

## 入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川 和朗

### 概要

秋の PF 及び PF-AR 放射光施設への電子入射運転と低速陽電子施設の運転は順調に行なわれ、12月21日朝に終了した。フェーズ1コミッショニングと呼ばれる最初の SuperKEKB リング調整運転入射を2016年2月にひかえて、入射器内でのコミッショニング運転も進めることができた。

SuperKEKB 向けの陽電子生成については順調に準備が進んでいたが、この秋、陽電子を集束捕獲するフラックスコンセントレータに最大電流を印加したところ、放電が起り、電流を下げて運転を行っている。フェーズ1コミッショニングには大きな問題は無いと思われるが、障害の解析を急いでいる。

また、大電流運転に備えて、引き続き放射線管理についての段階的な変更申請と遮蔽の増強を進めている。

### PF-AR の 2.85 GeV 入射

ナノビーム・スキームを採用する前の SuperKEKB 計画には、陽電子のエネルギーを上げ、電子のエネルギーを下げるという、エネルギー交換によって、電子雲不安定性の問題を緩和する案があった。これに対応するために、陽電子のエネルギー利得を倍増させる C バンド加速ユニットの開発・設置を行い、KEKB・放射光の入射にも使用することで、運転経験を積んできた。その後、エネルギー交換案は採用されなかったため、C バンドユニットは必要なくなり、さらに、SuperKEKB 向けの低エミッタンスの電子・陽電子入射には障害となるため、撤去が決まっていた。

昨夏、その撤去を行わざるをえなくなったが、PF-AR の入射エネルギー 3.0 GeV は満足できるものの、冗長性はなくなり、1台でも加速ユニットが障害を起こすと故障修理が終わるまで入射ができない可能性が生じることになった。そこで、担当者間で議論した結果、今期（2015年10月～12月）から、PF-AR 直接入射路を使用した 6.5 GeV 入射を行うまでは、入射エネルギーを 2.85 GeV まで下げて信頼性を上げることにした。今期の立ち上げ時に、入射調整時間を多く割り当てた結果、実験は成立することがわかり、この条件で入射を継続している。関係者のご協力に感謝したい。

### RF 電子銃の評価委員会

11月19、20日に RF 電子銃の評価委員会を開催し、前回の評価委員会での提案に従って進めてきた開発についての報告を行った。この間に熱電子銃の再設置が行われたため、ビーム運転を長期間行うことはできなかったが、レー

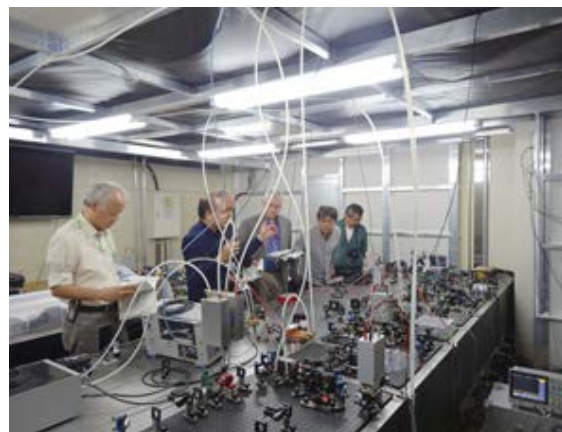


図1 RF 電子銃の評価委員会の会議室、及び A1 電子銃前、A1 第2レーザー室での議論。

ザーの開発を中心として詳細な評価をいただいた。前回に引き続き現場での議論にもできるだけ長い時間を割り当て、会議室での議論と合わせて、理解を深めることができた（図1）。

