

BESS-Polar : 南極周回気球実験による宇宙線反陽子の精密測定

福家英之¹・山本 明²・野崎光昭³・John Mitchell⁴・Eun-Suk Seo⁵
浅岡陽一¹・安部 航¹・安楽和明¹・泉 康介¹・大宮英紀²・佐々木誠²
志風義明¹・鈴木純一²・田中賢一²・谷崎圭祐³・西村 純¹・灰野禎一¹
藤川元治¹・前野忠嗣³・榎田康博²・松井長隆¹・松田晋弥¹・松本 浩¹
山上隆正⁶・大和一洋³・山本康史¹・吉田哲也²・吉村浩司²
Alexander Moiseev⁴・Jonathan F. Ormes⁴・Jian-Zhong Wang⁵

BESS-Polar Experiment : Precise Measurement of Cosmic-ray Antiprotons by Long Duration Flights in Antarctica

By

Hideyuki FUKU¹, Akira YAMAMOTO², Mitsuaki NOZAKI³, John MITCHELL⁴, Eun-Suk SEO⁵,
Yoichi ASAOKA¹, Koh ABE¹, Kazuaki ANRAKU¹, Kosuke IZUMI¹, Hidenori OMIYA²,
Makoto SASAKI², Yoshiaki SHIKAZE¹, Junichi SUZUKI², Kenichi TANAKA², Keisuke TANIZAKI³,
Jun NISHIMURA¹, Sadakazu HAINO¹, Motoharu FUJIKAWA¹, Tadashi MAENO³,
Yasuhiro MAKIDA², Nagataka MATSUI¹, Shinya MATSUDA¹, Hiroshi MATSUMOTO¹,
Takamasa YAMAGAMI⁶, Kazuhiro YAMATO³, Yasuchika YAMAMOTO¹, Tetsuya YOSHIDA²,
Koji YOSHIMURA², Alexander MOISEEV⁴, Jonathan F. ORMES⁴ and Jian-Zhong WANG⁵

Abstract : A long-duration balloon flight in Antarctica, BESS-Polar experiment, is being prepared. It aims at extremely sensitive measurement of low energy antiprotons to search for any novel primary origin and to study the cosmic-ray propagation and the solar modulation. The search for cosmic antimatter such as anti-helium is a fundamental objective to study baryon asymmetry/symmetry in the Universe. This report describes the progress and future prospect of BESS-Polar experiment.

¹ 東京大学 University of Tokyo

² 高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

³ 神戸大学 Kobe University

⁴ NASA/GSFC National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center

⁵ University of Maryland

⁶ 宇宙科学研究所 Institute of Space and Astronautical Science

要 旨

南極周回気球による宇宙線反粒子探査を目的に「BESS-Polar実験」が計画されている。中でも、低エネルギー反陽子の精密測定は主要な目標であり、宇宙線の伝播や太陽活動から受ける影響の正確な理解に加え、一次起源反陽子の探索を目指している。また、反ヘリウム等の反粒子の探索により、現在の宇宙における物質/反物質の非対称性に関する直接的な知見を得ることができる。

本稿では、BESS-Polar計画の概要を紹介すると共に、開発の状況について報告する。

重要語：BESS, 反粒子, 反陽子, 反ヘリウム, 南極気球実験, 精密探査

1. はじめに

超伝導スペクトロメータによる気球実験(BESS)は、「宇宙における素粒子現象」の探索を目的に、東京大学・高エネルギー研・神戸大学・宇宙科学研究所・NASA・メリーランド大で推進されてきた国際共同実験である [1, 2]。

加速器科学で培った最先端の技術を駆使して設計・製作されたBESS測定器は、超伝導ソレノイド・飛跡検出器・高性能粒子識別装置・並列処理型高速データ収集システムで構成され、同種の測定器では世界最大級の大面積立体角を有し、0.2~150GeVの広いエネルギー領域を同時に高精度で測定できるというこれまでの飛翔体観測器に無い特長を備えている [3]。

この特長を生かして、1993年以来カナダ北部等での8回のフライトに成功し、これまでの宇宙線観測を大きく上回る高精度の観測結果を挙げてきた [4]。

特に、宇宙線反陽子の測定に関しては 質量の同定という確実な方法で低エネルギー反陽子の存在を世界で初めて確認したのみならず、0.18~4.2GeVの広いエネルギー領域にわたってこれまでの実験よりも圧倒的に優れた精度で反陽子のスペクトラムを得ることができた。その結果、宇宙線反陽子の起源が主として宇宙線と星間物質の衝突によって二次的に生成されることを示す2 GeV付近の特徴的なピークを世界で初めて検出し、標準的な宇宙線伝播モデルが反陽子にも適用できることを示した(図1)。

