、 e は電子の電荷量、 r_e は古典電子半径、 σ_y^*/σ_x^* は衝突点での x 方向と y 方向のビームサイズ比、 I_{\pm} はビーム蓄積電流値、 $\xi_{y\pm}$ は垂直方向のビーム・ビーム・パラメータ、 β_y^* は衝突点での垂直ベータ関数、 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係数である。*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。これより、ルミノシティを上げるにはビーム蓄積電流値 I とビーム・ビーム・パラメータ ξ_y を上げ、衝突点での垂直ベータ関数 β_y^* を小さくすれば良いことがわかる。SuperKEKB では β_y^* を絞ることで 20 倍に、ビーム電流増加によって 2 倍に、合わせて KEKB の 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。ここで、 ξ_y については KEKB で既に達成されている 0.09 を想定している。

SuperKEKB 加速器の設計は、2009 年 2 月の KEKB 加速器レビュー委員会の勧告以降、ナノビーム方式と呼ばれる技術に基づいて進められた。ナノビーム方式は P. Raimondi と SuperB グループによって提案された方式であり、衝突点における垂直方向ベータ関数 β_y^* をバンチ長よりはるかに小さい値まで絞り込むことを可能にする。図 2.2 に示すように、水平ビームサイズが十分に小さいバンチ同士を水平面内で大きな交差角をもって衝突させるので、バンチが重なり合う領域の進行方向の長さ d はバンチ長自身より圧倒的に短くなる。したがって、砂時計効果に妨げられずに $\beta_y^* \sim d$ まで垂直方向ベータ関数を絞ることができる。 d は衝突点における水平ビームサイズ σ_x^* と交差角 2ϕ で決まり、 $d = \sigma_x^*/\phi$ である。 d を小さくするには、 σ_x^* を小さく、すなわち、水平エミッタンス ϵ_x と衝突点水平方向ベータ関数 β_x^* の両方を小さくする必要がある。SuperKEKB では $\sigma_x^* = 10 \sim 12 \mu\text{m}$ 、 $\phi = 41.5 \text{ mrad}$ 、よって、 $\beta_y^* \geq d = 300 \mu\text{m}$ となる。また、ビーム電流値は運転に用いる電力量の制限から現状の約 2 倍の LER=3.6A、HER=2.6A とする。ビームエネルギーはこれまでの電子 8GeV、陽電子 3.5GeV の衝突ではビーム光学設計の力学口径が確保できないので、電子 7GeV、陽電子 4GeV に変更する。ここで、SuperKEKB 加速器の設計における主要なパラメータを表 2.1 に示す。

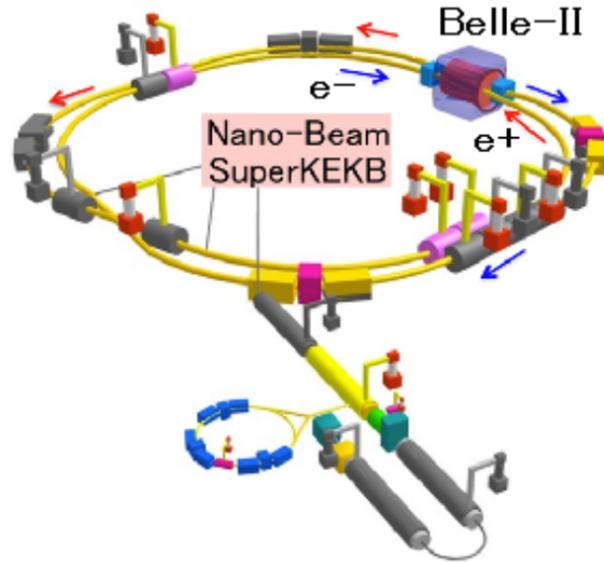
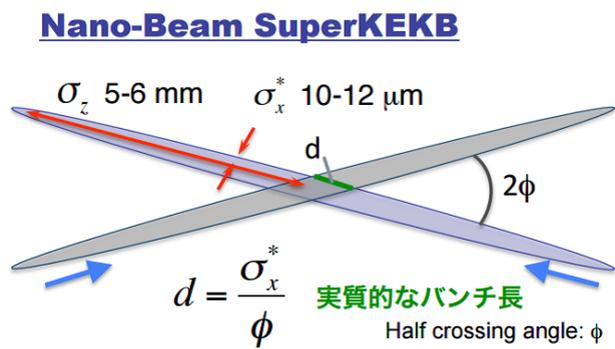


図 2.1 SuperKEKB 加速器の全体図



overlap region \ll bunch length

図 2.2 ナノビーム方式の模式図。 d は衝突点における水平ビームサイズ σ_x^* と交差角 2ϕ で決まる。

表 2.1 KEKB 加速器と SuperKEKB 加速器のパラメーター

	KEKB		SuperKEKB		単位
	LER	HER	LER	HER	
Energy	3.5	8.0	4.0	7.0	GeV
ϕ	11		41.5		mrاد
Current	1.64	1.19	3.7	2.6	A
Bunches	1584		2500		
ε_x	18	24	3.2	5.2	nm
β_x^*	1200	1200	32	25	mm
β_y^*	5.9	5.9	0.27	0.30	mm
σ_x^*	147	170	10.1	11.4	μm
σ_y^*	940	940	48	62	nm
σ_z^*	~7		6	5	mm
ξ_x	.127	.102	.0028	.0012	
ξ_y	.129	.090	.0889	.0807	
Luminosity	2.1×10^{34}		8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

2.2.2 検出器に入射するビームバックグラウンド

SuperKEKB では、検出器に入射するビームバックグラウンドも増加すると予想される。特にルミノシティに比例して増える成分の増加は原理的に避けられないので、可能な遮蔽とデータの質への影響を最小化する各種の工夫が必要である。想定される主なバックグラウンド源には以下のようなものがある。これらが本研究で対象にする電磁カロリメーターに対して与える影響については第 4 章で詳しく議論する。

1. タウチェック散乱

同一バンチ内でビーム粒子どうしが衝突して運動量が増加または減少すると、力学口径の範囲から外れるものが出てくる。外れたものはビームの中心軌道からそれて、これが衝突点付近でビームパイプ壁にあたってシャワーを生成し、検出器へ届くとバックグラウンドとなる。バンチ内でビーム粒子どうしが散乱する確率はビームサイズに反比例するため、KEKB に比べてタウチェック散乱によるバックグラウンドは激増する。対策としては、軌道を外れた粒子をアーク部の可動マスクで可能な限り停止させ、衝突点付近まで到達させないことが鍵になる。

2. ビームガス散乱

ビーム粒子がビームパイプ中の残留ガスに衝突し、クーロン散乱により角度が変わ

るか、または制動放射によってエネルギーが減少することにより、力学口径を外れてバックグラウンドになるものである。ビーム電流と真空度に比例するので、最寄りの真空ポンプまでの距離がリングの他の箇所より長く、かつビームパイプの径が細くなる衝突点付近では、真空度が KEKB に比べて 1000 倍程度低くなる可能性が指摘されたが、衝突点付近でビームガス散乱した粒子は測定器を通過後のさらに下流でビームパイプにあたるものがほとんどで、比較的寄与は少ないと見積もられている。

3. シンクロトロン放射

ビームが磁場によって曲げられる際に放射光を出す。衝突点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の部分を照らすと、そのすぐ背後に置く内層の検出器 (PXD/SVD) に対して深刻なバックグラウンドとなる。放射光はビーム軌道の接線方向に出るので、衝突点付近のマスク (コリメーター) 配置を適切にして防止する。

4. Radiative Bhabha 散乱

Radiative Bhabha 散乱とは、 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ のように γ 線の放出を伴った電子と陽電子の弾性散乱のことであり、これに起因するバックグラウンドはルミノシティに比例して増加する。小散乱角、すなわち前方に大きな断面積を持ち、衝突点で電子と陽電子が Radiative Bhabha 散乱するとビーム軸方向に光子が出る。光子を放った電子または陽電子はエネルギーが落ちているので、衝突点通過直後の収束系電磁石が作っている磁場によりきつく曲がって中心軌道からそれ、衝突点から数 m 以内のビームパイプ内壁に当たって電磁シャワーを作りバックグラウンドとなる。光子は直進して下流の加速器構造物に当たってシャワーを形成する際に巨大双極子共鳴反応によって中性子が発生する。これが検出器付近まで戻ってきたものが KLM のバックグラウンドとなる。また、電磁カロリメーターの PIN-PD もこの中性子を浴びることにより格子欠陥ができ、漏れ電流が増加する。

2.3 Belle II 測定器

Belle II 測定器とは、SuperKEKB 加速器の衝突点に設置する、高さ、幅、奥行きそれぞれ約 8m 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% を覆う。Belle II 測定器で捉えたデータを処理することで、 B 中間子の崩壊を再構成する。加速器の性能向上に伴い、ビームバックグラウンドも Belle 実験時に比べ約 20 倍まで増加することが予想されるため、Belle II 測定器ではこの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する必要がある。そのための性能改良工事が現在最終段階を迎えている。

Belle II 測定器は、生成した粒子を荷電粒子と中性粒子のいずれも可能な限り検出、識別するため、それぞれの役割を持った7つの検出器サブシステムから成る複合型測定器である。これら7つの検出器の形状と配置を図 2.3 に示す。

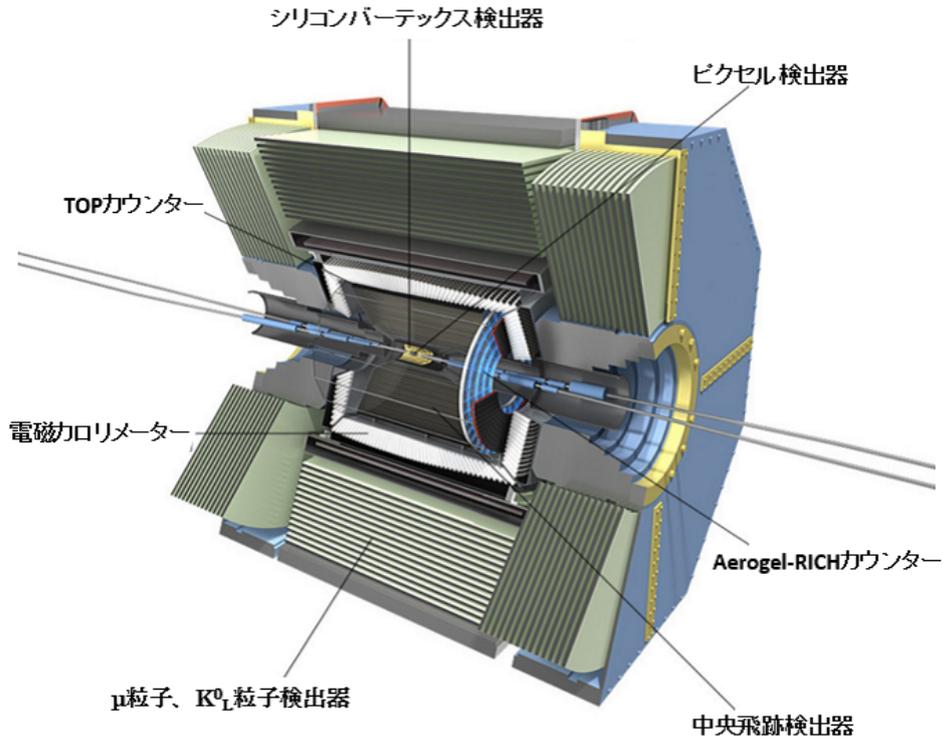


図 2.3 Belle II 測定器

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。

- 崩壊点検出器 (VXD: Vertex Detector)

VXD は B 中間子の崩壊点を測定するための 2 種類の半導体センサー (PXD:ピクセル検出器、SVD:シリコンバーテックス検出器) によって構成され、2 層構造の PXD と 4 層構造の SVD を図 2.4 のように配置する。これらは荷電粒子がシリコン板を通過すると作られる電子・正孔対の塊を電気信号として取り出し、荷電粒子の通過位置を測定できる。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 自身が検出した荷電粒子の通過位置の測定点から B 中間子の崩壊点を再構成し、2 対でできる二つの B 中間子の崩壊点についてビーム軸に沿った 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) を算出して時間依存 CP 対称性の破れを測定することを可能とする。Belle から Belle II への改造では、電子・陽電子のビームエネルギーが $8\text{GeV} \cdot 3.5\text{GeV}$ から $7\text{GeV} \cdot 4\text{GeV}$ になりブーストファクターが小さくなるが、衝突点でのビームパイプの内径を 30mm から 20mm へと細くして、そのすぐ外に各ピクセル $50\mu\text{m}$ 角でセンサー厚み $80\mu\text{m}$ と低物質量の PXD を搭載することで崩壊点測定精度を約 2 倍程度向上させ、Belle 実験と同等以上の Δt 分解能を得る。この PXD は DEPFET (DEPLETED Field Effect Transistor) 素子を用いたピクセル検出器であり、大きな空乏領域を持つので大きな信号パルスが得られる。一方、SVD は n 型半導体を用いた DSSD (両面シリコンストリップ) 検出器であり、前方領域では角度を持たせて配置 (slant) する。これは荷電粒子の 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。この SVD は Belle の半径 88mm から 135mm へと大型化し、 K_S^0 中間子が荷電 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。

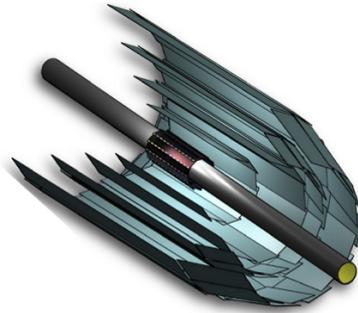


図 2.4 PXD と SVD の配置図。内側 2 層が PXD で、外側 4 層が SVD である。

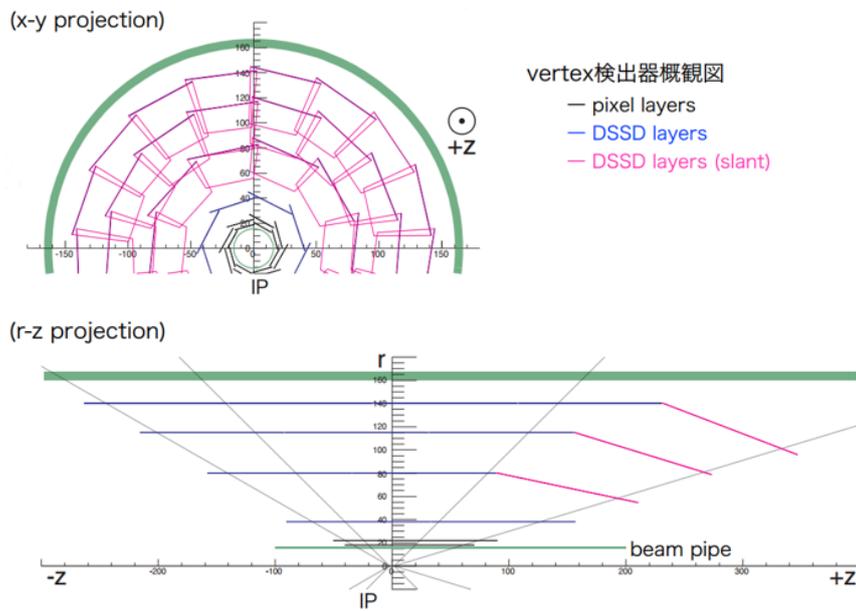


図 2.5 PXD と SVD の配置図。 $x-y$ 平面 (上) と $r-z$ 平面 (下) で見たもの。

- 中央飛跡検出器 (CDC:Central Drift Chamber)

Belle II の中央飛跡検出器は、半径約 1.1m の円筒形状内に多数の細い金属ワイヤーを張り巡らせたガス放射線検出器である。1.5Tesla の磁場中で荷電粒子は螺旋を描くように通過する。その際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てからワイヤーのごく近傍で電子なだれを形成し、その結果この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を測定することにより、荷電粒子の通過点とワイヤーの間の距離がわかるので、その情報から飛跡を再構成する。飛跡の曲率から精密に運動量を求めるため、陽極ワイヤーは一般的な金メッキありの直径 $30\mu\text{m}$ タングステンワイヤーだが、金メッキ無しのアルミニウム合金を陰極ワイヤーの素材として選択し、ヘリウムとエタンを 50% ずつ混合したガスを常圧で満たす等、物質量を極限まで抑え、粒子の軌道に対する多重散乱の影響を可能な限り小さくするように設計されている。さらにガス中の電離量 (dE/dx) を測定して粒子識別の情報を与える。ワイヤーにはビーム進行方向に対して平行な Axial Wire と角度 $\pm 70\text{mrad}$ の Stereo Wire とを使用することで、荷電粒子の飛跡を 3 次元で再構成することができる。また、内層は高い密度で読み出しワイヤーを配置する。これは高電圧をかけた陽極ワイヤーの周りを陰極ワイヤーで囲った単位をセルと呼び、バックグラウンドレイト増大に備えるため、セルをなるべく小さくすることでセルあたりのヒットレイトを抑え、同時に電子のドリフト時間を短く抑えるためである。さらに、ルミノシティ増大に対応するために Belle の 60 倍に達するデータ収集レイトに耐える高速で耐放射線度の高い電子回路を使用する。

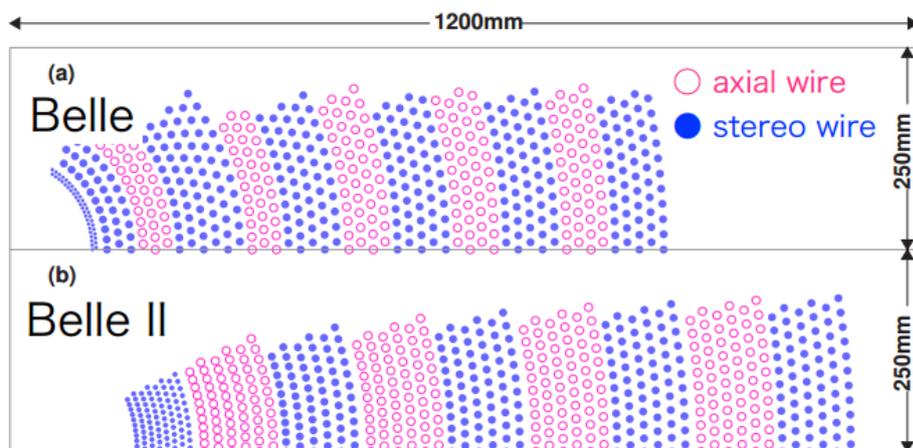


図 2.6 Belle 実験と Belle II 実験の CDC ワイヤー配置の比較

- 粒子識別検出器

(TOP:Time of Propagation counter, ARICH:Aerogel RICH counter)

高速の π 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起因して速さが異なり、その結果チェレンコフ光の放射角に差が出ることを用いて荷電粒子の識別を行う。バレル部には石英輻射体からのチェレンコフ光を内部で全反射させ、端部においた MCP-PMT(Micro-Channel-Plate Photo-Multiplier Tube) により放射角の違いを全反射を繰り返して MCP-PMT まで到達する時間の違いとして検出して粒子識別を行う TOP を導入し、エンドキャップ部には aerogel 放射体からのリングイメージを 20cm 程離れた場所に置かれた HAPD(Hybrid Avalanche Photo Detector) により再構成する A-RICH を導入する。いずれも π 中間子の検出効率を 97%、4GeV の K/π を 4σ で分離する性能を出す設計となっている。TOP、ARICH 各々の動作原理の概念図を以下に示す。

