

PFの将来計画について

物質科学第一研究系 野村昌治

1. はじめに

PFリングは放射光黎明期の1970年代に計画、建設され、1982年から運転を続けてきた第二世代放射光源ですが、二度に亘る高輝度化を行い、エミッタンスを当初の300nmradから36nmradまで下げることが出来ました。また、設計当初から挿入光源を設置する直線部が用意されている優れたデザインであったこともあり、現在進行中の直線部増強計画が完成すると既存の直線部が長くなり、長い挿入光源を設置出来るとともに短直線部にはミニポールアンジュレーターを設置出来るようになります[1, 2]。

多くの研究分野で高輝度の放射光を供給できるアンジュレーターの利用が必要とされていますが、このような改造を行っても自ずと限界はあり、SLS(スイス)をはじめとする新第三世代光源以上の輝度や挿入光源数を実現することは出来ません。動的な構造解析等を目的としたサブピコ秒のパルス状光源、数十nm程度のナノビームによる局所解析も求められています。現状のPFでは実現不能です。このような状況の中、我国における放射光利用研究の更なる発展と従来の放射光源では実現不可能な高輝度、極短パルス、高コヒーレンス利用を目指して将来計画を検討してきましたが、概要が出来つつありますので紹介します。

2. KEKの状況

KEKは日本原子力研究所と協力して2006年度までの計画で大強度陽子加速器施設の建設を東海村で進めています。完成後は物構研の内の中性子、中間子関係の実験は東海で行われることとなります。一方、つくば地区では現在のKEKBのルミノシティを一桁上げるsuper KEKB計画やリニアコライダーのJLC等が検討されています。また加速器研究施設からは図1に示すタイプのEnergy Recovery Linac(ERL)のテスト機の提案もなされています。

このような状況の中、機構運営協議会の下に「つくば地区における研究の進め方を中心とした高エネルギー加速器研究機構の将来構想について審議する」つくばキャンパス将来構想委員会が設置され、6月の委員会では以下に示すPFの将来構想を提案しました。PFの提案している計画も機構の将来計画の一環として議論されています。

3. PFの将来計画検討の流れ

高輝度化後の運転が安定した1999年春の第16回PFシンポジウムで広範囲の利用実験者に高品質の放射光を供給する4GeV、2A、 $\sigma_x=14\text{nmrad}$ の電子蓄積リングPF-II [3]が提案されました。同時に高輝度、高コヒーレンス光を目指す10GeV、ピーク電流3000A、 $\sigma_x=0.05\text{nmrad}$ のリニアックに100m級のアンジュレーターを設置した自由電子レーザー(FEL)も提案されました。FELには電子ビームをダンプする前にアーク部に設置した挿入光源から放射光

を取り出す案も紹介されました。リングについては「直線部長が短い」、「常識的すぎる」等の意見も出される一方、FELについては「多くのユーザーが利用する環境ではない」という意見が出されました。

同年末の第17回PFシンポジウムでは更に詰めた案が提案されると共に、PF懇談会で各ユーザーグループに対して行ったアンケートの報告が行われました。それによると「FELは夢の光源だが、蓄積リングがなくなるとは困る」というのが大勢でした。

2000年末の第18回PFシンポジウムではPF-IIの直線部長を長くし、エミッタンスを9nmradとしたPF-IIAが提案されました。

これらの議論を積み重ねた上で2002年春の第19回PFシンポジウムでは、今後とも広汎な放射光利用研究を支えるとともに先進的な放射光・放射光利用研究を開発することが出来る放射光施設としてERLと蓄積リングを組み合わせた案が提案されました。PFシンポジウムの報告については各「PFシンポジウム報告」を参照して下さい。

4. 蓄積リングとERL、FEL

21世紀に入り欧州を中心に真空封止アンジュレーター技術を活用した2.5~3.5GeV程度の高輝度リングが建設されています。これらの光源ではVUVから硬X線までの広いエネルギーの放射光を利用した実験が予定されています。その代表例はスイスのSLSで、2000年末から運転を開始しています。SLSではギャップの小さいミニポールアンジュレーターが常用されるとともに、頻繁に入射をして蓄積電流値を一定に保つtop-up運転がなされています。同様な考え方で仏国のSOLEIL、英国のDIAMOND等が建設されています。これら従来の放射光源は全て電子蓄積リングを用いていました。

