

入射器の現状

概況

2011年9-12月の入射器運転日程は以下の通りであった。

- 9月13日 入射器立上げ
- 9月26日 PFへ入射開始
- 10月3日 PF-ARへ入射開始
- 12月22日 全加速器運転停止

また、1-3月の予定は以下の通りである。

- 1月10日 入射器運転開始
- 1月16日 PFへ入射開始
- 1月20日 PF-ARへ入射開始
- 3月14日 PF, PF-AR, 入射器運転停止

震災復旧の現状

電子陽電子入射器は、昨年3月の震災により大きな被害を受けたが、震災2か月後、入射器8分の3を仮復旧させ、PF及びPF-ARへの早期入射と秋からのユーザ運転再開に間に合わせる事ができた(図1)。

PF, PF-ARへの入射試験運転が軌道に乗ったため、6月6日から引き続きA~2セクター(34加速ユニット)の被害調査を開始した。最終的に、10月16日全ての加速ユニットのイオンポンプが立ち上がり、真空が十分良くなった11月14日から大電力マイクロ波の投入試験を開始した。約2週間ではほぼ震災前の運転値に復帰した。ただし、まだビームラインは復元されておらず、これらの加速ユニットは真空中には孤立した状態で試験された。ビームラインをつなぎビーム試験ができるのは平成24(2012)年秋、SuperKEKB入射器の陽電子加速は、平成25年秋~26年度初めの試運転をめざしている。この様に、上流側入射器

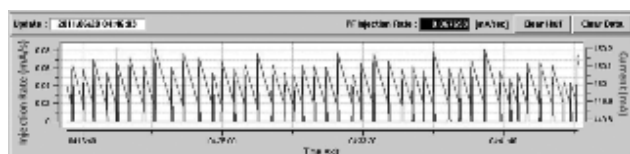


図1 図1(上) PF, PF-AR入射運転中の入射器下流側8分の3。(下) 6月20日午前4時半前後のPFトップアップ入射による蓄積電流(450.0 ± 0.2 mA)と入射率(0.02~0.08 mA/s)を示す。



図2 セクターA~セクター2の様子。加速ユニットの真空を立ち上げたが、ビームラインはまだ復元していない。

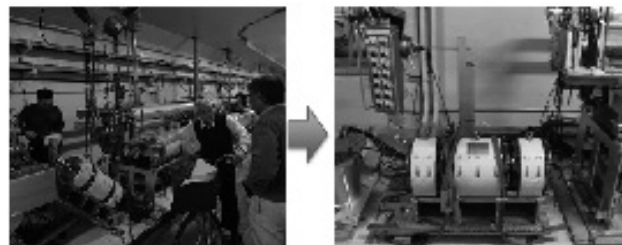


図3 床に仮置きされている4極電磁石



図4 震災によりずれた位置を修正した加速ユニット

はまだ全面復旧していない(図2)。

ビームラインで、落下したQ電磁石は当面床置きしている(図3)。破損したBPMペローズは、BPMをQ電磁石から取出し、機構内の放射物加工工場で切断し、新品を溶接して修理した。地震でずれた加速ユニットは、位置を修正し(図4)、最終的に復旧するまでの間、角材の上に加速ユニットを仮置きしている(図5)。震災により破壊された加速器トンネルジョイント部からの湧水は1日

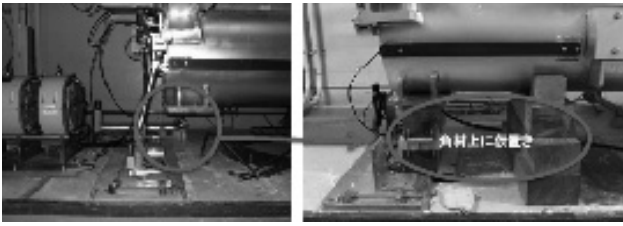


図5 角材上に仮置きされた加速ユニット架台



図6 トンネル湧水はかなり少なくなった。



図7 クライストロンギャラリーの様子

50 トンを超えたが、数回のグラウティング剤注入工事を行った結果、秋の運転時からは1日2トン程度まで減少した(図6)。損傷した地上部のマイクロ波源の修復は予備の部品を用いて行われた。故障したクライストロン、フィーダ、パルストランス、集束電磁石電源、電力分配器、パルス圧縮器の交換などが行われた(図7)。

SuperKEKB 入射器建設

毎週火曜日の入射器スタディを利用して開発中のRF電子銃は、電子銃からのビームを確認する成果があがった(図8)。リニアックでの加速に向けて、ビームを励起するレーザーのタイミングと加速マイクロ波の同期をとるための調整方法を逐次確立中である。

震災で4カ月あまり遅れたダンピングリング工事が昨年12月始まった。ダンピングリングは入射器セクター2とセクター3の間にある第2ビームスイッチヤードの西側に建設され、陽電子ビームのエミッタンスを小さくするために用いられる。入射器側の遮蔽を強化するための土木工事(図9)が最初に始まり、今年度中に完了の予定である。PF、PF-AR入射運転には直接影響がない。

新年を迎えて

昨年は、震災からの入射器の復旧に追われた1年であったが、今年は新しい入射器建設に向けた出発の年であってほしいと願っている。復旧もまだその途上であるが、第3次補正予算による復旧復興の支援もいただけることになっ

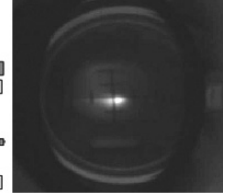
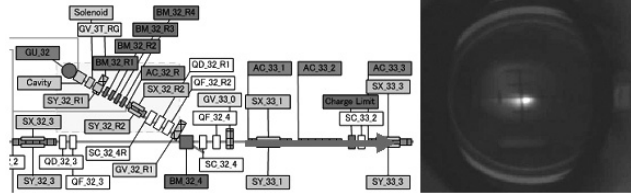


図8 秋の運転から SuperKEKB 用 RF 電子銃(写真上手前左)のスタディも開始した(写真撮影峠嶋一氏)。(右下)スクリーンモニタ SC32_4 で初めて観測された RF 電子銃ビームのスポット(吉田光宏氏提供)。



