

## 放射線高速計測システムの耐放射線性能向上 のための研究開発

田村 忠久\* 鳥居 祥二\*\* 高柳 昌弘\*\*\* 久保 信\*\*\*\*

Research and development to improve resistance to radiation of a fast detector system  
measuring high energy particles and gamma-rays

Tadahisa TAMURA\* Shoji TORII\*\* Masahiro TAKAYANAGI\*\*\* Shin KUBO\*\*\*\*

### 1. はじめに

現在、宇宙や地球大気圏で起こる高エネルギー粒子による宇宙線現象の解明を目指して、次世代の観測装置の開発を行っている。その一つは図1に示すように、電子やガンマ線といった宇宙線をスペースステーションなどの飛翔体を利用して検出することで、地球上では見るこ

とも実現することも不可能な高いエネルギーまで超新星残骸などにおいて粒子が加速されるメカニズムや、そういった高エネルギーの粒子が宇宙空間を伝播してくる現象を解明するのが目的である<sup>(1)(2)(3)</sup>。もう一つは原子核も含めた宇宙を伝播してきた宇宙線が、地球大気突入後に大気と相互作用して、次から次に粒子を多重発生する宇宙線空気シャワーとよばれる超高エネルギーの現象を理解することを目的としている(図2)。後者はスイスとフランスの国境に2007年に完成して世界最高エネルギーを達成する予定の粒子加速器(CERN-LHC)を利用するビーム実験の計画である(図3)。加速器で実現できるエネルギーは宇宙線の最高エネルギーよりもまだ3桁も低い、詳細な研究が可能となるビーム実験では前人未踏の領域である。宇宙線空気シャワー現象と同じように相互

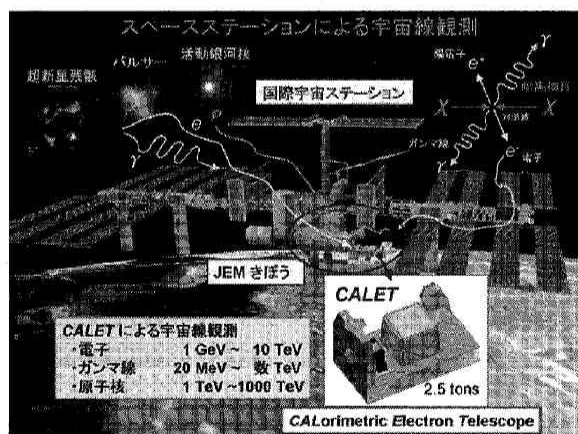


図1 スペースステーションに2.5トンの宇宙線観測装置CALETを搭載して高エネルギーの電子、ガンマ線、原子核の観測を行って、宇宙における高エネルギー現象の解明を目指す計画を提案している。

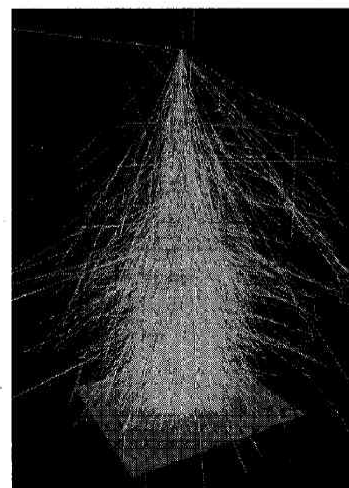


図2 高エネルギーの宇宙線(陽子)が地球大気に突入した場合に起こすカスケードシャワー現象のシミュレーション。

\*助教授 物理学教室

Associate Professor, Institute of Physics

\*\*教授 早稲田大学理工学総合研究センター

Professor, Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

\*\*\*副主任研究員 宇宙航空研究開発機構(JAXA)

Japan Aerospace Exploration Agency

\*\*\*\*技術部員 クリアパルス(株)

Clear Pulse Co.Ltd.

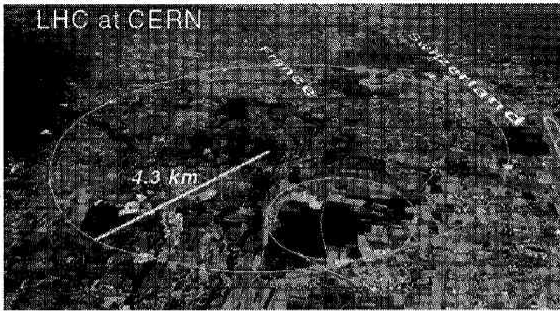


図3 ジュネーブ近郊のスイスとフランスの国境にある欧州共同原子核研究所 CERN では、世界最高エネルギー (7 TeV) を実現する陽子陽子衝突型加速器 LHC の建設が行われている。半径 4.3 km の円周の地下 100 m にビームパイプが設置される。完成は 2007 年、本格的な実験の開始は 2008 年の予定になっている。写真は CERN のホームページ<sup>9)</sup>より。

