

大型加速器と小型加速器

一私立大学の一研究室における加速器設備

鷲尾 方一*

Accelerator Facility in a Small Laboratory of a Private University

Masakazu WASHIO*

1. はじめに

編集委員長より、私立大学での加速器及びこれをベースにした活動についてご紹介してほしい、内容的にはアカデミックとか談話室風とかを問わず、苦労している点や、学生教育について触れても良い、という連絡を受けてからすでに2ヶ月ほど経過してしまった。何を書こうか、と思ひ悩みながらの2ヶ月でもあったのだが、いよいよ締め切りが間近になり、とにかく書かねばという思いから筆を執った次第。まとまりのない記事になることをご容赦願ひながら、我々のここまでの道のりと現状、将来展望等について簡単に紹介してみたい。

我々の加速器は、そもそも一私立大学の一研究室で運営することができるとしたらどんな装置なのか、ということが元々の開発の経緯の根幹にある。従って、とにかく安く、とにかく小さく、ということがコンセプトであった。実際に装置の設計から設置、応用実験に至るまで計画当初からできるだけ具体的な構想を作り上げ、それを粛々と実現して行くことを念頭に、一私立大学での加速器施設立ち上げを目指したのである。(一部では無謀な試みとも言われていたし、今でもそう思われているかもしれない。しかし“できるかどうかはやってみなければわからない”が持論の筆者としては、やるしか無かったのである。)

2. 加速器プロジェクトの予算化

筆者が早稲田大学に奉職したのは1998年4月であった。この教授職採用の人事の委員会(面接試験)の折に、当時住友重機械で携わっていたNEDOのプロジェクト(フェムト秒テクノロジー)で開発を行っていたレーザーフォトカソードRFガンを紹介をしたと

ころ、学内の先生方から、実に面白い装置ですね、という評価を戴いた。当時早稲田大学の理工学総合研究センターでは、私立大学ハイテクリサーチセンタープロジェクトがスタートしたばかりで、人事に関わった先生方が、1997年スタートのプロジェクトにこの装置があれば非常に面白かったのに、残念ですね、などと囁いていたのだった。従って1998年に早稲田大学の理工総研に奉職した折には、(しばらくハイテクは無いだらうから)当面加速器のプロジェクトを推進することもなかろうと思ひ、あちこちで私は住友で人の2倍ほども苦労したから、早稲田で5年ほどリハビリ生活に入ると公言していた。従って着任初年度の秋ころまでは、実にのどかな余裕のある日々を過ごすことができたのだが、1998年12月のある日、理工総研の執行部より、第2の理工総研のハイテクリサーチセンタープロジェクトを立ち上げる可能性ができたので、加速器のプロジェクトを提案して欲しいという要請を受けた。ただ、同時に別のグループからのCOEの申請もありうるので、駄目もどで! という但し書き付きの話であった。年が明け、正月早々に内部のヒアリングがあり、1999年度スタートは無理かもしれないというようなニュアンスの発言もあり、「アー、少し時間ができたな」、という妙な安堵感を持ったことが思い出される。ところが、それからしばらくすると、COEの件が相当難航しそう(?この辺の状況は実はよく知らされていないので、当時の担当者に怒られるかもしれない)ということで、とにかくハイテクの申請をするということに流れが急速に強まっていった。この申請の結果、1999年の連休明け頃に、プロジェクトスタートの連絡を受けることになった。この時点で、加速器を入れる建物も、遮蔽設計も何もない状況であったのであるから、それからはとてつもない

* 早稲田大学・理工学術院 理工学総合研究センター
Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

忙しさになった。加速器については、住友時代に経験のあったレーザーフォトカソード RF ガンをベースに種々の実験システムを付帯させる方向で折り合いが良かったが、高周波源のクライストロンモジュレータ、ガン励起用のレーザー等のスペック決定や遮蔽設計について忙殺されることになった。加速器の設置場所としてはひどく狭い地下2階の一室が割り当てられることになったのだが、当時から μm での位置調整が必要と考えていた電子レーザーの衝突による X 線発生を開発プログラムに組み込んでいたため、隣室に建築グループが設置予定であった、大型の耐震実験装置の存在は脅威であった。(実際にはこの耐震実験は頻度も少なく、当方には余り大きな問題を生じなかった。また地下2階の地盤の強さも助けになった)

