

PF SLOW POSITRON SOURCE

A.SHIRAKAWA, A.ENOMOTO, T.KURIHARA, H.KOBAYASHI, T.SHIDARA,
K.NAKAHARA, T.SUZUKI, H.HIRAYAMA, I.KANAZAWA* and A.ASAMI**

KEK, National Laboratory for High Energy Physics

1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305

* Tokyo Gakugei University

Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184

** Naruto University of Education

Naruto-cho, Naruto-shi, Tokushima 772

ABSTRACT

A new slow-positron source is under construction at the Photon Factory. Positrons are produced by bombarding a tantalum rod with high-energy electrons; they are moderated in multiple tungsten vanes. We report here the present status of this project.

PF 低速陽電子源

1. はじめに

高エネルギー物理学研究所の放射光実験施設 (PF) においては、電子線形加速器を使用して低速陽電子線を発生させ、物性研究その他に利用するためのビームラインを建設している [1]。これまでに陽電子発生装置から実験エリアまでのビームラインが一応完成し、ビームラインを接地電位にしての実験を行っている。実験で、ビームライン終端にて低速陽電子を確認したのを受け、ビームラインのアップグレード工事を行いつつある。それらの現状及び今後の見通しについて報告する。

2. 実験の目的

陽電子源としては β^+ 崩壊する放射性同位元素を用いる方法が実験室規模でできる手法である。陽電子の電子との対消滅を用いた実験は放射性同位元素を陽電子源として盛んに行われている。陽電子の強度としては毎秒 $10^4 - 10^6$ 個といったところであり、電流としてはフェムトアンペアのオーダーである。しかし例えば、走査型電子顕微鏡程度の電流量数ナノアンペアを実現するためには、少なくとも 10^{10} 個の陽電子が必要であり、放射性同位元素では殆ど現実的ではない。従って、線形加速器によって生成される、強い陽電子ビームが期待される。低速陽電子とは、簡単に言うと、固体物質中に入射されることで減速されて熱化した後、拡散によりその固体表面に達し、負の仕事関数により表面から放出された陽電子のことである。

3. ビームライン概要

低速陽電子ビームラインは、2.5 GeVリニアックの終端部である第3スイッチヤード (地下) からクライストロンギャラリー (地上) にかけて設置された。全体を鳥瞰した様子を図1に示す。低速陽電子輸送用のビームダクトには、直巻きコイルおよびヘルムホルツコイルによりソレノイド磁場がかけられている。ダクトはICF114のフランジにより接続されており、接続部分の磁場の補正のためにフランジ部を覆うソレノイドコイルを取付けてある。これにより、ビームライン全体が均一に約100 Gのソレノイド磁場となり、生成された低速陽電子はこの磁場に巻き付けられて輸送される。

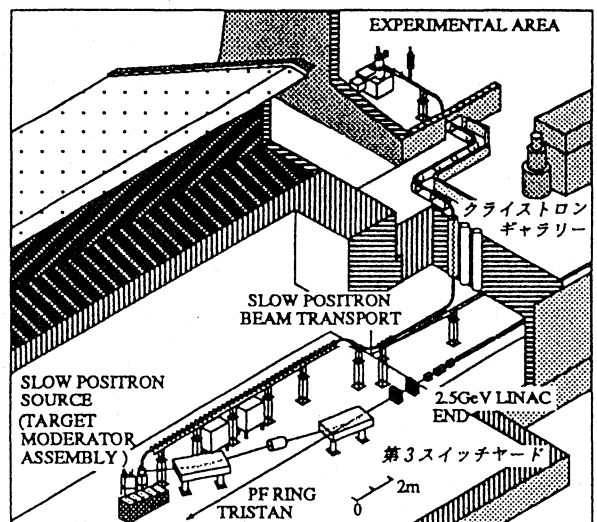


図1 低速陽電子ビームライン鳥瞰図

輸送は、ビームライン中5箇所に取り付けられた可動式の2次電子増倍管をモニターとして、またビームダクト各所に取り付けられたステアリングコイルを用いて行われる。ターゲットからビームライン終端まで31mを150l/sおよび60l/sのイオンポンプ計8台で排気し、 10^{-7} Paの良いところの真空度を維持している。

4. 陽電子の生成

低速陽電子生成用ターゲットは水冷式タンタル製で、総アルミ製真空槽中にある。13枚のタングステン箔をモデレータとし、ターゲットおよびモデレータには正の電圧がかかっている。ターゲットで制動放射、対生成によって発生した白色の陽電子は、直後のモデレータにより「低速陽電子」となり、ここにかけられた電場によって、その後の真空ダクトに導かれる。図2はターゲットおよびモデレータである。1992年夏に、このタンタルターゲットを組み込んでからは、実験中の顕著な真空度の劣化はなくなった。

