

解説

ソルテックにおける 1-GeV SR光源の現状

岸本 健*, 椋木 健**, 小平 政宣***,
淡路 直樹****, 渡邊 牧夫, 荒木 美次,
阿刀田 伸史
株式会社 ソルテック

土舘 裕幸, 飯田 利昭, 来島 裕子, 浅井 脩次,
三菱電機株式会社 神戸製作所

Recent Progress of SORTEC 1-GeV SR Source

Takeshi KISHIMOTO*, Ken MUKUGI,
Masanobu KODAIRA***, Naoki AWAJI****,
Makio WATANABE, Mitsugu ARAKI
and Nobufumi ATODA**
SORTEC Corporation

**Hiroyuki TSUCHIDATE, Toshiaki IIDA,
Yuko KIJIMA and Osatsugu ASAI**
Kobe Works, Mitsubishi Electric Corporation

* (現)三菱電機(株)本社
Mitsubishi Electric Corp.

** (現)三菱電機(株)神戸製作所
Kobe Works, Mitsubishi Electric Corp.

*** (現)(株)東芝 京浜事業所
Kobe Works, Mitsubishi Electric Corp.

**** (現)(株)富士通研究所 基盤技術研究所
FUJITSU LABORATORIES LTD.

The SORTEC 1-GeV synchrotron radiation (SR) facility was started to provide SR mainly for the study of SR lithography from April 1990.

In order to satisfy the requirement of higher SR intensity for practical use, the ring has been upgraded to 500 mA beginning April 1992. Since then, the lifetime has been improved and achieved over 25h at the stored current of 500 mA.

Recently, the lifetime of 35h at the 500 mA, which is longer than the lifetime at daily operation by nearly 50%, was recorded by an RF knockout of the beam.

In this paper, an outline of the present progress of SORTEC 1-GeV SR source is presented chiefly about the performance of the upgraded ring to 500 mA and main operational statistics since providing SR for the study of SR lithography. Adding them, early progress of the facility is simply showed for the reference.

1. はじめに

(株)ソルテックは、シンクロトロン放射光 (SR) を利用するSRリソグラフィの基礎技術確立を主目的として、1986年6月に基盤技術研究促進センターと民間13社の官民合同出資で設立された研究開発会社で、研究期間は1996年3月までの約10年間である。SR光源施設、ビームラインおよびライナーなどの基幹研究設備の開発、そしてそれらを用いたリソグラフィ評価技術の確立である。

SR光源開発の目的の第1は早期にリソグラフィ実験のために必要な強度のSRを安定に得ることである。目的の第2として、それだけでなく、並行して光源自体の基本技術や高度化技術の研究をすることである。

計画初期に電子エネルギー1GeV、蓄積電流200mAのSR光源を開発し、大きなトラブルもなく安定に稼働させ、SR利用実験やマシンスタディに供してきた。

引き続き、より高強度のSRによるリソグラフィ実験を可能とする目的で電子蓄積リング (SRリング) の蓄積電流500mAへの改造を実施した。

本稿では、ソルテックSR光源について、大電流化改造の内容とそれ以降の研究成果および稼働状況などの現状を中心に報告する。

なお、最後に、改造以前の開発の経緯についても簡単に触れた。詳細は関連論文^{1) - 18)}を参照されたい。

2. 大電流化改造

2.1 技術課題の検討と改造内容

大電流蓄積にともなう技術的課題を事前に把握し、対策を検討することを目的としてマシンスタディを行った。1GeV以下の低エネルギーで稼働させることにより大電流蓄積を可能とし、得られたデータから1GeV、500mA蓄積時の条件を推定した。これにより次の結果を得た¹⁸⁾。

(1)バンプ電磁石部セラミックダクトの温度上昇を実測し、冷却強化の方法を決定した。

(2)大電流蓄積時のビーム不安定性について検討し、これを抑制しビーム特性を向上するための条件を見いだした²³⁾。さらに、電磁ノイズの影響を除去した。

上記課題を検討する過程で、600MeVで最高1150mA蓄積 (ビーム寿命3h) に成功した¹⁸⁾。ただし、ビーム寿命は1/e寿命で記載した (以下、1/2寿命で記載した1989年末までの初期立ち上げ時を除いて、1/e寿命で記載)。この実験結果より大電流を安定に蓄積するための課題を抽出し、1GeV、500mA蓄積を実現できる見通しを得た。

(3)大電流化によるダクト内の真空度低下の対策として、水素に対する排気速度の大きいNEG (Non Evaporable Getter) ポンプの増強により寿命20h達成の見通しを得た^{18), 19)}。

改造に際し、仕様および設計案構築のための検討を1991年8月末に完了、翌月末にSRリングを製作した三菱電機(株)に発注した。改造のポイントは、①高周波加速空洞用電源のパワーアップ (14kW→28kW) および高周波加速空洞カップラート同軸管 (77D→120D) の新製、②NEGポンプの増強 ③BMダクトおよびセラミックダクトの冷却強化である^{18), 22)} (図1)。主な改造箇所について、表1に改造前後を比較して示す。

[高周波加速装置]²¹⁾

高周波加速システムにおいて、シンセサイザーから発信された蓄積ビームに同期した信号が増幅管で増幅された後、結合器 (パワーカップラー) を介して空洞に導入される。高周波電源に必要な電力 P_g は電子ビームに与えられる電力 P_e 、空洞壁で消費される損失 P_w と反射電力 P_r の和で与えられる。電源の入力周波数が空洞の共振周波数と大きくずれていると入射電力 P_g は反射されて空洞内に電磁場が立たずビームを加速出来ないため、空洞に設置されたチューナにより反射電力 P_r が小さくなるよう共振周波数制御を行っている。高周波加速システムとしては、そのほか加速電圧 V 。一定制御を行っている。

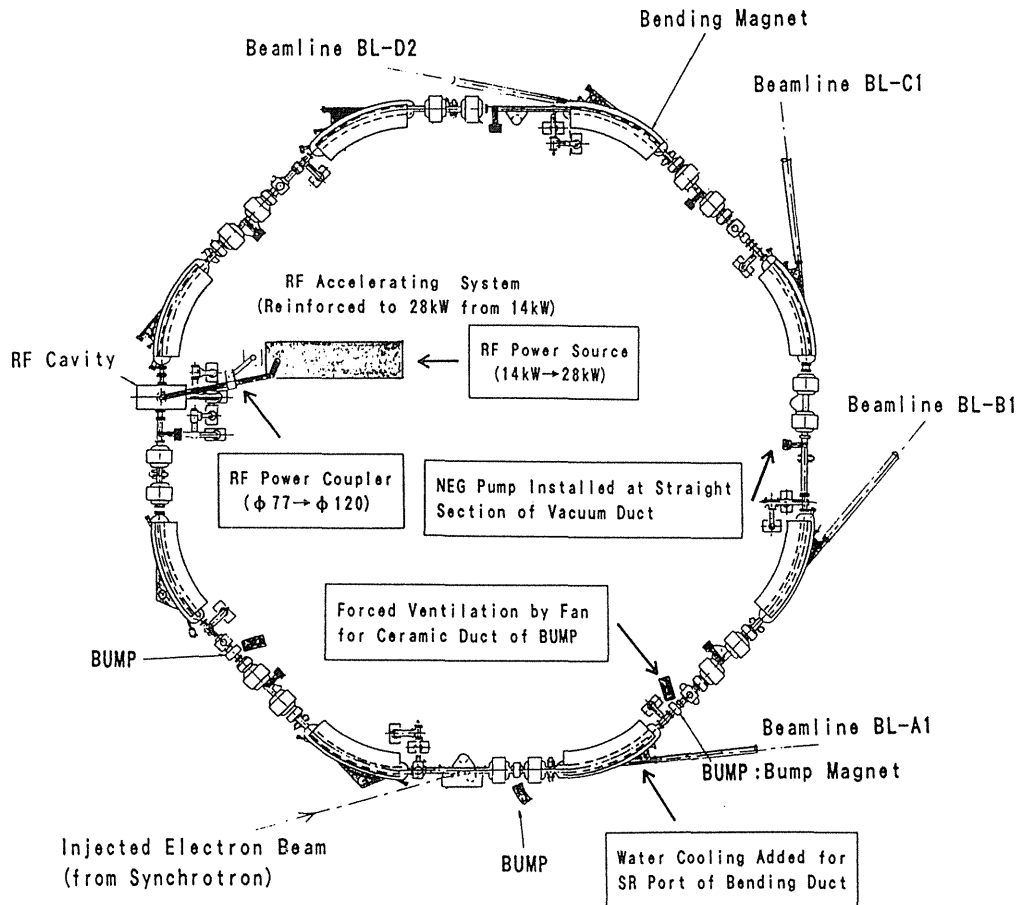


Fig.1 Layout of SR ring and upgraded parts.

Table 1 Specification of main upgraded parts compared with original parts.

