

第一部

「次世代放射光施設に関するニーズ調査」のとりまとめ

1. はじめに

文部科学省から東北大学が受託した「次世代放射光施設に関するニーズ調査」事業は（以下では、ニーズ調査と略称）、2014年5月15日から2015年3月31日までの期間に実施した。本受託業務では、次世代放射光施設の整備方針の検討に向け、放射光施設に対する研究者のニーズの調査を科学的な観点から行い、有益な資料を得ることを目的とした。調査対象として(A)環境・エネルギー、(B)健康・医療、(C)材料、(D)情報通信、(E)基礎科学、(F)産業利用の6分野を設定し、次の6項目についてニーズを調べた。

- (1) 今後5～10年にわたって想定される社会的・科学的課題
- (2) (1)の各課題を解決するにあたり、取り組むべき研究内容
- (3) (2)の当該研究内容を進めるにあたり、放射光がどのように貢献するのか
- (4) (1)の各課題に対応するために要求される放射光施設のビーム性能
- (5) (4)で要求される放射光施設が整備・共用されるときの特長、されなかった場合の特長
- (6) その他

ニーズ調査の実施にあたっては、第一段階において国内外の主要な研究者60名から電話とスカイプを用いてヒアリング調査するだけでなく、可能な場合には直接面談による聴取も行った。第二段階では放射光専門家や研究者53名によりヒアリング調査の取りまとめについての意見交換によるレビュー調査を行った。レビュー調査では(A)～(F)の6分野に加え、(G)放射光以外の分野（電子顕微鏡、中性子、レーザーなど）を設定し、放射光以外のツールの観点からの調査も行った。第三段階ではヒアリング調査とレビュー調査の結果にもとづいて、次世代放射光施設に対する研究者のニーズを取りまとめた調査報告書を作成した。

本報告書は3部から構成される。第一部はヒアリング調査とレビュー調査の結果を踏まえ、我が国の放射光施設に対する研究者のニーズと、今後の整備・利用促進に向けた観点を取りまとめたものである。第二部はヒアリング調査で作成した6研究分野ごとの聴取内容と、この聴取内容にレビュー調査の結果を反映したものである。第三部はヒアリング調査で作成した研究者ごとの聴取内容と、レビュー調査で作成した7研究分野ごとの聴取内容の取りまとめであり、レビュー調査の議事録を参考資料として添付する。

2. 東北大学での受託事業の実施体制と進め方

2.1 受託事業の実施体制

本ニーズ調査を東北大学で受託するにあたり、光・量子ビーム科学連携推進室に設置された「次世代放射光施設に関するニーズ調査専門委員会」（以下では、専門委員会と略称）が担当した。光・量子ビーム科学連携推進室は光・量子ビーム施設をこれまで以上に有効活用し、東北大学から光・量子ビームを用いた新たな研究や、国の将来の大型施設の建設・運用に対して提案し、国際社会をリードしていくことを目的として、2014年2月19日に設置された。表1-1に示すように専門委員会は計18名の委員で構成され、多元物質科学研究所（以下では、多元研と略称）所長の河村純一教授が委員長を務めている。東北大学の受託事業体制は、契約権者は多元研所長の河村純一教授、業務責任者は専門委員会委員長の河村純一教授、業務

主任としてヒアリング調査は高桑雄二教授（多元研）、レビュー調査は上田潔教授（多元研）が担当した。

ニーズ調査の実務は、専門委員会の下に編制された作業チームにより行った。作業チームは業務責任者（1名）と業務主任（2名）に加え、表 1-2 に示すように実施者（14名）、補助者（14名）から構成される。実施者と補助者は主に多元研に所属する教員であるが、金属材料研究所、理学研究科、環境科学研究科、原子分子材料科学高等研究機構からも参加している。実施者として教授もしくは准教授、補助者として准教授もしくは助教が担当した。多元研からの参加者が多い理由は、放射光（17名）だけでなく、中性子（3名）、レーザー（8名）、電子顕微鏡（6名）などを専門とする教員が多いためである。環境・エネルギー、健康・医療、材料、情報通信、基礎科学、産業利用の6分野の実施者と補助者は、理化学研究所・大型放射光施設 SPring-8(播磨科学公園都市)や高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory (PF)（つくば）などで長年にわたる放射利用とビームライン建設の豊富な経験をもつ教員が多く含まれている。放射光以外の分野は、佐藤卓教授（中性子）、寺内正己教授（電子顕微鏡）、南部雄亮助教（中性子）、小澤裕市助教（レーザー）が担当した。

2.2 ヒアリング調査とレビュー調査協力者

ヒアリング調査とレビュー調査協力者として関連する研究分野に十分な知見を有する研究者および専門家を選定し、大学では准教授以上、企業では管理職相当に依頼した。選定にあたっては研究分野における専門性、調査協力者間のバランスも考慮した。ヒアリング調査協力者として大学や国立・公立研究所の研究者だけでなく、放射光の産業利用を考慮して企業からの研究者を含めるとともに、海外動向を把握するために外国人もしくは海外で研究活動を展開している日本人研究者からも意見を聴取した。レビュー調査協力者として各研究分野の研究者に加えて、放射光利用（実験装置・手法）に関する専門家を2名以上選定した。ヒアリングおよびレビュー調査協力者として放射光利用経験の有無にとらわれず各分野で著名な研究者を選定し、とりわけ社会的・科学的課題と取り組むべき研究内容、そして期待される放射光の貢献について意見を聴取した。

環境・エネルギー分野のヒアリング調査では表 1-3 に示すように、環境一般、資源リサイクル、地圏環境・除染、蓄電池、燃料電池、太陽電池、人工光合成、エネルギー安全、海外動向（光合成）の9分野を設定し、9名の研究者を選定した。海外からの研究者として、米国ローレンスバークレイ国立研究所 (LBNL)の J. Yano 研究員に依頼した。レビュー調査協力者として関連する分野の5名の研究者に加え、放射光利用の専門家として早川慎二郎教授（広島大学）と雨宮健太教授（高エネルギー加速器研究機構）の2名を選定した。

健康・医療分野のヒアリング調査では表 1-4 に示すように、創薬、幹細胞・再生医療、放射線生物学、バイオメディカルイメージング、細胞生物学、農学、食品、構造生物学の8分野を設定し、11名の研究者を選定した。海外からはドイツ・マックスプランク医学研究所の I. Schlichting 所長に依頼した。レビュー調査協力者として関連する分野の5名の研究者に加え、放射光利用の専門家として小林克己名誉教授（高エネルギー加速器研究機構）と八木直人室長（高輝度光科学研究センター）の2名を選定した。

材料分野のヒアリング調査では表 1-5 に示すように、半導体、炭素材料、ソフトマター、金属、酸化物、アモルファス・液体、有機 EL、金属錯体、海外動向（無機ナノ構造体、ソフト構造体）の 9 分野を設定し、9 名の研究者を選定した。海外からはスウェーデン・ストックホルム大の寺崎治教授に依頼した。レビュー調査協力者として関連する分野の 6 名の研究者に加え、放射光利用の専門家として組頭広志教授（高エネルギー加速器研究機構）と平井康晴副センター長（佐賀県立九州シンクロトン光研究センター）、そして太田俊明教授・センター長（立命館大学 SR センター）の 3 名を選定した。

情報通信分野のヒアリング調査では表 1-6 に示すように、スピンドバイス、有機デバイス、酸化物・プロセス、スピントロニクス、半導体デバイス、光通信・光デバイス、極端紫外 (EUV) リソグラフィ、情報ストレージ、半導体・相変化 RAM、海外動向（スピンドイナミクス）の 10 分野を設定し、10 名の研究者を選定した。海外からは英国・ヨーク大学の廣畑貴文教授に依頼した。レビュー調査協力者として関連する分野の 5 名の研究者に加え、放射光利用の専門家として鈴木基寛チームリーダー（高輝度光科学研究センター）と小野寛太准教授（高エネルギー加速器研究機構）、そして中村哲也主幹研究員（高輝度光科学研究センター）の 3 名を選定した。

基礎科学分野のヒアリング調査では表 1-7 に示すように、物理理論、物理実験、化学、生物、地学、海外動向の 6 分野を設定し、11 名の研究者を選定した。海外からは韓国・基礎科学センターの H.W. Yeom 教授（表面物理学）と米国・カリフォルニア大学の J. Miao 教授（コヒーレントイメージング）に依頼した。レビュー調査協力者として関連する分野の 5 名の研究者に加え、放射光利用の専門家として山本雅貴部門長（理化学研究所）と坂田誠客員主席研究員（高輝度光科学研究センター）、そして小杉信博教授（自然科学研究機構）の 3 名を選定した。

産業利用分野のヒアリング調査では表 1-8 に示すように、創薬、タイヤ、素材、応用化学、エレクトロニクス、エネルギー、自動車、分析評価、産業政策の 9 分野を設定し、10 名の研究者を選定した。海外からの研究者は含まれず、企業からは 6 名に依頼した。レビュー調査協力者として関連する分野の 5 名の研究者に加え、放射光利用の専門家として野村昌治教授（高エネルギー加速器研究機構）と片山芳則副センター長（日本原子力研究開発機構）の 2 名を選定した。

放射光以外の分野のレビュー調査では表 1-9 に示すように、電子顕微鏡（ハード）、電子顕微鏡（ソフト）、NMR（核磁気共鳴）、レーザー、ミュオン、中性子、総合手法の 7 分野を設定し、7 名の研究者を選定した。この分野では海外および企業からの研究者は含まれず、大学などの分析手法の専門家に依頼した。選定された 7 名の研究者は、電子顕微鏡と放射光の両者を用いて構造生物学の研究を進められている難波啓一教授（大阪大学）を除くと、放射光利用の経験はない。

2.3 ヒアリング調査とレビュー調査の進め方

ヒアリング調査の進め方

(1) 調査協力者に以下の調査項目を送付し、最初に書面での回答。

- ① 今後 5～10 年にわたって想定される社会的・科学的課題（技術動向、海外動向、社会構造変化などを含める）
- ② ①の各課題を解決するにあたり、取り組むべき研究内容
- ③ ②の当該研究内容を進めるにあたり、放射光がどのように貢献するのか
- ④ ①の各課題に対応するために要求される放射光施設のビーム性能（エネルギー、輝度、ビームサイズなどのスペックについて）
また、放射光施設への要望として蓄積リング、挿入光源、ビームライン（集光ミラーや回折格子など）、エンドステーション、運用システムの観点からの意見
- ⑤ ④で要求される放射光施設が整備・共用されるときとのメリット、整備・共用されないときのデメリット（我が国における科学技術・学術の発展、産業の活性化、人材育成、国際化などの観点からの意見）
- ⑥ その他

- (2) 書面回答にもとづいて、担当実務者が電話、スカイプ、もしくは直接面談によりヒアリング調査。
- (3) ヒアリング調査内容を A4 版 1 枚程度にまとめ、ヒアリング調査の個人報告書を作成。
- (4) 個人報告書を調査協力者に確認していただき、修正・追加・削除して修正版を作成。
- (5) 修正版個人報告書にもとづいて、聴取内容を研究分野ごとに整理し、A4 版 3 枚程度の取りまとめの作成。

レビュー調査の進め方

- (1) 事前にレビュー調査協力者に上記質問項目と、当該ヒアリング調査の個人報告書および取りまとめ報告書を送付。放射光以外の分野のみ、環境・エネルギー、健康・医療、材料、情報通信、基礎科学、産業利用の 6 分野のヒアリング調査の聴取内容を送付。
- (2) レビュー会議での意見交換は 7 研究分野ごとに東北大学東京分室もしくは東京サイトで、2 時間程度にわたり開催。レビュー調査協力者は全員出席、業務主任はオブザーバーとして参加。
- (3) レビュー調査の意見交換の司会は、当該分野の実務者が担当。
- (4) レビュー会議では、最初に調査協力者に一人ずつヒアリング調査の聴取内容について意見を述べていただいてから、意見交換を開始。
- (5) 放射光利用の専門家から、とりわけ取り組むべき研究内容に対して求められるビーム性能の妥当性と、ビーム性能が実現可能かどうかの観点からも意見聴取。
- (6) 放射光以外の分野でのレビュー会議では、課題を解決するための研究内容が放射光以外の実験手法で代替できるかといった観点から意見聴取。
- (7) レビュー会議は IC レコーダに記録し、議事録として発言者を明記して文書化。
- (8) 議事録はレビュー調査協力者に確認していただき、必要があれば修正・追加して修正版を作成。
- (9) 修正版の議事録にもとづいて、レビュー調査で得られた聴取内容を研究分野ごとに整理して、A4 版 3 枚程度の発言者を明記した取りまとめを作成。

(10) レビュー調査取りまとめの聴取内容を、ヒアリング調査取りまとめに反映させて改訂版を作成。

ヒアリング調査とレビュー調査の進捗状況および聴取内容取りまとめは専門委員会に3回報告し、意見交換を実施した。第1回は2014年9月30日に開催し、ヒアリング調査の聴取内容の紹介とレビュー調査の予定を説明した。第2回は2014年12月4日に開催され、レビュー調査の聴取内容の紹介と報告書の取りまとめ方針について説明した。第3回は2015年3月3日に開催され、ニーズ調査の報告書について意見交換を実施した。また、文部科学省に設置された「次世代放射光施設検討ワーキンググループ」(以下では、有識者会議と略称)においても、2015年1月7日に東北大学で進めてきたニーズ調査の概要を報告し、意見交換を行った。

報告書の作成

ニーズ調査報告書は3部から構成される。第一部では環境・エネルギー、健康・医療、材料、情報通信、基礎科学、産業利用の6研究分野のヒアリングとレビュー調査の結果に加え、放射光以外の研究分野のレビュー調査の聴取内容、そして専門委員会と有識者会議での意見交換を踏まえて、我が国の放射光施設に対する研究者のニーズと、今後の整備・利用促進に向けた観点を取りまとめた。第二部は、(1)ヒアリング調査で作成した6研究分野ごとの聴取内容と、(2)この聴取内容にレビュー調査の結果を反映したものである。第三部は、(1)ヒアリング調査で作成した研究者ごとの聴取内容についての個人報告書と、(2)レビュー調査で作成した7研究分野ごとの聴取内容から発言者を明記して取りまとめたものである。レビュー調査の議事録を参考資料として添付した。

以下では、ニーズ調査項目ごとの取りまとめについて述べる。

3. 今後5～10年にわたって想定される社会的・科学的課題と取り組むべき研究内容

3.1 今後想定される技術動向、海外動向、社会構造変化など

今後5～10年後に想定される技術動向として、(1)低環境負荷と環境汚染・破壊の抑止、(2)クリーンで安全なエネルギー供給、(3)省エネルギーと省資源・資源リサイクル、(4)安全で多様な食料供給、(5)先端産業技術の国際的競争激化、(6)飲料水、工業・農業用水の確保、(7)気候変動に伴う天候不順、(8)事故による放射能汚染や老朽化原子炉の処理、(9)高齢化に伴う医療費の急増、(10)高度情報化社会における情報通信データ処理・伝送量の急激な増加、(11)希少金属に頼らない元素戦略、(12)低炭素社会に向けた技術革新が、調査対象である6研究分野の全て、もしくは複数に共通するものとして挙げられた。これらの技術動向は密接に関連する。例えば、情報通信データ処理・伝送量の急増はエネルギー消費と熱負荷の増大をもたらす。これは環境・エネルギー分野での課題ともなり、その解決のために低消費エネルギーデバイス開発ではスピントロニクスが鍵とされる。量子テクノロジーとしてのスピントロニクスは、基礎科学分野で重要なテーマである。一方、スピンドバイス製作のために必要とされ

る磁性薄膜／酸化膜ヘテロ界面制御は材料分野の課題でもある。このように、今後想定される社会的・科学的課題に関する技術動向は分野間にまたがって密接に関連している。したがって、課題解決のためには、互いの分野が連携して研究内容に取り組むことが必要とされる。

我が国の持続的発展に向けた課題を海外動向から考えるとき、人類だけでなく地球生命圏の維持が、太陽エネルギーとそれによりもたらされる大気・水循環により基本的に支えられていることを認識する必要がある。地表における太陽エネルギーの収支バランスが気候変動をもたらし、温暖化・寒冷化だけでなく、氷河期にも関係していると考えられる。そのため、温暖化ガスが国際的に着目されているが、大規模な火山噴火による火山灰が成層圏まで吹き上げられ太陽輻射を遮ることによる寒冷化も心配されている。いずれにしても気候変動は生活環境にとどまらず、とりわけ農業に深刻な影響を与える。したがって、化石燃料の代替エネルギー源と省エネルギー技術の開発が世界で活発に展開されており、その中心は触媒や電池電極などの機能性材料開発である。このような機能性材料開発は、環境・エネルギーにとどまらず、健康・医療分野における医工学材料、情報通信分野における次世代電子・光デバイス用多層ヘテロ構造材料、産業応用分野における炭素繊維や高分子材料等にわたり、極めて重要である。材料科学に関連する学会、例えば Materials Research Society (MRS)は、米国だけでなく欧州とアジアにおいても広範囲に活動し、シンポジウムでの発表件数の多さから、各国が多岐にわたる材料開発を重点政策として進めていることが理解できる。

近年、海外では、レアメタルや化石燃料などに加えて、水が今後の重要な資源問題としてクローズアップされている。日本では、牧畜による地下水汚染がないので井戸から汲み上げた地下水を直接飲むことができる。冬期の降雪、梅雨、夏の台風、秋雨による豊富な水供給があるため、飲料水だけでなく生活用水、農業・工業用水にも困ることはない。しかし、世界では水不足が深刻な地域が多く、今後、飲料水だけでなく、生活用水や農業・工業用水の確保が課題となってくる。水問題は、浄化や淡水化により飲料水などを得るだけでなく、下水処理による環境汚染防止の技術開発も必要としている。このように水資源の有効活用においても高分子フィルターや吸着剤などの機能性材料の開発が重要である。

我が国で今後予想される社会構造変化の特徴は、人口減少と高齢化が同時に進行することによる産業や地域社会に与える影響である。日本の出生数は今後も減少が続くと考えられ、2010年に1.26億人あった人口は2027年には1.16億人、そして2049年には1億人を下回ると予想されている。他方、「国民衛生の動向2010/2011」（財団法人厚生統計協会）によると全人口に占める65歳以上の割合は、2005年の20%から2024年には31%まで増加すると推計されている。このことは労働力人口の著しい減少による経済活動の停滞をもたらすだけでなく、医療費や介護費の増大、地域社会の活動力低下が考えられ、我が国の持続的発展のために産業技術革新による経済活動の促進だけでなく、医薬品や医療器具、さらには病気診断技術などの予防医療の役割が重要になってくる。

3.2 研究分野ごとに考えられる社会的・科学的課題と、取り組むべき研究内容

【環境・エネルギー分野】

環境分野では、産業界におけるエネルギー多消費プロセスの改善、福島第一原子力発電所

の事故を踏まえた除染・廃炉などの環境調和・環境保全／回復、CO₂ ガス排出に伴う気候変動の抑制に関連する項目を課題として特定した。他方、エネルギー分野においては、地球規模でのエネルギー消費量の急増による環境破壊と、地球温暖化を抑制するためにクリーンで安全な持続可能エネルギーシステムの構築が急務である。このように環境問題とエネルギー問題は密接に関連しているため、その解決のためには、S + 3E (Safety, Energy security, Economic growth, Environmental conservation) を同時に達成するエネルギー供給体制の確立が必要である。

エネルギー関連の取り組むべき研究内容として、太陽光などの再生可能エネルギーの普及拡大に向けた材料・デバイス開発、燃料電池に代表される高効率発電技術の開発、また、再生可能エネルギーの系統連携や電力需給の平準化のための大型蓄電池、および電気・ハイブリッド自動車用蓄電池などの電力貯蔵技術開発、人工光合成、電解による燃料製造、将来的な水素エネルギー社会の実現のためのエネルギーキャリアの開発などが必要である。

環境分野において取り組むべき研究内容も、産業プロセスの省エネルギー化などの環境負荷低減に繋がる技術、福島第一原子力発電所 1～4 号機の事故原子炉だけでなく、40 年以上の稼働年数を越える老朽原子炉の安全な廃炉技術の確立、放射能汚染物質処理・除染などの環境保全／回復技術が重要である。持続可能エネルギーシステムの構築のためには省エネルギーだけでなく省資源・資源リサイクル、エネルギープラントの信頼性・安全性の研究が不可欠である。

