

NEW POSITRON SOURCE WITH TUNGSTEN SINGLE-CRYSTAL

Tsuyoshi Suwada^{1A)}, Kazuro Furukawa^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Takashi Sugimura^{A)}, Hideki Okuno^{B)}, Kensei Umemori^{C)}, Takeshi Haruna^{D)}, Yusuke Endou^{D)}, Ryosuke Hamatsu^{D)}, Takayuki Sumiyoshi^{D)}, Katsuhide Yoshida^{E)}, Alexander P. Potylitsyn^{F)}, Igor S. Tropin^{F)}, Robert Chehab^{G)},

A) Accelerator Laboratory, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

B) Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

C) Institute of Materials Structure Science, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

D) Department of Physics, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Ohsawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

E) Saga Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005, Japan

F) Nuclear Physics Institute, Tomsk Polytechnic University, 634050, P.O.Box 25, Tomsk, Russia

G) LAL, IN2P3-CNRS, Universite de Paris-Sud, Bat.200-B.P.34, 91898 Orsay, France

Abstract

In order to achieve high luminosities in high-energy e^+e^- colliding experiments, positron sources must be reinforced, especially towards the next generation of high-energy e^+e^- accelerators. In a conventional positron source, positrons are produced by high-energy electrons hitting a heavy-metal target. However, the allowable heat load on the target limits the beam power of the incident electrons. One promising approach to improve the positron-production efficiency and to reduce the heat load on the target is to use a crystal-assisted positron source. A new tungsten single-crystal target was successfully employed at the positron source of the KEKB injector linac in September 2006. The tungsten crystal target increased the positron intensity by ~25% compared to that for the conventional tungsten plate. On the contrary, although the positron intensity increased, the heat load on the crystal target decreased by ~20%. We believe that these results could stimulate new interest towards the development and application to high-intensity positron sources in the next generation of high-energy electron/positron linear accelerators.

タングステン単結晶標的を利用した陽電子源

1. はじめに

次世代の電子・陽電子衝突型加速器では、ルミノシティの向上を目的として大強度陽電子源が要求される。高エネルギー電子をタングステン等の重金属標的に照射し陽電子を生成するという従来の方法では、入射電子のエネルギー又は強度を上げるしか方法がない。しかしながら、この方法では、標的の熱負荷による損傷が限界を与えられている。これまで、大強度陽電子ビームを実現するために、陽電子生成効率を増大させ、標的の熱負荷を軽減させるいくつかの新しい方法が提案されてきた。そのひとつが、Chehab (LAL-Orsay) らにより提唱された重金属単結晶からの強力なチャネリング放射を利用する方法である[1]。

陽電子の大強度化は、ルミノシティのさらなる向上を目指したKEKB入射器[2]の重要な課題の1つで、入射器を中心とする結晶標的開発グループは、単結晶を利用した陽電子生成用標的の開発を進めてきた。長年にわたる準備研究を経て、2005年から2006年にかけて良質で結晶乱れのない厚いタングステン単結晶を開発することに成功し、さらに、入射器では約10mmの厚さが標的として最適であることを検証した。また、電子ビームを正確に結晶軸に沿って照射できるように結晶標的の加工・装着法を確立するこ

とで、2006年9月、タングステン単結晶標的の実装を行い陽電子の増強に成功した。生成された陽電子ビーム強度は、運転開始以来の最高値(1.8nC/bunch、陽電子源直後で計測)を記録した。

2. タングステン結晶標的

2.1 準備実験

我々は、2005年から2006年にかけてタングステン結晶の最適な厚さを決めるための陽電子生成実験を行なった[3]。

図1に、標的厚さに対する陽電子生成効率の変化を示す。ここで、陽電子生成効率とは、入射電子強度で規格化した陽電子強度である。図には、通常のタングステン板による結果も示す。実験結果によると、結晶標的の最適厚さは、約10mmでタングステン板に比べ陽電子強度は~26%大きい。また、それぞれの曲線は、標的中の電磁シャワー発達の様子を示し、結晶標的は、通常標的に比べ、より薄い厚さでシャワー発達が最大となる。これは、結晶標的の放射長が効果的に短縮していることを示し、結晶効果によるものである。

