

ユーザーとスタッフの広場

◇ユーザー受賞記事

八島正知氏（東京工業大学）が日本セラミックス協会賞（学術賞）を受賞

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・材料物理学専攻・准教授の八島正知（やしま まさと）氏が、第63回（平成20年度）日本セラミックス協会賞（学術賞）を受賞されました。日本セラミックス協会賞は、日本セラミックス協会会員のうちセラミックスの産業及び科学・技術の進歩発達に資し、学術研究及び技術上の業績顕著な者に贈り、これを表彰されるものです。そのうち学術賞は、セラミックスの科学・技術に関する貴重な研究をなし、その業績が特に優秀な者に授与されます。

今回の受賞は、「高温における無機物質の結晶構造および電子・核密度分布の研究」に関する次の業績が高く評価されたものです。

- (1) 室温から高温 1900 K までの温度領域に試料を保持して、中性子粉末回折および高分解能放射光 X 線粉末回折データをその場測定可能な試料高温装置を開発し、高温での精密構造解析の基盤技術を確立したこと。
- (2) これらの加熱装置を用いて様々なセラミック材料の結晶構造解析、電子・核密度解析を行なうことにより数多くの独創的な成果を上げ、いわば高温精密構造物性と呼ぶことができる新分野を開拓したこと。
- (3) 数多くの酸化物イオン伝導体、リチウムイオン伝導体、混合伝導体および触媒の不規則構造と可動イオンの拡散経路を明らかにしたこと。
- (4) 電子セラミックス、構造材料、バイオセラミックス、環境・エネルギーセラミック材料、光触媒およびナノ粒子の結晶構造、相転移機構および電子・核密度を明らかにしたこと。



表彰式での八島氏（左）。

以上の成果は、セラミックス誌、一流学術誌、セラミックス協会年会・秋季シンポでのトピックス講演、PF シンポジウムでの招待講演（2009年3月24日～25日、つくば国際会議場エポカルつくば）などにおいて数多く発表されています。

受賞対象となった研究成果のいくつかは PF の BL-6C や BL-4B2 における実験と装置開発によるものであり、PF での放射光利用研究がセラミックス材料の科学・技術分野に大きく貢献していることが、日本セラミックス協会においても高く評価されました。

表彰式は、2009年6月5日に日本セラミックス協会第84回通常総会（東京都千代田区、霞ヶ関ビル）において行なわれました。

今回の受賞を受けて、八島准教授からのコメントです。「今回の受賞は、大変光栄であり、とても嬉しく思っています。これも PF のスタッフをはじめ数多くの先生方、共同研究者、研究室の学生諸氏、研究協力者、放射光・中性子実験施設など皆様のおかげであり、とても感謝しております。」

ERL09 ワークショップ報告

ERL 計画推進室 河田 洋
日本原子力開発研究機構 西森信行
加速器第七研究系 島田美帆
加速器第七研究系 阪井寛志

ERL ワークショップ (<http://www.lepp.cornell.edu/Events/ERL09/WebHome.html>) は ICFA (International Committee for Future Accelerators) の中の Beam Dynamics Panel の中のワークショップと位置付けられ、ERL に特化して加速器研究者を中心とした意見交換の場として 2005 年に Jefferson Lab. (JLab) で、2007 年に Daresbury で、と 2 年ごとに定期的に開催されてきています。

今回の ERL09 はアメリカの Cornell 大学で 6 月 8 日から 12 日まで開催されました。ところで、Cornell 大学はニューヨーク州の西のはずれに位置しており、氷河が残っていた finger lakes の一つである Cayuga lake のほとりの丘陵地にキャンパスが広がっています。キャンパスの中には湖に注ぎ込む溪谷がいたるところに走り、湖もあり、正に自然の真理を探究するには非常に良い環境にあると実感しました。写真 1 は会場となった Cornell Schwartz Center で初日に撮影されたグループフォトですが、最終日の報告によりますと参加者は延べ人数で約 170 名ということでした。

さて ERL09 は、Plenary session と 3 つのワーキンググループ (WG1: Injectors, Guns, & Cathodes, WG2: Optics & Beam Dynamics, WG3: RF & Cryomodules) の分科会に分かれて、それぞれのテーマにおける開発要素、問題点を明確にする作業が 1 週間をかけて行われました。我々の ERL プロジェクトからは、KEK, JAEA, ISSP からの関係者総勢



写真1 ERL09 ワークショップでのグループフォト

14名が参加し、Plenary session で3件、分科会（ワーキンググループ）で9件、施設ポスターで2件の発表を行いました。そして分科会の世話人（convener）としてJAEAの西森氏（電子銃・入射部担当）と、KEKの坂中氏（ビームダイナミクス担当）の両名が寄与したことで、ワークショップ全体にKEKのプロジェクトの存在感が示されたと思います。ここではワークショップ全体の様子を紹介するにとどめ、WG1: Injectors, Guns, & Cathodes は西森、WG2: Optics & Beam Dynamics は島田、WG3: RF & Cryomodules は阪井がその概要を紹介することといたします。

初日はすべてPlenary session で行われ、先ず、Maury

Tigner 先生の Welcome から開始し、午前中は主に現在世界中で進行している7つのERLプロジェクトの概要報告、午後は加速器の開発要素ごと（電子銃・入射部、ビームダイナミクス、同期精度の必要性、マシンの安全制御、ビーム安定性、そして超伝導空洞技術）の開発項目に関するレジュメトークが行われました。夕方にはCornell大学で進めている電子銃と入射部、および放射光利用が行われているWilson Lab. と超伝導空洞開発および製作を行っているNewman Lab.の第1回目のサイトツアーが行われました(写真2)。第1回と言うのは、2回目のサイトツアーが3日目の夕方に再度行われ、参加者が両方のLab.を見学できるように配慮されていました。

