

はじめに

2015 年度が始まりました。cERL では、昨年度末までの約束事として日本原子力研究開発機構（JAEA）との共同開発で進めてきたレーザーコンプトン散乱 X 線の発生と 100 μ アンペアの CW 運転を、cERL 建設部隊と照沼信裕教授（加速器第六系）を代表とする「光・量子融合連携研究開発プログラム」のメンバーも加わり、その両方を実現しました。その成果は既にプレス発表されています (<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20150427150000/>)。「30 ミクロンほどの電子ビームパルスとレーザービームパルスを数ピコ秒の時間軸も含めて衝突させる技術は加速器では決して特別なものではない」と加速器の研究者の方々は言いますが、決して容易ではありません。その実現には数ミクロンで安定した電子ビームとレーザービーム、そして時間軸にも数ピコ秒で安定したシステム設計が必須です。ERL 計画を放射光源計画として設定した時に、多くのユーザーの方々が懸念した「ライナックで本当に安定なビームが実現できるのか？」という疑問に答える実証実験とも言えるでしょう。一方、電流値はライナックから見ればすでにかなり高い電流値ですが、放射光のユーザーの皆様から見ますと、まだまだ低い値かもしれません。今年度の大きな目標は、着実に一桁ずつ電流値の増加をすすめ、1 mA までの運転を目標に放射線変更申請を進めて行く予定です。また平均電流値だけではなく、「バンチ当たりの電荷量を上げて、エミッタンスが十分に小さな値を実現できるか」ということを検証していくことも重要な課題です。そして、THz 光源利用や、近年急速に世界的に注目されてきている ERL をベースにした FEL 光源による半導体リソグラフィーの大強度 EUV 光源で必須である、アーク部のマグネットを用いてバンチ圧縮（目標値は 100 フェムト秒）を cERL で検証することも今年度の重要な課題です。

cERL では、常に次の先端放射光源実現を目指して技術開発を進めています。どこかの会社の宣伝文句ではないですが、「明日を切り開く cERL!」という気概を持って関係者一同進めていますので、どうか今後ともご支援ください。

cERL での進捗状況

はじめに述べましたようにこの 3 か月間、cERL の現場では日本原子力研究開発機構（JAEA）との共同研究で進めているレーザーコンプトン散乱 X 線の発生と 100 μ アンペア運転の実現に集中して取り組みました。1 月末から放射線変更申請（100 μ アンペア運転）に向けて調整運転を開始し、2 月 5 日の自主検査で、問題がない状況を先ず確認し、続いて 2 月 12 日に原子力規制庁の施設検査が実施され、2 月 13 日付けで合格を頂きました。そして、施設検査合格後はレーザーコンプトン散乱 X 線の発生に向けて全力で取り組みました。この作業には、「核セキュリティ

強化等推進事業」として原子力機構が進めている文科省委託事業のプロジェクトであると同時に、「光・量子融合連携研究開発プログラム」の基礎課題「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基礎技術開発」プロジェクト（照沼教授代表）とも絡んでおり、両者のメンバーに加わって頂きました。その結果、80 μ A の 162.5 MHz の繰り返し周波数での CW 運転で蓄積レーザーとの衝突を行い、安定して 6.9 keV の準単色 X 線の取り出しに成功しました。実験ステーションは発光点から約 17 m ほど離れており、4.66 mm ϕ の検出器で測定して、現状は 1200 cps 程度です。これはレーザーコンプトン散乱 X 線が $1/\gamma$ (γ = 電子ビームのエネルギー / mc^2) で広がり、現在の電子ビームエネルギー 20 MeV ですと、約 25 mrad に広がるコンバージェントビームだからです。しかし発光点換算すれば 10^7 cps 程度であり、今後の電流増強（10 mA 運転）と蓄積レーザーの性能向上、そして電子ビームのエネルギーの増大の余地を考えれば、十分に小型 X 線光源として期待できることが明らかになりました。また、30 ミクロン程度である微小光源から期待される高精細 X 線屈折イメージングの予備実

