

JAERI-Tech
2003-091



JP0450247



静電輸送陽電子ビームによる
反射高速陽電子回折 (RHEPD) 装置の開発

2003 年 12 月

石本 貴幸*・河裾 厚男・岡田 漱平・伊藤 久義

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

静電輸送陽電子ビームによる 反射高速陽電子回折(RHEPD)装置の開発

日本原子力研究所高崎研究所材料開発部
石本 貴幸*・河裾 厚男・岡田 漱平⁺・伊藤 久義⁺⁺

(2003年10月31日受理)

反射高速陽電子回折(RHEPD)の表面研究における有用性を実証するために、我々は1996年から静電輸送方式による陽電子ビームの開発に着手した。1998年には、世界で初めてとなる明瞭な陽電子回折図形の観測に至った。初期に開発された装置は、三段のアイントゥエルレンズとコリメータによって平行陽電子ビームを得る仕組みになっていた。しかしながら、この装置では、ビームエネルギー幅とガンマ線によるバックグラウンドが鮮明な回折像観察の妨げとなることが分かってきた。即ち、より精度の高い実験を行なうためには、ビームエネルギー幅と γ 線のバックグラウンドを低減し、かつ観測システムのダイナミックレンジを高める必要がある。そこで、初期の装置に対して同心球状の静電偏向器と二段のアイントゥエルレンズを新たに加える改造を施すとともに、新たに画像観測システムを構築した。その結果、 γ 線が起源のノイズを大幅に低減することができ、ビーム径1 mm、エネルギー幅0.1%以下、及び発散角0.1°以下の高品質陽電子ビームを得ることができた。また、観測システムのダイナミックレンジを約 4×10^9 に向上させることができた。本装置を用いて、従来の研究では観測不可能であったSi(111)表面に付随する微弱な一次ラウエ帯の観測に成功した。本報では、上記の研究開発について詳述する。

高崎研究所: 〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

⁺企画室

⁺⁺原研・機構統合準備室

*サンヨー電子株式会社

Development of Reflection High-energy Positron Diffraction (RHEPD) Based on an Electrostatic Positron Beam

Takayuki ISHIMOTO^{*}, Atsuo KAWASUSO, Souhei OKADA⁺ and Hisayoshi ITOH⁺⁺

Department of Material Development
Takasaki Radiation Chemistry Research
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received October 31, 2003)

To demonstrate capability of reflection high-energy positron diffraction (RHEPD) in the surface study, we have been developing a positron beam based on the electrostatic manner. In 1998, we succeeded in observing clear positron diffraction patterns for the first time. A well-focused positron beam was obtained using linearly aligned three einzel lenses and a pin-hole collimator in the original system. However, the large energy variation and high frequent events by gamma ray background disturb to observe sharp diffraction patterns. It was required not only to reduce them, but also to enhance the dynamic range of the observation system. Then, we improved the original apparatus by installing a hemispherical electrostatic prism and additional two einzel lenses. We also developed a new beam observation system. Consequently, the background from gamma rays were well reduced and a high quality positron beam with a diameter of 1 mm, a energy variation of less than 0.1 % and divergence of less than 0.1° were obtained at the target. The dynamic range of the observation system was improved to approximately 4×10^9 . Using the above apparatus we succeeded in observing the weak first Laue pattern associated with a Si(111) surface. In this report we detail the above research and development.

Keywords: Electrostatic Positron Beam, Positron Diffraction, RHEPD

⁺ Office of Planning

⁺⁺ Preparations Office for JAERI-JNC Integration

^{*} Sanyu Electron Co., Ltd.

目次

1.序論	1
2.反射高速陽電子回折(RHEPD)装置の開発	2
2.1 陽電子ビームラインの製作	2
2.1.1 陽電子銃部	2
2.1.2 アインツェルレンズ	3
2.1.3 静電偏向器	5
2.1.4 ビーム軌道シミュレーション	8
2.1.5 偏向器付きコリメータ	8
2.1.6 電源系統	9
2.2 陽電子回折観測システムの構築	9
3.装置の特性試験	11
3.1 陽電子ビーム特性評価	11
3.2 シリコン表面を用いた陽電子回折の観測	12
4.まとめ	13
謝辞	14
参考文献	14
付録	30

Contents

1. Introduction	1
2. Development of a New Reflection High Energy Positron Diffraction (RHEPD) Apparatus	2
2.1 Positron Beam Line	2
2.1.1 Positron Gun	2
2.1.2 Einzel Lens	3
2.1.3 Hemispherical Electrostatic Prism	5
2.1.4 Beam Orbit Simulation	8
2.1.5 Collimator with Deflector	8
2.1.6 Electric Power Supply System	9
2.2 Positron Diffraction Observation System	9
3. Characteristics of Apparatus	11
3.1 Characterization of Positron Beam	11
3.2 Observation of Positron Diffraction from Silicon Surface	12
4. Summary	13
Acknowledgement	14
Reference	14
Appendix	30

1. 序論

半導体や金属の表面原子構造を得る方法として、反射電子回折法が一般的に用いられている。反射電子回折法は、10～500 eV のエネルギーの電子を利用する低速電子回折 (Low Energy Electron Diffraction, LEED) と、10～100 keV の反射高速電子回折 (Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED) に分けられる。RHEED において電子の代わりにその反粒子である陽電子を用いることで、反射高速陽電子回折 (Reflection High Energy Positron Diffraction, RHEPD) が可能となる[1]。RHEPD には電子回折では起こりえない全反射回折があり、これを利用することで結晶最表面の構造をバルクの影響無しに知ることができる。全反射回折の臨界角は、1～2°程度であり通常の実験で十分に実現可能な大きさである。陽電子全反射回折を用いることで、電子回折では得ることが難しい表面吸着層の構造、表面デバイ温度及び金属表面ダイポール障壁などの知見を得ることができる。

上述した RHEPD の有用性を実証するため、我々は陽電子ビームの研究開発を行ってきた[2]。1996～1999 年の研究開発では、陽電子発生部と直線的に配置された三段のアイントゥエルレンズから構成される静電場輸送方式による陽電子ビーム発生装置を製作した。また、回折実験を行なうためには小径で発散角の小さいビームを形成する必要がある。そこで、試料直前にコリメータを設け、近軸ビームを利用することにした。陽電子ビーム強度は約 $2 \times 10^3 \text{ e}^+/\text{s}$ であり、電子ビームと比較すると格段に低強度であるが、CCD カメラで得られた画像を積算処理することで明瞭な回折パターンを得ることに成功した[3]。

初期の研究では、強度の高いゼロ次ラウエ帯は観測できた。しかしながら、より高次のラウエ帯や分数次回折点の観測には至らなかった。上記の装置の構成から、その原因としては次の二つの問題点が考えられた。まず、陽電子ビームの単色化が不十分だった点である。単一エネルギーの陽電子ビームは、線源から放出された高エネルギー陽電子を減速材によって熱エネルギーまで減速、単色化し、かつ減速材の負の仕事関数を利用して熱化陽電子を真空中に引き出した後に改めて加速することで形成される。しかし、実際には減速材では完全に熱化されない陽電子が混在するため、ビームエネルギー幅が 10 % 程度と大きかった。エネルギー幅が大きいと、ビームが干渉可能な最大光路差である可干渉距離が低下し、高次ラウエ帯や分数次回折点の観測が困難になる。次に線源からのガンマ線が検出器のバックグラウンドを増加させ、信号-ノイズ(S/N)比を低下させる原因となった点である。高次のラウエ帯及び分数次回折点はゼロ次ラウエ帯に比べ、一桁以上強度が弱いため測定系の S/N 比が低いと観測が益々難しくなる。以上の問題点は線源、ビーム輸送系そして観測部がそれぞれ直線状の配置にあり、しかも距離的に十分隔てられていないことによる。そこで、本研究開発では、初期の装置に対して同心球状の静電エネルギー分析器を付加するとともに、さらに二組のアイントゥエルレンズを追加してビームを長距離輸送することで、ビームエネルギー幅の低減と S/N 比の改善を図ることにした。また、微弱な陽電子回折図形を精度良く観測するために、従来よりも広いダイナミックレンジを持つ観測システムを製作することとした。さらに、陽電子回折強度を入射視射角の関数 (ロッキング曲線) として自動に測定できるようにソフトウェアを開発した。本稿では、これらの研究開発について報告する。

2. 反射高速陽電子回折(RHEPD)装置の開発

2.1 陽電子ビームラインの製作

現在、陽電子ビームは多くの場合、空芯のヘルムホルツ電磁石またはソレノイド電磁石によりビーム進行方向にベクトル成分を持つ一様な磁場を発生させ、陽電子が磁力線周りにラーマ運動する特性を利用して陽電子輸送を行っている。この方法は陽電子の輸送には適しているが、陽電子回折実験に耐える平行な陽電子ビームの形成には適していない。平行な陽電子ビームを発生する方法としては、強磁性体外套で囲まれたヘルムホルツ電磁石(磁場レンズ)を用いる方法と円筒電極間に発生する静電界を用いる方法(静電レンズ)がある。一般に、前者は比較的高エネルギー領域に、そして後者は低エネルギー領域において有効な方法であると言われているが、その境界は必ずしも明らかではない。歴史的にみると、静電レンズによる陽電子ビーム輸送は、低エネルギー陽電子回折や陽電子再放出顕微鏡の開発に際して利用された。我々の初期のRHEPD研究開発では、静電レンズを用いた陽電子ビームを開発した。そこで、本装置の製作にあたっては、初期の陽電子ビーム輸送方式をそのまま踏襲した。初期に開発された装置のビーム形成上の問題点を解決するために、エネルギー分析器とさらなるアインツェルレンズを付加する構造とした。図1は装置全体図とその写真を示している。以下で、各部の詳細について述べる。

2.1.1 陽電子銃部

陽電子銃部では、低速陽電子ビームを効率的に引き出し、後段に輸送することが重要である。陽電子減速材を一般的な電子銃におけるフィラメントに見立てることで、ウェネルト電極と陽極(陽電子に対しては実際には減速材に対して陰電位が与えられる)から構成される陽電子銃を考えることができる。しかしながら、このような電極配置は陽電子ビームの発生には利用されていない。この理由は、陽電子減速材が電子発生のためのフィラメントと比較して大きな寸法となっていること、及び減速材から放出された陽電子が減速材面近傍に滞留することにより、ウェネルト電極だけで陽電子の引き出しと集束を行なうことが難しい点にある。従って、陽電子ビームの発生には基本的に減速材の直後に引き出し電極を設けることが必要となる。このようにして引き出された陽電子は、ビーム軸に対してある程度平行な線束となっているが、それ以後集束力が欠落するとすぐに発散してしまう。そこで、後段にさらに集束作用を与える電極を設ける必要がある。引き出し電極の後にウェネルト電極、ソア管およびアノード電極を設ける方法が、低エネルギー陽電子ビーム装置の開発に際して、ブランダイス大学で提案された [4]。この方法は陽電子の軌道の調整幅を大きく持たせたものであり、低エネルギー陽電子ビームの発生には適しているかもしれないが、本研究開発で目標とする高エネルギー陽電子回折のためのビーム発生方法としては、必ずしも唯一ではない。しかしながら、ここでは実績のある方法として採用することにした。図2は陽電子銃部の構成を示している。陽電子線源とタングステン減速材に引き続き、引出グリッド、ウェネルト電極、ソア管及びアノード電極が配置された構造となっている。寸法についても、大略ブランダイス法と同様である。これは、線源の寸法が同様であることによる。ただし、減速材は単に板状のものではなく、図2の下段に示すよ

うに、その上下に二枚の減速材を井桁状に組むことにした。このようにすることで、多少でも低速陽電子の発生量を稼ぐことができる。さらに、減速材で囲まれた空間に引き出し電極からの電界が侵入することになり、陽電子ビームに対して都合の良い集束作用が生ずる。実際、上下の減速材を使用することで、最終ビーム強度はそれがない場合と比較して2倍以上となることが初期の研究で確認されている[5]。

陽電子銃はビームラインから電氣的に絶縁され、それ自体が最大 30 kV まで印加できるようになっている。後段のビームラインは接地させてあり、陽電子はアノード電極と第一段目のアインツェルレンズの間で加速される。ここでは、線源及び減速材の電圧は 20 kV とし、引出電極の電圧はこれよりも 0.4kV 低い値 (19.6 kV) とした。アノードの電圧は 19.2 kV とし、ウェネルト電極とソア管の電圧は 19.6~19.2 kV の間で調整した。以上の電圧配分は、初期の研究において陽電子引き出し量を最大化するように実験的に決められたものである[3]。図3(a)に示すように、SIMION 計算コードによる軌道シミュレーションによって、陽電子が減速材の形状効果で集束されつつ引き出され、その後適正に輸送されることが確認できる。さらに図3(b)にアノード電極出射直後の集束点におけるビームの位相図を示す。ビームの初期値は径を 4 mm、発散角を $\pm 1.0^\circ$ としている。位相図から発散角は約 $\pm 8^\circ$ と初期値に比べ大きくなっているが、径は約 0.3 mm となり非常に良く集束していることがこれからもわかる。

本研究開発では、真空仕様の Na-22 陽電子線源 (AEA Technology 社製) を使用した。線源強度は 370 MBq である。平行性の高いビームを形成するためには、陽電子発生部は点源であることが望ましい。そのため、購入可能な線源の中でアクティブエリアができるだけ小さい (直径 5 mm) ものを選択した。減速材としては、十分にアニールした多結晶タングステン箔 (5 μm 厚) または単結晶タングステン (0.5 μm 厚) を用いることとした。減速材と輸送系を含めた低速陽電子ビームの発生効率は、約 5×10^{-5} である。