### 入射器の SuperKEKB 向けコミッショニング

秋の入射器コミッショニングにおいては、まずは2月からのフェーズ1コミッショニング向けの準備が進められた。フェーズ1においてはバンチ当たり 1 nC 程度の電子

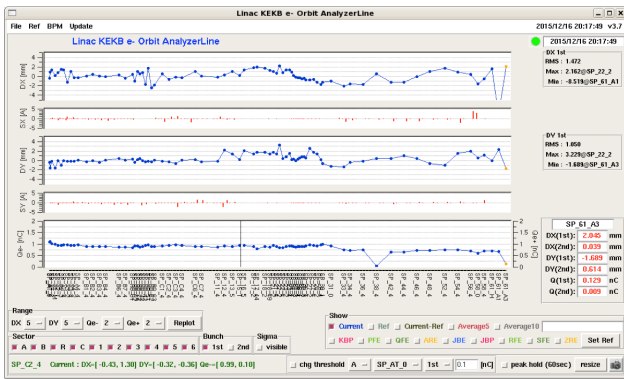


図2 入射器全体にわたる電子輸送の様子。上から水平位置，垂直位置，電荷量，左端が電子銃位置，右端は入射器終端。



図3 陽電子輸送の様子。中央左が陽電子標的，中央右のダンピングリング接続部まで約 2 nC，入射器終端まで約 1 nC の陽電子ビームを導いている。

と陽電子ビームが期待されている。フェーズ1の開始時期をダンピングリングの完成よりも前に設定したので、陽電子については1nCのビームの確保は保証されていないが、熱電子銃を用いた入射器内での要求ビームは確認されつつある(図2, 3)。生成陽電子の捕獲のためのフラックスコンセントレータについては、先に述べた放電障害により印加電流値は設計値の半分としているが、フェーズ1の対応について大きな障害とならないと考えている。今後、フェーズ2も考慮しながらビームの準備を進めていく予定である。フェーズ1立ち上げ時には熱電子銃を使用するが、期間内にRF電子銃も適用していきたいと考えている。

ビームの測定技術の確立も急いでおり、ビームワイヤスキャナ、スクリーンモニタと四重極磁石を用いたビーム測定、高精度スクリーンモニタの開発、高精度ビーム位置モニタの試験と設置、ビーム縦方向測定のためのストリークカメラ、などに時間を割いた(図4)。

### 入射器の遮蔽の増強

入射器の SuperKEKB 向けコミッションングにおいては、段階的にビーム電流を増やしており、これに合わせて放射線管理についても段階的に施設変更の申請を行ってきた。対応して、入射器の各区域の遮蔽の試験を繰り返しており、

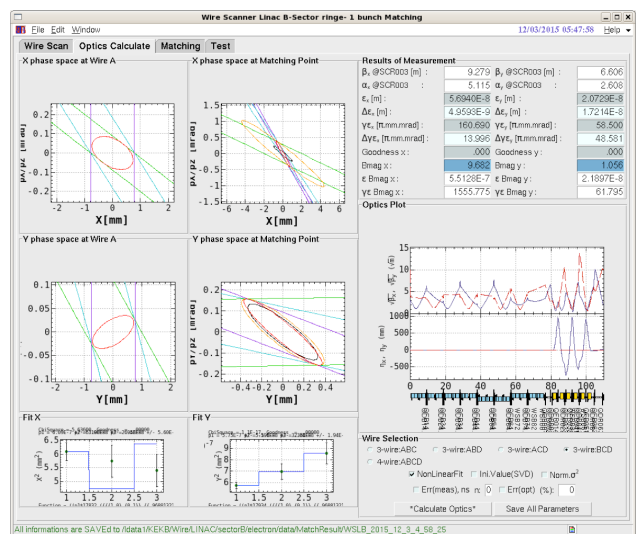
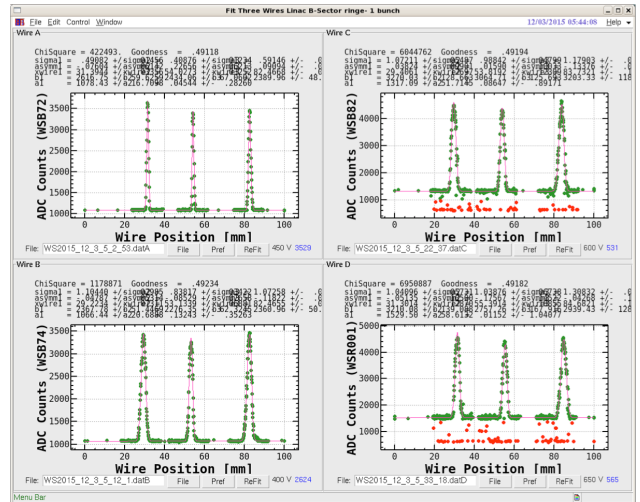


