

## 第二部

### 2-1 ヒアリング調査で得られた各分野の聴取内容

A：環境・エネルギー分野

B：健康・医療分野

C：材料分野

D：情報通信分野

E：基礎科学分野

F：産業利用分野



## ヒアリング調査報告書（A：環境・エネルギー分野）

① **社会的・科学的課題**：環境・エネルギー分野における今後 5-10 年にわたって想定されるニーズ・課題を図 1 にまとめる。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、地球温暖化を抑制するため、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となっている。また、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/回復に関連した課題が存在する。

これら課題の解決を目指すにあたって、必要な様々な技術開発を進めること

で、「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を確立し、また、地球環境問題の解決に繋げることで、持続可能な社会の実現に貢献することができる。

② **研究内容**：具体的な研究内容として、エネルギー関連では、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挙げられる。また、環境分野においても、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、原子炉の安全な廃炉技術の確立、汚染物質処理、除染などの環境保全/回復技術が待ち望まれている。

太陽電池、燃料電池、蓄電池においては、次世代型デバイスの開発における、高性能化、コスト低減、高信頼性の達成が重要な研究課題となる。高性能化については、新材料開発に加え、性能・信頼性のボトルネックを同定するため、運転中のデバイス評価が重要との認識を全ての研究者が持っていた。人工光合成、電解による燃料製造、低環境負荷プロセスの開発においては、反応場の直接評価により、反応機構解析や、反応場の最適構造評価を行い、デバイスの高性能化や、プロセスの改良や新規開発に繋げる研究が複数挙げられた。また、廃炉や除染の技術確立のためには、燃料デブリや原子炉構造材の状態評価や、吸着剤へのセシウム吸脱着機構解明と減容化技術の最適化などを行う必要があるが、安全性を十分考慮し、極微量試料での評価が必須となる。

殆どの分野に共通して、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

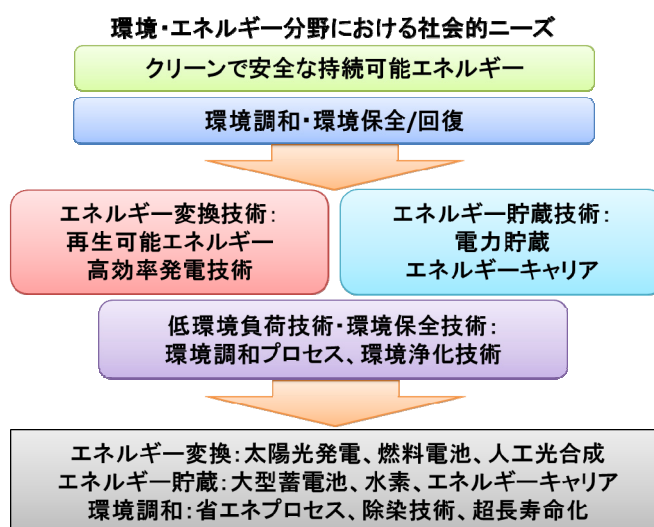


図1 環境・エネルギー分野における社会的ニーズと課題、研究動向の模式図。

料やデバイスの実使用環境下での評価、いわゆる in situ 評価 (operando 評価) が、より簡便にできることを希望する意見を多く頂いた。

③ **放射光の貢献**：放射光は、マイクロビーム化することで、高い空間分解能で高精度な測定ができるだけでなく、photon 数が多いことを利用することで、材料・デバイスの内部構造の測定においても、高い時間分解能を実現することが可能である。さらに、透化能と空間分解能が高い放射光 X 線を用いれば、実デバイス環境下での in situ 計測や材料内深部や埋もれた界面などを局所的かつ選択的に測定できる。このため、各分野におけるエネルギー変換デバイスの開発や、触媒・化学反応場のメカニズム解明においては、材料のバルクや表面の電子構造などの評価に加え、電極/電解質、pn 接合、反応物/触媒などの界面現象にかかわる情報を得る上で欠くことのできない測定技術となっている。

また、アクチノイドのような取扱に制約の大きい放射性核種を含む試料は、安全性を十分考慮して微量サンプルの利用が考えられるので、高輝度放射光源の利用は大変重要である。すなわち少ないボリュームの実験で大きなインパクトをもたらす研究の実施が可能である。

④ **ビーム性能**：各分野において要求される分析・解析技術、感度やビーム性能、放射光施設への要望を添付資料 表 2-1 にまとめる。それ以外のビーム性能、施設仕様については現状施設(SPring-8)と同程度を希望するとの意見が多かった。その他の意見・要望について、重要と思われるものを以下に示す。

- ・放射光ユーザーでなかった研究者、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サイエンティストの体制の充実がこれまで以上に不可欠と考える。また、ビームラインサイエンティストが腰を据えてユーザーと研究を進めるための環境整備にも配慮して欲しい。

- ・プロジェクト研究などに対応できる使用(専用ビームライン)および申込方法を取って欲しい。

- ・放射光技術の開発にあたっては、開発した技術で測れるものを測定するのではなく、ユーザーが測りたいものを測れる技術を開発することを希望する。

- ・年間 4000 時間以上の運転を確保するか、あるいはビームラインの総数を増やす、セッティングにかかる時間を短縮するなどしてユーザービームタイムを増やすことを望む。また、よほど手慣れた実験課題でない限り、一発で決定版のデータを出すことは、本来は難しい。時間をあけて 2、3 回実験するなど利用形態の改善ができないか。

⑤ **メリット・デメリット**：今回のヒアリング対象者全てが新たな放射光施設の整備を希望した。メリットとして、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、などが挙げられた。

一方、供用されなかった場合、上記メリットが得られないことに加え、我が国の研究開発が他国の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。

⑥ **その他**：特に重要と思われる意見を以下に列挙する。

- ・国内の産業競争力を維持するためには、研究体制などが必ずしも整っていない中堅以下

の企業へ、研究者側から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が必要と考える。

・企業などの技術者・研究者が放射光を利用する際に、高い敷居があるため、事前の相談や、測定時のビームラインでのサポートなどを充実して欲しい。また、その際に最先端の技術開発を可能にするために、NDAなどを結んでの情報の取扱いの枠組みの整備もされたい。また技術開発主体に、開発投資に見合ったリターンが生じる仕組みにし、民間が利用しやすい知財保護などの設計が必要である。

・放射性廃棄物の処分問題、福島の問題は、原子力の推進の是非にかかわらず取り組まなければならない課題である。しかしながら、昨今の当該分野においては負のイメージが強く、この分野を志す研究者や学生の数が減少傾向にある。放射光を利用した研究開発は、基礎的な視点で知的好奇心を満たす形で原子力科学分野の研究に取り組むことが可能で、人材育成の観点でも大変重要なツールであると思われる。本放射光施設を、次世代へ技術および人材を繋げていく核とできるよう整備されることを望む。

以上

## ヒアリング調査報告書（B：健康・医療分野）

① **社会的・科学的課題**：健康医療分野における重要課題として以下の12項目が挙げられる（次頁図参照）。

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. 癌の成因解明、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
11. 構造生物学分野におけるアジア諸国（特に中国）の台頭と、それを念頭においた日本の基礎生物学分野のさらなる飛躍的発展
12. Swiss Light Source（スイス）、Diamond（英国）、Advanced Light Source（アメリカ）等の海外の放射光施設が軒並み回折限界リング（diffraction-limited storage ring）へのアップグレードを予定している状況の中、日本の放射光施設の今後の拡充・発展

② 研究内容:「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、H17年の20%に対し、H27年は27%、H36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、そのための技術革新に対する努力を惜しむことはできない。また、動脈硬化などに対する血管評価法の進歩とその安全対策も重要である。老化に関する研究では、糖・脂質などの代謝産物の網羅的解析(メタボローム解析)や各組織(局所部)における水分子の存在率の定量的解析が重要である。さらに幹細胞研究においては、幹細胞の体内導入から動員(モビライゼーション)・定着(ホーミング)に至るプロセスの動態を高解像度にリアルタイムに解析することは、再生医学の躍進につながると思われる。うつ病・認知症などの現代病についても、精神活動・記憶・神経変性疾患等を引き起こす原因遺伝子(タンパク質)が同定されつつある昨今において、それらの分子レベルでの研究がますます重要となる。疾病メカニズムが解明されれば、新たなバイオマーカーを用いた効果的な薬剤投与の体制を構築することも可能となる。また現在、大規模な創薬プロジェクトが走りつつあり、希少疾患を含む多種多様な疾病に対する医薬品および治療のハイスループット開発が期待される。その意味においてもタンパク質の高分解能構造解析の重要性はますます高まる。農業基盤を支える研究開発については、地球の温暖化や環境破壊などによる農産物(特に植物)への影響を考慮すれば、厳しい環境に耐えうる作物の品種改良や遺伝子組換え体を用いない新たな育種方法の開発は重要である。農産物の大規模生産を行っている昨今において、ウイルス感染の拡散を抑制するための抗ウイルス薬の開発は必須である。一方、基礎生物学分野においては、タンパク質が細胞の中で多くの生体分子と過渡的あるいは恒常的に相互作用し、様々な制御機構のもと協同的に働いていることを考慮すれば、今後は、これまでの静止した生体分子を対象とした構造生物学に加え、生体分子間相互作用を含む動的構造を非侵襲的にリアルタイムに高分解能で解析できる技術の確立が必須となる。生命現象の本質を理解するためには、構造生物学研究(特に膜タンパク質・超分子複合体・病気関連因子の構造解析)は今後も極めて重要であり、そのための技術革新と施設整備の労を惜しんではいけない。欧米諸国さらにはアジア諸国の放射光施設の新たな建設・アップグレードや、そしてそれに伴う構造生物学の急速の発展を顧みれば、日本も本分野において立ち後れないよう最大限の努力を払うべきである。また運営面においても、ほぼ年中稼働している諸外国の放射光施設に対して、運転時間が削減されつつある日本の放射光施設の現状は、

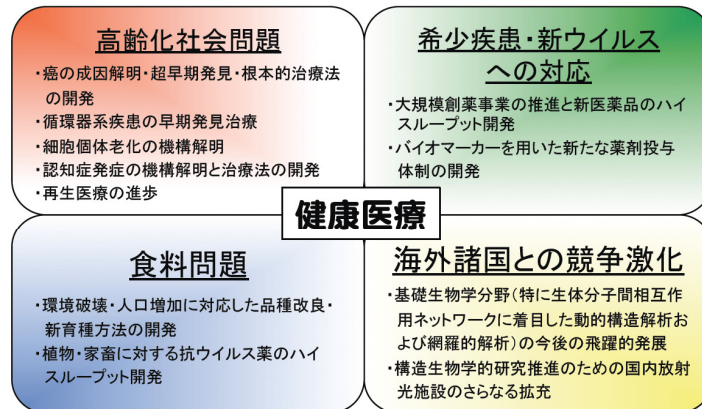


図 健康・医療分野で今後5~10年の間に想定される社会的・科学的課題とその対応策

早急に改善すべき課題である。

③ **放射光の貢献**：上述の全ての課題において、放射光が大きく貢献できることは全てのヒアリング対象者が同意するところである。特に癌の超早期診断、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、放射光施設は不可欠である。また、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疑う余地がなく、今後ますます高まると考えられる。

④ **ビーム性能**：各分野において要求される分析・解析技術、感度やビーム性能、放射光施設への要望を添付資料 表 2-2 にまとめる。結論として、汎用性ビームラインのさらなる拡充とともに放射光施設ごとに際立った特徴・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十分にマイクロフォーカスされたビームライン、さらには X 線自由電子レーザーの開発などが特に必要と思われる。その他エンドステーション、運用システム等に関する意見・要望で特に多かったものを、以下に列挙する。

1. 停止期間をできるだけ短くすること（少なくとも他の放射光施設停止期間と重ならないこと）
2. 使用料金を最低限（成果公開の場合、無償利用）にすること
3. 十分なビームラインスタッフ数の確保
4. 動物の一時飼育室や簡易な手術室、さらには医学の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物理的空間を設けること
5. 施設への交通アクセスがよいこと
6. 全国および海外の学術機関並びに製薬企業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が可能であること
7. 旅費のサポートがあることも望ましい
8. 既存の施設の使用状況から考えて、日本国内において生体高分子結晶構造解析用ビームラインは 5 本以上、小角散乱用ビームラインは 3 本以上が同時に稼働することが求められる

⑤ **メリット・デメリット**：既存の放射光施設の老朽化が進む状況の中、今後修復・再建設されたとしても、その間ユーザー利用停止が余儀なくされたとすれば、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が妨げられることとなり、世界に対して我が国が後れをとる結果となる。その打開策を海外施設の利用に見出した場合、海外施設の成果となる上、国内での人材育成の観点からも望ましくない。したがって、ユーザーからのビームタイム需要に応えるべく、国内に（できれば東日本の交通アクセスの良い地域に）PF と同等かそれ以上の性能を有する生体分子構造解析用ビームラインを複数設置し、日本全国の学術的・産業的発展に大きく寄与することが期待される。

結論として、医学・生物学者が何を知りたいと考えているか、放射光ビームラインの設計・運営に携わるものが正しく理解し、常に研究課題解明に向けた方策の議論を重ねることが肝要である。これにより、医学あるいは基礎生物学と放射光科学の真の異分野連携が可能とな



る。今後の動向が強く期待される。

以上

## ヒアリング調査報告書（C：材料分野）

① **社会的・科学的課題**：図1に示すようにエネルギー問題、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研究を課題としてとらえており、それらを解決するための材料研究・開発が必要であるという考えであった。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が益々重要になり、それらの課題を解決するための材料研究・開発が求められる。

また、今後の生産活動においてより低環境負荷が求められるであろう。省エネ、低環境負荷のためには、軽量で強靱かつ高耐久の材料開発が求められる。また、希少で資源の限られるレアメタルを使用せずに、地球上にありふれた元素で同等の機能を実現する元素戦略に基づいた研究も重要である。わが国の重要産業である自動車産業においても、高効率バッテリーの開発、車体軽量化、レアメタルフリーの触媒開発など、材料研究に期待するところは大きい。さらに今後は食糧や生体・医療に関係したバイオ・ソフトマター材料の研究が発展すると思われる。また、海外でも同様にエネルギー問題、低環境負荷の課題が想定されているが、特にナノ構造体、生体のX線イメージングなどの生命・医療関係、ならびに世界的には不足が予測される食糧や水の問題に寄与できる材料研究が課題となっている。