作用した粒子が最前方方向に散乱されてくる場所に、検出器を置いて研究を行うという、加速器実験でもユニークな手法である (図 4)。この LHCf 実験は 2006 年 9 月に CERN の LHC 委員会で正式実験として認められた。LHCf 実験は加速器施設で行うため、宇宙空間以上に放射線レベルの高い環境下に実験装置がさらされる。

どちらの放射線検出にも、我々は荷電粒子に反応して微弱な蛍光 (シンチレーション光) を出すシンチレータを検出器として用いる。微弱な光を電気信号に変えて増幅するための光電子増倍管は放射線損傷に強く、その影響を考慮する必要はない。これに対して、光電子増倍管の信号を読み出すフロントエンド回路は省スペース化および省電力化のために VLSI 化を行う必要がある。VLSI は半導体チップであるため、宇宙空間や加速器施設での使用は放射線損傷に留意する必要がある。それでも VLSI 化を行う理由は、まず宇宙空間における実験では興

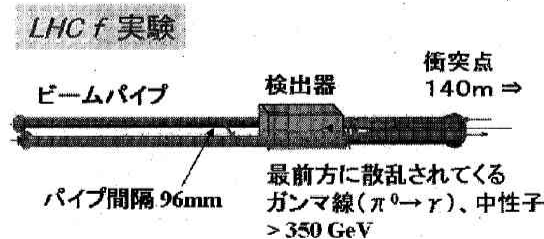


図4 陽子は 2 本のビームパイプの中をそれぞれ反対方向に回り、衝突点付近では 1 本のビームパイプに合流する。衝突点から 140 m 離れたところにビームパイプの分岐点があり、その 96 mm の隙間に検出器を置くことで、衝突点から最前方に散乱してくる中性の粒子 (ガンマ線、中性子) を測定することができる。

味のある高エネルギーの宇宙線ほど強度が弱くなるために大面積の装置が必要となり、結果として数万チャンネルの読み出し処理が要求されるからである。そして、加速器によるビーム実験では粒子の衝突点から最前方に飛び出してくる粒子を検出するために、ビームパイプの間にわずかに存在する狭いスペースに装置を置かなければならないためである。

光電子増倍管を読み出すための VLSI を使ったフロントエンド回路の開発は進んでいるが、次の段階として上述したような VLSI を含めた回路の耐放射線性能を向上させる開発が必要となっている。既に開発した VLSI を耐放射線性に優れたものに改良することが本研究の課題である。



図5 シンチレーティングファイバー (1 mm 角) を横一列に並べたシートの断面。

## 2. シンチレーティングファイバー検出器

### 2.1 宇宙線観測用 (CALET)

我々の開発した放射線検出器はシンチレーティングファイバーを採用している<sup>9)</sup>。これは図 5 のような断面が 1 mm 角のファイバーで、コア材にシンチレータが用いられている。このファイバーを横一列に並べてシート状にしたものを、鉛やタングステンといった物質量の大きな板と交互に積層したものが検出器となっている。スペースステーションに搭載する計画の検出器の概念図 (断面) を図 6 に示した。

検出器に入射してきた高エネルギーの電子、ガンマ線、陽子、重粒子といった粒子は、鉛などの物質層で電磁相

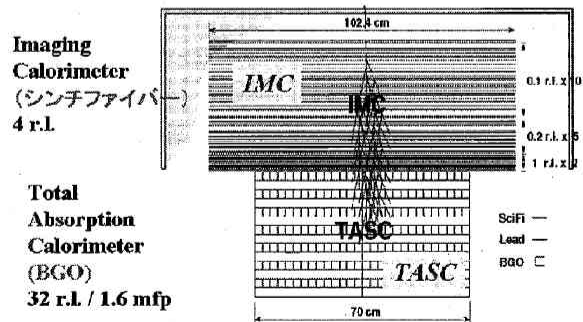


図6 スペースステーションに搭載する計画の CALET の検出器の概念図。上部のシンチレーティングファイバーでできたイメージングカロリメータ (IMC) と、下部の BGO シンチレータを組んだ全吸収型カロリメータ (TASC) からなる。

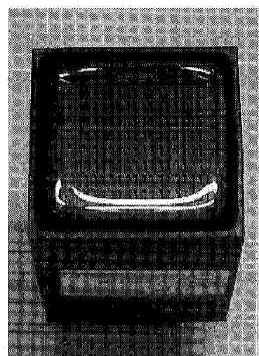


図7 およそ3cm角の受光面の中に8×8のマトリックス状に64チャンネル分のアノードを持った光電子増倍管（浜松ホトニクス）。出力端子はこの裏側にある。

相互作用や核相互作用を起こして、二次粒子を多数発生する。この相互作用が繰り返されることによって、発生した粒子群があたかもシャワーのような形状になるため、この現象はカスケードシャワーと呼ばれている。図2に示した大気中でのカスケードシャワー現象と同じものが図6に示したように検出器内で起こる。カスケードシャワーのサイズは大気中では数kmであるが、検出器内では相互作用を起こす物質（鉛やタンゲステン）の密度が高いために数10cmとなる。

