



次世代放射光源

Energy Recovery Linac

Energy Recovery Linac



Edge of
Revolutionary
Light

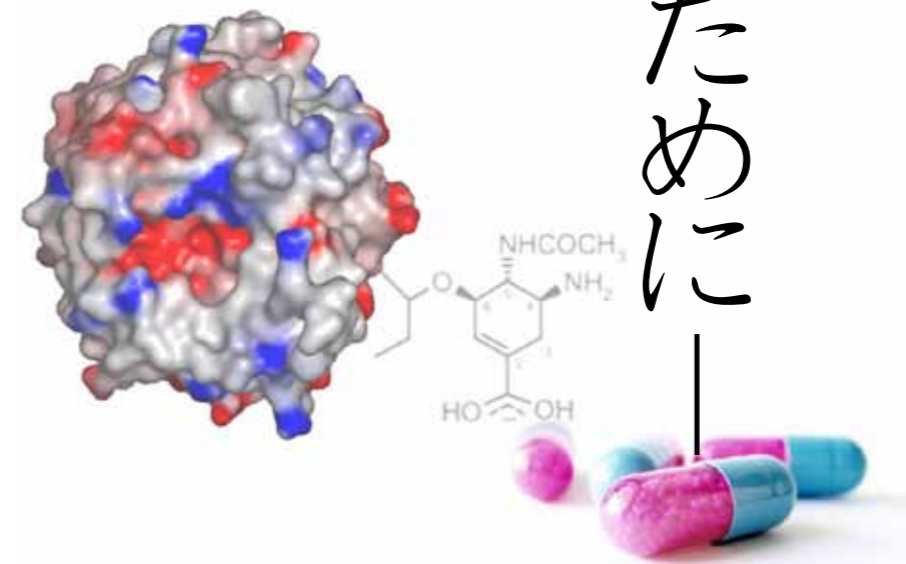
エネルギー

環境

持続可能な

社会の実現のために

ナノテク



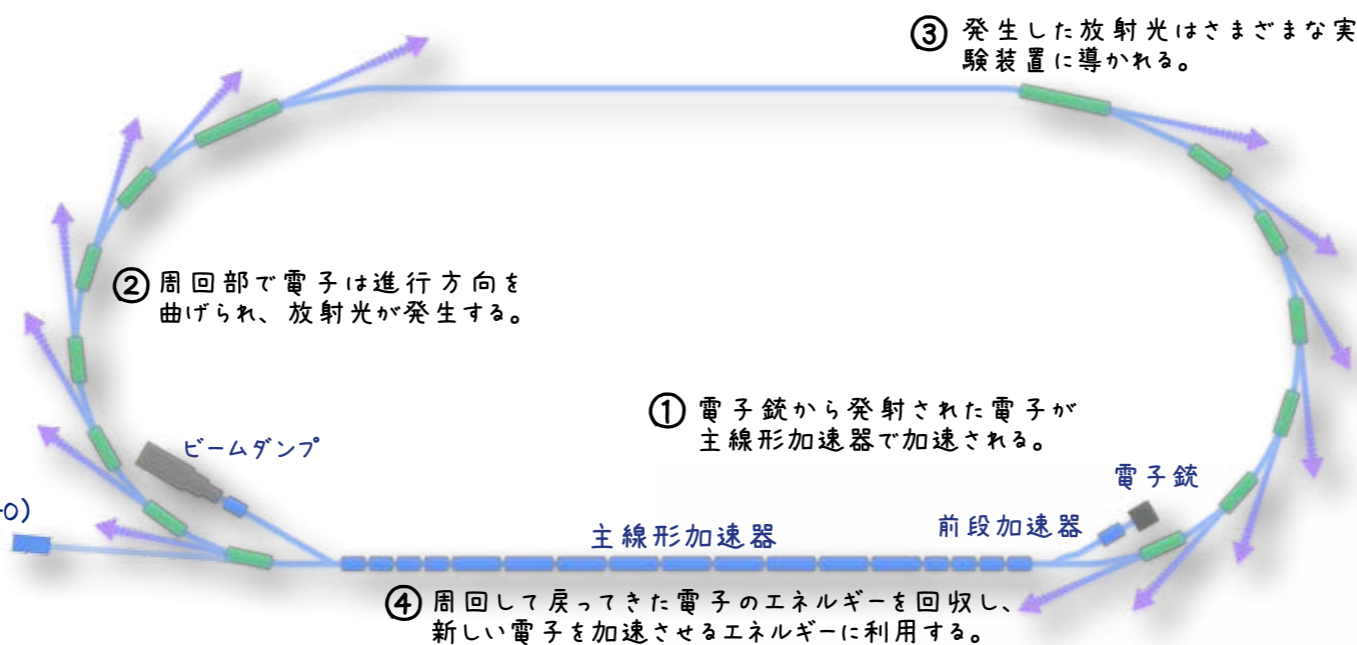
ライフサイエンス



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することができます。



2013年5月
コンパクトERL入射部
電子ビームの加速に成功!!