Item	Before Upgrade	After Upgrade	(Number)
<u>RF Accelerating system</u>			
RF Power Source	14kW-CW	28kW-CW	1
Power Tube (Main Amp.)	RS2012CJ (Siemens)	RS2058CJ (Siemens)	
Power Coupler, Coaxial-pipe	φ77 for 14kW	φ120 for 28kW	1
<u>Vacuum System</u>			
NEG Pump	Only by SIP	Added at Straight Sections without S1 (with Activating Electrode)	7
Ion Clearing Electrode (at Straight Section)	All without S1	Added at S1	8
	(Applied Voltage 500 V)	at all added NEG Pumps (Applied Voltage 1500 V)	7
<u>Cooling</u>			
SR Port of Bending Duct	Water Cooling	Water Cooling Reinforced	8
Ceramic Duct of Bump Magnet	No Ventilation	Forced Ventilation by Fan	3

高周波電力は同軸管から供給され、パワーケーブル部のアンテナループで空洞内の磁界と結合する方式をとる。同軸管の内導体の冷却用水冷パイプ導入のため、水冷T分岐部を設けている。またセラミック窓を空洞本体より離し、旧ケーブルに比べ積極的に温度上昇の低減を図っている。

ビームの長寿命・高安定化と、電源出力低減のため高い加速電圧が要求されることから、加速電圧 V_a の定格仕様は改造前同様90kVとした。ただし、使用電圧としては改造以前のマシンスタディの結果から100kVを用いている(5.3参照)。

電源出力 P_g の値は、蓄積電流200mAにおいては放射光で失われるエネルギーを補給するために必要な電力 $P_b = 6.37\text{kW}$ に P_r 、 P_c を考慮して14kWであったが、改造後の電流500mAにおいては、同様に $P_b = 15.9\text{kW}$ に対して P_g を28kWとした。図2のベクトルに示されるように、 V_a はビーム誘起電圧 V_b と電源電圧 V_c とのベクトル和で示され、位相安定条件である、

$$S = V_c \cdot \sin \phi + V_b \cdot \sin \psi > 0$$

を満たせば安定とされる²⁵⁾が、これは理想的な場合で実験的に S は10kVの余裕を見る必要のあることが分かった。なお、図において、 V_{br} 、 V_{gr} はそれぞれ、 $\phi = 0$ の時の V_b 、 V_g を示す。

[NEGポンプ]

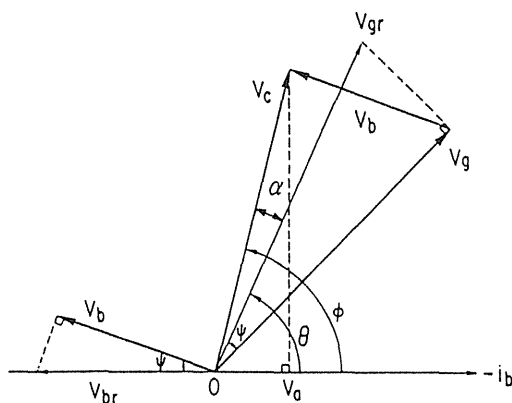


Fig. 2 Vector diagram of RF accelerating system.

導入したNEGポンプ内のNEGモジュール(SAES製WP-1250, ST707)について、事前に真空特性評価を実施し、真空容器の汚染を極力抑えるためNEG活性化を真空容器のベーキング中に実施することにより、NEGモジュール単体で水素の排気能力に対して 10^{-10}Torr 台で600 l/s以上の真空特性を達成できることを確かめた。また $2 \times 10^{-11}\text{Torr}$ の超高真空を達成した¹⁹⁾。

[イオン除去電極]

大電流を蓄積する場合、トラップイオンのビーム寿命や安定度に対する影響が、従来に比べてより大となることが予想される。そこで、イオン除去電極を、従来の入射部を除く各直線部7ヶ所に加えて、従来は設置されてなかった入射部のビームストッパー入り口をイオン除去電極に変更、計8ヶ所とし最大印加電圧($-V_{ic}$)を500Vから1500Vと増加出来るように改造した。

イオンはビーム軌道上のすべての場所で生成された後、ビームポテンシャルの最低点に集まると考えられる。ビーム蓄積中におけるRound Mode(5.3参照)では既設のイオン除去電極の位置はポテンシャルの最低付近に合致している。

しかしながら、ビーム入射時におけるFlat Modeに対しては最低点にならないので、大電流化改造時に、入射の安定化のため、直線部のFlat Modeにおいてポテンシャル最低点に合致した場所の増設NEGポンプ7ヶ所にイオン除去電極を付設した。このイオン除去電極は既設のようなディスク型($\phi 56\text{mm}$)ではなく、帯状としてNEGの排気能力を極力活かす構造とし、最大印加電圧($-V_{ic}$)を1500Vとした。

2.2 立ち上げとビーム特性の結果^{26), 27)}

改造工事は、1992年4月より3ヶ月かけて行われ順調に進捗した。7月15日には目標の電子エネルギー1GeV、蓄積電流500mA(ビーム寿命約10h)を達成した。改造後のSRリング全景および高周波加速装置部分を図3、図4にそれぞれ示す。

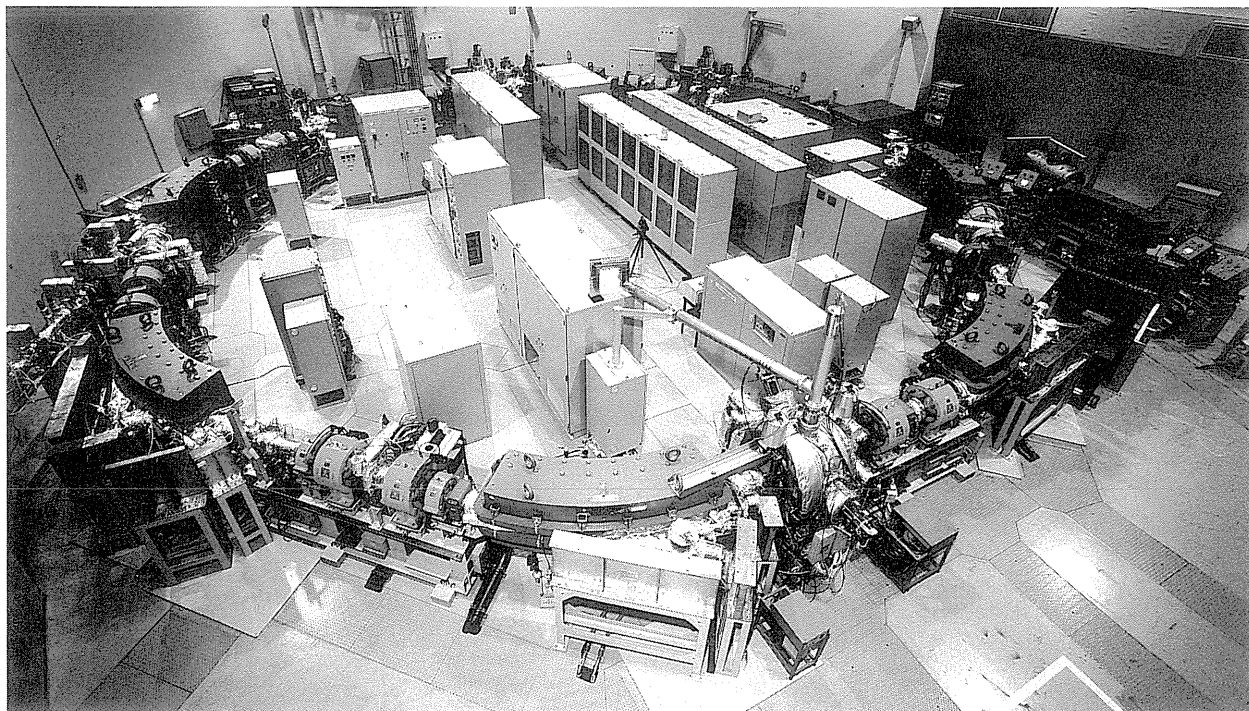


Fig.3 Overview of storage ring (SR ring)(After upgrade to 500 mA at 1 GeV)

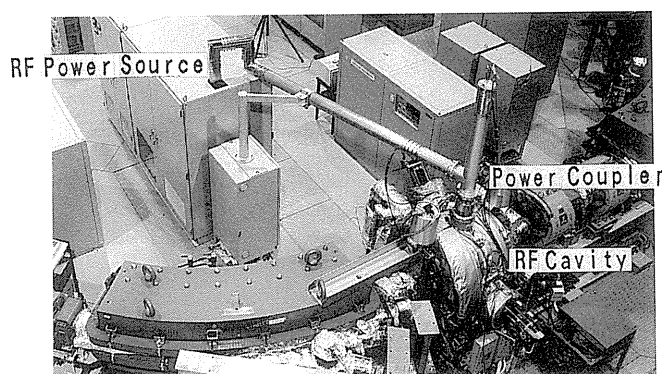


Fig. 4 RF accelerating system.
(After upgrade to 500 mA at 1GeV)

8月5日より利用運転を再開し、その後真空ダクトのビームエージングが進み、寿命はさらに延びて9月15日には1GeV、500mAにおいて約20h(最終目標値)に達した²⁶⁾。

図5に1989年9月末のSRリング蓄積開始から1993年3月末までのSRリングのビーム寿命の延びの変遷を示す²⁷⁾。

1992年11月には、蓄積電流200mAにおける寿命が改造前の水準(約70h)に回復した。さらに、

1993年3月末には、200mAおよび500mAでの寿命は、それぞれ、80hおよび25hに達した。入射開始から500mA蓄積までに要する時間は7~8分程度の短時間である。

なお蓄積電流500mAにおける全放射光パワーは15.9kW(2535mW/mrad)、1nmにおける上下±0.5mrad内の平均強度は1000mW/nm/mrad(軌道平面上1600mW/nm/mrad)となった。

