修士論文

BELLE実験のための K_L^0/μ 検出器の研究

東北大学大学院理学研究科
物 理 学 専 攻

山鹿光裕

平成9年

目 次

第 1 章　序 **1**

第 2 章　BELLE 実験 **3**

2.1 BELLE 実験の物理 . . . 3

2.1.1 小林・益川行列とユニタリティー三角形 . . . 3

2.1.2 ユニタリ角の測定と BELLE 実験 . . . 5

2.2 KEK B ファクトリー (KEKB) . . . 7

2.3 BELLE 検出器 . . . 12

2.3.1 シリコン・バーテックス検出器 (SVD) . . . 15

2.3.2 中央ドリフトチェンバー (CDC) . . . 15

2.3.3 エアロジェル・チェレンコフカウンター (ACC) . . . 16

2.3.4 飛行時間差測定器 (TOF) . . . 18

2.3.5 CsI 電磁カロリーメータ (ECL) . . . 18

2.3.6 K_L^0/μ 検出器 (KLM) . . . 20

第 3 章　K_L^0/μ 検出器 (KLM) **21**

3.1 要求される性能 . . . 21

3.2 構造 . . . 22

3.3 RPC(Resistive Plate Counter) . . . 24

3.3.1 概説 . . . 24

3.3.2 動作原理 . . . 24

3.3.3 読み出しストリップ . . . 27

3.3.4 BELLE KLM 用 RPC . . . 28

3.4 スーパーレイヤー (Super Layer) . . . 30

第 4 章　KLM エンドキャップモジュールの製作 **32**

4.1 RPC の製作 . . . 32

4.2 RPC の性能評価 . . . 36

4.2.1 測定値の定義 . . . 36

4.2.2 宇宙線による動作テスト . . . 38

4.2.3 暗電流値による評価 . . . 41

4.2.4 まとめ . . . 42

4.3 モジュールの組み立て . . . 43
4.3.1 RPC の組み込み . . . 43
4.3.2 膨らみ度、ガス漏れ率の測定 . . . 44
4.3.3 導通チェック . . . 44
4.4 製作数 . . . 45
4.5 長期動作テスト . . . 46

第 5 章 KEK テストベンチでの測定 48
5.1 搬送 . . . 48
5.2 測定システム . . . 48
5.2.1 配置 . . . 48
5.2.2 ガス系 . . . 49
5.2.3 高電圧系 . . . 53
5.2.4 データ収集系 . . . 54
5.3 解析方法 . . . 57
5.3.1 オフライン解析 . . . 57
5.3.2 トラッキング . . . 57
5.3.3 検出効率 . . . 59
5.3.4 ヒットストリップ数 . . . 59
5.4 測定 . . . 59
5.4.1 ガス漏れと膨らみ度のチェック . . . 59
5.4.2 高電圧チェック . . . 61
5.4.3 測定電圧の決定 . . . 61
5.5 結果 . . . 63
5.5.1 宇宙線測定による動作テストの結果 . . . 63
5.5.2 問題の見付かったモジュールの例 . . . 63
5.5.3 スーパーレイヤーの効果 . . . 64
5.5.4 θ ストリップと ϕ ストリップのヒット数の差 . . . 64
5.5.5 電極の違いによる動作性能の差 . . . 65
5.5.6 シングルレイヤーとスーパーレイヤーでのヒットストリップ数の差 . . . 65
5.5.7 印加電圧とディスクリミネータの閾値とヒットストリップ数の関係 . . . 66
5.6 モジュールの評価 . . . 66

第 6 章 BELLE エンドヨークでの測定 81
6.1 インストール . . . 81
6.2 測定システム . . . 82
6.3 測定及び結果 . . . 84
6.3.1 ガス漏れ及び膨らみ度のチェック . . . 84
6.3.2 絶縁チェック . . . 84

6.3.3 宇宙線の測定 85
6.4 見付かった問題点 85
6.4.1 気温低下によるガス混合比の変動 85
6.4.2 暗電流増大による動作不良 87

第 7 章 まとめと今後の課題 **90**

付録 A RPC への非可燃性ガスの使用可能性 **92**
A.1 序 92
A.2 テストしたガス混合比 92
A.3 測定結果 92
A.3.1 検出効率、暗電流、シングルカウンレート、時間分解能 92
A.3.2 パルスの広がり 93
A.3.3 結論 93

付録 B $B^0 - \bar{B}^0$ 混合と CP 非対称 **98**
B.1 $B^0 - \bar{B}^0$ の時間発展 98
B.2 CP 非対称とユニタリー角 100

図目次

2.1 ユニタリティー三角形 4
2.2 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合のダイアグラム 5
2.3 $B^0 \to J/\psi K_L$ の崩壊様式 6
2.4 KEK B ファクトリー (KEKB) 7
2.5 CP 非対称度の測定に必要な積分ルミノシティー 8
2.6 クラブ交差 (crab crossing) 10
2.7 座標系の定義 10
2.8 BELLE 検出器 12
2.9 BELLE 検出器の構造断面図 13
2.10 シリコン・バーテックス検出器 (SVD) 15
2.11 中央ドリフトチェンバー (CDC) 16
2.12 バレル ACC 17
2.13 エンドキャップ ACC 17
2.14 飛行時間差測定器 (TOF) 18
2.15 CsI 電磁カロリーメータ (ECL) 19

3.1 KLM 検出器概観図 23
3.2 KLM エンドキャップモジュールの形状 23
3.3 KLM エンドキャップモジュールの読み出しストリップ 23
3.4 RPC の動作原理 25
3.5 discharge cell の等価回路 26
3.6 読み出しストリップの等価回路 28
3.7 RPC の構造図 28
3.8 スーパーレイヤーの断面図 31
3.9 ガラス製 RPC の典型的シグナル 31

4.1 KLM エンドキャップモジュール用 RPC 33
4.2 ガス漏れ、膨らみ度のテスト方法 34
4.3 プラトー電圧の求め方 37
4.4 RPC 測定のセッティング 39
4.5 RPC データ収集システム 39

4.6 トラッキングしたイベントの例 40
4.7 高電圧トレーニングが進まなかった RPC10 枚のストリップ毎の検出効率の例 . 42
4.8 KLM エンドキャップモジュールの構造 43
4.9 製作時点でのモジュールの膨らみ度 (r-value)、ガス漏れ率の分布 44
4.10 RPC 及びモジュールの生産数の推移 45
4.11 長期テストにおける検出効率の時間変化 47
4.12 長期テストにおけるシングルカウントレートの時間変化 47
4.13 長期テストにおける暗電流の時間変化 47

5.1 通常車とエアサス車の衝撃吸収の違い 49
5.2 テストベンチのモジュールの配置 49
5.3 ガス分配系 50
5.4 モジュール内のガス置換の様子 52
5.5 排気系 54
5.6 高電圧モニターパネル 55
5.7 データ収集系 56
5.8 Time Multiplex & Pipeline scheme 57
5.9 トラッキングしたイベントの例 58
5.10 膨らみ度、ガス漏れ率の分布 60
5.11 スタンダードガス使用時のトップレイヤー、ボトムレイヤーでの測定による各層の 5 RPC のプラトー曲線 62
5.12 非可燃性ガス使用時のトップレイヤー、ボトムレイヤーでの測定による各層の 5 RPC のプラトー曲線 62
5.13 宇宙線測定をしたモジュールの検出効率の分布 69
5.14 トップレイヤー動作時のヒットストリップ数の分布 69
5.15 ボトムレイヤー動作時のヒットストリップ数の分布 69
5.16 検出効率の場所依存性のマップの例 70
5.17 トップレイヤー動作時のヒットストリップ数の場所依存性のマップの例 71
5.18 ボトムレイヤー動作時のヒットストリップ数の場所依存性のマップの例 71
5.19 不感領域 (dead spot) のあるモジュールのトップ・ボトム・スーパーレイヤーでの測定による検出効率のマップ 72
5.20 θ ストリップに接触のあるモジュールのヒットストリップ数 (θ) のマップ . . . 73
5.21 スーパーレイヤーでの測定における検出効率の場所依存性のマップ 74
5.22 トップ、ボトム、スーパーレイヤーでの測定によるプラトー曲線 (スタンダードガス) 74
5.23 点電荷が読み出しストリップに及ぼす電場 75
5.24 点電荷により読み出しストリップに誘導される電荷分布の広がり 75
5.25 電極の種類毎に分類した検出効率 (平均値) の分布 76

5.26 電極の種類毎に分類したヒットストリップ数 (θ)(平均値) の分布 77
5.27 電極の種類毎に分類したヒットストリップ数 (ϕ)(平均値) の分布 78
5.28 電極と読み出しストリップ間の等価回路 79
5.29 電極に現れる電圧変化の広がり 79
5.30 印加電圧と検出効率及びヒットストリップ数の関係 (ディスクリミネータの閾値 $50mV$) 80
5.31 ディスクリミネータの閾値の値と検出効率及びヒットストリップ数の関係 (HV= $4.1kV/mm$) 80

6.1 エンドヨークへのインストール作業 83
6.2 エンドヨークへのモジュールのインストール方法 83
6.3 インストールしたモジュールの膨らみ度とガス漏れ率 84
6.4 エンドヨークでのモジュールの宇宙線テスト (1) 86
6.5 エンドヨークでのモジュールの宇宙線テスト (2) 86
6.6 KLM バレルモジュールの電流値の推移 87
6.7 エンドヨークにインストールしたモジュールの電流値の推移 89

A.1 ブタン 25%、12%、8%、4%の各混合比におけるプラトー曲線 94
A.2 検出効率、電流、シングルカウンレート、時間分解能 95
A.3 信号電荷分布の例 96
A.4 全体に占める第一のピークの割合 97
A.5 信号電荷の平均値 97
A.6 ヒットストリップ数の平均値 97

表目次

2.1 KEKB の主要パラメータ 11

5.1 検出効率によるモジュール評価の結果 68
5.2 ヒットストリップ数によるモジュール評価の結果 68
5.3 モジュール評価の総合結果 68

第1章

序

現在の物理学の □ の一つに

> この宇宙には物質 (陽子と電子) ばかりが見つかり、反物質 (反陽子と陽電子) はほとんど観測されていない。なぜ宇宙は均整がとれていないのだろうか？

という問題がある。この問題を解くための鍵のひとつが「CP 非保存」である。CP 非保存とは、粒子と反粒子の間の、電荷 (Charge) と空間 (Parity) の同時反転に対する対称性・同等性が破れていることである。CP 非保存の現象自身は、1964 年に中性 K 中間子の崩壊を通じて発見されており、その原因の一つと考えられているものが「クォークの混合」である。

1973 年に小林、益川によって、クォークが 3 世代ありそれらに世代混合があれば、CP 不変性が破れることが予言された。当時は、まだ 3 種類のクォーク (u、d、s) しか知られていなかったが、その後 SLAC 及び BNL において c クォークが、Fermilab において b クォークが、CDF において t クォークが、次々に発見されたことから、小林・益川の理論 (KM 理論) への関心が高まり、現在では CP 非保存は標準模型の本質的な部分であると考えられるようになってきた。

1980 年、三田らは、KM 理論において、B 中間子系の CP の破れが、K 中間子や D 中間子に比較し非常に大きく現れることを指摘した。また、最近の実験から、b クォークが長い寿命を持つことや $B\bar{B}$ の混合が大きいことが観測された。すなわち、CP 非対称度の小さな K 中間子や D 中間子では不可能であった CP 非保存のパラメータ決定が、B 中間子系では可能になり、KM 理論の検証ができることになる。こうして、CP 非保存の観測、標準理論の検証に B 中間子を用いることが適当であることがわかってきた。

このため、B 中間子を使って CP 非保存の観測を行なう実験が世界各地で計画若しくは進行中である。この中に、日本の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の B ファクトリーがある。これは、非対称エネルギーの電子-陽電子衝突型加速器により大きな運動量をもった B 中間子を大量に生成し、その崩壊を調べて KM 理論の CP 非保存のパラメータ (KM 行列の複素数因子) を測定し、理論の検証をすることを主目的としており、1998 年の実験開始を目指して現在加速器 (KEKB) および粒子検出器 (BELLE) の建設が進められている。

KEK B ファクトリー実験は国際共同実験であり、10ヶ国より約 50 の研究機関から多数の研究者が参加している。東北大学はこの実験に KLM グループとして参加し、青森大学、大阪市立大学、KEK、東北学院大学、バージニア工科大学、プリンストン大学とともに、K^0_L粒子/μ粒子 検出器 (KLM) の開発研究及び製作を担当しており、そのための開発設計をハード面、ソ

フト面ともに行なっている。K_L^0 粒子の検出は、CP 非保存の測定が可能な $B^0 \to J/\psi K_L^0$ の崩壊モードの検出において不可欠であり、また μ 粒子の検出は $B^0(\bar{B}^0)$ の同定や π 中間子との識別、その他 B 中間子の希崩壊等の物理過程の研究についても重要な役割を持っている。

KLM は、ソレノイドコイルの外側に配置され、リターンヨークを兼ねた $47mm$ の鉄の層と $44mm$ の薄い検出器層とを交互に配置した構造をしている。検出器部には、RPC(Resistive Plate Counter) を使用する。特徴としては、高抵抗極板にガラスを用いた RPC であること、及び、RPC2 層を一組として検出器 1 層のモジュールに組み込む、いわゆるスーパーレイヤーでの運用ということがあげられる。

BELLE 検出器のための RPC は、エンドキャップ KLM の分が東北大学 □ 箱写真解析施設において株式会社本田精機により大量生産され、1997 年 10 月にその製作が完了した。KLM モジュールへの組み込みも並行して行なわれていたが、組み込み後の動作テストを東北大学で行なうことが難しいことや、KEK への搬送中の破損等の懸念もあったため、KEK への搬送後に KLM モジュールの動作テストを行なうことになった。

本研究では、こうして製作され KEK に搬入された KLM モジュールについて、検出効率等の動作特性を測定し、その性能が KLM としての要求を満たしていることを検証した。さらに BELLE 検出器へのインストールも一部行なわれたことから、これらのモジュールについても、インストール後のチェックを兼ねて測定を行なった。

本論文の構成は、

- 第 2 章 BELLE 実験
- 第 3 章 K_L^0/μ 検出器 (KLM)
- 第 4 章 KLM エンドキャップモジュールの製作
- 第 5 章 KEK テストベンチでの測定
- 第 6 章 BELLE エンドヨークでの測定
- 第 7 章 まとめと今後の課題

となっている。

第2章

BELLE実験

2.1 BELLE実験の物理

2.1.1 小林・益川行列とユニタリティー三角形

標準理論では、CPの破れを小林・益川行列を用いて説明している。クォークの質量の固有状態を $u, d, ..., t, b$ で表すと、弱い相互作用においてクォークの各世代は

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

という二重項での結合を通じて相互作用する。ここで、d', s', b' は d, s, b の混合した状態で

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

と関係づけられる。この 3×3 行列 V を小林-益川行列 (KM 行列) という。小林・益川の理論 (KM 理論) において、CP 非対称性は KM 行列が複素数因子を持つことにより説明される。

KM 行列 V を、$\lambda = \sin\theta_c$ (θ_c : Cabbibo 角) で展開し λ^3 までとった Wolfenstein 表示で表すと [1]

$$V = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & \lambda^3 A(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda^2 A \\ \lambda^3 A(1 - \rho - i\eta) & \lambda^2 A & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4) \tag{2.3}$$

と、4 つの実数のパラメータ λ、A、ρ、η で表すことができる。これらの値のうち、λ についてはストレンジ粒子の崩壊 [2][3] や原子核の β 崩壊 [4]、チャーム粒子の生成 [5][6] などから

$$\lambda = 0.221 \pm 0.002 \tag{2.4}$$

と良くわかっている。A は $Br(b \to cl\nu)$ の測定 [7] から

$$A = 0.839 \pm 0.041 \pm 0.002 \tag{2.5}$$

の値が得られている。

複素成分に関係する残りの ρ、η についてはその関係式しかわかっていない。$b \to u$ 及び $b \to c$ 遷移より

$$|V_{ub}/V_{cb}| = 0.08 \pm 0.03 \tag{2.6}$$

すなわち

$$\sqrt{\rho^2 + \eta^2} = 0.36 \pm 0.14 \tag{2.7}$$

という値が得られている [8]。

KM 行列はユニタリ行列なので、

$$\sum_{i=u,c,t} V_{i\alpha} V_{i\beta}^* = \delta_{\alpha\beta} \tag{2.8}$$

が成り立つ。式 (2.8) のうち、複素数因子を持つ V_{ub}、V_{td} を含む式

$$V_{td} V_{tb}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{ud} V_{ub}^* = 0 \tag{2.9}$$

により、図 2.1 のように複素平面上に閉じた三角形を描ける。これをユニタリティー三角形といい、内角の大きさが CP 非保存の効果の大きさを表している。これらの内角はユニタリ角と呼ばれ、

$$\phi_1 \equiv \arg\left(\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{td} V_{tb}^*}\right), \phi_2 \equiv \arg\left(\frac{V_{ud} V_{ub}^*}{V_{td} V_{tb}^*}\right), \phi_3 \equiv \arg\left(\frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{ud} V_{ub}^*}\right) \tag{2.10}$$

で定義される。

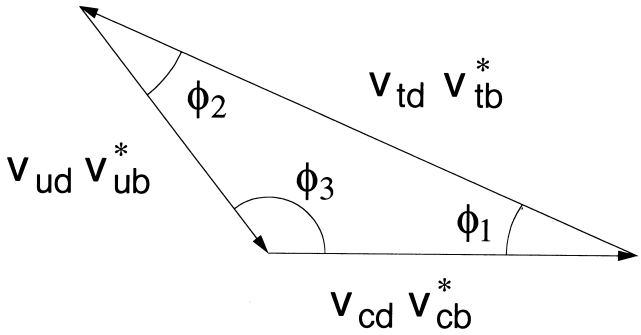


図 2.1: ユニタリティー三角形

図 2.1 の三角形において各辺の長さや各角度の大きさが実験で測定できれば、ρ、η が決定できる。CP 非保存が KM 理論に従っているならば、実験によって得られたこれらの値を使って正しく閉じたユニタリティー三角形を再構成することができるはずである。そうならなかったとき、それは CP 非保存が標準理論の範囲をこえた物理現象であることを意味する。そのとき、KM 理論をこえた新しい理論が要求されることになる。

KEK BELLE 実験は、B 中間子を用いてユニタリティー三角形の内角および各辺を独立に測定することにより、ユニタリティー三角形を規定して CP 非保存の検証をし、KM 行列の各成分を決定することを第一の目標としている。

2.1.2 ユニタリ角の測定と BELLE 実験

$B^0 - \bar{B}^0$ 中間子系は $K^0 - \bar{K}^0$ 中間子系同様、図 2.2 の過程を介して混合する ($B^0 - \bar{B}^0$ 混合)。故に実際に観測される B 中間子は、

$$
\begin{aligned}
|B^0(t)\rangle &= e^{-i(M-\frac{i}{2}\Gamma)t}\Big\{\cos(\Delta Mt/2)|B^0\rangle + i\frac{q}{p}\sin(\Delta Mt/2)|\bar{B}^0\rangle\Big\}, \\
|\bar{B}^0(t)\rangle &= e^{-i(M-\frac{i}{2}\Gamma)t}\Big\{i\frac{p}{q}\sin(\Delta Mt/2)|B^0\rangle + \cos(\Delta Mt/2)|\bar{B}^0\rangle\Big\},
\end{aligned}
$$

と、$B^0 - \bar{B}^0$ の時間発展で表される (付録 B、式 B.3 参照)。ここで M 及び ΔM は、B 中間子の質量固有状態の質量 M_H、M_L を用いて

$$
M = \frac{M_H + M_L}{2}, \quad \Delta M = M_H - M_L,
$$

であり、Γ はその崩壊幅 (2 つの質量固有状態間で差がないと仮定)、p、q は $B^0 - \bar{B}^0$ 混合の大きさを表す。

$\Upsilon(4S)$ から生成された B 中間子が CP の固有状態 f_{CP} に崩壊するとき、時間に依存する CP 非対称度 $A_f(t)$ をいう量を用いて角度 ϕ_{CP} が測定できる。

$$
A_{f_{CP}}(t) = \frac{\Gamma(B^0(t) \to f_{CP}) - \Gamma(\bar{B}^0(t) \to f_{CP})}{\Gamma(B^0(t) \to f_{CP}) + \Gamma(\bar{B}^0(t) \to f_{CP})} = \sin 2\phi_{CP} \cdot \sin(\Delta m \cdot t) \tag{2.11}
$$

Δm は B^0 の 2 つの質量固有状態での質量差、t は B^0 と $\bar{B}^0$ の崩壊の時間差である。角度 ϕ_{CP} は、$B^0 - \bar{B}^0$ 混合の確率振幅と $B^0 \to f_{CP}$ 崩壊の確率振幅の位相差であり、これはユニタリティー三角形の内角と関係付けられる。すなわち、適当な崩壊様式についてその崩壊の時間発展を観測すれば、ユニタリ角を測定できる。重要なのは、f という崩壊モードのイベント再構成はもちろんのこと、t の測定が必要であること、f が B^0 と $\bar{B}^0$ のどちらから生成されたかの識別が必要なことである。

BELLE 実験においては、各ユニタリ角に対し

$$
\begin{aligned}
\phi_1 &: B^0 \to J/\psi K_S \quad \text{(Gold Plated Mode)} \\
&\quad B^0 \to J/\psi K_L \\
\phi_2 &: B^0 \to \pi^+\pi^- \\
\phi_3 &: B \to D^0 K
\end{aligned}
\tag{2.12}
$$

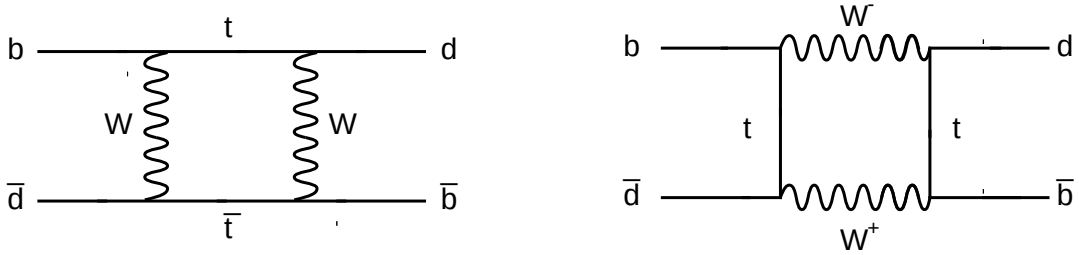


図 2.2: $B^0 - \bar{B}^0$ 混合のダイアグラム。

等の崩壊モードで測定できると期待されている [9]。

例として、式 (2.12) のモードのうち、ϕ_1 測定モードである $B^0 \to J/\psi K_L$ の場合、崩壊様式は図 2.3 のようになる。

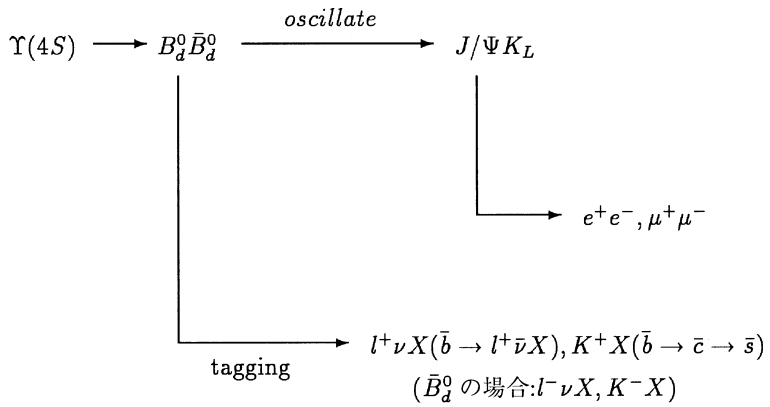


図 2.3: $B^0 \to J/\psi K_L$ の崩壊様式

したがって中性 B 中間子を使って CP の破れを観測するためには、

- 多数の $B^0\bar{B}^0$ 対の生成
- $B^0\bar{B}^0$ の崩壊した時間の測定
- 正確な粒子識別

が必要である。

B 中間子の崩壊時間を正確に測定する方法として、電子と陽電子を非対称なエネルギーで衝突させる方法がとられることになった。電子と陽電子の衝突で生成される共鳴状態 $\Upsilon(4S)$ が崩壊してできた $B^0\bar{B}^0$ 対は、スピンの保存のためどちらかが崩壊するまではコヒーレントな状態を保つ。$B^0\bar{B}^0$ 対はそれぞれ時間がたつにつれ混合を起こすが、系全体では常に B^0 と $\bar{B}^0$ を等量含んだままである。そのためどちらかの粒子が先に崩壊したとき、その時点でもう一方の粒子は必ず先に崩壊した粒子の反粒子である。遅れて崩壊する粒子はその時点から $B^0 - \bar{B}^0$ 混合を始める。$B^0\bar{B}^0$ 対の崩壊で、初めに片方が崩壊した時間を t_1、残ったもう一方が崩壊した時間を t_2 とし、$\Delta t = t_2 - t_2$ とすると式 (2.11) は

$$A_f = \sin 2\phi_{CP} \cdot \sin(\Delta m \cdot \Delta t) \tag{2.13}$$

となり、CP 非対称度は 2 つの粒子の崩壊時間差に依存する。

このとき、最初に崩壊した粒子が B^0 であるか $\bar{B}^0$ であるかの識別が重要である。この識別は、B 中間子が崩壊して生成されるレプトンや K 中間子の電荷により区別する方法が有効である。しかし、$\Upsilon(4S)$ の静止質量が約 $10.58GeV/c^2$、B 中間子が約 $5.28GeV/c^2$ と質量差が小さく、重心系では崩壊により生成される B 中間子は $0.34GeV/c$ 程度の小さな運動量しか持て

ず、ほとんど動かない。そのため、崩壊時間 (それぞれの粒子の飛距離から求める) が短く測定が困難である。そこで、電子と陽電子を非対称エネルギーで衝突させ、生成する $\Upsilon(4S)$ に運動量を持たせることが考えられた。$\Upsilon(4S)$ が運動量をもっていれば、ローレンツ変換により実験室系から見た場合 B^0 と $\bar{B}^0$ がより大きな運動量を持つために寿命が長くなり、結果として崩壊までの飛距離が伸びる。これにより崩壊までのそれぞれの粒子の固有時間を正確に知ることができる。

2.2 KEK B ファクトリー (KEKB)

高エネルギー加速器研究機構で 1994 年 4 月から建設が開始された B ファクトリー (KEKB) は、B 中間子と反 B 中間子の対を大量にあたかも工場 (ファクトリー) のように造りだすことを目的とする、電子・陽電子衝突型の加速器である。

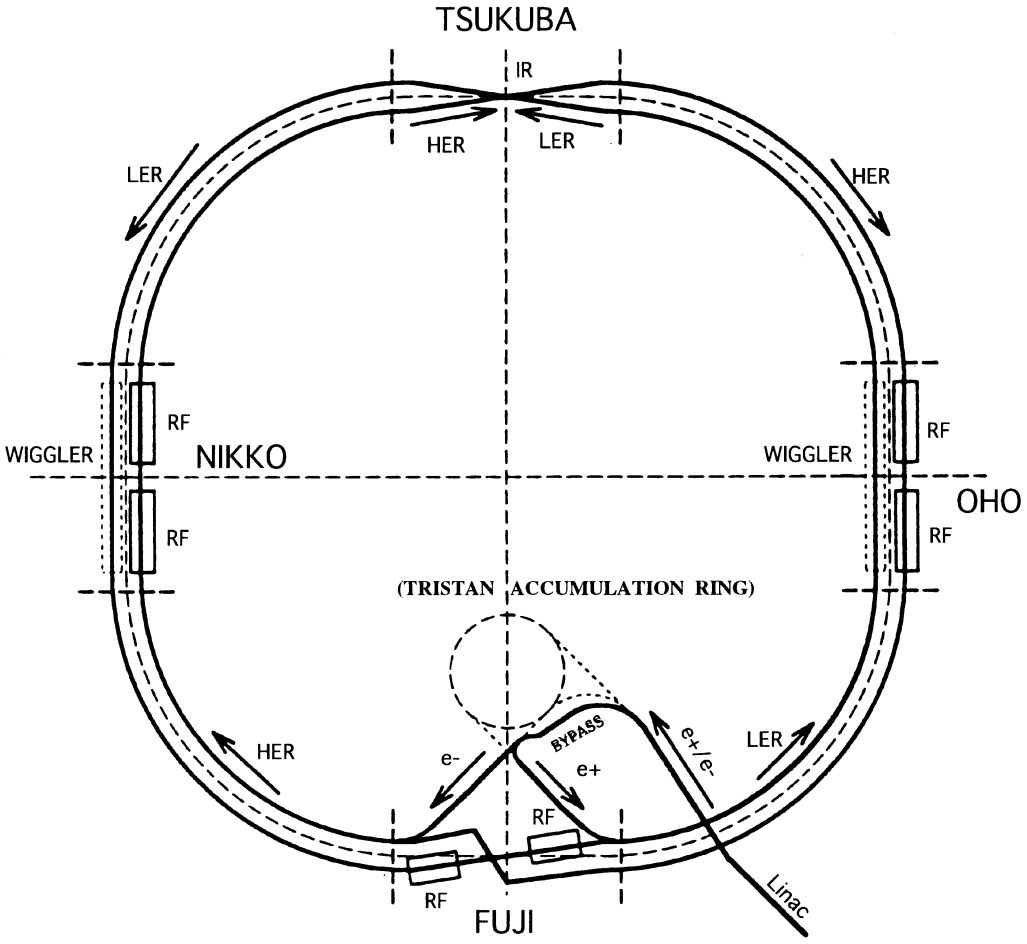


図 2.4: KEK B ファクトリー (KEKB)

B 中間子の生成には，次の反応を用いる。

$$e^+ + e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$$

$\Upsilon(4S)$ は $B\bar{B}$ にのみ崩壊するため、B 中間子の研究は $\Upsilon(4S)$ の共鳴エネルギー付近で行なわれる。しかし、前述のとおり $\Upsilon(4S)$ と $B\bar{B}$ の質量差が小さく、$\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ の反応で生成した B 中間子は $\Upsilon(4S)$ の静止系で約 $0.34GeV$ しか持てず、ほとんど動かない。したがって、B 中間子崩壊の時間発展を測定するために、親の $\Upsilon(4S)$ に十分な運動量を与え、B 中間子が測定可能な距離を走ってから崩壊するようにし、その生成から崩壊までの時間経過を観測するという方法をとる。そのため、KEKB は、電子と陽電子のエネルギーが異なる非対称エネルギー、2 リング型の衝突型加速器であることを特徴とする [10][11]。

一般にビームエネルギーの非対称度は、ローレンツ変換パラメータ $\beta\gamma$ により

$$\beta\gamma = \frac{E_- - E_+}{\sqrt{s}}$$

と表される。ここで、E_-、E_+ はそれぞれ電子、陽電子のエネルギー、$\sqrt{s}$ は $\Upsilon(4S)$ の静止エネルギー $10.58GeV/c^2$ である。エネルギーの非対称度が大きくなれば、B 中間子崩壊の時間発展をより精度良く測定できることになるが、検出器の有効領域や時間発展と関係ない崩壊モードの観測を考慮すると非対称度は小さい方が良い。これらの相反するパラメータを考慮し、KEKB での非対称度は以下のように決定された。

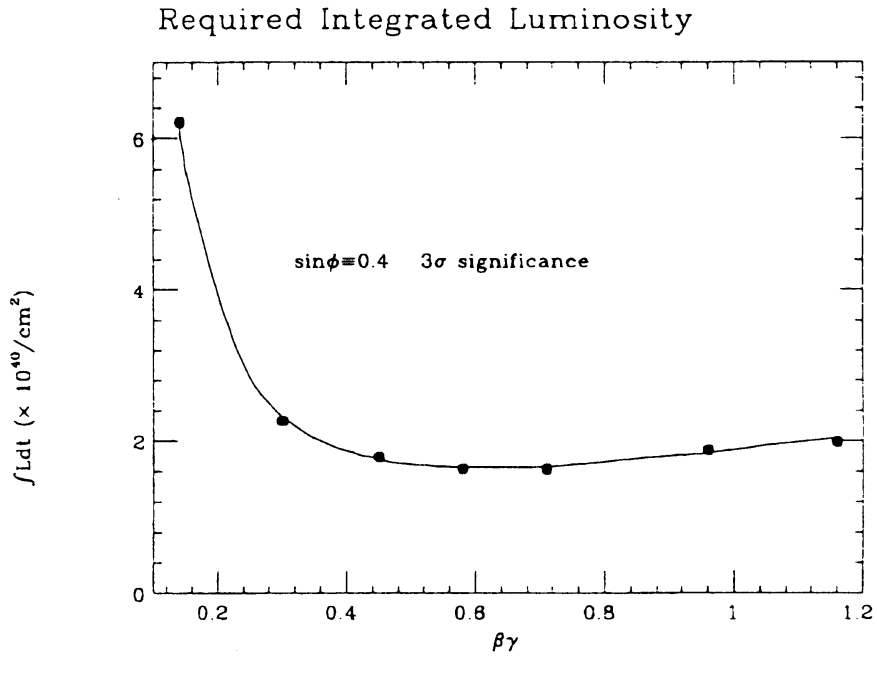


図 2.5: CP 非対称度の測定に必要な積分ルミノシティー

図 2.5 は、3σ の精度で CP 非対称度を測定するために必要な積分ルミノシティーを、$\beta\gamma$ の関数として表したものである。$\beta\gamma = 0.4$ ~ 0.8 までの領域ではあまり変化がないことがわかる。

そこで KEKB ではエネルギーの非対称度を $\beta\gamma = 0.42$ とし、その結果電子・陽電子のエネルギーはそれぞれ

$$\begin{aligned} E_- &= 8.00GeV \\ E_+ &= 3.50GeV \end{aligned}$$

と決定された。これにより、B 中間子の実験室系での運動量は平均 $2.3GeV/c$ 程度となる。

実際の建設では、既存の周長 $3km$ のトリスタンのトンネルの中に、電子蓄積用の $8GeV$ のリング (HER : High Energy Ring) と陽電子蓄積用の $3.5GeV$ のリング (LER : Low Energy Ring) を並べて設置する。KEKB のように電子と陽電子のエネルギーが異なる場合、別々のリングに蓄積しなければならないためである。2 つのリングは 2 箇所で交差するが、KEKB の衝突点は筑波実験ホールの 1 箇所のみで、ここに BELLE 検出器が設置される。反対側の富士実験ホールではリングを上下に交差させ衝突を起こさせないようにする。LER の加速空洞は富士実験ホールに、HER の加速空洞は日光、大穂の両実験ホールに、それぞれ設置される。

また、b クォークは非常に重いため、B 中間子の崩壊モードは非常に多岐にわたり、個々のモードの分岐比は大変小さくなる。そのため、十分な精度で CP 非対称度を測定するためには、大量の B 中間子が必要となり、加速器には高いルミノシティーが要求される。崩壊モードのうちで最も期待されている、ϕ_1 測定モードである $B \to J/\psi K^0_S$ を使って CP 非対称度を測定するためには、積分ルミノシティーでおよそ $30 \sim 100fb^{-1}$ 程度必要と見積もられている。KEKB では実験開始から数年で $100fb^{-1}$ を得ることを目指しており、この達成のため最大ルミノシティーは $1.0 \times 10^{34}cm^{-2}s^{-1}$ が目標とされた [12]。これはトリスタンのルミノシティ $4 \times 10^{31}cm^{-2}s^{-1}$ の 250 倍という大きな値である。KEKB リングに電子や陽電子を効率良く入射するため、中間の貯蔵リングを廃止し、電子と陽電子は電子線形加速器から直接主リングに入射される。このため、電子線形加速器は既存の $2.5GeV$ から $8GeV$ に増強される。これにより、陽電子発生標的にあてる電子ビームのエネルギーもこれまでの $200MeV$ から $4.5GeV$ に上げることができる。また、高いルミノシティーの実現のためには大電流の蓄積が必要であり、KEKB では各リングに 5000 個のバンチを蓄積することになり (トリスタンは 4 個)、バンチ間隔は $60cm$、またバンチサイズも非常に小さいものとなっている。

この難しい加速器の実現のため、KEKB では新たに超電導加速空洞 ARES (Accelerator Resonantly Coupled with Energy Storage) の開発を進めており、また真空ダクトも、高性能にも関わらず難しいことからこれまで使用実績のほとんどない銅の真空ダクトの実用化を目指して開発を進めるなど、多くの新技術を導入している。

衝突点では、2 つのビームは $11mrad$ の有限角を持って衝突する。これは、衝突点で交差した電子・陽電子ビームを速やかに分離させ、衝突点以外での衝突を防ぐこと、正面衝突型に比べ衝突点付近の構造をシンプルにできること、等のメリットがある。反面、幾何学的なファクタによりルミノシティが減少すること、衝突点付近でバンチ同士にキック力が働いてしまうこと、等の問題点も知られている。このため、ビームの重心系で見た場合正面衝突になるようなキック力を衝突前にバンチに与える、クラブ交差 (crab crossing) という方法 (図 2.6) が考案された。

表 2.1 に、KEKB の主要パラメータを示す [12]。なお、座標軸のとり方は、電子の進行方向に $+z$ 軸をとり、これと垂直に天頂方向を $+y$、右手系水平方向を $+x$ 軸とする。 原点は衝突点 (IP:Interaction Point) とする。その他、天頂角 θ、方位角 ϕ について、図 2.7 に示す。

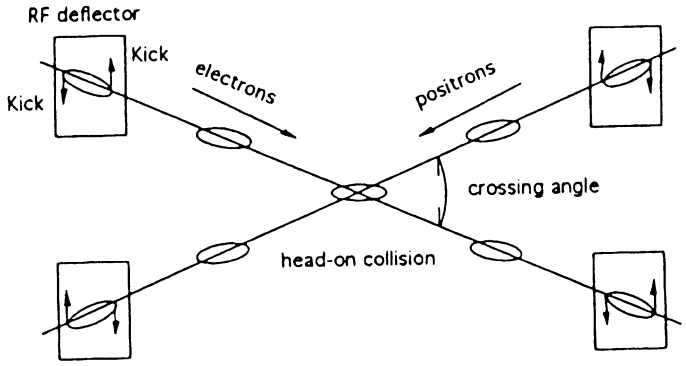


図 2.6: クラブ交差 (crab crossing)

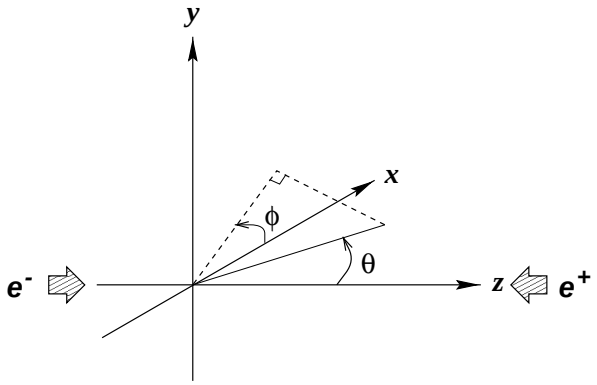


図 2.7: 座標系の定義

	(expr.)	LER	HER	(unit)
Energy	E	3.5	8.0	GeV
Circumference	C	3016.26		m
Luminosity	L	1.0×10^{34}		$cm^{-2}s^{-1}$
Crossing angle	θx	± 11		$mrad$
Tune shifts	$\xi x/\xi y$	0.039/0.052		
Beta function at IP	$\beta x^*/\beta y^*$	0.33/0.01		m
Beam current	I	2.6	1.1	A
Natural bunch length	σz	0.4		cm
Energy spread	$\sigma E/E$	7.7×10^{-4}	7.8×10^{-4}	
Bunch spacing	sB	0.6		m
Particles / bunch		3.3×10^{10}	1.4×10^{10}	
Emittance	$\varepsilon x/\varepsilon y$	$1.8 \times 10^{-8}/3.6 \times 10^{-10}$		m
Synchrotron tune	νs	$0.01 \sim 0.02$		
Betatron tune	$\nu x/\nu y$	45.52/45.08	46.52/46.08	
Momentum compaction factor	αp	$1.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4}$		
Energy loss / turn	Uo	0.87	4.8	MeV
RF voltage	Vc	5∼10	10∼20	MV
RF frequency	fRF	508.887		MHz
Harmonic number	h	5120		
Energy damping decrement	$To/\tau E$	2.5×10^{-4}	5.9×10^{-4}	
Bending radius	ρ	15.3	76.6	m
Length of bending magnet	Lb	0.86	4.3	m

