大型放射光施設 SPring-8 の概要と研究成果

大 野 英 雄*

* 財団法人高輝度光科学研究センター

Present Status and Research Frontiers on the SPring-8

Hideo Ohno*

* Japan Synchrotron Radiation Research Institute (SPring-8/JASRI)

Synchrotron radiation is useful and powerful tool for research and development on materials science, life science, environmental science and so on. The SPring-8 (Super Photon ring 8GeV) has been operated more than 5 years since October 1997. At the moment, 44 beamlines are operating for the users and another 3 beamlines are under construction. The present status and some research frontiers on the materials science at the SPring-8 are summarized.

Key words : synchrotron radiation, SPring-8, X-ray, materials science

1. は じ め に

放射光が発見され、その利用が開始されてから 50 年以上になり、物性物理、化学、物質科学、材料、生命科学などの基礎基盤研究のみならず、産業応用などの分野にも多くの成果を上げてきた。SPring-8 (Super Photon ring-8GeV) は、世界研究内容の高度化に伴い、高強度・高輝度を目指した第 3 世代放射光光源の建設が進み、ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, フランス, グルノーブル), APS (Advanced Photon Source, 米国, アルゴンヌ国立研究所) ならびに SPring-8 (Super Photon ring-8GeV, 日本) が稼働している。

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 年に初めて電子シンクロトロンで観測された。放射光は、電子のエネルギーが高く、磁場が強いほど、波長の短い高エネルギー X 線を発生する。電子の進行方向を変えるために用いられ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光電磁石と、特定の形に組み合わせた磁石により電子を蛇行させより高強度の光を発生させる挿入光源 (アンジュレータ, ウィグラー) がある。放射光の発生原理ならびにその利用研究に関する一般的な解説は引用文献 [1, 2] を参照されたい。

SPring-8 は、世界最高性能の放射光を発生することが出来る大型の研究施設であり、平成 3 年から日本原子力研究所 (原研/JAERI) と理化学研究所 (理研/RIKEN) が共同で建設し、約 6 年の歳月をかけ完成し、平成 9 年 10 月から共同利用を開始したものである。

本施設は、原研と理研により建設され、財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) が一元的に管理・運営を行っている。SPring-8 は、日本国内はもとより海外の研究者にも広く開かれた共同利用研究施設として、物質科学、生命科学、化学、環境科学、地球惑星科学、医学など幅

広い研究分野において利用されている。また、産業界においても SPring-8 の利用の重要性が認識され、産業界専用の放射光ビームラインの運用もなされている。

現在、本施設は年間 5400 時間運転し、ユーザーが利用できる時間は年間 4200 時間を超えている。研究課題も年間約 1000 件が採択され、年間延べ約 7000 人以上の研究者に利用されている。

2. SPring-8 の概要

2.1 施設の構成

SPring-8 は電子を 8 GeV まで加速する入射系加速器 (線型加速器, シンクロトロン) と電子を長時間蓄える蓄積リングから構成されている。図 1 に施設の航空写真を示す。第 3 世代放射光光源の特徴は、挿入光源を主体としたものであり、従来の放射光光源と比較して極めて高い輝度が得られる。

蓄積リングに設置されるビームラインは 62 本であり、挿入光源から 38 本、偏向電磁石から 24 本である。図 2 に稼働中 (43 本) ならびに調整中 (3 本) のビームラインを示す。これらのビームラインは利用形態により、共用ビームライン、専用ビームライン、原研・理研ビーム

図 1 SPring-8 の全景写真

* 〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1 (1-1-1, Kouto, Mikazuki, Sayo, Hyogo, 679-5198 Japan)

図2 SPRING-8におけるビームラインマップ

表1 蓄積リングの性能

	設計値	実測値
対称性	24/48	4
蓄積電流値		
マルチパンチモード	100mA	100mA
シングルパンチモード	5mA	13mA
エミッタンス	6.9nmrad	3nmrad
寿命 (life time)		
マルチパンチ (100mA)	24hrs	120hrs
シングルパンチ (1mA/パンチ)		22hrs

