

X線自由電子レーザー計画  
中間評価報告書

平成20年8月  
科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会

## 目次

1. はじめに	・・・2
2. 開発について	・・・3
(1)開発の現状	・・・3
(2)評価	・・・6
(3)今後の在り方	・・・7
3. 利用推進研究について	・・・8
(1)利用推進研究の現状	・・・8
(2)評価	・・・9
(3)今後の在り方	・・・10
4. 情報発信について	・・・11
(1)情報発信の現状	・・・11
(2)評価及び今後の在り方	・・・11
5. 運用等について	・・・11
(1)運用等の現状	・・・11
(2)評価及び今後の在り方	・・・12
6. 総合評価	・・・13
用語解説	・・・14

## 1. はじめに

### (背景)

X線自由電子レーザー(XFEL)計画は、人類がいまだ手にしたことのないX線領域のレーザー光源を開発し、その装置をナノテクノロジー・材料分野やライフサイエンス分野をはじめとする幅広い分野における研究者・技術者の利用に供する計画である。これにより、原子レベルの超微細構造や化学反応などの超高速動態・変化を瞬時に計測・分析することが可能となるなど、様々な分野で飛躍的な成果が多数創出され、科学技術の発展とイノベーションの実現が期待されている。

本計画については、平成17年6月から8月にかけて、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設置された次世代放射光源計画評価作業部会において事前評価が行われ、「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」との結論が得られている。また、総合科学技術会議においても事前評価が行われ「本計画を実施することが適当」とされたところである。これらの結果を踏まえ、平成18年度から独立行政法人理化学研究所(理研)において本計画が進められている。

一方、科学技術・学術審議会の事前評価においては、プロジェクトが開始されてから一定期間が経過した後に、事前評価における指摘事項の反映状況等について、中間評価を行うべきであるとされている。これを受けて、本年が事前評価実施後3年目に当たること、及び施設の建設予定期間約5年の中間に当たることから、本計画の中間評価を実施することとなった。このため、科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 ナノテクノロジー・材料委員会にX線自由電子レーザー計画評価作業部会を設置し、計画の進捗状況や事前評価における指摘事項への対応状況を確認するとともに、これらの状況を踏まえ、今後のプロジェクト推進の在り方等を示していくという観点から評価を行った。

### (評価項目・評価方法等)

本作業部会においては、国及び理研が行っている本計画に係る活動全般を評価対象とし、計画の進捗状況及びこれまでの事前評価等で指摘された事項への対応状況について、「開発」「利用推進研究」「情報発信」「運用等」の4つの観点から評価項目を整理した。その上で、それぞれの評価項目について、施設整備の実施者である理研や利用推進研究を推進するために文部科学省に設置された「X線自由電子レーザー利用推進協議会」(協議会)等から、活動の現状についてヒアリングし、その状況について評価するとともに、今後の在り方について審議した。

なお、利用推進研究については、事前評価等の指摘事項を踏まえ、既に協議会において、方針の策定、課題の公募、選定、評価等が実施されている。このことから、個別の課題の詳細について評価するのではなく、推進体制や課題選定の考え方等の利用推進

研究の実施に係る大枠について評価を行った。

(今後の期待)

XFEL は、第3期科学技術基本計画において、国家的な大規模プロジェクトとして集中的に資金を投資すべき基幹技術(国家基幹技術)の一つとなっており、施設の整備に389 億円の国費が投入される予定である。また、XFEL と同様な計画は、米国及び欧州でも進められており、国際競争の中で実施されている状況である。

こうした状況を踏まえ、国及び理研は、本作業部会の評価の結果を今後の計画の推進に適切に反映し、世界に先駆けて XFEL 装置を完成させ、我が国から世界初の画期的な成果が多数創出されるよう、本計画を着実に進めていくことが期待される。

## 2. 開発について

(1)開発の現状

(計画の進捗)

本計画は平成18年度に開始され、これまでに装置の研究開発や製作、関連施設の建設等が進められている。XFELは、従来の放射光X線と比べピーク輝度において10億倍という超高輝度で、100フェムト秒以下の高速な動態・変化を捕捉し、コヒーレントな光によって原子・分子レベルでの超微細構造を精密に解析することが可能となる。その設計の基本パラメータは以下の通りである。

### 実機の設計基本パラメータ

【加速器】	
電子ビームのエネルギー	8 GeV
電荷 (single and multi bunch)	1 nC/バンチ、 1 nC/バンチ × 40 バンチ
規格化スライスエミッタンス	1 $\pi$ mm·mrad 以下 (rms)
バンチ長	0.1 ps (FWHM) 以下
ピーク電流値	3 kA 以上
スライスエネルギー拡がり	0.01 %以下
エネルギー安定度	0.01 %以下
【アンジュレータ】	
セグメント数	18 セグメント

セグメント当たりの長さ	5 m/セグメント
周期長、周期数	18 mm、277 /セグメント
【レーザー】	
波長	最短で 0.06 nm
ピーク輝度	$10^{32}$ photons/sec/mrad <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> /0.1% bandwidth
光子数密度	$10^{12}$ photons/pulse/mm <sup>2</sup> 程度
パルス長	0. 1 ps 以下*
ビーム径	0. 2 mm $\phi$ (波長 0.06 nm、試料位置)
繰り返し周波数	60 Hz

※ SASE方式では、パルス内の微細な時間構造はショット毎に変化する

主要機器の内、電子ビームを生成する電子ビーム入射系、及びそれを加速する加速管等については既に実機の製作に入っている。レーザーの発生・増幅を行う装置であるアンジュレータについても研究開発が終了し、平成20年10月から量産が開始される予定である。アンジュレータと計測装置をつなぐ光学系については、XFEL光源の特性を踏まえ、コヒーレントな波面を乱さないためのスペックルフリー光学系、外部機器に対し高精度の時間同期を可能にするためのフェムト秒タイミング伝達システム等の研究開発が進められている。さらに、超平坦ミラーの活用によりエネルギースペクトルをシングルショットで精密計測するためのシステムが開発され、従来より2桁高い分解能(光子エネルギー10keVにおいて13.1meV)が達成された。このパルス毎の光特性診断はXFELの利用実験にとって重要なものである。

建屋等についても計画通り建設が進められている。XFELビームを安定して供給するために、各機器をマイクロオーダーの精度で保持することが必要とされる。このため、地盤の強度を確保するための杭打工事や砕石置換等が行われ、平成20年度中には加速器やアンジュレータを収納する建屋が完成する予定であり、機器を設置するための準備作業が開始されることになっている。さらに、共同実験棟・共同研究棟や XFEL のリニアックから SPring-8 に電子ビームを入射するための電子ビーム輸送系トンネルについても、平成20年度中に着工し、XFEL の試運転が開始される平成22年度半ばまでには完成の予定となっている。

(計画実施体制)

本計画は、理研と財団法人高輝度光科学研究センター(JASRI)が XFEL 計画合同推進本部を設置し、両者が一体となって研究開発及び建設が進められている。

また、研究開発の推進に当たっては、理研の各センターや研究所、大学等の研究機関、

企業等と連携を図るとともに、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、欧米で同様の計画を行っているドイツ電子シンクロtron研究所 (DESY) (独) やスタンフォード線形加速器研究センター (SLAC) (米) などと協力協定を結ぶなど、国内外の関係機関とも連携がなされている。

さらに、計画の実施段階において発生した問題点に対応するため、情報を共有し、問題点への対応を迅速に進めるシステムが構築されている。

#### (プロトタイプ機の活用)

XFEL のプロトタイプ機の主要な目的は、高品位電子ビーム生成の確認、アンジュレータによるレーザー光の生成の試験・確認等、実機建設に向けた各種研究開発を行うことである。既に平成18年6月には SASE 方式のレーザー発振に成功し、さらに、平成19年4月には同機を活用して実験をするための実験棟が整備されている。

このプロトタイプ機の運転の成果は、実機の設計に反映されており、例えば、加速器の入射部の設計において、バンチ圧縮の効率向上のために S-バンド加速管の上流に L-バンド加速管を追加する等の措置が講じられている。

また、プロトタイプ機における利用研究により、スペクトルのピーク波長及びスペクトル形状のショットごとの変化を抑制する必要性やさらなる短パルス化の重要性等が明らかになってきた。これらの問題に対応するため、プロトタイプ機において外部レーザーの高次高調波を種光としてシングルピークのレーザーパルスを生成するためのシーディング技術の研究開発等が進められている。

さらに、微弱なアンジュレータ自発放射をもとにした電子のマイクロバンチ化を行う通常の SASE 方式では、マイクロバンチを生成するまでにある程度の距離が必要となる。そのため、可視レーザー光を利用し、あらかじめ電子ビームのバンチの中に周期的な密度変調を与えてから加速することによりマイクロバンチ化を促進する日本独自の技術 (スーパーシーディング技術) の開発をプロトタイプ機で行うことが計画されている。

さらに、プロトタイプ機は、波長約50nmの真空紫外線レーザー光源としてユーザーの利用も開始されている。この利用研究に関しては、XFEL合同推進本部の利用グループの下に3チームが形成され、利用体制の強化やユーザーの受入体制の整備が行われている。

#### プロトタイプ機真空紫外レーザーのパラメータ

波長	50~60 nm
ピーク輝度	$10^{28}$ photons/sec/mrad <sup>2</sup> /mm <sup>2</sup> /0.1% bandwidth 以上
光子数密度	$10^{12}$ photons/pulse/mm <sup>2</sup> 程度

