

トピックス

卓上型シンクロトロン“みらくる-20”による新しいX線の発生

山田廣成

立命館大学理工学部光量子発生科学研究室*

Novel X-ray Source Based on a Tabletop Synchrotron and its Unique Features

Hironari YAMADA

Ritsumeikan University

Abstract

The novel x-ray source named MIRRORCLE is based on a tabletop normal conducting synchrotron using a collision of circulating electron beam with a tiny target. It is demonstrated that the brightness is comparable to SR, its source point size can be a nano scale, the spectrum is very flat and dominated by hard components, and it is highly coherent. MIRRORCLE is useful for medical and industrial applications since this is tabletop and its electron energy can be less than 8 MeV which suppresses neutron generation. The mechanism for brilliant hard x-ray production, design concept of the smallest synchrotron, novel beam injection scheme, the observed features of the x-ray beam, and some applications are described.

1. はじめに

立命館大学には2台のシンクロトロンが有る。1台は、超伝導シンクロトロン“**AURORA**”であり、1台はここで話をする (Fig. 1) “みらくる”という名の世界最小 (軌道半径15 cm, 外径1.2 m) 常電導シンクロトロンである。筆者が **AURORA** と共に¹⁾立命館大学に移籍したのは7年前のことであるが、このとき既に“みらくる”の開発に着手していたことを知る人は少ない。

世界最小電子蓄積リングを“みらくる”と銘々したのはつい最近のことである。“みらくる”は、科学技術振興事業団さきがけ研究²⁾, 科研費基盤研究 A³⁾, NEDO 地域コンソーシアム補助⁴⁾などの学外資金により開発したものである。物理設計, 機械設計から組み立て, 据え付け, 入射実験までの全てを筆者と学生で行った。小型とはいえ, 新型加速器の開発を私立大学の一研究室で行ったのは多分歴史上初めてのことである。企業ならば1年ですむ開発に約5年の歳月を要したのは, 全てを自前でやったことと, 予算が一度に付かなかったためである。

“みらくる”は加速器の特徴として完全円形リングという点でユニークである^{17,18)}。完全円形リングへの入射は **AURORA** で初めて成功した⁵⁾が, 軌道半径15 cm というさらに小型のリングで成功させることができた⁶⁾。小型になればなるほど入射はむづかしくなる。共鳴入射法は住友重機械工業の高山による発明⁷⁾であるが, 小型化において技術の真価を発揮することになった。

“みらくる”で発生したX線は, 指向性が高く, 光源点サイズが小さいという意味で放射光の様であるが, 放射光よりも白色であり, 20 MeV までフラットなスペクトルを持つ点と, 発散角が25 mrad と大きい点でユニークである。また, パルス光である点と干渉性が高い点で放射光で

はできない新しいアプリケーションが期待される。もちろん小型という点で, 産業利用や医学利用に期待が寄せられている。さらには, まだ成功していないが, 放射光を同心円のミラーに蓄えて遠赤外線領域でレーザー発振をさせるユニークな装置でもある。レーザー発振原理の名称を光蓄積リング⁸⁾と呼ぶ。

2. 小型シンクロトロンの必要性

筆者がシンクロトロンに関係するようになったのは, **AURORA** の開発に携わって以来のことである。1985年頃, 次世代半導体メモリー生産用のX線源として放射光が注目を集め, 海外も含めて複数の加速器メーカーが開発にしのを削った。**AURORA** もその一台であるが, 4 T の超伝導磁場を発生して, 600 MeV 程度の電子を蓄積し, 臨界光子エネルギーとして1 keV 程度のX線を発生しようというものであった。**AURORA**⁹⁾, **HELIOS**¹⁰⁾, **NIJI-III**¹¹⁾, **Super-ALIS**¹²⁾等が成功し, X線リソグラフィの研究が進展した。しかしながら半導体業界から出た意見は, “**AURORA** でも大きすぎる”, “X線強度は10倍必要である”, “16本のビームラインがトラブルで全部シャットダウンするのは困る”といった厳しいものとなり, 結局今日に至るまで, X線リソグラフィはプロセスに採用されなかった。

開発から10年が経過し, 過去となった今日だから語ることとし, 開発当事者としてもシンクロトロンのリソグラフィへの採用は困難に思われた。筆者は早い時期に **AURORA** を汎用装置として位置づけた結果, XAFS, X線顕微鏡, 蛍光X線分析, 軟X線反射率測定装置を開発するとともに¹³⁾, **LIGA**, アブレーション, アモルファスSiの低温結晶化を実証した¹⁴⁾。その結果が **AURORA** の

* 立命館大学理工学部光量子発生科学研究室 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
TEL: 077-561-2684 FAX: 077-561-2860 E-mail: hironari@se.ritsumei.ac.jp

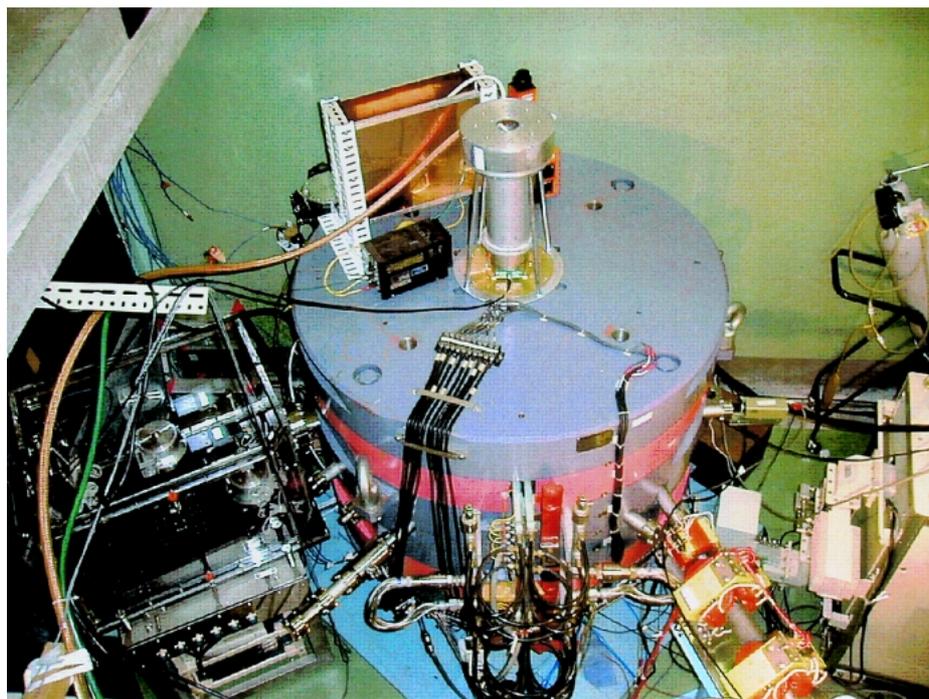


Figure 1. Tabletop synchrotron named MIRRORCLE-20
The out diameter of the ring is 1.2 m. Perturbator pulse compression system is seen on the top of the ring. In the left hand side, the acrylic irradiation chamber is seen. The beam is injected from the bottom through a quadrupole doublet.

