

# 産業科学研究所・量子ビーム科学研究部門

## 量子ビーム発生科学研究分野



研究室紹介

磯山 悟朗\*

Department of Accelerator Science, Division of Quantum Beam Science  
and Technology, Institute of Scientific and Industrial Research

**Key Words** : electron accelerator, linac, storage ring, FEL, SASE, synchrotron radiation

### 1. はじめに

平成7年度に行われた産業科学研究所の改組により6研究部門の一つとして量子ビーム科学研究部門が生まれた。量子ビーム科学研究部門は量子ビーム発生科学研究分野と量子ビーム物質科学研究分野の2研究分野より構成され、量子ビームの発生と利用という相補的な立場から研究を進めている。量子ビーム発生科学研究分野は加速器科学と技術を基礎にして、自由電子レーザーや放射光、低速陽電子ビームなどの量子ビーム発生の研究を行っている。これに加えて放射線照射技術の研究も行っている。ここでは研究室の主要な研究課題である赤外自由電子レーザーの開発研究と短波長自由電子レーザー開発のための赤外線領域での基礎研究、タイとの国際共同研究である放射光光源加速器の建設についての概要を紹介する。

### 2. 赤外領域の自由電子レーザー

自由電子レーザーは、高エネルギー電子ビームの運動エネルギーを直接コヒーレント光のエネルギーに変換する装置である。原理的にはミリ波からX線領域に至るどの波長領域でも動作可能、波長が連続可変、大出力、エネルギー変換効率が高いなどの優

れた特徴があり、世界各地で研究開発と利用が進められている。阪大産研では附属放射線実験所のLバンド電子ライナックを用いて1989年ころから赤外自由電子レーザーの開発研究を行っており、1994年に波長32~40 $\mu\text{m}$ で最初のレーザー発振に成功した。これ以来、FEL波長を長波長側に拡大するためにFEL装置の改造と、新しい装置での発振実験および特性測定を順次進めている。

150 $\mu\text{m}$ を超える波長まで波長範囲を拡大するためのFEL装置の改造を1995年に始めた。FELの発振波長 $\lambda_w$ は、電子エネルギーとウイグラーの周期長 $\lambda_w$ およびK値に依存する。K値はウイグラーの動作を特徴付ける指数で、 $B$ をウイグラーのピーク磁場とすると $K=93.4B[\text{T}]\times\lambda_w[\text{m}]$ で与えられる。ウイグラーの周期長が一定の場合、FEL波長を長くするには電子ビームのエネルギーを下げるかウイグラー磁場を強くする、即ちK値を大きくすればよい。我々が使用するウイグラーは永久磁石製であり、周期長6cm周期数32を持つ。永久磁石を使用したウイグラーの磁場強度を変えるには、磁極間隙(ギャップ)を変化させる。最初の発振実験に使用したウイグラーは磁極ギャップが44mmに固定されており、K値も0.7と比較的小きな値を採用していた。そこでこのウイグラーを1996年に改造して、磁極ギャップを30mmから120mmの範囲で連続的に変えられるようにした。その結果、K値を最大1.47まで増やすことができる。この改造により同じ電子エネルギーに対して波長を約2倍長くすることができるだけでなく、大きいK値により高い増幅率が期待できる。またFEL波長を連続的に掃引できるようになった。

長波長領域で問題になるのはFEL光の光共振器内での回折損失である。この回折損失を低減するために光共振器を順次改造した。それまで光共振器の

\*Goro ISOYAMA  
1950年5月29日生  
昭和53年3月東北大学大学院理学研究科原子核理学専攻博士課程修了  
現在、大阪大学・産業科学研究所・量子ビーム科学研究部門・量子ビーム発生科学研究分野、教授、理学博士、加速器物理学  
TEL 06-6879-8485  
FAX 06-6879-8489  
E-Mail isoyama@sanken.osaka-u.ac.jp