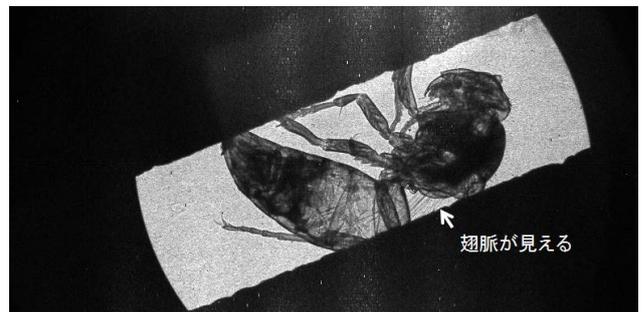


図1 スズメバチの屈折イメージング。翅脈が確認できる。



図2 微小光源である LCS 光源によるイメージングの特徴である屈折イメージングを取るために試料と検出器は 2.5 m の距離を置いて撮影。そのような条件でも検出器の空間分解能（100 μ m）を保っている。

験も行い、スズメバチの薄い翅（ハネ）を支える翅脈が見える他、体内の構造が良好なコントラストで観察できました（図1）。これらの成果はプレス発表すると同時に、5月3日から開催される第5回国際粒子線加速器会議（米国リッチモンド）で発表されました。図2は、レーザーコンプトン散乱X線実験ハッチ内で、X線屈折イメージング実験のセットアップをする様子を示しています。

コミッシュニング全体に関しても、5月3日からのIPACで坂中教授が口頭発表を行い、続いて、6月7-12日のERL2015ワークショップ（BNL/米国）では、上記の話題のほかにERL-FELによる大強度EUV光源に関する検討も含めて発表する予定です。また、ERL2015では3つのワークショップ分科会のコンピナーをKEKおよびJAEAの関係者が行う状況となっており、本機構のERL推進室関係者が世界のERL技術開発を牽引する立場となって来ています。

その他の活動について

前号PFニュース（Vol. 32 No. 4）に紹介しましたが、2月17日に、平成26年度の高エネルギー加速器科学研究奨励会の諏訪賞の授賞式が行われました。今年度この賞には、コンパクトERL加速器建設チームに贈られ、今回受賞対象となった研究課題は「エネルギー回収型リニアック（ERL）の基幹技術確立をめざした試験加速器の建設とビーム加速による性能の実証実験」です。図3は授賞式に参列したERL計画関係者です。この受賞を一つの区切りとして、今後、ERLはもとより、CWの超伝導加速器を利用した新しい応用への展開に尽力したいと考えています。この関連記事は物質構造科学研究所のホームページおよびKEKのホームページに紹介されていますので、関心のある方はそちらを参照してください（<http://www2.kek.jp/imss/news/2015/topics/0218Suwa-Awd/>, <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20150427150000/>）。

最後に最近のリソグラフィー用大強度EUV光源検討の状況について紹介します。国内の半導体産業は厳しい状況と聞いていますが、国際的には更なる微細加工への必要性は依然高い状況です。具体的には10nm程度のパターン転写が近いうちに必要とされる状況となりつつあり、その有力候補として長年EUV（波長13.5nm）を用

いた縮小光学系のシステムが開発されて来ています。また、その光源として、錫をベースにしたレーザープラズマ光源が長年開発されていますが、依然必ずしも十分な強度を得るに至っていない状況です。そのような中、近年、加速器を用いた大強度のEUV光源の可能性が再認識される（過去に2005年ごろにERLを利用した光源提案が行われています）状況となって来ており、国際的に「ERLをベースにしたFEL光源が唯一の解決策」という認識になりつつある状況です。このことを受けて、昨年度から国内の電機総合メーカーと協力してそのフィージビリティの検討を開始し、確かに800MeVクラスのERLに40mmほどのFELを導入し、電流値も10mA以下の条件で10kW以上の大強度EUV光源が可能であることが検討されました。その結果を国際的には昨年11月にダブリンで行われた「2014 International Workshop on EUV and Soft X-Ray」で加古教授（KEK）と羽島良一氏（JAEA）が報告しています。workshop proceedingは以下のサイトに掲載されていますので、ご興味のある方はご覧ください（<http://www.euvlitho.com/2014/2014%20Source%20Workshop%20Proceedings.pdf>）。その後、2月に共同開発研究を開始し、更なる検討といくつかの開発研究を開始しており、その検討結果は6月に開催される「2015 International Workshop on EUV lithography」<http://www.euvlitho.com/>の国際ワークショップで報告する予定です。このような超伝導加速器技術とFELとの組み合わせは、現在、国際的には極めて当たり前の展開です。欧州でのEURO-FEL（ロングパルスのパルス運転）が運転まで秒読み状態になっている事、米国ではLCLSII（1MHzのCW運転）が予算化され建設が開始し、精力的にサイエンスケースの検討が開始されている状況です（https://portal.slac.stanford.edu/sites/conf_public/LCLS2ScienceFeb15/Pages/default.aspx）。この先端放射光源の実現に必要な超伝導加速器技術を有する研究機関は、日本もしくはアジア全体を見渡してもKEKだけです。しっかりと、そのような将来も射程に入れて開発を進めて行かなければならないと考えています。