図9 12月に始まったダンピングリング土木工事

た。職員の異動もある。マイクロ波グループの責任者を長年務められた福田茂樹教授が退官されることになった。福田教授は、入射器クライストロンの安定運転で大きな貢献をされた他、J-PARCやSTF、ERLなどのクライストロン、RF源の開発を横断的に発展させてきた。引き続き入射器グループで仕事をされるが、入射器マイクロ波グループのリーダーは既に若手の道園真一郎准教授が引き継いでいる。SuperKEKB入射器の入射部は従来の熱陰極と高周波空洞によるバンチャー方式でなくRF電子銃を用いる。またSuperKEKB入射器では、従来のSバンドの加速管だけでなく、Lバンド、Sバンド、Cバンド、そしてXバンドといった幅広い周波数の加速管を利用する。この様なことから、これらを一括して担当してきた(旧)加速管グループを、入射部グループと(新)加速管グループに分け、それぞれ吉田光宏准教授と肥後壽康教授が分担して率いることになった。新しい入射器は、SuperKEKBへ低エミッタンス、大電流の電子、陽電子を入射するだけでなく、PF、PF-ARへのパルスベースでの連続入射が求められている。このような時期、若い力を引き上げ、入射器の力を結集し新たな建設に踏み出したい。

光源リングの運転状況

PF リング, PF-AR とともに秋の運転は概ね順調だった。図 1 に典型的な運転として, 11 月 7 日から 12 月 7 日までの蓄積電流値の推移を示す。PF リングでは 11 月 18 日から 11 月 24 日にかけては単バンチユーザ運転を行っている。単バンチモードは寿命が短いため, トップアップ運転は必須となっている。そのため, 火曜日ごとに行われているリニアックマシン調整をこの週に限り中止して頂いた。また, 12 月 1 日のマシン調整日に多バンチ 300 mA と単バンチ 50 mA を組み合わせたハイブリッドモードでのテスト運転をビームライン側と合同で行い, ビームライン側での問題点を洗い出して頂いた。特に, 問題は無いようである。PF-AR では再入射を必要とする寿命急落が 11 月 11 日に 2 回, 1~2 時間で回復する寿命急落が 11 月 12 日と 11 月 15 日に 3 回ずつ発生した (11 月 15 日には 2 分間隔で 2 回起きていた)。その 8 回のうち 5 回は SW12-13 間の FB ダンパ部の圧力のハネと同期していた。一度起きると頻発する傾向がある。カレント依存性も見えており, 非回復型は 60 mA 付近で発生, 回復型は 50mA 付近で発生している。放電条件やダストの種類やサイズの違いが考えられている。FB ダンパを改良型に交換する方向で検討している。さらに再入射を要する寿命急落が 11 月 22 日, 11 月 25 日, 11 月 29 日に 3 回あった。短時間で回復する急落も頻繁にあったが, そのうちの幾つかでは NW14-2 付近の圧力が変動していたこともあり, ギャップを 10 mm まで閉じたことによる (ダストではない) ビームロス率の上昇と思われる。

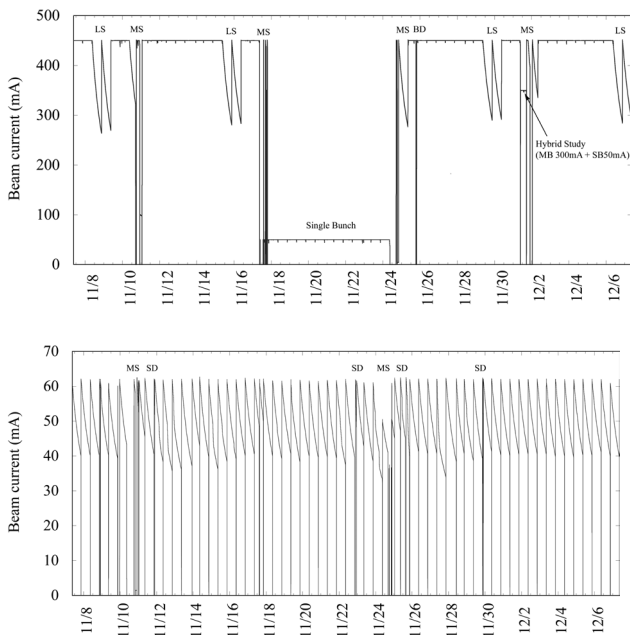


図 1 (上) PF リングと (下) PF-AR の蓄積電流値。MS はマシン調整, LS はリニアックマシン調整, BD はビームダンパ, SD は寿命急落を示している。

PF リング, PF-AR とともに, 12 月 22 日 9:00 に運転を停止した。冬の停止期間中には, PF リングの超伝導ウィグラー上流のゲートバルブを取り外し, ダミー管と交換する作業を行った。このゲートバルブは震災後にハイブリッドモード運転での真空悪化が顕著になったので撤去した。1 月の立ち上げは, PF リングが 1 月 16 日に, PF-AR が 1 月 20 日に行われ, 現在ユーザ運転が行われている。なお, 1 月のマシン調整で, 蓄積電流値を多バンチ 400 mA と単バンチ 50 mA で行ったが, 顕著な真空悪化は見られなかったので, 2 月 3 日から 2 月 7 日まで予定されているハイブリッドモードでのユーザ運転では, 通常のマルチバンチ運転と同じ 450 mA で行う予定である。

PF リングにおける進行方向四極振動について

PF リングにマルチバンチ・大電流を蓄積した際には, 進行方向のカップルドバンチビーム不安定が発生する。これを抑制するために, 従来より広帯域進行方向キッカー, 高速デジタル信号処理装置からなるフィードバックシステムを開発してきた。進行方向のフィードバックによって重心振動モード (シンクロトロン振動の二極振動成分) を完全に抑制することに成功し, 2008 年秋からは常時ユーザ運転に供している。しかしながら, 実際の不安定現象は二極振動だけではなく, バンチが進行方向に伸縮する四極振動が発生していることもこのとき判明した。これをフィードバックによって抑制するには新たなキッカーを設計・製作する必要があるうえ, 強力なアンプも必要になるなど費用と時間の両面で容易に対処できなかった。そこで, 主加速 RF 信号 (約 500 MHz) にシンクロトロン周波数の 2 倍 (約 43 kHz) で位相変調をかけることでバンチ長を伸ばし, 全体としてビームを安定化する手法を併用してきた。この手法は四極不安定の安定化に有効である一方, ビームのエネルギー広がりが大きくなる欠点を持ち合わせている。したがって, リング内の分散がある場所ではビームサイズが大きくなり, 結果としてビーム輝度の減少につながってしまう。とくに顕著に表れるのが BL3, BL17 など, 分散のある場所にある挿入光源ビームラインである。

