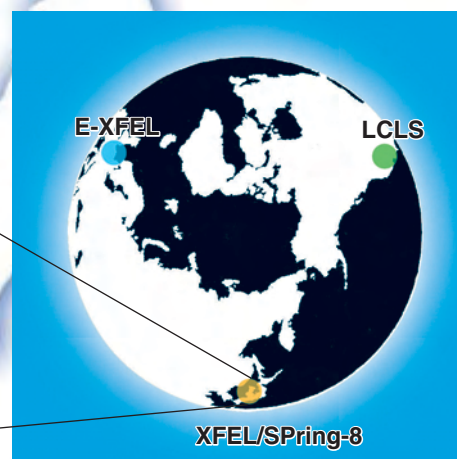


## 世界のX線自由電子レーザー計画

- XFEL/SPring-8 日本 (兵庫県)
- E-XFEL, DESY ドイツ (ハンブルグ)
- LCLS, SLAC アメリカ (カリフォルニア)



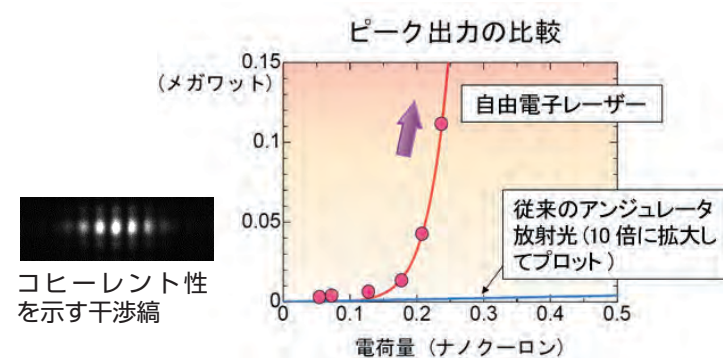
— 国家基幹技術 —

# XFEL

X線自由電子レーザー

## 試験加速器によるレーザー発振に成功

「夢の光」実現に、着実かつ大きな一歩



コヒーレント性を示す干渉縞

2005年、XFEL実機の実証実験用としてSPring-8 Compact SASE Source (SCSS)の試験加速器を建設しました。電子の加速エネルギーはXFEL実機の32分の1のエネルギーである2.5億電子ボルトですが、主要装置の基本的な部分はXFEL実機と同様です。2006年6月20日には、波長 49ナノメートルのレーザー発振に成功しました。これは日本のXFEL実現に向けた、記念すべき着実な一歩となりました。

電荷量の増加とともにピーク出力が指数関数的に増加して、レーザー発振していることを示している

X線自由電子レーザー計画合同推進本部  
独立行政法人 理化学研究所  
財団法人 高輝度光科学研究センター

〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1  
Tel: 0791-58-2849, Fax: 0791-58-2862  
URL: <http://www.riken.jp/XFEL/> E-mail: project-xfel@riken.jp





# XFEL : 未来を拓く新たな光

X線自由電子レーザー (XFEL) によって拓かれる21世紀のサイエンス

もっと細かく、もっと速く、もっと遠くを・・・今まで誰も見られなかったものを「見たい」という私たちの好奇心は、何世紀にもわたって科学技術を発展させる原動力となってきました。新しい道具を使い、新しい視点から対象を観察することによって初めて、天体の動きや細菌の存在が明らかになりました。ロケットや抗生物質といった後世の大発明は全て「見る」ことから始まったのです。

近年、「見る」ための光科学は、2つの革命を経験しました。19世紀末のX線の発見と、20世紀半ばのレーザーの発明です。X線を用いると、「原子の世界」を直接覗くことができます。また、高い透過力によって対象物の「内部」を壊さずに見ることができます。X線は、大学や研究所にとどまらず、病院、工場、空港といった私たちの身の回りでも広く用いられています。一方、レーザーは、「非常に明るく」「きれいに揃った」光を発生します。レーザー技術は、現代の情報・通信社会にとって欠くことができないものになっています。

この2つの世紀の発見、X線とレーザーを組み合わせることはできないだろうか・・・世界中の科学者が抱いたかつての夢が、いま、X線自由電子レーザー (XFEL) として現実のものになろうとしています。従来のX線より10億倍の明るさで、わずか100兆分の1秒の現象を切り取る・・・XFELは、光科学に第3の革命をもたらし、私たちの社会にも大きく貢献するでしょう。



