

新たな軟 X 線向け高輝度 3GeV 級放射光源の整備等について
(報告)

平成 30 年 1 月 18 日

科学技術・学術審議会

量子科学技術委員会

量子ビーム利用推進小委員会

目次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに..... | 3 |
| 2. 放射光研究の動向及び諸外国の放射光施設の整備状況 | 4 |
| 3. 次世代放射光施設の科学技術イノベーション政策上の意義 | 6 |
| 4. 求められる性能等の技術的事項..... | 13 |
| 5. 国の整備・運用主体 | 15 |
| 6. 整備・運用にあたっての基本的考え方、マネジメント方策等..... | 17 |
| 7. 整備費用・運用経費 | 25 |
| 8. おわりに..... | 27 |
| 委員名簿..... | 28 |
| 量子ビーム利用推進小委員会における審議経過..... | 29 |
| 高輝度放射光源とその利用に係る整備運用計画案（量子科学技術研究開発機構） | 31 |

1. はじめに

放射光は、広範な分野の科学技術を飛躍的に発展させる強力な研究開発手段として、その利用とともに進化を遂げてきた。1947年、米国の電子シンクロトロンにて放射光が世界で初めて直接観測されて以降、1960年代頃から、物質の構造や性質を解析・分析する画期的な手段として研究、利用が本格的に開始された。我が国でも、これまで国、大学、地方自治体等において9つの放射光施設が順次整備され、例えば、高温超伝導体、固体セラミック電池等の材料研究、自動車用排ガス触媒や高性能タイヤの開発など、学術研究のみならず産業利用においても、科学的、社会的、経済的に高いインパクトを与える研究成果を数多く創出してきた。現在では、これらの質の高い研究成果や高い産業利用割合など、我が国の放射光の研究、利用は、諸外国にも高く評価され、世界中の研究者等から注目を集める存在になっている。

また、2016年1月に閣議決定された第5期科学技術基本計画では、科学技術イノベーションが先導する未来社会の姿として「Society 5.0」（超スマート社会）を掲げている。SPring-8をはじめとする世界最先端の大型研究施設は、これを実現するための、多様で卓越した知を生み出す基盤として位置づけられ、科学技術イノベーションの持続的な創出や加速が期待されている。

他方、最先端の科学技術は、新材料や触媒、医療・創薬等の開発において、物質の機能や化学反応の過程を適確に理解するため、物質表面の電子状態を詳細に解析するニーズが高まっている。世界の研究潮流は、物質の「構造解析」に加えて、物質の「機能理解」へと向かっており、物質表面の電子状態変化を時間的に追える、高輝度の軟X線利用環境の整備が重要となっている。加速器技術等の進展も相俟って、電子エネルギーが比較的低い領域でも高輝度の放射光を発生させることが技術的に可能になったことから、諸外国では2000年代に整備が進められ、2010年代に入ってから、米国、台湾、スウェーデンにおいて、更に高性能の軟X線向け高輝度放射光源が稼働を開始している。このため、材料科学、触媒化学、生命科学など我が国の多岐にわたる研究開発分野の研究力、競争力に大きな影響を与え得る、軟X線に強みを持つ高輝度3GeV級放射光源（以下「次世代放射光施設」という。）の早期整備が我が国において必要である、との高い期待が学術、産業等の各界から寄せられているところである。

これらを背景として、科学技術・学術審議会では、2016年11月に量子ビーム利用推進小委員会（以下「小委員会」という。）を設置し、次世代放射光施設に関し、その科学技術イノベーション政策上の意義、求められる性能、整備・運用の基本的考え方と具体的方策等について、これまで計14回にわたり審議検討を進めてきた。その結果、小委員会では、学術、産業ともに高い利用が見込まれる次世代放射光施設を、官民地域パートナーシップにより早期に整備することが必要であり、量子科学技術研究開発機構を国の整備・運用主体として計画を進めていくことが適当である、との判断に至り、ここに小委員会としての報告を取りまとめた。

本報告を踏まえ、今後、国、量子科学技術研究開発機構、大学、産業界、地域等の関係者において、次世代放射光施設の整備に向けた計画が具体的に進展することを期待する。

2. 放射光研究の動向及び諸外国の放射光施設の整備状況

【放射光研究の動向】

これまで放射光を利用した研究は物質の構造解析が中心であったが、最先端の科学技術では、これに加え、物質の機能理解の重要性が増している。近年、放射光を利用した電子状態の測定技術が進展したことで物質の機能理解が可能となってきた。硬X線分光は物質の機能に関わる電子状態を間接的に測定することしかできないが、軟X線分光は軽元素の p 軌道、遷移金属の d 軌道など、機能に直接関わる電子状態を選択的に測定することができる。

次世代放射光施設は、国内の軟X線向けの既存施設と比べ、電子ビームが低エミッタンス¹であることから、既存施設の100～1,000倍の輝度の放射光が得られ、局所領域を様々な測定手法でより鮮明に観察できる。また、同じ試料を測定した場合、既存施設と比べて1/100の時間（100倍の時間分解能）でも鮮明なデータが得られるようになり、物質の化学反応等の高速変化を測定することができる。また、次世代放射光施設では、軟X線領域で高いコヒーレンス²が得られるという特徴がある。ビームを絞ると試料に照射ダメージが生じるが、ビームを絞らずにビームのコヒーレンスを利用（コヒーレント回折イメージング）して、照射ダメージを抑制しつつも1～10 nmの空間分解能（既存施設の10～100倍の高い分解能）での測定が可能になる。これにより不均一かつ複雑な系をもつ材料の解析が進むと期待される。

このため、次世代放射光施設は、「学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想ロードマップの策定—ロードマップ2017—」（平成29年7月 科学技術・学術審議会 学術研究の大型プロジェクトに関する作業部会）において、学術研究の大型プロジェクトの推進にあたっての優先度を明らかにする観点で、特に一定の優先度が認められた7つの研究計画の1つとして取り上げられている。また、産業利用に関しては、物質の構造解析に加え、物質の機能に係る電子状態の測定やダイナミクスの観察により、製品の中で起こる複雑な現象の理解につながることから、次世代放射光施設を製品開発に積極的に活用することが期待される。

【諸外国の放射光施設の整備状況】

我が国では、国や地方自治体、大学等により、これまで9つの放射光施設が整備されており、物質科学、生命科学、地球科学等の広範な分野で、数々の高インパクトな学術研究の成果が生み出されている。また、創薬や新材料開発等の分野では放射光の産業利用が進められており、放射光施設は科学的・社会的・経済的課題の解決に資するイノベーションの源泉としての役割を果たしている。

諸外国では、2000年代に数ナノメートルラジアン[nm・rad]のエミッタンス性能を備えた高輝度な3GeV級放射光施設が相次いで建設されたのに加え、2010年代には更なる低エミッタンス化を目指

¹ エミッタンス：電子ビームの絞られ具合を示す値。エミッタンスが低いほど電子ビームが細く絞られ、そこから発生する放射光の輝度は向上する。

² コヒーレンス：波の位相の揃い具合。コヒーレンスが高いほど局所領域の観察が容易になり、また結晶性の低い試料も観察できるなどの利点がある。

して NSLS-II (米国)、TPS (台湾) が建設された。2016 年 6 月には、マルチバンドアクロマット (MBA) ラティス³の採用によりエミッタンス 0.3 nm·rad 程度を目標とする MAX IV (スウェーデン) が稼働を開始している。さらに、Diamond (英国) 及び SOLEIL (仏国) においても、MBA ラティスの採用による低エミッタンスリングへのアップグレードが計画されており、諸外国でも第 3 世代放射光施設⁴よりエミッタンスを下げた第 4 世代放射光施設を目指した整備が進んでいるといえる。なお、諸外国で 3 GeV 級の放射光施設の整備が進められているのは、いわゆるテンダー X 線 (2 ~ 5 keV) 及び軟 X 線 (2 keV 以下) といった、光子エネルギーが比較的低い領域の学術的ニーズ、産業利用ニーズが高まっているとともに、3 GeV 級の放射光施設においても硬 X 線領域 (5 ~ 20 keV) までカバーできる加速器技術が進展してきたことが要因であると考えられる。

その一方で、諸外国で整備が進められている、軟 X 線領域に強みを持つ高輝度の放射光施設は我が国には存在せず、これを活用する様々な研究開発分野で、諸外国と互角に競争していくための環境が整っていない状況である。

³ マルチバンドアクロマット (MBA) ラティス：蓄積リングを構成する磁石群の基本構造 (ユニットセル) 中の電子ビームを曲げる偏向電磁石の数を、従来の 2 つ (ダブルバンドアクロマット (DBA)) より多く設置し、さらに低エミッタンス化を実現した蓄積リングの磁石配列。

⁴ 世代別の放射光施設：

- ・ 第 1 世代：真空紫外線領域の放射光を発生させる初期の放射光施設 (1950 年代～)
- ・ 第 2 世代：蓄積リングを用いて X 線領域の放射光を安定に発生させる放射光施設 (1980 年代～) (例：フォトンファクトリー)
- ・ 第 3 世代：電磁石のないフリーな直線部を多数有する蓄積リングにアンジュレータを設置して X 線領域の高輝度の放射光を発生させる放射光施設 (1990 年代～) (例：SPring-8)
- ・ 第 4 世代：MBA ラティスの採用により、第 3 世代より更に低エミッタンスで高輝度な放射光を発生させる放射光施設 (2010 年代～) (例：MAX IV (スウェーデン))

3. 次世代放射光施設の科学技術イノベーション政策上の意義

【軟 X 線利用の特徴】

硬 X 線を利用した解析では重元素の測定が中心になるのに対し、軟 X 線では軽元素の測定が中心になる。硬 X 線は透過力が高く物質内部まで分析が可能であり、大気中での実験が可能のため実験が容易という特徴があるのに対し、軟 X 線は透過力が低く主に物質表面を測定・観察することになり、高真空又はヘリウム中での実験を行う等の工夫が必要となる。また、硬 X 線を利用した解析では回折による構造解析が中心であるのに対し、軟 X 線では分光による電子状態の解析が中心である。

【基本的な分光技術】

軟 X 線を利用した解析は、一般的に 3 つの分光技術（光吸収分光、光電子分光、発光分光）を用いる。以下に、それぞれの分光技術と次世代放射光施設を利用した場合の利点等を示す。

（軟 X 線光吸収分光）

軟 X 線光吸収分光は、物質の機能に関わる軌道（非占有軌道）の情報を、ラベルフリー⁵で元素選択的に測定することができるという特徴がある。軟 X 線吸収のエネルギーレベルは化学結合状態に非常に敏感であるため、化学結合状態を解析するためには高いエネルギー分解能が必要である。エネルギー分解能に関しては、既に第 3 世代放射光施設でも十分な光量があるため、次世代放射光施設を利用すれば、光量を落とさず、更にエネルギー分解能を上げることが可能になる。これにより、化学的な環境変化によって生じる数 meV 単位での軟 X 線吸収スペクトルのシフトが観測可能になり、詳細な化学状態の分析が可能になる。

また、空間分解能に関しては、フレネルゾーンプレート（FZP）を用いて集光する手法について、技術的限界である 20～30 nm を第 3 世代放射光施設において既に達成しており、この手法で次世代放射光施設を利用しても利点はないと考えられる。一方、次世代放射光施設は軟 X 線領域で高いコヒーレンスが得られるため、コヒーレント回折イメージング（タイコグラフィ等）手法を用いることで、1 nm の空間分解能を達成することが可能になると期待される。

（軟 X 線光電子分光）

軟 X 線光電子分光は、内殻電子のスペクトルのシフトを測定することで、原子の価数や結合状態の情報を得ることができるという特徴がある。光電子分光においても、高精度な測定を行うため、空間分解能とエネルギー分解能を向上させることが重要である。エネルギー分解能に関しては、既に第 3 世代放射光施設で十分な性能を達成しているが、エネルギー分解能と空間分解能を両立することが困難であった。次世代放射光施設ではコヒーレント成分が増えることにより、エネルギー分解能を犠牲にせず空間分解能を上げることができるようになると期待されている。

⁵ ラベルフリー：NMR や電子顕微鏡のように重元素を加える等の試料の修飾を行わないこと。

(軟 X 線発光分光)

