

SPRUC

放射光科学将来ビジョン白書
中間報告

2014 年 4 月

SPring-8 ユーザー協同体 (SPRUC)

SPRUC 放射光科学将来ビジョン作業部会メンバー

雨宮慶幸（SPRUC 会長、東京大学）

濱 広幸（作業部会代表、東北大学）

高尾正敏（同副代表、大阪大学）

佐藤 衛（同副代表、横浜市立大学）

北岡良雄（同副代表、大阪大学）

足立伸一（高エネルギー加速器研究機構）

木村真一（大阪大学）

唯美津木（名古屋大学）

西野吉則（北海道大学）

若林裕助（大阪大学）

木須孝幸（大阪大学）

有馬孝尚（東京大学）

篠原佑也（東京大学）

鈴木基寛（コンタクトパーソン、高輝度光科学研究センター）

渡部貴宏（コンタクトパーソン、高輝度光科学研究センター）

山田和芳（オブザーバー、物質構造科学研究所）

横山利彦（オブザーバー、分子科学研究所）

高田昌樹（オブザーバー、高輝度光科学研究センター）

目次

要 旨	1
1 章 はじめに	4
2 章 今日の科学技術における SPring-8 の役割と将来展望	6
2. 1 SPring-8 施設の現状と将来展望	6
2. 2 SPring-8 における課題解決型利用研究成果	7
2. 3 将来の科学技術イノベーション創出における放射光源性能への期待	9
2. 4 放射光源開発の国際的情勢	13
4 章 SPring-8 次期計画に対するグランドデザインの提言	26
4. 1 光源性能	26
4. 2 放射光将来ビジョンによる施設の位置づけの階層化	27
4. 3 産業利用の将来像—産業の創出と活性化のためのグランドデザイン	28
4. 4 人材育成	29
5 章 おわりに	30

要 旨

Executive Summary

現在の科学技術や産業技術の相当部分が、原子や分子による素材の成り立ちや、それらの働きによる物質機能に依存して成立している。原子や分子の配置やそれらの働きを観察するための様々な手段は、それぞれに重要性を増しているが、その中でも放射光の特段の有用性への認識は急速に拡大しつつある。2010年代に入り、放射光の応用は次々と未開拓領域に広がってきたが、原子や分子を基本要素とする科学技術の進展とともに、この傾向はさらに一層拡大されていくこととなろう。

他方で、このような方向性を支えてきた大きな要因として、放射光源の急速な進歩も忘れてはならない。我が国では、東京大学原子核研究所での INS-SOR や、高エネルギー物理学研究所の PF を嚆矢として、SPring-8、さらには X 線自由電子レーザー施設 SACLA に至る輝かしい光源開発の伝統があり、新しい光源が新しい科学技術を拓き、拓かれた科学技術の発展により更に新しい光源が要求されるという正のスパイラル的発展が世界を牽引する形で健全に進んできた。このことにより、SPring-8 一施設のみをとっても、ユーザー数 11,000 名の規模となるユーザーコミュニティ（SPRUC）が形成されるに至った。かつて、放射光学会形成時の総数 1000 人弱のコミュニティが、二十余年の間に、十倍以上に拡大したのであり、この拡大傾向は潜在的な産業利用需要等を考慮すれば、今後とも数十年に亘って継続するものと思われる。一方でこの間、放射光学会会員数がそれほど伸びていないことを勘案すると、放射光学会と各施設のユーザーコミュニティの役割をしっかりと再考する局面に至っているのかもしれない。

この二十余年の間、我々は画期的新光源であっても歳月とともに旧式化し、より先端的な光源が先端的なサイエンスのために必要となることを見てきた。真空管の時代には、その高度化は非常に重要ではあったが、それだけではトランジスタ時代は決して到来しない。「ゲームチェンジ」があって初めて、トランジスタ時代は到来し、それが集積回路に発展したのである。しかし同時に、最先端とは言えない光源ではあっても、広範な応用分野での分析手段として利用され、その分析結果が応用分野での先端的科学を進めるために不可欠である場合が多数存在することも経験してきた。最先端光源で開発された分析手法を社会全体で享受していくためには、最先端光源が一つ存在すれば良いのではなく、そこでの成果をより多くの利用者に供するための、階層的システムを合理的に構築することが求められている。

一例として米国では、エネルギー省(Department of Energy; DOE)が硬 X 線領域での先端放射光施設としてアルゴンヌ国立研究所の Advanced Photon Source (APS)、軟 X 線領域での先端放射光施設としてローレンスバークレー国立研究所の Advanced Light Source (ALS)、新世代中型低エミッタンス放射光施設としてブルックヘブン国立研究所の National Synchrotron Light Source (NSLS) II、X 線自由電子レーザー施設として SLAC 国立加速器研究所の Linac Coherent Light Source (LCLS) を擁し、さらに必ずしも最先端ではないが多くのユーザーデマンドに応えるために SLAC 国立加速器研究所の放射光実験施設 Stanford Synchrotron Radiation Lightsource (SSRL)や、国立科学財団(National Science Foundation; NSF)がサポートする Cornell High Energy Synchrotron Source (CHESS)、および Wisconsin 大学の Synchrotron Radiation Center (SRC)を加えて、階層的システムを構築している。これらの放射光関連施設は、Cornell を除けば DOE がサポートしており、DOE が全体状況を俯瞰してアップグレードの優先度を決めているところが、我が国の状況とは全く異なっている。しかし、このような階層的システムを構築した米国でも放射光利用の多くはアカデミアのものであり、産業界を含めた社会全体がその恩恵を享受する段階には至っていない。

我が国では個々の施設が個別的に、アカデミアと産業界ユーザーへのサービスを考えており、産業利用の観点からは米国や欧州諸国より遥かに進んだ面がある。一方で、残念なことに、今まで我が国では、俯瞰的な将来ビジョンを纏めることは皆無であったといっても過言ではなく、また俯瞰的な現状分析も十分とはいえない。各施設の将来計画を放射光学会の特別委員会で議論したことはあっても、それは決して全体を俯瞰したものではなく、そのために委員会の中心課題を外れて付言的に報告書に盛り込まれた個別的内容が、マスタープランであるかのように取り扱われ、将来に対して禍根を残したことすらある。現状分析や将来ビジョン策定を俯瞰的観点から行い、各施設での重複を極力なくすことによって、資源の有効利用を図ることが出来れば、科学技術に於いての米欧との熾烈なトップ争いの中で一頭地を抜くことが可能になると同時に、産業応用の進化によって、まさに現在求められている「イノベーション」を産み出し続ける母体を構築することが可能となる。このときに、俯瞰的に階層構造を構築した上で、その最適運用を図る役割を文部科学省と各施設がどのように分担するのが早急に検討される必要がある。

そのような状況下で、今般 SPRUC に於いて「放射光科学将来ビジョン白書」を纏める機運が生じたことは、時宜を得た一種画期的なことであり、関係者の労を多とするところである。一方で、PF 建設の時にも、また SPring-8 建設の時にも既に経験したように、

光を見る前に議論したことの多くは、あとから振り返れば「旧世代の延長」であった。このことを踏まえ、将来構想は一旦出来上がったなら金科玉条とするのではなく、進歩のスピードの速い現在においては、三年後には陳腐化してしまうものと考えておくべきである。その意味では、変化の方向性を共有しつつ、個々の方法論に関しては固定観念を持たないことが重要である。

本白書は、あくまでも 2014 年時点での SPring-8 ユーザーコミュニティの観点をまとめたものであり、今後、様々な議論に発展していくベースとなるものである。なぜなら、現状であっても非常にオープンな利用者コミュニティは将来計画が実現する時点では、その構成員の多くが入れ替わっている可能性があるからである。すなわち、現在のコミュニティ構成員のみで将来を決めてしまうことは、将来新たに参入する科学技術分野の可能性を縛ることになりかねないため、これらの可能性をも十分に考慮した上で、将来の方向性を決めていく必要がある。

SPRUC 会長 雨宮慶幸

1 章 はじめに

SPring-8は1997年の供用開始以来、世界最高性能の放射光源として様々な分野で利用され、高エネルギー光量子科学（X線科学）を牽引する世界的拠点の役割を果たしている。ナノの世界を観察し、また内殻レベルを探る光であるX線は、物質科学、生命科学、エネルギー・環境科学、地球科学、考古学・科学鑑定など多種多様な学術・科学技術分野に、基礎・応用を問わず強力な観察・分析ツールを提供する。SPring-8は、このような多様な研究分野で利用される課題解決型研究基盤として、この15年余の間、世界のトップランナーとしての役割を果たしてきた。

競争の激しい最先端科学技術分野で、基盤的研究装置がこのように長い間、世界のトップランナーであり続けたのは稀有なことである。これは、世界の趨勢がSPring-8以降、SPring-8で完成された真空封止型アンジュレータ技術を用いて、蓄積リングのエネルギーが3 GeV程度の中型施設で8 GeVのSPring-8とほぼ同等の性能を出す方向に向かったためである。スイスから始まったこの動きは放射光ユーザーの継続的拡大と相俟って、ヨーロッパでは大型放射光施設としてEU全体で整備したESRFとは別に各国が個別に中型放射光施設を建設し、自国独自の科学技術振興と産業振興に利用する潮流が出来上がり、ヨーロッパ以外でも、中国、台湾、韓国、インド、ブラジルなど、多くの新興工業国で、複数の放射光施設を国家の代表的研究機関として整備する動きが出ている。これは放射光の幅広い応用価値が認められたものであり、世界各国が競って中型放射光施設の開発高度化に努めた結果、最近では中型でも現状のSPring-8を凌駕する放射光施設建設が可能となった。一方で、中型放射光施設の性能向上に寄与した新技術を、SPring-8のような大型放射光施設に適用して発展させると、更に高度な光源が実現できることも明らかになり、SPring-8とほぼ同時期に整備されたESRFやAPSでこのような「究極蓄積リング光源」に向けての検討が進められている。

