

問合せ先

ホームページを利用できない方は下記にお問い合わせ下さい。)

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
日本原子力研究所東海研駐在関西研究所
光量子科学研究センター

自由電子レーザー研究グループ 峰原英介

TEL : 029-282-5464 FAX : 029-282-6057

e-mail : eisuke@jfel.tokai.jaeri.go.jp

URL : http://www.wapr.apr.jaeri.go.jp/fel2003/

ユーザーとスタッフの広場

コーネル大学、ジェファーソン研究所訪問記 ～両施設の将来計画への取り組み～

放射光源研究系 坂中章悟

最近の PF ニュース [1,2] でも紹介されているように、PF 将来計画の有望な候補として、エネルギー回収型リニアック (ERL) を利用する超低エミッタンス・超短パルス光源が検討されています。この種の新光源については、米国のコーネル大学とトーマス・ジェファーソン国立加速器施設 (ジェファーソン研究所) が共同で提案している ERL 計画 [3] が現時点で最も良く検討されている計画の一つです。このたびコーネル大学とジェファーソン研究所を訪問し、先方の ERL 光源計画の進捗状況や現在取り組んでいる研究課題などについて見聞して来ましたので、簡単に報告いたします。

コーネル大学はニューヨーク州の小さな町イサカにあり、私が訪れた3月中旬にはまだ雪が残っていました。大学のキャンパスは小高い丘陵地帯にあり、その丘の下のトンネル内に電子・陽電子衝突リング CESR が設置されています。CESR リングでは、これまでビームエネルギー 5.2 GeV 付近で B メソンの高エネルギー実験が行われ、それと共存して放射光利用が行われてきました。コーネル大学の放射光施設 (CHESS) には現在 6 本のビームラインと 12 の実験ステーションがあります。これらを約 40 人の CHESS スタッフで運営し、年間で 600 人から 1000 人ぐらいのユーザーが訪れるそうです。放射光利用は、ビームエネルギー 5 ~ 5.3 GeV、ビーム電流 300 mA 程度で行われます。

CHESS 副施設長の Don Bilderback 氏が将来計画について説明して下さいました。高エネルギー物理の計画として、チャーム粒子の物理を研究する CESR-C 実験が今後 5 年間行われます。この実験ではビームのエネルギーを 1.9 GeV に下げるため、硬い X 線の利用実験とは共存できません。このため、CESR-C の運転とは別に、放射光専用の運転を年間 100 日程度確保する予定だそうです。CESR-C が終わる 2008 年以降には、CESR を放射光専用リングとして運転するための経費を要求する予定だそうです。現在リングは改造中で、トンネル内 (図 1) と実験ホールを見学させて頂きました。小さなグループがあちこちで朝のミーティ



図1 CESR トンネルの内部。内側に入射用シンクロトロン、外側に CESR リングの 2 つの加速器が設置されている。

ングを開いており、活気溢れる雰囲気を感じました。

CHESS 施設では、将来計画として ERL を利用した新光源計画を検討しています [3]。この計画の全般について Charles Sinclair 氏、Georg Hoffstaetter 氏などに話を伺いました。新光源用 ERL は、ビームエネルギーが 5 GeV、平均ビーム電流 100 mA、規格化エミッタンス (注: ビームエミッタンスにビームのローレンツ因子 γ と $\beta=v/c$ を掛けた値) として 1.5 mm-mrad 程度を目標にしています。現時点での有力な案としては、CESR トンネルに延長トンネルを追加し、その中に超伝導リニアックやビーム輸送路などを収納する案があります。これにより CESR トンネルの一部と既存ビームライン、CHESS 施設の建物などが有効利用できます。この案は最初 Talman 氏によって提案され [4]、現在は幾つかの問題点を修正した案 [5] が検討されています。図 2 にオリジナルな Talman 氏の案を示します。

ERL 新光源の基本設計と併行して、実証用加速器 (Phase I ERL) の設計が進められています。これはビームエネルギー 100 MeV、ビーム電流 100 mA の小型 ERL をコーネル大学の敷地内に建設し、ERL 光源を実現するために必要な実験を行うための試験加速器です。ここでは、電子銃も含めた入射リニアックの問題点、ビームのエミッタンス増加、コヒーレント放射光 (CSR) のビームへの影響、ビーム不安定性などについて実証実験を行う予定です。計画では建設に 3 年半、実験に 1 年半を予定しており、National