2日目は、先ず、Plenary session で各ワーキンググループの検討項目がワーキンググループの世話人から報告され、いよいよ各ワーキンググループに分かれての平行セッションが開始しました。2日目の夕方には、Advantages of ERL というタイトルで、コライダーおよびX線源としての立場からEduard POZDEYEV氏 (BNL)、George NEIL氏 (JLab) のPlenary session があり、その日の夜にはワークショップディナーが行われました。

3日目は、先ず前日のワーキンググループでの議論の内容報告が各convenerから紹介があった後、Maximum achievable beam brightness from photoinjectors に関してCornell大学のIvan BAZAROV氏のPlenary session があり、その後、またワーキンググループへ分かれての平行セッションとなりました。夕方に、今度はX-ray Applications for ERLのPlenary session が企画され、CHESSからDon BILDERBACK氏、KEKから河田、APSからIan MCNULTY氏によって「ERLにおけるX線サイエンス」の講演が行われました。ちょうど同時期にCHESSのユーザーミーティングが別会場であったということで、このセッションだけはCHESSのユーザーミーティングとのジョイントセッションの形で行われたとのこと。

4日目も同様に先ず前日のワーキンググループの議論の内容が紹介され、SRF System Optimization Process につい

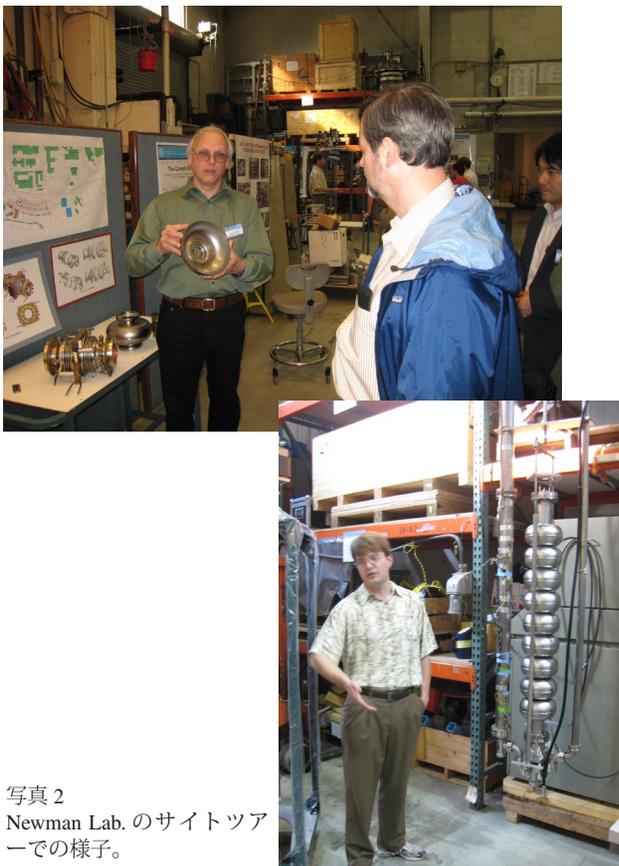


写真2 Newman Lab. のサイトツアーでの様子。



写真3 Don Bilderback 博士

での Plenary session の後、パラレルセッションとなりました。昼食後、「ピクニック」ということでどこに連れて行ってもらえるのかと楽しみにしておりましたところ、バスで 30 分ほどの Robert H. Treman State Park に到着し、約 1 時間程度の渓谷沿いの遊歩道を歩いて、渓谷の下に用意されているバーベキューを楽しむというものでした。Don Bilderback 博士と道中をご一緒させてもらい（写真3）、ERL のサイエンスを含めた諸々の話をして楽しみました。また、その道すがらの会話で、この遊歩道は世界大恐慌のときのニューディール政策の一環として整備されたということも教えてもらった次第です。

5 日目は最終日となり、各ワーキンググループの最終報告を行い、その後 Outlook で Maury Tigner 先生がワークショップのまとめを行った後、KEK と JAEA との共同主催の形で次回の 2011 年の ERL ワークショップを開催することが告げられ、1 週間のワークショップを閉じました。

筆者の河田は加速器科学の研究者ではないので、多くの講演内容は十分に理解するにはいたりませんでした。文中にも触れましたように KEK を中心とした ERL プロジェクトが、世界の加速器研究者の中で重要な位置を占めるに至っていることを肌で感じ、2 年後の ERL11 を成功させなくてはならない責任を感じて帰国の途に着いた次第です。ワークショップでの講演スライドは上記のサイトに掲載されていますので興味をもたれた方はぜひそちらを参照してください。各ワーキンググループの詳細な報告を下に掲載いたします。

WG1: Injectors, Guns, & Cathodes

WG1 では 100 mA 級の高輝度電子源開発を念頭に、DC 電子銃、RF 電子銃についての議論を主に行いました。DC 電子銃では GaAs カソード、500 kV 以上の高電圧電源、セラミック管と主要コンポーネントの仕様がほぼ固まっているので、その技術的な改良がワークショップでの主要テーマです。ERL07 では、カソード電極を高圧純水洗浄することで、暗電流を低く抑えることが報告され、大きな注目を集めました。ERL09 で関心を集めたのが、セラミック管に 500 kV 以上の電圧を安定に印加する、極めて基本的

な技術です。過去 2 年以上に亘って、JLab-FEL など 3 ケ所で 500 kV 以上の高電圧印加試験が試みられましたが、485 kV でセラミック管に穴が空くなど失敗に終わっています。その原因は、セラミック管中心を通るカソード電極を支えるサポートロッドから発生する電界放出電子が、セラミック管のある特定の場所に集中し、穴を空けるものと理解されています。これを解決するために提案されているのが、多段分割型 (JAEA/KEK) と inverted 型 (J-Lab) セラミック管です。多段分割型はセグメント化したセラミックでコバルト電極をサンドイッチし、高抵抗により電圧分割し、各電極に取り付けたガードリングが、セラミック管を電界放出電子から護るというものです。Inverted 型は医療用 X 線管で実績のある方式で、セラミック管の高電圧端子が真空容器中に押し込まれる構造になっており、サポートロッドが不要な構造となっています。両方式とも現在製作段階にあり、ERL11 ではその結果が報告されることになるでしょう。

