

フォトンファクトリー次期光源検討委員会中間まとめ

2005年12月

物質構造科学研究所ではその運営会議の下に「フォトンファクトリー次期光源検討委員会」を2005年6月に設け、PFの次期放射光源ではどのようなサイエンスを目指し、また共同利用研としてどのような役割を果たすべきか、光源としての加速器はどのようなべきかについて検討した。

PF次期光源は、(1)新しい可能性を示すことにより「新しいニーズを作り出す」という極めて先端性の高い解析ツールとしての役割、と(2)新物質、新材料に関する「多様なニーズに対応できる」高性能の解析ツールとしての役割、の二つの役割の両方をバランスよく果たして行くことを目指すべきである。先端的放射光の性能を用いた「時間領域測定」「空間的コヒーレントX線を用いた広義のイメージング測定」そして「ナノビームを用いた種々の放射光計測による局所電子構造・状態解明」をベースにした種々のサイエンスが期待されると同時にそれらを同時に展開することができるハードウェアが必要とされる。

このような役割をはたすことのできる光源としては、Energy Recovery Linac (ERL) と高度化されたストレージリング (スーパー・ストレージ・リング (SSR)) の可能性が考えられ、具体的な性能としては、輝度 $10^{21} \sim 10^{23}$ ph/s/0.1%/mm²/mrad² @10keV、コヒーレントフラクション 10~20%@10keV、パルス幅~100fs、ビームライン数~30本、を満たすものが考えられた。

SSRに関しては、基本となる3GeVクラスの高性能第三世代光源の実現には基本的な困難さは予想されないが、10pmradの水平方向エミッタンスや100fs程度の超短光パルスを得る技術に関しては今後のR&Dが必要とされる。特に、10pmradの水平エミッタンスの実現は技術的に未知と言わざるを得ない。また、数本のかぎられたビームラインでのみ空間コヒーレンスの高いあるいは長短パルスのビームが得られのみで、さらに高い空間コヒーレンス、超短光パルスを同時に要求される場合は実現困難である。

ERLの場合には、超低エミッタンス、超短光パルスというビームを多くのビームラインで実現することができる可能性がある。想定しているビーム電流値(約100mA)では、現在実現している電子銃のエミッタンスは約一桁悪いが、微少電流ではこのエミッタンスは実現しており、今後の性能向上の余地があるとも言える。この他、キーコンポーネント一つの超伝導加速空洞については、リニアコライダ(以後LCと略記)用空洞の開発と共同すればよいとの議論がなされた。ビームエネルギー数GeVクラスのERLが実現していない現時点では200MeV程度の実証機の建設が不可欠であり、またこの実証器をVUV光源として利用する可能性も議論された。

このようにSSR、ERLを検討した結果、次期光源はその将来性および拡張性を鑑み、ERLの選択が妥当であるとの結論に達した。その場合に、低光子エネルギー(数十eV)の発生に関して十分な検討が必要なことも確認された。

ERL光源についてはこれから解決すべき技術的問題もあるが、大きな可能性を持っている光源と位置づけられる。これについての開発および将来の建設、利用研究はPFという枠を超えてKEK機構内、日本の放射光コミュニティー、加速器研究者コミュニティー、国内外の関連他機関の力を結集して行うべきプロジェクトといえる。フォトンファクトリーはそのような協力・共同作業体制の実現のために努力をすべきである。

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所放射光研究施設の 2.5GeV リングは放射光専用リングとして 1982 年から 23 年間稼働しており、PF-AR リングとあわせ約 3 千人のユーザーをもつ大学共同利用施設として機能している。2.5GeV リング直線部増強などの改造により、現在および近い将来に亘って多くのユーザーのニーズに応えてゆくことは可能であるが、今後 20 年～30 年にわたって時代に応じて進歩してゆく放射光ユーザーのニーズに十分応えるには、基本となる光源を時代のニーズにあった新たなものとする必要がある時期が迫ってきている。また、実験室光源から PF リングへ、PF リングから Spring-8 への変化が大きな飛躍をもたらしたとき以上に、あたらしい可能性を示し新しいニーズを作り出し物質・生命科学の発展に貢献するためにも、既存の放射光源にくらべて格段高い性能を持つ光源を例え 10 年後の実現を目指すにしても、PF としてそのための努力を早急に開始すべき時期が来ている。

このような背景を受け、物質構造科学研究所ではその運営会議の下に「フォトンファクトリー次期光源検討委員会」を 2005 年 6 月に設け、PF の次期放射光源ではどのようなサイエンスを目指し、また共同利用研としてどのような役割を果たすべきか、光源としての加速器はどのようなべきかについて検討した。本報告は、2005 年 9 月までに上記委員会において検討された結果を中間まとめとして物構研運営会議に報告するものである。