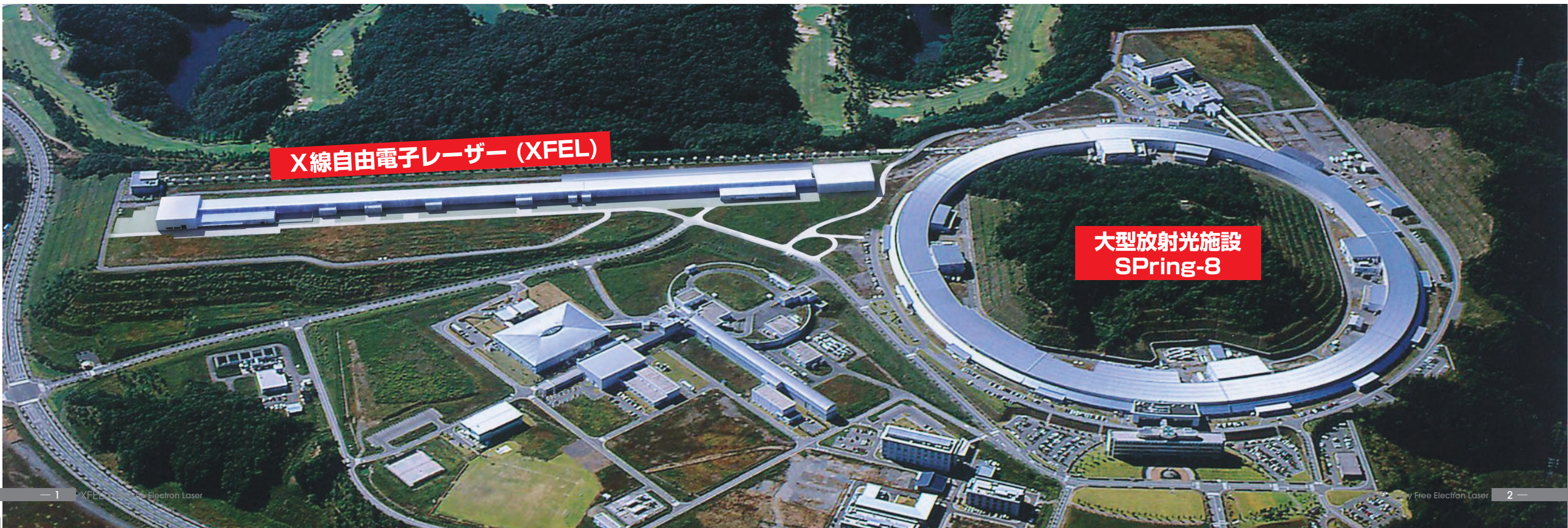
# XFEL計画 : 国家基幹技術

SPring-8に隣接するXFELによって光科学の最先端拠点が完成

兵庫県西播磨地方に建設された大型放射光施設 SPring-8 (Super Photon Ring - 8GeV) は、世界最高強度のX線を極めて安定に生み出す施設として幅広く利用されています。2006年、このSPring-8キャンパスにおいて、2010年度の完成を目指してXFEL施設の建設が始まりました。本計画は、政府から「国家基幹技術」ー世界最高性能の研究設備を実現する技術ーの指定を受け、(独)理化学研究所(理研)が(財)高輝度光科学研究センターと協力して組織する「X線自由電子レーザー計画合同推進本部」によって進められています。

世界に目を向けると、アメリカ (SLAC: スタンフォード線型加速器センター) や欧州連合 (DESY: ドイツ電子シンクロトロン研究所) においてもXFELの建設が進められ、熾烈な国際競争が繰り広げられています。日本はどう戦うか? そのヒントは、日本の製造業が得意とする、無駄を省きながら高品質に仕上げることにあります。日本のXFEL施設は、SPring-8で培われた最先端技術を応用することで、高い性能を維持しながら他と比べて非常にコンパクトになるよう設計されています。日本独自技術の検証は、2005年に建設された試験加速器を舞台として行われました。2006年6月20日、波長49ナノメートルという真空紫外光のレーザー発振に速やかに成功したことで、高性能のXFELの実現は確かなものになりました。

SPring-8キャンパス内でXFELが利用できるということは、ユーザーにとっても大きなメリットがあります。非常に強力なXFELと、安定したSPring-8の放射光を使い分けることによって、未知の対象を分析する効率は飛躍的に高まります。また、2つのX線を試料に同時照射することによって、反応過程を追跡することも可能になります。XFELを配したSPring-8キャンパスは、世界の叢智が集まる光科学の拠点としてさらに発展していくものと期待されます。