図3 諏訪賞授賞式に参加したERL計画関係者一同の喜びの表情。

はじめに

cERL は前号に記載しましたように、100 μ A 運転に成功し、30 μ m の微小光源によるレーザーコンプトン X 線の発生とそれによるイメージングの応用研究を開始しつつあります。また、今年度の大きな目標は、着実に一桁ずつ電流値の増加をすすめて、1 mA までの運転を目標に放射線変更申請を進めて行く予定です。さらに、平均電流値だけではなく、「バンチ当たりの電荷量を上げて、エミッタンスが十分に小さな値を実現できるか」ということを検討していくことや、アーク部のマグネットを用いたバンチ圧縮（目標値は 100 フェムト秒）を cERL で検証することも今年度の重要な課題です。このバンチ圧縮に関する課題の実現は、THz 光源利用や、近年急速に世界的に注目されてきている ERL をベースにした FEL 光源による半導体リソグラフィの大強度 EUV 光源で必須である。それらの開発研究を進めるべく、まず電流増強に関しては 8 月中旬過ぎの放射線安全審議委員会で 1 mA 増強に向けての放射線変更申請を出し、12 月ごろに認可されることが予想されますので、今年度末に 1 mA 運転を達成していく予定です。また、周回部でのバンチ圧縮に関しても、それに必要なマグネットの整備を限られた予算の中から手当を行い、またバンチ圧縮の程度を確認するためのモニター系の整備も行って、今年度末までに達成する計画で進めています。

2015 年度が始まり、新しい山内機構長体制の下に、KEK の運営方針が決定がされつつあります。山内機構長は「現在のロードマップに記載されている機構内の数多くのプロジェクトに関して、現実的な実行プランを作る」という目的で、機構内の研究推進会議で各プロジェクトの今後の方針をヒアリングすることを進めています。これを受けて、ERL 推進室の今後の方針案を 6 月ごろから ERL 関係者を中心に検討してきました。その方針決定をしていくに当たり、放射光コミュニティの要望である 3 GeV 蓄積高輝度リングが、国内のどこかに実現した時にも、十分にその光源と相補性・先端性を有する cw-XFEL などのライナック型回折限界光源の技術開発も射程に入れていくことを検討しています。7 月 14 日の ERL 推進委員会でも、cERL の今後の技術展開に関して、10 mA までの着実な大電流化、大バンチ電荷におけるエミッタンス向上、そして、近々にはレーザーコンプトン X 線源の利用に向けた電子ビームのエネルギー増強を行う事により、半導体業界のイノベーションが求める大強度の EUV 光源の目途を立てると同時に、cw-XFEL の加速器技術確立の優先順位を上げることを提案しました。前号の最後に LCLSII や EURO-FEL の状況を述べましたが、世界的な動向を考えると今後、より一層、このような超伝導加速器技術を用いた先端放射光源実現が求められるようになると理解しています。その