放射光研究が始まった40年前には、世界中の数か所の施設で放射光を様々な研究分野に活用し、逆にそのために放射光を改良する作業を関係者が一丸となって推進していた。しかし、現在は、多くの施設で多くの研究者がそれぞれの目的に応じて放射光利用を進めている。利用研究者人口の増大や利用分野の拡大は研究開発を高速化する一方で、分野ごとに施設に対する異なる要求を生じさせる。例えば、放射光施設を高級汎用分析装置として利用する立場と新規計測法開発の舞台として使う立場では、施設に対する要求は全く異なるものとなるのは当然であるが、幅広い科学技術分野での利用が進んでいる放射光科学ではこの状況が日常的に発生している。

SPring-8の利用者も同様の状況にあるが、長期的視野に立てば今日の最先端計測手法が十年後に汎用分析手法となることは過去に多くの例があり、将来放射光光源にとって

代わりうる革新的技術が生まれるまでは、常に最先端計測手法を産み出しうる最先端施設としてSPring-8を維持発展させていくことが、我が国の科学技術の競争力を増進させることになる。一方で、SPring-8が産み出す数々の分析手法を他施設においても漸次広く波及させるという、真の意味での汎用化が科学技術の裾野を広げ、産業利用を推進するためには肝要である。この汎用化はより大きなコミュニティのニーズを満たすことにつながる。これら2つの観点に基づき、次世代の放射光科学戦略を策定していくことが重要であろう。このように考えれば、将来ビジョンは、一施設で閉じるものではなく、日本全体の放射光計画が時空を俯瞰して議論されるべきである。

本白書では、このような視座のもと、大型放射光施設SPring-8が次世代においてもX線科学の世界的拠点としての地位を維持し、さらに日本の放射光科学を施設間で連携して総合的に推進するためのグランドデザインを、ユーザーの視点を中心に纏めることを意図した。

SPring-8ユーザー協団体（SPRUC）は、大型放射光施設SPring-8のユーザー組織として、登録施設利用促進機関や施設所有者である理化学研究所との密接な連携のもと、SPring-8の利活用・高度化・最適化・科学技術的進展に協力することを目的として発足した。そのSPRUCにおいて、日本の放射光科学のグランドデザインに関する議論および意見集約を行い、それを踏まえてSPring-8の将来計画に対する白書を纏めるべく、2013年3月に作業部会「放射光科学将来ビジョン」が設置された。これは、各施設が個別に将来計画を策定してきたこれまでとは大きく異なり、日本全体の放射光計画「グランドビジョン」を策定し、それをもとに、SPring-8の将来計画についてのグランドデザインを述べるというものである。このグランドビジョンは、基礎研究から産業利用に至る広範なユーザー層を持つ我が国の光科学（Photon science）が、急速に発展する世界の研究開発競争の中で屹立することを目的とし、そのために不可欠な人材育成も含めて策定するものである。その意味で、会員が1万人を越え、裾野の広いSPRUCにおいてこれらを議論する意義は深い。

なお、これまで拡大を続けきたX線科学やその他の放射光関連分野が、今後も長期にわたり広範かつ積極的に研究されていくことに疑いの余地はなく、更に、これまでとは全く異なった分野で新たに利用されていく期待は非常に高い。そこで、本白書では、SPring-8の「次期」計画に限らず、また、現在の放射光科学の枠組みに捕われることなく、長き将来にわたる科学・産業の展望に基づき、提言を行いたい。

2 章 今日の科学技術における SPring-8 の役割と将来展望

2. 1 SPring-8 施設の現状と将来展望

兵庫県西播磨の SPring-8 サイトは、大型放射光施設 SPring-8、X 線自由電子レーザー施設 SACLA、ニュースバル放射光施設、真空紫外自由電子レーザー SCSS を擁する高エネルギー光子科学（X 線科学）の世界最高の研究拠点である。SPring-8 サイトの規模と総合性能は、フランス・グルノーブルの European Synchrotron Radiation Facility (ESRF)、アメリカ・シカゴのアルゴンヌ国立研究所 Advanced Photon Source (APS)、ドイツ・ハンブルクの DESY などの世界第一級の X 線科学の研究拠点を凌駕する。大型放射光施設 SPring-8 は、この拠点の中核施設として、放射光専用リング世界最大の周長と世界最大規模のビームライン設置可能数をもって年間 1 万 5 千人を超える利用者のニーズに応えるとともに、世界最先端の放射光技術開発拠点としての役割を担ってきた。たとえば、SPring-8 で開発された放射光技術開発で随一のブレークスルーとみなされる“真空封止アンジュレータ”は、2000 年代以降の海外の中型放射光施設ラッシュと X 線自由電子レーザー SACLA を生み出した技術的要因である。ここでは、世界競争が激化する放射光科学分野において、供用開始後 16 年が経過した現在でもなお、世界トップレベルを維持し続ける SPring-8 施設の概要および現状を示すとともに SPring-8 サイトにおける大型リング光源としての施設の将来展望を述べる。

SPring-8 は、周長 1.4 km の電子蓄積リングから得られる放射光の利用施設であり、1997 年 10 月の供用開始以来、15 万 4 千人以上の研究者・技術者が利用している。2013 年現在、放射光利用研究を行う設備として 56 本のビームラインが稼働中であり、1 本のビームラインが建設・調整中である。2012 年度の総運転時間は 5,063 時間であり、その内の 4,156 時間を利用者に提供している。2012 年度の利用実施課題数は 2,007 件であり、累計利用者数は 15,249 人である。2011 年度の出版論文数は 901 本であり、これまでに 9,000 本以上の論文が成果として公表されている。

SPring-8 は、真空封止アンジュレータ、低エミッタンス・ラティス、トップアップ運転など、重要な基幹技術を独自のアイデアで最適化し、ユーザー運転に耐えうる、安定・安全・確実な技術として確立させ、光源の世界最高性能を維持してきた。例えば、真空封止アンジュレータは、X 線を発生させるための永久磁石列を超高真空中に配置する独創的なアイデアにより、高エネルギーかつ強力な X 線の生成を可能とした。低エミッタンス・ラティス技術は、蓄積リング内の電子ビームを細く絞ることで高輝度な光の発生を可能とした。これらの技術は、2000 年代以降に建設された海外の中型放射光施

設で採用され、より小型の蓄積リングにおいて SPring-8 と同等に近い高輝度 X 線の利用を実現した。トップアップ運転は、常に最大出力の放射光の安定利用を可能とした。SPring-8 では、任意のタイミングで入射することで高い安定度を誇るトップアップ運転と、低エミッタンス・ラティスとのコンビネーションによって、電子寿命に大きく左右されることなく高品質かつ高安定度なビームをユーザーに提供するシステムを早くから実現し、洗練させてきた。こういった技術は徐々に世界中の放射光施設で採用されてきているが、未だにこれら SPring-8 の技術は世界の最高レベルを維持している。この事実は、我が国が有する SPring-8 が世界最先端の技術開発拠点であることを示している。

今後 10 年以内を目処に、これまでの技術開発実績と世界情勢、利用研究の推移から施設側より大規模なアップグレードである「SPring-8 次期計画」が提案されている。現有の加速器を、世界に例のない蓄積リング型「回折限界光源」(高コヒーレンス光源)へ改造し、SPring-8 の光源性能・輝度を 100 倍以上に高めることを目標としている。これは、発生した X 線の大部分がコヒーレントな究極の光源であり、現状の 100 倍以上の効率で高品質のコヒーレント X 線を利用できるようになる。その上、施設の最適化により消費電力や運転コストは現 SPring-8 よりも削減できる。したがって、この回折限界蓄積リングは環境に配慮した究極の効率をもつ新しいコンセプトの X 線源である。光源に「ゲームチェンジ」をもたらす SPring-8 次期計画に伴い開発される新たな基幹技術は、現 SPring-8 での技術と同様、将来の世界潮流となるであろう。現状の 100 倍の輝度の実現は、光学素子、検出素子などの高度化にも技術革新をもたらす。これにより、光源性能向上以上の研究展開へと発展することを期待したい。

2. 2 SPring-8 における課題解決型利用研究成果

SPring-8 は、我が国の研究者がトムソン・ロイター等でノーベル賞候補者として名を連ねる強相関物質科学、超伝導体、多孔性材料、ナノカーボン材料、タンパク質などの基礎科学の発展を支えるとともに、エコタイヤやインテリジェント触媒など我が国の基幹産業を支える、計測科学の基盤施設である。これをもたらしているのは、2.1 で前述した光源の絶え間ない高度化に加えて、光源性能を徹底的に使い尽くすための実験技術の開発・高度化とユーザーの要望に応じて多種多様な実験装置を設置可能な施設の規模にある。利用者の広がり、古くから放射光利用を進めてきた物理・化学・地学・生命科学の枠を大幅に超えて、医学、エネルギー・環境、産業、文化財などこれまで放射光計測が行われてこなかった分野へと広がり続けている。ここでは、現在までの SPring-8 の利用研究を示し、将来 SPring-8 に期待される利用研究を展望する。