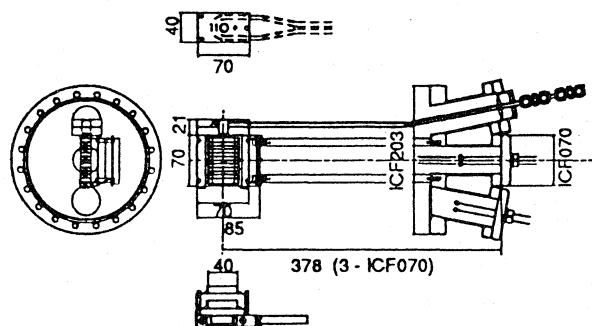


図2 ターゲット及びタングステン箔
モデレータ・アッセンブリー

得られる陽電子の個数を見積るために、他の研究機関の100 MeV前後の電子線形加速器による低速陽電子生成率のデータを参照する [2]。それによると、電子ビーム 1 kWあたり毎秒 1×10^8 個の低速陽電子が得られる。PF 電子線形加速器の公称性能は、ビームエネルギー 2.5 GeV、ピーク電流 50 mA、パルス幅 1 μ s、繰り返し周波数 50 Hzで、平均ビーム電力 6.25 kWである。EGS4コード [3,4] を使った計算 [5] によれば、 $E_e = 2.5$ GeVの時の最適なタンタル標的の厚さ6放射長に対する10 MeV以下の陽電子生成率は、電子ビーム電力1kWに規格化して、 $E_e = 150$ MeV、タンタル標的厚さ2放射長の場合のおよそ0.7倍になる。このことから、 $E_e =$

2.5 GeVの時の電力規格化低速陽電子生成率は、 0.7×10^8 e⁺/sと見積もることとする。この係数を使うと、 $E_e = 2.5$ GeVでのビーム電力 6.25 kWでは、低速陽電子ビーム強度は 4×10^8 e⁺/sとなる筈である。

実際には、ターゲットへの電子の入射エネルギーは約 2 GeVで、ビーム電力は約 10 Wであった。これは、実験室近傍にある大電力クライストロンからのノイズ軽減のためにそれらを待機状態にしているのと、2.5 GeVエネルギーアナライザー用モード（入射ビームの電力の上限が放射線のインターロックにより最高50 Wに制限されているモード）で使用していたためである。今後は後述のように最高 6.5 kW まで可能となる。

また、ターゲットから取り出す陽電子のエネルギーは、ほとんど0から数10 keV程度である。この上限値は、ターゲットにかける電位により決まってくる。

5. ビームライン終端での消滅 γ 線測定

これまで行ってきた実験は、低速陽電子の発生と輸送に主眼を置いていた。すなわち、ビームライン終端にシンチレータ (BGO 2" x 2") を置き、陽電子消滅 γ 線を測定しながら、ターゲット/モデレータにかける電圧や輸送路の磁場の最適化を図ってきた。ビームエネルギー $E_e \sim 2$ GeV、ビーム繰り返し25 Hz、ビームパルス幅 1 ns、ビーム電力 ~ 10 Wというパラメーターで実験を行ってきた中で、1993年7月には、1次ビーム 1 kWに規格化して毎秒 10^6 個の陽電子を長さ 31 mの輸送路の終端で検出した。

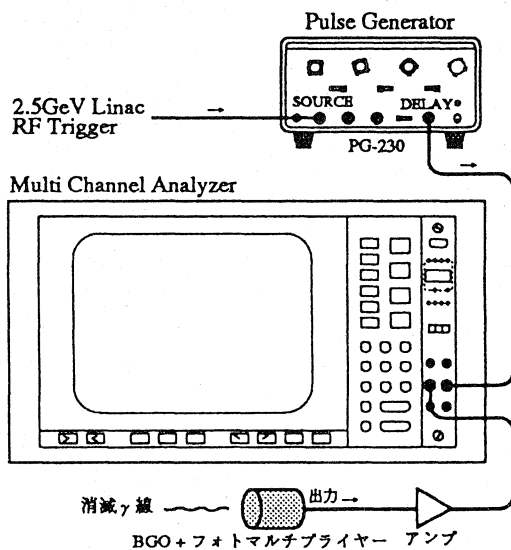


図3 γ 線測定部ダイアグラム

γ 線測定装置周辺のダイヤグラムを図3に示す。フォトマルチプライヤーからの信号を増幅して波高検出器に入力する。また、波高検出器には、1次ビーム側のトリガーをゲート信号として使用している。

