

## マックス研究所を訪問して

分子科学研究所 春日 俊夫

Toshio KASUGA

Institute for Molecular Science

本年8月下旬から9月中旬にかけて、日本＝スウェーデン協力事業によりスウェーデンに派遣された。同国の国立放射光施設であるルント大学のマックス研究所 (MAX-LAB) には約2週間滞在し、多くの研究者や大学院生と議論をし、マシンスタディにも参加したので、この研究所の概要を紹介する。

ルント大学の電子加速器の歴史は古く、1953年の30 MeV シンクロトロンに始まり、1.2 GeV シンクロトロンを経て現在のマックス研究所に続いている。本研究所の加速器は1976年にパルスストレッチャーリングとして建設が決定され、1979年にこのリングをシンクロトロン放射光源としても利用することに計画が変更され、1981年に国立研究所とすることが決められた。加速器の建設は1983年から85年にかけて行われ、85年の3月に電子ビームの蓄積に成功している。本研究所の所長はフォークマン教授 (Prof. Bengt Forkman) であり、加速器の責任者はエリクソン教授 (Prof. Mikael Eriksson) である。

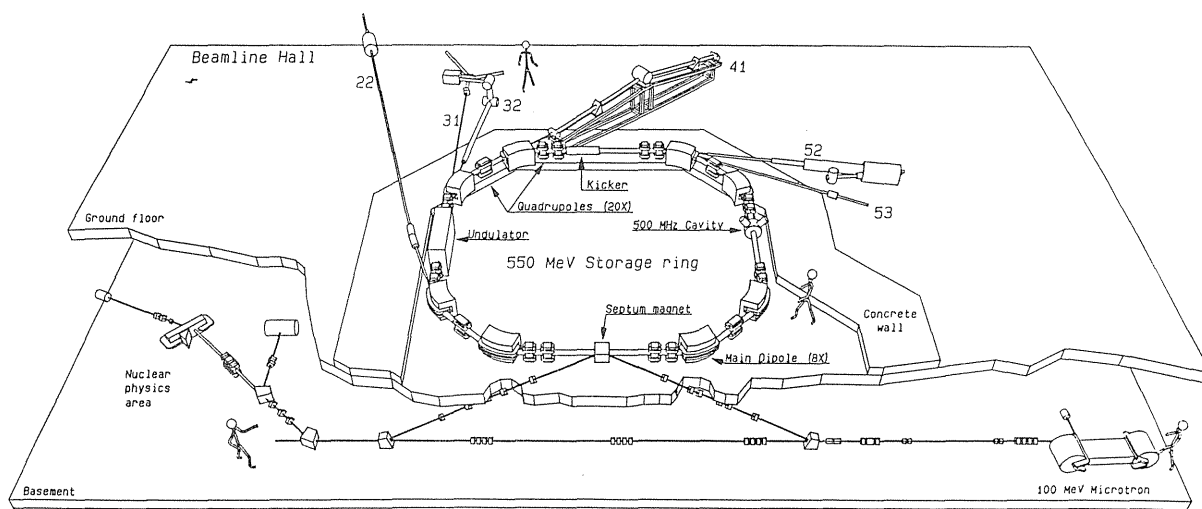
加速器の主なパラメータを表1<sup>1)</sup>に、構成図を図1に示す<sup>2)</sup>。入射器は100 MeVのレーストラック型のマイクロトロン(写真1)である。550 MeVの電子ストレージリング(写真2)は主に極端紫外光源として利用されているが、100 MeV程度の電子ビームパルスストレッチャーとしても用いること

ができる<sup>3)</sup>。リングは8台の二極電磁石、20台の四極電磁石、クロマティシティ補償用およびパルスストレッチャーモード時のビームの遅い取り出し用の六極電磁石から構成されている。シンクロトロン放射により失ったエネルギーは500 MHzの空洞より補われる。真空ドーナツはステンレス製であり、イオンポンプ及び分布型ポンプにより排気される。リング内各所に伝送線路型のビーム位置モニターが組込まれている。現在、このモニターの電極は後で述べるイオン除去用の電極およびチューン測定用のビーム励振用の電極に転用されており、本来のビーム位置モニターは光学的なものに変更中である。