その他、DC 電子銃関連の新しい話題は以下のようなものがありました。

- 電子銃の高電圧プロセシングに 10^{-3} Pa 程度のクリプトンガスを使うのが有効であること。
- 極高真空でのイオンポンプの排気量は、ポンプの大きさに比例せず、40 l/s 程度が最も排気量が大きいくと。
- Nb 電極からの暗電流がステンレスに比べて低いこと。
- アノードに取り付けた DC 電圧を使ってアノード下流のイオンの逆流を防ぎ、寿命が 2 割程度延びること。
- GaAs カソードからの電子パンチ電荷がレーザーパルスエネルギーが大きくなると飽和するのは、プラズマ不安定性によること。

RF 電子銃のハイライトは、Rossendorf 超伝導電子銃から 3 MeV、平均電流 100 μ A (400 pC@250 kHz) の電子ビームが生成されたことです。カソードは Cs₂Te を用いています。イオン冷却用の 703 MHz 超伝導電子銃 @BNL も、着々と開発が進むほか、新たに 3 つの超伝導電子銃が製作段階 (112 MHz@BNL, 200 MHz@ ウィスコンシン大, 500 MHz@Naval Postgraduate School) にあるのは驚きでした。ドイツの Hermholtz-Zentrum Berlin でのコンパクト ERL によく似た計画でも、超伝導電子銃を用いるようです。

ERL09 では、議長がワークショップであることを強調し、研究所間の共同作業を強く求めたのが印象的でした。その象徴の一つとして joint paper writing があり、conveners がまとめ役として、DC、RF 電子銃でそれぞれ一つずつ paper を書くことになっています。ワークショップに馴染みの薄い私にとっては、コンファレンス的な色彩の強かった ERL07 との雰囲気の違いに戸惑う面もあり、convener として議論を進める際も、うまくいわずに参加者に迷惑をかけてしまったかも知れないという反省点もありますが、convener として貴重な経験をさせて頂いたこ

とを、co-convener の John Lewellen 氏、推薦して頂いた羽島良一氏、他 organizing committee メンバーに感謝したいと思います。

WG2: Optics & Beam Dynamics

WG2 ではビームダイナミクスを中心とした議論が行われました。前回の ERL07 では別に Working Group が設けられていたモニターに関する発表と合流したこともあり、発表内容は多岐にわたるものでした。

ERL07 と大きく異なったのは、マルチ・ターン ERL (2 ループ以上) に関する発表が多数見られたことです。マルチ・ターン ERL とは、建設・運転コストを抑えるために、2 回以上加速と減速を繰り返す方法であり、KEK 敷地内に建設予定のコンパクト ERL を始め、Cornell 大学も 2 ループ ERL を予定しています。一方で、ループの数を増やすことでビームダイナミクスは複雑なものとなり、ワンループでは見られなかった新しい検討課題について議論がありました。その一つは、同じ線形加速器に 4 種類以上のエネルギーが通るため、そのオプティクスの計算およびビーム診断が困難であることです。また、一つのバケットに異なるエネルギーの複数のバンチを入れることについても多くの議論がありました。ひとつは空間電荷効果によってエネルギーの低いビームの質が劣化する可能性があることが示されました。また、加速空洞の実質の電流値が倍になるために、高次モード (HOM) による影響が大きくなり、ビームの許容最大電流値がおよそ 1/4 になるといったシミュレーション結果がありました。これらの問題について白熱した議論があり、電子バンチ毎に異なるバケットに入れるべきという意見が挙がりました。

シミュレーション手法については、start-to-end (S2E) が関心呼びました。より詳細なシミュレーションのためには、空間電荷効果、RF focusing, CSR wake など多くのビームダイナミクスを取り入れて数値計算する方法が望ましいのですが、計算機に対する負荷が大きいため規模の大きい周回部には不適切です。そこで提案された手法が S2E で、エネルギーの低い入射器付近は詳細な数値計算、周回部では近似式を取り入れた計算コード、挿入光源のアンジュレータでは放射光の計算に最適なコード、と部分毎に異なる計算コードで最適解を探し出す方法です。このほかに、光源の性能と建設費用の関係も重要な課題であり、S2E の一つとして数えられています。

その他には、前回の ERL07 と同じく短バンチ運転で発生する CSR wake の対策が議論になりました。オプティクスの高次項を最適化する方法が紹介された一方で、遮蔽効果が理論で示されているとおりに存在するのか実測して確認する必要があるという意見が出ました。さらに、トレランス、Touschek 散乱、挿入光源や CSR 以外の wake の影響など、様々なトピックについて詳細な計算結果が報告されました。

稼働中の ERL については、ALICE が入射合流部までの距離を伸ばしてエミッタンス測定などのためにビーム診

断系を充実させると発表がありました。加速するまでの飛行距離が長くなるためにビームの質の劣化が懸念されますが、試験器としては診断がより優先順位が高いという判断に、多くの人が賛同しました。個人的には、4 ループ ERL の検討が進んでいる Novosibirsk の発表がキャンセルされたことが残念でしたが、非常に興味深い発表・議論に参加できて有意義な時間を過ごすことができたと感じています。

WG3: RF & Cryomodule

WG3 では ERL の重要コンポーネントである超伝導空洞について議論がなされました。100 mA 以上の大電流ビームの ERL の実現には高次モード (HOM) の削減が最重要課題であり、2 年前のワークショップでは主に HOM の削減に対する空洞設計などが主なテーマでしたが、それから ERL の prototype の建設が各国で始まり、今回のワークショップでは、空洞開発の現状とその問題点が主なテーマとなっています。

