1997年度 修士学位論文
ＢＥＬＬＥ測定器における
環境モニターシステムの開発

奈良女子大学大学院理学研究科
物理学専攻高エネルギー物理学研究室
高田　明子

1997年2月

目次

1 B 中間子の物理 3

1.1 CPT 定理 3

1.2 小林・益川模型 4

1.3 B 中間子系における CP 非保存 5

1.3.1 $B^0\bar{B}^0$ ミキシング 5

1.3.2 B 中間子崩壊における CP 非保存 8

1.4 B ファクトリーでの役割 10

2 KEKB 加速器と BELLE 測定器 11

2.1 KEKB 加速器 11

2.2 BELLE 測定器 13

2.2.1 粒子崩壊点測定器 (SVD) 14

2.2.2 中央飛跡検出器 (CDC) 14

2.2.3 粒子識別装置 (ACC,TOF) 16

2.2.4 電磁カロリーメータ (ECL) 16

2.2.5 K_L,μ 粒子検出器 (K_L,μ) 18

3 データ収集システム及び全体のモニターシステム 20

3.1 トリガーとデータ収集 (DAQ) システムの概要 20

3.1.1 トリガーシステム 20

3.1.2 データ収集 (DAQ) 20

3.1.3 サブシステム間のコミュニケーション 22

3.1.4 データの共有 22

3.1.5 NSM の構造 24

3.2 BELLE モニターシステム 25

3.2.1 BELLE 測定器の環境モニターシステム 25

3.2.2 エレクトロニクスハットのモニターシステム 26
3.2.3 SVD モニターシステム 27
3.2.4 HV コントロール・モニターシステム 28
3.2.5 加速器とのコミュニケーション 28

4 測定器の環境モニターシステムの設計 30
4.1 環境モニターシステムの概要 30
4.2 環境データの信号 32
4.2.1 センサーの概要 32
4.2.2 磁場中での湿度センサーの動作テスト 34
4.2.3 センサーの放射線耐性 38
4.3 環境データの数値化と読みだし 40
4.3.1 HP3852A データロギングシステム 40
4.3.2 50m ケーブルを用いたアナログ信号の伝送試験 41
4.3.3 GPIB バス 47
4.3.4 SPARC ボード 51
4.3.5 SBUS-GPIB 51
4.3.6 プログラムの流れ 52

5 環境モニターシステムのプロトタイプテスト 55
5.1 CsI 電磁カロリメータ 55
5.1.1 カロリメータの構造 55
5.1.2 CsI(Tl) カウンター 57
5.1.3 温度依存性 59
5.2 冷却方法 61
5.3 セットアップ 65
5.3.1 CsI バレル部実物大模型のセットアップ 65
5.3.2 冷媒の流量の較正 65
5.3.3 測定方法 67
5.4 結果 68
5.5 考察 72

6 まとめ 74

A テスト用プログラム **76**

B 冷却テストに用いたプログラム **84**

表一覧

1.1 相互作用の種類 4

2.1 Parameters of the KEK asymmetric energy collider 13
2.2 BELLE 検出器のパラメータ 19

3.1 各サブシステムのノード 25
3.2 エレキハットモニターシステムでモニターされるチャンネル 26
3.3 温度モニターの測定点 28

4.1 HP3852A で測定される環境データ 33
4.2 結果 38
4.3 センサーの放射線耐性 39
4.4 2 線式抵抗測定の結果 45
4.5 4 線式抵抗測定の結果 46
4.6 インターフェース機能 49

5.1 CsI 電磁カロリメータの大きさのパラメーター 57
5.2 PF-5060(冷媒) の特性 61
5.3 流量計とフロリナートの流量との対応 67
5.4 各測定点での温度変化 72

はじめに

現在、素粒子物理学では、標準理論が成功をおさめ非常に多くの現象が統一的に理解できるようになった。この理論に明らかに反する実験事実は今のところ存在していない。しかし、標準理論自身未だ実験的に確認されなければならない点を持っている。その一つが「CP 対称性の破れ」である。「CP 対称性の破れ」とは、物質を構成する粒子と反物質を構成する反粒子とのあいだの対称性、同等性が破れていることを意味する。

この CP の破れは 1960 年代に中性 K 間子の崩壊から発見された。標準理論での「クォークの混合」において、1973 年に小林・益川らが示した「クォークが少なくとも 3 世代あれば標準模型で CP の破れが起こりうる」というものである。また Carter、三田らは小林・益川理論に基づく計算を行なった結果、CP の破れは B 中間子の崩壊において最も大きく現れると指摘した。従って、B 中間子を大量に生成しその崩壊過程から CP 対称性の破れを見ることができれば標準理論の重要な検証であるとともに新しい物理の発見を導く可能性もある。

日本では高エネルギー加速器科学研究機構において 8GeV の電子と 3.5GeV の陽電子を衝突させ、B 中間子を大量に生成しその崩壊から CP の破れを検証するという B ファクトリー計画が進んでいる。衝突後に出てきた粒子をあまさず測定するようにさまざまな検出器から構成された BELLE 測定器がおかれる。

さて、B ファクトリー実験のような衝突型実験は長期に渡るため、測定器が安全な状態にあるか絶えず監視することが必要である。例えば熱によって読みだしのプレアンプが破損するなどの異常を起きないよう温度を測定したり、またドリフトチェンバーのようなガスを用いる検出器の場合にはガス圧を測定したりする必要がある。つまり測定器の状況を把握するのに必要な環境情報（温度・湿度・ガス圧など）をリアルタイムで測定するようなシステムが必要である。またこのような情報は実験データの較正にも使用される。以上の 2 点から、BELLE 測定器全体の環境を統一してモニターするシステムが必要であり、今回私は BELLE 測定器の環境モニターシステムの設計と開発をおこなった。

まず、環境情報を測定するセンサーの動作チェックを行ない実際の実験で用いることのできるものであるか確かめた。そして、実際にプロトタイプの環境モニターシステムを組上げ、これを用いてCsI電磁カロリメータバレル部の実物大模型内の温度を測定し、冷却システムの性能を評価した。

本論文では、第1章でB中間子の物理、第2章でBファクトリーで用いる加速器と測定器の説明をおこない、第3章で、Bファクトリー全体のモニターシステムの概要を説明する。そして、第4章と5章でBELLE測定器の環境モニターシステムのこれまでの設計と開発に関する研究結果の報告を行ない、第6章でまとめを行なう。

第 1 章

B 中間子の物理

1.1 CPT 定理

自然界にはいろいろな対称性が存在する。そのなかには厳密に成り立っているもの、または限られた条件で成り立たないものがある。荷電共役 (C)、空間反転 (P)、時間反転 (T) を組み合わせた CPT 変換のもとでは今までにわかっている物理法則は全て不変である。これは CPT 定理と呼ばれ変換の順序に関係しない。この定理により、全ての粒子にはその反粒子が存在し、質量、寿命は等しく電荷などが逆符合になることが保証される。しかし個々の変換の対称性は保証されていない。例えば弱い相互作用の反応では、パリティ対称性が 100% 破れていることがわかっている。また荷電共役対称性は、π^+ の μ^+ への崩壊 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ を見ると C 変換後左巻きの反ニュートリノは存在しないためその対称性が破れていることがわかる。(図 1.1) 時間反転に対する対称性が破れているという証拠は今までにみつかっていないので CP 変換対称性は保存すると考えられていたが、1964 年にフィッチとクローニン [2] 達が中性 K 中間子の崩壊で、CP 対称性の破れの証拠をつかんだ。その後、CP 対称性の破れに関する本質的に新しい観測はいまだなく、K 中間子以外の系 に

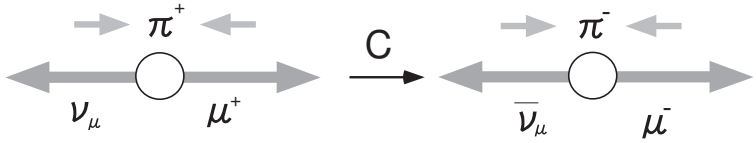


図 1.1: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ における C 変換

おける CP 対称性の破れの観測が期待されている。

1.2 小林・益川模型

自然界に存在する基本的な相互作用は表 1.1のように特徴づけられこれらの相互作用はゲージボゾンを媒介することによって働いている。クォークは 6 種類ありこ

相互作用	媒介粒子	到達距離
重力	重力子	∞
電磁相互作用	光子	∞
強い相互作用	グルーオン	10^{-15}m
弱い相互作用	ウィークボゾン (W,Z)	10^{-18}m

表 1.1: 相互作用の種類

れらは 2 つずつで 2 重項を形成し次のような 3 世代からなっている。

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \tag{1.1}$$

ここでは、u、c、t クォークをアップ系クォーク、d、s、b をダウン系クォークと呼ぶ。弱い相互作用のうち W^+ または W^- ボゾンに媒介される荷電カレント相互作用のみがクォークの種類 (フレーバー) を変えることができる。荷電カレント相互作用では、アップ系クォークがダウン系クォークに遷移したりあるいはその逆の遷移が起こる。この遷移は主として同一世代内で起きるのであるがある確率で別の世代のクォークにも転換する。これを「世代の混合」と呼ぶ。この様子を行列式を用いて表すと

$$d'_i = \sum_j U_{ij} d_j \tag{1.2}$$

と表される。ここで、d_1=d、d_2=s、d_3=b である。U_{ij} はクォークの混合行列で、3 行 3 列のユニタリー行列、すなわち $U^{\dagger}$U=1 である。1972 年に、小林と益川はクォークが三世代以上であれば、このユニタリー行列の中に CP の破れを引き起こす複素位相が入りうることを示した。結果としてチャームクォークが発見される以前に、最低三世代までの存在を予言したことになり、チャームクォーク、ボトムクォークの発見により大きな注目を集めた。

三世代のこのユニタリー行列は、小林・益川行列と呼ばれしばしば V_{KM} と呼ばれる。この行列の成分は、

$$V_{KM} \equiv \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \tag{1.3}$$

であり、それぞれの要素は、添字にあるクォーク間の混合の大きさを表わすパラメータであり、そのクォーク間の遷移を表すパラメータでもある。V_{KM} の行列要素の独立変数の数は 4 個、内 3 個は混合角、残り 1 つが CP を破る位相である。ヴォルフェンシュタインの方法で表示すると

$$V_{KM} = \begin{pmatrix} 1-\frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + 0(\lambda^4) \tag{1.4}$$

となる。この行列において、対角要素から最も遠い要素に現れるパラメータ η が CP を破る複素位相を作り出す。V_{KM} がユニタリー行列であるという仮定から

$$V_{td}V_{tb}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{ud}V_{ub}^* = 0 \tag{1.5}$$

の関係があり、各々の項は全て複素数なので複素平面上にこれを書くと図 1.2のような三角形を描く。これをユニタリー三角形と呼ぶ。ここで、3 つの内角は、小林・益川行列の成分を用いて、

$$\phi_1 \equiv arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right),\ \phi_2 \equiv arg\left(\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{td}V_{tb}^*}\right),\ \phi_3 \equiv arg\left(\frac{V_{cd}V_{cb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*}\right) \tag{1.6}$$

と書け、CP 対称性の破れに直接関係のある量である。

1.3 B 中間子系における CP 非保存

1.3.1 $B^0\bar{B}^0$ ミキシング

中性 B 中間子 (B^0) は (図 1.3) のファインマンダイアグラム（ボックスダイアグラムと呼ばれている）で反 B 中間子 $(\bar{B}_0)$ に変化する。これを $B^0\bar{B}^0$ ミキシングと言う。この状態の時間に依存したシュレディンガー方程式は、

$$i\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix} B^0 \\ \bar{B}^0 \end{pmatrix} = H\begin{pmatrix} B^0 \\ \bar{B}^0 \end{pmatrix}$$

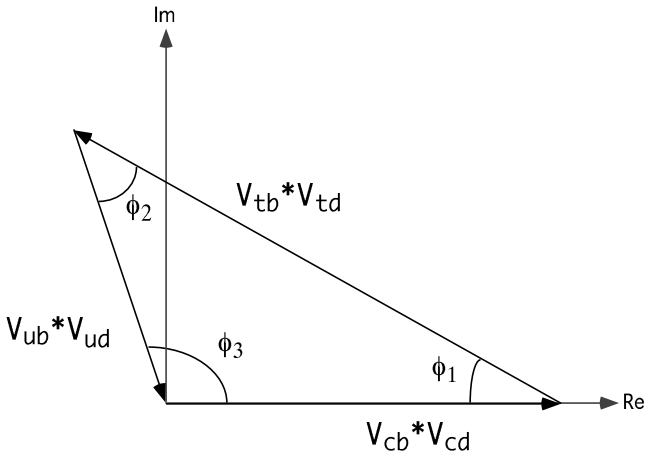


図 1.2: 小林・益川行列のユニタリー三角形

$$\begin{aligned} &\equiv \left(M - \frac{i}{2}\Gamma\right)\begin{pmatrix} B^0 \\ \bar{B}^0 \end{pmatrix} \\ &\equiv \begin{pmatrix} M_{11} - \frac{i}{2}\Gamma_{11} & M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ M_{21} - \frac{i}{2}\Gamma_{21} & M_{22} - \frac{i}{2}\Gamma_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} B^0 \\ \bar{B}^0 \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{1.7}$$

M、Γ はそれぞれ質量行列、崩壊行列と呼ばれるエルミート行列である。よって、$M_{21} = M_{12}^*$、$\Gamma_{21} = \Gamma_{12}^*$ であり、M_{11}、M_{22}、Γ_{11}、Γ_{22} は実数となる。また、ハミルトニアンに対し CPT 保存

$$\begin{aligned} \langle B^0|H|B^0\rangle &= \langle B^0|(CPT)^{-1}H(CPT)|B^0\rangle \\ &= \langle \bar{B}^0|H|\bar{B}^0\rangle \end{aligned} \tag{1.8}$$

を要求すると、$M_{11} = M_{22} = M$、$\Gamma_{11} = \Gamma_{22} = \Gamma$ が成り立ち、式 1.7は、

$$H\begin{pmatrix} B^0 \\ \bar{B}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M - \frac{i}{2}\Gamma & M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ M_{12}^* - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^* & M - \frac{i}{2}\Gamma \end{pmatrix}\begin{pmatrix} B^0 \\ \bar{B}^0 \end{pmatrix} \tag{1.9}$$

と表される。 ここで、対角成分の M、Γ はそれぞれ、フレーバーの固有状態である B^0、$\bar{B}^0$ の質量、崩壊幅を表している。また、非対角成分にある、M_{12} は仮想的な崩壊における B^0、$\bar{B}^0$ の遷移を、Γ_{12} は B^0、$\bar{B}^0$ 共に共通に起こり得る崩壊における B^0、$\bar{B}^0$ の遷移を表している。ここで、H の固有値 E_1,E_2 と固有状態 B_1,B_2 は

$$E_1 = (M - \frac{i}{2}\Gamma) + pq \equiv M_1 - \frac{i}{2}\Gamma_1 \tag{1.10}$$

$$E_2 = (M - \frac{i}{2}\Gamma) + pq \equiv M_2 - \frac{i}{2}\Gamma_2 \tag{1.11}$$

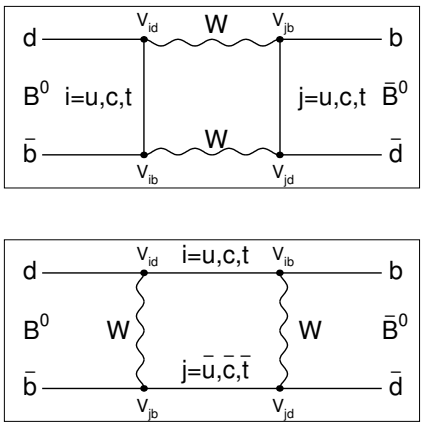


図 1.3: B^0_d-$\bar{B}^0_d$ のファインマンダイアグラム (ボックスダイアグラム)

$$|B_1\rangle = \frac{p}{\sqrt{|p|^2+|q|^2}}|B^0\rangle + \frac{q}{\sqrt{|p|^2+|q|^2}}|\bar{B}^0\rangle \tag{1.12}$$

$$|B_2\rangle = \frac{p}{\sqrt{|p|^2+|q|^2}}|B^0\rangle - \frac{q}{\sqrt{|p|^2+|q|^2}}|\bar{B}^0\rangle \tag{1.13}$$

となる。ここで、

$$p = (M_{12} + \frac{i}{2}\Gamma_{12})^{1/2} \tag{1.14}$$

$$q = (M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12})^{1/2} \tag{1.15}$$

である。また、質量の差 ΔM、崩壊幅の差 $\Delta\Gamma$ は、次式のようになる。

$$\Delta M = M_1 - M_2 = 2Re\sqrt{\left(M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}\right)\left(M^*_{12} - \frac{i}{2}\Gamma^*_{12}\right)} \tag{1.16}$$

$$\Delta\Gamma = \Gamma_1 - \Gamma_2 = -4Im\sqrt{\left(M_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}\right)\left(M^*_{12} - \frac{i}{2}\Gamma^*_{12}\right)} \tag{1.17}$$

ここで t=0 で B^0、または $\bar{B}^0$ であったものの時間発展について考えることにする t=t 秒後の状態を $|B^0(t)\rangle$,$|\bar{B}^0(t)\rangle$ とすると

$$|B^0(t)\rangle = f_+(t)|B^0\rangle + \frac{q}{p}f_-|\bar{B}^0\rangle \tag{1.18}$$

$$|\bar{B}^0(t)\rangle = \frac{p}{q}f_-(t)|B^0\rangle + f_+|\bar{B}^0\rangle \tag{1.19}$$

$$f_\pm = \frac{1}{2}\left\{\exp\left[i\left(-M_1 + \frac{i}{2}\Gamma_1\right)t\right] \pm \exp\left[i\left(-M_2 + \frac{i}{2}\Gamma_2\right)t\right]\right\} \tag{1.20}$$

で表される。B 中間子には多数の崩壊チャンネルがあり、それらのチャンネルのほとんどが B^0 にも $\bar{B}^0$ にも共通のチャンネルであることから、$\Gamma_1 \simeq \Gamma_2 = \Gamma$ とおけ

る。これを利用すると式 1.20は、

$$f_+ = \exp\left\{\left(-iM - \frac{\Gamma}{2}\right)t\right\}\cos\left(\frac{1}{2}\Delta M t\right) \quad (1.21)$$

$$f_- = \exp\left\{\left(-iM - \frac{\Gamma}{2}\right)t\right\}\sin\left(\frac{1}{2}\Delta M t\right) \quad (1.22)$$

となり、t=0 で $100\%B^0$ だったものが時間と共に変化して、B^0 のままで留まる確率、及び $\bar{B}^0$ に変換する確率式は

$$P_{B^0}(t) = \frac{\exp(-\Gamma t)}{2\tau_B}\{1+\cos(\Delta M t)\} \quad (1.23)$$

$$P_{\bar{B}^0}(t) = \frac{\exp(-\Gamma t)}{2\tau_B}\{1-\cos(\Delta M t)\} \quad (1.24)$$

となる。ここで、τ_B は B 中間子の生存時間である。この式から、ΔM はミキシングの周期を表していることがわかる。一般的に、ミキシングを表すパラメータとして、質量差と崩壊差の比をとった

$$x_d = \frac{\Delta M}{\Gamma} \quad (1.25)$$

が用いられている。今までは、B 中間子の個々の事象について崩壊までの時間測定ができなかったため式 1.23と 1.24の積分値 χ_d を測定することによって x_d を測定してきた。現在までの測定値は $\chi_d = 0.156 \pm 0.024$、$x_d = 0.71 \pm 0.06$ である。最近になって LEP などで x_d を直接測定することが行なわれてきており、その値は OPAL の実験で $x_d = 0.82 \pm 0.16(stat.) \pm 0.03(syst.)$ である。

B ファクトリーでは加速器の電子・陽電子のエネルギーを非対称にすることによって B 中間子を約 200μm 飛行させる。そして崩壊点の精密な測定をおこない時間差の測定を行なう粒子崩壊点測定器（SVD）によって x_d の直接測定を高精度で行なうことが可能になっている。

1.3.2 B 中間子崩壊における CP 非保存

次に B 中間子の崩壊出どのように CP の破れを測定するかを示す。今、中性中間子がある CP 固有状態 $|f_{cp}\rangle$ に崩壊する場合を考える。そうすると時刻 t=0 で $B^0(\bar{B}^0)$ であった粒子が時刻 t で $|f_{cp}\rangle$ に崩壊した場合の崩壊振幅はそれぞれ、

$$\langle f_{cp}|H|B^0(t)\rangle = f_+(t)\langle f_{cp}|H|B^0\rangle + \frac{q}{p}f_-(t)\langle f_{cp}|H|\bar{B}^0\rangle \quad (1.26)$$

$$\langle f_{cp}|H|\bar{B}^0(t)\rangle = f_+(t)\langle f_{cp}|H|\bar{B}^0\rangle + \frac{q}{p}f_+(t)\langle f_{cp}|H|B^0\rangle \tag{1.27}$$

である。ここで、CP 非対称度 a_{fcp} を

$$a_{fcp} \equiv \frac{\Gamma(B^0(t)\to f_{cp}) - \Gamma(\bar{B}^0(t)\to f_{cp})}{\Gamma(B^0(t)\to f_{cp}) + \Gamma(\bar{B}^0(t)\to f_{cp})} \tag{1.28}$$

と定義する [1] この a_{fcp} は B^0 が f_{cp} に崩壊する過程と $\bar{B}^0$ が f_{cp} に崩壊する過程の違いを示したものである。つまり、これを求めるためには崩壊点で B^0、$\bar{B}^0$ のどちらの状態であったかの判定が必要である、さらに時間の関数であることから崩壊した時の時間 (崩壊の時間差) が必要となる。ここで、$\langle f_{cp}|H|\bar{B}^0\rangle = A$、$\langle f_{cp}|H|B^0\rangle = \bar{A}$ として、次のように λ を定義する。

$$\lambda = \frac{q}{p}\frac{\bar{A}}{A} \tag{1.29}$$

すると、式 1.26,1.27は、

$$\langle f_{cp}|H|B^0(t)\rangle = A(f_+(t) + \lambda f_-(t)) \tag{1.30}$$

$$\langle f_{cp}|H|\bar{B}^0(t)\rangle = \frac{p}{q}A(f_-(t) + \lambda f_+(t)) \tag{1.31}$$

となり、最終的には時間に依存した非対称性を表す式

$$a_{fcp} = \frac{(1-|\lambda|^2)\cos(\Delta M t) - 2Im\lambda\sin(\Delta M t)}{1+|\lambda|^2} \tag{1.32}$$

が求まる。この式 1.32から時間、-∞ から $+\infty$ の範囲で積分すると 0 になってしまうことから a_{fcp} を測定するときに時刻 t を測ることは非常に重要である。また $|\lambda| = 1$ となるような崩壊過程については

$$a_{fcp} = -Im\lambda\sin(\Delta M t) \tag{1.33}$$

となる。この a_{fcp}(式 1.28) を測定から求め、B^0-$\bar{B}^0$ ミキシングの測定から ΔM の値が求まれば、λ の値を求めることができる。
次にこの λ という測定値とユニタリートライアングルの関係について述べる。B 中間子のミキシングの場合、q/p は小林・益川行列を用いると

$$\left(\frac{q}{p}\right) = \sqrt{\frac{M_{12}^*}{M_{12}}} = \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{tb}^*} \tag{1.34}$$

となる。これは図 1.3の真中に走るトップクォークの寄与が効いてくるためである。A、$\bar{A}$ についてはその比 $\bar{A}$/A を求めるため、結局式 1.29から λ には小林・益川行

列の部分の計算が残ることいなる。
ここで、例として J/ψK_s については

$$\frac{\bar{A}_{\psi K_s}}{A_{\psi K_s}} = -\left(\frac{V_{cb}V_{cb}^*}{V_{cb}^*V_{cb}}\right)\left(\frac{V_{cs}V_{cd}^*}{V_{cs}^*V_{cd}}\right) \tag{1.35}$$

となり、式1.34、1.35から

$$\lambda(B \to \psi K_s) = --\left(\frac{V_{tb}^*V^{td}}{V_{tb}V_{td}^*}\right)\left(\frac{V_{cd}^*V_{cb}}{V_{cd}V_{cb}^*}\right) \longleftrightarrow Im\lambda_{\psi K_s} = \sin(2\phi_1) \tag{1.36}$$

つまりこのモードで非対称性 (式 1.28) を測定することによってユニタリートライアングルの ϕ_1 を求めることができる。この角度が存在すれば CP の破れを立証することができる。また同様に $B \to \pi\pi$ から ϕ_2 の測定、$B^{\pm} \to D^0K^{\pm}$ から ϕ_3 の測定が可能である。

1.4 B ファクトリーでの役割

B ファクトリー実験での重要な目的は、B 中間子の崩壊から B 中間子系での CP の破れを発見することである。これらの測定からユニタリー三角形の内角、辺の大きさが求められ、小林・益川理論の検証をすることが可能となる。
実際の実験では、x_d の直接測定、非対称性を示す、式 1.28の量を測定するためには B 中間子の崩壊時間の情報が必要になるためできる限り B 中間子を走らせてやらなければならない。また、B 中間子の CP 固有状態への崩壊確率は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ と非常に小さく大量に B 中間子を作り出すことが必要になってくる。
この要請のために測定器、加速器がどのような特徴を持っているか次章で述べる。

