

ICFA Future Light Source 2006 報告

2006.6.2 羽島 良一

1 会議概要

ICFA (International Committee for Future Accelerators) が主催する次世代放射光源に関するワークショップ、“37th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources” が5月15日-19日に、ドイツ DESY 研究所で開催された。このシリーズのワークショップは、ほぼ3年毎に開催されており、1996年 ESRF、1999年 ANL、2002年 SPring-8 に続いて、今回が4回目である。

ワークショップは、プレナリーセッションの他、

- WG-1 = Storage ring based synchrotron radiation sources (26)
- WG-2 = Energy Recovery Linac based synchrotron radiation sources (20)
- WG-3 = Free Electron Lasers (55)
- WG-4 = Low emittance electron guns (20)
- WG-5 = Beam diagnostics and stability (27)

に分かれて議論を行う形式であった。末尾の数字は各 WG に登録した人数である。私が参加した WG-2 を中心に報告する。

2 ERL light source

WG Chair の G. Hoffstaetter (Cornell)、S. Smith (CCLRC) により、提示された “Questions” に答えることをワークショップの目的とし、“Question” 毎に講演者が事前に指名された。通常の Conference 形式 (各人が自由に演題を設定) とは異なる運営であり、プログラム編成にあたって Chair の負担は大きかったようだが、まずは、成功したと言ってよいだろう。

事前に設定された “Questions” は以下の通りである。

1. Is there an optimal bunch compression scheme for ERL light sources and how can bunch flattening scheme in longitudinal phase space be realized within such ERLs?
2. How can space charge and other emittance diluting effects be compensated in an ERL, especially in the injector and merger?
3. What needs to be remembered when designing a ring that should later be upgraded to an ERL?
4. What are diagnostic needs for light source ERLs?
5. What should front to end simulations for light source ERLs be sure to include?
6. What are good beam stabilization strategies and their limits for light source ERL?
7. What are realistic beam abort strategies and beam loss tolerances for light source ERLs?
8. What are needs for vacuum and apertures in light source ERLs?
9. What are advantages and limits of multi turn ERLs?

10. What are the optimal parameters for superconducting cavities of an ERL light source?
11. At what loaded Q can an ERL be stabilized?
12. How should undulators for an ERL light source differ from those for ring sources?
13. What are critical issues that are common to all ERL projects?

1. bunch compression (H. Owen) これまでに提案されたバンチ圧縮方式には、Single Stage (JLab, ERLP)、Stepped/2-Stage (FLASH, XFEL, LCLS etc.)、Progressive/Modular (4GLS)、Large Dispersion/Split Linac Approach (Cornell)、Velocity Bunching (JAERI) などがある。

短いバンチを得るには、リニアな圧縮が必要であるが、XFEL で採用されているような 3rd-harmonic cavity 方式と ERL arc で提案されている sextupole 方式がある。

4GLS の undulator ライン (non-FEL) では、150 度 arc (FODO) と 10 度 × 6 arc (TBA) の構成で、6 本のアンジュレータで 100-900 fs のバンチが得られる設計。wakefield の影響を避けるため、100fs は中央のアンジュレータのみ。

Cornell ERL は、180 度周回軌道を挟んで 2 つの linac が配置される。2 本のリニアックでの energy chirp を反対にして、180 度周回で高次の行路差を調整することで、バンチのエネルギー広がりを一桁以上小さくできる可能性がある。

2. space charge and merger (R. Hajima) 電子銃から主加速器までのエミッタンス増大の原因とその抑制についてまとめた。merger 手前までは、横方向空間電荷 (TSCF) と時間依存の RF 場 (RF) がエミッタンス増大を引き起こす。TSCF はソレノイドによるエミッタンス補償が有効。RF は空洞位置でのバンチサイズ (縦、横) を適切に整形することが有効。この両者を同時に満たすためには、ソレノイドの強さと位置、二つのパラメータを振って最適解を探す必要がある。

merger 部では TSCF に加えて、縦方向空間電荷 (LSCF) がエミッタンス増大を引き起こす。LSCF の補償はエンベロープマッチングが有効であり、解析的手法で軌道が求められる。TSCF によるエミッタンス増大は、gun から merger 出口までの履歴を持っているため、解析的な扱いは困難であるが、数値的な探索でエンベロープの最適解が見つかる。TSCF のエミッタンス補償を行うには、“over bunching” が起こらないように、バンチ圧縮する必要がある。

merger を跨いだエミッタンス補償が本当に働くのか？との疑問が出されたが、PARMELA の二つのアルゴリズム (2D-SCHEFF、SPCH3D) では、有効に働いているように見える。さらに詳細な解析は、非慣性軌道を正しく扱えるようなコードの開発を待ちたい。