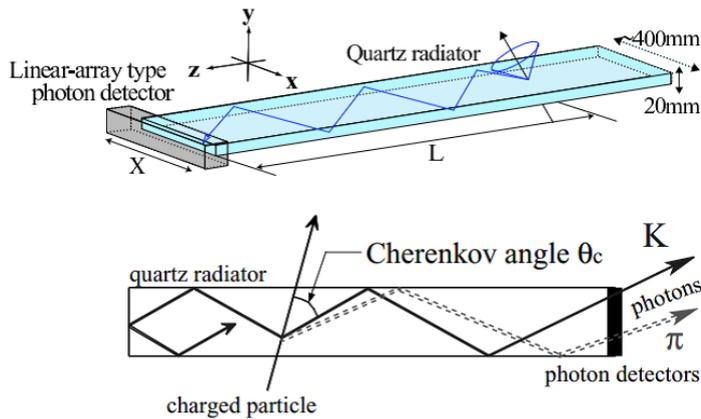


図 2.7 TOP カウンターの動作原理の概念図

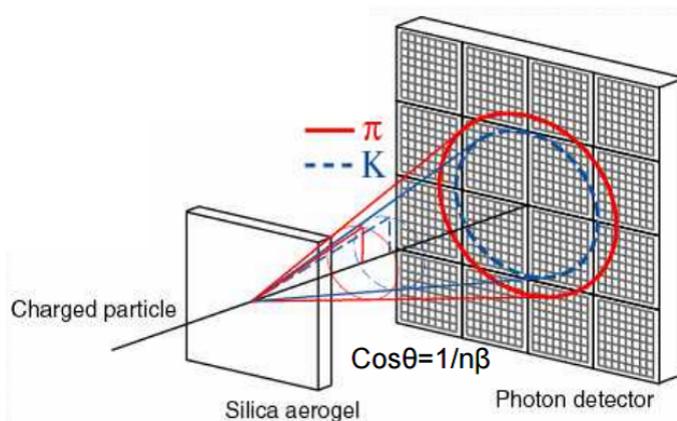


図 2.8 A-RICH カウンターの動作原理の概念図

- 電磁カロリメーター (ECL:Electromagnetic Calorimeter)

ECL は Tl 添加 CsI(CsI(Tl)) シンチレーターを用いて電子や光子のエネルギーを測定する電磁カロリメーターである。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量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知ることができる。結晶は長さ 30cm、前面が約 $5.5 \times 5.5 \text{cm}^3$ 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) は発光時間が長い ($\tau \sim 1\mu\text{s}$) ため Belle II の高バックグラウンド下では対処が必要で、1.76MHz のサンプリング周波数で動作する 18bit の ADC を用いて波形データを 31 点取得し、波形フィットを実行する。これにより、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、入射時刻の情報から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。また、特にバックグラウンドの高いエンドキャップ部を発光の時定数が短い純 CsI に置き換える計画が議論されている。本研究は ECL のサブシステムの開発に関するものなので、次節以降でさらに詳しく述べる。

- μ 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。物質を通り抜けやすい性質を持っている μ 粒子と、電氣的に中性で平均自由飛程の長いハドロニック相互作用で物質と反応するまでは検出できない K_L^0 中間子を検出するために設置されている。ソレノイドによる磁場のフラックスリターンを兼ねた厚み 5cm の鉄板 14 層の間に設けられた 4cm 間隔のギャップに有感検出器を挿入したものである。 μ 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 μ 粒子と同定できる。 K_L^0 は鉄と衝突し強い相互作用によるハドロンシャワーを形成するので、CDC に飛跡を残さず KLM でハドロンシャワーとして検出される。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と予想されるので、高レートに耐えられない既存の RPC(Registive Plate Chamber) に換えてプラスチックシンチレーターにファイバーを通し、高増幅率の半導体光検出器である PPD(Pixelated Photon Detector) で読み出すものに置換した。バレル部も最も内側の二層は同様の改変を行った。

第 3 章

電磁カロリメーター

3.1 電磁カロリメーターの概要

電磁カロリメーターとは、電子や γ 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 γ 線を放出してエネルギーを失い、高エネルギーの γ 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ので、その中に含まれる粒子のエネルギー損失の総和にあたる信号を記録することにより、入射した γ 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。

高いエネルギー分解能を要求する Belle/Belle II 実験では、全吸収型のカロリメーターが必要であり、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ーを使用する。この無機結晶シンチレーターのシンチレーション光を半導体光検出器で読み出すことにより、磁場中で動作する電磁カロリメーターを実現できる。

ここで、無機結晶シンチレーターと半導体光検出器について説明する。

3.1.1 無機結晶シンチレーター

シンチレーターとは、粒子が入射してエネルギー損失を起こしたときに蛍光を発する物質のことで、このとき発生する光をシンチレーション光とよぶ。シンチレーター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ーは、結晶中の電子が基底状態から励起状態へと移り、その電子が脱励起するときにシンチレーション光を発する。純結晶中では電子が脱励起しにくかったり、波長がその材料の透明度が低いところにあたりする場合もあり、結晶中に適切な不純物を加えることでエネルギー準位の構造を変化させ、発光効率を上げたものもある。無機物質の結晶は有機物質に比べ発光量が大きくエネルギー分解能が優れているため、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ーとして向いている。Belle/Belle II 実験では CsI 結晶

に不純物としてタリウムをドーブした CsI(Tl) 結晶を使用している。この結晶シンチレーターは約 5×10^4 photons/MeV に達する非常に豊富な発光量を示す。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いるため、電磁カロリメーター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ため、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。

以下に、主な無機結晶シンチレーターの特性を示す。

表 3.1 主な無機結晶シンチレーターの特性。f は fast component で s は slow component を表す。

	BGO	純 CsI	CsI(Tl)
密度 $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	7.13	4.51	4.51
放射長 $X_0(\text{cm})$	1.12	1.86	1.86
モリエール半径 $R_m(\text{cm})$	2.23	3.57	3.57
発光波長 $\lambda_{max}(\text{nm})$	480	310f 420s	560
減衰時間 $\tau_{decay}(\text{ns})$	300	6f 35s	1300
発光量 (NaI(Tl)=100)	21	1.1f 3.6s	165

3.1.2 半導体光検出器

半導体中では電子が外部から光や熱を吸収することにより価電子帯から伝導帯へと励起すると、電気伝導に寄与するキャリアとなる。この際に電子が移動したあとは正孔となり、これもキャリアとして働く。したがって、半導体を光検出器として使用する上では、高い効率で入射した光子を電子・正孔対に変換し、これらによる信号電荷を効率的に収集するとともに、光が入射しないときの漏れ電流を可能な限り小さくすることが重要である。そのため、一般に真性半導体であるシリコン (Si) 結晶等にリン (P) のように 5 価あるいはホウ素 (B) のように 3 価の添加物を少量まぜた不純物半導体を使用される。5 価の添加物では、シリコンと共有結合した際に電子が余分に余り、この電子が伝導帯に上がると負電荷のキャリアとなる。これを n 型半導体と呼ぶ。一方、3 価の添加物では、シリコンと共有結合した際に電子の不足分に起因する正孔がキャリアとなり、これを p 型半導体と呼ぶ。この n 型半導体や p 型半導体のような不純物半導体では、添加物の種類や濃度を制御することにより様々なデバイスの開発が可能となる。

n 型半導体と p 型半導体を接合した半導体は、一般的にはダイオードと呼ばれる。この pn 接合部では互いの電子と正孔が打ち消しあい、キャリアが存在しなくなった空乏層が形成される。整流する目的でダイオードを使用する場合、p 側に正電圧、n 側に負電圧を

印加すると、キャリアは接合部付近で次々に結びついて消滅し、これを繰り返すことで電流が流れ続ける。このように p 側が高電位に、n 側が低電位になるよう電圧をかけることを「順方向バイアス进行かける」といい、このとき流れる電流は順方向電流である。一方、光検出器としてダイオードを使用する場合、これとは逆に p 側に負電圧、n 側に正電圧をかける。これを「逆方向バイアス进行かける」といい、この場合、正孔は p 側に、電子は n 側に引き寄せられキャリアが不足し、空乏層が大きくなる。この空乏層内の電場が電源に接続されていることによる電場と等しくなると電流が流れなくなる。この状態で光子が入射し、空乏層で光電効果により電子を伝導帯に励起すると、対になって生成された電子および正孔がそれぞれ n 側と p 側に移動し、電気信号パルスが生じる。この半導体光検出器 (フォトダイオード) にシンチレーターを組み合わせることで、シンチレーターに素粒子が入射したときに発生するシンチレーション光を、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。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) を挟んだ構造をしている。i 層を設けることで p 層および n 層にかかる電場が少なくなり、漏れ電流を減らすことが可能である。また、空乏層を大きくして量子効率を上げることができる。

3.2 Belle 実験のカロリメーターと Belle II 実験へのアップグレード

Belle 実験のカロリメーターの全体像を図 3.1 に示す。合計 8736 本の CsI(Tl) 結晶で構成され、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。また、光検出器として $1 \times 2 \text{cm}^2$ の受光部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 は感度波長範囲は 340nm~1100nm、540nm で 85% の量子効率を示し、増幅率は 1 である。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。一方、既述したように CsI(Tl) 結晶は $5 \times 10^4 \text{photons/MeV}$ におよぶ豊富な発光量を誇り、発光波長のピークエミッタンス λ_{max} が 560nm であるため、PIN-PD との相性が非常に良い。これらの特徴により、Belle 実験では CsI(Tl) の PIN-PD 読み出しを採用した。一本の CsI(Tl) 結晶のサイズは長さが 30cm、断面が約 $5.5 \times 5.5 \text{cm}^2$ (前面)、約 $6.5 \times 6.5 \text{cm}^2$ (シンチレーション光読み出し面) となっている。この長さは $16.1X_0$ (X_0 ; radiation length) に対応し、幅 (約 5.5cm) はモリエール半径 (R_m) の 1.5 倍強の値に対応する。PIN-PD への集光効率を上げるため結晶は

厚み 200 μm の白色テフロンシート (Goretex) で包む。また、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 μm 、PET 樹脂層 25 μm) 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ーの読み出しエレクトロニクスでは、時定数 1 μs の波形整形回路 (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 個となる。一方、CsI(Tl) 結晶の発光量は約 5×10^4 photons/MeV であり、PIN-PD にはこのうち約 1/10 が届くため、約 5000 個/MeV の電子・正孔対を得る。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 0.2MeV 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 0.5MeV から 1MeV 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 1~2MeV に達すると予想される。これはルミノシティを向上させることにより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 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$) に起因するものがほとんどの割合を占める。このノイズは、エネルギーが数百 MeV 以下の低エネルギーの γ を検出する際のエネルギー分解能に影響があり、 $D^{*0} \rightarrow D^0\pi^0$ 再構成のように低エネルギー光子の検出が重要な研究の感度が制限される懸念がある。また、 $B^+ \rightarrow \tau^+\nu_\tau$ の検出のように、エネルギーや運動量の未検出分の正確な理解が必要な研究にも影響が出る。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対処する。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と送信データの多重化を担う FPGA を搭載した Shaper DSP ボードで行う。このボードは VME3U 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 測定器構造体の周辺に配置する。

一方、パイルアップの問題は CsI(Tl) シンチレーターの特性である発光が終わるまでの減衰時間が長いことに起因しているため、ビームバックグラウンドのレベルが高い前方エンドキャップの結晶シンチレーターを発光時間が短い純 CsI に置き換えるオプションも検討している。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 またはファインメンシュ型ダイノード 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。

Belle II 実験の環境に合わせ周辺機器も改変が必要なものがある。その中の一つが本研究の対象である PIN-PD の電流モニターシステムおよびバイアス電源制御システムである。SuperKEKB 加速器の運転ではビームバックグラウンドを抑制しつつルミノシティの向上を企むために様々なパラメーターを調整する。その際にビームの状態を診断するため様々なモニター情報が必要である。ここで CsI(Tl) カウンターが吸収するビームバックグラウンドの線量は重要な情報であり、これを PIN-PD の電流をモニターすることにより得られる。その積算から CsI(Tl) 結晶の被ばく量を見積もることができ、放射線損傷による発光量の変化を確認するためにも必要である。本研究では、この PIN-PD 電流モニターシステムと、PIN-PD に電源電圧を供給するバイアス電源制御システムの構築について報告する。

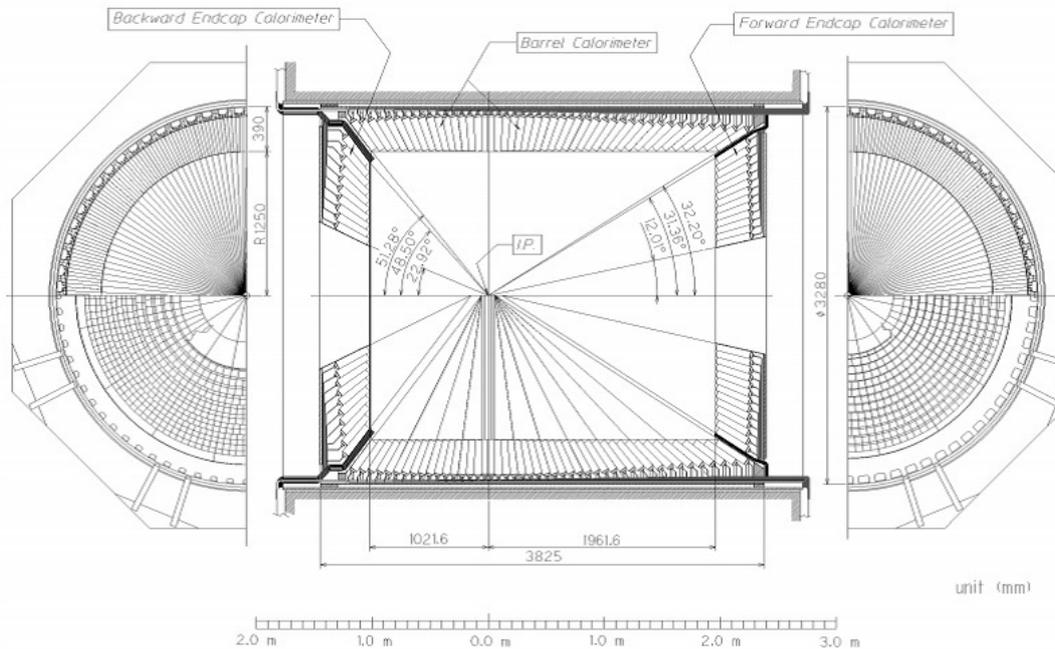


図 3.1 Belle の電磁カロリメーター。Belle II でも初期段階は既存のものを使用するため、配置は変わらない。

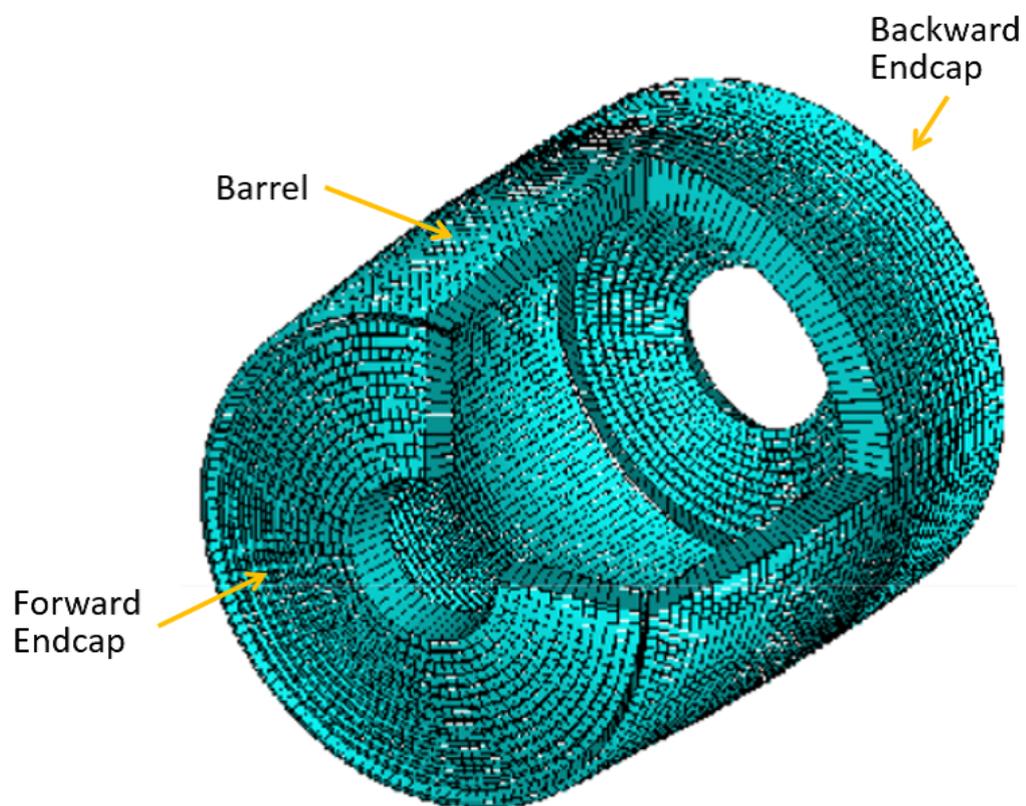


図 3.2 カロリメーターの CsI(Tl) 結晶配置の立体図

第 4 章

PIN-PD 電流モニターシステム

PIN-PD 電流モニターシステムとは電磁カロリメーター用の周辺機器の一つであり、PIN-PD に流れる電流値を常時モニターする。本章では、このモニターシステムの概要、設計、動作試験について述べる。

4.1 PIN-PD 電流モニターシステムの概要

PIN-PD の電流値はバイアス電圧の印加中、常時モニターすることが必須の量であるが、以下に述べる重要な役割を果たす。

1. ビームが ON の時と OFF の時の PIN-PD に流れる電流値の差は、ビーム運転中、単位時間あたりに CsI(Tl) 結晶が吸収する放射線量 (Gy/sec) に比例する。ゆえに放射線レベルメーターとして機能する。
2. 1 で説明したビーム運転中の放射線量 (Gy/sec) の時間積分値より、CsI(Tl) 結晶の吸収線量を算出する。

実験中、ルミノシティを向上させるのに加速器の様々な運転パラメーターの調整を行うが、その際にビームバックグラウンドは可能な限り抑制しなければならない。その運転調整を行う上で、放射線レベルメーターとしてはたらくものが必要で、CsI(Tl) 結晶の吸収線量 (Gy/sec) はその機能を果たす重要な指標の一つである。1 でも述べたように、CsI(Tl) 結晶の吸収線量 (Gy/sec) はビームが ON の時と OFF の時の PIN-PD に流れる電流値の差に比例するので、これを求めることを可能にするため、その電流値を常時モニターする。

また 2 で述べたように、ビーム運転中の放射線量 (Gy/sec) の時間積分値より、CsI(Tl) 結晶の吸収線量を算出できる。このデータは CsI(Tl) 結晶の被ばくによる発光量の低下度合すなわち放射線損傷の影響を確認する際に用いられ、CsI(Tl) 結晶の発光量低下に関する実験終了時までの見通しを立てる際にかかせない情報となる。

また、ビームが OFF の時、PIN-PD に逆方向バイアスをかけた際に流れる暗電流の増加は PIN-PD の中性子被ばくの積算に比例する。したがって、ビーム供給が休止してい

る期間中も、PIN-PD の電流値をモニターしておくべきである。

ここで Belle 実験における CsI(Tl) 結晶の吸収線量を図 4.1 に示す [1]。この約 10 年間分にわたる吸収線量の算出は、Belle 実験期間中の PIN-PD 電流モニターシステムの記録により得たものである。この図の縦軸は吸収線量の積算 (rad) で横軸は日数を表しており、 $1\text{rad} = 1/100\text{Gy}$ であることから、バレルは 10 年間で約 1Gy、前方エンドキャップ最内側は約 4Gy を被ばくしたことがわかる。また、Belle 実験での CsI(Tl) 結晶の発光量の低下度合の θ 分布を図 4.2 に示す。縦軸は 1999 年の発光量に対する 2009 年の発光量の割合を表しており、横軸は θ_{id} である。ここで、結晶の θ_{id} の位置関係を図 4.3 に示す。図 4.1 に示した吸収線量に対する発光量の低下は 5~10% 程度で抑えられていることがわかる。

