

解説

UVSOR 光源の現状と将来の展望

磯山 悟朗

分子科学研究所 UVSOR 施設

Present Status and Future Prospects of the UVSOR Light Source

Goro ISOYAMA

UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

The accelerator system for the synchrotron radiation source at the Institute for Molecular Science consists of a 750 MeV electron storage ring and a 600 MeV synchrotron for the injector. The present status of the light source including insertion devices, single bunch operation for time resolved experiments, stabilization of the electron beam in the storage ring, and the new control system is described. Research activities for the future light source are presented. One of them experiments to control the bunch length on the storage ring by means of varying the momentum compaction factor. The momentum compaction factor was reduced by more than two orders of magnitude. The other is free electron laser experiments on the storage ring. Recently, the first lasing was obtained around 470 nm.

1. 序論

分子科学研究所の UVSOR 光源加速器システムは 1981 年に建設予算が認められ、SOR-RING、PF と TERAS に次ぐ、我が国で 4 番目のシンクロトロン放射専用光源として 3 年計画で建設が開始された。1983 年 11 月 10 日、電子ストレージリングに初めてビームを貯めることに成功した。それ以来、光源加速器システムは順調に稼働している。一般的に、光源加速器は建設が終了した時点で完全な性能を発揮するわけではない。運転開始後に、設計や建設時に予測されなかった現象が現れ、それに対応する改良や改造が行われる場合もあれば、シンクロトロン放射利用実験の進展に伴

う新たな要求に応えるために性能向上を計る場合もある。UVSOR 光源加速器システムの場合もその例にもれず、運転開始以来、ユーザー実験用運転やマシンスタディーを通じて明らかになった事柄に基づく現有機器の改良や新しい装置の導入が行われてきた。この他に将来の光源の開発を目指した基礎研究も行っている。UVSOR 光源加速器が稼働してから 10 年が経過した機会を取らえ、加速器から見た UVSOR 光源加速器の現状と将来の展望について述べる。

2. UVSOR 光源加速器システム

UVSOR 光源加速器は、真空紫外及び軟 X 線領

域の光源である 750MeV 電子ストレージリングとその入射器である 600MeV シンクロトロンからなる¹⁻⁷⁾。図 1 に UVSOR 施設の平面図を示す。加速器システムは地下に収められている。15MeV の線形加速器で加速された電子ビームは、シンクロトロンに入射され 600MeV まで加速される。シンクロトロンの周長は 26.6m で、ストレージリングの周長の丁度半分である。そのため、単バンチ運転などに必要なストレージリングへの同期入射がやりやすくなっている。シンクロトロンの加速周波数は 2.6Hz である。シンクロトロンで加速された電子ビームは、そのエネルギーが 600MeV に達すると速い取り出し用キッカー磁石で蹴り出され、取り出し用のデフレクター磁石を通り、ストレージリングへのビーム輸送路に導かれる。シンクロトロン及びビーム輸送路の床面はストレージリングのそれより約 3m 低い位置にある。電子ビームはそのままストレージリングの床下を通り、2 台の垂直偏向磁石で立ち上げられた後、ストレージリングの内側から入射される。この入射ラインの配置により、ストレージリングの全周に実験用ビームラインを設置することが出来る。ストレージリングには、ビームサイズを決める主要な量であるエミッタンスが小さく、エネルギー分散がない長い直線部がとれるダブルベンドアクロマートと呼ばれる磁石配列を採用している。周長は 53.2m である。ストレージリングは、2 台の偏向磁石と 4 種 7 台の四極磁石を単位にして 4 回対称の磁石配列を持ち、長さ 3.75m の長い直線部が 4 ヶ所ある。その内の 1 本は入射用のインフレクター磁石と呼ばれるパルス電磁石が設置されている。電子ビームの周回方向に従い入射点から反時計まわりを見ると、次の長い直線部にはアンジュレータが設置されておりビームライン (BL) 3A1 にアンジュレータ光を供給している。3 番目の長直線部には自由電子レーザー実験に使用する光クライストロン型のアンジュレータが設置されている。このアンジュレータはレールの上に置かれており、自由電子

レーザーの実験を行なう時にだけリングに挿入される。4 番目の長い直線部には高周波加速空洞と超伝導ウイグラーが設置されている。超伝導ウイグラーからのシンクロトロン放射は BL7A に導かれる。超伝導ウイグラーの運転を行わない時は、偏向部からの光を利用する。UVSOR 加速器システムの主なパラメータを表 1 に示す。

3. 運転状況及び運転スケジュール

ユーザー実験時のストレージリングの運転エネルギーは 750MeV である。初期電流は、多バンチ運転の時には 200mA であり、単バンチ運転の時 50mA である。入射直後のビーム寿命は、多バンチ運転の時は 240 分、単バンチ運転の時は 60 分程度である。入射用シンクロトロンの最大加速エネルギーは 600MeV であるので、入射は 600MeV で行い、入射終了後ストレージリング内で電子ビームを 750MeV まで加速する。入射の繰り返しはシンクロトロンの運転周波数 2.6Hz と等しく、入射速度は、多バンチ運転の時 1 ~ 2mA / 秒、単バンチ運転の時 0.1 ~ 0.3mA / 秒である。従って、ビーム蓄積に必要な時間はそれぞれ、2 ~ 3 分と 3 ~ 8 分程度である。多バンチ運転の時には、入射に必要な時間の大部分はユーザーのストレージリング室からの退出とその確認に使われている。

マシンスタディー時には、多バンチ運転では 700mA、単バンチ運転では 100mA 以上のビーム電流を貯蔵することが出来る。ユーザー実験時の最大ビーム電流を上記の値に制限している理由は、多バンチ運転では主にビーム不安定性であり、単バンチ運転ではビーム寿命の問題である。

光源加速器は、毎週月曜から金曜日まで運転される。月曜日は、マシンスタディーに使われる。火曜から金曜日までユーザー実験のために運転する。通常、運転時間は午前 9 時から午後 6 時までであるが、木曜日は午後 9 時まで延長している。ビームの入射は、朝 9 時と午後 1 時に行う。木曜日はこれに加え、午後 5 時に 3 回目の入射を行う。最近

