

# 先端的リング型光源計画に関する報告書

平成19年1月12日

日本放射光学会

日本放射光学会  
「先端のリング型光源計画特別委員会」委員

朝倉 清高 (北大)	古宮 聰 (JASRI)
足立 伸一 (KEK)	坂中 章悟 (KEK)
雨宮 健太 (KEK)	島田 賢也 (広大)
雨宮 慶幸 (東大)	関山 明 (阪大)
石川 哲也 (理研)	高田 昌樹 (JASRI)
籠島 靖 (兵庫県立大)	田中 均 (JASRI)
神谷 幸秀 (KEK)	中川 敦史 (阪大)
河田 洋 (KEK)	西島 和三 (持田製薬)
木下 豊彦 (JASRI)	羽島 良一 (JAEA)
熊谷 教考 (JASRI)	村上 洋一 (東北大)
小杉 信博 (分子研)	若槻 莊市 (KEK)

(以上 22 名、下線委員長)

オブザーバー/事務局 (放射光学会)  
下村 理(会長)、澤 博(渉外幹事)、木村真一(行事幹事)

特別委員会の開催日

第1回 2005年10月28日  
第2回 2006年 1月 8日  
第3回 2006年 4月10日  
第4回 2006年 6月12日  
第5回 2006年 8月 8日

## 要 旨

日本放射光学会では、我が国の放射光科学のあり方について、特別委員会を設置して提言を行うと共に、ワークショップや講演会などで様々な見地からの議論を積み重ねてきた。2005 年度には「次世代光源検討特別委員会」を設置し次世代光源計画についての基本的な考え方の検討を行い、X 線自由電子レーザー (X-FEL) による光科学のフロンティアとして「究極を目指す光源計画」と、幅広い研究領域において基盤的に貢献するリング型光源を念頭に置いた「先端的基盤設備としての光源計画」の 2 つの方向性にまとめた。そのうち前者の X-FEL は第 3 期科学技術基本計画に国家基幹技術として盛り込まれることが決定し、2006 年度にはその建設が開始され、これにより既存の光源にはない特色を活かした新しい研究が展開される。

一方、後者の先端的リング型光源に関しては、それが目指すべき性能を明らかにし、先端的リング型光源計画策定の基本的な指針を与えることを目的とした「先端的リング型光源計画特別委員会」を 2005 年 10 月に設置し検討を行い、以下の提言を行うに至った。

リング型光源は、基礎科学から産業利用にわたる幅広い研究領域において、数多くのユーザーが同時に利用可能な基盤設備となっている。特に近年、欧米では放射光施設の分析ツール化の進展により利用者数の激増と質の変化が顕著になり、これに対応するため新たな施設建設や経年施設の更新が着実に進められている。また、アジア、アフリカでもナノ産業やバイオ産業の基盤設備として放射光施設を建設する動きが活発化している。すなわち、グローバルには放射光利用の大転換期にある。翻って我が国では、SPring-8 は依然世界最高性能の競争力を維持しているが、SPring-8 だけでは我が国における利用研究の量的・質的变化に完全に対応できるだけのキャパシティはなく、フォトンファクトリーはさまざまな高度化を進めているものの、老朽化による競争力の低下は免れない。この現状を放置すれば、たとえ X-FEL でフロンティアに於ける国際競争を互角に戦うことが可能となったとしても、基盤設備で展開される我が国の基礎科学および産業競争力に深刻な影響をもたらすことは必定である。それを回避し、さらに放射光利用の量的・質的イノベーションを我が国が先導していくためには、新たな先端的リング型光源の建設が不可欠である。

数年先の建設開始を念頭に置き、完成時点で十分な先端性を有するリング型光源として最有力な候補はエネルギー回収型ライナック (ERL) であり、その実現のための研究開発に早期に着手すべきである。また、ERL の開発とその利用研究を積極的に推進することは、X-FEL と並んでアジア地域においてリーダーシップを取りつつ世界的競争力を維持する上でも極めて重要であるだけでなく、次世代の放射光科学を担う人材を育成するという観点からも重要な意義を持つものである。

