

ERL 総括委員会報告

平成 28 年 9 月 7 日

1. 委員会構成

本委員会は山内正則機構長の依頼を受けた以下のメンバーによって構成された。

日本放射光学会関係

- ・雨宮慶幸 (東京大学大学院・新領域創成科学研究科教授)
- ・小杉信博* (自然科学研究機構・分子科学研究所教授、UVSOR 施設長)
- ・壽榮松宏仁 (東京大学名誉教授、元理化学研究所・播磨研究所長)

高エネルギー加速器研究機構教育研究評議会より

- ・上垣外修一 (理化学研究所・仁科加速器研究センター・加速器基盤研究部長)
- ・瀧川 仁 (東京大学物性研究所長)
- ・中野貴志 (大阪大学核物理研究センター長)

*委員長 (機構長の指名による)

2. 委員会開催

委員会は以下の要領で開催された。また、適宜、高エネルギー加速器研究機構の理事、所長、副所長、主幹、施設長には陪席を依頼した。

第 1 回 平成 28 年 7 月 25 日 (月) 9 時～13 時

山内正則機構長による趣旨説明

野村昌治理事による「KEK 放射光将来計画の経緯」説明

河田洋 ERL 計画推進室長による「ERL プロジェクトについて」説明

委員による意見交換

第 1 回と第 2 回の間

電子メールを利用した委員による「ERL 総括委員会報告 (案)」の作成

第 2 回 平成 28 年 9 月 7 日 (水) 9 時～12 時

委員による「ERL 総括委員会報告 (案)」の仕上げ

山内正則機構長への報告 (まとめ部分)

※ 第 2 回ののち KEK からの意見も参考に委員による最終確認を行い、9 月 13 日に提出。

3. 総括の背景

以下のような KEK ロードマップの改訂が行われたことを受けて本委員会が設置された。

本機構で今後取り組んでいく研究の方針として、平成 25 年 5 月 24 日に策定した「KEK ロードマップ 2013」では、フotonサイエンス(放射光科学)の将来計画として、『コンパクト ERL により ERL の加速器技術を実証する。これにより ERL が新たな研究分野を開拓する光源であることを示して、3GeV ERL 建設開始を目指す。』とされていた。

しかしながら、最近の加速器技術の進歩で、3GeV クラスの蓄積リング型高輝度光源により、ERL で期待されていた放射光科学への貢献の多くは早期に実現が可能となったことから、将来の放射光源としての ERL 計画の検討を中止し、蓄積リング型高輝度光源の早期実現を目指すことを決定した。

4. 総括する観点

総括の具体的項目については委員会での議論に基づき、主に以下の点を取りあげることにした。

- 1) ERL 光源を PF の将来計画に決めた経緯と理由が妥当だったか。
- 2) ERL 光源を PF の将来計画として実現するための実証機の位置付けが妥当だったか。
- 3) ERL 光源を PF の将来計画としないことに至った経緯と理由が妥当だったか。

3項目それぞれについて、機構内部（PF、物構研、機構全体）での議論・見直しが適切だったか、利用研究者との関係が適切だったか、日本放射光学会との関係が適切だったか、世界動向と把握が適切だったか、などのいろいろな面を考慮しながら総括することにした。

5. 観点 1 「ERL 光源を PF の将来計画に決めた経緯と理由」

委員会が把握した内容とその評価は以下の通りである。

1) 松下 PF 施設長（1997 年～2006 年）のもと、1982 年 PF 施設完成後、高度化計画も進めながら 15 年を越えた 1998 年から PF 施設の本格的な将来計画の検討が始まった。第 3 世代の硬 X 線光源である SPring-8 が 1997 年に完成後、第 2 世代の軟 X 線・硬 X 線光源（当初は VUV 領域も力を入れていた）である PF が利用者の動向を把握しつつ、SPring-8 との棲み分けを念頭に、PF 及び PF-AR の高度化、軟 X 線アンジュレータ重点化などを処理しながら、新光源の将来計画の検討をスタートしたのは時宜を得たものであると判断する。

2) 2004 年の法人化を念頭に 2002 年に行われた高エネルギー加速器研究機構全体の外部評価では、物質構造科学研究所そのものが研究者コミュニティの強いボトムアップ的ニーズではなく、機構化の中で考え出されたことによって生じた諸問題の指摘があった。その中で物質構造科学研究所の意義のひとつとして、SPring-8 などの機構外のより優れた設備も利用した総合的物質研究拠点、物質科学・生命科学のための新しいコンセプトのビーム源や最先端加速器技術の開発拠点などの可能性への提言がなされている。現時点でも将来を考える上での材料がこ

