

## AURORA 1号機の現状

—硬X線源としての超電導小型SRリングについて—

山田 廣成, 堀 利匡

住友重機械工業(株)量子技術研究所

### Present Status of AURORA-1

...Compact SR ring as a hard X-ray source...

Hironari YAMADA and Toshitada HORI

Sumitomo Heavy Industries LTD. Laboratory for Quantum Equipment Technology.

The superconducting compact SR source AURORA has been constructed as a light source for the x-ray lithography aiming the next generation DRAM fabrication. The first SR light was observed on November 3, 1989. After that the 150MeV injector racetrack microtron has been modified and resulted the maximum peak current of 8mA, which enabled finally the 500mA accumulated current and the lifetime of 15 hours at 300mA. The first exact circular machine has been established and been demonstrating more impulse than expected. The beam orbit is extremely stable as expected from the weak focussing principle. For last 3 years AURORA has been operated daily for users programs such as the x-ray lithography, the x-ray microscope, and the solid phase epitaxial growth experiment. Users are invited to enjoy extremely bright X-ray beam at less than 2m distance from the source point which is benefited by the thick iron yoke. The 10keV photon density at 2m distance is 100times brighter than a conventional rotating anode x-ray source.

### 1. はじめに

#### 1.1 オーロラ開発の経緯<sup>1)</sup>

完全円形リングを超電導で構成すれば世界最小のリングが出来ることは誰の目にも明らかであっ

た。当時そのようなリングが可能か否かという議論は別にして、X線リソグラフィー用に適しているかどうかは議論の分かれるところであった。否定的な主張としては、X線リソグラフィー用とし

てはいずれ10mに及ぶビームラインが必要なので、そこまで小さくする必要はなくむしろ常電導の磁石を使用して信頼性を上げることが重要であるという議論が有った。あるいは光源が故障してULSI生産が中断するのは困るから光源は簡単に置き換えられるものでなければならないという議論があった。いずれももっともな議論であるがこれらをすべて満足するためには光源は常電導の完全円形空芯コイルで作らなければならない。

各社それぞれに選択の弁があるが、小型であることは単に大きさの問題ではない。例えば信頼性の点では、磁石が1台であることはそれに付随する電源の数も1台でよく、結果として信頼性が大いに上がることになる。超電導技術はかなり確立されたものであるとは言え、そのリスクを犯す以上の利益がなければならない。それは、(1)同じ臨界波長に対して相対的に低い電子エネルギーで良く、とりもなおさず放射線取り扱い上安全である、(2)周長を短くできるために僅かな蓄積電子数で実効的に大きな電流値を実現できる、等をあげることができる。構成が簡素であることは更に運転、制御、保守という観点からも都合が良い。

オーロラは理想に近い完全円形の超電導磁石で構成することになったが<sup>2)</sup>、1/2共鳴入射法の発明<sup>3)</sup>により世界で初めて実施される事になった。磁石は120Tonの鉄を使用しているために簡単に置き換える事ができるという理想は犠牲にしたが、鉄のヨークが放射線シールドとして利用できるという別のギフトが与えられた。オーロラのパラメータは主に磁極の形状と3個のトリムコイルで決定されるので、設計を誤った場合に補正が困難になるのではないかと危惧されたが、幸いにして設計通りの磁場を出すことに成功した。

## 1.2 オーロラの現状

装置は89年に完成し、その11月に初めてフルエネルギー650MeVでの入射蓄積に成功した。当初入射器のマイクロトロンが不調で、ピーク電流が

数 $\mu\text{A}$ という僅かな量であったが非常に大きな入射効率に助けられて50mAまでは蓄積に成功した<sup>4)</sup>。但し入射に1時間ほどを要している。その後マイクロトロンを半年ほどで改造し<sup>5)</sup>、91年からは順調に電流値を増やし、92年10月には500mAに到達している。寿命もガス放出の減少に伴い増加し、現在では15時間を達成している。設計思想として超電導完全円形リングを選択したことに我々はたいへん満足している。パラメータの数が少なく運転が容易であるという予想通り、運転の自動化もいち早くに達成された。多少問題なのは、650MeVのとき漏れ磁場が大きくなり過ぎるために最近では575MeVで通常運転している事である。もちろん重要なことは得られたSR光のビーム特性がX線リソグラフィーに適しているかどうかであるが、実際に露光実験を行った結果は、波長がそれで長すぎるということはなく、ライン/スペース0.2 $\mu\text{m}$ という最高レベルの結果を出している<sup>6)</sup>。さらにストリークカメラによるバンチ長測定や望遠顕微鏡によるプロファイルの観測、RFノックアウト法によるチューンの測定などを通じてマシンの性能は十分に理解されている<sup>7)</sup>。2号機については、希望があれば鉄芯の量を増やして、650MeVの定常運転を確保するが、必ずしもその必要は無いように思われる。

この2年間安定してユーザーにビームを供給しているが、オーロラの優れた特性はX線リソグラフィー<sup>6)</sup>、X線顕微鏡<sup>8)</sup>、X線内殻励起によるアモルファスの低温結晶化<sup>9)</sup>などの実験でよく発揮されている。とりわけ後者の実験は光源点から2mあるいはトランスファーロードで本体に試料を挿入することで可能になる0.75mという至近距離で実験することにより小型リングで始めて実現したものである。約2分の白色光照射によりアモルファスSiがその場で単結晶に変わるのを観測している。試料温度は300 $^{\circ}\text{C}$ 以下であった。このような照射は小型といっても実にオーロラならでは可能になった事柄である。至近距離で実験できる事

は、厚さ0.5mのヨークが放射線シールドとして働いていることによる意外な効用である。

### 1.3 小型光源の新しい利用展開

超電導小型SR装置はX線リソグラフィーというターゲットがなければ日の目を見なかったと思われるが、出来上がった結果はSR装置に新しい概念を導入し、新しい利用分野を切り開くものとなっている。従来のSR装置の常識では考えの及ばなかった、光源点から2m以内で実験をすることにより中型光源並の光子密度を享受できることである。放射光は指向性が良いとはいえ基本的には放射状に発生する。従ってフォトンファクトリー(PF)で通常行なわれるように光源点から25m離れて実験を行なうのと2.5mで行なうのとでは光子密度が100倍違うことは道理である。オーロラを用いて2mの地点で実験を行なうとき、PFで25m離れて行なうときの光子数の違いを表1に示す。表の左列には光源の光子数を、右列にはそれぞれ指示された地点での試料面上の光子密度を示す。SR光源を記述するパラメータには、Flux, Brightness, Brillianceがあるがこれらはいずれも光源点の明るさおよび光子密度を定義している。従って装置の性能を示しているが、実際に必要な試料面上での光子数を表現していない。表1は単位mm<sup>2</sup>当りの光子数をレイトレースを用いて計算したもので、

光源の emittance と size も勘定に含まれている。これで見るとオーロラの能力は1keVの光でPFを上回り、5keVで等価となる。10keVで1桁落ちであるが、500mA蓄積時にはそれでも回転対陰極X線源の100倍程度の能力となる。小型SR光源オーロラはハードX線源として十分に分析用への展開が可能である。

## 2. オーロラの概要

オーロラの詳細については、これまで折にふれて発表しており、住友重機械工業(株)発行の技報で特集を組み11編の論文を掲載しているので参照されたい<sup>1)</sup>。ここで基本仕様を表2に示し、蓄積リング本体の断面図を図1に掲げる。ここでは装置の特徴を、具体的な構成機器の特徴から見渡してみると、以下のようにまとめることができる。

### [超電導磁石]

- 1) 単体の真円形超電導電磁石を使用した初めての实用蓄積リングであり、電子軌道が真円、かつ直径1mとコンパクトである。
- 2) 直線部を持たないため、1/2共鳴入射法という新しい概念に基づく入射方法を採用している。
- 3) 主電磁石に鉄芯を用いて、超電導コイルに働く電磁力を大幅に緩和している。これにより熱絶縁の良好な非金属製コイル支持材の採用が可能

Table 1 Photon numbers in unit area at practical target positions are compared between Aurora and Photon Factory. Number in parenthesis are of the 575MeV operation.

