

SRI '97 特集

## 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

山田 廣成

立命館大学理工学部光工学科\*

### Development of the World Smallest Electron Storage Ring for Ultra High Intensity FIR and Hard X-ray Generation

Hironari YAMADA

Ritsumeikan University, Department of Photonics

In this paper, the status of the world smallest electron storage ring is reported. This ring is designed to provide coherent as well as incoherent emissions of FIR, and hard X-ray emissions by single body 50 MeV storage ring. The FIR emission is forced by the surrounding mirror around the electron orbit. The emission mechanism is rather similar to a free-electron laser. The expected output is the order of 100 W/0.1% band width. Brems-strahlung is used instead of the synchrotron radiation to generate hard x-rays. Since electrons re-circulate and gain energy from accelerating cavity, the expected hard x-ray brightness exceeds 1000 times more than a rotating anode source. We hope that the new source brings new research ramification. A novel research tool named the resonance absorption spectroscopy using ultra-high intensity FIR is also proposed.

#### 1. はじめに

世界最大の放射光施設である SPring-8 が完成した今、放射光コミュニティは新しい時代を迎えた。加速器専門家にとって、その主な役割は終わったのか？ 既存のリングは、さらに改良すべきであるのか？ 小型リングをもっと必要としているのか？ 第4世代光源について検討を始めるべきなのか？ 等を議論すべき時期が来ている。検討を行うための視点は二つある。ユーザーの数が今日及び将来どれだけであるから何台の装置が必要であるという視点と、新しいサイエンスを切り開くためにこれこれの新しい装置が必要であるという視点がある。放射光装置をさらに高性能化したいという要求は、加速器専門家の生来の要求であるが、コミュニティとしてのコンセンサスを必要とする。

将来計画をたてる際に必要なのは、もちろん現状の認識である。現状の認識を、放射光コミュニティだけに閉じて行うのはあまり意味がない。光ビームを発生する全ての装置を比較する必要がある。そこでレーザー、自由電子レ

ーザー、X線管、X線レーザー等を概観したのが図1である。横軸は光子エネルギーである。縦軸で表現したいのは、輝度及びコヒーレンスである。輝度が上がれば一般にコヒーレンスが上がるから同じ軸で表現している。しかし、光源のもう一つの特徴に連続光とパルス光の違いがある。平均強度とピーク強度を同じ軸で扱うことはできない。平均強度を必要とするアプリケーションとピーク強度を必要とするアプリケーションは異なる。一般に分光分析やプロセスに必要なのは平均強度である。多光子吸収やアプリケーションの利用にはパルス光を必要としている。図1は、どちらかといえばピーク強度を示している。自由電子レーザーのピーク強度はメガワットに達するが、平均強度は、ミリワットからワットであり、アンジュレーター光とさほど変わらない。白抜きの枠は既存の装置を示し、塗りつぶした枠は、次世代の装置である。第4世代光源の定義は明らかではないが、おおむねX線レーザーを意味している。指摘したいのは、赤及び緑で塗りつぶした領域である。遠赤外線光源として自由電子レーザーがあるが、大

\* 立命館大学理工学部光工学科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1  
TEL 077-561-2684 FAX 077-561-2663 e-mail hironari@bkc.ritsumei.ac.jp

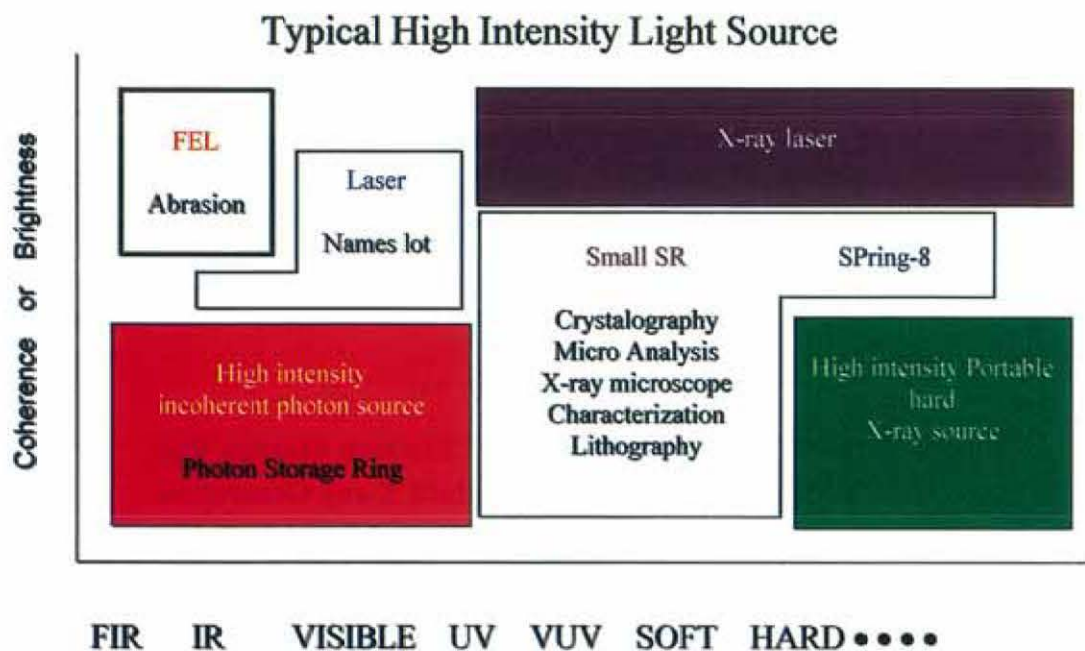


Figure 1. Domains which the existing and proposed light sources occupy in the categories of brightness and wavelength.

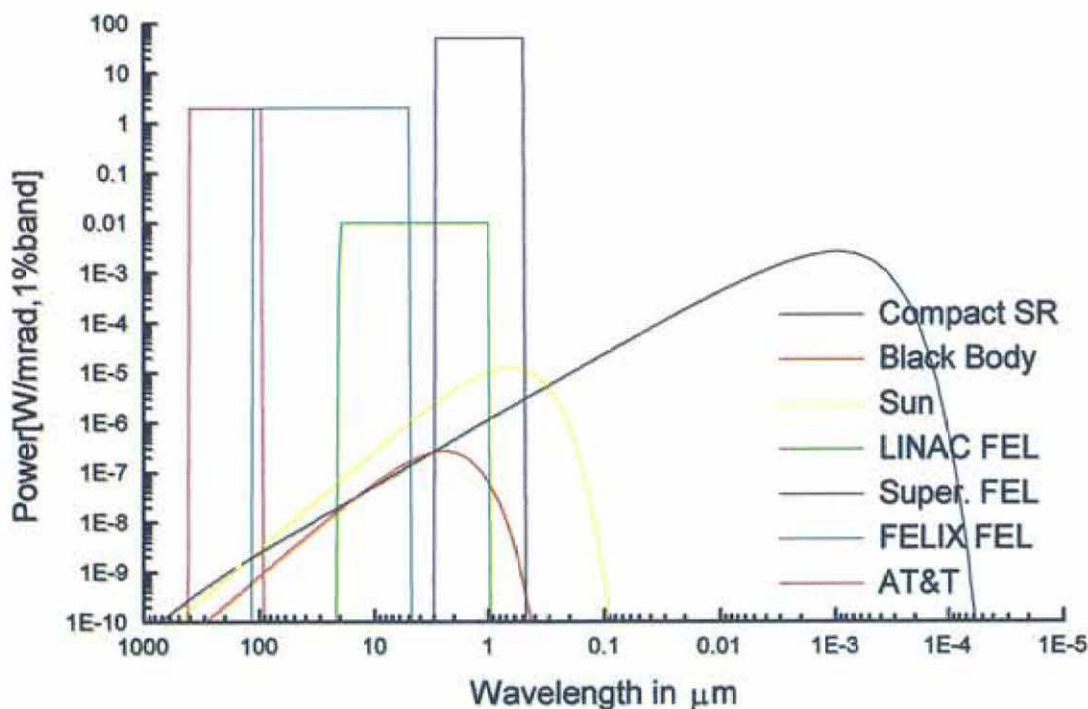


Figure 2. Average power of existing light sources such as a high pressure mercury lamp, the sun, a compact synchrotron light source, and free-electron lasers.