蓄積リングの技術はほぼ確立していますが、その利点は効率性の高さにあります。電子ビームは周回するため、周回する電荷は小さくても平均電流値は大きくなります。周長を300mと仮定しても、電子は1秒間に 10^6 回周回します。しかし、如何に小さなエミッタンスの電子ビームを入射しても電子がリングの中を数千回周回する内に平衡状態に達し、そのエミッタンスはリングに依って決まっています。このため、エミッタンスで数nmrad、ビームサイズで数十 μm 、パルス長で数十ps程度が限界となっています。また水平方向のエミッタンス σ_x は鉛直方向のエミッタンス σ_y と比較して2桁程度大きくなり、横長の光源となります。

一方、リニアックを使うとエミッタンスは電子銃で決まり、加速とともにエネルギーに反比例して下がります。このため数十pmrad程度の低エミッタンスの電子ビームを得ることが可能となります。蓄積リングと異なり σ_x と σ_y の関係は調整可能で、直径数 μm の丸い電子ビームを作ることにも可能です。また、100fsオーダーの極短パルス光を得ることも可能となります。

その極限を狙ったものが FEL であり、ドイツ DESY の TESLA Test Facility[4]、米国 SLAC の LCLS[5] が進行中です。これらの光源では従来より 10 桁高いピーク輝度、5 ~ 6 桁高い平均輝度、高いコヒーレンスの放射光が得られます。一方、FEL から得られるピーク光輝度は高過ぎて多くの場合放射線損傷が深刻な問題となること、パルスの繰り返し周波数は低いこと、SASE を利用すると時間的・場所的に安定な光源とならないこと、同時に利用出来るポート数が限定されること等の難点もあり、多くの放射光利用実験者から見た時これらの光源は既存の第三世代放射光源と相補的に利用するものであって、スーパーセットとはならないと考えられます。また、巨大なエネルギーを一度に失うため、放射線や電力の問題も深刻になります。

ERL の基本形を図 1 に示します。高輝度の電子銃から放出された電子は超伝導リニアックで加速され (CHESS の提案では 5 ~ 7GeV、100mA [6]) 放射光を出しながら周回し、加速時とは逆位相で超伝導リニアックに入って減速します。減速時に回収されたエネルギーは別の電子の加速に利用されます。即ち蓄積リングでは電子そのものを再利用しているのに対して ERL ではエネルギーを再利用してエネルギー効率を改善しているとも捉えられます。減速によってダンプする電子のエネルギーが下がるため、放射線の問題を軽減出来ます。幸いなことに超伝導リニアックの技術に関して KEK は世界のトップレベルにあります。

このような ERL から得られる光の特徴を定性的にまとめると、

- a) 低いエミッタンスが実現出来るため輝度とコヒーレンスを上げられる；
- b) サブピコ秒のパルスを用いて時間分解実験を行える；
- c) 丸い小さな電子ビームが得られ、縮小光学系を用いることによって 50nm のビームも期待出来る；
- d) 時間的に強度が一定な光源である；
- e) 電子銃技術の進歩に伴い、電子銃を交換するだけでエミッタンスを低減出来る；

となります。この ERL を建設するためには高輝度で安定して機能する電子銃の開発、特に大電流に耐えるものの開

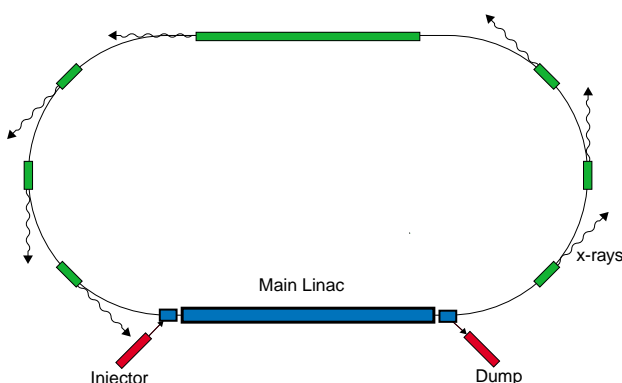


図 1. Energy Recovery Linac の構成図。Injector から入射された電子は Main Linac で加速され、一周して放射光を放出した後、再び Main Linac で減速されて Dump する。この時回収したエネルギーは別の電子の加速に使われる。

発が必要です。また放射線安全を確保するために、大電流運転時に安定にエネルギーを回収する技術を確立することも重要です (6GeV × 100mA = 600MW!)。放射光利用実験者のアイデアがこの様なエミッターの開発のブレークスルーとなるかもしれません。

5. 計画内容、マシン

既に概要は PF シンポジウムで報告されていますが、図 2 に示す様な概念となっています。計画は二期計画として提案しています。

まず第一期では外周を蓄積リングとして利用実験に供し、内部の Multi-turn Accelerator Recuperator Source (MARS) はリングへの 4GeV の入射器として機能すると同時に ERL 光源として使用します。外周は蓄積リングですので、KEK の加速器技術を使えば既存の技術のブラッシュアップで実現可能ですし、大電流の入射器は必要とされません。