実現のポテンシャルを持った研究機関は、日本もしくはアジア全体を見渡しても KEK だけです。しっかりと、そのような将来も射程に入れて開発を進めて行かなければならないと考えています。

cERL での進捗状況

5 月の連休明けから超伝導空洞の冷却を開始し、5 月末から 6 月末までの約 1 か月強のマシントimeで電子ビームオプティクス最適化、中～大電荷バンチにおける電子ビーム最適化、そしてレーザーコンプトン散乱 X 線発生とそのイメージング実験を行っています。飛躍的な進展というものではありませんが、一つずつ問題点を解決して前に進んでいます。それらの進捗状況は 7 月 30 日に「第 2 回コンパクト ERL ミニワークショップ」を開催し、1 月以降の運転状況、技術開発の進展状況、そして今後の課題を議論しました。ワークショップの資料も以下のサイトにアップロードしていますので興味のある方はご覧ください。
http://pfwww.kek.jp/PEARL/cERL_miniWorkshop/
アジェンダは以下の通りです。

- | | |
|----------------------|---------------|
| 1. はじめに | 河田 洋 |
| 2. オプティクス関係スタディー | 島田 美帆 |
| 3. 大バンチ電荷スタディー | 宮島 司 |
| 4. LCS 関係概要 | 照沼 信浩 |
| 5. レーザーと光共振器 | 赤木 智哉 |
| 6. LCS 検出とイメージング実験 | 小菅 淳 |
| 7. 電流 1mA 増強に向けた見通し | 坂中 章悟 |
| 8. テラヘルツ観測・バンチ圧縮予備実験 | 本田 洋介 |
| 9. THz 利用に向けて | 足立 伸一 |
| 10. 入射器空洞 / 主空洞の運転状況 | 加古 永治 / 阪井 寛志 |
| 11. その他運転経験・トラブル等 | 坂中 章悟 |
| 12. 超伝導 RF 電子銃開発 | 許斐 太郎 |
| 13. 総合討論 | 全員 |

情報発信関係

6 月 7-12 日に BNL がホストして ERL2015 (<https://www.bnl.gov/erl2015/>) が Stony Brook Univ. で開催されました。総勢 114 名の参加者で、ERL という一つの加速器要素を議論するワークショップとしては、適正な規模でした。写真は初日に撮影された全体写真です。

ワークショップは 5 つのワーキンググループに構成されており、それぞれのワーキンググループとそのコンヴィーナーは以下の通りです。

- WG1 : ERL Injectors: Injector Performance, Electron Guns, Cathodes, Lasers
- Thorsten Kamps (HZB), Adam Bartnik (Cornell)



図1 ERL2015の全体写真

•WG2：ERL Beam Dynamics and Optics: Collective Effects, Multi-Pass Effects, Halo Simulations

–Michael Abo-Bakr (HZB), Vadim Ptitsyn (BNL)

•WG3：ERL Beam Instrumentation, Controls, Beam Losses and Halo Management

–Takashi Obina (KEK), Colwyn Gulliford (Cornell)

•WG4：ERL and SRF, including SRF System Performance, Field Stability, Synchronization, Special Requirements, HOM Damping

–Hiroshi Sakai (KEK), Erk Jensen (CERN)

•WG5：ERL Applications

–Vladimir Litvinenko (Stony Brook), Oliver Bruning (CERN)

全ての発表資料はワークショップのサイトの以下の indico サイトにアップされていますので、ご興味のある方はご覧ください (<https://indico.bnl.gov/conferenceDisplay.py?confId=909&view=standard>)。

KEK/JAEA のグループからは以下の方々招待講演の形で現在の開発状況を報告しました。

まず、Plenary Session で坂中章悟教授が “Successful Result of the Commissioning on cERL in KEK” を、また中村典雄教授が “Design work of the ERL-FEL as the high intense EUV light source” を講演しました。続いて、WG1 の招待講演として、JAEA の西森信行氏が “Operational Experience of DC Photoemission Gun at the compact ERL” を、山本将博助教が “Development of a 500 kV DC Gun with Narrow Gap” を、WG2 と WG4 とのジョイントセッションの招待講演として、Si Chen 博士研究員が “HOM-BBU Simulation for KEK ERL Light Source” を、WG3 の招待講演で帯名崇准教授が “Non-destructive Beam Position Monitoring in Two-Beam Section of ERL” を、WG4 の招待講演として阪井寛志准教授が “Operational Experience of CW SRF Injector and Main Linac Cryomodules at the Compact ERL” そして Feng Qiu 特別助教が “Performance of the Digital LLRF Systems for cERL at KEK” を、そして、WG5 の招待講演として、河田が “Science cases on ERL as a synchrotron light source” を、また JAEA の羽島良一氏が “Laser Compton Sources Based On Energy Recovery Linacs” を講演しました。

