

研究紹介

広島大学電子周回装置における教育研究

高橋 徹

広島大学大学院先端物質科学研究科

tohrut@hiroshima-u.ac.jp

2002年5月1日

広島大学ベンチャービジネスラボラトリーには超高速電子周回装置という 150MeV の電子リングがあり、大学院先端物質科学研究科の光子物理学研究室が中心となって、電子線を利用した教育研究を行っている。この施設の運用開始から約 5 年が経過し、この間いくつかの実験が行われてきた。また、2001 年度の補正予算により念願の RF の設置が認められ、新たな展開が可能となった。そこでこの機会にこの電子線施設の現状を広く高エネルギー業界の方々を知っていただきたいと考え、この小文を執筆した。

1. 建設の経緯

読者の方々は、ベンチャービジネスラボラトリー(VBL)という施設について耳にしたことがあるだろうか。これは 1995 年度の補正予算によって、全国 11 の国立大学に設置された実験施設である。その名称からも推察できるように、この施設はベンチャービジネスにつながるような研究および、起業家精神をもつ学生の育成を目指して設立されたものである。このような設立の理念から、この施設はほとんどの大学において工学部系ものであり、私たちのような物理の研究者にはほとんど関係のないものとなっていると思われる。VBL を持つ国立大学に所属する方々でも、この存在をほとんど知らない方も多いのではないだろうか。

しかし、広島大学では少し事情が異なっていた。VBL 設置と時を同じくして、理学部の有志を中心に 10 年以上にわたって設立の努力をしてきた放射光科学研究センターの設立が認められたのである。一方、物理学科の研究グループでは、旧核研の電子シンクロトロンを利用して、電子と結晶の相互作用を利用した X 線(パラメトリック X 線)生成実験を積極的に行っており、成果を挙げつつあった。このパラメトリック X 線は、可変波長の単色 X 線を生成できるという性質があり、新しい X 線源になりうる可能性が指摘されていた。これらのことから広島大学 VBL では、「放射光センターの電子線を利用してパラメトリック X 線などの新しい X 線源の開発を行う」という構想が持ち上がった。幸い、パラメトリック X 線の実験を行ってきた物理学科の遠藤一太(現先端物質科学研究科長)および牟田泰三理学部長(当時、現学長)らを中心とした努力が実り、このような加速器を使った新光源開発を広島大学 VBL のひとつの柱とすることになった。

周知のように、放射光施設の入射器は 1 日 1 回か 2 回の入射を行えばその入射器としての役目は終わりである。そこでこれを有効利用するために、放射光リングとは別に電

子リングを建設しパラメトリック X 線をはじめとしたいいろいろな実験に電子線を使えるようにする、というアイディアである。通常は、放射光への入射は午前 1 回だけなので、その時間を除いた 1 日のほとんどの時間はこの電子線利用実験に費やすことができる。このような経緯により、広島大学 VBL には放射光施設の入射器からの電子線を使う電子リングが設置された。正式名称を超高速電子周回装置、略称は REFER (Relativistic Electron Facility For Education and Research) と言う。

2. 装置の概要

超高速電子周回装置の配置概略を図 1 に示す。電子周回装置は、放射光の入射器である 150MeV マイクロトロンからの電子を周回させる周長約 13.8m の電子リングであり、現在のところ、10Hz または 20Hz で電子を入射することができる。付随する装置として、パラメトリック X 線用の内部標的などを挿入するための真空容器、主にレーザーを入射する目的で設置した 0 度ビームラインがある。また電子線引き出しラインも持っており、引き出し電子を用いた実験をすることも可能である。