東日本大震災の後, 6 月 30 日にはじめて単バンチ・大電流のビームを蓄積したところ, B23-B24 間の真空が悪化してビームダンプにつながる事態が発生した。この時点では原因究明に至らなかったものの, 夏の停止期間の作業によって RF コンタクト付きのゲートバルブ付近が変色し, O リングが変質していることが判明した。このタイプのゲートバルブは PF リングでは全部で 3 か所使用していたため, このうち 2 つはダミー管と交換し, 残り 1 つは状態が比較的良好と思われたためそのままにする方針とした。

この状態で秋の運転を開始したところ, 進行方向の四極振動の様子が従来とは変わっていることが判明した。四極

振動が起き始めるビーム電流の閾値は 230 mA 程度であったものが 270 mA 程度まで上昇した（閾値は RF 空洞のパラメータにも依存しており、常に同じ電流で起き始めるわけではない）。また、蓄積電流値がさらに大きくなって 400 mA を越えたあたりでは、夏以前の運転では四極振動が起きたり起きなかったりを繰り返す奇妙な現象が起きていたのに対し、400 mA を越えても不安定が発生することが無くなり、ビームが安定になった（念のため付言するとビーム不安定の二極振動モードは起きているため、進行方向フィードバックによる抑制は不可欠である）。このため、ゲートバルブ部分が空洞構造となり、四極振動をひきおこすインピーダンス源になっていたものと推定した。

これで四極振動問題が全て解決したかと思つたのもつの間、ビーム電流が 450 mA でトップアップ運転を継続している間は非常に安定であったのに対し、リニアックマシン調整にともなうトップアップを停止して蓄積モードで運転したところ、電流が 320 mA 付近まで減少したときに四極振動が起きはじめることが判明した（図 2）。この現象にはヒステリシスがあり、一度不安定が起きはじめると 450 mA でのトップアップ運転に戻しても四極振動が治まることは

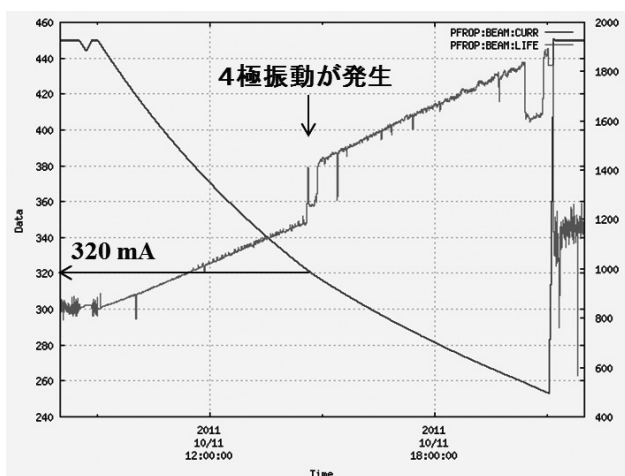
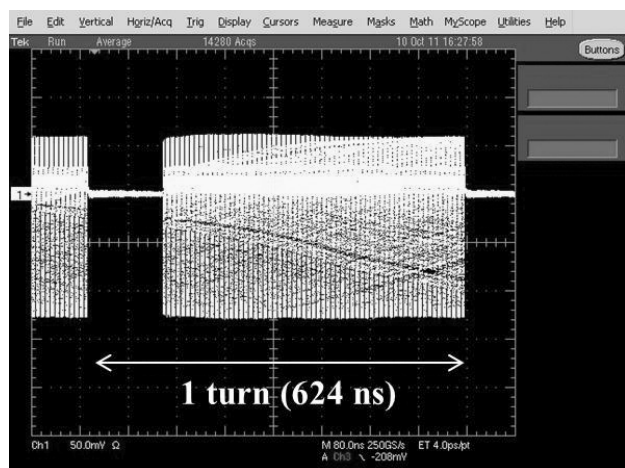


図 2 (上) 250 バンチ + 62 ギャップのフィルパターン、(下) ビーム電流 320 mA 付近まで減少したときに四極不安定発生。バンチ体積が増えるためビーム寿命が増加する。

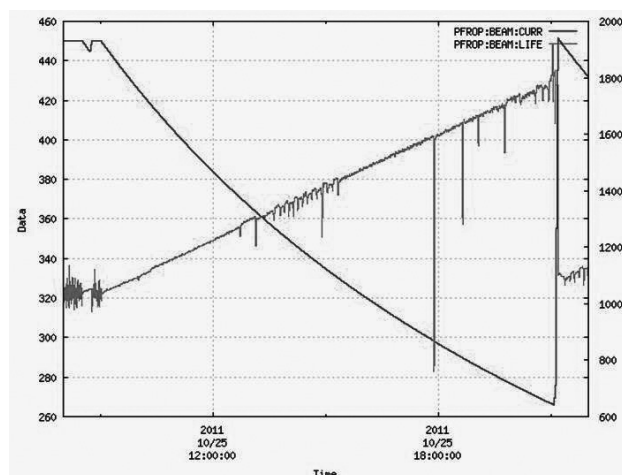
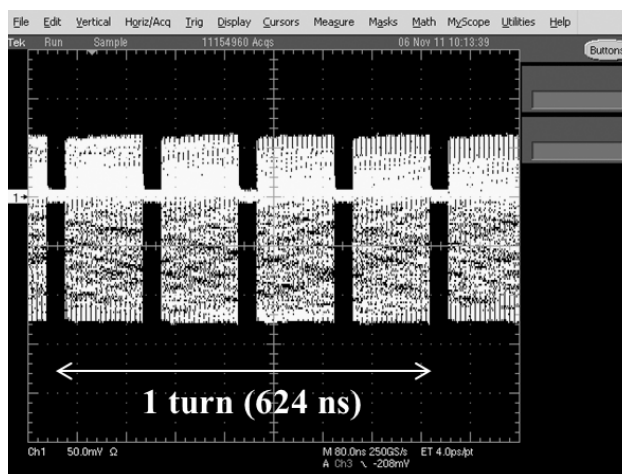


