



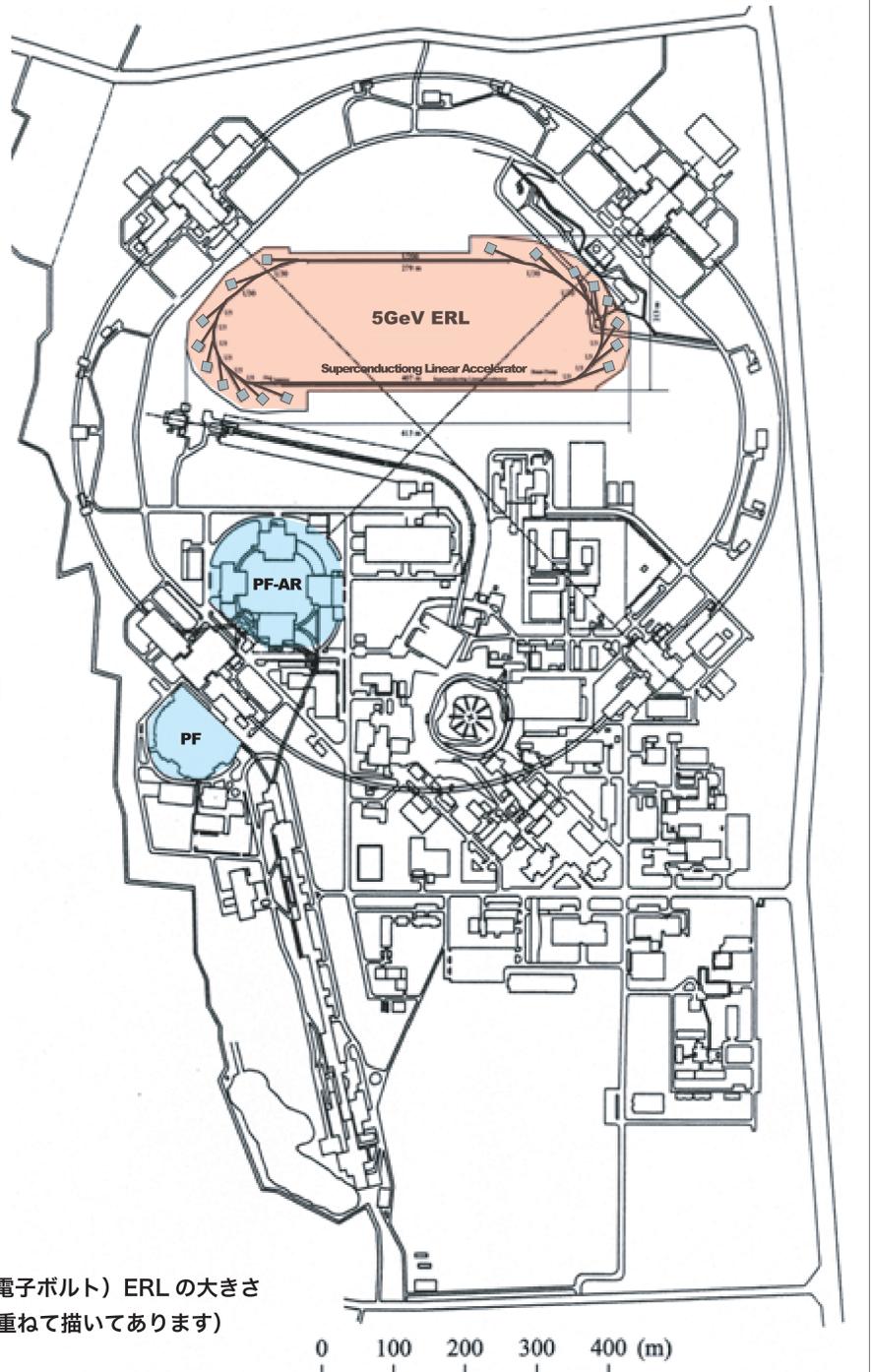
# 将来放射光光源 (ERLプロジェクト)

# ERL

# ～次世代の光源加速器～

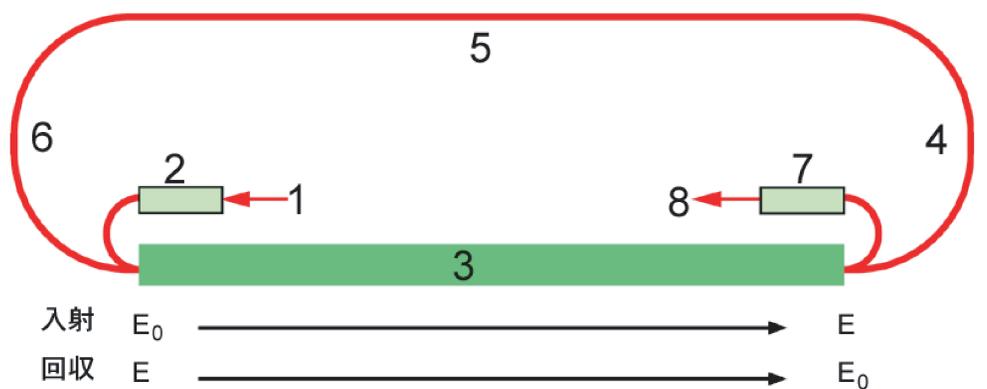
加速器から生まれる明るい光、放射光は、今では多くの分野の研究になくてはならない道具となり、さまざまな物質の構造や機能を解き明かし、新しい物質を創るための有用な情報を生み出しています。しかし科学の発展にともない、今まで見えないものを見えるようにする、よりすぐれた性質の光が求められるようになってきました。

ERL (Energy Recovery Linac ; エネルギー回収型ライナック) は、最先端の科学を切り拓く「先端性」と、さまざまな分野の研究者のニーズにこたえる「多様性」という、次世代放射光に求められる2つの要素を満たす光源として、最も有望なものです。現在、X線領域の高輝度放射光を発生できる ERL は世界でもまだ実用化されていません。KEK では、機構内で培ってきた最先端の加速器技術や、日本原子力研究開発機構 (JAEA)、東京大学物性研究所 (ISSP) をはじめとする多くの機構外の加速器研究者の力を結集して ERL の開発を進めるために、平成 18 年度に ERL 計画推進室を設置しました。



