

X 線自由電子レーザーの開発・共用

1. 研究開発の概要

(1) 名 称

課題名 : X 線自由電子レーザーの開発・共用
担当課室名 : 文部科学省 研究振興局
基礎基盤研究課 大型放射光施設利用推進室

(2) 期 間

開始・終了年度 : 平成 18 年度～平成 22 年度
平成 23 年度共用開始

(3) 予 算

平成 18 年度概算要求額 : 3,293 百万円（国費）
総事業費 : 375 億円（国費）

要求額の内訳は以下のとおり。

X 線自由電子レーザー装置の整備 (2,843 百万円：新規)

一原子レベルの超微細構造、化学反応領域の超高速動態・変化を瞬時に計測・分析することを可能とする世界最高性能の研究基盤施設「X 線自由電子レーザー」の整備に着手する。具体的には、電子を発生し加速する装置（入射器及び線型加速器）の製作を開始するとともに、それらを収納する建屋の建設に着手する。

X 線自由電子レーザーの利用研究開発 (450 百万円：新規)

X 線自由電子レーザー装置が生み出す超高輝度・超短パルスの X 線レーザーを効果的かつ効率的に利用し、広範な科学技術分野において先端的研究成果を多数輩出するための技術開発を開始する。具体的には、文部科学省のもと専門家・有識者による利用推進協議会（仮称）を設置し、利用方針・利用計画を策定するとともに、X 線自由電子レーザーの利用研究を実施する際に生ずることが想定される問題点（超高輝度による熱負荷、X 線光学系、照射タイミングなど）を解決するための技術開発を、公募により選定し推進する。

(4) 目 的

○ 背景及び目指す方向

放射光は、物理学、化学、生物学、医学、工学などの広範な分野を対象として、原子・電子レベルでの構造・物性情報を提供する計測ツールとして位置づけられ、特に、平成 9 年 10 月に大型放射光施設 SPring-8 の供用が開始して以来、これらの研究分野の発展に大きく貢献してきており、今後も重要なツールとして最先端の研究成果を多数輩出するものと期待されている。

一方で、放射光を利用した研究成果の量的拡大、質的向上が進むにつれ、研究者の間から、更に性能の高い光、より強力な、より絞られた、よりパルス幅の短い、より干渉性の高い光への要求が高まってきている。

また、レーザーを利用する研究分野においても、現在、可視光～紫外線領域で確立している超短パルス、高強度技術を、X 線領域まで拡張し、より微細なレベルでより高速な動態・変化を観察したいとの要望が高まってきているところである。

こうした中、独立行政法人理化学研究所を中心として、X 線自由電子レーザー計画が進められている。X 線自由電子レーザーは、波長 0.1 ナノメートル以下の X 線領域において、SPring-8 の 10 億倍を上回る高い輝度、100 フェムト秒以下の極短パルス、100% 完全な干渉性を実現するもので、上記の要求に応えるものとして期待されているものである。理化学研究所では、SPring-8 において培った技術をベースにして、既にこの X 線自由電子レーザーを実現するために必要となる要素技術を確立しており、現在は、X 線レーザーの利用研究に必要な技術開発を行うための、波長 60 ナノメートルの真空紫外レーザーを発振するプロトタイプ機の建設を行っているところである。

新たな計測ツールは、それまで全く見るできなかった構造・現象を見えるようにするという最先端の解析・分析ツールとしての役割があり、その後時を経て、確立された手法として新しい物質や材料など未知の対象の素性を調べる汎用的な解析・分析ツールとしての役割に移行していく。あるものは最先端ツールとして、またあるものは汎用的ツールとして、計測ツール全体が両輪となって科学技術の発展に大いに貢献することが非常に重要である。

SPring-8 も、供用開始当初は最先端の解析・分析ツールとして、革新的な計測手法の開発が進められ、その対象を拡大してきたが、現在は、これらの計測手法が広く多くの研究者に利用されるようになり、徐々に汎用的な解析・分析ツールとしての役割も広がりつつあるところである。