3. upgrade ring to ERL NSLS-II で Ring → ERL の upgrade を検討していることを受けての Question であったが、適当な講演者が見つからず省略された。

4. diagnostic needs (K. Jordan) 入射部では、テストベンチで十分にビーム診断をしておく必要がある (実機では診断用に十分なスペースを確保するのが厳しいため)。プロファイルの測定には、金属に蛍光体を薄く塗ったスクリーンがにじみが少なくて良い。電流モニタは電荷量を知るために必須である。log amp が利用できる cavity 型モニタを使ってレーザーの調整を行うのが便利。

リニアック、周回軌道部では、ERL 特有の診断装置として、穴つきの OTR スクリーンが必要。Halo モニタとして穴つきの蛍光板も。診断装置周りにおけるビームインピーダンスへの配慮 (内面を滑らかに) は、他の加速器と同様。

5. S2E simulation (M. Abo-Bakr) S2E (= start-to-end) simulation は FEL の設計に欠かせない手法であり、LSC instability、CSR instability、bunch compression などの解析に役立っている。講演は FEL における S2E simulation の実績を越える内容はなく、目新しい情報はなかった。

ERL 固有の問題、例えば、BBU 閾値以下の HOM がビームに与える影響とか、エネルギーが広がった電子パンチを減速してダンプする方法とか、そういう項目も含めて S2E simulation ができるとよいと思うのだが、FEL に比べて人材的に手薄の印象を持った。

6. beam stabilization (C. Steier) ALS の経験をもとに、transverse 方向のビーム安定化をまとめた。ビーム安定化には、3つの種類があり、passive、feed forward、feed back である。passive の例は温度変化、振動の除去があり、feed forward の例はアンジュレータ開閉効果の補償、feedback の例は軌道補正などである。光源擾乱の周波数と実験データ取得の周波数の大小で、擾乱の影響が大きくなり、小さくなったりする。データ取得周波数が多い場合は擾乱の影響がそのまま出るので注意が必要。ALS では、ビームの擾乱が問題になる実験は2例：非均一な試料にマイクロビームを照射する実験では、ビーム位置の変動がデータ質の劣化を招く。二色円偏向の実験では、ビームのわずかな擾乱が対称性を崩す。ALS の軌道補正は、1kHz 周期で補正磁石 (20bit) を制御する fast feedback と 1Hz 周期の slow feedback の両者を併用している。電子ビームの位置安定度は、0.01-500Hz の範囲で、垂直方向 $< 1\mu m$ 、水平方向 $\sim 2\mu m$ である。長期の安定度 (week) は $\sim 3\mu m$ である。

ERL 放射光の場合は、ビームサイズが小さくなるので、より高い安定性が必要。安定性に配慮した設計を当初から十分に考慮すべきである。軌道補正については、slow feedback は現状の技術で十分に実現、fast feedback はリングの multi-bunch feedback に似たシステムになるだろう。もちろん、電子銃におけるビーム安定化も考える必要あり。

7. beam abort, beam loss (G. Neil) JLAB-ERL の経験をもとに、beam halo (beam induced, field emission from gun and SCA, scattered light in photoinjector) と beam loss について考察した。storage ring (ガス散乱) に比べて、はるかに大きな ($\sim 10^5$ 倍) ビームロスがあり、beam halo によると考えられる。

周回軌道に配置したビームロスモニタ (光電子増倍管を利用) で設定値を越えるロスを認められた時は、ビームの緊急停止を行う。フォトカソード・ドライブレザーの EO シャッター ($0.1\mu s$ の応答) が最も早い停止措置であるが、EO シャッターのバイアス値は温度依存があるので、運転モード (パンチ繰り返し) を変える時には、その都度、バイアス値を再設定する手間がかかる。

RF or SCA がトリップした時には、最初の dispersive path でロスが生じる。この箇所に適切な対策が必要。

8. vacuum and apertures (R. Hajima) 電子ビームは残留ガスとの散乱で失われるため、真空は大切な問題である。講演では、2通りの設計方針を提示した。conservative design = 排気速度が十分に大きな分布型のポンプを配置して、良い真空を維持し、適度なアパーチャサイズも選択する設計。これにより、周回あたりの電子損失を蓄積リングと同等の値 ($< 10^{-10}$) にできる。例として、真空 ($< 10^{-7} Pa$)、アンジュレータダクト ($> 5mm$)。progressive design = 十分に制御されたビーム損失を許容する設計。例えば、周回軌道中の 20 箇所数ワットずつのビーム損失を許せば、周回あたりのビーム損失として 10^{-7} となる。この値であれば、エネルギー回収には影響しない。X 線ビームラインへ放射線が入り込まないように、アンジュレータの上流にスクレイパー (コリメータ) を置いて、ガスに散乱された電子を止めてしまう。この設計では、真空 ($< 10^{-4} Pa$)、アンジュレータダクト ($\sim 4mm$) が可能。

