



## IHI小型シンクロトロン放射光装置 LUNAの現状

丸下 元治, 大石 真也, 高橋 光幸,  
小松 孝仁, 萬代 新一  
I H I 石川島播磨重工業株式会社

### The Present Status of a Compact Synchrotron Radiation Source LUNA of IHI

Motoharu MARUSHITA, Masaya OISHI, Mitsuyuki TAKAHASHI,  
Takahito KOMATSU and Shinichi MANDAI  
Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.

Synchrotron radiation is expected to apply to many fields of science and industry and we are especially interested in availability of SR for X-ray lithography. This paper presents the characteristics, the design parameters, the features and current status of LUNA.

Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd. (IHI) has developed a compact synchrotron radiation source "LUNA" for lithography and has successfully stored beam current at full energy. LUNA consists of a 45 MeV linear accelerator as an electron injector and an 800 MeV synchrotron as a storage ring.

The construction of LUNA has been completed in April 1989 at IHI Tsuchiura facility near Tsukuba. Synchrotron Radiation was first observed at December 1989. The design goal, which is to store beam current of 50 mA with the beam lifetime of over 30 minutes, has been successfully achieved in March 1991. At present the stored beam current is 80 mA with the beam lifetime of over 5 hours.

#### 1. はじめに

シンクロトロン放射光の科学利用, 産業利用が

具体的になりつつある今日, とくに半導体産業に  
おけるX線リソグラフィーへの適用は注目されて

いる分野である。

IHI (石川島播磨重工業株式会社) は、昭和61年に放射光装置の自社開発を前提としたソフトの整備、主要機器のモデル製作および性能評価を行い、技術的見通しを確認した上で、昭和62年4月から社内用実験装置として、LUNA (Lithography Use New Accelerator)<sup>1),2)</sup>の開発に着手した。

LUNA開発の目的は、

- ①放射光装置の設計、製作、運転技術の取得
- ②放射光取り出しのためのビームラインの設計、製作、利用技術の取得
- ③放射光装置からのSR光利用

である。その後、平成元年4月に茨城県新治郡出島村のIHI土浦実験場内に据え付けを完了し、同年12月、800MeVでの放射光の取り出しに成功、平成3年3月に当初の目標値である蓄積電流50mA (800MeV)、電子寿命30分を達成した。以下では社内小型放射光装置のLUNAの概要について報告する。

## 2. 施設の概要

IHI放射光実験施設は、茨城県新治郡出島村に建設され、昭和63年5月に着工、同年11月に完成した。昭和63年10月には、「放射線障害防止法」に基づく科学技術庁の放射線取扱施設としての使用の許可を与えられ、平成元年12月には機器調整後の施設検査(財団法人原子力安全技術センターによる)に合格した。

装置本体は、平成元年1月から据え付けを開始し、3月に終了した。

建屋は、LUNAを収納するシンクロトロン室を中心とした地上2階建の鉄筋コンクリート構造及び鉄骨構造である。1階は、中央にシンクロトロン室を、周囲に実験室Ⅰ、実験室Ⅱ、電源室、排気機械&動力室、ユーティリティー室、予備実験室を配置している。実験室Ⅰは、物性研究用ビームラインを設置し利用するための部屋でシンクロトロン室への出入口となっている。実験室Ⅱは、

X線リソグラフィー用ビームラインを設置することを想定してクラス1000のクリーンルームとして設計されている。シンクロトロン室と実験室Ⅱは、放射線発生装置使用施設となっており、特にシンクロトロン室の出入口は、インターロックが設けられており装置の運転中は、人が立ち入れないようにしている。2階は、制御室、事務室、会議室等を配置している。図1に1階の平面図を示す。