2.1.2 アインツェルレンズ

図4に示すように、陽電子ビームを集束しつつ輸送するためのアインツェルレンズは、三つの電極から構成されている。両端の電極は同電位であり、かつ中心の電極に異なる電位を与える。これにより、エネルギーはレンズ通過前後で変化せず、ビームには常に集束作用が働くことになる。本装置では、陽電子銃部と後述する静電偏向器の間に三組、静電偏向器の下流に二組の計五組のアインツェルレンズを配置した (図1)。減速材の寸法を考慮し、電極内径 D は 30 mm とした。また、中間電極の長さはこれと同じく 30 mm、そして両側電極の長さは 90 mm ($=3D$) とした。各電極間の間隔は 3 mm ($=0.1D$) である。第五アインツェルレンズでは、ビームを集束させるというよりも、回折実験に必要な平行ビームを形成する必要がある。そこで、後述するようにレンズ電極の終端に、偏向器付きコリメータを取りつけることとした。この場合、アインツェルレンズ中間電極の電場の侵入長がおおよそ D 程度であることを勘案し、コリメータの存在がアインツェルレンズの電場を乱さないようにする必要がある。そこで、第三電極長を 140mm とした。第三アインツェルレンズも同様の寸法仕様になっているが、これは後述する静電偏向器の入り口付近で平行性の高いビームを形成する必要があるためである。全てのアインツェルレンズの第一及び第三電極は接地させている。

アインツェルレンズは、低エネルギー領域で使用されるのが一般的である。そこで、本装置で使用する 10~20 keV の陽電子ビームの集束が可能であるかを計算評価した。上記のアインツェルレ

レンズは既にイオンや電子ビームの輸送に実績のある方法であり、その特性は良く調べられている。系の軸対称性から、ビーム軌道は中心軸からの距離 r と軸方向に対する偏向角 θ で指定することができる。即ち、伝送行列式を用いると、レンズ通過後のある点における (r, θ) は、レンズ通過前のある点の位置を (r_0, θ_0) として、

$$\begin{pmatrix} r \\ \theta \end{pmatrix} = (T)_{2,3} (T)_{1,2} (T)_{0,1} \begin{pmatrix} r_0 \\ \theta_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表される。 $(T)_{0,1}$ と $(T)_{2,3}$ はビームが第一および第三電極内部を通過し終える直前までの行列である。このときは電場の変化が無いのでビームは単にドリフトするだけであり、行列は以下の式で与えられる[6]。

$$(T)_{0,1} = (T)_{2,3} = \begin{pmatrix} 1 & l - \frac{d}{2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

一方、第一電極から第二電極、第二電極から第三電極へビームが通過する際は、電場によりビーム軌道が変化する。その行列は、

$$(T)_{1,2} = \begin{pmatrix} \frac{F_2 - \frac{d}{2}}{f_2} & f_1 - \frac{\left(\frac{d}{2} - F_1\right)\left(\frac{d}{2} - F_2\right)}{f_2} \\ -\frac{1}{f_2} & \frac{F_1 - \frac{d}{2}}{f_2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表される。ここで l はレンズ通過前の点から第一電極と第二電極の境界（及び第二電極と第三電極の境界からレンズ通過後の点）までの距離、 d は電極の内径である。 F は焦点距離、 f は中間焦点距離であり、それぞれビームエネルギーが一定の場合、第二電極の印加電圧の値が増すにつれて指数関数的に減少する。行列要素の値は、Harting と Read の数値計算の結果を用いて得ることができる [7]。図5(a)は、上記の伝送行列を用いて計算した陽電子ビーム軌道特性を示している。ここでアインツレルレンズに投入するビームのエネルギーは 20 keV、ビーム径は 1 mm、発散角は 0 rad、 ± 0.05 rad ($\pm 2.86^\circ$)、 ± 0.1 rad ($\pm 5.73^\circ$) とし、第一、三電極は接地させ、第二電極を 16.8 kV とした。この結果、入射位置が第一電極の入り口からから 10 mm の上流のとき、第三電極の出口から約 10 mm 下流のところまで最小ビーム径となることが確認できる。図5(b)は、レンズ通過前後のビーム位相図を示している。点線で囲まれた範囲が初期値、実線で囲まれた範囲がアインツレルレンズ通過後の位相図である。ほぼ、初期値の位相形状を維持したままビームが輸送されているが、ビーム径は初期値よりも 0.4 mm 程度大きくなっている。これは、アインツレルレンズに付随する球面収差の影響と考えられる。球面収差係数は、半径方向の軌道のずれが発散角の三乗に比例することから、約 200 mm/rad³ と見積もられる。球面収差は非常に小さいものの、上の条件において合計五式のアインツレルレンズで収差が累積すると考えると、最終径は初期値よりも 2mm 増大し、3 mm 程度になる。ビーム径が増大すると輸送条件から外れるビームが生じ、輸送効率が低下する。球面収差は取り除くことができないものであり、そのため最終的に得られるビームの質（径と発散角）は、陽電子銃部で形成されたビームの質に左右される。

上の結果は、最大 20 keV の陽電子ビームを集束・輸送するためにはアインツレルレンズへの印加電圧が 15~20 kV 程度となることを示している。このことから、実際のレンズの製作にあたっては、

間隙 3 mm の電極間にこの電圧を印加しても放電しないように配慮する必要がある。本研究開発では、絶縁材にはマシナブルセラミックスを使用した。電極端面を極力平滑に仕上げ、エージングを繰り返すことで放電を低減させた。

2. 1. 3 静電偏向器

本装置ではアインツェルレンズを用いて陽電子ビーム輸送を行なうため、エネルギー分析器としては静電偏向器を採用した。ここで、偏向器に必要な電界強度は以下のようにして求められる。静電偏向器の電極間の電界強度 V 、電荷を e 、ビーム軌道半径を r_0 、質量を m 、速度を v とすると次式の関係が得られる [8]。

$$m \frac{v^2}{r_0} = eV \quad (4)$$

さらにビームエネルギーを E とすると、

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (5)$$

と表される。(5)式を(4)式に代入すると

$$V = \frac{2eE}{r_0} \quad (6)$$

を得る。 E を [keV] 単位、 r_0 を [cm] 単位で表わすと、 $V=2E/r_0$ となる。例えば $E=20$ keV、 $r_0=10$ cm とすると $V=4$ kV/cm となる。

次に偏向に伴うビームの集束性について述べる。図6に示すように、半径方向を y 、電界と直行する方向を z とすると、電界強度 V_y は軌道半径 r_0 に対して次式で表される。

$$V_y = V \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-n} \quad (7)$$

ここで V は r_0 の電界強度である。 n の値は、電極の形状 (円筒型か同心球型か) によって決まる。円筒電極の場合、電界強度は r に反比例することが初等電磁気学[9]から知られている。従ってこの場合は $n=1$ となる。 $n=2$ は同心球型となる。この場合、偏向器内の電位は、

$$W = \frac{A}{r} + B \quad (A, B \text{ は定数}) \quad (8)$$

と表される。中心軸から偏向器の内側電極の距離を a 、外側電極の位置を b とするとそれらの位置での電位は次のようになる。

$$-W_0 = \frac{A}{a} + B \quad (8')$$

$$+W_0 = \frac{A}{b} + B \quad (8'')$$

(8')、(8'')から定数 A 、 B がもとめられ半径 r での電位は

$$W(r) = \frac{2abW_0}{a-b} \frac{1}{r} - \frac{a+b}{a-b} W_0 \quad (9)$$

となり、電界強度 V_y は、

$$\begin{aligned}
 V_y &= -\frac{\partial W}{\partial r} \\
 &= \frac{2abW_0}{a-b} \frac{1}{r^2}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

となる。これより

$$V = \frac{2abW_0}{a-b} \frac{1}{r_0^2}
 \tag{11}$$

となる。

近軸軌道方程式は、

$$y'' = -\left(\frac{\beta_y}{r_0}\right)^2 y
 \tag{12}$$

$$z'' = -\left(\frac{\beta_z}{r_0}\right)^2 z
 \tag{13}$$

と表される。ここで β_y 、 β_z はそれぞれ次式で示される。

$$\beta_y = \sqrt{3-n}
 \tag{14}$$

$$\beta_z = \sqrt{n-1}
 \tag{15}$$

また、偏向角度を θ とすると、伝送行列式は次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} y/r_0 \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_y \theta & \beta_y^{-1} \sin \beta_y \theta \\ -\beta_y \sin \beta_y \theta & \cos \beta_y \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0/r_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}
 \tag{16}$$

$$\begin{pmatrix} z/r_0 \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta_z \theta & \beta_z^{-1} \sin \beta_z \theta \\ -\beta_z \sin \beta_z \theta & \cos \beta_z \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_0/r_0 \\ z'_0 \end{pmatrix}
 \tag{17}$$

ここで、 $n=1$ の場合は $\beta_z=0$ であるため、 y 方向には集束作用があるが、 z 方向の集束作用は無い。しかし、 $n=2$ とすると(14)、(15)式より $\beta_y = \beta_z = 1$ となり(16)、(17)式はそれぞれ以下のように示され、

$$\begin{pmatrix} y/r_0 \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0/r_0 \\ y'_0 \end{pmatrix}
 \tag{16'}$$

$$\begin{pmatrix} z/r_0 \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_0/r_0 \\ z'_0 \end{pmatrix}
 \tag{17'}$$

y 方向と z 方向に同一の集束特性が得られる。その結果、静電偏向器には二方向集束性を持たせることができ、静電偏向器入口と出口でビームの歪が低減できると期待される。そこで、本装置では、 $n=2$ となる同心球型静電偏向器を採用することにした。

実際の静電偏向器の設計では、真空ラインの内径が 95.6mm で構成されているため、その陽電子ビームラインの中に収まる大きさとしなくてはならない。そこで、軌道半径を 100 mm、正負の電極

間距離を 10 mm とした。(6)式から陽電子のエネルギーが 20 keV の場合には、それぞれの電極に印加する電圧は ± 2 kV となる。ここで $n=2$ の場合、偏向角が 180° のときに、

$$\begin{pmatrix} y \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} z \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} z_0 \\ z'_0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

となり、入射前後の偏向器端からの焦点距離が同一になる色消しの条件を満たし、ビームを効率よく輸送することができる。しかし、本装置では実験室のレイアウト上、偏向角を 45° とした。偏向角 45° のときの焦点位置を図 6(a) に示す。点源 p から出たビームが偏向器を通過した後、再び焦点を結ぶ点 q の位置は Barber の法則[7]により p 、 q 、中心点 o が一直線上に乗らなければならない。

$$\theta + \varphi_p + \varphi_q = 180^\circ \quad (20)$$

ここで点源から偏向器までの距離 P と、偏向器から焦点位置までの距離 Q を同一とすると $\varphi_p = \varphi_q$ である。さらに $\theta=45^\circ$ であることから(20)式から $45^\circ + 2\varphi_p = 180^\circ$ となり、 $\varphi_p = 67.5^\circ$ が得られる。また $P=Q=r_0 \tan \varphi_p$ であるため $P=Q=241$ mm となるが、装置の構成上この距離は現実的ではない。さらに、本装置において偏向器出口に焦点があることが望ましいが、その様にすると 45° の偏向角を満足することが困難になる。しかしながら、この事情は理想的に点源とする場合であって、有限の大きさを持つ陽電子線源に適用することは實際上意味のあることではない。実際には有限の径のビームを集束させながら偏向器に入射させることが必要である。そのためビームを集束させながら偏向器に入射させるということを検討した。入射前後にビームが移動するドリフト空間を想定すると(15')式は、

$$\begin{pmatrix} y/r_0 \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Q/r_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & P/r_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0/r_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

となる。初期値として、 $0 \text{ mm} < y_0 \leq 2 \text{ mm}$ の範囲で $y'_0 = -0.8^\circ$ 、 $-2 \text{ mm} < y_0 \leq 0 \text{ mm}$ の範囲で $y'_0 = 0.8^\circ$ を与え、偏向器出口と第四アインツェルレンズの中間地点を Q として、 $Q=11$ mm における y の最小値を求めた。その結果 $P=60$ mm という本装置で実現可能な距離において焦点を結び、ビーム径を約 ± 0.3 mm とできることが確認できた。即ち、第三アインツェルレンズを通過したビームを平行に近い状態とすることで効率の良いビーム輸送が可能となる。

静電偏向器の電場の浸出しが陽電子の軌道に悪影響を与えることがないように、静電偏向器の入口と出口に、高さ 10 mm、幅 5 mm のスリットを持つ電場補正板を設けた。図 6(b) は SIMION 計算コードを用いて計算した、静電偏向器によって発生する電場分布を示している。電場補正板を偏向器入出口につけることで、偏向器内の電場がよく終端されていることがわかる。静電偏向器の製作にあたっては、電極表面の微小な凹凸によって電場が不要にゆがむことを防ぐために、電極表面を鏡面仕上げとした。

次に偏向器の分解能について述べる。既に計算しているように、ビームエネルギーを 20 keV とすると、 ± 2 kV の電圧を二つの電極に与えることで、ビームは軌道半径 100 mm をもって偏向される。エネルギーが 20 keV からずれたビームはこの軌道半径からずれるが、偏向器出口スリット位置でのビーム位相がスリットの ± 2.5 mm のアクセプタンスに入っていると、偏向器を通過することになる。偏向器正面から 241 mm の地点を点源としてビームに発散角を持たせ、偏向器に向かって入射させる。

発散角 0.8° 以下のビームは入口スリットで切られることなく通過する。偏向器に入射したビームはエネルギー約 $20 \pm 4 \text{ keV}$ の範囲において出口スリットを通過する。以上のことを、SIMION 計算コードを用いて確認した。即ち、本偏向器の分解能は約 $\pm 20\%$ であると考えられ、非熱化陽電子の大部分は、このエネルギー分析器で除去されることが期待できる。エネルギー幅は電源リップル、長距離のビーム輸送による正規軌道からの逸脱によっても支配される。従って、最終的に得られるビームエネルギー幅は実機を用いた試験結果を待たなければならない。