表 2.1: KEKB の主要パラメータ

2.3 BELLE 検出器

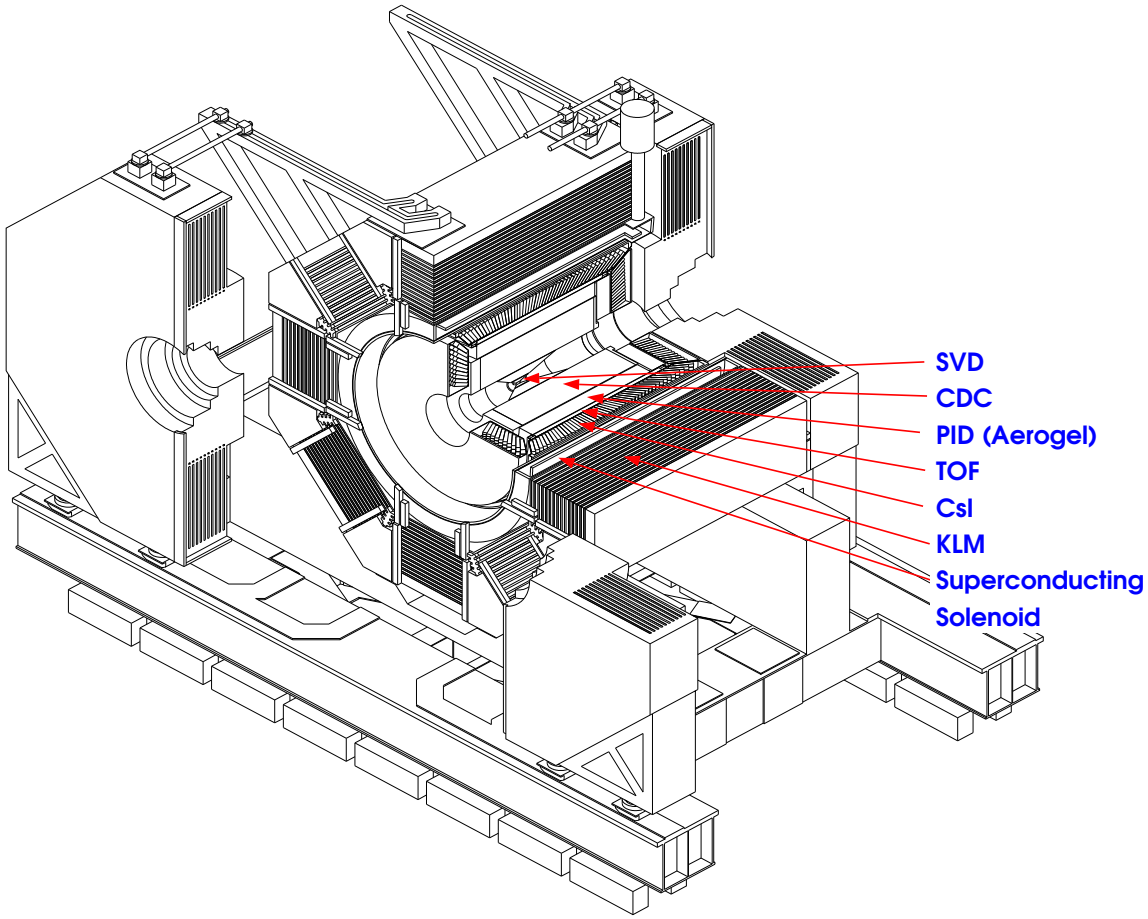


図 2.8: BELLE 検出器

図 2.8 に、BELLE 検出器の構造を示す。KEKB は非対称コライダーであるため、検出器も衝突点に対し非対称な構造をしている (図 2.9)。

B 中間子における CP 非対称性を精密に、効率良く測定するため、BELLE 検出器には以下のことが要求される [9]。

- B 中間子の崩壊点を少なくとも平均崩壊長の $1/2$ より良い精度で測定できること (KEKB では $\leq 100\mu m$ 程度)。
- $\pi^{\pm}$、π^0、K_S、K_L など多岐に及ぶ終状態粒子を正しく判別するために粒子の識別能力を持つこと
- γ 線を伴う B 中間子の崩壊を測定するため高性能のカロリーメータを持つこと
- 効率良く興味ある事象を判別して取り込むトリガーと高速のデータ収集システムを持つこと

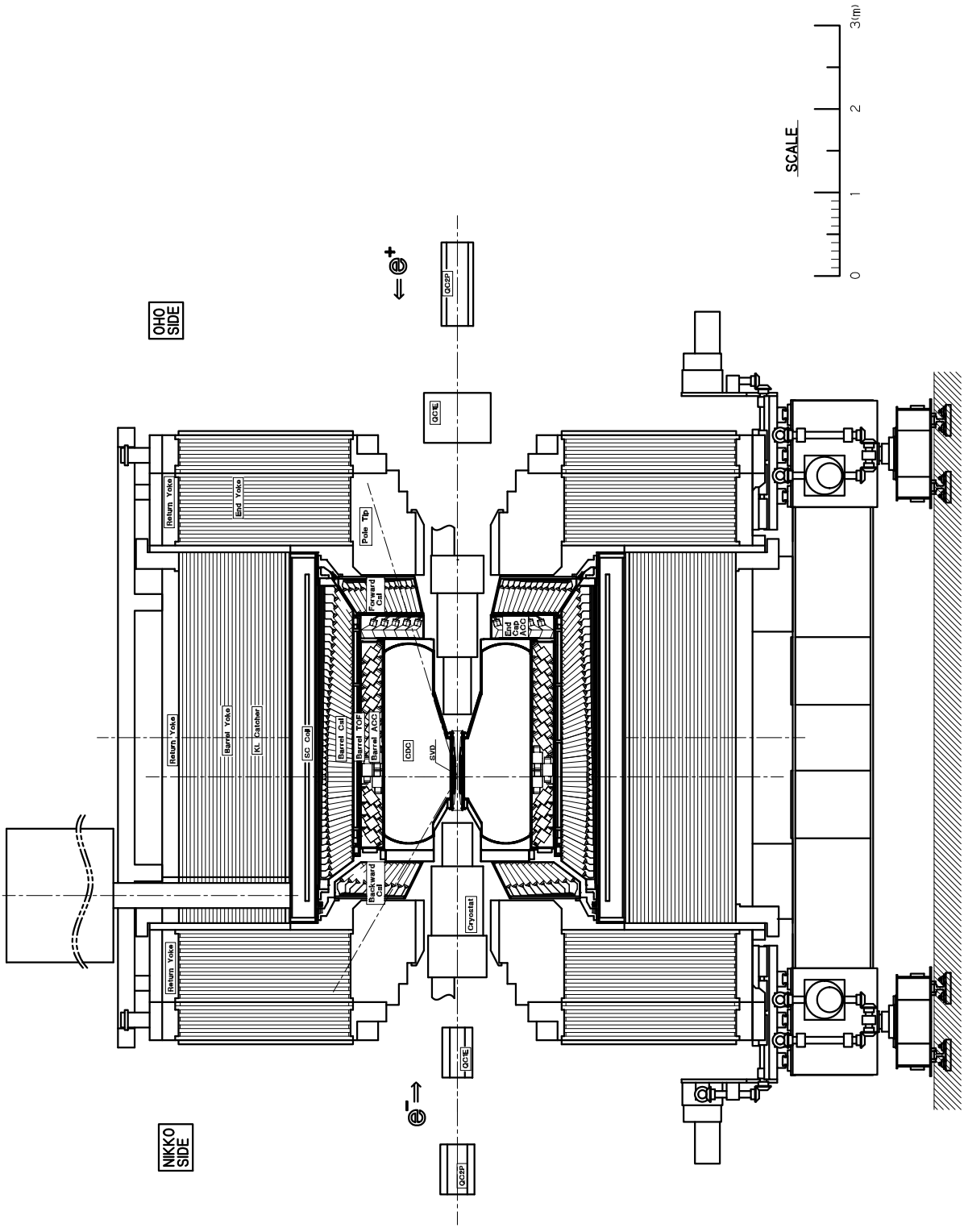


図 2.9: BELLE 検出器の構造断面図

これらの要請に基づき、BELLE 検出器の構造は以下のようになっている。まず、Be 製のビームパイプの周囲に、崩壊点検出のためのシリコン・バーテックス検出器 (SVD) が置かれ、その外側の中央ドリフトチェンバー (CDC) と共に荷電粒子の飛跡を検出する。CDC の外側にはエアロジェル・チェレンコフカウンター (ACC)、その外側に飛行時間差測定器 (TOF) が配置され、CDC の dE/dx の情報と合わせ粒子識別を行なう。TOF の外側に、電子の識別及び γ 線検出のための CsI 電磁カロリーメータ (ECL) が置かれ、その外側に $1.5Tesla$ の磁場を発生させる超電導ソレノイドが配置される。ソレノイドの外側には、内部の検出器では検出されない K_L^0 粒子の検出および μ 粒子の識別を行なうため、最も外側の検出器である K_L^0/μ 検出器 (KLM) が、リターンヨークを兼ねた鉄の内部に配置される。

以下に、それぞれの検出器について概説する [13][14]。

2.3.1　シリコン・バーテックス検出器 (SVD)

前述のように、B 中間子で CP 非対称性を測定するためには、B 中間子と反 B 中間子が同一固有状態に崩壊するときの崩壊時間分布の違いを精密に測定する必要がある。BELLE 実験では、崩壊の時間情報は 2 つの B 中間子の崩壊点の相対位置から得られる。したがって、崩壊点を精度良く検出することは非常に重要である。KEKB では、B 中間子は平均 $200\mu m$ 飛んで崩壊するため、$100\mu m$ 程度の崩壊点検出精度が求められる。また、粒子のエネルギー損失、多重散乱を少なくするため、ビームパイプ、SVD 自身の物質量をできるだけ少なくする必要がある。

以上の要求を満たす崩壊点検出器 (SVD) として、両面読み出しのシリコン・ストリップ検出器 (DSSD : Double-sided Silicon Strip Detector) が採用された。

SVD は 3 層の検出器層をビーム軸の周りに 8 角形に並べた構造をしている (図 2.10)[15]。読み出しストリップのピッチは、$r-\phi$ ストリップが $50\mu m$、$r-z$ ストリップが $84\mu m$ であり、z 方向の分解能はシミュレーションにより $\delta z \sim 105\mu m$ 程度という結果が得られている。

θ 方向の検出可能領域は $23^\circ < \theta < 140^\circ$ となっている。

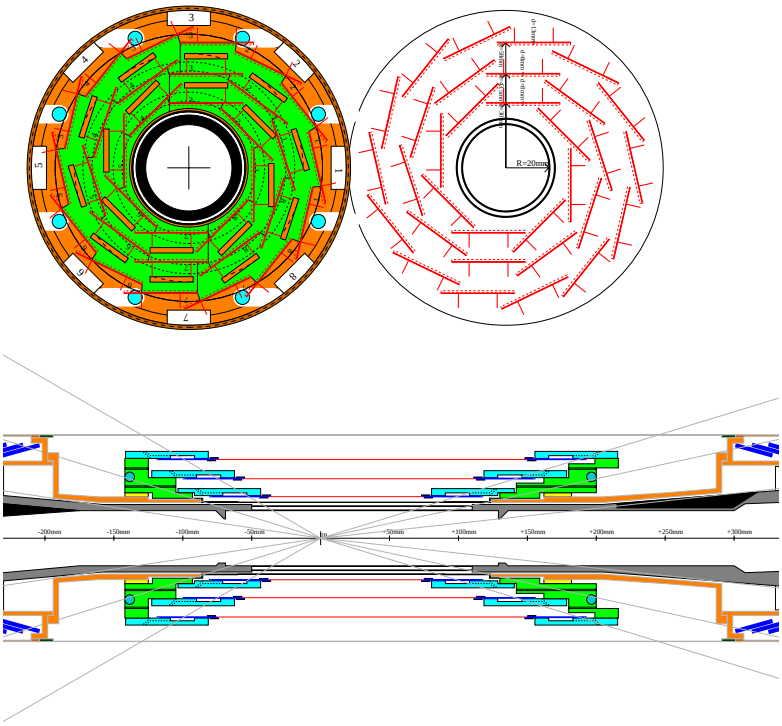


図 2.10: シリコン・バーテックス検出器 (SVD)

2.3.2　中央ドリフトチェンバー (CDC)

荷電粒子の飛跡検出器として、SVD のすぐ外側にドリフトチェンバー (CDC : Central Drift Chamber) が配置される。CDC は、荷電粒子のトラッキングにより運動量測定をし、またエネル

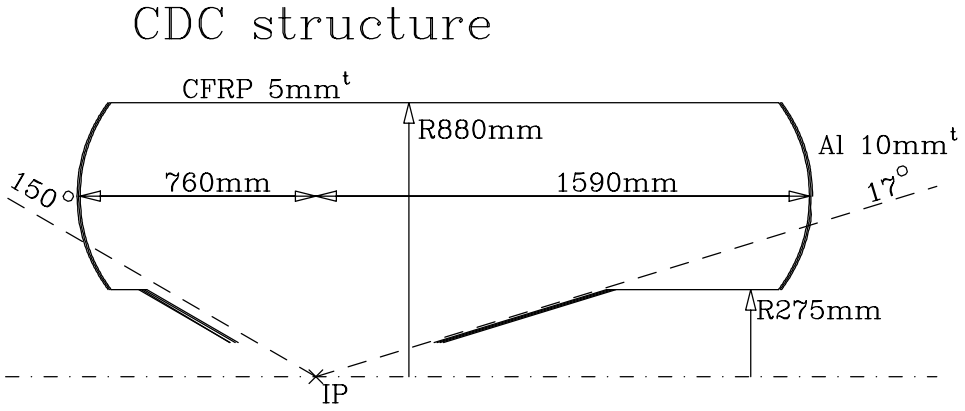


図 2.11: 中央ドリフトチェンバー (CDC)

ギー損失 (dE/dx) の測定による粒子識別を行なう。荷電粒子は、ソレノイドコイルの $1.5Tesla$ の磁場中でその運動量に応じたらせん状の飛跡を描くことから、その飛跡を検出することで運動量を測定できる。エネルギー損失は、粒子の種類に依存せずその速さ $(\beta = v/c)$ で決まるため、運動量及びエネルギー損失が分かれば粒子を同定できる。

CDC は内径が $8cm$、外径が $88cm$、長さ $250cm$ の円筒形で、中央部は加速器の構造上円錐形をしている (図 2.11)。

内部は 3 層のカソードワイヤと 50 層のアノードワイヤで構成される。アノードワイヤは、z 軸方向に平行な axial ワイヤと、わずかに角度を持たせた stereo ワイヤとがある。この stereo ワイヤにより、z 方向の位置測定が可能になっている。

内部のガスは、運動量を精度良く測定し、dE/dx の精度も保ち、物質量も少なくなるよう、ヘリウム:エタン =1:1 の混合ガスを用いる。

θ 方向は、$17^\circ < \theta < 150^\circ$ の領域をカバーする。現在までのテストの結果、空間分解能 $120\mu m$、dE/dx 分解能 $\sim 5.3\%$ という結果が得られている。

2.3.3 エアロジェル・チェレンコフカウンター (ACC)

ACC は、SiO_2 エアロジェルを用いた、しきい値型チェレンコフカウンターである。屈折率 n の物質中を速さ β の荷電粒子が通過するとき、$n > 1/\beta = \sqrt{1 + (m/p)^2}$ であればその物質はチェレンコフ光を発生する。ACC は主に $1.2GeV/c$ 以上の高い運動量の π/K 識別を目的としているため、その屈折率は π ではチェレンコフ光を発生し K では発生しないような値に調整され、チェレンコフ光の有無でその識別を行なう。n の値は $1.010 \sim 1.020$ のものを用いる。バレル部は $33.7^\circ < \theta < 120.8^\circ$、エンドキャップ部は $13.6^\circ < \theta < 33.4^\circ$ をカバーする。エアロジェルの大きさは、バレル部で $12 \times 12 \times 12cm^3$、エンドキャップ部で $12 \times 12 \times 10cm^3$ のものを用いる。バレル部は 1 つのエアロジェルを 2 個の光電子増倍管で、エンドキャップ部は 1 個の光電子増倍管で、その光量を測定する。

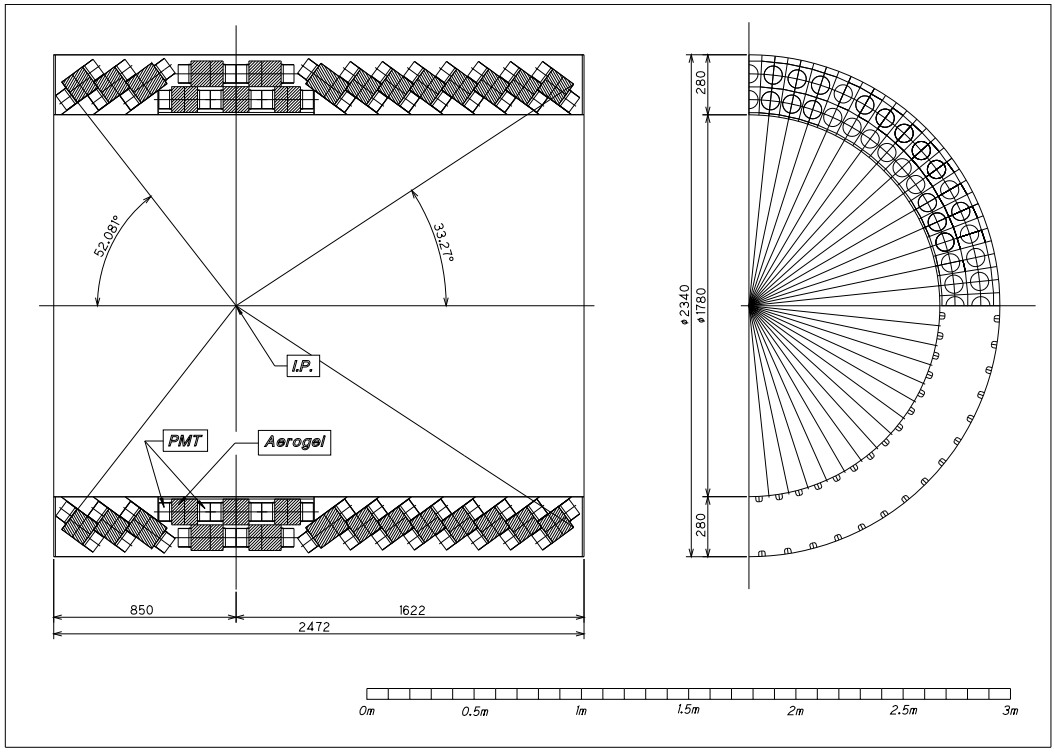


図 2.12: バレル ACC

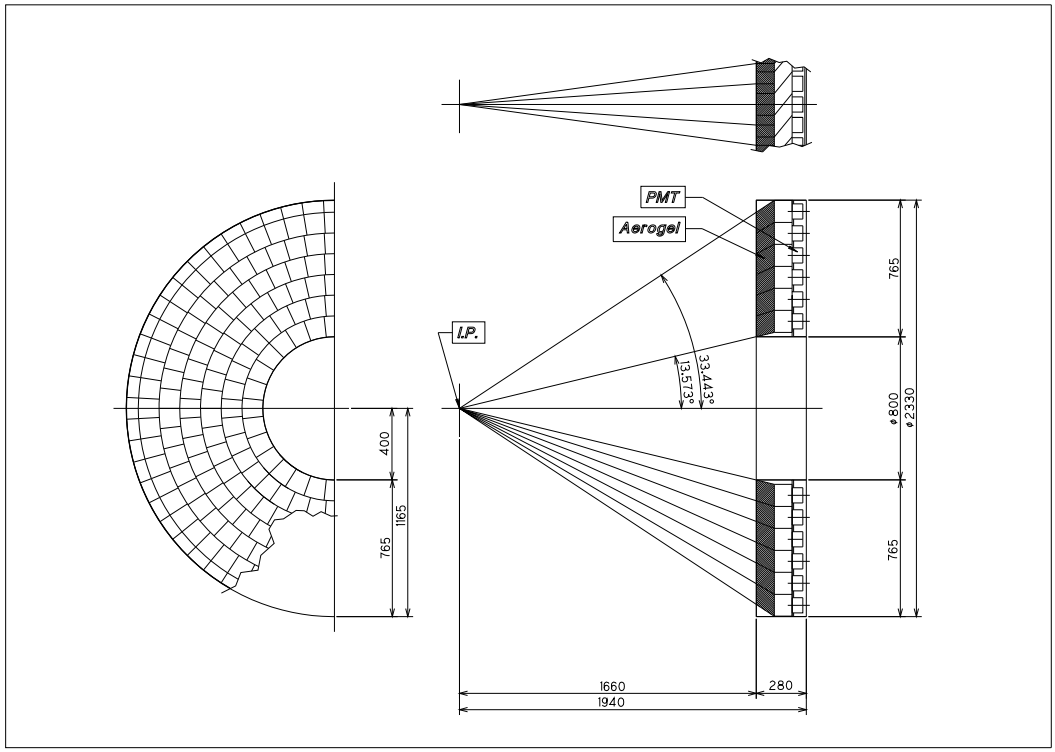


図 2.13: エンドキャップ ACC

2.3.4 飛行時間差測定器 (TOF)

TOF はプラスティックシンチレータを用いて粒子の飛行時間を $100psec$ 程度の時間分解能で測定するものである。粒子の飛行時間 T が測定されれば、

$$T = \frac{L}{c}\sqrt{1+\frac{m^2}{p}}$$

の式から、飛行路の長さ L および CDC で測定された運動量 p を用いて粒子同定が可能である。主に、$800MeV/c$ 以下の運動量の π/K 識別を目的とする。

図 2.14 は TOF のモジュールである。1 つのモジュールは 2 つの TOF シンチレータと 1 つの TSC(Trigger Scintillation Counter) で構成される。TOF は $4\times6\times255cm^3$ のシンチレータの両端に FM-PMT(Fine Mesh dynode PhotoMultiplier Tube) と呼ばれる光電子増倍管が取り付けられる。TSC は $0.5\times120\times263cm^3$ のシンチレータに 1 個の FM-PMT が取り付けられる。このモジュールが 64 個、バレル部に円筒形に配置される。

また、時間応答が特に速いことから、測定器全体のトリガーとしても利用される。

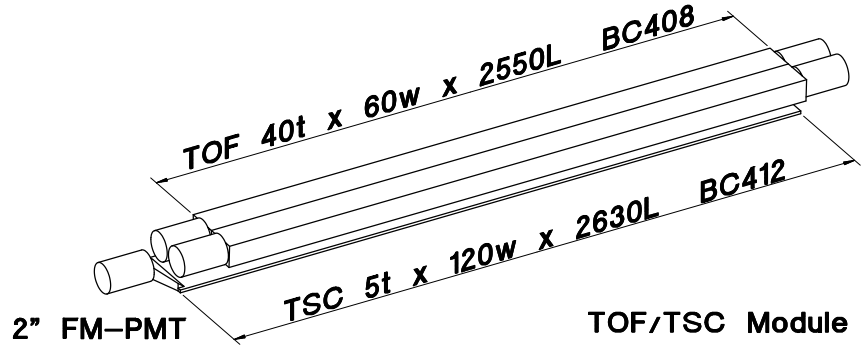


図 2.14: 飛行時間差測定器 (TOF)

2.3.5 CsI 電磁カロリーメータ (ECL)

ECL は、光子 (γ) および電子の検出を主な目的とした検出器である。γ や電子が物質にあたると電磁シャワーを起こす。この電磁シャワーを検出することでエネルギー測定を行なう。

B 中間子の崩壊の多くは π^0 を含んでいるので、γ を高い効率、高いエネルギー分解能かつ良い S/N 比で検出することが必要である。B 中間子の崩壊により生成される γ のエネルギーは、$20MeV\sim3GeV$ であるが、Bhabha 散乱に対応するため $8GeV$ までの測定が必要であり、非常に広いエネルギー領域をカバーする必要がある。

このため、ECL には CsI(Tl) 結晶にフォトダイオードを取り付けたものが使用される。1 つの結晶の大きさは、前面積約 $5.5\times5.5cm^2$、後面積約 $6.5\times6.5cm^2$、長さ約 $30cm$ である。この結晶をバレル部、エンドキャップ部合わせて 9000 本使用する。図 2.15 にその配置図を示す。

検出可能領域は、$17^\circ<\theta<150^\circ$ である。

ビームテストの結果、$2GeV$ の電子に対し 1.8% のエネルギー分解能が得られている。

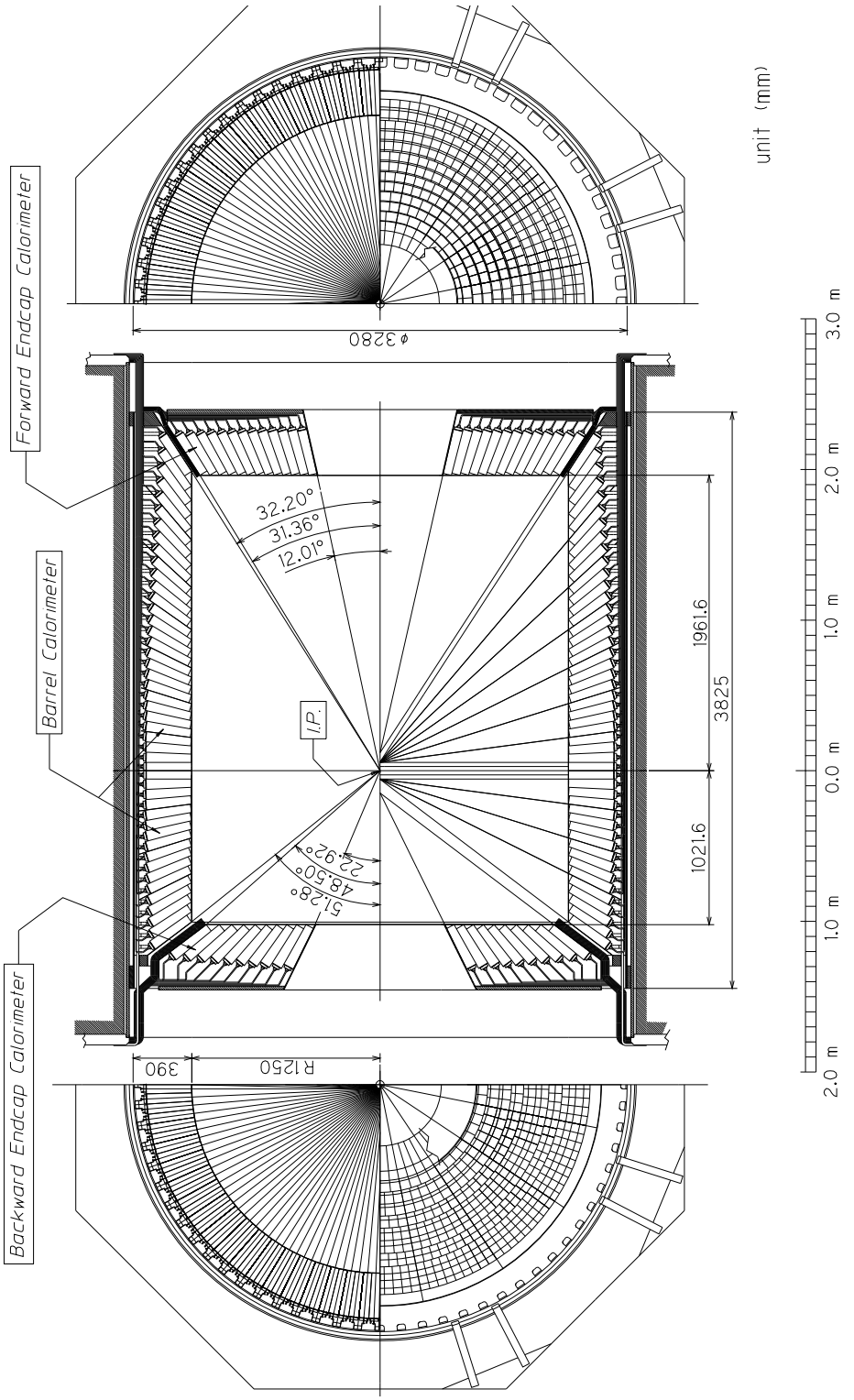


図 2.15: CsI **電磁カロリーメータ** (ECL)

2.3.6 K_L^0/μ 検出器 (KLM)

KLM は、BELLE 検出器の最も外側に配置され、内側の検出器では検出できない K_L^0 粒子と、物質透過力の強い μ 粒子の識別を行なう。構造は、リターンヨークを兼ねた鉄の薄い吸収体と薄い粒子検出器を交互に配置した、一種のハドロンカロリーメータである。鉄の層の厚さは $47mm$、ギャップは $44mm$ で、バレル部は鉄 14 層検出器 15 層、エンドキャップ部は鉄 14 層検出器 14 層からなる。

K_L^0 粒子の検出は、ECL やソレノイドコイル、鉄の層等で K_L^0 が物質と強い相互作用をして発生するハドロンシャワーを利用する。μ 粒子は、CDC 等で検出された荷電粒子のうち KLM 中をより深く貫通し多重散乱の少ないものであることを利用して、π 粒子との識別を行なう。KLM の位置分解能は $5cm$ 程度と見込まれている。

KLM については、次章で詳細を述べる。

第3章

K_L^0/μ 検出器(KLM)

3.1 要求される性能

KLMはBELLE検出器においてK_L^0粒子の検出及びμ粒子の識別を行なうことを主目的とするサブシステムである。

KEKBではK_L^0の寿命が平均$c\tau \sim 15.5m$と長くなること、中性粒子であり内部の検出器で検出できないことなどから、K_L^0の検出は物質との強い相互作用を利用する。K_L^0粒子の検出は、$B^0 \to J/\psi K_L^0$の崩壊モードにより生成されるものが重要である。このモードは前述のようにユニタリティー三角形のϕ_1測定モードであり、$J/\psi \to \mu^+\mu^-$の崩壊で生成するμ粒子と合わせ、KLMでこのモードの観測に必要な粒子検出を行うことができる。

μ粒子はB中間子の多くの崩壊モードで生成されることから、その検出はB中間子のフレーバーを知るため、またB中間子の稀崩壊モードの観測のためにも非常に重要である。また、μ粒子とπ粒子との識別も重要になるが、μ粒子は物質中で電磁相互作用により電離損失をするのみであるのに対しハドロンは強い相互作用をし多重散乱が大きいことを利用して識別する。実際の解析においては、CDCでトラッキングされた荷電粒子の軌跡をKLM領域まで外挿し、KLMでトラッキングした荷電粒子の軌跡とのマッチングをとることでμ粒子の再構成を行なう。

これらを実現するため、KLMは吸収材の層と薄い検出器層とを交互に配置する多層構造とされた。したがって検出器としては、第一に薄い構造をしていることが望まれる。また、BELLE検出器の最も外側に配置されるものであるからもともと大きな検出器が必要であり、さらに多層構造となると検出器の数も多くなり、総面積は巨大なものになるため、大面積のものを安価に製作でき、取り扱いも容易であることが望まれる。

BELLE実験は10年程度継続する予定であるため、その間長期にわたり高い検出率を維持でき安定した動作をすることが要求される。

KEKBはレプトンコライダーであるためイベントレートはそれほど高くなく、$\sim 200Hz$程度と見込まれている。KLMで検出する粒子のレートは宇宙線のレート$(\sim 0.01Hz/cm^2)$よりも低いと考えられるため、検出器としてはさほど高レートのイベント検出ができなくてもよい。

K_L^0は物質中で強い相互作用により多重散乱するため、K_L^0検出のために要求される位置分解能は$5cm$(角度分解能で$30mrad$)程度で十分という結果がシミュレーションにより得られている[16]。μ粒子は散乱が少ないが、$5cm$程度の分解能の検出器であっても、多層での飛跡検

出が可能であるからその再構成においては問題がないと考えられる。

以上の要求を満たすものとして、次節に述べる構造が決定された。

3.2 構造

図 3.1 に KLM の構造を示す。KLM は BELLE 検出器の最も外側に配置され、筒状のバレル部と両端のエンドキャップ部で構成される。吸収材の鉄は、ソレノイドコイルのフラックスリターンヨークを兼ねているため、検出器の配置及び磁場漏れをなくすことを考慮にいれてその形状・構造が決定された。吸収材の鉄の層の厚さは $47mm$、ギャップは $44mm$ で、層数はバレル部・エンドキャップ部ともに 14 層であり、この狭いギャップに検出器が配置される。検出器層をバレル部で 15 層、エンドキャップ部で 14 層持つことから、そのカバーする延べ面積は約 $1800m^2$ に及ぶ。

KLM に要求される性能を満たす検出器として、RPC(Resistive Plate Counter) が採用された。RPC はその構造上、非常に薄く大面積かつ自由な形状のものを比較的安価に製作でき、さらに信号読み出し回路もシンプルな構成にできるというメリットがある。RPC については次節で概説する。

KLM の検出器部は、モジュールと呼ばれる単位で構成される。バレル部のモジュールは長方形で、長さ $220cm$、幅約 151(最内層) $\sim$ 267(最外層)cm、厚さ約 $3.9cm$ である。エンドキャップ部のモジュールは、エンドキャップ部の $1/4$ を単位とした扇型で、内円半径 $130.5cm$、外円半径 $331cm$、厚さ約 $3.9cm$ である。1 つのモジュールは、2 層の RPC と 2 枚 1 組の読み出し用銅製ストリップ及び絶縁フォームを、アルミニウム製のフレームに入れた形で構成される。バレル部は RPC1 層分を 1 枚の大きな長方形の RPC で構成するため、1 モジュール当たり RPC が 2 枚必要で、合計 240 モジュール、480RPC を使用する。エンドキャップ部は 5 枚の台形の RPC を並べて RPC1 層分の扇型を構成するため、1 モジュール当たり RPC が 10 枚必要で、合計 112 モジュール、1120RPC を使用する。RPC2 層で 1 モジュールを構成するこの構造をスーパーレイヤーと呼んでいる。スーパーレイヤーについては、3.4 節で説明する。

2 枚の読み出し用ストリップは、バレルでは z-ストリップと ϕ-ストリップ、エンドキャップでは θ-ストリップと ϕ-ストリップの組で、どちらも 1 モジュールで粒子の通過位置を知ることができる。位置分解能が $5cm$ 程度でよいことから、ストリップ幅も $5cm$ 程度と広くとることができ、巨大な面積を覆っているにも関わらずストリップ数はそれほど多くならずに済む。実際には、データ収集システムの構成上ストリップ数は 12 の倍数とすることが望まれたため、バレル-z は 48 本、バレル-ϕ は内側の 6 層分が 36 本で外側 9 層が 48 本、エンドキャップ-θ は 48 本、エンドキャップ-ϕ は 96 本とされた。読み出しストリップの本数は総計 37984 本である。バレルモジュールでは、ストリップは細長い長方形で、z ストリップの幅は $4.5cm$、ϕ ストリップの幅は各層で異なり約 $4.3 \sim 5.5cm$ である。エンドキャップモジュールでは、θ ストリップは幅 $3.6cm$ の同心円状であり、ϕ ストリップは放射状で幅は内側が約 $1.86cm$、外側が約 $4.76cm$ である。

図 3.2、3.3 に KLM エンドキャップモジュールとストリップの概要を示す。

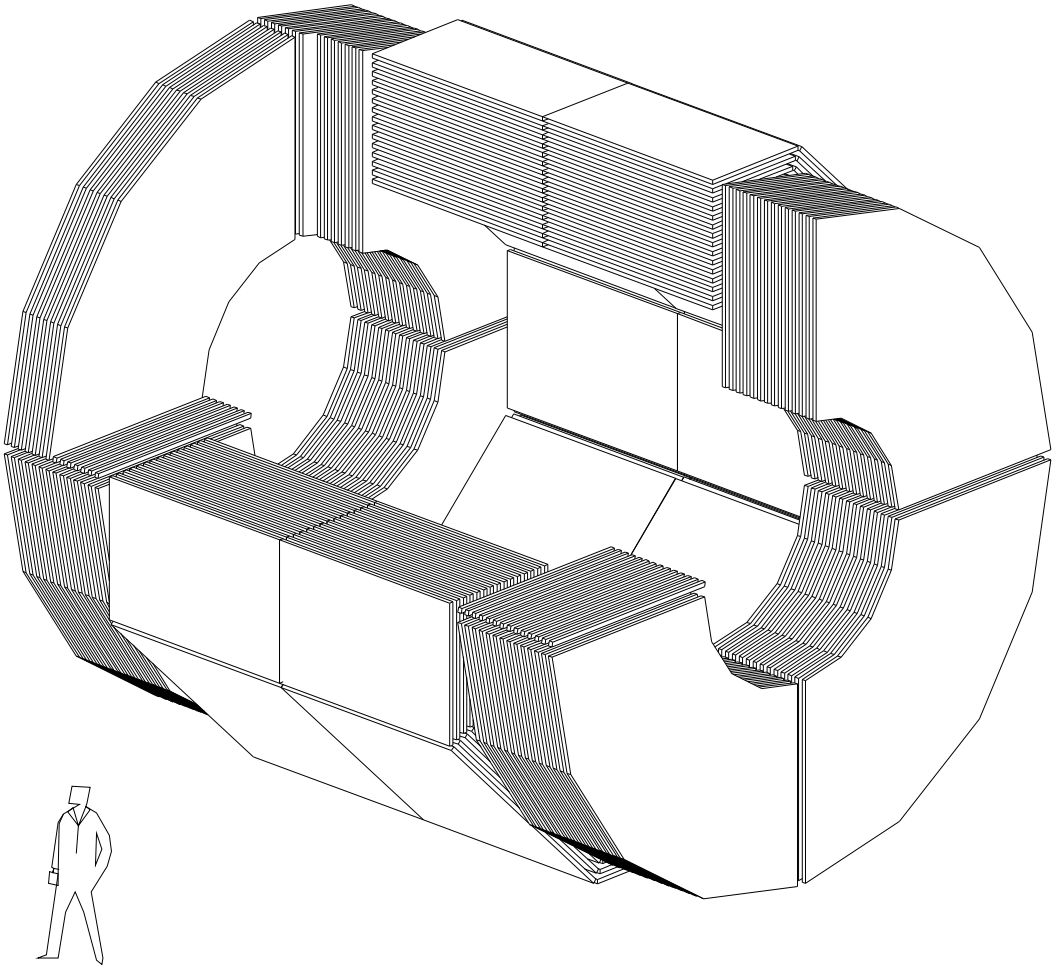


図 3.1: KLM 検出器概観図

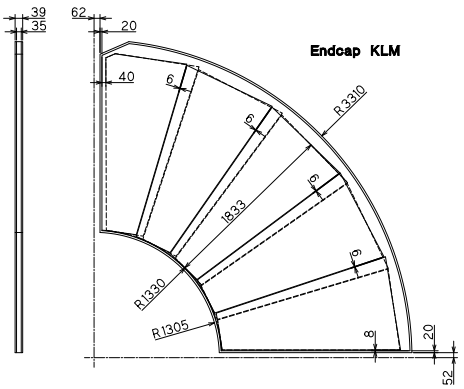


図 3.2: KLM エンドキャップモジュールの形状

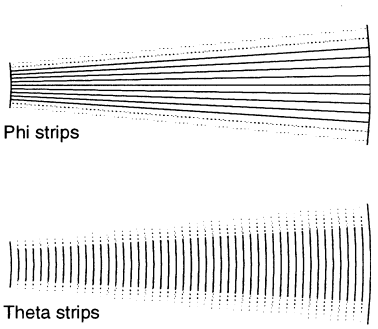


図 3.3: KLM エンドキャップモジュールの読み出しストリップ

3.3 RPC(Resistive Plate Counter)

3.3.1 概説

RPC(Resistive Plate Counter) とは、高電圧を印加した極板内に封入したガスが荷電粒子の通過により引き起こす電離を電子雪崩により増殖させ信号として取り出す、平行平板スパークカウンターの一種である。