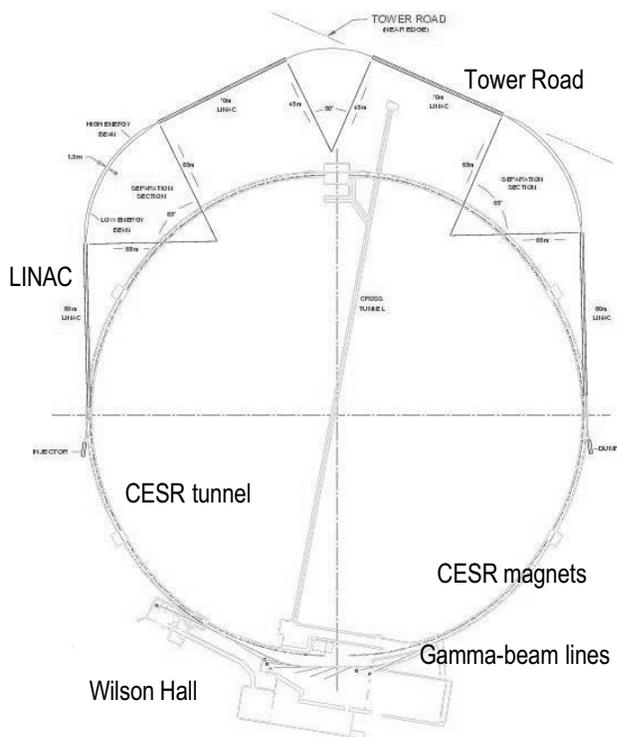


図2 CCSR トンネルの一部を利用した ERL の案 (オリジナルは文献 [4]、この図は資料 [5] より転載)。

Science Foundation (NSF) に予算要求中です (未だ認められていません)。現在はこの Phase I ERL の詳細設計を行っている段階だそうです。ERL の軌道設計やビーム力学上の諸問題については、前述の Hoffstaetter 氏や Ivan Bazarov 氏等が中心となって着々と研究が進められていました。軌道設計、バンチ圧縮の諸問題、ビーム不安定性などについて最近の研究成果を伺いました。

コーネル大学では超伝導加速技術に関する長い経験があり、現在の CCSR でも超伝導空洞を利用しています。ERL 向けの超伝導リニアックについても、主に入射器用大強度・低エミッタンスビーム用に最適化された加速管の設計研究が着々と進められていました。

2 日間の滞在の後イサカを離れ、プロペラ機を乗り継いでバージニア州、ニューポート・ニュースにあるジェファーソン研究所に向かいました。ここは主に原子核物理実験のための研究所で、大規模な超伝導リニアックを用いて連続的 (CW) な 6 GeV 電子ビームを供給できる CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) 加速器を中心とした研究所です。CEBAF の開発、建設によって培われた超伝導リニアックに関する多大なノウハウを持ちます。

超伝導リニアック関連の開発・製造はテストラボで行われていて、ここだけでも 60 人 (物理屋が 10 人程度、エンジニアが 6~7 人、他はテクニシャン) もの超伝導専門のスタッフがいるそうです。現在は核破砕中性子源 (SNS) 向けのクライオモジュール (ニオブ製加速管を収納した極低温容器システム) が月 1 台のペースで生産されています