ここに提供されていると判断される。

外部評価報告書 組織・運営について 2002年9月 高エネルギー加速器研究機構
<https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/ResearchAccount/>

3) VUV 領域を中心にしていた東京大学物性研究所 SOR 施設は、1976 年に稼働開始後、PF 施設に分室を設けて軟 X 線を利用した共同利用研究も積み重ねてきたが、柏キャンパス問題と連動して 1995 年前後より次期計画として軟 X 線領域の第 3 世代光源を検討するようになった。同時期、東北大学も類似の光源計画を提案した。2001 年には、文部科学省科学技術・学術審議会部会での検討のあと、東京大学物性研究所、東北大学、物質構造科学研究所の三者は極紫外・軟 X 線高輝度光源計画検討会議を設置し、物質構造科学研究所が新たにデザインした軟 X 線光源も参考にしながら統合を図った。日本放射光学会でも将来計画検討特別委員会を継続的に開催するなど、連動する活動が行われた。以上の流れの中で、PF は 8 割以上が硬 X 線利用者であったことから硬 X 線までカバーする施設として異なる位置付けにあった。

当時、同じ硬 X 線施設である SPring-8 との棲み分け議論もあった中で、SPring-8 の完成後、多くの PF 利用者が SPring-8 に移るのではないかという危惧はそれほど深刻にはならず、むしろ硬 X 線利用者が全国で拡大する方向が強まったことで、物質構造科学研究所はユーザー層を維持したまま PF リングに替わる新たな硬 X 線光源を独自に建設する方向に舵を切った。しかし、各施設に固有の利用者がつくことには負の側面がある。上述の KEK 外部評価報告書の内容とも関連するが、放射光科学を主導する PF と SPring-8 の間で相補性や差別化の検討を進めることで、利用者の流動を施設側が戦略的に促していれば、その後の国内放射光源の将来計画は日本全体でもっと柔軟に考えることができたのではないか。

極紫外・軟 X 線高輝度放射光施設計画に関する提言 2001 年 8 月 日本放射光学会特別委員会
<http://www.jssrr.jp/tokubetsu/2001-2003/shourai.html>

4) 第 3 世代の硬 X 線光源は SPring-8、第 3 世代の軟 X 線光源は東大計画という背景の中、物質構造科学研究所として運営協議員会（現運営会議）のもとに放射光将来計画検討ワーキンググループを設置し、第 4 世代的な将来光源として ERL 光源の可能性を技術的に検討し、その報告書が 2002 年度末に公表された。そこでは、硬 X 線を前提に最終的に 5GeV までアップグレード可能な 2.5GeV ERL が提案された（2011 年度に 3GeV に変更するまでは 5GeV が ERL の将来計画となった）。すでに先行していた超短パルスコヒーレント X 線光源である直線型の FEL は世界的に第 4 世代光源として位置付けられつつあったが、さらに通常のリング型の高輝度光源の特徴も兼ね備えた ERL 光源は、国際的にも本来の第 4 世代光源候補の最右翼に位置付けられていた。ERL 光源を PF 光源の後継機と位置付けて、R&D から始めようと計画し、加速器研究施設に放射光研究施設が共同して ERL の実証機(100MeV, 26 億円)を 2003 年度概算要求に盛り込む（予算化はされず）など、実現への準備が始まった。

当時の国内外での第 4 世代光源に対する技術的検討状況を考えると、ERL 光源を将来計画に決めたことは妥当であったと判断する。

放射光将来計画検討報告-ERL 光源と利用計画- 2003 年 3 月
http://pfwww.kek.jp/outline/pf_future/studyreport1/index.html

6. 観点2「ERL光源をPFの将来計画として実現するための実証機の位置付け」

1) 2004年4月より、国立大学及び大学共同利用機関は法人化された。ERL計画については第1期中期計画期間(2004-2010年)には実証機で検証し、第2期中期計画期間(2010-2016年)に5GeVの実機を建設、完成させ、共同利用を開始する予定であった。その中で、第3世代軟X線光源を柏キャンパスに建設するという東京大学が進めていた計画が法人化の影響もあり難航する中で、物質構造科学研究所との共同提案も模索される状況になった。結局、2005年に東京大学は光源計画そのものを断念し、既存施設への軟X線アウトステーション計画で限定的に対応することになった。そのような議論を進める中で、物質構造科学研究所では、PF光源の次期計画として、第3世代軟X線光源としての特性も包含する技術的困難の比較的少ない通常の蓄積リング型で第3世代以上の性能を持たせることのできるスーパーストレージリング(SSR)の検討が行われた。