パルス長	1 ps 以下※
ビーム径	3 mm $\phi$
繰り返し周波数	60 Hz

※ SASE方式では、パルス内の微細な時間構造はショット毎に変化する

## (2) 評価

本計画については、当初の予定通り平成23年度の共用開始を目指して、建屋の建設、装置の開発・整備、光学系の研究開発が順調に進んでいると評価できる。また、事前評価における指摘事項には適切に対応できていると考える。

特に、以下の項目において格段の進展があったと評価できる。

- ・ 加速器分野：

熱電子銃と速度変調バンチ圧縮システムを組み合わせた高品位電子ビーム源が開発され、プロトタイプ機においてバンチ圧縮後も高い性能が維持されていることが実験的に検証された。

- ・ アンジュレータ：

XFEL のレーザー増幅に不可欠な異なるセグメント間における磁場の均一性を確保するために、真空槽内の磁石間隔（ギャップ長）を精密に測定し、調整する装置が開発された。

- ・ 利用技術：

世界で初めて超平坦ミラーの製作技術が開発され、コヒーレントな XFEL の波面を維持したままビームをハンドリングすることが可能となり、超平坦ミラーの長尺化(400mm)が達成され、0.1° 以下の非常に小さい視斜角で XFEL ビームの全幅を受光することが可能となった。この結果、ミラー表面における光子密度は、放射線損傷に関する基準（ローレンス・リバモア国立研究所(米)で示された基準)と比較して100分の1以下に抑制することが可能となった。

超平坦ミラーは光特性の計測にも応用され、XFEL の利用にあたり大きな課題の1つとされていたシングルショットのスペクトル精密計測が実現された。X線領域のビームスプリッターの開発にも着手している。

また、高精度の時間基準を与える光周波数コムと光路長安定化装置を組み合わせたフェムト秒タイミング伝達システムが開発され、極めて高い安定度で装置全体(約700m)にわたってフェムト秒領域のタイミングを伝達することが可能となった。

開発体制についても、SPring-8の運転・維持管理等を実施しているJASRIと共同体制を構築し、SPring-8の経験や技術を適切に反映しながら進められているほか、実施段

階で発生する問題点に適切に対応できる体制が構築され、KEKをはじめ国内外の関係機関との協力・連携を図りながら進められており、概ね妥当である。

また、XFEL のプロトタイプ機が平成18年度にレーザー発振に成功しており、運転を通じて明らかになった問題を逐次解決し、それらの結果を実機の設計に適切に反映させている点や、プロトタイプ機を利用推進研究にも活用することにより実機での利用に備えている点は評価できる。

引き続き、SPring-8 やプロトタイプ機の経験や技術の成果を適切に反映しながら、国内外の関係機関との協力・連携体制を強化しつつ、着実に計画を進展していくことを期待する。

また、計画を着実に進めていくためには、年度計画に対応した予算が措置されることが重要である。特に、本計画が国際的な競争の中で進められていることに鑑みて、世界に先駆けて装置を完成させることは、成果創出の観点からも重要であり、こうした点も踏まえ、国が適切な予算措置を講じていくことを期待する。

### (3) 今後の在り方

今後の装置の開発に当たっては、主として、これまでの研究開発段階から、実機の製作に移行することに鑑み、品質管理や設計変更等の見直しに対するリスク管理等が重要になってくると考えられる。こうした点も踏まえながら、理研を中心とした国内外の関係機関との協力・連携体制や計画外事象の発生に柔軟に対応できるシステムを維持・強化しつつ進めていくことが重要である。なお、人的資源の確保や国内外の関係機関との協力体制の強化を図る際には、装置の開発・施設の建設にとどまらず、施設完成後の試験運転、さらには施設の高度化や性能向上等も視野に入れることも重要である。

光学系の開発に関しては、理研において必要となる研究開発が進められているところであるが、国で推進している利用推進研究の状況に応じて、優先順位を付けて進めていくことも必要と考える。

XFEL の高度化という観点から、理想的な光の状態であるシングルモードのコヒーレント光を実現する技術は非常に重要である。このためのスーパーシーディング技術は、日本独自の極めて独創的な方式であり、異なる電子ビーム発生方式を採用している諸外国に対して優位性を有することから、プロトタイプ機を十分に活用しながら、早期に実用化することが求められる。

また、これまで本計画の一環として開発されてきた技術の中には、例えば、シングルショットのスペクトル計測装置など、利用者が利用しやすい標準装置に発展させていくことが期待されるものがある。さらに、こうした技術に関しては汎用的な技術として普及されていくことが期待される。

なお、プロトタイプ機についても、それ自体が研究基盤として価値が高いものであるこ

とから、プロトタイプ機としての目的が終了した後も、真空紫外 FEL 光源として幅広いユーザーが利用できる体制を維持していくことが望まれる。

本施設のビームラインの本数は最大5本設置可能であるが、現在、計画において具体化されている本数は2本である。本施設の能力を最大限活用し広範な分野の利用研究を推進していく観点から、成果の状況も踏まえつつ、利用者側のニーズを把握しながら、ビームラインの増設について検討していく必要があると考える。

### 3. 利用推進研究について

#### (1) 利用推進研究の現状

##### (利用推進協議会)

科学技術・学術審議会及び総合科学技術会議における事前評価等において、XFEL 施設完成後における利用研究推進体制確立の重要性が指摘された。これを受けて、平成18年2月、装置完成後直ちに本格的な利用研究を実施し、多数の先端的研究成果を創出するため、X線自由電子レーザー利用推進協議会が文部科学省研究振興局に設置された。

協議会には、放射光科学、ナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス、レーザー科学等の分野の学識経験者、産業界からのメンバーのほか、光源開発との連携を図るためにプロジェクトの実施主体である理研の研究者も参画している。

また協議会の下には、利用推進方針策定プロジェクトチームと利用推進研究課題選考・評価プロジェクトチームが設置され、前者においては利用推進研究を効果的・効率的に実施するための利用推進方針の策定が、後者においては利用推進研究課題の選定、実施課題の進捗状況の把握等がそれぞれ行われている。

##### (利用推進研究課題)

利用推進研究は、XFEL 完成後に当該装置を用いて実施される利用研究において想定される様々な問題点を解決するために、前期3年間及び後期2年間の2つの期間に区分し、現在、協議会を中心に実施されている。

この利用推進研究課題は、あらかじめ利用推進方針にて、多くの利用研究に共通する技術開発(共通基盤技術開発)と個々の利用研究に特異的な技術開発(個別研究開発)に大別され、公募により18課題が選定されている。

課題の選定は、目標とする利用研究に独自性や優位性があるか、我が国における科学技術の発展への貢献と社会・経済への波及効果があるか、技術的な見通しが十分検討されているか等の観点から行われている。また、例えば、XFEL の光によって物質中の

電子を励起させ、その状態を SPring-8 の放射光で観測するポンププローブ手法など、SPring-8 との相乗効果を利用することによって新たな研究分野の開拓も目指しており、そのための研究課題も利用推進研究課題として実施されている。

#### (利用推進研究の進め方)

利用推進研究は、前期においては個々の要素に関する技術開発を、後期においてはそれらの技術を統合して実際の利用研究で使用可能な計測システムに組み上げる期間とされている。平成20年度は前期3年間の最終年度に当たるため、協議会において中間評価及び課題の絞り込みが実施されることとなっている。

利用推進研究の実施に当たっては、装置開発主体である理研と密接な連携をとって行われている。また、必要に応じて、理研の所有する SPring-8 のビームライン及びプロトタイプ機を利用できるものとしており、ミラー光学システムの開発や原子・分子クラスターのダイナミクス等に関する利用推進研究では実際に成果が上がっている。

さらに、利用推進研究課題の研究代表者相互の情報交換や連携を図り、総合的かつ効果的に利用推進研究を推進するために、研究代表者を利用推進方針策定プロジェクトチームの委員とすることにより、協議会や同プロジェクトチーム等の会議の場において相互交流が図られている。

#### (2) 評価

本計画の開始当初から、関連分野の有識者からなる協議会を設置し、利用推進研究を推進していることは評価できる。引き続き、XFEL が持つポテンシャルを活かして世界に先駆けた成果を創出するために今後も着実に推進していくことが必要である。

また、一定の予算の枠内でインパクトのあるいくつかの成果を早期に創出するという観点から、現在実施されている利用推進研究課題は、概ね妥当と判断できる。しかしながら、従来の放射光研究の延長線上にあると考えられる課題が散見されるので、今後は、短波長、コヒーレンス性、短パルス、大強度といった XFEL の大きなポテンシャルをより広い分野で発揮していくための方策も必要である。

利用推進研究の進め方については、中間評価を実施し課題を絞り込む予定であることや、研究課題実施者が連携しながら進めていることなど、妥当であると判断される。ただし、現時点では期待される成果や技術的見通しが曖昧な点もあり、今後行われる中間評価等の作業の中で、どのような飛躍的な成果が期待できるのか、またその技術的見通しはどうであるのか等の具体的描像を明確にしつつ、国際競争における優位性を確保すべく、XFEL の上記の特長をうまく引き出し、より戦略的に進めていくことが必要である。

産業界との連携に関しては、協議会に産業界のメンバーが含まれており、産業利用を

見据えた利用推進研究課題も実施されていることから、一定の評価はできる。しかしながら、産業界の参画はまだ限られたものになっており、その参画を促進するために引き続き努力すべきである。