シンクロトロン放射光源として利用する時は、100 MeVの電子を約1分かけて300 mA程度蓄積し、約10秒間で550 MeVまで加速する。電磁石系の鉄芯は積層型であるため、この様に速い加速が可能である。加速の初期の段階でビームロスが生じ550 MeV時の初期電流は200～250 mA程度となる。この電流でのビームの寿命は約3時間である。無電流時のドーナツ内の真空度およびビーム電流250 mA時の真空度は、それぞれ $0.5 \times 10^{-9}$ ・ $2 \times 10^{-9}$  Torrと予想されている。通常は54個すべてのバケットにビームを満たして運転をしているが、選択的なRFロックアウトを行ないながら入射をしてシングルバンチを蓄積することも可能である。

表1 加速器の主なパラメーター (参考文献1より)

RACETRACK MICROTRON	
.....Max energy	100 MeV
.....Pulse current	20 mA
.....RF	3 GHz
.....Pulse length	1 $\mu$ s
.....Energy spread	0.1 MeV
STORAGE MODE	
.....Operating energy	500 MeV
.....Max circ current	200 mA
.....Hor emittance	$4 * 10^{-8}$ mrad
.....RF	500 MHz
.....Bunch length	120 ps (FWHM, single bunch. 4 mA)
PULSE-STRETCHER MODE	
.....El energy	75-100 MeV
.....Duty factor	50-80 %
.....Operating current	50 nA (limited by user needs)



Layout of the MAX storage ring.

図1 MAX-LABの加速器の配置 (MAX Publicationsの表紙より)

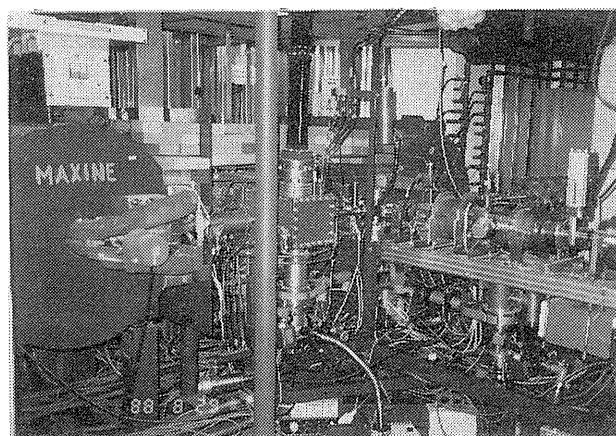


写真1 100 MeV マイクロトロン

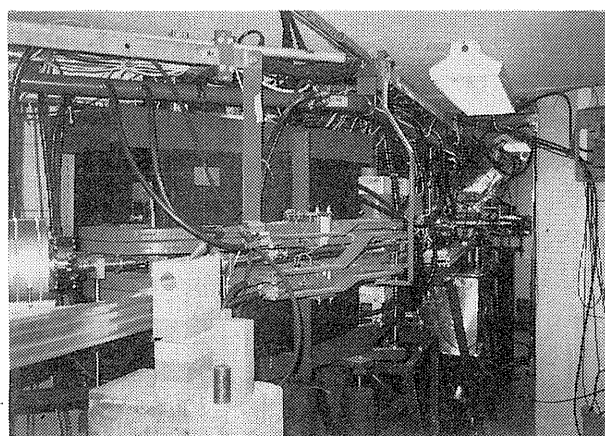


写真2 ストレージリング

表2 MAX-LAB アンデューレーターのパラメーター (参考文献6より)

Main parameters, dimension and tolerances of the undulator

Magnet dimensions	$150 \times 100 \times 31 \begin{cases} +0 \\ -0.2 \text{ mm} \end{cases}$
Magnet dipole moment	$168.6 \mu\text{Vs m} \pm 0.3 \%$
Pole dimensions	$135 \times 75 \times 6.5 \begin{cases} +0 \\ -0.1 \text{ mm} \end{cases}$
Undulator period ( $\lambda_u$ )	$75 \pm 0.15 \text{ mm}$
Undulator gap, adjustable	$(20-80) \pm 0.08 \text{ mm}$
Overall length	2030 mm
Number of periods ( $N$ )	25.5
Peak field at minimum gap ( $B$ )	0.35 T
$K$ maximum (at min. gap)	2.47
$K$ minimum (at max. gap)	0.15
Maximum magnetic force	4000 N

