

NTT 電子蓄積リング

NTT LSI 研究所

北山 豊樹, 早坂 東亜

NTT Electron Storage Rings

Toyoki Kitayama and Toa Hayasaka

NTT LSI Laboratories

Nippon Telegraph and Telephone Corporation

Design parameters, features, and the present status of accelerators in the NTT SOR facility are presented. In order to realize a compact and economical SR source suitable for lithography, both a superconducting compact storage ring with racetrack shape and a short linear accelerator are developed. Electrons from 15 MeV linear accelerator are injected, accelerated to 600 MeV and stored in the ring "Super-ALIS". From this experience, it is demonstrated that low energy injection is a very attractive method for constructing a compact synchrotron light source. The initial stored current reaches about 100 mA. A normal conducting storage ring is also developed and used in lithography experiments. This ring also uses a low energy injection scheme.

1. はじめに

LSI の高性能化は微細加工技術の進歩により先導されてきた。リソグラフィは微細加工の最も基本的な技術である。現在の主力技術は紫外線を用いたホトリソグラフィであるが、微細化は波長による限界に近づいており、それをこえる次世代のリソグラフィ技術の確立が急務である。

紫外線より2桁波長が短い軟X線を用いるX線リソグラフィは、ホトリソグラフィの限界を越える0.2 μ mのパターン形成能力をもつが、LSI生産に適する小型で経済的な放射光源の開発が最大の課題である。NTTでは1985年より、超伝導偏向磁石を用いた小型蓄積リング、常伝導蓄積リング

等からなる放射光施設の建設を進めてきた。本稿では、NTTが開発した電子蓄積リング等について構成、特徴、現状等を述べる。

2. 全体の構成

図1にNTT放射光施設の概要(1)を示す。施設は地下にあり、2つの電子蓄積リングと入射用線形加速器等が設置されている。地下2階には、入射用線形加速器と常伝導蓄積リングが設置されている。常伝導蓄積リングは八角形のリングで、最終エネルギーは800MeVである。周囲には放射光利用実験のためのスペースが設けられている。地下1階に設置された小型のレーストラック型リン

