



小型放射光リング NIJI-II の現状

杉山 卓, 三角 智久, 千脇 光國, 山田 家和勝,
大垣 英明, 鈴木 良一, 清 紀弘, 野口 勉, 山崎 鉄夫

電子技術総合研究所

中石 博之, 蟹江 智彦, 平田 嘉祐

住友電気工業(株)

Compact Synchrotron Radiation Source NIJI-II

S. SUGIYAMA, T. MIKADO, M. CHIWAKI, K. YAMADA, H. OHGAKI,
R. SUZUKI, N. SEI, T. NOGUCHI and T. YAMAZAKI

Electrotechnical Laboratory

H, NAKAISHI, T. KANIE and Y. HIRATA

Sumitomo Electric Industries Ltd.

NIJI-II is a 600MeV compact electron storage ring mainly used for microdevice production, for example photo-induced chemical vapor deposition (SR-CVD). The storage ring has four bending magnets producing SR with critical wavelength of 3.62 nm, and a 1.31m-long polarizing undulator in a straight section generating quasimonochromatic radiation with high intensity and peak wavelength shorter than 100 nm. Construction of the NIJI-II was started in April 1989, and the first beam storage was achieved in August 1989. The undulator was installed in August 1991. This report describes the status of NIJI-II and its applications.

1. はじめに

産業用小型蓄積リングの開発は凡そ10年前から世界的規模で行われてきた。小型リングの工業的利用としてX線リソグラフィが挙げられるが、SR-CVD (SR-induced chemical vapor deposition) プロセス技術への応用が最近注目されつつある。また自由電子レーザーの光化学工業等への活用を実現するためにも、小型放射光リングの開発が重要となってくる。電総研においては工業技術院の官民連帯共同研究制度で常伝導型の小型SR装置の基礎研究が1985年度から開始された。このプロジェクトの最初のリングとして電総研と住友電工(株)との協力で建設されたNIJI-Iは1986年2月に初の蓄積に成功した。NIJI-Iでは小型リングへの低エネルギー電子入射技術と大電流蓄積技術の開発を行い、電子エネルギー160MeVで524mA、90MeVで400mAの蓄積電流が達成された。NIJI-Iは小型放射光源開発のための試験リングとしてSR施設の小型化に明るい見通しをつけ、また放射光の利用実験にも成果をあげ、1989年にNIJI-IIに改造された。

放射光を使ったCVD等のプロセスを選択的に行うためには単色光を用いる研究が必要であり、アンジュレータからの放射光に対する期待が大きい。しかし、従来型のリングではユーザーの数も多く、アンジュレータギャップや蓄積エネルギーを変えて自由に波長を選ぶことについて制約が大きかった。NIJI-IIはアンジュレータ等挿入光源の利用をも目的とした新しいタイプの小型リングとして開発された。従って、このリングは小型リングでありながら長い直線部を持ったレーストラック型の構造を持っている。1989年8月から蓄積が開始された。直交遅延磁場型アンジュレータは1991年に挿入された。現在は、通常凡そ250mAが蓄積され、直交遅延磁場型偏光可変アンジュレータの準単色の光子密度の大きい偏光放射光が利用されている。本稿では、放射光源の概要、光源装置の実験、利用の現状等について報告する。

2. NIJI-IIの概要

NIJI-IIはアンジュレータや将来の光源である自由電子レーザーの光クライストロンを挿入するために長い直線部を有するリングとして設計が検討された。リングの設置される実験室(中エネルギー実験室)は8m×10mであって放射線シールド及び放射光利用空間を確保するためリングの大きさは著しく限定されたものになった。蓄積リングやアンジュレータに対して、例えばSR-CVDによる炭素薄膜の形成実験のために次のような要請が挙げられる。メタンの励起が100nm以下放射によって起こることがNIJI-Iの実験によって明らかとなっていたのでアンジュレータからの放射光の第1高調波成分のピーク波長が100nm以下が必要であった。偏向電磁石からの放射光の臨界波長が炭素K殻(cK殻)に対応する4.26nmより短いこと、また、蓄積電流が多くビームの寿命が長いと云った要請もあった¹⁾。

上記の制限や要求によってNIJI-IIの主要なパラメータは決められた。図1にNIJI-IIの構成図を示す。最大電子エネルギーは600MeV、リングの周長は17mである。直線部の長さを可能な限り長くするために、偏向電磁石の半径を1.4m、従って、最大磁場強度1.43Tとした。この場合の臨界波長は3.62nmである。n値0の電磁石を採用して

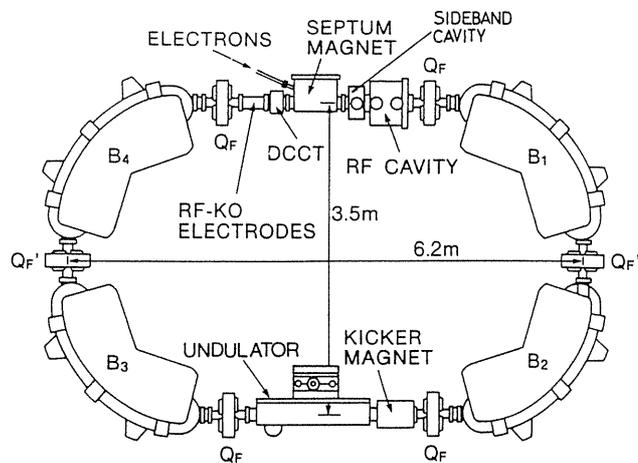


Fig.1 Plan view of NIJI-II .