RPC の動作原理自体は、1940 年代の Parallel-Plate Counter、1970 年代の Planar Spark Counter で既に実現されていたが、いずれも技術的な困難さにより実用的なものとはならなかった。

現在の RPC の原型は、1980 年代にイタリアの Santonico らが開発したもので [17]、その構造は 2 枚の高抵抗極板を狭いギャップ ($2mm$ 程度) をあけて平行に配置し、ギャップにガスを流し、極板に高電圧をかけ、荷電粒子の通過によって起こる電子雪崩を極板の外側に配置した読み出しストリップで信号として取り出すものである。高抵抗極板としてはベークライトが用いられ、ガスはアルゴンとブタンを 6:4 で混合したものにフレオンを数パーセント加えたものを 1 気圧で使用する。これは材料、製作の面から見て十分実用に耐えるもので、実際に E771、WA92 実験でミューオン検出器等として使用されている [18][19]。

この検出器の特徴としては、

- 得られる信号の波高が数 $100mV$ 程度と高いため、アンプを必要としない
- 時間分解能が良い ($\sigma =$ 数 $nsec$)
- 製作が容易で、大型のものや自由な形状のものが作れる
- 材料費が安価である

等が挙げられる。

3.3.2 動作原理

動作の過程

図 3.4 に RPC の動作の模式図を示す。

まず、極板間にアルゴン、イソブタン、フレオンの混合ガスを流す。

極板に高電圧を印加すると極板間に一様な電場が発生し、粒子検出可能な状態になる。

荷電粒子の通過により、極板間のガスが電離され、粒子の飛跡にそって一次イオン対ができる。一次イオン対を発生するのはアルゴンとイソブタンである。これらのガスが標準状態における最小エネルギー損失で荷電粒子により電離された場合、$1cm$ の飛行当たり生成するイオン対の数はそれぞれ約 29 個、46 個である [20]。極板間隔 $2mm$ の RPC にガス比アルゴン:イソブタン:フレオン $= 25 : 25 : 50$ の混合ガスを使用するとき、極板間で生成されるイオン対の

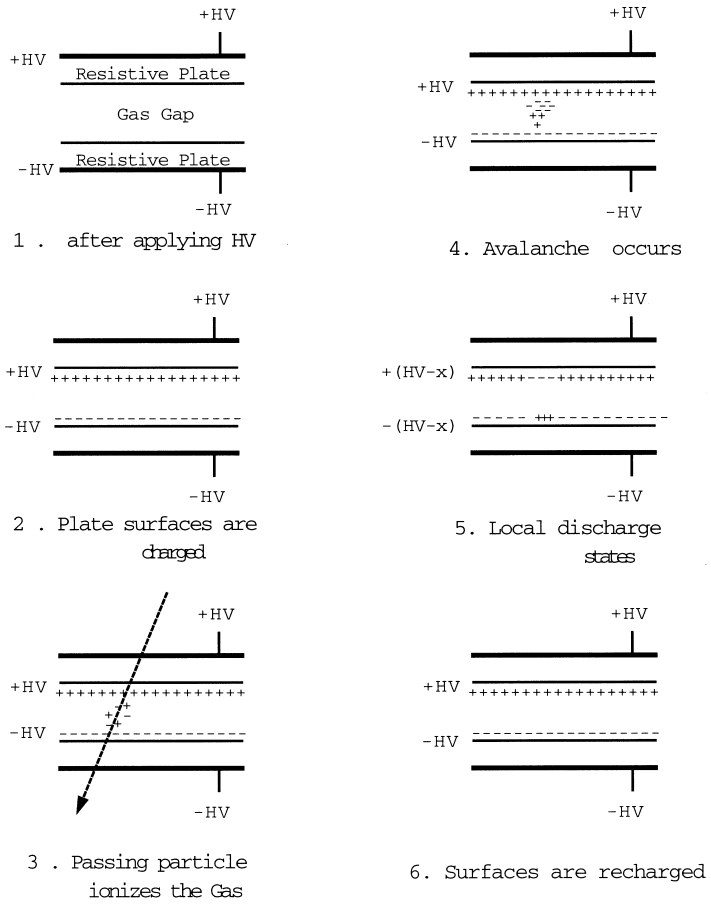


図 3.4: RPC の動作原理

数は平均でアルゴンが 1.5 個、イソブタンが 2.3 個であるので、合計で平均 3.8 個生成されることになる。

生成された一次イオン対は極板間の電場により加速され、電子雪崩を起こしてストリーマに発展する。ガス増幅率は、生成されたイオン対 (平均 3.8 個) の電荷量と読み出しストリップに誘起された電荷の総量 (平均約 $100pC$、付録 A) との比をとるとおよそ 10^8 となり、GM 領域 (ガス増幅率 $\sim 10^9$)[20] に近いストリーマモードで動作しているものと考えられる。このとき極板間は電気的に短絡された状態になるが、極板の抵抗値が大きい (約 $10^{10\sim12}\Omega\cdot cm$) ため、電圧の降下がストリーマの起こった点の周囲のみに限定され、それ以上に拡がらないこと、また、次節で述べる通りイソブタン、フレオンのクエンチング効果により二次放電やストリーマの拡大を抑えられることにより、放電が極板全体に及ぶことはない。

RPC の信号はこのストリーマによって誘起される電荷であるため、通過粒子のエネルギー測定はできない。

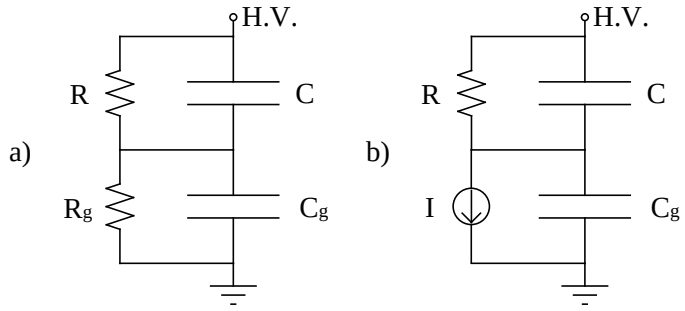


図 3.5: discharge cell の等価回路

discharge cell

前節で述べたように、RPC の極板の電圧降下がストリーマの周囲のみであることから、RPC は互いに独立した小さな放電領域の集合体とみなすことができる。これを discharge cell と呼ぶ。図 3.5 は discharge cell の等価回路である。図中のコンデンサ C、C_g 及び R, R_g はそれぞれ極板とガス層に相当する。ガスがイオン化していない状態 (図 a) では $R_g = \infty$ であり、印加電圧によりコンデンサ C_g に電荷が蓄えられる。ストリーマが発生した状態 (図 b) の電流源は、ストリーマによる放電を指している。放電により C_g に蓄えられた電荷が失われていくが、極板の抵抗が大きいため電源から電流はほとんど供給されない。その後 a の状態にもどり、C_g が再充電される。

ストリーマ発生から再充電までの間は、discharge cell は粒子検出ができないことになる。再充電にかかる時間を τ としたとき、

$$\tau = R(C + C_g) = \rho\epsilon_0 \left(\epsilon_\tau + \frac{2d}{g} \right) \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned} \rho &= \text{極板の体積抵抗率} \\ \epsilon_0 &= \text{真空の誘電率} \\ \epsilon_\tau &= \text{比誘電率} \\ d &= \text{極板の厚さ} \\ g &= \text{極板間距離} \end{aligned}$$

と表せる。式 (3.1) からわかるように、極板の抵抗が高くなるほど再充電に時間がかかるため、高い入射レートの場合や自発放電が多い場合などは再充電が間に合わず検出効率の低下につながることがわかる。ガラス ($\rho \sim 10^{12}\Omega \cdot cm$) を極板に用いた場合、$\tau \sim 1sec$ となる。ストリーマの放電時間はおよそ $10nsec$ 程度であり、再充電時間より遙かに短い。このような短時間においては、$R \sim \infty$ とみなすことができるため、ガス内において二次的な放電は起こらない。このような機構により、RPC は粒子検出可能となっている。

ストリーマにより発生した電荷を Q とすると、discharge cell の大きさ S は

$$S = \frac{Qg}{\epsilon_0 V}$$

$$\begin{aligned} g &= \text{極板間距離} \\ V &= \text{極板間の電位差} \\ \epsilon_0 &= \text{真空の誘電率} \end{aligned}$$

と表すことができる。したがって、電荷 Q が discharge cell の大きさを決めることから、Q が大きくなると discharge cell の領域すなわち粒子検出不能領域が広くなる。粒子の入射レートを r としたとき、検出効率の低下 η_{loss} は近似的に

$$\eta_{loss} \sim r\tau S = \frac{rQ\rho}{V}(g\epsilon_\tau + 2d) \tag{3.2}$$

と書ける。高い入射レートの場合でも高い検出効率を得るためには、ストリーマの電荷を小さく抑える必要があることになる。

混合ガスの働き

混合ガスの各成分は、以下の働きをする。

アルゴン (Ar) は入射する荷電粒子により電離され、イオン対を生成する。この電子が電子雪崩を起こすことによりストリーマに発展し、読み出しストリップに電荷を誘導する。

イソブタン ($(CH_3)_3CH$) はイオンの再結合により発生する紫外線を吸収することで、光電子による二次放電を抑え、アフターパルスの発生やストリーマのサイズを抑える働きをする。これは、イソブタンの吸収する光子の波長がアルゴンの発光スペクトラムの全領域をカバーしているためである。

フレオンは、電子親和力が大きいため、外殻電子捕獲によりストリーマが拡がることを防ぐ。

3.3.3 読み出しストリップ

RPC 内で発生したストリーマにより RPC の外側に配置した読み出しストリップに電荷が誘導され、信号として検出される。このため、正極側のストリップには負の、負極側のストリップには正のパルスが発生するので、両面からの読み出しが可能である。したがって、異なる方向 (x と y など) のストリップを両面に配置すれば、粒子の通過位置を測定することができる。

ストリップはインピーダンスを適切にとれば伝送線 (transmission line) の役割をするため、長いストリップの使用においても信号の波形や時間情報を失うことなく信号を送ることができる。信号ケーブルとのインピーダンスの整合には、ストリップの外側に設けたグラウンドシールドとの間の距離を適切に設定すればよい。

図 3.6 はストリップの等価回路である。C、R はそれぞれ、ストリップの容量およびストリップとグラウンドとの抵抗である。電流源 I はガス中の放電による電流である。ストリップを伝送線とみなせるとき、C はストリップの長さに関わらず信号の広がりの大きさに依存する。RPC の信号の広がりは数 cm^2 であるので、$C \sim 1pC$ となる。インピーダンスが 100Ω のとき、信号はストリップの両側に伝わるため $R \sim 50\Omega$ で、この回路の時定数 τ は $\tau = RC \sim 50psec$ となり、信号の立ち上がり時間に比べ遙かに短い。

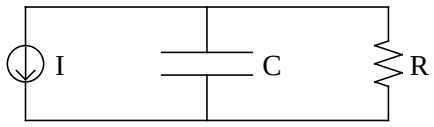


図 3.6: 読み出しストリップの等価回路

3.3.4 BELLE KLM 用 RPC

KLM 用の RPC の特徴としては、高抵抗極板としてガラスを使用したこと、及び、使用するガス混合比が従来使用されてきたものと大幅に異なること、が挙げられる。

以下では、東北大学で開発及びテストを担当したエンドキャップモジュール用の RPC を中心に説明するが、形状以外はバレル用 RPC でも同様である。図 3.7 にエンドキャップモジュール用 RPC の構造を示す。

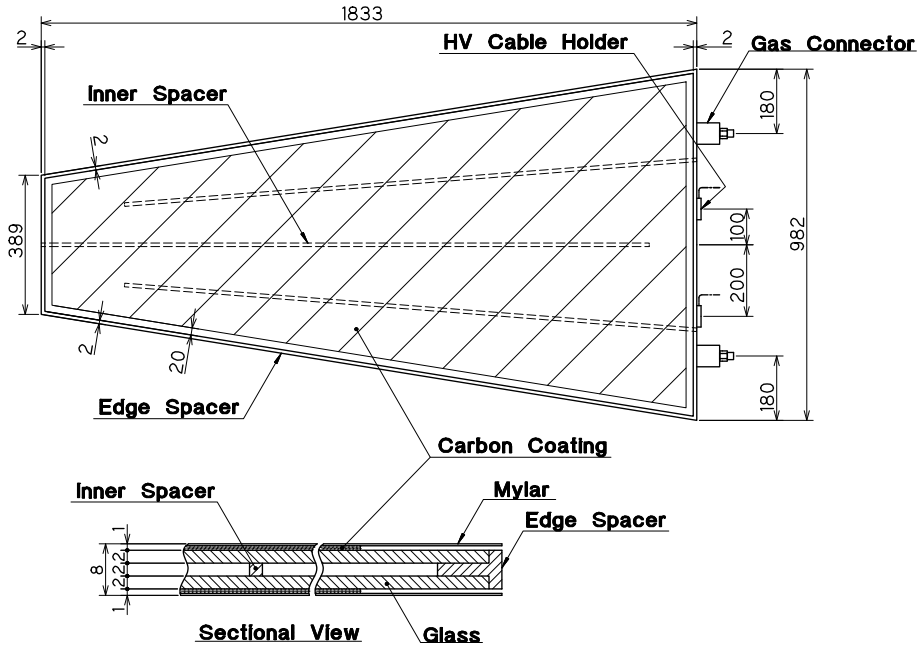


図 3.7: RPC の構造図

ガラス極板

高抵抗極板に使用されるガラスはフロートガラスと呼ばれるもので、厚さはバレル用が約 $3mm$、エンドキャップ用は約 $2mm$ のものを使用する。

フロートガラスの名は、加熱して融解したスズの上に液体ガラスを流し、冷却して板ガラスを作るという製法による。スズに接していた面と空気に触れていた面とでは性質が多少異なり、スズ側の面の方が表面抵抗率のバラツキが小さい等の理由により [21]、スズ側の面を RPC の内面に使用することにした。

ガラスを高抵抗極板として使用する理由は、ベークライトでは吸湿性があるため反りなどの変形をし、大型の物をつくる場合に問題となることや、スパーク発生時に極板表面に'spot burst' の様なものができて変質し、その箇所が常に放電するようになるなど、長期安定性にかけると判断されたためである。ガラスは体積抵抗率が約 $10^{12}\Omega\cdot cm$ と大きいため高レートでのイベント検出には適さないが、KEKB 程度のレートであれば問題はない。

高電圧印加用電極

高電圧印加用の電極は、$10^7\Omega/\square$ 程度の表面抵抗率を持った材料を用い、ガラス面の端部から $15mm$ 程度の余白をとった残り全面を覆う。

電極の材料としては、導電性インクまたはカーボンシートを使用する。

インクは、印刷用の黒色インク (KIN-I-NOOR 3080FG-BLA NKP1204) と白色インク (同 3080FG-WHI NKP1205) を一定の割合で混合し、黒色インク中のカーボンの量を調節することで必要な抵抗率を得る。

カーボンシートは、神東塗料社製の片面粘着テープ (STR-9140-105) を使用した。仕様書によると表面抵抗率 $\sim 50M\Omega/\square$ である。

スペーサー

極板間にガスを流すためのギャップを形成するため、ガラス周辺部及び内部にスペーサーを設置する。図 3.7 でわかるように、内部のスペーサーは広い面積の極板の間隔を一定に保つと共に、「ねずみの迷路」のようなガス経路を形成し隅々までガスが行きわたるよう考慮されたものである。スペーサーとガラスはエポキシ系接着材で接着され、ガス漏れや剥がれのないように注意して製作される。

ガス及び混合比

使用するガスの種類は、アルゴン、ブタン、フレオンで、基本的には従来使われてきたものと同様である。

フレオンについては、多くの種類がありそれぞれ特性が異なっているため、使用するフレオンの種類を変えた場合最適な動作性能を得るためのガス混合比が変わってくる。過去のテスト

では、R13B1(CF_3Br) での動作性能が良好であったが、環境問題から製造禁止となったため、代替ガスとして R116(C_2F_6) がテストされた。これも良好な動作性能を示したが、高価であることから、現在では工業的に多く使われコストの低い R134a(CH_2FCF_3) を使用している。

また、ブタンとしてはこれまでイソブタンを使用していたが、n-ブタン (ノルマルブタン) でも性能的にイソブタンとほとんど変わらないことが既に試験済みで、イソブタンと n-ブタンの混合ガス (ブタンシルバー、iso-：n- $\sim 3:7$) が安価に入手可能なことから、小型の RPC でブタンシルバーでの動作試験を経て、これを使用することになった。以後、特にことわらない限り、「ブタン」の表記はブタンシルバーを指すものとする。

これらのガスを用いた場合、アルゴン：ブタン：フレオン R134a $= 25:25:50$ の混合比で使用したときの動作性能が良好であるという結果が、過去に小型の RPC を用いたテストで示された。この混合比のガスを「スタンダードガス」と呼ぶことにする。

ところで、スタンダードガスは可燃性のブタンを大量に含む。この混合比では、大気中では可燃性ガスとして扱われる [22]。RPC 内では酸素がないため燃焼の可能性はないが、何らかの原因で大気中に放出されたときの危険性が問題となる。BELLE 実験では非可燃性ガスの使用が義務付けけられているわけではないが、安全面からは非可燃性ガスの使用が望ましく、また仮に事故等が発生すれはその後の使用規制も考え得ることであるため、非可燃性ガスの使用可能性についても研究し、できれば実験当初から非可燃性ガスで運用することが望まれる。これについては、東北学院大学のグループが詳細に研究し、アルゴン:ブタン:フレオン R134a $= 30:8:62$ という混合比が良好であるという報告をした [22]。現在はこの混合比での運用を行なっている。

RPC への非可燃性ガスの使用可能性については東北大学でもその研究を行なった。付録 A でその結果について概説する。

3.4 スーパーレイヤー (Super Layer)

KLM モジュールの特徴の一つに、スーパーレイヤーと呼ばれる構造がある。KLM モジュールのスーパーレイヤーの構造を図 3.8 に示す。

このスーパーレイヤーでは、RPC2 層を一組にし、その上下に一組の読み出し用ストリップを配置する。ストリップは 1 枚が θ 位置 (エンドキャップの場合。バレルでは z 位置と呼んでいる)、もう 1 枚が ϕ 位置の測定用で、RPC は両面からの信号読み出しが可能なことから、1 つの KLM モジュールで粒子の通過位置を決定できる。

重要なことは、高電圧の向きが 2 層の RPC で同じ向きになっており、どちらの RPC がヒットした場合でも上下のストリップの組に同じように信号が発生することである。この方法によれば、個々の RPC の検出効率の低下を η_{loss} としたとき、2 層にすることでその低下を η_{loss}^2 に抑えることができる。また、仮に 1 層が何らかの理由により動作しなくなった場合でも、検出効率は 2 層の時より下がるにせよ、残る 1 層だけで粒子の通過位置を決定できる。読み出しストリップから遠い方の RPC の信号は、波高値が低く見えることになるが、RPC が発生する信号はもともと数 $100mV$ 程度もあるため、とくに問題にはならない (図 3.9)。

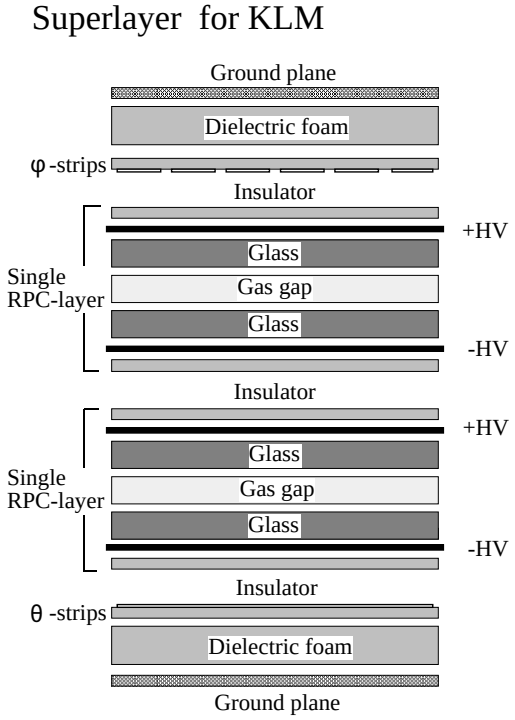


図 3.8: スーパーレイヤーの断面図

また、エンドキャップ KLM では、5 枚の台形の RPC を並べて 1 層の扇型を構成するため、RPC の境界部分の不感領域が KLM の有効領域に現れることになる。この部分の検出効率低下を防ぐため、大きさの異なる RPC を使用して 2 層の RPC の境界が重ならないよう配慮がなされている。

この方法により、KLM では荷電粒子の検出効率 99%以上を目標とする。

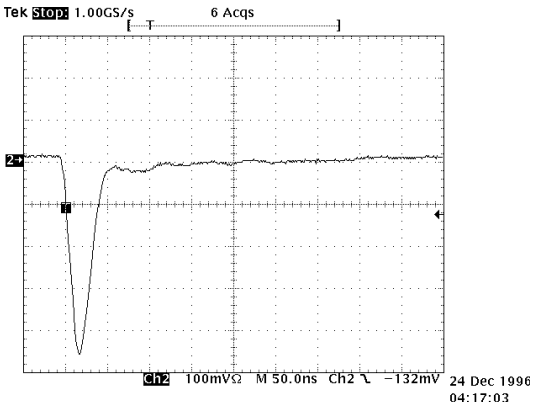


図 3.9: ガラス製 RPC の典型的シグナル。アルゴン:ブタン:フレオン $= 30 : 6 : 64$ の混合比で、$4.25kV/mm$ の高電圧をかけて観測したもの。波高値は $450mV$。

第4章

KLMエンドキャップモジュールの製作

KLMモジュールの製作は、バレル部をバージニア工科大が、エンドキャップ部を東北大学が、それぞれ担当している。以下、東北大学におけるKLMエンドキャップモジュールの製作について概説する。

4.1 RPCの製作

東北大学では、□箱写真解析施設においてRPCの製作及びKLMモジュールの組み立てが行なわれた。

RPCはホコリを□うため、製作はクリーンルーム内で行なわれた。□箱施設内に設置されたクリーンルームは床面積約$60m^2$で、天井部に設置された5台のフィルターユニットから清浄な空気を下方に吹き出し床付近に設けられた□間から室内空気を排出することにより、室内の塵を除去する。パーティクルカウンターによる測定では、4人で製作作業中の場合でも塵粒子の数はクリーンルーム外の1/7程度に抑えられたことがわかった[23]。

KLMエンドキャップモジュール用のRPCは、長辺の長さ約$1m$、短辺の長さ約$40cm$、長さ約$1.8m$の台形であり、モジュールへの組み込みの都合上、若干サイズの小さいものと、両サイズで長辺側の一角を切り落としたもの、合計4種類が使用される。極板間のギャップ保持兼ガス経路形成のためのスペーサーはRPC内部に3本設置される(図4.1)。

製作手順は以下の通りである。

ガラスの洗浄

高抵抗極板用のガラスは、旭硝子社製のフロートガラスで、RPCの形にあらかじめカットされたものが納入される。そのままではホコリや切り出し時の切削油が付着しているため、両面を洗浄して汚れを落す。洗浄方法は、

1. アルコールによる洗浄(2回)
2. ガラス用洗剤による洗浄(1回)
3. 蒸留水で洗剤を洗い流す(□が消えるまで数回繰り返す)

の手順で行なう。

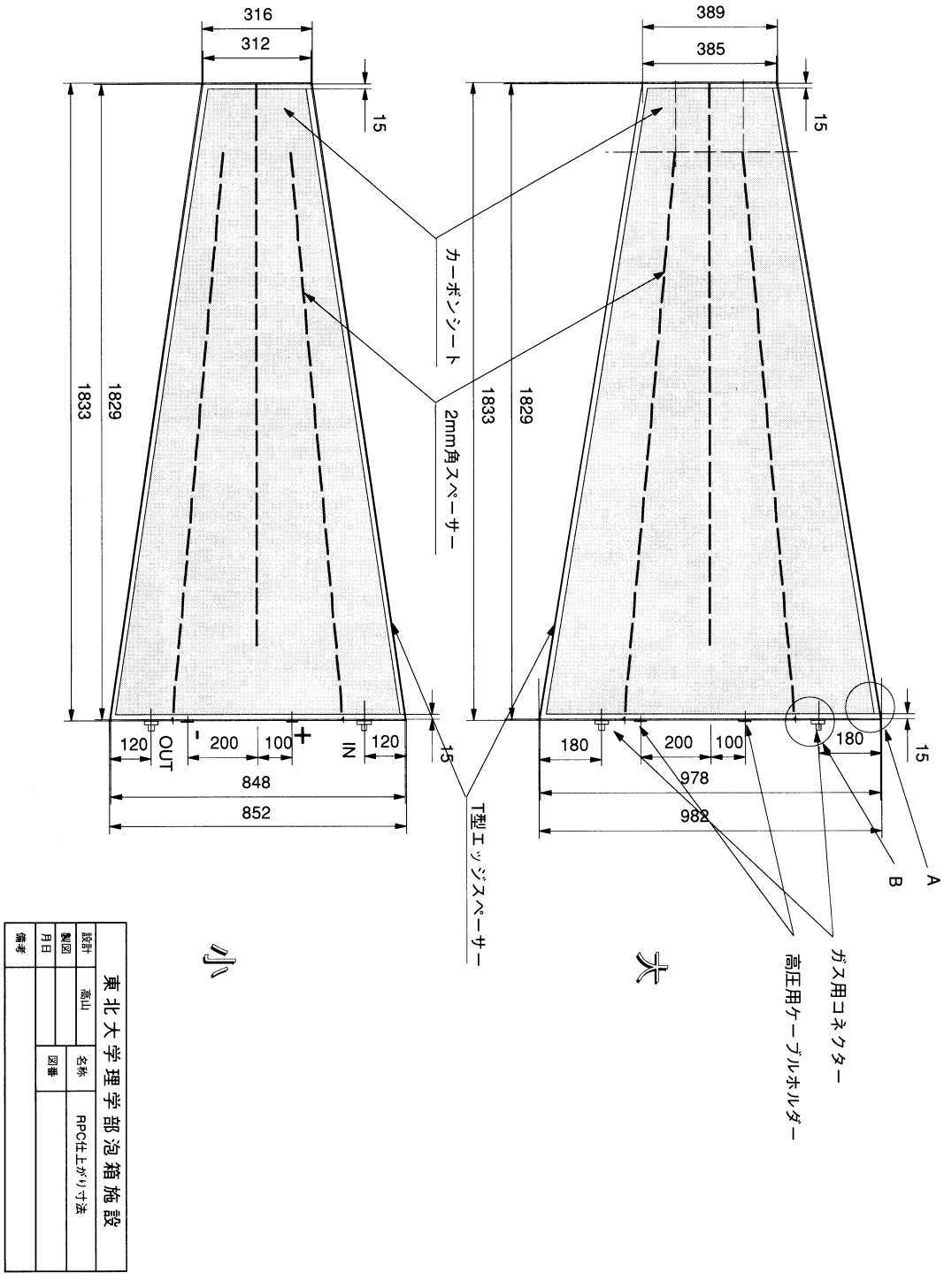


図 4.1: KLM エンドキャップモジュール用 RPC

高電圧供給用電極及び絶縁シートの貼り付け

洗浄したガラスを十分乾燥させた後、高電圧供給用電極をガラスに付ける。カーボンシートの場合、専用の機械を用いてガラスに圧着させる。インクの場合は、スポンジのついたハケを用いて、縦方向、横方向と 2 回重ね塗りをする。

電極の端子を取り付け、端子と短辺側の端との間の対角抵抗を測定する。これは同時に、導通チェックも兼ねている。

その後、絶縁用のポリエステルシートを電極の上から機械で貼り付け、1 枚の極板を完成する。

最後に、RPC 内面にあたるガラス面をもう一度アルコールで洗浄する。

極板の接着

片側の極板を専用の型の中に置き、スペーサーその他の部品を所定の位置に、エポキシ系接着剤 (住友 3M DP-460) で接着する。圧縮ガスを用いてガラス表面のホコリをあらためて取り除き、もう片方の極板をはめて接着する。上からおもりを載せて圧力をかけ、接着剤が十分乾くまで一晩おいておく。

ガス漏れと膨らみの検査

製作した RPC が完全に密封されていることを確認するため、RPC 内部にアルゴンガスを流し、リークディテクターで RPC 周辺部の接着部からの漏れをチェックする。漏れのある箇所は、単純な場合はシリコンゴム (信越シリコーン KE4895T) で塞ぎ、ガス漏れ箇所がなくなるまでチェックを繰り返す。

漏れがなくなれば、RPC 内面のスペーサの接着面の剥がれがあるかどうかを、RPC の膨らみ度を表す r-value を測定して評価する。

これらを調べる方法を、図 4.2 に示す。

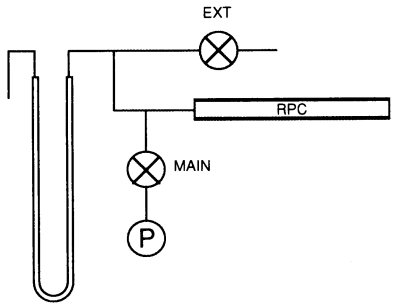


図 4.2: ガス漏れ、膨らみ度のテスト方法

図中の P は空気注入用のシリンジである。RPC のガス出口を塞ぎ、一定体積の空気を注入すると、RPC 内の圧力が上昇する。この圧力の上昇を図の U 字管に入れたシリコンオイル (比重 ~ 0.995) の液面差で読みとる。ガス漏れがあれば RPC 内の圧力が徐々に減少し液面差が小さくなっていく。また、ガラスの接着面がはがれた場合、RPC が膨らむことができ、これにより空気注入直後の圧力差 (= 液面差) が通常のものより小さい値となる。

ガス漏れ率および膨らみ度 (r-value) の定義は以下による [24]。

空気を注入することにより RPC 内の圧力が上昇するが、RPC が若干膨らみ体積が増加するためその分上昇圧力は抑えられる。注入量が微小量であるとき、圧力上昇と体積増加の間に

$$dV = \alpha dP \tag{4.1}$$

を仮定する。

$$VdP + PdV = dmT \tag{4.2}$$

V : RPC 内の体積

P : RPC 内の圧力

dV : RPC 内の体積変化

dP : RPC 内の圧力変化

dm : 注入した物質量

であるから、式 (4.1) を式 (4.2) に代入し、$PV = mT$ を考慮すれば

$$\left(\frac{V}{P} + \alpha\right) dP = V\frac{dm}{m} \tag{4.3}$$

温度・圧力一定の下では物質量変化は体積変化であるので $dm/m = dV/V$、よって

$$\left(\frac{V}{P} + \alpha\right) dP = dV \tag{4.4}$$

これを時間微分すれば

$$\frac{dP}{dt} = r\frac{dV}{dt} \quad , \quad r \equiv \left(\frac{V}{P} + \alpha\right)^{-1} \tag{4.5}$$

式 (4.5) により時間当たりの漏れの量を時間当たり圧力減少量に置き換えることができる。また r$(\equiv (V/P + \alpha)^{-1})$ は最初に注入した空気量とその時点での圧力上昇量により式 (4.3) から求められ、これは膨らみの度合を表す。これを r-value と呼ぶ。

本測定において、r-value は空気注入直後の液面差を注入量で割った値 $(mmAq/cc)$ で表す。また、r-value の値は、その数値が小さいほど膨らんでいることを表す。ガス漏れについては、空気注入後に液面の高さを時間経過とともに記録し、その変化率及び r-value の値から式 (4.5) により求め、cc/min で表す。

本測定では、$30cc$ の空気 (RPC 内部の体積 2.5ℓ に対し 1.2%) を RPC 内に注入し、圧力差を U 字管の液面差で測定する。

このテストでガス漏れあるいは接着面の剝がれの見付かったものはこの時点で不合格とされ廃棄される。実際には、この時点での廃棄率は低く、製作した RPC1525 枚中で 35 枚 (2.3%) であった。

この検査に合格したものは、次節に述べる動作試験にかけられる。

4.2 RPCの性能評価

完成した RPC については、実際に混合ガスを流し高電圧をかけて動作試験を行ない、その性能を評価する。

RPC の性能評価の基準としては主に、動作電圧、暗電流、自発ノイズ発生率、検出効率、時間分解能、位置分解能が挙げられる。しかし、RPC の総数が 1500 枚にも及ぶこと、BELLE 検出器建設のスケジュールから見てあまり時間的余裕がないこと、モジュールに組み込んだ後にも再度動作試験が必要であること、等を考慮し、全ての RPC についてこれら全ての性能評価をすることはやめ、

- 製作初期段階では、詳細なデータをとり性能評価を行なう
- 製作が順調に進行し個々の RPC の性能にバラツキがないことを確認できたら、その後は特徴的な性能のみに着目したテストを行なう
- 最終的な動作試験は、モジュールに組み込んだ後に行ない、その時点で動作不良品が発見されたらその RPC を交換する

とすることにした。

4.2.1 測定値の定義

RPC の性能評価のための測定値の定義を説明する。

高電圧 (HV)

RPC の極板間に電場を発生させるための高電圧は、正・負の極性をもつ高電圧電源から RPC の正極端子・負極端子にそれぞれ接続する。電圧の表記は kV/mm を単位とする。例として正極に $+4.0kV$、負極に $-4.0kV$ をかけた場合、極板間には $8.0kV$ の電位差があり、極板間隔が $2mm$ であるから、HV の表記は $4.0kV/mm$ となる。

検出効率

荷電粒子が RPC を通過した位置が何らかの方法で再構成できたとき、その位置に最も近いストリップがシグナルを出すと期待される。実際にそのストリップがシグナルを出した (ヒッ

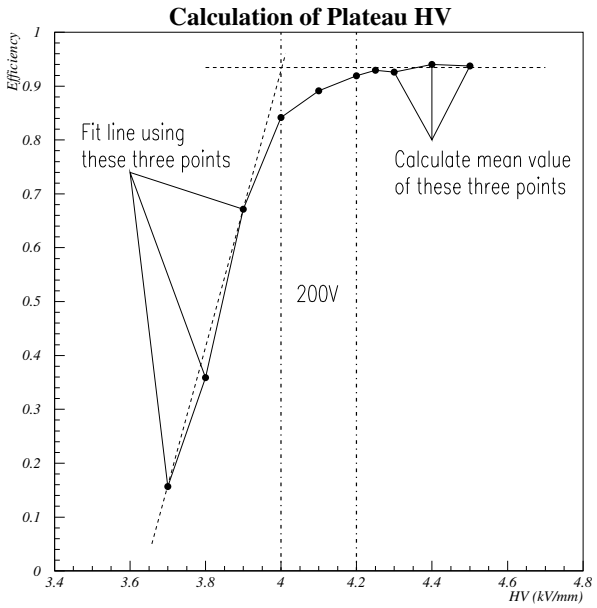


図 4.3: プラトー電圧の求め方

トした) とき、RPC が粒子を検出したものとする。したがって、検出効率 η は一般に

$$\eta = \frac{\text{期待されるストリップが正しくヒットしたイベント数}}{\text{そのストリップにヒットがあると期待されたイベント数}} \tag{4.6}$$

と定義する。

プラトー電圧

HV と検出効率の関係をグラフに表すと、ある電圧以上で検出効率がほとんど一定になる領域が現れる。この領域をプラトー領域といい、その境目の電圧をプラトー電圧と呼ぶ。プラトー曲線からプラトー電圧を求める方法は、以下のとおりである。

電圧上昇に対し検出効率の上昇する割合の大きな 3 点を選び、その 3 点を用いて直線フィットを行なう。次に、十分プラトー領域に入っていると思われる 3 点を選び、この検出効率の平均をとり、先の直線上で検出効率がこの値になる電圧値を求める。この電圧値に $200V/mm$ を足した値をプラトー電圧とする (図 4.3)。

最後に足す $200mV/mm$ の値は経験的なものであり、多くの RPC の測定データでこの電圧値がプラトー領域の下端付近を指すことからこの値を用いている。

自発放電発生率 (シングルカウントレート)

RPC が動作状態にあるときは、自発的な放電が常に発生しており、これがストリップにシグナルとして現れている。この放電の発生率をシングルカウントレートといい、単位時間・単位面積当たりのシグナル数で表す。単位は Hz/cm^2 である。

暗電流

RPC が動作中は、高電圧供給用の電源から RPC に常に微弱電流が流れている。電流値はその極板面積に依存することになるので、単位面積当たりの値で表す。単位は $\mu A/m^2$ である。

ヒットストリップ数

荷電粒子の通過位置がトラッキングにより再構成でき有効なイベントであったときに、荷電粒子の通過により発生するストリーマーが何本のストリップにシグナルを誘起したか、その平均本数でヒットストリップ数を定義する。

4.2.2 宇宙線による動作テスト

製作初期段階では、製作した RPC が正しく動作することを確認するため、宇宙線の測定により詳細な性能評価を行なう。これは、動作不良など製作工程に起因する問題に対しできるだけ初期の段階で対策を施しその後の品質を改善していくためのデータ収集でもある。

この測定の詳細は [23] で述べられている。以下では概略を述べる。

測定システム

本測定では個々の RPC の性能評価が目的であるので、スーパーレイヤーではなくシングルレイヤーでの測定を行なった。測定枚数は一度に 10 枚で、トリガー用の RPC をその上下に配置する。信号回路の数の制限から、使用した読み出しストリップはトリガー用も含め ϕ ストリップのみであり、RPC の性能の 2 次元的な評価はできない。ガス混合比は、スタンダードガス (3.3.4 節) であり、マスフローコントローラでそれぞれのガス流量を調整し、$10cc/min$ で 10 枚の RPC に直列に流す。データ収集系は、ディスクリミネータ + シフトレジスターを一枚に組み込んだ Readout board (96-channel 6U VME board)[25][26] を使用する。時間分解能はシフトレジスターの動作クロックで決まるが、本システムでは $4MHz$ での動作のため $250nsec$ の分解能となり、RPC 個々の時間分解能 ($\sim$ 数 $nsec$) の詳しい測定は不可能である。

図 4.4、4.5 に、RPC のセッティング、データ収集システムを、図 4.6 にトラッキングしたイベントの例を、それぞれ示す。

結果

製造初期のおよそ 300 枚の RPC についての結果を以下にまとめて述べる。

プラトー電圧はおおむね $4.25 \pm 0.05kV/mm$ であった。電圧の高いものを調べたところ、ある特定の時期に使用したスペーサに歪みがあったために極板間隔が若干広くなってしまったためとわかり、その後は品質の悪いものを使用しないことで対処した。また、製作時に接着剤乾燥のためにのせるおもりの置き方も工夫して、極板間隔の均一化を図るようにした。