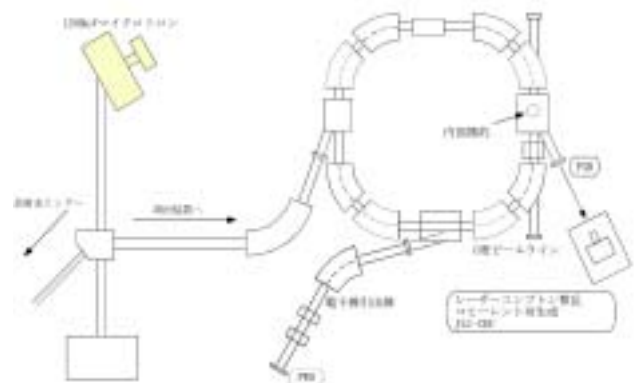


図 1 電子周回装置の配置

残念ながら予算上の理由により、この装置の設置時には電子エネルギーの放射損失を補うための高周波加速空洞を取り付けることはできなかった。装置中の電子の周回電流の時間変化を表したのが図2である。周回電流は入射後約0.5msの時点で大きく減少し、その後比較的なだらかに減少した後、約2.5ms後に消失している。電子のパンチ長は約0.5 μ s (150m)であるので、周回装置の周長より遥かに長い。したがって、電子ビームは装置中をDC的に回っていると考えることができる。図3は周回中のパンチの位置を時間の関数として表したものである。これは0度ビームラインから出てくるシンクロトロン放射をCCDカメラで観察することによってモニタしたものである¹。電子にエネルギーを供給できないため、電子の軌道が時間とともにリングの内側(図の上方)に移動していることが分かる。

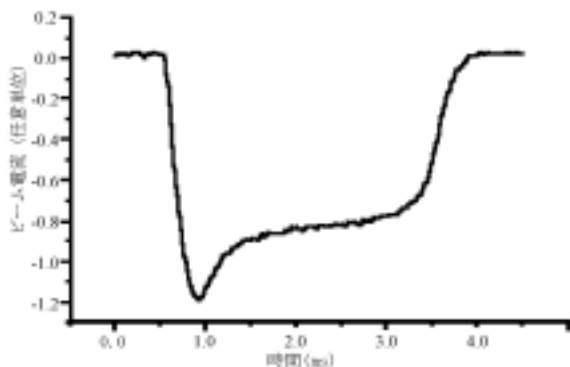


図2 ビーム電流の時間変化

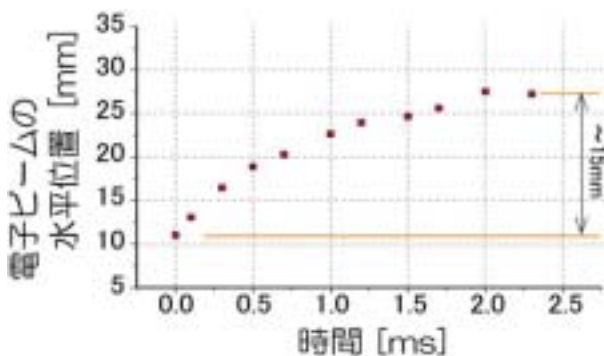


図3 ビーム位置の時間依存性

電子線の引き出しは、周回電子を削るアブソーバ、それを軌道の外側に蹴り出すキッカー電磁石および、最終的に電子を引き出しラインへ向けるセプタム電磁石からなっている。これにより、周回中の電子をリングから少しづつ引き出して使用することができる。2001年7月に行ったビームサーベイ時において、引き出し電子の計数率はおおよそ20kHz、ビームサイズは水平方向約17mm、垂直方向約6mmであった。

3. 電子周回装置における実験

1996年度に運用を開始して以来、電子周回装置を利用して実験を行ってきた。そのいくつかについて紹介する。

a. パラメトリック X 線²

パラメトリック X 線を使った X 線生成実験は、電子周回装置を設置する主な動機となったものである。白色の X 線を結晶に入射すると、特定の方向に単色 X 線が観測されることはブラッグ反射として良く知られている。この白色 X 線の代わりに相対論的な電子を入射する。すると、やはりブラッグ条件を満たす方向に単色 X 線が観測される。これがパラメトリック X 線である。観測される X 線のエネルギーは電子と結晶軸の角度により変化させることができるため、この方法を用いると可変波長の単色 X 線を生成することができる。また生成 X 線のエネルギーは結晶格子で基本的に決まっており、電子のエネルギーの大小とは(それが相対論的でありさえすれば)無関係である。すなわち、放射光施設などに比べると遥かに小さな加速器で十分だということである。しかし X 線の生成効率はおおよそ $10^{-5}/e$ であるので、X 線源としてはその強度が不十分である。それを克服するために、いくつかのアイデアが考えられているが、そのひとつがリングを周回する電子線に結晶を挿入することである。図4は電子周回装置の内部標的に結晶を用いて得られた、パラメトリック X 線のスペクトラムである。きれいな単色 X 線が得られていることが分かる。

