

基礎講座 1 SPring-8 について、概要説明

JASRI 加速器部門

原 雅弘

1. はじめに

放射光は光速に近い電子が磁場で軌道を曲げられたときに発生する電磁波である。第2次世界大戦後電子加速器ベータトロンで放射光による電子エネルギーの損失が測定され、その後シンクロトロンで放射光が直接観測された。強度・スペクトルなどの性質を計算したところ非常に優れていることが分かり、既存の高エネルギー電子加速器に寄生する形で放射光の利用がはじまった。これを第1世代の放射光装置と呼ぶ。偏光電磁石からの放射光を利用し、電子エネルギーの変化に伴って光ビーム軸、強度、スペクトルが変化するなど多くの障害があった。日本では1975年完成の原子核研究所のINS-SOR (0.4 GeV) をはじめとして、電子技術総合研究所のTERAS (0.75 GeV)、高エネルギー物理学研究所のPhoton Factory (2.5 GeV)、分子科学研究所のUV-SOR (0.75 GeV) とあいついで放射光専用の蓄積リングが建設され、1980年代の前半に稼働しはじめ、放射光を用いた研究が大きく発展した。これらの施設を第2世代放射光施設と呼ぶ。光源は主として偏光電磁石であるが、周期磁場を用いて電子を多数回蛇行させることにより高輝度を得る挿入光源が考え出され実用化された。挿入光源には2種類あり、スペクトルを短波長側へシフトしたり、高フラックスを得たりするウィグラーと、電子軌道を弱くうねらせることにより干渉性をもたせ、準単色光で高輝度を得るアンジュレータである。

1980年代半ばにはいって専用光源の時代になると、放射光を利用

する研究者の数も急激に増大し、光源に対する要求が高度化すると共に多様化してきた。放射光発生

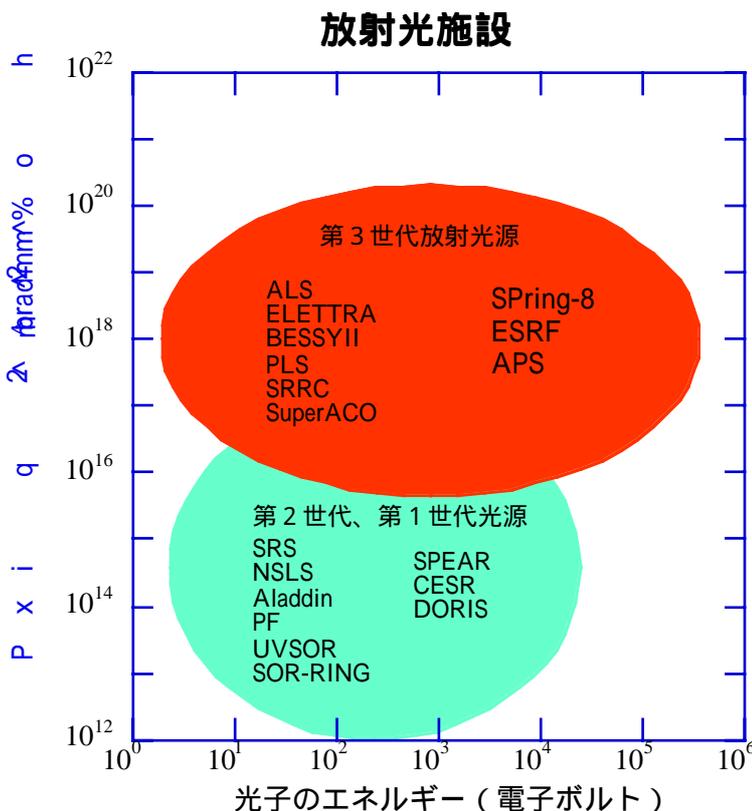


図1 世界の放射光施設の分類

技術の発展，特に挿入光源の出現と，低エミッタンスの電子ビームを蓄積する加速器技術の進歩により，低エミッタンス電子蓄積リングとアンジュレータ等の挿入型光源の組み合わせで高輝度光源を実現することが可能となり、第3世代放射光施設建設の時代となった。こうした状況で電子エネルギーが5 GeV を超す第3世代の大型放射光施設が欧州・米国・日本と相次いで建設された。SPring-8 はこれらの施設の最高峰に位置する。

