

PF および日本の放射光科学の 将来への提言

2015年2月

Photon Factory User Association
(PF-UA)

作業グループメンバー

佐藤 衛 (PF-UA 会長、横浜市立大学)

PF-UA 戦略・将来計画検討小委員会

腰原 伸也 (委員長、東京工業大学)

朴 三用 (副委員長、横浜市立大学)

雨宮 慶幸 (委員、東京大学)

尾嶋 正治 (委員、東京大学)

佐々木 聡 (委員、東京工業大学)

三木 邦夫 (委員、京都大学)

目次

Executive Summary	4
提言の骨子	6
1. はじめに	8
2. PF の現状と課題	
2-1. PF の現状	10
2-2. PF の課題	11
3. 提言	
3-1. 高輝度中型放射光源施設の建設と施設運営形態の提言	15
3-2. 高輝度中型放射光源施設と回折限界光が拓く新しいサイエンス の提言	19
3-3. 放射光協働ネットワークの構築とサイエンスボード設置 の提言	19
4. おわりに	22
表 1	23
図 1	24
図 2	25
図 3	26
図 4	27

Executive Summary

1982年わが国初の大型放射光施設 Photon Factory (PF) が共用運転を開始し、日本における放射光実験が本格的にスタートした。以来、多岐にわたる様々な革新的な技術やサイエンスが放射光を利用して開発・創出され、物質および生命科学の分野に大きなインパクトを与えた。こうして創出された革新的な技術やサイエンスは 1997年に建設された SPring-8 に引き継がれ、PF とともに更なる発展を遂げて現在に至っている。この間、日本各地に様々なエネルギー・規模を持った放射光施設も建設され、21世紀はポストゲノムと放射光科学の時代とまで言われるようになった。しかしながら、最先端の施設も時代とともに旧式化し、とりわけこれまで世界の放射光科学を先導してきた PF リングにおいては、これまでに数回の改造を行ってきたものの、運転開始から 32 年間もの年月の経過によって、老朽化による国際競争力の低下は免れない状況に立ち至っている。

世界に目を向けると、1990年代中頃の ESRF に始まる第三世代の光源に触発されて放射光需要が急速に高まり、その後のトップアップ入射と最新の挿入光源技術にも支えられて、ヨーロッパを中心に SLS (スイス)、Soleil (フランス)、DIAMOND (英国) など多数の高輝度放射光施設が建設されてきた。これらの光源は中規模 (中型) ながらも多数のユーザーが必要とする光源性能を有しているため、大型の放射光源よりも費用 (建設費、運転経費、維持費など) 対効果が優れている。このため米国 (NSLS-II)、スウェーデン (MAX-IV) 等先進国だけでなく、台湾 (TPS)、アルメニア (CANDLE)、ポーランド (SOLARIS) などの国々においても高輝度中型放射光施設の利用が始まるに至っている。また、イラン (ISLF) やブラジル (Sirius) においても、3GeV クラスの高輝度中型放射光施設の建設計画が進められ、光源のエミッタンスも当初の数 nmrad から 0.3nmrad にまで高度化されている。

このような世界の動向を考えると、PFの「老朽化」対策は、わが国の自然科学全般にとって最大かつ緊急の課題である。また、今世紀になって放射光利用研究を専門としないユーザーが急増しているにもかかわらず、これら多くのユーザーの利用研究を支える体制が整備されていないことや、将来の放射光利用研究を支える若手研究者の人材育成の問題など、将来の放射光科学の発展にとって克服すべき課題も数多く抱えている。加えて、産業界の放射光利用が飛躍的に高まっている中、大型放射光施設の設置・運営形態として、国立大学法人法に基づく大学共同利用機関と共用促進法に基づく登録機関とのバランスについても早急に議論が必要である。

こうした状況を踏まえ、PFの全ユーザーから構成される Photon Factory User Association (PF-UA) は、これまでPFが歩んできた歴史を振り返り、PFの現状と課題を整理し、PFの将来計画、さらにはわが国の放射光科学と科学技術イノベーションのための提言をまとめた。

なお、本提案はPF-UA会長より諮問を受けた戦略・将来計画検討小委員会が中心になって作成し、PF-UAの運営委員会や会員の意見、さらには、よりオープンな形でパブリックコメントを取り入れながらまとめたものである。しかしながら、放射光科学の分野は日進月歩で、新たに開発された技術もすぐに後発の技術に取って代わられていく状況の中で、この提言の内容もダイナミックに変化し、グローバル化の中で時代の要請に合致したものにならない。したがって、今後も継続して今回同様によりオープンな形でPF-UA会員のご意見やパブリックコメントを取り入れながらPFおよび日本の放射光科学の将来に対して提言を行っていきたいと考えている。

PF-UA 会長 佐藤 衛

提言の骨子

物質、材料、生命（細胞）は、原子・分子クラスターから構成される多体複雑系として振る舞い、その構成員である原子・分子単体の性質からはまったく想像がつかない複雑で高度な機能を発現している。このような多体複雑系の機能発現機構の解明こそ、これから挑戦していかなければならない物質、材料、生命科学のフロンティアである。

このような多体複雑系の謎に切り込み、放射光利用の量的・質的イノベーションを先導して世界の放射光科学をリードするためには、十分な輝度をもちナノメートル領域まで光を絞り込める新しい高輝度中型放射光源とそれを効率的に運営する施設を早急に（2019年頃までに）建設する必要がある。この施設から生み出される様々な知見は、多体複雑系の機能発現機構の解明という学術的な成果と産業界における革新的成果（機能性材料の開発や創薬イノベーションの創出）を導出し、わが国の放射光利用の量的・質的イノベーションを先導し、世界の放射光科学をリードしていくものと確信する。