シンチレーティングファイバーのシートはファイバーがXY方向に直交するように重ねられて二層で一組と

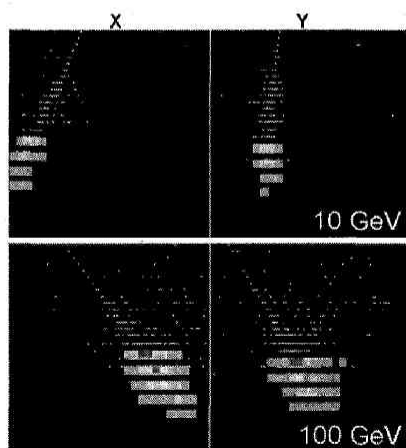


図8 電子がCALETに入射したときに取得されるカスケードシャワーのXY画像を、入射エネルギーが10 GeV（上）、100 GeV（下）の場合についてシミュレーションした例。画像の上部はシンチレーティングファイバーによるイメージングカロリメータの画像で、一つの点が1mm角のファイバー1本に対応している。下部は断面が2.5cm角のBGOによる全吸収型カロリメータの画像である。

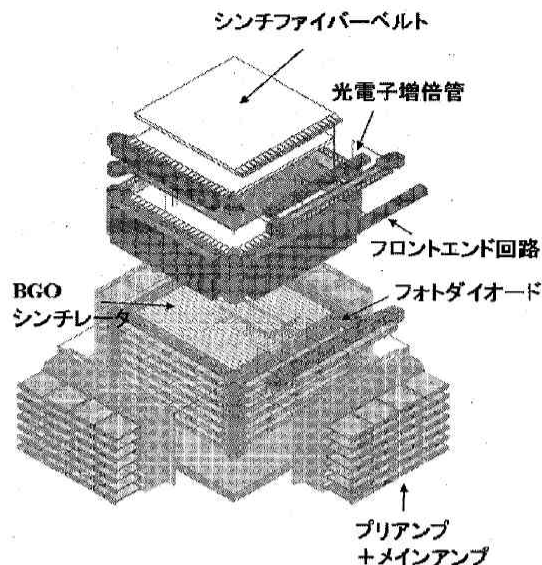


図9 CALETの検出器の構成。上部、下部のいずれも信号処理のためのフロントエンド回路は検出器の側面に取り付ける。

なっている。そこをカスケードシャワー中の荷電粒子が通過するとシンチレーション光が発生し、その光がファイバー方向に伝播して光電子増倍管（図7）の受光面に到達して電気信号に変換される。この信号を読み出すことによって粒子通過点のXY位置が求まり、カスケードシャワーをXY方向に投影して側面から捉えた図8のような画像が得られる。

スペースステーションにおいて高エネルギーの宇宙線（電子、ガンマ線、原子核）を観測する計画に用いる検出器（CALET）は、図9の上部のようにシンチレーティングファイバーが1024本並べられた幅約1mのシートをXYの各方向にそれぞれ18枚使用して、合計36864本の

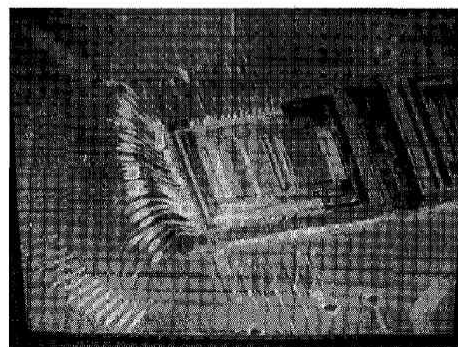


図10 アナログVLSI (VA32HDR14)。前置増幅器、波形整形増幅器、サンプルホールド回路の組を32チャンネル分、さらにサンプルホールドされた電圧を順次読み出すためのアナログマルチプレクサを内蔵。サイズは4.375×3.330mm<sup>2</sup>。

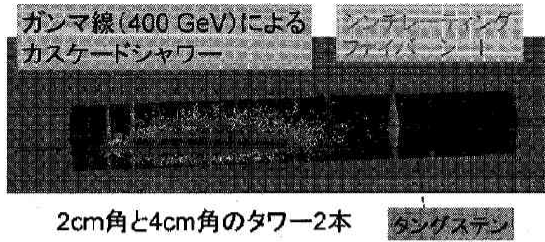


図11 CERN-LHC加速器を用いた最前方散乱粒子測定実験 LHCfに用いる検出器に400 GeVのガンマ線が入射した場合のシミュレーション。タンクステンとシンチレータを積層したタワー中でカスケードシャワーが発生する。途中で挿入されたシンチレーティングファイバーストでカスケードシャワーの断面画像を取得する。