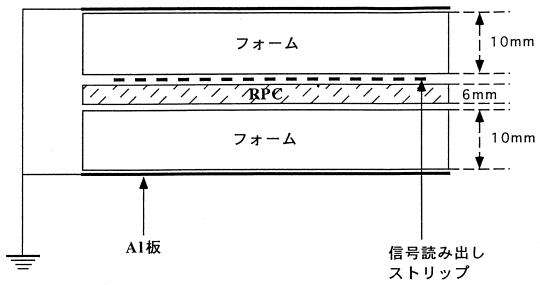


図 4.4: RPC 測定のセッティング

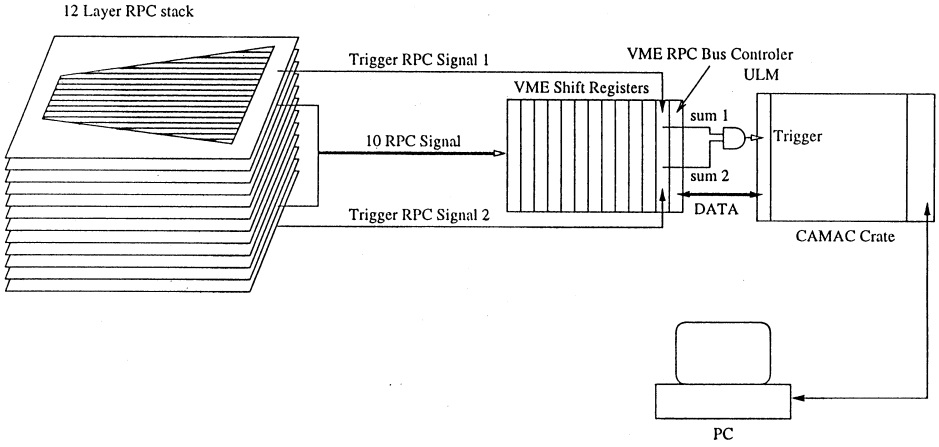


図 4.5: RPC データ収集システム

検出効率については、製造時期に関わらず $88 \pm 3\%$ 程度であり、大幅に低いものもなく、特に問題は見られなかった。

シングルカウントレートは $0.04 \sim 0.1 Hz/cm^2$、平均約 $0.55 Hz/cm^2$ で、分布は大きい方にややテールを引いていた。しかし、シングルレートの大きいものでも検出効率には影響がなく、この程度の値であれば問題はないことになる。

ヒットストリップ数については 1.5 ± 0.3 ストリップ 程度で、電極の抵抗値が大きい程ヒットストリップ数が少なかった。

暗電流については、$0.3 \sim 1.0 \mu A/m^2$、平均約 $0.5 \mu A/m^2$ で、これも分布は大きい方にややテールを引いていた。また、暗電流と検出効率の間には、暗電流の大きいものは検出効率が低い傾向にあることがわかった。したがって、暗電流の大きさをチェックすることで、ある程度の性能が予測できることになる。

以上により、製造した RPC の性能には大きなバラツキは見られず、良くまとまった動作性能を示すことがわかった。また、宇宙線の測定を行なわずに RPC の性能を端的に予測する方法として、暗電流値が使えることがわかった。

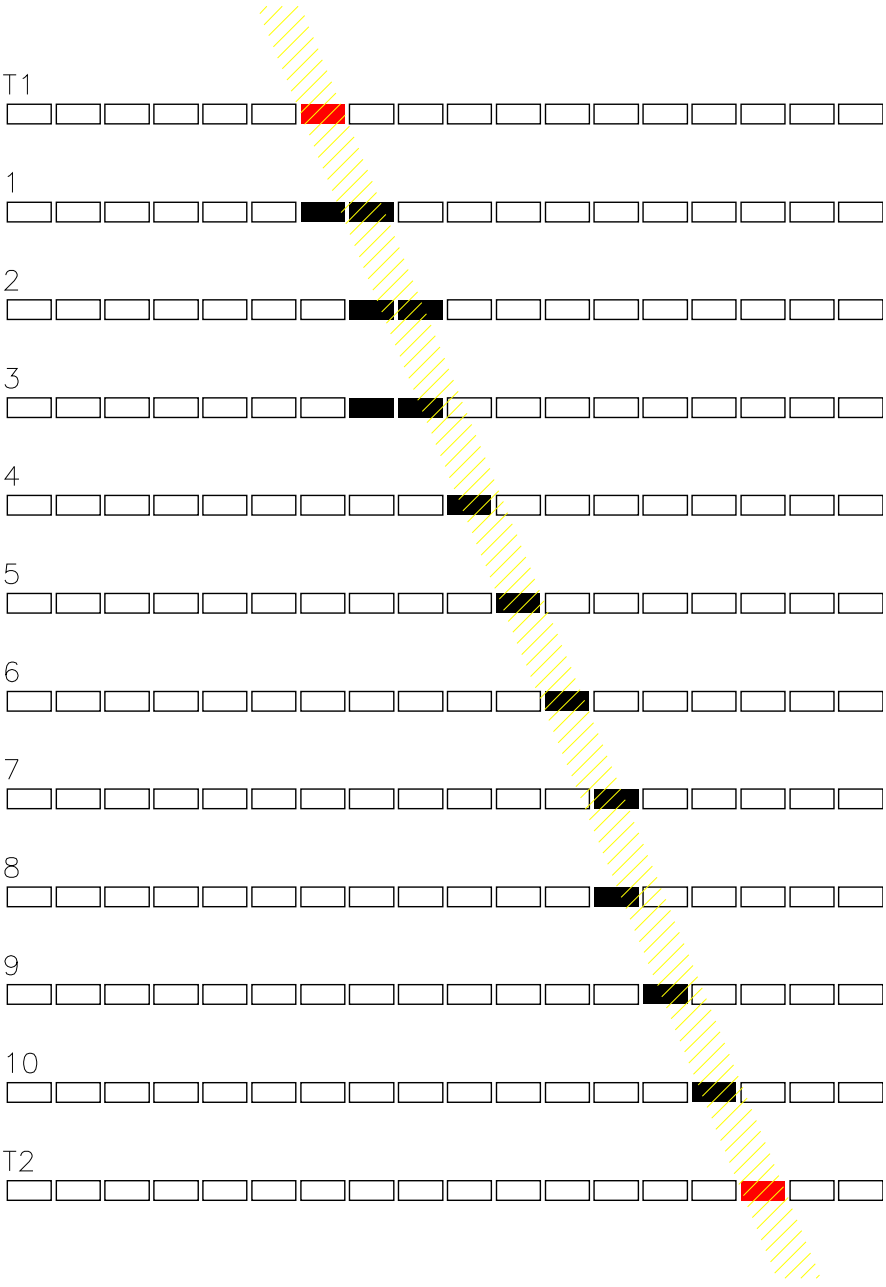


図 4.6: トラッキングしたイベントの例。T1 と T2 がトリガー用 RPC。斜線はトリガーのヒットから再構成したトラック。各層ではヒット (黒い領域) が斜線内にあれば粒子検出できたものとする。

4.2.3 暗電流値による評価

高電圧トレーニング

暗電流の値は、同じ RPC でも動作を始めた直後の値としばらく HV をかけ続けた後の値とで大きく異なり、初めは電流値が大きいものでも電圧をかけ続けるにつれ徐々に下がり、2 週間程度でほぼ一定 ($\sim 0.5\mu A/m^2$) の値をとるようになる。シングルカウントレートも、初めは高かったものがこれに同調して下がっていく。これにつれ検出効率も上昇していくが、こちらは 1 週間程度でほぼ一定値をとるようになり、その後電流値が下がっても検出効率は変わらない。これらの特徴は、RPC の動作の長期安定性を調べるためのテストでその傾向がはっきり現れた (4.5 節)。

このように、RPC が安定した動作をするようになるには、通常 2 週間程度の「試運転」が必要になる。これをトレーニングと呼んでいる。

RPC の製造が順調であり、性能も問題ないことが前節の結果により確認できたので、これ以降は基本的に暗電流値のみをチェックし、トレーニングの完了をもって RPC の動作試験を終了することにした。そして、トレーニングがうまく進まない場合、すなわち HV をかけ続けても暗電流値が下がらないとき、その RPC は問題があると判断し、最終的には宇宙線の測定による性能テストを行なって原因を調べることにした。

トレーニング方法

RPC に最初から高い HV をかけることは、極板間のスパークにより深刻なダメージを与える可能性もあるため、トレーニング中の電圧の設定は暗電流値を見ながら慎重に上げていく必要がある。

実際に行なった方法は、コンピュータで電流値をモニターしながら、$1.0\mu A$(単位面積に直すと約 $0.85\mu A/m^2$) を越えないように高電圧モジュールの出力設定を自動的に徐々に上げていく方法である。HV コントロール用に LeCroy 1458 High Voltage Main Frame を用いた。電圧はプラトー電圧である $4.3kV/mm$ で上昇を止め、その後電流値が $0.6\mu A$ 以下に落ち着いたところでトレーニング終了とする。HV 出力モジュール (LeCroy 1468P、1469N) の端子の数から、一度にトレーニングできる RPC 枚数は 60 枚である。

結果

大部分の RPC は、2 ~ 3 週間程度で問題なくトレーニング終了となった。

トレーニングが進まなかったものについては、同様のものを集めて再度トレーニングを繰り返した。それでも駄目なものは宇宙線テストにかけられた。これらは、製造番号で 1100 ~ 1200 番台のものが多かった。

トレーニングが進まなかった製造番号 1100 ~ 1200 番の RPC の宇宙線テストの結果の例を図 4.7 に示す。ストリップ毎の検出効率を調べると、全体に検出効率が低めで、RPC の中央付近の領域で特に検出効率が低くなっていることがわかる。

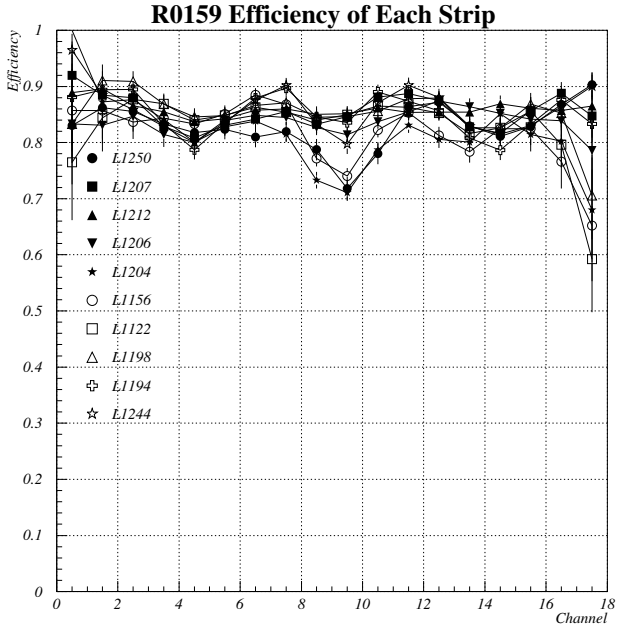


図 4.7: 高電圧トレーニングが進まなかった RPC10 枚のストリップ毎の検出効率の例。横軸はストリップ番号。

製造番号 1100 ~ 1200 番台は、RPC 製作作業員が交替した時期である。この少し前の製造番号 748 番からは、RPC の内部のスペーサの補強を開始した。これはガラスとスペーサの接着が剥がれ RPC の極板間隔が広がってしまった RPC が見付かったため、接着面積を広くとり剥がれにくくするために本来のスペーサの中程に長さ $5cm$ の短いスペーサを添えることで接着面積を増やす措置であった。交替した作業員が製作に不慣れな時期に、この部分に使用した接着剤の量が多過ぎたために極板間の電流リークの原因となり、高電圧がかからなかったものと考えられる。その後、接着剤の使用量に十分注意して製作を進めることで対処し、以後同様の問題は現れなくなった。

4.2.4 まとめ

宇宙線テストの結果は、製作した RPC の性能が KLM の要求を十分満たしていることを示した。

RPC の品質に関しては、製造番号で 500 番以前及び 1100 ~ 1200 番台に性能が悪いものが集中している。これらはいずれも製作技術が未熟な時期であり、RPC 製作中に誤って破損したり、ガス漏れの修復が不可能だったもの、スペーサの剥がれによる膨らみがあるものも含め、製作した RPC1525 枚のうち 193 枚 (13%) が不合格となり廃棄された。RPC の製作には熟練と細心の注意が必要であり、作業中のちょっとした油断が RPC の性能悪化に影響するということである。材質がガラスであるだけに、その取り扱いには十分注意する必要がある。

RPC の性能の指標としては、暗電流値が使えることがわかった。RPC は高電圧トレーニングが必要なため、性能評価をする前には $2 \sim 3$ 週間程度の間 HV をかけておく必要がある。

宇宙線測定を経ずにテストを終了したRPCについては、その動作性能が期待通りであるかどうかは、モジュール組み込み後の宇宙線テストで明らかになる。

4.3 モジュールの組み立て

性能テストを終えて問題ないとされたRPCは、モジュールに組み込まれる。モジュールの構造図を図 4.8 に示す。

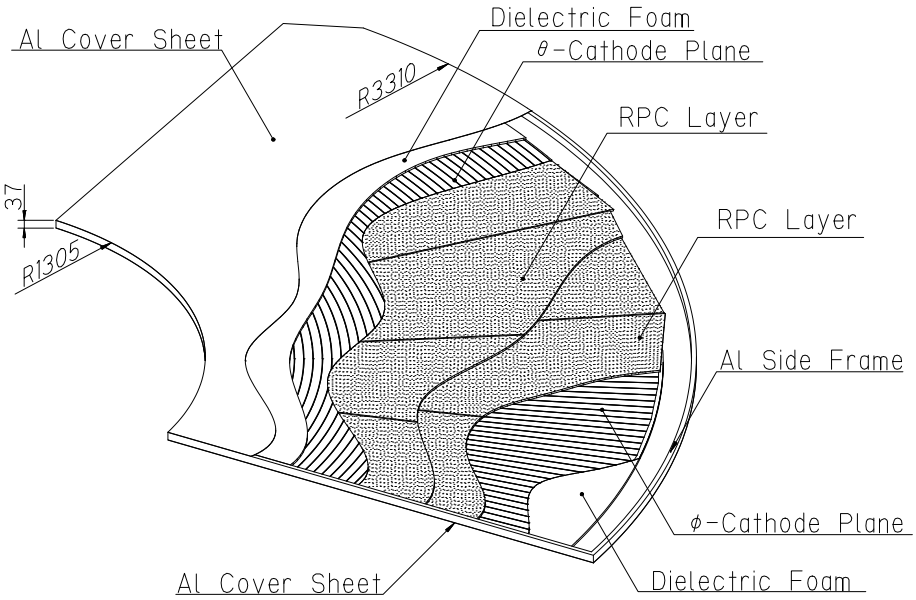


図 4.8: KLM エンドキャップモジュールの構造

4.3.1 RPCの組み込み

KLM モジュールは、アルミニウム製のフレームにスーパーレイヤー構造を組み込んだものである。このフレームがグラウンドシールドの役割を果たす。

アルミフレームの片側のアルミカバーを開け、絶縁フォームと θ ストリップシートを敷く。所定の大きさのRPCを端から順に敷き詰める。この際、RPCの電極の種類の違いにより性能が異なることが考えられるため、一つのモジュールとしての性能の一様性を重視し、一つのモジュールに組み込むRPCはできる限り同じ種類の電極を持つものを使用するようにした。RPCの周囲には衝撃によるRPCの破損を防ぐための厚さ $6mm$ のゴム製クッションが設置される。RPCのガスコネクタを各層毎にチューブで直列につないでいく。2層のRPCを敷き詰めたら ϕ ストリップシートを敷く。両面のストリップから出ている信号線をコネクタに接続し、RPCのHV端子もHVケーブルに接続する。絶縁フォームを敷いて、アルミカバーを閉じれば組み込み終了である。最後にアルミフレーム全体を絶縁フィルムで覆って、モジュールの完成であるが、その前に以下に述べるガス漏れチェック、導通チェックで問題ないことを確認する。

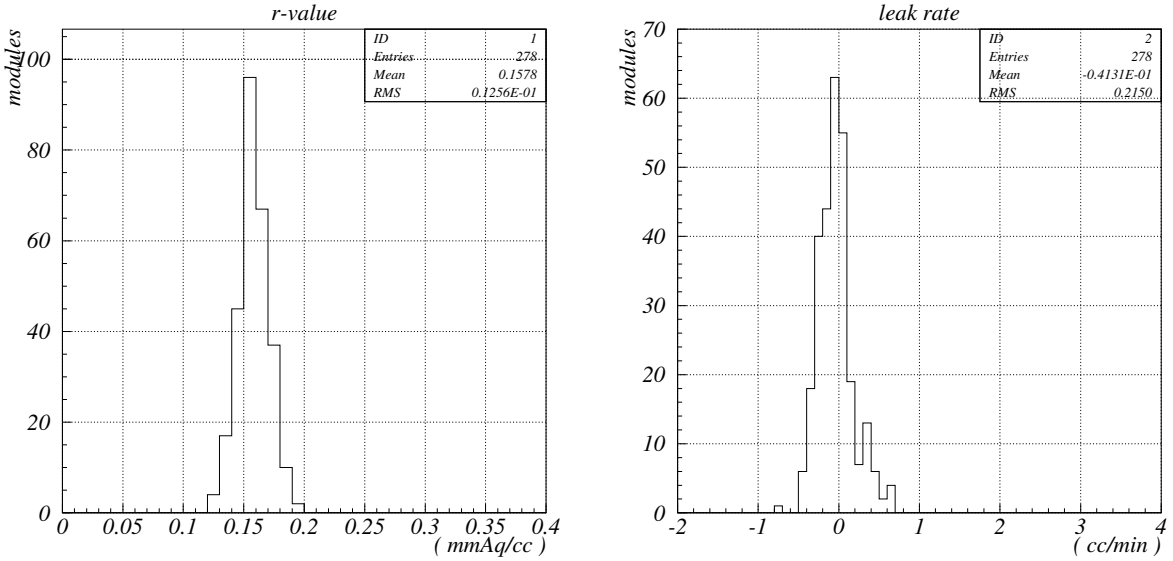
4.3.2 膨らみ度、ガス漏れ率の測定

モジュールに組み込まれた RPC は、この時点で再度、膨らみ度 (r-value) 及びガス漏れ率の測定を受ける。

本測定では、モジュールのガス出口を塞ぎ、直列に接続されている 1 層分 5 枚の RPC に対し $120cc$ の空気を注入し、圧力差を U 字管の液面差で測定する。5RPC 内の体積の合計は約 12.1ℓ であるので、注入量は体積比 1%である。

これらの値は本来、測定時の気温や気圧によっても変わる。しかし、これらが厳密に一致した条件はなかなか得られないため、本測定においてはこれらの差を無視している。

製作時点で合格となったモジュールの r-value 及びガス漏れ率の分布を図 4.9 に示す。測定数が 139 モジュールと多いのは、次章で述べる KEK での測定の結果 RPC の動作不良やガス漏れがあることがわかったために RPC を交換して再測定したものを含んでいるためである。



(a) r-value　　(b) ガス漏れ率

図 4.9: 製作時点でのモジュールの (a) 膨らみ度 (r-value)、(b) ガス漏れ率の分布

R-value はまとまった分布をし、$\sim\ 0.16 \pm 0.01 mmAq/cc$ であった。またガス漏れ率は $\sim -0.04 \pm 0.2 cc/min$ となった。

ガス漏れ率で負の値を取っているものは、空気が RPC 内部に流入しているように見えたことを意味する。これらの理由としては、気温や気圧が測定中に変化したことによること、及び液面差の読み取り誤差によるものと考えられる。

4.3.3 導通チェック

ガス漏れ等の問題がなければ HV ケーブル及びストリップの導通チェックを行なう。これらの方法は以下による。

モジュールにアルゴンとフレオンを 1:1 で混合したガスを流し、HV を徐々に上げていく。およそ $3.6kV/mm$ 付近でシグナル (宇宙線 + シングルカウントによる) が出始めるので、ストリップからの信号線一本ずつをディスクリミネータを通して NIM のスケーラに入れ、カウントすることを確認する。カウントしないチャンネルがあれば、モジュールを開けてストリップからの信号線の断線をチェックし、問題箇所を直す。

4.4 製作数

平成 7 年 12 月に開始したこれらの作業は、まず RPC が平成 9 年 10 月に 1525 枚の製作を完了し、モジュールの製作が平成 9 年 12 月に 120 個全ての製作を完了した。

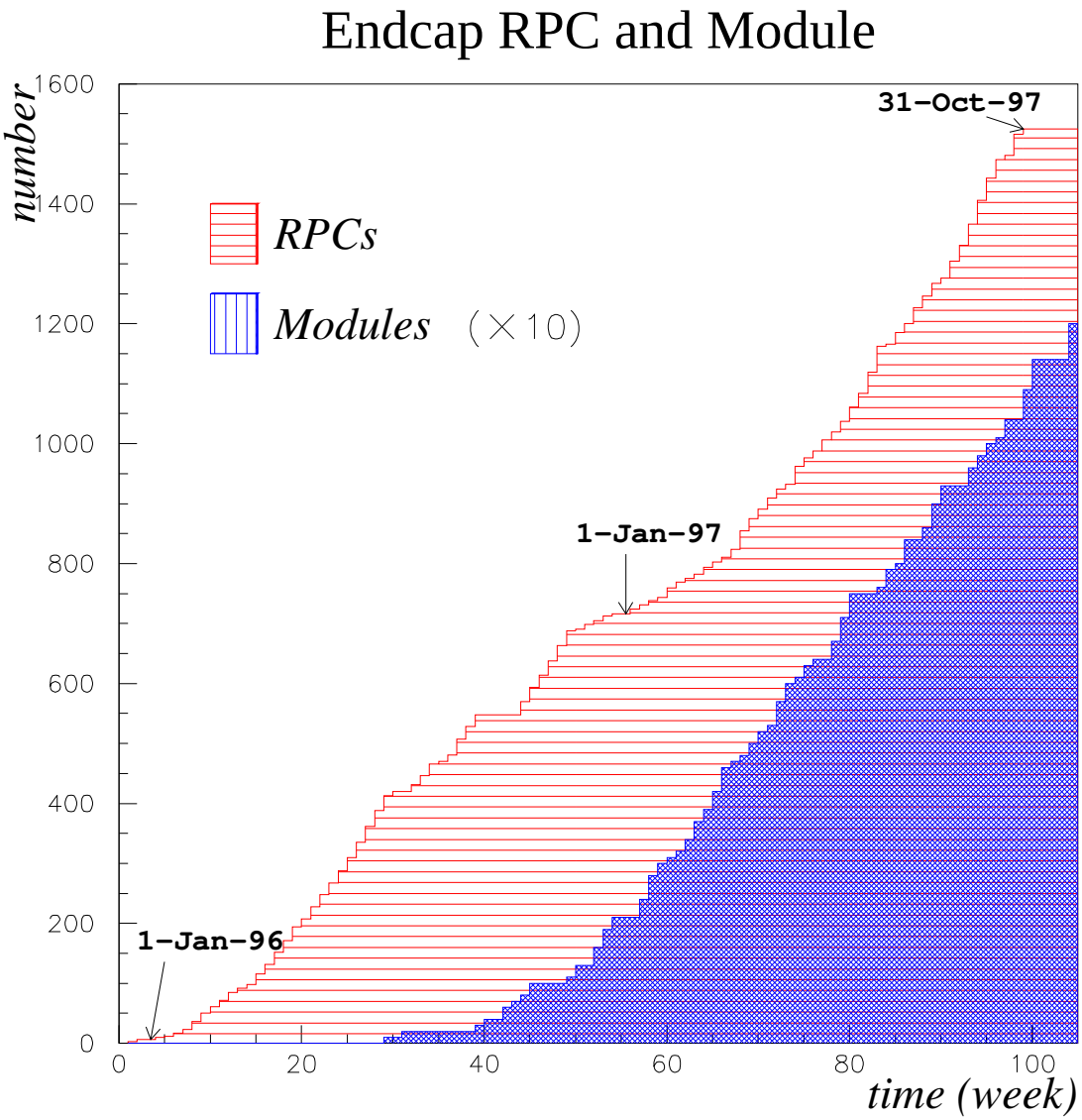


図 4.10: RPC 及びモジュールの生産数の推移

4.5 長期動作テスト

BELLE 実験は 10 年にわたって行なわれる予定であるので、RPC に要求される性能も単に検出効率が高いといったものだけでなく、高い性能を長期間にわたって維持できることが重要である。そのため、個々の RPC の性能チェックとは別に長期テスト用に RPC を用意し、長期間動作させることで性能にどのような変化があるかを調べている。

図 4.11 に検出効率の時間変化を示す。高電圧をかけ始めてから 600 日以上が経過しているが、現在まで安定した動作を続けている。測定開始から 30 日目まではフレオンとして R116 を用いていたが、それ以降は R134a を用いている。また、この時期の検出効率は 60 ~ 70%と低いものだったが、常時高電圧をかけておくようにしておくことで検出効率は上昇し約 30 日が経過すると現在のような値を得るようになった。

140 日目付近で 10 日程停電のために高電圧・ガスともに流していなかった時期がある。この時期の前後の検出効率に変化がないことから、RPC は一度検出効率が上がった状態になれば、電圧を落して再び高電圧をかけるような場合でも検出効率が下がってしまうようなことはないとわかる。

次にシングルカウントレート・暗電流の時間変化を図 4.12、4.13 に示す。検出効率の低い時期にはシングルカウントレート・暗電流共に大変大きく、検出効率の上昇に伴なってこれらの値が下がっていることがわかる。また検出効率がおおむね一定の値を取るようになってからもシングルレート・暗電流は下がり続け、約 50 ~ 60 日程で現在の値をとるようになっている。

このように電圧をかけたばかりの頃のシングルカウントレート・暗電流の値が大変大きな理由としては、製造時に RPC 内に残ったホコリやガラス表面の汚れ等が極板間に高電圧がかかることにより放電を起し焼かれていることが考えられる。いわば高電圧をかけることにより RPC 内を洗浄しているのである。このように内部の塵などを取り除いている間はシングルカウントレートが大きいため極板間に粒子の検出に必要な電場を生成することができず検出効率も上がらない。粒子の検出が可能なレベルにまで達しても、内部が完全に洗浄されるまでは暗電流値が下がり続けるものと思われる。また、ガラス極板の表面にガス分子が吸着することによりガラス表面の仕事関数が増大し光電効果を抑えることでシングルカウントレートが下がるとも考えられている。

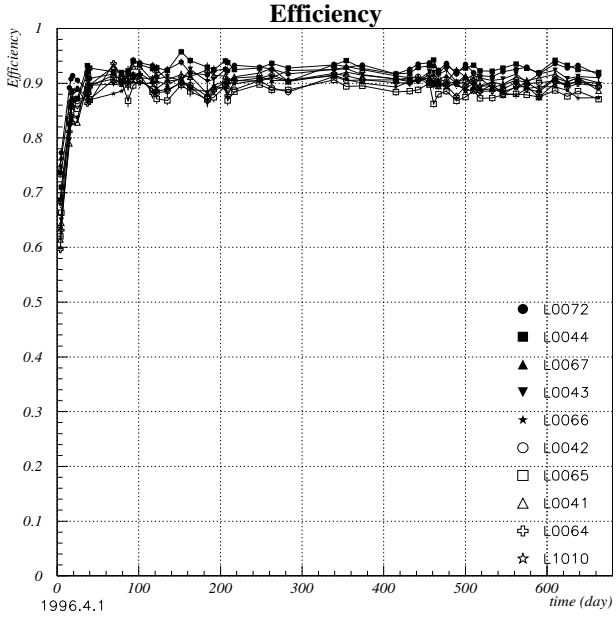


図 4.11: 長期テストにおける検出効率の時間変化

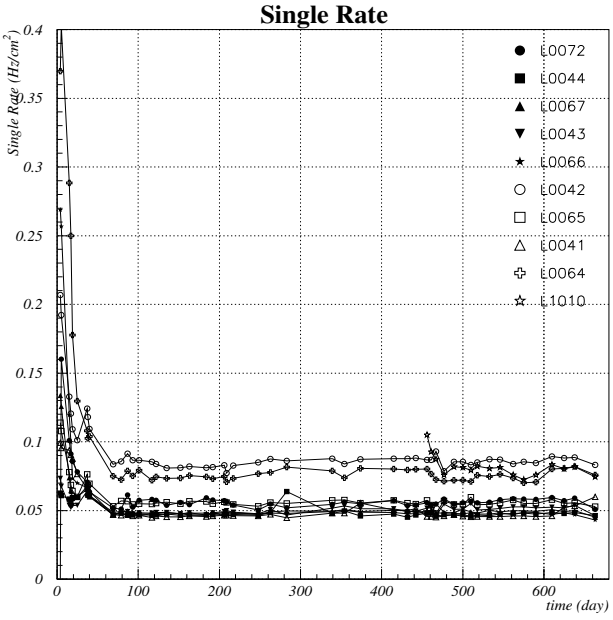


図 4.12: 長期テストにおけるシングルカウントレートの時間変化

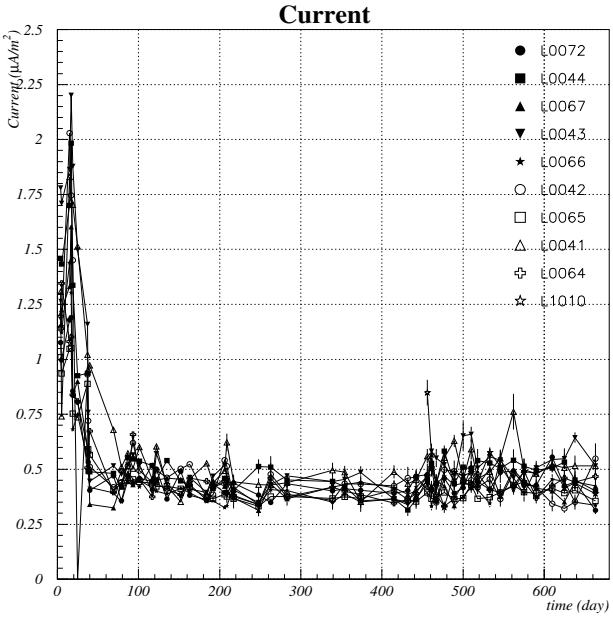


図 4.13: 長期テストにおける暗電流の時間変化

第5章

KEK テストベンチでの測定

KEK でのテストは、筑波実験ホール地下 4 階の実験準備室で行なわれた。

ここで行なう測定の主目的は、搬送によるモジュール破損の有無の検査をすること、及び、宇宙線の測定によりモジュールの性能が予定通りであるかを確認し、BELLE エンドヨークへインストールする際の資料とすることである。

また、本測定で使用する測定システムは、テストとはいえ BELLE 実験本番で使用するものと全く同様のものである。このシステムが全体として正しく機能し、KLM の運用・データ収集に問題がないかどうかを確かめることも、本測定の重要な目的である。

5.1 搬送

東北大学 □ 箱写真解析施設で製作された KLM エンドキャップモジュールの KEK への搬送は、運送会社の大型トラックで行なった。一度に運べるモジュール数は、その大きさから最大で 20 枚であり、BELLE 検出器には 112 枚必要であるから、最低 6 回は搬送する必要がある。

積載方法は、KLM モジュールを入れたモジュール立て (搬送用台車) ごと荷台に載せ、防水・防塵用のシートをかけ、ロープで固定するというだけである。RPC の材質がガラスであるため、搬送中の振動や衝撃等による破損が一番の懸念であった。そのため、搬送用のトラックは、通常のものより衝撃を吸収できるというエアサスペンション仕様のものが使用された。図 5.1 は、通常車 (リーフサスペンション) とエアサス車の衝撃吸収の違いを示したデータである (明仙運輸提供資料による)。コンクリート道路でのトラック荷台後部の上下振動のピーク値を加速度 G で表すと、エアサス車は通常車に比べ平均約 36%の振動低減が見られる。しかし、これで大丈夫かどうかは、実際に搬送するまでわからないことでもあった。

5.2 測定システム

5.2.1 配置

東北大学から搬送されたモジュールは、実験準備室内に用意されたストッカーに移し替えられ、測定が行なわれる。図 5.2 にテストベンチのモジュールの配置を示す。モジュールは図のように立てた状態で測定する。測定線源は宇宙線であり、ほとんどがモジュールの面に対し低

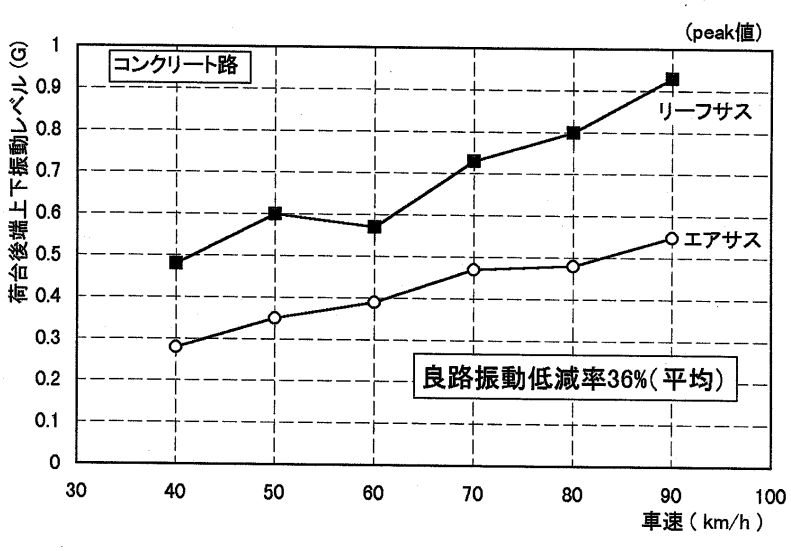


図 5.1: 通常車とエアサス車の衝撃吸収の違い

い角度で入射することになる。

図 5.2: テストベンチの配置の図。中央の扇型のものが測定するモジュール

5.2.2 ガス系

図 5.3 にガス系の概略図を示す。

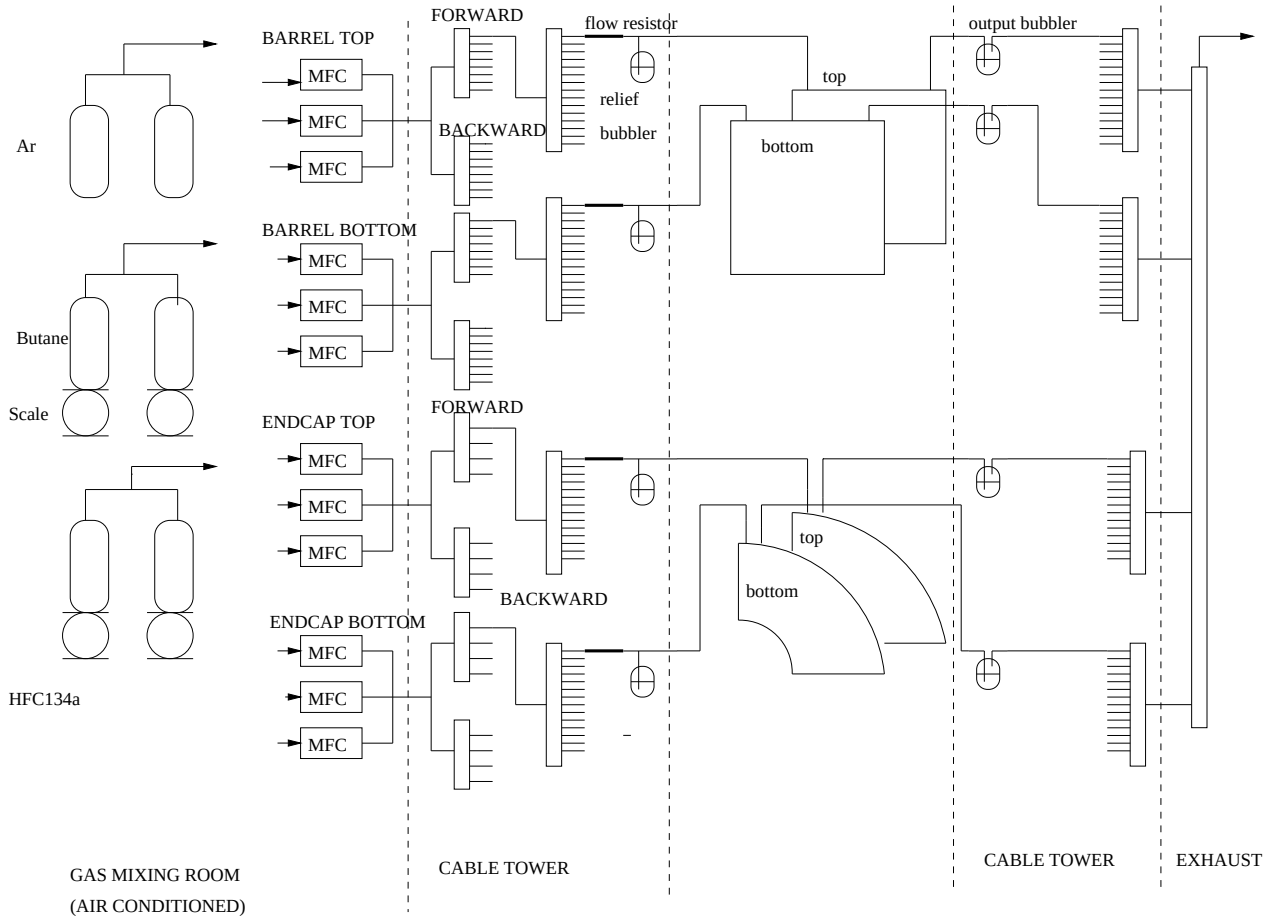


図 5.3: ガス分配系

使用するガス

ガスは、アルゴン、ブタン、フレオン R134a をマスフローコントローラ (MKS Instruments 647B Flow/Pressure Controller) で流量調節・混合し、各モジュールに分配する。

ガス混合比は、当初はこれまでのテストで動作性能が良いとされてきたスタンダードガス (アルゴン:ブタン:フレオン $= 25 : 25 : 50$、3.3.4 節を参照) の割合であった。しかし、前述のようにこの比では混合ガスは可燃性ガスとなり、安全性の面から好ましくないとの指摘があったため、本測定の途中 97 年 7 月から非可燃性ガスとなる混合比 (アルゴン:ブタン:フレオン $= 30 : 8 : 62$) に切替えた [22]。

系統数

1 つのモジュールでは、一層分 5 枚の RPC を直列につないで 1 系統とし、2 層それぞれを独立系統としてガスを流すので、1 モジュールあたり 2 系統必要である。この方法では、1 系統のモジュール内体積は約 12.1ℓ となる。ガス流量は 1 系統当たり 約 $12cc/min$ である。

ガス置換に要する時間

ガスの置換にかかる時間は、一般には以下のように考えられる。

はじめ空気で満たされていた体積 V_0 について、時刻 t にガス A が $a = V_A/V_0$ の割合で含まれていたとき、ガス A の流入量 $(=$ 空気 $+$ ガス A の流出量$)$ を v として、単位時間あたり V_0 中のガス A の増加量は $(1-a)v$、したがって

$$\frac{dV_A}{dt} = (1-a)v$$

より

$$a = 1 - e^{-\frac{v}{V_0}t}$$

これによると、$V_0 = 12.1\ell$、$v = 12cc/min$ として、$a > 0.99$ となるのに 77 時間以上かかることになる。

しかし、RPC ではガス層が厚さ 2mm と非常に薄く、ガス経路も「ねずみの迷路」形式のため細長く、流入したガスが一様に拡散しにくい構造になっている。そのため、ガスは流入口から順に、ところてん式に空気を押し出す形で置換が進む。

