

## 第2回南極周回飛翔宇宙線観測実験 - BESS-Polar II 報告

吉村 浩司<sup>1</sup>, 安部 航<sup>2</sup>, 折戸 玲子<sup>2</sup>, 坂井 賢一<sup>3</sup>, 篠田 遼子<sup>3</sup>, 鈴木 純一<sup>1</sup>,  
田中 賢一<sup>1</sup>, 谷口 敬<sup>1</sup>, 西村 純<sup>3</sup>, 野崎 光昭<sup>1</sup>, 灰野 禎一<sup>1</sup>, 長谷川 雅也<sup>1</sup>, 福家 英之<sup>4</sup>,  
堀越 篤<sup>1</sup>, 榎田 康博<sup>1</sup>, 松川 陽介<sup>2</sup>, 松田 晋弥<sup>1</sup>, 山上 隆正<sup>4</sup>, 山本 明<sup>1</sup>, 吉田 哲也<sup>4</sup>,  
John W. MITCHELL<sup>5</sup>, Thomas HAMS<sup>5</sup>, Ki-Chun KIM<sup>6</sup>, Moohyung LEE<sup>6</sup>,  
Jonathan F. ORMES<sup>7</sup>, Frank San SEBASTIAN<sup>5</sup>, Makoto SASAKI<sup>5</sup>, Eun-Suk SEO<sup>6</sup>,  
Robert E. STREITMATTER<sup>5</sup> and Neeharika THAKUR<sup>7</sup>

### Cosmic-ray observation by the second Antarctic long duration balloon flight - BESS-Polar II

By

Koji YOSHIMURA<sup>1</sup>, Koh ABE<sup>2</sup>, Reiko ORITO<sup>2</sup>, Ken-ichi SAKAI<sup>3</sup>, Ryoko SHINODA<sup>3</sup>,  
Jun-ichi SUZUKI<sup>1</sup>, Ken-ichi TANAKA<sup>1</sup>, Takashi TANIGUCHI<sup>1</sup>, Jun NISHIMURA<sup>3</sup>,  
Mitsuaki NOZAKI<sup>1</sup>, Sadakazu HAINO<sup>1</sup>, Masaya HASEGAWA<sup>1</sup>, Hideyuki FUKU<sup>4</sup>,  
Atsushi HORIKOSHI<sup>1</sup>, Yasuhiro MAKIDA<sup>1</sup>, Yousuke MATSUKAWA<sup>2</sup>, Shinya MATSUDA<sup>1</sup>,  
Takamasa YAMAGAMI<sup>4</sup>, Akira YAMAMOTO<sup>1</sup>, Tetsuya YOSHIDA<sup>4</sup>,  
John W. MITCHELL<sup>5</sup>, Thomas HAMS<sup>5</sup>, Ki-Chun KIM<sup>6</sup>, Moohyung LEE<sup>6</sup>,  
Jonathan F. ORMES<sup>7</sup>, Frank San SEBASTIAN<sup>5</sup>, Makoto SASAKI<sup>5</sup>, Eun-Suk SEO<sup>6</sup>,  
Robert E. STREITMATTER<sup>5</sup> and Neeharika THAKUR<sup>7</sup>

#### Abstract

Balloon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer (BESS) has been carried out to observe various galactic cosmic-ray radiation. Since its first flight in 1993, ten flights were successfully carried out in northern America to study elemental particle phenomena in the early universe. We have developed the new instruments for long duration balloon flight over Antarctica (BESS-Polar) and succeeded in the first flight in December, 2004. On the basis of its result, we improved the detector performance for further long duration flight at the solar minimum. The second flight (BESS-Polar II) was carried out from December 2007 to January 2008. We successfully observed about 4.7 billion cosmic-ray events during 24.5 day flight. Data was recovered and analysis is now proceeding. This report describes BESS-Polar II flight and detector performance during the flight.

---

<sup>1</sup> 高エネルギー加速器研究機構

<sup>2</sup> 神戸大学

<sup>3</sup> 東京大学

<sup>4</sup> 宇宙航空開発機構

<sup>5</sup> National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center

<sup>6</sup> University of Maryland

<sup>7</sup> University of Denver

## 要 旨

超伝導スペクトロメータを気球により高空に持ち上げ、銀河から降り注ぐ宇宙線を観測する実験（BESS 実験）を実施している。1993年の初フライト以来、カナダ北部およびアメリカにおいて10回の飛翔実験に成功し、反陽子スペクトルの精密測定、宇宙線反ヘリウムおよび反重陽子の探索、各種一次宇宙線および大気宇宙線の観測、を行っている。2002年からは、南極周回長時間飛翔気球LDB(Long Duration Balloon)を用いた長時間観測のための新しい測定器（BESS-Polar 測定器）を開発し、2004年12月に南極において第1回目の飛翔実験（BESS-Polar I）を行い8.5日間の観測に成功した。その成果をもとに、さらに改良を施した測定器を用いて、第2回飛翔観測実験（BESS-Polar II）を2007年12月から2008年1月にかけて実施し、南極を約1周半するフライトにおいて約24.5日の宇宙線観測に成功した。測定器は順調に動作し、約47億事象の宇宙線イベントを記録し、データを回収した。現在、観測データの解析が精力的に進められており、これまでに、各測定器が期待される性能を発揮していることが確認できている。本稿ではBESS-Polar II 測定器および飛翔実験の報告を行う。

## 1. BESS-Polar II の概要

BESS-Polar 実験は、高エネルギー加速器研究機構（KEK）、NASA ゴダードスペースフライトセンター（NASA/GSFC）、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部（JAXA/ISAS）、神戸大学、メリーランド大学、デンバー大学による日米共同実験で、超伝導スペクトロメータを南極周回長時間飛翔気球により高空に持ち上げ、銀河から降り注ぐ宇宙線の観測を行っている。1993年以来、主にカナダ北部で観測を続けてきたBESS測定器をベースにして、1週間以上の長時間飛翔気球での観測を行うことができる測定器を新たに開発し、2004年には第1回南極飛翔実験に成功した[1]。第2回の飛翔実験（BESS-Polar II）では、太陽活動極小期における20日以上での飛翔観測を行い、低エネルギー宇宙線を前回の太陽活動極小期の統計量の10倍以上の精度のデータを得て、以下の研究を行うことを目的とする。

### 1.1 低エネルギー反陽子

BESS 実験により前回の太陽活動極小期（1995～1997）に得られた反陽子スペクトル（図1）は、一次宇宙線の星間物質との衝突から予測される曲線（2GeVあたりで特徴的なピークを持つ）とよく一致しているが、低エネルギー領域では過剰があるようにも見える[2, 3]。反陽子を生成する際の衝突過程の運動学的な理由から、低エネルギー反陽子の

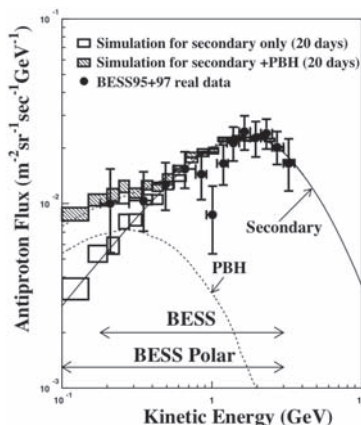


図1 BESS-Polar IIで期待される反陽子スペクトルを前回の太陽活動極小期のデータ[2, 3]とともに示す。低エネルギーにPBHからの信号[4]が十分にある場合（ハッチあり）には、バックグラウンド（ハッチなし）と識別可能である。

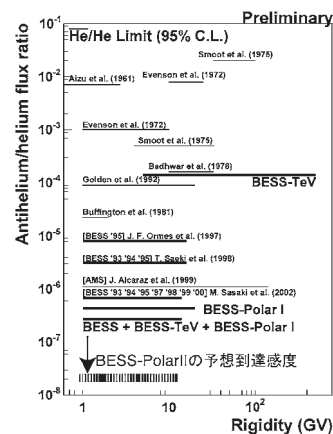


図2 反ヘリウム/ヘリウム比の上限值[5]。BESSおよびBESS-Polar I 実験がそれ以前の上限を2桁向上させた。BESS-Polar IIではさらに1桁の精度向上を目指す。

生成が抑制されるため、この過剰は、原始ブラックホールの蒸発等から生成された一次起源の反陽子の存在を示唆している可能性がある。ただし、データの統計量が少なく、また理論計算に様々な不定性があるため、決定的なものとは言い難い。今回の太陽活動極小期において、BESS-Polar II では前回の10倍以上のデータを得ることにより、十分な精度で反陽子の流束を決定し、モデルの不定性を減らすとともに、反陽子の過剰問題に決着をつける。

1.2 反ヘリウムの探索

我々の住む世界がなぜ物質だけでできており、反物質は存在しないのか？いわゆる「物質-反物質の非対称性問題」は素粒子物理学、宇宙物理学の大きな問題の一つである。この対称性の破れが、自発的なものであったとすると、反物質でできた領域（ドメイン）が存在し、そこから反物質が飛来する可能性も否定できない。BESS 実験では、これまでに宇宙線ヘリウムの中に反ヘリウムが存在するかどうか、実験的に探索を行ってきた。反ヘリウムは反陽子のように、宇宙線の衝突で生成される可能性はきわめて小さく、もし1例でも発見されれば、反物質ドメインの存在を示唆する決定的な証拠となる。図2に示すように、今までの観測データでは反ヘリウムは発見されておらず、BESS 実験、BESS-Polar 実験が、これまでもっとも低い上限値を与えている [5]。BESS-Polar II では、統計量をさらに1桁あげて、究極の感度での探索を行う。

1.3 反重陽子

反重陽子は、反陽子と同様に宇宙線の星間物質との衝突で生成される可能性があるが、反陽子のほぼ2倍の質量を持つ反重陽子を生成するためには、さらに高いエネルギーの宇宙線衝突が必要となり、低エネルギー反重陽子の生成はより抑制されることになる。また、反陽子と反中性子が束縛状態を生成するように、ほぼ同じ位相空間に同時に生成される必要があるため、生成確率はさらに低くなる。このため、低エネルギーにおける反重陽子は、もし一例でも発見されれば、一次起源である可能性が高い。これまでに BESS 実験でも反重陽子の探索が行われている [6] が、BESS-Polar II では飛躍的に感度を高めた探索をすることが可能になる (図3)。

1.4 太陽風による宇宙線の変調 (長期的, 短期的)

BESS 測定器は図4に示すように太陽活動の各フェーズでの測定を連続的にを行い、太陽活動の宇宙線変調の理解に必要な基礎となるデータを供給してきた [7, 8]。特に、陽子と反陽子の流束の年次変化を追うことにより、太陽活動の極

