

放 射 光 と 施 設

千 川 純 一

高エネルギー物理学研究所 放射光実験施設 〒305 茨城県筑波郡大穂町上原 1-1

(1986年3月19日 受理)

Synchrotron Radiation and Its Facility

Jun-ichi CHIKAWA

National Laboratory for High Energy Physics
1-1 Uehara, Ôho-machi, Tsukuba-gun, Ibaraki-ken 305

(Received March 19, 1986)

An introduction to the use of synchrotron radiation and an overview of the main facilities throughout the world are presented. The fundamentals, such as its generation and advantages, are described briefly. "Photon Factory", the synchrotron radiation facility in Tsukuba, is described as one example.

1. はじめに

レーザーは電波から紫外線までの波長領域にわたっているが、全波長領域の光がくまなく利用できるわけではなく、自由に波長が選択できる強力なレーザーの開発が望まれてきた。これに対して、シンクロトロン放射光は赤外から γ 線にまでおよぶスペクトルの連続性が特長になっている。さらに、最近米国ではこの技術を発展させ、赤外から真空紫外域の波長域で自由に波長が選択できる自由電子レーザーが開発されたと伝えられている。

ほぼ光速で走る電子が磁場で曲げられるとき、光を発生する現象は1947年に確認され、シンクロトロン放射光 (Synchrotron radiation, 以下放射光と略記) と呼ばれてきた。この光は電子の軌道面内に偏光していて、軌道の接線方向に鋭い指向性をもった赤外からX線領域にわたる強力な白色光である^{1,2)}。波長領域は物質中の原子や分子の間隔に対応し、放射光と物質との相互作用は非常に強い。それゆえ、分光学の手法による物質科学の研究には理想的な光源であるばかりでなく、顕微鏡や回折実験にも適している。さらに、通常の光源では不可能であった物質の構造や物性の変化の連続観察、また微小部分の測定(物性の場所的变化; 物性のイメージング)ができるようになった。

放射光の利用は高エネルギー物理学の研究を目的としたシンクロトロン施設に寄生して行われてきた。しかし、最近になって、レーザーで得られない真空紫外からX線

領域の光源として、専用装置が先進国で建設されている。放射光が利用できる電子蓄積リングは、建設中のものを含めると、米国が7、日本が4、西ドイツが4、フランスが2、ソ連が2、イタリア、中国、スウェーデンがそれぞれ1で、合計22基になっている。現在稼働中の施設を Table 1 に挙げた。

放射光の利用は1960年に米国の NBS (National Bureau of Standards) で始まった。1974年には、ハンブルクにある Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) で IBM の研究グループがX線リソグラフィの実験をしている。その頃から、米国では Stanford 大学のシンクロトロンの利用が始まり、この10年間、官、学、民が平等に利用してきた。参加した民間企業は Bell, Exxon, IBM, Xerox である。また、Boeing, Chevron, Du Pont Eastman Kodak, Ford, General Electric, Gulf Oil, Hewlett & Packard, Lockheed, Mobil Oil, 3M, Monsanto, Rockwell, Standard Oil, TI, Western Electric などの研究者は個人の資格で参加し、光電子分光、光イオン分光、蛍光分光、X線回折、EXAFS など種々の方法で、触媒、非晶質、半導体などの研究が行われた。この間に、高エネルギー物理学の研究用に建設されたリングの利用も開始され、また、光源専用の施設の建設も始まった。Brookhaven 国立研究所の National Synchrotron Light Source では、現在185人、34研究チームが登録し、企業からの参加は、その中25%で、建設費7300万ドルの38%、1900万ドルを負担している。

Table 1 Synchrotron radiation facilities in the world

Country	Name and Place	E(GeV)	$h\nu_c(\text{keV})$	Year of Completion
JAPAN	INS-SOR II (Tanashi)	0.4	0.13	1975
	Photon Factory (Tsukuba)	2.5	4.00	1982
	INS UVSOR (Okazaki)	0.7	0.35	1984
	TERAS (Tsukuba)	0.8	0.58	1981
U. S. A.	TANTALUS-I (Stoughton)	0.24	0.05	1968
	ALADDIN (Stoughton)	1.0	1.07	
	SSRL (Stanford)	3.5	7.5	1974
	SURF-II (Gaithersburg)	0.28	0.06	1976
	CHESS (Cornell)	5.5	11.37	1979
	NLSL-UV (Brookhaven)	0.75	0.94	1981
	NLSL-X (Brookhaven)	2.5	4.34	1984
W. GERMANY	HASYLAB (Hamburg)	5.0	22.9	1974
	BESSY (Berlin)	0.8	0.62	1982
U. K.	SRS (Daresbury)	2.0	3.20	1980
FRANCE	LURE { ACO (Orsay) DCI (Orsay)	0.54	0.32	1973
		1.8	3.39	1976
ITALY	ADONE (Frascati)	1.5	1.50	1978
U. S. S. R.	PAKHRA (Moscow)	1.3	1.22	1980
	VEPP-III (Novosibirsk)	2.25	4.11	1977

