

入射器の現状

加速器第五研究系研究主幹 古川 和朗

概要

2016 年秋には 10 月 3 日から 12 月 19 日まで、PF リングへの入射運転を順調に行うことができた。並行して、SuperKEKB フェーズ 2 コミッショニングや、PF-AR 直接入射路コミッショニングの準備も進めているところである。年度内にはフェーズ 2 コミッショニング向けの設備の準備を進め、来年度には集中的に設置を行うため、5 月から 10 月にかけて連続 5 ヶ月弱の建設期間を確保する必要がある。装置の詳細設計や図面作成を内部で行い、部品分割調達を追求するなどスケジュールの最適化を行うことによって資源節減をさらに進めているところである。KEKB の建設時期にも、光源の改造時期と合わせることによって、9 ヶ月連続の停止期間をいただいております。複数のプロジェクトに対する入射器の更新の難しさを感じるとともに、関係者の協力をお願いしたい。

高精度ビーム位置モニタ読み出し

SuperKEKB 計画においては衝突性能を向上させるために、電子及び陽電子ビームについて双方ともに 20 mm-mrad 以下のエミッタンスを確保する必要がある。これを実現するためには、ビーム光学設計上、0.1 mm 以下の加速管のアライメント精度が必要となる。また、同程度のビーム安定性、さらにはビームによるアライメントも安定して達成する必要があり、ビーム位置モニタ (Beam Position Monitor, BPM) には 10 μm 以下の単バンチ位置分解能が必要と考えられる。

KEKB 計画においては、位置分解能が 50~100 μm で充分であったために、複数の BPM からの信号を一台の市販のオシロスコープに接続することによってコストを最適化

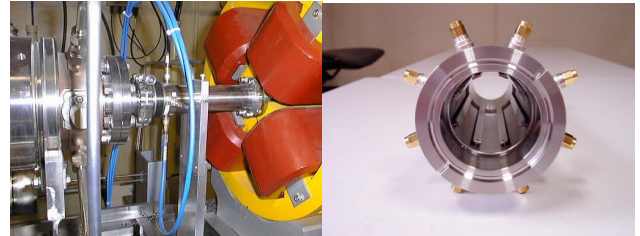


図 1 収束電磁石の磁極に固定されたビーム位置モニタ (左) と 8 電極タイプのビームモニタ (右、通常は 4 電極であるが 8 電極タイプを用いるとビーム形状情報も取得できる)。

し、1 秒間に 50 回の読み出しを行っていたが、更新を迫られることになった。SuperKEKB 向けの精度の高い読み出し回路として、2 通りの回路を試験検討し、また、外部研究者にも評価してもらった結果、バンドパス・フィルタと高速 ADC を組み合わせた回路を開発することになった。

入射器のビーム位置モニタはストリップライン型の 4 つの電極を持ち、インピーダンスを 50 Ω 整合させることにより、シングルバンチのビームから約 1 ns 間隔の一組の双極信号を生成する (図 1, 図 3 (上))。ビームは 1 秒間に 50 パルス加速されるが、一つのパルスには 1 つまたは 2 つのバンチが含まれ、また入射先の蓄積リングによって約 0.2 nC から 10 nC の電荷のビームがパルス毎に切り替わる可能性がある。

このような信号を読み出す回路を VME 規格の 2 幅のモジュールとして構成し、複数段のフィルタ、増幅器、可変減衰器を組み合わせて、250 MSa/s の 16 ビット ADC によって読み出しを行う (図 2 (左))。ビーム信号をフィルタで整形することによって、精度が高く、フィルタと整合性