MARS は Kulipanov 博士による命名 [7] ですが、高コストの超伝導リニアックの加速エネルギーを抑えることでコストダウンする代わりに繰り返し加速するものです。また、超長尺のアンジュレーターを使うことによって電流が小さいことを補おうとするものです。ここでは 1GeV のリニアックを想定していますので、1、2、3、4GeV の電子ビームラインに設置された数十 m 級の超長尺アンジュレーターからの放射光を利用でき、利用できる放射光のエネルギー範囲を広げるという御利益もあります。

このような運転を行いながら、MARS の大電流化の開発、試験を行い、技術が確立した時点で内部の MARS と外周のリングを一体的な ERL として運転する第二期へ移行する案です。この時点では MARS 部分では大電流化による輝度の増大、外周部ではエミッタンスの減少による高輝度化、極短パンチ化が期待されます。

第一期に得られる光の特性をまとめます [8]。まず、外周の蓄積リングでは 4GeV、 $\epsilon_x = 15 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 、カップリング 1% の光源で、蓄積電流 400mA を想定します。この蓄積

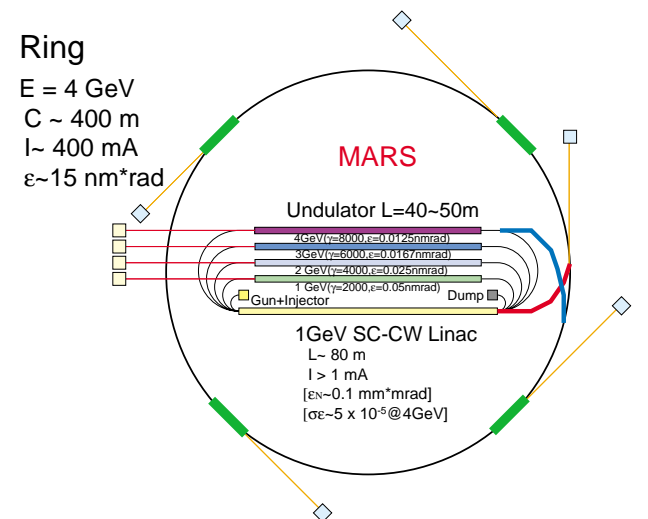


図 2. PF の提案する新光源施設の概念。内部は MARS 構造となっている。詳細は本文参照。

リングへ周期長 8cm(アンジュレーター全長 4.5m)、4cm(同 4.5m)、2cm(同 2m) のアンジュレーターを設置した時に得られる放射光の輝度スペクトルを図 3 に示します。この光源でも数百 eV 域では現在の PF より一桁改善して SLS 並、10keV 付近では三桁近くの輝度が改善して、SLS 以上、SPring-8 に準ずる輝度が期待されます。

電子源として電流値 1mA、規格化エミッタンス 0.1mm-mrad を想定すると、MARS 部で 4GeV まで加速した場合、エミッタンスは 0.026nm-mrad となります。これは第三世代蓄積リングの 200 分の 1 です。周期長 4cm、全長 50m の超長尺アンジュレーターを用いた時の輝度は 10^{21} ph/sec/mm²/mrad²/0.1%BW と SLS や SPring-8 の一～二桁上を達成できます(図 4)。これ以外のエネルギー部のスペクトルについては PF シンポジウムの報告 [8] を参照下さい。MARS 部では 100fs オーダーのバンチ長の光が得られ、その周波数は 1.3GHz 程度が予定されます。