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。

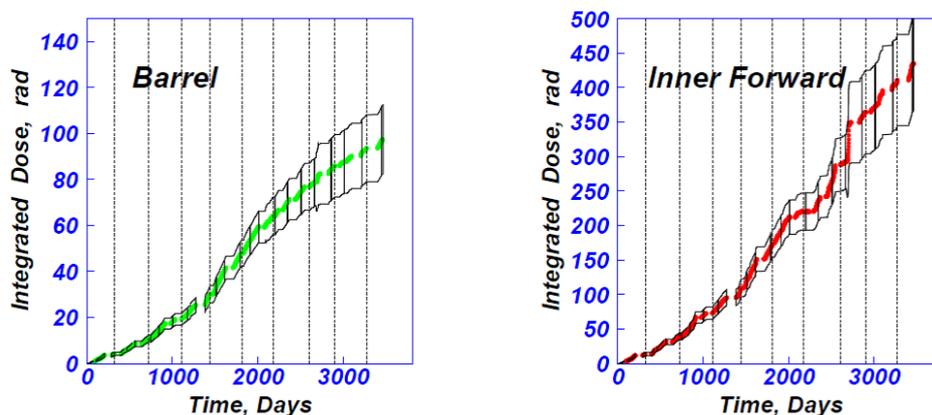


図 4.1 Belle 実験における CsI(Tl) 結晶の吸収線量。約 10 年間分の積算を表す。

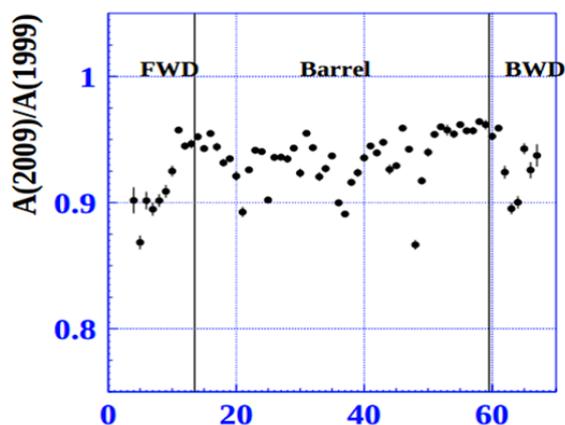


図 4.2 Belle 実験における CsI(Tl) 結晶の発光量の低下度合の θ 分布

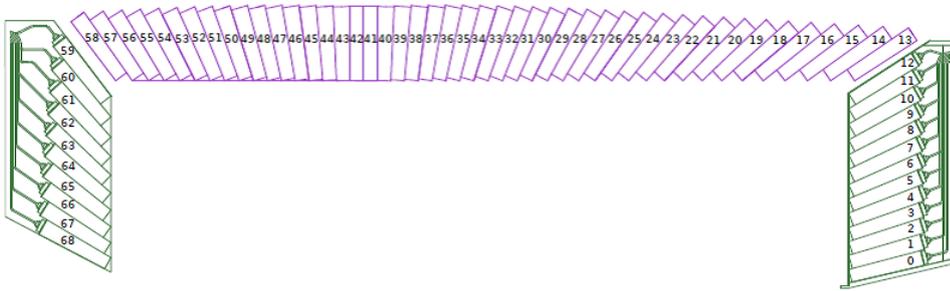


図 4.3 CsI(Tl) 結晶の θ_{id} の振り方。前方エンドキャップ最内側から順番に 0~68 まで割り振る。

4.2 電流モニターの原理

PIN-PD 電流モニターシステムのブロックダイアグラムを図 4.4 に示す。PIN-PD に流れる電流は、その経路に抵抗を挿入することにより生じる電圧降下を読み出す。この電圧降下を直接デジタルマルチメーターで読むと PIN-PD のバイアス電圧に対して雑音源となる恐れがある。したがって、差動入力で高入力インピーダンスのオペアンプを電圧降下検出の初段に配した電子回路を用いる。これを計測アンプと呼ぶ。この計測アンプが出力する電圧信号は約 20m のケーブルを通じてエレクトロニクスハット内にある Agilent34980A データロギングシステムの Agilent34924A マルチプレクサモジュールに接続し、データロギングシステムのデジタルマルチメーター部で数値化する。数値化されたデータは 34980A 内の出力バッファにためられ、Ethernet (Local Area Network, LAN) を介してコントロール用 PC がそのデータを受信し、ディスクに保存するとともに Network Shared Memory (NSM) というソフトウェアを通じて、Belle II DAQ ネットワーク上の他の PC と随時共有できる。コントロール用 PC は OS として 64bit 版 Linux 標準ディストリビューションの一つである CentOS6 を使用している。

本研究では、このシステムの実装設計、計測アンプ設計、計測アンプのプロトタイプを用いた動作試験を行った。これらについて次節で詳しく述べる。

4.3 PIN-PD 電流モニターシステムの設計

PIN-PD 電流モニターシステムを構築する上で重要になるのは、PIN-PD 電流測定点の配置、計測アンプの回路構成である。これらの設計は、ビーム運転中に CsI(Tl) 結晶が吸収する放射線量や PIN-PD の中性子被ばく量のシミュレーション予測に基づいて行う。以下では PIN-PD に流れる電流値や中性子被ばくによる暗電流増加量の見積値を算出するとともに、電流測定点の配置を議論する。

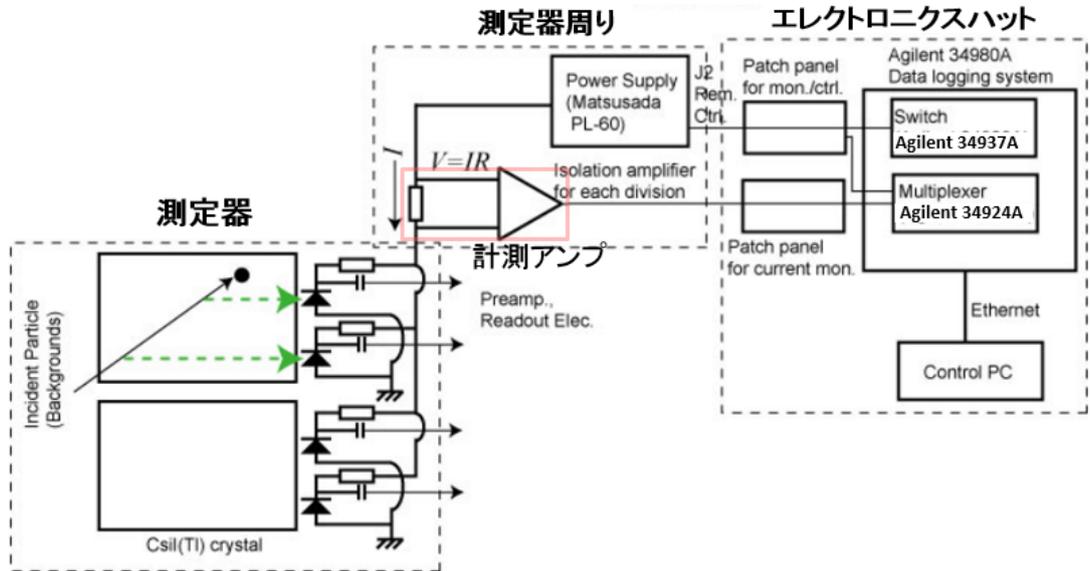


図 4.4 PIN-PD 電流モニターシステムのブロックダイアグラム

4.3.1 PIN-PD の電流値予測

PIN-PD に流れる電流値は、ビームがない状況で逆方向バイアスをかけた際に流れる暗電流値と、ビーム運転時にバックグラウンド放射線の入射による電流値の増加分の合計である。図 4.5 に Belle II で予想される年間の CsI(Tl) 結晶の吸収線量のシミュレーション予測 [10] を示す。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 [11] により、ビーム粒子の運動をシミュレートし、その情報を GEANT4 プログラム [12] 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を構成する物質中のエネルギー損失を計算するという手法に基づいている。SuperKEKB 加速器の設計値ルミノシティ ($8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) では輻射バーバー散乱 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$) が主なバックグラウンド源となり、バレル部では 0.5Gy/yr 、エンドキャップ部では最大 $3 \sim 4 \text{Gy/yr}$ に達することがわかる。

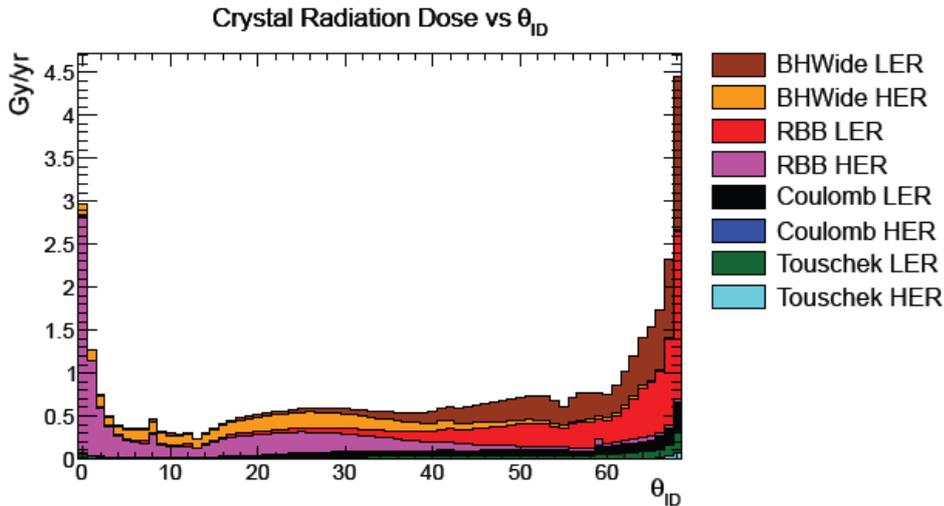


図 4.5 Belle II 実験における CsI(Tl) 結晶の吸収線量のシミュレーション予測 (ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の場合)[10]

この図の黄、紫、青、水色の領域は HER(High Energy Ring)、つまり電子に起因したビームバックグラウンドであり、茶、赤、黒、緑の領域は LER(Low Energy Ring)、つまり陽電子に起因したビームバックグラウンドである。また、茶、黄、赤、紫の領域は Radiative Bhabha 散乱によるビームバックグラウンドであり、黒、青はクーロン散乱、緑、水色はタウシェック散乱によるものである。この図より年間の吸収線量は約 0.5~4.5(Gy/yr) であると予想される。この見積値と表 4.1 にまとめたパラメーターの値より結晶一本あたりの PIN-PD に流れる電流値を算出したところ、バレル部分は約 0.4nA/結晶、エンドキャップ部分は約 3~4nA/結晶となった。

表 4.1 結晶の吸収線量に対する PIN-PD 電流値を見積もる際に用いる値

1 Gy	1 J/kg
1 J	$6.24 \times 10^{18} \text{eV}$
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	$1.6 \times 10^{-19} \text{C}$
1 年	$\sim 10^7$ 秒

4.3.2 中性子被ばくによる暗電流増加の見積もり

KEKB 加速器は $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のルミノシティを実現したが、それに伴い加速器トンネル内で生成する中性子によるバックグラウンドも決して無視できないことが明らかになった。これは輻射バーバー散乱、つまり $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ 過程が前方に非常に大きな断面積を持ち、ここで生じた γ 線が、加速器トンネル内の物質と相互作用して電磁シャワーを形成する際に双極子共鳴によって発生する中性子のためである。PIN-PD がこの中性子を浴びると半導体格子中に欠陥を生じるバルク損傷により、そこで電子または正孔の熱励起が起りやすくなるため、暗電流が増加する。PIN-PD 電流値測定用の回路を設計する際、この暗電流増加も考慮しなければならない。

Belle II 実験における PIN-PD の中性子被ばく量のシミュレーションによる予測値 [10] と、2008 年に東京大学原子炉「弥生」で行われた PIN-PD の中性子損傷試験の結果 [13] をもとに Belle II 実験における暗電流増加量を見積もる。図 4.6 は年間の PIN-PD 中性子被ばく量期待値の θ_{ID} 分布であり、表 4.2 は PIN-PD の中性子損傷試験における、中性子被ばく量に対する暗電流増加量の結果である。

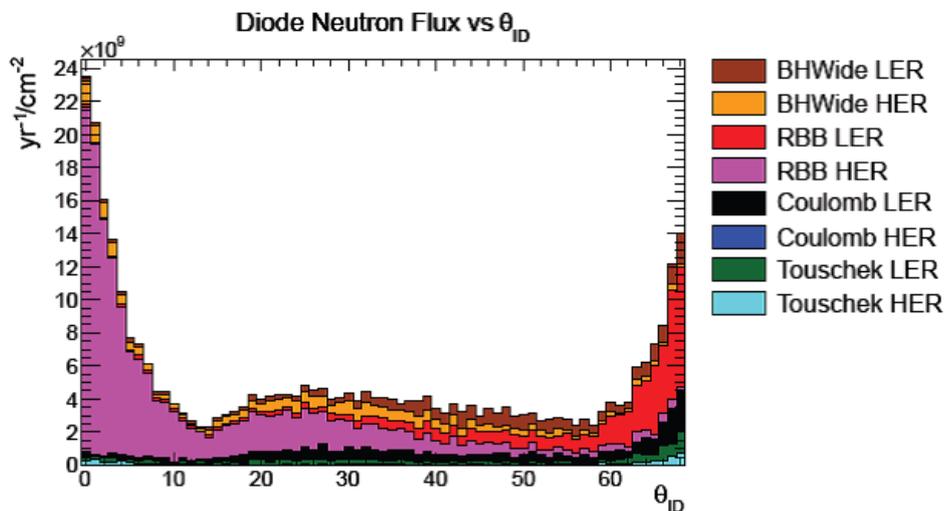


図 4.6 Belle II 実験における PIN-PD の中性子被ばく量のシミュレーション予測 (ルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の場合)[10]

表 4.2 PIN-PD の中性子被ばく量 (dose) に対する暗電流増加量 (ΔI)[13]

dose (cm ⁻²)	ΔI (nA)
1×10^{11}	~100
1×10^{12}	~1000
1×10^{13}	~10000

PIN-PD における中性子線フラックス F (year⁻¹cm⁻²) は、シミュレーション中で PIN-PD に達した中性子の数とエネルギー E_n に基づいて次式で見積もる。

$$F(\text{year}^{-1}\text{cm}^{-2}) = \frac{W(E_n) \times 10^{13}(\mu\text{s}/\text{year})}{4\text{cm}^2 \times N_\theta \times t_{\text{samp}}(\mu\text{s})} \quad (4.1)$$

ここで、 $W(E_n)$ は中性子のエネルギー E_n の関数で、1 MeV の中性子が与えるものと等価にする損傷の重みを示す係数、 N_θ は該当する θ_{id} を持つ結晶の数、 t_{samp} はシミュレーションが計算対象とする時間の長さを表し、4 cm² は CsI(Tl) 結晶一つが装備する PIN-PD の面積である。被ばく量が最大である前方エンドキャップ最内側の被ばく量は約 2×10^{10} (neutron/year · cm²) であり、被ばく量が少ないバレル部分では約 5×10^9 (neutron/year · cm²) である。表 4.2 の結果より、前方エンドキャップ最内側では Belle II 実験期間 (10 年間) で約 100nA、バレル部では約 10nA の暗電流増加が見込まれる。

4.3.3 電流測定点の配置

PIN-PD の電流を測定する際、8736 本ある CsI(Tl) 結晶をいくつかのグループに分けて測定する。ここで必要なことは、結晶が吸収するビームバックグラウンドの角度分布を検出可能なグループ分けにすることである。ここで、Belle II で予想される結晶の吸収線量の θ 分布と ϕ 分布のシミュレーションによる期待値を示す。図 4.7 の縦軸は左右とも年間の吸収線量 (Gy/yr) で、横軸は左の分布が結晶の θ_{id} 、右が結晶の ϕ_{id} である。また、右の分布は前方エンドキャップ最内側での吸収線量の ϕ 分布を表す。結晶の θ_{id} は図 4.3、 ϕ_{id} は図 4.8 に示すように割り当てる。

図 4.7 より、 θ 方向は前後方エンドキャップとバレル部で 6 倍または 9 倍近く違い、 ϕ 方向は 0°付近と 180°付近で数倍違う。つまり、図 4.9 で示した赤の領域の吸収線量が多いことがわかる。この結果より、エンドキャップ部分は ϕ 方向の 0°付近の吸収線量が多く、内側と外側でも吸収線量に差があることがわかる。また、バレル部も同様に ϕ 方向の 0°付近の吸収線量が多い。エンドキャップ部は ϕ 方向に 8 分割し、 θ 方向は内側と外側に 2 分割して、片方のエンドキャップを 16 個の領域に分割する。バレル部は ϕ 方向に 16 分割、 θ 方向に 3 分割で 48 個の領域に分割する。すると、測定箇所数は合計で 80 となる。測定領域の分割を図 4.10 に示す。ここで、図 4.10 の赤の領域は吸収線量が多いところを表している。

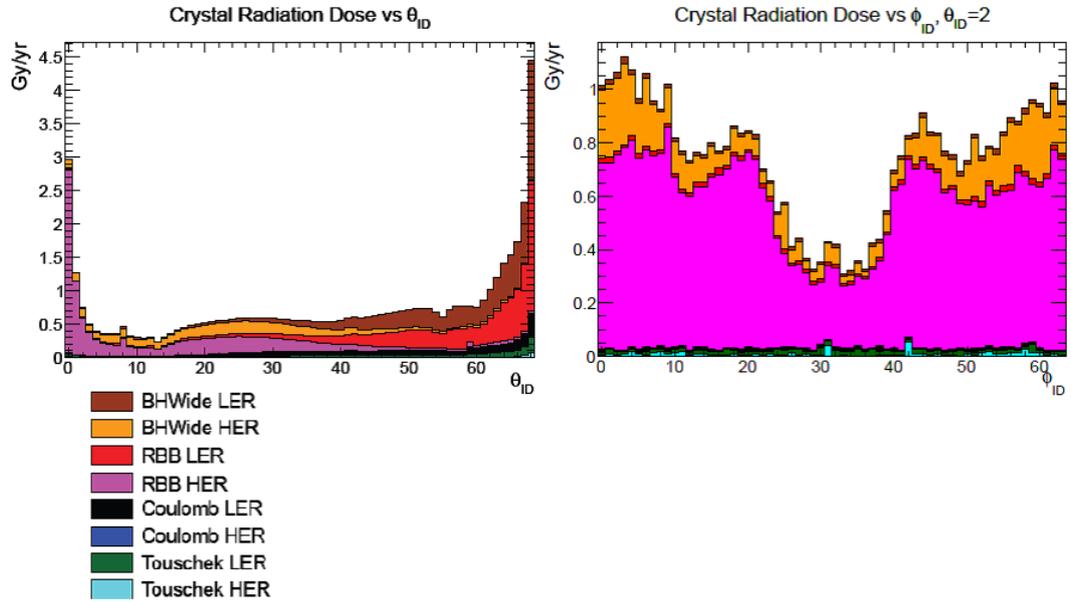


図 4.7 Belle II 実験における結晶の吸収線量の θ 分布と ϕ 分布のシミュレーション予測。左が θ 分布で右が前方エンドキャップ内で $\theta_{id}=2$ の結晶における ϕ 分布。(フルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の場合)[10]

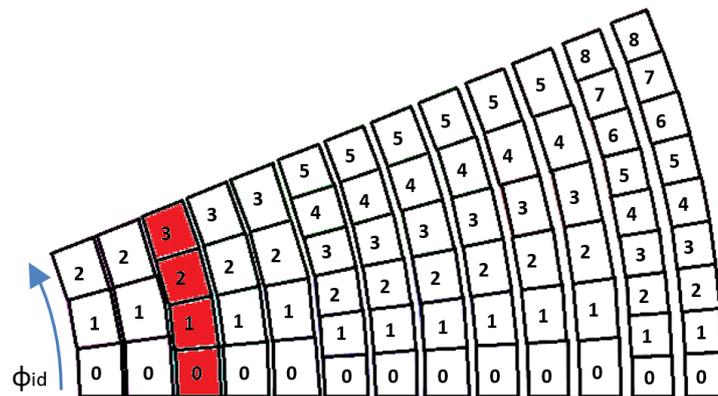


図 4.8 前方エンドキャップの CsI(Tl) 結晶の ϕ_{id} の振り方。図中の 0 を始点に反時計回りに 1 周して番号が振られる。図 4.7 の ϕ 分布は図中の赤で示した列における分布である。