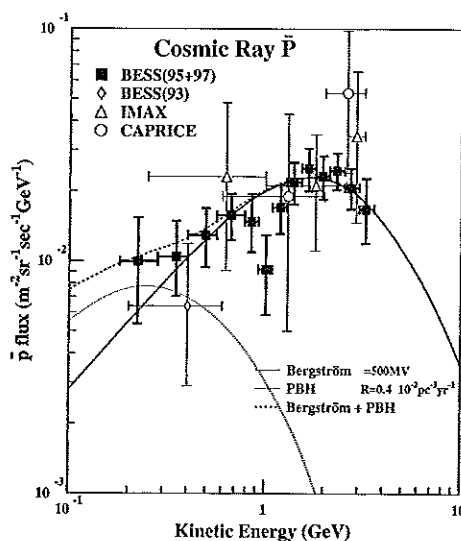


図1 BESSで観測された反陽子のエネルギースペクトラム。実線が二次粒子としての予測

一方、反陽子スペクトラムの1 GeV以下の低エネルギー領域においては、衝突起源二次粒子として予測される理論値に比べて、若干の過剰が観測された(図1)。「宇宙初期に作られた原始ブラックホールのHawking輻射」や「暗黒物質の候補である超対称性粒子の対消滅」などの宇宙論的・素粒子物理学的に興味深い現象が仮に存在したとすると、低エネルギー反陽子が生成されると考えられており、これらの未知現象の兆候を探索するためには、今後さらなる精密探査が必要である。

また、120GV(54GV/n)までの宇宙線陽子(ヘリウム)のスペクトラムを5%(10%)以下の誤差で観測し、ニュートリノ振動実験における大気ニュートリノフラックスの理論計算に不可欠である、宇宙粒子線の精密観測に貢献した。加えて、測定可能領域を1 TeV付近まで拡大し、より広い領域での高精度陽子/ヘリウムスペクトラムの測定を目指した、「BESS-TeV実験」が2001～2002年にかけて進行中である。

日本国内の観測としては、1999年に宇宙線研との共同利用実験として、乗鞍宇宙線観測所(高度2,770m)における宇宙線観測実験が行なわれた。これにより、山頂高度における初めての宇宙線反陽子の観測に成功すると共に、同高度におけるミュオン粒子スペクトラム等の精密観測に成果を得た。

これらの成果を踏まえた次期計画として、南極周回飛行による宇宙線反粒子の精密探査「BESS-Polar計画」を目指している。本稿では、BESS-Polarの概要を紹介すると共に、開発の状況について報告する。

2. BESS-Polarで目指すもの

BESS-Polar計画はBESS測定器の持つ精密かつ大立体角である特色と、南極周回による長時間観測、そして2006～2007年に予想される太陽活動極小期の三つの条件を兼ね備えることにより、究極的な高感度での宇宙線反粒子の精密探査を行なうことを目標としている[5, 6]。

[反陽子]

なかでも特に、低エネルギー反陽子に焦点を絞った精密観測により、

(1)これまでより一桁高い統計精度でエネルギースペクトルを観測して、星間物質の衝突により生成される二次宇宙粒子線の伝播モデル、及び、太陽活動が及ぼす変動を正確に理解しつつ、

(2)「原始ブラックホールのHawking輻射」等からの一次起源反陽子を探索する

ことを目指している。また、(2)と同様の観点から、宇宙線反重陽子の探索も行なう。低エネルギー反重陽子は二次粒子としての生成がより難しいため、もし観測されれば、宇宙起源反重陽子の存在を高い確率で示唆することとなる。

[反ヘリウム]

反ヘリウムが二次粒子として生成される確率は反重陽子よりもさらに小さい。従って、反ヘリウムが一例でも観測されれば、初期宇宙にその起源を求めざるを得ない。現在我々の知る宇宙において物質/反物質の対称性が破れているのは、ビッグバン直後に起きたCPの破れ・バリオン数非保存の結果として解釈されている。しかし、もしこの破れが自発的なものであれば、宇宙が物質と反物質の領域に分かれたドメイン構造をしている可能性もあり、そこから漏れ出した反ヘリウムが地球に到達することも考えられる。これまでのBESS実験では、ヘリウムに対する反ヘリウムの上限値として 7×10^{-7} を得ている。これは、我々の銀河およびその周辺の宇宙が物質のみからできていることの最も直接的な証拠であるが、さらに高感度の観測により、より広い領域での検証が可能となる。BESS-Polarでは、 10^{-7} 以下の感度を目標とした反ヘリウムの探索を目指す(図2)。

[その他]

これまでのBESS実験と同様に、BESS-Polarにおいても反物質以外の宇宙粒子線測定も計画されており、観測時間の長時間化と測定器の薄肉化(後述)による測定精度の向上が期待されている。具体的には、

