

# テラヘルツ自由電子レーザーとLバンド電子ライナック



随 筆

磯山 悟朗\*

Terahertz Free-Electron Laser and L-Band Electron Linac

Key Words : Free electron laser (FEL), L-band electron linac, High intensity, Terahertz, Far-infrared

## 1. はじめに

筆者は、東北大学理学部物理学科の応用原子核講座で学部1年と大学院5年の計6年間、25 MeV ベータトロンを使いガンマ線の原子核共鳴散乱の実験をすると共に、ベータトロンの運転と少しだけ保守の手伝いをした。研究室には、使われていない40 MeV 電子シンクロトロンもあり、この加速器でシンクロトロン放射を観測したという論文の別刷りを見た。後付けであるが、これらが筆者の加速器と自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) を含む放射光への最初の関わりである。大学院修了後に、日本原子力研究所の核融合特別研究生として1年余り東海村で過ごした後、1978年に東京都田無市 (当時) にあった東京大学物性研究所軌道放射物性研究施設 (通称 SOR 施設) の助手に採用され、電子エネルギー 380 MeV の SOR リングの運転・保守・改良と、次期の高輝度光源の設計研究、高エネルギー物理学研究所 (当時) フォトン・ファクトリー (PF) の物性研ビームラインに設置した高輝度準単色軟 X 線光を発生するアンジュレーターの設計・建設などを行った。1988年に愛知県岡崎市にある分子科学研究所の極端紫外光実験施設 (UVSOR 施設) の助教授に採用され電子エネルギー 750 MeV の UVSOR リングの保守・改良と可視・紫外自由電子レーザー (FEL) の開発研究を行った。

このような経歴を持つ筆者であるが、1994年4月に阪大産研の放射線応用計測部門 (当時、翌年の産研改組で量子ビーム発生科学研究分野) の教授に採用され、附属施設の放射線実験所 (当時、現在: 量子ビーム科学研究施設) の RF 周波数が 1.3 GHz の L バンドライナック (以下、「L バンド」と略す) を使った遠赤外・テラヘルツ FEL の研究を行うことになった。その経緯と結果を紹介する。

## 2. テラヘルツ FEL の開発

放射線実験所では1980年代末頃から FEL の開発研究が行われていたが、未だ発振には至らなかった。着任から1年間は研究室の立上げに忙殺されており FEL の発振実験を見学する程度であったが、翌年、1995年に遠赤外領域の波長 43  $\mu\text{m}$  で最初の発振に成功した。当時、赤外 FEL は、アメリカと、フランス、オランダに中赤外の FEL 利用施設が稼働していた。国内では、大阪の自由電子レーザー研究所で中赤外から紫外領域までの4台の FEL システムが建設中で、その試験として東京大学東海村の電子ライナックを使った FEL で1994年に波長 43  $\mu\text{m}$  で最初の発振を得ていた。

このような状況で着任翌年から本格的に FEL の研究を始めた。その際の問題は、L バンドの RF パルスの時間幅が 4  $\mu\text{s}$  で、加速管への充填時間が 2  $\mu\text{s}$  と長い場合電子ビームのパルス幅は 2  $\mu\text{s}$  に過ぎない。その結果、FEL の増幅回数は最大 50 回程度と少なく、波長 43  $\mu\text{m}$  ではパワー飽和に達する大強度 FEL パルスは発生できなかった。

理論的には波長が長くなるにつれて FEL 増幅率が高まることと、RF ライナックを用いた FEL はこれより長波長領域には存在しないため、産研 FEL の動作を長波長領域に拡大する研究を始めた。FEL 波長を連続的に変えるために、磁石部を除くウイグ



\* Goro ISOYAMA

1950年5月生まれ  
東北大学大学院理学研究科原子核理学専攻修了 (1978年)  
現在、大阪大学名誉教授  
産業科学研究所 理学博士  
専門/電子加速器と自由電子レーザー  
E-mail : isoyama@sanken.osaka-u.ac.jp

ラーの架台を磁極ギャップ固定型からパルスモーター駆動の可変型に改造し、真空チェンバーを最少ギャップ 30 mm に適合するものに造り直した。光共振器は共中心型のため反射鏡に近づくと光ビームサイズが増大する。長波長で問題になる光共振器での回折損失を低減するために、球面鏡の直径を 60 mm から 80 mm に増やすと共に、ウイグラー両側にある偏向磁石の磁極ギャップを削り、縦方向内寸が大きい真空チェンバーに交換した。これらの改造を進めながら波長領域を長波長側に拡大した結果、RF ライナックを使った FEL では当時最も波長が長い 150  $\mu\text{m}$ 、周波数 2 THz での発振に成功した。しかし、FEL の増幅回数が少ないためパワー飽和に達することは出来ず、L バンドの改造を待たなければならなかった。