いるため偏向部での垂直方向の集束性を持たせるために磁極端の電子の入出角度を16度とした。全長1.31mの直交遅延磁場型アンジュレータを挿入しキッカー等を設置するために、長直線部は2.2mである。入射部の長直線部にはセプタムマグネット、RFキャビティー等がある。リングの主要諸元は表1に示した。また、図2に偏向電磁石から発生する放射光光子数分布を示す。

NIJI-IIは、ビームエミッタンスの影響を受けやすい挿入光源の利用を目的としているのでエミッタンスの低いリングのラティスの採用しなけりばならなかった。次式で与えられるように、ビームエミッタンスを小さくするためには曲率半径を大きくする必要がある。それには偏向角を小さくし、偏向電磁石の数 N_d を増やさなければならない。このことを小型リングで実行することは困難であるから、ラティスの選択によってエミッタンスを小さくすることができる。 ρ は偏向電磁石の半径、 γ はビームエネルギー(E/mc^2)、 H は $(\eta^2 + (\beta\eta' + \alpha\gamma)^2)/\beta$ で与えられる。 β 、 η はそれぞれベータ、イエータ関数、 J_x はベータトロン振動のdamping partition numberである。 N_d は1セルの中の偏向電磁石の数、 $F(\nu_x, \text{Lattice})$ はラティスと動作点によって与えられる定数である。

Table 1 Principal parameters of NIJI-II

Electron energy	600 MeV
Injection energy	150 MeV
Circumference	17.06 m
Periodicity	2
Bending magnet	
Radius	1.4 m
Magnetic field	1.43 T
Bending angle	90°
Field index	0
Radio frequency	158.2 MHz
Harmonic number	9
RF power	2 kW
Nominal tune	
ν_x	1.22
ν_y	0.54

$$\begin{aligned} \varepsilon &= C_q \frac{\gamma^2}{\rho J_x} \frac{1}{2\pi\sigma} \int_{\text{dipoles}} H ds \\ &= F(\nu_x, \text{lattice}) \frac{E^2}{J_x N_d^3} m\text{-rad} \\ C_q &\equiv \frac{55 \hbar}{32 \sqrt{3} mc} = 3.84 \times 10^{-13} m\text{-rad}. \end{aligned}$$

表2に動作点を変化させて得られた比例常数 F の最小値とラティスの関係を示す²⁾。偏向電磁石の数が少なく最小の F を与えるラティスとしてDouble Bend Achromat (DBA)が適当と考え採用した。このままでは四重極電磁石によってスペースを取るのでは実際には変形されたラティスが用いられている。NIJI-IIのラティスとDBAを比較するために図3にそれぞれのベータ関数とイエータ関数を示す。また、リングパラメーターの計算値を表3に示す²⁾。計算では、アンジュレータを挿入するための直線部のイエータ関数をゼロにすることができなかつたが、エミッタンス、ベータトロン関数は低い値なので小さなビームサイズが期待された。

リングへの入射エネルギーは150MeVである。

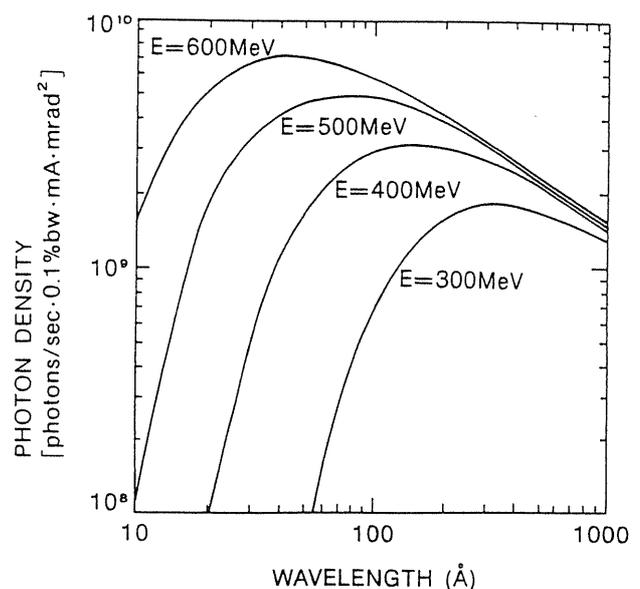


Fig.2 Spectral distributions of SR from bending magnets of NIJI-II.

Table 2 The lists of approximate minimum values of $F(\nu_x)$ for several types of lattices

Lattice Type	F_{\min}	N_d / cell
FODO	7.285×10^{-4}	2
Triple Achromat	3.86×10^{-4}	2
Double Bend Achromat	2.36×10^{-5}	2
Triple Bend Achromat	6.70×10^{-5}	3