軟 X 線発光分光は、軽元素の p 軌道や遷移金属の d 軌道など、物質の機能に直接関わる電子（価電子）を元素選択的に測定することができるという特徴がある。軟 X 線では発光確率が非常に小さく、これまでは空間分解能を犠牲にして光量を確保した上で、エネルギー分解能を上げる方向で進展してきたが、次世代放射光施設では空間分解能とエネルギー分解能の両立が可能になると期待される。ただし、光量が多くなることから試料ダメージが課題となると考えられる。

【個別分野における具体的な意義】

次世代放射光施設は、学術研究だけでなく産業利用も含めた広範な分野での利用が期待される。高輝度、高コヒーレンスな軟 X 線放射光を利用した具体的な研究開発として、触媒化学、生命科学、磁性・スピントロニクス材料、高分子材料の例を以下に示す。

(触媒化学)

触媒化学においては、固体表面の化学過程を理解することが不均一な触媒学理を理解するための鍵となっている。2007 年、独国の化学者 Gerhard Ertl は、固体表面の化学過程を精密科学の対象にまで引き上げたことが評価されてノーベル化学賞を受賞した。Ertl の方法論は多くの触媒化学者の研究に影響を与え、オペランド測定⁶（その場観察）を目指す強い流れにつながっている。

触媒化学は、触媒反応機構の解明を通じた触媒学理の発展と、学理に基づく触媒開発によって進展しており、反応過程におけるオペランド測定が進展の鍵となっている。触媒の解析に用いられる手法のうち、放射光による触媒の解析は、構造解析能や化学状態解析能が高く、オペランド測定ができる点で優れ、例えば不均一な触媒のナノスケールの局所構造の観察や化学状態分布解析が可能である。また、放射光は透過力が高く、反応ガスや溶液が共存する作動環境下でのオペランド測定も可能である。

硬 X 線による触媒解析では、主に重元素を含む触媒側の構造や化学状態に関する情報が得られるが、軟 X 線では、軽元素を含む反応・生成種側の両方の解析が可能である。特に軽元素の感度が活かせる触媒関連物質として、カーボン系触媒、有機分子触媒、生体触媒などの軽元素触媒の詳細解析に有効である。また、通常の触媒においても、自動車触媒における一酸化炭素、窒素酸化物やヒドロカーボン、合成触媒におけるポリエチレン、エチレンオキシドやアンモニア、電極触媒における水や酸素など、軽元素で構成される反応種・生成種を、触媒とあわせて総合的に解析することができる。これにより、これまで観測することができなかった吸着過程と活性相再生を含む触媒サイクルのダイナミクスの解析や、反応種の顕微分析によるマルチスケールの不均一性と触媒機能の関わりが期待される。また、構造だけでなく反応中の電子状態の解析も可能になることから、微粒子効果、担体効果、合金効果といった、触媒作用における重要因子の詳細な解析が期待される。

産業利用の観点では、軟 X 線によるオペランド測定により、触媒の活性起源や劣化機構の解明が期待される。これらの成果は、企業の触媒開発においても非常に有用であると考えられ、活性制御因

⁶ オペランド測定：動作中の触媒やデバイスのその場観測を行うこと。動的過程を分析することにより、動作中の反応の本質を理解することができる。

子や最適利用条件の調査、新しい反応機構に基づく新規触媒の開発、その性能を引き出すための条件の解明など、企業による新規触媒の研究開発の促進が期待される。

【次世代放射光施設により実現する社会（触媒化学）】

触媒の機能の学理解明及び、それによる新たな高性能触媒の開発により、例えば、省エネルギーで高い生産性の製造プロセスを持った産業の興隆や、物質の超高効率変換等により排ガスや廃棄物を極限まで抑えた循環型社会の早期実現が期待される。

○新たに拓かれる科学の例

- ・触媒の電子状態の直接観測による反応の重要因子の解明⁷
- ・電場・磁場を利用した触媒活性化のオペランド観測による反応機構の学理解明

○新たに拓かれる産業の例

- ・場当たりのでない理論的な設計に基づく新たな高性能・安価な触媒の開発
- ・触媒の理想的な反応条件の決定による、高効率、長寿命、高収率な化学プラントの設計や、高生産プロセスの実現

（生命科学）

21世紀の構造生命科学は2000年代の構造ゲノムプロジェクトに端を発し、生命現象の理解と医療・創薬に向けて、生命現象を多階層（個体・組織から細胞・分子・原子レベル）で可視化することで進展してきた。生命現象の理解には「多階層構造の理解」と「局所構造の理解」が必要であるが、各階層において必要な可視化技術は異なる。そのため、それぞれの長所・短所を見極めて、様々な手法でタンパク質の生体中における真の働きとメカニズムを解明するハイブリッドメソッドが有効である。その中で放射光は、原子構造、分子構造の解明を通じて、構造生命科学の進展、医療・創薬への応用展開において大きな役割を果たしてきたといえる。

生命現象の本質的な理解にはタンパク質の静的な状態だけでなく、タンパク質の動的な構造変化とそれに伴って起こる化学反応の原理を理解することが重要であり、現在では、構造変化の各ステップで止めた中間体の構造解析を行うことで化学反応のメカニズムを推定するというアプローチでの研究が行われている。一方、化学反応の更なる理解のためには電子状態の詳細解析が必要である。

次世代放射光施設の利用により、軽元素のp軌道や遷移金属のd軌道など、タンパク質の機能に関わる電子状態を、高いエネルギー分解能で元素選択的に精密測定することが可能になり、タンパク質の「機能の見える化」が期待される。例えば、メカニズムの解明が期待される光合成タンパク質の解析においては、硬X線による精密な構造解析が必要不可欠であるが、さらに次世代放射光施設の軟X線を用いることにより、化学反応過程の可視化が期待される。また、SPring-8の軟X線ビームラインの100倍の光量になれば、これまで1時間かかっていた1試料の分析を30秒でできるよう

⁷ 触媒は材料のごく一部が触媒機能に関与している、とされており、機能発現に必要な構成要素は解明されていないものが多い。

になり、系統的に試料分析を行うことが可能となる。これにより、電子論に立脚したタンパク質研究という新しい分野が切り拓かれることが期待される。ただし、軟X線発光分光で高い空間分解能を出そうとすると照射ダメージの問題も生じるため、高速フローシステムやX線自由電子レーザー(XFEL)施設で開発が進められている液体ジェットシステムなどの試料更新技術を活用していくことが重要と考えられる。

【次世代放射光施設により実現する社会（生命科学）】

タンパク質の働きなど生体機能の新たな学理解明及び、それによるスクリーニングの合理化や創薬プロセスの合理的な設計等の革新的な医薬品開発により、健康長寿社会の早期実現が期待される。

○新たに拓かれる科学の例

- ・これまで構造解析により推定していた生体内のタンパク質の機能等について、電子状態の解析による新たな機能発現の学理解明

○新たに拓かれる産業の例

- ・タンパク質の働きを制御する候補物質のスクリーニングの合理化
- ・これまで場当たりの創薬について、合理的な設計による効率的な製品開発の実現
- ・天然物からの効率的な候補物質の抽出等による医薬品の生産プロセスの合理化

（磁性・スピントロニクス材料）

磁性・スピントロニクス材料分野においては、希少元素を使わない省エネ新規磁性材料、データストレージにおける磁気記録の高密度化、IoT社会を支える磁気センサー技術及びコンピューティングメモリの省エネルギー化等を目指した研究開発が行われている。こうした研究開発にはナノスケールでの界面構造の理解が重要であり、次世代放射光施設が大きな役割を果たすと期待される。

省エネ新規磁性材料においては、極めて希少な元素であるジスプロシウムを含まないネオジム磁石が注目されており、電気自動車への応用が広がっている。新規磁性材料は、保磁力をいかに向上させるかが開発の中心であり、結晶粒の微細化により保磁力の向上を目指す流れがある。保磁力を理解するには、磁界をかけながら磁区構造のその場観察を行うことが重要であるが、例えば MOKE マイクロスコピー⁸を用いた方法では、きれいに研磨した表面上の磁区構造しか観察できず、実際の磁石で起こっている現象とは異なる情報しか得られないという問題がある。また、透過型電子顕微鏡やホログラフィー電子顕微鏡も試料を薄膜にする必要があり、同様の問題が生じる。SPring-8 に整備された軟 X 線 MCD⁹では、結晶粒界に沿って破壊された破面における磁区構造の様子を、実際の磁石に最も近い形で観察することが可能であり、軟 X 線が磁区構造のその場観察を行う上で重要な役割

⁸ MOKE(Magneto-Optical Kerr Effect) マイクロスコピー：磁場に入射した光の変化を利用して磁区構造を解析する手法。測定にあたり、試料表面をきれいに研磨する必要があり、実際の磁石と挙動が異なる。

⁹ 軟 X 線 MCD：試料内部の磁化の向きによって、X 線の吸収が変化する性質を利用して磁区構造を解析する手法。測定にあたり試料表面を研磨する必要がないため、実際の磁石と同じ挙動での測定が可能になる。

を果たしている。一方、磁性材料の研究で扱う結晶粒のサイズは微細化が進み、現在 200 nm 程度が主流となっている。SPring-8 の軟 X 線ビームサイズは、最小でも 100 nm 程度であり、このような超微細な磁石の磁区構造を観察するには空間分解能が足りないことから、次世代放射光施設においては、円偏光軟 X 線ビーム及び軟 X 線のコヒーレンスを利用した 1~10 nm スケールの空間分解能が求められる。この空間分解能が実現できれば、バルクの磁石だけでなく、データストレージやスピントロニクス素子の研究にも応用できる強力な開発ツールとなると期待される。

例えばデータストレージにおいては、近年のクラウドや AI 等の進展により大量のデータの保存が必要となり、データセンターで使われるデータストレージの消費電力が課題となっている。このため、産業界では磁気記録の高密度化を目指した研究が進められており、熱アシスト磁気記録(HAMR)¹⁰やマイクロ波アシスト磁気記録(MAMR)¹¹という技術が注目されている。これらの技術の研究を進める上では、磁化反転のダイナミクスを観察することが重要であり、磁石と同様に 10 nm 以下の分解能で時間分解イメージングによる磁壁の移動観察が必要である。また、磁気記録に書き込むヘッドも重要であり、ホイスラー合金というスピン分極率の高いハーフメタルを用いて、電気抵抗の低い磁気抵抗素子を開発しようという研究が行われている。ハーフメタル材料は磁気ヘッド以外にも高感度磁気センサーや大容量の MRAM¹²など様々な応用が期待されているが、温度が上がると磁気抵抗比が著しく減少するという課題がある。その原因を解明するためには、スピン分極率の測定が必要であり、次世代放射光施設を用いたスピン分解光電子分光による磁区構造中のスピン分極率の直接観測が期待される。

コンピューティングメモリにおいては、記録素子に磁性体を用いることで、電源供給が必要な DRAM¹³等のメモリを電源供給が不要な不揮発性メモリに置き換え、省エネルギー化を実現することが期待されている。一例として、内閣府の革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) では、電流を流さず、電圧による磁化制御で省エネルギー化を目指す電圧トルク MRAM の実現に向けた研究開発が行われている。電圧トルク MRAM の実現に向けて、酸化還元反応に基づかず大きな電圧効果を出せる材料が探索されているが、酸化物の生成の有無を判断するためには現状より 2 桁高い測定精度が必要である。次世代放射光施設による時間分解磁気イメージングにより、電圧トルク MRAM のメカニズムが解明され、より高性能な MRAM の実現が期待される。

磁性スピントロニクス材料の解析には軟 X 線 MCD による磁性の高感度検出が必須であることから、光学系による偏光制御を行うことが重要である。スピン角度分解光電子分光(スピン分解 ARPES)も微小磁気構造の解明に効果的であり、軟 X 線 MCD と併せて整備することが重要である。また、作製した試料を測定装置まで搬送するまでの間に受ける酸化の影響が測定結果に大きく影響するという課題がある。このため、成膜装置を整備し、デバイス作製過程における表面、界面の状況を正確に測定することでデバイス開発の強力なツールとなり得る。また、デバイス開発においては、埋もれ