② **研究内容**：取り組むべき研究内容としては、金属、半導体、酸化膜、ソフトマターなどの材料分野ごとに様々であり、非常に多岐にわたった。例えば、革新的電池材料や各種発電材料の研究・開発、エネルギー貯蔵や運搬のための気体貯蔵や分離材料の開発、新規触媒の開発が挙げられた。また、半導体分野では、超低消費電力極微細トランジスタに



図1 今後5～10年の間に想定される社会的・科学的課題。

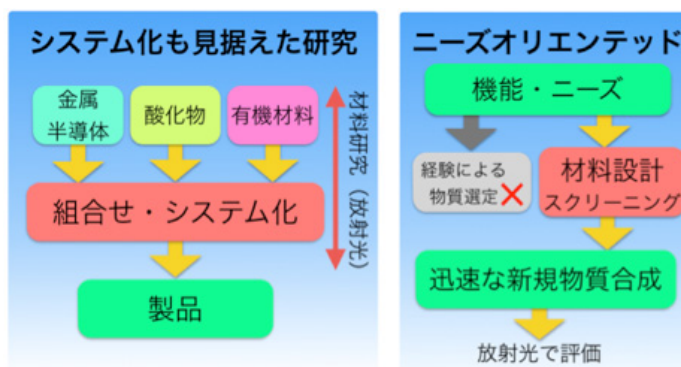


図2 これからの材料研究のスタイル。



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などが挙げられた。有機エレクトロニクスにおいては、分子配向形成機構の解明と制御、有機デバイス特性と結晶粒界の関係の解明、有機材料のダイナミクス解明が求められるということであった。また、材料の種類によらず、ナノ加工、ナノ構造作成技術の開発は重要であるという認識であった。材料を分析する技術の開発や向上も重要であり、材料の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求められている。材料研究スタイルに関しては、図2に示すように様々な材料そのものを研究するのではなく、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が必要になるであろうということであった。いわゆるニーズオリエンテッドな材料研究が必要であり、欲しい機能を実現するための材料研究が主流となる。そのため、今後の材料研究に共通して求められているのは材料設計手法の確立である。要求される機能から、材料を設計し、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だろう。

③ **放射光の貢献**：全ての方が材料研究において放射光はもはや欠かせないツールになっているという認識であった。放射光施設では、大学や企業の実験室で準備できる物に比べて、はるかに質の高い光源が使用できる。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重要であるのは当然であり、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いうことであった。

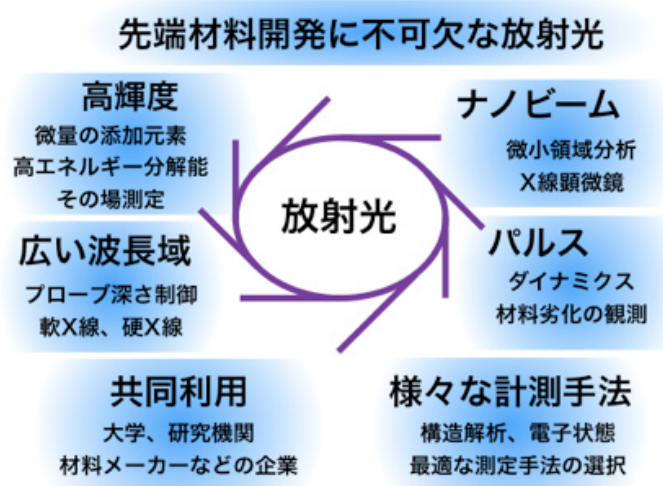


図3 材料研究における放射光の貢献。

図3に示すように、放射光の高輝度、広波長域、ナノビーム、パルス性等々の特長はいずれも先端材料開発に活用されている。例えば、電池開発では、極微量の添加元素の影響の解明や、試料表面の元素キャラクタリゼーションに高輝度の放射光が不可欠である。また、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が、硬X線光電子分光法では、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が可能となる。この硬X線光電子分光法は、高輝度、高分解能の放射光でこそ実力が発揮される。また、有機エレクトロニクスや半導体デバイス、蓄電池等においては、高輝度、ナノビーム、パルス性を活用した動作状態での測定（オペランド計測）による材料物性の解明が期待されている。放射光施設には、波長域に応じて様々なビームラインが整備され、様々な実験ステーションが提供される。そのため、例えば測定したい試料に最適なビームライン、実験手法を選択することが可能である。また、実験ステーションには、複数の測定装置が備わっている場合が多く、それらを同時に使用することで材料を多面的に調べることが可能である。以上のように、材料分野における放射光の貢献は計り知れず、放射光なくしては今後

の材料研究の進展・深化は期待できない。

④ **ビーム性能**: 材料分野の研究に必要なビーム性能 (表 2-3) については、図 4 に示すようにいわゆる第 3 世代の高輝度な放射光が要望された。材料研究においては、硬 X 線による X 線回折、小角 X 線散乱等の構造を調べる手法、軟 X 線を用いる X 線吸収分光法、X 線発光分光法、光電子分光法等の主に電子状態を調べる手法が用いられるため、軟 X 線から硬

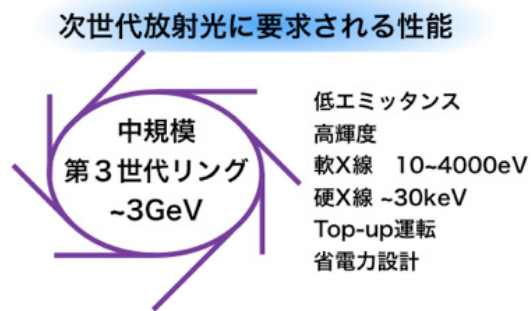


図 4 材料研究が要求する次世代放射光の性能。

X 線が発生できる放射光リングが必要である。特に炭素などの軽元素の分析に対応するために、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 (電子エネルギー 3 GeV 程度) が望ましい。個々のビームラインやエンドステーションへの要望は、対象とする材料によって様々であったが、重要と思われる物を以下に列挙する。

- ガス反応チャンバーが接続できるビームライン
- 有機分子に対応できるエンドステーション
- 有毒排気ガス、高圧ガス保安法に基づく施設
- ナノビームによる顕微分光
- 軟 X 線を大気に取り出せるビームライン
- 性能重視のビームラインと利便性重視のビームラインの併設
- 放射光以外の基本的な物性測定環境の整備
- X 線二次元検出器の自国開発
- 回折分光器と結晶分光器にまたがる広い波長域のビームライン
- 迅速な光軸調整、真空排気のできるエンドステーション
- 任意形状の実試料を測定できる余裕のある実験槽

以上の要望は、海外で続々と建設されている高輝度放射光施設で既に可能なものも多く、本国でも次世代の高輝度放射光施設の建設と速やかな供用が望まれている。

また、放射光施設の利用や運用に関しても多くのご意見をいただいた。それらをまとめたブロック図を図 5 に示す。まず、様々な物質を合成する材料研究ではターンオーバーの速い運用とアクセスの良さが重要であるため、研究者の多い大都市圏から日帰りで測定できるようなアクセスの良い場所への立地が要望された。もちろん時間のかかる高度な分析も必要であるため、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し、後者は申請から実験までターンオーバーの速い運用を行う。巨額の投資に対する社会的合意として、次世代放射光では産業応用に役に立つことが最重要である。したがって、企業ユーザーをできるだけサポートして、企業が利用しやすい運用にする必要がある。測定代行や受託解析サービスも必要であろう。また、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も必要であろう。

海外の放射光施設では、ビームラインサイエンティストだけではなく、博士号を有した多数のエンジニアやテクニシャンがビームラインの運用をサポートしている。しかも、身分に上下関係はなく、非常にフラットな関係が保たれている。日本の放射光施設の運用にも、専任のテクニカルスタッフや測定機器開発部門も充実させる必要がある。それら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。また、海外の放射光施設には、近隣の総合力の高い大学が放射光施設の様々な運営をサポートしているケースがある。外からのユーザー受入や運営はオープンにしながらも、近くにある総合力の高い大学があらゆる分野で開発、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。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。次期放射光施設は、そのような総合力の高い大学の近くに建設すべきである。

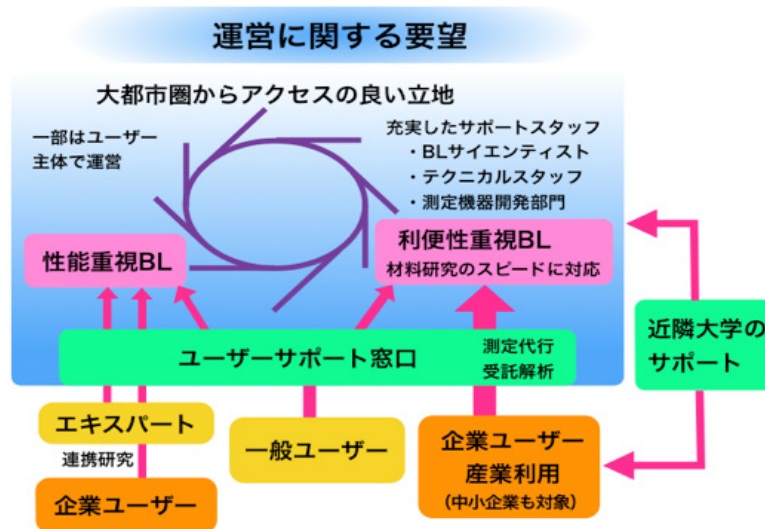


図5 次世代放射光施設の利用・運用体制への要望。

⑤ メリット・デメリット：材料分野の研究に関して全ての方が共用によるメリットは非常に大きいと考慮しておられた。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。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すると思われる。特に、軟 X 線領域に強い中規模高輝度放射光施設が整備されれば、炭素を中心とした軽元素材料に関する発展が期待できる。また、次世代放射光施設の整備により、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、研究の国際化も期待できる。

一方、整備されなかった場合は、ほとんどの方が材料研究に対して大きなデメリットが生じると述べられた。材料研究において、放射光を必要とする評価ニーズは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。また、高度な分析技術に基づく知識の蓄積と深耕ができなくなり、研究競争力は低下し、人材も育たない。同規模の放射光施設が海外で次々に整備されている中で、放射光の有する高度な材料研究力の欠如は、わが国の自動車産業、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。

⑥ その他：



- 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、学術的な軟 X 線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。例えばニュースバルは利用課題申請を提出して審査する必要はないため、企業からのアクセスは容易であり、かつ利用に伴う条件（全国共同利用施設の一般課題ならば成果公開が条件。成果占有課題だと高額。）は受け入れ側の判断で柔軟にできるため、企業側の負担をかなり軽減できる。さらに、理論解析もサポートすることにより、企業材料の測定と理論解析をワンストップで完結できることも企業の利用を高めている。放射光施設による産業支援を標榜する場合、如何に企業からの敷居を低く（負担を軽減）できるかを、企業の立場で考えることが重要である。
- 大学や企業の研究者の多い東京などの大都市圏から日帰りで測定できる場所に施設があることが重要である。できれば首都圏から交通のアクセスのいいところがベスト。SPRING-8 は良い性能をもっているが遠すぎる。
- 日本には軟 X 線が強い施設がほとんどない。そのため、軟 X 線をターゲットとした放射光施設の整備は必要である。
- 農業分野における放射光利用が進むことが期待されており、農学分野のニーズ調査をぜひとも加えていただきたい。

以上

## ヒアリング調査報告書（D：情報通信分野）

① **社会的・科学的課題**：情報通信分野における各分野の課題を大別すると、図 1 に模式的に示すように、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するための超高速・大容量データ処理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の 2 つに分類できる。これら課題の解決を目指す上で、それぞれに必要な様々な技術開発を進めることは不可欠であり、加えて低環境負荷・省資源という地球規模の課題に対しても貢献が求められる。例えば、半導体・スピンドバイスやストレージデバイス分野では、より一層の微細化・高集積化や 3 次元化が本格化するものと予想される。光

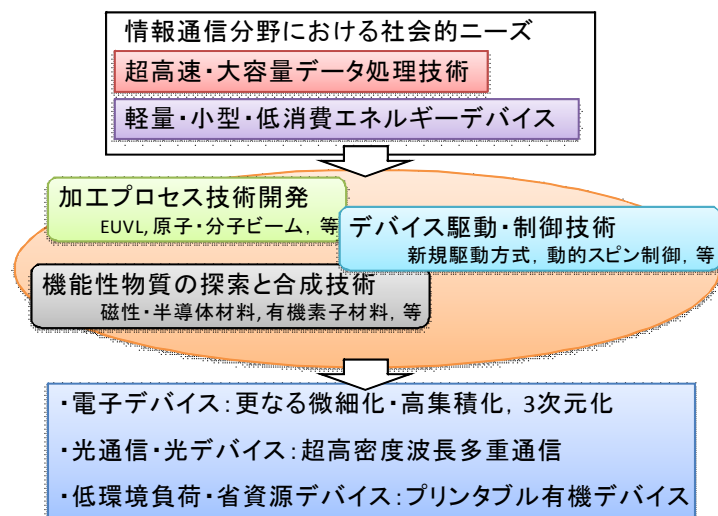


図 1 情報通信分野における今後 5～10 年の社会的ニーズと課題、研究動向の模式図。

通信・光デバイス分野では超高密度波長多重通信の実現、また低環境負荷・省資源デバイスにおいてはプリンタブル有機デバイスなどが期待される。

一方、海外においては、スピンドバイスの生体応用などのように異分野間の融合が積極的に進められている一方、既存技術、既存デバイスについては巨大企業による市場寡占化に伴う技術の選別・集約が進んでいる。そのため、デバイスや材料開発などの面で日本国内のそれとは大きく異なる分野も幾つか見られる。

② **研究内容**：半導体・スピンドバイスにおいては、10年以内に7 nm、その先には4 nmの加工精度実現が要求されている。そのため、EUVリソグラフィや原子・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となる。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、上記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である。光通信、光デバイスにおいては、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求められる。

さらに、各分野に共通する課題として、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、組織運営が重要である、との意見が多数あった。

③ **放射光の貢献**：各分野における次世代デバイス、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となっている。そうした背景を基に、放射光には、従来の一般的な化学分析・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。さらに高い空間分解能（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への要求も高い。

④ **ビーム性能**：各分野において要求される分析・解析技術、感度やビーム性能、放射光施設への要望を添付資料 表 2-4 にまとめる。

それ以外のビーム性能、施設仕様については SPring-8 と同程度を希望する、との意見が多かった。その他エンドステーション、運用システム等に関する意見・要望について、重要と思われるものを以下に示す。