## 3. 放射光装置

### 3.1 設計の方針

本装置はX線リソグラフィー用放射光装置の設計、製作、運転技術の取得、SR光利用を目指した社内用光源であることから、コンパクトで、信頼性の高い装置が重要である。このため、既存の加速器技術をベースとして、偏向電磁石は、セクター型の常電導電磁石を採用し、リングはリング形状を4角形とし、加速、蓄積兼用とした電子シンクロトロンとした。入射は、社内での実績、小型化、低コスト化より、約10mの45MeV線形加速器(LINAC)<sup>3)</sup>を使用し、台形波多重入射方式の低エネルギー入射を行う。また、X線リソグラフィーに適した波長が6~15Åであることから、ピーク波長が9.2Å(臨界波長21.8Å)となるよう電子エネルギーを800MeVとした。本装置からの放射光取り出しのためのビームラインポートは4つ設置している。

### 3.2 線形加速器

図2に線形加速器の構成図を示す。蓄積型のシンクロトロンにおける入射・蓄積は、入射エネルギーが高い方が容易となる。一方、装置をコンパクトにすることおよびコストの面からは、入射エネルギーは低く抑えたい。これら双方の要求を考慮して、線形加速器のエネルギーは、45MeVと設定した。線形加速器は、2856MHzの大電力Sバンドクライストロン2本を高周波源として用いたバ

Building: 2-story ferro-concrete structure  
 Floor space: 1st Floor;952m<sup>2</sup>  
 2nd Floor;326m<sup>2</sup> (including control room and office)

