

# SOR-RING

佐々木泰三 (東大教養)

SOR-RINGは核研の1.3 GeV 電子シンクロトロン(ES)に付設された分光学専用の300 MeV電子Storage Ringである。

SOR(シンクロトロン軌道放射)を用いる光学・分光学の研究は核研においてすでに12年余の歴史をもち、当初750 MeV、現在1.3 GeVの最高エネルギーで運転されるESに光のとり出し口をつけて、原子・分子・固体の光吸収・光電子放出の研究、宇宙物理学やプラズマ物理学に用いられる装置の較正や開発等に利用されてきた。分光学のような、従来は小規模の実験装置で個別におこなわれていた研究が、ESのような日本に1つしかない巨大装置を用いて共同研究を進めるについては少からぬ行政的・技術的困難がつきまとうものであるが、それにも拘らずこのような研究が今日まで継続され、むしろますます発展の形勢にある、こののは、SORが紫外・軟X線の領域( $\lambda = 10 \sim 1000 \text{ \AA}$ )において、分光学用光源として他のものがなるものよりも圧倒的にすぐれているという事情による。SOR-RINGはESによってつけられてきた、SOR物性研究の延長線上に生じた第2段階の計画である。ESのSORを利用する研究の実績がすでにあり、ESも健在であるのに、それよりも電子エネルギーの低い、従って実用スペクトル範囲のせまい装置をわざわざつくった理由は次のとおりである。(1) ES-SORの利用者がよすぎで要求をみたしきれない。(2) SynchrotronよりもStorage Ringの方が光源としてすぐれている(安定性・真空度・強度等)。(3) エネルギーの低い装置にはそれなりの利点がある(安全性・光源との距離・長波長側強度・スペクトル純度)。(4) 専用料としての利点がある(スペクトル・輝度・寿命の制御、メンテナンス等)。とくにES-SORを利用した研究成果や、諸外口における発展によって、原子の内殻準位からの励起とその緩和過程には従来の可視・紫外領域の分光学にはなかった多くの新しい問題が提起され、当面の分光学の最も実り多い領域となりうるという認識が高まってきた。そのため新設のSOR-RINGは一番利用者が多くと予想される $\lambda > 100 \text{ \AA}$ の軟X線領域、あるいは原子の中間的な内殻準位にねらうを定め、それ以下の短波長領域は従来通り核研ESの利用をつける、という考えから、エネルギーを300 MeVに定めたのである。この装置を分光学専用料としてつくりたい、という提案は1965年秋、INS-SORグループの総会でできまり、1966年春に物研連に提出され、SOR分光学研究を推進するという一般的な要請とともに、核研・物性研・プラズマ研の3所長が協力して実現をはかるといふ申しあわせがおこなわれた。うすうすな曲折を至ったこの計画は結局核研の特別設備としてとりあげられることとなり、1971~3年度に総額7000万円の予算で建設され、1974年度に総合調整をおこなない、試運転に成功した。建設の費用は29ほか、三菱財団科学研究奨励金(70,71年度)、文部省科研費(一般A, 74年度)にも負っている。

さて、リングの性能および各部の定数を表1にまとめておく。スペクトルの形をきめるのはEと $\rho$ であって、 $\rho$ は1.1 mとした。 $\rho$ を固定し、Eをパラメーターとして電子1個が毎秒1 Aの波長中に放出する光子数を波長の函数としてあらわしたものが表1図である。300 MeVのとき、

表1 表 SOR-RINGの性能 (設計値)