一方、わが国の大小様々な放射光施設に目を向けてみると、各施設は独自に将来ビジョンを描いて将来計画を立案しているために、それぞれ施設の将来計画が重複して日本全体を俯瞰した効率的な将来計画が策定できていないのが現状である。まさしく「木を見て森を見ず」の諺どおりで、確りしたわが国の放射光科学の将来ビジョンを策定していくためには日本の放射光施設全体を俯瞰した協力ネットワーク（以後、放射光協働ネットワークと呼ぶ）構築と現状分析が不可欠である。したがって、高輝度中型放射光源施設の建設に加えて、わが国のすべての放射光施設を有機的なネットワークで結び、PFとSPring-8がそのネットワークのハブとしての役割を果たす体制を早急に構築する必要がある。このような体制を構築することで：

- 新しいサイエンスや技術開発のシーズが発展段階へスムーズに展開できる。

- 万一個々の放射光施設が事故や災害などで大きく損傷しても、放射光協働ネットワーク全体の機能は保持され、損害を最小限に止めることができる。さらに、福島原発問題のような未曾有の問題の解決にも柔軟に取り組める。
- 研究者や技術者の異動と人材育成が活性化される。
- 放射光と相補的に利用できる中性子などの施設と密接に連携するために、放射光協働ネットワークを中性子の分野へ拡張・発展でき、量子ビームの横断的利用を効率的に行うことができる。

など、効率的に革新的な研究成果が創出されていくものと期待される。

このような放射光協働ネットワークの構築と同時に、提言する新しい高輝度中型放射光源施設では、従来の大学共同利用と共用促進法による利用の各々の長所と短所を考慮しながら、大学共同利用の精神を活かした21世紀にふさわしい新しい共同利用体制を構築することも必要である。そして、これに基づく新しい設置・運営形態を提案することが新しい放射光源施設の将来に向けて非常に重要である。そのためには、放射光協働ネットワーク全体を俯瞰する組織として、日本放射光学会あるいは日本放射光学会と各施設のユーザーコミュニティが連携した機構による日本放射光連携委員会（サイエンスボード）の設置も必要である。このようなサイエンスボードを設置することで、これまでそれぞれの放射光施設で個別的に策定されてきた施設の将来計画の全体像が放射光協働ネットワークを通じて初めて俯瞰可能となり、All Japan の体制で議論できるようになる。また、世界の放射光施設の動向を鑑みながら、わが国の放射光科学の在り方が適切に分析でき、All Japan の視点で確りとした将来ビジョンの策定が可能となる。

1 章. はじめに

現代の自然科学は、極微の素粒子世界から宇宙の果てまでの広大なスケールにおいて、自然の普遍的法則を明らかにし、合理的な自然観を提示することを試みてきた。物質、材料、生命科学では、放射光を利用して我々が密接に関係する空間・時間スケールにおける自然法則を精密に決定し、生命の維持に重要な役割を果たす物質や生活を豊かにする材料の構造・機能解析に必要な知識や方法を提供してきた。このように現代の自然科学のフロンティア開拓において放射光科学が果たしてきた役割は非常に大きい。このような放射光を利用した数多くの挑戦的研究にもかかわらず未だ十分に理解できない未踏領域が存在する。このような領域では物質、材料、生命（細胞）は原子・分子クラスターから構成される多体複雑系として振る舞い、その構成員である原子・分子単体の性質からはまったく想像がつかない複雑で高度な機能を発現している。このような未踏領域の謎に切り込み、放射光利用の量的・質的イノベーションを先導して世界の放射光科学をリードしていくことがわれわれ放射光を利用する研究者の使命である。

歴史を振り返ると、PF でわが国の放射光実験が本格的にスタートした 1980 年代後半から 1990 年代中頃は放射光科学の黎明期で、放射光は先端的な研究を志向する限られた研究者のツールであった。その後、放射光を用いた研究成果が次々と発表され、放射光が様々な現象を解明するために広く活用できる有用なツールであることが認識されるようになると、その利用分野は、物理学、化学、生物学、地球・惑星科学などの様々な基礎科学分野から、材料科学、エネルギー科学、環境科学、創薬科学などの応用科学分野、さらには産業利用分野へと飛躍的に拡大した。その結果、2014 年 4 月現在、PF のユーザー団体である PF-UA の会員数は約 4,000 人、SPring-8 のユーザー団体である SPRUC の会員数は約 11,000 人を数え、放射光利用者は学术界から産業界に渡る巨大なコミュニティを形成するに至っている。さらに今後 10 年間には放射光利用者のコミュニティはさらに飛躍的に拡大していくことが予想されている。

一方、世界に目を向けると、最新の挿入光源技術の導入と放射光を利用した量的・質的イノベーションへの期待から、ヨーロッパを中心に多くの高輝度放射光源の施設が建設されてきた。これらの光源は中規模ながらも大型の放射光源よりも費用対効果が高く、優れた光源性能を有しているため、米国

(NSLS-II)、スウェーデン (MAX-IV) 等の先進国だけでなく、台湾 (TPS)、アルメニア (CANDLE)、ポーランド (SOLARIS) などの開発途上の国々においても高輝度中型放射光源施設の利用が始まっている。また、イラン (ISLF) やブラジル (Sirius) においても、3GeV クラスの高輝度中型リング施設の建設計画が進められ、世界的にも放射光利用者の数は急速に増加している。

したがって、これまで世界の放射光科学を先導しリードしてきた PF リングも老朽化による相対的な国際競争力の低下は免れ得ないのが現状である。また、放射光利用者が増加する中、放射光科学を専門としないユーザーが急増し、放射光を利用した研究分野が基礎科学から応用科学・産業利用へと展開し、そこから再び新しい基礎科学のシーズが生まれるという正のスパイラルが期待される一方で、急増したユーザーの利用研究を支える体制が整備されていないことや、将来の放射光利用を支える若手研究者の人材育成など、今後の放射光科学の発展にとって克服すべき課題も数多く抱えている。加えて、産業界の放射光利用が飛躍的に高まっている中、施設の設置・運営形態の見直しも必要である。