第 2 章

KEKB 加速器と BELLE 測定器

2.1 KEKB 加速器

1994 年から建設が開始された KEKB 加速器は、B 中間子を大量発生させることを目標とした電子・陽電子衝突型加速器である。この加速器の電子・陽電子の重心系エネルギーを 10.58GeV に設定することにより、b クォークと反 b クォークの共鳴状態である $\Upsilon(4S)$（質量 10.58GeV）を大量に発生させる。$\Upsilon(4S)$ の質量は B 中間子・反 B 中間子対生成の閾値のすぐ上にあるため、その崩壊過程により B 中間子を大量に発生させることができる。
図 2.1に KEKB の全体図を示す。KEKB は実験のその性質から、これまでの実験とは異なる特徴を持つ。

(1) 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 リング型の加速器である
既存の周長 3km のトリスタンのトンネルの中に、8GeV の電子を蓄積するリングと 3.5GeV 陽電子を蓄積するリングの 2 つのリングが並べて設置され、線形加速器から直接入射された電子・陽電子はそれぞれのリング内を反対方向に周回する。2 つのリングは 2 ヶ所交差するがその 1 ヶ所筑波実験室内で、電子と陽電子が衝突する。電子と陽電子の対消滅によって生成される $\Upsilon(4s)$ の質量は 10.58GeV であり、電子・陽電子が同じエネルギーの加速器では、B 中間子対はほとんど静止した状態で生成される。CP 非保存の測定には B 中間子・反 B 中間子の崩壊時間の差が必要なため B ファクトリーはビームのエネルギーを非対称にすることによって B 中間子を実験室系に対して走らせることによって B 中間子の崩壊時間の差の測定を可能にしている。

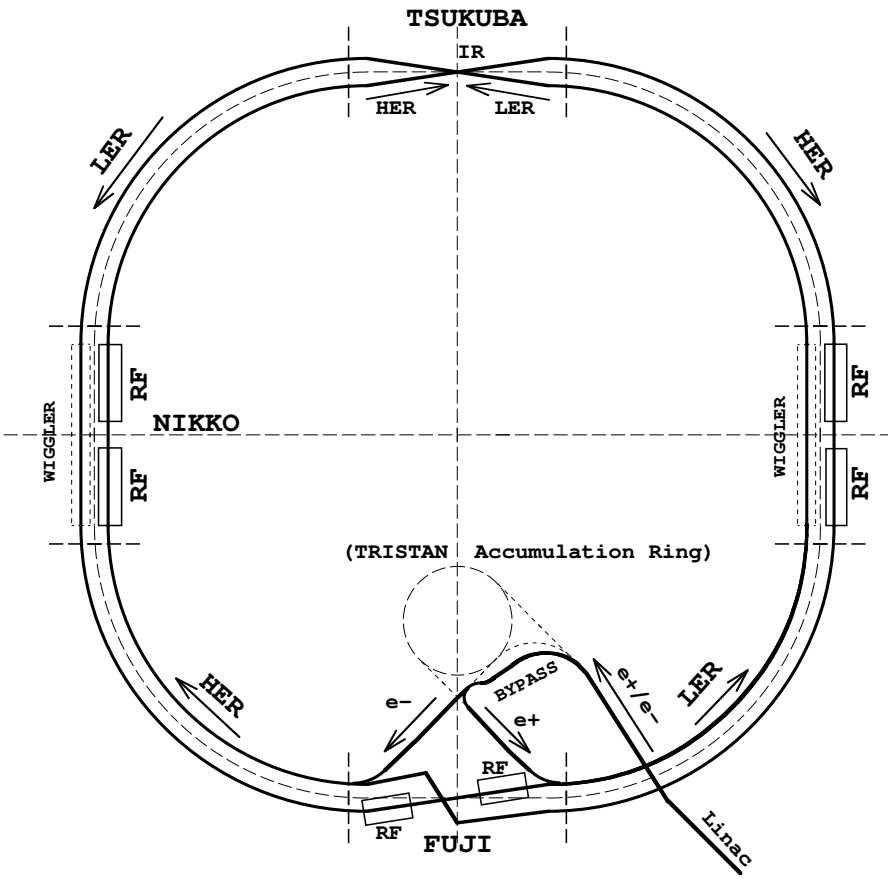


図 2.1: KEKB の構成。電子および陽電子は線形加速器から直接 KEKB に入射される。2 つのリングは 2ヶ所で交差するが、そのうち 1ヶ所 (筑波実験室) で電子と陽電子が衝突し、他の交差点 (富士実験室) では上下にすれ違うだけで衝突は起きない。

item	Phase- 1	Phase-2
circumference(m)	3018	3018
beam energy(GeV)(e^+e^-)	(3.5, 8)	(3.5, 8)
Luminosity($cm^{-2}s^{-1}$)	$2 \cdot 10^{33}$	10^{34}
beam-beam tune shift	(0.05,0.05)	(0.05,0.05)
beta function(cm) (β_x^*,β_y^*)	(100,1)	(100,1)
beam current(A) (e^+e^-)	(0.52,0.22)	(2.6,1.1)
number of bunches	1000	5000
bunch spacing	3 m (10 ns)	0.6 m (2 ns)
beam energy spared (MeV) (e^+e^-)	(3,6)	3,6)
beam crossing angle(mrad)	± 2.8	± 10

表 2.1: Parameters of the KEK asymmetric energy collider

(2) たくさんの B 中間子対を発生させるために高いルミノシティを持つ。
ビーム強度を表すためにはルミノシティと呼ばれる物理量を用いる。このルミノシティ L は、断面積 σ を持つ反応の発生頻度 R が、 R=Lσ となるように定義されている。 B 中間子から CP の破れの測定に使える終状態に崩壊する確率は非常に小さいため ($10^{-4} \sim 10^{-5}$)、大量の B 中間子対が必要である。 (約 10^8 個) KEKB でのルミノシティは表 2.1 に示されているように段階的に高くする予定であるが最初 (Phase 1) は $2 \cdot 10^{33} cm^{-2}s^{-1}$、最終的 (phase 2) には $10^{34} cm^{-2}s^{-1}$ を達成する予定である。これはトリスタンのルミノシティの 250 倍にあたる。このルミノシティの達成のために、電子リングで 1.1A, 陽電子リングで 2.6A の電流を蓄積し、各リングのバンチ数は 5000 個に達する。

2.2 BELLE 測定器

KEKB 加速器で生成される、大量の Υ(4s) 生成を含む物理事象を検出するのが BELLE 測定器である。図 2.2に全体像を示す。図 2.3にで示されるようにの BELLE 測定器はいくつかの検出器が組み合わされてできている。それぞれの検出器の達成すべき

性能は表 2.2 [3] に示されている。
それぞれの検出器は、高エネルギー加速器科学研究機構の筑波実験室にあるビーム衝突点の周りに配置されている。B ファクトリー実験では CP の破れにもちいるモードの分岐比が非常に小さいため、大量のデータが必要になる。また、B 中間子・反 B 中間子の崩壊点の精密測定と運動量、エネルギーの測定から粒子の識別を行なうためには高い分解能を持った検出器が必要となる。BELLE 測定器内には、衝突点から順に次のようなさまざまな検出器が配置されている。

1. B 中間子の崩壊点を 80μm の精度で測定する検出器
2. 荷電粒子の飛跡と運動量を測定する検出器
3. 電荷を持たない粒子のエネルギー測定をするカロリーメータ
4. 粒子を識別するための装置

これらの検出器について以下に詳しく述べる。

2.2.1 粒子崩壊点測定器 (SVD)

B 中間子の崩壊点と生成点の測定をを高精度で行なう検出器である。用いるのはシリコンストリップ検出器でこれは、厚さ 300μm のシリコン板に幅 6μm の電極を 25μm 貼りつけたもので、ビームパイプ中心から 30mm、43.5mm、58mm の位置に 3 層にして取り付けられている。逆バイアス電圧をかけたところを荷電粒子が通り抜けると電子ホール対が生成されてパルスを発する。KEKB で作られる B 中間子は崩壊点までに約 200μm 走るがこの検出器によって 80μm の精度で測定することが可能である。

2.2.2 中央飛跡検出器 (CDC)

荷電粒子の飛跡の検出にはドリフトチェンバーを用いる。この検出器は混合ガス (ヘリウム 50%, エタン 50%) を用いたガス中に細い電極線を多数 (センスワイヤー約 8400 本、フィールドワイヤー約 25000 本) 張ったものである。荷電粒子がガス中を通過するとその飛跡に沿ってガス分子を電離する。そこで発生した電子は陽極に向かってドリフト (< 350ns) する。陽極のごく近傍まで来ると強い磁場によって電子は急激に加速され電子雪崩がおこった結果ガス増幅と呼ばれる現象が起こるため、これを電気信号として読み出すことができる。そして、電子がガス増幅するまでの

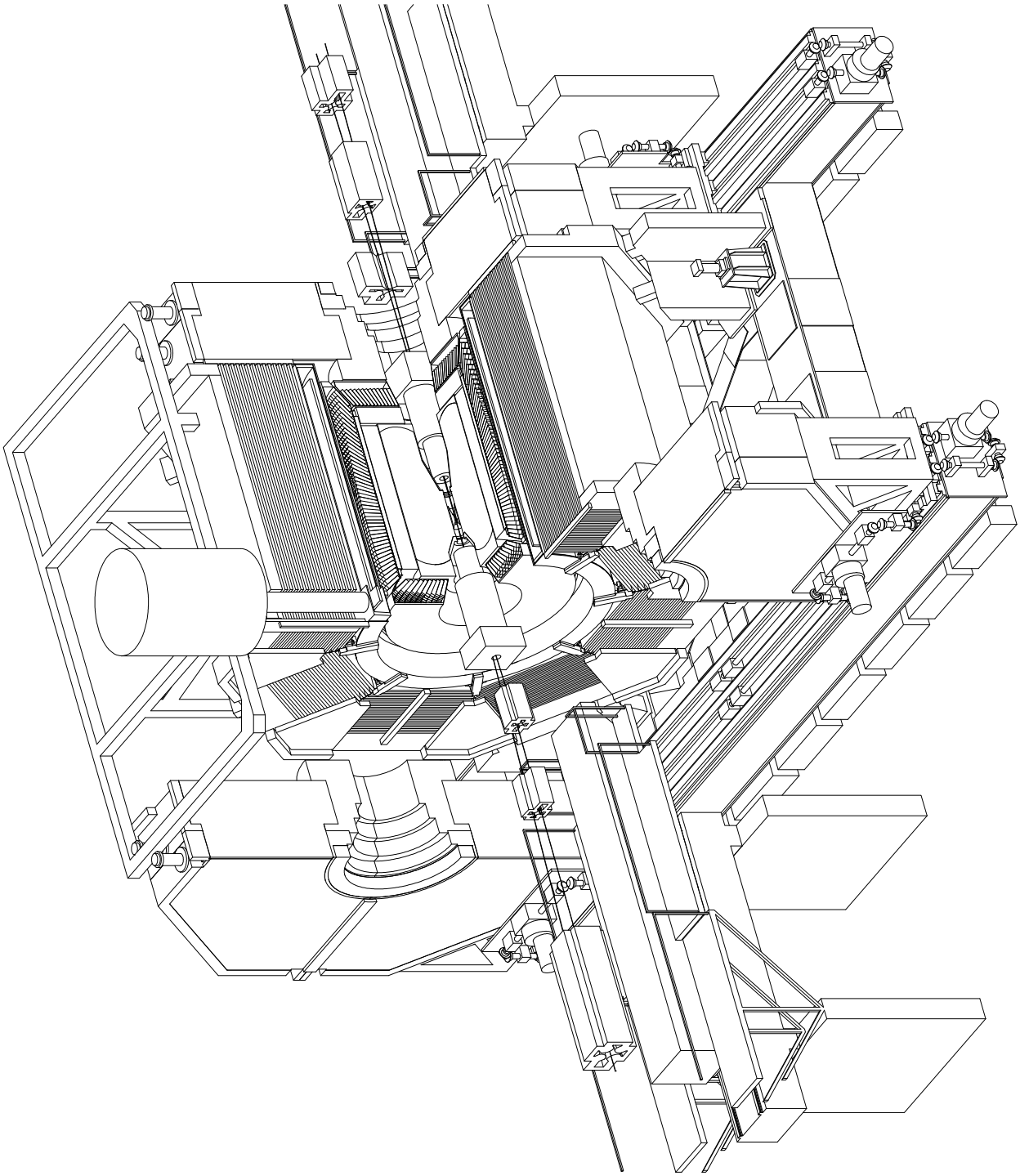


図 2.2: BELLE 測定器の全体像

時間を測定することで 130μm の位置分解能での測定が可能である。また、超電導ソレノイドの 1.5T の磁場によって測定した飛跡から荷電粒子の運動量を求めることができる。その分解能は P_t≥100MeV/c をもつ荷電粒子について、

$$\frac{\sigma_{P_t}}{P_t} = 0.5 \times 10^3 \sqrt{P_t^2(GeV/c) + 1} \tag{2.1}$$

である。また、パイ中間子、K 中間子の識別にも用いられる。

2.2.3 粒子識別装置 (ACC,TOF)

B 中間子崩壊での CP の破れを解明するには、S/N 比をあげ終状態での粒子の識別が必要である。特に K 中間子 (K^+ と K^-) の識別から始状態が B 中間子・反 B 中間子のどちらであったか知ることができる (フレーバタグ)。従ってπ中間子と K 中間子を識別が必要である。その種類として、運動量の大きさから 2 つの検出器を用いる。

チェレンコフ検出器 (ACC)

荷電粒子が物質を通過する時にその速度が光速を越えるとチェレンコフ光を放射する。この検出器では、ラジエータ物質として屈折率が〜 1.01 のエアロジェルを用いる。この物質によって 0.7GeV/c 以上の運動量を持ったπ中間子は発光するが、4GeV/c 以下の運動量の K 中間子には発光が起こらない。このことを利用して K 中間子とπ中間子の識別を行なう。読み出しにはフォトマルを用いている。。

飛行時間差測定器 (TOF)

1.2GeV 以下の粒子の識別には TOF を用いる。TOF はプラスチックシンチレータを用いて 100psec の精度で飛行時間の測定をおこなうことがでる。そしてこれは B 中間子の崩壊から生じる全ての荷電粒子の約 90% にあたっている。また、非常に速いトリガー信号にも使われる。

2.2.4 電磁カロリーメータ (ECL)

電磁カロリーメータは B 中間子崩壊からの電子、光子のエネルギー測定をおこなう。また、光子は CDC 内に飛跡を残さないので光子の入射測定も電磁カロリーメータで行なう。ほとんどの光子は崩壊の終状態で生成されるので、低いエネルギーを持つ。そのため 500MeV 以下についても高い分解能が必要である。また B→ $K^*\gamma$、

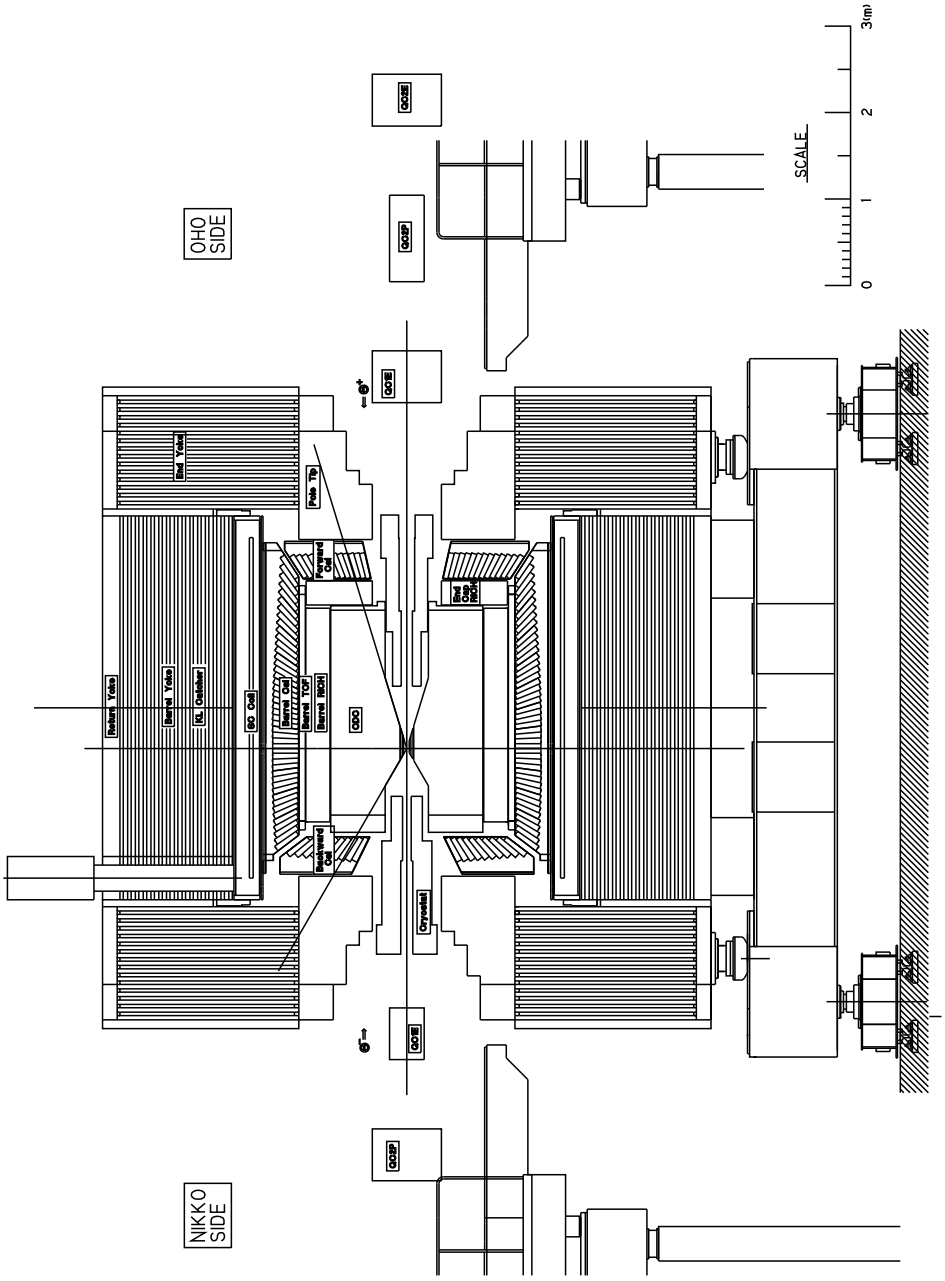


図 2.3: BELLE 測定器における各検出器の配置

B→ $\pi\pi$ のような 2 体崩壊で生成される光子は 4GeV のエネルギーを持つ。また、Bhabha 散乱のようなバックグラウンドを減らすためにももっと高いエネルギー領域での測定が必要である。これを満たすために、BELLE 測定器では、CsI(Tl) 結晶を使用する。結晶はバレル部に 6600 本、前後方の端部 2300 本使用し総数 9000 本もの結晶を使う。エネルギー分解能及び位置分解能は、

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{1.3\%}{\sqrt{E(GeV)}} \sigma_{pos} = \frac{0.5cm}{\sqrt{E(GeV)}} \tag{2.2}$$

である。奈良女子大学高エネルギー物理学研究室ではこの電磁カロリーメータの設計、開発に取り組んでいる。今回、この電磁カロリーメータのバレル部の実物大の模型を用いてプロトタイプの環境モニターシステムを用いた冷却テストを行なった。従って、電磁カロリーメータの構造については 5 章で詳しく述べることにする。

2.2.5 K_L,μ 粒子検出器 (K_L,μ)

この検出器の内側の検出器では検出されない K_L 粒子の検出とと μ 粒子の識別を行なう。K_L 粒子は電気的に中性であり測定器の物質と強い相互作用を起こして荷電粒子を放出しない限り検出されない。従ってソレノイドの外側に鉄と高抵抗プラスチック板による平面型スパークカウンターを交互に挟み、その鉄と反応させて検出する。μ 粒子はさらにその外側に厚い鉄の吸収材を起きこれを通り抜ける粒子を観測することによって検出する。

Detector	Type	Configuration	Readout	Performance
Beam pipe	Berylium double-wall	Cylindrical, r=2.3 cm 0.5mm Be/2mm He/0.5mm Be		Helium gas cooled
SVD	Double Sided Si Strip	300 μm-thick, 3 layers r = 2.7 - 5.8 cm Length = 22 - 34 cm	ϕ: 45.1K z: 45.1 K	$\sigma_{r\phi}$ $\leq$10μm σ_z=7-40μm $\sigma_{\Delta z} \sim 80$ μm
CDC	Small Cell Drift Chamber	Anode: 52 layers Cathode: 3 layers r = 8.5 - 90 cm -77$\leq z \leq$ 160 cm	A: 8.4 K C: 1.5 K	$\sigma_{r\phi}$ = 130 μm σ_z = 200 $\sim$ 1400μm σ_{p_t}/p_t =0.3%$\sqrt{p_t^2+1}$ $\sigma_{dE/dx}$ = 6%
ACC	$n \simeq 1.01$ Silica Aerogel	$\sim$12x12x12 cm^3 blocks 960 barrel/268 endcap FM-PMT readout	2188	$N_{p.e.} \geq 6$ K/π 1.2<p<3.5GeV/c
TOF	Scintillator	128 ϕ segmentation r = 120 cm, 3 m-long	128$\times$2	σ_t = 100 ps K/π up to 1.2GeV/c
ECL	CsI	Towered structure $\sim$ 5.5x5.5x30 cm^3 crystals Barrel: r = 125 - 162 cm Endcap: z = -102 and +196 cm	6624 1216(f) 1040(b)	σ_E/E= 0.67%/$\sqrt{E}\oplus$1.8% σ_{pos}=0.5 cm/$\sqrt{E}$ E in GeV
MAGNET	super conducting	inn.rad. = 170 cm		B = 1.5 T
KLM	Resistive Plate c.	14layers(5cm Fe+4cm gap) two RPCs in each gap θ and ϕ strips	θ:16 K ϕ:16 K	$\Delta\phi$=$\Delta\theta$=30mr for K_L σ_t=1ns 1% hadron fakes

表 2.2: BELLE 検出器のパラメータ

第 3 章

データ収集システム及び全体のモニターシステム

3.1 トリガーとデータ収集 (DAQ) システムの概要

3.1.1 トリガーシステム

トリガーシステムは図 3.1のように各検出器から単独に送られてきた信号を総合評価して、トリガーするか否かの判断をくだす。各検出器のトリガーには大きく分けて飛跡トリガーとエネルギートリガーの 2 つに分けられる。飛跡トリガーには宇宙線事象によるバックグランドを主に落す r-ϕ 方向のトリガーとビームガス事象によるバックグラウンドを落す r-z トリガーがあり CDC によっておこなわれる。またエネルギートリガーは電磁カロリーメータから検出されたエネルギーの総量から実際に陽電子・電子の衝突によって起こった事象かどうかを判断するものである。TOF はトリガー系で基本となるタイミングをとるために使われる。各検出器からのトリガー信号は、GDL（グローバル・ディシジョン・ロジック）に送られ最終的なトリガー信号が生成される。そしてその信号は、各サブシステムの VME クレート内にあるタイミング・ディストゥリビュータ・モジュールを経て、シーケンスコントロールによって各サブシステムに分配される。

3.1.2 データ収集 (DAQ)

BELLE 測定器のデータ収集システムを図 3.2に示す。各検出器は 200Hz の割合で読み出しを並行に行ない、SVD を除いた全てのサブシステムのデータは TDC で読み出される。そして、読み出されたデータは VME と FASTBUS でコントロールされる。読み出されたデータのシグナル、つまり電荷とタイミング、電荷またはタイ

