

修士学位論文
BESS-Polar 実験のための Flash ADC の開発

神戸大学大学院 自然科学研究科 物理学専攻
035S113N
竹内 一真

平成 17 年 2 月 10 日

概要

BESS(Balloon-borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) 実験は宇宙線反陽子の精密測定を目的として、神戸大学、東京大学、宇宙航空研究開発機構、NASA ゴダードスペースフライトセンタ、メリーランド大学で進められてきた国際共同実験である。1993年の第一回のフライト以降宇宙線反陽子のエネルギースペクトルの測定などさまざまな成果をあげてきた。今回 BESS 実験の経験を基に低エネルギー反陽子の測定を主な目的とした BESS-Polar 実験を南極において実施した。この実験では測定器の改良と地磁気カットオフの低い南極において測定を行うことにより、BESS 実験での低エネルギー測定限界 180MeV を 100MeV まで引き下げ、さらに 10 日に及ぶ長期間測定により統計量の増加を見込んでいる。本論文では私が開発した FlashADC システムに必要された性能、機能、各部の詳細、DAQ との関係について述べる。また南極でのフライトの様子を 5 章にまとめている。

目次

1	BESS 実験	4
1.1	宇宙起源反陽子の探索	4
1.2	Solar Modulation の測定	4
1.3	宇宙線基礎データの測定	5
1.4	反ヘリウム探索	7
1.5	BESS-Polar 計画	7
2	BESS-Polar 実験装置	9
2.1	測定原理	9
2.2	TOF	11
2.3	Aerogel Cherenkov Counter(ACC)	13
2.4	Middle-TOF	13
2.5	超伝導ソレノイドコイル	14
2.6	JET/IDC	14
3	データ収集システム	16
3.1	読み出しモジュール	16
3.1.1	TDC & Discriminator モジュール	16
3.1.2	QDC	18
3.1.3	Trigger	19
3.1.4	MU2	21
3.1.5	FlashADC	21
3.2	DAQ システム	21
3.2.1	DAQ システム構成	22
4	FlashADC の仕様	27
4.1	FlashADC システムの構成	29
4.2	FlashADC ボードの構成	29
4.2.1	FlashADC 部	31
4.2.2	データ圧縮部	31
4.2.3	バッファ部	32
4.2.4	マスタースレイブ通信 (Master-Slave Connection)	34
4.2.5	USB	34
4.2.6	コマンド系	36
4.3	実際の性能	37
5	南極フライト	41
6	まとめ	46
6.1	今後の展開	46
7	謝辞	47

1 BESS 実験

BESS(Balloon-Borne Experiment with a Superconducting Spectrometer) 実験は加速器実験で培われた素粒子測定技術を気球搭載測定器に応用する事で、それまでの気球実験と比べ圧倒的な立体角と精度を持つ気球搭載型超伝導スペクトロメータを開発した。この気球搭載型超伝導スペクトロメータを用いて、宇宙線反陽子、陽子、ヘリウムと言った各種宇宙線の精密測定、反ヘリウムの探索などを行っている。

1993 年に行われた最初のフライトでは初めて「質量による粒子の同定」という確実な方法で宇宙線反陽子を 4 イベント確認した ([1] [2])。その後改良を加えながら低エネルギー宇宙線反陽子の測定を主な目標とし 7 回のフライトを行い、これまでに全体で 2000 イベント以上の宇宙線反陽子現象を確認している。

現在勧め進められている BESS-Polar 実験 ([3]) では BESS 実験での経験をもとに BESS 実験の 10 倍以上の長時間観測と、さらに低エネルギーの反陽子を測定するために従来の BESS 測定器よりも低物質、軽量、低消費電力の測定器を開発し、2004 年 12 月南極において最初の長期間のフライトに成功している。

1.1 宇宙起源反陽子の探索

BESS 実験のこれまでの成果でもっとも重要なものとして宇宙線反陽子フラックスの精密測定があげられる。地球に降り注ぐ宇宙線はほとんどが陽子やヘリウム核だが、微量に反陽子が含まれている。この反陽子の多くは高エネルギー一次宇宙線陽子と星間物質との衝突によって生成された二次起源反陽子だと考えられるが、この仮定では 1GeV 以下の反陽子の生成確率は運動学的に非常に低い。いくつかある宇宙線伝播モデルが予測する反陽子のエネルギースペクトラムは 2GeV 付近にピークを持ち、低エネルギーになるにつれて急激に減少している。BESS 実験でこれまで測定したデータは同じく 2GeV 付近にピークがあり、測定した反陽子の大半は二次起源であると言える。しかし 1995+1997 年のデータの 1GeV 以下の領域で反陽子のフラックスが理論予測値よりやや平坦に見える。実際にフラックス (図 1) が平坦であれば宇宙線伝播モデルに修正を加えるか、あるいは別の起源の反陽子があると考えられる必要がある。別起源の反陽子として考えられているものは原始ブラックホールの蒸発や、超対称性粒子の対消滅である。しかしさらに低エネルギー領域の統計精度を上げなければ確実な事は分からない。BESS-Polar 実験では長時間観測で統計精度を向上させると共に、測定器の改良でより低エネルギーまで観測領域を拡大することで反陽子の起源について明確にする事ができると期待される。

1.2 Solar Modulation の測定

BESS 実験では太陽活動の極小期から極大期にわたる陽子反陽子の経年変化についても観測している。一般的に太陽系に入射した宇宙線は太陽風と共にひろがる太陽磁場の影響を受ける。この効果は太陽変調 (Solar Modulation) とよばれ、低エネルギーの宇宙線ほど影響を受けやすい。太陽活動極小期では太陽変調の効果が弱くなり、大気頂上で観測されるフラックスにあたる影響が弱くなる。よって一次起源宇宙線の探索によっては重要な時期となる。BESS 実験では長年にわたる測定により太陽活動の活発化 (図 3) による陽子・反陽子のスペクトラム減少を測定する事に成功している。さらに太陽活動極大期には太陽内部での磁極が反転するため、太陽変調により影響をうける粒子の電荷も変化する。反陽子/陽子比の経年変化を観測すれば極大期に急激な変化が見られる

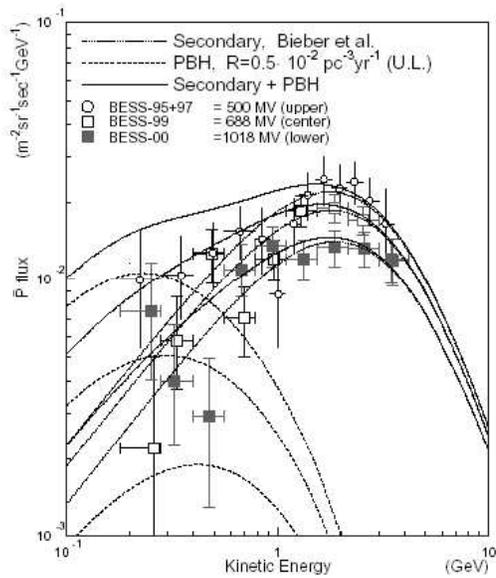


図 1: BESS 実験で得られた宇宙線反陽子フラックス

と予測され、太陽活動極小期の 1997 年と 1999 年の測定では反陽子/陽子比 (図 2) は予測とほぼ一致し、極大期にあたる 2000 年のデータも反陽子/陽子比の急激な上昇を示しており、予測とおりの結果を得ている。この様に BESS 実験では太陽活動の変化による宇宙線流束の変化をとらえており、これらのデータは太陽変動を知る上でも有効であると期待されている。

1.3 宇宙線基礎データの測定

BESS 測定器は汎用の宇宙線測定器であるため一次宇宙線の主成分である陽子、ヘリウムならびにミューオンなどの絶対フラックスの測定を地上や山頂でも行ってきた。これらのデータは宇宙線の基礎データであり、さまざまな宇宙線現象の研究において不可欠なものである。Super Kamiokande で行われていたニュートリノ振動を観測する実験においても、大気ニュートリノの起源になる一次宇宙線の流束についてはさまざまな実験が結果を出してはいるがこれまでのデータには 50GeV 以下で 20% の不一致があり大気ニュートリノのフラックス計算に不定性を残していた。BESS 実験では 1998 年に行った測定より 100GeV 付近までの陽子スペクトラムを詳細に決定し、大気ニュートリノの親となる一次宇宙線のフラックスが明確になった。また 2002 年に行われた BESS-TeV 実験ではこれまで精度のいいデータが得られていなかった高エネルギーである 540GeV までの陽子フラックスを測定している。さらに地上、山頂だけでなく、フライトの上昇時、下降時での宇宙線観測を行うことで、大気中での相互作用を正確に予測するために必要である、大気各高度における精密な大気ミューオンデータも測定している。

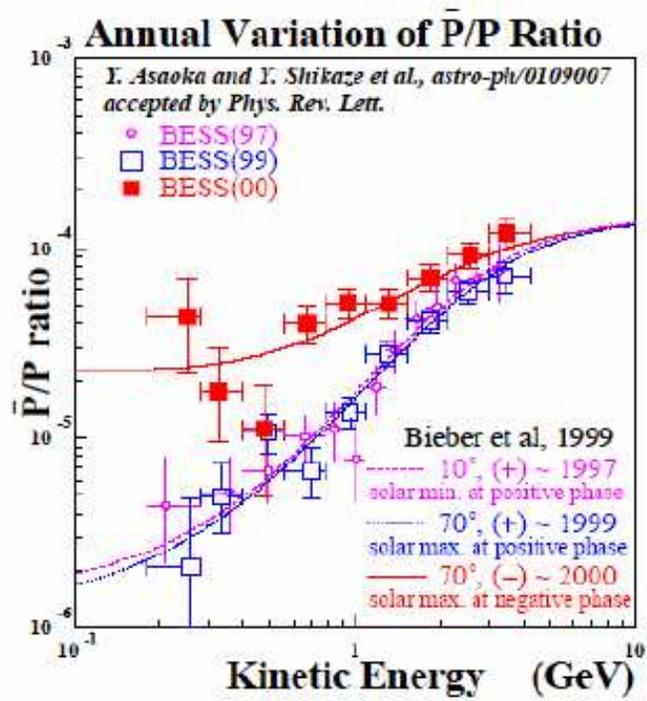


図 2: \bar{P}/P の経年変化

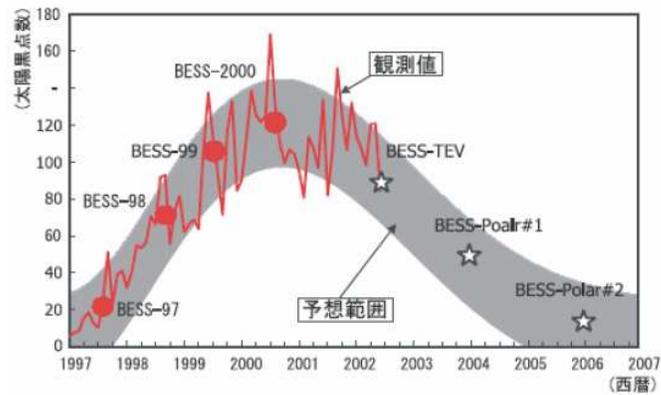


図 3: 太陽活動の変化

1.4 反ヘリウム探索

我々の世界では物質と反物質の量は圧倒的に物質が優勢になっている。しかし宇宙に反物質だけからできた領域 (反物質世界) が存在し宇宙線の一部にその領域からの反物質が混在している可能性がある。宇宙線に含まれる反物質がすべて反物質世界が起源であるとは限らないが、反ヘリウムについては宇宙線と星間物質もしくは大気との衝突によって生成される可能性が非常に低いため、その測定が直接的な反物質世界の証明になるとされている。BESS 実験では一次宇宙線に含まれるヘリウムに対する反ヘリウムの存在比は 7×10^{-7} が上限値であるとしている (図 4)。これは近傍での反物質世界の存在に否定的な証拠でさらに高精度な測定を行う事により、より広い領域での反物質世界の探査を行う事ができる。

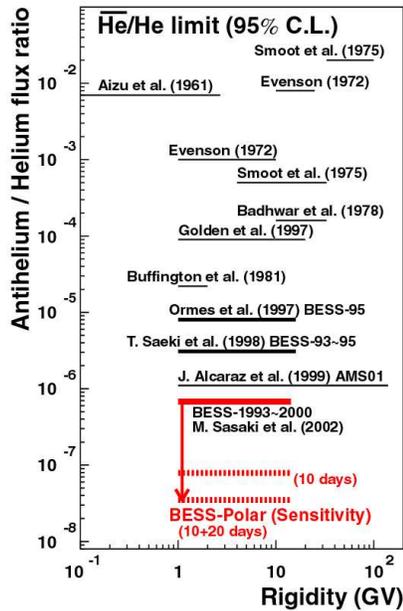


図 4: $\bar{H}e/He$

1.5 BESS-Polar 計画

BESS-Polar 計画では NASA のもつ LDB(Long Duration Ballooning) を用いて測定器を南極周回気流にのせる。これにより地磁気カットオフリジディティ (図 5) の小さい磁極周辺での長期間の高精度の宇宙線反粒子の探査を行う。南極周回気流は 10 日から 14 日で南極周辺を一周する。10 日間の観測をおこなうだけでもいままでの BESS 実験より統計精度をあげられる。低エネルギー領域を精度よく測定することによりいままで不確定だった 100MeV 近傍のフラックスを明確にする事ができる。(図 6) これにより原始ブラックホールの蒸発、ニュートラリーノの対消滅などの生成原理を理解する事ができると期待される。図 6 は BESS-Polar 実験を 20 日実施した場合の予測されるフラックスである。また統計量の増加により 5×10^{-8} までの反ヘリウム探査を行える。

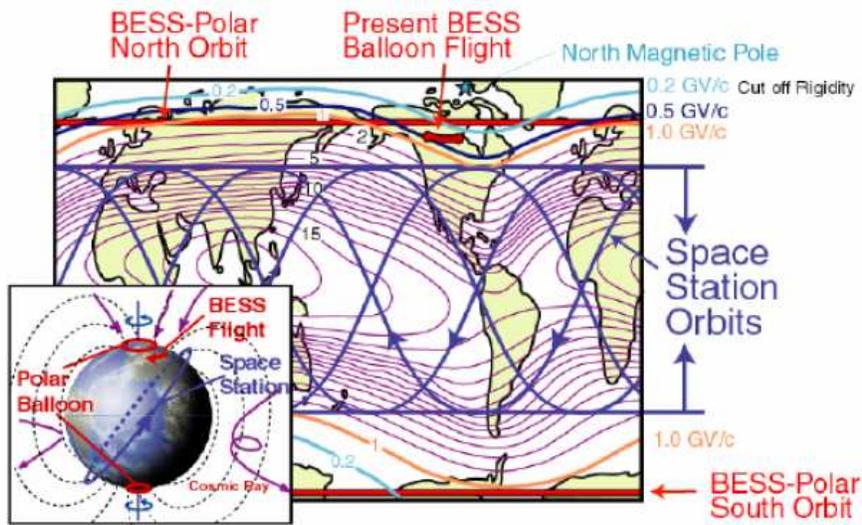


図 5: 地磁気カットオフリジディティ

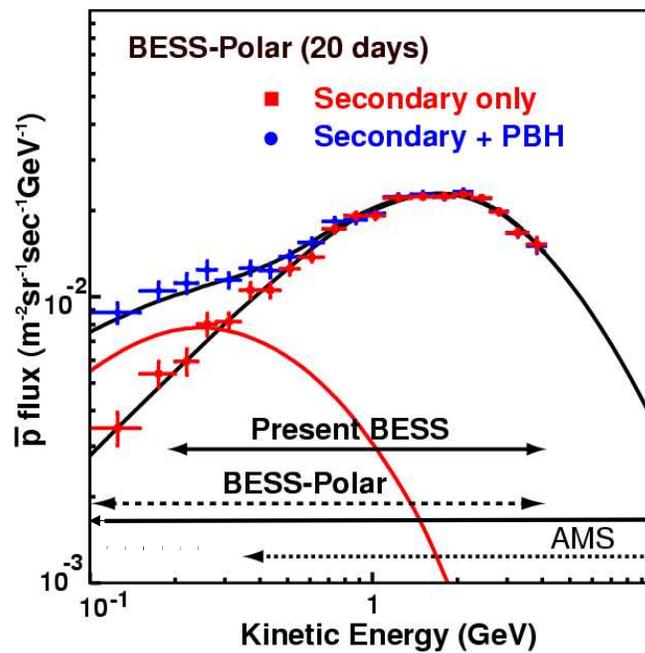


図 6: BESS-Polar 実験で期待されているフラックス

2 BESS-Polar 実験装置

BESS-Polar 実験は従来の BESS 実験の技術をもとに極地域でのフライトを行う。そのための重量削減と低エネルギー反陽子測定のための測定器の物質質量削減が必要となった。また長期間に及ぶフライトを目指すため、電力供給の方法を従来の一次電池を使ったものから太陽電池パネルを用いた発電システム ([8] [10]) に変えることで重量的要求を満たすことになった。

