

## 次世代放射光源計画評価作業部会 X線自由電子レーザー計画評価について（中間とりまとめ）概要

本作業部会では、日本放射光学会「次世代光源検討特別委員会」の中間報告（平成17年5月）などを受け、次世代放射光源の方式のうち、計画の進捗度、技術的成熟度、諸外国の状況などを勘案し、X線自由電子レーザー計画について評価を実施した。

### 1．X線自由電子レーザー計画の必要性

#### (1) 科学技術・学術的評価

- ・わが国独自の加速器技術により光源のコンパクト化、低コスト化を実現。大型放射光施設SPring-8に併設し独創的な放射光利用研究の拠点を形成。
- ・放射光とレーザーの優れた特性を併せ持つ、革新的なまったく新しい光源（短波長、超高輝度、極短パルス、高干渉性）を実現。
- ・ライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野などで先導的な研究成果の創出が期待される基盤的施設。
- ・多数の成果を波及的に生み出す可能性、SPring-8の特性の改善の可能性など発展性が存在。

#### (2) 経済的・社会的評価

- ・広範な科学技術の発展を支える研究基盤として、科学技術面でのわが国の国際競争力の維持・向上に貢献。
- ・利用研究について、例えば、巨大タンパク質の一分子構造解析やカーボンナノチューブなどの物質内の電子の挙動に関する超高速現象の解明などの基礎的研究に貢献するとともに、創薬などの産業展開に向けた基盤となることで、将来的な産業競争力強化に寄与。

#### (3) 国費を用いた研究開発としての評価

- ・基礎研究分野を中心とした広範なニーズに対応。
- ・世界最高性能の研究基盤として、国内外の多数の研究者の共用に供する必要がある、国が責任を持って整備し運用すべき施設。
- ・わが国の放射光科学の維持・強化に寄与。
- ・欧米の計画と比較して、わが国独自の利用研究の提案、また、コンパクト化・低コスト化により早期完成が可能となるなどの優位性が存在。
- ・極めて先端的な研究領域の研究者による強い要望。放射光科学とレーザー科学の融合による新たなサイエンスの開拓が期待。

## 2. より効率性の高いX線自由電子レーザー計画のあり方

- ・建設に当たっては、要素技術開発を実施してきた理研が関係研究機関と連携・協力し、推進。
- ・利用研究に当たっては、国内外の広範な研究者が機動的に参加できる枠組みの構築が必要。
- ・利用研究実施に十分な性能を保有。SPring-8に併設することにより、運営面の大幅な効率化が可能。
- ・SPring-8での施設運営・供用業務の経験やノウハウの活用により効率的な運営体制の構築が可能。

## 3. X線自由電子レーザー計画の有効性

- ・国際評価及び加速器専門家による検討の結果、本計画の実現可能性に問題ないとの評価。
- ・既存の放射光施設や大強度陽子加速器施設(J-PARC)など類似の大型研究施設と相互補完的な役割を有することが期待。
- ・新たな知の創出などにより、わが国の科学技術・学術に果たす役割は大きく、多くの分野への波及効果が期待。
- ・加速器技術の継承・蓄積及び研究者・技術者の育成につながることを期待。

## 4. 総合評価

- ・本計画は、科学技術・学術的な意義が極めて大きく、経済的・社会的な意義も認められ、今後のわが国の基礎研究と産業の発展に大きく寄与。また、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。
- ・以上を総合し、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。
- ・本計画の推進にあたっては、指摘事項の適切な反映が必要。特に、完成後、速やかに利用に着手できるよう利用研究の推進体制の確立が必要。
- ・一定期間経過後「文部科学省における研究及び開発に関する評価指針」等に準拠した中間評価の実施を提言。
- ・国の大型プロジェクトとして国民に対する説明責任を自覚し、本計画に対する理解増進に努めることが必要。

## 次世代放射光源計画評価作業部会について

### 1. 趣旨

- ・放射光は、物質の解析・分析などの画期的な手段として、ライフサイエンス、ナノテクノロジーなどの様々な分野で、幅広く利用されている。近年における放射光を利用した先端的研究の進展などに伴い、「より微細な構造」、「より速い変化」の計測・分析に対するニーズが高まってきている。
- ・このため、高コヒーレント性、短パルス性、高ピーク輝度などの特徴を持った次世代放射光源の計画や構想が提案され、その実現が強く期待されている。
- ・このような状況を踏まえ、わが国の次世代放射光源の整備方針、利用研究方針、さらには運営体制等について検討し、評価するため、平成17年5月24日に、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会研究評価部会に「次世代放射光源計画評価作業部会」を設置した。
- ・これまで、4回にわたって次世代放射光源の一つであるX線自由電子レーザー計画の評価を実施し、中間とりまとめを行ったところである。