1. 専任研究者、技術職員が常駐し、非専門家でも最高水準の測定ができるような体制が望ましい。
2. 挿入光源の管理は加速器部門で行う方が良い。
3. 学術研究においては、国内の他の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施設が望ましい。
4. 産業利用においては、特化した性能よりもタイムリーな測定が行えることがとりわけ重要視されており、それを可能とするフレキシブルな運用体制の構築が非常に重要である。特に停止期間が国内の他の放射光施設との調整が図られ、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。むろん、学術利用においてもタイムリーな測定

に対する要望は高い。

5. 有毒ガスを含む高圧ガス利用を前提とし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。

⑤ メリット・デメリット：供用された場合のメリットとして、上記課題の解消に加えて、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緩和を期待できる。また現施設のバックアップ、高度研究施設立上げ・運用による人材育成、などが挙げられる。さらに、既存放射光施設は軟 X 線ビームラインが少ないため、軟 X 線ビームラインを持つ新規放射光施設の供用は、産業利用や広い分野のユーザーを獲得する上で大きなメリットがあると期待される。

一方、供用されなかった場合、上記メリットが達成できないことに加えて、以下の点にも留意すべきである、との意見があった。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に限定されるため、新規放射光施設が供用されない場合のデメリットは産業利用の方が学術研究に比べて大きい。

⑥ その他：特に重要と思われる意見を以下に列挙する。

1. 未踏領域に挑戦する最先端科学と、一般・産業利用の利便性の確保の両立は運営面で難しいかもしれないが、未踏領域に挑戦することはそれ自体極めて重要である。その場合に、非放射光研究者と放射光研究者が高いレベルで協力し合える研究環境を構築する必要がある。

2. 放射光施設の利用経験の無い人にとっては、一般的にその利用は非常に敷居が高く感じられる。また SPring-8 のように年 2 回の研究公募ではタイムリーな測定は困難である。

3. 産業利用を積極的に進めるためには、民間分析委託会社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)が今後は必要と思われる。システム設計の段階から、民間分析委託会社に参画してもらうことも考慮して検討すべきである。

4. SPring-8 では測定代行サービスを行っているが、中小企業まで含めて十分な広報がなされているとは言えないようである。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。費用は民間分析委託会社と同程度であれば問題ない。

以上

## ヒアリング調査報告書（E：基礎科学分野）

① 社会的・科学的課題：基礎科学分野内での連携と領域横断研究、および、基礎科学と応用研究との強結合や境界領域の消失が重要である。全分野に共通して、省エネルギー、省資源化、高効率化を実現する新物質材料の探索・開発と、その高機能化が重要な課題である。新物質開発と同時に、先端分光技術の発展や量子ビーム研究同士の共同研究が必要である。また、エネルギー問題や温暖化などの地球環境問題も大きな課題である。これを解決するための代替自然エネルギーの利用促進と、太陽光の高効率利用、さらには、これまでの経験とは異なる災害への対応、振興国の工業化による大気・土壌汚染の深刻化に対応するための研究、地球内部の動的挙動(深発地震の成因など)の解明研究の促進が必要になる。また、海外におい

ては、例えば新物質開発には、米国や欧州などで大型のプロジェクト予算がつぎ込まれ始めており、上記の課題は日本だけに留まらず世界的にも重要であると認知されている。また、基礎科学における分野間連携や応用研究との融合も国際的に進行している。

② **研究内容**：各分野から多岐にわたる回答が得られたが、その内容は、大別すると、新物質開発、技術開発、および基礎的な研究に分類することができる。以下に具体例を示す。

○**新物質開発**では、高機能磁性体、高効率太陽電池、熱電材料、ナノ触媒、高効率・人工触媒(自己再生機能、人工光合成)、環境調和型材料(レアメタル・重金属フリー)、超硬材料、スピントロニクス材料、有機金属化合物、新機能界面/人工超格子などの開発が求められる。

○**技術開発**では、量子ビームとスペクトロスコープの進歩による高分解能化の推進、オペランド・顕微分光の開発、物質の三次元解析法の開発、極端条件(超高圧、超高温、超高磁場、超臨界)などの複合極限における実験手法の開発、生態系各層に跨がるメガデータ解析手法の開発、多変量解析の新たな手法の開発、変形破壊実験の温度圧力領域の拡張、高分解能 X 線イメージング法の開発、有機化合物のリアルタイム観測法などの開発が求められる。

○**基礎的な研究**では、相転移ダイナミクス of 解明、液体の物性解明、高温超伝導などの特異物性発現機構の解明、有機金属化合物の幾何構造・電子構造の解明、高度な電子状態理論と化学反応理論の構築、地球マントルにおける深部の動的挙動の解明、太陽系の惑星内部および太陽系外の惑星の研究、生物多様性の繋がり、生物多様性の維持創出メカニズムに与える影響の解明、ミクロ生物学とマクロ生物学を融合した新たな生物学の創成、などが重要である。

③ **放射光の貢献**：放射光は、基礎科学と応用科学の両方で基本的で汎用的なツールになる。物理・化学分野においては、高分解能光電子分光による新物質開発への貢献、放射光のパルス性を生かした時間分解分光、ポンプ・プローブ実験による化学反応ダイナミクスの解明などが上記の研究を進めるうえで極めて重要である。地学分野では、極端条件下 (高圧・高温

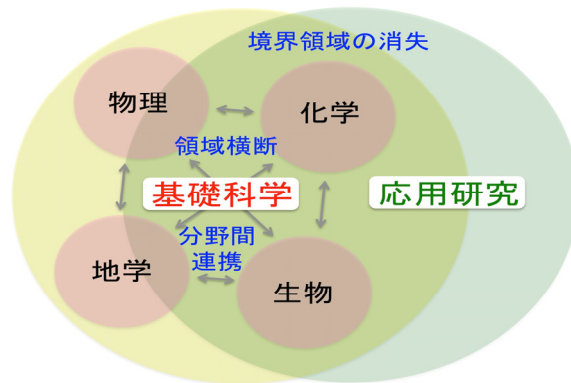


図 1: 基礎科学における分野間連携と、応用研究との強結合・境界消失。



図 2: 基礎科学において取り組むべき研究内容の例。



など)、とりわけ太陽系を形成する天体の90%を占める流体のX線回折・散乱が不可欠である。また、生物分野では、生体分子やタンパク質の高精度構造解析および反応中間体や変体の構造解析、創薬に関連して膜タンパク質の立体構造や反応ダイナミクスの解明が必要である。全分野に共通して、ナノスケールの構造解析、イメージング、オペランド(その場)観察、顕微分光など、高い空間・エネルギー・時間分解能を有する実験手法

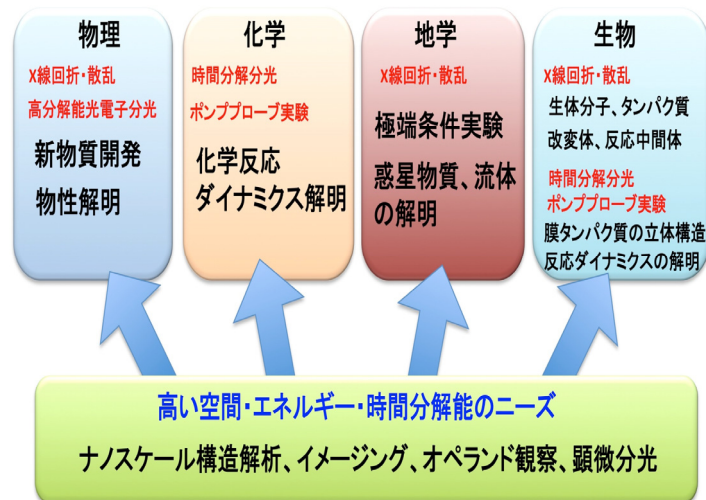


図3:基礎科学に対する放射光の貢献

法に対するニーズが非常に高い(図3)。また現在、世界各地で、高輝度放射光施設、とりわけ3 GeVクラスの中型放射光施設の建設や稼働が報告されており、ここ数年から10年のピリオドで上記の研究が急ピッチで進展している。

④ **ビーム性能**: 各分野において要求される分析・解析技術、ビーム性能、放射光施設への要望を添付資料表2-5にまとめる。その他、光源、運用システム等に関する意見・要望について、重要と思われるものを以下に示す。

- ・光源性能として:2-3 GeV、1 nmクラスのエミッタンス、500 mAの電流値
- ・必要となすにすぐにビームを使用できるような運用体制が望ましい。
- ・測定オート化:気軽にビームを使用できる環境が望ましい。例えば合成化学分野においては、測定者を出張させることなく試料を送付するだけでデータが返却される環境が理想的。
- ・可能であればアクセスの良い立地条件が望ましい。
- ・PF、SPring-8の停止期間中におけるビーム使用ができるとよい(既存施設との使い分けができれば便利)。
- ・ビームタイムの予約が半年前では不便。例えば1ヶ月程度先の予約も可能になるように、フレキシビリティを上げて欲しい。

⑤ **メリット・デメリット**: **メリット**:放射光は、上記の問題の解決に加えて、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、人材育成、国際化などに貢献できる。

**デメリット**:「近隣の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て取り返しがつかないことになる」「国内の基礎科学分野の研究者は海外の放射光施設を借用することになり、世界に先駆けたわが国独自の成果を出すことが難しくなる」などといった意見が多く見られた。

⑥ **その他**:特に重要と思われる意見を以下に列挙する。

- ・ 厳しい管理下での量子ビーム、放射線、および放射光の利用の有用性を、一般社会に示

していくべき。

- 確実な実験データに裏付けされることが、研究において如何に大切であることを示していくべき。
- オールジャパンとしての運営を期待したい。
- 既存の施設が運用を終え、それに変わる光源の新設が進まないとする、わが国の多くの基礎科学の研究者にとって現在行われている放射光実験が不可能になり、そのデメリットははかり知れない。既存の放射光光源を上回る性能をもつ中規模光源の建設は不可欠である。
- 喫緊の課題とされる中型高輝度光源だけでなく、回折限界光源への期待も高い。

以上

## ヒアリング調査報告書（F：産業利用分野）

① 社会的・科学的課題：産業利用分野における重要課題として以下の項目が挙げられる。

1. 基盤技術...素材開発／応用化学／エネルギー／エレクトロニクス/分析評価
2. 製品技術...自動車／タイヤ／産業政策
3. ライフサイエンス...創薬／食品／医用工学

### 1. 基盤技術

原発事故や地球温暖化などを受けて今後益々エネルギー需給が逼迫していく。シェールガスの活用なども含めたエネルギー・ミックスの見直しが必要になり、低環境負荷・低コスト・高信頼性を兼ね備えた次世代創エネルギーデバイス開発のニーズは高まる一方である。エネルギー問題を受けて、環境調和型社会の実現に資するデバイスに向けた素材開発も加速すると考えられる。近年の電子デバイス・蓄電デバイスでは、デバイスの小型化、高速応答、安定性などの性能要求に応える目的で、異種物質間の複合構造や界面構造、結晶粒子内の組成不均一構造など、サブミクロン・ナノオーダーでの構造制御が利用されている。半導体分野における薄膜化は1 nm 程度まで進み、表層の構造の分析評価では、表面から深さ100 nm 以下での構造と物性との関係を調べるのが非常に重要になってきている。また、ソフトマテリアル材料でも表面・界面構造の精密な制御が重要となってきている。絨毯爆撃的な材料開発・デバイス設計を避ける上で、微小空間・微小時間における現象のサイエンス確立がより重要になる。

エネルギー問題を受けて、環境調和型社会の実現に資するデバイスに向けた素材開発も加速すると考えられる。近年の電子デバイス・蓄電デバイスでは、デバイスの小型化、高速応答、安定性などの性能要求に応える目的で、異種物質間の複合構造や界面構造、結晶粒子内の組成不均一構造など、サブミクロン・ナノオーダーでの構造制御が利用されている。半導体分野における薄膜化は1 nm 程度まで進み、表層の構造の分析評価では、表面から深さ100 nm 以下での構造と物性との関係を調べるのが非常に重要になってきている。また、ソフトマテリアル材料でも表面・界面構造の精密な制御が重要となってきている。絨毯爆撃的な材料開発・デバイス設計を避ける上で、微小空間・微小時間における現象のサイエンス確立がより重要になる。

### 2. 製品技術

日本企業が海外で得た知的財産収支の黒字額が2013年度に初めて1兆円を超えており、産業利用分野の中心となる日本企業の今後5～10年は、真の国際競争の時代を生き抜いていく

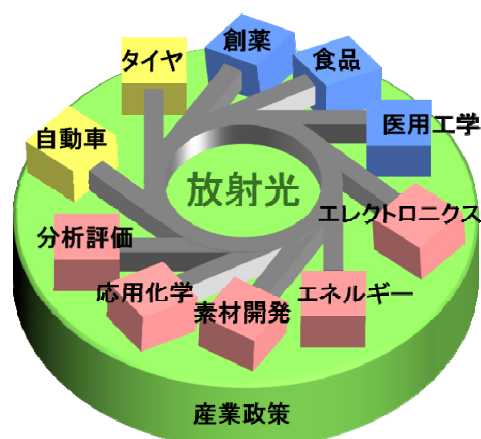


図1. 産業利用分野における今後5-10年の社会的・科学的課題。

ため、魅力ある革新的製品・情報・サービスの開発とその知的財産の保護を、これまで以上にグローバルに進めていく必要がある。昨今では製品開発のサイクルや特許対応のスピードがどんどん速くなっており、利用まで3か月～半年程度の期間を要する放射光を製品開発に利用することが困難となっているのが実情である。また、グローバルな価格競争には製品、研究開発の低コスト化が必要であり、放射光の利用にも更なる効率化が求められる。

現在日本に代表的な放射光の具体的製品開発応用として、自動車関連の材料開発が挙げられる。低環境負荷が売りの電気自動車、燃料自動車とも、電池・水素キャリアの革新的軽量化が進まない限り普及は難しいが、まだ有効なシーズ技術が乏しい。エンジン関係の要素技術も同様であるが、一部貴金属を使わない触媒など放射光を利用した先進的な研究課題もある。また、自動車燃費の約20%をタイヤによってロスしており、2008年洞爺湖サミットにおいてIEA（国際エネルギー機関）よりタイヤで約5%の燃費性能向上が提言され、重要な問題となっている。原材料である天然ゴムなどの資源枯渇も懸念されており、両立しない『燃費性能』『グリップ性能』『強度』を向上させるためには新たな材料開発が必要である。