図 3 (上) (63 バンチ + 15 ギャップ) × 4 個のフィルパターン、(下) ビーム電流 260 mA 付近になっても四極不安定は発生しない。(ビーム寿命がスパイク的に下がっているのは挿入光源のパラメータ変更にもなうもので、不安定とは無関係)

無かった。

フィードバックシステムの解析機能を使用して個々のバンチ振動の様子を測定したところ、バンチトレイン後半になるにしたがって振動が大きくなることが分かった。これまで PF はハーモニック数 312 に対し、連続した 250 バケツにビームを蓄積して、残り 62 バケツはイオン捕獲不安定を抑制するためのギャップとしていた（バンチトレイン 1 個）。バンチ列後半で不安定が成長するならば、バンチトレインの数を増やして、個々のトレインの長さを短くすれば不安定が抑制可能になると考えて、いくつかのフィルパターンを試行した。その結果、4 つのバンチトレイン（63 バンチ + 15 ギャップ）× 4 個、とすれば四極振動が起き始める電流値が下がることを確認できた（図 3）。これ以上分割しても効果は無く、むしろ不安定が起りやすくなってしまった。当面のユーザーランは 4 バンチトレインで行うとともに、今後も原因究明のマシスタディを継続する。

運転・共同利用実験

3.11 大震災の影響が心配された 2011 年度秋期運転も 12 月 22 日に無事終了しました。同年度冬期運転は、予定通り PF リングでは 1 月 16 日から立ち上げ調整運転が開始され、1 月 19 日の光軸確認を経て利用実験に供されています。PF-AR は 1 月 20 日に立ち上げ、23 日から利用実験が開始されました。リングおよびビームラインは順調に運転されており、3 月 14 日（水）午前 9 時まで運転が行われる予定です。3 月 14 日午後には ERL シンポジウムが、15、16 日の両日には PF シンポジウムがエポカルつくばで開催されます。

2012 年度予算が成立しておらず、また 4 月以降の電気代の動向が分からない状況ですが、2012 年 4 月から 6 月の運転スケジュールが決まりました。しかしながら、PF のプロジェクト経費の減少が予測されており、また電気代の上昇は必至であります。そのほかに、2012 年度中には cERL のビーム試験運転が予定されており、これまで以上の建設予算も計上しなければなりません。このように、2012 年度の予算状況は非常に厳しく、利用実験モード 4000 時間あるいはユーザーの方々の出張旅費を十分に確保出来るかについても PF 懇談会（4 月以降は PF-UA）を通してご議論いただくことが出てくるかもしれません。

ビームラインの建設等

PF では数年来ビームラインの再編・統廃合を進めてきました (http://pfwww.kek.jp/whats_new/announce1110_beamline.html)。その目標の一つとして、挿入光源ビームラインへの資源集中があります。2.5 GeV-PF リングの中長直線部の 4 か所については VSX 領域をカバーする競争力のあるアンジュレータ・ベースのビームラインを整備してきました。

具体的には、BL-2、BL-13、BL-16 および BL-28 です。BL-2 以外は、従来 X 線利用研究とビームタイムをシェアしてきましたが、2009 年夏の BL-13 建設作業により 4 本すべての VSX 領域専用化を達成することができました。しかしながら、BL-16 以外は、予算的な制約から挿入光源をはじめとしてフルスペックのビームラインには至っていない状況です。

PF リングの直線部増強計画により生み出された 4 か所の短直線部については、short-period and small gap undulator (SPSGU) ベースの X 線ビームラインを BL-3A、BL-17、BL-1 に整備してきましたが、ようやく BL-15 にマイクロビーム XAFS/XFA と小角散乱を用いた X 線複合解析を目指す 4 本目の SPSGU ビームラインを建設するために一部コンポーネントの購入までこぎ着けています。

このような厳しい予算状況の中で、経年劣化が進んでいる BL-13、BL-15 および BL-28 に手を入れることについて

予算的な目途をつけることができました。多くのコンポーネントは 2012 年度に製作し、2013 年度夏のシャットダウン中に設置することができますが、3 本のビームラインを一斉に建設することはマンパワー的にも難しい状況です。BL-15 についてはすでに先行投資もありますので、2013 年夏のシャットダウン中に設置、秋からビームライン立ち上げ調整を進めることができると考えています。他のビームラインを含めて全体的な増強建設の予定は、3 月 15 - 16 日の PF シンポジウムでお伝えできると思います。

実験ホール、実験準備棟ホールの整理整頓および安全関係

PF 光源棟の実験ホールは、近年建設されている第 3 世代の放射光施設とは異なりスペースが限定されています。実験ホール外壁のスペースおよび実験準備棟ホールを合わせても決して十分な広さではありません。ここ数年、ビームラインの改変・統廃合を進めながらこれらの整理整頓を進めてきました。今後は、所有者不明の物品および数年間使用されていない装置の整理整頓を進めていきます。これらの作業の中で、とくにユーザーの方々が所有されている実験装置および物品については、常設場所の変更などのご協力をお願いすることになると思います。

3 月 11 日の東日本大震災では、PF 実験ホール外壁スペースおよび実験準備棟でも多くの物品の転倒、損壊などが起きました。震災以来、整理棚、キャビネットなどの固定作業、転倒落下などの防止対策を施してきました。外壁スペースおよび実験準備棟はフリースペースではありませんので、これらを利用される場合は、物品の内容、管理者、連絡先、PF 内での対応者名を明確にして、事前に PF 担当者の内田 (yoshinori.uchida@kek.jp)、濁川 (kazuyuki.nigorikawa@kek.jp) にコンタクトしていただくようお願いいたします。また、利用されるときは、これらを物品の一時置場と考えるのではなく、物品の安全かつ確実な収納を実施していただくようお願いいたします。

