

ビームライン構想委員会
報告書
(初期ビームライン答申)

2018年8月

ビームライン構想委員会

目次

第1章	はじめに	1
第2章	ビームライン構想検討の資料とその分析	2
第3章	Ready to Use コンセプト	4
第4章	技術的課題の検討	6
第5章	初期ビームラインポートフォリオ	9
第6章	建設チームのあり方	17
第7章	ビームライン構想のまとめ	18

資料 1：委員名簿

資料 2：コウリションコンセプトに整合したビームラインイメージ

資料 3-1：軟X線向け高輝度3GeV級放射光源が得意とするエネルギー領域

資料 3-2：量子ビーム利用推進小委員会によるビームライン候補リスト

資料 4：デザインコンペで答申されたエンドステーション図

資料 5：ビームライン構想に関するアンケートまとめ

資料 6-1：Ready-to-Use コンセプトによる光学系の考え方

資料 6-2：Ready-to-Use コンセプトによるエンドステーションの考え方

資料 7：RtU コンセプトで整理したエンドステーション

資料 8：ハイスループット自動計測・解析の課題

資料 9：初期ビームラインポートフォリオ案仕様

第1章 はじめに

本ビームライン構想委員会（以下、本委員会という）は、一般財団法人光科学イノベーションセンター（以下、財団という）がパートナーとして建設を目指している次世代放射光施設（以下、本施設という）において、運用開始時に用意すべき初期ビームラインを構想することを目的に、財団理事の諮問機関として組織されたものである。財団が提案者の代表として応募した「次世代放射光施設（軟 X 線向け高輝度 3GeV 級放射光源）官民地域パートナーシップ具体化のためのパートナー募集」においては、整備すべきビームラインは当初 10 本（提案者最大 7 本）とされており、本委員会では、提案者分の最大 7 本を構想し、答申するものである。ただし、施設全体の一元的な運営や将来の活用を考えた場合、国側の主体である量子科学技術研究開発機構（以下、量研という）が整備する残り 3 本に関しても、提案者分 7 本と整合するかたちでその構想を行うべきである。本委員会では、提案者分 7 本の答申がミッションであるが、それらと合わせて施設全体として研究の質を高めるために、国側 3 本も加えた運用開始時に用意すべき 10 本のビームラインの構想を行った。本委員会の委員構成を資料 1 に示す。本委員会は、個別出資を行う参画企業を代表する委員と学術アドバイザーから構成され、産業界からの要望を最大限取り込むとともに、コウリシヨンのユーザー、学術パートナー、ビームラインの専門家のそれぞれの視点からビームラインの検討を行ったものである。

次世代放射光施設においては、輝度やコヒーレンスの向上など光の質的な向上は当然のことであるが、それをユーザーの利用できる形に届けるビームライン、エンドステーションも、従来の考え方を捨てて、次世代にふさわしいものでなければならない。放射光施設を運営する上で潜在的な問題の一つは、利用できるビームポートの数に限りがあることである。そのため、利用者グループが個々にビームラインの仕様や建設を考える既存の枠組みでは、建設時には各グループが自分たちのポートを確保することに労力を費やすとともに、その後も継続的にポートを死守しようとする悪習を生んできた。その結果、各ビームラインが閉じた利用者グループに占有されて「たこつぼ化」し、機器の更新や新しい利用者の参入の障壁となる事例がしばしば見られた。また、このような方式でビームラインが建設された旧来の施設では、運転開始後もビームラインが縦割りで管理されることになり、異なるビームラインに類似の装置が導入されたり、異なるビームラインで並行して同種の手法開発や機器整備が行われたりするなど、運用の効率化や限られた人的資源の配分の点からも問題が生じている。そのために、建設されたビームラインは一般のユーザーが真に必要とするものとはならず、施設全体で見た場合も、非効率な整備・運用が行われていると言わざるを得ない。同様の非効率性は、学術専用ビームライン、産業利用ビームライン、特定機関の専用ビーム

ラインなど、ビームラインごとに性格付けを行い、それぞれを異なる方式で運営する場合にも散見される。次世代放射光施設のビームラインは、小さな利用者グループに支配されることなく、広く多くのユーザーが真に求めるものとなるように、施設全体として構想し、効率的に建設、管理、運用されなければならない。

本委員会では、第一に、施設全体としての明確なビームラインポートフォリオを作成し、建設から利用フェーズに至るまで、ポートフォリオに基づいて一元的にビームライン群の運営を推進できる体制の構築を提言する。単に利用者の声を集めるだけでなく、施設者がそこから最適なポートフォリオを組み上げてビームラインを一元的に管理することで、「ビームポートを確保する」という不毛な労力から利用者を解放し、学术界から産業界までの幅広い需要に応えるとともに、遅滞なく新たな研究手法を導入して最先端の研究環境を維持し続けることが可能となる。

以下、本答申の構成を述べる。本委員会では、従来のビームライン建設、運用の問題点を考慮しつつ、ビームラインの検討を行った。次世代放射光施設のビームラインに関してこれまでに他所で行われた議論と企業メンバーに対して行ったアンケート結果の検討結果を第2章で述べる。その結果を受けて、第3章では、新しく施設全体でビームラインを効率的に建設運用する仕組み Ready-to-Use (RtU) コンセプトを提案する。第4章では、RtU コンセプトに整合するビームラインを実現するための技術課題を検討した結果を述べる。第5章で、本委員会での検討の結果まとめられた、本施設として運用開始初期に揃えるべき10本のビームラインのポートフォリオを示す。第6章では、縦割りではない建設チームのあり方について述べ、最後に、第7章で本委員会でのビームライン構想をまとめる。