## 1. はじめに

日本放射光学会では設立以来、我が国における放射光施設のあり方について特別委員会を設けて検討してきた。特に 2005 年度に、第 3 期科学技術基本計画に盛り込まれる「今後 10 年以内に重点的に開発に取り組む国家基幹技術 10 項目」が明らかにされ、この中には次世代放射光源が挙げられた。これを受けて日本放射光学会は「次世代光源検討特別委員会」を設置し、次世代光源の検討を行い、第 3 期科学技術基本計画の国家基幹技術に対する放射光学会の考えを以下のようにまとめた。即ち、放射光コミュニティが望む次世代光源は、未踏技術としての「究極を目指す光源計画」と、従来から検討を行ってきている「先端的基盤設備としての光源計画」という二つの相補的なコンセプトを矛盾なく実現するものでなければならない。前者は X 線自由電子レーザーを意味し、この計画は既に第 3 期科学技術基本計画の中で理化学研究所を母体として予算化され建設が開始され、これにより既存の光源にはない特色を活かした新しい研究の展開が期待される。一方、「先端的基盤設備としての光源計画」とは物理、化学、ナノ・材料、情報、バイオ、医学、環境など広範な研究領域においてインパクトのある実績を数多く定常的に創出している現在の放射光科学を持続的に、かつ、さらに広範に発展・進化させる拡張性、波及性のある光源計画である。

このような状況の中、後者の「先端的基盤設備としての光源計画」言い換えれば「先端的リング型光源計画」ではどのようなハードウェアを念頭に置き、どのような特色ある利用研究を展開するかについて、より明確な指針を構築することを目的に「先端的リング型光源計画特別委員会」を設置し 2005～2006 年度に亘り、合計 5 回の委員会および、「第 3 回次世代光源計画ワークショップ—先端的リング型光源が開くサイエンス—」を開催し、放射光学会の指針をまとめた。

## 2. 先端的リング型光源計画で展開される利用研究

リング型光源は第 2 世代、第 3 世代と進化し、それをういた放射光利用研究は多くの研究領域で基礎科学から産業利用にわたって拡大し、現在では、科学技術と産業技術の発展のために不可欠な基盤設備として定着するに至っている。この間、リング型光源から得られるプローブ放射光の大きさは mm オーダーから  $\mu\text{m}$  オーダーへ、ビーム強度も  $10^8\text{ph/s}$  から  $10^{13}\text{ph/s}$  へと継続的に発展してきた。その結果、数多くの放射光利用研究成果が全国共同利用の放射光施設から定常的に創出され、タンパク 3000 やナノテクなどの国の基幹プロジェクトにも大きく貢献してきている。

しかしながら、上記の基幹プロジェクトを含め基礎科学や産業利用において、放射光利用研究に対する要求は、国際競争の激化によりその質及び量の両面においてますます高くなってきている。従って、「先端的リング型光源」は、プローブ光としての特徴を保ちつつ、 $\mu\text{m}$  オーダーから nm オーダーの微小領域、微小試料の物質状態分析研究が行えること、さらには従来の「スタティック」な分析研究から「ダイナミクス」をも含めた分析研究が十分に行える性能を有することが必要である。さらに、基盤設備として多様な研究を幅広く展開できることが必要であり、そのためには数多くのビームポートを有することが必須である。すなわち、「先端的リング型光源」は、現状の第 3 世代光源を十分に上回る空間コヒーレンス性、極短パルス性、低エミッタンス性の光源性能（質）と、多様な研究を可能ならしめるビームポート数（量）を兼ね備えるものでなければならない。現時点において予想される「先端的リング型光源」を用いて展開されるべき研究として以下の例が挙げられる。