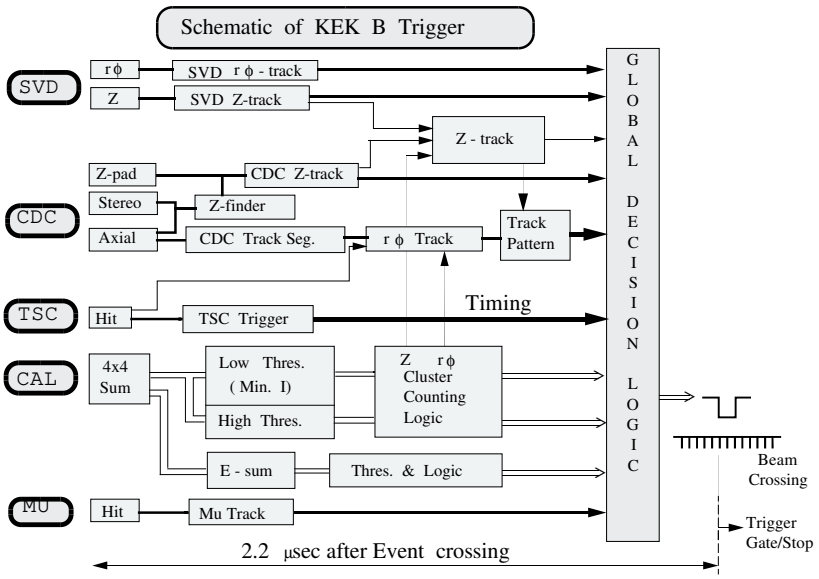


図 3.1: トリガーシステム

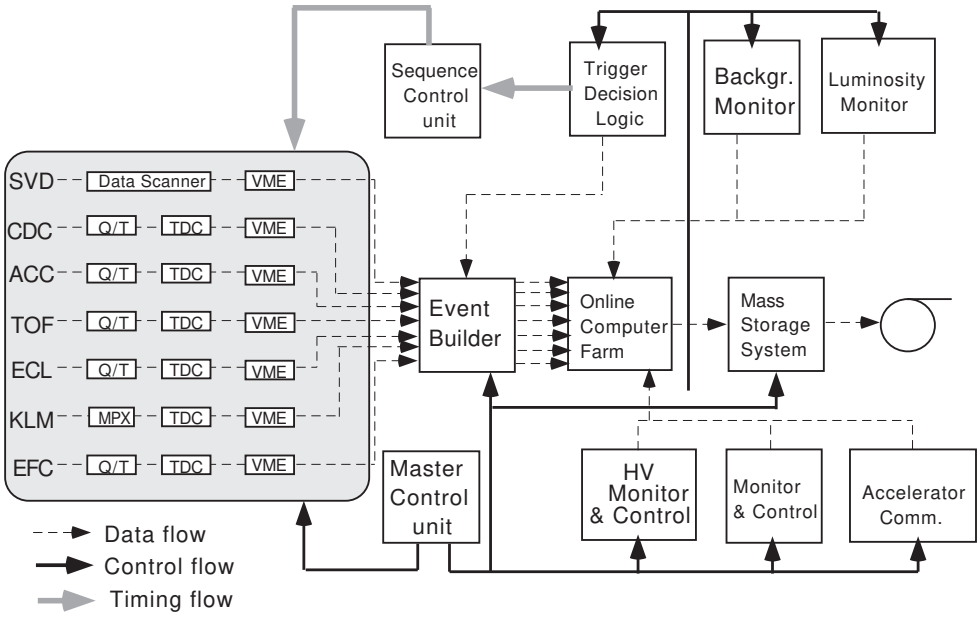


図 3.2: データ収集システム

ミングシグナルは KLM を除いて QtoT でマルチエッジシグナルに変換され、KLM については 1 つのシグナルの時間積分がシグナルとして読み出される。SVD の情報については、データスキャナで処理されたものが直接 VME メモリーに送られることになる。
次に各サブシステムからの読み出しはイベントビルダースイッチネットワークに送られる。そしてそこで、検出器ごとの並行なデータからイベントごとのデータに再構成され、各ノードごとにオンラインコンピュータファームへ送られる。コンピュータファームでは、各事象ごとの解析を行ない、完全にバックグラウンドを落し、解析に必要な事象のデータのみを選択する。オンラインコンピュータファームを通過したイベントは、マス・ストレージシステムに送られ最終的にテープシステムに蓄積される。

3.1.3 サブシステム間のコミュニケーション

BELLE 実験のデータ収集系は、大きく分けて、リアルタイムに動作するデータ収集サブシステムとモニターシステムのようなリアルタイム性を要しないサブシステムに分けられる。実験運転中は、全てのサブ・システムはマスターコントロールによって制御されている。これらのサブシステムは TCP/IP プロトコルを用いてネットワーク上の情報伝達をおこなう。TCP/IP プロトコルでは、UDP と TCP の 2 種類のプロトコルを使用し、上位プロトコルとしてネットワークシェアードメモリー (NSM)[4] を用いて、相互のコミュニケーション、情報伝達をおこなう。

ネットワークシェアードメモリー (NSM)

3.1.4 データの共有

ネットワークシェアードメモリーでは、図 3.4に示すようにハードウェアによりネットワーク上の全てのノード上で共有されるメモリーを持つ。ハードウェアとしては最大 250kB のサイズがあり、各ノードで分割して使う。1 つのノードは連続した 1 つの領域を確保しておりその場所に情報を書き込むことができ、他のノードからその情報をネットワークを通じて見ることができる。この共有データ領域は定期的、あるいは指定されれば、他のノードに伝達されデータの書き換えがおこなわれることになる。

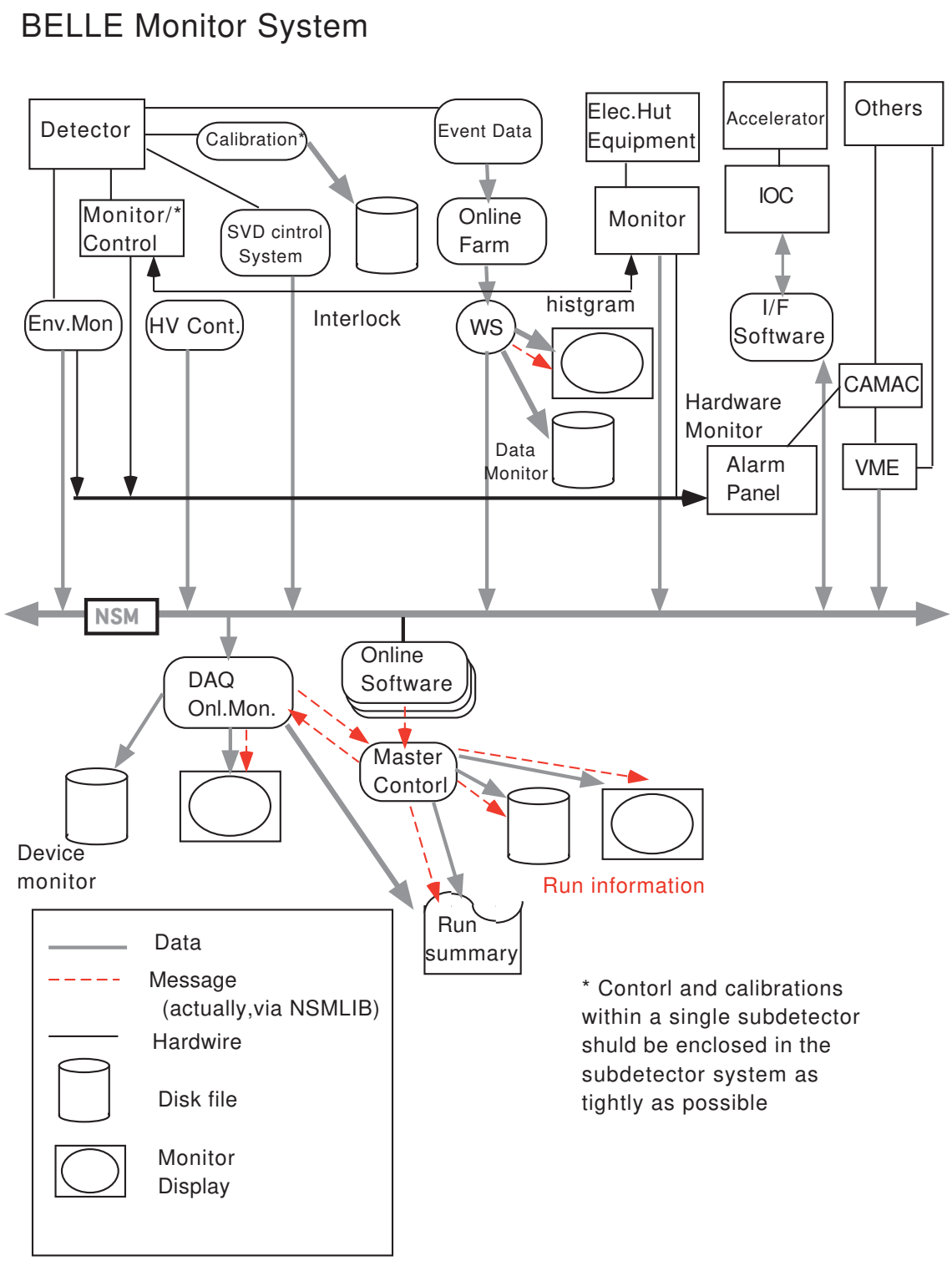


図 3.3: BELLE モニターシステム

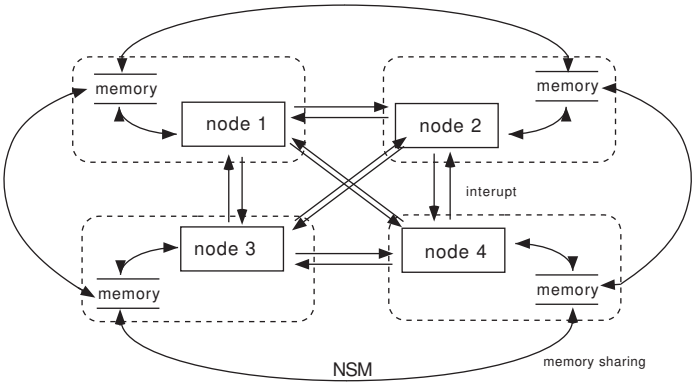


図 3.4: ネットワークシェアードメモリー

3.1.5 NSM の構造

NSM のネットワークの構造としては、マスターコントロールを中心とした星型のネットワークをもちいる。また NSM では一つのサブシステムがそれぞれ 1 つのノードとして取り扱われマスターコントロールも 1 つのノードとして扱われる。表 /reftab:node にノードのリストを載せる。NSM の構造は次のようになっている。

1. それぞれのホストコンピュータ（ノード）にデーモンプロセス (nsmd) として存在する。

2. ユーザーは NSM 関係のライブラリー (NSMLIB) をリンクしたプログラムを使ってノード名で示されたメモリー領域にデータの読み書きができる。

3. サブシステムの 1 対 1 のやりとりには”リクエスト”と”メッセージ”として情報を伝達し合う。(TCP)

4. データの共有（1 対多数）には”ブロードキャスト”を用いる。(ITP)

全てのデーモンはさらにマスターコントロールのデーモン (マスターデーモン) によっ制御されている。そして、NSM を使用するユーザーは NSMLIB をリンクしたプログラムを実行することができるが自分のシステム以外のデーモンとのやりとりはできない。すなわち、ネットワーク上でのデータのやりとりはデーモンが行なうことになる。

MASTER	MONITOR	SVD	SVDLOCAL
CONSOLE	HVC	CDC	CDCLOCAL
GDL	ENV	ACC	ACCLOCAL
SEQ	EHUT	TOF	TOFLOCAL
EBULD	BGM	ECL	ECLLOCAL
FARM	LUMI	KLM	KLMLOCAL
STOR	KEKB	EFC	EFCLOCAL

表 3.1: 各サブシステムのノード

モニター & コントロール

BELLE DAQ モニターシステムは、データ収集時の BELLE 測定器の状況を管理するシステムである。測定器から異常を示すような情報は実験の解析に悪い影響を及ぼすため自動的に迅速に察知されなければならない。
BELLE 実験ではさまざまなハードウェアが使われるためそれぞれのハードウェアによってモニターの方法は異なっている。しかし、ソフトウェアでは、シフトメンバー（ノン・エキスパート）が測定器の異常を迅速に知るために統一した方法でハードウェアからの警告を察知しなければならない。そこで、各モニターサブシステム、例えば測定器のモニターシステム、エレクトロニクスハットのモニターシステムで測定されたデータは全て NMS 上の共有メモリーに置かれ、ワークステーションを通じてデータに容易にアクセスすることができる。(図 3.3)[6] 全てのデータは、30 秒毎に更新され、その度にデータベースファイルに保存されることになる。
次のセクションでは、BELLE モニターシステムのそれぞれのサブシステムについて述べる。

3.2 BELLE モニターシステム

3.2.1 BELLE 測定器の環境モニターシステム

測定器全体の環境をモニターするシステムが BELLE 測定器の環境モニターシステムである。以下、BELLE 測定器の環境モニターシステムを環境モニターシステムと呼ぶことにする。ここで、環境とは測定器内の温度・湿度・ガス圧などを指している。測定器の環境測定は (1) 測定器の状況を知り事前に異常（測定器の冷却シ

ステムの停止による温度上昇など）を感知する、(2) 測定データの較正にもちいる、ために必要である。そのため約 1000 点の環境情報を測定する。測定されたデータは、HP3852A データ収集システムで数値化されネットワークを通じて他のサブシステムなどに転送される。
今回、我々はこの BELLE 測定器の環境モニターシステムの開発研究をおこなった。従って詳細については 4 章以降で述べることにする。

3.2.2 エレクトロニクスハットのモニターシステム

測定器で測定されたデータは読み出しに必要なモジュールに送られ数値化される。これらのモジュールとその電源装置などは、すべてエレクトロニクスハット (EH) 内に設置される。従ってエレクトロニクスハット内の環境を監視することも測定器の環境モニターシステムと同様必要である。エレキハット内で監視すべき量は、表 3.2[5] に示したようにおよそ 300 点におよぶ。これらは、横河電機製 DA100 データ収集ユニットを用いて数値化され、測定器の環境モニターを初め、他のモニターあるいはコントロールサブシステム同様 NSM データベースに書き込まれる。それぞれの測定点は 1 つまたは 1 つ以上の警告ラインにつながっている。警告ラインは 3 0 チャンネルあり、DA100 で測定したデータがエレクトロニクスハット内に影響があるとこの警告ラインを通じてシグナルが出力される。出力されたシグナルはこの警告ラインを通じて筑波実験室 B3 に設置された警告パネルを点灯させる。

Item	Number of ch.
DC Voltage (FASTBUS)	32
VME(TTL out)	30
Rack temperature	50
Rack air blow(movable)	10
Room temperature	10
Room humidity	6
Power supply for subdetectors	< 150
Total	≤ 300

表 3.2: エレキハットモニターシステムでモニターされるチャンネル

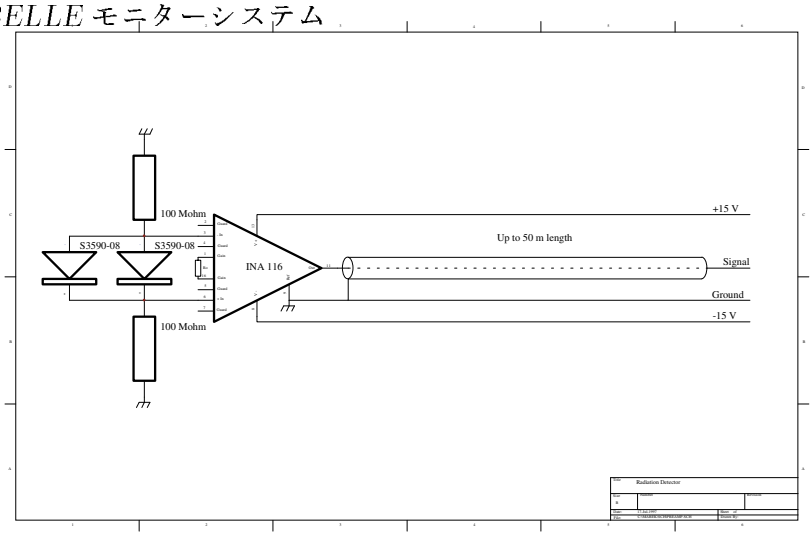


図 3.5: Schematic diagram of radiation monitor

3.2.3 SVD モニターシステム

SVD はビームパイプのすぐ外側の非常に狭い場所にある検出器であることから検出器の温度、周囲の放射線量を測定することは重要である。従って SVD については独自に次の 2 つのモニターシステムがある。

放射線モニター

SVD の読みだしエレクトロニクスで測定される放射線量は、25-30 krad/year となると計算されている。SVD で用いられる読みだし部分の DA1 チップを放射線から守るためには、信頼できる放射線モニターが必要である。LEP での DSSD の動作実験や他の加速器での実験から、自動ビーム停止装置が放射線ダメージを避ける装置として知られている。BELLE 測定器の SVD 用の放射線モニターシステムは、限られたスペースのため浜松の S3590-08 シリコンフォトダイオードを使いその面積は 15 mm×15 mm の非常に小さなものである。図 3.5にこのモニターシステムの構造を示す。

温度モニター

SVD システムでは、ビームパイプと読みだしエレクトロニクスからおよそ 750W の熱が発生する。SVD 自体はビームパイプのすぐ外側にある非常に小さな検出器であるため、冷却なしではこの熱による温度上昇のために測定器が破損する可能性がある。そのためこの熱を取り除くために $20°C$ の水と He ガスを循環させて熱を取り除いている。また、読み出された信号には温度依存性があるため $5°C$ 以内の安

定性が不可欠である。従って、温度をたえず測定し冷却システムや検出器の状況を把握するためには温度モニターが必要である。
SVD の温度モニターシステムでは温度センサーに白金の測温抵抗体が用いられ、測定したデータは DA100 データ収集ユニットで数値化される。また温度測定は表 3.3示された 8 箇所、６６チャンネルである。

Location		Number required
Be Pipe	2×4+2	10
Inner cover	2×4	8
Heat sinks	2×3×4	24
F.cooling ring	6	6
B.cooling ring	6	6
Outer cover	2×2	4
Near Rad-monitor	2×2	4
Near repeater card	2×2	4
Total		66

表 3.3: 温度モニターの測定点

3.2.4 HV コントロール・モニターシステム

測定器の高圧電源 (HV) のコントロール、そしてその状態を各サブシステムに伝えるのが HV コントロールモニターシステムである。ここで言う測定器の高圧電源は、CDC のワイヤーに印加する電圧や ACC、TOF で読みだしに用いる光電子増倍管の印加電圧などを指す。加速器のビームの準備が完了した後に高圧電源をオンにしなければ検出器にバックグランドの事象が入ってくるため、このモニターシステムは加速器と絶えずコミュニケーションをとっている。

3.2.5 加速器とのコミュニケーション

実験がおこなわれる際、ビームを出す加速器とのコミュニケーションは非常に必要な情報である。加速器はビームの状況を測定器側に伝えるために “Beam- ON” （ビームがリングに入射。しかし衝突はさせず循環のみ） “Beam-Ready” （ビームの衝突を行なう準備完了）の信号を送る。一方検出器は、放射線量の情報、測定器の HV

のオンとオフの情報を測定器に報告する。他の必要な情報は、加速器、I/O コントローラー、そしてケーブルテレビで作られたネットワークシステムによって伝えられる。

第 4 章

測定器の環境モニターシステムの設計

4.1 環境モニターシステムの概要

環境モニターシステムはＢＥＬＬＥ測定器の状況を連続してモニターするシステムである。ここでの「環境」とは、測定器の状況がわかる要素、つまり温度・湿度・ガス圧などを指す。環境データを測定する目的は次の 2 点である。
(1) 測定器の破損を未然に防ぐため、これを招くような情報を検知したときには警告信号 (アラーム) を発する。
(2) 測定器自体が正常に動作していたとしても、その特性はこれら「環境」に依存するため測定器の較正に必要である。
環境モニターシステムは、以上の 2 点を満たした図 4.1のようなシステムになっている。
測定器に設置されたセンサーは、環境データを抵抗、電圧の形で読み出せる。それらのデータは約 50m のセンサーケーブルを通じてエレクトロニクスハット内の HP3852A データロギングシステムで数値化される。数値化されたデータは、HP3852A 内の出力バッファーにためられ、制御計算機である SPARC ボード GPIB バスを通じてそのデータを受信する。SPARC ボードは受信したデータをネットワークシェアードメモリー (NSM) というソフトウェアを通じてネットワーク上に転送するため、他のサブシステムも NSM を通じて環境データを読むことができる。

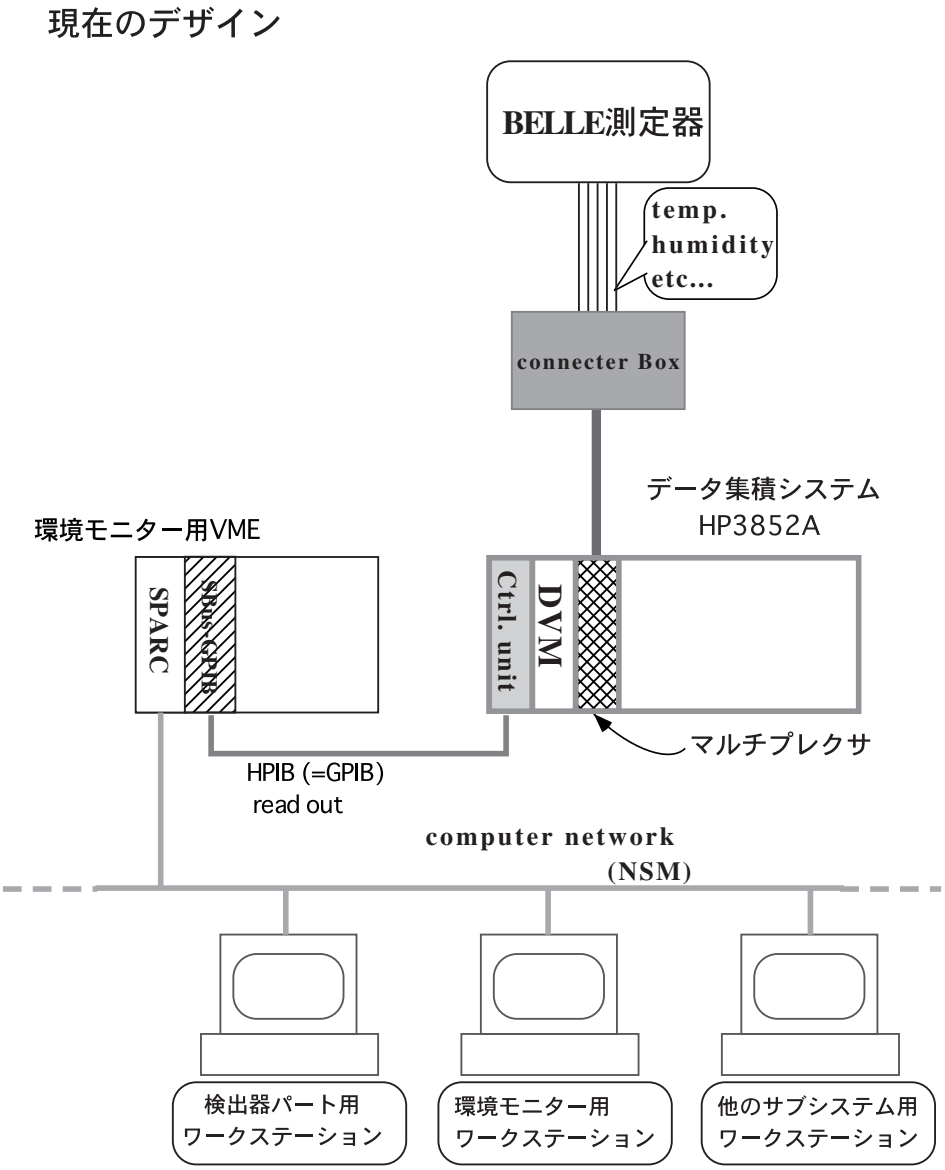


図 4.1: 環境モニターシステムの概略

4.2 環境データの信号

環境モニターシステムでは表 4.1に示したように独立のモニターシステムを持つ SVD 以外のそれぞれの検出器が要求している環境データをモニターする。温度センサーは抵抗値、湿度センサーは直流電圧の形で信号を出力する。またそれ以外のデータも設置されたセンサーやコントローラは原則として直流電圧の形で信号を出力するためこれを HP3852A データロギングシステムで読みだし数値化する。

4.2.1 センサーの概要

温度センサー

温度測定にはサーミスタを使用した。サーミスタは金属酸化物を主原料とした高温で焼結して得られるセラミック半導体であり、その抵抗値が温度によって変化することを利用した温度センサーである。変換公式は

$$R_1 = R_2 \exp\left[B(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})\right] \tag{4.1}$$

T_1,T_2: 絶対温度 (K)

R_1,R_2:T_1,T_2 におけるゼロ負荷抵抗値 (Ω)

B: B 定数 (K)

となっている。ゼロ負荷抵抗値とは、サーミスタを一定の温度で抵抗を測定した時の自己加熱による抵抗値変化を無視できるような十分低い消費電力で測定した場合の抵抗値を示す。また B 定数は抵抗 - 温度特性で任意の 2 点の温度から求めた抵抗値の変化の大きさを表す定数で次の式で表されたものである。

$$B = \frac{\ln R_1 - \ln R_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

この特性を $logR$ と 1/T でグラフ化すると直線で表すことができる。今回使用したセンサーは、10kΩ で 25°C、B 定数が 3435 のものであり図 4.2 のような形状をしている。

CsI 電磁カロリメータに使用する 372 個のサーミスタについて温度絶対値の較正を行なった。この較正は 25°C の恒温槽内にサーミスタを設置しそれぞれのサーミスタの抵抗値を測定して温度によっておこなった。その結果を図 4.4上に表す。図 4.4上図からわかるように 7 個のサーミスタを除いて $\pm$ 0.5°C 以内の良い精度で測定することができることがわかった。

