

電総研放射光施設の現状

The Present status of the Synchrotron Radiation Facility of
the Electrotechnical Laboratory Headquarters

富增多喜夫

Takio Tomimasu

電子技術総合研究所

Electrotechnical Laboratory Headquarters

1. はじめに

電子技術総合研究所（電総研，つくば市梅園1の1の4）の電子蓄積リングに初めて電子が蓄積されたのは1981年10月7日で，以来6年6ヶ月，約26000時間運転されてきた。最近RF空洞の電極近くで真空漏れ，放射光によるガラス窓の破損，コイルの水詰まり，などのトラブルのため，あるいは，光クライストロンや円偏光アンジュレータの設置やレーザと電子の衝突による単色 γ 線の発生実験などに備えた真空系の加造などでリングが止まることが多くなってきたが，年間平均4000時間程度は動いてきたといえる。

電総研の放射光源としては現在800 MeV電子蓄積リング“TERAS”と小型テストリング“NIJI-I”がある。NIJI-Iは住友電工と共同で試作されたもので，1988年度中に直径約5mの600 MeV常電導リング“NIJI-II”に改造される。

TERASとNIJI-Iについては，すでに何回か報告されているので，ここではTERASの現状，リングの電子ビームを用いた2，3の実験，放射光（SR）利用施設の概略と最近のSR利用研究について述べる。

2. 電子蓄積リング“TERAS”の概略

蓄積リングには電子入射器で電子を入射し，電子蓄積後に加速してエネルギーを何倍にも上げて貯蔵しておく方法と，入射・蓄積して，そのままのエネルギーで貯蔵しておく方法がある。前者の例は電総研，東大物性研，フランスのACOのリングで，電総研リングの愛称をTERAS(Tsukuba

Electron Ring for Accelerating and Storage, 照らす)とし，二つの意味を持たせた所以である。

TERASの電磁石や真空槽は図1に示すように直径10mのほぼ円型に配列されている。設計軌道の周長は31,45mで， 45° 偏向電磁石の重量は1台約6.5トン，軌道半径2m，最大磁場は13340ガウスで800 MeVの電子を蓄積する。 45° 偏向電磁石は平行磁極($n=0$)とし，垂直方向の集束力をもたせるために端面は電子ビームに対して直角とせず， 11.7° の斜入(出)射角を持たせてある。

電子集束の主役は12台の四重極電磁石で，1台0.2トンの四重極電磁石3台を1組とする4組のトリプレットからなる。電子ビームの集束は，0/2 BD QF QD QF BD 0/2 を単位とする電磁石配列で行われ，4単位で1周となる。

電磁石配列の位置精度は，垂直方向は0.3 mm以下，水平方向は0.5 mm程度である。QFやQDを1 mm程度軌道に直角の方向に動かしても電子ビームの寿命になんらかの影響を与えないが，震度4程度の地震では電子ビームを少し落す。偏向電磁石は 11.7° のエッジ・フォーカスで，垂直方向の集束力のほかに水平方向の電磁石位置精度を多少ゆるくできる利点がある。

電総研蓄積リングの特徴としては，

- (1) 電子を入射し蓄積してから加速し，エネルギーを2.6倍以上に上げる低コスト型で，電子入射器としては図2に示すような大強度の低速陽電子やパイ中間子なども発生できる多目的の400 MeV大出力電子リニアックを使用しているが，全部で11億円であること，