平均パワーを供給する光源はまだない。次に、図2に、小型放射光、高圧水銀ランプ、自由電子レーザーの平均パワーを示す。高圧水銀ランプは、FTIRのほとんど唯一の光源であるが、あと一桁強度の高い光源はこの波長領域の分析に画期的な進歩をもたらすと考えられる。自由電子レー

ザーは、分析用としては強度が強すぎ、プロセス用としては弱すぎる。図1にもどり、ハードX線発生装置であるが、SPring-8は良くも悪くも巨大である。SPring-8ほどの輝度が無くても、生産や医療現場で利用できる小型高輝度ハードX線光源は利用者の枠を拡大する。緑の領域が

検討されても良い。

筆者はこのような独断と偏見にもとづき、軌道半径15 cmの世界最小電子蓄積リングを用いて高輝度遠赤外線(FIR)とハードX線を発生するプロジェクトを推進している。光蓄積リングと呼ぶ新型光源を提唱して8年、装置はやっと本体を完成して入射実験を開始し、97年のクリスマスイブにビームの周回を確認した。

本装置の開発は、いろいろな点で従来の光源開発と趣を異にしている。加速器は、国や大企業の研究所が複数のスタッフで開発するのが従来の例であるが、小型とはいえ億円規模の装置を私立大学の一研究室で、教授1人と学生で開発した例はあまりない。また、特定の企業に全体の開発委託をしたのではなく、設計したコンポーネントを個別メーカーに発注し、試験・組立を全て自前で行っている。予算とはいえば、大学からの援助はゼロにひとしく、科学技術振興事業団の「さきがけ研究21」(93~96年)と文部省科研費補助・基盤研究A(95~97年)でまかなわれた。「さきがけ研究21」は、プロジェクトを始動する大きな引き金になった。予算の獲得は、各方面に奔走したが、高輝度遠赤外線を何に使うのですかという疑問の前に5年間をむなしく費やした経緯がある。プロジェクトを立ち上げるまでの筆者の仕事は、従って、遠赤外線の利用を調査検討する事であった。しかし、高輝度の遠赤外線利用は例が無く、従来の遠赤外線分光分析の延長を予測できても、そのマーケットは規模が小さく、従って、開発に自らリスクを負うような企業は現れなかった。

光蓄積リングを生命現象の解明に用いるという筆者の提案は、そのような中で、プロジェクトにしっかりとした動機付けと意義をあたえるために創り出したものである。ただ単に光蓄積リングのアイデアが斬新で、日本のオリジナルであるという理由だけで開発する場合、それは遊びに終わるのではないかという危惧と、科研費補助金だけでは開発を完成するのに十分ではなく、もっと大きな支援を必要としていることによる。

生命現象の解明は、21世紀の科学の中心課題であり、光蓄積リングはそのために多大な貢献をしようと確信している。それは、単に開発を正当化するというたぐいの方ではなく、筆者のまさに興味を中心である。余談であるが、筆者のもとの専門は、加速器物理ではなく原子核の $\gamma$ 線核分光である。遠赤外線分光ではないのだが、異分野の知識の融合が新しいサイエンスを進展させると確信している。見方によっては、高輝度遠赤外線利用の専門家はまだいないから、これから新しい研究分野をつくらうというわけである。

そのようなわけで、本稿は、光蓄積リング開発の現状を述べるに止まらず、利用に関しても展望を述べたい。

## 2. 高輝度遠赤外線光源の開発

### 2.1 高輝度遠赤外線の科学<sup>1,2)</sup>

光の全波長領域を通して、遠赤外線ほど我々の身近にある光はないにもかかわらず、その物質との相互作用は未知に包まれている。生命活動は、熱、即ち赤外・遠赤外線の吸収・発生をともなう。ところが、生命活動の遠赤外線波長依存性はほとんど調べられていない。それは、単一波長の高輝度遠赤外線光源がないためである。遠赤外線のソースはたくさんあるが、単一波長を取り出した場合、それは、マイクロワットに満たないために、分光は長時間を要し、ダイナミクスの研究は今日まで不可能であった。測定に際しては、対象以外からの遠赤外線雑音が顕著で、目的の信号はかき消される。遠赤外線領域では高感度検出器が無く、レスポンスが遅いのも問題である。このような現状のために、この分野は、今日までサイエンスとして取り上げることができなかった。

必要なのは、生体のダイナミクス研究である。X線や中性子を用いてタンパク質の構造は明らかにされてきている。しかし、我々は、生命が何かを知らない。それは生命のダイナミクスを知らないからである。生体高分子を分解しても生命が何かを理解することはできない。我々が明らかにしなければならないのは、生体高分子の振る舞いである。人間を知るためには、人間の行動原理を明らかにしなければならないように、我々は、DNAの行動原理を明らかにしなければならない。分解から統合へ。これが生物学の新しい潮流に思われる。統合された個体の機能は、部分の単純な和ではあり得ない。

生体高分子のダイナミクスを明らかにするには、生体高分子と同程度の波長の光が必要である。Fleming and P. G. Wolynesの表<sup>3)</sup>によれば、分子振動の緩和は、0.1~10 ps、分子振動の周期は、10~100 fs(波長にして3~30  $\mu\text{m}$ )、分子の回転は、3 p~100 ms(0.3~300 mm)タンパク質の内部運動は、ps以上、光合成におけるエネルギー伝搬時間は、100 fs、光合成の緩和時間は、3.5 ps、等々であるから、生体のダイナミクスは、波長にして数 $\mu\text{m}$ から数100  $\mu\text{m}$ で起きており、それは、光蓄積リングの波長領域である。

生命体は、タンパク質の驚くほどわずかな状態変化により、各機能を司っている。エネルギーの違いが非常にわずかであるために“non-radiative”遷移と呼ばれているが<sup>4)</sup>、即ちそのような遷移を観測することに今日まで成功していないということである。研究方法としては、第一にそのような遷移を観測するための検出器を開発することであるが、これは大変困難である。そこで筆者が提唱するのは、そのような遷移を外的に起こさせ、生体機能の変化を観測するという手法である。原子核物理では、よく原子核に電子や核子をぶつけて原子核を人為的に破壊または励起してやる。そして、残留原子核が $\gamma$ 線を放出して基底状態に遷移するのを観測して原子核の構造やダイナミクスを明らか