第2章 ビームライン構想検討の資料とその分析

本委員会では、「産学連携スキームであるコウリションコンセプトを実現する」ことを目指し、産業界、学术界が広く次世代の活用ができるビームライン、エンドステーションを揃えるという視点で検討を行った。はじめに、本委員会以前に検討されたものを含む以下の資料を参考にし、分析を行った。

【コウリションコンセプトに整合したビームラインイメージ】(資料2)

財団により提示された、コウリションコンセプトに整合するビームラインの基本コンセプトでは、高レベルな計測をハイスループットで行う「高度自動化計測ステーション」と、プラグインによるカスタムメイド機器の受け入れに対応した先端的計測を行う「先端計測

ステーション」の 2 種類のエンドステーションをバランス良く配備することで、コウリションによる産学連携を強力に進めるイメージが描かれている。

【軟 X 線向け高輝度 3GeV 級放射光源が得意とするエネルギー領域】（資料 3-1）

文部科学省の量子ビーム利用推進小委員会において、高輝度放射光源とその利用に関する報告がなされ、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 3 GeV 級放射光源の必要性が示されている。その施設が得意とすべきエネルギー領域を示したのが、資料 3-1 である。資料に示されているように、軟 X 線向け高輝度放射光源の得意な領域は、約 0.1 ～数 10keV のいわゆる軟 X 線から、硬 X 線の低エネルギー側を含む、テnder-X 線に渡る領域である。

【量子ビーム小委員会によるビームライン候補】（資料 3-2）

文部科学省の量子ビーム利用推進小委員会において備えるべきビームラインに関する議論が行われており、2018 年 1 月 18 日の報告に添付された「量子科学技術研究開発機構による高輝度放射光源とその利用に係る整備運用計画案」には運用当初段階で整備する 9 種類のビームライン候補が記されている。

【デザインコンペで答申されたエンドステーション】（資料 4）

東北大学東北放射光施設推進会議専門委員会が 2016 年 7 月から 1 年間かけて行った「東北放射光施設計画（SLIT-J）エンドステーション・デザインコンペ」では、外部委員会により運用当初段階で整備するものとして 13 種類のエンドステーション候補が答申されている。

【ビームライン構想に関するアンケートまとめ】（資料 5）

ビームライン構想にコウリションメンバーの意見を取り入れるために、2018 年 5 月 18 日を締め切りとして、コウリションに参加を表明している企業メンバーに対し、ビームライン構想に関するアンケートを行った。アンケートの設問内容と、回答結果をまとめたものを資料 5 に示す。

本委員会は、財団によって提案されたコウリションコンセプトによる産学連携スキームを、次世代の放射光活用の姿として高く評価する。その上で、コウリションコンセプトを実現するために相応しいビームラインを、手法、性能、使いやすさなどを吟味して検討を行った。

大前提として、軟 X 線向け高輝度 3 GeV 級放射光源の得意とするエネルギー領域、すなわち軟 X 線から、硬 X 線の低エネルギー側を含むテnder-X 線領域を最大限活用できるビームラインを検討する事が本委員会での検討の基本となる。

量子ビーム小委員会のビームライン候補とデザインコンペで答申されたビームラインは、

従来の放射光施設に存在するビームラインの発展形となっており、既存の放射光ユーザーが期待するリストとなっている。したがって、そのレポートは参考にはなるものの、新しい産学連携スキームにマッチさせるためには、新しく光学系、手法なども含めたビームライン構想を検討する必要がある。

コウリションメンバーに向けて行われたビームライン構想に関するアンケートの結果には、「研究、開発、生産、量産、品質管理の各フェーズにバランス良く対応するビームライン構成」、「日本の産業ニーズに応えうる構成」への希望など、これまでと異なった考え方で構想が必要であることが示された。より具体的には「ニーズの高いビームラインの複数建設」、「測定から解析分析までも含めた構想」、「データの視覚化」、高度自動化によるクオリティーと効率の向上」への要望が示された。

以上の資料から、ビームラインごとに建設を考える既存の枠組みを超えて次世代のビームライン構想を検討しなければならないことは明らかである。

第3章 Ready to Use コンセプト

第1章でも述べたように、利用者グループが個々にビームラインの仕様や建設を考える既存の枠組みでは、運用の効率化や限られた人的資源の配分の点において問題が生じることとなる。施設としての明確なビジョンを持って、ビームライン群、エンドステーション群を総合的に設計・建設する仕組みが必要である。また、建設だけでなく、管理や運営に関しても一元的に行う必要がある。今日の放射光科学においては、一つの研究課題に対して、異なる手法・異なるビームラインを複合的に使用することにより、多角的な視点から研究を進めることが常識となりつつある。この傾向は次世代放射光施設でもますます加速することが予想される。一元的なビームラインの建設・管理は、試料環境・機器の制御通信・データストレージなどの研究基盤を統一し、高い利便性を確保するためにも重要である。さらに、このようなビームライン運営は、多様な手法で個々の課題をより深く研究できる環境を提供できるだけでなく、ビームライン設置者間に存在する波長や分析手法などに関する垣根を取り払い、異なる専門性や技術をもつ利用者間の交流を活発化し、イノベーションを生み出す土壌を育むことも期待される。また、放射光施設がタイミングを逃さずに「スクラップアンドビルド」を実行するための施策も、本施設の運営システムにビルドインすることが必要である。時々刻々と変化する利用者のニーズに遅滞なく追従し、常に最先端の研究環境を提供するためには、常に最新のビームラインポートフォリオを持つと同時に、それを速やかに実行に移せるビームラインの運営システムが必要である。