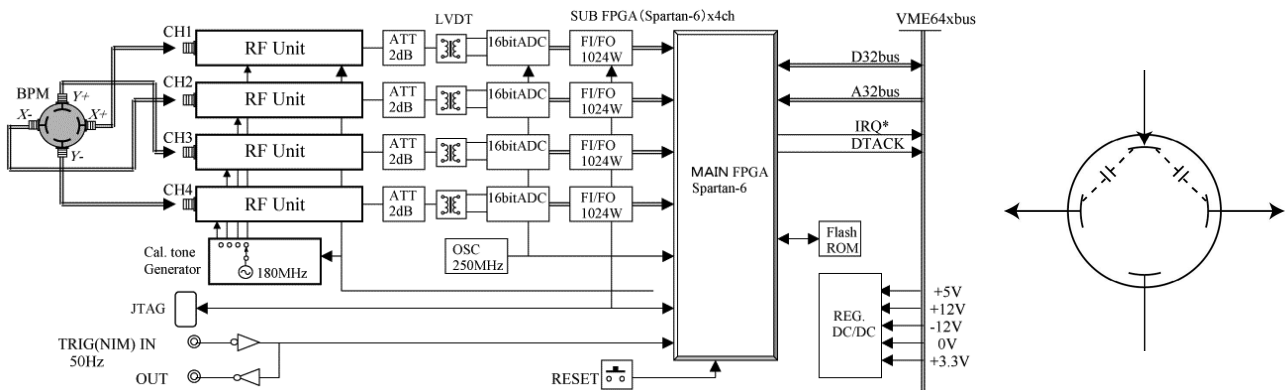


図 2 BPM 読み出し回路のブロックダイアグラム (左) と、較正信号誘起の仕組み (右)。

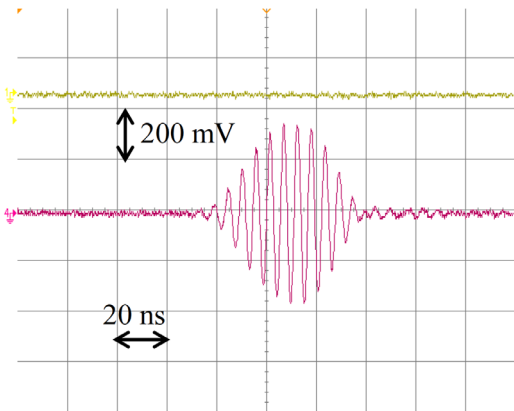
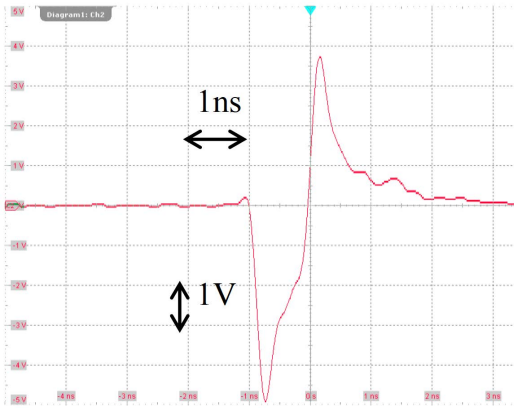


図3 ビーム位置モニタの電極から得られる信号(上)と、回路を通してADCに取り込まれる信号(下)。処理回路を通すことによって、情報を取り込みやすくなっている。

の良い高サンプルレートのADCを通して位置精度の高い読み出しを行う(図3)。1つのパルス内の2つのバンチが96 nsしか離れていないため、その2つの信号が重ならないよう、慎重にフィルタの係数が選ばれた。

一方、位置精度を高めるためには、さまざまな素子の特性のドリフトによる影響を補償する必要がある。このため、較正信号発生装置をモジュール内に実装することにし、ビーム測定間隔の20 msの間にBPMの一電極に対して較正パルスを与え、隣接する一対の対向電極に誘起されたパルス信号を測定することによって、チャンネル間の特性の変動を監視し、ビーム位置演算に補正を加えることとした(図2(右))。

読み出し回路は多数の試験によって、温度特性や位置精度を改善するための改造を加えられた後、入射器内のBPM向けに100台余りが量産され、昨年度末から設置が行われている。モニタと読み出し回路との配線接続が以前の仕組みとは変更されたことによって、これまでの較正係数が使えないため、ダイナミックレンジの広い多数の較正係数について一台ずつ慎重に検討を加えながら設置を進めている。

読み出し回路内のFPGAのファームウェアの動作や、VMEシステム内のソフトウェアの動作も順調で、現在のところ大きな障害なく運用出来ている(図4)。入射器全

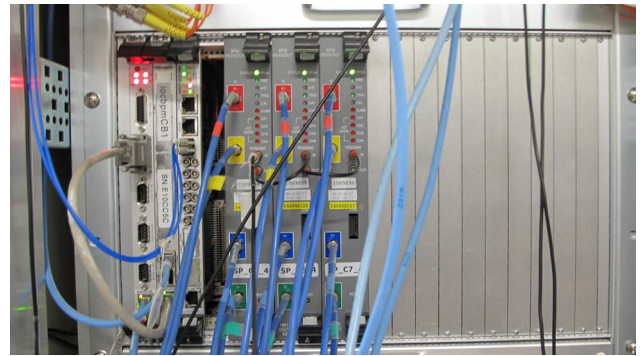


図4 VME装置内に実装されたBPM読み出し回路(灰色のパネル)とCPUやイベント受信器。

体のイベント制御システムから、パルス毎(20 ms 毎)に次のパルスの入射ビーム種類を受け取り、減衰器の設定を変更するとともに適切な較正係数を選択し、入力された信号処理を行い、ビーム位置と電荷量を算出し、さらに入射器を全体を通したビーム軌道を得る。

さまざまな入射ビームを用いた動作試験を重ね、PFリング及びPF-ARへの入射にも利用を始めている。また、位置精度の確認も進めており、ビームを用いた収束電磁石に対する相対位置の再測定には大きな時間を割いている。これまでのところ、約8割の回路を置き換え、数 μm の位置精度が得られることの確認を進めている。

ところでBPMは、水平方向、垂直方向の位置、そして電荷量という3つの情報を取得するために、4つの電極から得られる信号を使用するわけであるが、情報量としては1つ冗長である。BPM信号の読み出しの精度が向上したことにより、この情報を利用した将来の拡張性も期待されている。例えば、信頼性の向上やビーム形状の取得なども試みられており、また、ビーム・エミッタンス測定への応用も試みる予定である。

また、入射器からダンピングリングへの接続部や蓄積リングへのビーム輸送路など、ビームラインの場所によっては、電極の数を増やし8つの電極からの信号を使用することにより、位置のダイナミックレンジを広げている。電極の形状も複数あり応用も広がる可能性もある。

