

**総合科学技術会議が実施する
国家的に重要な研究開発の評価**

**「X線自由電子レーザーの開発・共用」
について**

平成17年11月28日

総合科学技術会議

目 次

はじめに	
審議経過	
評価専門調査会名簿	
評価検討会名簿	
1．評価の実施方法	1
(1) 評価対象	1
(2) 評価目的	1
(3) 評価者の選任	1
(4) 評価時期	1
(5) 評価方法	2
過程	2
項目	2
その他	3
2．評価結論	3
(1) 総合評価	3
(2) 指摘事項	5
我が国の科学技術に対する貢献と社会・経済への 波及効果について	5
プロトタイプ機による技術開発の役割について	5
利用研究の推進について	6
運営・評価組織の体制について	7
その他の指摘事項	7
補足資料	
補足 1 文部科学省への質問事項	9
補足 2 本研究開発における評価の論点（案）	15
補足 3 評価コメント	16
参考資料	
参考 1 第1回評価検討会文部科学省提出資料	
参考 2 第2回評価検討会文部科学省提出資料	
参考 3 後日文部科学省提出資料	

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化を図り、優れた成果の獲得や研究者の養成を推進し、社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動である。中でも、大規模な研究開発その他の国家的に重要な研究開発については、国の科学技術政策を総合的かつ計画的に推進する観点から、総合科学技術会議が自ら評価を行うこととされている（内閣府設置法 第26条）。

このため、総合科学技術会議では、新たに実施が予定される国費総額が約300億円以上の研究開発について、あらかじめ評価専門調査会が、必要に応じて専門家・有識者を活用し、府省における評価結果も参考として調査・検討を行い、その結果を受けて評価を行い、その結果を公開するとともに、評価結果を推進体制の改善や予算配分に反映させることとしている。

「X線自由電子レーザーの開発・共用」は、平成18年度予算概算要求において文部科学省が新たに実施することとした研究開発であり、平成18年度予算概算要求額33億円、5年間で国費総額375億円の大規模新規研究開発である。総合科学技術会議では、評価専門調査会において当該分野の専門家や有識者を交え調査・検討を行い、その結果を踏まえて評価を行った。

本報告書は、この評価結果をとりまとめたものである。総合科学技術会議は、本評価結果を関係大臣に意見具申し、推進体制の改善や予算配分への反映を求めるとともに、評価専門調査会においてその実施状況をフォローすることとする。

審議経過

9月16日 評価専門調査会
評価対象、担当議員・委員、進め方を確認

9月22日 第1回評価検討会
ヒアリング、追加質問と論点候補の抽出
追加意見（質問を含む。）を回収し文部科学省
へ対応を要請

10月12日 第2回評価検討会
追加ヒアリング、論点整理
評価コメントを回収し評価原案を作成

11月 4日 評価専門調査会
評価案の検討

11月28日 総合科学技術会議
評価案に基づく審議・結論

評価専門調査会 名簿

会長	柘植 純夫	総合科学技術会議議員
	阿部 博之	同
	薬師寺泰蔵	同
	岸本 忠三	同
	黒田 玲子	同
	松本 和子	同
	吉野 浩行	同
	黒川 清	同

(専門委員)

伊澤 達夫	N T T エレクトロニクス株式会社 取締役相談役
大石 道夫	財団法人かずさ D N A 研究所長
大見 忠弘	東北大学未来科学技術共同研究センター 客員教授
垣添 忠生	国立がんセンター総長
笠見 昭信	株式会社東芝常任顧問
川合 真紀	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
北里 一郎	明治製菓株式会社取締役会長
小館香椎子	日本女子大学理学部教授
小林 麻理	早稲田大学政治経済学術院教授
土居 範久	中央大学理工学部教授
中西 準子	独立行政法人産業技術総合研究所 化学物質リスク管理研究センター長
中西 友子	東京大学大学院農学生命科学研究科教授
西尾 道徳	元筑波大学農林工学系教授
原山 優子	東北大学大学院工学研究科教授
平澤 冷	東京大学名誉教授
平野 眞一	名古屋大学総長
畚野 信義	株式会社国際電気通信基礎技術研究所社長
虫明 功臣	福島大学理工学群教授

評価検討会 名簿

岸本 忠三 総合科学技術会議議員

黒田 玲子 総合科学技術会議議員

座長 川合 真紀 評価専門調査会専門委員

北里 一郎 評価専門調査会専門委員

原山 優子 評価専門調査会専門委員

板東 義雄 物質・材料研究機構 フェロー
若手国際研究拠点センター長

堀 利匡 広島大学放射光科学研究センター
副センター長

松下 正 高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所副所長

山田家和勝 産業技術総合研究所 計測フロンティア
研究部門副研究部門長

若槻 壮市 高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所教授

1. 評価の実施方法

(1) 評価対象

『X線自由電子レーザーの開発・共用』

【文部科学省】

平成18年度予算概算要求額：33億円

全体計画：5年間・国費総額375億円

(2) 評価目的

国の科学技術政策を総合的かつ計画的に推進する観点から、新たに開始が予定されているX線自由電子レーザーの開発・共用の評価を行う。

評価においては、当該研究開発の必要性、効率性、有効性という視点のみならず、加速器・放射光分野全体の中におけるX線自由電子レーザーの意義、他の研究開発との関係等も視野に入れ、高い次元から検討し、評価を行う。

(3) 評価者の選任

評価専門調査会において、有識者議員、専門委員数名を中心になり、さらに外部より当該分野の専門家、有識者の参加を得て、評価検討会を設置した。

当該分野の専門家、有識者の選任においては、評価専門調査会会長および会長により指名された評価検討会座長がその任に当たったが、この際、予算概算要求段階において、当該研究開発に参加が予定されている研究者を排除した。

(4) 評価時期

予算概算要求された大規模新規研究開発を対象とする評価であり、その結果を推進体制の改善や予算配分に反映させる必要があるため、予算概算要求提出後、9月より調査・検討を開始し、年内に評価結論を得ることとした。

(5) 評価方法

過程

第1回評価検討会において、当該研究開発の担当課長ほかから研究開発概要のヒアリング[参考1]を行い、の調査・検討項目を念頭に問題点や論点候補について議論した。これを踏まえ、評価検討会委員から追加意見(質問を含む。)を回収し、文部科学省へ対応を要請[補足1]した。

第2回評価検討会において、質問事項についての追加ヒアリング[参考2]を行い、本研究開発における評価の論点(案)[補足2]を参考にして、問題点や論点に対する考え方を議論した。

評価検討会委員から、第1回、第2回評価検討会での調査検討内容を踏まえた評価コメントを回収[補足3]した。

評価検討会における調査・検討内容及び回収した評価コメントに基づき、評価原案を作成した。

評価専門調査会において、評価原案及び文部科学省から提出された資料[参考3]について調査・検討し、評価案を作成した。総合科学技術会議本会議において、審議を行い、結論を得た。

項目

評価検討会では下記項目について調査・検討した。

A . 科学技術上の意義

当該研究開発の科学技術上の目的・意義・効果。

B . 社会・経済上の意義

当該研究開発の社会・経済上の目的・意義・効果。

C . 国際関係上の意義

国際社会における貢献・役割分担、外交政策との整合性、及び国益上の意義・効果。

D . 計画の妥当性

目標・期間・資金・体制・人材や安全・環境・文化・倫理面等からの妥当性。

E . 成果(見込み) 運営、達成度等

投入資源に対する成果（見込み）運営の効率性、及び目標の達成度等。評価結果の反映状況の確認等。
(ただし、Eについては、新規研究開発であることから、その内容を考慮。)

その他

評価検討会は非公開としたが、資料は原則として検討会終了後に公表し、議事録は発言者による校正後に発言者名を伏して公表した。

2. 評価結論

(1) 総合評価

「X線自由電子レーザーの開発・共用」は、物質の一原子レベルの超微細構造や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最先端放射光研究施設「X線自由電子レーザー（X-FEL）装置」を整備し、X-FELを効果的かつ効率的に利用することによって、ライフサイエンス分野、ナノテクノロジー分野、材料分野などの広範な科学技術分野において先端的研究成果を多数創出することを目指すものである。