電子エネルギー	$E = 300 \text{ MeV}^*$	$\beta$ -tron 振動数	$\nu_x \cong \nu_z \cong 1.20$	
電流(300MeVにおける最大値)	$I = 100 \text{ mA}$	$\beta_x$ の平均値	$2 < \bar{\beta}_x < 2.5 \text{ m}$	
電子数( )	$N_0 = 3.6 \times 10^{10}$	$\beta_z$ " "	$2 < \bar{\beta}_z < 2.4 \text{ m}$	
寿命(300MeV, 100mA)	$\tau > 1 \text{ hr}$	Q磁石の磁場勾配(K)の範囲	$0 < K < 7 \text{ m}^{-2}$	
偏向(B)磁石の曲率半径	$\rho = 1.10 \text{ m}$	" Kの中心値	$K_F \cong K_D \cong 4.6 \text{ m}^{-2}$	
" 磁束密度	$B = 9.09 \text{ kG}$	軌道延長率(= $\frac{dL}{dE}$ )	$\alpha_c \cong 0.9$	
" n値	$n = 0.5$	$\beta$ -tron 振動の減衰時定数	$\tau_x \cong \tau_z \cong 54 \text{ msec}$	
全軌道長	$L = 17.4 \text{ m}$	Synchrotron 振動の "	$\tau_s \cong 27 \text{ msec}$	
B磁石の長さ	$L_B = 0.864 \text{ m}$	ビームの大きさ	$S_x \cong 2.4 \text{ mm}$ $S_z \cong 1.7 \text{ mm}$ $S_L \cong 300 \text{ mm}$	
4重極(Q)磁石の長さ	$L_F = 0.10 / L_D = 0.20 \text{ m}$	リング内平均気圧(無負荷)		$P = 1 \times 10^{-10} \text{ Torr}$
各直線部の長さ	$L_S = 1.31 \text{ m}$	" (全負荷)		$= 1 \times 10^{-9} \text{ Torr}$
軌道運動の基本周波数	$f_0 = 17.24 \text{ MHz}$	総排気速度	$S > 4500 \text{ l/sec}$	
空洞の共振周波数	$f = 120.66 \text{ MHz}$			
バンチ数	$h = 7$			
RF電極電圧	$V_{RF} = 7 \text{ kV}$			
放射損失	$U_{rad} = 0.65 \frac{\text{keV}}{\text{el. turn}}$			

\* 400MeVまで増強可能

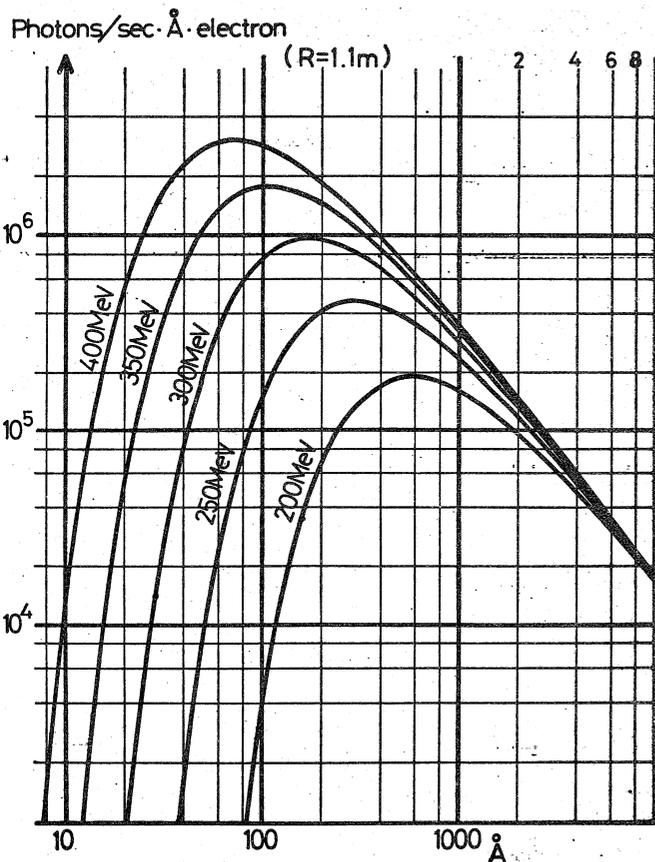


表1図 SOR-RINGの軌道放射スペクトル

スペクトルのピークは173Åにあり、ピーク強度の1桁下(10<sup>5</sup>のレベル)までを実用範囲とすれば、40Åから2500Åまでがこの範囲に入る。E=400MeVでは短波長端は13Åまでのウツることになり、一方250MeV以下に下げると100Å以下は急速によわくなる。電子E=400MeVで軌道にためた後、Eをかえることは容易にできるので、軟X線領域の広い範囲で同折格子の高次光をよくまなひ、純度の高い1次光によって測定をすることが出来る。連続スペクトルの場合、測光技術のみで高次光の影響を分離するのは大変むづかしく、この点は小型専用機の大きな強みである。エネルギーを上げることのメリットは単にスペクトルのみならず、以下にのべる電子数と寿命の積(Touschek limit)を大きくす