2.1.4 ビーム軌道シミュレーション

以上、陽電子銃部、アインツェルレンズ、及び静電偏向器について個別に特性評価を行った。そこで、全系を含めた軌道シミュレーションを行った。図7(a)は SIMION 計算コードを用いたビーム軌道である。初期値としてビーム径を 4 mm 、発散角を $\pm 1^\circ$ として計算した。第五アインツェルレンズには平行ビームを形成させるために第四アインツェルレンズよりも低い電圧を印加させている。図7(b)は第五アインツェルレンズ出口における陽電子ビームの位相図を示している。第五アインツェルレンズの集束を意図的に弱めることで、ビーム径は約 7 mm と初期値よりも大きくなった。しかし、発散角はビーム径が 2 mm 付近までの範囲で初期値よりも小さな $\pm 0.1^\circ$ 程度になっている。また、 3 mm 以上では発散角が増大する。RHEPD 実験では、小径で高平行なビームが必要である。そのため次章で述べるように、第五アインツェルレンズ出口に位相図の中心領域にアクセプタンスを持つコリメータを取り付けることで、RHEPD 実験に適したビームを切り出すことができる。

2.1.5 偏向器付きコリメータ

ビームエネルギー、発散角、及びビーム径は、リュビルの定理 $r \sin \theta \sqrt{E} = \text{constant}$ に示されるような関係にある。即ち、エネルギーが不変であればビーム径が小さいほど発散角が増大する。回折実験では、発散角と径を極力低減する必要がある。従来、小径陽電子ビームを得る方法としては、陽電子ビームを再び減速材に投入し再放出させる輝度増強法[10]が用いられていた。しかし、この方法では装置が複雑化する上に最終的に得られる陽電子個数の大幅な低下を免れることができない。そこで、本研究開発では、ピンホールコリメータを用いて中心軸近傍のビームを切出す方法を提案することとした。中心軸近傍のビームは近軸ビームと呼ばれており、エネルギー幅がゼロであればガウス結像条件を完全に満たすという性質がある。従って、上記の方法により発散角とビーム径が小さいビームを形成することができる他、シャープな回折スポットが得られるようになると考えられる。本コリメータのアクセプタンスは、径 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 、角度 $\pm 1^\circ$ の範囲となる。図7のビーム位相図にアクセプタンス図を重ねることで、どのような特性のビームが切り出されるかが分かる。

本研究開発では、図8に示すようなピンホールコリメータを設計した。コリメータ本体と静電偏向器は共に SUS316L 製であり、静電偏向器はマシンブルセラミックスで保持し、コリメータと電氣的に絶縁してある。また、水平に置かれた試料に対してある程度の入射視射角をもってビームを照射させるために、コリメータ直前に平行平板から構成される静電偏向器を設けた。ピンホールコリメータには 4.4° 下向きの角度をつけ、長さを 55 mm とした。陽電子ビームエネルギーが 20 keV のとき、この静電偏向器を用いてコリメータにビームを通過させるために必要な印加電圧 V_d は次式から求められる[11]。

$$V_d = \pm \frac{aE \tan \theta}{b} \quad (22)$$

a および b はそれぞれ上下の電極間距離(10 mm)、電極の長さ(10 mm)であり、 θ は偏向角である。(23)式にそれぞれ数値を代入すると、 $V_d = \pm 1.54 \text{ kV}$ となる。

2.1.6 電源系統

図9は、上述した陽電子銃、アインツェルレンズ、静電偏向器及び偏向器付コリメータを操作するための電源系統図である。陽電子銃は全体をグラウンドから 19.2 kV 浮かし、さらに線源と減速材を 0.8 kV、引き出しグリッドを 0.4 kV それぞれ印加することで加速電圧を 20 kV、引き出し電圧 19.6 kV とした。ウェネルト電極およびソア管は分割抵抗を用いて 19.6~19.2 kV の間で調整できるようにした。アノードは 19.2 kV である。第一から第五アインツェルレンズは 10~15 kV をそれぞれの第二電極に印加し、ビーム調整を行なう。第一、三電極は接地してある。ただし第五アインツェルレンズは陽電子ビームの発散角を小さくするために他のレンズに比べ印加電圧を小さくする必要がある。静電偏向器には内側の電極に -2 kV、外側の電極に 2 kV 印加することで 20 keV の陽電子を偏向させる。入出口にある電場補正版は接地させてある。偏向器付コリメータの偏向電極には上下にそれぞれ 1.5 kV、-1.5 kV 印加することで、4.4° 下向きに偏向させ約 60 mm 先の試料に陽電子ビームを照射させる。

2.2 陽電子回折観測システムの構築

RHEPD 実験を行なうにあたり、従来の観測方法には以下に示すような問題点があった。

- ①積算画像データのダイナミックレンジ(約 3.3×10^4)が狭い。そのため、長時間積算時において十分な統計精度を得る前に画像データが部分的に飽和してしまう可能性が高い。
 - ②ロッキング曲線を得るための入射視斜角度制御が自動化されていない。
- また、入射視斜角度ごとの積算画像から手動でスポット強度を求めてロッキング曲線を得ていたが、それでは解析効率も悪く、人為的誤差が含まれる可能性があった。そこで、上の問題点を解決するために Windows 上で動作する画像積算プログラムとマニピュレータの角度制御プログラムを一体化させた陽電子回折観測システムを製作した。入射視斜角度ごとの積算画像を読み込み、それぞれのスポット強度を簡潔に求めることができるプログラムを製作した。次にそれらの詳細について述べる。

本装置で得られる RHEPD の回折パターンは、陽電子ビームの強度が低いために、その場観測することはできない。そこで、マイクロチャンネルプレートアッセンブリ(MCPA)上に現われる回折パターンの輝点を CCD カメラで観測し、その画像データを長時間積分することで解析可能な明瞭な回折パターンを得ることとした。この手法は基本的には従来の方法と大差ないが、図10(a)、(b)で示すように、本システムでは CCD カメラからの信号を画像キャプチャーボードでパソコンに取り込み、積算処理を行なう。マニピュレータの制御もパソコンで可能とさせることとした。

CCD カメラは浜松ホトニクス製白黒 CCD カメラ C5985 を、画像キャプチャーボードはマイクロテクニカ製 MTPCI-DM を使用した。CCD カメラからは毎秒 30 フレームの静止画像が出力されている。

その静止画像をパソコンによって一枚ずつ取り込み、それらを積算して回折パターンの明瞭化を行なう。そのために CCD カメラから出力されたアナログデータは、パソコンに組み込まれた画像キャプチャボードによって 8 bit のデジタルデータに A/D 変換される。その後デジタルデータは画像キャプチャボードから PCI バスによってダイレクトメモリアクセス(DMA)方式で直接パソコンのメモリに転送され、あらかじめ確保しておいた領域に一時保存される。ここで、もし確保したメモリ領域内で画像の一時保存および画像の積算の両方を行なった場合、一時保存と積算を同時に行なうことはできない。そのため画像を積算しているときに転送されたデジタルデータは、メモリに保存されるのではなく、その結果画像の取りこぼしが発生してしまう。これを防ぐために、図10(b)に示すように画像を一時保存するメモリ領域と画像積算用のメモリ領域を別々に確保することとした。メモリ領域を別々に確保することで画像は次の様に処理される。最初にパソコンに取り込まれた画像は一時保存用メモリ領域に転送された後、すぐに積算用メモリ領域に移動される。二枚目に取りこまれた画像も同じ経路で積算用メモリ領域に移動され、そこで画像データの積算を行なう。積算中に画像データが転送された場合、その画像データは一時保存用のメモリ領域に保存され、積算が終了するのを待つ。積算が終了すると、待ちの状態にある画像データは積算用メモリ領域に移動され積算される。もしパソコンの積算処理能力が十分でない場合は、一時保存用メモリ領域を複数個用意すれば画像データをその分待ちの状態にでき、取りこぼしを防ぐことができる。今回は一時保存メモリ領域を二つ用意した。そうすることで取り込み画像の大きさにもよるが、ほぼ取りこぼしなく積算処理できた。

また、画像データは 8bit で A/D 変換されているが、積算後のデータも 8bit のままでは 256 階調しかなくダイナミックレンジとしては不十分である。そこで積算後のデータをビットマップ等の画像データとしてではなく、単なる数値データとしてテキスト形式の 32 bit データとして保存できるようにした。この値はダイナミックレンジとしては約 4.3×10^9 であり、仮に数日に渡る連続積算を必要とする観測をしたとしても積算データは飽和することがない。

実際の陽電子回折実験では、陽電子ビームの入射視射角の関数として回折強度(ロックンク曲線)を測定する必要がある。そのためにマニピュレータに試料を取りつけ、試料のビームに対する煽り角を調整している。そこで、これをパソコンで制御するために、マニピュレータに煽り角調節用の 0.01° の分解能を持つステップモータを取り付け、自動的に回折強度の角度依存性を計測できる仕組みを構築した。マニピュレータの角度制御は図 10(a) のように RS232C によってパソコンと通信可能なパルスモーターコントローラ(神津精機社製、PMC-1S-4M 型)を介して行なうこととした。

上記に示した方法で画像積算およびマニピュレータの動作が可能なように Visual C++ でソフトウェアを作成した。ソフトウェアの GUI 画面を図 11 に示す。本プログラムは入射視斜角度ごとの RHEPD 強度を、画像積算枚数および終了角度、変更角度を入力することで自動観測を可能とした。具体的にはある入射視斜角度で設定された枚数の画像積算が終了すると、その時の角度をファイルネームとしてパソコンのハードディスクに保存される。その後設定した変更角度分だけ試料の角度を変え、その入射視斜角度での再び積算を行なう。この一連の動作を、設定した終了角度まで行なう。また、積算画像をパソコンの画面上で、リアルタイムで見ることが可能であるが、積算画像は 256 階調として画面表示される。そのため、積算後のスポット強度が 256 以上になるとスポットは完全に白色となり画面上ではそれ以上の画像変化を見ることができない。そこで、強度の低いところから 256 階調を 1 段として複数段減算することを可能とした。例えば強度が 700 となった場合は 2 段減算させ、強度が擬似的に 188 として表示されることとなる。

ロッキング曲線を得るためには多数枚の画像データごとのスポット強度を求めなければならない。本 RHEPD 装置の場合は得られるスポットの強度が弱いため、ピーク強度を用いて解析を行なうと、統計誤差が大きくなってしまふ可能性がある。そのため、任意の領域における積分強度をスポット強度として解析できるようにした。しかし、従来の方法では解析誤差が生ずる恐れがあり、それを解消するためにスポット強度解析プログラムを Visual C++を用いて製作した(別添)。

RHEPD スポットが MCPA 上に現われる位置は入射視斜角度に比例して上昇する。そのため、最低2つの入射視斜角度におけるスポット中心位置を実測することで、他の入射視斜角度におけるスポットの現われる位置を確定することができる。その確定した中心位置から x, y 方向の任意の領域を積分させることでスポット強度を得る。この手法を用いて一連の観測による積算画像を読み込み、スポット強度を計算しその結果を出力させるプログラムを製作した。具体的には入力データとして上述の RHEPD 自動観測によって生成されたファイルネームに入射視斜角度の情報を持つデータファイルを読み込ませ、二種類の入射視斜角度に対するスポット中心及び変更角度を入力する。その結果、入射視斜角度ごとのスポット強度をテキスト形式で出力させる。出力したデータをグラフ作成ソフトで読み込むことでロッキング曲線を示すグラフを得ることができる。

3. 装置の特性試験

本章では、上の装置を用いて発生させた陽電子ビームの特性評価について述べる。また、水素終端処理シリコン表面を試料として RHEPD 実験を行なった結果について述べる。

3.1 陽電子ビーム特性評価

まず、静電偏向器とアインツェルレンズによる陽電子ビーム像を観察した結果について述べる。ビーム観察はビームライン最下流にあるチャンバーの中心に MCPA を設置し、蛍光面に映る像を CCD カメラで撮影して行なった。図12に各種の条件で観測したビーム像を示す。(a)及び(b)は、最終アインツェルレンズにコリメータを付けなかったときのビーム像である。(a)は、第五アインツェルレンズでビームを発散させたときの像であり、(b)は集束させたときの像である。これより、陽電子ビーム中心位置は一定であることがわかる。これは陽電子ビームの中心軸とアインツェルレンズの中心軸が一致しており、陽電子ビームが理想的な軌道を描いて輸送されていることを示している。また、(c)はアインツェルレンズにコリメータを取りつけたときのビーム像である。コリメータに付属している静電偏向器によってビームが下方に偏向され、径が約 1 mm になっていることが分かる。また、チャンパー中心位置を基準点(位置 A)とし、そこから 66 mm 後方(位置 B)に MCPA を移動させ、ビーム径の広がり測定した。その結果位置 A では径が 1 mmであったビームが位置 B において 1.2 mm であった。これより、ビーム発散角は $\arctan(0.1/66)=0.087^\circ$ となる。ビーム強度は初期の研究で得られている値とほぼ同等であることが確認された。これから、陽電子強度は $2 \times 10^3 \text{ e}^+/\text{s}$ 程度と見積もられる。

陽電子ビームの品質を表す指標としては、加速電圧当りのビーム輝度を用いるのが便利である。370MBq の線源強度を持つ本装置で得られたビームの輝度は、 $5.5 \times 10^6 \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ rad}^{-2} \text{ V}^{-1}$ となる。