光源リングの運転状況

PFリングにおける11月6日9:00から12月6日9:00までの蓄積電流値の推移を図1に示す。この期間、超伝導ウィグラーの真空悪化のトラブルが続いた。立ち上げ時にクエンチが発生したときから、ビームダクトと断熱真空の圧力上昇が始まった。ヘリウムの消費量に変化は見られなかったが、ビーム寿命は約半分程度まで短くなっていた。真空度の悪化状況を監視しつつ、メンテナンス日の11月10日まで運転を継続して、再度リークテストを行った結果、これまでに経験のない場所でのリークが発見された。さらに、ビームダクトと再液化機の断熱真空槽において同時にリークが発生していた。リークの原因は、クエンチ時にビームダクトに何らかの振動が付加されたことによるものと推察している。ビームダクトの方はリークシーラで補修し

リークは一旦止まったが、13日の5:00ごろに前触れもなく圧力が上昇し始めたため、同じ場所にリークが発生したと予想し、再度17日にリーク対処を行った。2度の対処で現時点までは真空悪化はみられていない。しかし、断熱真空の方は悪化したままであるため、12月19日のリングの運転停止とともに超伝導ウィグラーを長期間停止にして、ビームダクトと断熱真空悪化の原因を根本的に改善する予定である。

11月18日から、ハイブリッドモードでの運転を開始した。一年前に行った運転から特に大きな真空作業は行っていないことから、大きなトラブルもなく予定通り400（マルチ）+50（シングル）mAで蓄積はできた。しかし、11月18日17:50頃、ビームが削れていることに気がつき、原因を調査したところ、純化に使用していたパルスジェネ

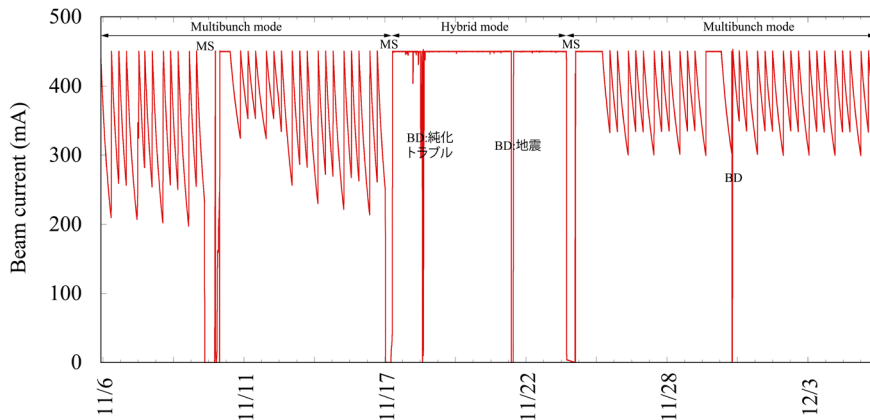


図1 PFリングにおける蓄積電流値の推移を示す。MSはリング調整、BDはビームダンプを示している。

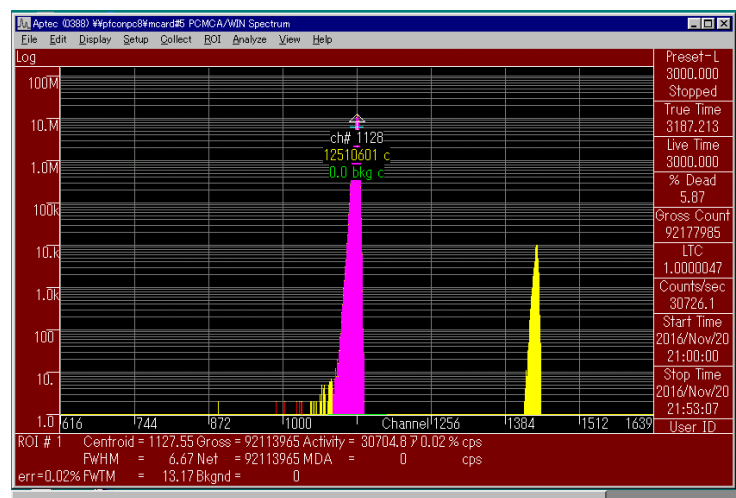


図2 ハイブリッドモードにおけるシングルバンチ周辺の純化の様子。ピンクのバンチがメインバンチ（50 mA）で、黄色のバンチが4バケット前（約8 ns）に入ったバンチ（50 μ A: $\sim 10^{-3}$ ）を示している。メインバンチの後は純化（ $< 10^{-6}$ ）されている。

レーターの故障と判明した。このパルスジェネレーターの予備はなく、急遽アナログのゲートジェネレーターとシグナルジェネレーターを使用して、純化信号を作り復旧させた。今期の運転では、入射ビームのタイミングジッターが時折発生していた。メインバンチの後ろに入る分は常時純化していたが、メインバンチの4バケット前に時折ビームが入ってしまうバンチに関しては常時純化を行うことができなかった。そのバンチの量は、メインバンチの3桁落ち程度(50 μ A程度)であった(図2)。通常の純化システムであればリモートでこのバンチを蹴り落とせたが、純化システムのトラブルのため、前方バンチの純化はユーザからの要望を受けてからローカルで随時純化する方針とした(メインバンチの後方については常時純化を行っていた)。特にユーザからの要望はなかったため、今期はメインバンチの前に少しサブバンチがある状態で運転を行った。さらに、今期のハイブリッドモードでの運転では、軌道変動を監視している光モニターの振れ幅が通常のおよそ5倍の10 μ mに増え、しばらくすると自然に元に戻るといった現象が数回発生した。振動の原因を探るべく、純化システムを停止したり、6極電磁石の電流設定値を変えてみたが効果がなかった。今回の運転期間では、軌道変動の原因を突き止めることはできなかった。マルチバンチモードでは発生していないので、ハイブリッドモード固有の現象だと推測している。ただし、これまでのハイブリッド運転時では、観測されていない現象であった。