サブシステム	測定点	チャンネル数
TOF	パイプ温度	8
	光電子増倍管温度	8
	湿度	4
CDC	チェンバー温度	32
	チェンバー周辺湿度	2
	チェンバー内ガス圧力	4
	ボンベ内ガス圧力	4
	バッファータンク内のガス圧力	3
	ガス流量	10
	酸素センサー	1
	水蒸気センサー	1
	エタンセンサー	1
	電源電圧	128
ACC	バレル部の温度	180
	バレル部の湿度	20
	エンドキャップ部の温度	24
	エンドキャップ部の湿度	12
ECL	バレル部の温度	216
	バレル部の湿度	72
	エンドキャップ部の温度	96
	エンドキャップ部の湿度	32
	電源電圧	260
	TKO ボックスの 温度	52
KLM	ガス流量、混合比等	10
	合計	1212

表 4.1: HP3852A で測定される環境データ

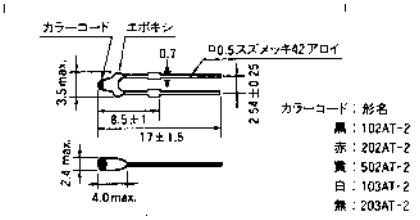


図 4.2: サーミスタ概観図

湿度センサー

我々が採用した湿度センサーは Vaisala 社製の HUMITTER-50U である。このセンサーは湿度によって多孔質ポリマーでできたセンサー素子の静電容量が変化することを利用しその静電容量を直流電圧に変換して出力する。長さ 51mm のハウジング内にはこれを行なう ASIC 特定用途集積回路製エレクトロニクスが入っている。出力電圧は 0 から 1V でこれが湿度の 0 から 100% に対応し、測定可能領域は 10% から 100% である。図 4.3 に湿度センサーの概観図を示す。塩化リチウム飽和水溶液を入れた密閉された瓶内の湿度が気温の変化にかかわらずほとんど 11.3% を保つことを利用して CsI 電磁カロリメータの 107 個の湿度センサーの湿度の絶対値の較正を行なった。この結果全てのセンサーが 11.3% からその差が 1.2% 以内の値を示しており CsI 電磁カロリメータ内の湿度の測定には問題なく使用できることがわかった。図 4.4下図にその結果を示す。

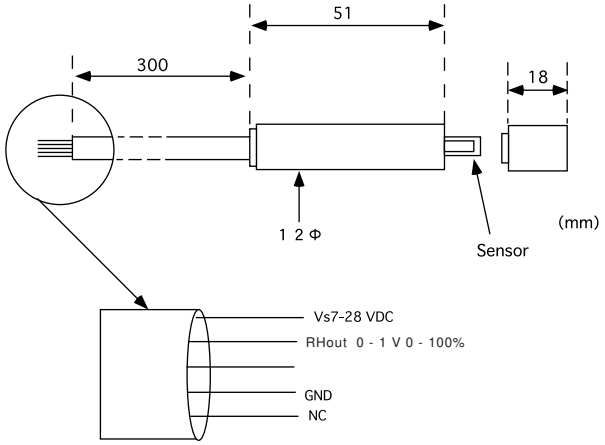


図 4.3: ヒューミタ概観図

4.2.2 磁場中での湿度センサーの動作テスト

BELLE 測定器の KLM 以外の測定器は全て超電導ソレノイドの作る 1.5Tesla の磁場内に置かれるため、各測定器に設置されたセンサーの値がその影響で変動しな

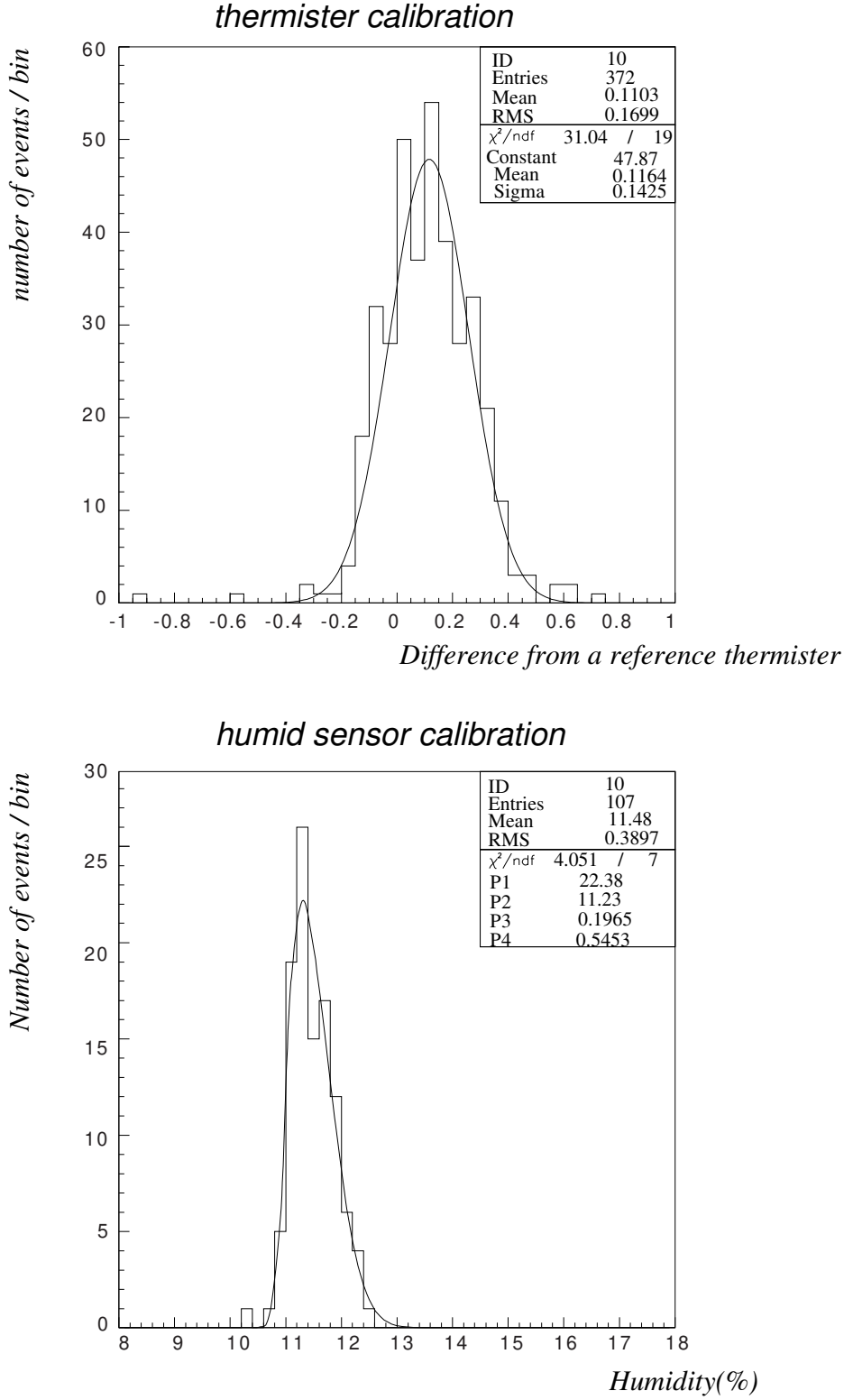


図 4.4: 上図：サーミスタのキャリブレーションの結果、下図：湿度センサーのキャリブレーションの結果

いか確かめる必要がある。特に湿度センサーについてはハウジング内静電容量を直流電圧に変換する電気回路が入っているのでこれが磁場による影響を受けないかどうか確かめた。方法は塩化リチウム飽和水溶液を入れた密封容器の湿度が $15°C$ から $35°C$ の間 11.3% に保たれることを利用して磁場中で信号電圧の変化を調べた。テストは高エネルギー加速器科学研究機構の陽子シンクロトロン付属東カウンターホール内 $\pi 2$ ビームラインの牛若マグネットを用いておこなった。

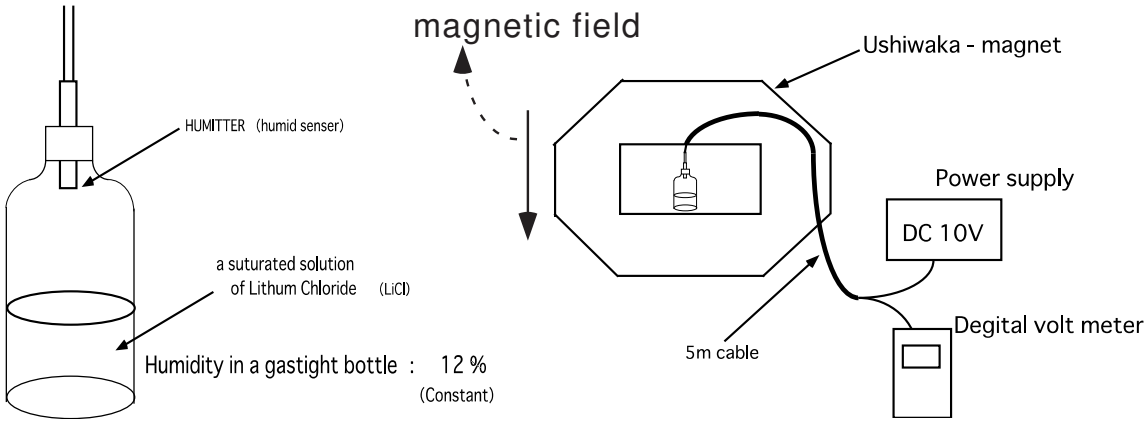


図 4.5: 磁場中での湿度センサーのテスト・セットアップ

測定方法

センサーは図 4.5の様に塩化リチウム飽和水溶液の入った容器に差し込みセンサーの値が安定するまで 3 時間程度放置し、その後牛若マグネット内に置いた。牛若マグネットから発生する磁場の方向は図 4.5のように鉛直下向きである。測定は磁場強度、センサーハウジングと磁場間の角度 (偏角)θ、センサー一素子と磁場間の方位角 ϕ をそれぞれ次のように変化させたときの湿度の値を測定した。

1. 磁場を 0T、 0.5T、 1.0T、 1.5T と変化させ、センサーの入った容器と磁場の角度 θ を 0、 $\pi/4$、 $\pi/2$ と変化させた。ただし、 $\phi = 0$ である。

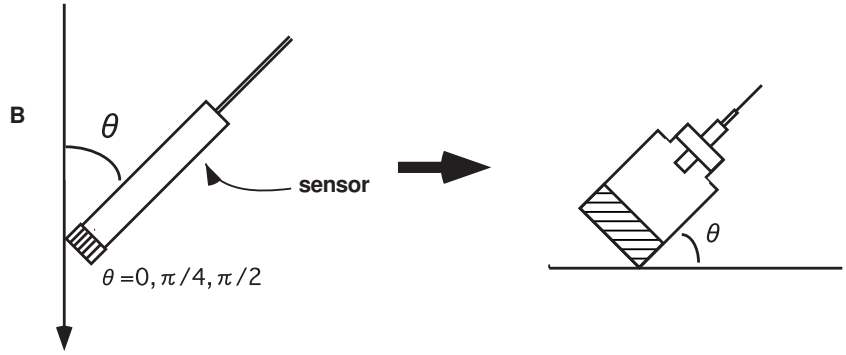


図 4.6: Dependence on magnetic field strength : B

2. 磁場を 1.5T に保ちセンサー自体と磁場との角度 ϕ を、 $0,\pi/4,\pi/2,3\pi/4,\pi$ と変化させ、 θ=$\pi/4$、 $\pi/2$ のときの湿度を測定した。

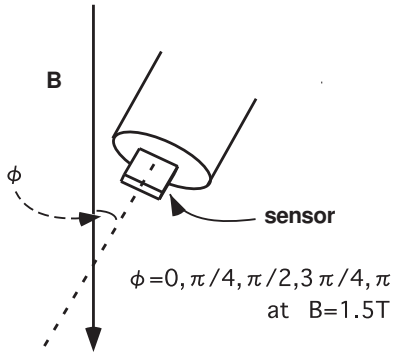


図 4.7: Dependence on azimutial angle ϕ

結果

表 4.2はそれぞれの結果を示している。これを見ると湿度センサーの値は磁場強度が 1.5T のときでもほとんど値は変化せず一定である。またセンサーと磁場の間の角を変化させても値はほとんど変化せず一定である。したがって、湿度センサーは 1.5T の強磁場中におかれてもほとんどその影響を受けないことがわかった。

1. ϕ=0

B/θ	0T	0.5T	1.0T	1.5T
0	12.17%	12.12%	12.18%	12.15%
$\pi/4$	12.21%	12.22%	12.24%	12.27%
$\pi/2$	12.25%	12.19%	12.19%	12.24%

2.B=1.5T

ϕ/θ	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π
0	12.17%	12.12%	12.18%	12.15%
$\pi/4$	12.21%	12.22%	12.24%	12.27%
$\pi/2$	12.25%	12.19%	12.19%	12.24%

表 4.2: 結果

4.2.3 センサーの放射線耐性

加速器運転時、ビームパイプ中の残留ガスとビームの相互作用により最終的に数 MeV 程度の低エネルギー光子が大量に発生し、これが測定器の被曝の原因となっている。測定器に設置するセンサーもこの光子を浴びて被曝する。したがって、センサーに γ 線の照射を行ないその耐性を調べた。

照射と測定方法

センサーへの照射は、東工大の放射線照射施設において行なわれた。用いた線源は ^{60}Co 線源（線源強度： 41.5TBq、γ 線エネルギー:1.17MeV or 1.33MeV）である。照射は、湿度センサーについては 3 つの湿度センサーを用いて CsI 結晶の被曝線量で 10rad、100rad、1krad の照射を行ない、温度センサーについては 10rad、100rad、1krad、10krad、100krad の照射をおこなった。測定は湿度センサーについては塩化リチウム飽和水溶液を入れた密封容器内の湿度の測定、温度センサーについては 25$^{\circ}C$ に保たれた恒温槽内の温度の測定をおこなった。

結果

表 4.3は湿度センサー・温度センサーの照射前後の測定値を示したものである。照射前後の値の変化（%）は

$$\text{照射前後の変化}\,(\%) = \frac{\text{照射後の値} - \text{照射前の値}}{\text{照射前の値}} \times 100(\%)$$

で表された数値である。この表をみると、照射前後の値の変化は 0.5% 以内におさまっており、放射線による影響はほとんどないことがわかった。

湿度センサーの放射線耐性

被曝量（rad）	照射前の湿度値	照射後の湿度値	照射前後の変化（%）
10	10.14%	10.14%	0
100	11.24%	11.24%	0
1k	10.96%	11.0%	0.36

温度センサーの放射線耐性

被曝量（rad）	照射前の温度値	照射後の温度値	照射前後の変化（%）
10	24.96°C	24.97°C	0.04
100	24.99°C	25.04°C	0.2
1k	25.01°C	25.0°C	-0.04
10k	24.98°C	24.95°C	-0.12
100k	25.35°C	25.31°C	-0.16

表 4.3: センサーの放射線耐性

4.3 環境データの数値化と読みだし

環境データの数値化にはヒューレットパッカード社の HP3852A データロギングシステムを用いる。HP3852A からのデータの読み出しには、HP3852A と GPIB バスを通じて接続されている SPARC ボードを使用する。

4.3.1 HP3852A データロギングシステム

HP3852A データロギングシステムはデータを集録・制御する装置である。HP3852A のみではデータ集録を行なうことは出来ず、HP3852A のリアパネルにプラグインアッセンブリを接続しなければならない。HP3852A は、7 つまでアッセンブリを設置するスロットを持っており、それ以上の設置には、1 台あたり 10 スロットを装備した HP3853A エクステンダを用いる。1 台の 3852A（メインフレーム）に 7 台のエクステンダを接続できる。抵抗、電圧などの測定はコマンドを入力することによって行なわれる。入力方法はフロントパネルのキーボードからと GPIB バスを経由してコンピュータからの入力が可能である。読み出されたデータはフロントパネルのディスプレイ上、または GPIB を通じてコンピュータ上に表示される。(図 4.8)

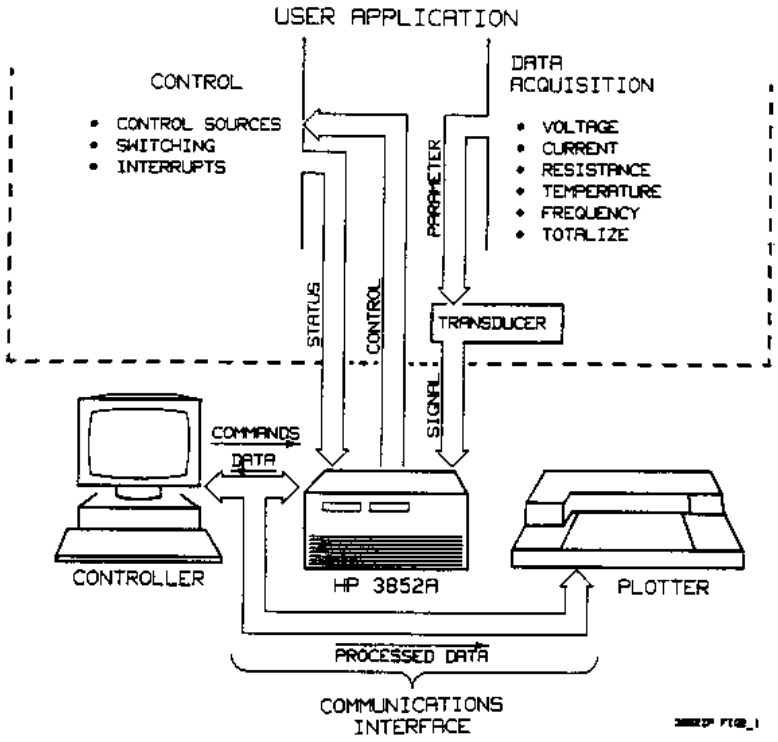


図 4.8: データ集録／制御システム

環境情報は、前に述べたように電圧、抵抗を測定することにより可能である。1000点あまりの環境情報を測定するために、HP3852A 及び HP3853A エクステンダにはHP44701A インテグレイティング DVM （デジタルボルトメータ）と HP44705A リレーマルチプレクサアッセンブリを設置する。

44701A インテグレイティング DVM 44701A は内部の電荷積分型 A/D コンバータにより電圧 (10nV ～ 300V)・抵抗 ($10\mu\Omega$ ～ $3M\Omega$)・電流のようなアナログ量を数値化し測定をおこなうアッセンブリである。数値化のために電荷積分する際に、積分時間は電源周期 (関東地区は 50Hz のため 0.02 秒) と同じかまたはその 1/10、1/200 などに設定できる。信号がデジタル値に変換されるとそのデータはディスプレイに表示されるか GPIB を介してコンピュータ上に表示される。

44705A リレーマルチプレクサ 44705A は、44701 のようなボルトメータアッセンブリを用いて多数の測定をおこなうときに 20 チャンネルの信号を切り変えるためのものである。図 4.9はカバーを外したマルチプレクサのターミナルモジュールを示し、チャンネル 0 に抵抗を接続した場合を示している。20 チャンネルをこのように配線しコマンドを入力すると、デジタルボルトメータは、0 チャンネルから順に測定を開始する。

4.3.2 50m ケーブルを用いたアナログ信号の伝送試験

センサーは測定器内部、HP3852A はエレクトロニクスハット内に設置されるため、両者を結ぶケーブルは約 50m に達する。従ってこのような長いケーブルの先に素子をつけてその抵抗を測定する場合、特にその素子の抵抗値が大きいと外部からのノイズがのり、測定値に影響を与える可能性がある。そこで、実際に 10Ω、100Ω、1kΩ、10kΩ、100kΩ の抵抗を 50m のより線対ケーブルの先ににはんだつけし、HP3852A を用いて抵抗値を測定することで 50m ケーブルに接続した場合の測定値への影響を調べた。
実験は、高エネルギー物理学研究機構の東カウンターホールで特に外部からノイズが多いと思われる陽子シンクロトロン運転中に行なった。

測定項目

抵抗の測定は HP3852A を用いておこない次のように接続方法、HP3852A の設定を変えて行なった。

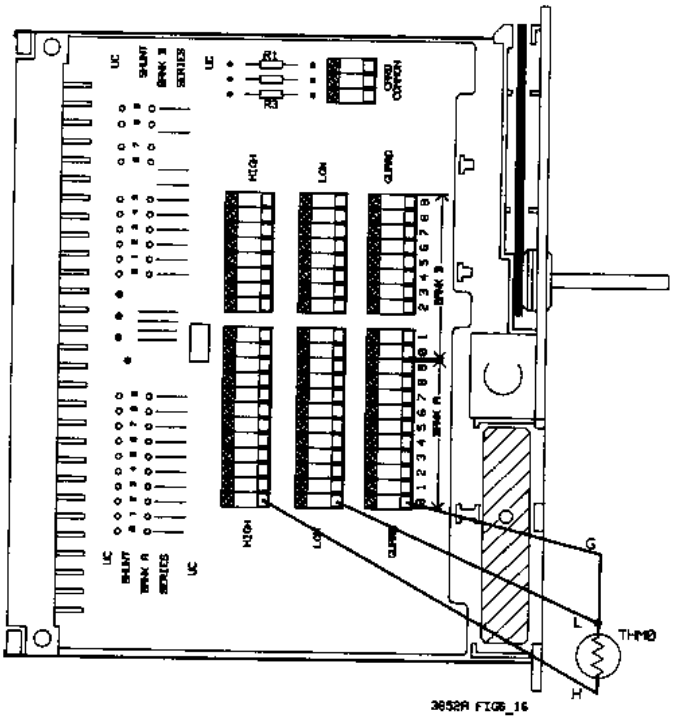


図 4.9: リレーマルチプレクサのターミナルモジュール: チャンネル 0 に 2 線式で接続をおこなった場合、電圧を測定する場合には電圧源のハイ (+) 導線を HIGH にロウ (−) を LOW にそしてシールド線を guard に接続する。また、2 線式抵抗測定の場合、抵抗の 1 本の導線を HIGH にもう一方を LOW に接続する。コモンモードノイズ除去のため HP 社は一般に LOW 接続の導線を GUARD にも接続することを推奨している。

1. それぞれの抵抗について 2 線式、4 線式で測定。(図 4.9)
2. HP3852A のへの接続時にガードに接続した場合としない場合
3. 測定の際に HP3852A に内蔵されているデジタルボルトメータ (HP44701A) の積分時間を電源周期の 1 倍、1/10 倍、1/200 倍にした場合。

そして、1 つの抵抗につき 1000 回測定をおこないその最大値、最小値、平均値、標準偏差を記録した。

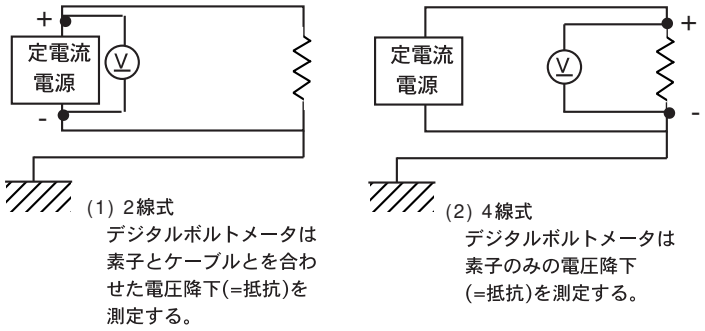


図 4.10: (i) 2 線式の場合の抵抗測定、(ii) 4 線式の場合の抵抗測定

結果

図 4.4に 2 線式抵抗の結果、図 4.5に 4 線式抵抗の結果を示す。表での L,H,M,S は 1000 回測定を行なった時の最大値、最小値、平均値、標準偏差を示している。また、T は電源周期 (0.02 秒) を単位とした積分時間、G と NG はそれぞれガード接続、ガード未接続を表している。結果を以下にまとめる。

(1) 2 線式、4 線式での測定 2 線式と 4 線式での主な違いは、デジタルボルトメータの測定する範囲が異なることである。4 線式の場合、測定したい部分の抵抗のみ取り出して測定できるが、2 線式の場合には 50m のケーブル部分が足された抵抗値が測定される。それぞれの抵抗について比較すると 50m のケーブルの抵抗値は約 12Ω 程度である。

我々は温度センサーで $25°C$ のとき 10Ω のサーミスタを用いるので 2 線式で測定してもこの 12Ω の抵抗値のシフトは温度に換算して 0.03° 程度の寄与しかなく無視できる。もし仮に $0°C$ で 100Ω の白金の測温抵抗体を (抵抗値変化 $1°C$ 当たり 3.9Ω) 用いたとすると 12Ω の変化は温度換算で $3.1°C$ となりこれは問題になる。このような場合には一般に 4 線式で抵抗すべきである。

(2)HP3852A のへの接続時にガードに接続した場合としない場合 ガードとは HP3852A において測定する装置（抵抗、センサーなど）を接続するのに、ノイズの除去のために＋端子と－端子の他に接続をする端子のことである。この接続の有無による効果は表を見てもわかるように、接続した場合と未接続の場合の差は 0.1% 以下で一致している。

