

# 第1章 将来計画の概要

## 1.1 放射光将来構想の検討経緯

放射光研究施設では、2002年度にPF将来計画を検討するに当たり、基本的な将来構想として、「普遍的な放射光利用ツールとしての側面と短パルス光、空間的コヒーレンス光そしてナノビーム利用という先端的放射光光源の両立」を掲げて、具体的なハードウェアの形態としてERLの検討をおこない、その検討結果を検討報告書としてまとめた[1]。その検討報告書の冒頭に放射光科学と次期放射光光源計画について述べられているが、そこで述べられている第2世代放射光光源、第3世代放射光光源、そしてSLS(Swiss Light Source)で代表される新第3世代放射光光源と放射光科学との位置付け、そしてまた線型加速器をベースとしたSASE・FELと放射光科学との位置付けは、現在においても全く色あせることなくそれらの関係を的確に表している。ここでは繰り返しのみに留めるので、その詳細を述べることはしない。1点だけ、2年前にERLを放射光光源計画のベースと位置付けたが、その理由だけは繰り返しの恐れず記述すると以下の通りである。ERLは線型加速器を用いているが、そのビームを一回だけ周回させ再び線型加速器に減速位相で導入しエネルギーを回収するエネルギー回収型ライナック(Energy Recovery Linac)であり、短パルス、高い空間コヒーレンスを持ち、さらに第3世代放射光光源と比較して1~2桁高い輝度を持ちながら周回することで数多くの挿入光源ビームラインを同時に利用できるという「先端性と汎用性」の側面を兼ね備えた放射光光源と成り得る可能性を有しているからである。ここではむしろその後の検討の経緯について、そして現在の検討状況について記述する。

2003年に、大学法人化等の状況変化があり、従来放射光科学のひとつの将来計画と考えられてきていたVUV/SX高輝度光源計画に関して、「一大学法人で全国大学共同利用をベースとしたVUV/SX高輝度光源計画の実現は困難なのではないか」との観測のもと、大学共同利用機関法人となる予定であるKEK-PFがVUV/SX高輝度光源計画を受け入れる場合を想定した上でのハードウェアの検討が急遽行なわれ、2.7~2.8 GeVリング構想が検討された。しかし、この将来構想の早期スタートはむずかしい状況となり、一方、PF直線部増強計画のリング改造の目途が立ち、直線部のビームライン整備(VUV/SX専用アンジュレータービームライン化)を進めることによってVUV/SXのアクティビティの活発な活動を維持するための当面の打開策を現在計画として進めることが出来得る状況となった。そこで再度、完成を8~10年後と想定した時の放射光科学と次期光源計画に関する議論が2004年度から所内で開始された。その結果、2年前に設定された「普遍的な放射光利用ツールとしての高輝度光源の側面と、短パルス光、空間的コヒーレンス光そしてナノビーム利用という先端的放射光光源の両立」をPF将来構想の基本目標とする事ではほぼ意見の集約を見た。その将来構想を実現するハードウェアとして、2年前に検討したERLは重要な一つの可能性である。しかし、技術的な検討に関して高輝度・高出力電子銃の開発、又VUVからX線までのアクティビティを担うという観点からの最適化等々の技術的な検討・開発が必要である。それとは別にもう一つスーパー・ストレージ・リングという概念の可能性が新たに浮上してきた。これは第3世代リングをベースに短パルス光、空間的コヒーレントX線を取り出すオプションを備えたハードウェアである。しかし、そのコヒーレントX線発生に関しての技術的検討が必要である。今後の予定としては、2005年度をかけて、それぞれのハードウェアの検討を進め、2006年度にそれらの選択を行ない、次期中期目標に将来計画を確実に実現する計画書を2007年度末に作成し、将来計画の実現を図る。