シンチレーティングファイバーを用いる予定である。それぞれのファイバーからのシンチレーション光は光電子増倍管によって独立に電気信号に変換されて処理される。その際に必要な信号処理回路として、前置増幅器と波形整形増幅器とサンプルホールド回路を1組としたものが36864チャンネル分必要になる。光電子増倍管からのアナログ信号を長く引き回すと雑音の要因となるため、検出器の直近で信号処理を行わなければならない。そのため32チャンネル分の信号処理を1チップに内蔵した図10のようなアナログVLSI (VA32HDR14)を開発し、検出器の直近で信号処理を行うフロントエンド回路を開発している。

## 2. 2 ビーム実験用 (LHCf)

CERN-LHCにおいて最前方に散乱される中性粒子(ガンマ線や中性子)を測定するLHCf実験にも、CALETで

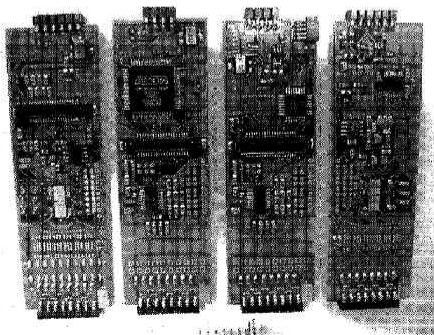


図12 CALET用に開発したフロントエンド回路の試作機の基板。両脇の2枚のそれぞれにアナログVLSI (VA32HDR14)とADCが1チップずつマウントされ、AD変換までが行われる。中央の2枚はデジタル回路になっており、AD変換の制御及びバスラインとの通信制御を行う。

用いる検出器と同じ原理を利用している。このLHCfの検出器は図11に示したように、その断面が2cmと4cmの二種類、長さが30cm弱のタワー状の構造になっており、CALETと比べると非常に小型である。粒子の位置を検出するシンチレーティングファイバーストは幅2cmのものが8枚、幅4cmのものが8枚であるため、シンチレーティングファイバーは合計480本である。しかし、検出器の設置場所が96mm幅と極端に狭いため、信号読み出しのための回路はやはり小型化する必要がある。そのため、当初はCALET用に開発してきたVLSIを用いたフロントエンド回路の試作機を利用した。

## 3. フロントエンド回路

CALET用フロントエンド回路として開発をした試作機は、図12のように1本の光電子増倍管に対して幅が3cm弱の4枚の両面基板からなる。光電子増倍管の出力は64チャンネルであるので、それを処理する32チャンネルのアナログVLSI (VA32HDR14)が2チップ必要になる。VA32HDR14からアナログマルチプレクサによって読み出されるアナログ信号は、即座に同じ基板上にマウントされた16bitのADCによってAD変換される。AD変換レートは最大250kHzであるが、ノイズ等を考慮して100kHz(1チャンネル当りの変換時間10 $\mu$ 秒)で使用している。マルチプレクサによるチャンネルの切り替えとAD変換のシーケンスは、デジタル回路を集結した別の2枚の基板にFPGAを搭載して制御している。図13は、4枚1組のフロントエンド回路の基板を光電子増倍管の受光面と反対側の出力端子に取り付けたところである。

ビーム実験に用いるLHCf用のフロントエンド回路にも、予備実験の段階では、このフロントエンド回路の試

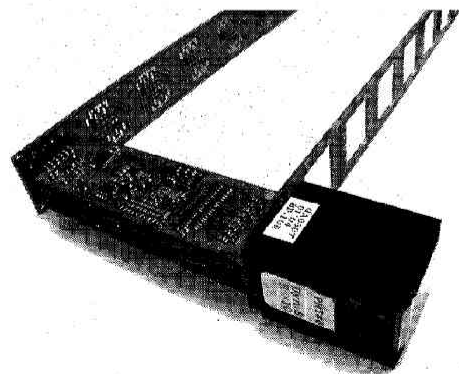


図13 フロントエンド回路の基板を光電子増倍管の出力に取り付けたところ。反対側はデジタルデータ読み出しのためのバスとなっている。

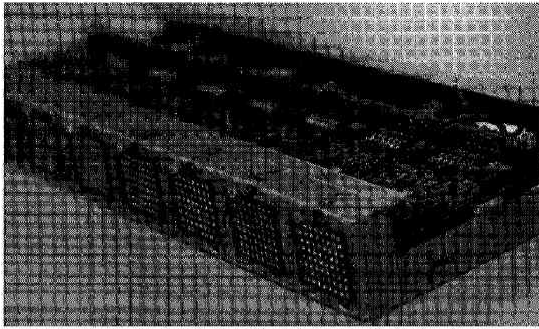


図 14 ビーム実験用に新規に製作したフロントエンド回路ユニット。光電子増倍管 8 本分 (512 チャンネル) の読み出しができる。予備実験に用いたものより、高速化したのみならず、さらに小型化も行われた。