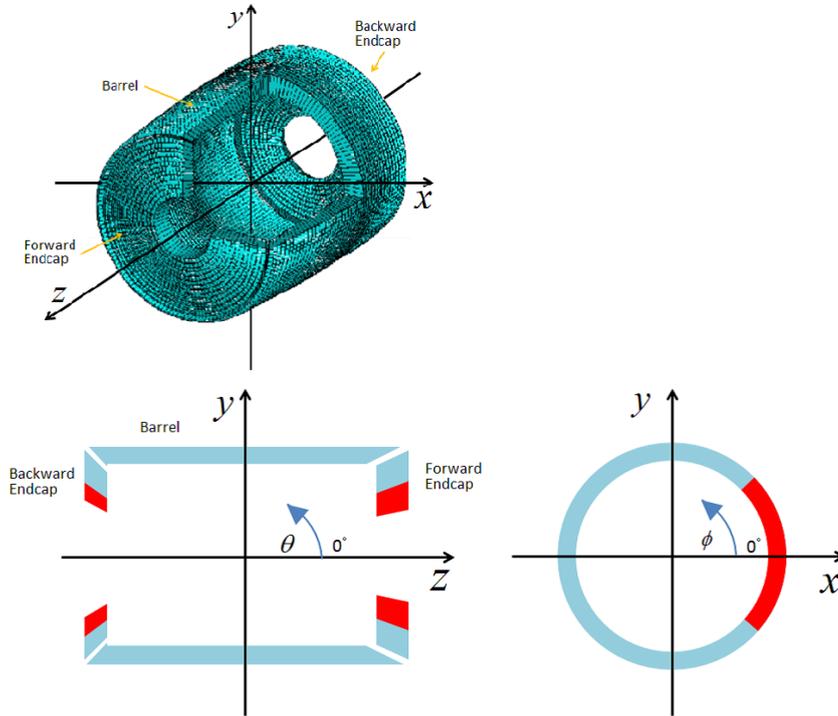


図 4.9 図中の赤の領域の吸収線量が多い。

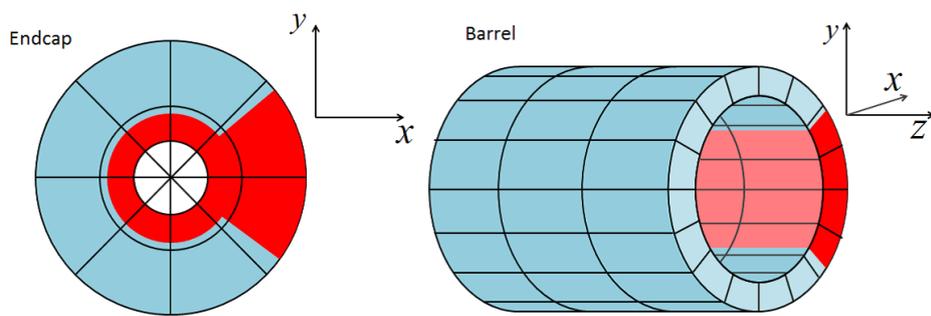


図 4.10 PIN-PD 電流を測定する領域の分割。エンドキャップ (左) およびバレル (右)。

4.3.4 計測アンプ設計

PIN-PD に流れる電流は、抵抗を挿入して、その両極間の電圧降下として検出する。この電圧降下を差動入力の高入力インピーダンスの増幅器で受けて、シングルエンドの電圧信号に変換する回路を計測アンプと呼ぶ。前節で述べた結晶の吸収線量に対する PIN-PD の電流値予測、および電流測定分割の情報等をもとに計測アンプの設計を行った。この際、Belle II 実験で用いる電磁カロリメーターは Belle 実験でも使用されていたものであり、すでに Belle の運転期間中に PIN-PD の暗電流が中性子被ばくにより増加した事実を考慮した。

計測アンプの設計では主に電圧降下ピックアップ用抵抗の値の設定、回路設計を行った。これらについて順に述べる。

- 電圧降下ピックアップ用抵抗の値の設定

抵抗値を決める際の制約として以下の二つが上げられる。

- ビームバックグラウンドによる電流値および暗電流を電圧降下により検出可能にする。
- 電圧降下の大きさを初段アンプ (図 4.11) の保護用ダイオードが導通しない範囲に収める。

そこで、以下では抵抗に流れる電流値の見積り、データロギングシステムの分解能、初段アンプ保護用ダイオードの順方向降下電圧の大きさといった境界条件について述べる。

- 抵抗に流れる電流値の見積り

前節の吸収線量より、1MeV あたり 5000 電子・正孔対の生成があることから、1 年間の運転時間を 10^7 秒として、ビームバックグラウンド放射線の入射による電流値はバレル部で約 0.4nA/結晶、エンドキャップ部で約 3~4nA/結晶と見積もった。中性子被ばくによる 10 年間での暗電流増加量の見積値はバレル部分で約 10nA/結晶、エンドキャップ部分で約 100nA/結晶である。また、ビームバックグラウンド起因の電流の見積値は設計値のルミノシティ $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ の場合であり、実験初期にはその 10 分の 1 程度であっても検出可能にする条件を課すこととした。また、現在の暗電流値はバレル部分で約 10nA/結晶、エンドキャップ部分で約 100nA/結晶である。

以上による前方エンドキャップとバレルの結晶 1 本あたりのビームバックグ

ラウンド起因の電流と暗電流値を表 4.3 に示す。また、前方エンドキャップ内側は測定点 1 か所あたりの結晶の数が 30 本であり、外側は 114 本、バレルは 138 本である。これより、前方エンドキャップとバレルの測定点 1 か所あたりの電流値の見積りは表 4.4 のようになった。

表 4.3 前方エンドキャップとバレルの結晶 1 本あたりのビームバックグラウンド起因の電流 (ビーム BG) と暗電流の値

	実験初期		実験終盤	
	ビーム BG(nA)	暗電流 (nA)	ビーム BG(nA)	暗電流 (nA)
前方エンドキャップ内側	0.3	100	3	200
前方エンドキャップ外側	0.04	40	0.4	50
バレル	0.04	10	0.4	20

表 4.4 前方エンドキャップとバレルの測定点 1 か所あたりのビームバックグラウンド起因の電流と暗電流の値

	実験初期		実験終盤	
	ビーム BG(nA)	暗電流 (nA)	ビーム BG(nA)	暗電流 (nA)
前方エンドキャップ内側	9	3000	90	6000
前方エンドキャップ外側	4.56	4600	45.6	5700
バレル	5.52	1400	55.2	2760

データロギングシステムとして用いる Agilent34980A の測定分解能は、DC 電圧測定で $0.00001 \times$ 測定レンジ、5.5 桁 18 ビットである。また、初段アンプの保護用ダイオードとして用いるシリコンダイオードの順方向降下電圧は 0.6~0.7V である。これらの条件から、電圧降下ピックアップ用抵抗の値を $100k\Omega$ とした。ここで、実験終盤では電流値が増えるため、 $10k\Omega$ の予備の抵抗も回路に組み込みジャンパーで切り替えを可能とする。表 4.5 に $100k\Omega$ の抵抗を用いた場合の前方エンドキャップとバレルの測定点 1 か所あたりの期待される電圧降下の値を示す。

表 4.5 100k Ω の抵抗を用いた場合の前方エンドキャップとバレルの測定点 1 か所あたりの期待される電圧降下

	実験初期		実験終盤	
	ビーム BG(mV)	暗電流 (mV)	ビーム BG(mV)	暗電流 (mV)
前方エンドキャップ内側	0.9	300	9	600
前方エンドキャップ外側	0.5	460	4.6	570
バレル	0.6	140	5.5	280

● 計測アンプ回路設計

電圧降下ピックアップ用抵抗を含めて設計した計測アンプの回路図を図 4.11 に示す。この設計のポイントを以下にまとめる。

- LEMO 端子を使用した入力部にはバイアス電源がつながり、同じく LEMO 端子を使用した出力部は PIN-PD へとつながる。
- 10k Ω と 100k Ω の電圧降下ピックアップ用抵抗を使用し、ジャンパーを用いて切り替えを可能とする。
- 電圧降下ピックアップ用抵抗を孤立させ、電圧降下を増幅させるためにフローティング測定に対応した G Ω 以上の高い入力インピーダンスを持つオペアンプとしてテキサスインスツルメンツ社製 OPA124 を使用する。また、非反転増幅回路を用いて電圧降下の増幅率を 10 倍とした。
- OPA124 に電源供給する際フローティング測定を行うため、 $\pm 12V$ を出力するベルニクス社製絶縁型 DC-DC コンバータ BLA12-12W06 型を使用する。
- OPA124 から出力される電圧の信号が差動型であるため、シングルエンド伝送に変換するためにテキサスインスツルメンツ社製差動アンプ INA117 を使用する。
- INA117 の出力キャパシタンスの定格は 1nF 以内である。ここで、INA117 の出力側からエレキハット内にあるデータロギングシステムへつながる Cat5e ケーブルの長さは約 20m であり、ケーブルのキャパシタンスが 1nF を超える。この問題を解決するためにボルテージフォロアを INA117 の出力側に配置する。このボルテージフォロアにテキサスインスツルメンツ社製 OPA27 を使用する。
- 計測アンプの出力側のコネクタは RJ45 とし、1~4 番ピンはアンプ用電源に、5、6 番ピンは Agilent34924A マルチプレクサモジュールに接続する。

この回路設計により、出力電圧は電圧降下ピックアップ用抵抗での電圧降下の 10 倍の値となる。

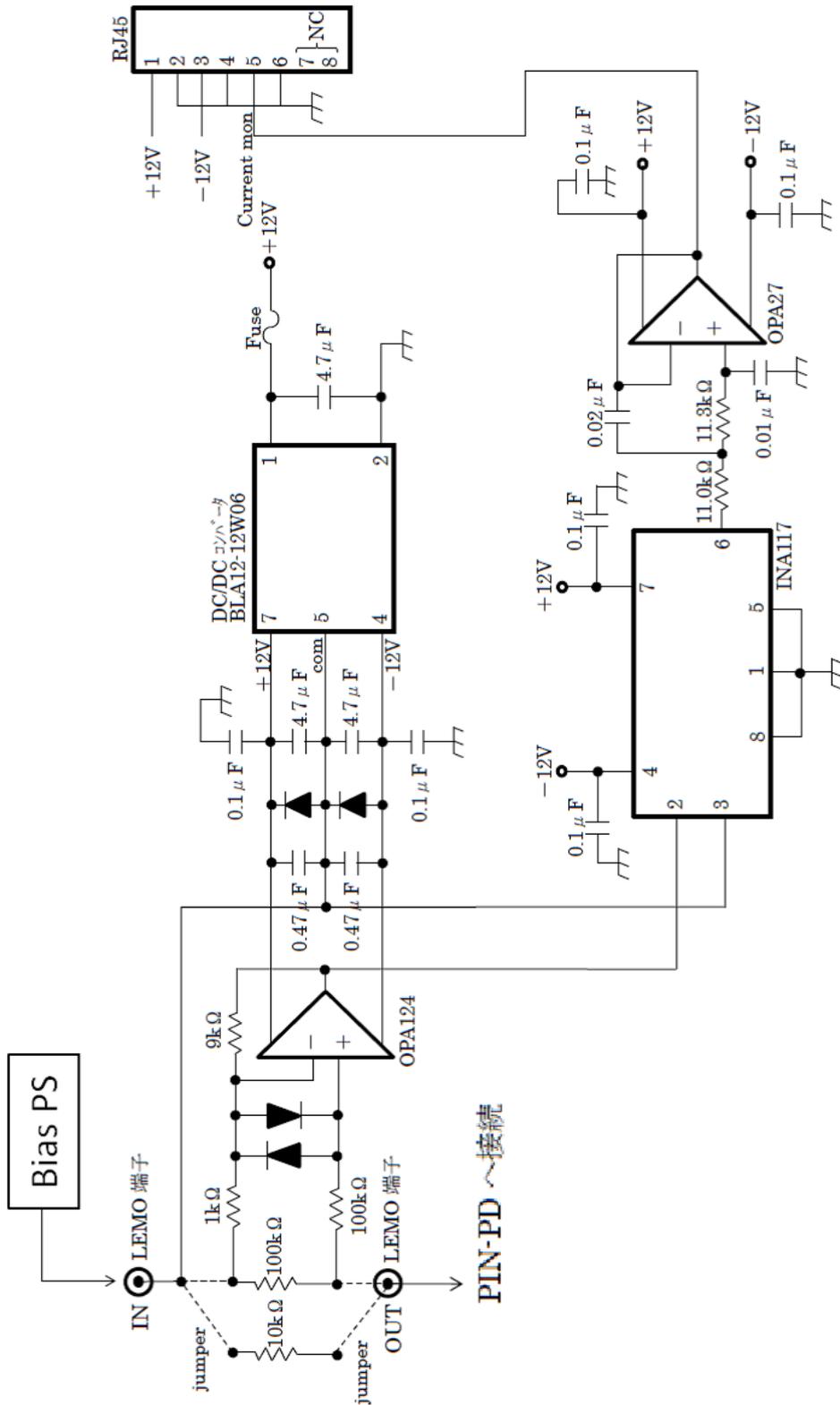


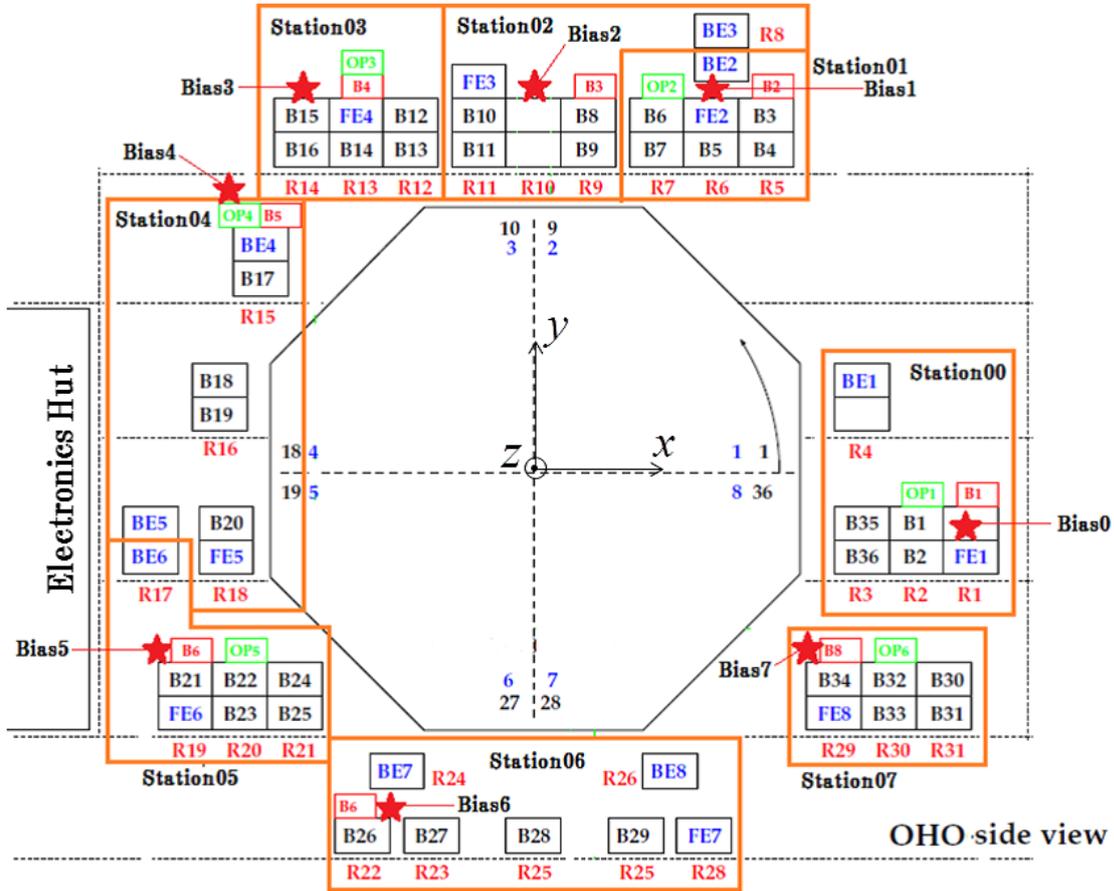
図 4.11 計測アンプ回路図

4.3.5 全体配置

4.3.3 節で議論したようにビームバックグラウンドの分布を測定可能にするために、80 個の計測アンプを配置する。バイアス電圧は電磁カロリメーターの読み出しエレクトロニクス、コレクターモジュールおよび Shaper DSP ボードを介して各 CsI カウンターの PIN-PD に供給されるので、計測アンプはその近傍に置く必要がある。読み出しエレクトロニクスは VME クレートにおさめられており、その配置を図 4.12 に示す。ここで、VME とはデータ収集システムで用いるエレクトロニクス規格で、それに準拠したモジュールをクレートに差し込み使用する。Belle II 測定器の周囲に図 4.12 に示す 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する。計測アンプはこのバイアス電源とモジュールの間に接続され、バルレル部の PIN-PD 電流値を読み出す計測アンプはステーション 1 つごとに 6 台、エンドキャップ部の計測アンプはステーション 03、07 に 2 台ずつ、00、01、02、05 に 4 台ずつ、04、06 に 6 台ずつ設置するのが現時点での案である。この計測アンプの出力コネクタには、電圧信号を出力する端子、回路内のオペアンプに供給する + 12 V と -12 V の電源に対応する端子、GND に対応する端子の計 6 ピン 3 対を約 20m の Cat5e ケーブルを經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。このパッチパネルの設計図を図 4.13 に示す。

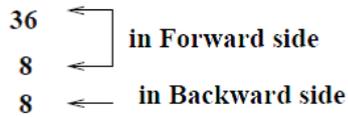
パッチパネル上部の 80 個の RJ45 コネクタは入力部であり、計測アンプからのケーブル 80 本を受ける。オペアンプの + 12 V と -12 V 電源はパネル左下のバインディングポスト電極に接続した直流安定化電源が供給するものを分配する。一方、計測アンプからの出力電圧は 5 個ごとにまとめてその単位の一つずつパネル右下の 10 ピン MIL コネクタを割り当てる。Agilent34924A マルチプレクサモジュールの入力は 35 チャンネル分の接続ピンを持つ 78 ピン D サブコネクタを 2 個装備するので、5 チャンネルずつ 10 ピン MIL コネクタに中継できるようにしたケーブルを介して接続する。

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 4.12 VME クレート配置図。星マークの部分にバイアス電源が設置される。B はバレル、FE は前方エンドキャップ、BE は後方エンドキャップの VME クレートを表す。

