



# 将来放射光光源 (ERLプロジェクト)

次世代放射光に必要な5GeV（50億電子ボルト）ERLの大きさ（KEKの敷地に重ねて描いてあります）および建設中のcERL（ERL実証機）の位置

# ERL

# ～次世代の光源加速器～

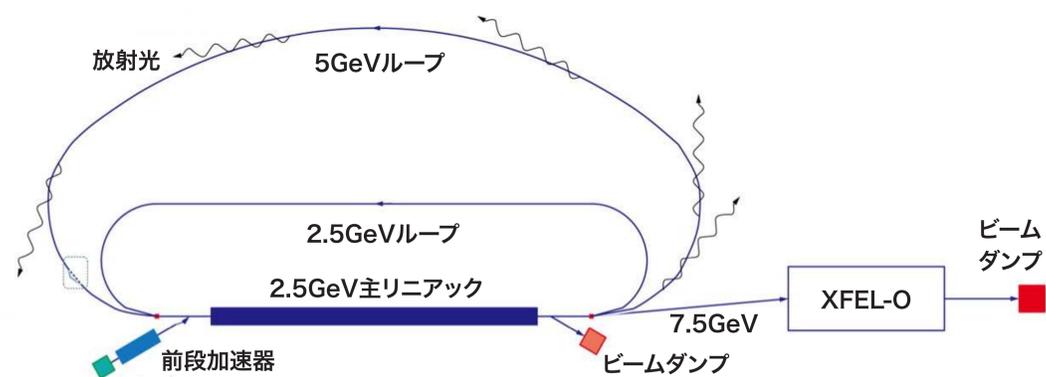


加速器から生まれる明るい光、放射光は、20世紀後半から多くの分野の研究になくてはならない道具となり、様々な物質の構造や機能を解き明かし、新しい物質を創るための有用な情報を生み出してきました。

21世紀の今、枯渇の危機が叫ばれているエネルギー問題解決へのクリーンエネルギーをベースとした新物質開発、生命現象と病原の解明による治療薬の設計、環境汚染の理解とその除去方法の開発、高速化する情報化社会における新しい高速機能性物質開発、人工的に制御された新しいナノ物質開発という様々な課題が横たわり、最新鋭の放射光源への期待が益々広がってきています。

ERL(Energy Recovery Linac; エネルギー回収型ライナック) はこれからの先端科学技術を切り開く「先端性」と「多様性」を満足する新しい次世代放射光源であり、従来の蓄積リング型放射光源を超えるものです。KEK は機構内で培ってきた最先端の加速器技術と内外の研究機関との協力の下、ERL の開発を進めています。

## エネルギー回収型ライナック (ERL) とは？



超伝導加速器で加速した電子を利用して、超高輝度の放射光を発生する装置です。放射光を出し終えて不要になった電子ビームのエネルギーは、超伝導加速器を通して回収され、次の電子ビームを加速するために利用されます。現在の最新鋭の第三世代放射光源と比べても、**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ます。**また、現在の放射光と同程度のビームラインが作れるため、多様なニーズに応えることができます。

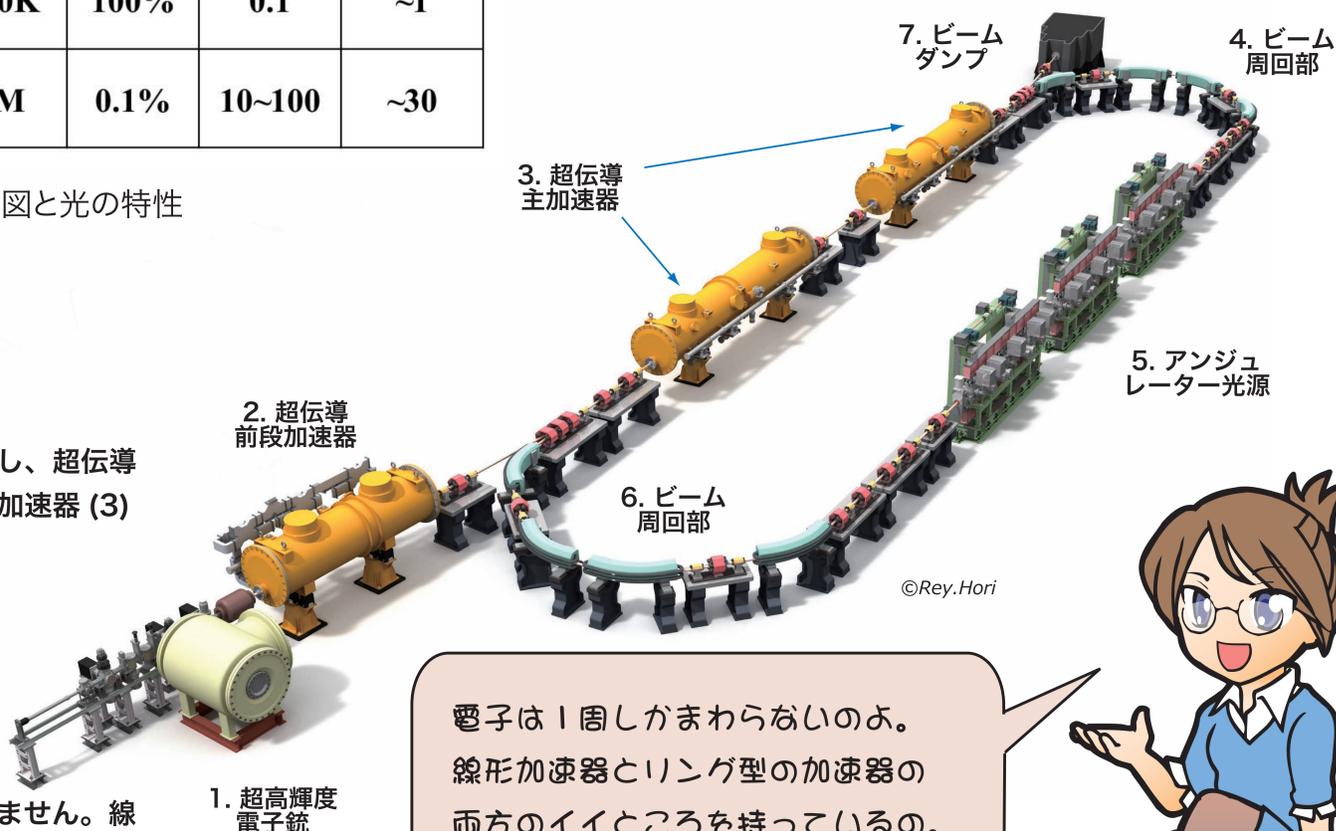
さらに、ERLの超高輝度電子ビームを用いることにより、現在各国で建設が進められているSASE-XFEL(X線自由電子レーザー)をはるかに超えた共振器型XFEL(XFEL-O)も本計画では射程に入れていきます。

