

シンクロトロン放射光の施設とその利用 —SPring-8, ニューズバルを中心として

寺澤 倫孝*・望月 孝晏*

Synchrotron Radiation Facility and its Application
—for SPring-8 and New SUBARU

Mititaka Terasawa and Takayasu Mochizuki

Synopsis: Two projects to construct an advanced synchrotron radiation facility, have been underway in Harima Science Garden City, Hyogo. The projects are for SPring-8 and New SUBARU. SPring-8 is a high brilliance light source consisted of 8 GeV electron/positron storage ring and injectors (1 GeV linear accelerator and 8 GeV synchrotron). The energy and ring circumference (1436 m) are the largest in the world. The facility started operation for public use on 1st October, 1997 and many research programs, such as protein crystallography, high pressure and high temperature structural properties, high energy inelastic scattering, high energy XAFS and so on, are progressing actively. New SUBARU is the storage ring facility intended to develop the research work on new light sources and try to break the limits determined by damping and excitation in the ring and to promote industrial activities such as micro machining of x-ray lithography and LIGA as well as fundamental soft x-ray studies like photo-chemical reaction, photo-electronic spectroscopy, soft x-ray microscopy and so forth. The facility is a satellite of SPring-8 which utilizes the same 1 GeV linear accelerator injector alternatively, and it will be completed by the end of March, 1998.

Harima Science Garden City is expected to become a Center of Excellence in the world on research and development in synchrotron radiation science and technology.

Key words: synchrotron radiation; storage ring; insertion device; undulator; wiggler; free electron laser; high brilliance; polarization; hard x-ray; soft x-ray; diffraction; inelastic scattering.

1. はじめに

高エネルギー物理学研究用の加速器として開発されたシンクロトロンなどにおいて高エネルギーに加速された電子が磁場を横切り、軌道の偏向を受けるとき、電子は電磁波を放出する。この電磁波をシンクロトロン放射光あるいは単に放射光という。

放射光は、(1) 指向性が良く、8GeVの電子からの放射光の放出角は 0.0037° となる。(2) 輝度が高く、従来のX線源に比べ10桁以上にも及ぶ、(3) 赤外からX線領域までの波長の連続的な白色光が得られる、(4) 電子軌道面内に平行な電場ベクトルをもつ直線偏光が得られる、(5) 挿入光源により単色光を得ることができ、また直線偏光の他、電子をらせん運動させることにより円偏光あるいは偏光度を制御した放射を得ることができる、(6) パルス光であり、電子を短パルス化することによりコヒーレンシーの高い光

が得られる、などの従来の光源ないしX線源にはなかった特長をもっている^{1,2)}。このため物質科学の研究をはじめとして、エレクトロニクス、新素材、バイオテクノロジー、医学利用など先端技術の開発や生産技術にも広く利用されることが期待され、注目されている。

放射光は1947年アメリカGE社のElderらにより、70MeVシンクロトロンではじめて観測された³⁾。当時は放射光は円形加速器で電子を加速するのに障害となる存在としての認識しかなかったが、やがて物質科学研究にとって強力な有用な光源としての可能性が注目され、利用されるようになった。はじめは放射光は軟X線から真空紫外線の波長範囲の分光学的強力な光源として使われた。1960年代は多くの数100MeV級の既存の電子シンクロトロンが改造されて使われた。1970年中頃にはこれに代わって、電子の蓄積リングが一般的な放射光源施設となった。蓄積リングは初めは高エネルギー物理の衝突実験のために開発されていた装

* 姫路工業大学高度産業科学技術研究所、工博

置である。蓄積リングでは加速した電子をリング内に蓄積するため強力に安定した光源として優れている。最近では数GeV級の大型蓄積リングが建設され、放射光の波長も硬X線領域まで拡大されるようになった。このような高エネルギーX線の利用はX線の散乱、回折、内殻励起、さらに原子核励起の研究に大きな刺激を与えた。

今日シンクロトロン放射光の有用性は広く認識され、数多くの放射光研究専用の蓄積リングが建設されている。はじめは専ら偏向磁場中で円軌道を描く電子からの連続波長を持った放射光が利用されたが、近年の蓄積リングでは偏向電磁石のほか挿入光源と呼ばれる新しい光源装置が導入され、さらに輝度の高い放射光が得られるようになった。挿入光源にはアンジュレータとウィグラーがあり、いずれも蓄積リング上で隣り合う2基の偏向電磁石の間の直線部に設置される、軌道の上下に極性を交互に変えて配列した多数の磁石列からなる光源装置である。高エネルギー電子は磁界の周期に対応して正弦波的に蛇行運動する。後述するようにアンジュレータでは準単色の高輝度光が、またウィグラーでは偏向電磁石と同じく連続波長で、かつ後者に比べ、より短波長の光が得られる。新しい世代（第3世代と呼ばれる）の蓄積リングは挿入光源を入れるため直線部を多く取り入れ、直線部での電子ビームの角度分散を小さくし、低エミッタンス光が得られるよう設計されている。このため高性能の放射光施設は常に大型化する傾向にある。

世界で最初の放射光専用蓄積リングとしては、1969年に完成したウィスコンシン大学のTANTALUS (0.24 GeV) が知られている。わが国では、1967年に東芝の亀井らにより放射光専用蓄積リング (0.3GeV) が設計され、同じ時期にスタートしていたが、残念ながら実現しなかった⁴⁾。東大物性研のSOR-RING (0.38GeV) が完成したのは1975年になってからである。その後、高エネルギー物理学研究所のフォトン・ファクトリー (PF, 2.5GeV)、分子科学研究所のUV-SOR (0.6GeV)、電子技術総合研究所のTERAS (0.8GeV) などが1980年代に相次いで建設され、放射光の本格的な利用研究が行われるようになり、多くの成果が上げられた。さらに新しい世代の高性能の放射光装置として、兵庫県播磨科学公園都市には、日本原子力研究所、理化学研究所の共同チームによる大型高輝度放射光施設SPring-8 (8GeV) が建設され、また同装置と電子入射加速器 (1.0GeV) を共用する1.5GeV蓄積リング「ニュースバル」の建設が姫路工業大学産業科学技術研究所によって進められている。前者はすでに1997年10月に放射光の供与が開始され、後者は1998年3月には完成する予定である。新しい世代の放射光源装置は、挿入光源（主としてアンジュレータ）を主力光源として設備して、特定波長の高い輝度のコヒーレント光を波長可変で放射できることを特長としている。SPring-8が硬X線までの広い波長領域をもつのに

対し、ニュースバルは軟X線・真空紫外線を主な波長領域とする光源である。Fig.1に代表的な放射光施設のスペクトルと輝度を、X線管、太陽光と比較して示す。

この稿では、新しく利用が開始される代表的な放射光施設としてSPring-8 およびニュースバルを取り上げ施設の概要と利用計画を紹介する。

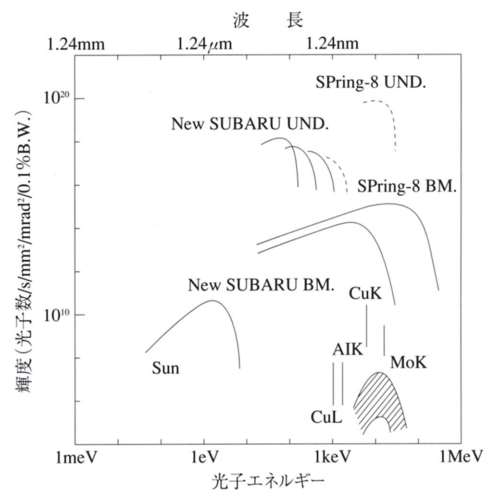


Fig.1. Spectral brilliance of synchrotron radiation. BM and UND are the radiation from bending magnet and undulator, respectively. As a reference are shown the spectra of the sun and a typical x-ray tube.

