

SPring-8



# SPring-8

放射光利用研究促進機構

財団法人 高輝度光科学研究センター

Japan Synchrotron Radiation Research Institute



## はじめに

放射光は、物質の解析、分析などの画期的な手段として、材料科学、地球科学、生命科学、環境科学及び医学利用など様々な分野で、学術研究・産業応用に広く利用され、今後も更なる発展が期待されています。

SPring-8は、世界最高性能の放射光を発生することができる大型の研究施設で、平成3年から日本原子力研究所と理化学研究所が共同で建設を開始しました。その後、約6年の歳月をかけて完成し、平成9年10月から広く開かれた共同利用施設として供用が開始されました。多くの利用者がここに集まり、21世紀を担う最先端の研究が進められています。本施設の運営は、SPring-8の共同利用の促進のため、国から「放射光利用研究促進機構」に指定された財団法人高輝度光科学研究センターが行っています。



### SPring-8って何?

SPring-8は科学の光ともいえる「放射光」を利用して、科学の研究や技術の開発を行う施設で、その性能は世界一です。民間企業・大学・官公庁など国内外の諸機関が様々な研究開発に利用しています。





平成15年9月撮影

### Super Photon ring-8 GeV

SPring-8という名前(愛称)は、Super Photon ring-8 GeV (スーパー・フォトン・リング・8ジエブ)に由来しています。  
 Photon = 光子(光のつぶ)  
 GeV = ギガ電子ボルト(電子の運動エネルギーの単位)

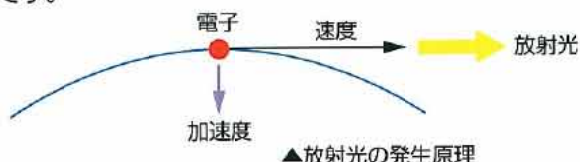


# 放射光は未来の光

## ◆放射光とは

ほぼ光速で直進する電子が、その進行方向を磁石などによって変えられた際に発生する電磁波を放射光と呼び、1947年に電子シンクロトロンで初めて観測されました。放射光は、電子のエネルギーが高いほど、指向性の良い明るい光となり、また電子のエネルギーが高く、進む方向の変化が大きいほど、X線などの短い波長の光を含むようになります。

電子は負の電荷をもっているためその周りに電場をつくっていますが、これは仮想の光子を雲のようにまとっていると考えられます。高エネルギーの電子が磁場で曲げられると仮想の光子が振り落とされて現実の光子となって放出されます。これが放射光です。



▲放射光の発生原理

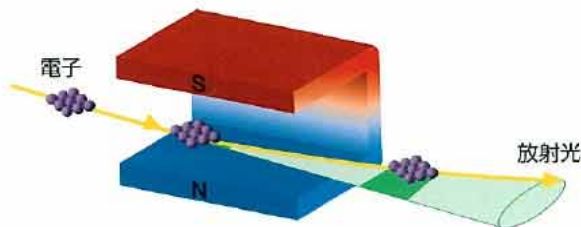
## ◆放射光を発生させるための磁石

電子の進行方向を変えるために用いる磁石のタイプとしては、電子をリング状の加速器に閉じこめるために必要な偏向電磁石と、特定の形に組み合わせた磁石（アンジュレータ、ウィグラー）の2種があり、これらは電子の進路に挿入して用いられるため、挿入光源とも呼ばれる）があり、それぞれ特徴ある放射光が得られます。

**偏向電磁石 (Bending Magnet)** ●赤外線からX線までの連続した波長の光（白色光）が得られます。

**アンジュレータ (Undulator)** ●電子を周期的に小さく蛇行させ、蛇行の都度発生する放射光を干渉させることにより、極めて明るい特定波長の光が得られます。

**ウィグラー (Wiggler)** ●電子を大きく複数回蛇行させることにより、より明るく波長の短い白色光が得られます。



▲偏向電磁石からの放射光



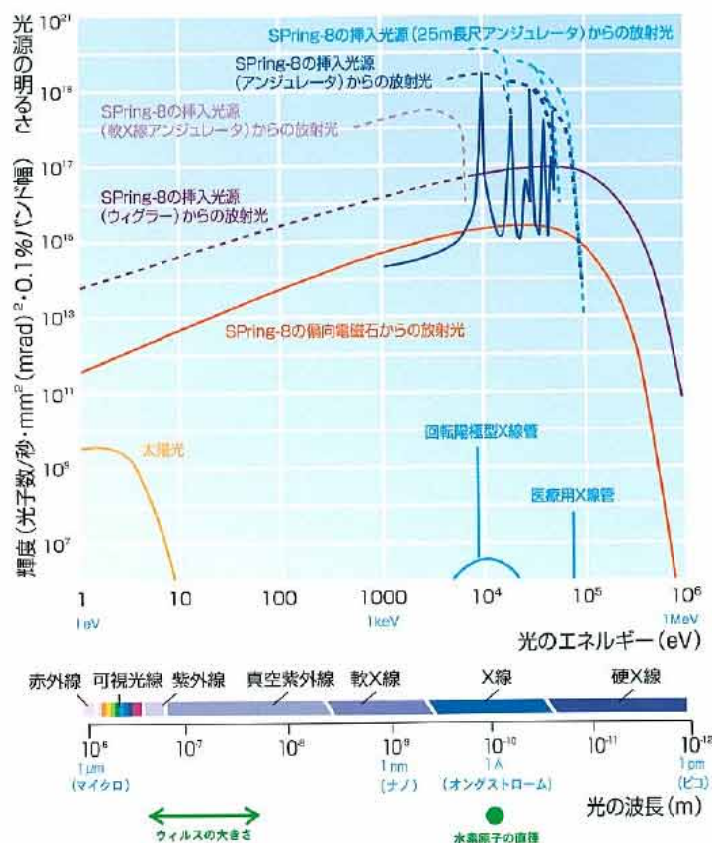
▲アンジュレータからの放射光

## ◆放射光の特徴

- 極めて明るい
- 細く絞られ拡がりにくい
- X線から赤外線までの広い波長領域を含む
- 偏光している
- 短いパルス光の繰り返し

## ◆SPring-8の放射光の波長と明るさ

SPring-8からの放射光の明るさ（輝度）は、従来のX線発生装置から得られる光の明るさに比べ、1億倍となっています。



## ◆SPring-8施設の特徴

- 硬X線（300 keV）から真空紫外線（300 eV）までの広い波長範囲で世界最高輝度、そのうえ、ガンマ線や赤外線も利用が可能です。
- 挿入光源を多数設置でき（最大38台）、これらの光を同時に利用可能です。
- 長い磁石列を持つ挿入光源（通常の4.5 mに対し25 m）の設置が可能です。
- 先端実験施設（医学利用実験施設、RI実験棟、長尺（1 km）ビームライン実験施設）まで導入された放射光の利用が可能です。
- 高エネルギーガンマ線専用のレーザー電子光ビームライン（LEP）を備えています。



## ◆第3世代の大型放射光施設

放射光の発生装置は、電子ビームを発生させ光速近くまで加速するための加速器（入射系加速器）と、その電子ビームを円形の軌道に貯めておくための加速器（蓄積リング）から成っています。大型放射光施設とは、電子ビームの加速エネルギーがおおよそ50億電子ボルト（5 GeV）以上の加速器を有する施設のことです。第3世代と呼ばれる放射光施設は、専用の加速器にアンジュレータ主体の挿入光源を多数設置できるように設計された施設のことです。大型のものは世界にSPring-8、APS、ESRFの3つがあります。

（第1世代は、放射光の専用施設ではなく、素粒子物理学研究用として建設された加速器により、放射光利用を行った時代のもの。第2世代は、放射光専用施設ですが、偏向磁石からの放射光利用が主なもの。）



