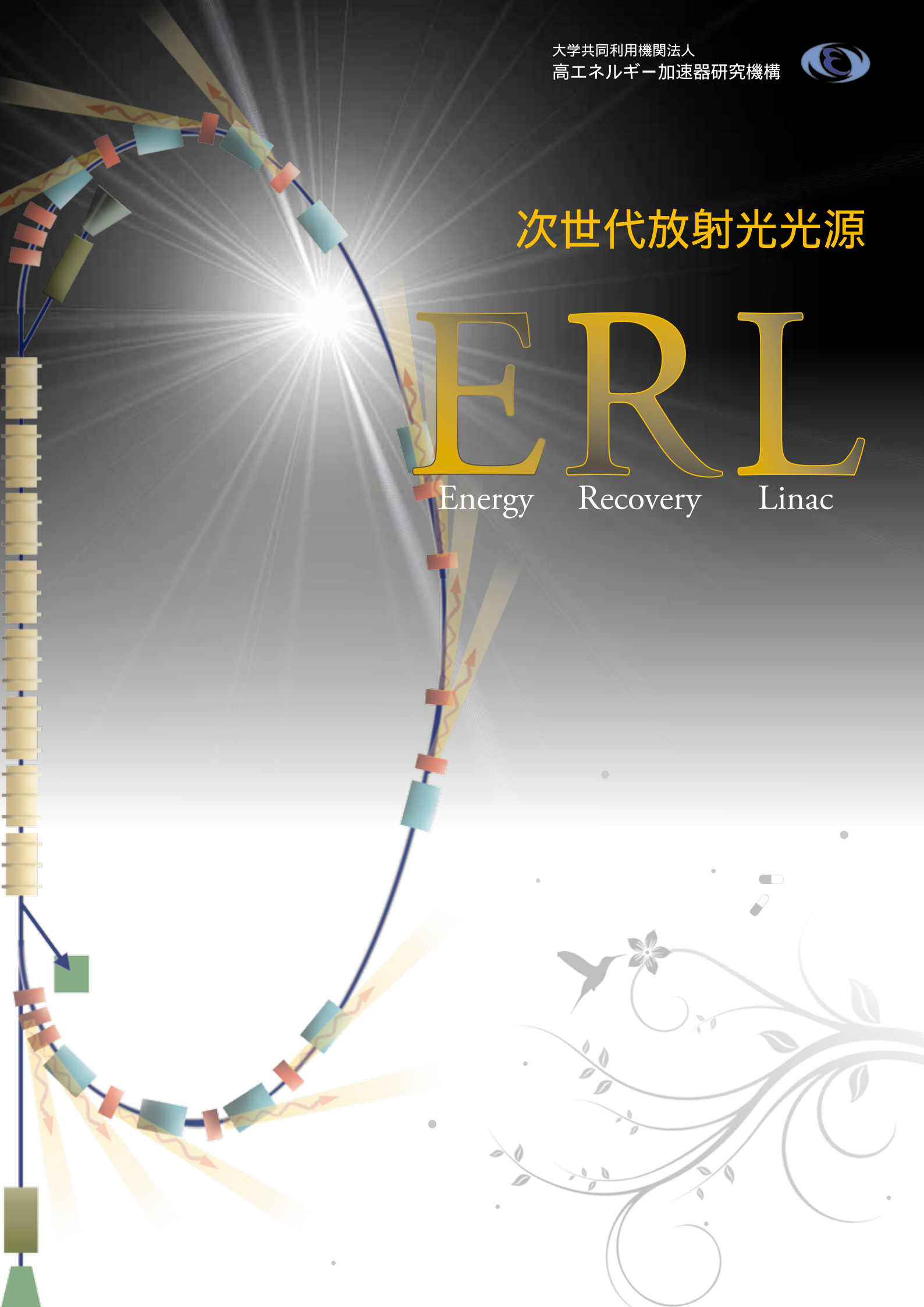




# 次世代放射光光源

# ERL

Energy Recovery Linac



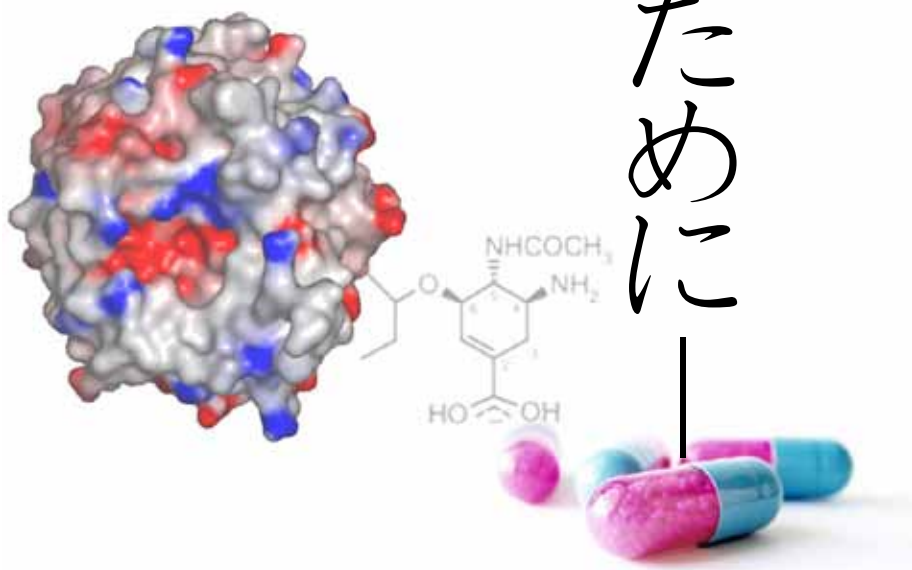
エネルギー

環境

— 持続可能な

社会の実現のために —

ナノテク



ライフサイエンス

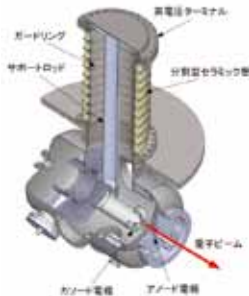


# 極微の世界を見る光 "放射光"

放射光は電子加速器から発生する、幅広い波長（エネルギー）領域の光です。

原子の大きさの数千倍もの波長を持つ可視光線では、物質・生命の姿やふるまいを原子スケールで捉えることはできません。X線など、波長の短い（エネルギーの高い）光を使うことで分子や原子スケールの世界を初めて見ることができます。

良質な光を生み出す  
超高輝度電子銃



「エネルギー回収」の心臓部  
超伝導加速空洞



人類未踏のフーリエ限界X線の発生に挑む  
共振器型自由電子レーザー (XFEL-O)

## ERL が作る光の特性

ERL（エネルギー回収型ライナック）は、これまでの放射光を凌駕する高輝度性、短パルス性をもつ放射光を生み出す次世代放射光光源です。電子銃から入射された電子は超伝導加速空洞で加速され、放射光を出しながらリングを回ります。一周して戻った電子はエネルギーが回収された後に廃棄され、リングには常に新しく高品質の電子が周回します。

