

# タングステン単結晶標的で陽電子強度の増大に成功

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

諏訪田 剛

tsuyoshi.suwada@kek.jp

2006年12月6日

## 概要

KEK 電子陽電子入射器 (KEKB 入射器) を中心とする結晶標的開発研究グループは、2006年9月、KEKB 入射器の陽電子源に、従来のタングステン標的に替えて、最適化したタングステン単結晶標的を実装した結果、陽電子ビーム強度を約 25% 増大させることに成功した。また、結晶標的の熱負荷は、陽電子強度の増大にもかかわらず、従来標的に比べ約 20% 低減することを確認した。このことにより、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。運転再開後の約 2 ヶ月の連続運転でも、結晶標的が安定して陽電子を生成していることを実証した。この成果は、次世代の高エネルギー加速器の陽電子源への応用にも貢献するものと期待される。

## 1. はじめに

現在、KEK では、B ファクトリー (KEKB) による高エネルギー電子陽電子衝突実験が進められている。この実験は、8GeV 電子と 3.5GeV 陽電子を衝突させ、生成される B 中間子の崩壊を通して CP 対称性の破れを検証することを目的とする。B ファクトリーという名のごとく、大量に B 中間子を生成し、その稀崩壊現象を調べるので、加速器にとっては、ルミノシティを如何に向上させるかが鍵となる。現在、KEKB[1]は、世界最強の加速器性能を有し、本稿執筆時の 2006 年 12 月 6 日で、ピーク・ルミノシティは  $1.7 \times 10^{34} / (\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$  を越え、総積分ルミノシティは 695/fb に達している。

陽電子ビームの大強度化は、積分ルミノシティのさらなる向上を目指した KEKB 入射器[2]の重要なテーマで、これまで三つの研究課題が進められた。(1)陽電子の 2 バンチ同時加速[3]、(2)単結晶を利用した陽電子標的の開発、(3) *Adiabatic Matching Device* による陽電子捕獲部の開発[4]である。(1)は、rf の 1 パルス内で、96nsec 離れた 2 バンチを同時に加速し、リングに入射するというものである。通常、2 バンチ加速と呼び、2002 年 9 月から本格的に運用を始め、陽電子入射率を 2 倍にした。(2)は、陽電子生成の増強を目指した結晶標的の開発で、本研究のテーマである。(3)は、陽電子の捕獲効率を向上させて、陽電子強度を倍増させることを目的とする。現在、(3)については、KEK の紙谷琢哉らが、実用化に向けた設計検討を開始している。

われわれは、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、2006 年 9 月、ようやくタングステン単結晶標的の実装をおこない、陽電子の増強に成功した。

本報告は、これまでの研究経緯も含めて実用化への道程を、いわば、奮闘記としてまとめたものである。結晶標的による陽電子生成の物理は、すでに吉田勝英により報告されているのでそちらを参照していただきたい[5]。

## 2. これまでの研究経緯

本研究は、1994 年、当時東京大学原子核研究所 (核研) に文部省外国人研究員として滞在したロシアのトムスク工科大学の Potylitsyn による単結晶を利用した陽電子源開発の提案に始まる[5]。この提案は、核研電子シンクロトロン (INS-ES) で採択され、1995 年当時核研在籍の吉田勝英、奥野英城を中心として、1.2GeV 電子によるタングステン結晶からの陽電子生成実験がおこなわれた。この実験では、結晶により陽電子生成量が大幅に増大することが確かめられ、世界初の原理実証実験として報告された[6]。

さらに、本研究は、1998 年、KEK における共同開発研究課題として採択され、KEKB 入射器陽電子源にタングステン結晶をテスト標的として装着し、陽電子強度の増大を確認している[7]。この実験では、1.7mm 厚のタングステン結晶と 7mm 厚のタングステンを組合せた複合標的に 3GeV 電子が照射され、結晶軸とビーム方向が一致したときには、約 40% の陽電子の増大があることを確認した。その後、浜津良輔を中心とする東京都立大のグループが加わり、これまでの成果を踏まえて、結晶標的の実用化を目指した本格的な実験研究が始まることになる。

INS-ES がシャットダウンされた 2000 年の夏から舞台を KEKB 入射器に移すことになった。入射器終端のエネルギー分析用ビームラインにゴニオメータに搭載された単結晶標的や陽電子測定装置などを再構築した。私が、本研究に参加したのはこの時からである。余談になるが、この年に

来、夏と冬のKEKBの長期シャットダウン後の立上げ時に、数日間のマシンタイムをもらい徹夜実験をおこなうというのが恒例になっている。

これまでの準備実験では、タングステン結晶のみならず、軽元素であるシリコンやダイヤモンドなどについても陽電子生成実験[8]をおこなっているが、特に、タングステン結晶については、厚さの異なる標的を準備し、高エネルギー電子照射（4GeVと8GeV）による準備実験を積み重ねてきた。われわれは、これまでの実験における系統的な測定を通して、陽電子強度が最大となる標的の最適厚を決定し、実装に向けた技術的諸問題を解決することで、結晶標的の実用化を可能にした[9-11]。

### 3. チャネリング放射を利用する陽電子生成

高エネルギー加速器における陽電子は、通常、重金属標的（タングステンなど）に高エネルギー電子を照射し、金属中の原子核と電子との電磁相互作用により生成される。生成された陽電子は、後段の陽電子捕獲部により収集・加速がおこなわれる。陽電子を効率よく生成・捕獲するために、入射電子のエネルギー（4～8GeV）に応じて、標的の最適の厚さ（4～5放射長）が決まる。また、陽電子の最適運動量領域は、5～25MeV/cとされる。陽電子強度を上げるには、陽電子生成量を向上させるのと、位相空間上の捕獲領域を広げて収集効率を上げる方法がある。陽電子生成量を上げるには、入射電子のビーム・パワーを増大させるしかないが、ビーム・パワーの大強度化には、標的の許容熱負荷により限界がある。リニアコライダーのような、強力なビーム・パワーでは、従来の標的は熱負荷に耐えられず、新しいアイデアに基づく陽電子源が必要となる。

単結晶による陽電子標的の開発は、次世代の大強度陽電子源への応用を目指し、1989年LAL-OrsayのChehabらにより初めて提唱された[12]。結晶標的の結晶軸に沿って電子が入射すると、電子は整列した原子列の作るポテンシャル（チャンネル）に捕らえられ、蛇行運動をおこなう。この運動により、電子は強力なチャネリング放射を前方に放出する。また、結晶中では、制動放射自身が、干渉効果により放射を強める（干渉性制動放射）。これらの放射が、結晶中で電磁シャワーの発達を強め、陽電子生成を増大させる[5,13]。