### (3) 今後の在り方

利用推進研究は、5年間で結果を出すことが求められており、今後の2年間の研究開発によって、計画通りの成果が出るように取り組んでいくことが必要である。

XFELで画期的な成果を創出するためには、コヒーレンス性、フェムト秒時間分解能、大パルス強度等の特長を活かし、幅広い分野で本装置でしか実現できない研究開発を進めることが重要である。こうした研究分野としては、現在、利用推進研究を行っている化学反応の素過程追跡を行う反応化学、創薬の開発に繋がるタンパク質機能解明を行う構造生物学、極小デバイス磁化挙動解析のための回折スペックル計測の開発のほか、X線天文学、光核物理、非線形光学、量子光学をはじめ、エネルギーや医療分野を含めて幅広い分野が考えられる。こうした観点から、現在行われているナノテクノロジー・材料、ライフサイエンス分野に加え、レーザー科学等の関連分野のコミュニティとも十分連携をとっていくことが重要である。

さらに、SPring-8 に隣接しているというメリットは、欧米の計画にはない特長であり、これを活かした独創的な利用研究の在り方についても更なる検討を期待する。

こうしたことから、レーザー科学をはじめとする広範な分野の研究者や実験系のみならず理論系の研究者が利用推進研究の推進に参画できるシステムを構築するとともに、現在研究が行われていない分野の課題や長期的に対応する課題等も含めた戦略的な利用推進研究の在り方について検討することが必要である。その際、リング型放射光施設と比較した XFEL の相違点、例えば、パルス光の繰り返し安定性、利用可能なビームライン数、実験技術の斬新さなどをどのように考慮していくかについても検討すべきである。

さらに、こうした検討結果を踏まえ、長期的な課題などについて、必要に応じ、利用推進研究として新たに採択することも検討すべきである。

また、利用推進研究における主要な分野とされているナノテクノロジー・材料分野やライフサイエンス分野においては、その進展の早さに鑑み、各課題について毎年評価し、それらの分野の最新の進展が反映されるようにすべきである。

さらに、理研は、装置の開発のみならず、その活用においても、広範な分野の研究者を有する自然科学の総合研究所として、XFEL の新しい利用方策について、率先して検討することが重要である。

産業界との連携に関しては、産業界がこうした最先端の装置を活用する場合、学界を中心とした先導的な研究の成果を踏まえた上で利用をするということが通常であるた

め、現時点で産業界の参画が少ないことも理解できる。しかしながら、今日の科学技術の発展のスピードは著しく、基礎科学と応用技術の両分野は同時並行的に推進する必要があることから、研究の初期の段階から産業界と学界の協調体制を構築することも重要である。こうした観点から、現在の利用推進研究課題の状況やプロトタイプ機における成果等の情報を産業界にも適切に発信し、産業界における利用の機運を高めていくことが求められる。

#### 4. 情報発信について

##### (1) 情報発信の現状

本計画が具体化した平成17年度以降、これまで3回にわたる XFEL シンポジウムの開催、産業界への説明や各種学会やシンポジウム等での説明など 102 件(平成20年3月現在)の講演が実施されるとともに、企業見学会、高校生を対象としたイベントや理研の一般公開等で XFEL の広報活動が積極的に実施されている。

また、一般向けのパンフレットなども作成され、地元地域をはじめ、一般国民、研究者、企業関係者などに幅広く情報発信が行われている。

その結果、XFEL シンポジウムの総参加者数は 1,044 名(第1回 336 名、第2回 266 名、第3回 442 名)を数えるとともに、プロトタイプ機の見学者は 4,404 名(平成20年3月現在)となり、新聞記事の掲載数は64件(平成20年3月現在)などとなっている。

##### (2) 評価及び今後の在り方

XFEL の意義や計画の状況について積極的に情報発信していることは評価できる。引き続きこうした取り組みを行っていくことが求められる。

また、XFEL 施設の完成が近づいていることを踏まえ、XFEL の利用の拡大を目指し、実際に利用が想定される研究者への説明や産業界も含めた潜在的なユーザーを発掘するための情報発信をこれまで以上に行うよう努めるべきである。こうした観点から、プロトタイプ機を用いた利用研究と成果に関する情報も、産業界を含め、広く学界に発信をしていくことが有効であると考えられる。

#### 5. 運用等について

##### (1) 運用等の現状

XFEL 施設は、平成18年4月に「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法

律」(共用促進法)における特定放射光施設に位置づけられ、幅広い分野の研究者・技術者の利用に供される共用施設として整備が進められている。これを踏まえ、XFEL 施設完成後の運営維持体制については、理研と JASRI のメンバーで構成される SPring-8 運営会議にて検討が開始されている。一方、国においても、平成23年の共用開始までに、登録施設利用促進機関(登録機関)の規模等を定める省令や共用に関する基本方針を定める必要があり、それに向けて運営体制の在り方について検討を行うこととされている。

国外の研究機関との連携体制の強化に関しては、DESY、SLAC などと研究協力協定が締結され、X 線自由電子レーザー3極(SPring-8、DESY、SLAC)ワークショップを開催することで、加速器、光科学に関し日欧米の3極間で共通に抱えている技術的な課題の検討、共同開発や施設の共同利用の検討が進められている。また、国内においても、独立行政法人日本原子力研究開発機構、独立行政法人物質・材料研究機構との間で3機関連携に係る研究協力協定を締結して、共同開発や共同研究の可能性についての検討が進められている。

施設側研究者と利用研究者の協力については、協議会において、理研と利用者が協力する体制が構築されている。

## (2) 評価及び今後の在り方

SPring-8 運営会議等で、施設完成後の運営維持体制について検討が開始されたことは評価できる。しかしながら、より具体的な検討には、XFEL の登録機関が選定されることが必要であり、今後は、しかるべき時期に登録機関を選定すべく、国において運営体制の検討を行うことが必要である。その際、登録機関が行う課題選定と協議会で現在行っている課題選定などとの整合性を考慮する必要がある。

一方で、登録機関が選定される前においても、理研が中心となって、JASRI の協力を得つつ、将来の利用形態を俯瞰した長期的ビジョンの策定、そのための適切な体制の構築や必要な経費の配分、少ない数のビームラインで実施すべき課題の採択方法や幅広い利用を実現するための研究支援の在り方、利用料金算出の考え方などについて議論し、効果的・効率的な運営体制をあらかじめ検討しておくことが重要である。

協議会の場を活用して、施設側研究者と利用研究者が協力する枠組みが構築されていることは一定の評価をするが、SPring-8 では利用者懇談会などの組織を通して産業界も含めてユーザーニーズの把握に努めており、XFEL においてもそうした例を参考にしながら、利用者の要望が運営主体に伝わるようなシステムを早期に構築すべきである。こうした業務は本来、登録機関の役割であるが、この機関が選定される前の段階においては、理研が中心となり、そうしたシステムの構築に取り組んでいくことが求められる。

なお、実機の運用の検討に際しては、現在 XFEL に計画されているビームラインは2

本と本数が少ない上、全て共用である点など、SPring-8 との相違も踏まえる必要がある。

## 6. 総合評価

平成18年度から本計画が開始されて以来、装置の研究開発、実機の製作、関連施設の建設等は順調に進んでおり、技術的な課題もほぼ克服しつつある。引き続き、これまでの推進体制を維持・強化しつつ、実機製作の段階で重要となる品質管理や設計変更等に対するリスク管理を適切に行い、計画を着実に進めていくことを期待する。

利用推進研究については、既に推進体制を整備し、XFEL の完成後直ちにインパクトのある成果を創出すべく、必要となる研究開発が進められており、一定の評価はできる。今後は、より広範な分野の研究者や理論研究者との連携を図りながら、XFEL のもつ大きなポテンシャルを最大限活かすべく、新しい研究分野の開拓や長期的な展望に立った研究を遂行していくべきである。

情報発信については、これまでも積極的に行われているところであり、評価できる。引き続き、XFEL の意義や状況を分かりやすく発信していくとともに、プロトタイプ機の成果等についても発信していくことが産業界も含めた新たなユーザーの開拓という観点からも重要である。

運用等については、今後、本格的な検討を実施すべき課題である。まずは、国において共用促進法が求める体制を構築するために必要な検討を開始すべきである。ただし、それまでの間、施設の設置者である理研においては、運用体制の在り方やユーザーニーズを把握するためのシステムの構築に努めるべきである。

以上のように、開発等は順調に進められており、また、事前評価における指摘事項には概ね適切に対応できていると評価できるが、国及び理研においては、本作業部会の評価やこれまでの事前評価における指摘事項を踏まえ、引き続き、本計画を着実に進めていくことが期待される。

## 【用語解説】

(A-Z)

GeV:

Giga Electron Volt の略。1GeV は10億ボルトの電圧での加速エネルギーを意味する。

L-バンド加速管:

円筒の空洞内に、円盤や小さい円筒を組み込み、この空洞の中に、周波数 1.4 GHz の高周波を導き、円筒内にできる定在波または進行波が作る電場を利用して加速する装置。

SASE 方式:

自由電子レーザーにおいて、アンジュレータの自発放射をもとにレーザー増幅を行う方式。通常のレーザーに用いられる光共振器、非線形媒質が不要のため、原理的な波長の制約がない。

SPring-8:

独立行政法人理化学研究所が所有する、兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高輝度の放射光を生み出す大型放射光施設。SPring-8 の名前は Super Photon ring-8GeV に由来する。放射光(シンクロトロン放射光)とは、電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、電磁石によって進行方向を曲げた時に発生する、細く強力な電磁波のこと。SPring-8 では、遠赤外線から可視光線、軟 X 線を経て硬 X 線に至る幅広い波長域で放射光を得ることができるため、原子核の研究からナノテクノロジー、バイオテクノロジー、産業利用や科学捜査まで幅広い研究が行われている。SPring-8 は日本の先端科学・技術を支える高度先端科学施設として、日本国内外の大学・研究所・企業から年間 14,000 名以上の研究者が利用している。