### 3. L バンドの改修

放射線実験所は、2002 年に高次インターマテリアル研究センターと統合して産業科学ナノテクノロジー研究センターが設立された。その際、L バンドを改造する予算が認められた。1978 年に建設されて以来、L バンドは幾度も改良されてきたが、運転の再現性と電子ビームの安定性が乏しかった。又、L バンドの制御系は、ヘリポットとメーターによるアナログ制御のため少数の熟練者しか運転できない。限られた予算の範囲で目指すものは、L バンド運転の安定化と再現性の向上、電子ビームの長パルス化である。

これらの目標を実現するために、計算機制御システムの導入と、ほぼ全ての電源類の更新、高精度・高安定の冷却水システムと高精度タイミングシステムなどを導入した。L バンドの 1.3 GHz 加速装置は、プレバンチャー (PB) とバンチャー (B)、主加速管で構成される。主要電源である 1.3 GHz クライストロンとその電源は、PB と B 用の 5 MW 電源と主加速管用の 25 MW 電源の 2 台あったが、経費の節減と安定性の向上のため 30 MW 電源 1 台に変更した。新電源は PFN (パルス形成回路網) を  $1 \times 10^{-4}$  の高い精度で充電してクライストロンで高精度 RF パルスを発生する。PFN の段数を切り替えることにより通常運転では電子ビームのパルス幅 4  $\mu\text{s}$  で最大繰返し 60 Hz、FEL 運転の場合 8  $\mu\text{s}$  で最大 30 Hz で運転する。単バンチ運転や FEL 運転

では、108 MHz 空洞 2 台と 216 MHz 空洞 1 台からなる SHB (Sub-Harmonic Buncher) システムを使う。SHB 電源は真空管式 RF 増幅器だが、固体増幅器に交換する予算は無いため、増幅器の補助電源を更新して計算機制御用のインターフェイスを付加するに留めた。新しいタイミングシステムは、市販の NIM モジュールや遅延信号発生器を組み合わせて作ったもので、加速器と利用実験の複雑で様々な要求に対応できる。ここでは大規模改修の一部を紹介したが、FEL 運転モードを除き計画通り動作した。

大規模改修ではライナック本体には触らなかったが、3 台の SHB 空洞はステンレスと銅の薄いクラッド板で作られているため温度変化による変形が大きく、ビームが不安定になる。RF 空洞は高額のため、自分達で作ることにした。現有の SHB 空洞と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のライナックで使われている SHB の構造を参考にして熱伝導が良い銅に冷却水路を張り巡らした構造を持つ 4 分の 1 波長同軸空洞の物理設計をし、機械設計と製造は重工などの下請けもしている明昌機工に依頼した。SHB 空洞は銅製のため、日立電線 (現:日立金属) から無酸素銅の塊を購入した。このようにして 3 台の SHB 空洞を順次製作しハイパワー試験も無事終了した後、新旧空洞の交換を加速器設置に経験のある専門の会社に依頼した。新しい SHB 空洞は、冷却水を流し始めて 10 分強で安定化して期待通りの性能を示した。前述のように SHB 空洞の励起用に真空管アンプを使っていたが SHB 空洞が更新されたため、真空管アンプの不安定性が見えてきた。又、良質の真空管を入手するのが困難になると共に価格も大幅に上昇した。他方、固体アンプに使う FET の動作電圧が高くなり固体アンプの価格は相対的に下がってきた。そこで、島田理化工業から毎年 1 台ずつ購入して 3 年で 3 台がそろった。立上げの初期では様々な不具合が発生したが、それらが解決した後は極めて安定に動作している。

L バンドライナックは 1978 年に建設以来、順調に稼働していたが 2007 年 10 月に加速管の出口付近で冷却水の漏れが発生した。加速管を固定するため厚さ 1 cm 程度のステンレスの帯状リングが加速管の終端に溶接で固定されているが、そのリングの内側で目視できない箇所からわずかに水が漏れていた。加速管の下側に漏斗を置き、水をホースで排水