### 3. ライフサイエンス

今後のライフサイエンス産業の発展にとって、ナノメートル以下の素材の構造分析や機能分析が不可避になると思われる。具体的にいえば、「医療器具の素材開発」「たんぱく質の構造解析」「従来の低分子医薬品に加え抗体などの高分子量の分子を活用した医薬品の開発」「再生医療」「遺伝子治療の技術開発」「各個人の遺伝的状況に応じた個別化医療」などが大きなテーマになると考えられる。これら課題の解決に対して、高輝度放射光分析が大きな役割を果たすことが期待されている。

#### ② 研究内容：

##### 1. 基盤技術

エネルギー問題の解決のためには、高効率自然エネルギー発電システム、そのバックアップとしての高容量2次電池、分散電源を可能とする燃料電池の開発、火力発電の高効率化を実現する耐熱タービン用材料や耐熱コーティング材料の開発などに取り組む必要がある。

素材開発の一般的な手順は、「材料の内部構造解析」→「特性発現機構に及ぼす原子レベル現象の影響を解析」→「利用環境下での材料解析」→「耐久性、劣化に及ぼす材料内部影響因子の導出」→「極限環境化における材料解析」→「高温、低温、超高压下における材料特性発現因子の導出」である。デバイスの微細化に伴い、材料分析の高感度化が望まれる。微小領域(ナノメートルオーダー)、微量元素(ppb、pptレベル)、あるいは僅かに含まれる成分(パーセントオーダー以下)などについて、現状よりも一桁以上低い(小さい)オーダーでの化学状態分析が重要になると考えられる。特に *in situ* 測定・時間分解測定は、ガス流通下、温度変化などにおける触媒・電池の反応ダイナミクスの追跡に不可欠である。

具体的に取り組むべき材料・デバイスの研究課題として以下のものが挙げられる。

- 航空機・自動車に用いる軽量高強度材料の構造解析
- コア・シェル構造をもつ誘電体単結晶粒子内の構造空間分布解析やナノドメイン構造の外場応答解析
- 蓄電デバイスにおける電極中原子の酸化還元反応解析、電極表面での物質形成とその電

## 場応答解析

- 不揮発メモリやグラフェンなどを用いた低消費電力の電子機器システム
- 水素化社会実現へ向けた、水素分離、水素吸収材料や燃料電池用非白金触媒材料の開発
- エネルギーの消費低減を可能とする新規固体照明
- 高磁気保持力の永久磁石を用いた高効率モーター

## 2. 製品技術

製造業などの製品特許は、他社の製品やその製品と明確に区別をする必要があるため、しばしば、機器分析の評価結果による権利の主張が行われ、実施例などにもよく使用される。また、特許侵害などを見つけやすくするためにも、精度や再現性が高い分析・評価技術が必要である。放射光などの産業利用においても、様々な手法を用いた分析・評価が行われているが、知的財産の保護を目的とした場合、現状よりも精度や確度、再現性などの向上が必須であると考えられる。

課題で挙げたタイヤ用ゴムは、ポリマーだけでなく補強性フィラーや添加剤など 10 数種類以上の材料から構成された複雑系である。これら材料が Å～ミクロンオーダーまでの広い空間スケールにわたり階層構造を形成し複雑に関与することで機能を発現しているため、階層構造の解析が必要となる。さらに数桁におよぶ時間スケールで運動していることも機能発現に関与しており、ダイナミクス研究も不可欠である。

個々の技術課題から、必要な基幹部品を洗い出し、その性能向上のために必要な材料要素やシステム要件を設定する必要がある。

## 3. ライフサイエンス

遺伝子解析や幹細胞の応用可能性が拡がり、今後は従来と異なる分子・高分子の医薬品設計、革新的な医用工学材料の開発が必要となってくる。具体的課題として、

- 細胞内のシグナル伝達を阻害・活性化できる新たな医薬品分子の研究ならびに細胞内の中のシグナル伝達をよりシステムとして理解する研究
- 個人の遺伝情報を迅速に解析し、疾病と個別の遺伝子の関連、医薬品への感受性と遺伝子の関連の解析研究
- 再生医療、創薬スクリーニングの発展へ向けた iPS 細胞、ES 細胞などの幹細胞の合成、精製、分化技術の開発、それを可能とする細胞分析、タンパク質分析技術
- 医工連携のもとで開発される医療器具の素材開発(体内に埋め込む器具の素材や、血栓を生じさせない表面加工など)
- 薬理効果の作用機序の研究

③ **放射光の貢献**：材料開発用途、中でも構造解析や微細分析に関しては放射光が主体的に活用されている。X 線吸収係数が高い重元素を含む無機材料の解析には、高い透過能を持つ高エネルギーの放射光 X 線が不可欠である。放射光を用いた分析では、主に X 線領域の電磁波による物質との相互作用から構造・電子状態を解明する手段として、放射光をプローブとした極微領域での分析が重要である。放射光で実現できる X 線イメージングや位相コントラストイメージングも局所状態の観測に有用である。また、材料・デバイスの変形過程や劣化メカニズム解明には、時分割計測が必須である。分光分析において時間的・空間的に高い分

解能を達成するには、実験室系の X 線装置では困難であり、高輝度な放射光 X 線が必須である。

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 in situ 分析は、平衡状態のみ見てはわからない過渡特性の評価に大きく貢献している。多次元イメージング(時間、XRD など)や時分割 XAFS (XANES + EXAFS) など、多元的な計測技術も重要である。今後、高強度量子ビームを利用した利用環境下、極限環境化における「その場観察」、「時分割測定」が安定して行えるようになることが期待されている。蛋白質の構造解析の観点では、高輝度の放射光によって、微少な結晶での解析、スループットの高い解析、高精度の解析から、放射光による化合物スクリーニングも可能である。光源技術開発により、細胞をそのまま解析し、細胞内での本当の働きを解析できる手法が望まれている。

現状のシンクロトロン放射光においては、ラボでは対応不可能な高度・高質な分析技術や手法の開拓は進んでおり、この点は特許など知的財産の保護の観点でも重要である。

以下に、放射光が貢献している点、今後貢献が見込まれる具体例を示す。

- 固体／固体ヘテロ界面、固体／液体、固体／気体ヘテロ界面での電気化学反応の in situ 観測
- 電極触媒の局所構造や劣化機構の解明
- 磁気円二色性測定による磁石材料やスピントロニクス材料の磁気特性解明
- 不揮発メモリ材料やグラフェンなどの電子材料電子構造の解析
- 高信頼構造材料の応力による歪の生成評価および腐食割れ発生の観測
- 医薬品の設計のための標的となる疾病関連蛋白質の 3 次元構造情報解析
- 代謝を経た後のたんぱく質内部における薬理効果の具体的検証
- 効率的な創薬開発によるバイオ医薬の開発コスト削減

#### ④ ビーム性能 :

##### ビーム性能

各分野において要求される分析・解析技術、感度やビーム性能、放射光施設への要望を添付資料 表 2-6 にまとめる。

- 光のエネルギーは、Pb、Bi、Ba、Mn などの重元素を含む材料の分析や原子分解能の蛋白質結晶構造解析を念頭におくと、高エネルギー側は数十 keV 程度まで、なおかつ高い単色性のビームが出せると望ましい。低エネルギー側は、価電子帯の測定もできるように、できれば数 eV、せめて 40 eV までの真空紫外領域で使用したい。
- X 線のエネルギーを選択するための結晶モノクロメータと高エネルギー X 線を除去するミラーを備え、マテリアルの微小領域の構造や電子状態を可視化するために 100 nm～数μm 程度の集光を行う光学系が必要。集光は KB ミラーもしくはゾーンプレート。
- ビームの微小化による強度低下を抑える上で、高輝度なビーム( $10^{20}$  photons/s/mr<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/0.1%bw 程度)が欲しい。サブミクロン集光した結果得られる X 線強度として、1 秒間あたり、およそ  $10^8 \sim 10^{12}$  個の光子数が必要である。全ビームラインが基本的に挿入光源(ビームバンド区間ではベンディング光源も設置可能)を使用することが望ましい。

- Top-up 運転が必須。蓄積リングの安定運転。
- 低エミッタンスが望ましいが、それにより微小部測定を充実させるとして、ビーム径が小さければ良いというものではなく、ビーム径やビーム位置の安定性が重要である。
- コヒーレントな放射光の必要性が高まっており、SPring-8 に SACLA が付加されたことから考えて、本格的な直線加速器型の放射光施設の建設が必要ではないか。

#### エンドステーション性能

- 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はスループットを上げるために一定レベル以上の計測は簡単にできるようにしておく必要がある。SPring-8 や SACLA のような強い光を用いた分析も、最近では定常的な材料開発のルーチンの中で使われるようになってきた。一方、高度な実験を行うための自由度の確保も必要。
- 科学的に高スペックな技術が要求されるのは勿論であるが、産業利用という観点では、高スループットや（データ）出力の安定性も求められる。そのため、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が期待されるビームラインとは別に、産業用として、スペックとしては 80%程度であるが、高スループットで安定にデータが出力されるビームラインも所望する。
- in situ 測定・時間分解測定、例えばガス流通下、温度変化などにおける触媒の構造解析、電池の充放電過程、各種化学反応の追跡などが求められており、これらの測定が実施しやすいビームラインが望まれる。基本的なものは用意されており、ユーザーの持ち込みも容易なビームラインが望ましい。
- 新しい材料の開発を行うためには、実際の動作環境下での計測（operando 計測）によって、そこで発現する機能、特性を原子レベルの構造や電子状態と対応付けて理解することが必須になる。あらゆる operando 計測を行えるように、試料まわりのスペースが十分に確保でき、かつ交換可能であることが必要である。
- 電極反応の解析には、外部からの通電をしながら測定可能な XANES 装置が有用。軟 X 線 XAFS の測定高速化は必要。
- 環境制御可能（有毒ガスを含む）、温度制御可能（77 K～1700 K）ができることよい。
- 輝度だけでなく光源性能を十分に引き出すには検出器開発が重要である。
- 試料からの回折・散乱 X 線または蛍光 X 線や透過 X 線の強度を測定するための検出器やゴニオメータに加え、数 10 nm の空間分解能でイメージングを行うための結像光学系が必要である。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。
- 放射光分野以外からの利用という観点では、ソフト面の充実も大切と思われる。特に、測定データを解析するソフトウェアの機能面での充実は、実験実施から成果発表までに要する時間・コストに直結する部分と感じる。

#### 運用システム

- 利用可能時期については、年間を通しての稼働が望ましいが、それが不可の場合、例えば、

多くの他の放射光施設が停止期間中である 8 月や 3 月に利用できることが望ましい。

- 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)、などの利用面での迅速化を意識した整備を期待する。

- 低コスト化による有償利用料金の引き下げは必要 (中堅企業を狙うなら必要)

- 産業利用できる放射光施設の目安として、

1 ビームシフト : 2hr 制、使用料金 : 1 万円/1 シフト (成果非専有)、10 万円/1 シフト (成果専有)、ユーザービームタイム : 7000 時間/年以上

- 現在、筑波の PF が北限になっており、これ以北に放射光施設が無いことから、新たな放射光施設の設置が必要だと思われる。

#### ⑤ メリット・デメリット :

##### メリット

- 国外に対する技術先進性を維持でき、国際競争力高まる。現状で、中国や韓国に対して、材料開発における明確なアドバンテージがあるのは放射光技術で、これを維持・発展させていくことが技術立国としての国際競争力を維持していくことに直結する。

- 既存の放射光施設との役割分担を行うことで、施設の先鋭化が行われる。

- 現状ではビームタイムの数、1 企業が使用できるビームタイムは制限がある。新たに供用されると実験機会が増加し、微少結晶への対応やスループットの向上につながる。

- 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) な結晶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ことが期待される。

- SPring-8 登場以降の放射光技術の進歩は著しく、3 GeV の第 3 世代の最先端放射光施設を国内に新規建設することで、SPring-8 と同等の性能を引き出せる可能性があり、また互いに補完的な関係を持つことができる。

- 国内に新たな放射光研究施設が設置され、産業研究に応用されることは、建設される地域の基盤強化に大きく貢献することになる。半導体、有機 EL、二次電池の開発など、電気・電子産業の集積も進むと考えられる。また、医工連携や創薬などのライフサイエンス産業の形成にとっても、大きくプラス効果を持つと考えられる。

##### デメリット

- PF と SPring-8 の老朽化に伴い、放射光を利用した研究が頭打ちとなる。

- 多額の費用が他の科学技術政策に利用できる一方で、放射光技術としてグローバルに後れをとる。

- 新たな放射光施設が建設されれば、基礎研究から工場まで揃えることができ、産業形成の重点地域が国内に新たに確立できたはずなのに、新興国の攻勢に太刀打ちできず、産業集積の解体や損失に繋がる可能性がある。