X-FELは、波長0.1ナノメートル以下のX線領域において、100フェムト秒以下の極短パルス及び良好な干渉性を実現する「放射光とレーザーの特徴を併せ持つ光」であり、そのピーク輝度はSpring-8の10億倍を上回る。このような特性を持つX-FELによる、対象物の原子レベルでの構造解析や超高精度・超高速イメージングによって、単分子での生体成分の立体構造解析、ナノレベルでの化学反応の動的観察、細胞の高分解能イメージングなど、従来の手法では実現が不可能あるいは極めて困難な分析が可能となる。例えば、タンパク質の立体構造解析において、X-FELは放射光、電子顕微鏡およびNMRなどの従来の分析法における制約を取り除く手法を提供する。特に、現状では構造解析に膨大な労力と資源を要し、

新たな手法の開発も検討されている結晶化の困難なタンパク質に対して、単分子レベルでの迅速な解析がX - F E Lによって可能となれば、重要なタンパク質の構造・機能情報の特許化や創薬・新規診断法への波及が期待される。また、S P r i n g - 8 によって、金属担体に水素やアセチレンなどの気体分子が高密度に吸着している状態の観測が可能となつたが、X - F E L はさらにその気体分子の動態を化学反応領域の時間分解能で観測可能とする唯一の手段となりうるものである。これによって、燃料電池の開発研究における、新たな気体吸蔵素子の開発にも展開の可能性が見込まれるなど、幅広い分野で産業や国民の生活向上に役立つ成果を諸外国に先駆けて創出することが期待される。さらに、X - F E L 装置の開発により、加速器本体、マイクロ波、電源、精密計測制御、精密機械加工等の装置の製造に関わる中小を含めた企業群に対し、技術の向上等の貢献が期待され、その意味での社会・経済効果は高い。

X - F E L 装置から得られる超高輝度・超短パルス硬X線の科学技術への貢献の可能性は国際的にも広く認知され、欧米では既に大規模プロジェクト（D E S Y（独）、S L A C（米））が開始されている。欧米の先行プロジェクトに対して、本プロジェクトでは独自技術を駆使したコンパクトな設計と短期間での整備計画に特色があり、計画通りに平成22年度に利用研究が始められれば、改めて我が国の加速器技術の高さを示す良い例となるばかりでなく、その成果の普及と海外の研究者も含めた利用促進による国際貢献（特にアジアのリーダーとして）が期待され、我が国の国益のためにも重要と考えられる。また、要素技術の開発に当たって、海外に先駆けた技術に関する特許取得の取組が進められており、今後の加速器・放射光分野における我が国の国際競争力強化につながると期待される。さらに、計画されているようにX - F E L 装置が第3世代放射光施設であるS P r i n g - 8 サイトに併設され、既存の高輝度放射光と複合的に利用できるようになれば、海外にも例の

無い複合的最先端放射光施設として、革新的な成果が期待できる。

欧米の計画が超伝導加速器やレーザー光陰極RF電子銃等の先進的であるが故に定着しているとは言い難い技術を用いるのに対して、本プロジェクトは熱陰極DC電子銃及び常伝導リニアック等の既に実績のある技術を利用し、さらに我が国が得意とする短周期長の真空封止アンジュレーター及び日本のオリジナルの技術であるCバンド加速管を組み合わせることによって、小型・低コストの設備で、諸外国と同等以上の性能を実現しようというものである。若干のリスクは想定されるものの、これまでの要素技術に係る研究成果及びプロトタイプ機によって実施される今後の研究の成果の還元により、早期実現の可能性は高い。

以上のことから、本プロジェクトは実施することが適當である。なお、実施に当たっては以下の指摘事項への対応が必要である。

(2) 指摘事項

我が国の科学技術に対する貢献と社会・経済への波及効果について

X - FEL 装置の開発により利用可能となる超高輝度・超短パルス硬X線が、放射光科学分野に留まらず、物質科学や生命科学等、科学技術全体に対してどのように貢献できるのか、より具体的な説明に努めていくべきである。X - FEL によって実現可能性の見込まれる研究について、その可能性の定量的な検討、実現に向けて必要なR & D の明示と具体的な研究体制を提示していくことによって、内外のサポートが得られやすくなり、さらに潜在的な利用研究の発掘も期待される。

また、X - FEL の利用研究によって期待される我が国の社会・経済への波及効果について、国民に分かりやすい形で説明し、産業利用を含めた具体的な貢献に至るシナリオを提示していくべきである。さらに、さしつけ「魔法の

光」ともいえるX - F E Lを生み出す最先端科学技術施設の成果と可能性について、次代を担う若者、少年少女の科学への興味・関心を惹きつけられるよう、積極的に広報していくべきである。

プロトタイプ機による技術開発の役割について

本プロジェクトは欧米に比して開発のスタートは遅れたものの、我が国独自の技術をベースとした戦略をもって推進されている。その上で、さらに他国に先んじる成果を上げるためににはタイトなスケジュール設定が必要であり、そのためには平成17年度中に運転が開始されるプロトタイプ機による研究・検討の成果を、X - F E L装置のデザインと整備計画に的確に反映させるための道筋と仕組みを明確にすることが望まれる。特にX - F E Lの利用研究を推進し、高度化する上で重要なスーパーシーディング技術を早期に実用化させるためには、プロトタイプ機の十二分な活用とその成果の還元が不可欠である。

また、プロトタイプ機自体も高輝度フェムト秒真空紫外コヒーレント光源として、新たな研究分野の開拓に供するための利用体制を早急に整えるべきである。

利用研究の推進について

CDR (Conceptual Design Report) 国際レビュー委員会の報告及び本評価検討会での説明から、X - F E L装置本体の開発に関しては十分な検討がなされていると判断されたが、利用研究についてはさらなる検討が求められる。生体分子の立体構造解析や化学反応のリアルタイムイメージングなど、X - F E Lが果たしうる可能性は極めて大きいが、X - F E Lが基礎科学に加えて、広く社会に貢献できる利用分野を開拓するためには、その利用研究による成果が具体的な形となることが重要である。

Spring - 8では、海外に比べ稼動開始が遅れたために、簡単だが意味のある研究、例えば位相コントラスト

イメージングやコンパウンドX線レンズといった、当該分野におけるその後の研究の方向性を決める重要な成果を諸外国に先行されてしまった。これは単に光源の利用開始が遅れたということのみでなく、ユーザーが第3世代の光源を使いこなすための技術や問題意識を持つまでに時間がかかったという部分も影響している。同じことを繰り返さないためには、利用研究に関する技術的基盤の整備、課題の選定と実験技術に関する準備、有力な研究者・研究グループの取込みなどを、今後早急に進展させることが不可欠である。当面はX-FELを用いることによって初めて実現可能となる戦略的な研究課題を絞り込み、そのための技術開発に注力することが肝要である。特に、早期に具体的な成果が見込まれる課題に関しては、X-FEL装置の開発と並行して準備を進め、運転開始と同時に研究を展開できる体制を整えておく必要がある。具体的には、優れた研究課題を選定するための利用推進専門委員会を立ち上げるとともに、利用研究の重要性とDESY、SLACの例で見られるような、海外における巨額の研究資金の投資状況等を勘案し、当該分野での競争的資金の積極的な獲得などを通じて、優れた利用研究を着実に実施できるよう努力することが必要である。

運営・評価組織の体制について

X-FELを用いた、極めて挑戦的で技術的に難しいテーマについては、複数の研究グループの長期的展望に立った協力関係をX-FEL運営主体がイニシアティブをもって形成し、優れた研究を推進する仕組みをつくることが必要である。黎明期のX-FEL利用研究においては、ピーク輝度やコヒーレンスなどX-FEL特有の先端性を生かすために施設側の研究者と利用研究者が緊密に協力することが不可欠であり、汎用型放射光施設に移行しつつあるSpring-8の利用研究スタイルとはおのずと異なるものとなる。既に財団法人高輝度光科学研究所センター（JASRI）