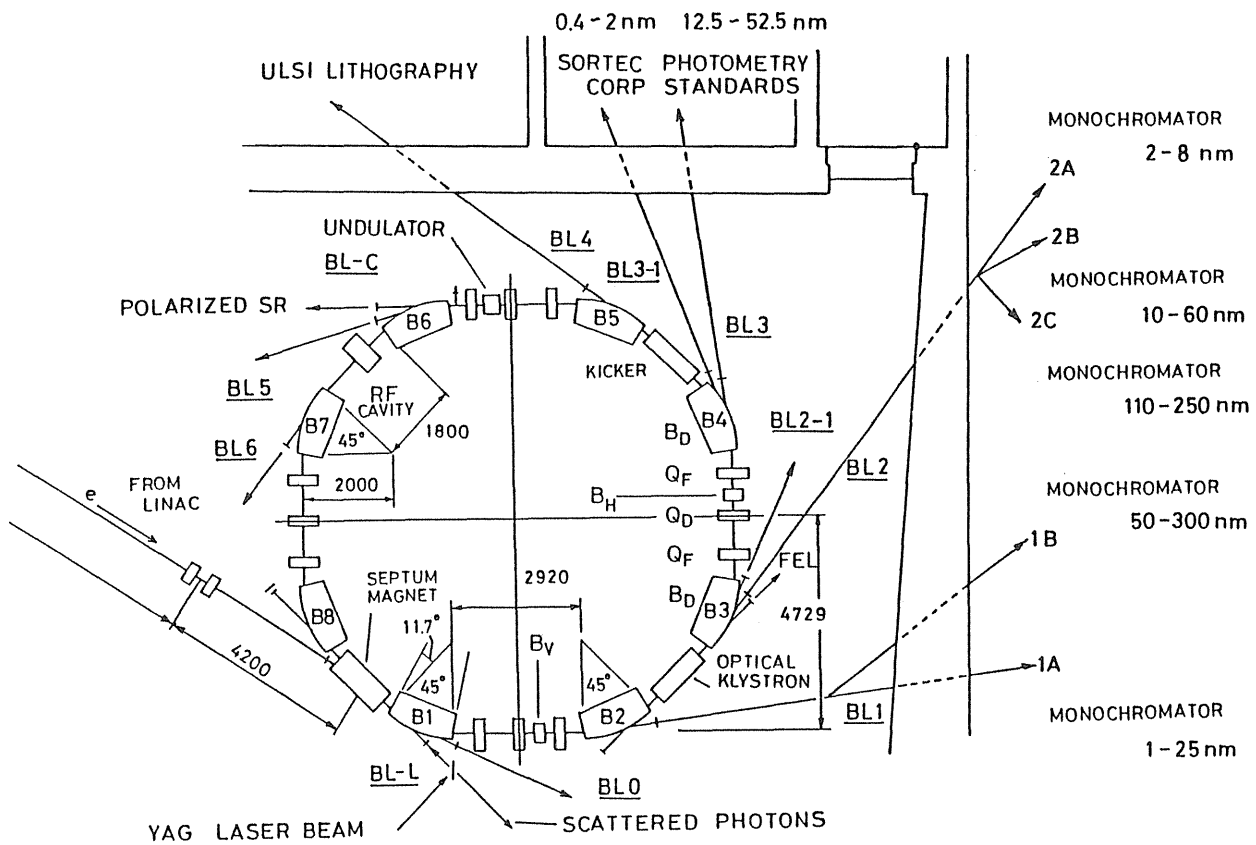


図1 Layout of ETL synchrotron radiation facilities

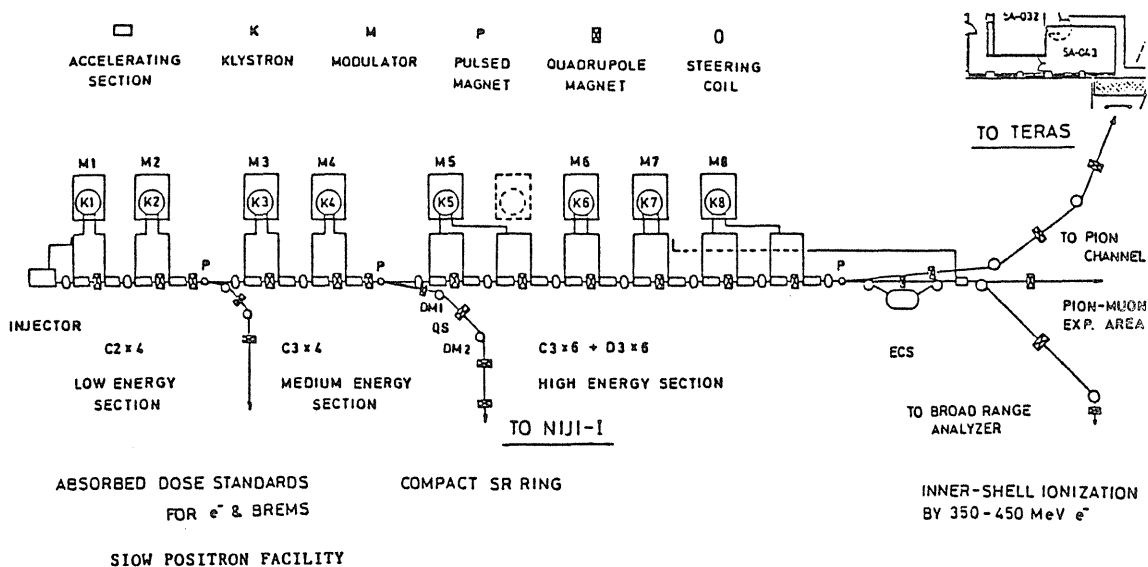


図2 Layout of ETL linac facilities

- (2) 45° 偏向電磁石の磁極は平行磁極 ($n = 0$) で、 11.7° のエッジ・フォーカスにしたこと、
- (3) 偏向電磁石の磁極の幅は 22cm とやや広めに製

作り、スパーサーや鉛ブロックを詰めることによりSRの高エネルギー成分を遮蔽できるようにしたこと、などがある。

表 1 に TERAS の主なパラメータを、図 3 には TERAS から放射光のスペクトル分布を示す。

表 1 Main parameters of TERAS () shows final target

Injection Energy	- 320 MeV	Horizontal	
Maximum Energy	700 MeV (800 MeV)	Betatron Tune	$\nu_x = 2.3$
Repetition Rate	50/32 pps	Vertical	
Circumference	31.45 m	Betatron Tune	$\nu_x = 1.3$
Focusing Order	0/2 Qf Bd Qd Bd	Harmonic Number	18
	Qf 0/2	Radio Frequency	171.6 MHz
Periodicity	4	Maximum RF Power	10 kW
Bending Radius	2.0 m	Stored Beam Current	250 mA (300mA)
Bending Field	1.17 T (1.33 T)		