(1)宇宙線の化学組成や銀河内伝播を知るための手掛かりとなる陽子/ヘリウム/軽原子核ならびにその同位体の

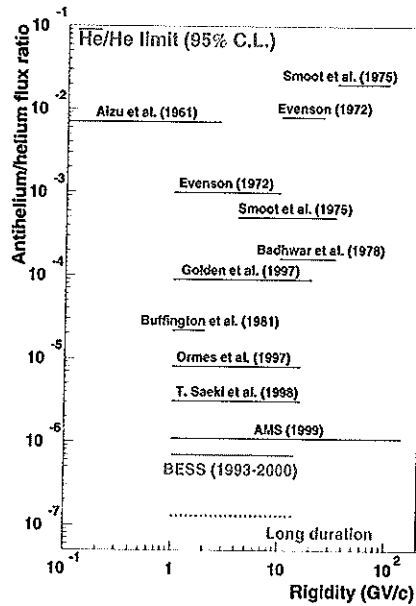


図2 反ヘリウム探索の進展とBESS-Polarで期待される探索感度

測定

- (2)宇宙線の大気発展や大気ニュートリノ理論計算の基礎データとなる大気ミューオンの測定
- (3)宇宙線の加速機構や銀河内伝播を知るための電子/陽電子の測定
- (4)その他、ストレンジクォークマター等のエキゾチック粒子の探索等が挙げられる。

3. 反陽子の測定と国際的な位置付け

BESS-Polar測定器の重量は約1.4トン(後述)であるため、現状では昭和基地からの打ち上げは困難である。よって、南極での気球実験はNASAとの協力により、NSF(National Science Foundation)が統括するマクマード基地からの周回飛行を行なうことを計画している。第一回フライトを2003年12月から2004年1月にかけて実現した上で、その結果を元に測定器の最適化を行ない、太陽活動極小期が予想される2006~7年に第二回目のフライトを本実験として実施することを目指している。

約20日間の南極周回飛行により、0.1~4 GeVのエネルギー領域において、 10^{-4} を超える低エネルギー宇宙線

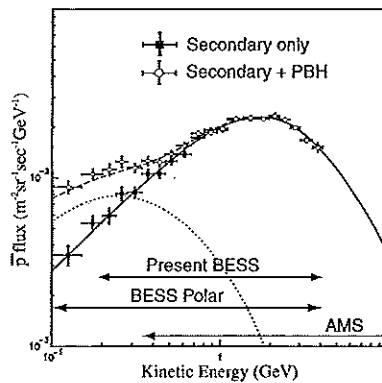


図3 BESS-Polarで予想される反陽子スペクトラムの予想シミュレーション

反陽子イベントの観測が期待される。図3は、BESS-Polarによる20日間観測のシミュレーションを示したものである。点線で示した様な原始ブラックホールの蒸発に伴う一次起源反陽子スペクトラムを仮定すれば、鎖線で示される様に、一次起源反陽子に起因する低エネルギー反陽子流束の過剰を捉えることが可能となる。一次起源反陽子流束の絶対値を予言するモデルは存在しないが、1 GeV以下の低エネルギー領域において 10^3 以上の二次起源反陽子イベントが観測されると予想されるので、仮に一次起源反陽子が二次起源反陽子の10%程度含まれれば、確実に捉えることができる。

飛翔体を用いた宇宙反粒子探索実験としては、BESS-Polarと共に、極軌道衛星によるPAMELA、国際宇宙ステーション(ISS)で計画されているAMS等が存在する(表1)。PAMELAは極軌道実験計画であるが、立体角がBESSに比べて二桁も小さく、BESS-Polarでの20日間観測に対して、統計が遥かに及ばない。一方、AMSはBESSと同等の立体角を有し、3年間に渡る連続実験であることから、高エネルギー領域では圧倒的な感度を発揮する。しかし、ISSの軌道が南北57度の範囲に限られるため(図4)、厳しいリジディティカットオフの制限を受け、低エネルギー領域での観測感度は上がらない。

従って、極地・高緯度(～80度)に留まるBESS-Polar実験は低エネルギー領域において高い感度(立体角×観測時間)を有する唯一の実験となる(図5)。即ち、一次起源反陽子という宇宙論的・素粒子物理学的に興味深い問題に決着をつけるためには、BESS-Polarによる精密探査が不可欠であると言える。勿論、AMSとBESS-Polarが各々の特色を生かし、2 GeV付近のピークをカバーしあった相補的な反陽子の観測データを提供することができれば、宇宙線反陽子スペクトルの全容を究極的な精度で解明できることになる。

表1 BESS-Polar と AMS・PAMELA とのパラメータの比較

実験名	BESS-Polar	PAMELA	AMS
面積立体角 ($m^2 \cdot sr$)	0.27	0.0021	0.3
飛翔時間 (days)	20	1000	1000
飛翔高度 (km)	36	690	320～390
軌道角/緯度 (deg)	>70	～±80	<±51.7
観測エネルギー (GeV)	0.1～4	>0.1	>～0.5
飛翔方法	南極気球	極軌道衛星	ステーション
打ち上げ予定 (年)	2003/2004	2002	2003