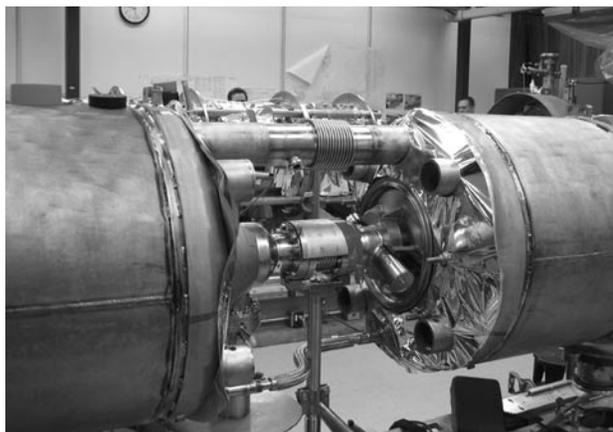


図3 製造中の SNS (Spallation Neutron Source) 向けクライオモジュール。

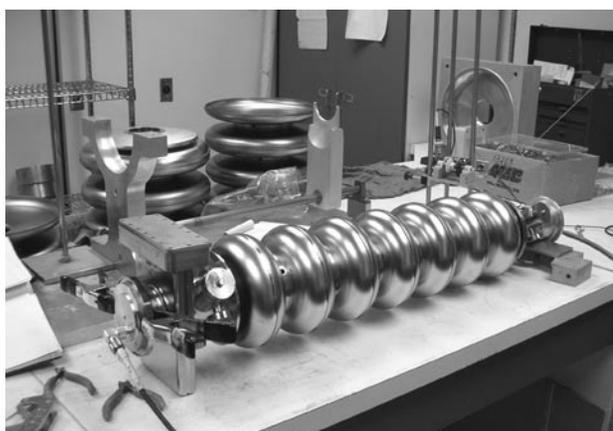


図4 CEBAF アップグレード向けに試作された 7 セル超伝導加速管。ニオブ製のカップを電子ビーム溶接して製造される。

た (図3)。これと併行して、将来の CEBAF アップグレード用の新型加速管 (図4) の開発や、超伝導 RF に関する基礎研究などが行われています。

CEBAF 加速器は周長 1.2 km のレーストラック形トンネルに収納されています。2つの長直線部に超伝導リニアックが組み込まれ、電子ビームは同じリニアックを 5 回通過して加速される、いわゆるリサーキュレーション・リニアックです。ユーザー運転の合間をぬって、CEBAF を利用したエネルギー回収実験 [6] の準備が進められていました。実験では、845 MeV まで加速した電子ビームをエネルギー回収して入射エネルギーと同じ 45 MeV まで減速し、エネルギー回収の実証をするもので、追加に必要なハードウェアはほぼ出来ていました。ビーム電流は通常運転と同程度の 100~300μA の見込みですが、低電流ながら初めての高エネルギービームを使ったエネルギー回収実験として注目されます。

ジェファーソン研究所には、超伝導リニアックを用いた赤外線自由電子レーザー (FEL) 加速器が稼働しています。この加速器では CEBAF と同型のクライオモジュールを使用しています (図5)。当初のビームエネルギーは 50 MeV でしたが、クライオモジュールを追加してビームエネルギーを 98 MeV に増強しました。また、エネルギー回収を利



図5 赤外線 FEL 施設 (IR Demo) の内部。右側に見えるのが超伝導加速管を納めたクライオモジュール。

用してビームに供給される電力を節約し、ビームダンプでの放射線レベルも低減しました。これらにより、今までにビーム電流 5 mA までのエネルギー回収に成功しており、赤外線 (波長数ミクロン) で 2.25 kW の取り出しに成功しています。FEL 発振を起こした電子ビームはエネルギー広がりが増大しますので、電子蓄積リングでの FEL の場合発振が間欠的にしか起こりませんが、このようにシングル・パスの電子ビームを利用すると連続発振が可能な点が大きな長所です。ちなみにやや小規模な同様の施設が日本原子力研究所・東海研究所にあります。冷凍機の制限のため超伝導リニアックを連続 RF で励振できない点が異なります。

この赤外 FEL 施設では、すでに連続 5 mA という大電流でのエネルギー回収を定常的に行っています。バンチ圧縮法に関する諸問題、ビーム損失をできるだけ避けるためのポイント、今までの放射線レベルの経験、電子銃の性能などについては David Douglas 氏、Steve Benson 氏などに聞きました。赤外線をさらに増強するために、ビーム電流を 10 mA に増やす計画が進行中です。さらに ERL の実証実験の一貫として、ビーム電流 100 mA までのエネルギー回収実験を行う計画があるそうです。これにより、低エネルギー (約 100 MeV) ながら大電流でのエネルギー回収を実証できることになり、CEBAF での実験と併せて将来の大型 ERL 光源を実現する上での貴重な基礎研究となりそうです。ちなみに、この赤外 FEL 施設には現在 120 人程度のユーザーがおり、年間 1800 時間程度をユーザー運転しているそうです。実験審査、施設運営等は良くマネージされているようです。