## 2 . SPring-8 の加速器

SPring-8 は、兵庫県の播磨科学公園都市に 1991 年から日本原子力研究所と理化学研究所が共同で建設し、1997 年 10 月(財)

高輝度光科学研究センター（JASRI）のもとで供用を開始した。

SPring-8 の加速器施設は、線型加速器、シンクロトロン、蓄積リングで構成される(図2)。

電子銃から引き出された電子は、線型加速器で1 GeVまで加速され、シンクロトロンでさらに8 GeVまで加速されて蓄積リングに貯め込まれる。蓄積リングに入射・蓄積された電子

ビームは、リングを周回しながら放射光を発生し続ける。電子の軌道を曲げて放射光を発生する光源には、偏向電

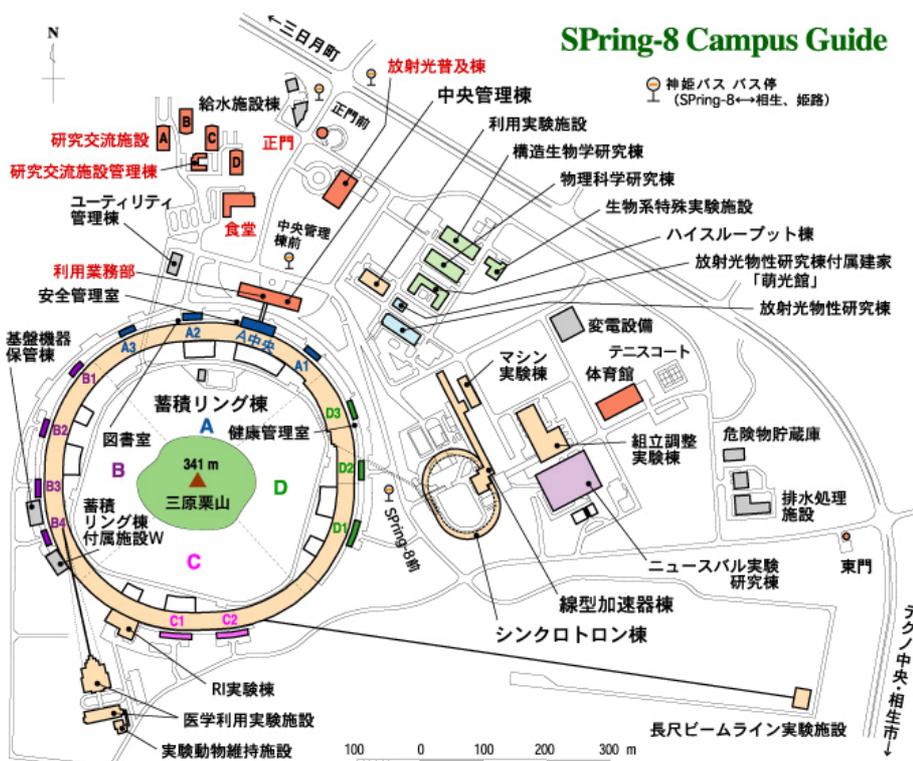


図2 SPring-8 のサイトと加速器の配置

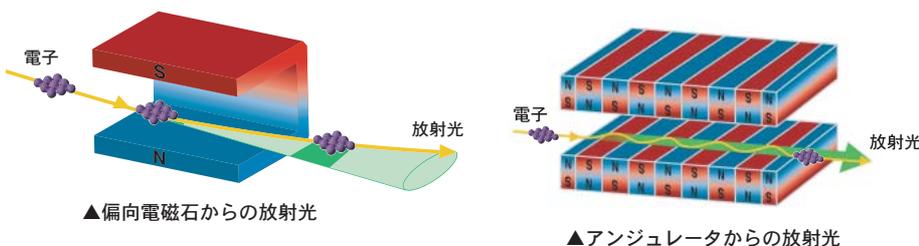


図3 偏向電磁石とアンジュレータからの放射光の発生

磁石光源と、直線部に磁石列を設置してそれらの作る周期磁場によって電子軌道をうねらせてつよい光を得ることのできる挿入光源（アンジュレータとウィグラー）とがある（図3）。発生した放射光を取り出して利用するための装置がビームラインである。基幹チャンネル、光学ハッチ、実験ハッチから構成される。光学ハッチで取り出された放射光を整形し、実験ハッチに導き試料に照射して実験するのだが、このようなビームラインが62本まで設置できる。SPring-8の主な仕様を表1にまとめておく。