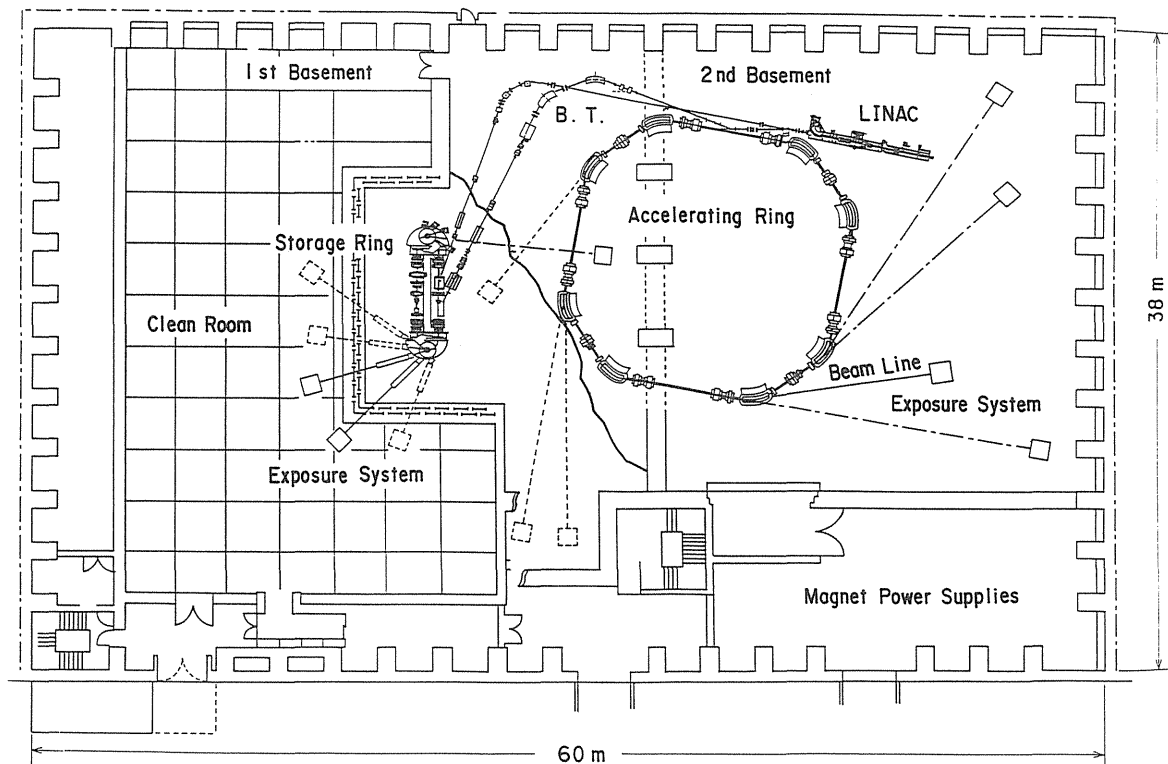


Fig. 1 NTT synchrotron radiation facility

グは、小型化・低ランニングコスト化を狙いに超伝導偏向磁石を用いた600MeVのリソグラフィ用蓄積リングである。リソグラフィ実験のため、この蓄積リングに隣接してクリーンルームが設置されている。

3. 超伝導小型蓄積リング“Super-ALIS”(2)

3.1 設計の基本方針

リソグラフィ用の小形で低コストなリング設計に当たって、①超伝導偏向磁石の強磁場で小型の電子軌道を実現し、②超伝導コイルにより低消費電力化することを基本的な狙いとした。

最初にリング形状を考案する。従来、円形(3)、レーストラック形(4)、4辺形(5)などのリング形状が提案されている。超伝導磁石は、低ランニングコスト、大きさ、放射光特性などの点から、工業用装置を構成する上で魅力的であるが、超伝導偏向磁石の数は少ないほど良い。電源導入部からの低温領域への熱侵入、および、超伝導磁石のフリ

ンジ磁場のためである。フリンジ磁場では6極や8極などの多極磁場がかなり大きく、電子の安定な運動を乱す。この観点からは、円形が最も良い。しかし、円形の装置を開発するに当たっては多くの問題があると予想され、直線部があると問題解決のための部品を容易に追加できる。円形リングのもう一つの欠点は、ビームサイズである。リソグラフィには水平方向のビームサイズが重要な要素であり、露光速度や露光品質に影響が大きい。直線部があると強集束が可能なのでビームサイズはより小さくできる。以上の要因を考慮して、レーストラック形を選んだ。

次に、入射エネルギーについて考える。LSI生産に適する装置とするには、リングだけでなく、入射用加速器とビーム輸送系を含む入射系全体の大きさとコストの低減も重要である。そこで、小型の線型加速器から低エネルギー電子を入射しリング内で加速・蓄積する方式を基本に設計をすすめることとした。

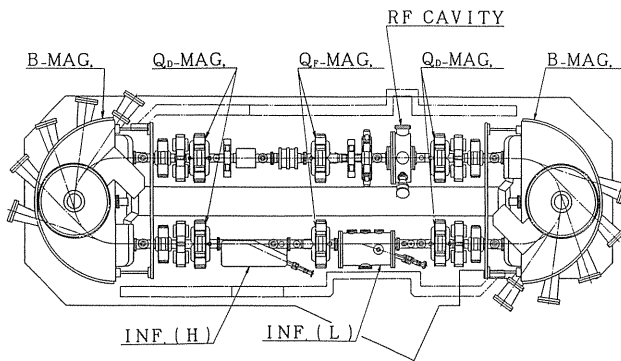


Fig. 2 Outline of super-ALIS

3.2 Super-ALIS の概要

図2にSuper-ALISの構成を示す。直線部には、多極（4極、6極、8極）磁石、高周波加速空洞、インフレクタおよびビームモニタが配置されている。ビームポートは10個である。周長は16.8 m、装置寸法は2.5m×8.8mである。

このSuper-ALISでは磁極付き鉄ヨークを有する超伝導偏向磁石を用いた。最大偏向磁場は3 Tである。鉄ヨークを用いることにより、電磁力が低減できるとともに、ヨークの磁極形状により入射エネルギーレベルでの磁場分布を容易に均一化できる。入射レベルではビームサイズとビームの振動の幅が大きいため、可能な限り均一磁場領域を広くする必要があるのである。さらに、ヨークは放射線シールドとしても有用である。