2. 大型放射光施設 SUPER PHOTON RING 8 GEV (SPring-8)

SPring-8は科学技術庁プロジェクトとして日本原子力研究所（原研）と理化学研究所（理研）が大型放射光施設計画推進共同チームを編成し、1990年に建設を開始した。当時ヨーロッパ12ヶ国（ベルギー、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、イタリア、オランダ、ノルウェイ、スペイン、スウェーデン、スイス、イギリス）の連合によるESRF (European Synchrotron Radiation Facility;6GeV)、アメリカのAPS (Advanced Photon Source;7GeV) など、世界的に進められていた大型高輝度放射光装置の建設計画と肩を並べる大型プロジェクトとして発足した。

SPring-8は周長1436mの電子蓄積リングで8.0GeVの電子または陽電子を蓄積して放射光源とする加速装置であり、電子入射器として1.0GeV電子線型加速器及び8.0GeV電子シンクロトロンを備えている。Fig.2の写真はSPring-8の加速器装置全景である。蓄積リング全体は標高280mのレベルの岩盤上に設置されており、三原栗山と呼ばれる標高345mの山を一周している。線型加速器及びシンクロトロンは270mのレベルにあり、シンクロトロンで加速された電子ビームは地下通路を通して蓄積リングに入射される。

SPring-8装置およびその周辺施設の配置をFig.3に示す。SPring-8装置の主要仕様を表1に示した。周長および蓄積



Fig.2. Overview of the synchrotron radiation facility SPring-8.

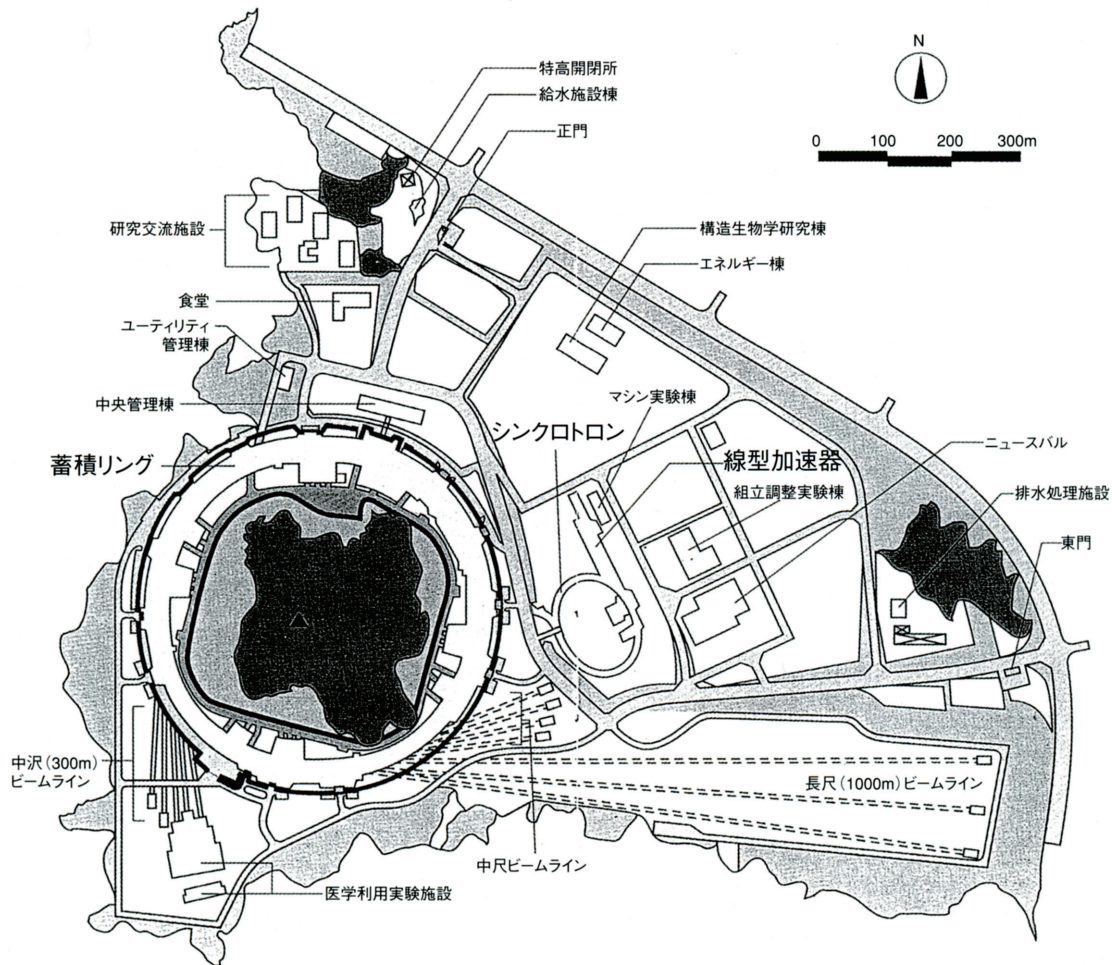


Fig.3. Overview of SPring-8, New SUBARU and related facilities.

電子エネルギーは世界3大施設中最大であり、より優れた低エミッタンス、高輝度の放射光を得ることが期待される。蓄積リングは主として偏向電磁石部と直線部で構成され、その間に四重極電磁石、六重極電磁石などの電磁石群がチャスマン・グリーンラティスと呼ばれる高輝度放射光発生に最適化された配置で並べられている。また電子ビームの放射エネルギー損失を補償するため、蓄積リング上の4ヶ所に周波数508.58MHzの高周波加速空洞を備える高周波ステーションが設けられている（当面3ヶ所使用）⁵⁾。

Table 1. Specifications of SPring-8.

Electron Linac		Storage Ring	
energy	1 GeV	energy	8 GeV
repetition rate	60 Hz	circumference	1436 m
e ⁻ /e ⁺ conversion	250 MeV	stored current	100 mA
Synchrotron		RF	508 MHz
injection energy	1 GeV	emittance	5.6 nmrad
maximum energy	8 GeV	No. of straight sections	
repetition rate	1 Hz	standard (4.5m)	40
circumference	396 m	long (30m)	4
emittance	230 nmrad	Beamline	
current	10 mA	total	61
		ID beamline	38
		BM beamline	23

蓄積リングには38ヶ所の挿入光源のための直線部があり、その標準のものは6mの長さであるが、4ヶ所には30mと非常に長い直線部を設けてあり、長尺アンジュレータなど将来の光源の開発が予定されている。放射光ビームラインは挿入光源から38本、偏向電磁石光源から23本で、最大61本が設置できる。標準ビームラインの長さは80mであるが、9本は300m、また3本は1000mまで延長可能である。

SPring-8は典型的な第3世代放射光源であり、各種の特長ある挿入光源装置が開発されている。例えば、真空封止アンジュレータが標準型光源として採用されている。磁界の周期長は3.2cm、周期数140、全長約4.5mで、最大磁場は0.78T（ギャップ10mm）、対応するK値^{脚注)}は2.3である。永久磁石ユニットはアルミ合金製のIビームに取り付けられている。上下2本のIビームが直径250mmの真空槽に設置されており、ベローズを介して真空槽外部の機械部（リニア・ベアリング）と連結され、磁石ギャップを可変にしている。可変範囲は8mmから50mmで、ギャップを小さくし磁場を強くできる特長がある。永久磁石はNdFe系のNEOMAX-33UH（住友特殊金属製）で窒化チタンでコートして、超高真空に支障ないようにして固定されている。さ

らに、強くバンチされた電子ビームが磁極面近傍を通過するときに生ずるイメージ電流を流すための金属製磁石カバーとして、50μmニッケルに10μmの銅メッキを施したものを採用している。Fig.4はこの標準型真空封止アンジュレータで得られる光のスペクトルである。