表3 ビームライン一覧表 (参考文献1より)

Beam Port	Source Type	Operational Status	Energy Range (eV)	Research Program
11	Undulator	Planned	60-600	Spectroscopy, microscopy, holography
22	Bending magnet, 10 mRad	Construction	20-1000	High resolution XPS
31	Undulator	Construction	8-150	Undulator research photoelectron microscopy
32	Bending magnet, 20 mRad	Operational	1-11	Time-resolved fluorescence spectroscopy
33	Bending magnet, 25 mRad	Planned	6-80	Photoelectron spectroscopy
41	Bending magnet, 18 mRad	Operational	10-200	Photoelectron spectroscopy
51	Wiggler, 10 mRad	Planned	1500-6000	EXAFS
52	Bending magnet, 25 mRad	Operational	5-25	Atomic spectroscopy
53	Bending magnet, 20 mRad	Construction	< 2000	Soft x-ray spectroscopy, microscopy lithography
73	Bending magnet, 35 mRad	Planned	$1000-10 \text{ cm}^{-1}$	Infrared spectroscopy

このときの最大電流は 10mA 程度である。

このリングの問題点の一つは同種のリングと同様イオントラッピングの影響が大きいことである。ドーナツ内の各所に設けたクリアリング電極に直流を印加してイオンを除去している。筆者の所属

する分子研UVSORでは直流電極以外に RF 励振法を併用して効果をあげている。MAXのリングでもこの方法を試みてみた。通常の運転時には特に効果は認められず、直流電極だけで充分の様であるが、後に述べるランダウ空胴を用いてカップ

ルドバンチ不安定を抑えたときはRF励振法は有効と思われた。これは不安定を抑えると有効なビームサイズが小さくなり、イオンに対する収束力が変化することと関係しているのかも知れない。

二番目の問題は縦方向のカップルドバンチ不安定である。この不安定を抑制するためにランダウ空胴が設置されている<sup>4)</sup>。この空胴は加速用高周波系の三倍の共振周波数(1.5GHz)を持ち、特に高周波電力増幅器を持たず、ビーム電流が誘起する電圧を利用する所謂パッシブ空胴である。ビームの入射後空胴の共振をとり空胴内に電圧を発生させると上記の不安定は抑制される。空胴の共振周波数をビームが発生する高周波より高くとるか低くとるかにによりバンチ長に差ができるはずである。フォトンカウンティング装置を用いてバンチ長の測定を試みたが、残念ながら装置の不調により測定は出来なかった。

電子ストレージリングの問題の一つにヘッドテール不安定がある。この不安定にはベータートロン振動とシンクロトロン振動が絡んでおり、通常は六極電磁石を用いてクロマチシティを補正することにより抑制する。しかし、この六極電磁石の

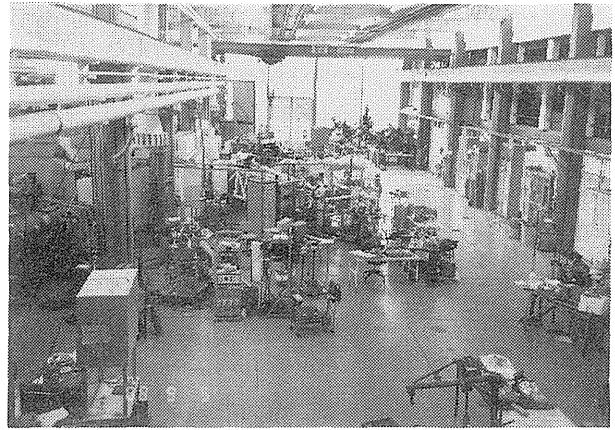


写真3 実験ホール(左側のシールドブロック内がストレージリング)