立命館大学への導入であった。LIGAは当時2.5 GeVのシンクロトロンでしか実施できないと考えられていたので、筆者らが最初の実証した結果、今日のように小型リングで普及することになった¹⁵⁾。アブレーションやアモルファスSiの低温結晶化もビームラインを出来るだけ短くすべきであるという筆者の提唱により成功した。

加速器をさらに小型化しなければ産業利用は出来ないと
言う思いはその当時からのものであった。

3. 新しい高輝度ハード X 線発生装置

3.1 新しい X 線発生機構の概要

シンクロトロン放射光といえば、ハード X 線から遠赤外線領域をカバーする高輝度光である。X 線領域では Spring-8 を凌ぐ光源はない。それでは、なぜ Spring-8 は高輝度なのだろうか？ 放射光の歴史も専用光源ができて25年が経過すると、その原点は薄れつつあり、ユーザーは専門化してそこに光があるからという認識にいたると思う。

放射光が高輝度である理由をまとめてみると以下のようになる。

- ① 高エネルギー電子ビームを繰り返し利用するため。
- ② 放射光として失ったエネルギーを供給し続けているため。
- ③ 周回周期が短く、発生繰り返し数が数100 MHz に及ぶ。従って平均光子数が大きい。

④ 高エネルギー電子から発生する放射光は、特殊相対性理論により、放射角が $1/\gamma$ に比例して小さくなる。

⑤ 電子エネルギーが高くなるほど、ベータトロン振動の振幅が小さくなり、エミッタンスが小さくなるため。光源点の大きさは数マイクロンになる。Brilliance は光源点サイズで規格化した表示である。

さて、注意したいのは、高輝度と大強度が異なるという点である。レーザーの場合には大強度というが、高輝度とは言わない。レーザーはコヒーレント光であるからわざわざ高輝度とは言わない。これに対して放射光は、インコヒーレント光であるため高輝度という表現を使う。放射光は、波長当たりのパワーで言えば、平均数 W から数100 W である。これに対してレーザーは、可視光領域で数 W ~ kW を発生する。あるいはパルスで MW を発生する。放射光は全放射パワーで数10 kW から数100 kW である。

一方、X 線の歴史は、レントゲンが発見して以来100年である。そして X 線管は今もなお人類に様々な恩恵を与えている。X 線管の出力は、60 keV、1 A の電子ビームを用いれば60 kW である。放射光リングの加速空洞は、数10 kW ~ 100 kW であるから、トータルの X 線出力としては、放射光も X 線管も実はあまり変わらない。X 線管では放射が 4π に広がり、かなりのエネルギーが熱になるのに対して、放射光では加速空洞に投入したパワーのほとんどが放射光になり、放射が前方に収束する点と、X 線管では放射光よりはるかに容易に100 keV 近くの X 線を発

生ずる点が違っている。最近の傾向では、マイクロフォーカス X 線源の能力がどんどん向上している²¹⁾。

筆者が放射光に疑問を持ったのはこの点である。X 線管は電子ビームをターゲットに当てて放射光よりはるかに容易にハード X 線を発生することができる。高エネルギー電子を用いれば制動放射を前方に収束することも出来るはずである。

筆者が提唱する新しい方法は、電子蓄積リングの電子軌道に微細ターゲットを置く方法である¹⁶⁾。必ず起こるのは、ライナックからの電子ビームをターゲットに直接当てると同じであるという反論である。

ターゲットを微細にすることが重要である。ターゲットの断面積が実効的な光原点の大きさであるから、それにより Brilliance が決まる。ライナックでもビームを絞り微小ターゲットに当てることは出来る。ところが問題は、微小ターゲットによる X 線の発生効率は低く、ほとんどの電子が大きなエネルギーを残したままターゲットを透過してしまうことである。その透過した電子をシンクロトロンで引き続き周回させるのがアイデアである。周回させて再度ターゲットに衝突させる。もちろんリングの加速空洞によりエネルギーを回復し、ダンピングして後に衝突させる。従って、装置の性能は入射器のパワーだけではなく、シンクロトロンのアパチャーにより決まる。リングが大きな物理アパチャー及びダイナミックアパチャーとモーメントムアクセプタンスを持つことが鍵である。幸いなことに、完全円形リングである“みらくる”は、動径方向に 100 mm、軸方向に 12 mm というきわめて大きなアパチャーを持つ。また 1/2モーメントムアクセプタンスは ±6% に達する¹⁸⁾。

3.2 期待される X 線強度

新型 X 線発生装置の輝度は、以下のように計算することができる¹⁶⁾。始めに全光子量 N_{br} を計算する。制動放射の微分断面積 $d\sigma_k$ ¹⁹⁾、ターゲットの粒子密度 n_t 、ターゲットの厚さ χ_t 、ターゲットのビーム進行方向断面積 α_t 、蓄積電流値 I 、ビーム断面積 S_b 、として以下のように計算できる。

$$N_{br}(k) = \frac{d\sigma_k n_t \chi_t I \alpha_t}{1.6 \times 10^{-19} S_b} \quad (1)$$

電流値は蓄積電流値であるが、それは単位時間の入射レートと損失レートで決まる。

$$\frac{dI}{dt} = R_i \varepsilon_i I_0 \Delta t f_{RF} - \mu I - \eta I^2 \quad (2)$$

(2)式の第1項が入射レートであり、第2、第3項が損失レートであるが、電流値に比例する項とその自乗に比例する項がある。入射レートは、入射の繰り返し数 R_i 、入射

効率 ε_i 、入射器のピーク電流値 I_0 、入射が可能な時間幅 Δt で決まる。損失はターゲットによる損失が主であり、電流値に比例するのでその係数を μ とする。ターゲットによる損失以外には、残留ガスによる散乱と、電子間の相互作用であるタウシェック散乱がある。前者は基本的にターゲットによる散乱と同質のものであるが、ターゲットに比べて圧倒的にわずかであるのでここでは無視をする。後者は蓄積電流値が増えると顕著になり、電流値の自乗に比例するので、(2)式の第3項の様に表示される。

ターゲットによる損失の係数 μ は、非弾性散乱である制動放射の断面積 σ_{br} 以外に、ターゲット原子のイオン化による損失の断面積 σ_i と、原子核との弾性散乱による損失の断面積 σ_{el} を用いて次の式、

$$\mu = -\frac{dI}{dt} \frac{1}{I} = (\sigma_{el} + \sigma_{br} + \sigma_i) n_t \chi_t f_{RF} \frac{\alpha_t}{S_b} \quad (3)$$

で表す。但し、それぞれの断面積には物理的な全断面積の全てを含めるわけではない。即ち、非弾性散乱により電子エネルギーの損失がシンクロトロンの 1/2モーメントムアパチャー $(\Delta p/p)_{max}$ を越えるような断面積、

$$\sigma_{br} = \frac{4Z^2 r_e^2}{137} \frac{4}{3} \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) \ln \left(\frac{1}{(\Delta p/p)_{max}} - \frac{5}{8} \right) \quad (4)$$

であり、弾性散乱により誘起するベータトロン振動の振幅 $\langle \beta \rangle$ がダイナミックアパチャー A_c を越えるような断面積、

$$\sigma_{el} = \frac{2\pi r_e^2 Z^2 \langle \beta \rangle}{\gamma^2 A_c} \quad (5)$$

である。従って、これらは加速器の性能で決まる量である。どのようなシンクロトロンでも良いというわけではなく、大きなダイナミックアパチャーとモーメントムアパチャーを持つことが新型 X 線光源開発の条件である。“みらくる”はまさにそのような加速器である。水平方向ダイナミックアパチャーは 10 cm に及び (物理的アパチャーはさらに大きい)、1/2モーメントムアパチャーは 6% に達する。イオン化による電子エネルギーの損失は、平均すると高々 20 keV であり、シンクロトロン加速により十分に回復できる値であるので、含める必要はないと考える。

蓄積電流値は、入射レートと損失レートがバランスして飽和に達する訳であるが、そのときの電流値は、(2)式の左辺がゼロであるとして、解くことができる。即ち、

$$I = \frac{R_i \varepsilon_i I_0 \Delta t}{(\sigma_{el} + \sigma_{br}) n_t \chi_t} \frac{\alpha_t}{S_b} \quad (6)$$

で与えられる。

蓄積電流値がわかると(1)式から光子量を計算することができるが、その結果は、

$$N_{br}(k) = \frac{d\sigma_k R_i \epsilon_i I_0 \Delta t}{1.6 \times 10^{-19} (\sigma_{el} + \sigma_{br})} \quad (7)$$