利用できるX線エネルギーの範囲は基本波（1次光）が5-18keV、3次光が51keV以下、5次光が75keV以下で、硬X線まで準単色光として得られる。

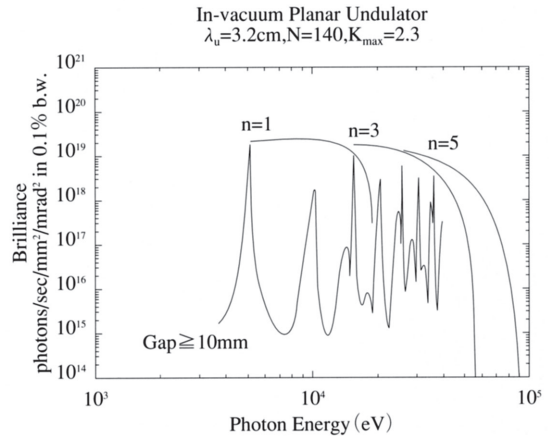


Fig.4. Radiation spectra of the standard type in-vacuum planar undulator for SPring-8. The brilliance and photon energy for 1st, 3rd and 5th (n=1, 3 and 5, respectively) harmonics can be changed by magnetic gap.

この他、真空封止垂直アンジュレータ、真空封止ハイブリッドアンジュレータ、楕円ウィグラー、ツインヘリカルアンジュレータ、8の字アンジュレータなどと呼ばれる挿入光源が製作され、目的に応じた波長域、偏光度の可変性を実現している⁶⁾。

SPring-8では放射光を利用するビームラインは、利用形態により三つのカテゴリーに分けられる。第1は共同利用ビームライン（共用ビームラインと呼ぶ）、第2は専用ビームライン（専用施設と呼ぶ）、第3は原研、理研ビームラインである。第1はSPring-8利用者懇談会に設置された利用研究サブグループにより計画され、利用研究が進められる予定のものである。現在34のサブグループが結成され、大部分のグループから設置計画趣意書が提出されている。ビームラインの建設予算は科学技術庁が確保する。第2は特定の研究機関が費用を負担して建設・維持管理・運転して利用するものである。第3は原研、理研がそれぞれ原研関西研究所および理研播磨研究所の放射光利用研究を進めるために建設しているものである。いずれのビームラインも

脚注) 軌道上での磁場の最大値をB、磁場の周期長をλ_uとして偏向パラメーターKを

$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi mc} = 0.934B[\text{tesla}]\lambda_u[\text{cm}]$$

と定義すると、K/γは電子の正弦波的運動の直線部軸方向に対する最大の傾きを与える。K>>1の強い磁場の場合がウィグラーであり、K<1の弱い磁場の場合がアンジュレータである。アンジュレータでKが大きくなると、基本波（n=1）の他に奇数次の高調波（n=3, 5）が現われる。

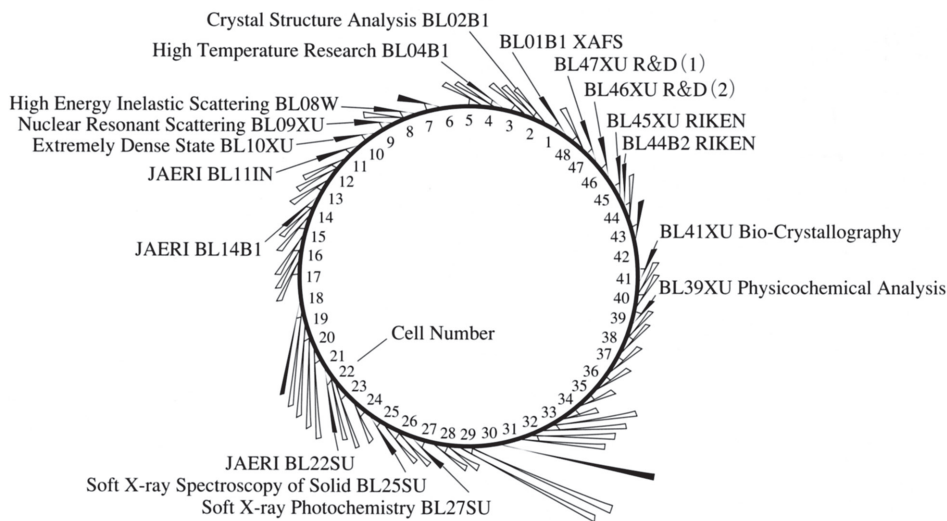


Fig.5. The arrangement plan of beam lines for SPring-8.

年次計画により、順次建設、整備されていくことになるが、第1期計画で対象となっているものは、共用ビームラインが10本、専用施設が7本、原研、理研ビームラインが各3本である。また、この他にR&D・マシン診断ビームラインが2本あり、光学素子、基幹チャンネルなどの評価試験、あるいはイメージング技術などの開発を目的としている。

以下に、現在建設、調整（一部は利用開始）が進んでいる10本の共用ビームラインの研究内容の概略を紹介する。

括弧内はビームライン番号を示す。Xは(硬)X線、Sは軟X線、Uはアンジュレータ、Wはウィグラーである。またFig.5はこれらビームラインの蓄積リング上での配備位置を示す図である⁷⁾。

- (1) 生体高分子結晶構造解析 (BL41XU)
高エネルギー・高輝度のX線を用いて蛋白質結晶構造解析のルーチン化・微小蛋白質結晶解析を行なう。
- (2) 軟X線固体分光 (BL25SU)
高エネルギー分解能の光学系を用いて、固体の光吸収・光電子の放出の磁気円偏光二色性、スピン偏極光電子放出及び光電子回折測定を行なう。固体の電子状態とスピン状態を明らかにする。
- (3) 高エネルギー非弾性散乱 (BL08W)
磁気コンプトン散乱を利用した物性研究を行なう。物質の磁性電子および伝導電子の運動量密度を測定し、磁性の発生機構やフェルミ面の決定など電子状態に関する研究を行なう。
- (4) 核共鳴散乱 (BL09XU)
極めて狭いバンド幅、高指向性およびパルス特性などに優れた特性をもつ超単色X線を取り出し、時間領域量子ビート法の利用、高分解能非弾性散乱実験及び干渉・強度相関の現象を利用したコヒーレンスの解析を行なう。
- (5) 高圧構造物性 (BL10XU)
高密度状態にある物質の構造解析を行なう。300GPa以上の超高压力下あるいは磁場などを印加した多重極限条

- 件下での構造を解析し、構造と物性の相関を追求する。
- (6) 生体分析 (BL39XU)
生体内における超微量物質の定量とその存在状態の物理的解析を行なう。
- (7) 軟X線光化学 (BL27SU)
高分解能・高強度の分光法を実現し、内殻励起状態に関わる光化学および原子・分子に関する研究を行なう。
- (8) 結晶構造解析 (BL02B1)
構造相転移などに伴う超格子反射、散漫散乱測定による格子の乱れなどの研究を行なう。
- (9) 高温構造物性 (BL04B1)
白色及び単色X線を用い、高温における凝縮系物質の構造を調べる。
- (10) XAFS (BL01B1)
XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) による局所構造解析を行なう。

これらのテーマは第3世代高輝度放射光施設としてのSPring-8における研究のトップバッターとして開始されるものであり、その成果が大いに期待される。詳しい研究内容あるいはその他のサブグループの利用研究については、他の資料を参照されたい⁷⁾。

専用施設については、現在、京都大学先端光ビームライン（京都大学化学研究所）、超精密材料解析ビームライン1および2（科学技術庁金属材料研究所・無機材質研究所）、生体超分子構造解析ビームライン（大阪大学蛋白質研究所）、兵庫県ビームライン（兵庫県）、サンビームラインBMおよびID（産業用ビームライン 建設利用共同体、13社）の7計画が進行中である。