2005年度には科学技術・学術審議会の研究計画・評価分科会として次世代放射光源計画評価作業部会が設置され、第1回～第4回はXFEL計画の評価を集中して行い、その結果、360億円規模のXFEL計画は2006年度から5年間の第3期科学技術基本計画の国家基幹技術のひとつとなった。さらに、第5回～第8回にかけては国内外の各放射光施設の現状把握に加えて、同じリング型次世代放射光源に分類された5GeVのERL型光源(800億円規模)とSSR光源について検討され、「リング型次世代放射光源については、スーパー・ストレージ・リングが現在構想段階にあり、一部の要素技術開発について検討が行われている状況にある。また、エネルギー回収型リニアックは、高輝度電子銃の開発など具体的な要素技術開発が行われているが、KEKとJAEAの協力が始まったばかりであり、X線自由電子レーザーのように詳細な事前評価を行い得る状況にはない。」「リング型次世代光源は、今後の放射光科学の進展に伴い、より高い品質の放射光を多数のユーザーに供給するという観点から期待は大きいものの、X線自由電子レーザーを上回る投資を必要とするものであり、費用対効果の観点からも綿密な調査検討が必要である。SPring-8が本格利用期に入り、またX線自由電子レーザーが整備されようとしている段階において、SPring-8を超える高輝度、高コヒーレント性、短パルスの放射光を多数のユーザーに同時に提供することの効果や研究ニーズを十分把握し、かつ分析することが必要である。」「すなわち、放射光利用研究の今後の見通しとその学術的、経済・社会的な意義、必要とされる光源性能、想定されるユーザーの分野の広がりや量的な範囲など、研究ニーズの調査・分析を十分行ったうえで、既存施設の有効利用や高度化による対応との比較検討を行い、それらの結果を、経費を負担する国民に分かりやすく示す必要がある。」との指摘がなされた。

世界的にも技術的困難がはっきりしていたERL光源以外の解として、2005年あたりからESRF, APS, SPring-8の3大施設やSOLEILやDIAMONDという通常の第3世代リングの次に来るべき回折限界を目指したリング型のX線光源加速器に関する検討が始まっていたが、SSRはその流れの初期段階のひとつの選択肢でしかなかった。世界的には回折限界リング型光源に向けての更なる検討が進んだ。物質構造科学研究所として、2005年度における科学技術・学術審議会の上記指摘に対して、米国等の世界動向を把握しながら真剣に検討する必要があったのではないかと。なお、後述するように、予算面から再検討されたのは2011年になってから、ERL光源とは違って短パルス性は追求せず、多数の偏向磁石を配列するタイプの蓄積リング型回折限界光源を検討し始めたのは2013年あたりになってからである。

PF将来計画に関するホームページ

http://pfwww.kek.jp/outline/pf_future/

次世代放射光源計画評価報告書 2006年6月 科学技術・学術審議会、研究計画・評価分科会
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/shiryo/06070715/002.htm

Science and Technology of Future Light Sources. A White Paper by ANL, BNL, LBNL & SLAC(2008年12月)
<http://slac.stanford.edu/pubs/slacreports/reports17/slac-r-917.pdf>

2) 技術的課題が多く残されている ERL 光源の見直しの議論や新たな SSR 光源の検討もある中で、2005 年に物質構造科学研究所運営会議のもとに置かれたフォトンファクトリー次期光源検討委員会では、PF, PF-AR に替わる次期光源として 5GeV クラスの ERL 光源を選択し、第 2 期中期計画期間中の 2013 年に運転開始を目指して、第 1 期中期計画期間中の 2006 年～2009 年間に ERL 実証機建設と実証試験を目指すことが結論された。それを受けて、2005 年、日本放射光学会特別委員会「先端的リング型光源計画」でも ERL 光源が先端的リング型光源として最有力候補であるとの結論を得た。