### ● ERLが作る次世代の放射光

ERLでは従来の蓄積型とは違い、常に新品の電子を使い放射光を作りだします。その光の輝度は現在の放射光より2~3桁高くなります。また、ERLが作る波面の揃った波は回折限界まで集光でき、ナノビームを可能にします。

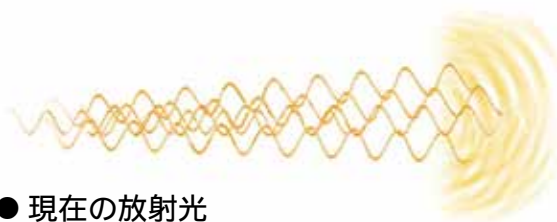


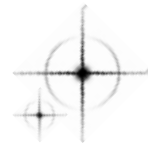
### ● XFEL-O が作る人類未踏の放射光

X線の波長領域（約0.1ナノメートル）で波面の揃ったX線レーザー光は空間的・時間的コヒーレンスを持ちます。このX線レーザー光は高いエネルギー分解能を持ち、1パルスあたり $10^9$ 個の光子が放射されるため、極めて高い輝度を持ち、その平均輝度は現在の放射光を6~7桁上回ります。

### ● 現在の放射光

リングを何度も周回する蓄積型リングから作られる放射光は、リングを周回する間に電子が有限の広がりを持ち、放射光の向きも不揃いになります。





# ERL が拓く新しいサイエンス



不均一な物質の観察に最適

## " ナノビーム "

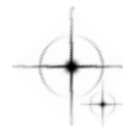
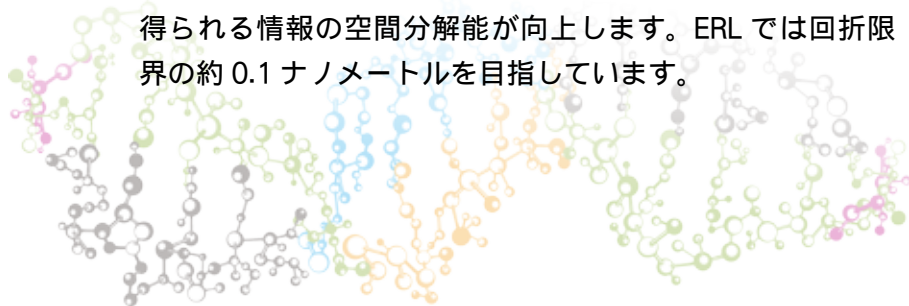
X線領域で回折限界に到達する ERL の放射光は、原理的にその波長約 0.1 ナノメートルまで集光できます。現在の放射光より 2～3 桁高い輝度の光を集光したナノビームになります。