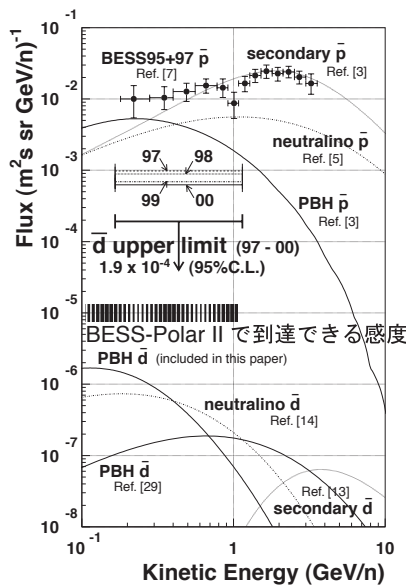


図3 反重陽子探索の結果。BESS 実験が唯一の上限値を与えている [6]。

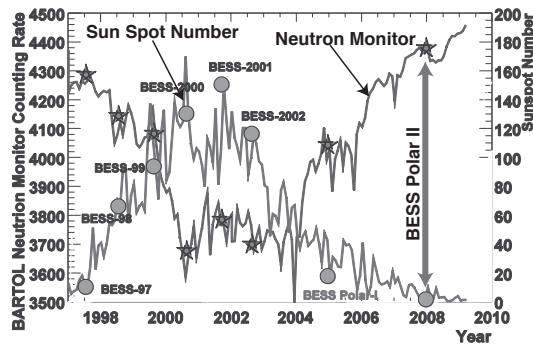


図4 太陽活動による黒点数と中性子モニタ値の推移。BESS 実験および BESS-Polar 実験でほぼ1周期をカバーしている。BESS-Polar II では太陽活動極小期の観測を目指す。

性と粒子の電荷によって変調の受け方が異なることを示唆するデータを与えている。しかしながら、陽子に比べて反陽子の統計は少なく、モデルを精密に検証するには十分なものではなかった。BESS-Polar II では、太陽極小期においてこれまでにない精度で反陽子流束を測定することが可能であり、太陽活動の電荷依存性を精密に調べることが可能となる。それに加えて、20 日以上で日々のスペクトルの変化を精度よく連続的にとらえることができるので、太陽活動の短期的な過渡現象（太陽フレア、CME、太陽の自転）による宇宙線のスペクトルの変調を詳しく調べることができる [9]。

## 2. BESS-Polar II 測定器

BESS 測定器は加速器実験で培った超伝導技術、粒子線検出器技術を応用して開発された宇宙線測定器である。薄肉超伝導ソレノイドの中に同心軸上に大型飛跡検出器を配置することにより、従来の宇宙線測定器にはない以下のような特長を備えている。

- 大面積立体角
- 薄型で宇宙線に対する透過性
- 優れた運動量分解能
- 複数の粒子識別能力
- 高速、低消費電力、大容量データ収集能力

BESS-Polar 測定器は、これら基本的な特長を受け継ぎつつ、南極周回飛翔による長時間観測を実現し、極低エネルギーの粒子が検出できるように極限まで物質量を減らすために、以下のような改良を施した。詳しくは [1] を参照のこと。

- 測定器全体をおおう圧力容器の撤廃
- マグネットの長寿命化
- マグネットの薄肉化
- 測定器の低物質量化
- リチウム電池から太陽電池への変更
- Middle TOF (MTOF) の開発により、極低エネルギー粒子の観測

図 5 に BESS-Polar 測定器の概要、図 6 に BESS 測定器と BESS-Polar 測定器の比較を示す。粒子が通過する物質量を約半分に減らすことに成功し、さらに、MTOF を利用することで測定器の途中でエネルギーを失って止まってしまう粒子を観測することが可能になり、通過する物質量は 1/4 に低減される。

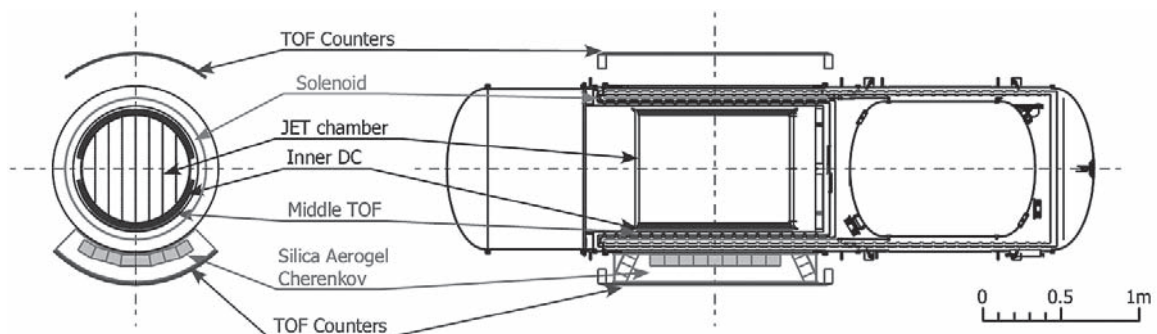


図 5 BESS-Polar 測定器 (BESS-Polar II バージョン)

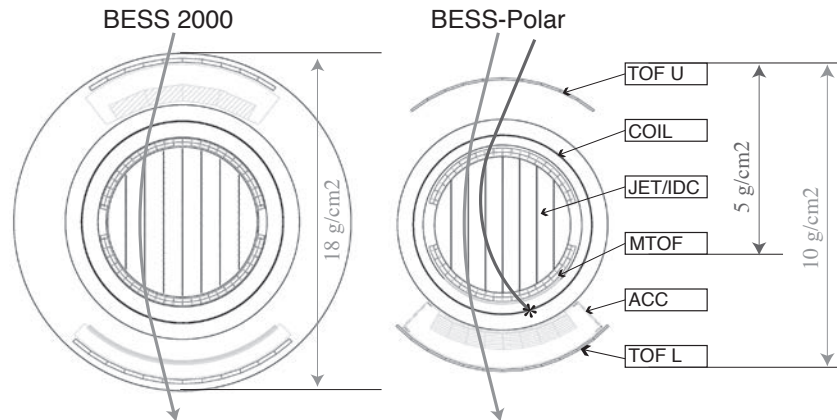


図6 BESS-Polar 測定器と BESS 測定器の比較

BESS-Polar 測定器は 2004 年に製作・調整を終えて、第 1 回実験 BESS-Polar I では順調に動作してデータ取得に成功した。しかしながら、改善すべきいくつかの問題点も見つかった。この経験を生かし、第 2 回の飛翔実験 BESS-Polar II に向け、以下にあげるような目標を掲げて、測定器の改良を行った。

### 20 日以上の実験の実現

BESS-Polar I で達成された 10 日間の観測時間を 2 倍以上に延ばし、南極周回を 2 回できるようにする。そのために、超伝導ソレノイドの冷却系を設計し直し、また、飛跡検出器に使用するガスの劣化に備えて、ガスフローシステムを改良する。

### BESS Polar I で起きた諸問題への対処と測定器性能の向上

BESS-Polar I では、TOF 測定器用光電子増倍管 (PMT) が上空の低圧、低温の環境で高電圧リークを起こし、約 1/3 の PMT が動作不良になり、測定器のアクセプタンスが大きく低下した。また、粒子識別を担う、エアロジェルチェレンコフカウンタおよび MTOF については、目標としていた性能を得ることができなかった。これらの問題の原因を究明し、これらの測定器性能を大幅に向上させる。

### DAQ の高速化、大容量化

BESS-Polar II は太陽活動極小期で測定を行うため、低エネルギー宇宙線の流束が増加し、トリガーレートの大幅な増大が見込まれる。このためデータ収集 (DAQ) を高速化して不感時間を減らすとともに、測定時間が 2 倍以上に増えることを想定し、データ蓄積能力を 4 倍程度に増強する。

これらの目標を達成するために、中央飛跡検出器 (JET/IDC) とエレクトロニクスの一部を除いて、すべての測定器要素に対して全面的に設計を見直し、新たに開発を行うことになった。以下それぞれの測定器に関して、改善点を中心にフライト前の地上試験における性能を交えながら、詳しく述べる。

## 2.1 超伝導ソレノイド

超伝導ソレノイドは、新たに開発された高強度アルミ安定化超伝導線材の特性を生かした設計により 3.4 mm 厚のエポキシ樹脂含浸コイル自体により強度が保たれており、補強用のシリンダーを省くことで大幅に物質質量を減らすことが可能となった。冷却はコイルの内外に貼り付けられた純アルミストリップにより冷媒タンクからの熱伝導により行われる。アルミハニカム材を用いた真空容器を用いて、さらに、軽量、低物質質量化をはかり、コイル、真空容器による物質質量は  $2.5 \text{ g/cm}^2$  (片側) に抑えられている [10]。

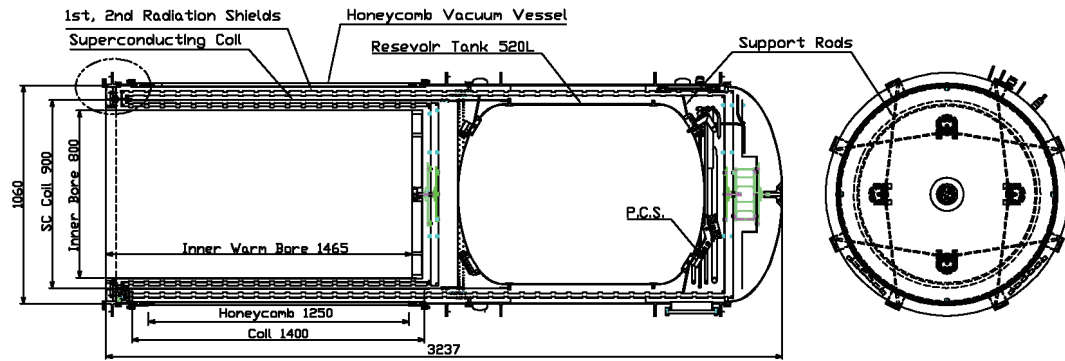


図7 BESS - PolarII 用クライオスタット

BESS-Polar I で約 10 日であった液体ヘリウムの寿命を 2 倍以上 (20 日以上) に伸ばすために、以下のようにクライオスタットの設計見直しを行った。

- ・ タンク周辺に第 3 層の輻射シールドの追加
- ・ 輻射シールドを冷却するガス配管をシールド全体に拡張して、これまで熱伝導に頼っていた部分を効率よく冷やすように改良
- ・ 電流リードの低温部に高温超伝導体を配置し、伝熱熱侵入を減らすとともに、温度マージンをかせぐことにより、電流リードからのクエンチ発生を防ぐ。
- ・ タンク容量の増大 (400ℓ → 520ℓ)
- ・ コイルおよびタンクをサポートするロッドの長さを長いものに変えて、外部からの熱抵抗を増やした
- ・ サーマルオシレーション防止用に逆止弁を排気ポートに装備。

BESS-Polar II のクライオスタットと改良点を図 7 に示す。これらの改良により、地上試験では蒸発量が 18 ℓ/h から 11.5 ℓ/h に低下し、実際にクエンチするまでの時間は 23.5 日を達成し、十分に要求性能を満たすことを確認した。