E: Energy of electrons

 $h\nu_c(\text{keV})=2.218 \times E^3(\text{GeV})/R(\text{m})$: Characteristic photon energy

西ドイツでは、ベルリンの光源専用蓄積リング (BES-SY) は政府機関の4研究所と Eurosil, Philips, Siemens, Telefunken の4社とが共同で建設したものである。ボンには光源専用の2基 (0.5と2.5 GeV) がある。利用分野としては、半導体の軟X線リソグラフィ、微細加工、EXAFSによる触媒の研究、X線トポグラフィによる半導体結晶欠陥の研究、高分子の構造解析、X線光学があり、参加した企業は11社に達している。

フランスは、Orsayに2基の蓄積リングがある。Thomson CSF, LETI, IBB (France), Philips がリソグラフィ、半導体界面、格子欠陥の研究を、化学、エネルギー関係の12社が触媒、ケイ光分析、巨大分子の構造解析の実験を行った。

英国では Daresbury に光源専用のリングがある。化学工業の3社が組合を作って利用し、GEC と British Telecom は半導体の研究を援助している。

イタリアでは蓄積リングを高エネルギー物理学の研究と共用している。FIAT, Montedison, ENEL が触媒、ガラスの研究、微量分析の実験を行った。

スウェーデンは共用のリングを建設中で、Volvo,

ASEA, Pharmacia, Ericson が利用する予定である。

さらに、ヨーロッパ連合で6 GeVの大型専用リングをグルノーブルに、また、米国では6 GeVの専用リングがアルゴンヌ国立研究所に建設されることが決まっている。

わが国では、元祖である東京大学物性研究所 SOR 施設、通産省電子総合研究所の TERAS、分子科学研究所 UV-SOR など、GeV以下のリングと、2.5 GeV リングをもつフォトン・ファクトリ (PF, 高エネルギー物理学研究所放射光実験施設) とが稼働している。ここでは、PF を例としてとりあげ^{2,3)}、施設の概要について述べる。

2. 放射光の発生

フォトンエネルギーが高域におよぶ連続スペクトルであるという放射光の特長は、電磁波を放射する電子が光速に近いことによる相対論的な効果とドプラー効果との相乗によるものとして理解できる^{1,4,5)}。

半径Rの円軌道を速さVでまわる電子は、軌道の中心に向かう加速度を受けて、軌道面に平行な電場ベクトル

をもつ電磁波を発生する。その強度は双極放射の式で与えられる。十分遠方の領域では、加速度の方向と角 θ をなす方向に放射される単位立体角、単位時間あたりのエネルギーは $\sin^2\theta$ に比例し、中心に向かう加速度の方向で 0 となり、放射エネルギーの角度分布は Fig. 1(a) のようにドーナツ形 (Fig. 1(b) に示すような軌道面上の角度分布曲線を加速度の方向を軸に回転してできる曲面) である。電子が光速に近づいても、電子が瞬間的に静止している系からみれば、角度分布はやはりドーナツ形であるが、これを観測系へローレンツ変換すると、電子から放射されるエネルギーは、後方には 0 に近づき、前方に集中する。電子の速度が増加するとともに、電子の運動方向に集中していく様子を Fig. 2 に示した。

二乗平均放射角は

$$\sqrt{\theta^2} = 1/\gamma \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 γ は電子の静止エネルギー m_0c に対する電子のエネルギーの比で、

$$\gamma = \frac{E}{m_0c} = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2)$$

