

# 次世代放射光源計画評価報告書

平成18年6月

科学技術・学術審議会

研究計画・評価分科会

# 次世代放射光源計画評価報告書

## 【目 次】

まえがき	1
1. 次世代放射光源の必要性	3
(1) <u>放射光源の発展の経緯</u>	3
(2) <u>科学技術の進展における放射光源の役割</u>	3
(3) <u>次世代放射光源の必要性</u>	4
2. 評価・検討の進め方	7
(1) <u>評価・検討の対象</u>	7
(2) <u>評価・検討の方法</u>	8
(3) <u>評価・検討結果の取り扱い</u>	9
3. X線自由電子レーザー計画に対する評価	10
(1) <u>はじめに</u>	10
1) X線自由電子レーザーについて	10
2) 理研のX線自由電子レーザー計画について	11
3) 諸外国の状況	11
(2) <u>X線自由電子レーザー計画の必要性について</u>	12
1) 科学技術・学術的評価	12
2) 経済的・社会的評価	13
3) 国費を用いた研究開発としての評価	14
(3) <u>X線自由電子レーザー計画の効率性について</u>	16
(4) <u>X線自由電子レーザー計画の有効性について</u>	18
(5) <u>総合評価</u>	20
(6) <u>中間とりまとめ後の状況</u>	20
1) 平成18年度概算要求	20
2) 利用研究を推進するための運営体制について	21
3) 第3次科学技術基本計画について	22

4. リング型光源計画に対する検討	23
(1) はじめに	23
1) エネルギー回収型リニアックについて	23
2) スーパー・ストレージ・リングについて	24
(2) 現在の検討・開発状況について	24
1) 理研/JASRI：SPring-8の現状と高度化計画	26
2) KEK：PFの現状と将来計画	26
3) JAEA：エネルギー回収型リニアックの検討・開発状況	27
4) 分子研：UVSORの現状と高度化計画	28
5) 広大放射光センター：HiSORの現状	28
6) 兵庫県立大学：ニュースバルの現状	28
7) 立命館大学SRセンター	28
8) 佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター	29
9) 東京大学の計画について	29
10) 諸外国の状況について	29
(3) リング型光源計画のあり方について	31
1) 既存施設の有効利用	31
2) 既存放射光源の高度化計画について	31
3) リング型次世代光源の整備について	32
(4) 今後の検討課題	33
5. 人材の育成について	35
あしがき	36

## まえがき

大型放射光施設 SPring-8 (Super Photon ring-8GeV) に代表される放射光源は、物質の構造や性質を解析・分析する画期的な手段として、材料科学、地球科学、生命科学、環境科学、医科学など様々な分野で、学術研究から産業応用まで広く利用され、科学技術の進展にとって非常に重要な研究開発基盤となっている。例えば、タンパク質分子の三次元構造解析や先端材料の原子・電子構造の解明、生体試料中の環境汚染微量元素の分析など、幅広い科学技術分野で質の高い研究成果が多数輩出され、また、産業利用も着実に増加しており、今後更なる発展が期待されている。

近年、放射光を利用した研究成果の量的拡大・質的向上に伴って、研究者からは更に性能の高い光源を求める声が高まってきた。これまでの放射光源の開発・整備は、一様に短波長化、高輝度化に向かうものであったが、これらに加え、より微小な試料でも短時間に精度良く立体構造を解析するための高干渉性(高コヒーレント性)、更には化学変化などの超高速な変化・動態を捉えるための短パルス性が求められるようになってきている。

現在、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」と呼ぶべき新しい光源計画が検討され、技術開発が進められている。

独立行政法人理化学研究所(以下「理研」という。)においては、SPring-8などで培ってきた独自技術を活用してX線自由電子レーザー計画が進められてきた。既に、電子銃、線形加速器、アンジュレーターなどの構成要素が所定の性能に達しており、それらを組み合わせることによって、真空紫外領域のレーザー発振を目指したプロトタイプ機の整備を進めているところである。

また、独立行政法人日本原子力研究開発機構(以下「JAEA」という。)においては、超伝導加速空洞の技術を用いて、既に赤外線領域での自由電子レーザーの発振に成功しており、これらを活用した新しい放射光源として、エネルギー回収型リニアックの計画を提案している。

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。)においては、放射光科学研究施設フォトン・ファクトリー(PF)の後継機として、エネルギー回収型リニアックの計画を提示するとともに、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維持しつつ、蓄積リングの一部でエミッタンスを極限まで小さくすることで、限定的に高コヒーレント光を実現するスーパー・ストレージ・リングについても検討を行っている。

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、次世代放射光源に関する基本的な考え方について検討を行い、平成17年9月にその報告書を取りまとめた。そこでは、『究極を目指す光源計画』

として X 線自由電子レーザーをあげ、『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』との提言がなされている。また、エネルギー回収型リニアックやスーパー・ストレージ・リングなどについては『先端的基盤設備としての光源計画』として、『全国共同利用の放射光施設において、数多くの成果を基礎研究から産業利用にわたって定常的に創出しており、幅広い研究領域において必要不可欠な基盤設備である』としたうえで、『計画的に更新・先端化することが極めて重要である』と提言している。

また、平成 18 年度から始まる第 3 期科学技術基本計画について、その重要政策として盛り込むべき内容を検討してきた科学技術・学術審議会 基本計画特別委員会は、平成 17 年 4 月に「第 3 期科学技術基本計画の重要施策」（中間とりまとめ）をとりまとめた。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）』の必要性が示され、その具体例の一つとして、『世界最高性能の光分析技術（X 線自由電子レーザー）』があげられたところである。

このように、放射光源に関する技術開発が新たな段階を迎え、様々な見解や提言がなされてきている状況を踏まえ、文部科学省として、平成 17 年 5 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、我が国の次世代放射光源の開発計画、利用計画、更には運営体制等について評価・検討することとした。

## 1. 次世代放射光源の必要性

### (1) 放射光源の発展の経緯

放射光源は「世代」という考え方に沿って発展し、世代を重ねるたびにその性能は飛躍的に向上してきた。

光速近くまで加速した電子を磁場で曲げたときに発生する放射光は、1940年代後半における高エネルギー物理学実験用円形加速器の大型化に伴い、加速電子のエネルギーを減じる障害としてその存在が知られていた。その後、物質科学研究において、非常に強力かつ安定な X 線回折用光源としての可能性が注目され、1960年代になって、高エネルギー物理学実験用加速器施設に寄生する形で、初めて放射光実験が行われた。これが「第 1 世代」の放射光実験である。

こうした研究の中から目覚ましい成果が多数創出されたことから、放射光の有用性が広く認識されるようになった。1960年代後半には放射光専用施設の建設が世界各地で始められ、昭和 51 年（1976 年）には世界に先駆けて国立大学法人東京大学物性研究所（以下「東大物性研」という。）の SOR-ring が供用運転を開始した。「第 2 世代」の放射光源とは、専用施設において主に偏向電磁石からの放射光を利用するものである。

「第 3 世代」の放射光源は、非常に高輝度の放射光を発生するアンジュレーターなどの挿入光源を多数配置できるように設計された施設であり、1980年代より各国で建設が進められ、平成 5 年（1993 年）には軟 X 線領域の放射光利用を中心とする米国の ALS（Advanced Light Source）が運転を開始した。更に、硬 X 線領域の放射光を発生する大型施設の建設が日米欧の 3 極で進められ、平成 6 年（1994 年）にはフランスの ESRF（European Synchrotron Radiation Facility）が、平成 8 年（1996 年）には米国の APS（Advanced Photon Source）が、そして平成 9 年（1997 年）には我が国の SPring-8 が供用運転を開始し、これらの施設が中核となって現在の放射光科学の発展を牽引している。

