レーザー解説

小型シンクロトロン放射光源

山 田 廣 成*

(1990年9月28日 受理)

Compact Synchrotron Light Sources

Hironari YAMADA*

(Received September 28, 1990)

Five compact superconducting light sources for synchrotron radiation (SR) are under development in the world. Some of them have already been utilized for lithography. Superconducting SR-source are not only small, but also have profitable features, high brilliance and easier operation compared to a normal conducting SR source for a UV, VUV, and soft X-ray. This paper reports the present status of the superconducting SR sources. Particularly, some details of AURORA which is made of a single superconducting magnet are presented. Also mentioned is that the compact SR-source is useful to generate coherent millimeter or submillimeter waves.

Key Words: Synchrotron radiation source, X-ray.

1. はじめに—小型SR光源の歴史的意義—

シンクロトロン放射光源(SR光源)を小型にしたいという要求は、もともと超LSIの生産を高スループットで行いたいという産業界の要請から発生した事である。シンクロトロン放射光(SR光)がリソグラフィーに適していると指摘された¹⁾のはすでに今から20年程前に遡るから、SR光の有用性が認識されだしたかなり初期の事である。LSIの線幅は予想通りに年と共に狭くなり、軟X線の利用は不可避であると認識されている。この様な背景で、最近コンパクトシンクロトロン放射光源(小型SR光源)の成功が各地で伝えられている。

小型SR光源は非常に大きな半導体マーケット

が有って初めて実現したと言える。通常のシンクロトロンでは大きすぎて故障の際に交換がきかないし、運転に熟練者を要するのでは産業利用には困るというのが小型化の主な理由であった。ところがこの単純な動機で始まった小型化に向けての努力は、加速器技術に予想した以上の価値を付与したように筆者には思われる。従来の加速器の利用はサイクロトロンの医学利用、PIXIによる微量分析等に留まっていたが、小型SR光源の出現により半導体産業のみならず、化学工業や薬品工業等の製造業、医学利用や分析業など実に産業界全体を巻き込むほどの規模に発展しようとしている。この様な成行きはもちろんSR光自体の有用性に基づくところであるが、小型化=私有化という異なる次元で

*住友重機械工業株式会社量子機器研究開発部(〒188 東京都田無市谷戸町2-1-1)

*Sumitomo-Heavy Industries Ltd., Quantum Equipment R & D Department (2-1-1 Yato-cho, Tanashi-City, Tokyo 188)

の魔力もまた産業の醸成に役かっている。そして最後に多少言及するが、電子加速器の小型化は自由電子レーザーの小型化をもたらし、引いては、レーザーを中心にして発達してきた光産業の再編をもたらす可能性を秘めている。即ち光産業は今や片やX線、片やサブミリ波を範疇に加えたものへと広がりつつある。

X線顕微鏡の光源として小型SR光源が期待されるのも、身近で研究者の自由になる光源としての価値がクローズアップされているためである。事実シンクロトロンと言うよりは大型電子顕微鏡と言っても差し支えないのが小型SR光源である。もちろん単にサイズの問題ばかりではなく、中型や大型のSR光源にはない利点があることも見逃せない。例えばSR光のビーム中心における輝度は電子ビームのサイズを考慮に入れるとき、実効的に電子軌道半径に逆比例するため、半径が小さいほど大きくなる²⁾。電子エネルギーが等しく、ビームのサイズ及びエミッタンスが等しいとき、超伝導を用いた小型リングは、常伝導のリングに比べて輝度は約4倍である。或は又、小型の場合にはシールド壁が不用なために光ビームラインを短くできるのが特徴であるが、このためにSR光の単位面積当りの強度を稼ぐことが出来るのは照射時間を短縮できると言う点でX線顕微鏡による生体資料の観察には有利である。住友重機械工業が開発したオーロラでは顕微鏡を光源から1.5mの至近距離に設置することが可能である。又大きな真空槽を有するため、必要ならばピンホールあるいは集光ゾンプレート光源から10cm程度まで接近して置くことが可能である。

上記を一つの例として、小型SR光源は、単に物理的に小さいというに留まらず、光源の単位面積当りの強度、ビームの安定性、オペレーションの容易さ、保守の容易さ等大型或は常伝導のSR光源とは異なる新しい質を提供すると期待される。