(3) デジタルボルトメータの積分時間を電源周期の 1 倍、 1/10 倍、 1/200 倍にした場合 積分時間の違いでデジタルボルトメータの測定精度、測定時間、ノイズ除去が変化する。積分時間が短いということは測定速度が早いが測定精度が悪くなる。逆に、積分時間が長いと時間がかかるが精度はよくなる。標準偏差の値からわかるように、積分時間が 1/10、 1/200 となると標準偏差が 10 倍,100 倍のオーダーで変わっていくことがわかる。しかし、そのふらつきは測定値の 0.1% 未満と非常に小さい値であった。

従って、 50m ケーブルを介してサーミスタの 10kΩ という高い抵抗値を読み出すのには問題ないことがわかった。

1k Ω （2線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^3\Omega$)	1.010912	1.01093	1.01077	1.01084	1.0106	1.0105
H($10^3\Omega$)	1.010994	1.010993	1.0117	1.0113	1.0116	1.0115
M($10^3\Omega$)	1.010954	1.010962	1.010973	1.010978	1.011113	1.011014
S($10^{-2}\Omega$)	1.815978	1.083898	10.39746	6.723510	15.63512	13.98377

3kΩ （2線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^3\Omega$)	3.02319	3.0232	3.0229	3.023	3.022	3.022
H($10^3\Omega$)	3.02329	3.02327	3.0236	3.0234	3.025	3.025
M($10^3\Omega$)	3.023244	3.023237	3.02193	3.023178	3.02292	3.022615
S($10^{-2}\Omega$)	2.256239	1.1745	15.12216	7.851927	85.69331	66.27324

10kΩ （2線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^3\Omega$)	9.96026	9.96035	9.9591	9.9595	9.957	9.957
H($10^3\Omega$)	9.96122	9.960104	9.963	9.9625	9.964	9.962
M($10^3\Omega$)	9.960741	9.960969	9.961014	9.960988	9.96046	9.959991
S($10^{-1}\Omega$)	2.65017	1.915121	1.293383	9.701493	13.2926	11.811

100 Ω （2線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^2\Omega$)	1.124955	1.125057	1.12474	1.12484	1.1246	1.1246
H($10^2\Omega$)	1.124996	1.125103	1.12498	1.125050	1.1253	1.125
M($10^2\Omega$)	1.124974	1.12508	1.124866	1.124944	1.125032	1.125031
S($10^{-4}\Omega$)	7.8016	7.8225	46.48891	42.20732	120.0732	124.22

300Ω （2線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^2\Omega$)	3.14631	3.14632	3.1461	3.1462	3.144	3.145
H($10^2\Omega$)	3.14675	3.14682	3.1481	3.1479	3.153	3.152
M($10^2\Omega$)	3.146531	3.14659	3.147155	3.147121	3.1486	3.148377
S($10^{-3}\Omega$)	6.985389	7.828199	39.15777	33.87065	131.426	126.9836

表 4.4: 2線式抵抗測定の結果

1k Ω （4 線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^2\Omega$)	9.97974	9.98042	9.9766	9.9752	9.972	9.976
H($10^2\Omega$)	9.98061	9.98143	9.9831	9.9867	9.99	9.998
M($10^2\Omega$)	9.980419	9.980847	9.980426	9.980909	9.985938	9.985938
S($10^{-3}\Omega$)	6.130956	7.364084	174.9833	380.1159	224.9591	437.5992

3kΩ （4 線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^3\Omega$)	2.99604	2.996508	2.9955	2.99589	2.9948	2.9948
H($10^3\Omega$)	2.996111	2.996638	2.99669	2.99722	2.9971	2.9978
M($10^3\Omega$)	2.996088	2.996571	2.99609	2.996563	3.022615	2.996438
S($10^{-3}\Omega$)	9.091596	1.258546	394.774	447.5461	434.0344	480.231

10kΩ （4 線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^4\Omega$)	1.004083	1.004059	1.00395	1.00404	1.0033	1.0037
H($10^4\Omega$)	1.0041	1.004078	1.00415	1.00410	1.0039	1.0042
M($10^4\Omega$)	1.004093	1.004070	1.00405	1.004068	1.003753	1.003989
S($10^{-2}\Omega$)	3.580845	4.161333	6.286069	1.451615	9.797954	9.017478

100 Ω （4 線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^2\Omega$)	1.002738	1.002725	1,00233	1.00221	1.0025	1.0022
H($10^2\Omega$)	1.002775	1.002763	1.002890	1.003250	1.003300	1.0043
M($10^2\Omega$)	1.002757	1.002744	1.002755	1.002757	1.002872	1.003190
S($10^{-4}\Omega$)	6.08958	6.39218	59.65531	331.5437	142.3858	364.145

300Ω （4 線式）

	T = 1		T=0.1		T=0.005	
	G	NG	G	NG	G	NG
L($10^2\Omega$)	2.9987	3.000174	2.9967	2.99975	2.9995	2.9993
H($10^2\Omega$)	3.00021	3.00272	3.0013	3.00079	3.0006	3.0011
M($10^2\Omega$)	3.000048	3.000252	3.000001	3.000259	3.000119	3.111222
S($10^{-3}\Omega$)	5.543003	0.6958627	63.32301	33.58349	14.1603	37.38467

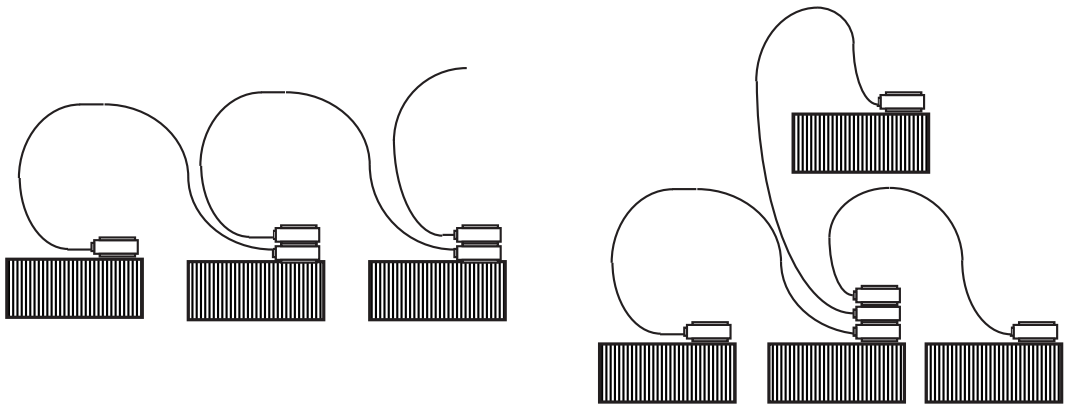
表 4.5: 4 線式抵抗測定の結果

4.3.3 GPIB バス

前節で述べたようにHP3852Aは、フロントパネルからコマンドを入力することによって測定、制御をおこなう。しかし実際の実験では全てコンピュータから遠隔操作によって測定、データの処理をおこなうため、コンピュータと周辺機器のように各機器を同じ線で結んでデータのやりとりを行なうもの（バス）が必要である。環境モニターシステムでは、SPARCボードとHP3852Aの間を結ぶバスとしてIEEE-488標準ディジタル・インタフェース規格[7]を用いている。この呼び名はさまざまでありIEEE-488、IEEE-IB、GPIB、HP-IB、IFCバスと呼ばれているが、ここではGPIBバスに統一し、その機能について説明する。

GPIB バスの構造

GPIBバスではコンピュータと周辺機器の間を図4.11のように数珠つなぎまたは星型につないでいく方式を用いている。GPIBバスではバス・ラインの信号の数は16これにグランドやシールドを入れて24ピンのコネクタで装置間を接続している。その接続にはプラグとレセプタブルを背中合わせについているコネクターケーブルを用いるために装置側につけるコネクタはひとつでよくなる。この接続には、インターフェースをドライブする電力とケーブル長によって生ずる信号の立ち上がりの遅れのために限度があり、次のように制限されている。



(a) 数珠つなぎ　　(b) 星型

図 4.11: GPIB バスの接続方法

1. １システムに接続できるインターフェースの数は１５以内。

2. ケーブルの長さは１システム合計で２０ m 以内。

また接続されるインターフェースの数が１０以下の場合、その数に応じて以下のようにケーブルの最大長が制限される。

$$L \leq 2N \text{メートル}$$

ただし、
L: ケーブルの長さの合計と最大値
N: 接続されるインターフェースの数

コントローラ・トーカー・リスナー

GPIB バス上では、全ての装置は並列につながっている。そのため、ある特定の装置間でやりとりを行なうために各インターフェースにアドレスをつけ、コントローラ・リスナー・トーカーの１つ以上の機能を持たせている。使用できるアドレスは０～３１までであるが３１は特別な用途に用いられる。コントローラ・リスナー・トーカーのようなインターフェース機能は１０種類あり (表 4.6) その中から組み合わせて使われる。ここで、コントローラはトーカーやリスナーを指定するもの、トーカーはバスラインを通じてリスナーに対して信号を送るもの、リスナーはコントローラとトーカーの信号をバスラインを通じて受けるものである。また同時に働くトーカーとコントローラは１台ずつになるように制限されているがリスナーはこれらと違い同時に２台以上指定することができる。コントローラーからの信号はバスラインにつながっている全てのインターフェースに同時に受信され、トーカーから送られてきたデータを２台以上のリスナーが受信することをアドレスの指定のみですることができる。実際にバスラインに接続されている複数の装置の中から特定の装置をトーカーやリスナーとして働かせるためにはコントローラからその装置のアドレスを含んだ信号を送ることになる。

バス制御コマンドとデータ

GPIB バスを通じて送られる情報にはバス制御コマンドとデータの２種類がありこれらは後で述べる ATN ラインの切り換えによって分けることができる。(図 4.12)

記号	インターフェース機能
C	コントローラ
DT	デバイストリガー
DC	デバイスクリアー
PP	パラレルポール
RL	リモート・ローカル
SR	サービスリクエスト
L	リスナー
T	トーカー
AH	アクセプタ・ハンドシェイク
SH	ソース・ハンドシェイク

表 4.6: インターフェース機能

・コマンドモード インターフェースの内部通信に用られる。例えば、コントローラがトーカー・リスナーのアドレスの指定をする場合はコマンドモードを用いる。

・データモード (HP3852A に測定を命じるコマンドを送るなど) 周辺機器を制御する文字列を送ったり、測定結果のようなデータを送る時にはデータモードを用いる。

GPIB のバスライン

GPIB のバスラインは、16 本の信号と 7 本のグランドと 1 本のシールドの合計 24 本からなっており 16 本の信号は次の 3 つのグループに分けられている。

(1)8 本のデータライン:DIO1 ～ DIO8 これら 8 本はデータの入出力のライン（データモード）に用いられる。8 本からなるので 8 ビットのデータを送ることができる。またインターフェースを設定するための内部通信（コマンドモード）にも用いられる。

(2) 3 本のハンドシェイクライン:DAV,NRFD,NDAC この 3 本のラインは信号の受け渡しのためのハンドシェイクをおこなう。

DAV(data valid) ソース（送りだし側）からDIOラインに送り出された信号が有効であることを示す。

NRFD(not ready for data) アクセプタ（受け入れ側）でDIOラインの信号を受け入れる準備ができているかどうかを示す。

NDAC(not data accepted) アクセプタがDIOラインのデータの受け入れを完了したかを示す。

(3) 5本の管理バス: ATN,IFC,REN,SRQ,EOI これらの信号のうちはじめの3つはコントローラがあとの3つは主にトーカーが出力する。

ATN(attention) DIO1 〜 8 にのっている情報がデータモードであるかコマンドモードであるかを示す。

REN(remote enable) 各装置のリモート制御、ローカル制御の切替に使う

IFC(interface clear) 負の幅 100μs （最小値）のパルスをこのラインに乗せ、インターフェースをクリアする。

SRQ(service request) トーカーからコントローラを呼び出すためのライン。

EOI(end or identify) データの最後のバイトと同時に終了記号を出す。

GPIB バスを使った信号のやりとり

実際に、コントローラ・トーカー・リスナーのやりとりを行なうかバスラインの動作を用いて説明する。環境モニターシステムではSPARC ボードがGPIB バスを経由してHP3852A にコマンドの入力をおこない、HP3852A で測定したデータを受けとる。図 4.13で、コントローラーがトーカー・リスナーを指定しトーカーからリスナーに GPIB バスを通じてデータを送信する時のバスラインの状況を示す。このとき、バスライン上での動作は次のように行なわれる。

(1) 最初、ATN がハイの状態にあるのでコマンドモードとなっている。

(2) コントローラーである SPARC ボードが、GPIB バスにつながっている全装置にアンリスン（リスナーを解除する）の信号を送る。

(3)SPARC ボードが自分をトーカーに指定する。

(4)SPARC ボードが HP3852A をリスナーに指定する。ここまで SPARC ボードはコントローラである。

(5) データモードに入る。(SPARC ボードがトーカー、HP3852A がリスナーになる。)

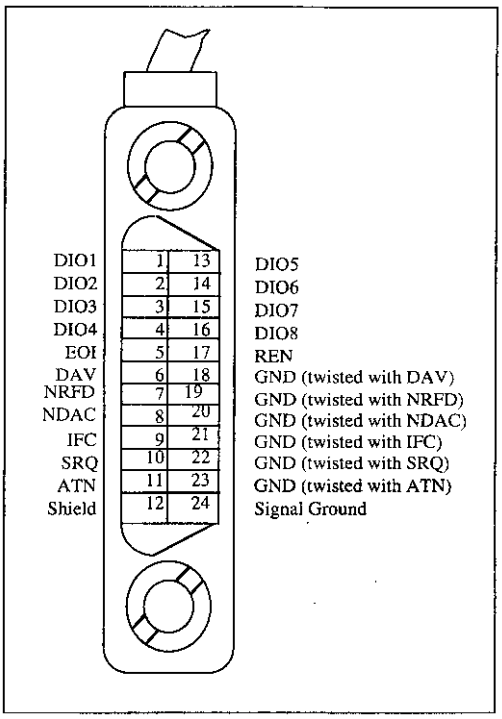


図 4.12: GPIB Connector and the Signal Assigunment

(6)SPARC ボードは、HP3852A に測定を行なうコマンドを送り、HP3852A はそれを受けとる。(7)HP3852A がコマンドの全てを受けとる。

4.3.4 SPARC ボード

SPARC ボードは VME バス規格のボード上に実装されたものであり、その CPU はサン・マイクロシステムズ社製 microSPARC-II でサン社製 SPARCstation5 と完全に互換性のある計算機である。このボードには、入出力のバスとして VME バス SCSI バス (ハードディスクなどの周辺機器接続用)、シリアルポート (VT100 端末など RS-232C 規格の機器接続用)、そして後述の SBUS などが用意されている。OS としては SUN4.1.3 を使用した。

4.3.5 SBUS-GPIB

SPARC ボードから GPIB バスをコントロールするために、SBUS-GPIB インターフェースを用いる。SBUS は、サン・マイクロシステムズ社が開発した I/O 拡張バスで、スパークボードにもサポートされているバスである。SPARC ボードからは

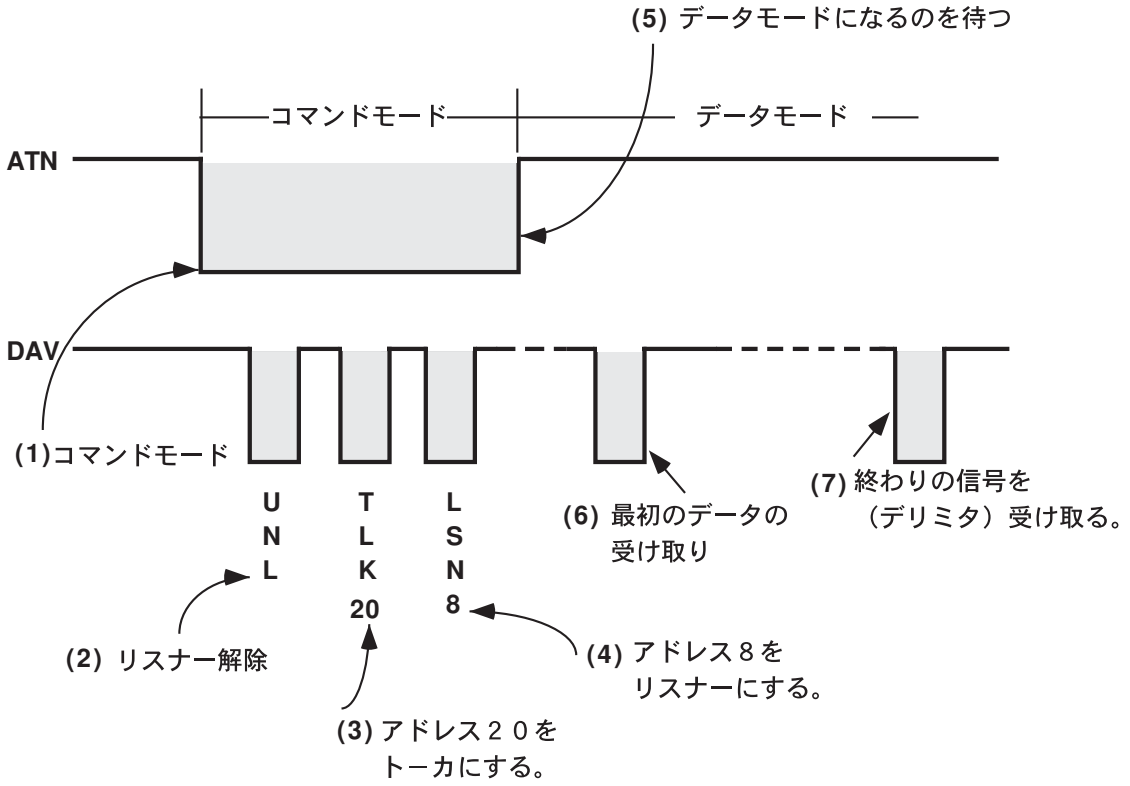


図 4.13: GPIB バスでの信号のやりとり

直接 GPIB へデータの入出力ができないため、このインターフェースを SPARC ボードの SBUS ソケットにとりつける。このインターフェースを SPARC ボードからコントロールするためには、デバイスドライバーが必要であり、ナショナルインストゥルメント社が開発した NI488.2 ソフトウェアをインストールし、SPARC ボードからユーザーレベルでの GPIB バスとのアクセスを可能にした。

4.3.6 プログラムの流れ

GPIB バスを用いて SPARC ボードと HP3852A を接続し、その間でデータのやりとりをするためにはプログラムの作成が必要である。プログラムの言語としては C 言語を用いる。ユーザー側から GPIB バスを経由して HP 3852A データロギングシステムにアクセスするためには、NI488.2 ソフトウェアが用意したファンクションコードをプログラムの中で用いてやればよい。基本的なプログラムを作成する上で、欠かせない命令は次の 4 つである。

インターフェースクリア (IFC) バスの IFC ラインを 100μsec 保ち、バスに接続されている全部のインターフェースをリセットする。

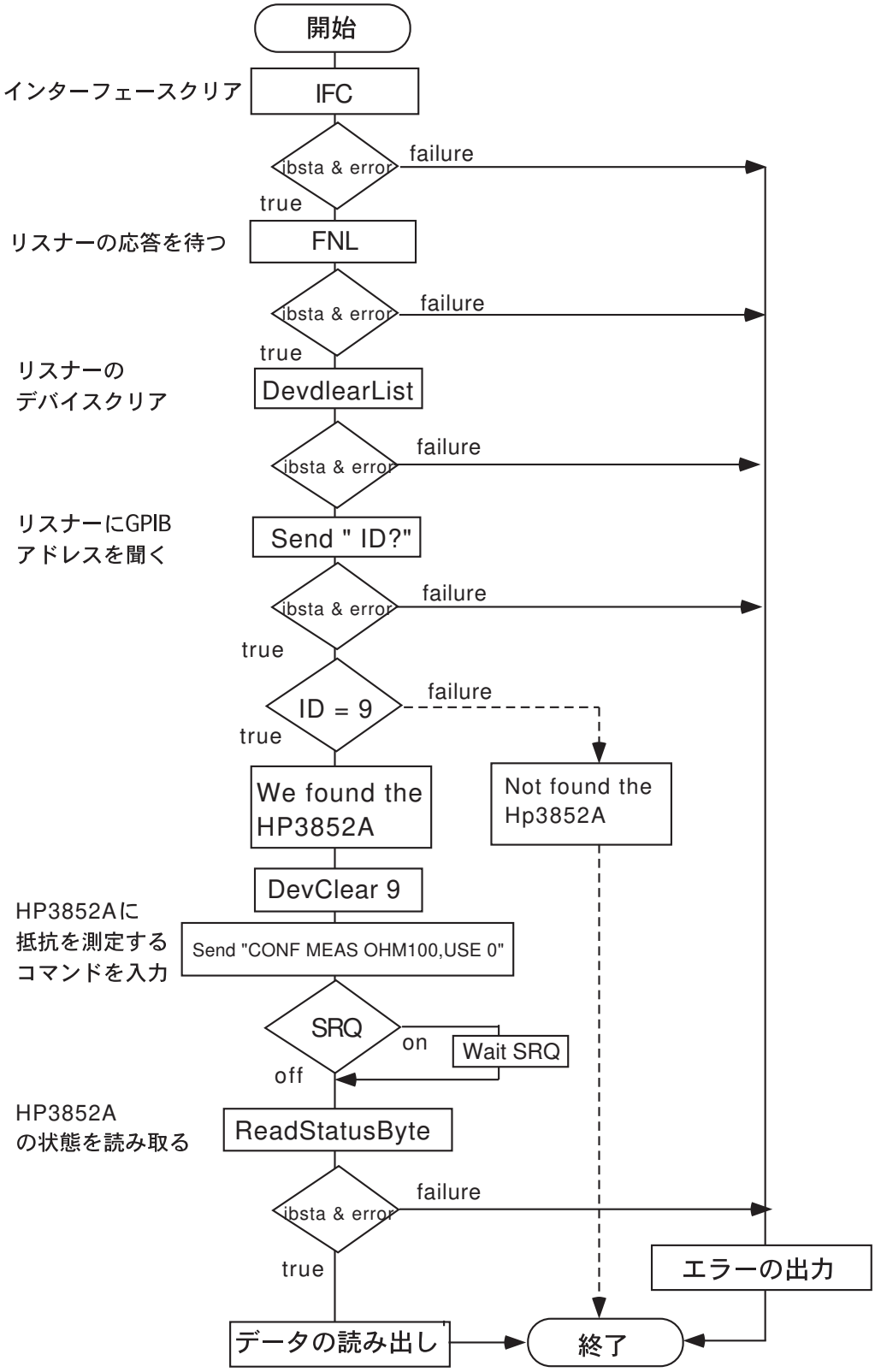


図 4.14: フローチャート

リモート・イネーブル (REN) バスの REN ラインを L にしてインターフェースをリモートモード（装置の設定は GPIB バスから送られたデータに従う。）にする。

リード (READ) コンピュータ自身をリスナーにし、トーカからのデータを読みとる。

ライト (WRITE) コンピュータ自身をトーカにし、リスナーに対してデータを送り出す。

これらの基本的な命令にいくつか命令を足し合わせ、図 4.14のフローチャートで表された簡単なプログラムを作成し GPIB でのアクセスが可能であるか確かめた。NI488.2 ソフトウェアでは、“READ”、“WRITE” の命令が “Receive”、“Send” ファンクションを用いることによって使用できる。ここで HP3852A の GPIB アドレスは 9 である。
まず、IFC を GPIB バスを通じて送り、GPIB バスに接続されている全ての装置のリセットを行なう。次に GPIB バスに接続されている装置の応答を待つ。リスナーの応答があれば全てのリスナーのリセットを行ない GPIB アドレスが 9、すなわち HP3852A であるかどうか確かめる。正しければ、抵抗測定をするようにコマンドを送る。送られたコマンドを HP3852A がが受けとり何らかの応答をするまでコントローラー側は待たなければならない。つまり、GPIB バスの SRQ ラインがオフになるのを待つ。オフになれば HP3852A からデータの出力があるかどうか確かめ、(HP3852A の状態を読みとる) 出力すべきデータがあるのならばデータの読み出しを行ないプログラムを終了させる。このプログラムでは GPIB バスを経由する全てのファンクションを実行後そのファンクションが正しく伝達されているかどうか確かめるために GPIB ラインのエラーライン (ibsta) の状況を出力させている。エラーがでればエラーメッセージを出力させプログラムは終了する。プログラムは appendix に掲載している。このプログラムは正常に動作し、HP3852A と SPARC ボードの間で GPIB バスを通じてデータのやりとりがおこなわれていることを確認できた。
実際の環境データの測定の場合は一定時間おきに GPIB を経由して HP3852A にアクセスを行なう。そのために新たにプログラムを作成した。(Appendix 参照) 作成したプログラムは、プロトタイプとして、次章で述べる電磁カロリーメータの冷却システムのテストに用いた。