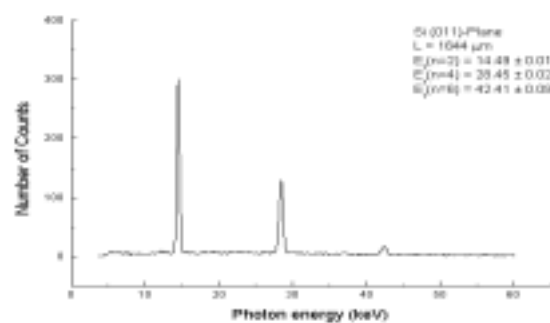


図4 パラメトリック X 線のスペクトル

また X 線強度増倍の工夫のひとつとして、単結晶の多層膜からの X 線生成実験を行い、結晶の厚さが同じ場合でも、薄い結晶を多数重ねた方が X 線の強度が強いことが分かった。図5にその様子を示す。厚さが160 μ mの結晶からよりも、16 μ mの結晶を10枚並べたほうが X 線の強度が強いことが分かる。今後はここで得られた X 線強度の絶対値を測定し、電子周回装置における多重衝突の効果の実証などに進展させる予定である。

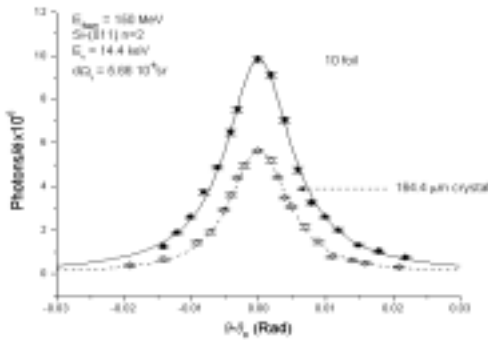


図5 多層膜からの X 線生成

b. レーザーコンプトン散乱³

パラメトリック X 線以外の X 線生成実験として電子とレーザーの後方散乱を用いた X 線生成実験も行っている。電子周回装置の 150MeV 電子に 532nm の緑色レーザーを照射した場合、生成 X 線の最大エネルギーは約 800keV である。前述のパラメトリック X 線よりも、一桁高いエネルギーの X 線生成が可能である。われわれのグループでは、JLC における光子光子衝突反応の可能性を追求しており、レーザーコンプトン散乱も研究の過程から参入した。電子周回装置における実験においても、その発展として、光子光子衝突型加速器のレーザーの光学系などのテストベンチとしての可能性を念頭においている。

図6は昨年度行った実験のセットアップである。使用したレーザーは波長 532nm、パルス幅約 6ns、パルス当たりのエネルギーは 600mJ である。前述したように、現在の電子周回装置では、電子の軌道が時間とともにドリフトしている。そのため、レーザーと電子を衝突させるためには、レーザーの入射位置とそのタイミングの両方を調整しなければならない。図7はレーザーの入射位置を決めた後に、そのタイミングを変化させた時の測定器の計数率である。あるタイミングにおいて計数率が増え、その値がレーザー強度とともに変化していることが分かる。このことから、電子周回装置においても、レーザーコンプトン散乱の X 線を捕らえることができたといえる。図8はこのようにして得られた X 線スペクトルである。約 800keV 付近にピークが得られている。しかし、そのピークの 800keV からのずれや、800keV より高いエネルギー領域におけるカウントの原因はまだつかめていない。何かレーザーに付随したバックグラウンドがあるようである。その正体の解明も次の実験の課題である。