図6に改造後の特性例として、最近の代表的な1日の運転特性を示す。利用者の実験計画に基づき、前半最大蓄積電流400mA、後半500mAで稼動した例であり、1日13h以上の時間内に3回の追加入射を行っている。500mAにおける寿命は26h、リングの真空度(ダクト直線部の平均値)は $3\sim 3.8 \times 10^{-11}$ Torrである。なお、オフビーム時は 10^{-12} Torr台の超高真空に達している。

表2に改造後のSRリングの主要パラメータを示す。

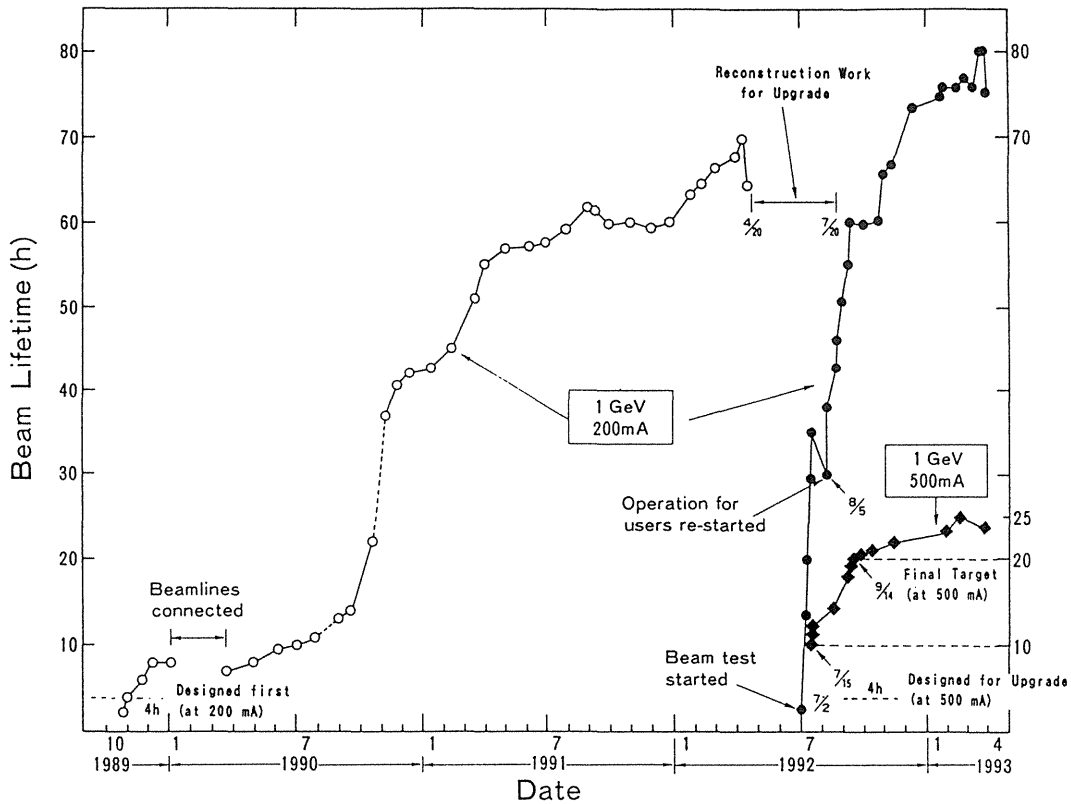


Fig.5 Improvement of beam lifetime. (Till end of March 1992 since first beam was stored in Sept. 1989)

SOR Beam Current Monitor

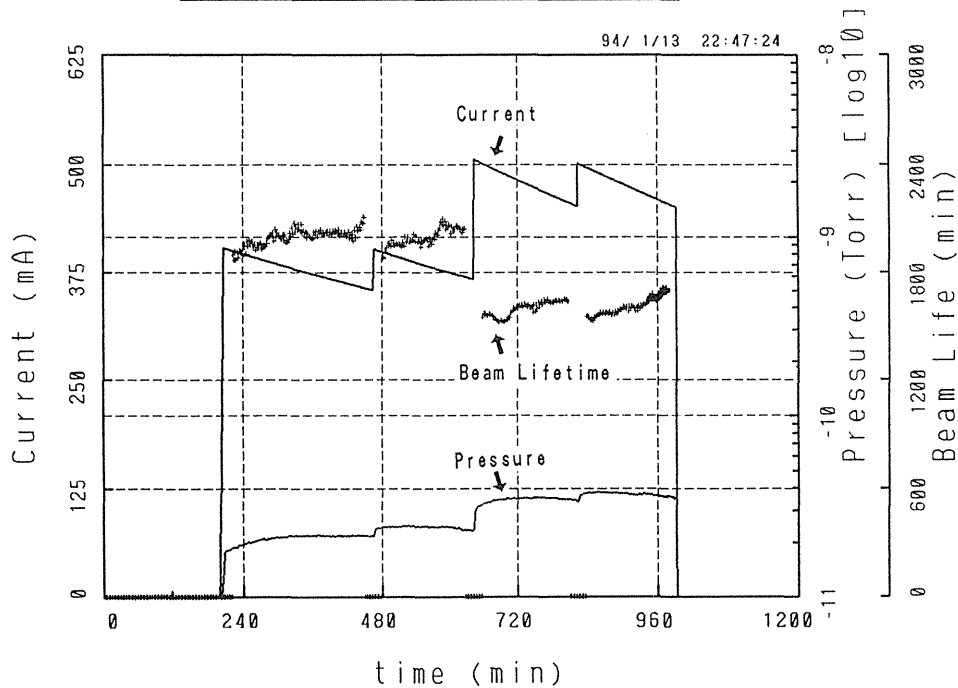


Fig.6 Typical daily operation after upgrade to maximum stored current 500mA. (Lifetime 26h and pressure $3 \sim 3.8 \times 10^{-10}$ Torr at 500mA, 32h and $2 \sim 2.5 \times 10^{-10}$ Torr at 400mA. Beam refilled three times during over 13h operation.)

Table 2 Main parameters of upgraded SR ring.

Main Parameters of SR Ring after Upgrade			
Operation Mode		Round	Flat
Beam Energy	GeV	1	
Beam Current (Designed)	mA	500	
(Achieved)		500 (200)	
Beam Lifetime (Designed)	h	>4	
(Achieved)		>25 (80)	8 (12)
Radiation Loss/electron	keV/turn	31.83	
Radiation Power	kW	15.9	6.37
	kW/rad	2.53	1.01
RF Frequency	MHz	118	
Harmonics/Bunch No.		18/18	
Betatron Tune	ν_x/ν_y	2.143/2.149	2.21/2.23
Avg. Beta Function	β_x/β_y	4.41/5.93	4.36/6.55
Coupling of Beta Function	κ	1	0.1
Emittance	ϵ_x/ϵ_y $\mu\text{m rad}$	0.35/0.35	0.622/0.062
Natural Chromaticity	ξ_{x0}/ξ_{y0}	-2.99/-0.201	
Chromaticity	ξ_x/ξ_y	2.26/-1.83	
Momentum Compaction	α	0.184	0.185
Momentum Spread	$\Delta p/p (\times 10^{-3})$	0.462	

2.3 改造箇所の性能評価

[高周波加速装置]

P_g と P_r の値を最適化した結果, RF アンテナの結合係数 $\beta = 4$ 程度, 位相安定のためのデチューン角オフセット値 $\alpha = 10 \sim 20^\circ$ は必要と推定された。図7に $\beta = 4$, $\alpha = 20^\circ$ および使用加速電圧 $V_c = 100\text{kV}$ における蓄積電流に対する P_g , P_r および S の理論値を実線で示す。

また, 図の破線は, 500mA 達成後に行った蓄積電流に対する P_g , P_r の実測結果を示しており理論と良く一致している。

理論値より, P_g の最大値 28kW と設計したが, 500mA 蓄積時の実測値は 22kW であり, 最大 600mA 蓄積が可能な性能が得られたことになる²⁷⁾。

表3に高周波加速系の改造前後の主要パラメータを比較して示す。

[偏向ダクト部温度上昇]

SRを直接受ける偏向ダクト部での温度上昇を抑制するため, ダクト外側に冷却水管が設けられて

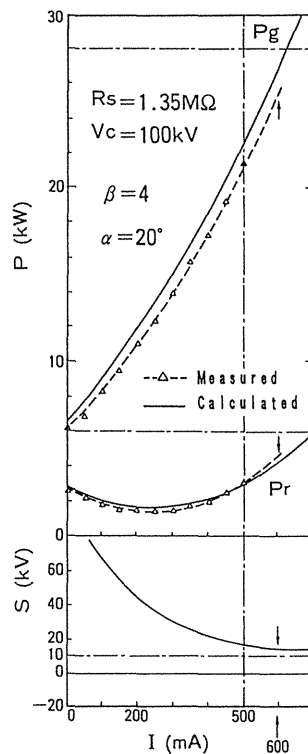


Fig.7 P_g , P_r and S as a function of beam current.