## 2.2 中央飛跡検出器

中央飛跡検出器は JET 型ドリフトチェンバー ( $\phi 760 \times 1000^L$  mm) とその外側に置かれるセルタイプの上下一対の IDC ドリフトチェンバーで構成される。ドリフト時間を測定することにより、磁場の軸に垂直な座標 ( $r\phi$ ) を求め、磁場の軸と平行な座標 ( $z$ ) は、両側から読み出したワイヤーの電荷の比、および、IDC のカソード面に置かれたバーニアパッドで測定される電荷により求めている。BESS-Polar I では電源に用いた DC/DC コンバーターのノイズの影響を受けて、特に  $z$  方向の分解能が大幅に低下した。BESS-Polar II では IDC の外側を  $76 \mu\text{m}$  のアルミ箔で覆い、電磁シールド (図 8) を施すことによりノイズを低減することに成功し、 $z$  分解能を  $\sigma = 38$  mm から 25 mm に向上させた。

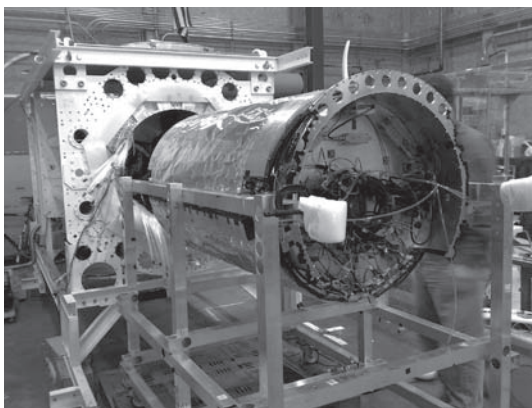


図8 中央飛跡検出器 (JET, IDC)。BESS-Polar II ではアルミシートを電磁シールドとして施した。

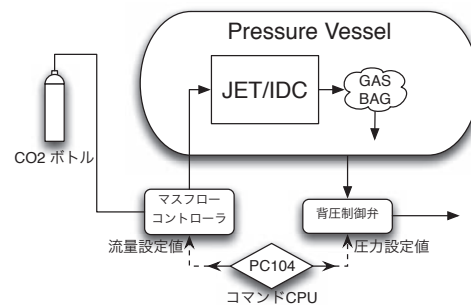


図9 中央飛跡検出器のガスフローシステム。BESS-PolarII では背圧制御弁により、圧力制御を行うことができるようにした。

測定器にはCO<sub>2</sub>のガスボンベが搭載され、実験期間中CO<sub>2</sub>ガスを流し続けることにより、ドリフトチェンバーガスの劣化を防いでいる。BESS-Polar Iではガスの流量制御のみを行い、ガス圧の制御は出口につけられた絶対圧安全弁により行っていたため、安全弁のヒステリシス特性により大きな圧力変動が見られ、チェンバーの性能に大きな影響を及ぼしていた。BESS-Polar IIでは背圧制御弁を新たに加えることで、圧力制御を行うことができるようにした(図9)。

### 2.3 MTOF (Middle Time Of Flight counter)

MTOFはJET/IDCとマグネットの間に配置された、15.5<sup>w</sup>x5.5<sup>t</sup>x1000<sup>l</sup>mmの寸法を持つ薄型のセグメント化された48本のプラスチックシンチレータである。測定器下部を通過する途中でエネルギーを損失して静止し、下のTOFまで到達しないような極低エネルギーの粒子に対してトリガー信号を生成し、dE/dXおよびタイミングを測定するために用いられる。シンチレータの信号はクリアファイバーを束ねたライトガイドでマルチアノード光電子増倍管(MA-PMT)に導かれるが、BESS-Polar Iにおいては、開口部に近い側からの片側読み出ししか実装できなかったため、通過位置に対して、光量、タイミングの依存性が大きく、十分な性能が得られなかった。BESS-Polar IIでは図10に示すように、分割可能なPMTアタッチメントを開発し、図11のようにファイバーの取り回しを工夫することにより、開口部の反対側の信号も読み出すことに成功し、両側読み出しを実現し検出効率と性能を大幅に向上させ、飛行時間分解能(平均)はBESS-Polar Iの $\sigma=420\text{ps}$ から320psに向上した。また、BESS-Polar Iでは応答速度が速いシンチレータ(ELJEN BC230)を用いていたが、より減衰が少ないもの(ELJEN EJ200)を使用することで、光量のz方向の依存性を大幅に減らすことができた(図37参照のこと)。

### 2.4 エアロジェルチェレンコフカウンター (ACC)

BESS実験用に開発されたもの[11]と同様のDiffusion Boxタイプのもので、屈折率 $n=1.02\sim 1.03$ のシリカエアロジェルブロックを積層したものを輻射体として使い、閾値型のチェレンコフカウンターとして動作させる。輻射体から出た光は、ゴアテックス・ハイパーシートガスを反射材として敷き詰めた箱の中を、反射拡散しながら伝播し、最終的に端部にマウントされた48本のPMTで検出される。PMTには、超伝導ソレノイドの漏れ磁場中で動作するように、ファインメッシュ型のPMTが用いられ、できる限り磁場の方向に軸を合わせるように設計されている。BESS-Polar Iで用いられたカウンターは、十分な光量を得られず(光電子数6.7)、反陽子のバックグランドとなる電子、パイオン、ミューオンに対して満足なリジェクション(排除能力)が得られなかった(排除比率 $\sim 1/900$ )。原因はスペース上の制約から厚みを薄くしたこと、寸法の小さなエアロジェルブロック(100<sup>w</sup>x100<sup>t</sup>x10<sup>l</sup>mm)を重ねて使ったことにより境界面での散乱が増え、十分な光がPMTまで届かなかったことである。

BESS-Polar IIでは寸法、エアロジェルブロック、構造体のデザインの徹底的な見直しを行った。GEANT4をベースにしたモンテカルロシミュレーションを行い、テストビームを用いたプロトタイプの試験を行って、寸法、構造の最適化を図った。エアロジェルブロックに関しては、屈折率を1.02から1.03に変え、また、従来の10倍以上の容積をもつ190<sup>w</sup>x280<sup>t</sup>x20<sup>l</sup>mmの大型のものを製作することに成功した(図12)。さらに、固定方法を工夫することにより、各ブロック間の隙間を100 $\mu\text{m}$ 以下に抑えた。図13にエアロジェルブロック、PMTをマウントしたACCを示す。以上の改良により、光電子数が11.3と70%増加し、バックグランドの排除能力が飛躍的に向上した(排除比率 $< 1/6000$ )。

### 2.5 飛行時間測定用カウンター (TOF)

飛行時間測定用カウンターは、100<sup>w</sup>x10<sup>t</sup>x950<sup>l</sup>mmの寸法を持つプラスチックシンチレータ(ELJEN BC230)の両側にアクリル製ライトガイドを挟んでファインメッシュ型PMTをマウントしたもので、上部に10本、下部に12本が測定器の最外層に配置されている。漏れ磁場の影響を少なくするために、PMTの軸方向は磁場の方向とほぼ一致するように合わせられている。従来のBESS実験と大きく異なることは、カウンターが気密容器の外側に置かれるため、低圧でしかも温度変化が激しい( $-30^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ )状況にさらされることである。このため、固定に際しては、温度変化による伸縮によってカウンターの間にはストレスがかからないように、相互のカウンターがスライド可能なように取り付けられ、PMTは低圧下でも動作するようにポッティングを施され、放電を防止する処置がとられていた。しかしながら、BESS-Polar Iの飛行観測中、合計44本のPMTのうち10本が放電をおこして高電圧をかけられなくなり、上下のTOF

によるアクセプタンスが6割に低下する問題が生じた。これは、用いられていたポッティング材料が低圧かつ低温においてクラックを生じて、高電圧がリークしたためと考えられている。ACC に用いられていた PMT はアルミ製の気密容器に封入されていたために問題が起こらなかった。

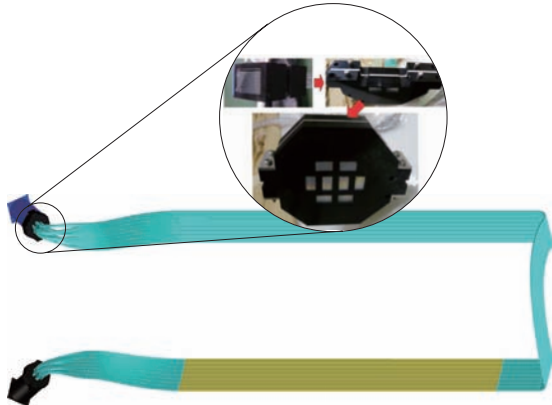


図 10 分割可能なファイバーアタッチメント。これによりファイバーバンドルの自由な取り回しが可能になった。



図 11 ファイバーの取り回し。下に敷き詰められているのが MTOF のシンチレータ本体。上部に物質がこないように工夫されている。

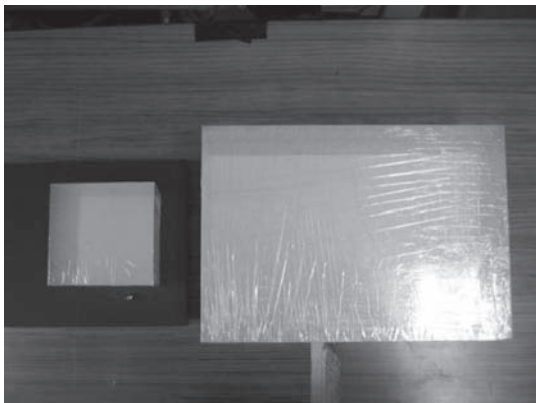


図 12 BESS-PolarII に使用されたエアロジェルブロック (右)。左は BESS-PolarI に使われたブロック。

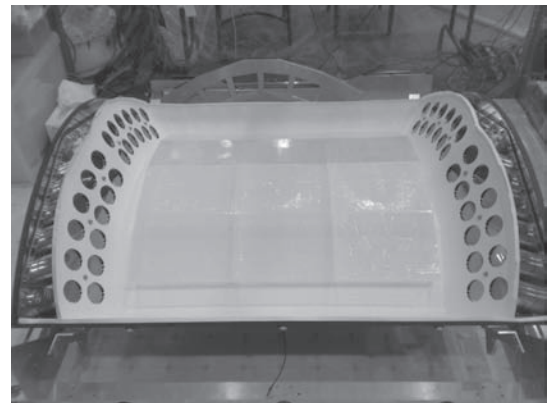


図 13 エアロジェルチェレンコフ測定器の内部。内部に置かれたエアロジェルブロックからの光を 48 本の PMT でとらえる。



図 14 TOF 用 PMT のためのアルミ製気密容器。上空で内部を常圧に保ち、高電圧の放電を防ぐ。

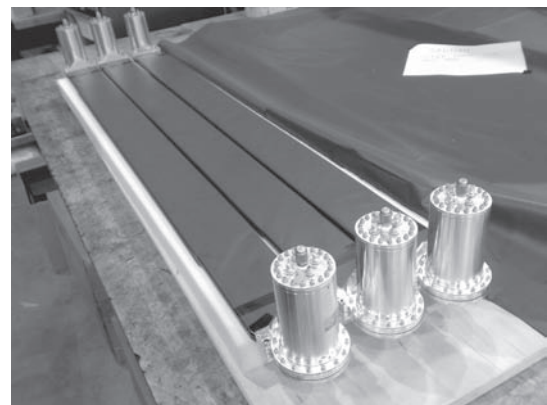


図 15 TOF カウンタの一部。



BESS-Polar II では TOF 用 PMT についても、気密容器を採用することにした。TOF 用 PMT のアルミ製気密容器を新たに設計・製作し（図 14）、完成した容器に封入した PMT はすべて、低圧下で温度サイクルをかけた試験を行い、実際の使用条件でリーク等の問題がないことを確認した。PMT 容器の変更に伴いライトガイドに固定するアタッチメントも新たに設計・製作した。また、粒子識別能力を向上させるため、シンチレータの厚さを 10 mm から 12.7 mm に増加させ、それに応じて飛行時間分解能（両側読み出し）が  $\sigma = 160$  ps から 120 ps に向上した。BESS-Polar II 用 TOF カウンタを図 15 に示す。

