

研究会報告 「先端放射光源に関する研究会 — 第3世代放射光 リング/SASE-FEL を越えて日本が選択すべき放射光 源ロードマップに向けて(1) —」

加藤政博 (分子科学研究所)

2014年11月21日, 22日の2日間, 自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター(愛知県岡崎市)において, 本学会および分子科学研究所の主催, また, 日本加速器学会の共催も得て, 「先端放射光源に関する研究会 — 第3世代放射光リング/SASE-FEL を越えて日本が選択すべき放射光源ロードマップに向けて(1) —」が開催された。

この研究会は, 第三世代リング型光源やX線自由電子レーザーの次に来る光源技術を概観し, 関連する光源および利用研究者間で情報を共有し, 今後の次世代光源開発へ向けた議論の基礎とすることを目的とした。回折限界を目指す超低エミッタンス電子蓄積リング, エネルギー回収型ライナックなどの超伝導加速器, 短波長自由電子レーザーの最新の状況と将来展望に加え, レーザー加速などの新しい加速器技術, 挿入光源技術, 非加速器技術による短波長光源などの動向も取り上げ, これら先端放射光源技術の特徴や性能, 開発の現状と今後の展開について議論を行った。

プログラムは下記の通り。大きく4つのセッションを設け, 回折限界を目指す電子蓄積リング, 粒子加速や光発生に関する新しい技術, エネルギー回収型ライナック(ERL), X線自由電子レーザーのそれぞれについて講演と議論が行われた。

研究会プログラム

11月21日(金)

趣旨説明(濱 広幸(東北大))

【セッション1: 回折限界放射光リングの可能性と意義/コンビナー 佐々木茂美(広大)】

講演I 世界の回折限界放射光リング戦略の動向とSPring-8 II がめざすもの(下崎義人(JASRI/SP8))

講演II SPring-8 II へのSACLAからの直接入射(大竹雄次(理研/SP8))

【セッション2: レーザープラズマ加速と光源技術の新展開/コンビナー 加藤政博(分子研)】

講演I レーザープラズマ加速の達成点とこれから(細貝知直(阪大))

講演II レーザーによるEUV・X線の発生(藤 貴夫(分子研))

講演III 短周期アンジュレータ開発の現状(山本 樹(KEK))

アンジュレータ技術の最先端(金城良太(理研/SP8))

講演IV 軌道角運動量を持つ光とその応用(佐々木茂美(広大))

11月22日(土)

【セッション3: ERLの先端光源としての可能性と意義/コンビナー 花木博文(JASRI/SP8)】

講演I ERL開発の現状と展望(宮島 司(KEK))

講演II 超伝導空洞の挑戦(阪井寛志(KEK))

【セッション4: FEL, 次の10年の進化/コンビナー 濱広幸(東北大)】

講演I 世界のXFELの展望とSACLAの現状と高度化の方向性(大竹雄次(理研/SP8))

講演II XFELOはどのように実現すべきか(羽島良一(JAEA))

閉会挨拶(村上放射光学会長)

研究会の冒頭, この研究会の世話人でもあり本学会渉外幹事でもある濱氏(東北大)より研究会の趣旨説明があった。同氏は, 我が国の加速器技術, ハードウェアに関する技術は極めて高いものがあるが, 世界をリードするようなオリジナルなアイデアがもっと出てきてもいいのではないかと, 議論の中から様々な新しいアイデアが生まれてくるような研究会としたい, という点を強調された。

一日目前半のセッションでは, まず下崎氏(JASRI)(図1)が, 電子蓄積リングで回折限界光の発生を目指す動きに関して講演した。世界的に3 GeV級の新しいリング建設計画と6 GeV級の既存リング高度化計画が動き出しており, その目標エミッタンスは, 現在の同程度の周長の高輝度リングよりも一桁以上小さい値となっていることが紹介された。その実現方法は, 偏向磁石を細かく分割することが基本であり, ビーム方向に磁場強度の変化する偏向磁石や収束作用を持つ複合機能型磁石が利用される。SPring-8においても, 既存トンネルの再利用, 光が使え



図1 下崎氏



図3 細貝氏



図2 大竹氏



図4 藤氏

ない期間1年、省電力化を骨子とする高度化計画の検討が進んでおり、低エミッタンス化の様々な手法を複合的に用いて現在のエミッタンスの1/10以下の100pm程度までの低エミッタンス化を目指す計画となっている。