生命科学においては、現在のタンパク 3000 プロジェクトで精力的にタンパク質の 3 次元構造の決定が行われているものの、その対象となるタンパク質結晶の結晶サイズは 10 ミクロン程度以上が限界である。一方、生物学・医学的に生体高分子超複合体や膜タンパク質の機能解明は極めて重要であると認識はされているものの、それらの結晶育成は必ずしも容易ではなく、その詳細を知るための立体構造を得るに至っていない。更なる低エミッタンス性を有する放射光によってサブミクロンサイズのタンパク質結晶の構造解析が可能となれば、それらのタンパク質の機能解析が可能となりその社会的貢献ははかり知れない。また空間コヒーレンス性を利用したコヒー

レントン折顕微鏡を用いて、結晶性を有しない細胞等の物質の3次元的な構造決定を非破壊で行うことも重要な利用技術である。この技術と細胞中のある特定のタンパク質を重原子でマーキングする技術を組み合わせることにより、細胞中の特定のタンパク質の機能解明といった生命科学の分野で革命的な情報を導き出すことが現実のものとなる。これらの研究を可能ならしめる基盤設備は、我が国の創薬業界における国際競争力を高める上で極めて重要である。

物質科学においては、産業分野から注目される機能性素子や高速スイッチング素子に関する研究が期待される。極短パルス光を用いた「スタティックからダイナミクスへ」というキーワードで記述されるサブピコ秒の時間分解能を持った「スピンダイナミクス、触媒反応機構、光誘起相転移現象」の解明は正にこのような対象分野である。また、現状より2桁高い輝度の放射光によって得られる10ナノメートルビーム径の集光ビーム（ナノビーム）はナノ構造物質の局所電子状態、局所構造評価を可能とし、今後更なる開発が期待される量子ドット、ナノ細線等のナノマテリアルの機能解明に対して、重要な知見を与える。このような知見は新たな機能性素子、ナノマテリアルの開発に再び結びつく正のスパイラルを作る原動力となり、この分野の産業競争力を保つうえで、「先端的リング型光源」の果たすべき役割は大きい。

一方、基礎科学においても、ナノビームは超高压、超高温という極端条件下での物質科学研究の極端条件領域を拡大することに結びつき、惑星・地球科学をはじめとする種々の極端条件下の物質研究の道を築くことにつながる。さらに、従来の第3世代光源では十分なコヒーレントフラックスが得られないためにテスト的な実験しか行われていないX線光子相関分光法（スペックル）はこの先端的リング型光源によって大きく生まれ変わることが期待され、前述のコヒーレント回折顕微鏡と組み合わせることにより物質秩序の揺らぎ現象（0.1HzからMHz領域における）、メゾスコピックなドメイン形成過程という未踏分野に重要な知見を与えるであろう。

イメージングの分野においては、空間コヒーレンス性は革命的な発展の原動力となる。ゾーンプレートをはじめとする集光光学素子の性能は最終的には空間コヒーレンス性で決定される。従って現状の第3世代光源と比較して2桁のコヒーレント特性が向上することにより現状の放射光施設におけるサブマイクロメートルの集光ビームと同じ強度を保ってナノビームを得ることができ、これを用いればナノマテリアルを中心として顕微分光をはじめ、種々の顕微鏡的な電子状態分析ツールとしての利用研究が可能となる。このことは前述のように、ナノマテリアルにおける機能（特に電子状態に着目した）を明確に理解する知見を与え、新現象の発見及びその理解、新物質開発に結びつく原動力となる。

### 3. リング型光源の世界の情勢

近年、欧米では、リング型光源の利用において、分析ツール化の進展および産業利用で代表される社会的必要性により、その利用者数が激増している。更に光源の質の高度化に対する要求が顕著になり、それに対応するため新たな放射光施設の建設や既存施設の更新が着実に進められている。第3世代リング型光源であるESRF、APSの建設後、DIAMOND、SLS、SOLEIL等の第3世代中型リング型光源が稼働もしくはその建設が進められている。さらに、サイエンスの最近の発展から光源の更なる高度化に対するニーズを満たすための新しいリング型光源コンセプトが提案されている。たとえばNSLS II計画では、超伝導アンジュレーターを基本とした光源設計によりX線領域で $10^{21}$ の輝度に迫る光源性能を持ち、ナノビームマシンとしての目標を掲げた計画が走り出そうとしている。また、その計画書の中には将来の更なる高輝度光源性能への飛躍の手法としてエネルギー回収型ライナック（ERL）への拡張性が記述されている。またAPSでの高度化計画の中にもERLの拡張性の議論が行われている。一方、根本的に高輝度、短パルスを実現するERL計画に関しては英国では4GLS計画が、米国ではコーネル大学がそれぞれ、その実現に向けた予算を獲得し研究開発がすでに進行している。