ライン、R&D ビームラインならびに加速器用ビームラインに分類される。

2.2 蓄積リングの性能

SPRING-8の加速器は世界最高性能を有している。蓄積リングの設計値と実測値を表1に示す。

2.3 利用状況

共用ビームラインを用いた利用研究は、公募（原則年2回）により行われている。各公募期における共用ビー

図3 課題数ならびに利用者数の推移

ムラインと専用ビームラインを合わせた課題数ならびに利用者数の推移を図3に示す。年間約1000件の課題が実施され、延べ約7000名の研究者が利用している。

各公募時における応募課題数と採択課題数を図4に示した。採択率は研究分野により異なるが、50%～80%で

図4 各公募時における応募課題数と採択課題数

ある。

3. SPring-8 の特徴を生かした研究

SPring-8 から得られる、高輝度・高品質な光を用いた特徴ある研究内容を以下にまとめた。

(1) 高輝度光

極微小な試料での研究：

- ・極微小サイズ(～10 μm)の蛋白質結晶の立体構造、隕石あるいは宇宙塵の内部構造

極微量な試料：

- ・極微量(～1 mg)の粉末結晶の精密電子密度分布・極薄膜、クラスター、希薄不純物の解析

極微小な相互作用の観測：X線非線形光学現象

- ・マイクロビームの利用(X線～0.1 μm, 軟X線～20 nm)：微小領域解析, 走査型顕微鏡

高指向性ビーム(10^{-5} ～ 10^{-7} rad)の利用：

- ・吸収・屈折・位相・回折コントラストのイメージング

(2) パルス光の利用, 時分割解析(高速シャッター：ms～μs, 少数パルス：ns)：

- ・蛋白質結晶の反応過程・生体反応
- ・化学反応過程の反応中間体の構造
- ・触媒反応, 光化学反応の機構

(3) エネルギー選択性の利用：

- ・異常分散利用の結晶構造解析
- ・高感度 XAFS による微量原子近傍の構造

(4) 高エネルギー分解解析：

- ・X線非弾性散乱(～meV)によるフォノンの分散関係
- ・X線核共鳴散乱(μeV～neV)による電子状態・運動状態

(5) 高エネルギーX線(50～300keV)の利用：

- ・重元素内殻励起
- ・核励起・核共鳴散乱
- ・コンプトン散乱
- ・ランダム系物質(ガラス, 液体)構造

(6) 直線偏光・円偏光の利用：

- ・磁性体の磁性電子の運動量分布
- ・磁性多層膜の磁気特性とスピントロニクス

(7) 空間コヒーレンス(0.1～10 mm)・時間コヒーレンス(1 mm～100 m)の利用：

- ・X線のコヒーレンスと光子相関関数
- ・X線ホログラフィーによる立体構造の直接観察

4. SPring-8 における利用研究分野

(1) 物質科学

- ・超伝導体, 強相関電子系物質, 重い電子系物質などの電子状態と機能発現機構
- ・量子ナノ構造の原子構造と電子状態
- ・物質表面構造と触媒反応, 化学反応
- ・高温・高圧下における構造相転移, 材料合成
- ・微量元素の局所構造と化学状態
- ・非晶質物質, 液体, 融体の構造
- ・フォノンなどの素励起の分散関係
- ・X線内殻励起による新物質の創製

(2) 地球・惑星科学

- ・地球深部マントルの構造と運動
- ・隕石や惑星間塵の構造と太陽系生成初期の状態

(3) 生命科学

- ・生体超分子タンパク質複合体の立体構造
- ・生体機能発現の機構, 酵素反応
- ・ヒトゲノムデータ中の遺伝子がつくり出すタンパク質の立体構造とその機能
- ・筋収縮・弛緩の機構
- ・生体試料中の環境汚染微量元素の分析

(4) 環境科学

- ・排ガス浄化触媒, 高性能電池材料, 水素吸蔵合金などの開発による環境負荷低減

(5) 医学利用

- ・微小血管造影法による腫瘍血管の観察
- ・マイクロトモグラフィー・屈折コントラストイメージングによる呼吸器系疾患の観察

(7) 産業利用

- ・機能材料(磁性体, 磁性多層膜, 高温超電導体など)の特性発現機能
- ・電子・光・磁気マイクロデバイスの作成プロセスの改良・性能向上
- ・環境調和型触媒(光触媒, 排ガス触媒), 化学プロセス触媒の触媒活性機能
- ・電池電極の信頼性評価・高性能化
- ・構造材料の耐久性向上, 疲労・破壊・腐食の進展機構
- ・機械部材深部(対摩耗・耐熱コーティング)の残留応力分布
- ・高分子の成形加工における構造の動的変化
- ・放射光照射による新素材創製と素材開発(結晶化

促進)