る、という点にもある。

光の強度はもし  $E$  が一定ならば当然電流  $I$ , 従って軌道に貯えられた電子数  $N$  に比例する。電子はリング内の残留気体分子による散乱 ( $\propto \tau_g^{-1}$ ), あるいはビーム内の電子同士の衝突 ( $\propto \tau_e^{-1}$ ) によって徐々に軌道から失われ、その半減期 (= 寿命)  $\tau$  は Single beam machine では  $\tau^{-1} = \tau_g^{-1} + \tau_e^{-1}$  で与えられる。  $\tau_g, \tau_e$  はそれぞれ low current limit, low pressure limit での  $\tau$  として測定されており、多くのデータがある。電子が軌道から失われるのは何れの場合にも、RF 電極を通過する電子の見る位相が安定なシンクロトロン振動の範囲をこえることによつて生ずるので、RF 電圧  $V_{RF}$  が高いほど捕獲率は高くなる。十分大きな  $V_{RF}$  に対しては、  $P = 1 \times 10^{-9}$  Torr のとき  $\tau_g \approx 20$  hr となることが理論的にも実験的にも知られているので、この程度の平均圧力がえられるならば  $\tau \approx \tau_e$  と考えてよい。その場合、時刻  $t=0$  で軌道に貯えられた電子数  $N_0$  が、時刻  $t$  で  $N(t)$  になるとすれば、その関係は  $N(t) = N_0 (1 + N_0 \Gamma t)^{-1}$  で与えられる。ここで  $\Gamma$  は  $E, V_{RF}$ , およびビームの体積  $V$  で定まる定数で、  $V$  に反比例し、  $E^{-5.5}$  に比例するという実験結果がある。従つて、半減期  $\tau \approx \tau_e = (N_0 \Gamma)^{-1}$  はビームの密度に逆比例する。そこでもし  $E, V$  が一定ならば、  $N_0 \tau$  の積は一定であつて、貯える電子数をよせるとすれば寿命は短くなり、大きい  $\tau_e$  (安定性) を求めるならば大きな電流 (強度) はえられなう、という二律背反につき当たることになる。前述のように、  $E$  を大きくすることは  $N \tau$  の積を大きくするのにきわめて有効であるが、何れにしても  $E \leq 1$  GeV のリングでは  $\tau_e$  が最も重要な役割を演ずることが知られている。従つて、一定の  $E$  で  $N \tau$  の積を大きくするには  $V$  を大きくする他ない。  $N_0$  と  $\tau_e$  とをどう選ぶかは強度と安定性のかねあひで妥協点を定めることには他ならない。我々の場合、先ず分光測光上の安定性の目安として、また入射の頻度をなるべく少くするという配慮から  $\tau = 1$  hr とし、300 MeV における Touschek limit として  $I = 100$  mA ( $N_0 = 3.6 \times 10^{10}$ ) を与えるよりのビーム体積  $V$  を求め、その条件を満足するよりの軌道定数を設定した。100 mA というのは  $\lambda > 100 \text{ \AA}$  の領域で核研 ES が 1.3 GeV, 10 mA で運転されるときよりも大きな強度を与え、SOR-RING が軟X線発生装置としてのメリットを十分主張しうる値である。