わずかな違いを検出

## " 空間コヒーレンス "

そろった波面（空間コヒーレンス）をもつ ERL の光は、物質に照射すると鮮明な干渉を起こします。波長が短いほど、得られる情報の空間分解能が向上します。ERL では回折限界の約 0.1 ナノメートルを目指しています。



超高速のスナップショット

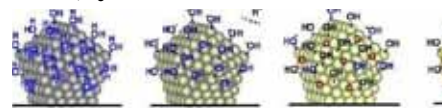
## 10 兆分の 1 秒 " 短パルス "

1 周ごとに新品の電子を使う ERL では、良質な電子ビーム性能がそのまま保たれます。電子のかたまり（バンチ長）が小さいほど、得られる放射光のパルス幅も小さくなります。ERL では、現在の放射光より 3 桁短い 100 フェムト秒（10 兆分の 1）のパルス幅を実現できます。

局所的な構造を見る

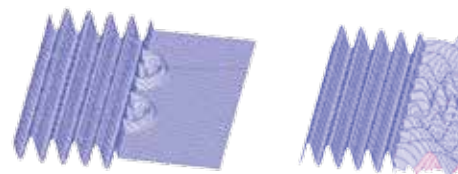
## 変化のその場を観察

排気ガスの分解・浄化などに利用される触媒は、物質に触媒活性点となる金属をさせた不均一な構造をしています。活性点をピンポイントで調べるには ERL の高輝度光を集光したナノビームが必要です。また、反応を時間を追って調べることが可能です。



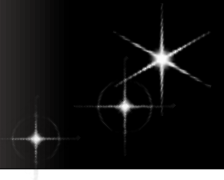
散乱像から 3 次元像を再生  
X線ホログラフィ・イメージング

紙幣などにも利用されているホログラフィは、光の干渉像に波面のそろったコヒーレント光を照射して、画像を再生する技術です。干渉パターンによって捉えられる大波長の長さに依存するため、波長の短い X 線を用いて、3 次元像をホログラフィで再生することが可能です。



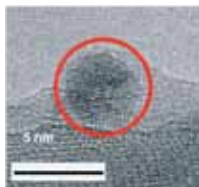
## 時間分解能

現在のハードディスクの書き込み速度は 1 ビットあたり約 2 ナノ秒です。情報伝達速度の向上にはより速い素子が求められます。ERL のフェムト秒パルス特性は、超高速で変化する分子構造や電子状態を、時々刻々捉えることに威力を発揮します。



## 新しい材料の創成へ

られている  
属を分散  
触媒の活  
RLの高輝  
す。  
が可能と

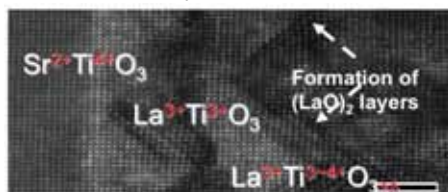


不均一触媒の活性点と  
ナノビームの大きさ  
K. Mori et al., *J. Am. Chem. Soc.*,  
126, 10657 (2004)



燃料電池電極 Pt 触媒反応の  
リアルタイム計測  
提供：電気通信大学 岩澤康裕

物質開発はナノマテリアルへと移行し、マイクロビームからナノビームへ、より微小な光が必要とされています。ナノスケールに特異的な構造や電子状態を知り、制御することは、新しい材料の創成へつながります。



エピタキシャル成長した  
LaTiOx フィルムの電子構造

A. Ohtomo et al., *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3922 (2002)

## イメージング

グラフィ  
ヒーレン  
術です。  
きは  
短いX線では原子レベルの3  
とが可能になります。



紙幣のホログラフィ



平面波による干渉

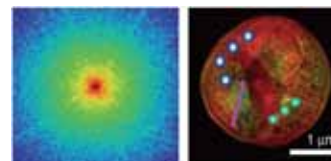
H. Nakao

## 細胞の中身を原子レベルで観る

タンパク質の複雑な立体構造は結晶化と放射光によって解明が飛躍的に進み、生命現象の理解や創薬に役立てられています。ERLの空間コヒーレンス特性を利用すれば、結晶化が困難な生体分子の複合体や膜タンパク質、細胞内小器官や細胞自身の立体構造をナノメートルサイズで観ることが可能になります。個々の生体分子にとどまらず、細胞や構造体全体の解明は、生物学、医学、薬学分野を大きく発展させるに違いありません。