S-バンド加速管:

円筒の空洞内に、円盤や小さい円筒を組み込み、この空洞の中に、周波数 2.9 GHz の高周波を導き、円筒内にできる定在波または進行波が作る電場を利用して加速する装置。

XFEL:

X 線自由電子レーザー(X-ray Free Electron Laser)の略。

(あ行)

アンジュレータ(undulator) :

加速された電子の直線軌道上に沿って、多数のN、Sの磁極からなる磁石列を上下に配置して、その間を通り抜ける電子を周期的に小さく蛇行させて、明るく特定の波長を持った光を作り出す装置。XFEL計画合同推進本部がXFEL用に開発したアンジュレータは、磁極の周期が18mmで、1台の長さが約5m。なお、磁石列を真空中に配置したアンジュレータを真空封止アンジュレータ(in-vacuum undulator)といい、真空チェンバールの外寸の制限なしに、対向する磁石列の間隔を小さくすることができる。

エネルギー安定度(energy stability) :

電子ビームの平均エネルギーの偏差。

(か行)

規格化スライスエミッタンス(normalized slice emittance) :

ビームの断面積と広がりを掛けた値で、電子ビームの性質を表す指標の1つ。エミッタンスが小さい場合はシャープで良質なビームが得られる。

コヒーレント(coherent) :

波の位相(波の山と山どうし、谷と谷どうし)がきれいに揃った状態。時間的コヒーレンスはビームの進行方向、空間コヒーレンスはそれに直交する方向のコヒーレンスを表す。

(さ行)

シーディング方式(seeding system) :

自由電子レーザーにおいて、外部のレーザーを増幅することでシングルモードのコヒーレントな光パルスを生成する方式。外部レーザーの動作領域に波長は制限される。

周期長、周期数(periodic length, periodic number) :

アンジュレータの磁石列の単位周期の長さ、アンジュレータ1セグメントに含まれる単位周期の数。

真空紫外線レーザー(vacuum ultraviolet laser) :

波長領域30ナノメートルから100ナノメートル程度の電磁波。

シングルショット(single shot) :

単一パルスの照射。

スーパーシーディング方式 (super-seeding system) :

自由電子レーザーにおいて、可視レーザーとの相互作用により密度変調をもった電子ビームを加速・圧縮してアンジュレータに通すことで、シングルモードのコヒーレントな光パルスを生成する方式。原理的に波長の制約はない。

スペクトル (spectrum) :

光を波長(周波数)に分解したもの。

スペックルフリー (speckle-free) :

コヒーレント光照明下において粗面の反射時に観測される明暗模様 (スペックル) がないような状態。X 線領域で達成するには光学素子に対して極めて高い完全性が要求される。

スライスエネルギー拡がり (slice energy spread) :

電子ビームのエネルギー拡がり (瞬時値) の平均エネルギーに対する比。

速度変調バンチ圧縮システム (velocity bunching system) :

加速空洞により電子バンチの先頭と末尾に速度の差を与えた後ドリフトさせることで、バンチ長を圧縮するシステム。

(た行)

超平坦ミラー (ultra-smooth mirror) :

ミラーの照射領域全体にわたって、表面の形状精度が極めて高精度に制御されたミラー。

(な行)

熱電子銃 (thermionic gun) :

高温に保たれた陰極に高電界をかけて電子を取り出す装置。

ナノメートル (nm) :

10億分の1メートルが1ナノメートル。

(は行)

パルス(pulse):

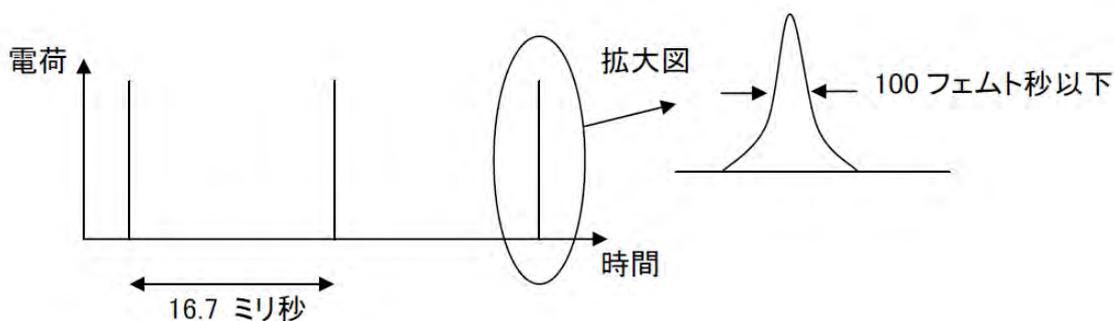
一般には非常に短い時間の間だけ変化する電流や電波。ここでは持続時間が短い光を指す。

バンチ(bunch):

高周波加速により電子が集群した状態を指す。

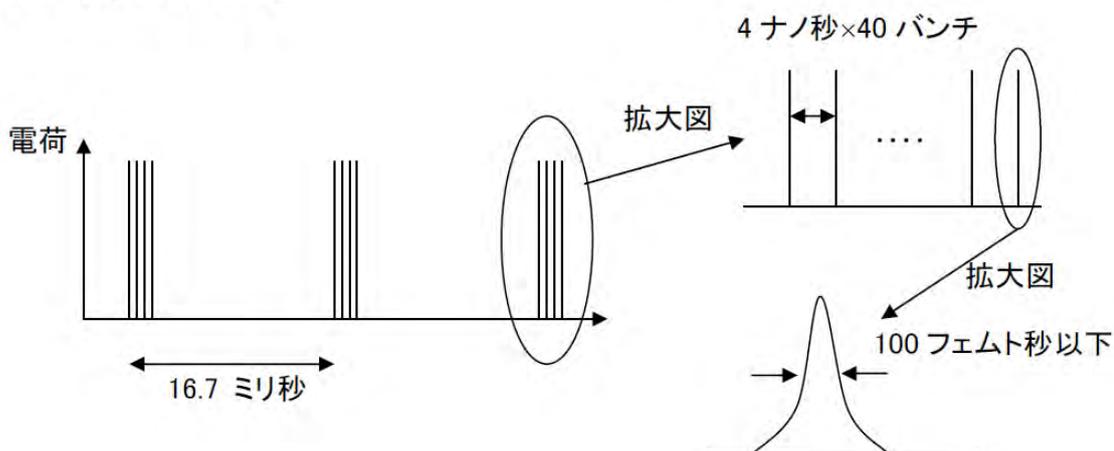
シングルバンチモード (single-bunch mode):

孤立したバンチを加速する加速器の運転方式。本計画におけるタイムチャートを下図に示す。



マルチバンチモード (multi-bunch mode):

短い時間間隔で連なるバンチ列を加速する加速器の運転方式。本計画におけるタイムチャートを下図に示す。



バンチ長 (bunch length):

集群した電子ビームの時間方向の長さ。

光周波数コム (optical frequency comb):

波長成分が等間隔に配列された光パルス列。

フェムト秒 (femtosecond) :

1,000 兆分の1 秒が1フェムト秒。1フェムト秒は、光の速さ(秒速約30万キロメートル)でも0.3ミクロンしか進むことができないほどの極短時間。フェムト秒領域は、1フェムト 秒以上1,000フェムト秒未満の範囲を指す。

プロトタイプ機 (prototype accelerator) :

ここでは、理研が建設した、XFEL の原理検証実験を行うための加速器を指す。加速エネルギー250MeV、全長60m。

(ま行)

マイクロバンチ (microbunch) :

バンチ内に形成される電子の密度変調。

## 参考資料

参考資料-1	X線自由電子レーザー計画評価作業部会の設置について .....	資1
参考資料-2	X線自由電子レーザー計画評価作業部会 委員名簿 .....	資2
参考資料-3	X線自由電子レーザー計画評価作業部会 開催経緯 .....	資3
参考資料-4	評価すべき項目 .....	資4
参考資料-5	X線自由電子レーザーの計画 .....	資6
参考資料-6	「開発」に関する説明資料 .....	資7
参考資料-7	「利用推進研究」に関する説明資料 .....	資29
参考資料-8	「情報発信」に関する説明資料 .....	資40
参考資料-9	「運用等」に関する説明資料 .....	資43

## X線自由電子レーザー計画評価作業部会の設置について

平成20年5月28日  
科学技術・学術審議会  
研究計画・評価分科会  
ナノテクノロジー・材料委員会

### 1. 趣旨

「X線自由電子レーザー計画」は、平成17年8月に科学技術・学術審議会において実施された事前評価を踏まえ推進されている。

現在、本計画は、平成23年度の共用開始に向けて、施設等の建設が進捗している。一方、事前評価実施後3年が経過し、その間に諸情勢が変化していることもあり、本計画の中間評価を実施し、今後の方向性等を示す必要がある。

このため、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会ナノテクノロジー・材料委員会に、X線自由電子レーザー計画評価作業部会を設置(設置期間:平成20年5月28日から評価終了まで)し、次の事項について調査する。