### (2) 科学技術の進展における放射光源の役割

このように放射光源は世代を重ね大きく発展し、物質科学に加え、生物学、化学、医学、工学などの広範な分野の研究対象に対して、原子・電子レベルの構造情報を獲得するための計測・分析手法を提供してきたが、その役割は大きく 2 つに分けられる。

第 1 は、それまで他の手法では見るができなかった構造や現象を見えるようにするという、新たな計測・分析手法の提供という役割であり、様々な科

学技術分野に新しい可能性を切り拓くことを目指すものである。

第2は、新たな研究対象に対して、放射光だからこそ得られる原子・電子レベルの構造情報を確実に獲得するという、確立した計測・分析手法の提供という役割であり、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の発展において非常に重要なツールとなっている。

放射光源の歴史を見ると、施設が建設され運転が開始された当初は、第1の役割を担うものとして、様々な手法が開発され、新たな科学技術分野を切り拓くことでその有用性が示されてきたが、多くの研究者がその手法を利用し始めると、次々と新たな研究対象が持ち込まれるようになり、徐々に第2の役割を担うものに移行するようになる。これまでは、ある放射光源において相対的に第2の役割の比重が大きくなると、それに並行して、新たに第1の役割を担うべく次の世代の放射光源が整備され、全体として、第1の役割と第2の役割がバランス良く提供されてきたところである。

我が国の数ある放射光源も、各々ある時期には第1の役割を果たし、その後第2の役割に重点を移していった例が多く、それゆえに現在も広範な科学技術分野にとって不可欠なツールとして機能している。しかしながら、SPring-8の供用開始から既に8年が経過しており、我が国の放射光源全体の現状として、第2の役割の比重が大きくなってきており、こうしたことから、第1の役割を担う新しい光源開発の重要性が増してきているところである。

### (3) 次世代放射光源の必要性

近年、放射光を利用した研究成果は量的にも質的にも益々拡大する傾向にあり、例えばSPring-8においては、年間のべ10,000人を越える研究者が約1,500件の研究課題を実施し、年間に400報を越える論文が発表されるに至っている。

このような放射光科学の裾野の広がりに伴い、研究者からは、新たな研究領域を開拓し先駆的な研究成果を創出しようという、言わば放射光科学の頂上をより高くしようという声が上がってきている。より少ない試料で精密な構造解析を行うこと、より詳細な電子状態の解析を行うこと、化学反応など極めて短い時間に生じるプロセスを解析すること等を求める研究ニーズが顕在化し、多くの研究者から、現在より高度な計測・分析手法の導入が求められるようになってきている。

例えば、タンパク質の立体構造解析の場合、現在の世界最高性能を誇るSPring-8においてさえ、数十マイクロメートル程度の大きさの結晶を作成し、それを試料として照射実験を行う必要があるが、生命活動において非常に重要な機能を司るタンパク質の中には、数マイクロメートルからサブマイクロメー

トル以下の微小結晶しか得られないものも数多く存在する。これらの立体構造を解析するためには、現在の SPring-8 では足りず、より高輝度、高コヒーレントな光源が必要となる。

特に、細胞内外の物質伝達を司る膜タンパク質は、極めて結晶化が困難な上に、分子量も非常に大きく、これらの構造解析を迅速に行うためには、一分子による構造解析を可能とするような超高輝度かつ完全コヒーレントな光源が必要となる。

また、物質科学分野においても、その形状や電子状態・磁気構造をナノメートルレベルで精密に計測・分析するためには、例えば SPring-8 の放射光をもってしても、比較的長時間にわたる照射実験によってデータを取得する必要があり、そのため固定した形状や時間平均の状態しか見ることができない。しかし、電子状態を操作することによって半導体に新しい機能を付加したり、化学反応を制御することによって環境汚染物質を浄化する新しい触媒を開発したりするためには、電子の動きや化学反応などの非常に高速な現象の計測・分析を可能とするような極短パルスの光源が必要となる。

このように、様々な分野における研究開発の進展と研究ニーズの広がりに伴い、先端的な研究者から、より高い性能の放射光源を求める声が高まってきている。

現在、こうした研究者の要求に応えるべく、既存放射光源の高度化や全く新しい放射光源の整備など、様々な計画が検討され、一部ではその実現に必要な技術開発が進められているところである。これらの計画の中には、現存する世界最高性能の第3世代放射光源 SPring-8 と比べても、輝度、コヒーレント性、パルス幅などの放射光としての主要な性能の一部または全部において、飛躍的な向上が見込まれる、言わば「次世代」放射光源と呼ぶべき計画が含まれている。

理研が計画している X 線自由電子レーザーは、従来の放射光源と比べて飛躍的に高い輝度、完全コヒーレント性、極短パルスを実現するもので、現時点での「究極を目指す光源計画」と位置付けられる。X 線自由電子レーザーは、一分子によるタンパク質の構造解析を可能とし、またフェムト秒単位での化学反応の動態観察を可能とするなど、これまでとは質の異なる全く新しい研究領域を切り拓く大きな可能性を持っている。このことから、放射光源の第1の役割を先鋭的に担うもので、極限を求める最先端研究者のニーズに応え、今後の放射光科学を牽引し、ライフサイエンスをはじめ多くの科学技術分野にブレークスルーをもたらすものと期待される。

一方で、研究者のニーズとしては、サブマイクロメートル以下のタンパク質結晶の構造解析に代表されるような、現在の放射光源では対応が困難であるが、



X線自由電子レーザーのような超高輝度、完全コヒーレント性までは必ずしも必要としない課題も多数存在する。

これらの分析・計測はX線自由電子レーザーによっても可能であるが、X線自由電子レーザーは技術的な制約からビームラインを多く設置することが難しく、ユーザー数が限られざるを得ないことを踏まえれば、X線自由電子レーザーは、他の光源では実施不可能なニーズ・課題に特化して利用を進めることが望ましい。

このため、多数のユーザーが同時に並行して利用することが可能であって、現在の放射光源より輝度、コヒーレント性、短パルス性に優れる光源として、KEKやJAEAが提案しているエネルギー回収型リニアックやスーパー・ストレージ・リングなどのリング型次世代放射光源の整備、または既存放射光源の高度化による対応が必要となる。これらの光源は、現在の放射光科学を持続的に発展・進化させる拡張性、波及性があるものとして、X線自由電子レーザーとともに計画的な更新・先端化の重要性が提言されている。

ただし、放射光源の新規整備や高度化は巨額の投資を必要とするものであり、現下の厳しい財政事情のもとでは、我が国全体としての放射光源の役割のバランスを考慮しつつ、中長期的な視野に立って、次世代放射光源の計画を検討することが肝要である。

## 2. 評価・検討の進め方

### (1) 評価・検討の対象

現在、検討・開発が進められている次世代放射光源には、大きく分けて2つの方向性がある。

1つ目の方向性は、現時点で可能となる究極的な放射光を発生し、1.(2)において前述した第1の役割に特化した計測・分析手法の実現を目指すもので、理研のX線自由電子レーザー計画がこれに該当する。

X線自由電子レーザーは、SPring-8の10億倍に及ぶ極めて高いパルス輝度、SPring-8の1,000分の1に至る短パルス性、完全コヒーレント性を同時に兼ね備えたX線レーザーを発振するものである。これまで結晶化が困難であったためにその解析が遅れていた膜タンパク質の1分子での構造解析を可能とし、また、化学反応などの超高速現象の時分割計測や全く新しい原子結合・原子解離を実現するなど、それまで他の手法では実現不可能であった新たな計測・分析手法を提供するものであり、多くの研究者から、様々な科学技術分野に新しい研究領域を切り拓くものとして期待されているものである。

日本放射光学会 次世代光源検討特別委員会において、『現在の放射光科学の連続的な発展を超えた、質の異なる飛躍的な発展が期待できる未踏の研究領域を開拓する光源計画』と位置づけられていることから、他の計画とは一線を画するものとして、個別の計画として評価すべきであると考えられる。