さてこのようにして、スタートしたプロジェクトは1999年の夏より装置の設計や製作に入り、2000年の3月にはほぼ全ての装置が各社の工場での検収を完了することとなった。ハイテクリサーチセンターのプロジェクト予算は基本的に文部科学省が半額、大学が半額負担でプロジェクトを進めるというものであり、特に建物以外の研究用装置は実は研究者が全体の1/4を負担(将来委任経理金等で返済することになっている)して導入したもので、私立大学のつらさがひとしお身に滲みる。こんなことから、発注先の各社にはとにかく嫌になるほどの値引きの交渉を繰り返す羽目になった。(当時の担当者の方、ご勘弁を)

3. 装置スペックの決定と学内協力

どんな形にしる、文部科学省と大学での予算化が行われ、実際に装置の設計や施設設計が周辺の色々な方々の協力で進み始めた。RF ガン装置本体は、1999年当時まだ修士1年であった黒田隆之助君(現・産業技術総合研究所)が KEK の陳先生の指導を受け、MAGIC コードによるシミュレーションを実施しながら、また住友のメンバーとも共同研究をしながら、着実に設計を進めてくれた¹⁾。(図1に当時計算された $\text{TM}_{010} \pi$ モードの電場分布を表1に空洞のジオメトリと共振周波数示す。また図2には当時計算により求められたレーザー入射位相と生成電子ビームのエミッタンスおよびエネルギーとの関係を示した。)

また同時期に総研大で博士号を取得した柏木茂氏が早稲田大学の客員研究員の立場で米国 Brookhaven 国立研究所の X-J. Wang 氏のところへ RF ガンの基本設計とオペレーションのための研修に行ってくれた。

RF ガン空洞の本体製作は2000年の春から夏にかけて、Xバンドの加速管製作などで大変高い精密加

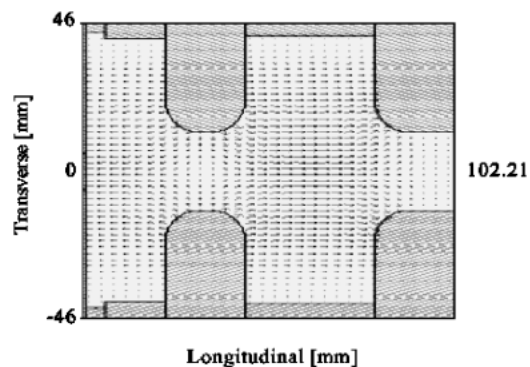


図1 空洞の共振モード計算結果 ($\text{TM}_{010} \pi$ モード)

表1 共振周波数と空洞のジオメトリ

共振周波数 (π モード)	2856.25 MHz
共振周波数 (0 モード)	2850.91 MHz
フルセル半径	41.81 mm
ハーフセル半径	41.26 mm
フルセル長	36.08 mm
ハーフセル長	22.61 mm

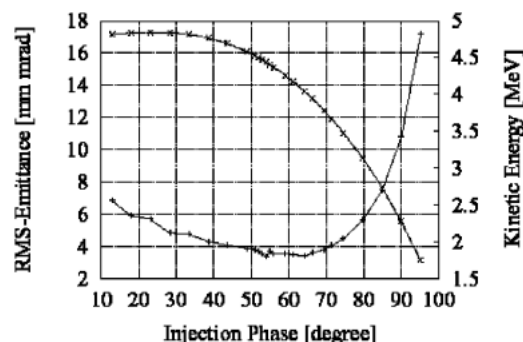


図2 レーザー入射位相と生成電子ビームのエミッタンス (+) およびエネルギーとの関係 (x)

工技術をお持ちだった KEK の工作センターに協力して戴きその加工を行った。実際の加工の際は、BNL と住友の図面をベースに黒田君が加工の際の切削量を計算しながら高周波測定と加工とを繰り返し行い、最終寸法へと追い込んでいった。途上種々のトラブルに見舞われたものの、何とか空洞の製作、ブレイジングにたどり着いた。図3にハーフセル及びフルセルの加工後の写真を示す。

