

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 8 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340063

研究課題名（和文） 宇宙からの極限エネルギー宇宙線観測のための電子回路装置開発研究

研究課題名（英文） Research and development of electronic equipment for the observation of extreme energy cosmic rays from space

研究代表者

梶野 文義 (KAJINO FUMIYOSHI)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：50204392

研究成果の概要（和文）：

日本とフランスが共同で JEM-EUSO ミッション専用の集積回路 ASIC を開発・製作・試験・評価を行い、消費電力、調整回路、フォトンカウンティング能力などについてはほぼ期待した性能を持つことを確認した。また、宇宙環境における放射線の影響を調べるため、この ASIC に対して放射線医学総合研究所で陽子線と重粒子線（鉄イオン）を照射することにより、総照射線量劣化試験を行い、ISS での JEM-EUSO の 5 年間の運用には問題がないことを確認した。さらに、この ASIC や FPGA を組み込んだ統合回路系を製作し、動作検証、および、ソフトウェア開発を実行し、ほぼ予定通りの性能を得るとともに、理研で製作した TA-EUSO 望遠鏡のレンズの光学系性能評価を行った結果、この光学系は所定の基本性能があることを確認した。その後、米国ユタ州 Telescope Array サイトにこれらを組み込んだ TA-EUSO 望遠鏡を設置し、背景光計測を行った結果、上記の統合回路系による検出器モジュールが動作する事を確認した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed, manufactured, tested and evaluated the ASIC that will be used for JEM-EUSO mission with collaboration between Japan and France. We confirmed that the power consumption, adjustment circuits and the photon counting abilities are almost satisfied as they are designed. We also examined the radiation tolerance of the ASIC by irradiating protons and heavy ions (Fe) at National Institute of Radiological Sciences (NIRS). We confirmed that there is no problem by the cosmic radiation to JEM-EUSO on the ISS for 5 years of operation. Moreover, we manufactured an integrated circuit system with this ASIC and FPGAs, verified the performance of the system and developed the software for the system operation. This integrated system was confirmed to have an expected performance. We also evaluated lens optics that were made in RIKEN and were confirmed that the optics has an expected performance. Finally, we set the TA-EUSO telescope into which these components were integrated at the Telescope Array site in Utah, USA and we measured background light. We confirmed that the integrated circuit module worked well as expected as a result.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2011年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2012年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線、宇宙、電子回路、JEM-EUSO、ASIC、光学系、TA-EUSO

1. 研究開始当初の背景

1966年宇宙線のエネルギーは宇宙背景放射の光子との衝突のために 10^{20} eV のエネルギーのあたりに「上限」があると理論的に予測された。これを GZK 限界と呼ぶ。1990年代前半に日本の AGASA 実験グループによって「GZK 限界がないかもしれない」という観測結果が報告され、宇宙物理学に衝撃をあたえ、宇宙線の最高エネルギーに関するスケールアップした Auger、Telescope Array、EUSO などの観測計画が始動した。

一方で、理論的な研究が進み、 10^{19} から 10^{21} eV の Trans GZK 領域と呼ばれるエネルギースペクトルに GZK 限界をはじめ、量子限界、加速限界、量子重力、ローレンツ不変性などの基礎物理と極限的物理の基礎課題が多く堆積していることが指摘され、最近その重要性がますます大きくなってきた。これまでのところ、AGASA、HiRes、Auger の各実験による観測では最高エネルギー宇宙線の事例数の少なさのために、これらの物理に対して確定的な結論はいまだに出せない状況にある。エネルギースペクトル解析の点から飛躍的な事例数の増加が強く待ち望まれている。

また、 10^{20} eV のエネルギーを超える粒子は銀河磁場でほとんど曲がらないので、到来方向解析からその起源を特定できる。十分な事例数があれば、その起源天体の方向に分布の集中が見られるはずであり、AGASA、HiRes、Auger は Blasar などの高エネルギー天体の位置と到来方向の相関を示唆している。しかし、まだ事例数が限られているため、明確なクラスタを見出すにはいたっていない。

