

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 N 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. We will calibrate the absolute energy scale of Fluorescence detector 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 was installed in Mar.2009. We had some troubles about the vacuum of ELS system, but we could recover all of troubles. The first shot of beam into the air will be early of September 2010.

超高エネルギー宇宙線観測用望遠鏡較正用 小型電子線形加速器の現状

1. 超高エネルギー宇宙線(UHECR)

宇宙線は地球に飛来する粒子や電磁波の総称である。その約90%が陽子で、他にも電子、ヘリウムや鉄などの原子核が観測されている。宇宙線のエネルギーは10MeV程度から 10^{20}eV に達し、そ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の高速プラズマが主であり、 10^{18}eV 程度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。我々は 10^{18}eV 以上のエネルギー領域の宇宙線を超高エネルギー宇宙線(Ultra High Energy Cosmic Ray; UHECR)と呼んでいる。

UHECRは複数の実験によって観測されているが、化学組成、発生起源、加速機構は重要な未解決問題である。また化学組成が陽子の場合、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、この有無についても未解決である。AGASA実験(1994年-

2004年)^{[3][4]}、HiRes実験(1994年-2006年)^{[5][6][7]}で得られた結果はお互い異なっており、AGASA実験ではGZKカットオフがなく^[3]、UHECRの到来方向には異方性がある^[4]、一方HiRes実験ではGZKカットオフが存在し^[5]、到来方向には異方性がなかった^{[6][7]}。2010年現在、UHECR観測は北米でTelescope Array(TA)実験(2008年~)^[8]、南米においてPierre Auger(PA)実験(2004年~)^[9]によって行われている。

2. UHECR観測の最新結果

2010年7月のICHEP2010²にてTA実験、PA実験^[10]、HiRes実験^{[11][12]}の最新結果が報告された。GZKカットオフの検証については全ての結果で、GZKカットオフの領域でUHECRのフラックスに制限があるという結果が得られた。PA実験では 20σ 以上の有意度で制限が付くという結果になり、HiRes実験では 5.3σ の有意度でGZKカットオフと矛盾の無い結果が得られた。TA実験でも 3.5σ の有意度でフラックスに制限があるという結果が得られた。化学組成に対する結果では、Auger実験は 10^{19}eV 以下のエネルギー

² <http://www.ichep2010.fr/>

¹ E-mail: shibata@icrr.u-tokyo.ac.jp

領域では主成分は陽子であるが、 10^{19} eV以上になると主成分が鉄に変化するという結果を得た。但し 10^{19} eV以上での陽子と空気分子の衝突断面積がエネルギーと共に急上昇するというモデルも存在するため、主成分が鉄であるという証拠が得られたというわけではない。一方、Hires実験とTA実験は 10^{19} eV以上のエネルギー領域のUHECRの主成分は陽子であるという結果を報告した。最後に到来方向に対する結果も報告された。Auger実験では 5.5×10^{18} eV以上のUHECRに対して、75Mpc以内の近距離内のAGNとの相関結果を報告し、AGNの位置から3.1度以内の範囲内から到来する宇宙線の観測数は等方的な場合、期待値は14イベントに対して実験値は29イベントであった事から、AGNとの相関を主張した。一方、HiRes実験は宇宙の大規模構造やAGNとの相関はなかったという結果を報告した。TA実験もAGNとの相関はなかったという報告をした。Auger実験とHiRes実験、TA実験の大きな違いはそれぞれが南半球、北半球にて実験を行っている事である。この違いによってお互いが観測している宇宙の領域が異なるためUHECRの到来方向の結果が異なっているという見解もある。

現在の所、UHECRのエネルギースペクトル、化学組成、到来方向の問題を解決させる結果ではないが、今後Auger実験とTA実験が統計量を増やして、更なる精密な結果が報告されるであろう。

3. 小型電子線形加速器(ELS)の現状

TA実験で用いられている大気蛍光望遠鏡(FD)の絶対エネルギー較正源として開発された小型電子線形加速器(Electron Light Source; ELS)^{[13][14][15][16]}は2009年4月から北米・ユタ州の観測サイトにて運転準備が開始された。2010年8月現在、ELSは加速ビームの運転が可能状態にまで準備が整っている。2010年6月末時点の様子を図1に示す。以下に2009年4月から現在までの立ち上げ作業について記述する。



図1：2010年6月末時点でのELSの様子

3.1 発電機からの電力配線工事

ELSはFD運転用に使用している80kW発電機とELS用の新80kW発電機の計2台で運転を行う。FD用発電機からは主に真空機器、制御、モニター、DAQ用コンピュータ、室内照明に用いられる。ELS用新80kW発電機からの電力は主にクライストロン、電