となり、実はターゲットの厚さや形状には依存しない。入射器の能力と、入射効率により決まる。これは予想された至極当然な結果である。しかしながら Brilliance は、

$$\frac{d^2 N_{br}}{d\Omega dS} = N_{br}(k) \frac{dk}{k} \frac{1}{\alpha \pi \theta_{br}^2} F(\theta) \quad (8)$$

で与えられる。これは、ターゲットの断面積 α_t と放射立体角 $\pi\theta_{br}^2$ に反比例する量であるから、ターゲットが微細であり、電子エネルギーが高いほど明るくなることは明らかである。 θ_{br} は放射光と同様におよそ $1/\gamma$ に比例する量である。ここで $F(\theta)$ は、制動放射の角分布であり、波長依存性がある¹⁹⁾。この角分布は放射光と異なり X 線の波長が長いほど広がりが狭くなるのが特徴である。

電子エネルギー 20 MeV の時の具体的な計算例を Table 1 に示す。幅 1 mm のカーボンと幅 50 μm のタングステンと比較している。全光子量は同じであるが、幅が小さいタングステンの Brilliance が大きい。ターゲットの原子番号や厚さには依存しない。

Table 1. “みらくる-20”からのターゲット放射理論値。全光子量はターゲット材質やサイズには依存しないが、Brilliance は、ターゲット断面積が小さいほど大きくなる

Machine parameters	Case 1	Case 2
e-Energy [MeV]	20	20
Orbit radius [m]	0.15	0.15
SR loss/turn, electron [eV]	9.44E-02	9.44E-02
target shape	C-wire	W-wire
Particle density [$/\text{m}^3$]	1.13E+29	6.25E+28
Atomic number	6	74
Cross section [m^2]	9.7272E-30	1.2854E-27
Target thickness/turn [m]	1.00E-04	1.00E-03
Target width	1.00E-03	1.00E-05
Total photon flux/A, 0.1%band	1.04E+13	7.63E+15
Photon flux/mrad, A, 0.1%band	1.37E+12	1.00E+15
Radiation loss/electron [eV]	3.42E+03	2.51E+06
Beam loss rate by Brem. [/sec]	2.03E+04	1.25E+05
Beam loss rate by nuclear scat. [/sec]	4.40E+05	3.22E+06
Injection rate (Hz)	100.00	100.00
Injector macro pear current (A)	0.05	0.05
Efficiency*Effective pulse width	6.00E-08	6.00E-08
Circulating max. current (A)	2.81E-03	3.86E-04
Max photon flux/mrad, curr., 0.1%band	1.02E+09	1.03E+09
Brilliance	1.071E+09	1.078E+11

4. 卓上型シンクロトロンの開発

4.1 電子ビームの入射法

電子シンクロトロンでは相対性理論の制約のために必ず入射加速器で高エネルギー電子ビームを生成してシンクロトロンに打ち込むという操作が必要である。AURORA で共鳴入射法を採用したのは、リングが完全円形であったためである⁹⁾。キッカー磁石をリング内に置いた場合に主磁石磁場の角度方向一様性に影響を及ぼすことを恐れたためである。軌道長は 3.3 m で、約 10 ns であるから、1 ターンの空心コイルで出来たかも知れない。しかし、共鳴入射法を採用したのは正解であった。非常に大きな入射効率を示したのである⁵⁾。入射器のマクロピーク電流値 3 mA、入射繰り返し数 10 Hz のとき、1 分で約 500 mA の蓄積を達成した。

共鳴入射法の名称は、ベータトロン振動との共鳴を利用するところから付けた名称である。通常のシンクロトロンでは、ベータトロン振動数が整数や半整数にはならないようにし、共鳴が起こらないように設計している。共鳴が起こるとビームはその振幅を急激に増大して瞬時になくなる。そのような共鳴を利用するわけであるから、もちろん短時間だけ制御された形で使う。

ベータトロン振動数を制御するのがその方法である。ベータトロン振動数を入射中だけ整数、半整数、1/3 整数に設定する。ベータトロン振動数は磁場分布で決まる量であるから、主磁石磁場の分布を 1 ターンの空心コイルで短時間変更する。この 1 ターンコイルのことをパータベータ (PB) と称する。AURORA で採用したのは 1/2 共鳴であり、今回 “みらくる” で採用したのは 2/3 共鳴である。共鳴現象は、同じ位相で毎回摂動が加わるところから、僅かな摂動で大きな変位をもたらすのが特徴である。従って “みらくる” で採用した PB の尖塔値は高々 400 ガウスのものであった。しかしそれでも 1 ターンのコイルであるから、6000 A というパルス電流を流す。

共鳴現象は Fig. 2 を見ると明らかである。Fig. 2 は入射点で見た周回ビームの運動を位相プロット、即ち動径方向変位の大きさ X とその傾き X' で見たものである。PB を弱くすると 2/3 共鳴状態が終息して行くのがわかる。PB 磁場は時間的に sin 半波で与え、幅は AURORA で 4 μ 秒、“みらくる” で 0.3 μ 秒である。Fig. 2(a)において当初右端の 70 mm に置かれたビームは、三つのアイランドを回って元に戻る運動をするが、PB 磁場が減衰するため、ビームは徐々に内側に引き込まれて、PB がゼロになった状態で中心を周回する。主磁石の磁場は、共鳴状態から僅かにずれた振動数を与えるような分布に設定している。磁場勾配の n-値で言うならば、AURORA では 0.72 に設定し、“みらくる-20” では、0.54 に設定した。

4.2 世界最小シンクロトロン “みらくる”

世界最小という呼称を更新している。しばらく前までは AURORA (外径 3 m) が世界最小であった。今は “みら

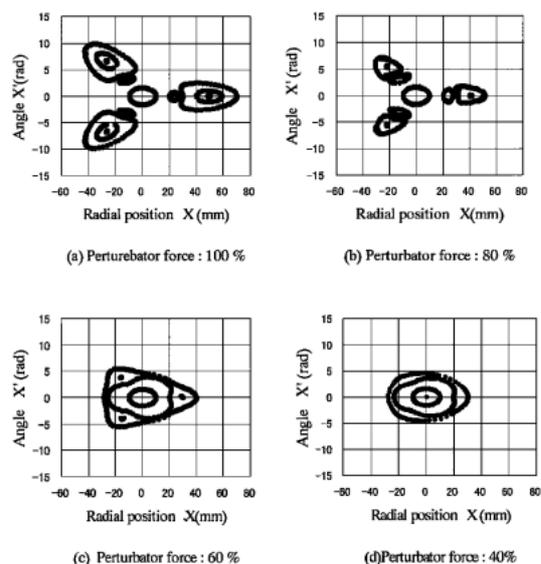


Figure 2. Shift of the tune during the beam injection. Phase plots at the injection points show the 2/3 resonance when the perturbator is excited as seen in a and b. The resonance disappears when the perturbator is less than 60% as seen in c and d.