	平均輝度	ピーク輝度	繰り返し周波数 (Hz)	コヒーレント比	パルス幅 (ps)	ビームライン数
ERL	$\sim 10^{23}$	$\sim 10^{26}$	1.3G	$\sim 20\%$	0.1~1	$\sim 30$
XFEL-O	$\sim 10^{27}$	$\sim 10^{33}$	$\sim 1M$	100%	1	$\sim 1$
SASE-FEL	$\sim 10^{22-24}$	$\sim 10^{33}$	100~10K	100%	0.1	$\sim 1$
第三世代放射光	$\sim 10^{20-21}$	$\sim 10^{22}$	$\sim 500M$	0.1%	10~100	$\sim 30$

次世代光源ERLの概念図と光の特性

## ERLのしくみ

電子ビームを超高輝度電子銃(1)で生成し、超伝導の前段加速器(2)で加速します。次に主加速器(3)で最終的なビームエネルギー(5 GeV)まで加速します。この電子ビームを周回部(4, 6)に設置した数十台のアンジュレーター(5)に次々に通すことによって、超高輝度放射光を発生させます。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はありません。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周しかまわらないのよ。線形加速器とリング型の加速器の両方のいいところを持っているの。最先端の光をみんなでお使いのわ。



# ERL が拓くサイエンス

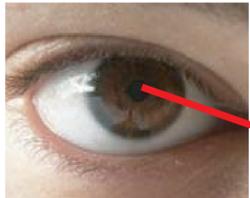
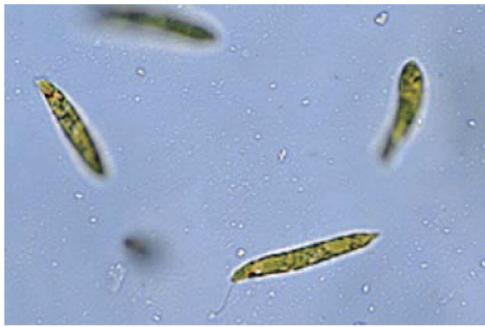
## ～スタティクからダイナミクスへ～

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

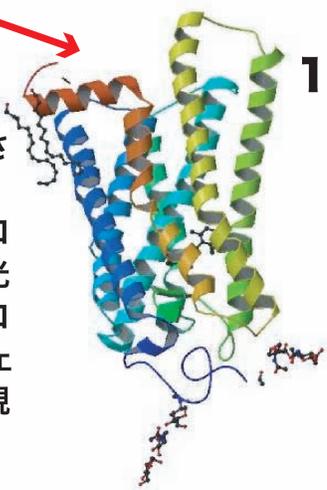
#### 生き物が「動く」しくみを探る

生物の動きは、年オーダーからフェムト秒まで、とても幅広い時間スケールで観測されます。顕微鏡下で動き回るミドリムシの動きをどんどん細かく見てゆくと、鞭毛の動き（1秒間に数100回転）、そして鞭毛のタンパク質の反応にまでつながっています。

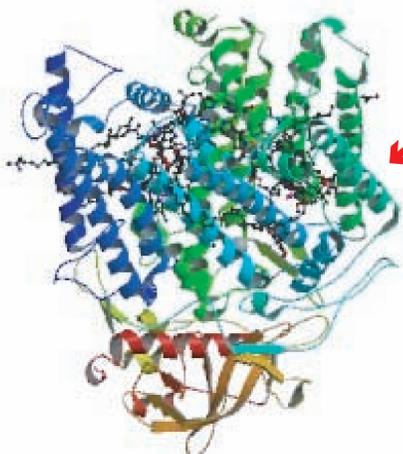


#### 創薬ターゲットのダイナミクス

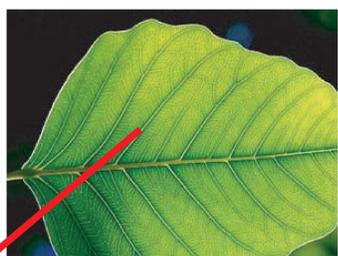
創薬ターゲットとして注目されているGPCR（Gタンパク質共役型受容体）であるロドプシンは、網膜にあり、光を感じるタンパク質です。ロドプシンは、光を～200フェムト秒で吸収し、脳にその視覚情報をミリ秒で伝えます。



#### 光エネルギーの有効利用へ



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。



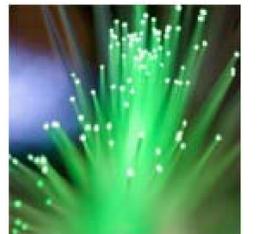
### 物質科学

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。

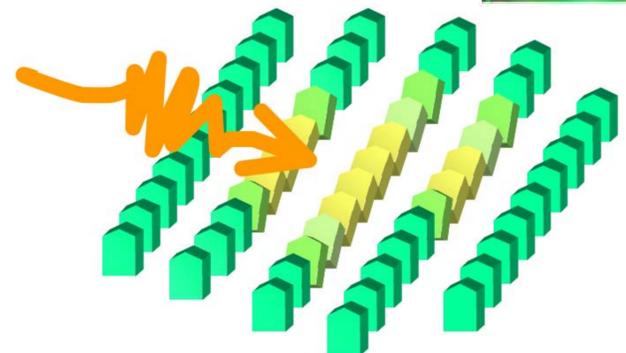


#### 次世代の超高速通信デバイス

1つの光子で多数の分子が変化する「ドミノ倒し」のような現象が光誘起相転移です。サブピコ秒という超高速な光スイッチング素子として有望です。



1ps (ピコ秒)



#### 次世代太陽電池



次世代太陽電池として有望な色素増感型太陽電池では、励起されたRu色素からサブピコ秒～フェムト秒で電子移動が起こります。

100fs

10fs

1fs (フェムト秒)