6. 陽電子源の高電圧化

低速陽電子ビームライン終端での低速陽電子の確認にともない、実際の低速陽電子利用実験を念頭に置いたグレードアップの一部を1993年年頭より行いつつある。ターゲット付近の放射線遮蔽を強化して1次入射ビームのパワー増強に備えることと陽電子源の高電圧化である。前者については7節に記す。

試料の温度を変えながらディーププロファイルを測定することを想定すると、試料を接地電位から浮かすよりも陽電子源を浮かしたほうが都合がよい。また陽電子の試料中での寿命測定を行うときも、試料のポテンシャルが接地レベルでないと寿命スペクトルに偽のピークが出てしまい、うまくない。このようなことからターゲットとその直後の8mの直線部分のうち6mを最大60kVまで浮かすこととする。ビームライン建設当初から高電圧化に備えて絶縁碍子に取り替えられるような架台の構造としておいたので、図4のようにターゲット真空槽の足、イオンポンプ引き口等を絶縁構造とし0-60kVまでエネルギー可変の陽電子ビームを発生する。なお、本施設の線形加速器はパルス運転をしているので発生する低速陽電子もパルスビームである。したがって短時間に陽電子が数多くやってくることになり、検出器の飽和、バックグラウンドの増加等をまねき好ましくない。高電圧に浮かす6mの直線部両端にゲート電極を設けベニングトラップによる陽電子の蓄積を行い、疑似的な直流ビームが取り出せるようになる予定である。

高電圧化する部分で使用する各種電源（陽電子引き出し用高電圧電源、陽電子集束用コイル電源）

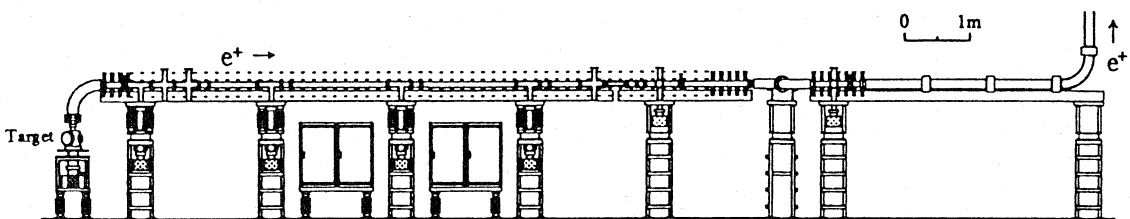


図4 ターゲット以降6mまでを高電圧化した様子

全体にも高電圧を印加することになる。従って、それらを制御するローカル・コントローラとともにまとめて高電圧部に組み込み、接地電位にあるパソコンから遠隔制御を行う。高電圧部と接地側との間の通信は、電気信号を光信号に変換して行う。パソコン上の電源制御プログラムは、Microsoft Visual Basicによって構築し、視覚的な操作で、電源等の遠隔制御を可能にする。これらを図5に示す。

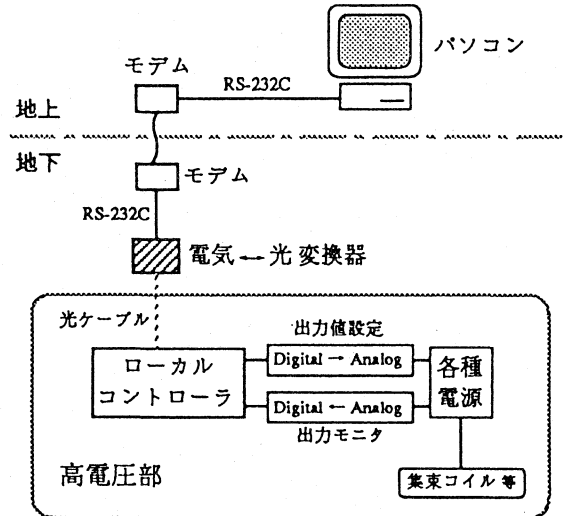


図5 高電圧部分の電源制御

7. 放射線遮蔽強化

前述のように、陽電子源の高電圧化と並行して、ターゲット付近の放射線遮蔽を強化する工事を進めている。これは、1次電子ビームのビーム電力を、これまでの約10 Wから最大6.25 kWでの実験が可能になるように、遮蔽を増強するものである。その具体的内容は次の通りである。