理論的には、IPN-LyonのArtruらのグループ[14,15]とNovosibirskのBaierらのグループ[16,17]により、シミュレーションの結果が報告されている。シミュレーションによると、このような結晶効果は、高エネルギー電子でより顕著になり、陽電子の増大度が大きくなること、また、従来の標的に比べ結晶標的の熱負荷が低減することが示された。一方、実験的には、Chehabらは、1995年LAL-Orsay線形

加速器からの2GeV電子をタングステン結晶に照射し、チャネリング放射の増大を観測している[18]。1999年には、舞台をCERN(WA-103)に移し、6GeVと10GeV電子によるタングステン結晶標的からの陽電子生成実験をおこなった[19]。彼らは、ドリフトチェンバーを用いて広い位相空間領域（～40mrad）で陽電子の軌跡を計測し、強度分布を測定した。一方、われわれの実験は、線形加速器特有のバンチした4GeVと8GeV電子ビームを使い、結晶標的の前方（～1mrad）に生成する運動量分析された陽電子バンチの強度を計測する。このような実験は、Chehabらの実験に比べると単純で解析が容易であるが、広い位相空間領域での計測が困難であるという欠点がある。いずれにせよ、入射電子のエネルギーは異なるが、陽電子生成の増大度を比べると、両者は、ほぼ同等な結果を与えている[20]。

残念ながら、CERNにおけるChehabらの実験は、LHCの建設開始に伴い2001年7月に終了した。現在では、われわれのグループだけが、唯一継続して実験をおこなっている。

## 4. タングステン単結晶についての準備実験

### 4.1 結晶標的の準備

タングステン結晶は、共同研究のメンバーであるロシアのトムスク工科大学を通して、チェルノゴロフカにある固体物理学研究所で製作された。タングステンの単結晶化には、固体再結晶化という手法が用いられた。通常、金属の結晶化は、熔融過程の中で純化をおこない、種となる結晶片をもとに結晶を成長させる。一方、固体再結晶化とは、固体のままに結晶を成長させる方法である。通常、金属は、多結晶とも呼ばれるように、小さなドメイン内では、結晶構造を残している。金属を高温度（熔融させない）で、機械的な圧力をかけると、あるドメインの結晶構造は、近傍ドメインの結晶構造を取り込みながら成長する。しかしながら、この方法の欠点は、最終的に成長した結晶の構造は、測定するまで明らかではなく、試行錯誤が必要なことである。このような手法で、いくつかの厚さの異なるタングステン結晶（最大厚14mm）を製作してもらった。図1に結晶のサンプルを示す。

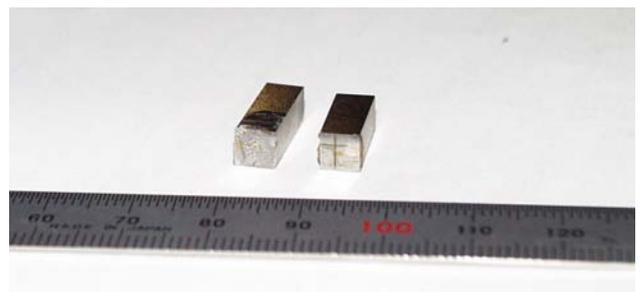


図1. タングステン単結晶（断面5mm×5mm）

## 4.2 標的厚さ最適化のための準備実験

われわれは、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おこなった。図2にその実験装置を示す。

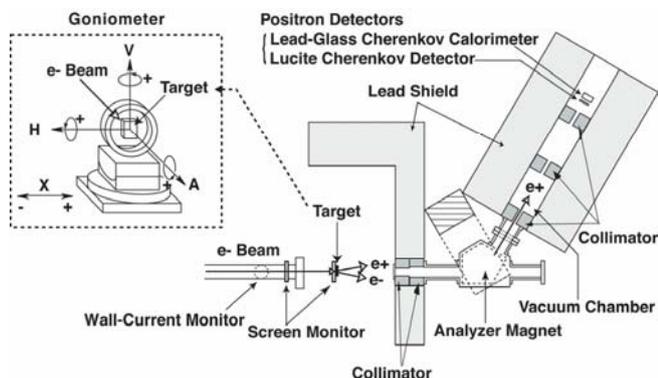


図2. 陽電子生成実験における実験セットアップ

電子は、ビーム取出し窓(  $30\mu\text{m}$  厚、直径  $10\text{mm}$  の SUS304 )を通して、ゴニオメータに固定した結晶標的( 空气中 )に入射する。入射電子のエネルギーは、  $4\text{GeV}$  である。入射電子の電荷量は、壁電流モニターで計測され、標的上のビームサイズは、スクリーンモニターで計測される。標的前方に生成した陽電子は、運動量分析磁石で  $60$  度偏向した後、陽電子検出器で強度を計測する。運動量分析領域は、  $5\sim 25\text{MeV}/c$  である。偏向磁石の前には鉛コリメータを配置し、陽電子検出のアクセプタンスを決める。標的直後の鉛コリメータ以降の輸送路は、空気との散乱を避けるために真空(  $\sim 10^{-1}\text{Pa}$  )にしている。陽電子検出器は、鉛ガラス・チェレンコフ・カロリメータとルーサイト・チェレンコフ・カウンターである。前者は、陽電子の総エネルギーを計測し、後者は、陽電子数を計測する。結晶軸は、陽電子強度が最大となるようにゴニオメータを二軸の周りに回転して探す。結晶標的直後には、厚さの異なるタングステン板(  $3\sim 18\text{mm}$  厚、  $3\text{mm}$  厚ステップ )をリニア・ステージ上に置き、陽電子強度の比較と校正をおこなえるようにしている。

図3に、電子の結晶軸に対する入射角度を変化させたときの陽電子強度の変化( ロッキングカーブ、  $9\text{mm}$  厚タングステン結晶 )を示す。電子の入射角が、結晶軸に一致する( *on-axis* )と陽電子強度が顕著に増大する。一方、分布のすそ( *off-axis* )は、チャネリングの臨界角[13]から大きくはずれ、通常のベータ・ハイトラ過程に従う陽電子強度を示す。ロッキングカーブの分布幅は、  $9\text{mm}$  厚結晶では  $\sim 40\text{mrad}$  ( FWHM )となり、チャネリングの臨界角に比べかなり大きい。これは、入射電子が多重散乱により空間的に広がってしまうからである。