委員会委員の構成は、付属資料 1 に示すように、フォトンファクトリースタッフ、KEK 加速器研究系スタッフ、機構外の加速器研究者、機構外の放射光ユーザーからなるようにし、機構全体および国内の加速器研究者・放射光ユーザーの意見と知恵が反映されるような工夫をした。さらに、委員会の下には次期光源検討ワーキンググループと利用研究検討ワーキンググループを設け、より具体的な検討を行った。

2. PF が今後果たすべき役割

放射光は、これまで物質・生命科学研究分野に対してふたつの役割を果たしてきた。すなわち (1) それまでには他の手法では見ることができなかったものを見えるようにし新しい可能性を示すことにより「新しいニーズを作り出す」という極めて先端性の高い研究・解析・分析ツールとしての役割、と (2) それまでには存在しなかった新しい機能をもつ新物質、新材料について放射光だからこそ得られる原子・電子レベルの静的・動的構造情報をタイムリーに提供するという「多様なニーズに対応できる」高性能の解析ツールとしての役割、である。PF は、大学共同利用施設という使命を認識し、上述の二つの役割の両方をバランスよく果たして行くことを目指すべきである。(1) のような視点は、Spring-8 を含む現存の放射光施設をもってしても実現できなかった実験が次期光源で可能となるというような大きな飛躍を実現し「新しいニーズを作り出す」ことを目指すというものであり、(2) のような視点は、大学共同利用施設として多くのユーザーが繰り返し PF を訪れ、物質科学・生命科学分野の多種多様な研究を行っている現状をさらに継続・発展させる方向性を目指すものである。

3. 次期光源で目指すサイエンスと求められる光源の特性

PF では、2003 年 3 月に、「放射光将来計画検討報告 - ERL 光源と利用研究」を、2005 年 3 月には、「放射光将来計画検討資料 2004 - 今後の将来計画検討のために -」を出版し、さらに本中間まとめの基礎となる次期光源検討委員会のもとでの利用研究検討ワーキンググループにおいても検討されている。その内容は後述するが表 1 に示すよう先端的放射光の性能を用いた「時間領域測定」「空間的コヒーレント X 線を用いた広義のイメージング測定」そして「ナノビームを用いた種々の放射光計測による局所電子構造・状態解明」をベースにした種々のサイエンスが期待されると同時にそれらを同時に展開することができる

ハードウェアが必要とされる。したがって、次期光源に求められる光源特性は表 2 に示すものが必要不可欠である。

表 1 次期光源で目指すサイエンスの例

生命科学>	
生体高分子超複合体や膜タンパク質のナノ結晶構造解析による構造生物学の新展開（真の医学応用へ）	
ポリマー-高分子の階層構造の形成・消滅のダイナミクスを含めた完全理解。（新機能物質の開発）	
時間領域測定による新たな展開>	
光誘起想定現象の徹底理解（次世代高速通信素子開発への応用）	
強光子場中の分子ダイナミクス	
ナノ磁性体のスピンドイナミクス（スピントロニクスへの応用）	
光誘起水分解触媒反応のダイナミクス（環境触媒、電池材料開発）	
溶液中反応ダイナミクス	
光反応性タンパク質の構造ダイナミクス 電子移動の観測へ（タンパク質の機能の直接的解明）	
非晶質物質の高時空分解能動画イメージング	
物質科学>	
触媒科学：光触媒の機能発現（水分解触媒の開発（エネルギー問題））	
光機能材料の開発研究（記録媒体、高速スイッチング素子開発）	
工業材料の評価（例えば腐食メカニズムと防食材料開発）	
燃料電池の機能解明とその開発	
光誘起現象の徹底解明。（高速通信素子開発へ）	
相転移現象のダイナミクス、揺らぎ現象。（スペックル測定をベースにした X 線光子相関分光）	
表面・界面における軌道・電荷秩序の害場応答（新しい機能物質創生）	
高分解能 RIXS による電子励起のバンド分散	
微量試料 [ナノマテリアル] の電子密度分布測定による機能解明。	
コヒーレント軟 X 線共鳴散乱スペックルによる磁気秩序のの解明。（スピントロニクス素子の開発）	
時間分解高分解能光電子分光による光誘起状態の電子状態解明	
etc. . . , その他、全ての現在行われている放射光利用研究において微小領域化・高エネルギー分解能化が進行	

表 2 次期光源として要求される仕様

光子エネルギー範囲	30eV ~ 30keV (コア領域 50eV ~ 20keV)
輝度	$10^{21} \sim 10^{23}$ ph/s/0.1%/mm ² /mrad ² @10keV
コヒーレントフラクション	10 ~ 20% @10keV
エミッタンス	10pmrad @10keV
短光パルス	~ 100fs
ビームライン数	~ 30 本