モジュレータについては、日新電機に発注が決まり、担当の犬下氏と鷲尾がほとんど膝詰めで装置の作りこみを行っていった。この結果出力電圧の平坦度は170 kV で $\pm 0.2\%$ 以下と我々のスペックを充分満足

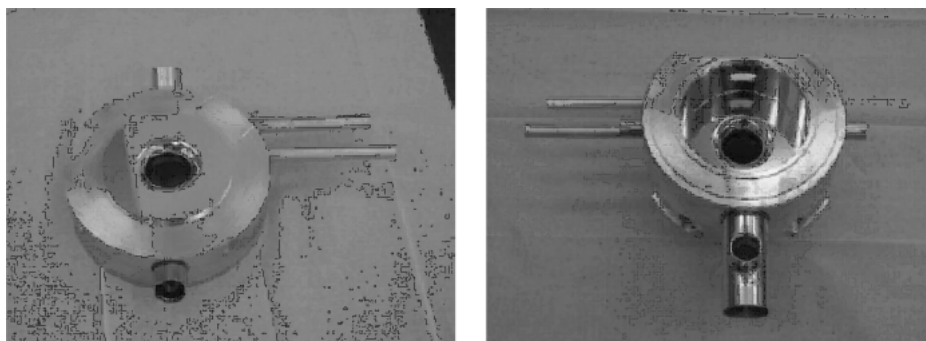


図3 プレーシング途中のハーフセル（左）およびフルセル（右）の外観

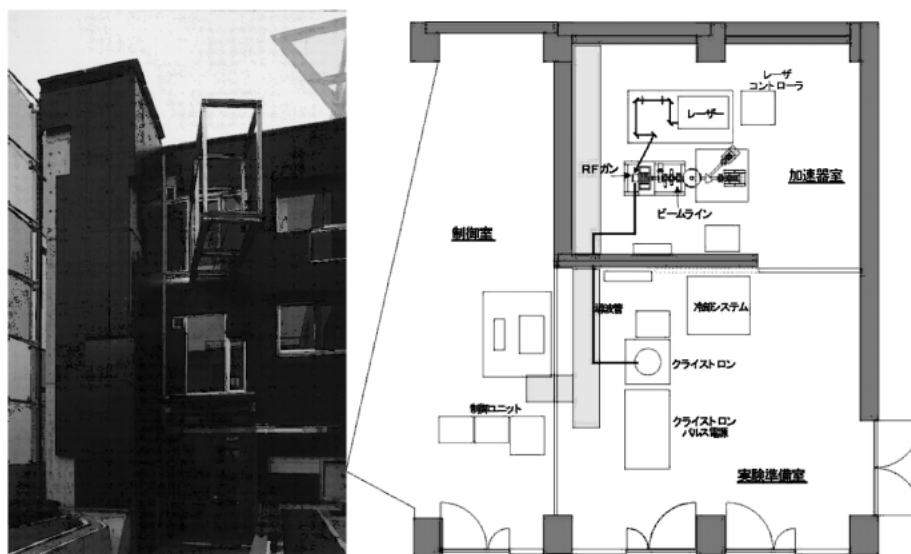


図4 第二ハイテク棟の外観と実験室レイアウト

する性能を確保できた。また、RFガンにとって最も重要な駆動用レーザーについては、筆者の古巣の住友重機械にとにかくNEDOで作った装置に一層の磨きかけた装置が必要であるという強い依頼を行い、遠藤彰氏（現ギガフォトングループリーダー）が大変な努力をして装置の作りこみを行ってくれた。こちらの方は出力変動 $\pm 0.5\%$ 以内で時間ジッターはシードレーザーについて300 fs以下と、十分な性能を示してくれた。一方遮蔽設計については、最大5 MeVの電子ビームを1 nC、25 ppsで取り出すことを想定して、早稲田大学の放射線安全管理室と理工総研の名誉教授・黒澤龍平先生に極めて精度の高い遮蔽設計を行ってもらった。

