

解説

PF リングの高輝度化計画

加藤 政博, 堀 洋一郎, 小早川 久

高エネルギー物理学研究所 放射光実験施設

High Brilliance Configuration of the Photon Factory Storage Ring

Masahiro KATO, Yoichiro HORI and Hisashi KOBAYAKAWA

Photon Factory, National Laboratory for High Energy Physics

The 2.5-GeV Photon Factory storage ring has been steadily improved by decade-long research and development. Its performance, especially the stored current, beam lifetime and beam stability, has been achieved to the world highest level. As one of our recent activities a high brilliance configuration was proposed. In the new configuration, the focussing magnets of the normal cells will be reinforced. Positions of all light-source points and directions of the beamlines will not be changed, because all bending magnets keep thier present locations. The beam emittance will be reduced to 27 nmrad which is one fifth of the present value (130 nmrad). The brilliance will be increased typically by a factor of ten.

1. はじめに

10年間の不断の研究はPFリングの性能を次第に向上させ、放射光専用リングとしては光のフラックス強度、ビームの安定度において世界最高を誇るものとなった。しかしながら放射光として最も重要な輝度において、最近完成した高輝度リング ESRF には及ばない。本格的な X線高輝度リングとして世界のトップを切った ESRF は、100mA を超す電流を蓄積し、しかも長寿命の運転に成功し、待ちかまえていたユーザーが早くも利用実験を開始した。VUV の高輝度リングとして建設中であつた米国の ALS も 400mA を超す電流の蓄積に成功したと伝えられる。このように、世界はすで

に第3世代リングの時代に移行したのである。欧米はもとより、韓国・台湾など近隣諸国も先を競って高輝度リングの完成を急いでいるのが実状である。高輝度リングとはビームのエミッタンスを下げ、放射光の輝度を飛躍的に向上させるものである。現在 PF リングのエミッタンスは 130nmrad であるが、リングを改造してやると、今のおよそ 5分の1 の 27nmrad にすることができる。偏向電磁石をいっさい動かさないで、ビームラインの位置は変わらない。そして輝度は、ビームライン毎に事情は異なるが、今より約 10倍上がり、第3世代なみの輝度が得られる。しかしこれにはかなり大規模なリングの改造を必要とする。

2. PFリングの現状と高輝度化計画の背景

2.1 PFストレージ・リングの現状

定常的なユーザー用の運転ではリングに朝9時に360mAまで蓄積する。そのまま翌朝まで入射しないが、寿命は60-70時間もあるので24時間後でも250mA程度残っている。蓄積電流と寿命の積 $I\tau$ はリングの総合的な性能をあらわすが23アンペア時というX線リングとしては驚異的な値である。毎年の大気開放にもかかわらず、300mAでも平均 2×10^{-10} Torrの超高真空が保たれている。1987年には初期から用いてきたラティスの改造を行い、エミッタンスを130nmradに下げ輝度の向上をはかった。ビームは1988年より陽電子である。

故障率は低く1992年度のリングの故障時間は全運転時間の1%であった(図1)。91年度の真空重故障をのぞき毎年1%-2%程度の非常に低い故障率を維持している。このことは非常に多数のユーザーが入れかわり利用する超過密なスケジュール

を予定通りにこなすためには最も重要なことである。仮に、通常のマシンのように5%-10%程度の故障率であったら、実験日程の変更、宿泊・旅費の変更など膨大な事務量を現有のスタッフではとても処理できない。

PFリングには6台の挿入光源があり、それぞれの特徴を生かして利用されている。また問題のあるものは順次改良されてきている¹⁾(表1)。1992年の夏に、B1-2間(BL2)の直線部のアンジュレータに代えて導入された光クライストロンは、波長177nmの自由電子レーザーを目指すものである。自由電子レーザー実験のためにはビーム・エネルギーを0.75GeVに下げ、単バンチまたは4バンチで運転される。最初はゲイン測定を行うことから始めるが、ミラーの開発も同時に行っていて、高ゲインと高性能のミラーを得たところで発振をさせるものである。真空紫外から軟X線、X線へと短波長領域の自由電子レーザーを目指すためには貴重な布石となろう。この光クライストロ