ちなみにブランダイス大グループの同型の陽電子銃部を持つ線源強度 3.7GBqの装置において、輝度増強技術を用いて得たビームの輝度は $1.3 \times 10^8 \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ rad}^{-2} \text{ V}^{-1}$ であった[12]。ブランダイス大のグループが輝度増強を使用した背景には、数 keV の低エネルギー領域で陽電子マイクロプロービングや回折実験を行なう目的があった。即ち、低エネルギー領域ではリュビルの定理による制約のために、発散角やビーム径を十分に低減することができないため、輝度増強を行なう必要があった。本研究開発では、RHEPD 実験が目的であり、加速によりビーム位相体積を低減することができる。そのため、単にコレメータによって近軸ビームを切り出すことで高輝度ビームを得ることを試みた。その結果、ブランダイス大グループの装置の線源が、本装置の 10 倍の強度を持っていることもあり、それに比べ輝度は劣るものの、輝度増強なしでも発散角の小さな高品質なビームを得ることができた。

次にコレメータを使用して、ビームエネルギー幅の測定を行った。陽電子ビームは(22)式から求められた電圧を、電極に印加したときに 4.4° 偏向される。しかし、実際にはコレメータ径が 1 mm でありビーム径がこれよりも大きいために、(22)式から得られる電圧よりも低い電圧で偏向された陽電子ビームもコレメータのアクセプタンスに入ることになり、ビームとして観測される。即ち、ビームがコレメータを通過する時の最も浅い角度 α (図13(a)参照)は、

$$\tan \alpha = \frac{l \tan \theta - \frac{r}{\cos \theta}}{l} \quad (23)$$

となる。 θ 及び r は、それぞれコレメータの水平軸からの角度と径、 l はコレメータの全長である。(23)式に $\theta=4.4^\circ$ 、 $r=1 \text{ mm}$ 、 $l=55 \text{ mm}$ を代入すると、 $\tan \alpha=0.059$ となる。ビームエネルギー20 keVの時に、この角度を(22)式に代入することで求められる電圧は1180Vとなる。即ち、(22)式で求めた電圧よりも359 Vだけ低い電圧を閾値としてビームがコレメータを通過するようになる。もしビームにエネルギー幅があると、この閾値電圧が低電圧側にずれる。従って、ビーム強度をコレメータ直前の偏向器電圧の関数として測定することで、閾値電圧のずれ量からビームエネルギー幅を評価することができる。図13(b)はその測定の実測結果を示している。横軸の電圧変化量はビーム強度が最大となったところを基準とした相対値である。陽電子ビームは基準電圧よりも360 V低いところから立ち上がり、計算から期待されるものとほぼ一致している。ここで、20 keVの陽電子ビームに対してエネルギー幅が1%であったとすると、陽電子ビームが偏向される電圧の閾値は359 Vよりも12V低い値を示すこととなる。今回の観測においては閾値のずれは1 V以内であり、この改造において得られた陽電子ビームのエネルギー幅は0.1%程度であるといえる。この値は電源のリップル値0.05%に近い。さらに正確にエネルギー幅を決定するためには、より詳しい実験を行なう必要があるが、静電偏向器設置前のエネルギー幅が10%程度であったことと比べると、大きく改善されていることが確認される。表1に本装置で得られた陽電子ビームの特性をまとめた。

ビーム品質を表す指標として電圧当りの輝度について述べたが、回折実験では可干渉距離が重要である。表面平行方向の可干渉距離は、 $24.5E^{1/2}/\Delta E$ (Å)で与えられる。ここで、 ΔE はエネルギー幅である。本ビームのエネルギー幅は20 eVであるので、可干渉距離は約170 Åである。これはSi-7×7などの大きな表面超構造を観察する上でも十分な値である。

3.2 シリコン表面を用いた陽電子回折の観測

上記の特性を持つ陽電子ビームを用いて水素終端処理を施した Si(111)表面に対する RHEPD 実験を行った。図14(a)は、入射方向[11-2]、入射視斜角 4.0° で得られた回折パターンを示している。なお、蓄積時間は約8時間であった。図の下方に見られるスポットは試料表面で回折に寄与しない陽電子ビーム(ダイレクトスポット)である。中心に見られる最も明るい輝点はゼロ次ラウエ帯である。ゼロ次ラウエ帯は当初の装置でも観測されていたが、ここではさらにその周辺領域に強度の弱い8個の輝点(一次ラウエ帯)が新たに観測された。一次ラウエ帯は従来の研究では観測されておらず、ビームの特性が向上していることを意味している。即ち、静電偏向器を加えたことによってビームエネルギー幅が小さくなり、可干渉距離が増加した効果、及び、線源からのガンマ線によるノイズが低減したことにより、一次ラウエ帯が観測できたといえることができる。図14(b)は画像データから求めた水素終端処理をした Si(111)表面のロックング曲線である。一次ブラッグピークから五次ブラッグピークが見られる。同図に示した動力学計算との比較からも分かるように、全反射領域には水素終端の効果であると考えられるディップ構造も見ることができる [3]。

以上のように、今回開発した陽電子ビームと観測システムを用いることで、初期の装置に比べ高精度な RHEPD 実験が行なえることが確認できた。

4. まとめ

当初開発した静電輸送陽電子ビームラインを元にして、静電エネルギー分析器を付加した新しい陽電子ビームラインを製作し、ビーム品質の向上を図った。その結果、RHEPD 実験に適した小径で発散角の小さいビームを実現することができた。ビームの静電加速とコリメーションを行なうことで、従来の輝度増強技術を用いることなく、高品質ビームが得られた。市販の画像キャプチャーボードを用い、そのデータ転送方式を修正することで、高ダイナミックレンジ及び自動計測を可能とする陽電子回折観測システムを構築した。その結果、Si(111)に対してこれまで得られていなかった一次ラウエ帯を含む回折パターンの観測に世界で初めて成功した。今後本装置を用いて、表面吸着構造、表面デバイ温度そして表面ポテンシャルの研究を実施する計画である。

本研究開発において、静電レンズを用いる方法によって陽電子ビームを数メートル輸送できることが分かった。これは、加速器を用いて陽電子ビームを発生する際に、遮蔽壁を介して陽電子発生室から実験室へ陽電子ビーム輸送する方式として利用することができる。一方、磁界レンズを使用する方法では、装置の小型化を図ることができると考えられるので、汎用の実験機器との複合利用を行なう上で有利であると考えられる。今後、装置をより小型化するために磁界レンズを用いた高輝度陽電子ビームの研究開発も実施する予定である。

謝辞

本報告書を執筆するにあたって的確なご指導と協力を頂きました材料開発部極限環境材料研究グループ 神谷様に感謝いたします。本装置の製作は、佐野肇氏(現株式会社日揮)、荒井秀幸氏(現株式会社石川島播磨重工業)、及び藤森公平氏(現株式会社三菱重工業)による初期の研究開発を引き継ぐ形で行われました。また、本研究開発が文部科学省原子力基盤クロスオーバー研究の一環として進められたことを付記いたします。

参考文献

- [1] A. Ichimiya, *Solid State Phenom.* **28/29** (1992/93) 143.
- [2] A. Kawasuso, S. Okada, *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998)2695-2698
- [3] A. Kawasuso, S. Okada, and A. Ichimiya, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **171** (2000) 219-230
- [4] K. F. Canter, P. H. Lippel, W. S. Crane, A. P. Mills, Jr.: *Positron Studies of Solids, Surfaces, and Atoms*, eds. A. P. Mills, Jr., W. S. Crane and K. F. Canter (World Scientific, Singapore, 1986) p. 199.
- [5] 藤森 公平, 私信
- [6] K. F. Canter, P. H. Lippel and D. T. Nguyen : *Positron Studies of Solids, Surfaces, and Atoms*, eds. A. P. Mills, Jr., W. S. Crane and K. F. Canter (World Scientific, Singapore, 1986) p. 207.
- [7] *Electrostatic Lenses*, E. Harting and F. H. Read (Elsevier, Amsterdam, 1976).
- [8] 裏 克巳著 : 電子・イオンビーム光学 共立出版 (1994).
- [9] 田中 勝廣著 : 電磁気学計算法 日本理工出版会 (1989)
- [10] A. P. Mills, Jr., *Appl. Phys.* **23**, 189-191 (1980)
- [11] 高木 俊宜著 電子・イオンビーム工学 電気学会 (1995)
- [12] G. R. Brandes, K. F. Canter, T. N. Horsky, P. H. Lippel and A. P. Mills Jr, *J. Phys. Condens. Matter* **1** (1989) SA135-SA143.

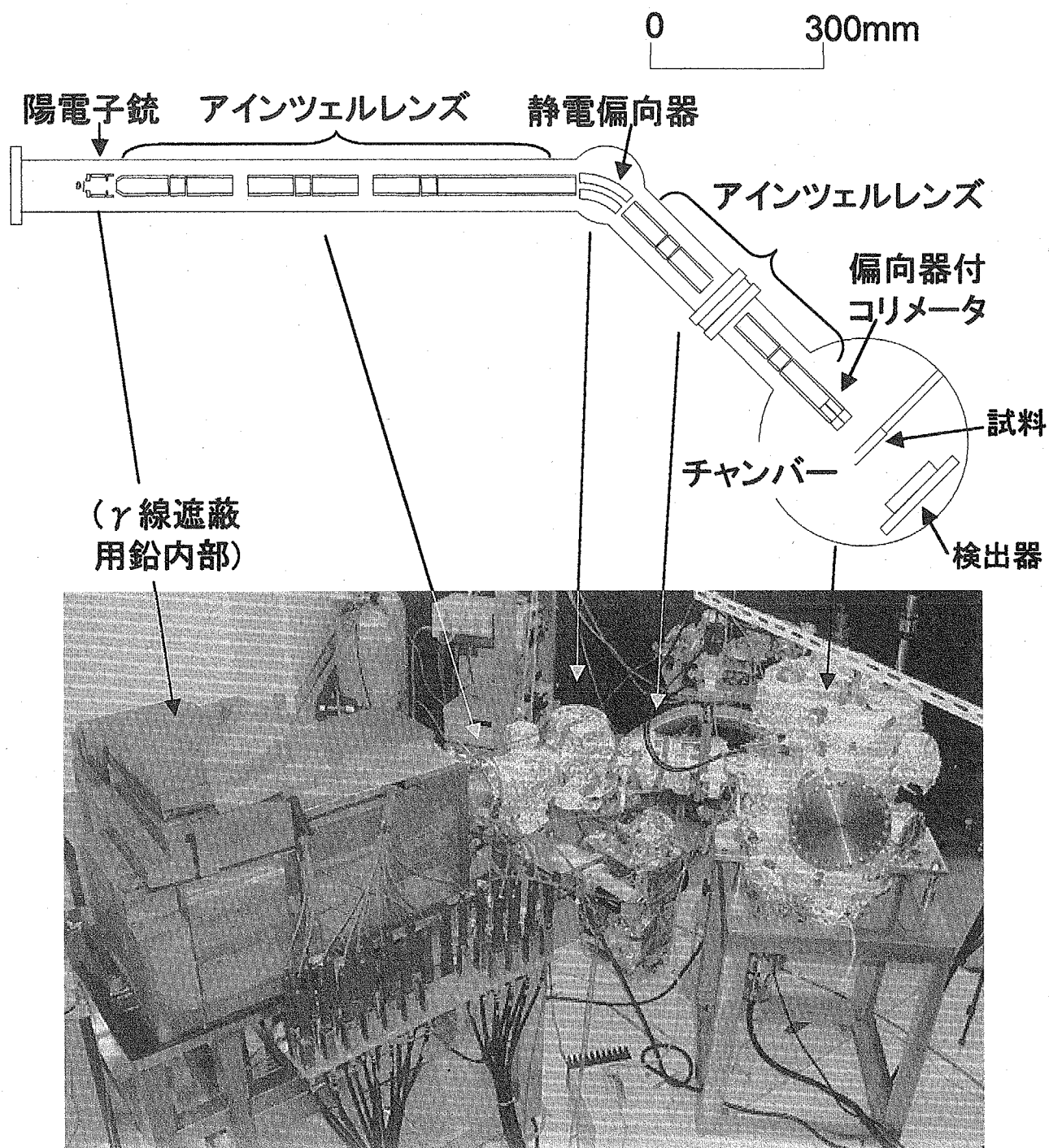


図1 反射高速陽電子回折(RHEPD)装置の概略図及び実物の写真。陽電子銃、上流側3組のアイツェルレンズ、45°静電偏向器、下流側2組のアイツェルレンズ、偏向器付きコリメータから構成されている。実際の装置では陽電子線源からのγ線を遮蔽するために、写真に示すように陽電子銃を鉛で囲んでいる。