### ●イメージング

ERLで空間コヒーレントX線の光子数を向上させることにより、さらに高分解能なイメージングが可能になります。



酵母菌細胞の回折像 左の回折像から構築した  
酵母菌細胞のイメージ  
D. Shapiro et al., *PNAS*, **102**, 15343 (2005)

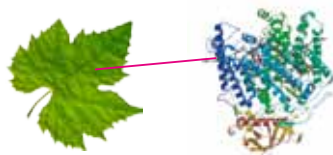
速度は、1  
処理や通  
必要です。  
高速に変  
刻々と追



ハードディスクドライブ

## 光エネルギーの有効利用へ

持続可能な社会の実現に向け、自然エネルギーを効率的に利用することが喫緊の課題です。フェムト秒オーダーで光エネルギーを化学エネルギーに変換する植物の光合成反応、サブピコ秒～フェムト秒で光励起から電気エネルギーを作り出す色素増感型太陽電池、これらのしくみを捉え、発展させることがエネルギー問題の解決に貢献します。

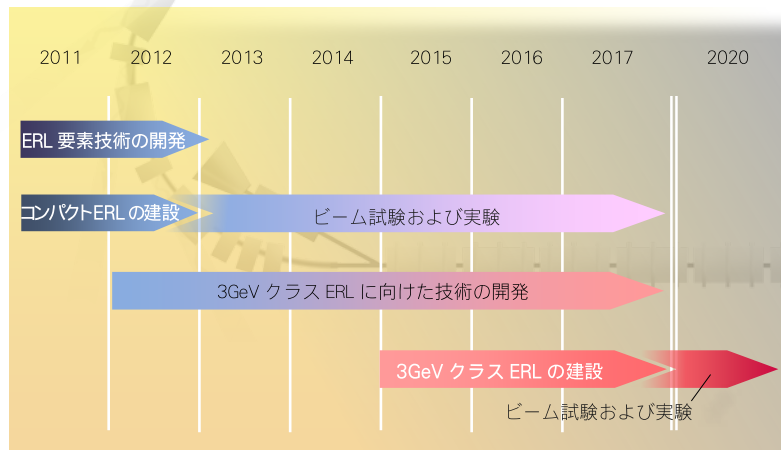


葉に存在する光合成反応中心タンパク質は、光を～100フェムト秒で吸収し、光エネルギーを化学エネルギーに変換します。

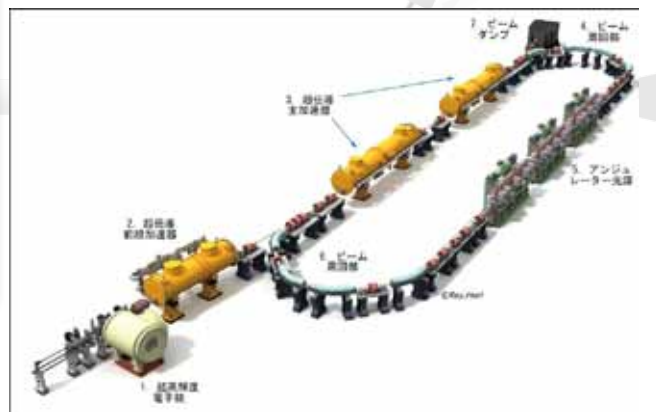
# ERL の実現へ

次世代の放射光光源 ERL の実現には、開発しなければならない技術がたくさんあります。そのため KEK では、まず小型の ERL "コンパクト ERL" の開発に着手しています。X 線領域の光を発するには 30 億電子ボルト (3GeV) クラスのエネルギーが必要ですが、コンパクト ERL は 3500 万～2 億電子ボルト (35～200MeV) 程度のエネルギーの加速器です。

コンパクト ERL は 2012 年度末に 35MeV、10mA での運転開始を目指し、建設が進められています。



上：次世代放射光光源 ERL 実現のためのロードマップ  
右：コンパクト ERL 概念図



## ERL 計画推進室

ERL の開発・検討を効率よく進めるために、KEK では 2006 年 4 月に「ERL 計画推進室」を発足させました。本推進室はメンバーをあえて固定せず、コーディネーターと呼ばれる研究者を中心にオープンな組織を作っています。コーディネーターは KEK の研究者に加え、日本原子力研究開発機構 (JAEA)、東京大学物性研究所 (ISSP) といった外部の研究者を含んだ組織になっています。要素技術の開発・検討を行うワーキンググループの集合体である ERL プロジェクトチームが組織され、具体的な開発・検討作業が進められています。

また、米国コーネル大学、Advanced Photon Source (APS) など外国の ERL 推進グループとの技術協力を推進しています。



大学共同利用機関法人  
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)  
ERL 計画推進室

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

<http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/>