理研の計画が、既に要素技術を完了し、プロトタイプ機の整備段階にあること、欧米において同様の計画が進んでおり、国際競争のもと早急な実機整備が求められていることなどから、本作業部会においては、究極的な光源としてのX線自由電子レーザーについて、理研の計画に対する事前評価を行うこととした。

2つ目の方向性は、1.(2)において前述した第2の役割を考慮しつつ、現在の放射光科学を持続的かつ広範に発展・進化させることを目的に、拡張性、波及性のある計測・分析手法の実現を目指すもので、JAEAやKEKで検討が進められているエネルギー回収型リニアック計画やスーパー・ストレージ・リング計画が該当する。

これらの計画は、質の高い放射光を同時に多くの研究者に提供することができる「リング型」を前提として、電子ビームの低エミッタンス化を図ることにより輝度やコヒーレント性の向上を実現しようとするもので、構造解析における空間分解能の向上や電子状態計測におけるエネルギー分解能の向上、計測時間の短縮など、現在の計測・分析手法を高度化するものとなる。

一方、既存の放射光源においても計測・分析手法の質的向上を目指した施設の高度化や改造が計画され、一部で既に実施されたものもある。これらは、研究者が求める高輝度化、高コヒーレント化、短パルス化のいずれかを実現するもので、目指す方向性はエネルギー回収型リニアック計画やスーパー・ストレージ・リング計画と同様である。

したがって、エネルギー回収型リニアック計画やスーパー・ストレージ・リング計画の検討にあたっては、既存の放射光源の運用状況や高度化計画等とともにを行うことが適当であると考えられる。

エネルギー回収型リニアックとスーパー・ストレージ・リングは、現時点では構想が示されたところであり、一部の構成要素の技術開発が進められている段階であることから、本作業部会においては、SPring-8をはじめとする既存放射光施設の有効活用や高度化計画、新たな第3世代放射光源の建設計画などとともに、計画のあり方について包括的に議論・検討することとした。

更に、今後、高い性能の放射光源を整備し、また放射光源を有効に活用して優れた研究成果を創出するためには、これら各々の段階での研究開発に携わる人材の育成が重要であることから、上記2つの方向性に対する評価・検討に加え、当該分野の人材育成のあり方についても議論・検討することとした。

## (2) 評価・検討の方法

本作業部会においては、各々の計画を推進している専門家からのプレゼンテーションを聴取し、これに基づいて評価・検討を行った。

X線自由電子レーザー計画については、計画を推進している理研から計画の概要と自己評価の結果について聴取し、また利用研究計画について提案している各分野の専門家から聴取し、これらに基づいて議論を行うとともに、予め設定した評価の観点に沿った検討を実施した。更に、施設計画の加速器技術に関する専門的な内容については、作業部会委員のほか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、理研からの説明に基づき議論を行い、これらを総合的に勘案し評価とした。

エネルギー回収型リニアック計画やスーパー・ストレージ・リング計画、既存放射光源の高度化計画等については、JAEA、KEKから各々の次世代放射光源に関する計画について聴取するとともに、既存施設の現状や今後の計画について、財団法人高輝度光科学研究センター（以下「JASRI」という。）、大学共同利用機関法人自然科学研究機構分子科学研究所（以下「分子研」という。）、国立大学法人広島大学放射光科学研究センター（以下「広大放射光センター」という。）から各々聴取した。更に、従前より新しい第3世代放射光源の建設

計画を提示してきた東大物性研からその後の検討状況等を聴取し、これら計画のあり方について包括的に検討した結果をとりまとめた。

### (3) 評価・検討結果の取り扱い

本評価・検討結果については、本作業部会が属する科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 研究評価部会の承認を受け、冊子の配布やホームページ等を活用して、広く公開することとした。

また、本作業部会の評価・検討の対象とした各計画においては、その実施にあたって、本評価・検討結果を適切に反映させることとする。

### 3. X線自由電子レーザー計画に対する評価

#### (1) はじめに

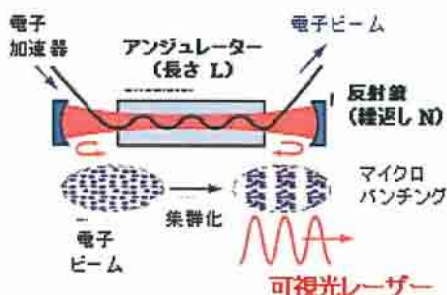
##### 1) X線自由電子レーザーについて

X線自由電子レーザーとは、自由電子（原子核に拘束されていない電子）を媒質として発振するX線領域のレーザー光、またはそれを発生するための装置をいう。

光速近くまで加速した電子ビームをアンジュレーターの交替磁場中で蛇行させると、蛇行する度に発生する放射光同士が干渉し合い、ある特定の波長にピークを持つ高輝度でコヒーレント性の高い放射光が発生する。アンジュレーターの前後に対向する鏡を置くと、その間を放射光が往復し、連続して入射される電子ビームと干渉し合うことで誘導放射が引き起こされ、非常に高輝度のレーザーが発生する。これまでに、この方式によって赤外・可視光から真空紫外領域の自由電子レーザーが実現されている。

X線領域では全反射する鏡が存在しないため、この方式ではX線レーザーの発振は困難だと考えられていたが、自己増幅方式（Self-Amplification of Spontaneous Emission ; SASE 方式）の開発により、この困難を解決することが可能となった。SASE方式とは、光が往復する距離に相当する長さのアンジュレーターを用意することで、鏡を使うことなく電子ビームが自ら放出した放射光と干渉し合い誘導放射を引き起こすものである。この方式は鏡を必要としないことから、X線領域でのレーザー発振が期待され、理研のほか、米国スタンフォード線形加速器センター（Sanford Linear Accelerator Center ; 以下「SLAC」という。）や欧州ドイツ電子シンクロトロン研究所（Deutsches Elektronen-Synchrotron ; 以下「DESY」という。）においてもSASE方式によるX線自由電子レーザー計画が進められている（図1参照）。

#### 従来型の自由電子レーザー



#### SASE方式自由電子レーザー

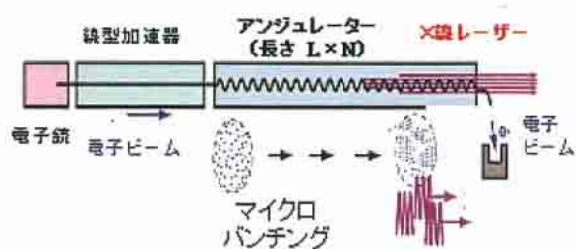


図1. 従来型及びSASE方式の自由電子レーザーの原理

更に、シーディング技術を導入することによって一層輝度が高いレーザーが実現される。シーディング技術とは、単色性に優れたレーザーをシード光として電子ビームとともにアンジュレーターに入射するもので、自発放射を増幅する場合に比べて単色性が優れ輝度も非常に高くなる。理研、SLAC、DESYのいずれの計画においても、SASE方式によるX線レーザーの実現の後に、シーディング技術の導入を検討している。

## 2) 理研のX線自由電子レーザー計画について

理研のX線自由電子レーザー計画は、第一期（平成18年度（2006年度）～22年度（2010年度））として、SASE方式によるX線レーザーの発振を実現し、それを広く研究者の共用に供しつつ、第二期（平成23年度（2011年度）～24年度（2012年度））として、シーディング技術の導入を図るものである。

X線自由電子レーザー装置は、電子ビームを生成する電子銃、電子ビームを所定のエネルギーまで加速する線形加速器、加速された電子ビームを蛇行しX線レーザーを発振するアンジュレーター、X線レーザーを集光・分光し実験ハッチまで導く光学系から構成される。これらの構成は、理研、SLAC、DESY、いずれの計画でも同じであるが、理研の計画は、超高電圧熱カソード型電子銃、高加速勾配加速管、真空封止型アンジュレーターなど、それぞれの構成要素に我が国独自の技術を駆使することによって、全長・予算総額ともに欧米の半分以下で、最短波長0.06ナノメートルのレーザー発振が可能となっている。