こうした状況を踏まえ、PF-UA はこれまで PF が歩んできた歴史を振り返りながら PF の現状と課題を整理し、PF の将来計画とわが国の科学技術イノベーションに必要な放射光科学の進むべきに方向性についての提言をまとめた。

2章. PFの現状と課題

2-1. PFの現状

PFは1982年にわが国初の本格的放射光施設として運転を開始して以来、物質・生命・化学・材料などの様々な分野で多大な研究成果を挙げてきた。2000年のノーベル化学賞受賞者である白川英樹先生はPFの初期のユーザーであり、2009年にノーベル化学賞を受賞したエイダ・ヨナス先生のリボゾーム（巨大タンパク質・核酸複合体）のX線結晶構造解析実験もPFから始まっている。このように、これまでPFは大学共同利用を基軸にして国内外の大学・国研の研究者と密接に連携することにより、世界の放射光の技術基盤を先導して放射光科学の分野において数多くの研究成果を創出し、優れた人材を育成してきた。

PFでは放射光利用研究の進展に伴ってより高度な測定への要求に応えるために、1987年と1996年の2度にわたって2.5GeV蓄積リングの大きな改造が行われ、高輝度化を進めてきた。さらに2005年には挿入光源が設置できるように直線部が増強され、挿入光源の導入が進められた。また、2002年にはPF-ARリングの高度化が完了し、世界的にもユニークな大強度単バンチ蓄積リングとしての利用が開始された。その結果、現在ではSPring-8とともにわが国における放射光を利・活用した研究を支え、非常に多くの研究成果を挙げ続けている。また、海外からの投資に基づいて整備されたビームラインも存在し、最近では、インド政府が整備した「インド・ビームライン」に対して、先日の安倍首相訪印時に、首相から今後の協力の成果に対する期待が表明されるに至っている。

また、産業イノベーションの中核としてもPFは先駆的な役割を果たしてきた。大学等での論文・学会等の成果発表に較べて、産業利用の成果は研究成果の守秘もあって公表されないことが多いが、PFは開設当初より産官学が一体となって研究を推進する環境を提供し、PFの利用開始直後から産業界の利用に対応する施設利用制度が整えられてきた。特に、産業界4社がそれぞれの専用ビームラインをPFに建設し、世界に先駆けて放射光の産業利用および産学連携を実施してこの分野で世界をリードしたことは特筆され、SPring-8を初めとす

る今日の産業利用の発展に大きく貢献している。実際にこうした環境の中で得られた知見は企業の技術革新に寄与し、産業のイノベーションにつながっている。さらに、企業研究者等と施設研究者が共同して研究・開発を行う共同研究制度も整備され、企業内での人材育成や大学院修了者の採用にもつながり、放射光の広汎な活用によるイノベーション創出を支えている。

2-2. PF の課題

世界の放射光施設に目を向けると、21世紀初頭から中規模ながら輝度の高いビーム性能を有する新たな第三世代蓄積リング型放射光源が台頭し、真空封止型アンジュレータとの組み合わせにより 2~3GeV 程度の中型リングでも X線領域のアンジュレータ光が使用できるようになった。その結果、新たな第三世代の蓄積リングが世界各地に建設され、PF リングの光源性能は相対的に低下してきている。このため、高い輝度が必要とされる実験や高い空間分解能・エネルギー分解能・時間分解能が必要な一部の先端の実験などは、その光源性能の限界により PF では実施することが困難である。また、PF では、ビームラインの性能向上に向けて、長期的なアップグレード計画に沿ったスクラップ&ビルドを繰り返してはいるが、幾つかのビームラインでは、その老朽化対策が喫緊の課題となっている。

一般に、先端的な大型放射光施設は自然発展的な形態として普遍化と先端化へと機能分化して二面性を持つようになる。普遍化により利用分野が基礎科学から応用科学へ、さらには産業利用へと拡大し、多くのユーザーが施設を活用するようになる。このような利用分野の拡大や得られる膨大なデータから、再び新しい基礎科学のシーズが生まれ、普遍的法則が明らかにされるという正のスパイラル現象が生まれる。一方、先端化は新しい測定法や手法の開発を促し、それがさらなる先端的科学のシーズを生みだし、新しい利用分野の開拓へとつながっていく。したがって、先端的な大型放射光施設が継続的に発展するためには、この普遍化と先端化という互いに強く関連する二つの機能が、調和しながら循環的に発展していく必要がある。現存する日本の放射光施設は、そ

の規模やビーム特性さらには運営形態などに応じて、それぞれ特有の普遍化と先端化の方向性を持っており、各施設の特長を生かす形での役割分担が必要になっている。実際 PF においても共同利用開始直後は、放射光利用研究自体が未開拓であったこともあり、多くのユーザーが放射光施設のスタッフと一体となって自主的に研究を実施する大学共同利用体制が機能し、わが国唯一の大学共同利用の大型放射光施設として、萌芽的な段階から確立した手法に至るまで様々な研究を受け入れてきた。しかしながら、国内外に多数の放射光施設が建設され、放射光を利用した観測技術の多くが技術的に確立されてきたことや、研究対象が原子・分子クラスターから構成される多体複雑系、さらにはそのダイナミクスへと高度化・複雑化することで、電子顕微鏡やNMRなどと同じように、研究を行うために必要な複数のツールの1つとして放射光を利用するユーザーが増加してきた。その一方で、研究対象が多様化および複雑化してナノビームや非弾性散乱、高速時間分解などより高度な放射光利用技術も求められている。