第 5 章

環境モニターシステムのプロトタイプテスト

CsI 電磁カロリメータに用いる CsI 結晶は温度依存性があり [3]、カロリメータ内の温度は一定に保たれる必要がある。また、読み出しのプレアンプの熱でカロリーメータ内の温度が上昇しエレクトロニクスの破損が起こる可能性もある。したがって、カロリメータ内に冷媒を循環させることによって内部の熱を取り除き温度を一定にするような冷却システムを作っている。

ここでは、CsI 電磁カロリメータの構造を述べた後、プロトタイプの環境モニターシステムを用いた CsI 電磁カロリメータバレル部の模型での冷却システムのテスト結果について報告する。

5.1 CsI 電磁カロリメータ

5.1.1 カロリメータの構造

カロリメータはバレル部と前方・後方エンドキャップ部から成る。図 5.1 [8] にその全体像を示す。カロリメータが覆うのは電子ビーム軸からの偏角で、17.0 ° から 150.0 ° の範囲である。総数 8736 本（総重量約 40 トン）の CsI カウンターがその縦方向を衝突点に向けて並べられる（図 5.2）。CsI カウンターを収める構造体は気密性を持ち、5% という低い湿度のなかに結晶を保つ。カウンターにとりつけられたプレアンプはカロリメータ全体で 3 kW の熱を発生するため、カロリメータ内に冷媒を循環させることによりその熱を取り除いている。[3] 全体は超電導ソレノイド内に置かれる。これは衝突点からカロリメータまでの物質量を少なくし、光子の検出効率をできるだけ高くするためである。CsI 結晶には潮解性があるため冷媒に水を用いると万が一洩れた場合に結晶をいためる恐れがある。そこで、冷媒には不

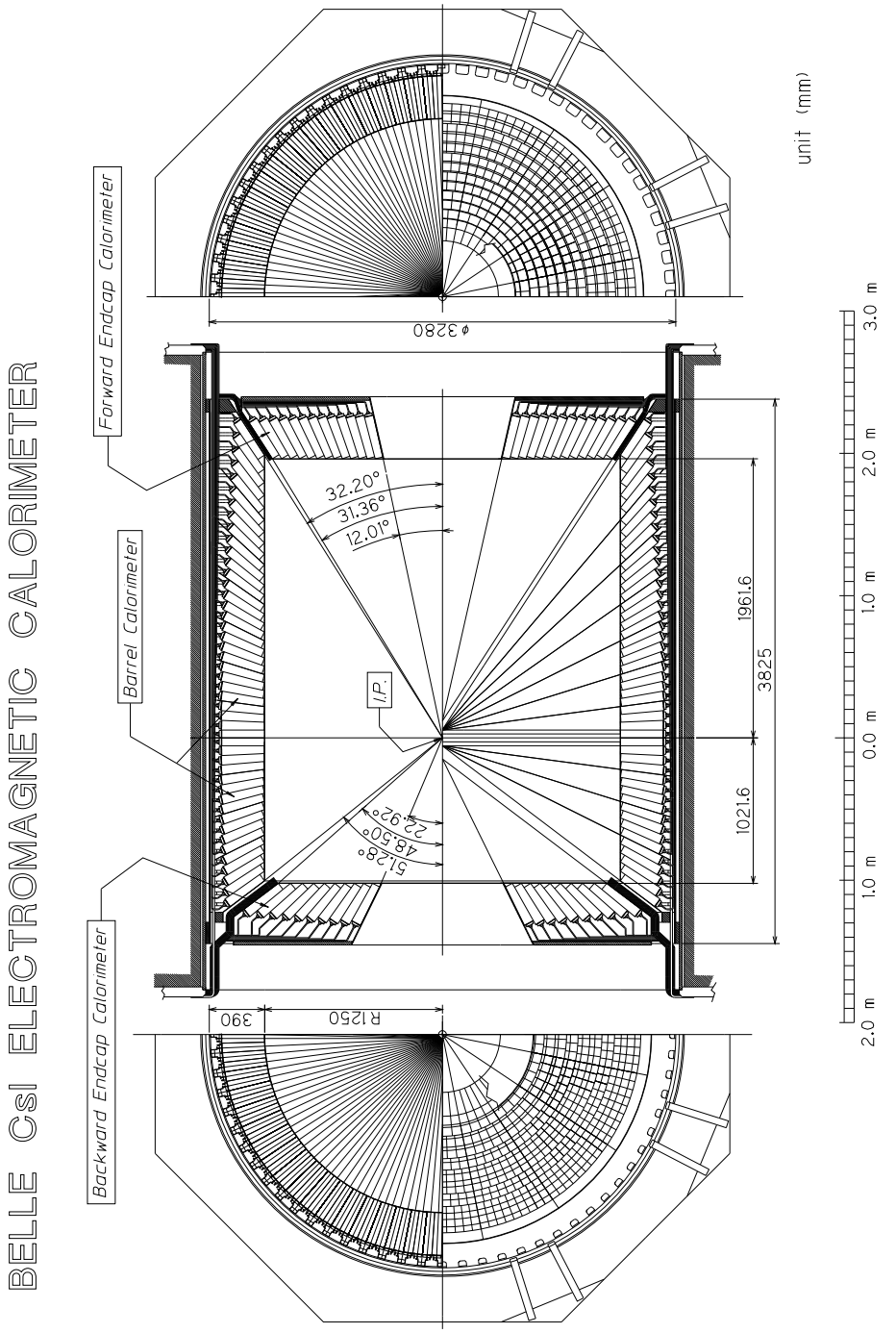


図 5.1: CsI 電磁カロリメータの全体像

活性で揮発性のあるフロリナートと呼ばれる液体を用いるため、万が一冷媒がもれてもカウンターに影響を与えることはない。カウンター内の温度が$\pm$ 1°C の安定性で30°C 以下に保たれていれば、エレクトロニクスは正常に動作する。そしてプレアンプのケーブルと冷却パイプはカウンターの背後を通りリングの端から外に出るようになっている。

	θ coverage	θ seg.	ϕ seg.	# of crystals
Forward Endcap	12.4° – 31.4°	13	48 – 144	1152
Barrel	32.2° – 128.7°	46	144	6624
Backward Endcap	130.7° – 155.0°	10	64 – 144	960

表 5.1: CsI 電磁カロリメータの大きさのパラメーター

5.1.2 CsI(Tl) カウンター

CsI（Tl）結晶の大きさ

個々の結晶の断面のサイズはカロリメータ中の場所により少しずつ異るが、前面が55×55mm^2、結晶内部からのシンチレーション光を読み出す後面が65×65mm^2の四角錐台の形を持つ。このサイズは、結晶の中心に光子が飛び込んだ場合に、光子のエネルギーの約80% がその結晶中で捕らえられる、との要請より決められた。結晶の長さ (300mm) は数 GeV の光子に対しエネルギー分解能が大きく悪化しない最小値が選ばれた。縦方向の長さが不十分だと、後方にシャワーが洩れてしまい、エネルギー分解能が悪化することが分かっている。[9]

CsI カウンターの構成

CsI カウンターの組み立て形態を図 5.4 [8] に示す。個々の結晶はその後面を除いて、効率良い集光のため厚さ 200μm の白色ゴアテックステフロンシートで包まれる。更にその上から厚さ 25μm のアルミナイズドマイラーで包み、光と電気的ノイズを遮断する。

結晶からの信号の読みだしには、磁場中で使用可能なフォトダイオード（PD）を用いる。CsI(Tl) 結晶はシンチレーション光の発光量が多く、またその波長は、PD の感度の高い領域に対応しているため、PD 読みだしにすることでカロリメータを

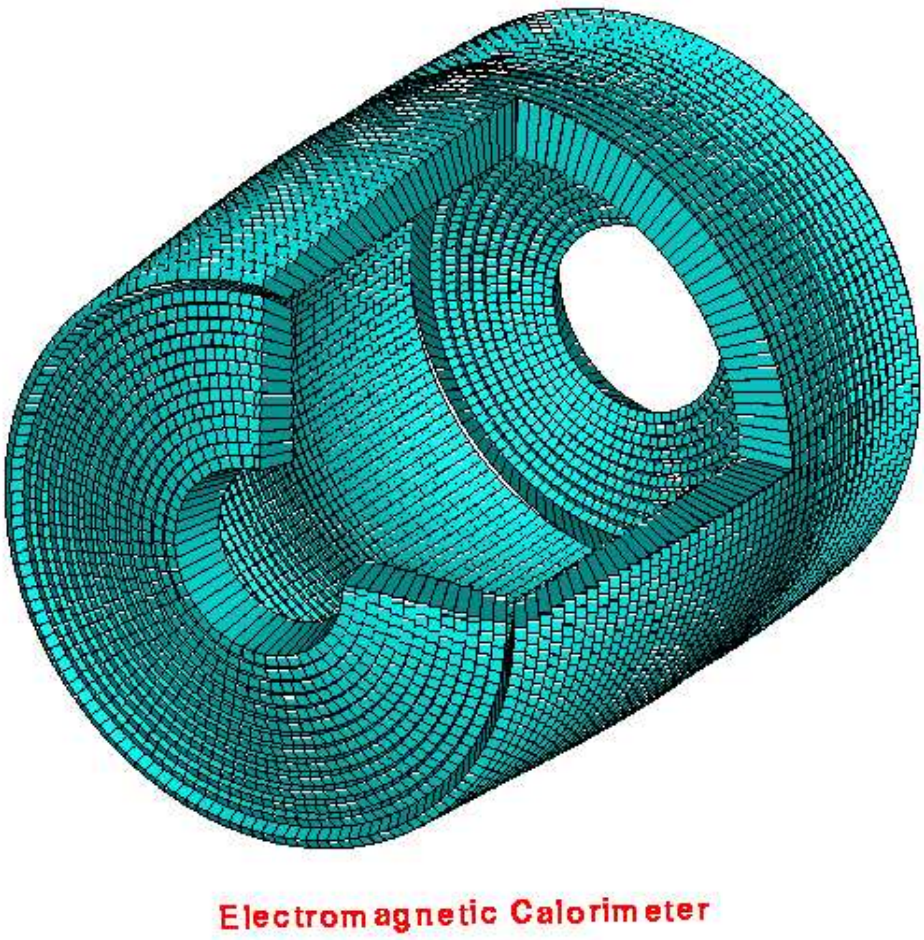


図 5.2: 約 9000 本の CsI(Tl) 結晶が並べられた様子

ソレノイドマグネット（1.5T の磁場をつくる）の内側に設置することが出来る。また、PD の受光面は $1cm \times 2cm$ である。2 個の PD が厚さ 1mm のアクリル板を通して結晶の後面に接着される。アクリル板は PD のシリコンと結晶の熱膨張率の違いによる両者の剥離を防ぐ為である。PD からの信号はプレアンプで独立に増幅される。プレアンプはアルミの箱に入っていて、結晶後面にネジ止めされたアルミフレーム上にボルトで固定される。また結晶を包んだアルミナイズドマイラーをこのアルミ板の下に挟み込み、プレアンプのケースと電気的に接触させている。

5.1.3 温度依存性

CsI カウンターとその構成要素それぞれの温度による信号の大きさの変化は $11°C$ から $51°C$ の範囲において五十嵐らによって測定されている。[3] 図の (d) はプレアンプにテストパルスを入力した時の出力の変化を示したものである。またプレアンプにフォトダイオードをとりつけた場合は ^{241}Am 線源 (59KeVΓ 線) を用いて測定された。CsI(Tl) カウンター全部についての温度依存性については ^{137}Cs 線源 (667KeVΓ 線) を用いて測定された。その結果、$30°C$ 以下で $0.24\%/°C$ であり、温度が $30°C$ 以下であれば問題ないことがわかった。(図 5.3の (a)) 結晶のみの温度依存性は図 5.3の (b)、フォトダイオードのみの温度依存性は図 5.3の (c) で示されている。

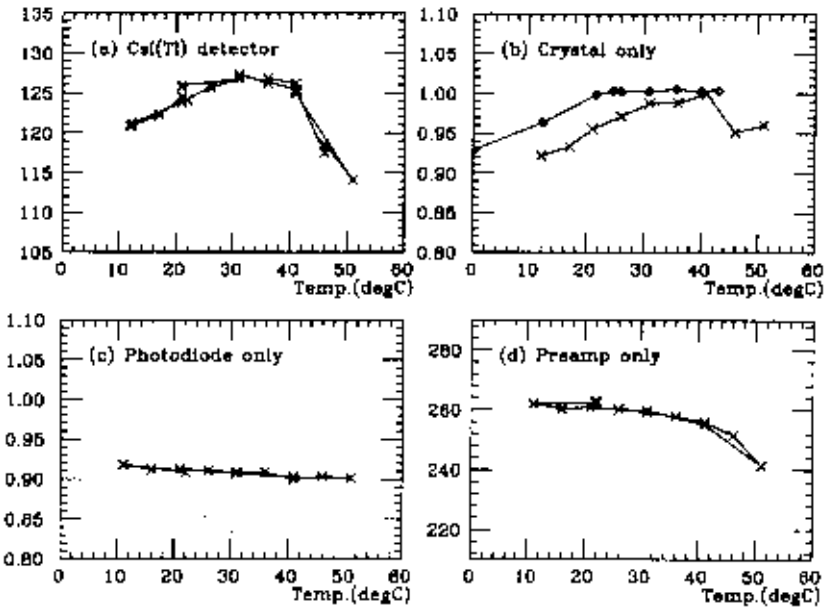


図 5.3: (a) CsI カウンター全体の温度依存性、(b)CsI 結晶の温度依存性、(c) フォトダイオード (PD) と (d) プレアンプの温度依存性

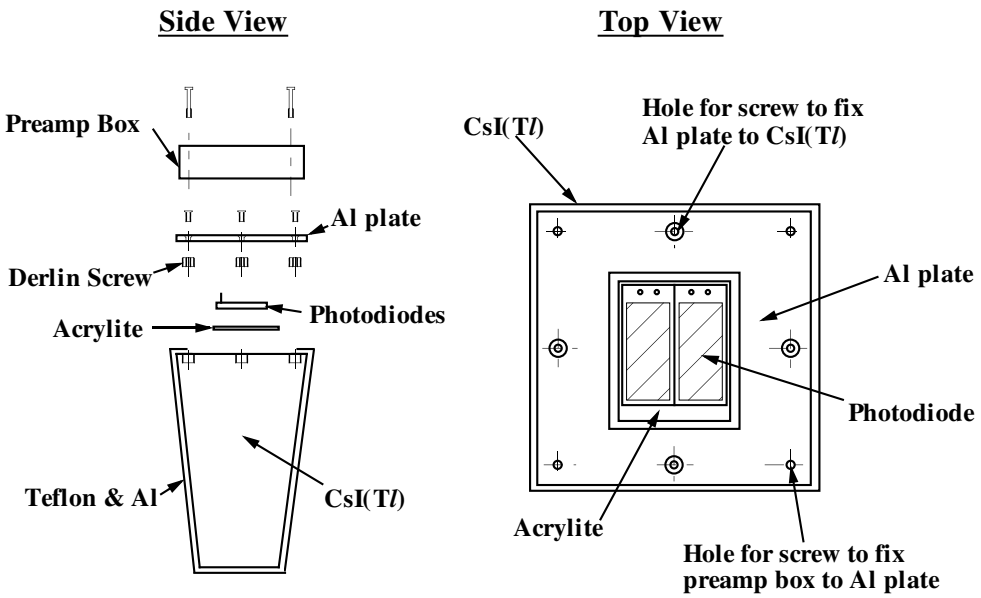


図 5.4: CsI(Tl) カウンターの組み立て形態

5.2 冷却方法

信号の読み出しにはプレアンプを用いるが、カロリメータ全体で3kWの熱（プレアンプ1つにつき300mW)が発生する。この熱によって構造体の内部の温度が上昇するとフォトダイオードやプレアンプのノイズを増したり、フォトダイオードと結晶の間の接着に悪影響がある。またCsI(Tl)カウンターの信号の波高には温度依存性がある。したがって構造体内を一定の温度に保つために内部に$20°C$の冷媒を循環させることによって熱を取り除く。図5.5にカロリメータバレル部のの r-ϕ 平面の断面図を示す。バレル部は全部でϕ方向に72区画に分けられているがその1区画は2列にカウンターが入っており測定器の後方($\theta = 150°$側)から銅パイプを通じて入った冷媒はカウンターの背後を通り前方でUターンしてもう1列のカウンターの背後を通り再び後方に出てくるしくみになっている。エンドキャップ部も同様にカウンターの背後を通る。

冷媒

冷媒にはフロリナート（PF-5060）をもちいる。この冷媒はフッカ炭素系化合物であり、金属類に対する腐食性や臭気もなく毒性も少ない。万が一洩れても、不活性であることから潮解性のあるCsI結晶をいためることはない。その特性を表5.2に示す。

特 性	単 位	PF-5060
化学構造		C_6F_{14}
沸点	$°C$	56
流動点	$°C$	-90
比重		$1.68(25\ °C)$
動粘度	cSt	$0.4(25\ °C)$
蒸気圧	torr	232
比熱	cal/g・$°C$	0.25
蒸発熱（沸点）	cal/g	21
熱伝導度	cal/cm sec $°C$	0.00014

表 5.2: PF-5060(冷媒) の特性

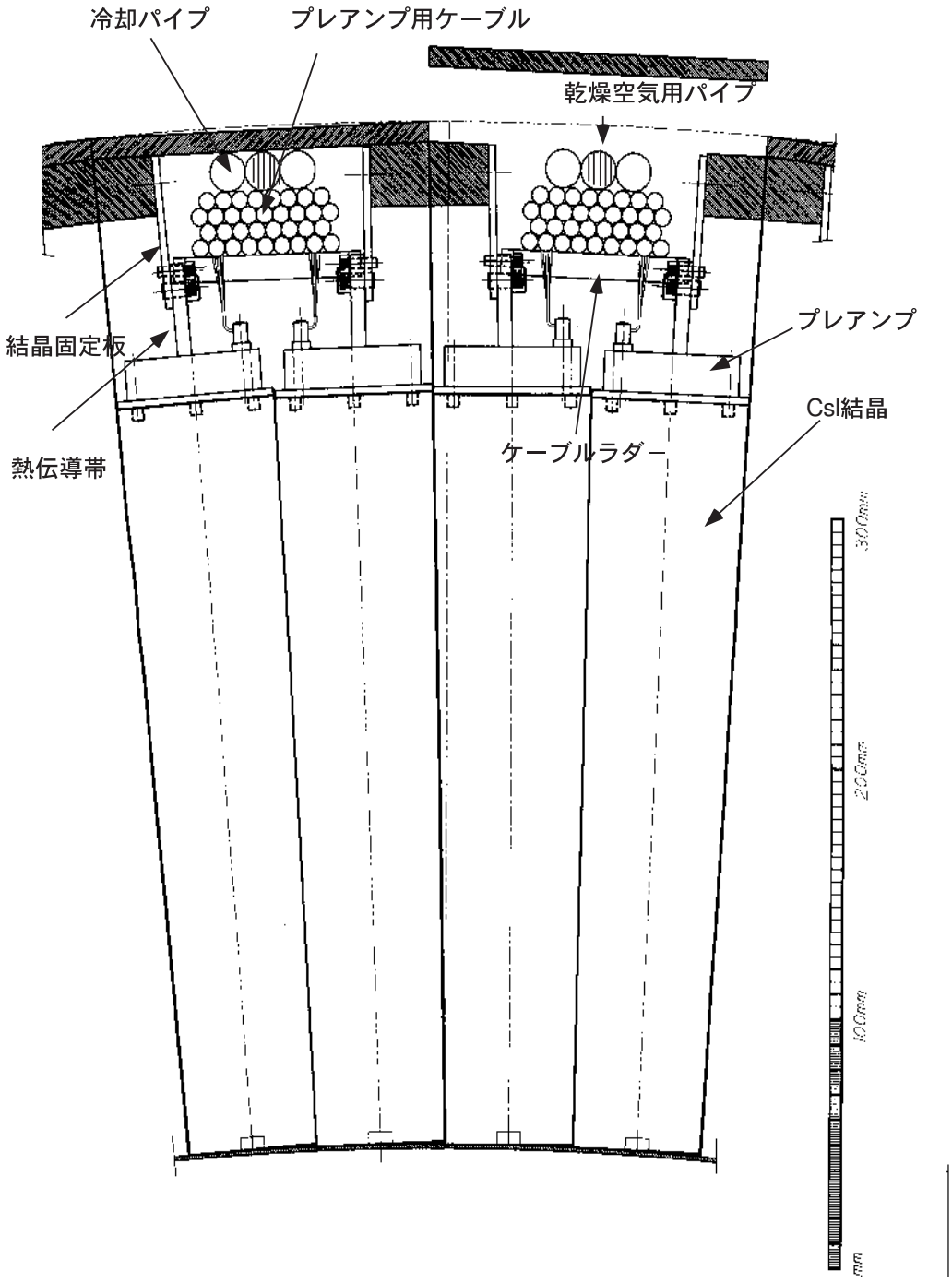


図 5.5: カロリメータバレル部 r-ϕ 断面図

冷却の仕組み

図 5.6はバレル部の r-z 断面図を示す。図のようにプレアンプから発生した熱はプレアンプ上部に接着された銅製の熱伝導帯を伝わる。そして結晶をを支えるための結晶固定板を通って最終的にはパイプ内の冷媒を通じて外に出る。

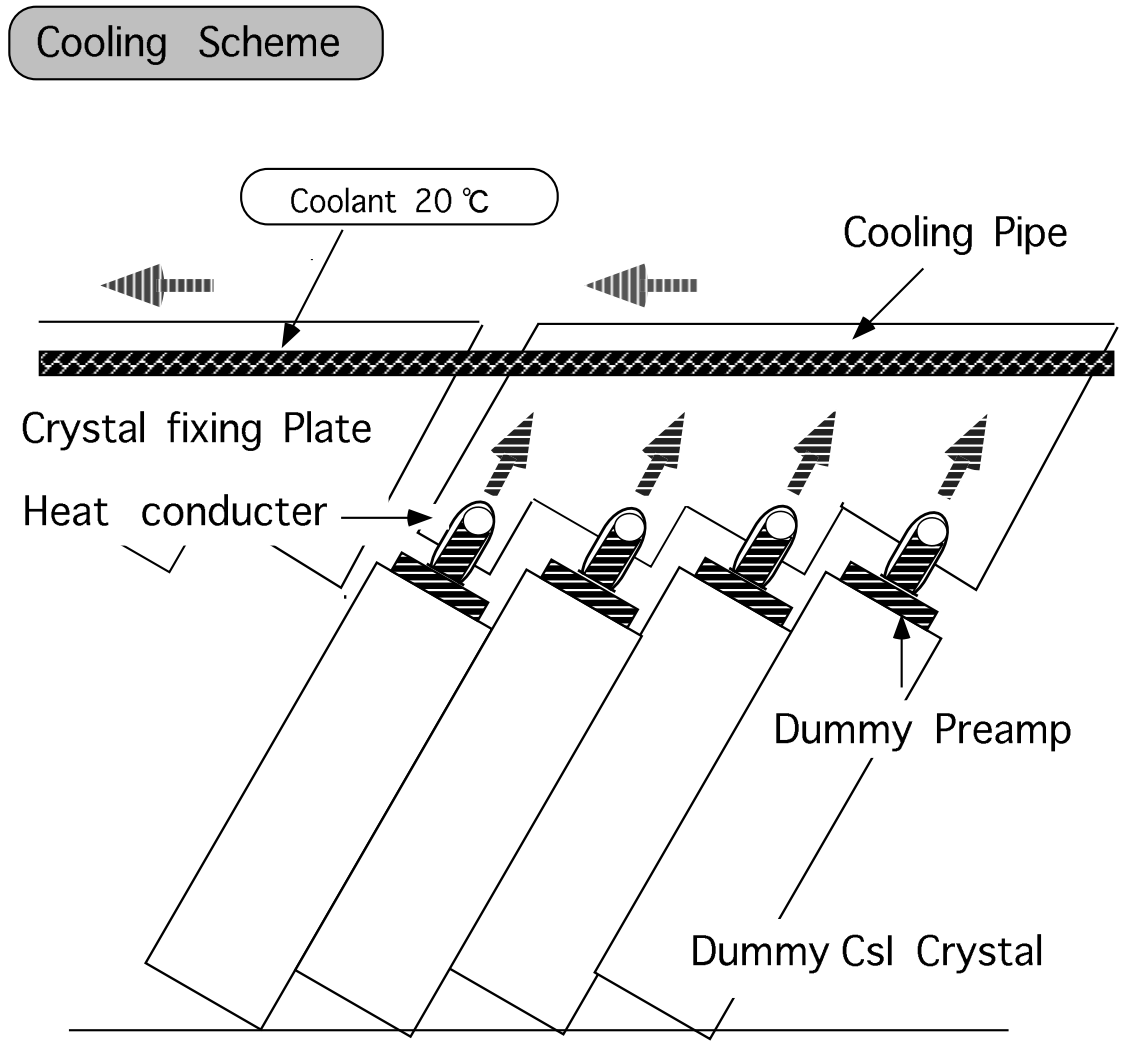
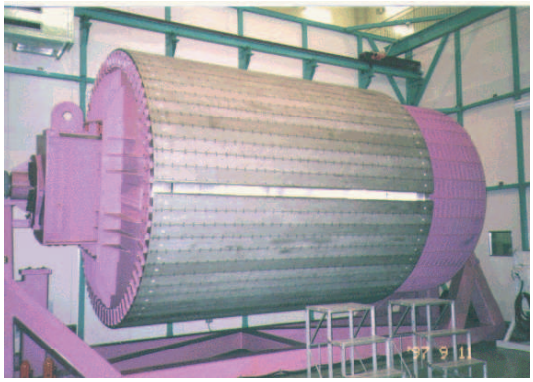
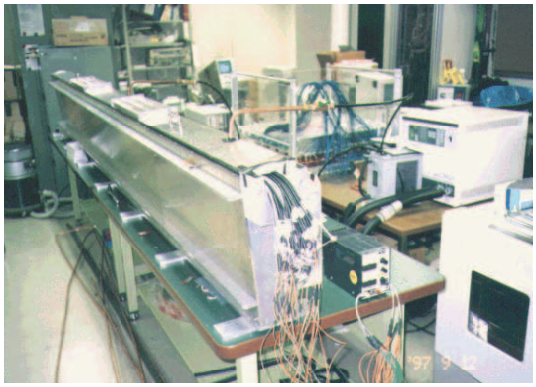