口に捨てて凌いだ。2012年9月にその漏れが大きくなりライナックを運転することができなくなった。ステンスカバーと加速管の間には1 cm程度の隙間しかないため、ファイバーカメラで見たところ、銅とステンレスの接続部から漏れていると思われるが、何処で漏れているか、漏れ箇所が一カ所か複数かも分からなかった。ステンレスと銅はロウ付けで溶接されており製造以来30年以上たっている。他の場所でも水漏れが起きる可能性もある。その場合は加速管を造り直す必要があると考えた。Lバンドを造ったアメリカの会社はずっと以前に倒産しており問い合わせも出来ない。Lバンド加速管を造ったことがある国内の企業は2社あったが、産研Lバンドと規格が違いどちらも新しい規格の加速管を造るのを嫌がった。1社は1~2億円かかるだろうとのこと。これでは実現が難しいと思い、SHB空洞のように自作出来ないかと考え、KEKの専門家から加速管設計用のプログラムを借りて検討を始めた。平行して加速管の漏れ箇所を調べるため、加速管を壊すことも覚悟して、ディスクグラインダーでステンレスリングの最上部を削り取った。その結果、水漏れ箇所は削り取った部分の真下にあり、加速管の銅材と水冷用ジャケットのステンレス材のろう付け部分だけで、他には漏れが無いことを確認した。更に、水漏れ箇所は銀ロウでは無く、はんだが使われていた。このことから加速管の製作時に銀ロウ付けが上手く行かず、その部分をはんだで補修したことが分かった。全般的な銀ロウ付けの不良ではないため、水漏れを止めれば良い。はんだで補修することも考えたが、現場で熱容量の大きな加速管とステンスカバーをはんだ付けすると過熱により加速管が変形する可能性もある。そこで凸凹がある漏れ箇所に密着する蓋を作るため、歯科技工の会社に依頼して現場で型を取り、入れ歯に使う固く錆び難い金属で蓋を作ってもらった。漏れ箇所に自動車エンジンの組み立てにも使う液体ガスケットを塗り製作した蓋を押し付けた後、ネジで機械的に押さえた。水漏れ問題は解決した。

#### 4. FELのパワー飽和

Lバンドライナックの大規模改造の後、FELの再立ち上げを試みたが期待通りにはいかなかった。設計通り1.3 GHz RFのパルス幅は8  $\mu$ sと改造前

の2倍に増えたが、RFパルス内のパワー変動は10%以上で、位相変動も数十度と大きい。FEL発振のためのRFに対する一般的な条件は、パワー変動1%以下で位相変動1°以下と言われており、改造前はこの条件を満たしていた。RFパルス内のパワーと位相の変動は、負荷での反射が大きい場合に起こる。改装前は2台のRF電源を、改造により30 MW電源に統一してRFパワーの伝送路(導波管)を組み直したことが原因と考えられる。このような場合にはサーキュレーターと呼ばれる反射防止装置を使うが、周波数が低いLバンドでは大型で高価だ。

RFパルスが4  $\mu$ sの運転モードではこのような問題が無い場合、FELモードでは、系の応答遅れを補正するオーバードライブ法とフィードフォワード法を組み合わせ、低レベルRFのパワーと位相を変えることにより高出力RFパルスのパワーと位相を一定にした。その結果、RFパルスのパワー変化が0.4%で位相変化は0.3°に抑えられ、FELのパワー飽和を達成した。光共振器内を往復するFELパルスは、往復する毎に数パーセントずつ空洞外に取り出されるが、これをマイクロパルス、マイクロパルスの列をマクロパルスと呼ぶ。電子ビームのエネルギーが18 MeVで波長67  $\mu$ mの時、マクロパルス幅は3  $\mu$ sで最大エネルギーは3.7 mJであった。マイクロパルス間隔9.2 nsを使い、マクロパルス幅とエネルギーから計算したマイクロパルスエネルギーは11  $\mu$ Jだ。中赤外FEL施設であったオランダのFELIXやフランスのCLIOもFEL波長を遠赤外領域に拡張している。産研FELのマイクロパルスエネルギーは、FELIXやフランスのCLIOと同程度のマイクロパルスエネルギーを得た。

#### 5. 更なる大強度化

産研FELの強度を更に上げることができないかを検討した。通常が多バンチ運転では1.3 GHzの周期、0.77 ns間隔で電子バンチが並ぶ。FELモードでは、電子バンチの電荷量を増やすため3台のSHB空洞の内、下流側2台を使い入射した電子ビームを進行方向に圧縮してバンチ間隔を9.2 nsに拡張することにより電荷量を1 nCまで増やす。FELの強度を上げるには電子バンチの電荷量を増やせばよい。この加速管は進行波型でRFパワーを加速管の上流側から入れて下流側で取り出し、模擬