いるが、SRポート部では200mA蓄積時の測定結果から外挿すると500mA蓄積時の温度上昇は約130°Cになると推定された。そこで、SRポート部に冷却水管を追加した結果、温度上昇は100~105°C程度に抑えられた。

[セラミックダクト温度上昇]

バンブ電磁石用セラミックダクト内面が数10nmのAu薄膜コーティングされており、蓄積電流に対するイメージ電流（壁電流）が流れる。その結果、大電流蓄積時のジュール損失による温度上昇がセラミックダクトのロー付け部に与える影響が問題となる。そこで、改造前に600MeVの低エネルギーにおいて蓄積電流500mAまでセラミックダクト部の温度測定を行い、自然空冷では500mA蓄積時に120~130°Cの温度上昇となることを確認した。このため直接セラミックダクトを強制空冷することとし、500mA蓄積時の温度上昇を35°C程度まで大幅に下げることができた²⁸⁾。

[ビーム寿命と真空性能]

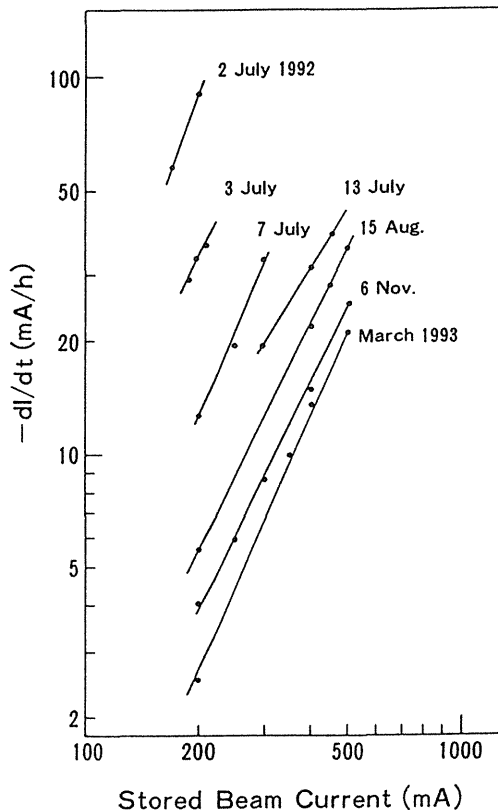


Fig.8 Improvement of the beam lifetime shown by decay rate plot.

Table 3 Main parameters of RF accelerating system.

Item		Before Upgrade	After Upgrade
Beam Parameter			
Beam Energy	GeV	1	←
Beam Current	mA	200	500
Radiation Loss/electron	keV/turn	32	←
Radiation Power	kW	6.37	15.9
RF Cavity			
Frequency	MHz	118	118
Accelerating Voltage	kV	90	←
Type		Reentrant Type	
Dimension			
Inner Length of Cell	mm	400	←
Inner Cavity Diameter	mm	800	←
Diameter of Central Electrode	mm	195	←
Bore Diameter	mm	110	←
Q_o			
Measured		20100	←
Shunt Impedance R _s	MΩ		
Estimated from Synchrotron Frequency		1.35	←
Power Coupler			
Type		Loop-coupling Type	
Coupling Coefficient β		1.77	4.0
RF Power Source			
RF power	kW	14	28

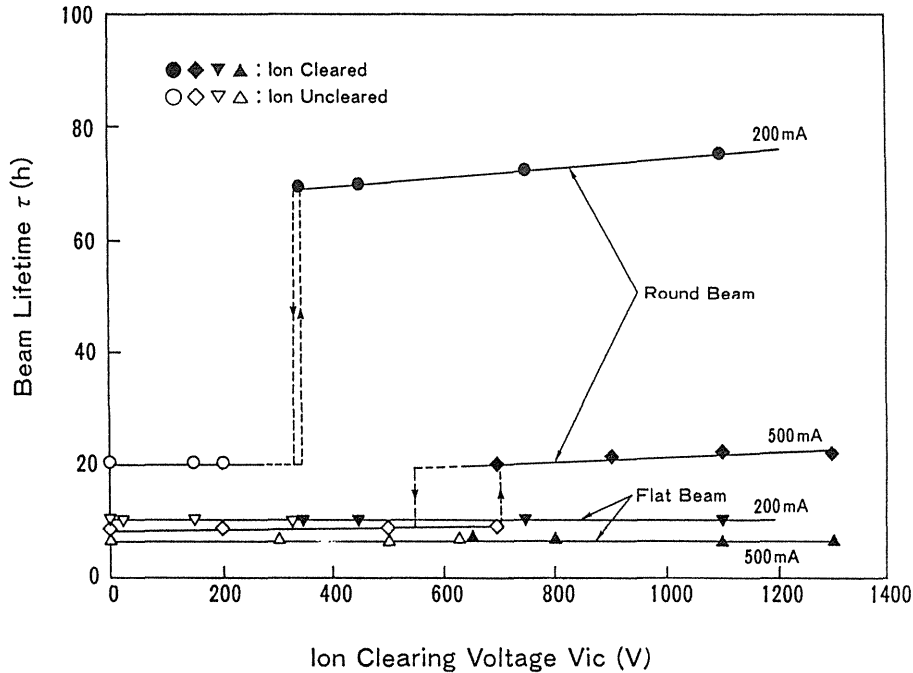


Fig.9 Beam lifetime as a function of clearing voltage at different beam modes.

大電流化改造時1992年7月2日のビーム立ち上げ以降のマシスタディの結果に蓄積電流の減衰率表示を適用すると、図8のように立ち上げ直後から、電流減衰率がほぼ電流の2乗に比例することが分かる。

これは、リングのベース真空度が充分良いため電流減衰率がSR照射によるガス放出で決まっていることを意味している²⁹⁾。

したがって、寿命 τ は圧力 P とともに蓄積電流 I にも逆比例することを示している。そして、真空ダクト内の枯れが進行し圧力 P の減少とともに τ が延びていくことになる。

なお、大電流化改造時に追加したNEGポンプの性能は、それだけ単独に切り離して評価出来ないが、前述のように1992年11月には、蓄積電流200mAにおける寿命が改造前の水準(約70h)に回復し、さらに、1993年3月末には、200mAでの寿命が、改造前を比較的早期に超え最高80hに達したことから、有効性が示されたものと考えられる。

[イオン除去効果]

図9にRound Beam (Round Mode時のビー

ム)とFlat Beam (Flat Mode時のビーム)それぞれについて蓄積電流500mAおよび200mAにおけるイオン除去電圧($-V_{ic}$)とビーム寿命の関係を示す。

Round Beamでは電流500mAでは $-V_{ic} > 700V$ でイオンクリアリング効果があり寿命は9hから20~22hに向上した。同様に電流200mAでは $-V_{ic} > 350V$ で20hから70~75hと向上した。

なお、効果の現れ始める $-V_{ic}$ のしきい値電圧は蓄積電流とともにほぼ比例的に増加する。また、 $-V_{ic}$ の上昇と降下でヒステリシスが存在する。典型的な運転はこのような特性を考慮して、 $-V_{ic} = 1100V$ とした。

この時の実験では、Flat Beamの場合イオン除去効果による寿命の顕著な延びは認められず、なおデータ蓄積が必要である。

[放射線量の評価]

大電流化にともなうSRリングの蓄積電流値の増加と蓄積に要する入射時間の増加による放射線量の増加が予想される。そのため、TLD (Thermoluminescence Dosimeter) 線量計による測定点を24ヶ所と従来より倍増し測定精度を強化し