光陰極DC電子銃から発生した電子ビームを、前段超伝導加速空洞で伝導加速空洞で光速近く(5 MeV)まで加速することに成功しました。

ビーム調整の様子

←電子を発生、加速させる様子の動画



主線形加速器は、「エネルギー回収」を行う ERL の心臓部。9セル超伝導加速空洞によって構成される。周回し終えた電子のエネルギーを回収し、新しい電子にエネルギーを渡す。加速される電子は、より高密度に細く絞られる。



加速された電子は前段超伝導加速空洞によって更に加速され、ほぼ光速になる。

超高輝度電子銃では、レーザー照射によって、ターゲットから電子を発生。そして500 kVの高電圧によって光速の約86%まで加速する。

ERL が作る光の特性

ERL（エネルギー回収型リナック、Energy Recovery Linac）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。

● 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10⁹個のフォトンが放射されるため、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。



PEARL が拓く新しいサイエンス



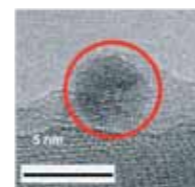
不均一な物質の測定に最適 " ナノビーム "

X線領域で回折限界に到達する PEARL の放射光は、原理的に波長 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。

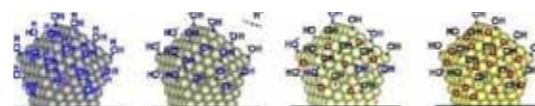


局所的な構造を見る 変化のその場を観察

排気ガスの分解・浄化などに利用されている触媒は、物質に触媒活性点となる金属を分散させた不均一な構造をしています。触媒の活性点をピンポイントで調べるには PEARL の高輝度光を集光したナノビームが必要です。また、時間を追って反応を調べることも可能になります。



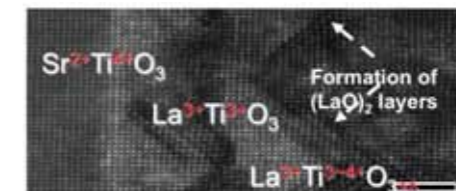
不均一触媒の活性点とナノビームの大きさ
K. Mori et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 126, 10657 (2004)



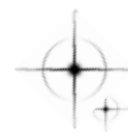
燃料電池電極 Pt 触媒反応のリアルタイム計測
提供：電気通信大学 岩澤康裕

新しい材料の創成へ

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)



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）を持つ PEARL 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。PEARL では回折限界の約 0.1 ナノメートルを目指しています。



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とらえられる大きさは波長の長さに依存するため、波長の短い X 線では原子レベルの 3 次元像をホログラフィで再生するこ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



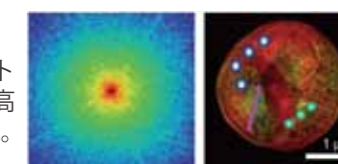
H.Nakao

細胞の中身を原子レベルで観る

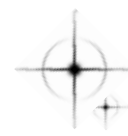
タンパク質の複雑な立体構造は結晶化と放射光によって解明が飛躍的に進み、生命現象の理解や創薬に役立てられています。PEARL の空間コヒーレンス特性を利用すれば、結晶化が困難な生体分子の複合体や膜タンパク質、細胞内小器官や細胞自身の立体構造をナノメートルサイズで観ることが可能になります。個々の生体分子にとどまらず、細胞や構造体全体の解明は、生命学、医学、薬学分野を大きく発展させるに違いありません。

●イメージング

PEARL で空間コヒーレント X 線のフォトン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)



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 PEARL 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短くなります。PEARL 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。



時間分解能

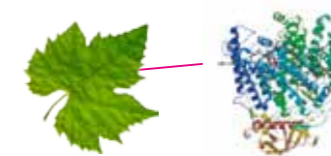
現在のハードディスクの書き込み速度は、1 ビットあたり約 2 ナノ秒です。情報処理や通信速度の向上には、より速い素子が必要です。PEARL のフェムト秒パルス特性は、超高速に変化する分子構造や電子状態を、時々刻々と追跡することに威力を発揮します。



ハードディスク

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。例えば、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、発展させることでエネルギー問題の解決に貢献します。



●光合成反応

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、光エネルギーから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" の開発を行っています。X 線領域の光を発するには 30 億電子ボルト (3 GeV) 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 (35～200 MeV) 程度のエネルギーの加速器です。

コンパクト ERL は 2013 年度に入射部の運転を開始しています。



コンパクト ERL 概念図



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/>

illustration by *Rey. Hori*

2013.9