### 2. 審議の経過

#### 第1回（平成17年6月21日（火））

次世代放射光源開発計画について  
今後、検討・評価すべき項目について

#### 第2回（平成17年7月19日（火））

X線自由電子レーザー計画について  
評価項目について

#### 第3回（平成17年8月5日（金））

X線自由電子レーザー計画の評価について

#### 第4回（平成16年8月19日（金））

「X線自由電子レーザー計画評価について（中間とりまとめ案）」  
について

### 3. 今後の予定

9月下旬～12月中旬  
12月中旬

4回程度の検討を予定  
最終報告書のとりまとめを予定

## 委員名簿

- 主査 太田 俊明 (東京大学 大学院理学系研究科 教授)
- 委員 雨宮 慶幸 (東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授)
- 大泊 巖 (早稲田大学 理工学部 教授)
- 神谷 幸秀 (高エネルギー加速器研究機構 理事・加速器研究施設長)
- 菊田 惺志 (高輝度光科学研究センター 参与)
- 熊谷 教孝 (高輝度光科学研究センター 加速器部門長)
- 腰原 伸也 (東京工業大学 大学院理工学研究科・物質科学専攻 教授)
- 小杉 信博 (自然科学研究機構分子科学研究所 研究総主幹)
- 今野 美智子 (お茶の水女子大学 理学部化学科 教授)
- 田島 節子 (大阪大学 大学院理学研究科 教授)
- 谷口 雅樹 (広島大学 理事・副学長)
- 中迫 雅由 (慶應義塾大学 理工学部物理学科 教授)
- 西島 和三 (持田製薬株式会社 開発本部開発企画推進部 主事)
- 丹羽 紘一 (株式会社富士通研究所 顧問)
- 林崎 良英 (理化学研究所 ゲノム科学総合研究センター プロジェクトディレクター)
- 水木 純一郎 (日本原子力研究所 関西研究所 放射光科学研究センター長)

(五十音順)

# X線自由電子レーザー計画評価について (中間とりまとめ)

平成17年9月

科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会 研究評価部会  
次世代放射光源計画評価作業部会

# 目 次

1 . はじめに	.....	1
2 . 評価の実施体制・方針	.....	3
(1) 評価の実施体制		
(2) 評価の観点		
(3) 評価の実施方法		
(4) 評価結果の取扱い		
3 . X線自由電子レーザー計画の必要性	.....	5
(1) 科学技術・学術的評価		
(2) 経済的・社会的評価		
(3) 国費を用いた研究開発としての評価		
4 . より効率性の高いX線自由電子レーザー計画のあり方	.....	9
5 . X線自由電子レーザー計画の有効性	.....	11
6 . 総合評価	.....	13
別添：X線自由電子レーザーの利用研究の例	.....	14
(1) ライフサイエンス分野		
(2) ナノテクノロジー・材料分野		
(3) その他		

## 1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 に代表される放射光源の活用により、ナノメートルサイズの物質や微小なタンパク質の構造解析、極微量成分の検出、極微領域の電子状態、磁性の解明等が可能となった。このように放射光は、特に X 線領域においてライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野の発展に大きく貢献しており、基礎研究だけでなく、産業利用においても重要なツールとなっている。

放射光を利用した研究成果の量的拡大・質的向上に伴い、更に性能の高い光源への要求が高まってきた。それらは、高コヒーレンス、超短パルス、超低エミッタンスを求めたものである。こうした要求に応えるべく、いくつかの研究機関において次世代放射光源の開発が行われている。

一方、レーザーの研究分野において、極短パルス・超高輝度のレーザーは、新しい物理現象の理解や工学的応用の発展に貢献してきているが、現在のところ、実用的な X 線領域のレーザーは存在しないため、新しい原理による X 線レーザーの開発が強く求められている。

こうした中、独立行政法人理化学研究所（以下「理研」という。）においては、X 線自由電子レーザーの計画が進められており、SPring-8 などによって培ってきた独自技術をベースに、電子銃、線形加速器、アンジュレーターなどの要素技術開発が既に完了している。更に、波長 60 ナノメートルの真空紫外レーザーを今秋に発振することを目標に、現在、プロトタイプ機<sup>1</sup>を建設中である。また、日本原子力研究所（以下「原研」という）においては、蓄積リングと線形加速器の長所を併せ持つ放射光源、エネルギー回収型リニアックの計画が提案されている。更に大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構（以下「KEK」という。）においても、エネルギー回収型リニアックと並行して、現在の大型放射光源が持つ普遍的なツールとしての性格を継承しつつ、高い性能を実現する放射光源として、スーパー・ストレージ・リングの構想が提示されている。