Photon energy	Brightness [ /sec, mA, mrad, 0.1% λ ]	Photons / [sec, mm <sup>2</sup> , mA, 0.1% λ ] at distance		
		2m	5m	25m
1 keV AU	1.2 × 10 <sup>10</sup> (6.4 × 10 <sup>9</sup> )	4 × 10 <sup>9</sup> (2 × 10 <sup>9</sup> )	6 × 10 <sup>8</sup> (3 × 10 <sup>8</sup> )	
PF	5.0 × 10 <sup>10</sup>			2 × 10 <sup>8</sup>
5 keV AU	8.4 × 10 <sup>8</sup> (1.2 × 10 <sup>8</sup> )	5 × 10 <sup>8</sup> (6 × 10 <sup>7</sup> )	8 × 10 <sup>7</sup> (1 × 10 <sup>7</sup> )	
PF	5.3 × 10 <sup>9</sup>			5 × 10 <sup>8</sup>
10 keV AU	2 × 10 <sup>7</sup> (7.0 × 10 <sup>5</sup> )	1 × 10 <sup>7</sup> (5 × 10 <sup>5</sup> )	3 × 10 <sup>6</sup> (8 × 10 <sup>5</sup> )	
PF	2.5 × 10 <sup>9</sup>			3 × 10 <sup>8</sup>

note: AU denotes Aurora, and PF is Photon Factory

Table 2 Operation parameters of Aurora-1

Storage Ring		Injector	
Type	Weak focussing	Type	Racetrack Microtron
Energy	650 (575) MeV	Final energy	150 MeV
Beam current	Max 500 mA	Injected energy	120 keV
Critical wavelength	1.02 (1.47) nm	Extracted current	1 mA
Lifetime at 300mA	15 hour	Macro pulse width	2 $\mu$ sec
Port number	16	Repetition rate	10 Hz
Magnetic field	4.3 (3.8) T	Number of turn	25 turn
Orbit radius	0.5 m	GA in / turn	6 MeV
Injection energy	150 MeV	Magnetic field	1.2 Tesla
RF frequency	191 MHz		
Harmonics	2		
RF voltage	120 kV		
Power loss/turn	30 (19.3) KeV		
Vacuum	$1 \times 10^{-7}$ Pa		

になった。また鉄ヨークはビーム蓄積時(4Tesla)の外部に対するもれ磁場を抑制するだけでなく、放射線遮蔽として有効に機能している。

#### [入射, 加速装置]

- 4) 高周波加速空洞, 入射用磁気チャンネル, インフレクタ, パータベータ, レゾナンスジャンパ, 真空排気用クライオパネル, 各種モニター類等すべての主要機器を単一のドーナツ型真空槽内に配置し, 磁極間隙に挿入している。入射用機器は蓄積時に昇降して放射光をブロックしない構造にしている。

#### [高周波空洞]

- 5) 磁極間隙に設置されるため, 通常のリエントラント型高周波空洞では直径が大き過ぎるので, 同軸型空洞を大幅に変形した小型の加速空洞を開発した。放射光の取り出しのために脇には全面スリットが設けられているが特に顕著なパワーの漏れは観測されない。

#### [真空排気系]

- 6) 真空槽内各機器からのアウトガス及び放射光によるアウトガスに十分対応できる大排気容量

( $H_2$ に対し約 40,000  $l/s$ ) のクライオパネルを開発した。定格 300mA のビーム負荷時において  $1 \times 10^{-7}$  Pa レベルの高真空を維持している。光ポートの入口では  $1 \times 10^{-5}$  Pa が許される。

#### [入射器]

- 7) 入射器に 150MeV レーストラック型マイクロロンを採用することにより, システム全体をコンパクトにまとめ得た。エネルギー分散の少ない良質のビームが得られることにより, 周辺装置の放射光が防止でき, 保守点検が容易であると共に遮蔽壁を薄くでき, 建屋のコストダウンが可能になった。
- 8) ライナックを入射器に使用した場合と比較して, 高周波電源が小容量でよく, 製作コスト, ランニングコストともに安価である。

#### [制御系]

- 9) ハードのみならずソフトを機能分散型階層構造とすることにより, 操作性・拡張性の向上を図り, 開発期間を短縮し, 運転の自動化を達成した。千点以上にのぼる入出力のアドレスに論理

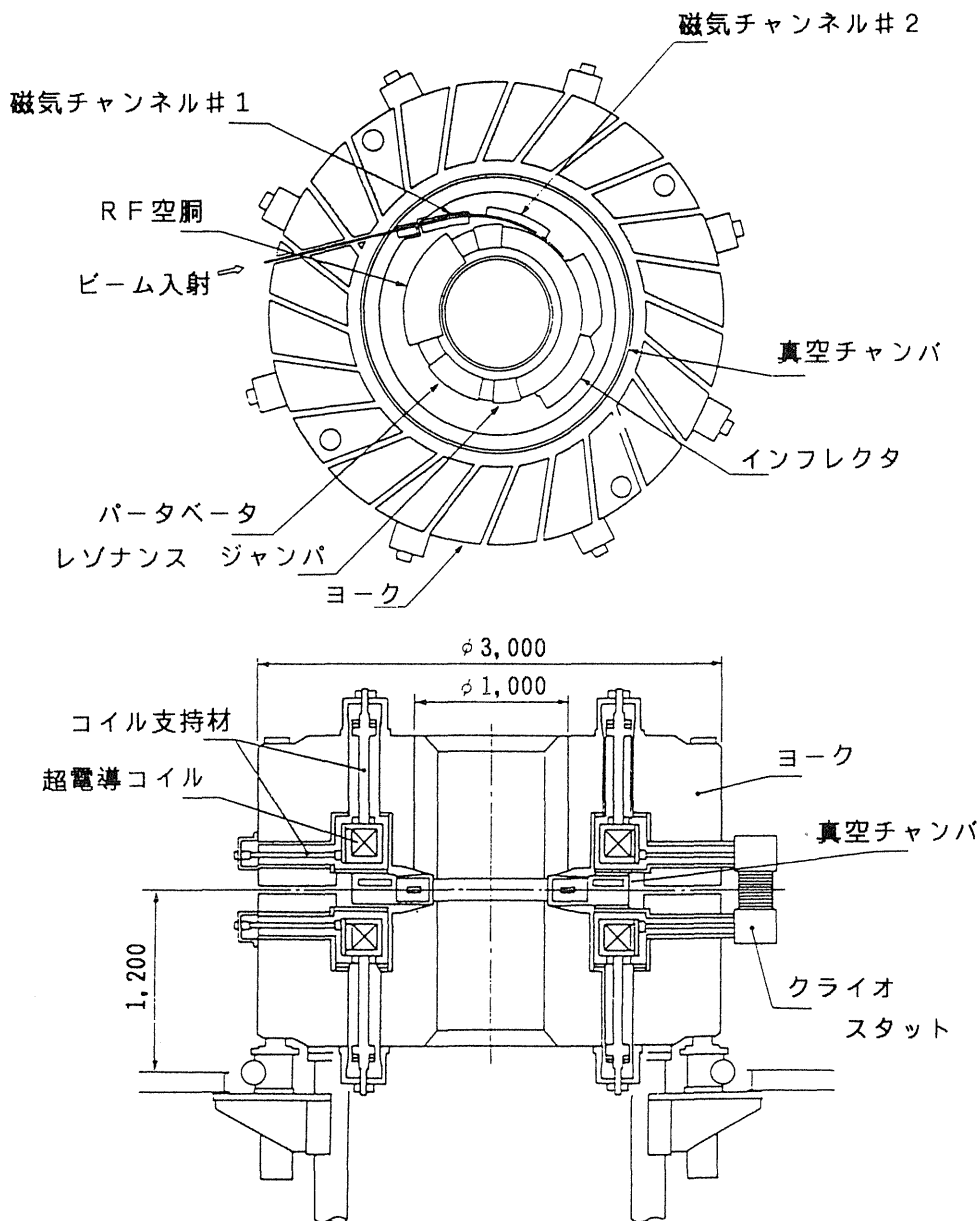


Fig.1 The vertical and horizontal cross sectional view of Aurora-1.