今回一番印象に残ったのはホストである Cornell 大学による大電流運転に向けての ERL の入射器試験器のクライオモジュールの開発の現状の報告でした。100 mA 運転を実現する ERL 入射器の prototype であり、cryomodule 内に 1.3 GHz の 2cell の超伝導空洞 5 台で 5.5 MeV の加速の実現を目標としています。2008 年 12 月に最大 4 mA までの運転が行われています。現状の問題点は install 前に行われた縦測定での空洞性能評価試験では 15 MV/m の加速勾配で $Q_0 > 10^{10}$ の性能を出していた空洞が cryomodule install 後では Q_0 値が半減し、特に module 内の両端の空洞での空洞劣化が激しいとの報告がなされました。他 BNL や Daresbury でも同様の Q 値の劣化が見られているとの報告がありました。BNL は 703 MHz で 5cell の空洞の製作を行い、縦測定では 20 MV/m で $Q_0 > 10^{10}$ の性能が得られていたものが cryomodule 試験での結果は一桁以上の Q 値の劣化がみられています。また Daresbury でも同様に縦測定では良好な空洞が install 後のビーム運転では field emission による空洞劣化のため、10 MV/m 程度の加速勾配しか実現できないなどの問題点が報告されました。これらの原因として、HOM damper の ferrite が低温で割れて空洞に混入したこと、フランジ部の温度上昇また空洞外部 (バンチャー部や diagnostics 部、ビームダンプ) からのガスの混入などによる Q 値の劣化などが考えられており、今回の workshop で ERL 超伝導空洞の問題点として非常に有益な知見が得られました。日本のグループ (KEK/JAEA/ISSP) からはコンパクト ERL 向けの入射器用の 2cell 空洞と主加速器用の 9cell 空洞の試作機の試験結果が報告されました。2cell 空洞にはビームパイプ HOM ダンパーが多い中 HOM カップラーによる HOM 対策を行っており、特に ILC タイプの HOM coupler から改良を行い、縦測定では最大電界 30 MV/m、15 MV/m で 8 時間の連続運転の結果が報告され、HOM カップラーによる HOM 吸収の可能性を示しました。主加速器空洞は 9cell を保ったままで HOM ビーム

ブレイクアップ (BBU) の閾値を 600 mA まで上げた設計として ERL07 で非常に関心を引いており、今回の発表ではその縦測定の結果を示しました。17 MV/m の加速勾配が得られているが、filed emission が問題となっていることの報告がなされました。

ERL09 でもう一つ大きなテーマとなったのは HOM を減衰させる HOM damper を具体的にどのように作成するかであり、様々な発表がなされました。特に Cornell 大での cryomodule 試験にて 80 K の低温部に置かれた HOM damper のロウ付け部分の剥離によるフェライトの脱落などが問題であり、damper の製作方法、HOM 吸収体の性能評価などの報告がなされました。日本グループからは 8 種類のフェライトの 80 K 以下での HOM 吸収特性の結果と現在製作中のロウ付けを使用しない HIP 処理と櫛歯構造による HOM damper の報告がなされ、新たな HOM 吸収体の提案がなされました。また Cornell 大からはカーボンナノチューブを用いたセラミック材料の吸収特性が非常に良好であるとの報告がなされ、新たな吸収材料の提案もなされました。それに対し、JLab では 100 mA の 10 倍もある 1A での運転を想定しており、導波管タイプの HOM damper の設計が報告されました。HOM damper は室温である cryomodule 外部に持つていくことで kW 級の HOM 減衰が可能であるとの報告がなされました。

その他、RF 振幅位相の制御や日本グループからは RF 制御の開発現状の報告がありましたが、チューナーや入力カプラーに関してはレビュー程度の話に留まった感は否めず、新たな議論ができなかったのは非常に残念でした。

全体として、WG3 会場は他会場と比べ、部屋も小さく、発表中にも質問を行え、非常に議論も活発に行われる雰囲気でした。但し、convener が発表者を事前にほぼ決め、直前の発表参加希望が受け入れられず、我々日本グループからの参加者を含め、発表者が大幅に削られたことが今回のワークショップでは非常に残念であり、次回の日本での ERL11 の際はこのような教訓を生かすべきであると実感しています。

最後に Cornell 大での入射器 prototype の見学や現場での cryomodule などの議論や問題提起などを通じ、人数は少ないながらもやはり ERL に関しては Cornell 大が地道に努力を進めている部分が大きく、発表での議論以外でも学ぶべきところは大きかったというのが私実感です。

コーネル大学滞在記 (その 3)

加速器第七研究系 宮島 司

2007 年 3 月から 2008 年 3 月までの 1 年間、アメリカ合衆国コーネル大学に出張して、主にエネルギー回収型リニアック (ERL) 入射器のビームダイナミクスについて研究を行ってきた。PF news Vol. 26 No. 4 では、コーネル大学滞在記 (その 1) としてコーネル大学に渡航するまでの

経緯とその準備について、PF news Vol. 27 No. 1 ではその 2 として、コーネル大学での生活の立ち上げについて紹介した。今回は、コーネル大学での研究生活について紹介したい。

コーネル大学では、加速器物理に関する研究を行う建物として、Newman Laboratory と Wilson Laboratory の 2 つがある。このうちの Wilson Laboratory の 2 階に居室を貰えることになった。Wilson Laboratory は CESR (Cornell Electron Storage Ring) のある建物であり、5 階建ての建物である。実際には崖に面して建っており、5 階は入り口、4 階は販売機スペース、3 階 2 階が居室フロア、1 階が CESR や CHESS (Cornell High Energy Synchrotron Source) 放射光ビームライン、ERL の実験室という構成である。前回の滞在記でも書いたが、コーネル大学は丘の上に立っており、非常に起伏に富んだ土地である。アパートからは徒歩 10 分程度の距離であったが、その間には数々のバラエティに富んだ地形が存在する。アパートを出ると大学の入り口にあたる橋と滝のあるところまで下り坂が続き、滝の横に設置された階段 (図 1) を上るとフットボールグラウンドの横に出る。その後暫く平坦な道を歩くと Wilson Laboratory 5 階の入り口に到着するが、今度は階段を居室のある 2 階まで下りることになる。トータルではアパートと高低差はほとんどない。慣れるまでは滝の横に設置された階段でよく息を切らせていたが、慣れてしまうと周りの自然豊かな景色を楽しむ余裕もでき (時々リスや鹿に遭遇し)、楽しい通勤経路であった。冬場の積雪のある時期も同じ経路を通っていたが、幸い除雪が行き届いており、雪の降ったあとすぐに融雪剤を撒いてくれるので危険はそれほどなかった。Wilson Laboratory に勤める他の人の通勤形態を見てみると、自動車通勤 (大学内での駐車料金は職員でも有料) の人が多いが、自転車通勤や徒歩の人も意外に多かった。私はほぼ徒歩通勤で、実験が深夜に及ぶときは自動車通勤していた。