表1 SPring-8の主な性能・仕様

電子線型加速器		シンクロトロン	
エネルギー	1 GeV	入射エネルギー	1 GeV
繰り返しの速さ	60 Hz	最大エネルギー	8 GeV
電子銃 熱電子銃	200 kV	繰り返し	1 Hz
R F周波数	2856 MHz	電流	10 mA
加速管	26 本	エミッタンス	230 nm·rad.
クライストロン	13 本	周長	396 m
最大出力	80 MW	偏向電磁石数	64 個
		集束用電磁石数	140 個
		加速周波数	508.58 MHz
蓄積リング	Hybrid Optics	HHLV Optics	Phase II Optics(LSS)
エネルギー	8 GeV	8 GeV	8 GeV
蓄積電流(多バンチ)	100 mA	100 mA	100 mA
周長	2436 m	2436 m	2436 m
エミッタンス	6.8 nm·rad	6 nm·rad	6 nm·rad
周回時間	4.79 μ秒	4.79 μ秒	4.79 μ秒
加速周波数	508.58 MHz	508.58 MHz	508.58 MHz
特性光子エネルギー	28.9 keV	28.9 keV	28.9 keV
電子エネルギー幅	0.0012	0.0011	0.0011
水平垂直結合	0.06%	0.04%	0.06%
チューン(水平/垂直)	51.16/16.36	43.16/21.36	40.15/18.35
運動量アクセプタンス	1.3%	1.9%	2.0%
寿命(多/単)	70hr/5hr	140hr/11hr	110hr/22hr
ビームサイズ			
水平	400 μm/86 μm	390 μm	380 μm
垂直	6.7 μm/6 μm	3 μm	4.5 μm

## 2. 加速器の現状

磁石の並びは、基本的にはセル構造を取っている。ユニットセルは30mの長さで、2個の偏向電磁石・10個の4極電磁石・7個の6極電磁石から構成されており、当初は通常セル44個と偏向電磁石をのぞいた直線セル4個であったが、2000年の夏に直線セル部を長尺アンジュレータが設置できるよ

う長直線部に改造し、現在は表 1 の Phase I Optics で運転している。現在の運転におけるベータatron関数と分散関数を図 4 に示す。高周波加速系は 4 つの RF ステーションをもち、不安定性を取り除くため単セル空洞 32 個で構成されている。放射光を発生する電子はバンチ状のビームを形成しており、バンチの数は 1 個から 2436 個まで任意の数の制御でき、バンチのタイミング信号も供給できるようになっている。SPring-8 の制御系は、高速の光ファイバーを用いた FDDI ネットワークに基づいている。1997 年に運転を開始して以来、運転に必要な殆ど全てのデータが記録されている。そのため、アクシデントがあった場合、後から原因を追及できるようになっている。

SPring-8 が稼働し始めて 5 年になろうとしている。電流値は 1999 年に 100 mA に達し、電子ビームの大きさ・安定度・ビーム寿命等の性能は世界最高の水準に達している。電子ビームの軌道の安定度は  $4\text{--}5\ \mu\text{m}$  で、垂直方向のビームサイズは世界最小となっている。光源は偏向電磁石より挿入光源が主となっている。利用者は光源で発生した放射光ビームをミラーや分光器を通して実験装置に導いて利用する。利用に際して、研究者は加速器から実験装置に至るシステムを全体として理解することが重要である。

### 3. ビームライン

放射光は、電子の軌道が曲げられると発生するので、偏向電磁石では常に発生している。光源としては、直線部に設置する挿入光源を主としている。放射光を取り出すポートは全部で 62 個あり、24 本が偏向電磁石から、38 個が直線部からとなっており、供用開始時に 10 本であったビームラインは、2002 年 5 月の時点で 39 本が稼働している。ビームラインの長さは、実験ホール内のものが 80 m 以下で、長いものとしては 300m 迄のものが 9 本、1 km までのものが 3 本ある。1 km が 1 本、215 m のも