いずれの設計でも、アンジュレータ部は十分に良い真空を維持する必要がある。また、イオントラップの影響を詳細に検討する必要がある。

9. multi-turn ERL (J. Bisognano) 2-turn ERL はリニアックが半分になるので、大幅な費用節減ができる。HOM-BBU の解析式 (単空洞、単一 HOM) によると周回数 n の 2 乗に反比例して閾値電流が小さくなることが示されるが、実際には、空洞の数が減る効果もあるので、それほど悪くはない。1GeV-ERL の計算例では、100mA の設計も可能である。ただし、HOM-Q \sim

3000 とやや楽観的な値を仮定している。x-y coupling、polarized cavity などの技術でさらに高い閾値電流が得られる見通しもある。

1 周目 (low-energy arc) では、バンチ圧縮をしなければ、CSR によるエミッタンス増大は cell-to-cell でキャンセルできる、SR によるエネルギー増大は大きくない。

費用削減と引き替えに、設計および運転の自由度が減少。2-turn による費用節減は、4GLS のような低エネルギー ERL では効果が少ない。low-energy arc で低エネルギー放射光利用も可能 (ただし、バンチ圧縮すると high-energy arc に影響)。

10. SCA cavity (D.M. Dykes) これまでの超伝導空洞のまとめ、新しい情報はなかった。

「cavity trip の頻度と再起動までの時間は、どの程度許容できるのか？」の問いには、「X 線光学素子の熱変形の時定数で決まる。数分のオーダーだろう」「CEBAF の例では、加速電界を少し下げるだけで cavity trip の頻度は劇的に少なくなる」などの答え。

11. loaded Q (J. Knobloch) よく準備された講演であり、発表資料を見れば内容は把握できると思う。

ERL では、beam loading がゼロであり、loaded Q の値は microphonics で決まる。これまでのクライオモジュールの実績では、ELBE が最も小さな microphonics を達成しており rms で 1Hz である。しかし、どういう設計をすれば microphonics を小さくできるのか、完全に理解されているわけではない。

ELBE の実績に従えば、 $Q_L = 1.1 \times 10^8$ とすることができ、cavity 当たりの RF は 1.8kW(peak)、930W(ave.) となる。

高い Q_L を目指して考慮すべき点は、microphonics $< 10\text{Hz(peak)}$ 、ヘリウム圧の変動 $< 0.01\text{mbar}$ 、RF conditioning の必要性から coupler の可動範囲に注意、空洞毎のバラツキを許容する RF 容量の余裕、振幅と位相の制御に大きなフィードバックゲインが必要、減速ビームの変動 (電流、位相) などである。

結論として、現状の技術レベルでは 10^8 を大きく越える Q_L は困難、おそらく $Q_L < 10^8$ が妥当。

「microphonics の active な制御ができれば、vector-sum も可能？」の問いには、「現状の技術では不可能だろう」の答え。

12. undulator for ERL (J. Clarke) 水平方向に開くアンジュレータが可能で、設計の自由度と費用削減を与える。丸いビームパイプを四方から磁石で囲む設計が可能で、軸上磁場を 1.4 倍程度大きくできる (APPLE-III)。

磁石の寿命を確保するためには、アンジュレータ位置におけるビームロス 10^{-10} 以下にする必要がある。

長波長 (低エネルギー) ERL ではアンジュレータ開閉による行路差が問題になるが、適切なフィードバックで補償可能であろう。

13. issues for common ERLs (G. Hoffstaetter) 放射光以外の用途、イオンの冷却、電子 / イオン衝突加速器などを含めた、一般的な技術課題をまとめた。特に新しい話題はなかった。