このような流れを受けて、日本放射光学会は「次世代光源検討特別委員会」を設置し、加速器技術に基づく次世代光源について検討を行い、平成 17 年 5 月にその中間報告を取りまとめた。その中で、「究極を目指す光源計画」としての X 線自由電子レーザーについて「我が国独自技術による光源のコンパクト化というブレークスルーにより国際的にも先導的な計画であり、X 線自由電子レーザーの実現を目指すことはきわめて重要である。」と提言し、また「先端的基盤設備としてのリング型光源計画」についても「計画的に更新・先端化することが極めて重要」であると提言したところである。

一方、科学技術・学術審議会基本計画特別委員会において、「第 3 期科学技

---

1 : 250MeV 線型加速器での電子ビームを磁場周期 15mm、周期数 600 の真空封止型アンジュレーターを通して波長 60nm の真空紫外光をレーザー発振させる。

術基本計画の重要施策」(中間とりまとめ)(平成17年4月)が取りまとめられ、その中で、「国の持続的発展の基盤であって長期的な国家戦略を持って取り組むべき重要な技術(「国家基幹技術」)」の推進が求められており、その例として「世界最高性能の光分析技術(X線自由電子レーザー)」が示された。

このような状況を踏まえ、平成17年5月に科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会研究評価部会の下に次世代放射光源計画評価作業部会(以下、「本作業部会」という。)を設置し、次世代放射光源の基本方針、次世代放射光源の開発計画の技術的評価、利用計画、運営体制などについて検討・評価することとした。

本作業部会においては、次世代放射光源それぞれにおける計画の進捗度、技術的成熟度、諸外国の状況などを勘案し、まずX線自由電子レーザー計画(以下「本計画」という。)について評価を行うこととし、その評価結果を今回の中間とりまとめとして報告することとした。

## 2. 評価の実施体制・方針

### (1) 評価の実施体制

次世代放射光源計画評価作業部会において本計画の評価を行った。委員については、加速器技術、X線計測技術、利用研究などのバランスの取れた構成とした。

また、X線自由電子レーザーにおける加速器部分の専門技術の評価については、本作業部会委員及び加速器技術の専門家に参加を求めて、加速器技術専門家会合を別途開催し、その審議内容を本計画の評価の参考とした。

なお、本作業部会の評価に当たっては、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成17年3月内閣総理大臣決定）及び「文部科学省における研究及び開発に関する評価指針」（平成17年9月文部科学大臣決定）に準拠した。審議については、原則として公開で行った。

### (2) 評価の観点

評価に当たっては、以下の観点から実施することとした。

#### X線自由電子レーザー計画の必要性

##### 科学技術・学術的評価

- 科学技術・学術的観点から意義が高いか（独創性、革新性、先導性、発展性）

##### 経済的・社会的評価

- 国際競争力の向上、知的財産権の取得・活用、産業活動の活性化、社会的価値（国民の健康・安全等）の創出につながるか

##### 国費を用いた研究開発としての評価

- 国や社会のニーズへの適合性はあるか
- 国が取り組むべきプロジェクトか
- 緊急性はあるか
- 他国の同様の計画と比較して妥当性はあるか
- ユーザーは十分いるか

#### より効率性の高いX線自由電子レーザー計画のあり方

- 計画の推進体制は適当か
- より効率的な計画となっているか
- 関連研究機関との連携はとれているか
- 施設完成後の運営体制を視野に入れているか

#### X線自由電子レーザー計画の有効性

- 計画は技術的に実現可能か
- 計画の目標設定、手段及び推進手法は適当か
- 類似の計画との関係は適当か（競争関係、補完関係との分析）

- 新たな知の創出や研究開発の質の向上、知的基盤の構築また、直接的な成果や波及効果が十分見込まれるか（費用対効果は適当か）
- 将来の人材育成につながるか

### (3) 評価の実施方法

本作業部会においては、提案者である理研より本計画の概要ならびに自己評価について聴取し、また、利用研究計画については、提案している各分野の専門家より聴取することとした。これらに基づき議論を行うとともに、評価の観点に沿った検討を実施した。

また、加速器技術に関する専門的な内容については、作業部会委員及び加速器の専門家の参加を求めて、加速器技術専門家会合を別途開催し、理研の説明に基づき議論を行った。

それらを総合的に勘案し評価とした。

### (4) 評価結果の取扱い

評価結果については、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会研究評価部会及び科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会に報告するとともに、外部に公表することとした。また、本計画の実施に当たっては、適切に評価結果を反映させることとした。

### 3. X線自由電子レーザー計画の必要性

本計画は、X線自由電子レーザー施設を SPring-8 に併設するもので、第一期（平成 18 ～ 22 年度、総予算約 400 億円）においては、自己増幅(SASE)方式による最短波長 0.06 ナノメートルのX線レーザーを発振する施設の設計、建設を行い、高いピーク輝度、フェムト秒の極めて短いパルス、完全なコヒーレント性（の性能<sup>2</sup>を実現するものである。