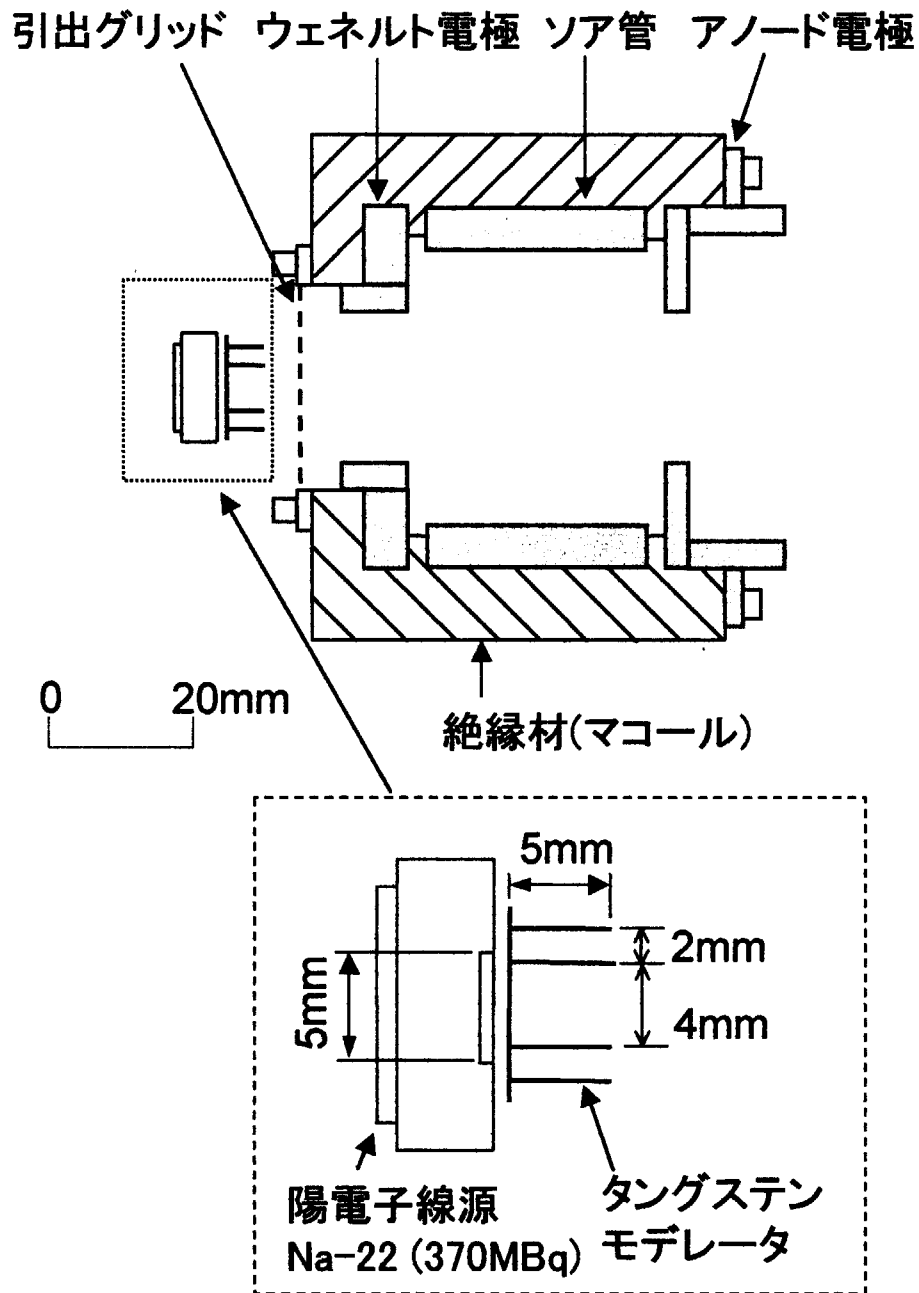


図 2 陽電子銃の概略図。強度 370MBq の Na-22 を陽電子線源として使用している。陽電子を熱化させるための減速材、引出グリッド、ウェネルト電極、ソア管、アノード電極から構成されている。点線内は線源部拡大図である。低速陽電子を効率良く引き出すためにタングステン減速材は井桁状に組んでいる。

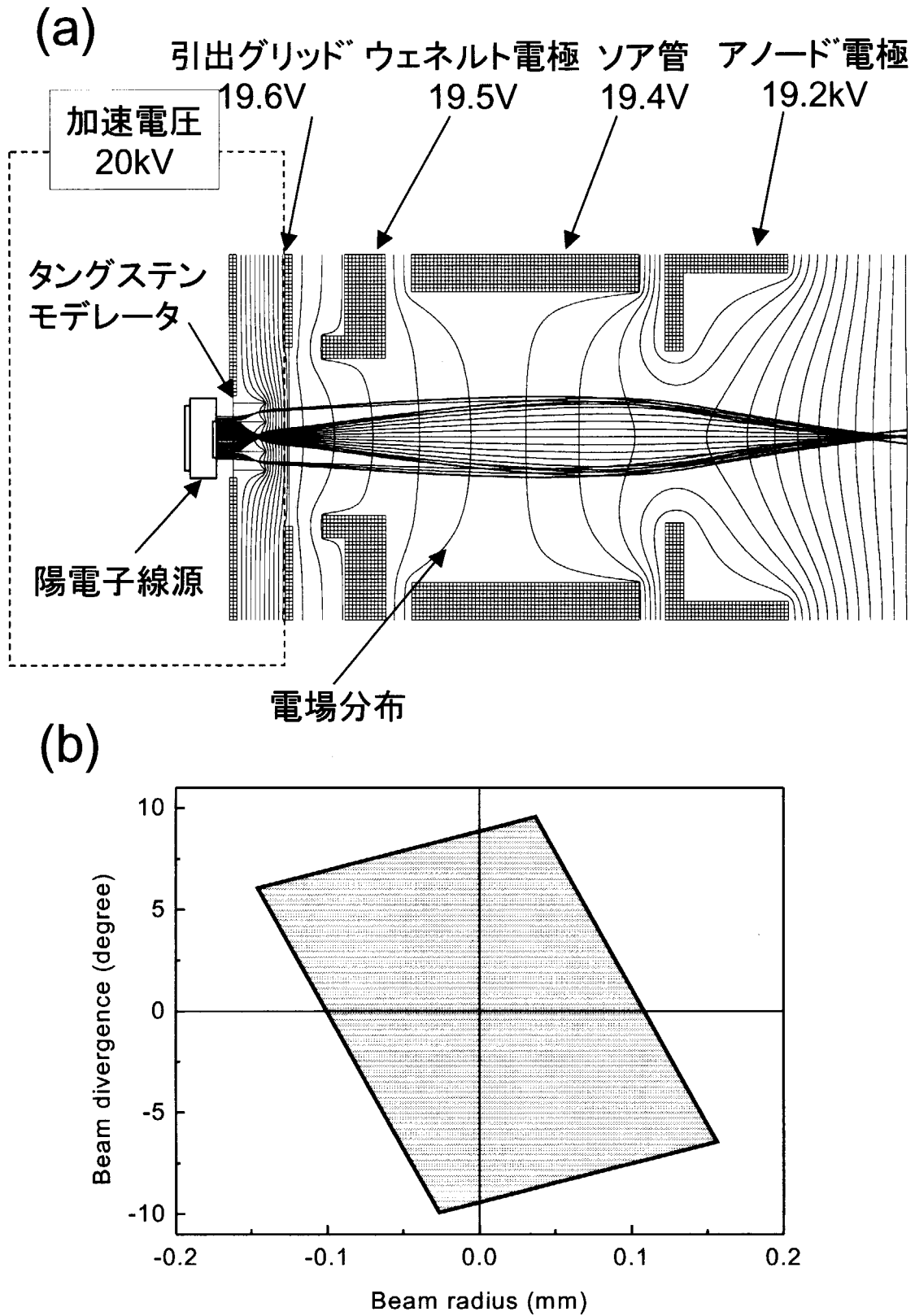


図 3 (a)SIMION 計算コードを用いた陽電子銃部におけるビーム軌道シミュレーションの結果。(b) アノード電極出射直後の集束点におけるビーム位相図。減速材出射後のビーム径、発散角を各々4mm、 $\pm 1.0^\circ$ としている。

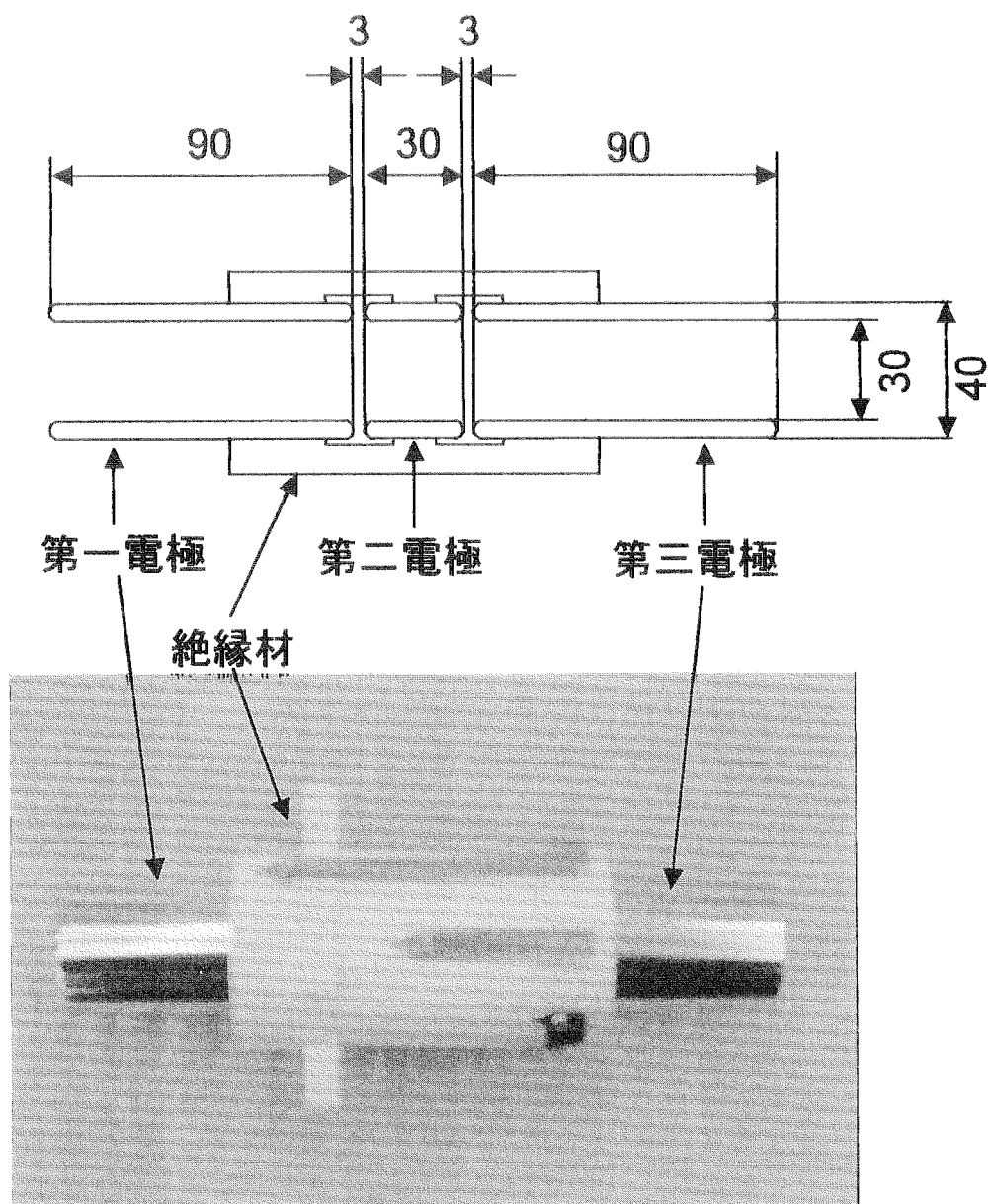


図4 アインツェルレンズの概略図及び実物の写真。電極はSUS316L製、絶縁材はマシンブルセラミックス製である。

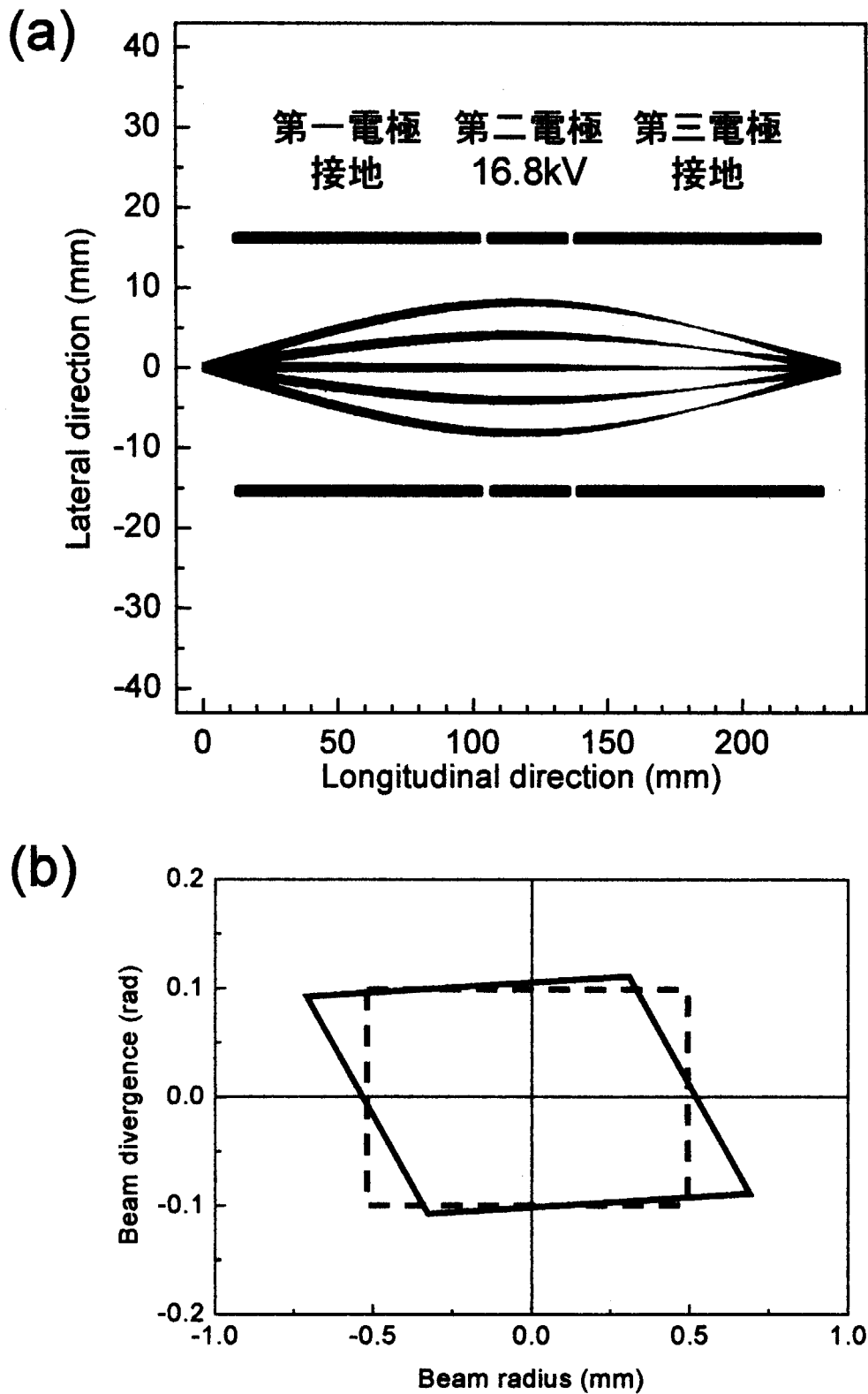


図 5 (a) 伝送行列を用いた 20keV 陽電子ビームの軌道シミュレーション。初期値としてビーム径を 1.0mm、発散角を最大 $\pm 0.1\text{rad}$ ($\pm 5.73^\circ$) と設定している。(b) アインツェルレンズを通過したビームの位相図。実線はレンズ通過後、点線はレンズ通過前に相当する。