2006 年には KEK 機構直属の先端加速器推進部に ERL 計画推進室が設置され、実証機建設への準備が始まった。一方、東京大学の第 3 世代軟 X 線光源計画で考えられてきた軟 X 線利用研究は PF 光源の直線部増強で 7 割程度をカバーできるとの検討が関係者で行われたが、結局、東京大学のアウトステーションは第 3 世代光源である SPring-8 において建設されることになった。そのため、PF リングの直線部増強計画は第 3 世代軟 X 線光源計画とは別の観点で進むところとなった。

限りある予算の中で、ERL 実証機の建設に向けての要素技術研究や 2008 年補正予算によるインフラの準備を行いながら、PF の直線部増強もしなければならない状況では、双方実現へのスピードが遅れ気味になるなどの影響はなかったか、また、組織的に ERL 計画推進室が物質構造科学研究所の外に置かれたことによるフォトンサイエンスとしての一体的な把握(予算や要員も含めて)が困難になるような影響がなかったか、などの疑問が残る。

PF 次期光源検討の現状 2005 年 11 月
http://pfwww.kek.jp/outline/pf_future/pfn23_3k.html

先端的リング型光源計画特別委員会報告書 2007 年 1 月 日本放射光学会
<http://www.jssrr.jp/tokubetsu/sentan/index.html>

3) KEK ロードマップ 2007 には 2013 年までに cERL で実証した上で、2013 年頃からの 5GeV クラス実機の建設を目指すとする。第 1 期中期計画期間中に実証機の建設を始めることはできなかったが、第 2 期中期計画が始まった 2010 年 4 月に機構長から ERL 計画推進室長に対して、ERL 実証機への予算配分の判断材料として、実証機の技術的実施可能性と予算的実施可能性(予算・人員の計画の妥当性)を評価する ERL 評価専門委員会の設置要請があった。報告書には「ERL は技術的に難しい点が多く、尻込みする国や機関も多いが、それだからこそ KEK の総力を挙げて取り組むのに相応しい」「cERL の性能目標の達成期限を 2012 年度末とするのは、必要な予算が手当てされれば、技術的には妥当」とある。これを受けて機構長より予算配分を受け、実証機の本格建設が始まった。(その後、2013 年には 0.01mA 運転、2014 年には 0.1mA 運転、2015 年には 1mA 運転を可能にし、性能目標の 10mA 運転に目処をつけた。)

2012 年度末に目標達成できなかったのは、予算面以外に段階的に放射線変更申請を行う必要があったことや技術的な困難さもあったと思われる。しかし、予算はそもそも実証機にとど

まっており、実証機での実証のあと 5GeV クラス実機についての技術的実施可能性と予算的実施可能性の評価を行うのであれば、現 PF 光源の延命期限を見極める意味でも、実証はもっと急ぐ必要があったのではないか、などの疑問が残る。

KEK ロードマップ 2007

<https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/>

ERL 評価専門委員会レポート 2010 年 4 月

<http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/hyouka.html>

4) 日本学術会議大型計画マスタープラン 2010 の中に放射光科学の将来計画を日本放射光学会としてまとめることになり、予算額を明示するものとしては PF、SPring-8、XFEL の大型施設を中心にとりまとめることになった。ERL については 2012 年運転開始予定の実証機 cERL で R&D を続けながら、2021 年に実機を建設し、2025 年に運転を開始、PF については ERL 実機が完成する 2025 年で運転中止、PF-AR については 2014 年から KEK-X に発展的に解消し、KEK-X は 2025 年で運転中止、という KEK の放射光ロードマップを盛り込んだ。

その後 2010 年度に日本放射光学会では、日本学術会議大型計画マスタープランの実現に向けて、放射光サイエンス将来計画特別委員会及び放射光源計画ワーキンググループを設置し、議論を深めた。その際、PF-AR の運転中止と KEK-X の計画は真剣に議論する前に立ち消えとなり、KEK の放射光ロードマップそのものを深く議論することはなかった。ただし、5GeV の ERL 実機の運転開始予定の 2025 年まで現 PF の運転を継続（延命）するという案については、その妥当性を物質構造科学研究所や高エネルギー加速器研究機構で議論すべきではなかったか。また、日本放射光学会としては物質構造科学研究所の執行部の意向を受けて KEK-X の実現を可能にするようにマスタープランを作成したつもりであったが、結果的に、学会、放射光施設や施設を有する機関、各施設の利用者コミュニティの間の意識のずれや情報共有の不足が顕在化し、その後の学会運営にも大きな影響を与えるところとなった。

