



P h o t o n F a c t o r y

# フォトンファクトリー

放射光科学研究施設

物質や生命のしくみを観る光

# 光の工場 フォトンファクトリー



## 2つの光源加速器

フォトンファクトリーの25億電子ボルト（2.5GeV）放射光リング（PFリング）は、日本初の、紫外線からX線までの光が利用可能な放射光専用光源として1982年に完成しました。現在までの四半世紀を超える間に数度の大きな改造を行い、放射光の高輝度化を図ってきました。また最新の技術を取り入れた実験装置の開発や実験環境の整備によって、多くの研究者に最先端の研究の場を提供しています。

もうひとつの光源加速器、PF-AR（Advanced Ring、アドバンスリング）は、トップクォークの探索が行われていたトリスタンの前段加速器を改造し、世界でも類を見ない大強度パルス放射光専用光源に転用したものです。パルス放射光を利用して分子の変化する様子を捉える研究や、高エネルギーX線を利用した地球科学研究など、特徴的な研究が行われています。

◆ フォトン（Photon）は光の粒子。ファクトリー（Factory）は工場。高エネルギー加速器研究機構（KEK）の放射光科学研究施設は、フォトンファクトリー（PF）の愛称で親しまれています。

◆ フォトンファクトリーでは、加速器から発生する明るく波長の短い光、「放射光」で、物質や生命を原子のスケールで観察します。放射光は、私たちの身の周りにある多種多様な物質のあらかず性質や、複雑で神秘的な生命のしくみを解き明かす、優れたツールです。

◆ 大学共同利用機関法人であるKEKでは、全国の大学や研究所、企業の研究者、そして海外の研究者に、フォトンファクトリーの放射光を用いた研究の場や技術を提供してきました。そこから生まれた成果は、物質や生命の理解を深めるとともに、私たちの生活を豊かにするためのテクノロジーにもつながっています。

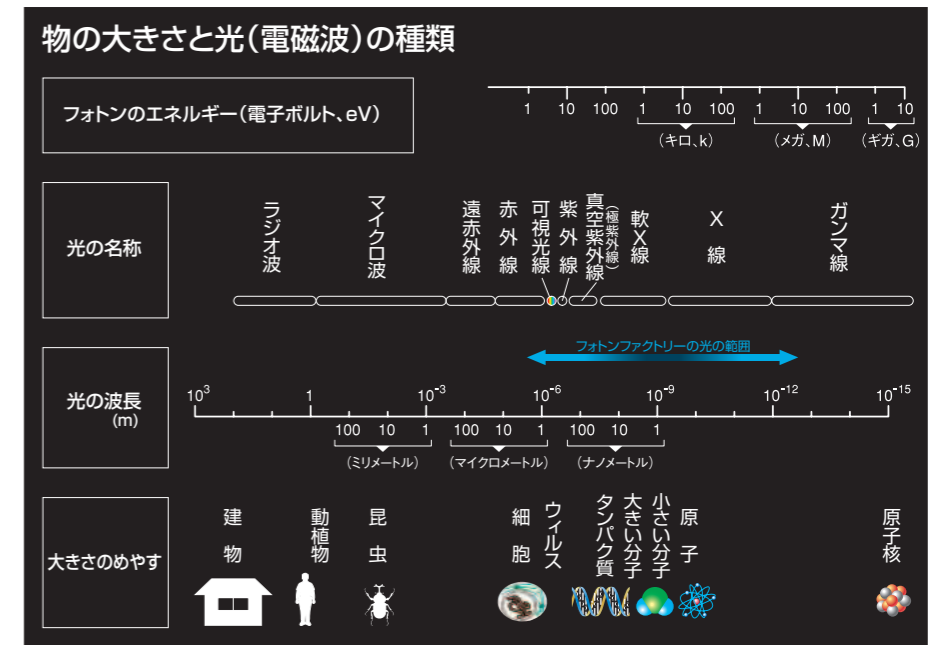
◆ フォトンファクトリーは、KEKという加速器科学の中核となる研究機関に所属する施設です。その利点を最大限に生かし、新しい加速器技術や測定器技術の開発を続けています。そして、これまでに見えなかったものを見えるようにする、さらに優れた「光」の工場へとその道を進めています。

## 極微の世界を見る「光」

放射光は、高エネルギーの電子加速器の中で電子が加速度を受けてその進行方向を変える時に放出される電磁波です。放射光は、私たちの目で捉えられる光「可視光線」よりもずっと広い波長（エネルギー）領域の光を発生します。

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・生命を原子のスケールで捉えることができません。波長の短い（エネルギーの高い）光を使うことによって、分子や原子といった極微の世界を初めて観ることができます。また、この光は物質の内部の電子を外に飛び出させるのに十分なエネルギーを持つため、物質の中での電子のふるまいを捉えることができます。

放射光は指向性が高い明るい光（高輝度）で、微小な試料でも精度よく測定ができます。また、偏光性、パルス性などの性質を持ち、分子の方向性や結合状態を調べたり、物質の変化する様子を捉える研究にも威力を発揮します。



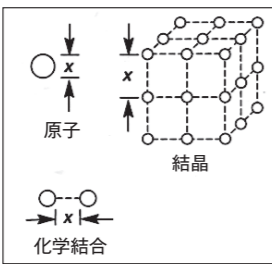
# 物質を観る

MATERIALS SCIENCE

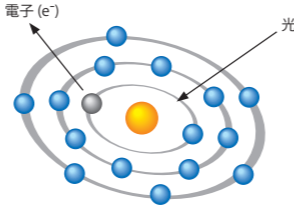
人間はもの(=物質)の性質を巧みに利用して生活を豊かにしてきました。物質があらゆる多彩な性質の起源は、物質がどのような原子からできているか、その原子がどのように並んでいるか、物質中を電子がどのように運動しているか、などに深く関係しています。

## 物質のナノスケールの姿を観る放射光

原子の大きさ、化学結合の長さ、原子間距離。これらはだいたい0.1nm(ナノメートル=10億分の1メートル)からその数倍程度です。このようなナノスケールの姿を観るためには、同じぐらいの波長を持つ光が必要です。



物質に光をあてると、物質中の電子がエネルギーを受け取って飛び出したり(電離)、より高いエネルギーの状態に変化したり(励起)します。物質が、どのようなエネルギーの光を吸収して、どんな電子が放出されるのか、といったことを調べると、物質の性質を知ることができます。原子の軌道電子の結合エネルギーは、約10eV~100keVです(eV:電子ボルト=電子1個が1Vの電位差で得るエネルギー)。

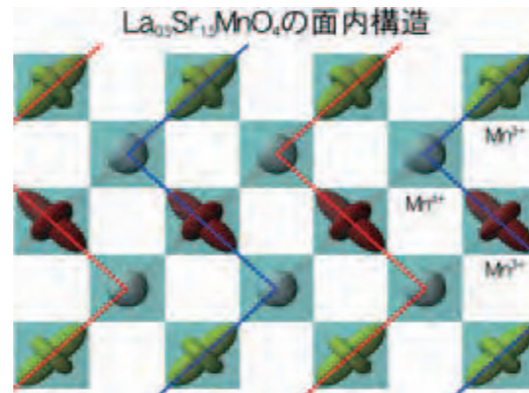


## ● 巨大磁気抵抗効果・電気磁気効果の起源を探る



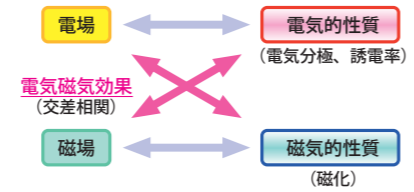
巨大磁気抵抗効果(GMR)は、物質に磁場をかけると電気抵抗が大きく変化する性質です。この性質を持つ素子を読み取りヘッド(GMRヘッド)に使ったハードディスクは、小さな領域に磁気的に記録された情報を大きな電気抵抗の変化で読み出すことができるため、小型・大容量化が飛躍的に進みました。フォトンファクトリーで生まれた「共鳴X線散乱法」は、物質中の電子の軌道の

情報を調べる優れた研究手段です。物質にあてたX線があるエネルギー以上になると電子が軌道の間を飛び移る現象(軌道間遷移)を利用したこの手法は、任意のエネルギーのX線を高い強度で取り出すことのできる放射光によって初めて実現できます。この方法で、巨大磁気抵抗効果が起こるしくみを解明し、より優れた素子の開発に役立つ情報が得られました。



巨大磁気抵抗効果を示すマンガン酸化物の電子状態。価数の違う原子(Mn<sup>3+</sup>とMn<sup>4+</sup>)が規則的に並び、Mn<sup>3+</sup>は電子軌道に方向性をもつ。このような状態を電荷の軌道秩序状態と呼ぶ。この電子軌道の形から、電子の遷移しやすい方向(赤と青の線)がわかる。

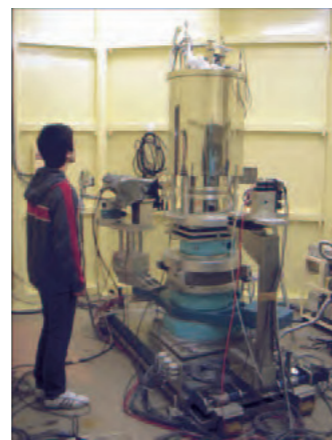
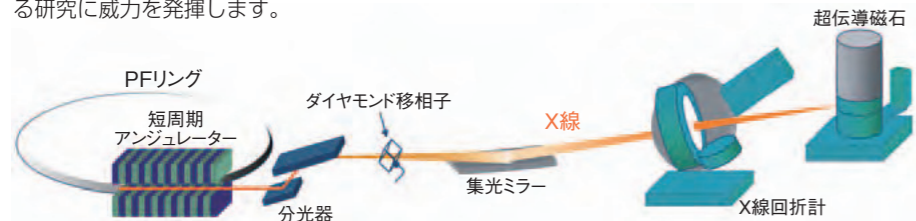
最近注目されている「マルチフェロイック物質」は、電場により磁気的性質を、また磁場により電気的性質を変えることができる物質です。マルチフェロイック物質を用いると、電場によって磁気メモリーに書き込みができるようになるなど、これまでにない全く新しいしくみの低消費電力のメモリー素子への応用が可能になります。この性質(電気磁気効果)を起こすマルチフェロイック物質は非常に限られています。その起源を放射光を用いて探ることにより、電気磁気効果を起こす新しい物質を設計することが可能になります。