このような新しい放射光施設を実現する方法として、本委員会は、ビームラインを構成要素ごとに分割して規格化を行い、施設全体のビームラインを共通仕様の構成要素の組み合わせで運用する Ready-to-Use (RtU) コンセプトによるビームライン建設を提案する。RtU コンセプトは、学术界から産業界に至る幅広い利用者からの高い要求に応えるとともに、上述した既存の放射光施設が抱えてきた問題を解決する手段として導き出されたものである。

【RtU 光学系】(資料 6-1)

いわゆるビームラインは、光源側の光学系と、各種計測を行うエンドステーションからなる。RtU 光学系では、資料 6-1 に示すように、光学系を挿入光源、分岐、分光器、偏光素子、集光光学系の要素に分解し、それぞれの要素から最適のものを選択することで、様々なエンドステーションに最適な光学系を構築する。要素の組み合わせで速やかに最適なものが用意できるという意味の Ready-to-Use である。

個別に建設された従来型の光学系と比較すると、RtU 光学系は、要素技術の共通化によって施設全体の光学系がシンプルになり、高品質化やコストカットが期待できる。また、将来的に要素技術がアップグレードした場合に、一つの要素の入れ替えのみで施設全体のビームラインに対応できる。さらに、共通化によりメンテナンス性も向上する。これらのメリットを考慮し、本委員会として RtU 光学系を強く推奨する。

【RtU エンドステーション】(資料 6-2)

エンドステーションに関しても、それらを構成する計測手法を要素ごとにまとめて整理する RtU エンドステーションの考え方を提案する。RtU エンドステーションでは、資料 6-2 に示すように計測手法を回折/散乱、イメージング、分光に分け、試料、環境/条件も含めてマトリックス状に整理して、それらから必要な要素の魅力的な組み合わせを選択することによりエンドステーションを構成する。このように整理することで、様々な分野の様々なユーザーが必要な計測手法の組み合わせを考えることができる。

【RtU プラグインシステム】

コウリションコンセプトによる産学連携スキームの実現には、特殊な試料、特殊な試料環境など、ユーザーの要望に柔軟に対応できるビームライン、エンドステーションが必要である。これらに関しては、プラグインシステムを用意することで対応を行うことを推奨する。計測機器、試料環境などについて、複数のビームラインをまたいで利用可能なプラグインシステムを実現する必要がある。

【6タイプのRtUエンドステーション】(資料7)

資料6-2に示したマトリックスを使い、量子ビーム小委員会のビームライン候補、デザインコンペで答申されたエンドステーション候補、アンケート結果を参考にしながら、次世代の産学連携活用に相応しいエンドステーションを以下の6タイプに整理した。

タイプ1：テンダーX線散乱・スペクトロスコピー

タイプ2：テンダーX線コヒーレントイメージングスペクトロスコピー

タイプ3：軟X線コヒーレントイメージングスペクトロスコピー

タイプ4：軟X線環境共鳴非弾性散乱

タイプ5：ナノ-スピン-角度分解光電子分光

タイプ6：雰囲気制御オペランド分光

それぞれの詳細については資料7に示すが、計測手法に関して同時に備えることでメリットのあるものが組み合わされている。この6タイプのエンドステーションには、それぞれ想定されているすべての計測装置が装備されているが、実際の建設では、優先される計測装置に絞って装備し、他はプラグインで実現することを想定している。ビームライン構想は、この6タイプを中心に進められた。

【共通化、自動化、解析への対応】(資料8)

アンケートでも多く要望が寄せられたように、計測機器の共通化、計測の自動化、解析の自動化とサポートは次世代の産学連携活用には不可欠な課題である。資料8は、ハイスループット計測・解析を実現するための課題を、技術/機器、自動化、計測ソフトウェア、解析ソフトウェアごとに書き出したものである。ビームラインの仕様検討においては、施設全体として、これらの課題を考慮して進めるべきである。

第4章 技術的課題の検討

Ready-to-Use (RtU) コンセプトでのビームライン建設で想定される共通仕様の構成要素は、ほとんどが既存技術の進化、発展で可能なものであるが、いくつかの要素に関しては、技術的課題を克服しなければならない。本委員会では、以下の技術課題3点に関して、慎重に検討を行った。

検討項目 1. 軟X線領域の偏光素子（偏光の制御）

直線偏光、円偏光など、制御された偏光を利用した計測は、放射光利用の大きなアドバンテージである。硬 X 線領域では、アンジュレーターからの直線偏光を楕円偏光や円偏光に変える後置型のダイヤモンド移相子が利用されている。一方、軟 X 線領域では、後置型の移相子は実用化されておらず、現状ではヘリカルアンジュレーターによって円偏光などを制御している。