SPring-8のビーム・コミッションは、1996年8月1日に電子線型加速器から開始され、続いてシンクロトロンに移り順調に進められたが、12月16日には8GeVまでの電子加速が達成された。シンクロトロンから蓄積リングへの入射試験調

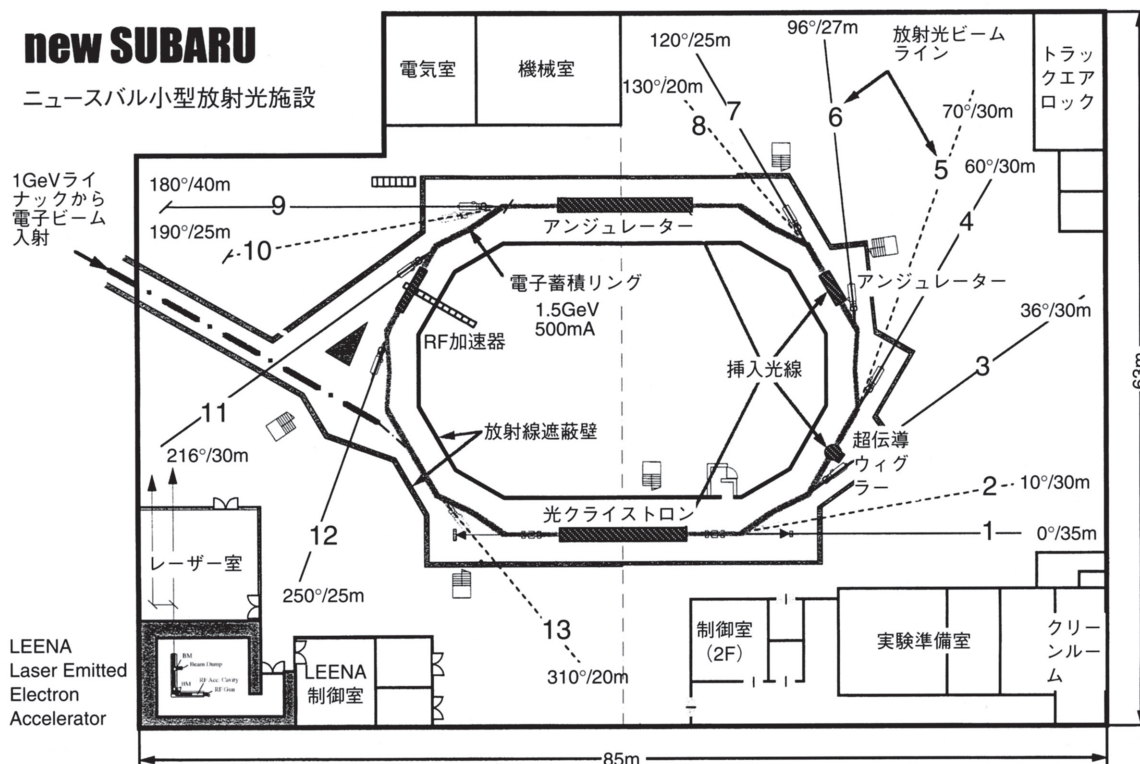


Fig.6. The arrangement plan of New SUBARU facility.

整は1997年3月13日から開始され、3月26日には蓄積した電子からの最初の放射光ビームが偏向電磁石ビームラインBL02B1で観測された。4月23日にはアンジュレータからの光が初めてBL47XUのビームラインで観測され、第3世代放射光源SPring-8の利用の歴史的幕開けを迎えた。その後、第I期計画対象の挿入光源およびビームラインの設置と調整が進められ、予定通り10月からは放射光の供与が開始された。

3. 1.5GeV軟X線・真空紫外線施設ニュースバル

3・1 ニュースバルの狙い

姫路工業大学高度産業科学技術研究所は、光科学技術を中心とした先端的科学技術の研究を推進するとともに、県下企業等との共同研究などにより、新産業技術基盤の創出を図り、産業支援を行う事を目的として、平成6年4月に設置された。研究所付属の主要研究施設として小型電子蓄積リングによる放射光装置「ニュースバル」が構想され、平成8年度より建設が始まった。ニュースバルは科学技術庁、日本原子力研究所、理化学研究所及び(財)高輝度光科学研究センターの協力でSPring-8のサイトに設置され、SPring-8の入射器である1.0GeVの電子加速器を入射器として利用する。平成10年秋には放射光の利用を開始する予定である。

本装置の機能の特徴としては真空紫外から軟X線の放射光エネルギー領域の発生に特化し、SPring-8装置と相補的に使用できることであり、その使命は光源の基礎研究及び応用研究を行い、産業のニーズに応えることである。産業

応用技術を目指した研究と共に、これら応用のニーズに応えるべく、光源の高度化の研究も同時に進める。挿入光源としては通常アンジュレータ以外に、自由電子レーザーや超伝導ウイグラーなどの技術研究ができるような直線部を設けている。

3・2 ニュースバル放射光施設の概要

ニュースバル装置全体を納める建屋はSPring-8の入射器に隣接して配置され、Fig.6に示すように延床面積は約5,338m²である。蓄積リングはコンクリート放射線遮蔽壁を形成するトンネル構造の中に納められている。光ビームラインは各々30~40mの長さにとれる空間を実験ホールとして確保している。屋内での重量物の移動、調整用に走行クレーンが設置される。

蓄積リングの仕様

形状	レーストラック型のダブルバンド
電子エネルギー	1.0~1.5GeV
入射エネルギー	1.0GeV
蓄積電流	500mA以上(目標値)
寿命	10時間以上
ビームエミッタンス	30nm-rad(於1GeV)
周長	119m
偏向電磁石	12台
長直線部	13.6m 2ヶ所
短直線部	2.8m 4ヶ所
(内2ヶ所は電子入射部とRF加速部として使用)	

ニュースバル装置は周長約120mの電子蓄積リングで12台の34度偏向電磁石と6台の8度逆偏向電磁石を持ち、モーメントコンパクションファクター α をゼロに近い所でも作動できるようにして、リング周回の等時性の実現を試みることができるようにしている。SPring-8の1GeV電子ライナックから電子ビーム入射を受け最大1.5GeVまで加速し、500mAの電流で10時間程度蓄積保持できる予定である。

直線部にはアンジュレーターや超伝導マルチポールウィグラーを挿入光源として置き、長直線部の1ヶ所には、赤外から紫外まで波長可変な自由電子レーザー (FEL) を発振させる光クライストロンと光共振器が設置される。

放射光を利用するビームラインとしてはFELのラインも含め、4本の挿入光源を光源とするものと、偏向電磁石を光源とするもの4本の設置を今のところ予定している。

3・3 ニュースバルを用いた研究

大別してSR光源の開発研究と産業応用研究の2分野の研究を行う。

3・3・1 SR光源の開発研究

(1) ニュースバル自由電子レーザー

原理はFig.7に示すように前段のウィグラーで電子ビームに速度変調を起こし、これにより中間の分散部 (バンチャー) で強い電子密度変調に変換して、後段の放射光ウィグラーでコヒーレント光を発生させる光クライストロン方式である。これに共振器を組み、発生したコヒーレント光をパルス状周回電子ビームに同期して往復させれば、変調された電子ビームから繰り返し、エネルギー供給を受けて、レーザー光として出力を得ることができる。発生するレーザー光の波長 λ_0 は $\lambda_0 = \lambda_u(1+K^2)/2\gamma^2$ で表される。ここで λ_u はウィグラー磁場周期長、Kは磁場強度から決まる値で γ は電子のエネルギーを mc^2 で割った量である。

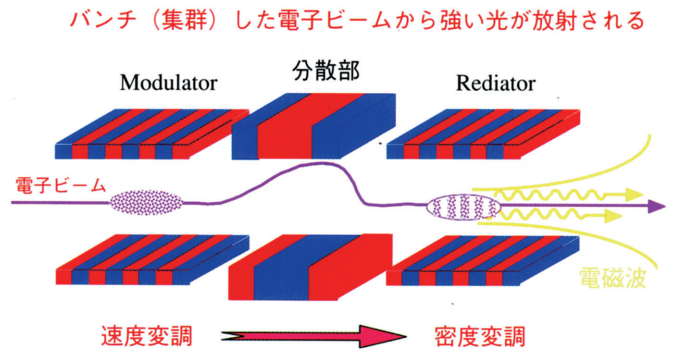


Fig.7. Schematic diagram of the free electron laser (optical klystron type).