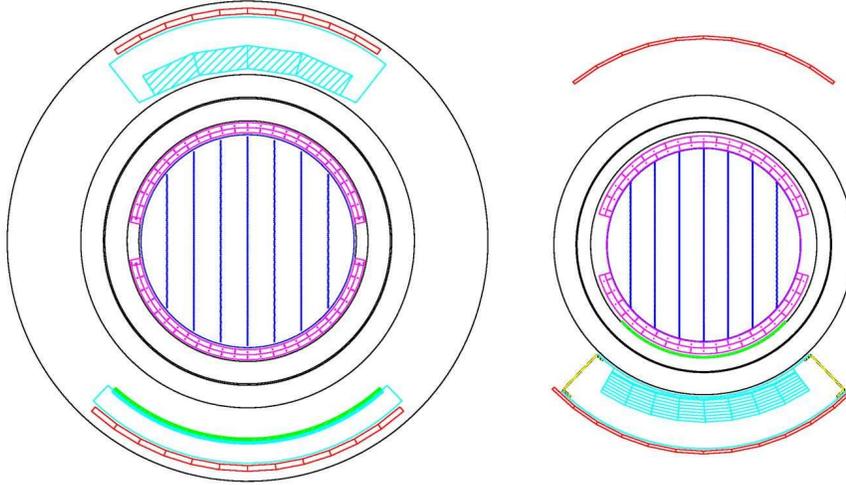


図 7: BESS 測定器と BESS-Polar 測定器 左が BESS 測定器 (2000)、右が BESS-Polar 測定器

BESS-Polar 実験で測定器が大きく変わった部分はまず重量、物質質量の観点から外側の圧力容器をなくし、JET/IDC の下部に Middle-TOF を設けた点である。圧力容器をなくした事により TOF と Aerogel Cherenkov Counter、一部の読み出しデバイスが圧力、温度変動の激しい環境に置かれる事になった。また Middle-TOF を設ける事により Middle-TOF でもコインシデンスをとることができるので下部の TOF に到達できずにマグネット内部で崩壊する粒子もトリガすることができるようになる。この効果により表 1 のようにトリガできる粒子が少なくとも通過する物質質量を抑える事ができる。

測定器全体としては軽量化、省電力を目指し最終的には表 2 のようになった。

2.1 測定原理

BESS-Polar 測定器では BESS 測定器と同様に粒子の質量による粒子の識別を行っている。粒子の速度 β と運動量 p との間には関係式

$$\beta = pc/(p^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$$

	BESS 実験	BESS-Polar 実験
Vessel	$0.7g/cm^2$	—
TOF	2.1	1.0
Chrenkov	1.6	—
Magnet	4.7	2.0
JET/IDC	1.6	1.0
mTOF	—	0.5
Magnet	4.7	—
TOF	2.1	—
合計	$17.5g/cm^2$	$4.5g/cm^2$

表 1: トリガする事のできる粒子が少なくとも通過する物質質量

	BESS 実験 (2000)	BESS-Polar 実験
アクセプタンス	$0.3m^2sr$	$0.3m^2sr$
フライト時間	1day	10day
中心磁場強度	1.0 T	0.8 T
液体ヘリウムの寿命	5day	11.5day
測定器の全重量	2400kg	1900kg
電源供給	リチウム一次電池	太陽電池パネル
消費電力	900W	420W
トリガに必要な最低通過物質質量	$17.5g/cm^2$	$4.5g/cm^2$
\bar{P} 測定可能なエネルギー範囲	0.18-4.2GeV	0.1-4.2GeV
測定可能な最大リジディティ	200GeV	200GeV

表 2: BESS 実験と BESS-Polar 実験での測定器のパラメータ

が成り立つ事から粒子の質量 m は粒子の回転半径 r と運動量の関係式とリジディティ R の定義をもちいて

$$r = p/ZeB$$

$$R = pc/Ze$$

$$\beta = ZeBrc/(Z^2e^2B^2r^2c^2 + m^2c^4)^{1/2}$$

$$m^2 = \frac{Z^2e^2B^2r^2}{c^2} \left(\frac{1}{\beta^2} - 1 \right)$$

$$m^2 = Z^2e^2R^2 \left(\frac{1}{\beta^2} - 1 \right)$$

となる。ここで Z は電荷の大きさである。BESS 測定器では TOF によって速度 β がもとなり、TOF と JET チェンバーの dE/dx より電荷 Ze を求め質量を得る事ができる。

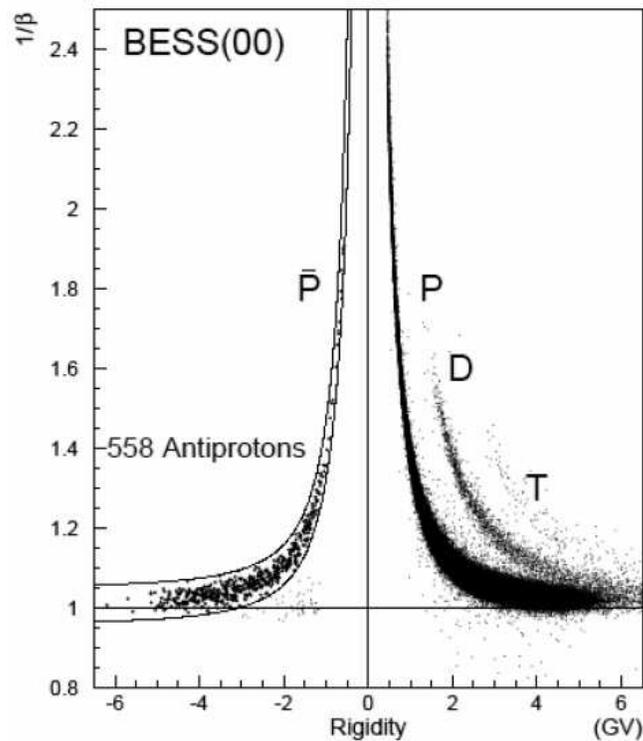


図 8: β^{-1} vs リジディティ

2.2 TOF

TOF は BESS-Polar 測定器のもっとも外側に設置される。BESS-Polar 実験では物質削減のため厚みを従来の 20mm から 10mm にし、950mm × 95.2mm × 10mm のプラスチックシンチレータを測定器の上部に 10 本と下部に 12 本設置して、それぞれのシンチレータの両端からライトガイドを通して PMT で読みだしている。TOF カウンタは粒子の速度 (β) とエネルギー損失を測定する。2003 年に KEK で行われたビームテストでその性能が確かめられている。

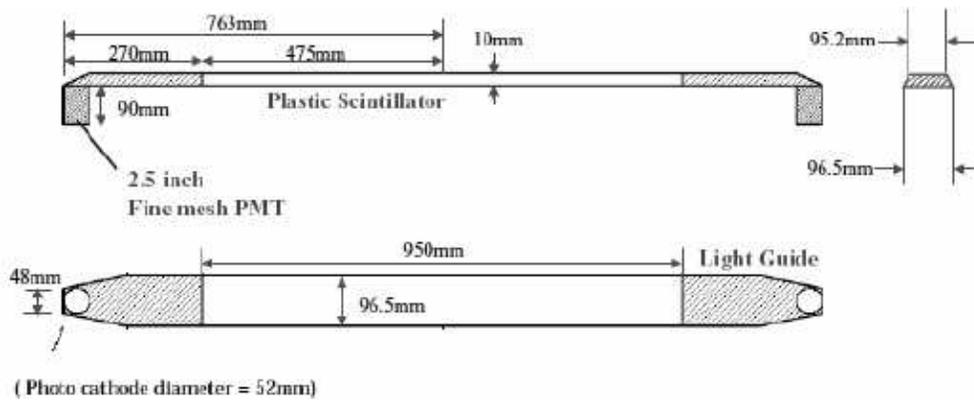


図 9: TOF

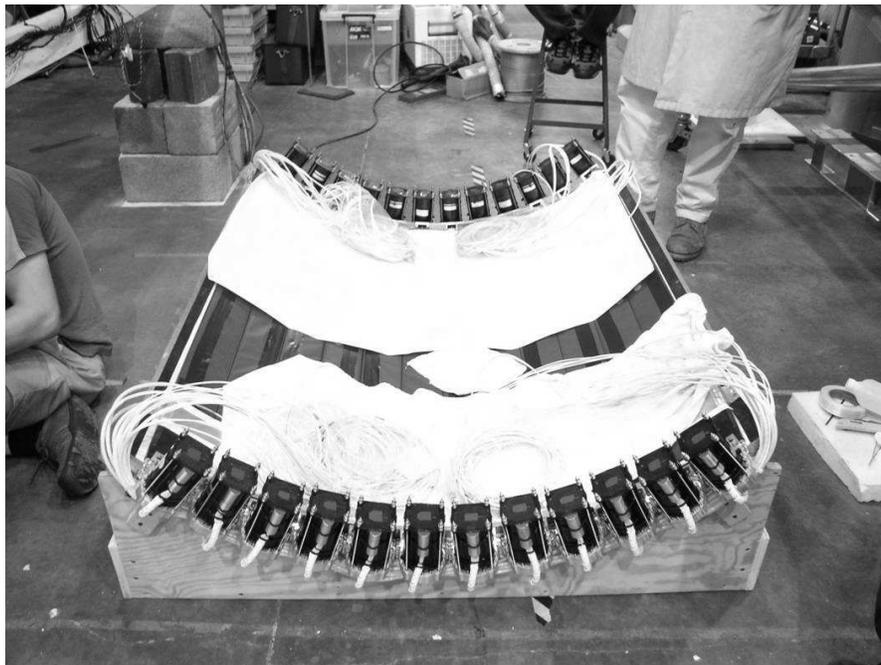


図 10: TOF 測定器

2.3 Aerogel Cherenkov Counter(ACC)

下部の TOF とマグネットの間に設けられた、スレッシュホールド型のシリカエアロジェルチェレンコフカウンタである。100mm × 100mm × 11mm のシリカエアロジェルを 7 枚重ねたものを横に 8 個、円筒方向に 9 個並べたものである。用いたシリカエアロジェルは屈折率 1.020 のもので、チェレンコフ光を発するか否かは粒子の速度によって決まるため、同じ運動量の粒子でも質量の違いによって変化する。この性質を用いて反陽子測定の際、反陽子のチェレンコフ光を発する閾値が 4.7GeV/c、バックグラウンドになるミュー粒子の閾値が 0.522GeV/c なので 0.522GeV/c から 4.7GeV/c のミュー粒子を識別する事ができる。BESS-Polar 実験に用いる ACC は 46 本のファインメッシュPMT を用いて読み出される。2003 年に KEK で行われたビームテストで性能が確かめられている。

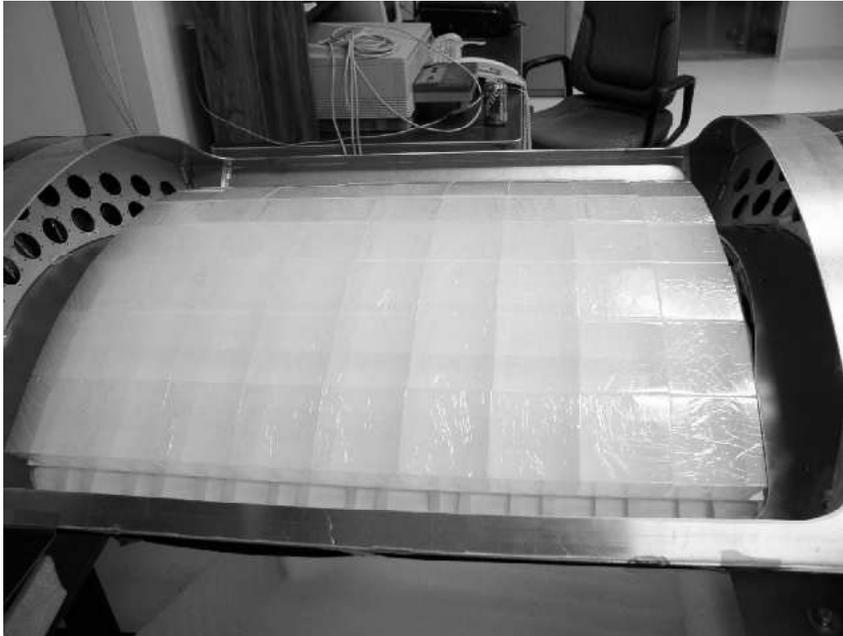


図 11: Aerogel Cherenkov Counter

2.4 Middle-TOF

BESS-Polar 実験から導入された測定器であり、JET/IDC の下部、マグネット内面に配置される、薄型シンチレーションカウンタである。1000mm × 10mm × 5mm のプラスチックシンチレータを 8 本並べ、それぞれのシンチレータから 50cm のファイバーを介して PMT で読み出す。Middle-TOF(以下 mTOF) に用いる PMT は 8ch マルチアノード PMT を使用し、8 本のシンチレータを 1 本の PMT で読み出す。このプラスチックシンチレータと PMT のセットを 8 セットならべたものが mTOF である。mTOF は低エネルギーの粒子が JET/IDC 下部のマグネットを貫通できなくても、その直前でトリガを出す事ができるので従来の BESS 実験よりさらに低エネルギーの粒子を測定する事ができる ([7])。2003 年に KEK で行われたビームテストで性能が確かめられている。



図 12: Middle-TOF 測定器

2.5 超伝導ソレノイドコイル

BESS-Polar 測定器に搭載された超伝導ソレノイドコイルは新たに開発されたもので、BESS-Polar 実験の主な目的である低エネルギー宇宙線の観測のために物質量を減らし、打ち上げの衝撃に耐えるだけの強度を持たせたものである。このため微小金属添加による高強度アルミニウム安定化超伝導線を用い、BESS 実験で用いられたコイルの半分程度の物質量におさえ、かつ強度を保っている。新しい超伝導ソレノイドコイルの中心磁場はこれまでの BESS 測定器の 1Tesla であったのに対し、BESS-Polar 測定器では 0.8Tesla となった ([5] [6])。このコイルは 2003 年秋に米国ニューメキシコ州フォートサムナにおいて行われたテクニカルフライトで性能が確認されている。

2.6 JET/IDC

BESS-Polar 測定器の中心に設置された、粒子飛跡検出器である。JET/IDC は粒子判別に必要な粒子の運動量を求めるため、その粒子のリジディティを測定する。まず JET は JET 型ドリフトチェンバーの略称で長さ 1060mm、直径 766mm の円筒状のシリンダに直径 $120\mu\text{m}$ のセンスワイヤ 256 本と直径 $200\mu\text{m}$ ポテンシャルワイヤ 292 本、直径 $200\mu\text{m}$ のドリフトワイヤ 465 本が張られている。印加電圧はセンスワイヤ 0V、ポテンシャルワイヤ-2.85kV、ドリフトワイヤ-10.30kV となっている。JET ではセンスワイヤを交互に左右に 0.3mm ずらして張ることによって、センスワイヤの左右のどちらを荷電粒子が通過したかを判別できる様にしている。また IDC は Inner Drift Chamber の略で、JET の上下に沿うように 2 重に配置されている。それぞれの厚みは 10mm で直径 $120\mu\text{m}$ の 2 本のポテンシャルワイヤと直径 $20\mu\text{m}$ の 1 本のセンスワイヤが張られている。IDC の特徴はバーニアパッドにある。一本のセンスワイヤの上下には 2 つのバーニアパッドが設けてある。バーニアパッドは場所によって大きさが変化しており、電荷がドリフトしてセンスワイヤ周辺で増幅されると電気力線の変化により逆の電荷がバーニアパッドに発生する。バーニアパッドに発

生ずる電荷の大きさは増幅された電荷周辺のパッドの大きさに比例している。よって各パッドの電荷の大きさを比較することにより Z 方向 (シリンダの円筒方向) の位置情報を得ることができる。(図 14 は BESS-98 以前のもの) である。