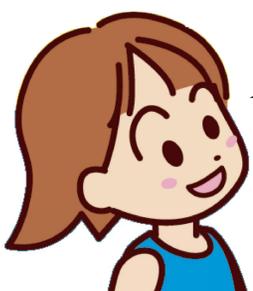
## ERL ってどんな加速器？

フォトンファクトリーをはじめ、現在世界中で使われている蓄積リング型の光源加速器では、電子が軌道を何度も周回するうちに、電子ビームが「ぼけ」てくるため、輝度を高くしたりパルスの長さを短くしたりするのには限界があります。これに対して、直線型の線形加速器 (ライナック) では、最初の電子銃の性能が輝度やパルス幅を決め、従来の光源加速器と比べて輝度を2～3桁高く、パルス幅を2～3桁短くすることができると期待されています。



ERL では、電子銃 (1) で生成された電子は超伝導線形加速器 (3) により加速され、円形部分 (4,6) や直線部の挿入光源 (5) を通過する間に放射光を発生して多くの放射光実験を可能とし、再び超伝導加速器 (3) に戻ります。このときに加速時と 180 度ずれた位相 (波の山と谷が打ち消しあう場所) になるようにして減速させます。電子の持っていたエネルギーは回収されて次の電子の加速に使われるので、エネルギー回収型 (Energy Recovery) と呼ばれています。電子が軌道をまわるのは1回だけなので、ビームがぼけることがありません。線形加速器とリング型加速器の利点をあわせ持った加速器です。

電子は1周しかまわらないんだー。  
線形加速器とリング型の加速器の両方のイイところを持っているのね。  
最先端の光をみんなが使えるね。

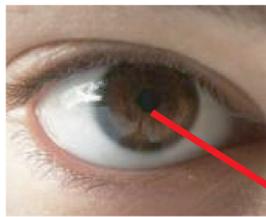


# ERL が拓くサイエンス

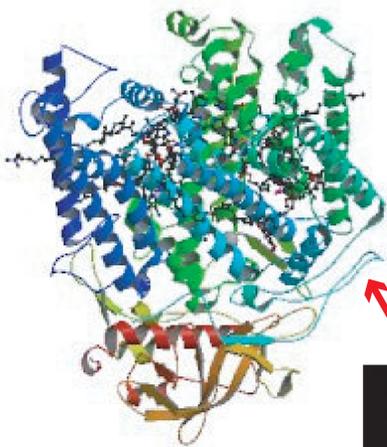
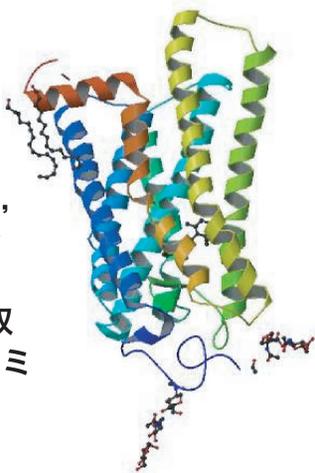
## ～スタティックからダイナミクスへ～

これまで放射光で見ていたのは、おもに「物質のスタティックな平均状態での姿」でした。最近の新しい機能性物質の開発という必要性から、放射光がパルス状の光であることを利用して、化学反応や相転移など、物質の姿を動的に捉える研究（ダイナミクス研究）が盛んに行なわれるようになってきています。しかし、現在の放射光では捉えることのできる反応の速さに限界があり、機能発現のいちばん初めに生じる素過程を知るには、ピコ秒（1兆分の1秒）より短いパルスの光が必要です。ERLが実現すれば、現在の放射光（～100ピコ秒）より1000倍も速い（～100フェムト秒）反応を見ることができるようになります。

### 生命科学



ロドプシンは網膜にあり、光を感じるタンパク質です。ロドプシンは、光を～200フェムト秒で吸収し、脳にその視覚情報をミリ秒で伝えます。



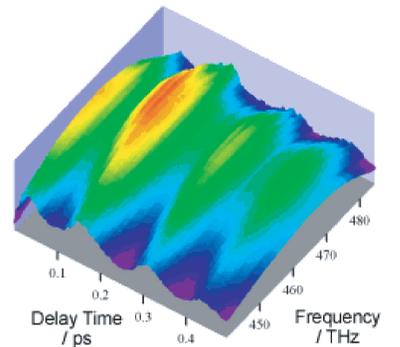
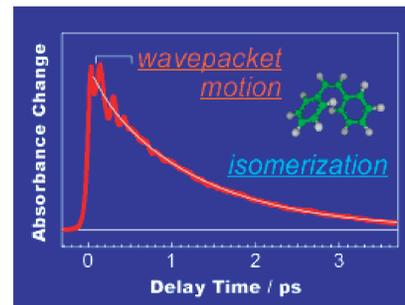
葉に存在する光合成反応中心タンパク質は光を～100フェムト秒で吸収し、光のエネルギーを化学エネルギーに変換します。



### 物質科学

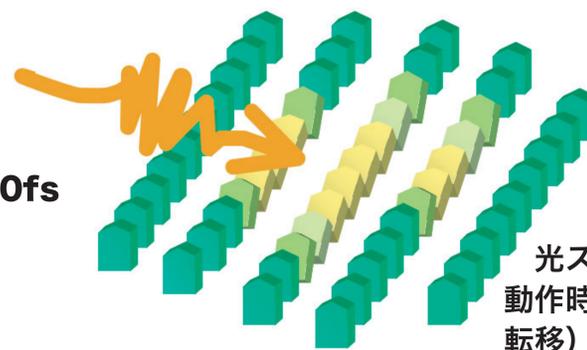


現在のハードディスクの書き込み速度は、1ビットあたり約2ナノ秒。



溶液中の有機分子 (*cis-stilbene*) のコヒーレント振動は約1ピコ秒。

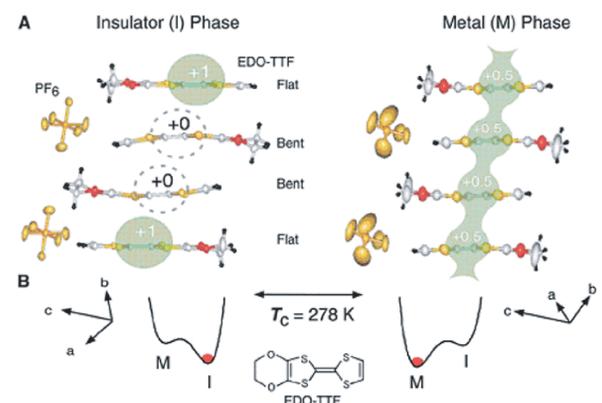
K. Ishii et al., *Chem. Phys. Lett.*, **398**, (2004).