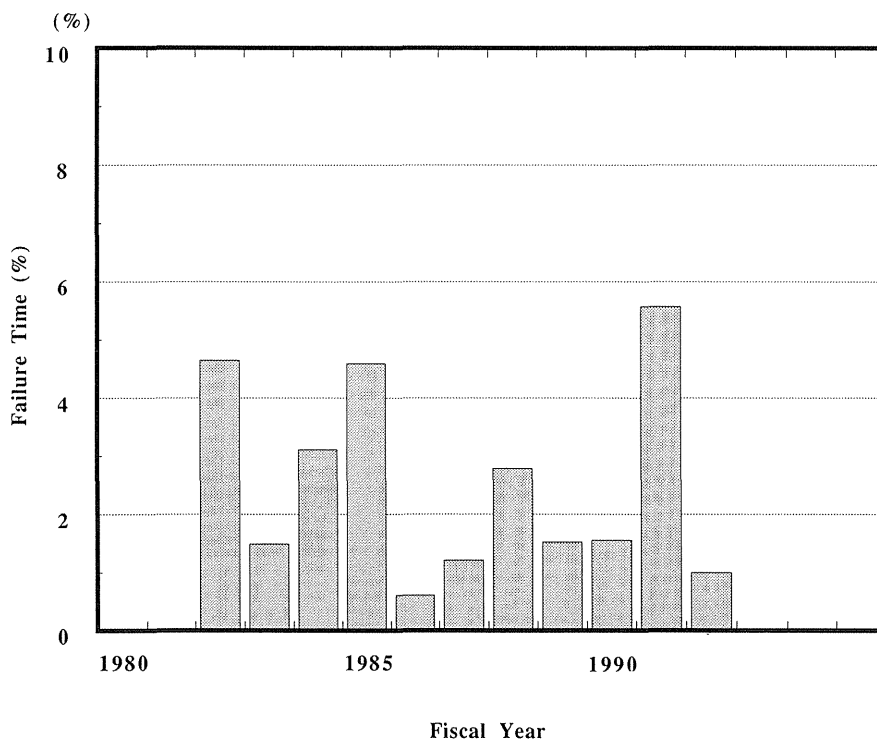


Fig.1 Failure rate of the photon Factory storage ring.

ンは磁石列をそっくり交換することで、もとのアンジュレータに戻すことができる。通常のユーザーランはアンジュレータ・モードで行われている。

B4-5間は、将来ここに最先端の挿入光源を入れるためにただ一つ残された直線部である。現在マシンスタディに使われていて、縦方向フィードバック用の空洞、横方向フィードバックのセンサー、そして高速キッカーなどが設置されている。ビームラインはこのBL5以外はすべて利用されていて、60近い実験ステーションにはユーザーが群がる(図2)。

一方、トリスタン入射蓄積リング(AR)に放射光実験用にホールが用意されることになったのは1983年であった。当時はまだPFの実験ホールでさえ6本のビームラインが建設途中であった。初

めて放射光を取り出したのは1985年であった。1987年度には北実験室に円偏光挿入光源が設置され、また1989年度には、第2の挿入光源が設置された。これは真空封止型X線アンジュレータであり、 ^{57}Fe によるメスバウア実験用の14.4keVが3次光で得られるように設計されたものである(表1)。

高エ研のBファクトリー計画に関連し、リニアックは電子8.0GeV、陽電子3.5GeVに改造する計画である。そして、ARはフル・エネルギー入射の専用リングとして放射光利用を行うという計画が検討されている。

PFではユーザー数・実験課題数は年々増え続けている。毎年提出される課題件数は今では300を超え、ユーザーは2000人以上にもなった(図3)。そして図4には総フォトン数に比例する積分

Table 1 Parameters of the insertion devices installed in the Photon Factory ring and the TRISTAN accumulation ring.

	名称	形式	周期長 cm	周期数	GAPmin mm	Bmax tesla	完成年
PF2.5GeV	U02	U (NdFeB+steel)	6	60	28	0.4	1982
	TOK	TOK (NdFeB pure)	9	37	27	0.7	1992
	Revolver	multi-U (NdFeB+steel)	5	46	30	0.3	1988
			7.2	32	30	0.4	
			10	23	30	0.5	
		16.4	14	30	0.6		
	MPW16	MPW/U	12	26	19	1.5	1987
MPW13	MPW/U(NdFeB+steel)	18	13	27	1.5	1988	
EMPW28	EMPW/HU (NdFeB) circular	16	12	30/110	1.0/0.2	1989	
VW14	3 (5)-pole (S.C) vertical				5.0	1982	
AR6.5GeV	EMPW-NE1	EMPW/HU(NdFeB) circular	16	21	30/110	1.0/0.2	1988
	U-NE3	U (NdFeB) in-vacuum	4	90	10	0.83	1990

U : アンジュレータ, MPW : 多極ウィングラ, EMPW : 円偏光ウィングラ/アンジュレータ
VW : 垂直偏光型超電導ウィングラ, TOK : 光クライストロン