くる-20” (外径1.2 m) である。そして多分来年度には“みらくる-6X” (外径0.6 m) になる。“みらくる-20”は軌道半径15 cmの完全円形リングであり、20 MeVのマイクロトロンで入射を行う。Fig. 1に示したように、“みらくる-20”のヨークの高さが1 mあるのは、ランプアップして50 MeVまで加速できるように設計したためである。50 MeVを蓄積するのに必要なヨークの高さが1 mであるが、磁極間に加速空洞やPBを挿入するために10 cmという磁極間隙が必要になり、このようなヨークになった。軌道半径15 cmに対して、外径1.2 mと言うのも大きすぎる値である。これは電子軌道の周りに、半径40 cmの円形トロイダル型ミラーを置くためである。“みらくる-20”は、元とは言えば、光蓄積リング型レーザー発振を実証するための装置である¹⁸⁾。必要なビームのエミッタンスとエネルギー分散を押さえるために、エネルギーを50 MeVとし、2/3共鳴を採用した経緯がある。X線利用者が多いためと新しいX線利用のパラダイムを早急に作るために、X線発生実験を優先しているのが現状である。“みらくる-20”は、X線発生用には最適化されていない。これに対して、“みらくる-6X”はX線発生用として最適化することになる。

共鳴入射法が真価を発揮するのは“みらくる”においてである。“みらくる-20”の真空槽内部構造と電子軌道をFig. 3に示す。内部にあるのは一対のPBと加速空洞とターゲットだけというシンプルな構造である。

Fig. 3(a)は、PBを励起しない状態に於ける入射軌道であり、Fig. 3(b)は、PBを励起した状態での入射軌道である。PBを励起しなければ、ビームはスイングバック

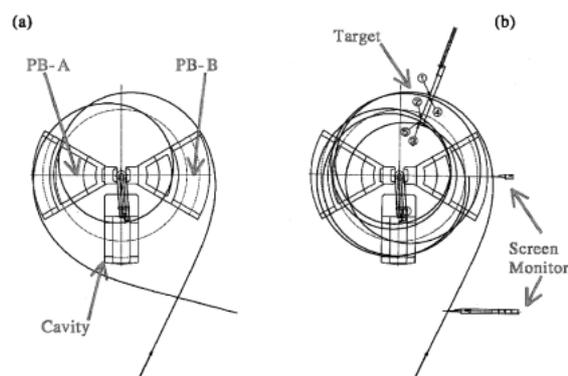


Figure 3. Configuration of MIRRORCLE-20 inside vacuum chamber and the injection beam trajectory. The left shows the injection trajectory without perturbator, in which the beam escapes. The right shows the one with perturbator, in which the beam is captured.

して遠ざかる様子が分かる。PB-Aは外側を回る電子を内側へ引き込み、PB-Bは、内側を回る電子を内側へ引き込む。2回転でビームは中心軌道に引き込まれているのがわかる。この後電子ビームは1万回転以上周回することがシミュレーションで確認されている。Fig. 3(b)で分かるのは2/3共鳴軌道の位相が3回転後にはほぼ元の位置に戻る様子である。

4.3 ビーム入射実験

低エネルギーシンクロトロンへのビーム入射には幾つかの困難がある。過去に15 MeV入射を行った例がある。NTTのグループが行った、Supper-ALISへのブースターシンクロトロンを使わない入射と、IHIが行ったLUNA²⁰⁾への入射である。低エネルギーの場合、偏向磁石からの放射光はサブミリ波領域となり、適当な観測手段がないために、入射条件を最適化するのが難しい。加うるに我々の完全円形リングでは内部にCTを挿入することができないために電流値の測定ができない。

“みらくる-20”の場合、放射光もCTも利用することが出来なかった。そこで採用したのは、スクリーンモニターである。厚さ5 μm のAlフォイルにZnSeの蛍光体を塗布して周回するビームを観測することに成功した。Alフォイルによる電子ビームの減衰は僅かであるために可能となった。

リング内部の様々な点でビーム位置を確認したが、現在は、Fig. 3(b)にあるターゲット位置に上記のスクリーンモニターを置くことで落ち着いた。Fig. 4は、幅5 mmのスクリーンを動径方向に駆動してビデオカメラで観測したものである²²⁾。駆動している領域は約50 mmである。フレームを上から1枚ずつ並べて見ている。一番上のフレームは、スクリーンを最も外に置いたときであり、Fig. 3(b)における点①である。一番下のフレームは、スクリーンをほぼ中心軌道に置いたときであり、Fig. 3(b)における点③である。左図はPBを励起しない状態であり、

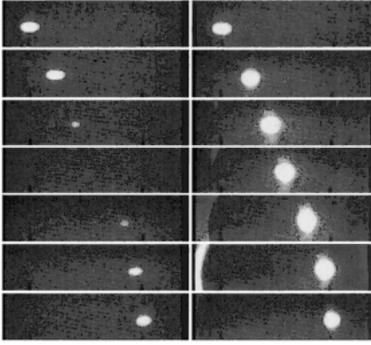


Figure 4. The circulating beam observed by a screen monitor made of $5\ \mu\text{m}$ Al foil. We are moving the screen monitor toward the ring center. Because the energy loss in the thin foil is small, the beam circulates contentiously. Without perturbator the localized beam at the injection point and the center are seen in the left column. Very bright beam spots appear when the beam is captured by the perturbator as seen in the right column.

右図は励起した状態である。PBを励起しない状態では、**Fig. 3(a)**から分かるように入射点とほぼ中心軌道の2点でビームが観測されることになる。これに対して、PBを励起した状態は、中心軌道と入射点の間のほぼ全域でビームが観測されるはずである。**Fig. 3(b)**は入射後の数ターンを描いたものであるから、ビームはまだ局在しているが、数千回転の後には、位相が進行するため、全域でビームが観測される。**Fig. 4**の右図は正にそのような状態を示している。とりわけ軌道中心で明るく輝いている。明るく輝いてビームダクトからの反射も観測されている状態である。

電流値であるが、計算によれば、入射のタイムウインドーがAURORAより短く約100 nsであり、入射器のピーク電流値が2 mA、繰り返し数が最大30 Hz、周回周期数が0.31 GHzであるところから、一回で60 mAの蓄積となる。小型リングは周回周波数が大きいため、僅かな電子数で大電流の蓄積ができる。最近、遠赤外線放射光の観測に成功したが、それから求めた入射効率は60 mA/shotであった。即ち入射効率は100%であった。

4.4 放射ダンピング

ダンピングとは、ベータatron振動の振幅が減衰する現象である。一般の入射法でも共鳴入射法でも入射時には大きなベータatron振動を誘起する。入射はこのベータatron振動が減衰してから行うのが通常である。従ってこのダンピングの速度が問題となる。単位時間当たりのダンピングレート α_e は、放射パワーの電子エネルギー依存性によるもので、

$$\alpha_e = \frac{1}{2T_0} \frac{dU}{d\varepsilon}$$

となる。 T_0 は、周回時間である。ダンピングレートは、

放射パワーに比例する量であり、放射パワーは電子エネルギーの3乗に比例し、軌道半径に逆比例するから電子エネルギーが高く軌道半径が短いほど早い。“みらくる-20”の軌道半径は15 cmときわめて短いけれども20 MeV電子の放射ダンピング時間は1秒である。ならば30 Hzという高速で繰り返し入射しても蓄積は出来ないと言うのが通常の理論である。ところが“みらくる”では、幾つかの事情が異なっている。

まず第1に、“みらくる”は水平方向に約 ± 50 mmという非常に大きなダイナミックアパチャーを持つことである。そしてパータベータは中心軌道から約40 mm以上外にいる電子にのみに影響を及ぼす。PBがゼロになった時点で、45 mmに広がっていた電子が、40 mmまでダンピングするのに要する時間は、120 msである。また、45 mmより外にいた電子はPBにより散乱を受けるが、 $0.3\ \mu\text{s}$ という短時間にこぼれ落ちる電子は僅かである。そもそも、入射点50 mmにいる電子を捕獲出来るのが共鳴入射法である。

第2に、“みらくる”の放射ダンピング時間は実際にはもっと短いと考えられる¹⁸⁾。“みらくる”の放射は、シンクロtron放射ではなく制動放射であるから、放射パワーはもっと大きい。しかもターゲットによるエネルギーロスだけではなく、残留ガスからの制動放射及びイオン化による電子のエネルギーロスをカウントしなければならない。これは、軌道長(L_e)により異なり、従って電子エネルギー($E=E_0+\varepsilon$)により異なる。残留ガスによるエネルギーロスは、

$$\begin{aligned} U_b &= n_i(E_0+\varepsilon)\sigma_{br}L_e = n_i(E_0+\varepsilon)\sigma_{br}L_0\left(\frac{\alpha\varepsilon}{E_0}+1\right) \\ &= n_i\left(E_0+\alpha\varepsilon+\alpha\frac{\varepsilon^2}{E_0}+\varepsilon\right)\sigma_{br}L_0 \end{aligned}$$

