

解説

小型SR光源開発の現状と将来

富 増 多喜夫

電子技術総合研究所

Development of Compact SR Rings—Recent Status and Future

Takio Tomimasu

Quantum Radiation Division, Electrotechnical Laboratory

This article describes recent status of seventeen compact SR rings world wide and key technologies needed to realized compact SR facilities used for lithography and angiography. The electron undulating method capable of wide and uniform exposure of SR and the low-energy, high-current injection method are also discussed.

1. はじめに

国内外の小型SR光源に関する報告は、昨年夏、筑波で開かれたSR188国際会議で発表されており、そのプロシーディングス(RSI, April~May, 1989)も近々発表される。特に、日本における小型SR光源の建設ブームは国外の注目を集めており、昨年8月31日の夜電総研大会議室で開かれた小型リングとその応用に関するAd-Hoc Meetingには180人近くの人が集まって、熱気あふれる会合となった。小型SR光源開発に遅れ気味であった米国も2~3年前からIBM、

BNL、Bechtel、Westinghouseと電総研と住友電工が開発したNIJI-Iを調査にくるなど米国の動きも活発になってきた。そして、この3月にはBNLのJ. Murphy博士が日本の小型リング開発の現状調査のため来日し住友重機、電総研、ソルテック、石川島播磨、NTTの研究所を訪問した。筆者は彼の筑波地区の研究所訪問に立合い国内外の小型リング開発の現状を知る機会があったので、その内容を簡単に報告するとともに、これからの小型リング開発のあり方について私見を述べたい。

2. 国内外での小型SR光源開発の現状

現在、世界で放射光利用専用として23台、建設中または開発中のものが十数台ある。稼働中のものは主として光電子分光、EXAFSなどによる材料分析・評価に利用されている。小型リングで稼働中または建設中でサブミクロン線幅の超々LSI研究用のものは表1に示すように17台ある。医学専用の小型リングはまだない。これらのうち稼働中のものは、電総研のTERAS (1981、10)⁻¹とNIJI-1^{2) 3)} (1986、2)、西独のBESSY (1981、12)とCOSY-II (常伝導型 (1986、5)、超伝導型 (1988、11)、表1の電流は常伝導のもの)⁴⁾、米国BNLのNSL-I (1982、5)⁵⁾、NTTのNTT-1 (1988、6)とNTT-II (1987、2)であるが、NTT-IIの蓄積電流は未発表である。TETAS、BESSY、NSLS-I以外はリソグラフィを目的としたリングで、いずれも完成年月が64MビットDRAMが試作される前年ぐらいの1989～1990年に集中しているのも興味深い。

これらのうちNIJI-1は電総研と住友電工が共同で開発したもので、160MeVで524mA、90MeVで400mAという低エネルギー大電流蓄積が可能なことを実証し、SR施設の小型化に明るい見通しをつけた。1989年には電総研-住友電工は常伝導の600MeVリングNTT-IIを、住友電工-電総研は超伝導の620MeVリングNIJI-IIIを、住友重機は超伝導の650MeVリングAURORAを、石川島播磨は常伝導の800MeVリングLUNAを完成する。国外でも西独BESSYのCOSY-IIが昨年11月に超伝導電磁石で電子蓄積をはじめたほか、米国のBNLとIBMが超伝導の小型リングの建設を始め、Bechtel、Westinghouseも小型化研究に注目しはじめるなど、米国の動きも活発になってきたが、今のところ日本は小型リング開発において世界のウェーブ・フロントにあるといえる。以下表1に示したもののうちからリングとリソグラフィ関連の話題について述べる。

Table 1. Main parameters of rings used for ULSI lithography and machine study.

Machine and Location	Size(m)	E(Gev)	R(m)	I(mA)	Ec(eV)
COSY-1(Berlin, BESSY)	~ 2φ	0.56	0.37		1053
COSY-II (Berlin, BESSY)	~ 6×2φ	0.63	0.44	50	1260
BESSY (Berlin, BESSY)	~20φ	0.8	1.78	1000	638
MARS (? , NEYRPIIC)	5φ	0.8	1.6		710
HELIOS(East Fishkill, IBM-OXFOD INSTR.)	~ 6 × 2	0.7	0.52		1463
NSLS-1(Brookhaven, BNL)	~16φ	0.75	1.9	1000	492
SXLS(Brookhaven, BNL)	~ 5×2	0.7	0.6		1268
TEARAS(Tsukuba, ETL)	10φ	0.8	2.0	250	568
NIJI-1(Tsukuba, ETL-SEI)	4φ	0.27	0.7	524	62
NIJI-II (Tsukuba, ETL-SEI)	5φ	0.6	1.4		342
NIJI-III (Tsukuba, SEL-ETL)	4φ	0.62	0.5		1057
SORTEC-1 (Tsukuba, SORTEC-ETL)	15φ	1.0	2.8		792
NTT-1(Atsugi, NTT-Toshiba)	~17φ	0.8	1.85	25	614
NTT-II (Atsugi, NTT-HITACHI)	9 × 2.5	0.6	0.67		715
AURORA(Tanashi, SHI)	3φ	0.65	0.5		1218
LURA(Tsukuba, IHI)	6.8	0.8	2.0		568
JSR(Tokai, JAERI)	~ 6△	0.3	0.835		72

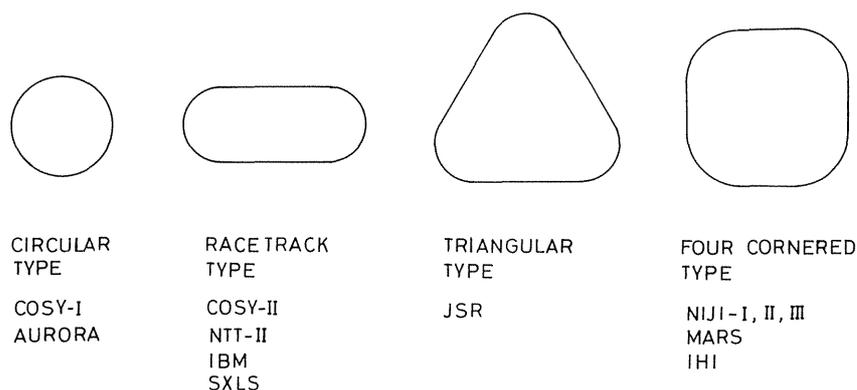


Fig.1. Various configurations of the guide field elements of the compact rings.

(1) COSY-I

西独のCOSY-I 建設計画は応用物理学会誌(1984年1月)にも紹介されているが、これが日本の小型リングのブームを引き起こしたと言っても良いだろう。図1に示すような円形リングで外径2m程度、電子の入射エネルギー50keV、ベータトロン加速で10MeV 近くまでエネルギーを上げて、後は高周波加速で300mAの電子ビームを560MeVにして貯蔵するというもの。このベータトロン加速で電子入射器を省略しようという計画は中止され、入射器でも50MeV 電子を入射し、高周波加速で数百MeVに挙げるというオーソドックスな小型リングCOSY-IIが建設されることになった。

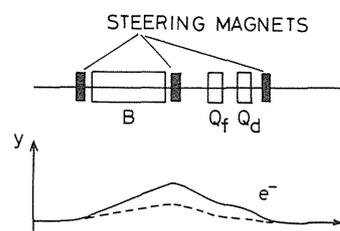
(2) COSY-II

図1に示すような180° 偏向×2のレーストラック型で、均一磁場の超伝導電磁石をつくるのに時間がかかったため、まず常伝導電磁石でテストリングが作られ1986年5月に50MeV 電子の蓄積に成功し、50mA 程度の電流蓄積に成功した。寿命は数十分程度。昨年11月から超伝導電磁石を用いているが、120MeV以上のエネルギー上昇にはまだR&Dが必要とのこと⁴⁾。

(3) BESSY

常伝導型の800MeVリングでビーム集束は低エ

(a) BESSY



(b) SSRL

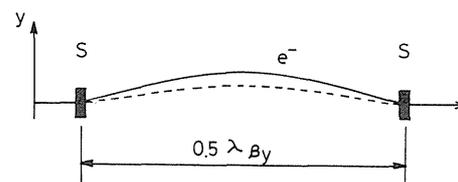


Fig.2. Electron beam wobbling at Bessy and beam position control at SSRL.