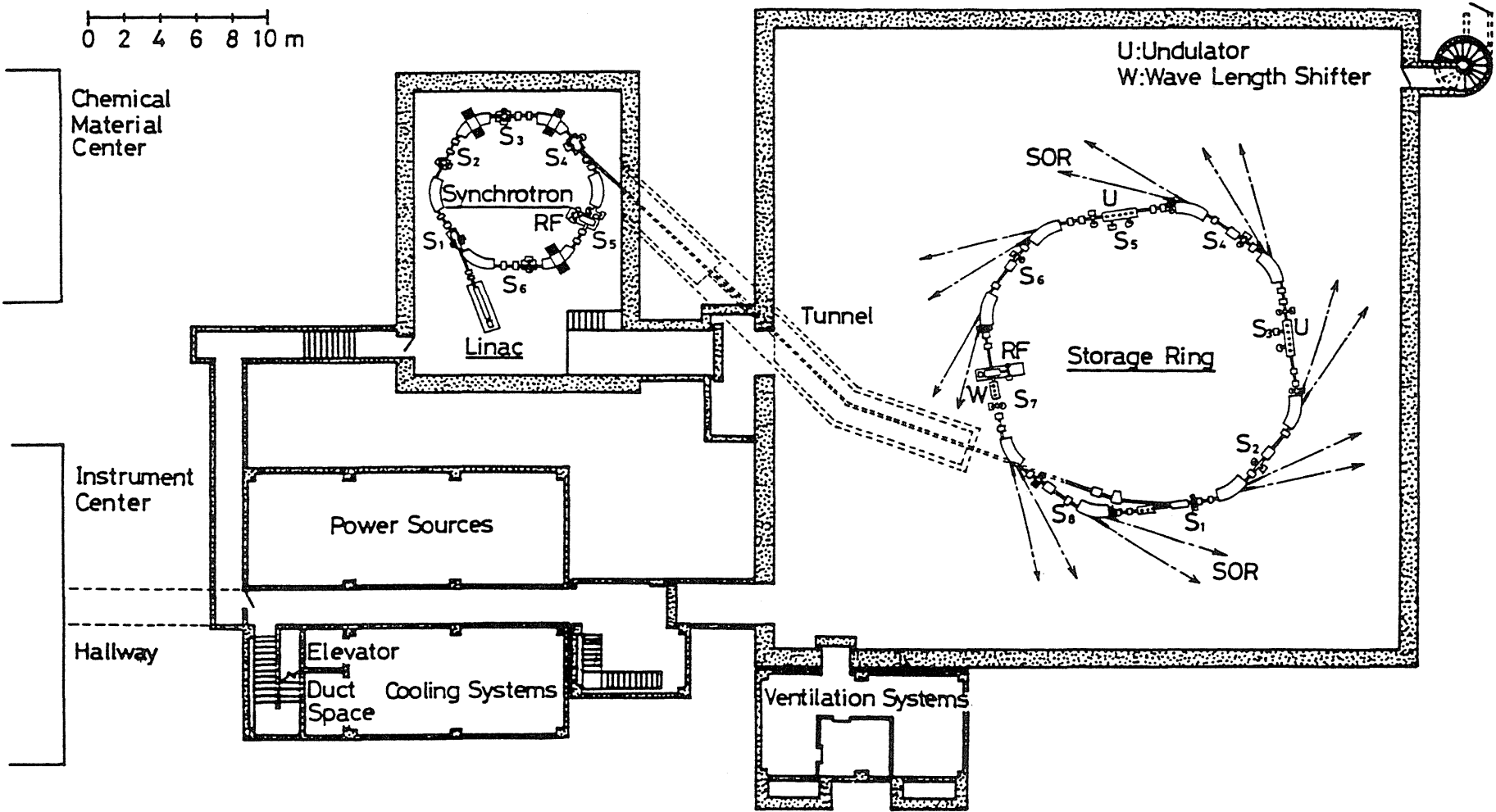


Fig.1 Ground plan of the UVSOR facility.

Table 1 Main parameters of the UVSOR accelerator complex

Linac

energy	$E = 15 \text{ MeV}$
frequency	$f_{\text{RF}} = 2.856 \text{ GHz}$

Synchrotron

energy	$E = 600 \text{ MeV}$
beam current	$I = 32 \text{ mA}$
circumference	$C = 26.6 \text{ m}$
superperiodicity	$N_{\text{superperiodicity}} = 6$
bending radius	$\rho = 1.8 \text{ m}$
harmonic number	$h = 8$
RF frequency	$f_{\text{RF}} = 90.115 \text{ MHz}$
repetition rate	$f_{\text{rep}} = 2.6 \text{ Hz}$

Storage Ring

energy	$E = 750 \text{ MeV}$
critical energy of SR	$\varepsilon_{\text{C}} = 425 \text{ eV}$
beam current (nominal)	
multi-bunch	$I = 200 \text{ mA}$
single-bunch	$I = 50 \text{ mA}$
beam lifetime	$\tau = 240 \text{ min. at } I = 200 \text{ mA}$
circumference	$C = 53.2 \text{ m}$
superperiodicity	$N_{\text{superperiodicity}} = 4$
bending radius	$\rho = 2.2 \text{ m}$
betatron wave numbers	
horizontal	$Q_{\text{X}} = 3.16$
vertical	$Q_{\text{Y}} = 2.65$
momentum compaction factor	$\alpha = 0.0354$
RF frequency	$f_{\text{RF}} = 90.115 \text{ MHz}$
RF voltage	$V_{\text{RF}} = 46 \text{ kV}$
natural emittance	
horizontal	$\varepsilon_{\text{X}} = 1.15 \times 10^{-7} \pi \text{ m rad}$
vertical ^{a)}	$\varepsilon_{\text{Y}} = 1.15 \times 10^{-8} \pi \text{ m rad}$
beam sizes	
horizontal	$\sigma_{\text{X}} = 0.39 \text{ mm}$
vertical ^{a)}	$\sigma_{\text{Y}} = 0.27 \text{ mm}$
bunch length	$\sigma_{\text{l}} = 170 \text{ psec}$

a) 10% coupling is assumed.

は、ユーザーからの要求があれば運転時間を延長しているが、再度の入射は行っていない。

4. 挿入光源

UVSOR ストレージリングに設置されている挿入光源とその主なパラメータを表2に示す。前述のようにアンジュレータ1台と超伝導ウイグラー1台がユーザー実験に使われている^{8, 9)}。BL3A1用

のアンジュレータは、永久磁石を使ったHalbachタイプの水平振動型アンジュレータである。周期長は8.5cmで周期数25である。建設当初は永久磁石にサマリウムコバルトを使用していたが、その後磁場強度を上げるため鉄ネオジボロン合金の永久磁石に交換した。アンジュレータ放射の基本波で8から50eVのエネルギー範囲をカバーするが、3または5次の高調波を使うと100eV程度までのエ

Table 2 Insertion devices at the UVSOR storage ring.

Undulator for BL3A

period length	$\lambda_u = 85 \text{ mm}$
number of periods	$N_p = 25$
photon energy of the 1st harmonic	$\epsilon_1 = 8.1 - 54.4 \text{ eV}$
magnet gap	$g = 20 - 80 \text{ mm}$
magnetic field	$B_0 = 4.62 - 0.7 \text{ kG}$
deflection parameter	$K = 3.67 - 0.56$
magnet structure	pure type with NdFeB

Superconducting Wiggler for BL7A

number of poles	$N_p = 3$
maximum magnetic field at the central pole	$B_0 = 4 \text{ T}$
critical energy of synchrotron radiation	$\epsilon_c = 1.5 \text{ keV}$

Optical Klystron for the Free Electron Laser

undulator section	
period length	$\lambda_u = 111 \text{ mm}$
number of periods	$N_p = 8 + 8$
photon energy of the 1st harmonic at E = 500 MeV	$\epsilon_1 = 1.7 - 13 \text{ eV}$
magnet gap	$g = 30 - 80 \text{ mm}$
magnetic field	$B_0 = 4.7 - 1.1 \text{ kG}$
dispersive section	
length	$\lambda_d = 370 \text{ mm}$
magnet gap	$g = 30 - 43 \text{ mm}$
magnet structure	pure type with SmCo