第二期（平成 23 ～ 24 年度）においては、SASE 方式から更に進んで、光源の安定化と高品質化を実現可能にするシーディング技術の導入を行い、最終的に、さらに高いピーク輝度を実現<sup>3</sup>するものである。

本計画の必要性について、以下のように評価した。

#### (1) 科学技術・学術的評価

##### ）科学技術・学術的観点から意義が高いか

（独創性、革新性、先導性、発展性）

##### ・独創性

本計画の要素技術である超高電圧熱カソード電子銃、高加速勾配加速管や真空封止型アンジュレーターなどの我が国の独創的な加速器技術によって、光源のコンパクト化、電子の加速エネルギーの低減化及び低コスト化が可能となった。更に、SPring-8 に併設することで SPring-8 放射光との併用が可能であり、欧米の計画では実施することが困難な独創的な利用研究を展開して、世界にも類を見ない放射光利用研究の拠点として大きな役割を果たすことが期待される。

##### ・革新性

本計画の第一期の SASE 方式では、X線の短い波長、高いピーク輝度、フェムト秒の極めて短いパルス、完全なコヒーレント性を実現する点で、これまでの SPring-8 等の放射光源や、通常のレーザー装置では実現し得ない革新的な性格を持つ光源である。

更に、本計画の第二期においては、光源の安定化と高品質化を実現するシーディング技術を導入し、光源特性の向上によって、より鮮明な画像の取得や、物質中の原子や電子の挙動を精密に測定・制御を可能とする開発が行われることが期待される。

こうした全く新しい性質を持つ光の実現により、科学技術に新たなブレークスルーを引き起こし、革新的な利用研究が実施されることによ

---

2：第一期の SASE 方式による性能は、ピーク輝度 4 ギガワット（SPring-8 の 10 億倍）、パルス幅 80 フェムト秒（同 1,000 倍）、コヒーレント性 100%（同 1,000 倍）が達成される。

3：第二期のシーディング技術の導入によって、ピーク輝度 1,200 ギガワット（SPring-8 の 1,000 億倍）、パルス幅 1 フェムト秒以上、の性能向上が見込まれる。

て、新たな知の創出に貢献することが期待される。

・先導性

X線自由電子レーザーは、これまでには実現し得なかった革新的な性格を持つX線光源であることから、極めて先導的な研究成果を出すことが期待される。特に、巨大なタンパク質の一分子の原子解像度での構造解析や化学反応の超高速現象の解明などを可能とする究極の光源として、大きな期待が寄せられている。この光源によって、ライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野を始めとする広範な科学技術において意義の高い研究の展開が期待される。（別添（p.15）参照）

・発展性

X線自由電子レーザーは、ライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野など広範な科学技術分野の発展を支える研究基盤設備であり、そこで得られた基礎的な成果が次の研究課題を生み、応用研究に生かされ、産業技術に発展するなど、多数の成果を波及的に生み出す可能性を有している。

また、X線自由電子レーザーからの電子ビームを SPring-8 に入射することで、SPring-8 の放射光のコヒーレント特性の向上や短パルス化を実現<sup>4</sup>し、これを多数の利用者に供給する構想があるなど、従来光源の併用においても発展性を有している。

将来的には、本計画の成果に、加速器技術の更なる向上を組み合わせれば、世界に先駆けてX線自由電子レーザー装置の小型化・汎用化の実現が期待される。

(2) 経済的・社会的評価

）国際競争力の向上、知的財産権の取得・活用、産業活動の活性化、社会的価値（国民の健康・安全等）の創出につながるか

X線自由電子レーザーは、ライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野など広範な科学技術分野の発展を支える研究基盤設備として、先導的な研究を担うものであり、社会的価値の創出、科学技術面での国際競争力の向上に貢献するものと期待される。

利用研究については、例えば、ライフサイエンス分野では巨大なタンパク質の一分子の原子解像度での構造解析が可能となる。これまで、結晶化が難点となっていた膜タンパク質の構造解析を短時間で行うことが実現できれば、細胞の内外の物質・情報の伝達のメカニズムが解明され、創薬につながる画期的なイノベーションとなる可能性がある。

また、ナノテクノロジー・材料分野では、物質中における超高速の状態変

---

4：X線自由電子レーザーの電子ビームを SPring-8 に入射することによって、パルス幅3ピコ秒程度（現状の10分の1）、コヒーレント性10%程度（現状の100倍）の性能向上が見込まれている。

化の観測が可能となる。この実現により、情報通信やナノエレクトロニクスのための新しいデバイスの開発につながることが期待される。

これらによって、創薬やエレクトロニクスなど関連する産業が活性化され、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の向上が期待される。

