



小型SR光源 “NIJI-III”

筒井 康充, 江村 勝治, 高田 博史

住友電気工業(株)

山崎 鉄夫

電子技術総合研究所

富増 多喜夫

(株)自由電子レーザー研究所

Compact Synchrotron Light Source “NIJI-III”

Yasumitsu TSUTSUI, Katsuji EMURA, Hiroshi TAKADA

Sumitomo Electric Industries Ltd.

Tetsuo YAMAZAKI

Electrotechnical Laboratory

Takio TOMIMASU

Free Electron Laser Research Institute, Inc.

NIJI-III is a superconducting compact synchrotron light source for X-ray lithography. The development of NIJI-III was entrusted to Sumitomo Electric Industries Ltd. (SEI) by the Research Development Corporation of Japan and was successfully completed with the attainment of the design goal. After the machine study in Electrotechnical Laboratory NIJI-III was transferred to Harima Research Laboratories of SEI in 1993 and is under reconstruction. This facility consists of a 100MeV electron linac, NIJI-III and experimental apparatus for the research on synchrotron radiation applications. The progress of NIJI-III and the outline of SEI SR-facility are described.

1. はじめに

シンクロトロン放射光 (SR光) は極めて強力で指向性に優れた光であり、物質科学の研究だけでなく、半導体プロセスを中心とした産業利用の分野でも大きな期待を集めている。特に紫外線の適用限界を越える半導体リソグラフィーのための光源として注目され、およそ10年前から独、英および日本を中心に産業用装置として実用性の高い小型SR装置の開発ラッシュが始まった。SRリングは高磁場の超電導偏向マグネットを用いることで偏向半径が短縮され、大幅な小型化が可能となる。住友電工(株)では新技術事業団の委託を受け、超電導小型SRリング“NIJI-Ⅲ”を開発し、目標とする波長および強度のX線発生と照射領域の大面积化に成功した。(開発期間1986~1991年)そして1993年夏より兵庫県播磨科学公園都市にある住友電工(株)播磨研究所に移設を開始した。本稿ではこのSR光源の概要と開発の経緯および現状について報告する。

2. 播磨研究所SR施設

NIJI-Ⅲは基本的にはリソグラフィー光源としての要求仕様を満足するように設計されているが¹⁾、そのほかにも光励起反応を利用した薄膜プロセスや、マイクロマシン技術として注目されているLIGAプロセスへの適用も可能である。播磨研究所はこのNIJI-Ⅲを用いたSR利用技術の研究開発を主目的とし、1993年7月末に竣工した新しい研究施設である。一方、当研究所の北西約3kmにはSPring-8が建設中であり、稼働の暁には物質科学や医学、生物学など広範な分野で、最先端の研究が進展するものと期待される。このような大型高輝度光源はスペクトルの広さにおいても光の強度においても小型光源をはるかに凌ぐと考えられているが、小型光源は大電流蓄積技術が確立されており、さらにビームラインを短くできるため、サンプル上では真空紫外から軟X線の波長域においてそれほど遜色ない光子密度が得られる。また、この波長域の利用ではノイズの原因となる高エネルギーX線の少ない小型光源の方が適する

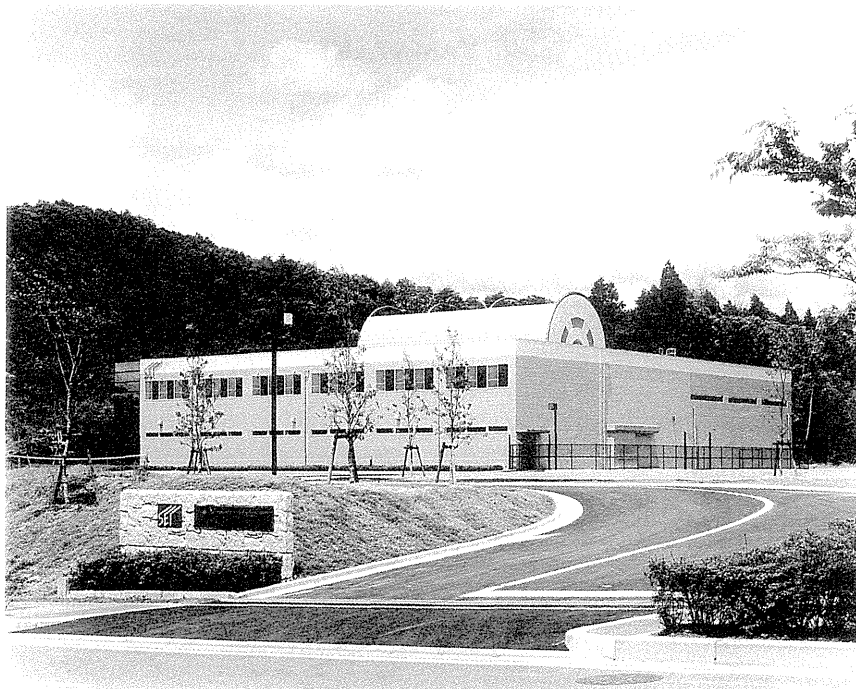


Fig.1 Photograph of Harima Research Laboratories of SEI.

