

# タングステン単結晶標的を用いた陽電子生成実験

古川 和朗<sup>1A)</sup>、穴見 昌三<sup>A)</sup>、梅森 健成<sup>C)</sup>、榎本 収志<sup>A)</sup>、大越 隆夫<sup>A)</sup>、大沢 哲<sup>A)</sup>、  
小川 雄二郎<sup>A)</sup>、奥野 英城<sup>A)</sup>、柿原 和久<sup>A)</sup>、笹原 和俊<sup>B)</sup>、紙谷 琢哉<sup>A)</sup>、諏訪田 剛<sup>A)</sup>、  
浜津 良輔<sup>B)</sup>、藤田 貴弘<sup>C)</sup>、吉田 勝英<sup>C)</sup>、V. Ababiy<sup>D)</sup>、A. P. Potylitsyn<sup>D)</sup>、I. E. Vnukov<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1 - 1

<sup>B)</sup> 東京都立大学、〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1 - 1

<sup>C)</sup> 広島大学、〒 739-8526 広島県東広島市鏡山 2 - 313

<sup>D)</sup> Tomsk Polytechnic University, P.O.Box 25 Lenin Ave. Tomsk, 604050, Russian Federation

## 概要

次世代の高エネルギー電子陽電子衝突型加速器においては、発熱などの問題を克服しながら、収率の高い陽電子生成部を設計することが大きな課題のひとつとなっている。単結晶標的を用いて陽電子を生成すると、発生するチャネリング放射光とコヒーレント制動放射によって陽電子生成効率が增大することが期待され、この振る舞いを定量的に把握することが求められてきた。今回 KEK の電子線形加速器において 8 GeV 電子を厚さ 2.2mm と 9mm のタングステン結晶標的に照射して得られる陽電子生成の測定を行なった。得られた実験データを利用して今後シミュレーションコードの精度を向上させることができれば、高効率の新しい陽電子源の設計が可能になると期待される。

## 1. はじめに

電子・陽電子衝突型加速器においては、衝突する粒子の質と量が実験効率を決めることになるが、そのうち、特に陽電子発生源の性能が効率を左右する大きな要因になる。

例えば、KEK の電子・陽電子線形加速器においては、要求される陽電子を発生させるために、パルスあたり 10 nC という大電流で 3.7 GeV という高いエネルギーの一次電子を安定に生成し、それを重金属の標的に照射して、発生する陽電子を捕獲利用している<sup>[1]</sup>。

このうち、大出力電子銃に引き続く集群装置においては、周波数の異なるサブハーモニック・バンチャを安定に動作させる必要がある。集群装置でも高い加速電界が必要になるが、陽電子発生装置においても、位相空間に大きく広がって発生する陽電子を捕獲するために、高い収束磁場と大きな加速電界が必要となる。そのような部分では、放電による加速管の損傷が大きな問題となっ

ている<sup>[2]</sup>。

このような困難を克服して、安定な陽電子が生成できるように、さまざまな Feedback Loop や監視装置を稼働させている<sup>[3]</sup>。また、今後複数バンチャによる陽電子の倍増も、ウェイク場の問題を解決しながら、実現すべく試験している<sup>[4, 5]</sup>。

しかし、次世代のリニア・コライダでは、さらにバンチャ数を増やして、百バンチャ程度の一次電子を標的に導くことが検討されており、その場合は標的の発熱が大きな課題となっている。この課題が解決されないならば、標的を融体にするなどの対策も考えなくてはならないかもしれない。

このような状況を打開するために、他の陽電子生成の過程によって陽電子の収量を向上させる方法も検討されている。その中で、Chehab らによって提案された単結晶標的を用いる方法<sup>[6]</sup>は新しい方法として期待されている。国内においても、陽電子収率の増大の確認をして、将来の利用方法を検討するための実験が始まった<sup>[7]</sup>。