従来の BESS 実験では使われていたガスは $\text{CO}_2(90\%) + \text{Ar}(10\%)$ だったが、今回 BESS-Polar 実験では長期測定をめざすため、チェンバ内のガスを上空でフローする必要がある。しかしガスの混合プロセスを上空で行うのは重量的に難しいため、ガスの混合プロセスを無くし JET、IDC ともに純 CO_2 を使う。 $r\phi$ 方向の位置分解能は JET、IDC ともに $150\mu\text{m}$ である ([12])。

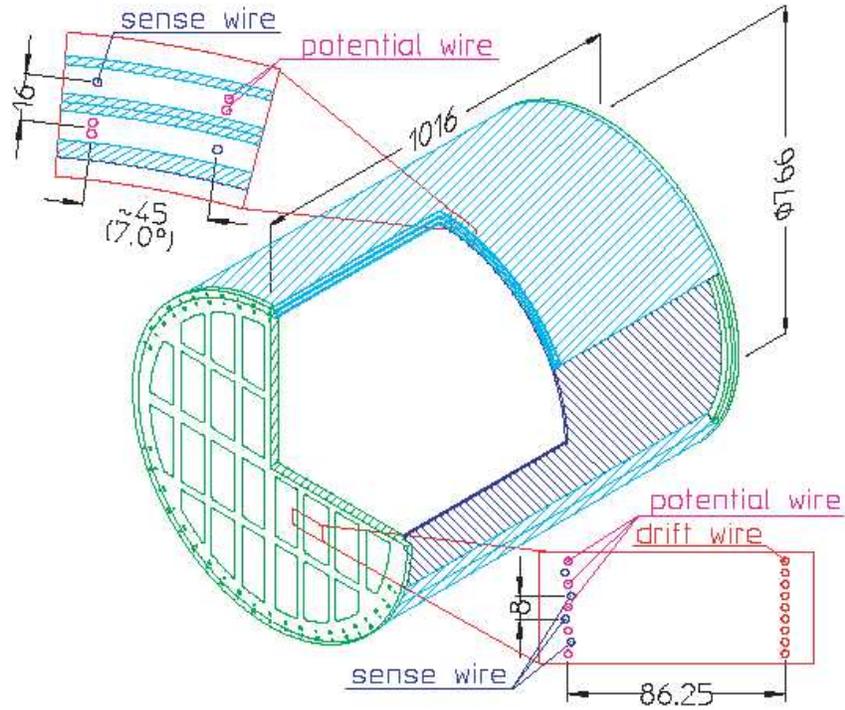


図 13: JET/IDC 測定器

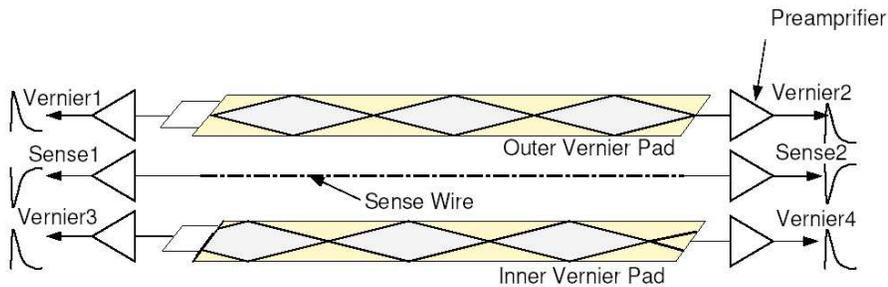


図 14: バーニアパッド

3 データ収集システム

BESS-Polar 実験では従来の BESS 実験と違い長時間のフライトを極地方で行う。よってデータ収集システムは低電力設計、長期安定性、メンテナンス性を満たす必要がある。以下にそれぞれを詳しく説明する。

○低電力設計

従来の BESS 実験の様にリチウム 1 次電池を搭載していたが、気球の重量制限により 10 日間の長時間フライトが可能ただけの電池を搭載することはできないので BESS-Polar 実験では太陽電池パネルを用いた電力供給システムを使用する。しかし搭載できる太陽電池パネルの面積は制限があるので安定して供給できる電力は実験装置全体で 600W 程度と見積もられている。この電力制限のため今まで BESS 実験で用いられてきたデータ収集システムの消費電力では電力が不足してしまう。そこで今回のデータ収集システムは低電力指向での構築を必要条件として課せられる事になった。

○長期安定性

従来の BESS 実験ではフライトは 1 日の内に終了していたが、今回のフライトは 10 日にも及ぶ、また人工衛星を介した通信でオペレーションを行うため地上からは限られた時間、限られた通信帯域でのオペレーションしかできない。よって読み出し回路を含むシステム全体ができる限り人の手を介さず安定して作動し続けなければならない。

○メンテナンス性

極地方でのフライトでは限られた人数と時間でフライトの準備をする必要がある。その際モジュールの交換が必要になることも考えられるのでそれぞれのモジュールをなるべく独立しており、短時間で交換できる必要がある。

データ容量が 3.6TB と従来の 30 倍に増やしたのはトリガ方式の変更 (詳細は本章 CP306、イベ

	BESS 実験 (2001 年)	BESS-Polar 実験
消費電力	900W	420W
データ容量	120GB	3.6TB
フライト時間	1Day	10Days

表 3: BESS 実験と BESS-Polar 実験の比較

ントビルド節で示す) と FlashADC(詳細は 4 章に示す) からの読み出しが増えたためである。

3.1 読み出しモジュール

イベントの読み出しは、TOF からの信号を TDC & Discriminator モジュールが捉え、Discriminator の閾値を越えたものについて Discriminator Signal を Trigger モジュールに出す。Trigger モジュールは上下 TOF 又は上 middle-TOF のコインシデンスがとれた場合に他の QDC モジュール、FlashADC に Trigger Signal とイベントナンバを送る。Trigger Signal を受けた QDC モジュールと FlashADC はそれぞれイベントの情報を読み出し、バケット化して DAQ へと転送する。

3.1.1 TDC & Discriminator モジュール

TDC&Discriminator モジュールは TOF、Middle-TOF につけられた PMT の信号を TDC(Time Digital Converter) によって時間情報を数値化する。さらにこのモジュールは Discriminator の機能

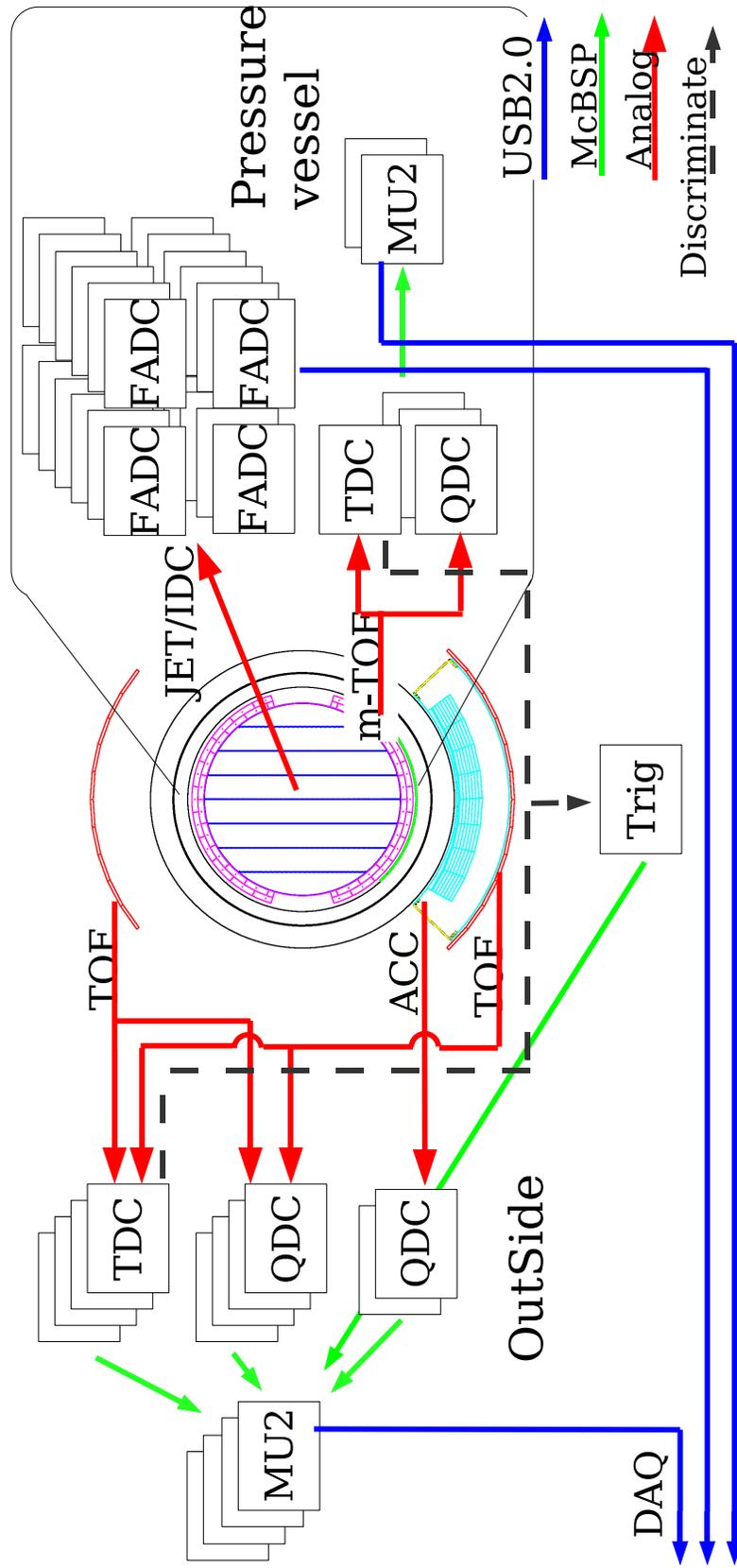


図 15: 読み出しモジュール相関図

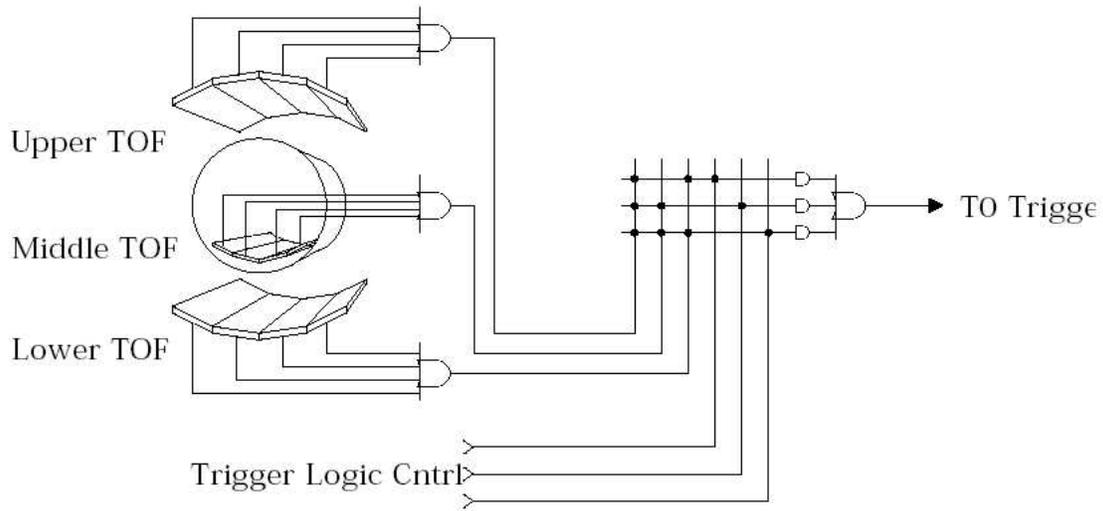


図 16: Trigger コインシデンスパターン説明図

も搭載しており、閾値を越えたシグナルがあれば Trigger モジュールに Discriminator Signal が送られる。Trigger モジュールは Discriminator Signal を受けると各モジュールに Trigger Signal とイベントナンバーを送る。TDC&Discriminator は得られた時間情報にイベントナンバーを付加しパケット化して DAQ へと送る。DAQ への通信は、Texas Instruments 社製の DSP(Digital Signal Processor) が標準で搭載しているシリアル通信ポート McBSP(Multi channel Buffer Serial Port, 3.1.4 節で詳しく説明する) を用いて一旦 MU2(McBSP to USB2.0, 3.1.4 節で詳しく説明する) へと送られる。逆に DAQ からのコマンド通信 (閾値設定、TDC のサンプリングレートの変更などのコマンドを送信する通信) は一度 MU2 をとおる McBSP の通信に変換され TDC&Discriminator モジュールの DSP に送られる。TDC&Discriminator モジュール Trigger モジュール間は McBSP により通信している。

読み出しチャンネル数	12
通信方式	McBSP
TDC の Timing Resokution	25ps
TDC の Full Scale	100ns
TDC の出力データ	16Bit
TDC の消費電力	0.8W/ch

表 4: TDC&Discriminator のパラメータ

3.1.2 QDC

QDC モジュールは TOF、mTOF、ACC に接続された PMT からのシグナルの電荷量をデジタル化する。TOF の PMT からのシグナルは dE/dx を求め粒子の同定に用いる。ACC からのシグナルは反陽子測定バックグラウンドである、電子やミュオン粒子を判別するために使われる。QDC

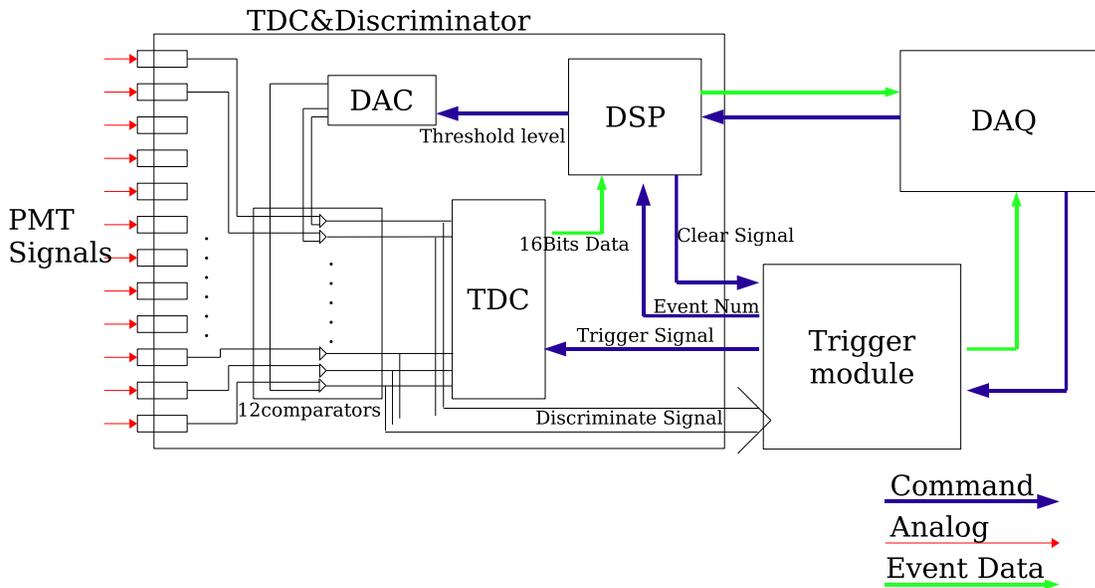


図 17: TDC&Discriminator モジュール概要図

モジュールは TDC&Discriminator モジュール同様に DSP を搭載しており、通信には McBSP を用いている。QDC ゲートの設定などは MU2 を介して McBSP で通信を行っている。

読み出しチャンネル数	24
通信方式	McBSP
QDC 出力データ	16Bit
QDC の消費電力	0.8W/ch

表 5: QDC のパラメータ

3.1.3 Trigger

Trigger モジュールは TDC&Discriminator モジュールからの信号で各モジュールにトリガ信号を送り、その後各モジュールにイベントナンバーを送信する。Trigger モジュールは他に external トリガを生成する機能を備えている。Trigger モジュールも QDC、TDC&Discriminator モジュール、同様 DSP を搭載しており QDC、TDC&Discriminator モジュールとは McBSP をつかって通信しており、DAQ との通信は MU2 を介して McBSP を用いている。Trigger モジュールは DAQ からのコマンドによってコインシデンスパターンの変更や、スケーラー情報を生かして PMT の状態確認ができる。