本リングはリング内加速方式を採用した。線形加速器からの低エネルギー電子を入射後、リング内で最終エネルギーまで加速する。入射エネルギーは約15MeV、最大エネルギーは600MeVである。

低エネルギー入射系とは別に、高エネルギー電子の入射系も設けた。後述の常伝導蓄積リングを入射器として使用する。入射系を2系統にした理由は以下の通りである。リング内加速方式は成功すれば効果は大きい、大電流ビームの加速に影響する要因は不明な部分も多い。高エネルギー入射系は、この不明要素からくるリスクを避けるためである。

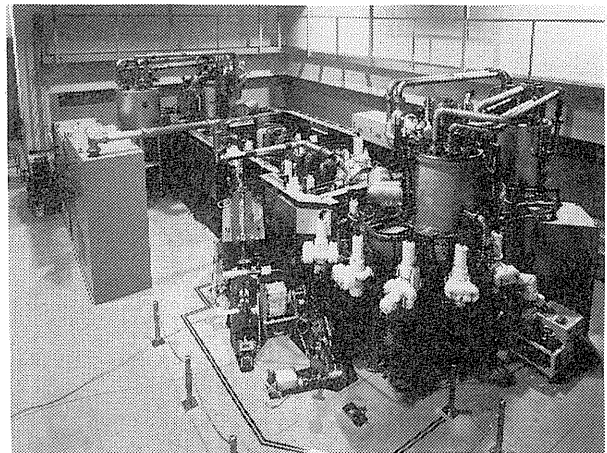


Fig. 3 Overview of super-ALIS

大面積露光のために放射光を縦に広げるビームウオブリグ方式を取り入れた。このシステムは4個の磁石とその駆動回路からなる。これらの磁石は、必要なら軌道調整にも用いることができる。

真空系には、非蒸発型ゲッターポンプ(NEGポンプ)を、偏向部ビームダクトの軌道内周側に設けた。NEGポンプの利点は小型なことにある。また、分布型イオンポンプにおいて加速時に磁場を上げるとき生ずるガス放出がない。平均真空度は 2×10^{-9} Torr (設計値)である。また、無負荷時の平均真空度は 5×10^{-10} Torr 以下である。

工業利用を考えると、放射線遮蔽は重要である。2つの直線部は、鉛、ステンレス、ポリエチレンから成る遮蔽体で覆われている。これにより、全遮蔽体積の低減を図った。

図3に、Super-ALISの外観を示す。この写真では、遮蔽体の上部は取り外してある。超伝導コイル冷却のためのヘリウム冷凍システムは、装置の真下の部屋に設置されている。

3.3 設計パラメータ

表1に設計パラメータを示す。水平方向のベータatron数は約0.6、垂直方向は0.3~0.7である。最終的動作点はマシンスタディを通じて決める。設計に当たっては、蓄積電流500mAを仮定した。RF周波数は125MHzである。

Table 1 Designed parameters of Super-ALIS

Maximum Energy	600MeV
Injection Energy	15MeV~600MeV
Critical Wavelength	17.3Å
Maximum Magnet Field	3 T
Betatron Number	$\nu_x \sim 1.6$ $\nu_y \sim 0.3 \sim 0.7$
Beam Size	$\sigma_x < 1.0\text{mm}$
Beam Current	500mA
RF Frequency	125MHz
Vacuum Pressure	$2 \times 10^{-9}\text{Torr}$
SOR Port Number	10
Circumference	16.8m
Footprint	$2.5 \times 8.8\text{m}$

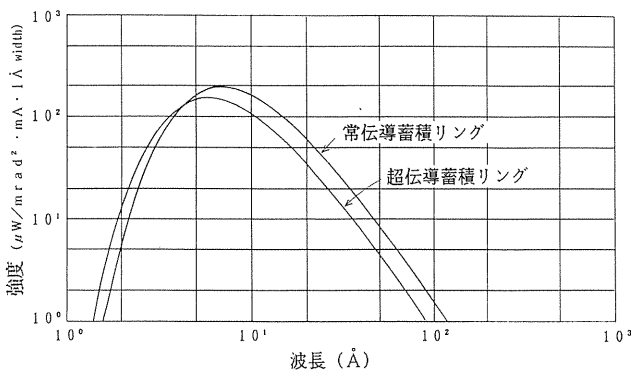


Fig. 4 SOR spectrum of NTT storage rings

図4に放射光スペクトル(計算値)を示す。厚さ $20\mu\text{m}$ のBeを窓を通したとき、リソグラフィに適する約 7\AA の波長で最大パワーが得られる。