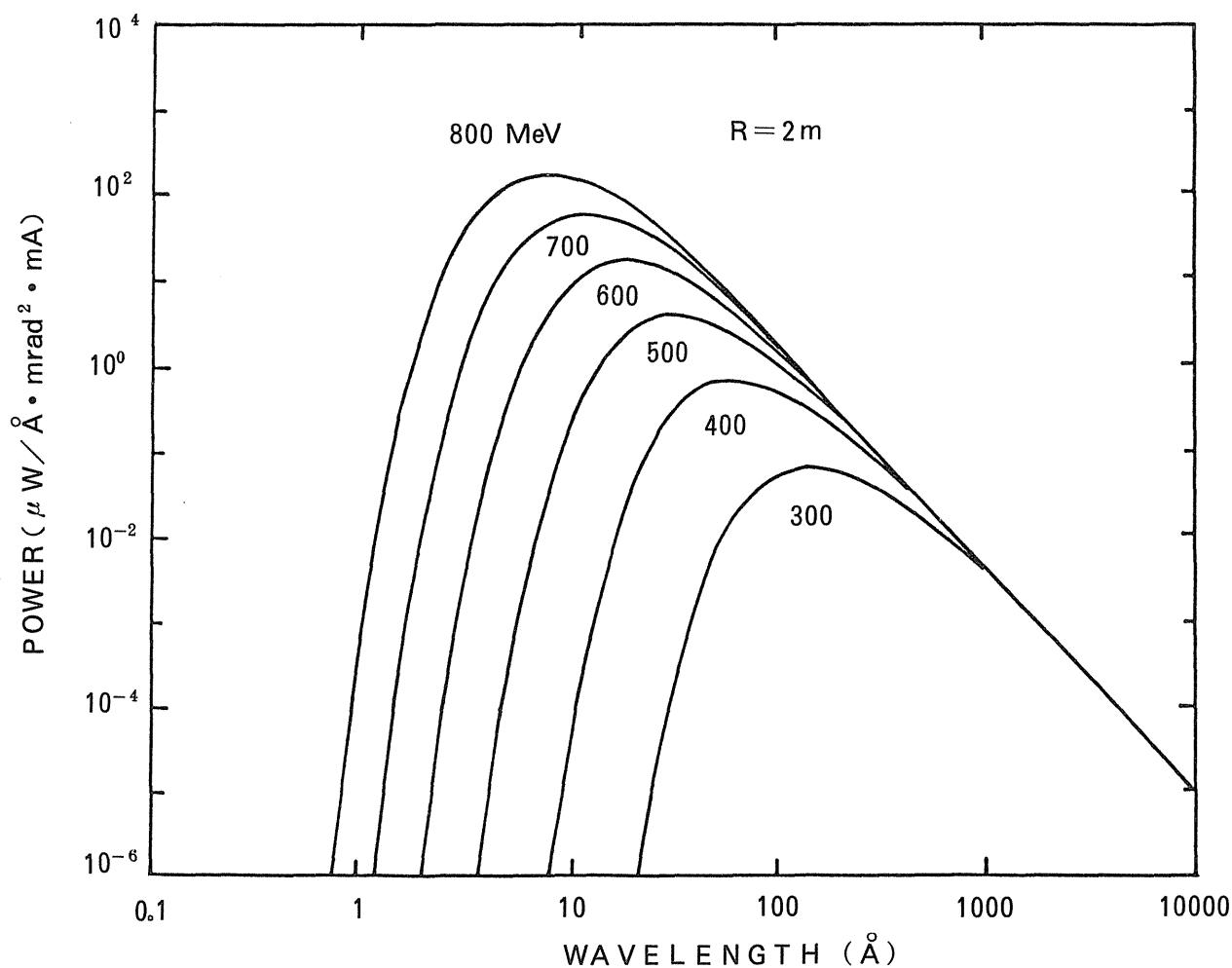


図 3 放射光のスペクトル分布

3. 光源研究の概略

電子蓄積を始めてから最近までの真空圧や電流減衰のデータを整理してみると、リング運転の初期では放射光による真空槽内面からのガス放出が多く40ntorr に達することがあり、その時の電流の減衰率は600 MeV-100 mAで2 mA/minと大きい。歳月とともに放射光による真空槽内面からのガス放出が減り、さらにイオン・クリアリングによって電流の減衰率 $|dI/dt|$ が減少し、寿命が延びている。

減衰率は次式で表わされ、

$$|dI/dt| = aI^2 + bI^2 + cI$$

右辺の aI^2 はTouschek 効果による項、 bI^2 は真空槽内面のガス放出による項、 cI は残留ガスによる項である。図4は光クライストロン用真空槽をリングに設置したときからの電流減衰率の変化を示す。図4から明らかなように700 MeVでの100mA 電流の1/e 寿命 $\tau = (e-1) \times I / |dI/dt|$ は約11時間であり、ガス放出 (bI^2) の減少とともに寿命は延び続けている。ガス放出量から計算したTouschek 効果による1/e 寿命は約70時間で、現在の寿命の約6倍となっている。このことは真空槽の内面処理によるガス放出量の減少、排気速度の増大によるガスの減少、等によって電