このような利用研究の発展を目指し、今後、産業界とも連携し、X線自由電子レーザーの新たな利用法の開発などについても研究を進めるべきである。

### (3) 国費を用いた研究開発としての評価

#### ) 国や社会のニーズへの適合性はあるか

X線自由電子レーザーは、前述のとおりライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野など国が掲げる重点分野の発展に大きく寄与する研究基盤として、基礎研究分野を中心とした広範なニーズに応えるものである。

#### ) 国が取り組むべきプロジェクトか

X線自由電子レーザーは、世界最高性能を目指す研究設備であり、我が国の科学技術の高い競争力を維持・強化し、独自性の発揮、自立性・自律性の確保のために、国が長期的な戦略をもって取り組むべき基幹的技術といえる。

すなわち、X線自由電子レーザーは国内外の広範な分野にわたる多数の研究者に対して、世界最高性能の光を提供し、多くの先端的な研究の基盤となる施設であることから、広く共用に供すべき施設であり、このことから、国が責任をもって整備し、運用すべきものである。

#### ) 緊急性はあるか

タンパク質の一分子解析など、X線自由電子レーザーの実現によって初めて可能となる重要な研究課題が既に提案されており、多数の研究者が本計画の早期実現を待ち望んでいる。

海外においても、米国のスタンフォード線形加速器センター(SLAC)におけるX線自由電子レーザー計画が、エネルギー省(DOE)の先導のもと2009年運転開始を目標に、国の主要な事業として進められている。また、欧州ではドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)におけるX線自由電子レーザー計画が、EUの重要な事業として、ドイツを含む11ヶ国共同で、2012年運転開始を目標に、建設が進められているなど、X線自由電子レーザーの実現は国際的な競争状態にある。(参考資料3(p.24)参照)

このような状況においては、これまでにSPring-8などが培ってきた我が国の放射光科学の優位性の維持・強化や先端的レーザー研究の更なる発展に早急に対応する必要がある。また、我が国が、本計画を早急を実現することにより、放射光科学およびその周辺分野における世界のトップランナーとしての地位を保持し、先端的研究成果とその波及効果を世界に先駆けて生み出していくことが必要であるなど、様々な面において、緊急性を有している。

) 他国の同様の計画と比較して妥当性はあるか

上記のとおり、欧米でも同様の開発計画が進められているが、我が国の計画は、最短波長 0.06 ナノメートルのX線を極めて高い輝度、極めて短いパルス、完全なコヒーレント性をもって発振する設計であり、欧米の計画に比べて同等以上の性能を有する計画である。

本計画では、細胞における遺伝子発現や分子動態解析（セルマップの作成）や分子構造変化の超高速イメージングなどの我が国独自の利用研究が提案されている。（別添（p.15 参照））

また、4. )で記述するとおり欧米の計画と比較してコンパクトかつ低コストであるため、2009 年完成を予定している米国の計画とほぼ同時期の2010 年に完成が可能となるなど、他国の計画と比較して優位性が認められる。

) ユーザーは十分いるか

SPring-8 では、国内外の利用者は年間約 1 万人以上おり、研究課題実施数は年間 1,400 件あまりを数え、多数の質の高い研究成果を生みだしている。

X線自由電子レーザーは、その構造上、設置可能なビームラインの本数が限られるため、SPring-8 のように多数のユーザーが同時に実験を行うことは困難である。しかし、我が国に数千人以上いる放射光のX線を利用する研究者にとって、X線自由電子レーザーは、時間及び空間の分解能を格段に向上した実験を可能にする究極の光源であり、世界最先端の研究の実現に向けて、その利用に強い期待を持っている。

また、放射光利用者よりはるかに多いレーザー科学の研究者にとってもX線領域のレーザー光源は、新しい研究の展開に待ち望まれていたものである。

これまでに、化学、医学、生物学、原子物理学の各分野において、X線自由電子レーザーの利用者開拓のためのシンポジウムやセミナーが開催されている。その中では、放射光科学とレーザー科学との融合による新たなサイエンスなど斬新な研究課題の提案がなされており、今後更に利用者の拡大が見込まれる。

このように利用を切望している研究者が多数いる中から、X線自由電子レーザーでしか達成できない、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させることが期待されている。このために、より効率的な利用体制の確立と、弾力的な利用計画の運用が必要である。

#### 4. より効率性の高いX線自由電子レーザー計画のあり方

) 計画の推進体制は適当か

これまで理研が要素技術開発などを行ってきており、建設に当たっては理研と加速器科学分野の人材が豊富な財団法人高輝度光科学研究センター（以下「JASRI」という。）が中心となって進めていく計画である。

また、これまで我が国の加速器研究においては、KEK が中心的役割を果たしており、X線自由電子レーザーで活用される高加速勾配加速管など優れた技術を開発してきた実績があり、既に理研と KEK との間で研究協力協定が締結されているなど、適切な推進体制となっている。