図5にラティスの関数、 β_x, β_y, η を示す。このラティスでは偏向部で β_x と η が小さいので、ビームサイズとCODを小さくできる。以下の理由により、これらの性質は重要である。超伝導磁石の均一磁場領域は常伝導磁石ほど広くないので、ビームは均一磁場領域からそれて失われやすいため、偏向部では、設計軌道からの電子軌道のずれを最小にしなければならない。さらにリング内加

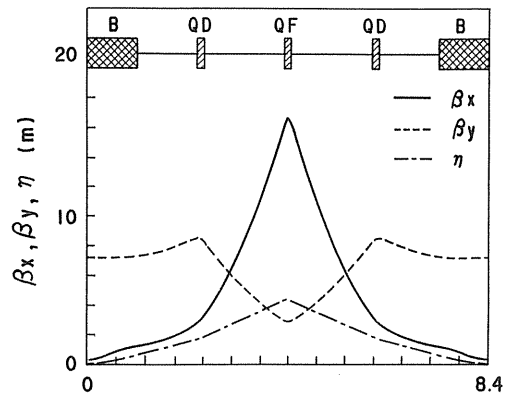


Fig. 5 Magnet lattice functions of Super-ALIS

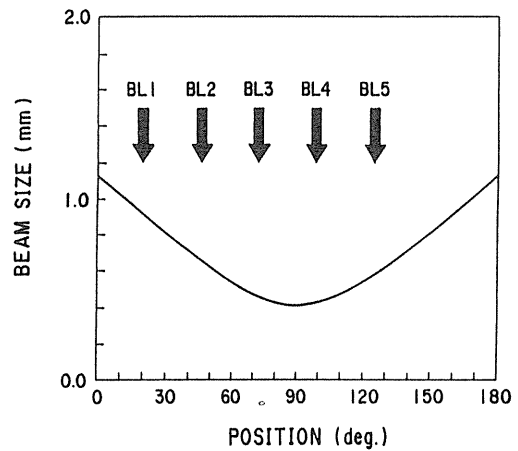


Fig. 6 Beam size in the bending section of Super-ALIS. Arrows indicate the source point of each beamline.

速方式で入射エネルギーが15MeV程度と低いときには、地磁気が平衡軌道を乱す。従って、この効果を最小にするように設計を行った。地磁気による最大のCODは、偏向部で水平方向に2mm、垂直方向で1mm以下である。

図6に偏向部での水平方向のビームサイズ(計算値)を示す。矢印は各ビームラインの光源点を示す。ビームサイズは全て1mm以下である。ビームサイズは一般に動作点とともに変化するがこのラティスでは、ビームサイズの変化は前述の動作領域で小さい。