である。 $E=2.5 \text{ GeV}$ のとき、二乗平均放射角は 0.2 mrad で、ほとんど平行光になっている。

それゆえ、十分遠い一点から観測すれば、電子が半径

R の円軌道上を $2R/\gamma$ だけ動く間に放射される電磁波が見えることになる。電子が電磁波とほぼ同じ速さで動くので、この間に電子から放射される電磁波はほぼ同時刻に観測点に達し、時間幅 $2R/\gamma v - 2R/\gamma c = R/c\gamma^3$ のきわめて短いパルス電磁波が観測される (トブラー効果)。このパルスには周波数 $(c/2\pi R)\gamma^3$ の高次のフーリエ成分が含まれるから、 γ が大きいほど短波長の電磁波が得られる。高周波加速された電子は集団 (バンチ) して回周するため、パルスの基本周波数は電子 1 個の軌道周波数ではなく、加速に用いた高周波の周波数となる。この基本周波数の間隔でならんだ多数の線スペクトルからなる電磁波が観測されることになるが、実際には、バンチの中の電子のエネルギーのゆらぎによりならされて、放射光は Fig. 3 に示すように連続スペクトルになっている。図に矢印で示した波長は短波長側の限界の目安となる特性波長 λ_c で、次式で与えられる。

$$\lambda_c = \frac{4\pi R}{3\gamma^3} = 5.59 \frac{R}{E^3} [\text{\AA}] \quad (3)$$

ここで、電子軌道の曲率半径 R をメートルで、電子のエネルギー E を GeV (10^9 電子ボルト) で表わしている。電子が磁場中で曲げられるときは、磁場の強さ B をテスラで表わすと、

$$\lambda_c = \frac{18.6}{BE^2} [\text{\AA}] \quad (4)$$

となる。

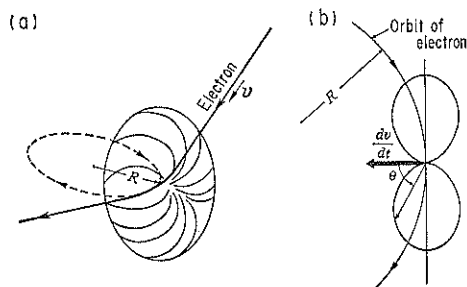


Fig. 1 Angular distribution of energy radiated from an electron moving at a velocity $v \ll c$ in an orbit with a radius R .

- (a) Schematic illustration of the three-dimensional distribution
(b) Distribution in the plane of orbit

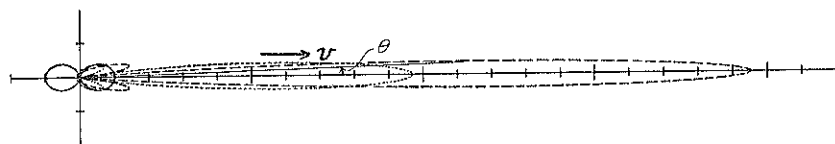


Fig. 2 Dependence of angular distribution of energy radiated from a moving electron on its velocity v .

Solid line: $E=0.5 \text{ MeV}$, $v/c=0.05$ Dotted line: $E=2.5 \text{ MeV}$, $v/c=0.979$
Dashed line: $E=5.0 \text{ MeV}$, $v/c=0.995$ (by courtesy of Y. Amemiya)

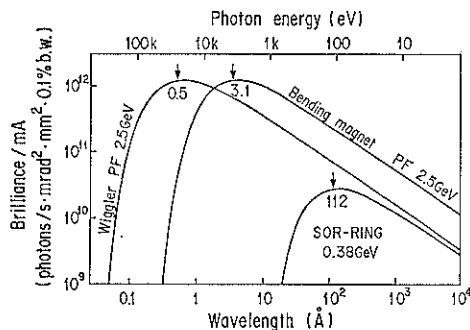


Fig. 3 Spectral distribution of synchrotron radiation.

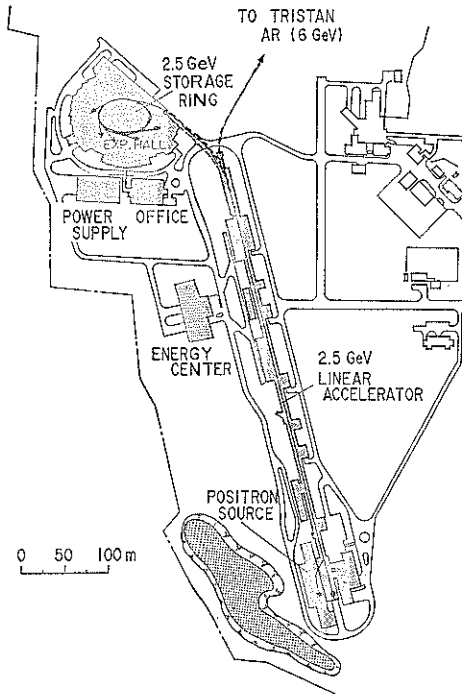


Fig. 4 Plane view of the Photon Factory.