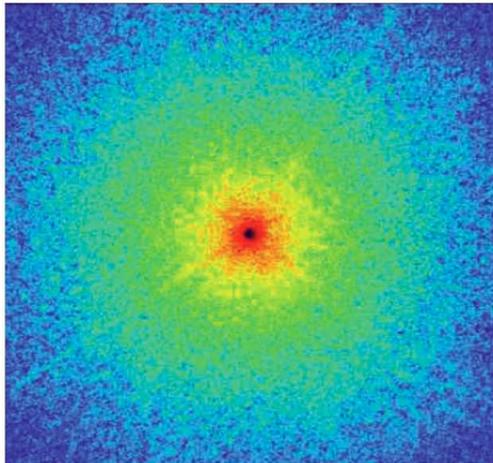


フェムト秒なんて遠い世界と思ってたけど、意外と身近なものがいっぱい。わたしの目はこれほど速い反応でものを見ていたんだね。

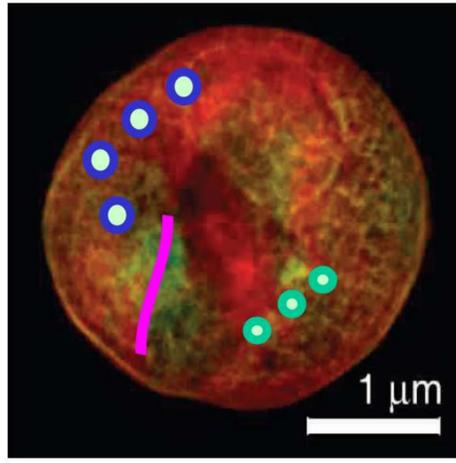


# ERL が拓くサイエンス ～コヒーレンスとナノビーム～

生命現象を理解するためには、タンパク質など個々の生体分子に注目しながらも、細胞や構造体全体を見渡す研究が必要です。波の振幅や位相がそろっているコヒーレントX線は、巨大分子複合体、細胞内小器官や細胞自身のように、結晶化が不可能な生体物質の立体構造をナノメートルのサイズで観ることが夢ではなくなります。このような研究は飛躍的に生物学、医学、薬学の分野の発展を約束するでしょう。

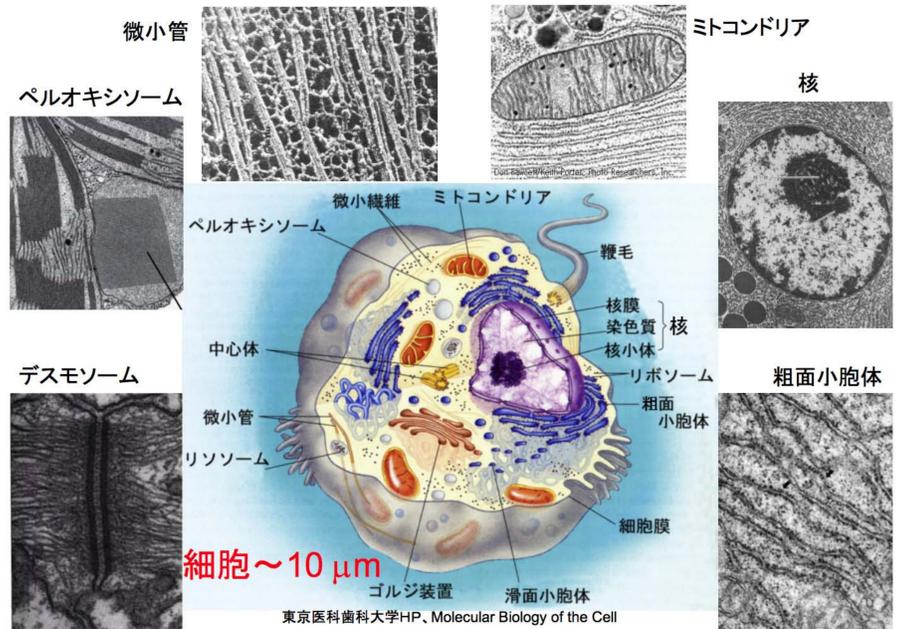


酵母菌細胞の回折像



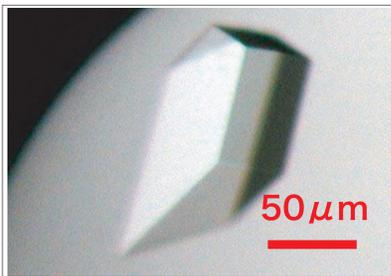
左の回折像から構築した酵母菌細胞のイメージ

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

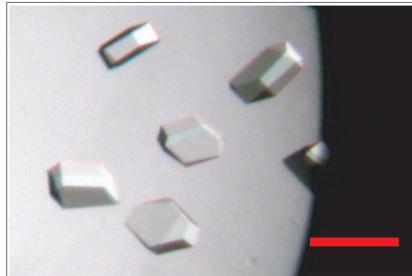


細胞膜にある膜タンパク質は、細胞内への分子の取り込みやシグナル伝達を行う大事な生体分子。市販の薬の約半数は膜タンパク質に作用するものです。しかし、結晶化が難しく、構造解析がなかなか進んでいません。ナノビームを用いると、微小な結晶でも構造解析ができるので、生命現象の理解や、創薬が飛躍的に進むことが期待されます。