S R I) で運用されている課題申請システムや宿舎その他のユーザー受け入れ体制は積極的に活用すべきであるが、効率性を求めるあまりに一元的な体制に固執することなく、両者の持つ役割を勘案し、相乗効果のある適切な運用を進めていくことが重要である。

利用研究の課題選定と評価については、X - F E L 特有の研究スタイルを考慮した独自の方針を打ち出していくことが望まれる。建設の進捗管理、個々の利用研究の内容と進捗状況の評価、成果を創出するためのマンパワーが十分に確保されているかなどについて、運用・推進主体による内部評価に加えて、外部評価委員会による厳しい評価が適時なされるべきである。

その他の指摘事項

極めて先端性の高い研究から、汎用的な分析・計測まで、研究分野が非常に多岐にわたる放射光利用の将来の発展と、X - F E L 装置の効率的な利用を考えると、汎用的ツールに移行しつつある S P r i n g - 8 等の従来の放射光施設の活用、役割分担についても X - F E L と並行して検討することが望まれる。

また、完成後に X - F E L 装置が計画通りの性能に達したか、あるいは発振した X - F E L がどのような特性を持っているかは、利用研究を進める上で極めて重要である。X - F E L の諸特性を精密計測するためのシステムに関しても十分な検討が望まれる。

《補足資料》

補足 1 文部科学省への質問事項

補足 2 本研究開発における評価の論点（案）

補足 3 評価コメント

《補足 1》

「X線自由電子レーザーの開発・共用」 文部科学省への質問事項

1. X線自由電子レーザー（X-FEL）の研究開発の意義について
加速器科学、放射光科学の分野全体の中で、このプロジェクトをどのように位置付けて推進するのか、既存の放射光施設のあり方などを含めた説明、資料を示されたい。
第1回検討会資料2-2にも示されている通り、X-FELが先端科学技術に大きなインパクトを与え、多くの研究アウトプットを生み出すとしても、約400億円の大きな資金を使う以上は、それが社会にどのような変革をもたらすのか、期待されるアウトカムは何なのか（何を目指すのか）を、総花的ではなく、わかりやすく示すべきである。例えば、医療や産業の現場に対してどのように貢献できるのかをより具体的に示されたい。また、国民にどのようなメリットがあるかについて、より明確で国民にも分かりやすい形で示されたい。
開発（建設）に関して企業が参加するような部分がどのくらいあるのかについて示されたい。
本プロジェクトの開発推進にあたって、特許化可能なものはあるか。

2. X-FEL施設の開発要素に関わる問題について
開発において他国の先行特許が障害となることはないか。
本計画は、既に実績のある技術を用いて諸外国と同等以上の性能を実現しようというもので、各要素技術の開発が進展しているとのことであるが、それらの技術を統合し、スケールアップする上で新たに生じる課題等が考えられるか。例えば、非常にギャップが狭く長尺のアンジュレータの中をビームを長時間安定に通す技術等、本研究開発において問題とならないか。また、このような開発において顕在化する可能性のある諸問題について説明するとともに、2010年にたしかに発振できるというロードマップを示されたい。
単分子の構造解析のために、どのくらいの光が必要かという点について、アセスメントとして示されていない。SASEによる光が単分子を対象として使用可能かについて追加資料の提示と説明を願いたい。その結果、SASEでは無理でシーディングが必要だということであれば、むしろシーディングを早期に進めるべきではないか。
移動装置による実験ハッチの入れ替えを予定しているとの説明がな

されたが、ファインチューニングを要する装置を実験のたびに移動させるのは非現実的ではないか。照射用ハッチで実験中も前段の準備用ハッチで作業できるような措置を想定しているのか。また、実験ハッチはいくつ予定しているのか。理想的には、S L A C や D E S Y で計画されているようにアンジュレータの後ろで X - F E L ビームを複数の扇状にならんだ実験ハッチに送り込むことで、タイムシェアリングができる方が、利用研究にとっては好ましいのではないか。以上の点を踏まえ、実験ハッチの有効利用について詳細に示されたい。

第1回検討会 資料2 - 2 の 24 ページに 2 次元 X 線検出器の開発について記述されているが、具体的にどのような検出器の開発を予定しているのか示されたい。

単分子構造解析におけるタンパク質の構造均一性に関して、カルシウムチャネルを例に挙げ、カルシウムの有無など、いくつかの状態がある場合、その一つの状態に固定したものについて単分子構造解析を行うので、コンフォメーションが揃っているとの説明であったが、たとえばカルシウム無しの「状態」でタンパク質を調製したとしても、イオン化して射出した单分子が皆同じ立体構造を持っている保障はないと思われる。結晶を精製する際は、「結晶場」に並べることで同じコンフォメーションを持ったタンパク質をセレクトしており、溶液中ではやはりフレキシブルな部分はフレキシブルであると考えられるので、百万個の单分子の散乱像を集めて構造を解いた場合に、フレキシブルな部分の構造は見えないことになるのではないか。

第1回検討会資料2 - 2 の 6 ページ、「X - F E L で加速した電子ビームを S P r i n g - 8 に入射することで、 S P r i n g - 8 の一層の性能向上を実現」とあるが、ストレージリングである S P r i n g - 8 のビームクオリティーは、放射励起と放射減衰のバランスにより決まるエミッタنسに左右され、入射ビームのクオリティーの記憶をとどめないため、特に性能向上が期待できないのではないか。何か特別な措置を検討されているのか。

3 . プロトタイプ機の利用について

S P r i n g - 8 では、数年の遅れによって、かなりの成果を諸外国に先取りされたと聞いている。そのため、プロトタイプ機で既にすべて問題が出尽くしているのであれば、これを前倒しして本当に世界初の成果を出すという計画にならないのか。

プロトタイプ機によるシーディング研究の重要性に鑑み、プロトタイプ機の今後の運用に関する資料・説明が必要である。来年度以降の予算に、プロトタイプ機に関わる研究が含まれているのか。プロトタイ

プロトタイプ機の利用と、X - F E L本体の開発とが仕分けられているのか。プロトタイプ機の研究開発が継続して行われ、それがX - F E L本体の開発にフィードバックされる仕組みがあるのかについて、明確な回答を求める。

プロトタイプ機で達成されたか、或いはされようとしている「加速器科学への貢献」の内容（日本オリジナルのCバンドライナックの実証等）について示されたい。

要素技術が全てプロトタイプ機で実証されるとすれば、今後高度化が必要な項目とその数値目標、及びそれを達成するための具体的方策を示されたい。

4 . 利用研究の推進・運営について

第1回評価検討会の説明では、利用研究（science cases）に関して、現状では実現が困難であり将来的に可能性のあるものを含めて漠然とした説明がなされた。開発後に直ちに実現可能な、目玉となる利用研究プロジェクトを絞り込んで検討すべきではないか。

公募テーマ、予算規模、理研との共同研究の必要性の有無など、どのように利用研究プログラムを展開するのか具体的に示されたい。

学術研究を目的とする研究者と民間利用者の差別化を行うのか。海外からの利用要求にどのように対処するのか。

5 . X - F E L施設の運営・推進体制について

開発を進めるにあたって、多くの課題を内包しており、進捗状況に対するクリティカルなアセスメントの実施が必要である。文部科学省あるいは理研においても実施されるであろうが、年度ごとにでも外部からのクリティカルな評価・指導を行うシステムが必要ではないか。

推進体制・組織に関してより詳細な説明が必要である。開発（建設）を監督する組織、進捗状況を評価・指導する組織、利用研究を推進・監督する組織など、プロジェクト内（あるいは外部）の組織構成と、その規模や人員構成について示されたい。

マンパワーに関して、建設で50人、運営で30人という説明がなされたが、それが十分であるのかを示すために、具体的な陣容についての資料、説明が必要である。どのようなレベルの研究者あるいはテクニシャンが参加するのか等の内訳を含めて説明願いたい。