1) ターゲット周囲の遮蔽新設

図6に示すように、ターゲット真空槽の西側側方に厚さ2mのコンクリート遮蔽を置き、上方に厚さ0.2mの鉄の遮蔽を施す。

2) 第3スイッチヤードの遮蔽強化

ビームラインの設置されている第3スイッチヤードは、外周を1m以上のコンクリートと2.5 m

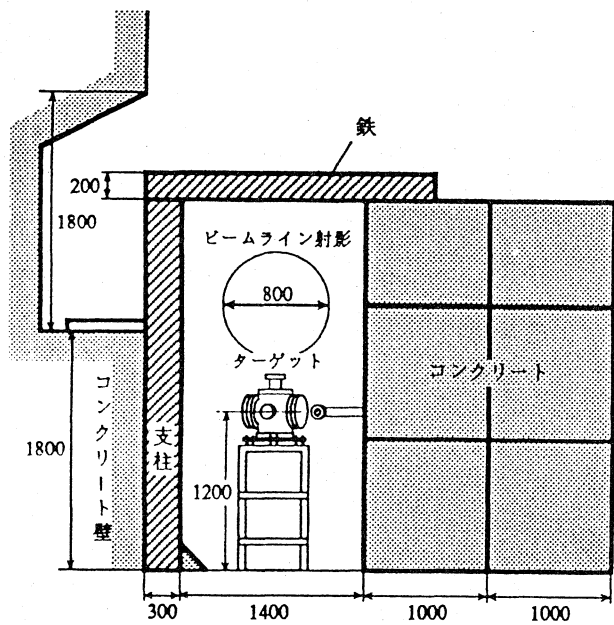


図6 ターゲット周囲の放射線遮蔽

以上の盛り土に覆われている。ただ、西側の搬入口の部分は、厚さ1mのコンクリート扉があるだけで、ここだけ地上の一般区域（＝非放射線管理区域）から直視できる構造になっていた。今回、扉の内側に厚さ1mのコンクリート遮蔽を増設し、この部分の遮蔽を強化した。

1次入射電子のビーム電力増強による、放射線安全の使用変更は、既に認可されている。

8. 応用例 — 再放出顕微鏡

陽電子でしかできない実験のひとつとして、陽

電子の再放出現象を用いて表面の欠陥に捕獲された陽電子の影を見る再放出顕微鏡 [6] の試作を検討している。図 8 に陽電子再放出顕微鏡の原理図を示す。これを用いれば低速陽電子のもつ特性を生かして、固体表面の欠陥観察であるとか、損傷を与えずに生体物質の観察を行うなども可能と思われる。

9. 終わりに

陽電子は、その特有の陽電子消滅という実験手法とともに、電子を用いてなされている分析方法に置き替わるだけのポテンシャルをもっていると考えられる。したがって、電子に比べてどれほど表面に対する感度がよいかを実証するために低速陽電子を用いた回折実験 [7] を計画している。

陽電子源の高電圧化等の改良と並行して、陽電子ビームのマイクロビーム化を進めているが、上述のような回折実験や再放出顕微鏡を実現するためにも、ビームの高輝度化 [8,9] も進めている。

