

放射光実験施設の現状

The Present Status of the Photon Factory

浅見 明、小早川 久、安藤 正海

Akira Asami, Hisashi Kobayakawa and Masami Ando

高エネルギー物理学研究所

National Laboratory for High Energy Physics

1. はじめに

放射光実験施設（フォトンファクトリー）は 2.5 GeV の電子ストレージリングからのシンクロトロン放射光を利用して物質科学の研究を行うことを目的とした共同利用実験施設である。このストレージリングへは線型加速器により 2.5 GeV に加速した電子を直接入射する方式である。

フォトンファクトリー計画は、X 線回折結晶学の研究者の間で 1970 年ごろから検討され、1973 年に正式に発足した。建設は 1978 年に開始され、1982 年 3 月に完成し同年 6 月から放射光科学研究のための最先端の施設として稼働している。当初 4 本であったビームラインは、逐次増設されて現在では 15 本のビームラインで、44 件の実験が同時に実施できるようになっている。1987 年度の運転時間は 3,600 時間をこえ 80% は共同利用実験に提供されている。現在全国の大学、官公庁の研究所からの共同利用実験の登録者は 2,000 人に達し、年間約 500 件の実験が行われている。また、民間企業から申し込まれた施設利用実験は年間 20~30 件で、主に半導体材料や触媒の研究が行われている。このほか、民間 4 社がそれぞれにビームラインを建設し、本格的な利用を行なっている。

2. 放射光実験施設の概要

放射光施設の加速器は電子を 2.5 GeV に加速する線型加速器（以下リニアックと略す）と、この電子を閉軌道に周回貯蔵し、シンクロトロン放射光源とするストレージリング（以下 PF リングまたは単にリングと略す）とからなる。

リニアックでは、電子は入射部で約 30 MeV に加速されてから、主加速部に入射される。図 1 の写真はこの部の全景で、加速器全長は 400 m に達する。主加速器部は 5 セクターで、1 セクターは 8 ユニットで構成される。1 ユニットは 4 本の加速管と 1 本のクライストロンなどから成り、電子は 1 ユニットあたり約 62 MeV 加速される。

このリニアックは高エネルギー物理学研究所のトリスタンリング (e^+e^- 衝突実験用) への入射器としても使用されていて、電子・陽電子ともに加速できる。放射光利用実験にとっては発光点である電子ビームの位置は正確に再現されねばならないが、PF リングへは貯蔵ビームと同じエネルギーでリニアックから直接入射するため、ビームの位置再現性にすぐれ、かつ入射が短時間で済む利点がある。

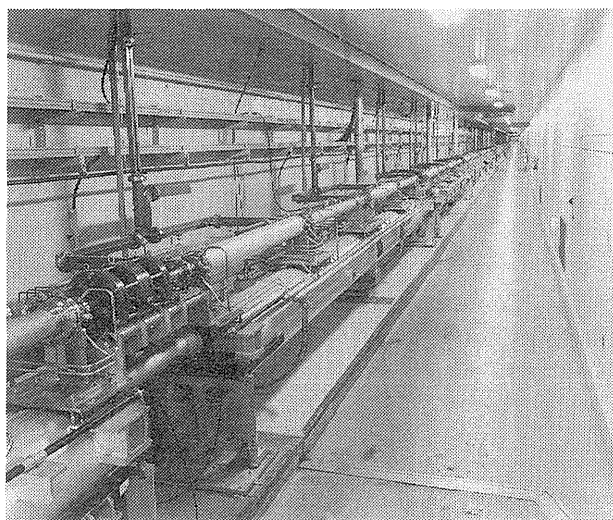


図 1 2.5 GeV 線型加速器の全景

このリニアックで2.5GeVに加速された電子ビームは、長さ150mの入射路で、そのエネルギー・位置などが調整されたのち、2.5GeV P Fリングに入射蓄積される。

リングは長径68m、短径50mの楕円型で、図2に示すように28個の偏向電磁石が電子軌道をつくり、円弧（曲率半径8.66m）を描いて軌道が曲

げられるとき放射光が発生する。その光子エネルギーは連続的に分布しており臨界エネルギーは4keVで、1eVの赤外領域から25keVの硬X線まで実験に供せられる。

周長は187mであり、一周するときこれらの偏向電磁石軌道により光を放射して電子1個が失うエネルギーは400keVである。すなわち300mAのビ

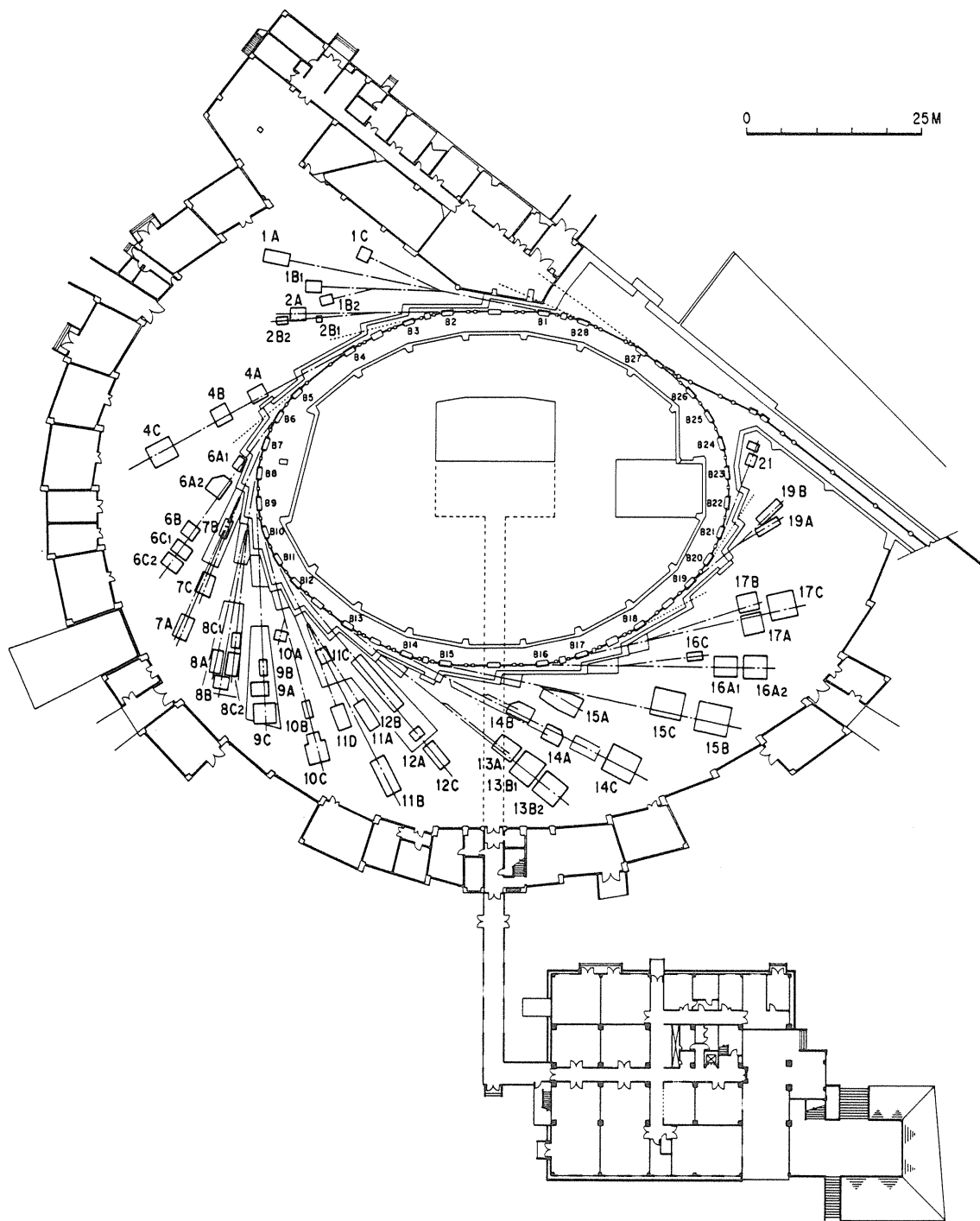


図2 ストレージリングと実験用ビームライン

ームは120 kWを光として失うことになる。

楕円型をしたリングには長さ5 mの直線部を2個所、3.5～3.75 mの中直線部を8個所もうけてある。中直線部のうち2個所には高周波加速空洞が設置しており、上記の電力を電子に供給している。また電子入射装置にも1個所使用されている。これらはストレージリング加速器として必要な装置であるが、残りの直線部（長直線部2個所、と中直線部5個所）は挿入型光源が設置できる。