第1回評価検討会の説明では、Spring-8（非常に多くのユーザーが様々なニーズをこなす）と同様の利用形態に受け止められた。実際は利用研究技術や対象など大きく異なると考えられ、多数のユーザーを抱えるSpring-8とはまた違う運営方針が必要ではな

いか。

共通部分と個別の部分について、S P r i n g - 8との運用面におけるすみ分けを明確に示されたい。

理研サイドからどの程度の人的、予算的な投入を行う予定なのかについて、特に理研内からの自助努力による参加、あるいは利用推進協議会の年間4．5億円のプロジェクトでの利用実験にどのくらいのグループが参加（effort率も含めて）するのかについて示されたい。

産業（民間）利用も視野に入れた際の、利用・課金制度について、詳細な説明を願いたい。

6 . その他

第1回検討会 資料2 - 2に国際レビュー委員会の評価結果の抜粋が示されているが、英文の本文全文を閲覧することは可能か。

第2回評価検討会 文部科学省の説明資料[参考2]に対する追加質問

質問1 - (ページ3)

セルマップについて。チップ上の細胞のマニピュレーションや、X線蛍光イメージング実験のセットアップについての説明がないので、実現可能性のアセスメントが難しい面がある。たとえば、X線蛍光イメージングを0次元蛍光X線検出器で行う場合、Pt、Euなど使用する元素ごとにX線波長を変え、細胞の同じ場所を何度もXFELビームでスキャンすることになるが、放射線ダメージはないのだろうか？

現在手に入る2次元検出器では、入射光と蛍光X線の波長の違いから、蛍光X線のみをイメージングする検出器はないが、この方向での新しい技術開発は検討されているか？

前回の説明資料2-2の9ページのセルマップの解説図の左側に「放射性同位元素」を使うとあるが、本実験では従来の放射性同位元素によるマッピングよりも感度の高いものを提唱されているのではないか？

機能性RNAは昨今特にその重要性が注目されており、機能性RNA発現の細胞内分布の微量解析は非常に有望と思われる。mRNA、DNAについては発現のみを解析しても、成熟タンパク質の発現レベルや、そのタンパク質により影響を受ける他の生体物質(ホルモン、核酸、脂質、糖鎖、ヌクレオチドなど)の量がどう変化するかのマップはできないので、本当の意味での「セルマップ」は難しいのではないか？

また、RNA、DNAがどのタンパク質と相互作用するかの解明が期待できるとあるが、XFELでどのようにタンパク質とRNA/DNAの相互作用を測定するのか示されたい。

病院にTOF-MSにおいて発現量を測定し、XFELで測定した「セルマップ」と付き合わせることで、診断に利用するという応用例が挙げられているが、TOF-MSで個々の細胞のRNA発現量を測定できるのだろうか？RT-PCRのようなものとの組み合わせを考えられているのだろうか？

質問2 - 、11ページ

Referenceの年は2002年でなく、2001年。「この十分条件は、波長0.25nmのX線に対する・・・」は分解能0.25nmの間違い？文献によれば、X線の波長は0.15nmで分解能が0.25nm。

分解能が0.25nmは近年の構造解析ではむしろ低分解能で、ドラッグデザインや、酵素反応の解明には0.2nmから0.1nm程度が良く使われるようになってきているので、XFELでも将来はこの程度の分解能が期待されるようになることを考慮する必要があろう。

「より分解能の低い散乱データのみから分子構造の高分解能構造解析を可能とするアルゴリズムの開発」は具体的にはMEM（マキシマムエントロピー法）のことかそれとも他のものか、また、どの程度の分解能のデータを取ればよいと考えているか具体的に示していただきたい。

質問2 - 、15ページ

X線結晶構造解析すでにわかっている同一タンパク質のいろいろな状態の高分解構造を用いて、それ以外の構造のダイナミクスを明らかにする研究ならば理解できるが、de novoで高分解能構造解析をする場合は状況がまったく異なる。そもそも、一枚一枚のX線散乱イメージが、どの方位を取った分子であったかを計算するアルゴリズムがない現在、それぞれの分子が「それなりのフレキシビリティー」をもって様々な構造をとっていて、しかもその構造がまったくわかっていないときに、どうやって「ある程度」同じ形をした分子からのイメージを集めてくるのかがわからないので、ご説明をいただきたい。ちなみに、2001年のJ. MiaoのPNAS論文では、全ての散乱イメージの分子方向性は既知として構造再構成をしている。

また、膜タンパク質の場合の脂質分子のように、一般の可溶性タンパク質の場合周辺の水分によりその活性が作用されることがあるが、単分子を飛ばす場合にどのくらいの（どの）水分子を残すべきかを判断する方法、また、そのようにして水を残してタンパク質を飛ばす技術が必要であろう。

《補足 2》

本研究開発における評価の論点（案）

論点 1 . 我が国の科学技術及び社会・経済に対する貢献について

X線自由電子レーザー（X - F E L）の開発により、極めて高輝度のフェムト秒高コヒーレンス硬X線の発振が可能となることによって、放射光科学の分野に留まらず、我が国の科学技術全体に対してどのように貢献できるのかを具体的に示すべきである。また、産業や医療の現場に還元できる実用的な貢献について、国民に分かりやすい形で説明に努めるべきである。

論点 2 . X - F E L 開発とプロトタイプ機による成果の還元について

X - F E L の開発に関しては、欧米に対して遅れをとらないために、タイトなスケジュール設定が必要であるため、開発要素に関する課題を予め明確にし、開発を成功させる上でのロードマップを示すべきである。特に、シーディング技術の確立を含め、今年度中に運転が開始されるプロトタイプ機による研究成果をX - F E L の開発に着実に還元・反映させることが不可欠である。

論点 3 . 利用研究の推進について

生体分子の立体構造解析、化学反応のリアルタイムイメージングなど、X - F E L が果たしうる可能性は極めて大きいが、社会への具体的な貢献は、そこで実施される利用研究の成果が形となることによって初めて生み出される。欧米に対して開発に若干の遅れのあることを勘案すると、実用化段階に入る前から、利用研究の具体的な提案、推進システムと運営体制について、入念な準備を行い、早期に具体的な成果が見込まれる利用研究を、X - F E L の実用化と同時に開始する必要がある。

論点 4 . 運営・評価組織の体制について

S P r i n g - 8 による運営方法の経験を生かすことは重要であるが、非常に新しく難しい研究を実施するX - F E L の運営方法は、極めて多数のユーザーが様々な目的に利用するS P r i n g - 8 とはおのずと異なることを考慮する必要がある。質的量的にも十分なマンパワーを供出し、効率的な運用を進められ体制の具体像を示すべきである。また、開発を成功させるために進捗状況をクリティカルに判断するシステムと、利用研究の公募から成果内容までを的確に評価するシステムを構築することが重要である。