また、X線自由電子レーザーの電子ビームをSPring-8に入射することによって、SPring-8の性能向上に寄与することも計画されている。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）の放射光の実現が見込まれている。

## 3) 諸外国の状況

前述のとおり、米欧でも高いプライオリティをもって同時並行的にX線自由電子レーザー施設の開発が進められている。

### ① 米国

米国ではSLACにおいて、かつて素粒子物理学実験用加速器として使用された2マイル線形加速器の後段3分の1を活用し、その下流側にアンジュレーターを設置することで、平成21年（2009年）に波長0.15ナノメートルのX線レーザーを発振する、総延長2キロメートルの施設の計画が進められている。

既存施設を活用することで300百万ドル以上のコスト軽減がなされているとされ、施設整備に必要な総コストは315百万ドル（約370億円）に抑えられて

いる。また、2003年11月にエネルギー省(DOE)が発表した“Facilities for the Future of Science: A Twenty-Year Outlook”において優先順位第3位に位置付けられ、強力に推進しているところである。

## ② 欧州

欧州ではドイツのDESYにおいて、平成24年(2012年)に波長0.085ナノメートルのX線レーザーを発振する施設の計画が進められている。超伝導線形加速器による総延長2.4キロメートルの計画で、ドイツを含むEU11カ国が参加して推進しているところである。

平成16年(2004年)には、極端紫外線領域のレーザーを発振するプロトタイプ機を整備し、現在これを活用するなど、実機建設に向けた研究開発を進めているところである。

本作業部会では、まず理研のX線自由電子レーザー計画(以下「本計画」という。)に対する事前評価を行い、その結果を「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)として公開した。以下その内容を示す。

## (2) X線自由電子レーザー計画の必要性について

### 1) 科学技術・学術的評価

#### ① 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。

#### ② 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、完全コヒーレント性を実現する点で、これまでのSPring-8などの放射光源や、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って、新たな知の創出に貢献することが期待される。

### ③ 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。

### ④ 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

### ① 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



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原子解像度での構造解析が一分子で可能となる。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を期待される。

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

#### ① 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。

#### ② 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広範な分野にわたる国内外の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。

#### ③ 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 SLAC における X 線自由電子レーザー計画が、DOE の先導のもと平成 21 年（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 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、平成 24 年（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。

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、放射光科学及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必要があるなど、様々な面において、緊急性を有している。

#### ④ 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優れた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。

また、(3) ②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、平成 21 年（2009 年）完成を予定している米国の計画とほぼ同時期の平成 22 年（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。

#### ⑤ 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、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から、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が寄せられている。

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の創出を目指した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。

### (3) X 線自由電子レーザー計画の効率性について

#### ① 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、建設にあたっては加速器科学分野の人材が豊富な理研と JASRI 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る。既に理研は KEK との間で研究協力協定を締結するなど、適切な推進体制を構築している。

更に、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。

② 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。

欧米の計画と比較して、本計画は設計・建設及び利用研究を含め約 360 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。

③ 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、建設を進めるにあたっては、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あたっては、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必要である。

④ 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（1997 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。

#### (4) X線自由電子レーザー計画の有効性について

##### ① 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 (2005 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」との勧告がなされている。

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 JAEA 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 (2005 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。

更に、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い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。

##### ② 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。

##### ③ 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、PF 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り、新しい超伝導物質の開発が促進されるなど、相互補完的な役割が期待される。

④ 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、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イクスルーにつ

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。

#### ⑤ 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。

### (5) 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、計画の実行にあたっては、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、その推進にあたっては、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。

### (6) 中間とりまとめ後の状況

#### 1) 平成 18 年度概算要求

文部科学省は、上記の評価結果の内容を受け、平成 18 年度概算要求において、X 線自由電子レーザーの開発・共用に必要な経費の要求を行った。

X 線自由電子レーザー計画はその経費の総額が 300 億円以上となるため、「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について」（平成 15 年 3 月 28 日総合科学技術会議第 26 回本会議決定）に基づいて、総合科学技術会議の評価を受けた。総合科学技術会議は評価専門調査会の下に、X 線自由電子レーザー計画の評価を行うための評価検討会を設置し、平成 17 年 11 月に以下の評価をとりまとめた。

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

**【総合評価】**

本プロジェクトは、幅広い分野における産業や国民生活の向上に役立つ成果を諸外国に先駆けて創出するとともに、放射光分野における我が国の国際競争力強化及び国際貢献にも寄与すると期待されており、実施することが適当。

**【指摘事項】**

- ・ 科学技術に対する貢献と社会・経済への波及効果に対する、国民にわかりやすい説明の努力
- ・ プロトタイプ機の活用とその成果の還元
- ・ 利用研究の充実と速やかな推進
- ・ 運営・評価体制の整備

この評価結果を踏まえ概算要求を行った結果、平成 18 年度政府予算案（平成 17 年 12 月 24 日閣議決定）において、X 線自由電子レーザーの開発・共用として、施設整備並びに利用研究開発のための経費として 23 億円が計上された。

2) 利用研究を推進するための運営体制について

平成 18 年度政府予算案として認められた 23 億円の中には、X 線自由電子レーザーの施設整備に要する経費のほか、その完成直後から効果的・効率的な利用研究を実施し、革新的な研究成果を多数輩出することを目的として、

- ・ 実際に利用研究を実施する際に想定される問題点の解決を図るための利用推進研究の実施、及び
- ・ 利用推進研究課題の選考や X 線自由電子レーザーの利用方針・利用計画の策定のための委員会の設置



に必要な経費が計上されている。

文部科学省は、上記の委員会として「X線自由電子レーザー利用推進協議会」を設置することとしており、その運営においては、本作業部会並びに総合科学技術会議の指摘事項への対応が不可欠である。

### 3) 第3次科学技術基本計画について

平成18年3月28日、今後5年間の政府全体で着実に実行すべき主要施策を掲示するものとして、第3期(平成18年度(2006年度)～平成22年度(2010年度))の科学技術基本計画が閣議決定された。

その中では、第2期基本計画で進めた研究分野の重点化にとどまらず、分野内の重点化も進め選択と集中による戦略性の強化を図ることとし、特に、『国が主導する一貫した推進体制の下で実施され世界をリードする人材育成にも資する長期的かつ大規模なプロジェクトにおいて、国家の総合的な安全保障の観点も含め経済社会上の効果を最大化するために基本計画中に集中的な投資が必要なもの』として、次世代スーパーコンピュータ、海洋地球観測探査システム、高速増殖炉サイクル技術、宇宙輸送システムとともに、X線自由電子レーザーが「国家基幹技術」と位置付けられ、人類の英知を生む、国力の源泉を創る、健康と安全を守るという3つの理念の実現に向けて、強力に進められることとなった。

#### 4. リング型光源計画に対する検討

##### (1) はじめに

エネルギー回収型リニアックやスーパー・ストレージ・リングの建設、既存放射光源の高度化を含む「リング型光源計画」は、高い品質の放射光をより多くのユーザーに供給するものであり、現在の放射光科学を持続的に発展・進化させる拡張性、波及性の観点から必要とされている。

本作業部会では、リング型次世代光源に関する計画について JAEA、KEK から聴取するとともに、既存施設の現状や今後の計画について各々の施設から聴取し、更に、従前より新しい第3世代放射光源の建設計画を提示してきた東京大学からその後の検討状況等を聴取した上で、これらリング型光源計画のあり方について包括的に検討を行った。

##### 1) エネルギー回収型リニアックについて

エネルギー回収型リニアックは、線形加速器（リニアック）によって光速近くまで加速した電子ビームを一度のリング周回後に再び線形加速器に導いてエネルギーを回収し、そのエネルギーを新たな電子ビームの加速に用いる方式である。この方式では、超伝導高周波技術を用いることにより、加速に要する電力がほぼゼロになり、大電流加速の場合でも消費電力を低く抑えることが可能となることから、放射光の平均輝度の向上に適した加速方式として期待されている（図2参照）。