エネルギー範囲の光を利用することが出来る。このアンジュレータには軌道補正用の磁石を使用しておらず、磁極ギャップの変更は現在のところビーム入射時にのみ行っている。アンジュレータのギャップを自由に変えたいというユーザーからの要求が有るので、近い将来アンジュレータの上流及び下流側に補正用電磁石を取り付け、マシンスタディーを通じてその可能性を検討したい。

BL7A用の超伝導ウイグラーは、ビーム軌道上の最大磁場が4Tの水平振動型3極ウイグラーであり、シンクロトロン放射の臨界エネルギーは、1.5keVである。最初は、液体ヘリウム汲み置き型の超伝導ウイグラーを使用していたが、運転に人手がかかり、維持が困難であったので、冷凍機を使用したヘリウムガス封じ込め型のウイグラーを導入した。図2に超伝導ウイグラーの3次元図を示す。鉄の磁極を使用した3組の超伝導コイルは液体ヘリウムで4.2Kに冷却されている。液体ヘリウム槽は、それぞれ20Kと80Kに冷却された2重の熱遮蔽板で囲まれ、断熱用の真空槽におさまられている。電子ビーム用の真空ダクトは80Kに冷却されている。ウイグラーの上部に2台のGM型の冷凍機が取り付けられている。このうちの1台は2重の熱遮蔽板を冷却し、他の1台は気化したヘリウムガスを再凝縮する。ヘリウム槽内の圧力は通常1気圧以下に保たれるため、ヘリウムガスの損失は無く、液体ヘリウムを補給する必要がない。超伝導ウイグラーは、コイルが収められたクライオスタット、冷凍機用のヘリウム圧縮機と超伝導コイル用電源より構成され、種々の被制御装置と数多くの監視パラメータがある。これらの制御と状態監視のため、現場にパソコンがおかれている。

ウイグラーが発生する強い磁場は電子ビームに強い影響を与える。この影響には、ベータトロン振動数の変化やベータトロン関数の変形を生じる線型磁場の効果と、ビーム寿命が短くなる非線型磁場による効果とがあり、共に電子ビームのエネ

ルギーが低いほど、ウイグラーの磁場が強い程大きい。UVSORの場合、線型磁場の効果が大きく¹⁰⁾、その補正をローカル補正と呼ばれる近傍の四極磁石を使用した補正と、グローバル補正と呼ばれる全体の四極磁石の収束力を変える方法の組み合わせで行っている。グローバル補正が必要なため、ベータトロン振動のずれに対する補正を行っているが、ベータトロン関数の補正は十分に出来ていない。電子ビームの入射は、通常の運転ではウイグラーを3Tに励磁して行う。入射終了後、まず電子ビームを600～750MeVに加速する。その後、ウイグラーの磁場を4Tまで励磁する。ビーム加速及びウイグラーの励磁は、後述の計算機制御システムを用い、ベータトロン振動数とビーム閉軌道位置の補正と連動して行う。

この超伝導ウイグラーは、1992年春に1カ月間、初めてユーザー実験用の運転を行なった。現状では、熱遮蔽板用の冷凍機の不調のため、3カ月以上の連続運転は困難である。現在、冷凍機の改造を行っており、近い将来、1年間の連続運転が出来るようになる見込みである。ウイグラーを運転した場合のビーム寿命は、運転しない場合に比べ1～2割短い。又、ビーム入射に必要な時間を短縮するため、入射時の励磁を4Tまで増やしたい。これらの問題は、ビームダイナミクスに対する補正をローカル補正だけで行えば解消できる可能性が有るので、調べてみたい。

5. 単バンチ運転

UVSORストレージリングの通常の運転モードは多バンチ運転であり、16個のバンチがストレージリング内を周回している。単バンチ運転は時間分解実験用の運転モードで、ストレージリングにただ1つのバンチを貯蔵する。UVSORストレージリングのバンチの長さは電子エネルギーが750MeVの時、半値幅で500ピコ秒であり、リングの周長で決まるバンチの周回時間は178ナノ秒であるので、この時間領域の現象を測定できる。ス

SUPERCONDUCTING WIGGLER

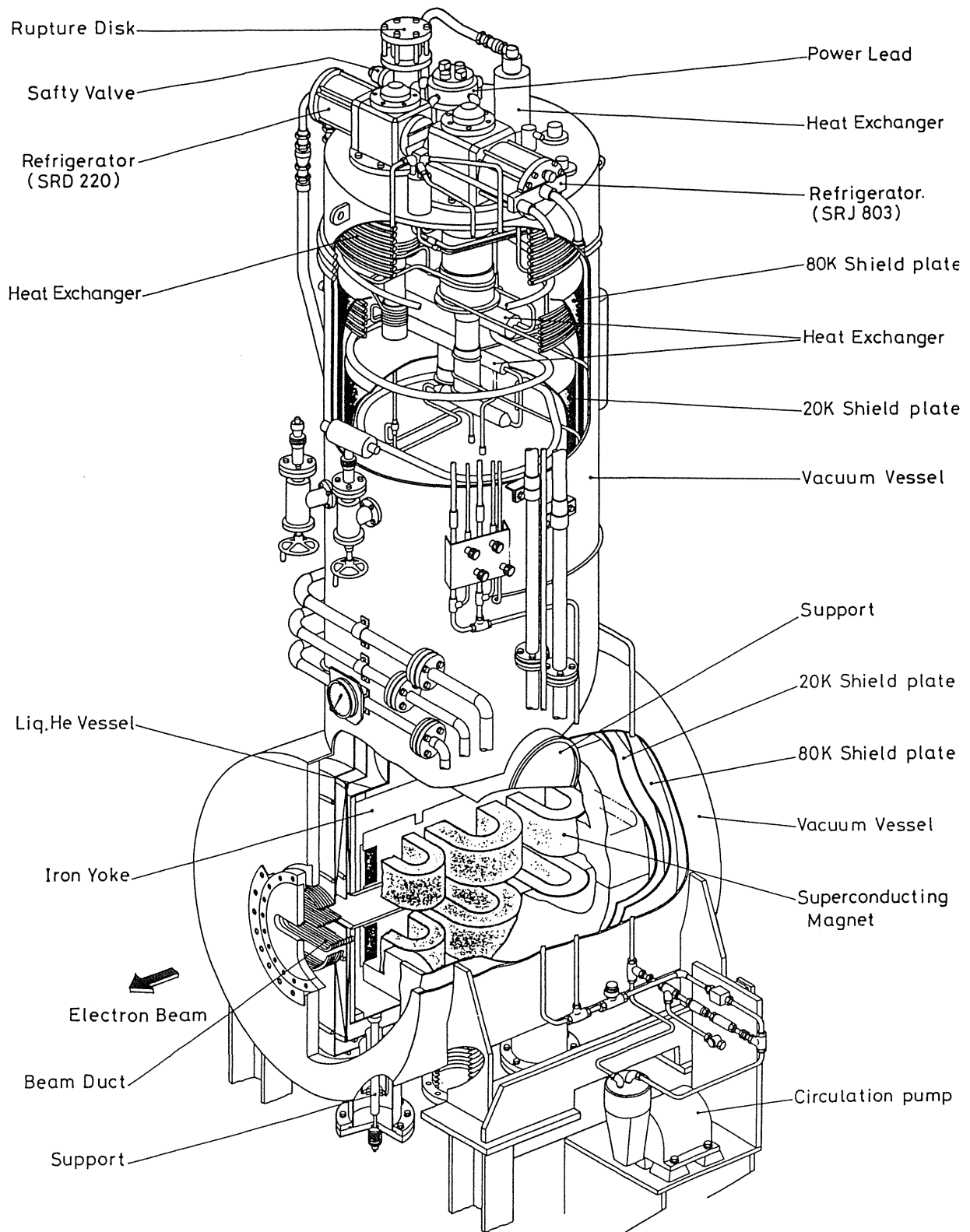


Fig.2 Three-dimensional drawing of the superconducting wiggler.

