

話題の  
**PROJECT**  
プロジェクト

**SPring-8**



## X線科学の未来を切り開く 大型放射光施設

世界最高8GeVを発生するSPring-8が  
1997年秋に本格稼働

兵庫県西南部の丘陵地帯に、科学技術庁が推進する西播磨テクノポリスの建設が進められている。

なかでも特に注目されているのが大型放射光施設SPring-8である。現代の科学技術発展に欠かせないといわれるX線解析。その最先端施設の現在にスポットをあててみた。





## さまざまな研究開発に利用されるX線

西播磨テクノポリスの拠点都市となるのが、播磨科学公園都市。県立姫路工業大学理学部や県立先端科学技術支援センターをはじめとする学術研究施設、企業の研究所や工場などを誘致する産業用地、関係者向けの住宅、ゴルフ場などのレクリエーション施設など、人と自然と科学が融合したまちづくりを目指した、壮大な計画だ。

このまちのトータルコンセプトは「人と自然と科学が調和する高次元機能都市」。2005年には、2010ヘクタールの土地に、2万5000人の人口を抱える未来都市が完成する。現在建設の進んでいる第1工区の中核施設のひとつがSPring8 (super photon ring-8) である。

SPring8は、日本原子力研究所と理化学研究所が建設主体となっている大型放射光施設。現在、主要な施設の建設は完了し、内部の各種施設・装置の設置や調整が進められている。実際に稼働を始めるのは、1997年秋の予定だ。

1895年、ドイツのレントゲン (Wilhelm Conrad Röntgen : 1845～1923) によって発見されたX線は、発見当初から世界中の注目を集めた。レントゲンが発表した論文に自身の手のX線写真を添付したことともあいまって、医学分野での有用性が明白だったからである。

その後、1912年にラウエ (Max Theodor Felix von Laue : 1879～1960) が、X線回折を発見する。この発見により、現代科学に必須のものとなったX線結晶解析の道が開かれることとなった。たとえば、1953年のワトソン (James D. Watson) とクリック (Francis H. C. Crick) によるDNA二重らせん構造の発見も、X線解析の成果なのだ。

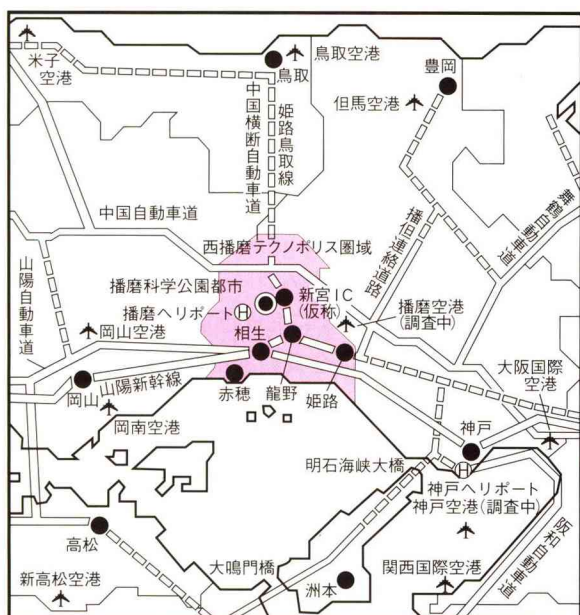
周知のように、X線は光と同じく電磁波の一種で、波長領域10～0.01nm (ナノメートル) のものを指す。特に、波長が0.3nm付近から長波長のX線を軟X線、逆に短波長のX線を硬X線と呼ぶ。

物体にX線を照射すると、①熱、②散乱X線、③透過X線、④蛍光X線、⑤光電子などが発生する。この性質を利用して、さまざまな利用・測定法が確立されてきた。

X線は、波長が短いほど透過力が大きい。また物体を構成する元素の原子番号が小さいほど、物体が薄いほどよく透過する性質を持つ。これを利用したのが、X線透過分析である。医療用X線装置や空港のX線透視装置、考古学の非破壊検査法など、幅広く利用されている。

また元素はX線を照射すると、固有の波長を持つ二次X線 (特性X線) を発生させる。物体にX線を照射し、発生した二次X線を分光分析することで、その物体がどのような元素を含んでいるかがわかる。これがX線分光分析だ。

同じ炭素原子からなるダイヤモンドと黒鉛、無定形炭素は、まったく違ったX線回折図形を描くことが知られている。X線が物体に当たると、散乱が起こる。散乱されたX線は、





位相がそろい互いに強めあうと回折を起こす。回折は原子の並び方と密接な関係を持っており、この性質を使って、物体の結晶構造を特定することが可能になった。これがX線回折分析（構造分析）である。

### より明るいX線光源を求めて

X線はさまざまな分野への利用が可能となり、数々の科学的発見を支える重要な研究手段となった。同時に、X線を発生させる光源の開発も急速に進んでいった。

通常X線は、放電管（X線管）の陰極から電子を放出し、ターゲット（陽極）の金属に衝突させて発生させる。X線管によるX線発生効率は、ターゲットに加えたエネルギーの1%以下と非常に低い。