名を採用して、オペレーターの負荷を軽減する等、マンマシンインターフェースを整備している。

10) フォルト発生時には発生前後の全てのパラメータを变化が有る毎に記録してトラブルの診断を容易にしている。

11) インタープリター型特殊言語を開発し、運転のシーケンスを容易に変更できるようにしている。

12) パラメータを自由に選択して長期間にわたり指定したサイクルで記録し表示する機能を有し、トレンドを長期に渡り観察することができる。

#### [利用系]

13) 電子ビームは弱収束磁場中の真円軌道を周回するので、全周にわたり同一特性のSR光が得られる。また、単体の電磁石によりビーム軌道が定まるので、ビーム位置が安定でしかも再現性が良い。従って継続した実験の際にデータの信

頼性が高い。

14)16本のSR光取出ポートが利用可能。

300mA 15時間

400mA 12時間

到達真空度：無負荷時  $2 \times 10^{-8}$  Pa

定格負荷時  $4 \times 10^{-7}$  Pa(注1)

### 3. オーロラの運転状況

#### 3.1 概要

1989年11月に初のSR光が観測された後、オーロラ1号機で1mA以上の入射電流による100mA以上の蓄積実験が行われるようになったのは入射器マイクロトロン改造が完了した90年10月以降のことである。翌91年1月の部分改造及び定期点検を経て、同年2月から蓄積リングとして本格的に運転実績が積み重ねられるようになった。そして、同年7月から、各種パラメータの自動解析をスタートし、初期蓄積電流量の改善の推移、積算ドーズ量(A・Hr)と寿命の伸びの関係等、運転実績の累積効果(枯らしの効果)を常時知ることができるようになった。以後2年間にわたって運転実績が積み上げられており、ここでその結果について紹介する。現在の運転状況を示す主な指標は以下の通りである。

#### [91年7月以降の運転状況]

常用蓄積電流：300～400mA

最大蓄積電流：500mA

累積ドーズ量：490A・Hr(91年7月～93年7月)

微分ビーム寿命：200mA時 21時間

注1)蓄積運転注の残留ガス成分は95%がH<sub>2</sub>であり、残り5%がH<sub>2</sub>O/COである。

蓄積電流の推移は図2に明らかなように91年7月以降順調に増え続け、92年9月のマシンスタディ時において500mA以上の蓄積が実証されている。通常は蓄積電流値(300～400mA)の定常運転が主体であるが、ユーザーの要望により400mA以上の大電流蓄積運転も実施されている。蓄積リングの枯らしの指標として引用される電流値に蓄積時間を乗じた積分ドーズ量は、計算機によるシステムティックなデータ処理を行う以前の累積量を加算すると500A・Hrを超している。

ビーム寿命に関しては、過去2年間に図3にみられる経過をたどって伸びてきた。初期の頃を除きやや伸び悩み傾向にあった寿命が、最近になって著しく改善されていることが判る。理由は $10^{-7}$ Pa以下の微少なリークを発見して真空度を改善したことによる。また、最近の代表的な運転例から、蓄積電流値とビーム寿命の相関を図4に示しておく。この例では蓄積時間にして約13時間であった。オペレーション条件の寿命への影響をみるた

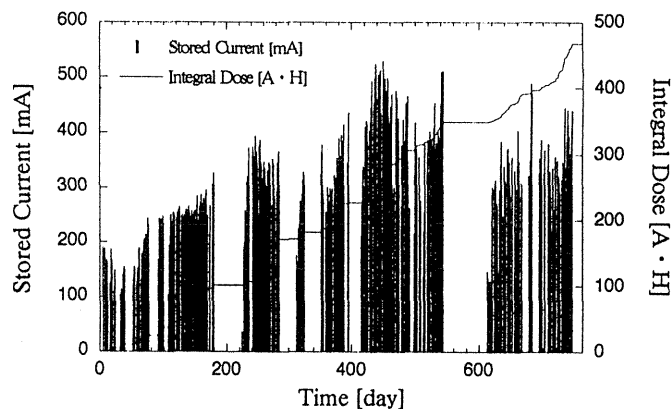


Fig.2 The record of the accumulated beam current since July 1991.

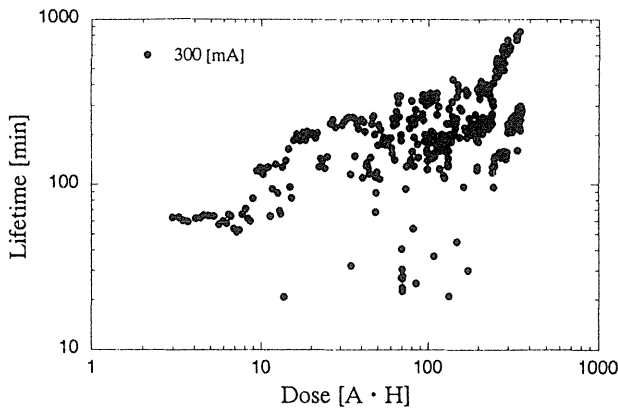


Fig.3 The record of the improving lifetime.

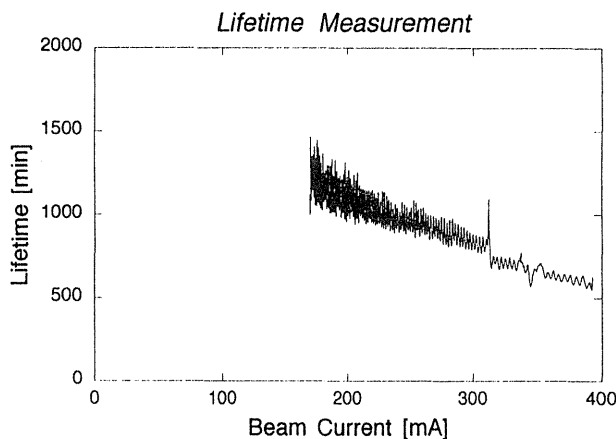


Fig.4 The typical correlation between the current and lifetime.

