

研究所へ異動されました。生命科学グループの研究者として構造生物学研究を推進してきた牧尾尚能さんが特許庁へ異動されました。

次に4月からの新任の方々をご紹介します。石井晴乃さんが先端技術・基盤整備・安全グループの技術員として採用され、主に制御関係を担当されます。北村未歩さんが電子物性グループの博士研究者として着任され、強相関電子系薄膜の磁性と電子状態の研究を推進されます。物質化学グループでは北澤留弥さんが研究者として着任され、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「革新的構造材料」のもとで、放射光を用いた先端計測技術開発に従事されます。田端千紘さんが、構造物性グループの研究者として、新学術領域「J-Physics：多極子伝導系の物理」のもとで、多様な多極子自由度に起因する多彩な伝導現象の研究を推進されます。新たにPFの仲間になった方々、PFから異動された方々ともに、今後の活躍を期待しています。

はじめに

cERLでは、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)が認可後、2月から3月の調整運転で以下に示すように、1 mA運転をはじめ、数々のERL運転技術の確立と将来のCW-FELやERL-FELに繋がる技術確立を行いました。一方、放射光の次期光源としての位置付けが「3 GeV高輝度リング」に移行しつつあり、3月中旬に機構長から、「ERLの出口として放射光の次期計画を掲げることは困難」のコメントを受け、また、機構の予算状況が極めて厳しい状況のため、今年度のcERLの運転を当面休止することとなりました。その一方で、機構長からERL開発の出口戦略として、2年ほど前から開始している「半導体リソグラフィ用の大強度EUV光源開発」で明確化できないかという示唆を頂いています。1年ほど前から企業と大学の関係研究者からなる「EUV-FEL光源産業化研究会」を立ち上げていますが、この研究会を中心に、出口戦略を明確化することを精力的に開始しています。また、この出口は、将来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、放射光利用の皆様方もご理解いただけるものと期待しています。

cERLでの進捗状況

cERLの1 mA電流増強の放射線変更申請に関して、3月8日の原子力安全技術センターによる施設検査を定格の30%に当たる0.3 mA運転で無事に終了し、検査後、検査官から口頭で「問題なく合格」の内示の報告を受けました。さらにその当日の夜、図1の示す様に、ほぼ定格である1 mA運転を2時間半に渡って保持し、ERL運転のハードウェアとハンドリングに関して大きな一歩を示すことが出来ました。また、その後、162.5 MHz運転でバンチ電荷

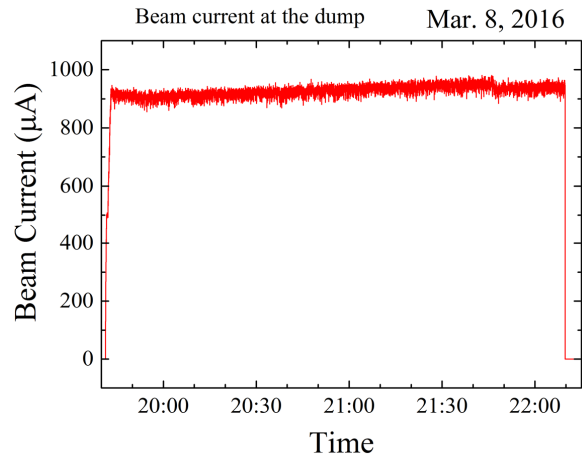


図1 cERLで1 mA蓄積電流を達成。

を6 pCに上げて約1 mm-mradのエミッタンスでの運転にも成功し、その時の放射線レベル測定でも十分にビームロスが少ない状況を確認することが出来ました。このことはcERLで10 mA運転も十分に可能であることを示す結果であり、もしも今年度放射線変更申請を行う事が出来れば、予定通りに10 mA運転を実証することが出来る状況になって来ていることを表しています。162.5 MHz運転は、レーザーコンプトン散乱の蓄積レーザーの繰り返し周波数に対応し、もちろんレーザーコンプトン散乱実験を行い、昨年度のレーザーコンプトン散乱強度と比較して、約6倍の増大が観測されました。また、短い時間でしたがイメージングの実験も試みました。