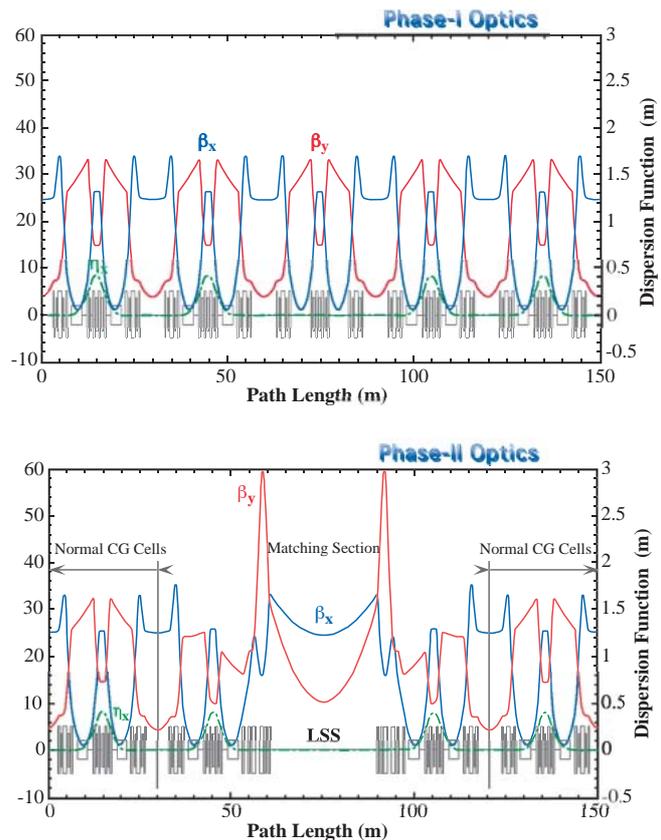


図 4 HHLV と LSS オプティクスに対するベータatron関数と分散関数

のが 2 本建設されていて既に利用されている。

SPring-8 の挿入光源は表 2 に示すように特徴のあるものが多い。真空封止型アンジュレータは、電子ビームの通過する真空部に磁石列を封じ込めることにより磁石のギャップを狭くすることができ、利用できる波長の範囲を短い方に広げている。垂直偏光・ヘリカル型・可変偏光型・8 の字型など、輝度と偏光特性で高性能のものが設置されている。また 2000 年の夏には長直線部を改造して BL29XU に 27 m の長尺アンジュレータが設置され、世界最高輝度の光源が実現している（図 5）。



図 5 BL19XU の 27 m の長尺アンジュレータ蓄積リングの直線部に設置した状態で全長 27m、磁石長は 25m、周期長が 32mm、周期数は 780、最大磁場はギャップ 12mm で 0.57T。

SPring-8 で得られる放射光の輝度を図 6 に示しておく。

表 2 設置済みの挿入光源のリスト

Beamline	Type	$\lambda_u$ (mm)	$N\lambda$	Min.Gap (mm)
BL08W	Elliptical MPW	120	37	20
BL09XU	Standard U	32	140	8
BL10XU	Standard U	32	140	8
BL11XU	Standard U	32	140	8
BL12XU	Standard U	32	140	8
BL13XU	Standard U	32	140	8
BL15XU	Revolver type U			
	Planar	40	102	20
	Helical	32	48	20
BL16XU	In-vacuum U	40	112	8
BL19XU	Standard U	32	780	12
BL20XU	In-vacuum U	26	173	7
BL23SU	Variable Pol. U	120	16	36
BL24XU	Figure-8 in-v U	26	173	5
BL25SU	Twin helical U	12	12×2	30
BL27SU	Figure-8 U	10	44	30
BL29XU	Standard U	32	140	8
BL35XU	Standard U	32	140	8
BL39XU	Standard U	32	140	8
BL40XU	In-vacuum U	36	123	7
BL41XU	Standard U	32	140	8
BL44XU	Standard U	32	140	8
BL45XU	Tandem vert. U	37	37×2	8
BL46XU	In-vacuum U	24	186	5
BL47XU	Standard U	32	140	8