- ・特定の病気の発症に関与する蛋白質の機能
- ・がん、糖尿病などを克服するゲノム創薬

5. SPring-8の主な成果

最近得られたいくつかの成果を以下に示す。

- (1) 粉末回折による精密構造物性 [3]
—金属原子を内蔵したフラーレン分子の構造—
C₆₀を代表とするフラーレン分子は、炭素原子の作る5員環が必ず6員環に隣接し、5員環同士は隣接しないことが知られていたが (Isolated Pentagon Rule), スカンジウム原子 (Sc) 2個を含むフラーレンで初めてこのIPR則の破れたフラーレン分子が発見された。微量粉末試料 (~1 mg) で結晶構造および分子構造が高精度に決定された。また、従来の金属内包フラーレン分子では、すべて金属原子が内蔵されたものであったが、Sc₂C₂@C₈₄ではSc₂C₂炭化物がフラーレン・ケージ内に内蔵されていることが明らかとなった。
- (2) 超伝導体MgB₂の電荷密度の精密測定 [4]
新規の超伝導体MgB₂結晶の電荷密度が0.1e/Å³の精度で決定された。電荷密度分布からボロン原子間には共有結合が形成されていることが明瞭にわかる。マグネシウムはMg²⁺の状態、Mgから2個の電子は原子間に非局在的に分布している。超伝導転移温度以下では、原子間に遍歴する電子の密度はボロン原子のネットワークへ集中することが明らかにされた。これらの結果は、今後の重要な議論に発展することが期待される。
- (3) 地球構成物質の高温高压下のその場観察 [5]
火山内部のマグマの粘性を平行性の高い放射光を使ってラジオグラフィ法で測定することができるようになった。マグマの主成分となるケイ酸塩の上部におかれた白金球が高压下での融解に伴い落下する様子を直接観察することにより、正確な落下速度が得られ、それから粘性を求めることができる。
- (4) X線磁気回折・散乱による磁気構造の解析 [6]
—Ho-Feガーネットの磁気形成因子の軌道とスピン成分の温度依存性—
X線回折強度は、磁性体の磁気モーメント (M) と入射X線 (Ki) の方向との関係に依存し、M//Kiでは磁気形状因子の軌道磁気モーメント成分μ_Lが、M⊥Kiでは軌道+スピン磁気モーメント成分μ_{L+2S}が観測できる。Ho+Feガーネットは、代表的なフェリマグネット、130 Kより高温でHoの磁気モーメントがFeのそれより小さくなり、全磁化の方向が反転する。この実験で初めてHoの軌道磁気モーメント成分およびHo+Feのスピン磁気モーメント成分の直接観測に成功し、その温度依存性を決定した。磁性体の磁気構造研究に中性子線回折と相補

的な役割をもち、重要な発展が期待できる。

- (5) 蛍光X線による超微量元素分析
蛍光X線分析による超微量物質の検出能力を飛躍的に向上させる技術を開発し、ニッケル、鉄、コバルトなどの検出限界の記録を更新した。従来の検出器に代えて新しく開発した湾曲結晶分光器を用い、エネルギー分解能とS/N比を大きく改善しニッケルの検出限界を4フェムトグラム (fg) に更新した。
- (6) 産業利用 [7, 8]
Liイオン電池電極材料の開発、次世代磁気ヘッド用GMR膜の製作条件を同定するためのnm多層膜の精密構造解析技術の開発、化合物半導体素子の局所歪み解析を利用した波長多重伝送用光学素子の発光特性向上などの成果が得られているが、一例としてLiイオン電池電極のサイクル劣化原因の解明を、電池セルでのその場 (in situ) 評価をXAFSを用いて行った。XAFSスペクトルの解析結果から、NiO₆八面体の歪みの復元力の減少がLiイオン充放電を制限していることを明らかにした。

6. おわりに

SPring-8は国内外の幅広い利用者に開かれた共同利用施設である。SPring-8は物質科学、生命科学、環境科学などの基礎研究分野において重要な研究手段であるが、産業利用においても多彩な利用の可能性を有している。21世紀においても、中性子線、レーザーなどと相補的に重要な研究手段の一つであり、基礎研究のみならず、ナノテクノロジー、情報、ライフサイエンス、環境など、日本においてこれからの科学技術の発展のために重点的に進めようとしている分野でも大きな貢献ができるものと考えられる。

SPring-8が有する高エネルギーX線とマイクロビームを組み合わせることで、腐食現象ならびに応力解析のその場観察においても有意義な研究手段となるものと思われる。

参考文献

- 1) 日本物理学会編, 「シンクロトロン放射」, 培風館 (1986).
- 2) 量子科学技術推進協議会編, 「実用シンクロトロン放射」, 日刊工業新聞社 (1997).
- 3) C.-R.Wang, T.Kai, T.Tomoyama, T.Yoshida, K.Kobayashi, E.Nishibori, M.Takata, M.Sakata and H.Shinohara: *Nature* **408**, 426 (2000).
- 4) E.Nishibori, M.Takata, M.Sakata, T.Tanaka, T.Muranaka and J.Akimitsu, *J.Phys.Soc.Japan*, **70**, 2252 (2001).
- 5) K.Funakoshi, SPring-8 Research Frontiers, 1999/2000, p.42 (2000).
- 6) M.Ito, SPring-8 Research Frontiers, 1999/2000, p.33 (2000).
- 7) T.Nonaka, C.Okuda, Y.Ukyo and T.Okamoto, *J. Synchrotron Rad.*, **8**, 869 (2001).
- 8) 古宮 聡, 放射光, **16**, 4 (2003).

(2003年5月6日受理)