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

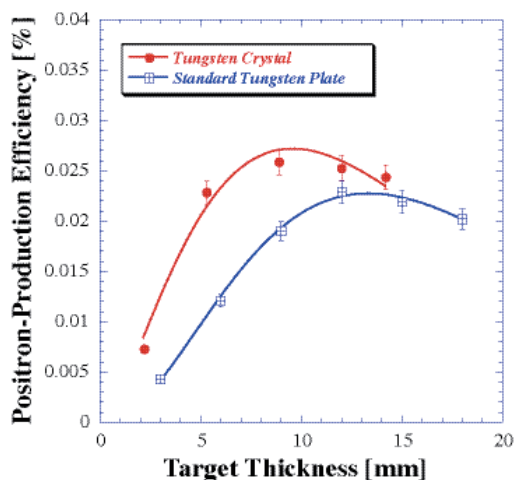


図1. 標的厚さに対する陽電子生成効率の変化
赤：タングステン結晶、青：タングステン板。陽電子運動量は20MeV/c、実線はガンマ関数によるガイドラインである。

2.2 KEKB入射器の陽電子源

図2に、入射器陽電子源[2]のカット模型を示す。

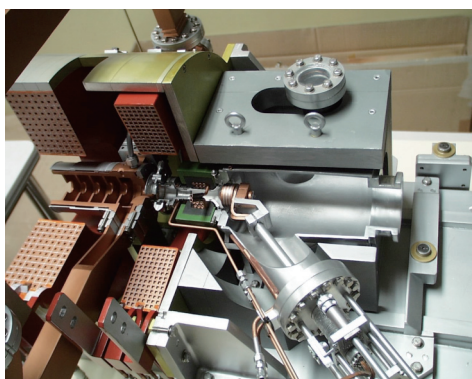


図2. KEKB入射器陽電子源のカット模型

標的は、リニア駆動機構により、陽電子入射時に挿入される。4GeV電子は、右側から入射し、標的で電子・陽電子対が生成される。

陽電子は、一次電子(エネルギー4GeV、電荷量 $\sim 10\text{nC/bunch}$ 、最大繰返し50Hz)をタングステン標的に衝突させて発生させる。一次電子の平均的な規格化エミッタンスは、 $\gamma\epsilon_x=660\text{mm}\cdot\text{mrad}(\text{rms})$ 、 $\gamma\epsilon_y=360\text{mm}\cdot\text{mrad}(\text{rms})$ である。ビーム半径は、標的直前のQ電磁石で絞られ、標的上で $\sim 0.7\text{mm}(\text{rms})$ である。これらの測定値から、標的に対する電子の入射角度 θ_x (θ_y)は、 $\sim 0.2(0.1)\text{mrad}(\text{rms})$ と推定され、入射電子の結晶軸に対する入射角は、チャネリング放射の条件を充分満たす。

従来の陽電子標的は、14mm厚(4X₀)のタングステン金属を使用していた。2006年9月、陽電子源のレイアウトを変えることなく、従来標的に替えて準備実験で決めた最適厚さである10.5mm厚タングステン結晶標的に置き換えた。

陽電子は、後段の陽電子捕獲部に捕らえられ、収

集と加速が同時に行われる。標的直後の強力なパルスコイル(2T)と後段の8m長DCソレノイド(0.4T)の磁場により、陽電子は効率よく収集され、DCソレノイドの中にある二本の1m長加速管と二本の2m長加速管により一気に加速され、陽電子源直後では、約70MeVのエネルギーとなる。一方、電子は、陽電子とは逆に減速し、捕獲部で損失しながら最終的にはシケイン部のストッパーで停止する。