可視光線によって物体を見る場合、光源が強く輝度が高いほど、よく見ることができる。X線にも同じことが当てはまり、分析の精度を上げるためには、より強い光源が必要になる。X線管の輝度は、焦点の単位面積当たりに発生するX線量で表されるが、通常は、X線管にかけられる負荷電力の大きさ（許容負荷電力）で比較することが多い。

X線管以外には、ターゲットに電子ビームをあててX線を発生させる電子線励起軟X線源、プラズマを圧縮・加熱してできる高電離多価イオンと電子の相互作用で軟X線を発生させるプラズマ軟X線源などが利用されている。

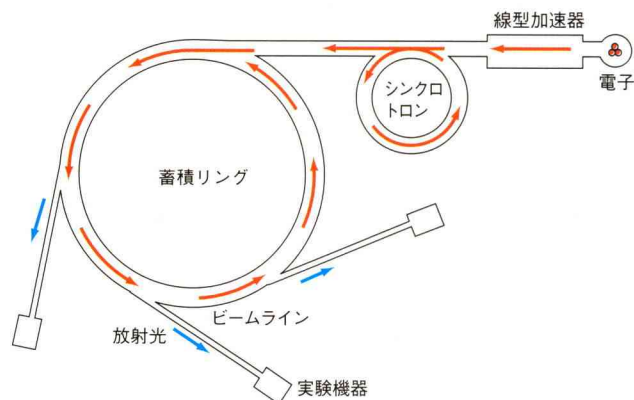
こうしたX線源よりはるかに高輝度で、非常に広いエネルギー領域の連続スペクトルをもつX線を発生させるのが、シンクロトロン放射（synchrotron (orbital) radiation: SOR, SR）である。シンクロトロンとは、電子を光速近くまで加速し、原子核などに衝突させて素粒子などの研究に使われる円形加速器のひとつ。1947年、アメリカGE社の円形加速器シンクロトロンで初めて観測されたことから、この名前と呼ばれるようになった。

高エネルギーの電子あるいは陽電子が、磁場によって曲げられ円運動をするとき、軌道の曲率中心の方向に加速度を受けて、軌道の接線方向へ電磁波が放射される。この電磁波がシンクロトロン放射（放射光）だ。

放射光は、従来のX線管に比べ1万～1000万倍の高輝度光源。一般にビーム利用研究では、輝度が3桁向上すると、研究が質的に変化するといわれている。放射光を利用したX線分析は、あらゆる科学分野を変革することになるだろう。

わが国で最初に放射光専用施設として建設されたのが、1974年に稼働した、東京・田無市にある東京大学物性研究所のSOR-RINGだ。1982年には、筑波研究学園都市にある高エネルギー物理学研究所（KEK）のフォトンファクトリー（photon factory: PF）が稼働する。フォトンファクトリーよりさらに3～4桁輝度を向上させたのが播磨科学公園都市の

■大型放射光施設概念図



SPring8なのである。

### 世界最高の8GeVを発生

SPring8の構造を概観してみよう。真空中に電極を置き、陰極を高温に加熱し陽極との間に電圧をかけると、陰極の表面から電子が飛び出す。この電子を線型加速器に誘導する。線型加速器は長さ140mの円筒形をしており、中央に穴のあいた電極が並んでいる。電極には交流電圧がかけられており、電子は往復運動を繰り返すことで、徐々に速度を増していく。電子は、ここで1GeV\*1まで加速される。

線型加速器を出た電子は、円周396mのシンクロトロンに送られる。電子は、シンクロトロン内で1秒間に5億回以上振動する高周波のなかを通過することでさらに加速され、8GeVに達する。電子はさらに蓄積リングに送られる。

蓄積リングの周長は1436m。電子の軌道を曲げるための偏向電磁石が88個設置されている。偏向電磁石は、可視光線の場合のプリズムのような役割を果たしている。

偏向電磁石で曲げられた電子から発生した放射光は、ビームラインと呼ばれる部分から外に取り出される。ビームラインには、アンジュレータ\*2やウィグラー\*3といった装置が設置されており、放射光を用途に合わせて加工する。

SPring8には、合計61本のビームラインが取り付け可能で、そのうち18本が1997年までに完成予定となっている。現在建設中のビームラインは全長約80mほどだが、研究テーマによっては300m、1000mといったビームラインも設置されるという。

当面設置されるビームラインは、大学、国公立研究機関、企業研究所などで共同利用される共同利用ビームラインが10本、日本原子力研究所・理化学研究所の専用分6本、その他R&D用2本の計18本。