## 1.2 将来の光源に期待するスペック

前述のように、放射光の将来計画として約8~10年後に稼動し始め、その後少なくとも20年程度稼動

し続ける放射光光源ではどのような研究が行われると予想されるであろうか？放射光科学は物質科学、生命科学、医学等々の広範な研究領域をカバーしており、そのスペクトル領域は VUV、SX、X線に至る領域をカバーすると同時に、多くの実験ステーションが同時に稼働できる必要がある。すなわち普遍的な研究ツールとしての高輝度放射光光源の役割は必ず満たすものが必要である。そして、8~10年後の放射光光源であるので、現在の高輝度放射光光源よりも、より詳細な電子状態、原子構造を得ることが出来るだけの高輝度性を有することが期待される。しかしそれだけでは十分ではない。近年の放射光科学の進展、また利用研究の進展を見ると、「スタティックからダイナミクスへ」また「数十 $\mu$ 結晶からサブ $\mu$ 結晶、そしてさらには結晶ではない試料の構造決定」へ移行していく事が予想され、そのような必要性は年々高まっていくであろう。一昨年に開かれた SRI2003 においても、その議論の中心が、短パルス、コヒーレンス、ナノビーム利用という方向に移行していることは明らかであり、ハードウェアの議論にそれらの可能性を達成するであろう SASE・FEL や ERL の新光源が数多く取り上げられていることからその方向性は揺るぎないものと考えられる。物質科学の進展は急展開しており現時点においても、時間分解実験による非平衡状態解明をとってみても、バンチ幅の~100 ピコ秒よりも各段に短いサブピコ秒の時間幅で結晶全体の物性が変化すると考えられる物質がすでに探査されており、今すぐにもサブピコ秒の光パルスによる研究を進めたい状況となってきている。したがって、先端性のキーワードとして短パルス、コヒーレンス、そしてナノビームという観点は必要不可欠なものであり、それらをまとめると以下ようになる。

- 1) 試料は益々微小化（マイクロメートルから数十ナノメートル）  
更なる高輝度化  $\text{Brilliance} = 10^{21} \sim 10^{22}$  (photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw)
- 2) より詳細な電子状態解明  
更なる高輝度化  $\text{Brilliance} = 10^{21} \sim 10^{22}$  (photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw)
- 3) 結晶ではない試料の構造決定  
コヒーレント X線が不可欠（両方向のエミッタンス~10 pmrad）
- 4) 非平衡状態の解明（高速現象の解明とその応用）  
短時間パルス放射光が不可欠（サブピコ秒以下）

ここで、縦・横方向のエミッタンスが~10 pmrad という目標値は、そのような加速器から発生する放射光が X線領域において、スリット等で光を制限することなく空間コヒーレンスを保つための条件である。一方、このエミッタンスが全てのビームラインで実現する必要は必ずしもない。この条件は空間コヒーレンスを要求する X線ビームラインにおいて必要とするものであり、普遍的な高輝度放射光光源を必要とする実験ポートでは必ずしも必要としない。同様に、短時間パルス放射光に関してもすべての実験ポートで実現する必要は必ずしもないと考えられる。

## 参考文献

[1] 「放射光将来計画検討報告—ERL 光源と利用研究—」。諏訪田剛、飯田厚夫編集、高エネルギー加速器研究機構 (2003)。

### 1.3 光源研究の概要

前節でも述べているように、放射光科学研究施設の将来の光源として想定される性能（光源のエミッタンスやバンチ長などの数値的な性能のみならず、安定性、汎用性や利用の容易さを含めた広い意味での性能）を満足する光源として、エネルギー回収型リナック（ERL と略記）とスーパー蓄積リング（SSR と略記、仮称）が挙げられる。ERL は放射光将来計画検討報告[1]に記載してある性能が実現できればまさに最適な光源であろう。しかしながら、この実現のためには開発しなければならない多くの要素があり、実証機による検証を経ずに一気に実用機の建設を行うことは現実的でない。一方 SSR は基本的には高性能な第三世代光源であり、ベースとなる光源建設にはさしたる問題はないと思われる。しかしながら、ベースとなる光源のみでは前節で述べた性能の一部「空間コヒーレンス」、「極短光パルス発生」の条件を満足しない。前者に関しては「円形ビーム生成」法を後者に関しては「レーザーライス」法や「RF 偏向法」を用いて、ある直線部では前者を、また別の直線部では後者を満足する方法をとることとする。