#### 4 . ビームラインの現状と利用研究

ビームラインは、施設者が設置して多数のユーザが用いる共用ビームラインと、特定のユーザが自分たちの負担で設置して専用使用する専用ビームラインと、理研・原研のビームラインに分類でき

る。

共用ビームラインは、年2回課題募集を行い、課題選定委員会で採択された実験に利用される。課題は生命科学、散乱・回折、XAFS、分光、実験技術・方法、産業利用、特定利用に分けて審査されるが、生命科学、散乱・回折の応募件数が60%を占め、SPring-8の特長であるX線の利用が多い。所属機関別で見れば大学が60%を超え、民間企業や海外の利用がまだ少ないように思われる。施設の利用促進を図るため、利用料金は共用でも専用でも結果を公表（成果非専有）すれば無料である。成果専有課題については、ビーム使用料を支払うが課題審査を一部簡略化することにより産業界の利用に配慮している。この他に特定利用で中長期間の実験が可能となる課題の募集も行っている。

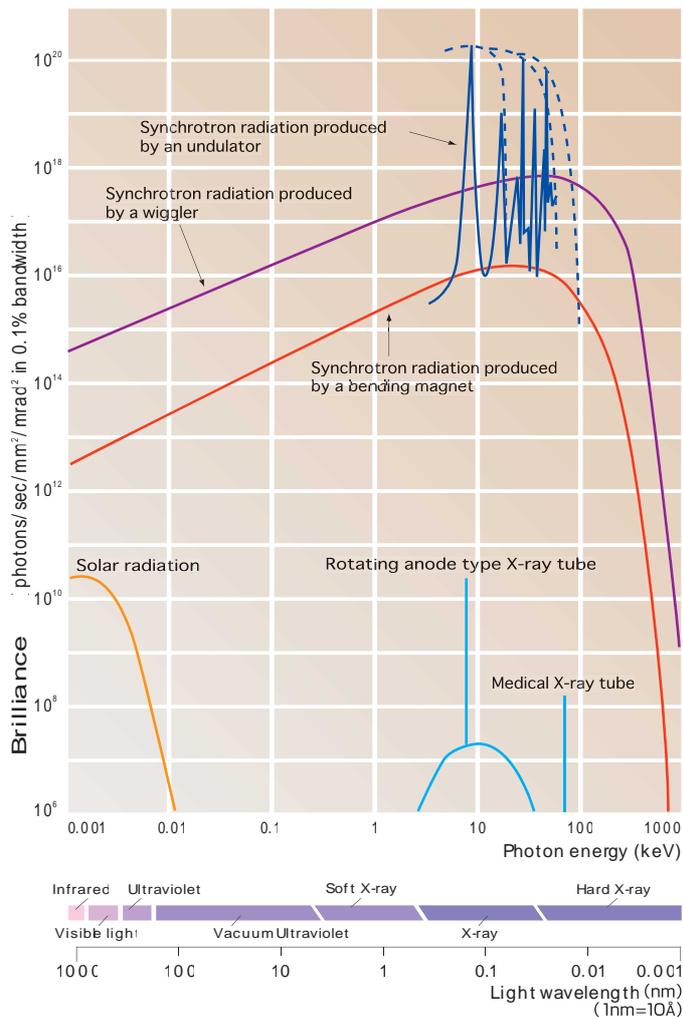


図6 SPring-8 放射光のスペクトル輝度

専用ビームラインは現在8本稼働している。民間企業13社が共同で作ったサンビームライン2本、兵庫県ビームライン、無機材研ビームライン、大阪大学のレーザー電子光ビームラインと蛋白質研究所ビームライン、台湾ビームライン、創薬産業ビームラインである。利用の仕組みについては図7に、2002年5月の時点でのビームラインマップを図8に示し