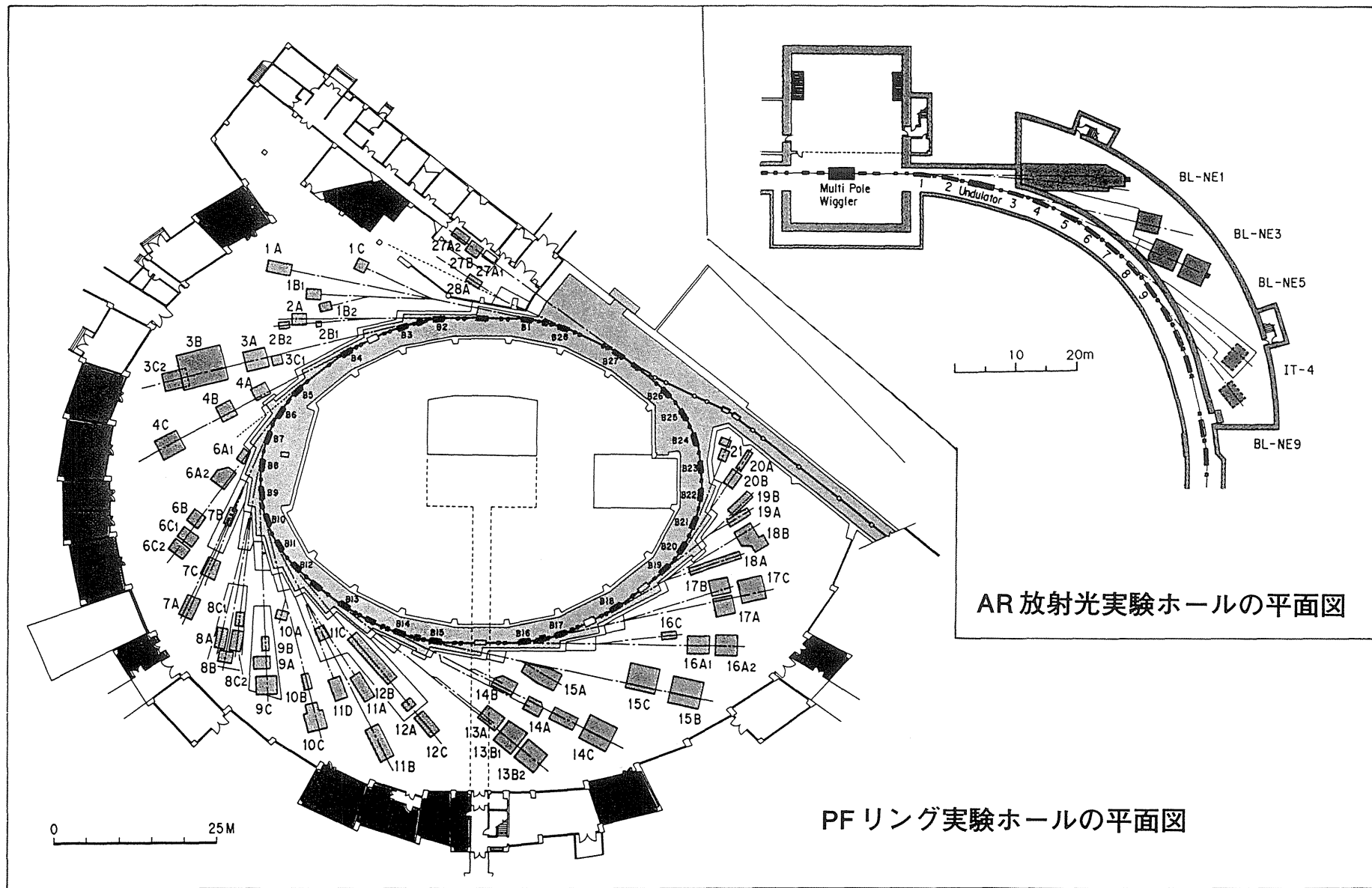


Fig.2 Storage ring and experimental hall.

— 4 —

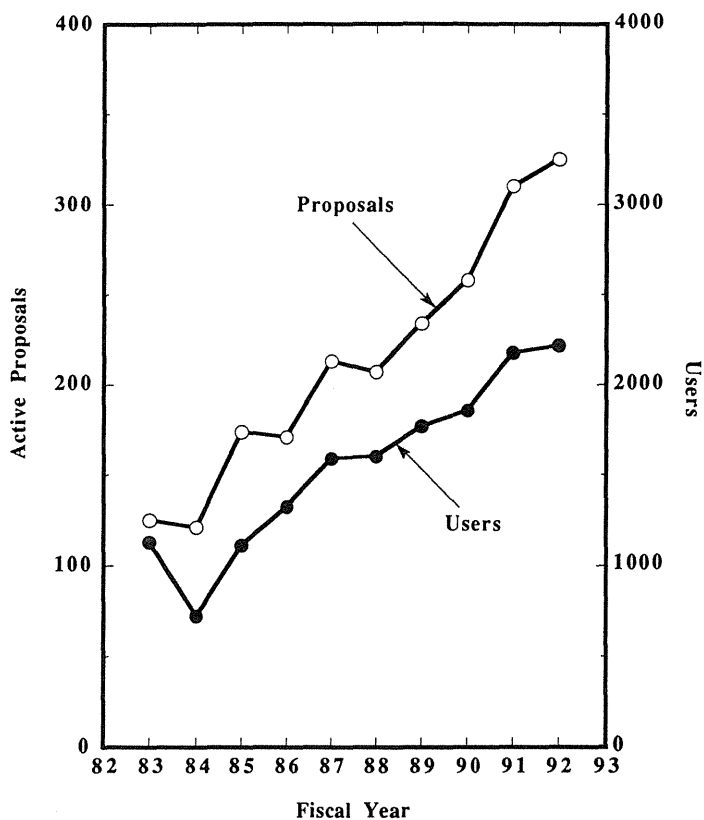


Fig.3 Numbers of users and proposals.