引き続き、大竹氏（理研）（図2）より、ダイナミックアパーチャの小さなSPring-8-IIへ入射するために既存のブースターシンクロトロンを使用せずSACLA直線加速器から直接入射する準備が進められていることが報告された。ビーム品質の低下を防ぐためのバンチ長制御やSACLAとSPring-8-II間のタイミング制御の検討状況、既に建設の終了しているSACLAとブースターシンクロトロンを結ぶトンネルを用いたビーム輸送の予備の実験の結果が紹介された。

以上の講演に関し会場からは、回折限界を目指した計画で、輝度、フラックス密度、コヒーレントフラックスなど様々なパラメタの何がどのように向上し、それが利用側にどういう恩恵をもたらすのか、また利用系の進もうとしている方向と合致しているのか、しっかりと議論する必要があるとの意見があった。

1日目後半のセッションでは、まず、細貝氏（阪大）（図3）がレーザープラズマ加速に関する講演を行った。最近の同分野の研究では5 GeV近い電子の発生にも成功する等華々しい成果が出ている一方、再現性や安定性に乏しいのが実情であり、これに対して細貝氏らは、電子発生と加速の過程を分離することで、高い再現性・安定性を有する実用的なレーザープラズマ加速器の実現を目指して研究を進めていることが紹介された。これまでに10 MeV程

度のエネルギーで再現性に優れた電子パルスが発生できており、加速部を多段化することで将来のコンパクトなX線自由電子レーザーの実現への展開が示された。

続いて、同じくレーザーを使って直接的に短波長域の光を出す技術の動向に関して藤氏（分子研）（図4）が講演を行った。高次高調波発生に関して放射光分野の研究者向けにわかりやすい解説が行われ、強度は限られるが1 keV付近で1フェムト秒の超短パルスが得られるに至っており、また、固体をターゲットにして得られる蛍光X線や制動放射を用いるとインコヒーレント光ではあるがkeV領域で100フェムト秒領域の超短パルス光が得られるようになっていることが紹介された。深紫外領域では周波数混合の技術により10 eV付近で10フェムト秒程度の光パルスが得られており、光電子イメージングへの応用が行われるなど実用段階に入っていることが示された。

アンジュレータに関する3件の話題の最初に、山本氏（KEK）（図5）が比較的低エネルギーのリングで硬X線アンジュレータ光を発生するための極短周期アンジュレータに関する講演を行った。PFを始め既存の光源で既に20 mm以下の周期長のアンジュレータが実用化されている。その次の段階として数mm周期のアンジュレータを製作する技術として、従来の磁石ブロックを組み合わせるのではなく一体の磁性体に周期磁場を着磁する方式によるアンジュレータ製作技術が実用化に向けて順調に開発が進められていることが報告された。

続いて2件目の講演では、金城氏（理研）（図6）がアンジュレータの軽量コンパクト化・低コスト化を目指す技



図5 山本氏



図7 佐々木氏



図6 金城氏



図8 宮島氏

術開発の状況を報告した。主磁石列の両側に吸引力相殺磁石ブロックを取り付けることで駆動架台の軽量化（総重量で約1/10）を実現しようとするものであり、特に、吸引力相殺ブロックを一体の磁性体に周期磁場を着磁する方式で製作し低コスト化を図っている。これは先の山本氏の講演で紹介された極短周期アンジュレータ磁石着磁法を応用したものである。現在、プロトタイプ製作が進んでいることが報告された。

3件目では、佐々木氏（廣大）（図7）がアンジュレータ光に関する新しい話題として、アンジュレータによる軌道角運動量を持つ光（OAM光）の発生に関して講演を行った。OAM光に関するわかりやすい解説の後、円偏光アンジュレータからの高次光がOAM光であることが説明され、UVSORで行った検証実験の結果が示された。利用法に関して既にいくつか提案もなされており、今後の展開に大いに期待していることが述べられた。

1日目のセッション終了後には、自然科学研究機構明大寺キャンパス職員会館において懇親会が開催され、研究会の熱気がそのまま持ち込まれ、飲み物食べ物が尽きるまで熱心な議論が続けられた。（図11）一部の参加者は、さらに東岡崎駅周辺にて夜遅くまで議論を続けたようである。

2日目の前半のセッションでは、宮島氏（KEK）（図8）がエネルギー回収型ライナック（ERL）の世界的動向やKEKにおける試験機cERLの状況について講演を行った。ERLの原理に関するわかりやすい説明に引き続き、実現に向けての課題が紹介された。歴史の長い蓄積リングと異なり、100 mA級の大電流を生成する電子源、それを加速