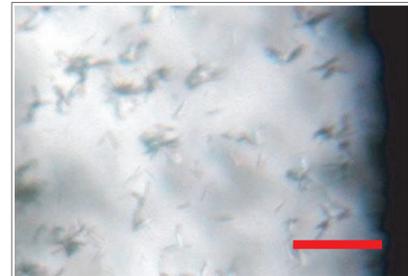
通常の結晶  
100 μm  
10<sup>12</sup> 分子



現在の限界  
10 μm  
10<sup>9</sup> 分子

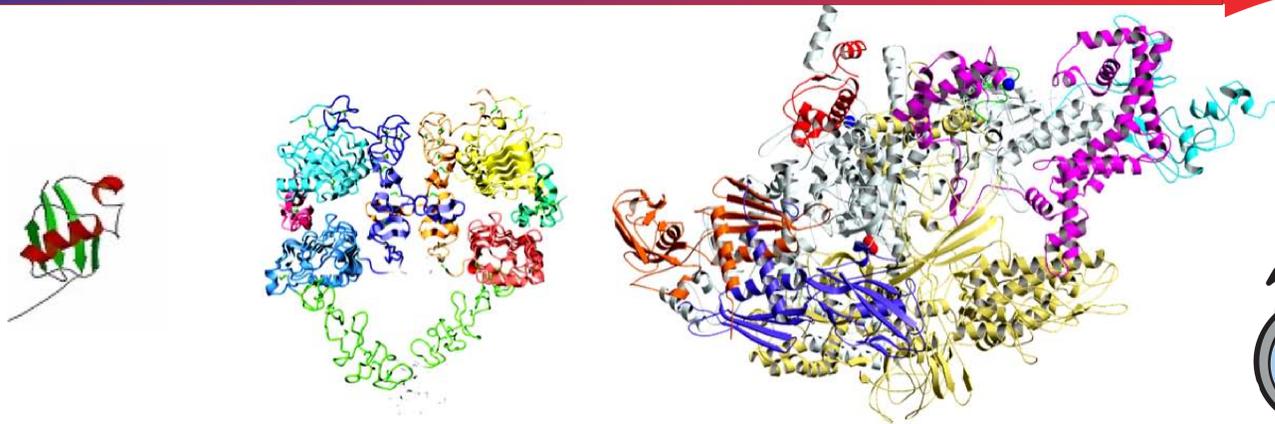


サブミクロン結晶  
1~0.1 μm  
10<sup>6</sup>~10<sup>3</sup> 分子

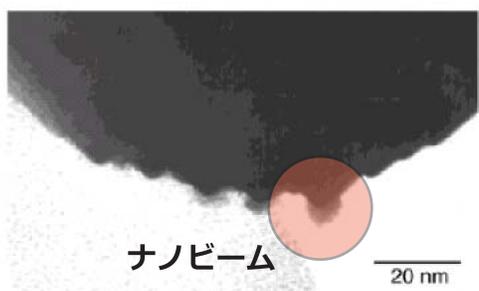


簡単 ←

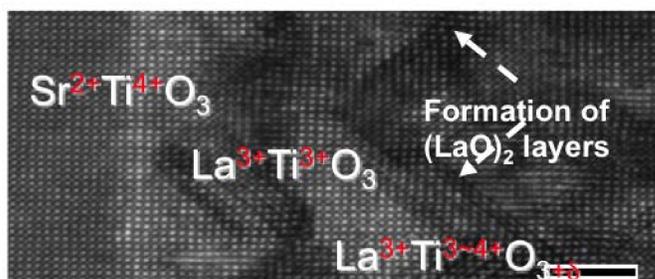
→ 難しい



物質開発は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ました。界面や粒界でのナノスケールの特異な構造や電子状態を制御することは新しい材料の創成につながります。また、ナノビームでは、空間的に不均一な触媒の活性中心で起こる反応を観ることができます。



ナノビーム

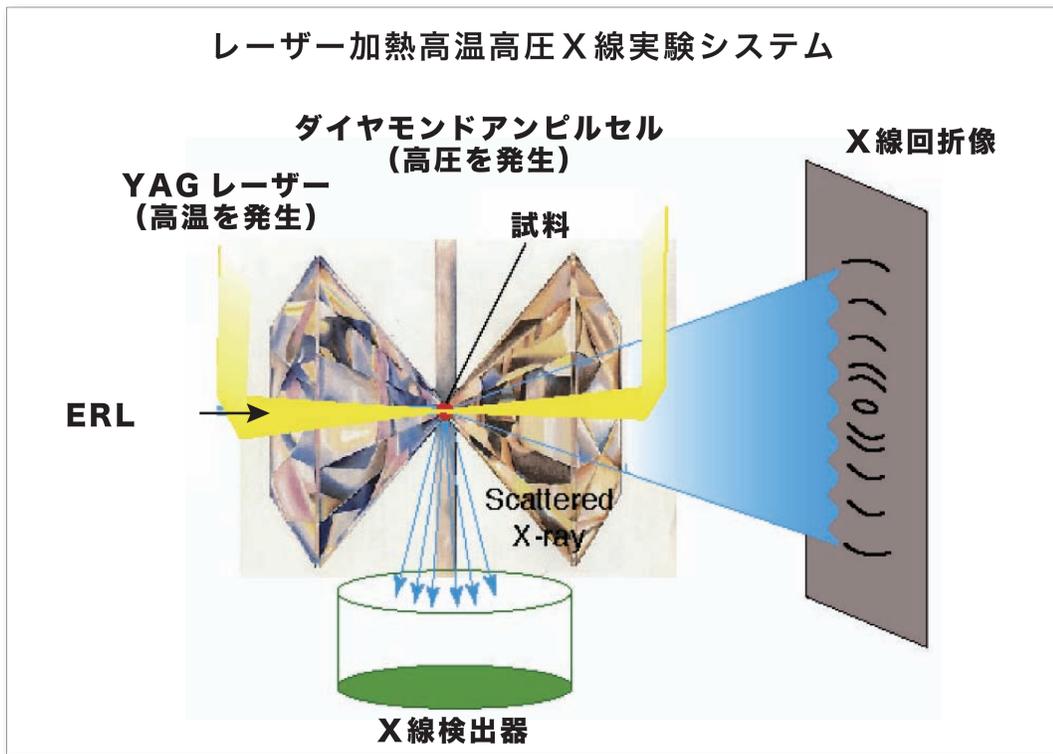
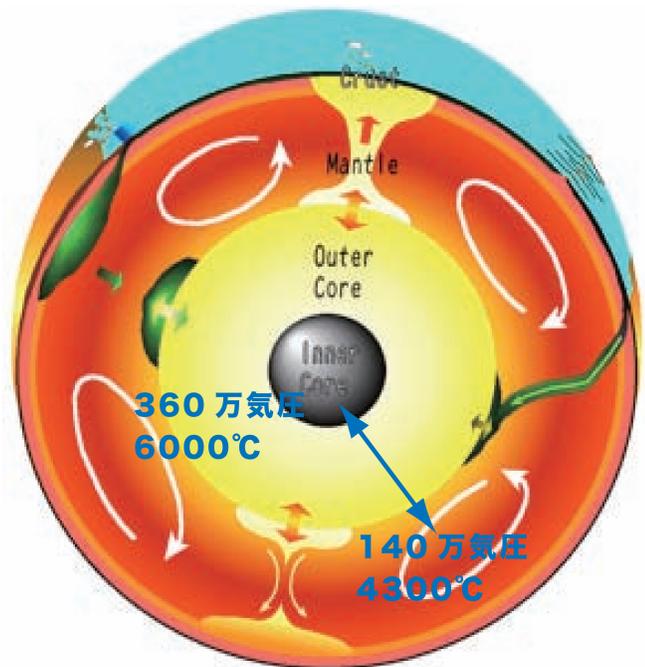