##### ☆ 装置概念図

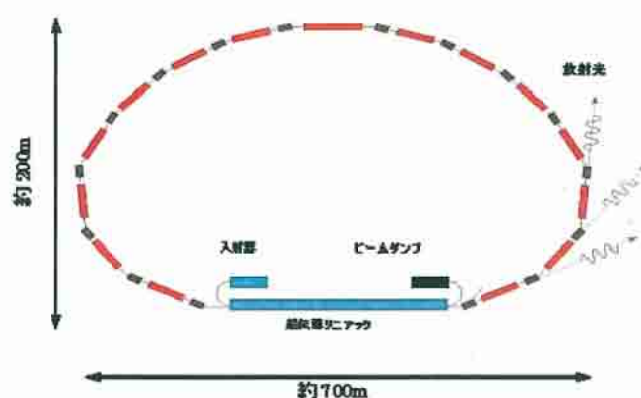


図2. エネルギー回収型リニアックの概念図

更に、エネルギー回収型リニアックによる電子ビームは、線形加速器としての特徴である低エミッタンス性、短バンチ性を有することから、そこから発生

する放射光も高コヒーレントかつ短パルスという特徴を持ち、電子ビームを再び線形加速器に導くまでの間に、偏向電磁石や挿入光源を多数設置することにより、高品質の放射光を多数のユーザーに同時に供給することが可能となる。

## 2) スーパー・ストレージ・リングについて

スーパー・ストレージ・リングは、第3世代の放射光源の設計をベースとして、従来よりも周長を長くし、最適な電磁石配置をとることによって、低エミッタンスかつ大電流を実現するものである。更に、特別に設計した電磁石群によって局所的にエミッタンスを極めて小さくし、また超伝導クラブ空洞などによって電子ビームのバンチ長を短くすること等により、一部ビームラインにおいて、高コヒーレントかつ短パルスの放射光を発生するもので、比較的少ない要素技術開発で、高品質の放射光を供給できるものと期待されている（図3参照）。

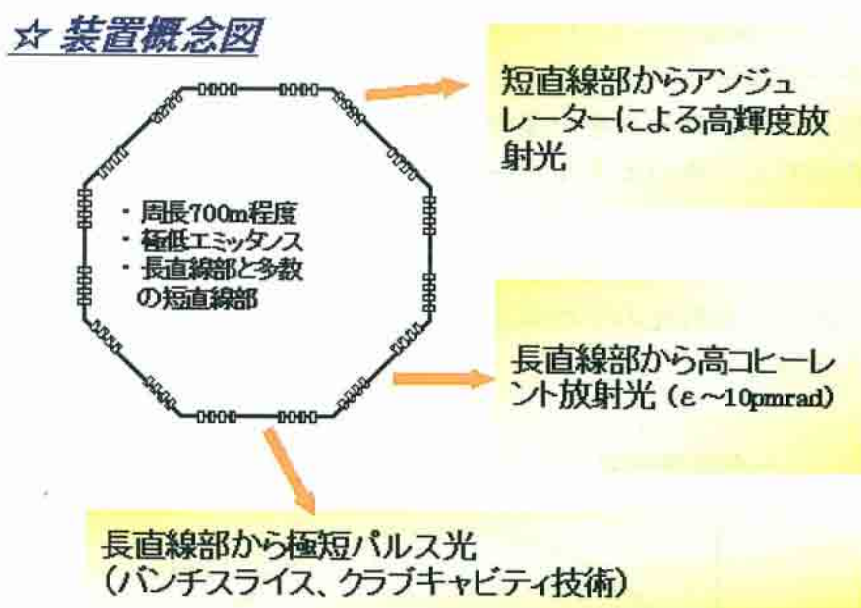


図 3. スーパー・ストレージ・リングの概念図

## (2) 現在の検討・開発状況について

放射光施設は、これまで短波長化、高輝度化を目指し、世代を重ねてきたと言えるが、より電子の加速エネルギーが高く、短い波長の放射光を発生できる施設が完成した後も、長い波長の放射光を含め、それぞれの波長領域に応じた利用が継続して行われている。

具体的には、タンパク質などの結晶構造解析や微量元素分析などは、



SPring-8 による硬 X 線領域の放射光を用いて実施されているが、光電子分光法を利用した物質の局所的な電子状態の解明や化学結合状態の解明、化学反応の選択的制御などの研究は、軟 X 線を中心に、真空紫外線から X 線に及ぶ幅広い波長領域において行われている。また、価電子や伝導電子の光電離・光励起、超伝導性や磁性の出現機構の解明などは真空紫外線領域を中心に行われている（図 4 参照）。