ハイブリッドモード運転後は、通常マルチバンチモードに切り替え、概ね順調にユーザ運転が行われ、12月19日(月)9:00に運転を停止した。

PF-AR 直接入射路建設の進捗状況

10月24日のPFリングの運転に伴い、PF-AR 直接入射路における入射器第3スイッチヤードの作業は一旦中断し、新入射路トンネル内、KEKB入射路との交差部、PF-AR リング側入射点での作業が行われた。図3は、

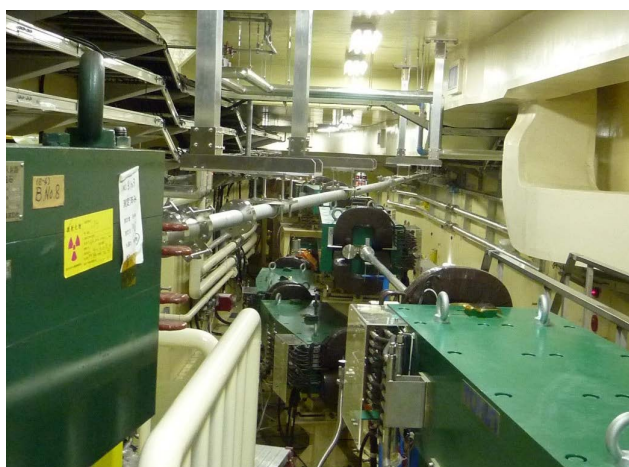


図3 PF-AR 直接入射路のKEKB入射路との交差部：PF-AR用6.5 GeV電子が、KEKB入射路(HER, LER)の上空を通過する。



図4 PF-ARの入射点：入射路上流からDCセプタム1台とパルスセプタム2台が設置された。

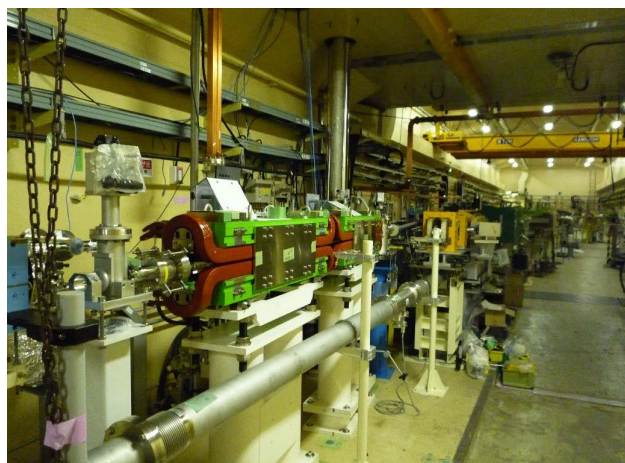


図5 入射器第3スイッチヤードのPF-AR 直接入射路最上流部にDCセプタム電磁石2台が設置された。

KEKB入射路との交差部の写真である。PF-AR 直接入射路の真空ダクトが、KEKB入射路(HER, LER)の偏向電磁石の上を横切って通過する。交差部に新たに設置する偏向電磁石もすでに据えられ、真空ダクトの接続も完了した。図4は、PF-AR入射点付近の写真である。PF-AR 直接入射路最終点は6台の入射用電磁石(DCセプタム1台、パルスセプタム2台、キッカー3台)の設置と、リング側真空ダクトの接続およびそれぞれの電磁石の精密アライメント等を行った。図5は、入射器第3スイッチヤード内PF-AR入射路分岐点の写真である。この場所はPFリングの運転時には作業ができなかったため、12月19日の運転停止後に、入射路最上流部のDCセプタム電磁石2台の設置、真空ダクトの接続を行った。PF-AR 直接入射路建設は最終段階に入り、現在電磁石の通電試験、インターロック等安全系の確認が行われている。今後放射線主任者検査等すべての準備を整えて、2月13日(月)からビームコミッションが開始される。

PF および PF-AR の運転状況とスケジュール

PF の 2016 年度第 2 期（10～12 月）のユーザー運転は、予定通り 12 月 19 日（月）に終了しました。PF の第 3 期のユーザー運転は、2 月 8 日から 3 月 10 日までの予定です。一方、PF-AR については、第 3 期（2 月 13 日～3 月 10 日）に、直接入射路工事完了後の加速器立ちあげ運転と施設検査を予定しています。またこの間、施設検査の合格後に、新しくなった NW2A の光導入試験等を実施する予定です。さらにこの期間中には、AR の全 BL の調整作業等も並行して行い、昨年 6 月以降しばらく停止していた AR のユーザー運転開始（4 月～）に備える予定です。約 1 ヶ月の短い期間ではありますが、PF のビームタイムをぜひ有効に活用いただければ幸いです。