ナノメートルは原子数個分の大きさ。ほくたちの世界とはおいぶん違うなあ。ナノの世界を観るにはナノビームが必要なんだね。

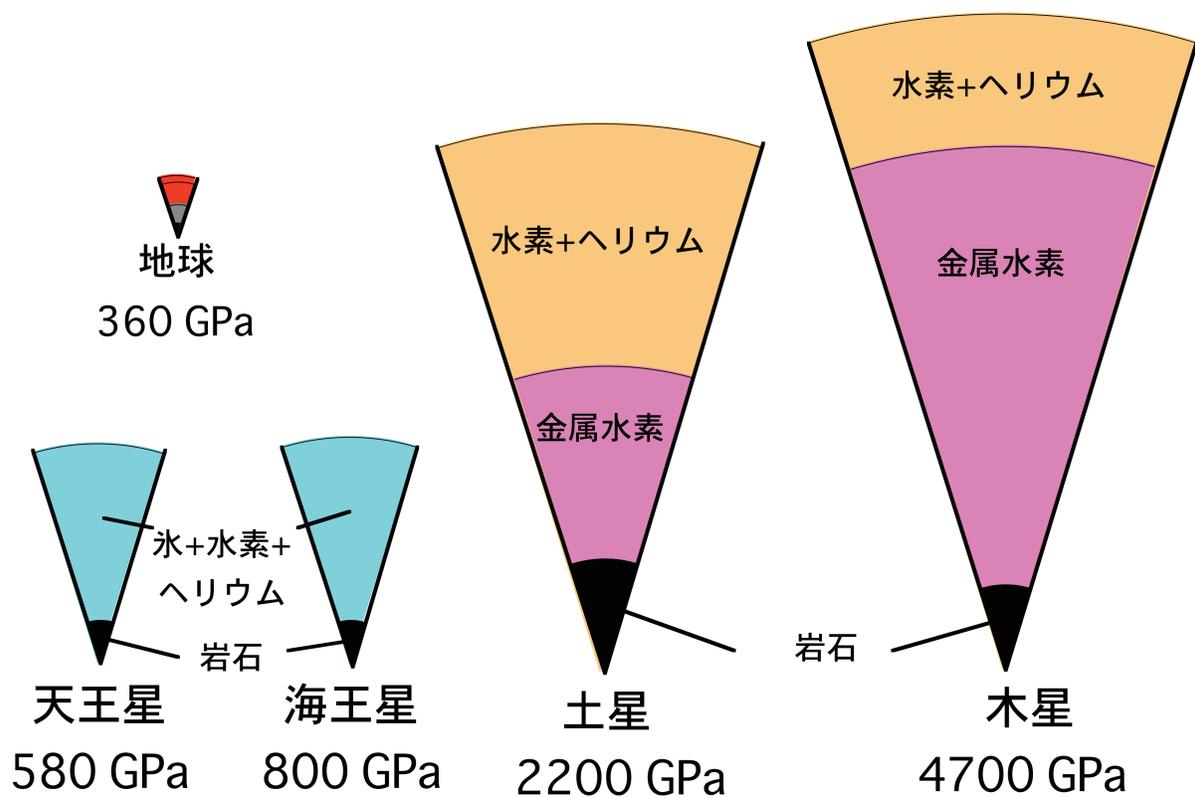
# ERL が拓くサイエンス

## ～地球惑星科学への誘い～

地球や惑星の中心は、超高温・高圧の未知の世界です。ERLの高輝度ビームは、極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。



木星や土星のような巨大惑星は、主に水素とヘリウムからできており、深部には金属水素が存在すると考えられています。この金属水素が、巨大惑星の特異な巨大磁場・巨大熱流量と密接に関係しているとされています。また、金属水素は、理論的には室温超伝導体であると予測されていて、その性質にも注目が集まっています。このような地球深部よりさらに高温高圧の世界は、現在の科学では未知の世界であり、ERLのナノビームがその謎を解き明かす鍵となるでしょう。



想像もできない超高温高圧の世界…。それが、微小領域であれば地上でも再現できるのね。ERLができればそんな夢の世界が見られるのかしら…。

# 要素技術の開発 (1) 電子銃

電子銃は ERL において電子ビームの性能を決定する重要な機器です。次世代光源加速器の光の品質は、まさにこの電子銃の性能によって決まります。

最先端のドライブレザ光をフォトカソードに照射し、引き出した電子を直流高電圧で加速することにより、超高輝度の電子ビームを生成します。

励起用の大出力ファイバーレーザー、負の電子親和力を持つフォトカソード材料、高電圧電極を組み合わせ、必要な性能を達成します。

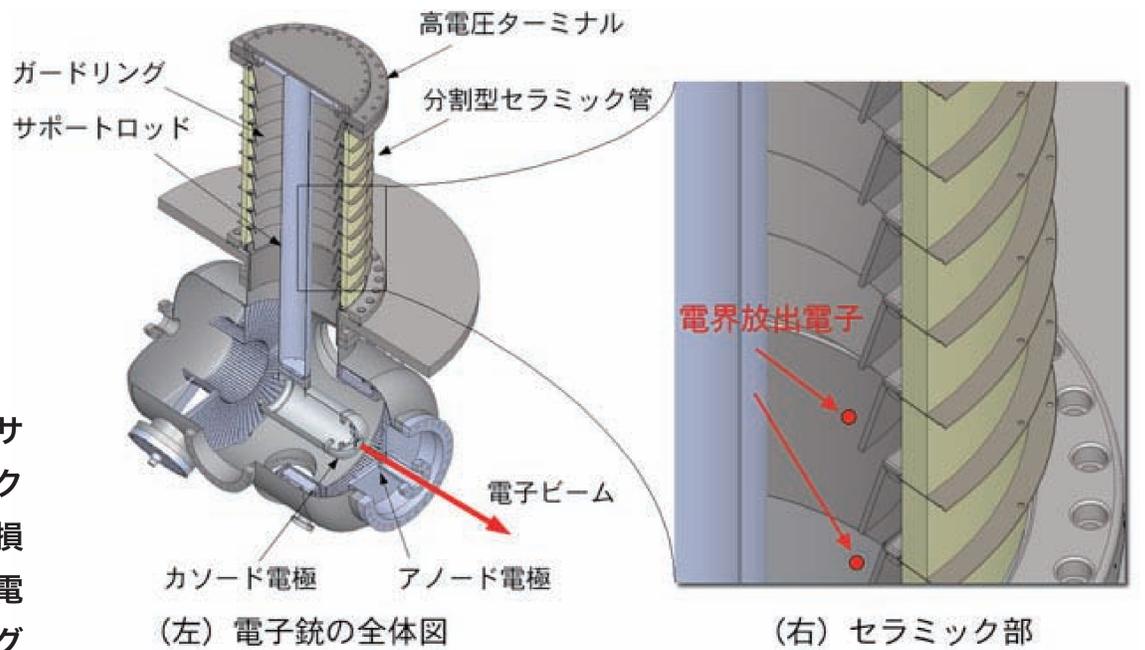


電子銃は...  
ココ!