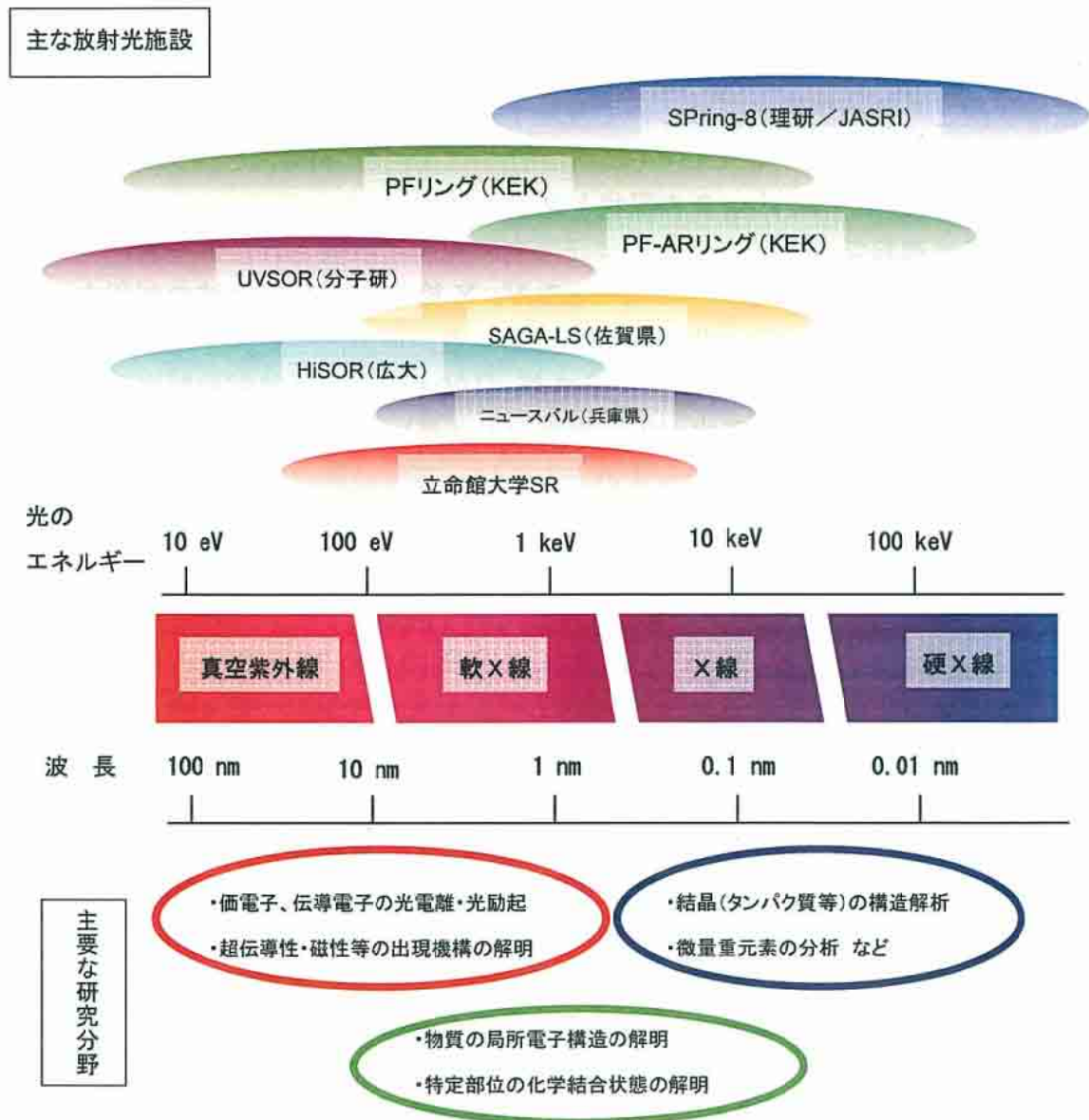


図 4. 既存放射光施設の波長領域と研究領域

このように、それぞれの研究内容に応じた波長領域の放射光が利用されてい

る。我が国においては、X線から硬X線領域の放射光を発生する SPring-8 が完成した後も、真空紫外線領域を中心とする分子研の UVSOR や軟X線からX線領域を中心とする PF などが引き続き重要な役割を担っている。

これらの3つの施設をはじめ、我が国では、それぞれの目的や用途に応じたいくつかの放射光施設が既に運用されており、それぞれにおいて、研究者のニーズに応えるため、施設の高度化や新たな光源整備が計画されているところである。また、近い将来の利用に向けて現在整備が進められている施設もあり、更には、地域に根ざした中小規模の放射光施設整備の構想もある。リング型光源計画のあり方を包括的に検討するため、まずは各施設における現在の利用・整備状況と今後の開発計画について整理することとする。

#### 1) 理研/JASRI : SPring-8 の現状と高度化計画

兵庫県播磨科学公園都市にある理研播磨研究所に設置された大型放射光施設 SPring-8 は、電子の加速エネルギー8GeV、X線から硬X線領域の利用を中心とする世界最高性能の第3世代放射光源である。

SPring-8 の利用に関しては、平成6年(1994年)に「特定放射光施設の共用の促進に関する法律(平成六年法律第七十八号)」を制定し、放射光利用研究促進機構として JASRI を指定するとともに、科学技術に関する試験研究の基盤の強化を図り、あわせて科学技術に関する試験研究に係る国際交流の進展を図り、もって科学技術の振興に寄与することを目的に、平成9年(1997年)10月に供用を開始した。国内外の研究者に広く開放し、その共用を図ることによって、平成17年度(2005年度)には、年間のべ約10,000人の研究者に利用されるまでになっている。また、トライアルユースやコーディネーター制度による支援を導入するなど、産業利用を積極的に推進しており、平成17年度(2005年度)の全体に占める産業利用の割合も20%近くにまで達している。

SPring-8 の高度化に関しては、放射光の強度を一定に保つためのトップアップ運転が平成16年度(2004年度)から実施されており、これに加えて、軟X線領域で非常に細く絞られたナノビーム放射光の発生を実現するための低エネルギー・低エミッタンス運転技術の開発、様々な対象の過渡現象、光誘起相転移、電子物性ダイナミクスの観察を実現するための電子ビームのサブピコ秒パルス圧縮技術の開発、天体核物理や素粒子物理の研究を可能とするための超伝導ウィグラーや逆コンプトン散乱を利用したガンマ線発生技術の開発など、様々な先進的利用に応じた高度化計画が検討されている。

#### 2) KEK : PF の現状と将来計画

KEK の PF は、当初より放射光専用施設として整備された、電子の加速エネ

ルギーが 2.5GeV の PF リングと、元来、素粒子物理学実験用ブースター加速器として整備され、後に放射光施設に転用された、電子の加速エネルギーが 6.5GeV の PF-AR リングの 2 つの施設からなり、あわせて年間約 3,000 人の研究者が利用している。

PF リングは、昭和 57 年度（1982 年度）の供用開始以来、軟 X 線から X 線領域を中心に利用が進められてきたが、より高い輝度の放射光を求める研究者に因應するため、平成 9 年度（1997 年度）には電磁石の配置と電源を更新して輝度を向上させ、さらに、平成 17 年度（2005 年度）には大幅な電磁石配置の改造を行い、挿入光源を設置できる直線部を従前の 7 ヶ所から 13 ヶ所に増やし、第 3 世代放射光源に近い性能を備えるまでになっている。

一方、PF-AR リングは、昭和 61 年度（1986 年度）から素粒子物理学実験に共生する形で放射光利用が開始されたが、平成 11 年度（2001 年度）に素粒子物理学実験用としての役割を終えたことから、ほぼ 3 年間にわたって真空システムの改良など大規模な改修を経て、現在は世界でもユニークな大強度パルス X 線を発生する放射光専用施設として利用されている。

しかし、これらの施設は当初の整備から既に 20 年以上が経っており、施設及び実験設備の老朽化が進行しつつあることから、KEK では PF 施設全体の次期計画として、エネルギー回収型リニアックとスーパー・ストレージ・リングの 2 つの方式について比較検討を行ってきた。現在は、より高い性能の放射光を同時に多くの研究者に提供できるエネルギー回収型リニアックに検討対象を絞り、その実現に向けた計画の策定、技術開発体制の確立等について、後述する JAEA との協力のもとに進めているところである。

### 3) JAEA : エネルギー回収型リニアックの検討・開発状況

JAEA では、光量子研究をはじめとする様々な分野での利用を目的とした各種レーザーの開発を進めており、その一つとして、平成 5 年（1993 年）、超伝導線形加速器を活用した、電子の加速エネルギー 15MeV で赤外線領域のレーザーを発振する自由電子レーザー装置を完成させた。

更に自由電子レーザーの短波長化を図るためには、施設の大型化が必要となることから、引き続きエネルギー回収技術の開発を進め、平成 13 年（2001 年）には、上記自由電子レーザー装置にエネルギー回収技術を導入し、エネルギー回収型リニアックによる赤外線領域の自由電子レーザー実験を進めているところである。

JAEA では、これらの技術開発をもとにして、電子の加速エネルギーが 6GeV の X 線領域の高コヒーレント放射光を発生するエネルギー回収型リニアックの提案を行っており、一部要素技術の開発を実施するとともに KEK との協力の

もと実現に向けた計画の策定、技術開発体制の確立等を行っている。

#### 4) 分子研：UVSOR の現状と高度化計画

分子研の UVSOR は、電子の加速エネルギーが 750MeV の主に真空紫外線領域の利用を中心とした第 2 世代放射光源である。

昭和 58 年（1983 年）に全国共同利用施設として供用を開始し、以来、分子科学を中心とする研究開発が実施されてきており、平成 17 年度には年間のべ約 800 人の研究者に利用されている。

UVSOR では、平成 14 年度（2002 年度）に、大幅な電磁石配置の改造によって低エミッタンス化を行うとともに、挿入光源用の直線部を増やし、ほぼ第 3 世代放射光源に匹敵する性能を実現している。また、平成 18 年度（2006 年度）には、入射器の増強によりトップアップ運転を開始する予定である。

#### 5) 広大放射光センター：HiSOR の現状

広大放射光センターの HiSOR は、電子の加速エネルギーが 700MeV の可視光から真空紫外線領域の利用を中心とする施設で、平成 10 年（1998 年）の供用開始以来、主に固体物理学を中心とする物質科学研究や生命科学に関する基礎的な研究が実施され、年間約 400 人の研究者に利用されている。

HiSOR は、大学に設置されている放射光施設として、人材の教育・育成ツールとしても活用されており、多くの若手研究者・技術者を育てている。

#### 6) 兵庫県立大学：ニュースバルの現状

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所の放射光施設ニュースバルは、SPring-8 の線形加速器を入射器とする、電子の加速エネルギー 1.5GeV の放射光施設であり、真空紫外線から軟 X 線領域の利用を中心としている。