中直線部の1個所には超伝導ウィグラー（垂直偏向型）が、1982年から導入され硬X線領域の実験研究に数々の成果をあげてきた。磁場強度は通常5 Tで運転されている。また長い直線部の1個所には1982年に60周期のアンデュレータが挿入され実験に使用されてすでに5年になる。もう1個所の長直線部には1987年に26周期の多極ウィグラーが挿入され、約1年かけた試運転の後現在は最高パワー（1.5 T）での耐熱試験にも成功し、間もなく実用に供せられる段階である。

偏向電磁石からは広いエネルギースペクトルの放射光をユーザーに供給している。建物の関係上偏向電磁石からの放射光は24ヶ所が利用可能であるが、現状（1988年5月）では15ヶ所に放射光実験用のビームチャンネルが、3本はビーム診断用に、4ヶ所は建設中であり、あと計画中の1ヶ所を残すのみとなった。

これまでリングの蓄積粒子は電子であったが、陽電子になるとイオン捕獲などによるビーム不安定や、寿命短縮などの問題がなくなることが知られている。フォトンファクトリーでは陽電子を加速できるリニアックを有する利点を生かし、陽電子蓄積を実用化する試験が、この3月末に行なわれ350 mA蓄積に成功した。まだ数々の課題を残しているが一応実用化のめどがついた。実用化のめどがついた。

3. 加速器の運転形態

本施設の共同利用実験は、1982年10月から開始された。そして翌1983年10月にはトリスタン

表1 リニアックの運転時間の推移

年 度	運転時間 (時間)	故 障 (時間) (率, %)
1982	1600	37 (2.3)
1983	2100	18 (0.9)
1984	2500	36 (1.4)
1985	3182	22 (0.7)
1986	3443	13 (0.4)
1987	4840	154 (3.2)

入射・蓄積リング、1985年3月には陽電子発生装置、1986年11月にはトリスタン主リング建設が完了し、これらの運転が相次いで行われるようになり、これらの入射器でもあるリニアックの運転時間は表1に示すように年々増加してきた。1987年度の飛躍的増加は、トリスタンで本格的実験が開始されたことによる。それに伴い故障時間も増加したが、全般的に見て故障率は非常に低い。なお、PFリングへの入射に直接支障となったものはこのうちの一部に過ぎない。ここで陽電子発生装置も含めたリニアックの主要パラメータを表2に示す。

運転開始以来PFリングはきわめて安定かつ効率的に運転されてきた。図3はこれまでの会計年度毎の運転時間の統計である。運転開始当初は蓄積電流値は少なくビーム半減期（以下ビーム寿命又は寿命と略す）も短かかった。しかし真空システム等の改良にともない徐々に性能が向上した。また当時運転費、とくに電力予算が不足し運転時間は1298時間であったが、運転費は年々増加し1986年度には3000時間を越えるまでになった。このうちユーザー使用時間は約80%であり、マシン故障によるユーザー時間減は約1%にすぎない。しかしながら垂直型ウィグラーを運転する場合には、入射時に超伝導磁場を一旦下げるなどの複雑な運転手順を踏まねばならず時間がかかる。

表2 リニアックの主要パラメータ

項目	2.5GeV リニアック	陽電子発生装置	
		電子加速部	陽電子加速部
エネルギー (GeV)	2.5	0.2	0.25
尖頭電流 (mA)	50 (150)	10000	10
パルス幅 (ns, 最大)	2000 (1.5)	1.5	1.5
パルス繰返し (Hz, 最大)	50		
加速器			
周波数 (MHz)	2856		
型, モード	進行波, 2/3 π		
長さ×本数	2m×162 0.7m×1	1.5m×1, 2m×1 4m×5	2m×4, 4m×4
クライストロン			
出力 (MW, 最大)	30		
本数	41	3	3
電子銃			
入射電圧 (kV)	110	160	

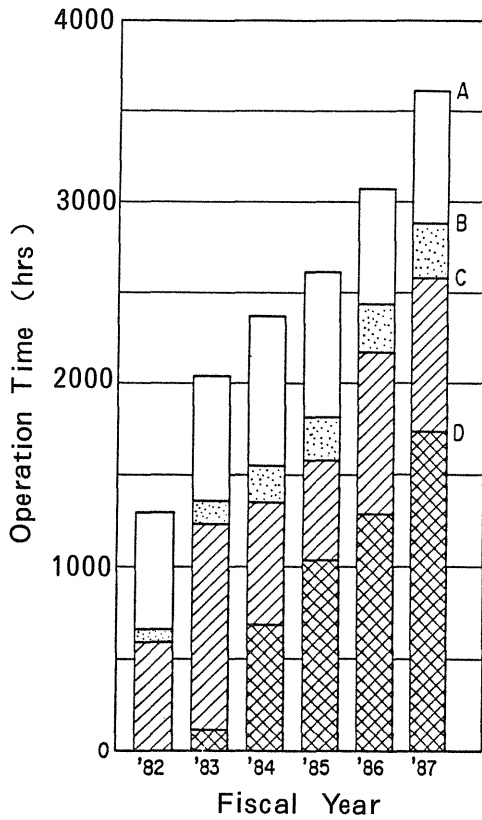


図3 PFリングの運転時間

- A : 全運転時間
- B : ユーザー用運転時間
- C : 有効ユーザー時間(入射時間, 故障時間を除く)
- D : 垂直型ウィグラーを運転したユーザー時間

そのためユーザー時間の約10%が消費される。このウィグラーの運転はユーザー時間の約60%を占めている。なお垂直型ウィグラーは現在この入射時の手間を省く方式に改良中であり 1989 年から稼働する予定である。

PF リングの主な運転パラメータを表3にまとめる。垂直型ウィグラーなしの時は通常 300 mA まで蓄積しユーザー実験に入る。ビームの寿命は 300 mA では約15時間, 150 mA では30時間程度である。入射蓄積の1サイクルを図4に示す。これは垂直型ウィグラーなしの運転例であるが, ウィグラー運転時には通常 250 mA を最高電流値として運転している。そのわけはウィグラーの非線型磁場のためビームの安定領域が狭く大電流での運転には微妙な調整が必要となるためである。

真空ビーム路が枯れて真空度が良くなるとともに寿命が増加し, それとともに入射間隔(入射蓄積後次の入射までの時間)が年々増加してきた。この様子が図5に示してある。またユーザー実験中の平均電流値は現在約 200 mA でこれもまだ増

表3 PFリングの主な運転パラメータ

エネルギー	2.5 GeV	最高達成 3.0 GeV
蓄積電流値	300 mA	最高達成 360 mA (電子), 350 mA (陽電子)
周長	187 m	
曲率半径	8.66 m	
ベータトロン振動数(水平)	8.38	
ベータトロン振動数(垂直)	3.18	
エミッタンス(水平)	130 nmrad	
エミッタンス(垂直)	2 nmrad	
加速周波数	500 MHz	
ハーモニック数	312	
空洞数	4	
輻射損失	400 keV/周 (510 keV/周: ウィグラーあり)	
直線部	長直線部 (5 m) : 2 箇所 中直線部 (3.5 ~ 3.75 m) : 8 箇所	
挿入型光源	超伝導垂直ウィグラー 5 T アンデュレータ (60周期, $K = 1.78 \sim 0.1$) 多極ウィグラー (26周期, 1.5 T) レボルバー型 (4 連式) * 円偏向アンデュレータ * 多極ウィグラー (14周期, 1.5 T) * (* は建設中)	
放射光チャンネル	放射光実験用 15 ビーム診断用 3 建設中 4	
真空度	3×10^{-11} Torr (蓄積電流値 0 mA) 4×10^{-10} Torr (蓄積電流値 150 mA)	
ビーム寿命	15時間 ($I = 300$ mA), 30時間 ($I = 150$ mA)	
入射	2.5 GeV 電子, 2.5 pps	
入射時間	1.5 ~ 10分	