## 次世代光源用の電子銃で世界最高の 500kV を達成!

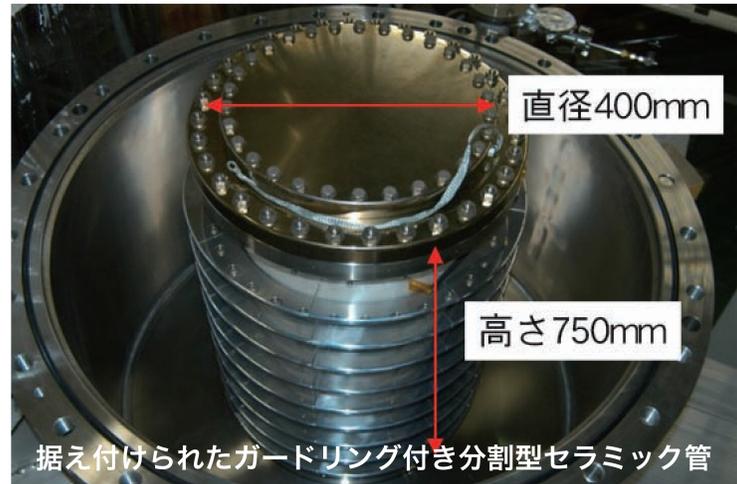
次世代光源 ERL に必要不可欠な高品質の電子ビームを得るためには、500kV の電子銃電圧が必要です。これまでの最高電圧は米国ジェファソン研究所の 350kV でしたが、JAEA, KEK, 広島大学, 名古屋大学の共同研究グループが開発した ERL 用電子銃では、世界最高の 500kV の電圧を達成しました。

高電圧化を目指す際に最も問題になっていたのが、サポートロッドの表面から放出された電子がセラミック管の内表面に当たり、放電によってセラミックが破損することでした。開発された電子銃では、電界放出電子がセラミック管に当たらないように、ガードリング付きの分割セラミック管を採用した設計を行ったことが、高電圧化成功の鍵となりました。



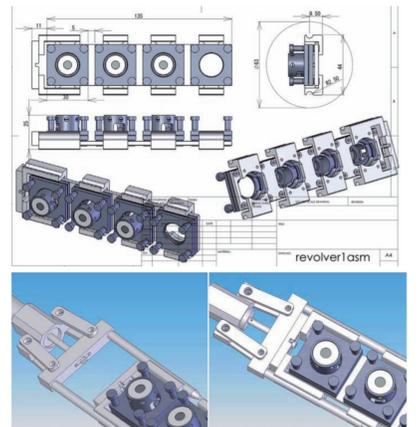
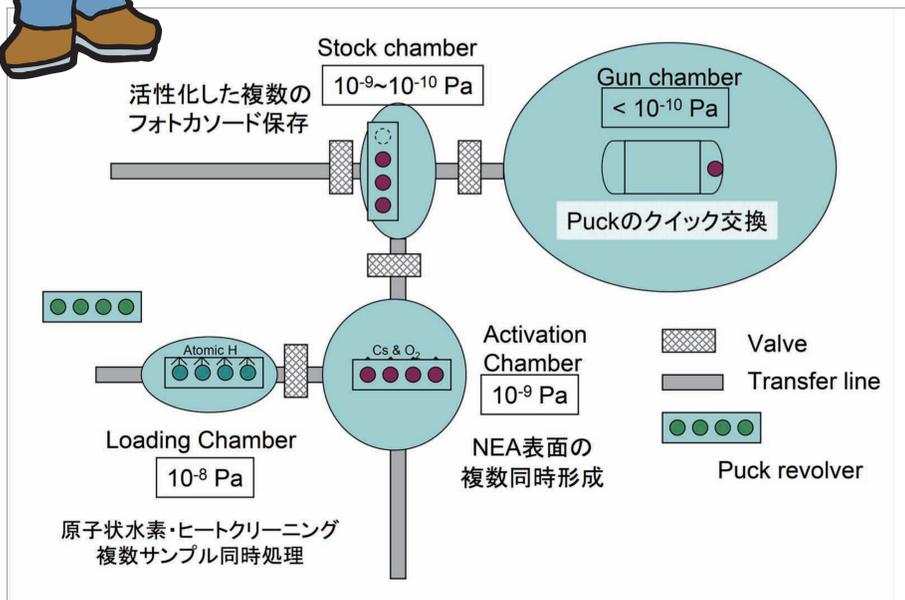
(左) 電子銃の全体図

(右) セラミック部



世界最高電圧達成! 世界中からも注目されているんだって。これで次世代光源 ERL がいよいよ現実には近づいたね!

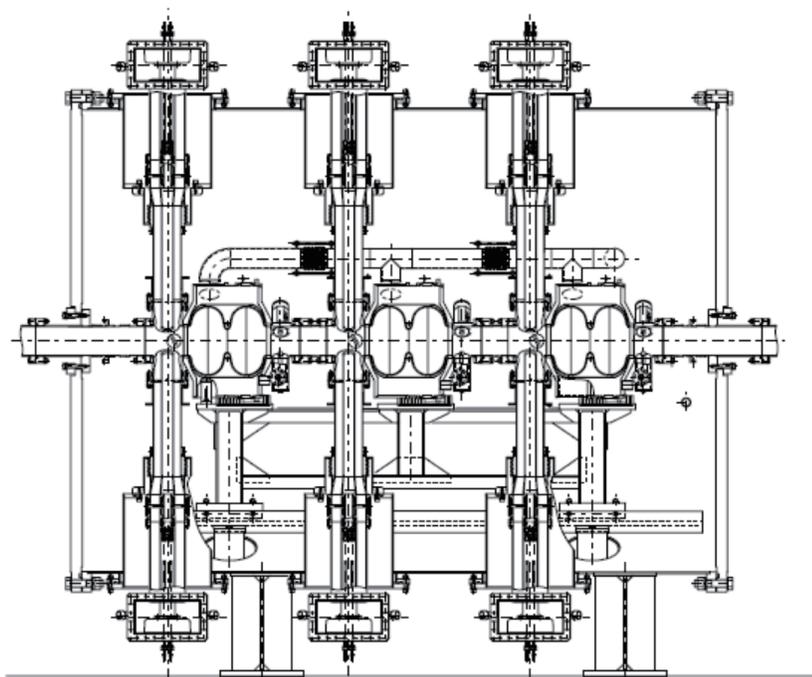
## フォトカソード材料およびシステムの開発



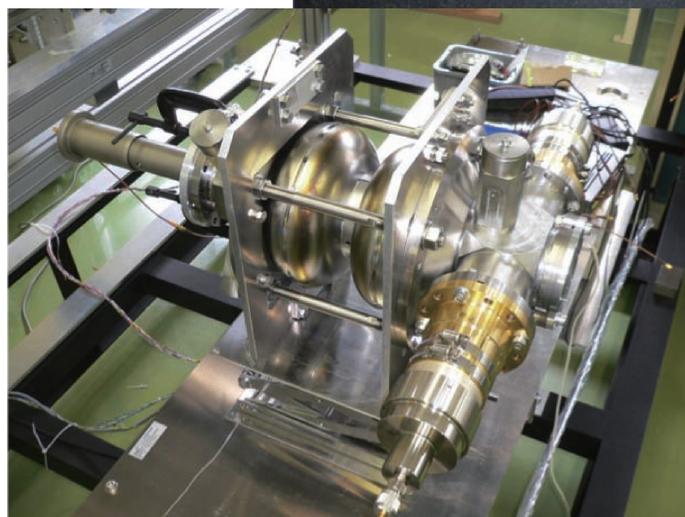
ビーム出力 10mA 以上という高出力では、フォトカソードの寿命は十分に長くありません。カソードを常時複数待機させておくシステムを開発しています。カソードの準備には、加熱洗浄・冷却・表面の形成という3ステップが必要であり、複数同時に処理を行うことができます。