日本放射光学会特別委員会及び日本学術会議大型計画マスタープラン 2010年

<http://www.jssrr.jp/tokubetsu/science/index.html>

7. 観点3「ERL 光源を PF の将来計画としないことに至った経緯と理由」

1) 2011年3月に東日本大震災が起きた。機構内(2011年4月 KEK 研究推進会議)で予算の見直しが行われ、早期実現(2020年運転開始を予定)のためにも ERL 実機は 300 億円クラスに抑える必要があるとの結論となり、5GeV クラスから 3GeV クラスへの計画変更が決定された(同時に、これまでオプションでしかなかった ERL のライナックからの電子ビームを加速して利用する XFEL-0 を第 2 期計画(7 GeV)として追加提案された)。3GeV 化によって軟 X 線がターゲットになり、高いエネルギーの硬 X 線を得るには工夫が必要になった。一方、ERL 実証機において、リニアコライダーの加速器と共通する部分での R&D を共同で行うことになった。なお、KEK-X 計画は中止になった。3 GeV ERL 計画の CDR は 2012 年に完成した。日本放射光学会では、2012 年 5 月に東日本大震災以降に東北 7 国立大学連合で提案された 3GeV の軟 X 線回折限界光源を含む東北放射光計画と 3 GeV にダウングレードした ERL 計画の公開シンポジウムが行われた。世界動向では ERL 光源の実機を作るのは日本だけになる可能性が大きいこと、実証機が 2013 年に動き出せば 3 GeV ERL 光源は技術的に 2015 年の建設開始、2020 年のユーザー運転開始が可能になるとの説明が PF 施設からあった。

ERL 実機の建設開始年(予算獲得年)として 2009 年(PF 次期光源検討委員会 2005)、2013 年(KEK ロードマップ 2007)、2021 年(日本学術会議大型計画マスタープラン 2010)、2015 年(2012 年日本放射光学会特別委員会)、2017 年(KEK ロードマップ 2013)と先延ばしになったり、前倒しになったりしていることは、単に実証機の立ち上げ状況の遅れだけが原因ではなく、実機に向けての技術的実施可能性、予算的実施可能性、政治的可能性が物質構造科学研究所としてしっかり検証されていない状況を示していると判断される。それはまた、現 PF 光源の延命あるいは増強についての施策が定まらない現状にもつながっていると判断される。

PF News Vo. 29, No. 1&No. 2 施設だより (ERL 戦略) (2011 年 5 月&8 月)

http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/29_1/shisetsu.pdf

http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/29_2/shisetsu.pdf

放射光将来計画公開シンポジウム KEK-ERL 計画資料 2012 年 5 月 日本放射光学会

<http://www.jssrr.jp/tokubetsu/syourai/index.html>

放射光将来計画特別委員会中間まとめ 2012 年 5 月 日本放射光学会

http://www.jssrr.jp/tokubetsu/syourai/tyuukan_0523.pdf

Energy Recovery Linac Conceptual Design Report 2012 年 10 月

http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/database/ERL_CDR_full_text.pdf

2) 2012 年 7 月の SRI 会議において MAX IV や NSLS II など、以前は ERL 光源を視野に入れて次期計画を考えていた施設においても、短パルス性を追求しない蓄積リング型回折限界光源(ultimate storage ring USR あるいは diffraction limit storage ring DLSR)が選択され、すでに建設が始まっているなど、世界的に数多くの蓄積リング型回折限界光源の開発や計画、既存施設の回折限界光源化計画が進んでいる状況が明確に把握された。また、2013 年 7 月には米国 DOE の BESAC で、加速器ベースの光源について米国が世界的リーダーシップを確保するための答申が出されるなど、米国では蓄積リング型回折限界光源と FEL の 2 つを重点項目とし、両方の性質を兼ね備えた ERL 光源は性能的に両方を凌駕するものではなく、技術的問題もあり、予算措置を行わないことが明確になった。

このような大きな流れはすでに 2010 年前後に世界的に始まっており、物質構造科学研究所

は PF と同じ役割を米国で果たしていた NSLS の動向を把握するなどして、事前に検討を始めておくべきだったと判断される。

M. Borland, "Progress Toward an Ultimate Storage Ring Light Source", J. Phys. Conf. Series 425 (2013) 042016 (SRI2012 Proceedings)

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/425/4/042016>

Report of the BESAC Subcommittee on Future X-ray Light Sources (July 2013) DOE, USA

http://science.energy.gov/~media/bes/besac/pdf/Reports/Future_Light_Sources_report_BESAC_approved_72513.pdf

X-ray source left without home, *Nature* Vol.505, 11-12 (Jan. 2014).