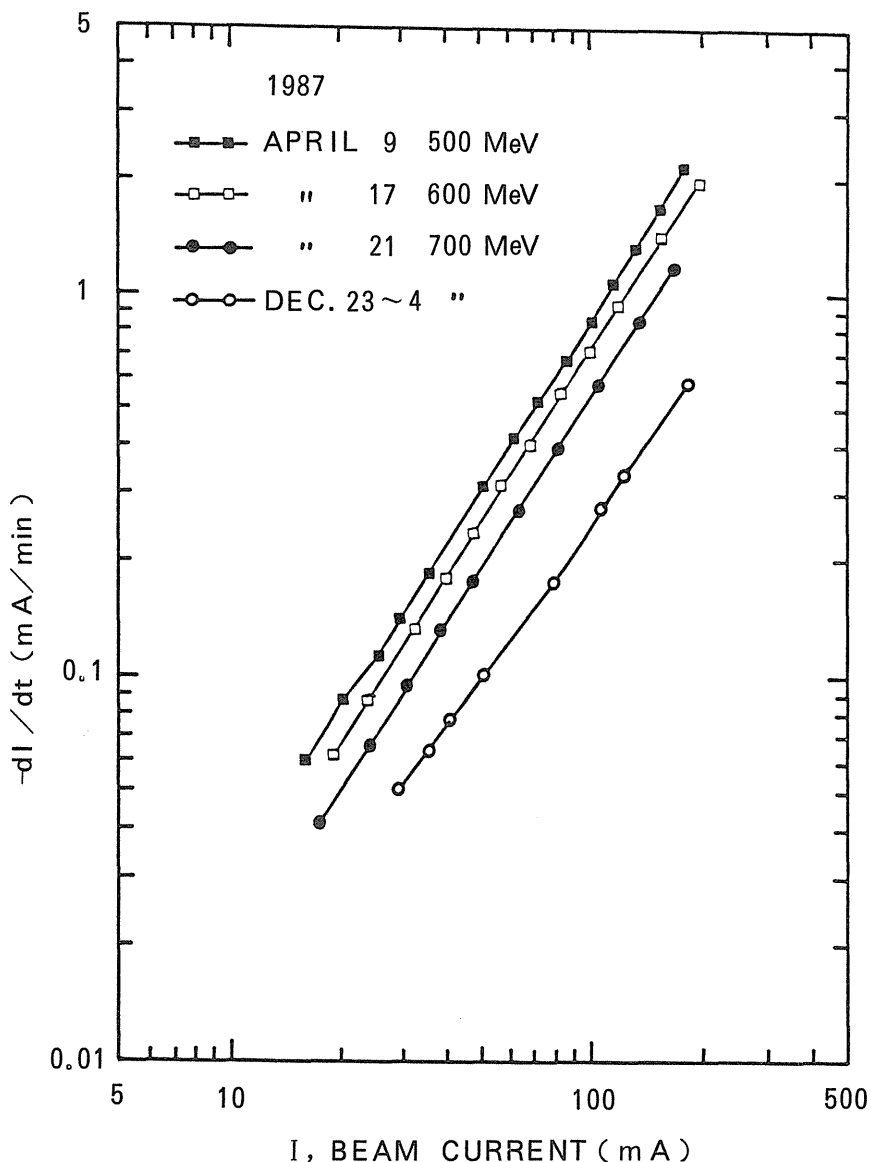


図4 蓄積電流の減衰率

流寿命が更に数倍向上することを意味しており、実用の小型蓄積リングの開発にも明るい見通しを与えるものである。

(1) 電子波動によるSRの大面積露光

1 GeV前後の蓄積リングからのSORは、波長、指向性（平行性）、強度においてもサブミクロン線幅の回路パターンを転写するリソグラフィ光源として優れている。しかし、リングの電子軌道面に垂直な方向へのSRの発散角は $1/r$ と小さいため、1 mrad程度の軟X線の露光部は横長の扁平で、光源から10m離れたところでも垂直方向に1 cmもとれない欠点がある。この欠点を解決するために当所で考案されたのが、電子波動法である。小さな波動用電磁石を1ヶ動作させることによって電子を設計軌道の回りに波動させることが可能で、電子ビームの傾き角は波動の節のところで約3 mradとなる。これによって垂直方向照射野の拡大は6倍以上になる。この電子波動リングのアイディアは「X線露光用小型電子波動リング」として新技術開発事業団の委託開発テーマになり、住友電工が4ヶ年計画で超電導小型電子波動リング「NIJI-III」を開発している。

(2) 単色 γ 線の発生と利用

γ 線の発生にはレーザー光子のエネルギー K_i が正面衝突する電子によって $4\gamma^2$ 倍に増幅されることを利用する。YAGレーザーを用いる場合電子エネルギー300 MeVから800 MeVまで変えて1.6~11.4 MeVの準単色 γ 線を 10^5 ヶ/秒以上発生できる。D(γ, n)断面積の精密測定など、光核反応の仕事も計画している。この逆コンプトン散乱によって生じる γ 線のエネルギーをゲルマニウム半導体検出器で0.1%以下の精度で測定できることを利用して蓄積電子のエネルギーを0.1%程度で決定し、1ヶの電子によるSR強度の算出にも利用している。