ミッタンス・ビームが得られるダブル・アクロマットタイプにしたため周長は62.4mと長い。1981年12月に電子蓄積に成功し、現在までに1A以上の電流蓄積の実績を持つ⁵⁾。

SRのリソグラフィ研究への利用は、当初から行われており、SR照射野の拡大についてはBetz等によって1983年に(1)ミラーによる方法と(2)Wobbling beamによる方法が発表されている⁶⁾。Wobbling beam法というのは図2に示すように1つの偏向電磁石を挟んだ3連のステアリング電磁石でビーム軌道を局所的に上下に揺れ動かそうというものである。この様な方式はSSRLのBaer

等によって1975年に発表されているし⁷⁾、米国特許庁では公知となっている。Bear等は、SSRLのSRビームラインのビーム位置調整のために調整点を中心に調整電磁石をベータトロン振動の1/2波長間隔で設置して、他のビームラインへのビーム変動の影響を最大変動振幅の5%以下におさえるよう配置している。これに反してWobbling法は、普通はリングの直線部に設置されるトリプレット・ウィグラーを1つの偏向部に並べたようなもので、ステアリング電磁石の間隔が狭く、SSRLのようなベータトロン振動への配慮もないため、局所的な軌道変動だけでなく全軌道にわたってビーム位置変動が生ずる欠点があり、全偏向電磁石についてWobbling beam法が可能かどうか明らかでない。

後で述べるが1983年に発表された電総研の電子波動リング(electron undulating ring)は^{8) 9)}、1ヶのパータベータ電磁石で軌道全周にわたって規則正しく任意の波動ビーム(undulating beam)を理論通りに作り出せる方法であり、1986年に米国特許が認められている¹⁰⁾。ただし、申請の一部に含まれていた図2に示すようなテレビーム状照射方法は拒絶された。現在、西独にも電子波動リングの特許を申請中であるが、BESSYのBetz等の方法は、ここで述べた理由により西独特許になっていないようである。

(4) MARS

MARSもCOSY-Iと同じように完成しないうちから日本の半導体関連メーカーに売り込みがあった。注文があれば作るということで1985年10月フランス郵政省電機通信本部国際研究開発企画部長アリエ博士が来日している。MARSは図1に示すような90°偏向×4の四角形に近く、平均直径は5m。ラテイスはFODOで、電子入射器として10MeVマイクロトロンを用いる電子シンクロトロンである。まだ、動いてはいない。

(5) HELIOS

IBMから英国のオックスフォード・インストルメント社に発注された180偏向×2のレーストラック型小型リングで、1989年夏頃に完成する。電子入射器は200MeV電子リニアックで、ニューヨーク州のEast Fishkillに設置される。IBMには、30年近くBNLでコスモトロンからNSLSまで仕事をしてきたBarton博士が移って指導する。

(6) NSLS-I

常伝導型の750MeVリングで、1982年5月に電子入射を始めた。平均直径は約16m。電子入射器は750MeV電子シンクロトロンを用いており、1A以上の電子蓄積の実績があるが、通常は750mA程度まで蓄積して使用する。IBMのリソグラフィグループのビームラインが設置されており、1988年には線幅0.5 μ mのMOS回路をSRリソグラフィで試作している。SRの照射野拡大については特に注目するものはないが、1990年代初めまでには蓄積されたSRリソグラフィ技術を産官学共同で産業界に移転して、米国が半導体技術でリーダーシップをとれるように計画している。

(7) SXLS¹¹⁾

180°偏向×2のレーストラック形の小型リングで、今年の11月には第一段階とし、図3に示すような周長8.5mの常伝導型の200MeV小型リングが試作され、約2年後の第2段階で、常伝導電

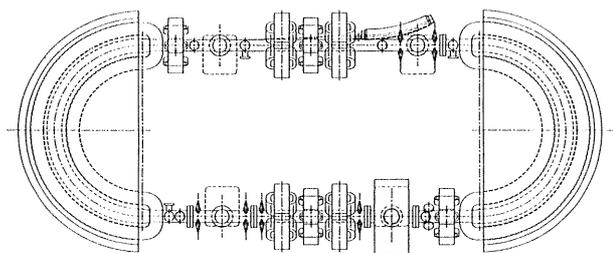


Fig.3. Layout of SXLS with conventional type 180° magnets.

磁石は超伝導のものに交換され、約700MeVの小型リングが完成する。図4にSXLSのラティスを示す。偏向電磁石には $n=0.1759$ の勾配がつけられるので、 $0/2 Q_f B_d Q_f 0/2$ を単位とする電磁石配列となり、2単位で1周となる。電子入射は第一段階では、BNLの750MeVシンクロトロンから200MeV電子が入射されるが、第二段階では100MeVの電子リニアックが用いられる予定。

(8) TERAS

電総研のTERASは1981年10月に稼働を始め、図5に示すSRビームラインBL4ではBe窓を通して1気圧Heガス中で露光しており、写真1のように転写パターン線の線幅は $0.1\mu\text{m}$ まで可能となった。SRリソグラフィの研究もサブミクロン線幅のパターンの位置合せ(重ね合せ)露光などの第2世代の研究に移りつつある。

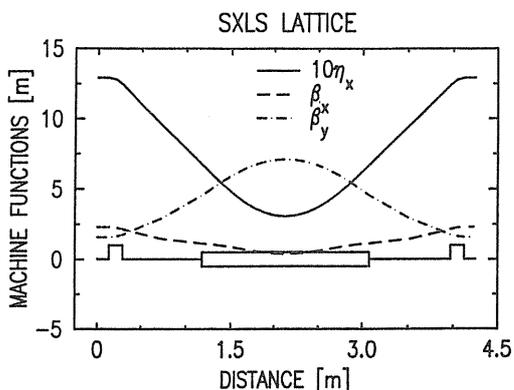


Fig.4. Betatron and dispersion functions of one superperiod of the lattice.