## 強磁場下で物質の構造と機能を調べる

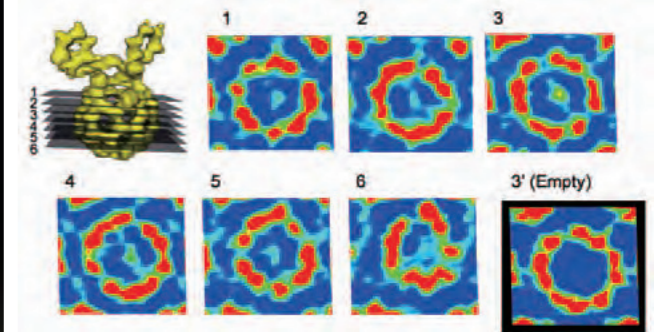
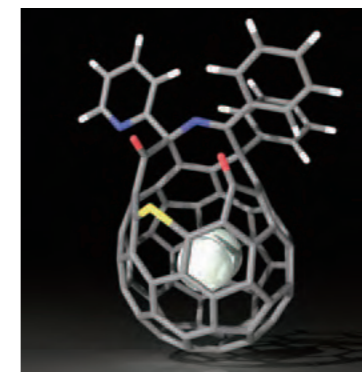
～構造物性研究用ステーション BL-3A～

物質の構造を調べるにはX線回折計という精密な装置を使います。写真は非常に強力な磁場を発生する超伝導マグネットを搭載した回折計で、磁場を加えたことによる物質の構造や電子軌道の変化を捉えることができます。巨大磁気抵抗効果や電気磁気効果などの物性の起源を調べる研究に威力を発揮します。



## ● フラレンの中の水素を観る

サッカーボール型の分子、フラレン。中に原子や分子を閉じ込めたり、ふたを開けて自由に分子が入り出せるものもあります。この大きな開口部を持つフラレンは、高温高压の水素ガスの中に入ると、効率100%で1個ずつ水素分子が入るといって驚くべき性質を持っています。フォトンファクトリーでは、精密なX線結晶構造解析により、水素分子がフラレンのちょうど真ん中に浮かんで存在していることを捉えることに成功しました。X線では水素のような軽い原子を捉えるのは困難ですが、放射光の高輝度、エネルギー可変といった特徴や、最先端の解析法によって、水素分子を鮮明に見ることができています。

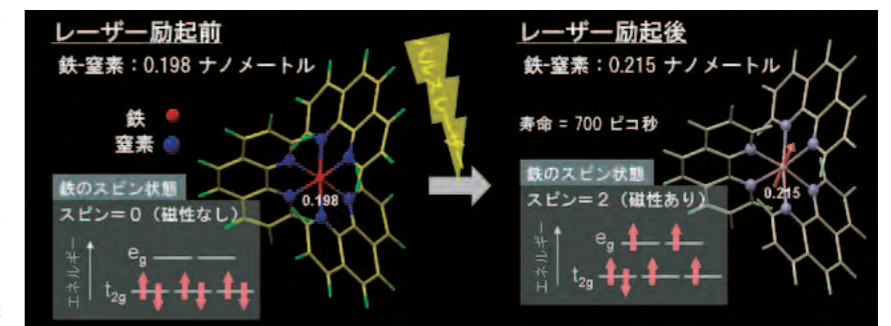


放射光で測定したフラレンの電子密度の断面図。赤・黄が電子密度の高いところ。水素を入れる処理を行ったものは中央に電子密度の高い部分が見えるが、処理を行わなかったもの(右下)は何も見えない。

## ● 100億分の1秒の分子の動きを観る

大強度パルスX線を発生するPF-ARは、100ピコ秒(100億分の1秒)のシャッタースピードを持つ分子動画カメラとして、物質が変化する様子を見ることが出来ます。

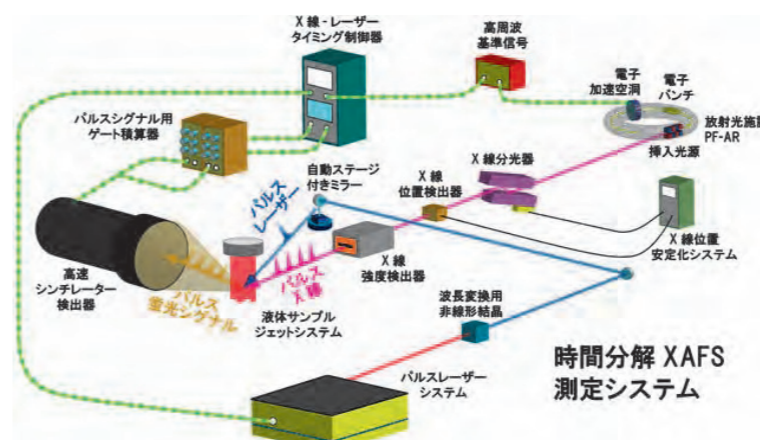
鉄フェナントロリン錯体という有機分子の溶液に、パルスレーザーで短い時間光をあてて光励起を起こしたときの分子構造と磁性的変化を観測しました。寿命700ピコ秒で鉄原子のスピンの状態が変化して磁性が出現していることを、これまで実現不可能であった空間精度と時間精度で捉えることに成功しています。このような研究は、光によって超高速で反応するメモリーやスイッチの基礎となります。



レーザー励起による鉄フェナントロリン錯体分子内の磁性と構造の変化。

## 極微の世界の高速カメラ

## ～時間分解実験ステーションAR-NW14A～



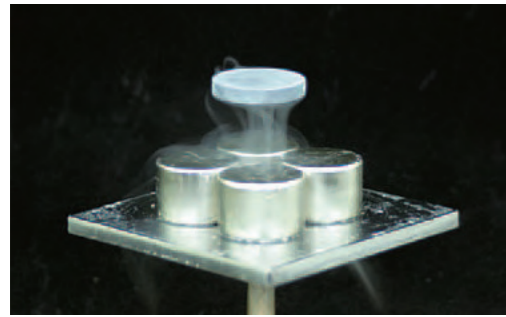
時間分解実験とは、刻々と変化する物質を時間を追って調べる実験手法です。この実験ステーションでは、主に「ポンプ-プローブ」という方法で実験を行います。「ポンプ」とは物質を不安定な状態に変化させる(励起する)ことで、強力なレーザーパルスで物質へ照射することにより実現します。「プローブ」は物質の状態を検出することで、X線パルスを使います。X線回折法、X線溶液散乱法、X線吸収分光法(XAFS)などさまざまな測定手法を用いて、多彩な物質の分子動画を撮影しています。

# 新材料を創る

物質の性質の起源を知ることは、新しい機能性材料を設計するためにも重要な情報です。設計した物質を評価し、さらに改良していくことによって、意図した性質が発現するように自由に新材料を創り出すことができます。

NEW MATERIALS

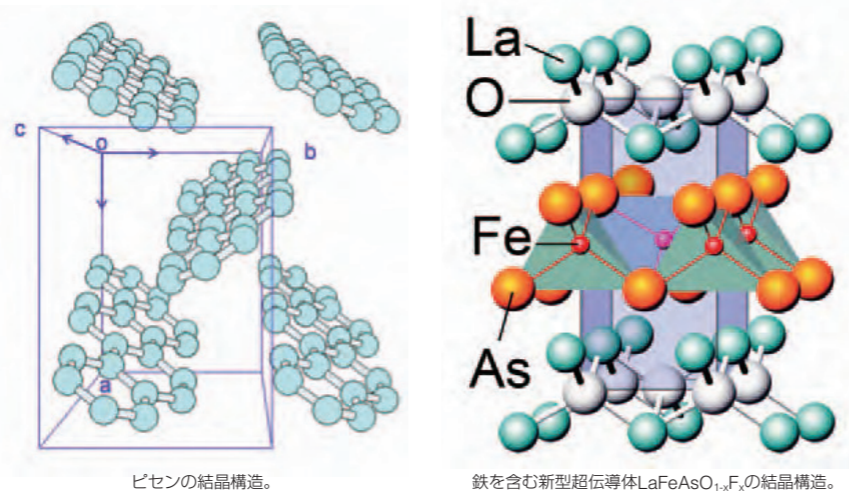
## ● 高温超伝導を目指す



超伝導とは、物質を超低温にしたときに電気抵抗がゼロになる現象です。強い磁場を作ることができる超伝導磁石はすでに多くの分野で使われていますが、より高い温度で超伝導を起こすことができれば、コストが大幅に削減でき、応用分野が飛躍的に広がります。

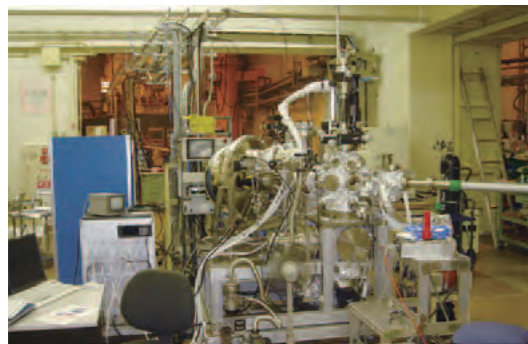
2008年に、これまでに知られていた超伝導体とは全く異なる鉄化合物が高温で超伝導を示すことが発見され、大きな注目を集めました。また、2010年には、ピセンという芳香族の分子に金属をドーブ（少量の不純物を添加すること）したものが、有機物としては世界最高温度で超伝導体になることが発見されました。日本の科学者によって発見されたこれらの新しい物質が、どのようなしくみで超伝導を示すのか、フォトンファクトリーで研究が進められています。

現在までに多くの鉄系超伝導体が見つっていますが、それらに共通して、鉄原子の磁気的性質「スピン」が超伝導の発現に重要であることが、放射光を用いた角度分解光電子分光法という手法で明らかになりました。有機超伝導体ピセンでは、ドーブした金属はピセン結晶層と同じ平面内にあることがX線結晶構造解析で確かめられています。新しい超伝導体の電子状態や構造を調べることで、超伝導を起こすしくみが明らかになり、より高い温度での超伝導体の発見につながります。



## 新材料の電子状態を詳細に調べる

～高分解能角度分解光電子分光装置 BL-28A～  
～有機・生体分子研究用実験ステーションBL-13A～

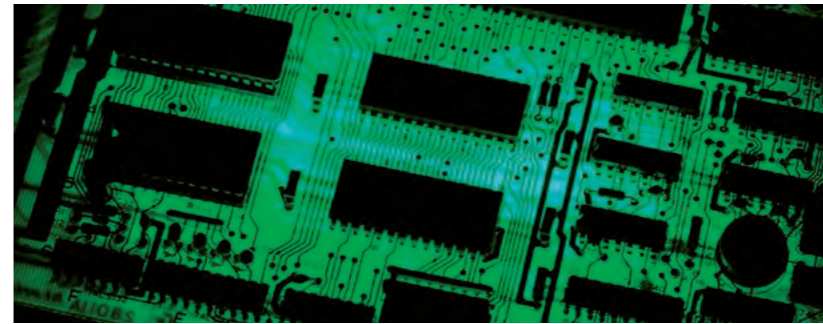


光電子分光装置は、物質に光をあてて放出された電子（光電子）のエネルギーを調べることで、物質中の電子状態を調べるための装置です。放出された光電子のエネルギーを精度良く測定するための大きな半球型のアナライザーが特徴的です。左の写真の角度分解光電子分光装置は、電子のエネルギーの他に電子の運動量も測定することができ、超伝導や磁性など物質のさまざまな性質を解明する強力なツールです。



