電子技術総合研究所における電子加速器による 低速陽電子の発生とそれによる物性研究

三角 智久*・鈴木 良一*・小林 慶規**

大垣 英明*・山田家和勝*・千脇 光國*

山崎 鉄夫*・冨增多喜夫***

(受付1994年1月12日, 掲載決定1994年9月3日)

Generation of Slow-Positron Beams with an Electron Linac and
Physics Research with Them at the Electrotechnical Laboratory

Tomohisa MIKADO*, Ryoichi SUZUKI*, Yoshinori KOBAYASHI**,
Hideaki OHGAKI*, Kawakatsu YAMADA*, Mitsukuni CHIWAKI*,
Tetsuo YAMAZAKI* and Takio TOMIMASU***

*(Quantum Radiation Division, Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305)

** (Department of Analytical Chemistry, National Institute of Materials and
Chemical Research, 1-1 Higashi, Tsukuba-shi, Ibaraki 305)

*** (Free Electron Laser Research Institute, Inc., 4547-44 Tsuda, Hirakata-shi, Osaka 573-01)

(Received January 12, 1994, Accepted September 3, 1994)

1. はじめに

陽電子は物質中では多量に存在する電子と出会うと再結合して消滅し、 γ 線を放出する。これは「質量のエネルギーへの転換」の典型的な例である。陽電子が物質に入ってから消滅して、その個数が $1/e$ に減少するまでに要する時間を「陽電子の寿命」と呼んでいるが、これは、物質が理想的な結晶であれば100 ps 程度のものである。現実の結晶にはなんらかの欠陥が多少とも存在しており、陽電子は欠陥に暫くの間捉えられてから消滅するため、その分だけ寿命は長くなり、欠陥の種類によって数

百 ps 程度にまで分布している。さらに陽電子は、特に物質表面の電子と互いに相手を束縛し合って水素原子に似た状態である“ポジトロニウム”を形成する。中でも、陽電子のスピンの電子のスピンの揃っている“オルソポジトロニウム”の寿命は100 ns 以上にも達する。このオルソポジトロニウムも、周囲にある平行スピンの電子を取り込んで数十 ns 程度の寿命で消滅したり、スピン反平行な電子とのスピン交換反応でパラポジトロニウムになって200 ps 足らずで消滅したり、というような種々の経過をたどることが、現在までの多くの研究によって明らかになってきている。

陽電子は正の電荷を持っていて、正イオンの“抜け殻”とも言うべき欠陥に入り込み易いため、陽電子を利用する欠陥検出法は極めて敏感であり、欠陥の存在率が 10^{-7} オーダーでも検出することができる。つまり物質に入射された陽電子は、物質内部での相互作用の結果、エネル

* 電子技術総合研究所量子放射部
(〒305 茨城県つくば市梅園 1-1-4)

** 物質工学工業技術研究所計測化学部
(〒305 茨城県つくば市東 1-1)

*** 自由電子レーザー研究所
(〒573-01 大阪府枚方市津田4547-44)

ギーや運動方向などが変化して物質外に戻るときは勿論のこと、上述のように、消滅するときでさえも、物質についての情報をもたらすことができるという、我々にとって極めて好都合な性質を有している。

昭和61年度から5年間に亘って、科学技術振興調整費の研究課題として「新ビーム技術による高性能機能材料の分析・評価技術に関する研究」が実施された。筆者らを含む研究グループは、その中のサブテーマである「高強度低速陽電子線を利用した分析・評価技術に関する研究」を担当した。これは、電子技術総合研究所、無機材質研究所、理化学研究所、東京水産大学、筑波大学、および化学技術研究所（現・物質工学工業技術研究所）の担当者が緊密な連繫の下に協力して実施したもので、電総研の電子リニアックを使用して効率良く低速陽電子（つまり低エネルギーの陽電子）を発生させ、これを高度に制御して種々の物性研究などに役立てる技術を確立することを第一の目標とした。