にする。電子を用いて共鳴吸収や散乱を起こさせることもある。このときには入射エネルギーを共鳴エネルギーにそろえて照射して調べたい状態だけを励起する。我々の新しい分析手段は、遠赤外線共鳴吸収法と名付けるのが良い。必要なのは、高輝度の遠赤外線光源である。このための光源は、あまりピークパワーが強すぎでは困る。多光子反応が起きては困るし、生体にダメージを与えても困るからである。しかし、反応イベント数を増やすために光子数は多い方が良い。即ち連続出力が良い。光蓄積リングは将に打ってつけである。光蓄積リングは、自由電子レーザーと異なり、2.45 GHzのCW出力を特徴としている。むしろ、レーザー発振をさせずに、放射光を集めるだけのモードで利用するのが適しているかも知れないと考えている。

Raman分光を行えばよいではないかという意見がある。しかし、短波長の光子は、ほとんど全ての分子状態を励起し、あまり選択性はない。複数の状態が励起した場合、状態を同定することが困難であり、状態の意味を理解することができない<sup>5)</sup>。状態の意味を理解することが我々の目的である。

生命活動を語るとき、水が一つのキーワードである。水は単にH<sub>2</sub>Oではなく、分子間のネットワーク構造を持っている。このネットワーク構造の違いが、生命活動に著しい影響を与えると考えられている<sup>6)</sup>。生体高分子の機能は、単独であるわけではなく、水との相互作用を通じて行われる。水分子は生体高分子と結合し、生体高分子の一部として機能している。水のネットワーク構造は、生体高分子に結合した結合水と自由水では大きく異なっている。水を含んだ生体高分子の研究こそが生命現象研究に不可欠であるが、今日のところ皆無といってよい。前節で述べた遠赤外線共鳴吸収法は、水のネットワーク構造を知り、生体高分子における水の役割を知る上で特に有意義であると考えられる。水には非常に多くの遠赤外線吸収ラインがあるために、必要とされる遠赤外線のバンド幅は、狭ければ狭いほど良い。光蓄積リングは、高輝度であるが故に、バンド幅を絞るにも好都合である。この場合には、もちろん光蓄積リングのレーザー発振モードを使用するのが良い。

光蓄積リング利用のバラ色の展望はさらに広がる。筆者が提唱したいのは、医学利用と熱化学合成への利用である。医学利用では、動脈硬化の治療と癌治療をあげたい。自由電子レーザーで癌治療ができるという宣伝がだいぶ以前に打ち上げられた。ガン細胞だけを波長を選択してたたくというわけである。筆者は、これに疑問を持っている。自由電子レーザーのピークパワーはあまりに大きく、全ての物質に多光子吸収によるアブレーションを起こさせて吹き飛ばすから、癌だけをたたくわけには行かないと考える。ならば、ピークパワーを下げれば良いではないかと思われるが、下げればレーザー発振が止まる。パワーを稼ぐには繰り返しを上げなければならないが、超伝導ライナックを使って1 kHzで運転するのが限界である<sup>7)</sup>。光蓄積リ

ングによる癌治療は、むしろ温熱療法に近いものである。ガン細胞は、正常細胞より少し熱に弱い。ガン細胞に特定の遠赤外線を吸収させて徐々に加熱する。いわばサウナ療法である。皮膚や正常細胞を透過するような遠赤外線が発見できれば成功する。この場合にも、水による吸収は非常に大きいわけであるから、なるべく光蓄積リングのバンド幅を狭くするのが鍵である。動脈硬化の治療も同様である。血管中のコレステロールを溶かすわけであるが、これも、サウナである。特定の波長でサウナをすると特に動脈硬化に利くというわけである。光蓄積リングサウナである。

石油合成化学で使われる熱化学反応であるが、熱浴の温度を微妙にコントロールして収率を最適化している。しかし、熱の分布はボルツマン分布であるから、熱化学反応は可逆反応である。従って、熱化学反応の収率は余り高いものではない。合成化学ではもっぱら触媒をさがすことが仕事である。これを特定の遠赤外線で行わせてはどうだろうか。特定の遠赤外線ですべて反応を非可逆に行わせることができれば、収率はもっと高くなると思われる。いくつかの反応プロセスを省略できるかもしれない。多分、希少物質の生産に役立つであろう。

以上が光蓄積リング利用のおよその展望であるが、特に新しい研究分野の創設につながるテーマに限定して述べた。従来の分光に適用すれば、計測時間を短縮し、時間分解型の測定ができることも期待できる。赤外線CTなどへの適用も興味深い。また、本稿では特に光蓄積リングの可視光や紫外線の利用については述べなかった。

## 2.2 世界最小電子蓄積リングの開発<sup>1,2,8,9)</sup>

光蓄積リングに使用する世界最小電子蓄積リングは、外径1.2 mの単体円型常電導磁石で作られている(図3)。軌道半径は、0.156 mで最大50 MeV電子の蓄積が可能である。2/3共鳴入射を採用し、入射エネルギーは、自由に変えることができる。現在は、分子研UVSORのライナックを使用するために15 MeVに設定している。

リングは、97年9月までにほとんどの要素の製作と単体テストを完了し、岡崎分子研の入射器室にて組立を開始して11月までに完成した。1ターンコイルであるパータベータの4500 A励磁と加速空洞への平均500 Wパワー投入に成功し、入射実験を開始した。クリスマスイブには少なくとも100 μsの間、電子が周回するのを確認した。蓄積電流値はあきらかではないが、遠赤外線モニターはピーク値で300 mW以上を示している。パータベータによる電子のキャプチャーを確認したわけである。高周波加速は、ランプアップ時の反射の調整にまだ成功していない。

低エネルギーリングの場合、放射光を直接観測できないのが、やっかいな問題である。また、完全円形リングでは、CTを挿入することもできない。我々は、光電子増倍管を使用した、放射光を直接測るのではなく、壁に衝突