本稿では、この様な小型SR光源の現状について述べる。小型SR光源の定義は人により様々であり、X線リソグラフィ用であると解釈す

る場合は常伝導のリングを含めるのが常であるが、ここでは超伝導のものに限定をしたい。そして筆者が建設に加わったAURORAについてより多くの紙面を費やしている。

2. 小型SR光源の現状

現在建設中或は建設予定の超伝導小型SR光源は筆者の知る限りではTable Iに掲げたものが全てである³⁻⁸⁾。歴史的にはCOSY-IIの建設が最も早く、1986年に50MeV電子の蓄積に成功したが、エネルギーの上昇に伴い電子が急速に散逸するために、592MeVでは1mAの蓄積に留まっている。冷却によりステンレスの磁性が変化したことにより、理論どおりの磁場を作ることに失敗したのが原因であり、関係者にショックを与えた。しかしその後1988年にNTTのSuper-ALISが成功、1989年に住友重機械工業のAURNRA、1990年にOxford社のHeliosが成功して超伝導磁石の技術は何れの方法でも確立したと言ってよい。

超伝導小型リングはいくつかのタイプに分けることが出来る。使用する偏向磁石の数により大きく分けることが出来る。典型的なものはレストラックタイプで、2台の超伝導磁石を使用している。COSY-II、Super-ALIS、Heliosがこのタイプに属する。建設中のものではBNL(USA)のSXLSがそうである。電総研で建設中の住友電工のNIJI-IIIは4極の超伝導磁石で構成されるが、初めに常伝導の磁石でテストを行い、順次超伝導に取り替えると言う方式で進められている。現在4台目の超伝導磁石を据え付けてテスト中である。SXLSも同様で、常伝導のバージョンは既に組立を完了している。AURORAのみは特異で、単体の超伝導磁石で構成されている。従って電子軌道は完全な円形である。単体であることから、これ以上小さなリング(外径3mの円筒状)を作るのは困難とされている。オーロラ以外のリングは強収束のシンクロトロンの原理を適用しているから、その意味では従来の大型リングと原理的に変わるところが無い。オーロラでは弱収束の原理だけ

Table I Compact SR-sources in the world.

MAME INSTITUTE COUNTRY	COSY- II IMT GERMANY	Super-ALIS NTT JAPAN	AURORA Sumitomo JAPAN	HELIOS Oxford ENGLAND	NIJI- III ETL JAPAN	SXLS BNL U.S.A.
Energy	592 MeV	600 MeV	650 MeV	700 MeV	620 MeV	700 MeV
Circumfer.	9.6 m	16.8 m	3.14 m	9.6 m	15.54 m	8.503 m
Radius	0.44 m	0.66 m	0.5 m	0.52 m	0.66 m	0.6037 m
Mag.Field	4.47 T	3.0 T	4.33 T	4.5 T	4.1 T	3.87 T
Critical λ	1.20 nm	1.73 nm	1.02 nm	0.84 nm	1.2 nm	0.98 nm
Current						
Design	100 mA	500 mA	300 mA	200 mA	200 mA	200-500 mA
Achieved	1	100	45	50	70	—
X-ray Pow.						
Design	2.4 kW	8.3 kW	9.5 kW	8.4 kW	5.05 kW	7-17.6 kW
Achieved	0.02	1.7	1.4	2.1	1.8	—
Life time						
Design	6 hour	>24 hour	20 hour	5 hour	—	6 hour
Achieved	12	2	1-20		1 hour	
Beam size	Desi (Achi)					
Horizon.	3.6 mm	<1 mm	1.3 (1.2) mm	1.0 mm	1.9 mm	1.0 mm
Vertical	3.1		0.1 (0.1)	0.8	0.3	1.0
Emitance						
Horizon.	2.3 mrad		2.0 mrad	1.3 mrad		1.0 mrad
Vertical	3.2		0.16	0.5		1.0
Number of dipoles	2	2	1	2	4	2
Beam duct	cold	warm	warm	cold	warm	warm
Yoke	no iron	iron	iron	no iron	no iron	no iron
RF freq.	500 MHz	125 MHz	190.8 MHz	500 MHz	154.3 MHz	211 MHz
Injector	Microtron	Linac	Microtro	Linac	Linac	Linac
Energy	50 MeV	15 MeV	150 MeV	200 MeV	180 MeV	200 MeV
Current						
Design	30 mA	200 mA	5 mA	20 mA	50 mA	
Achieved			100 μ A			
Duty cycle			10 Hz			
Pulse Width			1 μ sec			