さらに、X線自由電子レーザーは未踏の光であるため、X線自由電子レーザーの実現に向けて、トップクラスの研究者を擁する大学等の関連研究機関や優れた機器メーカーとの連携・協力が望まれる。

一方、利用研究に関して、ライフサイエンス分野、ナノテクノロジー・材料分野、情報通信分野、環境分野など多くの分野の研究者が、X線自由電子レーザーに強い関心を示しており、その実現に期待を寄せている。X線自由電子レーザーは極めて革新的な光源であるため、利用研究の実施には更なる技術開発が必要となる部分もある。このため、SPring-8 やプロトタイプ機を用いた予備実験によって、計測手法やX線検出器の開発を行うことで、X線自由電子レーザーの完成直後から、極めて先端的な研究の実施を可能とすることが必要である。

したがって、本計画には、幅広い分野の利用に対応する技術開発に向けて、国内外の広範な研究者が機動的に参加できる枠組みが必要である。

) より効率的な計画となっているか

本計画は、最短波長 0.06 ナノメートルのX線を極めて高い輝度、極めて短いパルス、完全なコヒーレント性をもって発振する設計となっており、ライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野等の期待されている利用研究を実施するための、十分な性能を持っている。

欧米の計画<sup>5</sup>と比較して、本計画は設計・建設及び利用研究を含め約 400 億円（第一期分）の経費であり、最高性能を低コストで実現できる効率的な計画であるといえる。

なお、本計画は SPring-8 の敷地内に併設されるため、前述のとおり、放射光との併用による相乗効果が期待できるだけでなく、施設・人員を共有す

---

5：欧州の DESY では、発振波長 0.085 ナノメートル、全長 3.4 キロメートルの計画を 2012 年の運転開始に向け、設計・建設及び利用研究を含め約 1,200 億円（9.08 億ユーロ）の経費で建設を進めている。

また、米国の SLAC では、発振波長 0.15 ナノメートル、全長 2 キロメートルの計画を 2009 年の運転開始に向け、約 350 億円（3.15 億ドル）の経費（既存施設（3 億ドル相当）分を加えると、合計約 700 億円）で建設を進めている。

ることにより、運営面における大幅な効率化が実現できる。

) 関連研究機関との連携はとれているか

X線自由電子レーザーの開発は、同様の計画を進めている欧州の DESY や米国の SLAC の研究者と技術面・利用面の情報交換や人材交流を行うなど連携を取って進められてきている。また、理研が実施した国際評価においても国内外の主要な関連研究機関の研究者の参加を得ている。今後、建設を進めるに当たっても、国内外の関連研究機関との更なる連携・協力の拡大を図る必要がある。

また、X線自由電子レーザーの利用研究の推進に当たっては、新たな利用者の開拓に留意しつつ、利用研究の中心となる大学等の関連研究機関の研究者との連携を通じて、有機的かつ強力な推進体制の構築が不可欠である。

) 施設完成後の運営体制を視野に入れているか

X線自由電子レーザーは、共用施設として、幅広い分野の利用が見込まれていることから、利用課題を広く募集し、適切に課題選定を行う必要がある。

SPring-8 では、平成9年の供用開始以来、JASRI が施設の運営と供用業務を行っており、加速器の運転、維持管理、利用研究課題の選定、利用者への支援などに関するノウハウを有し、多大な成果をあげている。このため、X線自由電子レーザーの運営においても、JASRI の有する経験やノウハウの活用を図るなど、より効率的な運営体制の構築が必要である。

## 5. X線自由電子レーザー計画の有効性

) 計画は技術的に実現可能か

本計画の国際評価が DESY、SLAC、アルゴンヌ国立研究所(ANL)及び KEK などから世界の第一線の研究者の参加を得て、平成 17 年 2 月に理研で行われた。同評価において、「要素技術の完成度、研究グループの能力から本計画は技術的に実現可能」であり、「目標設定は野心的であるが、研究グループの力量や SPring-8 で蓄積された経験・知識を考慮すれば適当である」とし、「早期に建設を開始すべき」との勧告を行っている。

また、加速器に関する専門技術について評価の参考とするため、本作業部会委員、KEK 及び原研などの日本を代表する加速器の専門家の参加により平成 17 年 8 月に加速器技術専門家会合を開催した。同会合においては、理研が作成した X 線自由電子レーザーの詳細な概念設計書をもとにして、加速器技術の観点から集中的な審議を行い、質疑が行われた。その結果、本計画の第一期について実現可能性に問題はないとの評価がなされた。また、本計画の第二期において光源特性の更なる高度化に向けて導入が予定されてるシーディング技術に関しては、今後、必要な技術開発を早期に推進すべき、との意見も出された。