ストレージリングの単バンチ運転を実現するには幾つかの方法が有るが、UVSORでは入射用シンクロトロンを単バンチで運転し、同期をとってストレージリングに入射する方法を採用している¹¹⁾。シンクロトロンとストレージリングの高周波加速系の周波数は90.115MHzで共通であるが、シンクロトロンの周長はストレージリングの丁度半分であるので、シンクロトロンには8個のバンチが周回している。線形加速器から電子ビームを入射した後、PFKOと呼ばれる方法で1つのバンチを残し、他の7個のバンチを蹴り出す。このバンチをストレージリングの特定の位置に同期をとって入射する。

時間分解実験、特に寿命の測定では発光強度の変化を数桁の範囲で計測するので、単バンチの純度は特に重要である。ここで単バンチの純度とは、主なバンチ以外のバンチが存在する場合、その強度の主なバンチ強度に対する比として定義する。UVSORストレージリングの場合、ビーム入射直後の純度は 1×10^{-4} 程度であるが、時間の経過と共に増加し数時間後には1%近くまで悪化する。これはUVSORストレージリングで初めて見いだされた現象である¹²⁾。単バンチ運転の場合、バンチ内の電子密度が多バンチ運転の場合に比べると高いので、ビーム寿命はタウシェク効果と呼ばれるバンチ内の電子-電子2体錯乱で決まる。衝突した2個の電子は、各々そのエネルギーが正常な値より高い値と低い値を持つ。エネルギーのずれがバンチの入れ物であるRFバケットの許容値以上になると電子は失われる。通常、一旦失われた電子は2度と再びRFバケット内に戻ることは無い。しかしエネルギーの高い電子が、他のRFバケット付近にいる時、シンクロトロン放射を放出すると、このRFバケットに再び捕獲される可能性が出てくる。不純バンチはこの様な機構によって成長する。現在、スクレーパを電子ビームの近くに挿入して単バンチ純度を 1×10^{-3} 以下に保っている¹³⁾。

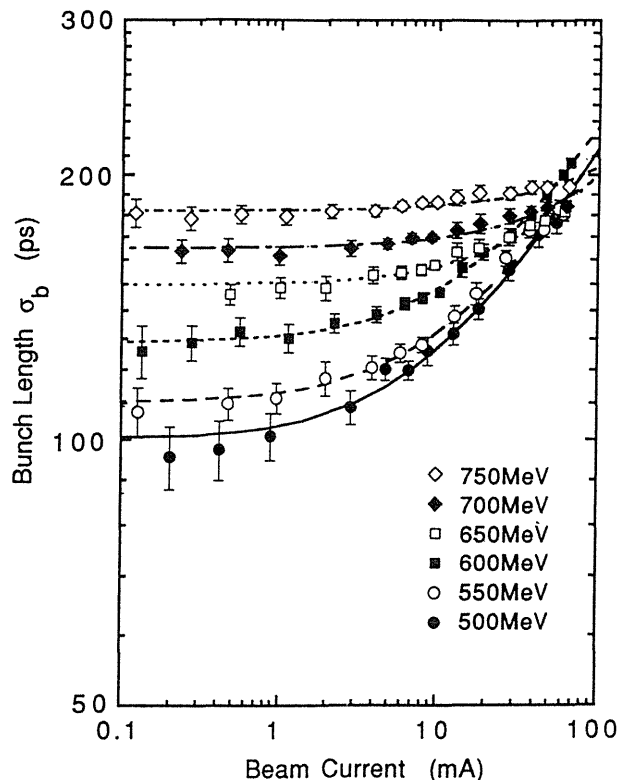


Fig.3 Beam current dependence of the bunch length. The various symbols indicate bunch length at the beam energies denoted in the figure. The rf voltage is maintained at $V_{RF} = 45.7\text{kV}$ throughout the measurement. The lines show theoretical bunch lengths calculated using potential-well distortion theory by the least square fit to the experimental data.

単バンチ運転での平均ビーム電流は、多バンチ運転でのそれよりも少ないが、バンチあたりの電子数は単バンチ運転の場合の方が遙かに多い。単バンチ運転でビーム電流を増やしていくと、バンチが長くなることが知られている¹⁴⁾。UVSORストレージリングでのバンチ長のビーム電流依存性を図3に示す¹⁵⁾。電子エネルギーが低いほど、バンチはビーム電流の増加と共に長くなる。バンチ長のビーム電流依存性より、UVSORストレージリングでのバンチが長くなる現象は、ポテンシャル歪みによるものと結論づけられた。ユーザー実験用の運転エネルギー750MeVでは、バンチ長はあまり変化しない。

6. 電子ビームの安定化

シンクロトロン放射光源としてのストレージリングの特徴は、光源の大きさを与える電子ビームの横方向の断面が小さく、その位置が変動しないことである。この特徴を壊す要因がビーム不安定性である。電子ビームの電流が大きくなると、それが発生する電磁波が真空槽や高周波加速空洞などを介して自分自身に作用し、電子ビームが集団的な振動を始める。この振幅が大きいとビームは真空槽に触れて失われてしまう。そこまで至らない場合でも、ビーム寿命が短くなったり、ビームの断面が大きくなり光源の性能が劣化する。UVSORストレージリングで観測されるビーム不安定性は、縦方向のバンチ結合型ビーム不安定性である。これは多バンチ運転の時に観測され、電子のバンチが高周波加速空洞の高次の共振モードを介して他のバンチと相互作用を行い、シンクロトロン振動と呼ばれるビームのエネルギー振動を励起する。この不安定性で電子ビームが失われてしまうことは無い。偏向部で発生するシンクロトロン放射を利用する場合、電子軌道にエネルギー分散があるので、水平方向のビームサイズが正常な場合に比べ大きくなる。一般に高周波加速空洞の共振モードの内、1番周波数の低い基本モードを加速周波数に合わせる。他方、2~3GHz以上の電磁波は加速空洞に連結されたビームダクトから洩れ出してしまふ。従って、高調波モードは基本波の周波数から2~3GHzの間に存在する。高周波加速周波数が低い場合には関連する高調波モードの数が多くなるので、このビーム不安定性を避けることは困難である。UVSORストレージリングでは現在、帰還制御法でこの不安定性をおさえている¹⁶⁾。これについては、春日氏による詳しい解説が放射光学会誌に掲載されている¹⁷⁾。動作原理は、バンチ毎のシンクロトロン振動の位相と強度をビームモニターで検出し、広帯域の高周波空洞にその振動を抑えるように電圧を加えてビームを安定化する方法である。通常の運転では、帰還制