震災のために実験ホールの天井等に被害が出ていますが、ようやく復旧作業が行われることとなりました。予算の関係上、今年度内に完了することが求められているため、一部は実験と平行して作業を進めざるを得なくなりました。ご不便をおかけしますが、ご理解の程をお願いいたします。

2011 年 11 月 1 日午後からユーザーの方々にもご協力をいただき、防災防火避難訓練を行いました。これは、年一回行われる機構レベルでの避難訓練で、今年度は物質構造科学研究所主催で行われました。PF では、毎年ユーザーの方々にも参加していただく避難訓練を実施しており、機構においてもこのことは高く評価されております。30 分間放射光ビームが使用できなくなることから、この時間に昼食を取りに外出されるユーザーが多々見られることは残念なことです。ユーザーの皆さんにも安全について大いに

関心を持っていただき、来年度以降は大多数のユーザーの方々が避難訓練に参加されるようお願いいたします。

人の動き

この3月31日で、これまでPFに大きな貢献をしていただいた飯田厚夫さん、小出常晴さん、小林克己さん、前澤秀樹さんの4人の方が、退職となります。飯田さんは、X線分光法およびX線回折法に基づく放射光を用いた物質評価手法の開発と応用研究、小出さんは、放射光の偏光特性を利用して、軟X線共鳴散乱実験による相分離構造を示す強相関電子系化合物の研究、小林克己さんは、放射光単色かつマイクロビームを用いた放射線の生物作用に関する研究、前澤さんは、チャンネルを中心とする蓄積リングの整備・維持管理および紫外および軟X線領域での光学素子に関する統一的な電磁気学理論の研究を進めて来られました。4人の方々は、今後もKEKで、ご研究にあるいは業務にご活躍されると聞いています。

第一研究系は主として真空紫外・軟X線を利用する電子物性グループと先基安グループメンバー、第二研究系は主にX線を用いる研究グループメンバーにより構成されてい

ます。これまで放射光科学研究系の技術職員は、全員第一研究系に所属されておりましたが、技術職員においても分化が進み、実際に則した研究系に所属することが必要となってきました。そこで、2012年1月から、第一研究系には6人、第二研究系には4人の技術職員を配属することにしました。小菅隆さん、小山篤さんが、それぞれ第一および第二研究系技術副主幹として技術職員のとりまとめでいただくこととなります。

平成24年度からの執行部体制

平成18年度からの現放射光執行部体制が平成24年3月31日で終わり、2012年4月には物質構造科学研究所、放射光科学研究施設とも新執行部体制となります。所長に東北大学山田和芳教授を迎え、副所長若槻壯市教授と共に物構研運営に当たられます。PFについては、村上洋一教授がPF施設長に、足立伸一教授が第二研究系主幹に着任されます。第一研究系主幹伊藤健二、加速器第7研究系主幹小林幸則教授は異動なしです。また、現在第二研究系主幹の野村昌治教授は高エネルギー加速器研究機構の理事に着任されます。

ERL 計画推進室報告

ERL 計画推進室長 河田 洋

ずいぶん新年から時間が立ちましたが、明けましておめでとうございます。

今年はいろいろな意味でERL計画において正念場となる年です。ひとつはコンパクトERLが開発モードから建設モードとなり、いよいよ1年後には電子ビームを出すところとなって来ています。現場では設計打ち合わせ、建設打ち合わせが交互に毎週行われ、まさに新しい加速器の創成の年となっています。もう一つはKEKおよび日本の放射光のロードマップを構築する年であり、まさに現在建設が進められているスーパーKEKBに続く、次のKEK内のロードマップを決定していく年となっています。ERL計画が次期中心プロジェクトとしての位置付けを獲得することが非常に重要であることは疑問の余地が無い所です。また、それと呼応する形で日本の放射光施設の今後のロードマップの議論も放射光学会で行われることになる理解しております。そのような観点から、昨年からの3 GeV ERLのCD0 (CDRの一つ手前のバージョン) をユーザーの皆様にもご協力いただいて作成準備を進めています。3月14日の第2回ERLシンポジウムでは、第1部(3 GeV ERLの新展開)でKEKの鈴木機構長、スタンフォードのKieth Hodgson博士をはじめとする世界的な研究者の皆様、そして文部科学省からの来賓の方から皆様にERL建設に向けてのメッセージを頂き、第2部(持続可能名社会に向けて)では、昨年度のノーベル化学賞を受賞された根岸英一先生に特別基調講演「d-Block 遷移金属触媒が21世紀を救う」

をいただくと同時に、ERLで期待されるサイエンスを各分野の第一人者の先生方にご講演を頂くことを考えております。詳しくは60ページをご覧ください。

何よりもERLの実現に向けて重要なドライビングフォースはユーザーの皆様への熱い支援と期待です。よろしくご支援をお願いします。それに答えるべく推進室ではこのプロジェクトを進めて参ります。

この3箇月の進展

情報発信の立場で二つの企画がございました。ひとつは12月6、7日の物構研シンポジウム、他方は1月6日から9日に行われた第25回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウムでの企画講演Iです。

物構研シンポジウムでは、「量子ビーム科学の展望—ERLサイエンスと強相関電子構造物性—」と銘打ち、6日はERLサイエンスに特化したセッションを行ないました。プログラムは以下の通り。(http://imss-sympo.kek.jp/2011/)

- 1) "Present status of ERL Project - 3GeV crass ERL and XFEL-O -" Hiroshi Kawata (KEK)
- 2) "Hardware for Energy Recovery Linac - Development of accelerator key components and construction of R&D machine in KEK -" Yukinori Kobayashi (KEK)
- 3) "Science Cases with Energy Recovery Linac" Shin-ichi Adachi (KEK)