光スイッチング素子の動作時間（絶縁体 - 金属転移）はサブピコ秒。

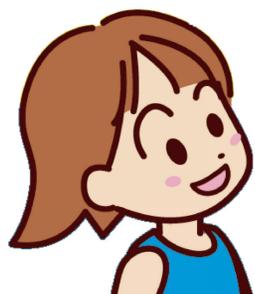


### 光スイッチング素子



2005年にKEK、レンヌ第一大学、東京工業大学他共同研究によって発見された光誘起相転移物質 EDO-TTF は、光をあてると0.2ピコ秒以内という極めて短時間で、光の反射率が50%以上も変化します。これは現在の高速電子デバイスの応答速度の約5000倍で、超高速の次世代光通信材料として有望です。

M. Chollet et al., *Science*, **307**, (2005).

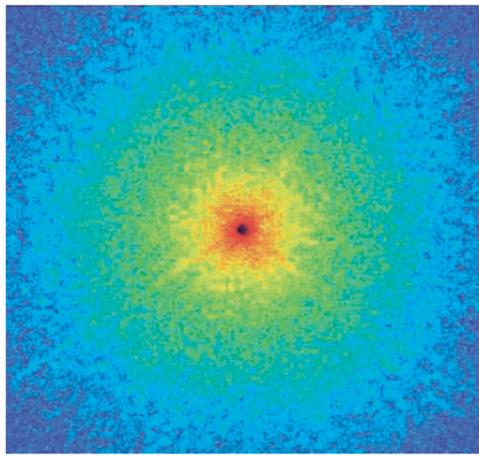


フェムト秒なんて遠い世界とってたけど、意外と身近なものがいっぱい。わたしの目はこんなに速い反応でものを見ていたんだね。

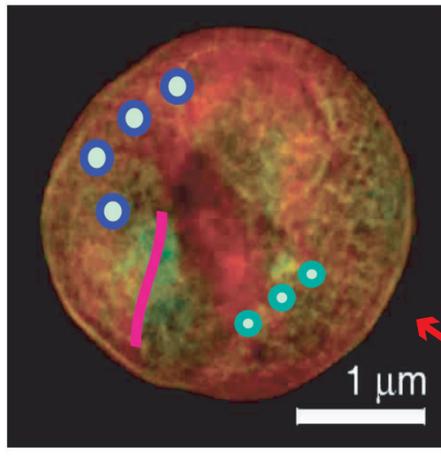
# ERL が拓くサイエンス

## ～コヒーレンスとナノビーム～

光は波の性質を持っています。波の振幅や位相がそろっている光をコヒーレント（可干渉）光と呼び、代表的なものにレーザーがあります。X線領域でもレーザーのようなコヒーレント光があれば、光の波としての性質を生かした新しい研究分野が拓けます。これまでのX線構造解析ではその物質が結晶になっていることが必要でしたが、コヒーレントX線では、結晶でない物質の構造解析も可能になります。たとえば、細胞中のタンパク質の機能をそのまま見ることも夢ではなくなります。



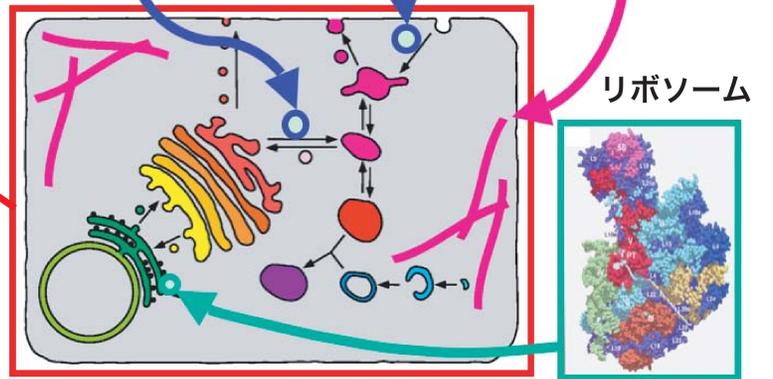
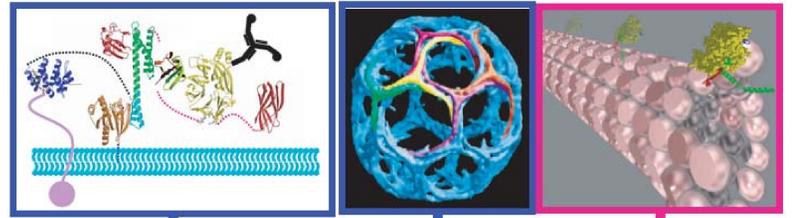
酵母菌細胞の回折像



左の回折像から構築した酵母菌細胞のイメージ

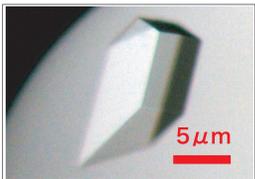
D. Shapiro et al., PNAS, 102, (2005).

アダプタータンパク質 クラスリン キネシンと微小管

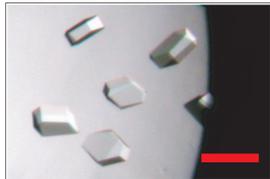


放射光によって可能になった「マイクロビーム」は今ではさまざまな研究分野で大活躍しています。一方、物質開発もナノマテリアルへと移行してきており、マイクロビームからナノビームへ、より微小な光が必要となってきています。ナノビームは、ナノマテリアルだけではなく、ごくわずかししか得られない貴重な試料の分析や、結晶をつくるのがむずかしい膜タンパク質の構造解析などへの応用も拓けます。