ニュースバルFELでは電磁石を用いてウィグラー場を構成しており、励磁電流を変化させてK値を変え、波長可変レーザーを実現する。共振器は29.68mと設定されており、Fig.8は完成予想図である。この光クライストロンでは電磁石コイルの磁性の向きを変えることにより基本周期160mmまたは2倍周期320mmを選択できるようになっていることが特徴である。このことにより短波長領域 (可視光領域から200nm迄) の発振と赤外領域 (2 μ mから12 μ mまで) の発振との領域を狙うことを可能にする。短波長領域では波長可変を利用して選択的電子励起を起こし、赤外領域では分子の選択的振動励起を起こすことに用いる。注目すべきは、これらのFEL光のパルスはニュースバルの偏向電磁石やアンジュレーターからの放射X線パルスと完全に同期させることが可能であるため、内殻電子励起を起こすX線と光による同時励起を可能にすることである。

(2) 高速粒子ビームによるレーザー光の波長変換

(γ 線ビームの生成)

ニュースバルの周回電子ビームに外部より導入したレー

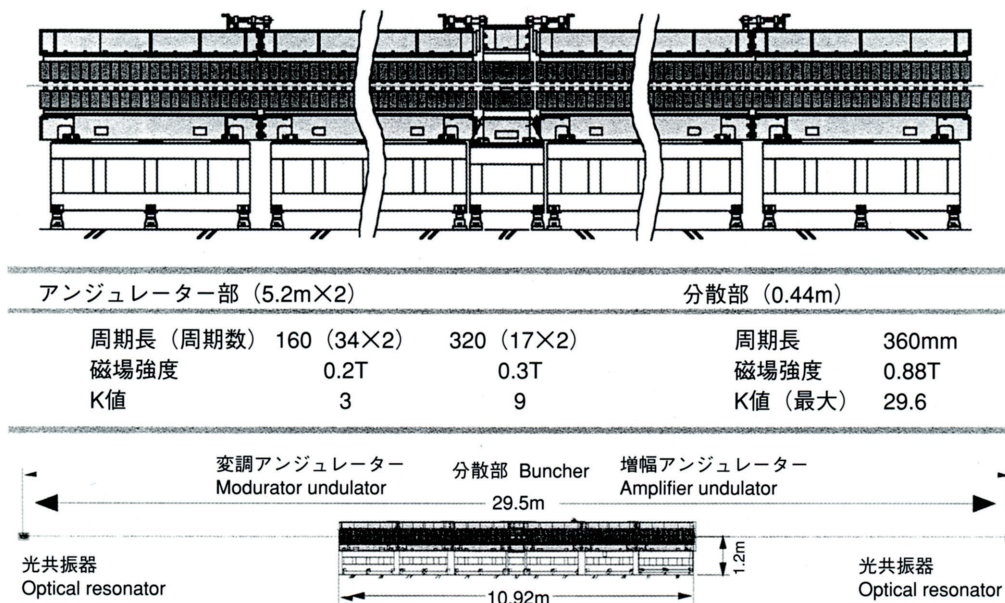


Fig.8. Overview of the optical klystron for New SUBARU.

レーザー光を衝突させれば、Fig.9に示すようなよく知られたコンプトン散乱が起こる。簡単にするためにレーザー光が電子ビームに逆方向から正面衝突して後方に散乱する逆コンプトン散乱の場合を考えると、その散乱光の波長 λ_γ は近似的に $\lambda_\gamma = \lambda_L / 4\gamma^2$ と書ける。 $\lambda_L = 1.06 \mu\text{m}$, $\gamma = 2000$ (1GeV)の場合、逆コンプトン光の光子エネルギーは18.7MeVとなる。これからわかるように得られる γ 線のエネルギーは入射レーザー光子エネルギーに比例し、電子エネルギーの2乗に比例する。相対論効果により散乱コンプトン光の分布は実験室系では電子ビームの進行方向に鋭く集中している。

そこで、このように生成された γ 線ビームは従来の制動輻射 γ 線に比べ、単色性、輝度、更に偏向特性も優れ、核物理研究に有用と考えられる。さらに γ 線発生で失った蓄積リング電子のエネルギーを高周波加速で回復できれば高効率な γ 線源を構成できる。そこで原子炉で発生した放射性核廃棄物に大量の上記 γ 線を照射し、光核反応を起こして安定な同位体に転換させることができれば、廃棄物処理への応用が開ける。21世紀の錬金術である。例えば、半減期30年のCs-137を特定のエネルギーを持つ γ 線で励起すると中性子を一つ放出して半減期がわずか13.5日のCs-136へ核変換し、これは β 崩壊して完全に安定なBa-136となる。課題は10~15MeVにある光吸収断面積の詳細な情報を知ることである。これがこのプロセスの経済的に成り立つかどうかの判断の要となる。断面積を測定する実験から開始する必要がある。コンプトン散乱用レーザー光源としてニュースバルFEL光を利用することも考えているが高繰り返し(高出力)パルスYAGレーザーを外部レーザー源として用いるか、電子ビームを共振器中に含むようなレーザー発振器を別途用意し、電子ビームの衝突散乱する場所での光子密度を上げる方法も考えられている。

入射レーザーの強度が大きくなれば、その磁界によりレーザーアンジュレータ場が形成されるので電子ビームのエミッタンスが充分小さければ γ 線(X線)レーザー光を放射させることも原理的に可能である。同様にイオンビームのような内部エネルギー準位を持つ高速電子ビームにレーザー光を対向させれば衝突時に 2γ 倍の光子エネルギーで

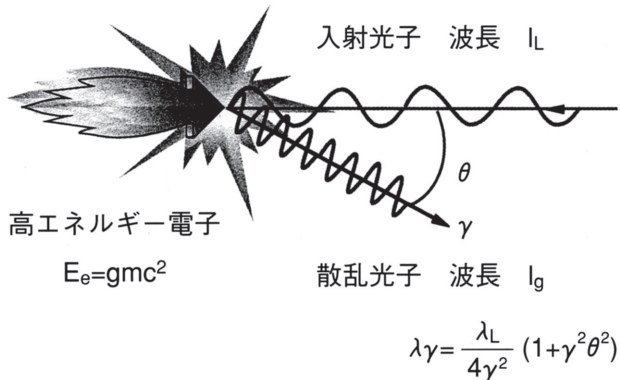


Fig.9. Schematic diagram of gamma ray generation by a backward Compton scattering.