2009年に完成した新しい実験ステーション、BL-13Aは、有機分子や生体分子に含まれる軽い元素の電子状態を調べるのに最も適した30～1000 eV（電子ボルト）のエネルギー領域の光を用いています。このエネルギー領域はフォトンファクトリーが最も得意とする領域で、世界最高水準の性能を誇ります。有機エレクトロルミネッセンス（EL）、有機トランジスタ等のデバイスの高性能化、希少資源代替材料の開発などに威力を発揮します。

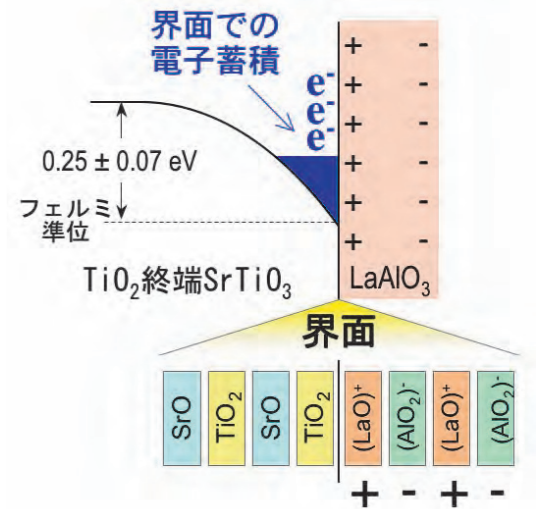
## ● 半導体素子の表面・界面を観る



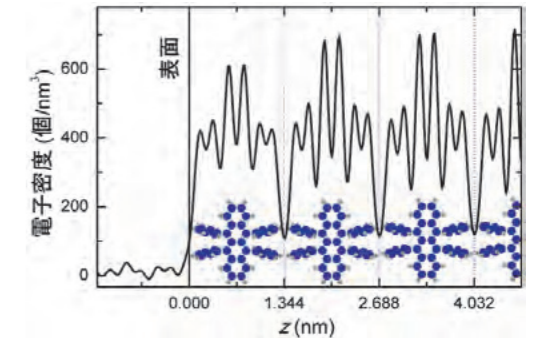
トランジスタなどの半導体素子は、p型半導体とn型半導体の接合でできています。このように2種類の物質が接している「界面」や、物質の一番外側の「表面」の電子状態は、その素子の性能にとって非常に重要です。2004年に、ある2種類の絶縁体を接合させたときに、その界面が金属になるという現象が発見されました。光電子分光法という手法によって、この現象が、基板上に成長させた絶縁体薄膜中の電気双極子（電荷の偏り）によるものであることが確かめられました。電荷の偏った酸化物を用いることにより、界面に大きな電圧をかけられる優れた素子設計の可能性を拓きました。



有機ELや有機トランジスタなど、さまざまな有機半導体が目されています。有機物は軽量でコストが安く、柔軟性に富むので、薄くて折り曲げることのできるディスプレイや、印刷で大量生産できる集積回路など、これまでの常識をくつがえす新しい製品の開発が期待されています。ルブレンという有機半導体単結晶の表面の状態が放射光を用いたX線回折実験により明らかにされました。表面に露出している分子が少し違う構造を取っていることが、原子の大きさの10分の1ほどの精度で見えています。

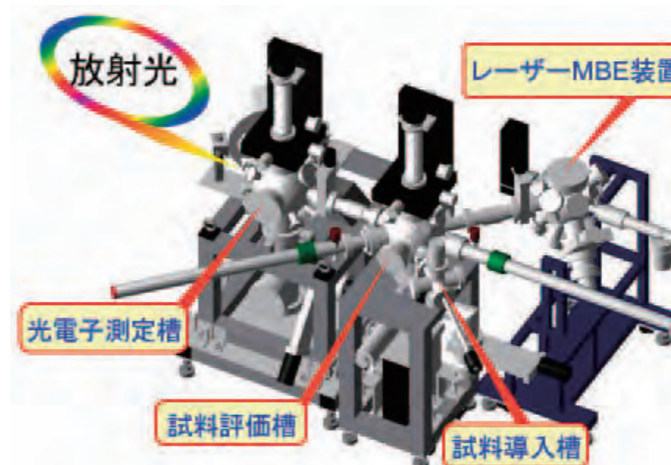


アルミニウム酸ランタン（LaAlO<sub>3</sub>）中の電荷の偏りによりチタン酸ストロンチウム（SrTiO<sub>3</sub>）中の電子が界面に引き寄せられている。



ルブレン単結晶の表面近傍における電子密度分布。

## 表面・界面を作りながらその場で測定する ～レーザー分子線エピタキシー光電子分光複合装置～



レーザー分子線エピタキシーは、半導体の結晶成長に使用される技術で、超高真空中で基板結晶の上に原子1層ずつ結晶を積み上げていきます。この装置では、半導体の表面・界面の状態をすぐにその場で調べられるように、レーザー分子線エピタキシー装置と、放射光によって電子状態を調べるための光電子分光装置を組み合わせたものです。試料を大気にさらすことなく、原子1層のレベルで制御された精密な半導体結晶の性質を調べることができます。

# 生命を観る

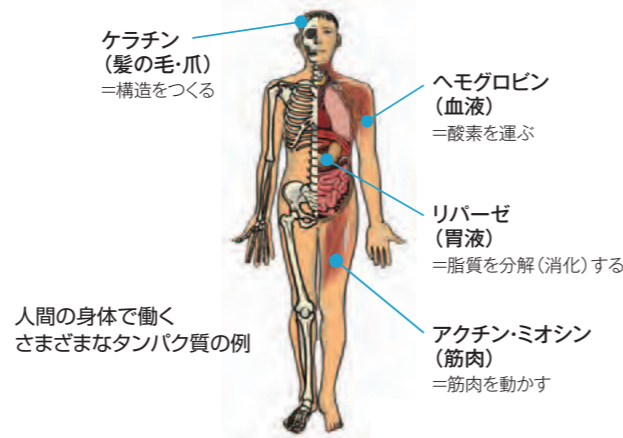
LIFE SCIENCE

タンパク質は生命活動をつかさどる巨大な分子であり、さまざまな種類のタンパク質が生体の中でいろいろな役割を担っています。タンパク質の機能を理解することは生命のしくみを知ることに繋がります。

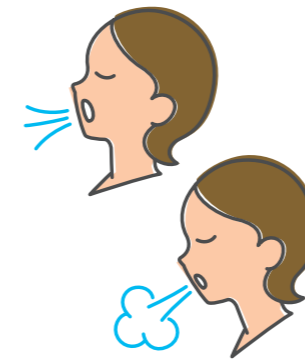
## 生命を担う分子機械「タンパク質」の立体構造

タンパク質は、アミノ酸が鎖のようにつながってできており、それが折り畳まれた複雑な立体構造をとって働いています。たった20種類のアミノ酸から成るタンパク質は、折り畳まれることにより、さまざまな機能を持った分子機械となります。

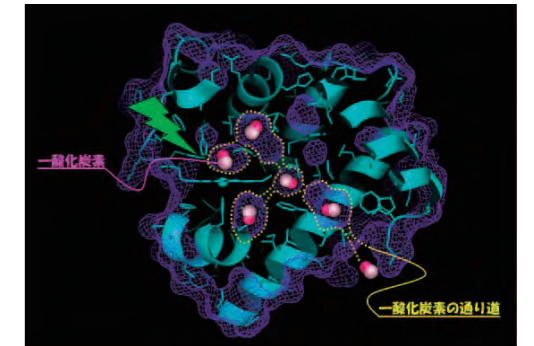
ヘモグロビンには酸素を運ぶための「ポケット」があり、筋肉ではアクチンとミオシンが構造変化による「引っ張り合い」によって筋収縮が起こっています。タンパク質が動くしくみの鍵は、その立体構造にあります。放射光はタンパク質の立体構造を観るにはなくてはならない道具です。



## ●タンパク質の「動き」を観る



タンパク質は「生きている」分子で、そのかたちを変えながら働いています。放射光による時間分解X線構造解析法という新しい手法を使って、生体中と同じ反応を起こしながらタンパク質の立体構造の変化を捉えることができるようになりました。筋肉中で酸素貯蔵を担うタンパク質、ミオグロビンが、あたかも「深呼吸」するように時々刻々と構造変化をすることで、気体分子を移動させていることを初めて観測しました。



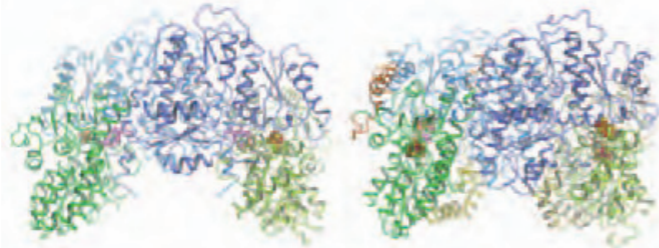
ミオグロビン分子内で、気体分子（ピンク）が移動する道すじ。分子中にある「穴」の形状が変形することによって気体分子が穴の間を飛び移っている。

## ●葉緑素が緑色になるしくみを捉える

日光に当てずに育てるとダイズは「もやし」に、アスパラガスは「ホワイトアスパラガス」になります。しかし、裸子植物や光合成細菌など、日光が当たらなくても緑色になる植物もあります。この、暗所でも葉緑素を合成できるタンパク質（暗所作動型プロトクロロフィリド還元酵素）の立体構造がフォトンファクトリーで明らかにされ、ある種の細菌が持つ窒素固定酵素（空気中の窒素分子をアンモニアに変換する）と良く似ていることがわかりました。葉緑素という複雑な分子の合成と、窒素分子をアンモ



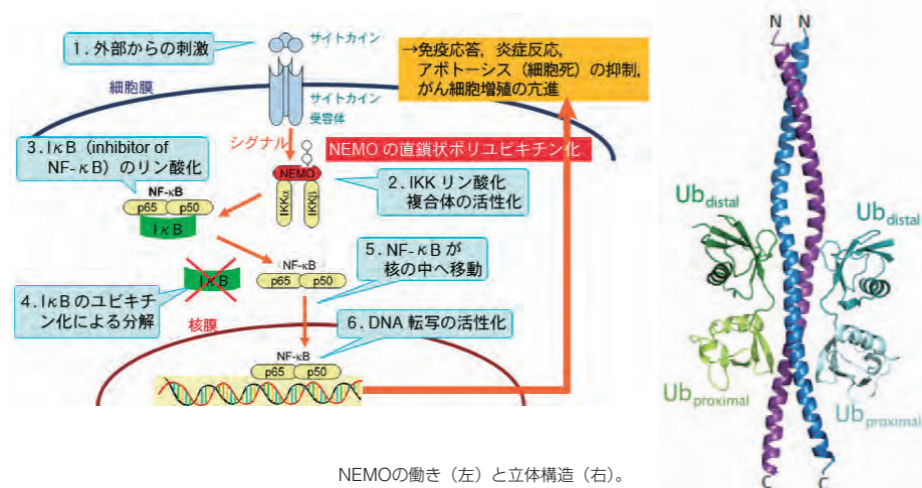
ニアに変換する窒素固定。両者は扱う分子の大きさや複雑さが全く違うにもかかわらず、同じようなしくみで反応を進めることがわかりました。2つの酵素は同じ起源を持ち、一方は光合成、他方は窒素固定に関わるように進化を遂げていったと推測され、生物進化の面からも注目されています。