作機を用いた。これにより、非常にコンパクトな検出器を製作することができ、シンチレーティングファイバーと光電子増倍管を組み合わせた高速なイメージデータの収集装置が完成した。

この予備実験の結果をもとに、さらに改良を加えた LHCf の本番用の検出器の製作を行った。フロントエンド回路もビーム実験専用を使用するためのものを新規に製作し、高速化を施すと共に、できる限りの耐放射線性を考慮した部品選定を行った。まず、高速化のために ADC を高速なものに変更した。これによって 32 チャンネル分の AD 変換レートがそれまでの 5 倍の 500 kHz となった (最高は 1 MHz であるが、やはりノイズなどを考慮)。さらに、内部バスをパラレル化して、AD 変換されたデジタルデータの吸い上げ速度の高速化を図った。また、予備実験用に利用したフロントエンド回路は、数 cm ではあるが装置全体のケースに収まらなかったため、コネクタ位置の変更などによって、さらなる小型化を行った。図 14 が完成した 512 チャンネル分を読み出せるフ

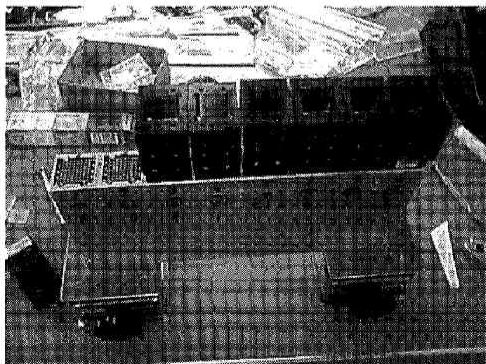


図 15 ビーム実験用フロントエンド回路ユニットに光電子増倍管を取り付けているところ。

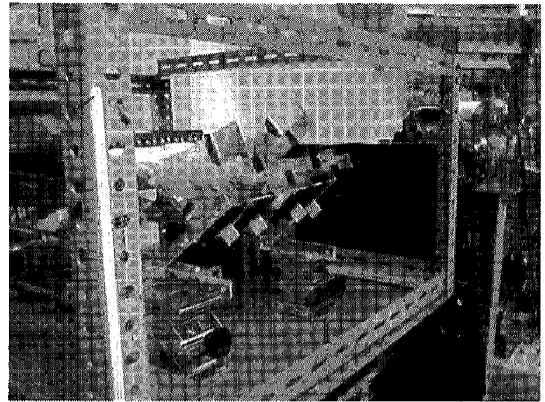


図 16 放射線医学研究所の重粒子イオン加速器 (HIMAC) での 290 MeV/u の C ビーム照射実験。写真右にビーム出口となるビームパイプが見える。その下流のビームライン上にシンチレーティングファイバーのシートを設置した。

ロントエンド回路のユニットである。これに 6 本の光電子増倍管を取り付けている様子を図 15 に示す。光電子増倍管の受光面側にはファイバー束を取り付けるためのアダプタが取り付けられている。

## 4. ビーム実験

### 4. 1 HIMAC での C ビーム照射実験

LHCf 実験の本番用に製作したシンチレーティングファイバーのシートを光電子増倍管に取り付け、それらを図 14, 15 のフロントエンド回路ユニットで読み出すシステムを準備した。このシステムによるフロントエンド回路の読み出し試験と、480 チャンネルについてのチャン

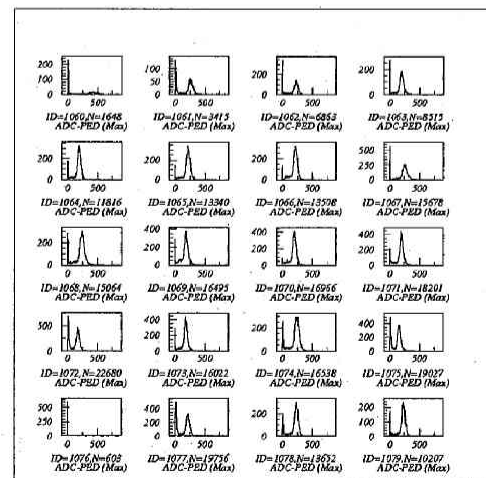


図 17 シンチレーティングファイバー 20 本分の 290 MeV/u の C ビーム照射による発光量に対応する ADC 値の分布。横軸は ADC 値、縦軸は頻度。