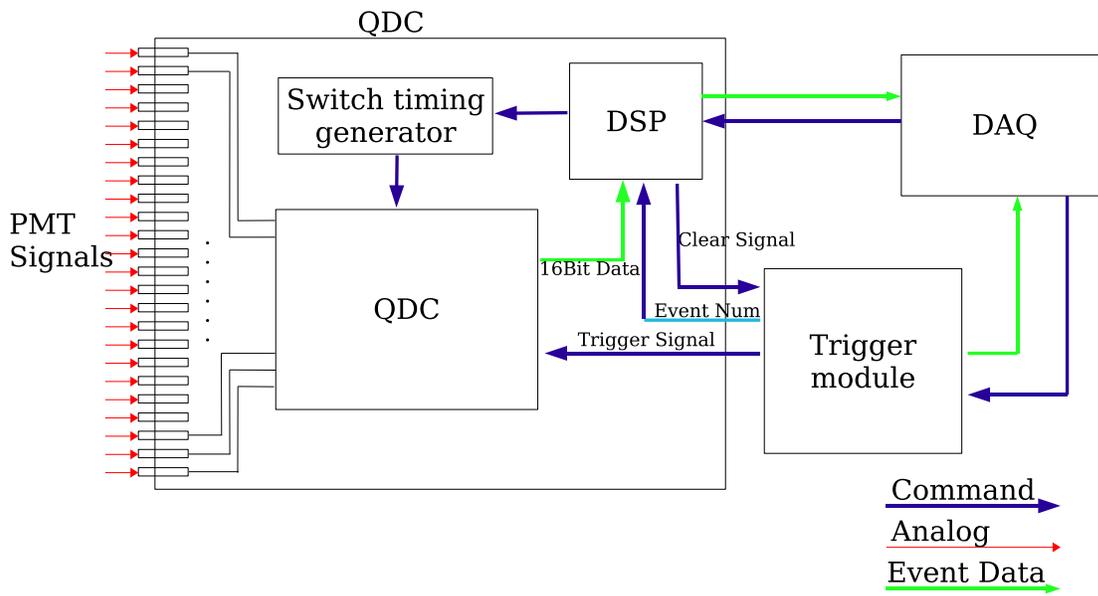


図 18: QDC モジュール概要図

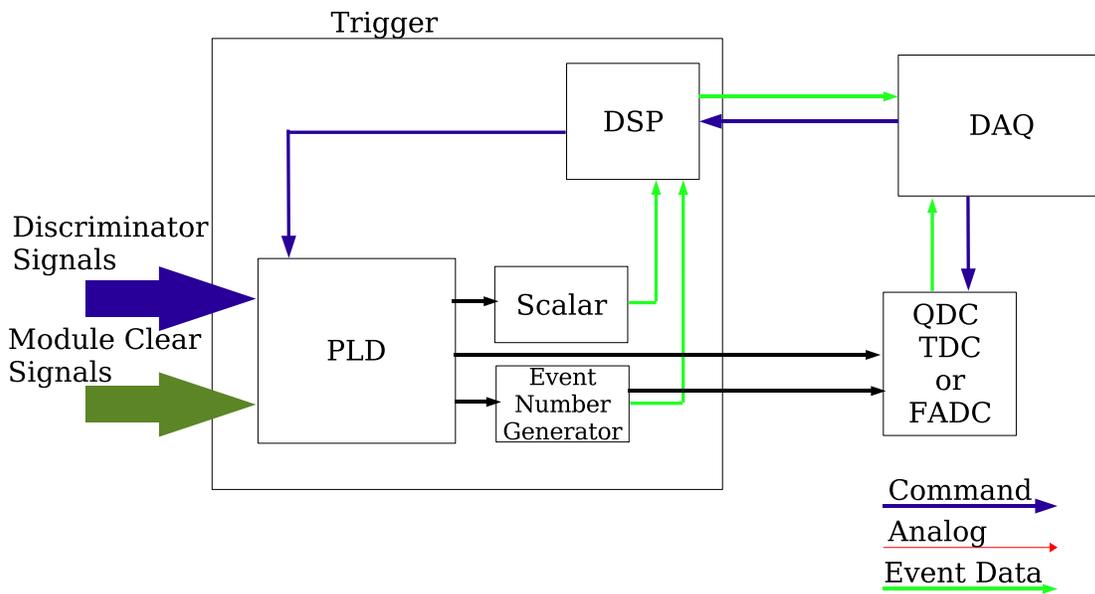


図 19: Trigger モジュール概要図

3.1.4 MU2

MU2(McBSP to USB2.0)([9])は McBSP の通信を USB2.0 に変換するためのもので DSP と ALTERA 社製の FPGA(ACEX1K30QC208) を搭載し、1 台の MU2 に 3 つのモジュール (QDC, TDC&Discriminator) を接続できる。これは 1 つの DSP チップが 3 つの通信ポートをもっているためである。MU2 効率よく DAQ へパケットを送信できるようにバッファリングを行いながら、通信を行っている。また DAQ からのコマンドも MU2 を介してモジュールへと送られる。表 6 に各モジュールの必要数を示す。表の内 Middle-TOF については Pressure vessel 内にあるため Pressure Vessel 内に MU2 を

測定器	モジュール名	必要チャンネル数	モジュール数	MU2 必要数
Trigger	Trigger	-	1	
TOF	TDC	44	4	
	QDC(13,18)	88	4	
ACC	QDC	46	2	外部で 4 台
M-TOF	TDC	8	1	
	QDC	64	3	内部で 2 台

表 6: 検出器と読み出しモジュール数

2 台搭載し、その他のモジュールについては外部に MU2 を 4 台設置した。

3.1.5 FlashADC

FlashADC は飛跡検出器 (JET/IDC) からその信号を読み出すためのデバイスである。FlashADC で得られた情報を元に粒子の飛跡をもとめる ([4] [11])。FlashADC については 4 章で詳しく説明する。

3.2 DAQ システム

BESS-Polar 実験では BESS 実験で行っていた Transputer を使った並列処理を行わず、各モジュールがパケットを生成しパケットデータをメイン CPU でイベントビルディング処理することにより、イベント情報を統括する。ここで問題になるのはデータ処理の速度である。データ処理にかかった時間はそのままデットタイムとなってしまうので、これを最短にすることが重要である。

また BESS-Polar 実験では 10 日間の上空での情報を蓄積できるだけデータ領域を必要とする。2kHz のイベントレートで 1 イベントにつき 2kB のデータが書き込まれると 1 日で必要なデータ容量は 345.6GB/Day にもなる。しかし搭載できる HDD の台数は空間的制限と重量的制限により 12 台程度である。この場合 300GB のハードディスクドライブ (以下 HDD) を搭載した場合でも 10 日間 (10.4=3600GB/345.6GB/Day) 程度しかイベントを蓄積できないことになる。気球の南極周回に必要な時間は 10 日程度と見積もられているのでこれではファイルシステムのジャーナリングなどによって占められる容量を考慮すると HDD の容量は十分ではないと考えられるため、イベントビルドの際にノイズと考えられる信号を蓄積しない、オンラインリジェクションを採用することになった。

DAQ システムは HDD や高速処理をする電子回路が多いためマグネットの影響を受けにくくする必要があるのである。このため鉄製の圧力容器をもちいて磁場の影響を防ぐとともに HDD を使用するためには空気が必要なため内部に空気を残した。

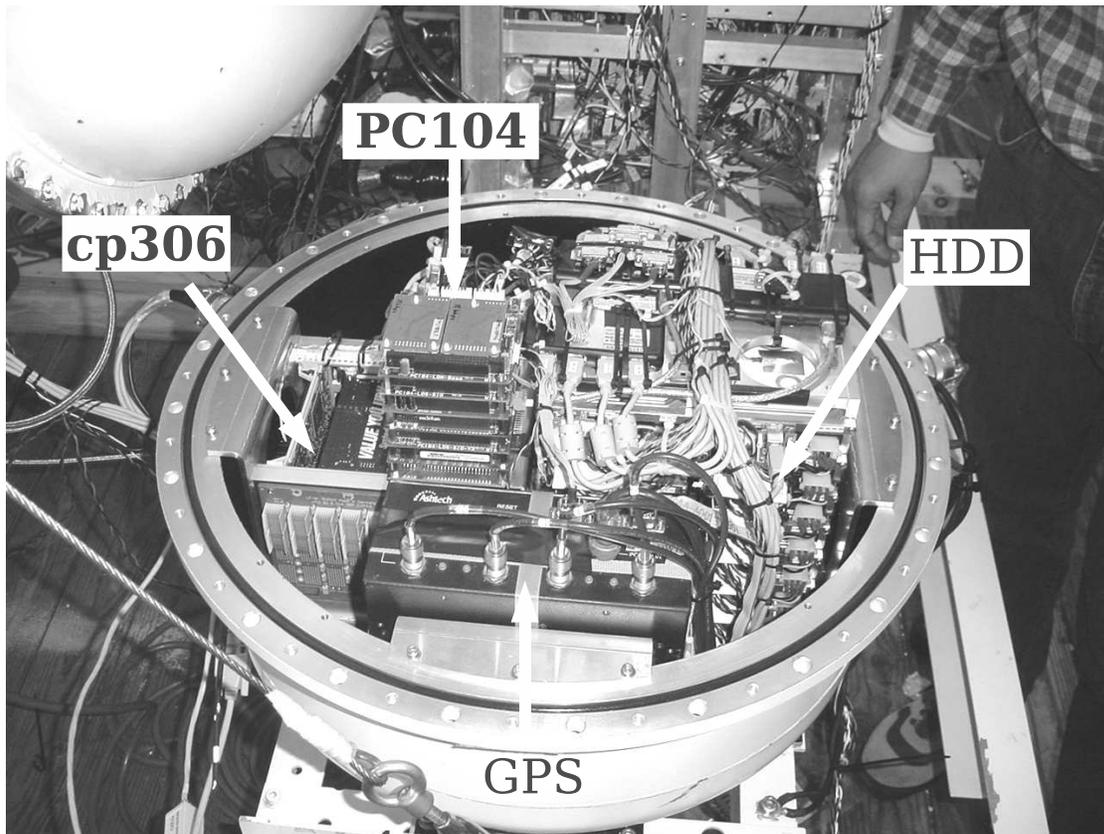


図 20: DAQ システムの入った圧力容器

3.2.1 DAQ システム構成

DAQ システムの構成は BESS 実験から大きく変わり、2 台の CPU とデータストレージとしての 12 台の HDD によって構成されている。1 台目は BESS 実験でも使われて来た cPCI 規格の CPU (以下 cp306) で、おもにイベントデータの処理や各読み出しモジュールへのコマンド送信、得られたデータのストレージ等を行う。もう 1 台は PC104 規格で作られた CPU (以下 PC104) で地上との通信、モニタシステムの統括、HV モジュールなどのコントロールを行う。2 台の PC 間は Ethernet でつながれており、2 台とも linux をベースにした OS を搭載している。それぞれの構成と機能の詳細を以下に示す。また DAQ の全体図は図 22 に示す。

CP306

構成 CompactPCI 規格に基づいて組まれた PC である。cPCI 規格は通常の PC に搭載されている PCI バスとおなじバスを使って、コネクタの形状をかえ、耐衝撃性を高めたもので、多くの組み込み装置に使用されている。cPCI は用途に適した拡張を行える。今回は DAQ のイベント処理のための CPU ボードと DAQ のインターフェイスに多く用いている USB2.0 の 5ch インターフェイスカードを 2 枚搭載した。CPU ボードは PC104 との通信のための Ethernet ポートを内蔵し、CPU が低電力で高速なもの、さらに消費電力の大きいファンを搭載していないものを選ぶことにし Kontron 社製の CP306 を用いる事にした。CP306 は低電圧仕様 Pentium M processor 1.1GHz を搭載している。さらに Intel 社の CPU はアーキテクチャとして i386 系を採用しているので linux ベースで開発を進める際にクロスコンパイルが必要無く簡単、かつ短時間で開発環境を整える事ができる。

イベントビルド CP306 の主な処理内容は各読み出しモジュールから USB を介して送られて来たイベント packets を収集し、イベントビルディングを行い、HDD にストレージする事である。従来の BESS 実験では TOF からのトリガをデータベース化しておき低エネルギーの粒子を多くとり高エネルギーの粒子はあまりとらないようにトラックトリガ方式をつかっていた。BESS-Polar 実験では CPU の技術の向上により、全てのトリガーでデータを取り込み、その後の処理によってノイズデータを除くオンラインリジェクションが可能になったため、この方式を使わずにオンラインリジェクション方式を採用した。オンラインリジェクションによって行われている処理は従来解析時に行っていたイベントデータの前処理を上空で行い、データストレージの容量を有効に使うためと、イベントビルドを行う際に最もボトルネックとなる HDD への書き込み量を減らす事によるデットタイムの削減のために考えられた。イベントビルディングプログラムは地上のコンソールからのコマンド入力により制御されている。イベントビルディングプログラムは各読み出しモジュールに対してコマンドを送信する作業も行っている。またイベントデータとは別にモニタリングデータを PC104 から受け取り、HDD に記録しており、あとで時系列にしたがって測定器全体がどういう状況になって行ったのかを知る事ができる。

PC104

構成 PC104はISAバスの規格を使ってつくられたスタック型の組み込み用PCの規格である。他のボードをスタックして行くことによってさまざまな機能を持たせることができる。CPU部分には低電圧作動National Semiconductor社製のprocessor(GX1)を搭載したKontron社製MOPSLcdGX1を用いた。これはEthernet2ポートもち、かつGX1がintel社製CPU同様のアーキテクチャi386系を使っており開発が容易である事と、さらにCHIP-DISKを搭載しているためOSの実装をストレージなしにでき、耐衝撃性にも優れているため採用する事にした。CPUの速度は300MHzとそれほど高速ではないが、コミュニケーション、モニタリング、電源制御の処理には十分である。この他に実験ではNSBFが搭載する地上と交信するための通信ユニットSIP(Support Instrumentation Package)と接続するためのRS-232Cボード、視認できる範囲で通信(Line Of Sight)への接続のためのLOS用ボード2枚、測定器の状態を確認するためのモニタリングやPMTのHVをコントロールする、HVコントロールユニットにコマンドを送るためのLON(Local Operating Network)ボードをスタックした。

コミュニケーション BESS-Polar実験は気球が打ち上げ場所からかなりの距離はなれてしまうので、地上からの直接通信だけ対応しきれない、そこで今回はTDRSS(Tracking and Data Relay Satellite System)とIridiumも併用する事になった(図21)。全てのコミュニケーションは気球上

通信帯域	帯域	通信可能条件
LOS	83.3kbps	視認可能である事
TDRSS	6kbps	TDRSS衛星の電波が受信可能である事 TDRSS衛星の帯域を予約する必要
Iridium	256byte/15min	Iridium衛星の電波が受信可能である事

表 7: 通信帯域

のSIPに送られ、PC104へと送られて来る。しかしSIPはBESSとは独立した電位をグランドレベルと定めているため、単純な交信は難しく、フォトカプラによって完全にグランドレベルが切り離された状態でPC104と通信を行っている。このためPC104に搭載されたRS-232Cインターフェイスはすべてフォトカプリングしてある。

モニタリング・電源制御 モニタリングやHVコントロールモジュールのコントロールはNeuronチップを用いたLONを使っている。LONは従来のBESS実験でも使われていた技術でNeuronチップをのせたノード間をチェーン状に接続する。各ノードに特定のプログラムを焼き込んでおけばモニターであれば入力電圧をデジタル化してPC104に搭載したノードへと送り、コントロール用のノードであればPC104搭載のノードから特定の命令を読み込んで出力電圧を設定することができる。BESS-Polar実験では圧力計、温度計、傾斜計、紫外線計、照度計などのモニタリングと、各HV電源に対して電圧の設定や、そこから得られるHV電源の電圧、電流のモニタリングを行っていた。