¹⁰ 熱アシスト磁気記録 (HAMR) : 保磁力の高い強磁性体にレーザー等を照射して熱することで保磁力を下げ、局所に磁気記録を行う手法。

¹¹ マイクロ波アシスト磁気記録 (MAMR) : 高保磁力媒体にマイクロ波を照射することにより、磁化反転を容易にする手法。

¹² MRAM : 磁気分極による抵抗値変化を利用してデータ保持を行う磁気抵抗メモリ。電源を切ってもデータ保持が可能。

¹³ DRAM : コンデンサにためた電荷の有無で情報を記憶する半導体メモリ。データ保持のため定期的にデータの書き込みが必要。

た界面の磁性評価のための高感度検出器の開発も重要である。

【次世代放射光施設により実現する社会（磁性・スピントロニクス材料）】

スピントロニクスのダイナミクスの解明及び、それによる省資源・省エネ型の磁性材料の開発や超低消費電力素子の開発等の省資源・省エネ産業の創出により、持続可能な超スマート社会の実現が期待される。

○新たに拓かれる科学の例

- ・ 超高精度の磁力解析による、これまで磁力を持たないとされていた物質の磁性現象の発見
- ・ スピン運動が作り出す巨大スピン波の伝搬現象等の新たな物理現象の解明
- ・ 磁気特性の発現メカニズムから磁気発生の学理解明

○新たに拓かれる産業の例

- ・ 希少元素の使用量を大幅に削減しつつ、高い磁気特性を持った磁性材料の開発による、資源戦略性の高い高性能磁石等の開発
- ・ 磁気記録密度が高く超低消費電力の新たなスピントロニクス素子の開発による超省エネデータストレージの実現

（高分子材料）

高分子材料の代表例であるタイヤゴム材料は、ポリマー、フィラー、架橋剤、添加剤等の10数種類以上の素材からなる非常に複雑な系となっている。各素材の構造や物性は既知であるが、ゴムとして混ぜた場合、空間構造的にも時間構造的にも非常に幅広いスケールでの階層構造により機能を発現するため、そのメカニズムの解明は非常に難しい課題であった。

近年の放射光のプロブサイズの小型化と輝度の向上に伴い、これまでの材料構造と物性との相関解析による推定に基づく素材開発から、材料構造にダイナミクスを含めた機能発現の理解に基づく素材設計・開発が行われるようになり、放射光の成果を活かした高性能タイヤが製品化されている。さらに、近年では化学（電子）状態の変化まで含めた複雑系の理解に基づく実製品を開発しようという流れになっており、次世代放射光施設が重要な役割を果たすことが期待されている。具体的には、ナノビームによる高空間分解能の達成により、従来のビームでは埋もれていた物性に大きく影響する局所情報が得られるようになり、ゴム材料のような複雑系の解析が可能になった。また、局所情報と大スケールでの測定を併せることで、複雑系における統計的な正しさの検証にも利用できる。さらに、軟 X 線観察の元素選択性を活用することで、ゴム材料の劣化機構を元素ごとに詳細に解析することが可能になり、例えば、ゴム内部で一部のポリマーだけが選択的に劣化しているといった情報を得られることが期待される。また、従来の電子顕微鏡ではシリカやフィラーしか観察できなかったが、コヒーレンスを活用し、タイコグラフィのような高空間分解能の軟 X 線観察を行うことで、元素選択的に様々な材料を分離して解析することが可能になり、飛躍的な材料開発につながることを期待される。また、XAFS（エックス線吸収微細構造）による化学状態解析を組み合わせることで新たな解析の展開も期待される。加えて、X 線光子相関分光法において、広角側のコヒーレンスが向上す

れば、より速いダイナミクスの観察が可能となることも期待される。

【次世代放射光施設により実現する社会（高分子材料）】

高分子材料の新たなダイナミクスの発見及びそれによる高分子材料の理論的な設計により、例えば、既存の材料の更なる高機能化や生産性向上、製品の長寿命化、新たな材料開発とそれに伴う新産業の創出により、省資源・省エネ社会の早期実現が期待される。

○新たに拓かれる科学の例

- ・高分子材料の局所の化学反応解析による、これまで明らかでなかった生体分子や高分子のダイナミクスの解明
- ・高分子材料のナノ領域の現象がマクロ特性に与える影響等の学理解明

○新たに拓かれる産業の例

- ・従来、経験則で行っていた異種材料の界面制御を理論的に制御できるようになり、局所変化による性能劣化等を考慮した理論的な材料設計による、高機能、低コストな製品の開発
- ・ナノ領域の化学変化や構造変化の解析・制御による、高強度化や軽量化、異種材との接着性の向上など、特化した性能を持つオーダーメイド型新材料の開発

4. 求められる性能等の技術的事項

軟 X 線向けの放射光施設は、加速器技術の進展により諸外国でも低エミッタンス化が進んでいるものの、設計とおりの実効性能¹⁴を実現することは容易ではない、との報告がある¹⁵。このため、エミッタンスの最小化を重視した目標にするのではなく、実効的な総合性能の最適化を図る必要がある。特に、MBA ラティスを採用する場合、セル内の偏向磁石の数を増やすと、4 極磁石、モニター、ステアリング磁石、光アブソーバー等の機器が同時に増加するため、設置スペースの問題が発生する。このため、実効性能を発揮できるよう現実的な設計とすることが必要である。

目標のエミッタンスについては、実用電流¹⁶に基づく実効エミッタンスと、ゼロ電流エミッタンスの乖離が小さい領域とすることが、実効性能の発揮及びコスト低減の両観点から効率的である。次世代放射光施設については、実用電流 500 mA¹⁷、垂直と水平のエミッタンス比 1%、リングの約 70% に電子ビームを薄く入れるマルチバンチフィリングと仮定した場合、実効エミッタンスとゼロ電流エミッタンスの乖離が始まる境界の 1 nm·rad 前後を目標エミッタンスとすることが合理的である。また、エミッタンスの低減によるエネルギー広がりが増大にも注意する必要があり、この観点からも、エネルギー広がりが増大が始まる境界の 1nm·rad 前後を目標エミッタンスとすることが合理的である。さらに、目標エミッタンスを 1 nm·rad 前後とすると、主波長域である軟 X 線領域において高いコヒーレンス比を得ることができる¹⁸。

現実的な設計が可能である 4~5 個の偏向電磁石を用いた MBA ラティスを仮定すると、目標エミッタンス 1 nm·rad での蓄積リングの周長は 325~425 m と見積もられる。諸外国で新設が進む 3 GeV 級放射光源の周長が 500 m を超える¹⁹ことに比べ、コンパクトな周長となっており、建設コストの観点からも合理的である。

以上のように、これまでの我が国における技術的な実績と経験を踏まえ、蓄積リングに MBA ラティスを採用し、諸外国と同レベルの先端性（エミッタンス 1 nm·rad 前後）と安定性（実効性能での

¹⁴ 実効性能：実際のユーザー運転で達成される性能。

¹⁵ NSLS-II (米国)：旧来のダブルバンドアクロマット (DBA) とダンピングウィグラー (DW) を組み合わせることでエミッタンス 0.55 nm·rad を目指していたが、目標値ではエネルギーの広がりが 2 倍以上になり、輝度のメリットが得られない。このため、実効エミッタンスは 1nm·rad にとどまり、792 m という大きな周長の割にエミッタンスを低減できていない。

・MAX IV (スウェーデン)：1 セルあたり 7 つの偏向磁石を用いた MBA ラティスの採用により、蓄積電流 500mA、エミッタンス 0.33 nm·rad 程度を目指すとしているが、稼働開始から 2 年を経ても、低出力での運転を行っており、設計とおりの実効性能を発揮できていない状況である。

¹⁶ 実用電流：電子ビームのエネルギーに依らず挿入光源からの放射パワーを一定にするために必要な電流であり、蓄積電流の目安となる。

¹⁷ SPring-8 の蓄積電流を参照点として試算した場合、3 GeV 級放射光源においては 500 mA 前後の実用電流とすることが適当と試算される。

¹⁸ 1 keV の軟 X 線では 10% のコヒーレンス比が得られる。これは世界中で検討が進められている硬 X 線 (10 keV) の目標エミッタンス (0.1 nm·rad 前後) で得られるコヒーレンス比と同等の高い値である。

¹⁹ 新設が進む諸外国の 3GeV 級放射光源の周長は NSLS-II (米国)：792 m、TPS (台湾)：518 m、MAX IV (スウェーデン)：528 m と大型である。

安定した定常的運転)を両立しつつ、コンパクトな 3GeV 級放射光源 (周長 325~425 m 程度)を整備することが適切である。

< 求められる主な施設性能 >

| パラメータ | 目標値 |
|----------------------|----------------|
| エミッタンス ²⁰ | 0.9~1.1 nm·rad |
| 蓄積電流 | 400~600 mA |
| エネルギー広がり | ~0.1% |
| 周長 | 325~425 m |

²⁰ ここでは、実効エミッタンスを言う。

5. 国の整備・運用主体

次世代放射光施設は、軟 X 線領域における高輝度な放射光利用環境を提供する大規模な研究開発基盤であり、学術研究のみならず高い産業利用ニーズが見込まれている。また、次世代放射光施設は、我が国の軟 X 線向け放射光施設としては最も高輝度（既存施設の 100～1,000 倍の輝度）であり、先端性と高い安定性（実効性能での安定した定常的運転）を両立した比類のない性能を有する。さらに、材料科学、触媒化学、生命科学などの科学技術の広範な分野における多様な研究等に活用され、質の高い研究成果の創出に貢献すると見込まれている。このことから、次世代放射光施設は「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」（平成 6 年法律第 78 号。以下「共用促進法」という。）第 2 条に規定する「先端大型研究施設²¹」として、同法のもとで施設の共用を促進することを想定し、国の整備・運用主体を判断する必要がある。

このため、国の整備・運用主体は、学術・産業の双方に対し、それぞれの利用ニーズに即して、適切な利用環境を提供することができる機関でなければならない。学術・産業の双方に利用環境を適切に提供することを法人の目的とし、共用促進法のもとで施設の共用を促進することを要件に考えると、国の整備・運用主体は、国立研究開発法人²²とすることが適当である。また、以下の理由から、その国立研究開発法人は、量子科学技術研究開発機構とすることが適当である。

量子科学技術研究開発機構は、法人の目的として、「国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構法」（平成 11 年法律第 176 号）第 4 条において「量子科学技術（中略）に関する科学技術の水準の向上を図ること」と規定されている。また業務の範囲として、同法第 16 条において「機構の施設及び設備を科学技術に関する研究開発を行う者の共用に供すること」と規定されている。このため、次世代放射光施設の整備・運用は、法人の目的や業務の範囲と合致する。

また、量子科学技術研究開発機構は、旧日本原子力研究所の際に、我が国最大の大型放射光施設である SPring-8 の計画、整備、運用を理化学研究所とともに担った実績を有する。また、国際熱核融合実験炉（ITER）においても日欧露米韓中印の 7 極からなる大型国際プロジェクトの国内機関としてプロジェクトを管理するとともに、日本初となる重粒子線がん治療装置「HIMAC」を整備し、重粒子線がん治療や装置の高度化等の研究開発を進めるなど、大型プロジェクトの整備・運用の実績を有している。このため、次世代放射光施設の整備・運用を担う法人として適格性がある。

²¹ 「先端大型研究施設」とは、国の試験研究機関又は研究等を行う独立行政法人に重複して設置することが多額の経費を要するため適当でない認められる大規模な研究施設であって、先端的な科学技術の分野において比類のない性能を有し、科学技術の広範な分野における多様な研究等に活用されることにより、その価値が最大限に発揮されるものをいう。（特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律（平成 6 年法律第 78 号）第 2 条第 1 項）

²² 「国立研究開発法人」とは、公共上の事務等のうち、その特性に照らし、一定の自主性及び自律性を発揮しつつ、中長期的な視点に立って執行することが求められる科学技術に関する試験、研究又は開発に係るものを主要な業務として国が中長期的な期間について定める業務運営に関する目標を達成するための計画に基づき行うことにより、我が国における科学技術の水準の向上を通じた国民経済の健全な発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする独立行政法人として、個別法で定めるものをいう。（独立行政法人通則法（平成 11 年法律第 103 号）第 2 条第 3 項）