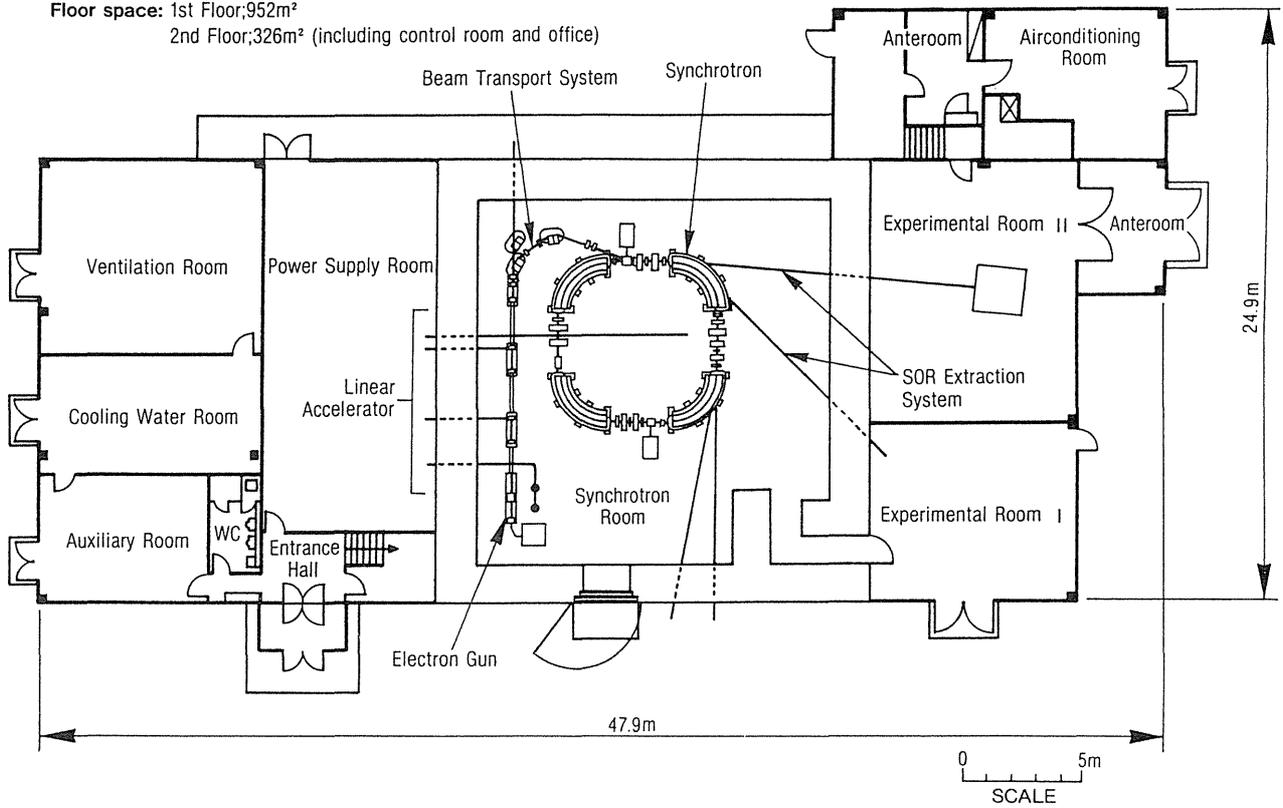


Fig.1 1st Floor Layout

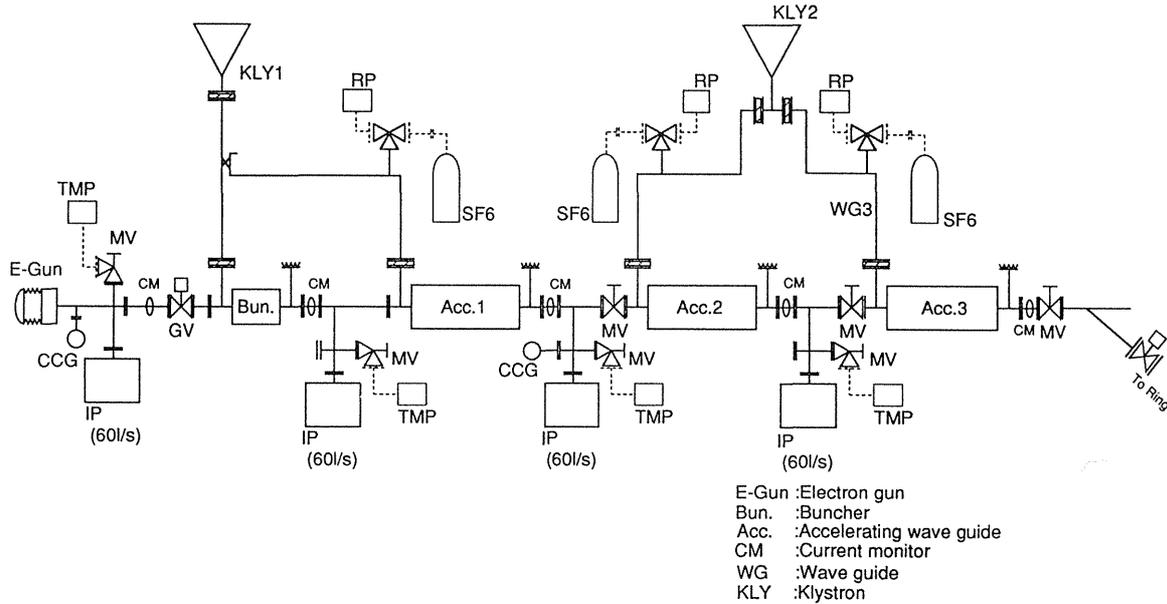


Fig.2 Linac block diagram

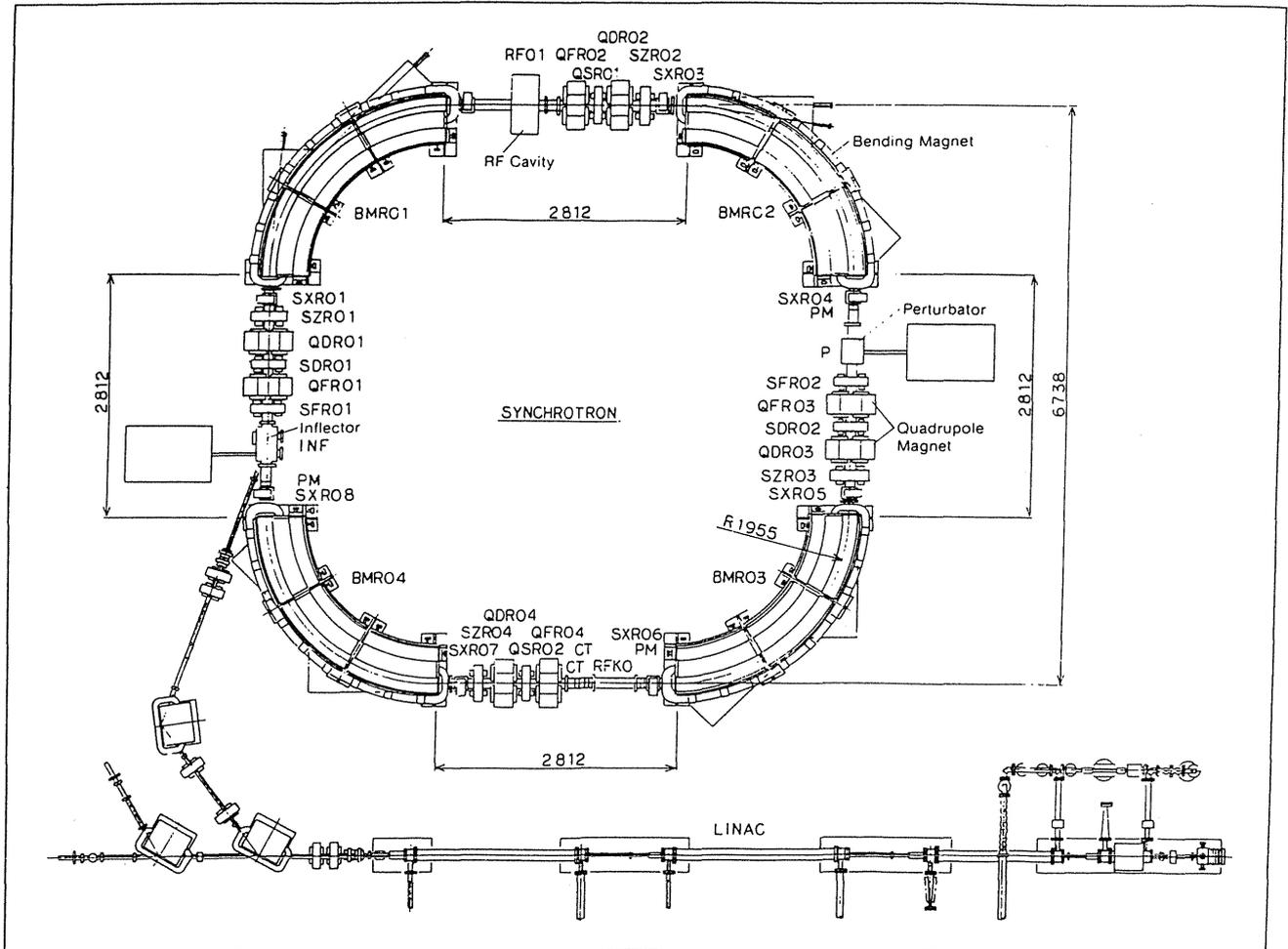


Fig.3 Layout of LUNA

ンチャー管1本を含む4本の加速管と、電子銃、収束電磁石、真空系、モニター系および制御系から構成されている。

昭和63年までに電子銃、バンチャー管、レギュラー加速管1本からなるシステムを試作しIHI横浜第1工場にて組み立て、運転調整を行った。平成元年に土浦実験場へ移設し、加速管2本を加えて全システムの組立を完了しビーム運転を開始した。45MeVの定格エネルギーを達成した後、収束電磁石系、高周波電源の安定化などの調整ののち仕様値を達成した。加速エネルギーは、60MeVまでの調整が可能であり、ピーク電流は、45MeVで200mAとなっている。