4 . 検討の経緯

フォトンファクトリーの将来計画の検討は、本委員会が設置されるかなり前から行われていた。本委員会での検討は、それらの検討も踏まえて行われたものである。すなわち、1997 年ごろからは 4GeV クラスのストレージリングの案が考えられたが、当時は機構内では J - P A R C 計画の推進が優先的課題であったこと、機構外では V U V ・ S X 光源計画が熱心に議論されていたことなどがあり、大きな進展は見られなかった。その後、PF では

2002年ごろからX線領域でのコヒーレント特性、短光パルス性、ナノビームという先端性を有し、かつ多くの研究を同時に実行することのできる汎用性をも兼ね備えた光源として Energy Recovery Linac (ERL) の検討が行われ、また2004年には上記の性能を部分的に実現できる可能性のある高度化されたストレージリング(スーパー・ストレージ・リング(SSR))の可能性が言及された。

2005年度に入り、次期光源として、その両者のどちらをベースすべきかを検討する本「フォトンファクトリー次期光源検討委員会」が物構研の運営会議のもとに設置され、そのもとに具体的な光源仕様、問題点等を検討する光源検討ワーキンググループと、次期光源で展開されるべき利用研究を検討する利用研究検討ワーキンググループに分かれて検討が行われた。

各ワーキンググループは7月から9月にかけて当初分かれて検討を進め、最後に光源検討、利用研究両WGの合同会合をへて、9月6日の第2回次期光源検討委員会で光源計画の方向性を決めた。以下は各ワーキンググループの検討経緯である。

4-1. 光源検討ワーキンググループの検討経緯

光源検討ワーキンググループ(以後WGと略記)に関連する会合を表3に示す。6月21日および7月29日に開催されているPF-SPRING8情報交換会は、光源に関する問題に関して、議論・意見交換をする場で数年前より行われてきた。両日は、主に”丸ビーム”^{*}法の議論を行った。6月28日には第0回の光源検討WGの会合を行った。第0回としたのは、7月1日の第1回PF次期光源検討委員会に先だって行ったためである。ここでは、光源検討WG位置付け、次期光源として要求される性能(表2参照)、次期光源の候補であるERLのための電子銃の現状および見通しが話し合われた。7月6日には坂中氏が2001年から2003年にかけて行われたERLの検討会(諏訪田、飯田編集「放射光将来計画検討報告-ERL光源と利用研究-2003年3月、参照)の参加者を招集し、光源検討WGにどのような提案をするかを協議した。第1回、第2回の光源検討WGは次期光源のもう一つの候補であるSuper Storage Ring(仮称、以後SSRと略記)における”丸ビーム法”および短い光パルスを得るための”Crab 空洞法”^{*}、”Laser Slicing 法”^{*}の議論を行った。

^{*})”丸ビーム法”や”Crab 空洞法”、”Laser Slicing 法”の原理は第1回光源検討WGでの原田氏の講演”SSR光源”資料(PF次期光源検討のHPよりダウンロード可能)を参照のこと。

表3 光源検討WGに関連する会合

6月21日	PF-SPRING8情報交換会
6月28日	第0回光源検討WG会合
7月 1日	PF次期光源検討委員会
6日	第1回ERL検討打合せ(坂中氏招集)
15日	第1回光源検討WG会合
29日	PF-SPRING8情報交換会
8月 3日	第2回光源検討WG会合
9月 1日	光源検討・利用研究両検討WG合同会合

4-2. 利用研究検討ワーキンググループの検討経緯

利用研究検討ワーキンググループに関する会合を表4に示す。第1回利用研究検討WG会合では利用研究検討の方針、タスクフォースの分類に関する議論を行い、第2回利用研

究検討WG会合では時間領域測定、コヒーレント特性、生命科学の各タスクフォースの検討報告をもとにその可能性を議論し、第3回利用研究検討WG会合では構造物性、化学・材料の各タスクフォースの検討報告をもとに次期光源をもとにした放射光利用研究の検討を行うと同時に、各タスクフォースから見たときのSSRとERLの適正について議論を行った。その各タスクフォースから報告された利用研究の一覧を表1に示す。また、8月10日「挿入光源ビームライン増強に関するユーザズミーティング」で将来計画のセッションを設けてフォトンファクトリー・ユーザグループとの意見交換を行うとともに、境界領域の新しいサイエンスに関して自由討論を行った。

表4 利用研究検討WGに関する会合

7月12日	第1回利用研究検討WG会合
7月26日	第2回利用研究検討WG会合
8月10日	「挿入光源ビームライン増強に関するユーザズミーティング」で将来計画のセッション・職員会館で境界領域の新しいサイエンスに関して自由討論
8月11日	第3回利用研究検討WG会合
9月1日	第3回光源・利用研究検討合同WG会合