【アンジュレーターによる偏光制御の問題】

ヘリカルアンジュレーターの磁石列のシフトによって行われる偏光の切り替えは周回する電子ビームの軌道を乱すため、低エミッタンス性を確保できなくなり、低エミッタンスリングでは、全ビームラインに悪い影響を与えるという問題がある。

【後置型軟X線移相子の技術的検討】

軟X線（いわゆるテングダー領域を含む 3.5 keV 以下の領域）の後置型移相子については、いくつかのアイデアは提唱されているものの、いずれも実用化されていない。これらに関しては、現時点での採用は難しく、将来的な利用に向けて R & Dが必要である。

【ツインヘリカルアンジュレーターの利用】

X線磁気円二色性（XMCD）の分光およびイメージングを行うためには、100%に近い円偏光度が望ましく、移相子の実用化を待つことはできない。そこで、ヘリカルアンジュレーターを右回り、または、左回り円偏光に固定して利用する方式を検討した。この場合、磁石列シフトによる偏光切り替えは必要ない。直線部に二つのヘリカルアンジュレーターを直列に入れてそれぞれで右回りと左回り円偏光を出射し、後方のビームラインで円偏光を利用できるようにする。通常は、右回り円偏光と左回り円偏光を、それぞれ別のエンドステーションに導くが、ビームラインの光学系を工夫することで一つのエンドステーションに両方の円偏光を導く方式も可能であると考えられる。

検討項目 2. ビームスプリッター

本施設をコウリションコンセプトのもとで、有効に、かつ、採算性も担保しながら運用するためには、一つの直線部からの光をビームスプリッターで二つに分けて二つのブランチで同時に利用できるようにすることが望ましいとされている。ただし、二つのブランチで波長を独立に変化させることができないため、利用方式を考慮する必要がある。また、ビームスプリッターは、一つの直線部からの光を同時に二つのブランチで利用する目的だけでなく、ビームをどちらかに完全に振り分けることで輝度の高い光を供給する目的にも利用可能である。その場合、輝度の高い光を二つのブランチで時間帯を分けて利用することが考

えられる。このようにして利用料金の設定方法等も含めて選択肢を増やしておくことは重要である。

【ミラーによる分岐】

軟X線に関して、エッジをシャープに研磨したミラーでの分岐方式を検討した。この形式のビームスプリッターは、X線自由電子レーザーで実績があり、初期ビームライン構想に組み込むこととした。ただし、振分け角度は3度程度と小さいので、分岐後の光学系、エンドステーションの干渉については、十分考慮する必要がある。

テンダーX線に関しては、さらに振分け角が小さいので、光学系を工夫して、エンドステーションの干渉について十分考慮する必要がある。

【ツインアンジュレーターによる分岐】

長直線部に2つの短いアンジュレーターを置いて、それぞれからのX線をわずかにオフセットさせて2本のエンドステーションに導くことで分岐する。アンジュレーターが短い分だけ輝度が低下するが、ミラー分岐での低下とほぼ同じ程度と思われる。ただし、この点に関する検討はまだ十分でなく、詳細については加速器の専門家を交えたさらなる検討が必要である。この方式のメリットは、それぞれのブランチで希望する光のエネルギーを利用できることであり、一つのアンジュレーターの光を二つのエンドステーションに分離する場合のように、ブランチで利用する光のエネルギーを調整する必要がない。また、2つのアンジュレーターを軟X線用と硬X線を含むテンダーX線用にすると、一つのビームラインで、軟X線から硬X線までの幅広いエネルギーのX線を利用可能になる。光学系を工夫することにより、同一試料への軟X線から硬X線までの広いエネルギー領域のX線照射が可能になれば、研究の幅が広げられる。

検討項目 3. 集光光学系

現在、軟X線の集光には、多くの場合、フレネルゾーンプレートが用いられている。しかしながら、フレネルゾーンプレートでは原理的に、光源から出てくる光の一部分しか利用することができない。また、エネルギーに依存して焦点距離が変化する色収差も避けることはできない。次世代放射光の高い輝度を有効に利用するうえでは、軟X線領域でもミラーによる集光方式の導入を検討する必要がある。

【ミラーによる集光光学系】

次世代の施設として10nm集光が目標であるが、軟X線領域での10nm集光の実現は、現段階では高いハードルがあるとの指摘があった。現在、ウォルター型ミラーによる軟X線集光の研究が進められており、200nm集光はほぼアラインメントフリーで可能であり、50nm集光も視野に入ってきた段階である。そこで、軟X線領域の初期ビームライ

ンでは、汎用ビームラインで $1\mu\text{m}$ 、先端ビームラインで 50nm の集光を目標とする。一方、 5keV 以上では、 10nm の集光光学系の開発が行われており、汎用ビームラインで $1\mu\text{m}$ 、先端ビームラインで 10nm の集光を目標とする。

以上、偏光素子、ビームスプリッター、集光光学系について技術課題の検討を行った。ビームスプリッターに関しては運用開始時に十分実用可能な技術が存在することを確認した。また、軟X線偏光子や、 10nm を実現する軟X線集光ミラーに関しては、将来的な実用化を目指して施設としてR&Dをサポートすることが望ましい。