3. 実験装置

放射光の装置は、電子を加速する入射器と、この電子を円形の軌道に閉じ込める蓄積リングからなっている。

入射器には、初段に低エネルギーのリニアックやマイクロトロン、後段にブースタシンクロトロンを組み合わせたものが多い。また、入射方式には貯蔵ビームより低いエネルギーのビームを入射蓄積した後、リングの磁界を上げながら、所定値までゆっくり加速してから貯蔵状態に入るものがあるが、PF のように貯蔵ビームと同じエネルギーのビームを入射するのがよいようである。

リニアックは最も強力な加速器であるが、高いエネルギーまで加速するときには高価につくので、他の目的と共用できる場合に使われている。PF では、電子-陽電子衝突型加速器“トリスタン”と共用するため、Fig. 4 に示すように、長さ 450 m の 2.5 GeV 電子リニアックが建設された³⁾。

エネルギー 2.5 GeV に加速された電子ビームは、Fig. 5 に示すような長径 68 m、短径 50 m の楕円形をした電子蓄積リングに入射される³⁾。リングには、28 個の偏向電磁石があって、電子は半径 8.66 m の円弧を描いて走り、放射光を発生する。電子軌道は円弧と直線をつなげ

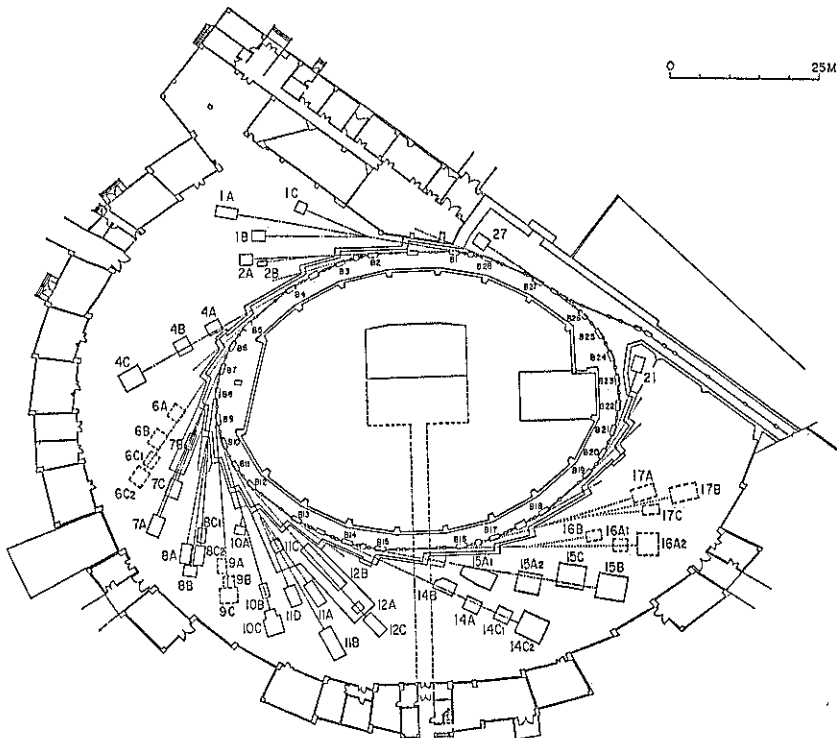


Fig. 5 Plane view of the storage ring and experimental hall in the Photon Factory.

たもので、直線部からは放射光は出ない。

電子は光速の 99.999998% の速度で、周長 187 m を 0.6 μ s で一周する。一周すると、電子は 400 keV のエネルギーを失うので、高周波電場で加速する。電子のリング回転周波数の整数倍の周波数の高周波電場を、リング中に置かれた空洞に励起する。電波が電子の進行方向と逆向きのときに空洞に入った電子は脱落してしまうが、順方向のときに空洞に入った電子は一周するごとに加速される。したがって、電子は集団（バンチ）をつくって回っている。PF リングでは、回転周波数は 1.6

MHz で、その 312 倍の 500 MHz の高周波（約 300 kW）を用いているので、電子は等間隔に並んだ 312 個のバンチが形成されている。放射光は幅 0.1 ns、間隔 2 ns のパルス光になっている。

放射光利用専用リングで最も重要なことは、空間的にも時間的にも安定した放射光を得ることである。リングの電子閉軌道が動かないこと、電子ビームに不安定がないこと、超高真空が保たれていて、ビーム寿命が長いことが要求される。現在、蓄積電流 150 mA で、30 時間のビーム寿命を得ている。

Table 2 Experimental Stations of the Photon Factory.