SPring-8

## ◆第3世代の大型放射光施設とその他の主な放射光施設

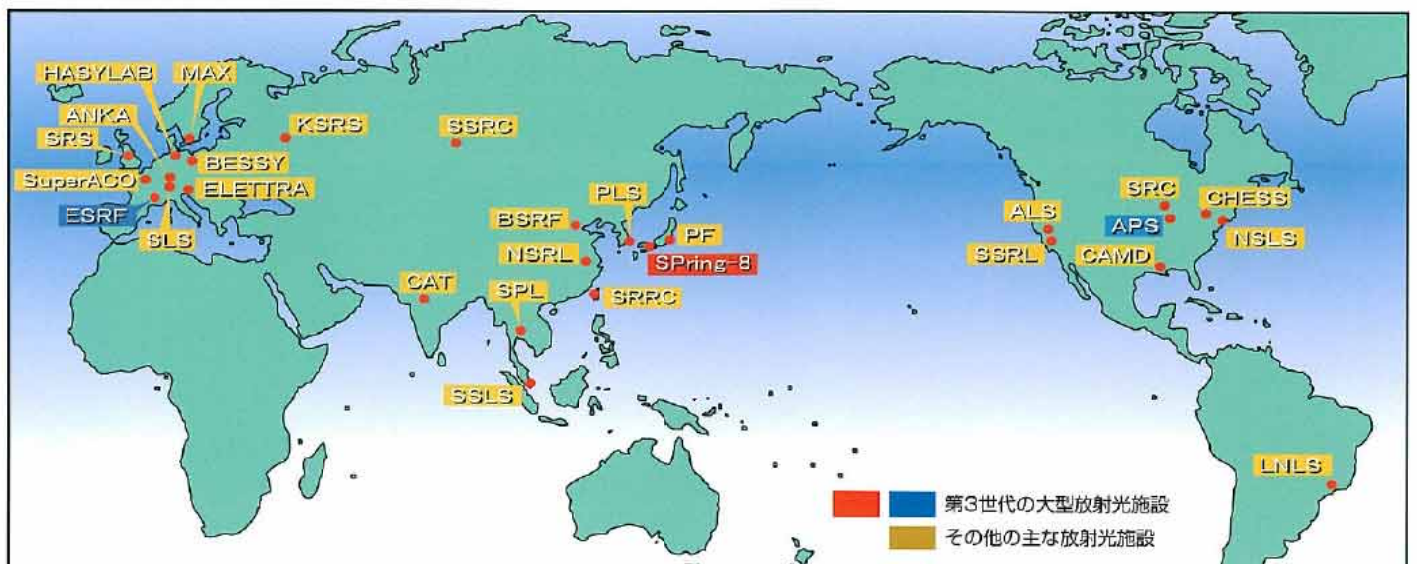
施設名称		SPring-8	APS Advanced Photon Source	ESRF European Synchrotron Radiation Facility
設置者 設置場所		原研・理研 播磨科学公園都市	米国エネルギー省 アルゴンヌ（米）	ヨーロッパ18カ国 グルノーブル（仏）
エネルギー ビームライン 周長		8(GeV) 62本 1436m	7(GeV) 68本 1104m	6(GeV) 56本 844m
年次 計画	準備	1987～1989	1986～1988	1986～1987
	建設 利用	1991～1997 1997～	1989～1994 1996～	1988～1994 1994～



APS



ESRF





# 放射光で先端研究

## ◆放射光を利用すれば

- 物質の種類や構造、性質を詳しく知ることができます。
- それらの様々な環境下での様子や時間変化の様子を詳しく知ることができます。
- 化学反応や物質変化の起動力として用いることができます。

放射光は以下の様な広範な分野で基礎研究から応用研究、さらに、産業利用に役立っています。

**生命科学への利用：** タンパク質巨大分子の3次元構造解析、非結晶生体材料の小角散乱、薬剤設計、新薬開発など

**物質科学への利用：** 先端材料の原子・電子の構造、極端条件下の材料物性、産業材料の評価、新物質創製と材料改質など

**地球科学への利用：** 地球深部物質の構造と状態、極限環境下の物性、隕石・宇宙塵の構造など

**環境科学への利用：** 生体試料中の環境汚染微量元素の分析、高性能電池材料の局所構造解析、環境浄化用触媒の分析など

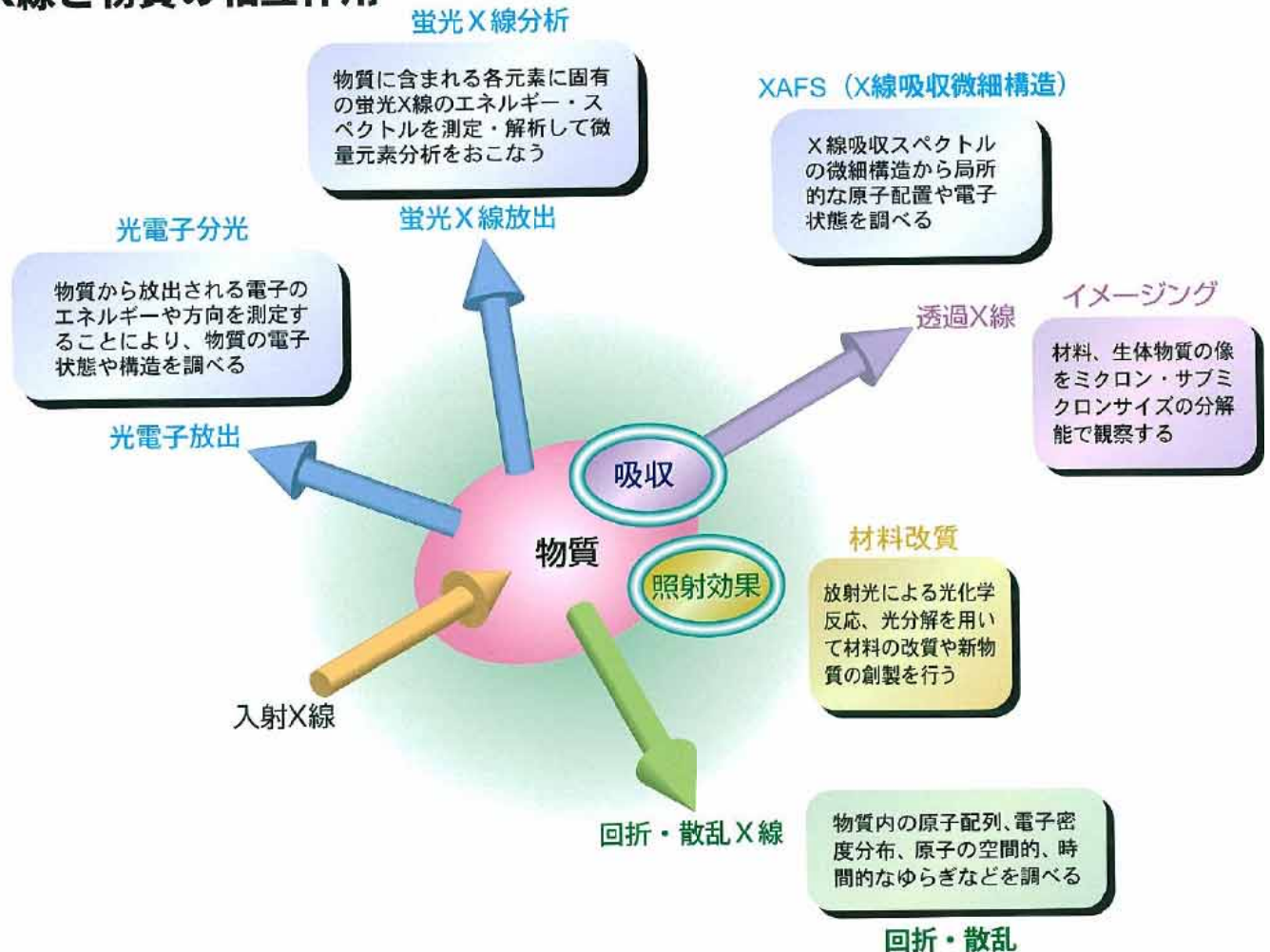
**医学への利用：** 微小血管造影法による腫瘍血管の観察、トモグラフィ、屈折コントラスト・映像法による呼吸器系疾患の観察など

**産業への利用：** 半導体用新酸化物材料の評価、ナノ材料の評価、微量元素分析、材料の断層観察、材料の歪み分布解析など

**核物理への応用：** レーザー電子光(逆コンプトン散乱)による中間子の生成・クォーク核物理など

このような科学分野を基盤とした**バイオテクノロジー、ナノテクノロジー、IT(情報技術)**、などの新技術は、21世紀初頭の新しい産業革命への先導となることが期待されます。放射光はこれらの技術発展に大いに貢献するでしょう。

## ◆X線と物質の相互作用





## ◆放射光(X線)を利用して行う研究

目 的	研究手段	研究対象例
原子配列・構造の解析	生体分子結晶構造解析	極微小タンパク質・タンパク質複合体の原子配列
	粉末結晶構造解析	無機・有機結晶構造、電子密度分布
	極端条件下X線回折	高圧・高温下での原子構造、地球深部物質構造
	時分割X線回折	動的構造変化、相転移
	表面回折	表面・界面構造、表面相転移、表面化学反応
	小角散乱	巨大分子の立体構造、溶液構造
	中角散乱	非晶質固体、液体・融体の局所構造
	散漫散乱	平均構造からのゆらぎ・乱れ
	X線光子相関法	スぺックル、不均一構造のゆらぎ
	XAFS	非晶質固体の局所構造
機能の解析、状態・成分の分析	歪・二次組織解析	残留応力分布、結晶方位分布
	光電子分光	高温超伝導体・磁性体、半導体の電子状態
	磁気散乱・吸収	磁気物性、スピン構造
	X線偏光解析	共鳴散乱、ATS散乱、軌道秩序
	XAFS	触媒作用、化学反応と中間体
	X線非弾性散乱	素励起・電子状態、フォノン分散関係
	蛍光X線分析	微量元素分析、微小領域の元素分布
	核共鳴散乱	超微細相互作用、局所フォノン密度
	原子・分子スペクトロスコピー	光励起化学反応、光分解過程、多価イオン生成
イメージング法による観察	軟X線発光分光	X線蛍光・ラマン散乱、電子状態
	屈折・位相コントラスト法	医学診断(がん、微小血管など)
	X線マイクロトモグラフィ	材料の断層観察
	X線顕微鏡	生体器官・細胞・ウィルス、材料・電子デバイスの観察
	X線トポグラフィ	格子欠陥、二次組織、結晶成長
	X線ホログラフィ	原子配置の立体映像化
材料の改質、新物質の創製	コヒーレントX線散乱顕微法	非結晶体の3次元可視化
	照射効果	内殻励起分子解離、固相成長、生物放射線効果
材料の改質、新物質の創製	光化学反応	X線CVD、超微細加工