以上



【表 2-1】 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（ヒアリング調査）

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、施設への要望
資源リサイクル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ in situ 測定による反応機構解析</li> <li>・ 溶液中のイオン種の構造解析</li> <li>・ 微小領域での高精度の元素分析、形態分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EXAFS</li> <li>・ XANES</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ サブミクロンから数十 nm 程度の空間分解能</li> <li>・ 反応評価への十分な時間分解能</li> <li>・ 固液界面および固気界面の反応解析が行えるスペック</li> </ul>
地圏環境・除染	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 構造解析と電子状態分析</li> <li>・ 元素の化学状態</li> <li>・ 上記 2 つの空間分布、反応の時間変化</li> <li>・ エンドステーションの特殊スペック：微量核燃料物質 (U, Pu など) および放射性物質 (Np-237, Am-241, 243, Cm-248, Cs-137 など) が取扱可能な実験施設である事。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ STXM</li> <li>・ SX-XAS/XES</li> <li>・ XPS</li> <li>・ XRD</li> <li>・ XMCD</li> <li>・ EXAFS/XANES</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 光学系：回折格子分光器、ミラー集光 (nm)、二結晶分光器</li> <li>・ エネルギー範囲：0.03 keV - 1 keV, 3 keV - 40 keV</li> <li>・ エネルギー分解能：<math>\sim 10^{-4}</math></li> <li>・ ビームサイズ：&lt;100 nm</li> <li>・ 集光位置でのフォトン数：<math>\sim 10^{13}</math></li> </ul>
蓄電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ オペランド測定による触媒・反応機構解析</li> <li>・ 回折による反応分布評価</li> <li>・ デバイスの二次元分布測定、時間分解測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EXAFS/XANES</li> <li>・ XRD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ エネルギー範囲：<math>\sim 2</math> keV, <math>\sim 10</math> keV, <math>&gt;50</math> keV</li> <li>・ 高い輝度 (<math>\mu\text{m}</math> 程度の空間分解能)</li> <li>・ 電気化学反応評価への十分な時間分解能</li> </ul>
燃料電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 遷移金属の価数変化</li> <li>・ 運転時の結晶構造の変化</li> <li>・ 劣化前後の電極分析</li> <li>・ デバイス内の応力測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EXAFS/XANES (hard/soft)</li> <li>・ XRD</li> <li>・ 硬 X 線光電子分光(低真空)</li> <li>・ X 線応力測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 基本的なビーム性能等は SPring-8 と同程度</li> <li>・ in situ で XAFS や XRD 測定可能な共用の装置・治具</li> <li>・ 酸素の分析を可能とする軟 X 線 XANES</li> <li>・ Li の状態分析 (結晶中の量や位置など) を界面で評価するための手法開発</li> </ul>
太陽電池	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高い空間分解能での構造、電子状態評価</li> <li>・ in situ 測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ XANES</li> <li>・ EXAFS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 基本的なビーム性能等は SPring-8 と同程度で十分</li> <li>・ 空間分解能：サブミクロン程度</li> <li>・ その場観察が可能な装置 (プラズマ処理が可能、膜堆積が可能など) の使用が可能なシステム</li> </ul>
人工光合成 (海外動向含)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子価、配位構造の時間分解測定(可能ならば数百 fs)</li> <li>・ 結晶構造解析</li> <li>・ 表面・界面の評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ XANES/EXAFS</li> <li>・ X-ray spectroscopy/diffraction along with optical/IR.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Beam size: for bulk samples as well as micron-sized focused beam. Diffraction-limited beamsizes for imaging requirements.</li> <li>・ Insertion device beamlines.</li> <li>・ Si(111), (220), and (311), and multilayers for pink beam.</li> <li>・ Hard X-rays: 2.1 keV - 30 keV, Soft-X-ray</li> <li>・ High resolution spectrometers</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low temperature data collection (cryostat)</li> <li>• 2D detectors, CCD detectors, energy resolving detectors.</li> <li>• Time-resolution, rapid scanning facilities.</li> <li>• Top-off mode.</li> </ul>
エネルギー安全	<ul style="list-style-type: none"> <li>• in situ 測定</li> <li>• 微量成分の同定とその空間分布の確定</li> <li>• 材料内深部や埋もれた界面などの局所的選択的な測定</li> <li>• ミクロンサイズの分解能での 2D/3D イメージング技術</li> <li>• 非破壊評価</li> <li>• 柔軟で使い勝手の良いことを最重要視したビームライン</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• XRD</li> <li>• XRF</li> <li>• Raman</li> <li>• XANES/EXAFS</li> <li>• X-CT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 波長 ~30 keV over までは最低限確保</li> <li>• Top-up 運転</li> <li>• ビームサイズ：サブ<math>\mu\text{m}</math> から 2 mm、輝度：SPring-8 と同程度</li> <li>• 4 軸/2 軸回折計 XRD、単結晶 XRD(4 軸回折系+IP 振動写真 X 線回折計)</li> </ul>

【表 2-2】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（ヒアリング調査）

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
放射線生物学・バイオメディカルイメージング	• 癌の超早期診断	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 吸収コントラストイメージング</li> <li>• 位相コントラストイメージング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 強度 (<math>10^{8-9}</math> photons/mm<sup>2</sup>/sec 程度以上)</li> <li>• 照射面積 (30 mm 角程度以上)</li> <li>• エネルギー範囲：15 keV - 55 keV 程度で可変</li> </ul>
	• 微小血管の高解像度造影	• Optical Coherent Tomography 法	• 放射光単色 X 線または compact ERL 由来逆コンプトン散乱 X 線
	• 重元素の高感度体内トレーシング	• 放射光 X 線蛍光分析法	• エネルギー範囲：5 keV - 100 keV 程度
創薬・農学・基礎細胞生物学を視野にいたれた構造生物学	• 生体分子の結晶構造解析	• 単結晶解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 波長範囲：0.4 Å - 5 Å (汎用性ビームライン: 0.7 Å - 2.5 Å)</li> <li>• 輝度： photon flux &gt; <math>10^{10}</math> photons/sec/mm<sup>2</sup></li> <li>• ビームサイズ： <ul style="list-style-type: none"> <li>マクロフォーカスの場合 (10 - 100 × 10 - 100 <math>\mu\text{m}^2</math>)</li> <li>マイクロフォーカスの場合 (~1 <math>\mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}</math>)</li> </ul> </li> <li>• 300 × 300 mm<sup>2</sup> 以上の検出面積をもつ高速読み出し検出器</li> </ul>

			<ul style="list-style-type: none"> <li>ロボティクスおよび遠隔操作による省力化</li> </ul>
創薬・農学・基礎細胞生物学を視野に 入れた構造生物学	<ul style="list-style-type: none"> <li>生体分子の溶液構造解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線小角散乱法 (SAXS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>波長範囲：0.9 Å - 2 Å</li> <li>輝度（集光位置）： photon flux &gt; 10<sup>12</sup> photons/sec/mm<sup>2</sup></li> <li>ビームサイズ：~300 μm × 300 μm</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>巨大粒子（ウイルスなど）の全体構造解析</li> <li>細胞内部の非侵襲的構造解析</li> <li>時間分解分光法による生体分子の作用機構解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線自由電子レーザー</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>波長範囲：0.8 Å - 3 Å</li> <li>輝度： photon flux ~10<sup>11</sup> phs/pls</li> <li>ビームサイズ：~1 μm</li> <li>高速読み出し検出器</li> </ul>

【表 2-3】 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（ヒアリング調査）

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
半導体	<ul style="list-style-type: none"> <li>反応槽が接続可能エンドステーション</li> <li>ナノビームによる顕微分光</li> <li>角度分解測定への対応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線光電子分光(XPS)</li> <li>X線吸収分光 (XAS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>クリーンルームを併設した施設</li> <li>数 nm~数十 nm に集光されたビーム</li> <li>角度分解による深さ方向分析</li> </ul>
炭素材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>薄膜の反射率測定</li> <li>低真空中での測定</li> <li>オペランド計測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>軟 X線吸収分光 (XAS)</li> <li>X線発光 (XES)</li> <li>光電子分光 (PES)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>オゾンアッシング機能つきミラー</li> <li>エネルギー：数十 eV - 4.0 keV</li> <li>高次光カットフィルター付ビームライン</li> <li>500 mA の Top-up 運転</li> </ul>
ソフトマター	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種分光測定が可能な波長域の軟 X線</li> <li>有機分子に対応可能なシステム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線光電子分光(XPS)</li> <li>紫外線光電子分光(UPS)</li> <li>軟 X線吸収分光(XAS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー：10 eV - 2 keV</li> <li>nm オーダーの集光されたビーム</li> <li>時間分解測定が可能な装置</li> <li>SEM、STM、FT-IR など放射光以外の計測装置を備えたビームライン</li> </ul>
金属	<ul style="list-style-type: none"> <li>軟 X線と硬 X線を用いた X線吸収測定</li> <li>測定代行や受託解析</li> <li>無人での自動測定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線吸収分光(XAS)</li> <li>X線光電子分光(XPS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Top-up 運転</li> <li>通年運転</li> </ul>
酸化物	<ul style="list-style-type: none"> <li>首都圏からの日帰り圏内にあること</li> <li>サポートスタッフの配置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>硬 X線光電子分光 (HXPES)</li> <li>X線吸収分光(XAS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー：10 keV</li> <li>SPring-8 と同程度のビームサイズや強度でよい</li> </ul>

アモルファス・液体	・超高温、超高压など極端条件での実験	・ X 線吸収 (XAFS) ・ X 線回折 (XRD) ・ X 線異常散乱	・ 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) ・ 高エネルギーもカバーできるような光源はウィグラーを希望
有機 EL	・ 有機材料の微小構造	・ X 線小角散乱(SAXS) ・ 軟 X 線吸収分光(XAS)	・ 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	・ ガス雰囲気中での測定 ・ 専任のテクニカルスタッフの配置	・ X 線回折(XRD) ・ X 線イメージング	・ 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

【表 2-4】 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 (ヒアリング調査)

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、施設への要望
スピンドバイス、ストレージ、スピン RAM	・ 界面スピン分析 ・ ナノメートル領域での磁気特性・構造評価 ・ ピコ秒オーダーのスピン動特性評価 ・ 表面・界面での構造・化学分析	・ 元素選択 XMCD、XMLD ・ ナノビーム XRD ・ EXAFS ・ 軟(硬)X 線光電子分光	・ 10 nm 以下の集光ビーム ・ ピコ秒以下のパルス光 ・ 軟 X 線領域において SPring-8 の 1000 倍以上の輝度 ・ 液体 He 温度から 700 K 程度までの温度変化
有機デバイス	・ 構造解析と電子状態分析 ・ サブミクロン領域での分析	・ 光電子分光 ・ 小角散乱	・ 赤外から軟 X 線領域までの波長域で高い輝度 ・ 高い指向性、安定性
酸化物・プロセス	・ 原子・分子ビームを用いた表面・界面における反応の評価・解析 ・ 表面反応の実時間計測	・ 軟(硬)X 線光電子分光	・ 分解能 $E/\Delta E = 10^4$ ・ 高い輝度 (0.1 mm - 1 mm 程度に集光) ・ 軟 X 線は検出深さや炭素励起の観点から波長 0.25 keV - 2 keV が望ましい
相変化 RAM	・ 界面の構造・化学分析 ・ ナノメートル領域での分析 ・ ピコ秒オーダーの動的化学状態分析	・ XANES ・ EXAFS ・ 硬 X 線光電子分光	・ 10 nm 以下の集光ビーム ・ 高輝度光 ・ ピコ秒パルス光
半導体デバイス	・ 界面の構造・化学分析 ・ 新材料の構造・化学分析 ・ 3次元デバイスの非破壊断面評価	・ XANES ・ EXAFS ・ 硬 X 線光電子分光 ・ XRD	・ 基本的なビーム性能等は SPring-8 と同程度で十分
光通信・光デバイス	・ フォトニック結晶や光集積回路の作製 (フォトリソグラフィ)	・ 大面積リソグラフィ	・ 大面積で高い直進性

EUV リソグラフィ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EUV リソグラフィ用マスク検査。10 nm の欠陥検出精度が必要</li> <li>• 高輝度なコヒーレント光が不可欠であり、産業応用においてはルーチン的な検査が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 反射型光学系を用いた拡大鏡による欠陥検出</li> <li>• レンズレス顕微鏡による微細な位相欠陥検出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 輝度 <math>10^{20}</math> Photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW</li> <li>• ビームサイズ 10 <math>\mu</math>m <math>\times</math> 10 <math>\mu</math>m</li> <li>• 集光ビームは 10 nm 以下</li> <li>• ルーチン的な検査には、サンプル送後は遠隔操作により検査実施できるような仕組みが必要</li> </ul>
------------	--	--	--

【表 2-5】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（ヒアリング調査）

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
有機化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 結晶構造解析</li> <li>• 内殻および価電子帯の電子構造の解明</li> <li>• 化学反応のリアルタイム観測</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 内殻光電子分光</li> <li>• 紫外光電子分光</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 光エネルギー数 keV（第3周期元素用）</li> <li>• フェムト秒より短い時間幅</li> <li>• ビームスポットの可変性</li> </ul>
表面・界面科学	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 電子状態の深さ解析</li> <li>• 埋もれた界面の分析</li> <li>• 表面・界面の電子状態評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 真空紫外光電子分光</li> <li>• 軟 X 線光電子分光</li> <li>• XAFS</li> <li>• MCD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ナノビーム(~100 nm)による微小領域分光</li> <li>• 高分解能スピン分解角度分解光電子分光装置</li> <li>• 時間分解光電子分光装置</li> </ul>
X線イメージング	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高空間分解能での生体物質などの評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• コヒーレント X 線回折</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• コヒーレント X 線フラックス: 第三世代放射光の 50 - 100 倍</li> <li>• 軟 X 線(500 eV - 3 keV)、硬 X 線(3 keV - 10 keV)</li> <li>• ビームスポット 1 - 10 mm</li> </ul>
生命科学	<ul style="list-style-type: none"> <li>• タンパク質の高精度構造解析</li> <li>• 反応中間体や改変体の構造解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• X 線構造回折</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 長波長(~0.7Å)から超波長(~0.3Å)をカバー</li> <li>• ビームスポット: 1 mm かそれ以下</li> <li>• 高速ピラタス検出器</li> <li>• XFEL も実現できるような加速器設計</li> </ul>
地球物質科学	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 微小試料の評価</li> <li>• 極限環境下での試料評価</li> <li>• 液体の評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• X 線構造解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 軟 X 線(10 keV - 20 keV)と硬 X 線(20 keV - 70 keV)</li> <li>• ビームスポット: 1 mm 以下</li> <li>• 超高温(3000 K)、超高压(300 GPa)</li> </ul>

高圧物質科学	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高圧下での試料評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ X 線構造解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大型高圧装置(LVP)</li> <li>・ 150 keV までの白色光(Wiggler)</li> <li>・ ビームスポット: 1 mm - 1 cm (可変)</li> <li>・ ダイヤモンドアンビル高圧装置(DAC)</li> <li>・ 40 keV までエネルギー可変</li> <li>・ ビームスポット : 1 mm かそれ以下</li> </ul>
物性物理学	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 新機能物質における電子状態の解明</li> <li>・ 特異物性発現機構の解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高分解能光電子分光</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ナノビーム(~100 nm)</li> <li>・ 真空紫外領域で 1 meV のエネルギー幅の励起光</li> </ul>

