

### 3.2 広い科学技術分野における先端的基盤研究施設

#### (1) 物質研究がなぜ必要か

この地球上に存在する安定元素は水素からウランまで 84 種しかなく、長寿命の放射性核種として存在する元素を含めても 92 種に満たない。ところがこの少数の元素からつくられた物質の種類は無数にあり、新しい原子構造（原子配列）や性質、機能を持つ物質の発見が続いてきた。とくに、20 世紀後半になって物質の熱的、電氣的、磁氣的特性と物質の原子配列あるいは電子状態との関係を解明する実験技術、解析手法や理論が進歩すると、新しい特性をもつ物質の探索/研究が急速に進み、また、人工的に原子配列を変えて新しい性質や機能をもつ物質の開発も行なわれるようになった。このような物質・材料科学の進歩が情報・通信技術・ナノテクノロジーの進歩を加速し、社会生活を一変させる大きな影響を現代社会にもたらしている。また、遺伝子の発見を端緒とする生命科学の発展も目覚しく、生体内で作り出される多様な物質の研究が行なわれて、生命現象の解明や病気の原因究明、治療法の開発に貢献している。なかでも生体機能をもつ蛋白質が次々に発見されており、その 3 次元原子配列（立体構造）を解析して新しい医薬品を創製する動きが活発になっている。

#### (2) 物質研究の手法

新しい機能をもつ物質の開発においては、物質中の原子配列と電子状態、微量成分元素の量と化学状態を精度よく決め、場合によってはその温度/圧力/磁場依存性や時間の経過に伴う変化を測定する必要がある。一般に、物質の特性や機能は表面、界面（二つの物質の接合面）、バルク（物質内部）で異なっているので、測定は表面/界面でも行うことになる。なお、表面に吸着している不純物原子（分子）の量や表面の平面度/平滑度、界面における原子配列変化などは、ナノデバイス材料の良さを決める最も重要な指標である。

今日では、物質の研究には電子顕微鏡やトンネル顕微鏡によるイメージング法とともに、光（テラヘルツ波から X 線までの電磁波）や中性子の吸収（発光）分光、回折、散乱、偏光計測などが最もよく使われている。なお、高温高圧など極端条件下の計測や時系列計測など光や中性子のみで可能な計測も多い。

X 線や中性子を得るのに加速器を用いると、実験室 X 線源や原子炉に比べて 3 桁以上の輝度が得られるので、際立って高い精度の測定が可能になる。加速器が

現代科学技術の研究開発において、最も重要な先端的基盤研究施設と言われる所以である。

### (3) 放射光の利用

光は電子と強く相互作用するので、物質内の電子分布や電子状態を調べる最も優れたプローブである。放射光は真空紫外から X 線に至る幅広い波長領域で、平行で明るく（高輝度）波長の揃った特性をもっている。ごく微小な試料の計測が可能で、放射光を用いた物質研究の先端的研究手法が次々に開発されている。

生体高分子とくに酵素など蛋白質の立体構造を決めるのに、X 線回折と核磁気共鳴（NMR）が主に使われている。これまで立体構造が決められた蛋白質の総数（蛋白質データベース登録数）は、2003 年 10 月現在で約 22000 であり、そのうちほぼ 19000 が放射光 X 線回折で決められている。なお、中性子回折による蛋白質の構造解析は水素原子の位置を決めることができるという特徴があるが、これまでに解析された蛋白質の数は少ない。

我が国の放射光施設では、X 線領域で SPring-8 と KEK の放射光実験施設 KEK-PF が優れた成果を挙げている。SPring-8 の特長は X 線波長範囲が広く輝度が世界で最も高いことである。一方、KEK-PF はビームラインの使い易さなど実験環境に優れている。なお、KEK にはこの他に 6GeV の AR リング放射光源があり、波長の短い X 線を半ば占有的に使って、蛋白質構造解析や医学利用で優れた成果を得ている。この他、姫路工業大学、分子科学研究所、広島大学、立命館大学の小型放射光施設では、主に真空紫外・軟 X 線領域の放射光を用いた分光学や微細加工の研究が進められている。また、産総研の小型放射光施設ではレーザーコンプトン散乱 γ 線の利用研究や高速偏光可変アンジュレータによる研究が行われている。