※2 図に示すリングの磁石構成は Orsay のリング ACO と同型で、8 個の偏向磁石 ( $B_1 \sim B_8$ ) と 4 個の四重極磁石の triplet ( $Q_1 \sim Q_4$ ) とから成り、分離并能型の外観をもっているが、分光専用リングとしての要請をみたすため、下記の特徴をもっている。すなわち、  $B_1 \sim B_8$  は磁場勾配  $m = 0.5$  の弱収斂型になっており、垂直方向および水平方向の betatron 振動数  $\nu_z$  と  $\nu_x$  がほいほいしくなるよう設計した。これは両方向の振動を結合させてビーム断面を大きくし、結局  $N_0 \tau$  を大きくすることを意図したもので、この種の試みは例えば Wisconsin の 240 MeV Tantalus I でも報告されている。  $\nu_x \approx \nu_z \approx 1.20$  の値は更に、入射直後の電子軌道が 2 周目以後に入射点 ( $S_1$ ) の器壁からなるべく遠ざかるよりの set を数値的に求めて決めたものである。  $m = 0.5$  という値は 300 MeV での各種の振動が、放射損失によつて十分すみやかに減衰することを保証するという点でも都合がよい。入射のくりかえしは毎秒 1 回であるが、表に示す通り、  $\beta$ -tron 振動は約 0.05 秒で減衰し、安定軌道に近づく。一方  $Q_1 \sim Q_4$  の系はこの条件を中心に動作点を可変にし、最適化のための微調整に備えるほか、実験の目的に従つてビーム断面の形を制御するのにも用いられる。

設計値ではビーム断面の大きさは縦1.7 mm, 横2.4 mmとなっており, 試運転時の測定では約2 mm x 3 mmとなっている。

さて才2図に従ってリング全体の構成を簡単に説明しておく。入射点をよくむ直線部を $S_1$ として左まわりには $S_8$ まで8ヶ所の直線部があり, その偶数番はQ磁石( $Q_1 \sim Q_4$ )が占める。偏向部も同様に $B_1 \sim B_8$ があり,  $B_3 \sim B_6$ の4ヶ所にはSORとリ出し用のダクトがある。 $B_1$ にも細いSORダクトがついており, これにはモニター用のフォトマルが取付けられている。奇数番の直線部にはすべてSputter Ion Pump (128 l/sec) と Sublimation Pump (実効700 l/sec) が取付けられ, そのうち $S_7$ にはあらかじめ用のRotary PumpとMechanical Boosterがある。 $S_1, S_5$ には打込み用のパルス磁石( $PB_2, K_2$ )があり,  $S_3$ は高周波加速部である。 $S_7$ には各種のモニター (Čerenkov-monitor ČM6) ( $\beta$ -tron 振動測定子, 静電誘導型電流計) がとけりつけられている。

以下, 各部の特性を簡単にのべると, まず偏向磁石 $B_1 \sim B_8$ は巾120 mm, gap 45 mmの純鉄ブロックの磁極をもち, 9.09 kGの固定磁場で運転される。電源に余力があるので磁場は11.4 kGまで上げられるが, このとき $E = 376$  MeVとなり, スペクトルの实用限界は $15 \text{ \AA}$ までひきこまり,  $N_0$ でのTouscheK limitも大巾に緩和されるのである。試運転の結果では, 磁極端での磁場のしめ出しの効果で, 300 MeVの運転に必要な磁場は8.8 kGであった。従って最大エネルギーは更に13 MeVほど余力があることになる。8個のB磁石の中心における磁場のつよさのバラツキは $\pm 0.08\%$ , 据付精度は $\pm 0.07\%$ , 電流安定度は $\pm 0.03\%/day$ であった。 $n$ 値は抜きとり測定値では0.4とやや低く, また中心から外に向ってたれり傾向があるため, シムをつけて補正した。 $Q_1 \sim Q_4$ の各組はF(0.1 m)D(0.2 m)F(0.1 m)のtripletで, 動作角で $K_F \approx K_D \approx 4.6 \text{ m}^{-2}$ , 磁極の表面は双極面, 内接円の直径は75 mmである。

RFは核研ESが750 MeVで運転していたときの自励振方式の空洞・発振器一式を転用し, バンチ数7に相当する120.66 MHzを中心として,  $V_{RF} = 7 \text{ kV}$  (最大8.5 kV)で運転し, 10 mA程度の負荷に対して十分動作することを確認した。49年度に科研費(一般A)で製作した才2代のRF系は, 他励振方式, 最大出力11 kW, gap電圧20 kVを供給でき, 空洞全体が真空容器となる。50年10月にはこの才2代RFへの切りかえがおこなわれ, エネルギーと電流の増強を試みる予定である。