PF の利用制度については、大学共同利用機関として PF の全ユーザーから構成されている PF-UA を存立の基盤としており、多様な研究活動を行う大学と、それらを横断して重点的に発展させる大学共同利用とを「車の両輪」としてわが国の学術研究を支えてきた。しかしながら、基礎研究から応用研究・産業利用へと拡大する普遍化と、新しい測定法の開発研究を目指す先端化への機能分化に対して、大学共同利用の枠組みだけで対応することが困難になりつつある。具体的には、大型放射光施設の自然発展的な形態としての普遍化と先端化が独立して進行し、ユーザー側は普遍化として施設を使うことが主目的となり、一方で、施設側のみが先端化として測定法や方法論の開発を行う状況が生まれ、両者が協力して施設の発展を支えるという初期の大学共同利用の考え方とは異なる状況が生まれてきた。このような状況に至った背景としては、大学側（ユーザー側）には各大学の基盤的経費の減少や法人化による大学運営の変革、また、施設側においてはユーザー（大学教員）が長期間滞在してプロジェクトを進めることが困難になってきたことなどの問題が重なったことが考えられる。

同時に、施設側にはプロジェクト経費の減少や放射光科学の拡大によるビームラインの増加と、それに伴うマンパワーの不足やスタッフの人材育成などの問題などがあり、以前のようにユーザーと協力して大学共同利用体制を維持する余裕がなくなってきている。その結果、新しい放射光科学を開拓するために必要な装置や手法の開発力が低下し、放射光施設を担う若手の人材育成も困難になりつつある。したがって、これらの諸問題を解決して効率的に放射光施設を運営していくためには、大学と施設の在り方を見直し、これまでとは異なる新しい共同利用体制を今こそ構築する必要がある。

大学共同利用機関は、「大学共同利用機関の施設及び設備等を大学の教員その他の者で当該大学共同利用機関の行う研究と同一の研究に従事するものの利用に供すること」（国立大学法人法）と規定されており、高まる産業利用への対応も必要となっている。したがって、新しい共同利用体制では、大学共同利用と産業利用とのマッチングも含めた運営体制の再構築や、放射光を専門としない研究者に対するサポート体制を充実させなければならない。今ほどわが国が抱える数多くの課題を解決し得るイノベーションが求められている時はなく、PF はこれまでの豊富な放射光の産業利用への展開の経験と産学連携の実績を基盤に、大学共同利用と産業利用とを整合させた新しい運営方式を早急に構築する必要がある。

また、ここ数年来の PF に対する慢性的なプロジェクト経費の減少は、放射光実験のための運転時間確保や現有設備の維持に大きな支障をきたし、学生の教育と研究への甚大な影響、さらにはわが国の科学技術力へ影を落としかねない状況が出始めている。特に、今年度は運転時間が大きく削減されて 2,500 時間（昨年度は 3,700 時間）という数値が出され、世界標準の運転時間（5,000 時間）の半分で、期待された成果を挙げるのが極めて困難な状況になっている。一刻も早くこのような状況を脱し、安定かつ十分な運転時間を確保するためには、PF の上部組織である物質構造科学研究所（IMSS）および KEK の組織改革と、それと連動した思い切った予算措置の見直しなど根本的な対策が必要である。加えて、当初から問題になっているサポートスタッフが極端に少ない点

にも特段の配慮が必要である。世界標準からすると、チームライン当たりサポートスタッフは3人以上必要であるが、現在のPFでは1人のサポートスタッフが複数のチームラインを担当している例も決して珍しくない。その意味でも組織改革と連動した予算措置の見直しは焦眉の急である。

3章. 提言

3-1. 高輝度中型放射光源施設の建設と施設運営形態の提言

わが国の豊かな自然環境を守り、持続可能な社会の発展を達成するためには、多体複雑系として機能する物質、材料、生命の未踏領域の謎に切り込み、放射光利用の量的・質的イノベーションを先導して世界の放射光科学をリードしていかなければならない。そのためには、2-2で述べた課題を解決して、十分な輝度をもちナノメートル領域まで光を絞り込める新しい高輝度中型放射光源とそれを効率的に運営する施設を早急に（2019年頃までに）建設することを提言する。

加えて、提言する高輝度中型放射光源施設は、拡大する物質・生命科学分野の放射光利用者のニーズに的確に応え、イノベーションにつなげるために、基礎研究と応用研究の区別なく、大学・国研・企業が自由に利用でき、他の放射光施設や量子ビーム施設との相補的利用などを効率的に運用できる機能を具備することを提言する（図1）。また、研究対象が原子・分子クラスターから構成される多体複雑系へと高度化・複雑化している現状においては、放射光実験の前後に他の手法で試料を評価出来る研究環境も必要である。したがって、高輝度中型放射光源施設と同じサイトに産官学の関連研究機関が集約する研究環境も重要で、地域コンソーシアムの形成等、外部との連携が強化された新しい研究の場が創成され、従来にない研究成果が生み出されるものと期待される。

具体的には、提言する高輝度中型放射光源施設は、ハード面からの研究を進める〔ビームライン・光源開発階層〕をベースに、ユーザーと協力してニーズの高い研究を集中的に行う〔イノベーション活用階層〕と、両階層の動向を睨みながら従来の学術研究領域に捉われずに量子ビームの相補利用なども含めて新領域を切り開き（共創）、人材を育成（共育）する〔イノベーション共創・共育階層〕の3つの階層から構成されることを提案したい（表1）。各階層は互いに強く連携して、階層間共同プロジェクトの実施や階層間の人事交流の活性化を図るとともに、イノベーション共創・共育層とイノベーション活用層は、