実際にガス置換の様子が見える測定データを図 5.4 に示す。図中、各層に見られる白い部分は、気温が下がったことでブタンがガス混合器の手前の配管内で液化して流れなくなったことにより、RPC 内の放電が止まらず極板間に十分な電場が形成されないために粒子検出不可能になった領域である (6.4.2 節)。時間の経過とともにこの領域が移動していく様子がわかる。

したがって、流量約 $12cc/min$ では全体積の置換はおよそ 17 時間で終ることになる。本測定では、余裕をもってガス流入開始から丸 2 日以上おいてから測定を開始することにした。

分配部

分配部では、各系統への流量が同じになるよう設定する必要があるが、この実現のために 1 系統ごとにマスフローコントローラをつけることは、数の多さからみて無理である。

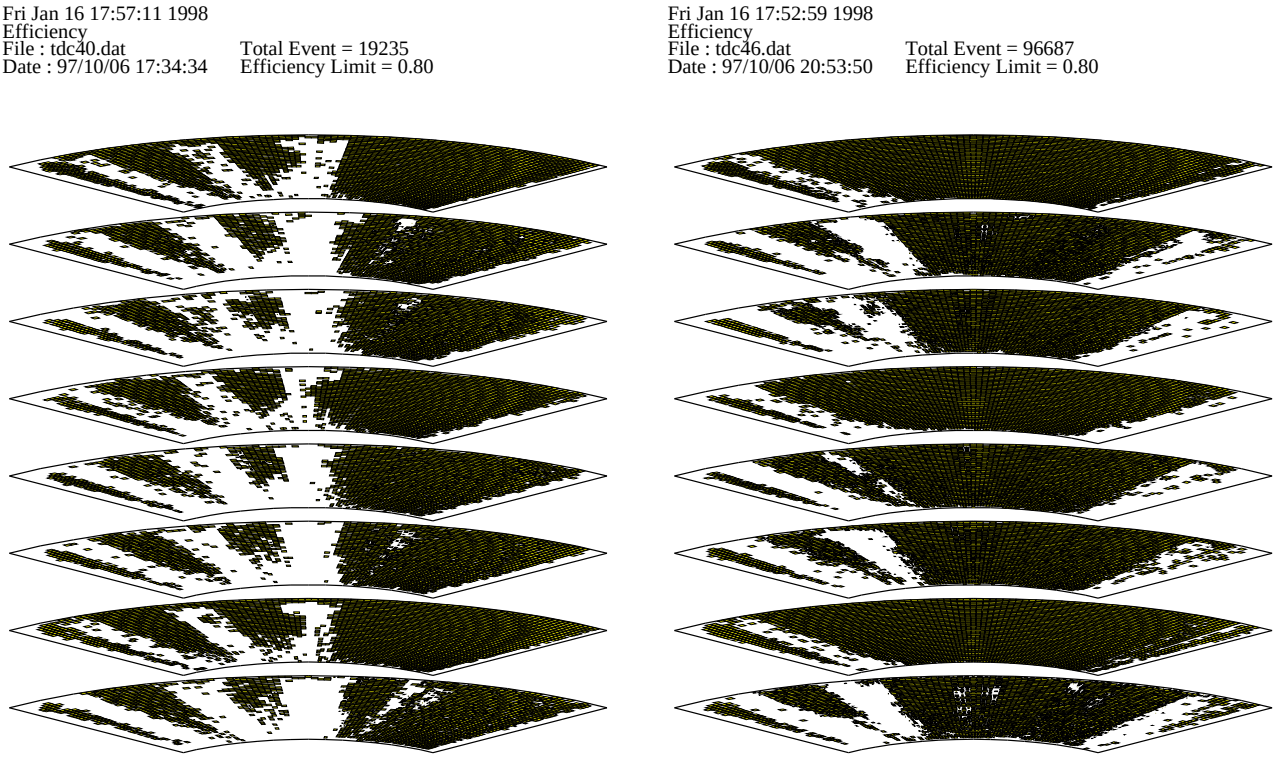
一般に、圧力一定ならばガス流量は各配管の抵抗の大きさによって決まる。配管の各部分のコンダクタンス C_i に対し全コンダクタンス C は $1/C = \sum^i 1/C_i$ であり、流量 Q は

$$Q = C\Delta P \quad , \quad \Delta P : C \text{ の両端の圧力差}$$

である。したがって、分配部で各系統への抵抗が等しければ、各系統の流量は同じになることになる。しかし実際には、配管の長さ・取り回しの違いや各 RPC・各モジュールの抵抗が等しいとは限らないことから、各系統の抵抗は等しくはならない。

そこで、考えうるこれらの抵抗より遙かに大きな抵抗を各系統に設ければ、抵抗はほとんどこの値で決まり、各系統はほぼ同じ流量で流れることになる。

この実現には、各系統に非常に細い配管部分を設ければ良い。現在使用しているのは、FISHER SCIENTIFIC 社製のステンレスチューブ、05701103 SS TUBE で、管の内径が $100\mu m$、外径 $630\mu m$、長さ $10cm$ である。



(a) 10 月 16 日 17 時 34 分　　(b) 同 20 時 53 分

図 5.4: モジュール内のガス置換の様子。ガスは各層で図の右上から左上へ「ねずみの迷路」式に流れる。灰色の部分が粒子検出率の高い領域。白い部分が粒子検出不能になった領域。右図 (b) は左図 (a) の 3 時間 19 分後の様子。白い部分が出口方向へ移動しているのがわかる。

排気部バブラー及びリリーフバブラー

各系統で RPC の後ろにはガスが流れていることを確認するためのバブラーが設置される。また、モジュールへのガス導入部には、ガス流入を抑制するためのリリーフバブラーが設けられた。

RPC 内のガス圧が上がると、RPC が膨らんで極板間隔が広がり、電場が小さくなったり不均一になり、性能悪化につながる。また、ガラスの接着面が剥がれたり、最悪の場合膨らみによりガラスが割れたりすることも考えられる。リリーフバブラーの設置により、一定以上の圧力のガスが流入しようとしたときにガスがそこから漏れ逃げていくことで RPC 内の圧力上昇を抑制し、RPC を守ることができる。

RPC 内のガス圧はバブラーの深さで決まる。排気バブラーは、シリコンオイル (比重 ~ 0.995) の中に深さ約 $5mm$ までガスチューブが挿入されているので、通常は約 $5mmAq$ 程度の圧力となる。リリーフバブラーは深さ約 $15mm$ としたので、最大でも約 $15mmAq$ 程度の圧力しかかからないことになる。これは、過去のテストで $50mmAq$ 程度の圧力ならば耐えられるという結果があるため、余裕をもって設定したものである。

排気系

混合ガスの比重が空気より大きく、そのままでは地下 4 階から地上に排出されないため、排気システムを構築する必要がある。

非可燃性ガスの場合平均分子量約 79.9 となり、空気が約 29 であるから、空気に比べ 2.8 倍の重さである。地上までの $20m$ の排気パイプを設けると、下端では約 $46mmAq$ の圧力がかかることになる。

当初は、RPC から排出されたガスにヘリウムガスを混合して比重を軽くし自然排出する方法もテストされたが、混合ガスとヘリウムガスをおよそ 1:2 の比で混ぜる必要があるため、使用するヘリウムガスが大量になり、無駄が多すぎることがわかった。その後、真空ポンプの一種であるベンチュリーポンプの原理を利用して機械的に排出する案が出され、試作およびテストを経てこれが採用された。

図 5.5 に排気系の概略図を示す。ベンチュリーポンプにより排気系に約 $-250mmAq$ の陰圧が発生する。RPC からのガスは一度バッファタンクに溜められる。タンク内の圧力と大気圧との差をセンサーで計り、この差が 0 となるようにバッファタンク出口のコントロールバルブの調整をコンピュータにより自動的に行なう。

5.2.3 高電圧系

RPC の動作に必要な高電圧のコントロールには、LeCroy 1458 High Voltage Main Frame (以下では HV メインフレームと表記する) を使用し、ネガティブ用に $-3.5kV$ まで発生できる 1469N モジュールを、ポジティブ用に $+6.0kV$ まで発生できる 1468P モジュールを、それぞれ使用する。実際のオペレーション時は極板間電位差 $8.0kV$ 以上が必要であるので、$-3.5kV/+4.5kV$

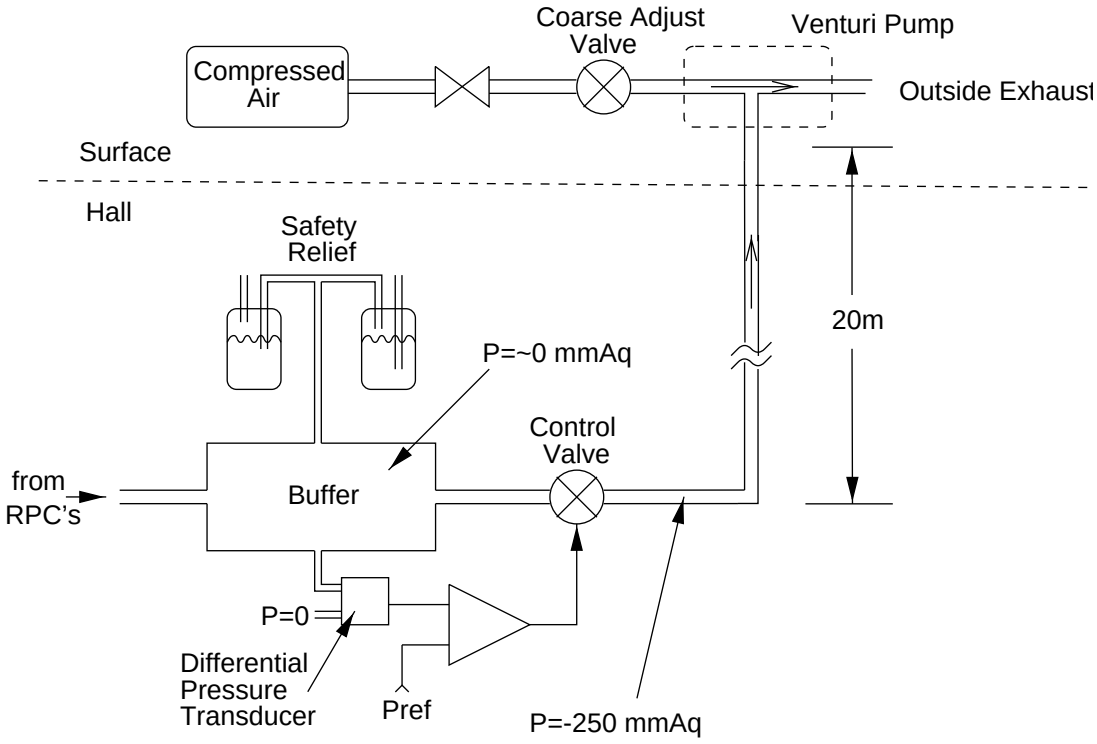


図 5.5: 排気系

以上という、非対称な電圧のかけ方になる。

電圧のコントロールは、ソフトウェアで HV メインフレームと通信しながら行なう。データとしては、設定電圧、及び、実際にかかっている電圧と電流値とを知ることができる。

図 5.6 に高電圧モニターパネルを示す。

系統および電圧設定

高電圧の分配は、ポジティブは各モジュールで RPC1 層分に 1 系統ずつ、ネガティブは各 RPC に 1 系統ずつ割り当てた。ただし、ネガティブの電圧は、高電圧モジュール 1469N の仕様により、RPC 1 枚ずつの電圧コントロールをするのは不可能である。したがって、本測定での電圧の設定は、ポジティブは RPC1 層単位で設定し、ネガティブは全て $-3.5kV$ に統一して測定することにした。

5.2.4 データ収集系

テストベンチでのデータ収集系の概略図を図 5.7 に示す。

宇宙線のトリガー

本測定においては、信号処理系の数に限りがあったため、一度に測定できるモジュール枚数は 8 枚であった。このうち、3 枚をトリガーモジュールとし、残り 5 枚を測定モジュールとし

図 5.6: 高電圧モニターパネル

た。測定回数を減らすため、同じ 8 枚のセットで、トリガーモジュールの位置を第 1、4、8 枚目にした測定と、第 2、5、7 枚目にした測定を行なって、8 枚全ての測定を無駄なく行なうことにした。

FASTBUS TDC + VME

BELLE のデータ収集系は FASTBUS TDC+VME という方式を取ることになっており [27]、KLM グループでは早い段階から FASTBUS TDC を用いてこの方式でのテストを行なってきた。

KLM モジュールからの信号は、各ストリップごとに、VME クレートを利用した Readout board (96-channel 6U VME board)[25][26] に入る。1 枚の Readout board で 96 本の信号線入力が可能で、内部で 12 チャンネルずつの組に分けて処理され、出力は 8 本である。この出力が FASTBUS TDC の各チャンネルに入る。TDC のデータは、FASTBUS−VME インターフェイスを通して VME に送られ、データ収集用ワークステーションで読み取る。

Readout Board の内部処理は、Time Multiplex & Pipeline という方法である。KLM は延べ面積がおよそ $1800m^2$ という広大なものになるため、取り出す信号線数がバレル・エンドキャップを合わせて 37984 本に及ぶ。高価な TDC の使用枚数を減らす工夫として、この手法がとられることになった。

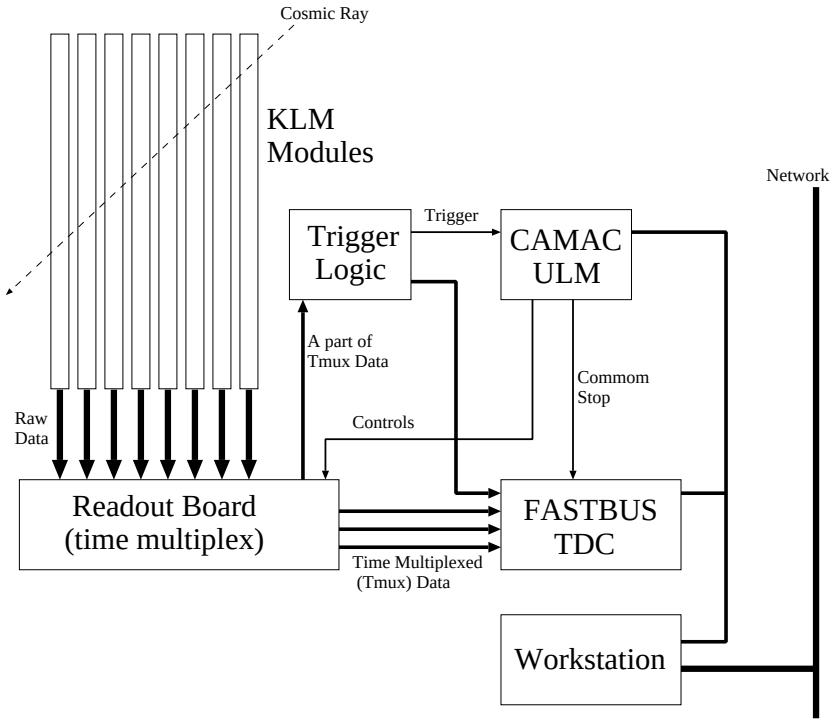


図 5.7: データ収集系

Time Multiplex & Pipeline

Time Multiplex & Pipeline による信号処理は、各信号線のヒット情報をまとめてパルス列に変換し、マルチバッファ TDC で読み取ったあと、TDC の時間情報を信号線の位置情報に変換しなおしてチャンネル番号を割り出すという方法である [28]。まとめた分のチャンネル数を TDC 1 チャンネルで読めるメリットがある。反面、それぞれのチャンネルの正確な時間情報は失われ、ゲート幅程度の時間分解能しか得られなくなる。

図 5.8 に Time Multiplex & Pipeline の概略を示す。

本測定では、KLM モジュール からの信号線 12 本を一組とし、これを単位として 1 つの出力を作る。各信号線には、一組のなかで 0 から 11 までのチャンネル番号を付けて区別する。

12 本の信号線のうち 最も早く来た信号の時間情報を記録するため、最も早い信号が来た直後に、クロックに同期させず直ちにパルスを出力する。これを Fast OR 信号と呼ぶ。

次に、一番早く信号が来たものを基準に $50nsec$ のゲートを開け、この間に入った各信号線の信号をディスクリミネータを通して個別に取り込む。これが各チャンネルのヒット情報である。

次に、チャンネル 0 から 11 まで順に、クロックに同期して、そのチャンネルがヒットありならば論理パルスを出し、ヒットなしならばパルスを出さない、という方法で、パルスの列を作る。これが Pipeline scheme である。12 チャンネル分終ったら、終ったという目印のためのパルスを付け加える。これを End Marker と呼ぶ。

このパルス列が TDC 1 チャンネルに入る。TDC はコモンストップモードで使用する。本 TDC(LeCroy 1877S TDC) は 1 チャンネル当たり 16 段のバッファを持っており、各バッファは

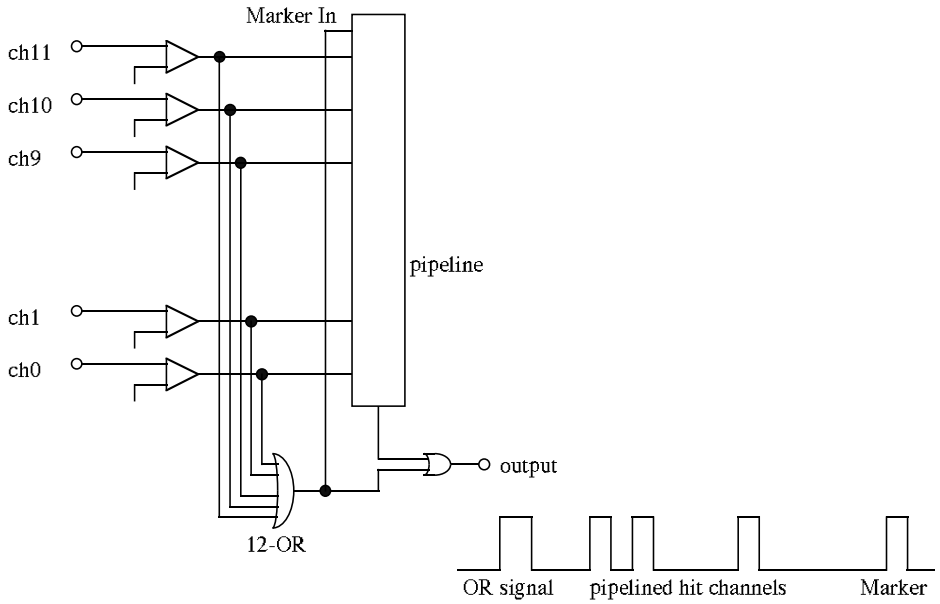


図 5.8: Time Multiplex & Pipeline scheme

パルス到着からストップ信号入力までの時間を記録する。TDC 1 チャンネルには、FastOR、12 チャンネル分の信号、EndMarker を合わせて最大で 14 個の時間情報が記録されることになる。

時間から位置への変換は、解析プログラム中で各パルスと FastOR との時間差 (または End Marker との時間差) からストリップ位置を割り出して求める。

5.3 解析方法

5.3.1 オフライン解析

テストベンチでのデータの解析は、オフライン解析である。これは、データ収集用のコンピュータの処理能力が、データ収集のみを想定して設定されたため、オンラインで解析を行なうには不十分であるためである。収集されたデータファイルは、解析用の別のコンピュータに転送してから解析にかけられる。

本測定の目的から、解析データとしては、まず検出効率、特にその面積が広いことから場所依存性がどの程度存在するかということ、そしてヒットストリップ数、すなわち 1 つのトラックについて各層で何本のストリップが信号をだすかということ、が重要となる。

5.3.2 トラッキング

宇宙線通過を空間再構成するためのトラッキングのアルゴリズムの概略は、以下の通りである。

まず、全てのモジュールについて、交差するヒットストリップからヒット点の位置とヒット

領域の大きさを求める。その際、隣り合ったストリップが連続して鳴った場合はひとまとめにし、その中心位置をヒット点、まとめたストリップの幅をヒット領域の幅とする。

トリガーモジュール 3 枚のヒット点から可能な 2 点の組合せすべてを選び出し、その 2 点を結んで直線を引く。

このすべての直線につき、その線に沿って ± 1.5 ストリップ分の幅をもった筒状の領域を考える。全モジュールのヒット領域のうちこの筒に接しているヒット領域を数えてその直線に属するヒット数とするが、1 モジュール内で複数のヒット領域がその直線に接していた場合は、それらを分けて考え、各モジュールでのヒット点が 2 点以上含まれないような直線を数えあげる。筒状の領域をこのように広い領域とするのは、本測定ではストリップの厳密な位置の補正をおこなっていないため、多少の位置のズレを許すということである。

こうしてできた各直線につき、そのヒット点すべてを用いてフィッティングを行ないトラックの候補をつくり、χ^2 を求める。

ヒット数の多い順、χ^2 の小さい順、の順で評価し、最良のトラックを決める。

最後に、最良とされたトラックが 3 枚のトリガーモジュールのヒット点を正しく通っているかを再度チェックし、通っていれば正しいトラックと判定する。そうでなければ、トラッキングに失敗したものとみて、そのイベントは捨てる。

図 5.9 に、実際のデータでヒットストリップから再構成したトラックの例を示す。

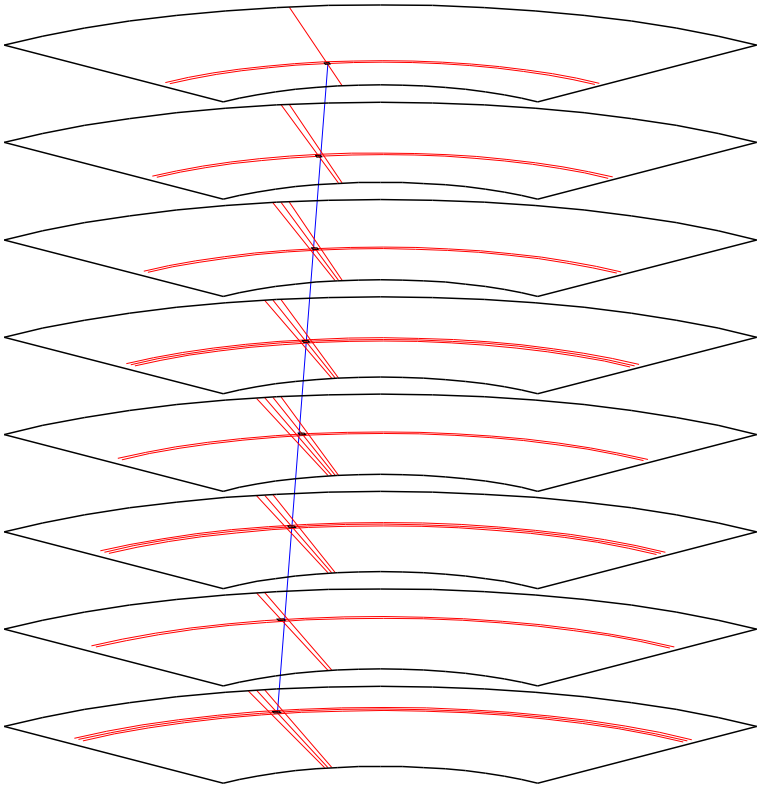


図 5.9: トラッキングしたイベントの例

5.3.3 検出効率

交差する 2 本のストリップの交差領域を 1 単位とし、ピクセルと呼ぶことにする。各ピクセルごとに検出効率を求め、その様子を 2 次元的にマップとして表示したとき、検出効率の場所依存性が見えることになる。

本測定における検出効率の求め方は以下による。

ヒット点のあるモジュールでは、再構成したトラックに属するヒット領域がこのイベントで正しくヒットしたものであるとみなし、このヒット点にもっとも近いピクセルを粒子通過位置とみなす。ヒット点のないモジュールでは、再構成したトラックがモジュールを通過する点にもっとも近いピクセルを粒子通過位置とみなす。こうして、各ピクセルごとに、

$$\frac{\text{そのピクセルが正しくヒットしたイベント数}}{\text{そのピクセルを粒子が通過したイベント数}}$$

として検出効率を求める。

5.3.4 ヒットストリップ数

あるピクセルがヒットしたときにその周囲で鳴ったストリップの本数の平均値を、そのピクセルにおけるヒットストリップ数と定義する。東北大学での RPC のテストはシングルレイヤーでの測定で、使ったストリップも比較的短い ϕ ストリップでしか測定できなかったが、本測定により実際にモジュールに組み込まれた状態のスーパーレイヤーでの測定、最長 $5m$ にも及ぶ長い θ ストリップでのヒット情報の様子等が調べられ、性能が期待通りであるか確認することができる。

5.4 測定

モジュールは、まずガス系、高電圧系に問題ないことをチェックしたあと、実際に動作させてその性能を調べる。

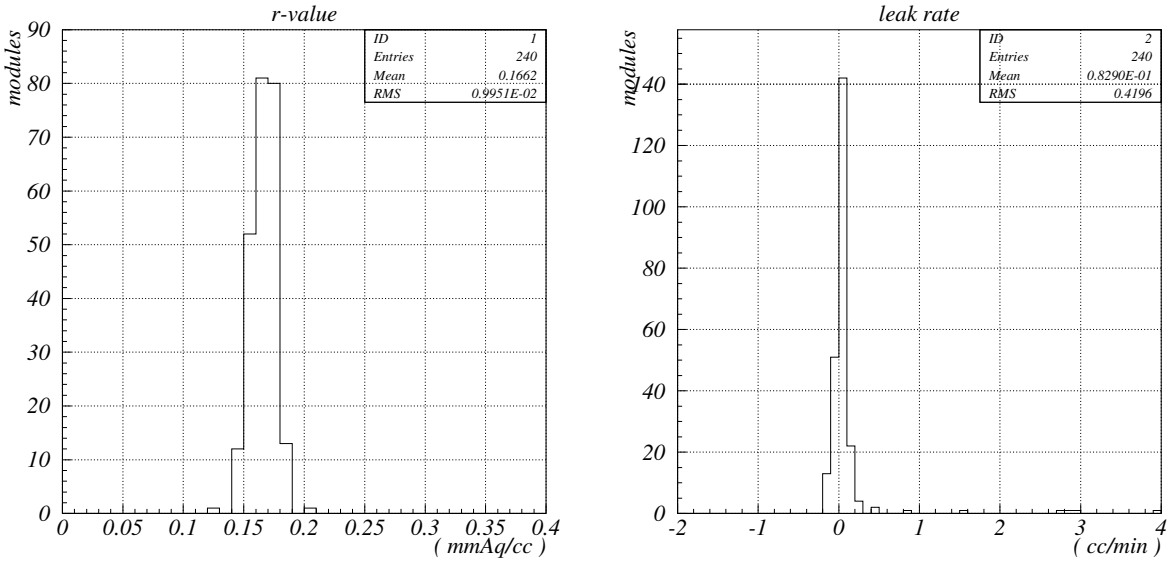
5.4.1 ガス漏れと膨らみ度のチェック

東北大学から KEK に搬送されたモジュールは、最初にガス漏れおよび膨らみ度のチェックを行ない、搬送中のモジュール破損の有無が調べられた。

測定方法はモジュール製作時と全く同様である。

前述のように、これらの値は本来、測定時の気温や気圧によっても変わる。本測定では、気温・気圧の変化の影響を簡単に打ち消すため、一度各系統のガス漏れ率を測定して最もガス漏れの少ない系統を選び、これを参照用系統とし、測定するものと同時に測定して値を比較する方法をとっている。この条件でも異常のあるモジュールは正常なものとはっきり区別できた。

図 5.10 に、テストベンチで測定した延べ 120 モジュール (240 系統) についての膨らみ度 (r-value) 及びガス漏れ率の測定結果を示す。この中には、ガス漏れや動作不良の修理をしたため複数回測定したものも含まれている。



(a) r-value　　(b) ガス漏れ率

図 5.10: KEK テストベンチでの (a) 膨らみ度 (r-value)、(b) ガス漏れ率の分布

R-value については良くまとまった値を示し、$\sim 0.17 \pm 0.01 mmAq/cc$ であった。

前述のとおり気温や気圧の補正を参照モジュールとの比較で行なってはいるが、ガス漏れの値が負になっているものもあり、それだけでは補正しきれないようである。それでも、ガス漏れのあるモジュールは他のものから大きく外れた値をもつことではっきり区別できる。

図 (b) においてガス漏れ率 $0.4 cc/min$ を越えるモジュールが 8 モジュールある。これらは平均 $(0.08 cc/min)$ から 5σ 以上離れており (ピーク部分の $\sigma \sim 0.06 cc/min$)、ガス漏れがあると疑われた。そこで電圧をかけるテストをせずにこれらを東北大学に持ち返り、モジュールを分解して調べたところ、5 モジュールで合計 9RPC にガラスの破損があった。これらは RPC を交換してモジュールを組み立て直し、再度 KEK へ送ってテストを続けた。

また、1 モジュールではモジュール内部でガスチューブの締め付け不足によりガス漏れが発生していた。RPC は問題なかったため、ガスコネクタ部分を締め付け直して KEK へ再送した。

残りの 2 モジュールでは、分解検査で漏れが見付からなかった。これは、テストベンチでの測定時に、ガスチューブをコネクタに接続する際の締め付け不足によりコネクタ部分から漏れていたのではないかと思われる。以後は測定時コネクタをきちんと締めるよう対処した。

搬送中に破損した原因としては、モジュールのアルミカバー内面についている、RPC を押えるためのリブがわずかに厚過ぎて、RPC を圧迫してしまったこと、また、モジュール搬送用の台車にモジュールをいっぱいに詰め込んだため、遊びがなくなって衝撃がモジュールに伝わってしまったこと、が考えられた。対策として、モジュール内面のリブを削って薄くし、台

車にはモジュール 1 枚分減らして載せ、 間に発 スチロールの板を詰めて衝撃を吸収するようにした。この対策後は、搬送による破損はなくなった。

5.4.2 高電圧チェック

ガス系に問題のないモジュールは、電圧をかけるテストを行なう。高電圧系に問題がある場合、電圧をあげても電流値が上がらない、または電流値が異常に大きいことでチェックできる。初期に作られたモジュールのうち、電流が流れなかったものが 3RPC あったが、これらはモジュール内の配線のコネクタ部分若しくは RPC の高電圧配線が断線しているためとわかった。これらも一度東北大学に持ち返り、配線を直した。組み立て時の導通チェックを厳密に行なうようにし、以後はこの問題はなくなった。

5.4.3 測定電圧の決定

電圧が正常にかかることが確認できたら、実際に宇宙線を測定してモジュールの動作を確認する。

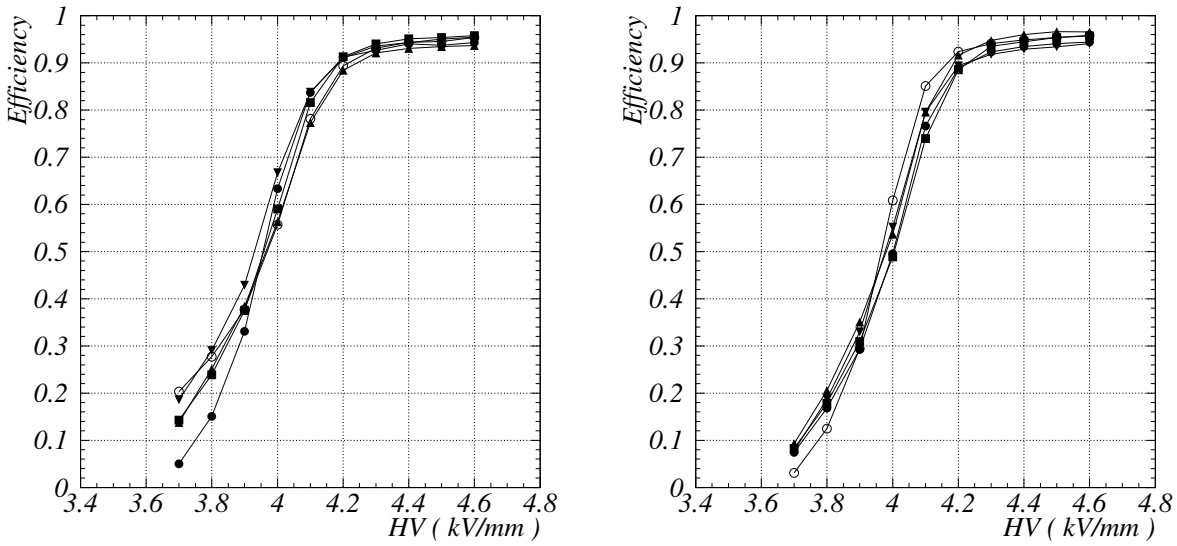
多数のモジュールについて一定の評価を行なうためには、動作環境を一定にする必要がある。このなかで、動作電圧とガス混合比は密接に関係しているが、特にガスについては現在も最良の混合比を得るためのテストを続けている状態にある。本測定においても、前述のように、1997 年 7 月にガス混合比を変えた。そのため、測定電圧もその前と後では異なっている。

RPC はプラトー電圧が適正動作電圧であることから、実際にいくつかのモジュールでプラトー測定をしてプラトー電圧を求め、これに最も近い測定点 ($100V/mm$ 刻みで設定) をとって測定電圧と決定した。RPC の動作特性は全て同じではなく、プラトー電圧が RPC 毎にわずかに ($\pm \sim 100V/mm$ 程度) 異なるが [23]、本測定の高電圧系では前述のとおり RPC 1 枚毎に電圧を調整することができないため、全ての RPC を同じ電圧で測定して性能評価する。トリガー数は 10 万イベントである。

なお、以降の測定において、トップレイヤー (Top Layer) とはモジュール内の 2 層の RPC 層のうち ϕ ストリップに近い層を、ボトムレイヤー (Bottom Layer) とは θ ストリップに近い層と定義する。これは、モジュール製作過程 (4.3.1 節) における上下位置をそのまま当てはめた定義である。また、トップレイヤーでの測定とは、トップレイヤーのみに HV をかけ、ボトムレイヤーには HV をかけない状態での測定である。逆もまた同様である。

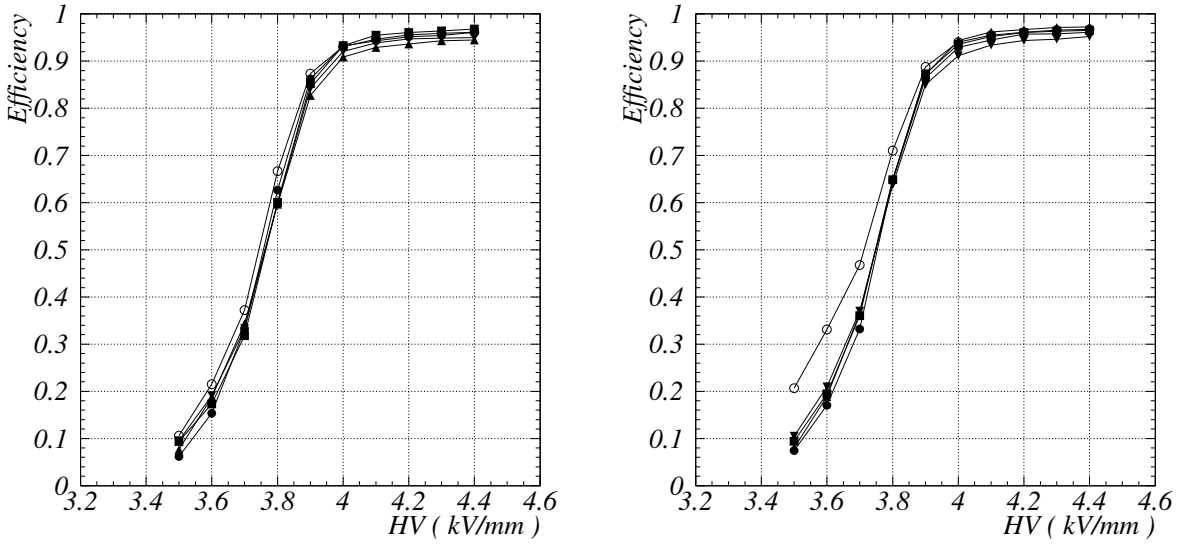
図 5.11 に、ガス混合比変更前 (スタンダードガス) のプラトー曲線の例を、図 5.12 に、ガス混合比変更後 (非可燃性ガス) のプラトー曲線の例を、それぞれ示す。

この結果から、スタンダードガスでは測定電圧を $4.3kV/mm$ 、非可燃性ガスでは $4.1kV/mm$ とするのが適当であることがわかり、性能評価のための宇宙線測定では HV をこれらの値に設定して測定を行なった。



(a) トップレイヤー　　(b) ボトムレイヤー

図 5.11: スタンダードガス使用時の (a) トップレイヤー (b) ボトムレイヤーでの測定による各層の 5 RPC のプラトー曲線。プラトー電圧は $4.3kV/mm$。



(a) トップレイヤー　　(b) ボトムレイヤー

図 5.12: 非可燃性ガス使用時の (a) トップレイヤー (b) ボトムレイヤーでの測定による各層の 5 RPC のプラトー曲線。プラトー電圧は $4.1kV/mm$。

5.5 結果

5.5.1 宇宙線測定による動作テストの結果

まず、宇宙線測定をした 97 枚のモジュールについての検出効率とヒットストリップ数の値の分布を図 5.13 ~ 5.15 に示す。これらの図は測定したモジュールの延べ数についてのプロットのため、修理等により複数回測定したものも含まれている。

また、検出効率及びヒットストリップ数の場所依存性を示した例を、図 5.16 ~ 5.18 に示す。

シングルレイヤーでの測定では、検出効率がトップレイヤーでの測定で平均 0.90、ボトムレイヤーでの測定で平均 0.92 であった。またヒットストリップ数の平均は、トップレイヤーでの測定で $\theta = 2.1$、$\phi = 1.7$ (本)、ボトムレイヤーでの測定で $\theta = 1.5$、$\phi = 2.6$ (本) であった。

宇宙線測定をした 97 モジュールのうち、何らかの問題により東北大学に送り返して修理することとなったモジュール数は 22 枚に上る。問題の内容は、シグナルケーブルの配線間違い、高電圧がかからない、RPC に検出効率の低い「大きな穴」領域がある、隣り合う読み出しストリップが接触している、というものである。また、1 モジュールでこれらの複数に該当するものも存在した。検出効率の「穴」の大きさの目安としては、モジュールの有効面積 $6.1m^2$ に対し十分小さいもののみ許し、約 $12cm(3 \times 3$ ピクセル、面積比 $0.2\%)$ 程度以上のものは不合格とした。

5.5.2 問題の見付かったモジュールの例

測定したモジュールの中には、問題があるため修理の必要があるものが見付かった。これらは一度東北大学に持ち返り、モジュールを開けて問題の箇所を直し、再度 KEK に搬送して測定をする。以下に問題の具体例を示す。

(例 1) HV ケーブルの断線、検出効率の「穴」

図 5.19 に示したモジュールは、トップレイヤーの第 2 枚目の RPC に HV がかからない状態であり、さらにボトムレイヤーの第 2 枚目の RPC に大きな不感領域が存在しているため、スーパーレイヤーでもその検出効率低下による「穴」が見える。HV がかからないものは HV ケーブルのコネクタ部分の断線とわかった。また、検出効率の「穴」領域は、スペーサ部分を中心としていることから、接着剤部分での電流リークによるものと思われる。これら 2 枚の RPC は交換修理された。