## 2.6 データ収集システム

### 2.6.1 概要

BESS-Polar 実験では長時間観測の実現に向けた低消費電力化、高速大容量化の要請に従って、従来使用していたデータ収集システムを一新し、新しいシステムを設計・製作した。電力供給の制約に対応するため従来の 1 kW を越える消費電力を 1/2 以下に減らし、また、特別なトリガー条件をかけずに全ての宇宙線事象を観測記録するために、データ収集速度、容量を強化した。図 16 に BESS-Polar 実験で用いたデータ収集システムの概要を示す。各測定器のデータはそれぞれ近くに配置されたフロントエンドの読み出し回路によって取得され、USB2.0 で CPU にシリアル転送され、ハードディスクに書き込まれる。近年のシリアル通信技術の発展により、低消費電力かつ高速のデータ転送を行える IC を安価に手に入れることが出来るようになっており、BESS-Polar でも従来の集中制御によるパラレルデータ転送ではなく、USB2.0 によるシリアル接続、並列読み出しを用いた。従来の BESS 実験と異なり、TOF、ACC 用のエレクトロニクスは気密容器外部に置かれているため、放熱を空気の対流に頼らず行えるよう、基板上的 IC 配置から基板取り付け用のシャーシまで含めて検討、開発された。各ボードは極力測定器の近くに置き、接続ケーブルの長さを短くし、さらなる重量の軽減に努めた。一台ごとのデータ転送レートはそれほど高くないため、各モジュールに直接 USB2.0 コントロール用 IC を搭載するのではなく、複数からの信号を集めて USB2.0 信号に変換して DAQ システムに送る、MU2 (McBSP-USB2.0 変換) モジュールを開発し、DAQ に接続する USB2.0 機器の数を減らし、データ転送の効率化を図った。各モジュールには低消費電力で動作する DSP (Digital Signal Processor [TMS320VC5402, Texas Instrument]) が搭載され、コントロール及びデータ転送を行った。以下に、それぞれの部分を詳しく説明する。詳細については文献 [12] を参照のこと。

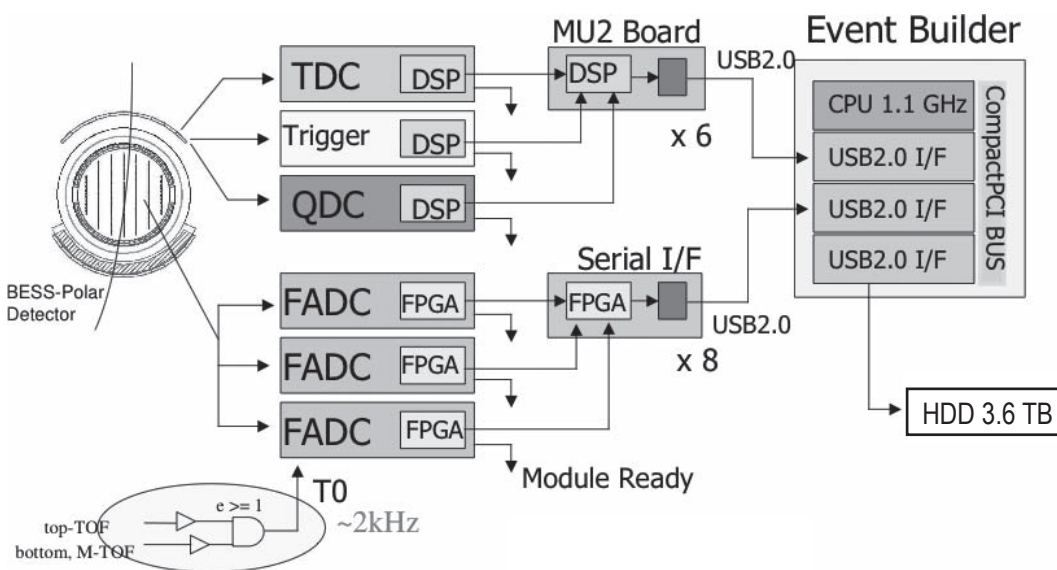


図 16 BESS-Polar データ収集システムの概要 (BESS-Polar I 構成)

### 2.6.2 フロントエンド読み出し回路 (FEE)

粒子の速度を測定する TDC (Time-to-Digital Converter) は、コモンストップ方式を採用し、1台12チャンネル、各チャンネルの分解能は43psec程度、消費電力は0.5W以下である。コンパレータを内蔵し、ディスクリミネーターとの機能を持たせることで、トランシーバー IC が不要となり、消費電力を削減した。図17に測定器の側面のアルミ板に取り付けられたモジュールの写真を示す。

測定器から送られる電荷を測定する QDC (Charge-to-Digital Converter) は、BESS-Polar I ではキャパシタ切り替え方式、BESS-Polar II では遅延ライン方式を用いた。測定できる電荷の範囲は測定器ごとに調整し、フルレンジは ACC で 250 pC、TOF 1000 pC、MTOF 2000 pC である。各チャンネルの消費電力は 0.16 W 程度である。

中央飛跡検出器用 FEE において、問題となるのはそのデータサイズである。平均的なイベントにおける、飛跡検出器 (チェンバー) からの総読み出しデータサイズは 2 kBytes 程度であるが、各ワイヤからのデータサイズはイベント毎に変化するため、1台のモジュールからのスループットはその最大値に対応する必要がある。BESS-Polar 実験では、一台24チャンネルの FADC モジュールを24台使い、チェンバーの読み出しを行った。BESS-Polar I では3台の FADC をバックプレーンで接続し、3台分のデータを一つにまとめて DAQ システムに転送することで、USB2.0 機器の数を減らしたが、BESS-Polar II では、FADC モジュール毎に USB2.0 Controller IC を搭載し、スループット能力を高めて、トリガーレートの増大に備えている。FADC モジュールおよび関連のエレクトロニクスは中央飛跡検出器の前面、気密容器内部にマウントされる (図18)。

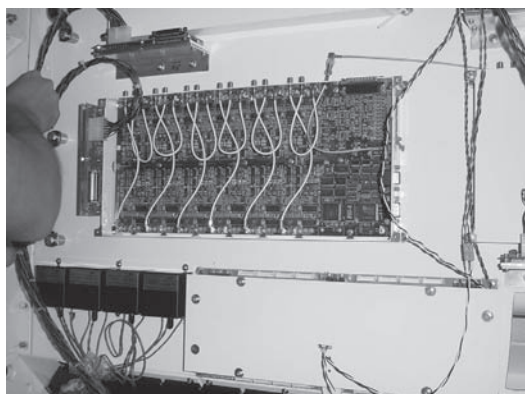


図17 気密容器外部に配置される、フロントエンドエレクトロニクス (TDC, QDC, M2E, トリガー, 高電圧モジュール)

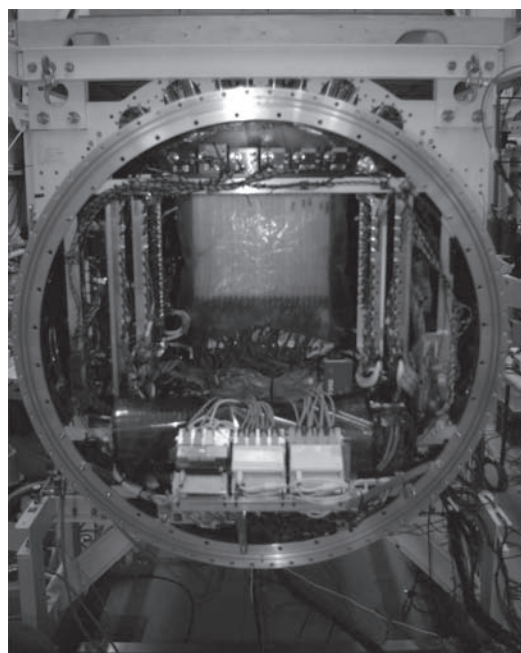


図18 気密容器内部に配置される、中央飛跡検出器および MTOF 用エレクトロニクス。中央奥のガスバッグの向こう側に見えるのが、FADC モジュール。

### 2.6.2 トリガー

低消費電力を実現するため、トリガーのロジックを極力単純化し、必要なエレクトロニクス、主にディスクリミネーターの数を減らした。従ってトリガーモジュールの内部は単純な上下の TOF 及び MTOF からの信号のコインシデンス回路と各測定器からの信号のレートをカウントするスケーラーとなっている。各 FEE ではイベント処理を非同期に行うため、トリガーモジュール上でトリガー信号と同時に 8bits のイベントナンバーを生成し、各モジュールに送信する。イベントビルダーに送られたデータは、このイベントナンバーをもとに再構成される。

### 2.6.3 DAQ CPU およびデータ蓄積

データ収集用のCPUとして、コンパクトPCI規格の市販のモジュールを用いることにより、開発にかかる時間を大幅に短縮し、また最新のコンピューティング技術の発展の恩恵をそのまま受けることが出来た。BESS-Polar Iでは1.1 GHzのPentiumMプロセッサを用いたが、BESS-Polar IIでは1.66 GHzのCore Duoプロセッサを用いることにより、データ収集能力を飛躍的に高めることができた。各フロントエンドからのデータはUSB2.0バスから非同期に送られてくるため、読み出されたデータはいったんFIFOにためられ、すべてのモジュールからデータが届いたことを確認したあと、一つのイベントとしてパッキングし、データストレージに記録する。USB2.0デバイスからの読み出しと、このイベントパッキングを別々のスレッドで行うことにより、イベントプロセスの効率を高めた。

データストレージには、複数の3.5インチのハードディスクを切り替えて使用した。太陽活動極小期によるイベントレートの増加および20日以上の高時間観測に備えて、BESS-Polar Iの3.6 TB (300 Gbyte x 12台) から16 TB (1 Tbyte x 16台) に大幅に増強し、4倍以上のデータを蓄積可能にした。