真空系は4ヶ所の直線部( $S_1, S_3, S_5, S_7$ )に配置された集中排気系のほか, B磁石の直流磁場を利用する分布排気素子が $B_1 \sim B_8$ の全部に組み込んであり, 後者は $P = 1 \times 10^{-8}$  Torrで1200 l/sec以上の総排気速度をもつと推定される。リング真空容器のやき出しは, 直線部とポンプは通常のマントル・ヒーターでおこなうが, ドーナツに関しては1200 ~ 1500 Ampの交流を直接流して200 ~ 250°Cで数10時間おこなう。3昼夜のやき出しの後,  $10^{-5}$  rangeでイオン・ポンプを作動させると, 48 hr後は $1 \times 10^{-10}$  Torrを得ることが出来る。枯れた状態ではTi Getterを作動させると更に $10^{-11}$  Torr rangeの中程まで下げることが出来る。但し, 現状では分布排気素子とRF電極部のセラミックとはこの方法ではbakeできないので, ビームを入射するとはじめの内この2つが新しいなガス放出源となり,  $I = 1 \text{ mA}$ で圧力は $1 \times 10^{-8}$  Torrまで上昇し, このときでは約2.5 hrであった。この値はほとんど残留気体分子の散乱によるものと考えられる。しかし

諸外口の例をみると、長時間連続運転するとSOR自身のせき出し効果で次第に系は枯れてゆき、ガス放出は初期時の $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 程度におちつくもよすである。我々の系がTousdek limitに達するには、長期間(少なくとも1ヶ月程度)の連続運転を全行しなければならぬので、これは今後の課題である。

ESからリングへのビーム転送は次の図のようにしておこなわれる。ESで加速される電子が300 MeVに達したとき、ES内の直線部に組み込まれたKicker magnet ( $K_1$ )が働き、ビームを12.1 mrad外へ振る。ESでの電子の周期は116 msec, リングでは58 msec であるから、その差58 msec 以内にパルスを立て、58 msec 以上のflat top をつくる必要がある。 $K_1$ はferrite coreをもつone turn coilで、spark triggerにより、50 msecの立ち上り(±5 msec程度のjitterがある)で動作する。次の直線部では1kHzの半波正弦波のflat topを利用する偏向磁石( $PB_1$ )により、ビームは12.5°曲げられてESの外へ出る。ビーム輸送系(BT)は、2つの偏向磁石( $Bt_1, Bt_2$ ), 6個のQ磁石( $Qt_1 \sim Qt_6$ ), 5個のČerenkov monitor, (ビーム位置観測用,  $CM_1 \sim CM_5$ ), 2個の上下調整磁石( $Z_1, Z_2$ )から成り、距離は約20 m, ESとリングの双方と厚さ50  $\mu\text{m}$ のカプトン膜で仕切られ、全体として $10^{-5} \sim 10^{-6}$  Torrの真空系を構成する。入射部では再びパルス偏向磁石( $PB_2$ )で14°まげ、中心軌道に平行に35.5 mm外側に入射する(オ4図参照)。リングが超高真空であるのに、 $PB_2$ は珪素鋼板を用いるSeptum型磁石であるため、この部分はリングとは別の真空容器に入れられ、入口は $PB_2$ のうしろのカプトン膜で仕切っている。後で、入射部の器壁は1周後の電子の軌道のじやまになる。そこで入射点( $S_1$ )の反対側( $S_5$ )でもう1つのKicker ( $K_2$ , one turn 空芯コイル)を働かせ、ビームを中心軌道のまわりに移さねばならぬ。入射後のビーム位置の測定には $S_7$ に設置したČerenkov monitor  $CM_6$  が主として用いられる。