ジェファーソン研究所の将来構想については、加速器部門副ディレクターの Swapan Chattopadhyay 氏に伺いました。ジェファーソン研究所の近くにはあまり放射光ユーザーがいないので、光源向け ERL の計画はないそうです。将来計画としては、1) CEBAF を 6 から 12 GeV までアップグレードする計画、2) ERL による電子ビームと軽いイオンとの衝突型加速器の構想、の 2 つが柱のようです。

ジェファーソン研究所についても 2 日間の滞在でしたが、超伝導加速技術およびその基礎研究に関して豊富な蓄

積があり、設備やスタッフが良く整備されていることが印象的でした。この分野では米国でも中心的な位置を占めていると聞きます。また、超伝導リニアックを利用した加速器の利用に関しても多くの経験があり、ERL の研究もアクティブに進められていました。最後に、コーネル大学でもジェファーソン研究所でも、できることはぜひ協力して研究しましょう、という暖かい言葉を掛けられたことを申し添えます。

参考文献

- [1] 野村昌治、Photon Factory News, **20** (2) 7 (2002).
- [2] 飯田厚夫、Photon Factory News, **20** (4) 7 (2002).
- [3] "Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac (ERL) Synchrotron Light Source at Cornell University", CHESS Technical Memo 01-003/JLAB-ACT-01-04 (2001), Sol. M. Gruner & Maury Tigner (ed.).
- [4] Richard Talman, "Energy Recovery Linac in the Wilson Tunnel", ERL 02-6, Laboratory of Elementary Particle Physics, Cornell University, 2002.
- [5] Georg Hoffstaetter, "ERL@CESR", http://www.lns.cornell.edu/~hoff/hoff/talks/03-03-07/03_03_07erl.pdf
- [6] http://casa.jlab.org/research/cebaf_er/er.shtml

位相情報による X 線撮像法の進展

東京大学新領域創成科学研究科 百生敦

筑波大学臨床医学系 武田徹

日立製作所基礎研究所 米山明男

物質科学第一研究系 平野馨一、兵藤一行

1895 年のレントゲンによる発見以来、X 線は医療や工業などの幅広い分野で大いに用いられてきた。たとえば、我々が日常経験しているように、体内を透視できるレントゲン写真は今日の医療診断において欠かせないものになっている。X 線を用いる撮像法では、これまで物質による吸収の差を利用して像を得ることが多かったが、近年、位相情報を利用して像を得る新しい撮像法の研究が世界的に進みつつある。位相型 X 線撮像法にはいくつか種類があるが、その中で最も感度が高いのが X 線干渉計を用いる方法である。この撮像法は炭素、窒素、酸素、硫黄などといった生体を構成する軽元素に対して従来の撮像法よりも約千倍高い感度を持っているため、生体軟部組織を特別な造影処理なしに観察することができ、しかも X 線照射ダメージを軽減することができる。図 1 は放射光を使って得られた観察例である。ラットの小脳のスライス (1mm) を光路中に置いて得られた位相像が図 1 (a) である。図 1 (b) は同じスライスの吸収像である。両者を比較すれば、この撮像法の感度の高さは一目瞭然である。