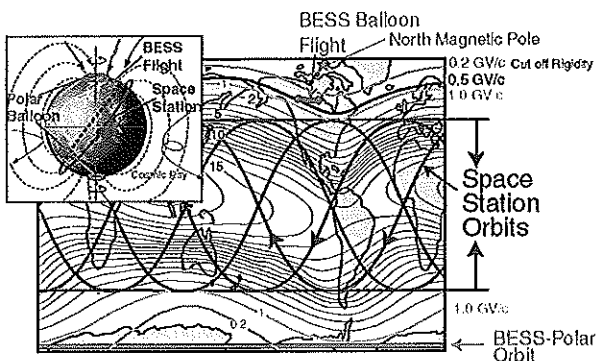


図4 BESS, AMS, PAMELA の飛翔軌道の比較

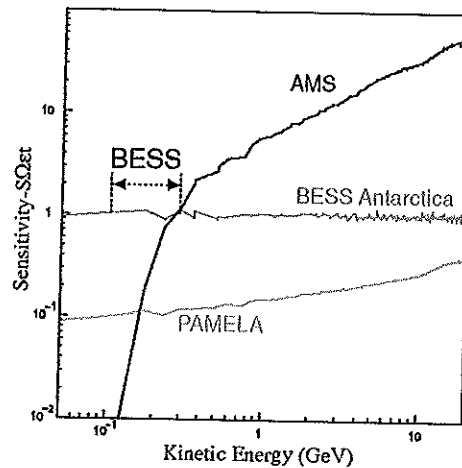


図5 BESS, AMS, PAMELA の感度の比較

4. BESS-Polar スペクトロメータ

BESS-Polar計画を実現するための基本的な技術はこれまでのBESS実験の積み重ねによって確立されている。しかし、南極での打ち上げ及び回収条件の制限から、測定器の重量を現在の約2/3となる1.4トンまで低減しなければならない。また、低エネルギー反粒子の観測を最大限の感度で行なうために、測定器を現在以上に薄肉化する必要がある。

大気頂上において0.1GeVの反陽子に観測感度を保つためには、気球上空の残留大気 5g/cm^2 を考慮すると、測定器上部の物質質量として 5g/cm^2 を目指さなければならない。このため、高強度アルミ安定化技術を駆使し、超伝導マグネットの物質質量を 2g/cm^2 まで低減するという究極的な薄肉化を目指すことにした。

また、中央飛跡検出器(JET/IDC)以外の粒子検出器を圧力容器外の真空中に配置することにより、思い切った測定器の軽量化とコンパクト化を計ることにした。即ち、図6-7に示される様に、上下の真空中にTOFカウン