同法人の中長期計画では、「量子ビームの優れた機能を総合的に活用」することとしており、放射光、レーザー、イオンビーム等の量子ビームの相補的・相乗的利用を推進している。また、「研究成果の最大化を目標に、産学官の連携拠点として、保有する施設、設備等を一定の条件のもとに提供するとともに、国内外の研究機関と連携し、国内外の人材を結集して、機構が中核となる体制を構築する」としている。さらに、20年、30年後を見据えて中長期的な視野に立った上で量子科学技術研究開発機構が目指すべき方向を定めた「QST 未来戦略 2016」（平成 28 年 10 月 理事長決定）においても「世界トップクラスの量子科学技術研究開発プラットフォーム構築を志す」、「大学や産業界を含む研究機関や行政機関との人材交流や共同研究など、産学官連携活動を積極的に推進しイノベーションハブとしての役割を担い、共創を誘発する場を形成する」としており、法人の果たすべき役割や将来ビジョンからも、産学共創の場の中核となることが期待される次世代放射光施設の整備・運用を行う法人として最適である。

これらの理由に加え、量子科学技術研究開発機構は、組織として積極的に次世代放射光施設の整備・運用を進める意思が認められることから、整備・運用を担う国の主体は、量子科学技術研究開発機構とすることが適当であると判断した。

6. 整備・運用にあたっての基本的考え方、マネジメント方策等

(1) 整備・運用の基本的考え方

(早期整備の必要性)

最先端の科学技術は、新材料や触媒、医療・創薬等の開発において、物質の機能や化学反応の過程を適確に理解するため、物質表面の電子状態を詳細に解析するニーズが高まっている。世界の研究潮流は、物質の「構造解析」に加えて物質の「機能理解」へと向かっており、物質表面の電子状態変化を時間的に追える、高輝度の軟 X 線利用環境の整備が重要となっている。

近年の加速器技術等の進展も相俟って、電子エネルギーが比較的低い領域でも高輝度の放射光を発生させることが技術的に可能になった。我が国は、これまで放射光施設の整備や安定的な運転の実績を蓄積してきており、次世代の放射光施設に求められる先端性と安定性を両立しつつ、コンパクトな 3GeV 級放射光源の整備が可能である。

諸外国においては、軟 X 線領域に強みを持つ高輝度の放射光施設の整備・運用が進められているが、我が国には高輝度の軟 X 線を利用できる施設が存在せず、軟 X 線領域を重点的に利用する多くの研究開発分野において諸外国と互角に競争するための環境が整っていない状況である。このため、幅広い研究開発分野の研究力、競争力に大きな影響を与え得る次世代放射光施設を早期に整備し、我が国の科学技術イノベーション創出に向けた基盤強化を図ることが必要である。

(官・民・地域連携による推進)

理化学研究所の試算によれば、SPring-8 が誘起する民間の研究開発投資の誘発効果は、1 次的な効果 (SPring-8 を利用して成果創出するまでに必要な研究開発費) に限っても年間 17.2 億円、2 次的な効果 (SPring-8 で創出した成果を利用して製品化するまでに必要な研究開発費) も含めると年間約 70~260 億円と推定され、放射光は単なる解析ツールではなく、産業界にとって経営戦略にも関わる重要な研究開発ツールとなっている。特に軟 X 線は、有機物の微量分析や材料開発等の分野で既に産業利用が進められており、次世代放射光施設は、既存の大型放射光施設よりも相対的に高い産業利用ニーズ²³が見込まれる。また、全国から研究者等が来訪することが見込まれ、こうした来訪者による経済効果に加え、放射光施設を中核とした周辺産業の発展、それに伴う雇用の創出等により、地域産業及び経済の活性化への大きな貢献が期待される。

このため、次世代放射光施設の整備・運用にあたっては、民間・地域の資金・知恵等も活用することとし、国や量子科学技術研究開発機構だけでなく、財源負担も含め、整備・運用に積極的に関わる地域及び産業界 (以下「パートナー」という。) とともに、官民地域パートナーシップにより計画を推進することが適当である。

²³次世代放射光施設は、運用当初から SPring-8 の産業利用割合 (2 割程度) を超える高い割合となることが想定される。

(リサーチコンプレックスの形成加速)

第5期科学技術基本計画では、オープンイノベーション推進に向けた取組の強化を促すため、産学官の人材、知、資金を結集させ、共創を誘発する「場」の形成が重要であることを指摘している。イノベーションの迅速な創出には、近年、リサーチコンプレックス、即ち、一定の範囲の物理的空間において、大学、研究機関、企業等がそれぞれの活動を融合させ、世界の注目を集める研究開発、成果の事業化、人材育成を一体的に実施するための世界的にも優れた研究インフラ、組織、その他の資源の集積、の形成を加速することが有効と考えられている。このため、次世代放射光施設は、産学の幅広い研究開発に活用される最先端の研究開発基盤としての役割を最大限発揮できるよう、その整備にあたっては、イノベーションの創出に向けた人材、知、資金の好循環を生み出す「場」の中核として位置づけ、地域のこれまでの取組や蓄積をもとにリサーチコンプレックスの形成を一層加速する観点を重視すべきである。

現に、諸外国では放射光施設を中核拠点としたリサーチコンプレックスの形成が進んでいる。Diamond（英国）は、バイオ、製薬系の研究開発が進められている軟X線向け放射光施設であり、周辺には10程度の国立研究機関等や、レーザー、パルス中性子の利用施設が集中している。さらに、施設近傍には民間企業が集積し、学術研究の成果を実用化・事業化に結び付けるべく、ベンチャーキャピタルが複数存在しているほか、技術移転関連組織も設置されている。このほか、SOLEIL（フランス）、TPS（台湾）、MAX IV（スウェーデン）等においても、軟X線向け放射光施設が中核となり、複数の国立研究機関、大学、民間企業等が集積し、また、研究成果を活用したベンチャー企業が多く設立されるなど、リサーチコンプレックスが形成されている。

パートナーとは、上記のイノベーション創出の考え方を共有した上で、次世代放射光施設の整備により、これを中核としたリサーチコンプレックスの形成が加速されるよう、地域全体の産学集積とその発展のビジョンをもって具体的な計画を進める必要がある。また、これにより産学官金²⁴連携によるオープンイノベーションの推進を促していくことが重要である。

(最先端の研究成果の持続的な創出)

次世代放射光施設は、軟X線領域における高輝度な放射光利用環境を提供する大規模な研究開発基盤であり、長期にわたり、我が国における最先端の軟X線向け放射光施設として、質の高い研究成果を創出し続けることが求められる。ビームラインや装置は、整備当初は最新の又は独創的なもので、質の高い研究成果の創出に貢献するものの、およそ10年程度も経過すれば、研究対象の更なる複雑化、多様化等により、既設の装置等では対応が困難となる。高付加価値で質の高い研究成果を持続的に創出し続けられるよう、その時々での学術利用・産業利用ニーズや最新の研究動向・技術動向を踏まえ、新たな測定技術や手法の開発など、ビームラインや装置を高度化していくことが必要となる。

このため、まず、運用開始当初から、研究成果の最大化が図られるよう、以下の取組を具体化し、限られた資源を最大限活用することが重要である。

① 新たな研究・技術領域を開拓し続けるようなビームライン整備の仕組み

²⁴ 「金」は、金融を指す。

- ② 適切な利用料金の考え方を含む本格的な産学連携につながっていくビームラインの運用
- ③ 整備、運用、改廃を含むビームライン全体のマネジメント
- ④ ビームラインに応じた技術的なサポート体制

さらに、ビームラインの活用により得られた利用料収入の一部を装置の高度化などの設備投資やサポートの充実・強化等に充てることで、学術研究のみならず産業利用においても最先端の魅力的な利用環境を維持し、これを発展させ、更なる利用料収入の拡大を図る、いわゆる「正のスパイラル」を構築することが重要である。

(本格的産学連携によるイノベーション創出)

「産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン」(平成 28 年 11 月 イノベーション促進産学官対話会議)では、新しいシーズに対して企業と大学・国立研究開発法人が連携することにより、総じて社会に貢献するような付加価値を創出するためのオープンイノベーションを推進していくことが重要であると指摘している。次世代放射光施設は、学術・産業ともに高い利用ニーズが見込まれ、学術研究の成果による新たなシーズが次々に創出されると同時に、民間企業等の抱える様々な課題が持ち込まれる場でもある。この施設の特徴を最大限に活かして、次世代放射光施設がイノベーションプラットフォームとなり、産業界が抱える課題解決に向けて、研究者・技術者が最先端のビームラインや装置等のリソースを横断的に提供し、共同研究を「組織」対「組織」で行う「ソリューション導出型共同研究」を実現するなど、本格的産学連携を実践していくべきである。

(2) 具体的なマネジメント方策

(ビームラインの整備・改廃)

次世代放射光施設の周長は 325~425 m 程度と見積もられ、整備可能なビームラインは最大 25 本程度に限られる。限られた資源を最大限活用するためにも、学術・産業の利用ニーズや最新の研究動向・技術動向を踏まえ、あらかじめ次世代放射光施設が担うべき研究開発の分野や方向性について十分に検討し、ビームラインの整備・改廃の全体方針(グランドデザイン)を策定しておくことが必要である。

(ビームタイムによる運用方式の導入)

SPring-8 における専用ビームラインは、共用ビームラインと比べ利用率(利用時間/利用可能時間)が低く、産業利用ユーザーの積極的な受入れ等の取組が行われているものの、最大限利用するにはまだ課題がある、との指摘がある。これを踏まえ、次世代放射光施設においては、従来のビームライン別に運用する方式ではなく、全ビームラインをビームタイム(利用時間枠)で分けて運用する方式(ビームタイム制)を新たに導入する(参考:図 1)。具体的には、国の整備・運用主体として設置するビームラインのビームタイムは全て共用枠²⁵とし、国の整備・運用主体以外の者が設置するビームラインのうち、共用に供することが適当なものについては、共用枠と専用枠²⁶に分けることを可能にする(参考:表 1)。ビームタイムを共用枠と専用枠に分けることで、ビームライン設置者が自ら利用するビームタイム以外を産学に広く共用に供することができ、ビームラインの有効活用によ

²⁵ 共用枠: 共用に供することを目的としたビームタイム。

²⁶ 専用枠: ビームライン設置者が自ら利用することを目的としたビームタイム。

る研究成果の最大化が期待できる。なお、この実現には共用促進法改正を視野に入れて更なる検討を行う必要がある。

(共用枠の一元的マネジメント)

SPring-8 や J-PARC 等においては、各ビームラインの研究者・技術者が利用者のサポートを行う体制となっているが、ビームラインによってサポートの質にばらつきがある、との利用者からの指摘がある。このため、次世代放射光施設においては、全ての共用枠を一元的に管理し、利用に係る提案、審査、実験のサポートを統合的に実施する（一元的マネジメント）（参考：図1）。これにより、例えば、複数のビームライン利用の提案、審査の合理化が図られるなど、利用者の利便性向上のみならず、複数の研究者・技術者がチームとなって複数のビームラインをサポートする体制を構築することで、ビームラインのサポートの充実・強化につながっていくことが期待される。