磁石、冷却水ユニット用に用いられる。また空調を2台設置し、FD用発電機、ELS用新発電機から1台ずつ運転する。それぞれの発電機からの電源配線工事は2009年10月に完了した。

3.2 真空機器の真空漏れ

10月以降は真空漏れ検査と立ち上げ、設備の監視システムの構築を行った。電子銃の真空引きは特に大きな問題はなく、数日で $\sim 5 \times 10^{-6}$ Pa台に到達し、最終的には 10^{-7} Pa台に到達した。2010年4月までに全ての真空漏れの検査が終了したが、幾つかの大きな問題が見つかりその対処を行った。

2009年4月、クライストロン^[16]の故障と思える症状が確認された。イオンポンプによってクライストロンの真空引きを開始した所、イオンポンプ電源(東芝電子管デバイス製VT-69060)の出力電流値が常時0 μ Aである事、電源オフの状態でもクライストロンヒーターに数十分程通電させた後再び電源をオンにしても出力電流値が0 μ Aであった。クライストロンイオンポンプは管内が大気圧になった状態では動作せず出力電流値は0 μ Aになるため、クライストロンに真空漏れがあると判断した。真空漏れの原因として北米への輸送中クライストロンに与えられた振動が考えられるが、詳しい原因は不明である。その後KEKの入射器グループより同じ型番の新しいクライストロンが提供され、2010年6月に交換された。交換後の動作状況については後述する。

2009年12月以降、電子銃以外の導波管、ビームライン上の真空漏れ検査を行い、スクリーンモニターの真空管の溶接部が一部割れている事を発見した(図2)。スクリーンモニターは3月に日本に持ち帰りKEKで再溶接した。これにより真空漏れは解決し、4月にビームラインに再インストールされた後、全てに真空漏れがない事を再確認した。

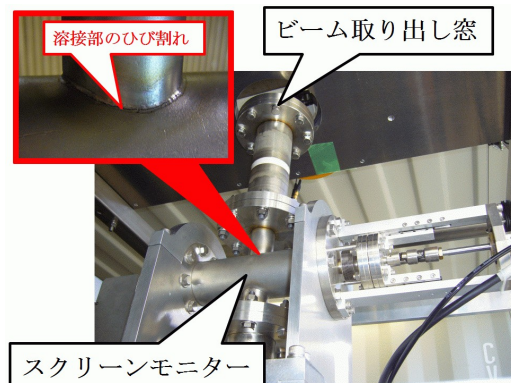


図2：真空漏れが発見されたスクリーンモニターとひび割れ箇所の写真

3.3 ELS断熱対策、冷却水の不凍液への変更

ELSは高周波システムと加速ユニット、冷却水ユニットがコンテナ内に収納された状態で北米・ユタ州の砂漠で運転される。夏季の最高温度は40 $^{\circ}$ C以上、冬季の最低温度は零下30 $^{\circ}$ C近くになるため、加速器

運転としては非常に厳しい環境にある。そのため断熱対策として2009年8月にコンテナの壁に厚さ約15cmの断熱材を接着させ、さらに断熱材全体を白色に着色させた。この断熱材の設置前はコンテナ内の日中と夜間の温度差が非常に大きく、また天気によって大きな変化が見られたが、断熱材の設置後は急激な変化はなくなった。

ELSでは冷却水に純水を使用する予定であったため冬季に発電機の故障等による停電等が原因で純水が凍結を起こす可能性がある。この問題を解決させるために、純水から不凍液の使用に変更する事が決定された。最終的には不凍液として腐蝕抑制剤入りプロピレン・グリコール50%と純水50%の混合液が使用された³³。この混合液の凍結温度は零下35℃、比重は22℃の時に1.049g/cm³、比熱は21℃から27℃の間で約0.84kcal/kg/℃であり、冷却水ユニットの仕様上特に問題はなかった。不凍液は2010年6月より使用を開始した。

3.4 高周波発生装置と電子銃の試験運転

2010年6月、KEKのスタッフ3名、三菱電機サービス1名とでELSの立ち上げ作業と試験運転を行った。最初にクライストロンの交換作業が行われた。交換作業は特に大きな問題もなく、交換に伴う真空漏れもなく完了した。交換後は大電力パルスモジュレータからのクライストロンへの入力パルス、出力RFを確認した。出力RFの確認後はRFエージングを開始し、繰り返し15Hzで約4日間行った。クライストロンの出力特性はKEKで行った単体試験結果と充分近い結果が得られた(図3)。今回のRFエージングでは出力RFのピーク電力は最大27MWを確認した。その後RFを停止させて、電子銃ビームの単体試験を行い、電子銃ビームの確認も行った(図4)。6月の試験によってRFシステムと電子銃システムに問題はなく、加速ビーム運転には問題がない事を確認した。