御回路の位相などを調整してビームを安定化しているが、安定化の度合はビーム電流の減少に伴い変化する。また、日により帰還制御がかかりにくいことが有る。そのため以下に述べるデカップリング法と呼ばれる別の方法でこのビームを安定化することを計画している。

ストレージリングを周回している電子ビームに、主高周波加速電界に加え、周回周波数の整数倍の周波数を持つ弱い高周波加速電界を加えると、各々のバンチは異なったシンクロトロン振動数を持つようになる。この振動数のずれが十分に大きくなると各々のバンチが共通の振動数を持って振動することが不可能になり、縦方向バンチ結合型ビーム不安定性は安定化される。デカップリング法によるビームの安定化は既に、UVSORストレージリングで研究されており、ビーム電流が100mA程度までの安定化に成功している¹⁸⁾。ビーム電流に制御が有るのは、使用したRFパワーアンプの出力が低いために加速空洞のシャントインピーダンスが低かったためである。最近、共振周波数が主RF装置の3倍、即ち270MHz付近の加速空洞をストレージリングに取り付け、出力が1kWのパワーアンプを準備したので、更に高いビーム電流でのビーム安定化の実験を計画している。

7. 制御システム

UVSOR光源加速器システムは、建設以来、主として遠隔操作盤と電子ビームをストレージリング内で加速するための電子回路を使い運転されてきた。この制御装置では、例えば超伝導ウイグラーの運転など光源加速器の性能向上に制約を受けるため、最近、計算機制御システムを導入した¹⁹⁾。この制御システムは、光源加速器を種々のモードで運転できる柔軟なシステムである事と、制御システムの故障の為に光源の運転に支障をきたさない信頼性の高いシステムであることに留意して設計をした。新しい制御システムのブロック

ダイアグラムを図4に示す。制御システムは2台の小型計算機より構成される分散処理型のシステムである。一台はストレージリングを制御し、他の1台はシンクロトロンからストレージリングへのビーム輸送系と取り出し打ち込み系を制御する。操作卓として2台のワークステーションを使用している。この他に状態表示用に数台のカラーCRTを使用している。これらの機器はDECNETと呼ばれるネットワークを介して互いに接続されている。2台の小型計算機と2台のワークステーションは、DECNETを介してクラスター構造と呼ばれる配置を取る。その結果、これらの計算機は全てのディスクに直接読み書きが出来る。それぞれのCPU直下のディスクは、オペレーティングシステムの作業領域として使用されている。残りのディスクは、2台の小型計算機に共有されており、小型計算機間の通信にも使われている。共有ディスクの大部分に対して、オペレーティングシステムが自動的にディスクのバックアップを作成するディスクシャドウイングを行っている。制御対象機器は主にCAMACインターフェイスを用いて制御用小型計算機に接続されているが、1部にGPIBやRS232Cインターフェイスで接続されている機器もある。

ユーザー利用実験のための加速器システムの運転は、立ち上げ、入射、加速、再入射準備や停止などの一連の操作の繰り返しである。新しい制御システムは、これらの操作をメニューから選択することにより自動的に行うことが出来る。これらの操作は、主にコンダクトファイル及びデータファイルと名付けられた階層構造を持つファイルにより定義されている。そのため運転モードを変更するには、制御用プログラムを変更すること無しにファイルの内容を書き換えるだけで容易に行える。

この制御システムは、それを構成する要素の1つが故障しても光源加速器を運転する事が出来、制御システムの故障が原因でユーザー利用実験が

長期間中断されることは無い。2台の操作盤用ワークステーションの内、1台が故障しても運転に支障は無い。ハードディスクの故障に際しても、オペレーティングシステムや制御用プログラムは、シャドウイングのなされたディスクに保存されているため、運転を通常どおり行うことが出来る。制御用小型計算機の1台が故障した場合、2台の計算機にそれぞれ接続された2つのCAMACループを直列にして残りの1台の小型計算機に接続する。制御用ソフトウェアは、1台の計算機上でも動作するように設計製作されているので、制御システムの反応速度は遅くなるが、通常の運転は支障無く行える。

新しい制御システムは、導入以来順調に稼働している。超伝導ウイグラーのユーザー実験用運転は、このシステムを使い初めて可能になった。また、次に述べるバンチ長制御の実験もこのシステムを使い行った。現在までのところ幸いにも制御システムの故障は無いが、故障を想定して行った小型計算機1台によるテスト運転では、良好な結果を得ている。

8. バンチ長の制御

既存のシンクロトロン光源用電子ストレージリングのバンチ長は、100ピコ秒から1ナノ秒の程度である。バンチ長がこれらの値より短くなると、単バンチ運転を利用した時間分解実験の測定領域を拡大するばかりではなく、電子ストレージリングでの自由電子レーザーの増幅率を上げたり、ミリ波及びサブミリ波領域のコヒーレント放射の発生も期待できる。電子ストレージリングでのバンチ長は、シンクロトロン放射の放出による励起と減衰の釣り合いで決る電子ビームのエネルギー幅と高周波加速周波数や加速電圧及びモーメントムコンパクションファクターと呼ばれるパラメータによる決る。モーメントムコンパクションファクター α は、偏向磁石部でのエネルギー分散関数の積分値に比例するので、図5に示すよう