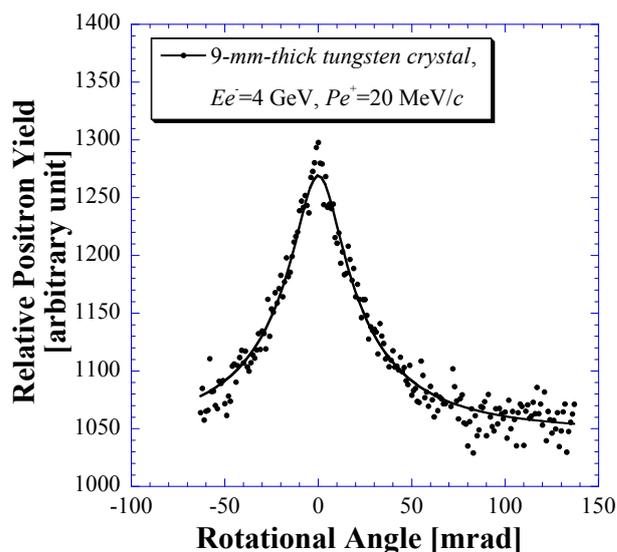


図3.  $9\text{mm}$  厚タングステン結晶で測定したロッキングカーブ  
陽電子運動量は  $20\text{MeV}/c$  である。

図4に、標的厚さに対するロッキングカーブの分布幅の測定結果を示す。厚い標的ほど、多重散乱の効果が大きく寄与するようになり、分布幅も次第に大きくなる。このように、厚い標的ほど入射電子がチャネリングの放射条件を長距離にわたり持続することは困難であることが予想される。実際、チャネリングの放射条件を満たす電子の走行距離は、標的入口からわずか数  $100\mu\text{m}$  程度と言われている。

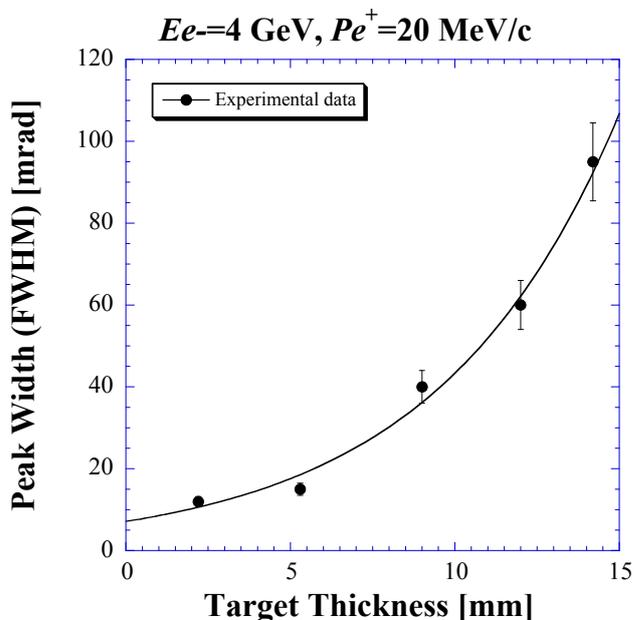


図4. タングステン結晶標的の厚さに対するロッキングカーブ分布幅の変化  
陽電子運動量は  $20\text{MeV}/c$ 、実線は二次曲線によるガイドラインである。

標的厚さに対する陽電子の増大度 (*on-axis* と *off-axis* 上での強度比) の変化 (図 5) で示すと、予想されるように、増大度は標的厚さが大きくなるにしたがい急速に小さくなり、14mm 厚程度でベテ・ハイトラー過程に従う陽電子強度に一致する。すなわち、チャネリング放射の御利益がなくなるわけである。このように、タングステン結晶は、陽電子強度のゲインが余り大きくない。このことが、われわれが、ダイヤモンドなどの軽元素結晶標的を用いた陽電子生成を追求している理由である[8]。

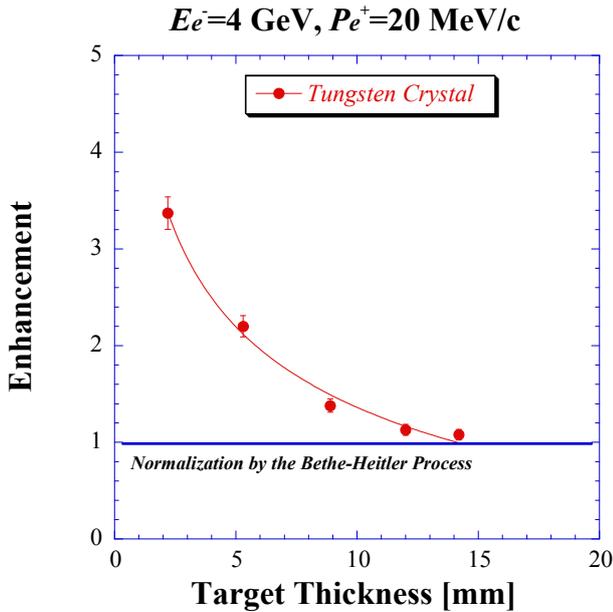


図 5. タングステン結晶標的の厚さに対する陽電子増大度の変化 Bethe-Heitler 過程に従う陽電子強度で規格化している。陽電子運動量は 20MeV/c、実線はガイドラインである。

標的厚さの最適化には、陽電子生成効率の変化をプロットするとわかりやすい (図 6)。ここで、陽電子生成効率とは、入射電子強度で規格化した検出陽電子強度である。図 6 には、通常タングステン板による結果も示す。薄い標的では、陽電子の増大度は大きい、絶対強度は小さい。逆に、十分に厚い標的では、結晶効果が消失してしまい適当な厚さで陽電子強度が最大になることがわかる。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% 大きくなる。また、それ

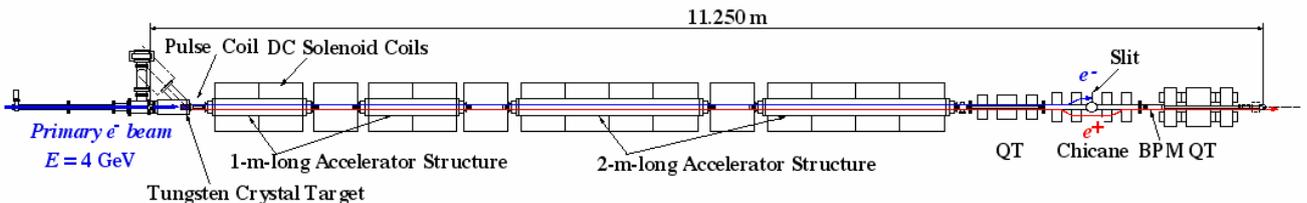
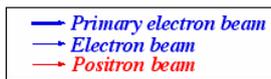


図 7. KEKB 入射器における陽電子源

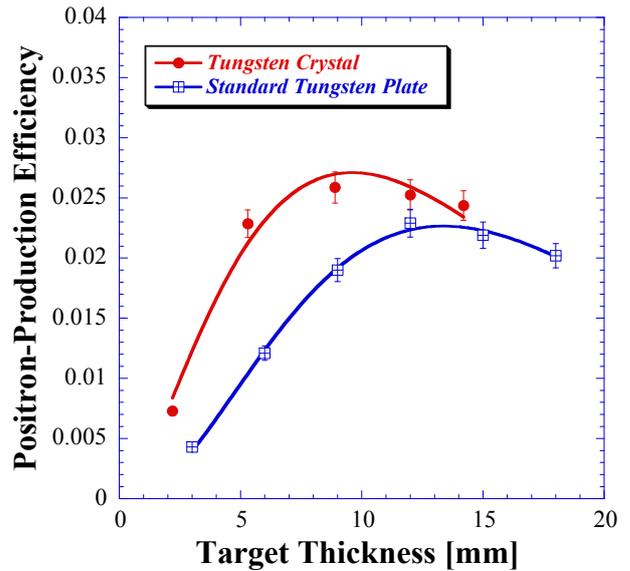


図 6. 標的厚さに対する陽電子生成効率の変化 赤：タングステン結晶、青：タングステン板。陽電子運動量は 20MeV/c、実線はガンマ関数によるガイドラインである。