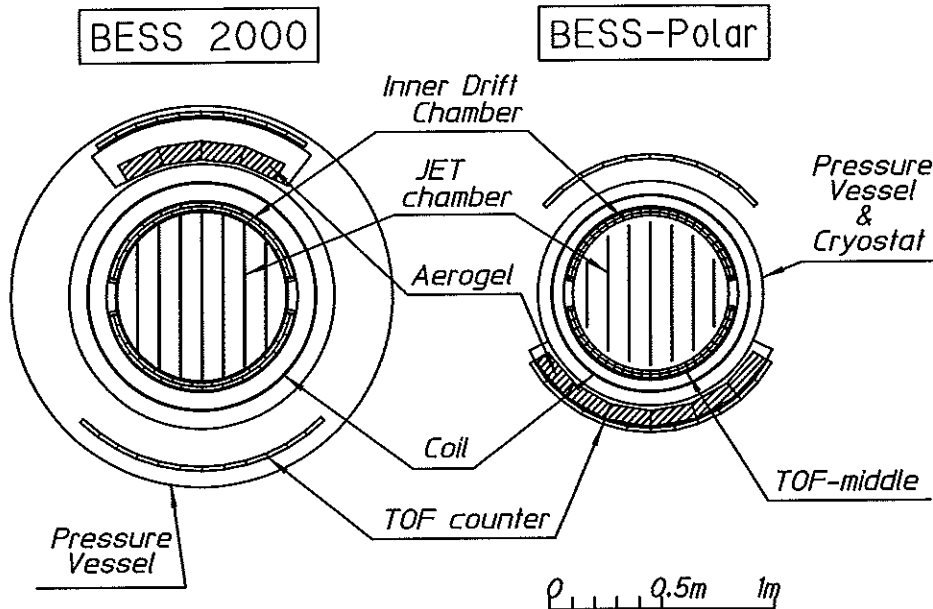


図6 現在の BESS と BESS-Polar スペクトロメータの断面図比較

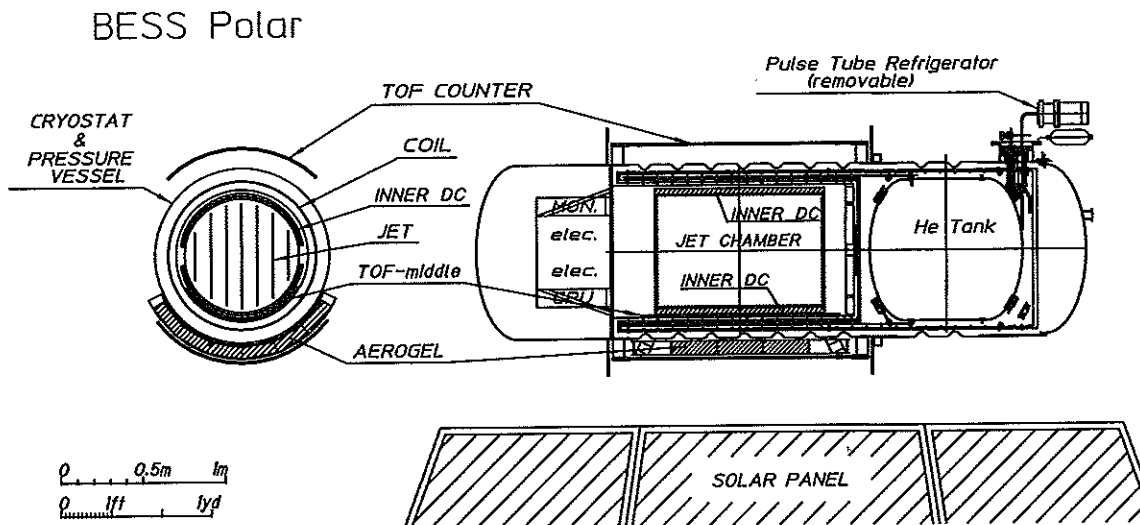


図7 BESS-Polar スペクトロメータの概念構成図

タが配置され、マグネットボア内のみを気密容器としてJET/IDCが置かれる。下部マグネット内壁直前には薄肉シンチレータ(TOF-middle)が位置し、低エネルギー粒子線が下部マグネット壁でストップしたとしても、その直前でのトリガを可能とする。マグネット下部にはエアロジェルチェレンコフカウンタ(ACC)が配置され、高エネルギー側での反陽子/陽子に対するベトーカーカウンタとして威力を発揮する。

以上の改良により、面積立体角を現在の90%に相当する $0.27\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ に保ちつつ測定器をコンパクト化し、且つ、測定器上部の物質量を $4.5\text{g}/\text{cm}^2$ まで薄肉化するというスペクトロメータシステムが設計された。これによって、大気頂上で 0.1GeV までの低エネルギー反陽子の観測が可能となった(表2)。

また、約20日間のフライト中の電力確保を容易にするため、消費電力を現在の $2/3$ となる約 600W に削減すると共に、太陽電池による電力供給システムの構築を目指している。

以下では これらBESS-Polar実現に向けた開発の状況について列記する。

表2 現在のBESSとBESS-Polar スペクトロメータのデザインパラメータ比較

実験名	現在のBESS	BESS-Polar
面積立体角	$0.3\text{m}^2 \cdot \text{sr}$	$0.27\text{m}^2 \cdot \text{sr}$
飛翔時間	~ 1 day	10~20days
反陽子観測エネルギー範囲(大気頂上)	$0.18 \sim 4.2\text{GeV}$	$0.1 \sim 4\text{GeV}$
磁場強さ	1 T	$0.8 \sim 1\text{T}$
TOFカウンタ間の距離	1.5m	1.2m
中央飛跡検出器直径(JET/IDC)	0.83m	0.75m
MDR(最大測定可能リジディティ)	200GV	150~200GV
消費電力	900W	600W
検出器物質量(上部)	$9\text{g}/\text{cm}^2$	$4.5\text{g}/\text{cm}^2$
測定器外寸(太陽電池除く;後述)	2 m/ 2 m/ 4 m	1.5m/1.5m/ 3 m
測定器重量	2.2ton	1.4ton

5. アルミ安定化超伝導技術の進展とBESS-Polar用マグネット

現在のBESS超伝導スペクトロメータの開発以来続けられてきた基礎技術開発の積み重ねにより、アルミ安定化材の高強度化技術が進展した。高純度アルミ($>5\text{N}$)に特に選択された異種金属を微量添加し、合金化すると共に、機械加工硬化を組み合わせることにより、アルミ安定化材の高強度化が可能となった([7, 8])。この技術開発の進展により、この約15年間に、4倍以上の高強度化が実現した。BESS-Polarでは、図8左で示されるように、5000ppmのNi添加と約15%の冷間加工により、 4.2K で 100MPa を超える降伏応力を持つアルミ安定化材を用いる計画である。

これによって、これまでの4層コイルから、さらに細い超伝導線による2層コイルとし、励磁時の電磁応力を分担していたサポートシリンダも簡素化することが可能となった。図8右に、アルミ安定化超伝導線の断面図と層構造を示す。