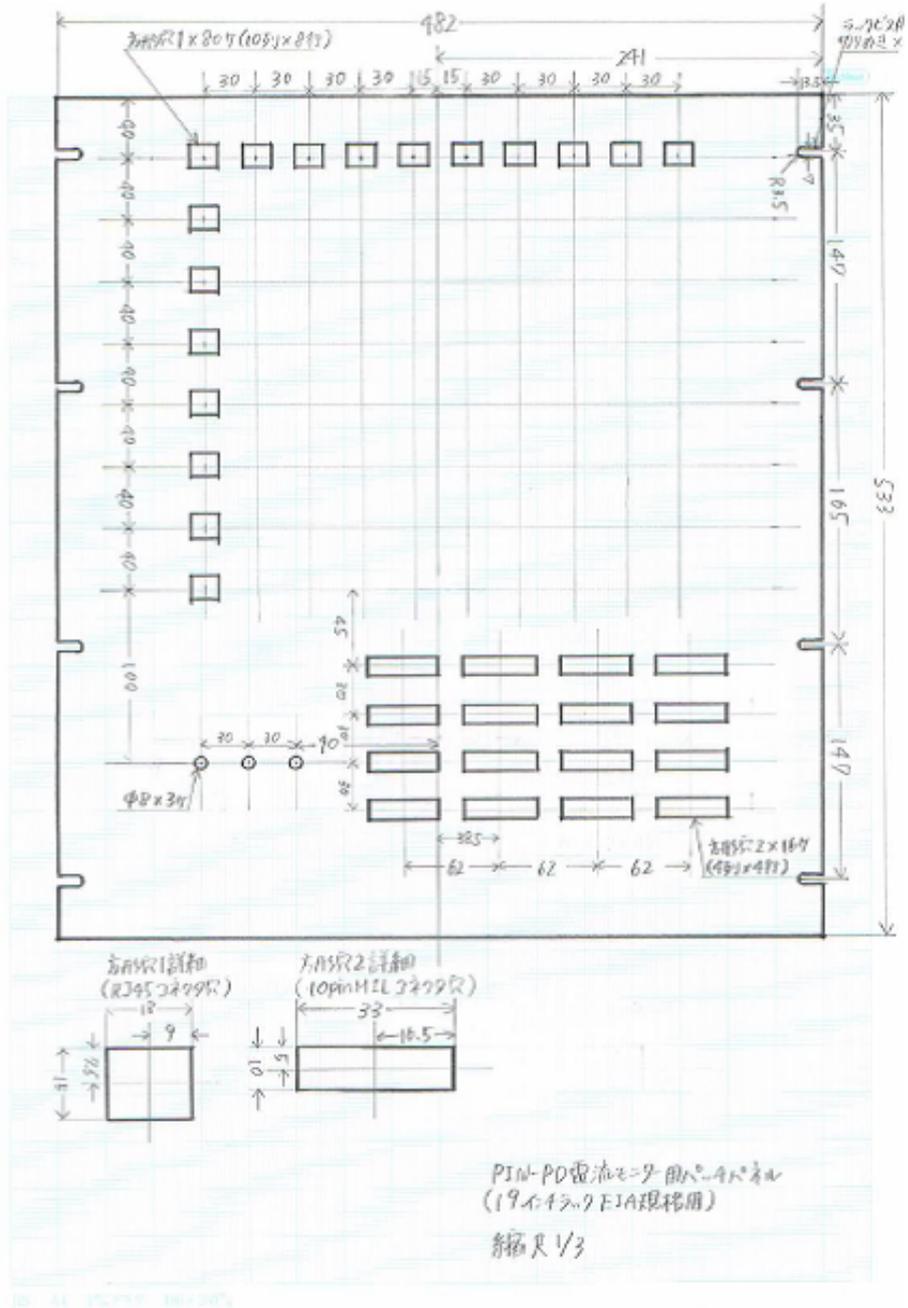


図 4.13 パッチパネル設計図

4.4 計測アンプ動作試験

前節で説明した計測アンプの設計が必要な仕様を満たしているかを確認するために、計測アンプのプロトタイプを自作し動作試験を行った。実際にこの動作試験で行ったことは以下の3つである。

- 直流電源と抵抗を用いた予備実験
- 実機 CsI(Tl) カウンターにつないだ場合の測定
- データ収集用エレクトロニクスへの影響の有無の確認

これらについて順に述べる。

4.4.1 直流電源と抵抗を用いた予備実験

計測アンプのプロトタイプを本番用の CsI(Tl) 結晶につないで試験を行う前に、PIN-PD 電流を模擬的に作る目的で抵抗を用いてその電圧降下を検出する予備実験を行った。図 4.14 で示すように、PIN-PD の代わりに $10\text{M}\Omega$ 抵抗をつなぎ、印加電圧を 10V きざみで 10V から 60V まで変化させ、テスターを用いて出力電圧の測定を行った。このとき $100\text{k}\Omega$ の電圧降下ピックアップ用抵抗に流れる電流値は約 $1\sim 6\mu\text{A}$ であり、これは測定点 1 か所あたりの暗電流値とオーダーが同じである (表 4.4 参照)。このとき $100\text{k}\Omega$ 抵抗での電圧降下は約 $100\sim 600\text{mV}$ となり、計測アンプの設計仕様では出力電圧がこれの 10 倍である約 $1\sim 6\text{V}$ になる。ここで図 4.15 は自作した計測アンププロトタイプであり測定の様子を図 4.16 に示す。

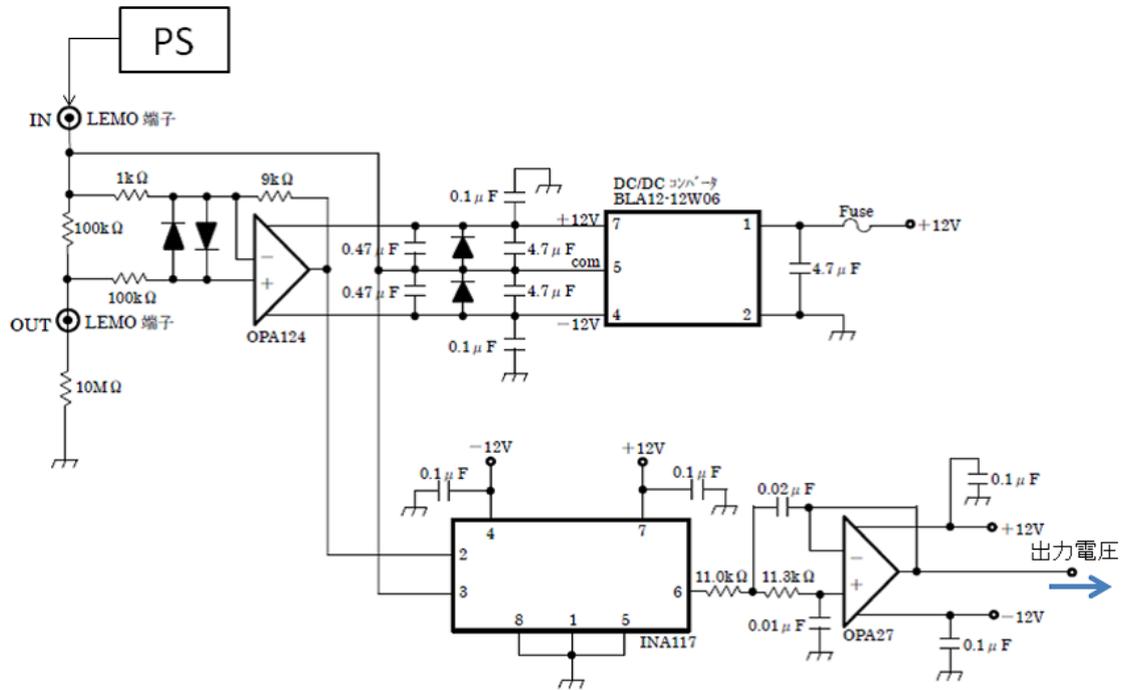


図 4.14 計測アンププロトタイプ回路図。PIN-PD の代わりに $10\text{M}\Omega$ 抵抗をつなぎ、PIN-PD 電流を模擬的に作る。

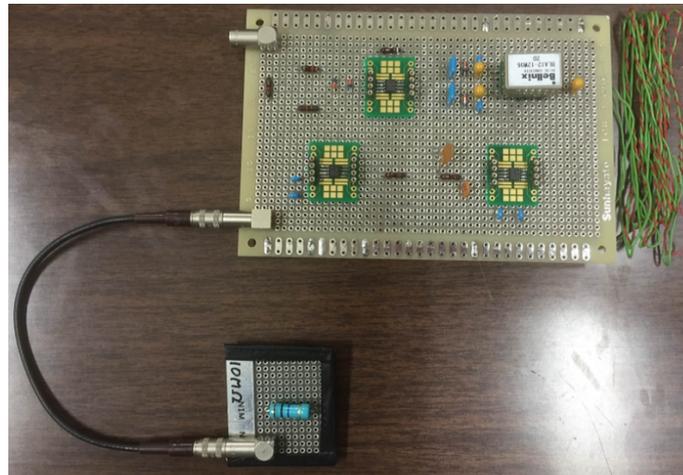


図 4.15 計測アンププロトタイプ実物

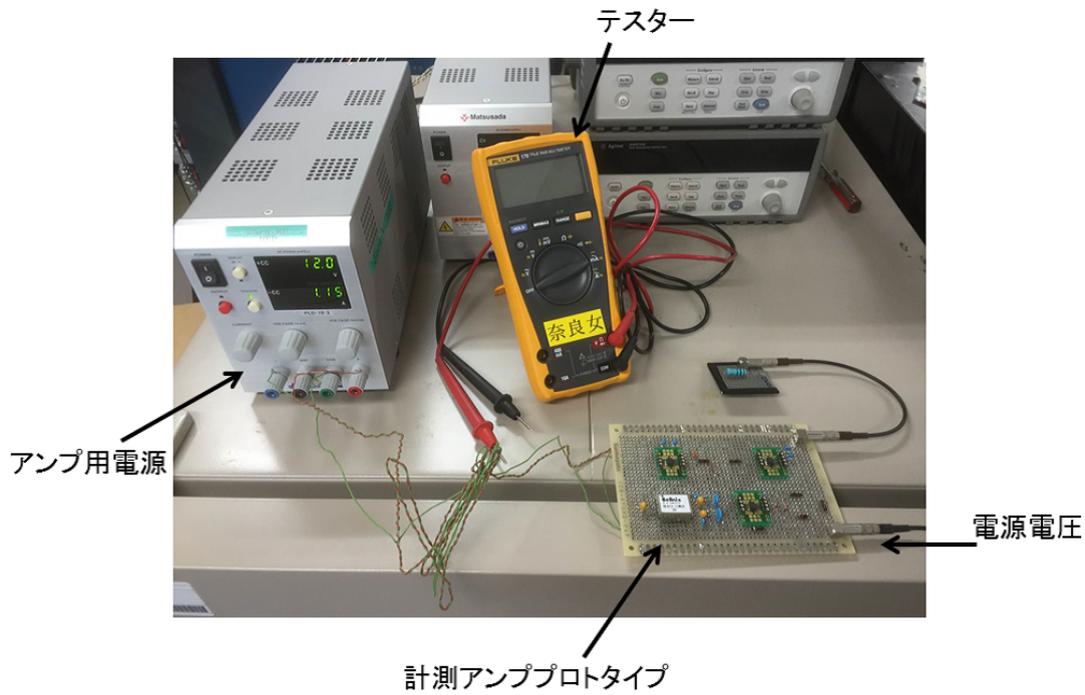


図 4.16 測定の様子

得られた測定結果を図 4.17 に示す。横軸が電源電圧、縦軸は出力電圧である。電源電圧と出力電圧が比例し、出力電圧が予想の値と一致していることが確かめられた。よって、この予備実験では計測アンプが設計通り動作していることが確認できた。

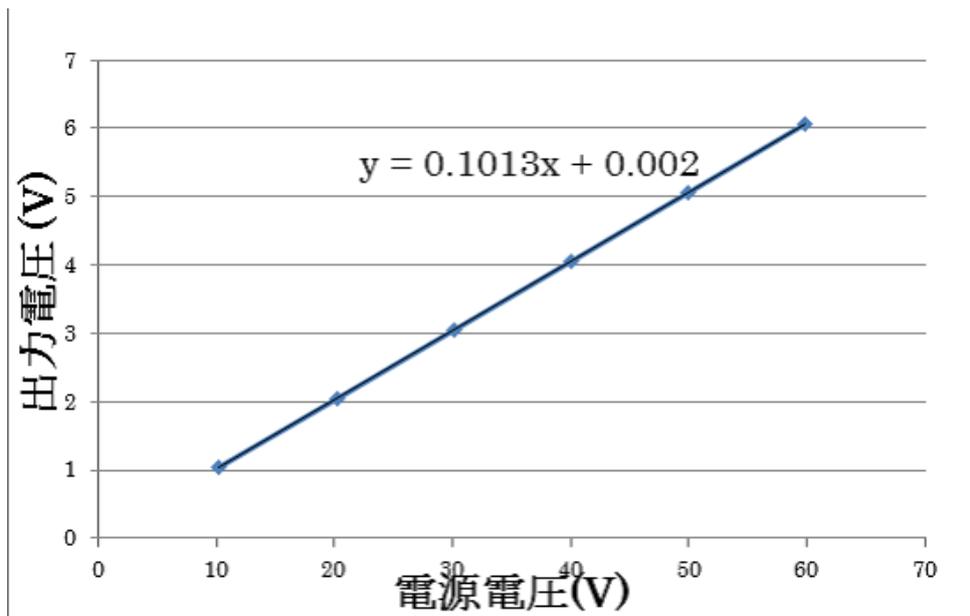


図 4.17 直流電源と抵抗を用いた予備実験の結果

4.4.2 実機 CsI(Tl) カウンターにつないだ場合の測定

プロトタイプの実験アンプを用いて、Belle II 電磁カロリメーター実機の CsI(Tl) カウンターにつなぎ動作試験を行った。この試験は図 4.12 で示した VME クレート B7 を用いて行った。図 4.18 に示すように、バイアス電源と各 Shaper DSP ボードへ分配するコレクターボードの間に計測アンプを接続し、この VME クレート内のデータ収集用エレクトロニクスにつながっているバレル部の CsI(Tl) カウンター 192 本の合計の漏れ電流を測定した。実際の測定の様子を図 4.19 に示す。また、バレル部の CsI(Tl) カウンター 1 本の暗電流は約 10nA である。よって、192 本の結晶につなげられた計測アンププロトタイプで暗電流を読み出す際、出力電圧は約 2V になると予想される。PIN-PD バイアスの印加電圧は 50V とした。

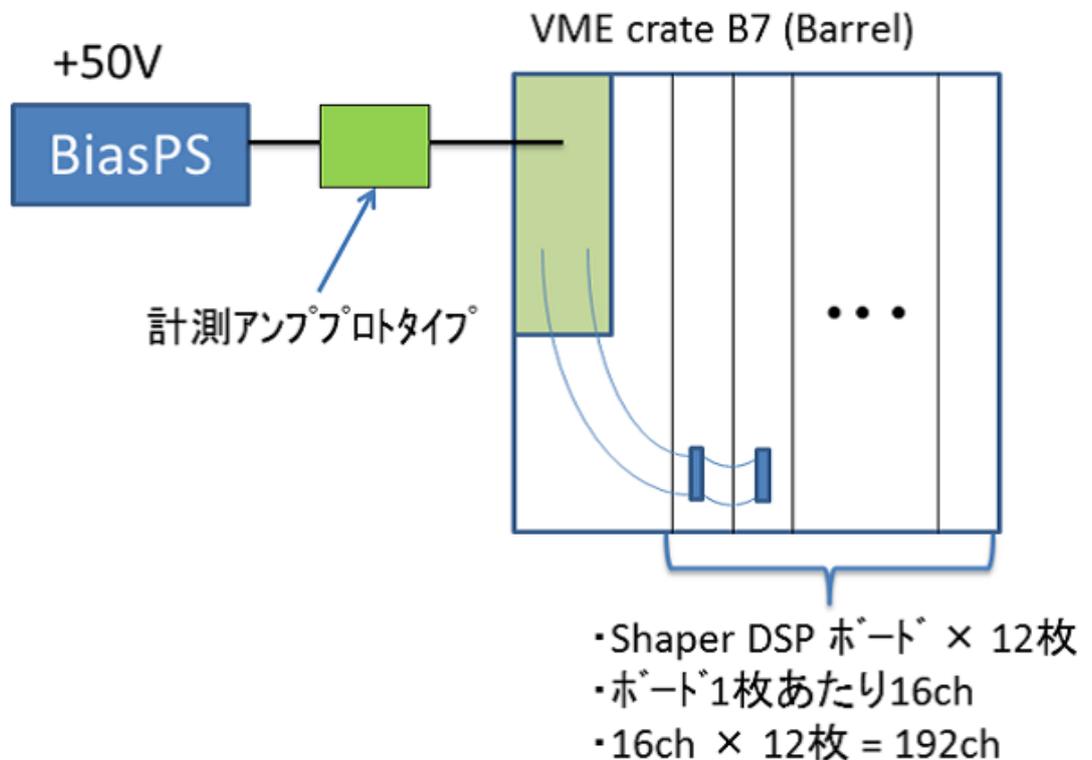


図 4.18 実機 CsI(Tl) カウンターにつないだ測定の設定アップ図

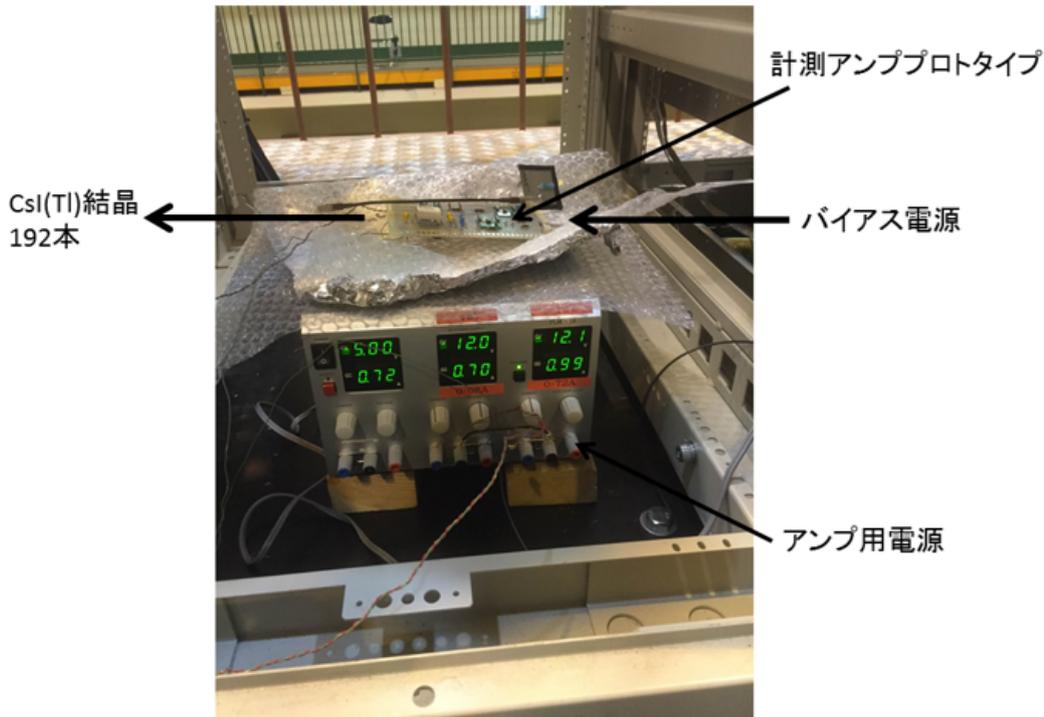


図 4.19 実機 CsI(Tl) カウンターにつないだ測定の様子

測定を行った結果、計測アンプの出力電圧は約 2.6V となり、結晶 1 本あたりの暗電流を算出すると約 13nA であることがわかった。これは、Belle 実験の記録である結晶 1 本あたりの暗電流値約 10nA と矛盾しない。よって、CsI(Tl) カウンターの PIN-PD の漏れ電流を仕様通り測定できることがわかった。

4.4.3 データ収集用エレクトロニクスへの影響の有無の確認

計測アンプを用いて PIN-PD の電流値を測定する際、バイアス電源とデータ収集用エレクトロニクスである Shaper DSP ボードの間に計測アンプを接続する。ここで、計測アンプを接続したために CsI(Tl) カウンターの信号のノイズ増加があってはならない。そこで Shaper DSP ボード 1ch のペダスタル分布からインコヒーレントノイズを算出するとともに、16ch のデータを使ってコヒーレントノイズを算出し、計測アンプありとなしの比較を行った。インコヒーレントノイズとは、各 ch に独立に寄与するノイズである。一方、コヒーレントノイズとは各 ch に同じ位相で寄与するノイズで、複数 ch の信号の和で測定したノイズから、各 ch のインコヒーレントノイズを *quadrature* に足したものを引き算して見積もる。以下でこれらについて順に詳しく述べる。

- ペDESTAL分布

計測アンプを接続した場合の Shaper DSP ボード 1ch のペDESTAL分布を図 4.20 に示す。横軸はペDESTALの平均値を引き算した ADC のチャンネル数である。これはほぼ正規分布しており、この分布の標準偏差がノイズレベルを表す。分布の標準偏差は 6.084 であり、これは計測アンプを接続しない場合と差がないことがわかった。 よって、計測アンプを接続することによるインコヒーレントノイズへの影響がないことが確かめられた。