めに、蓄積途中で意図的にパラメータを操作しているため、図中の寿命曲線が不連続に変化している箇所がある。

300mA 蓄積時に15時間という平均寿命は、実用的には全く問題がない。特に露光に必要な1日の積分ドーズ量という考えに立つならば、短い時間で入射を繰り返す事が出来れば、電流値の多いことが基本的に重要である。寿命が2倍に改善されても、積分ドーズ量としては大した改善はない。寿命は10時間あれば十分であり、さらにオーロラの場合、再入射に要する時間は15分と短い。

#### [運転形態]

週5日運転、蓄積時間9～12時間/日、平均入射

回数2～3回/日

定常運転：オペレータによる半自動運転

夜間特別運転：ユーザー自身によるワンタッチ自動運転

1 サイクルの平均所要時間；

- 1) 入射……0.5分
- 2) 加速……7分
- 3) 蓄積……2～4時間
- 4) 減速……7分

光を使用できないアイドリング時間は1サイクル約15分であり、ユーザーが実験エリアから退去していなければならないのは、入射中のわずか1分程度である。

### 3.2 放射線発生量

次に放射線発生装置としてオーロラをみた場合の注意について触れる。1号機は研究用マシンのため、通常のSR光利用運転の他に加速器研究用に運転する場合がある。主たる違いは入射器マイクロトロンノのピーク電流値であり、SR光利用運転の場合の1mAに対して研究運転では5倍の5mAを出す。1号機施設は、マイクロトロン稼働時間に関し、SR光利用運転で週20時間、加速器研究運転で週4時間を想定しており、この条件の下に放射線遮蔽が考慮されている。そのため、入射器マイクロトロンと蓄積リング本体の双方とも放射線に対しかなり自己遮蔽されているにも拘らず、周囲を厚さ50cmの普通コンクリート壁で囲う必要があった。SR光利用運転に専念する場合、上記運転形態で述べたとおり、マイクロトロンについては1日数分の運転を見込んでおけば十分であり、建屋の遮蔽はもっと簡素で良い。これまでの放射線定期検査時の実測値によれば、1号機施設の管理区域境界における最大線量率は放射光利用運転時で $2 \mu\text{Sv/hr}$ 、研究運転時で $10 \mu\text{Sv/hr}$ である。オーロラをSR光専用施設として使用する場合、特別な遮蔽壁は必要なく、通常の20cm程度の壁厚があれば十分である。

### 3.3 オーロラのビーム特性

#### [ビームサイズ及びエミッタンス]

オーロラのビームサイズ及びエミッタンスはX線リソグラフィーを満足するように設計されている。望遠顕微鏡を用いて観測したビームの水平方向及び垂直方向のサイズは650MeVでそれぞれ( $\sigma_x = 1.2\text{mm}$ ,  $\sigma_y = 0.14\text{mm}$ )であり、これはほぼ理論通りの値である。電流依存性も観測しているが、顕著ではない。図5は水平方向のビームサイズで、RF電圧を80kVから97kVまで変えて測定

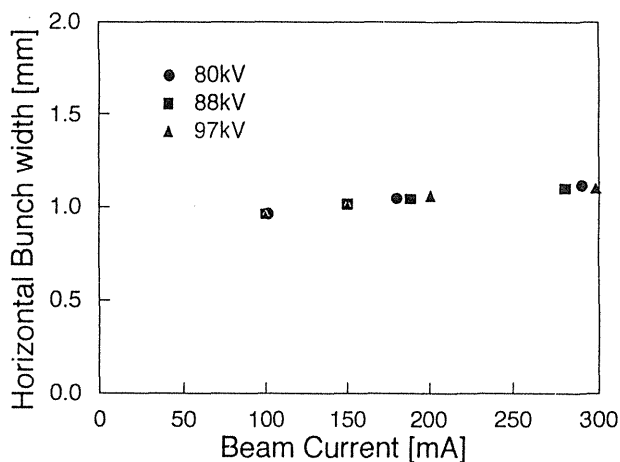


Fig.5 The current dependences of the horizontal beam width. Effects on the RF-voltage are indicated.

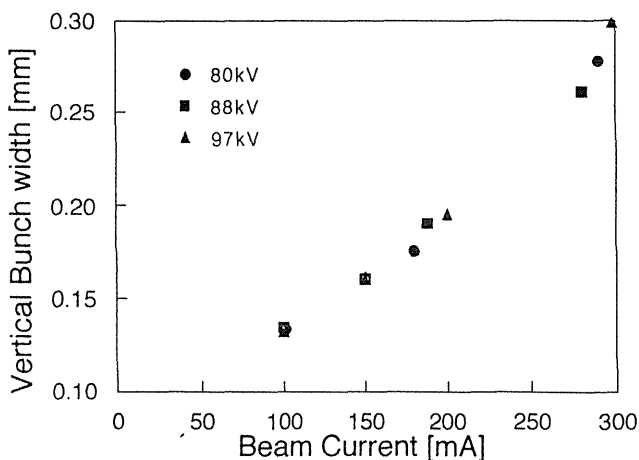


Fig.6 The current dependences of the vertical beam width. The RF-voltage dependences are also indicated.

しているが、さして変化はない。図6は縦方向のビームサイズであるが、電流とともに2倍ほど変化する。これはイオントラップの影響であると考えている。エミッタンスを直接観測することは現在まで行っていないが、RFロックアウトを用いたベータトロン振動数(チューン)の観測によれば<sup>7)</sup>、多少の電流依存性はあるものの、ほとんど理論通りである。ナチュラルのエミッタンスは弱収束のリングではチューンだけに依存する量であり、電流の増大によるチューンの変化が僅かなことからエミッタンスも理論通りであると考えている。

一方バンチ長は、ストリークカメラを使った測定を図7に示すが、ガウスフィットをして求めたバンチ長 $\sigma_L = 62\text{mm}$ は理論値 $\sigma_L = 54\text{mm}$ に対して少し長めになっている。顕著な電流依存性は観測されていない<sup>11)</sup>。RF電圧による若干の影響が観測される。

#### [ビームの安定性]

ビームのサイズがX線リソグラフィーに与える影響については今日まで良く議論されているが、ビームの不安定性が与える影響については余り議論されていない。ビームの不安定性にはいくつかの原因と種類がある。(a)大電流を蓄積したときに

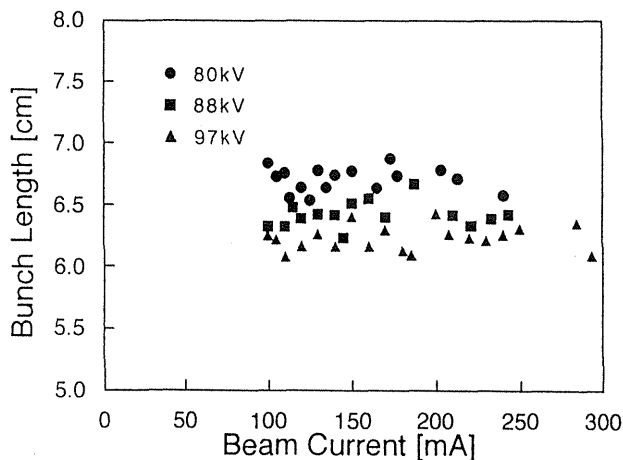


Fig.7 The bunch length observed by the streak camera. The RF-voltage dependences are indicated.