一方、昨年度の11月末に導入した6極電磁石を用いてバンチ圧縮運転を試み、約150フェムト秒まで圧縮できていることをTHz強度測定から推定することが出来ました。さらに、昨年度夏から進めてきていた電子銃の高電圧印加の値を現在の390 kVから450 kVに増強しての運転を最後に試みることが出来ました。残念ながら実質的に運転調整は1日だけであったために、著しい電子ビームの向上を確認するには至りませんでした。電子銃単体の性能テストは引き続き今年度も継続しています。

以上まとめますと、図2に示すように、2015年度末に1月から3月までのcERLの試験運転では、『1 mA運転を実証』、『6 pC/バンチの電荷運転で低エミッタンス運転を実証』、『約150フェムト秒のバンチ圧縮を実証』、『レーザーコンプトン散乱強度の6倍の増強』、『10 mA運転の可能性を確認』という多くの加速器技術の進展を成し得ることが出来ました。これらの成果は長年弛まず、cERLの建設と立ち上げを支えたERLチームメンバーの努力の賜物であると同時に、そのアクティビティーを支えて頂いた皆様方のお力添いによるものであり、深く感謝いたします。

コンパクトERLにおける加速器技術の現状

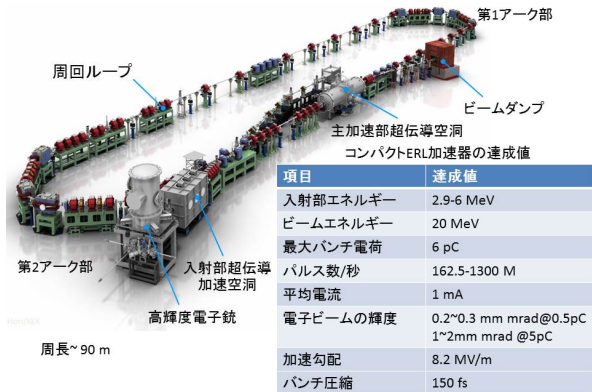


図2 cERLにおける加速器技術の現状

今後の展開

冒頭でも記述しましたが、当面出口戦略として、「半導体リソグラフィ用の大強度 EUV 光源開発」で更なる検討を進めています。その母体となる「EUV-FEL 光源産業化研究会」では、アカデミアと産業界が一体となってその実現に向けて活動をしています。この状況は決して日本だけの状況ではなく、米国では、世界第2位の半導体製造受託会社（ファウンドリ）であり、2014年 IBM の半導体製造部門を買収した Globalfoundries 社も自社でその光源の可能性を検討しています。5月27日の午前中に Globalfoundries 社の Dr. Erik Hosler 氏の EUV-FEL に関する講演を KEK つくば4号館2F 輪講室1で行う予定ですので、ご興味のある方は覗いてください。

一方で、cERL の運転は当面休止状態となりますが、現状でどの程度の加速器技術が確立され、残されている課題は何かを明確にする「ミニワークショップ」を、5月31日に4号館2F 輪講室1で行います。こちらにも、ご興味のある方は是非覗いてください。

また、ERL 計画開始の段階から、当時は東京大学物性研究所の助手として ERL の超伝導空洞開発に尽力してくれている阪井寛志准教授が4月7日から1年間 DESY の超伝導研究グループに参加しています。彼はこの期間に Euro-XFEL の超伝導空洞加速運転に参加すると同時に、同グループが将来に向けて開発を開始している CW 化に向けての R&D にも参加する予定で、将来に向けての人材育成も進めています。

はじめに

昨年から機構内で議論されて来ましたが、KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP) の国際諮問委員会が4月に行われ、それを受けて KEK 執行部が正式に KEK-PIP を表明しました。その中に明確に ERL の次期放射光源としての位置付けは取りやめ、次期放射光源の位置付けは「3GeV 高輝度リング」に移行したこと、一方、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今後求められています。前号でも紹介しましたように、この努力の一つとして「半導体リソグラフィ用の大強度 EUV 光源開発」に関して、1年ほど前から企業と大学の関係研究者からなる「EUV-FEL 光源産業化研究会」を立ち上げて活動を開始しています。また、この出口は、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います。放射光利用の皆様方もどうぞご理解下さい。