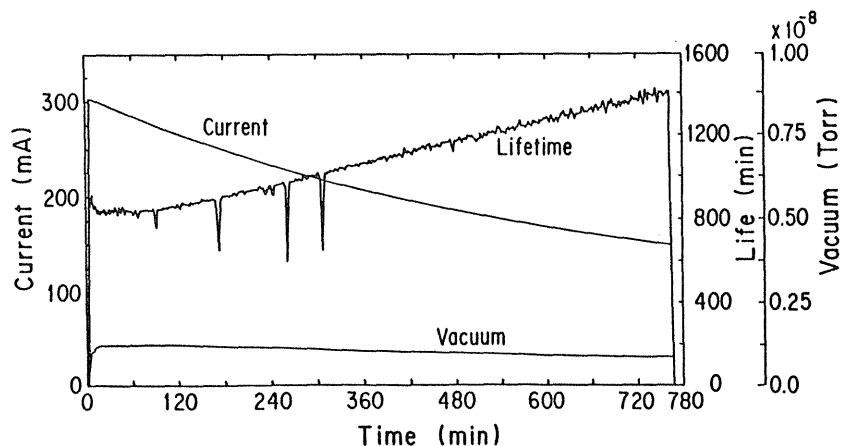


図4 蓄積電流値, ビームの寿命, リングの平均真空度

加の傾向にある(図5)。

運転モードは従来水曜日にはじまり次週の土曜日に終る2週間モードを採用してきたが、1986年秋からトリスタン運転がはじまり、入射器が共通であるためフォトンクトリー単独では決められず最近では3週間または4週間モードを採用している。

入射器・光源リング・測定器それぞれにシフトリーダーが付き、それらの運転に責任をもつ。各シフトリーダーはシフト(8時間)毎に交代する。マシンスタディのテーマは運転に必要な維持・改良が最優先される。マシンスタディでは加速器の改良に精力的にとりくみ、後述するように年々輝度を増加させた原動力となったのみならず、このスタディで得られる知見が将来の最先端の放射光リングの建設に役立つものと考えられる。

4. 加速器の改良

リニアック及びリングの特性改善のために、当初から多くの努力がなされてきた。リニアックではクライストロン、RF窓、RF負荷の開発、電磁氣的ノイズなどの変動原因の低減除去、コントロールの強化などがなされた。また、多目的使用のためのビーム切替システムや、異常の早期発見システムの整備・改善に努めている。昨年トリスタンの本格的運転もはじまり、そのためリニアックの急速な運転時間の増加もあり、いくつかの問題点が一層痛切となった。特にクライストロンの改善が急務であるが、最近やや明るい見通しを得た。また、初期調整を含めて運転をより容易にするため、コントロール系、モニター系の整備を進めている。このほか、陽電子発生装置の特性向上も依然として大きな課題である。

リングでは、1985年夏に真空系の大幅な改造が行なわれた。放射光があたり真空チェンバーが発熱する個所があり、それまで蓄積電流を150 mAにおさえていた。この改造ではリングの80ヶ所に水冷式光アブソーバを挿入し、その結果300 mA以上の運転が可能になった。

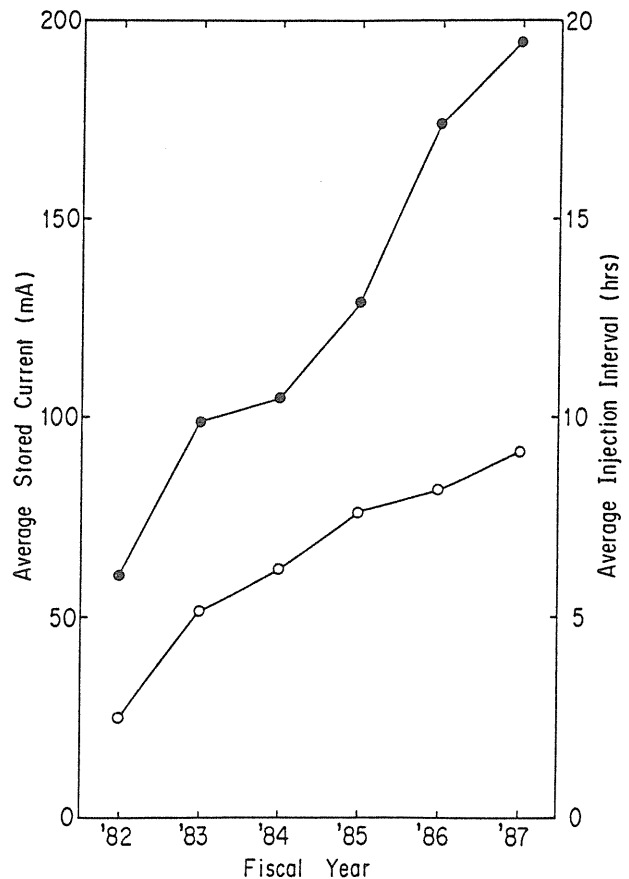


図5 ユーザー時間中の平均電流値(●)と平均入射間隔(○)

1987年3月から、それまで400nmradであった水平エミッタンスを130nmradに下げて運転を開始した。このための電磁石系の改良とこれに付随する真空チェンバーの改造は1986年の夏のシャットダウン中に行なわれ、その後のマシンスタディ時に試運転をくりかえしてきたものである。この低エミッタンス化で輝度はビームラインによって違いがあるが2~20倍上がった。ところでBL21(ビームライン21)はビーム診断に使われている。そこでは発光点から距離12mの所で光ビームの位置を常時観測しているが、低エミッタンス化後光軸の変動が約10倍ひどくなった。図6を見れば明らかであるが、外乱に対して敏感に光軸が動くようになった。ここで云う外乱とは電磁石用冷却水温度の僅かな変動、トリスタンリング電磁石が距離の離れたPFリングにつくる微小な磁場(20ミリガウスの磁場で160 μmの変動をともな

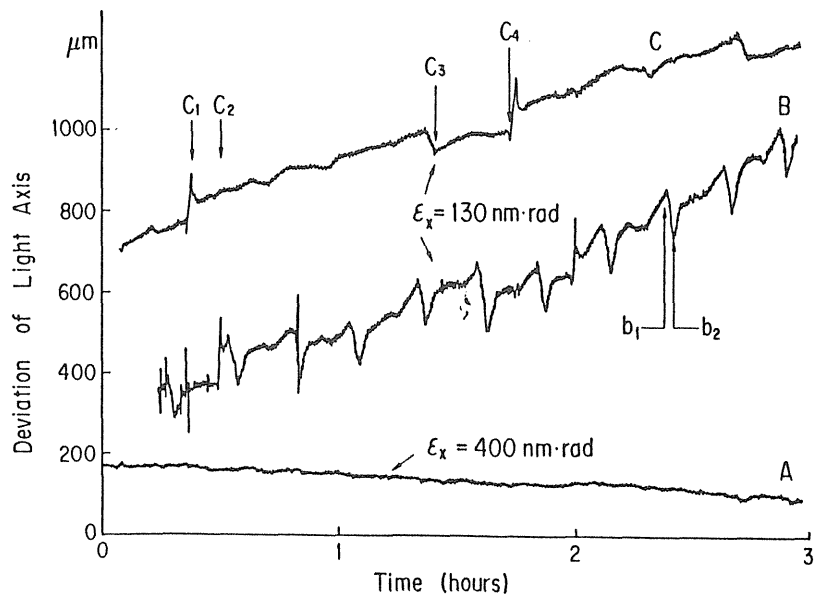


図6 BL 21 で 12 m 地点で見た光位置の垂直方向の変位

A : 1987年1月31日、 $\epsilon_x = 400 \text{ nmrad}$

B : 1987年2月4日、 $\epsilon_x = 130 \text{ nmrad}$

b1, b2 は冷却水クーリングタワーファン起動・停止に対応する。

C : 1987年2月5日、上記ファン停止後

c_1, c_2, c_3, c_4 はトリスタンリングのエネルギーが、それぞれ 0、6、25、40 GeV に対応する。

う) などである。また建物は日照・温度などで僅かに変形するものである。P F リングの建物も微小な歪を生じるが低エミッタンス化後、リングはこれを敏感に感知し、1日周期で光軸が変動するという現象が生じた。気象条件にもよるが光軸の日較差が1 mmに達することもあり、この時点では実験に支障を来たすので“低エミッタンス運転を止めろ”と云うのがユーザーの声であった。光源系ではそれまでB L 21の光軸変動をフィードバックにより抑える実験に成功しており、直ちにこの問題に対処できた。

こうしたフィードバック系は全周にわたって、全ビームラインに対して完璧に作動することは実際には困難であるが、当面の放射光実験が行なえる状態にまで変動を抑えることができた。

一般にビーム不安定を起す要因は数えきれないが大別して加速器装置自体が原因となるものと、外部からの電氣的磁氣的なノイズ、あるいは機械

的振動・気温変化・地殻変動などにもなう建物自体の微小な歪みによるものがある。

加速器の構成装置自身で不安定の要因となるものの代表格として加速空洞があるが、フォトンファクトリーでは空洞の高次モードの高いインピーダンスによるバンチ結合型ビーム不安定について当初から研究を積んできた。このリングの電子ビームは500 MHzのシングルセル空洞4台により加速されるが、これらの空洞のもつ758 MHz, 830 MHz, 1070 MHz, 1707 MHzの高次共鳴が原因で進行方向、あるいは横方向にビームが振動し、数々の問題をおこしてきた。