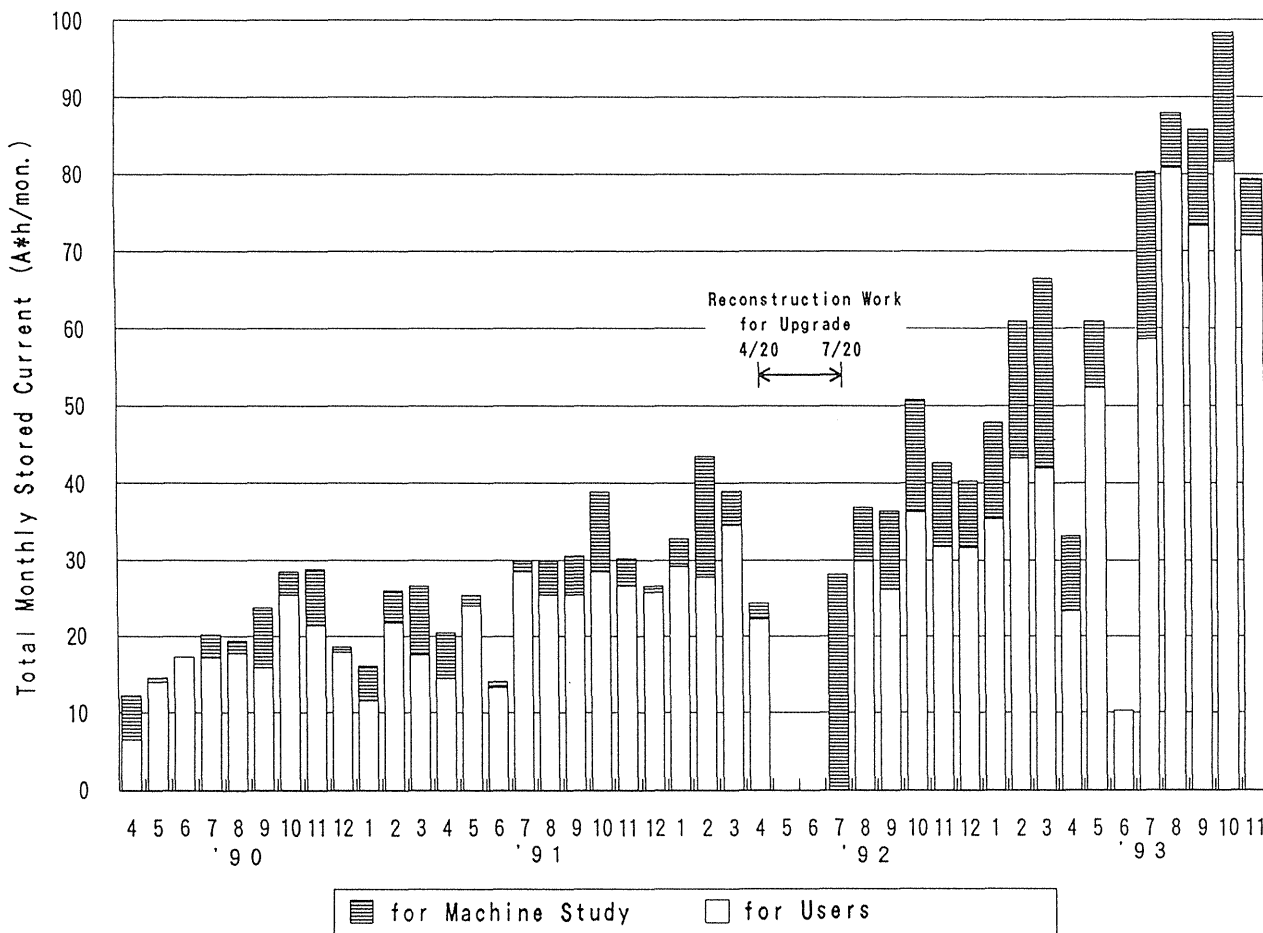


Fig.10 Record of total monthly integrated current of SR ring since April 1990.

た。測定結果によると、大電流化改造後もリソグラフィ実験室内をはじめとした、入射器およびSRリングのコンクリート遮蔽壁(厚さ1m)の外側近接部における放射線量は、最大となる場所においても、 $50\mu\text{Sv}/\text{week}$ 以下と法的な限度である $1\text{mSv}/\text{week}$ に比べ極めて低く充分安全が確保されていることを確認している^{17), 26)}。

3. 運転実績

3.1 運転形態

光源運転はリソグラフィ実験等のための利用運転と光源自身の研究等のためのマシンスタディ用に大別される。そのほか、改造工事や定期点検期間中での光源調整用がある。

利用運転は、月曜日から木曜日までの4日間、利用時間は、当初10:00~17:30であったがリ

ソグラフィ研究の進展とともに9:30~21:00(1990.2~1993.5)と延ばし、現在9:30~23:00(1993.6~)である。利用運転の典型的なパターンは初期入射400mA~500mA、3~4hごとに追加入射としている(図6参照)。

マシンスタディは原則金曜日とくに時間制限は設けない。土曜日は双方の予備日となっている。

3.2 1月当たりの積算蓄積電流値の推移²⁶⁾

リソグラフィ実験用としてSR供給を開始した1990年4月から1993年11月までの3年7ヶ月に亘るSRリングの月ごとの積算蓄積電流値および運転時間と平均蓄積電流値を、それぞれ図10および図11に示す。

図10の積算蓄積電流はリソグラフィ実験等のための利用運転(for Users)と光源自身の研究等の

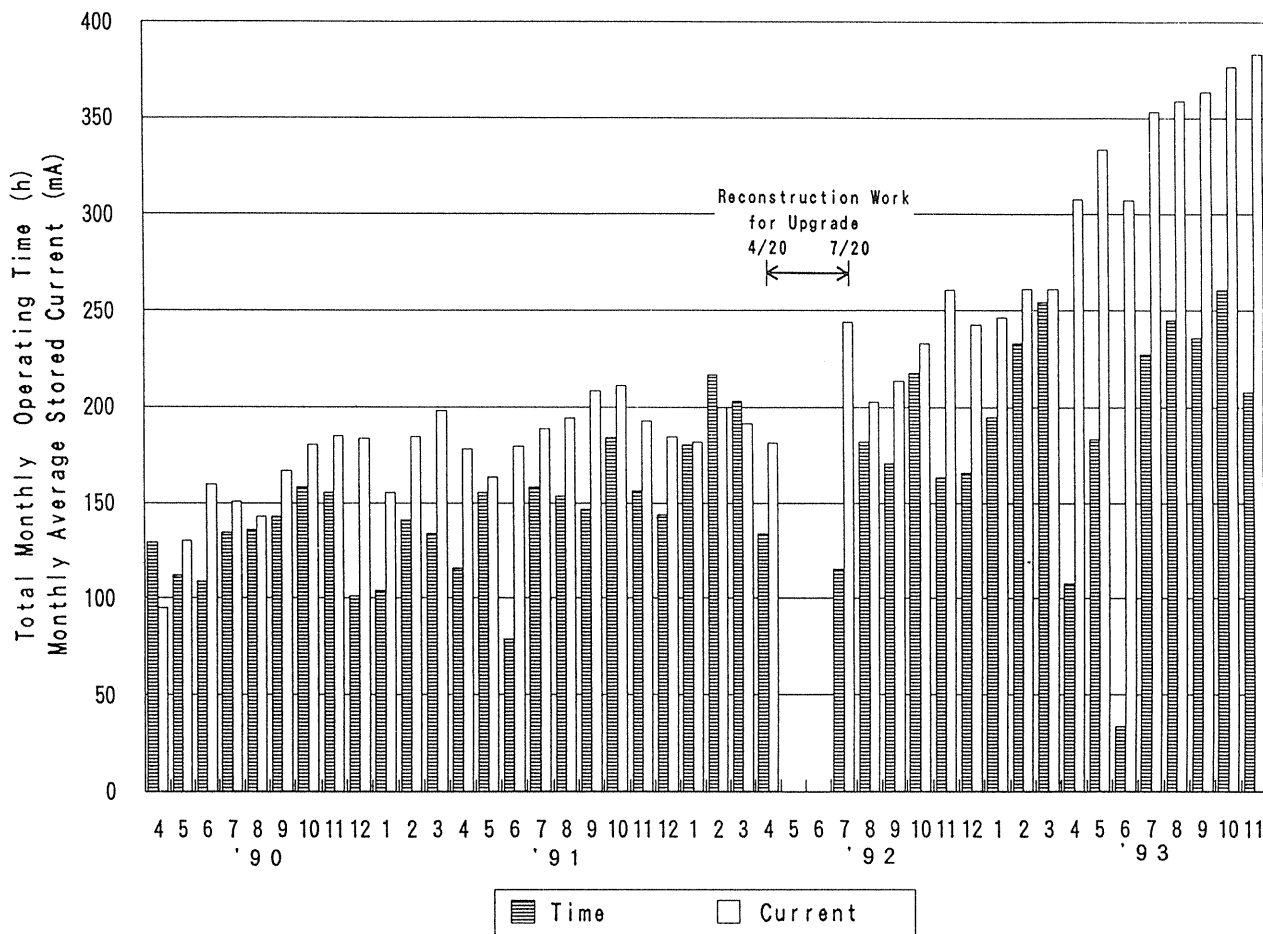


Fig.11 Record of total monthly operating time and monthly average stored current of SR ring since April 1990.

ためのマシンスタディ (for Machine Study) (この図に限り、予定の改造工事や定期点検期間中の光源調整 (for Tuning) の時間をマシンスタディに含む) に区分し両者の和を示した。図より1992年5月～7月の大電流化改造のための休止期間、1993年4月の真空トラブルおよび同6月の定期点検に係わる特定期間を除けば、1990年4月以後、1月ごとの積算蓄積電流は順調に延びてきたことが分かる。とくに1993年7月から10月は1月あたりの積算電流は、80Ah以上に達している。大電流化改造工事では2ヶ月半近く利用運転を休止したが、充分その見返りが得られている。

図11はこの延びの要因を示すため、積算蓄積電流を運転時間と平均蓄積電流に分離して表したものである。

大電流化改造以降、リングおよびビームライン各部の温度上昇、真空度低下、電流安定性への影響などをチェックしながらSR利用時の初期蓄積電流値を増大させていった。1992年10月には300mA、12月には400mAと増大させ、1993年2月に1GeV、500mAの安定運転体制を確立した。

最近の積算電流値の増加は運転時間の増加もあるが、初期蓄積電流400mA以上の運転がSR利用時の主体になったため、11月には平均蓄積電流が380mAを記録した。これ以上の積算電流増加のためには終夜運転などの運用の検討を要し、現在検討中である。

3.3 運転稼働率

図12は1990年4月から1993年11月までのSR

光源の運転予定時間と実際に蓄積した時間との割合を%表示した稼働率 (Uptime) を示す。蓄積した時間の内訳は、3.2に述べたように利用運転とマシンスタディと、予定された改造工事や定期点検期間中での光源調整の時間との和である。

1990年12月から翌年4月まで期間は稼働率の比較的低い期間であった。主な運転休止の原因は、1990年12月および1992年2月から4月の高周波加速空洞用電源の寿命部品異常による不具合などであった。それでも、この期間の平均稼働率は93%であり、いずれもリングの真空性能に影響しないものであった。これらの異常は大電流化改造時に一掃した。

1993年4月の稼働率低下はSRリング直線部のスパッタイオンポンプ高圧導入端子の腐食により真空リークを生じたこと等に基づくもので、予期しないものであった。そのため稼働率は43%まで低下したが放電防止用キャップを用いた部品に交換し、その後、月例点検などを強化して再発防止に万全を期した。