cERL に関する進捗状況

5月31日に4号館2階輪講室でcERLミニワークショップを開催しました(図1)。このワークショップでは、「cERLでどこまで達成できて何が残されているか?また、今後CW-FELやEUV-FELに展開するにはどのような開発が必要か?」を明確にすることを目的として、一日かけて発表と議論の場を持ちました。1mAの運転の確立、5pC/バンチ運転での電子ビーム輝度測定、10mA運転の目途も見えてきていること、バンチ圧縮の確認、超伝導空洞の劣化対策の知見の確保、CW-FELに向けた超伝導空洞の開発方針、500kV印加電子銃の性能とその開発の継続、冷凍設備の整備、レーザーコンプトン散乱X線の状況と今後の見通し等々に関する話題提供のもとに議論を行いました。下のURLに発表スライドを含めて掲載していますの



図1 cERL ミニワークショップの会場の様子。

で、ご興味のある方はご覧ください (http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/cERL_miniWorkshop.html)。プログラムは下の通りです。

- 10:00-10:20 ビーム調整 (宮島 司)
- 10:20-10:35 エミッタンス測定 (島田 美帆)
- 10:35-10:55 1 mA CW 運転・ビームロス (帯名 崇)
- 10:55-11:15 ビームハロー (田中 オリガ)
- 11:15-11:30 バンチ圧縮オブティクス (島田 美帆)
- 11:30-13:30 [昼食]
- 13:30-13:50 cERL 電子銃 (1号機) の現状と課題 (西森 信行・東北大学)
- 13:50-14:10 入射器クライオモジュール, および, 主加速器クライオモジュールにおける空洞性能の低下現象と性能回復の方策 (許斐 太郎)
- 14:10-14:30 EUV 光源用 ERL/FEL における超伝導空洞の技術的課題と開発の進展状況 (梅森 健成)
- 14:30-14:50 冷凍機の不具合の原因とその対策 (本間 輝也)
- 15:00-15:20 レーザーコンプトン散乱X線・今回の達成状況と今後の展開 (赤木 智哉)
- 15:20-15:40 電磁石の進捗: バンチ圧縮用6極電磁石とラスタリングシステム (原田 健太郎)
- 15:40-16:00 cERL ビーム運転中の真空系の運用について (野上 隆史)

一方、cERLの総合運転は今年度から休止状態となっていますが、cERLの根幹の加速器技術要素の一つである、高輝度DC電子銃(図2)の原子力機構(主に西森信行研究員(現在、東北大学准教授))とKEK(主に山本将博助教)の共同開発は継続して進めています。電子銃単体の開

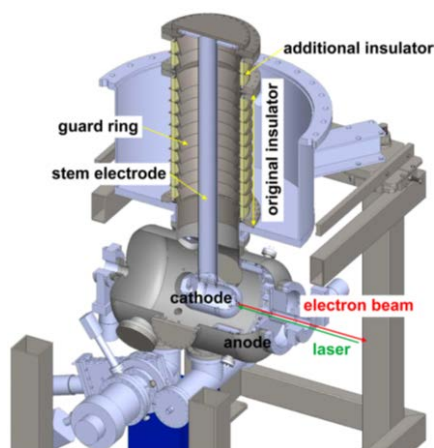


図2 cERLの根幹の加速器技術要素の一つである、高輝度 DC 電子銃

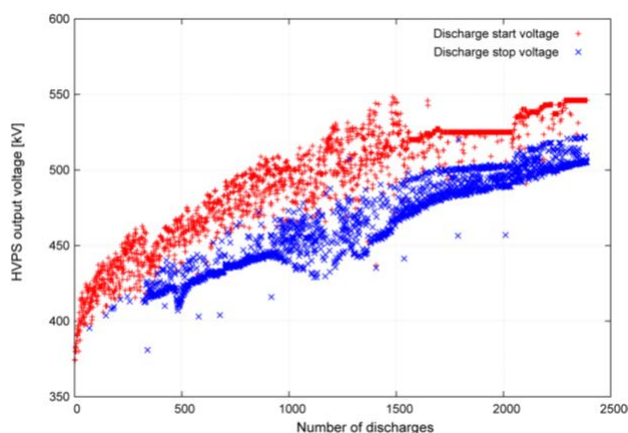


図3 500 kV まで印加したエージングでの放電開始電圧 (赤色・薄い色) と放電停止電圧 (青色・濃い色) のプロット。(ウェブ版ではカラー原稿を掲載しています。)