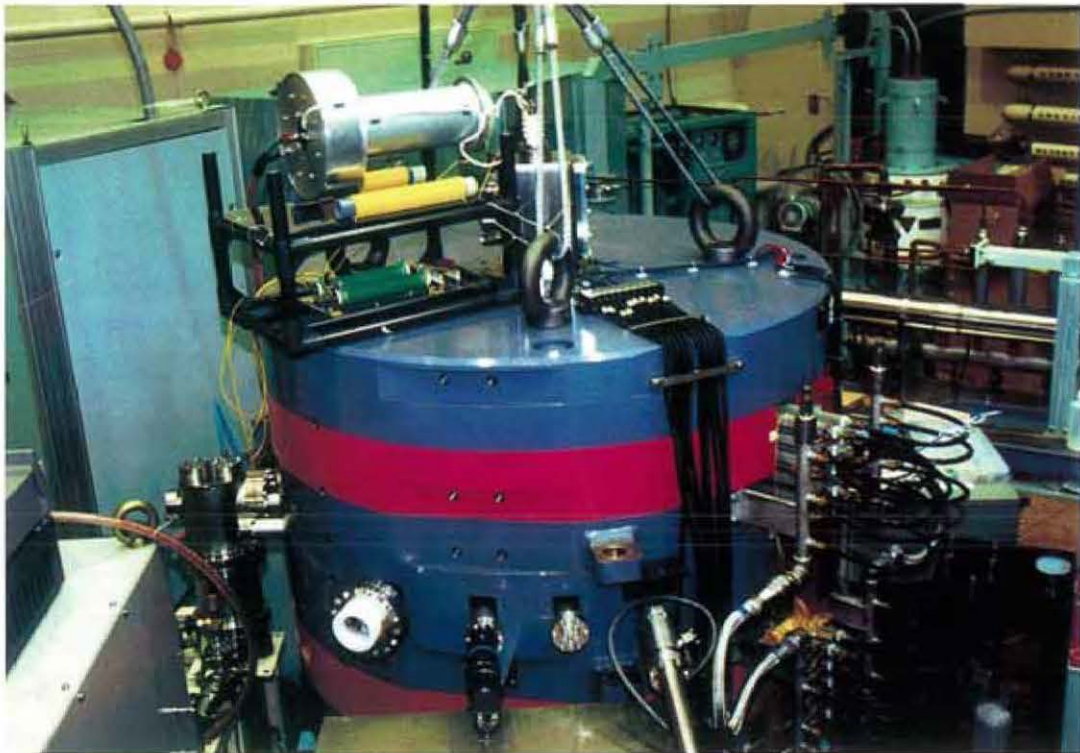


Figure 3. Over view of the world smallest electron storage ring. On the top of the magnet pulse compressor for the perturbation is seen. The cylindrical magnet is 1.2 m wide and 1.5 m high.

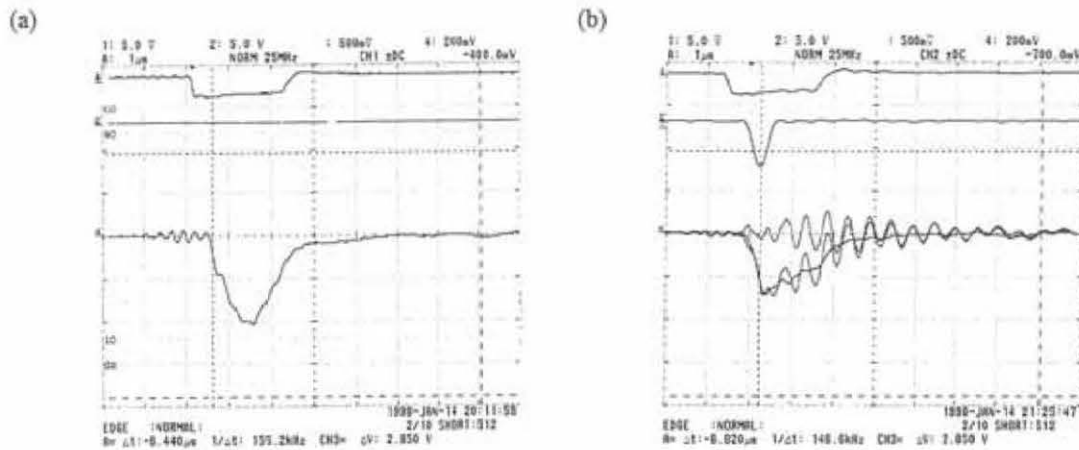


Figure 4. Output of digital oscilloscope. The top line is a current monitor signal at the exit of linac, the second is the perturbation signal, and the third is the photo-multiplier signal placed at one of the port of the ring. (a) is without perturbation, and (b) is with perturbation. In (b) noise signal originated from the perturbation is suppressed. Gamma ray signals which is generated from the electron beam hitting the chamber wall are suppressed in (b) when the perturbation is fired. The obtained injection efficiency is about 30%.

した電子が発生する制動放射を観測して電子ビームの周回を確認した。図4はデジタルオシロで採取した各種モニター出力である。一番上がライナックのビーム波形、2番目はパータベータのパルス波形で、(a)はパータベータを励磁しないとき、(b)が励磁したときで、幅約0.4  $\mu$ sとなる。一番下が、光電子増倍管(PM)の出力波形である。PMは、主磁石ヨークのつくるチャンネルから覗いているの

で、ある立体角の範囲で発生する $\gamma$ 線を見ている。(a)では、ほとんどの入射電子が直ちに消滅して $\gamma$ 線を発生したわけである。消滅しなかった電子を観測することはこの方法ではできない。パータベータを励磁すると(b)のように変わる。PM波形にはパータベータのノイズが載るためにこれを差し引いた波形を示している。(b)は、(a)のPM波形の頭が切れた形になっている。しかもかなりシャープ

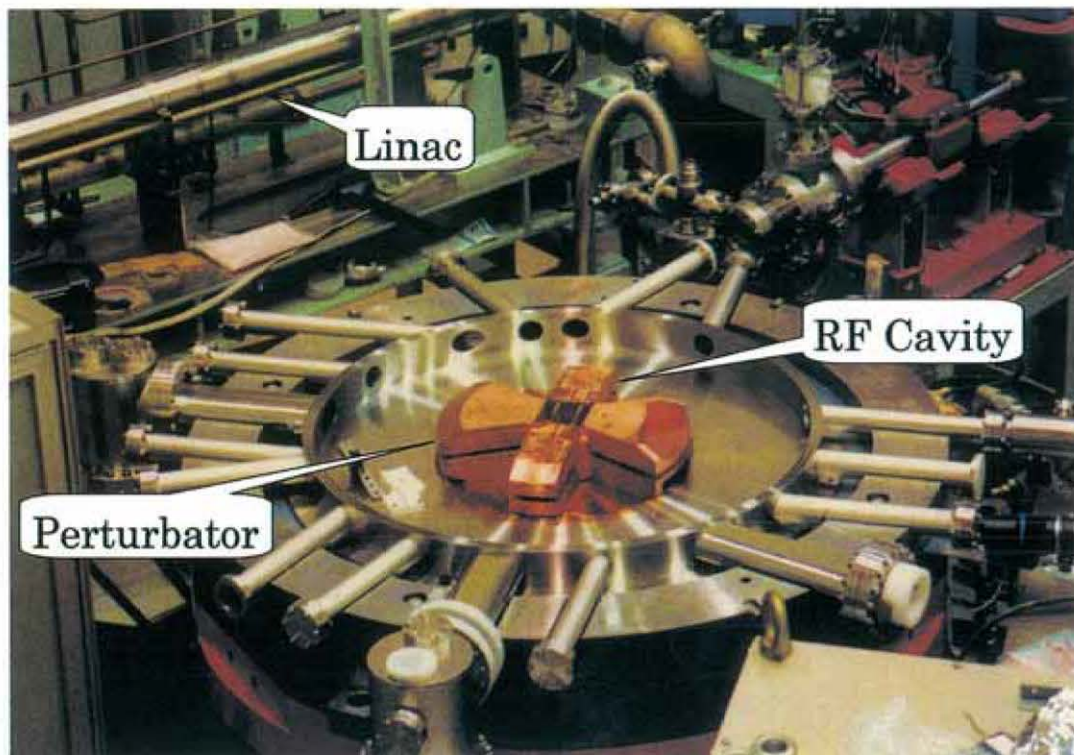


Figure 5. Inside view of the vacuum chamber in the early stage.