他方、アジア・オセアニアでは中国、台湾、シンガポール、インド、オーストラリアにおいて、さらにアフリカでは南アフリカ共和国において、ナノ産業やバイオ産業の基盤設備として新しいリング型光源の建設が活発化している。

このように、グローバルにはリング型光源を用いた放射光利用は大転換期にあり、新たなリング型光源の建設、および先端的なリング型光源の研究開発が着実に進展している。

#### 4. 先端的リング型光源の候補となるハードウェア

本委員会では既存の放射光施設（SPring-8, PF, UVSOR, 東京大学放射光連携研究機構）の改造計画と、KEK と JAEA が計画している ERL 計画のヒアリングを行い、検討を行った。

KEK と JAEA は前回の「次世代光源検討特別委員会」では夫々 ERL 計画を提案していたが、この一年間に ERL 関連技術に関する研究協力協定を締結し、実証機に関して共同で開発する体制を整えたこと、最終仕様として 5GeV クラスで 100mA, 10pm・rad、通常運転で 1.3GHz の繰り返しパルス運転とし、バンチ幅は圧縮時で 0.1 psec を目標とすることが報告された。ERL 実現に向けて重要な開発要素である大電流・高輝度電子銃の開発に関しては主に JAEA が担当し、超伝導キャビティーの開発に関しては主に KEK が担当し、実証機の建設場所はつくばキャンパスサイトで進められている。この最終仕様は前述の先端リング型光源計画で展開される利用研究を展開するに当たり、十分な性能を有している。また、その実現に当たっては数々の開発要素はあるものの、国際リニアコライダー（ILC）計画に向けて同様の加速器技術の開発が世界的に進められており、日本国内では KEK が中心となって技術開発が行われている。また、ERL の超伝導ライナックはその延長上に挿入光源を導入することにより、高繰り返し X-FEL の発振も可能であり、将来的には先端的リング型放射光源のみならず、高い繰り返しの究極の光源もオプションとなると理解される。以上の観点から、ERL 光源計画が先端的リング型光源としてのハードウェア候補として最も適しているものと判断する。

#### 5. 先端的リング型光源計画全体に対する考え方

現在、SPring-8 は依然世界最高性能の競争力を維持しているが、SPring-8 だけでは我が国における利用研究の量的・質的变化に完全に対応できるだけのキャパシティはない。フォトンファクトリーはさまざまな高度化を進めているものの、老朽化による競争力の低下は免れない。この現状を放置すれば、たとえ X-FEL でフロンティアに於ける国際競争を互角に戦うことが可能となったとしても、基盤設備で展開される我が国の基礎科学および産業競争力に深刻な影響をもたらすことは必定である。それを回避し、さらに放射光利用の量的・質的イノベーションを我が国が先導していくためには、新たな先端的リング型光源の建設が不可欠である。

数年先の建設開始を念頭に置き、完成時点で十分な先端性を有するリング型光源として最有力な候補はエネルギー回収型ライナック (ERL) であり、その実現のための研究開発に早期に着手すべきである。また、ERL の開発とその利用研究を積極的に推進することは、X-FEL と並んでアジア地域においてリーダーシップを取りつつ世界的競争力を維持する上でも極めて重要であるだけでなく、次世代の放射光科学を担う人材を育成するという観点からも重要な意義を持つものである。

また、現時点では予期出来ない加速器技術の進歩もあり得るので、先端的リング型光源計画については、学会として柔軟な議論を今後も継続的に進めていく必要がある。