### 2. 調査事項

「X線自由電子レーザー計画」について、事前評価における指摘事項への対応状況、及び今後の方向性等に関して、中間評価を実施する。

### 3. その他

X線自由電子レーザー計画評価作業部会の庶務は、関係課室の協力のもと、研究振興局基礎基盤研究課量子放射線研究推進室が処理する。

X線自由電子レーザー計画評価作業部会  
委員名簿

主査	雨宮 慶幸	国立大学法人東京大学大学院新領域創成科学研究科長
	潮田 資勝	独立行政法人物質・材料研究機構フェロー
	遠藤 守信	国立大学法人信州大学工学部教授
	神谷 幸秀	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構理事 加速器研究施設長(併任)
	今野 美智子	国立大学法人お茶の水女子大学大学院 人間文化創成科学研究科教授
	竹山 春子	早稲田大学理工学術院先進理工学部生命医科学科教授
	田島 俊樹	独立行政法人日本原子力研究開発機構特別研究員
	谷口 雅樹	国立大学法人広島大学放射光科学研究センター長
	徳宿 克夫	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所教授 国立大学法人東京大学大学院理学系研究科教授(併任)
	家口 浩	株式会社コベルコ科研材料評価事業部担当部長
	亘理 文夫	国立大学法人北海道大学大学院歯学研究科教授

計11名(五十音順、敬称略)

X線自由電子レーザー計画評価作業部会  
開催経緯

第1回：平成20年6月11日（水）10:00～12:00

- 議題 (1)X線自由電子レーザー計画の現状について  
(2)利用推進研究の現状について  
(3)X線自由電子レーザー計画の評価について  
(4)その他

第2回：平成20年7月7日（月）13:00～17:00

- 議題 (1)「評価すべき項目」ごとの議論  
(2)その他

第3回：平成20年7月28日（月）13:30～16:30

- 議題 (1)X線自由電子レーザー計画の中間評価について  
(2)その他

第4回：平成20年8月4日（月）13:30～15:30

- 議題 (1)X線自由電子レーザー計画の中間評価報告書(案)について  
(2)その他

## 評価すべき項目

1. 開発

- 1-1 計画の進捗状況の評価(計画外事象の発生の有無及び対応の適否を考慮)
- 1-2 計画の推進にあたり、計画的かつ効率的な仕組みが構築されているか。
- 1-3 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など、国内外の関連研究機関との連携・協力が図られているか。
- 1-4 X線自由電子レーザーの諸特性を精密計測するためのシステムを構築しているか。
- 1-5 プロトタイプ機から大型化するにあたってのクリティカルな課題が認識され、適切な取り組みが行われているか。

2. 利用推進研究

- 2-1 X線自由電子レーザーでないと出来ないこと及びそのメリットを明確にし、X線自由電子レーザー完成後、その性能を最大限に発揮する利用研究が速やかに行えるよう、利用技術、測定器技術を開発するなど、十分な利用推進研究を推進しているか。
- 2-2 利用推進研究の推進に当たっては、レーザーを含む幅広い分野への利用や新たな利用への対応に留意しつつ、関連研究機関の研究者との連携体制や国内外の広範な研究者が機動的に参加できる枠組みが構築されているか。
- 2-3 Emerging、短期、中期課題を設定して、継続的、戦略的に利用推進研究を進めているか。
- 2-4 インパクトのある研究や早期に具体的成果が見込まれる課題を選定しているか。また、SPring-8との相乗効果といった新たな研究分野の開拓を目指しているか。
- 2-5 SPring-8やプロトタイプ機を用いた予備実験を活用しつつ、利用推進研究を進めているか。
- 2-6 成果の自己評価を基礎、応用の広範な視点から適切に実施し、利用推進研究を進めているか。
- 2-7 企業等の応用分野の利用者との連携を図り、応用研究テーマを増やしているか。

### 3. 情報発信

- 3-1 X線自由電子レーザーの意義、目的、予想される成果などや社会・経済への波及効果を国民に分かり易く発信しているか。
- 3-2 X線自由電子レーザーの完成時に産業界が積極的な活用に興味を持つよう、産業界に向けての情報発信を行っているか。
- 3-3 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か、説明しているか。
- 3-4 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な広報を行っているか。

### 4. 運用

- 4-1 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推進するため、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を検討しているか。
- 4-2 共用施設として、利用課題を広く募集し、外部の評価委員により適切に課題選定を行うことを検討しているか。
- 4-3 JASRIの有する経験やノウハウを活用した効率的な運営体制だけでなく、SPring-8とX線自由電子レーザーの持つ役割を勘案した相乗効果のある適切な運用を検討しているか。
- 4-4 施設側研究者と利用研究者が協力する体制の構築を検討しているか。
- 4-5 企業等が独自利用できる枠組みの設定と社会還元策の確立が検討されているか。
- 4-6 海外におけるX線自由電子レーザー計画であるSLAC(米)、DESY(欧)との競争だけでなく、中長期スコープを持った戦略的な共同利用方法を検討しているか。

### 5. その他

- 5-1 SPring-8、PFなどの既存の放射光施設や現在建設中の大強度陽子加速器施設の中性子施設とX線自由電子レーザー装置の相互補完的な利用のための枠組みを検討しているか。

# X線自由電子レーザーの概要

平成20年度予算額 110億円  
 平成19年度予算額 107億円\*  
 (\*:補正予算 33億円含む)

## ☆ X線自由電子レーザーの概要

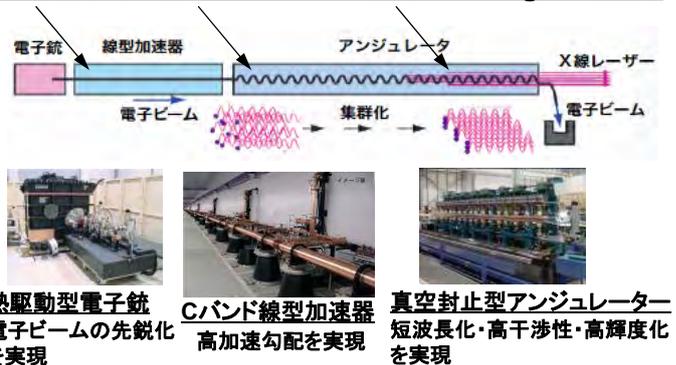
現在の10億倍を上回る高輝度のX線レーザーを発振し、原子レベルの超微細構造、化学反応の超高速動態・変化を瞬時に計測・分析することを可能とする世界最高性能の研究施設を平成23年度からの共用開始を目指して整備する。また、ライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野など、様々な科学技術分野に新たな研究領域を開拓し、欧米に先んじる成果の創出を目指す。(開発期間(平成18年度～平成22年度))

## ☆ X線自由電子レーザーの特徴

⇒ 放射光による強力な“高干渉性硬X線”の実現

- ・**短い波長** [硬X線(波長0.1ナノメートル以下)]  
→ 原子・分子レベルでの超微細構造解析
- ・**短いパルス** [フェムト秒パルス(10兆分の1秒以下)]  
→ より高速な動態・変化を捕捉
- ・**強力な光** [超高輝度(SPring-8の10億倍以上)]  
→ 物質深部の解析、瞬時のデータ取得
- ・**質の良い光** [高干渉性(コヒーレント性100%)]  
→ よりシャープな像の取得・精密計測