### 3.3 シンクロトロン

図3にLUNAの構成を示す。シンクロトロンをコンパクトにし、X線リソグラフィーに適した波長6~15Åを得るためには、小さい曲率半径すなわち高い磁場強度を設定した上で電子エネルギーを選択すればよい。常電導電磁石の磁場強度は、従来の加速器では1.5T程度であり、LUNAでは1.33Tを選択した。電子エネルギーとして800MeVを選択したため、放射光スペクトルは、図4に示すとおりとなる。

シンクロトロンは、入射時に軌道を調節するためのインフレクター等の入射系、電子の軌道を決定する電磁石系、電子の加速・蓄積時のエネルギーを補給する高周波加速系、真空系、モニター系、制御系で構成されている。

シンクロトロン・ラティスは、なるべくコンパクトになるよう4角形とし偏向部はセクター型の電磁石を用いた。4つの直線部に水平方向、垂直方向各々の収束用4極電磁石を配置し、他にクロマティシティ補正用6極電磁石を4台、結合定数を変えるためのスキュー4極電磁石を2台、また軌道調整用電磁石を水平方向用8台、垂直方向用4台配置している。

RF周波数は、パワー源の供給、信頼性、バンチ長からの要求、加速空洞の大きさ、ビーム不安定性への影響、制御系の使い易さなどを総合して178.5MHz (ハーモニック数14) とした。

入射方式については、45MeVで入射した電子ビームを300MeVまで加速したのち1秒程度保持し、放射減衰を待って再び45MeVまで落とし次の入射パルスを導入し蓄積電流値を増大させる、これを繰り返し、充分電流がたまったところで、800MeVまで加速するという台形波励磁方式の試験を行っている。ただし、この方式を用いなくても45MeVで入射した電子ビームをそのまま800MeVまで加速する方法により当初の仕様値

(50mA)は、達成することができる。

真空系は偏向部にイオンポンプ2台、NEG2台を、直線部にNEG1台、インフレクター部にクライオポンプ1台を設けた。チタンサブリメーションポンプは予備排気系として設け、粗排気用とし

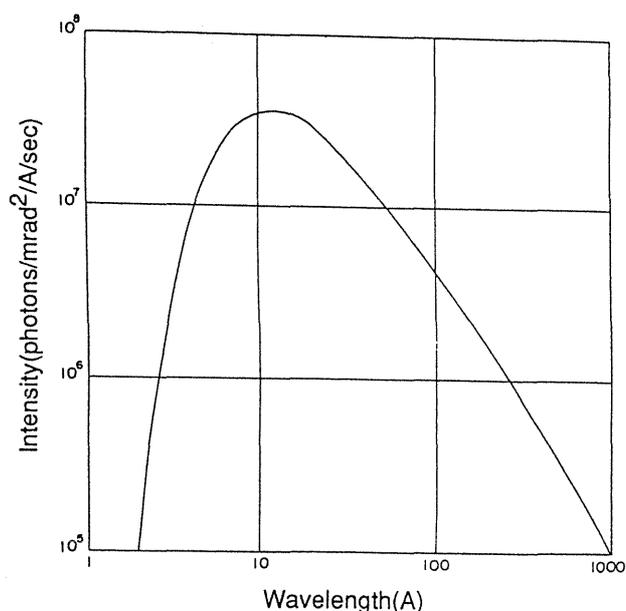


Fig.4 Spectrum of synchrotron radiation in LUNA (Beam current 50mA)

Table 1 Specification of Synchrotron

	designed	result
Energy (injection)	45 MeV	45 MeV
(operation)	800 MeV	800 MeV
Stored current	50 mA	80 mA
Lifetime	30 min	>5 hours
Vacuum pressure	$10^{-7}$ Pa	$10^{-8}$ Pa
Critical wavelength	21.8 Å	21.8 Å
Peak wavelength	9.2 Å	9.2 Å
Bending angle	90 deg.	90 deg.
Bending field	1.33 T	1.33 T
Tune (horizontal)	1.75	1.75-2.00
(vertical)	0.75	0.75-1.00
Circumference	23.5 m	23.5 m
RF frequency	178.5 MHz	178.5 MHz
Harmonic Number	14	14