JEM-EUSO はこれらの実験に比べて飛躍的な事例数の増加が期待される。JEM-EUSO により、極限エネルギー粒子による天文学が開始されるとともに、物理学の基礎課題が解決される可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の全体構想は宇宙から飛来する宇宙で最大のエネルギーの粒子を国際宇宙ステーション(ISS) から観測し、極限エネルギー宇宙を研究する JEM-EUSO ミッションを遂行することにある。

本研究では超低消費電力の信号読み出し用集積回路を含む電子回路系の開発・製作・試験を行い、この回路を用いた望遠鏡により大気発光現象の観測を行い、宇宙で観測のた

めの基礎データを得る。

これにより JEM-EUSO ミッションの観測において期待通りの成果が得られるようにすることを目的とする。

3. 研究の方法

これまでの試作 ASIC に改良を加えて改良版の製作・試験を行う。また、4 個の 64 ピクセル MAPMT(マルチアノード光電子増倍管)信号読み出し用のためにこの ASIC を用いたデータ収集・トリガー回路セル(EC)を製作し、さらに EC を 9 個組み合わせた 2304 ch 信号読み出しモジュール(PDM)を製作する。実際の JEM-EUSO ではこの PDM を 137 個使用することになるが、本研究では基本となるモジュール(PDM)の機能、消費電力、耐放射線性、温度依存性、耐振動性などを確認する。

さらに、この PDM を焦点面に用いた JEM-EUSO の基本機能を持った望遠鏡を製作し、レーザーや LED で性能確認を行った後、野外にて大気発光現象を観測する。

JEM-EUSO は 2.5 m の大口径、 60° の超広視野からなり約 400 km 上空の軌道上にある国際宇宙ステーション(ISS) に装着され、地球大気に突入してきた 10^{19} - 10^{21} eV の極限的エネルギーの宇宙線が作る空気シャワーからの蛍光紫外光およびチェレンコフ光や、夜光、放電現象などを観測する。

JEM-EUSO 観測装置は大別して光学系、焦点面検出器、電子回路系からなる。焦点面検出器は約 5,000 本の MAPMT からなり、それぞれの MAPMT は 64 ピクセルからなるので、全体で 30 万ピクセルにも達する。

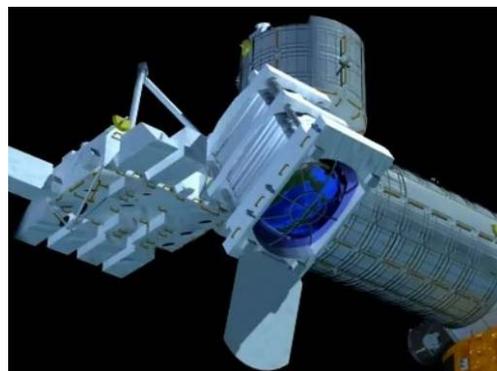


図 1：国際宇宙ステーションに取り付けられた JEM-EUSO の想像図

電子回路系は焦点面検出器からのパルス信号を用いて、極限エネルギー粒子による空気シャワーからの蛍光紫外光の強度を 2.5 μ 秒ごとに連続的に計測する。

電子回路系には、 10^{19} - 10^{21} eV のエネルギー領域に渡って柔軟でかつ高いトリガ効率および良好な線形性を維持すること、しかも信号数は 30 万チャンネルにも及ぶためチャンネルあたりの消費電力はわずか約 1 mW に制限されること、また実装のために利用可能な体積上の制約が課せられること、さらには予定されているミッションの期間内に想定される宇宙環境からの放射線レベルに耐えうること等、厳しい要求がある。ASIC の消費電力に関しては現在すでにチャンネル当たり 0.7 mW を達成している。

焦点面電子回路は、MAPMT を 4 台集約したエレメンタリーセル(EC)、それを 9 個集約した光検出器モジュール(PDM)、それを 137 個集約した焦点面検出器(FS)に対応して構成される。