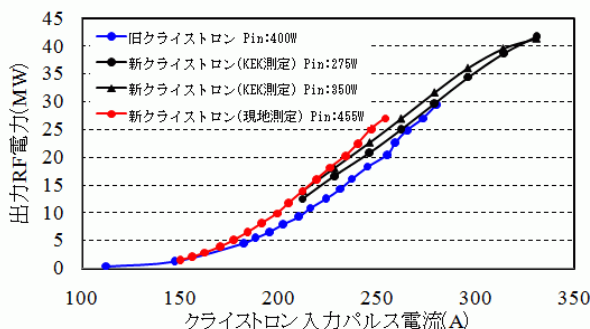


図3：クライストロンの特性曲線。交換前のクライストロン(青)、交換後のクライストロン(黒：KEKでの測定結果、赤：アメリカの観測サイトでの測定結果)

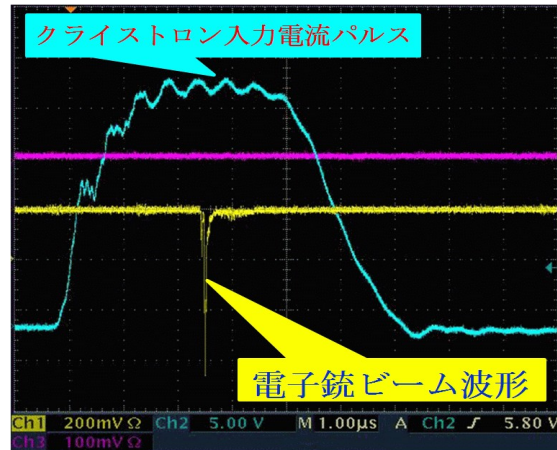


図4：北米の観測サイトで初めて確認された電子銃ビーム波形

4. ELSの今後と運転方針

ELSの今後の予定としては2010年8月末から9月初旬にかけて加速ビーム試験を行い、空気中へのビーム射出、FDでの空気シャワーの初観測を目指す。

射出ビームとFDでの観測が可能になった後は、ビームコミショニングを行う。RFのチューニング、収束電磁石のチューニングを行い、定格エネルギー40MeVの収束性の良い安定したビーム出力を行う。ビーム電流モニターの高周波源からのノイズ対策も行い、S/N比が充分良い電流値測定を目指す。

ビームコミショニングが安定した後はFDの絶対エネルギー較正を行う。一度のエネルギー較正のために必要な運転日数は数日程度で1日辺り数百パルス程度を予定している。ELSはUHECR観測実験にとっては非常に重要であるため、絶対エネルギー較正が急がれる。

参考文献

- [1] K.Greisen, Phys. Rev. D16 (1966) 748
- [2] G.T.Zatsepin and V.A.Kuz'min, J.Exp.Theo.Phys.Lett,4,78 (1966),[ZhETF Pis'ma, 4 (1966) 114-117
- [3] M.Takeda et al., Astropart.Phys, 19, 447 (2003)
- [4] M.Takeda et al., Astrophysics, J., 522, 225 (1999)
- [5] R.U.Abbasi et al., Phys.Rev.Lett. 100 : 101101 (2008)
- [6] R.U.Abbasi et al., Astropart.Phys,22, 139 (2004)
- [7] R.U.Abbasi et al., Astrophysics, J., 623, 164 (2005)
- [8] H.Sagawa et al., Proceedings of the 31st ICRC,2009
- [9] J.Abraham et al., Nucl.Instr.and.Meth.A, 523, 50 (2004)
- [10] J.Abraham et al.,Phys.Lett.B., 685, 239 (2010)
- [11] P.Sokolsky et al., Nucl.Phys.,196, 67 (2009)
- [12] R.U.Abbasi et al.,astro-ph.HE.1002.1444v1
- [13] T.Shibata et al., Nucl.Instr.and.Meth.A, 597, 61 (2008)
- [14] D.Ikeda et al., Proceedings of 4th PASJ 2007
- [15] T.Shibata et al., Proceedings of the 31st ICRC,2009
- [16] T.Shibata et al., Proceedings of 6th PASJ,2009

³ <http://www.buyglycol.com/>