場合もある。そして、なにより手軽に利用できることから、プロセス研究用途には最適と言える。

研究建屋(図1)は50m×40mの2階建ての建物で、建築延面積は約3500m²である。図2は光源装置が設置される1階の鳥瞰図であり、入射器である電子ライナックとSRリング“NIJI-III”を約

500m²の加速器室に設置する。図3はライナックの概略構成であり、電子銃から出射された電子ビームはプリバンチャ、バンチャを経て1本目の加速管で50MeV、2本目で100MeVまで加速される。稼働スケジュールとしては、1993年末までにまず50MeVの加速系(図4)を立ち上げ、SR光源シ

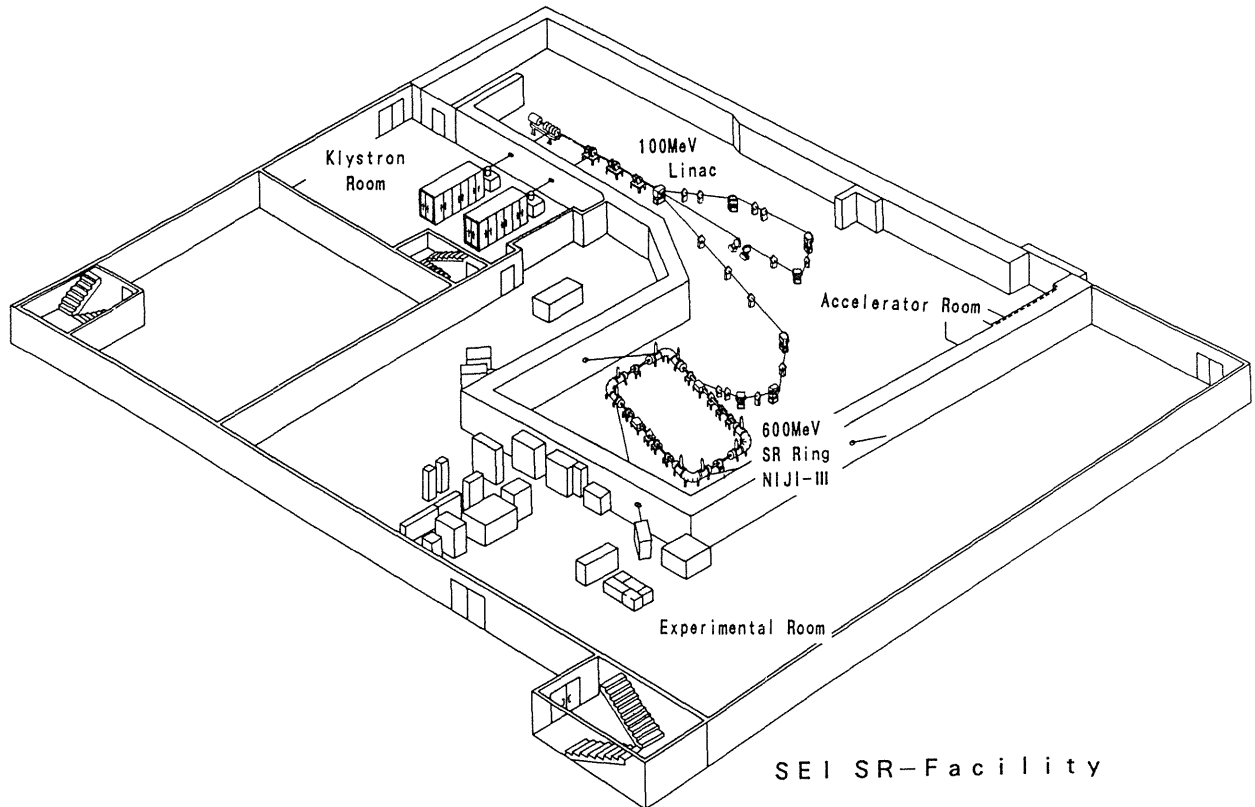


Fig.2. Layout of SEI SR-facility.

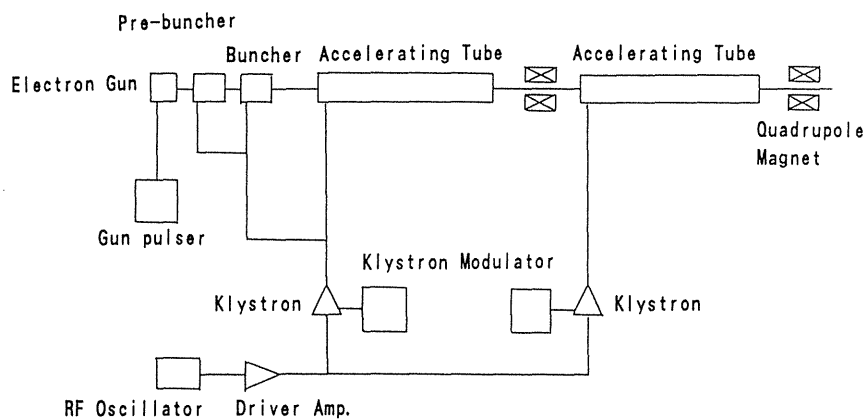


Fig.3 Linac block diagram.