暗所作動型プロトクロロフィリド還元酵素（左）と窒素固定酵素（右）の立体構造。

## ●免疫反応のしくみを解き明かす

長いらせん状の形が特徴的なタンパク質 NEMOは、免疫反応のスイッチを入れるしくみとして注目されているDNA転写因子「NF-κB（エヌエフ・カッパービー）」を活性化させるタンパク質です。NEMOによるNF-κBの活性化には、これまでによく知られていた種類のポリユビキチン鎖ではなく、新規の「直鎖型」のポリユビキチン鎖との結合が必要であることがフォトンファクトリーで調べた立体構造からわかりました。NF-κBは細胞のがん化にも深く関わっているため、抗がん剤の開発へつながることが期待されています。



NEMOの動き（左）と立体構造（右）。

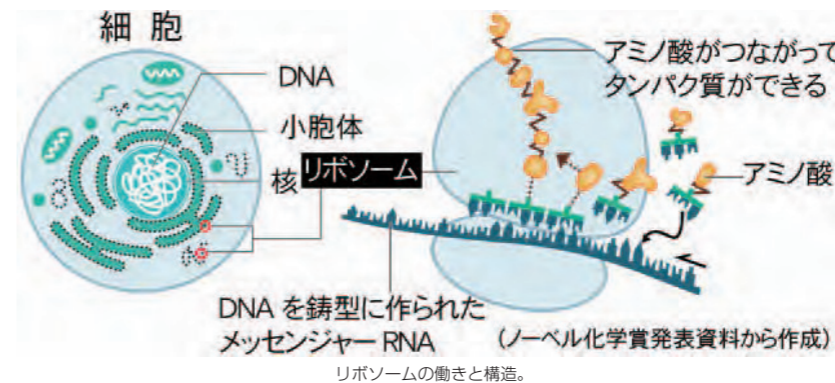
## ノーベル化学賞受賞者アダ・ヨナット博士とフォトンファクトリー



アダ・ヨナットKEK特別栄誉教授 (2010年3月、つくば国際会議場にて)

イスラエルの女性科学者アダ・ヨナット博士は、細胞のタンパク質工場である「リボソーム」の構造と機能に関する研究で、2009年のノーベル化学賞を受賞しました。リボソームは、タンパク質やRNAが複雑に組み合わさった巨大な複合体で、その構造を調べるのは困難だと多くの研究者が考えていました。1987年、世界最高性能のタンパク質結晶構造解析装置がフォトンファクトリーにできたと思った博士は、その装置が公開されるとすぐに、利用申請の書類を送り、研究をスタートさせました。まだインターネットなどなかった時代です。博士は複雑なリボソームの構造を見るためにさまざまな工夫を重ねました。そのひとつが、強力な放射光による結晶の損傷を防ぐためにリボソームの結晶を低温に冷やしながら測定する方法です。博士の開発した低温の技術は、今ではタンパク質の構造を捉える研究にはなくてはならないものとなっています。

この功績を讃えて、KEKは2010年3月にヨナット博士に特別栄誉教授の称号を授与しました。



ヨナット博士が開発した低温窒素ガス吹き付け装置。

# 病気と戦う

MEDICAL SCIENCE

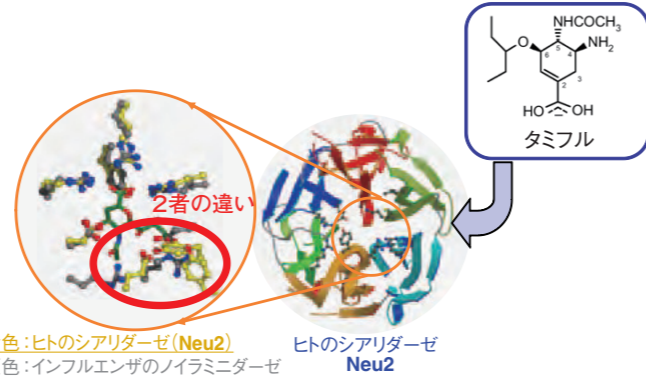
薬のターゲットとなるタンパク質の精密な立体構造を知ることは、副作用の少ない、優れた医薬品の開発につながります。また、放射光の特性を活かした新しい医療用画像診断の開発により、今までは見えなかった組織や病巣を捉えることが可能になります。

## ● 新型インフルエンザに立ち向かう

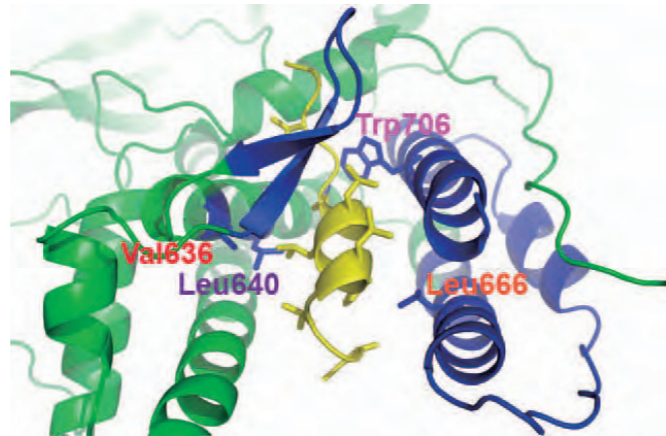
2009年に大流行した新型インフルエンザはH1N1型と言われました。H1, N1というのは、インフルエンザウィルスの表面にあるタンパク質で、タミフルは「N」(ノイラミニダーゼ)に作用する薬剤です。しかし、人間も似た構造のタンパク質を持っていて、タミフルが人間の正常なタンパク質にも作用してしまう「副作用」を起こすおそれがあることがフォトンファクトリーを用いた構造解析で明らかになりました。

副作用の少ない薬剤を作るためにはどうすれば良いのでしょうか？ 人間とウィルスのタンパク質のわずかな立体構造の違いを調べ、ウィルスのタンパク質にだけ作用する化合物を設計することが考えられます。このためには、放射光による精密な構造解析に基づいた創薬研究がますます求められます。

また、全く新しい作用機構を持つ抗インフルエンザ薬の開発につながる研究も行われています。インフルエンザウィルスの増殖に必要なRNAポリメラーゼの立体構造が解明され、増殖の鍵を握る部分の構造が精密に調べられました。この部分の構造は、これまでに発見されている多くのインフルエンザウィルスで共通に見られていて、多くのタイプのウィルスに効く薬を設計できる可能性があると考えられています。



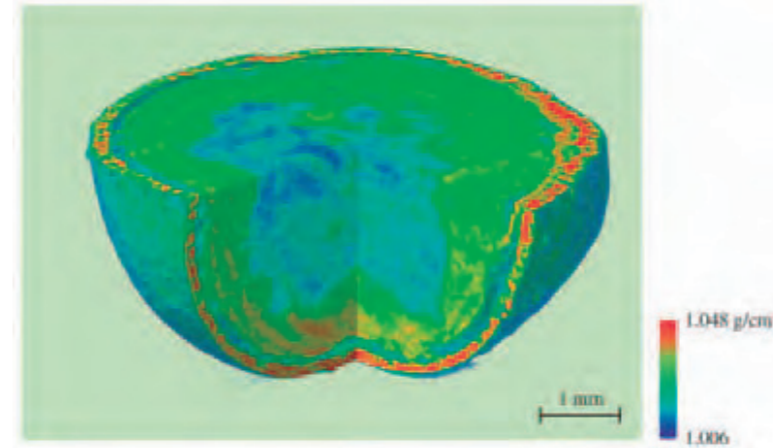
インフルエンザウィルスのノイラミニダーゼと、よく似たタンパク質である人間のシアリダーゼの立体構造の違い。わずかな違いを見分けて化合物を設計することが副作用の少ない薬剤開発につながる。



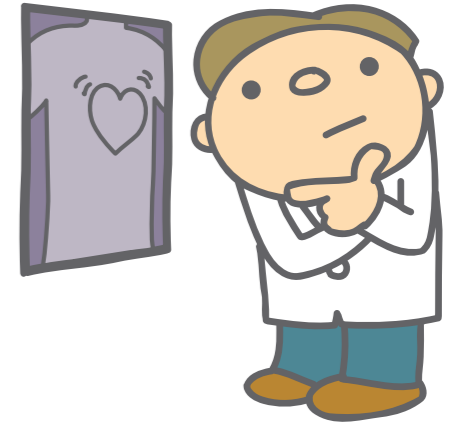
インフルエンザウィルスのRNAポリメラーゼは3つの部分(サブユニット)から構成される。サブユニットがお互いにつながる部分が、ウィルスの増殖の鍵を握っている。この部分の立体構造が精密に調べられた。

## ● 新しい原理で病巣を観る

病院で使われているX線撮影は、組織によってX線の吸収の度合いが違うことを利用しています。生体組織はX線の吸収によるコントラストがつけにくいので、X線の吸収の大きな造影剤(硫酸バリウムなど)が利用されています。これに対して、放射光の特徴を利用した新しい原理に基づくさまざまな画像診断法が開発されています。単色X線を利用した心臓診断システムや、X線の「波」としての性質を利用した位相コントラスト法、放射光が平行光であることを利用したX線暗視野法など、これまでに見えなかった組織や病変を捉える挑戦が行われています。



位相コントラストCTシステムで観察したヌードマウス表皮がん組織の三次元画像。がん組織の中心部分に密度の低い部分(青色)が広がり、抗がん剤投与によりがん組織が壊死していることがはっきり見えている。