国内外の関連研究機関や大学、企業と密接に連携することが重要である。

新しい放射光源施設がこのような3つの階層から構成され、それぞれの階層間で密接な連携を図ることにより、光源開発研究と放射光利用研究の協調的発展や基礎研究と応用研究の枠組みを超えた課題解決研究の推進が可能となる。その結果、放射光利用研究によるイノベーションが加速され、日本の科学技術の発展に直結していくと思われる。特に、材料開発や創薬研究においては、ナノ領域の構造や電子状態を明確に解明する必要性が増しており、従来の放射光施設では実現が困難な高輝度ナノビームを安定して提供できるようにすることは、学術的にも産業応用的にも厳しい国際競争を勝ち抜くために非常に重要である。そのためには、電子加速エネルギー：3 GeV クラス、水平エミッタンス：1 nmrad 以下、総ビームライン数：40 本程度など、既存施設からシームレスに移行でき、かつ15～20年先まで継続して世界をリードできる次世代高輝度放射光源施設が是非とも必要である。

さらに、このような光源性能（ハード面）を効率よく発揮するためには、次のような放射光実験を補完する実験環境整備と運営形態などのソフト面での充実が重要である。

(I) 放射光ビームを提供するだけでなく、サイエンスの新分野を開拓する“協働の場”を構築する：

- 材料系／反応系や生命科学系の試料測定に特化した実験ステーションの設置
- 分析装置が装備されたラボラトリー群や研究センター群の併設
- 他研究機関や企業との共同研究、量子ビーム相補利用研究が容易となる研究環境の整備（放射光協働ネットワークの展開）
- 様々な放射光利用研究に精通し、適切な研究アドバイスが行える施設スタッフの充実。特に、実験結果の解釈だけでなく、より高度な理論面でのサポートを得ることができるシステムの導入
- 新しい観測手法・技術の提案、先導を行うために、理論的検討も含めた総合的協議を日常的に行える、実験と理論を結ぶネットワークの構築。

(II) 光源性能だけでなく、ユーザーが望む運転モードとビームラインの仕様を実現する：

- 研究対象に応じたビームサイズ、輝度、フラックスの実現
- 機能性材料のその場観察（オペランド実験）を実現する実験・解析手法の開発環境の整備
- 実験頻度／手軽さ（ソフト・ハードの両面）／ハイスループットを実現する環境整備
- 時間とともに変化する物質の電子構造と機能の関係を追跡可能な実時間その場観測環境の整備
- 基礎物質科学のみならず加工プロセスの研究などでも急速に要望が高まりつつある、レーザー等のコンパクト光源との組み合わせ実験を可能とする環境の整備

(III) 放射光科学コミュニティの底上げを行う：

- 施設スタッフとユーザーが一体となり、新学術分野やイノベーションの創出を共に行い（共創）、人材を育成する（共育）環境整備
- 高いレベルの研究支援を行うために、施設内部の研究者がユーザーと協力して高いレベルの研究を行い、幅広い経験を積める研究環境の整備
- 学生や若手研究者の失敗を前向きにとらえ、失敗から新しい研究のリードやきっかけを生み出し、新しい試みにチャレンジできる研究環境の整備（「共創・共育」効果）
- 息の長い研究を支える長期利用課題制度（「共育」効果）の導入
- 産官学が連携しやすい制度（材料特化等の「共創」効果）の導入

(IV) 放射光科学により持続可能な社会を目指す：

- 省エネルギー設計による運転コストの低減（省エネ、インフラ共用等）
- 人材流動（「共育」効果）が起こりやすいシステムの導入
- 福島原発問題などのような未曾有の課題への取り組み（課題柔軟性）
- 個々の施設が事故や災害などで万一機能不全に陥っても、放射光協働ネットワークを利用して全体として放射光利用実験の機能を保持する（自

己修復機能)

こうした放射光源としてのハード面と放射光実験を補完する実験環境整備、運営方法などのソフト面の両面を考慮した高輝度中型放射光源施設が建設されることにより、物質材料・化学・物理・生命科学の幅広い分野の基礎的研究から、それを活用する産業のイノベーションにまで繋がっていくものと期待される。

なお、現在のわが国の経済状況を考えると、ここで提言する高輝度中型放射光源施設が建設・運営されるときには、PF および PF-AR は運転を停止することも想定される。そのような場合、新しい放射光施設がこれまで PF や PF-AR で行ってきた放射光実験をシームレスに引き継ぎ、さらに発展できることが極めて重要である。新・旧施設の交代時期に放射光利用実験が中断されると、研究開発やイノベーションの創出、教育・研究の現場などにおいて、取り返しのつかない甚大な問題が生じることが予想される。したがって、新しい高輝度中型放射光源を設計・立案するときは新・旧施設の交代がシームレスに行われるような計画の策定および設計が強く求められる。

さらに、既存の蓄積リング型の放射光源を軸とした研究開発に加えて「新たな研究分野を開拓する研究」を推進するために、先端的な加速器開発を基盤とした継続的な光源開発も提言する。これまで KEK のロードマップの中で、PF の後継機は X 線領域で回折限界を実現する ERL 光源であると位置づけられ、コンパクト ERL において原理実証が進められてきた。その結果、多くの技術的進展が実現した一方で、まだ解決すべき技術的課題や建設コスト面での課題が残されていることが認識されるに至っている。さらに、近年の蓄積リング光源の高性能化により、蓄積リング光源を用いることにより ERL の回折限界光源性能に肉薄するエミッタンスが実現できることも示されており、PF 後継機としての ERL 光源という位置づけをもう一度見直すべき時期に来ている。

一方で、ERL は連続光 (CW 光) に近い高繰り返しでフェムト秒オーダーの短パルス放射光を発生させることができるため、単に蓄積リング光源の延長としての回折限界光を実現するだけでなく、蓄積リング光源では実現不可能な、高輝度高フラックスな CW 型 X 線自由電子レーザーに発展する可能性を有して