物質の構造や電子状態と機能との関係を理解し新しい物質のデザインにつなげる物理・化学を包含したマテリアルサイエンスにおいて、高輝度放射光源を利用したX線回折やX線分光研究は、先端材料の開発・高度化において重要な位置を占める。粉末X線回折により、次世代電子素材としても期待されている金属内包フラーレンや各種ナノカーボン材料が構造決定され、デバイス応用が進められている。日本発のエレクトライド $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ セラミックス材料の金属-絶縁体転移のメカニズムが構造的な要因から解明され、その後希少金属からユビキタス元素への転換につながる新材料の開発や鉄系高温超電導体の発見につながった。また、太陽電池、二次電池（リチウムイオン電池）、燃料電池などのエネルギー源の素材や電極触媒にも活用されている。硬X線の高い透過力を利用して、発電条件における電極触媒の局所構造や劣化機構の解明が行われ、革新型蓄電池先端科学基礎研究事業（通称：RISING）をはじめとした次世代の電池材料開発の基盤情報として提供されている。

SPring-8 の高品質な放射光特性を利用したマテリアルサイエンスの革新も著しい。パルス光の高速時分割測定により GeTe 系 DVD の相変化が解明された。世界に先駆けて開発された硬X線光電子分光（HAXPES）法により、高温超伝導物質などの強相関電子系の研究やデバイスの深さ方向の構造情報の抽出が進められている。その他にも、共鳴X線回折、スピン偏極走査トンネル顕微鏡、磁気円二色性測定は、スピントロニクスなどの新しい原理に基づくデバイス開発に知見を与え続けている。数ミリ電子ボルトという世界最高のエネルギー分解能を誇る非弾性X線散乱実験により、格子振動等に関する知見が得られ、新規高温超伝導体 MgB_2 の機構の解明に繋がる成果などが得られた。

地球内部環境を人工的に再現した高温高压下の研究で、SPring-8 は世界を先導する成果を数多く挙げている。高温高压X線回折で、下部マントルと外殻との間にある D'' 層が、 MgSiO_3 ポストペロブスカイト相であることを解明し、これまで謎であった地震波速度の不連続性や異方性を矛盾なく説明した。高温高压下での地震波速度の測定により、マントル深部の主要鉱物の特定をするなど地学分野の教科書を書き換え得る知見の創出に貢献し続けている。

細胞や細胞小器官を取り囲む生体膜に埋められた膜タンパク質は、物質の取り込みや排出、シグナル伝達、エネルギー合成などの重要な生命機能に関与し、その構造解明は最重要課題として進められてきた。SPring-8 では、ロドプシン、カルシウムポンプ、ギャップ結合チャネルなどの膜タンパク質の構造が解明された。ロドプシンの論文の引用数は既に 3600 回を超えており、医薬品開発への知見を与えつづけている。また、光合成において光エネルギーを利用して水を分解し、酸素を発生させる「光化学系 II 複合体」の構造も SPring-8 で解明された。これは、光合成反応の機構の解明や人工光合

成に繋がる成果で、アメリカの科学雑誌 Science によって 2011 年に得られた画期的な 10 の科学成果「Breakthrough of the Year 2011」の 1 つに選出されている。コヒーレント X 線回折を利用した可視化法により、世界に先駆けて、細胞や染色体などの内部構造のナノメートル分解能での観察を実現するなど新たな計測手法の開発も続けられている。

SPring-8 における産業利用の発展は、数の増加だけではなく、新たな業種の参入を常に伴っており、生活に密着した多岐にわたる分野の研究成果創出につながっている。代表的な成果として、軽量気泡コンクリート建材の材料評価法の確立（旭化成、旭化成建材）、ナノ粒子解析による低燃費タイヤ開発（住友ゴム工業、東大、JAMSTEC、FSBL、JASRI）、毛髪損傷構造の可視化（カネボウ化粧品）、燃料電池電極触媒劣化現象の直接観測（NEC）、自己再生機能を備えた排ガス浄化触媒の開発（ダイハツ工業、日本原子力研究所）、歯の再石灰化を促すガムの実用化（江崎グリコ）などが挙げられる。

SPring-8 では、先端的な放射光技術が基礎的な学術利用を産み、そこで得られた材料機能や生体メカニズムに関する知見を活用して産業利用が導かれる学術と産業の循環により高度な産業利用を発展させてきた。これを推し進めた独創的なプロジェクトとして、2010 年 2 月に稼働を始めたフロンティアソフトマター開発産学連合体専用ビームライン（BL03XU）がある。これは、複数の企業の参画を受けて、ソフトマター研究の産学官の拠点となっている。

2. 3 将来の科学技術イノベーション創出における放射光源性能への期待

生体・物質機能の本質に迫る、生体で言えば電子、原子、タンパク質分子から細胞、組織などの階層的なマルチスケールの構造や電子状態を、それぞれの階層の応答時間の時間スケールで解明することは、物理・化学・生物・地学・農学・医学など科学者の夢を実現し、無機から高分子材料、創薬など幅広い産業利用にも革新をもたらす。この究極の目標の実現には、放射光源性能と計測技術開発の持続的な発展が不可欠である。SPring-8 次期計画が、この目標へのマイルストーンとなり、それによって計測技術の飛躍的な発展と利用研究の拡大、それに応える施設の高度化が適切に行われることを期待する。

日本学術会議が取りまとめた「今後のライフサイエンス・ヘルスサイエンスのグランドデザイン」（2008 年）、「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」（2011 年）では、2020 年から 2030 年代の科学技術において、光や量子ビームによる生体や新機能材料のメカニズム究明が、イノベーション創出の大きな柱として位置づけられている。なぜなら、ライフサイエンスやマテリアルサイエンスにおいて、マクロに現れる生体機

能や物性は、生体細胞内あるいは材料のミクロな構造と電子状態に由来し、その可視化には量子ビームが必須ツールであるためである。たとえば生体では、タンパク質分子から細胞、組織といった、構造サイズも時間応答も異なる多段階の階層構造全体が機能を司っている。今日の実験手法で観察できるのは、この時空間の階層構造の断片的な情報にすぎない。とりわけ、動的な観察手法はその適用範囲が限られている。生体および材料機能の発現を適切な時間・空間スケールで観察することにより、未解決の科学的課題の解決が大きく進展する。

(1) ライフサイエンス

ライフサイエンスで、分子レベルでは、タンパク質の高次構造解析データを利用した低分子医薬・分子標的薬・RNAiなどの核酸医薬の開発、および光合成機構の完全解明と人工光合成技術の開発などが重要な課題として挙げられる。これら結晶化が難しいタンパク質の構造解析は、放射光の技術革新が鍵を握る。光源の進化により、X線自由電子レーザーで可能となったシリアルフェムト秒 X線結晶構造解析のような技術革新が継続的に行われていくことが強く望まれる。また、細胞や組織をまるごと精密に観察する細胞内分子イメージングが渴望されている。究極的には、細胞内のタンパク質の構造ダイナミクスに基づいた細胞・生体機能の理解が可能となる。さらに、従来のレントゲン撮影の感度を更に上げた非侵襲医療技術の開発も急務である。

光源の高輝度化により、タンパク質では試料の放射線損傷が問題になってきている。タンパク質、染色体などの細胞内組織、細胞全体、組織といった生体の各階層において、損傷の強度や分布を制御して導入し、それに対する生体反応を観測していくことで、突然変異やがん化の原因を調べる研究につながる可能性がある。放射光の照射による損傷を階層的に観測しつつ積極的に応用することについて、SPRUC次期研究会で設置予定の生命科学分野に属する研究会での議論が始まっている。

上記の研究を遂行するための放射光ビームの特性は、ナノメートルからセンチメートルの範囲でビームサイズが可変であり、またビーム強度も制御可能であることが要求される。走査型のイメージングとともにコヒーレント回折イメージングや、屈折コントラストイメージングの併用が想定されることから、高い可干渉強度と、マイクロラジアン程度のビームの平行度が必要である。これらのビーム性能を得るには、SPring-8次期計画で検討されている高コヒーレンス光源が最も有望である。また、試料の長期保存が困難な生体材料では、利用機会を増やすための施設の運営・整備も重要である。

(2) ソフトマターサイエンス

ソフトマターサイエンスは、生体系と近い構造をもつ材料系を対象としている。この分野の将来においては、材料と生体の境界は最終的には消滅し、生体機能を模した材料系の創製が展望されている。具体的には、生体機能を模倣した高分子材料の開発と階層システムの構築、革新的分子システムの創成、分子シンセサイザー等がテーマとして挙げられる。このような研究において鍵となるのが、上述した時間、空間領域における階層構造の解明である。これは、原子スケールから生体スケールまで広い空間スケールでの観測を可能とする放射光 X 線によって可能となり、時空間のマルチスケール解析が鍵となる。

高分子膜と液面の濡れ性、タイヤ等での摩擦など機能と直結する原子スケールの構造を原子レベル機能発現の時間スケール（数十フェムト秒）で観測するには、現状の SACLA の 100 倍の光子量のパルスを数十フェムト秒間隔で得る必要がある。これには届かないものの、SPring-8 次期計画のスペックでは現在の 100 倍に向上した位置分解能で分子鎖の運動（時間スケールはピコ秒）などが観測可能になる。これだけでも既存のソフトマターサイエンスからの進展は計り知れない。