筆者らのグループは、この研究の前半には「直線ストレージ法」を低速陽電子に適用することを試み、低速陽電子を10 ms以上もの間蓄えておくことに成功した¹⁾。これは、パルス的に発生する低速陽電子ビームを実用的な強度を有する連続的なものに変換することが可能になったことを意味しており、世界初のことであった。次いで研究の後半には筆者らは「低速陽電子極短パルス化装置」を開発し、直流状の低速陽電子ビームを、時間幅150 ps程度のパルス列に変換することに成功した²⁾。この装置では、試料に入射する陽電子のエネルギーを0.5–30 keVの範囲内で任意に設定できるため、試料への侵入深さを調整して欠陥の存在を検出することが可能である。これによって各種材料中での陽電子の寿命の深さによる変化を測定することができるようになった。既に筆者らは、シリコン、ダイヤモンド薄膜、高分子物質、金属などでの陽電子寿命を入射エネルギーの函数として測定し、各物質中での欠陥種の同定や試料の深さによる分布状況を解析し、多くの興味ある結果を得ている。

本稿では、筆者らが行った電子リニアックによる低速陽電子の発生とその高度な制御に関する研究の経過および成果を紹介したい。

2. 低速陽電子の発生と制御

2.1 加速器による陽電子の発生

陽電子は“エグゾティク粒子”すなわち我々の宇宙においては、通常は物質の構成要素とはなり得ない粒子の代表的なものである。エグゾティク粒子であることから、陽電子を利用するには、その都度なんらかの方法で造り出してやる必要がある。もちろん、人工的に製造

した放射性同位元素（RI）の中には²²Naや⁶⁴Cuなどのように陽電子を放出するものもあり、これによる陽電子を利用することも物質の状態解析などを行う上で重要な手段であり、事実現在でも、この手法によって多くの研究が行われている。しかし物質の表面あるいは特定の深さでの格子欠陥の状態、電子の分布状態などを詳細に研究するためには、プローブとして低速陽電子を使用することが圧倒的に有利である。ところが陽電子のエネルギーを低下させる過程（これを通常「減速」または「熱化」などと呼んでいる。）で陽電子数が 10^{-3} 程度以下に減少することから、計測に要する時間などを考えると、通常の研究施設にとっては非現実的なほどの強度を有するRIを使用しなければ、実際的にはないこととなる。そのうえ当然ながら、RIには有限の寿命があることなどから、陽電子を加速器で発生させて利用するのが現実的と言えるようにさえてきている。

加速器による陽電子の発生を考えると、その方法には大きく分けて2種類ある。第一の方法はヴァン・デ・グラフ型加速器などで得た陽子ビームなどを適当な物質に照射して陽電子放出性の短寿命RIを製作し、これから放出される陽電子を利用するものである。第二の方法は電子リニアックなどで得た数十 MeV から100 MeV 程度の電子を適当な物質に入射して大強度の制動放射 x 線を発生させ、その x 線が「対創生」あるいは「対生成」などと呼ばれている現象（これは「エネルギーの物質化」で、対消滅の逆過程である。）を起こして生ずる陽電子を利用するものである。現在までのところ、最も強度の高い陽電子ビームを得たのは第二の方法によるものであり、世界的にも事実上の主流となっている。筆者らも、電総研に設置してある電子リニアックで得られる70 MeV 程度の電子を利用して高強度の陽電子ビームを発生させることとした。筆者らは幾つかの重金属について取扱いの容易さ、放射化、発熱、変質などを実験的にも種々検討し、その結果に基づいて、電子—陽電子変換物質としては円筒状のTaを使用している。

2.2 陽電子の低エネルギー化

単一の金属が真空と接触している状況を考えてみよう。金属の最も簡単なモデルは“jellium モデル”で、これは金属が正イオンを一様に塗りつぶした jellium であると考え、その内部を自由電子が動き回っているとするものである。このとき、jellium は図1(a)に示すように、金属と真空との境界面で鋭く切れて真空中には存在しないのに対して、金属表面付近の電子ガスの一部は真空中に滲み出している。その結果、金属表面付近での正味の電荷分布は図1(b)に示してあるようなものとなり、電氣的二重層が生じて双極子バリア $\Delta\phi$ が現れる。