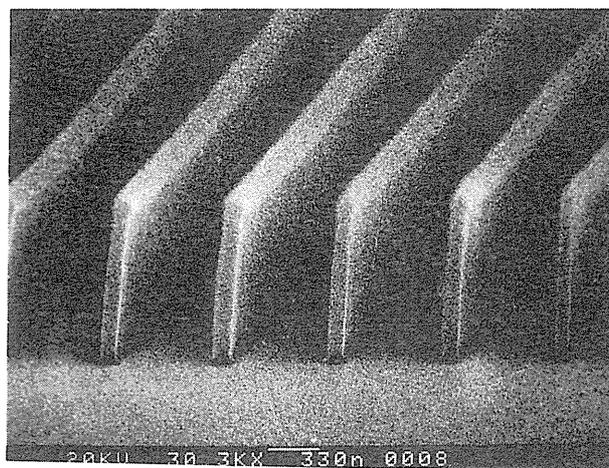


Photo.1 0.1 μm line pattern fabricated by 700 - MeV SR

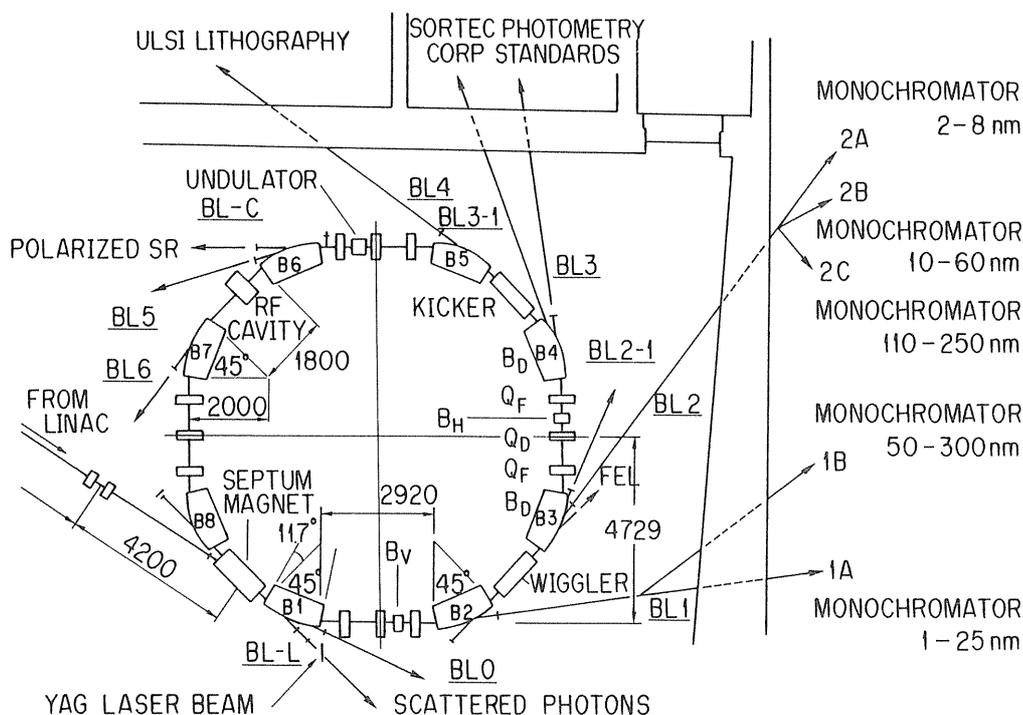


Fig.5. Layout of TERAS as an electron undulating ring, SR beam lines and monochromators used for experiments.

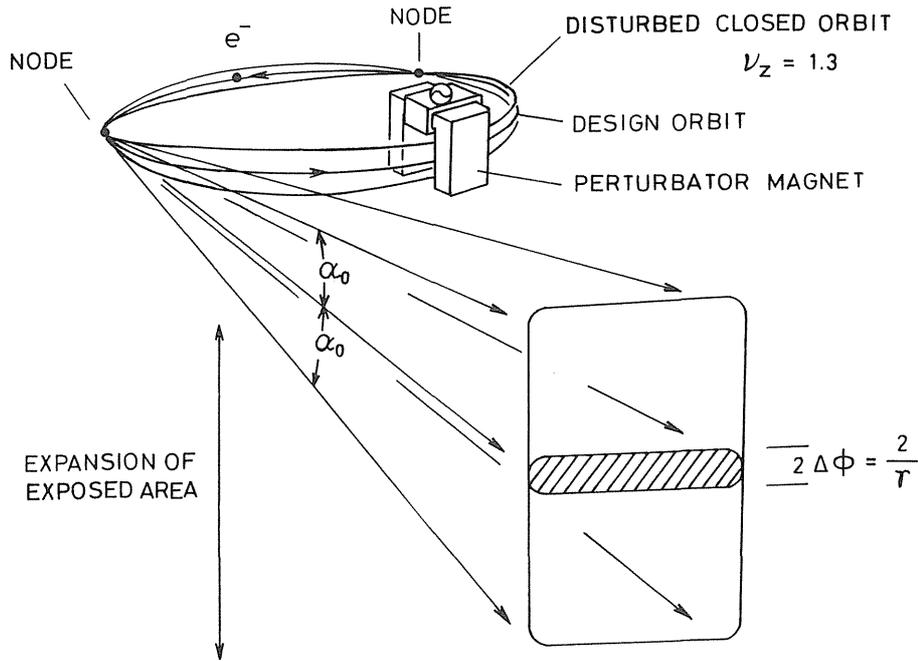


Fig.6. Expansion of the exposed area of SR by the use of vertically undulating beam near a node. The tilt angle varies between $-\alpha_0$ and α_0 .

SR露光も普通の蓄積リングのSRでは数mの所で露光するとなると照射野の狭さが欠点になるが、図5の電子波動リング(electron undulating ring)のSRであれば垂直方向の露光面積も5倍以上大きくとれる。図6に電子波動によるSR照射野拡大の原理図を示す。このことは電子軌道の観測⁹⁾ やリソグラフィ・グループの露光実験によって実証されている¹²⁾。

サブミクロン線幅パターンの位置合せ露光では、電総研リソグラフィグループはマスクと被写体とにそれぞれ設けられた合計3個の回折格子とゼーマン・レーザ光源から光の回折効果に基づいて得られる位置ずれ信号を、光ヘロダイン方式で検出するという全く新しい高精度位置合わせ露光システムを考案し、すでに形成されているウェハパターン上のレジストパターンの重ね合わせが自動的に1秒程度で、しかも0.01 μm の精度で可能となった¹³⁾。

KKソルテックのリソグラフィ・グループは、1987年露光用ビームラインBL3-1をTERASに新設した。このビームラインには照射野拡大用

ミラーからの反射光スペクトル測定用の小型結晶分光器と露光用試料導入装置が組み込まれている¹⁴⁾。

TERASでは、このほか図5に示す位置で逆コンプトン散乱による単色 γ 線発生¹⁵⁾、FEL実験¹⁶⁾、直交遅延磁場型アンジュレータによる円偏向発生¹⁷⁾などの線源開発の研究が行われている。

(9) NIJI-1

電総研を中心とする小型リング建設計画は、工業技術院の官民連帯共同研究の一部として始められた常伝導型の小型SR装置の基礎研究(NIJI-1、NIJI-II)と新技術開発事業団の住友電工への委託事業による電子波動リングの超伝導化・小型化研究(NIJI-III)である。

電総研では、産業用として使用可能な小型SR装置の開発に備えて1984年夏頃から住友電工へ小型蓄積リング試作研究の技術指導を始めた。1985年にはこれをもとに官民連帯共同研究の一つとして図7に示すような平均直径約4mの小型テスト

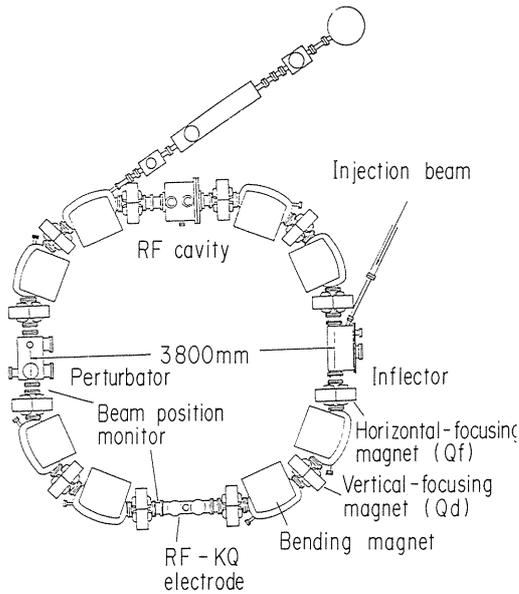


Fig. 7. Layout of NIJI-I and SR beam line.