## ☆ X線自由電子レーザーの構成(SPring-8に隣接)



# X線自由電子レーザーで初めて可能となる画期的な研究テーマ

## 従来技術の限界

X線領域の強度が不足  
 非結晶物質の構造解析困難

時間分解能:ピコ秒  
 電子状態制御困難

X線領域のコヒーレント光が存在しない  
 イメージング:極めて低解像度

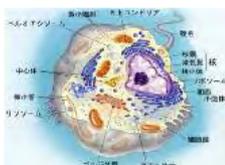
## X線自由電子レーザー

10億倍強いX線

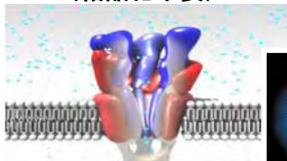
フェムト秒時間分解能

完全コヒーレントX線

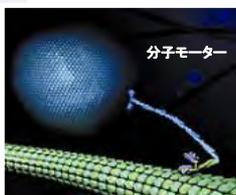
### 高分解能細胞イメージング



### 膜タンパク質一分子構造解析(結晶化不要)



### 生体ナノマシンのダイナミクス



生物学  
・  
医学

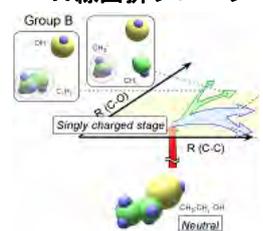
非結晶物体の原子レベル構造解析  
 超高精度・超高速イメージング

ナノサイエンス・ナノテクノロジー

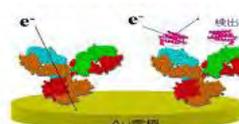
### 観測データの地上再現



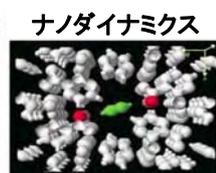
### 強光子場ポンプ X線回折プローブ



天文学  
・  
強光子場



### 電子状態観測 電子・分子制御

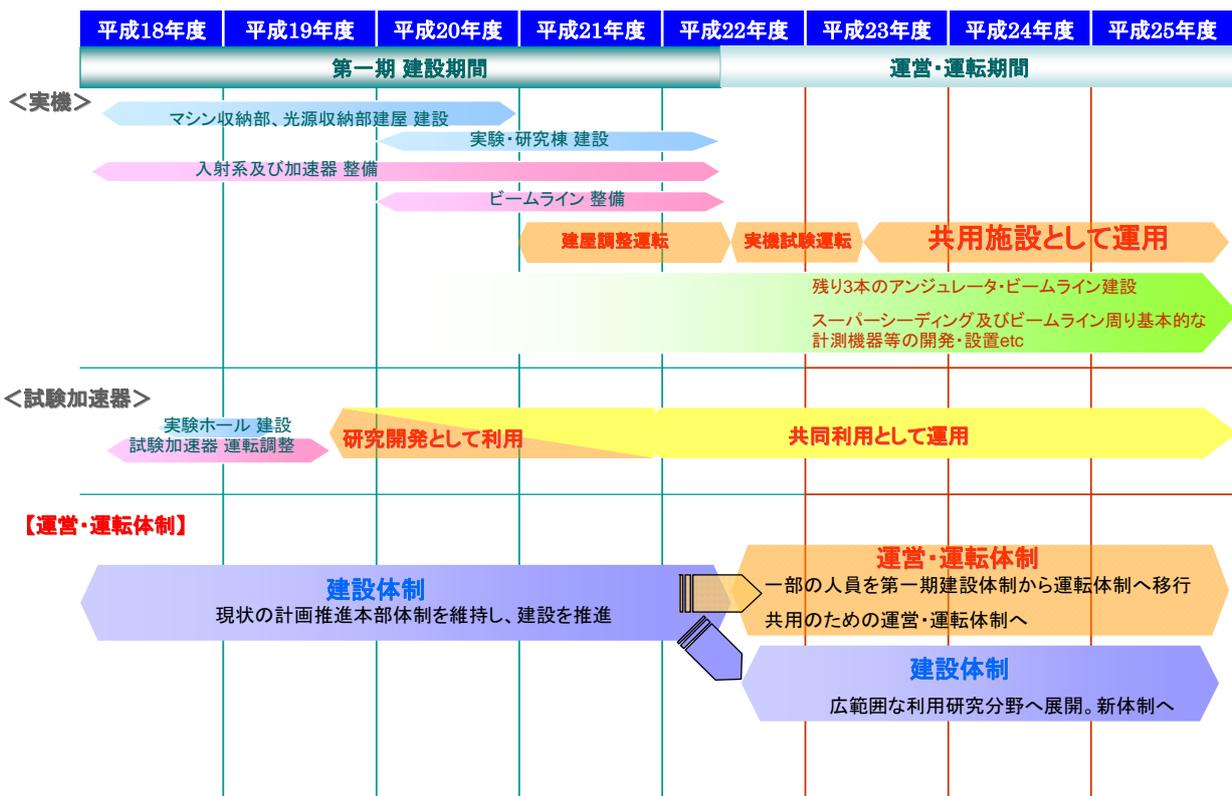


### ナノダイナミクス

# 「開発」に関する説明資料

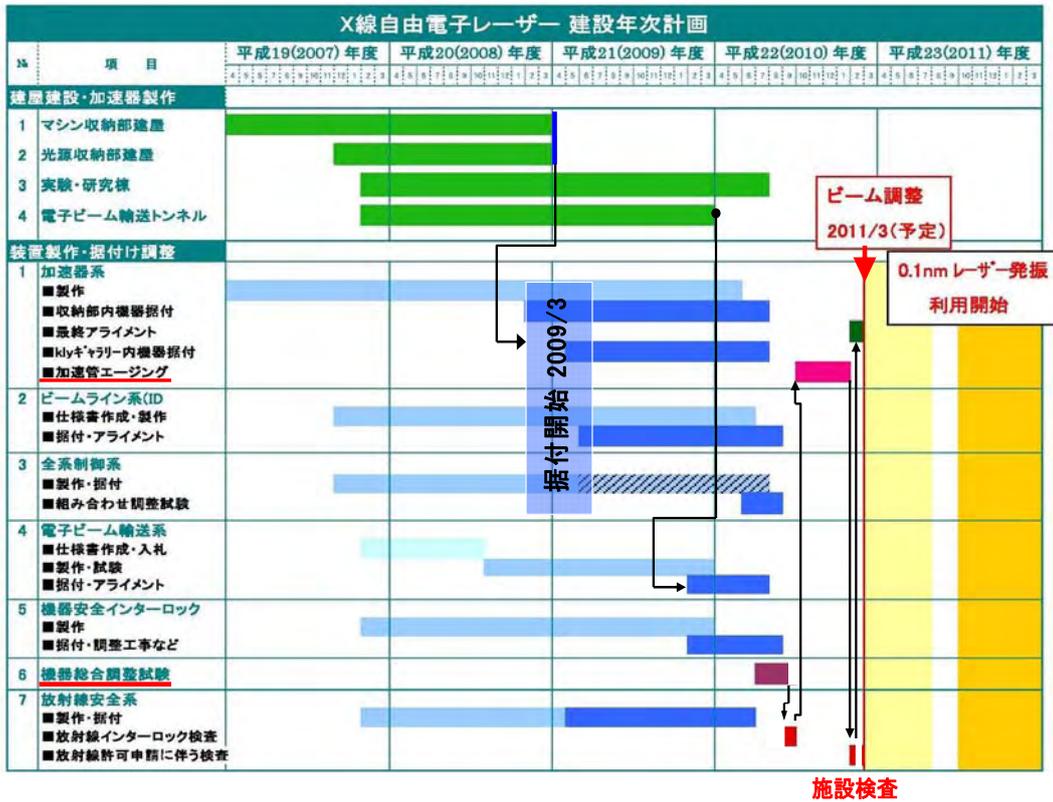
## 1-1 進捗状況 (XFEL計画ロードマップ)

建設開始時の建設・要素技術開発の計画表及びその進捗状況



# 1 - 1 進捗状況 (建設年次計画表)

建設開始時の建設・要素技術開発の計画表及びその進捗状況



# 1 - 1 進捗状況 (XFELの基本設計パラメータ)

0.06nm

## 1-1 進捗状況（入射器）

### 高品質電子ビーム源の開発が終了し実機電子銃の製作を開始

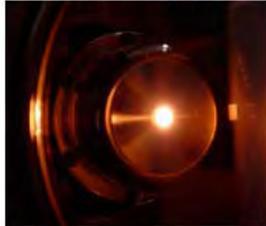
輝度が高く、エネルギーの揃った、位置と形状とビーム強度の時間変化の小さいビーム

CeB<sub>6</sub>カソード寿命：SCSS試験器で約2万時間の運用上十分な寿命を達成(約4年間)

Cathode Assembly



Heated Cathode

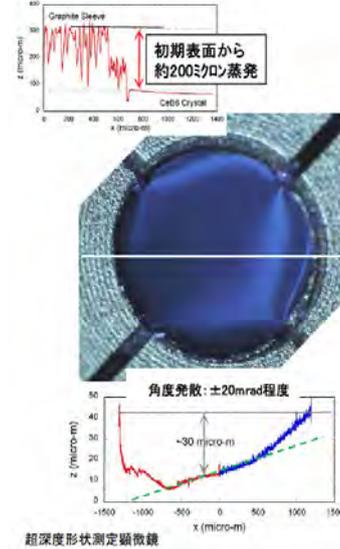


CeB<sub>6</sub>直流電子銃 直径:3mm、1500°C  
規格化エミッタンス(理論値) 0.4 π mm·mrad

#### 電子銃出口でのビーム性能(テストスタンド)

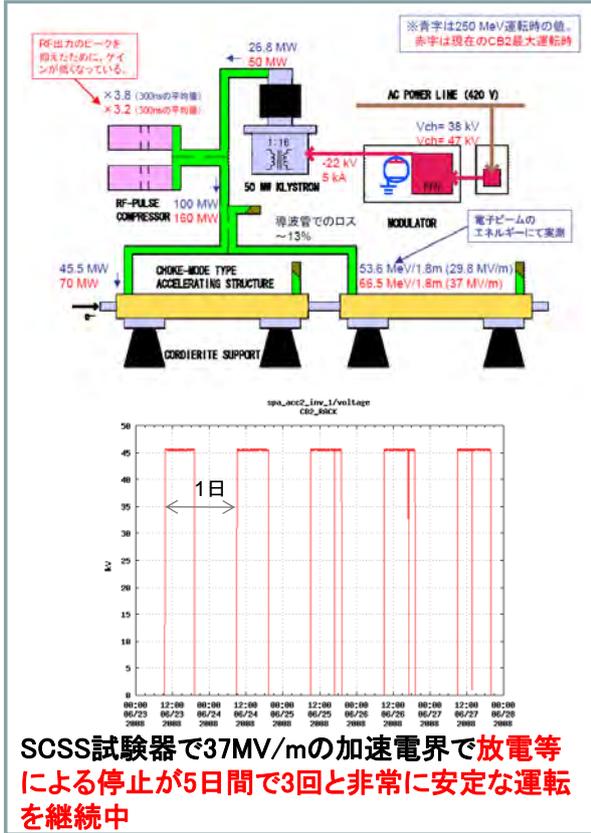
ビームエネルギー	500keV
ピーク電流	1 A
パルス幅(FWHM)	3 μ sec
繰り返し	10Hz(定格60Hz)
規格化エミッタンス (90%core)	0.6 π mm·mrad