平成 12 年（2000 年）の供用開始以来、兵庫県立大学における学術研究のほか、光微細加工等の産業利用技術の開発にも利用されており、県内企業を含む年間 130 人以上の研究者に利用されている。

#### 7) 立命館大学 SR センター

立命館大学 SR センターの超伝導小型 SR 光源は、電子の加速エネルギー 575MeV と非常に低エネルギーながら、超伝導磁石による極めて強力な偏向磁場により、軟 X 線領域の放射光の発生を可能とする施設である。

平成 8 年（1996 年）の供用開始以来、ナノテクノロジー・材料分野の研究を中心として、民間を含む年間約 200 人の研究者に利用されている。

## 8) 佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター

佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターは、電子の加速エネルギー1.4GeVの軟X線領域の利用を中心とする放射光施設である。

同センターは、放射光の産業利用を主な目的として地方自治体が設置した初めての施設であり、平成18年度(2006年度)の供用開始が予定されている。共用を目的とする県有ビームライン3本のほか、佐賀大学における学術研究のための専用ビームライン1本の整備が進められている。

## 9) 東京大学の計画について

東大物性研は、昭和50年(1975年)、世界初の放射光専用施設SOR-ring(電子の加速エネルギー380MeV)を整備。以来、平成9年(1997年)に運転を停止するまでの間、物質の電子状態や磁気構造の解明などを中心に利用され、物性科学の発展に多大なる貢献をしてきた。

東京大学では、物性研が中心になってSOR-ringの後継施設として、柏キャンパスに新たな第3世代放射光施設の建設計画を策定、平成14年(2002年)に「極紫外・軟X線放射光源計画」としてとりまとめた。

しかし、平成16年(2004年)の国立大学法人化により、一大学で放射光施設を建設し、運転・維持管理を行うことが財政上困難となってきたことから、平成17年(2005年)10月の科所長会議において、施設建設計画の中止を決定した。また、それに代わるものとして、SPring-8やPFなどの既存施設の活用を軸とした新たな計画の推進が承認された。

東大では、これを受けて、東大アウトステーションワーキンググループを立ち上げ、詳細な計画の策定に着手した。

## 10) 諸外国の状況について

### ① 米国、カナダ

米国では、第3世代の放射光源として、電子の加速エネルギー7GeVの大型施設APS、同1.9GeVの中型施設ALSが運用されているほか、スタンフォード・放射光研究施設(SSRL; Stanford Synchrotron Radiation Laboratory)では、素粒子物理学実験用加速器を放射光施設に転用したSPEAR(Stanford Positron Electron Asymmetric Ring; 電子の加速エネルギー3GeV)の高度化のために大規模な改造を行い、平成16年(2004年)より再稼働している。更に、ブルックヘブン国立研究所では、昭和57年(1982年)に運用を開始したNLS(National Synchrotron Light Source; 電子の加速エネルギー2.8GeV)が現在も活発に利用されているが、その後継機として、電子の加速エネルギー3GeVのNLSIIの計画を



提案している。

一方、カナダでは、平成 17 年（2005 年）、第 3 世代の中型施設として CLS（Canadian Light Source；同 2.9GeV）が稼動を開始している。

米国におけるリング型次世代光源については、ジェファーソン研究所において、電子の加速エネルギー 160MeV のエネルギー回収型リニアックを用いた赤外線領域の自由電子レーザーが既に稼働しており、現在、X 線領域の装置開発に向けて原子核実験用電子加速器を用いたエネルギー回収実験を進めている。また、コーネル大学では、電子の加速エネルギー 5GeV のエネルギー回収型リニアックの整備が計画されており、平成 18 年度（2006 年度）には、実証機の建設に向けた要素技術開発のための経費が予算化されている。更に、カリフォルニア大学バークレー校においても、電子の加速エネルギー 2.5GeV のエネルギー回収型リニアック計画が検討されているところである。

## ② 欧州

欧州では、第 3 世代大型施設である電子の加速エネルギー 6GeV の ESRF が欧州の共同施設として運転を行っているほか、第 3 世代中型施設としては、ドイツの BESSY II（Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung；電子の加速エネルギー 1.7GeV）、スイスの SLS（Swiss Light Source；同 2.4GeV）、スウェーデンの MAX II（同 1.5GeV）、イタリアの ELETTRA（同 2.4GeV）が稼動中、フランスの SOLEIL（同 2.75GeV）、英国の Diamond（同 3GeV）が建設中、加えてスペインの ALBA（同 3GeV）が平成 18 年（2006 年）に建設を開始するなど、各国がそれぞれの目的に応じた特徴ある施設整備を行っている。

また、ドイツの DESY では、SLAC と同様、素粒子物理学実験用の加速器から放射光施設として転用された DORIS（Double Ring Storer；同 4.45GeV）の一層の高度化や、更に PETRA（Positron-Electron Tandem Ring Accelerator Facility；同 12GeV）を放射光源として転用するなどの計画が提案されている。

リング型次世代光源については、英国ダズベリー国立研究所において、電子の加速エネルギー 600MeV のエネルギー回収型リニアックの整備が計画されており、現在、その実証機として 35MeV の加速器の建設が進められている。

## ③ アジア、その他

アジアなどでも各国が第 3 世代の中型施設の整備を進めており、韓国の

PLS (Pohang Light Source; 電子の加速エネルギー2.5GeV)、台湾の TLS (Taiwan Light Source; 同 1.5GeV) が稼動中、オーストラリアの Australian Synchrotron (同 3GeV)、中国の SSRF (Shanghai Synchrotron Radiation Facility; 同 3.5GeV)、ヨルダンの SESAME (Synchrotron-light for Experimental Science and Application in the Middle East; 同 2.5GeV) が建設中である。

### (3) リング型光源計画のあり方について

エネルギー回収型リニアックやスーパー・ストレージ・リングといったリング型次世代光源は現在まだ構想段階にあり、いくつかの重要な要素技術の開発が必要とされ、X線自由電子レーザーのように詳細な事前評価を行い得る状況にはない。そのため、多くのユーザーの要望に応えるためには、既存施設の有効利用を進めるとともに、既存放射光源の高度化や次世代光源の整備などについて検討を進めることが肝要である。

#### 1) 既存施設の有効利用

既存施設の有効利用にあたっては、利用者の多様化するニーズや関連する分野の研究動向を的確に把握し、利用実験の迅速化を目指した計測装置の自動化などを技術開発し、それを導入すること、運営の効率化による運転時間の延長や調整運転時間の短縮によってユーザーの実質的な利用時間を増加させること、支援体制の充実・強化によって計測・分析を効率化すること等、有効利用にあたって、より一層適切な対応を図ることがあげられる。また、ユーザーニーズの変化に対応し、必要に応じて新規ビームラインの建設、既存ビームラインの用途見直しも検討すべきであろう。

#### 2) 既存放射光源の高度化計画について

既存放射光源の高度化にあたっては、利用者のニーズやそれによる研究成果、波及効果等を鑑みて計画を策定し、実施することが肝要である。特に、大規模な改修を伴う場合は、優先順位を明確化するとともに、レーザー科学研究など他の光科学研究との連携や可能となる研究範囲に関する比較検討にも十分な注意を払うことが必要となる。

現在、我が国における既存放射光源の高度化計画には、次の2つのタイプがあり、高度化によってなされる性能の向上とそれによって得られる研究成果や波及効果を十分検証したうえで、実施することが重要である。

### ① 第2世代放射光施設の高度化

KEKのPFや分子研のUVSORなど、第2世代として整備された放射光施設は、既に電磁石配置の変更など大幅な改修が行われ、第3世代に近い性能を有するまでになっている。今後、更なる高度化も考えられるが、当初設計の制約により、挿入光源を設置するための直線部の数や長さが限られるなど、性能向上には限界があることから、費用対効果の検証が重要となる。