2.3 タングステン結晶標的の実用化

実用化に向けては、幾つかの技術的困難を克服する必要があった。つまり、(1) 冷却構造をもつ銅材にどのようにして結晶を組入れるかということ、(2) 結晶標的のアライメントをどのように確保するかということであった。特に、標的形状を大きく変更することなしに(1)と(2)を実現する必要がある。また、(1)と(2)は、お互い密接に関係するので、標的の製作には、十分な検討を行った。

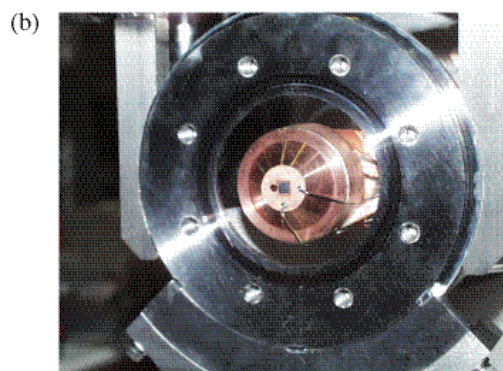
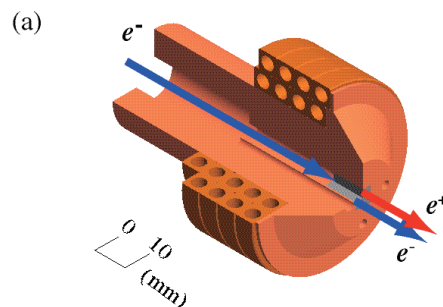


図3. (a) タングステン結晶標的の構造、(b) 真空チェンバーに設置した結晶標的(ビーム下流側から見ている) タングステン結晶は冷却用の銅部(直径50mm)の中央に仕込まれている。標的の熱負荷は外側に巻いた銅パイプ(直径4mm)に冷却水を流して(1.5l/min)取り除かれる。標的中心から7.5mmの位置に二組の熱電対を挿入し、標的温度をモニターする。

技術的課題の一つである銅材とタングステン結晶の接合には、HIP(Hot Isostatic Pressing)を適用した。また、X線による結晶軸測定の結果に基づいて銅材からなる標的銅部の中心軸が結晶軸に一致するように標的銅部に高精度な機械加工を施した。このことから、眼に見えない結晶軸を標的表面に再現することが可能になった。このように、標的実装における

一連の技術的課題を解決することで結晶標的の実用化を実現した[4]。図3(a)に、最終的な結晶標的の構造を、図3(b)に、実用化した結晶標的を示す。

3. 結晶標的の性能評価

2006年夏期シャットダウン後の運転立上げ時に、陽電子生成効率の測定を行った[5]。陽電子強度は、入射電子の結晶標的に対する入射角を調整することで最大にする。標的上流にある二組のステアリング磁石(x, y方向)を用いて入射角を変化させながら、入射電子と陽電子強度を同時に測定した。測定時の一次電子の平均電荷量は、7.5nC/bunchであった。図4に、結晶標的への入射角を調整した後の陽電子生成効率の測定結果を示す。

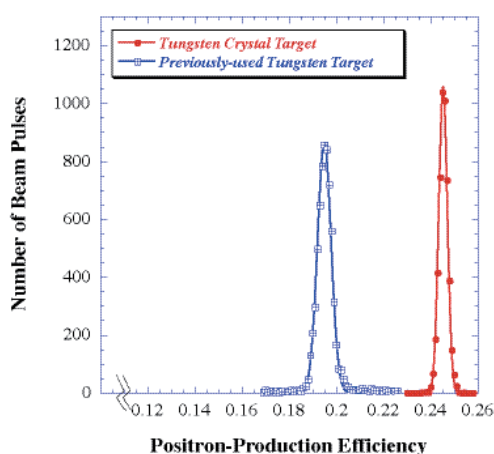


図4. ビーム・パルス毎に取得したタングステン結晶標的による陽電子生成効率の分布。比較のために、従来標的による分布もプロットした。実線は、ガウス・フィットを示す。