いる。このためコンパクト ERL 開発で培った超高輝度電子銃と超伝導加速空洞の技術は、CW 型 X 線自由電子レーザーに向けた技術開発として有用である。高フラックスな回折限界・フーリエ限界光を活かした新たな放射光研究は全く未開拓のフォトンサイエンスの研究分野であり、世界の放射光科学の先導にもつながるものとして、日本の将来の放射光利用にとってきわめて重要である。

3-2. 高輝度中型放射光源施設と回折限界光が拓く新しいサイエンスの提言

図 2 に様々な分野のサイエンスの山を越えて行くために必要な今後の放射光科学の方向性と、関連分野への波及効果、必要性・重要性をまとめた。その中でも提言する高輝度中型放射光源施設の実現によって目指すトップサイエンスは最も重要であり、世界の放射光科学を牽引するものでなくてはならない。一方で、この高輝度中型放射光源施設は、非常に幅広い学術・産業領域の基盤的施設となることも必要である。こうして、広いサイエンスの分野において産業イノベーションへの展開が自然発生的に計られていく。さらに、その先には回折限界光源への道が開けており、これまで我々が経験できなかった光を使って様々な科学分野でのブレークスルーが期待できる。この回折限界光源技術の開拓を推進し、日本の得意とする物質、材料、生命科学の世界的優位性を次世代に維持していくためには、現在 KEK で開発中のコンパクト ERL で蓄積している知見、経験の活用、さらにはその知見が積み上げられて初めて実現可能となる X 線波長域における高繰り返し自由電子レーザーの実現が必須となる。

3-3. 放射光協働ネットワークの構築とサイエンスボードの設置の提言

従来、わが国の大小様々な放射光施設は独自に将来計画を立案しているために、それぞれ施設の将来計画が重複して日本全体を俯瞰した効率的な将来計画が策定できていないのが現状である。したがって、今後 10 から 20 年後までを見通したわが国の放射光科学の将来ビジョンを策定していくためには、日本の放射光施設全体を俯瞰した現状分析が不可欠である。そのためには、わが国のすべての放射光施設を有機的なネットワークで結んだ「放射光協働ネットワ

ーク」を構築し、PF と SPring-8 がそのネットワークのハブ施設としての役割を果たす体制（図 3）を構築する必要がある。このような放射光協働ネットワーク体制を構築することで：

- 新しいサイエンスや技術開発のシーズが発展段階へスムーズに展開できる。例えば、ある施設で基礎研究が行われた触媒材料などに関して、放射光協働ネットワークとハブ機能を活かして、大型放射光施設利用者である民間会社での応用研究への展開が期待できる。
- 万一個々の施設が事故や災害などで機能不全に陥っても、放射光協働ネットワーク全体の機能は保持され、損害を最小限に止めることができる。さらに、福島原発問題のような未曾有の問題の解決にも柔軟性に取り組める。
- 研究者や技術者の異動と人材育成が活性化される。ハブ機能を備えた大型放射光施設における民間研究者による利用研究が引き金となって、大学院生などが民間会社でキャリアアップを行ったり、逆に民間の研究者が大学院生や若手研究者への指導を行ったりして人材交流を活性化させることが想定される。
- 放射光と相補的に利用できる中性子などの施設と密接に連携するために放射光協働ネットワークを中性子の分野へ拡張・発展でき、量子ビームの横断的利用が効率的に行うことができる。実際に、電子材料の分野では、磁性、構造などの中性子を用いた研究と軟・硬 X 線を利用した電子状態の研究の連携が遷移金属酸化物の各種巨大外場応答の起源研究では不可欠なものとなりつつある。

など、革新的な研究成果が効率よく創出されていくものと期待される。

同時に、提言する高輝度中型放射光源施設と SPring-8 を核に日本全体の放射光科学の将来計画の舵取りを行うための仕組みとして、「日本放射光連携委員会」（サイエンスボード）の設置を提言する（図 4）。このサイエンスボードは、日本放射光学会あるいは放射光学会と各施設のユーザー共同体が連携した機構のもとに常設委員会として設置し、国内の放射光施設（SAGA-LS、HiSOR、SPring-8、NewSUBARU、立命館大学 SR センター、あいちシンクロトロン光

センター、UVSOR) と連携して、放射光協働ネットワークの方向性を幅広く議論するとともに、わが国の放射光施設を俯瞰して日本全体の放射光科学を視野に入れた将来計画の立案や現状認識と改善策の提案などを行っていく。

さらに、既存の放射光施設を軸とした研究に加えて「新たな研究分野を開拓する研究」を推進するために、先端的な加速器開発を基盤とした継続的な光源開発も含めて検討することも提言する。特に、コンパクト ERL 開発で培った超高輝度電子銃と超伝導加速空洞の技術は今後の光源開発に極めて有用である。回折限界・フーリエ限界光のコヒーレンスを活かした新たな放射光研究手法の開拓は全世界の放射光ユーザーの念願でもあり、日本の将来の放射光利用にとってきわめて重要である。

4章. おわりに

以上、これまで PF が歩んできた歴史を振り返り、PF の現状と課題を整理し、将来の放射光科学のあるべき姿についての提言をまとめた。PF は KEK の加速器技術の蓄積を背景に日本の“User Oriented な放射光施設”として機能し、こうした背景の下に現在の放射光利用技術の成果が成り立っている。日本の東西に位置する PF/PF-AR および SPring-8 をはじめとする多くの放射光施設において、既存施設からその後継へとシームレスに移行し、15～20 年先まで継続して世界をリードする研究成果を挙げ続けるためには、それぞれがユーザーと施設の密接な連携を保つことに加え、日本全体の施設を俯瞰できる放射光協働ネットワークの構築と提言作成のためのボードが必要である。提言する次世代高輝度放射光源施設の建設を機にハードとソフト（運営／組織）の両面をダイナミックに改革することで、新たなステージへと共同利用研究全体が飛躍し、パラダイムシフトを起こすことを期待したい。そのためには産官学の多くが利用し続けている PF こそが、高輝度中型光源施設実現のために、All Japan 体制の中で中心的役割を果たさねばならないことを強調し、本提言の結語としたい。