大電流化改造以降の稼働率は、真空トラブルの起きた1993年4月を除いて98%以上であった。

4. ビーム寿命・真空性能の評価

4.1 積算照射量に対する寿命の延び評価

2.3に述べた真空性能と長寿命の得られる条件下では、圧力Pは蓄積電流Iに比例し、一方 τ はIに逆比例するため、規格化圧力P/Iの代わりに蓄積電流と寿命との積 $I \times \tau$ により、ビーム寿命やリングの真空状態の時間推移を把握できる。

図13に、リングの初期立ち上げ時(ビームライン接続後ベーキングなし:○印)、大電流化改造

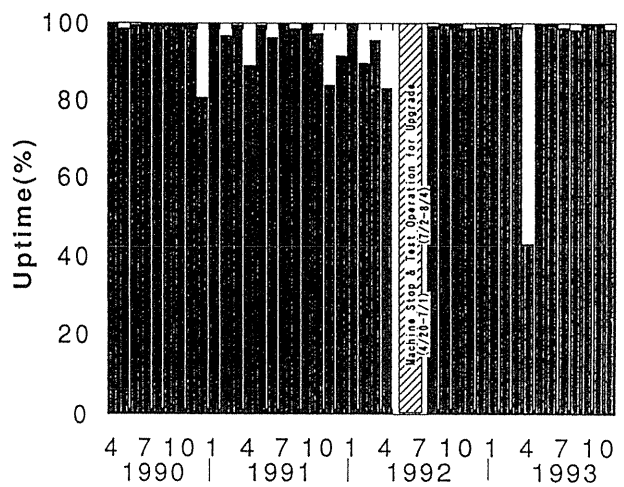


Fig.12 Uptime ratio during scheduled hours since routine operations started in April 1990.

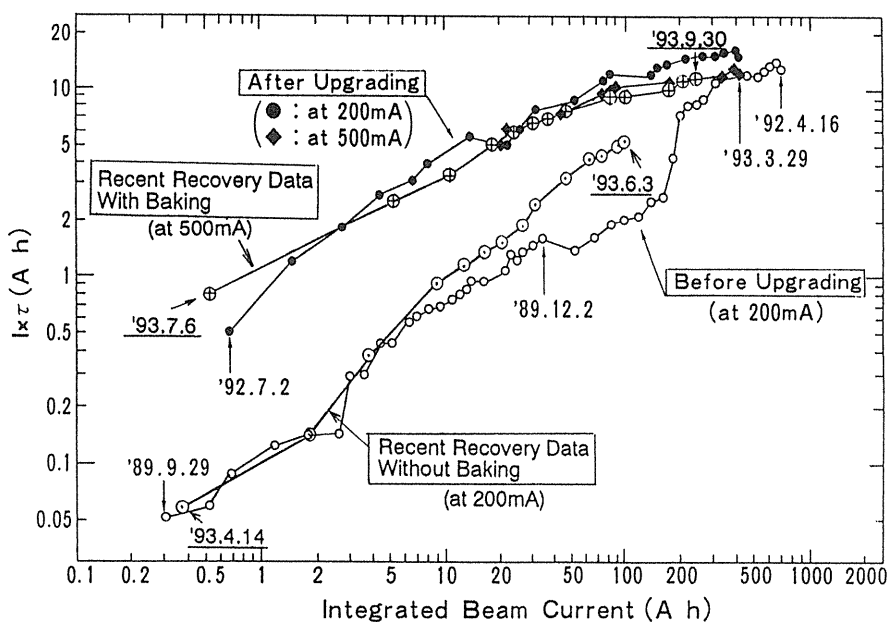


Fig.13 Improvement of the product of stored beam current and lifetime as function of integrated beam current.

後の立ち上げ時（ベーキングあり：●，◆印），およびその後のリングの大気開放（1993年4月のSRリング直線部のスパッタイオンポンプ高圧導入端子の腐食による）後の再立ち上げ時（ベーキングなし：○印），およびその後の定検後（ベーキングあり：⊕印）の4ケースについて，それぞれを起点とした $I \times \tau$ の推移を示す。図から明らかなように，立ち上げ時の条件（ベーキングの有無）が同じなら，その後の $I \times \tau$ の推移はほぼ同様な経路をたどっている²⁶⁾。

このようなデータを蓄積することにより，リングの真空状態の把握，再立ち上げ後の性能回復の予測などが定量的に可能となるものと考えられる。

なお，1989年9月末のSRリング蓄積開始から1993年11月末までの4年2ヶ月間に利用運転，マシンスタディおよび調整運転よりなる積算蓄積電流の総量は1636Ahである。内訳は大電流化改造直前までが693Ah (42.4%)，それ以降が973Ah (57.6%)であり，既に，大電流化改造以前より以降の方が多くなっている。

4.2 真空性能の再評価と一層の長寿命化

[真空性能の再評価]

超高真空に達したSRリングで，さらに長寿命化を達成するには，真空系をダクト内の平均真空度で評価するだけでなく，ビーム経路に沿った真空度分布を詳細に検討するなど，寿命決定要因解析をより高精度に行うことが要求される。

そのような観点から，種々の運転条件について，SRリングの真空圧力を質量分析計(QMS)にたいする校正データを用いて補正し，SRリングの一次限有限要素法的手法¹⁹⁾を用いたシミュレーション解析結果と比較検討した。この過程で，真空度計測に用いている冷陰極逆マグネロン真空計(IMG) (24ヶ所)が光電子により実際の10~100倍の圧力を指示し，大きな誤差があることを見いだした。対策として，IMG導管部に永久磁石を付加して二次的迷走電子を捕獲することによってこ

の問題を解決した³⁰⁾。その結果，ビーム寿命と圧力の関係の定量的評価が精度良く行えるようになった。なお，これまでに報告した真空の枯れ状況データ^{19), 27)}はIMGに誤差が存在していたので，誤差補正した結果を図14に示した。過去のデータに関しては光電子妨害対策前後の $\Delta P/I$ の差を用い，過去のデータからその分を差し引いて求めた。結果によるとダクトの偏向部および直線部ともなお真空度の向上の途上にある。

このことは，図6の1994年1月13日のデータからも明かで，同図の電流値と真空圧力(ダクト直線部平均値)から $\Delta P/I$ を算定すると $7 \sim 10 \times 10^{-12} \text{Pa}/\text{mA}$ が得られ，図14の1993年10月16日の時点よりさらに真空度の向上が見られる。

[寿命の制限要因検討と長寿命化]³¹⁾

このように，実測真空圧力が校正されたことを考慮すると，実測ビーム寿命17hに対応するガス散乱のみによる寿命の計算値は35hとなり，なおイオントラッピングなど制限要因の存在が示唆された。イオントラッピングの影響を小さくするためには，ビームサイズを大きくし，ビーム軌道上のイオン密度を小さくすることが有効である。そのため，チューン測定用のRFロックアウト電極からRF励振して共鳴を起こし，ベータトロン振動の振幅を増大させビームサイズを大きくすることを試みた。RF電力45Wで水平方向に励振した結果，ビームサイズは約2倍になりビーム寿命は約1.5倍に伸びた。そして，蓄積電流500mAにおいて，ビーム寿命35h (200mAでは90h)とこれまでの数十%増と大幅に長寿命化できた。

現状では立ち上げから安定するまでにベータトロン振動数が数100Hz程度変動するなど利用運転に適用するにはさらに対策が必要である(図15)。

5. SR光源装置の概要と大電流化改造までの開発の経緯

5.1 SR光源装置

[SR光源施設の概要]^{1), 7)}

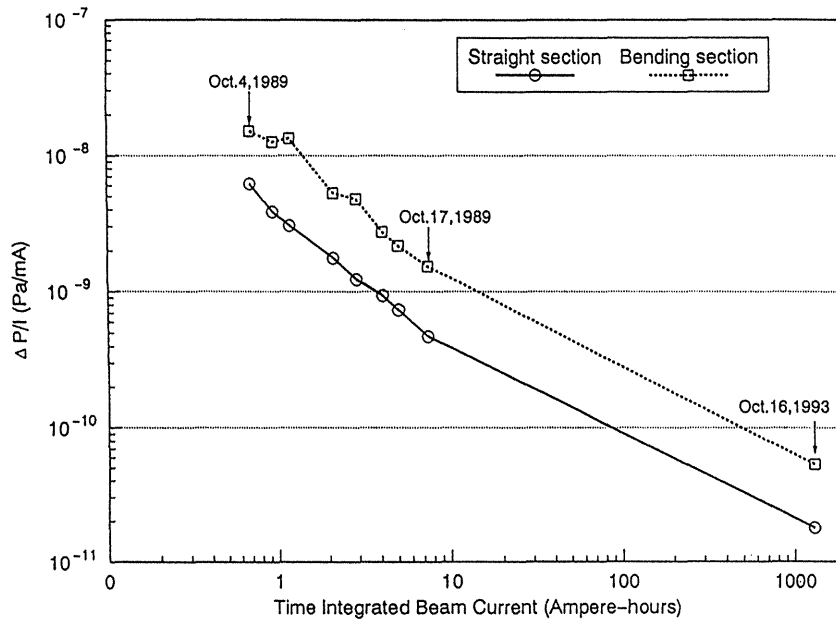


Fig.14 Change of normalized pressure rise $\Delta P/I$ for bending and straight section as a function of integrated beam current.