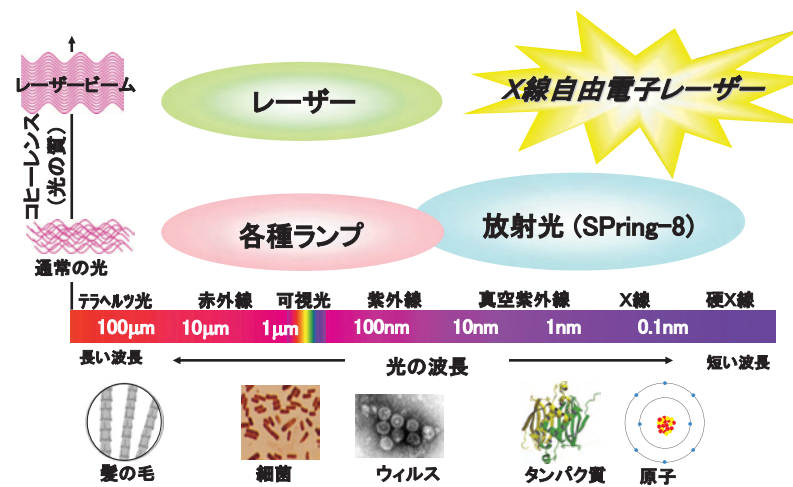




# XFELとは何か？

私たちはどこまで細かい世界を見ることが出来るのでしょうか？それは、ものを見る光の波長によって決まります。可視光の1万分の1程度の波長を持つX線は、原子ほどの小さな物質の観察が可能で分解能を持ちます。しかし放射光を含む従来のX線源は、レーザーのようにきれいに揃った光の波を発生させることはできません。レーザーは、**コヒーレント光**と呼ばれる、完全に波の位相（波の山と山どうし、谷と谷どうし）が揃った光です。レーザーは、コヒーレントな光を作るために2枚の鏡を向かい合わせ、光の反射を繰り返しながら光を増幅しますが、X線領域の光は物を透過する力が強いので反射率が低く、これに適した鏡が存在しません。

近年、科学者は、最先端の加速器技術を応用して自由な電子からレーザーを発生させる、自由電子レーザーという方法を考案しました。この方式は、反射鏡を使わなければ波長の制約がないため、X線にも応用できるのではないか・・・こうして、世界各国で**X線自由電子レーザー（XFEL）**の研究開発が始まりました。



# XFELを生み出す原理

XFELを生み出す源は**線型加速器**でほぼ光速まで加速された電子の集まり（バンチ）です。この電子ビームは、**アンジュレータ**と呼ばれる磁石が多数並んだ装置によって蛇行しながら進みます。まずアンジュレータの入り口では、電子ビームから弱い光が放射されます。この放射光は電子ビーム自身の密度をわずかに変化させます。長いアンジュレータの中を進むにつれて、この密度の変化は徐々に大きくなり、それとともに光の強さも急激に増大します。このようなプロセスは**自己増幅自発放射（SASE）**と呼ばれています。

効果的にSASEを起こすためには小さく絞られ、きれいに方向の揃った高密度の電子ビームが必要であり、そのためには**高品質の電子銃とバンチ圧縮システム**が求められます。

# デザインパラメータ

電子エネルギー	8 GeV (80億電子ボルト*)
電子ビームサイズ	40 μm
X線波長	>0.06 nm
X線パルス長	<100 fsec
X線ピークパワー	5 GW
X線ピーク輝度	10 <sup>33</sup> photons/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1% b.w.

\*電子ボルトはエネルギーの単位

# 日本のオリジナルテクノロジーの結集

現在建設を進めているXFEL施設は非常にコンパクトに設計され、なおかつ安定に運転できることを重視したデザインになっています。このコンパクトかつ安定なXFELのデザインは日本独自の技術によって支えられています。さらにこの技術が、他国のXFEL計画よりも建設費を大幅に抑えることを可能にしています。

### 電子銃

自由電子

電子銃の電子源

**熱電子銃が高品質な電子ビームを生み出す**

電子ビームは、テレビのブラウン管にも使われる熱電子銃という装置から取り出されます。電子ビームの最初の状態はXFELの性能を大きく左右するため、理研ではセリウムボライド (CeBe) という金属化合物の単結晶を電子源に用いた新しい熱電子銃を開発しました。この結晶の表面は非常に滑らかで、これを加熱することで、細く絞られた電子ビームが安定に供給されます。その後、電子ビームはバンチ圧縮システムに導かれ、最終的には数千倍という高い密度に圧縮されます。

### 加速管

電子を効率よく加速

Cバンド加速管

電子ビームのエネルギーは加速器によって約80億電子ボルトまで加速されます。理研では高エネルギー加速器研究機構と共同でCバンド\*加速管を開発しました。この新しい技術によって電子を効率よく加速することが可能になり、加速器の全長は大幅に短縮されました。また、この加速管は0.1ミクロンという極めて高い精度で加工されます。XFELでは、約2メートルの加速管が400メートルのトンネル内に128個並べられる予定です。