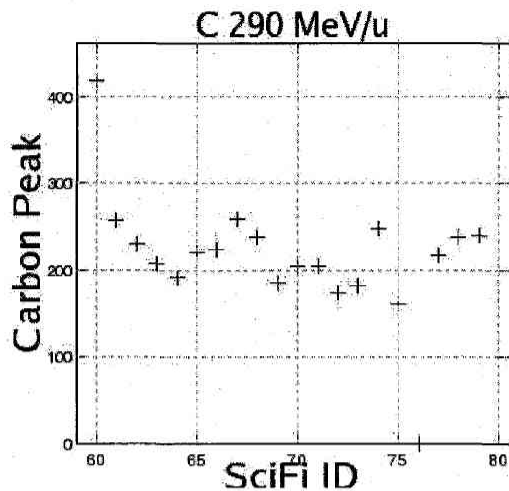


図18 シンチレーティングファイバー20チャンネル分(2cm幅の1シート分)について、横軸がシンチレーティングファイバーの番号で、縦軸がCビームによる発光量に対応するADC値分布のピーク中心値。

ネルごとの総合ゲイン(シンチレーティングファイバーの発光量、集光効率、光電子増倍管の増幅率、VA32HDR14内の増幅器の増幅率、ADCまでを全て込みにしたもの)の測定を目的として、放射線医学総合研究所の重粒子イオン加速器(HIMAC)による290 MeV/uのC(炭素)ビームの照射実験を行った。照射実験は2006年の5月12日21時から夜中も連続して13日20時まで行われた。

Cビームがシンチレーティングファイバーを通過するとエネルギー損失が起き、それに対応した発光が起こる。図17はその発光量に対応したADC値の分布である。こ

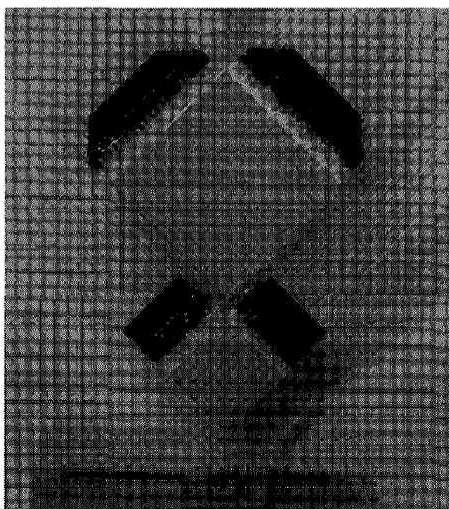


図19 LHCf実験のためのシンチレーティングファイバーのシートを直交する方向に2枚重ねてホルダーに固定したところ。上が4cm角のタワー、下が2cm角のタワーに対応する。

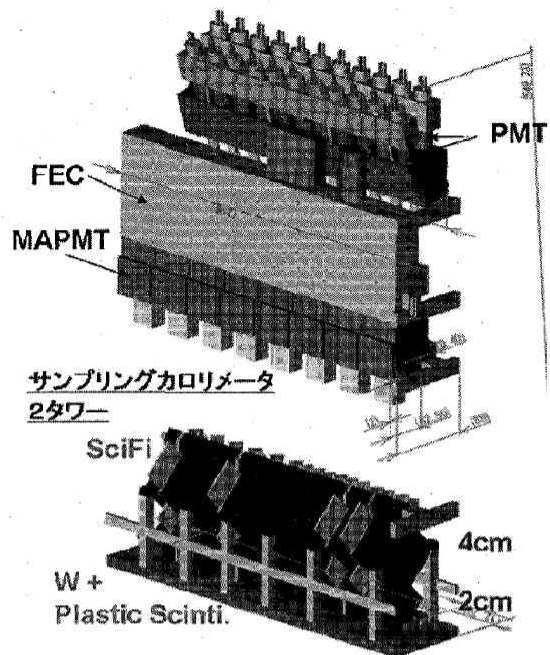


図20 LHCf実験用の検出器の概要。下部に2cm角と4cm角のタワー状の検出器がある。タワーはタングステンとプラスチックシンチレータを積層したもので、4箇所にシンチレーティングファイバーシートが直交するように挿入されている。上部にはシンチレーション光検出のための光電子増倍管と読み出しのためのフロンエンド回路(FEC)がある。

の分布のピーク中心のADC値を求めることによって、チャンネルごとの総合ゲインのばらつきを相対的に補正することができる。図18は、2cm角タワーの検出器に用いられるシンチレーティングファイバー20本(1シート分)について、ピークの中心値を求めた結果である。ゲインが高いチャンネルが1チャンネルあるが、それ以外は2割程度のばらつきに収まっている。その他のチャンネルについても解析中である。

#### 4.2 CERN-SPSでのビーム実験

HIMACにおいてビーム実験を行って、シンチレーティングファイバー検出器用のデータ収集システムの動作を確認するとともに、基礎的なデータを取得することができた。続いてこのシンチレーティングファイバーをLHCf実験用の検出器に組み込むために、図19のように、2枚のシートが4cm角タワーと2cm角タワーの位置で直交するようにホルダーに固定した。これが図20に示したようにタワーの4箇所に挿入されている。