と表すことができる。 α はモーメントコンパクションである。これを ε で微分すると、ダンピングレートは、

$$\alpha_e = \frac{1}{2T_0} n_i \left(\alpha + 1 + 2\frac{\alpha}{E_0} \varepsilon \right) \sigma_{br} L_e$$

となる。ダンピングレートは、全放射エネルギー $\alpha_e = n_i \sigma_{br} L_e$ に比例していることがわかる。“みらくる”は 1×10^{-4} Pという低真空で運転しているから、残留ガスの影響も大きい。ターゲットが有る場合には、制動放射とイオン化によるロスを放射パワーに含めるべきである。平均ロスを20 keVとするとダンピング速度は放射光で計算したそれよりも約1万倍早くなるから100 μs のオーダーである。もちろん加速しての話である。

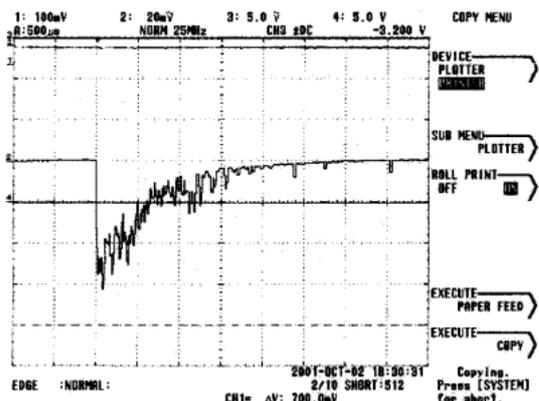


Figure 5. The lifetime of the beam is observed by a photo multiplier with an oscilloscope. The lifetime depends on the target material and structure. This is the case for $5\ \mu\text{m}$ Al foil. With heavy material targets the lifetimes are shorter, and without target, it must be much longer.

5. X線ビームの特徴²²⁾

5.1 X線発生実験

Fig. 3に示したスクリーンの位置に微小ターゲットを置いてX線の発生を行う。折線方向700 mmの位置にある30 mm ϕ の窓から取り出す。窓の材質は厚さ0.1 mmのBeである。ターゲットの材質としては、C, Al, Si, W, Pb等を試みた。サイズは様々である。X線モニターには、5 mm ϕ という最小の光電子増倍管を用いた。シンチレータを付けなかったのは、出力が大きくなりすぎるためである。アノード出力を、50 Ω で終端して直接オシロスコープで観測した。従ってコンプトン散乱電子を観測していて光電子は観測していない。Fig. 5が観測した波形である。ターゲットにより寿命は異なる。図の場合は $5\ \mu\text{m}$ のAlフォイルであり、約1 msの寿命がわかる。Fig. 3からわかるように“みらくる”は高周波加速空洞を有しているので、高周波加速の影響について述べると、1 kW投入時に積算X線強度は約2倍変化する。高々1 kWであるから、電子のエネルギーを回復するのに十分なパワーではないが、ダンピングには寄与し、周回効率が上がっていると思われる。

光電子増倍管の出力を約1秒の時定数で積分して常時記録している。入射電流値を一定にし、ターゲットの物質、厚さ、幅、高さを変えて積算X線強度を測定したのがFig. 6である。ここに記載した材質は全て鉛である。長さの単位はmmである。3 mmの厚いターゲット②より③~⑥の薄いターゲットの方が積算強度が大きい。③~⑤は、厚さが同じで高さも同じであるが、幅が狭いほど積算強度が大きい。①と③を比較すると、幅と高さは同じであるが、厚さは19倍違っている。しかしながら強度は2倍とは違わない。⑤と⑥では、厚さと幅が同じであるが、ターゲット断面積にして50倍違っているにもかかわらずX線積算強度にはほとんど差がない。ビームの広がり

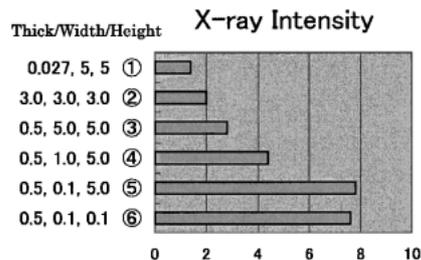


Figure 6. Target size dependences of the x-ray intensity from MIR-RORCLE-20. The x-ray intensity is measured with photo multiplier with 1 sec time constant. It is seen that the smaller or thinner target gives higher intensity. This result is quite consistent with the proposed x-ray emission mechanism by Yamada.

は、縦方向には数 mm である。

この結果は、新しいX線発生機構をよく説明している。ライナックなどで電子ビームをターゲットに衝突させてX線を発生する場合には、ターゲットが厚く断面積が大きい方が強度が高いのは明らかである。しかし我々の結果は異なっている。ターゲットの断面積が小さく、ある程度薄い方が高くなる。理論計算に依れば、3.2節で議論したように、X線フラックスは、ターゲットの断面積や厚さには依存しないはずである。しかし輝度は断面積に反比例して大きくなる。この計測で求めているのは、光子密度であるから、ターゲット断面積が小さいほど高輝度が得られるという理論を良く実証している。空間積分を行えばターゲットの形状には依存しないと考える。

5.2 スペクトル測定

X線スペクトルの測定は必ずしも容易ではない。結晶分光器の利用が最適であるが、“みらくる”のX線ビームは発散角が25 mradと大きいために大きな分散となる。スリットを使用した場合、高エネルギーX線をつくるコンプトン散乱の影響が顕著である。短冊形の結晶を用いることでスリットの使用を回避するような実験を準備中である。しかし、前方での計測は直接光のために不可能であるから、この方法で可能なのはせいぜい10 keVまでである。

NaIシンチレータの使用が簡便であるが、幾つかの注意が必要である。まず恐れるのはパイルアップである。強度の強いX線では複数の光子が同時に検出器に入り、個別のエネルギーが計測できず、足し算された一個の高エネルギーX線としてカウントされることである。従って、計測は入射電流値を極端に下げた行わねばならない。とくに“みらくる”のX線ビームはパルス状であるから、一層低電流値、高繰り返しで行うのが良い。次にNaIの応答関数であるが、コンプトン散乱の後に検出器からエスケープするX線のために低エネルギー側にテールを引くのが特徴である。大きな検出器を用いればこのテールを押さえることができるが、完全にすることは難しい。従って、スペクトルの低エネルギー部分は制動放射そのものとは言えない。デコンボリューションを行うテクニックが

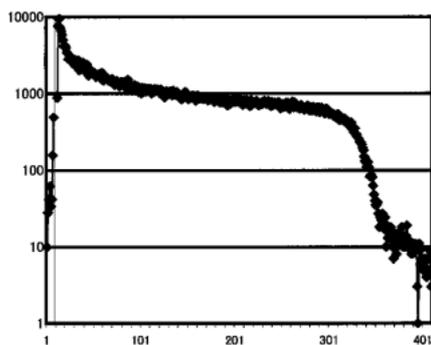


Figure 7. X-ray spectrum measured by 3ϕ NaI. The bremsstrahlung is featured by the flat spectrum up to the electron energy. Since pile up of photons cannot however be rejected although we have extremely decreased the beam current, the spectrum could be shifted toward higher energy.