長期にわたる研究蓄積の成果として、1987年夏に4台の空洞を改造し、冷却水温度制御と合せて不安定除去に成功した。この種の不安定除去の具体的方法を初めて確立したものである。

空洞以外のものが不安定の要因となる場合も多い。突発的な現象もあるが、周期的な場合も多い。

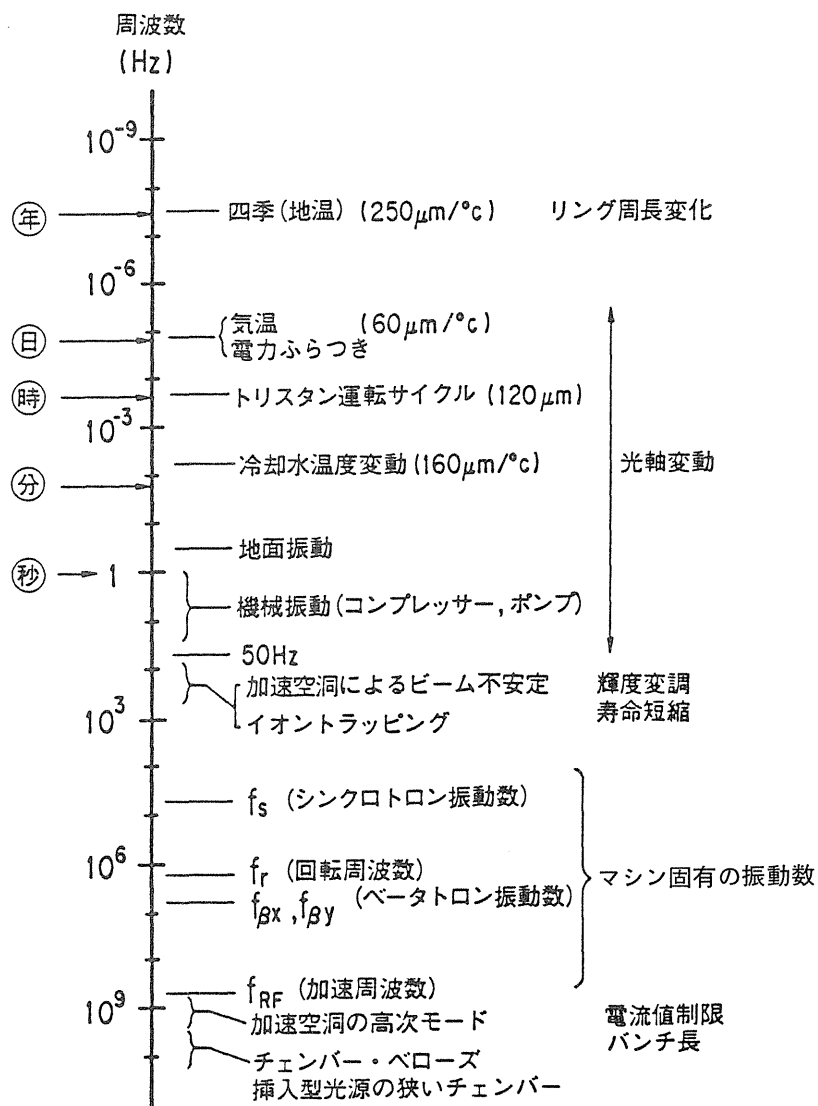


図7 PFリングで起きたビーム不安定の周波数分析

リングで起きた不安定の周期とその原因との関係を図7に示す。これらの不安定のほとんどは解決されたものである。

5. 放射光スペクトルと挿入型光源

こうしたビームの安定化のための改良が続けられた結果、輝度 (Brilliance : photons / (sec \cdot mm² \cdot mrad² \cdot 0.1% bw)) は年々増加してきた。また挿入型光源の導入とともにその得意とするエネルギー領域での輝度が上昇する。現在稼働している挿入型光源はアンデュレータ、垂直型ウィグラー、そして多極ウィグラーでありそれらの導入にともなう 0.1 keV から 100keV までの輝度の上昇を図8に示す。1986 会計年度後期の上

昇 (図8中の3) は、低エミッタンス運転開始によるものである。

リングは 1982 年 2 月に完成したが、その後 1 年以内に 2 台の挿入型光源が相次いで稼働した。超伝導電磁石を使用した垂直型ウィグラー (VW : wavelength shifter) は B 13-14 間 3.55 m の直線部 (図9) に挿入された。また B 1-2 はの 5 m 直線部に 60 周期のアンデュレータが導入された。このアンデュレータは SmCO₅ よりなる永久磁石を 6 cm 周期で配列したもので最高 0.31 T の磁場を作り、400eV から 5000eV までの高い輝度の光を供給してきた。こうした多極型挿入光源が実用化されるに至った背景には、永久磁石材料の目覚ましい進歩がある。我国ではこの分野

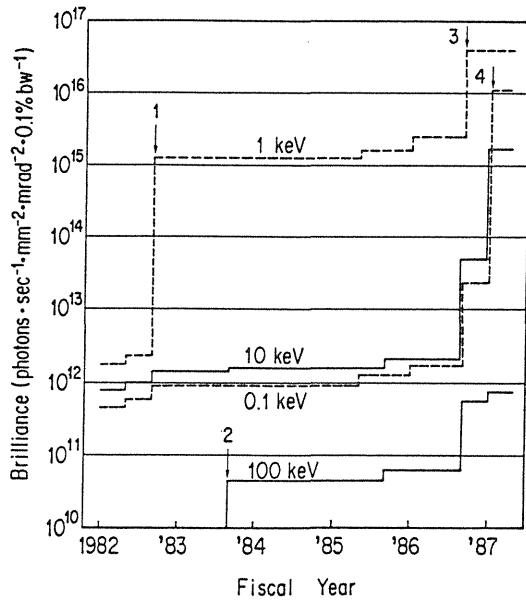


図8 PFリングの0.1 keVから100 keVについての輝度 (Brilliance)

- 1 : アンデューレータ挿入 (BL 02)
- 2 : 垂直型ウィグラー挿入 (BL 14)
- 3 : 低エミッタンス化
- 4 : 多極ウィグラー挿入 (BL 16)

の開発では世界第一級であり将来さらに強力な磁性材料を開発できる可能性もある。1984年には開発を始めた26周期多極ウィグラー(MPW)は周期長が12cmで0.03keVから70keVまでの高い輝度(偏向電磁石の100倍近い)を得ることができる。NdFeの永久磁石(NEOMAX 30H)とpermendurよりなる複合型で磁場強度は1.5 Tから0.05 Tまで可変であり、ウィグラーモード(1.5 Tに固定)とアンデューレータモード(0.05~0.5 T可変)との二つのモードが選択できる。この装置は1987年4月にBL 15-16間5 m直線部に挿入され、約1年かけたビームによる諸調整も終り、1988年2月にはパワー近くで結晶分光器の耐熱試験も終わり間もなく実用に供せられる。

これらの他、今年4月にBL 18-19間に挿入されたレボルバー型アンデューレータは4連式であり、使用エネルギーを変えられるものである。BL 12-13間にも周期長12cmのMPWが挿入される予定である。これらの装置の主なパラメータを表4にまとめる。