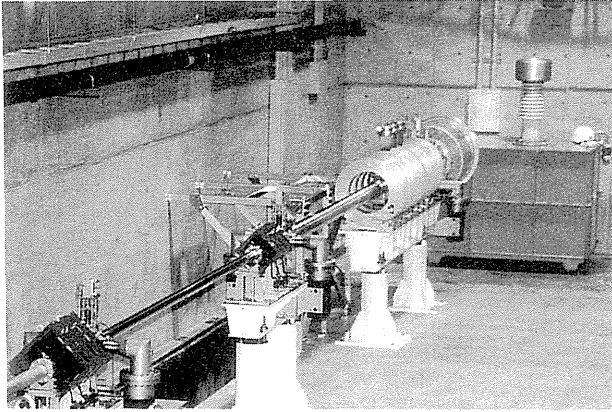


Fig.4 Overview of the linac (50MeV).

システムの調整，試験を行った後，1994年に100MeVまで増強し，本格稼働させる予定である。100MeVシステムの全長は約10mであるが，加速管部では大電力の高周波系の採用により20MeV/m以上の高勾配加速を可能としている。熱陰極カソード(Y646B)型電子銃は印加電圧を直流化することでビームパルス安定化させ，さらに200kVという高電圧でビームの高輝度化を図った。

SR光の利用は図2に示したようにリングを取り巻く放射線遮蔽用コンクリート壁の外側の，広さ約870m²の部屋(利用実験室と呼んでいる)で行う。このコンクリート壁は厚さ1.4mあり，調整やマシンスタディーなどでライナックが25時間/週稼働しても，利用実験室には常時立ち入ることができる。当面は3本のビームラインを引き出せるように準備しており，光励起反応や微細加工などのプロセス技術研究の他，光電子分光などの材料特性評価への利用も予定している。ビームラインはこれらの用途に合わせて，真空紫外域の集光ビームラインやX線用ビームラインなどを設計，製作中である。

NIJI-IIIは1989年より電子技術総合研究所にて組立，試験を開始し，1991年には開発目標を達成した。さらに播磨研究所への移設にあたって，SR光安定供給および低ランニングコスト化を目的に

若干の改良を進め，特に超電導マグネット用クライオスタットの断熱性能向上によって，液体He蒸発量を6割程度まで低減することができた。移設後のスケジュールは，1993年10月までに組立，調整を終え，11月より総合運転を開始させる予定である。

以下にNIJI-IIIの概要と電子技術総合研究所でのシステム試験結果，および現状について述べる。

3. SRリング“NIJI-III”

3.1 装置概要と特徴

移設前のNIJI-IIIの外観を図5に，主なパラメータを表1に示す。

蓄積電子エネルギーと偏向磁場強度は，SRスペクトルのピーク波長をリソグラフィーに最適な波長である0.5~1nmの範囲内にし，かつ超電導偏向マグネットの製作上無理のないよう，それぞれ600MeV，4Tとした。図6はこのときのSRスペクトルであり，波長0.7nm付近にピークを持つ。

SR光ビームは水平方向には一様な強度の照射領域が得られるが，ビーム偏向面に垂直な方向の照射領域は，指向性の良さゆえに狭く，強度も一様でない。従って，半導体プロセスで求められる実用的な露光フィールドを得るためには，垂直方向の照射領域拡大技術が必要である。この方法としては，電子ビーム軌道を垂直に揺動させる方法(電子波動法)^{2),3)}，振動ミラーで反射方向を振る方法⁴⁾，被照射物を垂直に動かす方法⁵⁾の3つが検討されている。特に最初の電子波動法はSR光強度の損失がなく，機械的駆動部を持たないため制御，保守も容易という長所がある。NIJI-IIIでは，この電子波動法を採用しており，総合システム試験ではその有効性を確かめることが目的の一つであった。