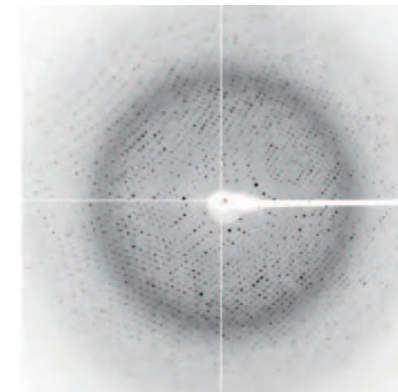


## 病気に関係したタンパク質の立体構造を観る

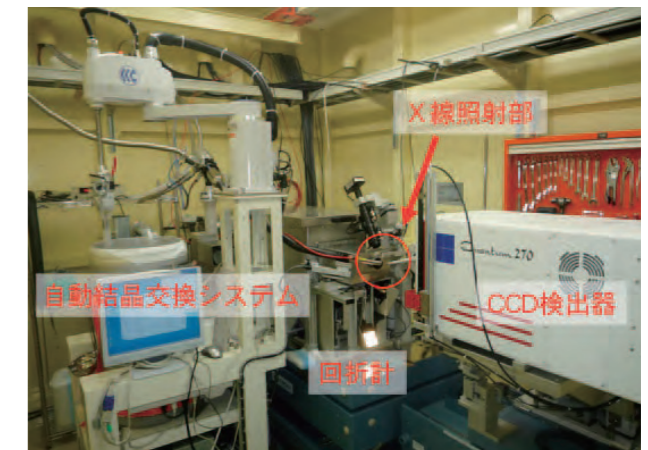
～創薬研究用タンパク質結晶構造解析ステーション AR-NE3A～

タンパク質の立体構造を調べるには、結晶化したタンパク質にX線をあてて、回折したX線を測定します。大きな結晶を作るのは非常に難しいので、小さな結晶でも測定できる輝度の高い放射光はタンパク質の構造解析にはなくてはならないものです。フォトンファクトリーにはタンパク質結晶構造解析用実験ステーションが5つあり、大面積の検出器や、高精度の回折計など、最新の技術により精密な構造解析ができるようになっています。

そのうちのひとつであるAR-NE3Aは、アステラス製薬株式会社の実験ステーションです。構造解析に基づいた薬剤設計では、標的となるタンパク質に対し、薬剤の候補となる多くの化合物との複合体の構造解析を行なう必要があります。迅速なデータ収集のための試料交換ロボットやソフトウェアが導入されています。



タンパク質のX線回折写真。タンパク質結晶中の多数の原子による回折X線が多数のスポットとしてあらわれ、まるで星空のようにみえる。このひとつひとつが原子の位置の情報を持っている。



AR-NE3Aに設置されている創薬研究のためのタンパク質結晶構造解析装置。



# 地球・惑星を観る

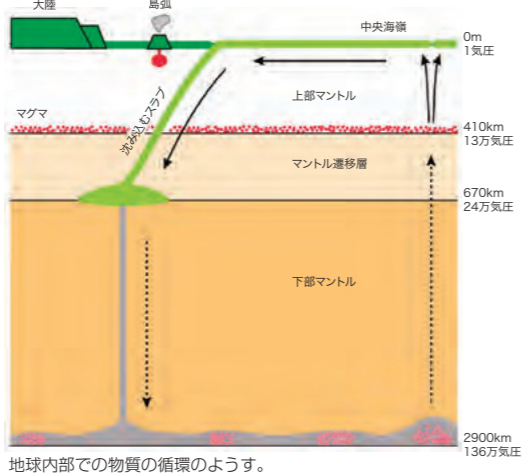
EARTH AND PLANETARY SCIENCES

地球の中心部は6000℃、360万気圧という高温高压の世界。地上では、極微小領域でなければ実現できない世界です。このような極微小領域での物質の構造を調べるには、高輝度光である放射光が必要です。この高輝度の光は、隕石や惑星探査機の回収試料などの少量で貴重な試料の分析にも重要な役割を果たします。

## ● 地球内部のダイナミックな反応を調べる

地球の内部では物質が絶えず循環しています。地球の内部で、物質がどのような状態で、どんな反応をしているかを知るために、地球深部と同じ高温高压状態を作り出し(ページ下の囲み記事参照)、マンツルの主成分のひとつであるガーネットの分解相転移の反応速度などが調べられてきました。

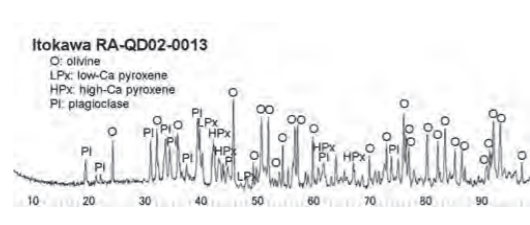
最近では、マグマの類似物質であるケイ酸塩ガラスの超高压下での構造解析によって、マンツル深部でのマグマの浮沈についての情報を得る研究が進められています。軽元素から構成され非晶質であるケイ酸塩ガラスはX線による構造解析は難しく、高度な技術開発により、さらなる高压領域での測定が可能になりつつあります。



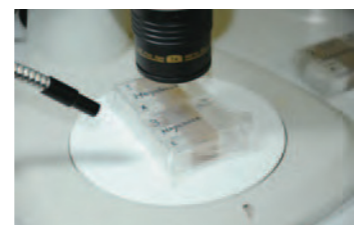
ガーネット。深紅色をした鉱物で、ザクロ石とも呼ばれる。

## ● 「はやぶさ」が回収した微粒子分析から宇宙史を観る

小惑星探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワから持ち帰った岩石質微粒子の初期分析が行なわれました。フォトンファクトリーでは、構成元素、構成鉱物とその結晶構造の情報を得るために、X線回折および蛍光X線分析が実施されました。イトカワ微粒子はLLコンドライト隕石に非常に近い物質であり、小惑星イトカワは太陽系の最も原始的な物質で構成されていることがわかりました。これらの情報から、イトカワ形成の歴史、そしてイトカワの今後を予測することが可能になります。



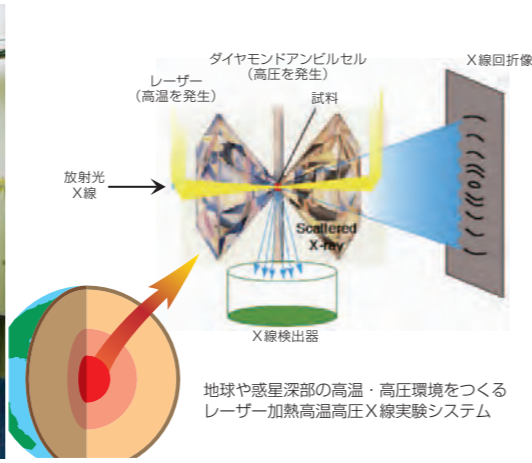
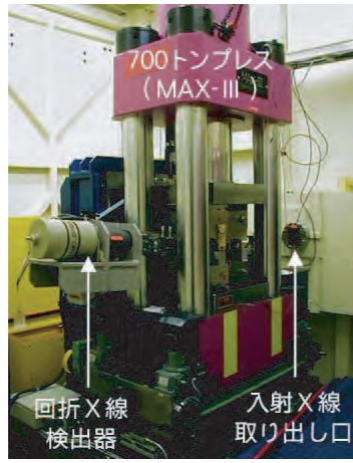
イトカワ微粒子のX線回折パターン。この粒子の主な構成鉱物はカンラン石(O)、カルシウムが少ない輝石(LPx)、カルシウムが多い輝石(HPx)、斜長石(Pl)。



フォトンファクトリーに到着した「はやぶさ」微粒子。

## 地球深部と同じ環境で物質の状態を調べる

地球の中心部の高温高压の世界では、岩石や鉱物も地上にある姿では存在できず、より密度の大きい別の構造に変化(相転移)し、その性質も地上とは違っています。しかし実際に地球の中心部まで穴を掘ってそれを観察することはできないので、硬い結晶であるダイヤモンドで試料を挟んだり(ダイヤモンドアンビルセル)、大きなプレスにより圧力をかけたりして、地球中心部と同じ高压状態を再現しています。また、レーザー光を試料部に照射することによって、1000度以上の高温状態を作り出しています。



圧力を発生させるプレス(上)とダイヤモンドアンビルセル(右)

# 環境を守る

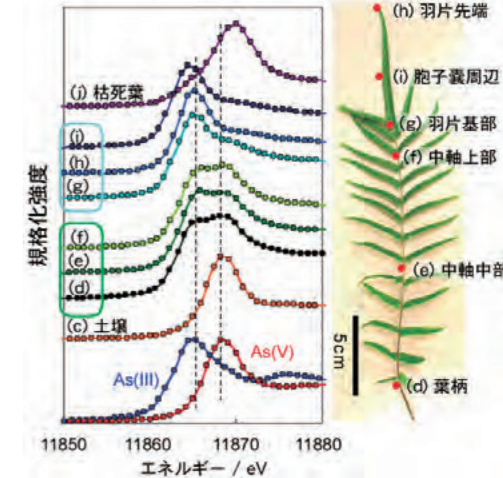
ENVIRONMENTAL SCIENCE

放射光は、わたしたちの環境を守る素材や技術の開発にも役立っています。また、環境の中に存在する微量成分の分析にも放射光が威力を発揮します。

## ● 植物が土壌中のヒ素を浄化するしくみを調べる

植物が根から水分や栄養分を吸収するしくみを利用して、土壌の有害物質を除去する技術をファイトレメディエーションと呼び、低コストで環境にやさしい技術として注目されています。すでに欧米で実用化されているモエジマシダは、高濃度でヒ素を吸収・蓄積する性質を持ちます。高輝度の放射光による小さなビームを用いて詳細に調べたところ、土壌中の5価のヒ素がシダの中で3価へと還元されていることがわかりました。ヒ素は、生体に含まれているリンと化学的挙動が似ていることから、リンとヒ素の化学形態や分布を明らかにすることにより、この植物がヒ素を蓄積するしくみに迫る研究が進められています。

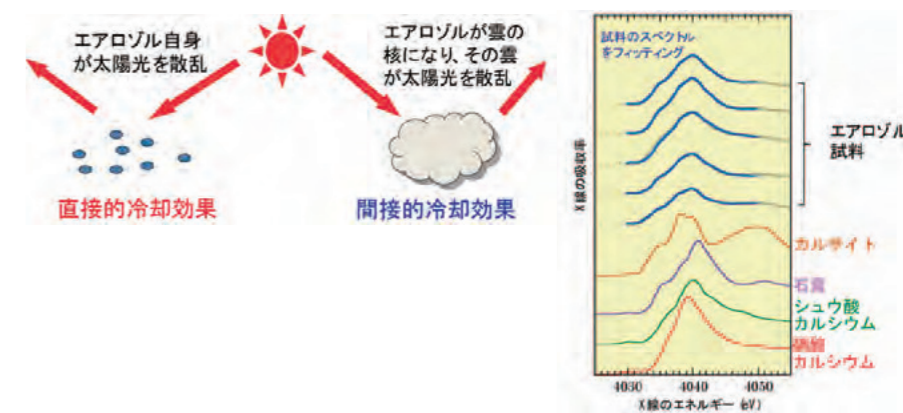
さまざまな有害物質の除去に実用的に使える植物を探したり、バイオエンジニアリングによりさらにすぐれた植物を作り出して行くときに、生きたまま重金属の分布や化学形態が測定できる放射光は有効な道具です。