3.4 現状

15MeV電子を入射して600MeVまで加速し蓄

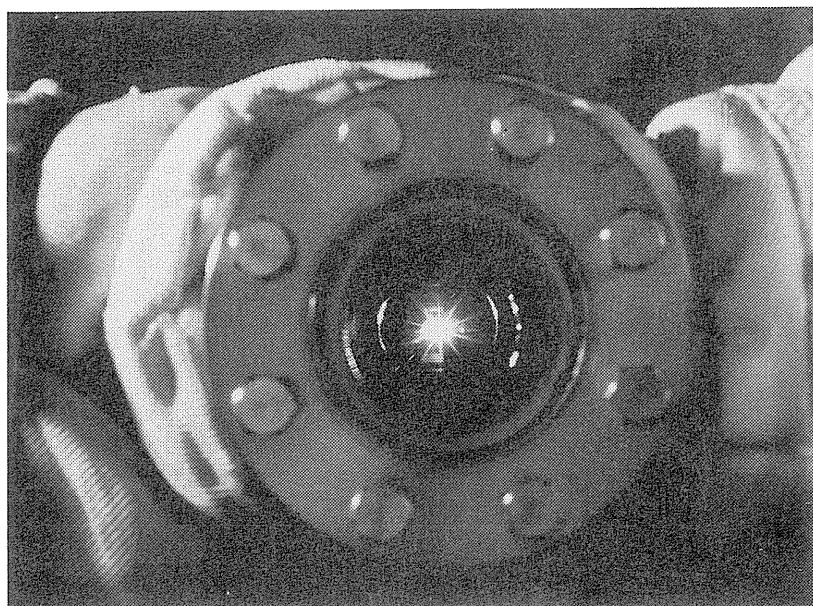


Fig. 7 Synchrotron radiation from Super-ALIS

積する方法で電子蓄積に成功した(6)。図7に放射光の写真を示す。蓄積電流は100mA, 寿命は約3000秒である。現在における電流の主な制限要因は、超伝導偏向磁石と4極磁石のトラッキング誤差、および、ビーム輸送系と線形加速器の調整が不十分なためである。また寿命は、電子とダクト内残留ガス分子との衝突・散乱により短い。無負荷時の平均真空度は、 1.5×10^{-10} Torrであり、蓄積時には光刺激脱離によって約2桁悪くなる。

4. 常伝導蓄積リングNAR(7)

4.1 目的

常伝導蓄積リングは、①リング内加速方式の実験装置、②Super-ALIS への高エネルギー電子入射装置③光源リングの3つの目的を持って開発した。なお、挿入光源も設置できるように長直線部を設けた。

4.2 ラティス

図8に本リングの構成を示す。最終エネルギーは800MeV ですべての磁石は常伝導である。ヨークの飽和を考慮して最大磁場は1.5Tとした。

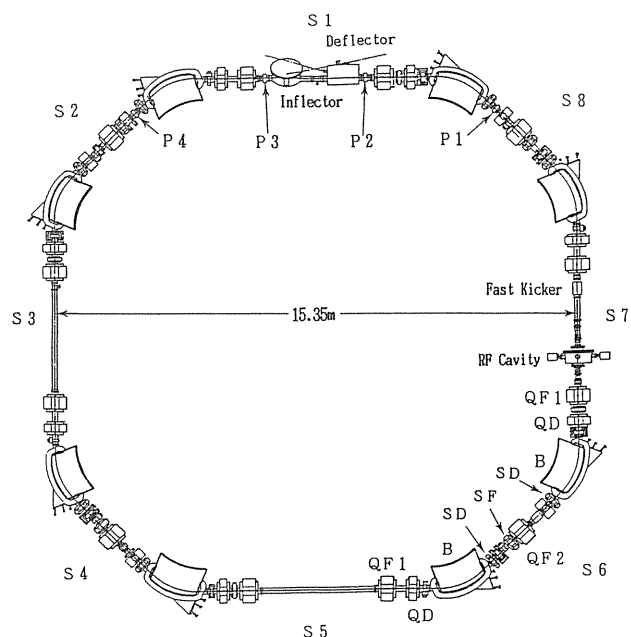


Fig. 8 Outline of NAR

主なパラメータを表2に示す。

リソグラフィに限らない用途を考慮し、偏向部でのビームサイズを小さくするよう配慮した。これと将来の挿入光源設置を考え、エミッタンスを小さくするとともに、長直線部で水平方向の β 関数大、エネルギー分散関数をゼロを設計条件とし

Table 2 Designed parameters of NAR

Maximum Energy	800MeV
Injection Energy	15MeV
Critical Wavelength	20.2Å
Maximum Magnet Field	1.5T
Betatron Number	ν_x 3.25 ν_y 1.25
Beam Size	σ_x 0.4mm
Beam Current	500mA
RF Frequency	125MHz
Vacuum Pressure	5×10^{-10} Torr (static)
Circumference	52.78m

た。また、リング内加速に必要なトラッキング精度向上を図るため、ラティスはアクロマト偏向系では最も簡潔なDFA型を選択した。リング全体のサイズを小型にするため、4回対称とした。

長直線部での η が零なので、その2か所に入射・出射磁石とRF加速空洞を配置した。長直線部S1の入射・出射磁石の両側には、パータベータ磁石を配置した。これらにより、入射時の変形軌道を動作点に応じて調整できる。ビーム出射のために、高速キッカー磁石をS7に設置した。この出射系により、超伝導小型リングに向けて200から600MeVの電子を供給できる。RF加速空洞もS7に配置した。

図9には、動作点 $(\nu_x, \nu_y) = (3.25, 1.25)$ におけるラティスの関数を示した。偏向部でのビームサイズは0.4mmである。本リングは別の動作点 $(\nu_x, \nu_y) = (3.75, 1.75)$ も持たせ、より低エミッタンスを狙った。