# SPring-8での研究成果例

## 生命科学

### 生体分子結晶構造解析

#### mRNAを合成するメカニズムを解明

DNA上の遺伝情報は、メッセンジャーRNA (mRNA) へコピーされ、mRNAの情報をもとにタンパク質が作られます。これは、生命の営みの基本的かつ普遍的な反応です。RNA ポリメラーゼ (RNAP) は、遺伝子の上流部分に結合し、下流に向かってスライドしながら mRNA を合成するタンパク質です。mRNA の構成単位はリボヌクレオチドで、その原型であるリボヌクレオチド三リン酸は、RNAP によって加水分解され、RNA 分子の末端に連結されて行きます。我々は、細菌に感染するウイルスである T7 ファージの RNAP (T7 RNAP) を材料として、mRNA が合成される仕組みを原子のレベルで解明しました。mRNA の合成反応を反映するようにデザインした DNA: RNA ハイブリッド分子、非加水分解型リボヌクレオチド疑似物質: AMPcPP、及び、T7 RNAP から成る複合体の立体構造を、SPring-8 を用いて解析しました (図1)。AMPcPP は、DNA: RNA ハイブリッド分子上で、DNA 鎖の相補ヌクレオチドと塩基対を形成し、T7 RNAP の Y ヘリックスと呼ばれる部分に結合していました。T7 RNAP は、非活性型である“開いた”構造 (図2の左) をしていました。すなわち、T7 RNAP は、活性型である“閉じた”構造 (図2の右) へ変化する前に、Y ヘリックスで正しいヌクレオチドを識別していると考えられます。この研究により、普遍的な生命現象の理解が深まったとともに、病原性細菌の RNAP に特異的に結合する抗生物質の創製といった医療への応用研究も進展するものと期待できます。

(独) 理化学研究所 横山茂之

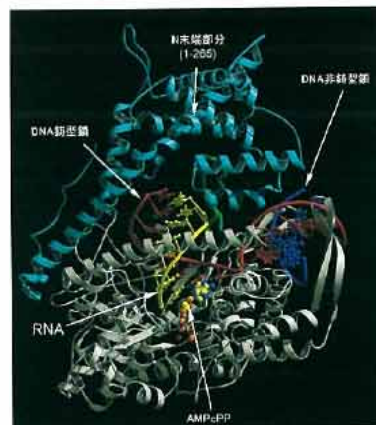


図1. T7 RNA ポリメラーゼ-AMPcPP-DNA:RNA複合体の立体構造

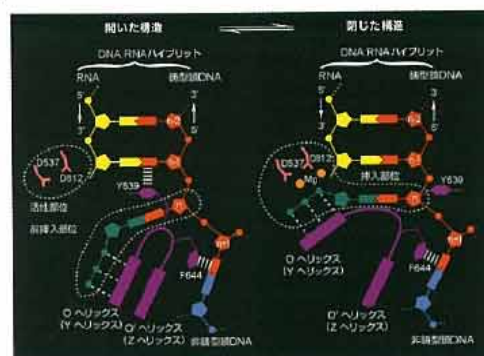


図2. T7 RNAポリメラーゼによる、mRNA合成のメカニズム

## 物質科学

### 粉末結晶構造解析

#### 新しいナノサイエンス 一酸素分子を一列に並べる

分子を空間中に任意に配列させた集合体は、通常バルク集合体とは異なった性質を示す事が期待され、科学的及び材料的な新しい対象物として興味を集めるものです。今回、多孔性配位高分子の均一な4 Åx6 Åの1次元ナノ細孔中に酸素分子を配列させることができました。「多孔性配位高分子」とは、金属イオンとそれを繋ぐ有機分子 (配位子と呼んでいます) によって構成され、骨格中にナノサイズの空間を持つ結晶性の固体です。これを約80 kPaの酸素圧下に置き90 Kまで冷却しながら粉末X線パターンの測定を行い、MEM/Rietveld法による解析によって酸素分子の構造を決定しました。ナノ細孔中の酸素 (90 K) は細孔中に2分子並行に配列しており、それらが細孔方向に沿って整列して均一な1次元ラダー (梯子) 構造を形成していました (図1)。最近接の酸素分子間の距離は約3.2 Åと非常に近く、磁気測定の結果、この酸素分子ラダーの基底状態は非磁性となり、反強磁性ダイマーの形成が強く示唆されました (図2)。また、吸着した酸素分子の伸縮振動のラマン散乱は、固体バルク酸素よりも大きく高波数側にシフトしており、その値は2万気圧下における固体バルク酸素 (80 K) と同程度という驚異的な値でありました。この様にナノ細孔中に取り込まれた酸素分子は、バルク状態では安定に存在できない特異的集合構造を形成し、かつバルクとは異なった磁気的、分光学的性質を示すことが明らかとなりました。多孔性配位高分子のナノ空間を分子凝集場として利用することによって、新たな材料群の創製につながると考えられます。

京都大学 北川 進

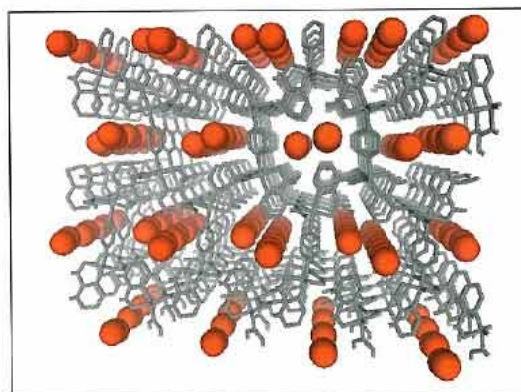


図1. 吸着した酸素分子の結晶構造図

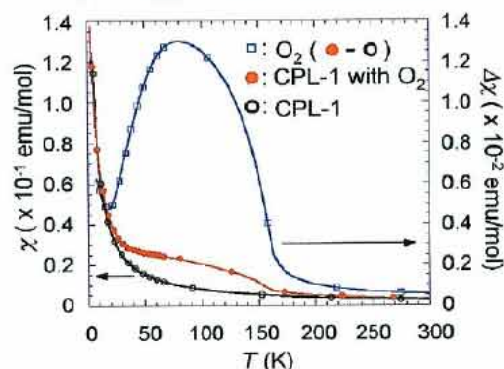


図2. 吸着した酸素の磁化率の温度依存性



## 物質科学

### 光電子分光

#### 6 keVにおける高分解能バルク敏感光電子分光法

光電子分光法は検出深さが非常に小さく、固体内部と表面の情報の分離が困難であるという問題点がありました。また、測定中の試料表面汚染をさけるために超高真空測定環境が必要で、これも応用範囲を狭くする問題点の一つでした。励起光のエネルギーを上げると検出深さは大きくなります。SPring-8ではJASRIが理研播磨研究所のX線干渉光学研究室、および放射光物性研究室との共同研究によってX線アンジュレータ・ビームラインで表面効果を全く無視できる高分解能光電子分光を世界に先駆けて実現しました。図1に測定の配置図を示します。BL29XUの2結晶分光器の後にSi333チャンネルカット分光器をおくことにより得たバンド幅の狭い5.95 keV単色X線を、Be窓を通して真空槽内の試料表面に導きます。試料からの光電子のエネルギー分布を高エネルギー用のアナライザーで分析します。図2は0.58 nmの熱酸化膜を形成したSi(100)基板の価電子帯スペクトルを5.95 keVで励起したものと、0.85 keVの軟X線励起のスペクトルを比べています。赤い実線は第一原理計算による部分状態密度から計算したスペクトルです。この図から軟X線領域のスペクトルは表面の酸化膜の影響が非常に大きく、5.95 keVではSi基板の価電子帯が測定されていることがわかります。その後さらにアナライザーの開発を進め、現在80 meVの分解能に達しています。また、BL47XUにおいてナノテク総合支援課題の受け入れを開始しました。この方法は厚さ10 nm前後のナノ薄膜材料や、埋め込まれた界面における電子状態、及び化学状態の解析に極めて有効です。

(財)高輝度光科学研究センター 小林啓介

#### 実験装置 at BL29XU



図1 5.95 keV光電子分光配置図

アンジュレータからのX線を2結晶分光器で単色化した後さらにSi 333チャンネルカット後置分光器でバンド幅を狭くし、真空槽内におかれた試料に照射する。試料からの光電子を高エネルギー用のアナライザーで分析する。