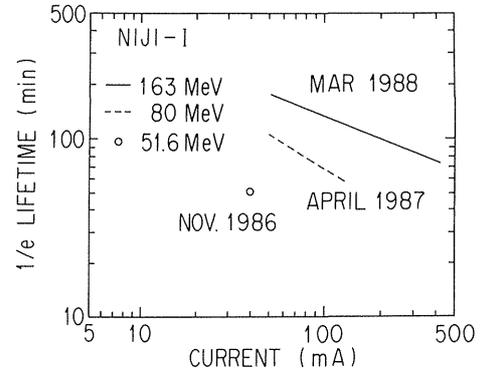


Fig. 8. Lifetime of stored beam current in NIJI-I.

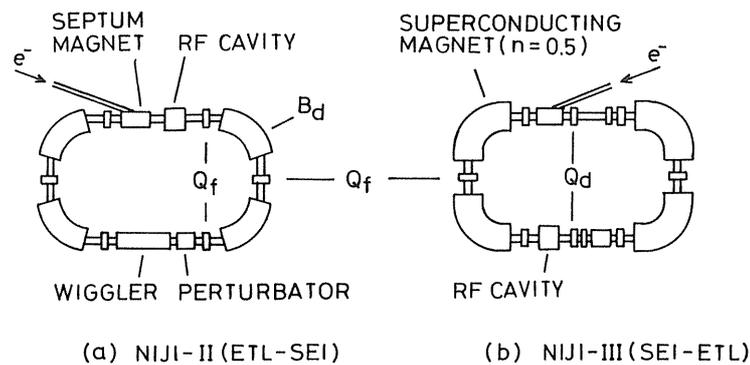


Fig. 9. Layout of NIJI-II and NTT-III.

リングNIJI-1を住友電工と共同で完成、1986年2月28日に電子蓄積に成功し、最近では160 MeV電子ビームを500mA以上蓄積しているが、90MeVでも400mA以上蓄積できることを実証した。図8に蓄積電流の寿命を示す。SRの大面积露光技術の研究では、筒井らによる電子波動実験で上下波動振幅が1cm以上になってもビーム電流減衰への影響はないことが示された¹⁸⁾。

官民連帯共同研究の小型SR装置の基礎研究は電総研リニアック施設の中エネルギー実験室などで4年計画で行われ、住友電工、三菱電機、東芝、島津とともに1985~89年に装置の小型化に不可欠な下記の基礎研究が行われた。

- ①電子入射器の小型化
- ②電子入射の効率化、電子エネルギースペクトル幅圧縮装置の試作
- ③電子蓄積リングの小型化、平均直径4mのテストリング試作と性能向上
- ④SRビームラインの小型化、

(10) NIJI-II

常伝導の90°偏向電磁石4台と6台の四重極電磁石で構成され、図9(a)に示すように0/2 Q_f B_d Q_f B_d Q_f 0/2を単位とする配列で2単位で1周となる。RF周波数は158.4MHz、バンチ数9で周長は17.037mである。リングの形状は長方

形で直線部に光クライストロンや偏光SR発生用の直交遅延磁場型アンジュレータを入れる。90°偏向電磁石の重量は1台約8トンで、軌道半径1.4m、磁極間隔は48mm、最高磁場強度1.43T、磁極には16°のエッジ角をつけて垂直方向の集束力をもたせている。NIJI-IIは、NIJI-Iの場所に設置されるが、NIJI-Iのテストがこの3月7日まで続いたため、電磁石の交換等の作業が遅れ電子蓄積は夏頃になる予定。

(1) NIJI-III

NIJI-IIIは住友電工が新技術開発事業団の委託事業として開発中の超伝導小型リングで、筆者らの電子波動の研究成果をもとに1986年から4年間、開発費13億円をかけて大面積露光が可能な小型電子波動リングを1989年に試作する。軌道半径0.5m、90°偏向の超伝導コイル4台で、電磁石配列はほぼ図9(b)のようになる。建設は3月頃から始められ、まず、常伝導電磁石で電子蓄積を行い、リングの特性を調べた後、超伝導電磁石と交換し、電子蓄積を行う。超伝導コイルの内径は20cmと大きく、各偏向部の端部に2本のSRビームラインを設置できる。

(2) SORTEC-I¹⁹⁾

株式会社ソルテックはシンクロトロン放射光の利用技術を確立することを目的に基盤技術研究促進センター(出資7割)と民間13社(出資3割)で設立された会社組織の研究所である。出資総額は143億円で、10年間でSR利用技術を確立することを目的とし、

- ①高輝度で安定なSR光源技術、
- ②SR光を真空中ないし大気圧中へ安定に、しかも大面積にわたって均一強度で照射するための電子波動技術及びミラーを利用するポート技術、
- ③縦型精密移動、高精度位置合わせ及びその安定な制御を可能とするためのアライナ技術等に関する研究開発を集中研究所体制により実施して

いる。

SR利用技術は、光露光技術を凌ぐ将来の微細パターン転写技術として解像度、生産性の面で、多くの可能性を有しているほか、広い新規用途が期待され、将来の基盤技術として活用される可能性を有するものと考えられる。本試験研究が期待通りの成果をあげた場合には、その成果は工業所有権等の形で蓄積され、広く工業的に使用されることの対価として十分な収益をもたらすものと期待しており、アンジオグラフィによる医学診断、光電子分光などによる材料分析・評価、CVDなど光化学反応等を利用する新たな基礎技術を拓くものとして期待されている。

SR光源を設置する実験棟は筑波北部工業団地の筑波山側入口近くに1988年9月末に完成した。規模は実験棟約2500m²、研究棟と機械棟など合わせて全部で約4000m²である。実験棟は放射線漏洩と環境温度の変化による影響を少なくすることを考えて、地下1階、地上1階とした。SR光源の電子蓄積リングと電子入射器の電子シンクロトロンと電子リニアック、制御電源、SR利用実験室は地下1階に設置される。制御室、空調機械室などは地上1階におかれる。

SORTEC-Iは1-GeV電子蓄積リングで、1-GeV電子シンクロトロンによるフルエネルギー入射方式を採用した。1-GeVシンクロトロンには40-MeV電子リニアックで電子を入射する。図10に全体の構成図を示す。

筆者はソルテック社設立当時から同社放射光源建設と放射光利用について共同研究と技術指導を行っていて、1-GeVシンクロトロンによるフルエネルギー入射は、電総研で進めているリングの産業用小型化の方向と相反するが、今後のHiSOR、関西SORなどの中・大規模リングの建設においては、電子入射器として電子シンクロトロンの役割が大きくなることは明らかで、SORTECの光源建設において電子シンクロトロンの技術が民間企業に定着し、それらの建設において活用される