使用している。さらに入射は、通常直線部分にキッカーマグネットを置いて行うが、AURORAには直線部分が無いために、新しい入射法を開発している。新しい入射法を1/2共鳴入射法⁹⁾と名付けている。

先に述べたように大方の小型リングは既に加速・蓄積に成功している。しかし何れもが蓄積電流値及び寿命において最終スペックを到達していないのが現状である。

小型SR光源は、入射器にもそれぞれ特徴がある。COSY-IIは50MeVのレーストラックマイクロトロン(RTM)、AURORAは150MeVのRTM、Heliosは200MeVのライナック、Super-ALISは15MeVのライナック、NIJI-IIIは、施設内の他の3つのリングにもビームを供給している500MeVのライナックを使用している。リングが小型であるだけに入射器を小型または低エネルギーにすることは重要な要素である。この

点で15MeVの入射を実現し、100mAを蓄積したSuper-ALISは優れた試みであるが、蓄積電流値をさらに増加するためにはこれ以上の入射器への負荷が問題とされる。AURORAではRTMを採用して入射器の小型化(3×1 m)を実現した。150MeVのRTMは現存のものとしては世界の最高エネルギーである¹⁰⁾。AURORAの蓄積電流値が45mAに制限されているのはこのRTMの出力が仕様の5 mAを達成していないためである。AURORAに付いては次節で詳しく述べるが、現在RTMの改造を実施している。

3. AURORAの現状

AURORAは、現在のところ世界最小のSR光源である。Fig.1に全体写真を示す。外径3 m, 高さ2.2m, 電子軌道半径0.5m。外側を幅0.5mの円筒状の鉄のヨークが取り巻いている。鉄のヨークのためにリングの総重量が100トン近くある。鉄のヨークは起磁力を高め、超伝導コイル間の力を緩和するのに必要であるが、それ以外にも様々な利点がある。例えば放射線シールドとして作用する。このために蓄積リングをコンクリートで遮蔽する必要がなく、光ビームラインは短くて済む。従ってSR光の強度を最大限に利用することが出来る。磁気シールド及び電磁シールドとなることも又SR光利用上都合

Fig.1 Overview of the compact synchrotron light source AURORA. The storage ring is composed of a single superconducting magnet. The injector racetrack microtron is seen behind the ring.

Fig.2 A view of the splashing synchrotron light from AURORA

がよい。

1989年10月27日にコミッショニングを開始し、3日後に650MeVで蓄積された光を観測した。Fig.2はAURORAから光が出ている模様である。本年5月末まで実験を続けた結果45mAの蓄積に成功した¹¹⁾。AURORA成功の鍵である1/2共鳴入射法は完全に実証されたと考えている。非常に高い入射効率を確認した。蓄積電流を制限しているのはRTMの出力であり、現在RTMを改造中である。RTMのシュミレーションをやり直した結果、もっと良いオプティクスが見つかったために、コンフィギュレーションを抜本的に変更している。10月初めには改造を完了して、蓄積実験を再開する。

3.1 1/2共鳴入射法の入射効率

1/2共鳴入射法は、リングの閉軌道上に置かれたパートベーター(空芯の8極磁石)を励起して、約1 μ secに渡って1/2共鳴軌道を発生し、この共鳴軌道にRTMからの150MeVの電子を誘導することにより行うものである。1/2共鳴軌

道は平衡軌道から半径方向に±約60mm広がる。この様に大きな変位にもかかわらず、主磁石の磁場が広範囲に渡って非常に精度良く出来ているために、ビームが発散することはない。パータベーターを切ると軌道はすぐに平衡軌道に戻り、放射冷却の効果でビームの径は、約30msecの後に1.2mm以下となる。更にパータベーターは平衡軌道上の電子には影響を及ぼさないために、繰り返し入射を行うことが出来る。現在は10Hzで入射している。入射は永遠に続けることが出来るが、実際には150MeVにおける蓄積ビームのタウシェック寿命により飽和するので、入射電流値が低ければ今回のように長時間かけて蓄積が可能である。最終的には、300mA蓄積するのに1mAの入射電流(ピーク値)で1分を予定している。