「円形ビーム生成」は、蓄積リングの直線部にソレノイド電磁石とスキュー四極電磁石（通常型の四極電磁石の中心軸—ビームの軌道に沿った軸—を中心として 45 度回転させた電磁石、本来独立であった水平方向の運動と鉛直方向の運動を結合させる）を用いた局所的なビームオプティクス変換系を設置しソレノイド内で断面が円形で、かつほぼ完全に平行なビームを得ようというものである。水平方向のエミッタンス $\epsilon_H$ と鉛直方向のエミッタンス $\epsilon_V$ の積 $\epsilon_H\epsilon_V$ が保存し、一方 $\epsilon_V$ は必要以上に小さいことを用いる。水平方向のエミッタンスはストレージリングの電磁石の配列によって決まるものであり、極めて大雑把に言えば電子エネルギーが一定の場合、この値を小さくするためにはリングの周長（あるいは半径と言い換えても良い）を大きくしなければならず、3 GeV で 1 nm.rad のエミッタンスを実現するためには 500 m 以上の周長が必要となるので、エミッタンスをこれよりずっと小さくすることは現実的ではない。一方鉛直方向のエミッタンスは、ストレージリングが理想的にできていれば極めて小さくできる。現在、鉛直方向のエミッタンスは水平方向の値の  $10^3$  程度に制御することが可能である。もしこの比を  $10^4$  程度に制御することが可能であり、かつ両方向のエミッタンスが等しくなるようにできれば（この値を $\epsilon$ とする）、 $\epsilon^2 = \epsilon_H\epsilon_V = 10^{-4}\epsilon_H^2$  より、 $\epsilon$ を元の値 $\epsilon_H$ の 1/100 程度にできる。 $\epsilon_H$ を 1 nm.rad とすれば $\epsilon = 10^{-2}$  nm.rad が得られ、1.2 で述べた条件を満足することができる。2.1 に詳説されているようにこの値は強力なソレノイド磁場の中で実現できるので、その中に挿入光源のための磁場を重畳させることの可否の検討が必要である。

蓄積リング内を周回する電子塊（バンチと称する）の進行方向の長さはモーメンタムコンパクションファクターと称する量（通常 $\alpha$ と書く）の平方根に比例する。 $\alpha$ を小さく設計し、短バンチを得る試みが幾つかの蓄積リングでなされたが、ピコ秒領域のバンチは極めて低い電流でしか実現していない。「レーザーライス」法は、ストレージリングを周回するバンチの長さそのものは制御せず、バンチの極めて短い部分からでた光のみが試料に照射されるようにするものである。たとえばアンジュレータと非常に短い光パルス照射することのできるレーザーを用いて、バンチの一部に他の部分のエネルギーと異なる部位をつくり、その部分からの光のみを利用するものであり、この方法はすでに実際に利用されている。またクラブ空洞と称する機器を利用し、バンチを進行方向に対し傾けることによりバンチの一部からの光を利用しようという「RF 偏向」法も検討されている。円形ビーム生成、レーザーライス法 RF 偏向法に関しては次章で詳説されている。

現時点では ERL、SSR 双方の可能性について検討をおこなう。ERL に関していえば前記のように応用法の検証も視野に入れた実証機のデザイン、その早期実現のため努力が必要である。ERL の成否は電子銃や超伝導加速構造の実現にかかっている。両分野とも、放射光研究施設にとっては経験の無い部分である。また、CSR(coherent synchrotron radiation)により引き起こされる諸問題や ERL 固有のビーム不安定現象等ビーム運動学の分野にも解決しなければならない多くの課題がある。ビーム運動学の理論的研

究の成果を取り入れた加速器コンポーネントの設計が必要となろう。実際上の問題としては、ストレージリングと異なり発光部を電子銃からのビームが一度しか通過しない ERL の場合光ビームの安定化も重要課題であろう。これらの机上の検討とともに、実証機による検証が最優先されなければならない。当然のことながら実証機を用いての放射光利用法の開発、あるいは利用実験も視野に入れておくべきである。