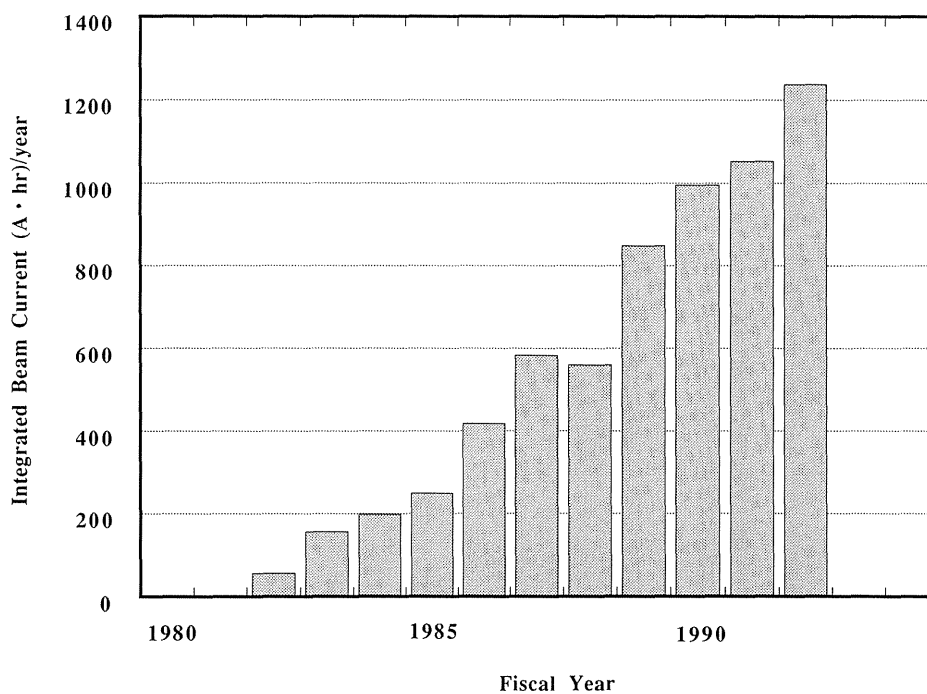


Fig.4 Integrated beam current per year.

電流値のこれまでの推移を示す。

2.2 高エ研周辺の計画と世界の情勢

世界の第3世代リングの建設の情勢を表2に示す。最も早く完成したのはヨーロッパのESRF(グルノーブル)であり、1992年2月にはじめてビームの蓄積に成功した。当初は数mAであったが、その後100mAを超す電流の蓄積に成功し、さらに200mAを目指す。エミッタンスはビームプロファイルの観測から、ほぼ計算どりの低エミッタンスであることが示された。すでにアンジュレータも導入され数本のビームラインでは利用実験を開始し、早くも高輝度・高性能光の特徴を生

かした実験の成果が上がっている。これにより第3世代の光源が就航したことになる。放射光利用の分野はこうした高輝度・高性能の光源により、さらに発展をつづけることが予想される。それゆえ欧米はもとより、韓国・台湾などの近隣諸国でも先を競って第3世代のリング建設を開始し、完成はいずれもここ数年以内である(表2)。一方、高エネルギー研周辺ではトリスタン主リング(MR)を改造し1nmrad以下の超低エミッタンスの、非常に高性能の放射光用リングとして生まれ変わる計画がある²⁾。また、真空紫外・軟X線領域での高輝度リングとして、物性研が中心となり、高エ研が協力する形で学問的技術的な検討を行っている

Table 2 Status of the third generation rings.

リング(研究所)	場 所	エネルギー (GeV)	完成予定年
LNLS-1	カンピナス (ブラジル)	1.15	
SRRC	シンチュ (台湾)	1.3	93
DAPS	ダレスベリ (英国)	0.5 - 1.2	
ESRF	グルノーブル (フランス)	6	運転中
SuperACO	パリ (フランス)	0.8	運転中
DELTA	ドルトムント (ドイツ)	1.5	93
BESSY II	ベルリン (ドイツ)	1.5 - 2	97
INDUS II	インドール (インド)	2	
ELETTRA	トリエステ (イタリア)	1.5 - 2	93
SPring-8	西播磨 (日本)	8	97
PLS	ポハン (韓国)	2	93
MAX II	ルント (スウェーデン)	1.5	
APS (ANL)	アルゴンヌ (米国)	7	95
ALS (LBL)	バークレー (米国)	1.5	運転中

計画もある³⁾。これらは重要かつ緊急度の高い計画にもかかわらず、いまだ建設予算が認められていない。

このような情勢のもとでPFとしてはリングの性能向上を急がねばならない。以下に述べるようにリングの一部を改造することで比較的容易に、しかも安価に性能を強化できる。PFは第2世代の専用リングから、今世界中で建設が進行している第3世代リングに輝度においても匹敵する性能のリングへと強化できる。

一方利用する側に目を向けると、実験装置あるいは研究方針そのものも10年を経過し先端的研究には向かなくなつたものが沢山ある。今は丁度それらを再検討し新しく建設し直す時機でもある。光源リングの脱皮とともに実験フロアにおいてもビームラインのスクラップ・アンド・ビルドが検討されている。