この結果、これまでのBESS薄肉超伝導マグネットに比べても、半分となる $2\text{g}/\text{cm}^2$ の物質量で超伝導マグネットの設計が実現した。これは、プラスチックシンチレータの厚さにしても 2cm にしかならない物質量である。

また、フライト時間が約20日間に延びるため、冷却媒体(液体ヘリウム)の長寿命化も要求される。そこで、パルスチューブ冷凍機を輻射シールド冷却に用い、なおかつ、一部部品を切り離してのフライト中も外部からの熱

侵入を最小限に抑えるべく開発を行なっている。これにより、現在の僅か2.7倍である400リットルの液体ヘリウム容量で、地上運転時100日・フライト時20日という長寿命化が可能となる。

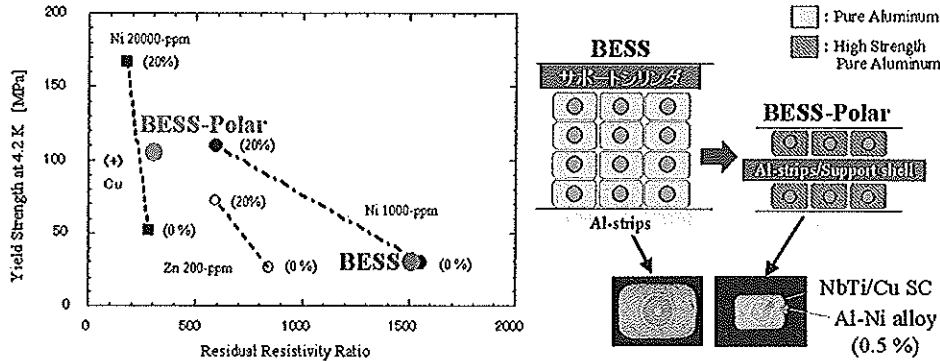


図8 [左]: アルミ安定化材強度 (降伏応力) と残留抵抗比の相関の、微小合金添加量と冷間加工率 (%表示) に対する依存性。 [右]: 現在の BESS と BESS-Polar のマグネットの、アルミ安定化超伝導線断面図及び層構造の比較

6. 粒子検出器

前述のように、BESS-Polarにおいては測定器の物質量を低減するため、上下のTOFカウンタやACCが真空中に配置される。そのため、真空中でも動作すべく光電子増倍管に改良を加え、動作確認を行なっている(図9)。また、物質量削減のため、時間分解能の変化を最小限に抑えつつ、TOFカウンタ(プラスチックシンチレータ)の厚さも現在の約半分の1 cm程度に薄肉化することを計画している。

低エネルギー粒子のトリガ用に新たに搭載されるTOF-middleは、厚さ5 mmのプラスチックシンチレータを用い、マルチアノード光電子増倍管で読み出すことを検討しており、詳細な設計と最適化を行なっている。

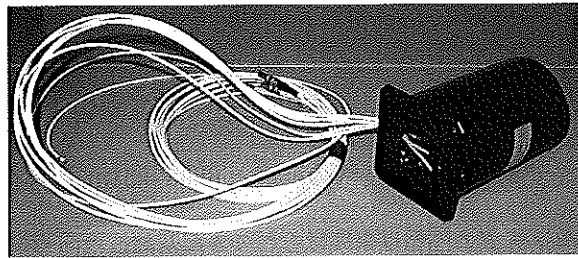


図9 真空中でも動作すべく改良された光電子増倍管HAMAMATSU R6504S

7. TOF用低消費電力エレクトロニクスの開発

BESS-Polarでは飛行時間が約20日間に延びるため、フライト中の電力確保を容易にすべく 測定器の消費電力をこれまで以上に削減する必要がある。

そこで、BESS-PolarにおいてはTOFカウンタからの読み出し系を図10の様に変更することを計画している[9]。現在用いているCAMACシステムに代わって、DSP (Digital Signal Processor) を用いたデータ収集システムを採用することにより、約50 μ sec/eventの高速並列処理を実現すると共に、ディスクリミネータとTDCの一体化による240Wから140Wへの消費電力低減が達成できる。また、分散制御型ネットワークLON (Local Operating Network) の採用により、個々のモジュールを独立に制御することも予定している。