シダのさまざまな部位で測定したヒ素の化学形態。

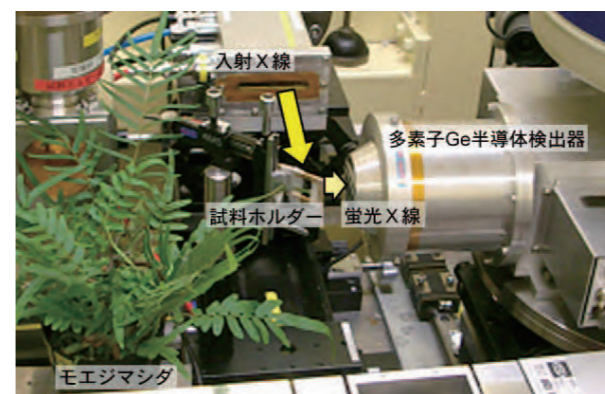
## ● 有機エアロゾルの分析から地球温暖化を正確に予測する

大気中を浮遊する微粒子「エアロゾル」の地球冷却効果には、それ自身が太陽光を遮る「直接的冷却効果」と、核になって雲を形成することによる「間接効果」の2種類が考えられていました。有機エアロゾルの主成分、シュウ酸の化学形態をXAFSで調べ、雲を作る能力が低い錯体化合物を形成していることがわかりました。この結果から間接的冷却効果は小さいことがわかり、正確な地球温暖化の予測に大きく寄与することになりました。



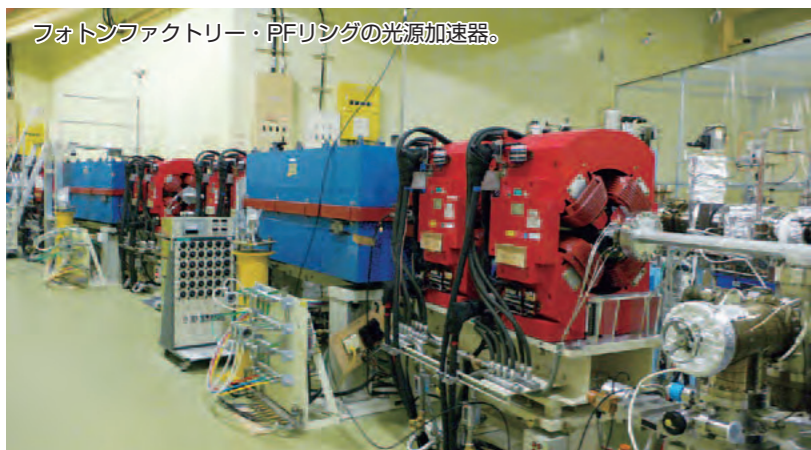
カルシウムのK殻吸収端XAFSによるシュウ酸カルシウムの同定。

## 微量の物質や化学反応を観る

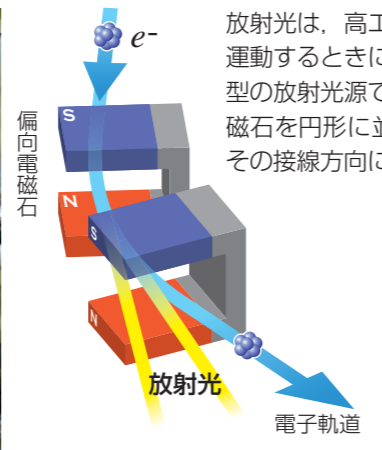


## ～X線吸収微細構造(XAFS)測定装置～

XAFS(ザフス、X-ray Absorption Fine Structure/X線吸収微細構造)とは、入射するX線のエネルギーを変えながら物質による吸光度を測定する実験方法で、物質の構造や化学状態を知ることができます。連続的なエネルギーのX線が得られる放射光はXAFSに最も適した光源です。分析する試料は結晶になっていなくても良く、微量な成分も感度良く測定できるので、最近では環境物質の分析にも良く使われるようになりました。また、反応の途中の状態を刻々と観測する方法として、時間分解XAFS法が開発され、化学反応を追跡するような実験に威力を発揮しています。



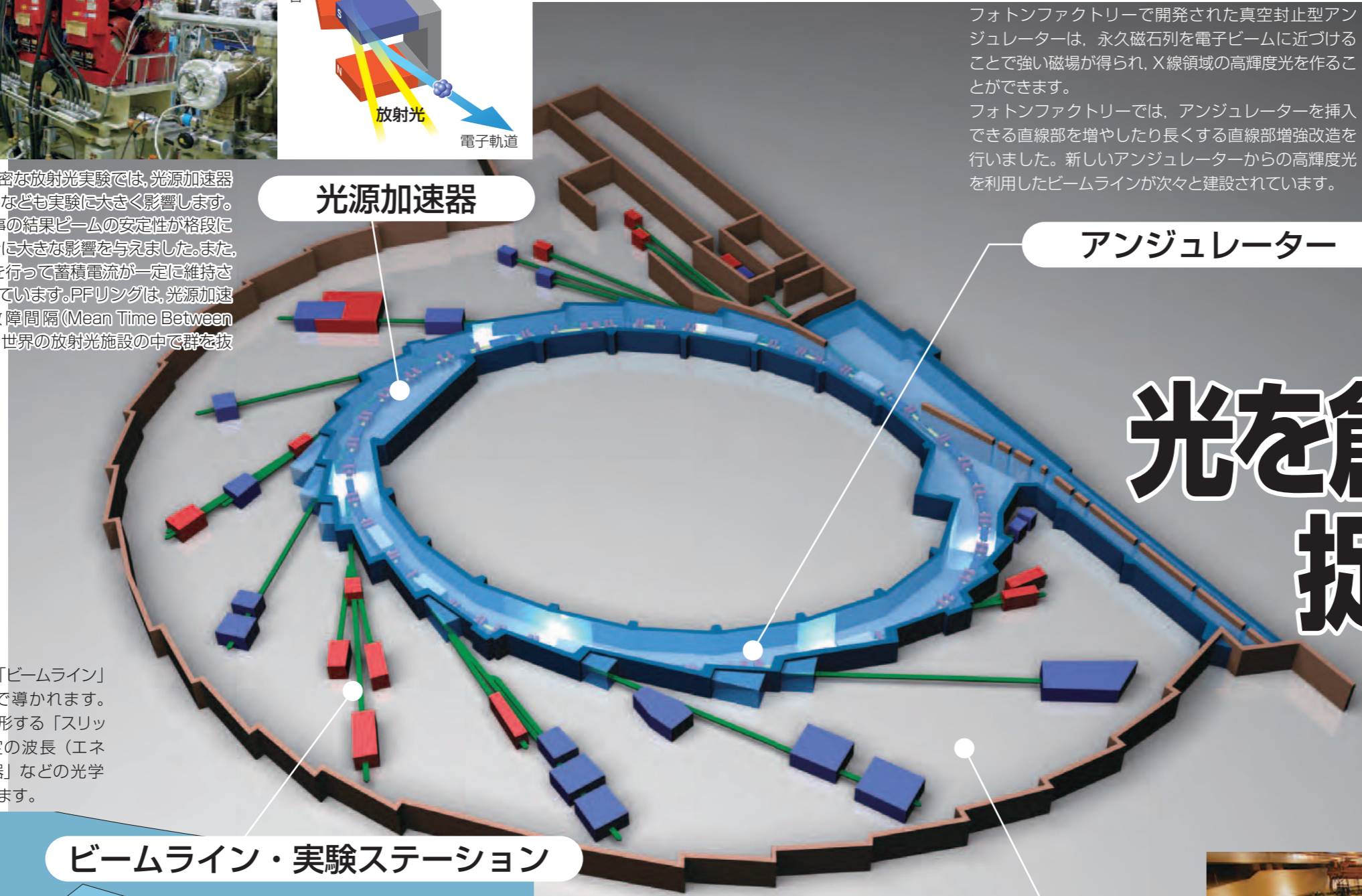
フォトンファクトリー・PFリングの光源加速器。



放射光は、高エネルギーの電子が磁場の中を運動するときに発生する電磁波です。リング型の放射光源では、偏向電磁石と呼ばれる電磁石を円形に並べて円形の電子軌道を作り、その接線方向に放射光を発生しています。

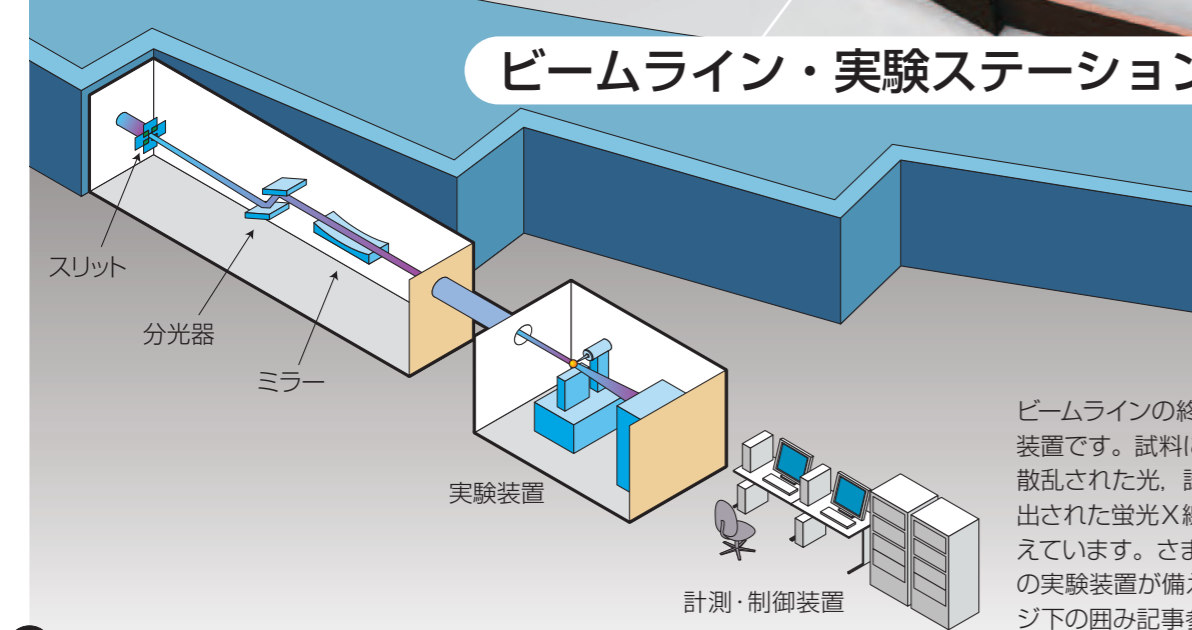
小さなビームを小さな試料に導く精密な放射光実験では、光源加速器自体の性能はもちろん、建物のひずみなども実験に大きく影響します。1990年のPFリング建物の断熱工事の結果ビームの安定性が格段に上がり、それ以降の光源加速器の設計に大きな影響を与えました。また、2009年からは、リングに常時入射を行って蓄積電流が一定に維持される「トップアップ運転」が定常化しています。PFリングは、光源加速器の信頼性の指標である「平均故障間隔(Mean Time Between Failures, MTBF)」が200時間超で、世界の放射光施設の中で群を抜いて最高の値を誇っています。