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。

入射器陽電子源の捕獲部は、広い位相空間に生成された陽電子を捕獲するので、ここで得られた生成効率が、一致するとは限らない。しかしながら、陽電子の異なる運動量に対する増大度が余り変化しないことや広い位相空間領域でも増大度の変化は小さい (核研での実験) ことなどから、入射器陽電子源においても 20 ~ 30% の陽電子強度の増大が期待できる。この結果をもって、主幹のゴーサインが出ることになり、実用化に向けた準備が始まった。

### 5. KEKB 入射器の陽電子源

図 7 に入射器陽電子源[21,22]のレイアウトを示す。陽電子は大電流一次電子ビーム (エネルギー 4GeV、電荷量 ~10nC/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エミッタ

すは  $\gamma_{e_x} = 660 \text{ mm} \cdot \text{mrad} (rms)$ ,  $\gamma_{e_y} = 360 \text{ mm} \cdot \text{mrad} (rms)$  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  $\sim 0.7 \text{ mm} (rms)$  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  $\theta_x (\theta_y)$  は  $\sim 0.2 (0.1) \text{ mrad} (rms)$  と推定される。電子の結晶軸に対する入射角は、チャネリング放射条件を決める重要なパラメータである。タングステン結晶 ( $\langle 111 \rangle$  軸) の場合、4 GeV 電子の臨界角度は理論的に計算され  $0.61 \text{ mrad}$  である。一次電子ビームの中心部 ( $2\sigma$  半径) は充分この条件を満たす。

従来の陽電子標的は 14 mm 厚 (4 放射長) 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、従来の標的を 10.5 mm 厚のタングステン結晶標的に置き換えた。

図 8 に入射器陽電子源のカット模型を示す。後段の陽電子捕獲部で陽電子の収集と加速が同時におこなわれる。標的直後の強力なパルスコイル (2 T) と後段の 8 m 長 DC ソレノイド (0.4 T) 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 2 本の 1 m 長加速管と 2 本の 2 m 長加速管により一気に加速され、陽電子源直後では約 70 MeV 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シケイン部のストッパーで停止する。

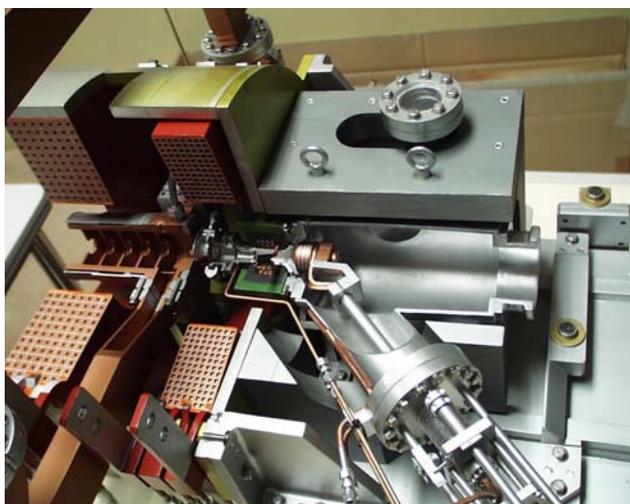


図 8. KEKB 入射器陽電子源のカット模型

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。電子は右から入射し、標的 (中央に見える) で電子・陽電子対が生成される。

## 6. タングステン単結晶標的の実装

### 6.1 結晶標的の製作

実用化には、いくつかの技術的困難を克服する必要があった。これらは、(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) 結晶標的のアライン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、

標的の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、標的の製作には充分な検討をおこなった。検討当初、結晶標的の軸合わせにはゴニオメータに替わる何らかの回転機構が必要なので、標的を組入れる真空チェンバー自身にその機構をもたせることも検討した。標的直後は、パルスコイル用のセラミック・ダクトにフランジを介して接続されるので、チェンバー回転による余分な負荷が、セラミックを亀裂させる恐れがあると指摘され、この方法を断念した。標的に回転機構がないと、結晶標的自身に高精度なアラインメントが要求される。これは、高精度な標的加工のみならず、設置においても高精度を要求する。4 GeV 電子の標的に対する入射角の調整範囲は狭いので、慎重さがいっそう要求されることになった。

とにもかくにも、回転機構を使わない方法で標的製作の再検討が始まった。従来のタングステン結晶と銅材の接合方法は、高温溶融した銅の中にタングステンを挿入し冷却して接合するものである。この方法では、必要な長さのタングステンを銅材と一緒に切断することになる。結晶の場合、切断のための余長はない。また、ビーム入射面が切断により損傷するので、この方法は使えない。かわりに HIP (Hot Isostatic Pressing) 接合を試みることにした。HIP とは、異種金属を高温高圧力下に置き、接触する金属面の原子レベルでわずか数層分を高圧力により融合させる技術である。図 9 に HIP 接合後の結晶標的を示す。

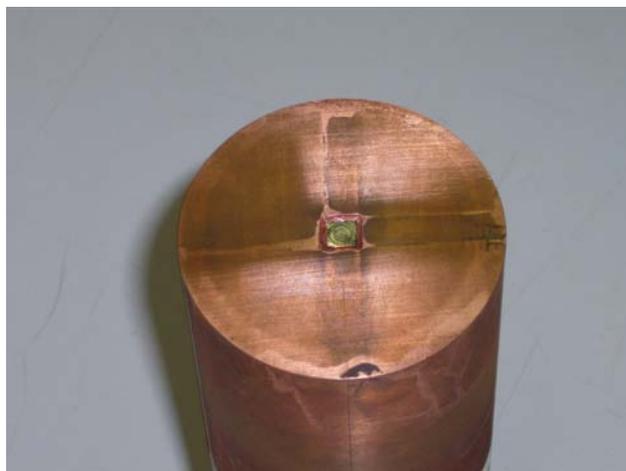


図 9. HIP 接合後のタングステン結晶標的

この写真は標的となる最終加工前のものである。写真からわかるように、タングステン結晶 (11 mm 厚) が銅材の中心に仕込まれたが、結晶表面に機械加工によるキズが残り、結晶表面の周りの銅部もエッチング処理のため溶解している。HIP 接合は、タングステンに対し銅の硬度は小さいので、図 9 に見える面に対し離形 (フタのこと) が必要となる。これは、中心の結晶が高圧力で飛出す恐れがあるからである。離形材料としてセラミックと SUS304 を選び、