内部エネルギー準位を共鳴励起できる。再放出光はさらに 2γ 倍の光子エネルギーで前方に放射されることになる。粒子密度が十分に大きければやはり単色性がよくチューナブルな高エネルギー光子ビームが得られるであろう。

3.3.2 放射光の産業応用研究⁹⁾

以下の3つの柱に焦点をあて応用研究を推進する。

(1) 電子機械産業の基盤技術の一つである光微細加工技術の研究

① 超LSI微細回路形成技術の研究

高集積度の超LSIの微細回路パターンは最小線幅がリソグラフィ露光装置に用いる光の波長により制限される。現在、エキシマステッパーが実用化されたが、さらに4Gbitまでの集積度を将来可能とするには真空紫外から軟X線領域の光によるリソグラフィ技術が必須となる。ニュースバルでは偏向磁石からの波長13nm程度(100eV)の放射光(極端紫外光リソグラフィ; EUVL)を用いてマスクパターンを縮小転写し、 $0.05 \mu\text{m}$ 以下の線幅を形成する将来の超LSI製造技術の開発研究を行う。Fig.10は非球面鏡を用いた縮小光学系の一例を示す⁹⁾。

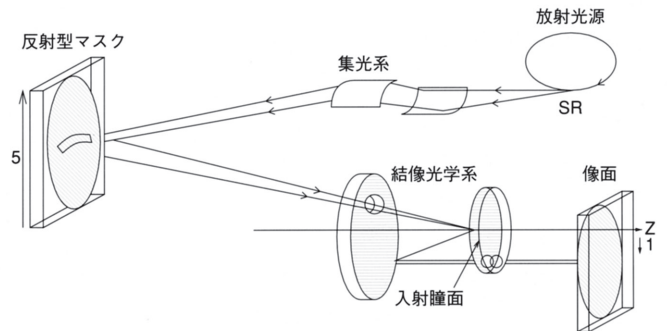


Fig.10. Schematic diagram of the optical system for an extreme ultra violet lithography.

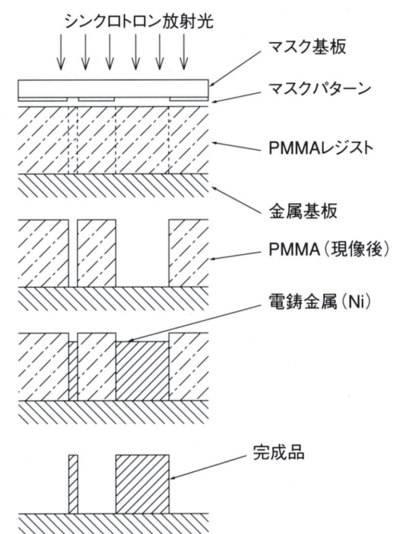


Fig.11. Schematic diagram of the LIGA processing.

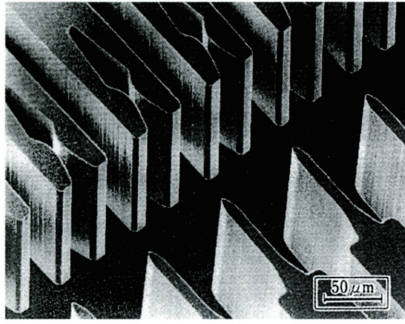


Fig.12. The microstructure of micro connector manufactured by the LIGA technology.¹⁰⁾

② マイクロ部品形成技術の研究

3~6keV程度の光子エネルギーを持つ放射光の平行性と高い透過力を利用し、レジスト材を深く露光・現像することにより、アスペクト比の大きい(~100)立体的構造を形成することが可能である。この構造に金属をメッキすることにより微小精密金型を作ることができる。この方法はドイツで最初に試みられたことから、LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung) と呼ばれており、微小部品の大量生産に適した方法といえる。LIGA技術を研究し、これを利用して数10~数100μmの寸法のマイクロセンサー、マイクロ電子・光学部品、マイクロマシンなどの形成技術とその応用の研究を行う。Fig.11は原理図を、Fig.12は応用例を示す¹⁰⁾。

これらの次は長尺アンジュレータから発生するX線ビームの部分コヒーレンス性を利用し、X線干渉計測や超高精度計測技術を開発する。このビームを用いてX線ホログラムやホログラフィック露光法によるナノメートル微細加工プロセスを研究する。

(2) 新素材産業を意識した新物質評価・創製技術の研究¹¹⁾

技術革新を支えるものは材料であり、新しい材料およびプロセスの創製がますます重要となろう。放射光の新材料創製への応用を考えた場合、材料の加工やプロセスには他のエネルギー源(熱、イオン、電子ビームなど)を用い、その評価に放射光を利用する立場と、放射光自体をプロセスに用いる立場がある。

素材産業では素材というより材料を相手にすることが多い。素材と材料の違いは、後者には表面が存在することである。鉄を錆から守り、複雑な個々の要求に応えるには、表面層の組成、構造、表面の性状、化学状態、下地との連続/密着性など、ミクロナレベルにおける解析技術が重要で、その評価や知見に基づいた材料設計や制御の努力が続けられている。材料としては軽量化、リサイクル性、長寿命化などの新しいニーズが重要視され、鋼の超高強度化、アルミニウムの応用という潮流の中で、水素侵入によるぜい化割れ防止、耐磨耗性や潤滑性の改善という新しい表面

機能も要求されてきている。

半導体分野においては、より高集積化したLSIにおいて安定した歩留まりを得るために数オングストロームの酸/窒化膜など、表面、界面の組成&膜質の制御が追求されている。

摩擦や磨耗、潤滑、半導体製造の熱酸/窒化やCVDは、一見異なった現象に見えるが、原子レベルでは、金属原子同士あるいは金属と溶液、ガスなどとの反応現象であり、共通した解析評価が可能な場合が多い。

① 新素材開発における評価¹¹⁾

新素材と呼ばれる材料は、新しい機能・特性を持つものであるが、多くの場合、それら機能は新奇な微細組織:例えば、準結晶、非晶質、ナノ結晶、薄膜、多層膜などに依る。また、特定の組成でのみ、新たな機能が発現するものもある。従来、巨視的な結晶構造の解析はX線回折によって行い、微小部の分析・解析は透過電子顕微鏡(TEM)を用いて行ってきた。X線回折の欠点は主に2つあり、一つは測定に時間がかかることであり、他は広い面積の平均値しか求められないことである。また、TEMの欠点は、試料破壊型の検査法であり、観察に用いた試料は他の測定には用いられないことである。

放射光の特長は強度の高さにあり、細いビームに絞っても解析に十分な強度を保持しうることなどである。これら特長を生かすことにより、下記3種の従来に無い評価法が確立でき、新素材の機能/特性の向上に役立てることができる。基本となるのは、結晶構造解析と組成分析と状態分析を同時に行うという手法である。

・ 広い面積中の微小部の結晶構造の評価

ビームを絞った上で試料を走査し、広い面積について全体の結晶構造を評価するとともに、特定部分で走査を止めて、微細な組織に対応した結晶構造の評価を行う。これにより、材料中の欠陥部の解析を可能とする。

・ 表面下の組織、結晶構造微量元素の評価

電子線に比べて透過能の高い放射光では、多層構造の表面から数層目の構造、あるいはその界面などに注目して組織および結晶構造の解析ができる。(Fig.13)

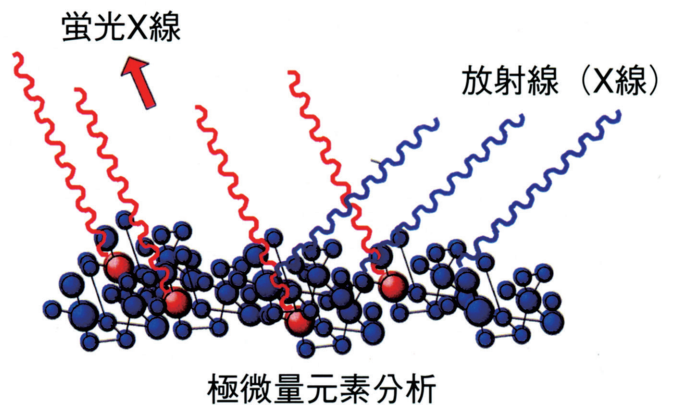


Fig.13. Trace element analysis by synchrotron radiation.