あるが、絶対強度を議論するのは困難に見える。

$3 \times 3.5''$ NaI を用いて測定をした結果を Fig. 7 に示す。入射電流値を通常の1/1000以下に押さえているが、入射直後の数10 μ 秒は出力が完全に飽和し、計数はできなかった。出力が恢復した後の計数である。電流値はCTで計測できる値ではなく正確にはわからない。繰り返しは30 Hzで、約20分かけて計測した。ターゲットを待避した状態で同じ時間計測したバックグラウンドを差し引いた結果である。19.5 MeVまでフラットに続く制動放射の特徴がよく示されている。しかしながらパイルアップが発生していないと考えるのは不合理であり、スペクトル全体が高エネルギー側にシフトしている可能性が高い。なお、波高分析機の出力は、バンド幅がコンスタントであり、 $\Delta\lambda/\lambda$ がコンスタントであるような結晶分光器とは異なるので注意されたい。

5.3 X線強度

X線強度の絶対測定にはまだ成功していない。電流値

を測定するのは不可能に近く、分光も困難である。可能であるのは、イオンチェンバーによるDOSE量の測定である。測定は、PF-ARの兵頭氏の立ち会いで行われた。PF-ARの医療用ビームラインで使用しているイオンチェンバーを使用して行ったものである。計測結果をTable 2に掲げる。全光量の絶対値を知る意味で、ビームのプロファイルに基づき、積分した値を示す。PF-ARでの計測を参考に掲げるが、ビームの特性があまりにも異なるために、直接比較するのはあまり意味のある事ではない。PF-ARはアンジュレータービームラインであるから、単色に近く、さらには結晶を用いてビームを拡大している。一方、“みらくる”は、20 MeVまでのX線を含む。但し、イオンチェンバーの応答は、30 keVあたりまではX線エネルギーに比例するが、それより高エネルギーでは減衰して100 keV以上では違いが出ない。20 MeV X線のエネルギーデポジットは100 keV相当である。そのような訳でX線の絶対強度はまだ不明である。むしろ、X線強度に関して、我々が直接感じるところは、次節で述べるイメージングを、2 mA, 30 Hz出力時に、約30秒で撮像できるという能力である。先に述べたように、“みらくる”のX線出力は入射器の能力に大きく依存する。20 MeVマイクロトロンは、30 mA, 400 Hzが標準であるから、現在の出力の200倍を出すのは容易なことである。出力は、単にクライストロン電源の容量で決まる。そのような訳で、我々は、0.15秒で非破壊検査もしくは医療診断できる装置を実証できたと言える。

5.4 イメージング実験

X線の発生に成功し、最初に行ったのがイメージング実験である。X線の質を見るために、幅35 mm ϕ 、厚さ0.1 mmのBe窓から出る白色光を、医療用X線フィルム(FUJI-RXU+増感紙 GRENEX-HR-8)を用い、簡易現像するのが最も簡便であった。デンタルフィルムは感度が

Table 2. “みらくる-20X”線出力とSR光比較表

	19 MeV 電子蓄積型高輝度光源	5 GeV SR 光源 PF-AR で20 mA 蓄積時
放射形態	ターゲットからの放射	アンジュレーター放射
放射角度	25 mrad	<1 mrad
スペクトル	数 keV~20 MeV までフラット	33 keV の単色
時間構造	パルス パルス幅 10 μ s 繰り返し Max100 Hz	400 MHz 連続
撮像場所での線量測定結果	空気1気圧電離箱(入射窓10 mm ϕ)使用	
	0.24 R/s/1 mA 入射時/78.5 mm ²	33 R/s/25 mA 蓄積時/78.5 mm ²
最大稼働出力	916 R/s/30 mA 入射時/100 Hz/15 cm ²	135 R/s/25 mA 蓄積時/106 cm ²
最大出力時理論値Brilliance	6.8E+08光子/s/mrad ² /mm ² /0.1% λ at 1 keV~20 MeV	3.0E+15光子/s/mrad ² /mm ² /0.1% λ at 33 keV
全光子数理論値	1.3E+8 光子/s/0.1% λ	3E+7 光子/mrad/s/0.1% λ

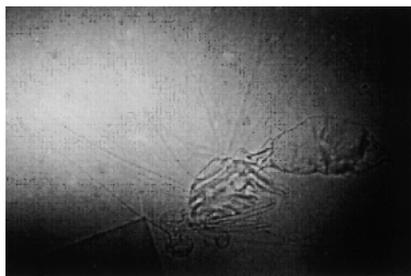


Figure 11. X-ray image of 30 mm long body butterfly. Soft tissue is imaged by the interference.

だということである。“みらくる”は白色性が強いことが既に明らかであるから、散乱光と直進光のエネルギー的な干渉である可能性が高い。干渉機構の理論的な解明は今後の課題である。

X線のBrillianceが高々 10^8 光子/mrad², mm², 0.1% bandで鋭い干渉が起こるのは不思議であると思うかも知れないが、この強度は平均強度である。“みらくる”はパルス光であるために実は、光子密度はもっと高い。主成分が10 μsのパルス幅で有るとするならば、30 Hz 運転であったとして、ピーク強度は、約 10^{12} 光子/mrad², mm², 0.1% bandである。私たちは、Peak Brilliance という概念を導入すべきであると考え。2号機である“みらくる-6X”は、入射電流値を100倍にする予定であるからそのPeak Brillianceは 10^{15} 光子に達する。X線のパルス幅は、ターゲットの厚さにより自由に変えることができるから、目的に応じてPeak Brillianceを変えることができるのが“みらくる”の特徴である。

“みらくる”はSRに比べて格段にハードX線成分を含むが、この干渉性の高さにより、柔らかい物質のイメージングが可能になる。Fig. 11に示したのは、胴体長約30 mmのあげは蝶を密着で撮像したものである。羽の肢脈、触覚、眼球の内部、腹部のひだや球状の物質などが鮮明に見える。よく見るとわかるのは、透過像であることと、物体のエッジが強調されていることである。

5.6 新しいX線ビームの特性

新しいX線発生機構は、放射光も物理的には制動放射であるという意味において、放射光である。光源点の大きさが小さい事とスペクトルが連続である点において類似している。しかしながら、やはり放射光とは様々な点で異なり、放射光ではできないアプリケーションがある。このような光は従来に無かった光である。今後の研究によりさらに新しい特質が明らかになると期待されるが、今日までに明らかになったのは、①非常にフラットな白色光である点(同じくターゲットを用いる回転対陰極X線源やマイクロフォーカスX線源は特性X線である点で異なっている)、②通常の放射光よりハードX線成分を多く含む点、③パルスのためであり、その幅は数μsから数msに渡り可変であ

る点、④低エネルギー電子を使う分、放射角が放射光より広く、“みらくる-20”では25 mradであり、“みらくる-6X”では80 mradある点、⑤高い干渉性が得られる点、等において異質である。干渉性は、入射器のピーク電流値を上げることで達成されるので、この方式により、 10^{18} 光子程度のピーク Brillianceも夢ではない。新型光源の特性を放射光、マイクロフォーカスX線源と比較したのがTable 3である。その他に逆コンプトン散乱を利用した光源もある。単色光を得る上で優れているが、散乱の断面積は古典電子半径の自乗に比例する量であるから大きいとは言えない。また、ハードX線を得るためには、波長1ミクロンの光子を使っても150 MeV程度の電子を必要とするから、装置は必然的に大きなものとなる。今後はさらに様々な光源が出てくると思われるが、それぞれの特性を生かした利用の開発もまた重要となる。

“みらくる”は、新しい質をもつX線源であることと小型である点において、X線利用のパラダイムを変える。筆者が期待しているX線利用をTable 4に掲げる。高エネルギーであること、指向性が高いこと、干渉性が高いことから、位相コントラスト法による癌の診断に適している。高エネルギーであることは、被爆を低減すると期待できる。同じ理由で体内軽元素の異物を診断するのに威力を発揮する。パルスのためであるところから、心臓の鼓動に同期させて冠動脈の診断を行うのに適している。“みらくる-6X”は1パルス、100 ns 当たり40Rの出力を目指しているから、1パルスで診断してお釣りがくる勘定である。“みらくる”はハードX線顕微鏡に適している。光源点を1 μm以下にして、光学素子を用いることなく、X線顕微鏡を実現できる。X線リソグラフィーに適しているの言うまでもない。放射光によるX線リソグラフィーでは、指向性が高すぎるために振動ミラーで露光野を広げるということを行った。“みらくる”ではその必要がない。但しハードX線の影響を除くためにミラーを導入しなければならないかも知れない。むしろ“みらくる”は縮小投影露光に適している。放射光ならば、一旦広げてから縮小するという光学系を用いなければならないが、“みらくる”では不要である。非破壊検査における威力は既に実証されたところである。もちろん装置が小型であるから、現場での検査が可能である。例えば原子炉の検査である。分析利用は放射光と同様である。10 keV 領域でSpring-8をのぐことはないが、光学系を利用して、ビームを収束すれば、Brillianceをさらに10倍程度はあげることができる。タンパク質の結晶構造解析を研究室で手軽に行うことができれば、研究は一層加速されると信じる。