ワークショップ全体での印象に残った点は以下の通りで

す。

- 1) 米国で既に予算化されている LCLSII 計画 (cw-FEL) の技術要素は、ERL の技術要素と多くが共通していることから、ERL で開発してきている電子銃や超伝導空洞の性能が LCLSII 計画の仕様に合致している実験結果を報告しているケースが数多く見られたこと
- 2) BNL や CERN が掲げているコライダーとしての応用の提案が数多く見られたこと
- 3) コーネル大では 5 GeV 放射光光源の展開は影をひそめ、逆に BNL と共同でマルチターンと FFAG とのコンビネーションの新しいプロジェクトの提案が行われたこと
- 4) その中で、我々のグループが数多く発表した cERL の着実な技術開発は、ワークショップの中でいずれの報告も注目を集めていたこと
- 5) 中村氏が報告した EUV の大強度光源としての ERL-FEL の展開は、その他の応用も期待され、今後の応用という観点から注目を集めていたこと

また 5) に関連して、世界的に EUV リソグラフィー露光装置のシェアを握るオランダの ASML 社の技術者が、このワークショップに参加していたことも印象深い点でした。

詳細な会議報告は 6 月 25 日に開催した ERL 検討会で帯名氏、阪井氏から行われているので、そちらの資料を参照してください。 http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/wg_1/erlmeetingsiryou/index.html

また、EUV 大強度光源に関しては、引き続き 6 月 15-19 日にハワイのマウイ島で行われた 2015 International Workshop on EUV Lithography (<http://www.euvlitho.com/>) で中村典雄教授が招待講演として “An ERL-Based High-Power Free-Electron Laser for EUV Lithography” の講演をおこないました。さらに、7 月 6-7 日に東京工業大学で開催された「次世代リソグラフィーワークショップ」では、河田が「ERL-FEL をベースにした大強度 EUV 光源開発の検討」を報告しています。

冒頭にも紹介しましたように、7 月 14 日 13 時 30 分から 15 時 30 分に ERL 計画推進委員会を開催しました。今回は、cERL での進捗状況を報告すると同時に、今後の ERL 計画の推進方針に関する議論を行いました。アジェンダは以下の通りです。

- 1) cERL コミッショニングの現状とその今後
宮島司 (25 分)
- 2) レーザーコンプトン散乱 X 線発生と今後の利用の展開
羽島良一 (20 分)
- 3) 第 2 電子銃開発状況とその今後
山本将博 (15 分)
- 4) ERL 計画推進室の今後の方針
河田 洋 (30 分)
- 5) 総合討論 全員 (30 分)

最後の総合討論では、cERL での技術開発状況に関するより詳しい状況 (例えば安定性や今後の見通し) に関する質問を頂き、開発に携わっている研究者が率直に現状を答える形で進められました。今後の方針に関しては、冒頭に

述べたような方針を説明しましたが、概ね理解を得られた状況です。

最後に、毎年夏の終わりに開催されている「高エネルギー加速器セミナー OHO」は、今年度はエネルギー回収型リニアックの加速器基盤技術と応用」というテーマで9月1-4日に行われます (<http://accwww2.kek.jp/oho/oho15/index.html>)。

サイトのプログラムをご覧いただければわかるように、加速器技術だけではなく、利用に関しても医学応用から半導体リソグラフィ、そして軟X線、硬X線利用と幅広く話題提供が行われます。ご興味のある方は是非参加頂ければ幸いです。