データ収集システムとは別に、モニターデータを収集し、コマンドのやりとりを行うためのスローコントロールシステムとして、PC104 CPUシステムを搭載している。モニターのネットワーク構築には、エシロン社が開発したLONシステムが採用され、インテリジェントなデバイスに対してリモートでモニターデータの収集、高電圧のコントロール等を、完全な分散システムで実現している。

これらのCPUとハードディスクについては、図19に示すような形に組み上げられ、超伝導ソレノイドの漏れ磁場を遮蔽し、内部を大気圧に保つための、磁気遮蔽気密容器に入れて運転された(図20)。

## 2.7 太陽光発電システム

1週間を越える観測に必要な電力を、リチウム一次電池で供給するのは重量の点で不可能である。そこでBESS-Polar実験のために、単結晶太陽電池セルを用いた、太陽光発電システムを開発した。BESS-Polar測定器は超伝導ソレノイドが発生する強磁場により地磁極の方向に向く強いモーメントが働くため、通常用いられているように測定器の方向を制御し、パネルを太陽の方向に向ける方法は困難である。そこで、測定器の周りを取り囲むようにパネルを配置し(図21)、測定器の方向に関わりなく発電できるようにした。電力変動を抑えるため、パネルは八角形に配置された。この方式では方向制御の不調により太陽光を逃す可能性がないため、二次電池を用いた充放電システムは搭載していないが、地上や上昇中に雲で太陽光が遮られる場合に備え、非常用として約1日分の電力を供給できるバックアップ用のリチウム一次電池を搭載している。BESS-Polar Iでは750<sup>W</sup>x1000<sup>H</sup>mmのソーラーカー用のパネルを縦に4列配置する構造をとっており900Wの電力供給能力を持っていたが、組み立て時や、打ち上げ時の作業に困難があった。BESS-Polar IIでは700Wの電力供給を確保しながら、3列構造にし最下段は折りたたむようにして、組み立て時の作業性・安全性を向上させるとともに、打ち上げ時に準備エリアの外に移動(ロールアウト)する際に、パネルを外さなくても建物のドアを通ることが可能になった。

BESS-Polar II測定器の諸元をBESS-Polar I測定器とともに表1にまとめる。

表1 BESS-Polar I

	BESS-Polar I	BESS-Polar II
面積立体角(実効アクセプタンス)	0.2 m <sup>2</sup> sr	0.3 m <sup>2</sup> sr
中心磁場	0.8 T	0.8 T
最大測定可能 Rigidity (MDR)	240 GV	240 GV
液体ヘリウム容量	400 <small>リットル</small>	520 <small>リットル</small>
超伝導磁場発生可能期間	11 日	25 日
上下 TOF 間隔	1.4 kHz	2.4~2.6 kHz
エアロジェルブロック屈折率	1.02	1.03
MTOF 幅	10 mm	15.5 mm
消費電力(レギュレータ込)	450 W	450 W
データ容量	3.6 TB	16 TB
総重量	1750 kg	1950 kg

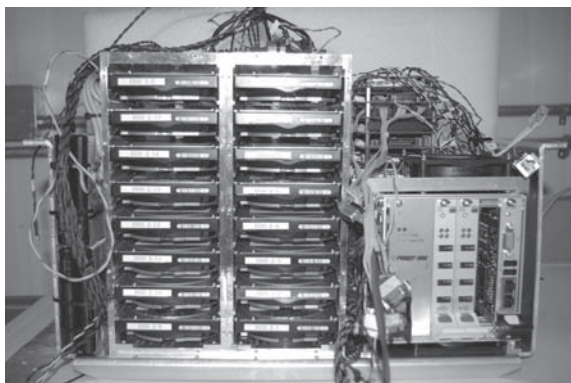


図 19 cCPI ラックにマウントされる CPU および PC104 システム、ハードディスク

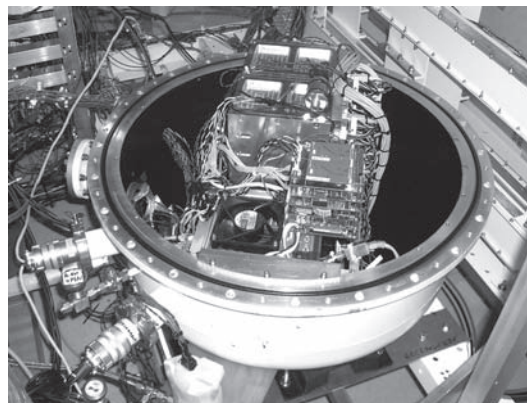


図 20 磁気遮蔽用気密容器に配置される、CPU 群、ハードディスク、測定器から切り離すことができ、一番早く回収される。

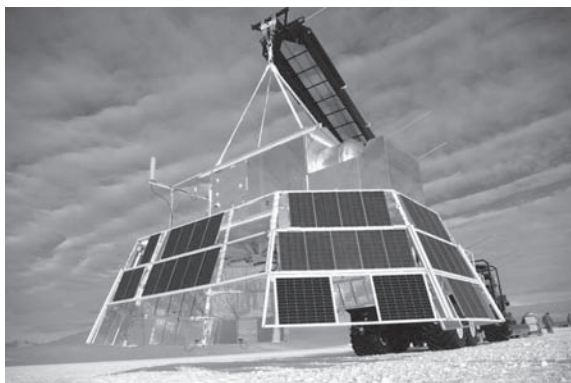


図 21 太陽電池電源システムを装備した BESS-Polar 測定器

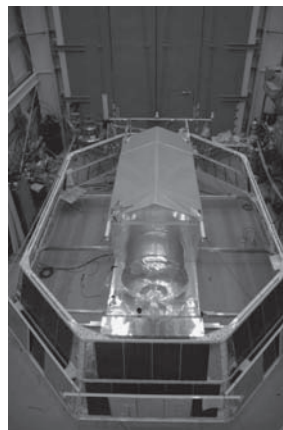


図 22 太陽電池パネルの最下層は折りたたむことにより、高さおよび幅を減らして作業性の向上に貢献した。

### 3. BESS-Polar II 準備・実験経過

#### 3.1 実験準備

第 1 回のフライト後の 2005 年から高エネルギー加速器研究機構 (KEK) および米国航空宇宙局ゴダードスペースフライトセンター (NASA/GSFC) において各測定器の開発が進められた。2007 年春からは NASA/GSFC において、測定器のインテグレーション (図 23) と太陽電池パネルの組み立てを行った。2007 年 7 月末には、測定器の最終調整および気球制御・通信機器との噛み合わせ試験 (コンパチビリティテスト) を行うために、測定器および地上支援機器をテキサス州のコロンビア科学観測気球施設 (CSBF) に移送した。この輸送の際に、振動および衝撃が原因で PCS (Persistent current switch: 超伝導ソレノイドの永久電流を ON/OFF するスイッチの役割を果たす) が輻射シールドと熱接触してしまい、温度が下がらずに超伝導にならないという状況になった。診断の結果、真空容器を開けて PCS スイッチを移設する作業が必要であることが判明した。通常ならば工場に移送して修理を行うところであるが、スケジュールが切迫していたため、現地に技術者を招聘し修理作業を行った。3 重の輻射シールドを外した後、PCS を取り外して、輻射シールドにさわらないような位置に移動した。図 24 に示すように、ヘリウムの配管を現場でカットし、再び溶接し、リークチェックを行うという困難な作業であったが、無事修理に成功し、超伝導コイルは再び運転可能となった。その後、磁場を発生させた状態で測定器の調整を行い、8 月 17 日に気球制御・通信機器との噛み合わせ最終試験に合格し、南極周回飛翔実験の実施が正式に許可された。PCS スイッチの修理の詳しい経緯については [13] を参照のこと。

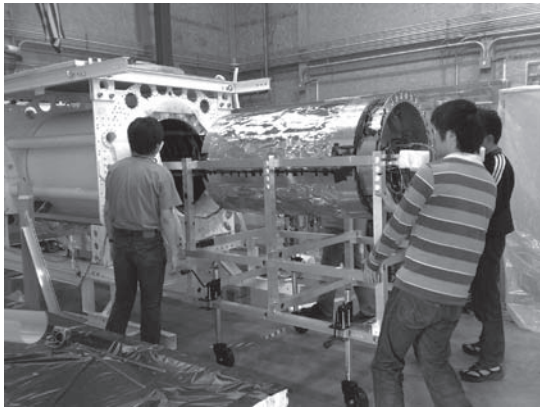


図 23 NASA/GSFC における BESS-Polar II 測定器の組み立て作業風景。

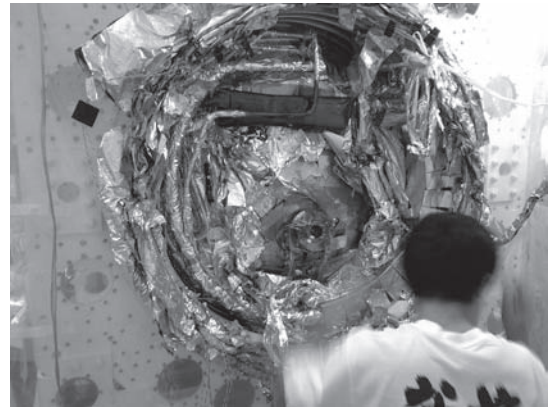


図 24 超伝導ソレノイドの PCS スイッチの修理作業。

測定器本体および地上支援機器、太陽電池パネルは、ニュージーランド経由で南極に輸送され、十数名のメンバーが10月26日から南極マクマード基地（米国）近辺の、ウィリアムフィールドにおいて実験準備を始めた。現地では、各測定器を立ち上げて最終調整を行うとともに、太陽パネルの組み立て、測定器の温度コントロール用の外装を行った。南極においては、直射日光に加え、氷からの照り返しによる熱流入があり、また、光が当たらない部分は放射冷却により、急速に冷却される。特に、測定器とエレクトロニクスの一部を気密容器の外に配置したため、それぞれの動作温度内におさめるため、断熱、放熱に対する厳しい管理が要求される。NASA/Wallops により行われた熱収支シミュレーションの計算結果をもとに、断熱用のスタイロフォーム、太陽光を反射するためのアルミナイズドマイラー、放熱を要する部分には銀テフロンを用いて表面をカバーすることにより、測定器の温度範囲を適切にコントロールした。すべての外装作業を終えた後、11月29日にフライトと同様の条件で、ランチャーにつり下げた状態でコンパチビリティチェックを行い、12月1日フライトレディを宣言した。