励磁がリングのダイナミックアパーチャを狭めることが知られている。ランダウ空胴を動作させるとシンクロトロン振動数に拡がりを持たせることができ、ヘッドテール不安定を抑制できる可能性がある。この考えのもとに実験を開始していた。即ち六極電磁石の励磁をやめ、この不安定を起こし、ランダウ空胴で再び抑制する試験を開始していた。確かに不安定は抑制することが可能のようであったが、残念ながらマックス研究所のランダウ空胴は前述の様にパッシブ空胴なので空胴電圧

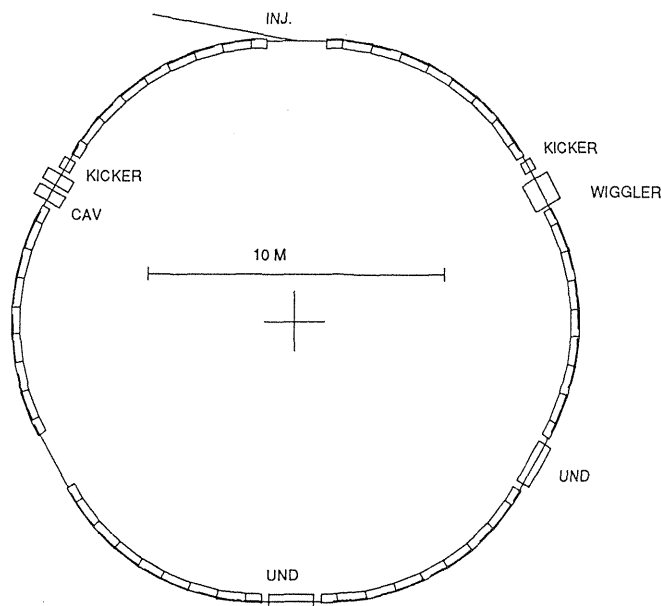
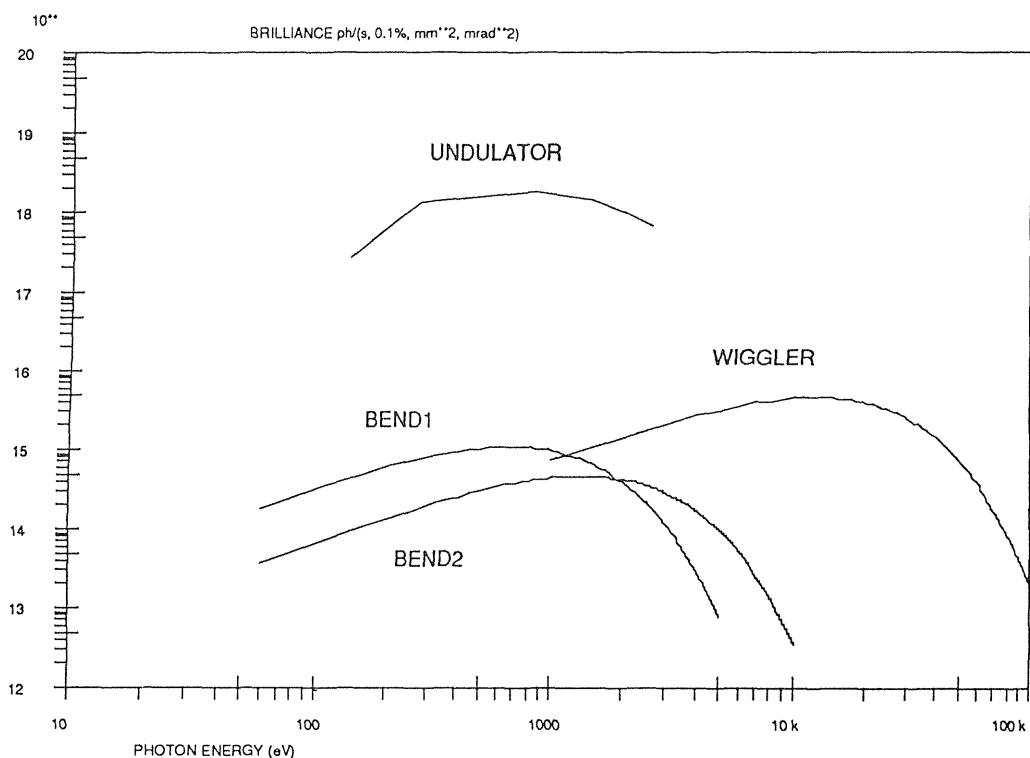