BL 1 (NTT)	BL 11
1A Semiconductor surface analysis	11A Soft X-ray solid state spectroscopy (2m grasshopper)
1B X-ray lithography	11B Surface EXAFS, soft X-ray standing wave (soft X-ray double crystal)
1C Photo-chemical reaction	11C VUV solid state spectroscopy (1m Seya-Namioka)
BL 2 (Undulator)	11D Angle-resolved photoemission spectroscopy (constant deviation)
2A Soft X-ray experiment	BL 12
2B X-ray microscopy	12A VUV gas spectroscopy (1m Seya-Namioka)
BL 4	12B VUV high resolution spectroscopy (6.6m off-plane eagle mount)
4A Dispersive EXAFS, Trace element analysis	12C Soft X-ray high resolution spectroscopy (10m grazing incidence)
4B Liq./melt structure analysis	BL 14 (Vertical wiggler)
Radiation effect on biocells	14A Crystal structure analysis of proteins (double crystal-4 circle goniometer)
4C X-ray diffuse scattering, fluorescent EXAFS (sagittally focused double crystal)	14B High precision X-ray optics
BL 6*	14C High speed X-ray topography, X-ray radiography (double crystal) X-ray magnetic scattering, Compton Scattering
6A X-ray Weissenberg camera	BL 15
6B EXAFS (channel cut crystal)	15A Small angle X-ray scattering of muscles and alloys (focused bent crystal)
6C ₁ X-ray diffract. at low temp.	15B X-ray topography, X-ray interferometry
6C ₂ X-ray diffract. under high press. and high temperature	15C High resolution X-ray diffraction
BL 7 (Tokyo University)	BL 16* (Multipole wiggler-undulator)
7A Soft X-ray photoemission spectroscopy (plane grating)	16A ₁ , A ₂ Hard X-ray experiment (sagittally focused double crystal)
7B Surface photo-chemical reaction (1m Seya-Namioka)	16B VUV experiment (10~4000 eV)
7C EXAFS and X-ray diffraction (sagittally focused double crystal)	BL 17 (Fujitsu)*
BL 8 (Hitachi)	17A X-ray lithography
8A Soft X-ray spectroscopy (self-focusing plane grating)	17B EXAFS
8B EXAFS (soft and hard X-ray double crystal)	17C Photo-chemical vapor deposition
8C ₁ X-ray lithography	BL 21* (Light Source Division)
8C ₂ X-ray tomography of minerals	Beam monitoring and photo-desorption exp.
BL 9 (NEC)*	BL 27* (Light Source Division)
9A X-ray lithography	Radiation test of mirrors
9B photo-chemical vapor deposition	
9C EXAFS and X-ray topography (sagittally focused double crystal)	
BL 10	
10A Crystal structure analysis of minerals (4-circle goniometer)	
10B EXAFS (channel-cut monochromator)	
10C Small angle X-ray scattering of enzymes (focused double crystal)	

* Experimental stations under construction

高輝度という観点からすれば、電子ビームが細く、電流密度が高く、軌道の発散角（中心軌道となす角）も小さい方がよい。しかし、そのためには中心軌道に電子を束縛する復元力が必要で、これは当然電子軌道を振動させることになる。また、リングは超高真空中に保持されているが、それでも残留ガスのイオンとの相互作用で、電子は軌道からそれる。これらの不安定性は電流密度が大きいほど顕著になり、安定性と高輝度は両立しない要因である。これを最適化することが今後の課題である。

電子にかわって、陽電子を蓄積すると、残留ガスイオンと反発し合い、ビームの安定性は格段に向上することが期待できる。PF の入射器には、トリスタンと共用の陽電子源が備えられている。