【健康・医療分野】

今後の健康・医療における重要課題は、高齢化である。「国民衛生の動向 2010/2011」(財団法人厚生統計協会)によると、全人口に占める 65 歳以上の割合は、平成 17 年の 20%に対し、平成 27 年は 27%、平成 36 年には 31%と推計されており、日本の人口構成は急速に高齢化している。それに伴う医療費の増大と日本経済の圧迫は逃れられない最も深刻な問題である。その最善の対応策は病気の予防、早期発見、早期治療であり、また、個別化医療の進展はそういった場面でも重要な意味をもっている。高齢化に次いで考慮すべき課題は、健康維持のために不可欠な食料問題(農業)であり、希少疾患や新ウイルスへの対応、そして福島第一原子力発電所の事故によりもたらされた放射線影響の問題である。

そのために取り組むべき研究内容として、(1)高齢化社会の激化とそれに伴う医療費の増大および日本経済の圧迫、(2)がんの成因解明、超早期診断、根本的治療法の開発、(3)うつ病・認知症の克服を目指した精神活動・情動・記憶の分子論的解析、(4)循環器系疾患の早期発見・早期治療を可能にする技術開発、(5)細胞・個体老化機構の解明、(6)幹細胞の動態解明とその再生医療への応用、(7)現在あるいは近未来的に進められる創薬プロジェクトに沿ったタンパク質の高分解能構造解析、(8)希少疾患にも対応した新たな医薬品の開発とその効果的な投与体制の構築、(9)農業基盤を支える(構造)生物学の発展と種々の抗ウイルス薬剤の開発、(10)加齢等による構造多型・翻訳後修飾による遺伝子およびタンパク質構造多型のハイスループット解析が必要である。

【材料分野】

材料分野の課題はエネルギー問題、低環境負荷、希少金属に頼らない元素戦略、そして食糧や医療分野の4分野に区分される。材料研究の基本的なあり方として、最終製品への昇華と国レベルでの波及効果を見据えることが重要であり、そのための評価指針も必須である。そして、製品や機能を見据えた材料の組合せやシステム化を含めた材料研究、ニーズオリエンテッドな材料研究が、今後重要となる。

取り組むべき研究内容として、(1)エネルギー問題では、石油燃料から天然ガス、水素ガスや自然エネルギーへのエネルギー代替、ならびに創電やバッテリーなどの蓄電、(2)低環境負荷ではCO₂や毒物を発生しないプロセスや材料の開発、省エネルギー・軽量で強靱かつ高耐久の材料開発、(3)希少金属に頼らない元素戦略としてレアメタルフリーの触媒や磁性材料開発、(4)食糧や医療分野ではバイオ・ソフトマター材料と医工学材料の開発が重要である。これに加えて半導体分野では、超低消費電力極微細トランジスタに向けた材料開発、高密度集積不揮発メモリ材料の高度化、3D集積化に向けた材料開発だけでなく、ナノ加工とナノ構造作成技術の開発も必要である。材料分析技術の開発も重要であり、材料劣化などを調べるために動作状態での観測技術の発展も見逃してはならない。さらに、要求される機能から材料を設計して物質合成をアシストする理論手法がなければ今後の材料研究は進まないと考えられる。

【情報通信分野】

「科学技術イノベーション総合戦略2014」(2014年6月24日閣議決定)では、環境、医療、次世代インフラなど5項目が最重要政策課題と位置付けられ、それら全てに共通する分野横断基幹技術である情報通信(ICT)、ナノテクノロジー(NT)、環境技術の涵養・育成が唱えられている。現在、情報伝送量は毎年2.4倍の割合で増加を続けており、高度情報化は大量エネルギー消費と環境負荷増大をもたらしている。このような課題を解決するため、ビッグデータに代表される膨大な情報トラフィックに対応できる超高速・大容量データ処理・伝送技術と、ウェアラブル・ライフサイエンス・医療などに対応する軽量・小型・低消費エネルギーデバイスの開発が必要となる。

そのために取り組むべき研究内容として半導体・スピンドバイスにおいては、10年以内に7nm、その先には4nmの加工精度実現が要求されており、EUVリソグラフィーや原子・分子ビームによる加工技術などのプロセス技術開発ならびに半導体、配線、コンタクトなどにおける新規材料開発が必要である。またスピンドバイスやストレージデバイスなどの磁性材料を用いる分野においては、加工技術や新規材料開発に加えて、電圧などによる新規スピン駆動技術やピコ秒オーダーの動的スピン挙動制御の実現も極めて重要な研究である。光通信・光デバイスの研究では、波長多重通信に対応する光源、変調器、分波・合波などの素子開発ならびに集積化した光回路の構築、また有機デバイスにおいては機能性物質の探索と合成技術の開発が必要になる。情報通信分野における今後の研究開発ならびに産業応用においては、高度な分析・解析結果をプロセス・作製技術に迅速にフィードバックできるような研究体制、組織運営が重要となってくる。

【基礎科学分野】

人類が永続・繁栄するための持続可能社会の実現は分野を超えた本質的課題である。このため、6分野に共通して求められているのは、省エネルギー、省資源、高効率、適環境を実現する物質・生体機能材料の探索・開発とその高機能化である。一方、基礎科学は人類のみが可能な叡智の集積にも貢献しなければならない。エネルギー・資源・環境に直結する強い社会的ニーズを見据えながらも、それらに縛られない先導的なサイエンスの構築も必要である。

今後取り組むべき研究内容における重要なキーワードの一つは「量子サイエンス・量子テクノロジー」である。量子エレクトロニクス・スピントロニクス・量子通信等の量子テクノロジーとシームレスに繋がり、メソスコピック～マクロスコピックな生命現象・生体機能に量子性を適用する研究（例えば量子ソフトマター）も始まっており、分野横断的に研究が加速している。

自然界は、素粒子・電子・分子・細胞・地球・宇宙という広大な時間・空間スケールを持つ階層構造を構成し、互いがシームレスに繋がっている。この階層構造の理解が基礎科学分野における最も重要な課題のひとつである。物質・生体の微視的構造と巨視的機能は事の両面であり、切り離す事はできない。今後重要となるメソスコピック・不均一な集合体の構造・ダイナミクスの研究では、従来フーリエ変換で結ばれる、3次元空間と時間軸による4次元時空間での観測量と、3次元運動量空間とエネルギー軸による4次元エネルギー運動量空間での観測量の関係は破綻する。従って、 $4 + 4 = 8$ 次元空間の任意の場所で物理量を観測して研究することが必須である。そのために、8次元空間を観測する手段としての計測技術の開発も必要である。放射光はもとより、光（レーザー）・電子線・ミュオン・中性子などを融合的に用いた先端回折・分光技術の発展が要求される。

具体的な研究内容として、(1)凝縮系（ナノ）固体・液体・表面界面における電荷・スピン・軌道・格子状態の時空間階層構造と相転移・緩和メカニズムの解明、(2)分子内・分子間相互作用が作る電子状態・結晶構造の時空間階層構造と化学反応メカニズムの解明、(3)原子レベルから複合体としてのタンパク質に働く多体相互作用の時空間階層構造と生体反応メカニズムの解明、(4)超高压・超高温等の複合極限環境下における固体・液体の静的・動的挙動の解明とそれに基づく恒星・惑星の構造解明等が必要である。

【産業利用分野】

日本の主な産業としては、化学工業、電子デバイス・情報通信、金属工業、機械工業、プラスチック・ゴム、薬品・医療技術・食品、環境・エネルギー等がある。これらの産業は日本社会を支えており、それらの技術高度化には科学的課題の解決が必要とされている。例えば、化学工業分野では石油精製等に用いる触媒の開発、電子デバイス分野ではメモリ用の半導体や磁性体の開発、金属工業分野では高強度や高加工性の材料の開発、機械工業分野では安全性に優れた構造体の製造の課題があるが、その研究開発フェーズは個々の材料やプロセスによって異なるため、各要素課題の性格を考慮し、総合的に科学的課題を把握して解決を図ることが重要である。

日本の企業が有している競争力のある産業技術は、例えば航空機構造材として採用された炭素繊維や低燃費タイヤなどがあり、世界でオンリーワンかシェアが圧倒的に高い。このような我が国の国力に結びつく産業技術開発を牽引する研究が必要である。

取り組むべき研究内容として、化学工業分野では各種触媒反応の制御や各種電池における酸化還元反応の制御、電子デバイス・情報通信の分野では新規の半導体や配線材料の開発、金属工業では軽量化に向けた高強度材料の開発、機械工業では各種構造体の残留応力・ひずみの制御、プラスチック・ゴム分野では劣化抑制の制御等、薬品・食品等の分野では微小部の構造や組成の解析技術高度化、環境・エネルギー分野では廃棄物処理のための材料開発などが必要である。その課題解決にあたって、実際的な材料・デバイス・プロセスに対して高い空間分解能や時間分解能で分析や解析を行うことにより、特性制御機構を明らかにすることが不可欠であり、機構解明に基づく知見を新しいプロセス制御に反映させることにより、優れた特性の材料や製品が実現できる。

以上の解決すべき課題に対して、6分野横断的研究内容は以下の項目である。

- (1) 科学技術イノベーション総合戦略などの産業政策と連携した研究内容の設定
- (2) 科学的見地にもとづいた課題解決を可能とする研究内容の展開
- (3) 機能性材料の発現機構の解明と合成プロセスの探索、評価法の開発
- (4) 表面・界面の原子スケールでの解析、ナノ構造体の合成とナノプローブ評価法の開発
- (5) ソフトマテリアル、バイオ材料、タンパク質などの階層構造と物性の評価方法の開発
- (6) 不均一系の8次元（3次元空間+時間+3次元運動量+エネルギー）での統合探索

これらの項目を見ると、新たな評価方法の開発が必須であることは明らかであり、とりわけ今後の先端計測としてナノビームによる複合計測が重要である。

4. 放射光がどのように貢献するのか

4.1 これまでの放射光施設における放射光の貢献

1947年に米国・General Electricの70 MeV電子シンクロトロンで最初の放射光が観測されてから、1960年代のほぼ同じ時期に米国と日本で原子核実験用電子シンクロトロンからの放射光（第一世代光源）を用いた利用実験が開始された。日本では東京大学原子核研究所の750 MeV電子シンクロトロン（INS-SOR）を用いたものであり、X線吸収分光のパイオニア的研究が展開された。1974年に東京大学物性研究所の施設として電子蓄積リング（SOR-RING）が建設された。これは世界で最初の放射光専用リング（第二世代光源）であった。INS-SORとSOR-RINGにより、放射光利用実験の黎明期から発展期にかけて日本においても世界に伍するだけでなく、先駆けた研究が展開できた。とりわけ、SOR-RINGは多くの研究者に放射光利用を可能とし、半導体から生体までの広範囲の学問分野で放射光の威力を普及させる役割を担った。その研究成果が1982年に高エネルギー物理学研究所に建設された2.5 GeV電子蓄積リングのPhoton Factory（PF）の実現に結びついた。PFは学術研究に大きな貢献をしただけでなく、NTT、日立、NEC、富士通の専用ビームラインを設けることによって本格的な産業利用が開始された。PFの運用開始により放射光ユーザーが急増するとともに、1988年に

日本放射光学会が設立された。当学会は放射光科学の普及と発展に努めている。

1980年代から世界ではエミッタンスが $10 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 以下の高輝度第三世代光源の実現に向けた努力が続けられ、1992年にフランス・グルノーブルに世界初の第三世代 X 線光源 ESRF が運用を開始した。それに引き続き表 1-10 に示すように、欧州、米国、そしてアジアでも極端紫外線 (EUV) から X 線までをカバーする高輝度第三世代光源の建設が続けられている。日本でも、1997年に世界で3番目の高輝度第三世代 X 線光源として、8 GeV 電子蓄積リングの SPring-8 が運転を開始した。現在 (2015年)、日本で稼働中の高輝度第三世代光源は SPring-8 のみである。このように世界で高輝度第三世代光源の建設が進む中、日本では、表 1-11 にまとめるように、1983年に UVSOR (岡崎)、1996年に HiSOR (広島) と立命館大学 SR センター (草津)、2000年に NewSUBARU (播磨科学公園都市)、2006年に SAGA-LS (鳥栖)、2013年にあいちシンクロトン光センター (ASRC) (瀬戸) が共同利用を開始したが、これらはいずれも第二世代並みの輝度を持つ汎用小型光源である。これらに PF-AR (つくば) と X 線自由電子レーザー (XFEL) SACLA (播磨科学公園都市) を加えると、現在日本で稼働している放射光施設は 10 箇所となる。

2013年における日本放射光学会の会員数は約 1,400 名程度であるが、SPring-8 の延べ利用者数が年間約 13,400 名、PF の延べ利用者数が年間約 6,200 名であることから、日本の放射光ユーザーは 10,000 名以上と考えられている。これまで SPring-8 や SACLA を用いた先端探索から、SAGA-LS や ASRC を用いた汎用計測に及ぶ研究の広がりの中で、物質科学・生命科学から医学、そして学術研究・教育から産業利用へと放射光の貢献は引き続き拡大している。

4.2 次世代放射光施設に期待される放射光の貢献

【環境・エネルギー分野】

環境・エネルギー分野の課題に対して放射光が貢献できる評価内容と評価手法を表 1-12、研究内容を表 1-20 にまとめる。表 1-12 から表 1-17 に記載された評価手法の略号説明は、表 1-18 にまとめる。関連する分野を取りまとめることでヒアリング調査の 9 分野から、表 1-12 と表 1-20 では 7 分野となっている。例えば、資源リサイクル分野では低環境負荷・環境保全・資源回収技術の研究内容に対して、EXAFS/XANES による *in situ* 測定による反応機構・過渡特性解析や溶液中でのイオン種の構造解析、そして XPS による微小領域での高精度の元素分析・形態分析において放射光が有用とされている。他の分野についても同様で、必要な場合には関連する元素名を記してある。

当該分野では、放射光を利用した最先端の測定技術の対象範囲を広げ、多くの材料やデバイスの実使用環境下での評価 (*in situ* 測定、オペランド評価) が、より簡便にできることが重要である。また、環境除染分野ではアクチノイドのような取扱の制約の大きい放射性核種を含む試料について、安全性を十分考慮して微小サンプルを利用する場合は考えられるが、そうした場合には高輝度放射光源の利用が大変有効である。

【健康・医療分野】

健康・医療分野の課題に対して放射光が貢献できる評価内容と評価手法を表 1-13、研究内

容を表 1-21 にまとめる。関連する分野を取りまとめることでヒアリング調査の 8 分野から、表 1-13 と表 1-21 では 4 分野となっている。例えば、創薬などを視野にいたした構造生物学の分野では、タンパク質複合体の高次構造解析の研究に対して高輝度放射光を用いた X 線小角散乱による生体分子の溶液構造解析が、膜タンパク質の構造解析にもとづく創薬では X 線自由電子レーザーによる微小結晶を用いた生体分子の高分解能構造解析が必要である。現在加速的に進められつつあるタンパク質複合体および哺乳動物細胞由来膜タンパク質の構造解析における放射光の利用価値と必要性は、今後ますます高まると期待できる。

バイオメディカルイメージングでは、(1)がんの超早期診断、微小血管造影法の確立とその臨床への応用において、放射光単色 X 線と超高感度・高画質撮像デバイスとを組み合わせた造影システムの開発が急務であり、(2) 放射光を用いた X 線顕微鏡や X 線 CT で細胞内の構造（オルガネラ）を生きたまま動いている様子を可視化する技術の開発が必須である。さらに、放射光マイクロビーム技術を用いれば細胞内の所望の位置のみに X 線を照射できるので、低線量被曝の確率的議論から確定的議論へと転換させる理解の深化に有効である。高感度蛍光 X 線分析技術が植物内の元素動態分析に活用できるようになれば、福島第一原子力発電所の事故後の汚染・除染の問題や食糧問題に多大な貢献が期待できる。

【材料分野】

材料分野の課題に対して放射光が貢献できる評価内容と評価手法を表 1-14、研究内容を表 1-22 にまとめる。ヒアリング調査の 9 分野から関連する分野をまとめ、表 1-14 と表 1-22 では 8 分野としている。例えば、磁性材料分野ではバルク材料の粒界構造の研究において XMCD/XMLD によるナノ顕微分光による磁区観察、金属分野での革新的電池・発電材料の開発では X 線吸収分光による化学組成／結合状態／原子価の解析において放射光が必要とされている。革新的な新しい材料開発のためには新現象の探索とメカニズム解明が必須とされ、メカニズム解明のための放射光を用いた分析や解析は必要不可欠となっている。

材料研究では内部とは異なる性質を持つ表面層が邪魔になる場合が多い。高輝度放射光による HAXPES は表面層を気にせずに材料内部の深い領域や埋もれた界面などの評価できるので材料研究に極めて有効である。また、高輝度ナノビームと波長可変性の特長を活用する新規分析手法が、新しい材料開発研究に大きく寄与すると期待されている。例えば、磁気記録媒体は将来的に 5 nm 程度のビットパターンに向かっており、バルク材料の粒界構造の観察においても高分解能イメージングが不可欠である。顕微分光に代表されるナノビームを利用した研究手法により、生物の観察、不均一デバイスなど挑戦的研究分野の進展が期待できる。また、地域産業連携の観点からは、自治体の試験研究機関が地域産業におけるパブリックサービスとして先端を切り開く必要があるため放射光は利用価値が高い。

【情報通信分野】

情報通信分野の課題に対して放射光が貢献できる評価内容と評価手法を表 1-15、研究内容を表 1-23 にまとめる。ヒアリング調査の 10 分野から関連する分野をまとめ、表 1-15 と表 1-23 では 7 分野としている。例えば、光通信・光デバイス分野での波長多重通信に対応する分波・

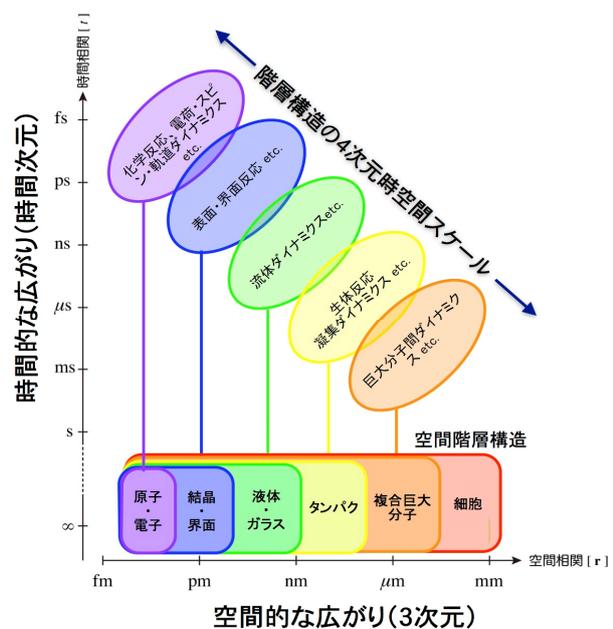
合波などの素子開発では放射光を用いた XRF による極微量不純物分析や光集積回路用短時間大面積露光技術が、相変化 RAM の研究では放射光を用いた XANES/HAXPES によるナノ領域の構造・化学状態の動的分析が不可欠である。

情報通信分野において次世代デバイス、プロセス、新規材料などの研究開発において、表面・界面における原子レベルでの分析ならびに制御が極めて重要であり、一般的な化学分析・構造解析手法に加え、さらに表面・界面の原子レベルでの高精度な分析に対する期待が高まっている。そのため、放射光ナノビームを用いた高い空間分解能（10 nm 以下）と時間分解能（ピコ秒オーダー以下）を有する各種計測技術が要求されている。また、半導体分野では超高純度、低欠陥密度の単結晶膜、ストレージ分野ではナノメートルサイズで高度に制御された金属グラニューラー薄膜が必要で、放射光を利用したオペランド計測は結晶成長メカニズムに関する重要な知見を提供することが期待される。製造現場において日々の製品不良やトラブルの対応に放射光利用は有用であり、最先端放射光を用いた材料開発も不可欠である。

【基礎科学分野】

基礎科学分野の課題に対して放射光が貢献できる評価内容と評価手法を表 1-16、研究内容を表 1-24 にまとめる。ヒアリング調査の 6 分野から関連する分野をまとめ、表 1-16 と表 1-24 では 4 分野としている。例えば、物性物理学での凝縮系の研究では、放射光ナノビームを用いた XAFS/XPS/XRD が、均質～不均質系、バルク～表面界面系、周期系～非周期系における電荷・スピン・軌道・格子状態の時間空間階層構造や相転移・緩和ダイナミクスの解明に効果的である。