) 計画の目標設定、手段及び推進手法は適当か

本計画は、世界最高性能の光分析手段としての X 線自由電子レーザーを完成させ、共用に供することを目標としたものであり、目標設定は適切であると考えられる。

また、本計画に示された X 線自由電子レーザーの仕様は、原子・分子レベルでの超微細構造解析、電子が絡む、より高速な動態・変化の捕捉などを指向した、瞬時かつ高度に精密な計測手段を可能とするものであり、上記目標を達成するために十分なものである。

X 線自由電子レーザーは、SPring-8 と同様、共用施設として国内外の研究者の利用に供されるものであり、計画段階から潜在的な利用者の声を反映する仕組みとして、利用研究促進懇談会を設立し、その研究推進体制の基盤構築がなされたことは適切である。

) 類似の計画との関係は適当か(競争関係、補完関係との分析)

試料の微細構造を解析する大型研究施設としては、SPring-8、KEK のフォトンファクトリーなどの既存の放射光施設に加えて、現在建設中の大強度陽子加速器施設(J-PARC)は、中性子線による物質の構造解析等を計画の一つとしている。これらの施設と X 線自由電子レーザーは、それぞれ異なる特徴から相互補完的な役割を担うことが求められる。それぞれの施設の特徴を生かし、様々な側面から解析することで、対象となる物質の本質を詳細に捉えることが可能となると考えられる。

例えば、J-PARC に代表される中性子線による物質の構造研究では、数百

マイクロメートル程度の比較的大きな測定試料を必要とし、長時間のビーム照射が要求されるが、X線では捉えにくい水素原子の位置を観測することが可能となる。また、中性子の持つ磁気スピンを利用し、物質の磁気構造解析や分子の統計・時間平均された運動・挙動の推察が可能である。

既存の放射光施設においては、数十マイクロメートル程度の微小結晶でも構造解析が可能であり、かつ、同時に多数の解析を並行して行えることから、結晶作成が容易な試料に関しては、時間平均構造の解析を多数進めることが可能である。

これらに対して、X線自由電子レーザーは、その高い輝度、完全なコヒーレント性によって、一分子の構造解析を可能とすることから、上記施設では不可能な、結晶化が困難なタンパク質の構造解析や気体吸着素子などの化学反応の動態分析に威力を発揮するものと期待される。

また、X線自由電子レーザーを利用して電子のダイナミクスを観測し、J-PARCを利用してスピンのダイナミクスを観測することにより、例えば、物性物理で中心的な課題となっている高温超伝導体の全体像が明らかになることが期待され、新しい超伝導物質の開発に拍車がかかるなど、相互補完的な役割が望まれる。

）新たな知の創出や研究開発の質の向上、知的基盤の構築また、直接的な成果や波及効果が十分見込まれるか（費用対効果は適当か）

X線自由電子レーザーの利用研究は、カーボンナノチューブなどの物質内における電子の挙動に関する超高速現象の解明や巨大タンパク質の一分子構造解析などの基礎的研究に貢献するとともに、将来の創薬やデバイス開発などの産業展開に向けた基盤的研究となるものである。これらの研究開発が我が国の科学技術・学術的な多くの分野のレベル向上に果たす役割は大きく、別添（p.15 参照）に示すとおり、多くの分野への波及効果が期待される。

また、X線自由電子レーザーの建設に不可欠な高周波技術、真空技術、光学技術、超精密加工技術、永久磁石などの材料開発技術は、既に社会で利用されている製品の更なる高度化や製造難工程のブレークスルーにつながるなど、関連する多くの製造業の技術レベルを高めるものである。

X線自由電子レーザーについては、上記に示したとおり広範な波及効果があり、十分な費用対効果を有すると考えられる。

）将来の人材育成につながるか

加速器技術に関わる研究者・技術者の育成と技術継承は、加速器施設の建設、維持、技術開発等を通じて行われてきた。しかし、最近では、技術継承などの一部空洞化が懸念されている。本計画の実施によって、産業が活性化され、技術継承と研究者・技術者の育成に寄与するものと期待される。

また、X線自由電子レーザーの利用研究においても、新たに生み出された計測手法が共同利用などを通じて蓄積・継承され、多くの分野の研究者の育成につながることを期待される。

## 6 . 総合評価

本計画は、科学技術・学術的な意義が極めて大きく、経済的・社会的な意義も認められ、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と考えられる。また、本計画の施設を利用する先端的研究によって生み出される新発見、新技術により、幅広い分野において新たな研究開発が展開され、更には新しい産業や技術の創出が促されることが期待される。

以上を総合すると、本作業部会としては、本計画は積極的に進めるべきものであり、早期に着手すべきであると評価する。

なお、計画の実行に当たっては、本中間とりまとめに指摘された事項を適切に反映させることが必要である。特に、X線自由電子レーザー完成後、速やかに利用に着手できるよう、利用研究の推進体制の確立が特に重要である。