MAPMT では一つの光電子が約 10^6 倍に増幅された信号が ASIC に送られ、信号の大きさによって画素レベルでトリガ信号を発生する。

ASIC は MAPMT から発生する電流信号を電圧に変換し、その後、信号の大きさにより弁別する。この閾値電圧は、画素ごとに設定することができるようになっており、画素ごとの利得のばらつきを補償するため光子の数分の一から数光子分に相当する範囲で可変となっている。この信号の時間幅 (T) は入力電荷 (Q) に比例するようになっていて、この ASIC は QT 変換回路となっている。この信号を後段の FPGA に送り、これによって約 20 n 秒の高速ダブルヒット分解能のもとで、10 ビットの精度のカウンタを用いて到来する光子を計数する。FPGA はプログラムによってロジック回路が自由に構成できる汎用性をもつ IC である。

この FPGA を使って 2.5 μ 秒 (=1 GTU) ほどの MAPMT からの光電子計数値を内部のリングメモリに蓄積し、トリガが発行されたときには、これらの値を読み出して読み出し制御ボードに送る。これらのメモリの深さは 128 GTU 分を想定している。

ASIC に関してはすでに甲南大学と JAXA、理研の協力の下、計 3 度の試作を行ったが、本研究では更なる改良を加える。

FPGA は EC ごとに取り付けられ、1 次レ

ベルの空気シャワー事例トリガを発行する。そのあと PDM レベルでその飛跡を見つけ出す「トラックトリガ」および、より長い飛跡を見つけ出す「クラスタトリガ」を行う。

PDM および現在試作中のフレネルレンズを使用して JEM-EUSO の基本機能を持った望遠鏡を製作し、各種性能確認後、大気発光現象を観測する。

4. 研究成果

日本とフランスが共同で JEM-EUSO ミッション専用の集積回路(ASIC) SPACIROC を開発・製作・試験・評価を行った。

SPACIROC は小信号を計測するフォトンカウンティング部と大信号を検出する KI 部からなっていて、1 個のチップに 64 チャンネルが組み込まれている (図 2)。

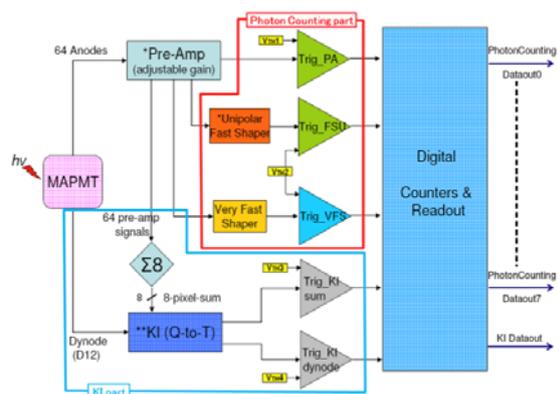


図 2 : SPACIROC のブロック図

SPACIROC を試験するために図 3 のような試験基板を製作し試験した。

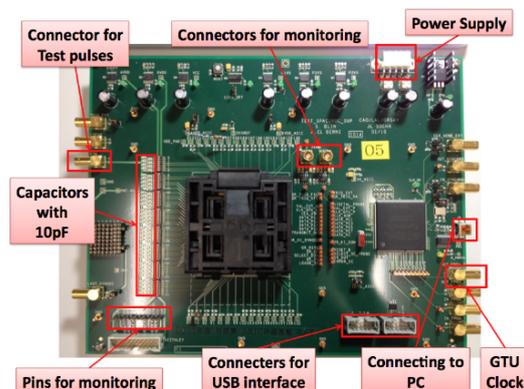


図 3 : SPACIROC の試験基板

この試験基板に JEM-EUSO 用に開発した 64ch マルチアノード光電子増倍管を取り付け、1 光電子信号を SPACIROC で計測した。

1チャンネル分の結果を図4に、64チャンネル分の結果を図5に示す。1光電子のパルス高に対するノイズの大きさは26:1となり十分に1光電子の信号を識別できる性能を持っていることが分かった。