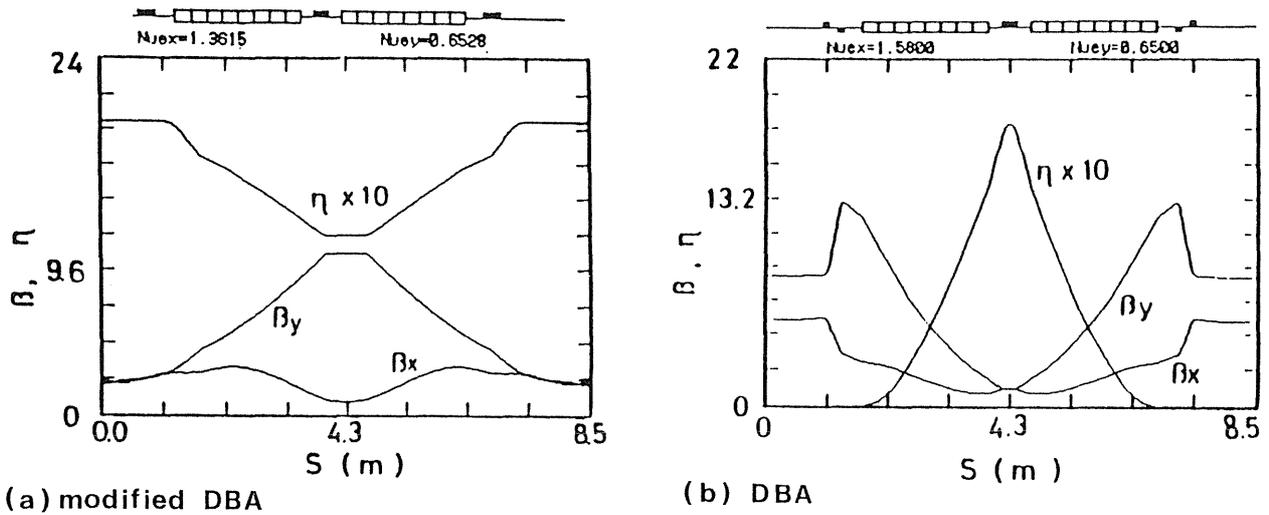


Fig.3 Lattice functions of NIJI-II (a) and double bend achromat (b).

Table 3 The lattice parameters of DBA and modified DBA at 250MeV

	DBA	Modified DBA
Betatron tune		
ν_x	1.58	1.362
ν_y	0.65	0.653
Momentum compaction	0.187	0.544
Natural emittance	1.11×10^{-7} m-rad	2.35×10^{-7} m-rad
Beam dimensions at straight sections		
σ_x	0.476 mm	0.573 mm
σ_y	0.739 mm	0.499 mm
Energy spread	0.0174 %	0.0167 mm
Chromaticity		
ξ_x	-1.29	-0.860
ξ_y	-0.046	1.264
Natural bunch length	1.71 cm	2.62 cm
Radiation damping time		
τ_x	141 msec	353 msec
τ_y	115 msec	115 msec
τ_e	53 msec	54 msec
RF voltage	25 kV	25 kV

電総研リニアックの電子ビームは通常運転の場合には約307MeVで加速されているが、リニアックの中エネルギー部の終端では大凡150MeVの加速エネルギーを持っている。この中エネルギー部のドリフトスペースに設置されたパルス振り分けマグネットによってリニアックのパルス電子ビームを 6° 偏向してNIJI-IIへのビーム輸送系に送り込む。輸送系の電磁石の配置図を図4に示す。この輸送系は 42° 偏向角の双極電磁石2台と4重極電磁石ダブレット3対、その他ステアリングコイル及びECS (energy compression system) から成っている。配置図から判るようにスリットを中心に電子ビームのリニアックからの入射点とセプタムへの出射点とが対称の位置になっており広いエネルギー幅の電子ビームを集束してリングに入射すること出来る。ダブレット Q_1 は DM_2 の出口で電子ビームに対するアクロマチック条件を満たすように調整される。この様子を図5に示す。さらに、 Q_2 、 Q_3 はリングの入射点でのベータトロン関数が

マッチするように調整される⁴⁾。

リングのダイナミックアパーチャを考えた時、入射電子ビームのエネルギーの広がり小さいことが有利であるので、輸送系の入り口に入射電子ビームのエネルギーを揃えるためのECS (Energy Compression System) を設置した。蓄積リング入射のためのこの試みは世界で初めてであり、入射効率を3倍ほど改良した⁵⁾。ビーム輸送系のビームモニタはセラミック蛍光板が用いられ、3箇所に設置されている。

リニアックから輸送されてきた電子はセプタムマグネットで 25° 偏向され、リング平衡軌道から40mm外側に入射される。キッカーはセプタムと対称の位置に設置され、キッカーパルスは時定数約 $0.5 \mu\text{sec}$ の減衰正弦波形である。マルチターン入射を行っている。

加速高周波空洞、そのための電源はNIJI-Iで使用されていたものを用いている。チューナーの制御は反射電力をモニタして行っている。

ビームモニタは4極ボタンモニタを採用し、全体で6箇所に設置されている。長い直線部の両端4箇所のモニタによってビームの位置をモニタし、ビーム軌道をアンジュレータの中心にするように調整している。残りのモニタはイオンクリアリング電極として利用されている。

電子ビームの寿命は現在電子エネルギー

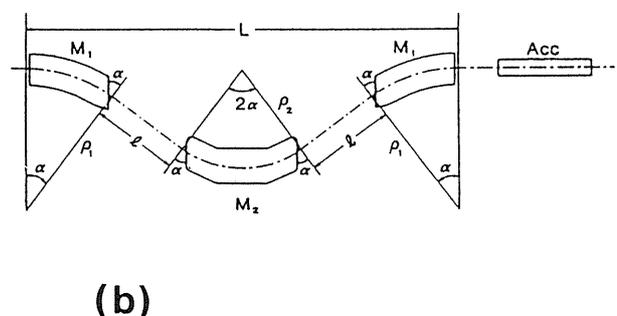
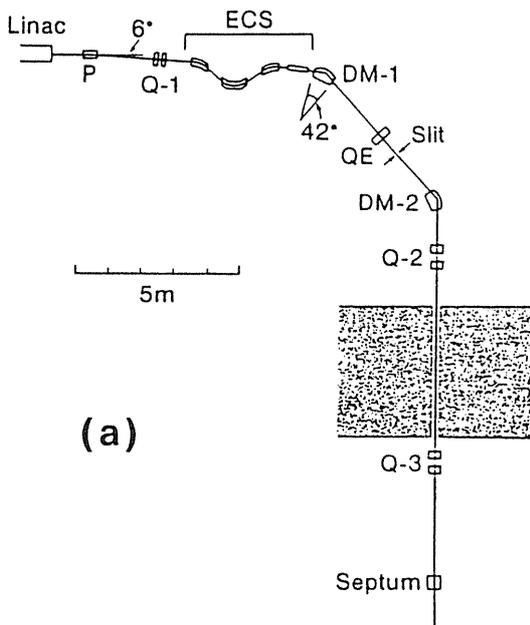


Fig.4 The beam transport system and the ECS for NIJI-II (a) and schematic diagram of the ECS (b). P: pulse magnet; Q-1~3: quadrupole doublets; QE: quadrupole single; DM-1~2: dipole magnets; M_1 and M_2 : ECS magnet; ACC: accelerating tube.