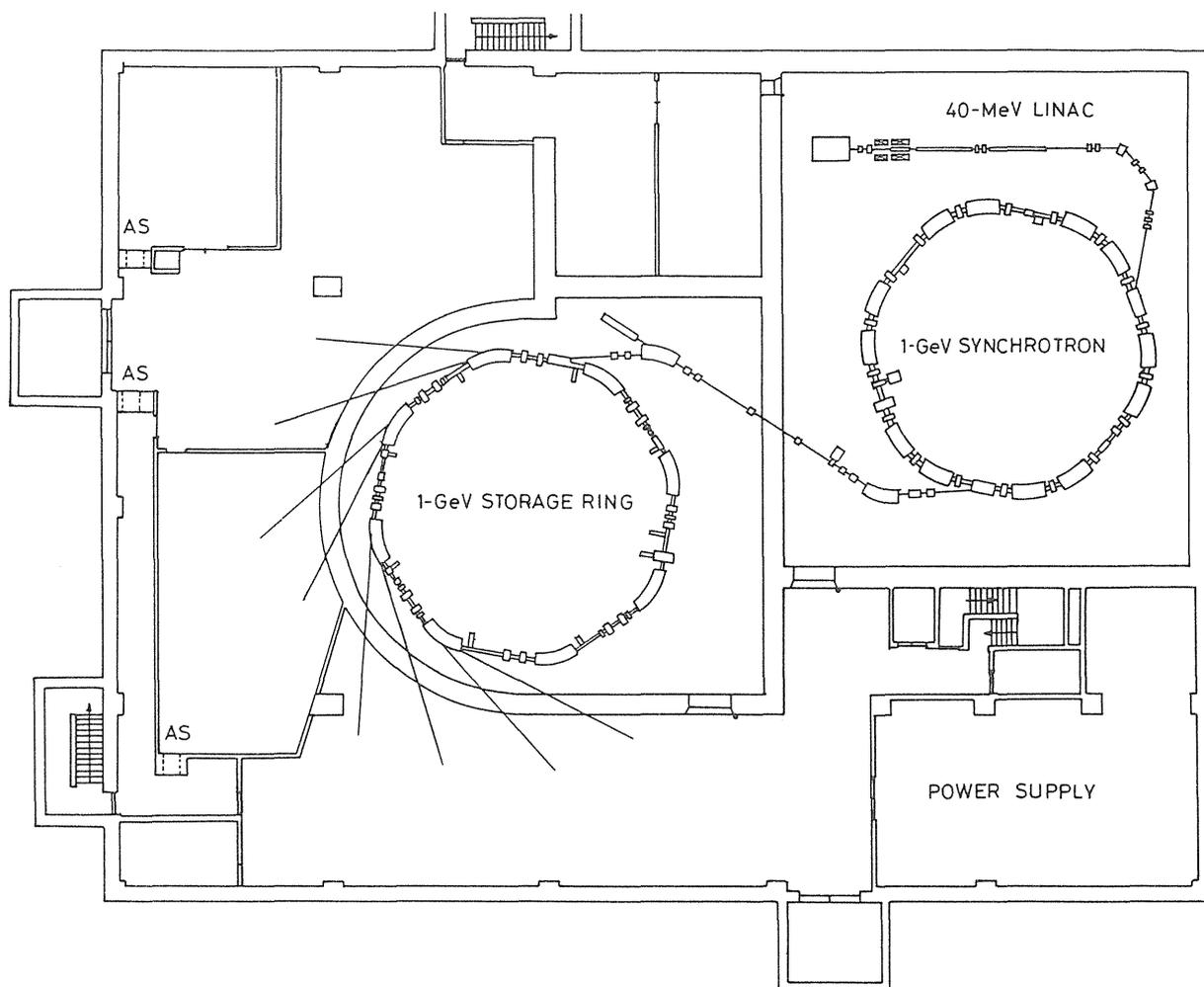


Fig.10. Layout of the SORTEC SR facility.

ことを期待している。

ここで電子入射側の40-MeV電子リニアックから順にSR光源の概略を述べる。

40-MeV電子リニアックの主構成部は、三極管電子銃、シングルキャビティのプリバンチャー、定在波型で $\pi/2$ モードのバンチャー部、進行波型で電総研仕様の $2\pi/3$ モード定ターパ型(C2型とD2型)²⁰⁾加速管2本、電子銃パルサー、PV-3030Aクライストロンとパルサー、真空系からなる。40MeV ($\Delta E/E=3\%$)でビームエミッタンス $6 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{rad}$ の電子ビームか30mA電子シンクロトロンに入射できるように三菱電機で製作し1988年11月に設置された。電子シンクロトロンは東芝で製作し1989年春に設置された。電子エネルギーは0.3~1.0GeV可変で、蓄積リ

ングSORTEC-Iへの低エネルギー電子入射も可能である。

蓄積リングSORTEC-Iの主なパラメータを表2に示す。図11にSORTEC-Iのレイアウトを示す。リングは三菱電機で製作し1989年春に設置された。早ければ今年9月頃から電子蓄積ができるものと期待している。一方、SRの大面积露光技術の研究については、結石らによる各偏向電磁石からのSRを最も有効に利用できるような電子波動方式の研究²¹⁾と島野らによる電子波動方式とミラー方式による大面积露光特性の比較検討がある²²⁾。SRの高エネルギー成分を減らすためにミラーを使う場合もあるようだが、ミラーによるSRの反射率が0.1程度と小さいためミラー方式は効率が悪い。

Table 2 Main parameters of SORTEC-I

(1)	ビームエネルギー	E	1 GeV
(2)	ビーム電流	I _d	200(500)mA
(3)	バンチ数	h	18
(4)	周長	c	46.0273
(5)	平均直径	R	7.3255
(6)	偏向磁石数	n _B	8 (C型)
(7)	偏向磁場	B	1.20
(8)	偏向曲率半径	ρ _B	2.78m
(9)	直線部数	n _s	8
(10)	直線部長	l _s	3.57 m
(11)	四極磁石数	n _Q	16
	配列		0FDB
	強さ	K _f	2.3723m ⁻²
		K _d	-2.6400m ⁻²
(12)	ベータトロン振動数	ν _x	2.235
		ν _y	2.215
(13)	RF加速空洞振動数	f _{RF}	117.24MHz
	電圧	V _{RF}	90KV (PRF=12kW)
(14)	運動量分散開数	α _p	0.165
(15)	結合係数	k	0.1
(16)	放射損失	V _o	31.835keV/tune
(17)	放射時定数	τ _x	17.1 sec
(18)	エネルギー分数	σ _E /E	4.66×10 ⁻⁴
(19)	エミッタンス	ε _{Xo}	0.514 mm. mrad
(20)	発散角分数	σ _x	0.521 mrad
(21)	ビーム形状	σ _{Xmax}	2.02 mm
		σ _{y max}	0.685 mm
(22)	バンチ長		89 mm
(23)	量子寿命	τ _q	2.3×10 ⁵ sec

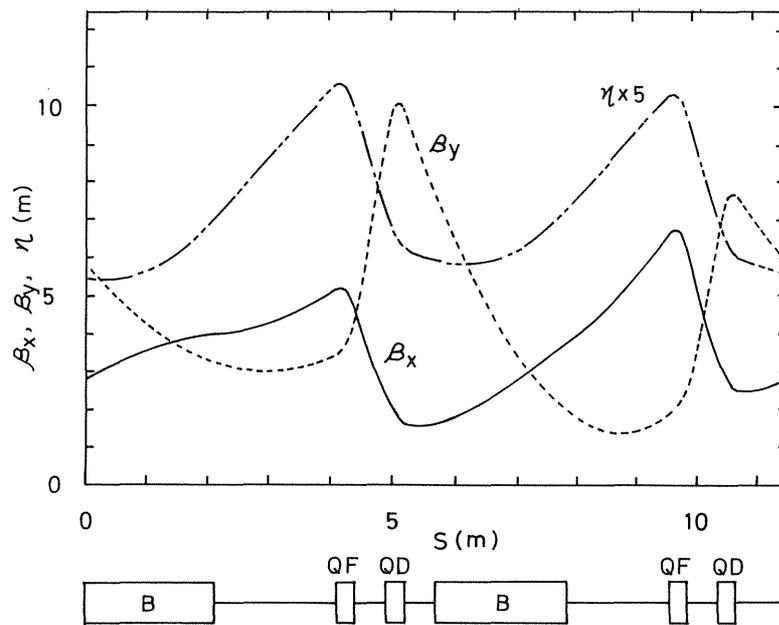


Fig.11. Betatron and dispersion functions of SORTEC-I.