5. 光源の選択

次期光源が持つべき性能・性格は主に利用研究検討WGにおいて検討されてきた。特に10年後から稼動する次期光源を考えると、先端的な放射光の性質（コヒーレントX線、短光パルス、ナノビームと種々の放射光実験と融合）は重要な位置を占め、種々な実験手法でそのような先端性を有することが物質科学の発展に重要であることが確認された。したがって、PF次期光源は表2の仕様を持つべきであることが再確認された。この仕様を満足する光源として、現時点ではERLとSSRが候補に挙げられる。ERLの概要については前記の報告書にある。SSRは基本的には電子エネルギー3GeVクラスで1nmrad程度のエミッタンスを持つ高性能第三世代の光源であるが、その幾つかの直線部で”Crab空洞法”、”Laser Slicing法”を用いて短い光パルス（1ps程度）および”丸ビーム法”を用いて水平方向エミッタンス10pmrad程度を実現しようというものである。

光源検討WGおよびこれに関係する会合での議論を基に、ERL、SSRの得失をまとめた（表5）。SSRに関しては、基礎となる3GeVクラスの高性能第三世代光源は建設が決定されれば実現には基本的な困難さは予想されず、比較的短期間で表2にある超低エミッタンスや超短光パルスを要しない目的には高性能光源を得ることができるであろう。しかしながら、表2にある10pmradの水平方向エミッタンスや100fs程度の超短光パルスを得るためには、前述のように長直線部にこれらのための装置を導入しなければならない。且つその直線部に対応するビームラインでのみこれらの要求された性能が得られるので、これらの装置を導入していない直線部に対応するビームラインにおいては、超低エミッタンス化、超短光パルスの恩恵にはあずかれない。さらに、超低エミッタンス、超短光パルスを同時に要求される場合は実現困難である。SSRに関する議論の中で、仮にこれらの特殊装置が完成できても、将来の発展性に関する疑義が出された。すなわち、既設の光源にこれらの装置を組み込みより高度な利用を図る場合はともかく、これらの特殊装置をゴールとすることに対する疑義である。

一方ERLは全世界でも、可視光やIRなどの小規模な装置が稼働しているのみで、表2の仕様を満足するものは存在していない。各国でこの規模のERLの建設が提案されている。ERLの場合、蓄積リングの場合とは異なり、電子銃の性能が最終的な光源の性能を

決定してしまう。規格化エミッタンスが0.1mm.mradの電子銃からのビームを5GeVまで加速すれば（が約 10^4 なので）10pm.radのエミッタンスが得られる。想定しているビーム電流値（約100mA）では、実現している電子銃のエミッタンスは約一桁悪いが、微少電流ではこのエミッタンスは実現している。いずれにせよ、電子銃性能がERLの性能を決めてしまうので、条件を満足する電子銃の開発は絶対的な条件である。ERL特有のビーム力学上の理論的な検討も必要となる。キーコンポーネント一つの超伝導加速空洞については、リニアコライダ（以後LCと略記）用空洞の開発と共同すればよいとの議論がなされた。所定のエネルギーのERLが実現していない現時点では200MeV程度の実証機の建設が不可欠である。

	ERL	SSR
1. 利点	<ul style="list-style-type: none"> 全ビームラインで極低エミッタンス、極短光パルスを実現可能 電子銃の改良とともに性能があがる 	<ul style="list-style-type: none"> ベースとなる storage ring それ自体が高性能光源 ベースとなる storage ring の建設期間が短い 汎用マシンとしては成熟している
2. 欠点、問題点	<ul style="list-style-type: none"> 建設開始時に仕様を満足する電子銃が完成しているか否か不明 ビーム運動学上の未解明部分がある VUVの発生に工夫を要する 	<ul style="list-style-type: none"> 丸ビーム法、Crab 空洞法が実現しても、限られた数のビームラインのみの恩恵 丸ビーム法の実現性が不明 将来の展開性に疑義
3. 開発要素 開発見通し 開発に要する人員	<ul style="list-style-type: none"> 仕様を満足する電子銃の見通しはある 超伝導加速系の実現性は高い 検討すべきビーム運動学上の諸問題有り VUVの発生を要検討 (光)ビーム安定化 開発に要する人員は広範囲の分野から多数 	<ul style="list-style-type: none"> Laser slicing は ALS で実現している Crab cavity は SP8 で検討中 丸ビーム法は構想段階 (光)ビーム安定化 開発に要する人員は比較的限られた分野からよい
4. 建設期間 (a) 性能を得るまでの期間 (b) a + b	<ul style="list-style-type: none"> 建設期間終了後、性能を得るまでの期間が長い 4 + ? 年 (ただし、電子銃性能の向上とともに光源自体の性能が向上する) 	<ul style="list-style-type: none"> ベースとなる storage ring の所定性能を得るまでの期間は短い 3 + ? 年 (ただし、丸ビーム、極短パルスを得るための期間を b に加える必要がある)
5. サイト	<ul style="list-style-type: none"> 地盤安定性 	<ul style="list-style-type: none"> 地盤安定性
6. 実現見通し、 周囲の情勢	<ul style="list-style-type: none"> 実証機による検討が必要 各所で計画中 	<ul style="list-style-type: none"> ベースとなる storage ring の見通しはほぼ 100% 丸ビーム法、Crab 空洞法ともに SP8 で検討中
7. 行うべき R&D	<ul style="list-style-type: none"> 電子銃 R&D ビーム運動学の研究 超伝導加速系 実証機建設 ビーム安定化、地盤安定性の問題 	<ul style="list-style-type: none"> 丸ビーム法 Crab 空洞法 ビーム安定化、地盤安定性の問題