上坪委員

放射光の特長は同時に多数のユーザーが実験できることで、スモールサイエンスのための最先端研究施設である。SPring-8 に例をとると、2002 年の統計では、1 年間のユーザーは延べ 8843 人、実験課題数は 1434 件である。学術雑誌に発表した発表論文数は査読つき学術雑誌に発表されたもの 347 編であつた。そのうち 28% 弱の論文がインパクトファクター (IF) の高いハイクオリティジャーナル (IF>3) に掲載されており、なかでも 44 編がとくに評価の高い学術誌 (IF>6) に発表されている。なお、共同利用ビームラインの産業界による利用が増えている、産業界の実験責任者が提案した課題が全体の 12% を超えている。

上坪委員

#### (4) 中性子の利用

中性子は電子と同じく物質波としての性格をもっており、X線と同様に物質研究の優れたプローブである。その波長は中性子のエネルギーが低いほど長くなるので、実際に物質研究に使われるのは低速の熱中性子である。光が重い元素ほど強く散乱されるのに対して熱中性子は水素などの軽元素に強く相互作用するので、物質中の軽元素の情報を得ることができる。例えば中性子回折で蛋白質の立体構造を調べると、X線では困難な水素の位置情報が得られ、蛋白質の機能解明に必要な水素の配位や周囲の水の情報が得られる。

電子や陽子、中性子はスピンとそれに伴った磁氣的性質（磁気能率）をもっている。中性子は電荷を持たないので、中性子は物質中の電子と磁氣的な相互作用により散乱される。物質の磁氣的性質はスピンの向きが異なる（例えば上向きと下向きの）電子の分布の違いで生じるので、中性子を用いると物質の磁氣的特性を解明することができる。現在情報機器で広く用いられている記録媒体などの磁気デバイスは、優れた磁気特性を持つ物質の発見で急速に進歩してきた。

中性子は光とともに生命科学や物質・材料科学の研究に不可欠のプローブであり、核破砕中性子源は最も重要な先端的基盤研究施設である。現在建設中のJ-PARCは、1秒間に50回繰り返すパルス中性子源として、世界で最も輝度の高い中性子を利用に供する予定である。

上坪委員

上坪委員

#### (5) イオンビームの利用

数 MeV に加速されたイオンによる分析も良く使われている。物質中の微量元素に衝突して出す X 線を測定して行なう定量や化学状態分析は PIXE 法と呼ばれていて、ppm (100 万分の 1) から ppb (10 億分の 1) の定量分析が可能である。このほか、入射イオンの後方散乱など原子核核反応やチャネリングを用いた欠陥の研究も行なわれているが、これらは主に大学、国公立研究所の小型加速器を用いて行われている研究である。

1950 年代から多様な化学物質が大気或いは河川に流出して環境が悪化する問題が表面化してきた。とくに化学物質には極微量でも生体に悪影響を与えるものがある。このような化学物質の分析には PIXE と放射光による分光が重要な役割を果たしている。

## (6) 陽電子／ミュオンビームの利用

上坪委員

陽電子は物質中の電子と衝突すると、対消滅を起こして反対方向に出る二つのガンマ線(511keV)になる。この二つのガンマ線を同時計測して陽電子の運動量分布を求め、また、ガンマ線量の時間的変化から陽電子寿命の測定を行って、表面や空孔内の電子状態や材料の欠陥を知ることができる。

一方、ミュオン( $\mu$ )は電子の仲間(レプトン)で、正のミュオン( $\mu^+$ )と負のミュオン( $\mu^-$ )とがあり、ともにスピンと磁気能率を持っていて、2.2マイクロ秒の寿命で陽電子(電子)と2つのニュートリノに崩壊する。その際、陽電子(電子)はミュオンのスピン方向に強く出るので、ミュオンとスピンの向きを検出するのに陽電子(電子)を測定する。

高エネルギー陽子をベリリウムや炭素ターゲットに衝突させると、パイ中間子 $\pi^+$ ( $\pi^-$ )が放出され、それが崩壊して $\mu^+$ ( $\mu^-$ )になる。このミュオンは100%偏極しているので、物質中に注入して磁気共鳴(Resonance)やスピン方向の回転(Rotation)あるいは緩和(Relaxation)を測定する(三つをまとめて $\mu$ SRと読んでいる)と、他の方法では知り得ない物質の内部状態を調べることができる。

$\mu$ SRは1970年代の初期に開発された研究手法であるが、当時、わが国の研究グループがアメリカの加速器を用いて、パイオニア的働きをしている。