陽電子生成効率は、準備実験での定義と同様に陽電子強度に対する1次電子強度の比で表す。結晶標的の分布は、約1.5時間の連続したビーム・パルスで得られたデータによるものである。一方、従来標的のデータは、夏期シャットダウン前のKEKB運転時(6月)の分布である。それぞれの分布をガウス・フィットすることで、陽電子生成効率の平均値と標準偏差を算出した。その結果、結晶及び従来標的に対する陽電子生成効率は、それぞれ、 0.25 ± 0.01 (0.26 ± 0.01)、 0.2 ± 0.01 (0.2 ± 0.01)となり、結晶標的からの陽電子強度の増大が明らかとなった。ここで、カッコ内は、2バンチ加速運転での2バンチ目に対する生成効率を示す。増大率で表すと $25 \pm 2\%$ ($28 \pm 2\%$)となる。この結果は、2バンチが同じ程度に増大し、一次電子が同様な入射角で衝突していることを示している。また、得られた増大率は、準備実験で得られた増大率と実験誤差の範囲内でよく一致している。

結晶標的の温度上昇は、標的の熱負荷を議論する上で重要な指標となる。ビーム繰返し50Hz、1バンチ運転時における定常的な温度上昇は、13.2°Cで

あった。測定時の1次電子の平均電荷量は、7.8nC/bunchであった。図5は、従来標的の温度上昇と比較するために、入射電子の電荷量で規格化した温度上昇の測定結果を示す。結晶標的の熱負荷は、従来標的に比べ~20%小さくなっている。この結果は、結晶効果で効率的に陽電子が生成されることを示し、Artruらによるシミュレーションの結果とも概ね一致している[6]。

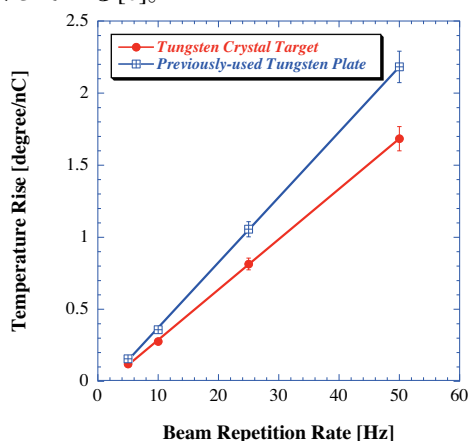


図5. ビーム繰返しに対する入射電子電荷量で規格化した温度上昇の変化。赤：タングステン結晶、青：タングステン板。

4. まとめ

我々は、準備実験において4GeV電子によるタングステン単結晶標的を利用した陽電子生成実験を行い、ビームを結晶軸に一致させると陽電子生成が、タングステン金属と比べ約26%増大することを確認した。また、結晶効果によりタングステン結晶の最適放射長が短縮することを定量的に確認した。

電子ビームを精度よく結晶軸に沿って照射できるように結晶標的の加工・装着法を確立したことで、KEKB入射器において、タングステン単結晶を利用した陽電子源の実用化に世界で初めて成功した。このことにより、従来のタングステン標的に比べ約25%の陽電子強度の増大を確認した。また、結晶標的の熱負荷は、従来標的に比べ約20%低減することを確認した。再開したKEKB運転においても連続的に使用され、安定した陽電子強度を実現している。

参考文献

- [1] R. Chehab, *et al.*, Proc. the 1989 IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC'89), Chicago, IL, USA, March 1989, p.283.
- [2] I. Abe, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A499** (2003) 167.
- [3] T.Suwada, *et al.*, Procs. the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, 2006, p.789.
- [4] 諏訪田剛, 高エネルギーニュース, 第25巻3号 2007, p.127.
- [5] 諏訪田剛, 日本加速器学会誌「加速器」 第4巻1号 2007, p.7.
- [6] X. Artru, *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **6** (2003) 091003.