X 線自由電子レーザーは、放射光とレーザーの特徴を併せ持つ夢の光として、従来の SPring-8 やレーザーでは見るできなかった、より微細なレベルでより高速な動態・変化の観察を可能とする最先端の解析・分析ツールとしての役割を担うものであり、早急に開発・整備し、多くの研究者の共用に供することが必要である。

○ 推進戦略上の位置づけ

我が国は、1976 年に世界最初の放射光専用施設を整備して以来、Photon Factory（高エネルギー加速器研究機構）や UVSOR（自然科学研究機構 分子科学研究所）をはじめ、多数の放射光施設を建設・利用してきており、常に世界の放射光科学をリードしてきた。1997 年には、目下 X 線領域において世界最高輝度を誇る大型放射光施設 SPring-8 を建設。全国の研究者の共用に供することにより、ライフサイエンス分野やナノテクノロジー分野など、幅広い研究分野において世界的に優れた多数の研究成果を輩出し、放射光先進国の一つとして確固たる地位を築いてきたところである。

欧米でもほぼ同時期に高輝度 X 線放射光施設の建設がなされ、現在、SPring-8 とともに、欧州 ESRF（フランス）、米国 APS（イリノイ州）が世界の大型放射光施設の三極を成し、互いに競合・協力しながら幅広い研究開発を進めるに至っている。

ところが、SPring-8 や欧米での同種施設での高輝度 X 線利用の経験から、今後、コヒーレント X 線の利用が科学技術のフロンティアを拓く強力なツールとなることを多くの研究者が共通の認識として持つようになってきた。このために、コヒーレント X 線源としての X 線自由電子レーザーが注目され、欧米では既に施設建設が進められているところである。本計画は、このような欧米での進歩に対して遅れることなく我が国の放射光科学の水準を維持するために必須のものである。

自由電子レーザー自体は、1970 年代に実証試験がなされ、既に、赤外～可視光領域において多数の装置が開発されている。これら装置では、レーザー共振器として全反射ミラーを対向して用いているため、直入射全反射ミラーが存在しない X 線領域で自由電子レーザーを実現することは困難とされていた。しかし、近年、対向する全反射ミラーで光を往復させる代わりに、超長尺化したアンジュレーターによって共振を行わせる自己増幅自発放射原理が見出された。これによって X 線自由電子レーザー実現への道が拓かれ、現在の建設競争に至っている。

自己増幅自発放射原理によって得られるコヒーレント光は、SPring-8 に代表される蓄積リング型光源と比べて同時利用可能者数が限られており、SPring-8 で行われている研究分野を全てカバーするものではなく、汎用光源としての蓄積リング型光源の重要性をいささかも減じるものではない。実際、SPring-8 を見ても明らかなように、放射光分野におけるある時点での最先端計測技術は、いずれ汎用計測技術に転化し、産業界を含めた多数の研究者に利用されている。X 線自由電子レーザーの完成により、最先端手法開発型研究の相当部分が蓄積リング光源から X 線自由電子レーザーに移行することが予想され、その分蓄積リング光源は、汎用計測技術として、それまで放射光の経験が無い新たな利用者を受け入れることになるものと期待される。

また同時に、本計画によって整備される X 線自由電子レーザーもいずれ汎用計測技術として転化されるものであり、今回の技術を基礎として、よ

り高性能あるいは小型の X 線自由電子レーザーの開発を並行して進めることも重要である。

(5) 目 標

世界最高性能の X 線自由電子レーザーを実現し、多くの研究者の共用に供することで、広範な科学技術分野の発展に貢献し、新しい産業や技術の創出を促すことを目標とする。

また、大型放射光施設 SPring-8 に併設し、一体的な運営を行うことで、放射光科学の世界的な COE としての地位を強固なものとする。

(6) 実施体制

○ 施設整備について

理化学研究所播磨研究所に線型放射光研究開発グループを設置し、そこを中心として、SPring-8 の運転に携わっている財団法人高輝度光科学研究センターの協力のもと進める。