タングステン板をタングステン結晶と同じ様に銅材に仕込み、テストをしたところ、セラミックには多数の亀裂が入り（完全には割れなかった）、使えないと判断した。一方 SUS304 は、タングステン板と接合することなく引離しに成功した。しかし本番では、結晶表面が SUS304 の離形表面にわずかに食い込んでしまい、機械加工で切断せざるを得なかった。写真の結晶表面の加工キズは、この時にできたものである。その結果、後の結晶軸測定がまったくできなくなってしまった。

当初の予定では、X 線により結晶軸を測定し、結晶軸と円柱加工した銅の中心軸を一致させるように銅材を削り出し、目に見えない結晶軸を銅材の円柱面に再現することを算段していた。しかしながら、放射光実験施設の関係者の協力を得て、X 線による結晶軸測定をおこなったが、ラウエ像さえ見えなかった。途中、X 線の強度不足の可能性を疑い、放射光ビームライン (BL-3C3) に標的を持ち込み、同様にラウエ像を撮影したが、まったく何も写らなかった。

このように、加工キズが X 線測定を不能にしていた。仕方なく、エッチングで結晶表面の加工キズを落とすことにした。この処理が、結晶近くの銅材の一部を溶解させた理由である。エッチングには、超伝導空洞の電界研磨で使うのと同様な処理液を用いた。銅材とタングステンの溶解速度は異なるので、溶解条件を事前テストで決めてから本番をおこなった。2 回処理をおこなった結果、ようやく結晶軸測定が可能となった。この処理により、タングステン結晶の厚さがわずかに短くなったが、溶解したタングステン重量から推定したところ、短縮長さは  $500\ \mu\text{m}$  程度 (結晶厚さは  $10.5\ \text{mm}$  となる) であった。

図 10 は放射光実験施設の X 線結晶軸測定装置である。X 線は、右に見えるスリットを通して結晶標的表面に照射される。ターン・テーブル上に固定した標的を回転させて、X 線のブラッグ・ピークを X 線検出器 (中央に見える) で測定することで結晶軸を同定する。結晶軸の同定は、銅材に溶接したステンレスを中心軸の周りに回転させ、90 度ごとの回転位置でブラッグ・ピークを測定しておこなった (左下写真参照)。対向する回転位置で測定したブラッグ・ピーク角の差が、結晶軸と標的中心軸のずれの角度を表す。このずれが、零になるように標的加工 (旋盤による) をおこなう。

図 11 は標的加工後の最終的に得られた 4 点の回転位置に対するブラッグ反射の強度分布である。広い角度範囲 ( $\pm 20\ \text{mrad}$ ) で計測したものであるが、図では、 $\pm 5\ \text{mrad}$  の範囲に拡大している。4 点における測定結果は、0 を中心として  $\pm 1\ \text{mrad}$  以内に入っている。これが、結晶軸に対する標的中心軸の精度を与え、基準面となる円柱銅表面の精度となる。

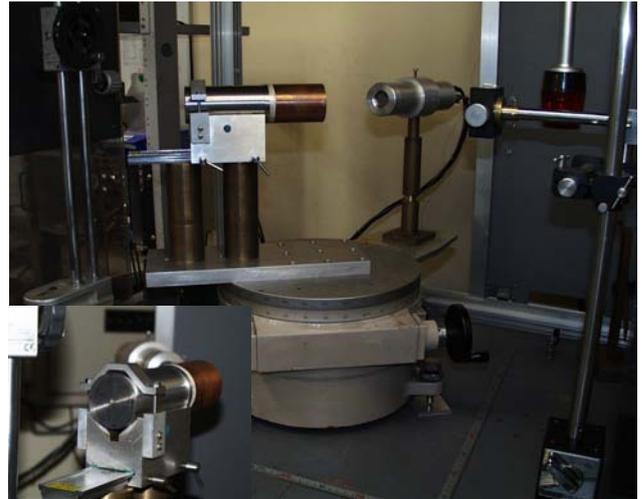


図 10. X 線による結晶軸測定の様子

ブラッグ反射角の測定により約  $1\ \text{mrad}$  の精度で結晶軸を同定することができる。

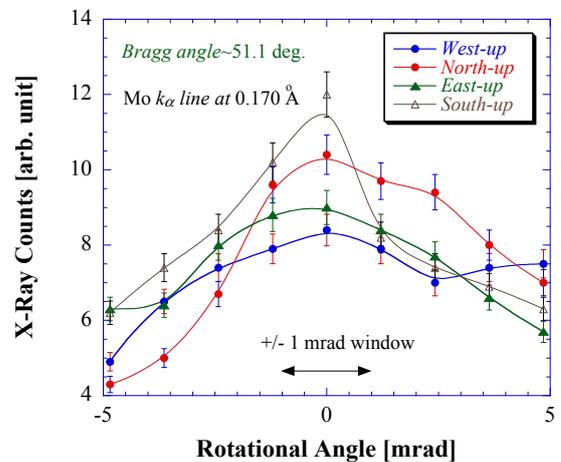


図 11. 4 点の回転位置で測定したブラッグ反射の強度分布

これら一連の結晶軸出し加工を前加工と呼び、前加工で得られた基準面をもとに後加工が施される。図 12 (a) に最終的な結晶標的の構造図を、図 12 (b) に今回の実用化した結晶標的を示す。