発運転を継続し、最大 500 kV (目標印加電圧) まで、安定な運転ができるようにエージングを継続することと、その時の電子銃単体の電子ビームの輝度を測定することを目的に進めてきました。今回、エージングを 4 月以降も行い、安定に 500 kV まで印加できることを確認しました。そのエージングのプロセスで、放電開始電圧 (赤色) と放電停止電圧 (青色) を整理してプロットすると (図 3)、明確なそれぞれの閾電圧が存在することが判り、さらに放電停止電圧が安定電圧印加の重要な閾電圧となっていることも実験的に明らかにすることが出来、その放電プロセスについての考察を含めて、APPLIED PHYSICS LETTERS **109**, 014103 (2016) に論文として掲載されています。現在 WEB でも見ることができますので、ご興味のある方は以下のサイトをご覧ください (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/109/1/10.1063/1.4955180>)。

ERL 技術の新たな応用に向けて

ERL 開発の出口戦略として、2 年ほど前から開始している「半導体リソグラフィー用の大強度 EUV 光源開発」に向けて、その利用者となる EUV リソグラフィー露光装置

会社やそのユーザーからの確実なコミットメント形成の作業が重要と理解しています。そのために「TIA 連携プログラム探索推進事業」である「かけはし」に「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」という題目で応募し、「主に半導体リソグラフィ用 EUV 露光光源としてコヒーレント放射光である EUV 自由電子レーザーの実用化可能性を産業 (業界) 動向 / ニーズや技術的見地から調査研究する。さらには、その調査研究を踏まえ、産業用光源としてあるべき姿と産業化プランを世界に向け提示し、世界的なコンセンサスの形成を図ることを目指す。」という内容で申請し採択を頂いています。この調査研究の一環として、12 月中旬ごろに「EUV-FEL ワークショップ (仮称)」を都内で開催する準備を開始しています。詳細が決まりましたら WEB でご案内いたしますので、ご興味のある方はご参加下さい。

一方、国際会議、ワークショップでの情報発信とコンセンサス作りの一環として、6 月 13 -16 日に米国で開催される EUVL Workshop (<http://campaign.r20.constantcontact.com/render?m=1101919912805&ca=a5ae487c-345e-41b0-80ed-8eccb435be28>) で、KEK 加藤龍好教授が「Design and Development of a 10-kW Class EUV-FEL Project in Japan」の講演を行っています。さらに、10 月 24-26 日に広島で開催される「EUVL Symposium 2016」(<http://euvl2016.org/>) では、中村典雄教授と私が講演を申し込み、中村氏からは加速器技術の検討結果報告の立場で、私のほうからは、この実現に向けた取り組みという立場で、話題提供する予定で、半導体のエンドユーザーへの大強度光源の実現に向けたコンセンサス作りの歩みを開始しようとしています。また一方で、cERL で開発してきている「大電流先端加速器の要素開発」が、単に半導体リソグラフィーの EUV 大強度光源という産業化の切り口だけではなく、医学応用小型高精細 X 線源や核医学検査用 RI ($^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$) 製造という『新しいイノベーションを見据えた加速器要素開発』という切り口でアピールできる可能性を検討し、関係機関への働きかけを検討しています。

はじめに

前回の報告で KEK-PIP の表明の内容を記述しましたが、それとほぼ同時に KEK ロードマップの改定が 6 月 30 日に公表されました (http://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/roadmap2013-J_1.pdf)。その中にはより明確に次世代放射光源の位置付けは「3 GeV 高輝度リング」に移行することが明記されています。またそのような判断が妥当であったことを検証する形で、「ERL 総括委員会」が、7 月から 9 月にかけて行われ、その報告書も KEK のホームページに公開されています (<http://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/ResearchAccount/2016/10/12/ERL2016.pdf>)。

この総括委員会の委員は、
日本放射光学会関係

- ・ 雨宮慶幸 (東京大学大学院・新領域創成科学研究科教授)
- ・ 小杉信博 (自然科学研究機構・分子科学研究所教授、UVSOR 施設長)
- ・ 壽榮松宏仁 (東京大学名誉教授、元理化学研究所・播磨研究所長)