(例 2) ストリップの接触

図 5.20 に示したモジュールは、隣り合う 2 本の θ ストリップが接触しており、そこだけヒットストリップ数が多くなっている。分解検査の結果、ストリップシート製作時の金属 □ が残っていたためとわかった。金属 □ を取り除いて元通り組み立てた。

5.5.3 スーパーレイヤーの効果

図 5.21 は、スーパーレイヤーで測定した検出効率の場所依存性を示したものである。トップ、または ボトムレイヤーでの測定 (図 5.16) と比べると、RPC の境界部分の不感領域が消え、ほぼ全面で一様な検出効率が得られていることが確認された。また、図 5.22 は、スーパー、トップ、ボトムレイヤーでのモジュールとしての検出効率 η を比較したものである。トップ、ボトムレイヤーのみの測定での不検出率 $\eta_{loss.Top}$、$\eta_{loss.Bottom}$ に対し、スーパーレイヤーでは不検出率が $\eta_{loss.Top} \times \eta_{loss.Bottom}$ 程度に抑えられており、プラトー電圧 $4.3kV/mm$ での測定でシングルレイヤーが $\eta \sim 0.9$、スーパーレイヤーでは $\eta \sim 0.99$ となった。

トップ、ボトムレイヤーのみを動作させたときの検出効率が 100%にならない理由は、まず 5 枚の RPC の境界及び内部のスペーサ部分の不感領域の存在である。RPC の境界部分は電極がなく、端部スペーサ部分と合わせ幅約 $4cm$ にわたり粒子検出不能であり、内部のスペーサは幅約 $2mm$ であるから、不感領域はモジュールの有効面積に対し約 6%を占める。さらに、電離ゆらぎにより粒子が通過してもガス分子が電離されない場合があること、電離したイオンが電子雪崩を起こす前に再結合したりブタン・フレオンによりクエンチングされてしまうことがあること、ストリーマが小さくストリップに誘起した電荷がディスクリミネータの閾値を越えないこともある等により、数%の不検出率になるものと考えられる。

本測定により、スーパーレイヤーの構造からは期待通りの効果が得られ、モジュールの検出効率は KLM の要求を十分満たしていると言える。

5.5.4 θ ストリップと ϕ ストリップのヒット数の差

図 5.14 と図 5.15 を比較すると、θ ストリップと ϕ ストリップのヒット数の多少がトップレイヤー動作時とボトムレイヤー動作時で異なっていることがわかる。トップレイヤーでの測定では θ ストリップのヒット数が ϕ ストリップよりも多いのに対し、ボトムレイヤーでは全く逆の結果が得られた。すなわち、動作している RPC に近いストリップはヒット数が少なく、遠い方がヒット数が多いことになる。

一般に RPC 内で発生したストリーマがストリップに誘起する電荷は距離が遠くなるほど広がって分布する。今、簡単のためストリップ面から距離 d の位置に点電荷 Q が存在していると仮定すると、ストリップ面に電荷が及ぼす電場は鏡像法により図 5.23 のようになる。ストリップ面上で Q から降ろした垂線の足から距離 r の位置における電荷密度 $\sigma(r)$ は

$$\sigma(r) = -\frac{Q}{2\pi} \frac{d}{(r^2 + d^2)^{3/2}}$$

と書ける [30]。距離 d を $3mm$(近いストリップ面との距離)、$9mm$(遠いストリップ面との距離) として $\sigma(r)$ をプロットすると図 5.24 のようにストリップ面との距離が遠い方が電荷分布が広がり、広い領域でシグナルを出してしまうものと考えられる。

さらに、KLM のような大きな検出器ではストリップ間のクロストークも無視できない。θ ストリップはその長さが $2 \sim 5m$ にも及び、ϕ ストリップも約 $1.8m$ の長さがあるため、スト

リップのクロストークによりシグナルが広がって見えることもあると考えられる。

5.5.5 電極の違いによる動作性能の差

RPC の製作に使用した電極の種類は、インク、カーボンシート (両面にカーボンが塗られているもの、及び片面のもの) の 3 種類で、以下ではそれぞれ Ink、CS、NewCS と表記する。抵抗率はそれぞれ $\sim 10^6$、$\sim 10^5$、$\sim 10^7\Omega/\square$ 程度である。そこで、電極の種類により性能に差が現れるかどうか調べるため、電極の種類毎に分類した各モジュールの平均の検出効率、ヒットストリップ数の分布を、図 5.25 ~ 5.27 に示す。

検出効率については、電極の違いによる差は特に見られない。図 5.25 中 CS、Ink のもので極端に低いものがあるが、これらは前述の「問題が見付かったモジュール」である。

ヒットストリップ数については、電極の違いでその数に差が現れた。図 5.26、5.27 において、CS のものが他より 1 ストリップ程度多く鳴っていることがわかる。Ink と NewCS はほとんど変わらない。過去の小型の RPC のテストにおいて、ヒットストリップ数を抑えるためには電極の抵抗率が $\sim 10^6\Omega/\square$ 以上必要で、これより大きくなればほとんど変わらないとの結果があるが、本測定において、大型 RPC で、またスーパーレイヤーにおいてもその傾向がはっきり現れることが確認された。

RPC 内に発生したストリーマによる誘導電荷は RPC の電極にも生じる。その電荷を相殺するために電極内を電流が流れるとき、その部分の電圧の変化が読み出しストリップに信号として現れる。電極と読み出しストリップ間の等価回路は図 5.28 のようになり、電圧変化は

$$V(x,t) = V_0 e^{iw(t-\frac{\omega}{v})} e^{-\alpha x}$$

と表される。ここで ω は角周波数、α は減衰定数、v は伝播速度である。減衰定数 α は

$$\alpha = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}\sqrt{\frac{2}{1+\sqrt{1+\left(\frac{R}{\omega L}\right)^2}}}$$

と導かれ [31][32]、RPC の構造から電極とストリップの間の容量 $C \sim 10pF/cm$、電極の単位長さ当たりインダクダンス $L \sim 10^{-10}H/cm$、RPC の信号の周波数 $\omega \sim 10^8 Hz$ の値を使用し [30]、電極の単位長さ当たり抵抗 R をパラメータとして $R = 10^5 \sim 10^7\Omega/cm$ とした場合の電圧変化の減衰成分 $e^{-\alpha x}$ をプロットすると図 5.29 のようになる。

読み出しストリップ上に現れる電荷の広がりは、ストリーマによって誘導される電荷の広がりと電極に流れる電流の電圧変化の広がりによる和として表されるものと考えられる。

5.5.6 シングルレイヤーとスーパーレイヤーでのヒットストリップ数の差

第 4 章で触れたように、RPC をシングルレイヤーで測定したときのヒット数は、ϕ ストリップで平均 1.5 本程度であった。

一方、図 5.27 によれば、スーパーレイヤーでの ϕ ストリップのヒット数は平均約 3 本であり、シングルレイヤーの 2 倍にもなっている。前述のとおり、ストリップ面と各層との距離に従い、トップレイヤーでの測定では約 1.7 本、ボトムレイヤーでは約 2.5 本になっているが、スーパーレイヤーでは RPC2 層がともにヒットする確率も高く ($\sim 80\%$)、2 層のストリーマが誘起する電荷によりこのようにさらに広い領域でシグナルが出るものと考えられる。

5.5.7 印加電圧とディスクリミネータの閾値とヒットストリップ数の関係

以上に見てきたように、スーパーレイヤーでの動作により、RPC シングルレイヤーでの動作に比較しヒットストリップ数が 2 倍程にも多くなることがわかった。ヒットストリップ数が多くなることは、位置分解能の低下に関わる。本来、KLM の要求する位置分解能が $5cm$ 程度であるためにストリップ幅も 1 本を $4cm$ 程度としたわけだが、現在の状況では平均 3 ストリップがヒットし、これがそのまま位置分解能になると考えると約 12cm という位置分解能になってしまう。したがって、ヒットストリップを減らす対策をとる必要がある。

図 5.30 は、ディスクリミネータの閾値の値を一定 ($50mV$) にしたときの HV と検出効率及びヒットストリップ数の関係を示した例である。プラトー電圧 (非可燃性ガスのため $4.1kV/mm$) より手前の $3.9kV/mm$ 付近から急激にヒット数が増えていることがわかる。

また、図 5.31 は、印加電圧を一定 (プラトー電圧 $4.1kV/mm$) にした場合の、ディスクリミネータの閾値の値と検出効率及びヒットストリップ数の関係を示した例である。ディスクリミネータの閾値を上げていったとき、およそ $75 \sim 100mV$ まではヒット数が顕著に減るが、それ以上では減少が緩やかで、最終的に平均 1.3 本程度になる。また、ディスクリミネータの閾値を上げることで検出効率の低下が目立ち始めるのもおよそ $75 \sim 100mV$ 以上にしたときである。トップレイヤーとボトムレイヤーとで検出効率の低下に差があるのは、前述のストリップとの距離の差によるものと思われる。

以上の結果から、ヒットストリップ数を減らすためには、可能な限り低い電圧で動作させること、ディスクリミネータの閾値の値を可能な限り上げること、が必要となる。しかし、これらの操作は共に検出効率を下げる方向に作用し、また RPC の動作電圧を一枚単位で設定できないため、印加電圧を下げることにより RPC 個々の動作特性 (特にプラトー電圧の違い) の影響が出やすくなることから、最も効果的にヒットストリップ数を減らすとともに検出効率も下げないような電圧、ディスクリミネータの閾値の値を探す必要がある。構造上の違いから、θ ストリップと ϕ ストリップとでディスクリミネータの閾値に異なる設定をすることも必要かもしれない。

5.6 モジュールの評価

動作テストで合格とされたものは 1998 年 1 月現在 87 モジュールである。以下では、この 87 枚の評価について述べる。

評価の基準

前述のように、本測定におけるモジュールの性能評価は主として、検出効率の高さ及びその場所依存性、ヒットストリップ数、による。スーパーレイヤーで高い動作性能を発揮するためには、RPC 各層も高い性能を持つことが望まれる。そこで、RPC 各層毎の性能を見てモジュールの評価をするために、トップレイヤー及びボトムレイヤーでの測定結果を用いてこれらを判断することにする。

評価は、それぞれ独立に、良い方から順に A、B、C の 3 段階のランク付けをすることにした。

検出効率については数値的にはほとんどが 90%前後であり、これはシングルレイヤーでの性能としては十分な値であること、RPC 個々の性能にバラツキ (4.2.2 節) があることを考えると、単純に数値で比較することは難しい。また検出効率の「小さな穴」はモジュール全体としての検出効率への影響が小さく数値で現れてこない。そのため検出効率の評価は、「小さな穴」の有無とその大きさについて、目視で決定することとし、「穴」のないものを A、2×2 ピクセルまでを B、それ以上を C とした。

ヒットストリップ数については、前述のとおりトップレイヤー測定時とボトムレイヤー測定時、また θ ストリップと ϕ ストリップとで、平均ヒット数が異なっているが、それらが多いか少ないかの傾向は一つのモジュールでは同じであるため、モジュールの評価にはトップレイヤー測定時の θ ストリップのヒット数を用い、数値基準として 2.1 本以下を A、2.5 本以下を B、それ以上を C とした。

評価結果

現在までに測定結果の出ている 87 モジュールの評価を表 5.1 ~ 5.3 に示す。

まず、検出効率・一様性の評価では、「穴」がなく A 評価となったモジュールは 64 枚 (74%) であった。小さな「穴」のあるものはその大きさに従い B 評価 17 枚 (20%)、C 評価 6 枚 (6%) であった。

電極の違いによる検出効率の評価の差については、両面カーボンシート (CS) 及びインク (Ink) の RPC を使用したモジュールの評価が低かった。CS を用いた RPC は製作初期段階のものであり、製作技術が未熟であったことが原因と思われる。また Ink を用いた RPC は、ガラス極板にインクを塗って電極を作る際、インクの性質上塗りムラが多くなってしまい一様な電極を形成しづらかったことから、このような結果になったものと思われる。

ヒットストリップ数の評価結果では、A 評価が 57 枚 (66%)、B 評価が 22 枚 (25%)、C 評価が 8 枚 (9%) であった。

電極の違いによるヒットストリップ数の評価の差については、両面カーボンシート (CS) の評価が低く、9 枚中 8 枚が C 評価であった。前述のとおり CS は抵抗率が低く ($\sim 10^{-5}\Omega/\square$)、RPC 内で発生したストリーマによる誘導電荷がこの電極でも広がって分布してしまうために、ヒットストリップ数が多くなるものと思われる。

総合評価では、検出効率・ヒットストリップ数ともに A 評価のものを総合 A、どちらかが B のものを総合 B、それ以外を総合 C とした。この結果、総合 A 評価が 44 枚 (51%)、総合 B 評

価が 12 枚 (14%)、総合 C 評価が 31 枚 (35%) という結果になった。

この結果は、エンドヨークへのインストールにおいて、モジュールのインストール位置を決める際の判断材料として用いられる。

検出効率・一様性				
(電極)	A	B	C	計
Ink	13	5	3	21
CS	5	3	1	9
NewCS	46	9	2	57
計	64	17	6	87

表 5.1: 検出効率によるモジュール評価の結果 (数字は枚数)

ヒットストリップ数				
(電極)	A	B	C	計
Ink	13	8	0	21
CS	0	1	8	9
NewCS	44	13	0	57
計	57	22	8	87

表 5.2: ヒットストリップ数によるモジュール評価の結果 (数字は枚数)

総 合 評 価				
(電極)	A	B	C	計
Ink	9	3	9	21
CS	0	0	9	9
NewCS	35	9	13	57
計	44	12	31	87

表 5.3: モジュール評価の総合結果 (数字は枚数)

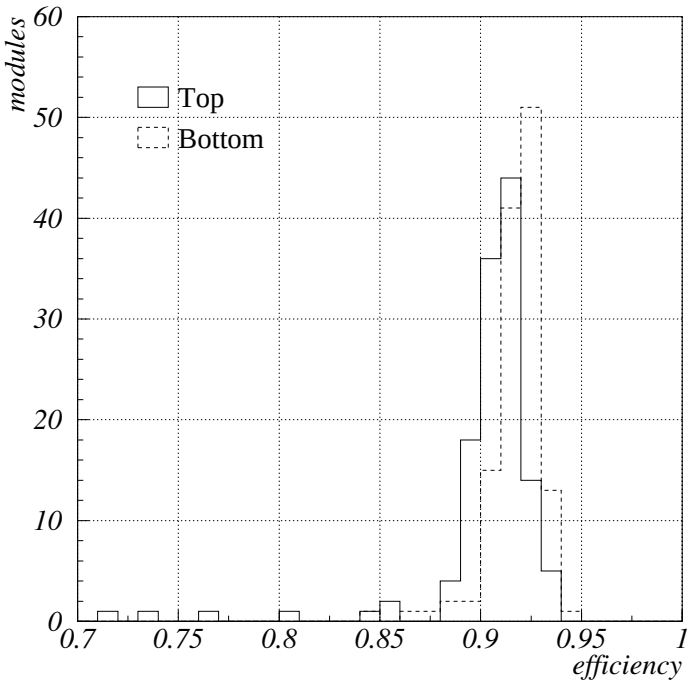


図 5.13: 宇宙線測定をしたモジュールの検出効率の分布

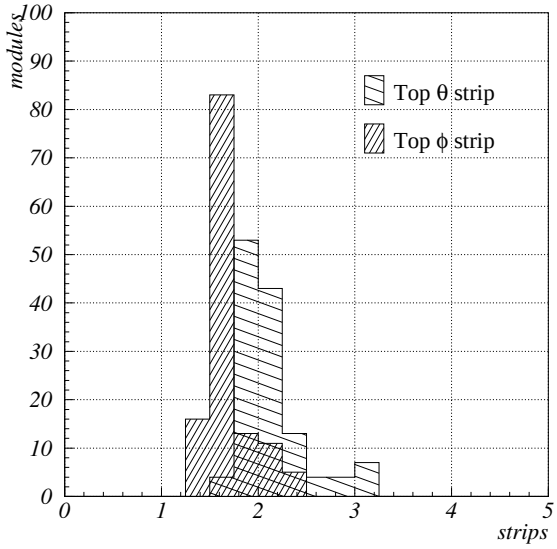


図 5.14: トップレイヤー動作時のヒットストリップ数の分布

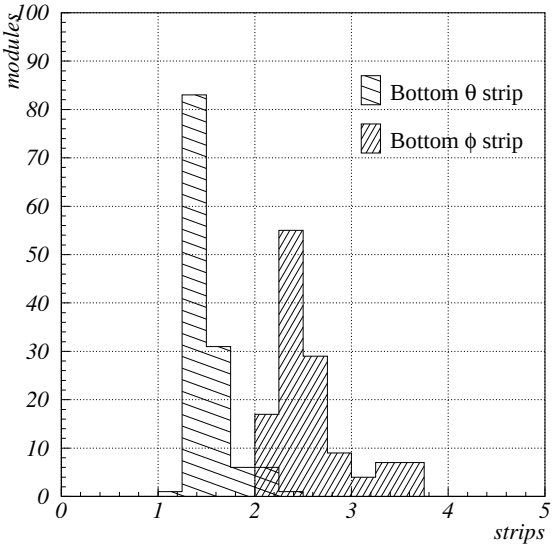
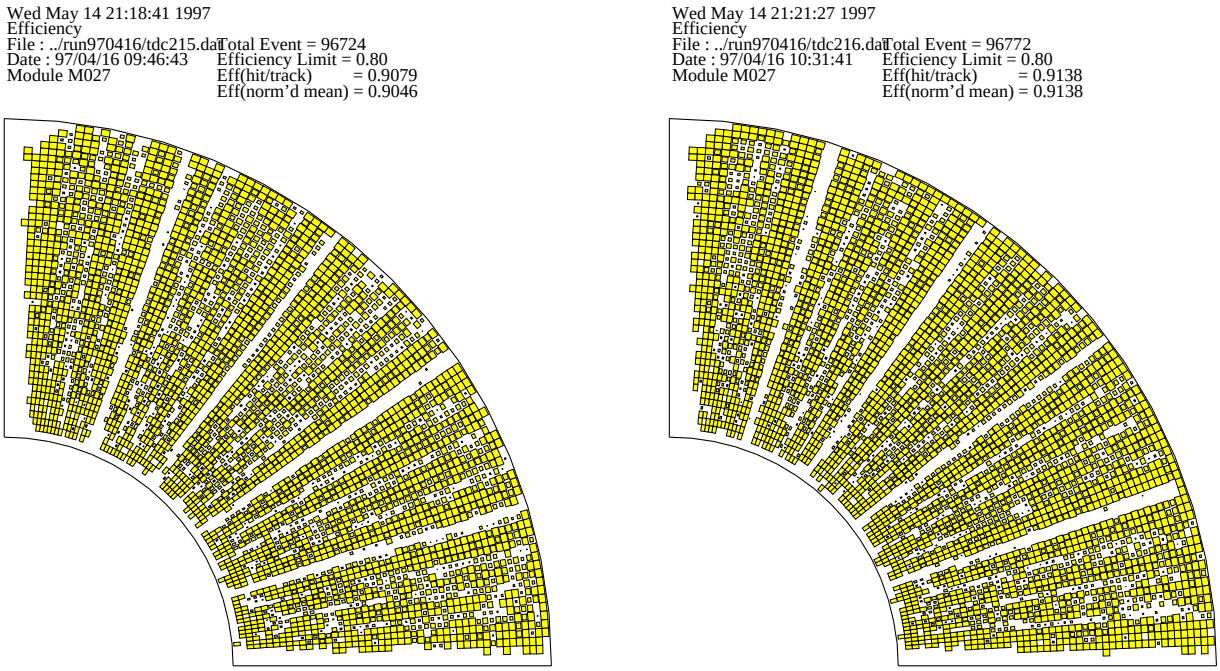
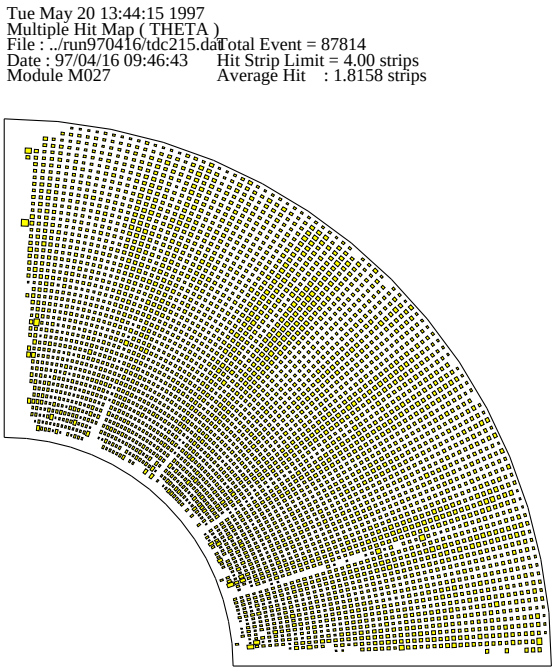


図 5.15: ボトムレイヤー動作時のヒットストリップ数の分布

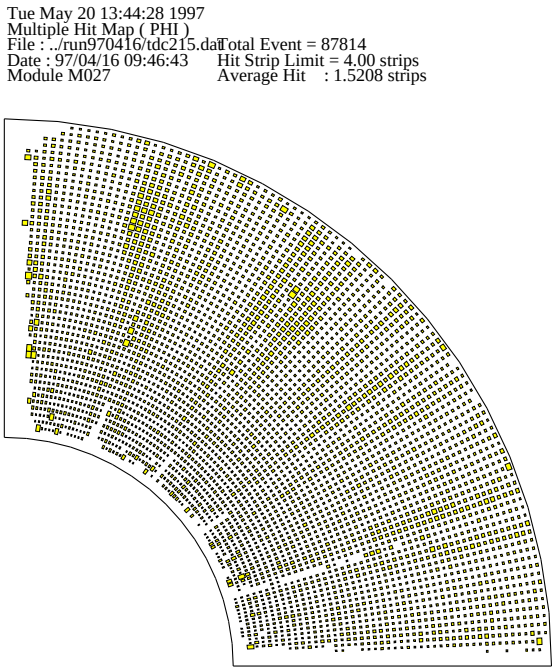


(a) トップレイヤー　　(b) ボトムレイヤー

図 5.16: 検出効率の場所依存性のマップの例。(a) トップレイヤー動作時、(b) ボトムレイヤー動作時のもの。四角形の大きさは、検出効率の高さをそのピクセルの大きさに対する割合で表したもの。この図では 80%以上のものについてのプロットであり、最も小さい四角が 80%に対応する。

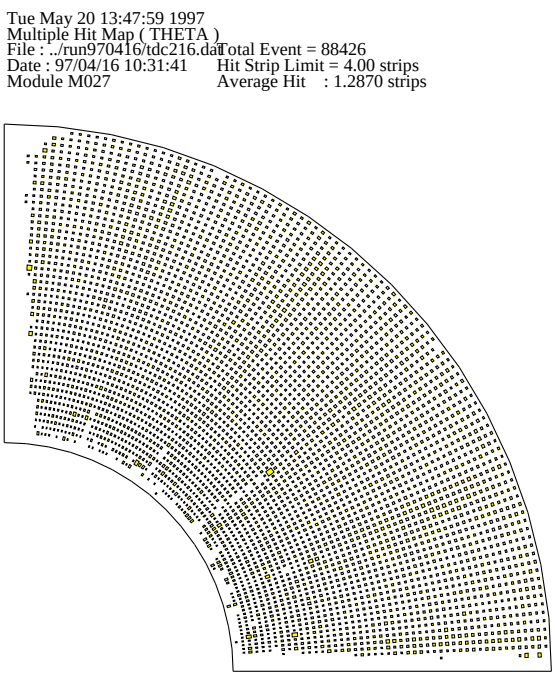


(a) θ ストリップ

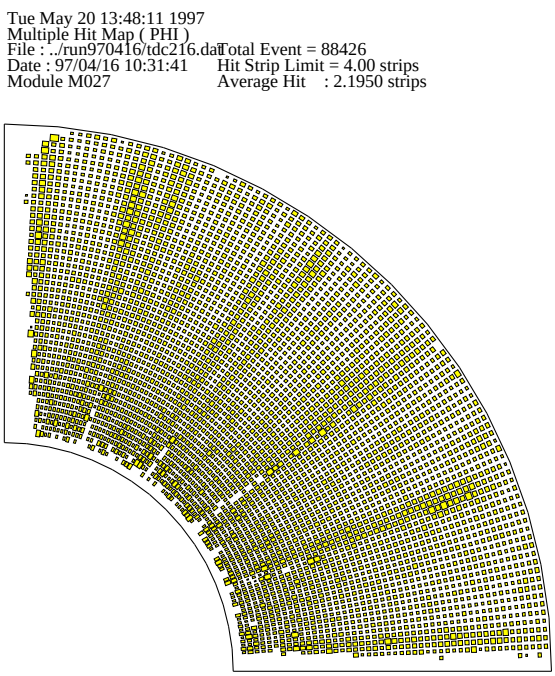


(b) ϕ ストリップ

図 5.17: トップレイヤー動作時のヒットストリップ数の場所依存性のマップの例。四角形の大きさは、ヒットストリップ数の多少をそのピクセルの大きさに対する割合で表したもの。この図では 4 本以下のものについてのプロットであり、最も大きい四角は 4 本以上を表す。

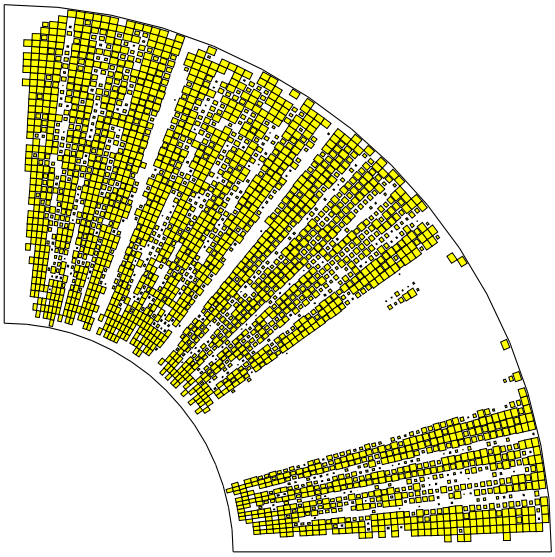


(a) θ ストリップ

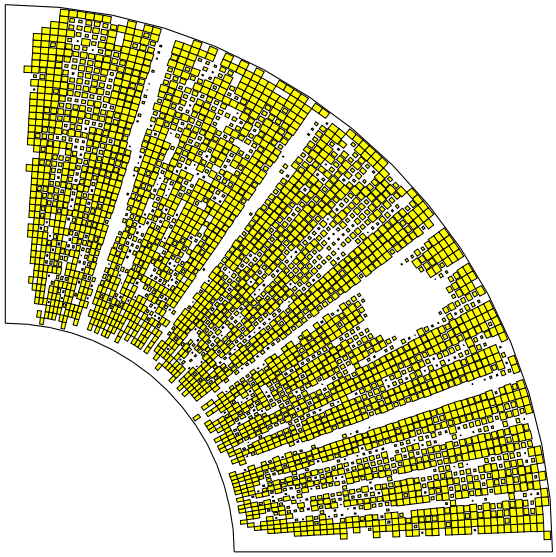


(b) ϕ ストリップ

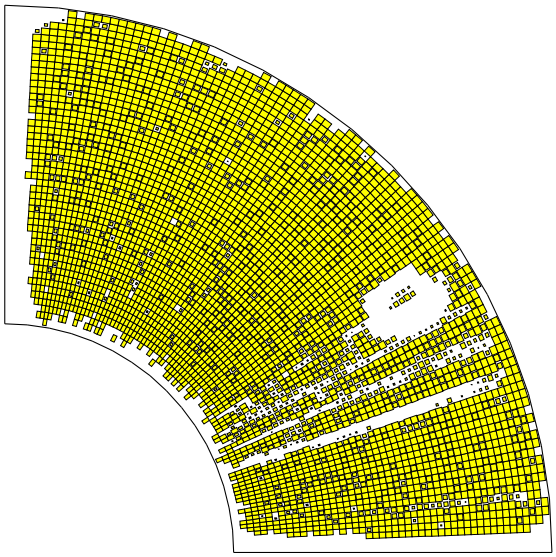
図 5.18: ボトムレイヤー動作時のヒットストリップ数の場所依存性のマップの例。四角形の大きさの意味は図 5.17 と同じ。



(a) トップレイヤー



(b) ボトムレイヤー



(c) スーパーレイヤー

図 5.19: 不感領域 (dead spot) のあるモジュールの (a) トップレイヤー (b) ボトムレイヤー (c) スーパーレイヤーでの測定による検出効率のマップ

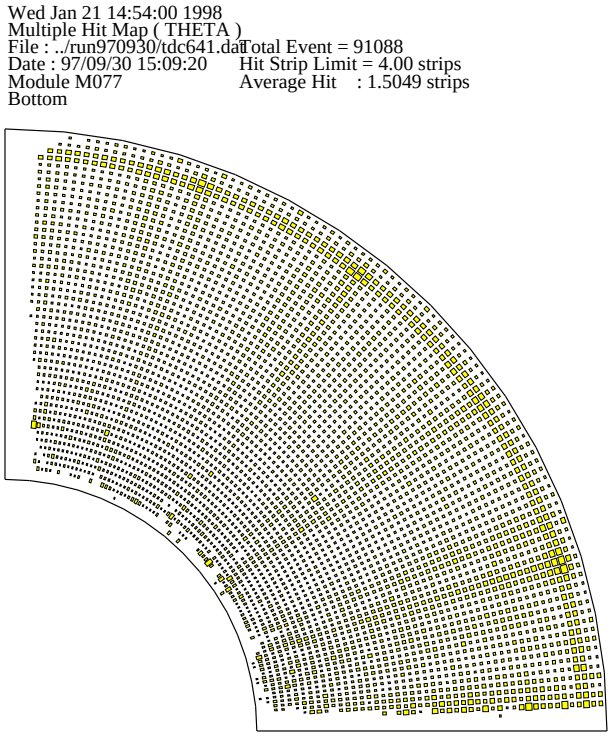


図 5.20: θ ストリップに接触のあるモジュールのヒットストリップ数 (θ) のマップ。ボトムレイヤーでの測定結果。接触があるストリップはヒット数が多く見える。

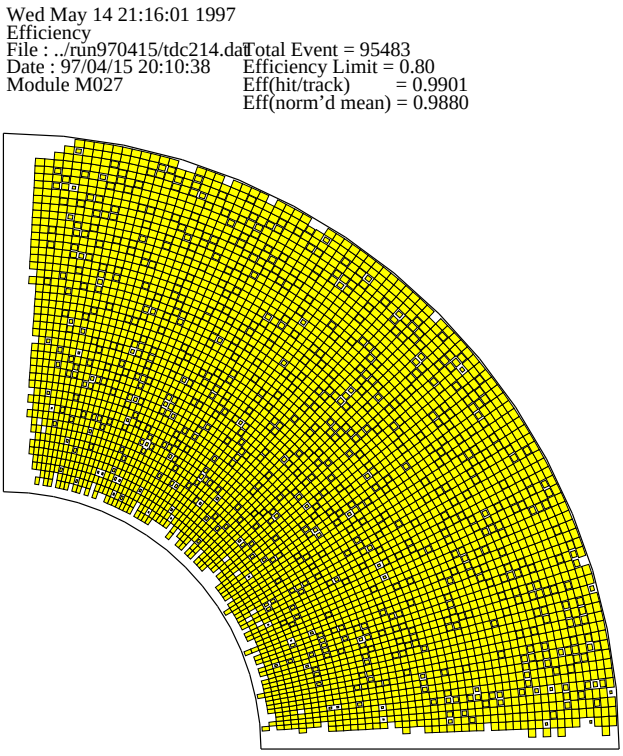


図 5.21: スーパーレイヤーでの測定における検出効率の場所依存性のマップ

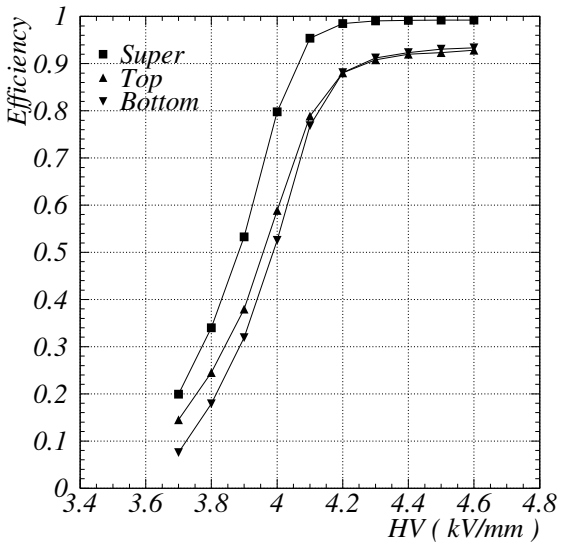


図 5.22: トップ、ボトム、スーパーレイヤーでの測定によるプラトー曲線 (スタンダードガス)

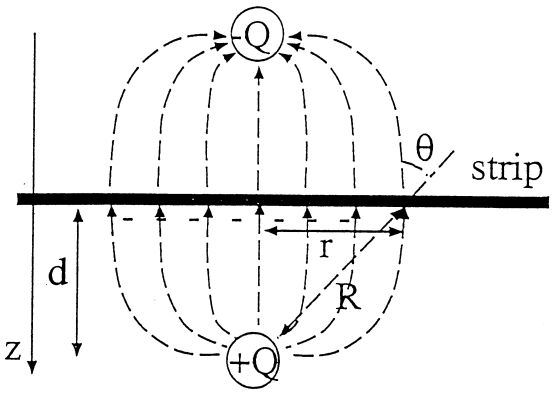


図 5.23: 点電荷が読み出しストリップに及ぼす電場

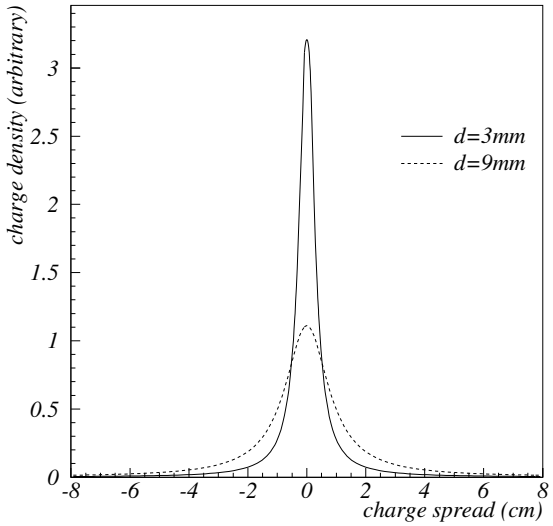


図 5.24: 点電荷により読み出しストリップに誘導される電荷分布の広がり

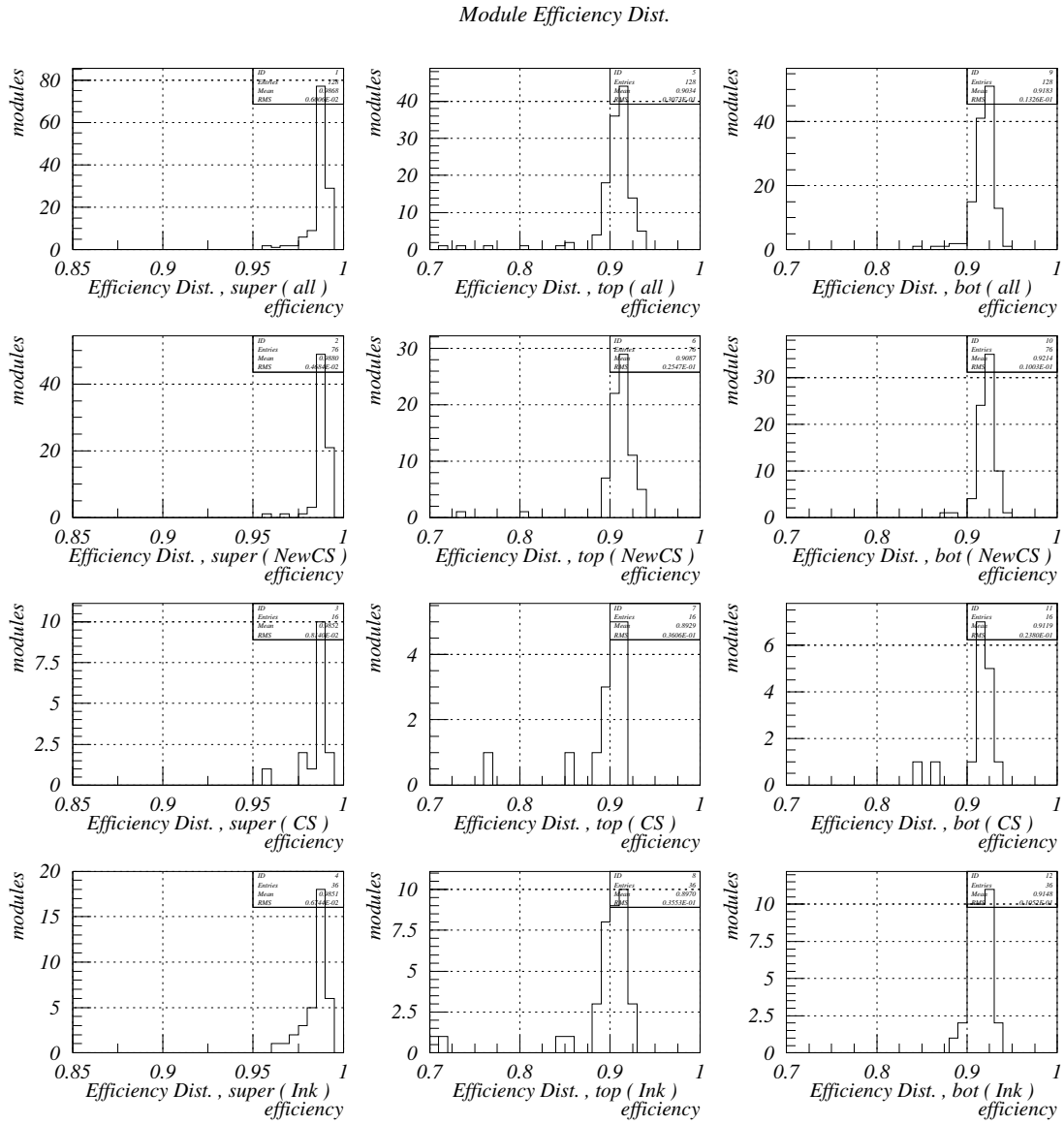


図 5.25: 電極の種類毎に分類した検出効率 (平均値) の分布。各列は、左からスーパー、トップ、ボトムレイヤーについて。各段は、上から全モジュール、NewCS、CS、Ink について。

