

A Portable Electron Linear Accelerator for Absolute Energy Calibration of Ultra-High Energy Cosmic Ray Telescope

Tatsunobu Shibata^{1,A)}, Yosuke Iino^{B)}, Daisuke Ikeda^{A)}, Mitsuo Ikeda^{C)},
Atsushi Enomoto^{C)}, Satoshi Ohsawa^{C)}, Kazuhisa Kakihara^{C)}, Yoshimi Kondo^{A)},
Hiroyuki Sagawa^{A)}, Masanori Sato^{C)}, Tetsuo Shidara^{C)}, Takashi Sugimura^{C)},
Masaki Fukushima^{A)}, Shigeki Fukuda^{C)}, Kazuro Furukawa^{C)}, Mitsuhiro Yoshida^{C)}, John H Matthews^{D)}

^{A)} Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, Japan, 277-8582

^{B)} Toyama Co., Ltd.

13-16 Hibarigaoka-4, Zama, Kanagawa, Japan, 228-0003

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

^{D)} University of Utah, Physics Department
115 South 1400 East, Salt Lake City, Utah, US, 84112-0830

Abstract

Telescope Array experiment (TA) which observes ultra-high energy cosmic ray was started from 2008 at Utah State in U.S. TA experiment consists of Surface Detectors (SD) and fluorescence (FD) detectors, and we will calibrate energy scale of FD with a portable electron linear accelerator (ELS) whose beam intensity is $40\text{MeV} \times 10^9 \text{e}^-/\text{pulse}$. The ELS was developed in KEK, Japan, and it was completed in Jan.2008. We evaluated the measurement of output beam and beam current. The ELS was exported from Japan, and installed at FD site in Utah State in Mar.2009. The beam operation and observation with FD will be started in this year.

超高エネルギー宇宙線望遠鏡 較正 小型電子線形加速器の開発

1. 超高エネルギー宇宙線

宇宙線は地球に飛来する粒子や電磁波の総称で電子、陽子、ヘリウムや鉄などの原子核、X線、 γ 線が観測されている。観測されている宇宙線のエネルギー領域は10MeV程度から 10^{20}eV までの高エネルギー領域にまで及ぶ。宇宙線の発生起源は様々で、100MeV程度までは太陽フレア等で放出される太陽系起源が主であり、 $\sim 10^{18}\text{eV}$ までの宇宙線は銀河系内の超新星残骸が起源であると考えられている。それ以上のエネルギーになると銀河系外の活動銀河核、ガンマ線バーストが起源であると考えられているが、銀河系外に起源を持つ証拠は未だ得られていない。ここでは超高エネルギー宇宙線とは $\sim 10^{18}\text{eV}$ 以上のエネルギー領域の宇宙線の事を意味する。

超高エネルギー宇宙線の観測はこれまで複数の観測実験によって観測され続けているが、宇宙線の化学組成、発生起源、加速機構は全く未解決な問題である。また100Mpc以上離れた場所で発生した $10^{19.6}\text{eV}$ 以上の宇宙線は宇宙背景放射との相互作用により地球には到達できないと予想されている(GZKカットオフ^{[1][2]}) が、GZKカットオフの検証結果についても異なる実験結果が発表されているため、

未解決な問題である^{[3][4][5]}。2009年現在、北米で Telescope Array (TA) 実験(2008年～)^[6]、南米において Auger 実験(2004年～)^[7]が超高エネルギー宇宙線の観測を行っている。

TA 実験は北米・ユタ州に建設された宇宙線観測装置である。宇宙線が地球に突入した際、大気分子との相互作用で発生する巨大空気シャワーに含まれる電子やミュー粒子、 γ 線を地表 760km^2 の範囲に1.2km間隔で配置された507台のシンチレーションカウンタ(Surface Detector, SD)によって検出する事で宇宙線の事象を観測する^[8]。また空気シャワー中の電子が空気中の窒素分子を励起させる事で発光する紫外領域の大気蛍光を地上の3箇所に設置された大気蛍光望遠鏡(Fluorescence Detector, FD)によって観測する事で宇宙線の事象を独立に観測する^[9]。