物質・生体の構造・ダイナミクスは図 1-1 に示すように、フェムト秒～秒及びフェムトメートル～メートルの広大な時空間において階層構造を成している。調査した 4 研究分野はそれぞれに特徴的なスケールで階層構造をもち、その時空間構造を明らかにすることが必要である。8 次元空間（3 次元空間+時間+3 次元運動量+エネルギー）の任意の領域に「最適な」時間空間分解能で「自在に」アクセスし、求めるべき物理量を計測する手段は放射光において他にはない。次世代放射光施設では、高い時空間分解能でのナノスケール構造解析、イメージング、オペランド観察、顕微分光が、原子・電子レベルの構造・ダイナミクスから、細胞・一生命体、惑星・恒星の構造・ダイナミクスまで、これまで得られなかった広大な領域の階層構造の解明に貢献することが期待される。



【図 1-1】 階層構造の理解と次世代放射光施設

【産業利用分野】

産業利用分野の課題に対して放射光が貢献できる評価内容と評価手法を表 1-17、研究内容を表 1-25 にまとめる。表 1-17 と表 1-25 では、関連する分野をまとめ、ヒアリング調査の 9 分野から 6 分野としている。例えば、触媒反応、電池の酸化還元反応の解明・制御の研究では、新規レアメタルフリー非金属触媒の機能解明と実デバイス開発、重元素ドーブ軽元素触媒の化学分析による材料設計において、放射光を用いた時間分解 XAFS や XPS/HAXPES などが有用である。プラスチック・ゴムなどの分野の材料劣化の解析・制御の研究では、複雑系としてのタイヤゴムの階層的構造経時変化・外場応答・化学反応ダイナミクスを、時分割・エネルギー可変 SAXS/WAXS/USAX や X 線位相コントラストイメージングなどの手法を用いて研究することが有用である。

産業利用分野では、とりわけ実用環境下で外場（熱、応力、電圧、光など）を付加しつつ行う電気デバイス・蓄電デバイス・材料の放射光オペランド分析が不可欠とされている。また、時間分解 XRD 等の平衡状態の多次元イメージングや時間分解 XAFS (XANES+EXAFS) などの計測技術も重要で、平衡状態のみを見ては分からない過渡特性の評価に大きく貢献できる。今後、実環境だけでなく、極限環境下における「その場観察」、「時分割測定」が安定して行えるようになると期待できる。

調査対象の 6 分野に共通した次世代放射光が貢献すべき普遍的な課題と役割は、次のようにまとめられる。

- ・ 人類が永続・繁栄するための持続可能社会の実現（環境・エネルギー、健康・医療）
- ・ 技術立国として、国際競争力の維持・向上（材料、情報通信、産業利用）
- ・ 人類の知の蓄積（基礎科学）
- ・ 科学技術、産業イノベーションを創出・加速
- ・ 新産業育成のエンジン

また、6 分野での特徴的な放射光利用は、以下の通りである。

- (1) 環境・エネルギー分野：各種電池用の材料・デバイス・プロセスの実動作環境下でのオペランド評価
- (2) 健康・医療分野：X 線顕微鏡や X 線 CT による可視化・高解像度リアルタイム解析、画像診断技術
- (3) 材料分野：元素選択的な波長可変高輝度ナノビームを用いた不均一材料やナノ構造の解析
- (4) 情報通信分野：高空間分解能 (< 10 nm) と高時間分解能 (< 1 ps) での表面・界面分析
- (5) 基礎科学分野：元素を選択して最適な時間・空間分解能、最適なエネルギー・運動量分解能で解析
- (6) 産業利用分野：実際的なデバイスやプロセスの解析、微小部解析、微量元素解析

以上から、分野ごとの特徴というよりはむしろ次世代放射光が必要とされる共通項が見取れる。

【放射光以外の分野】

放射光以外のレビュー調査では、6 研究分野のヒアリング調査取りまとめにもとづいて意見交換を行った。各分野から提案された社会的・課題と取り組むべき研究内容、そして課題解決のために放射光がどのように貢献できるかについて意見交換を行うとともに、課題解決にあたり放射光以外のツールで代替できないかとの観点からも意見交換した。

全ての研究者から、放射光の代替・競合としての NMR や電子顕微鏡などの利用ではなく、それらの相補的な役割（組み合わせ）が重要と指摘された。そのほか、次のような具体的意見があった。

- ・ 放射性物質が取り扱い可能な X 線分析施設は除染で重要、微量分析（ppt, ppb）は毒物分析などで貢献、使い易い施設は装置よりも組織が重要（電子顕微鏡）
- ・ 構造生物学でのビームタイム不足を解消するため複数の中型放射光施設が必要、結晶化が難しいタンパク質の構造解析法の開発も必要（電子顕微鏡）
- ・ 次世代放射光施設の建設は研究者と技術者の育成のためにも必要、放射光で見え難い対象について NMR などを相補的に利用することが重要（NMR）
- ・ 既存放射光施設の運営方式の検討が必要、次世代放射光施設はユニークさで世界一を目指すべき、ダイナミクス計測が重要（レーザー）
- ・ スイスのポールシェラー研究所のように、放射光だけではなく他の量子ビームとの複合・連携利用ができる施設も考えられる（ミュオン）
- ・ 中性子による分析ではできないオペランド計測や顕微観察は重要、中性子・レーザー・放射光の特徴を有効利用した相補的解析法の開発が必要（中性子）
- ・ 目的を明確にして大型施設の社会的受容性を高めることが必要、産業利用の促進のためのコーディネート仕組みが重要（総合手法）

5. 次世代放射光施設に求められるビーム性能

5.1 次世代放射光施設に求められるビーム性能の取りまとめ

【環境・エネルギー分野】

環境・エネルギー分野での課題解決のために要求される放射光施設のビーム性能を、現行施設の性能と比較した新施設への要望を表 1-12 にまとめる。調査した分野により、用いられる評価方法や観察対象が異なることに対応して、要求される光エネルギー領域、輝度、ビーム径などが異なる。このように広範囲に及ぶビーム性能を特徴づけるために、表 1-19 にまとめるように輝度とエネルギーに着目してクラスター化し、(1)構造解析、(2)分光、(3)先端分光、(4)先端構造解析、(5)蓄積リング型低エミッタンス光源によるコヒーレントイメージング、(6)直線加速器型光源によるフェムト秒イメージングの 6 領域に区分した。

表 1-20 にまとめたビーム性能の分類まとめから、環境・エネルギー分野のどの分野においても構造解析領域と分光領域とに分類したビーム性能への要望が多いことがわかる。材料・デバイス・プロセスの実動作環境下でのオペランド評価への要望が多いことから、高輝度放射光による先端分光領域への希望も多い。用途によって大きく異なるものの、高輝度（ $\sim 10^{20} - 10^{21}$ photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw）、高エネルギー分解能（ $\Delta E/E \sim 10^{-4}$ ）、高空間（ ~ 10 nm）・

高時間分解能 (~1 ps) といった要求が多く見受けられる。とりわけ、地圏環境・除染の分野では先端構造解析とコヒーレントイメージングも必要とされている。原子炉構造材料や放射能汚染物質の性状を解明するためには、電子状態と構造に関する基礎的なデータに加え、構成する元素の化学状態、これらの空間的な分布、反応あるいは放射性壊変に伴う時間変化などの分析を行うことが必要であり、そのためにはマイクロフォーカスあるいはコヒーレント放射光を利用したイメージングによる局所的分光分析と局所構造解析、またはそれをインテグレートした知見が不可欠だからである。

全ての分野で希望があったオペランド測定では高輝度光源が不可欠である。時間分解能は対象とする現象により異なるが、デバイス・システムの経時変化を見るのであれば秒単位でも十分な場合があり、拡散にかかわる現象ならミリ秒単位、触媒上での反応ではさらに高い時間分解能が必要となる。したがって、用途に合わせたオペランド測定用ビームライン/エンドステーションの設計が重要である。

【健康・医療分野】

健康・医療分野での課題解決のために要求される放射光施設のビーム性能を施設への要望と合わせて表 1-13 に示し、クラスター化した結果を表 1-21 にまとめる。

当該分野では、構造解析領域のビーム性能が全てのヒアリング調査協力者から要望された。また構造生物学分野からは、非常に多くのタンパク質分子の構造決定が必要なことを反映して、ビームラインの増設と自動化による迅速計測への希望が多く出された。この硬 X 線領域の放射光は構造解析だけでなく X 線イメージングにも分光実験にも広範囲で利用されている。分光実験に用いられるのは、植物などの元素動態分析に放射光 X 線蛍光分析が有用だからである。また、タンパク質・糖・脂質の構造解析、タンパク質複合体の高次構造解析、農業を支える薬剤開発などの研究のために、コヒーレントイメージングや軟 X 線 FEL を用いたフェムト秒イメージングへの強い要望があった。

このような広範囲の要求を満たすためには、放射光施設ごとに際立った特長・利点をもたせることが重要であり、他の施設と比べ長波長側に高輝度をもつビームラインや微小結晶にも対応したマイクロフォーカスビームライン、さらには軟 X 線 FEL も必要である。一方、汎用的なタンパク質結晶構造解析に関しては、質的向上よりも量的向上、すなわち、汎用ビームラインの拡充とビームタイムの増加が必要である。創薬を推進するためには、これに加え、数百・数千の結晶試料を迅速に測定するスループットが必要なため、高速読み出し可能な X 線検出器やロボットの導入、ミニハッチ方式のような運営面での工夫も必要である。

【材料分野】

材料分野での課題解決のために要求される放射光施設のビーム性能をビームライン/エンドステーションへの要望と合わせて表 1-14 に示し、クラスター化した結果を表 1-22 にまとめる。当該分野では、元素分析や化学結合状態解析、電子状態観察のため、全ての分野において分光および先端分光領域の放射光ビーム性能への要望があった。また、アモルファス・液体分野をはじめとして多くの分野で構造評価が不可欠であるため、構造解析と先端構造解析

領域の放射光への要望もあった。他方、コヒーレントイメージングと XFEL への強い要望は見られなかった。

材料研究においては、構造を調べるために硬 X 線による X 線回折、小角 X 線散乱、広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) が用いられるとともに、電子状態を調べるために、軟 X 線による吸収分光、発光分光、光電子分光等が用いられるため、軟 X 線から硬 X 線を発生できる放射光リングが必要である。とりわけ、ソフトマター・炭素・有機 EL などの軽元素分析に対応するため、10 eV から 1000 eV の領域でも十分な強度が期待できる中規模リングが求められる。現状よりも高い時空間分解能、高いエネルギー分解能、高い輝度の実現が各分野における今後の研究開発推進のキーポイントとなるので、次世代放射光施設において約 1 nm・rad の低エミッタンス光源がひとつの目標点となる。

【情報通信分野】

情報通信分野での課題解決のために要求される放射光施設のビーム性能を施設への要望と合わせて表 1-15 に示し、クラスター化した結果を表 1-23 にまとめる。当該分野においても材料分野と同様に化学分析・電子状態分析が主要な評価であるので、分光および先端分光領域の放射光への要望が多い。界面構造やナノ領域の構造解析のために、構造解析と先端構造解析領域の硬 X 線も必要である。この分野でもコヒーレントイメージングとフェムト秒イメージングへの強い要望は見られなかったが、中型高輝度光源だけでなく、回折限界光源への期待もあった。軟 X 線領域および硬 X 線領域において、現状よりも高い時空間分解能、高いエネルギー分解能、高い輝度を、実現すべきである。

【基礎科学分野】

基礎科学分野での課題解決のために要求される放射光施設のビーム性能として現行施設のものと新施設への要望と合わせて表 1-16 に示し、クラスター化した結果を表 1-24 にまとめる。当該分野では先端分光領域の高輝度放射光への要望が強く見られた。とりわけ、物性物理学、化学、生物・生命科学の分野では軟 X 線領域の FEL を用いた研究が多く提案され、コヒーレントイメージングも生物・生命科学で要望された。

物性物理学分野では、硬 X 線による構造解析が重要であることはもちろんであるが、軟 X 線の放射光が物質の基本となる電荷・スピン・軌道相互作用の研究に不可欠であり、100 eV から 4000 eV の領域も重要である。この領域は現在欧米施設の独壇場であり、この状況を覆すために、次世代施設では国内現行施設の 100 倍の輝度 (フラックス) が必要である。「量子サイエンス・量子テクノロジー」の重要性は世界中で認識されており、国家の科学技術施策として様々なプロジェクトが進行している中で、我が国がこの世界的潮流に追いつき、追い抜くためには次世代高輝度放射光施設が不可欠である。

物質・生命の多様な階層性を解明するため、一つの放射光施設で全ての要求を満たすことを考えるのではなく、我が国の放射光施設全体として機能的に連携することで、多様な性質の放射光ビームを有効利用できることが重要である。

【産業利用分野】

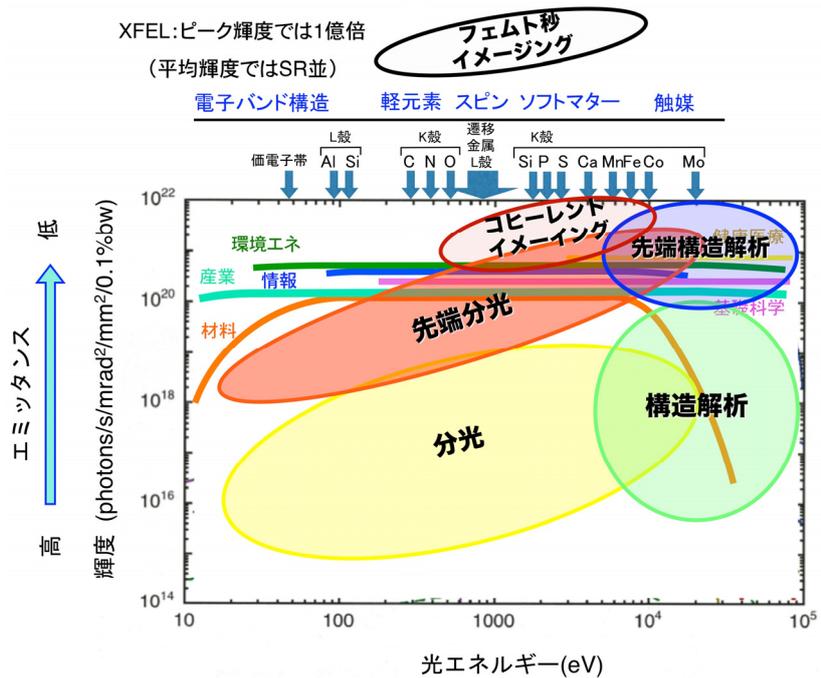
産業利用分野での課題解決のために要求される放射光施設のビーム性能を施設への要望と合わせて表 1-17 に示し、クラスター化した結果を表 1-25 にまとめる。この分野においても化学組成や構造の材料評価が重要なので、構造解析と分光領域に加えて先端分光領域の放射光が求められている。例えば、化学工業分野でのデバイス内化学反応・劣化過程の時間分解可視化、金属工業分野での応力応答評価（歪み・腐食割れの生成確認）の研究では、高輝度放射光のナノビームを用いた XPS や XRD が有用である。また、複雑系としてのタイヤゴムの階層的構造経時変化・外場応答・化学反応ダイナミクスの追跡、そしてタンパク質の 3 次元構造解析において、高空間コヒーレンスをもつ放射光によるコヒーレントイメージングが求められている。

測定手法によって必要とされる放射光を区分すると、UPS、XPS、HAXPES 用に EUV から X 線までのエネルギー領域（数 eV—数 keV）、XRD による内部の残留応力測定用に 100 keV 程度までの硬 X 線、XAFS 測定では数 keV から 20 keV 程度までの X 線が必要とされ、EUV から硬 X 線（数 eV—100 keV）までの広範囲に及ぶ。また、現状最高レベルの数 nm のビームサイズに加え、二次元イメージングのために平行性の良いビームも必要である。

放射光ビーム性能への要望のクラスター化とそれぞれの放射光領域での特徴

表 1-20 から表 1-25 にまとめた要求される放射光ビーム性能の分類は、表 1-19 に示したように輝度とエネルギーに着目してクラスター化したものである。各クラスターの輝度・エネルギー領域を、図 1-2 を用いて比較する。エネルギーに沿って記された矢印は各元素の K 吸収端または L 吸収端のエネルギー位置である。分光および先端分光領域のエネルギー範囲が 20 eV

から 20 keV となっているのは、価電子バンド構造の UPS 観察ではもっぱら 20 eV 近傍の EUV が使われる一方で、金属触媒等の X 線吸収測定ではもっぱら 20 keV 近傍までの硬 X 線を必



【図 1-2】 放射光ビーム性能の輝度、エネルギー、コヒーレンス度による分類と、放射光施設に要求されるビーム性能についての 6 領域のまとめ

要とするからである。このエネルギー領域の放射光を用いることにより C から Mo までの元素を調べることができ、電子バンド構造や触媒だけでなく、軽元素、スピン、バイオ・ソフトマターを対象とすることができる。そのため、環境・エネルギー/材料/情報通信/産業利用分野の主要研究内容をカバーできるだけでなく、健康・医療や基礎科学の生物・生命科学の分野の研究内容にも対応することができる。

分光領域と先端分光領域の違いは、放射光源の輝度の違いであるが、この違いは蓄積リングのエミッタンスの違いに還元できる。ここでエミッタンスとは電子ビームのサイズと発散角の積で与えられ、一方、輝度は光フラックスをエミッタンスで割ったものである。したがって、蓄積リングのエミッタンスを低くすることにより、輝度は分光領域から先端分光領域へと増加できる。これに加えエミッタンスをさらに小さくすると、放射光のコヒーレント成分が増加し、図 1-2 のコヒーレントイメージング領域となる。

エミッタンスを小さくして電子ビームのサイズが光源サイズよりも小さくなると、これ以上エミッタンスを小さくしても輝度の増加は見られなくなる。このような超高輝度光源は、回折限界光源と呼ばれる。回折限界波長はエミッタンスに比例し、エミッタンスが $1 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ のとき 125 nm (0.1 keV) である。限界波長よりも短波長側でも、ある割合でコヒーレント成分は含まれる。図 1-2 のコヒーレントイメージング領域 ($0.5 \text{ keV} - 10 \text{ keV}$) のコヒーレント性の高い放射光を得るためには、エミッタンスを $0.1 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 程度まで低くしなければならない。

一方で、直線加速器型光源の XFEL によって、空間的にコヒーレントな光源が実現される。現状の XFEL はピーク輝度では $10^{28} - 10^{30} \text{ photons/s/mrad}^2/\text{mm}^2/0.1\% \text{ bw}$ を実現できるものの、平均輝度ではリング型のものと同程度である。この XFEL を用いた実験で要望されたビーム性能を、図 1-2 のフェムト秒イメージング領域として示す。

XRD による汎用構造解析で必要とされる放射光が、図 1-2 の構造解析領域 ($5 \text{ keV} - 100 \text{ keV}$) である。この領域は調査した分野のほとんどで要望があり、非常に多くの需要がある。分光領域 ($20 \text{ eV} - 20 \text{ keV}$) では、XAFS による汎用元素分析・状態解析への要望が多かったことと似ている。今後、情報通信分野でのナノ粒子界面の構造解析や、環境・エネルギー分野での放射能汚染粒子の空間分布計測のためにナノビームが必要とされるが、ナノビームを用いた XRD に必要なビーム性能を、図 1-2 に先端構造解析領域として示した。

表 1-12 から表 1-17 にまとめられたビーム性能の取りまとめには、輝度とエネルギー以外のスペックについても調査した。集光ビームサイズと空間・時間分解能への要望は以下の通りであった。

【集光サイズ、空間分解能】

- 材料・情報通信・産業利用などのナノサイエンス・ナノテクノロジー分野
ビームサイズ：10 nm
空間分解能：1 nm (PEEM やタイコグラフィーなどのイメージングも含めて)
- タンパク質構造解析
ビームサイズ：1 μm - 100 μm 可変
- X 線イメージング
ビームサイズ：平行性の良い 2 mm 程度

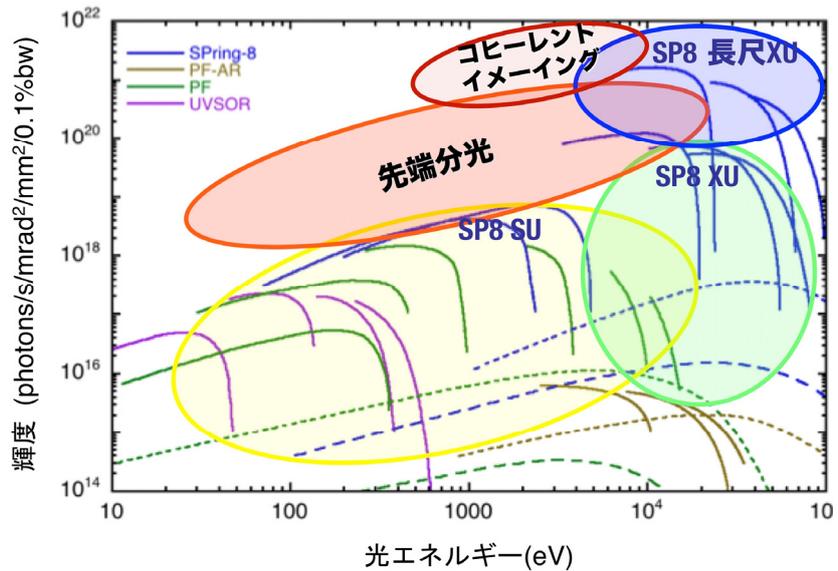
【時間分解能】

- ・ 超高速現象・反応素過程の追跡（基礎科学）
1 fs（XFEL）
- ・ ナノサイエンス・ナノテクノロジー分野
1 ps
- ・ 材料の経時変化の追跡（環境・エネルギー、材料、産業利用）
1 ms – 1day（常時観察
ではなく、例えば一日
毎に数分計測して数
ヶ月から数年継続）