高エネルギー加速器研究機構教育研究評議会より

- ・ 上垣外修一 (理化学研究所・仁科加速器研究センター・加速器基盤研究部長)
- ・ 瀧川 仁 (東京大学物性研究所長)
- ・ 中野貴志 (大阪大学核物理研究センター長)

の 6 名の先生からなり、委員長は小杉信博先生に務めて頂きました。

「総括の具体的項目については委員会での議論に基づき、

- 1) ERL 光源を PF の将来計画に決めた経緯と理由が妥当だったか。
- 2) ERL 光源を PF の将来計画として実現するための実証機の位置付けが妥当だったか。
- 3) ERL 光源を PF の将来計画としないことに至った経緯と理由が妥当だったか。

3 項目それぞれについて、機構内部 (PF, 物構研, 機構全体) での議論・見直しが適切だったか、利用研究者との関係が適切に行われたか、日本放射光学会との関係が適切だったか、世界的動向の把握が適切だったか、など、いろいろな側面を考慮しながら総括」されています。

詳細は原文を参照して頂きたいと思います。まとめとして、「PF 運転開始 15 年となる前後に、第 3 世代硬 X 線光源である SPring-8 の利用開始や第 3 世代 VUV・軟 X 線光源計画の提案などの国内動向における紆余曲折があった中で、PF の次期光源計画が検討された。その結果、PF 運転

開始 20 年後の 2002 年に、当時、蓄積リング型光源と直線型光源の両方の特性を持つと世界的に期待されていた ERL に基づく硬 X 線光源を提案したことは妥当である。次期光源の運転開始の目標を、PF 運転開始 30 年を越えた 2013 年あたりとしたのも妥当である。

ただし、2016 年においても、未だ次期光源の実現に至っておらず、PF・PF-AR が競争力低下に陥っていることについては、いろいろ反省すべき点がある。2006 年には、蓄積リング型光源と直線型光源の異なる特性をそれぞれ最大限引き出しながら放射光科学を推進するという世界動向に沿って、国内でも硬 X 線光源として SPring-8 に加えて SACLA の建設が始まった。また、この 10 年の間に国の科学技術・学術政策 (財政面を含む) も大きく変化した。ERL 計画をスタートして以来、このような国内の放射光科学や科学技術・学術政策の変化の中で、日本全体の視野に立って PF の次期光源の位置付け (目指すべきサイエンスや対象とする利用者層など) の見直し、実現プロセスの見直し、を適切に行う必要があったと考える。」

と冒頭に指摘されています。さらに

「5 GeV の ERL 光源計画に関する 2005 年度の科学技術・学術審議会の研究計画・評価分科会での審議の結果では、

- ① 建設コストが 800 億円クラスとなり、費用対効果の観点から綿密な調査検討が必要、
- ② SPring-8 が本格利用期に入り、XFEL も整備されようとしている段階で研究ニーズの十分な把握・分析が必要、
- ③ 技術的に多くの課題を解決する必要があり、まだ詳細な事前評価ができる段階にない、などの指摘を受けた。上述の見直しを適切に行うためにも、物質構造科学研究所は 2005 年度の時点での①～③の指摘に対して直ちに対応すべきであったが、以下のような経緯を辿ることで対応が不十分になってしまった。」

と続き、経緯がつつられている。さらに、

「ERL 実機の計画を中止し、より現実的な蓄積リング型次世代光源の計画に変更するのは妥当な判断ではあるが、世界動向から見れば遅きに失してしまった。なぜ、判断が遅れたか、なぜ、上記のような経緯を辿ったか、の原因をより具体的に考えると、大型計画に必要とされる以下の Feasibility ⑦～⑨の検証が ERL 計画を進める過程において極めて不十分であったと言わざるを得ない。

⑦ Political Feasibility (Leadership) (政治的可能性) : 計画全体に責任と権限をもつリーダーが不在であった。フォ

トンサイエンスに責任を持つ物質構造科学研究所と並列に ERL 計画推進室を置くという構造もその一因である。その結果、各種 Feasibility に対する見極めを最終的に誰が責任を持って行うかが曖昧となり、ERL 光源を PF の将来計画としないとの判断に至ったタイミングが遅きに失した主要因になったと考える。