<http://www.nature.com/news/x-ray-source-left-without-home-1.14447>

3) KEK ロードマップ 2013 において、3GeV ERL 光源は 2020 年度より試験的運転を開始、2021 年度には利用を開始することを目標とした。実証機を 2013 年度中に運転し、実機の実現可能性を詳細に議論した上で、技術設計書(TDR)を 2013 年度末に完成させると書かれている。しかし、同じ 2013 年の早い時期にすでに、CDR の見直しを 2013 年～2014 年に行い、TDR の完成は実機に必要な技術レベルに到達する見込みの 2017 年にまで延長されている。TDR の完成が遅れることによる 2020 年運転開始の遅れについての議論があったかどうかは不明であるが、KEK ロードマップの放射光部分が希望的観測に基づいて書かれているというのは、今後、繰り返してはならないと判断される。

KEK ロードマップ 2013

<https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/>

4) 日本放射光学会では日本学術会議大型計画マスタープラン 2014 において放射光科学の将来計画の改訂を行った。マスタープラン 2010 作成時の反省に基づき、緊急性のある 3GeV 蓄積リング型軟 X 線回折限界光源 (多数の偏向磁石を配列し短パルス性は追求しないタイプ) については年次計画を含めて具体的に記述し、その次に来るべき硬 X 線回折限界光源については未確定なことは書かず、ERL 計画と SPring-8 II 計画でそれぞれ独自の開発研究を 5 年間程度は進めるといだけの簡単な記述に留めた。2013 年 6 月には 3GeV 軟 X 線回折限界光源(東北放射光計画として具体的な提案があった)、ERL 計画、SPring-8 II 計画を中心に学会主催で国内の放射光光源将来計画に関する公開討論会が開催された。その場で PF 施設から、ERL 実機建設を目指して実証機で技術開発を継続する一方で、実機稼働までのギャップを埋めるために日本放射光学会が進めていた 3GeV 蓄積リング型回折限界光源の計画に中心的役割を果たすとの説明があった。1 年前 2012 年 5 月の日本放射光学会の公開シンポジウムと大きく違う説明に学会は非常に混乱した。

日本学術会議大型計画マスタープラン 2014 2013年3月 日本放射光学会

<http://www.jssrr.jp/tokubetsu/2013MasterPlan/MasterPlan.JSSRR.2013.pdf>

放射光光源将来計画に関する討論会議事録 2013年6月 日本放射光学会

<http://www.jssrr.jp/tokubetsu/20130601syorai/syorai-j.html>

マスタープラン 2014 & 放射光光源将来計画討論会報告 2013 年 7 月 日本放射光学会誌 Vo. 26, No. 4

<http://www.jssrr.jp/journal/pdf/26/p227.pdf>

<http://www.jssrr.jp/journal/pdf/26/p238.pdf>

5)2014年10月に物質構造科学研究所運営会議の下にPF将来計画検討委員会が開催された。その最終報告では、「ERLの実証機であるcERLについては、低電荷での性能チェックが概ね完了し、ほぼ目標通りの性能が達成されている。しかし、今後に向けて、解決すべき課題が少なからず残されていることも明らかになってきた。例えば、100 mAクラスの大電流を生成する電子源、電子を高勾配で加速するためのフィールドエミッション対策が施された超伝導空洞など、中核となるハードウェアの多くが開発途上にある。また、光源加速器としての総合性能の検証作業が不可欠である。長期間の安定な運用が可能であることを示すことや超伝導空洞などの量産化体制への目途をつけることも重要な課題である。更に、放射線安全に関する検討は極めて重要である。このようにPFの次期光源として要求される大電荷（リング電流100 mA）を実現するためには、今後に向けて更なるR&Dが必要で、開発予算が十分に投入されても最低数年の開発期間を要し、正確には先を見通せない状況にある。また、ERL実機の建設費は加速器部分だけで約430億円と見積もられ、運用には32 MWの電力で数千時間の運転を行うための光熱費と保守・維持・管理費が必要になる。」「ERL計画については、大電流化などの残された開発要素があり、更に、技術面が解決されても、現状ではコスト面の問題が深刻である。したがって、3GeV ERLの早期実現は困難であると言わざるをえない。」と結論した。3GeV ERL実機稼働までのギャップを埋めるための3GeV蓄積リング型回折限界光源の位置付けから3GeV ERL実機を目指さない3GeV蓄積リング型回折限界光源への大きな方向転換である。フォトンサイエンスの世界動向から見て妥当な方向転換だと判断するが、世界動向からは遅れた判断になってしまった。また、2011年の時点では300億円クラスに抑えるために5GeVから3GeVに下げたにも関わらず、その後、300億円をはるかに越えることになった見積もりの甘さも問題である。