図4 Bセクタにおけるワイヤスキャナによるビーム特性測定の場合。

これまで、電子銃部、180度偏向部、陽電子標的部、ダンピングリング接続部、入射器終端スイッチヤード部、などで遮蔽を増強してきた。鉛、鉄、コンクリート、ポリエチレン等の部材を主に機構内で調達し、設置している。遮蔽は有効に機能すると思われ、協力いただいた各施設の関係者には感謝したい。

### 光源リングの運転状況

PFリングおよびPF-ARの11月10日9:00から12月10日9:00までの一ヶ月間の蓄積電流値の推移を図1に示す。両リングともにこの期間数件のビームダンプが発生した。PFリングの1件目のビームダンプは、11月16日VW#14下流部で真空悪化が見つかったことによる。ビーム寿命も悪化していることから、チャンネルをクローズしてビームをダンプし、VW#14周辺を調査した結果、震災時にリークが発生した真空チャンバーの箇所でも再リークしていることが判明した。リークシーラーの塗り直しで対処して復旧し、今のところ真空悪化は見られていない。2件目は、11月19日15:33に発生した。BL-8Bにおいて、講習会に参加していたM1の学生がシャッター開のボタンと誤ってビームダンプボタンを引いてしまったのが原因であった。3件目は、4極電磁石電源QDBにおける冷却ファン異常の

インターロックが働き、電源停止が起こったためであった。現場で調査したところ、冷却ファンは動作しており、電源内の温度上昇も見られないことから、故障リセットを行い復旧し、運転を再開した。今回の故障は、インターロック系に何らかのノイズが入ったことによるものと判断して様子を見ているが、再度起こった場合は、原因調査を行う予定である。

PF-ARにおけるビームダンプは、1回目11月15日14:49に発生した。ビームラインNW10のフロントエンドにあるBS1-2（ビームシャッター）のタイムアウトが原因であった。設定は30秒であるが、通常は5秒で開くものなので、リミットスイッチなどに何らかの異常があると予想され、現場確認をした結果リミットスイッチ位置に異常があることが分かり、リミットスイッチ位置変更後に運転を再開し様子を見ていた。しかしながら、11月29日19:42に今度