【図1】次世代放射光施設におけるビームラインの運用について

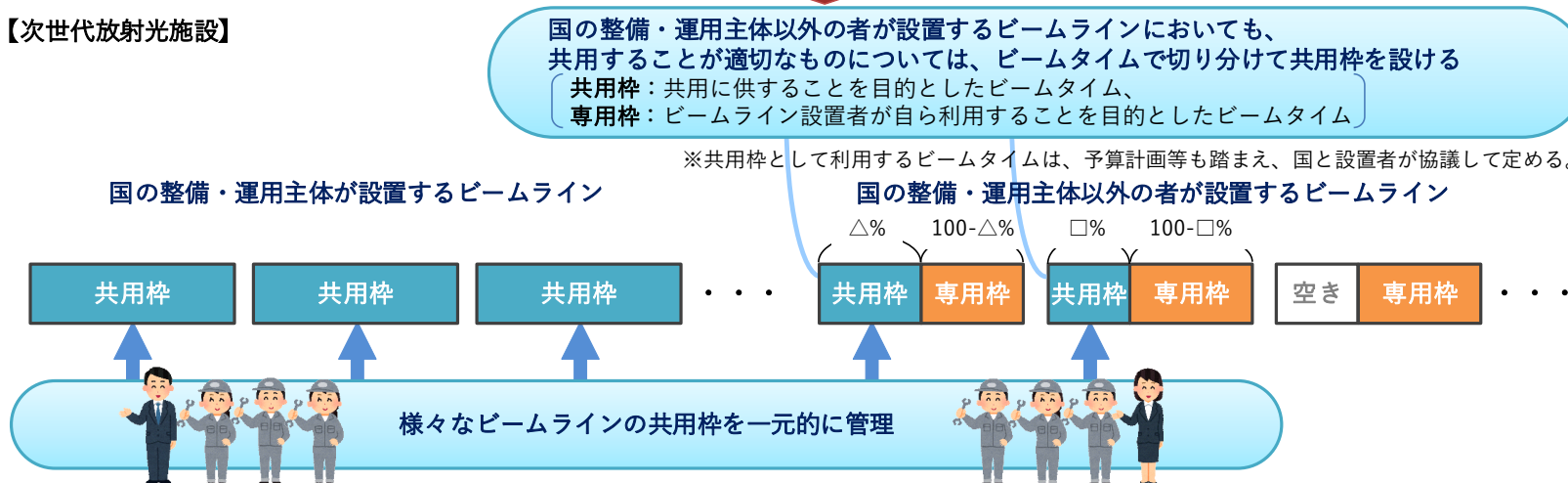
次世代放射光施設におけるビームラインの運用について

- 【課題】
- ・共用ビームラインと比較して**専用ビームラインを有効利用し切れていない**
 - ・ビームラインによって**サポートの質にばらつきがある**

【従来の共用促進法対象施設】



【次世代放射光施設】



- 【解決策】
- ・ビームタイムで分けて**共用枠を設けることにより、国の整備・運用主体以外の者が設置したビームラインを最大限有効利用**
 - ・様々なビームラインの**共用枠を一元的に管理し、利用に係る提案、審査、実験のサポートを統合的に実施 (一元的マネジメント)**

【表1】想定されるビームラインの種類と役割分担

| ビームラインの種類 (設置者) | 国の整備・運用主体(※1) が設置するビームライン | パートナーが設置するビームライン | | 大学、大学共同利用機関法人、国立研究開発法人、 民間企業等が設置するビームライン | |
|----------------------|---|--------------------------------------|--|---|---|
| ビームタイムの種類 (利用枠) | 共用枠 | 共用枠 | パートナーが 利用する枠 | 共用枠(※2) | 専用枠 |
| ビームラインの 設置に係る財源 | 国の補助金等 | パートナーの資金 | | 設置者の資金 | |
| ビームラインの 維持運営に係る財源 | 国の補助金等 | 国の補助金等 | パートナーの資金 | 国の補助金等 | 設置者の資金 |
| 主たる利用者 | 大学、民間企業等 (国が公募により選定) | 大学、民間企業等 (国が公募により選定) | 産学連携による民間企業の 利用を中心に想定 | 大学、民間企業等 (国が公募により選定) | 設置者自身 |
| 利用料金 | 成果公開：徴収しない 成果専有：国が利用者から徴収 (※3) | 成果公開：徴収しない 成果専有：国が利用者から徴収 (※3) | 国はパートナーから、想定される 成果公開・成果専有の割合に応じ て、施設運営に必要な経費を徴 収。 パートナーは利用者から、パート ナーが設定した料金を徴収。 | 成果公開：徴収しない 成果専有：国が利用者から徴収 (※3、※4) | 成果公開：徴収しない 成果専有：国が利用者から徴収 (※3、※4) |
| ビームラインの 利用に係るサポート | 様々なビームラインの共用枠を国の整備・運用主体(※1)とパートナーが一元的に管理し、 利用に係る提案、審査、実験のサポートを統合的に実施 | | | | 設置者自身が対応 |

※1 国の整備・運用主体が国費(補助金等)により設置、維持運営、サポートを行う。

※2 ビームラインの利用形態や予算計画等を考慮して、共用枠を設けない場合もありうる。

※3 この利用料金とは別に、ビームラインの利用に係る消耗品(実費)等を、国が利用者から一律で徴収する。

※4 この利用料金とは別に、設置期間に応じた設置料を、国がビームライン設置者から徴収する。

（本格的産学連携の費用分担の適正化）

「産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン」（平成 28 年 11 月 イノベーション促進産学官対話会議）では、大学・国立研究開発法人はエビデンスに基づく適切な費用算定をオペレーションごとに進めた上で、「組織」対「組織」の関係の下での交渉を行い、大学・国立研究開発法人と企業の両者が納得した形で共同研究の契約を結ぶことにより、適切な費用負担を産業界に求めていくことが重要である、と指摘している。本格的産学連携による大型の共同研究では、大学・国立研究開発法人が分野横断的な共同研究の企画及び立案から成果の管理及び活用までの一連のフローを「組織」として実施することから、研究の規模の大型化及び企画等に携わるスタッフの増加などが見込まれる。このため、次世代放射光施設においては、「ソリューション導出型共同研究」といった本格的産学連携の実践にあたり、共同研究に携わる研究者等の人件費相当額やこれに付随する経費、「戦略的産学連携経費²⁷」も含めた共同研究の契約を結び、費用負担を適正化していくことが重要である。

（民間企業の利用ニーズを踏まえたサービスの提供）

産業利用のニーズが高いという次世代放射光施設の特徴を活かし、民間企業の研究者、技術者等の利用ニーズを踏まえた柔軟かつ多様な支援サービスの提供を検討する必要がある。また、利用料に関しては、これまでの考え方を踏まえ、成果公開利用の場合はビームタイムの利用料を無料（消耗品相当分は別途徴収）とし、成果専有利用の場合は運営費回収方式に基づく利用料を徴収するが、上記の支援サービスや付随設備利用など、ビームタイムの利用料とは別に経費がかかることが見込まれるサービス等については、適正な利用料金を定め、利用者に応分の費用負担を求めることが適切である。

（ベンチャー企業の利用促進）

次世代放射光施設は、学術利用による新たな知見の創出とともに、産業利用による新たな材料、製品、創薬の開発など、新しい市場の開拓につながる成果も期待できる。このため、新たな技術シーズが積極的に市場の開拓につながるよう、ベンチャー企業に対しては、例えば利用料金の低廉化等の優遇措置を設けるなど、積極的な利用開拓と支援の検討が必要である。また、「科学技術イノベーションの活性化を促進する制度的基盤の構築に向けて（提言）」（平成 29 年 6 月 2 日 総合科学技術・イノベーション会議 有識者議員）において、「ベンチャー企業から国立大学や国研が対価として株式・新株予約権等を取得できるケースを拡大すべき」、「大学や国研が当該法人発ベンチャー等から取得した株式・新株予約権等について、長期保有を可能とすべき」といった提言がなされている。これらの提言を踏まえた所要の法改正も見据えて、次世代放射光施設においては、ベンチャー企業からの株式・新株予約権等の長期保有等も視野に入れて、これらの寄附の拡充等についても、あらかじめ検討を進めるべきである。

（次世代放射光施設を活用した人材育成）

放射光に関わる人材育成を促進するため、次世代放射光施設の整備・運用にあたっては、人材育成の視点を取り入れていくことが重要である。大学や大学共同利用機関法人においては、施設の整備段

²⁷ 戦略的産学連携経費：今後の産学官連携活動の発展に向けた将来への投資や、そうした活動に伴うリスクの補完のための経費。例えば、大学・国立研究開発法人の産学官連携機能強化のため企画・提案関連経費や知財マネジメント関連経費、インフラ整備経費、広報関連経費等が考えられる。（本格的な産学連携による共同研究の拡大に向けた費用負担等の在り方について（報告書）（平成 27 年 12 月 イノベーション実現のための財源多様化検討会））

階から若手研究者や学生を最先端のビームラインや装置の開発に関わらせるなど、次世代放射光施設を人材育成の場として活用するとともに、利用する若手研究者や学生に対して適切に指導・助言を行える体制を構築することが望ましい。また、次世代放射光施設においては、若手研究者や学生が自ら試行錯誤しながら研究に取り組むことで効果的に人材育成が行われるよう、十分なビームタイムを確保することが重要である。

(3) 国内外の放射光施設との連携・協力

次世代放射光施設は、我が国の放射光の研究、利用に関する中核拠点の一つとして機能し、他施設との協力により我が国として通年的な放射光利用環境を実現することなど、国内の既設の放射光施設との連携強化を図っていくとともに、諸外国の放射光施設との連携・協力を進めることが期待される。加えて、放射光施設のみならず量子ビーム施設の役割分担及び連携強化により、日本全体で量子ビーム利用に係る科学技術イノベーションの推進を図ることが重要である。また、運用にあたっては、高い技術力を持った研究者や技術者がオールジャパン体制で協力し、利用技術の開拓を進めることも重要である。

7. 整備費用・運用経費

量子科学技術研究開発機構の整備運用計画案で明らかにした施設・設備の整備に必要な経費及びスケジュール並びに運用経費について、小委員会においてもこれを妥当である旨、確認を行った。今後、パートナーの募集を行い、施設の建設地を含めて官民地域パートナーシップの具体化を図る必要がある。なお、これらの経費及びスケジュールは、今後、これらの検討状況により変更・修正があり得る。

(整備費用)

概算総額：約 340 億円程度 (用地取得・土地造成に係る経費は別途)

○想定される国の分担：約 190 億円～約 200 億円程度

○想定されるパートナーの分担：約 135 億円～約 150 億円程度 + 用地取得・土地造成に係る経費

| 項目 | 内訳 | 内訳の試算額 | 内訳の合計 | 役割分担 |
|---------|---------|--------------|----------|-------------|
| 加速器 | ライナック | 約 60 億円 | 約 170 億円 | 国 |
| | 蓄積リング | 約 85 億円 | | |
| | 輸送系 | 約 5 億円 | | |
| | 制御・安全 | 約 20 億円 | | |
| 基本建屋 | 建物・附帯設備 | 約 80～85 億円 | | パートナー |
| ビームライン | 当初 10 本 | 約 60 億円 | | 国及びパートナーが分担 |
| 研究準備交流棟 | 建物・附帯設備 | 約 25 億円 | | パートナー |
| 整備用地 | 用地取得・造成 | 整備用地状況により異なる | | パートナー |

その他、整備期間中の業務実施費（建設工程の管理、事務管理費等）として 2 億円/年程度が必要。

(運用経費)

当初整備するビームラインを 10 本とした場合の年間の運用経費については概ね以下のとおり。

| 項目 | 内訳 | 内訳の試算額 | 内訳の合計 |
|----------------|------------------------|-----------|-----------|
| 加速器運転管理 | 運転経費（人件費含む） | 約 14 億円/年 | 約 19 億円/年 |
| | 光熱水費 | 約 5 億円/年 | |
| ビームライン 維持管理 | 人件費 | 約 1 億円/年 | 約 5 億円/年 |
| | 保守管理費 | 約 4 億円/年 | |
| ビームライン 利用支援 | 利用者選定・ 支援業務費（人件費含む） | 約 3 億円/年 | |
| その他 | 事務運営管理費等 | 約 2 億円/年 | |
| 合計 | | 約 29 億円/年 | |

パートナーとの経費分担は、パートナーが利用するビームタイムの成果専有利用の割合等について協議の上、決定。

(整備スケジュール)

整備着手の予算が計上された年度を初年度とした場合に想定されるスケジュールは以下のとおりであるが、整備状況も踏まえ、可能な限り整備スケジュールの前倒しを検討していくことが望ましい。

| | 初年度 | 2年度目 | 3年度目 | 4～5年度目 |
|-------------|-------|------|--------|----------|
| 加速器 | 機器製作 | | 据付け・調整 | |
| 基本建屋 | 造成・建設 | | | ファーストビーム |
| ビームライン | | 製作 | | |
| 研究準備 交流棟 | | | 建設 | |

注：2018年度は、官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の具体化等を推進するため、施設の調査及び汎用性の高い加速器技術開発を実施する。