する超伝導空洞など中核となるハードウェアの多くが開発途上であり、光源加速器としての総合性能の検証作業が不可欠である。このために実証機として基本的要素をすべて含んだcERLが建設されその立ち上げ調整が進められていることが紹介された。進行中の加速器の立ち上げ状況についての詳細な報告がなされ、また、それらの結果を3 GeV級ERLの設計に反映させていく方針であることが述べられた。一方で、ERLをEUVあるいはX線領域での自由電子レーザー駆動に用いる可能性についての検討が進められていることが紹介された。

続いて阪井氏（KEK）（図9）が超伝導空洞技術に関する講演を行った。超伝導空洞に関する基本事項や開発の歴史、cERLで用いられている空洞に関する説明の後、空洞性能の劣化の原因となる電界放出への対応の世界的な状況、KEKでの取り組みについて述べられた。特にLCLSの次期計画LCLS-IIに向けた開発で素案ドーピングという新しい手法が見出されたことが紹介された。超伝導加速技術の発展により高繰り返し自由電子レーザーなど次世代加速器で重要な役割を果たしていくであろうとの意見が述べられた。

2日目の後半のセッションでは、大竹氏（理研）がX線自由電子レーザーの現状と展望、また、SACLAの高度化の方向について講演を行った。世界的な情勢として、稼働中のLCLS及びSACLAに続いてDESY、PAL、PSIなどで建設が進んでいる状況が示され、今後の発展の方向のひとつはマルチビームライン化ではないかとの意見が述べられた。続いてSACLAの現状が詳しく説明され、安



図9 阪井氏



図11 懇親会の様子



図10 羽島氏

定な発振の実現に向けて加速管の精密温調は言うまでもなく湿度も影響があることが見出されており、様々な対策が取られている状況が紹介された。SACLAの一層の高度化へ向けてマルチビームライン化へ向けたビーム振り分けシステム、SASE特有のスペクトルの不安定性の排除に向けた自己シード法の導入などの取り組みが紹介された。

続いて羽島氏（JAEA）（図10）は共振器を用いたX線自由電子レーザーの可能性について講演を行った。理論的な考察により、共振器ミラーとして結晶のブラッグ反射を使い、ERLで期待されている高品質・高繰り返しの電子ビームを用いることで、SASEに見られるような不安定性のない狭帯域なX線レーザーが期待できることが示されていることが説明された。また、最近ではLCLS-IIやEuroFELに併設する案も提案されていることが紹介された。我が国においても他の光源加速器に併設して実現するのが現実的であろうとの意見が述べられた。

研究会の最後に本学会の村上会長の挨拶があり、先端光源開発においては利用を強く意識しすぎることなくオリジナリティのある夢のある研究開発を進めてもよいのではな

いか、新しい光源が開発されれば新しい利用者が現れ新しい分野が作り出されることもあるのではないかと、一方、多数の利用者を抱える既存の放射光施設の高度化や利用者の期待の大きい中規模高輝度光源計画においては、光源研究者と利用者との密接な連携が必要であろう、との意見が述べられた。

本研究会は分子研研究会として採択され一部の参加者には旅費の支給を行うことができた。準備の遅れから研究会に関するアナウンスが遅れ気味になったことや回折限界光源に関するワークショップが米国にて同時期に開催されるなど日程的な問題もあり、参加者数は67名とやや少なかったが、熱のこもった学問的な議論が行われ、光源加速器技術の到達点を確認し、将来を展望する良い機会になったのではないかと考えている。なお、講演が光源技術中心であったためか、参加者の大半が光源の研究者であり、利用側が非常に少なかった。次の世代を担う若手の利用側研究者が数多く参加し、同じく若手の光源研究者との意見交換の場となることを期待していただけにやや残念であった。次回以降の宿題である。

最後に、時間的余裕がない中で講演をお引き受けくださった先生方、また、急なお願いにもかかわらず各セッションのコンビナーを務めていただいた花木先生（JASRI）、佐々木先生（広大）、この研究会全体を通じてご尽力いただいた、放射光学会庶務幹事の足立先生（KEK）、渉外幹事の濱先生（東北大）に御礼を申し上げます。また研究会当日には、UVSOR施設の萩原秘書、山崎及び林技術職員、本学会事務局佐藤さんには大変にお世話になりました。どうもありがとうございました。