また、本委員会での議論の過程において、高分子、半導体、生物を研究するうえで重要なSi、P、S、Clといった元素のK吸収端に相当するいわゆるテnder領域のX線について、産業界からも利用の要望があることが確認された。アンジュレーター、分光器、検出器といった要素技術は確立されており初期ビームライン構想に組み込むには問題がないが、偏光素子、集光ミラーに関するR&Dを早急に進めることが望ましい。

第5章 初期ビームラインポートフォリオの提案

第1章で述べたように、次世代放射光施設を真に活用するためには、施設としての明確なビームラインポートフォリオを準備し、建設から利用フェーズに至るまで、ポートフォリオに基づいて一元的にビームライン群の運営を推進することが重要である。本施設の電子蓄積リングには、26の直線部が予定されており、将来的には26本のビームラインが稼働することになる。そのうち、本委員会では、運用開始当初に揃える予定の10本（提案者側最大7本）の構想を行った。特に、その10本の組み合わせ、すなわちビームラインポートフォリオを最重要項目とし、以下のように検討し提案するものである。

【ビームラインポートフォリオの検討】

本委員会のミッションは、本施設の運用開始時に予定されている初期10本のうち提案者側の7本のビームラインを構想することである。個々のビームラインの検討もさることながら、初期にどのような7本を用意するのかは、施設運用にとっても、利用者にとって最も重要なポイントであり、本施設の成否に関わる問題である。このビームラインポートフォリオに関しては、第一回委員会で提案者側7本のビームラインの原案を提示し、第二回委員会までの間にメール審議が行われた。メール審議では、「アンケートで要望された様々な計測手法が可能であるか」、「限られたビームラインに需要が重なることはないか」などを軸

に審議された。第二回委員会では、メール審議の結果が反映されたポートフォリオ案を基に検討が行われた。この過程で、施設全体の一元的な運営の実現や、コウリションメンバーの施設利用のメリットを考えて、提案者側7本だけではなく、国側が整備する3本についても本委員会での枠組みにしたがって構想し、施設全体の10本の構想を行うべきという考えに至った。そこで本委員会では、10本トータルで次世代の活用に相応しいビームラインポートフォリオとなるように、残りの3本についても構想し、参考意見として本答申に付すこととした。

本委員会の本分である提案者側7本としては、産業や学術のユーザーに運転開始と同時に確実に最先端の計測結果を提供できる「先端計測ビームライン」とする。残りの3本としては次世代放射光の可能性を追求する先端性の高いものや、実現にR&Dが必要な「R&D最先端追求型ビームライン」を提案する。ただし、いずれのビームライン群についてもRtUコンセプトに従ったビームラインとし、コウリションユーザーにも学術ユーザーにも利用可能となるような共通の運営形態とすべきである。10本の初期ビームラインポートフォリオ案は、第二回委員会、および、その後のメール審議を通して最終的に取りまとめられた。

その議論の中では産業、学術の様々な分野での利用を考えたバランス、「エネルギーの範囲の検討」、「硬X線イメージングと軟X線イメージングの見直し」など利用側、学術側の双方から重要な意見が出され、ポートフォリオ案の内容が様々な側面から高められた。以上の結果をまとめたものが以下の初期ビームラインポートフォリオ案である。

【初期ビームラインポートフォリオ案】(資料9)

資料9に、本委員会での検討結果からまとめられた初期ビームラインポートフォリオ案を示す。以下に、その10本の名前をリストアップする。最初の7本が先端計測ビームラインで、残りの3つがR&D最先端追求型ビームラインである。

先端計測ビームライン (提案者側整備7本)

BL01-TU-A&B	メールイン全エネルギーX線分光
BL02-MPW-A&B	メールイン構造・電子状態トータル解析
BL03-MPW-A&B	階層的構造解析
BL04-U-A&B	テンダーX線コヒーレントイメージングスペクトロスコーピー
BL05-TU-A&B	軟X線コヒーレントイメージング&磁気イメージング
BL06-U-A&B	軟X線電子状態解析
BL07-TU-A&B	全エネルギー雰囲気制御環境下計測

R & D最先端追求型ビームライン（国側整備3本）

BL08-U	リアルタイム分析ビームライン
BL09-U-A&B	極限性能軟X線分光ビームライン
BL10-U	超高エネルギー分解共鳴非弾性散乱

先端計測ビームラインの7本は、長直線部5本、短直線部2本の構成になっている。また、それぞれAとBのブランチに分岐されており、合計14本のエンドステーションからなる。テンダーX線、軟X線をそれぞれ利用するエンドステーションだけでなく、広いエネルギー領域のX線を利用できるエンドステーションも考える。R & D最先端追求型ビームライン3本は、全て長直線部からの光を利用する。ブランチに関しては、その性格上、アンジュレーターからの光を専有する振り分けタイプ、または、串刺し型とする。ただし、R & Dが終了した場合には、ビームスプリッターによる同時利用を検討する。

それぞれのビームラインの光源スペックやエンドステーションの詳細は資料9に示してある。以下にそれぞれのステーションの特徴をリストアップする。尚、光源加速器の詳細及び実際に発生するX線の具体的な光エネルギー範囲および光源スペクトルについては、加速器および光学ビームラインの建設グループと十分議論したうえで決定する。