損失を決めていたウイグラーの上流と下流にある偏向磁石のギャップを拡大する改造を1997年に行い、その部分の真空チャンバーを鉛直方向に口径の大きいものと交換した。光共振器の改造の一環として1998年には5軸全てが遠隔操作可能な高精度・高安定なミラーフォルダーに交換した。長波長側での回折損失をさらに軽減するために反射鏡の口径を60mmから80mmに拡大した。この改造に伴い、反射鏡付近の真空チャンバーを口径の大きな物に交換した。これらの一連の改造により光共振器の回折損失は減少し、鉛直方向に口径の小さいウイグラー用真空チャンバーで長波長領域の回折損失が決まるようになった。

長波長FELを開発するために光の測定システムにも新たな装置や機器を導入した。波長100 $\mu$ m付近の赤外光は空気中の水蒸気による吸収が大きい。そこで真空排気可能な光輸送路を新たに製作してFEL装置から測定室まで設置した。この光輸送路に直結して回折格子を用いた真空排気可能な遠赤外分光器を取りつけてFEL光の波長測定を可能にした。赤外光の検出には液体ヘリウム冷却の半導体検出器を用いる。波長40 $\mu$ m付近の測定にはGe:Be検出器を用いたが、波長50 $\mu$ m以上の領域ではGe:Ga検出器を用いる。FELの発振を得るためにはライナックとFELビームラインの微妙な調整が必要である。この調整を行いやすくするためにFEL用ビーム輸送路に安価で拡張性に富む計算機制御システムを開発・設置して利用している。

Lバンドライナックと改造後のFEL装置の模式図を図1に示す。発振波長が32 $\mu$ mの時の電子エネルギーは19MeVであるが、電子ビームエネルギーを最低12MeVまで順次下げて長波長領域でFELの発振実験を行う。FEL用運転モードでの電子ビー

ムのバンチ当り電荷量は2nC、ピーク電流は50A程度である。ライナックで加速された電子ビームはビーム輸送路を通りFEL装置に導かれる。光共振器は長さ5.53mで、ウイグラーの中心にビームウエストがある。上流側の反射鏡にあけた直径3mmの穴からFEL光を取りだし、光輸送路を通り測定室に導く。波長150 $\mu$ mでの発振を現在得ているが、これはRFライナックを持たないFELとしては世界で最も長波長のFEL発振である。長波長側での検出器の検出器感度により発振波長の制限を受けている。200 $\mu$ mまで検出感度を持つ圧縮型Ge:Ga検出器を現在準備中であるが、これを用いて波長領域を長波長側に更に拡大する実験を行う予定である。

### 3. 赤外線領域でのSASEの基礎研究

自由電子レーザーは原理的に動作波長領域を選ばないが、光共振器を構成する鏡の反射率が波長200nm付近から短波長側で急激に低下するために、通常のFELで得られる最短波長は現在のところ200nmに限られている。X線レーザーを実現するためにSASE(Self-Amplified Spontaneous Emission)という新しい型のFELが最近注目を集めている。SASEは、鏡や光共振器を使わずに高い増幅率のFELを用いることにより自発放射を種にして1回の増幅で大パワーのコヒーレント光を発生させる。アメリカとドイツでは電子ライナックを用いたSASEで、大パワーコヒーレントX線の利用施設を設置する提案がなされており準備研究を進めている。短波長領域でSASEを発生させるためには高輝度・大強度電子ビームと10mを超える長いウイグラーが必要である。SASEは理論的研究やシミュレーションによる研究が主で実験的な研究は赤外線領域でのSASEの発生実験が少数あるだけである。この内の