5.2 日本の放射光施設の
ビーム性能の現状

我が国の既存放射光施設（SPring-8, PF-AR, PF, UVSOR）のビーム特性と、ニーズ調査で得られた要望のクラスター領域を重ねて図 1-3 に比較する。破線は偏向電磁石からの放射光、そして実線は挿入光源からのものである。

例えば UVSOR の挿入光源からは 500 eV のエネルギー領域で 10^{17} photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw 以下の輝度の放射光が利用できる。PF の場合には約 20 keV まで光エネルギーが拡大され、輝度も約 10 倍高くなっている。SPring-8 ではさらに高エネルギー側に広がるとともに輝度も向上し、長尺の X 線アンジュレータでは 10^{21} photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw まで達している。しかし、エネルギーが 100 eV – 2,000 eV 付近では PF と同程度となっている。このデータに要望されたクラスター領域を重ねると、分光、構造、先端構造の 3 領域への要望は既存の放射光施設の多くのビームラインで実験可能であることが分かる。ただし、先端構造解析領域をカバーできているのは、SPring-8 の理研長尺アンジュレータビームライン 1 本のみである。これに対して先端分光およびコヒーレントイメージングについては、我が国の既存放射光ビームラインでは対応できないことが分かる。さらに、この図には示されていないが、フェムト秒イメージング領域での要望へは、4 keV 以上の硬 X 線領域では稼働中の SACLA がカバーしているが、それ以下の軟 X 線領域は現在カバーされていない。以上のことから、ニーズ調査での要望に対して既存の放射光施設で対応できず、今後整備が望まれる次世代放射光施設でカバーすべき領域は先端分光、コヒーレントイメージング、軟 X 線領域のフェムト秒イメージング、および先端構造解析領域の増強である。



【図 1-3】 放射光施設に要求されるビーム性能領域と日本の放射光施設の現状

次に、我が国で稼働中の蓄積リング型の放射光施設の現状を考えるために、表 1-11 にまとめた放射光施設の所在地を図 1-4(a)の日本地図に示す。図中には示されていないが、SACLA は、播磨科学公園都市にある SPring-8 に併設されている。つくばに設置されている PF/PF-AR が最も東側であり、鳥栖に設置されている SAGA-LS は最も西に位置しており、他の施設は両者の間に分布している。そして、現在東北・北海道地区に放射光施設は稼働していない。

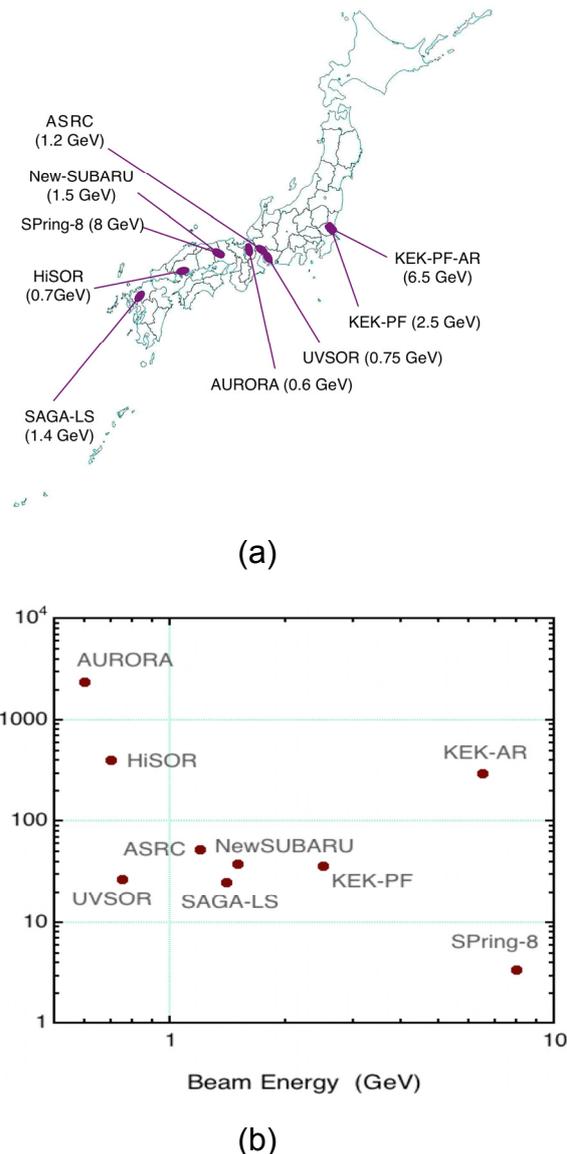
各放射光施設のエミッタンスとビームエネルギーの関係を、図 1-4(b)にまとめる。高輝度化に向けた改修作業が繰り返された PF や UVSOR、そして近年運転開始された NewSUBARU、SAGA-LS、ARSC は、エミッタンスが $20 - 50 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ の範囲に分布しており、SPring-8 ですらも $3 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ にとどまっている。我が国の放射光施設において先端分光とコヒーレントイメージング領域の輝度を実現できない理由は、このようにエミッタンスが大きいことが原因である。

したがって、次世代放射光施設で先端分光とコヒーレントイメージング、SPring-8 長尺アンジュレータビームラインでしか実現できていない先端構造解析領域の輝度をカバーするためには、次節で述べるように、蓄積リングのエミッタンスを $1 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ 程度まで低くする必要がある。

さらに、コヒーレントイメージング領域を追究するためには、さらなる低エミッタンスを目指す必要がある。また、現在 SACLA でカバーできていない軟 X 線領域のフェムト秒イメージング領域を実現するためには、 3 GeV クラスの直線加速器型光源が必要である。

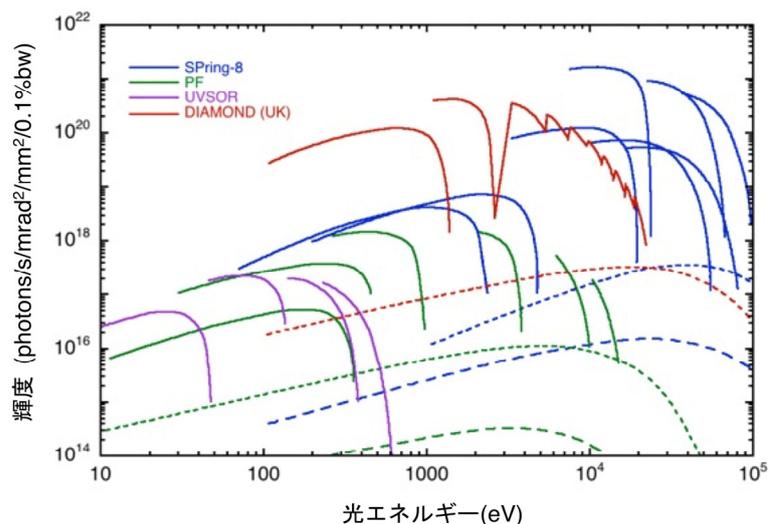
5.3 世界の放射光施設のビーム性能の現状と今後

エミッタンスが $10 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ 以下の高輝度第三世代放射光施設は表 1-10 に示すように、1992 年に運用開始された ESRF (フランス) から 2015 年の NSLS-II (米国) まで 17 施設が現在稼働中である。また、TPS (台湾)、MAX-IV (スウェーデン)、SIRIUS (ブラジル) は建設中で



【図 1-4】 日本の蓄積リング型放射光施設の(a)立地分布と、(b)水平方向エミッタンスとビームエネルギーの関係

ある。これに対して、我が国における第三世代放射光源は SPring-8 のみであり、建設中のものはない。世界の第三世代高輝度放射光源は欧州に多いだけでなく、米国でも 3 施設、そして韓国、中国、オーストラリアのアジア・太平洋地域でも稼働中である。欧州では物質科学にとどまらず、とりわけ生命科学での有用性が高いと認識されている。韓国や中国では先端科学技術の研究開発を牽引するエンジンもしくは COE としての期待が大きい。



【図 1-5】 第三世代放射光施設 (DIAMOND、英国) の輝度と光エネルギーの関係と日本の放射光施設との比較

表 1-26 に運転／建設中の中型高輝度放射光施設の光源パラメータを示す。ビームエネルギーは SLS (スイス) と SOLEIL (フランス) がそれぞれ 2.4 GeV と 2.75 GeV であるが、他は全て 3 GeV である。エミッタンスは SLS の $5 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ から MAX-IV の $0.33 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ まで低くなっている。この中で DIAMOND (英国) の光源特性を、図 1-5 において我が国のものと比較する。偏向電磁石による放射光では、エネルギー領域 (0.1 keV – 10 keV) において PF のものより 1 桁以上大きいだけでなく、高エネルギー側まで延びている。挿入光源では 100 eV – 1000 eV において、SPring-8 のものよりも 1-2 桁輝度が高くなっている。さらに重要なことは、3 GeV 規模の蓄積リングで $1 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ あるいはそれ以下のエミッタンスに到達すると、20 keV においても SPring-8 と同程度の輝度が実現できていることである。この結果は先端分光領域で要求される光源特性と重なる。我が国では現在全く対応できていない一方で、SLS、SOLEIL、DIAMOND 等といった海外の高輝度放射光施設では先端分光領域のうち 5 keV 以下の高輝度軟 X 線領域はカバーされている。このように、我が国の放射光施設で空白領域となっている先端分光領域の高輝度軟 X 線は、これまでに開発された技術によりつくり出すことが可能である。

世界における高輝度放射光源の今後の動向を考えるために、表 1-26 に示すエミッタンスとリング周長の関係を図 1-6 にまとめる。ビームエネルギーが等しければ、エミッタンスを対数でプロットしたとき、リング周長とほぼ直線的な関係にあることが分かる。基本的には同じ加速器技術で建設された放射光源は、周長を長くすることでエミッタンスを著しく低くできることを意味している。偏向電磁石の中で電子軌道が曲げられるとき放射光が発生するが、それによるエネルギー損失した電子は設計軌道から曲がり、ビーム分散を大きくしてしまう。この分散を防ぐために、4 極や 6 極磁石で集束している。このような効果によるビーム分散の増大を防ぐためには、電子をできる限り緩やかに曲げる、つまり、リング周長を大きくす

るか、偏向電磁石を分割して、できるだけ少し曲げては集束を繰り返すこと、さらにはビームエネルギーを小さくすることが必要である。ビームエネルギーとラティス構造（偏向-集束電磁石の配列）が同じであればエミッタンスは周長で決まることになる。図 1-6 で SPEAR-3 と NSLS-II のビームエネルギーは同じ 3 GeV であるが、前者のエミッタンスは 9.8 nm·rad であるのに対して後者が 0.55 nm·rad まで低くなっているのは、

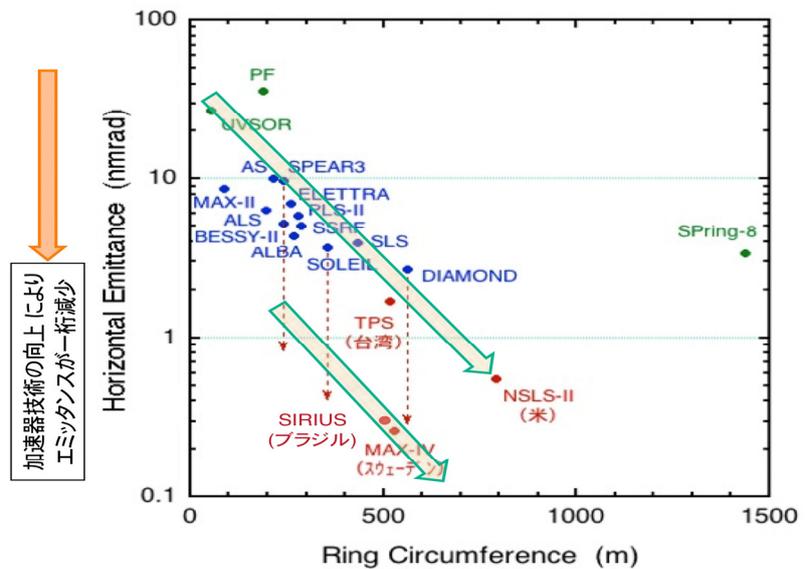
主に周長が 234 m から 791.5 m と長くなっているからである。ここでビームエネルギーを下げることは低エミッタンス化に有効だけでなく、電力消費量の抑制にもつながる。他方、ビームエネルギーが減少することにより、発生できる放射光エネルギーも小さくなるが、この問題を解決したのが日本で開発・実用化された真空封止アンジュレータである。現在、真空封止アンジュレータの短周期化により、発生できる X 線の短波長化と高輝度化の開発が続けられている。

現在建設中の SIRIUS と MAX-IV における輝度とリング周長の関係は、これまでのものと比べると約 1 桁低エミッタンス化することを目標としており、DIAMOND や SOLEIL などにおけるアップグレード計画でも同様のスペックを達成目標としている。この低エミッタンス化は加速器技術の革新によるものである。一つは、表 1-26 で示すようにラティス構造がこれまでの高輝度放射光施設では Double-bend Achromat であるが、MAX-IV では 7-bend Achromat と偏向部が細分化されている。さらに、これまでの高輝度放射光施設では線形加速器 (Linac) で予備加速された電子をブースターシンクロトロンでさらに加速してから蓄積リングに入射していたが、これに対して、MAX-IV では S-band Linac から直接蓄積リングに入射している。このようにすることで、低いエミッタンスの電子ビームを蓄積リングに入射可能となる。このような世界における加速器技術の進歩を取り込んで、日本でも次世代放射光施設の検討を進めることが必要である。

6. 次世代放射光施設が共用・整備されるときメリット、されなかった場合のデメリット

6.1 我が国における科学技術・学術の発展

次世代放射光施設の共用・整備のメリットは、最先端の高度な分析・解析による科学技術および産業競争力の向上、最先端の国際的な研究拠点の構築、今後人材が必要な原子力分野



【図 1-6】 海外の中型放射光施設のエミッタンスと蓄積リング周長の関係 (2014 年 12 月現在 ; NSLS-II はは 2015 年 2 月から稼働)

での人材育成、他施設も含めた国内放射光実験のマシンの増加、既存施設と異なる地域での利便性向上等である。とりわけ、軟 X 線領域に特色をもつ中規模高輝度放射光施設の整備は、炭素を中心とした軽元素材料に関する日本の基礎科学に関しても大きな影響を与えるだけでなく、今後 10 年間推進すべき材料研究に大きく寄与する。

他方、整備されなかったときのデメリットは、物質材料科学における日本の優位性や伝統が消失するだけでなく、我が国で生まれた優れた物質材料が国外に流出してしまう恐れがあることである。

6.2 産業の活性化

材料研究は技術立国であるわが国の浮沈にかかわるものであり、次世代放射光施設が早期に整備されることは新規材料開発を加速しわが国の産業競争力を高めるメリットをもつ。特に、学術研究のみならず産業応用に重点を置くことで、日本経済の活性化や国力増強へ大きく寄与できる。高輝度に特色を持つ新規放射光施設ができると、アカデミアだけでなく、様々な産業分野の研究者・技術者が施設を利用することが期待され、学術や技術のレベルアップにつながり、アカデミアから産業へのイノベーションが一気に進展する。情報通信分野では電子デバイスに求められる素子の微細化・高速化が進展する中、高分解能（空間的・時間的）な構造解析のニーズは、産学両面において今後急速に高まると思われる。それらのニーズに特化したビームラインが整備共用され、他分野から利用しやすい環境が構築されれば、学術・産業発展の加速化に大きく寄与する。

もし、放射光の有する高度の材料評価・解析が欠如するならば、我が国の自動車産業、半導体産業、エネルギー関連、ソフトマター・バイオ・医療分野の根幹にかかわる新規材料開発が他国に後れをとることを意味する。このような材料研究において、放射光を必要とする評価ニーズは今後急激に増えることが予想されるのに対し、整備されない場合はそれらの研究が停滞してしまい、産業競争力で近隣諸国に逆転される恐れがある。そして、我が国の材料関連の研究開発が他国の放射光施設への依存度を高め、産業競争力を失うことが懸念される。さらに、学術研究では海外施設の利用も盛んに行われているが、産業利用では情報保持の観点から原則として放射光利用が国内施設に限定されるため、新規放射光施設が共用されない場合のデメリットは大きい。このように、次世代放射光施設は産業形成を推し進めるエンジンとなると期待され、放射光施設が整備・共用されなかった場合、主に国内施設を利用する産業界に対して学術分野に比べて大きな不利益となることが考えられる。

6.3 人材育成

次世代放射光施設の整備は基礎科学の振興と活性化に繋がるだけでなく、広い分野の科学技術・学術の発展、国際化のみならず、研究者や技術者の人材育成に貢献するメリットがある。しかし、現状では十分なビームタイムが供給されていないことに起因する需給ギャップの打開策を新規放射光施設の整備ではなく海外施設の利用に見出した場合、国内施設の成果の減少だけでなく、国内での学生・若手人材育成の観点からもデメリットが大きく望ましくない。

6.4 国際化

軟 X 線領域から硬 X 線領域の高輝度放射光施設が整備されれば、例えば炭素を中心とした軽元素材料に関する発展が期待でき、材料・デバイス研究の COE として広範囲な人材が集結することが予想され、海外からも優れた研究者が集まることで研究の国際化が進展するメリットが大きい。しかし、整備されない場合、諸外国に比べて基礎研究や先端的なサイエンスが大幅に立ち後れる恐れがある。

6.5 その他

我が国で最高性能と言われる SPring-8 ですら設置後既に 18 年が経っており、また、性能でそれに次ぐ PF では運転開始から 33 年が経過しており、両施設の老朽化のために放射光の利用研究が滞ることが考えられる。また、両施設の軟 X 線領域ビーム特性の現状は世界水準から大きく後れをとっている。このような我が国の放射光施設の現状を放置すべきではない。そして、既存の放射光施設の老朽化が進み、ユーザー利用停止が余儀なくされれば、硬 X 線による構造解析などを基盤とした生命科学研究や科学技術の発展も妨げられ、世界に対して我が国が後れをとることになる。

7. その他、運営やサポートなどについて

7.1 運営

放射光施設のような基礎分野にも幅広く波及効果が期待できる大型施設については、必ずしも 5 年、10 年というような短期的な応用研究の成果だけにとらわれずに、国が関与・支援してリスクを引き受けることで、予想外の利益・効果に結びつく可能性のある長期的な基礎研究に関しても、広く開放して使われることが重要である。また、このような巨額の投資に対して、次世代放射光施設では産業応用に役に立つことが重要となり、企業ユーザーをできるだけサポートし、利用者が施設を利用しやすいような運用を行う必要がある。

次世代放射光施設の整備は学術研究においては、国内の他の既放射光施設と相補的かつ特徴のあるエンドステーションを持つ施設が望ましく、我が国の放射光ビームラインを資産として効率良く機能させるために、国内全ての放射光施設間の連携が必須であり、オールジャパンとして放射光統合機構による運営を検討する必要がある。このような連携を通して高度測定、汎用測定、自動測定のような住み分けができるように、次世代放射光施設を含めて既存施設間で意思疎通の風通しのよい制度を工夫すべきである。とりわけ、停止期間についてはできるだけ短くし、放射光施設停止期間が互いにできるだけ重ならない運用が必要である。

既存の PF や UVSOR などは大学共同利用機関として、SPring-8 は「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」により、そして、SAGA-LS や ASRC などは地方自治体の施設として運営され、我が国の放射光施設では異なる運営方式で放射光利用が進められてきた。これらのメリットとデメリットを考慮して、次世代ではこれまでとは異なる運営体制と使い方を検討することが必要である。

7.2 企業ユーザーへのサポート

企業などの技術者・研究者が放射光を利用する際の敷居をなくすために、事前の相談や、測定時のビームラインでのサポートなどの充実、また、その際に最先端の技術開発を可能にするために秘密保持契約（NDA）を結んでの情報の取扱いの枠組みの整備が必要である。これと関連して、技術開発主体にとって開発投資に見合ったリターンが生じる仕組み、民間が利用しやすい知財保護などの設計が必要である。