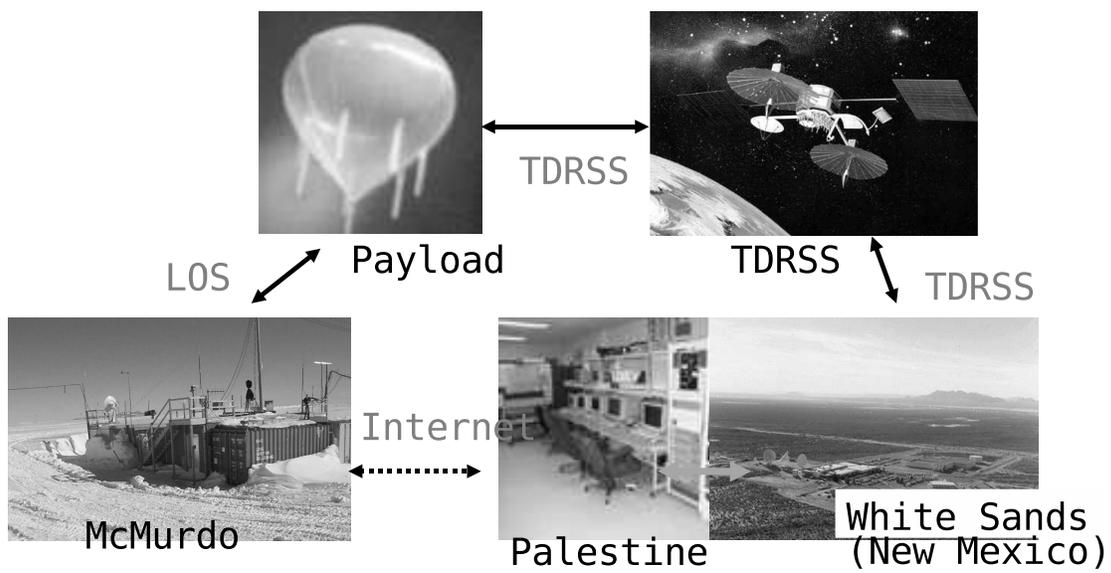


図 21: 上空でのコミュニケーション図

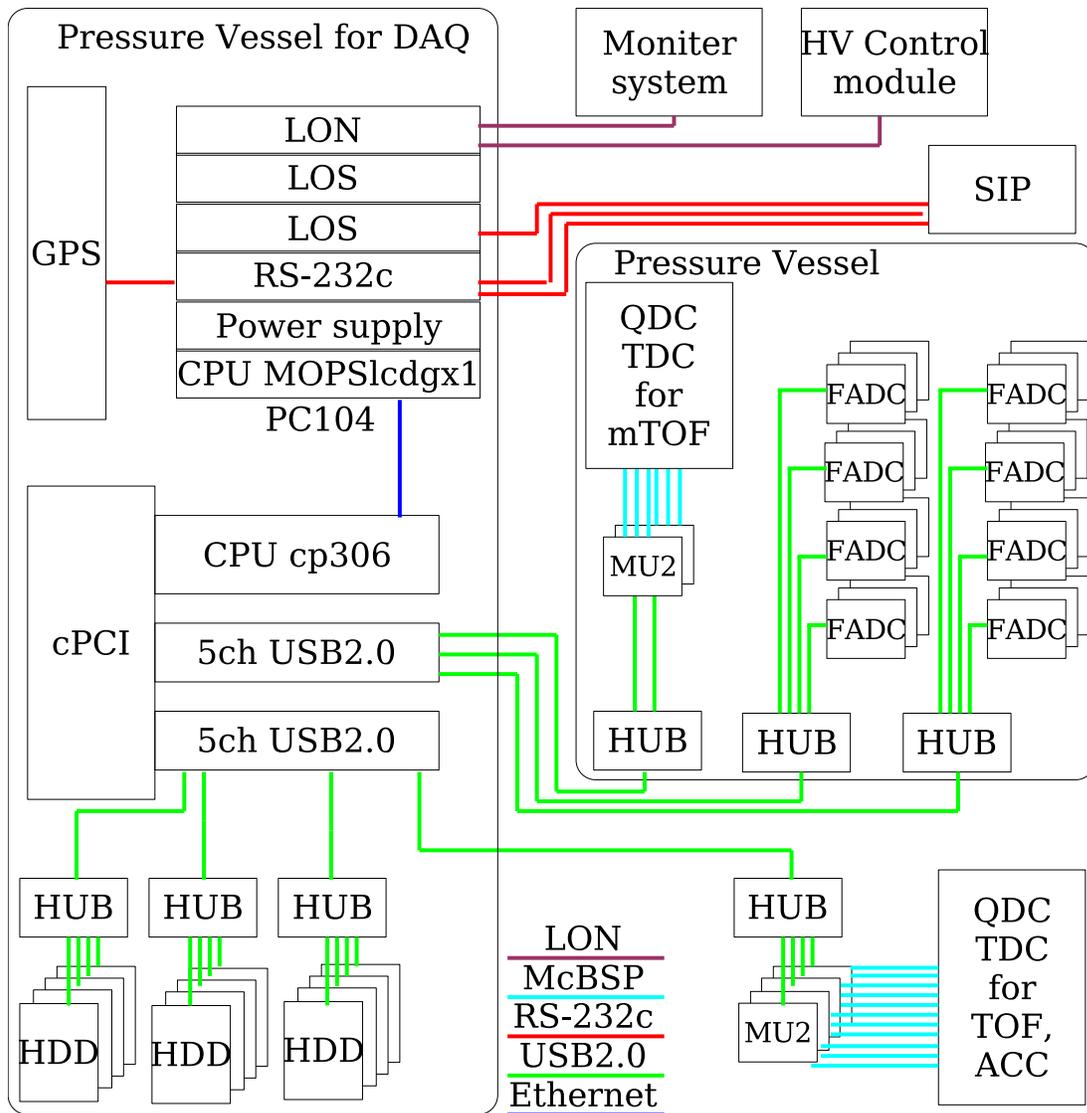


図 22: DAQ システムの全体図

4 FlashADC の仕様

JET チェンバーでは荷電粒子が JET チェンバー内 (純 CO_2) を通過する際にトラックの近傍の CO_2 を電離させる。電離した CO_2 イオンと電子はチェンバー内の電場によってそれぞれドリフトワイヤとセンスワイヤ側へ移動する。このときの移動速度は電場による加速度、 CO_2 分子との衝突によりある一定の速度 (ドリフト速度) へと収束していく。センスワイヤ周辺の電場が約 10^6V/m 以上であれば加速された電子が CO_2 分子に衝突した際に分子を電離させ、新たな電子を作り出す。この反応は連続して起こるため電子なだれを発生させセンスワイヤ近傍で自由電子が増える (ガス増幅)。増幅された電子がワイヤ近傍を移動する事で、センスワイヤに微弱な電流が流れる。この電荷の流れを電位に変換し FlashADC で読み出している。一般的な信号を図 23 に示す。

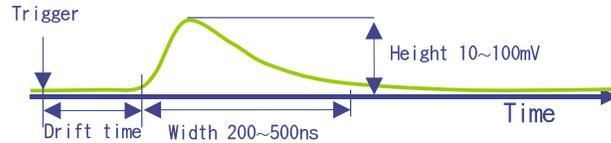


図 23: 一般的なチェンバーからの信号

JET チェンバーからの信号を用いて粒子のトラックを再構成するには、まずトリガーから信号を得られるまでの時間から、入射した荷電粒子が CO_2 を電離させた位置を計算する。JET チェンバーはセンスワイヤの左右どちら側から電子がドリフトして来たかを判別するためにセンスワイヤを交互にずらして設けてある。これにより各ワイヤの CO_2 を電離させた位置を計算すれば左右のどちら側にトラックがあるか判定できる。さらにセンスワイヤからの電流はワイヤの両側から読み出される。読み出される信号の電荷の大きさはワイヤ近傍で移動した電子の総電荷量を、電子からの距離が最短となるワイヤ上の点からワイヤの両端までの距離に反比例して分割されたものになる (電荷分割)。同一のセンスワイヤから読み出された電荷量の比をとれば Z 軸方向の位置を特定できる。

IDC では Z 軸方向の位置を知るために電荷分割だけでなく、バーニアパット (図 14) からの信号の大きさを使って Z 軸方向の位置を検出している。

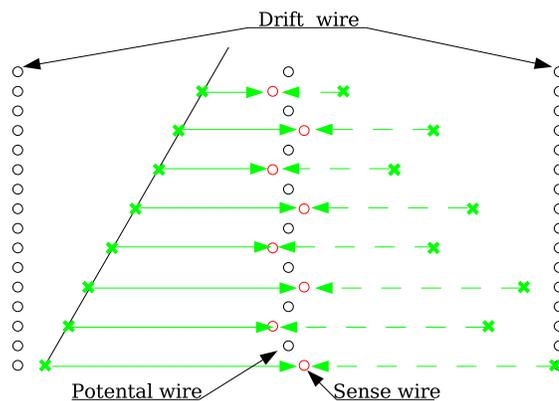


図 24: トラックとドリフト

BESS-Polar 実験では従来の BESS 実験同様マルチトラックをそれぞれ判別できるようにするため FlashADC を用いる。FlashADC に求められる仕様は JET/IDC を精度よく読み出しトラックデータの精度を向上させる事と従来の FlashADC では消費電力が多すぎるため低電力設計にする事である。

まずトラッキングの精度を上げるために読み出しワイヤ数を 2 倍近く増やした。他にも Z 軸方向の精度を上げるため従来 8Bit に変換していたところを 10Bit 変換するようし $r\phi$ 方向の位置精度を上げるため、サンプリング周波数を向上させた。

読み出しチャンネルの増加によりリジディティの精度は

$$\sigma \propto \epsilon \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

(ϵ は各読み出し点での読み出し精度) に従うので 1.3 倍程精度がよくなる。またチェンバーによる各読み出し点での位置精度は

$$\epsilon = \sqrt{\sigma_{\text{sampling}}^2 + \sigma_{\text{velocity}}^2 \dots}$$

できまり、チェンバーのシグナルのタイミングは一様分布となるのでサンプリングによる誤差は

$$\sigma_{\text{sampling}} = \frac{t_{\text{sampling}}}{\sqrt{12}}$$

となる。BESS-Polar 実験で用いる JET/IDC では $150\mu\text{m}$ の位置精度を目指しており、 σ_{sampling} を十分小さくするために、FlashADC のサンプリングはドリフト速度を $7\mu\text{m/ns}$ として

$$\frac{150\mu\text{m}}{7\mu\text{m/ns}} \times \sqrt{12} = 74.2\text{ns}$$

$$\frac{1}{74.2\text{ns}} = 13\text{MHz}$$

となる。BESS 実験では 28MHz に設定していたが BESS-Polar 実験では 32MHz に設定した。これにより σ_{sampling} は大体 $63.2\mu\text{m}$ になっている。これに伴いサンプリング数の変更が必要になる。チェンバーのフルドリフト時間は、ドリフト速度を $0.7\text{cm}/\mu\text{s}$ として

$$T_{\text{drift}} \simeq \frac{L_{\text{gap}}}{0.7\text{cm}/\mu\text{sec}}$$

と考えると、大体 $13\mu\text{sec}$ 程かかる。よって 32MHz サンプリングでは 416 回以上のサンプリングが必要になる。そこでフライトでは 512 回のサンプリングを行う用に設定した。

BESS-Polar 実験で FlashADC はチャンネル数の増加と変換 Bit の増加によって多くの情報をすばやく DAQ に送る必要があった。そこで従来の BESS で行われてきたシグナル圧縮と大きい帯域をもつ USB2.0 を通信規格に使うことで、通信の高速化を行うことにした。また省電力を実現するために低電力チップを中心にアナログ部分を組みなおし、プログラム可能な集積回路を使うことでデジタル処理による電力の消費も抑えることにした。

	BESS 実験 (2001 年)	BESS-Polar 実験
FADC の消費電力	300W	150W
読み出しチャンネル数	336ch	568ch
DAQ との通信	Transputer link	USB2.0(480MByte/s)
サンプリングレート	28.5MHz	32MHz

表 8: 従来の FlashADC との比較

4.1 FlashADC システムの構成

FlashADC システムの構成は 1 つのクレートに 24 枚の FlashADC ボードを搭載し、Trigger Signal をうけたクロックジェネレータがサンプリングクロックとイベントナンバーを各 FlashADC ボードに送りそれぞれのボードが 24 チャンネルの ADC を行う。これによりシステム全体で 568 チャンネルのデータの読み出しを行うことができる。その上 USB コントローラの消費電力を抑えるために 24 枚の FlashADC ボードは 3 枚を 1 組にし内一枚をマスターボード、その他 2 枚をスレーブボードとし、マスターボードには、DAQ システムへのデータ転送を行うための USB コントローラボードを載せている。3 枚のボード間のデータのやりとりはクレートの後部のバスをつかって 6Mbps のシリアル通信によって行う。またマスターとスレーブのボードではハードウェア的に差はなく FPGA の内容の変更によってマスターとしてもスレーブとしても使用することができる。このことによりシステムのメンテナンス性を向上させている。

データの読み出し以外にも各チャンネルの FlashADC 部のオフセット調節や、デバッグのための RAW モード(無圧縮)を備えたり、上空での故障に備えチャンネル単位、さらにはボード単位での読み出しを行わないモードなど、多くの機能を必要とするためデータ収集のためのバス以外にコマンド通信用のバスも持たせている。コマンド通信の処理はデータ処理とは無関係に行われる様になっている。コマンド通信については後の節で説明する。

4.2 FlashADC ボードの構成

一枚の FlashADC ボードには 2 つの FPGA チップと 24 チャンネル分のアナログ回路、24 個の FlashADC チップを搭載し、マスターボードにはデータボードとして USB コントローラを搭載している。

FPGA とは Field Programable Gate Array の略で容易にプログラミングのできる LSI である。プログラムにより内部にロジック回路を形成し高速なデジタル信号処理ができる。2 つの FPGA はデータ圧縮と通信の統括、バッファリングを行う。FPGA チップは米国 Altera 社 ([?]) 製 APEX(EP20K400EBC652-3) と APEX(EP20K200EQC208-2X) を使っている。これらのチップは機能によって呼称しており APEX(EP20K400EBC652-3) を Compress、APEX(EP20K200EQC208-2X) を Mother と呼ぶ。Compress は FlashADC 部からの信号をデータ圧縮し、さらに FlashADC 部のオフセット調節などのコントロールもしている。Mother は Compress からのデータをバッファリングし、さらにマスタースレーブ通信をおこないデータパケットを統括し、USB コントローラに送っている。Mother は他にも Compress に対し、各チャンネルのデータ圧縮の際の閾値の設定や FlashADC 部のオフセット調節の指示、各チャンネルのモード設定や不調チャンネルにはデータを出さないように指示をだすなど、コマンド系の処理もしている。全体の概要図を図 25 に示す。