図1 単一金属と真空との境界面でのポテンシャルエネルギー

この $\Delta\phi$ は電子に対しては、それを金属内に引き込むように作用する。金属に対する電子の仕事函数 ϕ_- は $\Delta\phi$ と電子の化学ポテンシャル μ^- との差、すなわち

$$\phi_- = \Delta\phi - \mu^- \quad (1)$$

で与えられる。一方 $\Delta\phi$ は陽電子に対しては、それを金属から押し出すように作用するので、陽電子の化学ポテンシャルを μ^+ で表すと、陽電子の仕事函数 ϕ_+ は

$$\phi_+ = -\Delta\phi - \mu^+ \quad (2)$$

で与えられる。これらを模式的に示すと図1(c)および(d)のようになる。電子の仕事函数 ϕ_- は通常 4-6 eV 程度であるのに対し、陽電子の場合は、 $\Delta\phi$ と μ^+ とが同程度の大きさの量であるため、それらのバランスで決まる ϕ_+ の値は微妙であるが、現在までに実験的に得られている少数の例では負の値であることが多い。理論計算では、表面の原子配置や電子状態の理論的な記述法が確

立されていないこともあって、報告者により著しく異なることがある。しかし現在のところ ϕ_+ は 0 に近い負の値であると考えてよいようである³⁾。

高エネルギーの陽電子を適当な物質に入射すると、陽電子は物質の構成原子と非弾性散乱を繰り返して、エネルギーを失い、遂には原子の運動エネルギーと平衡に達する。このエネルギー（熱エネルギー）は常温ではおよそ 0.025 eV で、この程度にまでエネルギーが低下することを“熱化”と呼んでいる。この状態になった陽電子は拡散によって物質中を移動し表面付近に戻ってくる。このとき物質の ϕ_+ が負であると、陽電子は図1(d)に描いてあるような電場に引かれて真空中へ出ていく。ただし、実在の物質では格子欠陥や原子空孔が不可避免的に存在していて、多くの陽電子はそれに捉えられるため、表面から真空中へ出て行く陽電子数は著しく減少する。このようにして得られる陽電子のエネルギーは、減速物質（モデレーター）の ϕ_+ の絶対値にほぼ等しいので“単色陽電子”と呼ばれることもある。このとき外部に 10-20 V の電位をかけて陽電子を引き出すと、その後は必要に応じて電磁力を利用して制御することが可能になる。

ここでの問題は、物質を十分に吟味しなければ物質中でほとんど全ての陽電子が消失してしまうこと、たとえ良質のものを使用しても入射陽電子から低速陽電子への変換率（減速率）が高々 0.1% 程度に過ぎないことである。稀ガスを固体化したものでは減速率が 1% オーダーに達するものもあると言われているが、当然ながら取り扱いはかなり面倒で、あまり一般的なものではない。従って、現実には減速材として W, Cu, Ni などの単結晶を用いることが多く、筆者らも現時点では単結晶の W リボンを使用している。

一方では、高純度 Si 結晶と W 薄膜とを組み合わせ、それに高電場を印加することによって 10% 以上の減速率が得られる可能性のあることが指摘され、技術開発が進められている⁴⁾。このようなものを使用する減速装置が実用化されて、しかも長期間の使用に堪えられるようになれば、利用可能な低速陽電子量が一挙に数百倍以上に増加するわけで、条件に合わない低速陽電子を切り捨てて高品質のものだけを利用することなども現実味を帯びてくる。この面での一層の技術開発が期待される。

2.3 パルス状低速陽電子の直流化

現在の技術水準では、安定に使用できる多くの高エネルギー電子リニアックは、デューティサイクルが 0.1% に満たないパルス加速器である。従って、これで得られる低速陽電子ビームもパルスの発生し、減速過程で多少は時間幅が広がるとしても、デューティサイクルはや

図2 電総研低速陽電子研究施設の平面図

は0.1%に満たない。この結果、数 μ s以内に多量の低速陽電子が試料に到達し、その時間帯には、現存する検出器の処理能力を遥かに上回る事象が生起するのに対し、その後数百倍以上の時間に亘って、なんら意味のある事象が起らないという不都合な事態に陥る。このような事態は、発生する陽電子強度が増すほど甚だしくなる訳で、加速器を使って高強度の陽電子を生成するメリットがほとんど失われることを意味している。