\*Cバンドは周波数帯域の種類

### アンジュレータ

放射光

X線レーザー

真空封止アンジュレータ

**真空封止アンジュレータが強力なX線レーザーを生み出す**

電子ビームはXFELを発生させるためにアンジュレータに入射されます。理研が開発されてきた、真空封止（真空容器の中に磁石を置く）アンジュレータの技術は、より短い磁場周期によって、より短い波長の光を得るために導入されました。この技術は、X線領域に到達するために必要な電子ビームエネルギーを低く抑え、大幅なコストダウンを可能にしています。



# みえないものが、みえてくる

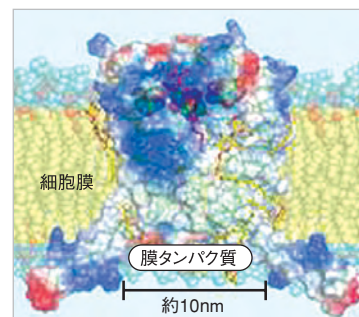
～新しい光がもたらすイノベーション～

## XFELが切り拓くサイエンス

### タンパク質の構造解析

Protein Structure Analysis

XFELはきわめて明るく質の良い光であるため、複雑なタンパク質の構造を従来よりも簡単に調べることができます。



#### ■膜タンパク質

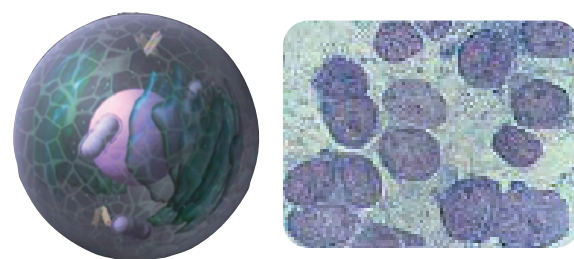
膜タンパク質は細胞の表面で細胞内外の物質のやり取りをするチャンネルの役割を果たします。今使われている薬の半数以上がこの膜タンパク質に働いて効果を発します。

### 細胞生物学

Live Cell Biology

現在、細胞のしくみはまだ解明されていない部分が残されています。XFELを用いると、細胞を原子レベルまで、生きたままリアルタイムで観察でき、細胞の真の姿を見ることができます。

#### ■細胞の姿



### 微細加工

Microfabrication

XFELがつくる波長の短い瞬時の光はナノレベルの超高精度の微細加工を可能にします。

#### ■レーザーで加工した牛の彫像



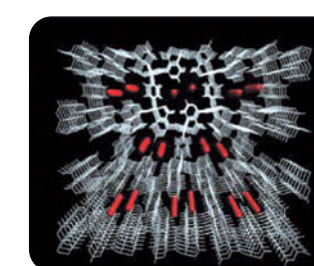
XFELでは左図よりもさらに細かいナノメートル単位の加工が可能になります。レーザーはものを見るだけでなく、加工ツールとしても活躍します。

### 超高速現象の観察

Ultrafast Observation

100 フェムト秒\*以下というXFELの瞬時の光を用いると、物質の化学反応や吸着反応の根幹を担う電子や原子の超高速の挙動を観測することができます。

\*フェムト秒とは時間の単位で、1000兆分の1秒のこと。



#### ■ナノ材料

左図は酸素ガスを吸着した人工物質の構造。赤で示したものが酸素分子(O<sub>2</sub>)で、物質の細かい孔に規則正しく収まっています。

## 未来のテクノロジー

### 治す

Medical Treat



### 新しい薬づくりが はじまる

タンパク質や細胞の詳細な構造を知ることにより、アルツハイマー病、エイズのような難病だけでなく、脳に関わる心の病気まで早期診断・治療が可能になるかもしれません。また、副作用の少ない、人にやさしい薬も開発されるでしょう。

### 創る

Create



### 生物から学ぶ ミクロのロボットが 生まれる

より小さく高性能なマシンの開発が期待されます。XFELによる高精度観察・微細加工技術に基づいて、将来、ミクロのロボットが、発電所の危険な配管修理や、生物の細かい巧妙なしくみを模倣した体内治療などで活躍するかもしれません。

### 変える

Innovate



### ナノテクが地球を クリーンにする

これまで不明だった化学反応や吸着反応のしくみの解明と制御が実現し、優れた機能を持つ材料開発が進みます。これにより、ナノテクを中心とする未来技術によって、地球環境・エネルギー問題が解決されることが期待されます。