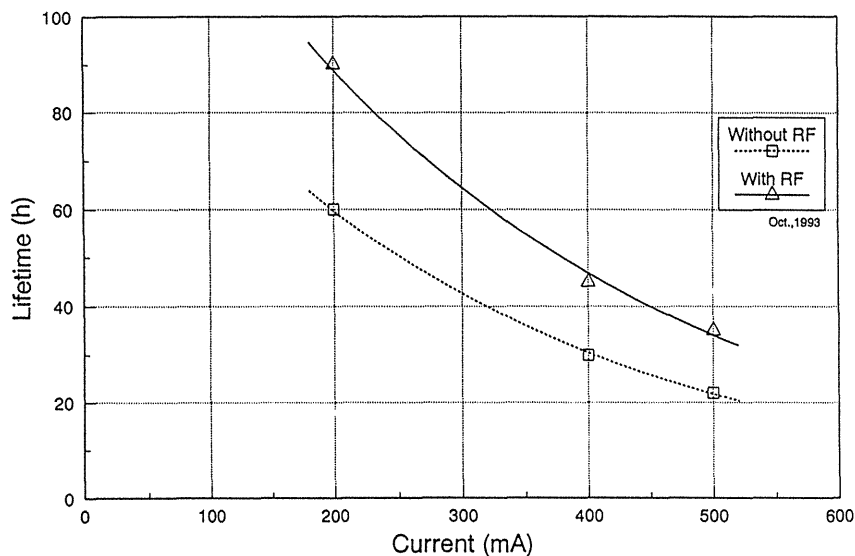


Fig.15 Improvement of beam lifetime by RF knockout.

SR光源施設の配置の概要を図16に示す。この図は地下一階にある実験棟（地上一階，地下一階構造，床面積：40m×53m）の地下一階部レイアウトを示し，光源装置と利用実験室より成る。電磁石用の電源室の真上，地上一階部分に光源の運転管理を集中的に行う制御室がある。光源装置のうち，入射器とSRリングは放射線遮蔽のための周囲1m，天井3mのコンクリート壁でそれぞれ囲ま

れた部屋に納められている。

SRリングにおける放射光の取り出しポートは図示の偏向電磁石当たり各2ヶ所ずつ設けられており，うち実線で示したA-1～D-2の4本のビームラインが設置されている。A-1には露光実験装置が設置され，パターン転写特性やレジスト評価などの基礎実験を行っている。B-1にはステップ&リピート機能を備えたアライナーの試作機が設置

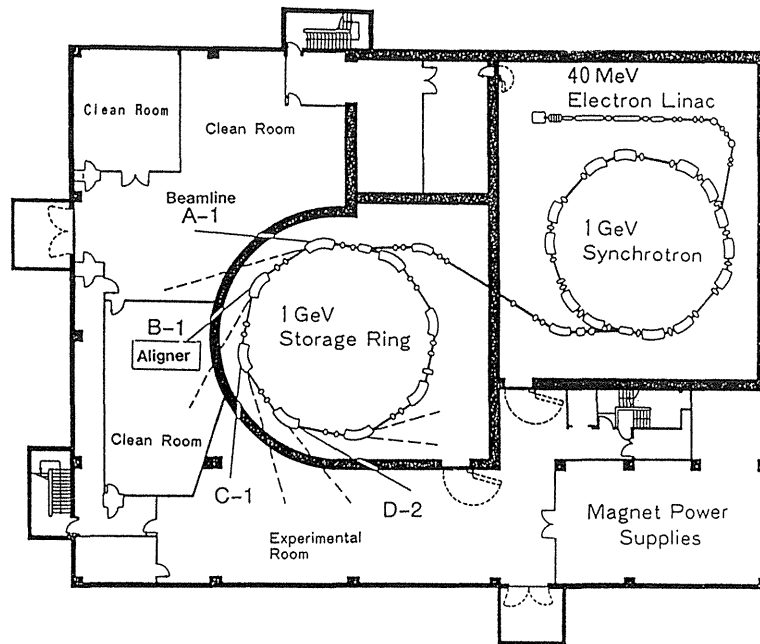


Fig.16 Layout of SORTEC 1-GeV SR source facility.
(Accelerator control room is above magnet power supply room.)

され、アライメント精度や解像性評価を行っている。C-1ではマスク用メンブレン等の放射光照射耐性の評価実験を行っている。D-2には当初各種分析装置が設置され、SRリング用の真空容器材料のSR照射によるガス放出特性の評価実験を行っていたが所期の目的を達成し、その後、縮小投影露光の基礎実験に用いられている。

[基本構成の選択]

SR光源はSRリソグラフィ技術開発における最も重要な構成要素の一つであり、実用化のためには、必要な放射光強度が安定に得られるとともに、小型、低価格、低維持費であることが要求される。そのため、1リングによる加速蓄積方式や超電導磁石の採用による各種のリング方式が提案されている。超電導磁石を用いた小型蓄積リングの開発が進められてきたが、ここ2~3年で大きな進展を見せ、国内外で露光実験に適用されている。その詳細は関連論文を参照されたい^{2) - 6)}。

ソルテックではSRリソグラフィの実験が早期に確実に開始できることを重視し、SR光源の基本構成として、小型化指向の開発要素を含まず、実績のある常電導磁石・フルエネルギー入射方式を採

用した。

[光源装置設計の方針]⁷⁾

SR光源の基本仕様は、リソグラフィ性能の要求から、表4のように決定された。なお、電子ビーム寸法は光源点-ウェハ間距離7m、半影ぼけ $0.02\mu\text{m}$ 以下の条件から求めたものである。

これを満足するSRリングの基本パラメータを電子エネルギー1GeV、蓄積電流200mA、偏向磁場1.2Tと決定した。これにより、全放射光パワー6.37kW (1014mW/mrad)、放射光ピーク波長0.65nm (臨界波長1.55nm)、1nmにおける $\pm 0.5\text{mrad}$ 内平均強度400mW/nm/mrad (軌道平面上640mW/nm/mrad)となる。

前段入射器には40MeV電子直線加速器(電子ライナック)を採用し、主入射器は1GeV電子シンクロトロンを採用した。以上述べた設計方針に基づき決定した構成機器の主要パラメータを表5に示す。同表には、設計値とともに大電流化改造直前における達成値(1992年3月末時点)も示した。

この基本概念に沿って各構成機器の機器の詳細設計・製作が進められ、1988年10月より据え付けを開始し、翌年3月末に据え付けを完了した。

Table 4 Specification from SR lithography requirement.

Peak wavelength	0.5~1nm
Radiation power at 1nm	400mW/nm/mrad ²
0.7~1.3nm	240mW/mrad ²
Beam size 2σ _x , 2σ _y	≦ 7mm
Available angle (Horizontal)	≧ 3.6mrad (25mm wide at 7m)
Beam lifetime	≧ 4h (a half-life)

構成機器のうち電子ライナック⁸⁾, SRリング^{9), 10)}は三菱電機(株), 電子シンクロトロン¹¹⁾は(株)東芝が製作した。また, 制御システム¹²⁾は三菱電機(株)(一部(株)東芝)が製作した。

5.2 ビームの初期立ち上げ^{7), 13), 20)}

SR光源は, 1989年7月末より電子シンクロトロンへの入射を実施し9月27日にSRリングへのビーム入射を開始, 翌28日には最初のビーム蓄積(約3.5mA)に成功した。SRリングへの入射から蓄積成功までに要した時間は9h(ビーム調整開始より約2ヶ月)である。その後, ビームエージングを行いつつ徐々に蓄積電流を増大させ, リングへの入射開始から1ヶ月足らずで設計目標の電流200mA, 寿命4h, 同年末にビーム寿命は8h(この時点まで1/2寿命で記載)に達した。

そして, SR光源施設, ビームラインおよびライナーなどの立ち上げを完了後, 1990年4月よりリソグラフィの実験を開始した。

5.3 大電流化改造までの代表的な成果

SR光源のマシスタディを行い, ビームの長寿命化, 追加入射による一定電流制御などの成果をあげた。以下, 現状の理解を助けるという観点か

Table 5 Main parameters of SR facility.