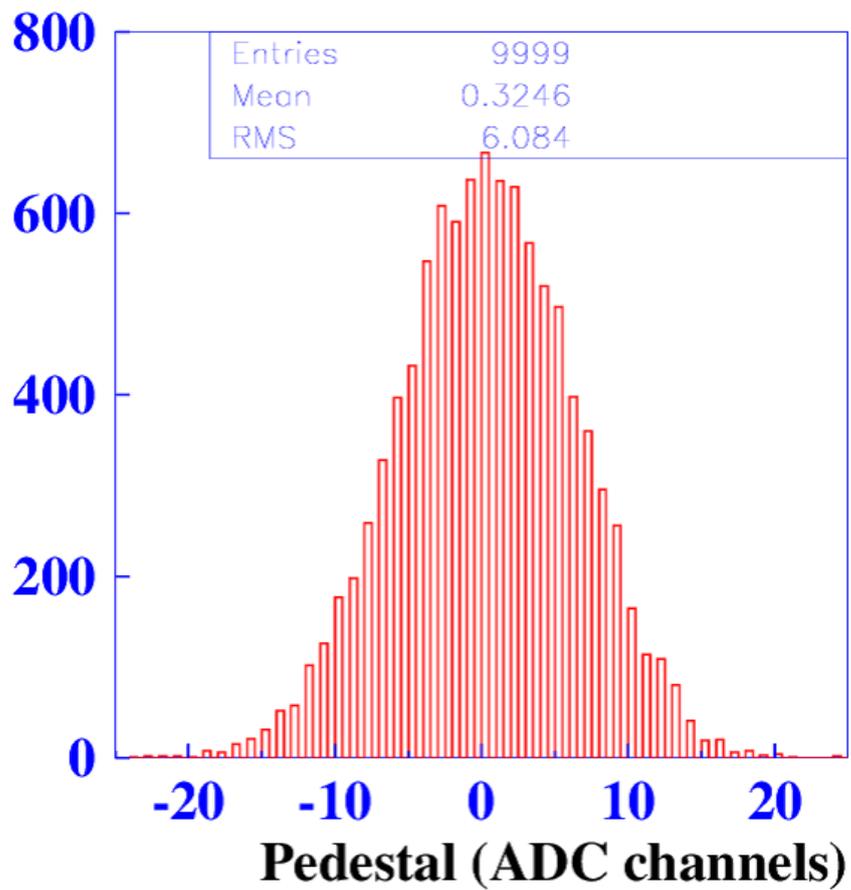


図 4.20 計測アンプを接続した場合の Shaper DSP ボード 1ch のペDESTAL分布

- コヒーレントノイズへの影響

コヒーレントノイズは複数のチャンネルに同じ位相で影響するので、複数のチャンネルで得られた信号の和をとるときリニアに効いてくる成分である。Shaper DSP ボード 1 枚には 16ch の CsI(Tl) カウンターが接続されているので、VME クレーツに挿入されている 12 枚の Shaper DSP ボードごとに算出することができる。図 4.21 は Shaper DSP ボード 1 枚ごとに算出したコヒーレントノイズを表し、横軸は Shaper DSP ボードの番号で縦軸はコヒーレントノイズを ADC のチャンネル数で表したものである。ここで、図 4.21 の赤のプロットが計測アンプなしの場合のコヒーレントノイズで、青のプロットが計測アンプありの場合のコヒーレントノイズであり、これらに差がないことがわかる。よって、計測アンプを接続することによるコヒーレントノイズへの影響がないことが確認できた。

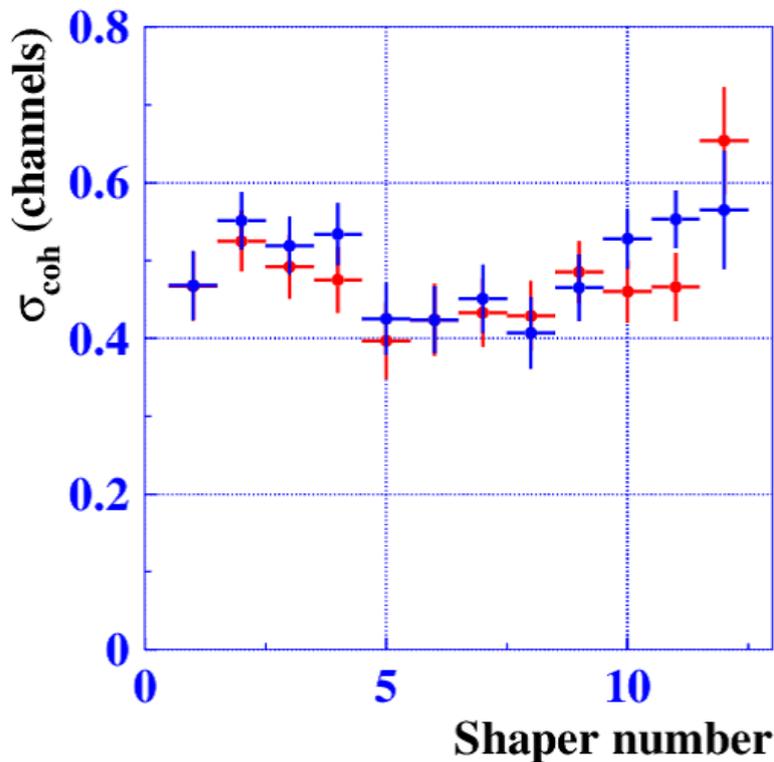


図 4.21 Shaper DSP ボード 1 枚ごとに算出したコヒーレントノイズ

これらより、計測アンプ動作試験では実施したすべての項目において正常な動作が確認でき、データ収集用エレクトロニクスのノイズへの大きな影響もないことがわかった。そこで来年度以降、この回路構成の計測アンプを量産して良いという結論に達した。

第 5 章

バイアス電源システム

PIN-PD バイアス電源システムとは、モニターシステムと同様に電磁カロリメーター用の周辺機器の一つであり、バイアス電源のリモートコントロールとその出力電圧・電流のモニターを行う。本章では、このバイアス電源システムの概要、設計、動作試験について述べる。

5.1 PIN-PD バイアス電源システムの概要

バイアス電源は松定プレジジョン PL-60 型を測定器付近に全部で 8 台設置し、そこから全部で 52 台の VME クレートにバイアス電圧を分配する。設置場所は実験中に放射線管理区域となって立ち入ることができないため、電源の ON と OFF をリモートコントロールで行う必要がある。また、同時に電源の出力電圧、電流もモニターする。

PIN-PD バイアス電源システムのブロックダイアグラムを図 5.1 に示す。PIN-PD への電源供給に用いる松定プレジジョン PL-60 型電源が背面に設けている J2 コネクタのリモート端子より、約 20 メートルのケーブルを通じてエレクトロニクスハット内にあるデータロギングシステム Agilent34980A に接続する。ここで、電源の ON/OFF 用端子は Agilent34937A スイッチモジュールにつながりリモート ON/OFF の操作を行い、電源の出力電圧と電流モニターの端子はモニターシステムでも使用する Agilent34924A マルチプレクサモジュールにつなぎ、電圧と電流を測定・記録する。

このシステムの設計と試験用の電源を用いたリモートコントロール試験を行った。これらについて次節で詳しく述べる。

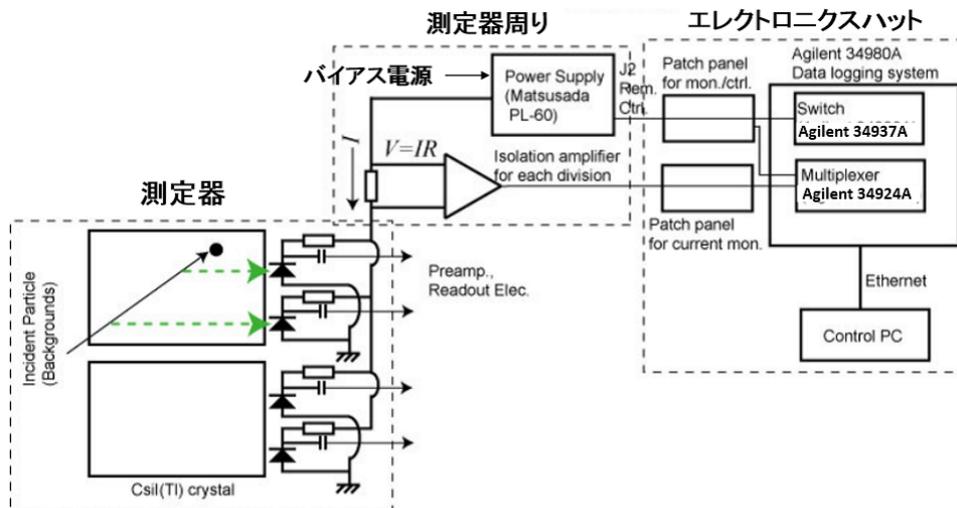


図 5.1 PIN-PD バイアス電源システムのブロックダイアグラム

5.2 ハードウェアの設計

バイアス電源として用いる松定プレジジョン PL-60 型電源が背面に装備する J2 コネクタ (MIL 規格 0.1 インチピッチ 16 ピン) 中にリモート端子があり、本システムでは外部 ON/OFF 入力と電流、電圧モニター出力に対応した端子を用いてリモートコントロールを行う。これらの端子計 6 ピン 3 対を MIL 規格 0.1 インチピッチコネクタと RJ45 コネクタを持つ特製ケーブルを介して 25m の Cat5e ケーブル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つなぐ。このパッチパネルの実物を図 5.2 に示す。

パッチパネル上部の RJ45 コネクタは入力部であり、バイアス電源からのケーブル 8 本はここにつなぎこまれる。電流、電圧モニターに対応する端子はパネル右下の 34pinMIL コネクタにまとめられる。ここから Agilent34924A マルチプレクサモジュールヘターミナルブロックを介してつなぐ。一方、外部 ON/OFF 入力に対応する端子はパネル内のリレーに接続され、その ON/OFF を制御する接点信号 8 系統分を 16pinMIL コネクタにまとめ、これを Agilent34937A スイッチモジュールヘターミナルブロックを介してつなぐ。リレーを駆動する電源は表面のバインディングポスト電極につなげたものを分配する。このパッチパネルのブロックダイアグラムを図 5.3 に示す。

電源 ON/OFF のリモートコントロールは、リレー用電源、データロガーとこれを制御する PC 上のプログラムの全てが通常動作しているときに、電源 ON となる。言い換えるとこの三つのうちのいずれか一つでも異常をきたした場合は OFF になるようにすべきである。図 5.3 で示した PL-60 型バイアス電源の外部 ON/OFF 入力に対応するリモート端子 7 番ピンとコモン の 9 番ピンの間をショートさせると電源の出力が OFF となり、オープンで出力が ON となる。そこで、この 7 番ピンと 9 番ピンをパッチパネル中のリレーのノーマルクローズ (NC) に接続する。PC 上のプログラムのスタート前、またはリ

レー用電源が入っていないときがリレーは閉じた状態であり7番ピンと9番ピンはショートしているのですが、バイアス電源はOFFである。ここで、リレーに電源電圧をかけ、PC上のプログラムがスタートしてスイッチモジュールで対応するチャンネルを閉じた場合、リレーが7番ピンと9番ピンの間をオープンとすることによってバイアス電源の出力がONになる。この機能を利用し電源 ON/OFF のリモートコントロールを行う。

8台分の電源を接続

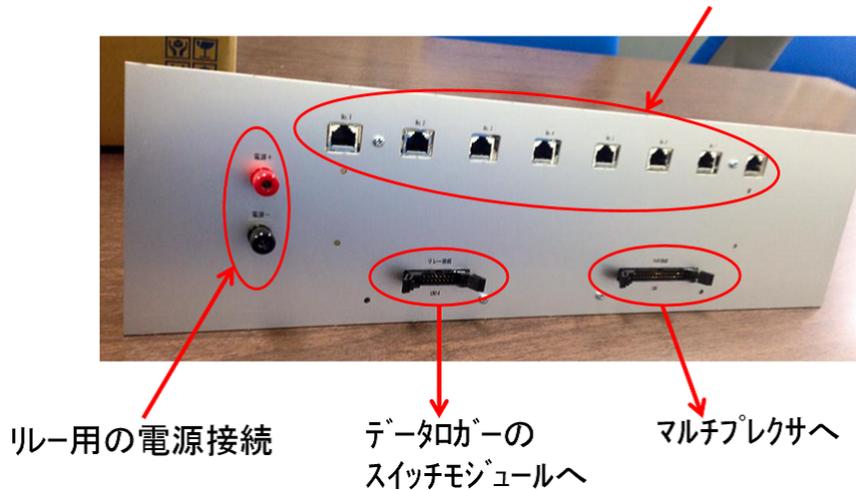


図 5.2 パッチパネルの実物

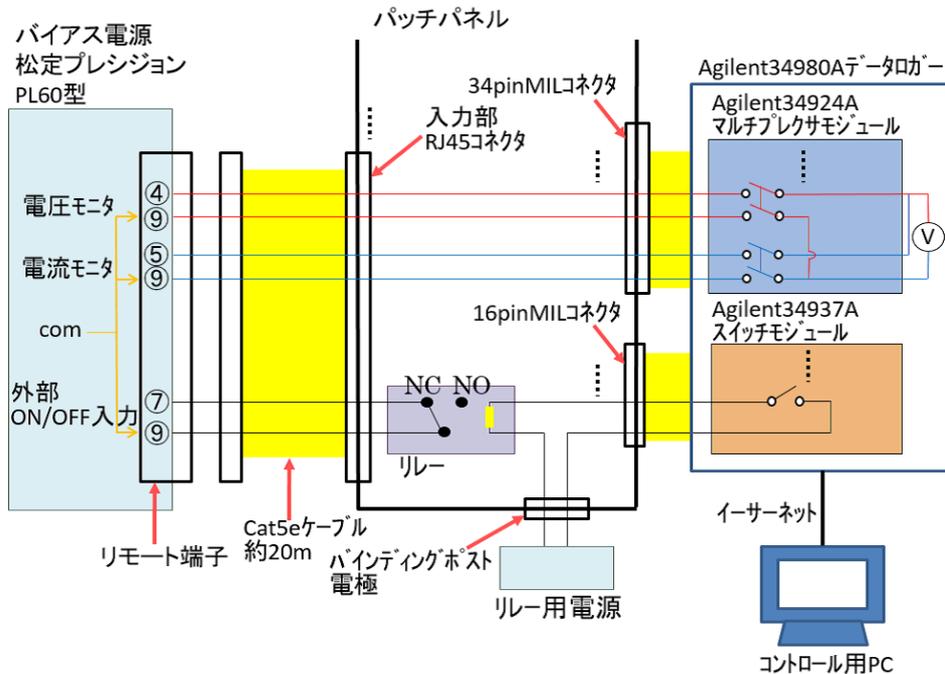


図 5.3 パッチパネルのブロックダイアグラム

5.3 電源コントロール試験

パッチパネルやケーブルの調達後、これらのハードウェアが仕様通り動作するかを確認するために、本番で使用するバイアス電源松定プレジジョン PL-60 型の予備の同型機 1 台を用いて試験した。この動作試験で行ったことは

- 電源 ON/OFF のコントロール
- 電源の電圧モニター出力の特性測定
- 電源の電流モニター出力の特性測定

である。以下、これらについて順に述べる。

5.3.1 電源 ON/OFF のコントロール、出力電圧のモニター

セットアップの様子を図 5.4 に示す。予備の PL-60 同型機である電源 1 台をパッチパネルの 8 つの入力部につなぎ、電源 ON/OFF のコントロールと出力電圧のモニターを行う操作を 8 つの入力端子についてくりかえした。このとき、電源の出力電圧は 10V きざみで 10~50V に設定した。パッチパネルの入力部は左から順番に No.1~No.8 である。

本システムで用いるデータロガー Agilent34980A は、Ethernet (Local Area Network, LAN) を介してコントロール用 PC とやりとりし、LXI/VXI11 プロトコルに基づき制御を行う。コントロール用 PC は OS として CentOS6 を採用し、言語は C++ を使用する。この動作試験では、電源 ON/OFF コントロールと出力電圧・電流モニター各々を制御するプログラムを作成し試験を行った。プログラムについては巻末の付録を参照のこと。

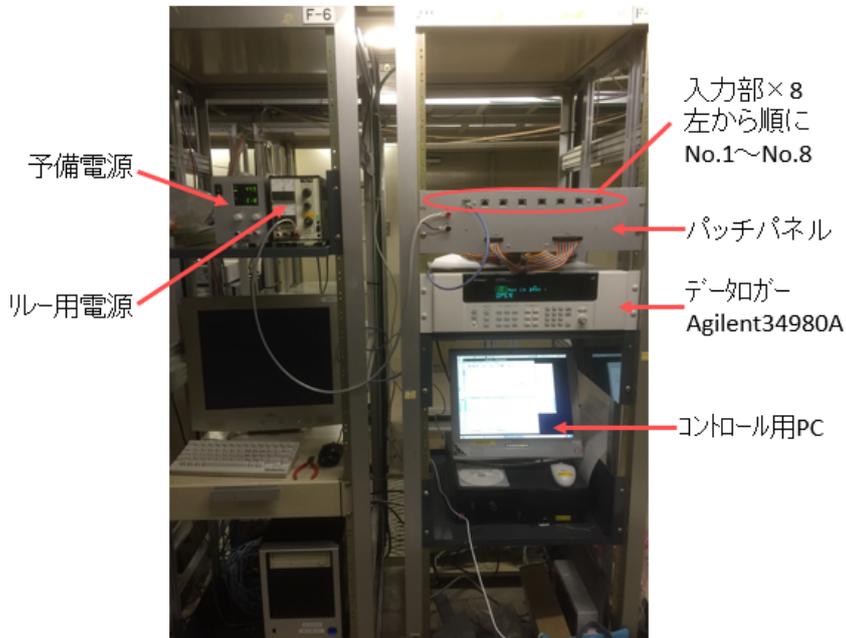


図 5.4 電源コントロール試験の様子

- 結果

電源の ON/OFF コントロールについて、入力部 No.1~No.8 の全てにおいて正常な動作が確認できた。また、電圧モニターについて No.1 の入力コネクタにつないだ際に得られたデータを図 5.5 に示す。図 5.5 の横軸は電源の出力電圧 (V) で、縦軸は電圧モニターで得られた値 (V) である。また、電源の定格出力電圧は 0~60V であり、電圧モニターではそれを 0~10V の値で出力する。つまり、電圧モニター値は出力電圧値の約 0.166 倍となることが期待される。図 5.5 の結果より、 $y=0.1661x - 0.0002$ (y は電圧モニター値、 x は出力電圧値) となり、電圧モニター値の傾きは期待値と一致するとともに切片の値も -0.0002 となり、誤差の範囲内で 0 と一致することがわかった。No.1~No.8 の入力コネクタにつないだ際に得られた傾きと切片の値を図 5.6、5.7 に示す。これらの測定においても期待されるものと無矛盾な結果となった。よって、電源の J2 コネクタ中のモニター端子を読み出すことによる電圧モニターが正常に動作していることが確認できた。