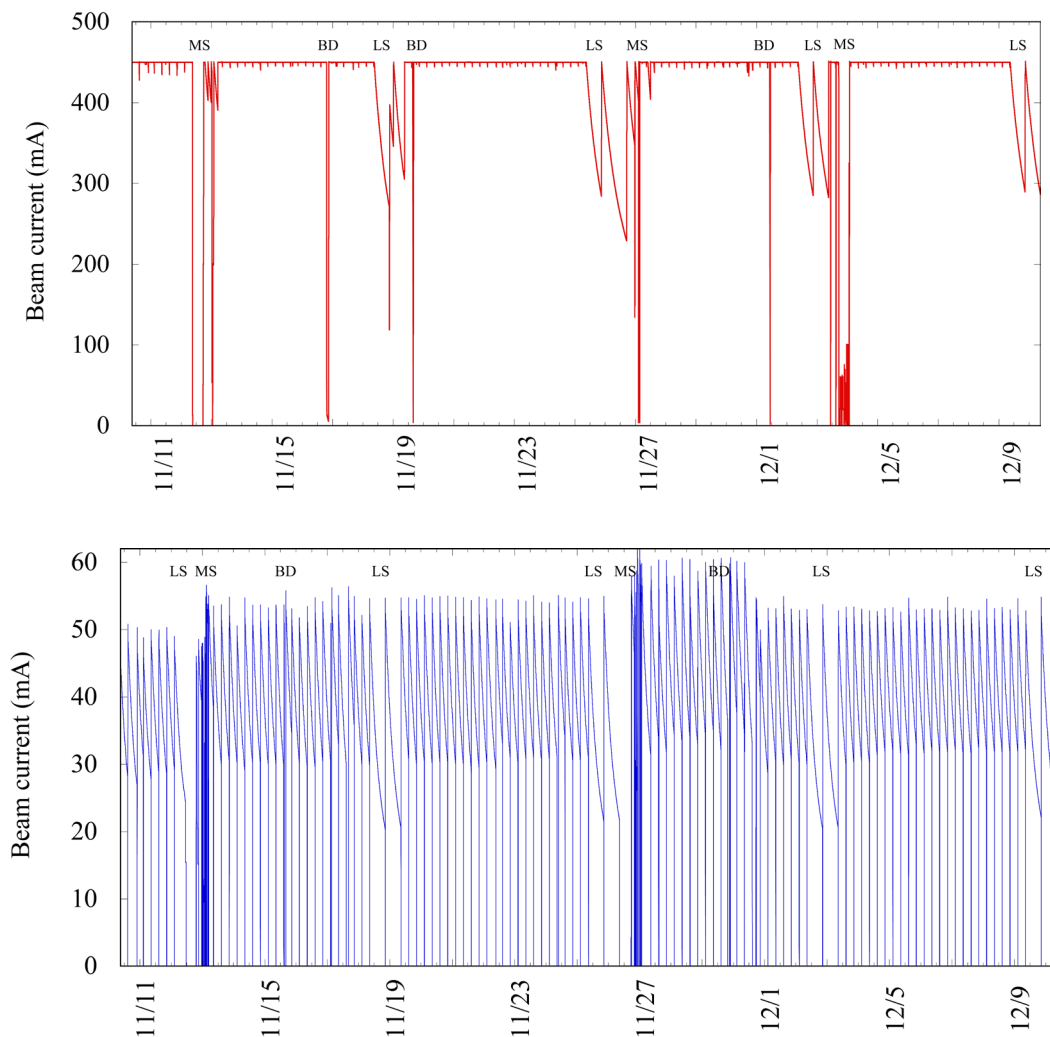


図1 PFリング（上）とPF-AR（下）における蓄積電流値の推移を示す。LSは入射器調整、MSはリング調整、BDはビームダンプを示している。

は同じく NW10 のフロントエンドにある ABS (ビームアブソーバ) で再発した。ここでもリミットスイッチ位置を変更する対処をして運転を再開したが、12月10日のメンテナンス時に原因調査を行ったところ、BS1-2 および ABS どちらもねじの緩みが原因であることがわかり増し締めを実施した。

PF-AR では入射器の事情により 3 GeV から 2.85 GeV に下げて入射することになった。低いエネルギーでの入射となったためビーム不安定性が強くなったものの、初期電流値 53 mA での運転は担保された。

両リングともに 12月21日 9:00 に運転を停止した。運転再開は PF リングが 2月15日 9:00、PF-AR が 2月17日 9:00 を予定している。

### PF-AR 電磁石電源老朽化の状況

大電流パルス放射光リング (PF-AR: Photon Factory Advanced Ring) は、トリスタン計画のブースター・リングとして昭和 57 年度に整備されたアキュムレーション・リング (AR) を改造した蓄積リングである。AR は、もともとは電子・陽電子リニアックからの 2.5 GeV ビームを蓄積した後、8 GeV まで加速して主リング (MR) に入射していた。その機能の性格上、ビーム処理を効率良く、繰り返し運転できるように最適化されていた。トリスタン計画終了後 B ファクトリーとして MR は利用されることとなったが、リニアック直接入射となったため、AR は放射光専用リングにしようという提案があり、そのための機能の最適化が必要とされた。ビーム寿命を 2 時間から 24 時間に改善するために、真空チェンバーの交換や長時間の連続運転の信頼性の確保が要求された。トリスタンでは AR を 8 GeV で最大 30 分継続する仕様で機器が設計されていたが、放射光利用の運転では、長時間での運転を要求されるためエネルギーを 6.5 GeV に下げて運転する。電磁石電源としては、ステアリング電源の長時間安定性が問題になり、ステアリング電源が更新された。この放射光専用リング改造作業は 2001 年に実施された。