6. おわりに

“みらくる-20”の開発に成功したことで大きく展望が開けた。まず第1に、さらに小型の“みらくる-6X”が文部省科研費基盤研究Sで予算化されたことである。その

Table 3. 各種 X 線源比較表

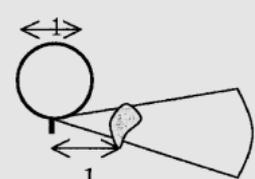
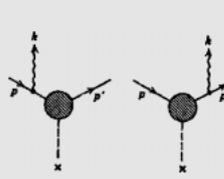
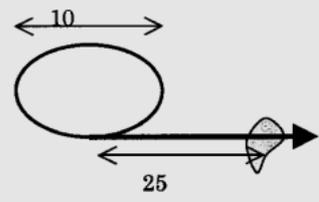
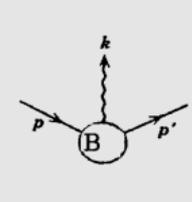
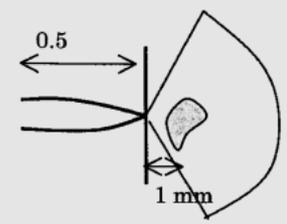
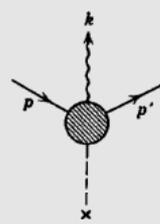
	X 線発生スキーム	発生原理	輝度	特徴
みらくる6X			放射角: 80 mrad 光源点サイズ: 1-100 μm 輝度: 10^{11} 光子/ mm^2 , mrad^2 , 0.1%band 電子エネルギーまで続く白色光 ピーク輝度 10^{15} 光子	テーブルトップ 中性子を発生しない 病院に設置可能 大きな発散角 視野が広い 小さな光源点
放射光			放射角: 1 mrad 光源点サイズ: 10-100 μm 輝度: 10^{15} 光子/ mm^2 , mrad^2 , 0.1%band 臨界波長をもつ白色光 連続光	高輝度 高い指向性 小さな光源点 連続光
マイクロフォーカス			放射角: 4π rad 光源点サイズ: 10 μm 輝度: 10^7 光子/ mm , mrad^2 , 0.1%band 特性 X 線 連続光	小さな光源点 非常に手軽

Table 4. “みらくる”に適したアプリケーションの色々

アプリケーションの種類	筆者が考えるアプリケーションの特徴
1. 癌の診断, 体内軽元素異物の識別	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高い空間分解能により形状から癌の種類を識別できるか? ■ 位相コントラスト法により密度の違いから癌を識別できるか? ■ 視野が広い点が有利。みらくる-6Xでは80 mradある。
2. ハード X 線顕微鏡	<ul style="list-style-type: none"> ■ ターゲット断面を $1\mu\text{m}\phi$ 以下にすることにより光学素子なしで, ハード X 線顕微鏡ができあがる。
3. 冠動脈診断	<ul style="list-style-type: none"> ■ 心臓の鼓動に同期した早い撮像が可能?
4. 癌治療	<ul style="list-style-type: none"> ■ ライナックに比べて高エネルギー X 線成分が多い点で, 効果が異なると思われる。(注1)
5. 非破壊検査	<ul style="list-style-type: none"> ■ 重量物, 構造物の透視が可能。また, エンジン等の診断を期待している。
6. X 線リソグラフィ	<ul style="list-style-type: none"> ■ 視野が広いため, 振動ミラーを必要としない。 ■ 縮小投影露光にも有利と考える。
7. タンパク質構造解析	<ul style="list-style-type: none"> ■ ビーム収束により SR と同様な分析利用を行う
8. トポグラフ, XAFS etc	<ul style="list-style-type: none"> ■ ビーム収束により平行光を作る必要がある。
9. 放射性同位元素消滅処理	<ul style="list-style-type: none"> ■ 高エネルギー X 線により, γ-n 反応を利用。 ■ 核を励起する核構造の研究に利用。

注1) 阪大医学部グループが癌の殺傷力を評価中

Table 5. “みらくる-6X”仕様

シンクロトロン	ヨーク外径 60 cm 軌道半径 165 cm 加速高周波 2.45 GHz 10 kW
入射器	6 MeV マイクロトロン ピーク電流値 100 mA パルス幅 1 μ 秒 繰り返し 400 Hz
放射形態	ターゲットからの放射
放射角度	83 mrad
スペクトル	連続 1 keV~6 MeV
時間構造	パルス パルス幅 100 ns~1 ms で可変 繰り返し Max400 Hz
強度	40R/パルス (200 ns)
撮像時間	1 パルス (200 ns)/フレーム (576 cm^2)
最大出力	16000 R/s
Brilliance	$5.5\text{E}+11$ 光子/s/ $\text{mrad}^2/\text{mm}^2/0.1\%\lambda$
全光子数	$2.5\text{E}+11$ 光子/s/ $0.1\%\lambda$

スペックを **Table 5** に掲げる。リングの外径は60 cm であり, 全体が長さ 1 m のテーブルに載ることになる。みらくる-6X は医学, 産業利用のためのプロト機として開発を行う。電子エネルギーを 6 MeV まで下げるのは, 中性

子を発生しないためと、放射角を80 mrad まで広げるためである。これで装置は通常の部屋に設置可能となり、肺全体の診断が可能となる。入射器の負担が軽減されることで、電流値を100 mA まで増強し、繰り返し数を400 Hz まで上げることが出来るので、X線強度4000 R/s,あるいは 10^{11} 光子/s, 0.1%bsnd を達成できる。

“みらくる-20”を用いて今後幾つかの特徴的なX線アプリケーションを実施するが、“みらくる-6X”の早期の完成に基づき、X線利用アクティビティーを移行した上で、光蓄積リング型レーザーの発振実証研究に移りたい。現在実施しているアプリケーションは、Table 4にある癌の診断と治療及びX線リソグラフィーを中心に勧めている²³⁾。

さて、開発に7年の歳月を費やしたが、この間実に多くの方々のご支援と励ましを受けた。悪戦苦闘を5年間続けると、次第に周りに理解者も増え、研究員を派遣する中小企業が現れ、現在は派遣研究員5名が常駐している。支援企業の㈱光子発生技術研究所、㈱アポロメック、服部ヒーティング工業㈱、㈱フジキン、理学電気㈱、ニチコン㈱に謹んでお礼を申し上げたい。成功の理由としてその背景に、実は、ベンチャー企業を立ち上げることににより研究員と安定的な予算の確保を図ったということがある。私立大学では助教授も助手も技官も居ないのが実状であるから、ベンチャーの立ち上げ無しにこのプロジェクトを成功させることはできなかった。㈱光子発生技術研究所はそのようなベンチャー企業である。今後は“みらくる”を商品化して世に出すという義務が残った。

本プロジェクトは、国家プロジェクトでも大学プロジェクトでも無かった点と、ユーザーに対してオブリゲーションが無かった点で、思い切った開発を実行できたと考えている。小型とはいえ、総額2.5億円の予算を一研究室で獲得できたのは幸運以上のものであった。開発のきっかけになったのは、科学技術振興事業団の“さきがけ研究21”である。高良和武先生、千川純一先生、霜田光一先生のご支援がなければ、この装置は世に出ることがなかった。心からお礼申し上げたい。1/2共鳴入射法の発明者である高山氏がこのプロジェクトに深く関与されたことは言うまでもない。プロジェクトの途中で彼が急逝したことは大きな痛手であった。ここに改めてお礼を申し上げると共に、ご冥福をお祈りする。