④ Financial Feasibility (予算的実施可能性)：建設コストおよび運転コストの見積もり、その予算をどのように何時までに獲得するかに関する具体策が曖昧であり、その結果、予算的実施可能性に関する検証姿勢が曖昧であった。

⑤ Technical Feasibility (技術的実施可能性)：電子銃の寿命・超伝導空洞の性能・所期の蓄積電流の達成・エネルギー回収率・電子エネルギーのスケーリング (MeV → GeV) の難度等を含む技術的実施可能性に関して、実証機による実証は不可欠なステップであるものの、現実的な放射光源用加速器としての時間軸を入れた技術的可能性に対する検証姿勢が曖昧であった。

・今後に向けては、以上のいろいろな反省点 (①～③, ⑦～⑨) を改善するための方策を早急に検討していただきたい。」と結ばれている。最後に、加速器科学の成果に関しては

「・なお、ERL 実証機を使った開発研究は結果的に PF・PF-AR の次期計画 (フォトンサイエンス) には結びつかなかったが、加速器科学の基幹技術開発及び将来につながる応用面で成果を挙げた点は評価できる。」の一文が加えられています。

以上のような総括の結果を頂き、「次期放射光源」の位置付けとしての ERL 開発を停止することに至ったことに室長として大いに反省する次第です。30 数年前に KEK の PF に来たときから「大型計画は時間がかかるもの」という意識が自分自身の中にあり、それが甘い判断をしてしまった原因であると認識するとともに反省しています。現在世界で冠たる大強度陽子施設である J-PARC は、私が 30 歳ごろに着任した 1980 年代から「大型ハドロン計画」という形で進められており、それが JAEA のオメガ計画と統合する形で 2000 年代に J-PARC という形となって実現してきた事を見ていると、無意識のうちに「大型計画は時間と予算がかかるもので、重要なのは粘り強くあきらめないで開発を進める事」という意識が出来上がってしまっていました。一方、放射光科学は普遍的なツールとなり、ある意味で賞味期限が重要であると同時に、国の財政状況も 20 年前とは様変わりしている事を十分に加味しなかったことは事実であり、大いに反省する次第です。ただ、その中で、最後の一文ではありますが、cERL で培われた加速器技術が基幹技術として将来の応用面で成果を上げたことを委員会が認識して下さったことに感謝いたします。

この総括委員会の結果を重く受け止め、今後の「KEK

放射光計画 (3 GeV 高輝度リング計画)」を進めて行くことが肝要であり、その推進を行っている方々をお願いする次第です。一方、ERL の加速器技術開発を支えてきてくださった加速器の皆様は、KEK-PIP の判断にあるように「ERL 技術の産業応用」を目指して、出口戦略を作ることに今後もさらにご協力いただければ幸いです。

その観点から、現在、ERL 計画推進室は先端加速器推進部の中に機構横断型の推進室として位置付けられていますが、その根幹である「次期放射光源」としての位置付けがなくなった事、一方で KEK-PIP で記述されているように「ERL 技術の産業応用」を目指して、出口戦略を作る受け皿としての役割が KEK として残っている事から、推進部部長の岡田部長から機構に向けて 8 月 31 日付けで、

- 1) 2017 年度から「ERL 計画推進室」を廃止する
- 2) 2016 年度は cERL を中心に活動してきた加速器技術のまとめを行う
- 3) 2017 年度からは「ERL 技術の出口戦略を策定し、その研究開発を担うために、先端加速器推進部に部内措置として、超伝導加速器利用推進チーム (仮称) を設ける

という内容の組織改編の要望を提出しています。現時点で、この要望がどのように取り扱われるかは定かではありませんが、ERL 技術の新たな応用に向けた開発を KEK として進めていきたいと考えています。