・その場解析による評価

新素材の作製法は従来とは異なる特殊なものであり、作製条件がシビアな場合が多い。試料作製装置を放射光のビームライン上に設置し、作製しながら、その場で回折、観察を行って、望みの結晶構造/組織を有する材料を作ることができる。

② 放射光励起プロセスの研究¹¹⁾

放射光を表面プロセスに応用する研究は、これまでエッチング、CVD、エピタキシャル成長、表面清浄化、固相アニールなどの研究が活発になされてきた結果、エッチングやCVDの基本的特性については、ある程度、明らかになったとは言え、反応の励起波長依存性については今後の課題である。内殻励起が可能な高エネルギー光であること、および幅広い波長可変性は放射光の優れた特長であるが、ニュースバルでは光励起プロセスの研究課題として製法に関する将来の産業応用の芽を育てるものに焦点をあて研究を進めることが強く望まれている。ニュースバル放射光の十分な強度と光励起プロセスと評価専用のビームラインの設置により、STMや顕微XPSと組み合わせて微小領域での反応観察や分光単色光による反応の励起波長依存性の研究が可能である。この問題は光化学としても未踏の領域であり、原理的に新しい応用が発見されることも期待される。この反応の励起波長依存性の問題は、今後、分光技術の開拓と高度な分析技術の開拓を両輪として進め、切り開かれるべき未知の領域であろう。

応用に重点を置いた研究の一つとして放射光の特長を發揮すべく、パターン形成を意図した照射なども積極的に進める。

電子部品にはエンジニアリングプラスチック（以下EPL）を代表とする高分子材料の適用が広まっている。現状ではこれら材料は主に構造材として用いられているが、表面に母材とは異なる物性を創り込むことにより、機能部品への適用拡大が期待される。そのために表面改質が必要である。ニュースバルからの軟X線領域の光は、高分子の主構成元素の内殻電子の励起が可能であり、特定エネルギーの照射で内殻電子を分子の非結合軌道に選択的に励起して特定の化学結合を切断する、「分子メス」(Fig.14)の実現の可能性がある。このような反応は、新材料の創製はもとより、

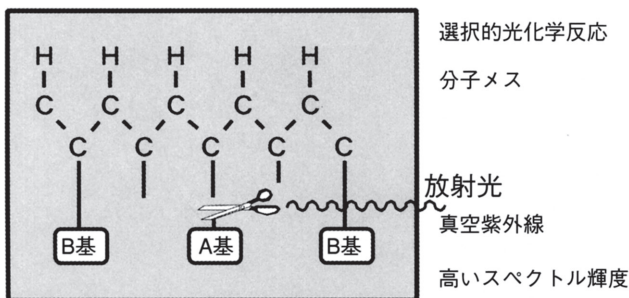


Fig.14. Molecular scissor utilizing selective excitation of synchrotron radiation.

上記に挙げた表面改質にも極めて有効であると考えられる。また、吸収スペクトルやXPS等の解析を、改質と同時に或いは引き続いて実施することが可能である。

(3) 健康・福祉産業に役立つバイオ計測技術¹²⁾

X線の医学・生物学への利用は、レントゲンのX線発見(1895年)直後から積極的に検討された。その結果、がんの放射線治療、各種医学診断、生体高分子の結晶構造解析などの成果に見られるように、X線は医学・生物学における重要な線源としてその利用価値が確立されている。ニュースバル放射光を用いたバイオ計測では、次に述べるように軟X線顕微鏡による生体試料の観察、軟X線領域における生体高分子吸収分光分析、軟X線照射による化学進化の研究などが視野に入れられており、SPring-8からの硬X線を利用する分子構造解析、医療基礎研究と相補的な研究が実現されよう。これらの基盤研究の成果の上に高度な医療産業技術が構築されると期待されている。

① X線顕微鏡

X線顕微鏡は、分解能が光学顕微鏡より高く、電子顕微鏡よりも厚い試料(1-10 μm)の観察が可能と期待される将来性の高い顕微観察技術である。例えば、1 μm 以上の厚さの生体試料を50-100nmの分解能で透視観察するためにはX線顕微鏡が最適であり、それ以外の方法は見あたらない。よく知られているように生体は主に水素、酸素、炭素、窒素等の軽元素を構成元素としており、その大半が波長1-10nmの軟X線領域にK殻あるいはL殻吸収端を持っている(Fig.15)。また、水は水素と酸素のみで構成されているのに対し蛋白質や核酸といった生体構成分子は主要な構成元素として炭素・窒素を含む。そのため、酸素のK殻吸収端(2.33nm)より長波長側で炭素のK殻吸収端(4.37nm)までの波長域は、水による吸収が低いにもかかわらず生体分子による吸収が大きい領域である。従ってこの領域のX線(“水の窓”と呼ばれている。)を利用すれば、水による吸収の影響を最小限にして生物試料の観察を行うことができる。しかも、この波長域のX線は、電子線よりもはるかに透過性が高い。

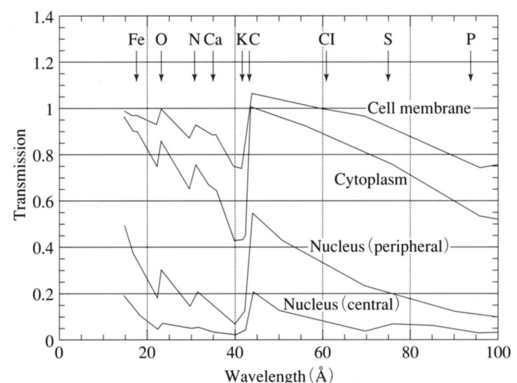


Fig.15. X-ray transmission as a function of wavelength for several intracellular materials showing the contribution of K and L absorption edge.

現在、X線顕微鏡は、生きた細胞のような生物試料をそのまま観察する技術としてその特長が発揮できると期待され、フレネルゾーンプレートを結像光学系として用いたシステムの分解能も50nmまで達成している。

また、放射光によるX線顕微鏡は、光源の幅広い波長可変性を活用して、元素の分布及び分析の高解像度観察に適している。なお、X線顕微鏡は、光学顕微鏡同様に、位相差観察、3次元観察などの手法も将来可能となろう。しかし水の中の生体試料を観察するには、放射線損傷とブラウン運動による像のボケの問題があり、その分解能の向上には試料の凍結など、さらに工夫が必要である。

② 分光分析

軟X線領域における生体高分子の吸収スペクトルを測定し、元素組成及び化学結合についての情報を得ることができる。特にXANES (X-ray Absorption Near Edge Structure) の利用は、特定元素の近傍の化学結合状態に関する情報を提供し、特異性の高い分析が可能となるであろう。また、この吸収スペクトルを、X線顕微鏡による生物試料の原子・分子観察に利用することも可能である。

③ 照射効果

水、炭酸ガス、アンモニアといった単純な分子から、蛋白質の構成単位であるアミノ酸等生命体に必須の化合物を合成する過程(“化学進化”と呼ぶ)は、太古の地球上で行われたと考えられているが、そこでは、まだ、大気が薄く、真空紫外線も地上に到達していた。分光し

た軟X線による特定元素の吸収端を利用した照射効果の研究、あるいは、マイクロビームによる生体試料の特定部位のみの照射効果の研究により、化学進化の分子機構、さらには、生命の誕生の謎を解明する手懸かりを得ることが期待できよう。

④ 医療基礎研究

ニュースバルで供給可能な波長領域のX線は、直接人体に照射するには適していないが、モデル系を用いて、その基礎となる研究を行うことは可能である。具体的には、元素の特異的な吸収を利用してオージェ効果を誘発し、そのオージェ効果の高い細胞毒性作用をがん治療に応用するための基礎研究、分光した放射光による単色X線CT、コーンビームCTによる高分解能画像診断法の開発、元素の吸収端を利用した高分解像度血管造影法の開発等がその例である。なお、現在、干渉計を利用した硬X線領域の位相差顕微鏡の開発やマイクロビームを利用した蛍光X線イメージングなど、新しい手法の開拓が盛んであるから、医療基礎研究分野には、今後さらに新しい提案がでるものと期待したい。