8. おわりに

世界的に見て我が国の軟 X 線利用環境は立ち遅れている状況にあり、その早期整備が求められている。小委員会では、次世代の軟 X 線向け高輝度放射光源の整備やその利用に関する政策的な審議検討を重ね、結果、このように結論するに至った。そして、次世代放射光施設は、学術研究のみならず、産業利用ニーズが高いことがその特徴として挙げられ、新たな試みとして、官民地域パートナーシップで最先端の大型共用施設を整備することを提案している。今後、国において官民地域パートナーシップ具体化のため、パートナーを広く募集することになる、と考えられる。

また、次世代放射光施設の整備・運用に関して、小委員会としては、これまでの審議検討を通して、特に、以下のことを強調しておきたい。

- (1) 科学技術の進展は目覚ましいこと。放射光の研究、利用についても例外ではなく、整備した最先端のビームラインの計測・分析設備も 10 年経てば陳腐化していく、と言って過言ではない。次世代放射光施設が最先端の研究成果を持続的に創出し続けることができるよう、今後の科学技術の進展を見据えてビームラインの整備、改廃の全体方針を定期的に策定・改訂していくとともに、これを踏まえてビームラインの開発、高度化を国の整備・運用主体及びパートナーが協働して、計画的に行うことができる経営的基盤とマネジメント体制を整えていくことが重要である。
- (2) 産業利用ニーズが高い、という施設の特徴を最大限に活かすこと。民間企業の研究者、技術者等の利用ニーズを踏まえた柔軟かつ多様な支援サービスを提供するとともに、次世代放射光施設をプラットフォームとして、民間企業の抱える課題に対し、施設の持つ人材、ビームライン等のリソースを横断的に提供して「組織」対「組織」で共同研究を行うこと（ソリューション導出型共同研究）など、本格的産学連携を実践していくべきである。
- (3) 次世代放射光施設を中核にリサーチコンプレックスの形成を加速し、オープンイノベーションの推進を促すこと。次世代放射光施設は、材料科学、触媒化学、生命科学など幅広い科学技術分野の飛躍的発展の鍵を握る、重要な研究開発基盤である。これを拠点に、アクセス、インフラ等の利用者の利便性も相俟って、産・学・官・金が地域に更に集積し、研究開発、人材育成、事業化の好循環を生み出すイノベーション・エコシステムを構築していく。

現在、国の財政状況が極めて厳しい中、このような大型研究施設の整備を新たに行うことは非常に難しい。他方、我が国の研究力、競争力の低下又は停滞が指摘されているところ、次世代放射光施設は、産学の積極利用により、広範な科学技術分野の研究成果を最大化し、科学技術イノベーションの創出・加速に大きく貢献できる。国の研究力、競争力を向上させ、生産性を押し上げる、国の重要な研究開発基盤であり、これを整備する意義は大きい。このような認識のもと、次世代放射光施設の整備・運用にあたっては、オールジャパンでの協力体制のもと最先端の技術の粋を結集し、数十年後も世界の最先端の研究開発・人材育成の拠点であり続けられるよう、関係者は進取の気概をもって取り組んでもらいたい。

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会
量子科学技術委員会 量子ビーム利用推進小委員会
委員名簿

平成 30 年 1 月 18 日現在

(臨時委員)

- ◎ 雨宮 慶幸 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 物質系専攻 特任教授
尾嶋 正治 東京大学名誉教授、東京大学大学院 工学系研究科 特任研究員

(専門委員)

- 石坂 香子 東京大学大学院 工学系研究科 准教授
内海 涉 量子科学技術研究開発機構 高輝度放射光源推進準備室 室長
金子 美智代 トヨタ自動車株式会社 未来創生センター
T-フロンティア部 グローバル企画室 戦略企画グループ 主査
岸本 浩通 住友ゴム工業株式会社 研究開発本部 分析センター 課長
○ 小杉 信博 自然科学研究機構 分子科学研究所 教授
近藤 寛 慶應義塾大学 理工学部 教授
高橋 瑞稀 第一三共 RD ノバーレ株式会社 主任研究員
高原 淳 九州大学 先導物質化学研究所 主幹教授
田中 均 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
山田 和芳 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 所長

(◎：主査、○：主査代理、敬称略、五十音順)

量子ビーム利用推進小委員会における審議経過

【第1回】平成28年11月7日

1. 議事運営について
2. 量子ビーム利用に係る概況について
3. 量子ビーム利用推進小委員会における当面の調査検討について
4. 高輝度放射光源及びその利用に係るこれまでの検討について
5. その他

【第2回】平成28年11月29日

1. 科学技術政策を取り巻く概況について
2. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について

【第3回】平成28年12月15日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について

【第4回】平成29年1月24日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
2. これまでの議論について（軟X線向け高輝度放射光源に関する中間的整理（案））

【第5回】平成29年2月3日～7日（書面審議）

1. 高輝度放射光源とその利用に関する中間的整理（案）について

【第6回】平成29年4月11日

1. 議事運営について
2. 量子ビーム利用推進小委員会における調査検討について
3. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
4. その他

【第7回】平成29年5月18日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
（産業利用について、他の計測技術との比較について、国の主体について）
2. その他

【第8回】平成29年5月29日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
（国の主体について、高輝度放射光源に係る地域構想の調査について）
2. その他

【第9回】平成29年6月29日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
（高輝度放射光源に係る地域構想の調査について、計画案の検討にあたっての留意点について）
2. その他

【第10回】平成29年7月27日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
(整備運用計画案の骨子(案)について)
2. その他

【第11回】平成29年8月30日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
(ビームラインの整備・運用について)
2. その他

【第12回】平成29年9月25日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
2. その他

【第13回】平成29年10月18日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
2. その他

【第14回】平成30年1月18日

1. 軟X線向け高輝度放射光源やその利用について
2. その他

高輝度放射光源とその利用に係る
整備運用計画案

平成 29 年 12 月 22 日

国立研究開発法人
量子科学技術研究開発機構

目次

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 第1章 | はじめに | 1 |
| 第2章 | 基本方針 | 2 |
| 第3章 | 整備する主要施設 | 3 |
| 3.1 | 加速器 | 3 |
| 3.1.1 | ライナック（入射器） | |
| 3.1.2 | 蓄積リング | |
| 3.1.3 | ライナック - 蓄積リング輸送系 | |
| 3.1.4 | 制御・タイミング系 | |
| 3.1.5 | 放射線安全 | |
| 3.2 | ビームライン | 5 |
| 3.2.1 | 挿入光源 | |
| 3.2.2 | ビームライン | |
| 3.3 | 基本建屋 | 6 |
| 3.3.1 | ライナック棟 | |
| 3.3.2 | 蓄積リング棟 | |
| 3.3.3 | 付帯設備・ユーティリティ | |
| 3.4 | 研究準備交流棟 | 7 |
| 3.5 | 整備用地 | 7 |
| 3.5.1 | 敷地寸法 | |
| 3.5.2 | 地盤要件 | |
| 第4章 | 運用 | 9 |
| 4.1 | 運転時間 | 9 |
| 4.2 | ビームライン | 9 |
| 4.3 | 利用制度 | 10 |
| 4.4 | 人材育成 | 12 |
| 4.5 | 他施設及びユーザーコミュニティとの連携・ネットワーク | 12 |
| 第5章 | 官民地域パートナーシップ | 13 |
| 第6章 | 経費・スケジュール | 15 |
| 6.1 | 整備経費 | 15 |
| 6.2 | 運用経費 | 16 |
| 6.3 | 整備スケジュール | 16 |

第1章 はじめに

我が国で放射光の研究が開始されてから約半世紀が経過し、これまでに9つの放射光施設が整備されている。これらの放射光施設は、多数の研究者が利用する共用施設あるいは共同利用研究所として運用され、物質科学、生命科学、地球科学分野等の幅広い分野で数々の高インパクトな学術成果を生み出すとともに、創薬から新材料開発等の広範な産業利用や応用展開を通じて幅広く社会に還元され、様々な科学的・社会的課題の解決に資するイノベーションの源泉としての役割を果たしてきた。

海外においては、2000年代に数ナノメートルラジアン[nm・rad]級のエミッタンス性能を備えた軟X線向け高輝度光源が相次いで建設されたのに加え、2010年代には更なる低エミッタンス化を目指した光源が米国、台湾、スウェーデンで稼働開始しているなど、3GeV級の低エミッタンスリングの整備が進んでいる。これに対して、我が国には、軟X線領域に強みを持つ高輝度光源放射光施設が存在せず、この波長領域を重点的に利用する研究環境が大きく立ち遅れている状況にある。

このような国内外の状況等を背景として、科学技術・学術審議会量子ビーム利用推進小委員会（以下「審議会」という。）において、平成29年2月、科学的にも産業的にも利用価値の高い軟X線向け高輝度3GeV級放射光源の利用環境の整備を推進することが必要等とする中間的整理がまとめられた。また、審議会において、同年5月、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下「量研」という。）が計画案の検討を行う国の主体候補として適切であるとの見解がとりまとめられ、国から量研に対し、高輝度放射光源とその利用に係る整備運用計画案の検討を具体的に進めるよう依頼があった。

量研は、「量子科学技術による『調和ある多様性の創造』により、平和で心豊かな人類社会の発展に貢献する」との基本理念のもと、世界トップクラスの量子科学技術研究開発プラットフォームを構築することや産学官連携活動を推進しイノベーションハブとしての役割を担うこと等を重要な経営戦略に位置付けている。高輝度放射光源の整備運用を通じて、量研が、我が国の放射光科学、量子ビーム利用、科学技術・学術の幅広い分野にわたる共用、本格的な産学連携等に貢献すべく、審議会の中間的整理やこれまでの議論を踏まえ、国としての高輝度放射光源とその利用に係る整備運用計画案（グラウンドデザイン）をここに提案するものである。

第2章 基本方針

高輝度放射光源の整備・運用においては、以下を基本方針とする。

- 1) 先端性と安定性を兼ね備えたコンパクトな軟 X 線向け高輝度 3GeV 放射光源（以下「本光源」という。）を新たに整備し、放射光による世界レベルの最先端学術研究及び多彩な産業利用成果を創出することのできる、利用者視点に立ったフォトンサイエンス&テクノロジーの研究開発拠点を構築する。
- 2) 国内の他放射光施設との役割分担や相補性を考慮し、「軟 X 線利用研究」、「産業利用・産学連携の促進」、「汎用測定の高スループット化」などに重きを置いた整備運用を行う。
- 3) 「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」（平成 6 年法律第 78 号）（以下「共用促進法」という。）の枠組みに基づく科学技術・学術の幅広い分野にわたる共用を見越すが、これまでの制度の枠組みに必ずしもとらわれることなく、柔軟な発想や検討に基づく新しい放射光施設にふさわしい運用を目指す。
- 4) 放射光科学に係る人材が結集してオールジャパンで整備運用に当たることができるよう、これに係る計画案の検討を行う国の主体候補たる量研の強みや専門性を活かしつつ、関係機関の積極的な協力を仰ぎ、本光源計画を推進する。
- 5) 国だけでなく地域や産業界の活力を取り込み、官民地域パートナーシップにより整備運用を推進する。国の主体候補が示す本整備運用計画案は、その第一歩となるものであり、早期の段階から地域・民間のパートナーとの対話を通じて、産学官の人材、知、資金を結集させ、新たな産学共創の場として真に利用価値の高い施設を整備運用していくことが重要である。
- 6) 我が国の高輝度軟 X 線利用環境は立ち遅れており、本光源の早期整備が求められることから、速やかに官民地域パートナーシップによる計画成案を得て、整備に着手し、2020 年代初頭の運用開始を目指す。

第3章 整備する主要施設

3.1 加速器

フルエネルギー入射用線形加速器（ライナック）及び蓄積リングからなる 3GeV 電子加速器を整備する。我が国で培われた技術的な実績・経験に基づき、先端性と拡張性、定常運転時の安定性と実効性能を両立させるコンパクトな加速器とする。マルチベンドアクロマートラティスの採用による電子ビームの低エミッタンス化を図り、発生する放射光の高輝度化、高品質化を目指すとともに、コンパクト化することで整備費及び運用経費の抑制を図る。