### 光源加速器

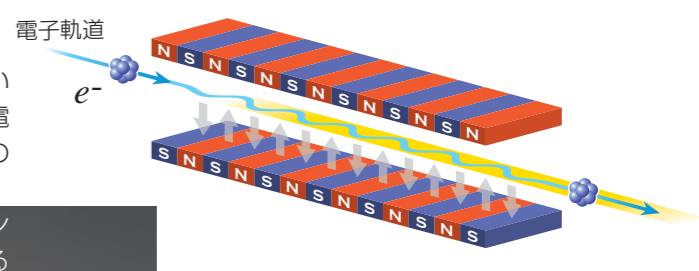


光源加速器から発生した放射光は「ビームライン」によってそれぞれの実験装置まで導かれます。ビームラインの途中には、光を成形する「スリット」、光を集める「ミラー」、特定の波長(エネルギー)の光を取り出す「分光器」などの光学系と呼ばれる装置が設置されています。

### ビームライン・実験ステーション



ビームラインの終端にあるのはさまざまな実験装置です。試料に放射光を当て、試料から回折・散乱された光、試料を透過した光、試料から放出された蛍光X線や電子などを「検出器」で捉えています。さまざまな研究に特化した最先端の実験装置が備えられています(P.3~12, ページ下の囲み記事参照)。



永久磁石の列が交互にならんだアンジュレーターという装置を電子ビームの軌道に挿入すると、蛇行した電子から放出される光どうしが干渉して、エネルギーのそろった輝度の非常に高い光が得られます。

フォトンファクトリーで開発された真空封止型アンジュレーターは、永久磁石列を電子ビームに近づけることで強い磁場が得られ、X線領域の高輝度光を作ることができます。

フォトンファクトリーでは、アンジュレーターを挿入できる直線部を増やしたり長くする直線部増強改造を行いました。新しいアンジュレーターからの高輝度光を利用したビームラインが次々と建設されています。

### アンジュレーター



調整中の真空封止型アンジュレーター。

# 光を創る・捉える技術

### 実験ホール

リング型の光源加速器の外に広がる、実験ステーションが立ち並ぶ広い空間、実験ホールは、放射光を用いた研究の現場です。

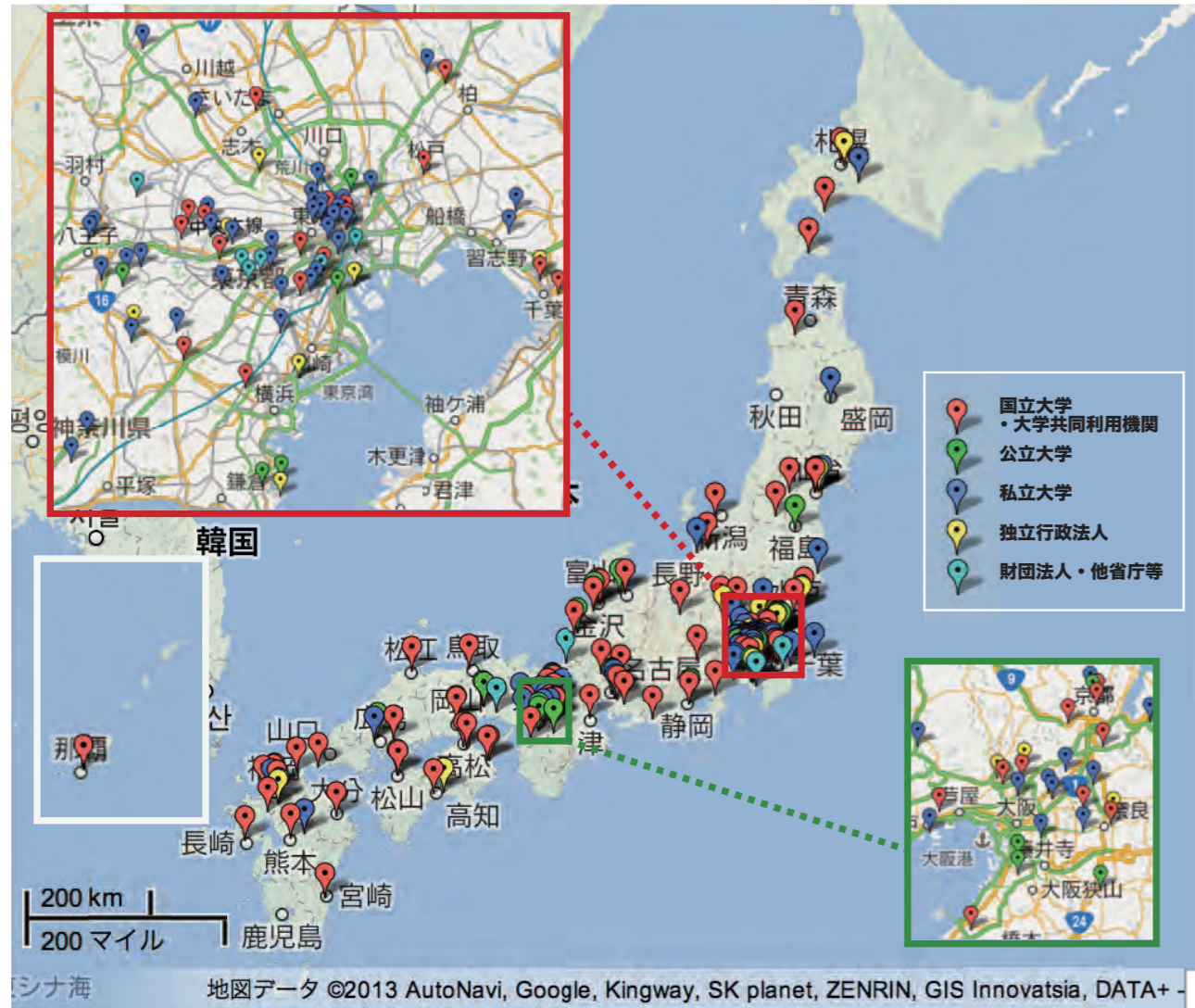




# 共同利用

フォトンファクトリーは、大学共同利用機関法人・高エネルギー加速器研究機構（KEK）内にある研究施設です。大学共同利用機関とは、個々の大学では維持が難しい大きな設備や、共有することによって有効に使われる情報等の集約場所として設置されている機関です。申請された実験課題は、放射光共同利用実験審査委員会（PF-PAC）で審査され、採否が決定されます。採択された課題は、無償で実験設備を利用できる他、規定の範囲で旅費が支給され、KEK内の宿泊施設（有料）、図書室などの設備が利用できます。多くの分野の研究に利用されるフォトンファクトリーは、KEKの中でも共同利用者の数が特に多く、年間の実数で3500名を超える研究者が利用しています。

【問い合わせ先】 研究協力課 共同利用支援室 共同利用係 E-mail: kyodo1@mail.kek.jp



# 企業等の利用

共同利用の他にも、企業等が利用できるさまざまなプログラムが用意されています。年間50社以上の企業がフォトンファクトリーを利用しています。

**共同研究：**企業等の研究者とフォトンファクトリーの職員が、共通の課題について相互に研究者、研究費、研究設備等を提供しあい、密度の高い共同研究を行います。

**施設利用：**所定の施設利用料をお支払いいただくことにより、成果の公表をせずに、研究・研修・講習等の目的のために利用することができます。

**フォトンファクトリーの戦略的産業利用：**平成21年度より文部科学省の補助事業「先端研究施設共用促進事業」として、放射光を用いた研究を始めようという産業界を支援しています。

【問い合わせ先】  
研究協力課 産学公連携・知財係  
E-mail: kenkyo2@mail.kek.jp

# 国際協力

フォトンファクトリーの利用は国際的にも開かれていますが、多くの海外からの研究者が共同利用研究のため来訪しています。

2009年からはインド政府科学技術省（DST）による専用ビームラインが稼働しており、インドの研究者による放射光利用研究が行われているほか、インドの若手研究者の育成にも貢献しています。フォトンファクトリーには、1992年から2012年度末まで、20年以上にもわたってオーストラリアによる専用ビームラインが稼働していました。このビームラインからは多くの成果が生まれただけでなく、培われた研究技術や人材育成は、オーストラリア放射光施設の設定につながっています。

フォトンファクトリーは、国際会議やワークショップ、若手研究者育成スクールなどを通じて、世界中の放射光研究者コミュニティと協力しています。その一つの例が中東の放射光研究拠点としてヨルダンに建設予定の放射光施設SESAMEであり、研究者育成スクール開催や、中東の若手研究者の受け入れなど、さまざまな支援をしています。

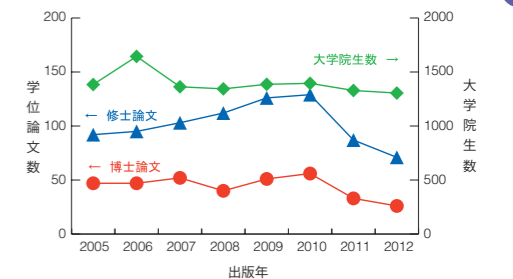


インドDSTビームライン BL-18B

# 大学院教育

総合研究大学院大学（総研大）は、大学共同利用機関の高度な研究環境を活用した、わが国初の大学院大学です。フォトンファクトリーでは、同大学高エネルギー加速器科学研究科・物質構造科学専攻、加速器科学専攻の大学院生が研究指導を受けています。総研大以外の大学の大学院生を受け入れる特別共同利用研究員制度や、連携大学院制度などもあります。フォトンファクトリーを利用する共同利用者の中には多くの大学院生が含まれています。多くの修士論文、博士論文が、フォトンファクトリーを用いた研究から生まれています。

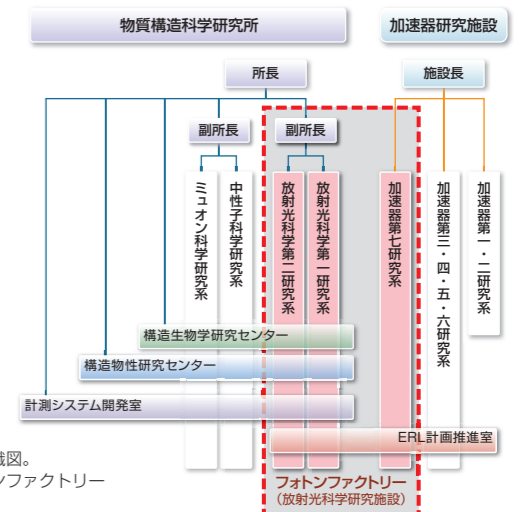
【問い合わせ先】  
研究協力課 大学院教育係 E-mail: kyodo2@mail.kek.jp



フォトンファクトリーを利用している大学院生の数と、修士・博士論文数。(2011年度は年度途中までの集計データになっています)