表5 光源検討WGでの議論を基に整理されたERL, SSRの得失

一方、利用研究検討WGでも各タスクフォースから見たERLとSSRの適正を評価し(表6)そしてそれらをまとめて整理すると表7のようになった。その表にあるように、SSRでは限られたビームポートでのみ先端的特性を利用するに過ぎず、最終的な到達点で単に先端的需要に答えられるか疑問があるのに対して、ERLではすべてのビームポ-

トで先端的特性を利用することが原理的に可能であり、放射光科学の全体の基盤的底上げが可能であるとまとめた。

研究内容および必要とされる光源仕様	ERL	SSR
<p>< 先端的放射光源利用 ></p> <p>コヒーレンス > X 線領域で 10 ~ 20 % のコヒーレントフラクション。</p> <p>短光パルス性 > 100fsec 程度の短光パルス。各実験ポートで時間構造実験が利用できることがベスト。</p> <p>ナノビーム > 10nm ノ集光ビーム 種々に実験手法との合成がエッセシナル。 回折実験との両立のためには $10^{2.2-2.4}$ の輝度が必要。</p>	<p>コヒーレンス > 運転開始時は低電流。 電子銃性能アップによって徐々に改善。 全てのビームポートで、ある程度の性能が期待できる。</p> <p>短光パルス性 > 全てのビームポートでピコ秒以下のパルス光が利用可能。 バンチ圧縮によって 100 フェムト秒まで可能。 フィリングに関してはあまり自由度はないか？ ジッターに関する R&D が必要不可欠。</p> <p>ナノビーム > 全てのビームポートでナノビームの利用研究が最終的には可能。 集光光学素子開発の R&D が不可欠</p>	<p>コヒーレンス > コヒーレント放射光の発生には丸ビームの生成技術に依存。 可能になったとしても、ある限られたビームポートのみで利用可能。</p> <p>短光パルス性 > 限られたポートでピコ秒の光パルスを利用可能。 ジッターに関する R&D が必要不可欠。</p> <p>ナノビーム > ぎりぎりの回折限界までの X 線領域のナノビームは限られたポートのみ。VUV 領域では第 3 世代光源として稼動した段階で回折限界までの集光ビームを利用可能。 集光光学素子開発の R&D が不可欠</p>
<p>< 生命科学 > サブミクロン結晶の構造解析の発展を推進するには $10^{2.2-2.4}$ の輝度が必要。またそのようなビームラインが複数必要。 小角散乱においても基本的には輝度の向上に期待。</p>	<p>左の仕様は ERL の最終形態で実現できる。(先端的研究環境を多くのビームラインで)</p>	<p>左のような仕様を満足するビームラインを複数確保する必要があり、全体の needs を満足するか疑問。</p>
<p>< 構造物性 > 非平衡状態の解明からサブピコ秒の光パルスは必要不可欠。その条件で電子密度分布解析まで持っていく。 多重極限での物質構造研究。共鳴非弾性散乱による更なるエネルギー分解能の向上が必要。 スペckルによる揺らぎ現象の観察。相転移現象の特性時間の理解。 更なる高輝度、および先端性の特性を利用した研究を展開。先端性のポートの数がある程度必要。</p>	<p>左の仕様は ERL の最終形態で実現できる。(先端的研究環境を多くのビームラインで)</p>	<p>左の研究の一部は十分に可能。ただし、先端的な特性との複合的研究は限られる。</p>