に切れている。パータベータの励磁で入射電子のかなりの部分が消滅しなかったわけである。消滅しなかった電子は、平衡軌道を周回していると言って良い。していなければ遅れて $\gamma$ 線が発生して良いが、このタイムレンジでは発生していない。即ち(a)と(b)の差が入射効率を示している。約30%である。これは、ライナックのビーム特性を考えるならばかなりの高率である。さらに詳細を見ると、入射は、パータベータパルスのピークを過ぎたところから始まっている。これは、全く共鳴入射の理論道理である。

真空槽内の写真を図5に示す。パータベータを2台設置しているが、1台は外側の電子を外側へ、1台は内側の電子を外側へキックしている。パルス電源は、sin半波を生成し、そのピーク電流は4500 A、電圧は30 kV、幅は4  $\mu$ sである。我々は、これをさらに磁気圧縮(図1の磁石の上に乗っているのがそれである)してパルス幅を0.4  $\mu$ sにして使用している。同じ単体円形リングであるAURORA<sup>10,11)</sup>の場合は、周長が3 mあるために、パルス幅は1  $\mu$ sで十分であるが、光蓄積リングでは、理想的には0.2  $\mu$ s程度にしたい。

同じく図5の真空槽には、加速空洞が2台設置してある。加速空洞もパータベータも、放射光を外へ取り出すために、軌道面上で側面全体が開いている。加速空洞は、特異な形をしているが、基本的にはリエントラント型であり、TM01モードで使用している。側面が開いているためにパワーが漏れるという問題はあるが、モードに問題はない。加速周波数は、ハーモニクス8に対して2.45 GHz

で、ソースとしてCWマグネトロンを使用している。2台の加速空洞へパワーをT型同軸管で分岐して投入している。2台の加速空洞はカップリングしている状態であるために、2台の固有周波数は、正確に一致していなければならない点と、同軸管のカップリングも正確に等しくしなければならないが、我々はこの調整方法を見だし、パワーの投入に成功した。

一方、放射光を蓄積するためのミラーは、アルミ製とSiC製を準備している。いずれも一体から削り出して製作している。ミラーは、遠赤外線に対してさほどの表面精度を要求しないが、形状精度は1  $\mu$ m以下を必要としている。必要形状精度については、以下のように試算している<sup>2)</sup>。

ミラーの変形による光の位相のずれを $\Delta\lambda$ とすると、変形の最大振幅を $\Delta_r$ として、次のように書くことができる、

$$\Delta\lambda = \sqrt{\sum_n (\Delta\lambda_n)^2} = \frac{2\rho^2}{R_0^2} \Delta_r \sqrt{\sum_n \left( \frac{\sin(n\theta/2\pi q)}{\sin(n\theta)} \right)^2}$$

ここで $\Delta\lambda_n$ は反射毎に起こる位相のずれで、nは反射の回数である。 $\rho$ は軌道半径、 $R_0$ は平均ミラー半径である。 $q$ は正数であるが、変形の周期を成分に分けて記述したものである。これは、製作に関わるシステムティックな量であるから実験的に求めることができる。従って、変形 $\Delta R_m$ は、次のような周期関数として表される、

$$\Delta R_m = \Delta_r \sin\left(\frac{\theta}{2\pi q}\right)$$

波長30  $\mu\text{m}$  のレーザー発振は、100回ほどの相互作用で起こるので、その間の位相のずれを10%以内に押さえるためには、変形の最大振幅を  $\Delta_r = \pm 0.1 \mu\text{m}$  に押さえれば良いことが分かる。今回の SiC ミラーの製作では、 $q=2$  の成分が1  $\mu\text{m}$  を越えたが、高次の成分は、おおむね0.1  $\mu\text{m}$  に押さえることができた。低次の変形は、機械的に矯正できると考えている。

さて、今後の予定であるが、高周波加速がうまく行けば、年度内にもミラーを設置して光の蓄積を行う。しかし、我々は、マグネトロンでは無理であると考えており、既にクライストロンを手配している。また、分子研の15 MeV ライナックは、エネルギーの分散が非常に大きく、従って入射効率を期待できないという問題がある。15 MeV という値も少々低い。ダンピング時間は3 s である。22 MeV では1 s、50 MeV では100 ms になる。

立命館大学では、既に光蓄積リングのための新しい放射線遮蔽施設を準備しており、98年の早い時期にリングを移設することを考えている。入射器には、22 MeV のマイクロトロンを予定しており、これは、ロシアの P. L. Kapitza 物理学研究所との共同で推進しようとしている。従って本格的なレーザー発振は、それ以後になる見込みである。

### 2.3 光蓄積リングの出力<sup>2,8)</sup>

ハード X 線の発生は次章に回すとして、可視から遠赤外線領域で、光蓄積リングが発生する様々なモードの光についてこの章で説明する。

光蓄積リングの出力には3つのモードがある。最大50 MeV 電子の臨界波長は、600 nm であるから、紫外線領域までの利用が可能である。放射光であるから、連続スペクトルを持ち、2.45 GHz の CW 光である。超小型リングで、高い加速周波数を用いているところから、バンチの長さが0.1 mm のオーダーになるのが特徴である。これは0.3 ps に対応しており、光蓄積リングを時間分解測定に使う道を開く。但し、くり返し数が多いために間引きをする必要がある。

第2のモードは、マイクロバンチから発生するコヒーレント放射光である。波長0.1 mm 以上で顕著となる。

以上の光は、単に放射光として利用することも可能であるが、円形ミラーにより全ての光を集めて1ヶ所から取り出すことにより、その強度は、100倍近くになる。波長当たり平均 mW の光は、遠赤外線はもちろんのこと、紫外線の利用も有意義である。

第3のモードは、干渉光の発生である。ミラーの半径を電子軌道半径に対して特定の値に設定すると放射光同士が干渉して、自然干渉光が発生する。続いて干渉光は電子

ビームと相互作用して、電子から光の強制誘導放出、即ち、レーザー発振が起こる。これが光蓄積リングの原理である。この原理の証明がそもそもの光蓄積リング開発の動機である。

レーザー発振は、まだ実証していないが、成功した場合、理論的な出力は遠赤外線領域で KW から MW に達する。もちろんそのエネルギーはリングの加速空洞と入射器から供給されるので、それだけのパワーを投入しなければ発生できない。現在の装置では、加速空洞に投入しようとしているパワーは1 KW であるから、レーザーになるのは100 W 程度である。そこで、本稿では、自然干渉光の強度についてその計算値を示す。自然干渉光の発生は、なんら疑いの余地は無いところであり、蓄積電流値に比例する。

自然干渉光の計算は、アンジュレータからの自発放射光に似ている。スペクトルは次の式で与えられる<sup>1,8)</sup>。

$$P(\lambda) d\Omega d\lambda = p(\lambda) h N_e \{1 + [N_e - 1] F(\lambda)\} G(\lambda) d\Omega d\lambda, \\ \approx p(\lambda) h N_e \{1 + N_e F(\lambda)\} G(\lambda) d\Omega d\lambda \quad (1)$$