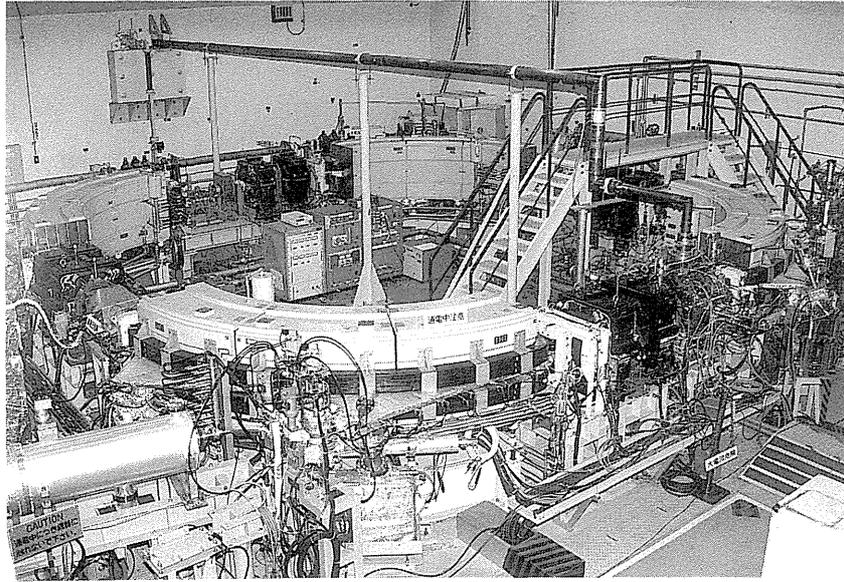


Fig.5 Overview of LUNA

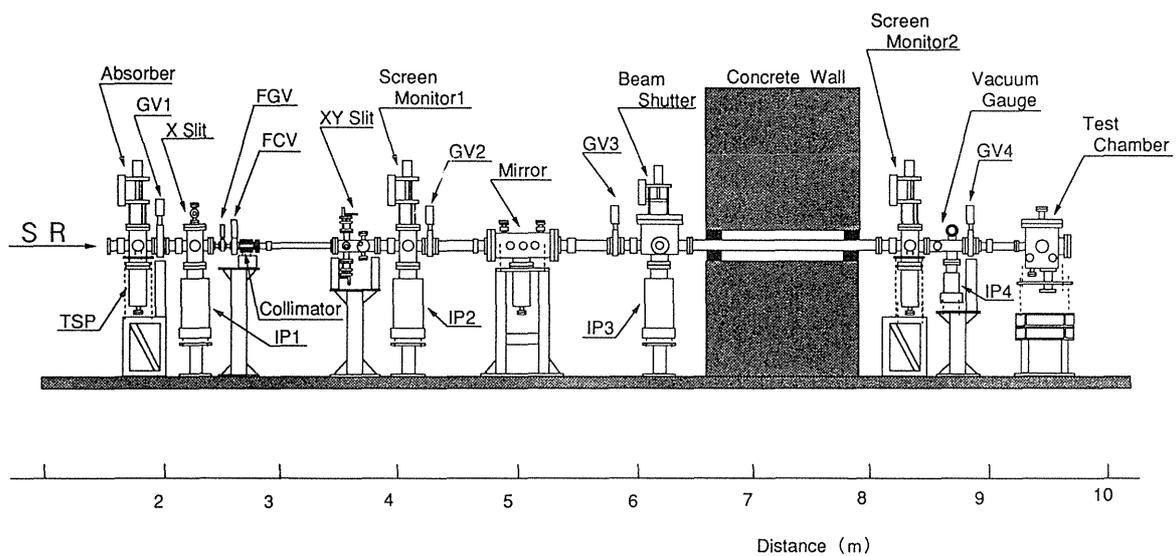


Fig.6 LUNA BL-1 beamline layout

てターボ分子ポンプを設けてある。現在、800MeV蓄積時  $10^{-8}$  Pa台の真空が得られている。シンクロトロン主要パラメーターを表1に、図5にLUNAの外観を示す。