現在、数 cm 角まで視野を広げることに成功しており、

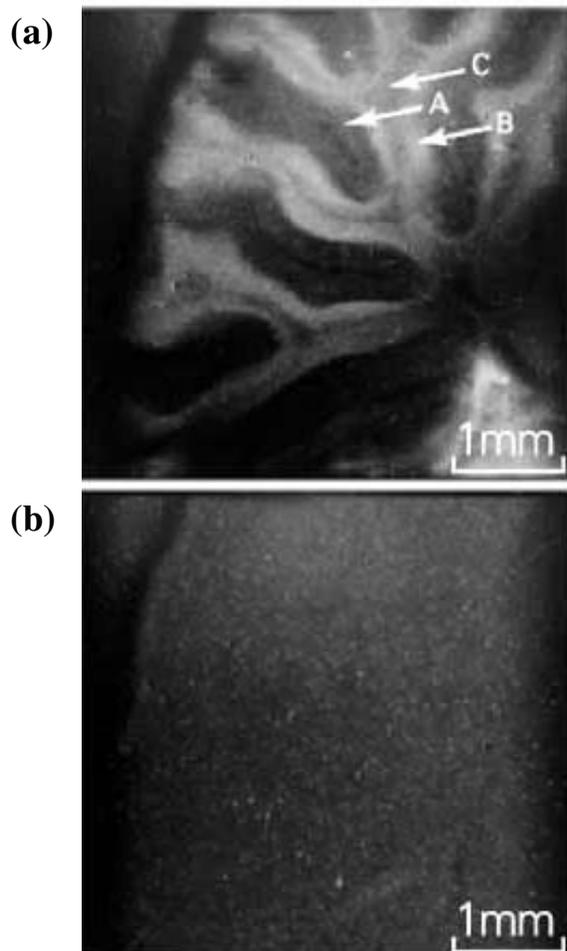


図1 ラット小脳スライスの観察例 (a) X線干渉計を用いて得られた位相像。分子層 (A)、顆粒層 (B) 及び白質 (C) によるコントラストが現われている。吸収像 (b) と比較すると、位相像の感度の高さがよくわかる。両画像は同じ照射量のエネルギー 13.5keV の放射光 X 線を用いて撮影された。

将来的には 10cm 角程度まで広げること目標としている。位相像で見ると、がん化する前の軟組織の微妙な変化や良性と悪性の区別ができる可能性がある。このような特長を生かして、小動物を用いた癌の状態観察への応用等が計画されている。将来、視野を 10cm 角以上に出来れば、臨床応用への展望も開けてくるものと期待されている (この位相型 X 線撮像法は 2003 年 2 月 25 日発行の日刊工業新聞で紹介された)。

参考文献

[1] 百生敦：PF News Vol.12, No.3 (1994) 20-22.
 [2] 米山明男、百生敦、瀬谷英一、平野馨一：PF News Vol.17, No.2 (1999) 18-21.

参照 URL(<http://www.kek.jp/newskek/2003/marapr/xray.html>)

ビームタイム利用記録より

実験企画調整担当 小links 克己 (KEK・PF)

昨年 10 月から今年の 2 月までのビームタイム利用記録に書かれていた PF に対する要望と、それに対するお答えをまとめました。ご希望はなるべく具体的にお書き下さい。また運転当番あるいは担当者(ビームラインおよび準備室)に相談していただければすぐに解決する場合がありますのでお気軽にご相談下さい。

--- 実験室関係 ---

AR-NE の入り口付近が暗い、トイレなどの環境が悪い。

A: 新しい NW にくらべて見劣りしますが、順次清掃などで対処したいと思います。

ビームライン近くに実験スペースが欲しい。

A: どのくらいのスペースが必要か、ステーション担当者にご相談下さい。

AR リングを定時入射にしてほしい。

A: 4 月の運転から定時入射になりました。詳細は今号の「お知らせ」に掲載されています。

実験ホールのソファを清潔にして欲しい。布団カバーを洗濯して欲しい。

A: 停止期間中にクリーニングにいたしました。

実験ホールでのインターネット接続を容易にして欲しい。

A: 実験ホール内で使える貸出用の IP アドレスを増やしましたのでご利用下さい。

実験ホール内の時計が正しくない。

A: 調整しました。

AR の運転表示をホームページに掲載して欲しい。

A: PF ホームページ (<http://pfwww.kek.jp/indexj.html>) の「現在の運転状況 <PF-AR>」でご覧いただけるようになりました。