このような不合理な事態を打開するために、筆者らはパルスの得た低速陽電子ビームを一旦電磁場で形成される空間領域に閉じ込めておいて、それを徐々に取り出すことによって時間的にはほぼ連続なビームに変換する技術の開発に取り組んだ。その結果、総体の強度は数分の1に低下するものの、低速陽電子を10 ms以上もの間蓄積することに成功し⁵⁾、実質的には連続ビームが得られるようになった。この手法は“Penning Trap”と呼ばれるもので、数十 eV の電子プラズマや数 keV の反陽子蓄積の実績はあるが、低速陽電子の蓄積に成功したのは世界でも初めてのことであった。

図2は本研究で建設した施設の概要を示す平面図で、全装置は電総研リニアック棟の低エネルギー実験室および隣接する計測室に設置されている。図2の地域では電子ビームは床上 $\sim$ 1.2 mの高さで飛行しており、低速場電子ビームも最上流部ではその高さであるが、放射線遮蔽や人員の往来、作業性などを考慮して床面からの高さは $\sim$ 2.5 m から $\sim$ 0.3 m まで種々変化している。

電総研リニアックで70 MeV 程度にまで加速された電子ビームは低エネルギー実験室へ導かれ、Ta 円筒を主体とする電子-陽電子変換装置（コンバーター）で多量の陽電子を発生する。この陽電子は、その直後に設置してあるモデレーター（W リボン）中での相互作用の結果、低速陽電子となって出てくる。これを $\sim$ 20 V の直流電位で引き出してビームラインへ送り込む。このビー

図3 試作した直線ストレージ部の構造および動作機構

ムラインは全長約22 m で、その周囲にはヘルムホルツ条件をほぼ満たすようにコイルが設置してあって、低速陽電子は、これによる $\sim$ 0.01 テスラの軸状磁場でガイドされて計測室まで飛行する。ビームラインの途中には4 m の距離を隔てて2 個のリング状電極が設置されており、これによる電場と周囲のコイルが造る磁場とで Penning Trap による“直線ストレージ部”（図2でPと示されている箇所）を形成している。

低速陽電子は直線ストレージ部を数千回往復するため、内部の圧力が充分低くなければ気体分子との衝突によって低速陽電子強度が著しく低下する。また、上記のヘルムホルツコイルの造る磁場が乱されることのないよう、磁性を帯びる恐れのある物体を周辺に置くことは極力避けなければならない。さらに、コンバーターでの電子から陽電子への変換率が0.1%程度であり、モデレーターでの減速率も同様に0.1%程度であることから、1 個の低速陽電子を手にするためには10⁶個以上の高エネルギー電子が必要である。これはコンバーターに入射したほとんど全ての電子は有効に利用されず、x 線や中性子線となって周囲の物体に衝突するということを意味している。従ってビームラインの素材としては、できる

だけ放射線に対して“透明な”ものを選定することが重要である。筆者らは以上の点を考慮して超高真空仕様のアルミニウム製パイプを主体としてビームラインを構築することとした。

現在では、もはやそのようなことはないであろうが、昭和61年当時は技術の蓄積が充分ではなかったせいか、熔接部での真空リークが多く、かなりの苦勞を強いられた。極端な例では、4個の電流導入端子を有するフランジで、3個の導入端子で真空リークが見つかったり、一度組み立ててから解体するとエッジが鈍って再使用のきかないフランジがあったり、などというような信じ難いことさえ体験した。このような経過の末に、最初の予定より半年ほど遅れはしたものの、昭和62年11月には電総研リニアックで加速した電子ビームを低エネルギー実験室へ導いて低速陽電子を発生させ、それを蓄積することに成功した。この時点での直線ストレージ部での真空圧力は、装置を動作させないときで 2×10^{-8} Pa程度で、コンバーターに電子ビームを入射するとビームライン最上流部でのガス放出のため、圧力が1桁ほど上昇したが、全体の特性に大きな悪影響はみられなかった。