ビームラインの利用は、共同利用ビームラインを利用

■現在運転中の主な放射光施設

| 国名   | 機関名              | 施設の名称     | エネルギー<br>(GeV) | 特性光子エネルギー(keV) |
|------|------------------|-----------|----------------|----------------|
| アメリカ | ウィスコンシン大学        | TANTALUS  | 0.24           | 0.05           |
|      | ウィスコンシン大学        | ALADDIN   | 1.0            | 1.07           |
|      | ブルックヘブン国立研究所     | NSLS(X)   | 2.5            | 5.0            |
| フランス | オルセイ電磁光利用研究所     | Super-ACO | 0.8            | 0.67           |
| イギリス | ダルズベリー研究所        | SRS       | 2.0            | 3.2            |
| ドイツ  | ドイツ電子シンクロトロン研究所  | DORIS     | 5.3            | 22.7           |
|      | ベルリン電子シンクロトロン研究所 | BESSY     | 0.8            | 0.6            |
| ロシア  | ノボシビルスク原子核研究所    | VEPP-3    | 2.2            | 4.3            |
| 中国   | 高能研究所            | BEPC      | 2.8            | 3.8            |
| 日本   | 高エネルギー物理学研究所     | PF        | 2.5            | 4.0            |
|      | 分子科学研究所          | UV-SOR    | 0.75           | 0.43           |
|      | 電子技術総合研究所        | TERAS     | 0.8            | 0.57           |
|      | 東京大学物性研究所        | SOR-RING  | 0.38           | 0.11           |

ここにあげた施設は専用、もしくはほかの利用目的との共用施設だが、このほか寄生的に利用されているものも多い。  
出典：日本原子力研究所・理化学研究所「大型放射光施設 SPring-8」、「日経サイエンス1995年2月号」(日経サイエンス社)

■建設中の大型放射光施設

| 計画名称                                                     | 設置者                 | 設置場所            | エネルギー<br>(GeV) | 特性光子エネルギー<br>(keV) | ビーム<br>ライン    | 周長    | 準備            | 建設            | 利用開始  |
|----------------------------------------------------------|---------------------|-----------------|----------------|--------------------|---------------|-------|---------------|---------------|-------|
| ESRF<br>European<br>Synchrotron<br>Radiation<br>Facility | ヨーロッパ連合(EU)         | フランス・<br>グルノーブル | 6.0            | 19.2               | 29本+ $\alpha$ | 844m  | 1986～<br>1987 | 1988～<br>1994 | 1994～ |
| APS :<br>Advanced<br>Photon<br>Source                    | アメリカ・エネ<br>ルギー省     | イリノイ州<br>アルゴンヌ  | 7.0            | 19.0               | 34本+ $\alpha$ | 1104m | 1986～<br>1988 | 1989～<br>1995 | 1996～ |
| SPring8 :<br>Super Photon<br>ring-8                      | 日本原子力研究所・<br>理化学研究所 | 播磨科学公<br>園都市    | 8.0            | 28.9               | 61本           | 1436m | 1987～<br>1989 | 1990～<br>1998 | 1997～ |

出典：日本原子力研究所・理化学研究所「大型放射光施設 SPring-8」、「日経サイエンス1995年2月号」(日経サイエンス社)

する方法と、専用施設を建設し利用する方法がある。SPring8の運用は、(財)高輝度光科学研究センターが担当することになっており、共同利用ビームラインの利用は、課題選定委員会で審議され決定される。また専用ビームラインの建設・利用は、専用施設委員会の審議を経て、申請者が建設費を負担して専用する仕組みになっている。

現在、SPring8の利用を希望する研究者のための連絡組織「利用者懇談会」が設置されている。ここには大学や国公立の研究機関だけでなく、民間企業も含めて1000人以上の研究者が参加している。また企業の利用に際しては、研究結果を公表する場合、利用にかかる費用を無料にする予定になっている。そのほか産業界や企業グループで、専用ビームラインを建設することも検討されているという。

日本の放射光科学は、世界最高峰の域にある。SOR-RINGは当時世界初の放射光専用施設であり、フォトンファクトリー、SPring8と世界最高の明るさをもつ施設の建

設がその後次々と進められたことにも、そのことは現れている。

特にSPring8では、結晶表面の構造解析、半導体結晶の原子配列・成長過程の解析、超伝導材料の構造解析、化学反応プロセスの解明、タンパク質の構造解析、材料の格子欠陥、不純物の検出、がん・循環器障害の診断など、これまでのX線分析では見えなかった現象の解明を飛躍的に進化させるだろう。

- \*1 GeV：ギガエレクトロンボルト（ジェブと読むこともある）。電子ボルト(eV)は、電子の運動エネルギーを表す単位。1eVは、真空中で電子を1ボルトの電圧で加速したとき、電子が獲得する運動エネルギー量。1GeVは10億電子ボルト。
- \*2 アンジュレータ (undulator)：多数の永久磁石を規則正しく並べて作った磁場のなかを電子ビームが通過すると、電子の軌道は何回も蛇行させられる。電子は蛇行するたびに放射光を発生するが、それらは重なり合って非常に強く干渉しあい、特定の波長だけが高い輝度で得られる。このときの放射光は単色光となる。
- \*3 ウィグラー (wiggler)：超伝導磁石のような強い磁場によって電子ビームの軌道を急激に強く曲げると、きわめて波長が短く、輝度の高い連続スペクトルをもつ放射光を発生させることができる。このときの放射光は白色光となる。アンジュレータやウィグラーは、蓄積リングの直線部分に挿入して放射光を発生させることから「挿入光源」と呼ばれている。

[資料・写真提供：科学技術庁]