### 3.2 飛翔実験

2007/2008年シーズンは BESS-Polar II を含めた3つのペイロードが打ち上げを予定していた。上空の風は11月末から12月上旬にかけて、時計回りから反時計回りに変わるが、上空の風が安定するまで約2週間待たなければならなかった。1番目のペイロードが打ち上がってから、約1週間後12月23日6時30分（現地時間）BESS-Polar II 測定器はウィリアムフィールドから打ち上げられた（図25）。約6時間かけて高度110 kfeet に到達し、BESS-Polar II の宇宙線観測実験が開始された。図26、27にフライト経路と気圧および高度を示す。飛翔観測中太陽電池パネルは安定して電力を供給し、測定器のパラメータ（ゲイン、スレショルド調整）調整の後、順調にデータを取り続けた。約18日間でマクマード基地のほぼ真上に戻ってきた際、2周回目に入り飛翔実験を継続するか、実験を終了し、気球を切り離して測定器の回収を優先して行うかの議論があった。液体ヘリウム残量を蒸発量から精密に見積ると（図28）、当初



図 25 BESS-Polar II の打ち上げ（2007/12/23）

予測していたよりも長い25日間のフライトが可能であり、データストレージの残量と併せて判断した結果、2周回目に臨めばさらに約8日間のデータ取得が可能になることがわかった。しかしながら、さらに周回して戻ってくる1月下旬には、マクマード基地の夏シーズンの終わりが近づき、飛行機、人員等の基地のサポートが枯渇し、また気象条件も悪化するために回収が困難になることが予想された。最終的に、我々は太陽活動極小期における8日間の飛翔観測の重要性の認識のもとで飛翔実験を続けるという決断を下し、NASAのヘッドクォータ、NASA/Wallops、現地での活動をサポートするNSFもこれを支持し、2周回飛翔をすることが決定した。2008年1月17日、2周回に入ってから8日後、液体ヘリウムタンクが空になるのとはほぼ同時にデータストレージにデータを書ききったため、超伝導ソレノイドを消磁して約24.5日間の飛翔観測は終了した。その後、磁場がない状態で飛翔を続けたが、約3/4周回したところで回収困難な山岳地帯に達する前に気球が切り離され、約29日間のフライトを終了した。測定器は氷原に静かに着氷し、データベッセルは無事回収されたが、時期的な問題により、本体の回収は次のシーズン以降に持ち越された。実験準備から飛翔実験終了に至るまでの経過を表2にまとめる。

フライトデータのサマリを表3に示す。磁場中での観測時間は24.5日である。そのうち、測定器のチューニングおよびジェットチェンバーおよびPMTの処理に要した時間は、約1.5日である。実効的に22日間の宇宙線観測データが得られた。飛行中に観測されたイベントは約47億事象である。ハードディスクにはフォーマット後の容量をほぼ使い切る13TBのデータが記録された。飛行高度および残留大気に関してはBESS-Polar Iの36~38 km、3~4 g/cm<sup>2</sup>に比べて、BESS-Polar IIのフライト高度は35~36 kmと低く、また残留大気圧は4~8 g/cm<sup>2</sup> (平均6 g/cm<sup>2</sup>) と高かった。これは、BESS-Polar II測定器の重量が増加したために、BESS-Polar Iで使用した軽量の気球を使用することができず、より重いペイロードを飛翔させられる重量が重い気球を用いたためである。これにより、大気補正をより注意深く行う必要がある。地磁気によるRigidityカットオフについては1周目の後半の一部にカットオフが高い領域を通過したものの、全領域に対して0.7 GV以下となっており、低エネルギー反陽子の測定に影響はない。

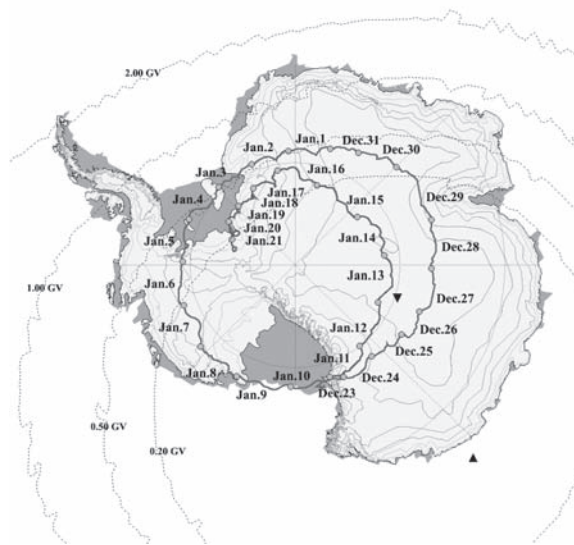


図 26 BESS-Polar II のフライト経路

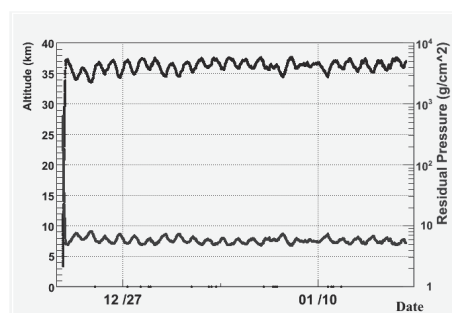


図 27 BESS-Polar II 飛翔の高度および気圧

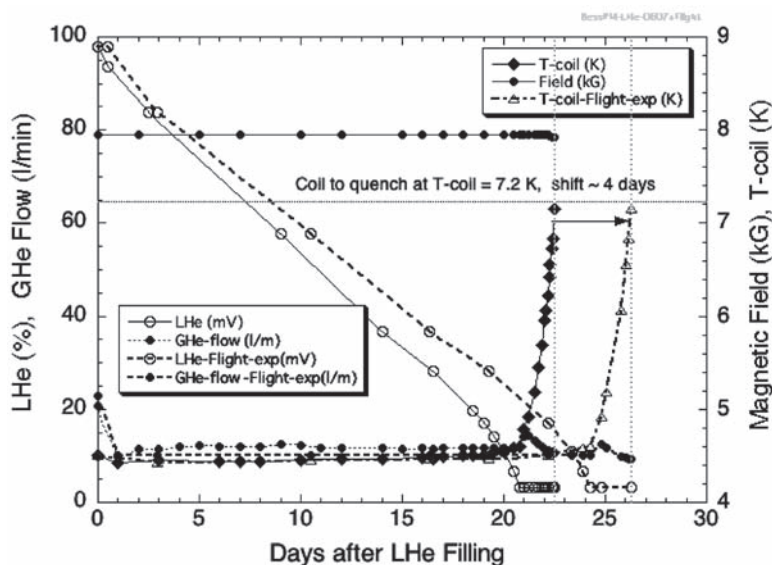


図 28 フライト中の液体ヘリウムの蒸発量，液面，およびコイル温度．地上に比べて 4 日以上，運転時間が延びているのがわかる．

表 2 BESS-Polar II 実験の経過

2005 年 6 月	BESS -Polar I 測定器の検証. TOF 用 PMT 問題の探求
2005 年 9 月	各測定器コンポーネントの開発開始
2005 年 12 月	BESS-Polar I 測定器 (TOF, ACC) と開発中の ACC のビームテスト
2006 年 12 月	各測定器コンポーネントの完成
2007 年 1 月 19 日	NASA/GSFC に輸送, 組み立て開始
2007 年 7 月 26 日	組み上げ完了, CSBF に輸送
2007 年 7 月 31 日	超伝導ソレノイドに熱ショートがあることが判明
2007 年 8 月 4 日	現場での修理作業
2007 年 8 月 19 日	CSBF との噛み合わせ試験に成功
2007 年 10 月 26 日	南極遠征部隊がマクマード基地に到着
2007 年 11 月 29 日	最終噛み合わせ試験
2007 年 12 月 1 日	BESS-Polar II 打ち上げ準備完了
2007 年 12 月 23 日	打ち上げ
2008 年 1 月 11 日	1 周回を終えて, マクマード基地上空を飛翔
2008 年 1 月 16 日	超伝導ソレノイド消磁. 宇宙線観測終了
2008 年 1 月 21 日	気球切り離し. 南極点から 685 km の地点に着水
2008 年 2 月 3 日	第 1 回目測定器にアクセス. データベッセル回収
2008 年 2 月 18 日	マクマード基地を離れる
2009 年 12 月	測定器本体の回収予定

表 3 BESS-Polar II の飛行実験のサマリ

	BESS-Polar I	BESS-Polar II
全飛翔時間 (レベルフライト)	8.5 日	29.5 日
科学観測時間 (磁場あり)	8.5 日	24.5 日
記録イベント数	900 M	4700 M
記録データサイズ	2.1 TB	13.5 TB
トリガーレート	1.4 kHz	2.4 ~ 2.6 kHz
有効観測時間率 (1 - 不感時間)	0.8	0.77
高度	37 ~ 39 km	34 ~ 38 km
残留大気圧	4 ~ 5 g/cm <sup>2</sup>	4.5 ~ 8 g/cm <sup>2</sup>

## 4. BESS-Polar II 測定器性能

### 4.1 オンラインでの測定器チェックおよび調整

フライト中は、宇宙線観測事象および各種環境データをテレメータで約 10 秒に一回に送信し、測定器の状態を常にモニタした。図 29 に通信経路と使用可能なデータ転送速度を示す。基地とペイロードが直線で見わたすことのできる LOS (Line of Sight) 期間、即ち、打ち上げ直後および一周回後に基地上空に戻ってきた数日間、直接アンテナを利用した高速通信が可能であるが、それ以外は TDRSS あるいは Iridium 衛星を用いて通信を行った。ペイロードに向けたコマンドは 1 時間に約 15 分間可能であり、測定器のパラメータ（高電圧値、スレシヨールド、トリガー条件）の変更を行った。実際、以下に述べるようなトラブルが生じた際にも、診断システムが異常をいち早く察知し、すぐにコマンドを送って対処したため、大事には至らなかった。

#### TOF 用 PMT HV の不調

打ち上げ直後、気球上昇中に 2 本の TOF 用 PMT が動作不安定になり、高電圧に異常が生じた。コマンドにより、2 本の PMT の高電圧を OFF にし、トリガーの条件から外すことにした。これにより、22 本の TOF カウンタのうち、2 本が片側のみ読み出しを行うこととなった。

#### PMT のノイズ増大

TOF 用 PMT および ACC 用 PMT において、突然シングルレートが急激に増加する現象が断続的に見られた。スレシヨールドを変化させながらスタディをしたところ、ノイズの波高は信号に比べ十分に小さく、スレシヨールドを上げることにより、検出効率、時間分解能に影響を与えることがなく、ノイズを落とすことができることがわかった。これらの事象は測定器が低温になったとき多く発生したことから、原因は急激な温度変化によるものと考えられている。合計 8 本の TOF 用 PMT について、スレシヨールドの調整を行い、ACC 用 PMT に関しては 1 本の高電圧を OFF にすることにより対処した。

#### JET チェンバーの高電圧の不調

観測を開始してから約 1 日後に JET チェンバーのドリフトフィールド用高電圧電源の電圧および電流モニタが不安定になる現象が起こった（図 30）。送られてくる測定器データおよびモニターの値から判断して高電圧電源の制御系のトラブルと考えられた。原因を特定することができず、電源が完全に壊れる状況を回避するため、高電圧を約 90% に下げて JET チェンバーを運転することにした。電圧変化に伴うドリフト速度の変化を補償するために、気密容器の背圧弁の設定圧力を変化させることで、ガス圧を下げることにし、ゲイン変化をポテンシャルワイヤの電圧で補正した。