超高エネルギー宇宙線観測実験の重要な課題はそのエネルギーの精密な測定である。宇宙線のエネルギーはSDによって観測される空気シャワー中の粒子数を用いる方法とFDによって観測される大気蛍光の光子数を用いる方法があるが、非常に困難な測定量であり、これまでの観測実験であるAGASA実験、HiRes実験、そして現在行われるAuger実験でのエネルギー測定における不定性はそれぞれ18%^[3]、

¹ E-mail: shibata@icrr.u-tokyo.ac.jp

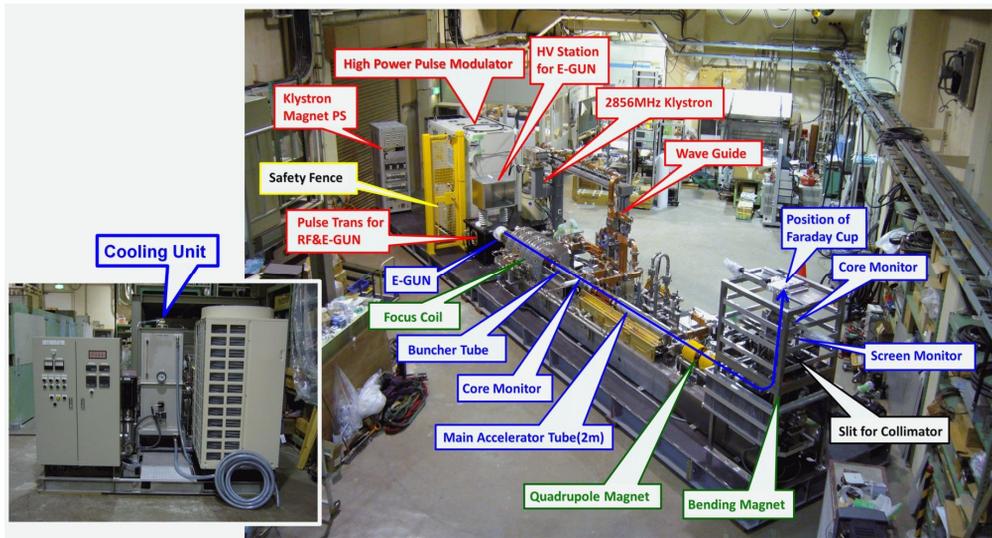


図1：2009年2月の完成時のELS。左写真は冷却水ユニット。右写真はRFシステムとビームラインの加速ユニット。

17%^[4]、22%^[5]である。エネルギー決定の不定性が大きい理由に宇宙線のエネルギーが既知でないために、宇宙線のエネルギー較正が宇宙線を用いて行う事が不可能である事、現在の加速器では達成不可能なエネルギー領域を対象にしているため空気シャワー中のハドロン相互作用モデルが確立していない事が挙げられる。そこで、TA実験ではFDから100mの近距離に設置される加速器から出力される鉛直上向きの電子ビームをFDで観測する事で絶対エネルギー較正を行う。加速器ビームを用いる事は較正源のエネルギーが精密な既知の量であるという事、較正源として安定したものである事から、非常に有効な絶対エネルギー較正装置である。加速器ビームを用いた絶対エネルギー較正によってFDによるエネルギー再構成に用いる全ての較正定数を一括で較正できると期待できる^[10]。

2. 小型電子線形加速器 (ELS)

FDの絶対エネルギー較正用の加速器は東京大学宇宙線研究所(ICRR)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)の共同研究としてKEKにて2005年から2008年にかけて開発された。加速器は北米・ユタ州の砂漠に設置されるため、小型の線形加速器が選ばれた。この小型電子線形加速器はELS(Electron Light Source)と呼ばれている²。

ELSは最大出力エネルギー40MeVの可変式、1パルス当たりのビーム電力は6.4mJ(10^9 ppp)、ビームパルス幅は1μsec、繰り返しは0.1~1Hzでデザインされた。ELSの基本デザインはParmelaとGeant4によるシミュレーションによって決定された^{[10][11]}。ELSの完成写真を図1に示す。ELSの加速ユニットは100keVのパルス型電子銃、1台のプレバンチャー+バンチャー管、1台のSバンド2/3πモード進行波型加