放射光専用リングへの転用後は、特に電源機器の老朽化が問題になり、2008 年には偏向電磁石電源の更新が、2013 年には 4 極電磁石電源 16 台の更新が達成できた。しかしながら、4 極電磁石電源 8 台 (QCN 電源) の更新が未達成で、残された課題である。4 極電源 (Q 電源) は、東西南北 (EWSN) に配置された 4 極電磁石を励磁するための電源である。東西の加速空洞周辺にある 4 極電磁石 (QRE, QRW)、ビーム入射機器が配置されている南直線部にある 4 極電磁石 (QCS)、これらを励磁する電磁石電源は更新されて、加速器の性能向上に貢献した。未更新の電源 (QCN) の負荷である電磁石は北直線部にあり、放射光ユーザのビームラインが多くある。これらは昭和 57 年 (1982 年) に設置された電源である (図 2)。

QCN 電源は製作後 32 年が経過し、深刻なトラブルの前兆とも思えるトラブルが起きている。電源内部のトランスやトランジスタは水冷していて、水冷の銅パイプに通水し



図 2 製作後 32 年が経過して老朽化が著しい 8 台の未更新 4 極電磁石電源 (QCN)。

ている。最近のトラブル 2 件は、このパイプの平坦な箇所ピンホールが起こした水漏れである。32 年の長きに渡って 10 気圧の純水を流したために、かなりの浸食が起きたものと認識できる。これらは、保守点検時に発見され、工場で修理し、大事に至らなかったが、運転時に発生した場合には、最低でも 3 日程度は停止しなければならなかったであろう。電源にも内部に多くの保護センサーがあるが、水冷系が多く分岐していて、必ずしも万全ではなく、異常加熱が連続して焼損や火災の危険もある。老朽化した電源では、入手不可能になってしまった部品が多々ある。現時点では、倉庫にある旧 Q 電源から部品取りをして急場こそ対応できそうであるが、やがて全くなくなることになる。このような現状であるため、電源の更新が早急に必要である。電磁石が異常になった場合、それを電源停止シーケンスにつなぐために、インターロック回路があるが、これもまた老朽化しているので、同時に更新してシステムとして信頼性を向上させる必要がある。

### PF および PF-AR の運転状況とスケジュール

PF および PF-AR の 2015 年度第 2 期 (10 ~ 12 月) の運転は、予定通り 12 月 21 日 (月) に終了しました。前年度は光熱水料の制約のため、第 3 期 (1 ~ 3 月) のユーザー運転が実施できませんでしたが、今年度は 2 月下旬から 3 月中旬にかけて約 1 ヶ月弱のユーザー運転を確保し、3 月 14 日 (月) に今年度のユーザー運転終了の予定です。この短い期間内にユーザーの皆様から多くの配分希望をいただきましたが、多くのステーションで配分希望には十分にお応えできていない状況です。2016 年度予算も引き続き厳しい状況ですが、可能な限りビームタイムの確保に努めて参ります。最近の PF の予算状況やビームタイムスケジュールについては、3 月に開催される PF シンポジウムでもご紹介いたします。

KEK では、2015 年度第 3 期から SuperKEKB の運転開始に向けた加速器調整運転を開始します。PF、PF-AR と SuperKEKB は入射器を共有しているため、SuperKEKB の立上げに伴い、しばらくの間 PF の入射モードは通常とは異なるモードとなる予定です。具体的には、2016 年 2 月から 6 月までの間、**PF の Top-Up 連続入射は行わず**、入射が可能なときに随時入射を行います。また**その間ハイブリッドモード運転は実施しません**。ユーザーの皆様にはしばらくの間ご不便をお掛けすることになりますが、何卒ご了承ください。

また関連して PF-AR においても、入射器から PF-AR への 6.5 GeV 直接入射を実現する為に、PF-AR 直接入射路工事と PF-AR への繋ぎ込み工事を 2016 年 7 月 ~ 11 月末に行う予定です。そのため、2016 年度の PF-AR の運転時期は第 1 期 (2016 年 4 月 ~ 6 月) および第 3 期 (2017 年 1 月 ~ 3 月) のみとなり、第 2 期 (2016 年 10 月 ~ 12 月) には PF-AR の運転を行わない予定です。この工事により、PF-AR への 6.5 GeV 直接入射が実現するだけでなく、SuperKEKB の本格的な運転開始後も、PF-AR、PF および SuperKEKB への複数リング同時入射が実現することになります。また将来的には PF-AR の 6.5 GeV での Top-Up 入射も視野に入れていきます。PF-AR ユーザーの皆様にはご迷惑をおかけいたしますが、PF-AR の環境整備の一環として何卒ご理解いただきますようお願い致します。