その他の測定器は、問題なく動作し、期待された性能を発揮してデータを取り続けることができた。トリガーレートは約 3.1～3.3 kHz（測定器の不感時間を含めると 2.4～2.6 kHz）で推移したが、図 31 に示すように、フライト中に変動するのが観測された。同時期に観測された、南極での中性子モニターの値、太陽風の速度と非常に強い相関が認められたため、太陽風による宇宙線の日々変化を観測したものと考えられている。取得したデータを詳細に解析することにより、短期的な太陽活動の変化が宇宙線流束に及ぼす影響を詳しく探求できると期待できる。

### 4.2 データ解析による測定器性能

回収されたデータをもとに解析は順調に進められており、現在、各測定器の飛翔実験中の較正を行っている。フライトデータは約 30 分間の 1171 個の RUN に分けられ（打ち上げ直後の測定器調整 90 RUN を含む）、上空で行った較正データ（各測定器のペダスタル、スレシヨールド）に加えて、実際のフライトデータから、温度、圧力等の環境による測定器の性能の変化を細かく求めて、適正な較正パラメータを算出している。



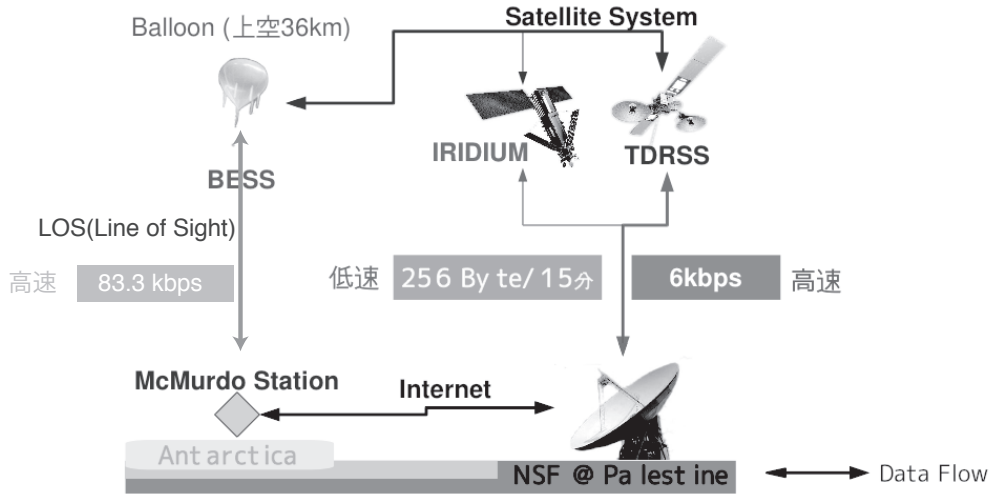


図 29 フライト中のコミュニケーション経路および転送速度

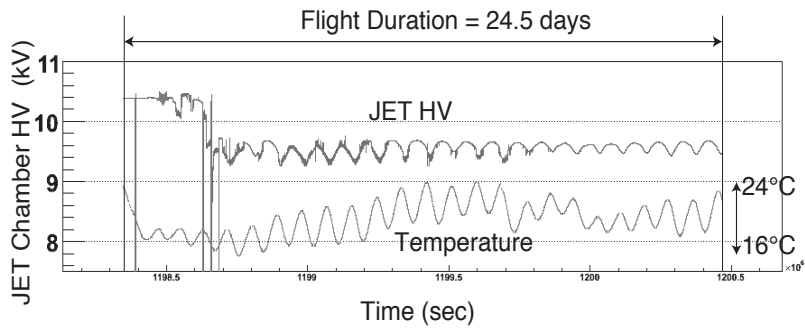


図 30 JET チェンバー高電圧不良問題. 突如として高電圧電源のモニタが不安定になる. 温度とともに, 高電圧の値が変動を始めた.

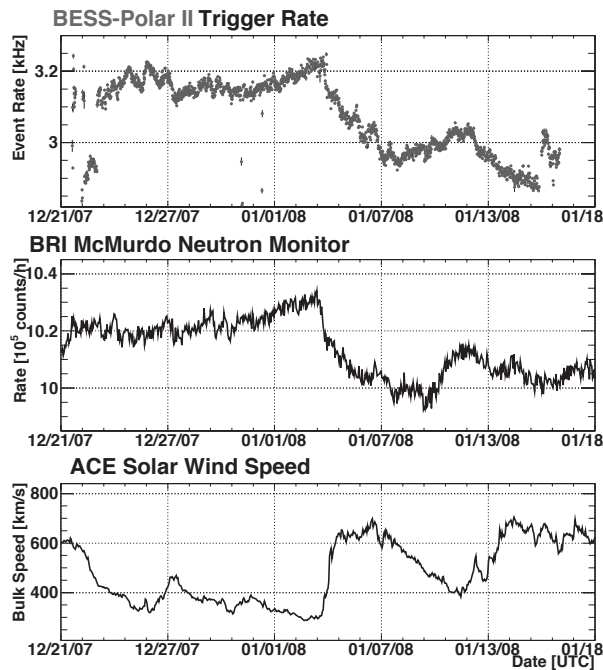


図 31 BESS-Polar II のトリガーレート (上), マクマード基地の中性子モニタ (中), ACE で測定された太陽風速度. 非常によい相関 (逆相関) が認められる.

これまでに、得られた測定器性能を BESS-Polar I との比較を交えながら、以下に示す。

### 飛跡検出器

前述のように、JET の高電圧が不安定になってからはドリフト電圧を約 90 % の 9.5 kV で運転し、他の高圧、ガス圧もそれに併せて調整した。図 30 に示すように、ドリフト電圧が約一日周期で変化しており、温度との相関が認められる。JET チェンバーのドリフト速度は、従来は温度、圧力の関数として補正を行っていたが、今回は新たに JET チェンバーの高電圧もパラメータに加えて、較正を行った。これまでのスタディの結果、特に電圧変動の激しかった RUN の一部（全体の約 2 %）を除いて、飛跡を精度よく再構成可能なことがわかり、BESS-Polar I と同等の  $r\phi$  座標における位置分解能  $\sigma \sim 120 \mu\text{m}$ （様々なドリフト距離における平均値）が JET、IDC の両方で得られていることを確認した（図 32, 33）。

また、 $z$  方向の位置分解能は  $76 \mu\text{m}$  の電磁シールドの効果が顕著に現れており、特に外側のワイヤーに対しての改善が著しく、全体として BESS-Polar I に比べ約 1.5 倍優れた、 $\sigma = 25 \text{ mm}$  の測定精度を達成することができた（図 34）。IDC に関しても、計算アルゴリズムの見直しにより  $\sigma = 650 \mu\text{m}$  と BESS-Polar I より優れた分解能が得られている（図 35）。

### TOF

PMT の高電圧印加不良により動作不可能な PMT は 2 本にとどまり、Noisy になった PMT についてもディスクリミネータの閾値をあげることにより性能を落とすことなくノイズのみを落とすことができ、BESS-Polar I で起こったアクセプタンスのロスにはなかった。また、BESS-Polar I で片側読み出しが大半を占めていたため  $\sigma = 160 \text{ ps}$  に低下していた時間分解能が  $120 \text{ ps}$  に改善した（図 36）。

### MTOF

MTOF は圧力容器の中に配置されたため温度変化が少なく、TOF 用 PMT に見られた Noisy になる PMT は少なく、フライト途中で 1 本が Noisy になったが、スレシールドを上げることにより、対処することができた。図 37 に得られた時間分解能の  $z$  方向依存性を示す。MTOF は両側からの読み出しが可能になったことで、開口部から離れた側における時間分解能と検出効率が向上した。BESS-Polar I が  $\sigma = 320 \sim 530 \text{ ps}$  であったのに対して、加重平均を用いることにより、 $\sigma = 260 \text{ ps} \sim 360 \text{ ps}$  になった。図 38 は BESS-Polar II で初めて測定可能になった MTOF の時間差による  $z$  測定の精度を示している。 $\sigma = 60 \text{ mm}$  の分解能が得られている

### ACC

ACC の性能は相対論的な粒子が通過した場合に発生する光量によって評価できる。BESS-Polar I では光量が不足したために、反陽子のバックグラウンドとなる電子、 $\mu$  粒子が十分に除去できなかった。BESS-Polar II の ACC はフライト中 2 本の PMT が Noisy になった以外は順調に動作した。図 39 にピークの高さを合わせて BESS-Polar I と BESS-Polar II の QDC 分布を比較したものを示す。分布から計算される平均光電子数は BESS-Polar I において 6.7 個であったものが、11.3 個と 1.7 倍に改善した。これにより、バックグラウンドの排除比率が  $1/900$  から  $1/6000$  以上に向上した。

以上、各測定器は期待通りの性能を発揮し、打ち上げ直後の測定器の調整期間（ $\sim 7\%$ ）、JET の高圧の変動が激しかった期間（ $2\%$ ）を除いて、 $90\%$  以上のデータが物理解析に使用できることを確かめた。実効的な観測時間は BESS-Polar I の 5 倍に達し、前回の太陽活動極小期に実施された BESS97 の約 20 倍に達する。

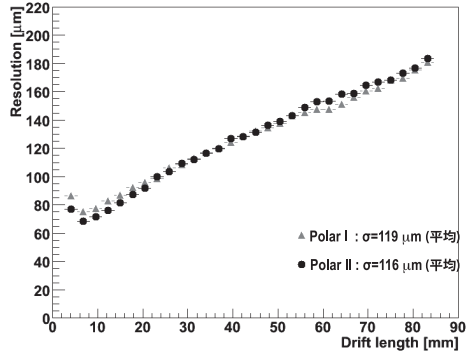


図 32 JET チェンバーの  $r\phi$  面での位置分解能. 図中の値はドリフト領域での平均を表す.

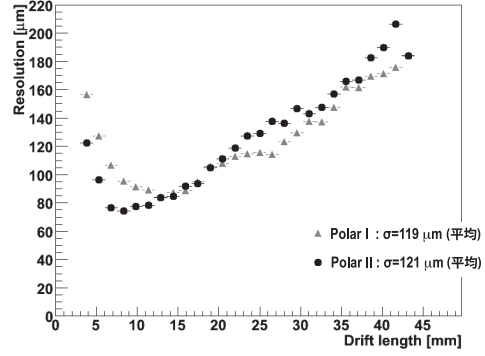


図 33 IDC の  $r\phi$  面での位置分解能. 図中の値はドリフト領域での平均を表す.