表 1：提言する高輝度中型放射光源施設の 3 つの階層と機能*

担当階層	機能
イノベーション 活用階層	実際のイノベーション展開に向けた企業利用者など、幅広い放射光利用者のニーズを拾い上げ、統合的な成果創出を狙うラボラトリー群。主に、国内外の関連研究機関や大学、企業と密接に連携する中心的な役割を受け持つ。
イノベーション 共創・共育階層	他の 2 つの階層の動向を睨みながら、従来の放射光技術や学問のカテゴリーに捉われない、量子ビーム相補利用など新たな領域開拓（共創）を大学と共同で人材育成（共育）を担う研究センター群。主に、3-2 で提案する他の放射光施設・量子ビーム施設とのネットワークのハブとしての役割を受け持つ。
ビームライン・ 光源開発階層	先端的な光源加速器技術を活かした、未踏研究分野の開拓に向けた観測光源システム開発を行うビームライン・光源開発群。

*図 1 と合わせて参照されたい。

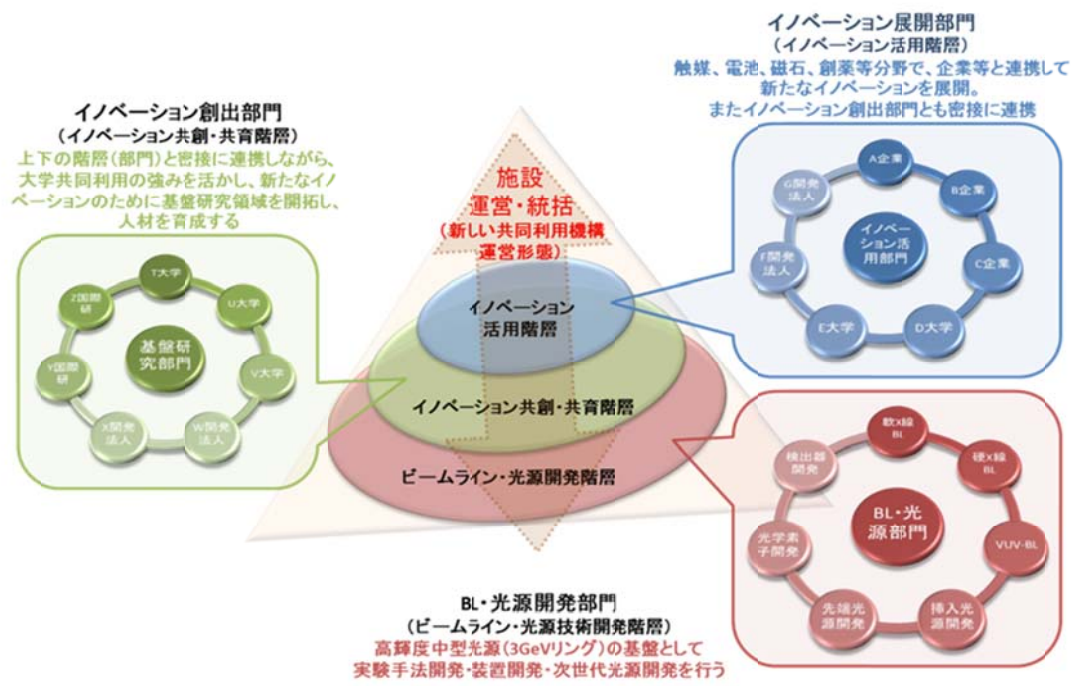


図1：高輝度中型放射光源施設の組織と運営の概念図。提言する高輝度中型放射光源施設は基礎研究と応用研究の区別なく、大学から企業まで広くに利用できる。表1と合わせて参照されたい。