通常の結晶  
100 μm  
10<sup>12</sup> 分子



現在の限界  
10 μm  
10<sup>9</sup> 分子

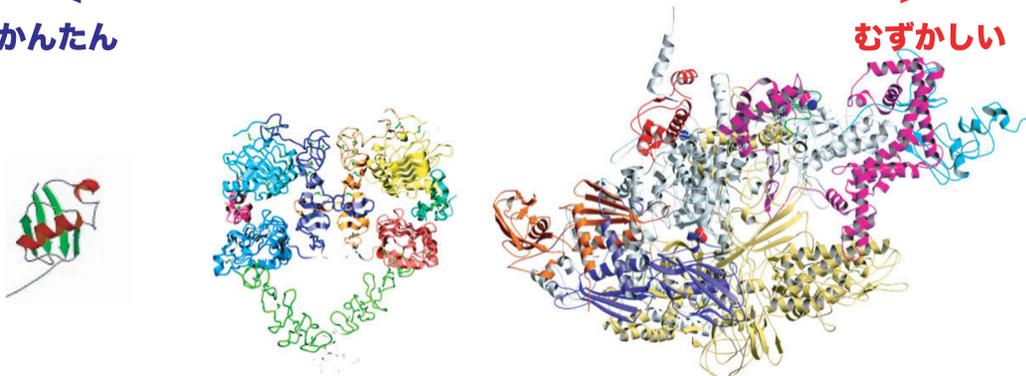


サブミクロン結晶  
1~0.1 μm  
10<sup>6</sup>~10<sup>3</sup> 分子



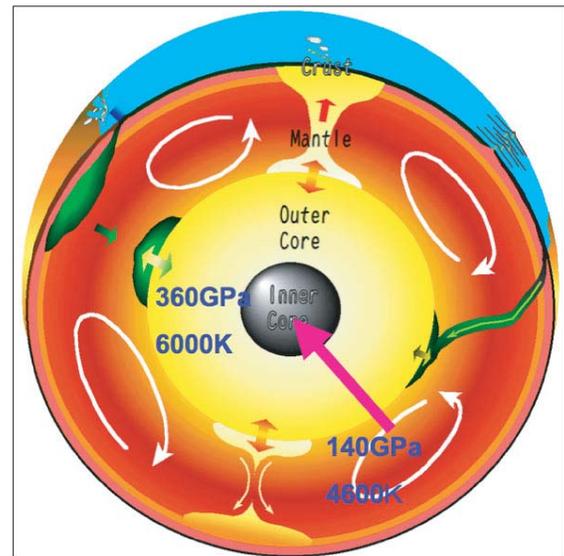
かんたん

むずかしい

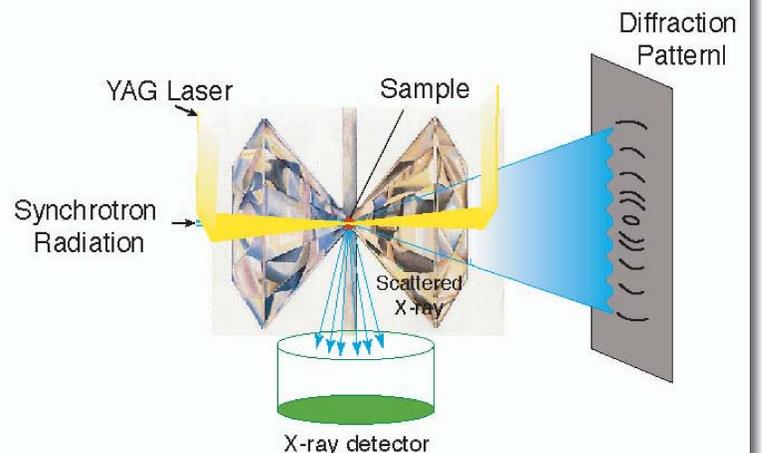


小さな結晶や結晶のできないものも構造が調べられるんだ。今まで見えなかったものが見えるようになるんだね。楽しみだね。

### 地球の中心を見る！

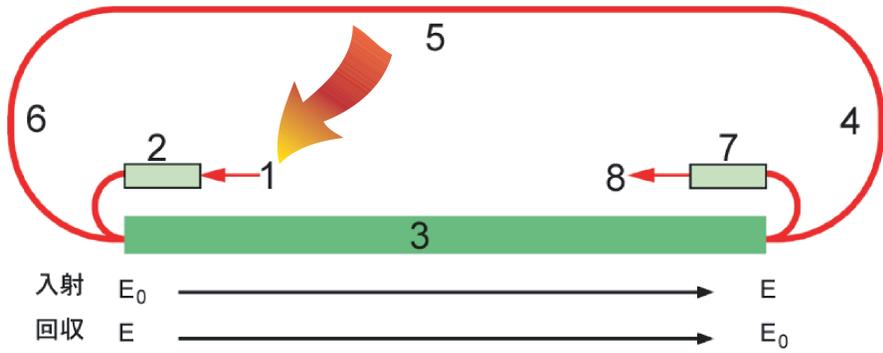


Diamond Anvil Cell



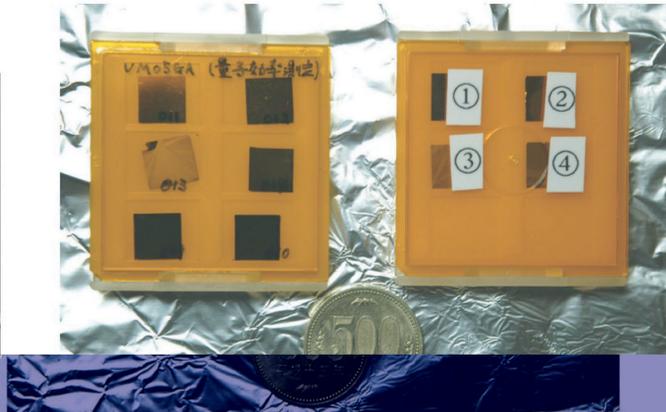
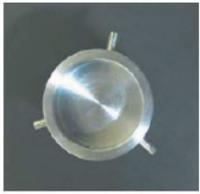
ERLの高輝度ビームは、地球中心の高温高压状態(360GPa, 6000K)と言う、微小領域でなければ地上では実現できない極端条件下での物質の状態、構造を解明します。