《補足 3》

評価コメント

1. 評価の論点に対する意見

【論点 1 我が国の科学技術及び社会・経済に対する貢献について】

- ・パブリックコメントを求めることも考え、「国民にどういうメリットがあるか、分かりやすい形で説明に努めるべきである。」
- ・我が国科学技術に対する貢献とその社会・経済への波及効果について
- ・X線自由電子レーザー（X-FEL）の開発により発生可能となる超高輝度フェムト秒コヒーレント硬X線が、放射光科学分野に留まらず我が国科学技術全体に対してどのように貢献できるのかを具体的に示すべきである。またそれによって期待される我が国社会・経済への波及効果について、国民にわかりやすい形で説明に努めるべきである。（X-FELのような先端的な科学技術ツールに対して、アウトカムを議論するのは無理がある、科学技術に対する貢献で十分ではないか、との意見があったが、予算申請に際して、今やアウトカムの提示はマストの要素となりつつある。例えばJ-PARKでさえも、その産業利用など、国民に直接訴えかける具体的な議論をしている。従つて、X-FELについても、少なくとも社会に貢献できるアウトカムに至るシナリオを示す必要を感じる。）
- ・電子銃や真空封し型アンジュレータ、極めて高精度なビーム制御光学系等の加速器関連技術による科学技術への波及効果が大いに期待できる。医療等の応用分野への社会還元はあまり大上段に構えず、むしろ広く先端技術、理学、工学、生命科学、医学等の科学においてインパクトの高い研究が展開されることを実例により示せるかどうかで、X-FELの真価が問われる。
- ・科学技術の発展、特に基幹技術分野での研究のオリジナリティと重要性をより明確にし、見込まれる独創的な研究成果の社会に及ぼす波及効果をわかりやすく述べるべきである。
- ・本研究開発が加速器科学の今後の発展に対し多大の寄与をなすことは間違いないので、その内容を具体的にアピールしておくべきと考える。リニアコライダーなど、将来スタートする可能性のある大型研究開発に対する貢献についても明示しておくべき。
- ・X線領域においてレーザー光を得ること自体が技術的に大きな飛躍といえる。一方、レーザー光といえどもX線領域では物質に関するミク

ロ、マクロな情報を機出すプローブ、あるいは物質を創製、加工するツールとして有効に利用されてこそより意義があると言え、海外の計画でもそのような点を意識した検討が行われている。

- ・この計画は現段階では、X線自由電子レーザー（X - F E L）を実現すること自体に、注意と力が向けられているように見える。X - F E Lが実現したことにより、物質科学、生命科学にどのようなインパクトを与えることができるのかについての説明については、まだ大幅な改善が望まれる。総額400億円という巨額の資金が国民の税金から投入されると考えると、科学者、技術者や一般国民に対して、それぞれにわかりやすく論理的飛躍がないように説明することが必要である。ライフサイエンス分野、ナノテクノロジー、材料分野、産業展開にむけた基盤などの表現が使われることがあるが、これらの言葉を使うときには第3世代放射光以上にX - F E Lがどのような対象にどのような手法を用いて有効に貢献することができるということを具体的な例を論理的な飛躍を伴わない形でわかりやすく説明することが必要である。

【論点2 X - F E L開発とプロトタイプ機による成果の還元について】

- ・欧米に比し、スタートは遅れたが、我が国独自の技術をベースとした戦略をもって、他国に先んずるには、タイトなスケジュール設定が必要である。
- ・X - F E Lの利用研究を推進するにあたり重要なであろうシーディング技術の確立を含めて、今年度中に運転が開始されるプロトタイプ機による研究成果をX - F E L開発に的確に反映させることはもとより、プロトタイプ機自身も高輝度フェムト秒真空紫外コーレント光源として新たな研究分野の開拓に供するための利用体制を早急に整えるべきである。
- ・プロトタイプ、実機の開発要素はかなりの部分先行して進められており、ロードマップも示されている。250 MeVのプロトタイプ機でX - F E Lが発振した場合に、それを8 GeVにスケールアップするために必要な技術が何なのかをもう少し明確にする必要がある。現在の計画は、250 MeVから8 GeVへの推移は物理としては問題ないという印象があるが、ビームのジッター、エネルギーや位置の安定性など、プラクティカルな問題について8 GeV対応がどのくらいされているかがわかると良い。
- ・欧米に先行してX - F E L開発が進むようにプロトタイプ機の早急なる開発と、そのためのしっかりとしたロードマップを示すべきで

ある。

- ・プロトタイプ機を用いて本研究開発と併行して実施すべき R & D 項目が指摘されており、その成否が X - F E L の成果を左右しかねない。プロト機の今後の十二分な活用が望まれる。ユニークなスーパー・シーディング技術の開発に早く着手し、見通しが得られることを期待したい。
- ・熱陰極 DC 電子銃、真空封止アンジュレータの開発、高工研グループが開発した常伝導 C バンドリニアック技術の利用という、重要な要素技術をすでに持っていることは高く評価でき、海外と比べて開発のスタート、利用研究課題の検討などでやや遅れている印象があることを補い、現計画をポジティブにとらえることができる要因となっている。
- ・一方、これらの要素技術があれば全てうまくいくと主張しているようにも聞こえる部分があるが、プロトタイプでのテストをすることは、これらを組み合わせて総合的に動作させるときに起こる問題、課題を洗い出し、それらにどのような対応し克服することを見出すことが必要と認識して行っていると理解できる。そのような段階で見出した問題と解決策についての知見を、6-8 GeV・X - F E L のデザイン、建設にフィードバックしてよりよいものとするための、道筋、仕組みを明確にすることが望まれる。プロトタイプ機に関しては、シーディング技術の開発に関する説明が多くあったが、それ以前の問題、課題についてもどのようなものをどのようにプロトタイプ機でスタディーし 6-8 GeV 機にフィードバックしてゆくのかの説明があると、計画についての理解がより得られると思う。
- ・プロト機でシーディング技術の開発を行うと述べているが、「スーパー・シーディング」では電子ビームの単色性の向上が必要という指摘が加速器の専門家からなされており、この点についてもより丁寧な説明が必要である。

【論点 3 利用研究の推進について】

- ・本プロジェクトは利用研究を併行して推進することにより、社会貢献に繋がる道が開かれるので、幅広い体制作りに努めるべきである。
- ・生体分子の立体構造解析、化学反応のリアルタイムイメージングなど、X - F E L が果たしうる可能性は極めて大きいが、そこで得られる研究成果が、基礎科学に加えて、広く社会に貢献できる利用分野を積極的に開拓するため、利用研究推進体制について入念な準備を進めつつ、早期に具体的な成果が見込まれる利用研究については、X - F E L 開発と平行して開始する必要がある。X - F E L は極め

て広い利用分野が想定されるが、当面X - F E Lを用いて初めて実現できる戦略的な研究課題を絞り込み、そのための技術開発に注力することが肝要である。

- ・利用研究のある程度の方向性は示されているが、「論点1」で述べたように、基礎科学にどれだけ革新的な貢献ができるかが本プロジェクトの最重要課題であるので、[論点3]は、他の論点よりもスペースを割いて論じるべきであろう。
- ・2月に行われた国際レビューの本文を見ると Scientific Case については、欧米での例をいくつか列記し、今後の発展が期待されるにあるくらいで、実質的なことはほとんど何もふれられていなかった。それに対し、その後、理研内部で利用者懇談会を組織し、200人以上が参加してプロジェクト検討を進める中で、RNA のセルマップなどユニークなアプリケーションも見出されてきている。単分子構造解析については、UCLA の John Miao との共同研究で、SPring8 を実際に用いて feasibility study も行い、論文発表するなど将来の方向性を見極めて準備している。ただし、タンパク質の単分子構造解析は、成功したあつきには、生命科学分野で非常に高いインパクトのある研究成果につながる期待があるだけに、そこに至る過程の研究上のロードマップをしっかりと提示し取り組んでいただきたい。たとえば、X - F E L ビーム中に到達したタンパク質分子一つ一つの配向を決定する方法論などのように、極めてチャレンジングなプライオリティーの高い課題から取り組む体制が必要。
- ・オリジナリティの高い利用研究を数多く推進するためにも、X - F E L 開発と平行して利用推進委員会（全国規模）を立ち上げ、優れた研究課題の早期の絞り込み等の取り組みが重要である。
- ・具体的な利用方法や手段が必ずしも明確でない現在、理研を核とする全日本規模の推進体制を敷いて欲しい。
- ・利用研究については、CDR での記述、国際レビュー委員会の報告、本委員会でのプレゼンテーションから判断すると、X - F E L 本体の検討にくらべると、詰めが不十分で、海外での検討結果があるということに助けられているとの印象を受ける。X線 FEL およびそれを用いての物質・生命科学研究が意義があることは、海外での動向をみても理解できるが、逆に利用研究の展開について海外で相当なレベルの検討および準備活動があることから、日本で X - F E L 光が得られたときに利用研究において独自のものが展開されないと国際的に高い評価を得ることが難しいという局面も想像される。この点に関しては文科省、理研グループも認識をされ、これから利用研究検討体制を整備することを考えているという説明がなされたが、400