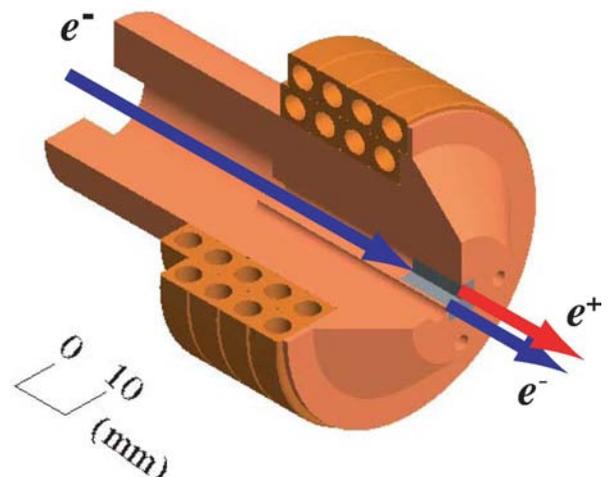


図 12. (a) タングステン結晶標的の構造

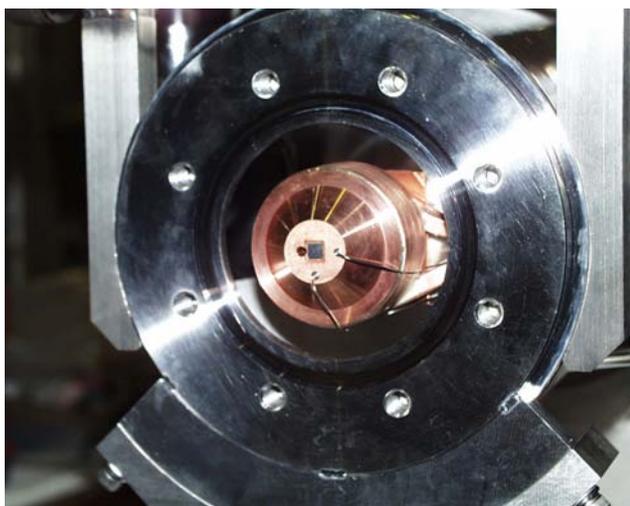


図 12. (b) 真空チェンバーに設置した結晶標的（ビーム下流から見て） タングステン結晶は冷却用の銅部（直径 50mm）の中央に仕込まれている。標的の熱負荷は外側に巻いた銅パイプ（直径 4mm）に冷却水を流して（1.5 l/min）取り除かれる。標的の中心から 7.5mm の位置に 2 組の熱電対を挿入し、標的の温度をモニターする。タングステン結晶すぐ横（中心から 4.5mm 離れて）には、電子ビームを通すための穴（直径 3mm）を開けている。これは、標的の出し入れをせずにパルス磁場で電子の軌道を偏向させて電子輸送も可能にし、将来的には電子と陽電子の同時加速を目指すためのものである。

## 6.2 標的部の組立てと設置

加工した標的には熱電対が仕込まれた後、エア・シリンダによるリニア駆動用の中心棒先端に L アングルを介して固定され（図 13）、標的チェンバーの中に駆動機構とともに挿入される（図 8）。標的先端にはアラインメント用の高精度ミラーを取付けている。

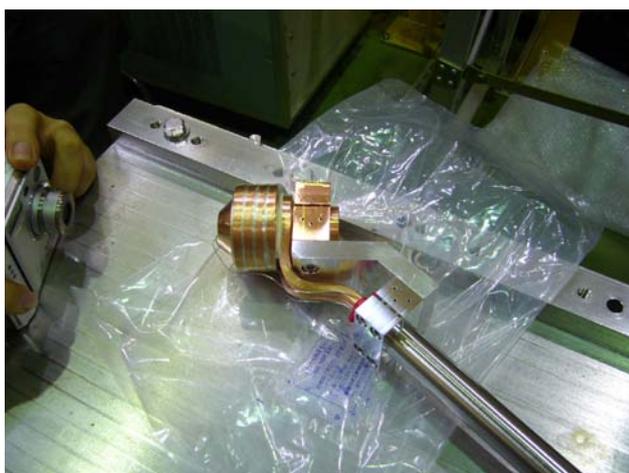


図 13. リニア駆動機構の中心棒先端に取り付けられた結晶標的

標的のアラインメント試験では、ビームライン用の架台を準備し、これに標的チェンバーとアラインメント用テレスコープを設置した（図 14）。アラインメントは、テレスコープがもつ基準線に対してミラー（直径 16.9mm、厚さ

2mm、公差 f6、Al+SiO<sub>2</sub> コート付）からの反射像（ミラー中心に開けた直径 0.5mm の穴が基準点になる）のずれを測定することで、標的の傾きを計測する。アラインメント調整は、駆動機構と標的のチェンバーをつなぐフランジ用の 8 本のセットビスの締め具合で微妙に調整する。標的の傾きは、この調整により 1mrad 以下となった。



図 14. アラインメント用テレスコープにより標的の傾きを計測している様子

最後に、標的傾きの再現性が、以下の 4 項目に対してテストされた。(1) 標的の直線駆動による再現性 (30 回)、(2) 標的チェンバー本体の据付けに伴う再現性 (3 回)、(3) 標的チェンバーの運搬に伴う再現性、(4) アラインメント用ミラーの取付けに伴う再現性。測定結果を表 1 にまとめる。

表 1. 標的傾きの再現性テストによる誤差評価

再現性テスト項目	測定誤差 [mrad]
駆動部テスト	0.41
チェンバー据付けテスト	0.41
チェンバー運搬テスト	0.41
ミラー取付けテスト	1.81
系統誤差	2
標的加工誤差	±2
全体誤差	±3

この中で、項目 (1) ~ (3) の再現性はよく、標準偏差は 0.4mrad 程度で問題はない。項目 (4) は、ミラーとホルダーのはめ合いから生じる誤差で、これがミラーの取付け精度を決めたようだ。再現性は 2mrad 程度と最も大きな値となった。テレスコープによるアラインメント測定の系統誤差は 2mrad と見積もられるので、標的加工の誤差も考慮すると、全体のアラインメント誤差は ±3mrad と見積もられた。この誤差は、電子ビームの標的への入射角度を調整することで補正できる角度である。

## 7. 結晶標的の性能評価

### 7.1 陽電子生成効率の測定

運転再開後の立上げ時に陽電子生成効率の測定をおこなった。ビームを出すと陽電子強度が入射器終端で  $1.2\text{nC/bunch}$  を越えていることがすぐにわかり、結晶標的の威力に驚いた（従来は  $1\text{nC/bunch}$  を越えるのは稀であった）。この時点で、これまでの一連の工程に大きな誤りがないことがわかり、ようやく安心した。

陽電子強度は、一次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 2 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、一次電子と陽電子強度を同時に測定した。ビーム強度は、陽電子源の上下流にあるビーム位置モニター (BPM) で測定する (入射器の BPM は、ビーム位置のみならず、電荷強度測定も可能なように較正している)。この測定の一次電子の平均電荷量は  $7.5\text{nC/bunch}$  であった。ステアリング磁石の強度不足により入射角の調整範囲は  $\pm 2\text{mrad}$  に限定されたが、この角度範囲で明瞭なピークはなかった。このことは逆に、一次電子の入射角がすでに結晶軸近傍にいることを示し、これまでの一連の工程が高精度なアライメントでおこわれたことを示すものである。

図 15 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。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一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、従来標的の分布は、夏期シャットダウン前の KEKB 運転時 (2006 年 6 月) のものである。