企業ユーザーが利用しやすいようにコーディネート業務をこなすユーザーサポート窓口や技術サポートの充実が必要であり、具体的には高度な運用のために科学者や技術者をビームラインに配置するとともに、外部からの利用者に対する人材育成も行う体制が必要である。そして、積極的な利用促進のために、民間分析委託企業並みのサービス提供（試料加工、分析・解析、結果説明まで含む）が今後必要になる。そして運用システム設計の段階から、民間分析委託企業に参画してもらうことも考えるべきであり、測定代行だけでなく受託解析サービスを考慮すべきである。また、国内の産業競争力維持のために、研究者側から中堅以下の企業に積極的にアプローチし、未発見の課題発掘や問題解決に繋げ、技術開発を下支えすることも重要となる。これに加え、産業利用の裾野を広げるだけでなく高度化のために、海外の放射光施設では企業と大学の共同研究が積極的に進められており、次世代放射光施設においても産学共同研究が重要となる。

計測システムについて、全国および海外の学術機関並びに製薬企業等から多くのユーザーを確保するため、リモートによるデータ収集操作を可能にする必要がある。そして、2000年以降は炭素材料研究者による放射光軟 X 線分光法の利用が急増し、特に企業の利用は活発になっており、今後、学術的な分光計測技術の先端化とともに、産業利用にむけた汎用化が重要である。

企業サイドの使用料金について、民間分析委託企業と同程度であれば問題なく、材料系の中小企業では潜在需要が相当にあるものと思われる。産業利用を増やすために情報公開や料金設定などをフレキシブルに調整し、施設利用の敷居を低くすることを検討するべきである。

7.3 総合大学による運営サポート

Swiss Light Source (SLS)はポールシェラー研究所が運営しているが、同じチューリッヒにあるスイス連邦工科大学チューリッヒ校と強く結びつきながら開発、研究、教育、および運転を行っている。スウェーデンの MAX Laboratory も同様にルンド大学が強くかかわっている。台湾の TPS でも同様に近くにある国立清華大学と国立交通大学が関与している。そのため、我が国の次世代放射光施設においても外からのユーザー受入や運営をオープンにしながら、近くにある高い総合力をもつ大学による広い分野で開発、研究、教育、および運転をサポートできる体制は重要である。このように総合力の高い大学がビームライン、エンドステーションの建設や運用のサポート、企業ユーザーの実験や実験結果の解析のサポートを援助することで、研究の質も高まりアクティビティの向上も期待できる。

7.4 利用申請・使用料金・運転時間

長時間の運転時間を確保し、随時もしくは短期間での申請受付、長期課題の設定、定期的な利用（例えば環境モニタリング）枠の設定など、ビームタイムをフレキシブルに配分できる制度、そして、ビームラインの利用状況（空き具合）が web などにより自由に確認できる、申請より利用までの期間をできるだけ短くする（おおむね 2 週間以内）などの利用促進が必要である。また、よほど手慣れた実験課題でない限り、一度で決定版のデータを得ることは難しいため、時間をあけて 2、3 回実験できるようにするなど利用形態の改善も必要である。

使用料金については、必要最低限（成果公開の場合、無償利用）にすることに加え、中堅企業への利用拡大の観点から、低コスト化による有償利用料金の引き下げを考慮すべきである。

次世代放射光施設のフレキシブルな運用体制の構築により、とりわけ停止期間を国内の他の放射光施設との調整を図ることで、常時、国内のいずれかの施設において測定可能な状態が保たれることが望ましい。また、表 1-12 に示す我が国の放射光施設では放射光利用実験に使用できる運転時間が 1,000 – 3,500 時間にとどまっており、海外の第三世代光源 SLS、ALS、SOLEIL、DIAMOND のように 5,000 時間程度までの増加が求められる。

7.5 施設スタッフ

放射光施設の性能を 100% 活かし、将来の測定高度化に繋げるために、ユーザーサポートも含めて十分な数の専任研究者と技術職員が常駐し、放射光施設とユーザーをつなぐコーディネーターも加わることで、専門外の方でも次世代放射光の特性をフルに活かした最高水準の測定ができるような体制を整える必要がある。なぜなら、初めて放射光を使用する多くの研究者、技術者が研究課題を遂行するために、彼らを強力にサポートし、測定や解析の知恵をだすビームライン科学者の体制の充実がこれまで以上に不可欠と考えられるからである。実際、海外の放射光施設ではビームライン科学者だけではなく、博士号を有した多数の技術者がビームラインの運用をサポートしており、身分に上下関係はなく、非常にフラットな関係で運用が行われている。我が国の放射光施設の運用においても、技術者をもっと活用すべきである。

このような体制構築のためには、ビームライン科学者が腰を据えてユーザーと研究を進めるための環境整備を配慮すること、放射光施設の研究者・技術者の競争力を養成して流動化を促すシステムの検討、測定機器開発部門の充実、そして、支援スタッフのサポート業務の業績評価システムの確立も重要である。

7.6 ビームライン・エンドステーション

軟 X 線領域から硬 X 線に特徴をもつ高輝度放射光施設では、その光源特性を最大限に引き出すために回折格子分光器（約 2 keV まで有効）と結晶分光器（約 2 keV から有効）にまたがる広い波長域のビームラインの開発が重要である。実環境分析では軟 X 線を大気に取り出せるビームラインも必要とされる。さらに、性能重視ビームラインと利便性や迅速性重視のビームラインを併設することも必要である。例えば、産業利用では高スループットや（デー

タ) 出力の安定性も求められるので、セットアップ、調整などに時間がかかるチャンピオンデータの創出を期待するビームラインとは別に、産業用としては 80%程度のスペックでも、高スループットで安定にデータが出力できるビームラインが必要である。

エンドステーションでは各分野の研究内容毎に特徴ある装置が提案されているが、本調査において喫緊の課題として共通の認識とされたのが軟 X 線、硬 X 線用の X 線二次元検出器の自国開発である。これは日本での技術開発が後れているだけでなく、高輝度光源性能を十分に引き出すには検出器開発が重要だからである。例えば、産業利用への対応には、ビーム性能よりもむしろ、分光系、検出系など、要素技術の高度化が不可欠である。

エンドステーションの設備には、スペースを充実させることも実験遂行上重要である。放射線防護のためのハッチが干渉しない程度に必要とされるだけでなく、作業通路、そして実験機などの作業エリアを確保するためにも、隣接するビームライン間で十分なスペースを考慮することが必要である。例えば、新しい材料の開発におけるオペランド計測においては、ガス供給系、測定試料の動作制御・モニター系、そして、試料交換システムなども加わりエンドステーションそのものが大型化する傾向にある。そのため、余裕をもって実験やメンテナンス作業を行うことができるだけのスペースが必要である。

測定データの解析ソフトウェアの機能面での充実、実験実施から成果発表までに要する時間・コストに直結するので、放射光利用者への支援のために必要である。さらに、エンドステーションの高性能化には新規のハードウェアの導入や開発だけでなく、それらを制御するソフトウェアの開発も必要であるので、測定制御・データ解析の統合ソフトウェアの開発が重要である。

その他に、放射光ナノビームを用いて数 10 nm の空間分解能で行うイメージングでは、結像光学系の性能を向上させるために電子顕微鏡並み以上の床、光学系、試料チャンバーの防振対策、試料位置決めシステムが必要である。産業利用のオペランド観察のためには独自装置の持込みが必要かつ重要とされ、例えば SPring-8 では、リチウムイオン電池と燃料電池専用ビームライン建設、豊田ビームラインでは、排気浄化触媒のオペランド計測が行えるように、自動車排気を模した種々のガス、ガス混合機、ガス分析計等を常設、さらには炭素繊維の製造プロセス装置の持込みが行われている。この装置持込みのためにも、エンドステーション用として十分なスペースが確保されている必要がある。さらに、放射光に求める解析技術として既存の測定装置や測定方法に限定されることなく、例えば粉末回折法に単結晶回折技術も複合利用するなど、新旧の方法論を駆使した総合的な材料開発評価の実施が求められる。

7.7 付帯設備

産業利用だけでなく材料や情報通信、そして基礎科学の分野においても重要とされるオペランド観察のために、有毒ガスを含む高圧ガス利用を前提とした法令に基づいた施設設計やドラフト・超純水製造装置などを備えた化学準備室の設置が必要である。さらに、ガス反応チャンバーを備えたエンドステーションが接続できる差動排気付きビームラインも必要である。

健康・医療分野では動物の一時飼育室や簡易な手術室、さらには医学分野で多用されている遺伝子組み換え動物の利用が可能であるような法令に基づいた物理的空間を設けること、材料分野では放射光以外の基本的な物性測定環境の整備が求められる。このように放射光施設の近くに他の機能をもつ装置（SEMなどの評価装置、金属蒸着などの成膜装置など）や施設を付属させることで、それらの施設で得られる相補的情報から材料等の実態を効率的に解明できる環境が必要である。

7.8 その他

ニーズ調査において産業競争力への貢献を意識した放射光利用に関する意見が多かったが、社会的なニーズ（出口）にとらわれすぎず、基礎的な研究を重視する次世代放射光施設の議論も重要と考えられる。他方、放射光施設は社会的インフラであるから、次世代の放射光計画は科学技術・産業イノベーション創出に必須であるとの意見もあった。調査分野にかかわらず、次世代光源をつくるならば独創的な意見を取り入れることも必要であり、特に若い人のチャレンジが期待される。放射能・放射線に対して厳しい意見が多い中で、厳しい管理下で運営されている量子ビーム、放射線、および放射光を利用する施設の有用性を、一般社会に示していくべきと考えられる。また、次世代放射光施設の立地場所について、全国および海外の研究者にとって交通アクセスが良いことが必要である。

このほか、次世代放射光施設の整備に関しては以下の項目が今後の課題に係る論点として挙げられた。

- ・ タンパク構造解析や材料分析に一般的に用いられている硬 X 線ビームラインを多数有する放射光施設にも高いニーズがあり、その整備を通じて現有放射光施設のビームタイムの欠如の緩和に寄与するとともに広く産業界のニーズに応えることが重要である。(5.1 節参照)
- ・ 先端構造解析ないしコヒーレントイメージング領域の放射光を供給できる次世代放射光施設にも高いニーズがある。(5.1 節参照)
- ・ 本調査は蓄積型リング型次世代放射光施設を意識したものであったにもかかわらず、直線加速器をベースにした XFEL、特に軟 X 線 FEL への期待が少なからず寄せられた。次世代放射光では入射器に直線加速器を用いて高輝度化を図るとともに XFEL をも視野に入れた設計が望まれる。(5.1 節参照)
- ・ 先端分光領域の高輝度軟 X 線に対応できる次世代放射光施設に高いニーズがある。(5.2 節参照)
- ・ これら次世代放射光施設と既存の稼働施設を密接に連携運用して、我が国の放射光資産を有効活用するための仕組みを作ることが強く望まれる。(7.1 節参照)
- ・ 次世代放射光施設は最先端の科学のみならず、産業利用を進めるとともに新たな産業を育成するエンジンとなることが極めて重要である。これを可能にするようなコーディネートの仕組み作りが強く望まれる。(7.2 節参照)
- ・ 次世代放射光施設では、光源リングだけでなく、ビームラインやエンドステーションの先

端化・高効率化も図るべきである。X線検出器や光学素子などの技術開発も不可欠である。
(7.6節参照)

- ・ 次世代放射光施設では、ハードウェアだけでなく、施設スタッフや測定サポートなどのソフトウェアも含めて総合的な制度設計が重要である。(7.5、7.7、7.8節参照)

8. まとめ

本調査で明らかになった現状と研究者から寄せられた要望について、放射光施設のビーム性能を6つのクラスター領域に分類してまとめる。

(1) 構造解析領域 (輝度: $10^{16} - 10^{20}$ photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw、エネルギー: 5 keV – 100 keV)

SPring-8並のビーム性能で多くの研究者が満足しているが、ビームタイムの欠如が著しい。これを補うために、多くの国内企業が海外放射光施設のメールインサービスを利用している。本調査では、このようなビームタイムの欠如を補うための運用に関する意見が多数出され、新たな施設が整備された場合、5 keV – 20 keV 近傍の領域を SPring-8 並あるいはそれよりも高い輝度でカバーすることへの要請が多く寄せられた。

(2) 分光領域 (輝度: $10^{16} - 10^{19}$ photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw、エネルギー: 20 eV – 20 keV)

この領域の国内施設の軟 X 線、硬 X 線ビームラインは、海外の施設に比べて輝度あるいはフラックスが約一桁低いが、それでも利用者は多く、ビームタイムの欠如も著しい。本調査では、課題解決のために、多くの研究者が、輝度、フラックス、またはフォーカスサイズについて、より高い性能を希望していることが明らかになった。

(3) 先端分光領域 (輝度: $10^{18} - 10^{21}$ photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw、エネルギー: 20 eV – 20 keV)

本調査で多くの要請があったにもかかわらず、日本が国際競争力に欠ける領域であることが明らかになった。特に高輝度が必要な軟 X 線 RIXS による運動量分光は海外施設の独壇場であることが指摘され、日本では磁性材料等で必須であるスピンの観測ができないために、日本で作られる多くの試料が海外放射光施設で測定されている現状も明らかになった。基礎科学から産業利用に至る全ての分野の多くの研究者が、この領域をカバーできる新たな放射光施設が速やかに設備されることを強く望んでいる。

(4) 先端構造解析領域 (輝度: $10^{20} - 10^{22}$ photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw、エネルギー: 5 keV – 100 keV)

本領域は、SPring-8 の硬 X 線長尺アンジュレータビームラインが世界を一步リードしてきたが、本調査では、基礎科学だけでなく、材料や産業利用等多くの分野で、このようなビーム性能をもったビームラインによる in situ 測定 (オペランド観察) のニーズが潜在的に多数あることが明らかになった。

(5) コヒーレントイメージング領域（輝度： $10^{21} - 10^{22}$ photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw、エネルギー：500 eV – 10 keV）

MAX IV や SIRIUS といった次世代高輝度光源や SOLEIL や ALS のアップグレード計画が
目指している領域であり、本調査でも、この領域でのソフトマターや生体の細胞等の軟 X 線
イメージングの重要性が指摘された。

(6) X 線自由電子レーザー領域（輝度： $10^{27} - 10^{33}$ photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw、エネルギー：
200 eV – 20 keV）

本調査の主な趣旨は蓄積リング型放射光施設のニーズ調査であったが、SACLA で実現され
ている硬 X 線領域の XFEL だけでなく、軟 X 線領域の XFEL の必要性も、物理、化学等の分
野で複数の研究者から指摘された。

以上をまとめると、現在我が国で稼働している放射光源は 10 施設あり、(1)構造解析と(2)
分光領域への要望は既存施設でカバーされていることがわかる。ただし、(1)構造解析に関す
るビームタイムの不足は著しい。(4)先端構造解析の領域は SPring-8 にある理研の長尺アンジ
ュレータビームラインでのみカバーできるが、将来的には、より多くのビームラインでこの
ビーム性能が実現されることが重要になる。(6)フェムト秒イメージング領域の実験課題は、4
keV – 20 keV の領域では SACLA で実施可能であるが、0.2 keV – 4 keV の領域をもカバーす
ることが強く望まれる。これに対して、(3)先端分光放射光は、海外の多くの放射光施設で利用
可能であるのに対し、我が国の放射光施設では空白となっている。一方、(5)コヒーレントイ
メージング領域は、現時点では何処にも実現されておらず、海外では、現在建設中あるいは
次期計画の対象となっている。

以上

謝辞

今回のニーズ調査におけるヒアリング調査およびレビュー調査に協力いただきました研究
者の方々に感謝申し上げます。

【表 1-1】 光・量子ビーム科学連携推進室「次世代放射光施設に関するニーズ調査専門委員会」委員名簿

| | | |
|----------------|-------------------------------|------------|
| 東北大学 | 理事（研究担当） | 伊藤 貞嘉 |
| 〃 | 理事（産学連携担当） | 進藤 秀夫 |
| 〃 | 多元物質科学研究所長（委員長） | 河村 純一 |
| 〃 | 多元物質科学研究所 教授 | 高桑 雄二 |
| 〃 | 〃 教授 | 上田 潔 |
| 〃 | 〃 教授 | 柳原 美廣 |
| 〃 | 原子分子材料科学高等研究機構 ／金属材料研究所 教授 | 折茂 慎一 |
| 〃 | サイクロトロン・RIセンター 教授 | 酒見 泰寛 |
| 〃 | 経済学研究科 教授 | 大滝 精一 |
| 福島大学 | 学長参与／福島大学名誉教授 | 入戸野 修 |
| 山形大学 | 理事・副学長（研究担当） | 深尾 彰 |
| 東京大学 | 理学研究科 教授 | 藤森 淳 |
| 兵庫県立大学 | 生命理学研究科 教授 | 月原 富武 |
| 宮城県 | 経済商工観光部長 | 犬飼 章 |
| アステラス製薬株式会社 | 課長 | 善光 龍哉 |
| 株式会社豊田中央研究所 | 部長 | 妹尾 与志木 |
| ALS (USA) | Director | R. Falcone |
| DESY (Germany) | Director | E. Weckert |

【表 1-2】 ヒアリング調査とレビュー調査における実施者と補助者

| | 研究分野 | 実施者 | 補助者 |
|------------------|----------|---|--|
| ヒアリング調査 (12名) | 環境・エネルギー | 八代 圭司 准教授 (環境科学研究科) | 藤枝 俊 助教 (多元物質科学研究所) |
| | 健康・医療 | 稲葉 謙次 教授 (多元物質科学研究所) | 渡部 聡 助教 (多元物質科学研究所) |
| | 材料 | 虻川 匡司 准教授 (多元物質科学研究所) | 小川 修一 助教 (多元物質科学研究所) |
| | 情報通信 | 岡本 聡 准教授 (多元物質科学研究所) | 福澤 宏宣 助教 (多元物質科学研究所) |
| | 基礎科学 | 佐藤 宇史 准教授 (理学研究科) | 相馬 清吾 准教授 (原子分子材料科学高等 研究機構) |
| | 産業利用 | 本間 格 教授 (多元物質科学研究所) | 永村 直佳 助教 (多元物質科学研究所) |
| レビュー調査 (16名) | 環境・エネルギー | 雨澤 浩史 教授 (多元物質科学研究所) | 中村 崇司 助教 (多元物質科学研究所) |
| | 健康・医療 | 百生 敦 教授 (多元物質科学研究所) | 矢代 航 准教授 (多元物質科学研究所) |
| | 材料 | 杉山 和正 教授 (金属材料研究所) | 有馬 寛 助教 (金属材料研究所) |
| | 情報通信 | 北上 修 教授 (多元物質科学研究所) | 菊池 伸明 助教 (多元物質科学研究所) |
| | 基礎科学 | 木村 宏之 教授 (多元物質科学研究所) | 坂倉 輝俊 助教 (多元物質科学研究所) |
| | 産業利用 | 鈴木 茂 教授 (多元物質科学研究所) | 桑田 直明 助教 (多元物質科学研究所) |
| | 放射光以外 | 佐藤 卓 教授 (多元物質科学研究所) 寺内 正己 教授 (多元物質科学研究所) | 南部 雄亮 助教 (多元物質科学研究所) 小澤 裕市 助教 (多元物質科学研究所) |

【表 1-3】 環境・エネルギー分野でのヒアリングとレビュー調査協力者

| ヒアリング調査（9名） | | レビュー調査（7名） | |
|-------------|---|------------|---|
| 環境一般 | 秋本 圭吾 （地球環境産業研究機構 主席研究員） | 触媒化学 | 朝倉 清高 （北海道大学 触媒化学研究センター 教授、センター長） |
| 資源リサイクル | 中村 崇 （東北大学 多元物質科学研究所 教授） | 環境一般 | 田路 和幸 （東北大学大学院 環境科学研究科 教授） |
| 地圏環境・除染 | 矢板 毅 （日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究センター ユニット長） | 生態系 | 中井 泉 （東京理科大学 理学部 教授） |
| 蓄電池 | 内本 喜晴 （京都大学大学院 人間・環境学研究科 教授） | 蓄電池 | 井手本 康 （東京理科大学 理工学部 教授） |
| 燃料電池 | 稲垣 亨 （関西電力株式会社 研究開発室 エネルギー利用技術研究所 チーフリサーチャー） | 燃料電池 | 宇留賀 朋哉 （高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 主席研究員） |
| 太陽電池 | 大下 祥雄 （豊田工業大学 工学部 教授） | 放射光 | 早川 慎二郎 （広島大学大学院 工学研究科 教授） |
| 人工光合成 | 井上 晴夫 （首都大学東京大学院 都市環境化学研究科 特任教授） | | 雨宮 健太 （高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授） |
| エネルギー安全 | 庄子 哲雄 （東北大学 未来科学技術共同研究センター 教授） | | |
| 海外動向 | Junko Yano （LBNL, USA, Research associate） | | |