(3) FEL発振実験

蓄積リングを用いて可視域の自由電子レーザー(FEL)を発振させることはかなり困難な仕事で、1983年にフランスのACOリングで赤色レーザーの発振に成功した一例があるのみである。電総研ではB2とB3の間に設置した光クライストロンによるFEL発振実験のため、光キャビティ損失の精密測定システムを完成し、1988年春からはゲイン測定を始める。蓄積電子による可視域FEL発振が困難な理由としては光キャビティ損失を0.06%以下にする反射ミラーが必要なこと、可視域のウィグラー光のパワーが小さいうえに、エネルギーの高いSRやウィグラー光の高調波が混在するため光キャビティの反射ミラーが破損しやすいこと、などがある。

(4) 円偏光発生と利用

B5とB6の間には「直交遅延磁場型アンジュレータ」を設置し、光速近くで進む電子ビームを右回り、あるいは左回りと任意の方向に螺旋運動させて、右回りあるいは左回りの円偏光の紫外線を発生できるようにしている。これらは遺伝子DNAなどの螺旋物質や、磁性物質の構造解析に利用される。

4. SR利用施設とSR利用研究の概略

現在、5本のビームライン(BL1, BL2, BL3, BL3-1, BL4)と7本の短いビームポート(BLO, BL2-1, BL5, BL6, BL-L, BL-F, BL-E)が使われている。リング室と分光器などのある実験室の間には図1に示すように厚さ1mから1.5m程度の遮蔽壁がある。5本のビームラインで導かれたSRは、実験室では8本のビームラインで取り出されて利用されている。分光器は現在7台設置されており、図1に示すようにBL4ビームラインを除く7本のビームラインで使用されている。表2に各分光器の主なパラメータを示す。

表 2 既設分光器の主なパラメータ

Beam Line	Monochromator	Range	Minimum Band pass
BL 1A	Grasshopper XIV	1-14 nm	0.003 nm at 5 nm
BL 1B	Seya-Namioka	50~300 nm	0.1 nm at 50 nm
BL 2A	Laminar type	2~8 nm	0.01 nm at 2 nm
BL 2B	146°, 1m Toroidal Grating	10~15 nm	0.03 nm at 110 nm
BL 2C	1m-Normal Incidence	110~300 nm	0.2 nm at 110 nm
BL 3	146°, 1m Toroidal Grating	12.5~52.5 nm	0.03 nm at 12.5 nm
BL 3-1	Double Crystal	0.4~2 nm	0.01 nm at 0.4 nm

(1) BL 1

BL 1 は、現在は 1 A と 1 B に分岐されている。分岐する以前は量子技術部の光学標準グループによって光学標準研究専用として使用されていた。まだ研究段階ではあるが、1 個の電子が放射する SR を標準光源にしようとする研究が進められている。しかし、光学標準の研究は他光源の遮光など注意を払う必要があり、他種実験グループと大部屋で同居するのに適さないため、1985 年度には BL 3 ビームラインを新設し、光学標準の研究は BL 3 を用いて継続することとなった。研究の内容は BL 3 のところで述べる。

BL 1 の 1 A には、グラスホッパー分光器 (Baker Mfg. Co. Mark - XIV, 1nm -- 14 nm) が設置されている。前置鏡 (M。) は SR 光源から 4.9 m の位置に置かれ、SR 光を 88° で受けて水平方向に 4° 曲げるとともに横方向の集光性を高めている。1988 年春より、単色軟 X 線ビーム

を用いて内殻励起状態の原子分子の研究や、光学材料、半導体などの光学的性質の測定が始められる。1 B には、縦分散方式瀬谷波岡型分光器 (島津製作所, 50nm -- 300nm) が設置されている。紫外線ビームは、地球的規模の気候変動に影響を与えると考えられている OCS の分解と粒子化の機構解明の研究に利用されている。OCS は他の大気汚染物質と異なって対流圏では分解されにくく、成層圏まで上昇して 200 nm -- 260 nm の紫外線で分解され、硫酸性エアロゾルになると考えられている。

(2) BL 2

BL 2 は 2 A, 2 B, 2 C に分岐されている。2 A には、平面回折格子分光器 (回折格子は島津製作所, 2nm -- 8nm) が設置されている。ここでは、1) 軟 X 線領域での SR 強度の絶対測定、2) 原子分子の W 値のエネルギー依存性、3) コ