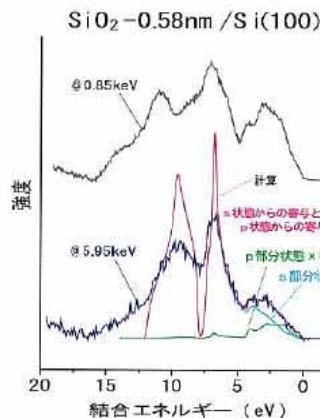


図2 0.58 nmの熱酸化膜が形成されているSi(100)結晶の価電子帯スペクトル。

黒線のスペクトルは0.85 keV軟X線励起によるもので、SiO<sub>2</sub>の構造が強くでている。紺色のスペクトルの5.95 keV励起のもので、第一原理計算によるSiの3s(青)及び3p(緑)部分状態密度からの寄与の和(赤)と非常に良い一致を示している。この結果から、5.95 keV励起では約0.6 nmの酸化膜の影響は無視できることがわかる。

## 考古学

### 蛍光X線分析

#### 三角縁神獣鏡原料産地の探求

紀元3世紀を中心に製作された三角縁神獣鏡は、これまで邪馬台国の女王卑弥呼が中国魏の皇帝より授かった鏡といわれたこともあり、日本において国家が形成され始めた時期の代表的な考古資料です。その製作地については、様々な論争をくりひろげながらも確実な証拠を得ることができず、古代史上の大きな謎のひとつとなっています。この謎を解明するために、古代青銅鏡の蛍光X線分析を実施しました。とくにSPring-8を利用した蛍光X線分析の利点を最大限に生かすために、従来の青銅鏡科学分析ではほとんど検討することが出来なかった微量成分銀・アンチモンの含有特性に注目し、中国製から日本製に至る幅広い時代・地域の青銅鏡を対象におこなったところ、青銅鏡の微量成分銀・アンチモンの含有は、製作時期および製作地域により大きく異なることがわかりました。微量成分の含有量は、原材料の産地に固有のものと考えられることから、原材料産地の違いを表すものと考えられます。さらに三角縁神獣鏡については、すべてが同じ含有特性を示すのではないことがわかりました。三角縁神獣鏡と同じ時期に中国で製作された神獣鏡と全く同じ特性を示すものと、同じ時期の日本製と似た特性を示すものとが確認できたのです。このことから三角縁神獣鏡の原材料は、複数の系統が存在することが明らかとなりました。この成果は、考古学界の重要な研究テーマである三角縁神獣鏡の製作地問題に新たな視点を提供するものといえます。

(財)泉屋博古館 廣川 守



図1. 三角縁四神四獣鏡(京都府城陽市久津川車塚古墳出土、泉屋博古館收藏)

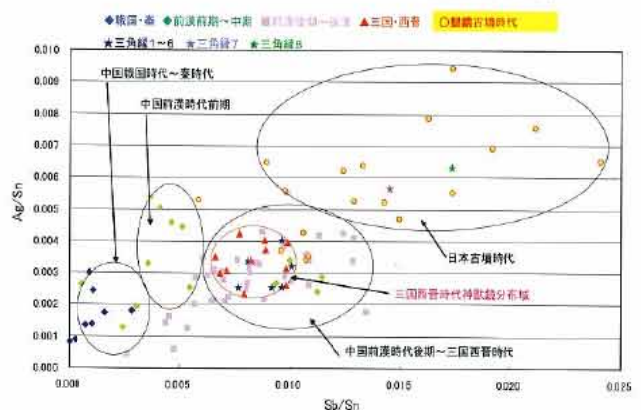


図2. SPring-8を利用した古代青銅鏡蛍光X線分析結果(横軸:Sb/Sn値、縦軸:Ag/Sn値)



# SPring-8での研究成果例

## 地球科学

### 高圧・高温構造解析

#### 全地球マントル領域における炭酸塩鉱物の安定性の解明

レーザー加熱ダイヤモンドアンビル装置と強力な単色X線を利用して、ほぼマントル全域に対応する圧力120万気圧、温度2700℃程度までの条件下でのマグネサイト( $\text{MgCO}_3$ )の相変化を明らかにすることに初めて成功しました。

地球上に存在する炭素の一部は、炭酸塩鉱物として海洋底に堆積し、マントル深部に沈み込む海洋プレートとともに地球内部にもたらされます。堆積物中に存在する炭酸塩鉱物のうち、上部マントル深部で最も主要なものはマグネサイトであると考えられています。従ってマグネサイトの安定性を地球内部の条件下で明らかにすることは、炭素の全地球規模での長期的循環や、天然ダイヤモンドの生成過程を明らかにする上でも重要です。

X線その場観察実験の結果、深さ2600 kmに対応する圧力115万気圧、温度2000℃程度までの条件では、マグネサイトは分解や相転移を起こさず安定に存在することが明らかになりました。しかし、これより高い圧力条件下では結晶構造の異なる新しい相(マグネサイトII)が出現しました(図1)。この高圧相は温度を急冷しても安定に存在しますが、圧力を下げるとその回折線は消滅しました。図2は実験結果および熱力学計算に基づいた $\text{MgCO}_3$ の予想される相関係と、地球内部の温度分布の推定値を示します。この結果は、 $\text{MgCO}_3$ は下部マントルのほぼ全域でマグネサイトあるいはその高圧相であるマグネサイトIIとして安定に存在し、地球内部における炭素の重要なリザーバーとなる可能性を示しています。

愛媛大学 入船徹男

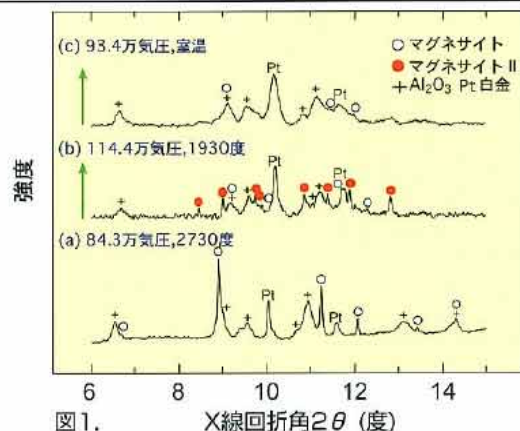


図1. X線回折角 $2\theta$  (度)

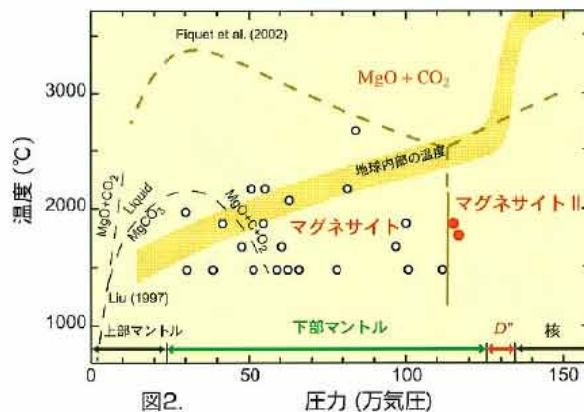


図2. 圧力 (万気圧)

## 環境科学

### XAFS

#### 自動車触媒の自己再生現象を解明

ガソリン自動車のエンジンから排出される窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )、一酸化炭素( $\text{CO}$ )、燃料の燃え残りなどの有毒ガス成分を無害化するのが自動車触媒の役割です。触媒には白金、ロジウム、パラジウムなどの貴金属が多量に含まれています。近年の厳しい環境基準に対応し、図のようなエンジン直下に搭載できる耐熱性の高い触媒の開発が焦点となっています。

高温の排ガス環境下では貴金属粒子が移動・合体・肥大化し、触媒反応がおこる表面の総面積が減少するのが活性低下の主な原因でした。貴金属粒子の肥大化を防ぐため、ナノテクノロジーを駆使した新しい触媒設計と調製方法により、貴金属をペロブスカイト酸化物に複合させました。この新型触媒は、アクセルペダルの操作などで起こる排ガス中の酸素濃度の変動に応答し、貴金属をペロブスカイト酸化物内に取り込んだり外に吐き出したりを繰り返します(図の結晶構造を参照)。その結果、触媒は自動車の運転中に自然に若返り(自己再生)、貴金属粒子は新品同様の小さいサイズを保ったまま活性を維持し続けます。

SPring-8の放射光X線を用いた結晶構造解析により、この触媒の自己再生メカニズムを原子レベルで明らかにすることが出来ました。この成果は、これからの触媒開発に対して自己再生機能という新しい設計概念を提唱したものです。すでに自動車排ガス浄化触媒として2002年10月から実用化されています。