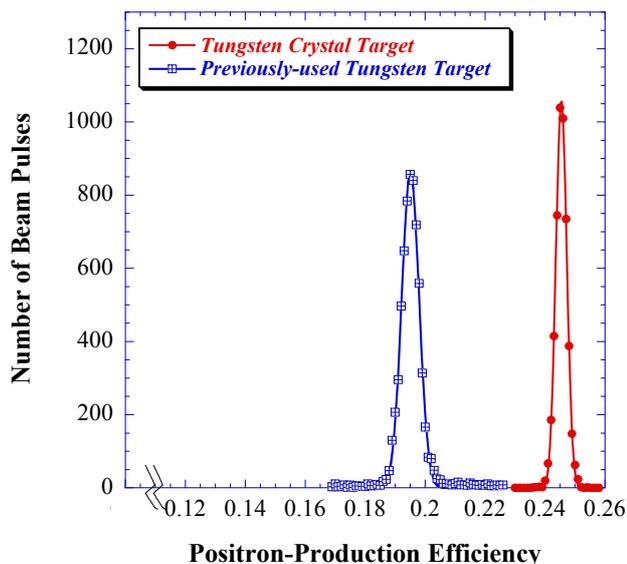


図 15. ビーム・パルス毎に取得したタングステン結晶標的による陽電子生成効率の分布 比較のために、従来標的による分布もプロットした。実線はガウス・フィットを示す。

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、結晶および従来標的に対する陽電子生成効率は、それぞれ  $0.25 \pm 0.01$  ( $0.26 \pm 0.01$ )、 $0.2 \pm 0.01$  ( $0.2 \pm 0.01$ ) となり、結晶標的による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す。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。準備実験と入射器陽電子源では、生成陽電子のアクセプタンスが異なり、必ずしも陽電子生成効率は一致しない。陽電子源では、強力な陽電子捕獲部により、広い位相空間 (発散角  $\sim 380\text{mrad}$ ) に生成した陽電子を捕獲するが、準備実験では、標的前方の狭い位相空間 (発散角  $\sim 1\text{mrad}$ ) に生成した陽電子のみが検出される。このように、双方の測定値がほぼ同じであることは、増大した陽電子の分布が捕獲可能な位相空間でほぼ一様に増大していると考えてよい。準備実験でも、陽電子強度の運動量依存性には余り変化が見られないことから理解できる。

陽電子のエミッタンスを計測したが、測定誤差の範囲内で、従来標的によるエミッタンスとの違いは見られなかった。これは、結晶標的といえども、 $10.5\text{mm}$  厚では多重散乱で陽電子が同様に拡がることを示し、エミッタンスは捕獲部のアクセプタンスで決まると考えてよい。

### 7.2 結晶標的の性能評価

運転再開後の 9 月 12 日に KEKB リングへの入射が始まり、衝突実験が再開した。図 16 に、9 月の立上げ時から 11 月上旬まで、約 2 ヶ月間の陽電子生成効率の変化を示した。各点は、5 日ごとに平均した陽電子生成効率を示し、その時間変化をプロットしたものである。

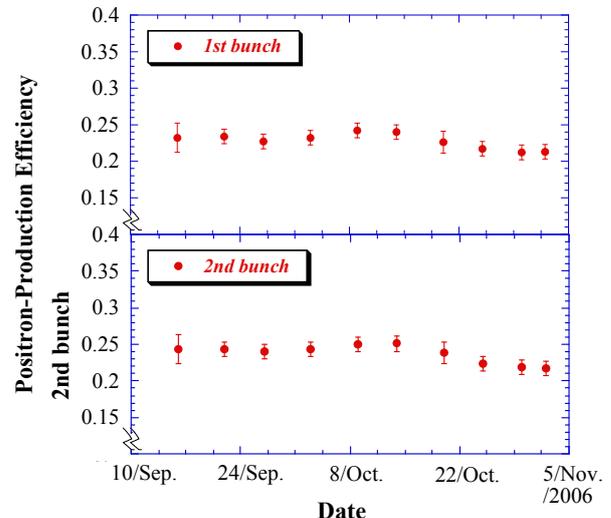


図 16. 陽電子生成効率の時間変化 各データ点は 5 日間の平均値を示す。

この結果から、概ね順調に陽電子ビームが生成されていることがわかる。10月中旬以降の若干の低下が気になるが、今後のマシンスタディで明らかにしたい。

一次電子強度に対する陽電子強度の線型性を調べておくことは重要である。これは、大強度の電子入射により、結晶構造に異常または破壊が生じる恐れがあるからである。チャネリング放射は、結晶格子の振動が大きくなると、その効果が低減することが知られている。過去の実験でも、結晶温度を変化させれば放射強度が変化するという結果が報告されている。入射器の電子ビームは、極短パルスでパルス長が約10psecである。このような極短パルスが結晶を通過すれば、結晶格子は相対論的にブーストされた強力な電磁場による衝撃を瞬間的に受けることになる。この衝撃力は結晶格子を大きく揺さぶり、チャネリング放射を低減させる可能性がある。もし、結晶格子の弾性限界を超えるような強い衝撃であれば、結晶構造そのものが破壊され、いわゆる固体プラズマを形成する可能性があるという[23-25]。準備実験で2.55mm厚のシリコンに8GeV電子(最大電荷量1.9nC/bunch)を照射し、入射電子の電荷量に対する陽電子生成効率の線型性を調べてみたが、異常現象は見られていない[26]。今回のタングステン結晶で得られた結果を図17に示す。この結果から、入射電子強度に対する陽電子強度は最大電荷量 $\sim 8$ nC/bunchの範囲では異常がないことを示している。

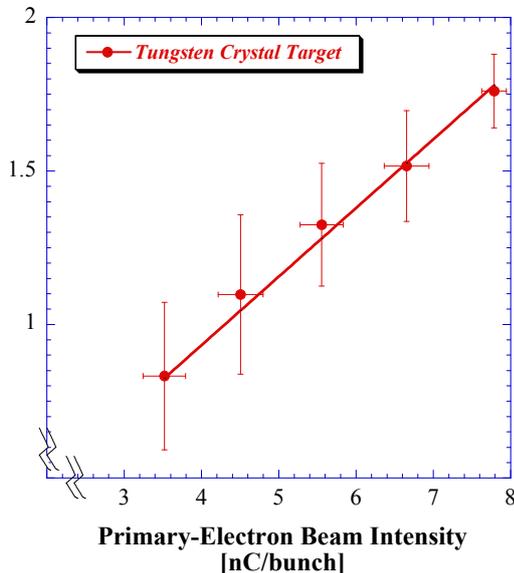


図 17. 入射電子強度に対する陽電子強度の変化

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である。ビーム繰返し50Hz、1パルス運転時における定常的な温度上昇は13.2°Cであった。測定時の一次電子の平均電荷量は7.8nC/bunchである。図18は従来標的の温度上昇と比較するため、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

比べ約20%小さいという結果を得た。この結果は、結晶効果で効率的な陽電子生成がおこなわれることを示し、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[15]。一方、この結果を標的の単位長さ当りの熱負荷(密度)に換算すると、逆に結晶標的の方が従来標的に比べ約7%高くなる。4.2節の議論に従うと、結晶標的は有効放射長を短縮し、電磁シャワー発達を強める。このことは、シャワー最大深さでは局所的に熱負荷密度が大きくなることを示し、結晶標的を応用するときの課題となる。すなわち、結晶標的といえども従来標的と同様に熱負荷による標的破壊という問題を拭いきれていない。また、結晶標的の場合は結晶構造の放射線損傷という根本的な問題もあり、今後の研究課題となっている。