(13) NTT-IとNTT-II

NTTが1985年頃から3年計画、総工費約70億円で建設したもので、NTT-Iの常伝導リングは東芝から、NTT-IIの超伝導小型リングは日立から納入されている。電子入射器は15MeVの定在波型のリニアックで、三菱電機から納入されている。電子リニアックで、NTT-Iにも、NTT-IIにも、電子入射が可能なのである。

NTT-Iは電子貯蔵が可能な電子シンクロトロンで、磁場は約1秒で立上げる。45°偏向電磁石と四重電磁石の配列はダブルアクロマットで低エミッタンスビームを蓄積する。電子シンクロトロンである以外は、BESSYの800MeVリングと似ている。ただし、RF周波数は125MHz(BESSYは500MHz)である。NTT-IIは180°偏向電磁石2台のレーストラック型でCOSY-IIと似ている。NTT-IIにはNTT-Iで加速した電子も入射できるし、15MeVリニアックからの電子も入射できる。J.Murphyの情報によるとNTT-Iは蓄積電流が25mA程度、NTT-IIはエネルギーは何MeVか不明だが、10mA程度で真空圧が100倍になり、寿命は非常に短い。NTT-IIもCOSY-IIとともにまだ十分に動いていないようだ。

(14) AURORA²³⁾

住友重機のAURORAは、1/2共鳴入射法と呼ばれる電子入射機構に特別な工夫があり、COSY-IIとともに世界で最もよく知られた外径3.2mの超小型リングである。磁場の動作範囲は1.0Tから4.3Tであり、入射器として試作中の150MeVマイクロトロンを用いる。マイクロトロンは100MeV近くまで加速可能になったようだが、早期のマイクロトロン完成と電子蓄積を期待したい。

(15) LUNA

石川島播磨のLUNAは、平均直径約7mの常伝導リングで筑波(新治郡 出島村)に1989年3

月末に完成した。90°偏向電磁石×4で電磁石配列はFODO、周長23.5m、RF周波数は178.5MHz、電子バンチ数は14である。三月上旬には電子入射器である45MeVリニアックが完成していて、電子シンクロトロン型の蓄積リングが建設されていた。春から夏にかけて電子蓄積を試みる。当初の蓄積電流の目標は50mAである。

(16) JSR

リング研究用の300MeVテストマシンで、形状は一辺約7mで正三角形型。電磁石の配列はダブルアクロマットで低エミッタンスビームを蓄積する。装置は3月に完成し、電子入射には既設の150MeVリニアックが用いられる。これも春から夏にかけて電子蓄積を試みる。直線部で挿入光源の研究も予定している。

3. 開発すべき小型SR光源

3.1 小型化の方向

表1に示した小型リングの多くは、いずれも数年後の線幅0.25 μ mの超々LSIリソグラフィ用光源として開発中のものであるが、最近リソグラフィとともに注目されているのが指向性の良いエネルギー可変なヴィグラX線による心臓毛細管撮影(アンジオグラフィ)である。これは、30~40代の壮年が自覚症状のないまま血管狭窄が進行し急性心不全で死亡するケースを未然に防ごうというものである。アンジオグラフィによる心臓の冠状動脈系診断システムを開発していくにも、X線リングを病院規模に小型化していく必要がある。

0.25 μ m線幅の超々LSIリソグラフィに適した1nm前後のX線を最も多く含むSRを出せる蓄積リングとなると、常伝導形で電子エネルギーは0.8~1GeV、軌道半径は10m以上になり、SRを利用する真空のビームラインを加えると、SR装置全体で25m四方以上の大型装置となる。これを図12に示すような12m四方にしようというのが、電総研を中心とする官民連帯共同研究制度による

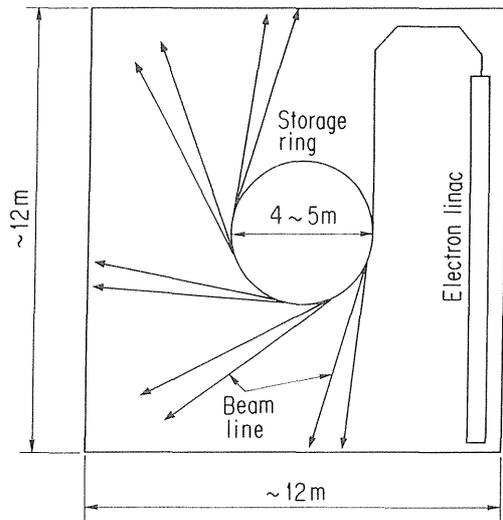


Fig.12. Example of proposed compact SR facility for ULSI lithography.

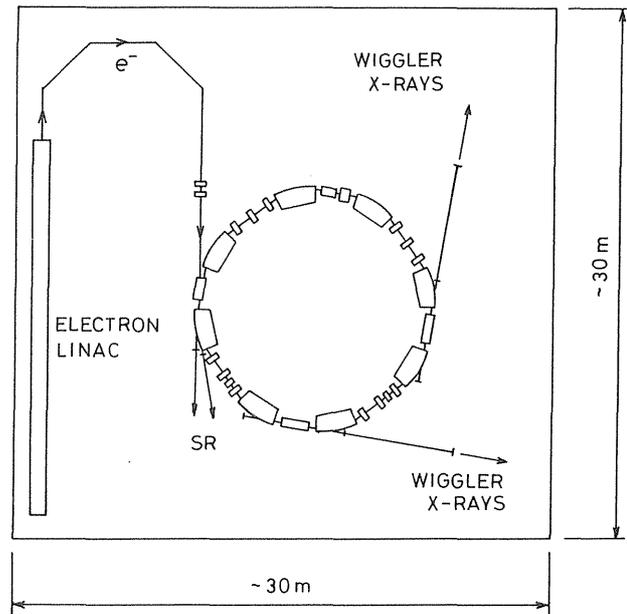


Fig.13. Example of proposed compact X-ray ring for medical diagnosis.

Table 3. Compact SR rings whose developments are expected.

Performance	Purpose of application
Soft X-ray(~1 keV)ring for industrial use. Compact size and wide-area exposure to silicon wafer. Electron undulating ring with an average diameter less than 5m. $E_e \sim 1 \text{ GeV}$, $I_e \sim 300 \text{ mA}$	Dedicated to ULSI Industry as soft X-ray source for submicron rule lithography $E_c(\text{keV}) = 2.218 \times E^3(\text{GeV})R(\text{m})$ $E_c = \text{characteristic energy}$
X-ray(~33 keV)ring for medical use. Compact size and wide-area exposure to human heart. Electron undulating ring with an average diameter less than 10m and super conducting type wiggler. $I_e \sim 1.5 \text{ GeV}$ $I_e \sim 300 \text{ mA}$	Dedicated to medical diagnosis as X-ray source for angiography $E_c(\text{keV}) = 0.664 \times E^2(\text{GeV}) \times B(\text{T})$
Racetrack type ring for FEL with a long optical klystron at the straight section longer than 5m. $E_e \sim 500 \text{ MeV}$, $I_e \sim 300 \text{ mA}$	Dedicated to scientific and industrial uses as FEL for processing

小型SOR装置の基礎研究の目標であり、筆者の電子波動法の研究成果をもとにした新技術開発事業団によるX線露光用小型電子波動リング開発の委託事業(委託先：住友電工)の目標なのである²⁴⁾。