フォトンファクトリー将来計画検討委員会最終報告 2016年3月
<http://www2.kek.jp/imss/notice/2016/08/191200.html>

6) ERL実証機を使った開発研究は結果的にPFの次期計画（フォトンサイエンス）には結びつかなかったが、加速器科学として基幹技術開発及び将来につながる応用面で以下のような成果を挙げた点で評価できる。

- ・若い研究者に低エネルギーながら世界最高性能の要素技術にチャレンジしながら、加速器設計・建設・運転に関わる機会を与え、人材育成したことで、今後の加速器科学への貢献が期待できる。
- ・世界最高レベルのCW運転用の超伝導加速空洞の開発技術を確立した。その技術は、将来の高繰り返しFEL実現の鍵となる技術であり、海外での新たな加速器に活かされつつある。
- ・電子銃は100mAのERL光源として必要な電流量までの性能は発揮できないが、10mA程度の電流に限れば十分利用に耐えるレベルである。
- ・ERL実証機及びその基幹技術の応用として、レーザー逆コンプトン散乱X線による医学応用高精細X線イメージングや次世代半導体リソグラフィ用の大強度光源、さらには大電流電子ビーム加速器による核医学検査用ラジオアイソトープ(^{99m}Tc の親核種である ^{99}Mo)の安定供給の実現可能性が高まったことは高く評価できる。

ERL計画推進室の活動状況 <http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/>

8. まとめ

・PF 運転開始 15 年となる前後に、第 3 世代硬 X 線光源である SPring-8 の利用開始や第 3 世代 VUV・軟 X 線光源計画の提案などの国内動向における紆余曲折があった中で、PF の次期光源計画が検討された。その結果、PF 運転開始 20 年後の 2002 年に、当時、蓄積リング型光源と直線型光源の両方の特性を持つと世界的に期待されていた ERL に基づく硬 X 線光源を提案したことは妥当である。次期光源の運転開始の目標を、PF 運転開始 30 年を越えた 2013 年あたりとしたのも妥当である。

ただし、2016 年においても、未だ次期光源の実現に至っておらず、PF・PF-AR が競争力低下に陥っていることについては、いろいろ反省すべき点がある。2006 年には、蓄積リング型光源と直線型光源の異なる特性をそれぞれ最大限引き出しながら放射光科学を推進するという世界動向に沿って、国内でも硬 X 線光源として SPring-8 に加えて SACLA の建設が始まった。また、この 10 年の間に国の科学技術・学術政策（財政面を含む）も大きく変化した。ERL 計画をスタートして以来、このような国内の放射光科学や科学技術・学術政策の変化の中で、日本全体の視野に立って PF の次期光源の位置付け（目指すべきサイエンスや対象とする利用者層など）の見直しや実現プロセスの見直しを適切に行う必要があったと考える。

・硬 X 線に特徴を持たせることができる 5GeV の ERL 光源を提案した背景には、1997 年の SPring-8 利用開始後も PF の利用者の 8 割以上を占める硬 X 線利用者に目立った減少がなかったことがあるが、5GeV の ERL 光源計画に関する 2005 年度の科学技術・学術審議会の研究計画・評価分科会での審議の結果では、

- ①建設コストが 800 億円クラスとなり、費用対効果の観点から綿密な調査検討が必要、
- ②SPring-8 が本格利用期に入り、XFEL も整備されようとしている段階で研究ニーズの十分な把握・分析が必要、
- ③技術的に多くの課題を解決する必要があり、まだ詳細な事前評価ができる段階にない、

などの指摘を受けた。上述の見直しを適切に行うためにも、物質構造科学研究所は 2005 年度の時点での①～③の指摘に対して直ちに対応すべきであったが、以下のような経緯を辿ることで対応が不十分になってしまった。