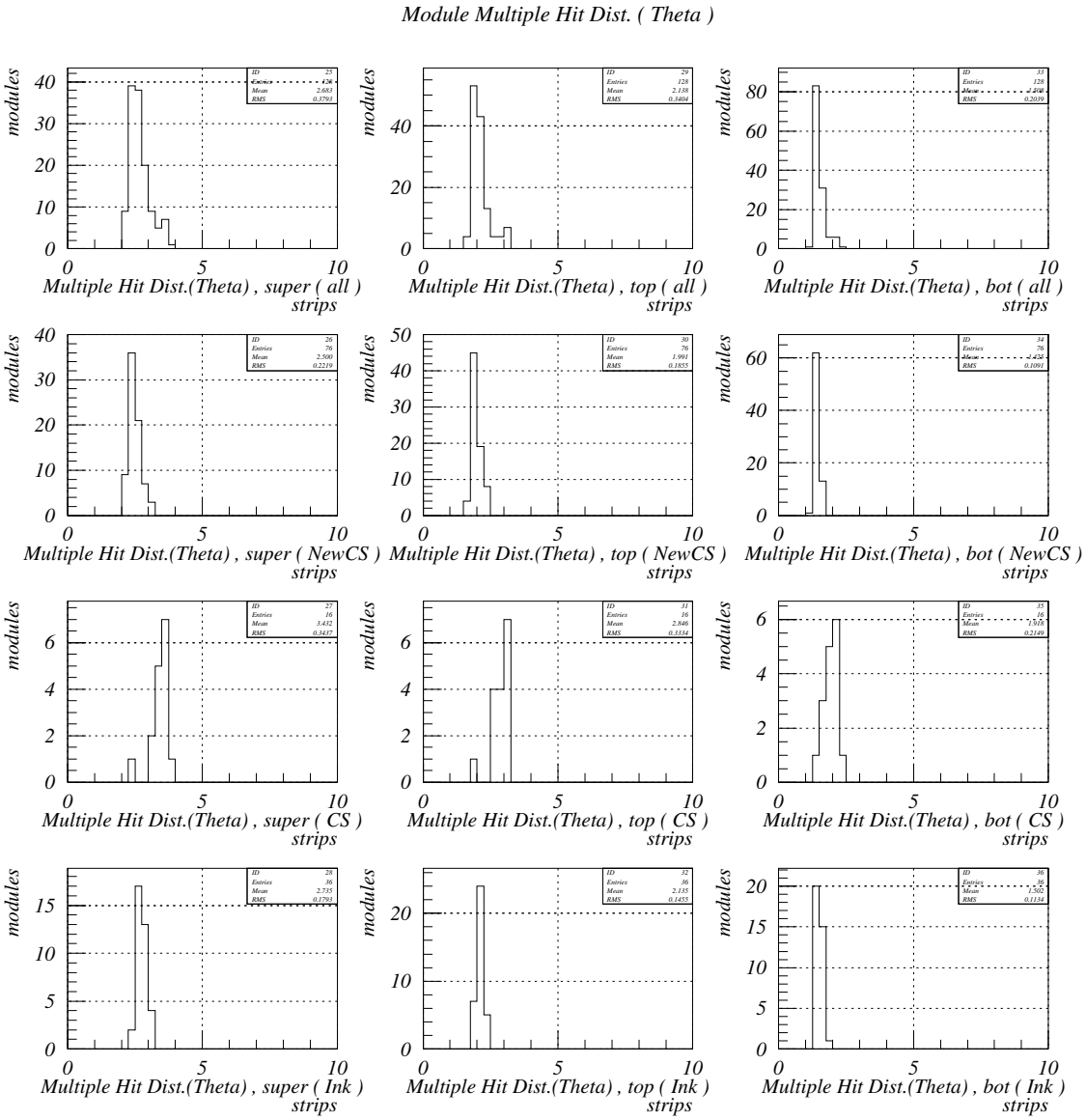


図 5.26: 電極の種類毎に分類したヒットストリップ数 (θ)(平均値) の分布。各列は、左からスーパー、トップ、ボトムレイヤーについて。各段は、上から全モジュール、NewCS、CS、Ink について。

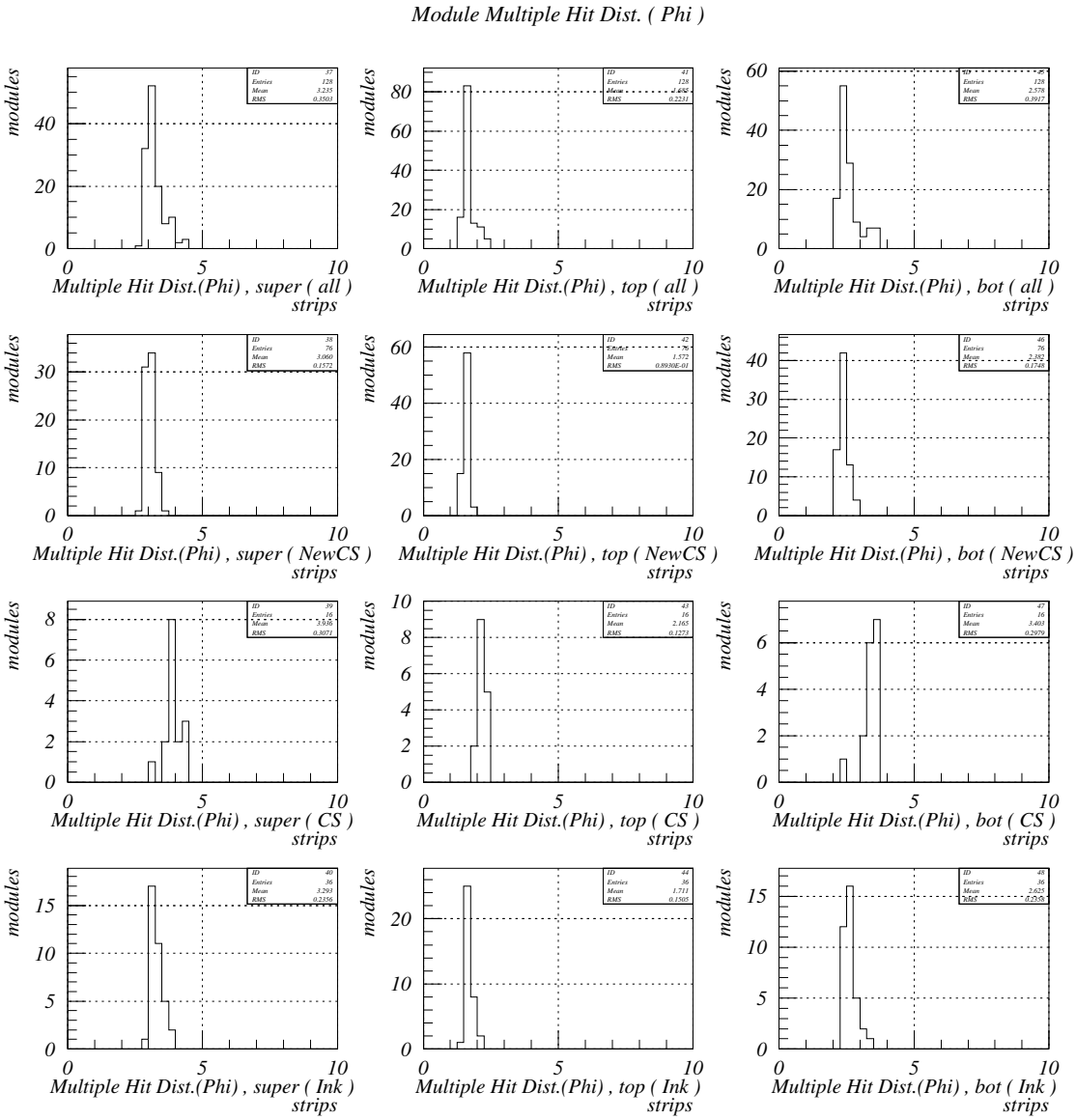


図 5.27: 電極の種類毎に分類したヒットストリップ数 (ϕ)(平均値) の分布。各列は、左からスーパー、トップ、ボトムレイヤーについて。各段は、上から全モジュール、NewCS、CS、Ink について。

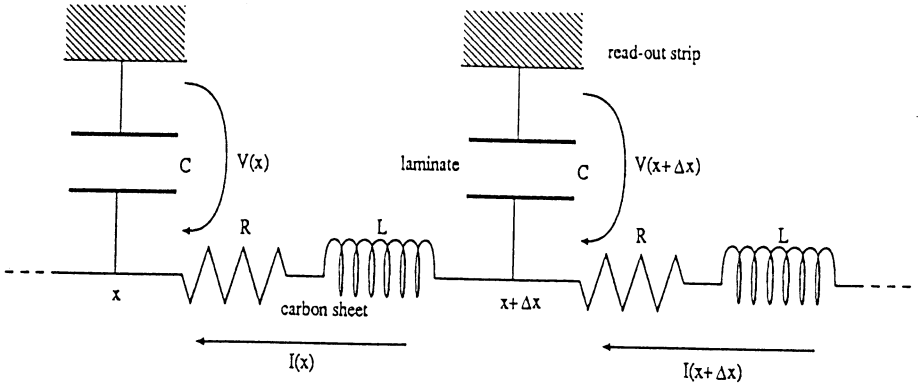


図 5.28: 電極と読み出しストリップ間の等価回路

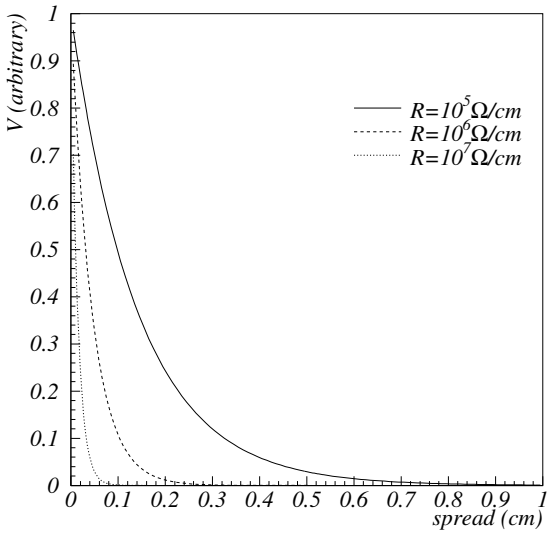


図 5.29: 電極に現れる電圧変化の広がり

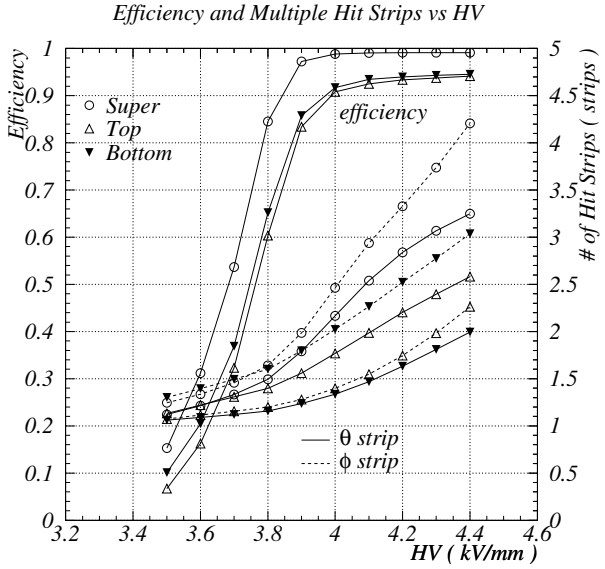


図 5.30: 印加電圧と検出効率及びヒットストリップ数の関係 (ディスクリミネータの閾値 $50mV$)

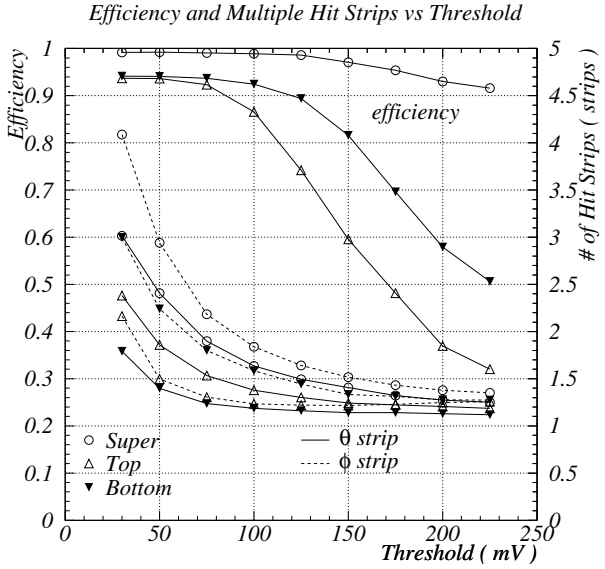


図 5.31: ディスクリミネータの閾値の値と検出効率及びヒットストリップ数の関係 (HV= $4.1kV/mm$)

第6章

BELLE エンドヨークでの測定

テストベンチでの測定により性能評価を終えたモジュールは、エンドヨークにインストールされ、BELLE 実験本番に備えてさらにテストが続けられる。インストール作業は、BELLE 検出器建設のスケジュールに合わせて行なわれる。

KLM エンドキャップモジュールはこれまでに平成 9 年 5 月および 11 月の 2 度にわたりインストールの機会があった。また、平成 9 年 10 月 ~ 11 月にかけ、インストールしたモジュールの一部について本番用の測定システムを実際に稼働させ、システムが正しく機能することの確認のためのテストを行ない、インストールしたモジュールの性能チェックを行なった。

6.1 インストール

モジュールのインストール位置

KLM での K_L^0 の検出においては、多重散乱の少ない内側の層でのヒット情報がトラック再構成においてより重要である。したがって、内側の層に入れるモジュールは性能が良いことが望まれる。

インストールに際しては、前章で評価したモジュールのうち、各評価のついたモジュール数を考慮し、

第 0 ~ 7 層には A 評価のものを、

第 8 ~ 9 層には B 評価のものを、

第 10 ~ 13 層には C 評価のものを、

それぞれインストールすることとした。

インストール作業

BELLE 検出器のエンドヨークへの KLM モジュールの最初のインストールが、平成 9 年 5 月 26 日 ~ 28 日にかけて行なわれた。図 6.1 はその時の作業の様子を写したものである。このときは BELLE 検出器の前方エンドヨーク部分の上側 2 区画に 14 枚ずつ、計 28 枚をインストー

ルした。その後、平成 9 年 11 月 25 ~ 28 日にかけて 2 回目のインストールが行なわれ、後方の 4 区画全てに 14 枚ずつ、計 56 枚が入った。

KLM エンドキャップモジュールは扇型をしているため、そのインストール方法は円弧に沿ってモジュールを回転させながら鉄の層の間 に挿入するというものである (図 6.2)。上側の部分にモジュールを入れる場合は、中ほどまでモジュールを挿入すればあとは自重により自然に中へ入るので、急激に落ちるのを防ぐためクレーンで引っぱりながら徐々に入れていく。下側に入れる時は、やはり自重により中ほどまでは自然に入るが、そのあとはモジュールを押し込む形で挿入し固定する。

鉄の間 は設計値で $44mm$ であるが、平面の精度を考慮し、モジュールの厚さは余裕をもって $39mm$ となっている。しかし、実際の作業ではかなりきつい層もあり、少々無理をして押し込んだものもあったため、インストール作業のモジュールへの影響もチェックする必要がある。

以下では、最初にインストールした 2 区画 28 枚のモジュールのうち、実際に動作テストをした 1 区画 14 枚についての測定結果を中心に述べる。

6.2 測定システム

今回使用した測定システムは基本的にテストベンチのものと全く同様であるが、使用するものは全て本番用のものであり、本測定はこれらの動作試験を兼ねたものでもある。

信号処理系・高電圧系は、FASTBUS TDC、HV モジュール等、BELLE 実験の本番で実際に使用するものを BELLE 検出器横の測定回路室に準備して使用した。これらはテストベンチで使用しているものと同じ型のものであるので、コントロールのためのソフトウェアはテストベンチのものをそのまま流用した。測定回路室と BELLE 検出器のヨークの間には約 $50m$ の長さの信号及び HV のケーブルを設置した。

ガス系は本番で使用する配管を使用し、筑波実験施設わきのガス分配用の建屋にガスボンベおよび混合器を置いた。リリーフバブラー及び排気部バブラーは、エンドヨークの上に設けた台座に設置した。

RPC からの信号を Time Multiplex 処理する Readout Board については数が揃わなかったため、テストベンチで使用しているものを流用した。そのため、一度に信号を測定できる枚数は 8 枚である。

高電圧の系統数については、テストベンチでの構成に比べ系統数を減らし、1 系統当たりの割り当てを 5 倍に増やした。ポジティブは 1 区画あたりトップ、ボトムそれぞれ 3 系統ずつ計 6 系統で、1 系統に RPC5 層分 (内側は 4 層分) を割り当てる。ネガティブは 1 系統に RPC1 層分を割り当てる。

プラトー電圧での動作時は RPC1 枚当たり平均 $0.6\mu A$ であるから、ポジティブは平均 $15\mu A$/系統 程度、ネガティブは平均 $3\mu A$/系統 程度の電流が流れることになる。HV モジュールの最大許容電流値は、ポジティブ (1468P) が $600\mu A$/系統、ネガティブ (1469N) が $1000\mu A$/コネクタ (1 コネクタ = 8 系統分) であるため、十分な余裕があるように見えるが、実際には RPC 全体が放電したような大きな電流が瞬間的に流れることがあることが確認されており、この場合

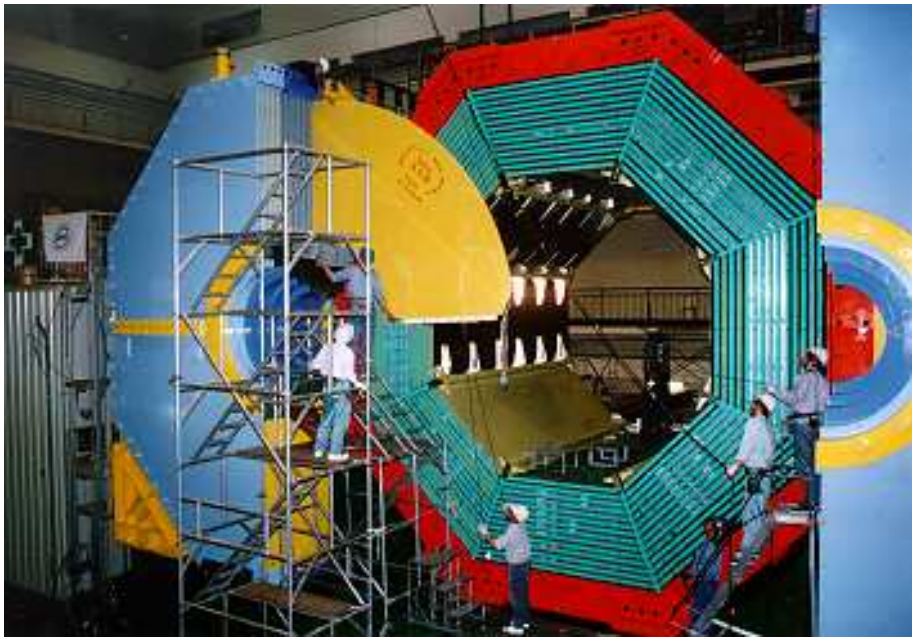


図 6.1: エンドヨークへのインストール作業

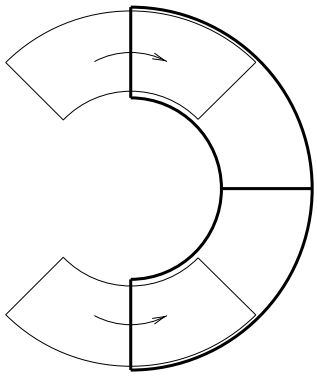


図 6.2: エンドヨークへのモジュールのインストール方法

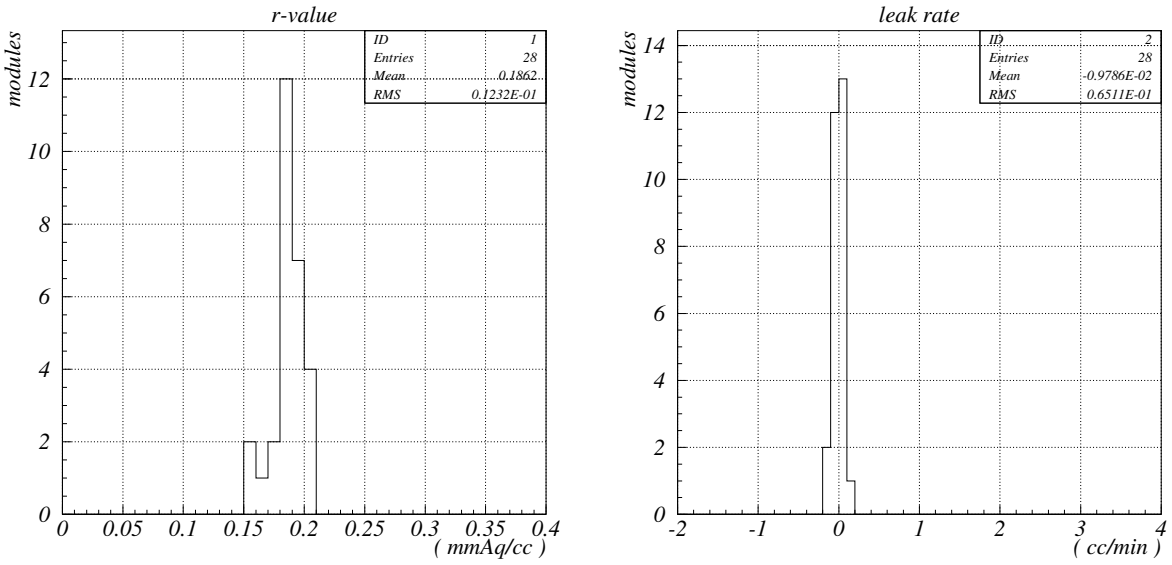
通常の 10 倍以上の電流値をとることもあるため、1 系統に割り当てられるモジュール数はこの程度にとどめたほうがよい。

6.3 測定及び結果

6.3.1 ガス漏れ及び膨らみ度のチェック

インストール作業によりモジュールに無理な力がかかって破損した RPC の有無を、ガス漏れ率及び膨らみ度の測定で調べた。実際に測定できたのは、測定器を置くスペースが限られていること及び測定スケジュールの関係で 5 月にインストールした 2 区画分のうち 1 区画 14 モジュールのみであった。

図 6.3 はこれらの測定結果である。r-value$\sim 0.19 \pm 0.01(mmAq/cc)$、ガス漏れ率 $\sim 0.01 \pm 0.06(cc/min)$ で、テストベンチでの測定結果の図 5.10 と比べ特に差はなく、少々無理をして入れたものもあったが壊れているものはないことが確認された。



(a) r-value　　(b) ガス漏れ率

図 6.3: インストールしたモジュールの (a) 膨らみ度 (r-value) と (b) ガス漏れ率

6.3.2 絶縁チェック

モジュールは全体が絶縁シートでおおわれており、鉄の層と電気的接続がないようにしている。これは、鉄のグラウンドレベルがモジュールのグラウンドレベル (これは信号処理系および高電圧系のグラウンドレベルに等しい) と一致するとは限らないこと、鉄のヨーク全体がノイズアンテナとなり信号にノイズが載ることが考えられること、万一鉄の層がチャージアップ

した場合モジュールにダメージを与える危険性もあることから、鉄の層とは電気的に絶縁する必要があるためである。

5月及び11月にインストールしたモジュール84枚について鉄とモジュールのアルミフレームの間の絶縁チェックを行なったところ、12モジュールで抵抗が $0 \sim 4.8k\Omega$ 程度と低いものが存在した。これらは、インストール時に絶縁シートが鉄との摩擦で破られ、むき出しになったアルミフレームが鉄と接触しているものと考えられる。

現在のところ、これらのモジュールについての対策はない。これらのモジュールの動作試験が進み、上に述べたような問題がKLMの性能低下に重大な影響を及ぼすという結果が出れば、再インストールも必要かもしれない。

6.3.3 宇宙線の測定

前述のとおり信号処理用のReadout Boardはテストベンチのものを流用したため、宇宙線の測定は一度に8モジュールである。

ここでは、トラッキングの様子及び検出効率のマップのみ簡単に示す。

図6.4は14層のうち第0 ~ 7層を動作させたものである。

図6.5は14層のうち第0 ~ 2、7 ~ 10、13層を動作させたものである。

宇宙線測定を行なったこれらの12モジュールについては、いずれも検出効率 ~ 0.99 を示し、特に問題はみられなかった。

6.4 見付かった問題点

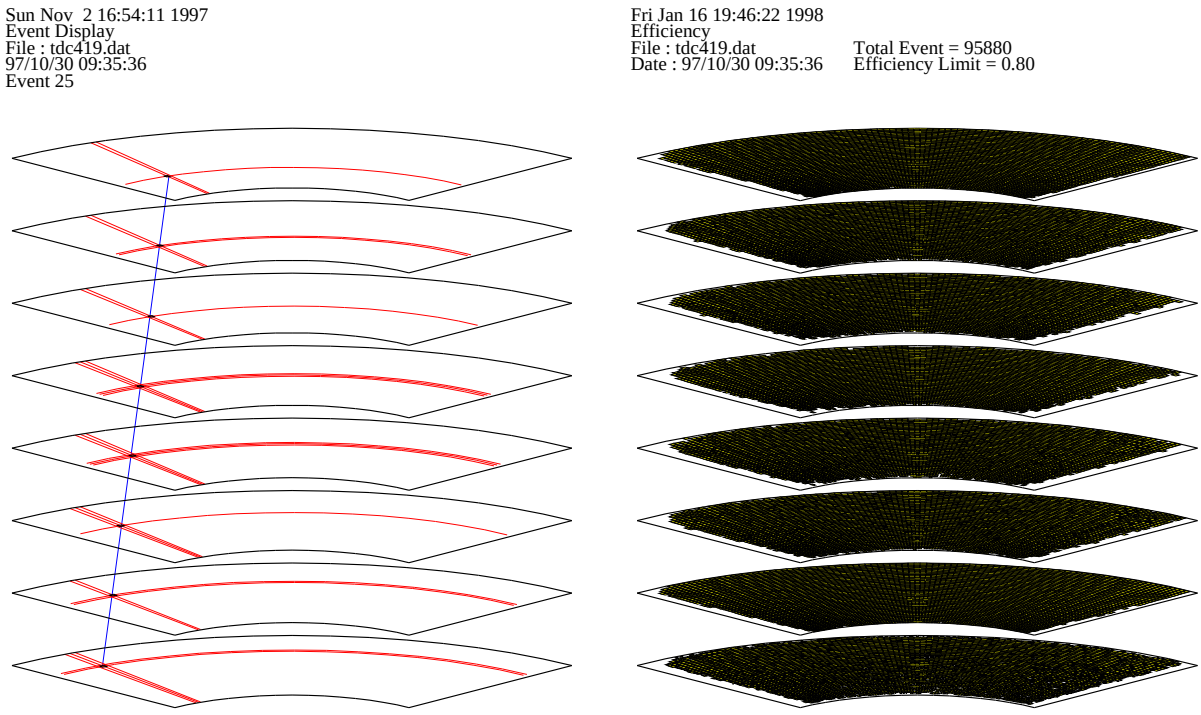
6.4.1 気温低下によるガス混合比の変動

BELLE検出器本番用のガス配管を使用したKLMの動作テストにおいて、気温低下によりガス混合比が変動するという問題があることがわかった。

図6.6は、9月15日~ 10月12日の間のKLMバレルモジュールの電流および検出効率の測定データである。これはバージニア工科大学を中心としたグループによる、BELLE検出器のバレル部分にインストールされたモジュールについての測定及び解析結果である。図中、通常は $2 \sim 4\mu A$ 程度の電流値が、629日目と637日目に $10 \sim 15\mu A$ と、通常の5倍程度も流れていることがわかる。

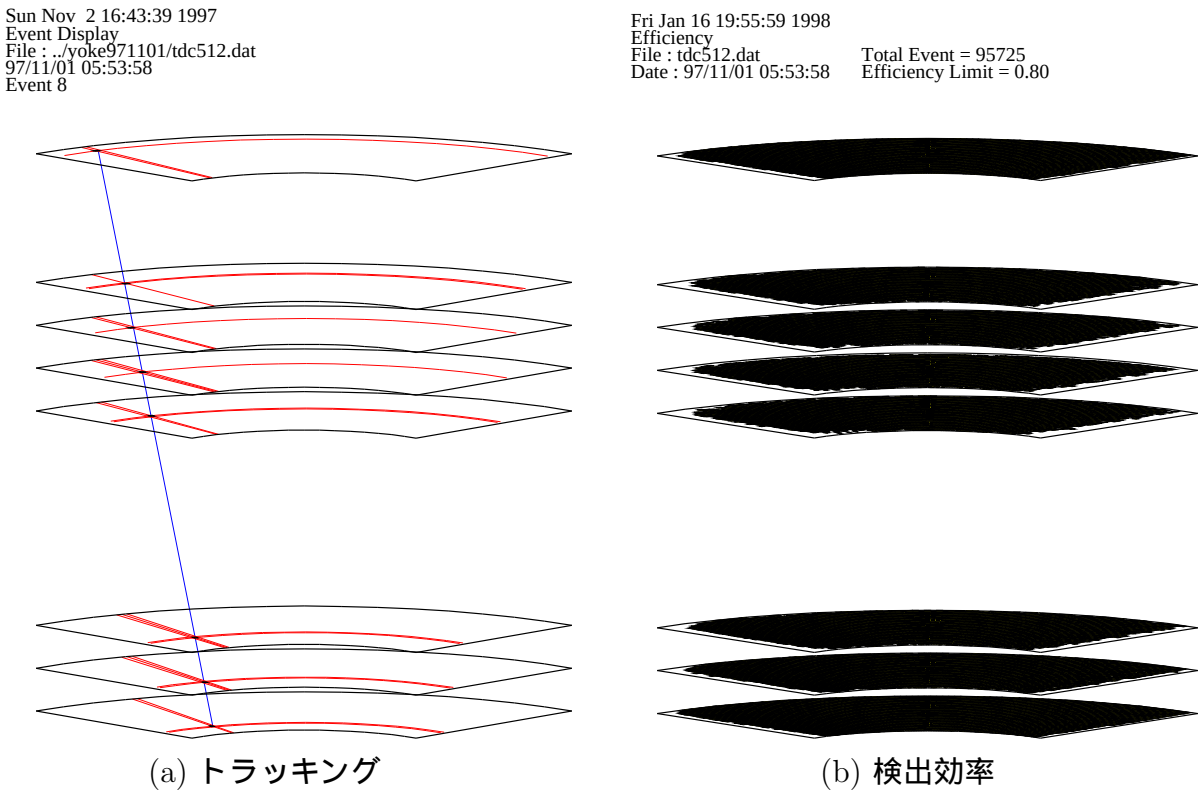
この原因は、夜間の気温低下によりブタンがガス混合器手前の配管内で液化して流れなくなったためとわかった。ブタン (ブタンシルバー) は、沸点がイソブタンで -11.7 ℃、n-ブタンで -0.5 ℃と高く[29]、もともと常温20 ℃においてもボンベの一次圧が1.5気圧程度しかない。BELLE検出器用のガスボンベ及びガス混合器は筑波実験施設わきの建屋に設置されるため、その温度は外気温とほぼ同じ温度であった。そのため、外気温の低下に従いブタンの蒸気圧が下がり、流れなくなったものと考えられる。

紫外線吸収によりRPC内の二次放電やストリーマの拡大を抑える働きをするブタンのない



(a) トラッキング　　(b) 検出効率

図 6.4: エンドヨークでのモジュールの宇宙線テストによる (a) トラッキングと (b) 検出効率の図。第 $0 \sim 7$ 層を動作させたもの。



(a) トラッキング　　(b) 検出効率

図 6.5: エンドヨークでのモジュールの宇宙線テストによる (a) トラッキングと (b) 検出効率の図。第 $0 \sim 2, 7 \sim 10, 13$ 層を動作させたもの。

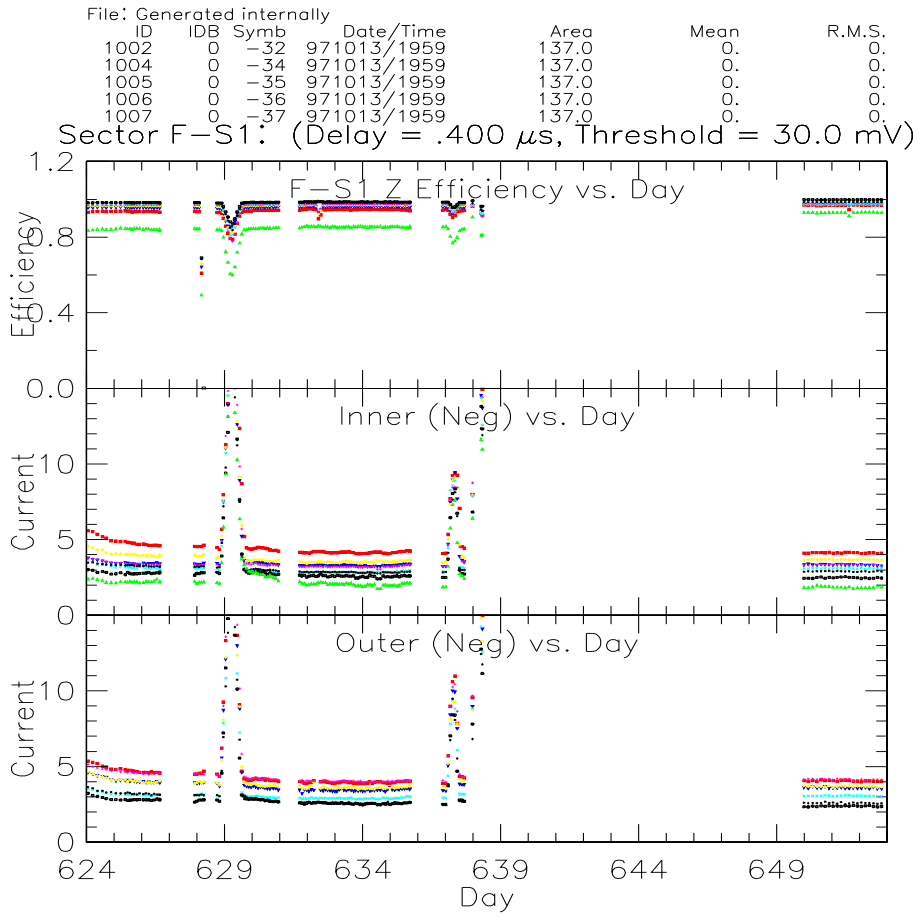


図 6.6: KLM バレルモジュールの電流値の推移。640 日目が 1997 年 10 月 1 日に該当する。629、637 日目に電流異常が見られる。

混合ガスでは、放電がなかなか止まらず RPC の極板間の電圧降下が起こり、検出効率の低下も起こる。また、大きな放電が極板にダメージを与えることにより、RPC が動作不能になるおそれがある。

対策として 10 月末に、ガスボンベ用の建屋の一区画を仕切ってエアコンを入れ気温を常時 22 ℃に保つようにし、そこにブタンとフレオン (R134a : 沸点 −26.3 ℃) のボンベ及びガス混合器を設置した。この対策後は同様の問題は起こっていない。

6.4.2 暗電流増大による動作不良

図 6.7 は、動作させた 14 枚のモジュールの電流値の推移を示したものである。それぞれの線は、ネガティブの 1 系統の電流値 (すなわち 5RPC の電流値の和) を表す。本測定は、HV を $4.1kV/mm$ の一定値にして動作を続けたものである。

図中、電流値が $3.0\mu A$ を越え明らかに増大を続けているものが 2 系統存在する。そこで、これらのモジュール内の RPC の電流値を 1 枚ずつ測定した。初めから電流が増大を続けている系統は、第 12 層のトップレイヤーで、5 枚の RPC のうち 4 枚が、プラトー電圧より低い

$4.0kV/mm$ において $1.3\mu A$ 以上、最大のものは $2.7\mu A$ という高い電流値を示した。また、途中から電流が増大したもう一系統は、第 11 層のトップレイヤーで、5 枚の RPC のうち 1 枚が、同じく $4.0kV/mm$ において $1.6\mu A$ の電流値を示した。

この原因は、前節で述べたガス混合比の変動と推測される。

エンドヨーク内のモジュールは 10 月 5 日から HV を $4.1kV/mm$ に設定して動作を続けた。10 月 16 日までは電流のデータの記録を継続してとっていないためこの図には載っていないが、したがって、前述のブタンの液化対策を施すまでの間、ブタンが流れなかったときにも電圧がかかっていた。前章で示した、ガスが置換されていく図 5.4 は、まさにこの時期ブタンが流れなかったために検出効率の低下が起こっていることを表す図である。前者はこのときに RPC がダメージを受けたものと考えられる。

また後者は、10 月 30 日頃から急に電流値が上昇したが、この前日 10 月 29 日に短時間の停電がありガス混合器を止め、復旧後にガス混合器のスイッチを入れ忘れたために丸一日ガスが流れない状態で HV がかかっていたことがわかった。

これらの 2 モジュールはガスの異常に敏感に反応し、電流異常になったものと思われる。その他のモジュールはとりあえず問題ないようであるが、やはり多くは 10 月 30 日の停電時に電流値が上がり、その後ももとの値まで下がらない。

この結果からは、ガス異常により RPC の電流値が一度上昇してしまうと、その後は元に戻らず、電流異常に陥り易くなるおそれがあることになる。どの程度のダメージで電流異常になるかは個々の RPC の特性によると思われるが、程度の差はあれすべての RPC がその危険性を持っているといえるであろう。

対策として、ガス流量の異常を早期に知り危険とわかれば直ちに自動的に HV を落すためのモニターシステムを構築する必要がある。

電流異常となったこれらの 2 モジュールは、1998 年 4 月以降に予定されているインストールの時にエンドヨークから引き出して RPC の交換修理をし、再インストールする予定である。

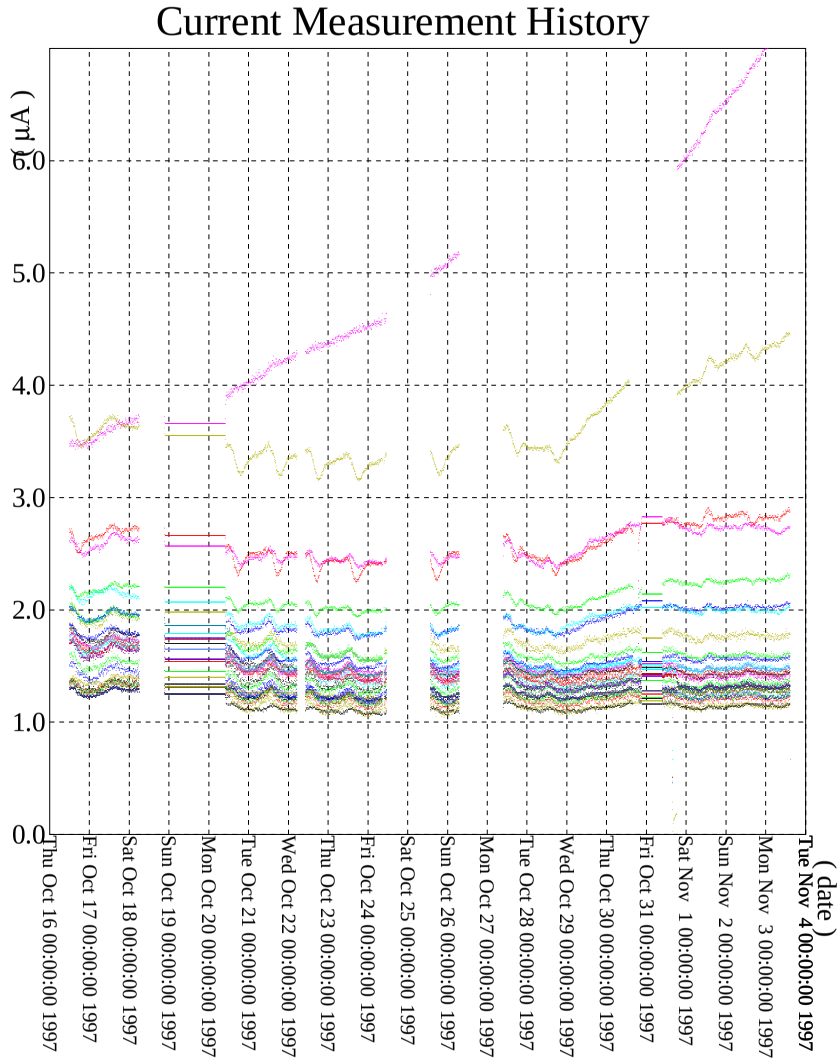


図 6.7: エンドヨークにインストールしたモジュールの電流値の推移

第7章
まとめと今後の課題

本研究において性能の評価を行なったKLMエンドキャップモジュールの性能は以下の通りである。

- 適正動作電圧

  スタンダードガス (アルゴン:ブタンシルバー:フレオン R134a=25:25:50)　$4.3kV/mm$
  非可燃性ガス (アルゴン:ブタンシルバー:フレオン R134a=30:8:62)　$4.1kV/mm$