【表 2-6】 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（ヒアリング調査）

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
素材	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 材料の原子レベル内部構造解析</li> <li>● 固液界面での反応・状態分析</li> <li>● 利用環境下 in situ 分析</li> <li>● 耐久性を調べるための極限環境(高温、低温、高圧)分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X 線回折(XRD)</li> <li>X 線イメージング (SPEM、PEEM など)</li> <li>X 線吸収(XAFS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 光子エネルギー：数 eV~100 keV</li> <li>● 輝度：<math>10^{20}</math> photons/s/mr<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/0.1%bw</li> <li>● ビームサイズ：数 nm/数 μm/1 mm (各サイズ個別のビームラインに)</li> <li>● in situ/operando 測定や雰囲気制御測定ができるエンドステーション</li> </ul>
応用化学	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 実デバイス構造・サイズでの微小領域構造解析</li> <li>● 誘電体単結晶粒子内の構造空間分布やナノドメイン外場応答</li> <li>● 蓄電デバイス電極中原子の反応、電極表面のその場電場応用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X 線回折(XRD)</li> <li>X 線イメージング (SPEM、PEEM など)</li> <li>X 線吸収(XAFS)</li> <li>硬 X 線光電子分光 (HAXPES)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 動作環境下および様々な雰囲気環境下(電圧印加、磁場印加、温度変化)に対応できるエンドステーション</li> <li>● 重元素材料分析も可能な数十 keV の高 X 線高単色性ビームライン</li> <li>● ビームの微小化と強度低下を抑える高輝度ビーム、高精度な回折系</li> <li>● 測定データを解析するソフトウェアやデータベースの充実</li> </ul>
エレクトロニクス	<ul style="list-style-type: none"> <li>● スピントロニクスデバイスの磁気特性解明</li> <li>● 省エネ型ナノ電子デバイスの電子構造解析</li> <li>● 高信頼性構造材の応力応答</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X 線イメージング (SPEM、PEEM など)</li> <li>X 線吸収(XAFS)</li> <li>硬 X 線光電子分光 (HAXPES)</li> <li>真空紫外光電子分光(UPS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 光エネルギー：数 eV - 10 keV</li> <li>● 100 nm~数 μm 程度の集光ビーム(集光位置が変化しない KB ミラー集光)</li> <li>● 集光後の photon flux が <math>10^8</math>~<math>10^{12}</math> 個/s になるような高輝度</li> <li>● 高空間分解能でイメージングできる結像光学系と除振システム</li> <li>● オペランド分析できるエンドステーション</li> <li>● フレキシブルなビームタイム</li> <li>● オープンイノベーション拠点としての運営体制</li> </ul>

エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 標準物質の認証分析</li> <li>● バイオマス材料開発</li> <li>● 高効率創エネデバイスと大容量電池開発のための材料分析</li> <li>● 火力発電高効率化のための耐熱材分析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● X線回折(XRD)</li> <li>● X線イメージング (SPEM、PEEM など)</li> <li>● X線吸収(XAFS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 有機材料が測定しやすい軟X線ビームライン</li> <li>● 申請から実験までの期間が短くなる柔軟な運用システム</li> </ul>
分析評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 性能と材料・組成・構造の要因解析</li> <li>● 製品の最適化された条件の検証</li> <li>● 耐久性・歩留まり評価</li> <li>● デバイス内部の不均一性・拡散・伝導・反応速度の評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● X線回折(XRD)</li> <li>● X線イメージング (SPEM、PEEM など)</li> <li>● X線吸収(XAFS)</li> <li>● 光電子分光(XPS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 光のエネルギーは低い領域で軽元素や価電子帯の分析ができる 40 eV 程度は欲しい</li> <li>● 低エミッタンスナノ集光</li> <li>● 絶縁性の試料を帯電中和して測れる設備</li> <li>● 雰囲気環境下その場 XAFS ビームライン</li> <li>● Top-Up 運転とビームの安定性</li> <li>● 相談窓口やアクセスの良さなどの利便性</li> </ul>
自動車	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 電気自動車用の電池材料 in situ 劣化メカニズム評価</li> <li>● 燃料電池自動車用の水素キャリア・触媒材料評価</li> <li>● エンジン用の非金属触媒材料評価</li> <li>● カーボン素材の開発とその評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● X線吸収(XAFS)</li> <li>● 硬X線光電子分光 (HAXPES)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● in situ/operando 測定や雰囲気制御測定ができるエンドステーション</li> <li>● 様々な車載動作環境を施設内で再現するための空間スペースの余裕と物理的自由度</li> </ul>
タイヤ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ポリマー材に添加剤が入った複雑系であるタイヤゴムの構造経時変化、外場応答、化学反応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 時分割 X線小角散乱 (USAX、SAXS、WAXS)</li> <li>● X線イメージング (STXM、SPEM、PEEM など)</li> <li>● 位相コントラストイメージング</li> <li>● X線吸収(XAFS)</li> <li>● (XPCS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Top-Up 運転とビームの安定性</li> <li>● 高輝度光源の性能を活かせる高精度検出器</li> <li>● SPring-8 と同様の空間コヒーレンス</li> <li>● 時間コヒーレンスを稼ぐためにエネルギー分解能が必要になるため、光学系におけるビームの揺れの低減</li> <li>● スループットをあげるための汎用ビームライン</li> <li>● ユーザーフレンドリーな利用システム</li> </ul>
創薬	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 疾病関連蛋白質の3次元構造解析</li> <li>● 薬剤の分子構造の決定</li> <li>● 細胞の直接観察によるシグナル伝達システム解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● X線回折(XRD)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 硬X線単色性ビームライン</li> <li>● 遠隔操作でリモート測定できるシステム、柔軟な運用期間、テクニカルスタッフ、ソフトウェアの充実</li> </ul>
産業政策	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 医用素材産業</li> <li>● 食品産業</li> <li>● 素材開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● フェムト秒イメージング</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● コヒーレンスの高い光源</li> <li>● XFEL の併設</li> <li>● これまで放射光施設が無い地域への新規建設</li> </ul>





## 第二部

### 2-2 レビュー調査結果を反映させたニーズ調査報告書

A : 環境・エネルギー分野

B : 健康・医療分野

C : 材料分野

D : 情報通信分野

E : 基礎科学分野

F : 産業利用分野



## ニーズ調査報告書（A：環境・エネルギー分野）

今回の委託業務内容に基づき、平成26年5月～9月の期間に計9名の方々を対象にヒアリング調査を行い、平成26年11月12日に計7名の有識者で調査結果をレビューした。ヒアリング調査にレビュー調査を反映した内容を以下にまとめる。

① **社会的・科学的課題**：エネルギーセキュリティの確保、地球温暖化に代表される地球規模での環境破壊・気象変動の抑制に対する社会的要請から、クリーンかつ安全で経済的なエネルギーシステムの構築や次世代インフラの構築が我が国の重要政策課題として挙げられている。これらの課題を解決していくため、エネルギー分野の観点からは、再生可能エネルギーの利用や高エネルギー効率発電などのエネルギー変換技術、蓄電池やエネルギーキャリアなどのエネルギー貯蔵技術、効率的なエネルギー供給インフラの構築などのエネルギー供給・利用技術を、並列して開発していく必要がある。また、電気自動車に代表される移動体用エネルギー源の開発は、エネルギー・環境分野の観点からだけでなく、近い将来我が国が技術的優位性を持つことができる分野と想定され、産業的・経済的観点からも推進すべき最も大きな課題と言える。環境分野の観点からは、リサイクル技術や産業プロセスの省エネルギー化などの環境調和プロセス技術、CO<sub>2</sub>固定化や有害物質除去などの環境保全／回復技術の確立が必要とされる。後者には、福島第一原子力発電所の事故に伴う除染・廃炉という喫緊の課題も含まれる。

② **研究内容**：エネルギー変換技術としては、太陽光、風力、潮力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エネルギー変換効率発電技術の開発が、エネルギー貯蔵技術としては、電力平準化のための大型蓄電池、電気・ハイブリッド自動車用蓄電池、電解や人工光合成による燃料製造が、エネルギー供給・利用技術としては、各種発電・蓄電システムの系統連携によるスマートグリッドの構築、将来的な水素エネルギー社会の実現に向けたエネルギーキャリアの開発が、具体的な研究内容として挙げられる。環境調和プロセス技術としては、希少元素の回収・分離・リサイクルプロセスの開発、エネルギー多消費型素材製造プロセスの省エネルギー化、CO<sub>2</sub>を含む有害物質の排出削減プロセスの確立が、環境保全／回復技術としては、CO<sub>2</sub>固定化、ゴミ処理、有害・汚染物質除去プロセスの確立が挙げられる。さらに、環境問題の解決には、地球観測技術や地圏・水圏・気圏科学などの基礎科学のより一層の充実と、これらを踏まえたプロセスの経済・環境の両側面からの適正評価法の確立も不可欠である。

上記技術に内在する課題の解決のための手法として、多くの材料やデバイス／プロセスの実作動環境下での評価、いわゆる *in situ* (*operando*) 評価を、より高度化あるいは簡便化することが有効であり、これらを可能とする研究施設、体制の充実が重要である、との意見が多数あった。

③ **放射光の貢献**：②に挙げたデバイス、プロセスの開発では、用いられる材料はもちろん、実際に反応が進行する表面や界面の分析・制御が重要である。放射光の高輝度、広い波長域、コヒーレンシーという特長を生かすことにより、汎用的な構造、化学・電子状態解析に加え、表面や界面の高精度分析が期待される。また、放射光のマイクロ・ナノビーム化、白色ビーム化、パルス特性などを利用すれば、高い位置あるいは時間分解能での測定、2～3次元での測定も可能となる。環境汚染物質やアクチノイドのような取扱いに制約の多い放射性核種を

含む試料では微小、微量サンプルの分析が予想され、この点でも高輝度なマイクロ・ナノビームを用いた分析のニーズは高い。したがって、これらの放射光分析技術をデバイス、プロセスの *in situ* (*operando*) 評価に適用することができれば、反応や物性発現のメカニズム解明、性能の最適化・高性能化に関する情報を得る上で欠くことのできない手法となる。一方、現在のエネルギー変換デバイスや環境プロセスにおおける材料分析では、構造や化学状態の評価に重きが置かれる傾向があるが、物性に直結する電子構造の評価は、さらなるデバイス、プロセス開発にとって今後一層重要になると考えられる。

④ **ビーム性能**：今回の調査で得られた要望を添付の仕様表 1-12 にまとめた。求められるビーム性能は、用途によって大きく異なるが、高輝度 ( $\sim 10^{20} - 10^{21}$  photons/s/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/0.1%BW)、高エネルギー分解能 ( $\Delta E/E \sim 10^{-4}$ )、高空間 ( $\sim 10$  nm)・高時間分解能 ( $\sim 1$  ps) との要求が共通して見られた。特に、軟 X 線領域は材料の電子構造評価に有用であるが、我が国現有の放射光施設が苦手とする領域であり、軟 X 線領域で上記スペックを実現することは、我が国の科学技術、産業の優位性を保持・発展させる上で、また、現有の放射光施設との差別化、区別化を図る上で必須である。

放射光施設への要望としては、運営体制に関するものを中心に、以下のような要望があった。

- a) ビームラインサイエンティストを充実し、放射光技術・測定技術の高度化、非専門家へのサポート体制が常時確保できる体制が望ましい。また、技術の継承、新たな人材育成の場となることが望ましい。ただし、技術の高度化は不可欠であるが、ユーザーが測りたいものを測れる技術とすることを指向して欲しい。この点で、ユーザーとの連携を進められる環境整備にも配慮して欲しい。
- b) 一つの試料に対して、一つのビームラインで様々な測定手法を、あるいは複数のビームラインを跨いで実施できるよう、ビームラインを設計することが望ましい。
- c) 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、長期課題の設定、定期的な利用（例えば環境モニタリング）など、ビームタイムをフレキシブルに配分できる運用が望ましい。
- d) 自動計測システムの導入など、ヘビーユーザー以外の研究者等の放射光施設への敷居を低くする体制が必要である。ただし、これについては必ずしも次世代放射光だけで行う必要はなく、既存の施設との連携し、高度測定、汎用測定、自動測定のような棲み分けができる、施設間で風通しのよい制度についても検討が必要である。
- e) エンドステーションのスペースや設備を充実させることが実験遂行上重要である。

⑤ **メリット・デメリット**：今回のヒアリング、レビュー調査対象者全員が次世代放射光施設の整備を希望した。メリットとしては、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、量子ビーム・原子力分野での人材育成、他施設も含めた国内放射光実験のビームタイムの増加、既存施設と異なる地域に設置された場合の利便性向上、などが挙げられた。

一方、共用されなかった場合、上記メリットが得られないことに加え、我が国の研究開発が他国の施設に依存することになり、産業競争力を失うことが懸念される。我が国最高性能と言われる SPring-8 ですら設置後既に 15 年が経っており、また、軟 X 線領域の放射光施設としては現状の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との意見も多くあった。

⑥ **その他**：その他、本調査で聴取した意見の中で、特に重要と思われるものを以下に列挙する。

- a) 国内の産業競争力維持のためには、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が必要である。
- b) 産業利用に対する敷居を低くするため、事前相談や実験サポートの充実は必須である。また、最先端技術開発を可能にするため、NDA など、情報の取扱いの枠組み整備も必要である。
- c) 福島第一原子力発電所の除染・廃炉問題は、原子力の推進の是非にかかわらず喫緊の課題である。放射光を利用した研究は、単なる研究開発に留まらず、減少傾向にある当該分野の研究者の人材育成の観点からも重要なツールとなり得る。次世代放射光施設は、次世代の原子力科学分野の技術継承、人材育成の核となるよう整備して欲しい。

以上

## ニーズ調査報告書（B：健康・医療分野）

今回の委託業務内容に基づき、平成 26 年 5 月～10 月の期間に計 11 名の方々を対象にヒアリング調査を行い、平成 26 年 10 月 14 日に計 7 名の有識者で調査結果をレビューした。ヒアリング調査にレビュー調査を反映した内容を以下にまとめる。

① **社会的・科学的課題**：社会の高齢化、個別化医療の要請、希少疾患や新ウイルスへの対応、将来の食糧問題、放射線影響の問題などの社会的課題を背景に、科学が取り組むべき課題について、下記の項目が挙げられた。

1. 癌の成因解明、超早期診断、根本的治療法の開発
2. 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
3. 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
4. 細胞・個体老化機構の解明
5. 幹細胞の動態解明とその再生医療への応用
6. タンパク質の高分解能構造解析に基づく創薬
7. 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
8. 低放射線影響に対するこれまでの確率的理解から確定的理解への展開
9. 農業基盤を支える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

② **研究内容**：「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、H17 年の 20%に対し、H27 年は 27%、H36 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持つ。

動脈硬化などの循環器系の画像診断技術や、糖・脂質などの代謝産物の網羅的解析（メタボローム解析）の技術を進展させることは高齢化社会において益々重要となる。再生医療研究においては、幹細胞の体内導入から動員・定着に至るプロセスの動態を高解像度にリアルタイムに解析する技術が必要となる。うつ病・認知症などの現代病については、精神活動・

記憶・神経変性疾患等を引き起こす原因遺伝子（タンパク質）の分子レベルでの研究が益々重要となり、疾病メカニズムが解明されれば、新たなバイオマーカーを用いた効果的な薬剤投与体制の構築も可能となる。現在、大規模な創薬プロジェクトが走りつつあり、希少疾患を含む多種多様な疾病に対する医薬品および治療のハイスループット開発が期待される。タンパク質の高分解能構造解析はこのプロジェクトで必須であり、そのための施設拡充の重要性は高い。