また、次段階の実験として、レーザーパルスの再利用光学系による、X 線生成効率の上昇を計画している。この準備として、内部に光学素子を配置できるようにした新しい

真空容器を製作した。今後、その中に設置する光学系の試験を経て新容器の電子周回装置への挿入を行う予定である。

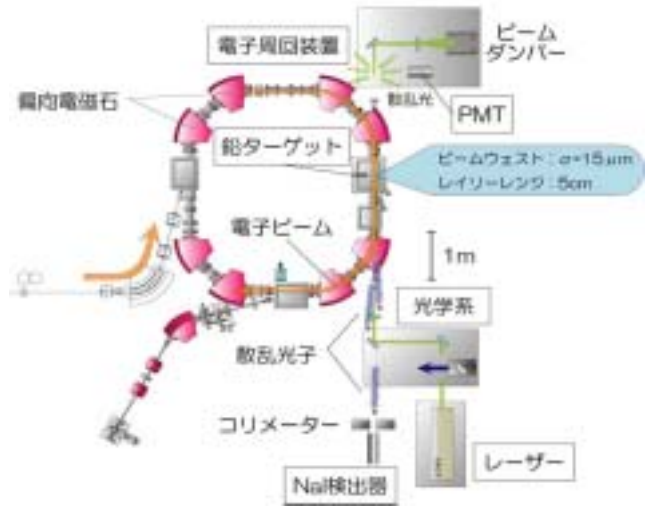


図6 レーザーコンプトン散乱実験のセットアップ

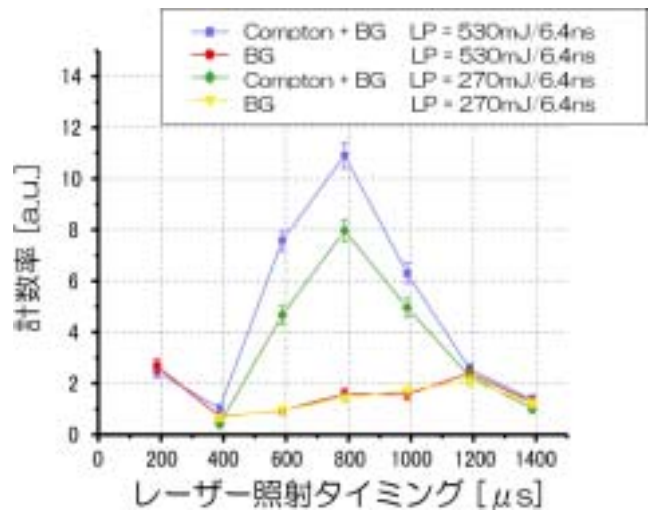


図7 レーザー照射タイミングと計数率

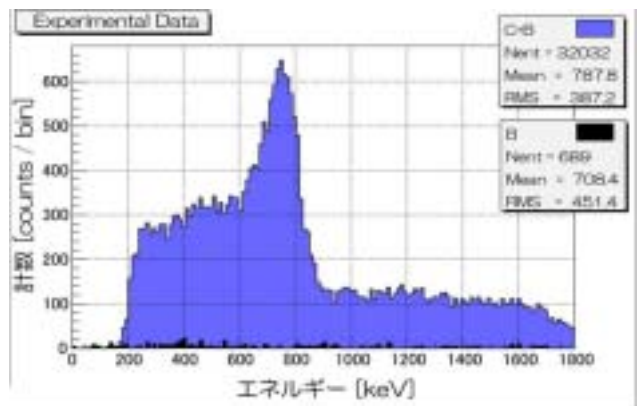


図8 レーザーコンプトン散乱による X 線スペクトル

c. 結晶におけるコヒーレントな対生成⁴

結晶軸にある角度を持って光子が入射されるとその角度に応じて特定のエネルギーの光子が散乱されるのがブラッグ反射であった。この実験は終状態の光子を観測する代わりに電子陽電子対を観測するものである。前述の2つの実験はその原理こそ違え、X線生成を目的としたものであった。この実験はそのような実用的側面は持っていないが、パラメトリックX線から続く結晶と電子/光子の相互作用の研究の一環である。

結晶軸にある角度をもって光子を入射した場合、入射光子のエネルギーがある条件を満たすと、対生成の断面積が増加する。このことは type-A のコヒーレント対生成として知られていた。今回実験を行ったのは、type-B と呼ばれる、光子が結晶軸に対して平行に入射した場合である。実験のセットアップを図9に示す。電子周回装置の内部標的に白金を置き、それによって生成された制動放射を結晶へ導き、その下流に設置した電磁石とホドスコープからなるスペクトロメータで電子陽電子対のエネルギーを測定している。得られた電子陽電子対のエネルギーとその生成数の関係は図10の通りである。統計が十分ではないが、対のエネルギーが105MeV付近にパンプがあるよう見える。現在これについてシミュレーションなどを用いて検討を行っているところである。