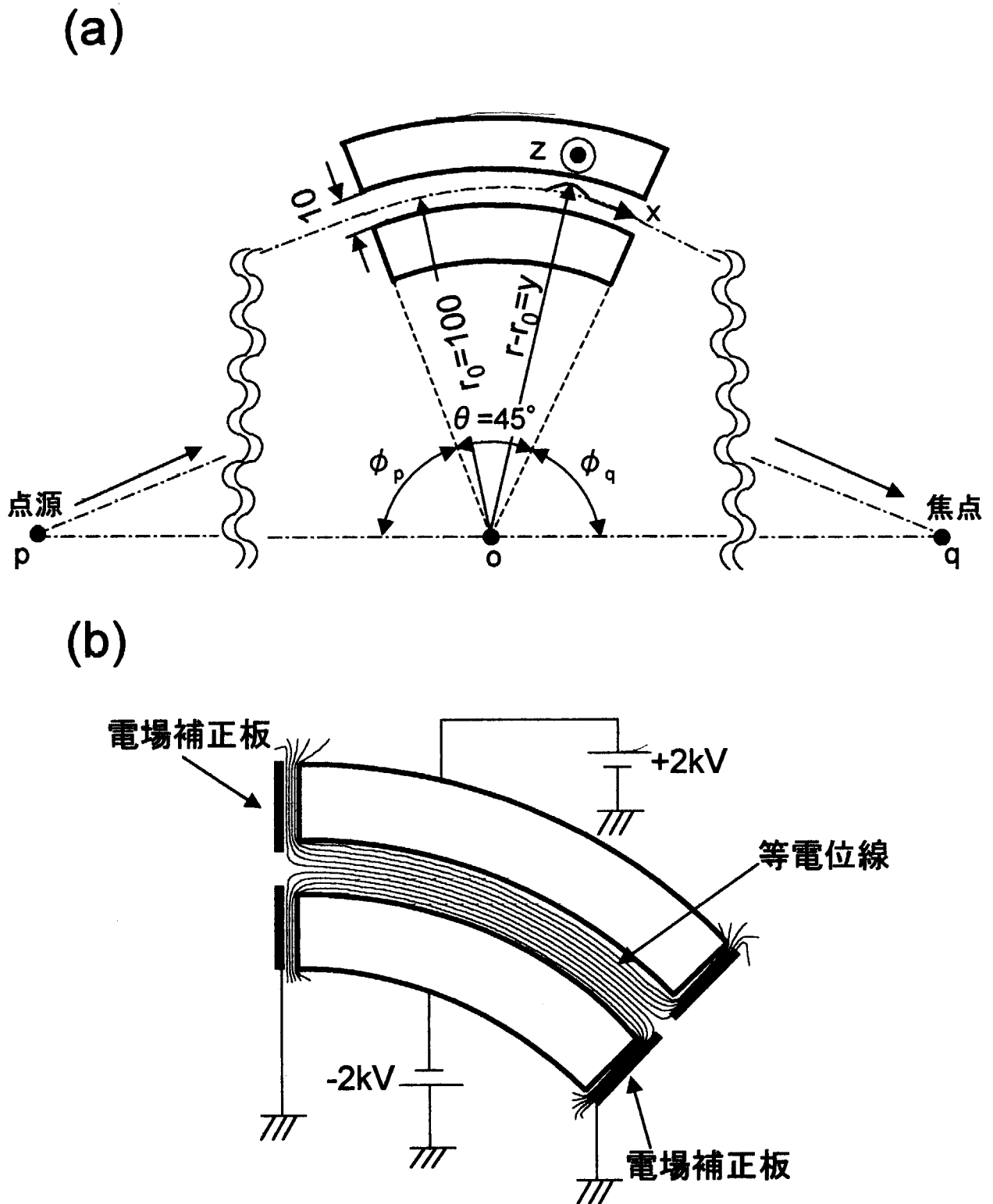


図 6 (a)45°静電偏向器の座標の定義。(b)45°静電偏向器の焦点位置を示す図。(b)静電偏向器で発生する電場分布のシミュレーション。等電位線の間隔は 400V である。

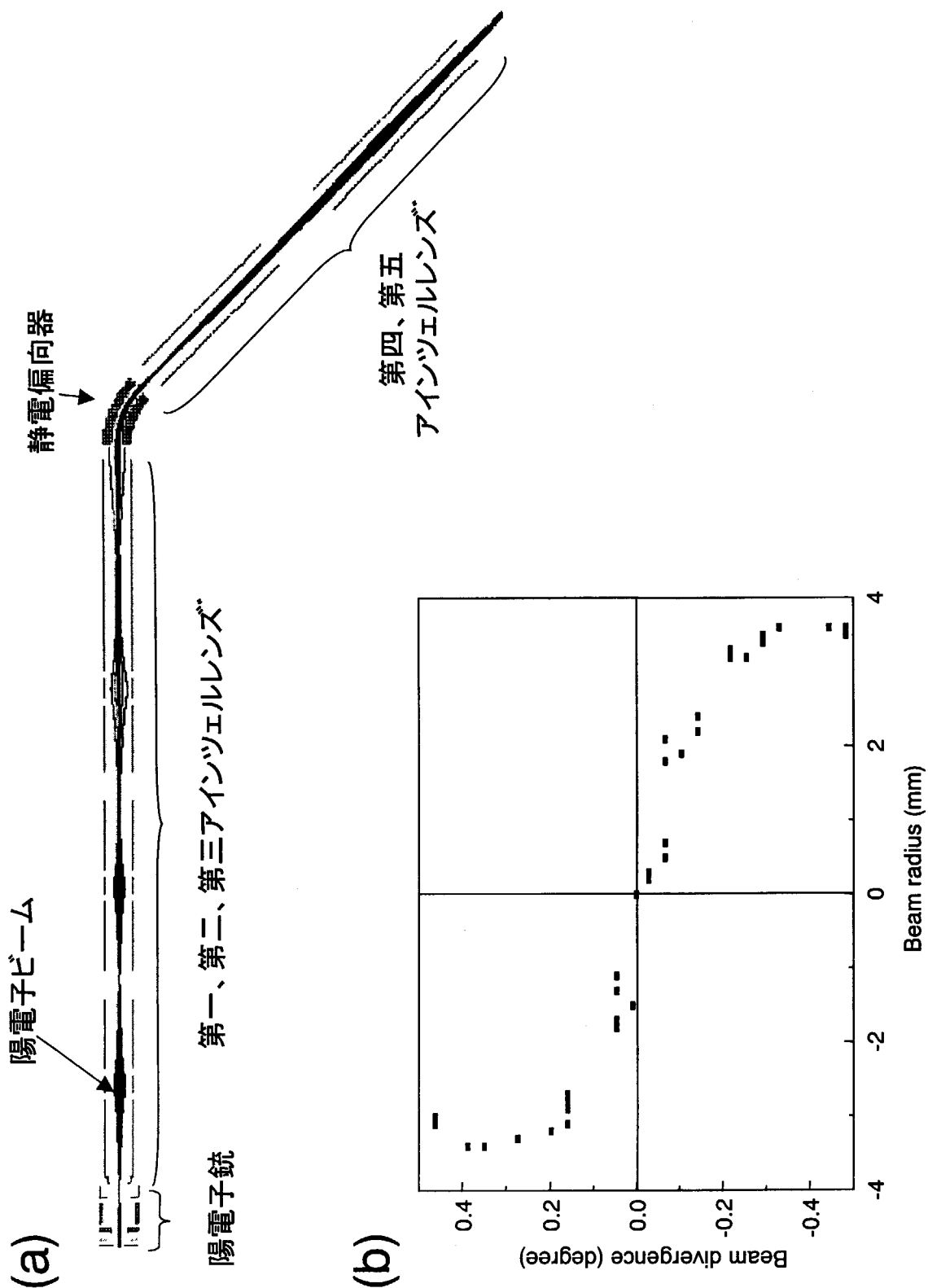


図7 (a)SIMION 計算コードを用いた装置全体におけるビーム軌道シミュレーションの結果。減速材出射後のビーム径、発散角を各々4mm、 $\pm 1.0^\circ$ としている。(b) 第五アイソツェルレンズ出射直後におけるビーム位相図。