図 5.6: 冷却方法

(a) CsI カロリメータバレル部



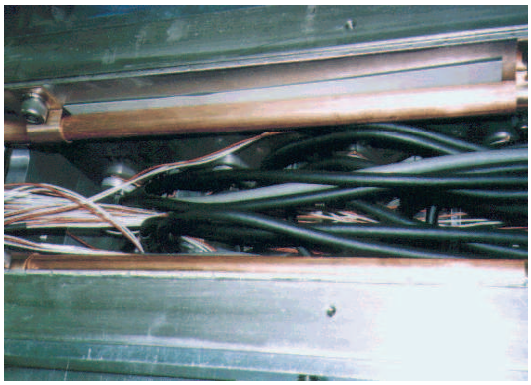
(b) カロリメータバレル部模型(前方)



(c) カロリメータバレル部模型(後方)

(d) カウンターの並んでいる様子

(e) 冷却パイプの取り付け



(f) 断熱材で周りを覆った様子

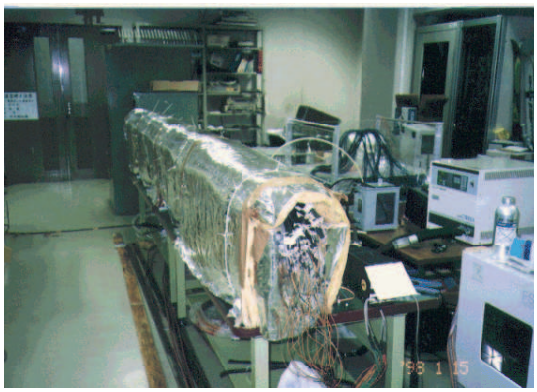


図 5.7: (a)CsI カロリメータ バレル部。(b)CsI バレル部模型 (前方)。(c) 手前から CsI バレル部模型、データロギングシステム、SPARC ボードの入った VME クレート。(d) バレル部模型内のダミーカウンターの並んでいる様子。(e) 冷却パイプ取りつけ部分、(f) 断熱材に覆われたバレル部模型

5.3 セットアップ

5.3.1 CsIバレル部実物大模型のセットアップ

今回テストに用いたCsIバレル部の模型はϕ方向に72に分割した ものの1区画分の実物大模型である。（図5.7の(b)）1区画分はさらに内部で１１個のコンパートメントに分かれている。前方からはプレアンプの読みだしのケーブル、後方からは温度センサー・湿度センサーのケーブルと冷却パイプが出ており、センサーのケーブルはデータロギングシステムHP3852Aに接続されている。内部には、実機同様に1列に４６本2列で９６本のダミーのカウンターが並んでいる。結晶部分は塩化ビニル樹脂でできており実際の結晶と同様にアルミナイズドマイラーで包装されており（図5.7の(d)）、プレアンプは電源供給時に実機と同様に1つにつき300mWの電力が発生するように内部に1kΩの抵抗がとりつけられている。従ってこの模型全体では電源供給時に27.6Wの熱が発生することになる。結晶固定板は実機同様1区画に片側１１枚、両側で２２枚とりつけられ、最前方、最後方の固定板で5個のカウンターの固定、残りについては順に4個ずつ結晶を固定できるようになっている。BELLE測定器ではカロリメータ内部にTOF、外部には超電導ソレノイドコイルが設置されているが熱が伝わらないように断熱されている。また発生した熱のうち、冷媒によって運び出された割合をできる限り正確に調べるために今回使用した模型についても、周囲を断熱材(厚み約2cmのグラスウール)で囲んだ。（図5.7の(f)）

5.3.2 冷媒の流量の較正

冷却に使用する冷媒は、冷媒循環器から供給され冷媒循環用パイプを通って模型内を冷却する。その流量はバルブの開け方で変えることができ、面積式流量計（フローター）で読みとることによって得られる。しかし、この流量計は水を冷媒としたときの数値を示している。今回使用したフロリナートは水と粘性が異なるため流量計の数値と一致しないことから流量の測定をおこなった。流量計の数値と今回使用したフロリナートの流量との対応は表5.3に示された通りである。

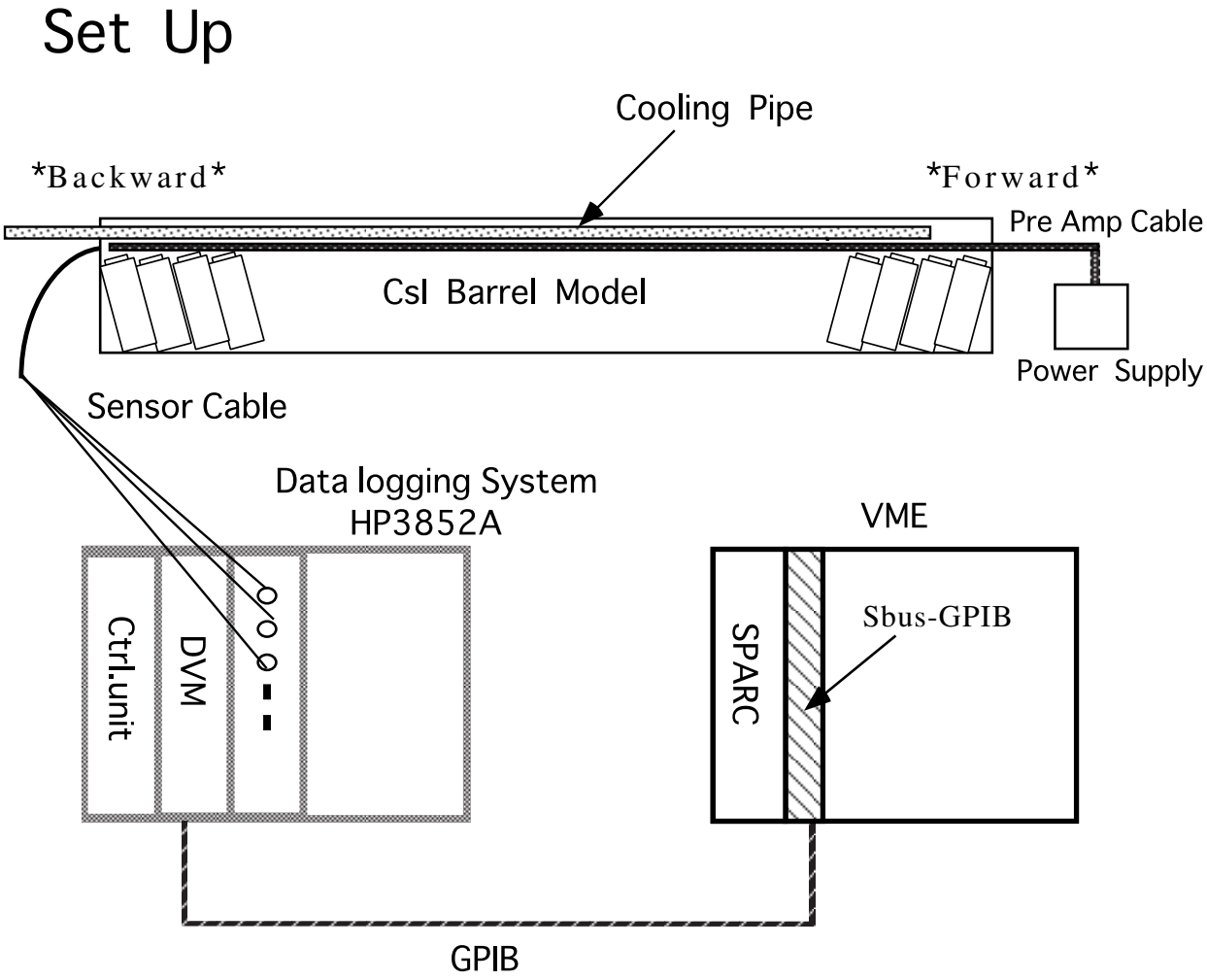

Set Up
Cooling Pipe
Backward
Forward
Pre Amp Cable
CsI Barrel Model
Power Supply
Sensor Cable
Data logging System
HP3852A
VME
Ctrl.unit
DVM
SPARC
Sbus-GPIB
GPIB

図 5.8: セットアップ

流量計の目盛 (l/hour)	実際のフロリナートの流量
50(l/hour)	15.66(g/sec)
80(l/hour)	28.25(g/sec)
100(l/hour)	36.43(g/sec)
120(l/hour)	43.23(g/sec)
150(l/hour)	54.09(g/sec)

表 5.3: 流量計とフロリナートの流量との対応

5.3.3 測定方法

図 5.8にこのテストのセットアップを示す。模型に設置された温度センサーが測定した温度はセンサーのケーブルを通じてデータ集積システム HP3852A で数値化される。HP3852A へのコマンドの入力は GPIB を通じて SPARC ボードから行なわれる。また HP3852A で数値化されたデータも SPARC ボードから GPIB バスを通じてハードディスク上のファイルにためられる。冷媒は冷媒循環器から供給され、冷媒の温度を 20°C、流量は 54.1g/sec(読み取り値で 150l/hour) として測定開始前に半日循環させ、測定開始時にプレアンプの電源をオンにした今回の測定は、プレアンプから発生した熱が、プレアンプ→熱伝導帯→結晶固定板→パイプと伝わる様子を確かめるとともに、全ての熱がどのように伝わっていくか確かめるものである。従って測定点としてはプレアンプの表面、結晶固定板、パイプだけではなく、容器内の空気の温度測定を行ない、この冷却方法の有効性を評価をした。測定は 10 分おきに約 3 日間おこなった。

模型内のダミーカウンターには番号がつけられておりその位置は図 5.9に示した。最前方の部分の測定に用いたプレアンプはカウンター 261、271、281、291、最後方ではパイプの入口付近と出口付近の部分を考慮してカウンター 174、164、173、163 のプレアンプと結晶固定板、中央では結晶固定板のと冷却パイプとの距離が短いため、61 と 71 のカウンターのプレアンプの温度および、冷却パイプ温度の測定をおこなった。

測定点をまとめると以下の通りになる。

1. バレル部模型の最前方、最後方、中央のプレアンプと結晶固定板または冷却パイプ。

2. 容器内の空気の温度 3 点（最前方、最後方、中央）

3. 冷媒循環用パイプの入口付近と出口付近と折り返し部分。

4. 模型の置かれた大穂実験室内の温度。

5.4 結果

図 5.10は、カウンター 221,231,241 のプレアンプ、そのプレアンプの熱の通り道である結晶固定板、そして冷媒循環用パイプの出口付近の温度を 50 分おきにプロットしたものである。プレアンプの温度上昇が $3°C$ と最も大きく、結晶固定板と冷媒循環用パイプ表面における温度が温度上昇が各々 $1°C$、$0.6°C$ となっていることから、プレアンプから発生した熱は、確かに結晶固定板に伝わり冷却パイプを通じて放出されていることがわかる。また、プロトタイプの環境モニターシステムは上記の議論をするのに充分な精度で温度測定を行なっていることがわかる。
図 5.11 と図 5.12に各測定点における温度測定の結果を示す。これを見ると

1. 図 5.10からそれぞれの場所（最前方、中央、最後方）でのプレアンプ表面の温度はおよそ 1 日で熱平衡に達し、$25°C$ 以内に収まっている。

2. プレアンプの熱は冷却システムを通じて外に放出される以外に模型内の空気にも伝導している。(図 5.11（右）)

3. 室温（(図 5.11の右▲印) は、室内に空調機が設置されているために $21.5°C$ から $24°C$ の温度の変動が見られるが図から見るように模型内への影響はない。

ということがわかった。この結果を、表 5.4にまとめる。

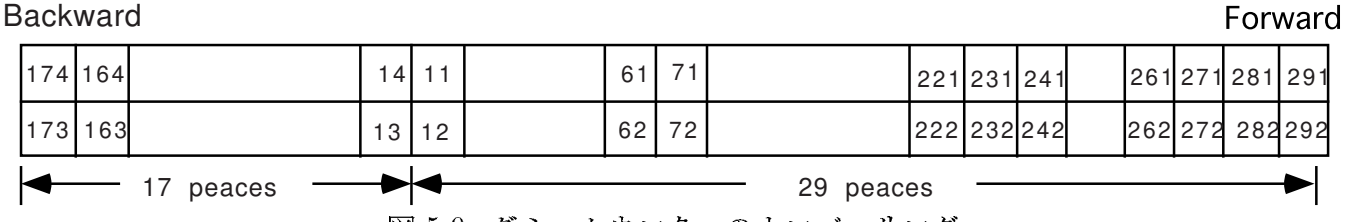


図 5.9: ダミーカウンターのナンバーリング

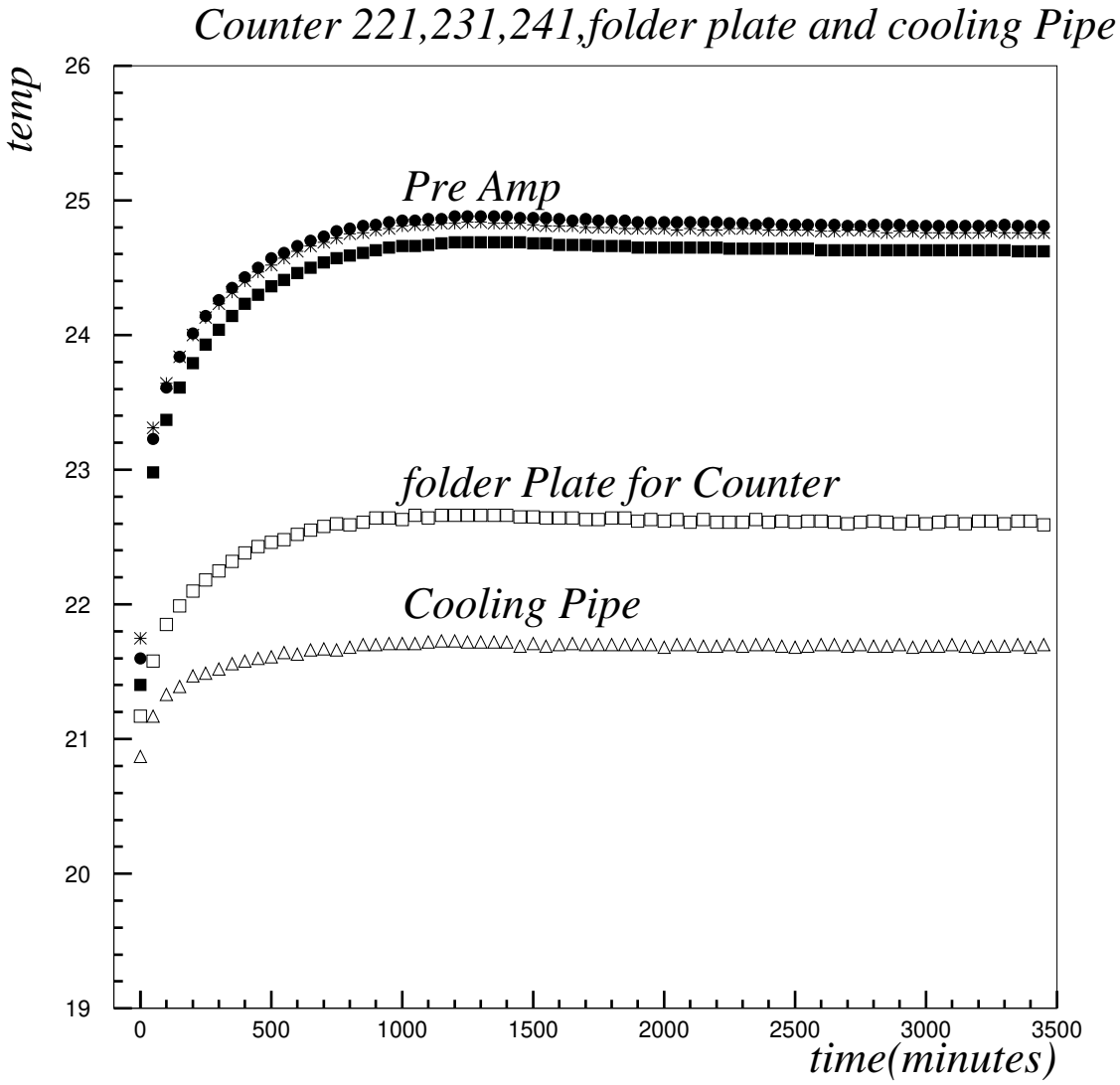


図 5.10: プレアンプから発生した熱が結晶固定板 (folder plate)、パイプ (Cooling Pipe) に伝わる様子

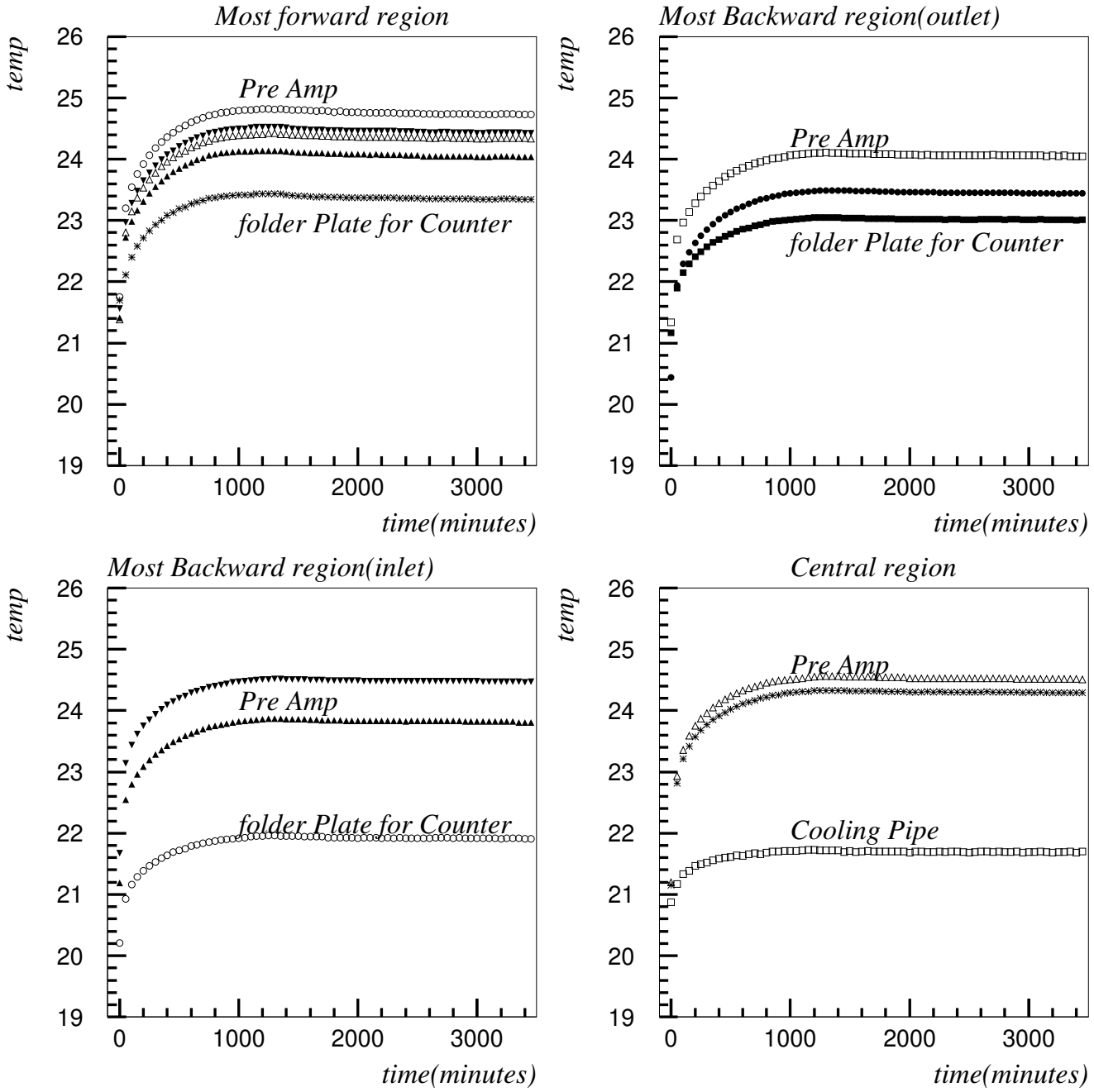


図 5.11: 上左図：最前方のカウンターと結晶固定板、上右図：最後方（パイプの出口）、下左図：最後方（入口）、下右図：中央のカウンターと冷却パイプ

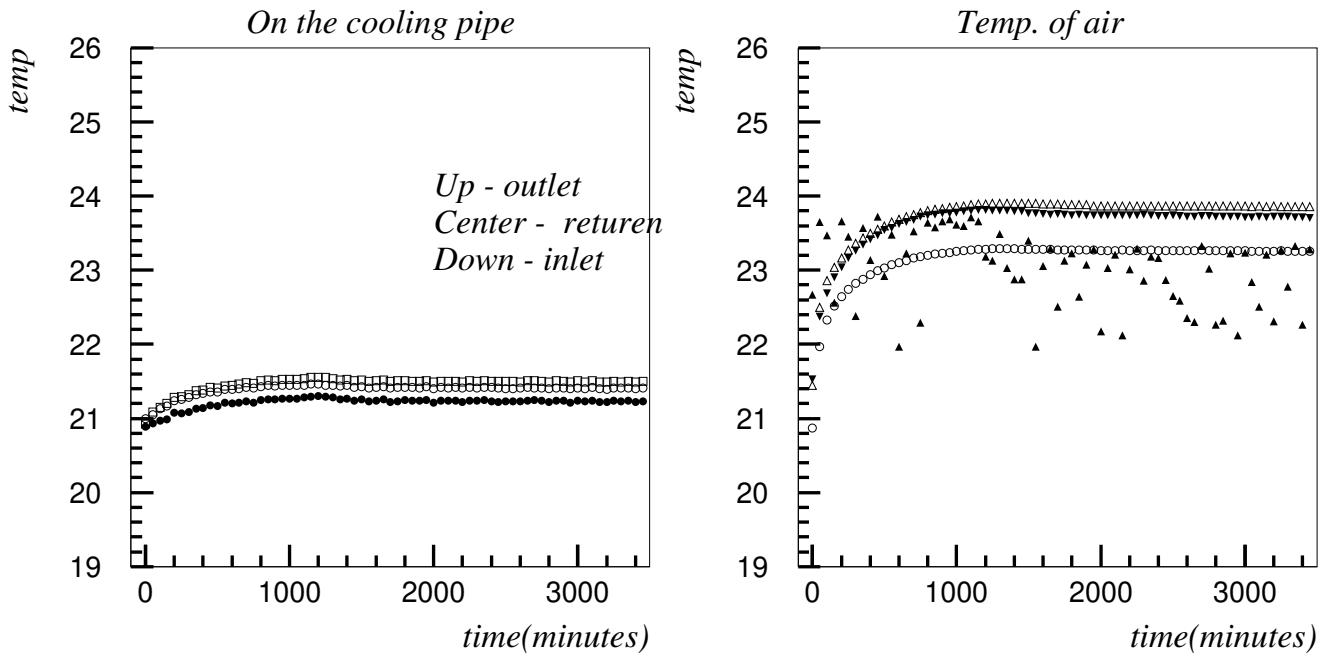


図 5.12: 上左図：冷却パイプ（入口、出口、折り返し、上右図：容器内空気の温度と室温 (▲印)

場所	測定点	温度変化 ($°C$)	温度上昇 ($°C$)
最前方	プレアンプ表面	21.4 - 24.8	2.8 - 3.0
	結晶固定板	21.4 - 23.4	1.0
	容器内空気	21.6 - 23.6	2.0
最後方	プレアンプ表面	21.2 - 24.6	2.4
(パイプ入口)	結晶固定板	20.4 - 22	1.6
最後方	プレアンプ表面	21.4 - 24.0	2.6
(パイプ出口)	結晶固定板	21.2 - 23	2.8
	容器内空気	21.6 - 23.6	2.0
中央	プレアンプ表面	21.2 - 24.6	3.4
	冷却パイプ	21.8 - 22.8	1
	容器内空気	20.9 - 23.2	1.3
冷却パイプ	パイプ入口	20.9 - 21.2	0.3
	折り返し	21.0 - 21.4	0.4
	パイプ出口	21.0 - 21.6	0.6