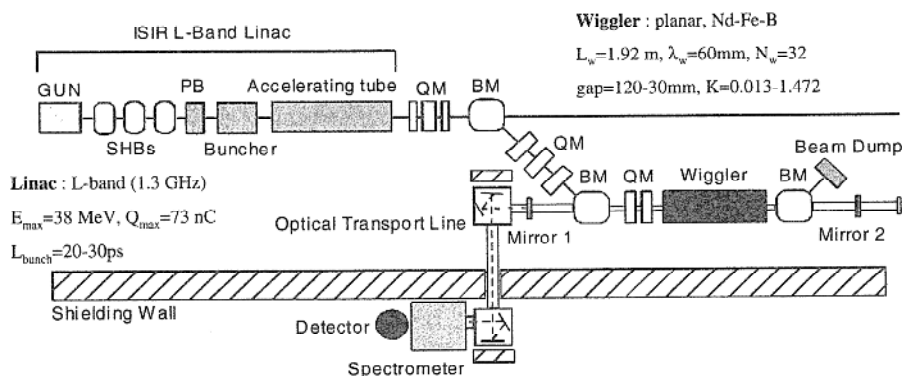


図1 放射線実験所Lバンド電子ライナックと赤外FEL装置

一つが阪大産研で1991年に行われた20と40 $\mu\text{m}$ でのSASEの発生実験である。

産研Lバンド電子ライナックは最大73nCの電荷量を持つ単バンチ電子ビームを加速することが出来る。この大強度単バンチ電子ビームと既存のFEL装置を用いて、SASEの赤外線領域での基礎研究を最近本格的に開始した。SASEの発生に大きな影響を与えるのは電子ビームの特性である。そこで単バンチ電子ビームの特性測定から実験を開始した。エネルギースペクトルとバンチ長、エミッタンス、ウイグラー内でのビームサイズ、ウイグラーを通過する電子ビームの電荷量などを電子エネルギーの関数として測定した。SASEの強度などの特性は1次元模型による理論式で評価することが出来る。しかしこの理論を適用するためには電子ビームや使用するウイグラーの特性などに制限がある。この理論式が我々の実験に適用可能か、測定した電子ビーム特性を用いて評価した。その結果電子エネルギーが15 MeV以下でかつK値が大きい領域で1次元模型の適用条件が満足されることが分かった。従ってこのような条件下で強いSASEの発生が期待できる。

実験の配置図は図1に示す発信型のFELと基本的に同じである。Lバンドライナックを単バンチ運転してFEL装置に導く。単バンチビームの電荷量が20nCの時、バンチ長を使い求めたピーク電流は1kAを超える。SASEの実験では、上流側の反射鏡を取り外し、ウイグラーの出口付近で発生した光を下流側の反射鏡で集光して光輸送路に導き、測定室で計測する。20nCを超える強い単バンチ電子ビームがウイグラーを通過する時、波長100 $\mu\text{m}$ 付近に強い光を観測した。この光強度をウイグラーのK値の関数として測定したところ、K値の増加に伴い3桁近く強度が増大した。この光強度のK値依存性は、1次元模型のそれと良く一致するので測定した光をSASEと同定した。観測した光のピーク強度は最大で1kWに達する。現在、SASE光の波長スペクトルを測定中である。

#### 4. Siam Photon プロジェクト

タイ王国で放射光研究施設(Siam Photon Laboratory)が建設中であるが、この光源加速器システムの建設を国立放射光科学研究所(National Synchrotron Research Center)との共同研究で行っている。放射光を使ったマイクロソングラフィーの開

発研究を行っていた日本のSORTEC(株)がその活動を時限により終了した後、光源加速器システムはタイ国政府に寄贈された。これを受けて科学技術環境省の下に国立放射光科学研究所が設立され、バンコクから北東に約260kmはなれたナコーン・ラチャシーマに放射光研究施設が建設中である。SORTECの光源加速器システムは分解・搬送して現地で保管されている。

SORTECの電子ストレージリングは放射光を用いたマイクロソングラフィーの研究に最適化された設計がなされていた。光源加速器システムの移設に際して、1GeVシンクロトロンと40MeVライナックからなる入射器システムはSORTECの状態を再現するが、光源用1GeV電子ストレージリングは一般の科学技術研究用に高輝度化をはかる。新しい光源加速器システムを図2に示す。地下に設置される入射器で1GeVまで加速された電子ビームは、長さ45mのビーム輸送路を通過して地表に設置されるストレージリングの内側から入射される。ストレージリングの改造を行う際の条件として8台ある偏向磁石の数は変えず、追加する四極磁石の数も出来るだけ少な