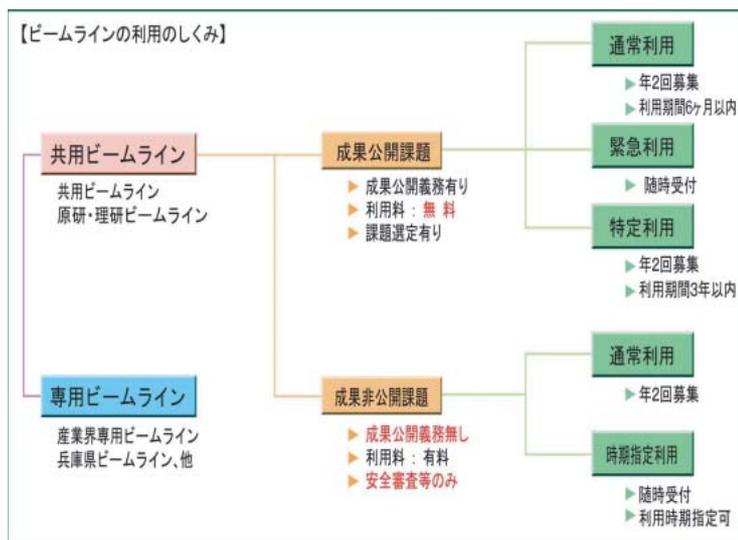


図7 ビームライン利用の仕組み

ておく。

放射光の利用は1997年10月の供用開始以来順調に増加している。平成13年度1年間について、運転は3週間または4週間の運転サイクルで、5311時間運転したうちユーザー時間は3695時間で、のべ1701件、7992人の利用があった。

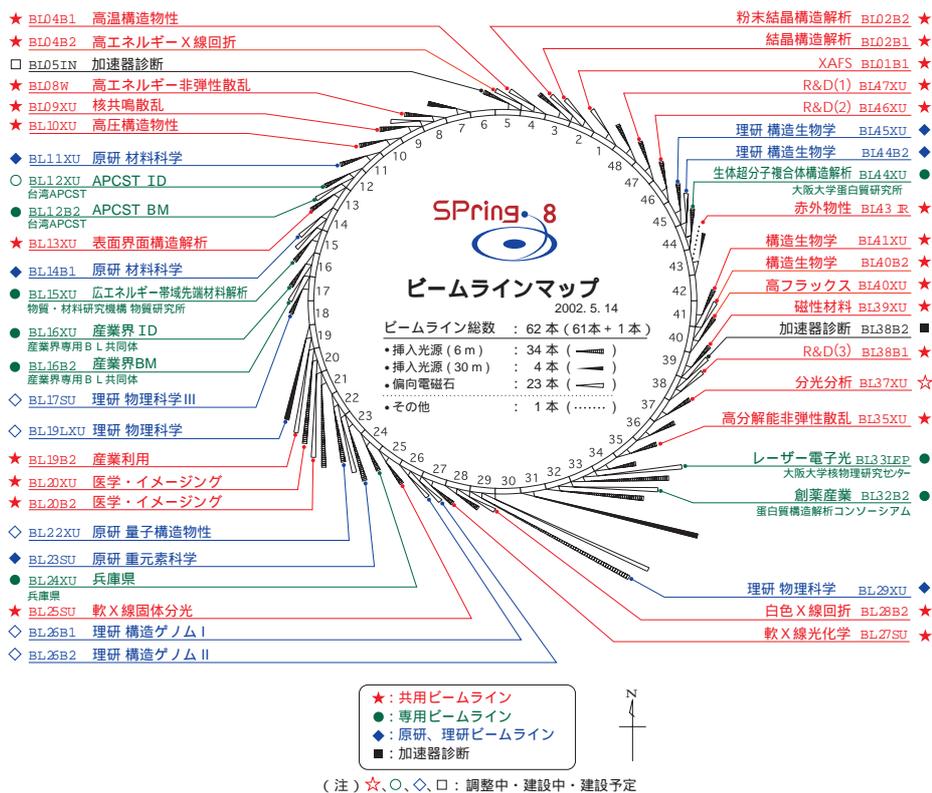


図8 ビームラインマップ

4 . SPring-8の利用と成果

放射光の特長は1)きわめて輝度が高い、2)指向性が強い、3)X線から赤外までの広い波長領域を含む、4)偏光している、5)短いパルスの繰り返しである、などであり、特にSPring-8では