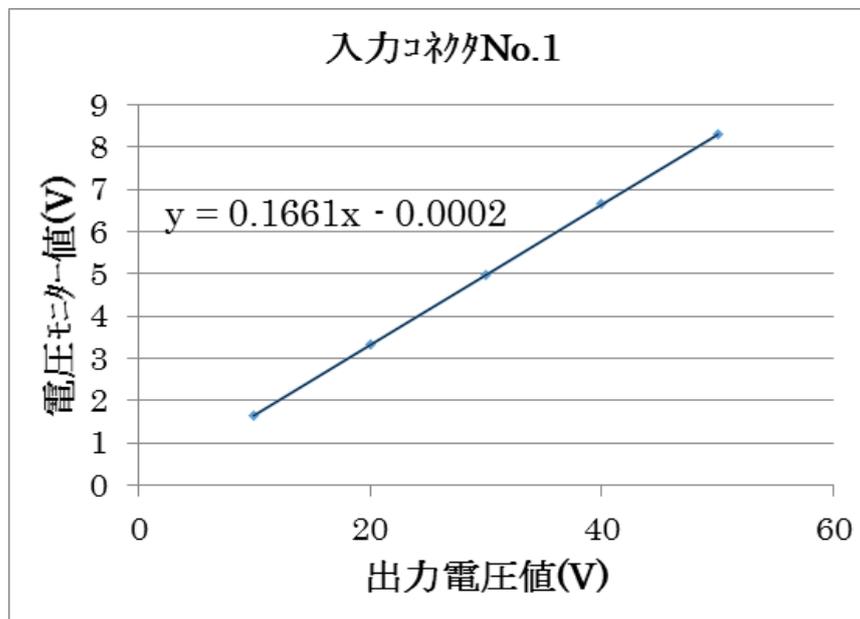


図 5.5 入力コネクタ No.1 につないだ際の測定結果

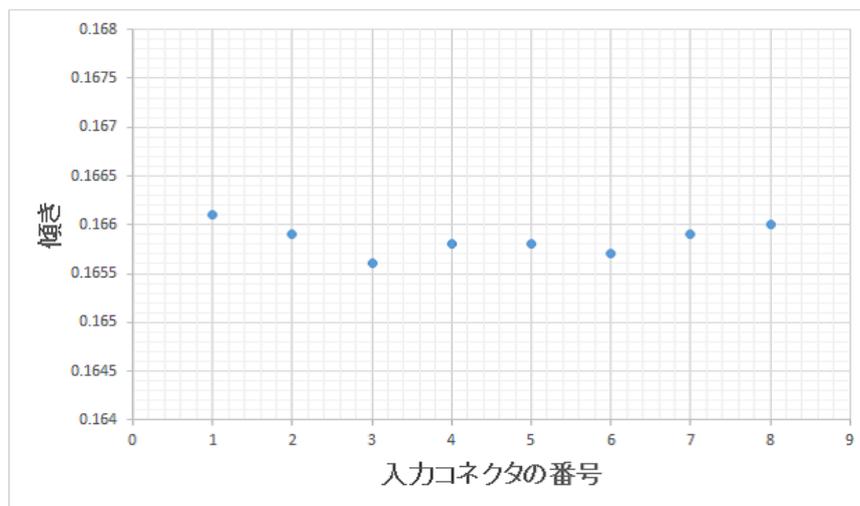


図 5.6 入力コネクタ No.1~No.8 の傾きの測定結果

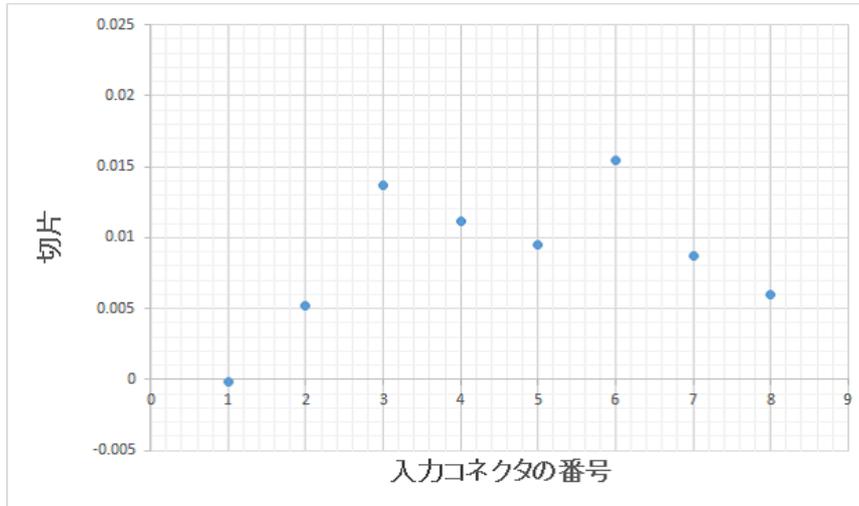


図 5.7 入力コネクタ No.1~No.8 の切片の測定結果

5.3.2 電源の電流モニター出力の特性

電源の出力側に図 5.8 のように 100Ω 抵抗を設置して出力電流値を測定し、電流のモニター端子出力を読み出す際の特性を測定した。出力電圧を $0\sim 10V$ の範囲で変化させることにより、電流値 $0\sim 0.1A$ に対応するモニター出力を測定した。その結果を図 5.9 に示す。横軸は電流値 (A) で、縦軸が電流モニター値 (V) である。ここで、出力定格電流は $0\sim 1.2A$ であり、電流モニターでは電圧モニターと同様に $0\sim 10V$ の値で出力する。測定結果より、電流値が $0.02A$ 以上の領域では $y=8.3525x- 0.0206$ (y は電流モニター値、 x は電流値) となり電流とモニター値の間に線形性が認められる。しかし、電流値が $0.02A$ 未満の領域ではその線形性が失われている。したがって、実験本番では電源からの出力電流はオーダー数 μA 程度であることから、バイアス電源の電流モニターの役割は過電流の有無を検出する目的に絞って考えるべきだということがわかった。



図 5.8 バイアス電源に抵抗をはさんだ様子

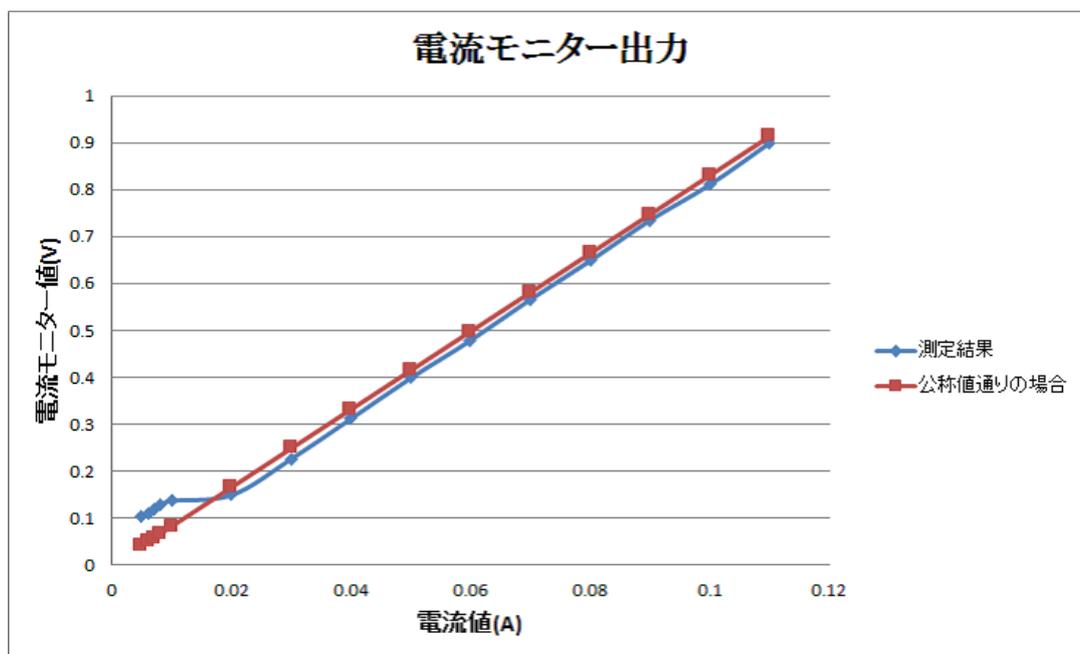


図 5.9 電流モニター出力の特性。赤線が公称値通りだったときの値で、青線が測定結果。

第 6 章

まとめ

本研究では、電磁カロリメーターの光検出器である PIN-PD の電流値モニターシステムとバイアス電源システムの構築を行った。

PIN-PD の電流値モニターシステムは CsI(Tl) 結晶の吸収線量の算出に必要であり、加速器の運転調整や CsI(Tl) 結晶の被ばくによる発光量の低下度合を確認する際に用いられる。PIN-PD の電流は、抵抗を挿入して電圧降下として検出するため、高入力インピーダンスの計測アンプを介してシングルエンドの電気信号として、データロギングシステムにより数値化する。BelleII 実験において、結晶 1 本あたりのビームバックグラウンド入射による PIN-PD の電流値の見積もりは約 0.4~4nA/結晶となり、暗電流値は現時点で 10~100nA/結晶、10 年間での暗電流増加量は 10~100nA/結晶と見積もった。電流測定点の配置は結晶の吸収線量の角度分布の検出を可能とするよう決定し、バレル部で 48 か所、エンドキャップ部で 32 か所の合計 80 か所とする計画を立てた。電圧降下ピックアップ用抵抗の値を 100k Ω とし、実験終盤での電流値増加に備え 10k Ω 抵抗も組み込んだ回路を設計した。

計測アンプのプロトタイプを用いた動作試験において、PIN-PD 暗電流を模すため、直流安定化電源と抵抗を用いた予備実験では電源電圧と計測アンプからの出力電圧が比例し、設計意図通りに動作していることを確認した。さらに、本番用の CsI(Tl) カウンター 192 本につないだ場合の測定では出力電圧が約 2.6V となり、結晶 1 本あたりの暗電流は約 13nA であることがわかった。これは Belle 実験終了時の値である結晶 1 本あたりの暗電流約 10nA と矛盾がない。よって、計測アンプの回路は必要な仕様を満たしているという結論に達した。

計測アンプを用いて PIN-PD の電流値を測定する際、バイアス電源とデータ収集用エレクトロニクスである Shaper DSP ボードの間に計測アンプを接続する。この際の Shaper DSP ボードのノイズ増加の影響の有無を調べた。方法は、計測アンプありとなしの二つの場合についてペDESTAL の ADC 分布を得て比較した。計測アンプを接続した場合のボード 1ch のペDESTAL 分布を確認したところ、標準偏差が 6.084 であった。これは計測アンプを接続しない場合のペDESTAL 分布のゆらぎと差がない。したがって計測アンプを接続することによるインコヒーレントノイズへの影響がないことが確かめられた。また、

計測アンプを複数のチャンネルにつなぐ際のコヒーレントノイズへの影響の有無も確認したところ、計測アンプありとなしの場合のコヒーレントノイズに有意な差は見られなかった。よって、データ収集用エレクトロニクスのノイズ増加は全く認められなかった。

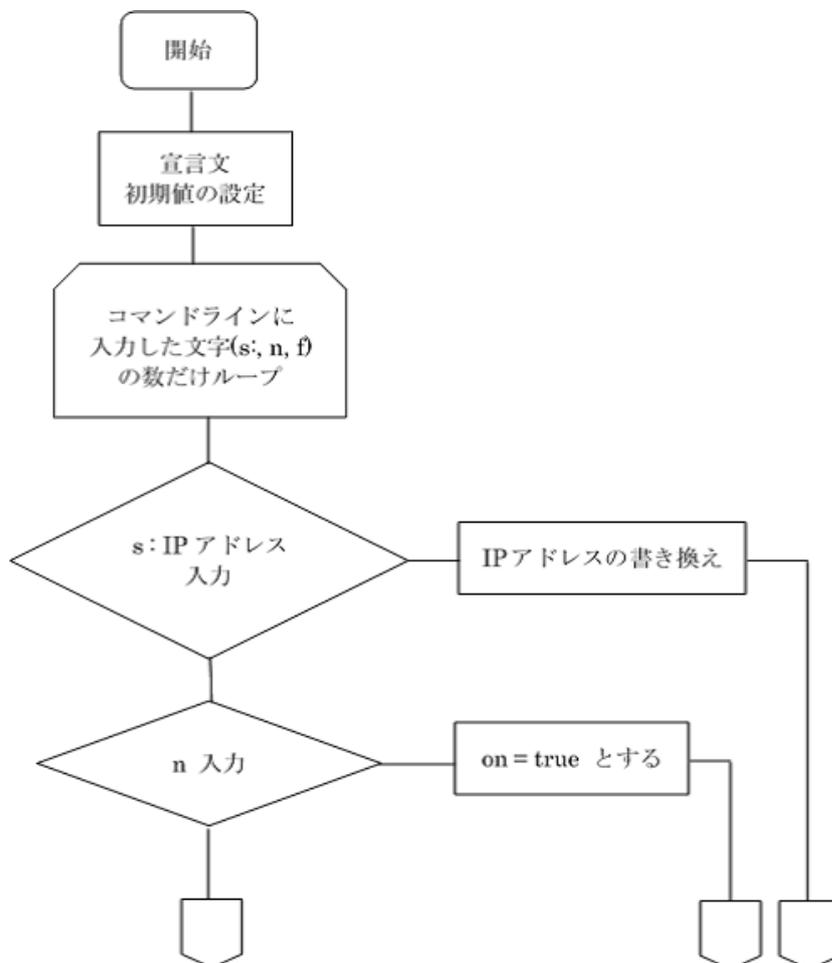
PIN-PD のバイアス電源システムは、バイアス電源のリモートコントロールや電源の出力電圧、電流のモニターを行う。本システムで用いるハードウェアは調達が済んだため、本番で使用するバイアス電源の同型機である予備電源 1 台を用いた動作試験を行った。電源のリモートコントロールは設計仕様通りの動作を確認した。また、電圧モニターも電源の出力電圧値と電圧モニター値に比例関係がなりたつことを確認した。PL-60 電源ごとの電流モニターにおいては、出力電流値が 0.02A 未満の領域はモニター値と出力電流値の間の線形性は失われていることがわかった。実験本番では電源からの出力電流はオーダー数 μA 程度であることから、PL-60 型電源の J2 コネクタから得る電流モニターの役割は過電流の検出に絞って考えるべきだということがわかった。