Wilson Laboratory での私の居室は一人部屋ではなく、コ

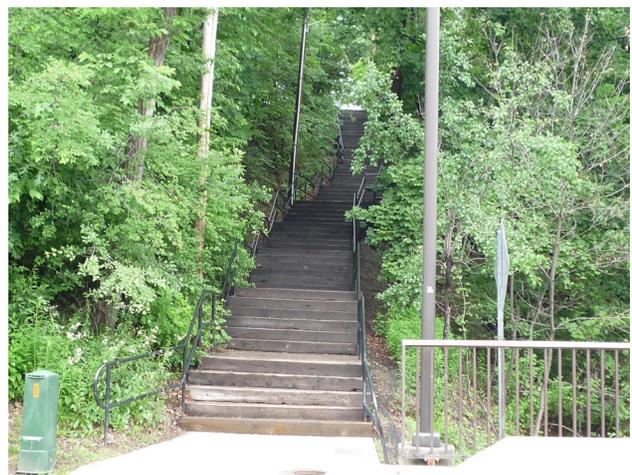


図 1 Wilson Laboratory に向かう途中の階段。右側に橋と滝がある。

コーネル大学滞在中に何かとお世話になった Ivan Bazarov 氏と、Georg Hoffstaetter 氏と同室となった。彼ら二人は非常に優秀であり、常に刺激を受けることができ、同じ部屋になれたというのは非常にラッキーであった。彼ら二人は大学での講義を持っており、よく学生が私たちの部屋を訪れて熱心に質問していた。また、大学院生もよく議論を訪れ、時には私も加わり非常に刺激に富んだ生活を送ることができた。

居室を貰った後は、私のコンピュータ環境を LEPP Computer Group が揃えてくれることになった。CPU の速度、メモリ、HDD 容量など必要なスペックと必要なソフトウェアを連絡すると、数日後には PC 一式 (Windows XP) を揃えてくれた。また、同時に LEPP にある Linux 計算機にもアカウントを作成して貰い、数値計算ができる環境が整った。支給された PC には Office や CAD ソフト (Autodesk) など基本的なソフトが含まれており、当初自分には問題なかった。しかし、本格的に研究を開始して PC をいろいろ弄ろうとすると壁が立ちだした。支給された PC には、自分ではソフトウェアのインストールはおろか、USB 機器も繋げなかった。何かをインストールするには全て Computer Group に依頼する必要がある、タイミングが悪いと少々時間を要することもあった。ただ、基本的に対応は早く、またセキュリティについても強固に保たれるので、Computer Group に頼るようにしていた。コーネル大学での研究では数値計算をすることが多かったので、Computer Group には大変お世話になった。

コーネル大学での私の研究の目的は、ERL 入射器のような低いビームエネルギー領域での数値計算法やパラメータ最適化法を研究し、さらに実際のビームラインでのビーム調整法および ERL を構成する各要素について調査することであった。Ivan はこの分野において非常に優秀な研究者であり、彼から研究に対する姿勢なども含めて多くのことを学ぶことができた。さらにコーネル大学では DC フォトカソード電子銃ビームライン (R128 ビームライン) が稼働しており、また ERL 入射部テストビームライン (LO ビームライン) 建設も進んでいたため、実際のビームを使った実験ができるとともに建設にも立ち会い、私にとって非常に魅力的な場所であった。

コーネル大学に来てからの私の最初の仕事は、電子銃ビームラインおよび ERL テストビームラインの数値計算に必要なデータを準備することであった。数値計算には、ビームライン上での機器の配置、各機器の電磁場データ、そして数値計算コード用の入力ファイルが必要となる。これらの情報を共有できるように wiki ページにデータをまとめた。LEPP では、情報共有のために wiki が使用されており、随時情報が更新されていた。Wiki だと誰でも情報更新可能で、さらに過去の履歴が管理されるため、良いツールであった。その後は電子銃ビームラインでの実験 [1] に参加するとともに、ERL テストビームライン上で最小エミッタンスを実現するためのパラメータ探索を行った。

特に電子銃ビームラインでの実験は、これまでに研究し

てきた GeV クラスのストレージリングとは異なることばかりで、新鮮で非常に楽しかった。電子銃ビームラインは、750 kV DC フォトカソード電子銃、ドライブ用レーザーシステム、収束用のソレノイド電磁石、そしてビームサイズやエミッタンス、バンチ長測定のためのビーム診断ラインから構成される。実際にビーム運転の際には、セラミックでの放電による制限などによって電子銃電圧は 250 kV に抑えられていた。私が加わった直後のビーム運転では、レーザーは CW で HeNe レーザーをドライブ用レーザーに使用していた。ビームサイズを測るには、実験開始直後は view screen を使用していたが、これの較正なども行い、非常に多くのことを学ぶことができた。また、実験中に何度かビームがおかしな軌道を描くことがあり、ガウスメータを持ってビームライン付近を調べたりもした。このビームラインでの運転を通して、低エネルギービームの場合にはわずかな残留磁場でも大きな影響を与えるということを身をもって体験した。その後は、CW ビームに対するエミッタンス測定を、ソレノイドスキャン法、ダブルスリット法、ワイヤースキャナ法の 3 つで行い、それぞれほぼ同じ結果を得られることを確認した。また、レーザー波長の初期エミッタンスに対する依存性なども測定した。これらの測定を通して、電子銃システムについて多くのことを経験することができたが、また同時に低エネルギービームの調整の難しさを改めて感じるようになった。