【先端計測ビームライン】

BL01-TU-A&B メールイン全エネルギーX線分光

ビームラインの特徴：試料の原子構造～マクロ構造及び全種元素分布の決定

挿入光源：長直線部にテンダーX線用と軟X線用のツインアンジュレーター

ステーションA：メールイン主体のロボット自動化ステーション

テンダーX線利用（想定エネルギー範囲：2keV-20keV）

基本計測：RtUタイプ6ステーションをベースにX線光電子分光（HAXPES）、X線吸収微細構造（XAFS）、走査型イメージング

プラグイン計測：X線回折、X線蛍光分光、蛍光X線ホログラフィー、収束拡大ビームによるイメージング

利用分野：機械、電機、エネルギー、素材

ステーションB：メールイン主体のロボット自動化ステーション

軟X線利用（想定エネルギー範囲：0.25keV-2keV）

基本計測：RtUタイプ3ステーションをベースにX線吸収微細構造（XAFS）と走査型透過X線顕微鏡（STXM）

プラグイン計測：小角X線散乱（SAXS）、光電子分光化学分析（ESCA）、光電子

顕微鏡、 X線蛍光分光

利用分野：機械、電機、エネルギー、素材

* どちらかのブランチに、軟X線とテンダーX線(硬X線を含む)を両方照射できるようにする。

* それぞれのビームラインで発生する光のエネルギーが連続的になるように光エネルギー範囲を設計する。

BL02-MPW-A&B メールイン構造・電子状態トータル解析

ビームラインの特徴：試料のナノ～マイクロメートルスケールの結晶構造と電子状態分布の決定

挿入光源：短直線部多極ウイグラー

ステーション A： メールイン主体のロボット自動化ステーション

テンダーX線利用（想定エネルギー範囲：2keV-30keV）

基本計測：RtU タイプ1ステーションをベースに走査型散乱イメージング

プラグイン計測：X線光電子分光 (HAXPES)、 X線吸収微細構造 (XAFS)、走査型X線蛍光イメージング、 蛍光X線ホログラフィー、 収束拡大ビームによるイメージング

利用分野：素材、機械、電機、環境エネルギー、医薬

ステーション B： メールイン主体のロボット自動化ステーション

テンダーX線利用（想定エネルギー範囲：2keV-30keV）

基本計測：RtU タイプ2ステーションをベースにX線吸収微細構造の分光器回転による高速測定 (quick-XAFS) とその走査型イメージング

プラグイン計測： X線回折、 走査型X線蛍光イメージング、 蛍光X線ホログラフィー、 収束拡大ビームによるイメージング等

利用分野：機械、電機、環境エネルギー、素材、食品

BL03-MPW-A&B 階層的構造解析

ビームラインの特徴：原子レベルからナノ～マイクロメートルスケールの階層的構造決定

挿入光源：短直線部多極ウイグラー

ステーション A： 先端自動化ステーション

テンダーX線利用（想定エネルギー範囲：2keV-30keV）

基本計測：RtU タイプ1ステーションをベースに走査型散乱イメージング

プラグイン計測：X線光電子分光 (HAXPES)、 X線回折、 X線吸収微細構造 (XAFS)、走査型X線蛍光イメージング、 蛍光X線ホログラフィー、 収束拡大ビームによるイメージング、 走査プローブ顕微鏡同視野計測

利用分野：機械、素材、医薬、環境エネルギー

ステーション B： 先端自動化ステーション

テンダーX線利用 (想定エネルギー範囲：2keV-30keV)

基本計測：RtU タイプ1ステーションをベースに広角から超小角までのX線散乱 (WAXS、 SAXS、 USAXS)、 走査型イメージング

プラグイン計測：X線光電子分光 (HAXPES)、 X線吸収微細構造 (XAFS)、 X線蛍光分光 (XRF)、 蛍光X線ホログラフィー、 収束拡大ビームによるイメージング

利用分野：ソフトマテリアル、機械、生命

BL04-U-A&B テンダーX線コヒーレントイメージングスペクトロスコープ

ビームラインの特徴：試料のナノ～マイクロメートルスケールの構造と元素分布のイメージング

挿入光源：長直線部アンジュレーター

ステーション A： 先端自動化ステーション

テンダーX線利用 (想定エネルギー範囲：2keV-20keV)

基本計測：RtU タイプ2ステーションをベースにX線吸収タイコグラフィー、コヒーレント回折イメージング (CDI)、 X線吸収コンピュータトモグラフィー (CT-XAFS)

プラグイン計測：オペランド共鳴非弾性X線散乱

利用分野：素材、電池、医薬、環境エネルギー、食品

ステーション B： 先端自動化ステーション

テンダーX線利用 (想定エネルギー範囲：2keV-20keV)

基本計測：RtU タイプ2ステーションをベースにX線位相イメージング、コヒーレント回折イメージング (CDI)

プラグイン計測：超小角散乱 (USAXS)