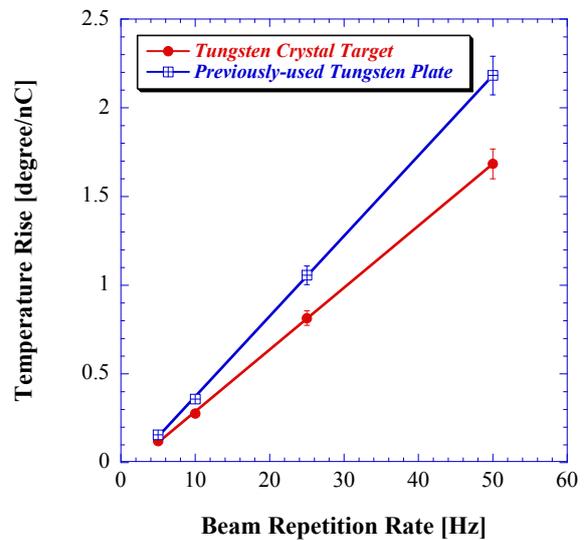


図 18. ビーム繰返しに対する入射電子電荷量で規格化した温度上昇の変化 比較のために従来標的の測定結果も示す。

2ヶ月間の運転ではあるが、大きな問題もなく陽電子ビームはKEKBリングに安定に供給されている。この間、結晶標的に照射された単位面積当たりの積分電子フラックスは、約 $5.5 \times 10^7$  nC/mm<sup>2</sup>である。ArtruらはSLAC/SLCの陽電子標的前に0.3mm厚のタングステン結晶を置いて放射線損傷のビームテストを唯一おこなっている[27]。結晶標的の放射線損傷が積分電子フラックスで決まるとすると、入射器でこのフラックスに達するには少なくとも1年以上の運転が必要で、今後の研究課題である。

## 8. まとめ

KEKB入射器では、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、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観測した。この結果、入射器の陽電子強度は運転開始以来の最高強度を実現した。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。結晶標的の実用化は、高エネルギー陽電子加速器としては、世界で初めての試みである。これにより、KEKB リングに入射される陽電子ビームの強度は運転開始以来の最高値を記録した。この成果は、現在稼働中の KEKB ファクトリーのみならず、スーパーB ファクトリーやリニアコライダーなど、次世代の高エネルギー加速器の陽電子源への応用にも貢献するものと期待される。今後の長期運転により、結晶標的の放射線損傷の問題や標的の安定性などのデータを蓄積することにより、次世代の高エネルギー加速器での実用可能性を追求したい。

## 謝辞

X 線による結晶軸測定では、KEK 物質構造科学研究所の河田洋教授、安達弘通助手、佐藤昌史氏、三菱電機システムサービスの木村康一氏にお世話になりました。また、標的製作の一連の工程に対しては、三菱重工の飯野陽弼氏に全面的に協力をいただきましたことを感謝します。なお、本研究は高エネルギー加速器研究機構の共同開発研究および文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)「単結晶を利用した高輝度陽電子・X線源の基礎研究」(No.17540377)よりご支援をいただきました。

## 本研究の参加メンバー

KEK 加速器(佐藤政則、古川和朗、紙谷琢哉、杉村高志)、KEK 物構研(梅森健成)、KEK 素核研(奥野英城)、東京都立大学(遠藤祐介、春名毅、浜津良輔、住吉孝行)、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター(吉田勝英)、トムスク工科大学(A. P. Potylitsyn, I. S. Tropin)、LAL-Orsay(R. Chehab)

## 参考文献

- [1] K. Akai, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A499** (2003) 191.
- [2] I. Abe, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A499** (2003) 167.
- [3] K. Furukawa, N. Kamikubota, T. Suwada and T. Obata, Procs. International Conference Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPECS2001), San Jose, U.S.A., 2001 (SLAC Report No. SLAC-R-592, eConfC011127), p. 266.
- [4] 紙谷琢哉, “陽電子源”, 高エネルギー加速器セミナー OHO2002.
- [5] 吉田勝英, 高エネルギーニュース **16** No.5 (1997) 98.
- [6] K. Yoshida, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 1437.
- [7] M. Inoue, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B173** (2000) 104.
- [8] M. Satoh, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B227** (2005) 3.
- [9] T. Suwada, *et al.*, Phys. Rev. **E67** (2003) 016502.
- [10] T. Suwada, *et al.*, Presented in the 2006 International Linear Accelerator Conference (LINAC'06), Knoxville Convention Center, TN, U.S.A., Aug. 21-25, 2006.
- [11] T. Suwada, *et al.*, to be submitted in Phys. Rev. Special Topics: Accelerators and Beams.
- [12] R. Chehab, F. Couchot, A.R. Nyaiesh, F. Richard and X. Artru, Procs. the 1989 IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC'89), Chicago, IL, USA, March 1989, p. 283.
- [13] V.N. Baier, V.M. Katkov, V.M. Strakhovenko, Electromagnetic Processes at High Energies in Oriented Single Crystals (World Scientific, Singapore, 1998).
- [14] X. Artru, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B48** (1990) 278.
- [15] X. Artru, R. Chehab, M. Chevallier, and V. Strakhovenko, Phys. Rev. ST Accel. Beams **6** (2003) 091003.
- [16] V.N. Baier, V.M. Katkov, and V.M. Strakhovenko, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B103** (1995) 147.
- [17] V.N. Baier and V.M. Strakhovenko, Phys. Rev. ST Accel. Beams **5** (2002) 121001.
- [18] X. Artru, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B119** (1996) 246.
- [19] X. Artru, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B240** (2005) 762.
- [20] R. Chehab, Procs. the NATO Advanced Research Workshop on Advanced Photon Sources and Their Application, Nor Hamberd, Armenia, August 29 - September 02, 2004, p. 357.
- [21] A. Enomoto, *et al.*, Procs. the Third European Particle Accelerator Conference (EPAC'92), vol.1, Berlin, Germany, March 1992, p. 524.
- [22] 佐藤勇他(編集), “放射光入射器増強計画”, KEK Report 95-18 (1996), p. 46.
- [23] P. Chen and R.J. Noble, Procs. 7th Workshop on Advanced Accelerator Concepts, Lake Tahoe, California, 1996, AIP Conf. Proc. 398, p.273.
- [24] R.A. Carrigan, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B234** (2005) 116.
- [25] R.A. Carrigan *et al.*, Phys. Rev. **A68** (2003) 062901.
- [26] T. Suwada, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **B252** (2006) 142.
- [27] X. Artru, *et al.*, Procs. the Sixth European Particle Accelerator Conference (EPAC'98), vol.2, Stockholm, Sweden, June 1998, p. 1394.