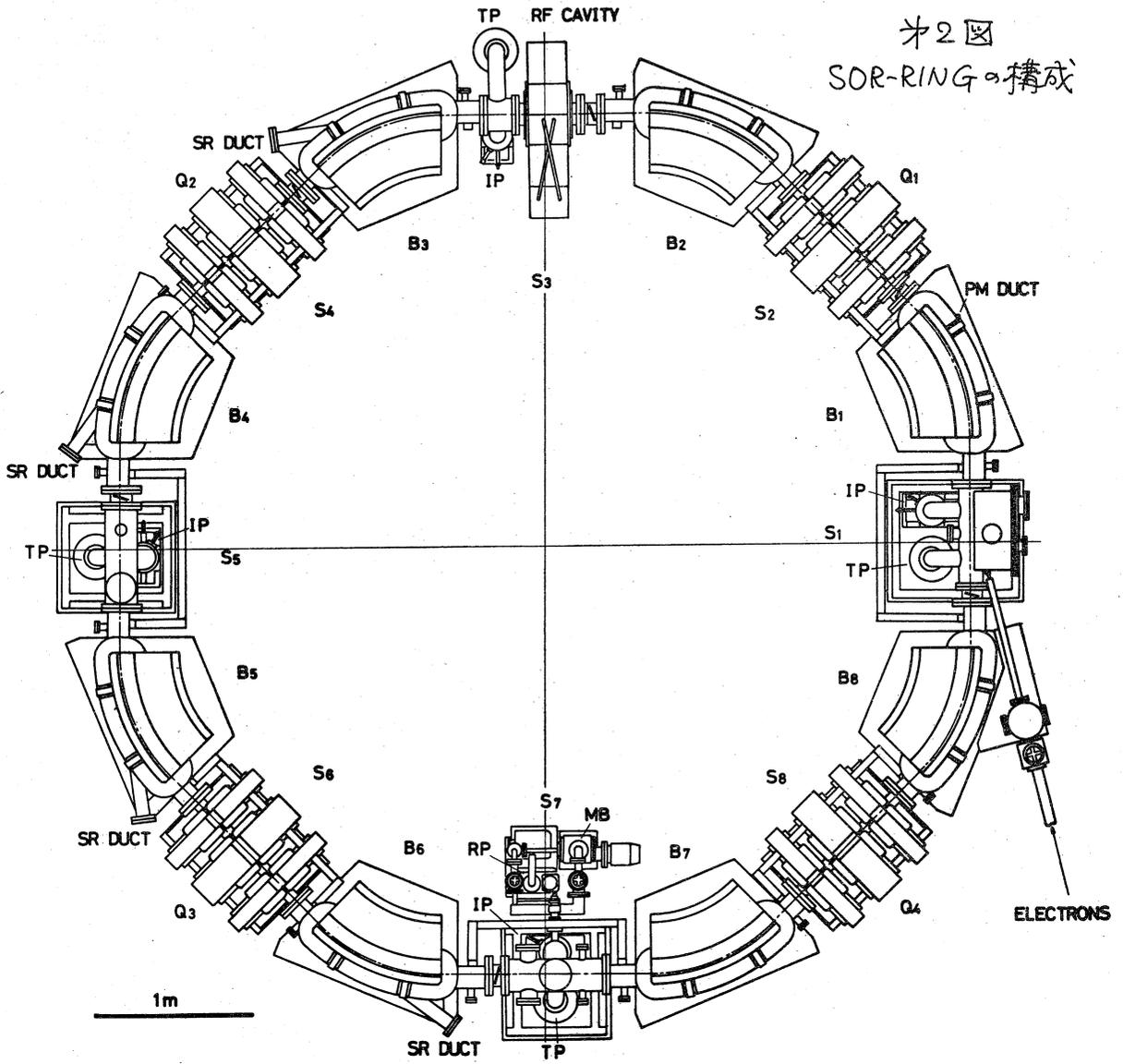
さて、試運転は49年7月以後段階的におこなわれ、ビーム転送試験は写真フィルムとCMにより、貯めるテストにはこの他、フォトマル、TVカメラ、静電誘導型電流計をモーターとして利用した。全系の総合試験は12月と3月におこなわれ、最大10 mA程度の電流をためることができたが、入射効率はまだ改善の余地が多い。ビーム転送に当っては、ESの運転にも、ESを利用する高エネルギー実験にも何ら妨害にならぬこと、また電子を貯めた後のリング近傍の放射線レベルも十分低いことが確認された。