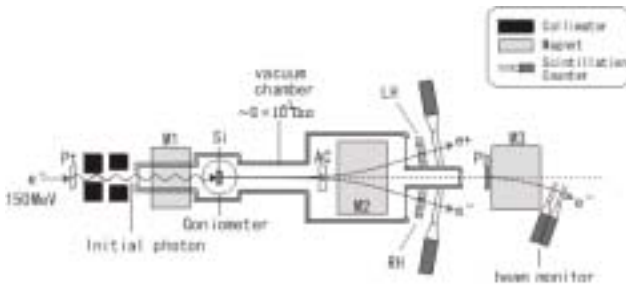


図9 コヒーレント対生成実験のセットアップ

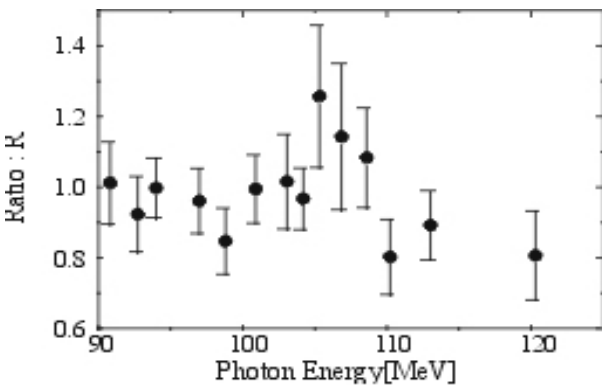


図10 対生成の発生効率と入射光子エネルギーの関係

4. 測定器の試験

これまで述べてきた物理の教育研究に加え、測定器のビームテストのための電子ビームを供給することも、装置の利用形態として当然考えられることである。特に、この種の実験に非常に有用であった核研のESがなくなってしまった今、その役割の一端を担うことができることも電子周回装置の使用方法として有益なものであろう。この観点からこれまで2件のテスト実験が行われた。

a. JLC-CDC のビームテスト

JLCのCentral Drift Chamber (CDC) 試作機の性能試験を行った。主な目的は、CDCの2飛跡弁別性能を確認することである。この実験は電子周回装置初の学外の研究者との共同実験であり、KEK、農工大、近大からの参加者と共同で行った。ビームラインのセットアップは前述のコヒーレント対生成とまったく同じものを使った。この実験で得られた、CDCの位置分解能を図11に示す⁵。この結果は、これまでこの試作機によって得られた結果とほぼ同程度のものである。2飛跡弁別性能については、解析結果待ちである。

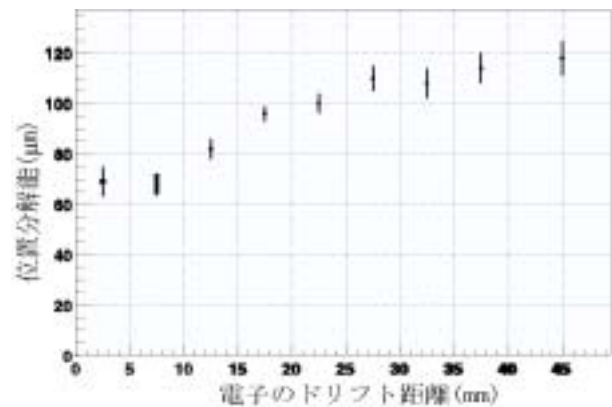


図11 JLC-CDC 試作機の位置分解能

この実験はCDC試作機の性能試験という側面の他、ビームチャンネルの使用可能性そのものも大きな興味の対象であった。前述したように現在の電子周回装置は、電子を3msの間周回させているだけなので、入射の頻度(この場合は10Hz)でビームダンプを繰り返している。このことは、測定器に対してかなりバックグラウンドがあることを意味しており、測定器をうまくシールドして運転できるかどうか問題となっていた。幸い、実験グループの努力によって、バックグラウンドもそれほど問題とならない程度に抑えることができ、図に示すような分解能を得ることができた。これは、電子周回装置のテストビームとしての有効性の観点からみると非常に有益な結果である。

b. 鉛タングステン結晶 (PWO) の性能試験⁶

鉛タングステン結晶は、高密度、高速、高放射線耐久性などから、カロリメータ材料として注目されている。またエネルギー分解能も 100MeV から数 GeV の領域にわたって、 $2\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ と期待されている。