また、理化学研究所は、これまで我が国の加速器研究の中心的役割を果たしてきた大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構との間で研究協力協定を締結しており、施設整備の実施体制の強化を図っている。

○ 運営について

SPring-8 の運営は、平成 9 年の供用開始以来、高輝度光科学研究センターが担っており、X 線自由電子レーザーの運営についても、高輝度光科学研究センターが有する運転、維持管理、利用研究課題の選定、利用者への支援等に関する経験やノウハウを活用するなど、より効率的な運営体制の構築を図る。

○ 利用方針・利用計画の策定について

X 線自由電子レーザーを幅広い分野の多くの研究者が活用し、有意義な研究を進め、多数の質の高い研究成果を輩出していくためには、施設の利用方針・利用計画の検討・策定が非常に重要となる。

そのため、平成 18 年度より、文部科学省のもと、利用推進協議会（仮称）を設置し、大学等の専門家をプロジェクト・ディレクターとして迎え、そのリーダーシップのもと、産業界や諸外国の動向調査などをもとに、X 線自由電子レーザーの利用方針・利用計画を策定する。

また、施設完成後直ちに本格的な利用研究に着手できるように、実際の利用にあたって想定される問題点を予め解決しておくため、利用研究に係る技術開発テーマを公募により選定し強力に推進する。

(7) 評価体制

○ 事前評価

既に 2 回の事前評価を実施済み。

国際レビュー委員会

- ・ 平成 17 年 2 月、理化学研究所にて、関連分野における世界的な第一人者を集め、技術的内容や実現性についてレビューを受けた。
- ・ 主な提言は以下のとおり（原文は英語）：
 - 本計画は、大強度かつコヒーレントな短パルス X 線の発生とその利用研究のための革新的なプロジェクトである。
 - 目標は欧米と同様であるが、本計画は、コンパクトな設計思想に加え、世界をリードする SPring-8 と併設する点でユニーク。
 - 建設スケジュールと技術的難度は野心的であるが、本計画のメンバーはこれまでも困難な課題に対して革新的な解決策を生み出してきた実績がある。
 - レビュー委員会は、提案されたスケジュールで建設可能であることを支持し、早期建設開始を勧告する。

次世代放射光源計画評価作業部会

- ・ 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 研究評価部会のもと、国内の専門家・有識者を集め、当作業部会を設置。この 8 月までに 4 回部会を開催し、計画の必要性、効率性、有効性について評価。
- ・ 総合評価は以下のとおり：
 - 本計画は、科学技術・学術的な意義が極めて大きく、経済的・社会的意義も認められ、今後の我が国の基礎研究と産業の発展に大きく寄与するものである。
 - 本施設を利用する先端的研究により幅広い分野で新たな研究開発の展開が期待される。
 - 本作業部会としては、本計画は積極的に進めるべきであり、早期に着手すべきであると評価。

○ 事業評価

「国の研究開発に関する大綱的指針」（平成 17 年 3 月内閣総理大臣決定）に準拠し、定期的に評価を実施。具体的には、

- ・ 中間評価（整備開始後 2 年程度を目途）
… 整備の進捗状況、ビームラインの仕様に関する評価
- ・ 事業評価（供用開始直前を目途）
… 研究方針、研究計画等に関する評価
- ・ 定期評価（供用開始から概ね 5 カ年間隔）
… 施設の運営・共用に関する評価 [SPring-8 の運営・共用と一体的に評価することも検討]

2. 府省における考え方

前出のとおり、文部科学省 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 研究評価部会のもと、国内の専門家・有識者を集め、次世代放射光源計画評価作業部会を設置。本年 8 月までに 4 回部会を開催し、計画の必要性、効率性、有効性について評価を行った。