この他、現在進行中のBESS-TeV実験等で計画されているFADCの消費電力削減などを併せると、BESS-Polar

における消費電力は、これまでの2/3の600Wまで低減できる。

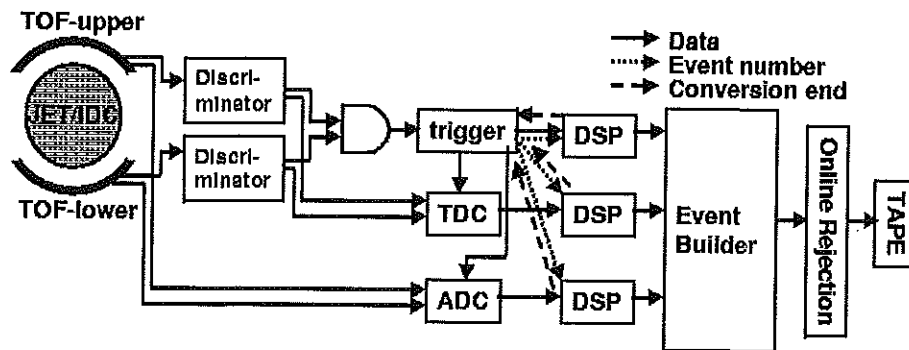


図10 DSPを用いたTOF読み出しデータ収集システムの概略図

8. 太陽電池による電力供給システム

約20日間のBESS-Polar飛行中、安定した電力を確保し続けるためには電源系の変更も必要となる。これまでのBESS実験ではリチウム一次電池によって全ての電力を賄っていたが、一次電池の必要量(即ち重量)はフライト時間に比例して増大するため、BESS-Polarでは2トン以上もの一次電池が必要となってしまふ。従って、現在の一次電池を用いたシステムのBESS-Polarへの適応は重量の観点から否定される。

BESS-Polarでは、一次電池に代わる新しい電力源として太陽電池の採用を計画している[10]。気球実験の電力源として要求される安全性を太陽電池は満たしており、しかもBESS-Polarの予想飛行経路は南極夏季の高緯度地域であるためフライトの全般にわたって白夜が期待できる。よって、太陽電池はBESS-Polarの電力源として適している。

BESS-Polarの太陽電池システムに要求される事項を表3にまとめた。600Wの消費電力を安定して賄うためには、DC/DCコンバータの変換効率やケーブルでの電圧降下など種々の効率を考慮して、約870W以上の発電が必要となる。電力の供給は気球上昇中を含む約20日間のフライト中連続して行なう必要があり、その際上空と地上では太陽光強度に差があることに留意しなければならない。重量の観点からは、打上げ環境から求められるBESS全体の重量制限1400kgと超伝導スペクトロメータの重量見積りに基づくと、電源系全体で300kg以下に抑えることが要求されるが、一方で、打上げ時の衝撃に対する耐性も満たさなければならない。また、白夜に加えて南極の水での太陽光の照り返し(アルベド強度90%)によりパネルが過度に熱せられる恐れがあるため、慎重な熱設計も求められる。

これら要求事項を踏まえて現在開発が行なわれている太陽電池システムの概略を図11に示す。太陽電池から発生した電力は約48Vのバスラインを介し、DC/DCコンバータで所定の電圧に変換された後、各系統に配電される。

表3 BESS-Polarの電源系に要求される基本事項

発電電力	>約870W
発電期間	約20日間のフライト中連続して発電(気球上昇中の間も含む)
重量	<300kg(電源システム全体で)
耐荷量	<10G(打上げ時の衝撃・振動)
パネル温度	-50°C~+100°C

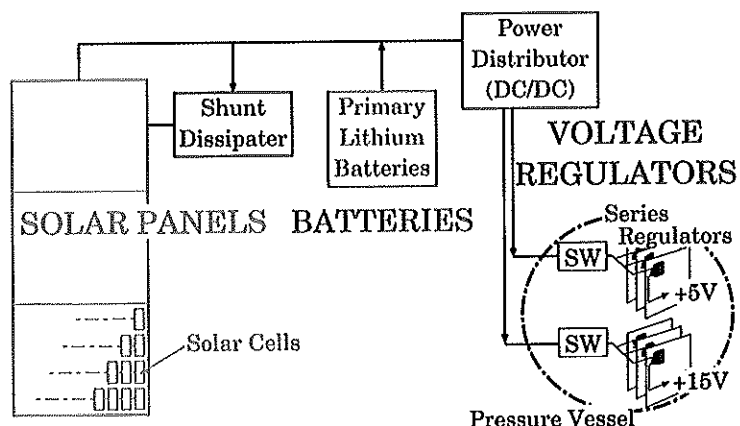


図11 太陽電池システム概略図

太陽電池の出力は25%以上のマージンを見込んであるが、気球上昇中の電力不安定化等の電力不足に対処すべく、約500Ahのリチウム一次電池もバックアップ電力として配備される。

BESSスペクトロメータの強磁場が地球の磁場と相互作用してペイロードが回転するため、太陽電池を太陽方向に追尾することは技術的にリスクを伴う。そこで、図13の様に太陽電池パネルを全方位型に配置することを計画している。全方位型として一般的な四角錐構造の代わりに八角錐を採用することにより、有効受光面積を2割増加させ、コンパクト化を目指している(図12)。加えて、八角錐構造は四角錐よりも力学的に構造の強化が容易であり、構造解析による構造の最適化を進めている。尚、リスク軽減の観点から、この八角錐パネルは予め展開した状態で打上げられる予定である。