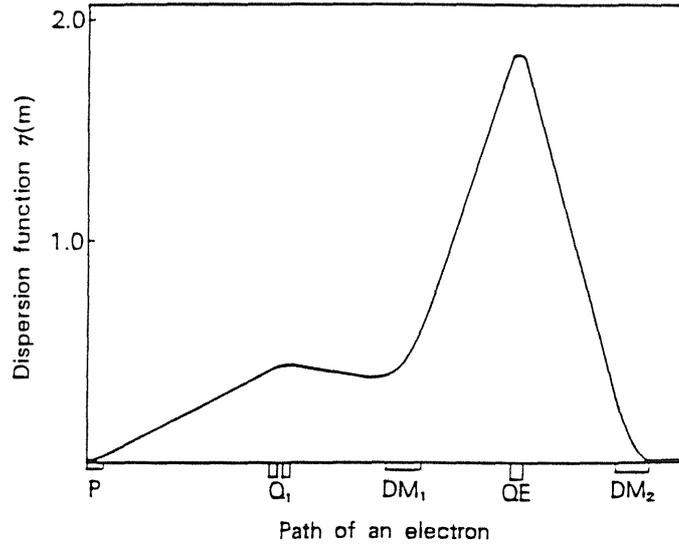


Fig.5 The dispersion function of the transport line for NIJI-II .

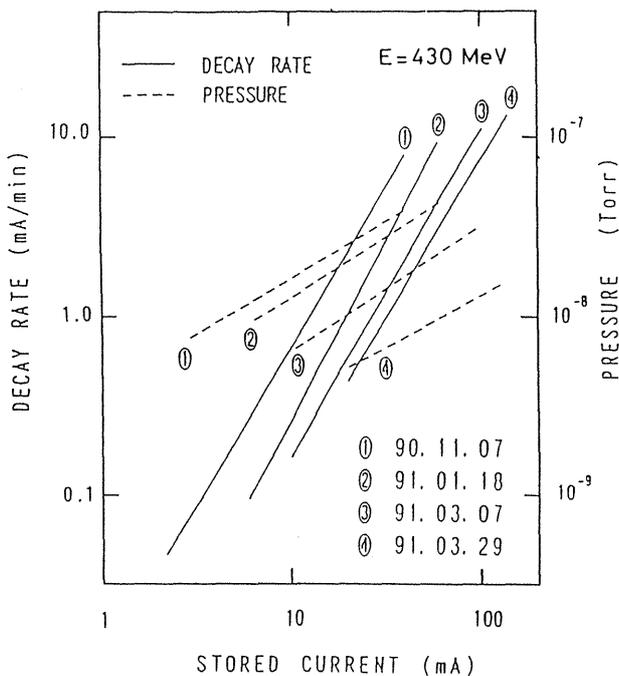


Fig.6 Variation of decay-rate and pressure conditions of NIJI-II .

500MeV, 電流 200mA の場合 4 時間である。図 6 はアンジュレータ挿入時に真空を立ち上げた後、ほぼ 2 ヶ月毎の電流減衰率とリングの真空の記録であり、真空の回復の様子を示している。電流の減衰率の傾斜から寿命は電子と残留ガス、及び放射光によってたたき出される真空チャンバからの

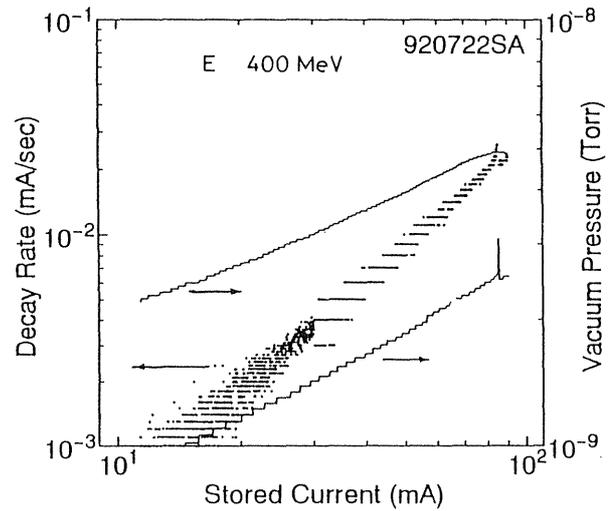


Fig.7 Decay rate plot and pressure as functions of stored beam.