3. 高輝度化計画の概要

3.1 高輝度化の指針

高輝度放射光を得るには蓄積ビームの低エミッタンス化が必要である。低エミッタンス化には、ダンピングウィングラの使用、低エネルギー運転と

いった方法も考えられるが、これらはPFリングで用いるには実際的ではない。ビームオプティクスの変更による低エミッタンス化が唯一可能なものである。

PFリングの約1/3を占めるノーマルセル部はFODOセルを基本構造としており(図5)、エミッタンスはこの部分のオプティクスで概ね決まっていると考えてよい。大雑把に言ってノーマルセルの四極電磁石の収束力を強くするほどエミッタンスは小さくなるが、どこまでも小さくなるわけではなく最小エミッタンスを得るある最適な強さが存在する。PFリングでは1986年にオプティクスの変更を行い、エミッタンスを460nmradから130nmradまで小さくした。このとき、四極電磁石の収束力を現在の電磁石配列のもとではエミッタンスが最小になるように最適化してある。従って、更にエミッタンスを小さくするには、単なる収束力の変更ではなく、電磁石の移動や追加等、ある程度のリングの改造が必要になる。

PFリングは現在極めて順調に稼働しており、また、それぞれのビームラインには多数のユーザーが付いている。従って改造増強は

- ・少ない改造で効果があがる。

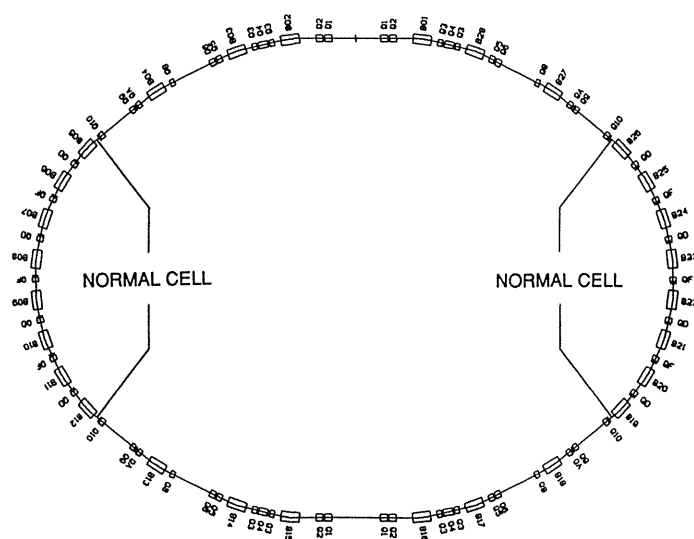


Fig.5 Present magnetic lattice of the PF storage ring.

- ・長期のシャットダウンを要しない。
- ・既存のビームラインに影響を与えない。

といった諸要求を満たすものでなくてはならない。これらを考慮して立案した改造増強計画の概要は

- ・ノーマルセル部の四極電磁石の増設増強を行なう。
- ・偏向電磁石は移動せず既存のビームラインへの影響を最小限に止める。
- ・エミッタンスを現在の約1/5の27nmradまで小さくし、放射光輝度を概ね10倍にする。
- ・改造のための運転停止は半年程度とする。

というものである。計画の詳細はデザインレポートとしてまとめてある⁴⁾。以下では極く簡単にその内容を紹介する。

3.2 高輝度ラティス

リング改造案の基本であるノーマルセル部の改造は、これまで偏向電磁石間に1個ずつ配置されていた四極電磁石を2個に増やすというものである(図6)。この改造ノーマルセルを基本にしてリング一周のオプティクスを設計すると(図7)、最小で27nmradと現在の値(130nmrad)の約1/5のエミッタンスが得られる。四極電磁石強度を少し変えれば、エミッタンスが33nmrad, 44nmradとやや大きいオプティクスも実現可能である。また、増設した電磁石の一部を使用しないことにより、リング改造後も現行のものと同様同じオプティクスでの運転も可能である。

このようにこの改造ラティスはエミッタンスを効果的に小さくできるとともに、チューニングの自由度が大きいことも特徴である。これにより、改造作業終了後は実績のある現行オプティクスで速やかにユーザー実験を再開し、ユーザー実験の中断を短くすることができるであろう。一方高輝度オプティクスの方はマシンスタディの時間等を利用して立ち上げ調整を行い、実用化のめどが立った時点でユーザー実験に用いることになる。一

般にエミッタンスの大きいオプティクスほど、後で述べるような運転上の困難も比較的小さいため、まずエミッタンスの大きいオプティクスで調整を開始し、段階的にエミッタンスの小さいオプティクスに挑戦していくのが実際的であろうと考えている。

この高輝度化が実現すれば全てのビームラインで放射光輝度の向上が期待できる。特にアンジュレータのビームラインでは約10倍と効果が大きい。ウィグラーや偏向電磁石のビームラインでも5-10倍の向上が期待できる。高輝度化前後でのアンジュレータの輝度の変化を図8に示す。

3.3 高輝度化に伴う諸問題

この高輝度化によってエミッタンスが第3世代リング並みに小さくなることから、低エミッタンスリング特有の問題が現われてくることが予想される。それら諸問題とその対策について簡単に触れておく。