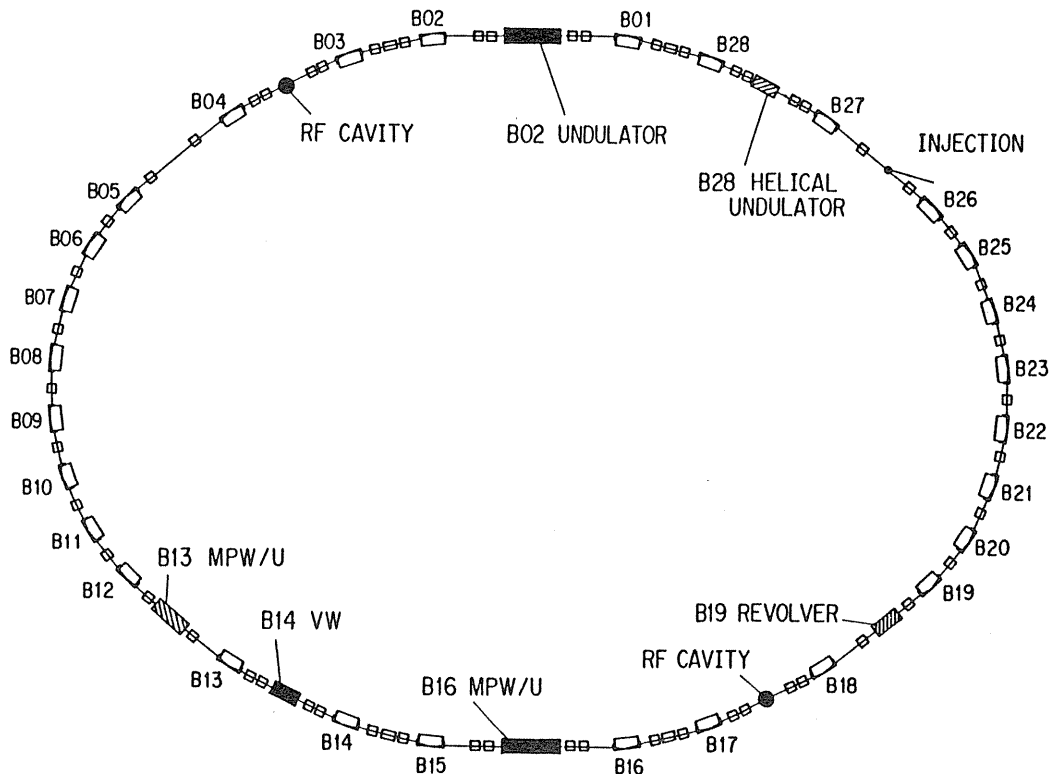


図9 PFリングの挿入型光源の配置

現在の放射スペクトル（輝度）を図10に示す。
 ここでは蓄積電流値は250 mA, 低エミッタンス
 ($\epsilon_x = 130 \text{ nmrad}$) とした。偏向電磁石, BL

2のアンデュレータ, BL 14の垂直型ウィグラー,
 BL 16の多極ウィグラーについてそれぞれ特色あ
 るスペクトルを示す。

表4 挿入型光源の主なパラメータ

チャンネル	型	λ_u (cm)	N	Gmin (cm)	Bmax (tesla)	Kmax	$h\nu$ (keV)	U0 (keV)	運転中 (op)
B02	U (Mk 2)	6.0	60	2.8	0.3	1.7	0.4	1.37	op
						2.3	0.25	2.44	
B13	MPW/U	18.0	14	2.7	1.5	25.0	0.03 ~70	22.4	
B14	WS			5.0	6.0		<100	50.0	op
B16	MPW/U	12.0	26	1.8	1.5	16.8	0.03 ~70	27.8	op
B19	U (レボルバ)	5.0	46	3.0	0.3	1.3	0.01	0.71	
			32	3.0	0.4	2.7	~1.1	1.5	
			23	3.0	0.5	5.0	2.6		
			14	3.0	0.6	9.5	3.5		
B28	C	16.0	12	3.0	1.0	15.0	0.01	7.2	
				11.0	0.2	3.0	~20		

- λ_u : 周期長
- N : 周期数
- U : アンデュレータ
- MPW/U : 多極型ウィグラー (アンデュレータ可)
- WS : ウェーブレングスシフター
- Gmin : 最小ギャップ
- B : 磁場強度
- K : $eB \lambda_u / 2 \pi mc = 0.934 \lambda_u (\text{cm}) B (\text{T})$
- U0 : 放射損失
- C : 円偏光光源

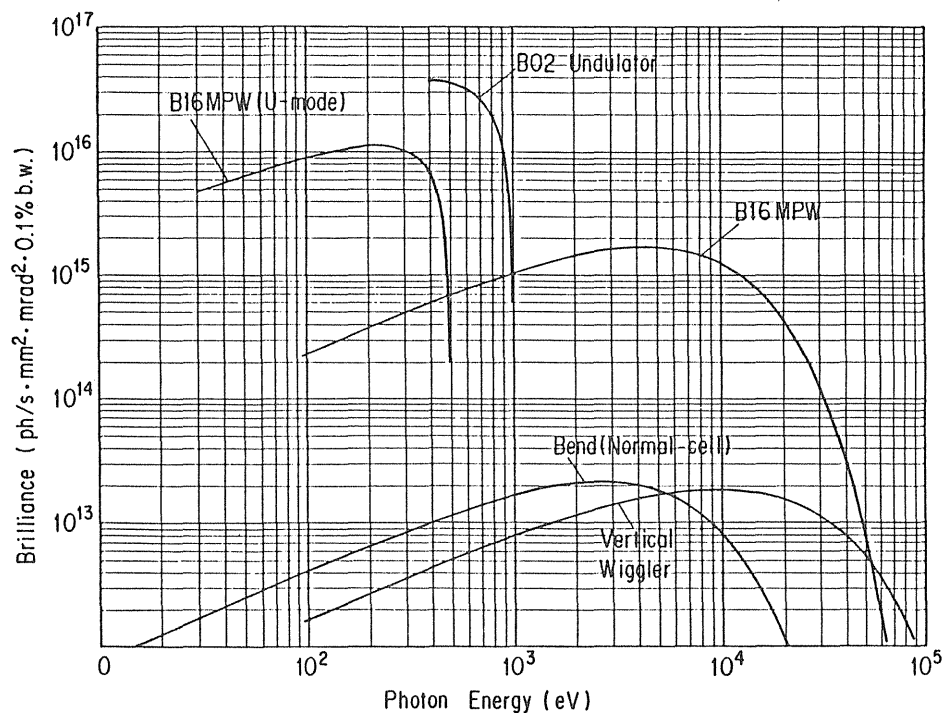


図10 放射光スペクトル

蓄積電流値は 250 mA, 水平エミッタンスは 130 nmrad

6. ビーム・ラインの構成

図10のスペクトルに見られるように偏向電磁石からの放射光の臨界エネルギー ϵ_c は4 keV である。スペクトルの低い方は軌道電子の角周波数1.6 MHz, 高い方は実効的には6 $\epsilon_c = 24\text{keV}$ と考えるとよい。従って低い方は可視領域のみならず赤外線をも十分包含している。X線回折法による物質構造解析において使われてきた特性X線は5 keV~25 keVの範囲にある。特殊な利用を除けば

X線領域といえはこのエネルギー範囲を意味してきたので ϵ_c の設定は誠に適切であったといえる。図2または図9の直線部に各種挿入型光源を設置すればさらに特色のある光を取り出すことができる。

表4に見られるように5 T超伝導ウィグラー, 60周期アンジュレーター, 26周期マルチポールウィグラー, 12周期楕円偏光アンジュレーターなどによる特色ある放射光がそれである。表5には年代を追って建設されたビーム・ラインを記載して

表5 ビーム・ラインと光源

ビーム・ライン名	光源	ブランチ・ビーム・ライン名				備考	立上げ・利用開始年
		A	B	C	D		
BL	B WS U MP W	A	B	C	D		
10	○	×	×	×			1982. 6
15	○	×	×	×			82. 6
12	○	√	√	√			82. 秋
11	○	√	√	√	√		82. 秋
14	○	×	×	×			1983. 3
2	○	S×	S×/S×				83. 春
1	○	√	√	S×		KEK/NTT 協力研究	83. 6
21	○	×/√				光源モニタ用	83. 7
4	○	×	×	×			83. 7
8	○	√	√	√/×		KEK/日立 協定研究	1985. 秋
9	○	√	√	×		KEK/NEC 協定研究	1986. 夏
7	○	√	√	×		KEK/東大分光 センター共同研究	86. 夏
6	○	×/×	×	×/×			86. 12
17	○	√	√	×		KEK/富士通 協定研究	1987. 7
16	○ ○	×/×		√			1988. 3
19	○	×	√			KEK/ISSP 共同研究	
13	○ ○	×	×/×			KEK/国研 協定研究	
28	○ ○	√	×				
3	○	×	√	×/√		Cは光源モニタ用	
5							
18	○	√					
27	○						
20	○						

B: 偏向電磁石; WS: 超伝導ウィグラー; U: アンジュレーター; MP W: マルチポール・ウィグラー
; ×: X線領域の利用; √: 真空紫外領域の利用; S X: 軟X線領域の利用; 国研: 計量研, 電総研,
化技研, 無機材研

ある。BL 6までは完全に建設が終了し利用されている。BL17は一部利用開始、BL16は立上げ中である。BL19, 13, 28は建設中、BL 3とBL 18の一部については設計開始したばかりである。BL 5, 27, 20については議論を始めたところである。これらが完成すれば現建屋においては満杯で、これ以上の建設の余地はない。さらにビーム・ラインを考える場合には建屋を増設し、BL 23, 24, 25, 26を取り出すことができる。