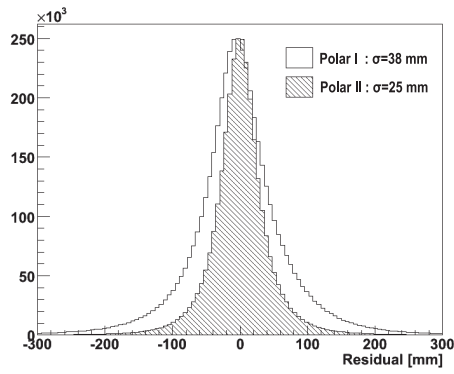


図 34 JET チェンバーの  $z$  方向の位置分解能

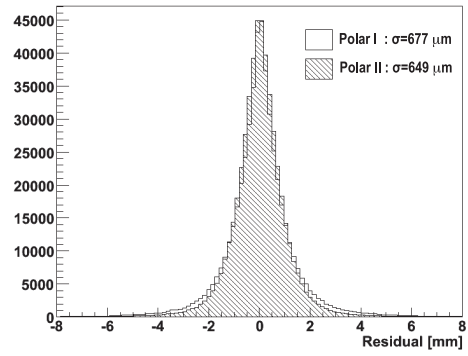


図 35 IDC の  $z$  方向の位置分解能

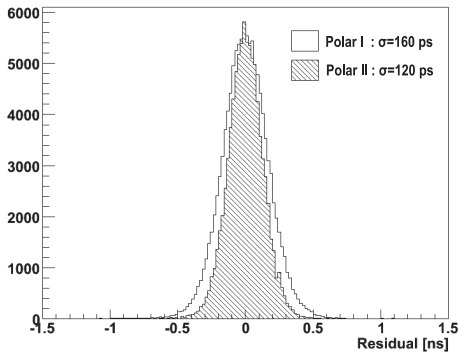


図 36 TOF の時間分解能

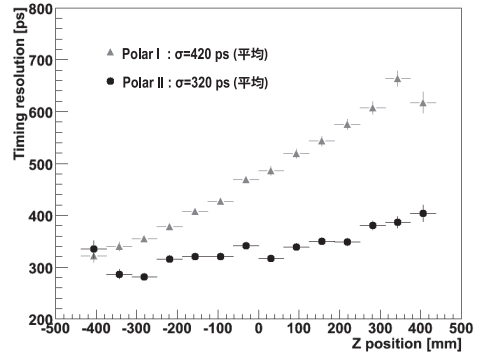


図 37 MTOF の時間分解能: 図中の値は  $z$  方向にわたって平均したもの.

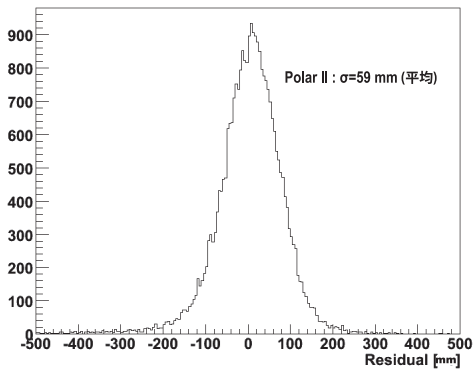


図 38 MTOF の両側の時間差から求めた  $z$  の分解能

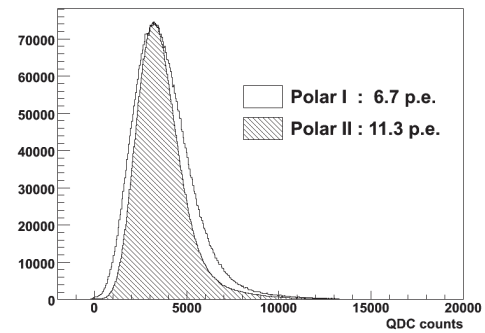


図 39 ACC の光量分布: 光電子数はヒストグラムをポアソン分布でフィットしてその形状から求めた.

表4に今回のフライトで得られた測定器性能を BESS-Polar I と比較してまとめる。全ての使用可能なデータを用いて電荷が1の粒子に対して、速度の逆数を Rigidity に対してプロットし反陽子の同定を予備的に行ったものを図40に示す。ACCによるVETO、各測定器でのdE/dXの情報を用いることで、反陽子がきれいに同定され、8000事象以上観測されている。今後、さらに詳細な解析を行い、反陽子の流束を決定するとともに、その他の物理解析も行っていく予定である。

## 5. おわりに

BESS-Polar II 実験は24.5日間の観測を太陽活動極小期に行った。フライト中様々なトラブルも発生したが、迅速に対処することでほとんどロスがなくデータ収集することができ、測定器全般の性能についても、すべてにおいて BESS-Polar I を上回る性能を発揮することができた。1993年以來10年以上続けて行われてきた BESS 実験の集大成とも言えるデータを取得することができ、今後解析を進めることにより、これまで目標に掲げてきた様々な物理を究極の精度で探求することが可能であると期待されている。

表4 BESS-Polar II 測定器性能のまとめ

	BESS-Polar I	BESS-Polar II
JET $r\phi$ 位置分解能 ( $\sigma$ )	119 $\mu\text{m}$	116 $\mu\text{m}$
JET $z$ 位置分解能 ( $\sigma$ )	38 mm	25 mm
IDC $r\phi$ 位置分解能 ( $\sigma$ )	119 $\mu\text{m}$	121 $\mu\text{m}$
IDC $z$ 位置分解能 ( $\sigma$ )	677 $\mu\text{m}$	649 $\mu\text{m}$
TOF 時間分解能 ( $\sigma$ )	160 ps	120 ps
MTOF 時間分解能 ( $\sigma$ )	420 ps	320 ps
MTOF $z$ 位置分解能 ( $\sigma$ )	NA	59 mm
ACC 光電子数 (MIP)	6.7	11.3
ACC バックグラウンド排除比率	1/900	1/6000 以上

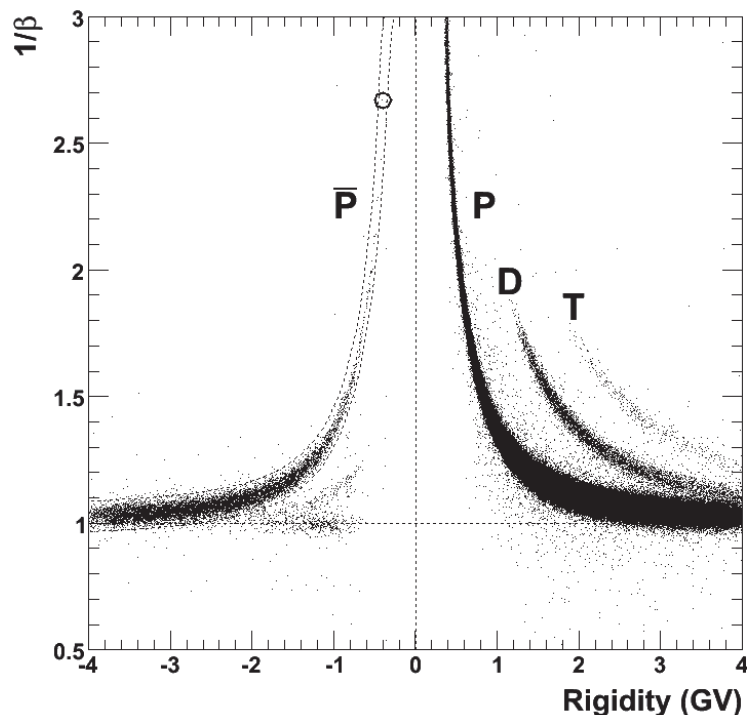


図40 BESS-Polar II データによる粒子識別の例。それぞれの粒子の質量に対応したバンド構造が見えている。○はこれまでに得られた最低エネルギーの反陽子を表す。

## 謝辞

BESS-Polar II 実験は高エネルギー加速器研究機構 (KEK), 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部 (ISAS/JAXA), 東京大学, 神戸大学, NASA Goddard Space Flight Center (NASA/GSFC), メリーランド大学, デンバー大学による日米共同実験として推進されている。気球実験の実施, 南極でのサポートについて, NASA Head Quarter, Balloon Project Office/NASA/GSFC/WFF, CSBF, NSF/RSPC によって多大なる御支援をいただいたことを深く感謝する。BESS-Polar 実験は文部科学省研究費補助金・特別推進研究 (1300-1004, 平成 13~17 年度), 基盤研究 S (18104006, 平成 18 年度以降), 基盤研究 B (19360070, 平成 19 年度以降), および NASA 研究費の支援を受け, 推進された。各関係機関の御支援に深く感謝する。

## 参考文献

- [ 1 ] A. Yamamoto, J. W. Mitchell, K. Abe, et al. BESS-Polar long duration flights in Antarctica. In Proc. 27th Intl. Cosmic Ray conf. (Hamburg), pages 2135–2138, 2001.; T. Yoshida, A. Yamamoto, J. W. Mitchell, et al. BESS-Polar Experiment. Adv. Space Res., 33:(10)1755–(10)1762, 2004.;
- [ 2 ] H.Matsunaga, et al., Measurement of Low-Energy Cosmic-Ray Antiprotons at Solar Minimum Rev. Lett. **81** (1998) 4052-4055.
- [ 3 ] S. Orito, et al., Precision Measurement of Cosmic-Ray Antiproton Spectrum, Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 1078-1081.
- [ 4 ] K. Maki, T. Mitsui, and S. Orito, Local Flux of Low-Energy Antiprotons from Evaporating Primordial Black Holes, Phys. Rev. Lett. **76**, 3474-3777 (1995)
- [ 5 ] M. Sasaki et al., Search for Antihelium: Progress with BESS, Adv. Space. Res. **42** (3) (2008) 450
- [ 6 ] H. Fuke et al., Search for Cosmic-Ray Antideuterons, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 081101.
- [ 7 ] Y.Shikaze et al., Measurements of 0.2-20 GeV/n cosmic-ray proton and helium spectra from 1997 through 2002 with the BESS spectrometer, Astroparticle Phys. **28** (2007) 154-167;
- [ 8 ] Y.Asaoka et al.,Measurements of Cosmic-Ray Low-Energy Antiproton and Proton Spectra in a Transient Period of Solar Field Reversal, Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 051101.
- [ 9 ] T. Hams et al., Short-term and diurnal proton flux variation during the BESS-Polar I balloon flight, Proc. 31st ICRC (Łódź) 1416 (2009).
- [10] Y. Makida, T. Kumazawa, K. Tanaka, et al. Performance of an Ultra-Thin Superconducting Solenoid for Particle Astrophysics. In IEEE Trans. Applied Superconductivity, volume 15, pages 1248–1251, 2005.
- [11] Y.Asaoka et al., Development of a Large-Area Aerogel Cherenkov Counter Onboard BESS, Nucl. Instr. and Methods A **416** (1998) 236-242.
- [12] M. Sasaki et al., Low Power Front-End Electronics for the BESS-Polar Time-of-Flight Counter and Aerogel Cherenkov Counter, Proc. 29th Intl. Cosmic Ray Conf. (Pune) 3 (2005) 421-424.
- [13] 篠田遼子 : BESS-Polar 実験 南極周回気球飛翔超伝導磁石に関する研究, 東京大学修士論文 2008 年 3 月