SR光源の性能評価において最も重要な特性の一つであるビームエミッタンスについては，リソグラフィーのような用途ではそれほど厳しい要求は

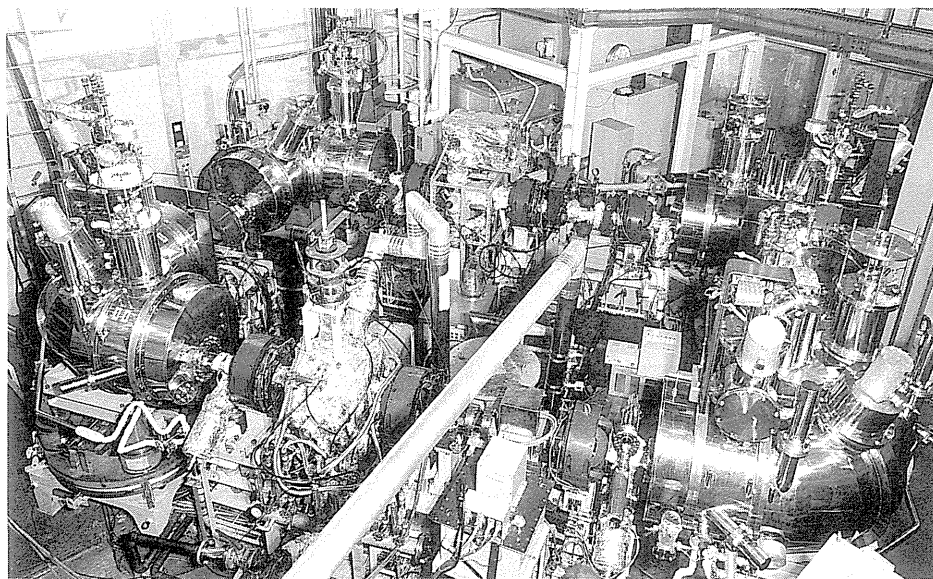


Fig.5 Overview of NIJI-III .

Table 1 Main parameters of NIJI-III

Stored Energy	600 MeV
Bending Magnetic Field	4 T
Bending Radius	0.5 m
Stored Beam Current	200 mA
Radiation Loss	23 keV/turn
Critical Wavelength	1.3 nm
Emittance	$\sim 2.5 \times 10^{-7}$ mrad

ない。しかしながら、ビームラインの短い小型リングではクォーターミクロン級の微細加工になると、ビームサイズで決まる半影ボケが無視できなくなり、ビーム断面の広がり σ はおよそ1mm以下であることが必要になる。さらに、物質特性評価などへ用途を拡大するためには光源の輝度はますます重要になり、小型光源においても低エミッタンス化が求められる。NIJI-IIIでは、リソグラフィからの要求($\sigma < 1$ mm)ならびに、他の利用への適用を考慮し、エミッタンスの十分小さい電磁石配列(マグネットラティス)を採用した。図7がリング構成であり、90°偏向超電導マグネット4台と3種類の四極マグネット8台からなる四角形状のマグネットラティスとなっている。図8はNIJI-

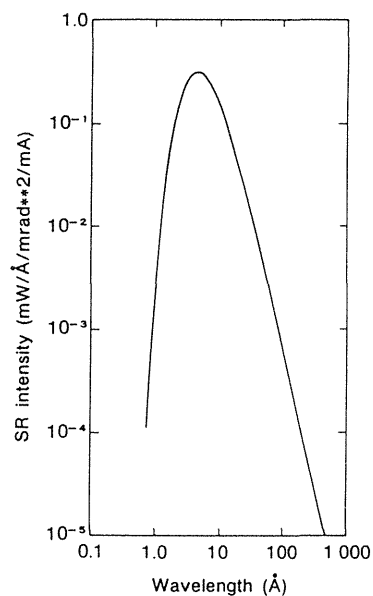


Fig.6 Calculated SR spectrum of NIJI-III .

IIIの典型的な動作条件でのビームサイズ計算値であり、SR発光点である偏向部において $\sigma < 0.5$ mmが得られる。また、自由度の高いオペレーションを可能にするため、超電導マグネットのフィールドインデックス(n値)は独立に変化させることができ、四極マグネットの励磁比と合わせて様々なパターンのラティス関数(ベータトロン

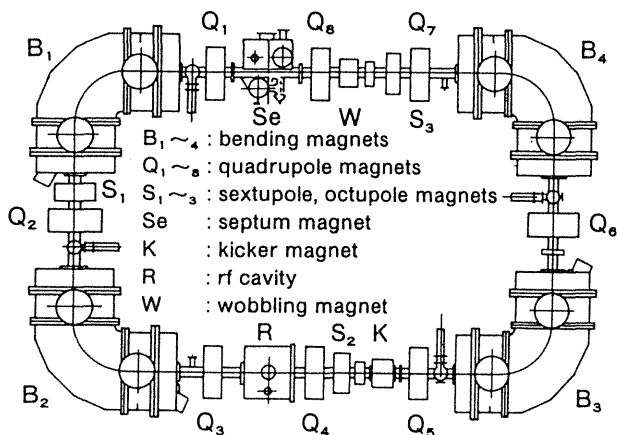


Fig.7 Schematic configuration of NIJI-III

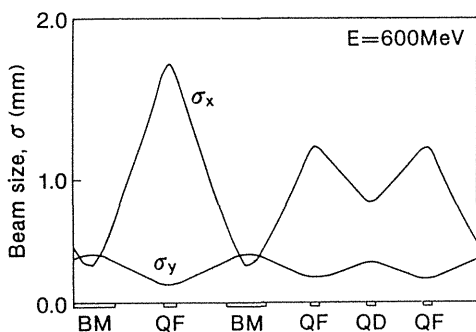


Fig.8 Calculated beam sizes.