また、一定期間経過後には、それらの反映状況等について、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」及び「文部科学省における研究及び開発に関する評価指針」に準拠した中間評価を行うべきであると提言する。

最後に、本計画は、大規模予算を伴う計画であるため、その推進に当たっては、計画的かつ効率的な仕組みの構築が求められる。また、国の予算を使って行われるプロジェクトとして国民に対する説明責任があることを自覚し、本計画に対する理解の増進に努めるべきである。

## X線自由電子レーザーの利用研究の例

X線自由電子レーザーは、幅広い科学技術の発展を強力に牽引する究極の光源として期待されている。その利用研究として考えられている例を示す。

## (1) ライフサイエンス分野

膜タンパク質は細胞膜にあって、細胞内外の物質・情報伝達を担う重要なタンパク質であるが、脂質部分を含むために結晶化が難しく、かつ分子量が大きいいため、その構造解析は世界的にほとんど進んでいない。しかしながら、X線自由電子レーザーが実現すれば、膜タンパク質を結晶化することなく、立体構造を解析することが可能となる。これにより、例えば、細胞が薬剤分子にどのように反応するかを原子レベルで解明することができるようになるため、病気の原因膜タンパク質に対する創薬の基盤データとなる。

また、遺伝子発現や細胞内の分子動態解析においては、本計画によって全細胞における細胞レベルの遺伝子発現プロファイルを、時間的・空間的に従来の組織レベルよりも精密かつ網羅的に分析することが可能となる。分析により得られたデータ（セルマップ）は、生命の基本単位である細胞の理解を促し、脳科学なども含めた生物学全体の新たな展開に重要である。更に、医薬品の開発や治療効果判定などの医療への応用の可能性が開かれる。

## (2) ナノテクノロジー・材料分野

物質機能及びそれを用いた各種光電子デバイス、バイオデバイス等の動作を、省エネルギー・低負荷環境で、超高速応答<sup>6</sup>させることは、今日のナノテクノロジー・材料分野とその応用分野において、最も重要な課題となっている。このためには、実際の材料に近い不規則で複雑な系においても、物質の構造のみならず機能を担う電子の動きを、直接、フェムト秒スケールで観測する計測技術（超高速イメージング）が必要不可欠である。

従来の放射光利用技術では、光源の時間的・空間的コヒーレンスがほとんどないために、このような観測はできなかった。このため、不純物を含んだ各種無機・有機半導体で構成される電子機能デバイスや、溶液中で操作する

---

6：デバイスに入力信号を与えてから、出力信号を出すまでの応答速度。ピコ秒オーダーでの応答（THz 応答）が行われ、応答速度に対応した分析が必要となる。

化学デバイス、ナノケミマシン、更には酵素機能を利用するバイオデバイス等が動作している状態を直接、機能解析することは不可能であった。しかし、X線自由電子レーザーが実現すれば、空間的・時間的に高コヒーレントな超短パルスを利用して、「機能を見る」ことができるため、これらの課題に対する全く新しい展望が期待される。

また、特定の原子軌道のスピンの挙動を観察することも可能となるため、磁場のみならず電場、光子場など全く予想していなかった外場刺激で新しい磁性体の「機能を創る」ことができる可能性もある。

以上のようにX線自由電子レーザーは、「機能を見る」、「機能を創る」強力なツールとして、ナノテクノロジー・材料分野の研究を飛躍的に展開することが期待される。これにより、カーボンナノチューブを用いたスピントロニクス応用による超高性能メモリ素子など新しいデバイスの開発や電極上にバイオ分子を固定したバイオチップ、生体ナノマシンの創生、新しい排気ガス浄化触媒の機能の解明など多くの分野へ応用が期待される。

### (3) その他

#### 超強光子場による利用研究

X線自由電子レーザーによって、物質内部にこれまでにない強い電場を励起し、通常では起こりえない原子結合・原子解離などを発生することが可能となり、また、極短パルス真空紫外レーザーとX線自由電子レーザーの組み合わせによって、原子結合・原子解離の過程をフェムト秒スケールで実時間観測できる可能性がある。このように、これまで知ることができなかった超強光子場中の超高速化学反応をX線自由電子レーザーで観ることができるようになることで、超強光子場を利用した新しい化合物の合成や未踏機能性材料の創製などが期待される。

#### X線天文学分野

X線領域での宇宙線観測が進むにつれて、得られた知見をより正しく解釈するために、各種の再現実験が必要となっている。そのうち、X線自由電子レーザーによって得られる高い輝度のX線により、光電離プラズマや放射圧による重イオンの加速などの実現が可能となる。

これにより、X線天文学が進展し、宇宙の起源を解明が進むことが期待される。