(3) マテリアルサイエンス

マテリアルサイエンスにおいても物質中の階層構造を理解することにより、新機能物性の解明と制御が期待できる。この目標には、高温超伝導体、分子性導体、量子スピン系、強相関電子系、マルチフェロイック物質、量子ホール系、グラフェン・ナノチューブ、磁性半導体、ソフトマター、光電材料、熱電材料、メタマテリアル等幅広い物質系が対象として含まれる。量子プローブである X 線による電子状態および構造解析の精緻化により、この目標が達成できる。また、高温超伝導体やスカルミオン格子等に見られるナノメートルから数 10 ナノメートルの領域、つまり、バルクとミクロの中間領域であるメゾスコピック領域の秩序構造を直接観察することも重要である。このためには、高コヒーレント光源から得られる極めて明るい X 線ナノビームが有用なツールとなる。相転移前後での非平衡状態や励起状態のダイナミクスにも注力すべきである。これら新機能材料の機能発現機構の解明により、室温超伝導の実現、新たな量子機能に基づく新しいエネルギー変換物質系の開発等（電磁、光電、熱電変換）、超省エネルギーかつ超高速な情報蓄積・転送技術といったイノベーションに繋げられる。さらには、物質合成時に強力な放射光を照射することによる、新たな物質相の生成が検討されている。強力なナノビーム照射によって母物質を空間選択的、元素選択的に活性化する、または、欠陥を導入した状態で物質合成を行う手法などが開発されれば、これまでに得られなかった機能を持つヘテロ構造材料の創成を実現できる。

上記の研究を遂行するための放射光ビームの特性は、ナノメートルからミリメートルの範囲でビームサイズが可変であり、またビーム強度も制御可能であることが要求される。加えて、軟X線から硬X線の広い領域でエネルギーが可変であること、ミリ電子ボルト程度の高いエネルギー分解能での測定が行えること、偏光が自在に制御できること、ピコ秒程度のパルス時間幅を持つことなどその要求は多岐にわたる。これらの要求されるビーム性能のうち、単一の特性については、SPring-8 次期計画で検討されている高コヒーレンス光源と、3 GeV クラスの中型高輝度リングを併用することで満たすことができる。特性の複合利用には 3GeV リング、SPring-8 次期計画をも凌駕する将来の高輝度光源が必要となる。

将来は、究極的な特性をもつ X 線ビームの利用が可能となり、上述した究極の目標が達成されることを期待したい。すなわち、空間的には X 線の波長に相当する 0.1 nm の分解能、時間的にはフェムト秒の分解能をもつ可干渉かつ 1 電子の挙動を観測しうる光子数を持った X 線ビームの実現を望む。これらのビーム特性が実現すれば、空間的にはサブナノメートルからセンチメートルまで 8 桁のダイナミックレンジ、時間的にはフェムト秒から日単位まで 20 桁のダイナミックレンジでの構造と電子状態の観測を行うことができる。これらの観測は、非周期構造、非同期現象に対して適用できることが重要であり、これによって真の意味でのマルチスケール解析が実現する。この実現には、SPring-8 サイトに設置された蓄積リング光源 SPring-8 と X 線自由電子レーザー SACLA の相補利用と両光源の持続的な高度化による発展が必須である。現在、SPring-8 と SACLA においてナノメートル空間分解能での先端イメージング計測の開発や SACLA におけるフェムト秒の時間分解能での計測など究極の目標に向けての要素技術の開発が進められている。SPring-8 次期計画によって、これらの技術は基盤化され、新たな技術の萌芽が期待できる。この基盤化と萌芽の循環を SPring-8 サイトで実現したい。一方で、こうして SPring-8 サイトで基盤化された技術を、学術および産業利用に幅広く臨機応変に活用するための受け皿となる施設が望まれる。現状、SPring-8 と他施設の性能差が大きすぎるため、この役割を担いうるのは海外施設のみである。その海外施設が現状の SPring-8 では届かない軟 X 線領域の光子量の増大によって軟X線顕微鏡や角度分解光電子分光、非弾性散乱などで世界に冠たる成果を上げていることは周知の事実である。光子量の増大による技術革新も進んでおり、論文中には SPring-8 の 100 倍の光子数で実験可能との記載もみられる。利用研究でも、日本が得意とする超伝導や強相関電子系に関する日本発の共鳴散乱法による成果が海外の軟 X 線光源で実現される、創薬企業の欧州利用、自動車・ソフトマター産業の海外利用など

SPring-8 で先端 X 線光源の威力を知った学術・産業ユーザーの海外利用が著しくなり、特に軟 X 線領域での日本の技術と人材の空洞化がすでに始まりつつある。このことから新超伝導体の発見や独自産業の開拓などの海外流出を避けるべき科学技術の課題を柔軟に受け持てる施設を要望したい。この目的のためには、現在の SPring-8 に準ずる光源輝度を有し、一定数のビームラインが設置可能な規模の施設—現在提案されている東北放射光計画における 3 GeV リング相当—が必要である。これにより、異なる性格を持つ複数施設の有機的利用による放射光計測技術の開発・基盤化・活用、さらには萌芽というサイクルが生み出される。これは将来的に、天然資源が乏しく、知の創出と活用が要求される我が国の課題を本質的に解決する端緒を開くだろう。

2. 4 放射光源開発の国際的情勢

SPring-8 は 1997 年の供用開始以来、ESRF [1]、APS [2] と共に、世界 3 大放射光施設の 1 つとして世界の放射光科学を牽引してきた（表 2-1 参照）。これらの 3 大放射光源は、10~20 keV 以上の硬 X 線を発生すべく、電子エネルギーは 6~8 GeV に設定され、その硬 X 線領域における輝度が 10^{20} 程度を達成するため、リングの周長は 844~1436 m が採用された。放射光の輝度を上げる（コヒーレンスを上げる）ためには電子ビームの質「エミッタンス」を小さくする必要があるが、エミッタンスは電子エネルギーの 2 乗に比例し、リングの周長の 3 乗に反比例するため、硬 X 線を発生すべく電子エネルギーを高くする分、周長を長く取る必要があるからである。また、この周長は、1 つのリングで 50 本以上のビームラインの提供を可能とし、広範な地域のユーザーを引き受ける放射光施設として、その役割を果たしてきた。

2000 年台に入ると、高性能な中エネルギーリングが世界各国で計画・建設ラッシュとなった（図 2-1）。2001 年の Swiss Light Source（スイス、2.4 GeV）[3] を皮切りに、2007 年に Soleil（フランス、2.75 GeV）[4] と Diamond（イギリス、3 GeV）[5]、2009 年には上海光源 SSRF（中国、3.5 GeV）[6]、2010 年に ALBA（スペイン、3 GeV）[7] といった中エネルギー高性能リングが台頭し、最近では、TPS（台湾、3 GeV）[8] や NSLS-II（アメリカ、3 GeV）[9] が 2014~2015 年の運転開始に向け、現在建設を行なっている。表 2-1 に示される通り、これらの光源は SPring-8 と電子エネルギーは大きく異なるものの、電子エミッタンスや対象スペクトルにおける光強度という意味

では SPring-8¹と同程度に達するようになった。その背景には、アンジュレータ技術の進化（短周期化）や、トップアップ運転の確立などがある。

更に、2009 年から DESY（ドイツ）が電子エネルギー 6 GeV という高エネルギーにおいて、エミッタンスが 1 nm.rad と SPring-8 を凌駕する大型放射光施設 PETRA-III [10]の供用運転を開始し、もはや世界 3 大放射光施設という位置づけも成立しなくなった。

ただし、ここまでの放射光源は、SPring-8 と同等か若干上回る（小さい）程度の電子エミッタンスであり、いわば世界が SPring-8 の性能に追いついた 15 年余であった。しかし、現在スウェーデンで建設が行われている MAX-IV [11]やブラジルで建設が開始された SIRIUS [12]は、現在の SPring-8 を 1 桁も上回るサブナノエミッタンスの光源性能を目標としている（図 2-2）。また、ここ数年、SPring-8 をはじめとする世界中の主要施設が、「究極蓄積リング光源」= Ultimate Storage Ring (USR) あるいは「回折限界リング」= Diffraction Limited Ring (DLR) と呼ばれる次世代放射光源の検討を開始している。SLAC は PEP-X[14]、APS は APS-U、ESRF は ESRF II などといった計画があり、これらの目標スペックは様々で現時点での動向は流動的だが、いずれも水平方向の電子エミッタンスが硬 X 線の回折限界と同程度に達する「究極の」放射光リングの可能性を模索し、検討が進められている。また、現在の主要放射光施設だけでなく、ロシアや中国など、新たに USR/DLR を目指す検討案も枚挙に暇がない。

このように、より高品質な光の生成を目指す各国間の競争は、既に SPring-8 の性能を凌駕する領域に達し、更に、今後世界で建設されていく光源計画は、次世代放射光科学を睨んだ新たな領域への到達を目論んでいる。SPring-8 の次期計画 Preliminary Report でも指摘されている通り[15]、2 桁以上輝度が上がるような光源性能の向上は、単なる現状の放射光科学の延長線上ではなく、研究のスキームに質的な変化を及ぼすこと（パラダイムシフト）を可能とし、上述のような各国の将来計画案は、本邦の放射光科学の競争力を持続する上で無視出来ない存在となってきた。

更に、世界の光源開発は、蓄積リング型以外にも存在する。まず、アメリカの Cornell 大学や日本の KEK を中心とし、Energy Recovery Linac (ERL) と呼ばれる Linac ベースの光源開発が行われている。この光源は蓄積リングとは異なり、完全 CW の超伝導リナックからの超低エミッタンスビームをリングで周回させ、電子ビームが熱的な平衡状態に達する前に光を発生させる回折限界光源である。基本的にビームは一度だけの