SSR のベースとなるストレージリングに関していえば、前記のように詳細・緻密な検討は当然のこととしてもその建設に大きな困難は無いと思われる。粛々とデザイン作業を進めればよい。ただし、すでに実現しているレーザースライス法はともかく、RF 偏向法による極短光パルス発生や、円形ビーム生成の実現性の検討を早急に開始しなければならない。またこれらを実現するための装置の開発研究も必要がある。前者に関しては超伝導空洞、後者に関しては超伝導電磁石の技術が不可欠である。

前にも述べたように、ERL、SSR 双方とも必要とする開発要素の中には、放射光研究施設にとって未経験の分野がある。一方、本研究機構加速器研究施設、共通基盤研究施設は、超伝導空洞、超伝導電磁石の世界最先端の技術を有している。機構各部門の協力の下に開発研究を進めるべきである。なお、諸外国とのいろいろなチャンネルを通しての共同研究も重要であろう。

春日俊夫 (KEK・PF・放射光源)

## 参考文献

- [1] 「放射光将来計画検討報告—ERL 光源と利用研究—」、諏訪田剛、飯田厚夫編集、高エネルギー加速器研究機構 (2003)。

## 1.4 利用研究の概要

現在考えている将来計画構想の放射光光源のスペックは、2002 年度に検討した ERL をベースにしたスペックとほぼ同様であり、その利用研究は 2 年前の放射光将来計画検討報告書に記載されている内容の多くの部分がそのままの形で引き継ぐ事が出来よう。しかし、その概要に関してはあえて繰り返しを恐れずに記載する事とする。

将来構想の光の特徴は

- 1) サブピコ秒のパルス光が得られ、時分割手法による種々のダイナミクス研究が進展する。
- 2) 空間的コヒーレンスの高い光源であり、位相やコヒーレンスを利用した応用研究が進展する。
- 3) 縦、横のエミッタンスが同じであることから、10 nm サイズのナノビームが実現可能である。
- 4) 普遍的な研究ツールとしての高輝度放射光光源であり、既存の放射光科学の更なる発展が実現する。

(Brilliance =  $10^{21}\sim 10^{22}$  (photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw))

本レポートでは、上記の 1)、2)、3) の先端的な光の特徴を生かした研究の展望を 2 年前の報告書から付加えるべき更なる展開をまとめると同時に、各研究分野、各実験手法からのアプローチで将来構想を、4) の普遍的な研究ツールとしての側面を含めて展望した。

サブピコ秒パルス光の利用では、その多くが高速現象の解明、ダイナミクスの解明であるが、その本質的な手法は励起用と検出用の 2 つの光源を用いてその 2 つの光源の間に遅延回路を入れ、励起からの遅延時間を変えて反応中間体や励起緩和状態の状態検出を行うという方法である (ポンプ&プローブ時間分解分光)。その検出用光源として、放射光領域である真空紫外から X 線領域に適用することが可能になれば、内殻励起分光や回折現象等を使って電子状態、電子密度分布のより直接的な情報が得られる。PF の将来計画としての新光源のパルス放射光によって、現在放射光を用いて行われている静的研究の全

てが原理的にはフェムト秒台の時間分解能を有した動的研究に踏み出す可能性を有することになる。そのような概観の中で、具体的な研究の方向性として、X線吸収発光分光を利用して「非平衡状態からどのように相関が発達し、新しい秩序が形成されていくのか」を明らかにするX線パルスを用いた新しいコヒーレント分光法を開発の提案、ナノ磁性体のサブピコ秒時間分解 XMCD 法による「スピンドYNAMIKSの解明とスピントロニクスへの応用」提案、時間分解 XAFS 法による「触媒化学及び材料化学における重要化学物質の反応機構の解明」、100 ピコ秒時間分解実験ですでに研究が進められている「光誘起構造相転移」研究の更なる展開、短パルスX線の利用した生命科学における機能解析を目的とした構造のダイナミクス研究、時分割光電子顕微鏡 (PEEM)のナノスケール微小領域イメージングによるナノ磁性体の磁区構造や磁化反転過程などの磁性体のダイナミクス研究があげられる。