日本原子力研究所 西畑保雄

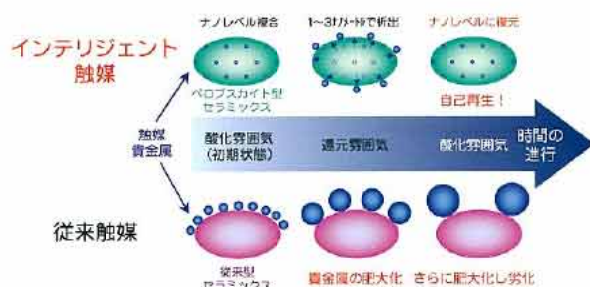


図1. インテリジェント触媒の自己再生と従来型触媒の劣化



図2. 貴金属が自己再生するインテリジェント触媒を世界で初めて搭載した自動車(ダイハツ工業(株)提供)。ペロブスカイト型結晶格子に配置した貴金属パラジウムが自動車排ガス中の自然な酸素濃度の変動に構造的に反応し、結晶から出入りすることにより自己再生機能を発現する。





## X線光学

### イメージング

#### コヒーレントX線散乱マイクロコピー

私たちが目で物を見てその形を知るのは、物体から散乱された光を眼の水晶体というレンズで網膜に結像し、そこで電気信号に変換して脳に伝達されるためだと考えられています。とても粗い話をしてみれば、物体による散乱でフーリエ変換という数学的操作を受けた光の波を、眼のレンズで再度フーリエ変換して像を作っていることになります。

眼に見える光よりずっと波長の短いX線では、原理的には非常に小さい物まで観察することが可能ですが、性能の高いレンズが存在しないことと、イメージをX線波長に匹敵する高分解能で記録する検出器が存在しないことから、実際に到達できた分解能は理論限界の2~3桁上に留まってきました。

ところが、最近コヒーレントX線入射での散乱強度分布からある条件の下で波の振幅と位相が求められることが判り、そのような複素振幅分布をフーリエ変換することにより、散乱体の立体構造がnm分解能で再構成可能であることが明らかになってきました。この方法での実空間像再構成のためには非常に良質なコヒーレントX線ビームを準備する必要があり、高分解能化が可能な硬X線領域では今のところSPRing-8でのみ、再構成に成功しています。

いままでに、ポラスシリカ、大腸菌、GaNなどを試料とした観察が行われてきましたが、埋もれた3次元構造の可視化が可能なユニークな手法として、材料科学、生命科学などに広範な応用があるように思われます。またX線自由電子レーザーと組み合わせた、単分子構造解析への応用や、動的構造解析への応用が検討されています。

(独)理化学研究所 石川哲也

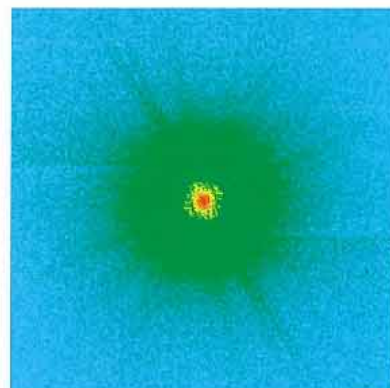


図1.大腸菌試料からのコヒーレントX線散乱パターン



図2. 図1の散乱パターンから再構成された実空間像(25 nm分解能)

## 素粒子・原子核

### 高エネルギー光核反応

#### レーザー電子光ビーム実験による5クォーク粒子の発見

クォークは、物質を構成する最小の基本粒子です。色電荷を帯びたクォークは、単独では自由に空間を飛びまわらず、色電荷が“白色”に中和された複合粒子だけが決まった質量をもった粒子として存在できます。3つのクォークで出来たバリオンや、2つのクォークで構成された中間子は、100種類以上見つっていますが、クォークの数が4以上の粒子は30年以上に及び様々な実験によっても発見されることはなかったのです。

SPRing-8には、普通の放射光とは違う、レーザー電子光(LEP:レーザー光線が電子ビームによって跳ね返された結果得られる高エネルギー光ビーム)を得るためのビームラインがあり、このレーザー電子光を炭素原子核に照射し、原子核中の中性子(n)と光子の原子核反応で生成された粒子を分析しました(図1)。まず、 $K^+$ 中間子を捕まえることにより生成されたものが反ストレンジクォークを含むことを確認します。次に、 $K^+$ 中間子の運動量を測定し、エネルギーと運動量の保存則を用いたミッシング質量法により、5個のクォークで構成される $nK^+$ 系の質量(重さ)を計算しました。そのスペクトルが、図2に示すもので、 $1540 \pm 10$  MeVのところに幅の狭いピークとして新粒子 $\theta$ (シータ)が観測されました。今後、更なる実験による検証が必要ですが確立されればシータ粒子は初めての5クォーク粒子となります。この実験では、光ビーム中のバックグラウンドが少ないため、0度にも検出器をおくことができたこと、そのためにビームの中に入れたプラスチック蛍光検出器中の炭素原子核が中性子のターゲットとなったということがポイントになっています。

大阪大学 中野貴志

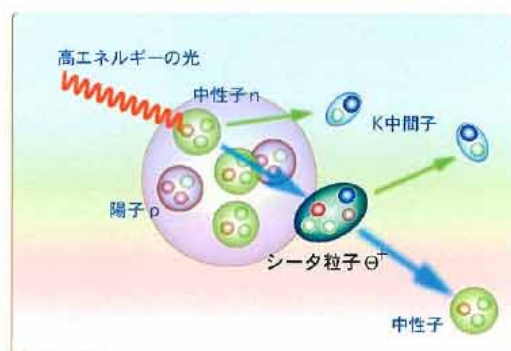


図1.LEPSでの $\theta^+$ 生成反応の模式図

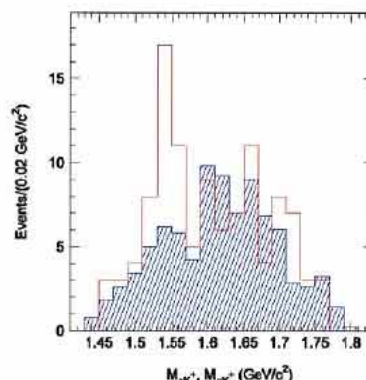


図2.プラスチックシンチレーター中の反応事象に対する $K^+n$ 系の不変質量分布。青色斜線は水素(陽子)標的での反応事象に対する $K^+p$ 系の不変質量分布。



# 多分野の研究施設が集結

## ◆SPring-8の施設配置図

SPring-8は、141ヘクタールの敷地内に配置された、放射光発生のための加速器施設（線型加速器、シンクロトロン及び蓄積リング）、それらを取り囲む放射光利用施設（ビームライン、医学利用実験施設など）、関連する研究施設（各種研究棟、マシン実験棟、組立調整実験棟など）、研究をサポートする施設（研究交流施設、ユーティリティー管理棟、中央管理棟など）から構成されています。



放射光物性研究棟  
付属建屋（明光館）

### 放射光普及棟

研究会などの会場、見学者用のPRセンターとして活動を行う拠点で、内部は、講堂および見学者のための展示コーナー、ロビーから構成されています。



### 研究交流施設

利用者の滞在・仮眠のための施設で24時間稼働のSPring-8に不可欠の施設です。近くには三食を提供する食堂があります。



### 中央管理棟

研究者居室、放射光共同利用支援及び事務管理者の居室を有し、SPring-8運営の中核的な施設です。



### 利用実験施設

SPring-8の利用者が共用ビームラインを使用した研究を推進するため、試料の作製、実験機器の調整、データの解析等を行う施設です。



### 医学利用実験施設

300 mビームラインが3本設置される予定です。現在2本(215 m)が稼働中です。これらを利用して、医療診断の研究や生物医学の研究が行われます。



### 蓄積リング棟

これも加速器のひとつです。シンクロトロンで8 GeVまで加速された電子のエネルギーをそのまま保ち、発生させた放射光をビームラインへと送り込みます。ビームラインは最終的に放射光を取り出し、実験を行う施設です。



### RI実験棟

現在2本のビームライン（100 m以上）が稼働中です。放射性同位元素を用いた研究も行なうことができます。



### シンクロトロン棟

シンクロトロンはだ円形の加速器です。線型加速器から送られてきた電子をさらに高周波加速管により8 GeVまで加速し、蓄積リングへ送り込みます。

食堂

ユーティリティー管理棟

基盤機器保管棟

蓄積リング棟付属施設W

300 m  
ビームライン

実験動物維持施設

三原栗山  
(34.1 m)

正門





## 構造生物学研究棟

理化学研究所独自の研究のうち、構造生物学、物理科学研究を総合的かつ効率的に推進するための研究棟です。生体機能の解明や医薬品開発等を旨とした研究、次世代放射光も考えた放射光発生、利用技術の研究を実施します。