入射効率(α)は入射電流値(I_0)と損失のバランスで決まる次式で表される。

$$dI/dt = 10\alpha \cdot I_0 - \beta \cdot I - (\gamma + \delta)I^2$$

ここで γ はタウシェック寿命によるもので、 β はベーシックな真空度に依存する項である。 δ は、コミッショニングの初期に光がビームダンプに当たってガスを放出し、蓄積電流がその自乗で減少すると言う効果¹²⁾を含めたものである。蓄積電流の増加率を上式を用いてフィットすると、それぞれの係数を求めることが出来る。求められた α は約0.6であり、パータベーター起動時に入射した電子の半分以上が捕獲されたことを物語っている。但し入射電流値 I_0 はリングの入口で観測されているので、リング内の磁気チャンネルやインフレクターによる減衰もこの値に含まれている。なお γ から求められるタウシェック寿命は45mA時に約30分であり、計算値より多少長い、リーゾナブルな値である。

3.2 加速・蓄積

150MeVで入射蓄積したビームは、650MeVまで加速して蓄積される。加速はリングの主磁場を1テスラから4.3テスラまで変化して行わ

れるが、このとき磁場の n 値を0.72から0.37に変更している。即ち β 振動数を変化させているが、これはビームのタウシェック寿命を長くするためである。この変化は、実は強磁場により鉄の磁気特性が飽和することを利用して自然に作りだしている。ところが n 値が変化することにより、 β 振動はいくつかのレゾナンスを通過する。 β 振動数が幾つの時にレゾナンスが発生するかは理論的に計算することが出来る。レゾナンスの発生はビームの発散を招くので、その領域をなるべく早く通過するのが望ましい。この目的でレゾナンスジャンパー(空芯の6極磁石)を挿入して β 振動数を強制的に変化させる。結果を述べると、AURORAではレゾナンスジャンパーを使用しなくてもビームの損失無しにレゾナンスを通過できることが分かった。これはもちろん磁場の立ち上げスピードに依存することであるが、1A/secで問題はない。1~4.3テスラに上げるのに全体で15分を要する。

3.3 ビーム寿命とサイズ

ビーム寿命とサイズは、リングの性能を決定する最も重要なパラメーターである。設計値はTable Iに示した通りである。観測値もほぼこれに近い値を得ることが出来た。Fig.3は650MeVで蓄積中のビームの形状をテレスコー

Fig.3 Typical electron beam size with AURORA observed by using a telescope focused on the beam orbit. The 1σ of beam sizes are 0.14 and 1.2 mm in vertical and horizontal, respectively.

Fig. 4 Electron beam decay rates at different dates are indicated as a function of the beam current. Two components in each data are apparent. One component is proportional to I^2 and the other to I . The whole curve tends to shift toward the right-bottom side day by day, implying that out gas is significant due to the radiation in earlier days.

Fig. 5 Beam life time and the current are indicated as a function of time. At a current of an order of mA, the life time of more than 20 hours is recorded.

ブで観測し、画像処理装置で斜影を求めたものである。これによると 1σ が、縦方向に 0.14mm 、動径方向に 1.2mm であり、設計値よりむしろ小さい。ビームは非常に安定で、ビーム中心はレゾナンス通過時でさえ変動しない。又どのビームポートで観測してもビームが同質であるのは軸対称な単体の電磁石を使用しているためである。

650MeV ではタウシェック寿命は40時間以上あるが、実際の寿命は残留ガスとの散乱により制限を受ける。真空度が 1×10^{-9} では約20時間

の寿命が期待されている。しかし実はコミッションの初期には、光によるビームダンプからのガス出しが顕著であり、電流値に比例して真空度が悪化するために、寿命は電流値の二乗に比例して悪化する。この傾向は初期のデータに良く現れている。Fig. 4は蓄積電流値の減衰率を電流値の関数として求めたものである。即ち電流値が大きいほど減衰率が大きい。そして初期のデータには明らかに2つの成分が観測される。電流値(I)が大きいときには減衰率は I^2 に比例し、小さいときには I に比例している。そしてグラフは日毎に右下に移動する。このことから I^2 の減衰が、光によるガス放出が原因であり、タウシェック効果に因るもので無いことが分かる。本年3月の段階で、オペレーションの延べ時間は1カ月程度であるが、蓄積電流値が 4mA のときに20時間以上の $1/e$ 寿命を達成している (Fig. 5)。この時のベーシックな真空は 2×10^{-9} であった。以上のデータから、真空槽が十分に枯れれば 300mA の蓄積時にも20時間の寿命が見込まれる。