速管、鉛直上向きにビームを偏向させ、出力エネルギーを決定するための90度偏向電磁石(出力磁場~0.6テスラ)、出力ビームのエネルギー領域とサイズを絞るためのコリメータスリット(50mm厚タンタル使用)から構成されている。またビームの収束や方向を調整するためにマグネットレンズ、ソレノイドコイル、ダブレット型四重極電磁石、ステアリングコイルを用いている。ビームモニターとしてはビーム電荷量測定用のファラデーカップ、ビーム電流測定用コアモニター、ビーム位置モニターとしてスクリーンモニターを用いている。RF源としては最大100MW出力の大電力パルスモジュレーター(日本高周波製KLY-M-104型)^[12]と最大出力40MWのSバンドクライストロン(三菱電機製PV-3030型)を用いた。また、冷却系として冷却能力20kWの冷却ユニットを製作した。ELSは米国での運用を考慮して加速ユニットを40ft海上コンテナに、冷却水ユニットを20ftの海上コンテナに収納可能な加速器として構築された。

3. ELSのビーム運転と性能評価

ELSの構築は2008年1月に完了し、翌2月よりビームの試験運転が開始された。KEKでのビーム運転では、ビームラインは水平方向へ偏向させた。ELSは50cm厚のコンクリートブロックで囲まれたシールド室内に構築された。ビーム本運転は2008年4月から12月まで行われた。以下にビームの性能評価について記述する。

3.1 出力ビームエネルギーの評価^[13]

出力ビームの性能評価として出力エネルギーの決定精度、取り出しエネルギー領域とその安定性の評価を行った。出力ビームエネルギーは90度偏向電磁石(Bending Magnet, BM)の磁場によって決定されたため、2007年にBMの磁場測定を行った。絶対磁場の測定にはNMRを使用し、BMへの供給電流値との

² ELSはTA-LINACとも呼ばれている。

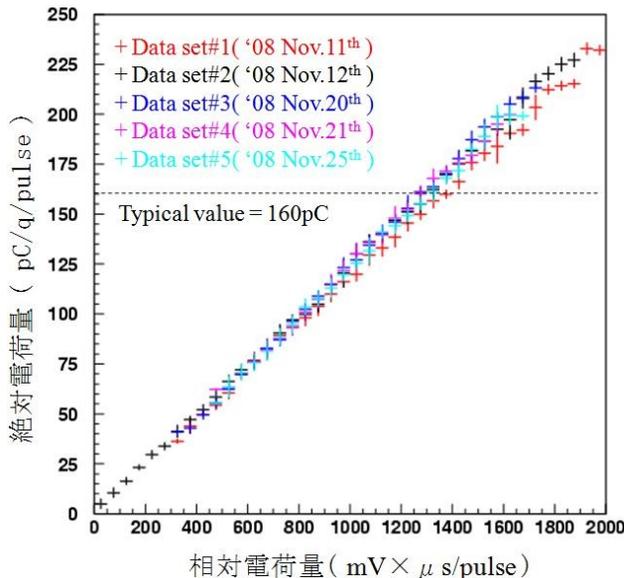


図 2 : 出力ビームのファラデーカップによる絶対電荷量とコアモニターによる相対電荷量の相関関係

相関を取り供給電流値から磁場への変換式を校正した。この校正により1%以下の磁場測定精度を得た。取り出しエネルギー領域はBM直後のコリメータスリットのスリット幅で決定される。スリット幅はビームサイズ、ビーム電流測定への影響が大きく、最終的に1mm幅で固定された。取り出しビームエネルギー領域は中心値に対して±1%以下であった。取り出しビームエネルギーの安定性はBM磁場の揺らぎで決定されるため、ビーム運転中の供給電流の揺らぎを測定した。その結果、取り出しエネルギーの揺らぎは±0.01%程度であり、非常に安定である事が分かった³。