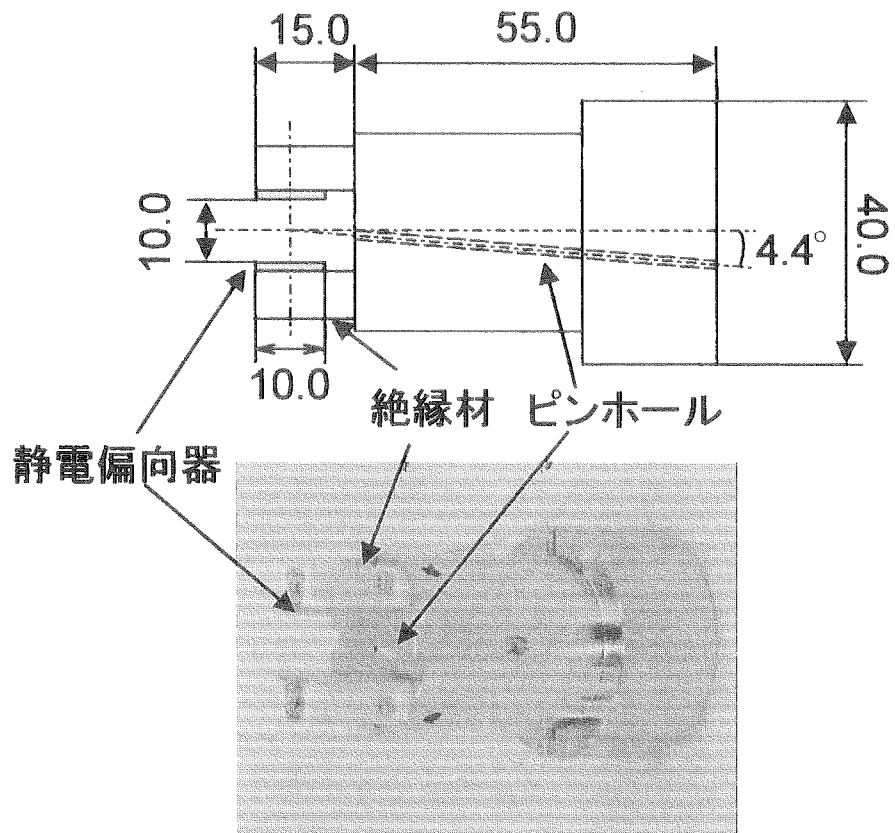


図 8 偏向器付コリメータの概略図及び実物の写真。

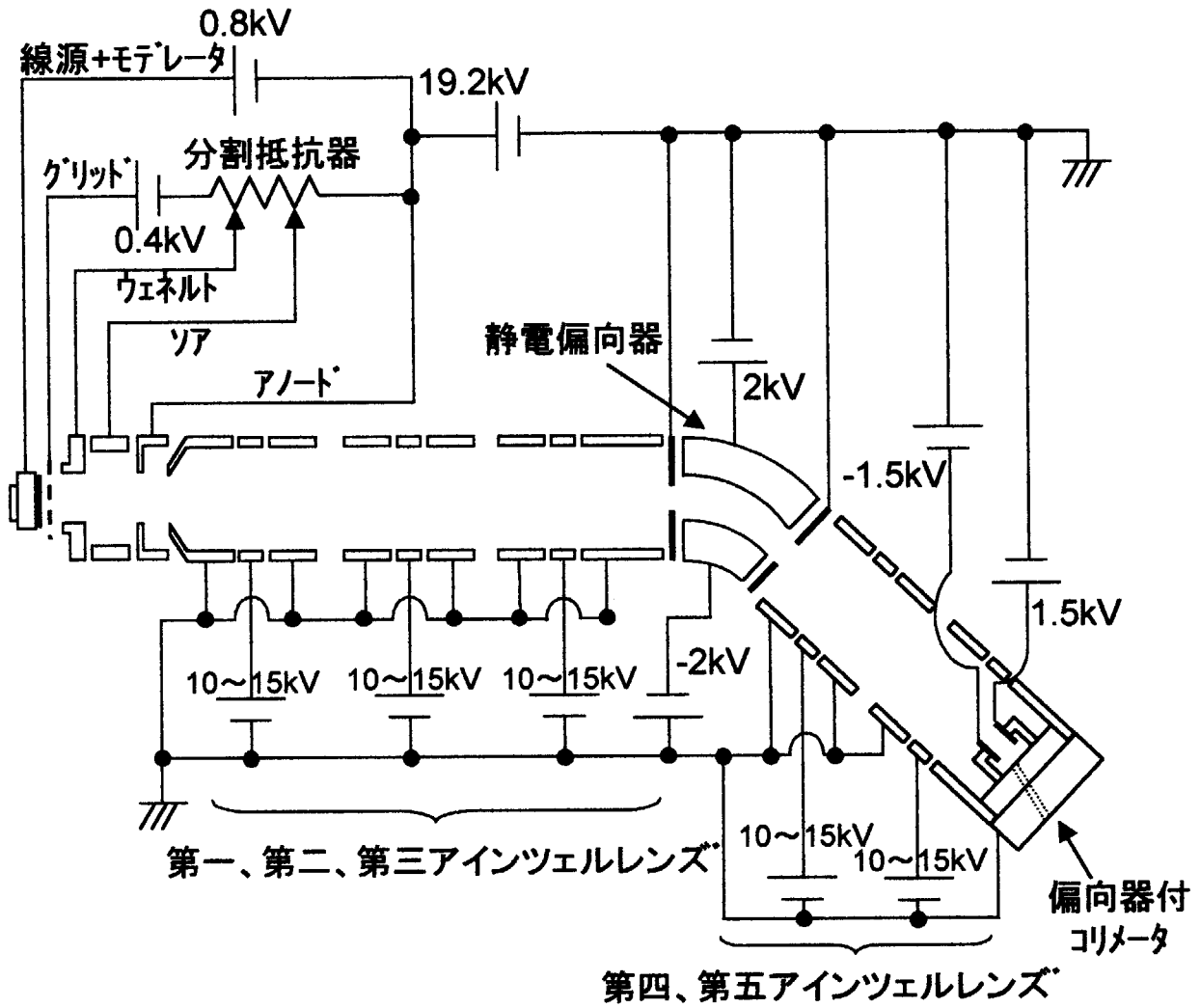


図9 電源系統図。

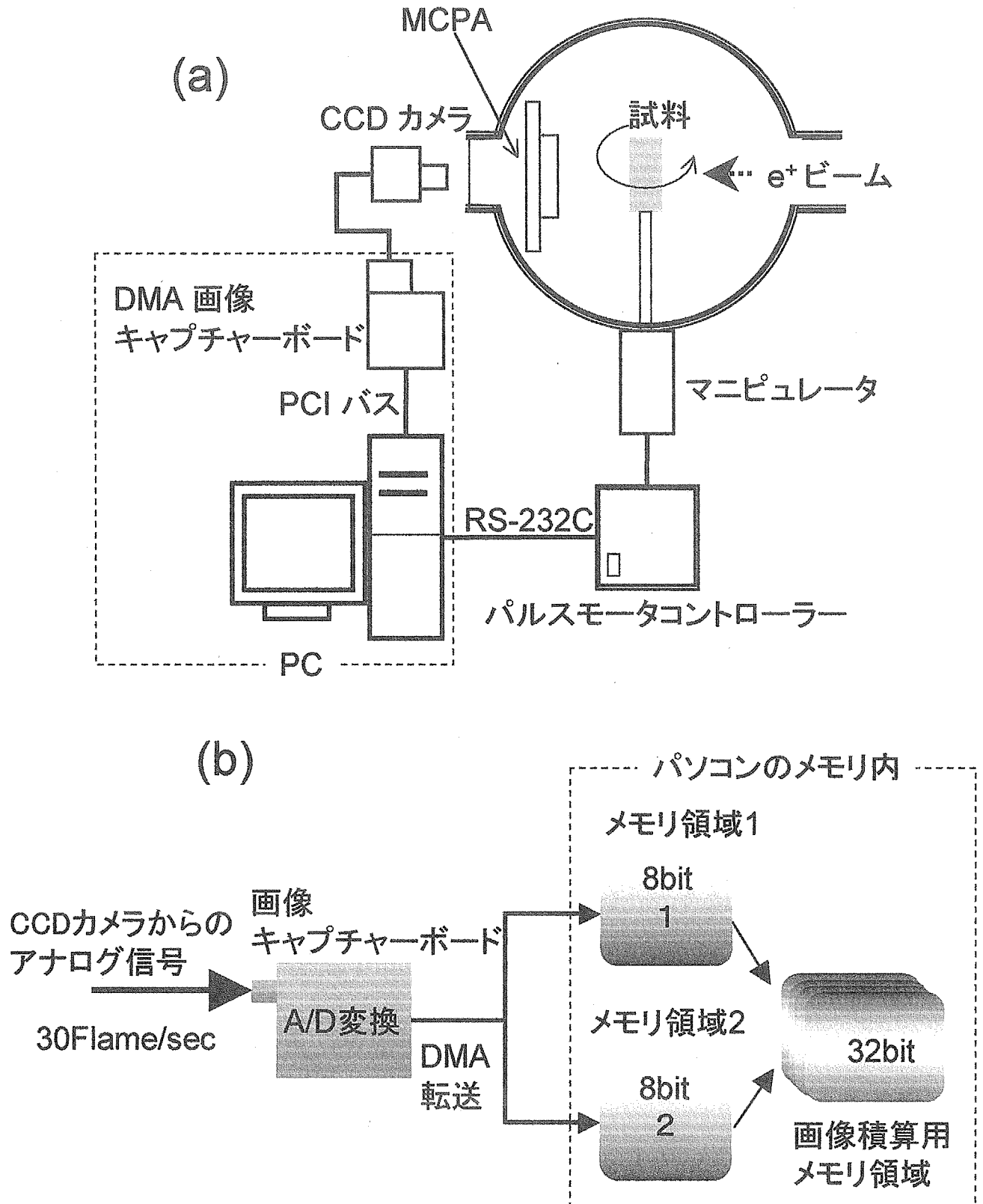


図 10 (a)陽電子回折観測システムの構成。(b)パソコンを用いた画像積算方法。画像キャプチャーボードで CCD カメラからの信号を A/D 変換した後、パソコン内のメモリに DMA 転送し積算を行なう。メモリ内には一時保管用、積算用の 2 種類のメモリ領域を設けている。

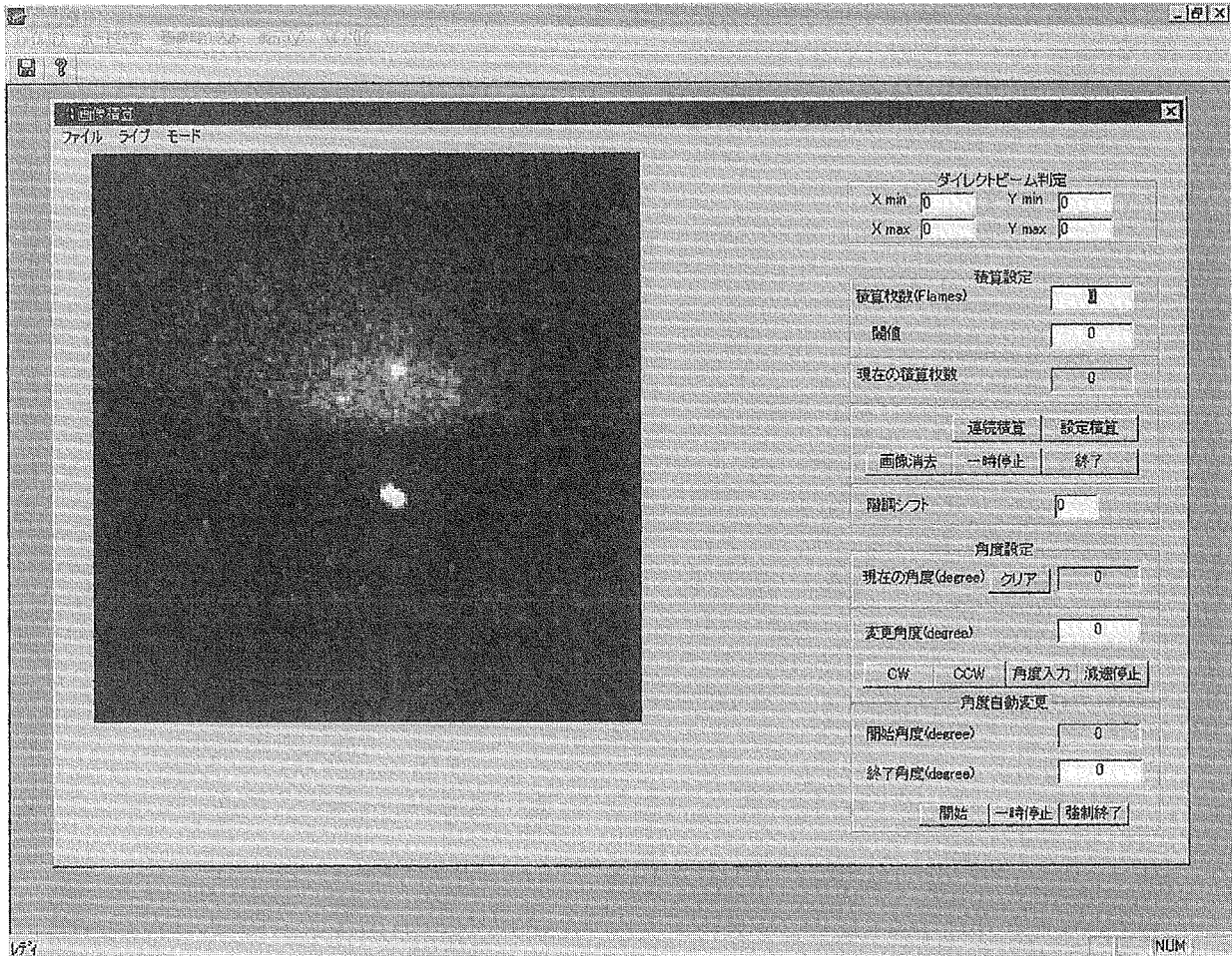


図 11 観測システムソフトウェアの GUI 画面。入射視斜角度ごとの RHEPD 強度の自動観測を画像積算枚数および終了角度、変更角度を入力する機能を設けた。

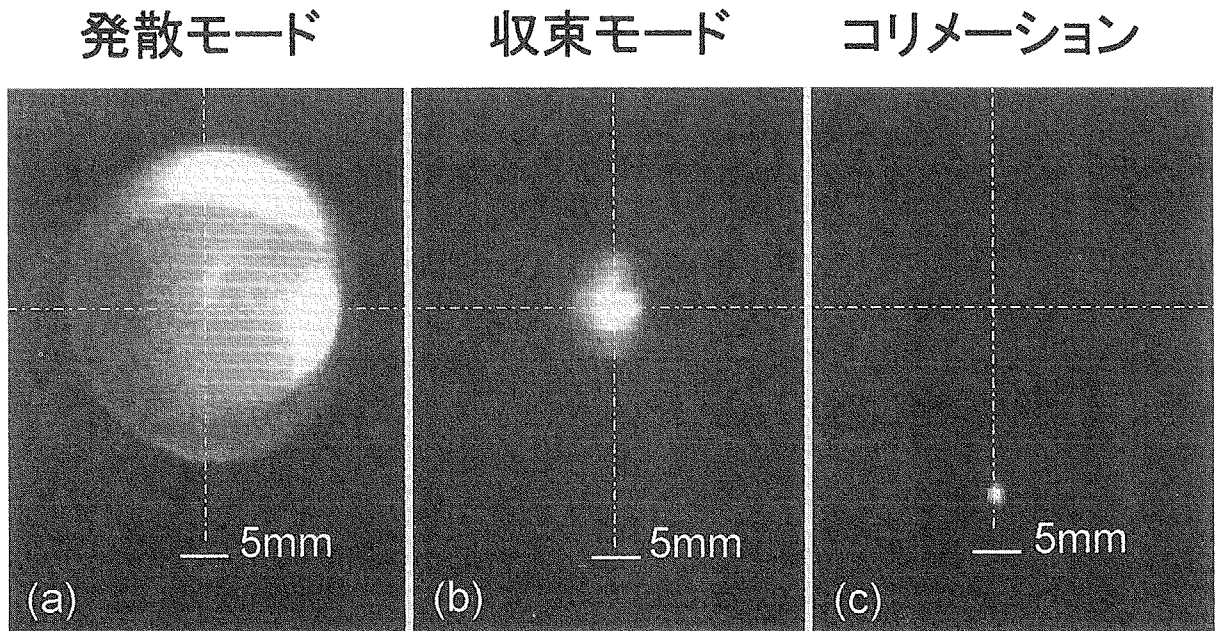


図 12 第五アイツェルレンズ通過後の陽電子ビーム像 (a)コリメータ無しの発散モード、(b)コリメータ無しの集束モード、及び(c) $\phi 1\text{mm}$ 、角度 4.4° のコリメータの通過後。