4. AURORAの特徴と将来の展望

以上に見た様に、小型SR光源は既に幾つかが実証され、フルスペックを到達するのは時間の問題とされている。小型SR光源はX線リソグラフィーのために開発されたが、常伝導の大型リングにはないいくつかの優れた特徴が指摘される。そして超伝導小型SR光源の中でもAURORAはさらにいくつかの特徴を持っている。単体の円形リングであると言う最大の特徴が予想以上に優れた結果をもたらしている。第1に、ビームが極めて安定で変動しない。そして β 関数が一定であることからビームのプロファイルがどのポートでも同一である。この事実は利用機器の調整や再現性にとりきわめて重要な意味を持つ。第2に、構成機器の数が少ないためにオペレーションが容易であり、又保守も容易である。第3に、入射効率が高いことは入射機器に対する負荷を軽減した。結果として入射オペレーションを容易にした。現在までに入射器を

除いてAURORAのオペレーションは自動化されている。全自動化への道はさほど遠くはないと考えられる。第4に、真空排気能力が非常に大きく、24時間で大気から 5×10^{-10} Torrまで引くことが出来る。従って故障時のアイドリング時間が短かくて済む。第5に、先に述べたごとく、鉄のヨークが放射線シールドとして働くために安全性が高く、コンクリートのシールドが不用である。このためにビームラインを短縮でき、従ってSR光の輝度を上げることが出来る。最後に、小型であることは周長が短いことであるが、即ち、僅かな蓄積電子数で等価な電流値を達成できることを意味している。AURORAは放射線の安全上でも理想的と言える。

ところで、最近筆者は「光蓄積リング」¹³⁾と言う装置を提案している。これは真円形の電子軌道の周りを同心円のミラーで囲み、AURORAを自由電子レーザーに転換する構想であるが、AURORAから平均パワー数10kWのコヒーレントなミリ波～サブミリ波を発生する方法を明らかにしている。可視や紫外光については、コヒーレントにすることは困難であるが、ミラーによる集光作用の結果一つの光ポートからAURORAの数100倍の出力が期待される。

この様な「光蓄積リング」の出現は、小型SR光源が単に小型のSR光源としてではなく、レーザーや自由電子レーザーとSR光源を融合し、さらには光科学と加速器科学全体を融合させるような、その様な役割を果たす装置であるように筆者には思われる。

(追加)10月14日に改造マイクロトロンが完成し、1mA以上の能力が明かとなった。現在入射実験中であり、650MeV、100mA以上の蓄積を容易に示し得る状況である。

参 考 文 献

- 1) See, for example, SPIE proceedings, Vol. 448 (1983), 471 (1984), 537 (1985) and 632 (1986).
- 2) S. Kurinsky et al.: in *Handbook on Synchrotron Radiation* Vol. 1a ed. E. Koch (North-Holland, Amsterdam, 1983) p.132.
- 3) E. Weihreter et al.: Proc. 3rd European Particle Accelerator Conf., 12-16 June 1990, Nice.
- 4) T. Hosokawa et al.: Rev. Sci. Instrum. 60 No.7 (1989) 1783.
- 5) N. Takahashi: Nucl. Instrum. Methods B24/25 (1987) 425; H. Yamada et al., Rev. Sci. Instrum. 60 (1989) 1786.
- 6) M. N. Wilson et al.: Microcircuit Engineering 89 (1990) 225.
- 7) T. Tomimasu et al.: Proc. 7th Sympo. Acc. Sci. Tech., 12-14 Dec 1989.
- 8) J. B. Murphy et al.: Proc. 3rd European Particle Accelerator Conf., 12-16 June 1990, Nice.
- 9) T. Takayama: Nucl. Instrum. Methods B24/25 (1987) 420.
- 10) M. Sugitani et al.: Proc. 1st European Particle Accelerator Conf., June 1988, Rome, p. 596.
- 11) H. Yamada, J. Vac. Sci. Technol.: Nov/Dec 1990, in press.
- 12) T. Tomimasu et al.: Rev. Sci. Instrum. 60 (1989) 1744.
- 13) H. Yamada: Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) L1665.