太陽電池セルには、民生品としては高い効率(約17%)を持ち且つ薄膜軽量のある単結晶シリコンを採用することを検討している。これにより、約1.2kWの発電に必要な有効受光面積8.1m²を確保しつつ、太陽電池パネル・バックアップ電池・安定化システムを含めた電源系の重量を300kg以下に抑えることが可能となる。

熱設計については、放射・吸収特性の優れた物質の選定と有限要素法による詳細な熱解析を並行して進めている。熱解析は、太陽電池パネルのみならずスペクトロメータ等も含めた総合的な解析として行なわれており、パネル温度100℃以下という要求を満たすことが可能であるとの見通しを得ている。

2002年5月には、太陽電池システムの最終試験として、三陸観測所から気球実験を行なうことを計画している。この三陸実験の最重要チェック項目は太陽電池パネルの気球上昇中の挙動とそれに伴う発生電力の変化である。気球上昇中のパネルの揺れや回転は気球実験でなければ確認できないことであり、是非とも三陸実験を実現したい。

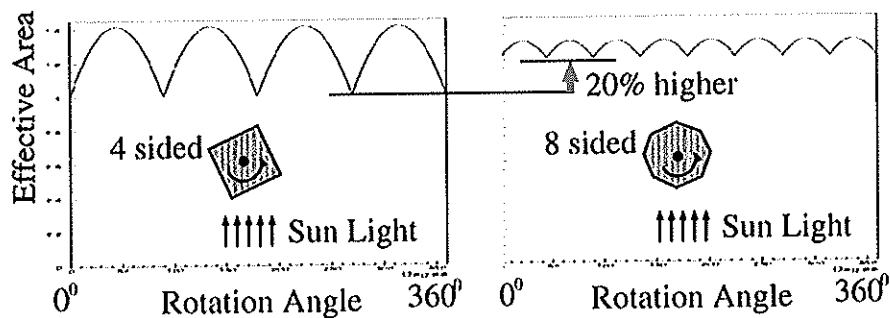


図12 太陽電池有効受光面積の4角錐と8角錐の比較

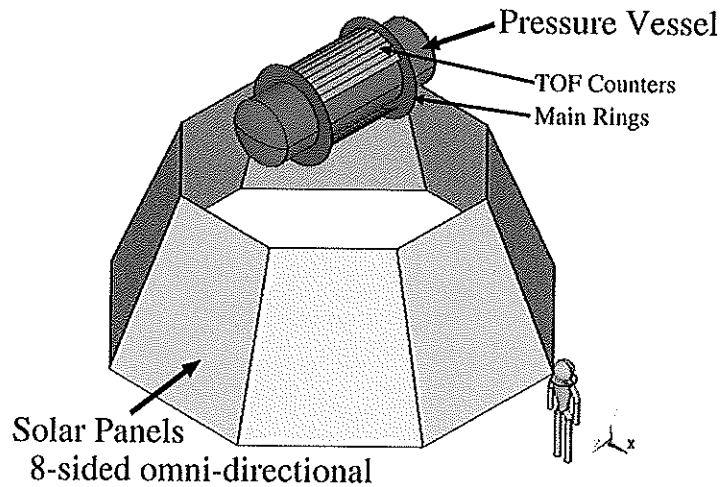


図13 太陽電池パネル構造

9. 南極周回飛行実験に向けて

以上のBESS-Polarに向けた開発を踏まえ、2003年12月から2004年1月にかけて第一回南極フライトを実現し、さらには2006～7年に第二回目フライトを行なって、究極的な高感度で宇宙起源反粒子を観測することを目指している。

宇宙起源反粒子という、宇宙論的・素粒子物理学的に極めて興味深い問題に決着をつけるためには、BESS-Polarによる宇宙線反粒子の精密探査が不可欠である。着実に準備を積み重ねてBESS-Polar実験を実現し、素粒子・宇宙物理学に貢献したい。また、(故)折戸周治先生(東大教授)の描いた大きな目標であったこの計画を実現することにより、先生の御指導と御恩に報いたいと願っている。

参考文献

- [1] S. Orito *et al.*, ASTROMAG Workshop, KEK Report 87-19, 111 (1987)
- [2] A. Yamamoto *et al.*, IEEE Trans. Magn. **24**, 1421 (1988)
- [3] Y. Ajima *et al.*, Nuc. Instr. Meth. A **443**, 71 (2000)
- [4] 浅岡陽一 他, 本報告, (2002)
- [5] A. Yamamoto *et al.*, Adv. Space Res., in press
- [6] A. Yamamoto *et al.*, Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf. (Hamburg) (2001)
- [7] A. Yamamoto *et al.*, Nuc. Phys. B (Proc. Suppl.) **78**, 3792 (1995)
- [8] K. Wada *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **10**, No.1, 1012 (2000)
- [9] 谷崎圭祐, 志風義明 他, 日本物理学会 2001年 秋季大会, (2001)
- [10] 福家英之 他, 日本物理学会 2001年 秋季大会, (2001)