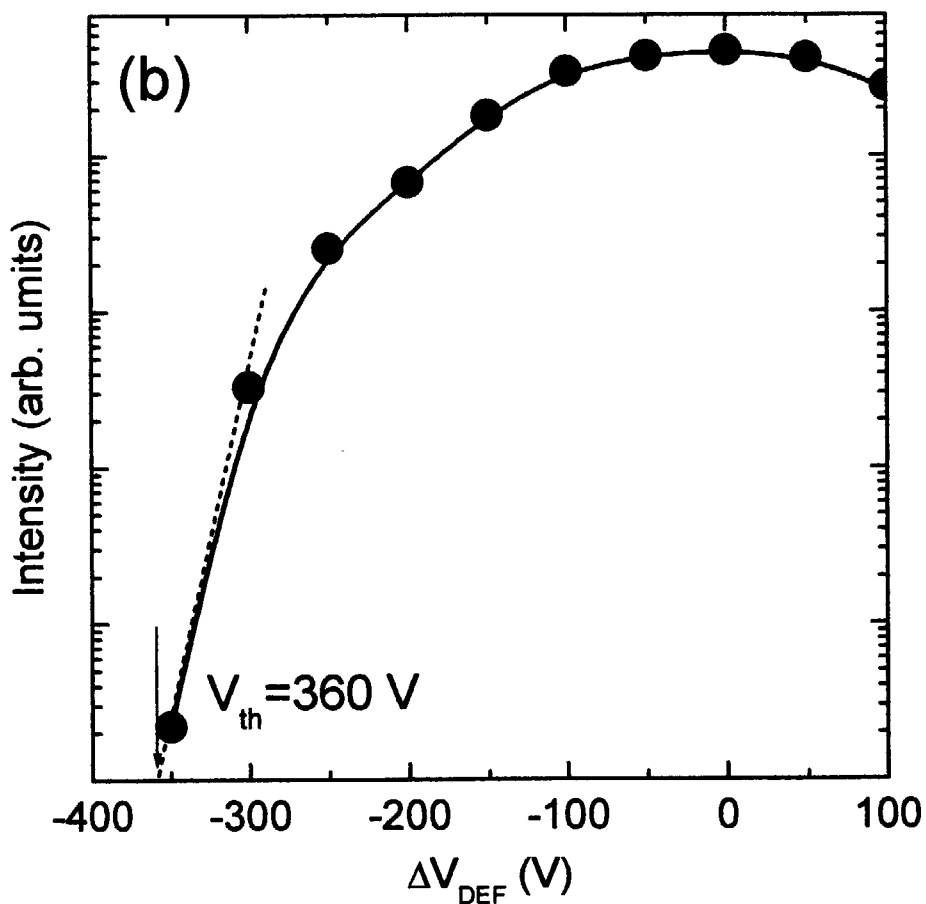
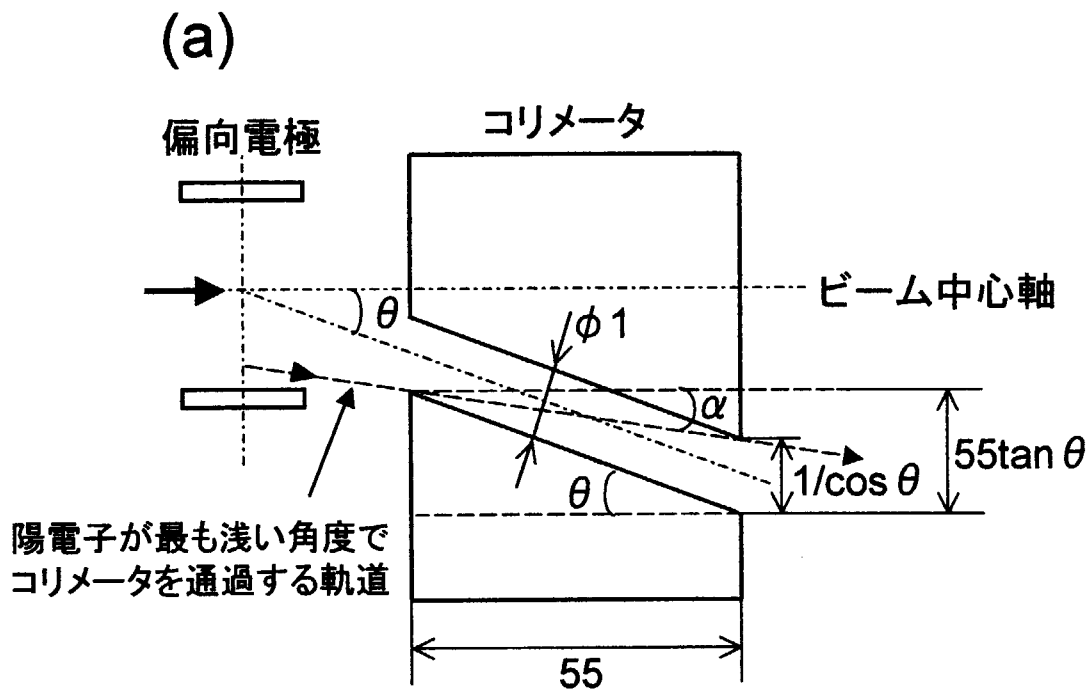


図 13 (a)陽電子ビームがコリメータを通過するときの最低角度 α を示す概略図。(b)ビーム強度を偏向器電圧の関数として測定した結果。ビーム強度が最大となる電圧を 0Vとしている。

表1 RHEPD装置で得られた陽電子ビーム特性

陽電子線源強度	370MBq
ビームエネルギー	20keV
ビーム強度	$2 \times 10^3 \text{e}^+/\text{sec}$
エネルギー幅	0.1%以下
発散角	0.1° 以下
輝度	$5.5 \times 10^6 \text{e}^+ \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{rad}^{-2} \text{V}^{-1}$

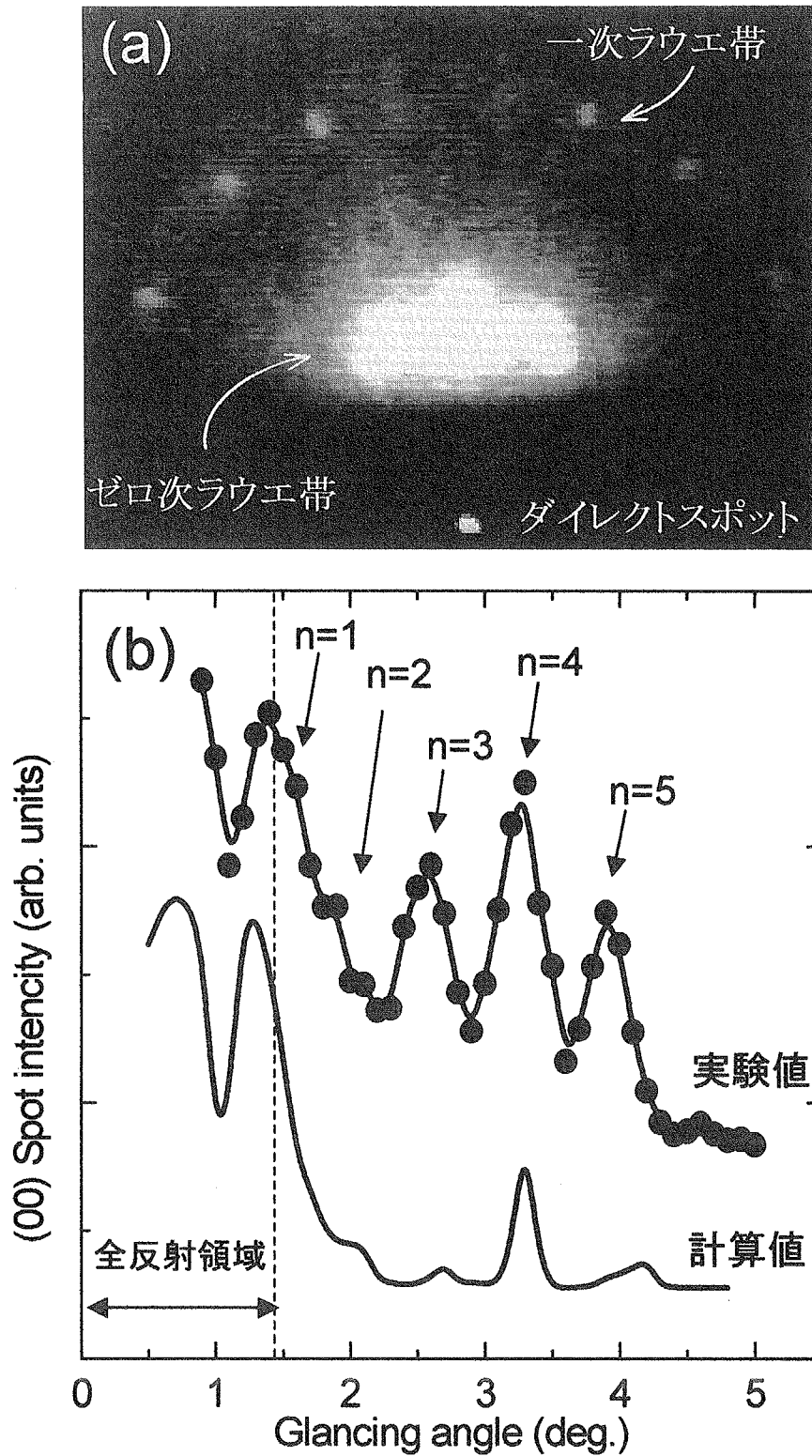


図 14 水素終端処理 Si(111)表面の観測結果。(a)入射視斜角 4.0° 、入射方向[11-2]のときの RHEPD パターン。図の下方に見られるスポットはダイレクトスポット、中心に見られる最も明るい輝点はゼロ次ラウエ帯、その周辺領域に強度の弱い8個の輝点が一次ラウエ帯である。(b)鏡面反射点の入射視斜角依存性(ロッキング曲線)。黒丸は実験値、実線は動力学理論による計算値である。

付録

スポット強度解析プログラム

メインファイル RHEPD pattern analysis.cpp

```

//////////////////////////////// 反射高速様電子回折強度解析プログラム////////////////////////////////
#include "stdio.h"
#include "string.h"
#include "stdlib.h"
#include "limits.h"
#include "RHEPD pattern analysis.h"
#include "math.h"
int main(){
    CArea c;
    c.first();
    c.roc_CON();
    return 0;
}
int CArea::first(){
    printf ("%n//反射高速陽電子回折強度解析プログラム//%n");
    return 0;
}
int CArea::rocking(){
    CArea c;
    c.roc_input();
    c.roc_file_remake();
    c.roc_CON();
    c.sel_pro();
    return 0;
}
////////////////////////////////ファイルオープン////////////////////////////////
int CArea::load(){
    char *tsp,tempstr[32];
    int x, y, point,c;
    unsigned int value;
    buff = new int[size_x*size_y];
    for(y=0;y<size_y;y++)
    {
        for(x=0;x<size_x;x++)
        {
            point=y*size_x+x;
            value=buff[point]=0;
        }
    }
    FN = (FAngle - SAngle+SAngle*Flag+0.009)*100;
    printf( "%d.txt%t", FN);
    sprintf( Filename ,"%d.txt",FN);
    FILE *fp;
    //ファイル open
    if(!(fp = fopen(Filename,"r")))
    {
        printf("ファイルをオープンできません%t");
    }
    for(y=0; y<size_y; y++)
    {
        for(x=0; x<size_x; x++)
        {
            fsp = &tempstr[0];
            while(strchr("%t%t%t",c=fgetc(fp)) == 0)
            {
                *tsp++ = c;
            }
            *tsp = 0;
            buff[x+y*size_x]=atoi(tempstr);
        }
    }
}

```

```

    }
}
if (fclose(fp))
{
    printf("ファイルをクローズできません\n");
    return 1;
}
return 0;
}
int CArea::roc_CON(){
    for( Flag=1; Flag <= Files; Flag++)
    {
        printf( "%d\t", Flag);
        load();
        intensity();
        max();
        rocking_save();
    }
    return 0;
}
int CArea::roc_input(){
    char CXX[10],CSYY[10],CEYY[10],FFAngle[10],SSAngle[10],EEAngle[10],FFiles[10],SX[10],SY[10];
    size_x = 0;
    size_y = 0;
    printf("%x1b[2J");
    printf("画像サイズ X=? ");
    gets(SX);
    printf("画像サイズ Y=? ");
    gets(SY);
    size_x = atoi(SX);
    size_y = atoi(SY);
    printf("\n");
    printf("初期角度 ? ");
    gets(FFAngle);
    printf("ステップ角度 ? ");
    gets(SSAngle);
    printf("終了角度 ? ");
    gets(EEAngle);
    FAngle = atof(FFAngle);
    SAngle = atof(SSAngle);
    EAngle = atof(EEAngle);
    Files = (int)((EAngle - FAngle)/(SAngle)+0.5) + 1;
    printf("入力ファイル数は%d つです。 ", Files);
    printf("\n");
    printf("X 座標中心 X=? ");
    gets(CXX);
    printf("初期角度 Y 座標中心 Y=? ");
    gets(CSYY);
    printf("終了角度 Y 座標中心 Y=? ");
    gets(CEYY);
    CX = atoi(CXX);
    CSY = atof(CSYY);
    CEY = atof(CEYY);
    a = (CSY - CEY)/(FAngle - EAngle);
    b = CEY - EAngle * a;
    return 0;
}
int CArea::roc_file_remake(){
    FILE *fp;
    fp = fopen ( "result of intensity.txt", "w+" );
    fprintf(fp,"Angle\tXsite\tYsite\tintensity\n");
    fclose( fp );
    return 0;
}
int CArea::intensity(){
    int point ,x,y,i,j ,px,mx,py,my;
    CY = int(a*FN/100 + b);
    Area_int = 0;
    px=CX+5;

```

```

mx=CX-5;
py=CY+5;
my=CY-5;
for(y=my; y<=py; y++)
{
    for(x=mx; x<=px; x++)
    {
        point = y*size_x + x;
        Area_int += buff[point];
    }
}
return 0;
}
int CArea::rocking_save(){
double fFN;
fFN = FN/100.0;
FILE *fp;
fp = fopen ( "result of intensity.txt", "a" );
fprintf(fp,"%f\t%d\t%d\t%d\n", fFN,CX,CY, Area_int);
fclose( fp );
return 1;
}

```

ヘッダーファイル RHEPD pattern analysis.h

```

class CArea
{
public:
int CX; //X 中心
int CY; //Y 中心
long double CSY,CEY; //初期 Y 中心,終了 Y 中心
long double a,b; //傾き,切片
int size_x; //画像ファイルサイズ x
int size_y; //画像ファイルサイズ y
int Area_int;
int *buff;
double FAngle; //初期角度
double SAngle; //ステップ角度
double EAngle; //終了角度
int Files; //読み込みファイル数
int FN; //ファイルネーム
int Flag; //繰り返し数

char Filename[128];

int first();
int sel_pro();
int load();
int load2();
int end();

int rocking(); //スポット強度解析
int roc_file_remake();
int roc_CON();
int roc_input();
int rocking_save();
int intensity();
int max();
};

```

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
上率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
 1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バー	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
 1 bar = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
 1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
 1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
 1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
 1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
 1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (= N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 ⁸	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

静電輸送陽電子ビームによる反射高速陽電子回折(RHEPD)装置の開発

R100

古紙配合率100%
白色度90%再生紙を使用しています