<p><化学・材料></p> <p>触媒化学 活性点の構造解析（光触媒は100fsの光パルスが必要）。</p> <p>光機能材料(新しい素子開発と応用)(100fsの光パルスが必要)。</p> <p>工業材料、溶液、固液界面(ナノビームがエッセシヤル)。</p> <p>新しい表面分析機器開発(STMとの複合機器)。</p> <p>必要スペックとして、X線強度は現状に数桁上、100fsの短光パルスであり、かつ安定光源。</p>	<p>ERLの最終形態ではほぼ使用を満足。 安定性に関して懸念？</p>	<p>安定性に関して早期に実現擦れであろう。 すべてのneedsを満足することは先端性を担うポートの数から困難。</p>
<p><電子物性></p> <p>強光子場中の分子ダイナミクス(100fsの光パルスが必要)</p> <p>時間領域の高分解能光電子分光法による励起状態の解明。</p> <p>軟X線顕微鏡(ホログラフィー)回折限界光がエッセシヤル。</p> <p>局所的な磁気秩序およびその揺らぎ現象(軟X線スペckル)。</p>	<p>最大電流が100mAとすると、フラックス的には問題があるか？</p> <p>VUV領域の放射光発生のため、2つエネルギーの運転の可能性を追求できないか。テーマとしてサブピコ秒オーダーの電子状態、スピン状態解析は有望。</p> <p>軟X線領域では高いコヒーレント性を用いた研究が期待できる。</p>	<p>1mradのエミッタンスはすでに100eVの光で回折限界となる。したがって、すでにその時点で回折限界までの集光等は達成している。</p> <p>一方、軟X線領域ではビーム生成ビームラインまで行かなければ高いコヒーレント性を用いた研究は出来ない(MCDスペckル等)。</p>

表6 各タスクフォースから見たERLとSSRの適正評価

	ERL	SSR
利用研究から見たERLとSSRの適正	利用開始後最終的なスペックに到達するにはそれなりの時間がかかるが、全てのビームポートで先端的特性を利用することが原理的に可能であり、放射光科学の全体の基盤的な底上げが可能。	限られたビームポートでのみ先端的特性を利用するに過ぎないが、第3世代光源としての立ち上がりには問題はない。 最終的な到達点は、先端性を担い得るポートの数で全体needsに応えることは困難か。

表7 利用研究検討WGでの議論をもとに整理されたERLとSSRの適正

両検討ワーキンググループでのSSR、ERLの検討の結果、次期光源はその将来性および拡張性を鑑み、ERLの選択が妥当であろうとの結論に達した。また、次節で述べるようにERLを選択した場合、低光子エネルギー(数十eV)側にどう対応するかの議論も行われた。必要とする最低の光子エネルギーやビームライン数を考慮に入れながらさらに検討する必要がある。この議論のなかで、KEK内の加速器資源の有効利用を図るべきとの意見も出された。

6. ERL実現のための検討

次期光源としてERLを選択するとすれば、今後どのように実現を図るべきかを検討する必要がある。短期間の検討なので前述の2001年から2003年にかけて行われたERLの検討会の報告書案を出発点とする。しかしながら、第1回ERL検討打合せ(坂

中氏招集)や第1回光源検討WG会合で議論されたように、本報告初案では、表1の条件のうち低光子エネルギー側を満足しない。また、前回の案ではビームライン数は20本弱であったが、表1のように今回はビームライン数約30本が要請されている。これらの点を修正する必要がある。

光源検討WGにおいて、ERL実現のため必要な開発研究要素が議論された。必要ビームライン数等を検討しリング基本デザインの再検討を行うグループが必要である。これ以外に早急に開発研究を開始しなければならない項目は

- ・ 所定の性能を有する電子銃のR&D
- ・ ビーム運動学上の検討(Linac部でのエネルギー授受の問題も含む)
- ・ 超伝導加速系のR&D(LC用空洞R&Dとの共同)
- ・ ビーム安定化
- ・ サイトの地盤安定性の影響の見積もりと対策

などである。

前回の検討会において200MeVクラスのERL実証機の建設が議論された。今回のWGにおいても実証機の建設は必須であることが議論された。かつ実証機は低光子エネルギー側で利用可能なようにすべき(あるいは実証試験後実用機として利用できるべき)との議論があった。実証機建設ができるだけ早く開始できる体制を構築すべきである。

7. 年次計画

KEK内外の状況を見ると、ERL建設を直ちに開始する状況にはない。また前記のように、検討しなければならない多くの項目があるし、実証機の建設も必須である。想定される建設スケジュールは以下の通りである。

2006 - 2009	各種R&D、理論的研究、実証機設計と建設および実証試験
2009 - 2013	5GeV ERL建設開始、試運転
2014	供用開始

8. 国内外の他の次世代放射光源開発状況

検討委員会では、国内外の他の放射光源の建設計画の状況について顕在的に議論されたことはなかったが、多くの委員がその状況も念頭においていたと考えられるので、ここで簡単に海外での新しい放射光光源の開発、建設、建設計画の状況について触れておく。