コヒーレンスを利用した研究は、近年急速に進みつつある。その大きな原動力は、結晶ではない物質の構造決定がコヒーレントX線を用いた位相回復法 (X線コヒーレント回折顕微鏡)により、現実のものとなる可能性が期待されてきているからであろう。本レポートでは「アンジュレーター放射のコヒーレンス特性」、次に「ソレノイドとスキュー4極電磁石によるエミッタンス制御」というハードウェアの検討を含めた。コヒーレンス利用研究の展望として「位相型X線イメージング」、「X線コヒーレント回折顕微鏡」の方法論の可能性を検討している。

一方、上記のコヒーレントX線はナノビームの生成にもきわめて重要な要素である。「マイクロビームからナノビームへ」の節では、「集光技術の現状と展望」で現状の技術を分析すると同時にコヒーレンス特性を向上、また縦横対称な「丸いビーム」への期待が展望されている。そしてその様に生成されたナノビームはナノスケールのサイエンスとテクノロジーにアプローチするのに最適な方法であり、局所領域における元素分析、局所構造評価、電子状態評価、原子構造評価が複合されたときに強力なツールを与えると考えられる。

一方、上記のような先端的な研究の展望だけでなく、今回の検討資料には、各研究分野の将来構想として構造物性、構造生物学、固体電子物性、の分野で概観した。全てを網羅することができないが、例えば構造物性分野からは、精密構造解析のナノマテリアルへの応用はさらに拡大することが予想され、究極には結晶化の困難な物質の構造データを得ることが求められる。また共鳴散乱を用いて特定の原子の局所対称性に着目し、通常の相転移機構および物質の機能を解析する事は今後も重要な放射光の担うべきテーマであると同時に、パルス光との組み合わせによって励起状態での局所対称性の変化、および緩和ダイナミクスも研究は新たな研究分野の構築につながるであろう。構造生物学では、結晶化が困難な蛋白質の構造解析が最も重要なテーマと理解出来る。究極は単分子構造解析であるが、その1歩手前に、超微小結晶 (サブミクロン結晶)の構造解析、およびその超微小結晶のハンドリング技術の確立を行う必要がある。そしてそれらの技術開発のもとに究極にはコヒーレンスを最大限に利用した単分子構造解析が目標となる。固体電子分光分野においては、高輝度放射光による内殻吸収、スピン・角度分解光電子分光、内殻励起軟X線発光分光、磁気円二色性、磁気線二色性が21世紀の科学技術の重要な柱とされる「ナノサイエンス・ナノテクノロジー」に大きく貢献している事は認識されている。人工格子・ナノワイヤーさらには強相関電子系における電荷秩序と磁気秩序が共存したストライプ構造のように、ナノ構造における磁気秩序の解析に軟X線を用いた共鳴磁気散乱は極めて有用な方法と考えられ、またコヒーレンス特性を用いてスペックルを観測することから秩序状態の情報が得られる事が期待される。一方高輝度性の究極としては「高スループット・高分解能光電子分光によるナノマテリアルの高速評価」が挙げられる。

実験手法からのアプローチによる将来構想として、イメージング研究、非弾性散乱実験、XAFS 実験、放射線効果、蛍光X線分析、表面コインシデンス分光法の立場からその検討をまとめている。イメージングではコヒーレンス性を利用したイメージング、非弾性散乱では、短パルス性に観測できるであろうメスパワー核種の増大、XAFS 実験ではその汎用的光源の必要性 (広い材料科学への応用) と高輝度先端的光源の必要性 (時間分解 XAFS による短寿命状態の解明、極微小領域への応用、超希薄試料への

応用)、放射線生物効果では、高強度X線マイクロビームによる粒子放射線による生物効果の解明、マイクロアナリシスとしての蛍光X線分析の展開、コインシデンス分光法による表面からの内殻光電子、オージェ電子、そして脱離イオンのコインシデンス法による表面反応ダイナミクス研究提案がなされている。

現時点では、内部スタッフだけによる検討であり、その検討段階は出発点と考えている。内部スタッフのカバーできる範囲は限られており、分野的にも全てをカバーしたものとはなっていない事も良く認識している。今後、この検討資料をベースにして、関連分野の研究者との協力を得て、それらの研究計画を研ぎ澄ましていく必要があり、ユーザーグループに呼びかけ、更なる検討作業を進めていくことを考えている。

河田 洋 (KEK・PF・放射光科学)