最初の6本については概算要求によって建設されたビーム・ラインである。いわば建設の当初に見えていた利用に基づくビーム・ラインということができる。BL 1～13は初期の利用によって爆発的に放射光利用の需要が高まりこれにもとづいて建設が促進された部分ということができる。但し、PFの金不足を補う意味で半分以上が外部資金によって建設された。一方で、建設と利用の過程で徐々にイメージがはっきりしてきた永久磁石配列によるより特色のある光とそれによる特色のある利用研究の機運が高まりBL 16, 19, 13, 28において挿入光源利用のビーム・ラインの建設が現在活潑に行なわれている訳である。表5の空白のBL 5, 18, 27, 20については全て偏向電磁石であるけれどもいよいよ残り少なくなってきたので今まで以上にビーム・ラインの取り合いは加熱することになる。

表6に各ビーム・ラインの光学系の特色と行ないうる実験テーマを掲げた。

7. 利用の形態

放射光利用の開始は図3または図11に見られるように1983年度からであった。それ以来年間運転時間と実験ステーションの増は順調に続いているが絶対値は多くない。年間運転時間は外国では5000～6000時間が普通であるが、PFの場合はその6割の3500時間であり運転要員の増を伴った運転時間の増は急務である。さらに実験ステーション数が倍増すれば年間運転時間実験ステーション数の値は最大4倍に増えることになる。

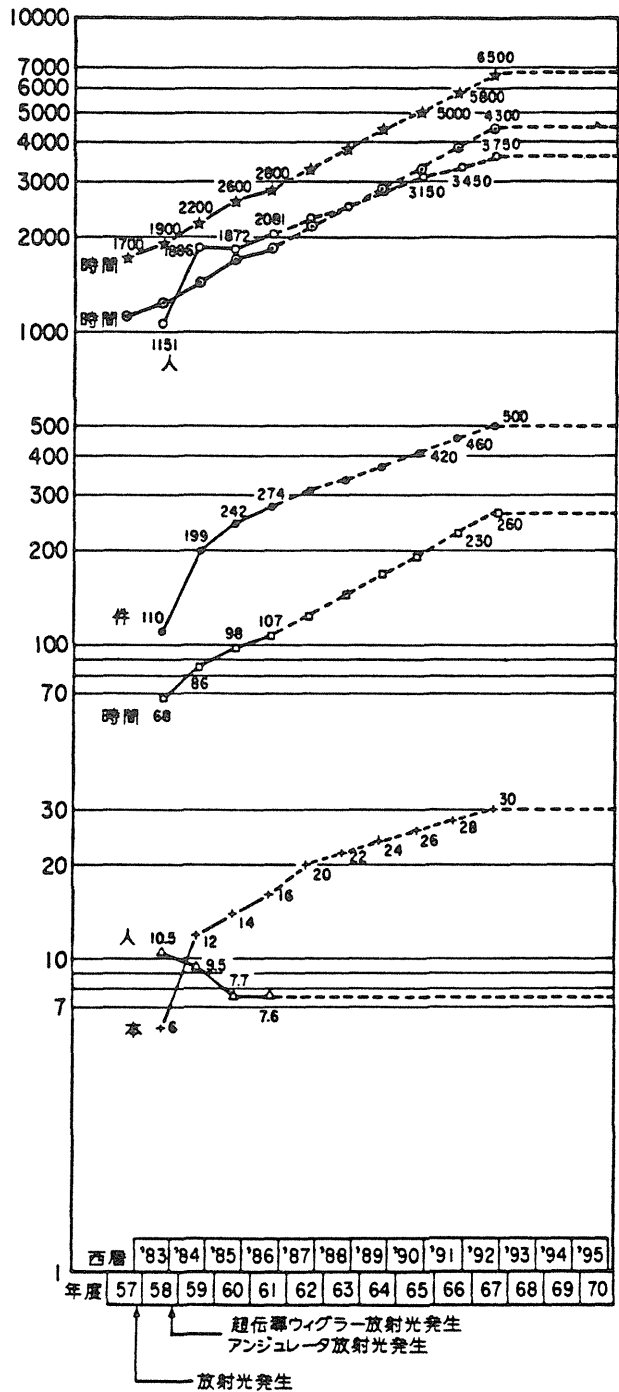


図11 放射光利用の伸び

その上で実験課題数の増をかなり制限することによって今までどちらかという機会均等であった

表6 Experimental Stations of the Photon Factory

BL1		BL11	
1A	Semiconductor surface analysis	11A	Soft X-ray solid state spectroscopy (2 m 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 (1 m Seya-Namioka)
BL2 (Undulator)		11D	Angle-resolved photoemission spectroscopy (constant deviation)
2A	Soft X-ray experiment	BL12	
2B	X-ray microscopy	12A	VUV gas spectroscopy (1 m Seya-Namioka)
BL4		12B	VUV high resolution spectroscopy (6.6 m off-plane eagle mount)
4A	Dispersive EXAFS, Trace element analysis	12C	Soft X-ray high resolution spectroscopy (10 m grazing incidence)
4B	Liq./melt structure analysis	BL14 (Vertical wiggler)	
4C	Radiation effect on biocells	14A	Crystal structure analysis of proteins (double crystal – 4 circle goniometer)
	X-ray diffuse scattering, fluorescent EXAFS (sagittally focused double crystal)	14B	High precision X-ray optics
BL6 *6A1	Precision X-ray optics	14C	High speed X-ray topography, X-ray radiography (double crystal) X-ray magnetic scattering, Compton scattering
6A2	X-ray Weisenberg camera	BL15	
*6B	EXAFS	15A	Small angle X-ray scattering of muscles and alloys (focused bent crystal)
6C	X-ray low temp diffraction	15B	X-ray topography, X-ray interferometry
6C	Precision X-ray optics	15C	High resolution X-ray diffraction
BL7		*BL16 (Multipole wiggler-undulator)	
7A	Soft X-ray photoemission spectroscopy (plane grating)	16A	A Hard X-ray experiment (sagittally focused double crystal)
7B	Surface photo-chemical reaction (1 m Seya-Namioka)	16B	VUV experiment (10 ~ 4000 eV)
7C	EXAFS and X-ray diffraction (sagittally focused double crystal)	*BL17	
BL8		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	X-ray lithography	*BL19 (Undulator)	
8C	X-ray tomography of minerals	BL21 (Light Source Division)	Beam monitoring and Photo-desorption experiment
BL9		*BL27 (Light Source Division)	Radiation test of mirror
9A	Z-ray lithography		
*9B	Photo-chemical vapor deposition		
9C	EXAFS and X-ray topography (sagittally focused double crystal)		
BL10			
10A	Crystal structure analysis of minerals (4-circle goniometer)		
10B	EXAFS		
10C	Small angle X-ray scattering enzymes (focused double crystal)		

* Under construction

マシン・タイムの配分に替わって“重み”をかけることによってピークを出す利用への傾斜が一層促進されるであろうし、されなければならない。企業ビーム・ラインのマシン・タイムの50%は各社の自由になっているのでこの点は利用開始の時点からとくに重視されているものと思う。利用の形態については、外国にも開かれた全国規模の共同利用研として世界最大規模のものであり、大きいがゆえの問題をかかえている。現在も模索中であるといえるが、問題が解けないうちに次の問題が生じ、“もぐらたたき”は永久につづく感じである。もぐらの頭の一例をとるとスタッフの超過重労働である。研究者を公務員としてとらえれば「勤務」に関しては就業規則にあてはめられていることになる。そのくせ研究者として見ると徹夜しようが日祭日働こうがそれは「研究者の勝手」である。スタッフはお人よしでのせられやすい。4-5年前に既に外国の類似の研究所を見た時我々の3倍の員数で運営しているとの実感であった。ここPFではユーザーの皆さんのために増える実験課題数を消化すべくせせとビーム・ラインを

建設している。建設すればする程労力負担は増える感じである。これを数字で実証してみよう。もっと事態は深刻である。(年間運転時間) × (ステーション数) を測定器スタッフ数で割ってみると1228 (1983年度), 1854(84), 2395(85), 2668(86), 3732(87)とおそろしい勢いで伸びている。しかも建設の仕事もある。これは何とかしないとイケない数字である。それにも拘らず現在PFは第2の建設ラッシュである。稼働状態になったらえらいことになる。一部のステーションは運転をやめるか、ユーザー管理に委ねるか革命的なことを考えないとイケない。上の数字は建設なしでおおよそ1000くらいであればスタッフも静かに考える時間をもつことができようか。