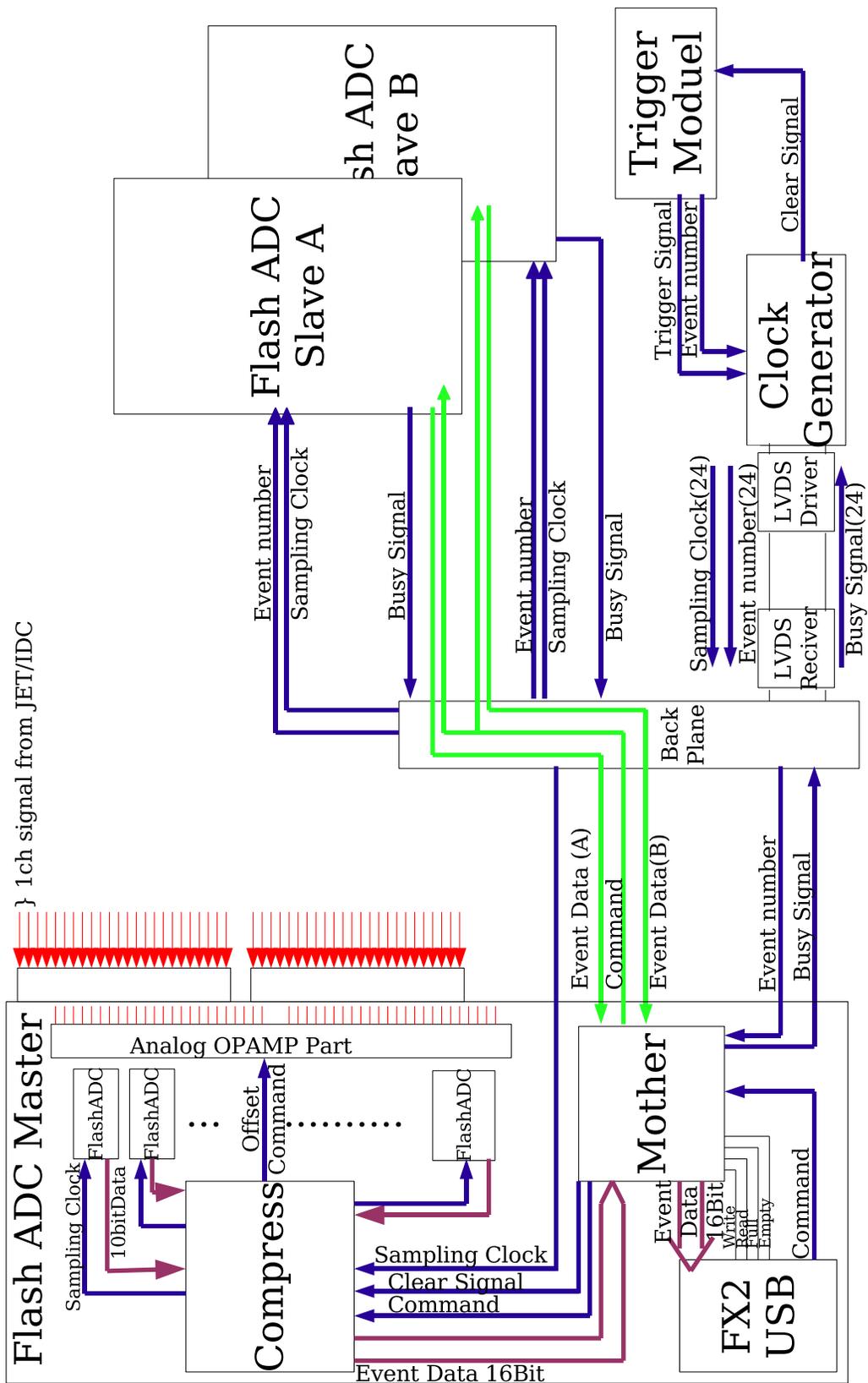


图 25: FlashADC 概念图

4.2.1 FlashADC 部

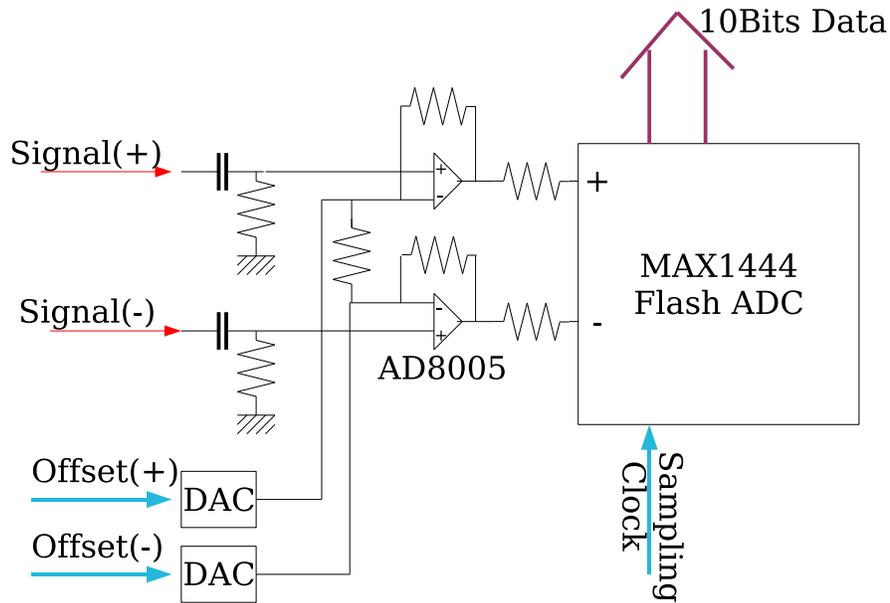


図 26: 1 チャンネル分の回路の概要図

JET/IDC から出たシグナル信号はプリアンプを通り差動信号 (電位を信号として送る際に Common-mode Noise に強くするため、信号線を+側-側の 2 本のラインにし、2 本のラインの電位の差が本来のシグナルになるようにした信号) となり FlashADC へと入る。このアナログ信号をフィルタと OP アンプを使って増幅し FlashADC チップへと送っている。フィルタの部分ではフィルタをかけて帯域を 18MHz に設定し、OP アンプ部には消費電力の小さい OP アンプチップ Analog Devices 社製 ([17]) の AD8005 をゲインが 10 になるように用いている。OP アンプの消費電力は 5V、400 μ A である。デジタル変換のための FlashADC チップは米国 MAXIM 社 ([16]) の MAX1444 を使用している。このチップは最大 40MHz のサンプリングが可能で差動信号を 10Bit のデジタル情報にする。サンプリングクロックはクロックジェネレータがつくり出したクロックを使っており、各チャンネルでのタイミングのずれは十分小さくなっている。また 1 カウントの信号の大きさはリファレンシャル電圧により設定できる。FlashADC チップの信号の許容信号入力電位の範囲内 ($\pm 1V$) でオペレーションさせるため OP アンプ回路の一部にオフセット調節回路を設けている。オフセットは DAC を使って設定することができ、Compress からコントロールしている。MAX1444 は Vcc3.0V、15mA で作動する。1 チャンネルのデジタル化には差動信号の+側-側を増幅するために OP アンプを 2 つと Flash ADC チップ MAX1444 を組み合わせた。(図 26 参照)

4.2.2 データ圧縮部

FlashADC で得られたデジタル情報は 1 イベントにつき 1 枚の FlashADC で 120kbit になり、3 枚で 1 つの USB コントローラをもっているので 1 秒間では 720Mbps にもなる。

$$24\text{ch} \times 500\text{count} \times 10\text{bit} = 120\text{kbit/event} \quad (1)$$

$$120\text{kbit/event} \times 3\text{boards} \times \text{Eventrate}(2\text{kHz}) = 720\text{Mbps} > 480\text{Mbps(USB2.0)} \quad (2)$$

このままでは USB2.0 の帯域では不足するので、波形データを測定後の解析に影響を与えないように圧縮する。圧縮データとして記録されるのは以下のとおりである。(図 27 を参考)

データ種類	図 27 中の名称	データの大きさ
圧縮データである事を示す Header	—	4Bit
TriggerSignal が入ってから設定された閾値を越えるまでの時間	Time	10Bit
閾値を越えて最初の ADC データ	1st Data	10Bit
閾値を越えてから 2 番目の ADC データ	2nd Data	10Bit
閾値を越えている間の時間	Width	10Bit
閾値を越えている間の ADC データの合計	Charge	16Bit
オーバーフローなどを示す Flags	—	4Bit
合計	—	64Bit

表 9: 1 パルスのデータ

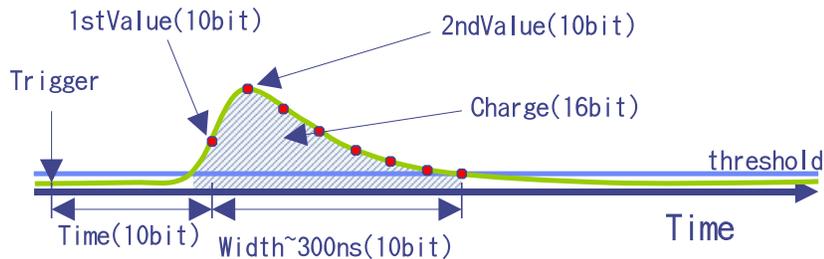


図 27:

処理は Compress 内部で各チャンネルごとに行われる。処理には 3 段のパイプラインを用いており、データの始めは WidthCut の閾値より、連続して閾値を越えた ADC データが多くなるとデータを記録しない仕組みになっている。またデータの終りは ADC データが 1 つでも閾値を下回るとそれまでの閾値を越えているデータを 1 つの 1 パルスデータとして扱い、次に連続して閾値をこえた ADC データから次のデータとなる。

4.2.3 バッファ部

データ圧縮部から送られて来た 1 パルスの情報にイベント ID やチャンネル ID をヘッダにして付加する。FlashADC 内部のデータ圧縮部で作られたパッケージはそれぞれの段階で付加されるヘッダ情報によって ID されている。これらの処理は Mother の内部回路で行っている。図 28 に概要を示す。またパッケージの形状の変化は図 29 に示した。図 28 の GetEvtModule が Compress からイベントデータを読み出しイベントナンバーを付加している。さらに FX2FIFOmanager によってイベントデータは統括され USB コントローラ FX2 へと送られる。スレイブについては BufferFIFO まではマスタと同じ構造になっている。

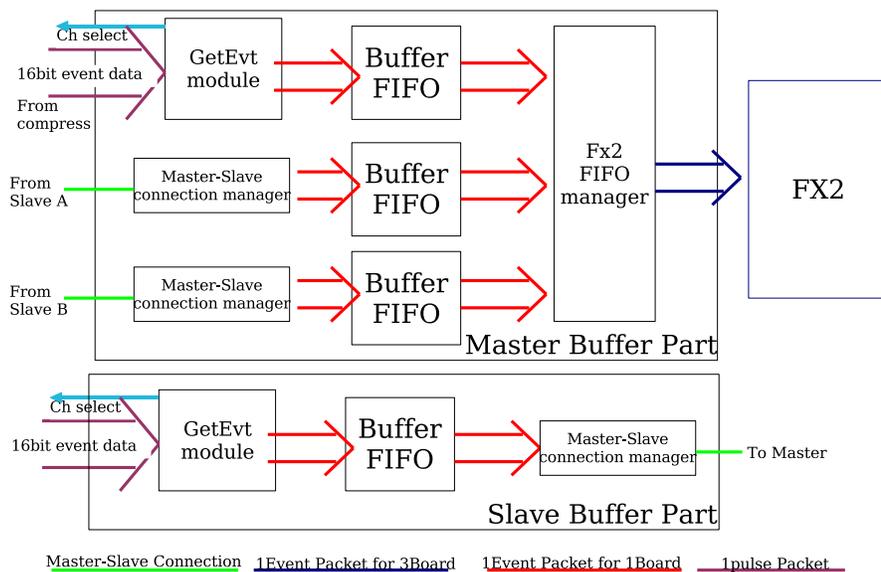


図 28: バッファ部とマスタースレイブ通信

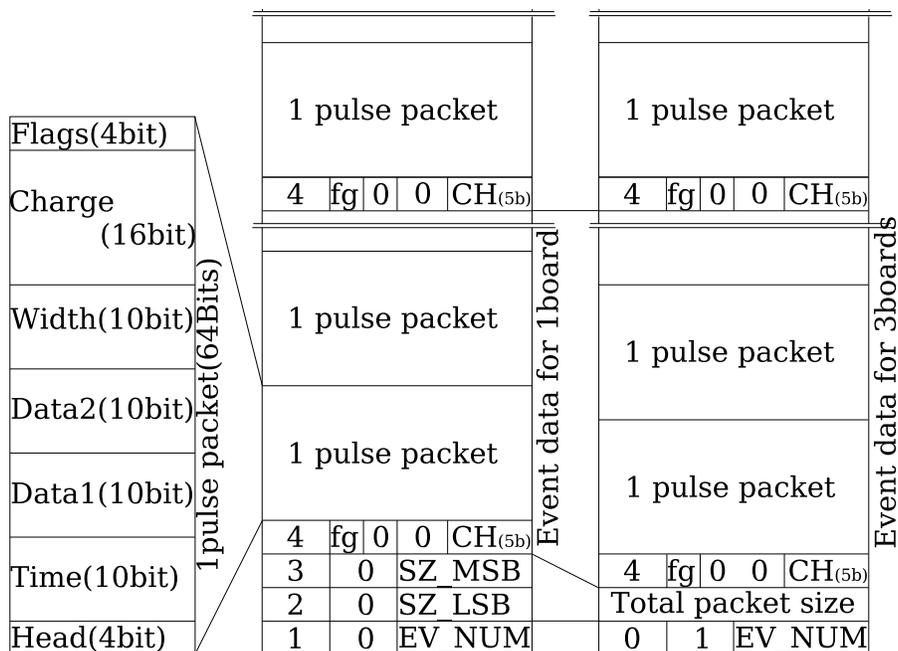


図 29: イベントパケットの形状

4.2.4 マスタースレイブ通信 (Master-Slave Connection)

電力削減のため電力消費の大きい USB コントローラは必要以上の台数を使うことが出来ない。このため FlashADC ボード 3 枚につき 1 枚にだけ USB コントローラを搭載している。そしてスレイブボードについてはマスターボードに 6Mbps のシリアル通信でイベントデータを送信している。これをマスタースレイブ通信と呼んでいる。これらの通信はデータ圧縮や DAQ との通信とは独立にお互いのボード上の Mother 間で行われ、他のチップからはあたかもスレイブボードのバッファ部がマスターボード上にあるかの様に見える。

4.2.5 USB

BESS-Polar 実験での大量のデータ転送を想定して今回から USB2.0 規格を使った通信を行うことにした。USB インターフェイスが普及にともない手に入りやすくなっており、USB HUB を使う事で信号線を少なくできること、LVDS を使った規格でノイズに強いなどの利点がある。

USB 規格には LowSpeed(1.5Mbps)、 FullSpeed(12Mbps)、 HighSpeed(480Mbps) の三種類の通信速度と通信の種類が Bulk、 Interrupt、 Isochronous、 Control の 4 種類がある。BESS-Polar 実験では必要な帯域が最低でも 20.64Mbps が必要となり、HighSpeed モードで、基本的な Bulk transfer で通信を行う事にした。

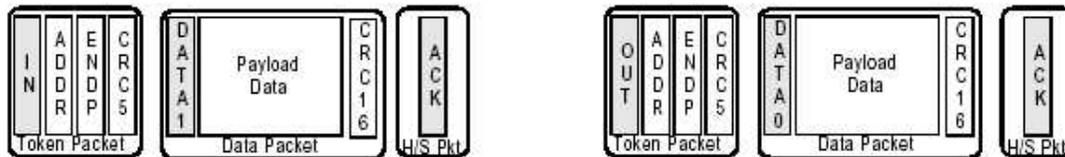


図 30: BULK Transfer のパケット形式

USB2.0 の通信を行う USB コントローラとして米国 Cypress 社 ([15]) の EZ-USB FX2(CY7C68013-128AC) を選んだ。FX2 は内部に 8Bit マイコンを搭載しており、簡単なデータ処理を行う事ができ、プログラマブル IO ピンを使用すれば電子回路への操作も可能である。またファームウェアを DAQ から USB 経由でダウンロードして使うため、ROM に焼き込む手間が省け、デバッグの効率もよい。さらにチップのもう一つの特徴は SlaveFIFO モードをそなえ他のデバイスからは FIFO のように使用することで USB 通信を行える点である。SlaveFIFO モードは 16 ビットの BUS と WritePin、ReadPin、FullFlag、EmptyFlag のみで制御できるのでバッファ部からの通信は簡単なものになる。また、一般的に使われている IC のため入手も簡単で開発ツールが全てフリーソフトウェアとして配布されている。ファームウェアのダウンロードについては LinuxOS の HotPlug 機能、さらには Kernel オプションにも Cypress EZUSB の記載がされており導入も用意に行う事ができる。

FX2 は USB2.0 のエンドポイント (以下 EP) を 6 種類もっている。それぞれに特性をもっているが、今回の用途には DAQ への転送速度を最大限引き出す必要があるのが、EP2 の 4 重バッファを使い、DAQ からのコマンド通信は EP1IN を用いた。これらの設定は全て FX2 の pin アサインもしくは FX2 にのせるファームウェアによって切替えることができる。SlaveFIFO モードを使った場合、FX2 は内部の 8Bit マイコンを介さずに全てハードウェアによる作業で USB 転送を行うため、大変高速に処理できる。コマンド通信は DAQ から EP1 に対する書き込みをポーリングし