海外での動向は大きく言って3つに分類できる。それは、(A)自由電子X線レーザー、(B)ERL、(C)3.5世代ストレージリングである。自由電子レーザーの開発はX線領域のものは、米国のSLAC(Stanford Linear Accelerator Center)、ドイツのDESY(Deutsches Elektronen Synchrotron)、日本の理研播磨研究所で計画されている。SLACの計画はSCLSと呼ばれ、すでに2005年8月から建設に入り2009年に完成の予定である。国内では、理研の計画が2006年度予算で認められたので、2010年の完成を目指し、これから建設が開始される。XFELは極めて高いピーク輝度、極めて短いパルス、時間的、空間的に高きコヒーレンスのビームを得られるが、平均輝度はERLなどとほぼ同等で、また数十の実験ステーションに同時にビームを供給することは難しい。これではサイエンスも、先端的なビーム特性をもっとも有効に利用するものとなり物質科学、生命科学の広範な高度の容共に応える役割は他の光源に譲ることになるであろう。一方、海外では英国ではDiamond、フランスにおいてはSoleilという3GeVクラスでエミッタンスが1mrad程度のストレージリングを建設中である。これは、第3世代の進化したものと言え3GeVクラスでも短周期アンジュレーターを設置することにより現在の第3世代X線リングに設置されているビームラインと同等の性能のビームラインが設置できるので、リング型光源の今

後の方向性として認識されている。また、Daiamond や Soleil よりほど大きくないものでは Canadian Light Source、SPEAR3、Australian Synchrotron などのエミッタンスが 10nmrad オーダーの 3GeV クラスのリング光源が建設されたり、もしくは現在建設中である。PF とほぼ同年代に稼動を開始した英国・Daresbury の SRS は Diamond の稼動後一定の期間の後に閉鎖される予定であり、一方、米国・Brookhaven の NSLS では現在の光源の後継機として Daiamond と似た性能をもつストレージリングを提案している。このほか上海で 3 GeV の 3.5 世代リングが建設中、台湾でも 3 GeV クラスのリング建設を検討中、中東では SESAME プロジェクトと称して 2.5GeV ストレージリングの建設計画が進められている。

ERL に関しては、コーネル大学の CHESS において現在あるストレージリング CEASR のトンネルを再利用して、5 GeV クラスの ERL の建設が提案されており、2005 年には実証器として 100MeV クラスの ERL の開発予算が NSF から認められている。このほかアメリカでは、Jefferson 研究所で 160MeV のエネルギー回収型 Linac を用いた自由電子レーザーが運転されており、また原子核実験用の CEBAF という加速器を用いて電子エネルギーの回収実験が行われている。SRS をある時期に閉鎖する予定の Daresbury では、6 0 0 MeV の ERL を建設しテラヘルツ波から軟 X 線領域をカバーする計画が進行している。

9 . まとめ

PF 光源検討委員会としては、PF 次期光源として 5 GeV クラスの ERL を選択する。 2 0 0 9 年の建設開始、2 0 1 4 年の供用開始を目標に、大至急各要検討項目の R & D および実証機建設を行う必要がある。光源検討 WG、利用研究 WG は引き続き、これらの具体化のための検討を行う。

早急に検討を開始しなければならない項目を挙げておく。

- ・基本デザイン
- ・実証機デザイン
- ・所定の性能を有する電子銃の R & D
- ・ビーム力学上の検討 (Linac 部でのエネルギー授受の問題も含む)
- ・超伝導加速系の R & D (LC 用空洞 R&D との共同)
- ・ビーム安定化
- ・サイトの地盤安定性の影響の見積もりと対策
- ・各利用研究の精鋭化
(ナノ結晶のハンドリング技術、X 線回折計・検出器の高度化等々)
- ・利用技術の開発研究
(コヒーレント X 線の輸送、時間ジーターの問題解決、集光光学系の開発等々)

1 0 . 終わりに

PF の次期光源についての検討を、PF スタッフ、加速器研究施設スタッフ、機構外の加速器研究者、機構外放射光ユーザーからなる検討委員、さらにその下に設けられた次期光源検討ワーキンググループを利用研究検討ワーキンググループで 7 月から 9 月までに集中的に行った。その結果、ERL 光源を PF 次期光源の候補として R&D を進めることとなった。ERL 光源についてはこれから解決すべき技術的問題もあるが、大きな可能性を持っている光源と位置づけられる。これについての開発および将来の建設、利用研究は PF という枠を超えて KEK 機構内、日本の放射光コミュニティー、加速器研究者コミュニティー、国内外の関連他機関の力を結集して行うべきプロジェクトといえる。フォトンファクトリーはそのような協力・共同作業体制の実現のために努力をすることが期待されており、本委員会報告がそのような動きを促進することに役立つことを願っている。