## 物理科学研究棟

理化学研究所独自の研究のうち、主に物理科学の研究を推進するため、試料の作成、実験機器の調整、データの解析等を行う研究棟です。



## 放射光物性研究棟

日本原子力研究所独自の研究を推進するため、試料の作成、実験機器の調整、データの解析等を行う研究棟です。



## ハイスループット棟

理化学研究所の構造プロテオミクス研究プロジェクトの一環として、放射光結晶解析により、大規模なタンパク質立体構造解析を行う施設です。



## マシン実験棟

加速器の高度化のための研究開発を行う実験施設です。また、SPring-8の加速器の製作、改良、設置のための試験等も行われます。



## 組立調整実験棟

ビームライン及び加速器の高度化等のための研究開発を行う研究施設です。



## 長尺ビームライン実験施設

高輝度で干渉性の高いX線を用い、ビームラインの長尺化(1 km)により検出器を遠方に設置できる特長を生かした「重力が光子に与える作用の大きさ」の高精度観測や「物質構造の極微小評価技術」の確立、また、長尺化により拡大される照射野を利用した「細胞レベルでの構造や反応機構」の解明など、放射光X線光学の最先端を目指します。



## 線型加速器棟

電子銃によって発生した電子を直線方向に1 GeVまで加速します。加速は高周波加速器により行われます。



## ニュースバル実験研究棟

兵庫県が建設し、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所が管理・運営する放射光施設で、SPring-8の線型加速器からの電子ビームを1.0~1.5 GeVで蓄積します。主リングは周長119 mで、14 mの直線部を2ヶ所もつユニークなレーストラック型です。ビームラインは8本が稼動しており、真空紫外線から軟X線領域の高輝度放射光を利用して、光微細加工、物質評価と創製など産業利用技術の研究が行われます。

生物系特殊実験施設

体育館

東門

1kmビームライン

300 mビームライン



0 100 200 300m



# 世界最高レベルの放射光発生

## ◆SPring-8の放射光発生概念図

SPring-8では、電子銃から発生した電子ビームを、線型加速器により1 GeVまで加速した後、シンクロトロンに導入して8 GeVまで加速します。この電子ビームを蓄積リングに導入し、8 GeVのエネルギーを維持させながら、偏向電磁石や挿入光源により放射光を発生させます。発生した放射光は、ビームラインを通して、蓄積リング棟内外に設けられたハッチ（光学ハッチと実験ハッチ）に導かれ、いろいろな実験に利用されます。

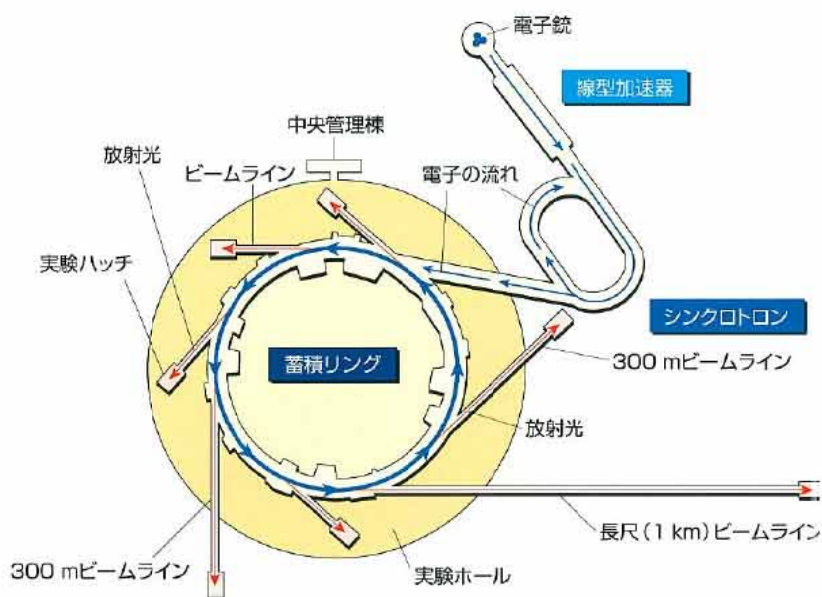
### ■ 線型加速器



線型加速器

- 加速エネルギー: 1 GeV
- パルス幅: 1 ns/40 ns
- 全長: 140 m
- ピーク電流: 2 A/350 mA

長さ3 mの高周波加速管26本が一直線に配置されており、電子ビームは1 GeVまで加速されます。朱色のものは電子ビームを集束させるための4極電磁石です。



### ■ シンクロトロン



シンクロトロン

- 電子エネルギー: 8 GeV
- 繰り返し: 1 Hz
- 周長: 396 m
- ビーム電流: 最大10 mA

電子ビームは、偏向電磁石(青色)、四極電磁石(朱色)、六極電磁石(黄色)によって作られる円形の軌道を周回しながら8 GeVまで加速されます。8 GeVの電子ビームは左奥より蓄積リングに送られます。

### ■ 蓄積リング



蓄積リング

- 電子エネルギー: 8 GeV
- 電流値: 100 mA
- 周長: 1436 m
- エミッタンス: 3 nm·rad

8 GeVの電子ビームを100時間以上貯蔵する性能があります。放射光の発生によって失われるエネルギーは4ヵ所の加速装置によって補充されます。



## ■ 光源とビームライン

8 GeVに加速された電子ビームは、アンジュレータや偏向電磁石等で曲げられて、放射光を発生します。発生した放射光は、基幹チャンネルを通じて、実験ホールに設置された光学ハッチ、実験ハッチに導かれ利用されます。

- 挿入光源 (4.5 m) ビームライン: 34本
- 長直線部挿入光源 (25 m) ビームライン: 4本
- 偏向電磁石ビームライン: 24本



蓄積リング内に設置されたアンジュレータ

周期磁場を利用して電子ビームをうねらせて放射光を発生させ利用します。SPRING-8で開発された挿入光源である真空封止型アンジュレータは、電子ビームが通過する真空部に磁石列を封じ込めることで磁石間隙を狭くでき、波長が短く、強力な放射光を発生できます。



偏向電磁石

SPRING-8では、88台の偏向電磁石で一周の閉じた軌道を作り、464台の四極電磁石で電子ビームを収束させ、またこのほか292台の六極電磁石、600台近くの軌道を修正させるためのステアリング電磁石などがあります。電子が偏向電磁石で曲げられた際に放射光を発生するのでその一部を取り出して光源として利用します。

## ■ 実験ステーション



実験ホール内の実験ハッチ

偏向電磁石あるいは挿入光源で発生した放射光を光学系で整形して実験ハッチまで導き、試料に照射し、散乱・回折X線、透過X線、蛍光X線、2次電子やイオン等を計測する様々な実験が行われています。



光学ハッチの内部

発生した放射光は基幹チャンネルを通して光学ハッチに導かれ用途に応じて光学機器で加工されます。光学ハッチに設置されている光学機器にはミラーや分光器があり、広い波長領域と高い熱負荷に耐え熱変形を小さくする工夫がされています。分光器には波長を変えても取り出し光軸がかわらないように設計された2結晶モノクロメータなどが用いられています。



マルチアンビル型高温高压発生装置

BL04B1

放射光実験専用に特別に設計された高压プレス装置で、30万気圧、2000℃程度までの高温高压条件で実験することができます。この装置を使って高温高压状態の地球内部の研究を進めています。



非弾性散乱スペクトロメータ

BL35XU

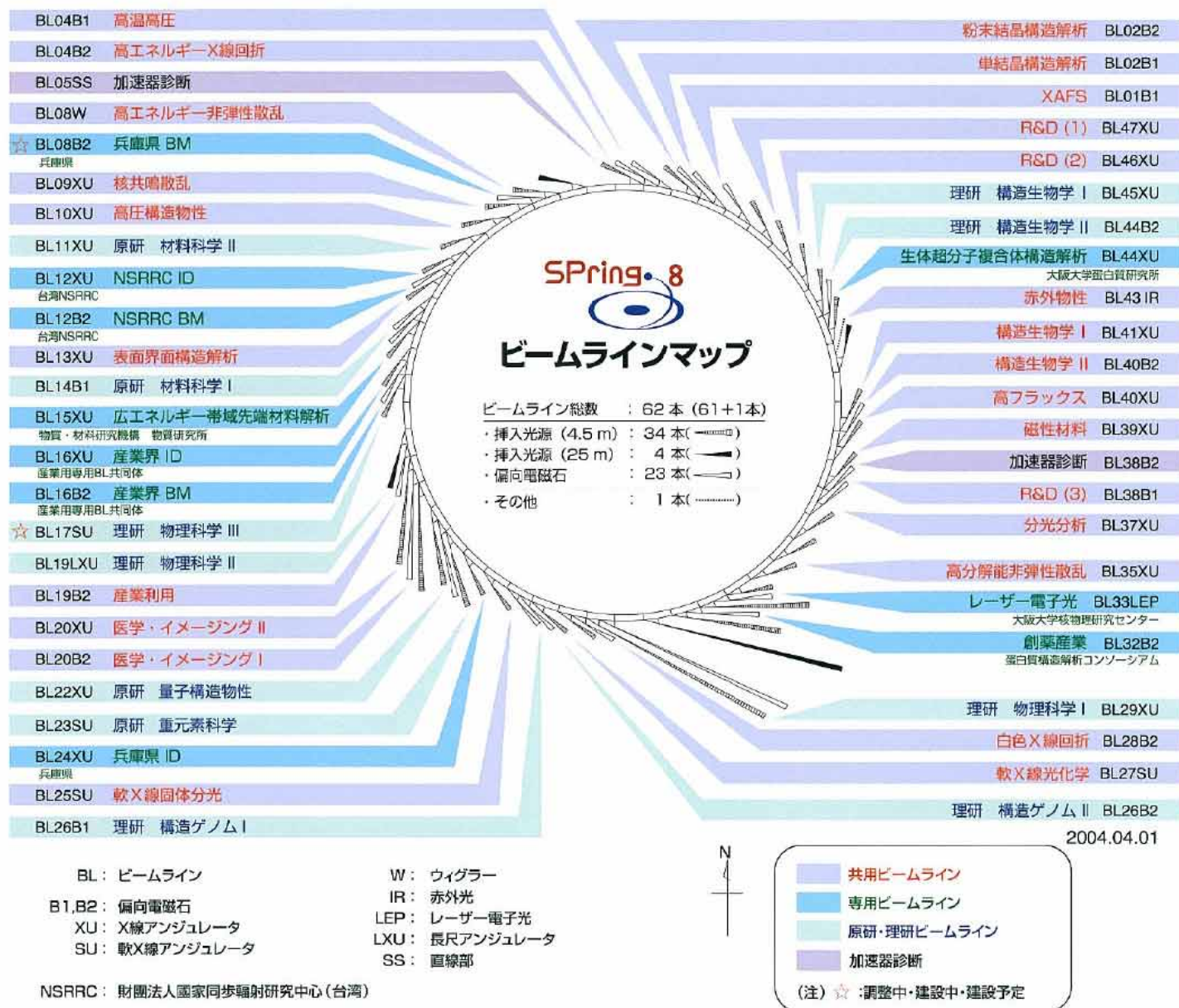
偏向電磁石あるいは挿入光源で発生した放射光を光学系BL35XU高分解能X線非弾性散乱用に開発されたスペクトロメータで、高分解能を実現するため長いアーム(10 m)を持ち、55°にわたって検出器の角度を動かせます。21.747 keVで1.5 meVという高分解能を実現しています。高熱負荷にも耐える液体窒素冷却のモノクロメータを備えています。