# 要素技術の開発 (2) 超伝導加速空洞

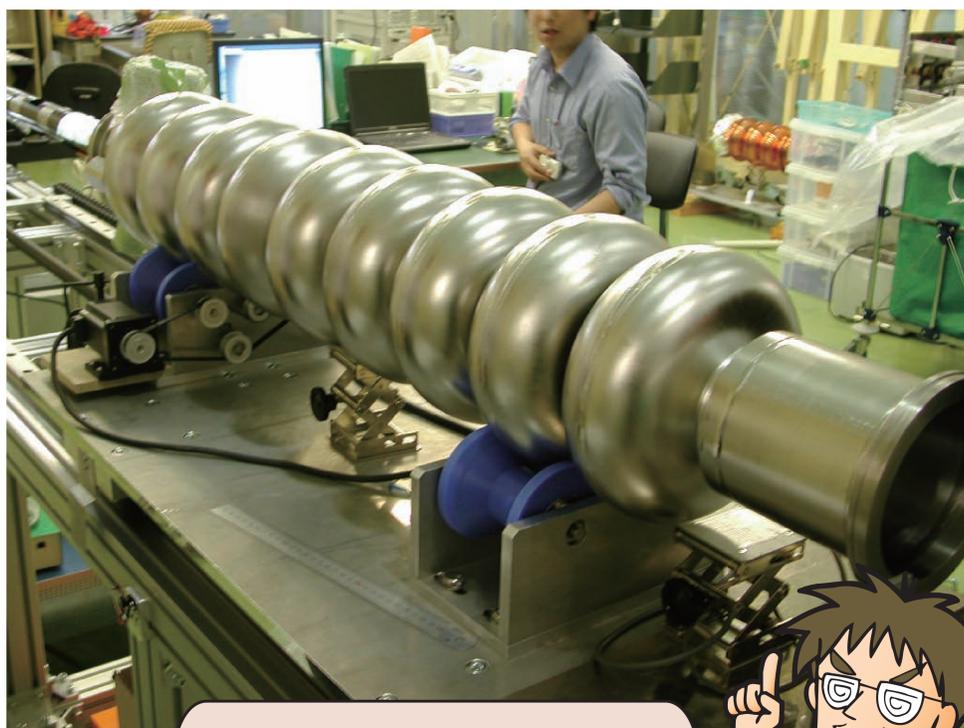
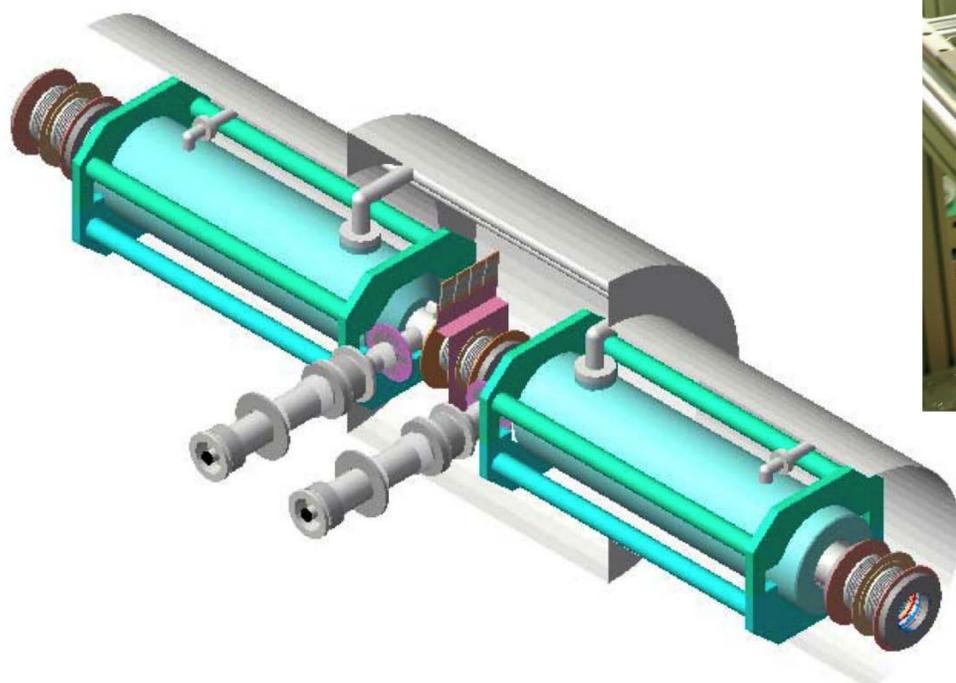
超伝導加速空洞は、高周波電力を投入して、ビームの加速に必要な高周波電場を発生する装置です。近年急速に進歩している超伝導技術を用いることで、高電界かつ高効率の加速が実現できます。最先端の超伝導加速器技術は、先進医療のための小型加速器を始め、産業への波及効果も期待されます。ERLでは、入射用の前段加速器、および主加速器といった主要なコンポーネントで用いられる超伝導加速器は、まさに鍵となる技術です。加速空洞の表面に傷や塵が存在すると超伝導が損なわれるので、電界研磨や超純水高圧洗浄などの表面処理技術を駆使してそれらを除去します。



超高輝度電子銃から発生する電子を初段で加速する前段加速部で用いられる超伝導加速空洞。



ERLの主加速器として製作されたニオブ製の超伝導加速空洞 (右) と、加速空洞を2台收容し液体ヘリウムで冷却するモジュール (下)。



この不思議な形の装置が加速空洞。超伝導を起こすためにニオブという特殊な金属を使ってるんだ。



# cERL (コンパクト ERL)

次世代の光源加速器 ERL の実現には、開発しなければいけない技術がたくさんあります。そのために KEK では小型の ERL 加速器を作ることから最初の一步を踏み出しました。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 が必要ですが、この ERL 実証機「コンパクト ERL (cERL)」は、3500 万～2 億電子ボルト (35～200MeV) 程度のエネルギーのものです。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ます。2009 年度末に建物の整備が終了し、2012 年度末に 35MeV, 10mA での運転開始を目指して建設が進められています。