利用分野：素材、電池、医薬、環境エネルギー、食品、ソフトマテリアル

BL05-TU-A&B 軟X線イメージング

ビームラインの特徴：軟X線による元素・磁気イメージング/磁性材料の解析

挿入光源：長直線部に左右円偏光に固定したツインヘリカルアンジュレーター

ステーション A：先端自動化ステーション

軟X線利用（想定エネルギー範囲：0.25keV-2keV、右回り円偏光）

基本計測：RtU タイプ3ステーションをベースにコヒーレントイメージング、走査型透過X線顕微鏡（STXM）とX線磁気円二色性（XMCD）

プラグイン計測：スピン-角度分解光電子分光(ARPES)、光電子顕微鏡、光電子分光化学分析（ESCA）、X線自然円二色性、走査プローブ顕微鏡同視野計測

利用分野：スピントロニクス、素材、エネルギー

ステーション B：先端自動化ステーション

軟X線利用（想定エネルギー範囲：0.25keV-2keV、左回り円偏光）

基本計測：RtU タイプ3ステーションをベースにナノ-光電子分光(ESCA)とナノ-X線吸収微細構造（XAFS）/X線磁気円二色性（XMCD）

プラグイン計測：スピン-角度分解光電子分光(ARPES)、光電子顕微鏡、X線自然円二色性、走査プローブ顕微鏡同視野計測

利用分野：エレクトロニクス、スピントロニクス、素材、エネルギー

* どちらかのブランチに、右回り左回りの円偏光を両方照射できるようにする。

BL06-U-A&B 軟X線電子状態解析

ビームラインの特徴：固体・液体のオペランド電子状態解析及びリチウムを含む化学組成分析

挿入光源：長直線部アンジュレーター

ステーション A：先端自動化ステーション

軟X線利用（想定エネルギー範囲：0.05keV-1.1keV）

基本計測：RtU タイプ5ステーションをベースに角度分解光電子分光、X線吸収微細構造（XAFS）

プラグイン計測：スピン-角度分解光電子分光（ARPES）、光電子顕微鏡、オペランド光電子分光化学分析（ESCA）

利用分野：半導体、素材、環境エネルギー、リチウムを含む材料開発

ステーション B：先端自動化ステーション

軟X線利用（想定エネルギー範囲：0.05keV-1.1keV）

基本計測：RtU タイプ4ステーションをベースにオペランド共鳴非弾性X線散乱（RIXS）

プラグイン計測：溶液X線吸収微細構造（XAFS）

利用分野：環境エネルギー、生命、医薬、食品、リチウムを含む材料開発

BL07-TU-A&B 全エネルギー雰囲気制御環境下計測

ビームラインの特徴：固/気界面における化学反応下での触媒及び反応種の化学状態解析、動作環境下における電池材料の化学状態解析

挿入光源：長直線部にテンダーX線用と軟X線用のツイーンアンジュレーター

ステーションA：先端計測

テンダーX線利用（想定エネルギー範囲：2keV-20keV）

基本計測：RtU タイプ6ステーションをベースに大気圧X線光電子分光、大気圧X線吸収微細構造

プラグイン計測：オペランド光電子分光化学分析（ESCA）

利用分野：環境エネ、電機、機械、資源、生命科学

ステーションB：先端計測

軟X線利用（想定エネルギー範囲：0.25keV-2keV）

基本計測：RtU タイプ6ステーションをベースに準大気圧X線光電子分光、準大気圧X線吸収微細構造

プラグイン計測：オペランド光電子分光化学分析（ESCA）

利用分野：環境エネ、電機、機械、資源、生命科学

* どちらかのブランチに、軟X線とテンダーX線(硬X線を含む)を両方照射できるようにする。

* それぞれのビームラインで発生する光のエネルギーが連続的になるように光エネルギー範囲を設計する。

【R & D最先端追求型ビームライン】

BL08-U リアルタイム計測ビームライン

ビームラインの特徴：X線分光・散乱の高速計測による動的現象（化学反応など）のミリ秒からマイクロ秒領域でのリアルタイム追跡

挿入光源：テイパー型アンジュレーター（ギャップをくさび形にすることでアンジュレーターの準単色光の幅を広げる事ができる。）

ステーション：先端計測

テンダーX線利用（想定エネルギー範囲：1.5keV-10keV）

基本計測：RtU タイプ2ステーションをベースにX線吸収微細構造分散同時測定（Dispersive XAFS）

プラグイン計測：X線吸収微細構造の分光器回転による高速測定 (quick-XAFS)、
準大気圧 X線吸収微細構造 (XAFS)、ラウエ X線顕微鏡、時間分解 CTR 散乱
利用分野：素材、電池、医薬、環境エネルギー、食品

BL09-U-A&B 極限性能軟 X線分光ビームライン

ビームラインの特徴：極限分解能での X線分光・散乱による物質の精密評価

挿入光源：長直線部アンジュレーター

ステーション A：先端計測

軟 X線利用（想定エネルギー範囲：0.05keV-1.1keV）

基本計測：RtU タイプ 5 ステーションをベースに超高分解能ナノ-スピン-角度分解
光電子分光

プラグイン計測：ナノ-X線吸収微細構造、

利用分野：応用物理、量子情報

ステーション B：先端計測

軟 X線利用（想定エネルギー範囲：0.05keV-1.1keV）

基本計測：RtU タイプ 3 ステーションをベースに軟 X線イメージングの開発

プラグイン計測：極限集光技術開発、軟 X線回折、時間分解計測技術

利用分野：軟 X線光学技術の開発、応用物理

BL10-U 超高エネルギー分解共鳴非弾性散乱

ビームラインの特徴：超高エネルギー分解共鳴非弾性散乱（目標エネルギー分解能 meV
オーダー）による電子状態の精密解析

挿入光源：長直線部アンジュレーター

ステーション：先端計測

軟 X線利用（想定エネルギー範囲：0.25keV-2keV）

基本計測：RtU タイプ 4 ステーションをベースに長尺超高分解能分光器による超
高分解共鳴非弾性 X線散乱

プラグイン計測：共鳴軟 X線回折

利用分野：応用物理、環境、エネルギー、情報デバイス

先端計測ビームラインの 14 本のエンドステーションは、メールイン主体になるロボッ
ト自動化ステーションが 4 本、自動化を進めた先端自動化ステーション 8 本、そして将来
的に自動化を考える先端計測ステーション 2 本となっている。メールイン主体となるステ