ここに  $p(\lambda)$  は、電子1個の発生する放射光パワーであり、 $h$  は、プランク定数、 $N_e$  はバンチ内の電子数、従って  $h N_e$  が電流値を与え、 $p(\lambda) h N_e$  が通常の放射光パワーとなる。この式では、コヒーレント放射光も考慮している。 $F(\lambda)$  は、ホームファクターであり、電子バンチの進行方向の分布をフーリエ変換して得られる。分布がガウス分布の場合には、

$$F(\lambda) = \exp\{-2\pi\sigma_L/\lambda\}^2 \quad (2)$$

となるが、 $\sigma_L$  はバンチの RMS 長である。 $G(\lambda)$  が干渉の大きさを示す。干渉の大きさは、円形ミラーの反射率  $f$  と干渉の回数  $N_b$  に依存する。

$$G(\lambda) = \left[ \sum_r^{N_b} (\sqrt{f})^r \left\{ \frac{\sin(r\pi\lambda/\lambda_R)}{\sin(\pi\lambda/\lambda_R)} \right\} \right]^2 \\ \approx \left[ \sum_r^{N_b} (\sqrt{f})^r \right]^2 \left\{ \frac{\sin(\hat{N}\pi\lambda/\lambda_R)}{\sin(\pi\lambda/\lambda_R)} \right\}^2 \\ \approx [1/(1-\sqrt{f})]^2 \delta(\lambda/\lambda_R) \quad (N_b = \infty) \quad (3)$$

$\hat{N}$  は平均の反射回数である。コヒーレント放射光は、従って、電子数  $N_e$  の自乗に比例し、およそ反射回数の自乗に比例する。

干渉を起こす共鳴波長  $\lambda_R$  は、次の式で与えられる。

$$\left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_R = 2(\theta + n\pi/h) \rho / \beta_0 - (2\rho \cos \alpha \tan \theta), \quad (5)$$

$\rho$  は軌道半径、 $m$  は高調波の次数、 $\theta$  はミラー半径  $R_m$  を

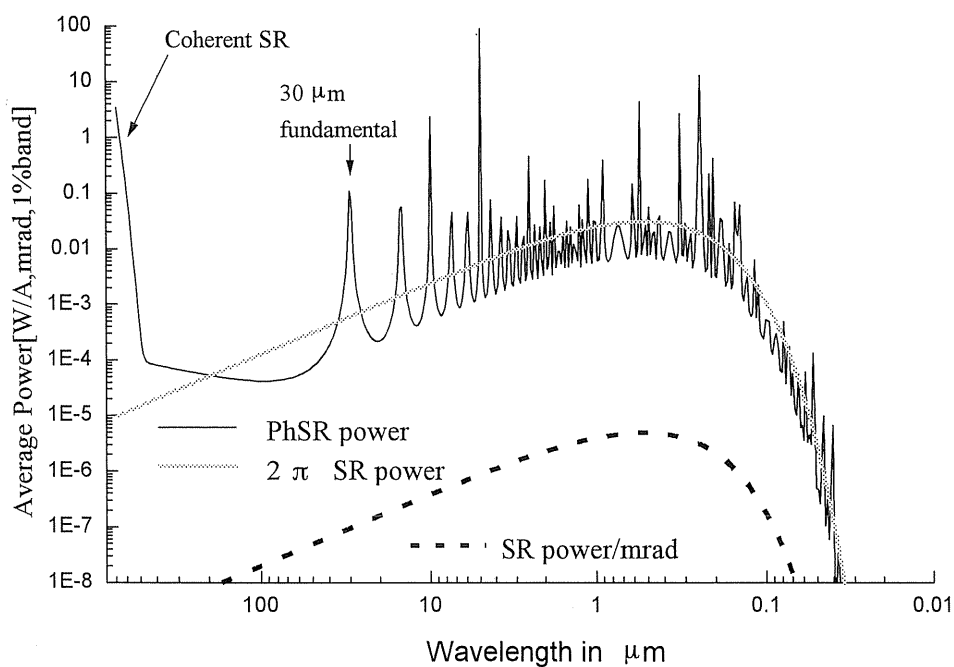


Figure 6. Calculated spontaneous coherent radiation spectrum at 1 A beam current.

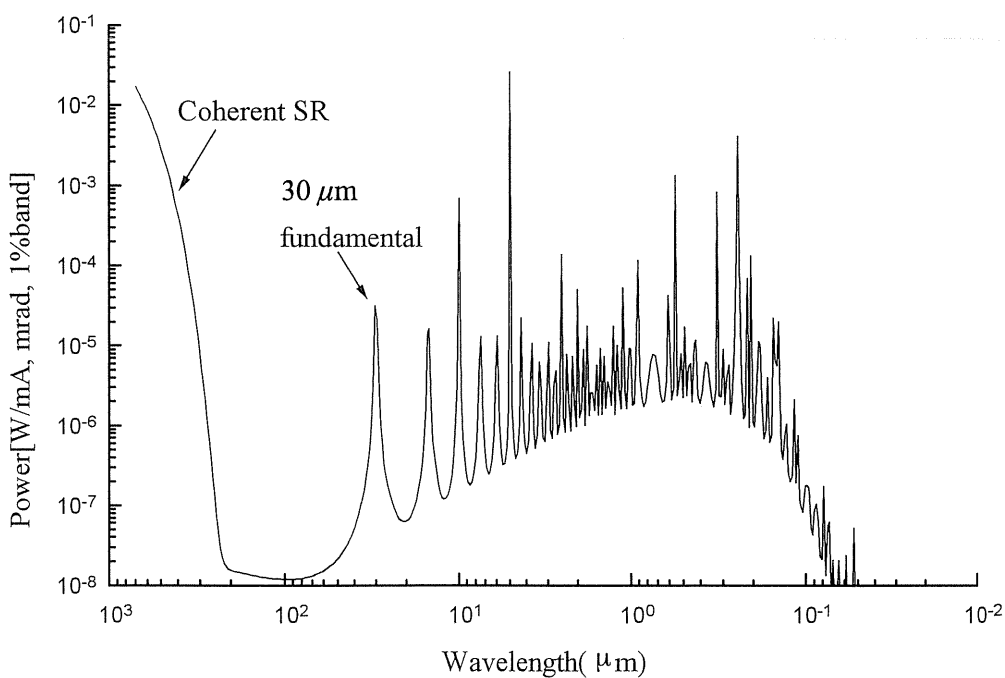


Figure 7. Calculated spontaneous coherent radiation spectrum at 1 mA beam current.

用いて次の関係式で与えられる。

$$R_m = \rho \cos \alpha / \cos \theta. \quad (6)$$

図6が式(1)に基づいて計算した放射光と自発干渉光のスペクトルである。表示は、W/mrad, 1% band, Aで与えている。電子エネルギー50 MeVの通常の放射光は、臨界

波長が0.6 μmで最大パワーがμWとなる(SR power)。これをミラーで集めてポートから取り出すと最大値は10 mWを越える(2πSR power)。なお反射率を90%とし、平均反射回数を100回としている。干渉光の出力(PhSR power)は、基本波を30 μmに設定している。たくさんの高調波が現れるが、実際には、ミラーの精度からして、10 μm以下で高調波は急激に減衰すると思われる。コヒ



ーレント放射光は、波長0.5 mm 以下で顕著となる。これは、1 A 蓄積時にパンチ長が、イントラビーム散乱のために0.5 mm になるという計算に基づいている。長波長でコヒーレント放射光を活用したい場合には、むしろ蓄積電流値を下げて、利用するのが良い。蓄積電流を1 mA とした時の例を、図7に掲げる。平均100 mW のコヒーレント放射光はむしろ有意義である。