主要パラメータ

| | |
|----------|----------------------------|
| 蓄積電流値 | 400～600mA |
| エミッタンス | 1nm・rad 前後 (0.9～1.1nm・rad) |
| 蓄積リング周長 | 350m 程度 |
| ビーム寿命 | 5～10 時間 |
| ラティス構造 | Quadruple-Bend Achromat |
| 蓄積リングセル数 | 16 |

3.1.1 ライナック（入射器）

蓄積リングへの入射器としては長期コストメリット等を考慮して、ライナックを選択する。ライナックは電子銃、バンチャー、バンチ圧縮器、主加速部で構成する。

電子銃は電子ビーム性能と機器の安定度、メンテナンス性を考慮して選定する。バンチャー部はシンプルで半導体増幅器が適用でき、将来の性能向上の余地のあるシステム構成とする。バンチャーの後に磁気シケインを用いたバンチ圧縮器でバンチ長を 1ps 程度まで圧縮し、後段の C バンド加速器の加速バケットで電子ビームを捕捉可能にする。主加速部には C バンドを選択し、高電界加速によりライナック全長を短くして建屋建設費を抑制するとともに、省電力なシステムの構築を目指す。

3.1.2 蓄積リング

低エミッタンス化とコンパクト化の両立を図るために、蓄積リングのラティスには Quadruple-Bend Achromat を採用する。ユニットセル間に 5m 程度の長直線部を設け、アンジュレータやビーム入射システム、高周波加速空洞などを設置する。ユニットセル内の短直線部についても挿入光源やビーム診断などへの利用を検討する。

a) 磁石システム

電磁石システムの詳細設計においては、要求される磁場性能とアライメント精度を満たした上で、初期コスト、維持コストを極力抑制することを方針とする。また、磁石間や他機器との空間干渉、コミッショニングシナリオを考慮して設計する。

b) 真空システム

真空システムは、設計蓄積電流において要求される真空性能を、限られたスペース的制約の下で確保できるように検討する。挿入光源の設置や大気開放を伴う定型作業の作業性と保守性を考慮する。

c) 高周波加速システム

放射光発生によって生じるビームエネルギー損失（放射損失）を補充して安定周回を保障するとともに、十分な加速電圧によりビーム寿命を確保するため、500MHz 帯の高周波加速技術を用いて高い安定性と電力効率を有する加速システムを構築する。

d) ビーム診断系

高品質放射光ビームの安定した利用運転を実現するために、電子ビームの状態を測定し制御するためのビーム診断系を構築する。

3.1.3 ライナック - 蓄積リング輸送系

ライナックからの低エミッタンス電子ビームは、蓄積リングの挿入光源設置用長直線部に入射される。実験ユーザーに入射時のビーム変動が影響を与えないこと、またビームコミッショニングの方法等を考慮して入射システムを検討する。

3.1.4 制御・タイミング系

運転制御用ソフトウェアは、高い信頼性と柔軟性、移植性に配慮して製作する。運転の安定性や各機器状態の再現性を十分確保した上で、Web サービスなどのネットワーク利用と連携したデータ処理、ビームラインや実験ステーションの遠隔操作や自動化・ロボット化など、高度な利用方法への適用を目指す。

ネットワークは制御系ネットワーク及び実験系ネットワークで構成し、他のネットワークからファイアウォールによって切り離された独立したネットワークとして構築する。各ネットワークは十分な安定性と高速性を確保するとともに、将来の利用実験の高度化に対応できる拡張性を考慮した構成とする。

3.1.5 放射線安全

放射線障害防止法に定められている管理区域内の人が常時立ち入る場所における実効線量限度に対して、本施設として適切な基準値を検討し設定する。遮蔽計算には既存の放射光施設の評価に用いられた実績ある計算手法を用いる。

3.2 ビームライン

3.2.1 挿入光源

本施設では挿入光源からのビーム利用を基本とし、軟 X 線領域（200eV～5keV）において高い輝度（ 10^{21} photons/s/mrad²/mm²/0.1%bw）が得られることを特長とする。なお、よりエネルギーの高い X 線領域（5～20keV 程度）もカバーできるよう、必要とする波長領域や偏光特性等に最適化したアンジュレータまたはウィグラーを採用する。

長直線部に設置する挿入光源は原則として真空封止アンジュレータとする。短直線部は白色光源、またはアンジュレータでは十分な強度が供給できない高エネルギー領域の光源用として利用する。

3.2.2 ビームライン

ビームラインは施設全体で最終的に 25 本程度を整備できるものとする。各ビームラインにおいては、実験ステーションを複数設置することも検討する。運用当初の段階において、利用ニーズに配慮した 10 本程度のビームライン整備を目指し、実験需要に対応できるビームタイムを確保する。標準的なビームラインは、フロントエンド（光源からの放射光を実験ホールへと導くために蓄積リング収納部内に設置される部分）、光学ハッチ（光学機器や輸送系機器、及びそれらを収納する遮蔽ハッチ）、実験ステーションから構成される。機器調整や試料交換、データ解析等において、AI やロボティクス等の最先端技術を積極的に取り入れ、利用者にとって使い勝手の良い利用環境が構築できる拡張性を持ったビームラインとすることを目指す。

どのようなビームラインを整備するかについては、今後、アカデミアや産業界から幅広く意見を聴取し、民・地域のパートナーとも十分な協議を行った上で、決定していくものとするが、本光源の特長や産業利用ニーズなどから、運用当初段階に整備するビームラインとして、以下のようなものが候補として考えられる。

- ・ 共鳴非弾性 X 線散乱ビームライン
- ・ 光電子分光ビームライン
- ・ X 線磁気円二色性分光ビームライン
- ・ コヒーレント回折イメージングビームライン
- ・ X 線吸収微細構造ビームライン
- ・ X 線小角散乱ビームライン

- ・ ナノビーム X 線分光ビームライン
- ・ タンパク質結晶構造解析ビームライン
- ・ 粉末 X 線回折ビームライン など

3.3 基本建屋

ライナック、蓄積リング、ビームライン及び実験ホール、制御用スペース、測定準備室等を収容する基本建屋。

3.3.1 ライナック棟

ライナック棟には線形加速器、蓄積リングへのビーム輸送系、電子ビームを廃棄するビームダンプ部を設置する。また、軟 X 線波長領域の自由電子レーザー (FEL) の設置など将来の拡張性も考慮した設計とする。電子ビームは蓄積リング内側から入射する。線形加速器からの入射ビームを蓄積リング実験ホールの地下を通すか、地上を斜めに通すかは、ビームライン利用可能本数と施設の建設コストの両面から検討する。線形加速器等の主要設備は、遮蔽体で構成する加速器トンネル内に収納する。

3.3.2 蓄積リング棟

蓄積リング棟の内部には遮蔽壁で囲まれたリングトンネルを設ける。遮蔽壁の材料と厚さは、遮蔽計算を行なって決定する。リングトンネル内周側には各種電源室と搬入組立室、各種診断・真空制御機器を設置する。

リングトンネル外周側には、ビームライン及び実験ステーションを設置し、放射光利用実験を行なうための実験ホールを設ける。実験ホールは、実験装置・機器を柔軟に入れ替えられるなど利用者の利便性を重視し、オープンスペースで十分な広さを確保する。

実験ホール外周側には、インハウススタッフのための居室、測定準備室、共通実験室などの部屋を設ける。

リングトンネル内部、リングトンネル内周側、実験ホールは機器の搬出入・移動に配慮し、必要なクレーン等の移動用設備を整備する。また、十分な幅の保守通路を設ける。

3.3.3 付帯設備・ユーティリティ

施設の運転に必要な受電用機器及び空調・冷却水用ポンプや冷凍機等設備は、機器の保守性の確保と、電子及び X 線ビームに対する振動の影響を極力低減することを考慮して整備する。加速器機器及びビームライン機器に対する電力供給は、適切に配置した分電盤から行う。またゲートバルブ等の駆動のための圧縮空気を供給する空気圧システムを整備する。なお、施設への電源供給において特高変電所等の設置が必要な場合はその整備も行う。

3.4 研究準備交流棟

研究準備交流棟は来訪する研究者の実験準備・実験検証や異分野を含む産学の交流・融合促進等の場となるとともに、国際的な来訪者も迎え、共創空間を提供する「施設の顔」となることを目標に、適切なブランディングデザインをもって整備する。

研究準備交流棟内部には、ユーザズオフィス、利用者用の居室や会議室などを整備する。また、十分な調査の上で必要な実験室の整備を検討する。食堂や売店の設置など将来の拡張性についても検討する。

3.5 整備用地

整備用地は、高輝度放射光源施設を確実に支持し十分な耐震性を確保できる安定した地盤であり、加速器の安定運転に影響する周辺環境からの震動やノイズなどが十分に小さく、施設整備に必要な面積を確保できることが必須である。また、本光源は広範な分野の学術研究や産業利用が見込まれることから、アクセスや宿泊インフラなど利用者の利便性が高く、周辺の産学集積や産学連携の発展可能性など「産学共創の拠点」となりうる場所であることが重要である。

必要とされる具体的な敷地寸法及び地盤要件は、以下の通りである。

3.5.1 敷地寸法

想定される基本建屋概略寸法は約 250m×175m である。これに、研究準備交流棟、管理用道路、駐車場等を配置することを考慮し、総敷地寸法として、約 300m×200m (60,000m²) の平坦な用地を確保できること。また、敷地周囲には適度な緩衝域があることが望まれる。

3.5.2 地盤要件

a) 地盤の安定性

自然堆積の地層は水平成層であること。地震による液状化の可能性が十分低く、立地内に活断層がないこと。

b) 地盤の支持力

直接基礎又は杭基礎により地上構造物を支持することを想定している。このため、浅層部（概ね地表から 30m 以浅）に N 値 30 以上の支持層となる地盤があること。

c) 常時微動の振幅

加速器本体及び計測機器への環境振動影響回避の観点から、敷地近傍の交通を制限できない道路等からの振動を含め、地表での常時微振動レベルは、1Hz 以上の高周波数域におけるパワースペクトル密度で $10^{-5} \mu \text{m}^2/\text{Hz}$ 程度以下であること。

第4章 運用

本光源は、世界レベルの最先端学術研究や多彩な産業利用による質の高い成果の創出を目的としたフォトンサイエンス&テクノロジーの研究開発拠点であり、幅広い分野の研究者に広く門戸を開いた国際的な共用施設であるとともに、新たな産学共創の場としての役割を担うものである。研究者・技術者の自由な発想と意欲に基づく真理の探究と社会のニーズに基づく課題解決の双方の要請に的確に応えることができるよう、産官学からの人材、知、資金や整備された設備及びビームタイム等の資源を最大限有効活用して、利用者視点に立った新しい放射光施設にふさわしい運用を目指す。

なお運用にあたっては、国の主体と地域・民間のパートナー機関とで詳細な協議を行い、密接な連携のもとで、これを進めていくものとする。

4.1 運転時間

学術研究、産業利用とも大きな需要があることから、利用者に対してできるだけ長時間のビームタイムを供給することが重要である。運用経費の極小化をはかりつつ、安定的に世界の放射光施設の標準である年間 6,000 時間を超える加速器の運転時間を確保することを目指す。また、年間を通じて国内の放射光施設がすべて停止している期間を可能なかぎり生じさせないように、他の大型放射光施設の停止期間を考慮した運転スケジュールを検討する。

4.2 ビームライン

国内の他放射光施設との役割分担や相補性を鑑み、本高輝度放射光源においては「軟X線利用研究の促進」、「産業利用の拡大」、「汎用測定の高スループット化」などに重きをおいたビームライン整備を優先させるのが適切であると考えられる。

運用当初段階に整備するビームラインとして、共用促進法の枠組みに基づき国の主体が設置するものと地域・民間のパートナー機関が設置するものが先行することを想定しているが、将来的にはその他に、大学・大学共同利用機関法人や研究開発法人が設置するもの、民間企業が設置するものなど、多種類のビームラインが整備されることが予想される。これらについては、既存放射光施設における先行事例の経験を活かした上で、大学等の学術コミュニティ及び産業界での今後の検討進捗に期待する。