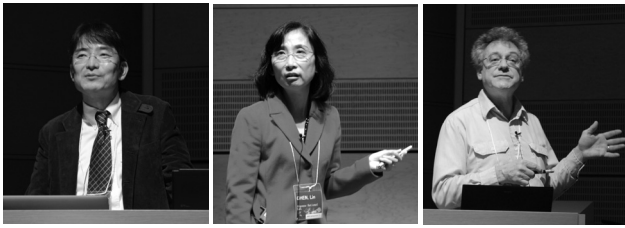


図1 写真：左から順に阿部 竜先生 (北大触媒センター), Lin X. Chen 博士 (Argonne National Laboratory), そして Sol Gruner 博士 (Cornell University)。

- 4) "Development of visible-light-responsive photocatalysts toward solar hydrogen production"
Ryu Abe (Hokkaido Univ.)
- 5) "X-ray Transient Absorption Spectroscopy for Solar Energy Research"
Lin X. Chen (Argonne National Laboratory)
- 6) "Science at the Hard X-ray Diffraction Limit: XDL-2011 Workshops Summary"
Sol Gruner (Cornell University)

前半は KEK から全体概要, マシンの開発状況, ERL のサイエンスケースを河田, 小林幸則教授, 足立伸一教授から紹介があり, 後半は ERL でのサイエンスケースをさらに議論するために, 外部から阿部 竜先生 (北大触媒センター), Lin X. Chen 博士 (Argonne National Laboratory), そして Sol Gruner 博士 (Cornell University) に, それぞれ水分解・光 (可視光) 触媒の開発における ERL への期待, フェムト秒時間分解実験による光誘起現象理解への期待, そして 2011 年 6 月に行われた XDL-2011 ワークショップで検討されたサイエンスケースの紹介が行われました (図1)。講演の後, 多くの参加下さった方々から「いよいよ来年度末にはテスト機 (cERL) が運転開始するのですね。楽しみです。」という期待の声を頂き, 勇気を頂いた次第です。

第 25 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウムでは企画講演 1 にて『3 GeV-ERL/XFEL-O 計画の現状と ERL サイエンスの展開』を 7 日の午前中に 3 時間の企画講演を行ないました。プログラムは以下の通りです。

【3 GeV-ERL/XFEL-O 計画の現状】

1. 「3 GeV-ERL/XFEL-O 計画の概要と現状」
河田 洋 (KEK)
2. 「ERL 加速器技術開発の進展と全体計画」
小林幸則 (KEK)

【ERL サイエンスの展開】

3. 「新光源による高速軟 X 線分光の研究展開」
松田 巖 (東大)
4. 「軟 X 線イメージングと ERL への期待」
小野寛太 (KEK)
5. 「1 分子計測学の行方と新光源の利用」
佐々木裕次 (東大)
6. 「タンパク質時計に秘められた秩序ある遅いダイナミ

クス～源振の分子科学的解明と新光源への期待～」

秋山修志 (名古屋大)

7. 「XFEL-O で期待される X 線非弾性散乱の新展開」

石井賢司 (JAEA)

8. 「まとめ」 河田 洋 (KEK)

はじめに, KEK サイドからプロジェクトの概要と進捗状況を説明の後, 5 名の先生方に軟 X 線から硬 X 線に至るサイエンスの展望の講演を頂きました。3 GeV-ERL の特徴であるコヒーレント・短パルスでありかつ非破壊・硬・軟 X 線によって切り開かれるであろうサイエンス分野を松田先生, 小野先生, 佐々木先生, 秋山先生からご講演頂き, さらに XFEL-O によって得られる超高エネルギー分解能・大強度 X 線光源によって切り開かれる新しい X 線非弾性散乱をベースにしたサイエンスを石井先生からご講演いただきました。昨年までの 5 GeV-ERL から 3 GeV-ERL に仕様を変更しましたので, 軟 X 線のアクティビティーを明確にしたいという考えで松田先生, 小野先生に講演をお願いした次第です。ただし, 私の講演で申しました様に, 3 GeV-ERL にしても十分に X 線領域のスペクトルをカバーしていますので, X 線のユーザーのみなさまもご安心いただければと思います。

一方, このような講演だけではなく, KEK での ERL の加速器開発に関する国際的な研究機関との共同研究提案があり, 3 箇月間に 3 施設 (カナダの TRIUMF 研究所, ロシアの BINP 研究所, そして中国の IHEP 研究所) とのコラボレーションミーティングの中で議論がされています。

皮切りに 11 月 7 日にカナダの TRIUMF と KEK との協力を目指した「Scientific symposium」が行われました。TRIUMF は現在すでに CW の 300 kV の電子銃や超伝導空洞の設計や製作を進めており, 将来, ライナックベースの放射光源である ERL に強い興味を持っています。その観点から, 「Scientific symposium」では, KEK の福田茂樹教授が「300 kW CW Klystron R&D」を, 加古永治准教授が「Development of High Power Input Coupler for cERL injector」の講演を行いました (図 2 は加古准教授の講演の様子)。

今後の協力に関する打ち合わせでは,

- 1) 1.3 GHz RF 技術に関して, 大強度入力カプラー, IOT, クライストロン等の技術交流。

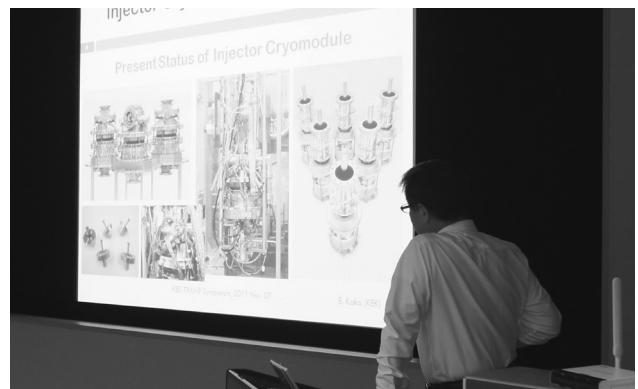


図2 加古永治准教授の講演の様子

- 2) ERLに向けて、例えば 500 kV の高輝度電子銃や ERL でのサイエンスに関する交流。
- 3) コンパクト ERL を用いた THz-CSR やレーザーコンプトン散乱 X 線の応用研究。