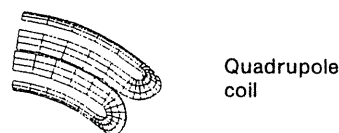
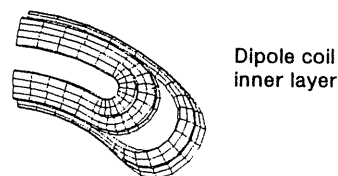
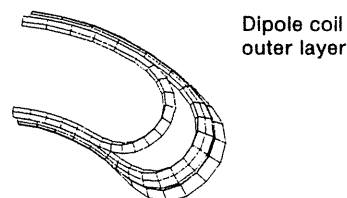
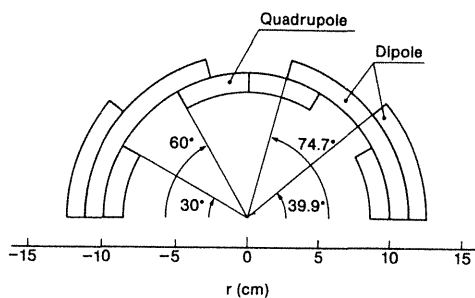


Fig.9 Cross section of the upper half and top view of one half of the winding heads of the superconducting bending magnet.

関数, エネルギー分散関数) を選ぶことができる。特に, 小型リングでありながら直線部のエネルギー分散関数を零にでき, 入射などビーム蓄積において有利な条件が得られる。

最も重要なコンポーネントである超電導マグネットは高い磁場精度が求められるため, 磁極の磁気特性に影響されず, 磁場均一性に優れる空心の $\cos \theta$ 型コイルを採用した⁶⁾。図9がこのコイルの概略形状で, 中央断面では $\cos \theta$ 型コイル配位が形成され, 磁場測定では直径60mmの範囲で約 6×10^{-4} の均一度が得られて, 磁場計算値とも良い一致を示した⁷⁾。しかしながら, 直線部との境界であるコイル端部はコイル配位が $\cos \theta$ 型から崩れるので強い非線形磁場が発生する。特にこのコイルの場合6極成分が強く, 補正をしないと極端にダイナミックアパーチャーが狭められ, ビーム

蓄積できなくなることがビームトラッキングより明らかになった。そこで端部形状を修正し, 逆符号の六極成分を作って相殺させることにより十分なダイナミックアパーチャーが得られるように設計した⁷⁾。また, このマグネットのもう一つの特徴としては, 図10に示されるようにビームダクトが超電導コイルと共に液体Heで冷却されており, このダクト壁のクライオポンピング効果で大きな真空排気能力が得られていることである。モデルチャンバーでの排気速度評価によれば, 超電導マグネット4台で N_2 および H_2 ガスに対してそれぞれ 20000 l/s, 44000 l/s の排気速度が得られることが判った⁸⁾。

NIJI-IIIの運転制御は図11のように, オペレー

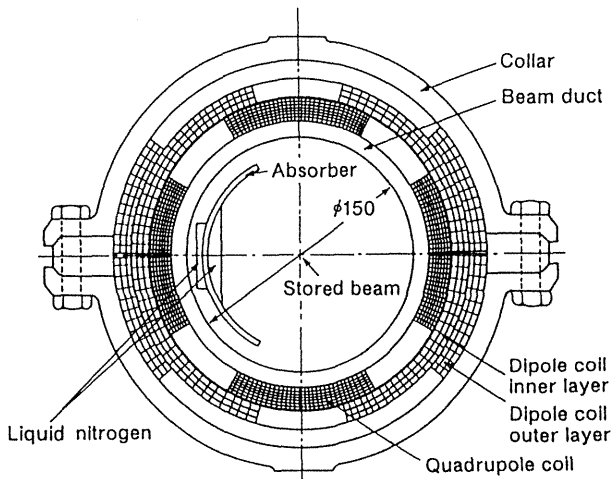


Fig.10 Sectional structure of cold bore and absorber.