BL-27、28 の付近の温度が一定ではない。

A: 3、4 月の停止期間中に空調設備の改修が行われていますので 5 月以降は大きく改善されるはずですが。

BL-12 下流側の暗室ドアが不調。

A: 昨年度、修理を行いました。ただ構造上の問題が大きいため、施設のほうに大幅な改造ができないか打診はしてあります。

暗室内の環境 (換気・排水) が悪い。水浸しになっていたため、そうならないような対策が必要。

A: 排水、および換気については今年度対処する予定です。

チェックングソースが古い。

A: 特殊なものでなければ対応出来ると思いますので放射線担当者にご相談下さい。

化学準備室の毒物保管庫を増設してほしい。

本格的なグローブボックスがほしい。

A: 上記 2 点については、担当者にご相談下さい。

--- PF 環境関係 ---

週末にごみが臭うことがある。

A：勤務日には必ず清掃をしていますのでご了解下さい。

食堂の土日営業をして下さい。あるいはパン類の自販機の設置を希望します。

A：ユーザーからの希望が多いのは承知していますが、採算が取れないので食堂は営業できません。その代わり食堂入口脇陽銀行 ATM の隣に軽食の自販機（焼きおにぎり、たこ焼き、やきそば、ホットドッグ、フライドポテト、おむすび&唐揚げ）とパン類の自販機（デニッシュ類、蒸しケーキ等）が、また BL-3B 付近出口の外に飲み物の自販機が設置されました。出前を取れる店も掲示してありますのでご利用下さい。

貸出し用の自転車が使えないことが多い。

A：鍵の返却率が低いからです。ユーザーのご協力をお願いします。

実験ホール入口の男子トイレが見苦しい。

A：今年度夏のシャットダウン時に光源棟および研究棟 1、2 階のトイレを改修します。

監視員室での手続きのコンピューター化、迅速化してほしい。

A：放射線安全管理センターに検討をお願いしています。

仮眠室の衛生状態が悪い。シーツをもっと頻繁に変えて欲しい。

A：現在は 2 週間に一度、交換しています。

--- 宿舎関係 ---（以下の宿舎に関する希望はユーザーズ・オフィスからの返事を載せています）

宿舎の管理人が 10 時前に鍵を守衛所に持って行ってしまった。

A：管理人に現状を話し、午後 10 時まで待っていただくこととしました。

4 号棟 104 室のエアコンの効きが悪い。

A：調査します。

1 月 18～21 日に 1 号棟 301 室に宿泊したら、室内に 2 匹の雀がいて、部屋が糞まみれであった。

A：調査します。

宿舎の大浴場がほしい。

A：ユーザーからの意見を聞いて廃止した経緯があります。

宿舎の毛布類にダニがいて喰われたので定期的な清掃・消毒をしてください。

A：今年の 3 月に室内を含む床面の病害虫駆除を実施しました。寝具の消毒は今年度より定期的に行う予定です。

宿舎の部屋替えをやめて欲しい。

A：ユーザーズ・オフィスでは途中の部屋替えを減らすために、部屋番号の決定をなるべく遅らせて最後まで調整する努力をしています。以前に比べると部屋替えの頻度は減っていると思われます。

--- その他 ---

KEK 構内での歩行者の為の案内表示を充実させて欲しい。

A：施設部に依頼しておきます。

共同利用実験環境の改善について

2003 年春の停止期間中に以下の改善を行いました。

1. 実験ホール、RI エリアの空調設備を更新しました。また、温度制御の方式を変更しました。
2. 実験ホール内の放送設備を増強しました。放送設備には二系統ありますが、その内一系統についてスピーカーを増強しました。緊急放送等が聞き取り易くなったはずです。
3. PF の計算機システムの更新に伴い、実験ホール、ユーザー控室の端末、プリンタが更新されました。詳細は計算機の web を参照。
4. ユーザー控室、実験準備室をはじめ研究棟の照明設備改修を行いました。照度改善と省エネを同時に実現しています。
5. 自転車置き場を整備し、照明を改修しました。
6. 仮眠室、女子更衣室の病害虫駆除を行い、寝具の洗濯を行いました。共同利用宿舎についても病害虫駆除を行いました。
7. ユーザー控室、廊下等の積年の汚れを落とす特別清掃を行いました。
8. ユーザー控室（プレハブ 1、2 号棟、研究棟 1 階、PF-AR 北西棟 1 階）の整備（北西棟は新設）を行いました。