農業基盤を支える研究開発については、地球の温暖化や環境破壊などによる農産物（特に植物）への影響を考慮すれば、厳しい環境に耐える作物の品種改良や新たな育種方法の開発は重要である。農産物の大規模生産を行っている昨今において、ウイルス感染の拡散を抑制するための抗ウイルス薬の開発も必須である。また、3.11を契機として、低放射線影響の理解や植物内の元素動態分析技術開発の重要性も認識されている。

一方、基礎生物学分野においては、これまでの静止した生体分子を対象とした構造生物学に加え、細胞内での生体分子間相互作用を含む動的構造を非侵襲的にリアルタイムに高分解能で解析できる技術の確立が必須となる。生命現象の本質を理解するためには、これら構造生物学研究（特に膜タンパク質・超分子複合体・病気関連因子を対象とした構造解析）は今後も極めて重要であり、そのための技術革新と施設整備の労を惜しんではいけない。

③ **放射光の貢献**：上述の多くの課題において、放射光が大きく貢献できることは全ての調査対象者が同意するところである。

タンパク質構造解析について放射光の利用技術は飛躍的に進歩した。量的な側面においてこの技術と測定機会の堅持拡大することがたいへん重要である。また、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疑う余地がなく、今後ますます高まると考えられる。

ゲノムやタンパク質の研究が進んできた現状を鑑み、次にこれがどのように細胞を形作るのかということについてわからないことが多く、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重要である。その際、軟X線領域の放射光活用も期待される。

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、これは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。放射光の高感度蛍光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、3.11後の汚染・除染の問題や食糧問題に多大な貢献が期待される。

④ **ビーム性能**：添付資料 表 1-13 に、要求される分析・解析技術、感度やビーム性能、放射光施設への要望をまとめる。

タンパク質結晶構造解析用の特に汎用的利用に関しては、質的向上よりも量的向上、すなわち、ビームライン数の増加およびビームタイムの増加が強く強調された。この技術に基づく創薬を推進するためには、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であり、例えばミニハッチ方式のような運営面での工夫も必要である。加えて、放射光施設ごとに際立った特徴・利点をもたせることの重要性が指摘され、通常より長波長側を使う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X線自由電子レーザーの開発などが必要と思われる。

また、X線顕微鏡、X線CT、蛍光X線分析、X線小角散乱などの手法も生命科学におい



て不可欠であり、それぞれ専用のビームラインが必要である。

その他エンドステーション、運用システム等に関する意見・要望で特に多かったものを、以下に列挙する。

1. 停止期間をできるだけ短くし、他の放射光施設停止期間と重ならないこと。
2. 使用料金を最低限（成果公開の場合、無償利用）にすること。
3. 十分なビームラインスタッフ数の確保。
4. 動物の一時飼育室や簡易な手術室、さらには医学の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物理的空間を設けること。
5. 施設への交通アクセスがよいこと。
6. 全国および海外の学術機関並びに製薬企業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が可能であること。
7. 旅費のサポートがあることも望ましい。

⑤ メリット・デメリット：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、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が妨げられ、世界に対して我が国が後れをとる結果となる。その打開策を海外施設の利用に見出した場合、海外施設の成果となる上、国内での人材育成の観点からも望ましくない。したがって、ユーザーからのビームタイム需要に応えるべく、国内に（できれば東日本の交通アクセスの良い地域に）PF と同等かそれ以上の性能を有する施設を設置し、日本全国の学術的・産業的発展に大きく寄与することが期待される。

⑥ その他：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である。

以上

## ニーズ調査報告書（C：材料分野）

今回の委託業務内容に基づき、平成 26 年 5 月～10 月の期間に計 9 名の方々を対象にヒアリング調査を行い、平成 26 年 10 月 17 日に計 9 名の有識者で調査結果をレビューした。ヒアリング調査にレビュー調査を反映した内容を以下にまとめる。

① 社会的・科学的課題：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研究が想定課題であり、それらを解決する材料研究・開発が不可欠である。エネルギー問題では、石油燃料エネルギーの代替ならびに創電や蓄電が重要である。また、今後はあらゆる生産活動においてより低環境負荷が求められ、例えば CO<sub>2</sub> や毒物を発生しないプロセスや材料、軽量強靱かつ高耐久の材料開発が要求される。わが国の自動車産業においても、高効率バッテリー開発、車体軽量化、レアメタルフリー触媒開発など、材料研究に期待するところは少なくない。特に今後 5～10 年の取り組みとしては、代替材料実用化までの期間に進める研究開発、食糧や生体・医療に関係したバイオ・ソフトマター材料の研究が発展すると思われる。材料研究の基本的なあり方として、最終製品への昇華そして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

次世代光源の方向性として、将来世代に向けた新しい課題発見とその解決のステージとなることが重要である。

② **研究内容**：材料分野では、金属、半導体、酸化膜、ソフトマターなど多岐にわたる開発研究が不可欠である。例えば、革新的電池材料や発電材料、エネルギー貯蔵や運搬のための特殊材料、新規触媒、超低消費電力極微細トランジスタ材料、高密度集積不揮発メモリ材料や3D集積化に向けた材料などの開発が重要であると指摘されている。さらに、積層構造そして金属・酸化物・有機材料の組合せにより極限的な特性を引き出して使うことを目指した研究が必須となる事が予想される。このような先進的半導体研究を強力に推進させるためには、SEMATECH（米国）、imec（ベルギー）などかつての超LSI研究協同組合のような産学連携のサポートが不可欠との指摘もあった。有機エレクトロニクスにおいては、分子配向形成機構の制御、有機デバイス特性と結晶粒界の関連性の解明、有機材料のダイナミクスに関する研究が求められる。材料の種類にかかわらず、ナノ加工およびナノ構造作製技術の開発が重要であると認識されている。そして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と指摘されている。さらに今後は、材料そのものを研究するのではなく、製品や機能を見据えた材料組合せやシステム化を含めた材料研究を積極的に推進する必要があると議論は進んだ。要求される機能を効率的に進めるための材料研究には、物質合成をアシストする理論手法も必要であると指摘された。

③ **放射光の貢献**：放射光の高輝度、広波長域、ナノビームおよびパルス性などの特長はいずれも先端材料開発に活用されている。例えば電池材料の開発では、極微量の添加元素の影響の解明や試料表面元素分析に高輝度の放射光が利用されている。また高輝度、高分解能の放射光で実現される硬X線光電子分光法は、バルク材料の材料深部領域や埋もれた界面構造の評価が可能となる。有機エレクトロニクスや半導体デバイスにおいては、放射光の高輝度、空間分解能およびパルス性を活用した動作状態での測定（オペランド計測）による材料物性の解明が期待されている。特に重要な視点として、次世代光源の高輝度ナノビームと波長可変性の特徴を活用する新しい材料開発研究が注目に値する。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重要である。そして高輝度の軟X線光源は、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大きなメリットとなることも注目に値する。さらにこの新光源は、生物の観察、不均一デバイスなど挑戦的な研究分野を大きく進展させることが強調された。また、次世代の材料研究のステップとして、分析、解析、評価に加えて、放射光で調べながら同時につくる例えばリソグラフィーのような研究開発分野にも貢献できるのではないかと指摘もあった。地域産業連携の観点では、都道府県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点においても放射光は利用価値があると指摘された。例えば佐賀県では、柿右衛門様式赤絵皿の発色、イカの魚群の資源分布および緑茶の産地識別などで放射光利用の実績がある。

④ **ビーム性能**：添付資料 表 1-14 に、要求される分析・解析技術、感度やビーム性能、放射光施設への要望をまとめる。

材料分野の研究に必要なビーム性能について、低エミッタンス、高輝度、10 eV から 30 keV のエネルギー領域、Top-up 運転など、第3世代高輝度放射光源の一般的な性能が要望された。材料研究においては、硬X線によるX線回折、小角X線散乱などの構造を調べる手法、および軟X線を用いるX線吸収分光法、X線発光分光法、光電子分光法などの電子状態を調べる

手法の両方が不可欠であるため、軟 X 線領域光から硬 X 線領域光が発生できる放射光リングが必要である。特に日本に稼働している放射光施設の状況を鑑みると、炭素などの軽元素の分析に対応するために、10 eV から 1000 eV 領域で十分な強度が期待できる電子エネルギー 3GeV 程度中規模リングが望ましい。磁性材料において軟 X 線のナノビームによる XMCD (円二色性) へのニーズは高く、XMLD (直線二色性) も非常に注目されているので実現できるような放射光施設が望まれる。調査では、現状よりも高い時空間分解能、高いエネルギー分解能、高い輝度の実現に応えること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り、次世代高輝度光源の建設において約 1 nm rad の低エミッタンス光源がひとつの目標点となると議論された。材料分野で要求されているオペラント測定に関しては、放射光の性能に加えて装置周りの工夫が重要な課題になる。調査であげられた要望は、海外で続々と建設されている高輝度放射光施設で既に可能なものも多く、本国でも次世代の高輝度放射光施設の建設と速やかな供用が望まれている。

また、放射光施設の利用や運用に関しても多くの要望があった。まず、様々な物質を合成する材料研究ではターンオーバーの速い運用とアクセスの良さが重要であるとの指摘があった。したがって運営には、性能重視の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し、後者は申請から実験までターンオーバーの速い運用を行うなどの工夫も必要であろう。企業ユーザーのサポートも重要である。特に、規模の小さな企業の場合、課題解決の手段として放射光利用が思いつかないことがよくある。ローカルではあるけれども芽のあるところを支援することも日本の材料研究には重要である。測定代行や受託解析サービス、企業ユーザーコーディネイト業務をこなすユーザーサポート窓口も必要であろう。海外の放射光施設では、ビームラインサイエンティストだけではなく、博士号を有した多数のエンジニアやテクニシャンがビームラインの運用をサポートしている。日本の放射光施設の運用にも、専任のテクニカルスタッフや測定機器開発部門も充実させる必要がある。また、海外の放射光施設には、近隣の総合力の高い大学が放射光施設の様々な運営をサポートしているケースがある。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。

⑤ メリット・デメリット：材料分野の研究に関して、要求される放射光施設が整備・供用によるメリットは非常に大きい。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最大限に高めることは明らかである。さらに軟 X 線領域に強い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、その発展は基礎科学を中心に、軟 X 線を積極的に利用する今後 10 年間で推進すべき材料研究を大きく進展することは確実である。また、次世代放射光施設の整備により、材料・デバイス研究の COE として広範囲な人材が集結、研究の国際化も期待できる。さらに、研究機関や企業と放射光施設／大学のコラボレーションが地域の活性化につながり、新規に建設する放射光実験施設は国際的にも影響を与えるような研究開発拠点になっていく大きなメリットがある。新しい光源の科学技術に対する挑戦は新しい人材を育てるという観点からも重要であろう。同規模の放射光施設が海外で次々に整備されている中で放射光の有する高度な材料研究力の欠如は、わが国の自動車産業、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。

⑥ **その他**：本調査で聴取した意見の中で、特に重要と思われるものを以下に列挙する。

- 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、学術的な軟X線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。
- 日本には軟X線が強い施設がほとんどない。そのため、軟X線をターゲットとした放射光施設の整備は必要である。
- 農業分野における放射光利用が進むことが期待されており、農学分野のニーズ調査をぜひとも加えていただきたい。
- ヒアリング結果にも記載されてあるように、材料開発と基礎科学を遂行する上で、総合大学との連携や一緒になった運営組織が必須である。
- 材料科学分野で放射光が不可欠だというのはヒアリング調査結果のとおりである。しかし現状は、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嵌まっている感じを受けた。将来を考えると、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。
- ヒアリングの結果は、非常に的を射ており、材料科学の各種研究課題に放射光が貢献できることは間違いない。しかし次世代光源をつくるならばエキセントリックな意見も必要ではないか。特に、若い人のチャレンジに期待する。また、産業利用だけではなく、例えば液相の構造やガラス転移などの基礎科学にも取り組む必要がある。次世代光源はその大きなチャンスである。
- 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イノベーション創出に必須である。次世代放射光源の建設には大きな期待を寄せている。応援したいと考える。
- エネルギー問題についてはブレークスルーを狙えるテーマに絞り、そのために必要なビームラインを検討してはどうか。
- 低環境負荷については今ある社会的課題の解決に加えて、将来世代に向けた課題の発見と解決を考えることが次世代光源の方向性として重要である。

以上

## ニーズ調査報告書（D：情報通信分野）

今回の委託業務内容に基づき、平成26年5月～10月の期間に計10名の方々を対象にヒアリング調査を行い、平成26年10月9日に計8名の有識者で調査結果をレビューした。ヒアリング調査にレビュー調査を反映した内容を以下にまとめる。

① **社会的・科学的課題**：科学技術イノベーション総合戦略2014（内閣府）は、環境、医療、次世代インフラなど5項目を最重要政策課題と位置付け、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）、環境技術の強化を唱えている。これらの政策課題を解決していくには、例えばNTを駆使したウェアラブル・ライフサイエンス・医療などに対応する小型軽量・省エネセンサー・デバイスの開発、環境負荷の低減に向けてはプリンタブル有機デバイスの開発、半導体・磁性体をはじめとするメモリ・デバイス分野では高集積化や不揮発化による高速・大容量・省エネ化を一層推進する必要がある。こうし

た様々なセンサーやデバイスの開発や性能向上に加え重要なことが、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するための超高速大容量データ処理・伝送技術であり、例えば光通信・光デバイス分野では超高密度波長多重通信の実現に向けた取り組みは極めて重要である。

② **研究内容**：半導体・スピンドバイス素子はナノメートルレベルまでダウンサイジングすることが予想され、今後 EUV リソグラフィや原子・分子ビームによる加工技術を含めたプロセス技術の確立、ならびに半導体、配線などの新規材料開発が求められる。磁性体を利用するスピンメモリ・ストレージデバイスでは、上記加工技術や新規材料探索に加え、電磁場や光による新規スピン駆動技術やナノサイズ・ピコ秒領域の動的スピンの実時間計測とその制御が重要な課題である。光通信・光デバイス分野では、波長多重通信に対応する光源、変復調器、分波・合波などの素子開発、集積光回路の構築、さらに喫緊の産業上の課題として短時間大面積描画技術の確立が切望されている。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求められる。

上記技術に共通する課題として、今後の研究開発ならびに産業応用において、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、組織運営が重要である、との意見が多数あった。