一般に低エミッタンスリングでは、ビームの色収差を補正するために六極電磁石を強く励磁する必要がある。この強い非線形磁場によりベータatron振動の安定領域(ダイナミックアパーチャ)が小さくなってしまい、ビームの入射蓄積を困難にする原因になることはよく知られている。このため、六極補正法を工夫すること等に加え、前述したように、エミッタンスが大きくダイナミックアパーチャも比較的大きいオプティクスから試験運転を始めて段階的にエミッタンスの小さなオプティクスへ挑戦していくことを考えている。

PFリングの1986年の低エミッタンス化の際には、電磁石の微少な位置変動による閉軌道の変動が大きくなり、ユーザー実験に大きな影響を与えた。この経験から、軌道変動に対するフィードバックシステムが開発され順調に稼働している。今回の高輝度化後は現在以上の軌道の安定化が求められることも予想されるため、このシステムを更に改良増強していくことを考えている。

PFリングのビーム寿命は、現在、ビーム電流300mA以上でも60時間を越えており、誇るべき性能の一つになっている。この寿命は、蓄積粒子の残留ガスとの衝突によって制限されている。しかし低エミッタンス化後はビーム内粒子密度が高くなるため、蓄積粒子同士の衝突によるビーム損失（Touschek効果）が寿命を制限することが予想

される。しかし、計算によれば40時間以上（ビーム電流300mA）は達成可能である。

4. リング改造計画

最後に、この高輝度化に必要なリングの具体的な改造作業とそのスケジュールについて簡単に述べておく。

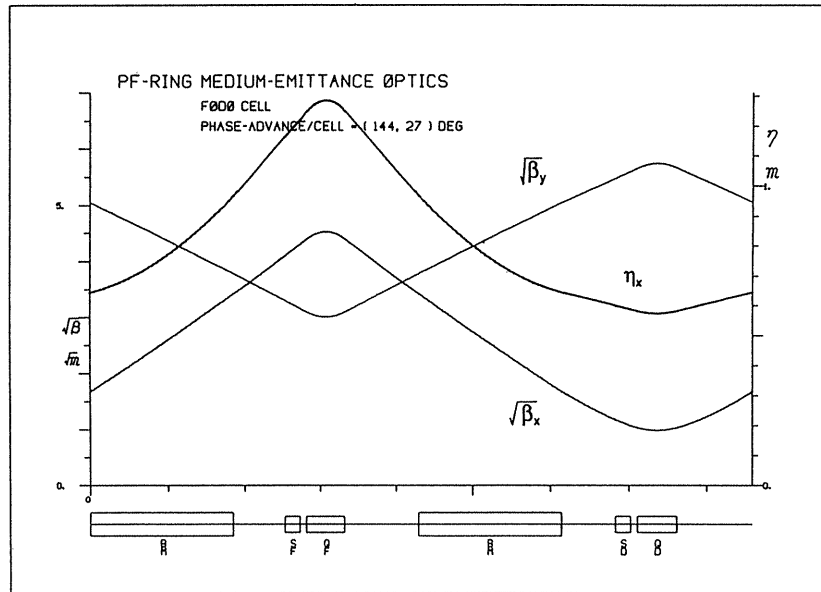


Fig.6-a. Optical functions of the present normal cells.

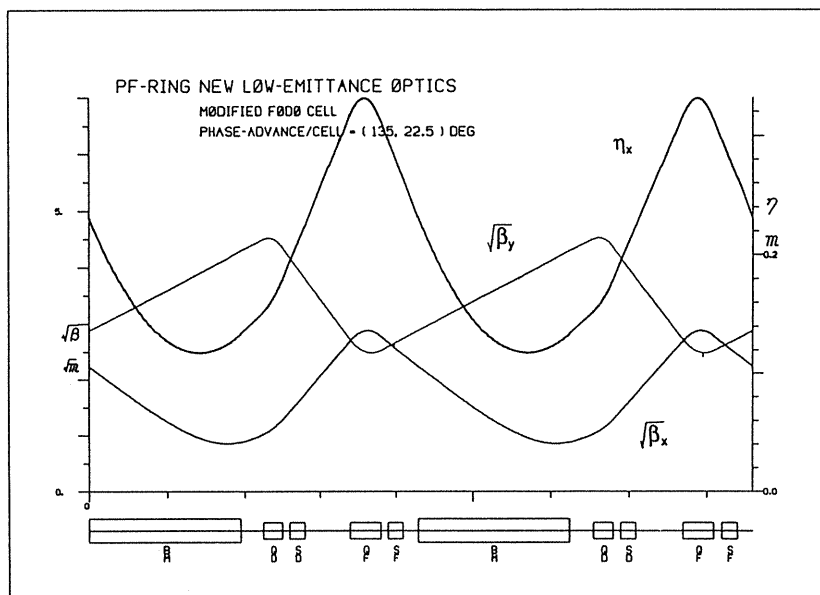


Fig.6-b. Optical functions of the modified normal cells.