実験は、REFER の電子引き出しラインで行った。150MeV の電子入射に対して得られたヒストグラムは図 12 の通りである。実験データから得られたエネルギー分解能は 16%であった。今回使用した PWO 結晶はその断面が 20mm×20mm (モリエール単位は 22mm) であったため、シャワーの漏れが大きく、エネルギー分解能を劣化させている。シミュレーションによるとエネルギーの収集効率は 77%、またエネルギー分解能は 13% となった。実験との違いは、シミュレーションに考慮されていない発光量のゆらぎや PMT の分解能によると考えられている。

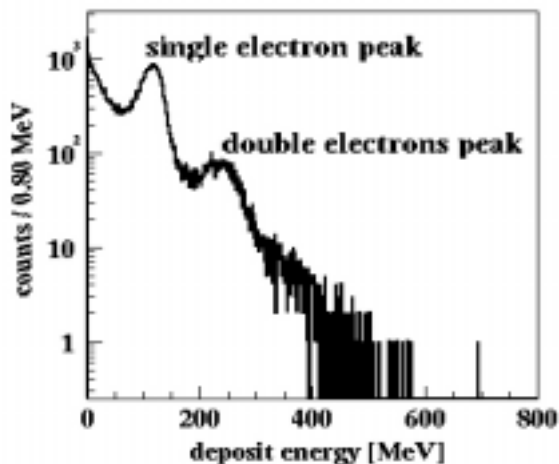


図 12 150MeV 電子によるカロリメータのスペクトル

この実験は電子引き出しラインにおける測定器のテスト実験の可能性を示すことができたという意味で、電子周回装置の利用上、有意義な実験であった。本年度は、シャワーの漏れを補償するための PWO アレイによる再度のビームテスト、また前述のレーザーコンプトン散乱による X 線をテストビームとした実験を計画している。

5. 運転体制と状況

電子周回装置における実験は、広大 VBL のプロジェクトであるとともに、放射光科学研究センターの電子線利用実験という形態をとっている。したがって、ユーザーが電子周回装置を使用して実験ができる時間は、放射光センターの光源利用のそれと同じである。具体的には、夏季、年末年始、学会の開催時期などの特別な時期を除くとユーザータイムは毎週火曜日から金曜日の放射光リング入射後

(午前 10 時頃) から午後 6 時までである。またこの装置の責任者は遠藤一太 (先端物質科学研究科) であり、日常の運転および機器の整備などは VBL の 2 名のポスドクによって行われている。

実験課題の採択はいわゆる PAC 制をとっており、申請があった課題については、PAC (2001 年度委員長、小方厚・先端物質科学研究科) によって審査される。実験課題の申請については、常時受け付けているが、年間計画をたてる都合上毎年 4 月末頃に一度申請の募集を行っている。運転スケジュールの詳細やマシンタイムの割付けなど、日常の運用の細部については、実験参加者と運転担当者からなるユーザー会を組織しそこで決定している。2002 年度については 4 月 17 日までに集まった 4 つの実験申請について PAC で審査が行われている段階である。

6. 今後の展望

電子周回装置の設置時より電子ビーム加速機構の必要性はわれわれも十分に承知していた。また実験のところで述べたように、ビーム軌道が安定していないため、なかなか苦しい実験であったことも事実である。設置以来あらゆる機会において学内外の予算申請を繰り返してきたが、大学の設備としてはかなりの大型予算となるため、その獲得はなかなか困難であった。しかし幸いにも 2001 年度の第 2 次補正予算で広島大学 VBL に施設更新・改良の予算が付き、これを使って RF を設置することが可能となった。またこれと同時に、電子線引き出しラインもエネルギー分散を打ち消すための改良を加えることが可能となった。これらの工事は 2002 年 10 月中旬より行い 10 月末完了の予定である。その後文部科学省による放射線関連の変更承認を受け、2003 年初頭には、新しい電子周回装置による運転が開始される予定である。この改造により、電子寿命の増大と軌道の安定化が期待でき電子周回装置の使い勝手も非常に良くなると期待している。また電子線引き出しについても、より高品質の電子線を供給できるようになると期待している。