ガスとの散乱によって決まっていることが判る。図 7 は真空立ち上げから凡そ 1 年後のビームの減衰率を示す。電子エネルギーが低いため、放射光による真空のからのし効果があり良くない。その結果、真空の回復に非常に長期間が必要である。リングの真空と関連して、電子ビームのイオン捕獲によってチューンシフトが発生する。そのため、蓄積電流の増加に伴ってビームサイズが変化のすることがある。この事を見るために、ビーム

サイズの蓄積電流依存性の測定結果を図8に示す。低エネルギーの高い蓄積電流でビームサイズが大きくなる。この変化はイオン捕獲の影響を受けてチューンシフトが発生していることが考えられる。

図9はNIJI-IIの全景を示す写真である。アンジ

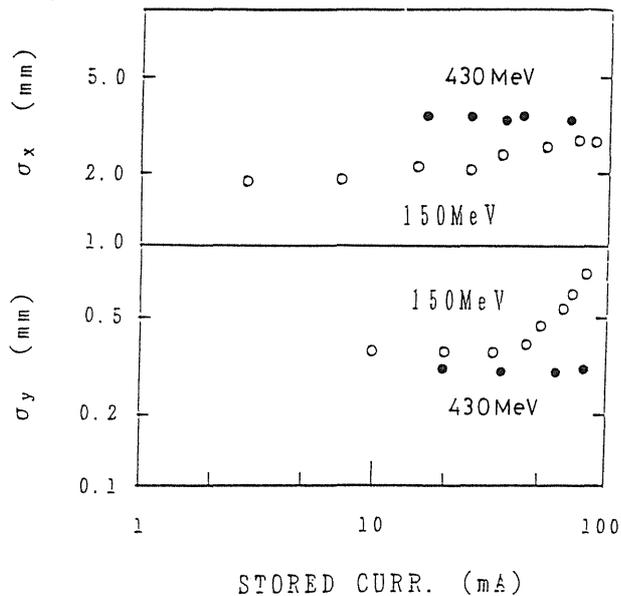


Fig.8 Plots of beam size as functions of beam current at 430 MeV and 150 MeV.

ュレータが大きなスペースを占めていることが判る。そこで、アンジュレータのリングに与える影響について測定した結果を述べる。

3. 直交遅延磁場型アンジュレータ⁵⁾とその電子ビームに対する影響

アンジュレータの周期長86mm, 周期数15, 全長1311.5mmである。ギャップ間隔を64mmから100mmまで変化することによって螺旋磁場モードで1.35kGから0.35kGまで変化することが出来る。主パラメータは表4に示されている。このアンジュレータは平面型アンジュレータを図10のように直交させ組み合わせてあり, 中心軸上の磁場分布は螺旋磁場を形成する。2組のアンジュレータの位相を変化することによって, 右回り, 左回りの円偏光, 直線偏光, 楕円偏光を自由に発生することが出来る。図11にアンジュレータから発生した放射光のスペクトルの一例を示す。

アンジュレータの真空チャンバは1辺60mmの角ダクトを45°回転して取り付けられている。真空チャンバの開口部は水平, 垂直共に80.6mmであり, 長さは1.4mである。セパタムからリングへ



Fig.9 Overview of NIJI-II.

Table 4 Parameters of the undulator

Overall length	1311.5 mm
Block size of magnet	21.5 × 21.5 × 63.0 mm
Magnet periods (λ_u)	86 mm
Number of periods	15
Magnetic material	NEOMAX-35H (Nd-Fe-B alloy)
Undulator gap	64~100 mm
Peak magnetic fields	
HF configuration	1.35~0.35 kG
PF configuration	1.91~0.50 kG
K parameters	
HF configuration	1.1~0.3
PF configuration	1.5~0.4

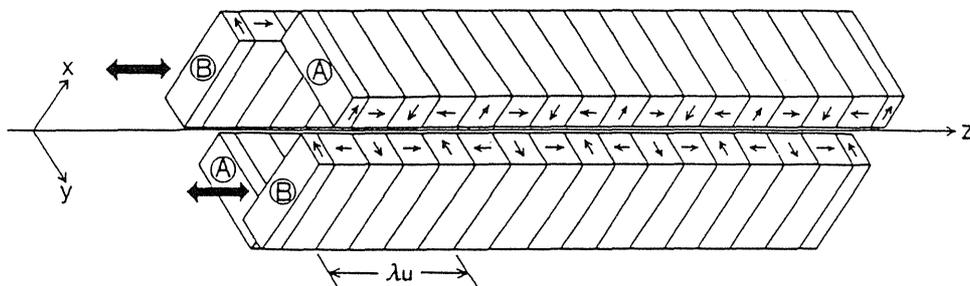


Fig.10 Schematic diagram of the cross-retarded type undulator.

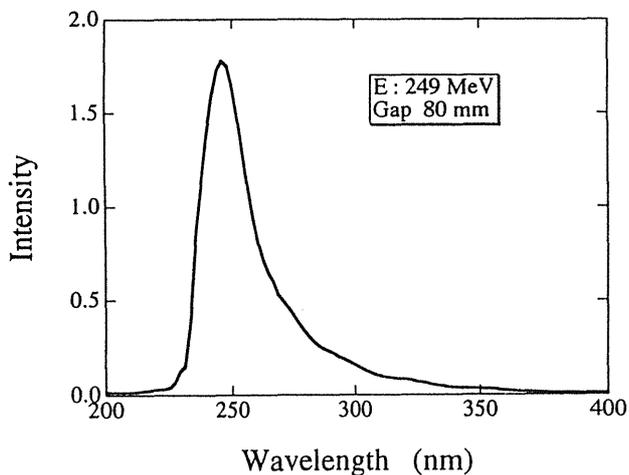


Fig.11 Spectral brightness of circularly polarized radiation from the cross-retarded type undulator.