はじめに

前号に記載しましたように、新しい山内機構長は「現在のロードマップに記載されている機構内の数多くのプロジェクトに関して、現実的な実行プランを作る」という目的で、機構内の研究推進会議で各プロジェクトの今後の方針をヒアリングすることを進めています。これを受けて、8月31日の研究推進会議で、ERL 推進室の今後の方針を説明する機会が与えられました。まず、cERL の現状とその今後に向けての開発に関して紹介し、cERL の運転実績から、低電流、低バンチ電荷における加速器性能は当初の目的を実証できた事、一方で大電荷、大電流の性能に関しては、今後もたゆまぬ開発が必要であること、またその開発には、現在の 20 MeV の加速エネルギーを増強することにより、空間電荷効果の軽減が重要であることを述べました。そして、その増強により、現在、米国で既に建設が開始している LCLSII のような CW-FEL の加速器技術を KEK でも蓄積することが出来ると同時に、cERL の技術開発で 2 年ほど前から検討が開始されている大強度 EUV 光源の技術課題も解決でき、さらに、レーザーコンプトン散乱による医学応用のテストポートの役割も果たせると説明しました。

今回の研究推進会議での議論が機構内にどの程度伝わったかは答えは出ていませんが、今後も機構の執行部への働きかけを続けていく所存です。どうぞユーザーの皆様のご支援をよろしくお願いします。

cERL での進捗状況

cERL の運転は 6 月 26 日で終了し、その後、第 1DC 電子銃の高電圧印加のための改造作業が開始しました。第 1DC 電子銃は主に JAEA が中心となって建設され、cERL の運転が行われています。約 2 年半前に東海の JAEA キャンパスから KEK サイトに移設しました。この電子銃は電子ビームの高輝度化を実現するため、別の言葉でいえば空間電荷効果を軽減するために、500 kV の高電圧印加をその仕様としています。そして、500 kV の高電圧を実現するために 12 段のセラミック絶縁碍子を用いていますが、移設前には 500 kV の高電圧印加が可能でしたが、移転に伴う作業で、多段のセラミック絶縁碍子の上段部の 2 段の絶縁碍子に絶縁の不具合が発生し、そのため、500 kV の高電圧の印加を行わず、400 kV の電圧印加に留め、ビームテストを行ってきました。そのような判断をしたのは、400 kV でも、現在世界中で稼働している DC 電子銃の中で、最高電圧を安定して印加できる電子銃となっているからです。しかし、更なる高性能化を目指し、この夏から秋にかけての運転停止期を利用して、不具合が生じている絶縁碍子を用いなくても 500 kV の高電圧が印加できるように 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に導入できることを確認、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態で高電圧印加テストにたどり着きました。カソードロッドは、今まで使用していたカソードロッドに新たなロッドを接続する形で進めましたが、残念ながら、高電圧印加の結果は、180 kV 程度から放電が発生し、高電圧印加が進まない状況に遭遇しました。放電箇所を特定したところ、カソードロッドの接続場所に対応することが判り、現在、一体のカソードロッドの新規製作を進めているところです。カソードロッドの作製が終了する 11 月末から 12 月中旬にかけて電子銃の立ち上げ作業を行う方向でスケジュール調整を進め、1 月からの cERL の運転に間に合わせる段取りを進めています。

一方、PF-AR 南実験棟で整備を進めている第 2DC 電子銃は、既に電極がある状態で 550 kV までの高電圧がかけられることを確かめていますが、この電子銃を用いて大電流（最大 10 mA まで）の電子銃単体の試験を行えるようにしたいと計画しています。そのためには放射線の遮蔽体の増強が必須ですが、段階的に電流値を上げていく計画の元、遮蔽の設計について放射線科学センターと相談を開始しました。

PF-AR 東第 2 実験棟では、超伝導空洞の横測定がオフラインで行える設備を LC の開発グループと協力して建設してきています。KEK には、超伝導空洞の単体性能を評価する縦測定装置は整備されていますが、クライオモジュールに組み入れた状況での性能テストを行う横測定装置は整備されていませんでした。クライオモジュールへの組み込みの際に生じるダストの混入等の問題を解決するためには、この横測定装置が必須です。そのため昨年度、横測定用クライオスタットを設置し、その冷却システムの整備を 4 月から開始しています。7 月段階で減圧ポンプの整備も終了し、2 K まで温度を下げられることを確認し、現在冷却に伴う熱振動の対策を行い、12 月に再度冷却テストを行うべく作業を進めています。このように超伝導空洞の性能向上に向けて弛まぬ開発とその立ち上げの努力を関係者は進めています。