以下に、その評価結果の概要を記す。

(1) 科学技術上の意義

- ・ 我が国独自の加速器技術により、X 線自由電子レーザー装置のコンパクト化、低コスト化を実現。大型放射光施設 SPring-8 に併設することで、独創的な利用研究が展開され、世界に類を見ない放射光科学に関する研究拠点を形成。
- ・ 従来の放射光とレーザーの優れた特性を併せ持つ、これまでにない革新的な光源（短波長、極短パルス、超高輝度、完全干渉性）を実現。
- ・ 研究基盤施設として、ライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野をはじめとする広範な科学技術分野において先導的な研究成果を多数創出することが期待され、多くの研究者から早急な施設整備が求められている。
- ・ X 線自由電子レーザーは最先端の解析・分析ツールであり、整備直後は、革新的な計測手法の開発など最先端の研究開発に利用されるものであるが、これらの計測手法が多くの研究者に広まるに連れて、徐々に汎用的な解析・分析ツールとして利用者を拡大していくものとなる。このことは SPring-8 における利用者の推移を見ても明らかである。
- ・ 研究基盤施設として、そこで得られた基礎的な研究成果が次の研究テーマを生み出し、応用研究に活かされ、産業技術に発展する可能性を有する。また、X 線自由電子レーザーの電子ビームを SPring-8 に入射することで、SPring-8 の放射光特性が向上するなどの発展性も有する。

(2) 社会・経済上の意義

- ・ 広範な科学技術分野の発展を支える研究基盤施設として、我が国の国際競争力の維持・向上に貢献。
- ・ 利用研究において、例えば、巨大タンパク質の一分子構造解析やデバイス中の電子挙動に関する超高速現象の解明など、創薬やエレクトロニクスなどの将来の産業展開に向けた知見が得られ、我が国の国際的な産業競争力の強化に寄与するとともに、国民の健康や利便性の向上が期待される。

(3) 国際面での意義

- ・ 非常に広範な科学技術分野における利用が想定されることから、各国で同様の計画が進められており、特に、米国スタンフォード線型加速器センター（SLAC）における計画やドイツ電子シンクロトロン研究所

(DESY)における欧州計画は、性能や完成時期の面で本計画と拮抗しており、現在、熾烈な国際競争下にある。

- ・ 本計画は、我が国独自の加速器技術により、コンパクトかつ低コストであるが発振波長で世界最短となるなど、他の計画と比べて優位性を持っている。また、本計画が唯一大型放射光施設との併設を可能とすることから、X 線レーザーと放射光の併用による新たな研究分野の開拓などの相乗効果が期待される。

(4) 計画の妥当性

- ・ 理化学研究所は、国際レビュー委員会において、「建設スケジュールと技術的難度は野心的であるが、本計画のメンバーはこれまでも困難な課題に対して革新的な解決策を生み出してきた実績があり、委員会として、提案されたスケジュールで建設可能であることを支持し、早期建設開始を勧告する。」との提言を受けている。
- ・ 世界最高性能を有する研究基盤施設として、国内外の多くの研究者の共用に供するものであり、国が責任を持って整備、運用を図るべきものである。
- ・ 施設整備にあたっては、これまでに要素技術の開発を行ってきた理化学研究所が中心となって、加速器研究に秀でている高輝度光科学研究センターや高エネルギー加速器研究機構をはじめ、関係研究機関の連携・協力を仰ぐこととしており、体制として妥当なものとなっている。
- ・ これまでに我が国が培ってきた放射光科学の世界的地位を強固なものとするためにも、欧米の計画に遅れることなく施設を整備し、共用に供することが必要であり、早急に整備に着手することが重要である。

(5) 成果・運営

- ・ 非常に広範な科学技術分野における利用が想定されることから、X 線自由電子レーザーでなければ達成できない卓越した研究課題を選定し、世界をリードする最先端の研究を強力に推進することが重要となる。このため、課題選定において広範な研究者が機動的に参加でき、弾力的な利用計画の運用がなされるような推進体制を構築し、これによって、多数の質の高い研究成果の創出が実現される。
- ・ 広範な科学技術分野の発展を支える研究基盤施設として、新たな知の創出や様々な研究開発の質の向上が期待される。
- ・ 材料開発、高周波技術、真空技術、光学技術、超精密加工技術などの総合技術としての加速器技術を蓄積・継承するものであり、若い研究者や技術者の育成につながることを期待される。

以上