インシデンス法を用いた内殻励起分子の動的挙動
4) 中空ガラスファイバーによる軟X線の伝送特性等の研究が行われた。2)の研究では、生成原子イオンの運動エネルギー分布が精密に求められた。1988年度には、平面回折格子分光器に替わって、環境試料の高感度分析のために、蛍光X線分析装置が設置される予定である。

2Bには定偏角トロイダル回折格子分光器(格子はJobin Yvon社, 10~50nm)が設置されている。このビームラインでは、所内外の利用者によって半球型電子アナライザーを用いて絶縁体結晶のバンド構造が調べられたほか、各種光学材料の吸収、反射特性などが調べられている。

2Cには垂直入射型分光器(Nikon/McPherson 225, 110~300nm)が設置されていて、半導体フォトダイオードの量子効率測定や当研究所材料部のグループによってモノシラン、ジシランや石英などの光吸収スペクトル測定に利用されている。

(3) BL 3

BL 3は先に述べたように光学標準研究用のビームラインである。現在、縦分散型のトロイダル回折格子分光器(格子はJobin Yvon社, 12.5~52.5 nm)が設置され、分光ビームは真空紫外域でのフォトダイオードなどの二次標準検出器の校正に利用される予定である。分光ビームの光子束の絶対計測には希ガス電離箱が用いられる。SRを一次標準光源にしようとする研究は、BL 3を途中で断ち切って観測用の窓をつけ、偏向や集光のための鏡を用いず直接発光点からのSRを利用して行われる。

(4) BL 3-1

BL 3-1はソルテック社専用のビームラインで、主としてSRリソグラフィの基礎研究用として1986年から1987年にかけて設置された。このビームラインにはSR照射野の拡大用のミラーからの反射光のスペクトル分布を調べるための小型

の結晶分光器(理学電機, 0.4~2 nm)とSR露光用の試料導入装置が組み込まれている。

(5) BL 4

BL 4はSRリソグラフィ専用のもので、所内外の利用者によって当初から現在に至るまでリソグラフィの基礎実験に使用されている。SR露光はBe窓を通して1気圧Heガス中から真空中で行われている。サブミクロン線幅のパターン位置合せ露光では、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・レーザ光源からの回折効果に基づいて得られる位置ずれ信号を光ヘテロダイン方式で検出するという新しい高精度位置合せ露光システムを完成させ、ウェハーパターン上へのレジストパターンの重ね合せが自動的に1秒程度で、しかも0.01 μmの精度で可能となっている。

5. 運転形態

TERASは月曜日の朝から立ち上げ、午後から電子を入射し、蓄積後は金曜日の夜までSRが利用できる。TERASへの電子入射は、通常4月~5月の3週間と正月休み以外月曜日は15時まで、火~金曜日は11時までで終了することになっている。入射・蓄積された電子は24時まで使用者希望のエネルギーで貯蔵されている。24時以後は電子のエネルギーを600か500 MeVにエネルギーを下げて翌朝の入射時まで真空槽の枯しもかねて貯蔵する。昼夜連続運転時には常時1人が泊り込んでいるが、金曜日の夜か土曜日の昼に運転を停止する。

電子入射器として電子リニアックを使用しているが、電子入射前1時間から電子銃のウォームアップを始める。入射は電子リニアックの運転に1人、リングも1人でやれるが、電子蓄積後、電子エネルギー上昇時には急激な負荷変動によって空洞の温度が変化するためRF空洞からの反射電力の制御に注意する必要がある。入射作業は研究員が交代でやっているの、電子エネルギー上昇の

とき蓄積電流をこぼすことがあって所定エネルギーにしたときの電流値は100mA位から200mA程度にばらつく。電流の寿命は先に述べたように100mAで10時間程度になっている。運転と保守は量子技術部高エネルギー放射線研のグループと岡部計測工業所が中心となっていて行っているが、稼動し始めてから7年になるので、リニアック側のSIPのダウンやパルサーなどの故障が多くなってきている。信じてもらえないと思うが、500 MeV電子リニアックと800 MeVリングの表向きの保守点検費はマイナスシーリングのあおりで筑波移転後ずっと128万円/年である。経常研究費や利用者の消耗品費等でこれを補っているのが現状であるが、それでも総額で400万円程度で保守点検を行っている。なんらかの対策が必要である。