現在の利用の形態は大きく分けて次の2つに分けることができる。①大学研究者に対する「共同利用」②企業研究者に対する「施設利用」。これは使用料負担の有無である。さらに③PFと東大分光センター、PFと東大物性研との「共同研究」④PFと他省庁研究者との「協力研究」がある。いずれも建設費もち込み・共同建設による放射光利

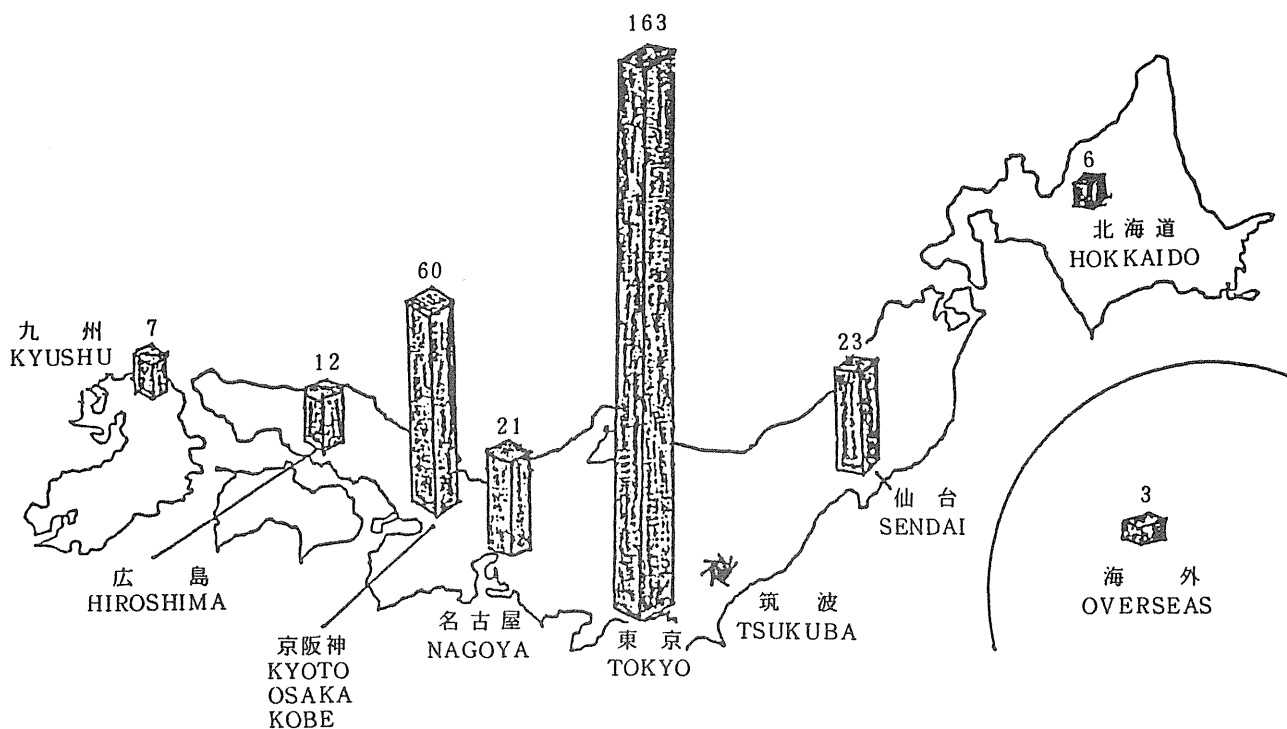


図12 課題の全国分布

用である。同じように企業がもち込むと④NTTとの「協力研究」、⑤日立、日本電気、富士通との「協定研究」の形態があり他に⑥PFと企業との共同出資による「共同研究」もあり非常に複雑である。この事情は建設時期におけるPF測定器予算不足とそれにも拘らず共同利用管理の一元化を目指しているからである。この大きい問題は本来大学だけに限らず広く産業応用が考えられる「光」の利用であることに根ざしている。光を使うことはあらゆる物性測定手段の根幹でありそれだけ魅力あるともいえる。この問題解決の即効薬はなく思案することしきりである。

8. 放射光利用研究

放射光利用の御利益は喧伝されてきたのでよく知られているかと思われる。放射光によって光強度が最低でも2桁最高6桁程度在来光源より強くなったことはどのように放射光を使う上でもこの恩恵にあづかっている。光強度が2-4桁強くなることはまさに革命である。量的革命は質的革命をおこしていると考えられる。超LSIのメモリー密度は年々倍増の趣きがある。これと同じようなすさまじいexponential的に伸びている分野は放射光であり放射光強度ではないだろうか。

放射光は他に、指向性、白色性、光源サイズ、偏光、パルスなど数々の利点がありこれらの特性を生かして年間500テーマの実験が行なわれている。(i)指向性(2×10^{-4} rad)が高いということはエネルギー分解能 $\Delta E/E$ が 2×10^{-4} のオーダーになり構造解析など吸収端を用いた位相決定などに必要なエネルギーの設定の精度が高くなった。即ち物質科学の根幹である構造決定の精度が高くなった。それだけ原子座標が精密にきまるようになった。(ii)白色性の利益に浴していることはことばを俟たない。光源がなかった、あるいは飛び飛びにしか線源が存在しなかった時代から見れば夢の実現である。欲しい光子エネルギーの全てが得られる。(iii)光源サイズは相対的には既設のものに比して小さい訳ではないがカメラ長を長くとるこ

とで実効的に小さくできる。特に低エミッタンス化に伴ない光源サイズは小さくなりX線トポグラフィなどの画像において画質改善の効果は著しい。(iv)偏光は例えば蛍光分析における試料からの信号のとり方を鉛直面を入射面とし検出器を水平にとるなどして高いS/N値の信号を得ている。さらに軌道面の上下で楕円偏光の回転の向きが異なることを利用し磁気散乱などに用いられている。(v)パルス性は今のところ単バンチ運転は多くはないがメスバウエ実験などに積極的に用いられている。個々のテーマについてはPF Activity Reportを参照して頂きたい。

9. 3年計画

BL14のアクティビティが高まるにつれPFリングだけでは需要がまかないきれずかねてトリスタン加速器の好意で用意されていたAR放射光実験ホールを使って6GeV ARの放射光利用を手がけることになった。図13に示されているように①偏向電磁石からの放射光はPF BL14のス

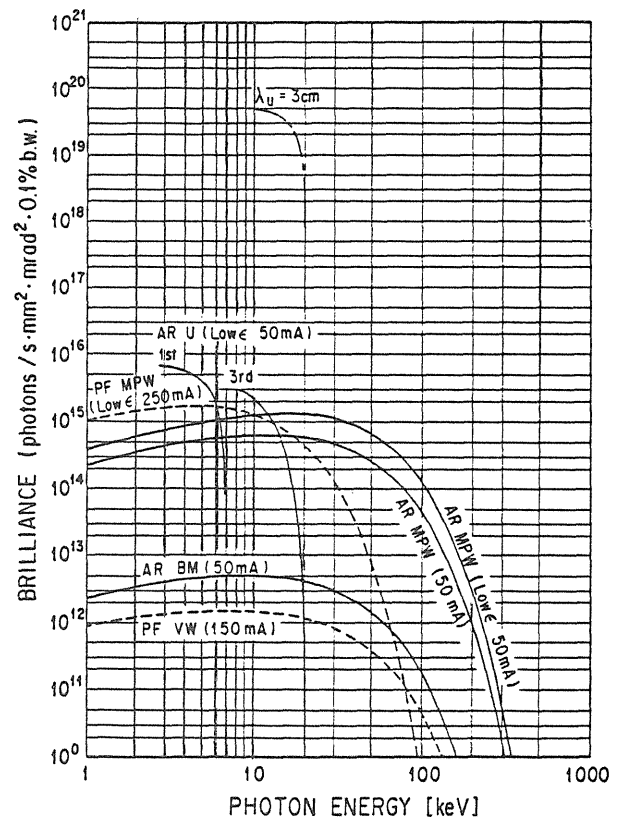


図13 AR放射光スペクトル

ペクトルとはほぼ同質である、②挿入型デバイスによってX線領域の高輝度光源になり得る、ことが特色である。PFにおける挿入型デバイスの技術をもってすれば世界第一級の円偏光軟X線、X線(図14)が取り出せる用途がつき磁気散乱、磁気コンプトン実験が大いに期待できる。1987年

から建設を始めて3年計画で完成する予定である。他に表面・界面構造解析、蛍光分析、超高压高温下構造解析、アンジオグラフィ、微結晶構造解析、メスバウァ光源開発等が含まれている(図15参照)。