# 要素技術の開発 (1) 電子銃



ERL から生み出される光の性質は、電子銃の性能で決まります。ERL を次世代光源として使うためには、高輝度、大電流の電子銃の開発が必要です。

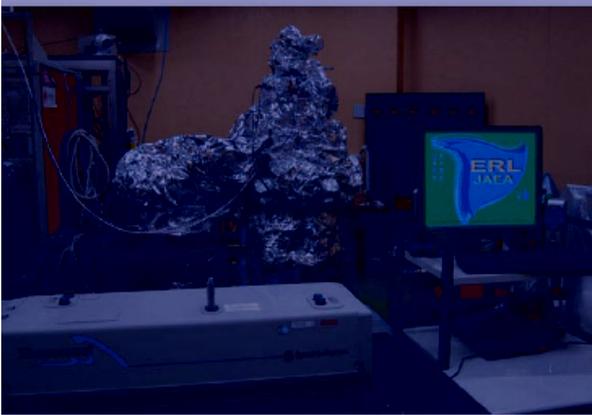
陰極ホルダー



組成を変えたサンプル  
名古屋大学VBL田淵研で作成

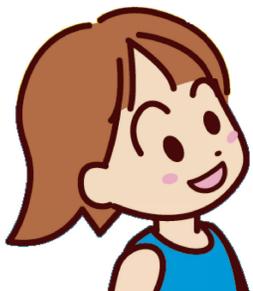
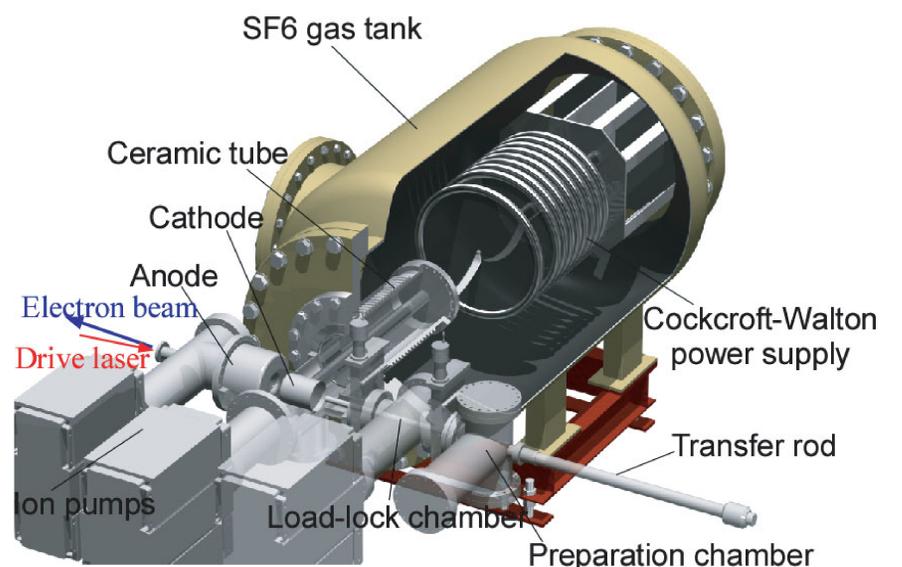
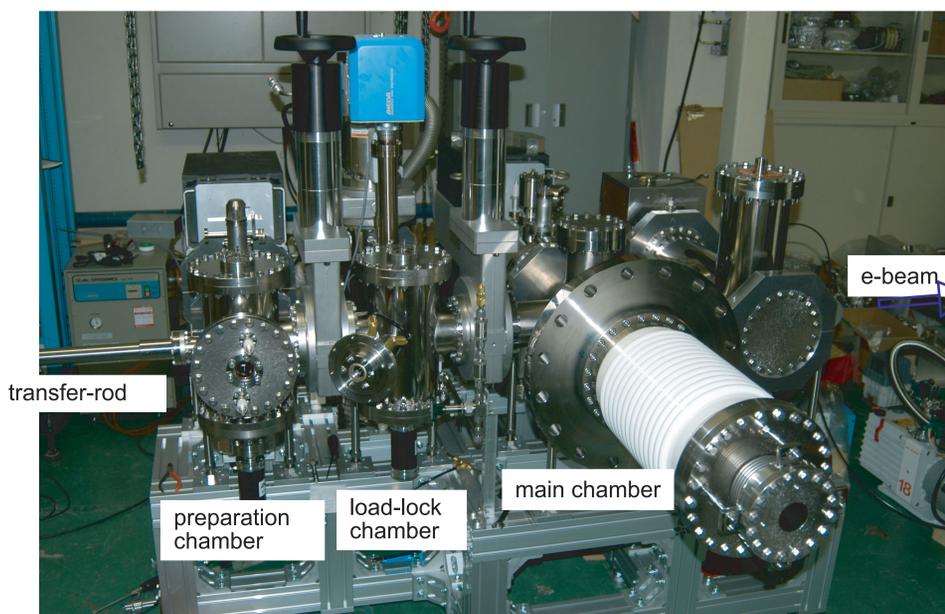
日本原子力研究開発機構 (JAEA) では、光陰極テスト用装置を用いて、電子を引き出す光陰極の材料の試験が行われています。2006 年度の開発研究で、GaAlAs は、GaAs に比べ、寿命が 10 倍長く、量子効率が 2 倍であることがわかり、ERL の光陰極材料として有力視されています。さらなる量子効率の増大を図るため、GaAlAs-GaAs 超格子光陰極の開発を進めています。