本リングの臨界波長は20.2Åである。放射光スペクトルを図4に示す。図10にリングの外観を示す。

4.3 構成上の特徴

低エネルギー入射・リング内加速方式による蓄

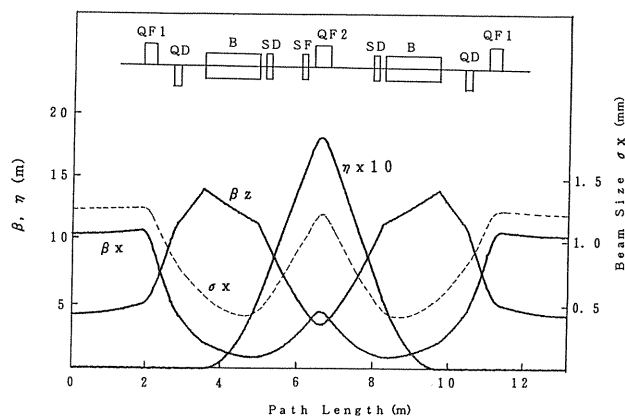


Fig. 9 Magnet lattice functions of NAR

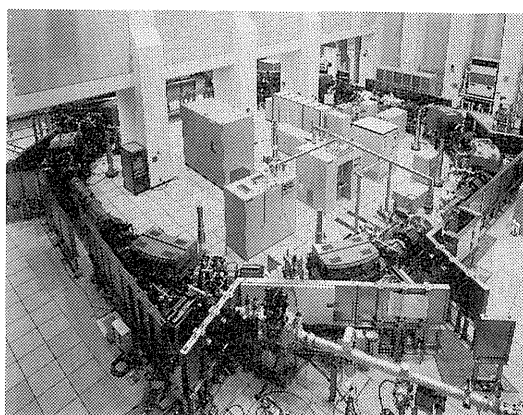


Fig.10 Overview of NAR

積リングなので、以下の特徴がある。

電磁石の鉄ヨークは、積層鉄板とし、加速時の渦電流発生を抑えた。この電源として、加速時にはコイル電流を増加させ、蓄積時には一定に保持するため、高精度でダイナミックレンジが広い直流電源を開発した(8)。計算機からのトラッキングデータにより、種々の動作パターンが実現できる。シンクロトロン動作時には加速周期を短くする必要があるが、磁石のインダクタンスと電源のフォーミング電圧で制限がある。コイル電流の減少時間を短縮するため、上記電源にはインバータ回路を付加した。

真空系については、加速途中、特に低エネルギー領域では、残留ガス分子による電子の散乱とイオントラッピングによるビームロスが重要な問題で

ある。また、蓄積モードでは十分なビーム寿命が必要である。そこで、真空排気能力を240001/sとした。イオンポンプ、チタンゲッタポンプ、分布型イオンポンプが適宜配置されている。偏向部ビームダクトには、光刺激脱離ガス低減のため放射光のアブソーバを導入した。

入射エネルギーが非常に低いため、イオントラッピングが問題と考えられるので、イオンクリアリング電極を配置した。また、磁場上昇中にビームダクトに生ずる渦電流は6極磁場成分を発生する。従って、ダクトの厚さは通常の高エネルギー入射の蓄積リングのそれに比べ薄くした。ビームダクトのカップリングインピーダンスを考慮し、リング一周にわたってダクトのスムーズ化に配慮した。さらに、ベローズの長さはできるだけ短くした。

RF加速系の動作条件はビーム電流に大きく影響する。入射直後には、エネルギー分散の広がりを抑えるためRF電圧を低く設定する必要がある。また、RF加速空洞は広くデチューンされなければならない。高エネルギー領域では、タウシェク寿命を長くするため約60KVと高いRF電圧が必要で、かつ、反射パワーを最小にするためデチューン周波数はフィードバック系で制御する。これらの要求を満たすため、26dBの電圧制御領域をもつRF電源と広範囲にデチューン可能な空洞を開発した。RF電源は蓄積電流500mAでも十分なRFパワーが供給できる。

4.4 現状

15MeV入射、800MeV蓄積に成功し、リソグラフィ実験に使用しつつ、装置研究を進めている。初期電流は20mA、1/e寿命は約3時間である。図11に、蓄積運転時の蓄積電流と寿命の測定例を示す。