の入射点と平衡軌道とは40mm離されている。このために平衡軌道の歪みの補正と入射軌道には十分な注意がなされた。図12はアンジュレータのギ

ャップ72mmの場合の平衡軌道の歪み(COD)の測定結果を示している。電子軌道の歪みはリング全体で水平、垂直方向に±2mm以内に抑えられている。入射ビームの調整は極めてデリケートである。現在、入射はアンジュレータのギャップを最大(160mm)に開けて、2から4秒に1パルスの割合で行う。1パルスの入射効率3から10mAが得られている。しかし、一度入射された電子ビームが次の入射パルス間に失われるという現象が現れる。これはイオン・クリアリング電極に電圧を加えることによって改善している。クリアリング電極はボタン型ビームポジションモニタを併用し全体10カ所にある。入射時に発生するこの現象の原因はまだ究明されていない。

NIJI-IIの蓄積状況はアンジュレータを挿入する以前は最大250mAの蓄積を達成出来たが、挿入

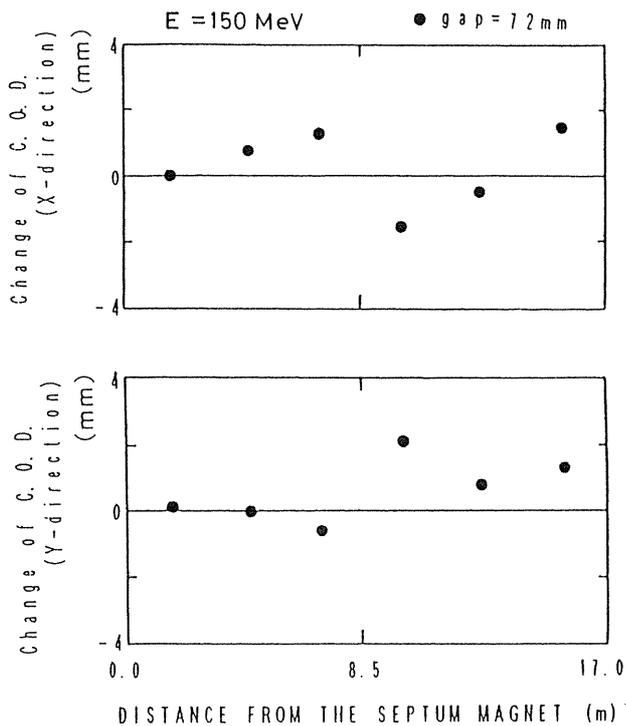


Fig.12 Horizontal and vertical C. O. D. s along the storage ring.

後は入射効率が一時的に低下した。現在 COD を改良したこととクリアリング電極に電圧を加えることによって蓄積電流の上限が延びて最大 350mA まで蓄積可能となっている。蓄積電流の上限はおそらく上述の現象が決定していると考えられる。リングに真空チャンバの開口の小さな挿入光源を設置し、より電流を蓄積するためには複数個の小型の入射キッカーを設置し、バンパ軌道の局在化を行うことが必要かと考えられる。

挿入光源によって電子ビームが影響を受けないようにするために、まず第一に、電子軌道が入口と出口で変化しないように磁場の対称性を精度良く製作することが必要である。その他の影響として、ベータトロンチューンシフトが考えられる。アンジュレータの内部で電子は集束力を受けるので、その結果、ベータトロン振動の位相が進みチューンシフトが発生する。図 13 の測定結果が示すようにギャップ間隔を変化させるとベータトロンチューンは水平、垂直方向ともに変化する。この

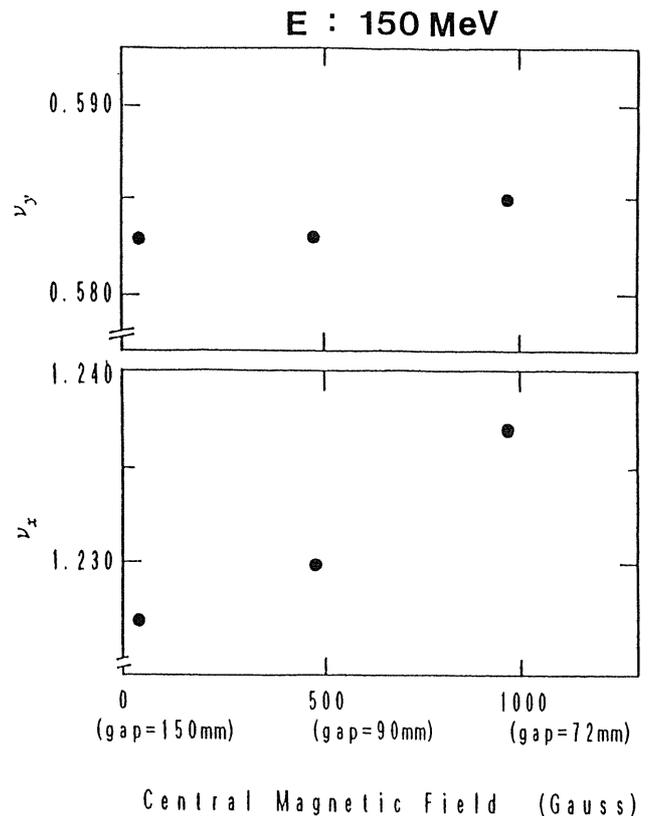


Fig.13 Horizontal and vertical betatron tunes as functions of the magnetic field of the undulator.