ビームダクトのつくる wake field の影響でビームが割れたり、振動したりすることがある。(b)残留ガスによる散乱でビームが広がることも好ましくない。(c)複数の磁石を使ったリングの場合はミスアライメントや誤差磁場によりビームが振動することもある。(d)さらに温度等の環境の変化によりビーム中心が緩やかに変動することもある。これらは何れも X線リソグラフィにとり好ましくない。

オーロラでは現在までにこれらの十分なデータを蓄積している。前記の(c)(d)に関しては、単体のリングであるオーロラでは全く問題にならないはずであり、事実そうである。(a)については150MeVで700mA以上蓄積するときに観測されるが、500mAでは問題にならない。

## 4. 光ビームラインの現状

### 4.1 概要

小型SR光源の特性は、マシンパラメータを議論するだけでなく実際に利用してみて評価すべき時期にきている。ここではオーロラを用いたいくつかの実験結果について紹介する。田無のオーロラ1号機には建屋の都合上9本のビームラインを設置しているが、商品機としては16本可能である。この内2本のポート(PT)はプロファイルモニター及び電流モニター(フォトダイオード、光電子増倍管のセット)に使用しているが、残り7本は既に次のようなビームラインで満たされている。

PT2: FT/IR 分光器ライン<sup>(注1)</sup>

PT8: シュバルツシルト型 X線顕微鏡ライン<sup>(注2)</sup>

PT9: 2多層膜分光器ライン<sup>(注3)</sup>

PT10: 超高輝度照射ライン

PT12: 振動ミラー付き X線リソグラフィ用ライン

PT18: 全反射蛍光 X線分析ライン

PT19: SR光 MBE ライン

これらのビームラインが設置されたオーロラの全景を図8に示す。また全体のレイアウトを図9に示す。上記のビームラインはいずれも利用可能な状態にあり、社内で独自に利用しているほか大学、国公立及び私企業の研究機関に開放して共同研究を進める方針をとっている。さらに委託分析や委託研究にも有料で応じている。現時点ではFT/IRを用いた散乱及び吸収の測定、2多層膜分光器を用いた1~0.1keV領域での反射率の測定、超高輝度ビームラインを使用した照射実験に依拠している。近い将来には2結晶分光器を導入する予定で既に製作を開始している。以下には上記4つのビームラインで実施したいくつかの実験結果を紹介する。

### 4.2 遠赤外分光

遠赤外光、とりわけサブミリ波領域には適当な光源がなく研究が後れていると言われている。そこで注目されているのかSR光の利用で、岡崎分子研のUVSORに最近遠赤外分光専用のビームラインが設置された。一般に使用される1300°Kの水銀ランプと比較して数100 $\mu$ mの領域でSR光は100倍以上強度が強いとされる。しかし注意すべき事は、これは光源点での強度だということである。放射光は指向性が高いとは言え、その発散角は臨界波長( $\lambda_{cr}$ )で約 $1/\gamma$ であり、それより長波長になると $(\lambda/\lambda_{cr})^{1/3}$ に比例する。UVSORの場合にもオーロラの場合にも発散角は約50mrad程度となる。従って光学系にはかなり大きなアパーチャーが必要となる。UVSORで得られた強度は水銀ランプのその数倍であるときいている<sup>12)</sup>。これに対してオーロラでは主張通りの短いビームライン

注1)日本分光(株)との研究協力により導入。

注2)木原(自治医大/現関西医大)及びオリンパス(株)との研究協力により開発。

注3)山下(名古屋大)との研究協力により開発。

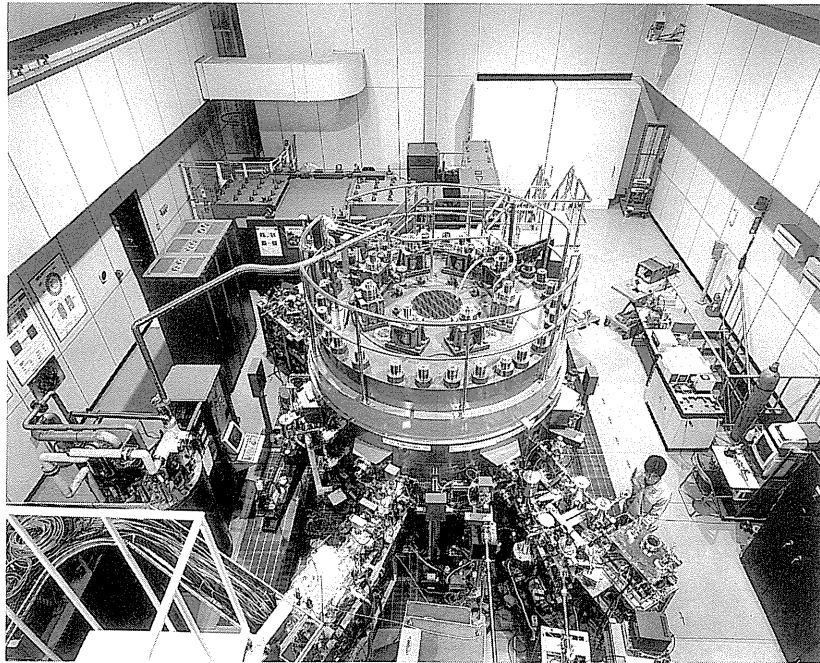


Fig.8 The over view of the Aurora-1 and the beam lines at The Laboratory for Quantum Equipment Technology in Tanashi, Tokyo. Nine beam ports are fully utilized.

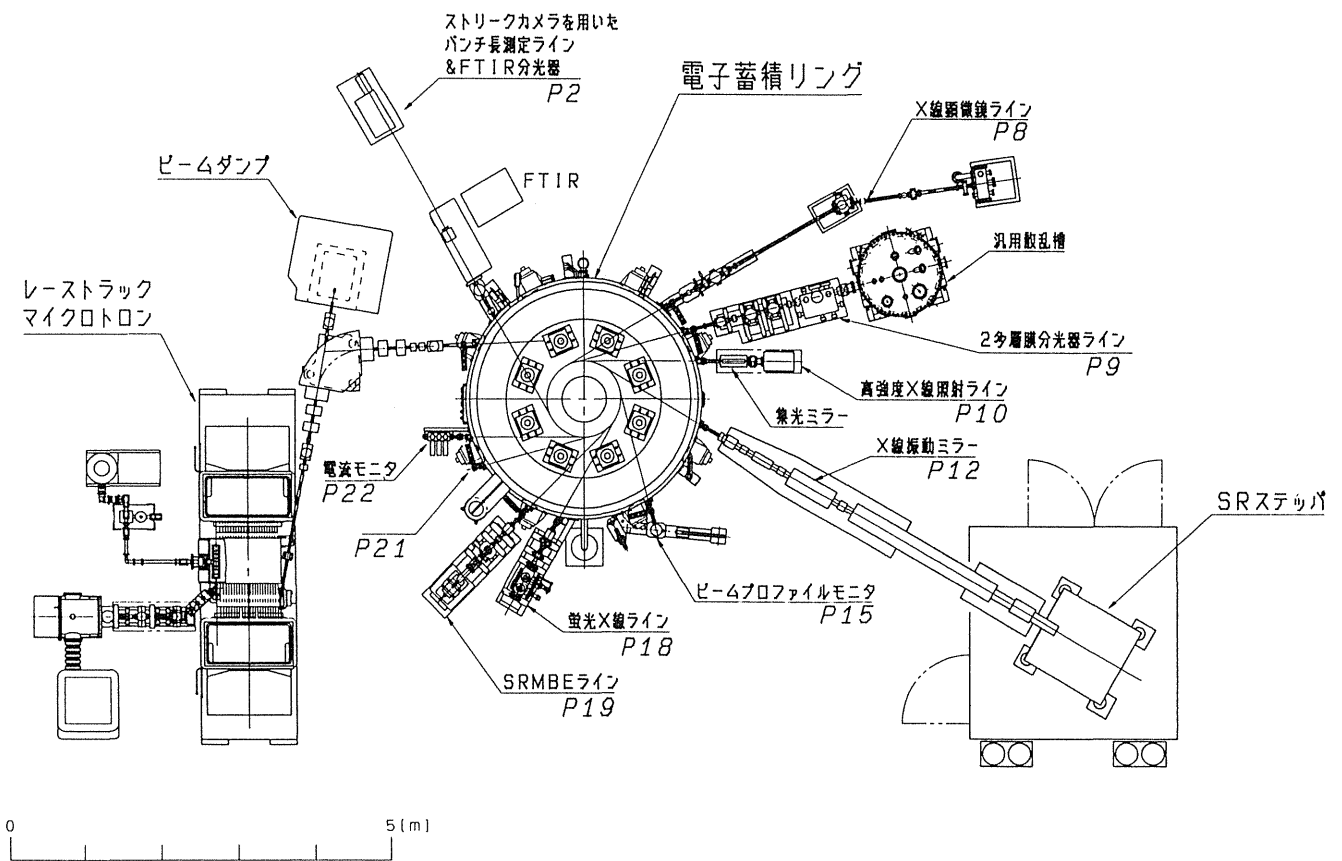


Fig.9 The layout of the Aurora-1 facility.