図3は本研究で試作した直線ストレージ部の構造および動作機構を示している。第一電極の電位(V_E)は初め0 Vであるが、モデレーターを出た低速陽電子の脉冲が到来して直線ストレージ部に入り切るタイミングを見計らって20 V程度の電位を印加し、そのまま保っておく。第二電極にも電位を印加しておく、それより高いエネルギーを有する陽電子は下流へ飛行するが、それよりエネルギーの低い陽電子は上流側へ押し戻される。第二電極の電位(V_R)を徐々に低下させると、より低エネルギーの陽電子も下流側へ飛行していく。このような操作をリニアックの脉冲に同期させて行うことによって、本来は数 μ s程度の低速陽電子脉冲を数

ms以上の時間に亘って取り出すことができる。

この直線ストレージ部の蓄積性能を確認するために、一定時間は完全に陽電子を閉じ込めておいてから徐々に取り出して、計測室に到達する陽電子数を計数した。この結果をプロットすると図4のようになり、モデレーターからの引き出し電位によって多少の相違はあるものの、半減時間が6 ms程度であることが判る。実際に低速陽電子ビームを使用して種々の物性研究を行うときには、電総研リニアックを50 ppsあるいはそれ以上の繰返しで運転しているので、実質的には連続なビームとして使用することが可能になった。

2.4 低速陽電子極短パルス化装置の開発

本稿の初めに述べたように、物質中での陽電子の寿命は、その物質に存在する欠陥種に応じて100 ps程度から100 ns程度まで分布している。従って、ある物質に入射した陽電子が消滅するまでの時間を詳細に分析することによって、その物質に存在する欠陥の種類や存在比を評価することができる。しかも陽電子のエネルギーを変えて物質に入射することによって、消滅するまでの試料への平均浸入深さを数 nm から数 μ m まで変化させて寿命測定ができるため、格子欠陥の深さ方向の分布などに関して有用な知見が得られる。しかしそのためには、低速陽電子ビームを100 ps オーダーの極短パルスにし、しかもそれを任意のエネルギーにまで加速するという極めて高度なビーム制御技術が必要である。そのような理由から、実用的な時間分解能で陽電子寿命が測定でき、しかも入射エネルギーが可変な装置は、世界でもMünchenのSchödlbauerらが開発した装置⁶⁾しか存在していなかった。その装置では時間分解能が225 psと、通常のRIによる寿命測定(熱化していない陽電子を使用する)と同程度の時間分解能を実現していたが、RIで発生させた陽電子を低速化して極短パルス化しているためビーム強度が弱く、従って計数率も必然的に30-70 cps程度と低いものであった。さらに、この装置のチョッパーは高周波電場によってビームの進行方向を偏向させ、スリットでチョップする方式であり、磁場による陽電子のサイクロトロン運動のため、チョップできる周波数(200 MHz)やビームの径(3 mm程度)が制限されていた。そのため、この装置では表面のボイドなどにできる寿命の長いポジトロニウムの成分を測定することは不可能であった。また、当所で発生している低速陽電子ビームに対してこの方式を適用しようとする、現状では直流化後のビームの直径が10 mm程度であるため、極短パルス化の効率が極めて悪くなるという問題が生ずる。

上述のような問題を解決するために、当所では図5に示すような低速陽電子ビームの極短パルス化装置を試作

図4 引き出し電位の函数としての直線ストレージ部の蓄積性能

図5 試作した低速陽電子ビームの極短パルス化装置の概念図

した。この装置は、チョッパー、サブハーモニックプリバンチャー（SHPB）、バンチャーから成るものである。このチョッパーは、3枚のグリッドでできていて、グリッド相互間に印加するパルス電場によってチョップするもので、Schödlbauerらが採用している偏向型チョッパーのように、磁場やビームの径に左右されることはない。また動作周波数も任意に設定することが可能である。しかしこの方式では、チョップできるビームのパルス幅が、2-3 ns 程度までであって、そのビームをバンチャーだけで完全にパンチさせるのは困難である。そこで、チョップしたパルスの時間幅を圧縮し、バンチャーで完全にパンチできるようにするため、SHPBをチョッパーの直後に取り付けた。このSHPBは2重の筒から成り、内側の筒に高周波を印加することによって筒の間の2つのギャップでビームをモデュレートするもので、バンチャーに入射するビームの時間幅が2 ns 以下になるようにする。バンチャーでは、このビームをさらにモデュレートして、最終的に試料位置で時間的なフォーカスが得られるようにする。