## 2. 単結晶を用いた陽電子の発生

従来の多結晶または非晶質を用いた陽電子発生に比べ、単結晶を用いた場合には、一次電子が結晶軸に沿って入射した場合に、チャネリング放射光やコヒーレント制動放射により低エネルギー (< 20MeV) 光子数が増大し、その結果、生成陽電子数が増大する。この効果を利用するためには、結晶軸を一次電子の入射方向に合わせるためのゴニオメータが必要となるが、他に特殊な装置が必要ないので、既存の加速器を利用した実験が考えやすい。

KEK の電子線形加速器においては、まず、既存の陽電子発生装置の標的の直前に放射長の 0.5 倍 (1.7mm) のタングステン単結晶において陽電子収量の増大を確認

<sup>1</sup>E-mail: kazuro.furukawa@kek.jp

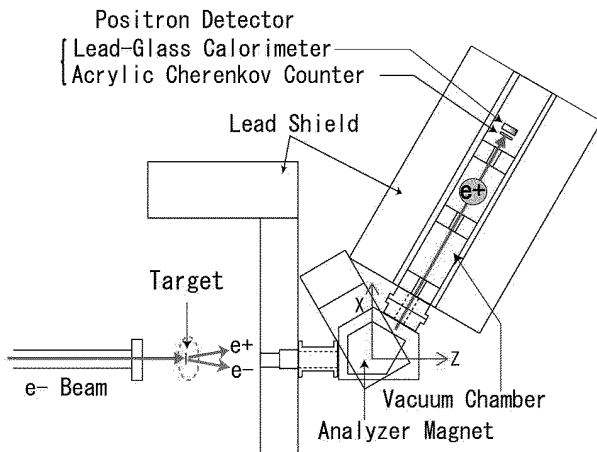


図 1: 実験に使われた標的、分析電磁石、測定器、等の配置

した<sup>[8]</sup>。

これらの実験やシミュレーションによると、陽電子収率の増大は残念ながらそれほど大きくないことがわかってきているが、同じ量の陽電子を得るのに必要な標的の厚さを薄くすることができるので、発熱量を抑えることが可能であると思われるため、特にリニアコライダには有望である。

そこで、結晶標的を用いた陽電子発生装置を、目的や条件に応じて設計できるように、精度の高いシミュレーションコードを開発することが計画されている。その中では、陽電子の発生効率だけでなく、発生した陽電子の捕獲効率も合わせて計算できることが重要になる。現在のところ、電磁シャワーのシミュレーションコードの素過程にチャネリング放射光やコヒーレント制動放射の効果を追加して、さらに標的後の電磁場の中の陽電子の飛跡追跡を行なうことが考えられている。しかし、そのコードの有効性を確認するためには、陽電子発生について、一次電子エネルギーや角度依存性、そして陽電子のエネルギー分布などの実験情報が必要となる。

この実験情報を収集するために、条件を変えた 2 回の実験を行ない、解析を進めている<sup>[9, 10]</sup>。

### 3. 実験方法

KEK の電子線形加速器はパルス運転を行なうので、陽電子を計数する実験は適さない。そこで、1 パルス内で多量に発生する陽電子をまとめて観測することにした。測定器の測定可能範囲を正しく把握していれば、精度を容易に高めることが可能となる。

実験は加速器の終端近く（第 3 スイッチヤード）のエネルギー分析ラインで行なわれた。8 GeV に分析されたビームを、標的に収束させるために四重極磁石が使

われ、また、ビーム診断用に蛍光板ビーム形状モニタと壁電流モニタが用いられた。

調整された一次電子は、結晶軸を合わせるためにゴニオメータに取りつけられたタングステン単結晶標的に導かれ、陽電子を発生させる。陽電子は鉛コリメータを通して、小型 60 度分析電磁石と 3 つの鉛コリメータとでエネルギー分析された後、ルーサイト・チェレンコフ検出器、さらに鉛ガラス検出器に到達する（図 1）。空気による散乱吸収に影響されずに、低エネルギーの陽電子を測定するため、測定器自体を含めて、標的直後からの経路には真空箱を設けた。また、一次電子を起源とするバックグラウンドを避けるため十分な鉛シールドを積んだ。