4. 装置の設置および研究グループの整備とKEKの協力

あわただしく1999年度を終え、2000年4月から

は装置のテスト準備に入った。この時点でBNLに研修に行っていた柏木氏が早稲田大学の客員講師の身分で日本に戻り、RFガンプロジェクトの前線指揮をとってくれることとなり、漸く早稲田でのプロジェクトも実働部隊がそろそろこととなった。さて一方、早稲田の建物の完成は早くて9月という情報（建設開始1年で完成ということなので決して遅くはなかったのだが、我々はいらいらして待っていた）が入っていたため、KEK-ATFの浦川・早野両先生の大変なご協力を戴いて、夏のATF停止期間にRFガン本体及びレーザーのテスト運転をさせていただくこととした。種々問題があったものの、この試験でRFガンからのビームを確認し、早稲田大学への移設、装置運転に強い自信を与えてくれるものとなった。これら一連の試験を終え、2000年9月より各装置の喜久井町キャンパス第二ハイテク棟への搬入・設置が始まった。（図4に第二ハイテク棟の外観と地下2階実験室レイア

ウトを示す.)

設置に関して一番苦勞したのは、クライストロンで、実験準備室(機械室)の天井に十分な高さがなかったため、日新電機のメンバーのアクロバティックな設置技術に頼ることとなった。装置設置後、それぞれの装置の動作確認にはほぼ半年を要した。この確認に際しては、レーザーの時間ジッターや出力のゆらぎなどについても非常に注意深い測定を行い、従来にない安定性を確保できるという目処をつけていた。2001年3月にはほとんどすべての装置の設置が完了し、すぐさまビームテストを開始した。RF パワーを上げながら、根気よくビームエネルギーを上げ、またエミッタンス測定についてもスリットスキンのシステムの導入を図った。これらの努力が実り、2001年11月27日に放射線発生装置としての仮使用許可があり、本格的なビーム実験を開始することができるようになった。我々の極めて少ないマンパワーで装置の搬入が始まって約1年の間で加速器システムの基本的な部分をはきちんと稼動開始でき、過去色々な装置の立ち上げを経験した筆者としても格段に順調な仕上がりにあることを感じていた。この使用許可に勢いを得て、2002年2月22日には文部科学省の施設検査にも合格し、名実ともに放射線施設として運営できるようになった。

ここで我々の研究グループの構成について少し紹介をしておきたい。早稲田大学は国立(現在の独立行政法人)の大学等とは異なり、教授一人であとは基本的には学生がいるという構造となっている。従って、専門の職員なり研究員を必要とする場合には外部からの研究費あるいは大学の数少ない非常勤枠を獲得して、雇用(PDのような形式)する必要がある。

総研大で博士をとってからBNL研修を経て早稲田大学の客員講師を勤めてもらった柏木茂氏はこの数少ない大学の非常勤枠での雇用することができた。我々のシステムの現場立ち上げはこの柏木氏の献身的な努力なしには成し得なかったものである。一方、RFガンのような経験の余りない装置を扱うということで、国内外の研究者にも多くの支援を仰いだ。最も現実的な支援をいただいたのがKEKのATFのグループであった。浦川先生や早野先生からは装置のハード関係で立ち上げ期で不十分なインフラしかなかった我々のグループに対し貴重な助言とご支援を戴いた。また、学生の教育という観点でもATFにおけるリニアックやダンピングリングの運転や実験補助などを通じて、加速器屋としての基本を徹底して叩き込んでいただいた。この辺のご協力が我々の宝となった。また更に

RFガンについて多大な経験を積んでいた住友重機械のメンバーやBNLのX-J. Wang氏らの直接的な指導もあいまって、上で述べたように順調な施設立ち上げが可能となったものと感謝している。おそらくは、弱小私立の弱小研究室がやっと加速器施設を立ち上げた、余りにもかわいそうだから見てもらえない、何とかしてやろう、といったきわめて同情的な雰囲気もあったに違いない。実際に、金がない・人がない・時間がない、の3ナイ状態であったにもかかわらず、思いの外順調であった裏にはこのような方々の支援が大きく横たわっていたと思っている。