アンジュレータの磁力線の方向は斜めに直交しており垂直、水平成分を有するためである。このチューンシフトの範囲はリングの動作点を調整する集束マグネットによって修正可能である。

図 14 はアンジュレータのギャップを変化した場合のビームサイズの変化をしめす。アンジュレータによるビームサイズへの影響は非常に少ないことが判る。僅かな変化はチューンシフトの変化に起因すると考えられる。ビームの輝度に対するこのアンジュレータの影響は殆ど問題とならない。

4. NIJI-II 周辺の放射線分布の測定⁷⁾

放射光の利用が急速に増大するに伴って、放射線防護の立場から電子蓄積リング周辺の散乱放射線量の空間分布を正確に把握することが非常に重要となってくる。NIJI-II のような産業用リングでの放射線の空間線量分布の測定データは貴重

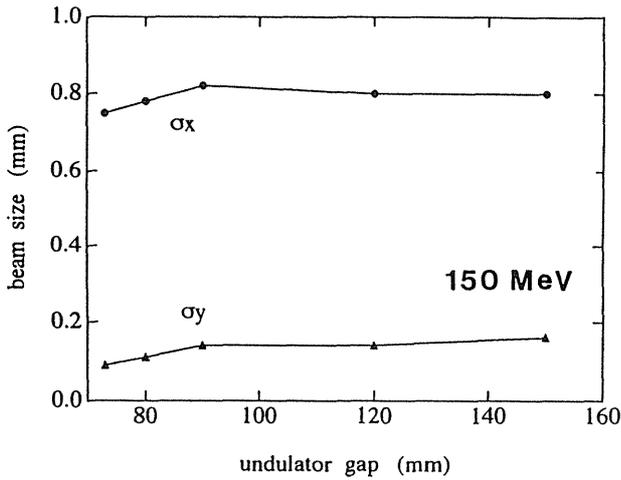


Fig.14 Horizontal and vertical beam sizes as functions of the magnetic gap of the undulator.

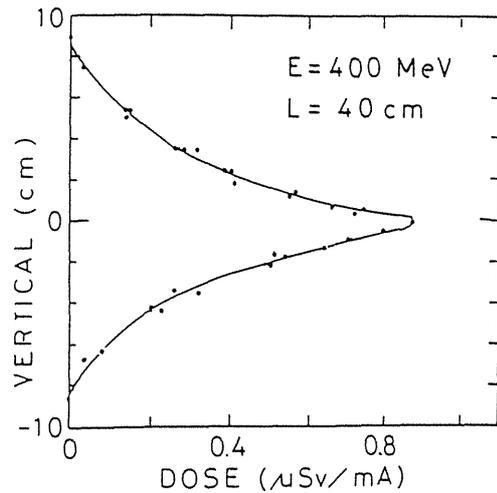


Fig.15 Vertical distribution of integrated radiation dose around a bending magnet of NIJI-II.

である。リング周辺の散乱放射線は電子ビームと残留ガスとの相互作用によって発生する制動放射や残留ガスとの散乱によって電子軌道を離れ真空チャンバの壁に衝突する場合に発生する放射線が発生源と考えられる。そこで、電子蓄積時の偏向電磁石周辺から発生する散乱放射線の水平、垂直方向の集積線量分布や直線部の散乱放射線が測定された。測定に用いられた検出器は光子エネルギー 30MeV までエネルギー校正された熱ルミネセンス線量計 ($\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{:TLD}$) である。図 15 は偏向電磁石部の磁極から 40cm 離れた位置での垂直方向の空間線量分布の測定結果である。電子ビームレベルにピークをもつ半値幅の狭い分布を示している。この結果によれば、磁極間隙部の比較的狭い部分を遮蔽することによって大部分の散乱放射線を防護することが可能なことが判る。

5. 縦方向不安定性の除去の研究²⁾

小型蓄積リングの蓄積電流を増加するためにビームの不安定性を抑制する技術が必要となる。縦方向バンチ間結合型不安定性の除去の実験をサイドバンドキャビティを用いてデカップリング法とモードフィードバック法を行い、この

方法の有効性を NIJI-II で明らかにした。この方法の原理は加速高周波電圧をバンチの回転周波数と同じ周波数を持つ波形で振幅変調することによって個々のバンチのシンクロトロン振動数に広がりを持たせることが出来る事である。高周波加速空洞は一般に大きな Q 値を持っているので、変調された高周波電圧を直接用いることはできない。そこで、第二の加速空洞を用い、

$$f = k f_{rf} + f_{rev}$$

の周波数で加速を行う。 f_{rf} および f_{rev} は加速高周波の周波数とバンチ回転周波数である。 k は整数である。第二の加速空洞をサイドバンドキャビティと呼んでいる。このキャビティの共鳴周波数は 334MHz、無負荷 Q 値 1100、シャントインピーダンス 74 k Ω である。Q 値が小さいことから判るように、このキャビティに高周波電力を与えなければ蓄積ビームに大きな影響を与えることはない。しかし、パッシブモードにおいても電子に実効的な加速電界を与えることができ、電子ビーム 150MeV、4.5mA と低電流の場合には不安定性を抑制することが出来た。図 16 は蓄積電流

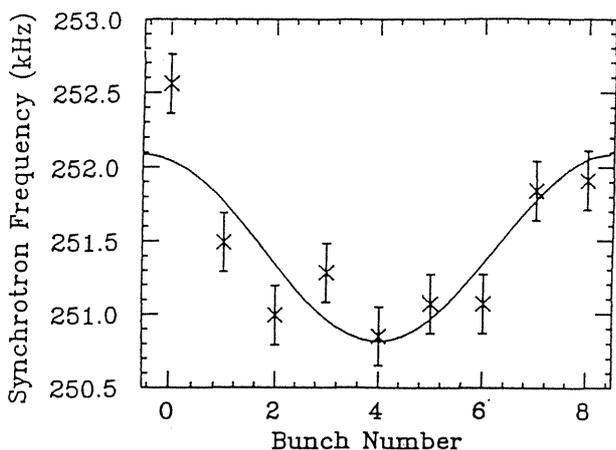


Fig.16 Synchrotron frequencies of bunches.