### ② 第3世代放射光施設の高度化

SPring-8では、挿入光源を設置していない直線部を活用するなど、高輝度化、高コヒーレント化、短パルス化のそれぞれを目指す高度化計画が検討されている。これらが実現すると、一部のビームラインにおいて、平均輝度やコヒーレント性を現在の20倍、パルス幅を現在の100分の1に向上させることが可能となるが、これらの技術要素や達成される性能は、スーパー・ストレージ・リングとほぼ同等のものであることから、高度化の実施にあたっては、リング型次世代光源の整備との比較検討が必要である。

### 3) リング型次世代放射光源の整備について

リング型次世代放射光源については、スーパー・ストレージ・リングが現在構想段階にあり、一部の要素技術開発について検討が行われている状況にある。また、エネルギー回収型リニアックは、高輝度電子銃の開発など具体的な要素技術開発が行われているが、KEKとJAEAの協力が始まったばかりであり、X線自由電子レーザーのように詳細な事前評価を行い得る状況にはない。

リング型次世代光源は、今後の放射光科学の進展に伴い、より高い品質の放射光を多数のユーザーに供給するという観点から期待は大きいものの、X線自由電子レーザーを上回る投資を必要とするものであり、費用対効果の観点からも綿密な調査検討が必要である。SPring-8が本格利用期に入り、またX線自由電子レーザーが整備されようとしている段階において、SPring-8を超える高輝度、高コヒーレント性、短パルスの放射光を多数のユーザーに同時に提供することの効果や研究ニーズを十分把握し、かつ分析することが必要である。

すなわち、放射光利用研究の今後の見通しとその学術的、経済・社会的な意義、必要とされる光源性能、想定されるユーザーの分野の広がりや量的な範囲など、研究ニーズの調査・分析を十分行ったうえで、既存施設の有効利用や高度化による対応との比較検討を行い、それらの結果を、経費を負担する国民に分かりやすく示す必要がある。

また、これら研究ニーズの把握、分析、提示と並行して、エネルギー回収型リニアックやスーパー・ストレージ・リングの実現に向け、様々な課題の検討、要素技術の開発を着実に進めていくことも重要である。

#### ① エネルギー回収型リニアック

##### i) 研究開発体制の整備

エネルギー回収型リニアックについては、KEK と JAEA のそれぞれが個別に計画していたが、既に、両機関の間で協力協定を結び、その第一段階として相互の協力体制の構築を進めているところである。今後、大学等の研究者の参加も得て、検討を進めることが必要である。

##### ii) 要素技術開発

エネルギー回収型リニアックについてその実現可能性を検討するためには、次にあげる要素技術について、KEK と JAEA の協力において開発を進めることが必要である。

- 電子銃の大電流化
- 極短バンチ電子ビーム生成技術の確立
- 大電流化に対応した超伝導加速空洞の開発・高周波制御技術の確立
- ビーム安定化のためのフィードバック技術
- 細径ビームに対応した光学系の開発
- エネルギー回収技術の確立

#### ② スーパー・ストレージ・リング

##### i) 要素技術開発

スーパー・ストレージ・リングの要素技術は、SPring-8 の高度化技術と共通する点が多い。SPring-8 においても高度化のための加速器特性研究を行ってきたことから、それぞれが独立して技術開発を進めるよりも、関係する研究機関が協力して、両者に共通する要素技術開発を進めることが望ましい。このような技術開発項目として次のものがあげられる。

- 低エミッタンス化のための電磁石群設計技術の確立
- 超伝導クラブ空洞などの極短パルス生成技術の確立
- 高エネルギーX線・ガンマ線生成技術の確立

#### (4) 今後の検討課題

リング型光源計画は、現在の放射光科学を持続的に発展・進化させる拡張性、波及性があり、高い品質の放射光をより多くのユーザーが同時に利用するため

にも必要とされている。

本作業部会では、放射光を利用する幅広い研究分野の動向や多様化する研究ニーズを踏まえつつ、関連する研究機関が一体となって研究開発体制を整え、次世代光源の実現に必要な要素技術開発を引き続き実施することの必要性について指摘したところである。

今後は、各々の要素技術開発や、必要に応じてシステムとしての実証試験を実施するとともに、資金確保の方策を検討するなど、全体としての実現可能性を検証することが必要となる。

これらの検討、検証の状況を把握し、必要に応じて総合的な評価が行えるよう、新たな計画評価作業部会などの体制を整えることも重要である。

## 5. 人材の育成について

放射光科学は、物質科学、生物学、化学、医学、工学などの広範な科学技術・学術的分野の進展に多大なる貢献をしていることから、我が国の科学技術・学術的分野全体の発展のためにも、放射光科学を支える人材の育成は重要な課題となる。

特に放射光科学に関しては、大学における教育だけではなく、放射光施設における実践的な育成・訓練が重要であり、優秀な若手研究者・技術者が放射光施設における最先端の研究現場に身を置けるような環境整備を整えることが必要となる。具体的には、大学と放射光施設の連携のもと、学生の放射光施設への派遣、放射光施設における学位の取得、放射光施設によるポストクの採用などが考えられる。

また、放射光科学を支える人材は、その役割に応じて大きく3つに区分され、放射光科学全体の発展のためには、それぞれの人材育成をバランス良く推進することが重要である。

第1は加速器や放射光源そのものを研究開発の対象とする研究者・技術者の育成であり、既存放射光源の高度化や次世代光源の整備にとって重要となる。現在、一部の放射光施設において、大学院生の受け入れが行われているが、このような実践的プログラムの拡充が必要である。また、実際の施設整備等を通じて、技術を継承していくことも重要となる。

第2は放射光を計測・分析ツールとして利用するための光学系、計測装置、解析手法を研究開発の対象とする研究者・技術者の育成であり、今後一層強力かつ高品質化する放射光を効果的・効率的に利用し、質の高い研究成果を数多く輩出するために重要となる。第1の人材同様、実践的な教育・訓練が重要であり、例えば、大学や民間企業との共同研究の中で、それぞれのニーズに合う装置開発を行うなど、ユーザーとの対話を通じて技術を積み上げていくことが重要となる。

第3は実際に計測・分析ツールとして放射光を使用する際の使い勝手の向上や放射光利用に不慣れな研究者に対する助言など支援を行う人材の育成であり、放射光科学の裾野の拡大、特に産業利用を通じて社会や国民生活に直接役立つ成果を多数輩出するために重要となる。支援技術者の場合、論文などの目に見える業績を出すことが難しいことから、放射光を利用する研究者とは異なる業務の性質を考慮したうえで、評価・処遇の改善を図り、優秀な人材を支援技術者として確保できるようにすることが必要である。

## あとがき

本作業部会は、X線自由電子レーザー、エネルギー回収型リニアック、スーパー・ストレージ・リングといった次世代放射光源計画について、その基本方針、開発計画、利用計画、運営体制などの評価・検討をするために設置したものであり、平成17年6月から翌平成18年1月にかけて8回開催した。

前半の4回では、理研のX線自由電子レーザー計画について事前評価を行い、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した。また、後半の4回では、現在の放射光科学を持続的に発展・進化させるリング型光源計画として、KEK、JAEAから提案されたエネルギー回収型リニアック、スーパー・ストレージ・リングに加え、SPring-8、PF、UVSORなど既存施設の有効利用や高度化計画について検討を行った。そして、研究ニーズの調査・分析、提示とともに、次世代光源に関する様々な課題の検討や要素技術の開発を着実に進めていくことの重要性を指摘した。

これら評価・検討の結果を本報告書にとりまとめたところであるが、本作業部会としては、報告書に示した内容を踏まえ、今後、次世代放射光源計画や既存施設の高度化計画がより適切に推進されることを期待する。本作業部会の評価・検討結果が放射光科学の発展、引いては我が国の科学技術の発展に生かされれば幸いである。