### 3. ハード X 線発生実験<sup>12,13)</sup>

光の発生は、量子力学的なものである。発生する光の特性は、偏向磁石によるか電場によるか核子の Coulomb 力によるかに関わらず、エネルギーと運動量保存則で決まる。X 線管の制動放射は、ほとんど  $4\pi$  方向に発生するが、これも実は  $1/\gamma$  法則に従っている。従って、電子の入射エネルギーが高い場合には、放射光と同様に前方に鋭く放射される。現在も X 線利用の大方を占めるこの X 線管は、放射光に比べてはるかに簡単にハード X 線を発生することができる。それは、原子核の作るクーロン場が、その近傍では、偏向磁石よりもはるかに大きな偏向を電子にもたらすからである。電子エネルギーがそのまま X 線の最大エネルギーに変換される。

電子蓄積リングの中で電子軌道上にターゲットを置いて制動放射を発生させるという考えは、放射が鋭く前方にフォーカスするという利点があるが不必要な高エネルギー  $\gamma$  線を出すという問題がある。一方、放射光は軌道の全周にわたって発生するためにその大部分が使われないで捨てられているという不合理があるのに対し、制動放射は指定した場所のみから発生できるという利点がある。従って、ターゲットを細くした場合、光ビームのプリリアンスは、ターゲットの電子ビームが当たる面積で決まるから、ターゲットを小さくすればプリリアンスはいくらでも大きくできる。例えば  $10 \mu\text{m}$  の光源サイズは、Spring-8 を凌ぐ。以上を検討すると、電子を繰り返し利用できれば、小型の高輝度ハード X 線源が実現できる。従って、電子がどのくらい周回するかがこのアイデアの鍵である。電子は一度の衝突でなくなるから蓄積リングを使う意味は無いと誰しも考えるかも知れない。ライナックを用いて厚いターゲットを使用するのと同じであるとも考えるかも知れない。しかし、厚いターゲットでは、多重散乱が起きて電子ビームは拡散してしまうので細いビームを作ることはできない。また、電子が周回すれば、加速空洞が繰り返しエネルギーを与える点も異なっている。重要な点は、薄くかつ細いターゲットを使うということである。計算によれば、 $10 \mu\text{m}$  程度の細線を用いるとき、ミリ秒オーダーの寿命を持つことが明らかになっている。衝突でエネルギーを十分に残した電子は、高周波加速によりエネルギーを回復し、ダンピングを行って中心軌道に集まり、再びターゲットをヒットして制動放射を発生する。

最近我々は、この予測を実証するために、物性研 SOR

リングを用いて、制動放射発生実験を行った。物性研 SOR はその直後にシャットダウンされたために、この実験は物性研 SOR リングの最後を飾る実験となった。

実験は、 $10 \mu\text{m}\phi$  の Ni ワイヤまたは、 $10 \mu\text{m}$  厚  $\times 3 \text{ mm}$  幅の Be フィルムを電子軌道に挿入して、蓄積電流値、X 線ビームプロファイル、X 線スペクトル等を観測した。スペクトル測定は、1 mm 厚の Al ウィンドウを通して NaI 検出器で行った。蓄積電流値は、放射光を光電子変換して増幅し、それをデジタルオシロで観測した。SOR リングは、入射を 300 MeV で行うが、実験は、300 MeV で入射しながら行うか、もしくは蓄積状態でターゲットを挿入して行った。実験は、蓄積電子エネルギー 380 と 500 MeV でも行った。

実験結果は、ターゲットを電子ビームのどの位置に挿入するかで大きく異なる。ビームのエッジに置けば、電子ビームはかなり長時間周回続ける。中心に入れればすぐになくなる。図8は、300 MeV 蓄積時にターゲットを定速度で挿入して中心で止めたときの蓄積電流値の時間変化である。ターゲットがビームのエッジから中心に到達するのに要した時間は、0.1秒である。観測した寿命は約2秒である。結果は RF パワーで異なり、95 W のときに、28 W と比べて顕著な寿命の伸長が観測される。263 と 549 W では、寿命の伸長は長くなっているように見えるが直線的ではなく飽和しているように見える。この実験は、ターゲットの挿入停止を人的に行っているの、正確とは言い難いが、確かに RF パワー依存性があると結論できる。

この結果は、ターゲットを挿入しても電子が周回し、しかも RF 空洞からエネルギーをもらっていることを示している。2秒という寿命はかなり長時間である。もし電子が一回の衝突で全てストップしたとしたら、発生する光子の数は周回電子数に比例し、それは、 $10^{10}$  のオーダーである。しかし、1秒の寿命が有るとすると、電子ビームはタ

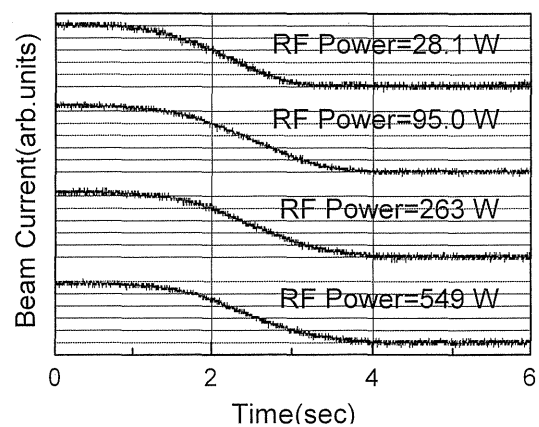


Figure 8. The RF power dependencies of the beam current were measured when the  $10 \mu\text{m}\phi$  Carbon target was placed on the electron orbit. One second life time is sufficiently long for the proposed novel hard x-ray source. The experiments were undertaken by ISSP-SOR (the first Japanese SR).

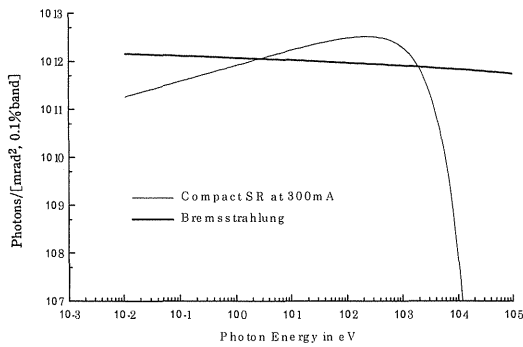


Figure 9. The calculated hard x-ray spectrum generated from the 10 μmφ Carbon wire placed on the electron orbit is compared with that of a superconducting synchrotron radiation source.