付属資料1 > フォトンファクトリー次期光源検討委員会委員名簿

フォトンファクトリー次期光源検討委員会利用研究検討WGメンバー名簿

フォトンファクトリー次期光源検討委員会光源検討WGメンバー名簿

フォトンファクトリー次期光源検討委員会メンバー

	氏名	所属・職名
機構外	朝倉 清高	北海道大学触媒化学研究センター教授
	雨宮 慶幸	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
	柿崎 明人	東京大学物性研究所軌道放射物性研究施設長
	加藤 政博	自然科学研究機構分子科学研究所教授
	熊谷 教孝	(財)高輝度光科学研究センター加速器部門長
	下村 理	(財)高輝度光科学研究センター審議役・研究調整部長
	羽島 良一	日本原子力研究所東海研究所光量子科学研究センター主任研究員
	藤森 淳	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
	水木純一郎	日本原子力研究所関西研究所放射光科学研究センター長
	村上 洋一	東北大学大学院理学研究科教授
機構内	松下 正	物質構造科学研究所副所長
	野村 昌治	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系研究主幹
	飯田 厚夫	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系教授
	柳下 明	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系教授
	伊藤 健二	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助教授
	河田 洋	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系研究主幹
	若槻 壮市	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系教授
	澤 博	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系教授
	春日 俊夫	物質構造科学研究所放射光源研究系研究主幹
	前澤 秀樹	物質構造科学研究所放射光源研究系教授
	伊澤 正陽	物質構造科学研究所放射光源研究系教授
	神谷 幸秀	加速器研究施設長
	生出 勝宣	加速器研究施設加速器第二研究系研究主幹
	榎本 收志	加速器研究施設加速器第三研究系研究主幹

フォトンファクトリー次期光源検討委員会利用研究検討 WG メンバー

	氏 名	所属・職名
所 外	朝倉 清高	北海道大学触媒化学研究センター教授
	雨宮 慶幸	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
	藤森 淳	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
	村上 洋一	東北大学大学院理学研究科教授
	佐々木 聡	東京工業大学応用セラミックス研究所教授
	齋藤 智彦	東京理科大学講師
	高橋 敏男	東京大学物性研究所教授
	下村 晋	慶応義塾大学理工学部先任講師
	鈴木 芳生	(財)高輝度光科学研究センター (JASRI) 実験部門副主席研究員
	籠島 靖	兵庫県立大学大学院物質理学研究科教授
	木下 豊彦	(財)高輝度光科学研究センター (JASRI) 利用研究促進部門主席研究員
	桜井 健次	物質・材料研究機構材料研究所ディレクター
	後藤 俊治	(財)高輝度光科学研究センター (JASRI) ビームライン技術部門 グループリーダー
所 内	野村 昌治	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系研究主幹
	飯田 厚夫	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系教授
	柳下 明	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系教授
	伊藤 健二	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助教授
	稲田 康宏	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助教授
	小野 寛太	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助教授
	小出 常晴	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助教授
	小林 克己	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助教授
	間瀬 一彦	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助教授
	宇佐美徳子	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助手
	兵藤 一行	物質構造科学研究所放射光科学第一研究系助手
	河田 洋	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系研究主幹
	若槻 壮市	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系教授
	澤 博	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系教授
	足立 伸一	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系助教授
	平野 馨一	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系助手
	亀卦川卓美	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系助手
	春日 俊夫	物質構造科学研究所放射光源研究系研究主幹

フォトンファクトリー次期光源検討委員会光源検討WGメンバー

	氏名	所属・職名
所外	庄司 善彦	兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 助教授
	羽島 良一	日本原子力研究所東海研究所光量子科学研究センター主任研究員
所内	春日 俊夫	物質構造科学研究所放射光源研究系研究主幹
	河田 洋	物質構造科学研究所放射光科学第二研究系研究主幹
	伊澤 正陽	物質構造科学研究所放射光源研究系教授
	前澤 秀樹	物質構造科学研究所放射光源研究系教授
	山本 樹	物質構造科学研究所放射光源研究系教授
	小林 幸則	物質構造科学研究所放射光源研究系助教授
	坂中 章吾	物質構造科学研究所放射光源研究系助教授
	榎本 収志	加速器研究施設加速器第三研究系研究主幹
	生出 勝宣	加速器研究施設加速器第二研究系研究主幹

付属資料2 > 委員会およびワーキンググループ会合日時

フォトンファクトリー次期光源検討委員会

第1回委員会： 2005年7月1日
 第2回委員会： 2005年9月6日

フォトンファクトリー次期光源検討委員会利用研究検討WG

第1回利用研究検討WG会合： 2005年7月12日
 第2回利用研究検討WG会合： 2005年7月26日
 第3回利用研究検討WG会合： 2005年8月11日
 第4回利用研究検討WG会合： 2005年9月1日

フォトンファクトリー次期光源検討委員会光源検討WG

第0回光源検討WG会合： 2005年6月28日
 第1回光源検討WG会合： 2005年7月15日
 第2回光源検討WG会合： 2005年8月3日
 第3回光源検討WG会合： 2005年9月1日