# フォトンファクトリーの組織

フォトンファクトリーは、放射光を利用する物質・生命科学研究に関する部門である物質構造科学研究所・放射光科学研究系（第一および第二の2系から成る）と、放射光源加速器に関する部門である加速器研究施設・加速器第七研究系から構成されています。それぞれ、物質・生命科学、加速器科学のエキスパートから成る組織のもとで、高度な研究や技術開発を可能とする組織となっています。



フォトンファクトリーの組織図。点線で囲んだ部分がフォトンファクトリー（放射光科学研究施設）。

## フォトンファクトリーを共同利用している機関（平成24年度、日本国内のみ）

- 【国立大学・高専・大学共同利用機関】** 北海道大学、室蘭工業大学、北海道教育大学、東北大学、弘前大学、山形大学、東京大学、東京工業大学、お茶の水女子大学、群馬大学、茨城大学、埼玉大学、横浜国立大学、千葉大学、筑波大学、筑波技術大学、電気通信大学、東京医科歯科大学、東京学芸大学、東京農工大学、総合研究大学院大学、高エネルギー加速器研究機構、名古屋大学、静岡大学、愛知教育大学、岐阜大学、金沢大学、三重大学、山梨大学、信州大学、新潟大学、長岡技術科学大学、富山大学、福井大学、名古屋工業大学、情報・システム研究機構（国立遺伝学研究所）、自然科学研究機構分子科学研究所、岡崎統合バイオサイエンスセンター、京都大学、大阪大学、京都工芸繊維大学、神戸大学、奈良女子大学、奈良先端科学技術大学院大学、北陸先端科学技術大学院大学、岡山大学、広島大学、山口大学、鳥取大学、島根大学、愛媛大学、香川大学、徳島大学、高知大学、九州大学、九州工業大学、熊本大学、佐賀大学、大分大学、宮崎大学、長崎大学、琉球大学
- 【公立大学】** 福島県立医科大学、茨城県立医療大学、横浜市立大学、首都大学東京、静岡県立大学、石川県立大学、福井県立大学、富山県立大学、名古屋市立大学、大阪市立大学、大阪府立大学、奈良県立医科大学、兵庫県立大学、京都府立大学、広島市立大学、東京都立産業技術高等専門学校
- 【私立大学】** 千歳科学技術大学、いわき明星大学、岩手医科大学、東北学院大学、帝京大学、学習院大学、昭和大学、慶應義塾大学、昭和薬科大学、工学院大学、上智大学、国際基督教大学、星薬科大学、埼玉工業大学、文京学院大学、創価大学、早稲田大学、中央大学、東海大学、東京理科大学、東邦大学、日本医科大学、日本大学、法政大学、北里大学、自治医科大学、立教大学、東京都市大学、城西国際大学、東京慈恵会医科大学、東京農業大学、東京電機大学、東京工科大学、日本女子大学、杏林大学、明星大学、東京薬科大学、明治大学、千葉科学大学、女子栄養大学、名城大学、藤田保健衛生大学、新潟工科大学、関西医科大学、同志社大学、大阪電気通信大学、立命館大学、関西学院大学、近畿大学、兵庫医療大学、京都産業大学、摂南大学、岡山理科大学、福岡大学
- 【独立行政法人】** 宇宙航空研究開発機構、産業技術総合研究所、日本原子力研究開発機構、農業・食品産業技術総合研究機構、農業環境技術研究所、農業生物資源研究所、物質・材料研究機構、国立科学博物館、国立環境研究所、放射線医学総合研究所、理化学研究所、海洋研究開発機構、医薬基盤研究所
- 【財団法人・他省庁他】** NHK放送技術研究所、国立感染症研究所、防衛大学校、(財)原子力環境整備促進・資金管理センター、(財)電力中央研究所、(財)微生物化学研究会、(財)総合科学研究機構（CROSS）、都立産業技術研究センター、(財)材料科学技術振興財団、(財)石油エネルギー技術センター、(財)名古屋産業科学研究所、(財)高輝度光科学研究センター、(財)ひょうご科学技術協会、(財)若狭湾エネルギーセンター、兵庫県立先端科学技術支援センター、(財)佐賀県地域産業支援センター、(社)バイオ産業情報化コンソーシアム、茨城西南医療センター病院



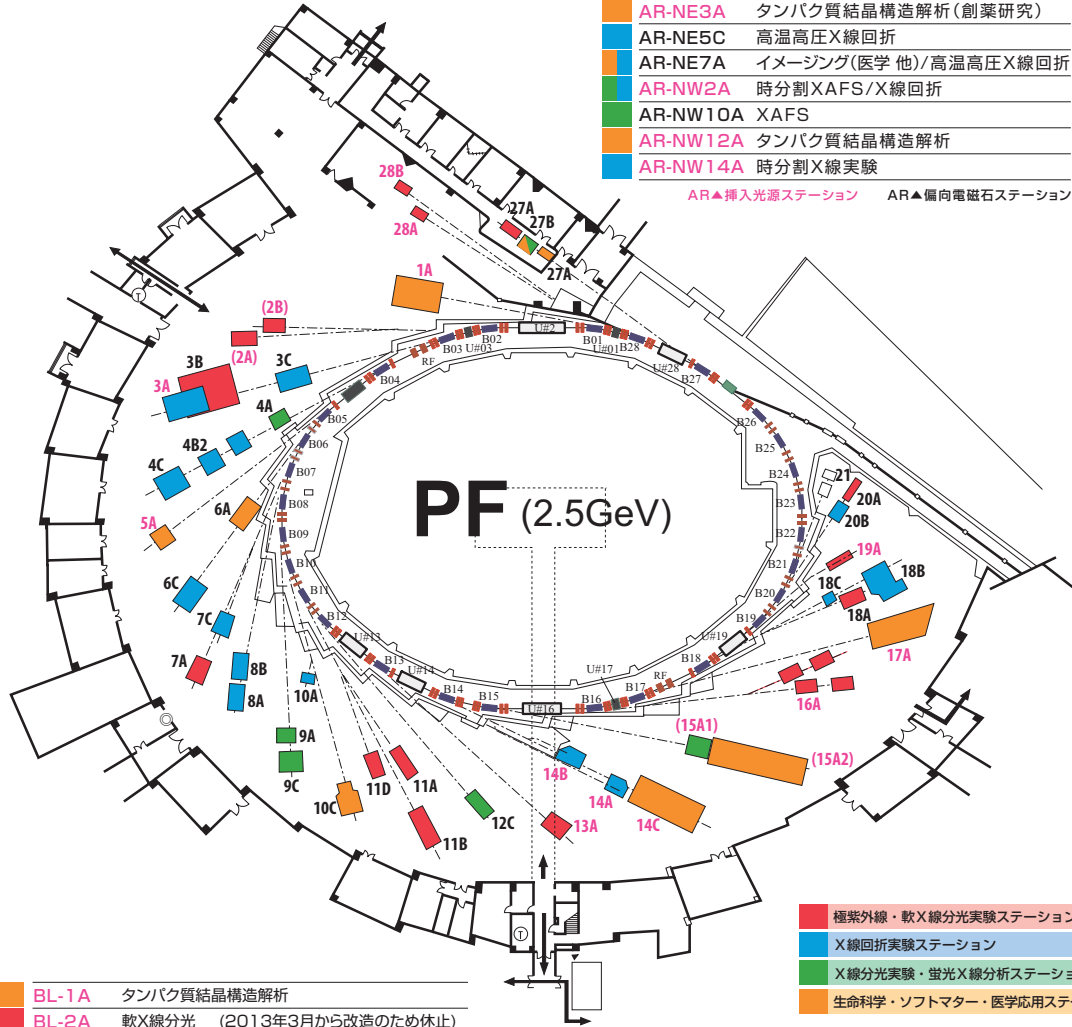
# フotonファクトリーの 実験ステーション



**PF-AR**  
(6.5GeV)

- AR-NE1A 高温高压X線回折
- AR-NE3A タンパク質結晶構造解析(創薬研究)
- AR-NE5C 高温高压X線回折
- AR-NE7A イメージング(医学 他)/高温高压X線回折
- AR-NW2A 時分割XAFS/X線回折
- AR-NW10A XAFS
- AR-NW12A タンパク質結晶構造解析
- AR-NW14A 時分割X線実験

AR▲挿入光源ステーション AR▲偏向電磁石ステーション



**PF** (2.5GeV)

- 極紫外線・軟X線分光実験ステーション
- X線回折実験ステーション
- X線分光実験・蛍光X線分析ステーション
- 生命科学・ソフトマター・医学応用ステーション

- BL-1A タンパク質結晶構造解析
- BL-2A 軟X線分光 (2013年3月から改造のため休止)
- 2B 軟X線分光 (2013年3月から改造のため休止)
- BL-3A 構造物性:X線回折-磁場中X線回折
- 3B 角度分解光電子分光
- 3C X線光学素子評価/白色磁気回折
- BL-4A 蛍光X線分析-マイクロビーム
- 4B2 高分解能粉末X線回折
- 4C 構造物性:X線回折
- BL-5A タンパク質結晶構造解析
- BL-6A X線小角散乱
- 6C X線回折-散乱
- BL-7A 軟X線XAFS, XPS【東大スベクトルセンター】
- 7C 異常散乱-汎用ステーション
- BL-8A 多重極限条件下精密構造解析
- 8B 極限条件下X線回折-構造解析
- BL-9A XAFS
- 9C XAFS
- BL-10A X線回折
- 10C X線小角散乱(溶液)
- BL-11A 軟X線分光
- 11B 表面EXAFS・軟X線分光
- 11D 軟X線光学素子評価

- BL-12C XAFS
- BL-13A 有機薄膜研究用光電子分光ステーション
- BL-14A 単結晶結晶構造解析/検出器開発
- 14B 精密X線回折
- 14C 医学応用X線汎用ステーション
- BL-15A1 XAFS (2014年公開予定)
- 15A2 X線小角散乱 (2014年公開予定)
- BL-16A 可変偏光軟X線分光
- BL-17A タンパク質結晶構造解析
- BL-18A 表面・界面光電子分光【東大物性研】 (2014年3月まで)
- 18B X線回折-散乱【インドDST】
- 18C 超高压下粉末X線回折
- BL-19A スピン偏極光電子分光【東大物性研】 (2014年3月まで)
- BL-20A 極紫外線分光
- 20B 白色X線トポグラフィー (2013年後半より)
- BL-21 モニター用ビームライン
- BL-27A 放射線生物-軟X線分光(非密封RI-核燃試料)
- 27B 放射線生物-XAFS(非密封RI-核燃試料)
- BL-28A 高分解能角度分解光電子分光
- 28B 高分解能可変偏光極紫外・軟X線分光

BL▲挿入光源ステーション BL▲偏向電磁石ステーション



大学共同利用機関法人  
高エネルギー加速器研究機構  
放射光科学研究施設



〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1  
Tel: 029-864-1171 (ダイヤルイン番号案内)  
029-864-5635 (フotonファクトリー事務局)  
Fax: 029-864-2801 (フotonファクトリー事務局)  
<http://pfwww.kek.jp/indexj.html>



2013年3月発行