等々の今後の研究交流に関して議論が行われ、具体的に 3 月 10 日に TRIUMF で ERL に特化したワークショップを行う事が決まっています。

ロシアの BINP 研究所、中国の IHEP 研究所とのコラボレーションミーティングはそれぞれ 11 月 16 日、12 月 12 日に行われ、今後 cERL を含む ERL 加速器技術の開発において研究交流を展開する事が話し合われました。具体的には IHEP で進めている電子銃開発の評価委員会に KEK の関係者が 3 月中旬過ぎに参加し、技術的な検討を行う事が決まっています。

加速器技術開発・建設の進展

冒頭で申しました様に、cERL の建設が目前に迫り、開発が急ピッチで進められています。今回は加速器第 6 系の加古永治准教授、渡邊謙特別助教が中心となって進めている cERL 入射器用 2 セル空洞の進捗状況、そして加速器第 7 系の本田洋介助教が中心となって進めている高輝度電子銃のフォトカソード励起用レーザーの開発状況、そして加速器第 7 系の芳賀開一講師が中心となって進めている、ERL 開発棟の放射線シールド建設の現状を紹介します。

cERL 入射器用 2 セル空洞の進捗状況

cERL 入射器用 2 セル空洞は CW で運転され、高次モードの減衰に HOM カプラーを採用したことから HOM カプラーの外導体およびピックアップに用いるフィードスルーの冷却能力不足に伴う発熱が問題の一つとなっており、その解決策を見つけることは重要な開発目標でした。その部分の冷却が十分ではないと、空洞性能を満足する事ができなくなってしまうからです。その発熱対策として表面電流値の小さい HOM カプラーの設計および高熱伝導特性を持つ材料を使用した N 型フィードスルーの開発を行ってきました。図 3 にそれぞれの写真を紹介します。

2011 年 4 月～12 月にかけて計 7 回の低温試験で種々の

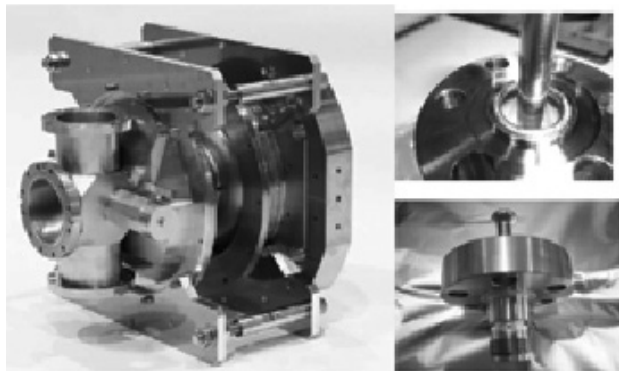


図 3 入射器用 2 セル空洞と HOM カプラー・N 型フィードスルーの写真

開発中の N 型フィードスルーの冷却効果のテストを行い、加速電界が 20 MV/m 以上で冷却効果において問題の無い設計に到達する事が出来ました。ERL での運転では加速電界は 15 MV/m であり、十分なマージンが得られています。しかし、実際のクライオモジュールにおける運転ではさらに冷却条件が厳しくなる可能性があるため、サーマルアンカーの取りかたをさらに工夫する予定ですが、現状でも十分な安定運転の目処を得て、cERL の運転のための超伝導空洞の組立に現在関係者は取り組んでいます。今年の春の 5 月には ERL 開発棟に設置される予定です。

フォトカソード励起レーザーの開発状況

ERL 電子銃開発グループでは、フォトカソードを励起するレーザーの開発を行っています。ビーム繰返し 1.3 GHz、ビーム電流 10 mA、ビームエミッタンス $1 \mu\text{m}$ が cERL での最初の目標で、半導体カソードを励起し適度なビーム品質を実現する為に、波長は 500 nm 帯で、平均パワーはカソード上で 1 W、レーザー発生装置としては 10 W 程度が必要となります。