ターゲットを10<sup>8</sup>回たたく。延べにすると10<sup>17</sup>個の電子がたたくことになる。電子は、衝突で全てのエネルギーを失うわけではない。電子は、蓄積リングの中でそのエネルギー損失と、散乱角度がリングのモーメントムアクセプタンスとダイナミックアパチャーを越えると失われる。

図8の実験データを積分すると、実際の電子数10<sup>17</sup>個が得られる。この実験では、蓄積電流値を10 mAに落として実験しているのだが、10<sup>17</sup>個という電子数はかなり大きな値である。10 mAは通常1回の入射で達成できる値であり、実際には、ビームを連続して入射するので、発生するX線量は、小型放射光源にせまる。現在建設している光蓄積リングは、最大100 Hzの運転が可能である。

図9は計算で得られたX線強度である。比較のために300 mA蓄積時の小型リングの放射光スペクトルを示す。計算は、50 Hz入射、ピーク電流値10 A、入射効率60%、ターゲットは10 μmφのタンングステン、ハーフモーメントムアパチャー6%、ビームダクト径30 mmφを仮定している。モーメントムアパチャー及びダイナミックアパチャーとして非常に大きな値を仮定しているが、これが超小型電子蓄積リングの特徴である。

4. まとめ

本稿では、世界最小の電子蓄積リングに関して、その開発の現状を述べると共に、電子蓄積リングの軌道を円筒型ミラーで覆ったときに発生する干渉光スペクトルの計算値を示した。また、高輝度遠赤外線の利用に関して筆者が考えている新しい研究分野について提唱している。それは、生命現象の解明である。さらに筆者は、小型リングで高輝度ハードX線を発生させる方法を提唱しているが、その予備実験を物性研SORを用いて実施したのでその結果について述べた。

光蓄積リングの開発は、本体を完成し、15 MeV入射実験を実施した結果、パターベータにより電子ビームが捕獲されて少なくとも0.1 msにわたり電子が周回していることを確認した。今後は、ランプアップとミラーによる光の

Table 1. Advantages of the smallest ring

High duty cycle	2.45 GHz
Low energy electron beam	less than 50 MeV
Large dynamic aperture	horizontal: 10 cm, vertical: 6 cm
Large momentum aperture	6%
Resonance injection method	enable continuous injection without disturbing electrons in a central orbit
Short bunch	0.1 mm
Bright IR and FIR	no other sources which generate more than 1 W FIR on average.
Hard x-ray	1000 times brighter than rotating anode
Instrument size	1×3 m (include injector)

蓄積までを分子研で実施した後、98年5月には、立命館大へ移設する予定である。立命館大ではすでに新しい建物を準備しており、入射器としてマイクロトロンを導入する。なお、この施設は実際の利用を目指していることから、利用のためのコンソーシアム作り着手し、既に2回にわたり利用のための研究会を開いている。光蓄積リングのレーザー発振はまだ実証されていないが、レーザー発振が不十分な場合でもそのインコヒーレント出力は既存の様々なタイプの遠赤外線光源よりはるかに明るいために、今後実用装置として発展することが期待される。

次に、ハードX線の発生実験であるが、得られた2秒というビーム寿命は、実用化を実施する上で極めて十分なものである。そこで、立命館大では、世界最小リングからハードX線を取り出すためのビームポートの準備も進めている。そのために、マイクロトロンでの繰り返し数は、最大100 Hzに設定しており、パターベータ電源も100 Hz運転が可能である。光蓄積リングには、100 Hzは不要である。

さて、以上のように、筆者は、今まで何の役にも立たないと考えられてきた小型・低エネルギー電子蓄積リングに焦点をあて、これが高輝度遠赤外線を発生するだけでなく実用的なハードX線を発生する上で極めて有意義であることを提唱し、かつ実際にリングを開発してほぼ成功したことを述べたわけである。そしてさらには、高輝度遠赤外線の新しい利用法と、共鳴吸収法という新しい分析手段を提唱した。

最後に、小型リングを使った遠赤外線発生装置及び、ハードX線発生装置の特徴を表1にまとめたので参考にされたい。

謝辞

本装置の開発は、原理の提唱から、リングの物理設計、リングの機械設計、発注、組立、単体テスト、入射実験、さらには利用の提唱までを、筆者が中心になり実施してきたわけですが、たくさんの方々のご支援とご援助なしには達成することができませんでした。ここに、今日まで筆者

の研究を援助いただいた全ての方々に深い感謝の意を表します。

その中には、東大名誉教授の霜田光一先生、阪大レーザー核融合研究センターの三間國興所長、ロシア科学アカデミー P. L. Kapitza 物理学研究所の A. I. Kleev 博士が含まれます。彼らは、光蓄積リングの理論を発展させる様々な助言を下さり、実際の計算にも参加下さいました。住友重機械工業の高山、堀、筒井、宮出、天野の諸氏には小型リングの物理設計で協力いただきました。リングのテストは、岡崎分子研 UVSOR の入射器を利用したわけですが、リングの設置を快く受け入れ、新たに BT 系を製作する労と費用を惜しなかつた浜助教授のご厚意なしにはできなかったことです。同じく分子研の保坂博士、山崎技官にも様々な協力をいただきました。そして、なににもまして立命館大学の大学院生である坂井一郎君の日夜を分かたぬ取り組みがあったからこそかくも早い時期に入射実験ができたことをここに銘記し、感謝の意を表します。そして、同じく立命館大学の井高護、汐崎充、伊藤雅也の諸君には、とても4回生とは思われない熱意で組立・テストに参加いただきました。さらに、遠赤外線の利用調査につきましても多くの方のご協力を頂いたわけですが、とりわけ香川大学の伊藤寛教授に感謝いたします。最後にハード X 線発生実験ですが、これは、東大物性研 SOR 施設のご厚意無しには実施できませんでした。実験及び実験のためのビームダクトの改造とターゲット挿入装置の設置に費用を含めて協力下さいました小関博士、高木博士及び、篠江技官に深く感謝いたします。

最後に末筆ではありますが、光蓄積リングがこのように

日の目を見ましたのは、科学技術振興事業団のさきがけ研究21に本テーマを採用下さった高良和武先生及び千川純一先生の深いご理解が有ったことであることをここに記して感謝の意を表します。そしてさらに、立命館大学に光蓄積リングのための放射線施設が完成したのは、田中道七総合理工学研究機構長及び辻村電子技術研究センター長のご支援があったからであり、ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) H. Yamada: *Advances in Colloid and Interface Sci.* **71-72**, 371 (1997). 山田廣成, 霜田光一: *応用物理* **65**(1), 41 (1996).
- 2) H. Yamada: *J Synchrotron Radiation*, to be published.
- 3) Fleming and P. G. Wolynes: *Phys. Today*, 1990, May, p. 36.
- 4) K. Aizawa: private communication.
- 5) H. Ozaki: *Trans. IEEE of Japan* **114-C**(5), 508 (1994).
- 6) H. Ohtaki: *Chem. Soc. Rev.*, 1-11, 1997.
- 7) T. Smith and A. Marziani: *Nucl. Instrum. Methods. in Phys. Res.* **A331**, 59 (1993).
- 8) H. Yamada: *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.* **B79**, 762 (1993).
- 9) H. Yamada: *Japanese J. Appl. Phys.* **28**(9), L1665 (1989); H. Yamada: *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res.* **A304**, 700 (1991).
- 10) H. Yamada, H. Tsutsui, K. Shimoda and K. Mima: *Nucl. Instrum. Methods. in Phys. Res.* **A331**, 566 (1993).
- 11) A. I. Kleev, A. B. Manenkov and H. Yamada: *Nucl. Instrum. Methods. in Phys. Res.* **A368**, 362 (1995).
- 12) H. Yamada: *J. Vacc. Sci. Tech* **B8**(6), 1628 (1990).
- 13) N. Takahashi: *Nucl. Instrum. Methods* **B24/25**, 425 (1987).
- 14) H. Yamada: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, L182 (1996).
- 15) to be published, H. Yamada, I. Sakai, T. Koseki, H. Takagi, K. Shinoe, N. Kawahara, T. Udaka, K. Inaba and T. Omote.