【表 1-4】 健康・医療分野でのヒアリングとレビュー調査協力者

| ヒアリング調査（11名） | | レビュー調査（7名） | |
|--------------------|--|---------------|---|
| 創薬 | 曾我部 智 （武田薬品工業株式会社 主任研究員） | 生化学・生物 物理学 | 吉田 賢右 （京都産業大学 総合生命科 学部 シニアリサーチフェロ ー） |
| 幹細胞・再生医 療 | 須田 年生 （慶応義塾大学大学院 医学研究科 教授） | 創薬 | 加藤 良平 （田辺三菱製薬株式会社 主 任研究員） |
| 放射線生物学 | 平岡 真寛 （京都大学大学院 医学 研究科 教授） | 植物学 | 三村 徹郎 （神戸大学大学院 理学研究 科 教授） |
| バイオメディカ ルイメージング | 盛 英三 （東海大学大学院 医学 研究科 教授） | 構造生物学 | 三木 邦夫 （京都大学大学院 理学研究 科 教授） |
| | 谷岡 健吉 （元NHK放送技術研究 所） | 医用工学 | 取越 正己 （東都医療大学 放射線医学 総合研究所 客員研究員） |
| 細胞生物学 | 永田 和宏 （京都産業大学 総合生 命科学部 教授） | 放射光 | 小林 克己 （高エネルギー加速器研究 機構 物質構造科学研究所 名誉教授） |
| | 大隅 良典 （東京工業大学 フロン ティア研究機構 教授） | | 八木 直人 （高輝度光科学研究センタ ー 利用促進部門タンパク 質結晶解析推進室 室長） |
| 農学 | 加藤 悦子 （農業生物資源研究所 農業生物先端ゲノム研 究センター 上級研究 員） | | |
| 食品 | 田之倉 優 （東京大学大学院 農学 生命科学研究所 教授） | | |
| 構造生物学 | 中川 敦史 （大阪大学 蛋白質研究 所 教授） | | |
| | Ilme Schlichting （Max Planck Institute for Medical Research, Germany, Director） | | |

【表 1-5】 材料分野でのヒアリングとレビュー調査協力者

| ヒアリング調査 (9名) | | レビュー調査 (9名) | |
|--------------|---|-------------|--|
| 半導体 | 宮崎 誠一 (名古屋大学大学院工学研究科 教授) | 半導体 | 中野 朝雄 (株式会社リガク 執行役員) |
| 炭素材料 | 村松 康司 (兵庫県立大学大学院工学研究科 教授) | ソフトマター | 宇理須 恒雄 (名古屋大学 革新ナノバイオデバイス研究センター 特任教授) |
| ソフトマター | 玉田 薫 (九州大学 先導物質化学研究所 教授) | 磁性材料 | 石尾 俊二 (秋田大学大学院 工学資源学 研究科 教授) |
| 金属 | 小笹 敏弘 (住友金属鉱山株式会社 市川研究所 所長) | 金属 | 佐々木 聡 (東京工業大学 応用セラミックス研究所 教授) |
| 酸化物 | 細野 秀雄 (東京工業大学 応用セラミックス研究所 教授) | 酸化物 | 山根 久典 (東北大学 多元物質科学研究所 教授) |
| アモルファス・液体 | 臼杵 毅 (山形大学 理学部 教授) | アモルファス・液体 | 鈴木 謙爾 (公益財団法人 特殊無機材料研究所 代表理事) |
| 有機 EL | 時任 静士 (山形大学大学院 理学研究科 教授) | 放射光 | 組頭 広志 (高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授) |
| 金属錯体 | 北川 進 (京都大学大学院 工学研究科 教授) | | 平井 康晴 (佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター 副所長) |
| 海外動向 | Osamu Terasaki (Stockholm University, Sweden, Professor) | | 太田 俊明 (立命館大学 教授 SR センター長) |

【表 1-6】 情報通信分野でのヒアリングとレビュー調査協力者

| ヒアリング調査（10名） | | レビュー調査（8名） | |
|-----------------|--|---------------|--|
| スピンドバイス | 久保田 均 （独立行政法人 産業技術 総合研究所 ナノスピ ントロニクス研究センター チーム長） | 半導体・光デ バイス | 松岡 隆志 （東北大学 金属材料研 究所 教授） |
| 有機デバイス | 佐々木 孝彦 （東北大学 金属材料研 究所教授） | 量子計算 | 玉作 賢治 （理化学研究所 放射光 科学総合研究センター 理論支援チームリーダ ー） |
| 酸化物・プロセス | 寺岡 有殿 （日本原子力研究開発機 構 量子ビーム応用研究 部門 主任研究員） | 情報ストレ ージ | 城石 芳博 （株式会社日立製作所 研究長） |
| スピントロニクス | 大野 英男 （東北大学 電気通信研 究所 教授 所長） | 光通信・光デ バイス | 斎藤 吉広 （住友電気工業株式会社 先進解析技術グループ 長） |
| 半導体デバイス | 富田 充裕 （東芝 研究開発センター LSI 基盤技術ラボラトリ ー 主任研究員） | スピントロニ クス | 松倉 文礼 （東北大学 電気通信研 究所 教授） |
| 光通信・光デバイ ス | 末宗 幾夫 （北海道大学 電子科学研 究所 特任教授） | 放射光 | 鈴木 基寛 （高輝度光科学研究セン ター 利用研究促進部門 XMCD チームリーダー） |
| EUV リソグラフ イー | 木下 博雄 （兵庫県立大学 高度産業 科学技術研究所 教授） | | 小野 寛太 （高エネルギー加速器研 究機構 物質構造科学研 究所 准教授） |
| 情報ストレージ | 近藤 祐治 （秋田県産業技術センタ ー 研究員） | | 中村 哲也 （高輝度光科学研究セン ター 利用研究促進部門 主幹研究員） |
| 半導体、相変化 RAM | 小池 淳一 （東北大学大学院 工学研 究科 教授） | | |
| 海外動向 | Atsufumi Hirohata （University of York, UK, Professor） | | |

【表 1-7】 基礎科学分野でのヒアリングとレビュー調査協力者

| ヒアリング調査（11名） | | レビュー調査（8名） | |
|--------------|--|----------------------------------|---|
| 物理理論 | 吉田 博 （大阪大学大学院 基礎工学 研究科 教授） | 物理理論 | 福山 秀敏 （東京理科大学 理学部応用物 理学科 教授） |
| 物理実験 | 辛 埴 （東京大学 物性研究所 教 授） | 物理実験 | 十倉 好紀 （理化学研究所 創造物性科学 研究センター センター長） |
| | 八尾 誠 （京都大学大学院 理学研究 科 教授） | 化学 | 大橋 裕二 （茨城県総合科学研究機構 顧 問） |
| 化学 | 有賀 哲也 （京都大学大学院 理学研究 科 教授） | | |
| | | 岸本 直樹 （東北大学大学院 理学研究 科 准教授） | 地学 |
| 生物 | 沈 建仁 （岡山大学 理学部 教授） | 量子工学 | 大森 賢治 （自然科学研究機構 分子科学 研究所 教授） |
| | 大串 隆之 （京都大学 生態学研究セン ター 教授） | | |
| 地学 | 大谷 栄治 （東北大学大学院 理学研究 科 教授） | 放射光 | 山本 雅貴 （理化学研究所 放射光科学総 合研究センター利用システム 開発研究部門 部門長） |
| | 入船 徹男 （愛媛大学 理学部 教授） | | |
| 海外動向 | Han-Woong Yeom (IBS Center, Korea, Professor) | | 坂田 誠 （高輝度光科学研究センター 客員主席研究員） |
| | John Miao (University of California, USA, Professor) | | 小杉 信博 （自然科学研究機構 分子科学 研究所 教授／極端紫外光研 究施設 施設長） |

【表 1-8】 産業利用分野でのヒアリングとレビュー調査協力者

| ヒアリング調査（10名） | | レビュー調査（7名） | |
|--------------|---|--------------|--|
| 創薬 | 半沢 宏之 （第一三共 RD ノバーレ 株式会社 グループ長） | 化学工学 | 岩澤 康裕 （電気通信大学大学 院情報理工学科 特 任教授） |
| タイヤ | 岸本 浩通 （住友ゴム工業株式会社 課長） | 産業利用促進 | 廣沢 一郎 （高輝度光科学研究 センター 産業利用 推進室 室長） |
| 素材 | 池松 陽一 （新日鐵住金株式会社 先端技術研究所 部長） | 工業材料 | 今福 宗行 （東京都市大学 工学 部 教授） |
| 応用化学 | 宮山 勝 （東京大学 先端科学技 術研究センター 教授） | 分析装置メーカ ー | 虎谷 秀穂 （株式会社リガク 執 行役員） |
| エレクトロニクス | 曾根 純一 （物質材料研究機構 理 事） | 放射光産業利用 | 高田 昌樹 （理化学研究所 放射 光科学総合研究セン ター 副センター長） |
| | 伊藤 順司 （住友電気工業株式会社 常務執行役員） | | 野村 昌治 （高エネルギー加速 器研究機構 理事） |
| エネルギー | 大和田野 芳郎 （産業総合技術研究所 福島再生可能エネルギ ー研究所 所長） | 放射光 | 片山 芳則 （日本原子力研究開 発機構 量子ビーム 応用研究センター 副センター長） |
| 自動車 | 射場 英紀 （トヨタ自動車株式会社 電池研究部 部長） | | |
| 分析評価 | 片桐 元 （株式会社東レリサーチ センター 常務取締役） | | |
| 産業政策 | 西澤 昭夫 （東洋大学 経営学科 教 授） | | |

【表 1-9】 放射光以外の分野でのヒアリングとレビュー調査協力者

| | |
|------------|--|
| レビュー調査（7名） | |
| 電子顕微鏡（ハード） | 田中 信夫 （名古屋大学 エコトピア科学研究所 教授 所長） |
| 電子顕微鏡（ソフト） | 難波 啓一 （大阪大学大学院 生命機能研究科 教授） |
| NMR | 竹腰 清乃理 （京都大学大学院 理学研究科 教授） |
| レーザー | 緑川 克美 （理化学研究所 光量子工学研究領域主任研究員） |
| ミュオン | 杉山 純 （豊田中央研究所 分析計測部 主監） |
| 中性子 | 吉沢 秀樹 （東京大学 物性研究所 教授） |
| 総合手法 | 黒田 孝二 （京都工芸繊維大学 伝統みらい教育研究センター 特任教授） |

【表 1-10】 エミッタンス 10nm・rad 以下の高輝度第三世代放射光施設の建設または運用開始年次推移

| 年 | リング | エネルギー (GeV) | 国 |
|------|-----------|-------------|---------|
| 1992 | ESRF | 6 | フランス |
| " | ALS | 1.5 - 1.9 | 米国 |
| 1994 | ELETTRA | 2.4 | イタリア |
| " | MAX-II | 1.5 | スウェーデン |
| 1996 | APS | 7 | 米国 |
| 1997 | SPring-8 | 8 | 日本 |
| 1998 | BESSY-II | 1.9 | ドイツ |
| 2000 | SLS | 2.4 | スイス |
| 2004 | SPEAR-3 | 3 | 米国 |
| 2006 | SOLEIL | 2.8 | フランス |
| " | DIAMOND | 3 | イギリス |
| " | ASP | 3 | オーストラリア |
| 2008 | SSRF | 3.4 | 中国 |
| 2009 | PETRA-III | 6 | ドイツ |
| 2011 | ALBA | 3 | スペイン |
| 2012 | PLS-II | 3 | 韓国 |
| 2015 | NSLS-II | 3 | 米国 |

【表 1-11】 日本で稼働中の放射光施設

| 蓄積リング型 | | | | | |
|---|-----------------------|------|--------------|----------------|-------------|
| 施設名 | 運営 | 開始 | 所在地 | エネルギー (GeV) | 周長 (m) |
| Photon Factory (PF) | 高エネルギー加速器 研究機構 | 1982 | つくば | 2.5 | 187 |
| 極端紫外光研究施設 (UVSOR) | 自然科学研究機構分 子科学研究所 | 1983 | 岡崎 | 0.75 | 53.2 |
| 立命館大学 SR セン ター | 立命館大学 | 1996 | 草津 | 0.575 | 3.14 |
| 広島大学放射光科学 センター (HiSOR) | 広島大学 | 1996 | 東広島 | 0.7 | 21.95 |
| PF アドバンストリ ング (PF-AR) | 高エネルギー加速器 研究機構 | 1997 | つくば | 6.5 | 377 |
| 大型放射光施設 (SPring-8) | 理化学研究所 | 1997 | 播磨科学 公園都市 | 8.0 | 1436 |
| ニュースバル放射光 施設 (NewSUBARU) | 兵庫県立大学高度産 業科学技術研究所 | 2000 | 播磨科学 公園都市 | 1.5 | 118 |
| 佐賀県立九州シンク ロトロン光研究セン ター (SAGA-LS) | 佐賀地域産業支援セ ンター | 2006 | 鳥栖 | 1.4 | 75.6 |
| あいちシンクロトロ ン光センター (ASRC) | 科学技術交流財団 | 2013 | 瀬戸 | 1.2 | 72 |
| 直線加速器型 | | | | | |
| X線自由電子レーザ ー施設(SACLA) | 理化学研究所 | 2012 | 播磨科学 公園都市 | 8.0 | 700 (長さ) |

【表 1-12】 環境・エネルギー分野における放射光を用いた研究内容、評価手法とビーム性能の取りまとめ (1/2)

| 分野 | 評価内容 | 評価手法等 | ビーム性能 | |
|---------|--|---|--|---|
| | | | 現行施設 | 新施設への要望 |
| 資源リサイクル | <ul style="list-style-type: none"> in situ 測定による反応機構・過渡特性解析 溶液中のイオン種の構造解析 微小領域での高精度の元素分析, 形態分析 固液界面および固気界面の反応・状態解析 | <ul style="list-style-type: none"> EXAFS/XANES SXAS/SXES XPS | <ul style="list-style-type: none"> ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm 時間分解能 $\Delta t \approx 100$ ps 輝度 $B \approx 10^{17} - 10^{18}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw | <ul style="list-style-type: none"> $\phi \leq 10$ nm $\Delta t \leq 1$ ps $B \geq 10^{18} - 10^{19}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw |
| 環境・除染 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉構造材と核分裂生成物の吸着状態の構造解析と電子状態分析 燃料デブリや選択的吸着剤中の元素組成・化学状態分析 上記の空間分布、反応の時間変化 放射線照射効果の各種状態分析 放射性核種の測定 (U, Pu, Np, Am, Cm, Cs 等) | <ul style="list-style-type: none"> STXM SXAS/SXES XPS XRD XMCD EXAFS/XANES コヒーレントイメージング マイクロビーム分析 | <ul style="list-style-type: none"> エネルギー $E = 0.1 - 100$ keV ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm 時間分解能 $\Delta t \approx 100$ ps エネルギー分解能 $E/\Delta E \approx 10^4$ 輝度 $B \approx 10^{17} - 10^{18}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw ビーム発散角：水平 ≈ 17 mrad, 垂直 ≈ 6 mrad | <ul style="list-style-type: none"> $E = 0.03$ keV - 1 keV, 3 keV - 40 keV $\phi \leq 100$ nm $E/\Delta E \geq 10^4$ $B \geq 10^{20} - 10^{21}$ (試料面上で photon flux $\geq 10^{13}$) コヒーレント度の高い光 |
| 蓄電池・触媒 | <ul style="list-style-type: none"> オペランド測定による触媒・反応機構解析 回折/吸収による反応分布評価 デバイスの多次元分布測定, 時間分解測定 軽元素 (Li, O, F, S 等), 3d 遷移金属等の測定による特性向上要因・活性サイトの評価 | <ul style="list-style-type: none"> EXAFS/XANES XRD, DAFS SXAS/SXES XPS イメージング | <ul style="list-style-type: none"> エネルギー $E = 0.1$ keV - 100 keV ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm 時間分解能 $\Delta t \approx 100$ ps 輝度 $B \approx 10^{17} - 10^{18}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw | <ul style="list-style-type: none"> $E = 0.03$ keV - 2 keV, 4 keV - 10 keV, >50keV $\phi \leq 10$ nm (反応分布観察) ミリ秒以下の測定時間を実現できる輝度 ($B \geq 10^{18} - 10^{19}$) |

【表 1-12】 (2/2)

| | | | | |
|----------------|--|---|---|--|
| <p>燃料電池・触媒</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 運転時の結晶構造・化学状態変化の実使用環境下オペランド測定 ・ 異種接合界面の組成・副反応・反応分布解析 ・ 劣化前後の材料分析 ・ デバイス内の応力測定 ・ 軽元素 (C, O), 3d 遷移金属, 4f 金属等の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・ EXAFS/XANES ・ XRD ・ HAXPES ・ 硬 X 線, 軟 X 線の併用 ・ 雰囲気環境下測定 ・ イメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー $E = 0.1 \text{ keV} - 100 \text{ keV}$ ・ ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100 \text{ nm}$ ・ 時間分解能 $\Delta t \approx 100 \text{ ps}$ ・ 輝度 $B \approx 10^{17} - 10^{18}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw | <ul style="list-style-type: none"> ・ $E = 0.1 \text{ keV} - 100 \text{ keV}$ ・ $\phi \leq 10 \text{ nm}$ (反応分布観察) ・ ミリ秒以下の測定時間を実現できる輝度 ($B \geq 10^{18} - 10^{19}$) |
| <p>太陽電池</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 高い空間分解能での構造・電子状態評価 ・ 非晶質材料の分析 ・ in situ 測定による反応分布解析 ・ Si を含む軽元素の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・ EXAFS/XANES ・ XPS・HAXPES ・ ナノイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・ SPring-8 でカバーできないビーム性能 ・ SPring-8 等の既存施設にはない実験環境 (プラズマ処理、膜堆積装置等) ・ サブミクロンビーム ・ $B \geq 10^{17} - 10^{18}$ | |
| <p>人工光合成</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 半導体・金属錯体の原子価、配位構造の時間分解測定 ・ 自然界由来材料の結晶構造解析 ・ 表面・界面の評価 ・ 軽元素, 3d 遷移金属等の測定 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 超高速時間分解 EXAFS/XANES ・ XRD ・ 可視光/IR 分光との同時測定. ・ ナノイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー $E = 0.1 \text{ keV} - 100 \text{ keV}$ ・ ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100 \text{ nm}$ ・ 時間分解能 $\Delta t \approx 100 \text{ ps}$ ・ Top-up 運転 | <ul style="list-style-type: none"> ・ $E = 0.1 \text{ keV} - 140 \text{ keV}$ ・ $B \geq 10^{20} - 10^{21}$ ・ $\Delta t \leq 1 \text{ ps}$, できれば 100 fs ・ Top-up 運転 |
| <p>エネルギー安全</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 実使用環境下での in situ 測定による材料構造、状態分析、応力測定 ・ 雰囲気環境下での耐久性評価、経年変化 ・ 微量成分の測定, 高空間分解能測定 ・ mm サイズ以下の分解能での 2D/3D イメージング技術 ・ 材料・デバイスの埋もれた界面の非破壊評価 | <ul style="list-style-type: none"> ・ XRD ・ XRF ・ Raman ・ EXAFS/XANES ・ X-CT ・ XRR (反射率) ・ サブミクロンイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー $E = 0.1 \text{ keV} - 100 \text{ keV}$ ・ ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100 \text{ nm}$ ・ 輝度 $B \approx 10^{17} - 10^{18}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw ・ Top-up 運転 | <ul style="list-style-type: none"> ・ E: 上限 40 keV 程度 ・ $\phi \approx$ サブミクロン ~ 2mm ・ $B \geq 10^{18}$ ・ Top-up 運転 ・ ビームの高い安定性 |