図 4 は具体的なレーザーシステムの構成図です。加速器

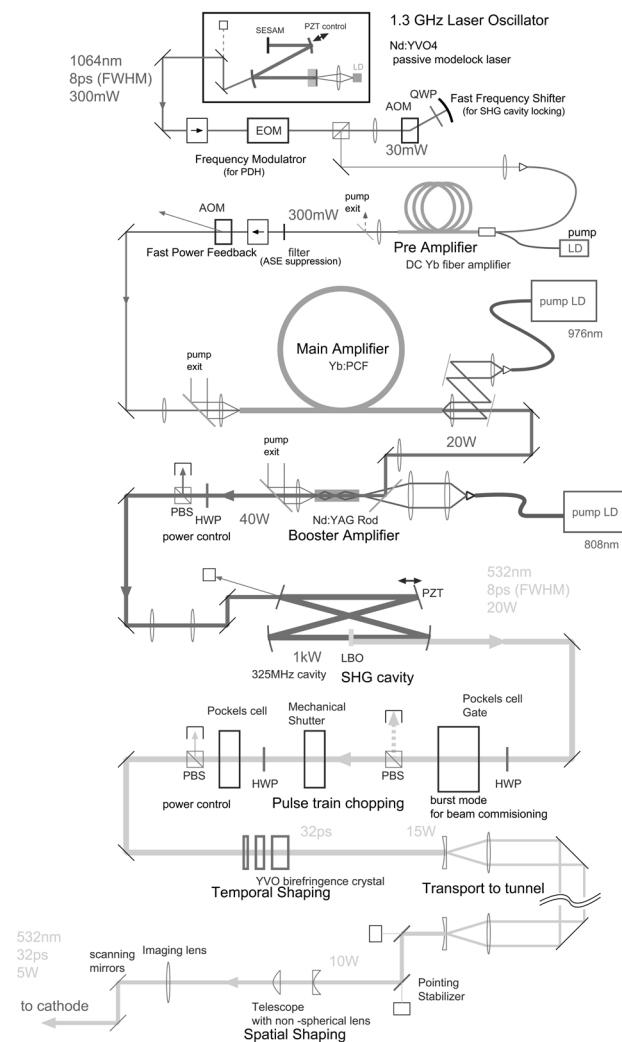


図 4 レーザーシステムの構成図

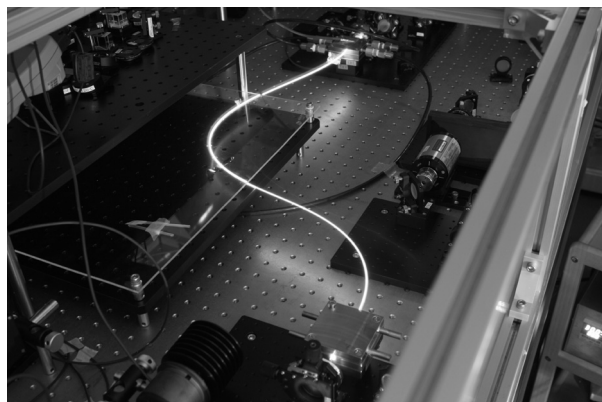
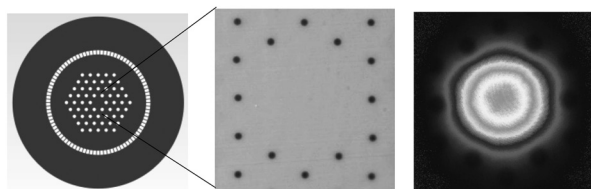


図5 Yb添加フォトニック結晶ファイバ(PCF)を用いた増幅器。

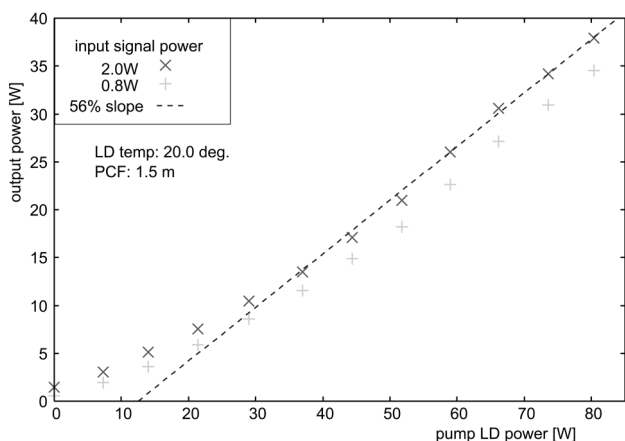


図6 増幅出力試験結果

のタイミングシステムに同期した 1.3 GHz、波長 1064 nm のレーザー発振器を種光として使用します。ファイバ増幅器で数 10 W まで増幅したうえで、非線形結晶で波長変換し、2 倍高調波の波長 532 nm を得、これを、ビーム運転モードに応じて整形し、電子銃へ入射する構成です。高繰り返しで、高平均出力であることがこのシステムの特徴ですが、そのためにパルス強度は低く、必然的に波長変換の効率が低くなります。そのために高効率、高平均出力の増幅器が重要な要素技術となります。

増幅器の開発はこれまで産総研で行って来ましたが、いよいよ cERL に導入することを睨んで、2011 年 8 月よりレーザー開発の拠点を KEK に移しました。KEK ではファイバ増幅器を独自に立ち上げて行くのは初めてなので、レーザー増幅器の原理に立ち戻って、基礎的な実験を積み重ねるところから開始しました。

このシステムでは、Yb 添加フォトニック結晶ファイバ (PCF) を用いた増幅器を使用しています。これは、図 5

のように、微細構造で光を閉じ込めて輸送する光ファイバで、コアに添加された Yb の準位を励起し、レーザー増幅する仕組みです。はじめに、比較的低出力で特性試験を行い、動作モデルを確立し、それを踏まえて、ファイバ長や入力強度等を最適化し、高出力の試験を行いました。これまでのところ、図 6 に示すように、35 W 以上の増幅出力が得られ、これは計算で良く理解できているものです。また、数時間で $\pm 0.5\%$ 以内の安定性が確認できており、十分に cERL の初期の電子ビーム電流を担保するシステムの目処が立ったと言って過言ではありません。いよいよ、来年度には次に述べるシールド建設の後にレーザーハッチを ERL 開発棟に建設し、電子ビーム生成に向けて進めて行く予定です。

ERL 開発棟の放射線シールド建設の現状

cERL の運転を 2012 年度末に開始するに当たり、懸念になっていた放射線シールドの仕様策定が 2011 年度前半に加速器第 7 系の芳賀講師を中心に進められて来ました。無事に 11 月末にその入札が行われ、シールド製作会社が決定し、複数年度契約で進め、2012 年 9 月末に完成予定です。前述しました様に 5 月に入射部超伝導空洞が納入される予定ですので、その付近のシールドブロックの設置をまず開始し、図 7 に示しますように順次反時計周りにシールドを建設していく予定です。

このような手順で設置する事により、入射部空洞、主加速部空洞、それらに RF パワーを供給する導波管の設置等の作業を、シールド建設と同時並行して進める事が可能となります。また、シールド建設が終了した後に、遅延なくシールド内の空調設備等の設置を行う予定で、2012 年度はまさに ERL 開発棟では建設が次々と行われることとなります。

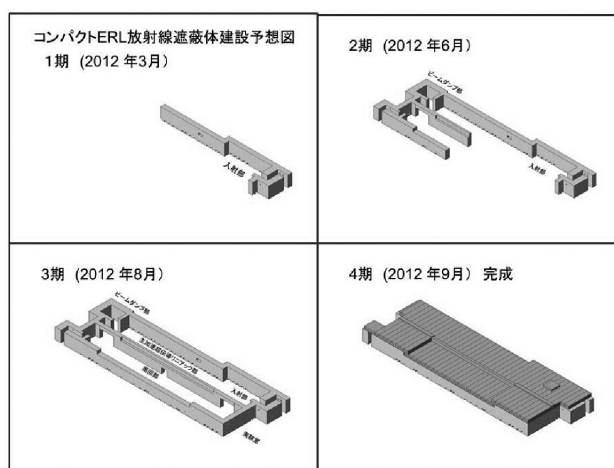


図7 シールド建設の概要とその手順