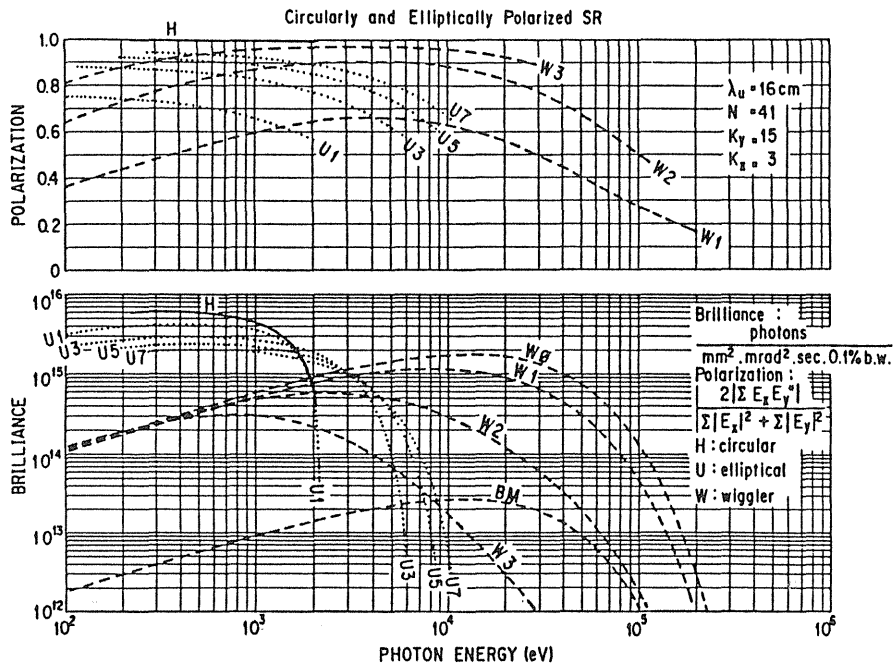


図14 ARから得られる円偏光スペクトル

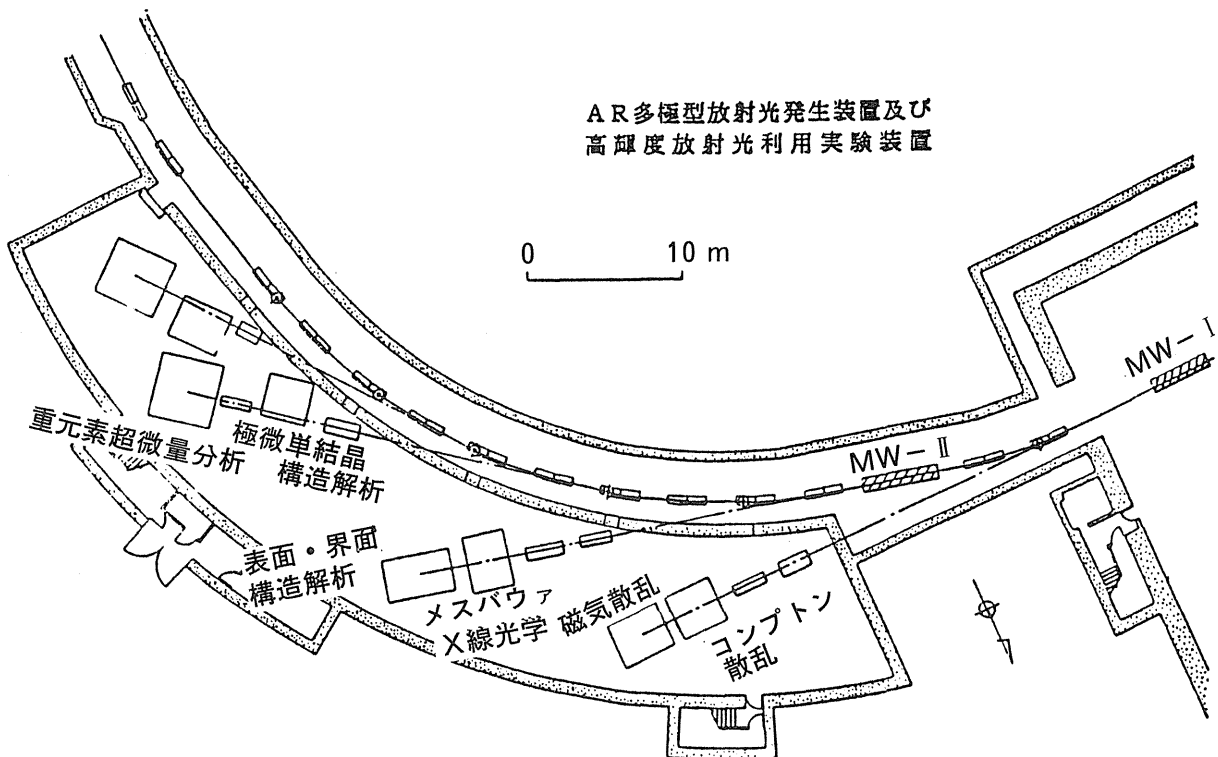


図15 AR放射光利用計画図

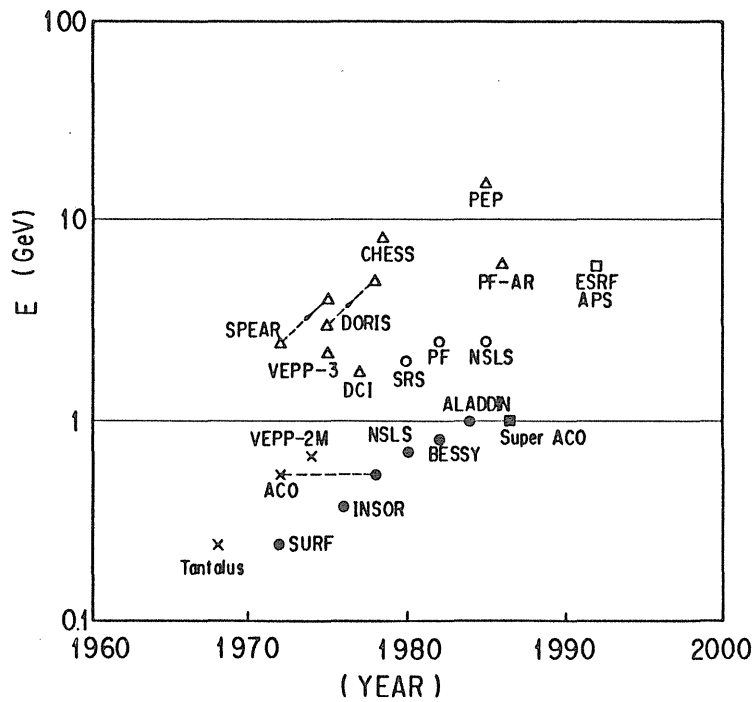


図 16 高エネルギー電子リングの放射光リング化と専用リング

10. 将来計画

眼を世界に転じると図 16 に示すようにアルゴンヌに APS (Advanced Photon Source) 計画あり、グルノーブルに ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) 計画あり、Stanford に高エネルギー加速器 PEP の放射光リング化の計画ありである。いずれも 6 - 7 GeV でエミッタンスが数 $\text{nm} \cdot \text{rad}$ を目指している。これによって 10^{20} 光子 / 秒 / $\text{mm}^2 / \text{mrad}^2 / 0.1\%$ b. w. 級の光源が得られるはずである。現在同じ単位で見た時に PF リングの偏向電磁石が $10^{12} - 10^{13}$ 級、挿入光源が $10^{15} - 10^{16}$ 級であるから 4 桁 - 8 桁の前進を意味している。これを手にした時は再び放射光利用において革命がおきるであろう。X 線管から放射光源に替わった際、特性線において 2 桁、白色 X 線において 5 桁 - 6 桁のジャ

ンプがあったことを思い起こして頂きたい。今や普遍的手段となった物質構造解析の荷ない手 EXAFS に匹敵する新しい方法が現われるかもしれない。位相問題を一気に解決してしまうメスバウアー線源が出現するかもしれない。真空紫外領域でのレーザーが実現するかもしれない。

この期待は PF において同じである。先日開かれた MR の放射光利用研究会において 7 - 10 GeV 運転における素晴らしい特性が理論的に確認されたことによって MR を次世代計画までのつなぎとして高輝度光源として徹底的に利用しようというコンセンサスができつつある。周長が世界一であることはエミッタンスが世界一小さいことであり、世界一の直線部を使えば放射光レーザーの開発ができるかもしれない。こういった期待をになつて将来計画の 1 つが出帆しそうである。