試作した極短パルス化装置のパンチング特性をMonte Carlo法でシミュレートした結果、基本波のみではなく第3高調波（電力は基本波のその1/4程度）を混合することによってパンチ効率が約30%向上し、出力ビームパルスの時間幅も10%ほど狭まることが確認されたので、試作したバンチャー部の共振空洞には基本波および第3高調波の共振周波数を同調させるチューナーを設けてある。これによって、時間幅150 ps 程度の極短パ

図6 極短パルス化後の低速陽電子ビームの時間分布 ●はバンチャーのみを動作させたときのもの、○は全体を動作させたときのもの

ルスを得ることが可能になった。実際にこの装置に、直線ストレージ法ではほぼ直流状になった低速陽電子ビームを導いて極短パルス化した低速陽電子ビームを試料に入射し、消滅 γ 線の時間分布を測定した結果が図6である。ここで●はバンチャーのみを動作させたときのもの、○は全体を動作させたときのものである。これにより、不要な時間帯のパルスはチョッパーで有効にカットされていて、 γ 線検出数のピークがバックグラウンドの5000倍程度あることも確認できる。

図7 アモルファスシリコン薄膜での陽電子の寿命分布 (E_i は陽電子の入射エネルギー)

図5に示してあるように、試作した低速陽電子極短パルス化装置のパンチャー部の下流には、ドリフトチューブおよび加速リングが設置されていて、これらに印加する電位を調整することによって陽電子のエネルギーを0.5 keV から30 keV 程度まで変化させられる。こうして得られる陽電子を試料に入射して対消滅させ、発生する0.511 MeV の γ 線の時間分布を測定することによって陽電子の寿命測定を行っている。消滅 γ 線は減衰時間が0.8 ns 程度の BaF_2 シンチレーターと、石英窓を有する高速の光電子増倍管とを組み合わせたもので検出しており、この出力信号と極短パルス化装置から電気的に取り出したタイミング信号との時間差の分布を、時間一波高変換器とマルチチャンネルアナライザとで計数することによって時間スペクトルを得ている。この装置による寿命測定の時間分解能は、現時点で約250 ps であり、電総研リニアックの電子ビーム電流が3 μA のとき、計数率は小さなシンチレーター (25.4 mm ϕ ×12.7 mm 厚) でも100 cps 以上が実現できており、50.8 mm ϕ ×25.4 mm 厚程度のシンチレーターを使用する場合には、時間分解能は多少悪化するものの、500 cps 程度の計数率が得られる。

この研究で開発した装置で得られる極短時間幅の陽電子ビームを半導体物質に入射したときの陽電子寿命を図7に示す。試料は、単結晶シリコンの表面にプラズマCVD法でアモルファスシリコン薄膜を970 nm ほど成長させたものである。陽電子の入射エネルギー (図7では E_i で示されている。) を変化させているのは、平均の消滅深さを調整するためで、0.5 keV では ~ 10 nm、6 keV

では ~ 300 nm、25 keV では $\sim 3 \mu\text{m}$ である。これはそれぞれ、試料表面の酸化膜で、アモルファス薄膜で、単結晶基板で大多数の陽電子が消滅することに対応している。単結晶性シリコン基板中では欠陥が少なく、陽電子はトラップされることが少いため寿命が短いこと、アモルファス薄膜では欠陥が多くてポジトロニウムが形成され易いため極短寿命の成分や長寿命の成分が観測されている。この外、プラズマCVD法でアモルファス薄膜を成長させるときの高周波電力を変化させることによって寿命曲線が著しく変化することも観測されている。このことは、薄膜に形成されるボイドなどの欠陥の状態が、薄膜の成長条件によってかなり異なることを示している。

3. おわりに

筆者らがこれまでに行ってきた、電総研リニアックを使用して高強度の低速陽電子ビームを発生させ、それを高度に制御する技術を開発する研究と、そのビームを利用して行っている物性研究の一例を紹介した。本研究で開発した低速陽電子極短パルス化装置で得られる低速陽電子ビームは比較的強力であるため、陽電子寿命ばかりではなく、消滅 γ 線エネルギーのドブラー拡がりと同時に測定することも可能である。また低速陽電子と内殻電子との対消滅を利用してオージェ過程を起させられるものと考えられ、筆者らはそのための装置開発にも取り組んでいる。このように、低速陽電子を活用することによって各種材料の表面や近表面・界面などの状態を解析するための手段が増すのは疑いのないことである。