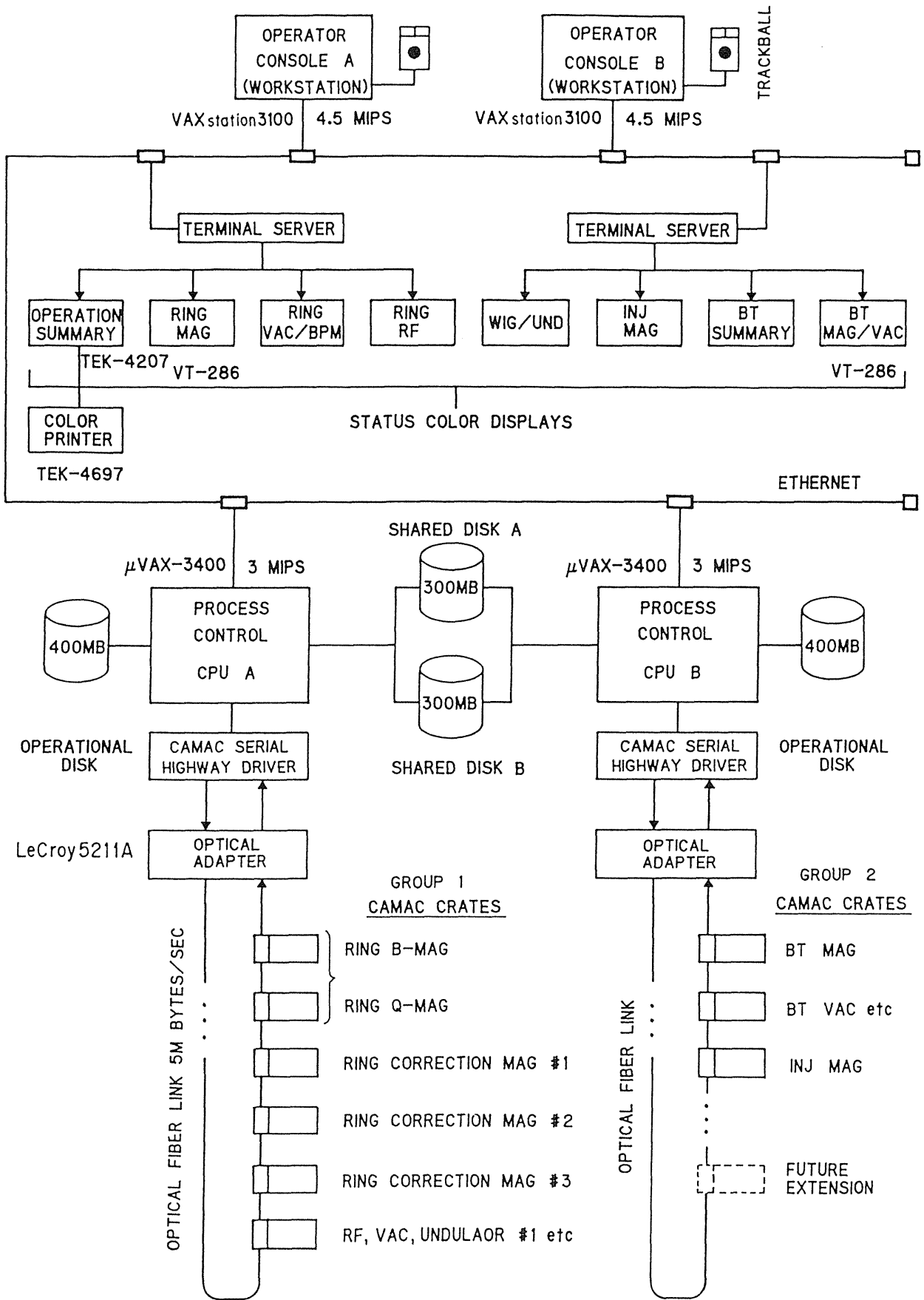


Fig.4 Block diagram of the computer control system.

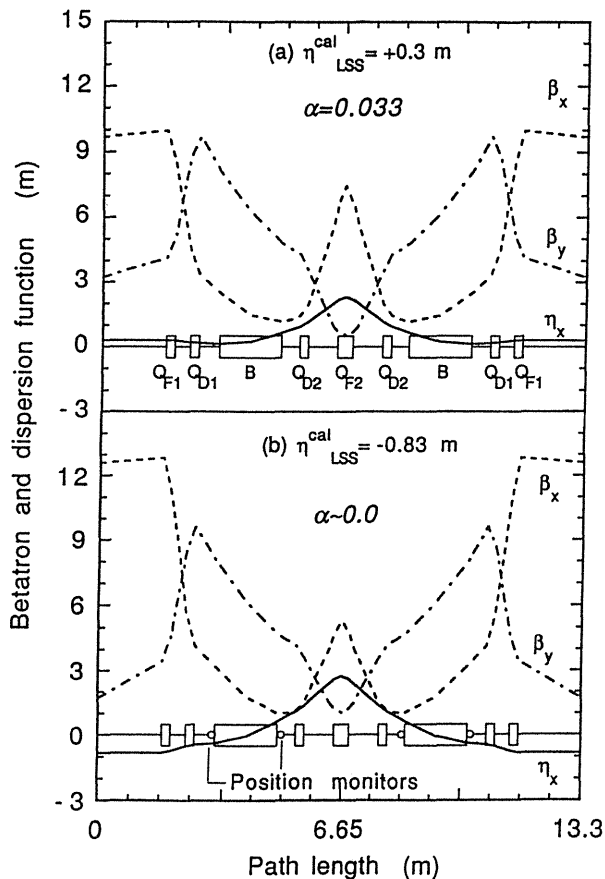


Fig.5 Calculated betatron functions and the dispersion functions in a unit cell. The magnet configuration as well as locations of the position monitors (solid circles) are also shown. A value of the dispersion function in the long straight sections is denoted by η_{LSS}^{cal} . (a) Injection point with $\alpha=0.0334$. (b) Extreme point with $\alpha\sim 0$. The dispersion function changes its sign in the bending magnets.

に、偏向磁石の内部でエネルギー分散関数の一部を負の値にすれば、正と負の打ち消し合が起こり、 α を小さく出来る。バンチ長は、 α の平方根に比例するため、バンチを短くする事が出来る。UVSORストレージリングの磁石配列は、ベータトロン振動数を一定に保ったままエネルギー分散関数を変化させることが出来るので、 α を広い範囲で変えることが出来る。

実験は、入射用シンクロトロン最大の加速エネルギー600MeVで行った。通常の動作点での α は、表1に示すように0.035であり、600MeVでのバンチ長は 2σ で258ピコ秒である。 α が小さくな

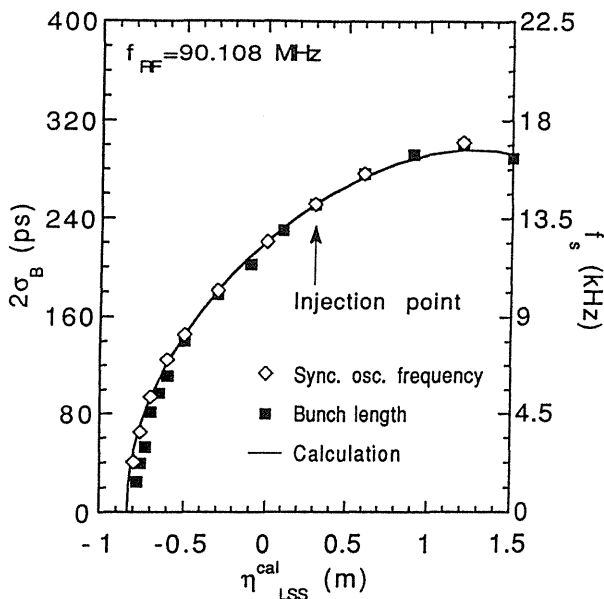


Fig.6 Bunch length $2\sigma_B$ and the synchrotron oscillation frequency f_s as a function of the calculated dispersion function in the long straight section for the central rf frequency of 90.108 MHz. The ordinate in the right side for f_s scaled such that the bunch length and the synchrotron oscillation frequency can be directly compared.

るとストレージリングへのビームの入射が困難になるので、入射は通常の動作点で行い、その後、ベータトロン振動数を一定に保ちながら α を段階的に小さくする。この操作では4種類の四極磁石の収束力を同期を取って変化させる必要があり、同様の操作を行う計算機制御システムの加速用ルーチンを使用した。実験では、 α に関する3つの量、即ち、RF周波数の関数としての水平方向のビーム位置、シンクロトロン振動数と低ビーム電流でのバンチ長を測定した。RF周波数を変化させると α に比例してビームのエネルギーが変わるので、水平方向のビーム位置変化は、位置モニター場所でのエネルギー分散関数を係数として α に比例する。シンクロトロン振動数はRF電圧が一定の場合、 α の平方根に比例する。図6にバンチ長とシンクロトロン振動数の測定値及び計算値を示す。横軸は長い直線部でのエネルギー分散関数の計算値である。 α を変えることにより通常の動作