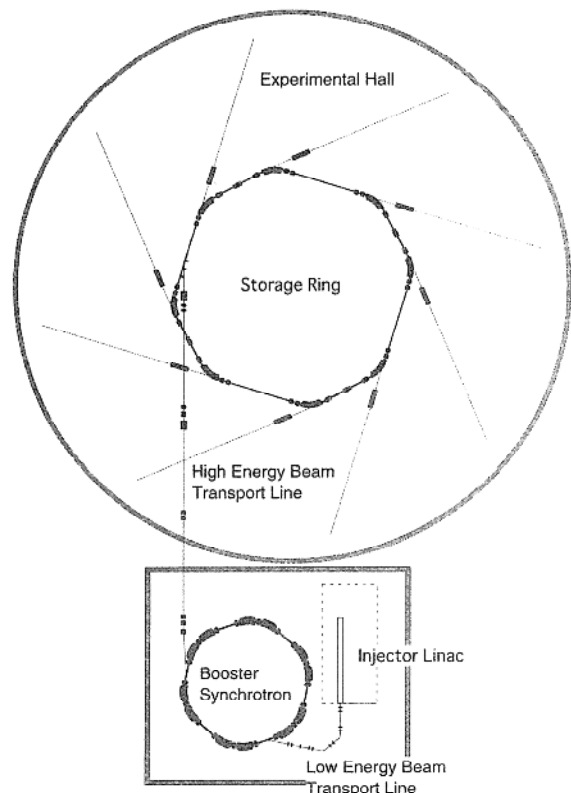


図2 タイ国立放射光科学研究所の光源加速器システム平面図

くすることとした。高輝度電子ビームを得るために、ストレージリングの磁石配列にDBA(Double Bend Achromat)と呼ばれる型を採用した。DBAの場合、電子エネルギーと偏向磁石の数で得られる原理的に最低のエミッタンスが計算できる。一般的に言ってこの最低のエミッタンスを達成するには非常に強い収束力を持った四極磁石が数多く必要であるので、既存の四極磁石を使い、追加する磁石の数も出来るだけ少なくするという改造の方針に反する。しかしながら四極磁石の収束力を弱めても、ビーム動力学に対する或る要求を満足する限りエミッタンスの増加は最小値の1.5倍にとどまる。この手法を採用することにより新しいストレージリングの磁石配列の設計を行った。リングには高輝度軟X線ビームを発生させるためのアンジュレーターやX線を発生させる超伝導ウイグラーなどの挿入光源を設置するために7mの長い直線部を4ヶ所設ける。新しいストレージリングの主要なパラメーターは、電子エネルギー1GeV、周長81.3m、エミッタンス $74\pi\text{nm}\cdot\text{rad}$ で

ある。電子エネルギーはSORTECと同一であるが、周長は約2倍弱に増大し、エミッタンスは7分の1に減少する。これは第2世代放射光光源加速器としては世界有数の性能である。

放射光施設の新しい建物が完成して、加速器の組立作業が今年3月に開始された。組立が完了するのが2001年春の予定で、その後加速器システムの立ち上げと性能向上、利用研究の開始へと進む。

#### 4. お わ り に

加速器を中心にした研究を行っている大学の研究室は国内でも数少ない。加速器科学・技術の研究は物作りが中心であるので費用も時間もかかり困難な点も多い。しかし長期的な視野に立った研究や基盤技術の開発、人材の育成など大学でしか出来ない仕事も数多く存在する。今後も放射線実験所の加速器を利用した研究を中心にして研究を進めると共に、短波長FELなど大型加速器が必要な分野では国内外の研究所と共同研究を積極的に行いたい。