しかし例えば、露光時間・倍率などの面で真に実用的な陽電子顕微鏡を建設するためには、筆者らが得ているものより数十倍も強度が高く、しかも品質の良い低速陽電子ビームを利用できるようにしなければならない。この意味でも、僅かでも変換率の高い電子―陽電子変換物質や減速率の高い陽電子減速物質、あるいは、それらの最適な形状を探索するなどの、地道な努力を今後も続けていくことが重要である。

加速器を使用して低速陽電子を発生・制御しようという、本稿で紹介したものと同様の研究は、国内外の幾つかの研究所でも行っていたが、種々の事情で中断していたり、ビームの実利用にまで至っていない例が多い。現時点では、加速器で低速陽電子ビームを発生させて利用できる状態を保ち、実際に定常的に物性研究を行っているのは当所のみようである。その意味では本施設を維持し、活用を図っていくことは筆者らの重要な責務である。しかし幸いなことに、国内だけを見ても、京都大学原子炉実験所、大阪大学産業科学研究所や高エネルギー

物理学研究所,あるいは民間企業数社において低速陽電子の発生・制御に関する研究が続けられている。また,日本原子力研究所・高崎研究所の関係者を中心として“ポジトロンファクトリ”の建設を目指して,様々な努力が払われている。そのような場面で,本研究で得た多くの経験やノウハウが活用されることが期待される。

既に述べたように,本研究は科学技術振興調整費によって発足したものであるが,現在は原子力試験研究費によって装置開発や運営が行われている。このような研究施設の重要性を認識し,ご援助下さっている科学技術庁研究開発局および原子力局の担当官諸氏には,深甚の謝意を表したい。また,本研究計画の初期の段階で献身的な努力を払い,現在でも種々ご援助およびご助言を下さっている無機材質研究所の千葉利信氏および赤羽隆史氏,ならびに筑波大学の谷川庄一郎氏および東京水産大学の塩谷亘弘氏(元理化学研究所),さらに,筆者らにこの報告の機会を与え,でき上りを辛抱強くお待ち下さった本誌編集委員諸氏にも深く感謝する。最後に,常々電総研リアックの維持・運転にご尽力下さっている岡部計測工業所の岡部茂雄氏,ならびに電総研の野口 勉氏,杉山 卓氏,および清 紀弘氏にも感謝したい。

〔文 献〕

- 1) T. Mikado, R. Suzuki, M. Chiwaki, T. Yamazaki, N. Hayashi, T. Tomimasu, S. Tanigawa, T. Chiba, T. Akahane and N. Shiotani: Proc. of the 3rd Japan-China Joint Symp. on Accel. for Nucl. Sci. and Their Appl., (RIKEN, Wako, Nov., 1987), pp. 163-165.
- 2) R. Suzuki, Y. Kobayashi, T. Mikado, H. Ohgaki, M. Chiwaki, T. Yamazaki and T. Tomimasu: Jpn. J. Appl. Phys. **30**, L532 (1991).
- 3) 谷川庄一郎:「陽電子を用いた表面研究」大槻義彦編 物理学最前線 5, (共立出版株式会社, 1983年); P. J. Schultz and K. G. Lynn: Rev. Mod. Phys. **60**, 701 (1988).
- 4) 例えば K. G. Lynn and B. T. A. McKee: Appl. Phys. **19**, 247 (1979); C. D. Beling, R. I. Simpson, M. Charlton, F. M. Jacobsen, T. C. Griffith, P. Moriarty and S. Fung: ibid. **A42**, 111 (1987); 谷川庄一郎, 上殿明良, 鈴木良一: Radioisotopes **41**, 536 (1992) など.
- 5) T. Akahane, T. Chiba, N. Shiotani, S. Tanigawa, T. Mikado, R. Suzuki, M. Chiwaki, T. Yamazaki and T. Tomimasu: Proc. of the Eighth Int. Conf. on Positron Annihilation, (Gent, Aug., 1988); Appl. Phys. **A51**, 146 (1990).
- 6) D. Schödlbauer, G. Kögel, P. Sperr and W. Triftshäuser: Phys. Status Solidi **A102**, 549 (1987).