億円もの大きな国家予算をつぎ込もうとしているプロジェクトの提案をしているわりには現段階の状況は聞くものがなるほどと思えるほどテーマや研究推進体制が詰まっていない印象を受ける。今後、早急に利用研究の中身をつめ研究推進体制を整備するとともに、実際にそのような検討、必要な R&D が順調に進展しているかについて定期的に第 3 者的立場から評価を行うことが有効と思える。

具体的テーマについて、(1) どのような科学的対象について、(2) どのような情報を、(3) どのような手法で、(4) どのような研究グループが、得ようとしており、(5) それを実現するための課題と解決策、R&D の進行状況、(6) 研究成果が得られたときの科学的、技術のあるいは社会的意義、などについて、具体的に論理の飛躍なく解り易く説明する努力を継続して欲しい。

- Spring - 8 では、海外に比べ稼動開始が遅れたために、簡単だが意味のある研究を先にやられてしまったという説明があったが、これは単に光源の利用開始が遅れたということのみでなく、ユーザーが第 3 世代の光源を使いこなすための技術、問題意識をもつまでに時間がかかったという部分も相当影響している。同じことを繰り返さないためには、単に光ができる時期を早めるということのみではなく、利用に関しての技術的基盤の整備、課題の選定と実験技術に関する準備、有力な研究グループの取り込みなどを、今後急速に進展させることが不可欠と思える。

【論点 4 運営・評価組織の体制について】

- 前述のように、タイトなスケジュールで最大の成果を上げるために効率良い運営を図ることは勿論であるが、集中的なマンパワーの投入も考えるべきである。
- Spring - 8 における運営・評価の経験を生かすことは重要であるが、Spring - 8 が多数のユーザーによる多目的利用を基本とするのに対して、X - FEL は第 3 世代放射光源とは特性が大きく異なる単機能に近いマシンであり、その運営方法は自ずと異なる部分が生じるはずである。課題選定や評価に関しては、Spring - 8 の課題選考委員会に X - FEL 分科会を設置することで対応可能と思われるが、運営に関しては Spring - 8 との一体管理による効率化に加えて、独自に必要となるマンパワー等について、予定されている体制が十分機能するか、一層の検討が必要と思われる。
- 黎明期の X - FEL 利用研究においては、ピーク輝度やコヒーレンスなど X - FEL 特有の先端性を生かすためにマシン側の研究者と

利用研究者が緊密に協力することが不可欠であり、SPring8 の利用研究スタイルとはおのずと異なるものとなる。このような研究体制と一般の課題申請は、別システムで運営することも考えられるが、JASRI で既に運用されている課題申請システム、宿舎その他のユーザー受け入れ体制はむしろ積極的に利用しながら、課題評価については、X - F E L 特有の研究スタイルを考慮した独自の方針を打ち出していくことが望まれる。

費用対効果を考えた効率的な運営体制が必要である。また、全国からの利用研究の公募に加えて、利用推進委員会での戦略的な課題の推進が不可欠である。

- ・ 説明では S P r i n g - 8 の運営方法の延長で対応できるとの印象が強かったが、それだけでは不十分との結論になったように思う。本計画を遅滞無く完遂し、そこから多大の成果を創出するためのマンパワーが本当に十分確保されているか、常にチェックし続けることが必要と考える。
- ・ X - F E L を用いた研究は、極めて挑戦的で技術的に難しいテーマについて、複数の優れたグループが役割を分担しつつ長期的な協力関係をもち、長期のビームタイムを利用して行う、という形が想像される。第 2 世代、第 3 世代放射光源で行われているように、施設が放射光を提供しユーザーが研究課題を提案して数日から 1 ~ 2 週間のビームタイムの実験を行うというパターンとは、異なるものになると思われる。複数の研究グループの長期的展望にたった協力関係を X - F E L 運営主体がイニシアチブをもって形成し、優れた研究を推進する仕組みをつくることが必要ではないだろうか。また、この研究グループあるいはプロジェクトに対してその進行状況を適切に評価しフィードバックをかけることができるような工夫も必要と思われる。

【他のコメント】

- ・ 現在の政府の基本方針のひとつ「民間でできることは民間で」に対する配慮がなされているのであれば、そこを示して欲しい。

2 . その他考慮すべき事項に関する意見

- ・ 発生した X - F E L の diagnostic system については CDR にも詳しい記述が無いが、完成後に X - F E L が計画通りの性能に達したか、あるいはどのような特性を持っているかは、利用研究を進める上で極めて重要である。X - F E L の強力なコヒーレント X 線の諸特性を精密計測するためのシステムについて検討する必要はないか。

- ・大規模の予算を投資する国家基幹プロジェクトであるので、費用対効果を十分に考慮して投資に見合った優れた研究成果が見込める運営・推進体制の構築が不可欠である。外部評価委員会による厳しい評価が適宜なされるべきである。
- ・次代を担う若者を育成する文科省の大型プロジェクトとして、これから理系を志す子供達の心に訴え、夢と希望を与える一言を付記できなかいか。小生の属する放射光施設を例にとると、あらゆる研究に有効なツール「夢の光」を提供している、と常々見学者（中高生が多い）にアピールするよう心掛けている。本計画が理系志望の若者に些かなりとも活力を付加できると良い（宇宙素粒子やコンピューター関連に比べ地味で少年少女との接点が希薄な分野ゆえ）。スローガンは、さしすめ「魔法の光」を生み出す最先端施設？
- ・X線領域で極めてピーク輝度の高い100フェムト秒程度のパルス幅をもち、しかもそれは時間的にも空間的にも高いコヒーレンスを持つビームが得られれば、それまでの放射光では行うことのできなかった研究が実現される可能性を生むこととなり、基礎科学分野に大きな貢献をする可能性がある。このようなX線ビームを実現する自由電子X線レーザーの開発は、X線物理および関連分野に大きなインパクトを与える可能性があり、海外でもSLAC, DESYで先行してX-FELの計画がある。
- ・理研の計画は、熱陰極DC電子銃、真空封止アンジュレータの開発常伝導Cバンドリニアック技術といった要素技術において独自のものを持つ点で評価できる。一方、何故X-FELを開発するのか、X-FELで得られるX線ビームを用いてどのようなサイエンスを開拓するかについては、現段階では海外での検討結果がすでにあること、海外で巨大なプロジェクトとして認められたあるいは認められつつあるという事実に大きく依存している感を否めないように思える。このような印象を払拭するためにもサイエンスベースにおいて独自なもので優れたものを提案し実行してゆくことが必要であり、そのような姿勢を示してゆく必要がある。第1回検討会議事録をみると、理研の方の「・・・。もちろん外国でも非常にあついもの（CDRあるいはTDRを指す）がでているわけですけれども、これはSpring-8のときにも厚いものをだしたけれども、そのどれだけが役にたったかを考えると、厚いものをつくるばかりがいいことではないだろうと私は思っています。」というような発言が記録されているが、400億円もの国費をつぎ込むことになるプロジェクトでは、予測できない成果が上がるというだけでなく、どのような成果が期待できるかを科学者、一般国民にできる範囲で具体的に論理の飛躍なく解り易く説明す