ゴニオメータは 4 軸の自由度を持ち、陽電子の収量の変化を見て、ビーム方向と結晶軸を合わせることができ。また、測定器から得られる信号は、入射した陽電子の数に比例するよう、注意深く光電子増倍管の高電圧が調整された。測定器の信号は、標的直前の一次電子の電荷量を表す壁電流モニタの信号とともに、電荷感応型 ADC で数値に変換され Linux 計算機で収集された。

標的としては、2.2 mm と 9 mm の単結晶と、較正のためにいくつかの厚さの多結晶タングステンを用いて情報を比較した。実験中は、信号の線形性やノイズなどに十分注意が払われ、情報の信頼性が失われないよう配慮した。

### 4. 実験結果

実験の結果、陽電子収量の角度依存性、標的厚さ依存性、陽電子エネルギー依存性、等の情報を得ることができた。収量の絶対値については、現在のところ推定が困難であるが、相対値についてはほぼ誤差の小さい情報が得られたと考えているが、さらにモンテカルロシミュレーションとの比較を含めて解析検討を進めている。

図 2 は 2.2 mm と 9 mm の厚さの単結晶標的について、20 MeV/c の陽電子収量に対する、結晶の (111) 面に垂直な軸と入射一次電子との角度の依存性を表している。軸の周りではチャネリング放射光やコヒーレント制動放射によって陽電子の収量が増えている。現在のところ、ピークの幅が 2.2 mm について 9 mrad (FWHM)、9 mm について 39 mrad (FWHM) と、チャネリング放射光から予想される幅 (< 1mrad) に比べ大きいことから主にコヒーレント制動放射の効果が大きいものと考えている。

ピークのすそでは、単結晶の効果はほとんどなく多結晶と同じ陽電子量が得られていると考えられるので、

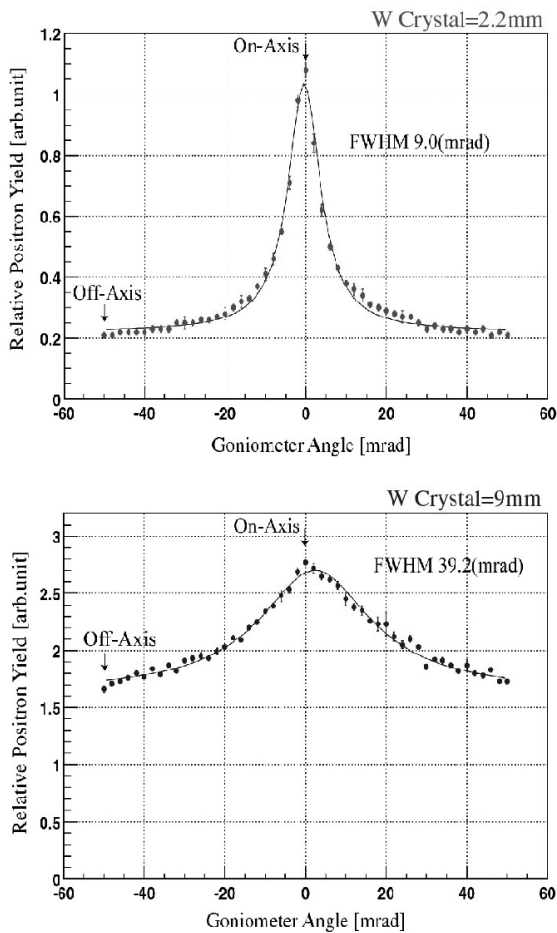


図 2: 2.2 mm (上) と 9 mm の標的についての陽電子収量の角度依存性

ピークの陽電子量と比較することによって、増倍率は 2.2 mm の標的について  $5.1 \pm 0.1$  倍、9 mm について  $1.7 \pm 0.1$  倍、という値が得られた。