4.5mAの場合のシンクロトロン振動数の各バンチ毎の広がりを示す。しかし、この蓄積電流以上となるとサイドバンドキャビティーにカップルドバンチモード $n=1$ の不安定性を誘起する。この場合、誘起されるモードは特定されるのでこの不安定の周波数成分のみを取り出してサイドバンドキャビティーにフィードバックすることによって不安定性を抑制することを試みた。このモードフィードバック法では入力周波数成分を90度位相を進めることによって不安定の減衰時間を短くすることができる。36mAの蓄積電流の場合に、不安定性によるサイドバンドを3分の1に抑制することができた。

6. NIJI-IIにおける放射光の利用

NIJI-IIの偏向部からのSR利用や、直交遅延磁場型アンジュレータが挿入されてから大凡2年の間に行われた利用状況について紹介をする。電総研での直交遅延磁場型アンジュレータの利用の詳細については別の機会に報告がなされる予定であるので簡単に紹介する。ユーザー・グループはそれぞれのマシンタイムにはリングを占有することが出来る。従って、電子エネルギーやアンジュレータの磁極ギャップ等を自由に変化させて実験を行うことができる。エネルギー上昇やギャップ

の変化には細心の注意が必要である。ユーザー・グループは住友電工1, 電総研3の計4組あって、マシンタイムは住友電工と電総研がほぼ分け合っており、1週毎のシフトである。1日2回の入射がなされている。

NIJI-IIにおける利用研究では高輝度で指向性の良い波長可変性、偏光可変性のある放射光が利用され実験がなされている。最近行われたアンジュレータ光の利用を挙げる。

- (1) アンジュレータ光励起によるシリカガラスの高屈折率化, 表面からの揮発等の半導体プロセスの研究。
- (2) 生体高分子の構造解析等に必要な円二色性顕微鏡の開発
- (3) キラルな化合物の絶対不斉合成を目的としてシクロオクテンの円偏光による直接不斉光異性化反応の研究。
- (4) アルミニウム, カーボンの光薄膜形成
- (5) 準単色光を用いた水素分子, CH_4 分子の選択励起及び分解過程の観測
- (6) アンジュレータ放射光の光量評価技術

7. おわりに

NIJI-IIの建設の経緯, 構成と蓄積状況についてのべた。アンジュレータの利用を目的としたリングのためのラティスの決定についての議論をした。直交遅延磁場型アンジュレータの電子ビームに対する影響を述べた。リングの周辺の放射線空間分布の測定や電子ビーム不安定性の抑制の研究について紹介した。ユーザー・グループのアンジュレータ放射光の使用状況も簡単に述べた。

小型蓄積リングというキーワードについて考えてみたが一般的定義はまだなされていない。しかし、汎用型リングにはない単機能性の概念が付与されると小型リングの性格が明確になってくる。産業用, 光源開発利用といった用途が限定されユーザーの自由度やリング運営の柔軟性が非常に高いリングといえる。マイクロデバイス, 自由電

子レーザー等の専用リング，小型リングではないが，医学専用放射光リング等の最適化の研究が必要となってくるであろう。

最後に，NIJI-IIの建設に指揮を執られ，研究のご指導を頂いている自由電子レーザー研究所富增多喜夫所長に感謝の意を表します。NIJI-IIにおいて行われたサイドバンドキャビティの研究は高エネルギー研究所の春日俊夫教授とそのグループの方々によって行われました。また，この報告に対して電総研アンジュレータ放射光の利用グループの多数の方々に協力して頂いた。併せて感謝します。

文献

- 1) Y. Oka, Y. Hirata, H. Takada, and T. Tomimasu: Proc. 7th Symp. Accelerator Science & Technology, (1989) 29.
- 2) 富增多喜夫：「シンクロトロン放射技術」富增多喜夫編著（工業調査会）p.63 (1990年).
J. Murphy: BNL 42333 Informal Report (Jan. 1989).
- Y. Kamiya and Kihara: KEK83-16 (Sep. 1983).
- H. Ohgaki, T. Yamazaki, S. Sugiyama, T. Mikado, R. Suzuki, and T. Tomimasu: Proc. 7th Symp. Accelerator Science & Technology, 1989, Osaka, 284.
- 3) S. Sugiyama, T. Yamazaki, T. Mikado, M. Chiwaki, K. Yamada, H. Ohgaki, R. Suzuki, T. Tomimasu, T. Mitsui, H. Takada, Y. Tsutsui, Y. Oka, and Y. Hirata: Proc. 7th Symp. Accelerator Science & Technology, 1989, Osaka, 20.
- 4) 高田博史：“小型電子蓄積リングの開発ならびに低エネルギー入射蓄積実験に関する研究”，博士論文，68頁。
- 5) H. Takada, Y. Tsutsui, Y. Hirata, and T. Tomimasu: Jpn. J. Appl. Phys. **30**, 2613 (1991).
- 6) 小貫英雄：放射光，**5**, 1 (1992).
- 7) 千脇光國，三角智久，鈴木良一，杉山卓，大垣英明，野口勉，山田家和勝，清紀弘，山崎鉄夫：第54回応用物理学会講演予稿集 19頁。
- 8) K. Tamura, T. Kasuga, M. Tobiyama, T. Obino, M. Sugiura, T. Takeo, T. Yamazaki, T. Mikado, S. Sugiyama, H. Takada, H. Nakaishi, and Y. Hirata: Proc. 9th Symp. Accelerator Science & Technology, 1993, Tsukuba, 410.