まず電磁石系であるが、ノーマルセル部の四極電磁石、六極電磁石はその数を倍増し、また、磁場強度も現在のものに比べ大幅に増強したものに交換する。これらの電磁石は既存のビームラインへの光取り出しのためヨーク形状を工夫したものになる。また電源についても増強・新設を行う。入射系は、入射点付近のオプティクスの変更に対

応して入射用パルス電磁石及び電源の増強を行う。真空関係では、新たに製作される電磁石の口径が現在のものに比べて小さくなることに对应して、ノーマルセル部の四極電磁石用ビームダクトを小口径のものに交換する。また、四極電磁石の設置場所が変わることに対応した排気系の変更、ビーム位置検出器の改造・移動、ノーマルセル部

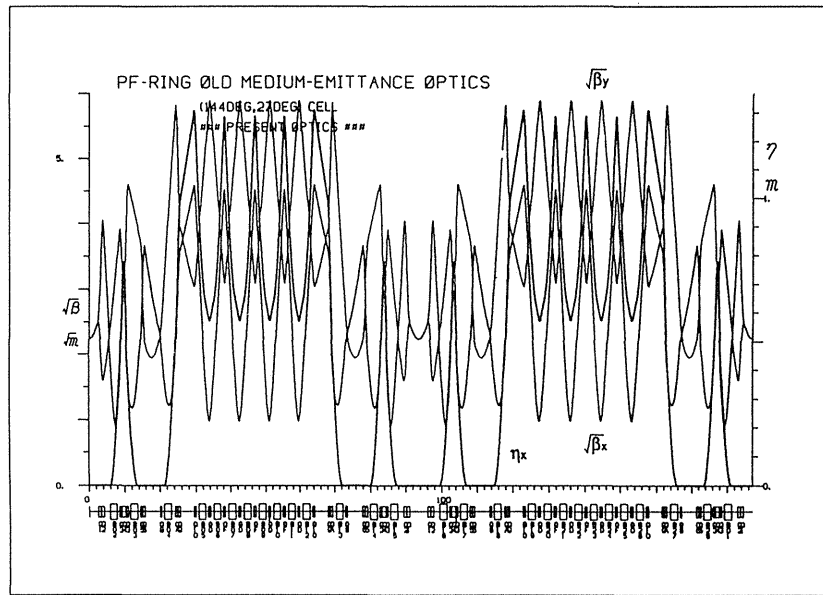


Fig.7-a. Optical functions of the present lattice.

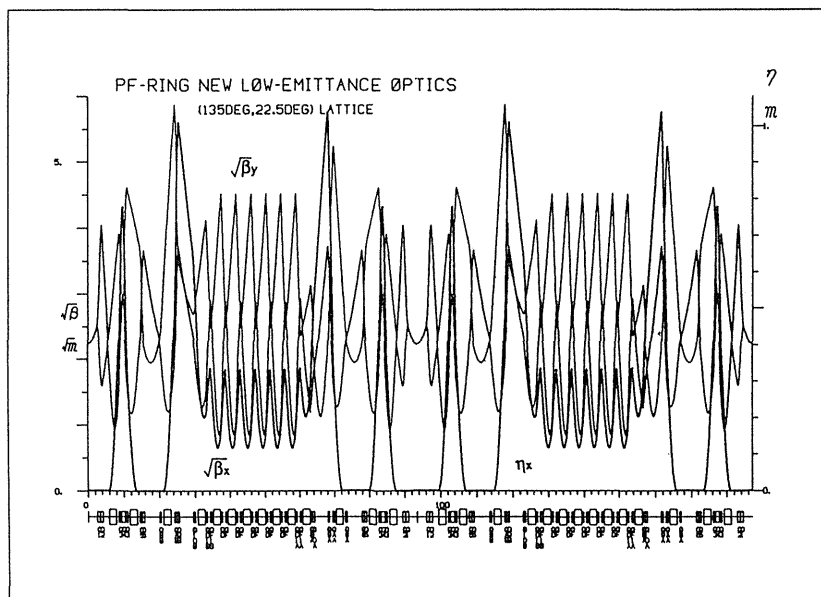


Fig7-b. Optical functions of the high brilliance lattice.