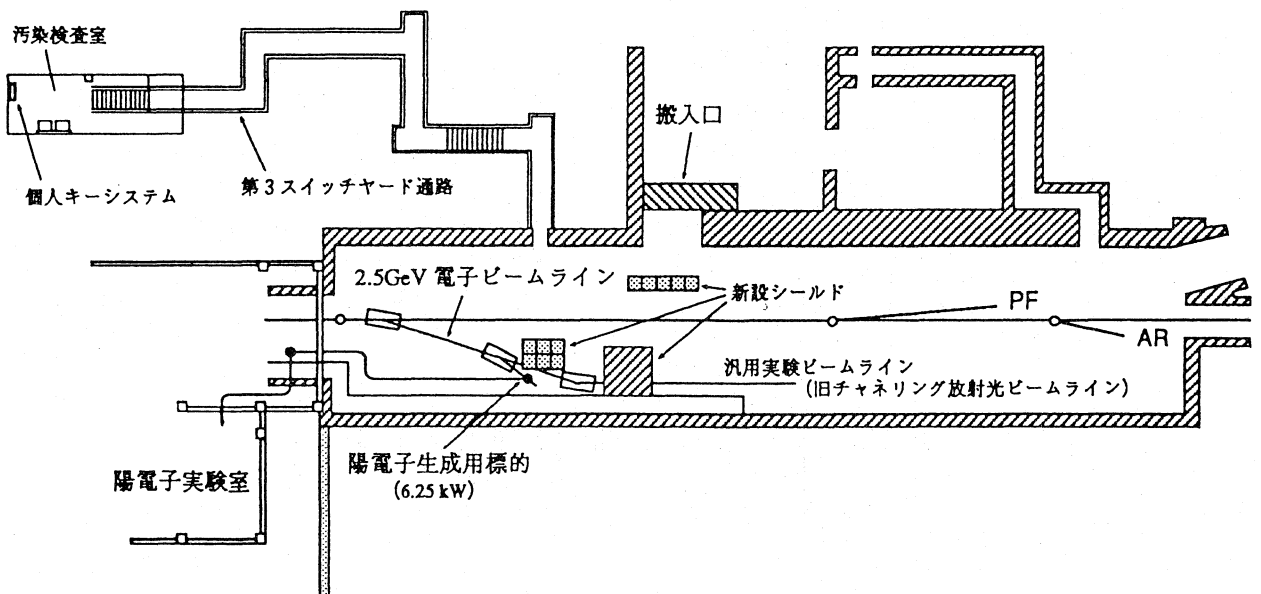


図7 第3スイッチヤード放射線遮蔽の様子

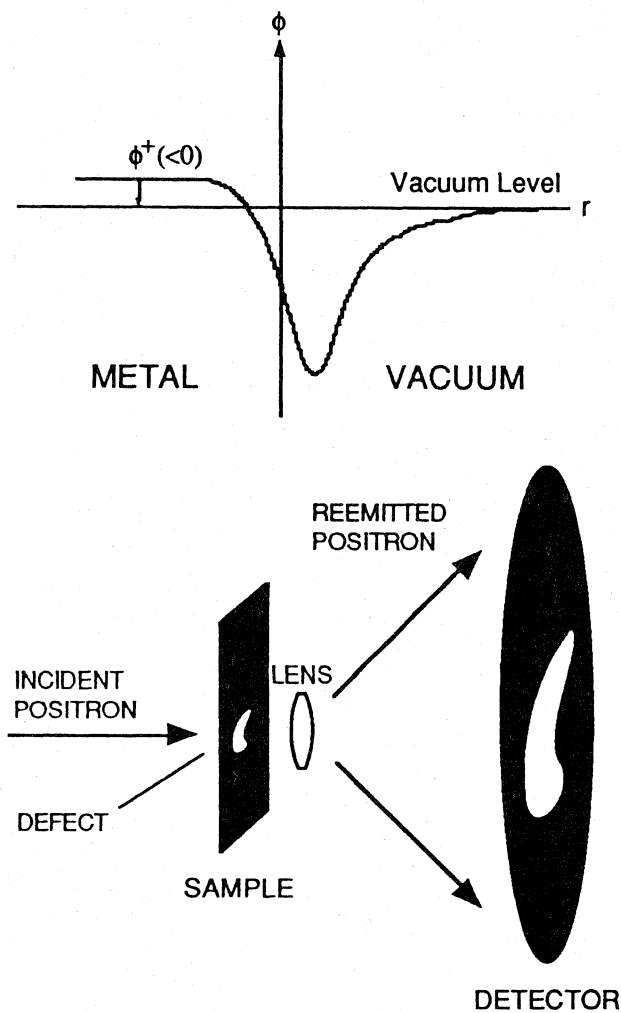


図8 陽電子再放出顕微鏡の原理図

参考文献

- [1] 浅見 明、他：ライナック研究会、16 (1991) pp.304.
- [2] A.Asami et al. , Materials Science Forum 105-110 (1992) 1833 ; 浅見 明、他：放射線、18 (1992) 35.
- [3] W.R.Nelson, H.Hirayama & D.W.O.Rogers : "EGS4 Code System", SLAC-265 (1985).
- [4] H.Hirayama : KEK Internal 89-17 (1990).
- [5] H.Hirayama : Proc. 2nd Workshop on Researches Using Positrons, Tokyo, 1991 (JAERI Takasaki, 1991) 145.
- [6] G.R.Brandes, K.F.Canter & A.P.Mills, Jr. :Phys. Rev. B43 (1991) 10103.
- [7] Alex.H.Weiss, I.J.Rosenberg, K.F.Canter, C.B.Duke & A.Paton :Phys. Rev. B27 (1983) 867.
- [8] A. P. Mills, Jr. :Appl. Phys.23 (1980) 189.
- [9] K. F. Canter and A. P. Mills, Jr. :Can. J. Phys. 60 (1982) 551.