ーション以外においても、一部はメールインによる計測ができるように、予め考慮してデザインすることが望ましい。例えば、メールイン専用のプラグイン等を準備できるようにすべきと考える。

R & D最先端追求型ビームラインの3本のエンドステーションは、それぞれ高い性能を追求するために、運用開始後もユーザー利用と平行しながらR & Dを行う。R & Dに時間が割かれるため、当初はユーザータイムが限られてしまうが、徐々に開発を進めて、最終的には先端計測ビームラインとして施設の運用に完全に組み入れることを目指す。

第3章の最後で述べたように、施設全体での計測機器の共通化、計測の自動化、解析の自動化とサポートは次世代の産学連携活用には不可欠な課題である。ビームラインの具体的な仕様検討においては、資料8に示した課題を考慮して、施設全体として進めるべきである。また、ビームラインの検討の際には、検出器の性能も考慮する必要がある。放射光の高度利用においては、光の発生だけでなく、光の検出の技術的向上も重要である。本施設の運用に向けて、次世代検出器の開発に官民が一体となった形で取り組む必要がある。波数やエネルギーの超高分解能化のためには、一般的に、エンドステーションを長くすることが考えられ、本委員会でも、超小角散乱 (USAXS) や超高分解能非弾性散乱 (RIXS) に関連してそのような点が指摘されている。一方で、検出器の位置分解能の向上が同じ効果をもたらすことには常に留意すべきであろう。

第6章 建設チームのあり方

次世代の活用を考えると、これまでのようにビームラインごと、エンドステーションごとに設計・建設担当者を決めるのではなく、本施設全体としてエンドステーションをトータルで設計・建設するチーム体制が望ましい。その中には、光源専門家、光学系専門家、複数の計測手法の専門家、計測自動化、計測ソフトウェアの技術的専門家、そして解析ソフトウェア技術者が含まれる。特に、施設全体の利用しやすさを考えると、測定の自動化、共通ソフトウェアによる測定、解析が重要である。施設全体を総合的に管理できる自動化技術者、ソフトウェア技術者が必要と考える。個々のステーションの建設に関しては、経験者、既存の測定手法の専門家の知恵を借りながら、チームで複数の測定手法、複数のエンドステーションを担当すべきである。光源と光学系に関しては、RtU 光学系の考え方の基に、施設全体の光学系を設計・管理するチーム体制が望ましい。

第7章 ビームライン構想のまとめ

本委員会は、次世代放射光施設における次世代の活用とは何かを考え、それを実現するために必要なビームラインを構想するために参集された。本施設が、魅力ある施設として活用されるためには、特定の研究者や測定手法グループに頼った従来型のビームライン建設を脱却し、施設全体としてのビームラインデザインの構想が必要である。本委員会では、以上の視点を持って、本施設のビームライン構想の検討を行った。

その結果、既存の放射光施設が抱える問題を解決すると同時に、光学系や計測システムの標準化を行いながらも、高い要求に応えるビームライン、エンドステーションを建設する仕組みとして、Ready-to-Use (RtU) コンセプトが最適であるという結論に至った。RtUでは、光学系は要素ごとに分解されて、それぞれが標準化される。RtU エンドステーションでは、計測手法が整理され、その組み合わせや、プラグインという形で多角的な計測が高度に実現される。要素が標準化されることでコストも低減し、要素を入れ替えることで施設全体の性能アップグレードが可能になる。この RtU エンドステーションの考え方で、次世代のエンドステーションは6タイプに分類される。これらの6タイプに特色を持たせることで、さらに様々なエンドステーションが実現される。

以上の考え方を基に、本委員会では、運転開始と同時に利用が予定されている初期ビームライン群の検討を行った。本委員会のミッションは提案者側7本の構想であるが、施設全体の一元的な運営のために国側3本についても同じRtUの考え方で構想すべきと考えて、それらに関しても検討を行った。個々のビームラインの性能はもとより、10本全体として並べたときに、次世代の放射光施設を標榜するポートフォリオになっているかを重視した。検討は、様々な分野の産業界の委員、学術の有識者が、それぞれの視点で行った。その中では、産業界の様々なニーズへの対応、実現の可能性、最先端性、効率性など、多方面の視点で検討が行われた。その結果得られたビームラインのポートフォリオは第5章に示したとおりである。本委員会で答申する7本の「先端計測ビームライン」は、参考意見として付した3本の「R&D最先端追求型ビームライン」と合わせて、10本全体で次世代の放射光施設における次世代的な活用を実現する礎となるものである。運転開始と同時に利用開始できるように、相応しい建設チームを選定し、具体的な仕様検討の早期開始を希望する。