図2 1.5 GeV 高輝度シンクロトロン光源の配置図  
(参考文献9より)

表4 1.5 GeV 高輝度シンクロトロン光源パラメーター  
(参考文献9より)

Max electron energy	1.5 GeV	
Circulating current	200 mA	
Hor emittance	$1.2 \times 10^{-8}$ rad m.	
Circumference	60 m	
Straight sections	$6 \times 2$ m	
Critical wavelength	1.0 Å	Wiggler
	10, 20 Å	Bending magnets
RF	500 MHz	
Beam dimensions		
hor * vert (mm <sup>2</sup> ) FWHM	$0.54 \times 0.046$	Straight section
	$0.68 \times 0.016$	Bending magnet
Beam lifetime	7 h	

図3 1.5 GeV 高輝度シンクロトロン光源からの放射の輝度  
(参考文献9より)

を自由に調整することができず定量的な測定は出来ていなかった。

現在挿入型光源としてアンデュレーターが用意されている<sup>5-8)</sup>。これはフィンランドの Technical Research Centre で製作されたハイブリッド構成のものであり、フェライト磁石を用い周期数は 25.5 で、250–1200 Å の波長領域の VUV を放射する。アンデュレーターの主なパラメーターを

表2に示す。さらに7.5Tの超伝導ウィグラーがマックス研究所とフィンランドの Institute of Technology in Tammerfors の共同で計画されている<sup>9)</sup>。このウィグラーを現在の550MeVのリングに挿入すると臨界波長は8Åとなり、後に述べる将来計画の1.5GeVリングに組込むとすれば1Å以下の波長の光が利用できることになる。

現在稼動中或いは計画中のビームラインを表3

に示す<sup>1)</sup>。TGMモノクロメーターが設置された光電子分光用のビームライン，時間分解蛍光分光用のビームライン，原子分光用のビームラインが稼動中で，アンデュレーター放射用のビームラインの建設が進められている。実験ホールの様子を写真3に示す。

最後にマックス研究所の将来計画の1.5 GeV高輝度光源を紹介する。この計画の主なパラメータを表4に，リングの構成を図2に示す。このリングの特長はコンバインドファンクション型のラティスを用いることであり，セパレーテッドファンクション型に比してずっと小型(周長60m)なことである。リングは6の対称性をもち，6箇所の長さ2mの直線部を置き，残りは磁場勾配付きの偏向磁石により構成されている。さらに磁石には六極磁場成分も含ませる。直線部には入射装置，加速空洞，ウィグラーやアンデュレーター等を配置する。偏向電磁石，8Tウィグラー及びアンデュレーターからの放射の輝度を図3に示す。

快く筆者の訪問を引き受けてくれたフォークマン所長，マシンスタディに参加させて下さったエリクソン教授とリングレン博士，観測システムを説明して下さい下さったニホルム博士，議論に参加して下さい下さった大学院生諸氏に感謝します。

## 文献

- 1) U. Karlsson (編集): MAX-LAB Activity Report 1987.
- 2) M. Eriksson: Nucl. Instr. and Meth. 196 (1982) 331.
- 3) L. J. Lindgren and M. Eriksson: Nucl. Instr. and Meth. 214 (1983) 179.
- 4) Å. Andersson: MAX publications (NTMX-7009) 1988.
- 5) S. Werin: MAX publications (NTMX-7002) 1986.
- 6) M. Eriksson, T. Meinander and S. Werin: Nucl. Instr. and Meth. A265 (1988) 587.
- 7) S. Werin: MAX publications (NTMX-7008) 1988.
- 8) S. Werin: MAX publications (NTMX-7010) 1988.
- 9) M. Eriksson, L. J. Lindgren, Å. Andersson, P. Röjssel and S. Werin: MAX publications (NTMX-7011) 1988.