SPACIROCの消費電力や調整回路などについても試験した結果、ほぼ期待した性能を持つことを確認した。

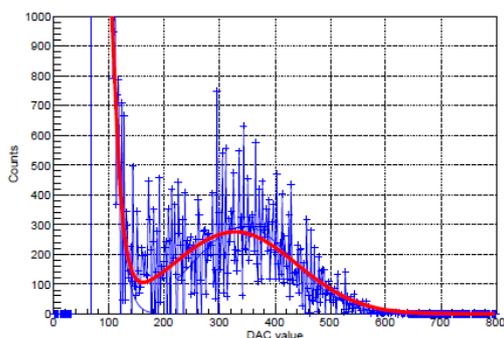


図4：SPACIROCで計測した1光電子信号分布

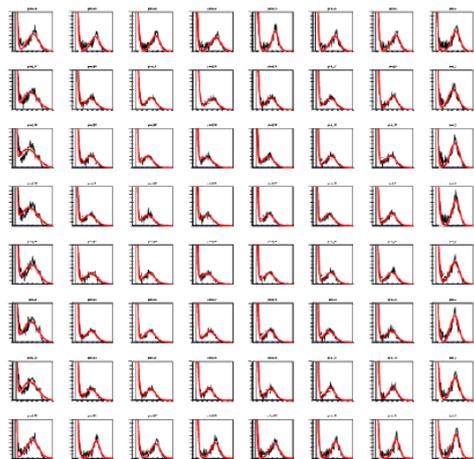


図5：SPACIROCで計測した1光電子信号分布（64チャンネル分）

また、宇宙環境における放射線の影響を調べるため、このASICに対して放射線医学総合研究所で陽子線、および重粒子線（Fe, 500MeV/u, 3×10^5 PPS (Particle Per Spill)）を照射することにより、総照射線量劣化試験を行い、JEM-EUSOでの5年間の使用には問題がないことを確認した（図6）。



図6：放射線医学総合研究所 HIMACでの重粒子線による試験の様子

さらに、このASICやFPGAを組み込んだ統合回路系を製作し、動作検証、および、ソフトウェア開発を実行し、ほぼ予定通りの性能を得るとともに、日本で製作したTA-EUSO望遠鏡のレンズの光学系性能評価を行った結果、この光学系は所定の基本性能があることを確認した（図7）。

その後、米国ユタ州 Telescope Array サイトにこれらを組み込んだTA-EUSO望遠鏡を設置し、背景光計測を行った結果、上記の統合回路系による検出器モジュールが動作する事を確認した。



図7：TA-EUSO望遠鏡の光学系

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計10件）

① J. H. Adams Jr., F. Kajino et al.
“An evaluation of the exposure in nadir observation of the JEM-EUSO mission”
Astroparticle Physics, 44, 76-90, 2013,
DOI:10.1016/j.astropartphys.2013.01.008, 査読有

② Salleh Ahmad, F. Kajino et al.