¹2014 年 5 月現在の SPring-8 は、電子エネルギー 8 GeV、エミッタンス 2.4 nm.rad となっている。

リング周回で捨てられる為、その膨大なビームパワーをエネルギー回収することが特徴的である。その実現には、高繰り返し且つ高性能な電子源・加速システムの開発、そしてビーム安定性の確保等が鍵だと考えられ、Cornell 大学や KEK を中心にその実現に向けた要素開発や詳細な検討が進められている。ただし、エネルギー回収するものの超伝導加速器の冷凍機が必要とする電力は蓄積リングよりも大きいことが予想され、また実現した場合に発生される X 線のパルス幅が短いこと (~ 100 fs) など、蓄積リング型光源と ERL 型光源では様々な点で相違があり、両者は単純に比較される対象ではなく質的に異なる光源という解釈も出来る。現状では、ERL は、実現に向けた要素開発の段階であり、本邦の放射光計画における位置づけについては、3 章を参照されたい。

また、全く別の光源案として、レーザー加速をベースにした光源案が昨今注目されている。レーザー加速とは、テラワット～ペタワットという高いピーク強度を持つフェムト～アト秒オーダーの超短パルスレーザーをガスに照射することでプラズマ振動を誘起し、そこから相対論的電子バンチを生成する手法である[14]。この加速手法により生成された電子バンチを、アンジュレータに打ち込む、あるいはプラズマ振動の横方向振動（レーザーアンジュレータ）を利用するといったプロセスを経ることで、 $\text{eV} \sim \text{keV}$ オーダーの極短パルス X 線を発生することが期待されている。現段階では、所望の電子バンチをいかに安定に発生させるかという研究段階であり、こういった加速機構の更なる研究を進めながら、併行して次のステップである放射機構の開発検討が行われる段階に来ている。

現在開発中の光源として更に特筆すべきは、Next Generation Light Source (NGLS) と呼ばれる新案である。これは、アメリカ Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) から提案されたもので [16]、XFEL を高繰り返し、且つ多ビームラインにすることで、より多くの光をユーザーに提供出来ることを特徴とする。現在アメリカでは、この NGLS を SLAC の将来計画に組み込むことが検討されており、ビーム加速の繰り返しは 1 MHz でこれをスイッチングすることによって 20 本の軟 X 線の FEL ビームラインへ同時供給することを目標として掲げている。NGLS が実現した場合、XFEL で生成される非常に高品位の光が多くのビームラインに提供されるばかりでなく平均パワーも蓄積リングのそれを越える可能性があり、その潜在能力は高い。

以上のように、現在世界では、10～20 年後の放射光科学を見据え、蓄積リング型次世代光源 (USR/DLR)、ERL、プラズマ加速、NGLS といった様々なアプローチが検討され、今後は、現在の SPring-8 の性能を何桁も上回る、あるいは全く別の長所を持つ光源の実現が予想される。こういった新光源の実現に向けたアプローチは多岐に及ぶが、基本的な方向性は、コヒーレント、高繰り返し、高輝度／フラックス、短パルス化

などであり、高輝度コヒーレント CW 光源のような理想的な光源の実現に向けた視野の広い議論が肝要である。ただし、各計画にはそれぞれ異なった背景（計画年、既存の施設、立地、予算等）があり、各々の最適解はその背景に依存することに留意が必要である。具体的な例としては、SPring-8 サイトには SACLA が既に稼働しているという特筆すべき特徴があり、更に、日本は 2011 年 3 月 11 日の大震災を経て、これまで以上にエネルギー問題が重視されているというような状況を踏まえた場合、例えばアメリカの Department of Energy (DOE) がアメリカの将来計画として注力しつつある NGLS が、SPring-8 の将来計画として最適であるとは限らない。SACLA がコンパクトな XFEL 光源という我が国の特色を生かした計画で成功を収めたように、省エネルギーをはじめ他国には希薄な我が国独自の観点での計画立案が重要であると考えられる。また、SPring-8 は既に産業利用を含めた多くのユーザーが実験を行っており、アップグレードがこれらに与える影響についても考慮することは必須である。

施設側である理化学研究所は、既にこういった事情を考慮した上で数年間にわたり計画の策定・公開を行っているが、SPRUC はこれらを注視しながら、適宜ユーザーとしての意見を主張し、施設側と密接に連携していくことが肝要であると考えられる。

表 2-1 世界の放射光施設・計画（抜粋）性能比較（目標値含む）

表 2-1 世界の放射光施設・計画（抜粋）性能比較（目標値含む）

光源名 (国)	電子エネルギー (GeV)	周長 (m)	エミッタンス (nm.rad)	電流 (mA)
SPring-8 (日本)	8	1436	2.4	100
APS (アメリカ)	7	1104	2.5	100
ESRF (ヨーロッパ)	6	844	4	200
SLS (スイス)	2.4	288	5.6	400
Soleil (フランス)	2.75	354	3.7	400
Diamond (イギリス)	3	562	2.7	300・500
SSRF (中国)	3.5	432	3.9	200・300
ALBA (スペイン)	3	269	4.3	400
TPS (台湾)	3	518	1.6	500
PETRA-III (ドイツ)	6	2304	1.0	100
NSLS-II (アメリカ)	3	792	<1.0 (planned)	500 (planned)
MAX-IV (スウェーデン)	3	528	0.3 (planned)	500 (planned)
SIRIUS (ブラジル)	3	518	0.28 (planned)	500 (planned)