ニュースバルの光ビームラインは表2に示す8本の建設が計画されている。平成9年度までにまず軟X線縮小投影露光用ビームラインとLIGA専用ビームラインの2本の建設を行い、以後年次計画に従って増設する予定である。Fig.16はニュースバルで得られると予想される放射光スペクトル強度と主な利用分野を示す。

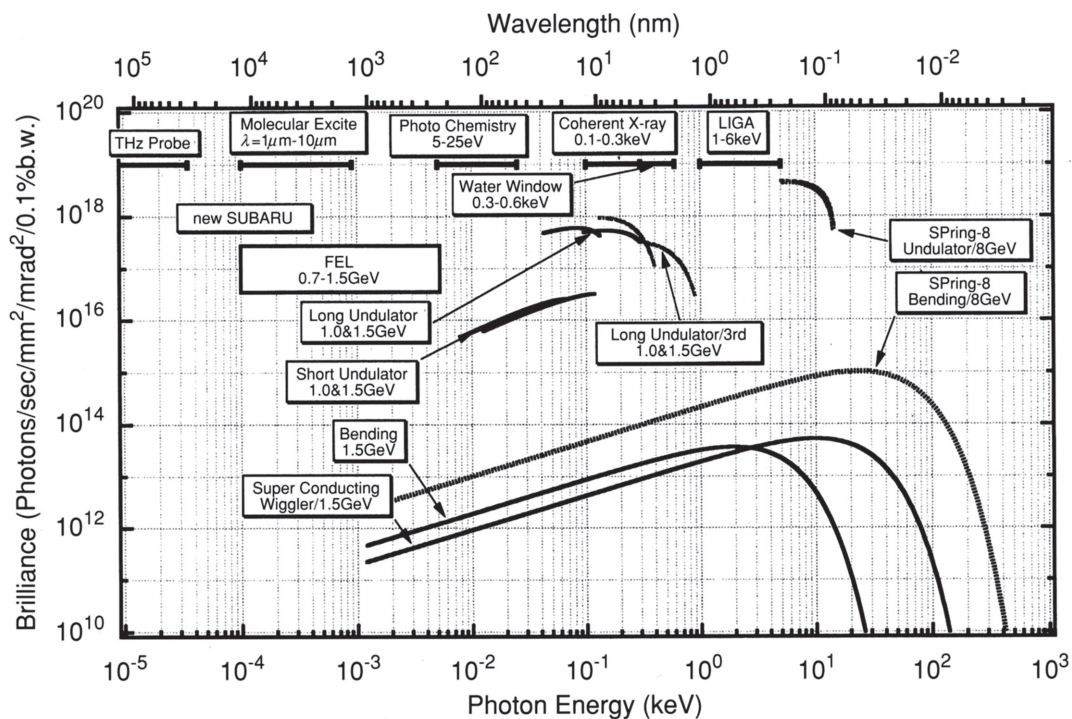


Fig.16. Spectral brilliance of the synchrotron radiation in New SUBARU.

Table 2. Proposed research and development programs and photon beam line schedule of New SUBARU.

研究テーマ	用途	種別	エネルギー	目的	1997年3月31日	
					BL番号	年度
光微細加工	(1) EUVL用	Bending	0.08keV~0.3keV フィルターによる分光	超先端加工技術開発に(>16Gb ULSI) 必須となる要素技術の開発	3	9
	(2) LIGA用	Bending	3keV フィルター	マイクロ金型加工,マルチメディア用光コネ クターなどの新技術創成	12	9
	(3) ホログラフフィック露光 及びコヒーレント応用	Undulator	0.08keV~0.3keV 分光器	将来のSR応用技術の開発,SRによるオン グストローム計測技術の開発	9	10
新素材開発	(4) 新物質創成用	Bending	<1keV 分光器	光電子分光による物質の原子・分子構造 解析技術の開発	6又は7	10
	(5) 光励起反応利用	Bending	<1keV フィルター	新材料開発,半導体新プロセス技術開発	11	11
光源の研究	(6) 光源開発	Undulator	0.006keV (波長 200nm)	FELなど加速器科学 コヒーレント放射光の発生	1	11
バイオ・医療 技術	(7) X線顕微鏡用	Undulator	0.3keV~0.6keV 分光器	生体構造解析技術の開発	6又は7	12
	(8) 医療診断技術開発用	Wiggler	数keV~数10keV	医療診断技術用の装置開発	4	12
光学素子の 開発	(9) 光学素子評価用	Bending	0.05keV~1keV 分光器	SOR応用光学部品評価,物質の光学定 数測定など	10又は13	(10)

4. おわりに

放射光は歴史的には、はじめ軟X線・真空紫外線の光源としてその重要性が注目された。それはこの波長領域の光は物質との相互作用がきわめて強いため、物質に吸収されやすく、光源として利用できる十分な強度が得られなかったことによる。シンクロトロン放射光が、この波長領域の光であることが確認されて、その利用に大きな関心がもたれ、光化学反応、光電子物性などの基礎研究から超微細加工などの技術開発に至るまで広範な利用が展開された。その後、シンクロトロン及び蓄積リングの大型化が世界の趨勢になり、SPring-8などの大型装置が生まれた。ここに至って高エネルギーの硬X線が放射光として出せるようになった。しかし単にエネルギーだけではなく、この放射光の特長はなんとといっても高輝度、高強度にある。これを武器として、より新しい先端科学技術の研究が掘り起こされ、大いに進展することが期待される。

一方、ニュースバルは前述したように放射光が最も特徴とする、軟X線・真空紫外線に特化した光源装置であり、新素材、バイオテクノロジーなどにおける基礎研究とともに、超微細加工の技術開発などで地域の産業に直結して応用分野が広がることを期待したい。播磨科学公園都市がSPring-8およびニュースバルの二つの放射光施設をもち、相補的に機能しながら、光科学技術の時代と呼ばれる21世紀を迎える意義は大きい。

文 献

- 1) 寺澤倫孝：実用シンクロトロン放射光，高良和武編，東京(1997)，5 日刊工業新聞社
- 2) M. Terasawa and M. Kihara: Applications of Synchrotron Radiation to Materials Analysis, ed by H. Saishou and Y. Gohshi,[Elsevier Science B. V.] (1996), 1
- 3) F. R. Elder, A. M. Gurewitsch, R. V. Langmuir and H. C. Pollock: Phys. Rev., 71(1947), 829
- 4) 亀井久，寺澤倫孝，宮沢竜雄：日本物理学会秋の分科会講演予稿集2 (1967), 137
- 5) 熊谷教孝：放射光，9(1996), 5, 8
- 6) 北村英男：放射光，9(1996), 5, 27
- 7) 大野英雄：放射光，9(1996), 5, 17
- 8) ニュースバル専門委員会報告書（姫路工業大学高度産業科学技術研究所，平成7年3月23日）
- 9) K.Kurihara, H.kinosita, N.Yakeuchi, T.Mizota, T.Haga and Y.Torii: J. Vac. Sci. Technol., B9(6), (1991) 3189
- 10) Microparts 社カタログ (1995)
- 11) ニュースバル専門委員会報告書（姫路工業大学高度産業科学技術研究所発行，平成9年7月）第4章新素材開発，宇理須恒夫他から引用
- 12) ニュースバル専門委員会報告書（姫路工業大学高度産業科学技術研究所発行，平成9年7月）第5章バイオ計測，篠原邦夫他から引用
- 13) K. Sinohara, A. Ito and T. Matsumura, X-Ray Microscopy, (1994), 264