一方、2017 年度は、約 5 ヶ月間（5～10 月）にわたって SuperKEKB の Phase II 運転開始に合わせた入射器の大規模工事を予定しているため、例年に比べてかなり変則的なビームタイムのスケジュールとなります。以下の PF ホームページにて、第 1 期（4、5 月）のユーザー運転スケジュールをご確認ください（http://www2.kek.jp/imss/pf/apparatus/schedule/SC2017F_17Jan17.pdf）。

これまで PF では、ゴールデンウィーク中のユーザー運転は行なっておりませんでした。2017 年度については、年間のビームタイムを可能な限り確保するために、連休中にもユーザー運転を行うことにいたしました。特に、4 月 28 日から 5 月 4 日までの間は、孤立バンチの利用が可能なハイブリッド運転モードとなり、トップアップ入射にてユーザー運転を行う予定です。ユーザーの皆様には連休中の運転でご不便をお掛け致しますが、何卒ご理解いただきますよう、お願いいたします。2017 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。最近の予算状況や今後の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説明させていただきます。

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、今年度中に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い、2 月に完了いたしました。PF-AR の運転スケジュールに記載した通り、今年度の第 3 期中に光導入試験を行い、2017 年度 4 月からのユーザー運転開始を予定しています。

平成 29 年度運営費交付金の重点支援について

第 3 期中期目標期間における国立大学法人の運営費交付

金については、各法人等の機能強化の方向性に応じた取り組みを支援するため、「国際拠点」、「全国拠点」、「地域拠点」の 3 つの枠組みで重点支援が行われていることはユーザーの皆様もご存知かと思えます。大学共同利用機関法人においても、国立大学法人と同様に「国際拠点」「ネットワーク形成」「研究環境基盤強化」をキーワードとして各機構の機能強化策が評価され、最終的に採択された重点支援の取り組みが公開されています。KEK では、「連携プラットフォーム共同構築による TIA 機能強化」と「放射光施設ビームラインを活用した産業界等におけるイノベーション創出の推進」の 2 件が採択されました。どちらの内容も PF との関わりが深い取り組みですが、特に後者は PF における新規ビームライン整備に関わる重要な事案です。現在、この重点支援の枠組みを活かして、産学連携に資するビームライン整備計画の検討を進めています。PF における産学連携の強化は、放射光を活用した産業界等におけるイノベーション創出の推進に留まらず、先端的な大学共同利用実験を推進するための設備を拡充し、さらには次世代光源を利用するビームライン技術開発にも繋がるものであると捉えています。産業界・学術界を問わず、PF ユーザーの皆様と協力しつつ、この取り組みを進めてまいります。

将来計画への取り組み

放射光将来計画（KEK 放射光）については、PF 施設と PF-UA が協力しながら、10 月に完成した概念設計書（Conceptual Design Report, CDR）をベースとして、CDR をさらにより良くブラッシュアップする作業を続けています。具体的には、「サイエンスケース」「ビームライン技術」「施設運営」という 3 つのカテゴリーにおいて、KEK 放射光の特徴を活かした魅力ある切り口を提示するべく、施設とユーザーが知恵を出し合うフェーズであると認識しています。このような活動を施設・ユーザー全体で持ち寄り、議論する場として、3 月の第 2 回 KEK 放射光ワークショップ（3 月 13 日）と PF シンポジウム（3 月 15 日）を是非有効に活用したいと考えています。ユーザーの皆様の積極的なご参加を、よろしくお願いたします。

人事関係

最後に人事異動についてご報告します。10 月 1 日付で生命科学グループの研究員として着任された篠田晃さんは、1 月 1 日付でスイスの Paul Scherrer Institut (PSI) にある Swiss Light Source (SLS) に異動されました。SLS でも引き続き画像処理によるタンパク質結晶試料の認識・ライメントシステムの構築等を継続し、タンパク質の構造解析研究プラットフォームの自動化・高度化を推進されます。PF の協力研究員として所属され、PF との協力関係も継続します。

はじめに

1月7～9日に神戸で開催されました「日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム」で、「コンパクト ERL の 2016 年 3 月末における運転状況 ～ 1 mA 運転とその他の加速器技術の達成に関して～」の発表をさせていただきました。前々号にも報告いたしましたように、ERL は KEK のロードマップから完全に次期放射光源としての位置付けが無くなり、今年度は今まで運転をしていませんので、昨年度末の段階の達成度を報告した次第です。

また以下の事も前々号にも報告しましたが、研究実施計画 (KEK-PIP) の中に ERL のアクティビティーに関しては、基盤経費を用いて進めてきているプロジェクトの一つとして以下のように記述されています。

3-2. Other research projects carried out using general funds of KEK

The following projects have up to now been conducted mainly using general funds of KEK. They will be continued on the condition that greater efforts are made to obtain external funding.