負荷に捨てる。現状のバンチ電荷量 1 nC でも RF パワーは加速管出口でゼロに近づくため、これ以上バンチ電荷量を増やすことができない。

他方、光共振器内で FEL ミクロパルスが往復する時間は 36.8 ns であるので 4 個の FEL パルスが光共振器を往復する。FEL 発振には共振器内の FEL パルスが 1 個あれば充分のため、電子バンチの間隔を 4 倍に広げ、電荷量を 4 倍に増やせば加速管内のビーム負荷は同じになる。そこで、最大電圧 180 V、パルス幅 5 ns で間隔が 37 ns のパルス列を発生するグリッドパルサーを製作して電子銃の高圧デッキに取り付け、熱陰極電子銃のグリッドに印加した。電子銃のピーク出力電流を 4 倍に上げて Lバンドを運転すると期待どおりの電子ビームが得られ、FEL を運転したところ強い発振を観測した。電子ビームの特性と FEL のビーム強度を測定した。電子バンチの電荷量は 4 nC と 4 倍に増え、バンチ間隔も 4 倍の 37 ns と広がった結果、加速管でのビーム負荷は以前の運転モードと変わらなかった。この時の FEL マクロパルスエネルギーは、波長 65  $\mu\text{m}$  又は周波数 4.6 THz で、最大 28.5 mJ だ。電子バンチと FEL ミクロパルスの繰り返し周波数が 27 MHz のため、この新しい FEL モードを 27 MHz モードと呼び、従来の FEL モードを 108 MHz モードと呼ぶ。同じ時期に測定した 108 MHz モードでの最大マクロパルスエネルギーは波長 70  $\mu\text{m}$ 、周波数 4.3 THz で 13 mJ であった。両モードでのマクロパルスの半値幅は 4  $\mu\text{s}$  で等しい。27 MHz モードの最大マクロパルスエネルギーは 108 MHz モードの 2.2 倍だが、27 MHz モードでのミクロパルス数 110 個は、108 MHz モードの 440 個の 4 分の 1 のため、27 MHz モードでのミクロパルスエネルギー 260  $\mu\text{J}$  は 108 MHz の 30  $\mu\text{J}$  より 8.7 倍、CLIO や FELIX のミクロパルスエネルギーより 26 倍高い。

FEL ビームラインから取り出した波長 65  $\mu\text{m}$ 、4.6 THz の FEL ビームは、断面の標準偏差 3.6 mm

のほぼ平行ビームで、これを焦点距離 12.5 mm の軸外し放物面鏡で集束すると、ビームサイズは 42  $\mu\text{m}$  (標準偏差)、面積は  $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$  になる。チタンサファイアレーザーを使い電気光学法で測定した 27 MHz モードでの FEL のミクロパルス長は約 2 ps、エネルギー 260  $\mu\text{J}$  から計算したピークパワーは 130 MW で、そのピークパワー密度は 1.15 TW/ $\text{cm}^2$  である。これより集束点のピーク電場は  $E = 2.9 \text{ GV/m}$ 、磁場は 9.8 T と計算される。

産研 FEL は波長 30~150  $\mu\text{m}$ 、周波数 2~10 THz の範囲で連続可変の単色で、ミクロパルスの時間幅は 2~20 ps と化学反応の時間領域で、且つ強い電場と磁場を持つ FEL ビームを発生できるので、他の手法では難しい物質改変などの実験が行われている<sup>1)</sup>。

## 6. 終わりに

筆者は電子加速器と高エネルギー電子ビームによる光の発生を専門にしてきた。学生時代から電子加速器にかかわり就職後は共同利用の放射光施設で運転、保守、修理が日常の仕事で様々な経験を積んだ。その経験が阪大の仕事に役立ったと思うので「はじめに」で紹介した。阪大に在職中、放射光によるマイクロ・リソグラフィーの基盤研究に使ったソルテック加速器システムのタイ移設にかかわったが、ここでは紙面の都合で割愛した<sup>2)</sup>。ここに記載した仕事は、多くの人々と共に行った。

## 参考文献

- 1) 永井正也、磯山悟朗、「テラヘルツ自由電子レーザーによる分子固体のアブレーション」、化学工業 2017 年 3 月号 26-30 (190-194)
- 2) 磯山悟朗、「タイ放射光計画の顛末」加速器 2 巻 4 号 (2005) 523-535  
<http://www.pasj.jp/kaishi/cgi-bin/kasokuki.cgi?articles%2F2%2Fp523.pdf>