1)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が得られ、さらにγ線や赤外線も利用できる。

2)挿入光源を多数設置でき(38台)、特徴のある光を同時に利用可能である。

3)長い磁石列をもつ挿入光源(30m)の設置が可能である。

4)特別な先端実験施設(医学利用施設、RI実験棟、1kmビームライン実験施設)が用意されている。

5)30 p秒程度の短いパルスで、バンチの数を1個から2436個まで制御できるので時間分解測定ができる。

6)偏光特性を利用した実験が可能である。

こうした特徴を用いてこれまでに多くの研究成果があげられている。

以下にはこれまでSPring-8の放射光を用いて得られた成果の幾つかについて挙げておく。

1)生命科学

東京大学の豊島教授の研究グループは、膜蛋白質である筋小胞体カルシウムポンプの立体構造を世

界で初めて解明した。筋肉の収縮・弛緩はカルシウムイオンで引き起こされる。カルシウムイオンは筋原繊維を取り巻く筋小胞体に貯蔵されており、その細胞膜に存在するイオンチャンネルによって筋細胞中に放出されて筋肉を収縮させ、イオンポンプによって筋小胞体に取り込むことにより弛緩させる。膜蛋白質であるポンプ蛋白質は、水溶性蛋白質に比べて結晶化が非常に難しく、実際得られた結晶は厚さ 20  $\mu\text{m}$  程度の非常に薄いものであった。しかし SPring-8 の高輝度 X 線光源を用いた結晶回折法で、カルシウムを結合した状態のカルシウムポンプの立体構造を、2.6 オングストローム分解能で解明することができたのである。この成果は英国雑誌 Nature に掲載され表紙を飾ったが、カルシウムポンプは心筋梗塞やガンの治療薬開発の手掛かりとして大いに注目されており、今後の研究の進展が期待される。理化学研究所の宮野氏のグループは、SPring-8 の理研構造生物ビームライン I を用いて G タンパク質共役受容体 (GPCR) ロドプシンの立体構造を解明した。ロドプシンは目の網膜にある物質で、生物の大切な視覚を司る環境情報センサーである。数個の光子で活性化される極めて鋭敏な分子スイッチとして機能しており、宮野氏らの研究でこの膜蛋白質の 7 回貫通型の立体構造をもとにした信号伝達の機能が明らかになった。においや痛覚などの信号伝達も同じ GPCR の 7 回貫通型構造に基づいていると考えられており、普遍性ゆえにこの成果は高く評価され雑誌 Science の表紙を飾った。

生命科学における放射光の利用は、これからの製薬や医療に大きく関わってくる。ヒトゲノムの塩基配列の読みとりは一段落し、これから重要となるのはタンパク質である。なぜなら、遺伝情報にしたがって実際に機能を実現するのはタンパク質だからである。生命の働きや病気のメカニズムを解明し、そこに関与するタンパク質を取り出して結晶化し、その構造を明らかにすることから新しい治療法や薬の開発が期待される。タンパクの立体構造解明に欠かせないのが高輝度 X 線源 SPring-8 なのである。

## 2) 材料科学

名古屋大学の篠原教授のグループは、これまでの常識を破る構造をもつフラレン分子 Sc<sub>2</sub>@C<sub>66</sub> の生成に成功した。サッカーボール型分子 C<sub>60</sub> をはじめとする炭素からなるボール状分子 (フラレン) は、炭素原子が作る六角形と五角形から形成されている。従来五角形が隣接するフラレンは存在しなかったが (孤立 5 員環則)、フラレン分子中に Sc 金属を内包させることで五角形が隣接する分子 Sc<sub>2</sub>@C<sub>66</sub> を生成することに成功し、SPring-8 の粉末回折用のビームラインを用いて炭素原子の配列を決定することができた。この研究も雑誌 Nature に掲載された世界レベルの成果である。アーク放電によって生成した煤からクロマトグラフィー法によって分離・精製した微量の試料で金属内包フ

ラーレン分子の構造を決定できたのは、SPring-8の高輝度と優れた試料生成技術・測定装置・解析技術等の組み合わせによるものだといえる。炭素の材料については最近カーボンナノチューブの利用が始まっており、チューブ内にフラーレンを詰めたものも確認されている。これからますます発展が期待されるナノテクノロジーの領域において、原子レベルでの診断や評価手段としてのSpring-8の役割は非常に大きい。