タが全システムを集中的にコントロールするマスターコントローラと、1:1光データ伝送により各機器を制御するリングコントローラをN:Nトークンリング方式の光データウェイで結んだ制御システムで行う。制御モードは調整時のための“手動モード”と定常運転時の“自動モード”があり、後者では各機器のON/OFFや、蓄積効率を最大にする入射系の最適化、エネルギー上昇など全てスタートボタン一つで行うことができる。

3.2 総合システム試験

電子技術総合研究所でのシステム試験における最大の課題は超電導マグネット磁場のクォリティーを実際のビームで評価することであった。これは3次元的に複雑な形状をしたコイル端部において、測定した六極磁場成分の大きさが設計と若干異なっており、このようなコイル製作上の誤差がビームに及ぼす影響を確認する必要があったためである。そこで磁場分布の制御が容易な常電導マグネットと比較する方法を取り、最初は超電導マグネットと等価な常電導マグネットを用いてシステム調整を行い、その後1台ずつ超電導マグネットに置換してビーム挙動の変化を観測していっ

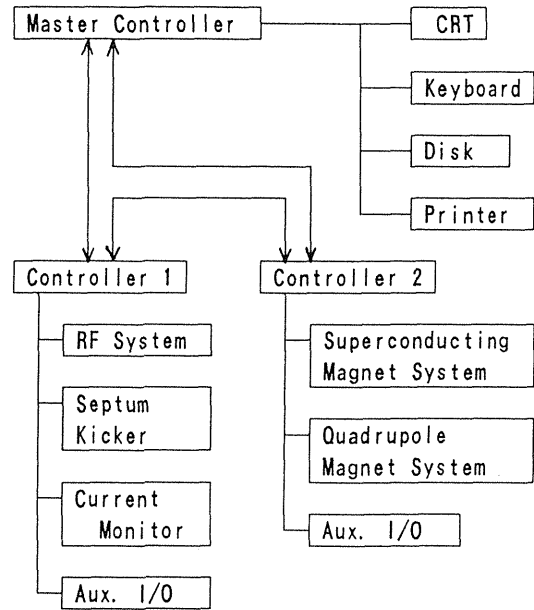


Fig.11 Block diagram of the control system.

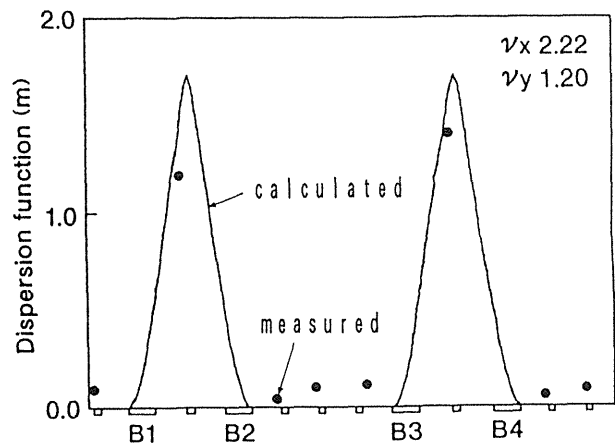


Fig.12 Dispersion function.

た。その結果、超電導マグネットへの置換で軌道のズレは増大したものの、ビーム寿命や蓄積効率はむしろ向上し、ダイナミックアパーチャーが設計どおり十分広いことが確認された。こうして軌道の調整を進め、1990年8月には全て超電導マグネットに置換してビーム蓄積に成功した。図12はエネルギー分散関数の測定例であり、長直線部でエネルギー分散関数がほぼ零になっており、線形計算で求めた計算値とほぼ一致していることから、非線形磁場補正が良好であったことが判る。

その後、最高蓄積電流は450mAを越えたが、蓄積電流が増加するにつれてビームサイズも増大し、かつ時間的に変動する現象が観測された。これはrf空洞の高次モードに起因する縦方向バンチ結合不安定性によることが判り、この抑制にサイドバンド空洞を用いたデカップリング法⁹⁾を試みた。これはバンチごとに加速電圧が異なる第2の高周波加速系を導入してシンクロトロン振動数に広がりを持たせ、バンチ間の結合を切り放すもので、サイドバンド空洞としてはスペース等の関係上、共振周波数 $2 \times f_{rf} - f_r$ (f_{rf} : rf周波数, f_r : 周廻周波数) のリエントラント空洞を用いた。図13はビーム信号をスペクトラムアナライザで観測した一例で、縦方向バンチ結合不安定性が発生しているときには $n \times f_r$ (n は正整数) の両側にシンクロトロンサイドバンドが強く見られるが、サイドバンド空洞を動作させると見事に抑制されていることが判る。実際、このときビームプロファイルを観測すると、ビームサイズが縮小し、そのふらつきも止まって安定化することが確認された。このデカップリング法の長所は、ランダウ空洞と異なり蓄積電流値に合わせた精密な位相調整が不要であることで、運転自動化が必要なプロセス用光源としてはうってつけの手法であると言える。

総合システム試験のもう一つの目的である電子波動法の検証では、波動マグネットと呼んでいる交流二極マグネットにて水平方向に最高20Hzの三角波磁場を印加し、軌道を垂直方向に振らせて、照射領域の拡大とビームに及ぼす影響を調査した。図14は波動マグネットで $\pm 8\text{mrad}$ のビーム偏向(キック)を与えたときの照射領域の変位を示した例で、この場合光源点から4mの位置で約50mmスキャンされている。ビーム寿命に与える影響を調べたところ、図15のようにキック角 8mrad を越えるまでは寿命の変化は観測されなかった。図16は電子波動させたときの垂直方向のビーム軌道変位を調べたもので、計算値と測定値はよく一致している。これによれば、 8mrad のキック角では偏向部で最大約 $\pm 25\text{mm}$ 軌道変位しており、この状態まで寿命の変化がないことは、ダイナミックアパーチャーが設計通り十分広いことを物語っている。