		Designed	Achieved (as of March 1992)
Storage Ring			
Energy	GeV	1	1
Dipole Field	T	1.2	1.2
Critical Wavelength	nm	1.55	—
X-Ray Power	kW	6.37	6.37
Beam Current	mA	200	200
Beam Lifetime	h	>4	>70
Natural Emittance	mm·mrad	0.51	—
Circumference	m	45.7	—
Synchrotron (Injector)			
Injection Energy	MeV	40	40
Maximum Energy	GeV	1	1
Beam Current	mA	30	50
Circumference	m	43.2	—
Linac (Pre-Injector)			
Energy	MeV	40	40
Beam Current *	mA	>30	60~80
Energy Spread	%	<±1.5	±0.67
Emittance	πmm·mrad	<3.8	0.7

*Useful beam current which satisfies values of energy spread and beam emittance

ら, 大電流化改造前の成果について簡単に述べる。詳細については関連文献(長寿命化については文献14), 15), 一定電流制御については文献16), 17), 18))を参照されたい。

[ビームの長寿命化]^{14), 15)}

ビーム寿命 τ はビームの不安定性や大きなCODに影響されない時はリングの真空系と直接関係しない①量子寿命 τ_q , ②タウシェック寿命 τ_t と, 真空性能に直接関係する③イオン化ガス分子との散乱による寿命 τ_i , ④残留ガス分子との散乱による寿命 τ_r より決まる。長寿命化のためには①~④の各寿命を, それぞれ増大する必要がある。

まず①, ②双方に起因し

$$1/\tau_{qt} = 1/\tau_q + (e-1)/\tau_t$$

で定義される τ_{qt} の長寿命化を行った。

高周波加速空洞の加速電圧 V_c を定格仕様90kVから100kVに増加させてRFバケットの高さを上

げ τ_0 を増大させた。

一方、エミッタンスのカップリング κ をそれ以前($\nu_x = 2.21$, $\nu_y = 2.23$)のように $\kappa \sim 0.1$ と弱い場合に比べ、 $\nu_x \sim \nu_y$ ($\nu_x = 2.143$, $\nu_y = 2.149$)と差共鳴点に調整することで $\kappa \sim 1$ と強くした。その結果、ビーム形状が従来の偏平状から円形状になり、電子散乱がx-y双方向で起こるようになり、電子の損失確率が飛躍的に減少し τ_0 が増大した。

そして、従来の $\tau_{0,t} = 46\text{h}$ から470hと③④に比べ無視できるまでに増大し、ビーム寿命は③④によって決まることになった。

③を増大するためには、電子ビームのつくる負のポテンシャルにトラップされるイオン化ガス分子を効果的に除去する必要がある、SRリングでは当初入射部を除く各直線部7ヶ所にディスク型イオン除去電極を配し、これに負の直流電圧を印加することによりイオンを除去した⁹⁾。

実際のビーム運転においては、入射時の動作点は共鳴点を避け、入射終了後に差共鳴点に移動させている。入射時は $\sigma_x/\sigma_y = 1.34/0.47\text{mm}$ とビーム形状は偏平であり(Flat Mode)、蓄積中は $\sigma_x/\sigma_y = 1.0/1.0\text{mm}$ と円形状である(Round Mode)。このビーム形状はリソグラフィ実験においてとくに問題はないことを露光実験で確認している。

以上により、寿命は主として④で決まるようになりRound Modeにおける200mA蓄積時の寿命は、1990年11月の時点で40hに達した。その後、ガス放出の進行による真空度向上とともに、寿命は延び大電流化改造前の1992年3月には70hに達した²⁸⁾。なお、イオン除去電極に-400Vを印加することにより、ビーム寿命は印加前の15~20hから60~70hへと大幅に延び、イオン除去効果が確認された。

[追加入射による一定電流制御]

通常の初期蓄積電流200mAでの利用運転では入射時間約3minで200mAまで蓄積され、その後

3~4hごとに、1min以下の追加入射を1日に2~3回行えば蓄積電流を5%以下の変動範囲に抑えられる。このような運転においては、長寿命だけでなく、安定で追加入射可、利用効率低下小というフルエネルギー入射方式の特長が充分活かされている。

しかしながら、リソグラフィ用としてはSR強度の時間的変化は出来るだけ小さいことが望まれる。そこで、蓄積電流一定制御の可能性を実験的に検討し、蓄積電流が200mAから2mA低下するたびにビームの自動追加入射を行い、その変化を1%以下に抑えることができた¹⁶⁾。この成果は、フルエネルギー入射方式の利点をより積極的に活かしたものであり、ソルテックSR光源システムが安定性、制御性、操作性に優れていることを実証したことになる¹⁷⁾。追加入射はビーム寿命が10hの時点では平均約3minに1回自動的に追加入射が行われた。また、寿命が60hの時点では、追加入射の間隔は、平均30min程度で、同一電流精度を達成するのに、寿命比だけ追加入射の頻度が低減されることを実証した¹⁸⁾。

6. おわりに

以上、ソルテックSR光源について、大電流化改造の内容とそれ以降の研究成果および運転状況やビーム特性などの現状を主体に紹介した。

SRリング大電流化の成功は、当初計画の段階から、改造が容易なように、真空や発熱対策など重要事項に関しては、500mA蓄積を見込んだ設計がなされていたことに加え、操作性や制御性にも優れ、専用で使用できるという利点も相俟って、マシンスタディに充分活用でき、改造点についても改造時の技術課題を事前にマシンスタディにより充分に把握できて、その対策が成されたことによるところが大である。

このたびの大電流改造の成功により500mAの蓄積電流と、25h以上の長寿命を実現し、世界最高級の性能を得るにいたった。これらの成果は大

電流化改造以前に行われた蓄積電流の長寿命化や一定電流制御が可能な高安定化技術をベースとしてその上に築かれたものである。

大電流化改造以降のUptimeは真空トラブルの起きた月を除く15ヶ月間常に98%以上と順調であったため、1ヶ月ごとの積算蓄積電流も順調に伸びた。最近では初期蓄積電流400mA以上の運転がSR利用時の主体になり、平均蓄積電流約400mAで積算電流値が80Ah以上に達し、現在の運用形態では、ほぼ限界まで利用が行われるにいたっており、リソグラフィ研究の進捗に大いに寄与しているものと自負している。

ところで、SRリングの寿命や真空性能は上限に達しており、これ以上の大幅な性能向上は望めないような段階に達したように見える。しかし、最近のビーム寿命の制限要因を究明する過程で得られたRF励振による寿命の数10%と大幅な向上が得られることがわかった。このことは、真空性能が理想的な水準に達したため、これまで以上にビーム特性を詳細に把握できる条件が整ってきたことによる成果といえる。

今後残された重要な課題としては、引き続きSRリングの寿命決定要因の検討の継続を始めとした、現状の光源システムから引き出し得る性能限界の追求をしておくことが望まれる。また、これらの成果を踏まえ、SR強度、安定性、利用効率、運転・メンテナンスを含めた総合性能について、実用段階におけるリソグラフィシステムのあるべき姿をとらえていくことが重要と考えられる。

最後に、ソルテックSR光源に関して、仕様検討から大電流化改造等にいたるそれぞれの段階を通して、多大なご指導頂いた富增多喜夫博士（現(株)自由電子レーザー研究所）に感謝に意を表す。また、それぞれの段階で光源の開発、性能向上のために尽力され、また、多大なご指導、ご支援を頂いたメーカーほかの関係各位、ならびにソルテックにおける、出資各社からの出向期間のなかで持ち味を発揮された研究者および関係各位に感謝の意を表す。ソルテックSR光源のこれまで成果はこれら関係各位による合作であり共通の成果と考えらる。

文献

- 1) 阿刀田伸史: FED ジャーナル **2** (3), 69 (1992).
- 2) 細川照夫, 北山豊樹: 応用物理 **60**, 703 (1991).
- 3) 細川照夫ほか: 放射光, **6** (4), 413 (1993).
- 4) 山田廣成, 堀 利匡: 放射光: **6** (4), 421 (1993).
- 5) A.R. Jorden et al: 放射光, **6** (4), 445 (1993).
- 6) 山田忠利: 放射光, **6** (4)455 (1993).
- 7) 中村史朗, 岡田浩一: 放射光, **3** (2), 127 (1990).
- 8) M. Shiota et al: Proc. of 7th Symp. on Acc. Sci. and Tech., KEK, 10 (1989).
- 9) Y. Yamamoto et al: ibid., 475 (1990).
- 10) M. Ohno et al: ibid., 1335 (1990).
- 11) M. Kodaira et al: Proc. of the 2nd European Particle Accelerator Conference, 409 (1990).
- 12) M. Takanaka et al: ibid., 836 (1990).
- 13) S. Nakamura et al: ibid., 1335 (1990).
- 14) N. Awaji et al: SR Vac. Sympo. RIKEN p45 March (1991).
- 15) N. Awaji et al: Rev. Sci. Instrum. **63** (1), 745 (1992).
- 16) M. Kodaira et al: Proc. of Topical Sym. on Synchrotron Radiation, p32 (1991).
- 17) M. Kodaira et al: Jpn. J. of Appl. Phys., **30**, 11B, 3043 (1991).
- 18) M. Awaji et al: Proc. 8th Sympo. Accele. and Tech., Saitama, 25 (1991).
- 19) 淡路直樹ほか: 真空, **34** (10), 752 (1991).
- 20) 浅井脩次ほか: 三菱電機技報, **65** (11), 1065 (1991).
- 21) 土舘裕幸ほか: 同上, 1095 (1991).
- 22) M. Kodaira et al: Proc. of the 3rd European Particle Accelerator Conference, 203 (1992).
- 23) N. Awaji et al: ibid., 348 (1992).
- 24) 小平政宣: SR 技術情報 **2** (7), 12 (1992).
- 25) S. Sakanaka: KEK Report 91-7, August 91, A.
- 26) M. Kodaira et al: Particle Accelerator Conference, Mb19 (1993).
- 27) T. Kishimoto et al: ibid., Mb20 (1993).
- 28) T. Kishimoto et al: Proc. 9th Sympo. Accele. and Tech., Tsukuba, (1993) 234.
- 29) 富増多喜夫: シンクロトロン放射技術, 富増多喜夫編著 (工業調査会, 1990), 第2章.
- 30) 椋木 健ほか: 第34回真空に関する連合講演会予稿集 p93 (28pS-3).
- 31) 椋木 健ほか: 同上 p151 (29pA-3).