5. 学生教育と学生の苦闘

我々のグループは上記のように自前のメンバーとしてはきわめて弱小であったが、幸いであったことは、研究室に入ってくる学生がきわめて優秀であったことである。初代の黒田隆之助君はもとより、小吹君、長岡君といった非常に優秀な学生が研究室のレベルを高めてくれたのは紛れもない事実である。それに引き続いた大島君はKEK-ATFでの研修を含め我々の設備の製作に大きな貢献をしてくれた。また、RFガンにとって命ともいえるレーザーシステムの安定化に関連して、矢田君、石川君、前田君といった学生が、NEDOのフェムト秒テクノロジー研究機構に出向してレーザー技術を極めてくれた。彼らのおかげで我々のレーザーは根源的な安定性が確保できただけでなく、レーザー調整の巧拙を伴う部分について、常に安心して扱える技術が身につけてきた。

6. ビーム実験の進捗と装置の現状と応用実験

我々のRFガンシステムは上記した2002年2月22日の施設検査合格以降、本格的なビームテストを開始したがそれ以前より種々のビーム基礎試験も実施してきた²⁾。具体的な試験項目としては、レーザー入射位相とビームのエネルギーや品質との関係³⁾、レーザーの安定度評価^{2,4)}、空洞からの暗電流評価⁵⁾、エミッタンス測定システムの開発(シングルスリットスキニング法、ダブルスリットスキニング法の導入)⁶⁾、Mgカソードによる高出力化の試み⁷⁾、バンチ長測定法の開発⁸⁾等を挙げることができる。

また我々の装置は単にビーム加速を目的としたものではなく、高品質ビームを取り出し、それを種々の物理・化学研究へ応用して行こうというものであり、そのためのシステム開発も平行して行った。具体的な研究開発テーマは逆コンプトン散乱による高輝度軟X

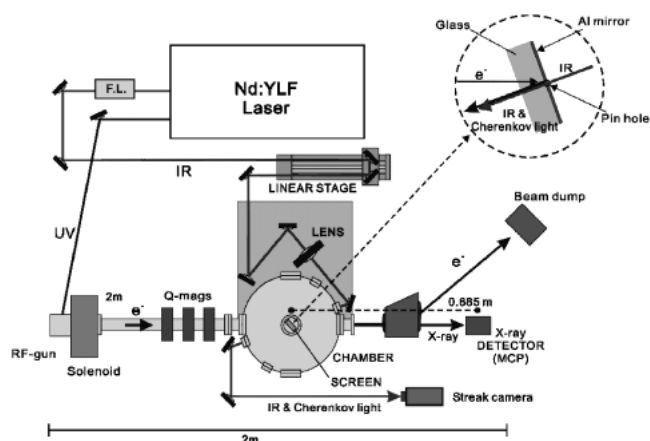


図5 逆コンプトン散乱システム模式図

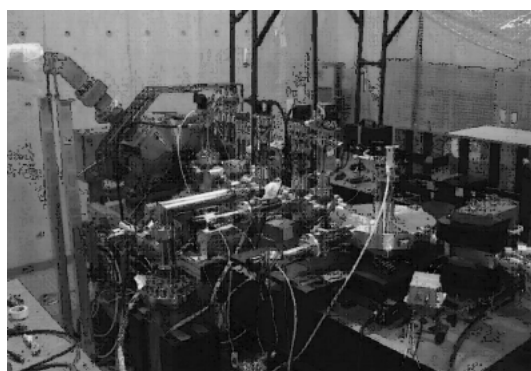


図6 逆コンプトン散乱実験システムの外観
(ビームライン下流より臨む, RFガン本体はソレノイド電磁石の向こうで見えていない)

線発生及びピコ秒パルスラジオリシスシステムの開発である。逆コンプトン散乱は最近でこそ良く知られた技術になってきたが、当初このシステム開発を提案した折、馬鹿げた発想と相当なバッシングも受けた。その都度、電子ビームの高品質化、レーザーの高輝度化、同期技術の進化などがこれを可能にする！と主張した。しかし結局一番説得力のある説明はローレンスバークレーで原理実験⁹⁾に成功したという説明であった。論より証拠ということだろう。この軟X線発生の実験は2003年の1月3日に最初の電子レーザーの衝突を確認し、X線の時間プロファイルも得ることができた。柏木氏、黒田氏、理研の丑田氏らの献身的な努力によるものであった¹⁰⁾。逆コンプトン散乱実験のシステム図を図5に示す。また実験システムの写真を図6に示す。