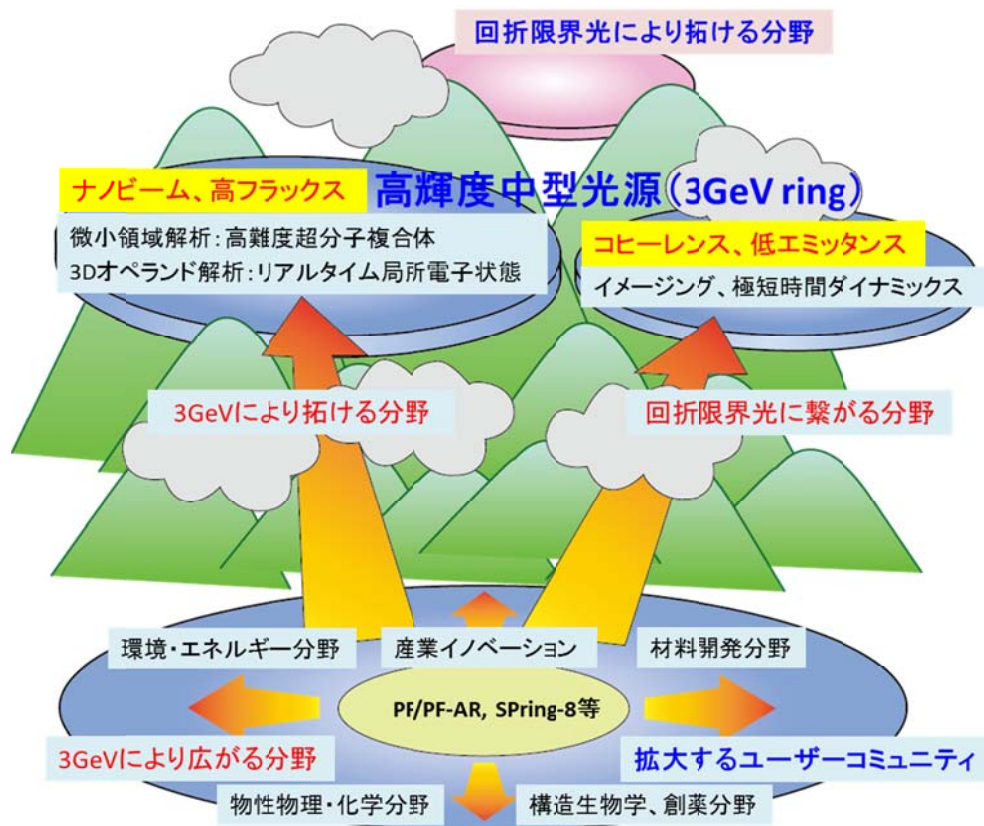


図2：様々な分野のサイエンスの山を越えて行くために必要な今後の放射光科学の方向性と、関連分野への波及効果、必要性・重要性の概念図

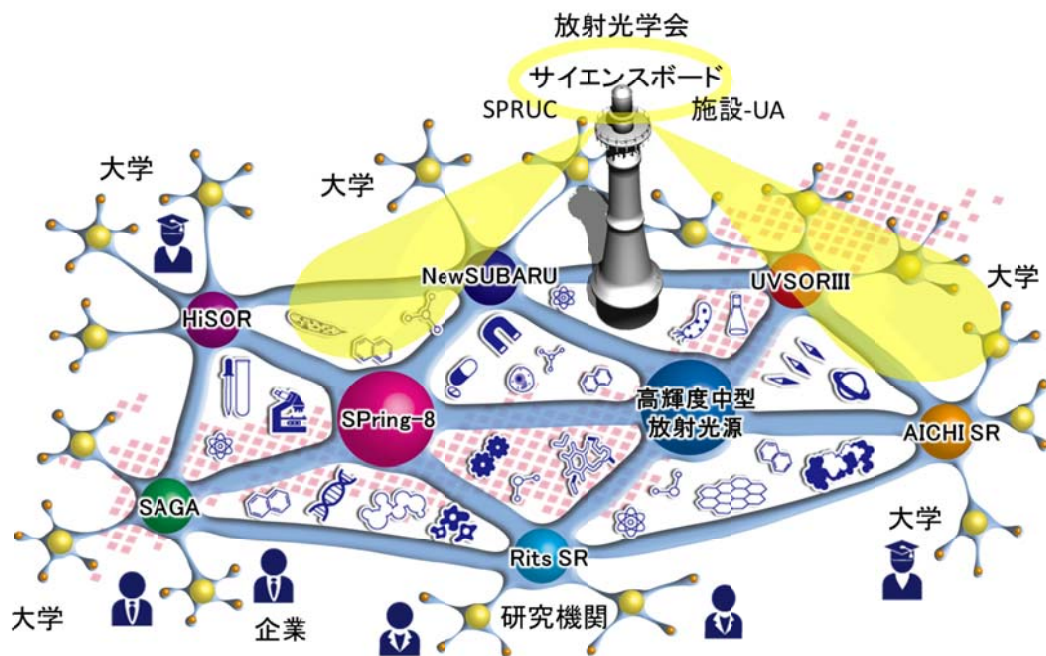


図3：本提言が想定するわが国の放射光施設のネットワーク（放射光協働ネットワーク）の概念図。提案する高輝度中型放射光源施設と SPring-8 がネットワークのハブとなる。

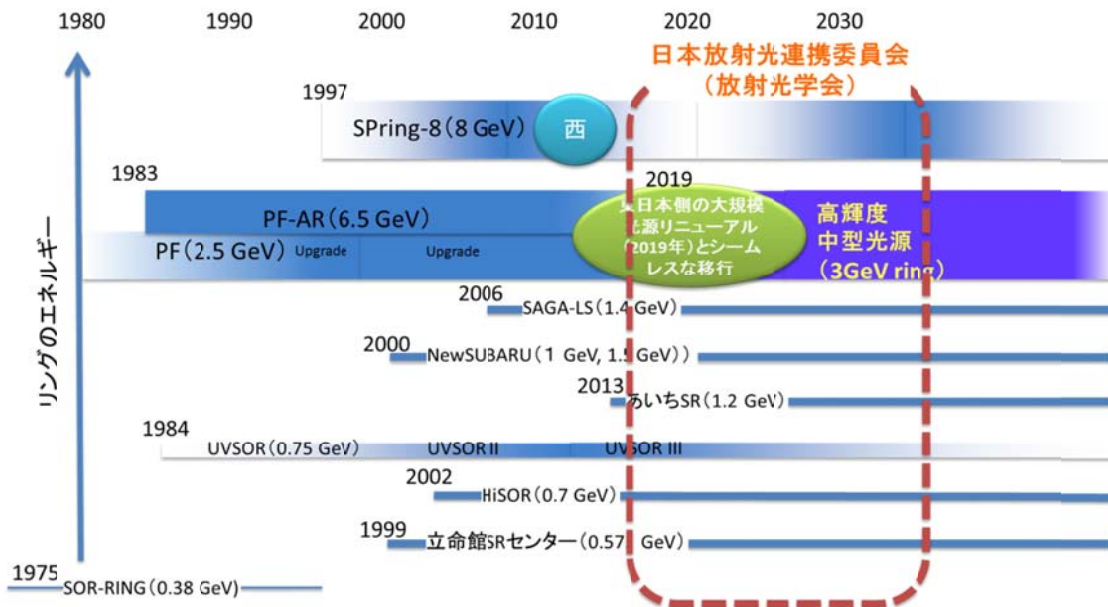


図4：各放射光施設の経緯および新組織（高輝度中型放射光源施設）と日本放射光連携委員会（サイエンスボード）の位置付け