電子銃ビームラインでの実験と並行して、数値計算も開始した。対象とするビームラインは電子銃テストビームラインと ERL テストビームラインである。電子銃テストビームラインでの計算は、実際に稼働中のビームラインについての計算であり、計算結果と実験結果を即座に比較できた。コーネル大学に来る前にも低エネルギービームの数値計算を始めていたが、空間電荷効果を含む計算では時に条件の設定の仕方によって正しくないと思われる結果が得られたりしていた。コーネル大学では、短いビームラインについてはあるが、実験と数値計算を比較でき、数値計算における条件設定についての理解を大きく深めることができた。また、建設中の ERL テストビームラインについての計算も行った。こちらの計算では、ビームライン初期の部分は電子銃テストビームラインと同じであり、その後バンチャー空洞や超伝導加速空洞が配置されることが大きく異なる。ERL テストビームラインでの計算の目的は、最小エミッタンスを実現するパラメータを探索することであり、Ivan が開発した方法 [2] を学ぶとともに、それを新たな計算コードに適用して計算を進めた。計算ではマルチパラメータの最適化を行うことになり、膨大な計算量が必要となる。幸い LEPP にあるクラスター計算システム、Feynman cluster (最大 100 ノード、1 ノードあたり 2 CPU) を専有して使えることになり、恵まれた環境で研究を進めることができた。ただし、計算機自身は最新ではなく、ときどきディスクシステムのトラブルや、設置場所の空調トラブルなどによって、再計算を強いられるときが何度かあった。

電子銃ビームラインでの実験は、2008年3月に電子銃が移設されるまで続けられた。数値計算は、2007年6月くらいまでは電子銃ビームラインの再現計算および ERL テストビームラインでの最適化計算を行った。計算法にも慣れてきた2007年夏以降は、合流部での最小エミッタンス評価と CSR 計算コードを開発することとなった。これらの研究について、帰国などについては次回の滞在記で紹介したい。

参考文献

- [1] Ivan V. Bazarov, Bruce M. Dunham, Yulin Li, Xianghong Liu, Dimitre G. Ouzounov, Charles K. Sinclair, Fay Hannon, and Tsukasa Miyajima, "Thermal emittance and response time measurements of negative electron affinity photocathodes", J. Appl. Phys. 103, 054901 (2008).
- [2] Ivan V. Bazarov and Charles K. Sinclair, "Multivariate optimization of a high brightness dc gun photoinjector", Phys. Rev. ST Accel. Beams 8, 034202 (2005).

BL-2C 軟X線発光分光器の改造報告

弘前大学 手塚泰久

BL-2C に設置されている軟X線発光分光器は、共同利用に供されていますが、維持管理は軟X線発光ユーザーグループが行っております。1996年に物性研グループが、S 課題で建設し、維持管理をしていました。その後、2003年に手塚が代表を務めます軟X線発光 UG に引き継がれました [1]。以降、UG の有志メンバーによって改造がなされ、データ取得の効率化と、使いやすさの向上が図られました。是非、今後の研究の手段の1つとして、軟X線発光分光の可能性も検討いただければと思います。

BL-2C の発光分光器は、偏光依存性測定のために作られた分光器です。詳細は PF のホームページを参照してください [2]。BL-2C は直線偏光のアンジュレータビームラインで、発光分光器はその放射光の進行方向に対して垂直方向の発光を検知するように設計されています。更に、その配置を保ちつつ、放射光ビームを軸に発光分光器自体が回転する事で、放射光の偏光に垂直方向への発光で放射光と同じ偏光を含んでいる配置（偏光保存 / polarized）と、放射光の偏光方向への発光で同じ偏光を含まない配置（偏光非保存 / depolarized）の2配置で分光ができるようになっています。ただ、その偏光配置切り替えにはかなりの労力と時間を要しますので、たびたび変えるわけには行きません。将来的には、挿入光源での水平・垂直の切り替えが望まれます。

光源側で偏光を変えられなかった建設当時としては画期的な分光器でありましたが、月日と共にシステムの古さが目立ってきました。そこで、軟X線発光 UG では、施設側から毎年予算を配分していただき、以下のような改造を少

しずつ行ってきました。

1. 制御コンピュータの更新

軟X線の発光スペクトルは強度が非常に弱いため、1024ch × 1024ch の2次元の検知器を用いています。発光スペクトルは実空間方向への積分で得られますが、ローランドマウントによる収差や光学素子のミスアライメントを補正して積分するためには、多くの計算処理が必要です。建設当時としては最高スペックのコンピュータを使用していましたが、それでも10%程度のデッドタイムがあって、非常に非効率でした。また、検知器の制御装置内に蓄積されたデータを一定間隔で一気に取り込むという方式を取っていたことも、デッドタイムの一因になっていました。

そこで、まずコンピュータを最新のものに更新しました。同時に、高速の I/O ボードを組み込んで、フォトン位置情報を、処理装置に溜め込まず、1つ1つ直接コンピュータに取り込む事としました。この事によって、検知されたフォトン位置情報をリアルタイムで表示する事が可能になりました。発光スペクトルが積算されていく様子が逐次表示されますので、直感的に捉えやすくなりました。収差なども一目瞭然で、画面上で簡単に補正することが可能です。以前、2次元表示無しに、積分された発光スペクトルだけを頼りに分光器のアライメントをしていた状況に比べると、信頼性が格段に向上しました。なお、測定プログラムは当初 HP 社の HP-VEE という制御ソフトを用いていましたが、機能が制限されている上に販売中止になったため、NI 社製の LabVIEW に変更しました。