また、医学診断やガン治療に使用できる33keV

近くのSRX線が出せるリングとなると、6 GeV以上、電子軌道半径20m以上となり、現状の常伝導電磁石を使用する限り、リングの平均直径は100m近くになる。心臓の血管撮影が可能な照射用ビームラインを加えると、リング施設全体で200m四方以上の超大型装置となる。これを図13に示

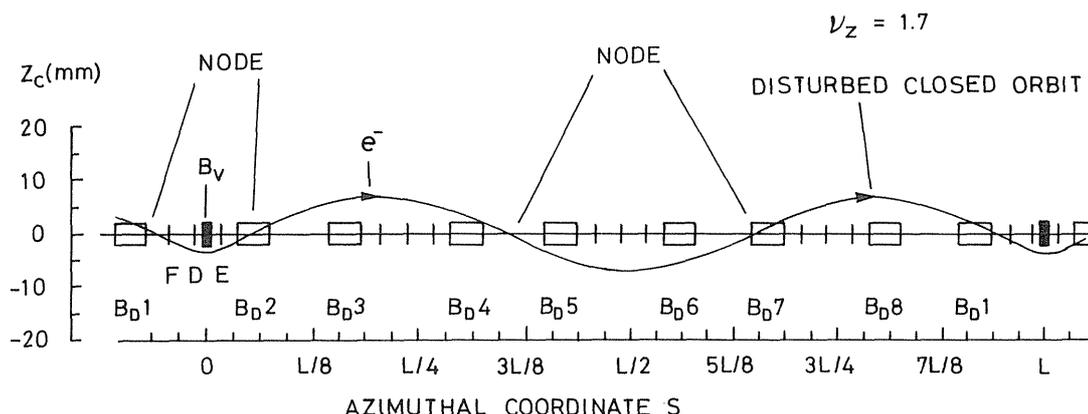


Fig.14. Typical pattern of vertical undulating motion of the stored beam in TERAS.

すような30m四方程度にしようというのが表3に示した医学用X線小型リングの開発構想なのである²⁵⁾。

SRX線を超 LSI 工場や病院などで使えるようにするには

- 1) リングの小型化 (曲率半径は小さく)
- 2) 短い照射用ビームライン (数m) で大面積照射できる
- 3) 入射器の小型化 (100MeV~500mA入射)
- 4) コンパクトなシールド (低エネルギー入射高効率蓄積)
- 5) 大電流ビームの高エネルギー化 (5~10倍) をバランス良く達成しなければならない。

このため電総研で開発したのが以下に述べる電子波動によるSR照射野の拡大法と電子の低エネルギー大電流蓄積法である。

3.2 電子波動によるSR照射野の拡大法

表1からも明らかのように、多くの小型リングの開発はリングの超伝導化による小型化に重点がおかれている。しかし、SR装置全体から考えると超伝導化による小型化の効果はあまり大きくなく、先に述べたように電総研で考案した電子波動法によってSR大面積・均一露光を可能にしながらSRビームラインを数m以下の方がはるかに効果的である。普通のリングからのSRでは、SRの鋭い指向性によって10m離れても垂直方向は1cm程度のガウス分布露光(強度的に)しかできな

いのだが、この方法によると5cm(5倍)以上の均一露光が可能になった。図14は、TERASの縦方向のベータトロン振動数 $\nu_y=1.7$ のときの波動ビームで、 ν_y とパータベータ電磁石の位置を変えることによって理論通りの波動ビームを作り出せる。パータベータ電磁石の励磁は、ベータトロン振動の減衰時間にもよるが、25Hz~50Hz程度まで可能であり、ミラーの操作に比べれば、はるかに簡単な操作でSR大面積均一露光が可能になった。ミラーを用いるSRの大面積照射法もあるが、反射SRのスペクトルも不明確でありリソグラフィに関する限り、ミラーの反射率が0.1程度と小さく、SRの利用効率がきわめてひくくなる。ミラーを用いてSRの高エネルギー成分を除去するという試みもあるようだが、電子エネルギーの適切な選択と適当なフィルターの開発によって適切なエネルギーのSRをレジストに照射する方がはるかに前向きな姿勢と言えよう。

3.3 低エネルギー大電流蓄積法

蓄積リングへの電子入射は、高エネ研のPFや分子研のUVSORのように蓄積エネルギーと同じエネルギーの電子を入射するのが一番易しい。しかし、SR装置を小型にするにはリングだけでなく電子入射器も小型にしなければならず、電子入射時の高速中性子の発生を少なくして、放射線遮蔽をコンパクトにするためにも150MeV以下の

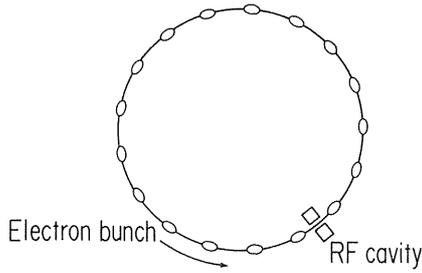


Fig.15. Circulating electron bunches with the same interval synchronizing with accelerating electric field in an RF cavity.

低エネルギー大電流蓄積が望ましい。しかし、後で述べるように蓄積電流の寿命は電子エネルギーの減少とともに急速に短くなるので、100MeV程度の電子の大電流蓄積は数百MeV以上の電子蓄積に比べてはるかに困難である。

蓄積電子は図15のようにバンチングされ安定軌道に添って周回しながら

- (1) バンチ内の電子の散乱
- (2) ガス分子やイオンとの散乱
- (3) シンクロトロン放射の量子的ゆらぎ

によって安定軌道からはずれ、蓄積電子は減少する。リング中の電子ビームは、電子入射器として使われるリニアック中のそれと比べよく絞られ方向が揃っているのでビームエミッタンス(emittance、ビーム断面積とビームの広がり角の積に関係した量)が2桁以上小さく、自由電子レーザー用の電子ビームに適しているので、表3に示したような5m以上の直線部のある500MeVリングで短波長の自由電子レーザーの発振も可能になる。しかし、電子の原子分子による散乱確率は電子エネルギーの2乗に逆比例するので、電子エネルギーが低くなるとイオンや電子に散乱されやすく、真空度が悪いとイオン・トラッピングによってビーム軌道中にイオンビームが引き込まれて、軌道面に垂直な方向にビームが広がることもある。電子の速度に比べてイオンの速度は極めて遅く、電子は軌道近くに集まったリング状のイオン群の中を走るようになるので、(2)の効果による電子ビーム

の減衰が生じ易く真空が悪いとビームの寿命は極端に短くなる。

通常、電子蓄積リングに蓄積される電子の数は、リングの大きさにもよるが、最高で $10^{11} \sim 10^{13}$ 個程度である。これらが図15のように軌道上を数個～数百個の電子群(バンチ)となって、ほぼ光速で周回している。たとえば、安定軌道の周長が30mの場合では、電子は一秒間に 10^7 周することになり、1個の電子が約1.6pAの働きをする。蓄積電流300mAといっても、電子の数は 1.8×10^{11} 個にすぎず、全部が零れたとしても漏洩放射線の遮蔽はやりやすい。

蓄積電流がe分の1になるまでの時間を寿命とよんでいる。電流寿命は、電子のエネルギー、バンチ体積、真空圧によって大きく変わるが、まだ十分研究されていない分野であり、放射光源の小型化には不可欠なリングへの電子の低エネルギー大電流入射は困難とされていた。当所では、TERASやNIJI-1で電流減衰率が

$$-dI/dt = aI^{2-n} + bI^2 + Ic$$

で近似できることを見だし、電流減衰モードを表示できる電流減衰率表示法を考案した²⁶⁾。ここで、 I^n はバンチ体積の電流依存性を示す。これにより、400MeV以上では放射光による真空槽内壁からのガス放出が多く、寿命は主として(2)によって、すなわち上式右辺の第2項によって、300MeV以下では(1)によって、すなわち上式右辺の第1項によって決まることを明らかにした。また、150MeV以下の低エネルギー・大電流入射については、ガス放出に伴って生ずるイオンを電子軌道に停滞させないようにする直流電極によるイオン・クリアリング法や①の効果を増加させるRF励振法を併用している。図16は、ビーム電流Iの減衰率(dI/dt)を電流Iの関数として示したもので、図は局所的な真空漏れ(1×10^{-9} Torr程度)がある場合にイオン・クリアリング電界をかける