実験申請の様子であるが、現在は広島大学の物理系がその主なユーザーである。JLC-CDC 実験の時は、学内共同利用施設であることから旅費などの手当てはできず、KEK、農工大、近大からすべて手弁当で来ていただいた。また現状の制度では学外のメンバーだけによる研究グループの実験は困難であり、すべて学内利用者との共同研究の形をとってきた。しかし、本年度より放射光科学研究センターが大学共同利用センターとなった。前述のように電子周回装置における実験は放射光センターの電子線利用実験の形態をとっているため、これも原理的には共同利用施設となる。実際にどのような形で共同利用ができるかの

詳細は明確になっていないが、学外のユーザーの利用も、より行いやすくなると思われる。

7. 終わりに

以上、広島大学の電子周回装置の現状と展望を述べてきた。この施設の運用は、装置の設置から始まった初期の段階を経て、RF の設置など、次のステップへ向かおうとしているところである。この設備は加速器としては非常に小さいが、大学グループがその本拠地に持っているという点では非常にユニークなものである。また大学にあるという性格上、その運用において、教育と言う側面を非常に重視している。この観点からみると、学生諸君が学部の卒業研究の段階から加速器の運転を実際に経験する機会を持つことができるというのは、この施設の非常に大きな利点であると考えている。このようなことが可能なのは、全国を見渡してもそうは無い(たぶん無い)と思う。文末の参考文献を見ていただいても分かるように、主要な実験のかなりの部分が修士論文はもとより、卒業論文として行われている。今後も施設を有効に利用した教育研究を続けていきたいと考えている。そのためには、われわれ広島大学の担当者が努力を続けることが最重要であるのはもちろんであるが、高エネルギーコミュニティからのサポートも必要不可欠である。この機会にこの施設の存在を知っていただくとともに、使用について興味をお持ちの方は是非連絡をいただきたい。

連絡先は広島大学大学院先端物質科学研究科：

遠藤 一太 iendo@hiroshima-u.ac.jp

または、高橋 徹 tohrut@hiroshima-u.ac.jp

である。また、

[http://photon.adsm.hiroshima-u.ac.jp/
lab/vbl/vbl-ebeam.html](http://photon.adsm.hiroshima-u.ac.jp/lab/vbl/vbl-ebeam.html)

からは最近の情報を得ることができる。

謝辞

この装置の設置から運用に至るまでのすべての面にわたって広島大学放射光科学研究センター、広島大学ベンチャービジネスラボラトリーの関係各位には多大なご協力と支援をいただいている。お礼を申し上げる次第である。

運転整備については、歴代のポスドク、K. Chouffani(現 Idaho State University)、益田伸一(現 KEK)、松門宏治(現光量子研)、大垣智巳の各氏の努力無しにはなし得なかった。この機会に感謝したい。

またパラメトリック X 線実験において重要な役割を果たされた M. Yu. Andreyashkin 氏が 2001 年に急逝された。この場を借りてご冥福をお祈りする。

参考文献

- ¹ 尾崎弘武 1999 年度広島大学理学部物理学科卒業論文
- ² K. Chouffani, M. Yu. Andreyashkin, I. Endo, J. Masuda, T. Takahashi, Y. Takashima Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. **B173** 241–252 (2001).
- ³ 木村勝 2001 年度広島大学大学院先端物質科学研究科修士論文
- ⁴ Y. Okazaki, M. Andreyashkin, K. Chouffani, I. Endo, R. Hamatsu, M. Iinuma, H. Kojima, Yu. P. Kunashenko, M. Masuyama, T. Ohnishi, H. Okuno, Yu. L. Pivovarov, T. Takahashi, Y. Takashima Phys. Lett. **A271** (2000), 110–114.
- ⁵ 後藤隆一 2000 年度広島大学総合科学部卒業論文
- ⁶ Y. Furuhashi, R. Kohara, T. Sugitate, K. Homma, Proc. the Seventh Workshop on Topics in Nuclear Radiation Detection, Miyazaki University, November 2001