2. スリットの可変性

当初、分光器の入射スリットは固定でした。スリットは真空中にありますし、光学条件が変わってしまいますので、一度設定したらなかなか変更できません。発光分光器の分解能は入射スリット幅に大きく依存しますので、高分解能の実験のためには、できるだけ幅を狭くする必要があります。一方で、十分な光量を得ようとすれば、ビームラインのスポット程度に広げる必要があります。分解能に対するユーザーの要望はまちまちですので、以前は程よいところに固定されていました。

しかし、強度の弱さが発光の成果を制限している状況が目立ってきましたので、高分解能と両立させるため、スリットを可変性しました。スリット部分だけを市販のピエゾ制御可変スリットに交換することで、真空外からスリット幅を随時変更可能になりました。現在 10 μm から 200 μm 以上まで連続的に変化させる事が出来ます。この事によって、高分解能の実験から高強度の実験まで、ユーザーが必要とするスリット幅で測定が可能になりました。

実は、交換作業のため古いスリットをはずして初めて知ったのですが、私が引き継いだ当初の設定値 (20 μm) よりかなり狭くなっていました。建設以降、測定槽内で作業を繰り返しているうちに何かをスリットにぶつけたのでしょうか、知る由もありません。数年の間、非常に効率の

悪い実験をしていた事になります。発光の成果が出にくい状況であったと言えるでしょう。そんな事情もあったわけですが、この改造によって10倍から100倍の強度で測定が可能になりました。分解能を気にしなければ、SPring-8に劣らない効率で測定が可能です。特に、光源のフラックスの関係から、500 eV以下のエネルギーでは、強度的にSPring-8より勝るかもしれません。

この改造によって、それまではまず不可能であった測定が可能になったものがあります。入口スリットをビームスポットより広げると、分解能の点で発光測定には使いものになりませんが、検出強度自体は最大になります。発光分光器のエネルギーを特定の蛍光線付近に固定しておいて、ビームラインのエネルギーを変化させれば、その蛍光線付近の発光だけをモニターしたイールド測定が可能になります（部分蛍光収量スペクトル/PFY）。具体的には、検知器から出力されるイベント信号をビームラインの吸収測定コンピュータに取り込んでやるだけで可能になりました。これまで使われていた全電子収量法（TEY）、全蛍光収量法（TFY）と合わせて多角的な測定が可能です。加えて、このスペクトルは発光スペクトルの積分強度の変化であるわけですから、共鳴スペクトルの強度補正にも使えます。

3. ビームラインの連動制御

ここまでの改造で、発光の測定効率は格段に向上しました。結果、短時間で測定が可能になり、多くの実験が出来るようになりました。これまで1スペクトルに数時間かかっていたものも、数分から数十分で測定できます。全く喜ばしい限りではありますが、反面、測定する人間の仕事量が増えたという事も意味します。BL-2Cは、ビームライン分光器と挿入光源をそれぞれ専用のコンピュータで制御しています。発光の測定のためには、まずビームラインのエネルギーを変更して、次に挿入光源のギャップを変更して、発光の測定を始めます。測定中にも実験記録を書いたりしますので、短時間の測定では休まる暇がありません。人手が十分にあればいかようにもなりますが、少人数での連続実験は過酷です。私も1人で24時間の実験を経験しましたが、肉体的にも精神的にも酷くダメージを受けました。

共鳴実験は励起エネルギーを変えて測定する単純作業の繰り返しですので、発光測定のコンピュータからビームラインとアンジュレータを制御できれば、自動化が可能になります。ビームラインコンピュータの遠隔操作は、比較的簡単に出来ました。あまり知られていませんが、BL-2Cのビームライン制御のソフトは外部駆動が可能になっています。RS-232Cでコンピュータ同士を接続すれば、外部のコンピュータからビームラインを制御可能です。ただ、波長駆動が一度の動作命令では正しく指定値にならないので、複数回動作させて分解能の1/10程度に収まれば良しとしています。

一方、挿入光源の制御は、一筋縄ではいきませんでした。挿入光源制御コンピュータに備えられているギャップ変更プログラム自体には、外部制御の機能が備わっていません。

それとは別に、外部駆動用のプログラムがあって、そのプログラムからギャップ変更プログラムにアクセスすることで外部制御できるようになっていました。ギャップ変更プログラムをキーボードからの入力で作動させる代わりに、外部からRS-232Cを通してキー入力を仲立ちします。具体的には、TABコマンドを送信し（キーボードのTABを押すのと同じ事）、プログラムのフォーカスをギャップ値入力欄に移動させた後、ギャップ値を送信して入力欄に書き込み、更にTABコマンドでフォーカスを実行ボタンに移してENTERして、ギャップ変更を行います。このようなハンドシェイクなしの外部制御を行っているため、RS-232Cの通信異常や挿入光源側でエラーが生じると、正常なギャップ値に到達しない状態で測定を行うという事態に陥ります。RS-232Cの通信エラーはRS-232Cケーブルを短くすることで解決できましたが、時々ギャップ変更中にエラー停止するという問題はまだ残っています。現在は、ギャップ変更がうまくいかなくても、ビーム強度に大きく影響しない範囲で、だまじだま実験しています。また、ギャップ値はPFのホームページで確認できますので、ビームラインを離れているときでもできるだけ確認するようにしています。

現在、この挿入光源の制御に関しては、上記のような既存のプログラムを使用せずに、測定コンピュータから直接制御出来るようにすることを検討しています。直接制御出来れば、通信エラーもなくなるでしょうし、ギャップ値を知ることも可能になるはずですので、安定した制御が可能になります。ただ、将来的にBL-2Cの制御プログラム自体が変更される予定であるとの事で、様子を見ながら作業を進めている状況です。

この改造によって、共鳴スペクトルの測定が格段にやりやすくなりました。原理的には無限に測定を続けることが可能です。現在、光源がトップアップになっていますし、発光測定の際に後置鏡カレントを取り込んでいますので、強度補正も気にすることなく共鳴実験が可能です。