入射はエネルギー180MeV~300MeVで行い、リング内で定格の600MeVまで加速したが、超電導マグネットと四極マグネットの励磁電流比を一定にした制御では動作点のシフトが発生した。図17がエネルギーに対するベータトロンチューンシフトの例であり、水平方向のチューンシフト $\Delta\nu_x$

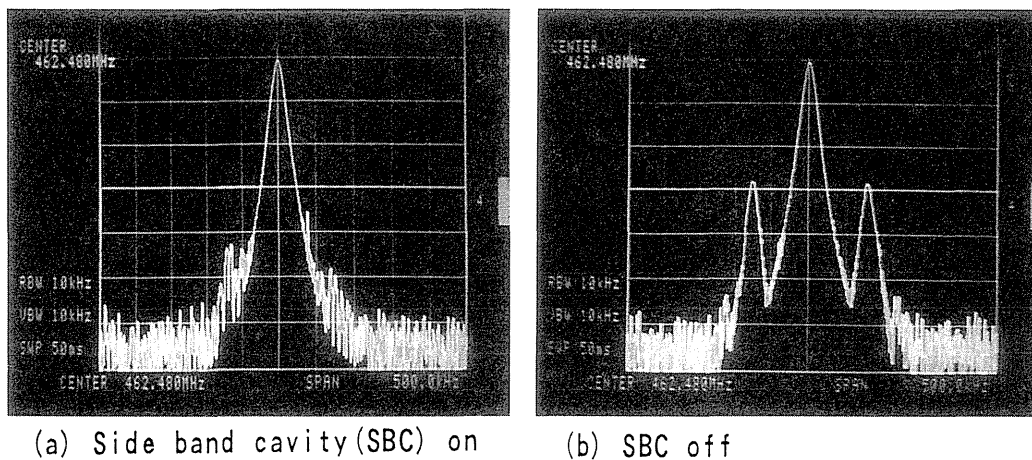


Fig.13 Frequency spectrum of the coherent mode of the synchrotron oscillation (the center frequency, 462.6 MHz, 50 kHz/div).

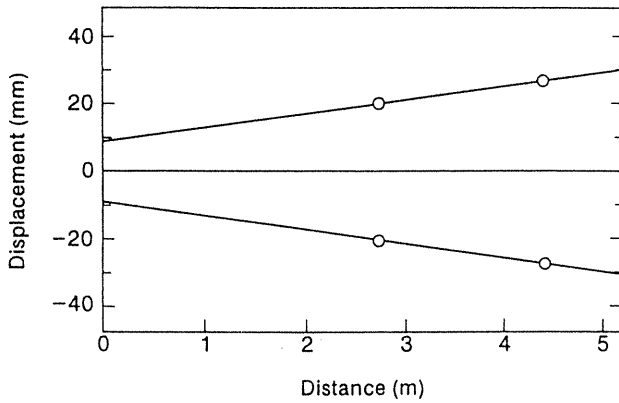


Fig. 14 Dependence of displacement of the synchrotron radiation generated by the stored beam on the distance from the synchrotron radiation source. $\nu_x=2.2$, $\nu_y=1.2$. The solid line plots the calculated displacement.

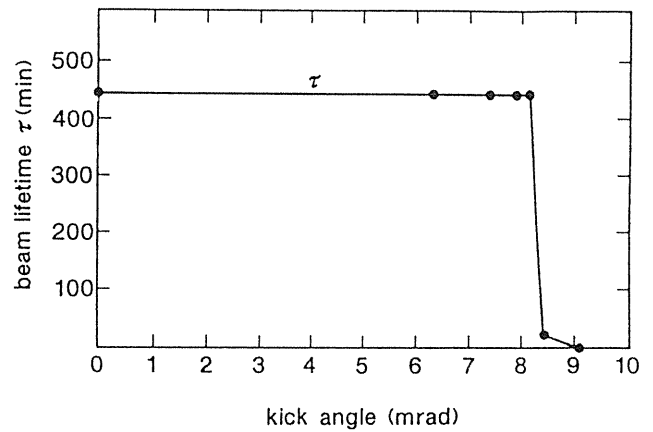


Fig. 15 Beam lifetime as a function of the kick angle of the wobbling magnet.