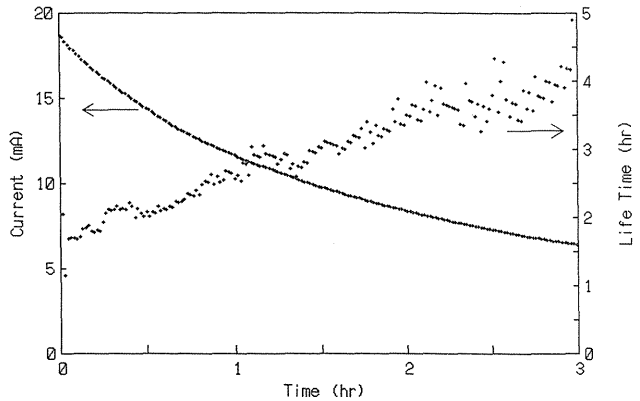


Fig.11 Characteristics of the stored beam in the 800MeV storage mode (NAR)

5. 線形加速器(9)

5.1 概要

15MeV電子の入射においては、入射時のダンピング時間が長いこと、ビームスタッキングができないので、高い入射効率が必要である。入射効率は入射ビームの質、特に空間エミッタンス、エネルギー分散およびビーム電流に強く影響される。そこで、入射器として新たに線形加速器を開発した。

5.2 構成

図12に線形加速器のブロック図を示す。加速部、エネルギー圧縮系(ECS)、エネルギー分析部、RF系、ビームモニタ系、および制御系からなる。制御系は加速器から約90m離れた制御室にある。冷却設備も含めた加速器系は一個所に集中的に配置されている。約15MeVに加速された電子はECSでエネルギー分散が小さくなる。電子ビームはエネルギー分析部とモニタ系で特性が測定される。

線形加速器の下流はビーム輸送系に接続されている。電子はビーム輸送系でスイッチされ、常伝導リングまたは超伝導リングに導かれる。加速部、ECS、エネルギー分析部のそれぞれの長さは3.4m、2.8m、1.6mである。主な性能を表3に示す。

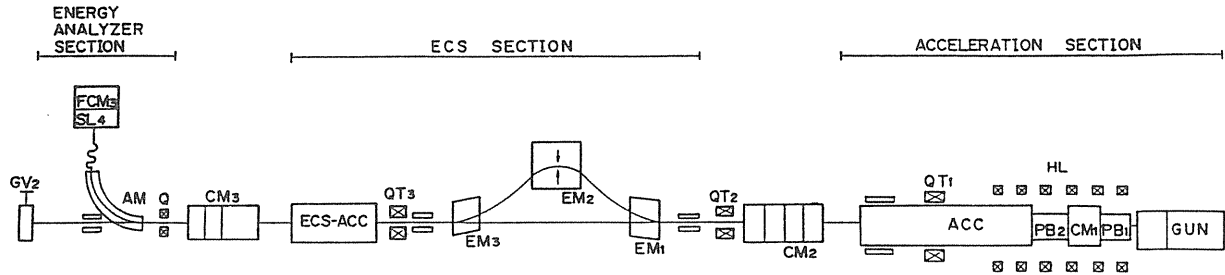


Fig.12 Linac block diagram

Table 3 Performance of injector linac

項	目	性	能
Beam Energy		15MeV	
Beam Pulse Width		2.0 μs	
Beam Current		270mA	
Energy Spread		1%(FW)	
Beam Size		3.0mm	
Beam Divergence		1.2mrad.	
Transverse Emittance		$2.4 \times 10^{-6} \pi$ m rad	
Repetition Rate		3 Hz max.	

これらはリングの入射特性を考慮して決定した。
 加速部は電子銃，2個のプリバンチャ，および主加速管からなる。電子銃は酸化物陰極を用いた3極管で90kVを印加する。電子銃からの電子は主加速管に入る前にバンチャで速度変調を受ける。
 2個のプリバンチャは電子銃と主加速管の間に配置されている。これらは進行方向の位相空間でのマッチングに用いられる。バンチャ付近には、ビーム軸に関して同軸形状のソレノイドコイル6個を配置し、空間電荷による発散力を抑制した。
 主加速管には、小型化のため $1/2\pi$ モードの定在波型を採用した。空洞数は32である。
 エネルギー圧縮装置 (ECS) は、3個の偏向磁石とRF加速空洞からなる。偏向半径は0.15mである。第2の偏向磁石の中心位置に幅可変のスリットを配置した。ECS部分ではビームロスが大きいので、すべての磁石を覆う放射線遮蔽を設