### 3) イメージング

放射光 X 線の屈折率の違いによるコントラストを利用したイメージングが注目されている。従来の方法との大きな違いは、吸収コントラストを利用する撮影は撮影面を被写体の直後に置くのに対し、屈折コントラストを利用する場合は被写体からかなりの距離をおいている点である。通常の吸収コントラストを利用して撮った像と比べると、鮮明さに歴然とした違いが見られる。こうした技術で、組織のちょっとした密度の違いによるコントラストが得られるため、ガン組織と正常組織との判別が可能となり、将来ガンの検診などに役立つと思われる。さらに、医療用の CT 技術と組み合わせることで試料の断面の観察も可能となり、応用範囲は広い。

### 4) 蛍光 X 線微量元素分析

重元素の蛍光 X 線分析も注目を浴びている。この分析法の特徴は、試料を非破壊・高感度で検査できる点にある。「和歌山毒物カレー事件」の試料の分析にSPring-8の放射光が用いられたことは衆知の事実である。亜硫酸に含まれる微量物質が産地や精製過程などその物質に固有の由来によって異なることを利用して異同識別を行ったのである。この蛍光 X 線微量元素分析は、考古学分野でも熱い期待がかけられている。古代エジプトのファイアンスというガラスの分析から古代の交易の手がかりが研究されている(5)。また、古九谷など陶器に含まれる微量元素の違いによる年代・産地・窯元などの識別が研究されている(6)。マイクロビームを用いると元素の分布を高空間分解能で測定でき、植物や魚介類の生体分析を行うことにより自然環境保全に役立つことも期待されている。

### 5) 産業利用

SPring-8は、基礎的な分野だけでなく産業利用の分野にも利用され、大きな期待がかけられている。マイクロビームを用いた回折やその場観察などがその例である。NECのグループが姫路工業大学と共同で行った、光通信用集積素子の発光特性の40%向上の研究を例としてあげよう(7)。この素子は、InP基盤の表面にSiO<sub>2</sub>膜で部分的に覆ったマスクを作り、マスク以外の所に有機金属気相成長(MOVPE)法によってInGaAsP系の結晶成長を行う「選択成長法」により作られる。選択成長層の組成を決定するのに必要な2つのパラメータを、フォトルミネッセンス法によるバンドギャップの測定と

SPring-8 のマイクロビーム X 線回折を利用した精密な格子定数の測定から決定することができるようになった。これを利用して、集積素子の発光特性を約 40% 向上させることができたのである。この他にも電池の表面や界面での現象を非破壊でその場解析し、電池の寿命の改良に役立っている (8)。

産業応用の研究は、生産に直結した技術開発・新製品開発・企業による基礎的研究など、目的や問題提起が明確な場合が多い。したがって、いかに企業の要望と SPring-8 の利用法を結びつけるかが重要なポイントとなってくる。JASRI にはコーディネーター制度や利用促進部門があり、企業の SPring-8 の利用を支援する体制ができています。研究内容が千差万別で身近な問題が多く経済効果が大きい産業利用の研究に、SPring-8 が利用されることを願っている。

#### 6) その他

高エネルギー加速器研究所の岸本氏のグループは、 $^{197}\text{Au}$  に放射光を照射して軌道電子の遷移による原子核の励起を観測した。内殻電子がたたき出されるとその軌道は外殻電子が穴埋めをする。この遷移に伴って通常は蛍光 X 線が放出されるが、電子軌道と原子核のエネルギーレベルの差が殆ど等しく多極度が同じであれば、蛍光 X 線が放出されずに原子核が励起することがある。森田氏によって予測されたこの稀な現象を、時間分光法を用いて励起に伴って核から少し遅れて放出される内部転換電子を測定することにより、観測をした。

レーザー電子分光ビームラインでは、8GeV の電子にレーザーを衝突させて 2.4 GeV までの高エネルギーガンマ線ビームを取り出し利用している。原子核に照射して発生する中間子を精密測定することにより、陽子・中性子中のクォーク・グルーオンの振る舞いを明らかにしようとしている。大がかりな測定器が据え付けられ、すでに  $\phi$  粒子の測定が行われている。このような基礎実験ができるのは SPring-8 のポテンシャルの大きさを示している。

以上、取り急いで SPring-8 の概要を述べたが、SPring-8 を紹介するためのパンフレットも参考にいただければ幸いです。