3 その他

会場の DESY では、軟 X 線のリニアック FEL (超伝導) が運転されており、ユーザー実験に供されている (半年で 2400 時間のユーザータイム)。従来 TTF-FEL と呼ばれていた施設であるが、最近、FLASH (Free-electron LASer in Hamburg) と改名された。これまでの最短波長は 13nm で、パルスあたり $5 \mu\text{J}$ の発振が得られている。この値は、関西研 X 線レーザーに比べて 100 倍大きなエネルギー (光子数) である。実験では、1MHz で繰り返される FEL パルスの情報 (パルス幅、強度、波長スペクトル) がすべて計算機に蓄積され、ユーザーは実験後にデータを参照できるようになっている。イベントを集めるだけ集めて、その後にデータを解析するのは、旧来の高エネルギー

素粒子実験のスタイルだが、FELでもうまくいっているようだ。短時間で多数のデータを蓄積できるのは超伝導の利点である。FELはピーク強度の大きな光パルスが特徴だが、実験によっては強度が大きすぎるということで、わざわざガスチャンネルで減衰させていたのが興味深かった。

全体講演では、D. Moncton(MIT)から小型レーザーコンプトン X 線源の提案があった。R. Ruth(SLAC)が開発中の同種装置を凌ぐ「第2世代のレーザーコンプトン X 線源」と謳っていた。(1) 電子を周回させるのではなく使い捨てとすることでエミッタンス増大が起らないこと、同時に空間配置の自由度が生まれ、関数、レーザー長ともに小さくできること、(2) 正面衝突とすることで、X線のエネルギー広がりを小さくできること、(3) 超伝導 RF 電子銃を用いて、高輝度の電子バンチを高い繰り返し(10MHz)で発生する点が鍵であり、X線の平均輝度は 10^{14} 以上で、第2世代放射光リングと同等の輝度を持ったX線が研究室サイズの装置で得られるとしている。MITは原子核実験用の加速器施設(Bates)廃止後の後継施設として超伝導XFELを提案していたが、この予算が認められなかったため、レーザーコンプトン X 線源の開発に切り替えたようだ。APS建設の立役者 D. Moncton の動向に注目。

また、同じく全体講演で、ミュンヘン大学、MPQ、UCLAの共同研究として、レーザー電子加速を使ったテーブルトップ X 線 FEL の提案があった。1ペタワット、5フェムト秒のレーザーが作る、高エネルギー電子(5フェムト秒、160キロアンペア、1GeV)を3メートルのアンジュレータに導くと、0.25nmのX線FELが発振するというシミュレーションの結果を示していたが、聴衆からは、電子の時間波形、エミッタンスを保持したままアンジュレータまで輸送することは容易でないとの意見があった。WS期間中に開かれたICFA FLS sub-panel meetingに(新竹氏、鎌田氏不参加のため)私が日本代表として呼ばれたのだが、今後は、レーザー加速の研究者との交流を積極的に進めようという意見が出ていた。JAEA 関西研は、そういう交流には絶好の立場にいるのだが、なかなか手が回らない。

seeded FELでは、L. GiannessiがBNL-SDLの実験結果を報告していた。superradiant seeded-FELのFROG測定が、非常にきれいに取れていた。後で聞くと、Ti:Sap.の波長ではFROGがsingle shotで測定できること、ビデオで撮影しながらきれいに取れたデータのみを抽出しているとのことである。

最近論文が出た、XFELの時間コヒーレンスを確立する方法(Z. Huang, PRL96, 144801)について、X線を取り出す方法が示されていなかったが、今回の発表では、結晶の帯域で決まるフーリエ限界よりも短い電子を使うことで、帯域外の成分が取り出せるというアイデアが新たに加わった。

横方向と縦方向の位相分布を交換する手法についてK-J. Kimが提案した。同氏のAPAC-04の招待講演では、今後の光源用加速器の目標として、縦方向のエミッタンスを犠牲にして横方向のエミッタンスを良くできれば画期的だと話していた。このようなアイデアは、SLACのM. Cornacciaが提案していたが(PRST-AB 5,084001)、今回の提案も同様である。規格化エミッタンス0.1mm-mradを実現できるという計算を示していた。

日本でX線FELの建設を開始した理研グループからは参加者がなく、外国の研究者からは「彼らはどうしている？」との質問を多数うけた。プロジェクトの立ち上げで多忙とは思いますが、大きな予算を取っている以上は、こういう会合に出席してきちんと話をするべきであろう。

BNLのNSLS-IIについては、大統領の予算教書に載っていたのでgoサインが出たのかと思っていたが、実は、今年CD-0、CD-1があるらしい(CD=critical decisionは、建設が決まるまでのプロセス)。J. Murphyによると、審査の鍵は、加速器の技術的な点ではなく、1nmのX線スポットを実現するためのゾーンプレート技術にあるとのこと。

今回の会合は、2009年にSLACで開催することが決まった。