- Simulation studies with the existing supercomputer (only up to summer of 2017)
- Industrial application of ERL technology
- Participation in CERN LHC/ATLAS
- Research carried out in the Detector Technology Project
- Research in the Japan-US cooperation program
- Projects under the Toshiko Yuasa Laboratory (TYL)
- Small-scale research projects conducted in KEK institutes

以上のように、「ERL 技術の産業応用」を目指して、出口戦略を作ることが求められています。

現在、ERL 推進室の活動はこの産業応用の出口戦略に向けた開発に舵を切りました。長年、この PF ニュースの紙面をお借りして開発・活動状況をお伝えして参りましたが、次期光源の位置付けが無くなったことを受けて、この紙面での情報発信は、今年度の本号の発信を最後に終了させていただきます。多くの方々にご支援を頂きましたことを御礼申し上げます。

ERL 技術の新たな応用に向けて

PIP に記述されている「ERL 技術の産業応用」を目指して外部資金を獲得すべく、cERL を開発してきたメンバーは新たな目標に向かって活動を開始しています。産業応用のテーマを拾い出して、その加速器技術の開発項目を整理すると、二つのポイントが浮かび上がります。一つは加速勾配が 12 MV/m 以上で 10 mA 以上の CW ビームを安定に運転できるクライオモジュール（産業化のひな形クライオモジュール）の製作とその運転実績。もう一つは大バンチ電荷（少なくとも 10 pC/バンチ以上）の状況で電子ビームエミッタンスが 1 mm-mrad 以下であることの検証です。

前者は大型の競争的資金の獲得が必須ですが、後者は現在の cERL をバーストモードで運転することで検証可能です。その状況を KEK 機構長に説明したところ、貴重な財源の中から約 5 週間程度の運転経費の追加予算配分を頂きました。メンバーの抱えている業務との兼ね合いを考慮し、2017 年の 2 月末から 3 月にかけて cERL の運転を再開し、上記の検証を行う予定です。

「ERL 技術の産業応用」の出口戦略の一つとして「半導体リソグラフィー用の大強度 EUV 光源開発」に関して今までに何度か紹介しましたが、必ずしも十分にその背景を含めて紹介をして参りませんでした。ここではその背景を含めて簡単にご紹介します。

半導体リソグラフィーの分野では、現在 ArF エキシマレーザー（波長：193 nm）をベースに「液浸」技術で開口率 (NA) をあげることで解像度を高めるとともに、複数露光（マルチパターニング）という手法を用いて何とかムーアの規則を保って微細化が 10 nm ノードまで進んでいます（図 1 参照）。しかし、更なる微細化を進めるためには、現在の手法を踏襲すると、更なる多重露光を進めることとなり、技術的にもコスト的にも難しい状況にあります。それを打破する手法として、13.5 nm 附近の EUV 光を用いて多層膜ミラーを用いた縮小光学系での露光技術開発が長年されて来ています。多くの問題は安定光源にあり、現在、錫のドロップレットに大パワーレーザーを照射してそこから発生するレーザープラズマ光源 (LPP) の開発が進められており、やっと近年 100 W クラスの光源がテスト露光機に搭載・稼働を開始し、台湾、アメリカ、韓国の半導体製造メーカーにおいて開発機として試運転を始めています。その状況を受けて光源メーカーは、現在、そのパワーを 200 ～ 250 W クラスの安定光源をターゲットとして開発が進められており、おそらく 2018 年頃には量産機として稼働開始するロードマップが示されつつあります。つまり、7 nm ノードから 5 nm ノードの微細加工が

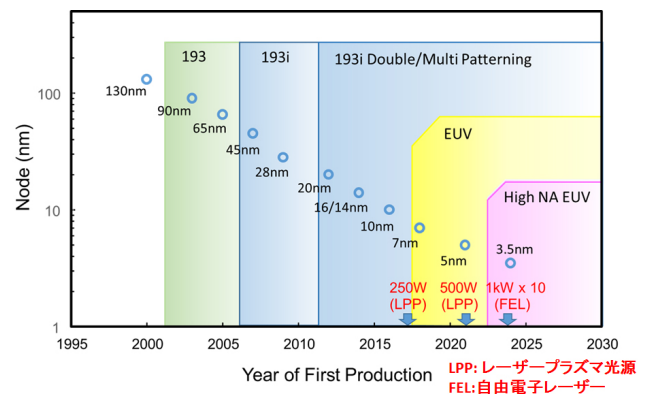


図 1 ロジック LSI の微細化と期待される EUV 光源出力

ら EUV 光源の露光装置が量産体制で稼働開始する予定と なっています(図1参照)。さらに3 nm ノードまで至るには、 約 1 kW の EUV 光源が必要と推定されます。この実現は LPP 光源での実現は極めて難しく、新しい光源の期待が業 界では高まってきており、その有力な候補は図2に示すよ うに ERL をベースにした EUV-FEL 光源です。FEL は非常 にパワーが高いという印象を持っておられるかも知れませ ませんが、高いのはピークパワーであり、現在動いている FEL 施設は必ずしも平均パワーは高くありません。図3はその 状況を表で示しています。現在稼働している米国の LCLS や日本の SACLA は常伝導加速器ですので、その繰り返しは高くても 100 Hz 程度です。その結果、平均パワーは 高くても 1 W 程度にとどまります。その平均パワーを上げ るには、1 秒当たりの発振パルス数を上げることが肝要で、 超伝導加速器によるロングパルス運転 (FLASH, Euro- FEL), さらに CW 運転の LCLSII 計画のように進む必要 があります。しかし、その LCLSII 計画でもせいぜい 1 kW 止まりです。その理由はビームダンプのエネルギーが 高くなりすぎて 1 MHz 以上の繰り返しではダンプの安全 性が保てないからです。一方、図2のような ERL-FEL の 場合には、エネルギー回収運転を行う事によってビームダ ンプのエネルギーを大幅に減少させることが出来ることか