実際に組みあがった検出器が図21である。下部にある検出器タワーのプラスチックシンチレータとシンチレーティングファイバーシートを上部の光電子増倍管に光学



図 21 完成した LHCf 実験用検出器。下部の検出器タワーのプラスチックシンチレータとシンチレーティングファイバーシートは、オプティカルファイバーによって上部の光電子増倍管へと接続されている。

的に接続するために 1 mm 径のオプティカルファイバー（クリアファイバー）を使用している。検出器の寸法は高さ 620 mm、幅 92 mm、奥行き 280 mm と非常にコンパクトにまとまり、総重量は 15 kg である。

この検出器の性能試験を行うために、CERN-SPS 加速器を用いて、電子 100, 200 GeV/c、陽子 150, 350 GeV/c、 $\mu$  粒子 150 GeV/c のビームを照射する予備実験を 2006 年 8 月 28 日 8 時～9 月 4 日 8 時のマシンタイムで行った。図 22 は検出器を T2-H4 ビームラインのビームパイプの

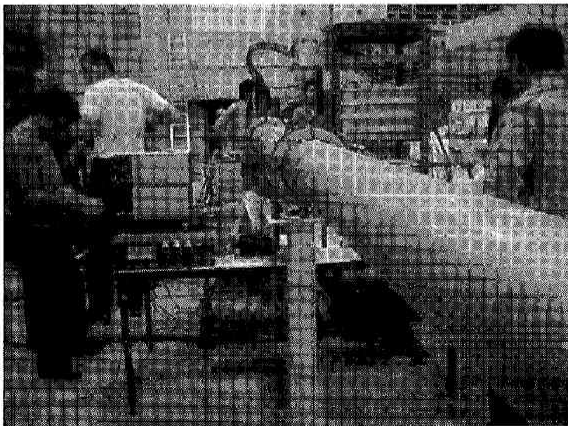


図 22 LHCf 実験用の検出器の性能試験を行うために、CERN-SPS 加速器を用いた予備実験を行った。電子 (200 GeV/c)、陽子 (350 GeV/c)、 $\mu$  粒子 (150 GeV/c) ビームを照射するためのビームパイプの後方に検出器が設置されている。

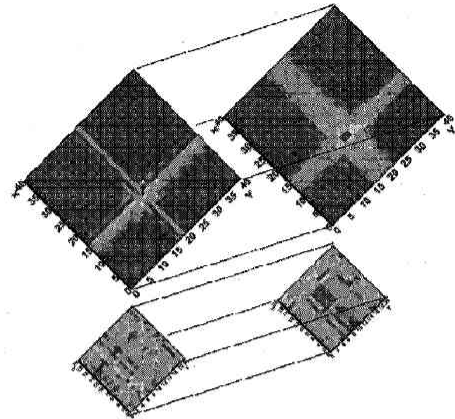


図 23 電子ビームが起こすカスケードシャワーの画像をシンチレーティングファイバー検出器によってとらえた例。上の 4 cm 角タワーへの入射で、前 2 箇所の XY シートでのシャワー中心が捉えられている（後ろ 2 箇所の XY シートは省略）。

後方に設置しているところである。総取得データは 350 万イベントで、現在解析を進めているところである。図 23 は 4 cm 角のタワーに 200 GeV/c の電子ビームを入射した場合に、4 箇所のシンチレーティングファイバー検出器のうち、前 2 箇所まででカスケードシャワーが発生して、その画像データを捉えている例である。画像データは XY へ投影したものが得られるので、図 23 では XY 方向それぞれの輝度を加えたものをその交点の輝度とすることで 2 次的に表現している。

## 5. 新チップ

ここまでに述べたフロントエンド回路の開発は第一段階がほぼ完了した。この回路に用いた VLSI は 0.8  $\mu$ m プロセスで製造されたものである。これを 0.35  $\mu$ m プロセスのものに改良することで放射線損傷を受ける確率が下がる。さらなる本格的な耐放射線性能の向上には、VLSI の基板として埋め込み酸化膜の上に超薄膜シリコンを形成して回路素子を作る薄膜 SOI (Silicon On Insulator) 技術を用いたものを採用することが挙げられる。これによって基板の厚み方向での放射線損傷の確率が劇的に下がる。但し、この薄膜 SOI 技術を取り入れるための開発費用は本研究の予算を上回るため、これは次段階以降の開発へ見送ることとする。

耐放射線性の改良の第一段階としてまずは 0.35  $\mu$ m プロセスを採用したチップの製作を行うことにした。VLSI の製造を行っている IDEAS 社 (ノルウェー) において、我々の開発したフロントエンド回路用 VLSI (VA32HDR14) についても 0.35  $\mu$ m プロセスに合わせた改造を行って VA32HDR14.2 を製造した。これまでの