- 検出効率

  トップレイヤー動作時　0.90
  ボトムレイヤー動作時　0.92
  スーパーレイヤー動作時　0.99

- ヒットストリップ数

  トップレイヤー動作時　$\theta = 2.1$　$\phi = 1.7$　(本)
  ボトムレイヤー動作時　$\theta = 1.5$　$\phi = 2.6$　(本)
  スーパーレイヤー動作時　$\theta = 2.7$　$\phi = 3.2$　(本)

また、KLMエンドキャップモジュールの動作に関し、以下の事柄がわかった。

- 検出効率に関しては、KLMの要求を十分満たしている。

  トップ、ボトムレイヤーのみ動作させた時の不検出率$\eta_{loss.Top}$、$\eta_{loss.Bottom} \sim 0.1$となるのは、RPC境界部分及び内部スペーサ部分の不感領域によるもの ($\sim 6\%$) と、電離ゆらぎ・再結合・クエンチング等によりストリーマ発生に至らなかったもの、ディスクリミネータの閾値を越えないシグナル等を合わせたものによる。スーパーレイヤーでは不検出率が$\eta_{loss.Top} \times \eta_{loss.Bottom}$程度に抑えられ、検出効率$\sim 0.99$と期待どおりの値が得られた。

- ヒットストリップ数に関しては、スーパーレイヤーでの運用を考えると数が多過ぎると思われる。

  θストリップとϕストリップのヒット数について、トップ、ボトムレイヤーのみ動作させた時の測定でその多少が異なっているのは、RPC内で発生したストリーマがストリップに誘起する電荷は距離が遠くなるほど広がることによるもので、KLMモジュールの構造上の特性である。

KLM はストリップの長さが $1.8 \sim 5m$ と長いこと及び 2 方向のストリップの交点をもってヒット点とみなすことから、複数の粒子が 1 モジュールを通過した場合、通過点以外にもストリップの交点が現れる。これをミラーヒットと呼んでいるが、ヒットストリップ数が多くなることでミラーヒットの数が組合せにより急激に増加し、粒子通過を空間再構成する際に通過点の誤認や位置精度の低下にも影響する。

本研究において、ヒットストリップ数を減らすためには印加する高電圧 (HV) を下げディスクリミネータの閾値を $80 \sim 100mV$ 程度まで上げることが必要とわかったが、検出効率を低下させないためこれらを最適な値に調整する必要がある。

- RPC の長期動作テストにおいては、テスト開始後 600 日以上が経過したが、検出効率の低下や自発放電発生率・暗電流の増加は見られず、現在まで安定した動作を続けている。今後もテストを継続し、更に長期にわたり安定した性能を維持できることの検証が必要である。

今後の課題としては、KLM の動作に関して

- インストールされたモジュールのうち未測定のものの動作テスト
- ヒットストリップ数を減らし、かつ検出効率を維持するための、HV、ディスクリミネータの閾値、ガス混合比等、運転パラメータの調整
- RPC の性能悪化を防ぐための、ガス系および高電圧系の自動モニターシステムの構築
- RPC の長期テストを続行し、更に長期にわたり安定した性能を維持できることの検証

また、データ解析準備も同時に進める必要があるため、

- 宇宙線測定によるストリップ位置の補正
- 空間再構成 (トラッキング) 方法の最適化
- TDC 時間情報を使って可能な限りミラーヒットを排除すること

といった事柄が挙げられる。これらは BELLE 実験開始準備のスケジュールに合わせて進められることになる。

今後の BELLE 実験のスケジュールは、1998 年 4 月以降に KLM (エンドキャップ KLM は 1998 年 1 月現在 3/4 が既にインストール済み) を初め各検出器のインストールを順に行ない、1998 年 10 月には完了予定である。その後各検出器のテスト及びキャリブレーションを行ない、KEKB 加速器の稼働準備が整い次第、1999 年 3 月頃には実験が開始される予定である。

付録 A
RPCへの非可燃性ガスの使用可能性

A.1 序

RPC に使用するガス混合比は、これまでアルゴン:ブタン:フレオン (R134a)= 25 : 25 : 50 を使用してきた。これをスタンダードガスと呼ぶ。

この混合比では、可燃性のブタンを大量に含み、大気中に放出されると可燃性ガスとして扱われる。安全のため、BELLE 実験においては非可燃性ガスを使用することが望ましい。そのためにはブタンの混合比を下げる必要があるが、紫外線吸収の効果が弱まることで光電子による二次放電がおこりやすくなりアフターパルスが増加することが予想される。

そこで、ブタンの混合比を下げた場合の動作特性の変化について、スタンダードガスとの比較をし、非可燃性ガスを用いた RPC の運用の可否について調べる実験が行なわれた [33]。

A.2 テストしたガス混合比

混合ガスが可燃性となる最低限のブタンの割合は 12%と見積もられている [22]。

本実験では、ブタン 4%、8%、12%、25%のそれぞれにアルゴン 20%、25%、30%、35%を組み合わせた全 16 通りについて、面積 $30 \times 30 cm^2$ の小型の RPC を用いて動作テストを行なった。ブタン 4%、8%のものが、非可燃性混合ガスである。

A.3 測定結果

A.3.1 検出効率、暗電流、シングルカウンレート、時間分解能

図 A.1 に、測定した 16 通りについてのプラトー曲線を示す。比較のため全てのグラフにスタンダードガスのプラトー曲線 (黒丸で示した点) を書き入れてある。アルゴンを 20%から 35%に増やすにつれプラトー電圧は $4.4kV/mm$ から $4.0kV/mm$ に減少するが、これはブタンの割合には依存しない。

図 A.2 は検出効率、暗電流、シングルカウンレート、時間分解能をプラトー電圧において測定したものである。非可燃性ガスでの性能が可燃性ガスにくらべ特に悪いということはなく、差はほとんど見られない。

A.3.2 パルスの広がり

ブタン混合比低下によりアフターパルスの増加が予想される。この影響によりシグナルパルスが広がってみえるかどうか、信号の読み出しに $0.3 \times 26cm^2$ の細いストリップを $0.2cm$ 間隔で 18 本並べたものを使用して調べた。

まず、図 A.3 にスタンダードガスと非可燃性ガスの例 (アルゴン 30%、ブタン 8%) の信号電荷分布を示す。大きなピークの後に続く小さなピークは二次放電によるアフターパルスによるものと推測される。この数が非可燃性ガスの方が多くなっている。測定した全てのガスについて、全体に占める第一のピークの割合をとったものが図 A.4 である。非可燃性ガスはこの割合がやや低く、予想どおりアフターパルスが増加していると考えられる。

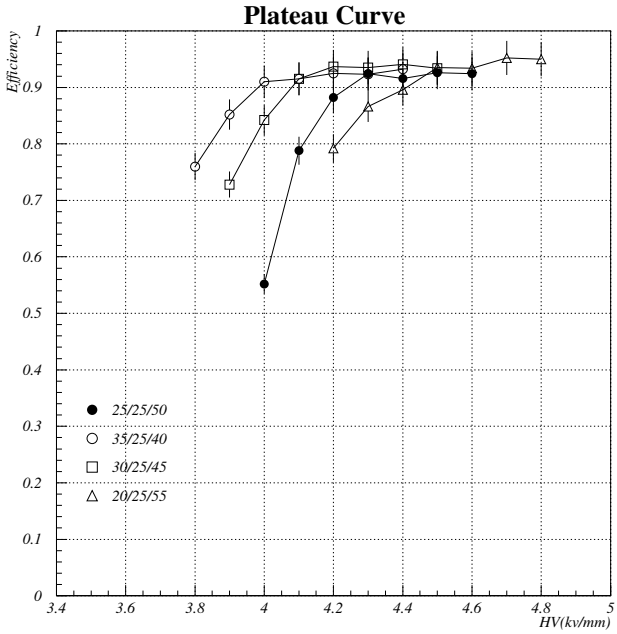
次に、図 A.5 にプラトー電圧における信号電荷の平均値を、図 A.6 にプラトー電圧におけるヒットストリップ数の平均値を、それぞれ示す。アルゴンの割合を増やすにつれ信号電荷量及びヒット数が増加するが、ブタンの割合には依存せず、非可燃性ガスの性能が可燃性ガスに比べ特に悪いということはない。

A.3.3 結論

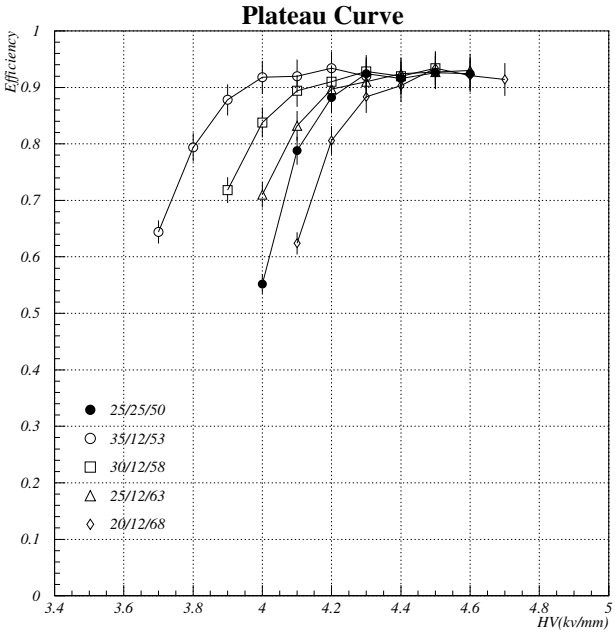
可燃性、非可燃性合わせて 16 通りのガス混合比について、その動作性能の比較を行なった。

検出効率・暗電流・シングルカウンレート・時間分解能のいずれにおいても、可燃性・非可燃性の間に差は見られなかった。アフターパルスについては非可燃性ガスでわずかに多く現れているが、信号電荷量及びパルスの広がりに対してはその影響が見られなかった。

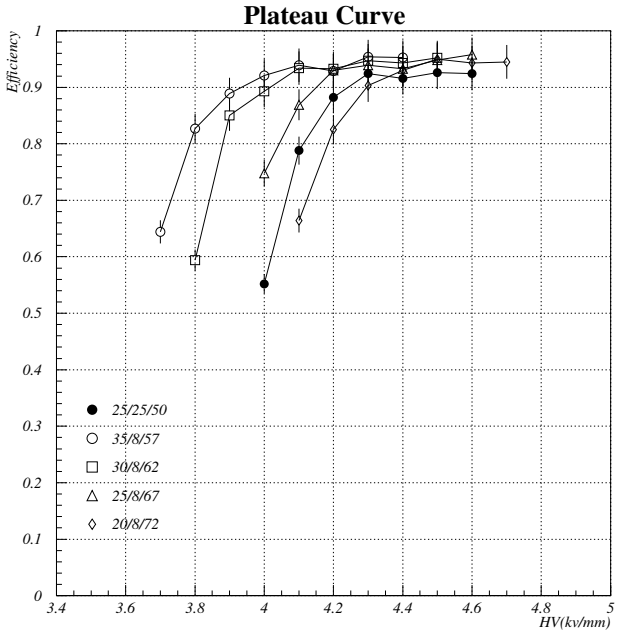
以上の結果から、RPC に非可燃性ガスを使用することに何ら問題はないといえる。安全の面からも BELLE 実験では非可燃性ガスの使用が望まれるが、本実験によりそれが十分可能であることが結論づけられる。



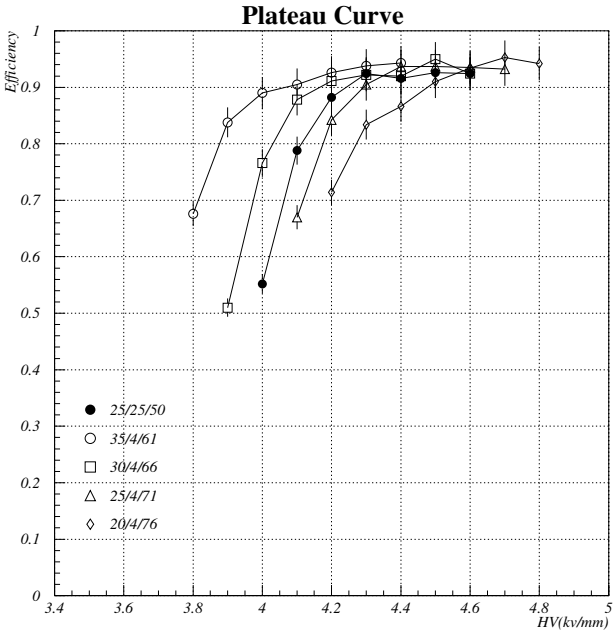
(a) ブタン 25%



(b) ブタン 12%

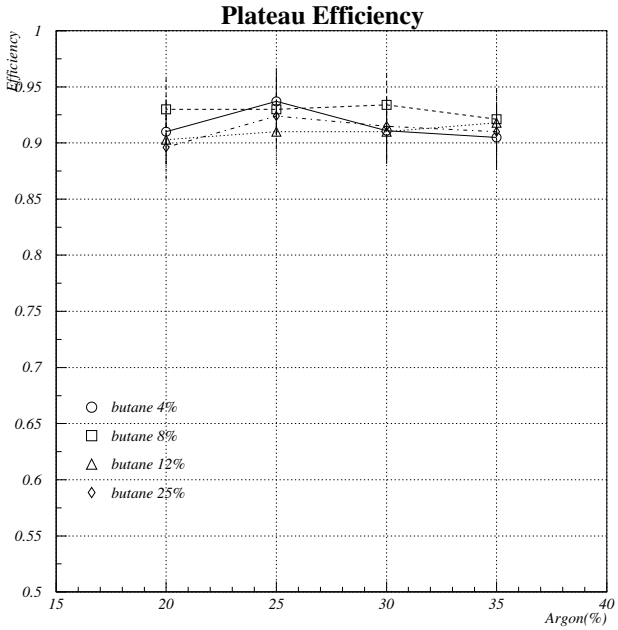


(c) ブタン 8%

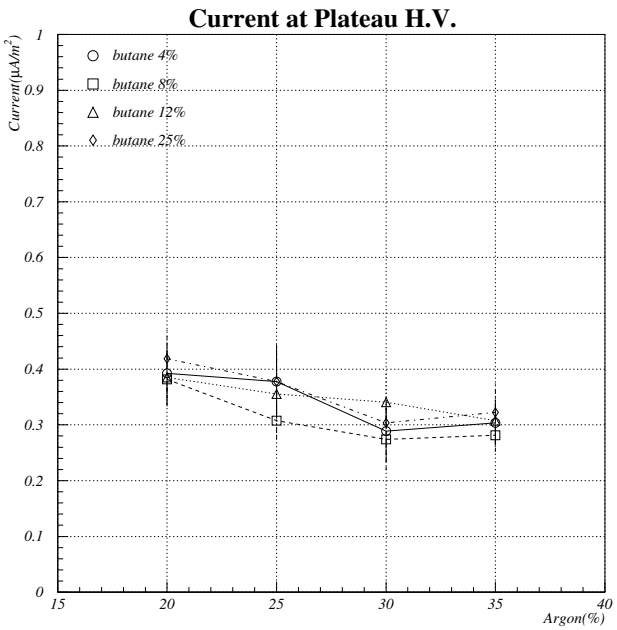


(d) ブタン 4%

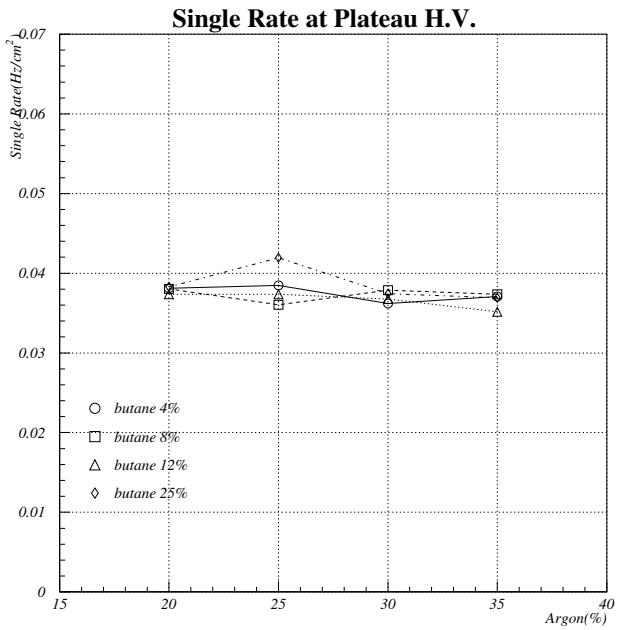
図 A.1: (a) ブタン 25%、(b) ブタン 12%、(c) ブタン 8%、(d) ブタン 4%の各混合比におけるプラトー曲線。比較のため全てにスタンダードガスのプラトー曲線を黒丸で記入した。



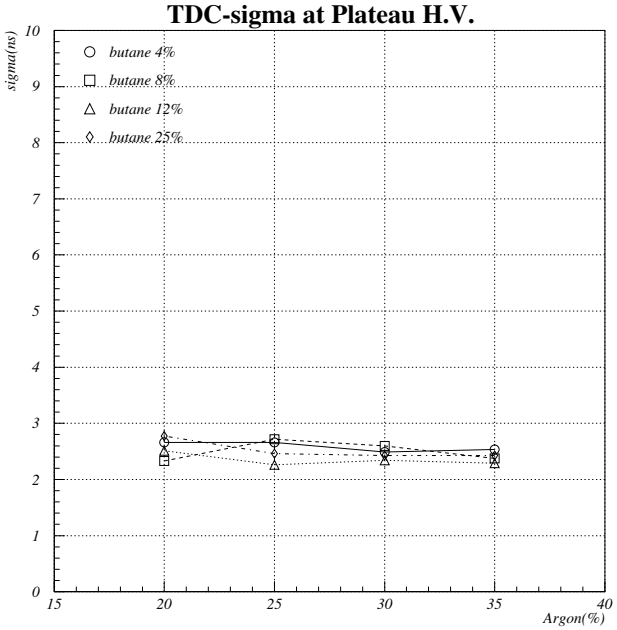
(a) 検出効率



(b) 暗電流

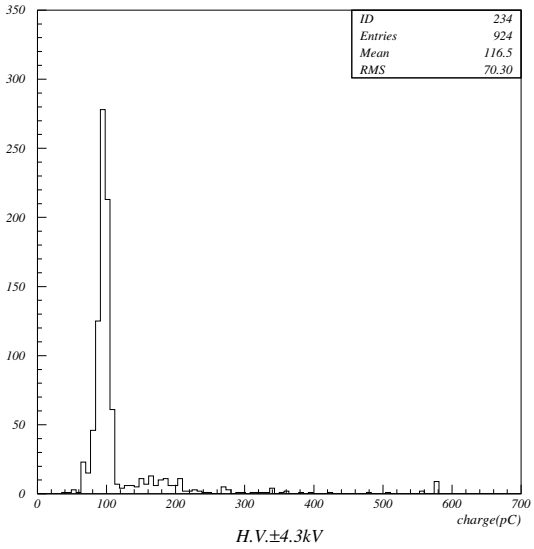


(c) シングルカウントレート

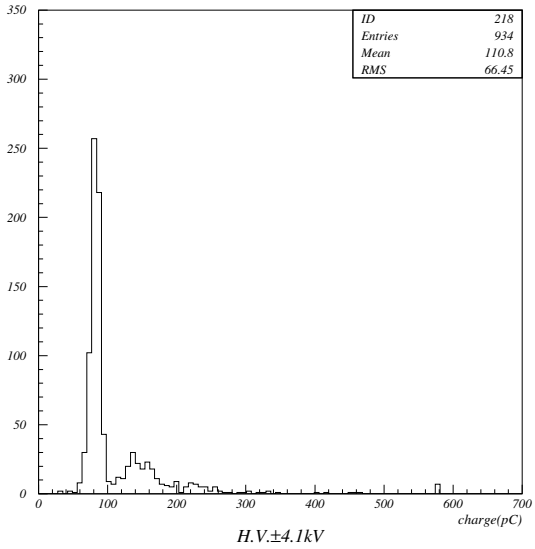


(d) 時間分解能

図 A.2: プラトー電圧における (a) 検出効率、(b) 暗電流、(c) シングルカウンレート、(d) 時間分解能



(a) スタンダードガス



(b) アルゴン:ブタン $= 30 : 8$

図 A.3: プラトー電圧における (a) スタンダードガス (b) アルゴン:ブタン $= 30 : 8$ での信号電荷分布の例。

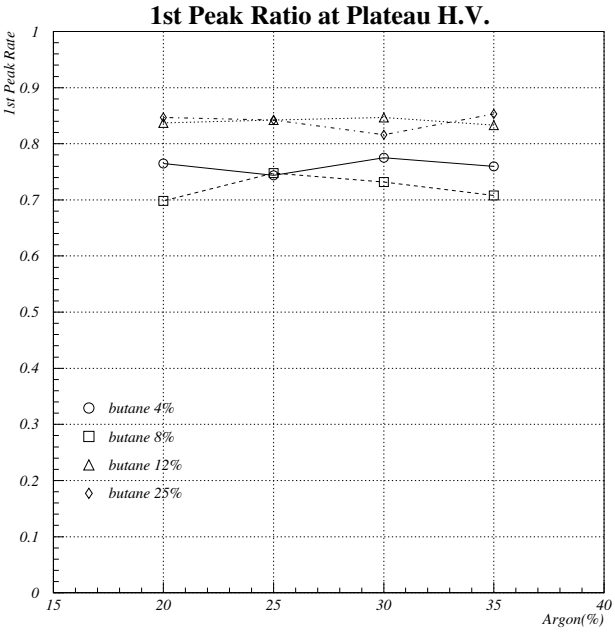


図 A.4: プラトー電圧における、全体に占める第一のピークの割合

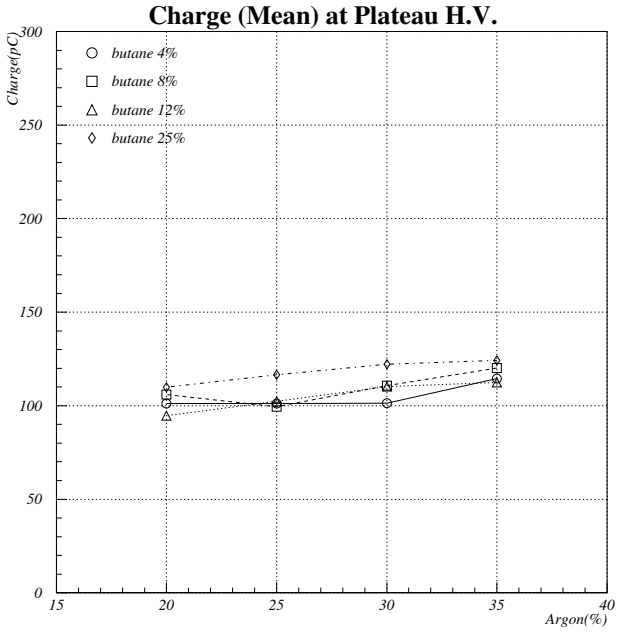


図 A.5: プラトー電圧における、信号電荷の平均値

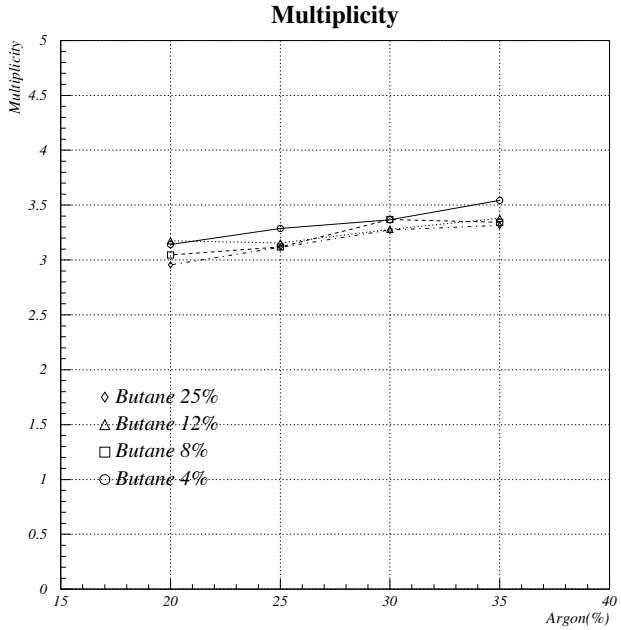


図 A.6: プラトー電圧における、ヒットストリップ数の平均値

付録 B

$B^0 - \bar{B}^0$ 混合と CP 非対称

B.1 $B^0 - \bar{B}^0$ の時間発展

第 2 章で述べたように B 中間子系は $B^0 - \bar{B}^0$ 混合を起こす。任意の中性 B 中間子の状態は、

$$|\Psi_B(t)\rangle = a(t)|B^0\rangle + b(t)|\bar{B}^0\rangle,$$

もしくは、

$$\Psi_B(t) = \begin{pmatrix} a(t) \\ b(t) \end{pmatrix},$$

と表記され、以下の時間に依存する Srödinger 方程式に従う。

$$i\frac{\partial}{\partial t}|\Psi_B(t)\rangle = \mathbf{H}|\Psi_B(t)\rangle = E|\Psi_B(t)\rangle. \tag{B.1}$$

但し、

$$|a(t)|^2 + |b(t)|^2 = 1$$

と規格化されている。このとき、ハミルトニアン $\mathbf{H}$ は 2×2 の行列で、式 B.1 に $\langle B^0|$ または $\langle \bar{B}^0|$ をかけて整理することにより、

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle B^0|\mathbf{H}|B^0\rangle & \langle B^0|\mathbf{H}|\bar{B}^0\rangle \\ \langle \bar{B}^0|\mathbf{H}|B^0\rangle & \langle \bar{B}^0|\mathbf{H}|\bar{B}^0\rangle \end{pmatrix}$$

が得られる。また、一般に崩壊する粒子の波動関数は、

$$\Psi(t) = \Psi(0)e^{-i(m-\frac{i}{2}\Gamma)t}$$

で表されることから、その対応を考えると、

$$\mathbf{H} = \mathbf{M} - \frac{i}{2}\mathbf{\Gamma}$$

であることが分かる。$\mathbf{M}$(mass matrix) 及び $\mathbf{\Gamma}$(decay matrix) も 2×2 の行列であり、

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} \end{pmatrix},$$

と書く。ここで $\mathbf{M}$、$\mathbf{\Gamma}$ 双方がエルミート行列であること、また CPT 不変性を要求することにより、

$$m_{11} = m_{11}^*,\ m_{22} = m_{22}^*,\ m_{12} = m_{12}^*,\ m_{21} = m_{21}^*,\ m_{11} = m_{22},$$

$$\Gamma_{11} = \Gamma_{11}^*,\ \Gamma_{22} = \Gamma_{22}^*,\ \Gamma_{12} = \Gamma_{12}^*,\ \Gamma_{21} = \Gamma_{21}^*,\ \Gamma_{11} = \Gamma_{22},$$

が得られる。すなわち $m_{11} = m_{22} = m_0$、$\Gamma_{11} = \Gamma_{22} = \Gamma_0$ として、

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \langle B^0|\mathbf{H}|B^0\rangle & \langle B^0|\mathbf{H}|\bar{B}^0\rangle \\ \langle \bar{B}^0|\mathbf{H}|B^0\rangle & \langle \bar{B}^0|\mathbf{H}|\bar{B}^0\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_0 - \frac{i}{2}\Gamma_0 & m_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ m_{12}^* - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^* & m_0 - \frac{i}{2}\Gamma_0 \end{pmatrix}$$

となる。

このハミルトニアンの固有状態が、質量の固有状態 (物理的な粒子) である。重い (Heavy) 方を B_H、軽い (Light) 方を B_L とすると、それぞれの固有状態 ($|B_H\rangle$、$|B_L\rangle$) 及び固有値 (λ_H、λ_L) として、

$$\begin{aligned} |B_H\rangle &= \frac{1}{\sqrt{|p|^2 + |q|^2}}\{p|B^0\rangle - q|\bar{B}^0\rangle\}, \\ |B_L\rangle &= \frac{1}{\sqrt{|p|^2 + |q|^2}}\{p|B^0\rangle + q|\bar{B}^0\rangle\}, \\ \lambda_H &= m_{11} - \frac{i}{2}\Gamma_{11} - pq \equiv M_H - \frac{i}{2}\Gamma_H, \\ \lambda_L &= m_{11} - \frac{i}{2}\Gamma_{11} + pq \equiv M_L - \frac{i}{2}\Gamma_L, \end{aligned}$$

が得られる。但し、

$$\begin{aligned} p &= (m_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12})^{1/2}, \\ q &= (m_{12}^* - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^*)^{1/2}, \end{aligned}$$

である。ここでそれぞれの質量を M_L、M_H に対し、

$$M \equiv \frac{M_H + M_L}{2}, \quad \Delta M \equiv M_H - M_L,$$

を定義する。また崩壊幅の違いは、多く見積もっても $\Delta\Gamma/\Gamma \leq 10^{-2}$、実験においては未だ何の効果も観測されていないので無視する。すなわち、

$$\Gamma_H = \Gamma_L \equiv \Gamma.$$

故に時間変化は Shrödinger 方程式の時間部分の解として、

$$\begin{aligned} B_H(t) &= B_H(0)e^{-i(M_H - \frac{i}{2}\Gamma)t}, \\ B_L(t) &= B_L(0)e^{-i(M_L - \frac{i}{2}\Gamma)t} \end{aligned} \tag{B.2}$$

で与えられる。

式B.2を書き換えることにより、$|B^0\rangle$、$|\bar{B}^0\rangle$の時間発展を表すことができる。$|B^0\rangle$、$|\bar{B}^0\rangle$を純粋な状態と定義する。すると$|B^0_{phys}(t)\rangle$を$t=0$で$|B^0\rangle$だった状態$(B_L(0)=B_H(0)=1/(2p))$の$t=t$における姿、$|\bar{B}^0_{phys}(t)\rangle$を$t=0$で純粋な$|\bar{B}^0\rangle$だった状態$(B_L(0)=-B_H(0)=1/(2q))$の$t=t$における姿とすれば

$$\begin{aligned} |B^0_{phys}(t)\rangle &= g_+(t)|B^0\rangle + \frac{q}{p}g_-(t)|\bar{B}^0\rangle, \\ |\bar{B}^0_{phys}(t)\rangle &= \frac{p}{q}g_-(t)|B^0\rangle + g_+(t)|\bar{B}^0\rangle, \end{aligned} \tag{B.3}$$

で与えられる。但し

$$\begin{aligned} g_+(t) &= e^{i(M-\frac{1}{2}\Gamma)t}\cos(\Delta Mt/2), \\ g_-(t) &= ie^{i(M-\frac{1}{2}\Gamma)t}\sin(\Delta Mt/2), \end{aligned}$$

とした。

B.2 CP非対称とユニタリー角

$t=0$の初期状態において純粋にB^0または$\bar{B}^0$の状態が、時間tにおいてCPの固有状態(f_{CP})に崩壊する場合を考える。純粋な状態にたいする崩壊振幅を、

$$\mathcal{A}_{CP} \equiv \langle f_{CP}|B^0\rangle, \quad \bar{\mathcal{A}}_{CP} \equiv \langle f_{CP}|\bar{B}^0\rangle,$$

と定義する。また便宜のため、

$$r_{f_{CP}} \equiv \frac{q}{p}\frac{\bar{\mathcal{A}}_{CP}}{\mathcal{A}_{CP}},$$

とする。このとき式B.3の時間に依存した崩壊振幅は、

$$\begin{aligned} \langle f_{CP}|B^0_{phys}(t)\rangle &= \mathcal{A}_{CP}[g_+(t) + r_{f_{CP}}g_-(t)], \\ \langle f_{CP}|\bar{B}^0_{phys}(t)\rangle &= \mathcal{A}_{CP}\left(\frac{p}{q}\right)[g_-(t) + r_{f_{CP}}g_+(t)], \end{aligned}$$

で表される。故に時間に依存した崩壊率は、

$$\begin{aligned} \Gamma(B^0_{phys}(t)\to f_{CP}) &= |\mathcal{A}_{CP}|^2e^{-\Gamma t}[\frac{1+|r_{f_{CP}}|^2}{2} + \frac{1-|r_{f_{CP}}|^2}{2}\cos(\Delta Mt) - \mathrm{Im}r_{f_{CP}}\sin(\Delta Mt)], \\ \Gamma(\bar{B}^0_{phys}(t)\to f_{CP}) &= |\mathcal{A}_{CP}|^2e^{-\Gamma t}[\frac{1+|r_{f_{CP}}|^2}{2} - \frac{1-|r_{f_{CP}}|^2}{2}\cos(\Delta Mt) + \mathrm{Im}r_{f_{CP}}\sin(\Delta Mt)], \end{aligned} \tag{B.4}$$

となる。ここで、時間に依存したCP非対称度、

$$A_{f_{CP}}(t) \equiv \frac{\Gamma(B^0_{phys}(t)\to f_{CP}) - \Gamma(\bar{B}^0_{phys}(t)\to f_{CP})}{\Gamma(B^0_{phys}(t)\to f_{CP}) + \Gamma(\bar{B}^0_{phys}(t)\to f_{CP})},$$

を定義する。式 B.4 を用いれば、

$$A_{f_{CP}}(t) = \frac{(1-|r_{f_{CP}}|^2)\cos(\Delta Mt) - 2\mathrm{Im}r_{f_{CP}}\sin(\Delta Mt)}{1+|r_{f_{CP}}|^2}, \tag{B.5}$$

と表せる。今 B_d の場合を考えており、2 つの質量固有状態の崩壊幅の差を無視しているから、

$$\frac{q}{p} = \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{td}^*} = e^{-2i\phi_M},$$

である。ここで、$2\phi_M$ は $B^0 - \bar{B}^0$ 混合ダイアグラム (図 2.2) の KM 位相であり、B_d のとき $\phi_M = \phi_1$ である。もし、直接的 CP 非対称が存在しない崩壊モードならば、全ての振幅は同じ KM 位相 (ϕ_D) に依存するため、$|\mathcal{A}_{CP}/\bar{\mathcal{A}}_{CP}| = 1$ となる。故に式 B.5 は、

$$\begin{aligned} A_{f_{CP}}(t) &= \mp\mathrm{Im}r_{f_{CP}}\sin(\Delta Mt) & \text{(B.6)} \\ &= \pm\sin 2(\phi_M + \phi_D)\sin(\Delta Mt), & \text{(B.7)} \end{aligned}$$

と簡潔に書き表せる。符号は終状態 f_{CP} の CP 固有値に相当する。すなわち適当な終状態 f_{CP} を選び $A_{f_{CP}}(t)$ を測定すればユニタリー角を決定することができる。例えば f_{CP} に $J\psi K_s$ を選べば、$\phi_D = 0$ より $A_{f_{CP}}(t)$ の測定で ϕ_1 を決定することができ、また $\pi^+\pi^-$ を選べば $\phi_D = \phi_3$ となり、

$$\begin{aligned} A_{f_{CP}}(t) &= \sin 2(\phi_1 + \phi_3) sin(\Delta Mt), \\ &= \sin 2(\pi - \phi_2) sin(\Delta Mt), \\ &= \sin 2\phi_2 sin(\Delta Mt), \end{aligned}$$

と ϕ_2 を決定することができる。

謝辞

本論文執筆にあたり、多くの方々から御指導、御鞭撻を賜わり、御協力をいただきました。
この場を借りて厚くお礼申し上げます。

平成 10 年 2 月 19 日

参考文献

[1] L.Wolfenstein, Phys.Rev.Lett. 51(1983)1945.

[2] H.Leutwyler and M.Roos, Z.Phys. C25(1984)91.

[3] M.Bourquin *et al.*, Z.Phys. C21(1983)27.

[4] A.Sirlin, Phys.Rev. D35(1987)3423.

[5] H.Abramowicz *et al.*, Z.Phys. C15(1982)19.

[6] C.Foudas *et al.*, Phys.Rev.Lett. 64(1990)1207

[7] S.Stone, *"Semileptonic B Decays - Experimental"* in the book *"B Decays"* , edited by S.Stone (World Scientific, Singapore, 1991).

[8] V.Luth, talk presented at *International Symposium on Lepton and Photon Interactions*, Ithaca, NY USA, August, 1993

[9] BELLE Collaboration, *Letter of Intent for A Study of CP Violation in B Mason Decays*, KEK Report 94-2, April 1994

[10] 高崎史彦 "なぜ B クォークなのか? : B ファクトリー建設計画" 日本物理学会誌 vol.46,No.7(1991)

[11] 岩田正義他 "B ファクトリーの建設が始まる" 日本物理学会誌 vol.49,No.9(1994)

[12] BELLE Collaboration, *KEKB B-Factory Design Report*, KEK Report 95-7, August 1995

[13] BELLE Collaboration, *BELLE Technical Design Report*, KEK Report 95-1, April 1995

[14] BELLE Collaboration, *BELLE Progress Report*, KEK Progress Report 96-1, March 1996

[15] BELLE SVD group, *Technical Design Report of BELLE SVD*, October 1997

[16] K.Neichi *et al.*, *The Readout-strip width in KLM detector*, KEK BELLE Note #109(1996)

[17] R.Santonico *et al.*, *DEVELOPMENT OF RESISTIVE PLATE COUNTER*, Nucl.Instr. and Meth. 187(1981)377.

[18] L.Antoniazzi *et al.*, *The E771 RPC muon detector* Nucl.Instr. and Meth. 315(1992)92.

[19] E.Petrolo *et al.*, *A fast tracking muon trigger for experiment WA92*, Nucl.Instr. and Meth. 315(1992)95.

[20] K.Kleinknecht, "粒子線検出器", 培風館 (1987)

[21] 石川正敏 "BELLE 実験のためのレジスティブ・プレート・カウンターの開発研究" 平成 7 年度東北大学大学院理学研究科物理学専攻修士論文

[22] Y.Hoshi *et al.*, *Nonflammable gas mixture for RPC*, KEK BELLE Note #185(1997)

[23] 一野瀬昌寿 "BELLE 実験用大型 RPC の開発研究" 平成 8 年度東北大学大学院理学研究科物理学専攻修士論文

[24] K.Abe, *Gas for KLM Detector*, KEK BELLE Note #145(1996)

[25] D.Marlow, *Implementation of RPC Electronics*, BELLE Note #69(1995)

[26] C.Mindas *et al.*, *Tests of a XILINX Based RPC Readout Board*, BELLE Note #87(1995)

[27] BELLE Collaboration, *BELLE Progress Report*, KEK Progress Report 97-1, April 1997

[28] Y.Inoue *et al.*, *Test Module for KLM Readout*, BELLE Note #60(1995)

[29] Louis Neel, *GAS ENCYCLOPEDIA*, ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY (1976)

[30] Y.Inoue *et al.*, *Spatial Distribution of Induced Charges on the Pickup Cathode of an RPC*, KEK BELLE Note #85(1995)

[31] 根市一志 "Resistive Plate Chamber におけるパルス" TOHOKU-HEP-NOTE-96-04(1996)

[32] Y.Teramoto, *2D-readout of RPC's signals*, KEK BELLE Note #18(1994)

[33] M.Ueki *et al.*, *Nonflammable gas study for RPC*, KEK BELLE Note #199(1997)