けた。上記スリットでのエネルギー分散関数は0.42mである(計算値)。

エネルギー分析部は偏向磁石 (AM)，スリットおよびファラディカップで構成される。偏向半径は0.5mである。スリットの幅は可変。分析磁石は可動で、主ビーム軸から隔てることできる。

RF加速系の主発振器は2856.65MHzのシンセサイザで、通常動作での出力レベルは約10dBmである。主発振器からのRF信号はパルス変調され、RFパワーは90mの同軸ケーブル(伝送損失は8.1dB)で伝送されてCW動作の進行波増幅器、さらにパルス動作の3段板極管で増幅されてクライストロンに送られる。クライストロンの最大出力は10MWで、ゲインは60dBである。クライストロンの出力は4つに分割され、減衰器、アイソレータ、移相器を通してプリバンチャ、主加速管、ECS加速空洞へ送られる。

ビームモニタとして電流トランス、ファラディカップ、プロファイルモニタが各部の下流に設置されており、調整が容易かつ高精度に行えるようにしている。電流トランスは磁気的にシールドされている。プロファイルモニタには遷移放射 (TR) を用い、ターゲット材料はAlとSiである。TR型モニタの長所は①電流とTR光強度の線型性が良いので、プロファイル観測精度が高い、②真空領域の汚染が最小、③時間応答が早い、などであるが、短所は、蛍光体型より感度が低いことである。

5.3 動作特性

線形加速器の特性を表3に示す。電流270mA, エネルギー分散1%以下など, エミッタンス以外は仕様を満たしている。エミッタンスが期待値より大きい理由は明らかでないが, 調整により改善できると考えている。

6. 結び

SOR リソグラフィ用放射光源として, 低エネルギー入射・リング内加速方式の電子蓄積リングを開発した。超伝導小型リング, 常伝導リングとも15MeVからの電子加速・蓄積に成功し, 低エネルギー入射リング内加速方式の可能性が実証された。現在, 性能向上に向けてマシンスタディを行うとともに, SOR リソグラフィの研究や, SOR リソグラフィによるMOS素子(10), DFBレーザー(11)等, 0.3 μ m以下のパタン寸法のデバイスの研究に使用している。

文献

- 1) 北山, 早坂, 井戸, 宇野, 柴山, 細川, 中田, 西村, 中島, 山田, 日本放射光学会第2回年会予稿集, 103, 1989
- 2) T.Hosokawa, T.Kitayama, T.Hayasaka, S.Ido, Y.Uno, A.Shibayama, J.Nakata, K.Nishimura and M.Nakajima, to be published in Rev. Sci. Instrum.
- 3) U.Trinks and F.Nolden, Nucl. Instrum. Meth., 200, 475, 1982
- 4) A.Heuberger, Microelectronics Engineering, 3, 535, 1985
- 5) S.Mandai, Y.Hoshi and Y.Kohno, presented at SRI88
- 6) T.Hosokawa, T.Hayasaka, H.Yoshihara, S.Ishihara and T.Kitayama, 2nd Microprocess Conference, 1989
- 7) A.Shibayama, T.Kitayama, T.Hayasaka, S.Ido, Y.Uno, T.Hosokawa, J.Nakata, K.Nishimura and M.Nakajima, to be published in Rev. Sci. Instrum.
- 8) T.Kitayama, A.Shibayama, Y.Uno, N.Kawakami, Y.Watanabe and Y.Sato, to be published in Proc. 1989 Particle Accelerator Conference.
- 9) T.Hosokawa, T.Kitayama, T.Hayasaka, S.Ido, Y.Uno, A.Shibayama, J.Nakata, K.Nishimura and M.Nakajima, *ibid.*
- 10) T.Kobayashi, M.Miyake, Y.Okazaki, T.Matsuda, M.Sato, K.Deguchi, S.Ohki and M.Oda, IEDM Technical Digest, 881, 1988
- 11) T.Nishida, M.Nakao, T.Tamamura, A.Ozawa, Y.Saito, K.Nishimura and H.Yoshihara, 2nd Microprocess Conference, 1989