VLSI チップの開発はイタリアとの共同研究で行っている。VA32HDR14 は入力電荷として正負の両極に対応するが、我々は光電子増倍管からの信号が負電荷であるために、負入力に対してダイナミックレンジを最適化してある。これに対して、今回の VA32HDR14.2 の開発は、イタリアのシエナ大学で開発しているシリコン検出器に合わせて、正入力に対してダイナミックレンジを最適化したものとなっているため、負入力に対するダイナミックレンジが若干落ちている。しかし、今回の目的は 0.35  $\mu\text{m}$  プロセスのチップの耐放射線性能を調べることであるので、ダイナミックレンジの最適化に関しては、今回のチップの性能試験後に、次段階の開発において考えることにした。

現在、放射線医学総合研究所の重粒子イオンビーム加速器 (HIMAC) を用いて 6 MeV/u の He ビームを VA32HDR14 および VA32HDR14.2 に照射する実験の準備を進めている。この VA32HDR14.2 も VA32HDR14 用のフロントエンド回路基板に取り付ける。ビーム照射実験のためのマシンタイムは 2007 年 2 月 7 日、13 日の 2 回分が承認されている。この照射実験によって、トータルドーズの影響や SEU (Single Event Upset) などについて調べる予定である。

HIMAC でのビーム実験前に VA32HDR14.2 についてはノイズなどの基本性能の試験を行う。0.35  $\mu\text{m}$  プロセスに変更することでノイズ特性も向上することが期待される。

## 6. 今後の発展性

本研究で行う VLSI の 0.35  $\mu\text{m}$  プロセスの採用や、その次の段階で計画している VLSI 基板の薄膜 SOI 技術は耐放射線性の向上のみならず、ノイズ特性の向上や、高速化、低消費電力化、高集積化が見込める。スペースでの宇宙線観測と最高エネルギーを達成する加速器でのビーム実験のために我々が開発している検出器は、プラスチックシンチレータの数 ns という短時間の蛍光を高速な光検出素子である光電子増倍管で読み出すが、現在の VLSI では増幅、波形整形などの処理に数  $\mu\text{s}$  の時間がかかる。新たな VLSI の開発は、さらなる高速処理の可能性を開くことになる。また低消費電力化は特にスペースにおける実験の熱設計を容易なものとしてくれるので、非常に重要な要素となる。

このように本研究の放射線粒子検出器の読み出しシステムの耐放射線性を含めた性能の向上は、将来の大型予算による本格的な開発につながるものとなる。このような開発においては、高速かつ高精度な回路技術について

の豊富な知識と経験が重要である。クリアパルス (株) は JAXA (宇宙航空研究開発機構) や KEK (高エネルギー加速器研究機構) などで放射線計測技術についての実績を積んで来た貴重な企業であり、既に我々のこれまでの VLSI 開発でもフロントエンド基板の設計製作などを担当している。スペースステーションでの宇宙線観測計画の実現に向けては、この計画のメンバーでもある JAXA の宇宙環境利用研究センターの高柳氏の協力を得ながら、JAXA が公募する予定の次期搭載機器に応募する準備を整えている。また CERN-LHC における加速器実験について、文科省の科研費 (基盤 B) の助成を 2006 年度から 3 年間受けることになったが、これをもとにしてさらに大型科研費に応募していく予定である。本格的な開発段階での導入を予定している VLSI の薄膜 SOI 技術などについては、その技術力を持つ三菱重工業 (株) の担当者 と連絡を取っており、いつでも検討を進められるように準備している。

現在開発している放射線粒子検出器は、コンパクトかつ多チャンネルの高速データ収集が可能なので、いろいろな分野での精密な測定を可能にする。医療分野では例えば、陽電子・電子トモグラフィ (PET: Positron Electron Tomography、ポジトロン CT) に利用すれば、より多くのチャンネルを高速に読み出すことで、いっそう精度の高い X 線断層撮影画像が得られると期待される。また放射線測定を利用した電気泳動法による DNA 分析などにも応用可能で、多チャンネル化による精度の向上と、データ収集の高速化が期待できる。その他にも原子力施設などの放射線モニターや、放射線計測を利用した地質調査や資源探査への利用も考えられる。

## 参考文献

- (1) 鳥居祥二, 榎野文命, “宇宙ステーションからの宇宙線観測”, 日本物理学会誌, 52-1, (2001-1), p.8.
- (2) S.Torii, et al., “The CALET, CALorimetric Electron Telescope, on ISS/JEM”, Nuclear Physics B, 134 (2004), p.23.
- (3) S.Torii, et al., “The CALET, CALorimetric Electron Telescope, Mission for the International Space Station”, Nuclear Physics B, 113 (2003), p.103.
- (4) <http://www.cern.ch>
- (5) 田村忠久 他, “宇宙環境下におけるシンチファイバー検出器の実証化研究”, 工学研究所報, 28 号 (2005-11), p.49.