る努力が必要である。海外のX - F E L のプロジェクトではそのような努力をしている。

- ・ X - F E L プロジェクトを海外に遅れないように進めたいという熱意の余りか、専門的にはやや客觀性に欠ける部分があるのも気になるので、もういちど冷静に検討して欲しい。例えば、第1回検討会議事録にあるように、スパーシーディングに関して電子ビームの単色性についての質問に対して、「今より3桁というのは実は正確でなくて、実は CDR を書くときにそこのエネルギー分散を計算してみるととんでもなくいい値が出てきてしまって、これは信じてもらえないだろう」といつて、その値は適當な値が書いてあります。……」とあるが、不用意な発言をとらえて揚げ足をとるということではなく、純粹に技術的にどうなのかを知りたいと思う。もうひとつの例をあげれば、「X線 FEL で発生させた電子ビームを Spring - 8 に入射させることにより Spring - 8 の性能向上」と謳っていますが、複数の加速器研究者の意見を聞いてもストレージリングとしての性能向上は原理上期待できず、また第2回検討会での回答にある「ビーム入射直後なら、性能があがる」という説明も、電流値が極めて低くこのようなモードでの利用は現在の Spring - 8 での利用モードを犠牲にすることになるのでどの程度意味があるか疑問である。
- ・ 建設および稼動後の運転のために必要なマンパワーについて、詳細な情報を提供していただいたことは評価できる。しかし、日本の組織において人員数を確保することが難しいということはよくわかるが、人員数は極端に少ない見積もりと思える。例えば、X - F E L 運転体制という資料には、加速器の人員として 11 名があげられている。詳細は異なると思うがエネルギーがほぼ等しい 8GeV の KEK リニアックのグループでは、現在 30 数名のスタッフと 10 名弱の業務委託要員が運転にあたっている。大型施設の建設期には、世界第一線級の施設をつくるという熱意により志気もあがり、民間の力も活用することにより少人数でも海外の施設建設に匹敵することをやり遂げた例はこれまであるので、何とかなるかもしれないが、長期的に安定に運転しつづけ絶えず改良・改善を重ねて性能を上げてゆくことが必要なフェーズになると熱意と頑張りだけでは、海外の競合関係にある施設と対等にやってゆくことは難しいと思える。少ないマンパワーを補う工夫を、是非考えていただきたい。

3 - A . 科学技術上の意義

- ・ 結晶化が困難な膜タンパク質の立体構造解析、化学反応における原子・分子のリアルタイムイメージング、原子レベルでの細胞イメー

ジング等、X - F E Lが果たしうる可能性は大きく、科学技術上の意義は非常に高い。

- ・ 次世代放射光としては、いくつかの方式が考えられるが、X - F E Lはコヒーレントな、極めてピーク輝度の高いビームを供給できるという点で他に類を見ないユニークな方式である。加速器科学における効果は明らか。X - F E Lを用いた利用技術については、未知の分野で具体的な成果を予測するのは困難ではあるが、コヒーレンス性をフルに利用したイメージングや単分子構造解析等、方向性のある程度見えているものについては、その実現可能性の定量的な検討、実現に向けて必要な R&D の明示と具体的な研究体制を提示することで、X - F E L利用研究から得られる研究の波及効果がよりわかりやすく、他分野からのサポートが得られやすくなるであろう。
- ・ 本プロジェクトは Spring - 8 の放射光を遙かに凌ぐビーム技術の開発を目指しており、その基幹ツールとしての優位性や独創性は高い。また、医療や材料など幅広い分野での先端的な利用が期待できる。
- ・ 高輝度、極短パルス、高コヒーレント光の利用は、物質科学、ナノサイエンス、バイオテクノロジーなど広範囲の学術研究の高度化に不可欠であり、波及効果も大きい。
- ・ 特に、コヒーレント光の利用技術開発が各方面にブレークスルーをもたらす可能性が高い。

3 - B . 社会・経済上の意義

- ・ X - F E Lの建設により、加速器本体、マイクロ波、電源、精密計測制御、精密機械加工等に関連する中小を含めた企業群の貢献が期待でき、その意味での社会・経済効果は高い。X - F E Lそのものの社会・経済効果に関しては、創薬、医療、新材料、新機能デバイス等の開発にどこまで役立つかによっており、現状では未知であるが、現在製作中のプロトタイプマシンによる予備実験や諸外国の研究成果により今後明らかになるものと思われる。
- ・ セルマップや水素電池などの例は、X - F E L社会・経済上の効果について述べるために選ばれた例であるが、非専門家にわかりやすいだけでなく、それぞれの分野の専門家も理解・納得できる形で提示する必要がある。セルマップは RNA の発現マップであり、細胞の活動全体をマッピングしているような誤解を与えるので、その内容をより忠実に伝えるような名前、例えばセル RNA マップ、発現セルマップなどとすべきではないか？ 水素電池については、第 2 回会議でも議論されたように、水素の構造解析は X 線よりも中性子の

方が適していること、水素の静的な構造解析なら X 線構造解析でも可能であるが、ナノ秒以上の早いダイナミクスを見る場合にかなりの困難が伴うことを考えると、もう少しわかりやすい例に代えた方が良いのではないか。

- ・本プロジェクトの成果の社会への還元の具体像が十分に示されていないが、本開発技術そのものが学術的に高い価値を有していることから、社会への波及効果は将来間違いなく見込まれると思われる。
- ・完成後の施設を最大限有効に活用できるよう準備を進めることは当然であるが、それと共に建設途上においても本研究開発で採用したテクノロジーでもって産業界ができるだけ多くのメリットを享受できるよう配慮が望まれる。

3 - C . 国際関係上の意義

- ・X - F E L からの超高輝度・超短パルス硬 X 線の、科学技術への貢献は疑う余地は無く、DESY(独)、SLAC(米)は既に大規模プロジェクトを開発している。その他にも APS(米)、BNL(米)等で研究が進められており、BESSY(独)、ENEA/INFN(伊)、ELETTRA(伊)、MIT(米)、POHANG(韓)等も提案を行っている。この様な状況の中で、わが国が X - F E L 開発で、先導的立場を確保することは、国際貢献(特にアジアのリーダーとして)と国益のために重要と考えられる。
- ・欧米の先行プロジェクトに対して、コンパクトな設計、短期間での建設計画などに特色があり、計画通りに 2010 に利用研究が始まれば、改めて我が国の加速器技術の高さを示せるよい例となるであろう。アジア・オセアニアにこの規模の自由電子レーザープロジェクトがないことから、本 X - F E L プロジェクトが時宜を得たスタートを切れないに相応の役割分担ができない。
- ・日本がアメリカ、ヨーロッパに次いで本ビーム技術を国家基幹技術の一つとして開発することは国益上重要である。但し、本プロジェクトはアジア地域との連携を考慮し、アジアのセンターとしての機能もあわせ持つべきである。
- ・日本の独自性を主張できる計画内容になっており、諸外国が他の方式で同様の計画を実現した暁には、お互いに独自の技術やノウハウを提供し合えるので、国益にも適い国際貢献も期待できる。

3 - D . 計画の妥当性

- ・欧米の計画が、超伝導加速器やレーザー光陰極 RF 電子銃等の複雑な技術を用いるのに対して、本提案計画は、既に技術的に実績のある、熱陰極 DC 電子銃、常伝導 C バンドリニアック、短周期長の真空封止

アンジュレータを用いた小型・低コストマシンで、諸外国と同等以上の性能を実現しようというものであり、実現性に対して若干のリスクはあるものの、目標・資金に関しては概ね妥当であると言える。利用面からは seeding 技術の重要性を感じる。期間に関しては若干タイトであるが、国際的な研究開発状況からは必要と思われる。安全・環境・文化・倫理面では全く問題無い。

- ・ ハードウェアの開発費、期間、体制については妥当と思われるが、運用面での人材については、更なる拡充が必要。特に、利用研究が発展していくにつれて、ビームラインの数も増やしていくことになると思われるが、その場合に内部スタッフの増加が必須となろう。
- ・ H18 年度から計画されている利用推進協議会により利用研究のための年間 4 . 5 億円の研究費を年間 7 ~ 8 千万円ずつの研究チームに交付する案はよいと思うが、利用研究 R&D の重要性、Stanford の例でも見られるように世界的にもかなり研究費を投入している状況等を考えると 5 年間の総額 22 . 5 億円では厳しい。文部科学省が提案されているような競争的資金のこの分野での拡充、例えば、CREST で新領域を設けるなど、いろいろな工夫をする必要がある。
- ・ 利用研究を視野に入れた装置開発をすべき。本ビームを利用した X 線顕微鏡の開発も将来課題。
- ・ 現在進行中のプロトタイプ機でも本研究開発と併行して今後とも各種 R & D の実施が必要と判断されており、担当する研究者の重複が懸念されるので、負荷が一部の研究者に過度に集中することのないよう配慮が望ましい。その意味で、真に有効なオールジャパンの体制を敷く必要がある。