一方、電磁石グループはこの秋の停止期間に、周回部でバンチ圧縮するための 6 極電磁石をインストールするスケジュールで作業を進めています。来季の 2 月から 3 月の運転でその効果を確かめることが出来るでしょう。

9 月 1 日から 4 日に渡り、高エネルギー加速器セミナー OHO'15 「エネルギー回収型リニアックの加速器基盤技術と応用」の題目で恒例の若き加速器研究者向けのセミナーが行われました。参加者は総勢 85 名であり、講師 13 名の 4 日間にわたる講義に熱心に耳を傾けていました。講師陣は cERL の建設、運転の実績をもとに充実したテキストを



図1 OHO'15の講師，参加者の集合写真



図2 EUV-FEL 光源産業化研究会打ち合わせの様子。

準備し、内容の濃い講義をしてくださいました。図1はセミナー開始日に撮影したものです。また、夜話では、(株)東芝 S&S 社の内山貴之博士から「EUV 利用」というタイトルで、半導体向け EUV リソグラフィの概要と展望についてご講演頂き、東海大学 盛 英三教授から「cERL を線源とする病院設置型微小血管造影装置開発に向けて」というタイトルで、既存の X 線源を用いた微小血管造影装置開発の歴史と cERL を線源とする逆コンプトン散乱 X 線への期待のご講演を頂きました。講義内容をテキストも含めて以下のサイトに紹介してありますので、ご興味のある方は参照してください。 <http://accwww2.kek.jp/oho/oho15/index.html>

EUV 大強度光源の検討に関して

今までに何度か大強度 EUV 光源開発が ERL の加速器技術を用いた新たな展開があることを報告してきました。その大強度 EUV 光源開発と、その関連材料(レジスト、マスク、多層膜ミラー等々)技術開発を共通の議論の場を持つことを目標とした、「EUV-FEL 光源産業化研究会」の立ち上げを開始しています。具体的には、第1回準備会(8月19日)に企業から15名(6社)、コンソーシアムから1名(1機関)、大学等から4名(3大学・1機関)、そして KEK から14名の関係者が参加しました。図2はその時の打合せの様子です。その後、9月24日に世話人会で今後の活動概要が議論され、10月21日の全体会議では、「EUV-FEL 光源の設計検討」、「EUV はなぜ 13.5 nm になのか」、「エンドユーザからの EUV-FEL 光源への要求」、「多層膜ミラーの現状と FEL での課題」、「関係学会最新情報」等の話題提供と意見交換が行われています。現在、7企業、1コンソーシアム、6大学・研究機関からの関係者が参加し、その規模が拡大してきています。

10月16日には時を同じくして二つの講演会で ERL-FEL による EUV 大強度光源の講演が行われました。一つはアルカディア市ヶ谷で開催された高エネルギー加速器科学研究奨励会が主催する特別講演会で、その中で(株)東芝・セミコンダクター&ストレージ社の内山貴之氏から「半導体向け EUV リソグラフィの現状と展望」、そしてこの展望

を受けて KEK の小林幸則主幹から「エネルギー回収型ニアック (ERL) を用いた高出力 EUV 光源の開発」の講演が行われました。一方、京都の木津にある関西光科学研究所で、日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究センター及び関西光科学研究所が主催する「第16回光量子科学研究シンポジウム」が10月15-16日に行われ、16日に私が「Feasibility study on high power EUV light source based on ERL-FEL」の講演を行ないました。それぞれの講演会、シンポジウムの詳細な情報は以下のサイトをご参照ください。 <http://www.heas.jp/lecture/koen.html>