図 3 は単結晶と多結晶標的についての 20 MeV/c の陽電子収量の標的厚さ依存性を表している。まだ情報が少

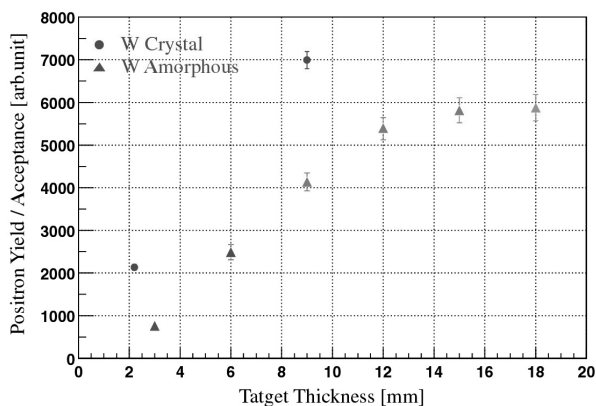


図 3: 単結晶と多結晶の標的についての陽電子量の厚さ依存性

いが、多結晶標的で最も陽電子収量が多くなる 14 mm の厚さのものに比べ、9 mm の厚さの単結晶標的は劣っていない。つまり、同じ量の陽電子を得るために、単結晶であれば、薄い標的を用いることができることを示している。このことは標的での発熱が少く、また発生分布が前方に片寄るので陽電子の質（エミッタンス）が少し良くなることが期待される。

## 5. まとめ

今回の実験で、単結晶を用いた場合の陽電子の収量について、入射角度、陽電子エネルギー、標的厚さなどの知見が得られ、さらにシミュレーションと比較しながら解析を進めている。これまでのところ、実験結果は、将来の電子陽電子衝突実験で単結晶標的を用いた陽電子生成が有用となる可能性のある情報を示しており、今後、さらに詳しい実験を行ないたいと考えている。

また、可能であれば入射電子エネルギー依存性などの実験も行ない、それらを参考にして、単結晶から生成される陽電子のシミュレーションコードを作成し、実験情報を再現できるかどうか試験して、さらには、リニアコライダ等の陽電子生成装置を設計できるコードに発展させることを期待したい。

## 参考文献

- [1] A. Enomoto, "Upgrade to the 8-GeV Electron Linac for KEKB", Proc. LINAC'96, Geneva, Switzerland, 1996, p.633.
- [2] K. Furukawa *et al.*, "Towards Reliable Acceleration of High-Energy and High-Intensity Electron Beams", Proc. LINAC2000, Monterey, U.S.A., 2000, p.630.
- [3] K. Furukawa *et al.*, "Beam Switching and Beam Feedback Systems at Keks Linac", Proc. LINAC2000, Monterey, U.S.A., 2000, p.633.
- [4] Y. Ogawa *et al.*, "KEKB ライナックにおける陽電子倍増のための大強度 2 バンチ加速", these proceedings.
- [5] K. Furukawa *et al.*, "KEKB 入射器の 2 バンチ加速に向けた BPM 読み出しとビームフィードバック", these proceedings.
- [6] R. Chehab *et al.*, Orsay Report LAL-RT 89-01, 1989.
- [7] K. Yoshida *et al.*, "Positron Production in Tungsten Crystal by 1.2 GeV Channeling Electron", Phys. Rev. Lett. **80**, 1998, p.1440.
- [8] M. Inoue *et al.*, "Experiment of Positron Generation using a Crystal Target at the KEK Electron/Positron Linac", Nucl. Instr. and Meth. B **173**, 2001, p.104.
- [9] T. Suwada *et al.*, "Positron-Production Experiment by 8-GeV Channeling Electrons in Crystal Tungsten at the KEKB Injector Linac", Proc. HEACC2001, Tsukuba, 2001.
- [10] K. Sasahara *et al.*, "Positron Production from a Tungsten Single Crystal at the KEK 8-GeV Electron Linac", Proc. 21st ICFA Beam Dynamics Workshop, Stony Brook, 2001.