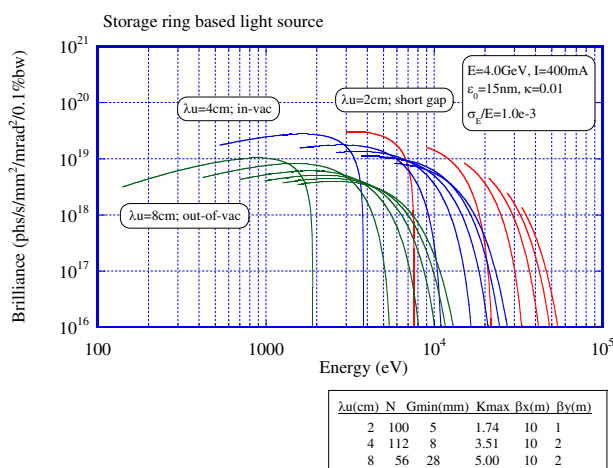


図 3. 蓄積リング部に設置したアンジュレーターから得られるスペクトル。

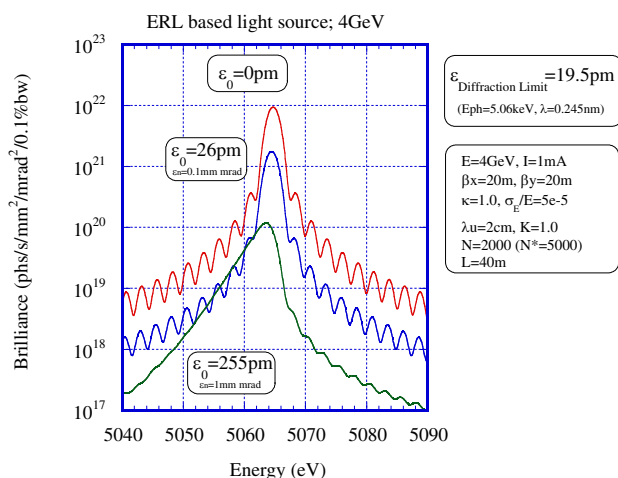


図 4. 4GeV の ERL に周期長 4cm、周期数 1250 のアンジュレーターを設置した時に得られる放射光のスペクトル (K=1)。

6. 放射光利用実験・共同利用

放射光利用研究は学問分野も、研究の中での位置付けも、利用方法も極めて多岐に亘ります。将来計画においてもそれぞれの研究分野の特性に合わせた計画を立てる必要があります。多くの研究分野にとってはスケジュール通り安定に動く高輝度光源が望ましいでしょう。しかし、放射光利用研究は当初の予想を超えた展開を示しています。例えば、PF や ESRF が出来た頃マイクロビームはごく限られた研究者の研究対象でしたが、今や第三世代光源施設では多くの研究にルーチ的に利用されています。偏光の制御にしても然りです。従って、目先の利益だけでなくその先も読む必要があります。

将来計画を考えるには当たっては光源の性能だけでなく、総合的に高度な研究を行える環境を整備することも重要です。実際、放射光利用実験の進展に伴い、更に研究対象に適した実験環境が求められてきています。従来の放射光研究施設では「まず光あれ」的な考えでしたが、物質を対象とした研究を行う場合にはその場での物質の合成、評価が出来る環境(例えば非密封 RI が使える、特殊材料ガスを安全に使える、バイオハザード対応の設備が備わっている、クリーンルーム環境下で実験出来る、放射光以外の分析機器を利用出来る等)も光の性質と同様に重要になります。また、現状の PF ではビームライン間の空間が狭く、実験装置設計の制約となったり、実験ステーションの近くに十分な試料調製・評価環境が用意出来ない等の改善を要する点もあります。これらの点は建屋を設計する時点で考慮しておく必要があり、この面からも特徴のある研究を行う可能性を広げることが出来ると期待しています。

また、大規模な共同利用を少人数で支援するためには効率的に活動出来る様に予め建屋を設計する事も非常に重要になります。

物構研運営協議会の下に放射光研究施設の将来計画に関する検討ワーキンググループが活動をはじめました。このワーキンググループの下にユーザー、PF 職員、加速器研究施設職員で構成されるグループを作り光源の設計、得られる放射光の特性を生かす研究、その研究を実現するための技術等について集中的に検討を行います。本稿に示した加速器の構成・配置や得られる光のスペクトルはユーザーの方々に検討を進めて頂く参考として示したもので、今後の議論や学問的、技術的検討の進展に伴い変化することをお断りしておきます。

本稿にはこの光を使ってこういった研究が可能となるかについては敢えて記しませんでした。これらについては、10月3～4日に開催される「フェムト秒パルス放射光源の開発と新しいサイエンスの展開」、10月31日から11月1日に開催される「X線位相利用計測における最近の展開」、11月14～15日に開催される「放射光マイクロビームと利用研究の展開」等の研究会や上記の検討グループに参加して詰めて頂くようお願いします。

参考文献

- [1] 小林幸則、Photon Factory News, **18**(2)17 (2000).
- [2] 野村昌治、Photon Factory News, **19** (3) 8 (2001).
- [3] 加藤政博、土屋公夫、Photon Factory News, **17** (1) 20 (1999).
- [4] <http://www.desy.de/~wroblewt/scifel/scifel.html>.
- [5] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/>.
- [6] <http://erl.chess.cornell.edu/>
- [7] G. N. Kulipanov, A. N. Skrinsky and N. A. Vinokurov, Nucl. Instrum. and Methods, **A467-468**, 16 (2001).
- [8] 小林幸則、山本樹、第 19 回 PF シンポジウム報告、p.51(2002).
<http://pfwww.kek.jp/pf-sympo/19/ contents.html>