3 - E . 成果（見込み） 運営等

- ・ X - F E L が先端科学分野に大きなインパクトを与えることは間違いない。ただし社会に還元できる実用的な成果がどの程度あげられるかに関しては現状では判断は難しい。しかしながら、計画されている X - F E L が第 3 世代放射光施設である SPring8 サイトに在り、既存の高輝度放射光と複合的に利用できるメリットは、既に走っている DESY や SLAC 等の計画には無く、その意味では他には無い革新的な成果が期待できる。運営に関しては、 SPring - 8 との一体管理による効率化が期待できるが、 X - F E L が SPring - 8 とは基本的に異なる単機能に近いマシンであることから、独自に検討を要する部分もある。一層の検討を期待する。
- ・ 11 月のプロトタイプ機の発振実験が重要な試金石となる。個々の要素技術については、これまでに、相応の検討が行われてきており、

また、これまでの SPring8 建設・運用実績から担当チームの技術力の高さは世界をリードしていることも明白であり、X - F E L ビームを出すことについては、予定通り進行するものと期待される。

- ・建設フェーズでのプロジェクト運営については、理化学研究所播磨研究所内で、強力な推進体制ができているだけでなく、高エネルギー加速器研究機構からの協力や、単分子構造解析で先駆的な仕事をしている UCLA の John Miao らと SPring8 を用いた共同研究など、効率よくプロジェクト推進ができる体制の準備ができていてることは高く評価される。
- ・費用対効果を考えたより簡素で効率的運営が必要。競合相手である米国の S L A C や欧州の D E S Y との連携をとりながらも、独自性を発揮した運営が不可欠。優れた利用研究があって初めて成果つながるので、利用研究の事前絞り込むが重要。
- ・現時点では必ずしも新光源の活用方法に十分な見通しが立っているとは思えず、本計画と併行して実施されるであろう利用研究、利用技術開発に対する期待が大きい。どちらにも万全の体制で臨んで欲しい。

放射光分野全体の中における、当該研究開発の意義及び他の研究開発との関係等

- ・放射光の研究開発分野においては、高輝度放射光のマルチユーザーによる多目的利用という従来の放射光施設の概念を継承する次世代放射光源として、ERL(Energy Recovery Linac)や、第 3 世代放射光リングを更に高度化させた高性能リングがあるが、むしろ目的を絞った複数の中・小型のシステムを用いてユーザー利用を分散させる手法等も考えられる。X - F E L は比較的単機能で、且つ究極的な性能を有する点で、独自の重要な研究設備と位置づけることができるが、その建設には上述の次世代放射光源の建設に匹敵する資金を要するため、X - F E L 建設が認められた場合は、今後の我が国の放射光施設開発方針を再度十分に検討する必要が生じると思われる。
- ・単パルス、コヒーレンス、ピーク輝度などの光の性質において第 3 世代放射光のそれをはるかに凌駕すると言う点で、放射光分野をまったくの未踏領域に導くという役割を担っている。一方、X - F E L の場合積分輝度はそれほど高くないことから、ナノサイズ単結晶構造解析などの積分型の実験や、やや遅い時分割回折・散乱実験においては ERL など他の次世代機の検討がなされている。さらに、研究分野が非常に多岐にわたる放射光利用の将来の発展を考えると、第 2 世代、第 3 世代放射光のさらなる高度化、基盤整備も並行して

行うことが強く望まれる。

- ・他の研究開発との関係という観点では、ILC (International Linear Collider) や ERL 用に開発されるであろう超伝導マグネット技術などが成熟した技術となっていくに従って X - F E L のほうもできる限り、最新のものを取り入れる考慮が必要であろう。利用研究についても、ERL や SPRing8 等のリング型放射光で行われるであろう超微小結晶構造解析実験に必要なナノ結晶ハンドリング技術は X - F E L 利用実験でも重要であるし、逆に、X - F E L で単分子構造解析のために開発するタンパク質単分子のハンドリング技術はナノ結晶解析でも応用可能であることなど、R&D 交流が重要となる。
- ・得られる新光源が従来のものとは桁違いに先進的なものとなることは明白である。この新しい光源でもって、これまで考えられなかつた最先端の研究成果を生み出すためには、放射光科学分野の裾野を拡充し足腰を強固にしておく必要がある。その意味で、既存施設を今後どう活用するのか、また E R L など他の新光源の重要度、必要時期などを整理し、少なくとも今後 10 年間を見据えた全体の方向付けを明確にしておくべきであると考える。
- ・ X - F E L 開発を放射光分野のなかでどのように位置づけるかという質問に対して、第 2 回検討会で文科省から出された回答は大筋でこの分野の特徴を適切に把握しているものと言える。すなわち、放射光は(1)極めて性能が高くそれまで観察が不可能であった現象、対象について新たな知見を得られるようにするという極限的性能をもったプローブ、(2)多様な分野で開発される新物質、新材料などについて放射光ならでは得られる情報をタイムリーに提供することのできるプローブ、という二つの役割を持っており、X - F E L の整備は(1)に相当し、既存の放射旺施設の性能向上・整備は(2)の役割を持ち、ERL (Energy Recovery Linac) の開発は(1)と(2)の役割をといったバランスよくたもつものと言える。このようなことが視野に入っていることは望ましいことであるが、それら全体をどのような戦略で整備することが日本の科学に貢献することになるかという分析が詳しくあるとよかったです。現在の財政状況では、既存の放射光源の性能向上・整備、かねてから案件となっている VUV ・ 軟 X 線光源の整備、X - F E L の開発・建設、さらには ERL の開発といったものを、これから数年にすべてが満足のゆくよう着手することは考えにくい。好むと好まざるに関わらずどのような戦略でゆくかという質問に答えざるをえなくなるのではないだろうか。
- ・ X - F E L から得られるコヒーレント X 線ビームは上にのべた(1)の役割を担うものであるが、プローブとして持つ性能がこれまでの

放射光とは極端に違うため、その利用に関しては極めて先鋭的な研究テーマ、問題意識、実験技術をもった比較的少人数の研究者が集中的に関わるという形になり、これまでの放射光利用者の枠を超えたものになるべきで、理研の研究者もそのような認識をもっているように思える。実際に、日本放射光学会の特別委員会の議論でも、これまでの放射光ユーザーの多くはX - F E Lができても現在のものより大幅に進化したリング型放射光光源の必要性を強く認識しているという理解であった。そのようなニーズに対して文科省としてはどのような考えをもっているかをもう少し踏み込んで述べると、X - F E L建設計画の位置づけもより明確になると思える。

《参考資料》

参考 1：第 1 回評価検討会文部科学省提出資料

参考 2：第 2 回評価検討会文部科学省提出資料

参考 3：後日文部科学省提出資料

第 1 回評価検討会文部科学省提出資料

X 線自由電子レーザーの開発・共用

[資料 2 - 1]

X 線自由電子レーザーの開発・共用 第 1 回評価検討会ご説明資料

[資料 2 - 2]

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（中間取りまとめ）概要

[資料 2 - 3]

SCSS (SPring-8 Compact SASE Source) X-FEL Conceptual Design Report, May 2005 【省略】

参考 2

第 2 回評価検討会文部科学省提出資料

「X線自由電子レーザーの開発・共用」質問事項への回答
[資料3]

参考 3

後日文部科学省提出資料

「超伝導にした方が施設の規模が小さくなるのではないか」に対する回答

[参考 3 - 1]

電子顕微鏡によるタンパク質の構造解析について

[参考 3 - 2]

タンパク質構造解析におけるX線自由電子レーザーと「タンパク質解析基盤技術開発」の差異について

[参考 3 - 3]