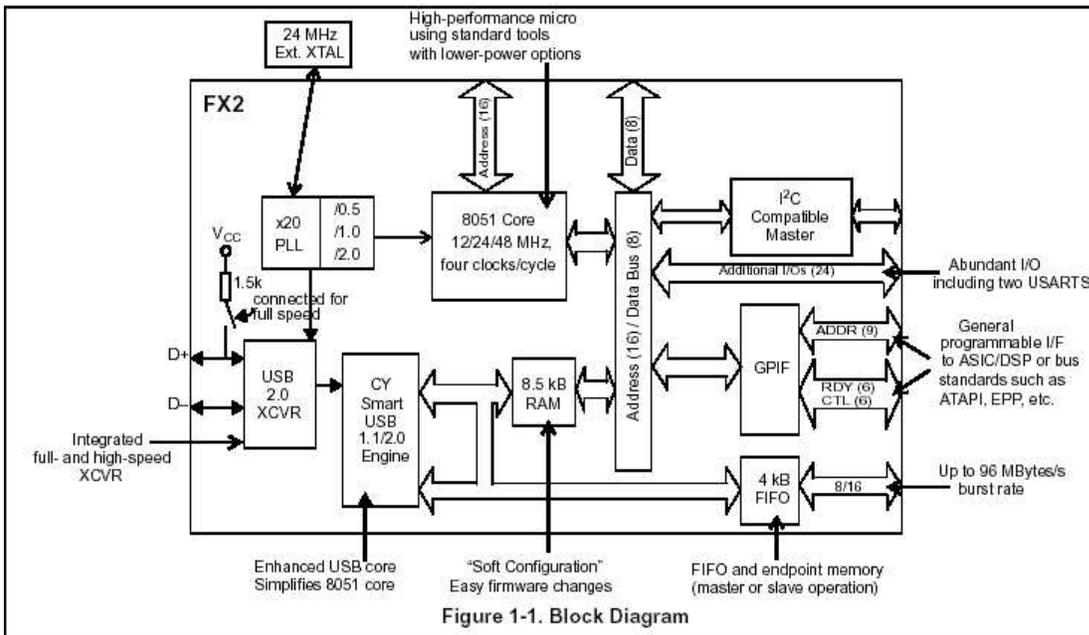


図 31: FX2 内部構造

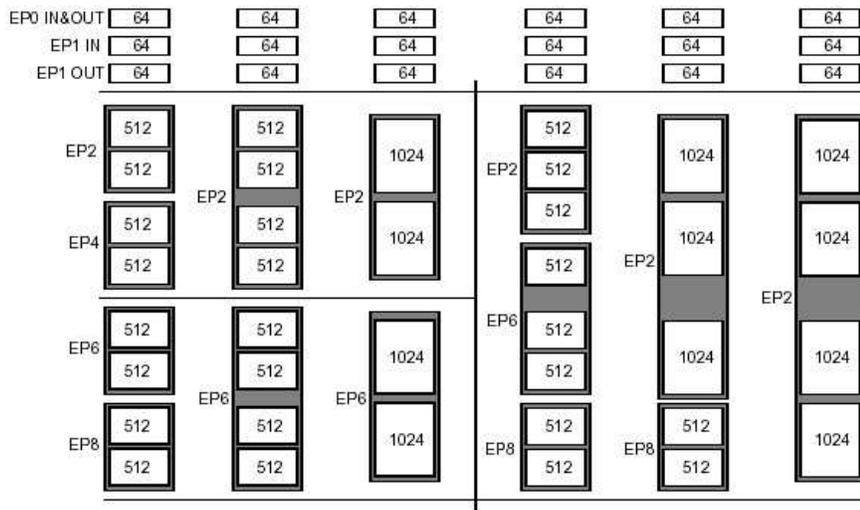


図 32: FX2 の EndPoint

ておき入力があればその内容によってプログラマブル IO ピンに Mother に解釈できる形で内容を渡すようにした。

4.2.6 コマンド系

FlashADC ではそれぞれのチャンネルごとにデータ圧縮の閾値、オフセット調節、モード設定、などを行う必要がある。これらの設定はすべて DAQ から USB を介して行う。USB を介したコントロールのための通信(コマンド通信)は USB コントローラからプログラマブル IO ピンを使って、まず Master の Mother に送られる。この時のパケットの形状は図 33 に示す、図中の CompThre は圧縮のための閾値、WidthThr は Width Cut のための閾値である。また Offset コマンドの channel ビットが他より多いのは AMP の+側-側を独立に設定するためである。また Life コマンドは特定のチャンネルからのデータを取り込まなくするためのコマンドである。Master の Mother はそれがマスターに対するものかスレイブに対するものかを始めの BoardSelect で判別しマスターに対するものであれば Packet の Flag 以降をマスターの Compress に送信する。スレイブに対するコマンドはマスターからシリアル信号に変換されスレイブの Mother に送られる。スレイブの Mother はマスターからのコマンドパケットの BoardSelect を使ってどのボードに対するコマンドかを判断する。自分にたいするコマンドであれば受け取ったコマンド Packet の Flag 以降をマスターの Compress に送信する。Compress はマスターとスレイブで同じ処理をしており、コマンドパケットを受け取るとそれが FlashADC 部のオフセット調整のコマンドかどうかを Flag を使って判別し Offset コマンドであればパケットの後半 16Bit をシリアル送信する。それ以外のコマンドであれば該当するチャンネルの圧縮部に信号をスルーして圧縮部がそれぞれコマンド解釈を行う。

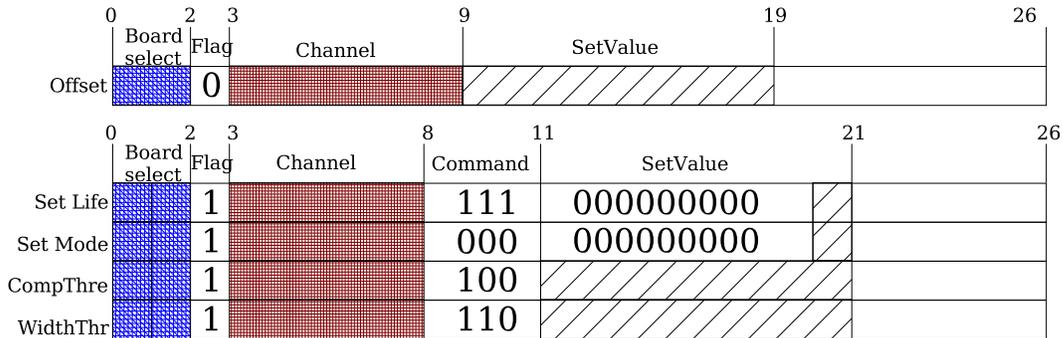


図 33: コマンド系パケット

4.3 実際の性能

FlashADC の量産は 2004 年 12 月から行い、29 枚の FlashADC を作成した。まずデジタル化での分散を調べるために信号を何も入れない状態で raw モードで ADC のカウントをチェックする。これはデバック時に FlashADC チップの足の部分の半田が不足し接触不良を起こした事があり、そのための全チャンネルチェックも兼ねている。

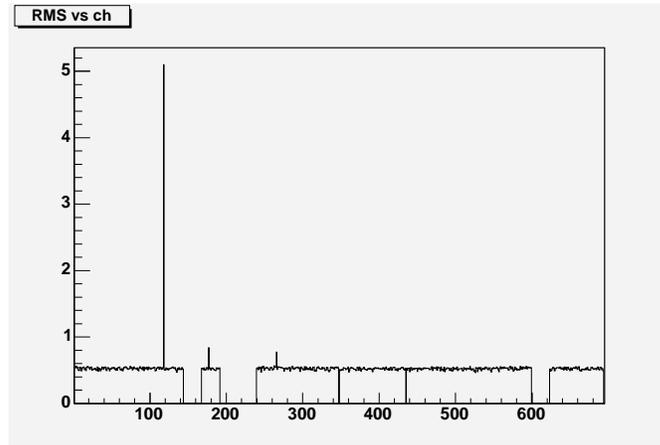


図 34: ペDESTAL 横軸がチャンネル、縦軸が RMS

1 チャンネルだけ RMS が他に比べて大きくなっている、これは接触不良を起こしていると考えられる。他に 2 チャンネル RMS の値が大きいものもあり、その他のチャンネルに付いては RMS が 0.0 か 0.55 ぐらいをしめしている。アナログ回路が受けるノイズによる影響を考慮すれば誤差の範囲であると言える。JET/IDC に接続した状態での波形は図 35 の様になる。JET/IDC からの

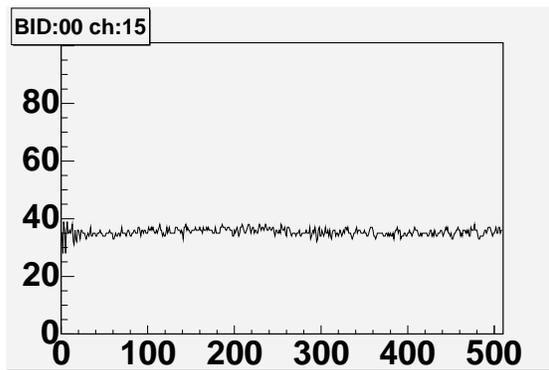


図 35: JET/IDC 組込み後の波形

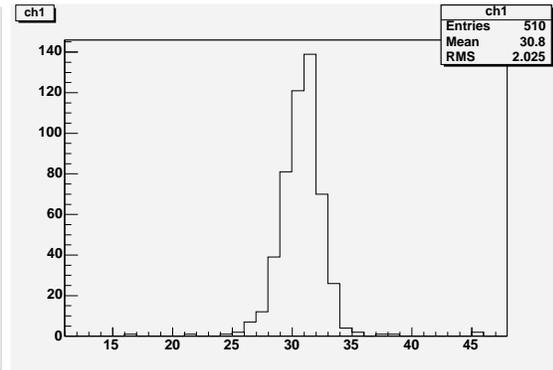


図 36: JET/IDC 組込み後のペDESTAL

ノイズはアンプを通過して FlashADC に入るためノイズも大きく見えている。また波形の先頭に表れるノイズは FlashADC のクロックジェネレータが発生するノイズである。

図 37 は地上でのミューオン測定の際の FlashADC により測定されたドリフト時間のヒストグラムである。横軸に時間を取り、縦軸はイベント数である。横軸は 32MHz サンプリグしたものなので 1 カウントにつき 31.25ns である。0counts(0 μ s) の周辺のイベント数が多いのは FlashADC が用

いているクロックジェネレータによって発生したノイズである。200counts(6.25 μ s) の周辺で減少しているのは IDC のフルドリフト時間が 6.25 μ s 程度になっているためで、さらに 400counts(12.5 μ s) の周辺の減少は JET のフルドリフトによるものである。400counts 以降のイベントはアフターパルスによるものだと考えられる。

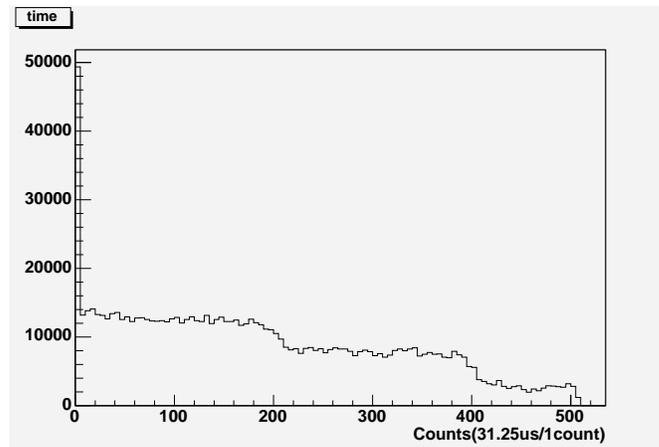


図 37: ドリフト時間

データ転送に関しては、システム設計の段階ではデータ読み出しは上空で 2.5kHz のイベントレート、1event あたり 100 個のパルスを発生させると想定した。想定していたデータ転送速度は 1 セットあたりのパルスの数

$$100 \text{ パルス} \div 8 \text{ セット} = 12.5$$

1 チャンネルあたりのパルスの数はパルスの分布がわからないため、オーバーヘッドが最大になるように想定し、パルスが全て違うチャンネルに入ったとすると、ヘッダーが 16bit 付くため

$$12.5 \times (64\text{bit} + 16\text{bit}) = 1000\text{bit}$$

イベントヘッダーの 32bit を計算にいれ、FlashADC を三枚一組にしたセットあたり

$$1000\text{bit} + 32\text{bit} = 1032\text{bit}$$

になる。

マスタスレイブ通信の必要帯域は、48bit のヘッダーを考慮し、スレイブの 2 枚は独立のバスで通信を行うため、

$$(1000\text{bit} \div 3 + 48\text{bit}) \times 2.5\text{kHz} = 952.4\text{kbps}$$

となり、6Mbps の帯域を用意しているため、十分であると考えている。

FlashADC システム全体では

$$1032\text{bit} \times 8 \text{ セット} = 8256\text{bit}$$

$$8256\text{bit} \times 2.5\text{kHz} = 20.2\text{Mbps}$$

となり、用意している USB2.0(480Mbps) の帯域内に収まる。

データ転送速度は実際のフライト中のFlashADCのデータサイズの分布を図38に示す。FlashADCとUSBコントローラはそれぞれバッファリング機能を持っているため、送られるデータ量はある程度平均化されると考えられる。この分布の期待値を計算したところ 2.31kbyte/event でFlashADCからDAQヘデータが送られていた事を表している。これは予想値のほぼ2.3倍の量である。これは波形の先頭に発生するノイズのためにデータ量が増加したと考えられる。FlashADC3枚のセットでは

$$2.31\text{kbyte} \div 8 \text{ セット} = 2.31\text{kbit}$$

実際のフライトでのイベントレートは想定より低く1.6kHzであった。もしイベントレートが2.5kHzであったと仮定しても、

$$2.31\text{kbit} \times 2.5\text{kHz} = 5.78\text{Mbps}$$

これは想定していた帯域を上回る転送レートである。USB2.0の帯域はDAQ全体で480Mbpsと考えられ、FlashADCが使う帯域は

$$5.775\text{Mbps} \times 8 \text{ セット} = 46.2\text{Mbps}$$

となる。またマスタスレイブ通信の帯域は

$$5.78\text{Mbps} \div 3 = 1.93\text{Mbps}$$

となる。したがって想定したイベントレートでデータを読み出してもUSB2.0の帯域もマスタスレイブの帯域も十分である。

また消費電力は一枚のFlashADCボードを使って概算すると表10になった。単純に測れなかつ

電源	FlashADCで使用される電圧	消費電流 (電源装置読み)	消費電力
+6.0V	+5.0V,+3.0V	0.36A	51.84w
-6.0V	-5.0V	0.02A	2.88w
+4.33V	+1.8V,+3.3V	0.06A(Slave) 0.21A(Master)	11.06w
小計	-	-	65.78w
	LVDS Driverで使用される電圧		
+3.0V	+3.0V	0.34A	4.08w
	ClockGenetatorで使用される電圧		
+4.33V	+3.0V	0.38A	1.65w
合計	-	-	71.51w

表 10: 実際の消費電力、ここにはクロックジェネレータに搭載したLONノードとマスタスレイブ通信の消費電力は含まれていない

た消費電力を多めに見積もってもFlashADCシステム全体で消費電力が80W程度になると考えられる。設計当初の消費電力が150Wであったが、オペアンプ(MAX8005)とFPGAが想定以上に低電力で作動したため全体の消費電力が低くなった。

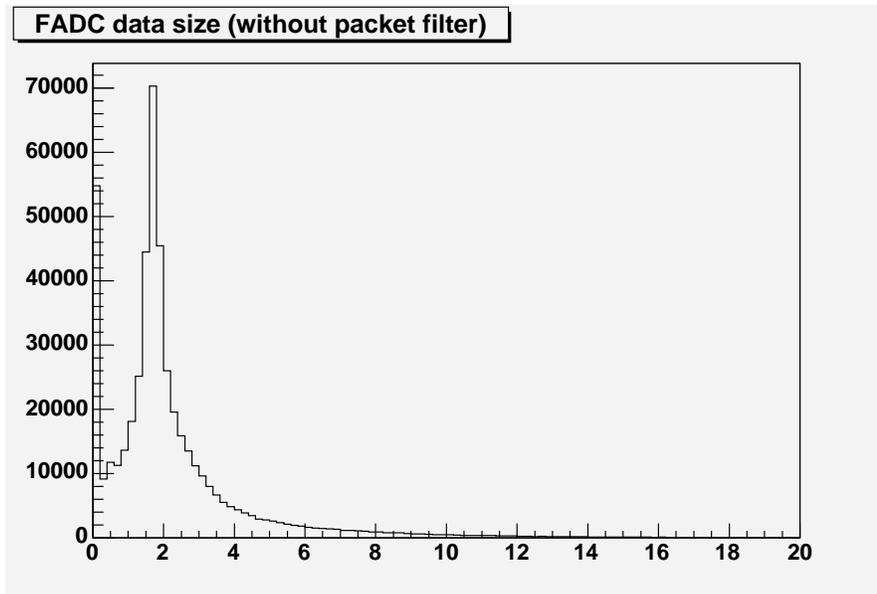


図 38: FlashADC のデータサイズ分布

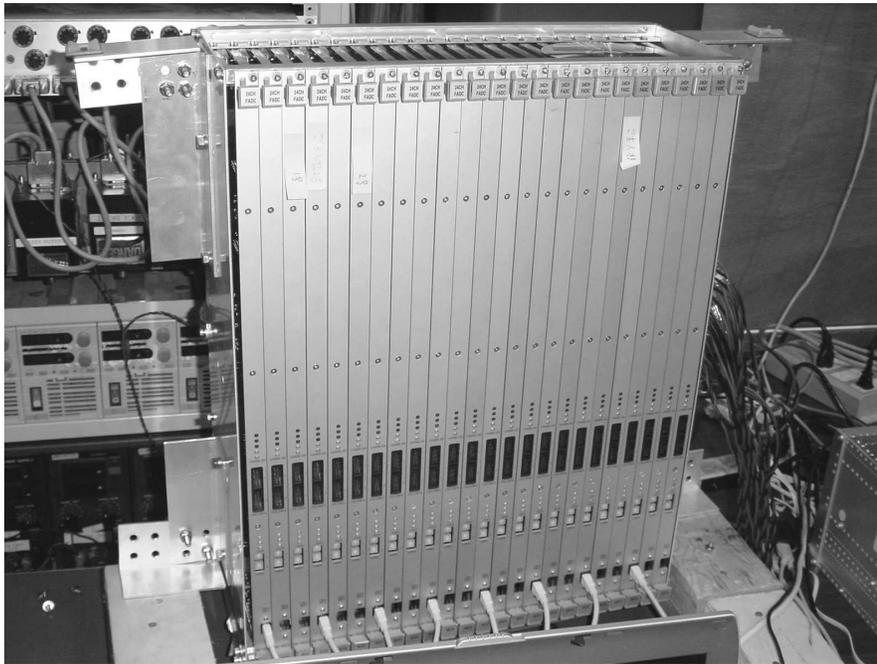


図 39: 実際に作成した FlashADC システム

5 南極フライト

BESS-Polar 実験は三陸での太陽電池パネルの発電試験、米国ニューメキシコ州フォートサムナにおいてテクニカルフライトを実施し、2003年の夏以降米国メリーランド州にある NASA ゴダードスペースフライトセンター内で準備を行った。日本で作成された測定器の仕上げや、組み込み、ケーブルリング、塗装などが行われた。