陽電子を人工的に発生させるには、電子-陽電子の対発生を利用する。まず、高エネルギーの電子ビームを、重金属ターゲットに当て、制動放射による γ 線を発生させる。 γ 線はターゲット内で運動量保存則を満たすように重い原子核の近傍で電子と陽電子の対に変る。この陽電子はエネルギーと角度の分布がともに大きくひろがっているため、強いソレノイド磁界を置いて集めても、加速管に入って加速される陽電子はターゲットにあてて一次電子ビーム電流の 1/1000 になってしまう。このため、一次電子ビームを加速するリニアックは大電流が得られるようになっており、200 MeV, 3 A, 10 ns のパルス電子ビームをターゲットにあて、数 mA の陽電子ビームをとり出し、リニアックで 2.5 GeV に加速し、PF リングに陽電子を蓄積する実験も行われている³⁾。

次に、PF リングに設置されている測定器について簡単に述べる。前述のように、PF リングには B1 から B28 まで 28 ケの偏向磁石があって、その中 24 ケから放射光が取り出せる。現在、稼働しているビームラインは 11 本で、各ビームラインの放射光は 2~4 本の分岐ラインで実験ステーションに導かれている。これらのステーションで使われている主な実験装置を Table 2 に示した⁶⁾。

これらの装置を用いて行われている実験には、大学、官公庁の研究所から申請された“共同利用実験”と、民間企業から申し込まれた“施設利用実験”の二種類がある。昭和 60 年度の申請課題の審査委員会では約 200 件の共同利用実験が採択された。また 59 年度の民間企業による施設利用は 36 件で、その内訳はリソグラフィが 2、光反応気相成長の基礎研究が 2、半導体結晶中の運動転位の観察が 5、微量分析が 6、EXAFS による非晶質材料と触媒の研究が 13、その他 8 で、17 件が電子材料に関するものであった。このほか、NTT、日立、NEC、富士通の 4 社によるビームラインの建設（電子

蓄積リングの光取り出し口から実験ステーションまでの諸設備と実験装置の建設）も行われ、まもなく本格的な研究が始まるものと期待されている。

4. 今後の放射光技術

放射光技術の発展の方向としては 1~2 GeV クラスの真空紫外領域と 5~6 GeV クラスの X 線領域専用の電子蓄積リングとを別けて建設する傾向にある。いずれも、電子軌道に直線部を多くして、そこにウィグラーやアンジュレータ、自由電子レーザーなどを挿入する計画がすすめられている。ウィグラーは超伝導磁石により電子軌道を急激に曲げて、短波長の放射光をとり出すもので Wavelength shifter とも呼ばれている。多極ウィグラーやアンジュレータは、多数の永久磁石を周期的に並べたもので、前者は各磁石からの放射光の和により、後者では干渉を利用して特定の狭い帯域の強度を 100~1000 倍も強くする⁷⁾。蓄積電子のエネルギーは利用する波長領域によって選ばれ、X 線領域では、結晶構造解析に適している結晶の原子間距離（ $\sim 1\text{\AA}$ ）に近い波長の X 線がアンジュレータから得られるように 5~6 GeV とされている。

1985 年 10 月に米国ブルックヘブン国立研究所で“シンクロトロン放射光施設の建設と立ち上げ”というワークショップが開催された。世界各国の施設の建設と利用の体験について情報を交換して、互いに協力して放射光の効果的な利用と将来計画の立案に資するのがこのワークショップの目的である。各施設の代表者から施設の概要、建設、利用の仕方、現状、問題点、将来計画について報告された。各国ともビームラインの増設、蓄積リングの直線部分に挿入デバイスを追加、蓄積リングの電子のエネルギーの増強などの計画を着々と推進している。たとえば、ブルックヘブン国立研究所の放射光施設 (National Synchrotron Light Source, NSLS) では、今ビルディングの拡張工事、リングの直線部にアンジュレータ、自由電子レーザーなどの挿入、電子エネルギーの 2.5 GeV から 3 GeV への増強の計画が進行中であった。また、リングの電子ビームを細くしぼり (PF の 1/3)、輝度を高くしており、その特長を生かして高分解 X 線顕微鏡 (分解能 0.2 μ)、収束 X 線を用いる微小部の EXAFS など新しい研究を立ち上げていた。一方、これから放射光実験施設を作る中国、台湾、ブラジルなどでは、挿入デバイスを入れる直線部分を多く設けるという新しい考え方で電子蓄積リングを設計、または建設中である。コンピュータと同じように、あとから作るものほど良いものができている。このようなわけで、PF は現在国際的にも高いレベルにあるが、エミッタンスの改善