実際の測定例を紹介します。図1は、TiO₂の共鳴発光スペクトルです[3]。Ti 2p吸収端付近で励起エネルギーを変化させて発光スペクトルを測定したものを、等高線表示にしてあります。上部に吸収スペクトルが示してありますが、その各点で励起して測定した発光スペクトルです。表示されているエネルギー範囲で、約100本の(0.3 eV step)の発光スペクトルが測定されています。縦方向にスライスしたものが1本の発光スペクトルに相当します。この測定の際はビームタイムも限られていましたし、最初のデモンストレーションという意味もあって、分解能は少し落として(~1.0 eV)測定しました。1スペクトル10分の測定で、計17時間ほどを自動制御で測定した結果です。ここでは細かいスペクトル解釈は省略しますが、共鳴効果によって細かくスペクトルが変化している事が読み取れるかと思えます。以前はこれだけの数のスペクトルは測定できませんでしたので、吸収の特異点だけを励起した飛び飛びのスペクトルを並べることしか出来ませんでした。連続測定によ

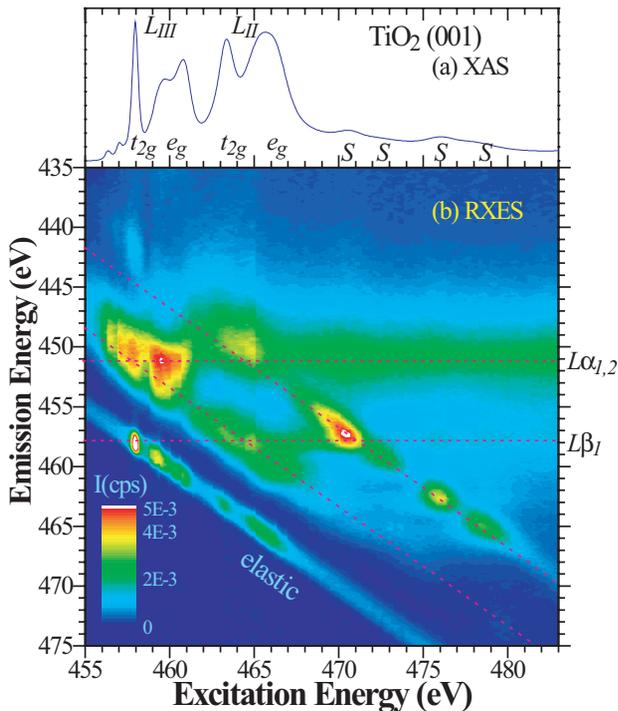


図1 TiO₂のTi 2p 共鳴発光スペクトル（等高線表示）。上に示してあるのは、電子収量法によるTi 2p吸収スペクトル。発光スペクトルの横軸は励起エネルギーで吸収スペクトルのエネルギーに対応している。縦軸が発光エネルギーで、図の各点を縦にスライスしたものが、個々の発光スペクトルに対応する。左下に直線状になっているのが弾性散乱ピークで、励起エネルギーに等しい。それ以外のスペクトルは蛍光とラマン散乱が混在した状態である。蛍光のエネルギー位置は図の右側に示してある。

って、得られる情報の質が、劇的に変化したと言えます。

以上、最近数年間で行われた、軟X線発光分光器の改造に関する簡単な報告です。本改造におけるコンピュータ及びプログラムの更新、ビームライン制御は、広島大の森本理氏が一手に行っていた結果です。更に、挿入光源制御の更新も検討していただいております。彼無しに一連の改造作業は進まなかったわけで、ユーザー一同大変感謝しております。また、スリットの交換や検知器の更新などの作業では、広島大の中島伸夫氏、佐藤仁氏、電通大の中村仁氏の協力が不可欠でした。今後も、ユーザーグループ一同協力して、発光実験の向上に努めていくつもりです。今後とも施設側のサポートをお願いすると共に、各方面からのご利用をお待ちしております。よろしくお願ひします。

PF トピックス一覧 (4月～6月)

2002年よりKEKではホームページで「News@KEK」と題して最新の研究成果やプレスリリースなどを紹介しています(KEKのトップページ <http://www.kek.jp/ja/index.html> に掲載。毎週木曜日に更新)。それを受けて、PFのホームページでもNews@KEKで取り上げられたものはもとより、PFの施設を利用して書かれた論文の紹介や受賞記事等を掲載しており、一部は既にPFニュースでも取り上げられています。各トピックスの詳細は「これまでのトピックス」(<http://pfwww.kek.jp/topics/index.html>)をご覧ください。

- 2009年4月～6月に紹介されたPFトピックス一覧
- 2009.04.01 物質構造科学研究所・構造物性研究センターの設立について
- 2009.04.09 次の3年は「新基軸！」～鈴木厚人機構長第二期就任インタビュー～
- 2009.04.09 第26回PFシンポジウムを開催しました
- 2009.04.16 水分子が生みだす電子の波紋～電子回折で開くピコ・ワールド観測への道～
- 2008.04.20 創薬に威力を発揮する新しいビームラインが稼動
- 2009.04.27 組頭広志氏(東京大学)が第3回日本物理学会若手奨励賞を受賞
- 2009.04.27 富田雅典氏(電力中央研究所)が平成20年度日本放射線影響学会奨励賞を受賞
- 2009.05.21 ERATO 腰原プロジェクトの記事がJST Newsに掲載されました
- 2009.05.21 加速器は夢の顕微鏡～構造物性研究センター設立～
- 2008.05.29 インフルエンザウイルスのRNAポリメラーゼの構造を解明～新型インフルエンザウイルスに対する画期的な薬剤設計に期待～
- 2009.06.04 光でつくるダイヤモンド～光誘起相転移のしくみにせまる～

[1] PF NEWS Vol. 27 No. 1 MAY 2009 p.51
 [2] http://pfwww.kek.jp/users_info/station_spec/apparatus/softxray_bunkoki.html
 [3] Y. Tezuka, et al., Photon Factory Activity Report 2007 #25 Part B (2008) p.96.