ら、100 MHz を超える繰り返しパルス数を達成すること が出来、結果的に 10 kW を超える EUV-FEL を実現するこ とが原理的に可能です。その電子ビームパラメーターも図 2 に同時に示しますが、現在の cERL の到達状況からさら に 1 桁大きいバンチ電荷 (60 pC/バンチ) で、ビームエミ ッタンスが 0.6 mm-mrad が要求されており、これを今年度 末の 2 月中旬から 3 月末までの運転で検証する計画です。 その検証が出来れば、後はより高い加速勾配での超伝導空 洞を並べてエネルギーの増大を図れば実現可能であり、現 在の cERL の加速器技術から後一步のところにある光源と いうでしょう。このような検討を約 2 年ほど前から少し ずつ積み上げてきましたが、今年になって TIA 連携プロ グラム調査研究 (かけはし) で「自由電子レーザーの産業 化に向けた技術および国際動向の調査研究」を用いて、精 力的に国際的な本光源検討の業界への宣伝活動を開始して います。先ず、10 月から 11 月にかけて広島で開催された EUVL symposium (10 月 24 - 26 日), OSA Workshop (10 月 27 - 28 日) に参加し、EUV-FEL の検討およびその実 現に向けての戦略 (EUV-FEL 産業化研究会の活動) に関 して、中村典雄教授、および私が行い、続いて、オランダ のアムステルダムで開催された EUV source workshop (11 月 7 - 9 日) に私が代表して報告し、精力的に国際的に発 信をおこなっています。

また、12 月 13 日にデバイス産業の動向と EUV-FEL 光 源の現状についての報告、および今後の展望を議論頂 くため、「EUV-FEL ワークショップ」を秋葉原 UDX 4F NEXT-1 会議室で開催しました。参加者は 102 名であり、 そのうちの 70% は関連企業からの参加者で、EUV リソグ ラフイー光源の大強度化に関して依然非常に高い関心があ ることが視えました。プログラム及び発表資料(スライド) は、以下のサイトにアップしてありますので、関心のある 方はご覧ください (http://pfwww.kek.jp/PEARL/EUV-FEL_Workshop/)。

はじめに、EUV-FEL 産業化研究会の代表である石原 直 東京大学名誉教授から、本ワークショップの位置付けを 紹介頂き (図4)、山道 新太郎氏 (日本アイ・ビー・エ ム) から「Big Data 時代の Cognitive Computing に向けた Neuromorphic Device」というタイトルで基調講演を頂きました。今後の Big Data を扱っていくに当たり、従来のプ ロgramming手法では限界があり、ある意味で脳科学の手法 を用いていくことの重要性と、その現状を判りやすく示 して下さいました。続いて、石内 秀美氏 (先端ナノプロ セス基盤開発センター) から、「半導体集積回路の微細化 と EUV リソグラフィ」のタイトルで招待講演を頂きました。半導体集積回路の微細化に関して 3 nm ノード未満 の微細加工には物理的な限界があるものの、現状の 10 nm ノードからは更なる進捗が期待され、それに向けて技術 開発が進められていること、特に 7~5 nm ノードの微細加 工では EUV リソグラフィの出番となるであろう事を報 告されました。さらに 3 nm ノードの実現のためには 1 kW 以上の出力の光源が必要であることを、数々の会議報告

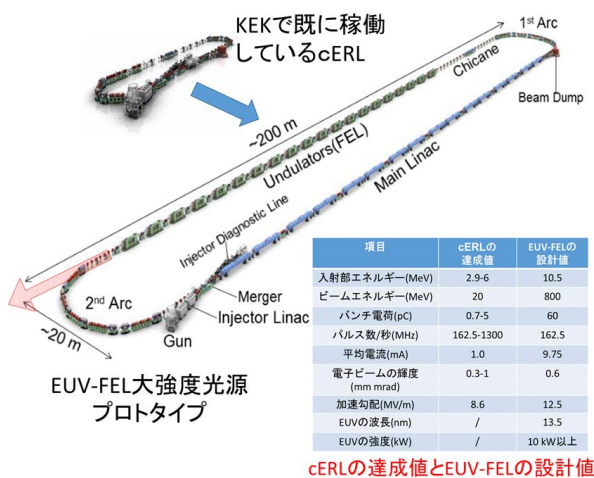


図2 ERL をベースにした EUV-FEL 光源

	LCLS	SACLA	FLASH	Euro-XFEL	LCLSII	EUV-FEL
常・超伝導	常伝導ライナック		超伝導ライナック			
運転形態	パルス運転		ロングパルス運転		CW運転	
建設国	米国	日本	ドイツ	ドイツ	米国	
エネルギー回収	無	無	無	無	無	有
パルス数/秒	120	30~60	<5000	<27000	1M	162.5M
加速エネルギー (MeV)	14300	6000~8000	1250	17500	4000	800 0.01@入射部
最短レーザー波長 (nm)	0.15	0.08	4.2-52	0.05	~0.3	13.5
光エネルギー/パルス(mJ)	~1	~1	<0.5	~1	~1	~0.1
光エネルギー/秒 (W)	<1	<1	<0.6	~30	~1000	>10000
ビームダンプパワー (W)	~1.5k	~0.5k	~6k	~0.5M	~1M	~0.1M
稼働開始/建設中/計画	開始 2009	開始 2011	開始 2004	建設中 2017予定	建設中 2020予定	検討中