表 5.4: 各測定点での温度変化

5.5 考察

プレアンプから発生した熱が、図 5.6で示した冷却システムによってどれだけ持ち去られているか計算をおこなった。冷媒から持ち去られた熱量を Q_f、冷媒の比熱を C、冷媒の温度変化を ΔT とすると熱量は

$$Q_f = f(g/sec) \times c(J/g°C) \times \Delta T(°C) \tag{5.1}$$

で表される。
従って、冷媒の流量 f $=$ 54.1(g/sec)、比熱 c $=$ 1.05(J/g$°C$)、そして冷却パイプの温度変化 $=$ (パイプの出口の温度)-(パイプの入口の温度)=0.34$°C$ を代入すると、冷媒によって持ち去られた熱量 Q_f は

$$Q_f = 19.3(W) \tag{5.2}$$

となる。プレアンプから発生する熱量は模型全体で 27.6(W) なので、このことからこの冷却システムで、全体の約 70% の熱が持ち去られていることがわかった。残りの 30% については次のようなことが考えられるが、実物大模型を構成する各々の部品の形状は大変複雑なため、これらを定量的に評価するのはかなり困難である。

1. 容器内の空気へ伝導し (図 5.12右)、そこから前後方へ出ているケーブルや後方に出ている冷媒循環用パイプを伝わり外へ出た。

2. プレアンプから、結晶を包装しているアルミナイズドマイラーを介して容器の側面と底面に伝わり、断熱材をどうしても巻けない脚の部分から外へ逃げた。

3. 外部の空気中に熱放射された。

第 6 章

まとめ

BELLE 測定器の環境モニターシステムの設計を開発をおこなった。
測定器内に直接設置する温度センサー・湿度センサーについては次のような動作チェックを行なった。

1. 湿度センサーの磁場内での動作チェック

2. 湿度センサーと温度センサーの放射線耐性

その結果、湿度センサーは 1.5T の磁場内でも正常に動作し、1% 以内で正確な値を示し、放射線耐性についても被曝前後のセンサーの値は 0.5% 以内で一致することからこれらのセンサーを実際の実験で用いることができると判断した。また、エレクトロニクスハット内にある HP3852A データロギングシステムとセンサーは 50m に達する読みだしケーブルで接続されているがこのケーブルによるノイズの影響はなく、数値は正確に読み出すことができることがわかった。

次に、プロトタイプの環境モニターシステムを用いて CsI 電磁カロリメータバレル部模型での冷却テストを行なった。
CsI カウンターは発光量に温度依存性があること、またプレアンプからの発熱により測定器内の温度が変化することから、冷却をおこなって測定器内を一定に保っている。この冷却機能が働いているか確認するためにプロトタイプの環境モニターシステムを用いてバレル部模型の温度測定を行なった。温度は 10 分おきに自動的に測定されこれを約 3 日間継続した。その結果、プレアンプから発生する熱の約 70% が、この冷却システムによって取り除かれていることが、また冷却システムが稼働していればまる一昼夜で測定器内の温度は一定になることが確認できた。
また、このようなデータをとることができたことからこの環境モニターシステムを

用いて実際の実験で環境データの測定ができると判断した。

このBELLE測定器の環境モニターシステムがBファクトリー実験で大いに役立つことを期待する。

付録 A

テスト用プログラム

SPARC ボードから GPIB バスを介して HP3852A データロギングシステムとデータのやりとりを行なう基本的なプログラムを記載する。

```
/*********************************************************************
 *  link this with cib.c                  *
*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include "ugpib.h"

#define MAVbit 0x45

char          buffer[5000];
int           loop,m,num_listeners,SRQasserted;
double        sum;
/*Addr4882_t   instruments[32],result[31],hp3852a;*/
unsigned short instruments[32],result[31],hp3852a;
short         statusByte;

FILE *outfp;
```

```
void gpiberr(msg)
   char* msg;
  {
     printf("%s\n",msg);

     printf("ibsta=&H%x ",ibsta, "<");
     if (ibsta & ERR)  printf(" ERR");
     if (ibsta & TIMO) printf(" TIMO");
     if (ibsta & END)  printf(" END");
     if (ibsta & SRQI) printf(" SRQI");
     if (ibsta & RQS)  printf(" RQS");
     if (ibsta & CMPL) printf(" CMPL");
     if (ibsta & LOK)  printf(" LOK");
     if (ibsta & REM)  printf(" REM");
     if (ibsta & CIC)  printf(" CIC");
     if (ibsta & ATN)  printf(" ATN");
     if (ibsta & TACS) printf(" TACS");
     if (ibsta & LACS) printf(" LACS");
     if (ibsta & DTAS) printf(" DTAS");
     if (ibsta & DCAS) printf(" DCAS");
     printf(">\n");

     printf("iberr= %d" , iberr);
     if (iberr == EDVR) printf (" EDVR <Error>\n");
     if (iberr == ECIC) printf (" ECIC <Not CIC>\n");
     if (iberr == ENOL) printf (" ENOL <No Listenern");
     if (iberr == EADR) printf (" EADR <Address error>\n");
     if (iberr == EARG) printf (" EARG <Invalid argument>\n");
     if (iberr == EABO) printf (" EABO <Not Sys Ctrlr>\n");
     if (iberr == ENEB) printf (" ENEB <Op. aborted>\n");
     if (iberr == ECAP) printf (" ECAP <No BPIB bord>\n");
     if (iberr == EFSO) printf (" EFSO <No capability>\n");
     if (iberr == EBUS) printf (" EBUS <file sys. error>\n");
```

```
      if (iberr == ESTB) printf (" ESTB <Command error>\n");
      if (iberr == ESRQ) printf (" ESRQ <Status byte lost>\n");
      if (iberr == ETAB) printf (" ETAB <Table Overflow>\n");

      printf ("  ibcnt= %d\n", ibcnt);
      printf ("\n");
/* Call the ibsnl function to disable the hardware and software.
*/

   ibonl (0,0);

}

main() {
      if((outfp = fopen("data","w")) == NULL){
          printf("%s file not open\n");
          exit(1);
       }
      system("clear");

/* GPIB bord must be the Controller-In-Charge to perform * the find
all listeners protocol.  */

   SendIFC(0);
   if (ibsta & ERR) {
   gpiberr("SendIFC Error");
   exit(1);
   }


/* Cleated an array with all of the valid GPIB primary address.  *
This array will be given to the Find All Listeners protocol.  */
```

```
  for (loop = 0 ; loop <= 30 ;loop++){ instruments[loop] = loop; }

   instruments[31] = NOADDR; /* Mark the end of array*/

/* Find all of the listeners on the bus */

   printf("Finding all listeners on the bus....\n");

   FindLstn(0,instruments,result,31);
   if (ibsta & ERR){
   gpiberr("FindLst Error");
   exit(1);
   }

   num_listeners = ibcnt - 1;

   printf("Number of instruments found = %d\n",num_listeners);

/* All device is clear */

   DevClearList(0,instruments);
   if (ibsta & ERR) {
   gpiberr("All DevClear Error");
   exit(1);
   }

/* now send the *IDN? commnd to each of the device that you * found *
* The GPIB bord address is at address 0 by defalt . * your GPIB bord
does not respond to *IDN, so skip it
*/

   for (loop = 1; loop <= num_listeners; loop++){
   Send(0,result[loop],"ID?" , 3L, DABend);
```

```
   if (ibsta & ERR){
   gpiberr("Send Error");
   exit(1);
   }

   Receive(0,result[loop],buffer,10L,STOPend);
   if (ibsta & ERR){
   gpiberr("Receive Error");
   exit(1);
   }

   buffer[ibcnt] = '\0';
   printf("The instrument at address %d is a %s\n",
           GetPAD(result[loop]), buffer);

   if (strncmp(buffer ,"HP3852A",7) == 0) {
   hp3852a = result[loop];
   printf("***** We found the HP3852A *****\n");
   break;
   }
}

   if (loop > num_listeners) {
   printf("Did not find the HP3852A!\n");
   exit(1);
    }

  /* Reset the HP3852A */

   DevClear(0,hp3852a);
   if (ibsta & ERR) {
   gpiberr("DevClear Error");
   exit(1);
```

```
   }

/*   Send(0,hp3852a,"RESET",5L,DABend);
   if (ibsta & ERR) {
   gpiberr("Send RST Error");
   exit(1);
    }
*/

            /* Set the SRQ */

      Send(0,hp3852a,"RQS ON; RQS FPS; SRQ",20L, DABend);
      if (ibsta & ERR) {
      gpiberr("Send SRQ Error");
      exit(1);
       }

  /* Set up for the test. Allow the HP3852A to asert SRQ
     when it has a message to send.  */


 Send(0,hp3852a,
      "CONFMEAS OHM100,USE 0",21L, DABend);

 if (ibsta& ERR) {
 gpiberr("Send Setup Error");
 exit(1);
 }

      /* Wait for the HP3852A to assert SRQ,meaning it is
       * ready with the measurement*/

      WaitSRQ(0,&SRQasserted);
```

```
      if (!SRQasserted) {
      printf("SRQ is not asserted. The HP3852A is not ");
      printf("ready.\n");
      exit(1);
      }



 /* Read it Status byte. Be sure the the MAV
*(Messageavailable) bit is set.  */
    ReadStatusByte(0, hp3852a, &statusByte);
    if(ibsta & ERR) {
    gpiberr("ReadstatusByte Error");
    exit(1);
     }

      if (!(statusByte & MAVbit)) {
      gpiberr("Improper status Byte");
      printf(" Status Byte = 0x%x\n",statusByte);
      exit(1);
      }

        /* Read the measurement */

      Receive(0, hp3852a, buffer ,15L, STOPend);
      if (ibsta & ERR){
      gpiberr("Receive Error");
      exit(1);
      }

      buffer[ibcnt] = '\0';
      printf("Reading :\n%s\n",buffer);
      fprintf(outfp,"%s\n",buffer);
```

```
      Send(0,hp3852a,"STA?",4L, DABend);

/* Call the ibonl function to disable the hardware and software.  */

  ibonl (0,0);


 }
```

付録 B

冷却テストに用いたプログラム

CsI 電磁カロリメータバレル部模型での冷却テストに用いたプログラムを以下に記載する。

```
/*********************************************************************
/* Temperature is measured by HP3852A and transfered with GPIB bus.
 *  link this with cib.c
*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include "ugpib.h"

/* time interval */
#include <time.h>
#include <sys/time.h>
#include <sys/types.h>
/*math.h included*/
#include <math.h>

#define MAVbit 0x45

char         buffer[1000];
```

```
static char  data[25][15];
int          minute,i,j,loop,m,num_listeners,SRQasserted;
unsigned short instruments[32],result[31],hp3852a;
short        statusByte;
double ohm[25],temp[25],T,a,b,c,rate,ondo;
FILE *outf0,*outf1,*outf2;

  double change(thrm)
    double thrm;
   {
    c = 10000.0;
    rate =c/thrm;
    a = log( rate );
    b = 1./3435.;
    T= 273.15 + 25.;
    ondo = 1/(1/T-b*a);
    return(ondo);
   }

 void gpiberr(msg)
    char* msg;
   {
      printf("%s\n",msg);

      printf("ibsta=&H%x ",ibsta, "<");
      if (ibsta & ERR)  printf(" ERR");
      if (ibsta & TIMO) printf(" TIMO");
      if (ibsta & END)  printf(" END");
      if (ibsta & SRQI) printf(" SRQI");
      if (ibsta & RQS)  printf(" RQS");
      if (ibsta & CMPL) printf(" CMPL");
      if (ibsta & LOK)  printf(" LOK");
      if (ibsta & REM)  printf(" REM");
```

```
      if (ibsta & CIC)  printf(" CIC");
      if (ibsta & ATN)  printf(" ATN");
      if (ibsta & TACS) printf(" TACS");
      if (ibsta & LACS) printf(" LACS");
      if (ibsta & DTAS) printf(" DTAS");
      if (ibsta & DCAS) printf(" DCAS");
      printf(">\n");

      printf("iberr= %d" , iberr);
      if (iberr == EDVR) printf (" EDVR <Error>\n");
      if (iberr == ECIC) printf (" ECIC <Not CIC>\n");
      if (iberr == ENOL) printf (" ENOL <No Listenern");
      if (iberr == EADR) printf (" EADR <Address error>\n");
      if (iberr == EARG) printf (" EARG <Invalid argument>\n");
      if (iberr == EABO) printf (" EABO <Not Sys Ctrlr>\n");
      if (iberr == ENEB) printf (" ENEB <Op. aborted>\n");
      if (iberr == ECAP) printf (" ECAP <No BPIB bord>\n");
      if (iberr == EFSO) printf (" EFSO <No capability>\n");
      if (iberr == EBUS) printf (" EBUS <file sys. error>\n");
      if (iberr == ESTB) printf (" ESTB <Command error>\n");
      if (iberr == ESRQ) printf (" ESRQ <Status byte lost>\n");
      if (iberr == ETAB) printf (" ETAB <Table Overflow>\n");

      printf ("  ibcnt= %d\n", ibcnt);
      printf ("\n");
/* Call the ibsnl function to disable the hardware and software.
*/

   ibonl (0,0);

}
main() {
  time_t tloc;
```

```
  struct tm *lt;
  int start_hour,start_min,start_sec;
  int loop_hour,loop_min,loop_sec,ref_sec,ref_min;
  int inter,iCount;
  char buf[64];
      if((outf0 = fopen("data/cooling4_0","a")) == NULL){
          printf("%s file not open\n");
          exit(1);
       }
      if((outf1 = fopen("data/cooling4_1","a")) == NULL){
          printf("%s file not open\n");
          exit(1);
       }
      if((outf2 = fopen("data/cooling4_2","a")) == NULL){
          printf("%s file not open\n");
          exit(1);
       }

      system("clear");

/* GPIB bord must be the Controller-In-Charge to perform * the find
all listeners protocol.  */

   SendIFC(0);
   if (ibsta & ERR) {
   gpiberr("SendIFC Error");
   exit(1);
   }


/* Cleated an array with all of the valid GPIB primary address.  *
This array will be given to the Find All Listeners protocol.  */
```

```
  for (loop = 0 ; loop <= 30 ;loop++){ instruments[loop] = loop; }

   instruments[31] = NOADDR; /* Mark the end of array*/

/* Find all of the listeners on the bus */

   printf("Finding all listeners on the bus....\n");

   FindLstn(0,instruments,result,31);
   if (ibsta & ERR){
   gpiberr("FindLst Error");
   exit(1);
   }

   num_listeners = ibcnt - 1;

   printf("Number of instruments found = %d\n",num_listeners);

/* All device is clear */

   DevClearList(0,instruments);
   if (ibsta & ERR) {
   gpiberr("All DevClear Error");
   exit(1);
   }

/* now send the *IDN? commnd to each of the device that you * found *
* The GPIB bord address is at address 0 by defalt . * your GPIB bord
does not respond to *IDN, so skip it
*/

   for (loop = 1; loop <= num_listeners; loop++){
   Send(0,result[loop],"ID?" , 3L, DABend);
```

```
    if (ibsta & ERR){
    gpiberr("Send Error");
    exit(1);
    }

    Receive(0,result[loop],buffer,10L,STOPend);
    if (ibsta & ERR){
    gpiberr("Receive Error");
    exit(1);
    }

    buffer[ibcnt] = '\0';
    printf("The instrument at address %d is a %s\n",
            GetPAD(result[loop]), buffer);

    if (strncmp(buffer ,"HP3852A",7) == 0) {
    hp3852a = result[loop];
    printf("***** We found the HP3852A *****\n");
    break;
    }
}

    if (loop > num_listeners) {
    printf("Did not find the HP3852A!\n");
    exit(1);
     }

   /* Reset the HP3852A */

    DevClear(0,hp3852a);
    if (ibsta & ERR) {
    gpiberr("DevClear Error");
    exit(1);
```

```
 }

     Send(0,hp3852a,"RESET",5L,DABend);
     if (ibsta & ERR) {
       gpiberr("Send RST Error");
       exit(1);
     }


  /* Set up for the test. Allow the HP3852A to asert SRQ
     when it has a message to send.  */
     loop = 0;
     inter=10;
     iCount=1008;
     minute=0;
      tloc =time( NULL );
      lt = localtime( & tloc );
      start_hour = lt->tm_hour;
      start_min = lt->tm_min;
      start_sec = lt->tm_sec;
/*      printf("Start Time %i:%i:%i\n",start_hour,start_min,start_sec);
*/
      strftime( buf, 64, "%a %b %d %H:%M:%S" , lt);
      printf("start time = %s\n",buf);
      ref_sec = start_sec;
      ref_min = start_min;
      if(ref_min>=60-inter) ref_min = ref_min - 60;

 Send(0,hp3852a,
      "REAL TEM(25); USE 0; CONF OHM;MEAS OHM,100-204,INTO TEM;VREAD TEM",
      65L, DABend);
/*
 Send(0,hp3852a,
```

```
      "REAL THM(24); USE 0; CONF DCV;MEAS DCV,100-219,INTO THM;VREAD THM",
      65L, DABend);
*/
       if (ibsta& ERR) {
       gpiberr("Send Setup Error");
       exit(1);
     }

            /* Set the SRQ */

     Send(0,hp3852a,"RQS ON; RQS FPS; SRQ",20L, DABend);
     if (ibsta & ERR) {
     gpiberr("Send SRQ Error");
     exit(1);
     }
      /* Wait for the HP3852A to assert SRQ,meaning it is
       * ready with the measurement*/

      WaitSRQ(0,&SRQasserted);
      if (!SRQasserted) {
      printf("SRQ is not asserted. The HP3852A is not ");
      printf("ready.\n");
      exit(1);
      }



 /* Read it Status byte. Be sure the the MAV
*(Messageavailable) bit is set.  */
    ReadStatusByte(0, hp3852a, &statusByte);
    if(ibsta & ERR) {
    gpiberr("ReadstatusByte Error");
    exit(1);
```

```
}

 if (!(statusByte & MAVbit)) {
 gpiberr("Improper status Byte");
 printf(" Status Byte = 0x%x\n",statusByte);
 exit(1);
 }

   /* Read the measurement */

 Receive(0, hp3852a, buffer ,375L, STOPend);
 if (ibsta & ERR){
 gpiberr("Receive Error");
 exit(1);
 }

 buffer[ibcnt] = '\0';
 printf("Reading :%s\n",buffer);
 for(j=0;j<25;j++){
   for(i=0;i<15;i++){
     data[j][i]=buffer[i+15*j];
 }
 }
 for(i=0;i<25;i++){
     ohm[i]=atof(data[i]);
     temp[i]=change(ohm[i])-273.15;
  }

 fprintf(outf0," %3d %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f\n",
 minute,temp[0],temp[1],temp[2],temp[3],temp[4],temp[5],temp[6],temp[7]);
 fprintf(outf1," %3d %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f\n",
 minute,temp[8],temp[9],temp[10],temp[11],temp[12],temp[13],temp[14],
 temp[15]);
```

```
  fprintf(outf2," %3d %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f\n
  minute,temp[16],temp[17],temp[18],temp[19],temp[20],temp[21],temp[22],
  temp[23],temp[24]);


  Send(0,hp3852a,"STA?",4L, DABend);
  minute=10;
  fclose(outf0);
  fclose(outf1);
  fclose(outf2);

while(1){
  if((outf0 = fopen("data/cooling4_0","a")) == NULL){
      printf("%s file not open\n");
      exit(1);
   }
  if((outf1 = fopen("data/cooling4_1","a")) == NULL){
      printf("%s file not open\n");
      exit(1);
   }
  if((outf2 = fopen("data/cooling4_2","a")) == NULL){
      printf("%s file not open\n");
      exit(1);
   }

  tloc = time( NULL );
  lt = localtime( & tloc );

  loop_hour = lt->tm_hour;
  loop_min = lt->tm_min;
  loop_sec = lt->tm_sec;

  if(loop_sec-ref_sec==0 && loop_min - ref_min ==inter) {
```

```
/* printf( "Loop Time %i:%i:%i\n" ,loop_hour,loop_min,loop_sec);
*/
      strftime( buf, 64, "%a %b %d %H:%M:%S" , lt);
      printf("loop time = %s\n",buf);

        ref_min = loop_min;
if(ref_min>=60-inter) ref_min = ref_min - 60;
loop++;

 Send(0,hp3852a,
      "REAL TEM(25); USE 0; CONF OHM;MEAS OHM,100-204,INTO TEM;VREAD TEM",
      65L, DABend);
/*
 Send(0,hp3852a,
      "REAL THM(24); USE 0; CONF DCV;MEAS DCV,100-219,INTO THM;VREAD THM",
      65L, DABend);
*/
       if (ibsta& ERR) {
       gpiberr("Send Setup Error");
       exit(1);
     }

            /* Set the SRQ */

     Send(0,hp3852a,"RQS ON; RQS FPS; SRQ",20L, DABend);
     if (ibsta & ERR) {
     gpiberr("Send SRQ Error");
     exit(1);
     }
      /* Wait for the HP3852A to assert SRQ,meaning it is
       * ready with the measurement*/

      WaitSRQ(0,&SRQasserted);
```

```
      if (!SRQasserted) {
      printf("SRQ is not asserted. The HP3852A is not ");
      printf("ready.\n");
      exit(1);
      }



 /* Read it Status byte. Be sure the the MAV
*(Messageavailable) bit is set.  */
    ReadStatusByte(0, hp3852a, &statusByte);
    if(ibsta & ERR) {
    gpiberr("ReadstatusByte Error");
    exit(1);
     }

      if (!(statusByte & MAVbit)) {
      gpiberr("Improper status Byte");
      printf(" Status Byte = 0x%x\n",statusByte);
      exit(1);
      }

        /* Read the measurement */

      Receive(0, hp3852a, buffer ,375L, STOPend);
      if (ibsta & ERR){
      gpiberr("Receive Error");
      exit(1);
      }

      buffer[ibcnt] = '\0';
      printf("Reading :%s\n",buffer);
      for(j=0;j<25;j++){
```

```
        for(i=0;i<15;i++){
          data[j][i]=buffer[i+15*j];
      }
      }
          printf("next \n");
      for(i=0;i<25;i++){
          ohm[i]=atof(data[i]);
          temp[i]=change(ohm[i])-273.15;
       }

      fprintf(outf0," %3d %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f\n",
      minute,temp[0],temp[1],temp[2],temp[3],temp[4],temp[5],temp[6],temp[7]);
      fprintf(outf1," %3d %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f\n",
      minute,temp[8],temp[9],temp[10],temp[11],temp[12],temp[13],temp[14],
      temp[15]);
      fprintf(outf2," %3d %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f %5.2f\n",
      minute,temp[16],temp[17],temp[18],temp[19],temp[20],temp[21],temp[22],
      temp[23],temp[24]);
      Send(0,hp3852a,"STA?",4L, DABend);
      minute = minute+10;
      }
   if(loop >= iCount) break;
  fclose(outf0);
  fclose(outf1);
  fclose(outf2);
    }

/* Call the ibonl function to disable the hardware and software.  */
  ibonl (0,0);

/*  fclose(outf0);
*  fclose(outf1);
*  fclose(outf2);
```

```
*/
 }
```

謝辞

本研究を行なうにあたって、多くの方々の御協力を得ることができました。この場をお借りて、心から感謝の意を表したいと思います。
多大な御講義をしていただいた野口先生、林井先生には大変感謝いたします。宮林先生には、実験に対する取り組み方、考え方を直接御指導して頂きました。本当にありがとうございました。
また、KEK カロリメータグループそして DAQ グループの皆様には適切な御指導、御助言を頂きました。大変感謝いたします。
そして、B ファクトリーという大規模な実験プロジェクトに参加する機会を与えて下さったことに対して先生方には本当に感謝いたします。

最後に、高エネルギー研究講座の皆様にも数多くの御助言や御協力を頂きまして、心よりお礼申し上げます。

参考文献

[1] A.B.Carter and A.I.Sanda,Phys.Rev.Lett.45(1980)952,Phys. Rev.D23(1981)1567.I.I.Bigi and A.I.Sanda,Nucl.Phys.B193(1981)85. I.Dunietz and J.l. Rosner,phys.Rev.Lett.65(1990)1404.

[2] J.H.Chiristenson,J.W.Cronin,V.L.Fitch and R.Turlay,Phys.Rev. Lett.1391964)138.

[3] KEK Proceeding,BELLE TDR,95-1

[4] M.Nakao,NSM version0.4,1996.12.27

[5] S.Uehara,Belle note186

[6] S.Uehara,DAQ Online Monitor for BELLE

[7] 岡村みちお,IEEE-488 （GPIB）とその応用

[8] BELLE Collaboration,BELLE Progress Report,1997

[9] 大嶋康伸,B ファクトリー電磁シャワーカロリメータのテストビームによる性能評価, 平成 6 年度修士学位論文