【表 1-13】健康・医療分野における放射光を用いた研究内容、評価手法とビーム性能の取りまとめ

| 分野 | 使用目的・研究内容 | 分析・解析技術 | 要求されるビーム性能, 施設への要望 |
|----------------------------|---|--|--|
| バイオメディカルイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・ 生きた細胞オルガネラなどの三次元可視化 ・ 微小血管造影 | <ul style="list-style-type: none"> ・ X線顕微鏡 ・ X線CT ・ 結晶を用いない構造解析 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 強度 (10⁸⁻⁹ photons/mm²/sec 程度以上) ・ 照射面積 (30 mm 角程度以上) ・ エネルギー範囲: 15 keV – 55 keV 程度で可変 ・ コヒーレントX線 |
| 放射線生物学・バイオメディカルイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・ 植物などの元素動態観察 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 放射光 X線蛍光分析法 | <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー範囲: 5 keV – 100 keV 程度 |
| 放射線生物学 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 低線量被曝研究、放射線治療 | NA | <ul style="list-style-type: none"> ・ マイクロビーム ・ 数百 Gy/s |
| 創薬・農学・基礎細胞生物学を視野にいたった構造生物学 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 生体分子の結晶構造解析 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 単結晶構造解析 ・ 特定元素分析 ・ 薬物動態解析 (X線蛍光分析) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 波長範囲: 0.4 Å – 5 Å (汎用性ビームライン: 0.7 Å – 2.5Å) ・ 輝度: photon flux > 10¹¹ photons/sec/mm² ・ ビームサイズ: <ul style="list-style-type: none"> マクロフォーカスの場合 (10~100 x 10~100 μm²) マイクロフォーカスの場合 (~1 μm x 1 μm) ・ 300 x 300 mm² 以上の検出面積をもつ高速読み出し検出器 ・ ロボティクスおよび遠隔操作による省力化 ・ 日本国内で積算して 10 本以上のビームライン |
| | <ul style="list-style-type: none"> ・ 生体分子の溶液構造解析 | <ul style="list-style-type: none"> ・ X線小角散乱法 (SAXS) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 波長範囲: 0.9 Å – 2 Å ・ 輝度 (集光位置): photon flux > 10¹² photons/sec/mm² ・ ビームサイズ: ~300 μm x 300 μm |
| | <ul style="list-style-type: none"> ・ 微小結晶を用いた生体分子 (主としてタンパク質) の高分解能構造解析 ・ 巨大粒子 (ウイルスなど) の全体構造解析 ・ 細胞内部の非侵襲的構造解析 ・ 時間分解分光法による生体分子の作用機構解明 | <ul style="list-style-type: none"> ・ X線自由電子レーザー | <ul style="list-style-type: none"> ・ 波長範囲: 0.8 Å – 3 Å ・ 輝度: photon flux ~10¹¹ phs/pls ・ ビームサイズ: ~1 μm ・ 高速読み出し検出器 |

【表 1-14】材料分野における放射光を用いた研究内容、評価手法とビーム性能の取りまとめ (1/2)

| 分野 | 評価内容 | 評価手法等 | 要求されるビーム性能 (例) | |
|--------|--|--|---|---|
| | | | エンドステーション性能 | 光源性能 |
| 半導体 | <ul style="list-style-type: none"> ・表面界面の構造・電子状態分析 ・埋もれた界面や積層試料の深さ分布分析・面分布分析 ・オペランド計測 対象元素：Si, Ge, C etc. | <ul style="list-style-type: none"> ・XRD ・XAS ・PES (XPS, HAXPES, ナノPES) ・X線ナノイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・軟X線 (10 eV – 2000 eV)・硬X線 (2 keV – 10 keV) エネルギー分解能 $E/\Delta E \approx 10^4$ 以上 ビームフラックス 10^{15}ph/s/0.1%bw 以上 ・ビーム径(試料面上) $\phi < 10$ nm @1keV ・試料準備チャンバーやクリーンルームの併設 | <ul style="list-style-type: none"> ・ビームエネルギー3 GeV 程度の低エミッタンス (~ 1 nm·rad) 放射光リング ・軟X線領域(0.1 keV - 2 keV) 世界最高レベルの輝度 ($>10^{20}$ ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw) |
| 炭素材料 | <ul style="list-style-type: none"> ・薄膜の反射率測定 ・低真空中での測定 ・オペランド計測 ・化学状態・電子状態分析 対象元素：B, C, N, O, F, Si, P, S (主に軽元素) etc. | <ul style="list-style-type: none"> ・XAS ・XRF ・XPS ・XES | <ul style="list-style-type: none"> ・EUV から軟X線 (数 10~4000eV) ・高次光カットフィルター付きビームライン ・オゾンアッシング機能つきミラー (光学系炭素汚染対策) | <ul style="list-style-type: none"> ・2 keV - 10 keV の硬X線領域 世界最高レベルの輝度 ($>10^{20}$ ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw) ・30 keV までの硬X線 SPring-8 程度の輝度 ($>10^{20}$ ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw) ・10 eV~100 eV の EUV 十分な輝度 ($>10^{18}$ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw) |
| ソフトマター | <ul style="list-style-type: none"> ・有機分子の各種分光測定 ・プラズモンダイナミクス ・金属-誘電体界面など埋もれた界面分析 (ビームダメージ対策) | <ul style="list-style-type: none"> ・XPS, UPS ・XES ・XAS ・X線イメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・EUV から軟X線 (10 eV~2 keV) ・nm オーダーの集光されたビーム ・時間分解測定が可能な装置 (ms、ns、ps) ・SEM、STM、FT-IR などを備えたビームライン | <ul style="list-style-type: none"> ・10 eV~100 eV の EUV 十分な輝度 ($>10^{18}$ph/s/mrad²/mm²/0.1%bw) |
| 金属 | <ul style="list-style-type: none"> ・軟X線と硬X線を用いたX線吸収測定 ・電池、発電材料の分析 ・自動車先端材料の分析 | <ul style="list-style-type: none"> ・XAS ・XPS ・XRD | <ul style="list-style-type: none"> ・通年運転 ・企業にも使いやすくサポートの整ったエンドステーション (測定代行、受託解析、無人自動測定) | <ul style="list-style-type: none"> ・Top-up 運転 ・省エネルギー設計 |

【表 1-14】 (2/2)

| | | | | |
|-----------|--|--|--|--|
| アモルファス・液体 | <ul style="list-style-type: none"> ・超高温、超高压など極端条件での実験 ・ナノ微粒子機能性物質の電子状態解析 ・機能性ガラス材の反応発現機構解明 | <ul style="list-style-type: none"> ・ EXAFS ・ XRD ・ X線異常散乱 | <ul style="list-style-type: none"> ・ SPring-8 よりも軽元素の分析に特化したエネルギー範囲 (200 eV~30 keV) ・ 硬X線用ウィグラーも希望 | |
| 有機 EL | <ul style="list-style-type: none"> ・有機材料の微小構造、階層構造 ・薄膜中の分子配列構造・物性・ダイナミクスの多次元解析 | <ul style="list-style-type: none"> ・ SAXS ・ XAS ・ XPS, UPS, ARPES | <ul style="list-style-type: none"> ・ SPring-8 と同程度の高輝度性、単色性、連続光、偏光、高平行性、演色性、パルス性、集光性 | |
| 金属錯体 | <ul style="list-style-type: none"> ・ガス雰囲気中での構造解析、分光測定 ・ガス貯蔵材料や人工光合成触媒材料の現象観測とそのメカニズム解明 | <ul style="list-style-type: none"> ・ XRD ・ X線イメージング ・ XPS・XAFS | <ul style="list-style-type: none"> ・有毒ガスを利用できるような安全設備 ・軟X線から硬X線まで出せること ・専任のテクニカルスタッフの配置 | |
| 磁性材料 | <ul style="list-style-type: none"> ・ナノ顕微分光によるナノビットパターン、粒界構造、不均一材料の分析 ・磁気円二色性、線二色性分光 ・スピントロニクスデバイスのオペランド計測 | <ul style="list-style-type: none"> ・ XMCD ・ XMLD ・ X線ナノイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・円偏光、直線偏光を自由にコントロールできる軟X線ビームライン硬X線ビームライン ・nmオーダーの集光されたビームライン | |

【表 1-15】 情報通信分野における放射光を用いた研究内容、評価手法とビーム性能の取りまとめ (1/2)

| 分野 | 評価内容 | 評価手法等 | ビーム性能* | |
|---------------|---|---|---|--|
| | | | 現行施設 | 新施設への要望 |
| スピンデバイス、ストレージ | <ul style="list-style-type: none"> ・ ナノ領域の表界面組成・構造・磁性評価 ・ 高速時間分解スピン動特性評価 ・ 同時測定、深さ分布測定 対象元素：3d, 4d, 5d, 4f 系, B, O etc. ・ 広温度領域測定: 4 K ~ 700 K ・ 強磁場環境測定: 常用 2T, 基礎磁性 10 T | <ul style="list-style-type: none"> ・ XMCD, XMLD ・ XRD, EXAFS ・ XPS | <ul style="list-style-type: none"> ・ ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm ・ 時間分解能 $\Delta t \approx 100$ ps ・ 輝度 $B \approx 10^{18}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw @1 keV $B \approx 10^{20}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw @10 keV | <ul style="list-style-type: none"> ・ $\phi \leq 10$ nm ・ $\Delta t \leq 1$ ps ・ $B \geq 10^{20}$ @1 keV $B \geq 10^{21}$ @10 keV |
| 半導体デバイス | <ul style="list-style-type: none"> ・ 界面の構造・化学分析 ・ 新材料の構造・化学分析 ・ 微量不純物元素分析 <p>対象元素：Si etc.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ XAFS, XRD, HAXPES, XRF | 基本的に SPring-8 と同程度で十分 <ul style="list-style-type: none"> ・ HAXPES フラックス密度 $F \geq 10^{11}$ photons/s@40mm² (6 keV – 10 keV) ・ XAFS F 測定対象に依存 (0.1 keV – 50 keV) ・ 薄膜 XRD $F \geq 10^{12}$ photons/s@100mm² 以上 (6 keV – 12 keV) ・ XRF 検出限界濃度 $< 10^{15}$/cm³ | |
| 相変化 RAM | <ul style="list-style-type: none"> ・ 界面の構造・化学分析 ・ ナノ領域の構造・化学状態の動的評価 ・ 深さ分解分析 (原子層レベルでの深さ分解) <p>対象元素：Ga, Ge, Sb, Te etc.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ XANES, EXAFS, GISAXS, HAXPES, | <ul style="list-style-type: none"> ・ ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm ・ 時間分解能 $\Delta t \approx 100$ ps | <ul style="list-style-type: none"> ・ $\phi \leq 10$ nm ・ $\Delta t \leq 1$ ps |
| 有機デバイス | <ul style="list-style-type: none"> ・ 構造解析と電子状態分析 ・ サブミクロン領域の分析 ・ 分子ダイナミクス計測 (ラジエーションダメージ対策) <p>対象元素：軽元素.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ XPS, UPS ・ SAXS | <ul style="list-style-type: none"> ・ 輝度 $B \approx 10^{17} \sim 10^{18}$ photons/sec/mrad²/mm²/0.1%bw @0.1 keV – 2.0 keV ・ ビーム発散角: 水平 ~17 mrad, 垂直 ~6 mrad, 高い安定性 (強度、位置) ・ ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100$ nm ・ 構造解析時間分解能 $\Delta t \approx 100$ ps | <ul style="list-style-type: none"> ・ $B \geq 10^{20} \sim 10^{21}$ ・ ビーム発散角: 回折限界 (水平 < 6 mrad, 垂直 < 6 mrad) ・ 安定性: SPring-8 と同等 ・ $\phi \leq 1$ nm ・ $\Delta t \leq 1$ ps |

【表 1-15】 (2/2)

| | | | | |
|------------------|--|--|---|--|
| <p>酸化物・プロセス</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・表界面における化学反応の評価・解析 ・表面反応実時間計測 ・実時間計測 (分解能$\Delta t \leq 1 \mu\text{s}$) ・深さ分解による界面分析 <p>対象元素 : Si, Ge, C, O etc.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ XPS, HAXPES, XANES | <ul style="list-style-type: none"> ・ 分解能 $E/\Delta E = 10^4$ @0.2 keV ~ 2 keV ・ ビーム径(試料面上) $\phi \approx 100 \text{ nm}$ (集光) ・ フラックス密度 $F \approx 10^{11} \text{ photons/mm}^2/\text{s}$ | <ul style="list-style-type: none"> ・ $E/\Delta E \geq 10^4$ @0.2 keV - 2 keV ・ $\phi \leq 10 \text{ nm}$ ・ $F > 10^{11} \text{ photons/mm}^2/\text{s}$ |
| <p>光通信・光デバイス</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 微量不純物元素分析 対象元素 : Ga, In, Al, N, C etc ・ in situ 結晶成長モニタリング 対象元素 : (Ga, In, Al) N etc. ・ 光集積回路用短時間大面積露光技術 (フォトリソグラフィ) | <ul style="list-style-type: none"> ・ XRF ・ XRD | <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー $E = 0.1 \text{ keV} \sim 100 \text{ keV}$ ・ 輝度 $B \approx 10^{18} \text{ photons/sec/mrad}^2/\text{mm}^2/0.1\% \text{ bw}$ @1 keV $B \approx 10^{20} \text{ photons/sec/mrad}^2/\text{mm}^2/0.1\% \text{ bw}$ @10 keV $F \approx 10^{12} \text{ photons/s}$@100mm² 以上 (6 keV - 12 keV) ・ 均質照射領域(ウエハ上) =30mm x 1mm ・ 波長 $\lambda \approx 13 \text{ nm}$ ・ フラックス $F \approx 0.3\text{W}@2\% \text{ bw}$ | <ul style="list-style-type: none"> ・ $E = 0.1 \sim 30 \text{ keV}$ ・ $B \geq 10^{20}$@1keV $B \geq 10^{21}$@10 keV ・ $F \geq 10^{12}$ ・ 領域 $\geq 30\text{mm} \times 1\text{mm}$ ・ $\lambda \approx 13 \text{ nm}$ $F \geq 30\text{W}@2\% \text{ bw}$ |
| <p>微細加工</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ EUV リソグラフィ用マスク検査 (産業応用 : ルーチン検査) ・ 3次元デバイス構造の非破壊可視化 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 反射型顕微鏡等による欠陥イメージング技術 ・ レンズレス顕微鏡による3次元構造再生技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー $E = 0.1 \text{ keV} - 20 \text{ keV}$ ・ 分解能 $E/\Delta E \approx 0.1 - 0.3 \times 10^4$ ・ 輝度 $B \approx 10^{17} \text{ Photons/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\% \text{ bw}$ ・ ビームサイズ $\phi \approx 100 \mu\text{m}$ ・ 時間分解能 $\Delta t \approx 100 \text{ ps}$ | <ul style="list-style-type: none"> ・ $E = 0.1 \text{ keV} - 20 \text{ keV}$ ・ $E/\Delta E \geq 0.5 \sim 1 \times 10^4$ ・ $B \geq 10^{20}$ ・ $\phi \approx 10 \mu\text{m}$ (集光により 10 nm 以下に) ・ $\Delta t \approx 100 \text{ ps}$ ・ 高輝度コヒーレント光 ・ **ルーチンのマスク検査においては、サンプル送付後に、遠隔操作により検査可能となる仕組みが必要 |

【表 1-16】基礎科学分野における放射光を用いた研究内容、評価手法とビーム性能の取りまとめ（1/2）

| 分野 | 評価内容 | 評価手法等 | ビーム性能 | |
|-------|---|--|--|---|
| | | | 現行施設 | 新施設への要望 |
| 物性物理学 | <ul style="list-style-type: none"> 均質～不均質系, バルク～表面界面系, 周期系～非周期系における電荷・スピン・軌道・格子状態の時間空間階層構造・ダイナミクス解明 液体の物性解明 ナノ超構造体材料の創製・創発機構解明 その場観察のオペランド分光分析 量子テクノロジー材料開発のための極高分解能多次元(空間・時間・エネルギー)解析 <p>対象元素：3d,4d,5d,4f系, B, O, Si etc.</p> | <ul style="list-style-type: none"> UPS, XPS, ARPES XAFS S-RIXS, S-REXS 構造解析 (SAXS+XRD+PDF) ナノ PES/XPS, HAXPES ナノイメージング 超短パルス可変ディレイ時間によるポンプ・プローブ実験 | <ul style="list-style-type: none"> ビーム径 $\phi \sim 30 \text{ nm} - 10 \mu\text{m}$ 時間分解能 $\Delta t \sim 100 \text{ ps}$ フラックス $B \sim 10^{12} - 10^{13} \text{ ph/s/0.01\% bw}$ 軟 X 線(200 eV – 1000 eV), 硬 X 線(1 keV – 20 keV) エネルギー分解能 $E/\Delta E \sim 30000 @ 1000 \text{ eV}$ 偏光：円, 縦横可変直線 | <ul style="list-style-type: none"> 光エネルギー 数 eV～ $\phi \sim 1 \text{ nm}$ $\Delta t < 1 \text{ ps}$ $B > 10^{13}$ 軟 X 線で SPring-8 の 100 倍のフラックス. 軟 X 線 FEL 2 GeV – 3 GeV 加速器の第 3 世代軟 X 線光源 極端条件下エンドステーション Top-up 運転 (常時稼動) |
| 化学 | <ul style="list-style-type: none"> 溶液中の溶質構造や分子間相互作用のリアルタイム解析 化学反応・触媒反応などのオペランド局所電子状態観測 元素分析, 化学状態分析におけるナノスケール顕微観測 表面・埋もれた界面の不均一構造解析, 深さ階層構造解析 微小結晶, 薄膜構造解析 <p>対象物質：新奇金属-有機構造体 etc.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ナノ PES/XPS, HAXPES UPS, ARPES ナノ, オペランド XAFS. 時分割 XAFS (時分割) 構造解析 (SAXS+XRD) XMCD SXES | <ul style="list-style-type: none"> 軟 X 線(200 eV – 4000 eV), 硬 X 線(4 – 50 keV) $\Delta t \sim 100 \text{ ps} - 1 \text{ s}$ | <ul style="list-style-type: none"> $\Delta t \sim 1 \text{ fs} - 1 \text{ s}$ の広いダイナミックレンジ $\phi \sim 1 \text{ nm} - 100 \text{ nm}$ (ビーム集光可変) 軟 X 線 FEL レーザーとの同期 光学・電子顕微鏡との連携 測定のアートメーション化と依頼測定システムの充実 ユーザーの利便性確保 |

【表 1-16】 (2/2)

| | | | | |
|----------------------|--|--|---|--|
| <p>生物・生命科学</p> | <ul style="list-style-type: none"> 原子レベルのタンパク質・タンパク複合体構造～細胞小器官・細胞の内部構造とダイナミクスと対象とした時間空間階層的構造解析とイメージング 遺伝子から生態系までを統合する研究分野の創成 生物多様性の維持創出メカニズムの解明 <p>対象物質：光合成等重要な生命機能分子，創薬ターゲット分子，量子ソフトマター etc.</p> | <ul style="list-style-type: none"> 構造解析 (SAXS+XRD) 時分割 XRD コヒーレント X 線回折イメージング X 線顕微鏡 雰囲気環境下 XAFS | <ul style="list-style-type: none"> 硬 X 線 (~50 keV) 部分コヒーレント X 線 (コヒーレント率がビーム面積の 0.1%) | <ul style="list-style-type: none"> コヒーレント率：数%～数十%. $B \sim 10^{12}\text{-}10^{13}$ ph/s/0.01% bw $\phi \sim 0.1 - 10 \mu\text{m}$ 短波長(~0.7Å)から長波長(~3Å)をカバー アンジュレータ光源 XFEL との連携 |
| <p>地球物質科学・高圧物質科学</p> | <ul style="list-style-type: none"> 複合極限環境 (超高圧・超高温・超強磁場・超臨界) の実現と，その環境下における固体・液体の静的・動的挙動 巨大惑星のコアの構造と地球表層元素の静的・動的挙動 <p>対象元素：軽元素，3d 遷移金属 etc. その他液体・非晶質・ガラス物質</p> | <ul style="list-style-type: none"> 複合極限環境下 (高温高圧下)における UPS, XPS XAFS 構造解析 (SAXS+XRD) コヒーレント X 線回折イメージング | <ul style="list-style-type: none"> 硬 X 線 (10 – 70 keV), 150 keV までの白色光 $\phi \sim 100 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$ 部分コヒーレント X 線 (ビーム面積の 0.1%) | <ul style="list-style-type: none"> $\phi < 1 \mu\text{m}$ 高コヒーレント放射光 超高圧 (300 GPa), 超高温 (3000 K)の雰囲気下測定を可能に |