・①について、2010 年には、5 GeV ERL 実機稼働を 2025 年とし、それまでのギャップを埋める KEK-X の計画が追加になったもののすぐ消えた。2011 年の大震災後に悪化した経済状況下でようやく 5 GeV ERL 実機の予算について見直しが行われ、300 億円クラスに抑えるために 5GeV から 3GeV にエネルギーを下げるとともに実機実現時期を早めた。2013 年には 3GeV ERL 実機稼働までのギャップを埋める必要があると考え、日本放射光学会が進めていた 3GeV 蓄積リング型回折限界光源の計画に中心的役割を果たすことになった。しかし、2015 年には、3GeV ERL 実機は加速器だけでも約 430 億円と見積もられ、結局、最終的には 3GeV ERL 実機は建設せず、独自の 3GeV 蓄積リング型回折限界光源の計画に変更することになった。ERL 実機については CDR 完成後、TDR の完成に時間がかかり技術的課題が解決できていない段階での予算や実現時期の見積もりは簡単ではないものの、ERL 実機の実現時期(30 年を超えた PF 光源の延命期限)が前後するという一連の計画変更には、費用対効果の観点を含めた調査検討の甘さが指摘される。

・②については、放射光科学を主導する PF と SPring-8・SACLA の間で相補性や差別化の検討を進めることで、利用者の流動を施設側が戦略的に促していくとともに、世界動向も参考にしながら新たに対象となる利用分野や利用者層に対する準備を行っていく必要があったのではないか。また、硬 X 線を中心とした 5GeV から 3GeV に下げた段階では軟 X 線が主要な対象になったが、そのことが必ずしも明確になっていないなど、一連の計画変更時における日本全体での研究ニーズの把握・分析の甘さが指摘される。

・③については、実機の前に実証機による検証が不可欠となり、2002 年の時点から実証機の概算要求等への努力が図られた。技術的困難の多い ERL 光源を将来計画に掲げた海外の多くの施設の中で、具体的に実証機で硬 X 線光源としての実現可能性を検討しようとしたのは KEK 以外に米国の Cornell 大だけであり、cERL での実証は世界的に期待が大きかったと思われる。

しかし、cERL の試運転が可能になったのは 2013 年であり、それまでの 10 年の間に、世界では、実現可能な次世代放射光源（リング型第 4 世代光源）は ERL 光源ではなく多数の偏向磁石を配置した蓄積リング型回折限界光源に移っていた。早期の cERL 実証機の実現と課題解決によって世界を先導できた可能性もないことはないが、2010 年まで cERL の建設がずれ込んだのであれば、その前に蓄積リング型次世代光源の世界動向を把握して計画を見直していればと悔やまれる。

・ERL 実機の計画を中止し、より現実的な蓄積リング型次世代光源の計画に変更するのは妥当な判断ではあるが、世界動向から見れば遅きに失してしまった。なぜ、判断が遅れたか、なぜ、上記のような経緯を辿ったか、の原因をより具体的に考えると、大型計画に必要とされる以下のようなフェージビリティの検証が ERL 計画を進める過程において極めて不十分であったと言わざるを得ない。

⑦ Technical Feasibility（技術的实施可能性）：実証機による実証は実機に向けた不可欠なステップであるものの、電子銃の寿命・超伝導空洞の性能・所期の蓄積電流の達成・エネルギー回収率・電子エネルギーのスケーリング（MeV→GeV）の難度等を含む ERL 実機に対する技術的实施可能性に関して、現実的な放射光源用加速器としての時間軸を入れた検証姿勢が曖昧であった。

⑧ Financial Feasibility（予算的实施可能性）：建設コストおよび運転コストの見積もり、その予算を科学技術・学術政策が変化している中でどのように何時までに獲得するかに関する具体策が曖昧であり、その結果、予算的实施可能性に関する検証姿勢が曖昧であった。

⑨ Political Feasibility (Leadership)（政治的可能性）：計画全体に責任と権限をもつリーダーが不在であった。フォトンサイエンスに責任を持つ物質構造科学研究所と並列に ERL 計画推進室を置くという構造もその一因である。その結果、各種 Feasibility に対する見極めを最終的に誰が責任を持って行うかが曖昧となり、ERL 光源を PF の将来計画としないとの判断に至ったタイミングが遅きに失した主要因になったと考える。

・今後に向けては、以上のいろいろな反省点（①～③、㉗～㉙）を改善するための方策を早急に検討していただきたい。

・なお、ERL 実証機を使った開発研究は結果的に PF・PF-AR の次期計画（フォトンサイエンス）には結びつかなかったが、加速器科学の基幹技術開発及び将来につながる応用面で成果を挙げた点は評価できる。

以上。