### 新しい施設利用 (メールイン測定・解析サービス) の開始について

PF のビームタイム利用の形態として、学術ユーザーの無償利用を対象とした大学共同利用以外に、産業界や学術ユーザーが有償でビームタイムを利用していただくための施設利用 (成果非公開) と優先利用 (成果公開) というカテゴリがあります。H28 年度から新しく開始する予定の施設利用 (メールイン測定・解析サービス) について紹介

させていただきます。

放射光利用が多様化する中で、放射光施設にはより迅速でハイスループットなデータ測定・解析が求められています。このような状況を踏まえて、PF では従来からタンパク質結晶構造解析、小角散乱、XAFS など利用ユーザーの多いステーションを中心として計測自動化を推進してきましたが、2016 年度からの新しい試みとして、タンパク質結晶回折測定とタンパク質溶液小角散乱測定に限定して、メールイン測定・解析サービスを開始する準備を進めています。この施設利用は主に産業界のユーザーを対象とした有償のサービスですが、ユーザーは所属先から宅配便で PF に試料を送付し、PF に来所することなく、PF 内で自動測定されたデータを後日所属先で受け取ることができるという利用形態になります。またオプションとして、測定データの解析もサポートする予定です。

PF では施設利用による利用料収入を原資として、測定装置のアップグレードや人件費の確保、さらにはユーザー運転時間の確保のために必要な光熱水料への予算補充を行っています。昨今、運営費交付金の削減が続く中で、PF が自己収入を上げながら、ユーザー運転時間を確保することは、極めて重要な取組であると考えています。学術ユーザーの皆様には、従来の大学共同利用のためのビームタイムの圧迫につながると捉えている方もいらっしゃるかもしれませんが、施設利用の結果として施設の装置を高度化し、全体のユーザービームタイムの拡大につながっていることを、ぜひご理解いただければと思います。

### ビームラインの改造, 立ち上げ状況

次はビームラインの改造に関する情報です。すでに PF のホームページ等でお知らせしておりますが、AR-NW2A の実験ステーションの拡張工事のため、2016 年度の NW2A のビームタイムは大幅に縮減される予定です。まず 2016 年 5 月 ~ 9 月には、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) プロジェクト (KEK 代表者: 木村正雄教授) に係る大型設備 (X線顕微鏡装置) 導入のための従来の NW2A 実験ハッチの拡張工事を行う予定です。また上記のとおり、2016 年度 7 月 ~ 11 月末には、PF-AR 直接入射路工事のため PF-AR 全体の運転を停止します。従いまして、NW2A のビームタイムとしては、2016 年度第 3 期のみ配分となる予定です。工事の進捗状況に関しましては、適宜ホームページや PF ニュース等で報告させていただきます。

### 人事関係

最後に人事異動についてご報告します。構造生物ビームライン担当の新しい助教として、引田理英 (ひきた・まさひで) 氏が 2016 年 1 月に着任されました。引田さんは兵

庫県立大で学位取得後、米国アルバート・アインシュタインカレッジでポスドクをされた後に、PFに着任されました。主にタンパク質の共鳴ラマン分光を専門とされており、

PFではタンパク質結晶のX線回折と顕微分光を組み合わせた新しい測定手法の開発を担当される予定です。

## ERL 計画推進室報告

ERL 計画推進室長 河田 洋

### はじめに

cERLでは2016年1月19日に原子力規制庁に提出していた放射線変更申請(0.1 mAから1 mAへの電流増強)が認可され、2月から3月の調整運転で1 mA運転の確立を目指します。2013年度末の10  $\mu$ AのcERL運転開始から1年ごとに1桁ずつ電流値を増大してきており、決して歩みを止めていません。このことは、前号でも述べましたように、cERLで培ってきているCWの超伝導加速器技術の別の応用としてのCW-FEL(米国のSLACで既に建設が開始されているLCLSII計画)や、更なる大強度を要求するEUVリソグラフィ用光源(ERL-FEL)の展開をにらんでも必要な技術開発につながっています。cERLでは何とか10 mA相当のパンチ電荷でのビーム性能の確認をする必要があり、そのために弛まぬ努力を現場では続けています。