(注) PEP-X、ESRF upgrade、APS-Uなどは現在流動的であるため記載せず。本文参照。

(注) PEP-X、ESRF upgrade、APS-Uなどは現在流動的であるため記載せず。本文参照。

世界の主な放射光施設

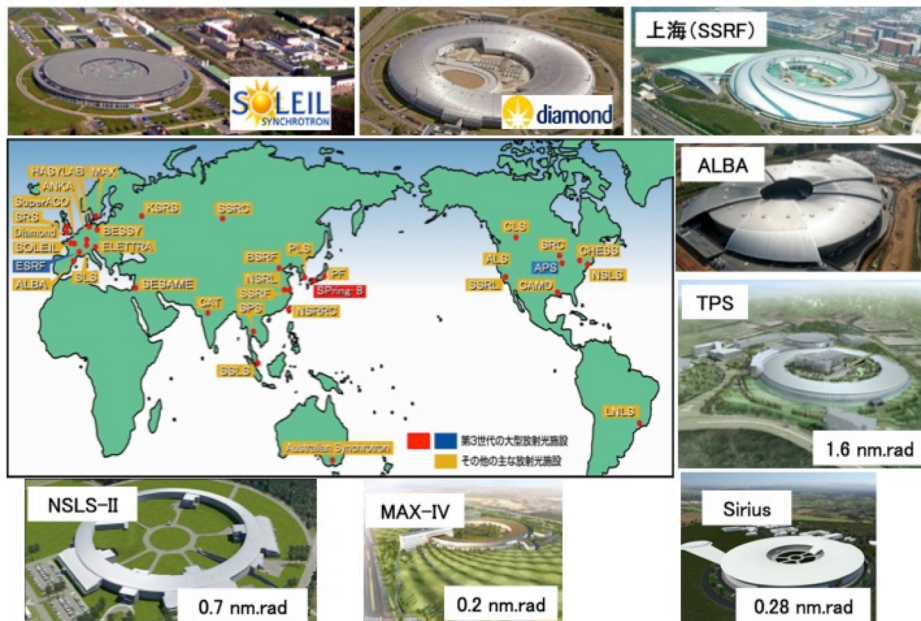


図 2-1 世界の主な放射光施設と計画

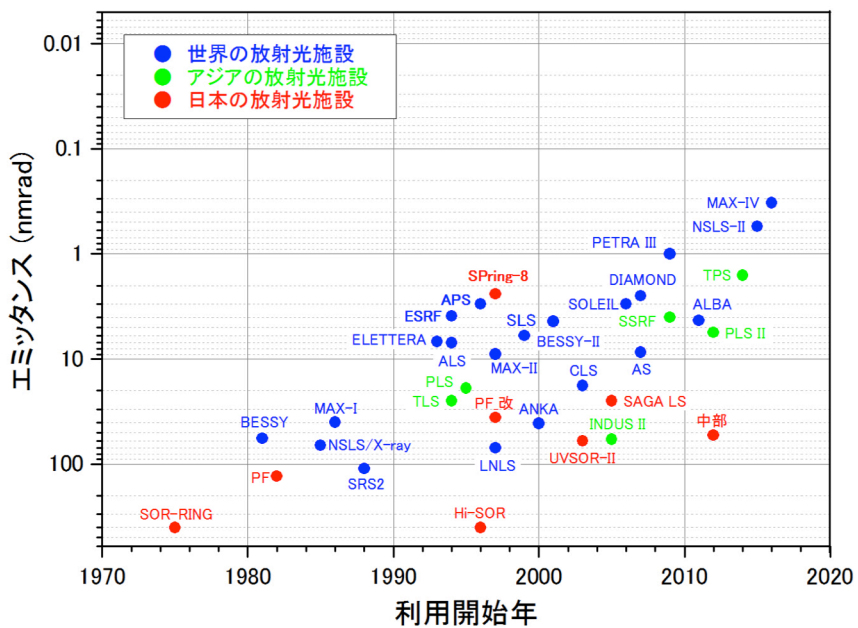


図 2-2 世界の放射光施設 エミッタンスの推移

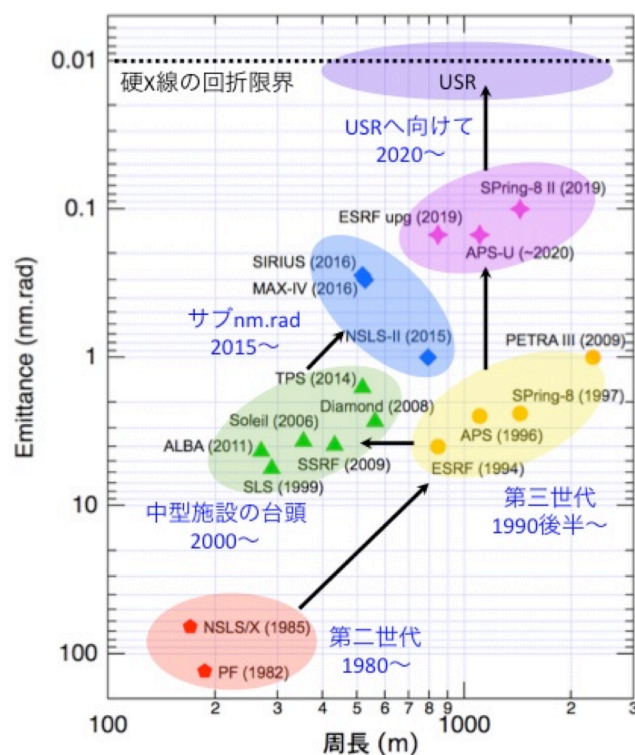


図 2-3 USR へ向けた世界の放射光計画推移。SPring-8 II、APS-U、ESRF II などは計画の詳細は未定。

参考文献

- [1] <http://www.esrf.eu>
- [2] <http://www.aps.anl.gov>
- [3] <http://www.psi.ch/sls/>
- [4] <http://www.lightsources.org/facility/soleil>
- [5] <http://www.diamond.ac.uk>
- [6] <http://ssrf.sinap.ac.cn/english/>
- [7] <http://www.cells.es>
- [8] <http://www.nsrrec.org.tw/english/tps.aspx>
- [9] <http://www.bnl.gov/nsls2/>
- [10] http://petra3.desy.de/index_eng.html
- [11] <https://www.maxlab.lu.se/maxiv>
- [12] <http://lnls.cnpem.br/sirius/>
- [13] <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/pep-x/>

- [14] T. Tajima and J.M. Dawson, PRL, 43, 267 (1979).
- [15] http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/spring8_II/publications/
- [16] <http://www.lbl.gov/ngls/>

3 章 グランドビジョン

現在、日本国内には、高エネルギー加速器研究機構放射光科学研究施設 (KEK-PF)、分子科学研究所極端紫外光研究施設 (UVSOR)、あいちシンクロトロン光センター、立命館大学 SR センター、SPring-8/SACLA、兵庫県立大学ニュースバル放射光施設 (NewSUBARU)、広島大学 HiSOR、佐賀県立九州シンクロトロンセンター (SAGA-LS) が稼働し、KEK では cERL が建設中である。これらの施設はそれぞれミッションが異なる研究機関に属し、設置理由や運営形態などが大きく異なっている。そのため、これまで各施設が打ち出す各計画は独立に議論・遂行されてきた。

しかし、俯瞰的観点に立ってこれら放射光将来計画の分析や将来ビジョンの策定を行い、その結果を個々の計画や運営の方針策定にフィードバックさせることで、国内全体としてのアウトプットを増大させ、資源の有効活用へと繋げるべきであろう。本章では、これらの計画を包括的に捉えた「グランドビジョン」案を提案したい。

アカデミア・産業ユーザーの視点からこれらの放射光施設を観た場合、その役割は「イノベーション」、およびそれに続く「産学基盤」、更には遠い将来を見越した「技術開発」といった階層に分けることが出来る (図 3-1、3-2、3-3 参照)。

1) イノベーションシーズ開拓...先端光科学創出施設

最先端光源でこれまで見ることができなかった物質構造や機能を科学的に解明し、新たな科学技術のイノベーションのシーズを開拓。

2) イノベーション活用...光科学活用施設

開拓されたシーズを活用し、新たな材料開発、創薬といった研究への発展。産業イノベーションへの展開。

3) 産学基盤...基盤支援施設

基礎研究を活かし、定常的かつ多様な高精度計測を提供。物質科学研究、製品の品質検査、実用化に向けた研究を支援。

尖端的な研究を担うアカデミアが、最先端光源である SPring-8 を用いてこれまで見ることが出来なかった物質構造や機能などを科学的に解明し、これがイノベーションのシーズとなっていく (科学技術イノベーション)。そして、これが新 3GeV リング (以下参照) や UVSOR-III を用いて新たな材料開発や創薬といった研究に活用され、産業イノベーションに発展して行く。最終的には、KEK-PF、あいちシンクロトロン光センター、立命館 SR センター、HiSOR、SAGA-LS といった広範な産学コミュニティの基盤によって裾野の広い利用へと展開され、その規模や可能性を拓けていくと同時に、産業イノベーション、科学技術イノベーションへのヒントを与える、という好循環を生み

出していく。これまでの歴史が示している通り、知の発展にはイノベーションのシーズを探索する「尖端性」と、裾野の広いアプローチを行う「多様性」の両者が必要不可欠であり、多くのユーザーにサービスを提供できるキャパシティも、グランドビジョンを策定する上で重要な因子であると言える。また、長期的な視野に立った場合、若手をはじめとする人材育成も非常に重要な責務であり、SPring-8 のような最先端の研究所から、HiSOR をはじめとする大学等において、広く人材育成が行われていくことが肝要である。

この階層的な役割分担の中で、基盤施設は利用者からみてアクセスしやすく、幅広いニーズの利用者を取り込む役割を果たす。基盤施設利用の経験は、利用者を容易にシーズ開拓・活用施設の利用に導くこととなり、新たなシーズの開拓へと繋がっていく。すなわち国内施設の階層的利用は、ニーズを広く取り込み、さらに吸い上げる「仕掛け」を有している（図 3-3）。すなわち、先端施設群から活用施設群を通じた基盤施設群への波及効果によって、サイエンスに基づく産業イノベーションが促進される。それとは反対に基盤施設群や活用施設群から先端施設群へ新たな課題の提示がフィードバックされる。これらの流れの中で、それぞれの施設は各々のミッションや特徴を生かした役割を果たすことになる。この仕組みにおいて SPring-8 がシーズの開拓における先陣的な役割を担うことが求められることは間違いない。

なお、この階層的システムは、「国内施設で閉じていること」が重要である。海外施設の利用は、上述の流れに基づく基盤化と課題提示のサイクルを分断し、非効率な研究開発と独自のノウハウの流失を生み出す。これは国全体の科学技術・産業にとって損失となる。先端的な研究とそれを支える先端的な光源の持続的な発展、および国内施設群の階層的活用が、我が国の「グランドビジョン」の中心的役割を担うことに疑いの余地はない。

2 章で述べた通り、1990 年代に世界 3 大光源（ESRF、APS、SPring-8）が世界の放射光科学の先陣に立ち、その後 2000 年代には世界各国で 3GeV クラスの第三世代中型リングが建設ラッシュとなり、中エネルギーを中心とする多くの光科学の受け皿となってきた。この間、日本では 3GeV クラスの蓄積リングは建設されず、1982 年に運転を開始した KEK-PF がアップグレードを繰り返してきたが、輝度は SPring-8 をはじめとする現在の先端光源よりも約 2 桁低く、これ以上のアップグレードも困難である。従って、多くのユーザーが存在する中エネルギー領域、およびそれよりも低エネルギー領域を主なターゲットとし、且つ、中エネルギーおよびそれよりも高エネルギーの領域をカバーする SPring-8 と相補的な関係にある第三世代中型リングは、ユーザーのニーズ

にも合致しており、早期に実現することが強く望まれる。現在検討されている東北放射光計画における 3 GeV リングは、この領域をカバーする新規光源として現在の世界トップレベルの光源性能を有しており、特に 3GeV 中型リングが最も得意とする軟X線領域においては、輝度、フラックスともに現 SPring-8 を完全に凌駕する。中エネルギーのX線は、デバイスや燃料電池の動作下での光電子分光を可能とするなど産業分野での利用価値が高く、産業利用の需要が持続的に増加していることから、SPring-8 ではビームライン数とマシンタイムが不足している。たとえば平均 7 割近い採択率の SPring-8 において、分光の BL の採択率は 6 割以下と低く、HAXPES などでは 4 割を下回るという問題点がここ数年顕在化してきている。以上のことから、図 3-1 に示すグランドビジョンにおいて、高輝度 3 GeV リング(新 3GeV リング)が中核施設としての役割を担うことを期待する。

更に、長期的な視野に立てば、先端加速器技術の開発を我が国で絶えることなく続けていくことは必須であり、これまで我が国の加速器技術開発の中心を担ってきた KEK が cERL の開発に取り組み、超伝導 RF 技術をはじめとする先端加速器技術が開発されていくことにも期待したい。

本章の最後に、図 3-1、3-2 で示したグランドビジョンを時間スケールに基づいて述べる。本グランドビジョンの 2 本柱となるのは、

I) 3GeV クラスの高輝度蓄積リング計画

II) SPring-8 次期計画

である。国内施設群における長年の懸案事項である中エネルギー領域のギャップを埋めるべく、3GeV クラスの高輝度蓄積リング計画を早急に実現し、それに続く形で、5~8 年後を目処に世界最高性能の座を奪回する SPring-8 の次期計画を実現させることを強く提案する。なお、SPring-8 の次期計画の留意点として、SPring-8 は既に多くのユーザーを抱え、アップグレードのための停止期間 (Dark time) がユーザーに与える影響を最小限に抑える必要がある。アカデミアに対する影響も多大だが、分析の遅延が命取りとなる産業界からこの声は強く、その意味でも、SPring-8 のアップグレードの前に 3GeV リングを軌道に乗せておくことが肝要である。