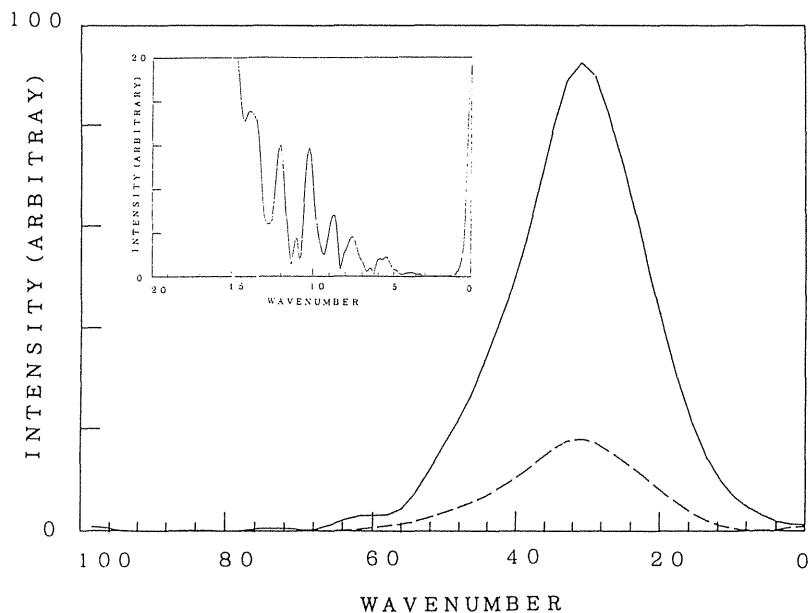


Fig.10 Far infrared spectrum of Aurora-1(solid line) is compared with a 1400 °C mercury lamp(dash line) demonstrating potential of Aurora as an outstanding far infrared source.

がここでも重要な意味を持っている。

オーロラに日本分光(株)製FT/IR - VM7<sup>13)</sup>をとりつけて容易に1400 °Cの水銀ランプの10倍以上の強度を観測する事ができた(図10)。図の枠内に示すように5cm<sup>-1</sup>でもかなりの強度が観測されているのは意義深い。実験は予備的なもので、光の取り出しは10×20mrad<sup>2</sup>で、ウィンドーには2mm厚のサファイヤを使用し、光はウィンドーの外で約1mにわたって大気中を走るという極めて大ざっぱな設定で測定したものである。光学系としてはf = 350mmの球面ミラーを使用しているが、5mmφほどに集光した光の1/4ほどを分光器に導いたという実にいい加減な設定である。なおこのときの蓄積電流値は200mA、検出器にはSiボロメータを使用している。今後光学系を改造して、これの10倍以上は強度を増強する予定である。

#### 4.3 2多層膜分光器の分解能と反射率測定

オーロラに短いビームラインを設置すれば10keVのハードX線の利用が十分に可能であるという主張は、分析を目的とする場合には分光器の

分解能とのかねあい議論されねばならない。分光器を光源点から離せば離すほど光源の大きさは無視することができ高分解能を得る事ができる。分解能は、 $(\Delta\lambda/\lambda) = \cot\theta \cdot \Delta\theta$ で与えられる。光源を見込む角度 $\Delta\theta$ は概ね光源の垂直方向のサイズと距離から $2\sigma_y/D$ で与えられるとして、オーロラのビームサイズは $\sigma_y = 0.12\text{mm}$ と実はフォトンファクトリーのそれよりも小さく、分光を行うにも大変都合が良い。分光器を2mに設置するとき $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-4}$ 以上の分解能を出し得ることがわかる。現在2結晶分光器の製作を進めており、94年度から利用が可能である。

一方、1~0.1keV領域の軟X線の分光には斜入射型の回折格子がよく使用されるが、近年格子定数の大きな結晶の開発や多層膜ミラーの開発が進み、2結晶型分光器の分光領域が低エネルギー側に延びている。2結晶型は駆動機構も比較的小型で済むのと、分解能は結晶にのみ依存する点で、信頼性が高い。

多層膜で得られる分解能は決して高くはなく0.5%程度であるが、用途によってはこれで十分で

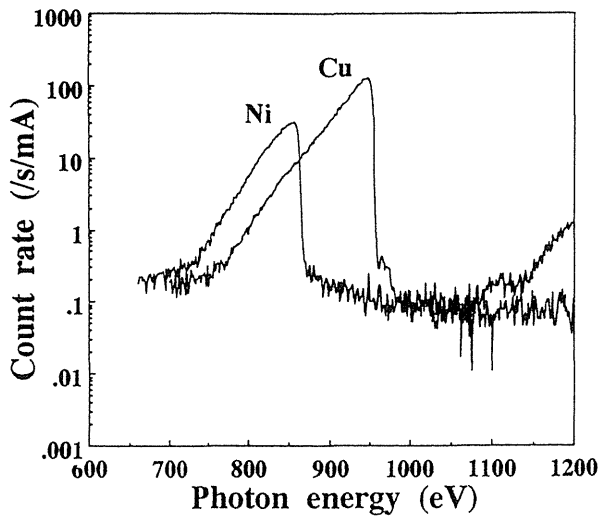


Fig.11 The demonstrated resolution of the double multi-layer monochromator by observing Cu L-edge. The obtained resolution  $\Delta\lambda/\lambda$  is 0.5%.

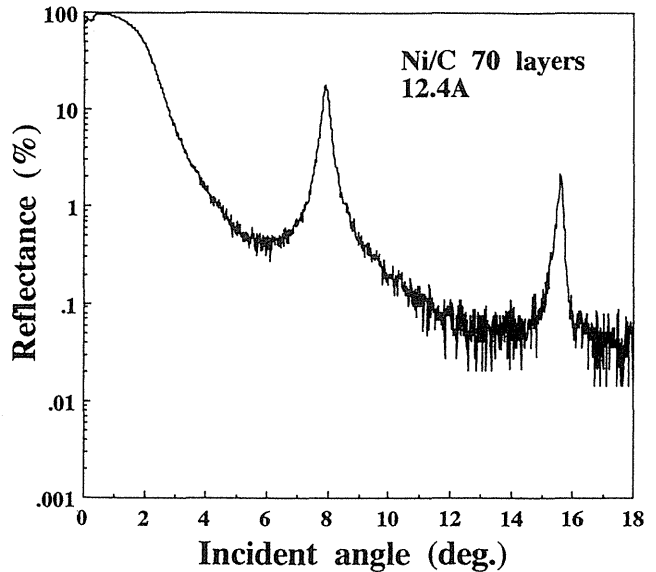


Fig.12 Measured reflection coefficient by the double multi-layer monochromator.