### cERLでの進捗状況

昨年6月末までの運転終了から夏、秋の停止期間で2つの大きな改造を行いました。一つは、電子銃の高圧印加(500 kVまでできるように改造すること)、もう一つは周回部でパンチ圧縮のスキームがスタディーできるように6極電磁石の導入です。

電子銃に関しては、前号でもお伝えしたように、400 kVまでの高圧印加に制限している不具合がありました(それでも世界で一番の性能ですが)、500 kVの高電圧が印加できるよう、2段分のセラミック絶縁碍子を追加する作業を7月から開始し、電極を取り除いた状態で550 kVの高

電圧を絶縁碍子に安定的に導入できることを確認しました。そして、カソードロッドと電極を取り付ける作業を行い、10月には電極がある状況で高電圧印加テストにたどり着きました。しかし、残念ながら、高圧印加の結果は、180 kV程度からカソードロッドの接続部から放電が発生し、高圧印加が進まない状況に遭遇したことを報告しました。その後、一体のカソードロッドの新規製作を進めて、11月11日に新しいカソードロッドが納入され、即座にカソードロッドの交換作業を行い、11月17-20日にベーキング、そして11月26日から高圧印加を開始しました。図1は接続したカソードロッドと新規製作した一体のカソードロッドです。順次エージングを行い、12月18日までのエージングの結果、490 kVまで安定に高圧印加が可能であることを確認しました。当初予定していた500 kVにはエージングの時間不足で到達できませんでしたが、十分な改造効果が期待できるまで作業を行う事が出来ました。尚、この一連の作業はJAEAの西森信行氏を中心にJAEAとKEKの関係者が協力して行ったものです。2月から運転再開後、はじめは2015年の夏前と同じ条件の390 kVで運転を開始し、放射線の変更申請(電流を1 mAまで増強)の施設検査に合格したのち、高圧印加による電子ビームの性能テストおよび大電荷試験を行う事を予定しています。

一方、ERLはライナック型加速器ですので、パンチ長は蓄積リング型加速器に比べて格段に短くすることができ、パンチ圧縮システムはTHz利用やフェムト秒サイエンスを切り開く基盤設備です。また、FEL発振においてもパンチ電流の尖頭値を上げるうえで重要な技術であり、将来ERLをベースにしたFEL発振を想定した時に重要な加速器技術のR&Dです。その設備として2015年11月、cERLにパンチ圧縮用の6極電磁石を4台設置しました。電磁石は2014年、2015年にそれぞれ2台ずつ、合計4台が製作され、コア長10 cm、メインコイル100ターン、空冷式で、最大電流10 A時の実効磁場勾配(積分磁場勾配をコア長で割ったもの)は226 T/m<sup>2</sup>です。また、各磁極には補正コイルが取り付けられており、それによって最大電流10 A時に実効磁場勾配0.4 T/mの歪4極磁場を発生させることができる設計になっています。歪4極磁場は誤差磁場や環境磁場による垂直方向の分散関数やビームプロファイルの傾きなどを補正する為に使うことを想定しています。cERL弧部は、2台の偏向電磁石間に長さ約2 mの



図1 接続したカソードロッドと新規製作した一体のカソードロッド。



図2 共通架台の上に設置されたバンチ圧縮用の6極電磁石（黄色の電磁石）です

電磁石架台（弧部共通架台）を置き、その上に3台の4極電磁石と2台の6極電磁石を交互に置くラティスで構成されていますが、6極電磁石は今まで設置されていませんでした。図2は共通架台の上に設置されたバンチ圧縮用の6極電磁石（黄色の電磁石）です。これらの6極電磁石を用いて2016年2～3月期の運転で、放射線変更申請の施設検査合格後にバンチ圧縮スタディを行う予定です。