- “SPACIROC: A Front-End Readout ASIC for JEM-EUSO Cosmic Ray Observatory”
Physics Procedia, 37, 1600-1607, 2012, DOI:10.1016/j.phpro.2012.02.482, 査読有
- ③ Ahmad, S., F. Kajino et al.
“SPACIROC: A front-end readout ASIC for the JEM-EUSO observatory”
Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSSMIC), 699-703, 2011, DOI:10.1109/NSSMIC.2011.6154085, 査読有
- ④ Y. Kawasaki et al.
“The focal surface of the JEM-EUSO instrument”
Astrophys. Space Sci. Trans., 7, 167-169, 2011, DOI:10.5194/astra-7-167-2011. 査読有
- ⑤ Y. Kawasaki et al.
“The focal surface of the JEM-EUSO instrument”
AIP Conf. Proc., 1367, 201-203, 2011, DOI:10.1063/1.3628745, 査読無
- ⑥ F. Kajino et al.
“Overall view of the JEM-EUSO instruments”
AIP Conf. Proc., 1367, 197-200, 2011, DOI:10.1063/1.3628744, 査読無
- ⑦ Fumiyoshi Kajino for the JEM-EUSO collaboration
“The JEM-EUSO mission to explore the extreme universe”
Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res., A623, 422-424, 2010, DOI:10.1016/j.nima.2010.03.023 査読有
- ⑧ Ahmad, S.; Kawasaki, Y. et al.
“SPACIROC: a rad-hard front-end readout chip for the JEM-EUSO telescope”
Journal of Instrumentation, 5, C12012, 2010, DOI:10.1088/1748-0221/5/12/C12012, 査読有
- ⑨ T.Ebisuzaki, F.Kajino et al.
“The JEM-EUSO Mission to Explore the Extreme Universe”
AIP Conference Proceedings, 1238, 369-376, 2010, DOI: 10.1063/1.3455969, 査読無
- ⑩ A. Santangelo, F. Kajino et al.
“The Science Case of the JEM-EUSO Mission - Unveiling the Universe at Ultra-High Energies”
AIP Conference Proceedings, 1238, 380-387, 2010, DOI: 10.1063/1.3455972, 査読無
- [学会発表] (計 15 件)
- ① 梶野文義
“JEM-EUSO(128) 装置全般状況報告”
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 27 日, 広島大学
- ② 川崎賀也
“JEM-EUSO(131) 検出器”
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 27 日, 広島大学
- ③ 梶野文義
“JEM-EUSO (132) 低消費電力高密度実装 Front-End ASIC の開発状況報告”
日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 27 日, 広島大学
- ④ 梶野文義
“地球を観て宇宙を知る” 地文台”
JEM-EUSO ミッション”
第 13 回 宇宙科学シンポジウム, 2013 年 01 月 08 日~2013 年 01 月 09 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
- ⑤ 梶野文義
“JEM-EUSO(124) 装置全般状況報告”
日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 13 日, 京都産業大学
- ⑥ 吉田賢司
“JEM-EUSO(126) 低消費電力高密度実装 Front-End ASIC の開発状況報告”
日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 13 日, 京都産業大学
- ⑦ 川崎賀也
“JEM-EUSO(125) TA サイト実験・気球実験”
日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 13 日, 京都産業大学
- ⑧ 梶野文義
“JEM-EUSO(119) 装置全般状況報告”
日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 03 月 25 日, 関西学院大学
- ⑨ 川崎賀也
“JEM-EUSO(120) TA サイト実験・気球実

験”

日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 03 月 25 日, 関西学院大学

⑩ 井口竜成

“JEM-EUSO(122) 低消費電力高密度実装 ASIC の開発状況報告”

日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 03 月 25 日, 関西学院大学

⑪ 梶野文義

“JEM-EUSO(116) 装置全般状況報告”

日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 09 月 16 日, 弘前大学

⑫ 井口竜成

“JEM-EUSO(117) 低消費電力高密度実装 ASIC の開発状況報告”

日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 09 月 16 日, 弘前大学

⑬ 梶野文義 他 JEM-EUSO WG

“地球を観て宇宙を知る” 地文台”
JEM-EUSO ミッション”

第 11 回 宇宙科学シンポジウム, 2011 年 1 月 6 日, 宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所

⑭ Fumiyoshi Kajino

“The JEM-EUSO Instruments”

22nd European Cosmic Ray Symposium
3 - 6 August 2010, Turku, Finland.

⑮ Y. Kawasaki

“The Focal Surface of the JEM-EUSO Instrument”

22nd European Cosmic Ray Symposium,
3 - 6 August 2010, Turku, Finland.

[その他]

ホームページ等

JEM-EUSO: 地球を観て宇宙を知る"地文台"

<http://jemeuso.riken.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梶野 文義 (KAJINO FUMIYOSHI)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号: 50204392

(2) 研究分担者

山本 常夏 (YAMAMOTO TOKONATSU)

甲南大学・理工学部・准教授

研究者番号: 40454722

川崎 賀也 (KAWASAKI YOSHIYA)

理化学研究所・戒崎計算宇宙物理研究室
協力研究員

研究者番号: 70344033

滝澤 慶之 (TAKIZAWA YOSHIYUKI)

理化学研究所・戒崎計算宇宙物理研究室
専任研究員

研究者番号: 70312246

(3) 連携研究者 (IKEDA HIROKAZU)

池田 博一

宇宙航空研究開発機構・教授

研究者番号: 10132680

榊 直人 (SAKAKI NAOTO)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号: 90342790