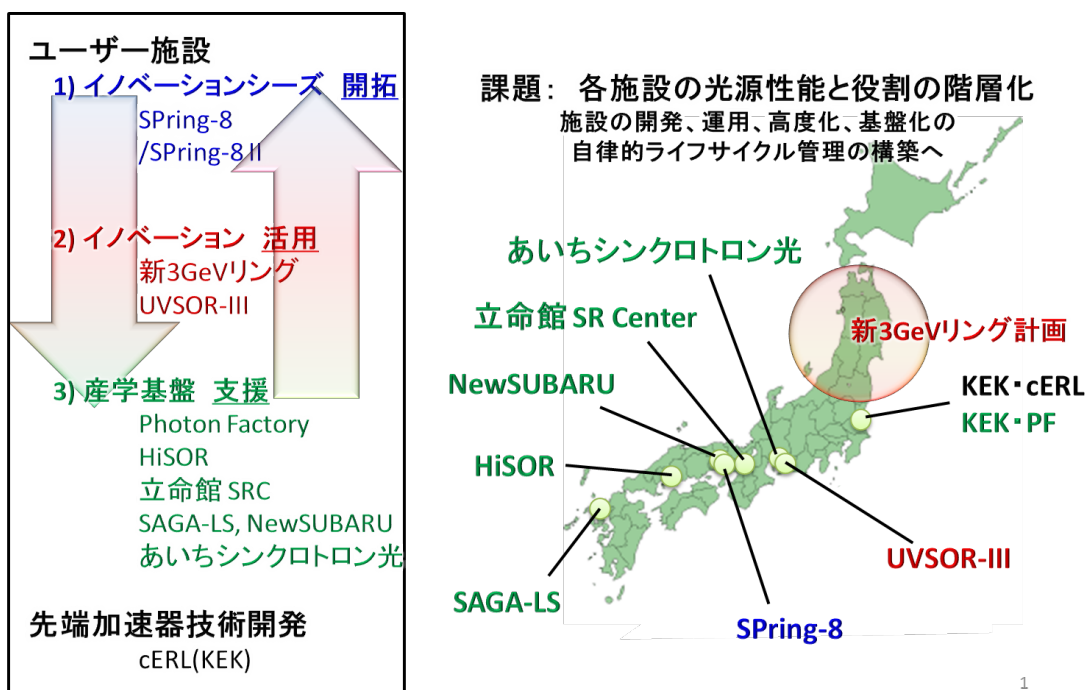


図 3-1 国内放射光施設群の階層的活用によるイノベーション創出支援

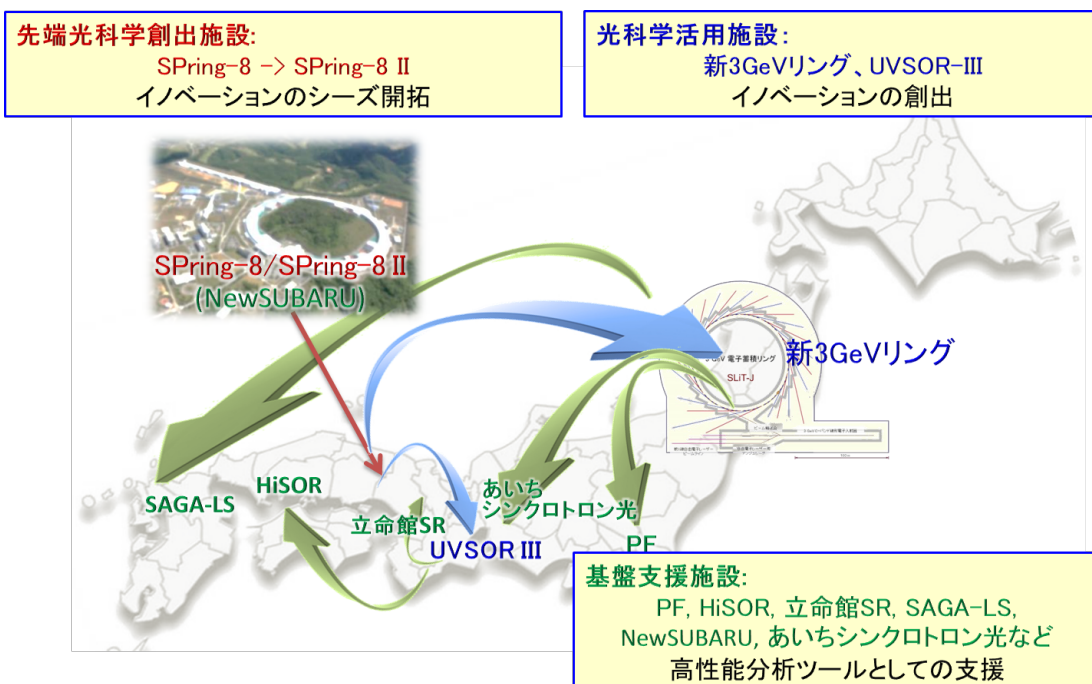


図 3-2 国内放射光科学拠点

科学技術・産業イノベーション

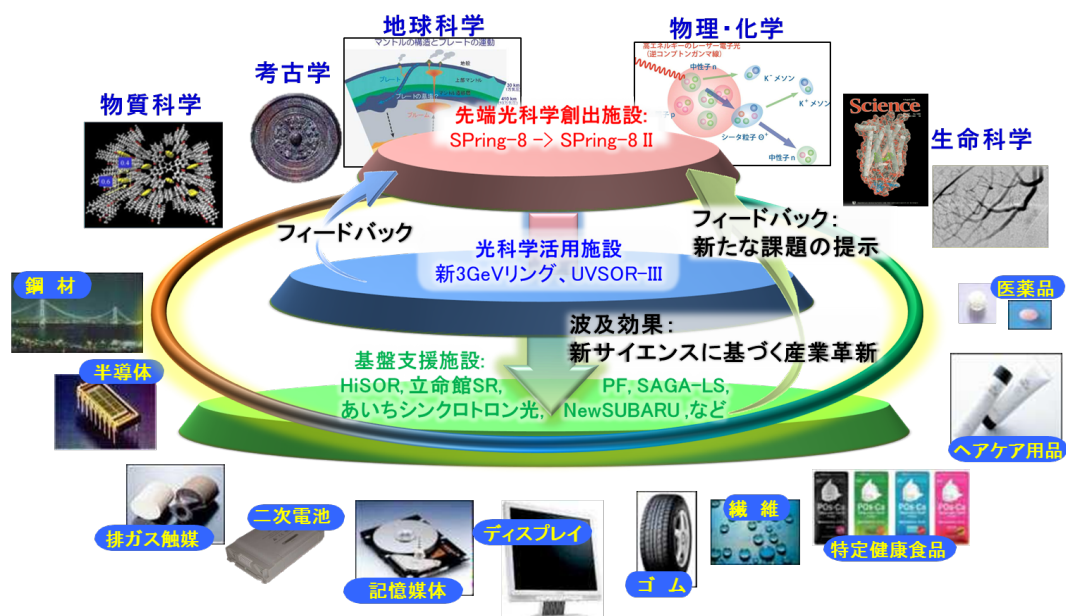


図 3 - 3 階層的施設運営における科学技術・産業イノベーションサイクル

4 章 SPring-8 次期計画に対するグランドデザインの提言

2 章で詳述した通り、学術分野における放射光利用研究はきわめて幅広く、物質科学、生命科学、エネルギー・環境科学、地球科学、考古学など様々な分野において傑出した成果を輩出してきた。また、産業界からの積極的な利用も放射光利用における大きな特色であり、エレクトロニクス、高分子・金属などの原材料評価、燃料電池や触媒など環境・エネルギー材料、創薬や生活用品に至るまで、放射光を用いた解析評価が活用されており、その成果に基づいて数多くの製品化が実現している。SPRUC の会員登録数が 1 万数千人に及んでいることから明らかなように、放射光のユーザー数は日々増加の一途にあり、それ自体が放射光科学分野の持続的に拡大する多様性を示しているといえる。一方で、これらの分野は世界的にも競争が盛んになり、今や、欧米だけでなくアジアや新興国を含めた世界の国々が新たな放射光計画を打ち立てている。

こういった背景の下、我が国の放射光将来計画案、すなわち「グランドビジョン」を 3 章に示した。本白書で重きを置いているのは、各施設が相補的且つ効果的に機能するような全体計画を策定することであり、また、世界のトップランナーとして走ってきた SPring-8 がこれまで以上に競争力を維持すべく、来たるべきパラダイムシフトを予見し、他に先んじて革新的な手を打っていくことである。そのためには、基礎研究、産業利用、人材育成といった幅広い観点の議論が肝要であることは 1 章でも述べた通りである。

そこで 4 章では、3 章で述べたグランドビジョンを踏まえた上で、SPring-8 の将来計画のマスタープランの基となるグランドデザインを提言する。実際の遂行における Feasibility や計画の各論については施設側である理化学研究所が既に検討を行っており、ここでは、SPRUC という独立した立場から考えられる見解・要望を、「光源性能（ハード面）」、「運営（ソフト面）」、「産業利用」、「人材育成」という観点から述べる²。

4. 1 光源性能

2、3 章で述べた通り、X 線科学を中心とした放射光利用研究は、XFEL による超高ピーク輝度によるサイエンスと、SPring-8 による高平均輝度を利用したサイエンスという、2つの方向性が確立されてきた。これは世界に類を見ない非常に重要な特色であり、今後もこのような方向性が強化されていくことを望む。