点よりもバンチを長くも出来ることがわかる。ここで得られた最短のバンチ長は40ピコ秒である。

通常の動作点では、シンクロトロン振動数はRF周波数を変えてもほぼ一定の値を持ち、水平方向のビーム位置変化の測定から得られた電子の運動量はRF周波数の変化に比例する。しかし、 α を小さくしていくと、両者に非線型性が表れる。更に α を小さくするとビーム寿命が極端に短くなり、ビームは失われてしまう。これは、四極磁石の収束力が電子エネルギーにより異なるために表れた2次のモーメントコンパクションファクター α_2 の影響である。電子エネルギーの値による収束力の変化は、エネルギー分散関数がゼロでない場所に設置した六極磁石で補正することが出来る。この様に α の小さい領域で α_2 の影響を補正して得られたモーメントコンパクションファクタを図7に示す。最小の α は、0.00025であり、 α を通常

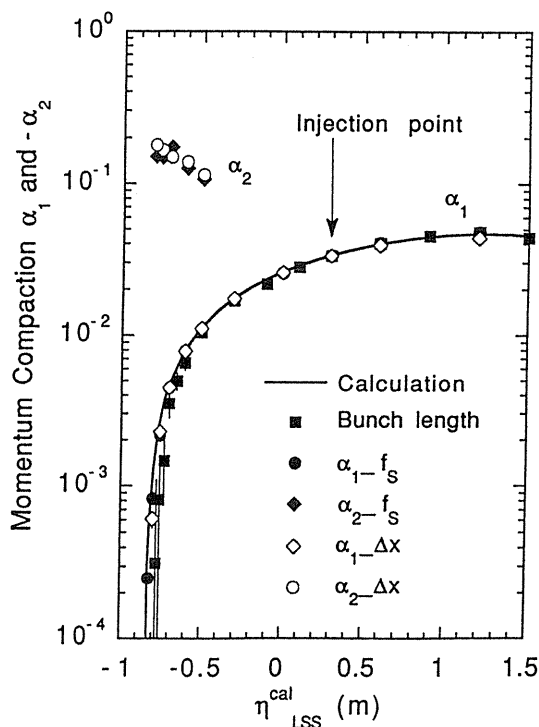


Fig.7 Measured momentum compaction factors of the first order α_1 and the second order α_2 . Sextupole strengths were set to compensate the natural chromaticities. However, the lowest α_1 derived from the synchrotron oscillation frequency was obtained by reducing α_2 using the focusing sextupoles.

の値より2桁以上小さくすることが出来た。バンチ長測定に使用した検出系の時間分解能が100ピコ秒程度であったので、短いバンチの長さを直接には測定できなかったが、シンクロトロン振動数から評価した最短のバンチ長は 2σ で25ピコ秒である²⁰⁾。

9. 自由電子レーザー

次世代光源の為の基礎研究として、1985年頃からUVSORストレージリングで可視光領域での自由電子レーザーの実験的研究を行っている。UVSORストレージリングは、シンクロトロン放射専用の光源加速器であるが、挿入光源設置用の長い直線部があり、電子ビームの性質も、ビームサイズが小さくピーク電流が高いなどと優れており、自由電子レーザーの実験研究に適している。FELの増幅率はアンジュレータの長さの3乗に比例し、電子エネルギーの3乗に逆比例する。アンジュレータの長さは、ストレージリングの直線部の長さで制御を受けるが、増幅率の観点からは、電子エネルギーは低いほど有利である。しかし、電子エネルギーが低すぎるとビーム寿命が短くなり実際上実験が出来ない。UVSORストレージリングの通常の運転エネルギーは750MeVであるが、FEL実験には、電子ビームの最適エネルギーとして500MeVを選んだ。

FEL実験は、通常型のアンジュレータを使って増幅率の測定から始めた、外部のレーザー光としてアルゴンイオンレーザーの波長488nmの光を使用した。この光を、周期長11.1cm、周期数19のアンジュレータに入射し、同時に電子ビームを通す。この時の出力光の強度変化を変調法で計測し、増幅率を求めた。このようにして得られた増幅率は電子ビーム10mA/バンチの時、 8×10^{-4} であった²¹⁾。この増幅率は、発振実験を行うにはぎりぎりの値であるので、アンジュレータをより高い増幅率が得られる光クライストロンに改造した。光クライストロンは、直線上に並んだ2台の

アンジュレータの間に、強い磁場を持つ分散部をはさんだ装置である。分散部の強い磁場の効果で、電子ビームのエネルギー変調を密度変調に変換する効果が増し、増幅率が高くなる。通常型のアンジュレータの中央の3周期を取り外し、長さ37cmの分散部に置き換えた。従って、この光クライストロンのアンジュレータ部は、それぞれ周期長11.1cmで周期数8を持つ。この光クライストロンを使い、同様に増幅率の測定を行った。図8に、測定した増幅率を N_d の関数として示す。ここで N_d は分散部で電子を追い越す光の波数である。最大増幅率は、電子ビーム10mA/バンチの時、 4×10^{-3} であった²²⁾。この値は通常型アンジュレータで得られた増幅率の5倍である。

この光クライストロンを使い、発振実験を行った。長さ13mの光共振器を作るため、長い直線部の上流と下流に反射鏡を設置した。多層幕反射鏡は、真空内に収められ、鏡の位置や角度を調整するための5軸の微調台に取り付けられている。ストレージリングは、対角上に2バンチを貯蔵して運転する。光共振器の長さはストレージリングの周長の4分の1に選んだので、光が共振器を往復する毎に電子ビームと相互作用をする。光クライス

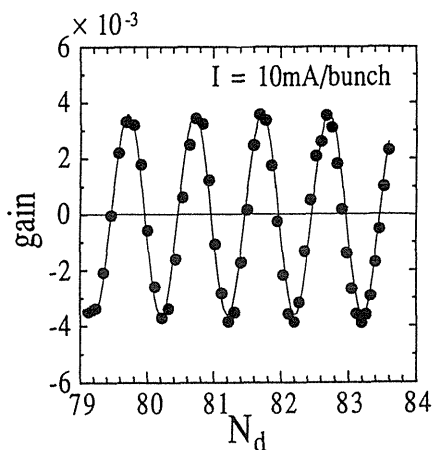


Fig.8 Instantaneous peak gain with the optical klystron at the wavelength of 488 nm measured as a function of N_d (the solid circles) and the gain curve calculated from the measured spectrum of spontaneous radiation by Madey's theorem (the solid line).