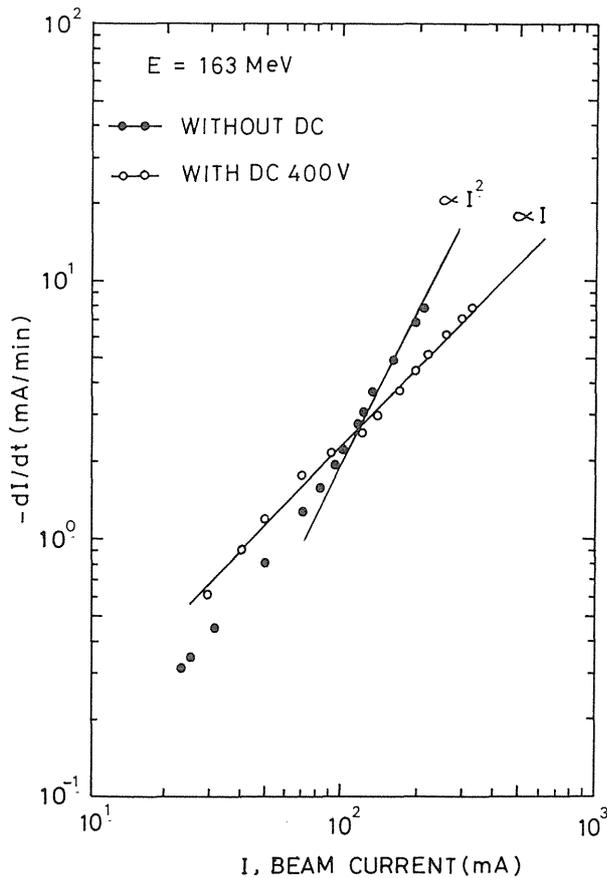


Fig.16. Change in the decay-mode of the stored beam current induced by clearing field in NIJI-I.

と、ビームサイズが変化するため、電流の減衰モードが変化することを示す。

4. おわりに

国内外の小型リング開発の現状と開発すべき小型SR光源について私見の述べた。このうち国内の小型リングの開発はまさに日進月歩であり、この稿が出版される頃には春から夏にかけて電子蓄積を予定しているリングの多くは稼働し始めて、現状報告の多くが旧聞に属していることを望んでいる。

今後開発すべき小型SR光源として、リソグラフィ用、アンジオグラフィ用、FEL用を挙げた。リソグラフィ用として今世紀中に何台作られるかといった話が度々聞かれるが、産業用である限り最も大切なことは使いやすく経済的なものでなけ

ればならない。電磁石を超伝導にするか、常伝導にするか、電子入射エネルギーは200MeV以下のものが多くなってきたが、電子リニアックかマイクロトロンか、SRの大面积照射についても電子波動にするか、あるいは他のもっと良い方法を考案するか、もう一度洗い直されるべきであろう。

参考文献

- 1) T.Tomimasu, T.Noguchi, S.Sugiyama, T. Yamazaki, T.Mikado and M.Chiwaki: IEEE Trans.Nucl.Sci Vol.NS-30, No.4 3133(1983).
- 2) H.Takada, K.Furukawa and T.Tomimasu: Proc.1987 SPIE SANTA CLARA Symposium on Microlithography 773(March,1987) p. 257.
- 3) T.Tomimasu, S.Sugiyama, T.Noguchi, T. Yamazaki, T.Mikado, and K.Furukawa, H. Takada, and Y.Tsutsui
proc.3rd Japan-China Joint Symposium on Accelerators for Nuclear Science and Their Applications(RIKEN, WAKO, SAITAMA 351-01, Japan Nov.1987).
- 4) A.Gaupp: Synchrotron Radiation News 2, No. 1, 18 (1988)
- 5) R.Garrett: idib I, No.4, 13 (1988).
- 6) H.Betz and G.Mulhaupt: Proc,1983 SPIE 448 (Upton, New York, Oct.1983) p.83
- 7) A.D.Bear, R.Gaxiola, A.Golde, F.Johnson, B.Salsburg, H.Winick, M.Balswin, N.Dean, J.Harris, E.Hoyt, B.Humphrey, J.Jurow, R.Melen, J.Miljan and G.Warren: IEEE Trans.Nucl.Sci.NS-22, No.3, 1794 (1975)
- 8) T.Tomimasu, Proc.2nd China-Japan Joint Symposium on Accelerators for Nucl.Sci. and Their Applications(IMP.Lanzhou, China, oct.1983) p.135
- 9) T.Tomimasu: Jpn J.Appl.Phys.26, 741(1987)
- 10) T.Tomimasu, T.Noguchi, H.Tanino and S. Sugiyama: US Patent No.4631743 (1986)
- 11) J.Murphy: private communication.
- 12) H.Tanino, K.Hoh, M.Hirata, S.Ichimura, N.Atoda, T.Tomimasu, T.Noguchi, S.Sugiyama, and T.Yamazaki: Jpn J.Appl.Phys.22. L677 (1983)
- 13) J.Itoh, T.Kanayama, N.Atoda and K.Hoh. Proc.1987 SPIE 773 (Santa Clara, USA, March 1987) p.7.

- 14) 山崎邦明、小林郁朗、今井高弘、冨增多喜夫、1987年 秋季第48回応用物理学学会学術講演会 予稿集p.446.
- 15) 野口勉: 応用物理 58, 46 (1989)
- 16) T.Yamazaki, T.Nakamura, T.Tomimasu, T.Mikado, M.Chiwaki, R.Suzuki, T.Noguchi, S.Sato and H.Usami: Proc.13th Linear Accelerator Meeting in Japan(ETL, Tsukuba, Sept.1988) p.174.
- 17) H.Onuki, N.Saito and T.Saito: Appl.Phys.Lett.52, 173 (1988).
- 18) 筒井康充、岡崎 徹、高田博史、冨增多喜夫、1988年春季第35回応用物理学関連連合会, p.571.
- 19) 中村史朗、大野守史、島野裕樹、吹田牧夫、結石友宏、長戸路雄厚、北野隆一、冨增多喜夫、1987年秋季第48回応用物理学学会学術講演会予稿集 p.477.
- 20) T.Tomimasu: IEEE, Trans.Nucl.Sci. Vol.NS-28, No.3, 3523 (1981).
- 21) 結石友宏、島野裕樹、中村史朗、長戸路雄厚、冨增多喜夫、1987年秋季第48回応用物理学学会学術講演会 p.477.
- 22) 島野裕樹、結石友宏、冨增多喜夫、1988年春季第35回応用物理学関連連合会p.571.
- 23) N.Takahashi, Nucl, Instr.Meth.in Physics Research B24 25, 425 (1987)
- 24) T.Tomimasu: J.Electronic Engineering 23, No.234, 72 (1986)
- 25) T.Tomimasu: Synchrotron Radiation News I, No.4, 28 (1988).
- 26) T.Tomimasu, T.Yamazaki, T.Mikado, S.Sugiyama, M.Chiwaki and T.Noguchi: Jpn.J. Appl. Phys.25, 1706 (1986).