その他の光源性能としての特色として、硬 X 線、高平均輝度、高安定性、高信頼性

²2013 年、SPRUC のホームページにおいて本白書策定のためのパブリックコメント募集を行っており、ここで寄せられた意見を参考にしている。

(機器トラブルによる運転停止の少なさ) 等が挙げられる。ユーザーの視点から光源性能を議論する場合、その分野や用途に応じて所望する光の仕様(波長、輝度/フラックス、パルス長 etc) が異なるのは言うまでもないが、3章で述べたグランドビジョンに示した通り、SPring-8 は日本を代表する課題解決型 X 線源施設として世界を牽引すべく、硬 X 線、高安定性、高信頼性というこれまでの長所を維持した上で平均輝度(コヒーレンス) を格段に向上させることが望まれる。また、輝度向上により、「フラックスユーザー」などと呼ばれる一見輝度を必要としないユーザーにとっても、有限口径を通過し試料に到達する光子数が増加するという重要な恩恵を受けることになる。

理想的な光源として考えられる 1 つの方向性は、CW、完全コヒーレント、高平均輝度/フラックスである。ここで、短パルス且つ高ピーク輝度で尖端的な光源といえる SACLA との相補性を考えた結果、SPring-8 では非破壊観測に重きを置き、高ピーク輝度ではなく高平均輝度/フラックスが理想的であると定義している。

更に、省エネルギーという「性能」にも着目したい。各光源計画の最適解はその背景に依存すると 2 章で述べたが、その 1 つとして、日本のエネルギー事情が挙げられる。日本は元来よりエネルギー問題を抱え、省エネルギーに対する意識が高い。この傾向は 2011 年の大震災以降更に強くなっており、SPring-8 の将来計画のような大型計画の策定においてエネルギー問題を考慮するのは必須だと考えられる。無論、アメリカをはじめ、エネルギー問題とは疎遠な諸外国との国際競争の中で競争力を維持する必要もあり、輝度をはじめとする重要な性能と省エネルギー性能とのバランスを考える必要があるが、こういった日本独自の観点で研究開発を行い、他国にはない独自の技術や戦略を推進することは大きな意義があると考えられる。

4. 2 放射光将来ビジョンによる施設の位置づけの階層化

3章で述べたとおり、グランドビジョンに基づく将来計画が進められれば、ユーザーから見た施設の利用目的に応じた役割分担が階層化され、国内全体としてのアウトプットは最適化・最大化が進み、研究資源の有効活用へと繋がっていく。この場合に SPring-8 次期計画を含めた各施設の運営で最も重要なことは、グランドビジョンとしての施設・計画の位置づけの明確化であり、階層化された施設の役割に応じた高度化・開発を推し進めるとともに、情報を利用者に公開すべきである。このことにより、各施設の高度化等は、その位置づけに沿ったものとなり、ユーザー目線での国内全体の施設利用の効率化へと進んでいく。

この階層化の概念に基づくグランドビジョンは、利用者の成果の最適化・最大化だけでなく、利用申請と審査の効率化、ユーザーサポートの充実にも繋がっていく。なぜな

ら、利用者は自身の研究・開発に最適な施設を選ぶことが可能となるためである。階層化によって試料・実験方法・観測目的を決定すれば最適な施設とビームラインが決定できるようになり、国内施設全体の課題申請書の記載の簡素化と審査の簡便化・迅速化が実現できる。また各役割に特化した施設研究者が育成されることによって、利用者からみれば自身の測定に最適なサポートが受けられるようになる。これは、利用者の申請から測定に至る負担と時間の軽減を生み出し成果の最大化に大きく貢献する。

グランドビジョンに基づく施設運営は、国内の未だ放射光を利用していない研究者に利用を促し、国内全体の研究成果の最大化にもつながっていく。各施設での研究が国全体で位置づけられることにより、施設・BLの選択が平易になり具体的な実験計画が立てやすくなるためである。約 11,000 名(平成 26 年度 4 月 18 日現在)の SPRUC 会員数も、未だ潜在的利用者数から見ればほんの一部でしかない。特に、放射光における新興分野の利用については、光源リソースの不足から既存分野との激しい競争に打ち勝てず、利用機会に恵まれない傾向にある。我が国に新しいイノベーションを与える可能性を秘めた分野を新興するには、新たな研究分野の価値を適正に評価し、戦略的・俯瞰的に利用の機会を与える仕組みが必要である。国全体の研究の活性化・成果創成のためにも、本提案のグランドビジョンに基づく施設運営が SPring-8 と共に国内の各施設を含めて行われていくことを期待する。

4. 3 産業利用の将来像—産業の創出と活性化のためのグランドデザイン

2 章で述べたように、放射光の産業利用によって、さまざまな産業分野における工業材料の基礎的知見が得られ、新素材開発やデバイスの高性能化に繋がり、ひいては数多くの製品開発へと結実している。この基礎・応用・製品というサイクルは、これまで主に SPring-8 という一施設の利用を通じて実証されてきた。

更に、3 章で提案したグランドビジョンに基づく階層的な国内施設利用によって、この正のサイクルは加速され国内全体の活動として定着する。すなわち、1) SPring-8 をはじめとする先端科学創出施設においては、先端的基礎研究により、全く新しい産業創出につながる芽の発掘を目指す、2) 光科学活用施設において高度な応用研究を展開することにより、開発中の素材評価や機能解明により、既存産業分野でのイノベーションを創出する、3) 基盤支援施設は高性能な汎用分析ツールとしての役割を担い、既存製品の評価、性能向上に特化し、生産効率の向上や低コスト化等に貢献する、という棲み分けを提案する。

この産業利用の階層化により、各施設の方向性とそこでの産業利用の目的が明確となる。施設にとっても利用する企業等にとっても、投入すべき人的・物的資源が明らかに

なるというメリットがある。それぞれの階層において産官学の協調は当然必要だが、アカデミアと産業のリソース配分、および基礎と応用研究のバランスや研究開発としての性格は、自ずと決まることとなろう。また、新規参入する企業等にとっても、自社の利用がどの階層に該当するかの想定が容易となり、参入への障壁を取り除く効果も期待できる。以上のように、グランドビジョンの考え方は、産業利用の効率や生産性をも飛躍的に向上させ、新産業の創出とわが国産業の活性化に大きく貢献すると考えられる。

4. 4 人材育成

1章で述べた通り、人材育成はイノベーションに欠かせない観点であり、パブリックコメントにも多くの意見が寄せられている。特に、若手人材の育成は国内の放射光施設が速やかに取り組むべき喫緊の課題である。若手研究者が育たなければ先端的な放射光測定技術を駆使した新しい科学技術イノベーション、産業イノベーションの創出や新規の光源建設が危ぶまれる。そのためには、学生時より放射光の測定技術に触れて積極的に学位取得を目指すモチベーションを育む必要がある。

学生や若手研究者の利用機会を考えれば、各大学・企業あたり一つの放射光施設やビームラインが理想となる。しかし、これは予算や省エネの観点から現実的ではない。グランドビジョンに基づく国内施設群の整備は、利用時間の最大化をもたらすことから、学生や若手研究者への利用機会の増大を実現できる。

人材育成はオールジャパンの関係者で統一的行うことが重要であるため、SPring-8ユーザーのみで行うのではなく、国内の全ての施設と教育研究機関が参加することが放射光科学の持続的発展のためにコミュニティに課せられていると認識すべきである。

5章 おわりに

これまで我が国では、個々の施設が個別的に将来計画案を打ち立て、国全体として俯瞰的な将来ビジョンを纏めることは皆無に近かった。本白書では、これらの状況を包括的に把握し、我が国の施設の役割を俯瞰的に位置づけ、各施設が効果的・相補的に機能し、且つ資源の有効利用を行なうために、グランドビジョンを策定した。また、産業利用の推進や高効率な光源計画案など、我が国独自の特色を更に推し進めることが重要であることを示した。

現在、欧米をはじめ、アジア、新興国など世界各国が将来計画を打ち立て、これまでトップランナーとして走り続けてきた「世界3大光源の1つ」という SPring-8 の地位はもはや過去のものとなってきている。我々は、現状での停滞は長期的なビジョンにおいて衰退を意味することを肝に銘じ、他に先んじて先端的・挑戦的な手を打っていくことが肝要であると考え。広範なアカデミア・産業を支える SPring-8 が、その研究基盤として世界のトップを走り続け、尖端的な研究やコミュニティ全体のボトムアップを促していくためにも、新 3GeV リング構想から SPring-8 次期計画へと続く一連の包括的計画の策定および遂行は、焦眉の急であると考え。

今後、SPRUC は、施設側との緊密な連携の構築を図り、本将来ビジョンの核となる SPring-8 次期計画を協議、支援していく所存である。そのためには、来年度より再編される新 SPRUC 研究会は、光源性能の飛躍的向上を見据えた将来の光科学や産業イノベーションをターゲットに据えた議論ができる組織へと生まれ変わらなければならない。ユーザーコミュニティは既存の利用者ではなく、我が国の科学技術コミュニティーを全てカバーするものでなければ、SPring-8 の将来計画について責任ある提案をできる組織としての存在理由を失うであろう。そのためにも、新しい研究会組織は、将来を見据えて“ゲームチェンジ”をもたらすために学協会や産業における潜在的利用者也巻き込みながら活動することが大前提となろう。

本白書は、施設側へ、そのことを提案するための第一歩に過ぎない。今後は、計画中の次期 SPring-8 の加速器・光源について、詳細な設計パラメータを SPRUC に提示いただき、施設側と、SPring-8 次期計画の利用研究分野の中味について協議を開始することを要望していくことになろう。そして、光源スペックについて、常に情報共有と意見交換を重ね、アップデートしていくことで SPring-8 次期計画がより実りあるものとなるよう、協力していく。次期光源 SPring-8-II が将来にわたり、わが国の放射光利活用の中核であり続けることが許されるかどうかは、国際的な科学技術競争力を有し続け、科学・産業イノベーションを基盤とする豊かな未来社会の実現に資する存在であるかどうかにかかっている。