科学技術的観点からビーム強度の低減の原因を超深度形状測定顕微鏡および蛍光X線による分析等で調査中



# 1-1 進捗状況(加速器・加速管)

## C-band 加速管の運転状況と実機製作状況



C-band SLED



C-band加速管

37MV/mの加速電界を達成

主加速器高周波機器の製作状況

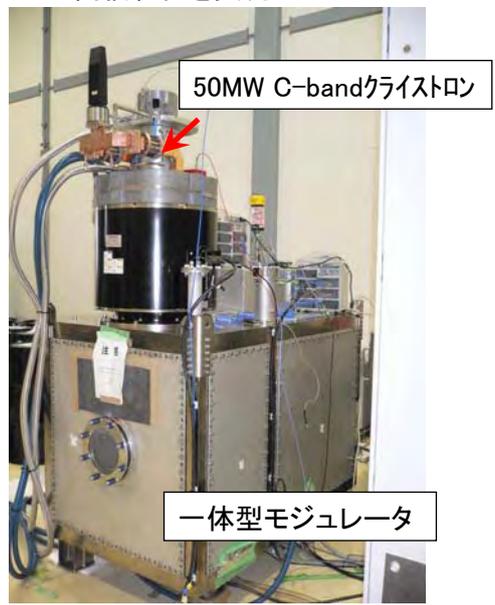
C-band加速管: 月産5本程度で割合で製作  
中、その他、SLED、ダミーロード、導波管、ク  
ライストロン等の製作・納入も計画通り。S-band  
(4ユニット)関係機器は全て納入。  
今後、テストスタンドで各機器の性能をサンプ  
リングでチェックする予定

# 1-1 進捗状況(加速器・電源関係)

50kV高電圧インバータ電源 :  
主充電器+補充充電器方式  
電圧安定度(測定器誤差を含め): <0.005%<sub>p-p</sub>

一体型モジュレータ:  
SCSS試験器でのオイル密閉型モジュ  
レータの実績をもとにクライストロンタンク  
とモジュレータタンクを統合、設置床面積  
を以前の分離型の約1/3に、同時に低ノ  
イズ化と高信頼性を実現

XFELの要求値、クライストロン用で0.01%(σ),電子  
銃用で0.003%(σ)をクリアー  
加速器システムの安定化のため、受電ラインで  
高調波対策を実施予定



## 1-1 進捗状況（電子ビーム診断・制御）

PARMELAとELEGANTを用いた3次元トラッキングによる電子ビームの性能評価

PARMELA (GunからBC1までの30MeV以下の低エネルギー部)

（空間電荷効果を含み、CSRと加速管のwake field は含まず）  
試験器でのビームサイズ、バンチ長のエネルギー依存性をよく再現

ELEGANT (S-band以降の高エネルギー部)

（空間電荷効果を含まず、CSRと加速管のwake fieldを含む）

### 電子ビームの初期条件

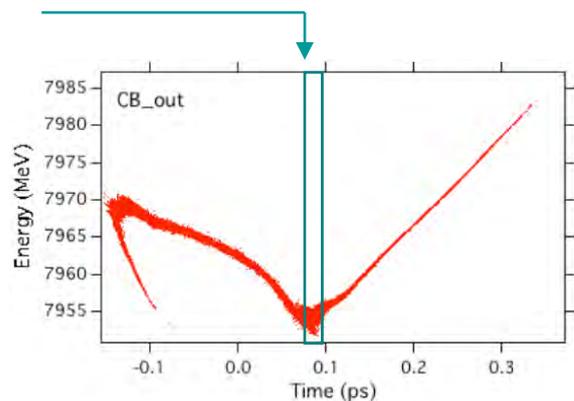
Φ5mmのdeflectorを通過後の電流値が1Aになるように電子銃からの電流を1.4Aとし、その他は試験器でのビームシミュレーションと同一条件

### 8GeVでレージングするための電子ビームの必要性能

Energy	8 GeV
Energy Stability	$\pm 1 \times 10^{-4}$ (1-sigma)
Peak Current	>3.35 kA
Current Stability	$\pm 10\%$ (1-sigma)
Normalized Emittance	$< 1\pi$ mm mrad (rms, sliced)
Bunch Length	~0.1 ps (FWHM)
Repetition Rate	60 Hz

## 計算機シミュレーションによる電子ビームの性能評価

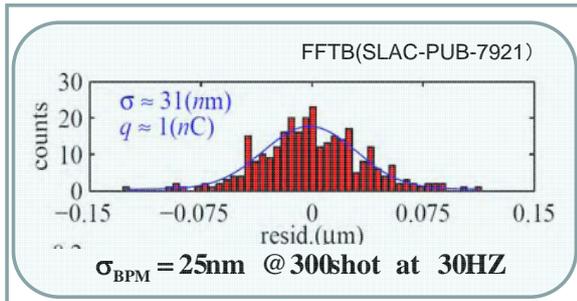
レーザー発振の要求をほぼ満たす



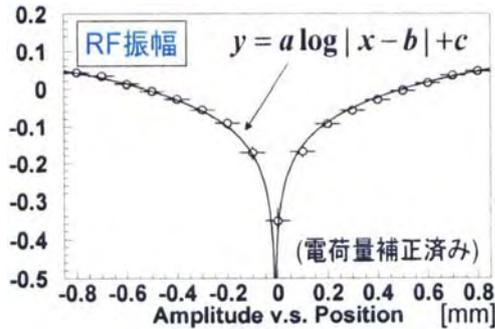
### 8GeVでのビーム性能(計算値)

規格化スライスエミッタンス	1.1 $\pi$ mm/mrad
スライスエネルギー拡がり	~0.006%
ピーク電流	4.5kA
3kA以上の発振に寄与する部分	20fs

## 空洞型BPMの性能と四極電磁石磁場中心の較正装置

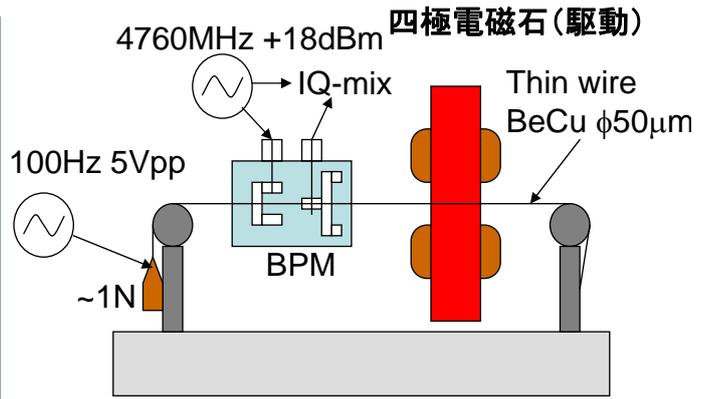


空洞型BPMの測定精度

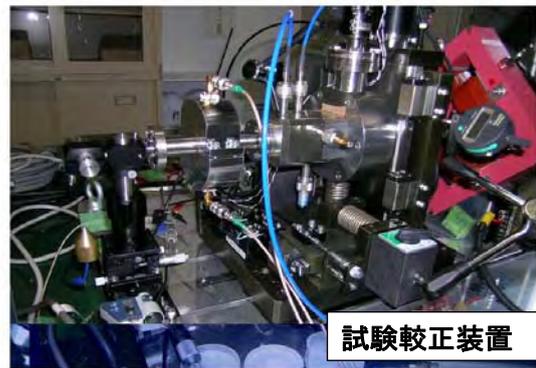


空洞型BPMのダイナミックレンジ:

精度は別として±数mmの範囲で検出可能

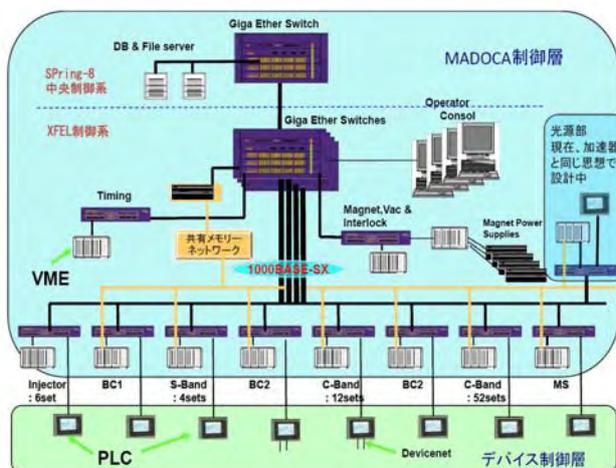


四極電磁石の磁場中心に対してBPMの中心を  
10  $\mu\text{m}$ の精度で較正、要求精度50  $\mu\text{m}$ を達成

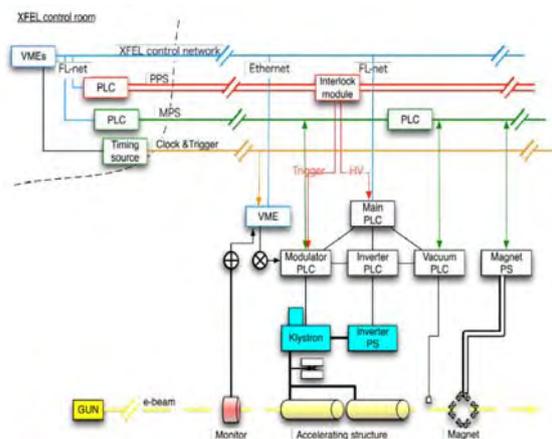


## XFEL全系制御およびインターロック(PPS,MPS)システムの概要

SCSS試験器およびSPring-8で培われた制御に関する人的技術的資源を活用して制御システムを構築、  
2007年度、光源部を除く制御システムの発注をほぼ終了