高真空チェンバーとレーザー



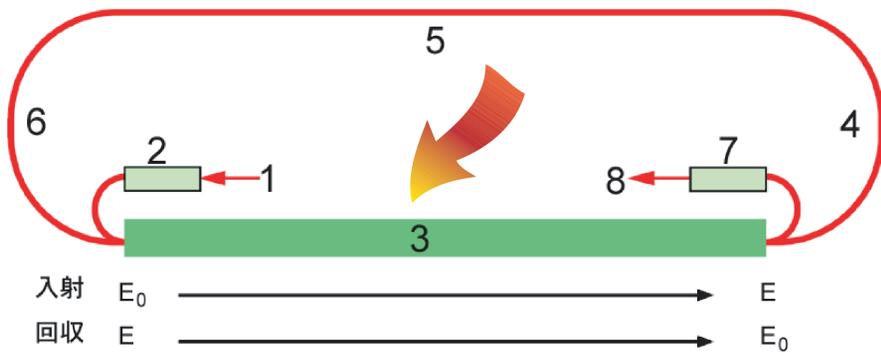
GaAs結晶加熱洗浄の様子

日本原子力研究開発機構 (JAEA) で開発中の 250kV 電子銃。すでに高電圧印加試験が完了しました。

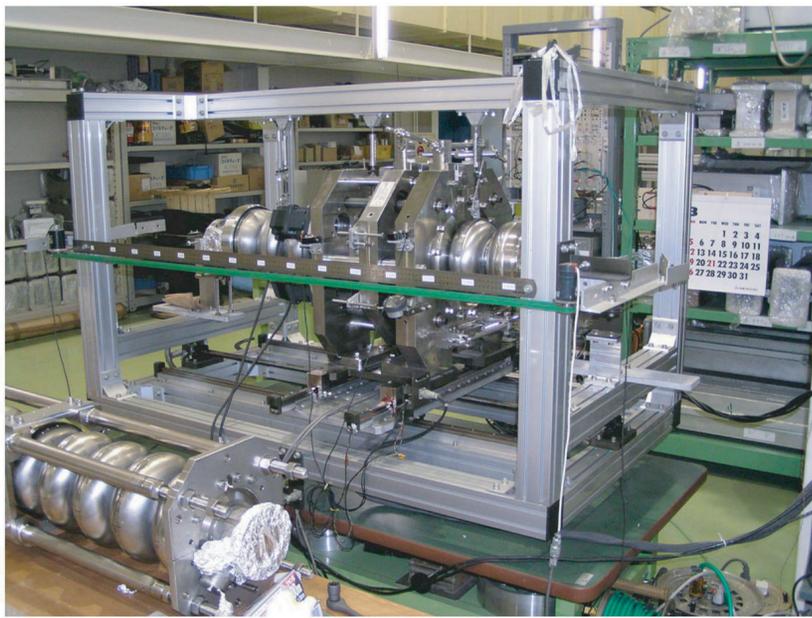


加速器をまわる電子の生まれる場所が電子銃。ERL では、光の品質は電子銃の性能で決まるから、とっても重要な部分だね。

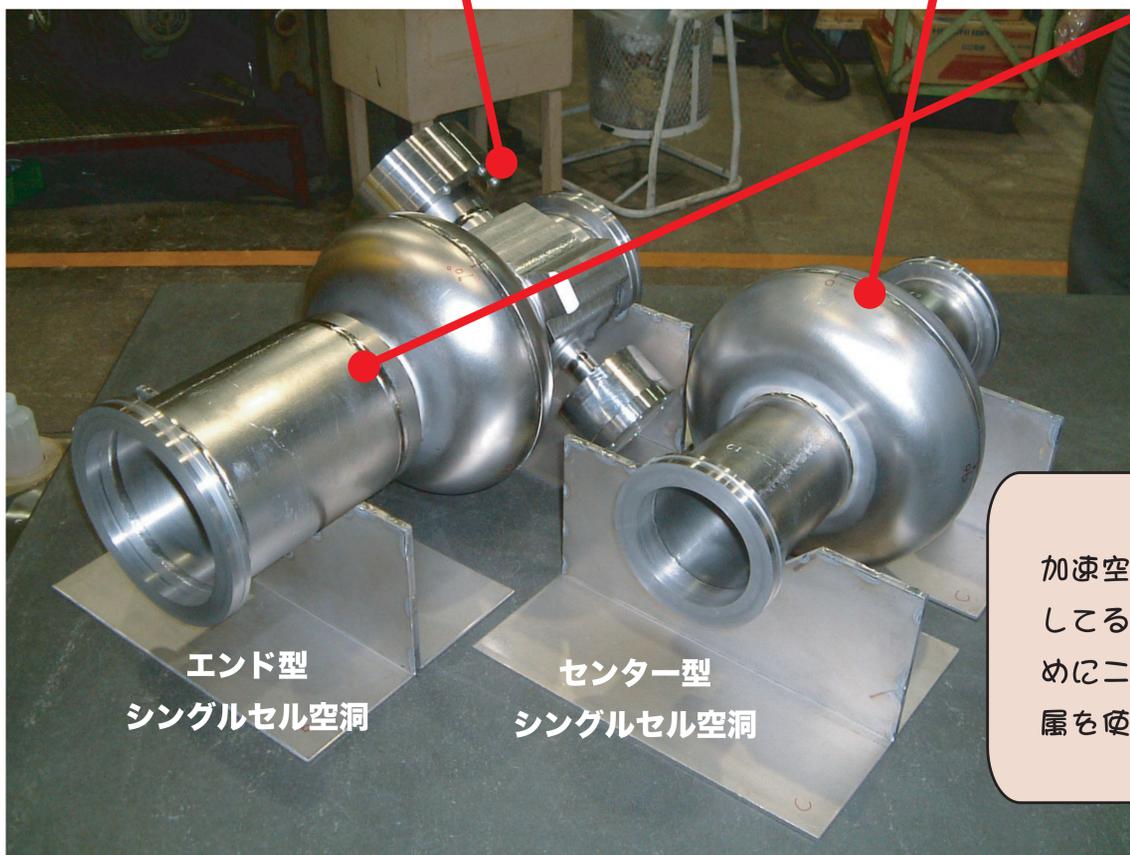
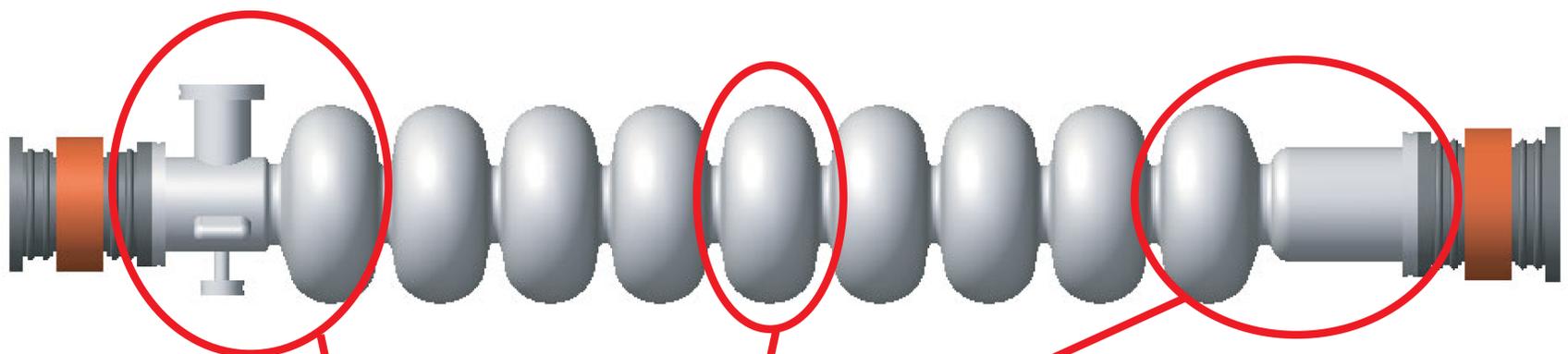
# 要素技術の開発 (2) 超伝導加速空洞