1月下旬から冷凍機の運転を開始し、入射部、および主加速部それぞれの超伝導空洞の冷却が終了し、RFパワーによるエージングを開始しています。パルスエージングの結果、入射部超伝導空洞で、昨年6月に発生したフィールドエミッションは除去できたことも朗報です。運転再開は、2月15日から開始する予定です。

### EUV 大強度光源の検討および情報発信に関して

1月10日に半導体露光装置の国際的なシェアを握るオランダのASML社のSenior Vice PresidentであるJos Benschop氏がKEKを訪問され、cERLの見学を行うとともに、”EUV lithography, status and opportunities”というタイトルで講演を頂きました。Senior Vice Presidentは副社長格に相当します。講演では、現在、ASML社はレーザープラズマ光源でのEUV露光装置の製造を進め、Intel、IBM、TSMC等の半導体製造メーカーに納入し、EUVリソグラフィの微細加工技術を製造メーカーに広げる努力を進めていること。一方、ASML社自身もレーザープラズマ光源の限界を認識しており、2020年頃にはEUV-FELのリソグラフィの実用化に向けて技術開発を進める必要性の認識を示されました。また、ERLをベースにしたFELが大強度のEUV光源として最も適しているという認識を示すと同時に、そのような工場モデルの概念図も示されていました。図3は講演を行われたJos Benschop氏の写真です。

1月21日、22日に「第22回FELとHigh-Power Radiation研究会」を4号館1階セミナーホールで行われました（[http://pfwww.kek.jp/PEARL/FEL\\_HPRadiation/index.html](http://pfwww.kek.jp/PEARL/FEL_HPRadiation/index.html)）。この研究会は日本の各施設で開発されているTHzからX線における自由電子レーザー（FEL）やレーザーコンプトン散乱X線やレーザー励起の軟X線レーザー等の新

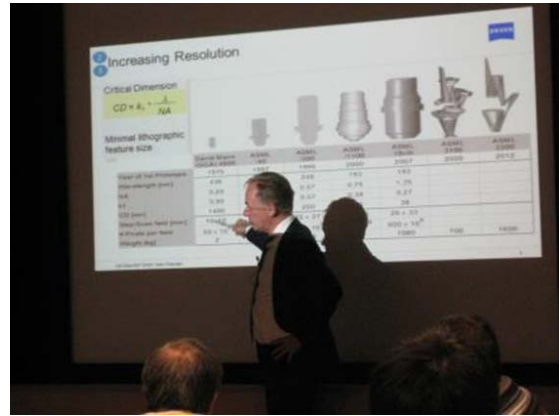


図3 講演中の Jos Benschop 氏。

たな radiation 発生手法開発、そしてそれらを利用した研究（提案を含む）等に話題提供を行うものです。1991年に電通大で第1回が開催された後、ほぼ1年に1回のペースで研究会の歴史を重ね、今回KEKが世話人代表としてホスト役をお引き受けして開催しました。今回は14施設の方々から、23の講演を頂き、ERL関係からはKEKの宮島司准教授から「compact ERL 試験加速器開発の現状と展望」、KEKの中村典雄教授から「ERLを用いた高出力EUV-FEL光源の設計検討」、JAEAの西森信行氏「次世代FELを見据えたcERL電子銃アップグレード」の話題提供がありました。また招待講演の形で（株）東芝のS&S社の内山貴之氏から「半導体向けEUVリソグラフィの動向」の講演を頂き、SACLAの大竹雄次氏からは、「なぜ、最近になってEUV領域のFELの発生が重要になって来ているのか少し理解できた。」という感想を懇親会で頂きました。今回の参加者は全員で62名、次回は東北大学にホスト役をお願いすることが決まり無事に研究会を終了しました。図4は、一日目の昼休みに撮影した集合写真です。

2月4日には「SAT2016・テクノロジー・ショウケース」（<http://www.science-academy.jp/showcase/15/>）が開催され、「つくば発注目研究ポスター発表」として阪井寛土准教授が、「次世代型加速器エネルギー回収ライナック（ERL）の開発」の発表を行い、ERL開発の状況の発信を行っています。



図4 第22回FELとHigh-Power Radiation研究会での集合写真。