思い出すのは、岡崎分子研のUVSORに“みらくる”を運び込み、15 MeV ライナック入射器を借りて入射実験を行ったことである。施設の提供にご厚意を頂いた浜、保坂、山崎の諸氏に深く感謝する。毎週岡崎まででかけ連日深夜に及ぶ実験に参加したのは、4回生の井高、汐崎、伊藤他の諸氏であった。たいへんな苦勞をおかけした。ここに深くお礼申し上げる。

文部省の補助と寄付金で立命館大学に専用の放射線施設ができ、科学技術振興事業団・委託開発部の林氏のご好意

でマイクロトロン入射器が手に入り、岡崎通いの悪夢から抜け出すことができた。ここに関係者に深く感謝の意を表す。その後は比較的穏やかな開発の日々が続いたが、光子発生技研の北澤、遠山、長谷川、及び理学電機の栗林氏のご援助により、かなりの部分を改造した。筆者及び学生の負担が大幅に軽減され、共鳴入射法の理論的側面を強化することができた。その結果が入射の成功と高輝度X線の発生につながった。修士卒業をした、尾崎、阪井、坂の諸氏は、修士論文をよくまとめて下さったので後輩の大きな励みになっていることをお伝えする。そして最後に、マイクロトロンのコミッションは、ロシア Kapitza 物理学研究所の G. D. Bogomolov 博士と A. I. Kleev 博士の協力でなされたことを記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 住友重機械工業が AURORA を10億円という破格の値段で立命館に売却したのは、当時 AURORA グループの責任者であった筆者の決断によるものであった。結果として、AURORA-II の開発が実現し、グループの延命をもたらしたが、最近グループは解散した。OXFORD の HELIOS グループが一足先に解散したのも歴史の流れである。
- 2) 山田廣成：「生命現象解明をめざす超高輝度遠赤外線光源の開発」さきがけ研究21研究報告書（科学技術振興事業団）1997, pp. 1~127.
- 3) 山田廣成：「光蓄積リング型自由電子レーザーの発振実証研究」基盤研究 A 研究成果報告書（研究代表者：山田廣成）1998, pp. 1~175.
- 4) 平成10年度地域コンソーシアム研究開発事業（中小企業創造基盤型）「超小型電子蓄積リングによるハード X 線装置の開発」（新エネルギー・産業技術総合開発機構）2000, pp. 1~66.
- 5) H. Yamada: “Commissioning of AURORA: the smallest synchrotron light source”, J. Vac. Sci. Tech. B8(6) 1628 (1990).
- 6) H. Yamada, Y. Kitazawa¹, Y. Kanai, I. Tohyama¹, T. Ozaki, Y. Sakai, A. I. Kleev² and G. D. Bogomolov²: “Development of the Hard X-ray Source Based on a Tabletop Electron Storage Ring”, Proc. 7th Int. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin, August 20-25, 2000; Nucl. Instrum. Methods, in Phys. Res. A467-468, 122-125 (2001).
- 7) T. Takayama: Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. B24/25 420 (1987).
- 8) H. Yamada: “Photon storage ring” (Japan J. Appl. Phys. 28 (1989) L1665-L1668; “Current Status and Biological Research Ramifications of Photon Storage Ring as a Noble Infrared Laser Source”, Advances in Colloid and Interface Sci. 71-72, 371-392 (1997) : 山田廣成, 霜田光一, 「光蓄積リング型自由電子レーザーの開発と生体研究利用への展望」(応用物理, 65(1), 41-47 (1996).
- 9) N. Takahashi: Nucl. Instrum. Methods, in Phys. Res. B24/24, 425 (1987).
- 10) M. N. Willson: 2nd European Particle Accel. Conf., Nice 1990, p. 295.
- 11) H. Takada et al.: Synchrotron Radiation Facilities in ASIA (Ionics Publishing, Tokyo) 247-262 (1994).
- 12) T. Hosokawa et al.: Synchrotron Radiation Facilities in ASIA (Ionics Publishing, Tokyo) 217-226 (1994).
- 13) H. Yamada: “Present Status of Aurora #1: Potential of Compact SR-ring as a Hard X-ray Source”, Synchrotron Radiation Facilities in ASIA (Ionics Publishing, Tokyo) 227

- 246 (1994); 山田廣成, 堀利匡: 放射光 **6**(4), 421-436 (1991).
- 14) T. Katoh, H. Yamada, F. Sato, Y. Hirano and J. Chikawa: "Solid phase epitaxy with x-ray irradiation using a compact SR source AURORA", J. Vac. Sci. Technol. **A14**(4) (1996).
- 15) LIGA プロセス (日刊工業社) (1998).
- 16) H. Yamada: "Super photon generator using collisions of circulating relativistic electrons and wire targets", Jpn. J. Appl. Phys. **Vol. 35**, L182-L185 (1996).
- 17) H. Yamada: "The smallest Electron Storage Ring for High Intensity Far-Infrared and Hard X-ray Generation", (Journal of Synchrotron Radiation) 1326-1331 (1998) (Invited paper for SRI97); 山田廣成, 「高輝度遠赤外線及びハード X 線発生のための世界最小電子蓄積リングの開発」放射光 **11**(2), 155-165 (1998).
- 18) H. Yamada: "Stimulated emissions in the exact circular electron storage ring" (Invited paper for Micro Bunches Workshop) (AIP CONFERENCE PROCEEDINGS 367) 165-180 (1996).
- 19) Koch and J. W. Motz: Rev. Mod. Phys. **31**, 920 (1959).
- 20) M. Marusita et al.: Synchrotron Radiation Facilities in ASIA (Ionics Publishing, Tokyo) 247-262 (1994).
- 21) M. Kuribayashi: Rigaku Co. Ltd., private communication.
- 22) H. Yamada, invited paper for the Int. Conf. on Synchrotron Radiation in Material Science (SRMS-3), Singapore, 2002.1.20-25; to be published in Nuclear Instruments and Methods.
- 23) 現在, 阪大医学部, 放射線科や学科内で共同研究を進めている. 利用にご興味のある方が居れば, <hironari@se.ritsumei.ac.jp> までご連絡されたい. 利用のための審査委員会等有るわけではないので, 柔軟な対応が可能である.

きいワード

シンクロトロンの小型化はなぜ難しいか?

小型シンクロトロンを作ることは容易ではない。確かにあの巨大な装置を数ミクロンの精度で据え付けるという難しさはない。しかしネックとなるのは電子ビームの入射技術である。

電子ビームの入射は, 人工衛星が地球に帰還する時の問題に似ている。人工衛星では逆噴射を行って減速し, 地球の引力にトラップされる。減速し過ぎると人工衛星は燃え尽きてしまうから適当な角度で大気圏に突入することが重要となる。減速をしなければ地球の引力で加速されて遠心力のために地球から遠ざかる結果となる。宇宙旅行のエネルギーをセーブする方法として使われる。同様に, 静磁場に電子を打ち込めば, 必ずスイングバックして遠ざかる。

電子の場合には自分で逆噴射はできない。通常用いる方法

は電車のポイントを切り替える方法に似ている。パルス電磁石又は高電圧インフレクターを用いてポイントを切り替える訳である。一周して戻った電車は自分でポイントを切り替えて周回軌道に入る。しかしここでも電子には自分でポイントを切り替える力はない。従って, 人間がポイントを切り替えてやらなければならない。磁場又は電場をゼロにするわけである。切り替える速度は, Spring-8 の場合には一周の周回時間が約 $4 \mu\text{s}$ であるから十分に時間がある。実際には, ベータトロン振動の位相を動かすことにより, もう少し時間の余裕を作ることができる。ところが, 軌道長 1 m のリングでは 3 ns である。そのような高速で約 1 kG の磁場をスイッチするのは困難である。小型リングへの入射を可能にしたのが共鳴入射法である。