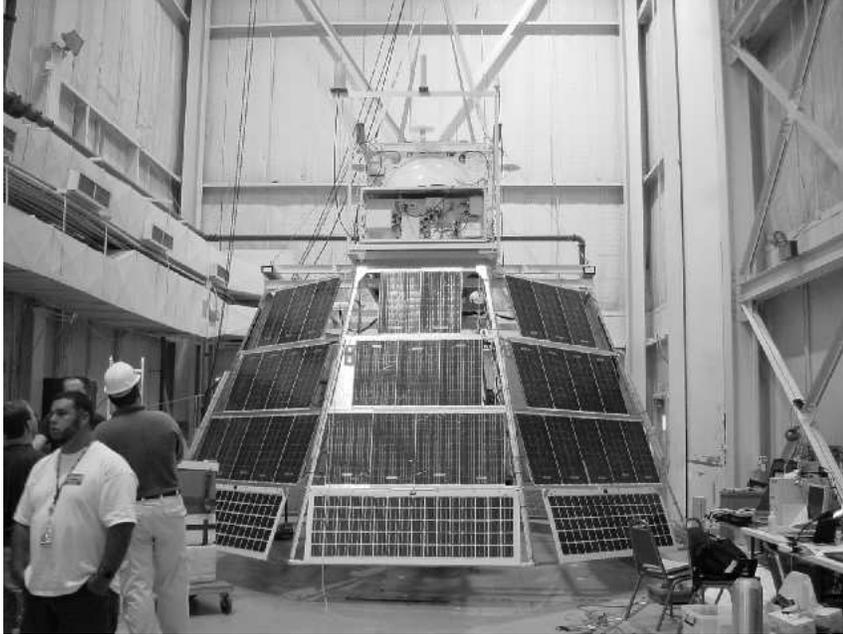


図 40: BESS-Polar 測定器と太陽電池パネルの接続試験の様子 (パレスティン)

2004年8月24日総合組み込みテストを米国テキサス州パレスティンにて行い、磁場中でのバッテリーを用いたオペレーションの確認をおこなった。図 40 はその際に行われた太陽電池パネルと測定器本体の組み合わせ試験の様子である。その後9月上旬に測定器は南極に向けて送り出された。



図 41: McMudro 基地



図 42: Williams Field

10月29日に BESS 南極スタッフがニュージーランドより南極にある米国 McMurdo 基地近くの Air Field に米空軍機でむかった。Air Field はニュージーランドからの便と南極点 (アムンゼンスコット基地) へ向けての便が発着する。McMurdo 基地は夏の間約千人のスタッフを受け入れ、米国の南極の玄関となっている基地である。翌日より McMurdo 基地近くの Williams Field で測定器を輸送用コンテナから出す作業と並行して南極でのフィールド作業拠点の設営を行った。その後、輸送による測定器へのダメージ、測定器全体の状況を確認し、マグネットの冷却作業準備、太陽電池パネルの組み立てをおこなった。また上空では外気圧が低く大気への熱伝導が起こりにくいた

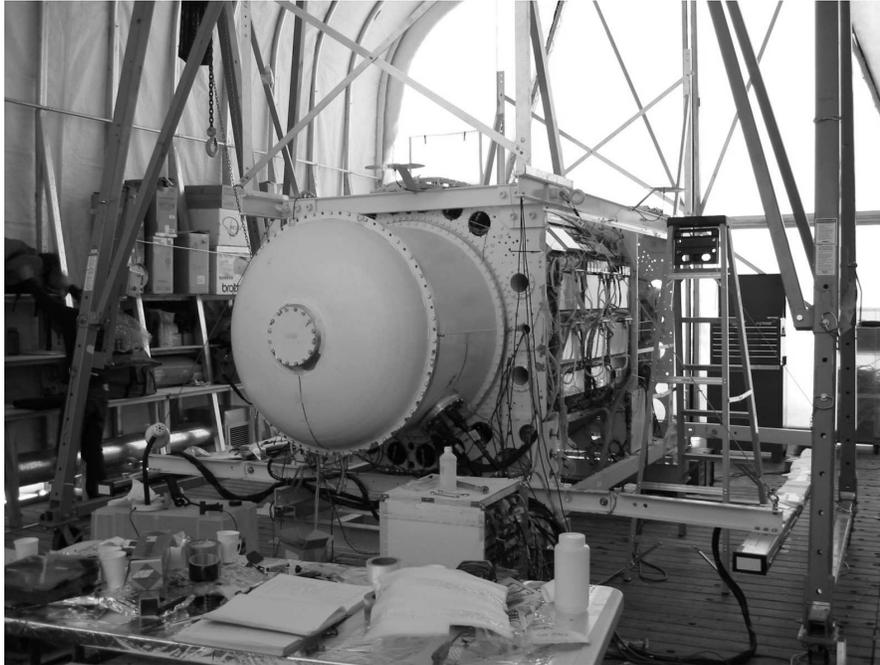


図 43: ハンガ内の様子

め、測定器の回りに太陽光を反射し熱を吸収しないようにシールドを取り付けるなど熱対策も行った。天候不良や、暖房装置の故障などいくつかのトラブルは起こったが、11月19日よりマグネットの冷却作業を行い、22日には南極での磁場中での地上ミュオン測定を行った。南極での総合組み込みテストを12月3日に行い、測定器として準備完了との判断を下した。

その後南極周回気流の状態と地上 Williams Field での天候が打ち上げ可能になるのを待ち、2004年12月13日18時54分(ニュージーランド時間)、Williams Field より放球した。同日21時16分には気球の高度が安定し水平飛行に移った。図45は飛行経路を示し、図46に示しのはあるイベントのモニタである。打ち上げ後は米国バレスティンと南極の Williams Field の両方で測定器の監視、オペレーションを行った。途中、気球が TDRSS の通信不可能圏を通過したため、地上からの通信が数時間に渡り Iridium 通信のみになり、オペレーションが困難になる事もあった。



図 44: 打ち上げ直前の様子、後方に気球がみえる



図 45: 飛行経路

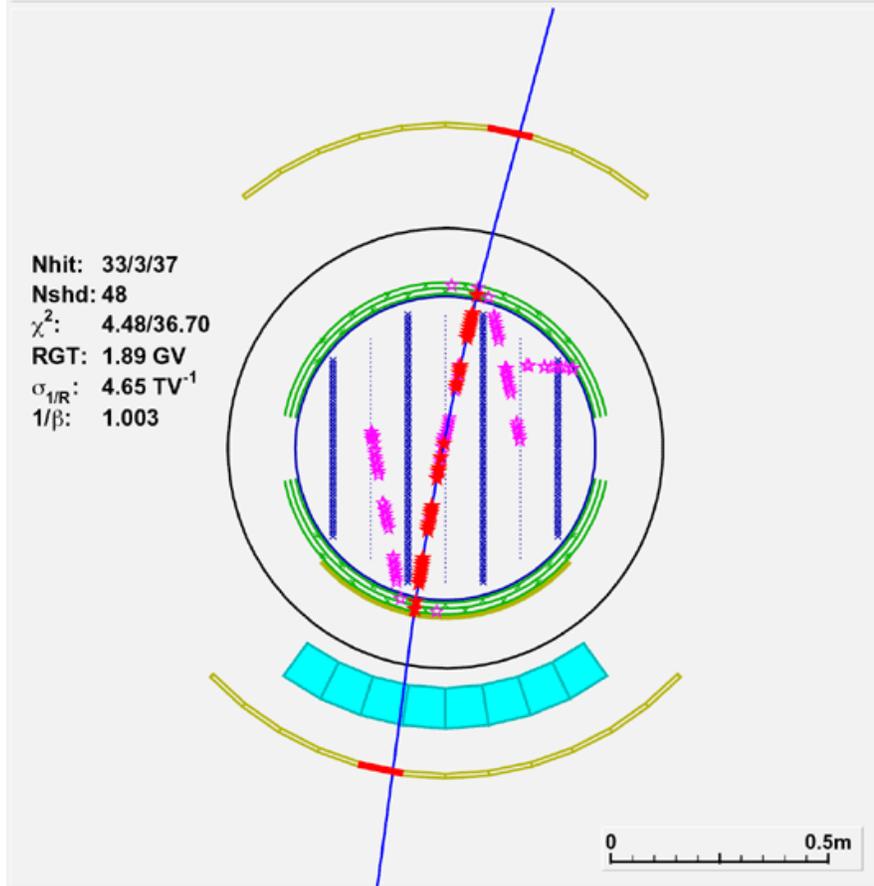


図 46: イベントモニタの様子

気球は徐々に高緯度へ進み、測定器の回収不可能になる事が予測されたので回収可能な地点で気球を切り離した。12月22日11時14分(ニュージーランド時間)に気球が切り離され、パラシュートで徐々に高度を下げ、11時56分に着地した。飛行時間は8日と17時間2分である。このフライトでの測定期間は約8.5日間、イベント数は 9×10^8 で、イベントデータ量は全部で2TBになった。図47と図48はその後の回収作業の様子である。測定器の回収は23日にファーストアクセスを行い、イベントデータが書き込まれたHDDの入ったDAQ用圧力容器を回収した。その他の測定器は12月29日までに測定器を解体しMcMurdo基地に持ち帰った。着地の際にHDDが破損する事が心配されたが、HDDは全て問題なく回収する事ができた。回収されたHDDのデータは現在高エネルギー加速器研究機構とNASAゴダードスペースフライトセンタにて解析中である。



図 47: BESS-Polar 測定器の着地後の様子



図 48: 回収作業の様子

6 まとめ

BESS-Polar 実験で用いる JET/IDC からの情報を読み出す FlashADC の開発を行った。2004 年 1 月に量産が完了した FlashADC は NASA ゴダードスペースフライトセンタにおいて、BESS-Polar 測定器に組み込まれた。その後も FPGA の柔軟性を生かしデバッグを行い、2004 年 12 月南極でのフライトでその性能を発揮する事ができた。

極地方での長期間の測定を行うため FlashADC に求められた条件は低消費電力、長期安定性、メンテナンス性であった。その内の低消費電力について FlashADC システム全体で 150W 以下に抑える計画であったが、実際の消費電力は 80W 程度にまで削減され、また測定器全体の消費電力も想定よりはるかに少ない 360W で作動した。

さらに 8 日間に及んだフライト中 FlashADC は 1 チャンネルの故障もなく、JET/IDC からの信号を読み出し、その安定性を示した。また今回から読み出しデバイス、DAQ 間に導入した USB2.0 のインターフェイスはデータ転送において仕様を満たし、データ収集のプロセスの中でボトルネックにはならなかった。

6.1 今後の展開

2007 年に BESS-Polar 実験の 2 回目のフライトを目指して準備を進めている。現在の FlashADC システムでも次回フライトで使う事も考えられるが改良する事も考えられる。改良点として考えられる点は以下の通りである。

◎ Charge Cut 機能の追加

Compress の機能を拡張し Width Cut だけでなく Charge Cut を実現する。この機能によって Charge、Width の閾値を下回るパルスを DAQ へ転送しないようにすれば、DAQ で行っているオンラインリジェクションの処理を軽減する事ができる。これは CPU でのデッドタイムを削減し、より多くのイベントを測定する事ができるようになる。

◎ サンプリングクロックにより発生するノイズの削減

また FlashADC がデータ読み出しを行うためのサンプリングクロックを発生させるクロックジェネレータにより、JET/IDC にノイズが発生してしまう。このノイズによりサンプリングの始めの信号は正確には読めていない。このノイズを抑える事ができればワイヤ近傍での信号の読み出しがより正確に行える様になる。

◎ 効率のよりデバッグ環境

FlashADC を BESS 測定器内の JET/IDC に組み込んだ事により、FlashADC および JET/IDC のデバッグが難しくなる。これは直接手で触れる事ができない Vessel 内の状況を知る事が難しくなったためである。FlashADC の状況を USB、もしくは LON 経由で DAQ へ送る機能を追加する事によってデバッグを効率良く行う事ができるようになる。

これらの機能を組み込む事で極地でのメンテナンス性の向上、データ読み出しのデッドタイム削減、JET/IDC のトラッキング精度の向上が見込まれる。

7 謝辞

指導教官である野崎光昭教授には修士論文の作成や発表の機会に様々な御指導を頂き、またこのような実験に加わり貴重な体験をさせて頂いた事、深く感謝致します。研究を進める上でデータ収集系、ハードウェア、ソフトウェアにおける様々な指導をしてくださいました大和一洋氏、佐々木誠氏、そして実験装置から実験手法に至る詳細を教えてくださいました山本明教授、吉田哲也教授、安部航氏、福家英之氏、谷崎圭祐氏、灰野貞一氏、松田晋弥氏、高杉佳幸氏、板崎輝氏には大変御世話になりました。さらに武田廣教授、川越清以助教授、蔵重久弥教授、原俊雄助教授をはじめとする神戸大学の皆様にも深く御礼を申し上げます。また海外出張で不在が多く様々な事務処理をお願いしました横山有美さんに感謝致します。その他のグループ内外を問わず、ここに挙げられなかった皆様に感謝の意を表したく思います。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] K.Yoshimura, et al.(BESS collaboration):Phys.Rev.Lett.75 (1995) 3792
- [2] H.Matsunaga, et al.(BESS collaboration):Phys.Rev.Lett.75 (1995) 3792
- [3] A.Yamamoto, et al, Adv.Space Res, 30 (2002) (5) 1253 - (5) 1262
- [4] Y.Ajima, et al, Nucl Instr. and Methods A443 (2000) 71-100
- [5] A.Yamamoto, et al., Nuc.Phys.B (Proc.Suppl.) 78 (1995) 3792
- [6] 熊沢 輝之：東京理科大学
大気球シンポジウム 2003 年 (2003)
- [7] 板崎 輝：神戸大学
修士論文、BESS-Polar 測定器における middle-TOF システムの開発
- [8] 松本 賢治：東京理科大学
大気球シンポジウム 2002 年 (2002)
- [9] 池田 伸穂：神戸大学
修士論文、BESS-Polar 測定器におけるデータ収集システムの開発
- [10] 高杉 佳幸：神戸大学
修士論文、BESS-Polar 測定器における電源供給システムの開発
- [11] 大和 一洋：神戸大学
日本物理学会 2003 年 春季大会 (2003)
- [12] 灰野 貞一：東京大学
博士論文、Measurements of Galactic and Atmospheric Cosmic-ray Absolute Fluxes
- [13] National Semiconductor Corporation HP
<http://www.national.com/>

- [14] Altera Corporation HP
<http://www.altera.com/>
- [15] Cypress Semiconductor Corporation HP
<http://www.cypress.com/>
- [16] Maxim Integrated Products HP
<http://www.maxim-ic.com/>
- [17] Analog Devices HP
<http://www.analog.com/>
- [18] 森岡 澄夫 : CQ 出版
Design Wave Books HDL による高性能デジタル回路設計
- [19] 坂巻佳寿美 : 工業調査会
見てわかる VHDL

8 Appendix FlashADC の回路図