ある。我々は名古屋大学山下教授との共同で2多層膜分光器を開発した<sup>14)</sup>。X線ミラーの開発のために多層膜の反射率測定を行う事は多層膜分光器開発の一つの目的である。反射率測定のためにゴニオメータを設置した直径1mの大型散乱槽もすでに設置完了している。散乱槽は光軸の回りに回転可能であり、SR光の偏向光に対して水平、垂直方向の反射率測定が可能である。

図11は多層膜分光器の分解能を測定するためにCuのL吸収端を測定した例である。測定は電流値約300mAで55分を要した。また図12は多層膜ミラーの反射率測定の一例である。1ランに要した時間は、約60分であった。

#### 4.4 X線顕微鏡<sup>8)</sup>

X線顕微鏡にはいくつかのタイプがある。ゾーンプレート型が最も進んでおり、空間分解能50nmがでていと聞く。しかしゾーンプレートの製造技術は残念ながら日本では遅れており、もっぱらIBMが技術を蓄積している。我々は多層膜を使用する反射型光学系であるSchwarzschild型X

線顕微鏡をオリンパス及び関西医大の木原教授と共同で開発しテストした。オリンパスが製作した対物レンズは波長13.5nmで反射率16%を有する<sup>15)</sup>。倍率は200倍と450倍のものをテストしている。システムを図13に示す。長波長の光はBe膜で落とし、短波長光は全反射集光ミラーの反射率の違いで落としている。検出系は対物レンズから光軸に対して21.5度方向に2m離してマイクロチャンネルプレート(MCP)を置き、光電変換を行い、蛍光板で可視光に変換している。肉眼で観察することも出来るが、通常はCCDカメラで画像を取り込み、マイクロVAXで画像処理している。像は非常に明るくかつ均一である。CCDカメラの1フレームの蓄積時間は30msecであるから、この露光時間で十分な光子数が得られていることになる。この状態で生体の動きを観察することが可能であるが、波長13.5nmはウォーターウィンドウの2.2~4.4nmよりかなり長い。反射率が数%に落ちても現在のシステムで十分に生体の動きを観察することができる計算である。ここでも光源から2mの位置に試料を設置できることの意義が明かである。メッシュ像から得られた分解能は0.19 $\mu$ mで

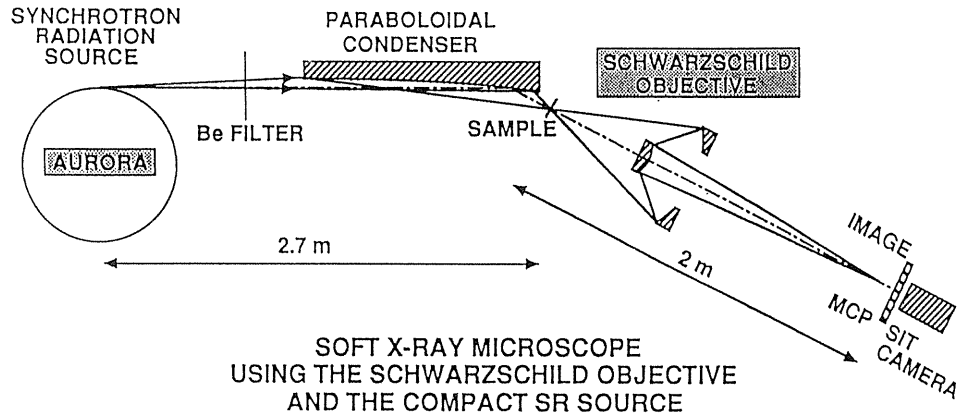


Fig.13 The schematic drawing of the Schwartzsild type X-ray microscope system. The best observed space resolution is  $0.19 \mu\text{m}$ .

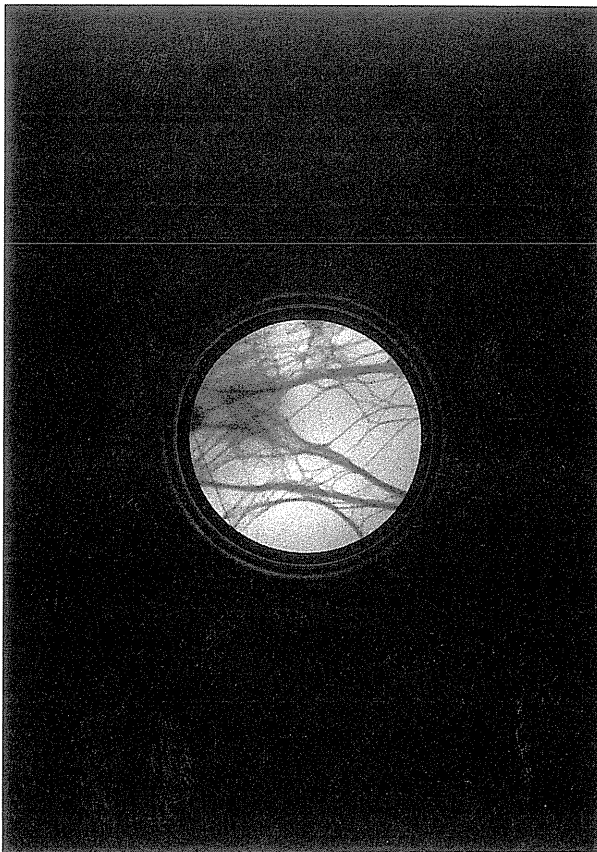


Fig.14 One of the biological specimen observed by the Schwartzsild x-ray microscope. The picture is viewed by CCD camera which takes 30msec exposure time.

あった。図14はコラーゲンというタンパク質繊維を観察したものである。

#### 4.5 超高輝度照射ラインを用いたアモルファスSiの低温結晶化実験

トランスファーロードで試料をオーロラ本体に挿入し、光源点から0.75mの位置で照射をした結果、アモルファスSiが2分で単結晶に変化するのを観測した。佐藤等が最初にPFで行なった実験<sup>16)</sup>は、偏向磁石からの光を利用し、約70時間照射したがその場で結晶化は観測されなかった。しばらくしてアニールしたところ通常より低温で結晶化したと言う事である。オーロラではその場で結晶化が起きた。このとき蓄積電流値は約300mAであった。結晶化に要する時間は試料の製法により大いに異なり、プラズマCVD法で製作したものが上記の2分であり、Si結晶に大量のAsをドーピングしてアモルファス化したものでは10分を要する<sup>9)</sup>。図15は後者の例で、結晶化の程度をラマン散乱の強度で見たものである。積分照射量を一定にして平均の光子密度(平均蓄積電流値)を変えて照射している。即ち光子密度が高いときには、( )内に数字を示すように短時間で照射を終えている。平均蓄積電流が200mAを越えたところで急速に結晶化が始まっていることがわかる。結晶化に

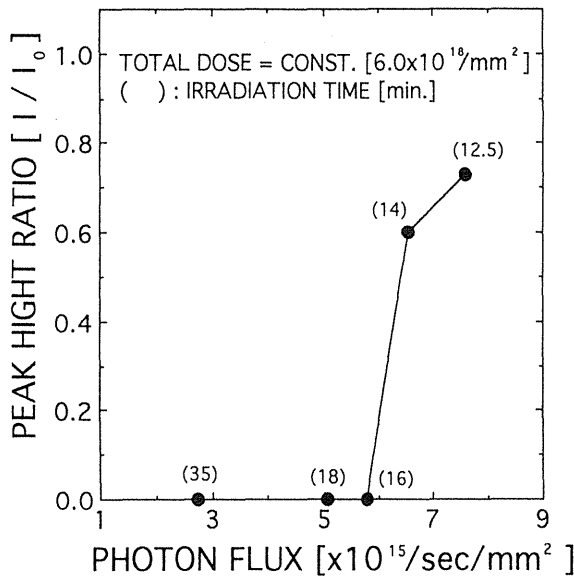


Fig.15 Degree of crystalization is measured by Raman intensity. Samples are irradiated by the same amount of integrated x-rays, but the average x-ray density were varied. It is seen that the threshold x-ray density is required for the crystalization.