### 3.4 ビームライン

放射光取り出しのために最大、4本のビームラインが設置可能である。偏向電磁石 BMR01 から

5°の方向に1本のビームライン(BL-1)をリソグラフィ用として実験室Ⅱに導いており、45°の方向に1本のビームライン(BL-2)を実験室Ⅰに導き、物性研究用として利用可能である。偏向電磁石 BMR02 から0°の方向に1本のビームライン(BL-3)を、10°の方向に1本のビームライン(BL-4)を設置している。

ビームラインBL-1の基本構成を図6に示す。

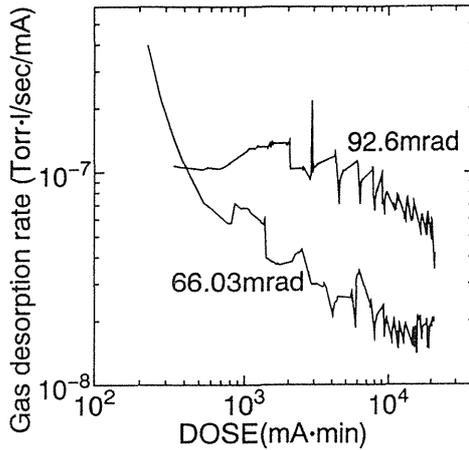


Fig. 7 Gas desorption rate of CVD-SiC mirror

SR光は、LUNAの偏向部上流5°よりの光を巾0.9°まで利用できる。本ビームラインは全長12mで、発光点からミラーまで5mである。アブソーバー、SR光モニターは同一構造とし、両者の機能を兼ね備えている。また、アブソーバーは、SR光を導く際マスクの機能も有する。高速遮断弁(FCV)、高速ゲートバルブ(FGV)は、各々閉時間10msecと100msecである。

現在までに、アブソーバー、ミラー等の構成機器の光枯らしを実施し、無酸素銅、CVD-SiC等の脱ガスデータを得ている。図7にCVD-SiCの斜入射での枯らし結果を示す。又、マシンスタディ及びSR光特性評価のため、SRモニターでSR光を測定している。図8にSR光をSRモニターで計測した結果を示す。ビームサイズ $\sigma$ はSRモニター位置で約1.1mmである。点線は軌道解析から求められるビームサイズに基づき光線追跡した結果である。実線はこの光線追跡の光線1本ごとに対してモニター位置でのスペクトル計算を行った結果である。図9は、同様な測定での蓄積電流値とSRモニター位置でのビームサイズ $\sigma$ との関係を示したものであり、イオン掃引電極(ICE)に電圧を印加した場合と印加しなかった場合を示した。このように、ICEに電圧を印加することによりビームサイズが小さくなっていることが判る。こ