3.2 出力ビーム電流測定精度の評価^[13]

パルス毎の出力ビーム電流値はコアモニターを用いて測定した。コアモニターからの出力パルスの時間積分値はビーム電荷量の相対値として得ることができる。この値をファラデーカップによるビームの絶対電荷量測定によって校正した。図2に校正結果を示す。絶対電荷量と相対電荷量は良い線形性を示した。統計誤差としてデータセットの各点の誤差の平均値を求めた(±4%)。系統誤差として各データセットの差を求めた(±5%)。

4. ELSの輸送とFDサイトへの設置

ビーム運転終了後、2009年2月にELSの輸送準備が完了した(図1)。米国への輸送とFDサイトへの設置は2009年2月末から3月に行われた。またELSの

³ エネルギーの揺らぎは出力ビーム方向の揺らぎにも影響するが、±0.01%の揺らぎはビーム射出後100mの上空において中心軸から10cmのずれである。このずれはFDの解像度と比べると充分小さい。

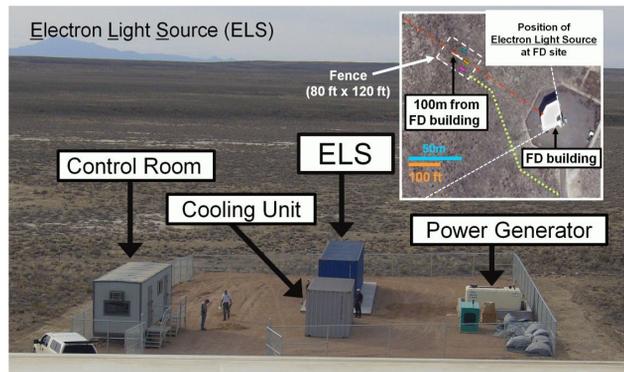


図 3 : FDサイトに設置されたELS、冷却水ユニット、制御室用コンテナ、ELS用発電機 (2009年3月撮影)

制御室用コンテナとELS用発電機の設置も完了した。FDサイトでの設置状況(2009年3月末)を図3に示す。2009年8月時点でELSのビーム運転のための準備が進められている。

5. 今後とELSの将来

ELSのビーム運転は年内中に行う予定である。ELSはこれまでの超高エネルギー宇宙線観測実験では実現できなかった精度のエネルギー測定を可能にする絶対エネルギー校正装置である。ELSによるエネルギー校正は今後、更に加速器の小型化を目指し観測に使用する全てのFDに対して校正を行う必要があると考える。またELSはエネルギー校正以外にも大気蛍光の発光量の測定にも応用でき、最近注目されている宇宙線の電波観測法の研究への応用も考えられている。ELSは今後宇宙線観測実験において大きな役割を担う事になると期待している。

参考文献

- [1] K.Greisen, Phys. Rev. D16 (1966) 748
- [2] G.T.Zatsepin and V.A.Kuz'min, J.Exp.Theo.Pyss.Lett,4,78 (1966),[ZhETF Pis'ma, 4 (1966) 114-117
- [3] M.Takeda et al., Astropart.Phys, 19, 447 (2003)
- [4] R.U.Abbasi et al., Phys.Rev.Lett. 100 : 101101 (2008)
- [5] J.Abraham et al.,Phys.Rev.Lett. 101 : 061101 (2008)
- [6] H.Sagawa et al., Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference in Lodz, Poland, 2009
- [7] J.Abraham et al., Nucl.Instr.and.Meth.A, 523, 50 (2004)
- [8] T.Nonaka et al., Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference in Lodz, Poland, 2009
- [9] H.Tokuno et al., Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference in Lodz, Poland, 2009
- [10] T.Shibata et al., Nucl.Instr.and.Meth.A, 597, 61 (2008)
- [11] D.Ikeda et al., Proceedings of 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, Aug. 1-3, 2007
- [12] T.Shintake et al., Proceedings of 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July 12-14
- [13] T.Shibata et al., Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference in Lodz, Poland, 2009