# 多様なビームラインで広範な研究活動

## ◆ビームラインマップ

稼働中、建設中または計画中のビームラインの名称、種類、その配置を下図に示します。ビームラインの長さは、通常は光源から最大80mですが、他に300m、1,000mのものが設置可能なように設計されています。



## ◆ビームラインの利用形態

SPring-8には、ビームライン62本の設置が可能であり、そのうち赤外光ビームライン1本を含む46本が、現在稼働しています。

ビームラインは利用形態によって次のように分類されます。

- 共用ビームライン (原研・理研が建設し、国内外の研究者が共同で利用)
- 専用ビームライン (外部機関が自前で建設し、専有して利用)
- 原研・理研ビームライン (原研・理研が建設し、独自研究に利用)
- 加速器診断ビームライン

区分	共用	専用	原研・理研	加速器診断	合計
稼働中	25	9	10	2	46
調整・建設中	0	1	1	0	2
合計	25	10	11	2	48



## ◆研究に利用されているビームライン

各ビームラインには、それぞれの利用研究分野に適した光源、X線のエネルギー領域などが設定されています。研究に利用されている共用、専用などのビームラインの概要は次の通りです。

### 共用ビームライン(25本)

実験ハッチ内には基本的な実験装置が設置されています。

ビームライン名称	ビームラインNo.	光 源	X線エネルギー	研究手法・研究分野
XAFS	BL01B1	偏向電磁石	3.8~113 keV	広エネルギー領域でのXAFS(非晶質固体・希薄系での局所原子配置・電子構造)
単結晶構造解析	BL02B1	偏向電磁石	5~70 keV	無機結晶のX線回折(新素材・薄膜の精密構造解析、構造相転移、化学反応)
粉末結晶構造解析	BL02B2	偏向電磁石	12~35 keV	粉末結晶のX線回折(先端材料の精密電子密度分布、構造相転移)
高温高压	BL04B1	偏向電磁石	20~150 keV	高温・高压下でのエネルギー分散X線回折(構造相転移、地球深部構造、超臨界流体の局所構造)
高エネルギーX線回折	BL04B2	偏向電磁石	37.8 keV 61.7 keV	X線回折(高压下の結晶構造、非晶質固体・液体の局所構造、相転移点近傍での構造ゆらぎ)
高エネルギー非弾性散乱	BL08W	ウイグラー	100~120 keV, 174~300 keV	コンプトン散乱(フェルミ面近傍の電子構造)、磁気コンプトン散乱(磁性電子構造)、重元素の蛍光X線分析
核共鳴散乱	BL09XU	アンジュレータ	9~80 keV	時間領域メスバウア分光、核共鳴非弾性散乱、表面・界面構造解析
高压構造物性	BL10XU	アンジュレータ	18~35 keV	極端条件下(高压・高温・極低温)のX線回折
表面界面構造解析	BL13XU	アンジュレータ	7~18.9 keV	表面構造の解析(吸着構造、超格子構造、相転移、結晶成長、触媒反応)
産業利用	BL19B2	偏向電磁石	5~100 keV	XAFS、X線反射法、蛍光X線分析、歪み解析、粉末回折
医学・イメージングⅠ	BL20B2	偏向電磁石	5~113.3 keV	イメージング技術(マイクロトモグラフィ、屈折コントラスト法など)の開発とその医学利用
医学・イメージングⅡ	BL20XU	アンジュレータ	8 keV~	イメージング技術(マイクロトモグラフィ、屈折コントラスト法など)の開発とその医学利用
軟X線固体分光	BL25SU	アンジュレータ	0.22~2 keV	光電子分光、光電子回折、光電子ホログラフィ、磁気円二色性(電子状態、固体磁気特性)
軟X線光化学	BL27SU	アンジュレータ	0.17~2.8 keV	軟X線光化学(内蔵励起光化学反応、原子・分子の光電離)、軟X線CVD(新素材の創製)
白色X線回折	BL28B2	偏向電磁石	5 keV~	白色X線トポグラフィ(結晶成長過程、格子欠陥、相転移)
高分解能非弾性散乱	BL35XU	アンジュレータ	8~50 keV	X線非弾性散乱、核共鳴散乱
分光分析	BL37XU	アンジュレータ	5~37 keV, 75.5 keV	微小領域元素分析、微量量分析、状態分析、蛍光X線ホログラフィー、高エネルギー蛍光X線分析、高感度XAFS
磁性材料	BL39XU	アンジュレータ	5~37 keV	X線磁気散乱、磁気円二色性、X線顕微分光、超微量元素分析
高フラックス	BL40XU	アンジュレータ	8~17.5 keV	生物学・物質科学での時分割小角散乱・回折、時間相関分光(スペックルパターン)、蛍光X線分析
構造生物学Ⅰ	BL41XU	アンジュレータ	6~38 keV	巨大分子結晶のX線構造解析(タンパク質結晶学、X線構造生物学)
構造生物学Ⅱ	BL40B2	偏向電磁石	6~17.5 keV	巨大分子結晶のX線構造解析、非晶質生体材料のX線小角散乱
赤外物性	BL43IR	偏向電磁石	10 meV~2 eV	赤外顕微分光、赤外表面科学、赤外吸収・反射分光、赤外磁気光学
RSD(Ⅰ)	BL47XU	アンジュレータ	5.3~37.8 keV	光学系の開発、各種イメージング技術・ビームエミッタンス測定技術の開発
RSD(Ⅱ)	BL46XU	アンジュレータ	12~25 keV	挿入光源の開発、共鳴・非共鳴磁気散乱技術
RSD(Ⅲ)	BL38B1	偏向電磁石	3.8~198 keV	光学系の検出器・制御系の開発、タンパク質結晶解析技術の開発