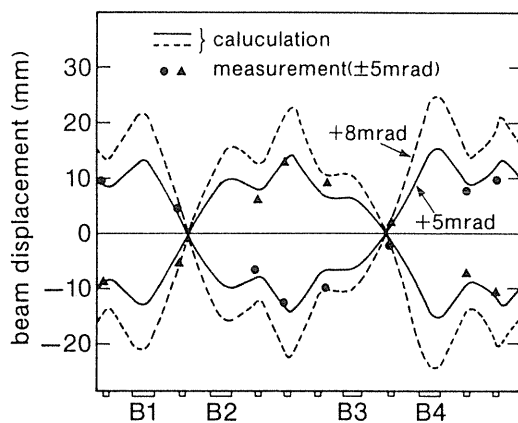


Fig. 16 Vertical displacement of the wobbled beam orbit. Solid circles and triangles indicate the measured beam positions at a kick angle of ± 5 mrad. Solid lines and broken lines indicate the calculated orbit at kick angles of ± 5 mrad and ± 8 mrad respectively.

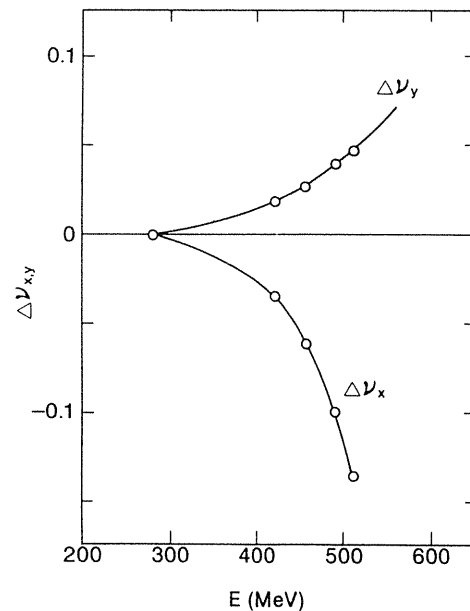


Fig. 17 Beam energy dependence of tune shifts at each step during beam energy ramping.

が垂直方向の $\Delta\nu_y$ より大きいことから、この非線形性は水平方向のベータatron関数 β_x が大きい四極マグネットで発生したと考えられる。したがって超電導マグネットで懸念されたステンレス材のわずかな磁化や強力な電磁力によるコイルの変形などは、この磁場領域では問題になっていないことが確認された。この動作点シフトは場合によっては共鳴を引き起こしビームロスをもたらすが、

この問題はベータatronチューンを一定にするような四極マグネットの励磁関数を制御システムに登録し、制御することで回避できた。

600 MeVでは強力なSR光が光アブソーバーに照射されるため、初期には大量のガスが放出され、蓄積ビーム寿命も2時間前後に制御された。その後、運転時間とともに徐々に真空は改善され、蓄積電流200 mAで約4時間の寿命が得られる

ようになった。ただし、この総合システム試験はSR利用のためのルーチンオペレーションではないので、マシンスタディの目的でたびたび真空リークして計測系などの追加、調整を行ったため、真空の枯れは十分進んでいなかった。したがって播磨研究所へ移設して本格的に稼働すれば、SR照射時間の増加にともない、さらに長寿命化が図れると期待される。

4. おわりに

小型SR光源“NIJI-Ⅲ”はX線リソグラフィ用として設計され、その目標仕様を達成することができたが、そのシステムの拡張性や、電子波動法などの新たに適用した技術は、単にリソグラフィだけでなく他の応用にも新しい展開をひらくと期待される。今後、播磨研究所でも光源としての本格稼働を急ぐとともに、新しい応用技術の探索や、光源の高度化も進めていく予定である。

最後に、多大な御指導、御支援いただきました電子技術総合研究所をはじめとする関係各位に感謝いたします。

文献

- 1) K. Emura, Y. Tsutsui, F. Miura, H. Takada and T. Tomimasu: Proc. 7th Symp. Accelerator Science & Technology (RCNP, Osaka, 1989) 344.
- 2) H. Betz & G. Mülhaupt: Proc. SPIE, **448**, 83 (1984).
- 3) T. Tomimasu: Japan J. Appl. Phys., **26**, 741 (1987).
- 4) J. P. Silverman, R. P. Haelbich, W. D. Grobman & J. M. Warlaumont: Proc. SPIE. **393**, 99 (1983).
- 5) P. Thompson, E. Cullman, W. Vach & K. H. Müller: Microelectronic Engineering, **6**, 293 (1987).
- 6) T. Okazaki, Y. Hosoda, S. Isojima, T. Keishi, C. Suzawa & T. Masuda: Proc. 11th Int. Conf. Magnet Technology (Elsevier Science Publishers, Tsukuba, 1989) 241.
- 7) H. Takada, Y. Tsutsui, K. Emura, F. Miura, C. Suzawa, T. Masuda, T. Okazaki, T. Keishi, Y. Hosoda & T. Tomimasu: Japan J. Appl. Phys., **30**, 1983 (1991).
- 8) F. Miura, Y. Tsutsui & H. Takada: Proc. 7th Symp. Accelerator Science & Technology (RCNP, Osaka, 1989) 130.
- 9) T. Kasuga, H. Yonehara, M. Hasumoto & T. Kinoshita: Japan J. Appl. Phys., **27**, 1976 (1988).