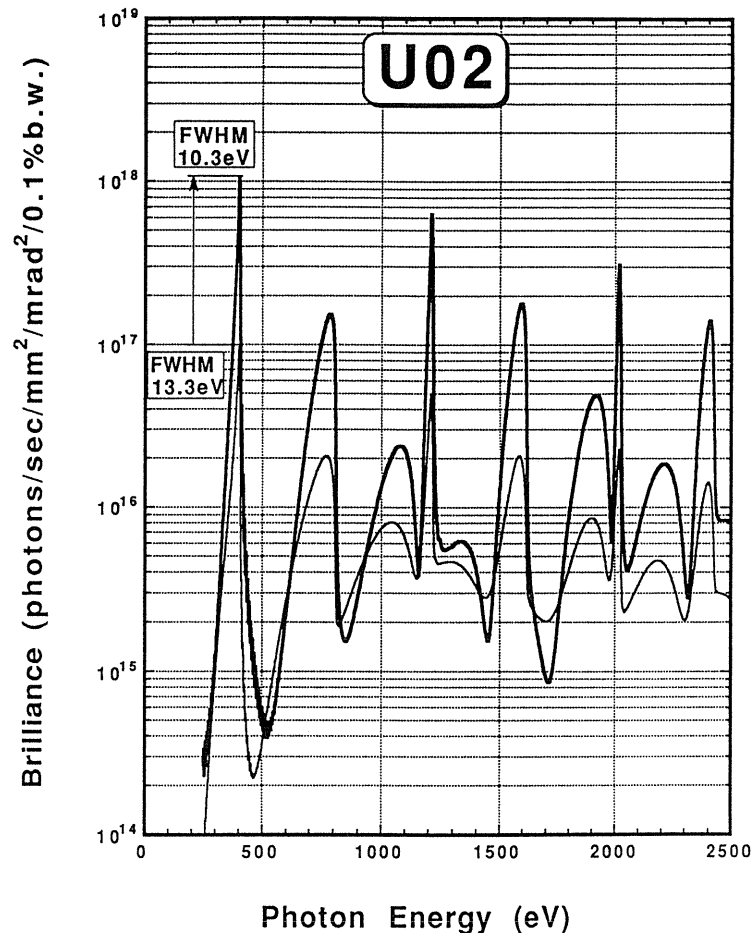


Fig.8 Brilliance of the synchrotron radiation from the undulator (U#2).
The boldfaced line is for the high brilliance and plain line is for present lattice.

偏向電磁石からの放射光取り出し用基幹チャンネル部の改造等を行う。高周波加速空洞については、低エミッタンス化後は特にビーム不安定性対策が重要になることから、ダンプドキャビティの開発・使用を検討している。

以上のような改造作業を行うには、ある程度の期間のリングのシャットダウンは避けられない。できるだけ短い期間で完了し営業運転を再開する必要があることは言うまでもない。このためにはシャットダウンに入る前に可能なかぎり準備を進めておき、シャットダウンに入ると同時に各コンポーネントの撤去、交換、据付作業を開始できるようにしておくことが望まれる。準備期間としては2年程度、また、シャットダウンの期間として

は約半年を考えている。

5. おわりに

PFは1982年に放射光の発生に成功して以来、わが国の放射光研究の中心機関として活動を続け、共同利用実験の推進、放射光科学フロンティアの開拓など大きな成果をあげてきた。この間に放射光の利用研究は日進月歩の発展を続けており、今後とも世界最高の研究水準を保ちながら、しかも年々増加する共同利用の需要に答えることがPFの責務である。PFは、真空紫外線、軟X線、X線領域のユーザーが利用し広範囲の研究成果を生み続けている。しかしながら、10年間の放射光の共同利用の間に、さらに高度の実験を行う

ための高輝度・高性能光に対する要求が強くなっている。このことは世界の第3世代リング建設の動きを見ても明かであろう。

本計画はこうした要請に答えるため、光源リングの一部を改造するなどにより低価格で効率的に高輝度・高性能リングに脱皮しようとするものである。また利用の要請により3GeVでのユーザー運転も可能にしたい。放射光フラックス強度およびビーム寿命においてはすでに第3世代をはるかに凌いでいるので、この計画が実現すれば第3世代より優れた特長を持つ強力光源として生まれ変わり、21世紀においても重要な役割を担うことができるであろう。

文献

- 1) H. Kitamura, S. Yamamoto, and S. Kamada, Rev. Sci. Instrum. 60, 1407 (1989). K. Ohmi, T. Nogami, Y. Fukushima, M. Katoh, and T. Yamakawa, Rev. Sci. Instrum. 63, 301 (1992) ほか.
- 2) 「次世代大型高輝度放射光施設計画に関する調査報告書」：日本放射光学会 1990年4月. トリスタン主リングの放射光利用計画：安藤, 小早川, 大隅編 KEK Report 88-16. トリスタンMR放射光利用タスクフォース軌道サブグループ作業報告書：小林正典編ほか.
- 3) 「中型放射光計画に関する調査報告書」：日本放射光学会 1991年4月.
- 4) 加藤政博, 堀洋一郎(編), 「PFリングの高輝度化計画デザインレポート」 KEK Report 92-20 (1993).

一口メモ

コマツヨイグサ／アカバナ科 (*Oenothera laciniata* Hill.)

太宰治が「富士には月見草がよく似合う」と言った月見草は、北アメリカ原産の植物をもとにヨーロッパで作られされた園芸植物で、和名がオオマツヨイグサという夏の花です。夕方に直径が7～8cmもある淡黄色の大きな花卉が風になびく様は、いかにも涼しげで風情があります。明治初期に我が国に入ったものが日本中に野生化し、太宰の頃には既に富士山の裾野にも広まっていたことを証明しています。日本の風景には、帰化植物であっても取り込んでしまう許容があるのでしょうか。

右の絵は、南アメリカ原産のコマツヨイグサで、オオマツヨイグサ、アレチマツヨイグサ等と同様の帰化植物で、夕方に淡黄色の花を咲かせ、朝になってしぼむと赤黄色に変化します。(H₂O)