50年度は前半にRF系更新のための建築工事、各種試験がおこなわれ、後半に新RFによる運転再開が予定されている。SOR-RINGは10月以後、核研から物性研に移管され、新設の物性研付属・軌道放射物性研究施設(施設長・神前教授)が客員部門と協力してこれを管理する。この施設は目下のとおり発足早々で、人員・予算ともきわめて不十分であるが、その充実にともない、リングの性能の向上、付帯設備の整備が進めば、わが国におけるSORによる軟X線・極紫外の分光学の共同研究は再び大きく前進するであろう。

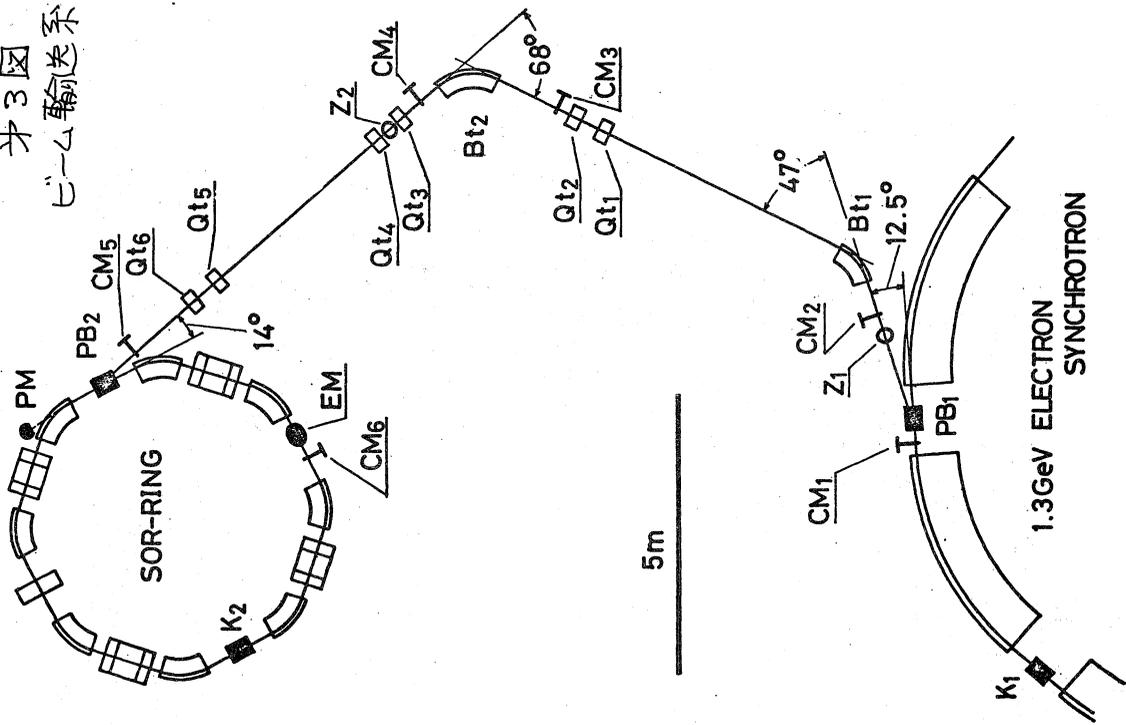
SOR-RINGの建設に参加した作業グループの主要メンバーは次のとおりである。

佐々木泰三・山口重雄・石井武比古・三谷七郎・渡辺誠・佐藤繁・石黒英治・宮原恒星・北村英男/  
山口省太郎・山川達也・片山武司・福島敏孝・辻川浩/菅原英直・井口裕夫・永倉一郎・遠藤真広  
杉浦秀雄

※2図  
SOR-RINGの構成



オ3図  
ビーム輸送系



オ4図  
入射部の構造