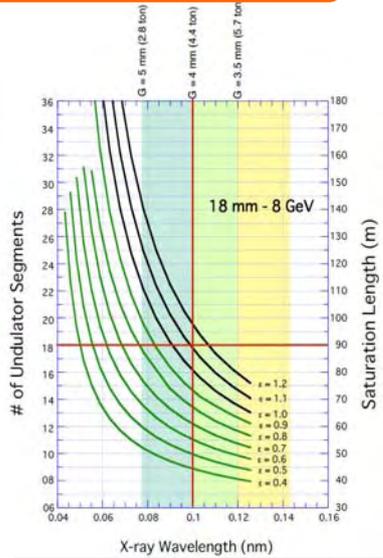
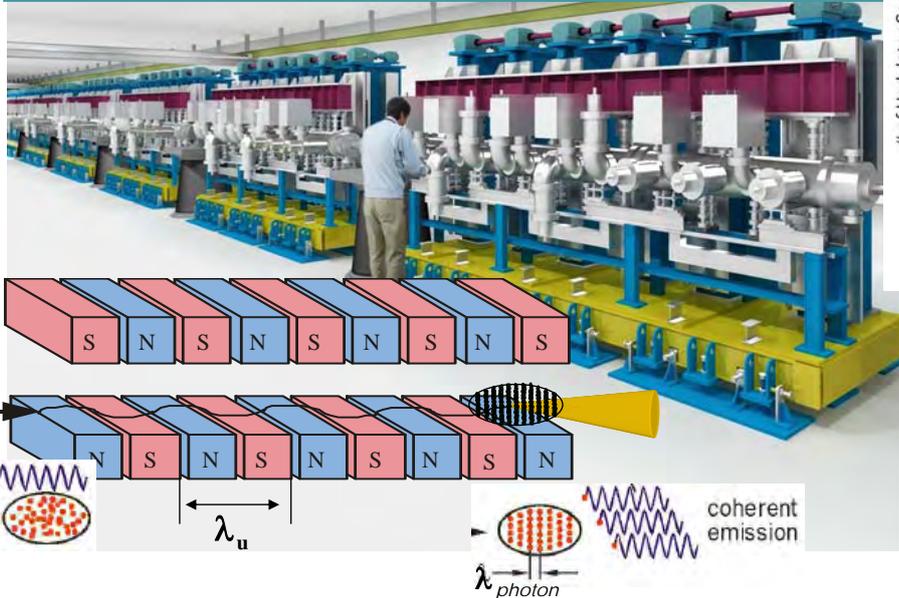
制御全系システムの概要



全系インターロックシステムの概要

# 1-1 進捗状況 (アンジュレータ)

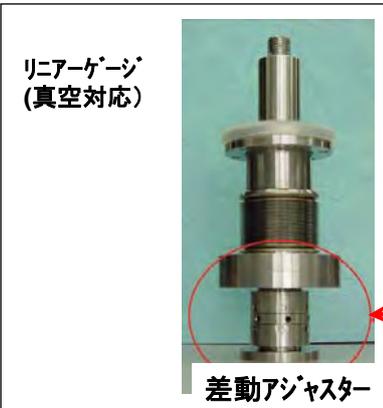
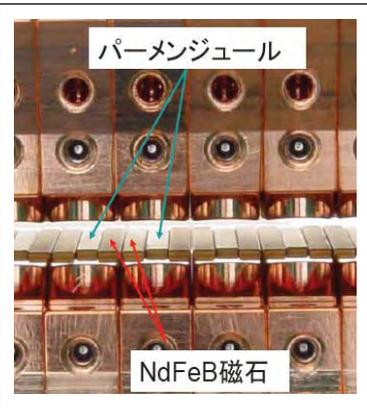
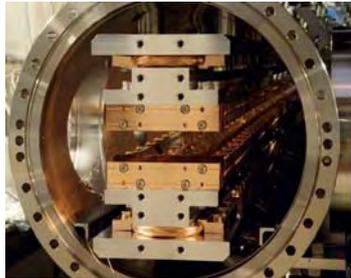
**XFEL/SPring-8アンジュレータの概要**  
 硬X線レーザー用真空封止アンジュレータ(BL3では18台)  
 周期長(18mm): ギャップ3.5mm以上で適切な波長可変範囲を実現  
 磁石列長: 5m(277周期),  $K_{max}=2.4$  at  $G=3mm$   
 波長0.1nm: Gap=4mm at 8GeV, Gap=5mm at 7GeV



**エミッタとアンジュレー台数(N<sub>id</sub>)**  
 8GeVで波長0.1nmの場合  
 $\epsilon = 0.4\pi$   $N_{id} = 9$ 台  
 $1.0\pi$   $N_{id} = 16$ 台  
 波長可変範囲:  
 ギャップ3.5mmで0.13nm  
 ギャップ5mmで0.06nm  
 当初は  $\epsilon = 1.1\pi$ 、 $N_{id}=18$ で波長0.1nmのレーザー発振を目指す

# 1-1 進捗状況 (アンジュレータ)

**XFELアンジュレータ(18台+1台)の現状**  
 周期長: 18mm、磁石列長: 5 m(277周期)  
 X線波長 = 0.1nm  $K=1.85(1.11T)$  at  $G=4mm$  @ 8GeV  
 $K=1.48(0.89T)$  at  $G=5mm$  @ 7GeV



ハイブリッド型磁石回路      Gapの直接測定と局所調整

平成20年10月からの量産に向けたR&D(終了)  
 ①真空槽内でのgap長の精密測定・調整装置の開発

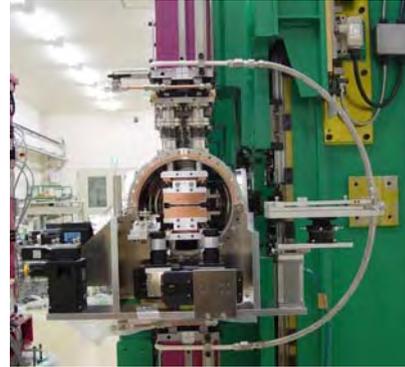
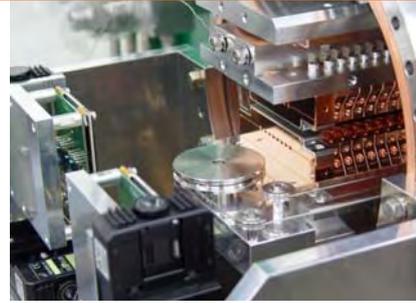
装置高  
可変機構  
XFELアンジュレータ先行機  
磁場測定

## 1-1 進捗状況 (アンジュレータ)

### ② 新型磁場測定装置(SAFALI)の開発

SAFALI:  
Self Aligned Field Analyzer  
with Laser Instrumentation

- 真空(槽)内部のホール素子走査による磁場計測
  - 真空封止アンジュレータ磁場測定
  - クライオアンジュレータ用真空対応磁場測定
- レーザーによる位置決めを利用
  - 縦方向: 干渉計型測長器
  - 横方向: アイリスとPSDによるレーザスポット位置計測

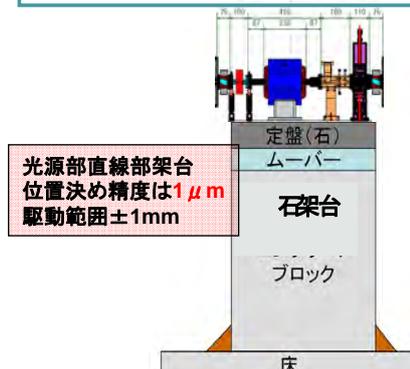


### ③ ウェイクフィールドの影響 今後更に最適化に向けて詳細に検討

RFトランジション部: 導電性の良い金属で滑らかに接続  
 磁石表面を導電性の良い金属でカバー: 材質の最適化、  
 抵抗性ウェイクフィールドによるエネルギー分散はアパチャーの二乗に反比例

#### XFEL機器の据え付け・アライメント

- ① 加速器部: 光学式測量機でユニットおよび加速管等をジオイド面に沿ってアライメント**
  - 石定盤(L:2から3m、H:0.35から0.45m)の基準面に機器基準面(加工精度 $50\mu\text{m}$ )を押し当てて固定ユニット化
  - ユニット内の四極電磁石とBPMの磁気中心と電気中心を較正
  - 定盤の基準点を光学的手法でジオイド面に沿って所定の精度でアライメント
  - S-bandおよびC-band 加速管は設置精度(0.1mm程度)が緩いためS-bandの上流側二本を除き鋼管架台上に設置・アライメントする。
- ② アンジュレータ部: X-ray beam based alignmentで機器を直線にアラインメント**
  - 四極電磁石、アイリス付きBPM、フェーズシフター等機器を位置調整機構付き定盤上に設置
  - 定盤上のアイリスとBPMおよび四極電磁石の中心をミクロンレベルで較正
  - 定盤とアンジュレータの基準点をジオイドに沿って0.1mm程度の精度で据え付ける
  - 電子ビーム加速後、アライメントアンジュレータからのX線を用いてアイリスの中心をX線光軸上に位置調整装置(ムーパー)を用いてミクロン精度でアライメントする。
  - 最後に電子ビームがアイリス中心を通るようにBPM用いて電子軌道を光軸に一致させる



電子ビーム	
ビームエネルギー	8GeV
バンチチャージ	0.3nC
規格化エミッタンス	$1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
AL ID (alignment undulator)	
周期長	32mm
長さ	0.992m
E1st	12.66keV
光源サイズ	50 $\mu\text{m}$ (rms)
光源発散角	7.2 $\mu\text{rad}$ (rms)
Iris付きBPM	
穴直径	100 $\mu\text{m}$