③ **放射光の貢献**：各分野における次世代デバイス、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となっている。そうした背景を下に、放射光には、従来の一般的な化学分析・構造解析手法に加え、表面・界面の原子レベルでの高精度な分析、さらには高い空間分解能 (< 10 nm) と時間分解能 (ピコ秒以下) を有する各種計測技術への期待が高まっている。ところで、ICT 関連デバイスの性能の飛躍的向上に伴い、それらに利用される材料の高品質化も切望されている。例えば、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 in situ 観測は結晶成長の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。産業利用に関しては、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るが、最先端放射光を用いた材料開発も不可欠である。

④ **ビーム性能**：本調査から明らかになったことは、分野に応じた差異はあるものの、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、特に軟 X 線領域で実現して欲しいという強いニーズであり、それに応えることが各分野における今後の研究開発推進のキーポイントになることであった。今回の調査を通してすくいあげた分析・解析技術、感度やビーム性能、施設や運用に関する仕様と要望を、添付の仕様表 1-15 にまとめた。その他、エンドステーション、運用システム等に関する意見・要望に関し重要と思われる事項を以下に記す。

- a) 専任研究者、技術職員が常駐し、非専門家でも最高水準の測定ができるような体制が望ましい。
- b) 学術研究においては、国内の他の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施設が望ましい。
- c) 有毒ガスを含む高圧ガス利用を前提とし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。

- d) 産業利用においては、タイムリーな測定が行えることがとりわけ重要で、それを可能とするフレキシブルな運用体制の構築が非常に重要である。具体的には、申込からデータが出てくるまで最低 1 週間以内であって欲しい。また、放射光施設の停止期間が国内他施設と調整され、常時、いずれかの国内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。
- e) 産業界は基本的に情報を出したくなく、公開が原則の場合それだけで利用を辞めるケースが多い。産業利用を増やすには、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べき。

⑤ **メリット・デメリット**：放射光施設が供用された場合のメリットとして、上記課題の解消に加えて、現状では十分なビームタイムが供給されていないため需給ギャップの緩和が期待できる。また現施設のバックアップ、高度研究施設立上げ・運用による人材育成、などが挙げられる。さらに、既存放射光施設は軟 X 線ビームラインが少ないため、軟 X 線ビームラインを持つ新規放射光施設の供用は、産業利用や広い分野のユーザーを獲得する上で大きなメリットがあると期待される。一方、供用されなかった場合、上記メリットが達成できないことに加えて、利用が国内施設に限定される産業利用では学術研究に比べてよりデメリットが大きい、との意見があった。

⑥ **その他**：本調査で聴取した意見の中で、特に重要と思われるものを以下に列挙する。

- a) 未踏領域に挑戦する最先端科学と一般・産業利用の利便性の確保の両立は、運営面で難しいかもしれないが、学术界と産業界、放射光専門家と非専門家が相互に高いレベルで協力し合える研究環境を構築する必要がある。
- b) 放射光施設の未利用者にとり、放射光施設の利用は非常に敷居が高く感じられる。また SPring-8 のように年 2 回の研究公募ではタイムリーな測定は困難である。
- c) 産業利用を積極的に進めるためには、民間分析委託会社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）が今後は必要と思われる。システム設計の段階から民間分析委託会社に参画してもらうことも考慮して検討すべきである。
- d) SPring-8 では測定代行サービスを行っているが、中小企業まで含めて十分な広報がなされているとは言え難い。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。費用は民間分析委託会社と同程度であれば問題ない。
- e) 放射光施設とユーザーをつなぐコーディネーターが非常に重要であり、さらに専任研究者とか技術職員が常駐し、専門外の方でも次世代放射光の特性をフルに生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。

以上

## ニーズ調査報告書（E：基礎科学分野）

今回の委託業務内容に基づき、平成 26 年 5 月～11 月の期間に計 11 名の方々を対象にヒアリング調査を行い、平成 26 年 11 月 14 日に計 8 名の有識者で調査結果をレビューした。ヒアリング調査にレビュー調査を反映した内容を以下にまとめる。

① **社会的・科学的課題**：人類が永続・繁栄するための持続可能社会の実現が本質的課題である。そのために全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、好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。とりわけ基礎科学分野は、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。従ってエネルギー・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、一方でそれらに縛られない先導的なサイエンスの構築も本分野では必須である。例えば30年以上前には極めて基礎的な研究であった遺伝学の分野は、現在の遺伝子工学に繋がり、iPS細胞等の医療分野にも発展している。今後重要になる一つのキーワードは「量子サイエンス・量子テクノロジー」である。ミクロスコピックな電子・スピン・軌道の固有状態及びそれらの多体相互作用を記述する量子サイエンスが、現在は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、基盤技術の目覚ましい発展に貢献している。更に最近は、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。一方日本が牽引してきた超高压・高温発生技術により、地球コアから表層にいたる構造やダイナミクスも解明が進んでいる。全ての研究分野は、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である。

② **研究内容**：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。現在の研究は、これまでの均一・無限周期系における最小単位の構造・ダイナミクス研究から、界面表面、ナノ粒子、複合巨大分子、非晶質・液体など、メソスコピック・ヘテロジニアスな集合体としての構造・ダイナミクス研究にシフトしており、今後、その時間空間スケールのダイナミックレンジが飛躍的に広がっていく。そこでは従来フーリエ変換で結ばれる、4次元時空間関数としての物理量（観測量） $G(\mathbf{r}, t)$ と、4次元運動量エネルギー空間関数としての物理量 $\chi(\mathbf{q}, \omega)$ の関係は破綻しており、 $4+4=8$ 次元空間としての $G(\mathbf{r}, t)$ と $\chi(\mathbf{q}, \omega)$ をトータルで観測し、研究する事が必要になってくる。一方で8次元空間を観測する手段としての技術開発も必要であり、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。具体的な研究内容は以下の通り。

- ・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
- ・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
- ・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
- ・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・動的挙動と恒星・惑星の構造解明
- ・上記を実現するための「時分割・顕微散乱分光」法の確立。具体的には、オペランド散乱分光、8次元空間にわたるメガデータの解析法（可視化法）、複合極限環境発生法、リアルタイム計測等。

③ **放射光の貢献**：物質・生体の構造・ダイナミクスは、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。各研究分野はそれぞれに特

微的なスケールで階層構造を持ち、その時空間構造を明らかにする事が必要である。ナノ構造を見る手段として電子顕微鏡が、顕微分光の手段としてレーザーが、 $(\mathbf{q}, \omega)$ 空間分光として中性子散乱などが観測手法として挙げられるが、8次元空間の任意の領域に「最適な」時空間分解能で「自在に」アクセスし、 $G(\mathbf{r}, t)$ と $\chi(\mathbf{q}, \omega)$ を得る手段は放射光において他には無い。次世代放射光施設で実現する、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・1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。

④ **ビーム性能**：基礎科学分野内の各分野において要求される分析・解析技術、ビーム性能、放射光施設への要望を添付資料 表 1-16 にまとめる。その他、光源スペック、運用システム等に関する意見・要望について、特に重要と思われた指摘を以下に示す。

ビーム性能・スペックについて

- ・一つの放射光施設で全ての要求を満たすことはできないが、我が国の放射光施設全体として、全分野に跨がる多様な階層性に対応することは可能。その意味で、SPRING-8 の硬 X 線と双璧を成す、軟 X 線の放射光施設が必須。

- ・物質の基本となる、電荷・スピン・軌道相互作用のエネルギーと強く結びつく軟 X 線の放射光が重要。100 eV - 4000 eV の領域が特に重要であるが、この領域は現在欧米施設の独壇場である。次世代施設では国内現行施設の 10 - 100 倍の輝度（フラックス）が必要。

運用システムについて

- ・国内全ての放射光施設間の連携が必須。オールジャパンとして一つの放射光統合機構を作り運営する事も考える必要がある。

- ・装置の性能を 100%生かし、将来の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研究者・技術者が必要。

- ・大型施設の研究者の競争力を養成し、流動化を促すシステムが必要。

⑤ **メリット・デメリット**：スピン・軌道を観る分野では、日本は海外から著しく後れており、その結果我が国で生まれた優れた物質材料が国外に流出している。海外に匹敵する、或はそれを超える性能の軟 X 線放射光施設が供用されない場合、その後れは取り返しがつかず、将来的には我が国が誇る物質材料科学の衰退に繋がる。

- ・新物質材料開発-機能評価・原理解明という過程において、機能評価・原理解明の手段としての放射光が大きく貢献する。逆にこの手段が失われる事により、正の循環が断ち切れ、物質材料科学における日本の優位性や伝統が消失する事に繋がる。

- ・海外放射光施設は、スクラップ&ビルドを繰り返す事で各時代のニーズに対応し、世界に先駆けた研究成果・人材を排出してきた。同様な事が我が国で実現されない場合、多くの研究者にとって現在行われている放射光実験が不可能になり、そのデメリットははかり知れない。既存の放射光光源を上回る性能をもつ中規模光源の建設は不可欠である。

⑥ **その他**：「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、我が国がこの世界的潮流に追いつき、追い抜くためには放射光施設が必要である。

以上



## ニーズ調査報告書（F：産業利用分野）

今回の委託業務内容に基づき、平成 26 年 5 月～10 月の期間に計 10 名の方々を対象にヒアリング調査を行い、平成 26 年 10 月 29 日に計 7 名の有識者で調査結果をレビューした。ヒアリング調査にレビュー調査を反映した内容を以下にまとめる。

① **社会的・科学的課題**：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も必要である。化学工業分野では石油精製等に用いる触媒等の開発、電子デバイス分野ではメモリ用の半導体や磁性体等の開発、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等に優れた構造体の製造等の課題がある。さらに、プラスチック・ゴム等分野では材料長寿命化、薬品分野では創薬や新薬の開発、食品等では安全性確認のための検査技術開発等に関する課題がある。これらの産業における研究開発フェーズは、それぞれ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て課題解決を行いながら、総合的な技術に関する課題を解決することが重要である。

② **研究内容**：各産業の課題解決に向けて取り組むべき研究としては、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等、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等、金属工業では軽量化に向けた高強度材料の開発等、機械工業では各種構造体の残留応力・ひずみの制御等、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等、環境・エネルギー分野では廃棄物処理のための材料の開発等が挙げられる。これらの今後取り組むべき研究の課題が解決されれば、各産業においてイノベーションが創出されることが期待される。これらの技術開発に共通する課題としては、それぞれの実際的な材料、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、特性制御の機構を明らかにする不可欠である。それらの機構解明に基づく知見を新しいプロセス制御等に反映させることにより、高い特性の材料等が得られる。

③ **放射光の貢献**：実際的なデバイスやプロセスで起こっている現象を明らかにするには、高空間分解能や高時間分解能でデバイスやプロセスの解析を行うことが必要である。それらの解析には、放射光が非常に有効である。例えば、高いエネルギー分解能の軟 X 線による XPS の高空間分解能測定により、動作環境での電極付近の電子状態を明らかにすることができる。また、高温のガス雰囲気曝された触媒に対するナノビーム XAFS 測定により、特定元素周囲の触媒反応に関する反応の素過程を明らかにすることができる。荷重が負荷された構造材においては、高エネルギーの微小部 XRD による格子ひずみ測定により、材料内部の残留応力分布を知ることができる。微小 XRF 測定により、農作物微小部の微量元素の分布を明らかにすることができ、それらの情報は食品の安全管理等に大いに役に立つ。

④ **ビーム性能**：幾つかの産業分野で、放射光を用いた評価内容や要求事項、具体的分析・解析技術、ビーム性能、エンドステーション等を、添付の表 1-17 にまとめた。要点は以下のとおりである。

a. **X 線のエネルギーについて**：HAXPES、XPS、UPS 測定用に、エネルギー幅が狭い数 keV

から数 eV までをカバーするエネルギーが必要である。XRD による内部の残留応力測定用に、100 keV 程度までの X 線エネルギーが必要な時がある。XAFS 測定では、触媒成分 (Mo ぐらいまで重い元素) の測定用に 20 keV 程度までのエネルギーが必要である。

b. ビームサイズについて : 現状最高レベルの数ナノメートルのビームサイズに加え、観測対象によってはサブナノメートル程度のサイズのビームが欲しい。二次元的な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。

c. in situ 測定について : 放射光を用いた XPS、XAFS、XRD による in situ 測定や operando 測定は、多くの産業分野で必要である。それらの測定を短時間で行うためには、高い時間分解能で質の良いデータが得られる必要がある。一方、数か月ごとに変化する材料の同一場所を測定したいというニーズもある。

d. エンドステーション性能について : in situ 測定や operando 測定は、学術分野では理想的環境で行うのに対し、産業利用のための実験では実環境に近い条件で測定しなければならない。高い空間分解能での測定や in situ イメージング等を行うには、光学的な安定性が必要である。高エネルギー X 線を用いた回折実験を行う時には、検出側に高精度のゴニオメータ等が必要になる。エンドステーション関連の検出器等の技術が進歩しており、それらを取り入れて高性能のエンドステーションにする必要がある。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。

e. 運営体制について : 産業界からの要望として、開発のスピードを考慮して、申請してから数日で使えるビームラインがあった方が良い。企業側では、非公開成果についても安価に施設を利用したいという要望がある。産業利用のために、相談窓口や技術サポートを充実させた方が良い。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。

⑤ メリット・デメリット : 上記の要求される放射光施設が国内で整備されると、国外に対する技術先進性を維持しながら国際競争力を高め、材料やプロセスの開発における優位性を出すことができる。国内の既設の放射光施設には高輝度軟 X 線が得られるビームラインがないので、高輝度軟 X 線の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生まれる下地が形成される。現施設との連携やネットワーク化によりバックアップ的な施設にもなりうる。さらに、放射光施設の近くに他の機能をもつ装置や施設を付属させると、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ようになる。従って、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る。一方、放射光施設が供用されなかった場合、主に国内施設を利用する産業界では、学術分野に比べて大きなデメリットとなると考えられる。

⑥ その他 : 産業利用分野の放射光施設利用では他の施設と連携しながら、申請から測定までの時間を短くするなど、利便性を良くすることが望まれる。利用頻度を高めるには、企業向けにした情報公開や料金設定などに配慮し、民間分析会社のように、測定結果の納期を意識したり、試料調整やデータ解析等も行ったりするサービスも視野に入れた方が良い。さらに、専門の研究者や技術職員による技術的サポートだけでなく、広い産業分野で利用できるよう

にコーディネーターによるサポート等を充実させる方が望ましい。一方で、最高水準の測定を行うグループとの共存を配慮し、さらに産業利用の技術面での高度化を図ることも重要である。

以上