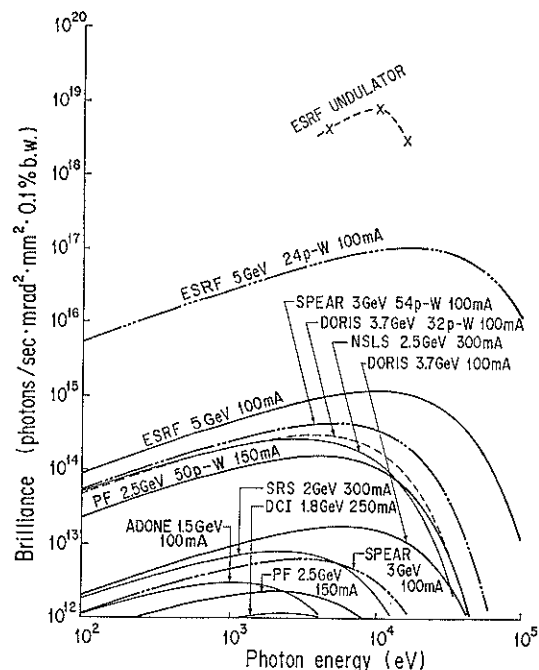


Fig. 6 Comparison of spectra of main facilities for synchrotron radiation in the world as listed in Table 1.

による高輝度化、直線部分へのウィグラー、アンジュレータの挿入などによる性能の向上をはからないと、2、3年後にはこの分野で後発の国々にも追い越される心配がある。5～6 GeV 大型蓄積リングは、新しい研究分野を展開するためだけでなく、現在進行中の各種の実験を飛躍的に発展させるために必要で、ヨーロッパ連合 (European Synchrotron Radiation Facility, ESRF) と米国のアルゴンヌ国立研究所で建設計画があり、それぞれマシンのデザインを練り5～6年で実用化する計画をもっている。

それによると、新光源を建設する上で大きな問題点はないとされており、検出器、データ処理技術、放射線損傷の対策など測定器系に重点を置き、これまでの研究分野を早急に発展させることを眼目としている。Fig. 6 はヨーロッパ連合の5 GeV リング (ESRF) の計画書に

記されているパラメータから計算したもので、その他の施設で現在計画中的のものも含めてスペクトル分布が比較されている。5 GeV リングのアンジュレータからのX線 (波長 $\sim 1\text{\AA}$) はPFの 10^7 倍も強いことになる。現在、稼働中の施設でも輝度の増強計画を進めてきており、PFでも、多極ウィグラー (50極, 50 p-W と印した曲線) を挿入することを考えている。

さらに、5～6 GeV の大型リングの完成によって、次の計画としてX線領域の自由電子レーザー⁸⁾の開発があげられる。コヒーレンシーという質的向上をもたらすX線レーザーが実現できれば、回折X線の位相の情報を取り入れた結晶構造解析は勿論のこと、干渉性を利用した新しい計測、イメージングの研究領域が展開し、非常に広範な分野へのインパクトが期待できる。自由電子レーザーは赤外域からはじまり現在は真空紫外域のものが開発されているようである。このような段階で、硬X線領域のレーザーを狙うことは一足とびのように思われるが、一方、完全な結晶によるブラッグ反射の反射率は100%に近いので共振系が作りやすいという特長もある。大型電子蓄積リングが建設できれば、X線自由電子レーザーの実現の可能性は高いものと考えてよいであろう。

文 献

- 1) たとえば、菊田惺志：日本結晶学会誌，**18**，65 (1976)；佐々木泰三：数理科学，**26**，No. 9，5 (1983)。
- 2) 高良和武，富家雄：日本物理学会誌，**30**，574 (1975)。
- 3) 富家雄，田中治郎，千川純一：原子力工業，**32**，No. 3，13 (1986)。
- 4) J. Schwinger：Phys. Rev. **75**，1912 (1949)。
- 5) A.A. Sokolov and I.M. Ternov：“Synchrotron Radiation”，(Academie-Verlag, 1968)。
- 6) Photon Factory Activity Report 1982/1983, 1983/1984, 1984/1985 (高エネルギー物理学研究所)。
- 7) たとえば，北村英男：数理科学，**21**，No. 9，22 (1983)。
- 8) たとえば，塚田甲子男：原子力工業，**32**，No. 3，42 (1986)；三関周興：日本物理学会誌，**37**，906 (1982)。