### 専用ビームライン、原研／理研ビームライン、加速器診断(21本)

ビームライン名称	ビームラインNo.	光 源	X線エネルギー	研究手法・研究分野
NSRRC ID	BL12XU	アンジュレータ	4.6~75 keV	高分解能X線散乱、高分解能X線共鳴ラマン散乱、高Q分解能散乱、X線物理学・光学
NSRRC BM	BL12B2	偏向電磁石	5~90 keV	X線吸収分光、タンパク質結晶構造解析、高分解能X線散乱、マイクロビームX線解析
広エネルギー帯域先端材料解析	BL15XU	アンジュレータ	0.5~60 keV	粉末X線回折、X線照射改質、X線光電子顕微鏡、角度分散光電子分光
産業界 ID	BL16XU	アンジュレータ	4.5~40 keV	産業材料評価用のX線回折、蛍光X線分析とX線マイクロビーム分析
産業界 BM	BL16B2	偏向電磁石	4.5~113 keV	産業材料評価用のXAFSとX線トポグラフィ
兵庫県 ID	BL24XU	アンジュレータ	3.5~60 keV	無機物質の表面・界面解析、X線マイクロビーム分析、X線イメージング、タンパク質結晶構造解析
創薬産業	BL32B2	偏向電磁石	7~17 keV	ドラッグデザインを目的としたタンパク質結晶構造解析
レーザー電子光	BL33LEP	逆コンプトン散乱	1.5~2.4 GeV	光核反応、偏極ガンマ線ハドロン分光、ファイメソンの検出
生体超分子複合体構造解析	BL44XU	アンジュレータ	9~16 keV	生体巨大分子複合体のX線結晶構造解析
原研 材料科学Ⅰ	BL14B1	偏向電磁石	5~150 keV	物質科学における構造解析(高压・高温実験、表面・界面構造研究)
原研 材料科学Ⅱ	BL11XU	アンジュレータ	6~70 keV	メスバウア分光、高压実験、非弾性X線分光、表面解析
原研 量子構造物性	BL22XU	アンジュレータ	3~70 keV	高压発生装置を用いた高压物性研究、共鳴X線回折実験
原研 重元素科学	BL23SU	アンジュレータ	0.5~1.5 keV	放射線材料の軟X線分光、表面光科学、生物学的放射線効果
理研 物理学Ⅱ	BL19LXU	25mアンジュレータ	72~18keV, 22~51 keV	X線非線形光学、コヒーレントX線光学、磁気散乱
理研 構造ゲノムⅠ	BL26B1	偏向電磁石	6~17 keV	ハイスルーブット・タンパク質結晶構造解析
理研 構造ゲノムⅡ	BL26B2	偏向電磁石	6~17 keV	ハイスルーブット・タンパク質結晶構造解析
理研 物理学Ⅰ	BL29XU	アンジュレータ	4.4~37.8 keV	コヒーレントX線光学
理研 構造生物学Ⅰ	BL45XU	アンジュレータ	7.5~14 keV	トリクロマチックMAD法による巨大分子結晶構造解析、生体材料の溶液散乱と構造回折
理研 構造生物学Ⅱ	BL44B2	偏向電磁石	6~30 keV	白色・単色X線での巨大分子結晶構造解析、時分割ラウエ法、希釈生体材料のXAFS
加速器診断	BL05SS	アンジュレータ	—	加速器診断と診断法の技術
加速器診断	BL38B2	偏向電磁石	4~14.2 keV	加速器診断と診断法の技術

他に2本のビームラインが建設中です。



# SPring-8の運営と利用

## ◆SPring-8の運営

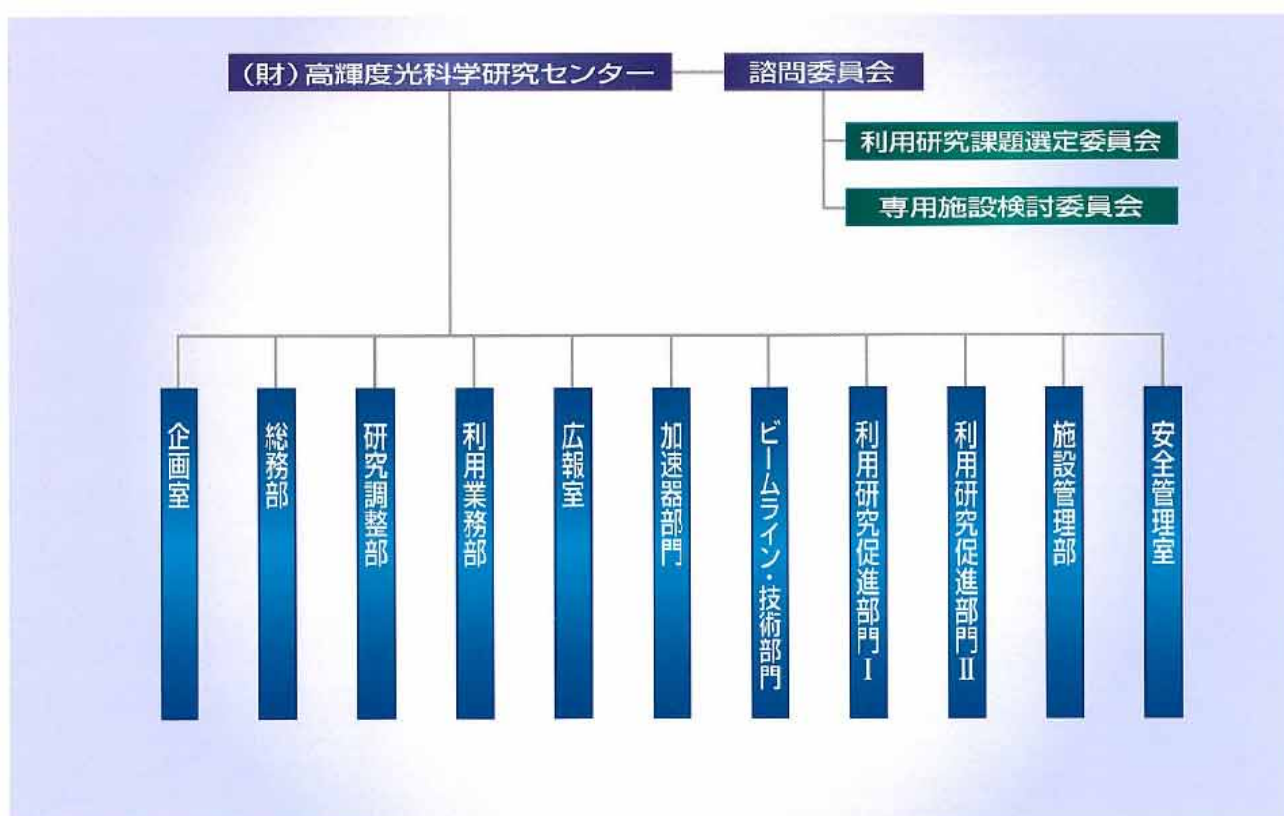
- 日本原子力研究所と理化学研究所によって平成3年から建設されてきたSPring-8は、平成9年3月に放射光の発生を確認、10月から使用を開始しました。
- 平成2年に設立された財団法人高輝度光科学研究センターは平成6年、国から「放射光利用研究促進機構」の指定を受けました。これにより財団は、国が指定する全国で唯一の機構として、SPring-8の運営を行っています。

### 財団の業務

- 供 用 業 務：共用施設の利用研究課題を募集、選定し、国内外の研究者等へ施設を供用し放射光を提供します。
- 利用促進支援業務：放射光利用研究に関する国内外の最新技術情報を提供するとともに、利用指導及び技術相談を行います。
- 試験研究開発：先進的な解析・分析手法等の開発を行い、施設の利用促進に資する試験研究を行います。
- 施設の運転、維持管理及び高度化：運転・維持管理及び高度化を行い、施設を最良な状態に管理し利用者に提供します。
- 普及啓蒙：放射光利用者の裾野の拡大を図るとともに、情報誌等を発行し高輝度光科学に関する知識等を普及啓蒙します。

- 日本原子力研究所は平成7年10月SPring-8のサイトに関西研究所放射光利用研究部（現 放射光科学研究センター）を開設し、極限環境物性、構造物性、表面化学、重元素科学、電子物性などの研究を推進しています。理化学研究所は平成9年10月に播磨研究所を開設し、構造生物学、X線超放射物理、X線干渉光学、軟X線物性などの研究を推進しています。平成15年10月に理化学研究所は、独立行政法人となりました。
- 日本原子力研究所、理化学研究所および財団法人高輝度光科学研究センターは、SPring-8のサイトでリサーチ・コンプレックスを形成し、研究交流を図っています。

## ◆SPring-8の運営組織





## ◆SPring-8の利用について

### ●ビームラインの利用等

共用ビームライン利用のための研究課題の募集は、半年毎に行われます。応募のあった研究課題は、利用研究課題選定委員会において審査され、選定された研究課題に対してビームタイムが配分されます。成果非専有利用（成果を公開）で申請される課題は、ビーム使用量は無料です。成果専有利用（成果を非公開）で申請される課題は、1シフト（8時間）あたり472,000円のビーム使用料が必要ですが、通常の課題選定を受けず、実験に関する実施可能性及び安全性の審査を受けるだけです。なお、専用ビームラインの建設計画は常時受け付けています。応募された専用ビームラインの建設計画は、SPring-8専用施設検討委員会において審議され、選定されます。

### ●産業界の利用促進

財団は、コーディネータを中心とした支援体制を整え、講習会や研修会の開催、利用に向けてのコンサルティング、課題申請書作成支援、産業利用の拠点としての産業利用ビームラインの整備・運用など、様々な支援を行っております。

利用の詳細については、SPring-8ホームページ [http://www.spring8.or.jp/j/for\\_users-7.html](http://www.spring8.or.jp/j/for_users-7.html) をご覧ください。

## ◆SPring-8の周辺地図







放射光利用研究促進機構

財団法人 高輝度光科学研究センター

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1

[広報室] Tel.0791-58-2785 Fax.0791-58-2786

[総務部] Tel.0791-58-0950 Fax.0791-58-0955

URL <http://www.spring8.or.jp/>