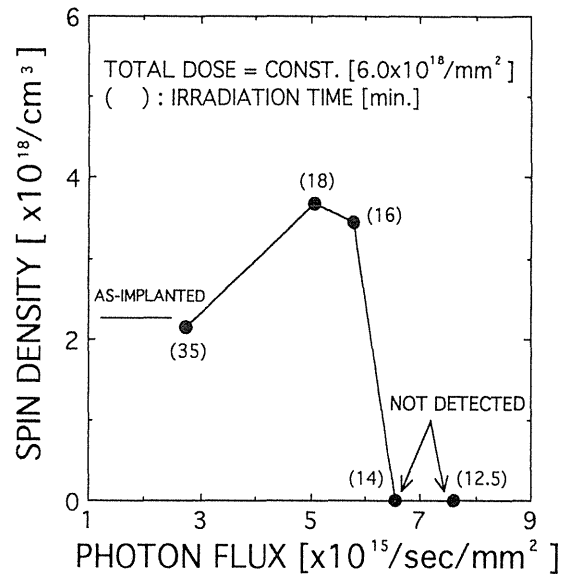


Fig.16 The ESR spin density were also measured for the same samples discussed in Fig.15. The increasing spin density at below the threshold x-ray density may indicates the process of the recrystalization headed by the bond breaking.

は光子密度に数倍値があることがわかる。結晶化には積分照射量ではなく微分照射量である光子密度がきわめて重要な働きをしているようである。このときの基板の温度を測定しているが、400°C以下であった。図16は同じ試料につきESRを用いてspin densityを測定したものである。ここでも結晶化によりspin densityが急速に減少していることがわかる。興味あるのは結晶化が起こるよりも平均蓄積電流が低いときにspin densityが一旦上がっていることである。これは結晶化が起こる前に一旦結晶格子が破壊されていることを示すものである。これはまた結晶化の時間経過を示していると言って良く、結晶化が起こる前にはボンドが一旦切れて後に結晶の再配列が進行するようである。結晶のボンドが切れるのはX線により内殻励起が起き、原子のイオン化が起きると解釈するのが妥当である。なぜなら基板温度はあくまで低温である。X線照射によりイオン化した原子は固体の中で低温でも大量に移動しうると考えられる。現在

この結晶化時間をさらに短縮するために集光ミラーを準備してヨークの外で照射が行なえるように改造している。この改造により大面積の結晶薄膜が製作可能になる予定であり、今後Siに留まらず、Si/Geやダイヤモンド薄膜の製作、TFTや太陽電池の高品質化、量子デバイスの製作等を計画している。

## 5. まとめ

以上、オーロラの現状を運転状況やビーム特性について述べると共に、既の実施しているいくつかの利用実験について紹介した。産業用SR光源としてオーロラが既に完成された域に到達していることが理解されたと思う。オーロラには専任のオペレーターは不要であり、加速器の知識の無い利用者でも入射運転が可能である。入射はボタン1つの操作で完了する。さらにオーロラで事故や故障が発生したときには、その時のマシンの状態が自動的に記録されオペレーターは後に原因を理解

し、故障を処置することができる。また重大な故障によってはマシンは自動的にシャットダウンするようにプログラムされている。例えばHe液化機の故障では超電導コイルの電流をクエンチしない速度で下ろしてシャットダウンを完了する。長期に渡る運転経験により得られたこの様なノウハウはプログラムのかたちで蓄積されており、マシンの信頼性は日々向上している。

オーロラはX線リソグラフィーのために開発されたという経緯はあるが、半導体薄膜の低温結晶化や表面の改質等で新しい産業利用が開花する可能性も生まれている。さらにXAFSやX線回折などの分析用としてオーロラの短いビームラインにより10keVのX線が十分に利用可能であることに付いても述べた。小型SR光源は従来X線リソグラフィー用としてだけ理解されてきた側面があるが、研究用としても見直されてしかるべき時期にきていると筆者は考えている。高い操作性と常電導リングの約半分(1日10時間の運転で1ヶ月の維持費は全てを入れて約400万円)で済む経済性は小型リングを共通設備としてではなく大学研究機関の専用施設として設置することを可能にしている。放射光の利用が大学研究機関で手軽に行えるようになり、利用人口が現在の10倍になるとき放射光科学が真に開花すると期待している。

最後に、今日のオーロラの完成がもたらされた背景には量子技術研究所(旧放射光技術部)に所属した以下の方々の日夜を分かたぬ努力が有ったことを記したい。[青木謙一, 天野大三, 大友清隆, 狩谷宏行, 木村隆成, 小比類卷一夫, 斉藤肇, 佐々木泰, 杉谷道朗, 高橋令幸, 高山猛, 田口茂, 坪井時雄, 外羽吉幸, 筒井裕士, 豊田英二郎, 仲伏広光, 成田知倫, 西根和彦, 橋本雅夫, 深海庸孝, 福島敏孝, 松原雄二, 密本俊典, 水口

忠良, 宮出宏紀, 宮林正博, 安光直樹, 矢野隆, 山田俊治]

## 文献

- 1) 高橋令幸, 山田廣成, 住友重機械工業技報, **39** (116) 2 (1991). (本号はオーロラ特集で, 他に関連論文11編を集録)
- 2) N. Takahashi, Nucl. Instrum. Methods **B24/25**, 425 (1987).
- 3) T. Takayama, Nucl. Instrum. Method, **B24/25**, 420 (1987).
- 4) H. Yamada, J. Vac. Sci. Technol, **B8** (6), 1628 (1990).  
山田廣成, レーザー研究, **18** (11), 31 (1990).
- 5) 堀利匡他, 住友重機械工業技報, **39** (116), 46 (1991).
- 6) F. Satou, K. Itou, T. Miyatake, K. Yamazaki, S. Hamada, and Y. Tomita, J. Vac. Sci. & Technol, **B10** (6), 3235 (1992) 宮武勤, 浜田史郎, 精密工学会誌, **59**, 47 (1993).
- 7) H. Yamada and S. Taguchi, Proc. 7th Sympo. Accele. Sci. and Tech., Osaka, (1989) 29.
- 8) H. Yamada et al., Springer Seriese in Optical Sci., **67**, 30 (1992).  
S. Masui, S. Mochimaru, N. Watanabe, Y. Horikawa, H. Yamada, and Kihara, SPIE **1741**, 95 (1992).
- 9) T. Katou, H. Yamada, S. Satou, and J. Chikawa to be published.
- 10) H. Yamada et al., Rev. Sci. Instrum. **63** (1), 741 (1992).
- 11) D. Amano, H. Yamada, and H. Tsutsui, Proc. 9th Sympo. Accele. Sci. and Tech., Tsukuba, (1993) 231.
- 12) 難波孝夫, 日本物理学会誌 **46** (7), 578 (1991).
- 13) M. Wada, K. Shirawati, and S. Nishizawa, Ferroelectrics, **107**, 67 (1990).
- 14) S. Masui, H. Yamashita, and H. Yamada, Sumitomo Heavy Ind., internal report.
- 15) Y. Horikawa, S. Mochimaru, Y. Iketaki, K. Nagai, K. Okawa and S. Iura, Proc. SPIE **1720** (1992).
- 16) 佐藤史郎, 後藤克幸, 千川純一, 放射光, **5** (3), 253 (1992).