図3 代表的な現在稼働・建設をされている FEL の中での本 EUV-FEL の位置づけ



図4 「EUV-FEL ワークショップ」での講演風景（左上より時計回りに）石原 直氏，山道 新太郎氏，石内 秀美氏，宮崎 順二氏。

をもとに紹介して頂きました。続いて宮崎 順二氏（ASML JAPAN）から、「EUV Lithography Industrialization and future outlook」というタイトルで招待講演を頂きました。ASMLは現在、世界の半導体露光装置のシェアを握るオランダの会社であり、特に EUV 露光装置の開発は一社独占の状況にあります。現時点ではまだ量産体制には至っていないものの、世界の半導体製造メーカーにレーザープラズマ EUV 光源をベースにした露光装置を開発機として納入しており、光源パワーは約 100 W で最高の条件での稼働率は 90% に至り、2018-19 年頃には量産機の体制に移行する予定で考えていることを紹介されました。正に、EUV リソグラフィーが夜明け前の状況となっていることを印象付ける講演でした。

午後には、一般講演の形で「自由電子レーザー "SACLA" とその基礎」を大竹 雄次氏（理化学研究所）、「ERL を用いた高出力 EUV-FEL 光源」を中村 典雄氏（高エネルギー加速器研究機構）、「高強度 EUV 光源用高耐久性 EUV 多層膜ミラーの開発」を市丸 智氏（NTT アドバンステクノロジー）、「半導体量産用 250 W LPP-EUV 光源開発の現状と将来」を山崎 卓氏（ギガフォトン）、「加速器の応用－基礎科学から一般産業へ」を佐藤 潔和氏（東芝）、そして最後に招待講演として "EUV free-electron laser requirements and considerations for semiconductor manufacturing" を Erik Hosler 氏（GLOBALFOUNDRIES）から、それぞれの現状の紹介を頂きました。最後の Hosler 氏は広島での EUVL シンポジウムと OSA ワークショップでこの「EUV-FEL ワークショップ」を開催することを伝えた所、「ぜひ日本の状況を知りたい」ということで参加頂くと同時に招待講演を引き受けて下さいました。その後、パネルディスカッションの形で「～ EUV-FEL 光源の実現に向けて～」のタイトルに対して以下のパネリストの方々：内山 貴之氏（東芝）、大竹 雄次氏（理研）、中村 典雄氏（KEK）、市丸 智氏（NTT AT）、山崎 卓氏（ギガフ



図5 パネルディスカッションの様子

ォトン）にそれぞれの課題をお話しいただきました（図5）。半導体メーカーの立場から内山氏は一刻も早く大強度の安定した光源が必要であることを強調されたこと、大竹氏からは現在稼働している XFEL（SACLA）に関して、稼働率はよい値を示していること、中村氏からは超伝導加速器である ERL においても安定運転の実績を積み上げつつあること、市丸氏からは多層膜ミラーや斜入射ミラーに関してその耐久性試験を進めつつあること、そして山崎氏からは現在の LPP 光源では 500 W の光源に関しては射程の中に入っていること、逆に 1 kW の出力を達成することは難しいこと、をお話し頂きました。それらの課題をもとにモデレータとして：岡崎 信次氏（ギガフォトン）、河田 洋（KEK）が議論を進め、時間を少し延長して 1 時間半程の議論を行いました。「今後の開発予算獲得に向けて協力的な体制を作っていくことが肝要である。」という共通認識を得ました。最後に神谷幸秀 KEK 理事から、「加速器は原理的に可能なものは必ずできるので、それに向けての周辺の開発も進めて行くことが肝要」という言葉を頂き閉会となりました。

時間を延長してのパネルディスカッションになっても、ほとんどの参加者が会場に残り、かつ、活発に意見を発言している様子を見て、アカデミアの立場の方は「EUV-FEL 光源は、産業界から見て強い興味と期待があるプロジェクトであることが覗えた。」という感想を口にしていましたし、半導体の業界の方は、「FEL という新しい光源に関する状況と見通しを聞けて、非常に有意義なワークショップであった」とコメントされていました。今後も、このようなワークショップを積み上げて ERL の加速器技術（CW の大電流加速器技術）を用いた産業応用の出口を一つ一つ開いていきたいと思っています。また、これらの出口は、将来、放射光の先端光源である CW-XFEL に向かうとした場合を想定しても、同じ方向性の開発方針を持っており、またいつの日か放射光利用の皆様方からの熱い期待が寄せられることを願っています。

本当に 11 年に渡り、温かく ERL の開発状況を見守って頂きありがとうございました。