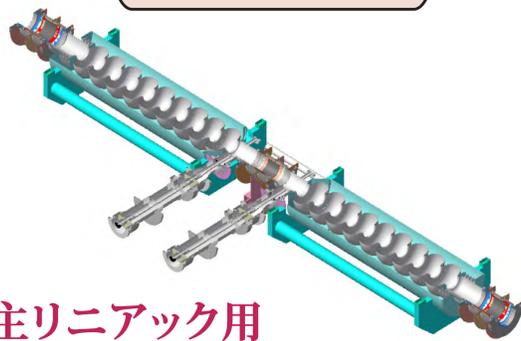


## ヘリウム冷凍システム

cERLの超伝導加速空洞（前段加速部および主加速部）を2Kで冷却するためのヘリウム冷凍設備。液体ヘリウムを生成するヘリウム液化冷凍機の主要な機器は、2009年度末までにトランスファーラインとともに設置されている。

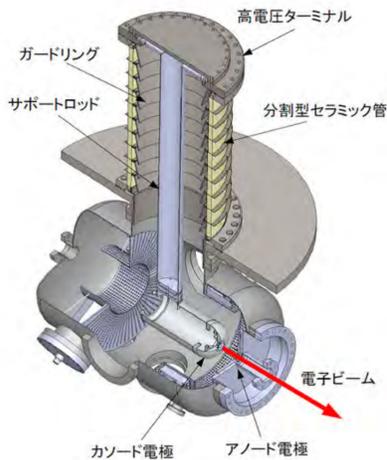


cERLはこの1年で急に建設が進んだわね。加速器が動き出すまであと1年半！



## 主リニアック用超伝導加速空洞

ERLの主加速部は「エネルギー回収」という役割を果たす心臓部である。すでにプロトタイプのパフォーマンス試験に成功し、cERLに導入するための加速空洞を2台収容したクライオモジュールの開発に着手している。



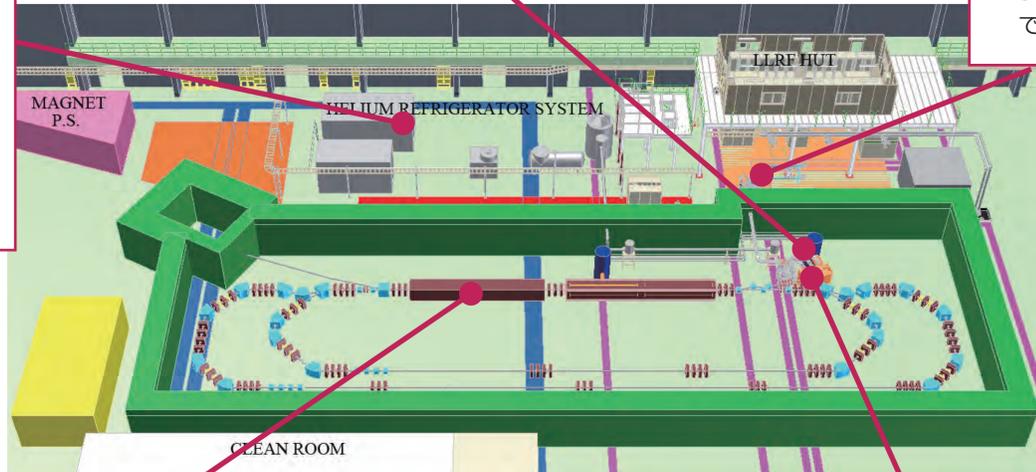
## 超高輝度電子銃

電子銃はERLにおいて電子ビームの性能を決定する重要なコンポーネントである。高輝度電子ビームを作るには高い加速電圧が必要である。これまでの最高電圧は米国ジェファーソン研究所の350kVであったが、JAEA, KEK, 広島大, 名古屋大の共同研究により、世界最高の500kV以上の電圧を安定にかけることに成功した。

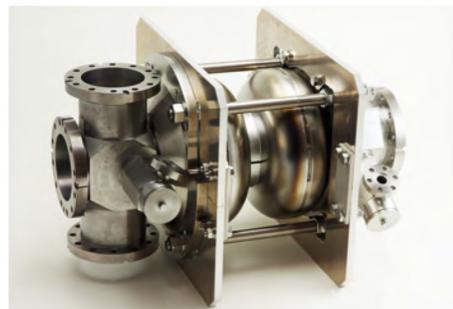


## クライストロン

cERLの前段加速部で使われる1.3GHz, 300kWのクライストロンの開発がすでに完了し、現場に設置されている。

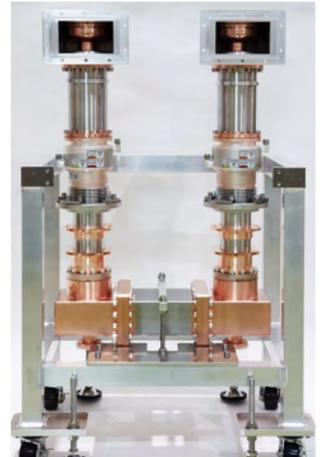


cERLからは、テラヘルツ・遠赤外領域の大強度のコヒーレント放射光が得られます。また、レーザー逆コンプトン散乱を利用して、微小光源でフェムト秒X線を発生させることができます。医学用イメージング研究や、時間分解・ダイナミクス研究への応用が期待されます。



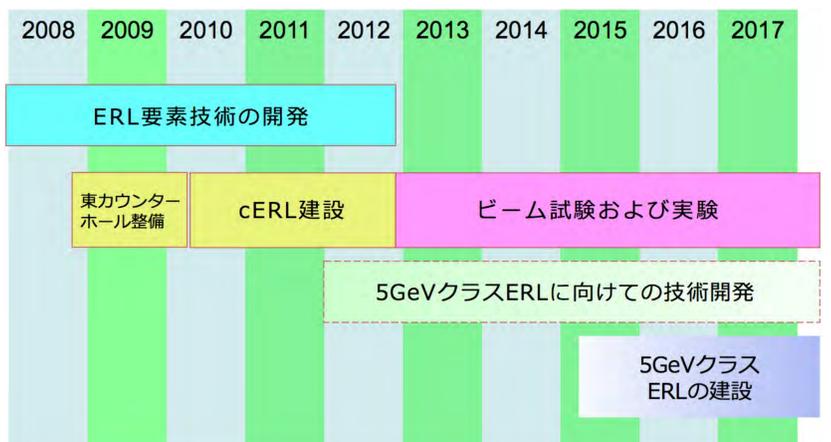
## 前段加速器用超伝導加速空洞

ERLの電子源を初段で5-10MeVまで加速する前段加速部では、大電力入力カプラと超伝導空洞が技術の鍵となる。すでにそれらの性能試験に成功し、cERLに導入するクライオモジュール開発に着手している。



## cERL建設地 (東カウンターホール)

2009年度末に建物の改修が完了した。ヘリウム冷凍システム、超伝導加速空洞開発のためのクリーンルームなどがすでに設置されている。また、準備室や会議室などの周辺施設も整備されている。



次世代光源ERL実現のためのスケジュール(予定)