ビームラインの整備にあたっては、施設全体を俯瞰し、学術研究にも産業利用的にも効果的でバランスのとれた形にすることが極めて重要であり、上記のビームライン種類をまたいだポートフォリオを構築する必要がある。また、科学技術の急速な進歩や利用ニーズの変化に対応するため、評価に基づいたビームラインの適切かつ迅速な改廃（スクラップアンドビルド）を円滑に行えることが必要である。そのために、設置者の別やビームライン種類を問わず、整備・運用・評価・改廃などに関する多くの部分を、施設

全体で一元的に管理できる仕組みを検討する。

4.3 利用制度

本高輝度放射光源は、共用促進法の適用を受ける施設となることを想定するが、その運営にあたっては、従来の放射光施設の経験や実態を踏まえて、さらに進化したものが求められる。特に、産学連携・産業利用を大きく促進するためには、そのニーズをくみ取った新しい利用制度や支援体制を構築する必要がある。以下に、検討すべき主なものを列記する。

a) ビームライン横断的な共用ビームタイム制度の導入

これまでの放射光施設においては、原則的に国が設置する共用ビームラインと国以外の者が設置する専用ビームラインで縦割りの運営がなされてきたが、これを見直し、国以外の者が設置するビームラインにも共用ビームタイム枠を設ける「ビームタイム制度」を導入する。これにより、種々のビームラインの共用枠を一元的に管理し、利用申請、課題審査、支援などを統合的に実施する。また、ひとつの課題で複数のビームラインを横断的に利用する制度を設けることも検討する。

b) 課題審査、成果公開/占有ルールの見直し

学術研究においては、公正な課題審査プロセスを経た課題採択ならびに成果の公開を原則とし、質の高い成果創出のため、メリハリある採択・ビームタイム配分ならびに新しいサイエンスの掘り起しを行う。

一方、産業利用においては、製品開発における時間スケールや知財保護の観点から、学術研究とは全く異なった制度の導入が必要である。課題審査の大幅な簡略化、迅速かつ柔軟なビームタイム配分、原則成果占有ルールなど、産業利用・産学連携を大きく促進するための新しい制度を構築する。

c) 産業利用・産学連携の促進に向けた取り組み

産業利用や産学連携を大きく促進するため、以下のような支援制度や産学共創スキームを構築する。これらにより産業界と大学・研究機関の研究者、施設運営主体が協働して、出口イメージを共有した「課題解決型」の産学連携研究開発の推進をはかる。

① 産業利用支援制度の充実

製品開発等を行う企業が、ビームラインや測定手法の選定、課題解決のためのアプローチ等について、適切に助言・相談を受けられるよう、専門知識を有するコンシェルジュやコーディネーター等を配備する。また、個別企業の求めに応じて、大学等の研究パ

ートナーを紹介するマッチングサポートを組織的に実施する。さらに、企業の研究者が直接現地に来ることなく、試料を送付してデータを受け取る測定代行制度（メールインサービス）を本格的に導入する。

② 知財管理の徹底、データベース・ネットワーク等利用環境の整備

企業が安心して利用研究を実施できるよう、知財や機密情報の管理を徹底するとともに、高スループットデータを取り扱える解析装置やデータベースの配備、学術情報ネットワーク等の各種利用環境の整備を行う。

③ 本格的産学共創による「課題解決型」の共同研究制度の構築

単なるチーム利用にとどまらず、個別企業と本光源運営主体が「組織」対「組織」の共同研究契約（アライアンス）を結び、重要課題の解決に向けて、大学等の研究者も加わって一体となって協働することができる本格的な産学共創スキームの構築を目指す。そこでは、協調領域と競争領域の区分や成果・知財の取扱い等に関する十分な配慮のもと、チームタイムの優先的確保やインハウススタッフとの共同研究のみならず、実験室や企業研究者の常駐スペースの提供など研究開発に必要な支援を組織的に行うとともに、クロスアポイントメントなどによる積極的な人事交流も視野に入れる。

④ ベンチャー企業など新たな利用者の開拓

創薬や新規材料などに関する有望なベンチャー企業や、将来性ある研究テーマを有する中小企業等に対して、トライアルユースによる利用料金の減免優遇措置を設けることで、放射光を利用する企業の新規開拓をはかる。

なお、現在、国において研究開発力強化の観点から、大学・研究開発法人におけるベンチャー企業からの新株予約権の取得方法の拡充について検討が進められており、その動向を踏まえて、当該企業からの株式や新株予約権の寄附等を受けることを検討する。

d) 利用料金の考え方

学術研究に関しては、成果公開での利用の場合は、原則としてチーム利用に係る利用料金は無料とし（消耗品相当分は別途徴収）、成果専有での利用の場合は、「運営費回収方式」に基づく利用料金を徴収する。また、成果公開での利用であっても、プロジェクト等により長期間のマシンタイムを優先的に使用する場合や、利用時期を限定して利用する場合には、応分の負担を求める。

一方、産業利用に関しては、「運営費回収方式」に基づくチーム利用料金を徴収することを原則とする。さらに、実験準備やデータ解析・解釈など、チームタイム以外における手厚い支援に対しては、別途利用者に応分の費用負担を求める。また、ベンチャー

企業など新規利用者のトライアルユースの利用に対しては、利用料金の減免措置を講ずる。

測定代行（メールインサービス）については、試料や測定内容、件数等に応じて、スタッフ人件費等を加味した料金設定を行う。

また、本格的産学共創を目指して個別企業と本光源運営主体が「組織」対「組織」の共同研究契約を締結するにあたっては、国の定める「産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン（平成28年11月30日）」等にもとづき、スタッフの人件費や設備費、消耗品費などの直接経費に加えて、今後の産学連携活動の発展に向けた将来への投資となる「戦略的産学連携経費（仮称）」等も必要な経費として計上し、企業側に対して応分の負担を求めることも検討する。

これらにより得られた利用料収入については、ビームラインの高度化や新たな研究開発のための装置設備、利用者支援の充実等に充てることで、新たな研究開発や更なる産学連携を促進し、利用料収入の更なる増加につながる正のスパイラルを構築することを目指す。

4.4 人材育成

放射光施設は、次の世代の放射光科学を先導する研究者・技術者の人材育成の場としての役割も期待されている。ビームラインの開発において、初期の段階から若手研究者や学生がかかわれるようにするとともに、大学・大学共同利用機関法人が設置するビームラインを中心に、一定のビームタイムを確保することにより若手研究者や学生が自ら試行錯誤を行える場を設けることなども検討する。

4.5 他施設及びユーザーコミュニティとの連携・ネットワーク

本施設が稼働することにより、国内に低エネルギー紫外線から高エネルギーX線までの高輝度放射光をシームレスに利用できる環境が整う。他の放射光施設及び中性子・高強度レーザー等の量子ビーム施設との強い連携・ネットワークを構築し、施設の役割分担や相補性を明示するとともに、利用者の利便性の向上や人材の流動性を図る。

また、アカデミアや産業界のユーザーコミュニティから幅広く意見を聴取する仕組みを構築し、それらを施設の整備や運営に適切に反映させる。

第5章 官民地域パートナーシップ

本計画は、整備・運用を通じて官民地域が対等な立場で協力関係を構築して事業を遂行していく「官民地域パートナーシップ」により推進することが肝要であり、施設の計画段階から官民地域による積極的な協力が求められることになる。

この場合、官（国）の主体に対応して、民・地域における協力の中核となる機関（パートナー機関）を指定し、当該機関が、地方自治体、産業界及び地域学術機関との連携協力におけるハブ機能を有し、国（の主体）と地域・民間との連絡窓口となることが求められる。

なお、官民地域における協力の範囲については、今後の国の主体と地域・民間との協議により、その具体的詳細が構築されていくものと想定されるが、現時点での基本的な整備役割分担を以下のとおり提案する。

a) 加速器（ライナック及び蓄積リング）

我が国が強みとする放射光科学の粋を結集した設備であり、技術的に安定した整備運用が肝要となることから、他の共用施設と同様、国が整備及び運用を担うことが適切であり、国の主体が国の財源を要求し、整備する。

b) 基本建屋

パートナー機関が国の主体以外の財源で整備費を用意し整備を行う。建屋の運用については、将来の具体的な官民地域の協議に基づき役割を整理することが想定される。

c) ビームライン

運用当初段階の整備を目指すビームライン（10本程度）については、国の主体が国の財源により整備するものと、パートナー機関が財源を用意して整備するものの両方が考えられる。パートナー機関が利用料収入を見越して積極的にビームラインの運用に関わるものについては、パートナー機関においてビームライン（挿入光源を含む）整備に関わる財源を負担する。ビームラインの整備運用を担う主体ならびに財源負担の役割分担については、今後、国の主体がパートナー機関と協議し、整理することが想定される。

大学、大学共同利用機関法人、研究開発法人、及び民間企業が整備するビームラインについては、設置者が整備費を負担し整備を行う。

d) 研究準備交流棟

本光源の周辺環境との接続も含めた整備が重要と考えられることから、パートナー機関が国の主体以外の財源で整備費を用意し整備を行う。

e) 整備用地

整備用地については、他の共用施設と同様、パートナー機関において整備用地の確保ならびに造成を行う。3.5に記述した整備用地に係る事項については、専門家による考慮・評価を経ることが望ましい。

官民地域パートナーシップが有効に機能するためには、官・民・地域の間で位相が整った推進体制が確立されることが不可欠であり、分担された役割を同時並行的に進めることが可能となる仕組みを作り、計画遂行に遅滞が生じないようにすべきである。

第6章 経費・スケジュール

6.1 整備経費

施設・設備の整備に必要な経費について、現時点における試算結果を以下に示す。今後の詳細な検討や、パートナー決定後に建設地を含めて検討が行われる中で増減があり得る。

概算総額：約 340 億円程度（用地及び造成に係る経費は別途）

想定される国の分担： 約 190 億円～約 200 億円程度

想定されるパートナーの分担： 約 135 億円～約 150 億円程度

+ 用地取得・土地造成費

| 項目 | 内訳 | 内訳の試算額 | 内訳の合計 | 役割分担（想定） |
|---------|---------|--------------|----------|---------------|
| 加速器 | ライナック | 約 60 億円 | 約 170 億円 | 国 |
| | 蓄積リング | 約 85 億円 | | |
| | 輸送系 | 約 5 億円 | | |
| | 制御・安全 | 約 20 億円 | | |
| 基本建屋 | 建物・附帯設備 | 約 80～85 億円 | | パートナー |
| ビームライン | 当初 10 本 | 約 60 億円 | | 国 及び パートナーが分担 |
| 研究準備交流棟 | 建物・附帯設備 | 約 25 億円 | | パートナー |
| 整備用地 | 用地取得・造成 | 整備用地状況により異なる | | パートナー |

その他建設期間の業務実施費（建設工程の管理、事務管理費等）として 2 億円/年 程度が必要。

6.2 運用経費

ビームライン 10 本の稼働を想定した年間の総運用経費について、現時点での試算結果を以下に示す。パートナーとの経費分担については、ビームタイム配分や成果占有利用割合などを考慮の上、協議するものとする。

| 項目 | 内訳 | 内訳の試算額 | 内訳の合計 |
|----------------|------------------------|-----------|-----------|
| 加速器運転管理 | 運転経費（人件費含む） | 約 14 億円/年 | 約 19 億円/年 |
| | 光熱水費 | 約 5 億円/年 | |
| ビームライン 維持管理 | 人件費 | 約 1 億円/年 | 約 5 億円/年 |
| | 保守管理費 | 約 4 億円/年 | |
| ビームライン 利用支援 | 利用者選定・ 支援業務費（人件費含む） | 約 3 億円/年 | |
| その他 | 事務運営管理費等 | 約 2 億円/年 | |
| 合計 | | 約 29 億円/年 | |

6.3 整備スケジュール

整備着手の予算が計上された年度を初年度とした場合に想定されるスケジュールは以下の通り。

| | 初年度 | 2 年度目 | 3 年度目 | 4～5 年度目 |
|-------------|-------|-------|--------|----------|
| 加速器 | 機器製作 | | 据付け・調整 | |
| 基本建屋 | 造成・建設 | | | ファーストビーム |
| ビームライン | 製作 | | | |
| 研究準備 交流棟 | | | 建設 | |

注：2018 年度は、官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の具体化等を推進するため、施設の調査及び汎用性の高い加速器技術開発を実施する。