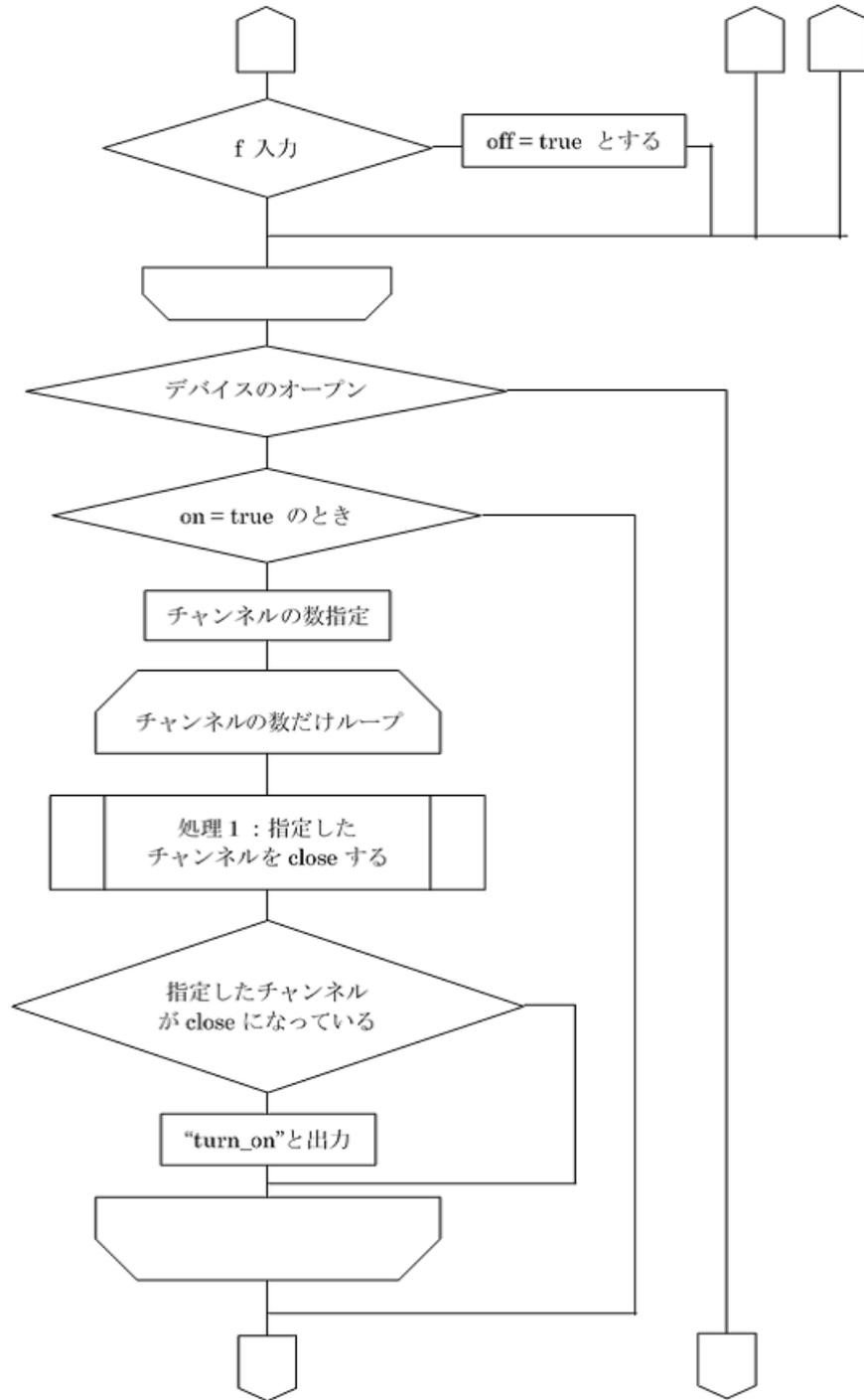
付録 A

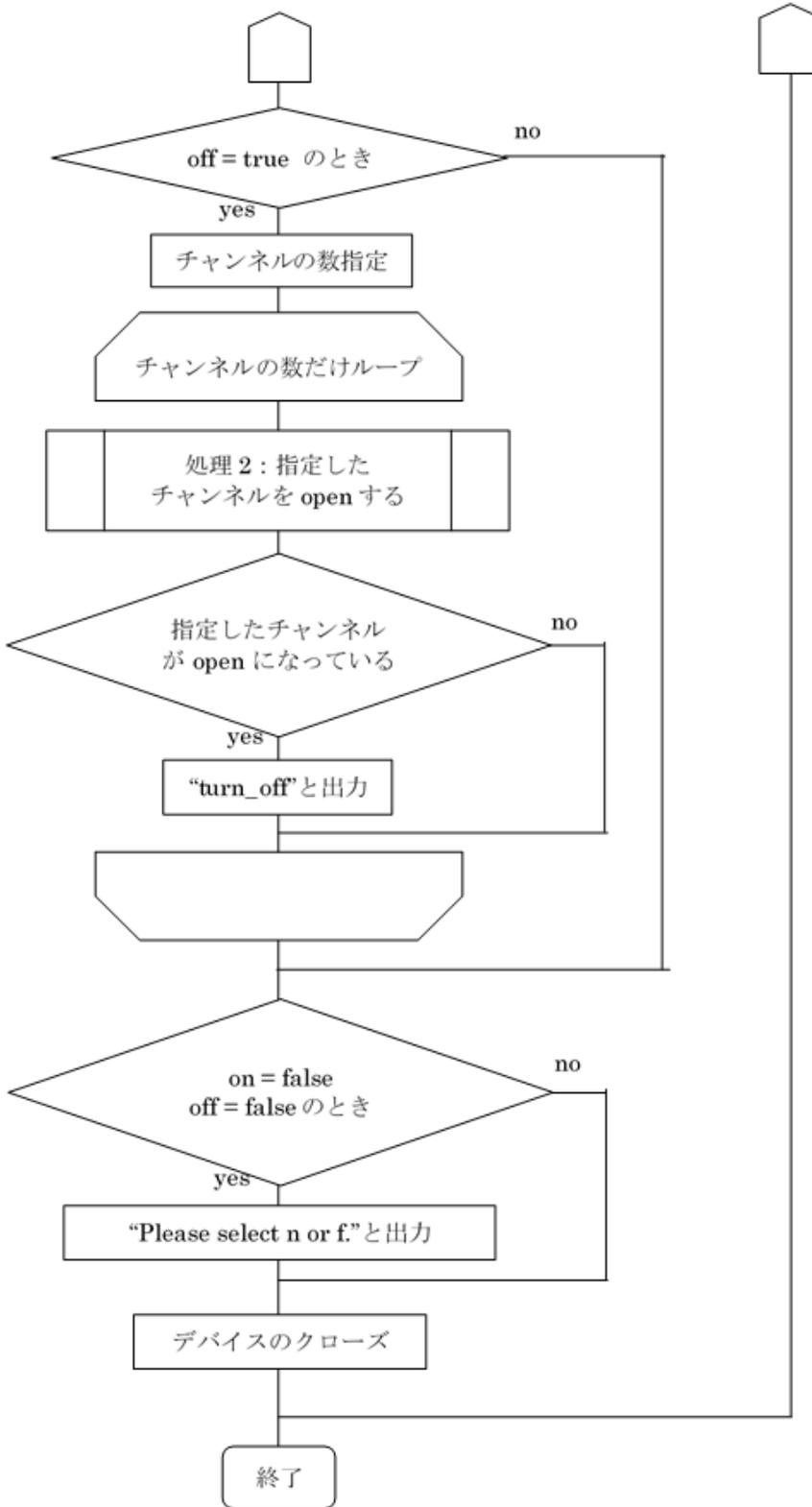
バイアス電源 ON/OFF コントロール用プログラム

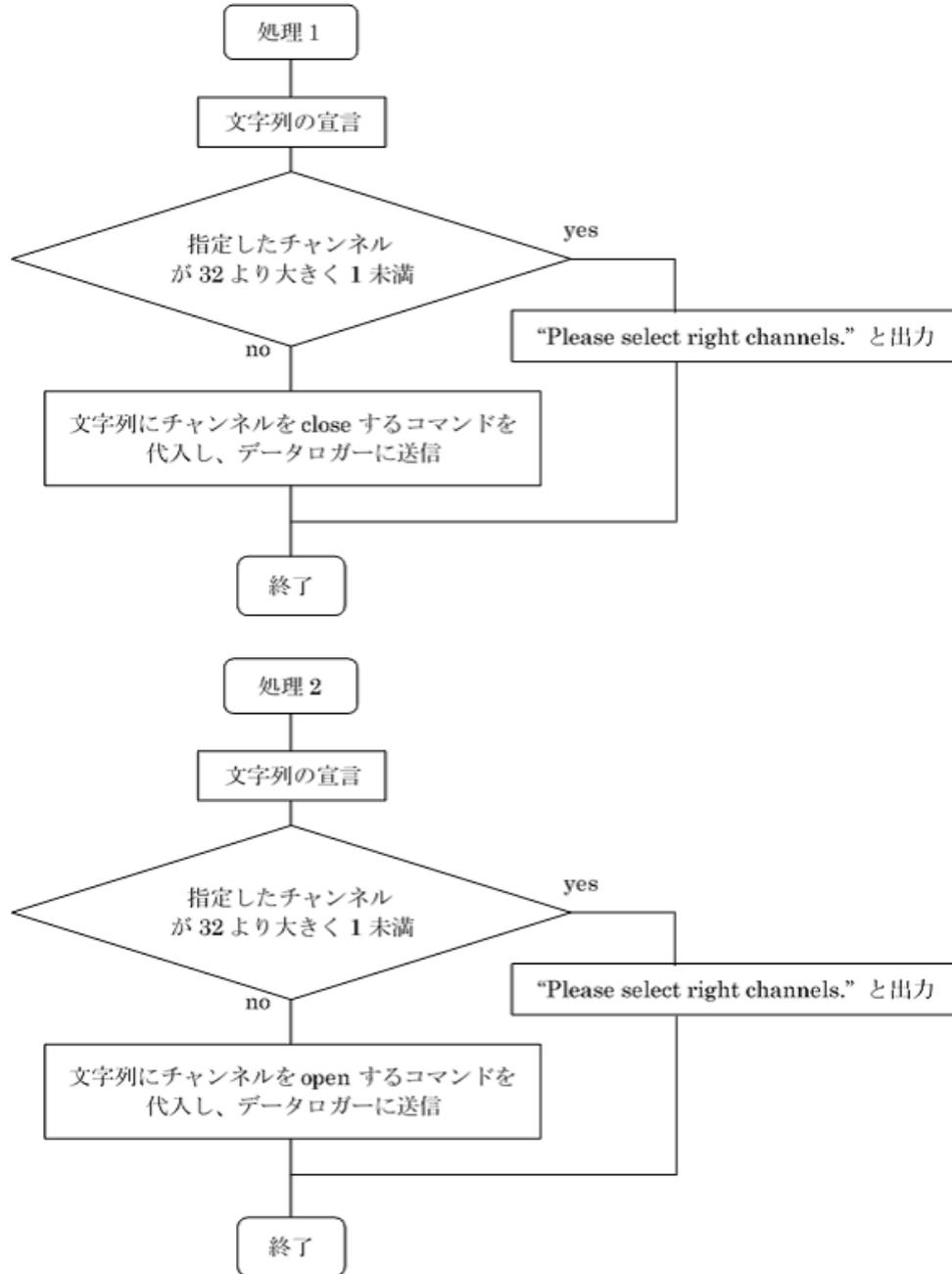
バイアス電源の ON/OFF をリモートコントロールする動作試験において使用したプログラムのフローチャート、ソースコードを以下に示す。

- フローチャート









- ソースコード

```
#include <unistd.h>
#include <math.h>
#include "vxi11_user.h"

CLINK *clink=0;
bool turn_on(int ich);
bool turn_off(int ich);

int main (int argc, char *argv[]) {

    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "192.168.11.4";
    bool on = false;
    bool off = false;

    int c;
    while ((c=getopt(argc,argv,"s:nf"))!=-1 ){
        switch(c){
            case 's': // IP address of scape
                serverIP = optarg;
                break;
            case 'n': // close channel -- turn on
                on = true;
                break;
            case 'f': // open channel -- turn off
                off = true;
                break;
                exit(0);
        }
    }

    //-- open logger
    if (vxi11_open_device(serverIP, clink) != 0){
        printf ("Couldn't open logger\n");
    }
}
```

```

        exit(1);
    }

    //-- close channel -- turn on
    if ( on ){
        int ch = 1;
        for (int i=1; i<ch+1; i++){
            bool turnon = turn_on(i);
            if (turnon){
                printf ("%2dch is closed -- turn on\n",i);
            }
        }
    }

    //-- open channel -- turn off
    else if ( off ){
        int ch = 1;
        for (int i=1; i<ch+1; i++){
            bool turnof = turn_off(i);
            if (turnof){
                printf ("%2dch is open -- turn off\n",i);
            }
        }
    }
    else {
        printf ("Please select n or f \n");
    }

    vxi11_close_device(serverIP, clink);

}

bool turn_on(int ich)
{
    //-- close channel ich
    char com[1000];
    if (ich<1 || ich>32){
        printf("%dch is not right -- Please select right channels\n",ich);
        return false;
    }
}

```

```
    }
    sprintf(com,"rout:clos (@%4.4d)",5000+ich);
    int ret = vx111_send(clink, com);
    return true;
}

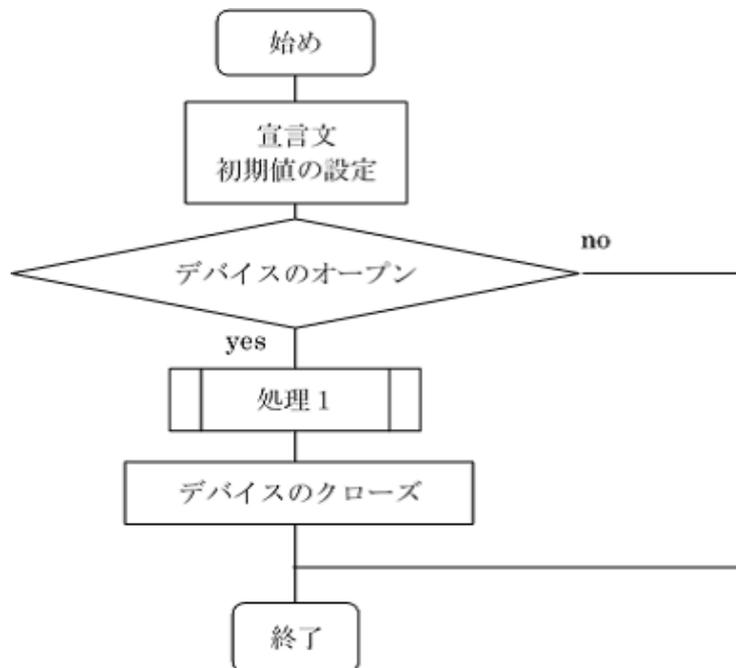
bool turn_off(int ich)
{
//-- open channel ich
    char com[1000];
    if (ich<1 || ich>32){
        printf("%dch is not right -- Please select right channels\n",ich);
        return false;
    }
    sprintf(com,"rout:open (@%4.4d)",5000+ich);
    int ret = vx111_send(clink, com);
    return true;
}
```

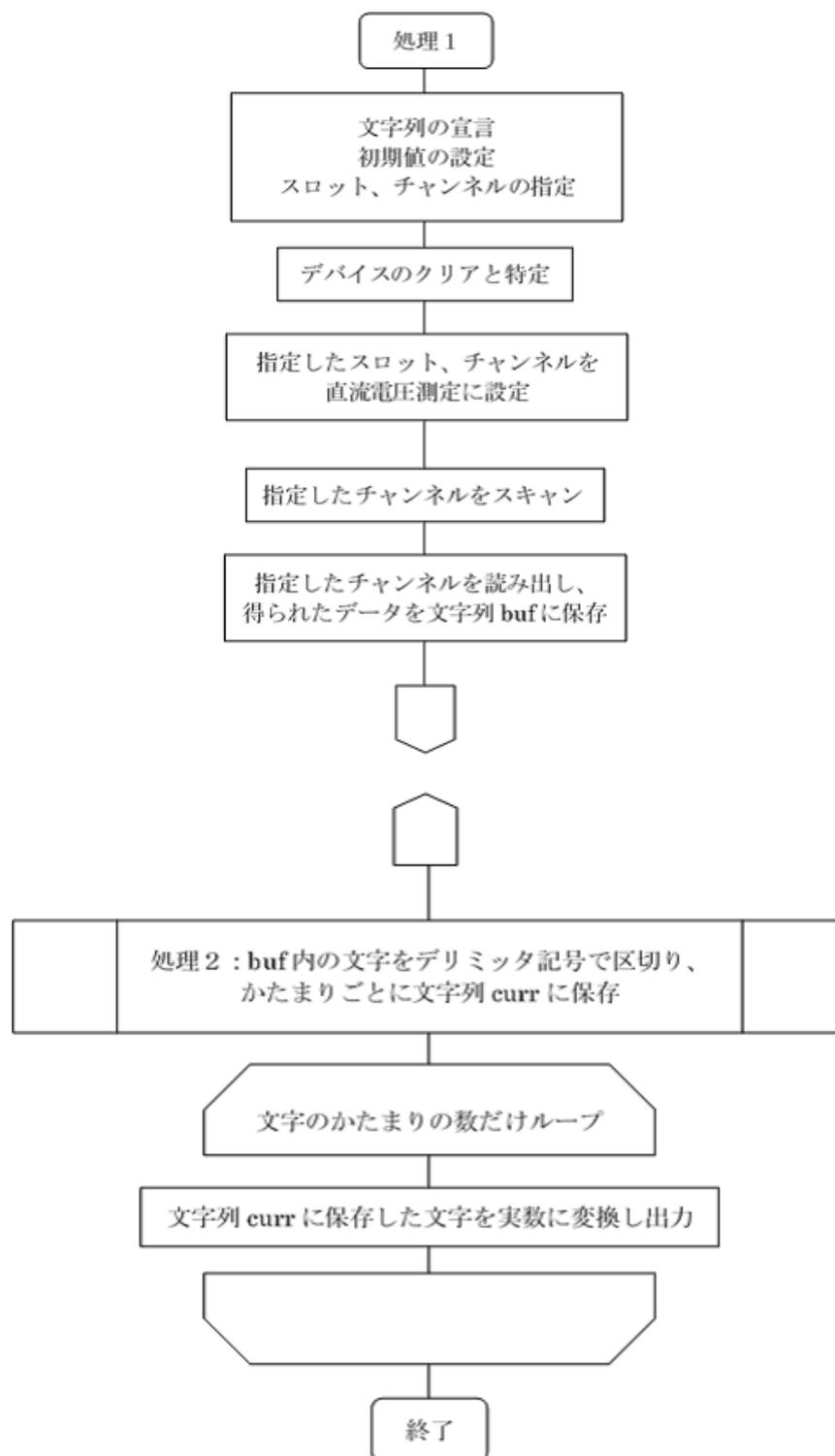

付録 B

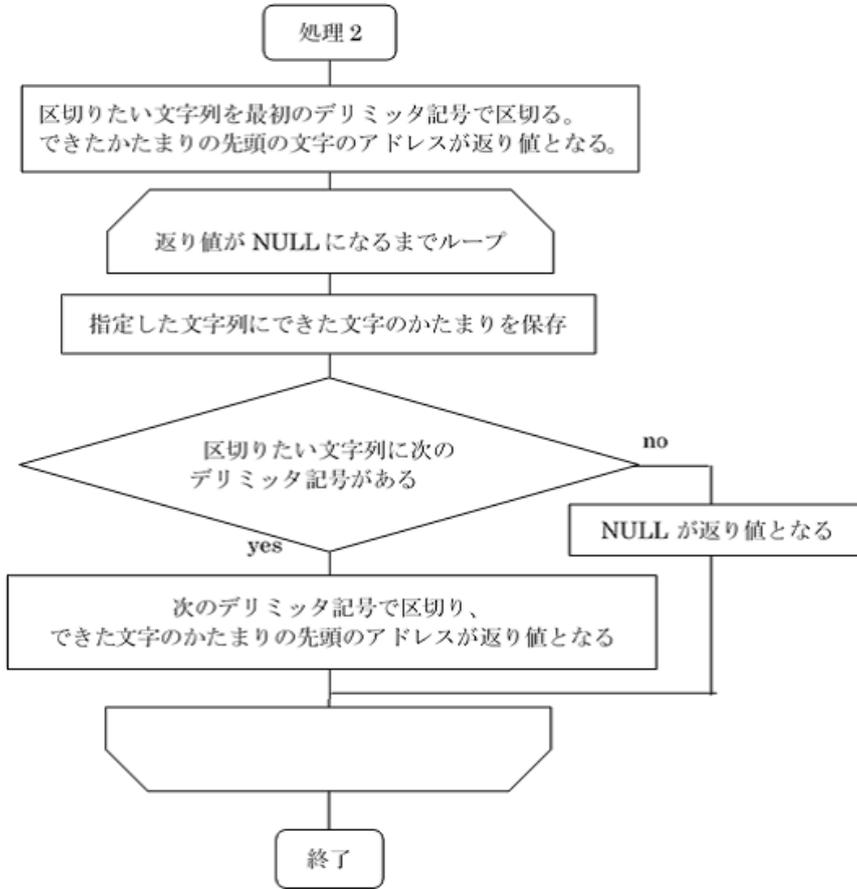
バイアス電源出力電圧・電流モニター用プログラム

バイアス電源の電圧・電流モニター出力の特性測定を行う際に使用したプログラムのフローチャートとソースコードを以下に示す。

- フローチャート







● ソースコード

```
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <math.h>
#include "vxi11_user.h"

void dl_test();

CLINK *clink=0;

int split( char *str, const char *delim, char *outlist[] ) ;

int main()
{

    clink = new CLINK;
    static char* serverIP = "192.168.11.4";

    //-- open logger
    if (vxi11_open_device(serverIP, clink) != 0){
        printf ("Couldn't open logger\n");
        exit(1);
    }

    dl_test();

    vxi11_close_device(serverIP, clink);

    return 0;
}

void dl_test(){

    const int blen = 10000;
    char buf[blen];
```

```

const int clen = 1000;
char com[clen];

int rets=0;
int retr=0;
const int sl_to_on = 1;
const int ch_to_on = 1;
const int ch2_to_on = 2;

rets = vx11_send(clink,"*cls");
rets = vx11_send(clink,"*idn?");
retr = vx11_receive(clink,buf,blen);
printf ("%s",buf);

//-- voltage

sprintf(com,"CONF:VOLT:DC (@%4.4d)",sl_to_on*1000+ch_to_on);
printf ("%s\n",com);
rets = vx11_send(clink,com);
printf ("%d\n",rets);

sprintf(com,"rout:scan (@%4.4d)",sl_to_on*1000+ch_to_on);
printf ("%s",com);
rets = vx11_send(clink,com);
printf ("%d\n",rets);

sprintf(com,"read?");
printf ("%s\n",com);
rets = vx11_send(clink,com);
memset(buf,0,blen);
retr = vx11_receive(clink,buf,blen);
float res = atof(buf);
printf ("\n>>>> %s, >%10.3e\n",buf,res);

//-- using split function
char* volt[20]; // return value
int nent = split(buf, ",", volt);
for (int i = 0 ; i<nent ; i++){

```

```

        printf ("%s > %10.3e\n",volt[i],atof(volt[i]));
    }

    //-- current

    sprintf(com,"CONF:VOLT:DC (@%4.4d)",sl_to_on*1000+ch2_to_on);
    printf ("%s\n",com);
    rets = vx11_send(clink,com);
    printf ("%d\n",rets);

    sprintf(com,"rout:scan (@%4.4d)",sl_to_on*1000+ch2_to_on);
    printf ("%s",com);
    rets = vx11_send(clink,com);
    printf ("%d\n",rets);

    sprintf(com,"read?");
    printf ("%s\n",com);
    rets = vx11_send(clink,com);
    memset(buf,0,blen);
    retr = vx11_receive(clink,buf,blen);
    float res2 = atof(buf);
    printf ("\n>>> %s, >%10.3e\n",buf,res2);

    //-- using split function
    char* curr[20]; // return value
    int nent2 = split(buf, ",", curr);
    for (int i = 0 ; i<nent2 ; i++){
        printf ("%s > %10.3e\n",curr[i],atof(curr[i]));
    }

}

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;
}
```


謝辞

本研究を行なうに当たり、お世話になりました方々に紙面を借りてお礼申し上げます。はじめに、このような素晴らしい実験に携わる機会を与えて下さった、高エネルギー物理学研究室の林井久樹教授、宮林謙吉准教授、下村真弥助教に深く感謝致します。直接ご指導いただきました宮林先生は、私の至らない所をフォローいただき、研究における疑問や質問についても丁寧に教えてくださいました。また、林井先生と下村先生には多くの有用な助言をいただきました。本当にありがとうございました。KEKの中村勇助教には、データロギングシステムのソフトウェア設計において、丁寧なご指導をいただいたことに心からお礼申し上げます。ブトケル原子核物理学研究所の上級研究員 Alexander S.Kuzmin さん、漢陽大学の海野祐士博士、Kim SungHyun さんには計測アンプの動作試験においてご協力いただき感謝しております。卒業生の田中先輩、福井先輩や同期の長谷川さん、M1の武田さん、横山さんには充実した研究生生活を送れるよう支えていただきました。最後になりましたが、この研究を行う上で、関わっていただいた方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T.Abe, "BelleII Technical Design Report"
- [2] 山内正則, "スーパー B ファクトリーで探る標準模型を超えた物理", 日本物理学会誌 Vol.63, No.1, 2008
- [3] K.Abe, "PhysicalReviewD66,071102(2002)"
- [4] K.-F.Chen, "PhysicalReviewLetters98,031802(2007)"
- [5] 飯田直子, "SperKEKB 計画進捗状況", 高エネルギーニュース Vol.29No.12010/04.05.0
- [6] H.Koiso, "Design of SuperKEKB based on the Nano-Beam Scheme"
- [7] 飯田徹, 中山浩幸, 後田裕, "BelleII 実験", 高エネルギーニュース Vol.29 No.4 2011/01.02.03
- [8] 遊佐洋右, "BelleII detector", FlavorPhysicsWorkshop2015
- [9] 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
- [10] Alex Beaulieu, Samuel de Jong, "12th Background campaign: ECL", 21st B2GM ECL Parallel
- [11] Strategic accelerator design (Available at: <http://acc-physics.kek.jp/SAD>)
- [12] Nucl.Instr.Meth. A506(2003)250-303; IEEE Transactions on Nuclear Science 53 No.1 (2006) 270-278
- [13] 中村勇, Private Communication
- [14] 前田奈津子・奈良女子大学大学院 人間文化研究科 修士論文 (2010)
- [15] 平山明子・奈良女子大学大学院 人間文化研究科 修士論文 (2012)
- [16] 峰村さつき・奈良女子大学大学院 人間文化研究科 修士論文 (2013)
- [17] 福井千尋・奈良女子大学大学院 人間文化研究科 修士論文 (2014)