トロンからの自発放射を使い、電子ビームと貯蔵した光ビームとの横方向の位置を0.1mm以内に一致させる。光共振器の長さを10 μm の単位で調整し、電子ビームと光ビームとの時間的空間的な一致をとる。その後、電子を貯蔵してレーザー発振を行わせる。図9に、ビーム電流の関数として光の波長スペクトルを示す。光共振器での反射損失は、往復で0.5%であるので、敷居値は10mA前後である。(c)と(d)は、光クライストロンからの自発放射固有のスペクトル形状を示している。(a)と(b)では、レーザー発振が明確に見える。(a)での発振波長は456nmである。アンジュレータ部の磁

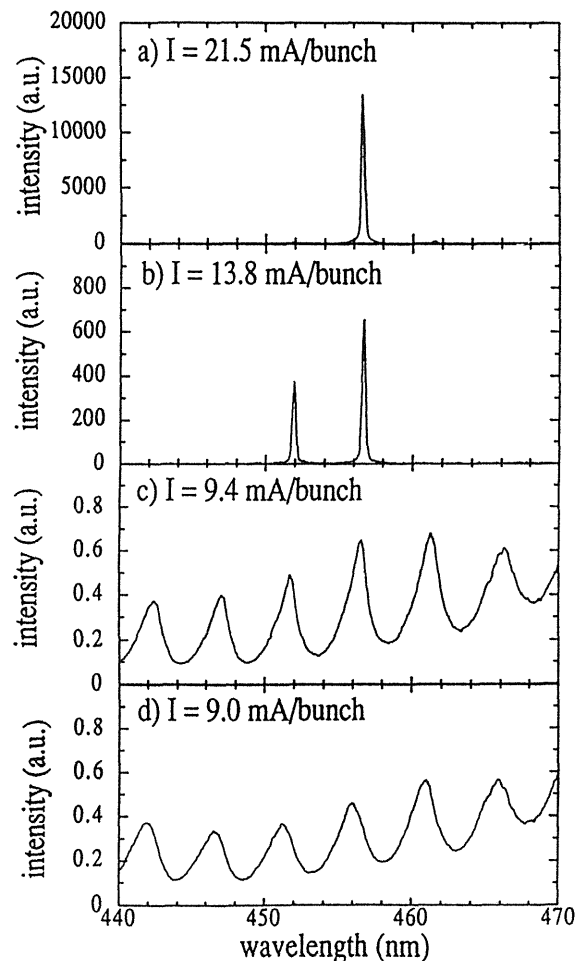


Fig.9 Spectra of output light transmitted by the front mirror of the optical cavity. The upper panels (a) and (b) show spectra above lasing thresholds. The panels (c) and (d) show those near and below the threshold, respectively.

場を変えることにより、発振波長を430から480nmの範囲で連続的に変えることが出来た^{2,3)}。

10. おわりに

教科書には、偏向部からのシンクロトロン放射の特徴が以下のように記述されている。(1)広い波長範囲で波長連続である。(2)強度が大きい。(3)鉛直方向の発散角が小さい。(4)発光点が小さい。(5)電子ビームの軌道面では直線偏光であり、その上下では楕円偏光である。(6)スペクトルが理論的に計算でき、標準光源としても利用できる。(7)0.1～1ナノ秒の時間幅を持つパルス光である。(8)電子ビームは、超高真空中を周回するので清浄な光源である。この内、(1)、(2)、(3)、(5)と(6)は、シンクロトロン放射固有の性質であるが、(2)、(3)の一部と(4)、(7)および(8)はストレージリングの性質と性能を反映している。この他に、ストレージリングに基づく光源の実用上重要な特徴として、(9)光強度が時間的に安定であることを上げる事ができる。しかし、これらの項目を全て同時に叶えることは容易ではない。例えば、強度と安定性は一般には相反する要求である。また、それぞれの項目に対する要求も、第3世代の光源に要求されているように、実験の進展と共に厳しくなっている。ここに紹介したUVSOR光源の現状は、理想的なシンクロトロン放射光源に近付けるための作業の1部である。UVSORストレージリングは、第2世代に属する光源加速器であるが、より一層光源の性能を向上させることが可能であると考えられる。また、次世代の光源開発には最適の加速器システムである。

謝辞

UVSOR光源加速器システムは、渡辺誠氏、春日俊夫氏(現高エネ研)と米原博人氏(現日本原子力研究所)により建設された。その後の性能向上と開発研究は、春日、米原両氏に加え、高野史郎氏(現理化学研究所)、浜広幸氏及びUVSOR

施設の技官諸氏によりなされている。計算機制御システムは、高エネルギー物理学研究所の金谷範一氏の協力を得て建設された。

文献

- 1) M. Watanabe, A. Uchida, O. Matsudo, K. Takami, T. Katayama, K. Yoshida and M. Kihara, IEEE Trans, Nucl. Sci. **NS-28**, 3175 (1981).
- 2) I. Koyano, Y. Achiba, H. Inokuchi, E. Ishiguro, R. Kato, K. Kimura, K. Seki, K. Shobatake, K. Tabayashi, Y. Takagi, K. Tanaka, A. Uchida and M. Watanabe, Nucl. Instrum. Methods **195**, 273 (1982).
- 3) M. Watanabe, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A246**, 15 (1986).
- 4) K. Kasuga, H. Yonehara, T. Kinoshita and M. Hasumoto, Proc. of the IEEE Particle Accelerator Conference, Washington DC, 1987, p.1672.
- 5) T. Kasuga and M. Watanabe, Proc. of the 6th Symp. on Accelerator Science and Technology, 1987, Tokyo, Japan (Ionics, 1987) p.50.
- 6) G. Isoyama, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **A308**, 31 (1991).
- 7) M. Watanabe, G. Isoyama, M. Kamada and K. Kimura, Rev. Sci. Instrum. **63**, 1584 (1992).
- 8) H. Yonehara, T. Kasuga, O. Matsudo, T. Kinoshita, M. Hasumoto, J. Yamazaki, T. Kato and T. Yamakawa, IEEE on Nucl Sci. **NS-32**, 3412 (1985).
- 9) H. Yonehara, T. Kasuga, T. Kinoshita and M. Hasumoto, Jpn. J. Appl. Phys. **26**, 1939 (1987).
- 10) H. Yonehara, M. Hasumoto, T. Kasuga and T. Kinoshita, Proc. of the 6th Symp. on Accelerator Science and Technology, 1987, Tokyo, Japan (Ionics, Tokyo, 1987) p.260.
- 11) T. Kasuga, M. Hasumoto, T. Kinoshita and H. Yonehara, Proc. of the 6th Symp. on Accelerator Science and Technology, 1987, Tokyo, Japan (Ionics, Tokyo, 1987) p.195.
- 12) T. Kasuga, H. Yonehara, M. Hasumoto and T. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, 541 (1989).
- 13) M. Tobiyama, T. Kasuga, H. Yonehara, M. Hasumoto, T. Kinoshita, O. Matsudo, N. Nakamura, K. Sakai and J.

- Yamazaki, Jpn. J. Appl. Phys. **29**, 210 (1990).
- 14) H. Yonehara, T. Kasuga, M. Hasumoto and T. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 2160 (1988).
- 15) A. Lin, H. Hama, S. Takano and G. Isoyama, Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 921 (1992).
- 16) T. Kasuga, M. Hasumoto, T. Kinoshita and H. Yonehara, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 100 (1988).
- 17) 春日俊夫, 放射光5卷2号3頁(1992).
- 18) T. Kasuga, H. Yonehara, M. Hasumoto and T. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys. **27**, 1976 (1988).
- 19) N. Kanaya, H. Hama, J. Yamazaki, O. Matsudo and G. Isoyama, submitted to IEEE Trans. on Nucl. Sci.
- 20) H. Hama, S. Takano and G. Isoyama, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, in press.
- 21) S. Takano, H. Hama, G. Isoyama, A. Lin and N. A. Vinokurov, Jpn. J. Appl. Phys. **31**, 2621 (1992).
- 22) S. Takano, H. Hama and G. Isoyama, Jpn. J. Appl. Phys, in press.
- 23) S. Takano, H. Hama and G. Isoyama, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, in press.