ERL 技術の新たな応用に向けて

「ERL 技術の産業応用」を目指して、出口戦略の一つとして「半導体リソグラフィ用の大強度 EUV 光源開発」に関して、4 月に経産省への働きかけを行い、その後、JST を含めて関係機関に働きかけを行っています。そのような活動に関して、文科省へも状況説明を 9 月中旬に行いました。また、10 月 11 日には TIA シンポジウムが東京のイイノホール&コンファレンスセンターで開催され、TIA かけはしの選択テーマの一つとして、「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」を発表し、意見交換を行いました。産総研の方々をはじめ、EUV リソグラフィの周辺技術の開発を進めている EIDEC の方々、東芝半導体の方々といった関係の皆様と情報交換ができたことは有意義であったと思います。今後、12 月 13 日に「EUV-FEL ワークショップ」を秋葉原の「秋葉原 UDX NEXT-1」で行うべく、EUV-FEL 産業化研究会の事務局を中心に招待講演者の依頼とプログラム編成を進めています。

9 月 29 日 (木) に、「アト秒、zeptosecond X 線発生」のセミナーを行いました。近年、レーザーの高次高調波 (HHG) により、高エネルギーのレーザー発振だけではなく、アト秒の軟 X 線源の実現として注目されています。一方で、もともとの基本レーザーをレーザー技術だけで進めると、その繰りかえし周波数を上げることに限界があることから、ERL の高繰り返し電子ビームを用いて共振器型の赤外レーザーを発振させ、それを基本レーザーとして高次高調波

を発生させるアイデアが浮上してきました。その場合には「10 MHz 程度のアト秒，さらにはzeptosecondに達するX線の発生の可能性があるのではないか」という夢を現実化するための議論するために，以下のお二人の講師にセミナーをお願いしました。

板谷治郎氏（東大物性研）

「レーザー高調波の最前線と将来展望」

羽島良一氏（量子科学技術研究開発機構）

「アト秒，zeptosecond X線発生のための共振器 FEL の提案」

板谷氏は東大物性研でレーザー開発に従事されており，特にレーザー高次高調波の発生と利用に関する研究を牽引されています。その高次高調波の性質を利用し，アト秒，さらにはzeptosecondの高調波発生 of 技術開発の最前線と将来展望を講演頂きました。羽島氏は ERL 開発を長年に渡り KEK と共同で牽引して頂いていますが，上述のアト秒，zeptosecond X線高調波発生のための種となる高繰り返しの共振器 FEL についての御講演を頂きました。

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

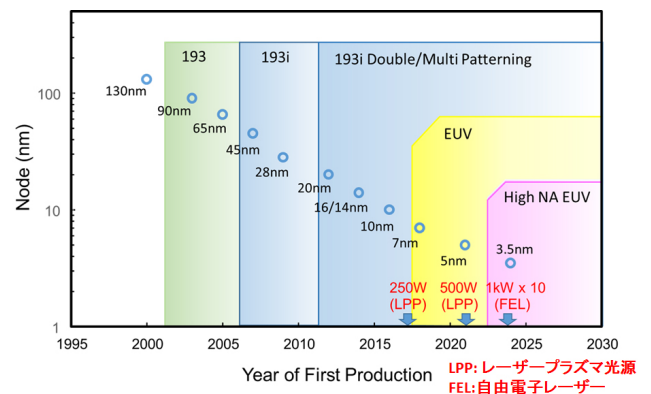


図 1 ロジック LSI の微細化と期待される EUV 光源出力

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、および私が行き、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

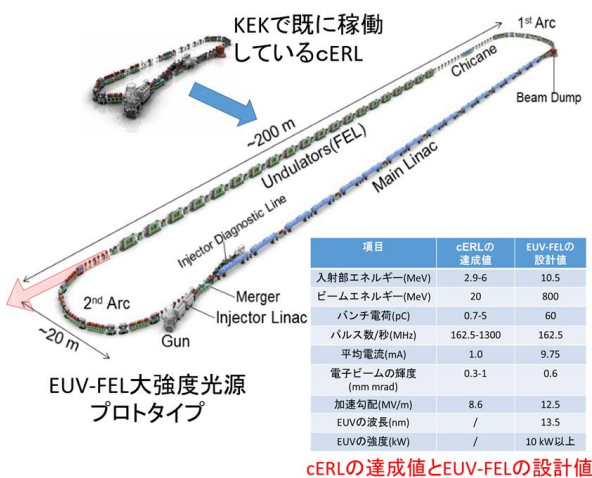


図2 ERL をベースにした EUV-FEL 光源

	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。