この逆コンプトン散乱によるX線発生に成功に意を高くした我々は続いて計画していたもうひとつの応用実験、ピコ秒パルスラジオリシスシステムの構築に

取りかかった。こちらの方は、過去に多少の経験（東大Linacにおけるストロボ法パルスラジオリシスシステム開発）があったため、やればできるという自負があったのだが、やはり5 MeVを切るエネルギーでのパルスラジオリシスシステム構築には大変な苦勞をした。ビーム取り出し窓の改造や光学系の最適化、光測定器の設置場所など、狭い実験室での学生諸君の苦闘が続いた。しかし彼らの努力が実り、2003年10月に我々のシステムでは初めて水和電子の生成の時間プロファイルをとることに成功した¹¹⁾。

7. 今後の展望

ここまで述べてきたように、一私立大学の一研究室が無謀ともいえる加速器施設建設を行い、高品質ビーム発生やそれを用いた応用実験を過去5年間にわたって実施してきた。この中で、加速器業界からの惜しめない支援や激励をいただけたことが大きな心の支えになっている。思いは常に世界最高のパフォーマンスであるが、それにも限界がある。小さな施設でなければできないこと、小さいがゆえに可能なことを追いつめながら、今後も高品質ビーム発生への努力を続けていくつもりである。幸い、文部科学省のハイテクリサーチセンタープロジェクトの第2期プロジェクトが認められ、大きな問題がなければ2004年度以降の5年間の運営にある程度の目処がついている。また2005年度にはKEKの大学支援プログラムにも選定いただけたので、ビームの大出力化を目指した研究とそれに引き続く高輝度X線発生の一層の大出力化とパルスラジオリシス実験の高度化を目指していきたい。

謝辞

我々の施設は早稲田大学の鷲尾研究室という名前を持っているが、文中で紹介した学生だけでなく、川合啓君、小林雅貴君、森雅和君、長澤章雄君、山崎一成君、工藤経生君、栗林剛彦君、上山大介君らの努力で立ち上げが行われてきた。また現在は坂上和之君、川口昌朗君、樋爪健太郎君、斉藤卓君、森山亮君、南口修一君らの努力によって運営が行われている。しかし、同時にKEK-ATFの諸先生方、早稲田大学・理工学総合研究センターの教職員各位の惜しめない支援、また更に住友重機械工業株の各氏の献身的なご協力、の賜物でもある。そして予算的には文部科学省のハイテクリサーチセンタープロジェクト、KEK共同開発研究、早稲田大学・特定課題研究費、学振の科研費等多くの支援を戴いている。ここに関係諸機関関係

者に厚くお礼申し上げたい。

参考文献

- 1) R. Kuroda et al., *Nucl. Instrum. & Methods A* **455**, 222–227, 2000.
- 2) S. Kashiwagi et al., *Int. J. Appl. Electromagnetics and Mechanics* **14**, 157–162, 2001/2002.
- 3) R. Kuroda et al. Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji p156 2000, R. Kuroda et al. EPAC 2000 Vienna p1666 2000.
- 4) T. Oshima et al., Proceedings of. PAC 2001 Chicago p2400 2001.
- 5) M. Washio et al. Proceedings of EPAC2002 Paris, p1774 2002.
- 6) N. Kudo, et al., Proceedings of 28th Linear Accelerator Meeting in Japan”, Tokai p413 2003.
- 7) R. Kuroda et al. Proceedings of EPAC 2002 Paris, p1783 2002.
- 8) Kuroda et al. Japanese Journal of Applied Physics. 43, 11A p7747 2004.
- 9) K. J. Kim, S. S. Chattopadhyay, C. V. Shank, Nuclear Instruments and Methods in Physics. Research A 341, p351 1994.
- 10) S. Kashiwagi et al. Journal of Applied Physics, submitted for publication.
- 11) Kawaguchi et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 236 p425 2005.