【表 1-17】産業利用分野における放射光を用いた研究内容、評価手法とビーム性能の取りまとめ（1/4）

| 分野 | 評価内容、要求事項 | | 分析・解析技術 | 要求されるビーム性能、エンドステーション | |
|------|-----------|--|--|--|---|
| | | | | 光源性能 | エンドステーション性能・運営体制 |
| 化学工業 | 対象 | 電池(エネルギーデバイス)/触媒/発電設備用耐熱材/水素吸収材/ナノカーボン材/バイオマス材 | <ul style="list-style-type: none"> ● 時間分解 XAFS ● XPS/HAXPES ● (エネルギー可変) ● ナノ分解能 SPEM, PEEM, STXM ● XES ● XRF | <ul style="list-style-type: none"> ● 光エネルギー：数 eV~100keV ● ビーム径(試料面上)：ナノ材料で 1 nm ~電極活物質やバイオマス材でダメージの少ない数 mm ● 輝度:10²⁰ photons/s/mr²/mm²/0.1%bw ● パルス幅: 1 ps~100 fs (触媒反応解析) (米 ALS ではレーザースライス法で~100 fs) ● 重元素材料分析も可能な数十 keV の硬 X 線領域の高単色性ビームライン | <ul style="list-style-type: none"> ● In situ/オペランド(動作環境下)測定や雰囲気制御測定 ● 海外でもまだ少ない溶液環境下測定 ● 高いビーム安定性 ● ビームの微小化と輝度低下を抑える高精度な回折系 ● 絶縁試料を帯電中和して評価できる設備 ● ソフトウェアやデータベースの充実 ● 高度な知識と技術を持ったビームラインサイエンティストによる研究バックアップ体制(海外と比較して現状圧倒的に不足) |
| | 項目 | <ul style="list-style-type: none"> ● デバイス内化学反応・劣化過程の時間分解可視化 ● 表面・界面での電子状態・組成空間分布分析 ● 光触媒における表面電子状態ダイナミクス ● 新奇レアメタルフリー非金属触媒の機能解明と実デバイス開発 ● 重元素ドーブ軽元素触媒の化学分析による材料設計 | | | |

【表 1-17】 (2/4)

| | | | | | |
|--------------|----|---|---|--|---|
| 電子デバイス・情報通信等 | 対象 | スピンドバイス/省エネ型ナノ半導体デバイス/強誘電体材料/有機デバイス | | | |
| | 項目 | <ul style="list-style-type: none"> ● ナノ空間領域での磁気特性評価 ● ピコ秒時間領域でのスピンドダイナミクス評価による相対論的エレクトロニクスデバイス設計 ● デバイス内部のナノレベル空間不均一性・拡散・伝導・反応速度の評価 ● 表面・界面での構造、電子状態分析による界面ナノアーキテクトニクス ● 微量不純物元素分析 | <ul style="list-style-type: none"> ● XRD ● ナノ分解能 SPEM, PEEM, STXM ● 時空間分解 XMCD ● XAFS ● UPS/XPS/ARPE S | <ul style="list-style-type: none"> ● 光エネルギー：数 eV~10keV ● ビーム径(試料面上)$\phi < 10$ nm ● パルス幅：$< \sim 100$ fs (スピンドダイナミクス解析) ● 集光後の photon flux で $10^8 \sim 10^{12}$ 個/s 程度の高輝度 (英 Diamond, 伊 Elletra レベル) ● 集光位置が変化せずに複合分析が可能な KB ミラーナノ集光 | <ul style="list-style-type: none"> ● 国際的独自性・優位性を出すために、日本の技術力を駆使した動作環境下および複合雰囲気環境下(電圧印加、磁場印加、温度変化)での高安定性測定システム ● 高空間分解能が安定して出せる結像光学系と除振システム ● 企業の開発スピードに合わせたフレキシブルなビームタイム ● 世界第一線の研究者・技術者・企業の先鋭部署がアクセスしやすい申請の簡略化や立地などの利便性 ● オープンイノベーション拠点 |
| 金属工業 | 対象 | 高信頼性構造材/軽量高強度材料/レアメタルフリーナノ材/原子力工業材(除染技術開発) | | | |
| | 項目 | <ul style="list-style-type: none"> ● 標準物資の認証分析 ● 極限環境での耐久性・歩留まり評価 ● 不均一組成における結晶構造・化学状態評価 ● 新奇プロセスの反応評価 ● 応力応答評価(歪み・腐食割れの生成確認) | <ul style="list-style-type: none"> ● XRD ● XAFS ● 時分割/エネルギー可変 SAXS/WAXS/US AX | <ul style="list-style-type: none"> ● 幅広い空間スケールの分析が一つの施設で履行できるような多様な性能を持つアンジュレーター・ベンディングマグネットの配備 ● Top-Up 運転、高い安定性 | <ul style="list-style-type: none"> ● TEM や NMR、化学・生物準備室など、放射光分析と相補的な情報が得られる複合的設備の拡充と十分なスペースが必要 ● 加熱・冷却しながら in situ (その場)観測できるシステム ● 耐久試験のため、温度のほかにもガス雰囲気下など、雰囲気制御できるシステム |

【表 1-17】 (3/4)

| | | | | | |
|------------|----|---|--|--|---|
| 機械工業 | 対象 | 高効率モーター/車載バッテリーシステム/省エネ固体照明システム | | | |
| | 項目 | <ul style="list-style-type: none"> ● 結晶構造解析による構造・残留応力評価 ● 製品の最適化された条件の検証 ● システムとしての車載燃料電池非破壊性能評価・内部材料解析 ● 高効率モーターに必要な高磁気保持力永久磁石材料開発のための結晶構造解析・磁区観測・元素分析 | <ul style="list-style-type: none"> ● XRD ● サブミクロン分解能 SPEM, PEEM, STXM ● 時空間分解 XMCD | <ul style="list-style-type: none"> ● 日本の得意分野や世界的に日本のシェアが大きな材料を海外で分析する必要がないように、海外施設レベルの輝度・エミッタンス(輝度は $10^{20} \sim 10^{21}$ photons/s/mr²/mm²/0.1%bw、エミッタンスは台湾 TPS の ~ 1.5 nm·rad、米 NSLS-II の ~ 0.7 nm·rad レベル) ● ビーム径(試料面上) $\phi < 10$ nm (実デバイス解析) ● パルス幅：$< \sim 1$ ps (チャージダイナミクス解析) | <ul style="list-style-type: none"> ● 申請から実験までを短時間(1週間程度)にすることが可能な柔軟な運用システム ● 光源性能を十分に引き出せる検出器の開発 ● 硬X線のXRDでも十分なエネルギー分解能を持つ検出器の開発 ● オペランド(動作環境下)測定したい大型構造体システムを丸ごと(バッテリー1台、エンジン1台、自動車1台等)導入できる十分なスペースと物理的自由度 |
| プラスチック・ゴム等 | 対象 | タイヤゴム/高機能プラスチック・樹脂 | | | |
| | 項目 | <ul style="list-style-type: none"> ● 複雑系としてのタイヤゴムの階層的構造経時変化・外場応答・化学反応ダイナミクス ● サブミクロン領域の電子状態分析 ● 分子ダイナミクス計測 ● 応力印加による歪み変化 | <ul style="list-style-type: none"> ● XRD ● サブミクロン XPS ● XAFS ● 時分割/エネルギー可変 SAXS/WAXS/U SAX ● X線位相コントラスト ● XPCS | <ul style="list-style-type: none"> ● 光エネルギー：数十~数百 eV ● ビーム径(試料面上)$\phi < 100$ nm (局所解析) ● 階層構造の分析のために集光サイズが選べること(サブ nm~μ m) ● SPring-8 レベルの空間コヒーレンス(コヒーレント度$> 0.1\%$) ● 時間コヒーレンスを稼ぐために、高いエネルギー分解能とビームの安定性 | <ul style="list-style-type: none"> ● スループットを上げるための汎用ビームラインと高分解能先端計測ができる研究用ビームラインの共存 ● 高輝度光源の特性を生かした高感度検出器 ● 有機材料のダメージを軽減しつつ測定できるシステム (photon flux 密度の調整・試料 scan など) ● ユーザーフレンドリーな利用システム ● 相談窓口やアクセスのよさなどの利便性 |

【表 1-17】 (4/4)

| | | | | | |
|-----------|----|---|--|--|---|
| 薬品・医療・食品等 | 対象 | 蛋白質/薬品/農作物/医用工学素材 | | | |
| | 項目 | <ul style="list-style-type: none"> ● 疾病関連蛋白質の3次元構造解析 ● 薬剤の分子構造の決定 ● 細胞の直接観察によるシグナル伝達システム解明 ● 農作物製品中の元素分析・組成空間分布評価 ● 医用工学素材(人工臓器・バイオセンサ)の特性評価 | <ul style="list-style-type: none"> ● XRD ● XAFS ● X線位相コントラスト ● XES | <ul style="list-style-type: none"> ● 光エネルギー：数 eV~数十 keV ● 軟X線による軽元素吸収分光分析から硬X線による結晶構造回折まで、一つの施設でカバーできる多様な光エネルギーのビームライン ● 高空間コヒーレンス(コヒーレント度~数十%) | <ul style="list-style-type: none"> ● 遠隔操作でリモート測定できるシステム ● 緊急性のある課題や長期課題が確保しやすい柔軟な運用システム ● ビームラインサイエンティスト・テクニカルスタッフの充実、人材育成 |

【表 1-18】 評価手法の略号説明

| 略号 | 英語 | 日本語 |
|--------|--|--------------|
| ARPES | Angle-Resolved Photoelectron Spectroscopy | 角度分解光電子分光 |
| EXAFS | Extended X-ray Absorption Fine Structure | 広域 X 線吸収微細構造 |
| GISAXS | Grazing Incidence Small Angle X-Ray Scattering | 斜入射小角 X 線散乱 |
| HAXPES | Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy | 硬 X 線光電子分光 |
| PDF | Pair Distribution Function Analysis | 二体分布関数解析 |
| PEEM | Photoelectron Emission Microscopy | 光電子顕微鏡 |
| PES | Photoelectron Spectroscopy | 光電子分光 |
| SAXS | Small Angle X-ray Scattering | X 線小角散乱 |
| STXM | Scanning Transmission X-ray Microscope | 走査型透過 X 線顕微鏡 |
| SPEM | Scanning Photoelectron Microscopy | 走査型光電子顕微分光 |
| S-REXS | Soft- Resonant Elastic X-ray Scattering | 軟 X 線共鳴弾性散乱 |
| S-RIXS | Soft- Resonant Inelastic X-ray Scattering | 軟 X 線共鳴非弾性散乱 |
| SXES | Soft X-ray Emission Spectroscopy | 軟 X 線発光分光 |
| USAX | Ultra Small Angle X-ray Scattering | X 線超小角散乱 |
| UPS | Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy | 紫外線光電子分光 |
| WAXS | Wide Angle X-ray Scattering | X 線広角散乱 |
| XAFS | X-ray Absorption Fine Structure | 広域 X 線吸収微細構造 |
| XANES | X-ray Absorption Near Edge Structure | X 線吸収端近傍構造 |
| XAS | X-ray Absorption Spectroscopy | X 線吸分光 |
| XES | X-ray Emission Spectroscopy | X 線発光分光 |
| XMCD | X-ray Magnetic Circular Dichroism | X 線磁気円二色性 |
| XMLD | X-ray Magnetic Linear Dichroism | X 線磁気線二色性 |
| XPCS | X-ray photon correlation spectroscopy | X 線光子相関 |
| XPS | X-ray Photoelectron Spectroscopy | X 線光電子分光 |
| XRD | X-Ray Diffraction | X 線回折 |
| XRF | X-Ray Fluorescence analysis | 蛍光 X 線分析 |

【表 1-19】 要求される放射光ビーム性能の輝度、エネルギー、コヒーレンス度による領域分類

| | 輝度 (photons/s/mrad ² /mm ² /0.1%bw) | エネルギー |
|---------------------------|--|-----------------|
| (1) 構造解析 (X線回折) | $10^{16} - 10^{20}$ | 5 keV - 100 keV |
| (2) 分光 | $10^{15} - 10^{19}$ | 20 eV - 20 keV |
| (3) 先端分光 | $10^{18} - 10^{21}$ | 20 eV - 20 keV |
| (4) 先端構造解析 (回折) | $10^{20} - 10^{22}$ | 5 keV - 100 keV |
| (5) コヒーレントイメージング | $10^{21} - 10^{22}$ | 500 eV - 10 keV |
| (6) フェムト秒イメージング (XFEL) | $10^{27} - 10^{33}$ | 200 eV - 20 keV |

【表 1-20】 環境・エネルギー分野の研究内容と、要求される放射光ビーム性能の分類

| 環境・エネルギー分野 | | | | | | | |
|-------------------|-------------------------------------|------|----|------|--------|--------------|------|
| | 研究内容 | 構造解析 | 分光 | 先端分光 | 先端構造解析 | コヒーレントイメージング | XFEL |
| 資源リサイクル | ・低環境負荷、環境保全、回復技術 | | ○ | ○ | | | |
| 地圏環境・除染 | ・汚染の除去、廃炉技術 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 蓄電池・触媒 | ・高エネルギー密度電池 ・長寿命、安価な定置電池 | ○ | ○ | ○ | | | |
| 燃料電池 | ・充放電サイクルと構造変化 ・電極／電解質界面の解析 | ○ | ○ | ○ | | | |
| 太陽電池 | ・太陽電池の高効率化 ・二次電池の大容量化 | ○ | ○ | | | | |
| 人工光合成 (海外動向含む) | ・エネルギー蓄積型反応系の開発および実現 ・自然界の光合成の理解 | ○ | | ○ | | | |
| エネルギー安全 | ・エネルギープラントの信頼性、安全性 | ○ | ○ | | | | |

【表 1-21】 健康・医療分野の研究内容と、要求される放射光ビーム性能領域

| 健康・医療分野 | | | | | | | |
|-----------------------------------|--|------|----|------|--------|--------------|------|
| | 研究内容 | 構造解析 | 分光 | 先端分光 | 先端構造解析 | コヒーレントイメージング | XFEL |
| バイオメディカルイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・生きた細胞の可視化 ・幹細胞の動態解析 ・疾患の早期発見 | ○ | | ○ | | | |
| 放射線生物学・バイオメディカルイメージング | <ul style="list-style-type: none"> ・農業を支える薬剤開発 ・放射性元素の動態分布 | ○ | ○ | ○ | | | |
| 放射線生物学 | <ul style="list-style-type: none"> ・放射線の生体への影響の確定的理解 | ○ | ○ | | | | |
| 創薬・農学・基礎細胞生物学を視野に入れた構造生物学（海外動向含む） | <ul style="list-style-type: none"> ・タンパク質、糖、脂質の構造解析、創薬 ・タンパク質複合体の高次構造解析 ・膜タンパク質の構造解析にもとづく創薬 ・農業を支える薬剤開発 ・幹細胞の再生医療への応用 | ○ | | ○ | ○ | | ○ |

【表 1-22】 材料分野の研究内容と、要求される放射光ビーム性能領域

| 材料分野 | | | | | | | |
|--------------------|-----------------------------|------|----|------|--------|--------------|------|
| | 研究内容 | 構造解析 | 分光 | 先端分光 | 先端構造解析 | コヒーレントイメージング | XFEL |
| 半導体 | ・半導体、絶縁膜材料開発 ・積層ヘテロ界面の解析 | ○ | ○ | ○ | | | |
| 炭素材料 | ・原子、分子、電子レベルの分析技術の高度化 | | ○ | ○ | | | |
| ソフトマター (海外動向含む) | ・プラズモニクスデバイスなどの機能発現の制御 | | ○ | | | | |
| 金属 | ・革新的電池、発電材料の開発 | ○ | ○ | ○ | | | |
| アモルファス・液体 | ・金属ナノ材料、機能性ガラス材料の合成と評価 | ○ | ○ | | | | |
| 有機 EL | ・有機分子結晶粒界の評価、制御 | ○ | ○ | | | | |
| 金属錯体 | ・選択的、効率的な気体分離、貯蔵材料の開発 | ○ | | ○ | ○ | | |
| 磁性材料 | ・バルク材料の粒界構造の観察 | | ○ | ○ | | | |

【表 1-23】 情報通信分野の研究内容と、要求される放射光ビーム性能領域

| 情報通信分野 | | | | | | | |
|-------------------------------|--|------|----|------|--------|--------------|------|
| | 研究内容 | 構造解析 | 分光 | 先端分光 | 先端構造解析 | コヒーレントイメージング | XFEL |
| スピンドバイ ス、ストレージ (海外動向含む) | ・新規スピン駆動技術の開発 ・ナノサイズ、ピコ秒領域でのスピン動作の実時間解析 | ○ | | ○ | ○ | | |
| 半導体デバイス | ・ナノメートルまでのダウンサイジング | ○ | ○ | | | | |
| 相変化 RAM | ・高信頼性の新規材料開発 ・ヘテロ界面の組成、構造解析 | | ○ | ○ | | | |
| 有機デバイス | ・新機能性有機材料の合成 ・電子機能デバイスの開発 | | ○ | | | | |
| 酸化物・プロセス | ・プロセスの極限制御 | | ○ | ○ | | | |
| 光通信・光デバイス | ・波長多重通信に対応する分波、合波などの素子開発 | ○ | ○ | | | | |
| 微細加工 | ・EUV リソグラフィの開発 ・原子、分子ビームによる加工 | ○ | | ○ | | | |

【表 1-24】 基礎科学分野の研究内容と、要求される放射光ビーム性能領域

| 基礎科学分野 | | | | | | | |
|---------------------|---|------|----|------|--------|--------------|-------|
| | 研究内容 | 構造解析 | 分光 | 先端分光 | 先端構造解析 | コヒーレントイメージング | XFEL |
| 物性物理学 (海外動向含む) | ・凝縮系における電荷、スピン、軌道、格子状態の時空間階層構造と相転移、緩和メカニズムの解明 | ○ | | ○ | ○ | | ○(SX) |
| 化学 | ・分子内、分子間相互作用が作る電子状態、結晶構造の時空間階層構造と化学反応メカニズムの解明 | ○ | | ○ | | | ○(SX) |
| 生物・生命科学 (海外動向含む) | ・複合体としてのタンパク質に働く多体相互作用の時空間階層構造と生体反応メカニズムの解明 | ○ | | ○ | | ○ | ○ |
| 地球物質科学・高圧物質科学 | ・超高圧、超高温等の複合極限環境下における固体、液体の静的、動的挙動と恒星、惑星の構造解明 | ○ | ○ | ○ | ○ | | |

【表 1-25】 産業利用分野の研究内容と、要求される放射光ビーム性能領域

| 産業利用分野 | | | | | | | |
|---------------|-----------------------|------|----|------|--------|--------------|------|
| | 研究内容 | 構造解析 | 分光 | 先端分光 | 先端構造解析 | コヒーレントイメージング | XFEL |
| 化学工業 | ・触媒反応、電池の酸化還元反応の解明、制御 | ○ | ○ | ○ | | | |
| 電子デバイス・情報通信など | ・新規半導体材料や配線材料の開発 | ○ | | ○ | | | |
| 金属工業 | ・軽量化に向けた高強度材料の開発 | ○ | ○ | | | | |
| 機械工業 | ・各種構造体の残留応力、歪みの解析、制御 | ○ | ○ | ○ | | | |
| プラスチック・ゴムなど | ・材料劣化の解析、制御 | ○ | ○ | ○ | | ○ | |
| 薬品・医療・食品など | ・微小部の構造や組成の解析技術高度化 | ○ | ○ | ○ | | ○ | |

【表 1-26】 運転／建設中の高輝度中型放射光施設の海外動向：光源パラメータ

| | SLS (Villigen) | SOLEIL (Saclay) | DIAMOND (Oxford) | NSLS-II (BNL) | TPS (Hshinchu) | MAX-IV (Lund) |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
| ステータス | 運転中 2000~ | 運転中 2006~ | 運転中 2006~ | 運転中 2015~ | 建設中 | 建設中 |
| エネルギー (GeV) | 2.4 | 2.75 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 周長 (m) | 288 | 354.1 | 561.6 | 791.5 | 518.4 | 528 |
| ラティ ス構造 | Double- bend Achromat | Double- bend Achromat | Double- bend Achromat | Double- bend Achromat | Double- bend Achromat | 7-bend Achromat |
| セル数 | 12 | 24 | 24 | 30 | 24 | 20 |
| 直線部 | 11.7 m × 3 | 12.0 m × 4 | 8.0m × 6 | 8.6 m × 15 | 12.0 m × 6 | 4.7 m × 20 |
| ” | 7.0 m × 3 | 7.0 m × 12 | 5.0 m × 18 | 6.6 m × 15 | 7.0 m × 18 | 1.3 m × 40 |
| ” | 4.0 m × 6 | 3.8 m × 8 | | | | |
| エミッ タンス (nm· rad) | 5.0 | 3.74 | 2.7 | 0.55 | 1.6 | 0.33 (0.26) |
| 入射器 | Booster Synch. | Booster Synch. | Booster Synch. | Booster Synch. | Booster Synch. | S-band Linac |