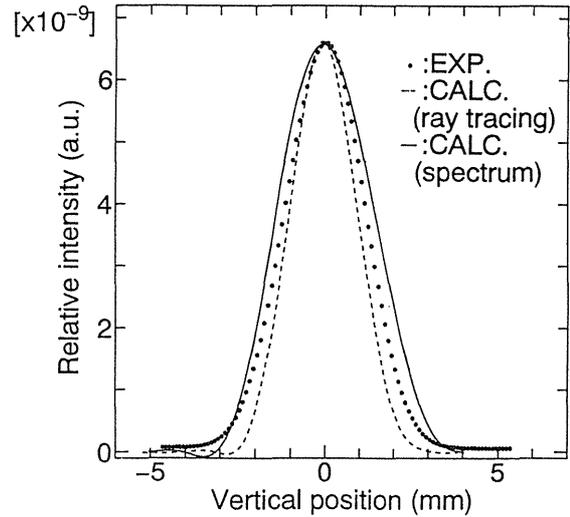


Fig. 8 The beam profile at SR monitor

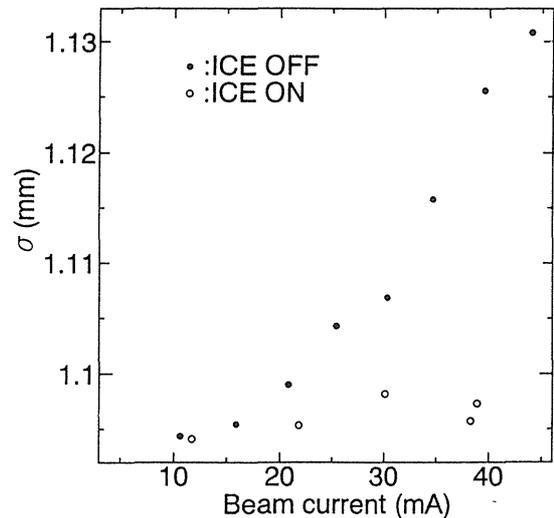


Fig. 9 Relation of beam profile and beam current.

の効果は蓄積電流が増加する程顕著であり、イオン化したガスが除去され、ICEの効果が大きく効いている事がわかる。

#### 4. 現状

45MeV入射、800MeV蓄積に成功し、当初の目標性能である蓄積電流50mA、寿命30分を達成した。その後、ビームラインを設置し、放射光利用実験に使用しつつ、マシンスタディを行っている。現在までに、当初の設計仕様を上回る初期電

流80mA,  $1/e$ 寿命は約5時間を達成できた。

## 5. 結び

低エネルギー入射(45MeV)による電子の加速・蓄積に成功するとともに、台形波多重入射の有効性も実証することができ、常電導小型シンクロトロン放射装置のX線リソグラフィー用放射光源としての技術的見通しが得られた。

## 文献

- 1) S. Mandai et al., Rev. Sci. Instrum. **60**, 1975 (1989).
- 2) S. Mandai, in Proceedings of the 14th International Conference on High Energy Accelerator, Tsukuba, Japan, Aug. 22-26, 1989.
- 3) N. Kaneko et al., in Proceedings of the 1991 Particle Accelerator Conference, San Francisco, USA.
- 4) M. Oishi et al., Topical Conference on Vacuum Design of Synchrotron Light Source, ANL, Illinois, USA, 1990.
- 5) M. Takahashi et al., 4th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Chester, UK, 1991.
- 6) M. Ida et al., Third European Particle Accelerator Conference, Berlin, Germany, 1992.

## きいワード

### イオン掃引電極 (Ion Clearing Electrode)

蓄積リングのビームの通り道であるチェンバーは超高真空にされるが、この中に $10^{-6} \sim 10^{-8}$  Pa程度の残留ガスが存在し、このガス分子が蓄積リングの中を周回するビームによりイオン化する。電子蓄積リングの場合ビームが負の電荷を持つため、このイオンが蓄積ビームの作るポテンシャルに捕獲される。このイオン化した残留ガスとビームが衝突し、エネルギーを失い、また真空チェンバーと衝突しビーム軌道から失われるため、ビーム寿命は短縮される。この捕獲されたイオンを除くために小型リングにイオン掃引電極(ICE)が取り付けられる。

### 台形波多重入射

低エネルギーで入射した電子ビームを充分放射減衰するエネルギーまでもってゆき放射減衰を待って再び入射エネルギーまで落とし、次の入射電子ビームを蓄積リングに導入し蓄積電流値を増大させる入射方式。これを繰り返す、充分電流がたまったところで、蓄積エネルギーまで加速する。