<http://www.wapr.kansai.jaea.go.jp/sympo16/index.html>

また、11月9-11日に Dublin で開催される「2015 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources」で、KEK の梅森健成准教授が、「Current Progress on Design Work of High Power EUV - FEL based on ERL」のタイトルで現時点での加速器設計検討・最新情報と、さらにそれに特化した超伝導加速空洞モジュールの概念設計の検討状況を報告します。少しずつですが ERL-FEL をベースにした大強度 EUV 光源の期待が広がってきていると想像しています。

情報発信その他

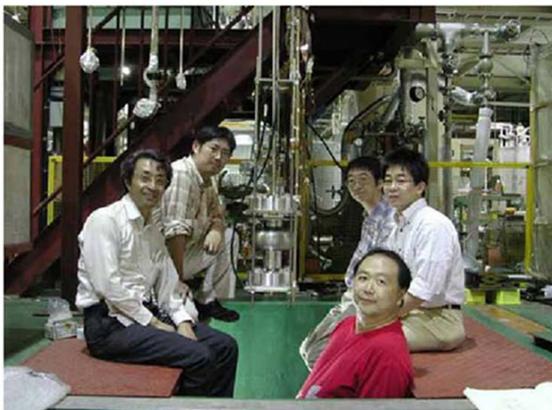
9月13-18日にカナダのバンクーバー郊外の Whistler Conference Centre で SRF2015 が開催されました。超伝導空洞をベースにした加速器の全体的な国際会議であり、KEK から ERL, ILC をはじめ機械工学センターのアクティビティを含めて多くの方々が参加されました。会議全体で約350名の参加者の規模で、現在世界的に建設が進んでいる重イオン加速器用としての超伝導加速空洞、EURO-FEL での数々のアクティビティ、そしてこれから建設を開始する LCLSII 計画での検討状況で多くの講演が行われました。特に LCLSII 計画が CW 運転をベースにしていることもあり、超伝導空洞開発のトピックスが高加速勾配から High Q 開発へと移行しつつある状況を新鮮に目の当たりにした次第です。そして、この様な先端光源の開発を日本国内でも開始する、もしくは開始できる準備を着々と



図3 SRF2015 での集合写真

進めることの重要性を実感した次第です。詳しい情報は、<http://srf2015.triumf.ca/> にプログラムが紹介されていますのでご参照ください。図3は最終日に撮影した全体写真です。

最後に非常に残念な報告です。ERL 計画推進に当たり、ERL 推進室が発足した当初から超伝導空洞開発でご尽力いただいた篠江憲治さん（当時は東大物性研のスタッフ）が、9月16日にご逝去されました。図4は2007年ごろに主加速空洞のシングルセル空洞テストを行った時に撮影された主加速部超伝導空洞グループの写真です。本当にERL 計画推進の初期から、施設を超えてご尽力いただき、現在のcERLの運転にまでたどり着ける原動力となって支えてきてくださいました。ここに謹んでご冥福をお祈り申し上げます。



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 μ 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 相当のバンチ電荷でのビーム性能の確認をする必要があります、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バ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が (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態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、バ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、バ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 発振においてもバ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 にバンチ圧縮用の 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/m² 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。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ーを行う予定です。

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。



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

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リソグラフィー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のリソグラフィー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)。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

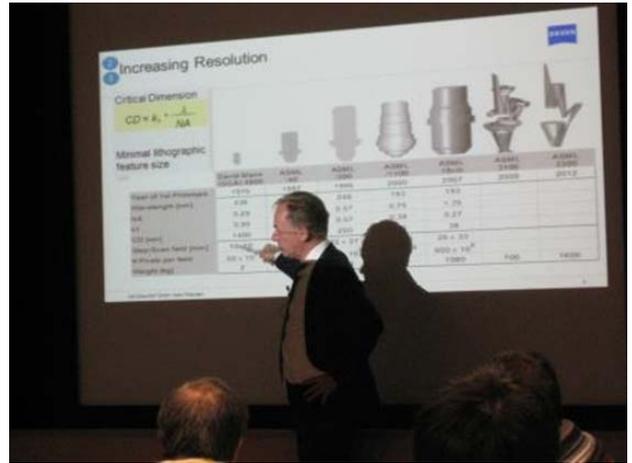


図3 講演中の Jos Benschop 氏。



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

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」として阪井寛士准教授が、「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。