加速空洞とは、高周波をその中に供給し、それが作る電場で電子などの荷電粒子を加速する装置で、加速器のもっとも基本的なコンポーネントのひとつです。加速器を超伝導材料（ニオブなど）でつくったものが超伝導加速空洞で、空洞内の高周波損失を著しく減らすことができます。



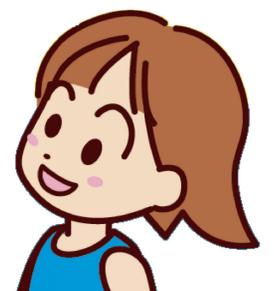
KEK のリニアコライダーの加速空洞開発グループとの協力のもと行なわれている ERL 用超伝導加速空洞の開発のようす。



## ERL 主線形加速器用超伝導加速空洞 (KEK-ERL model 2 cavity)

2006 年度、設計の最適化された KEK-ERL model 2 cavity。ERL で必要な大電流の電子加速においても電子ビームの劣化が生じないように設計されています。2007 年度には性能テストが開始しました。

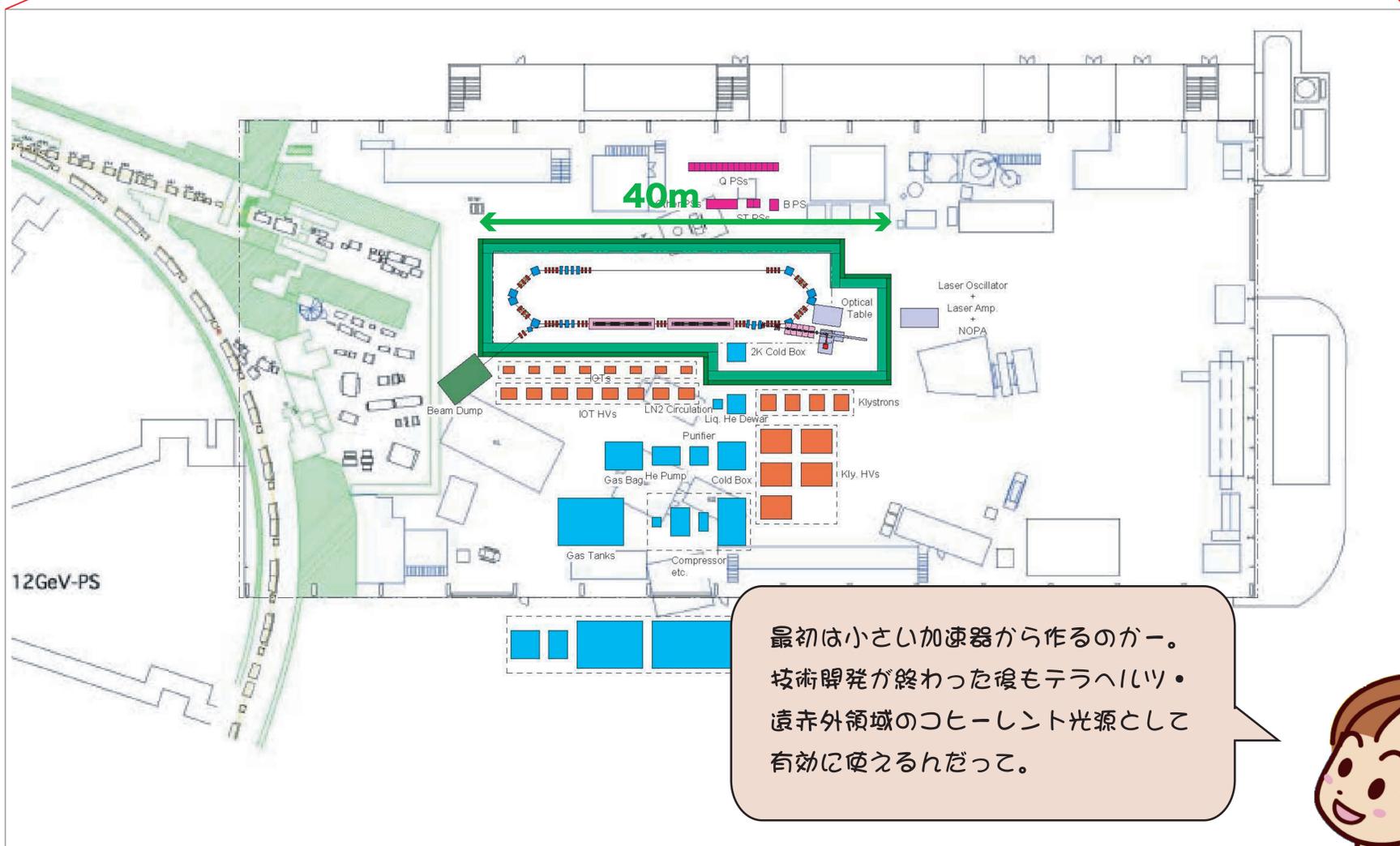
加速空洞っておもしろい形してるね。超伝導を起こすためにニオブっていう特殊な金属を使ってるんだって。



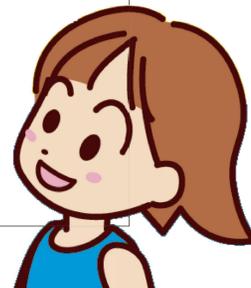
# コンパクト ERL

ERL はまだ将来の技術であり、これから実際に ERL を建設して光を発生させるためには、まだまだ開発しなければいけない技術がたくさんあります。こういった新しい技術の可能性を探るために、まず小型の ERL 加速器を作ることから最初の一步を踏み出すこととしました。実際に X 線領域の光を発生するには 50 億電子ボルト (5GeV) クラスのエネルギーの ERL が必要なのですが、このテスト用の ERL 実証機「コンパクト ERL」は、6000 万~2 億電子ボルト (60~200MeV) 程度のエネルギーのものが計画されています。コンパクト ERL は、2005 年度にその役目を終えた陽子加速器の実験施設、東カウンターホールに建設される予定です。

コンパクト ERL は、単なる技術開発のための加速器だけではなく、それ自身光源加速器として魅力的な性能を持っています。コンパクト ERL からは、テラヘルツ・遠赤外領域の大強度のコヒーレント放射光が得られます。また、レーザー逆コンプトン散乱を利用して、微小光源でフェムト秒 X 線を発生させることができます。これは、医学用イメージング研究や、時間分解・ダイナミクスの研究に有効に使うことができます。

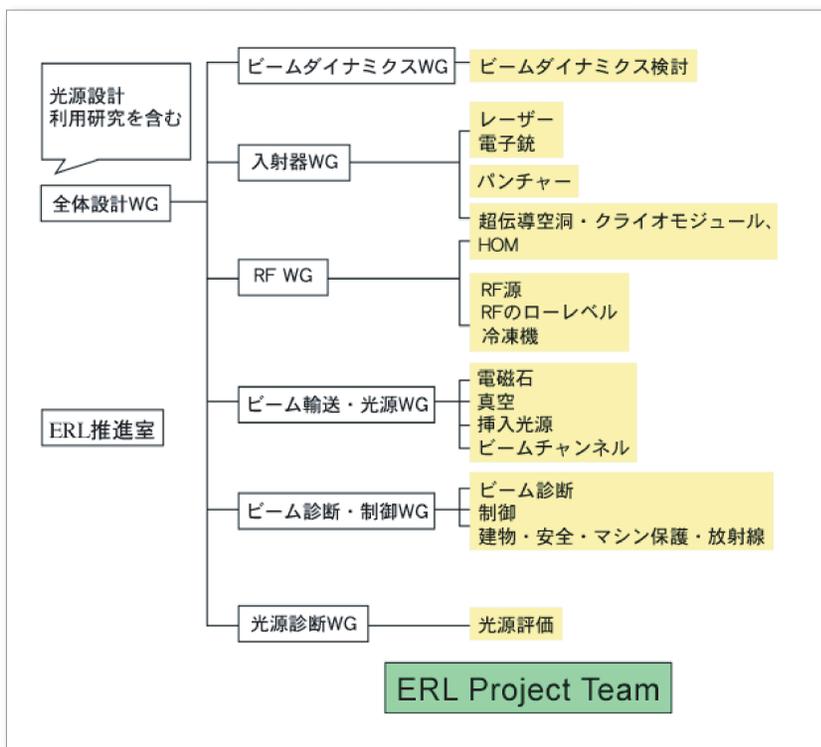
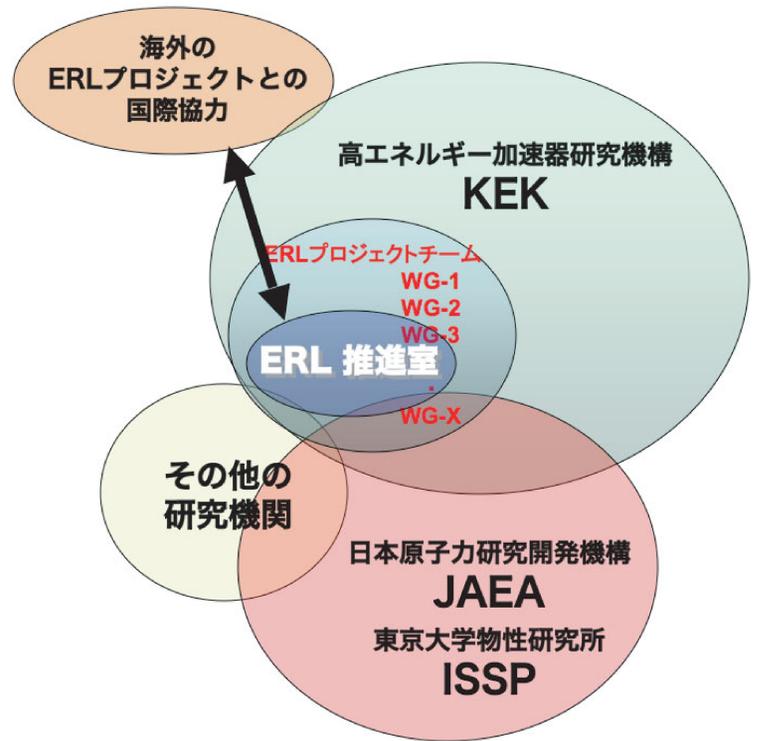


最初は小さい加速器から作るのさー。  
技術開発が終わった後もテラヘルツ・  
遠赤外領域のコヒーレント光源として  
有効に使えるんだって。

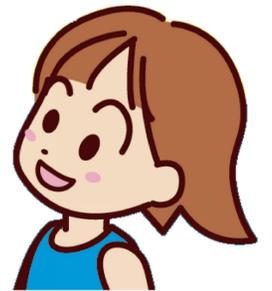


# ERL 開発の組織とスケジュール

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。ERL 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つくっています。コーディネーターは、2 名の KEK の 研究者に加え、日本原子力 研究開発機構 (JAEA) と東京大学物性 研究所 (ISSP) からそれぞれ 1 名ずつという組織になっています。要素技術の開発・検討を行な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・検討作業がすでに開始されています。また、コーネル大学など外国の ERL 推進グループとの技術協力を推進しています。すでに国際会議、ワークショップに積極的な参加を行い、具体的な技術協力関係が構築されています。



研究機関の枠を超えたプロジェクトチームなんだね。ふだんはみんな遠くに離れているから、打合せにはテレビ会議システムを使うんだって。



## ERL 計画のスケジュール

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>コンパクトERL</b>										
設計	—————									
要素技術の開発	- - - - -									
建設				- - - - -						
試験運転						- - - - -				
ユーザー運転						- - - - -				
<b>5GeV ERL</b>										
設計				- - - - -						
建設								—————		

スケジュールは、予算などの状況により大幅な変更の可能性があります。