

平成15年度日本大学量子科学研究所  
運営委員会報告

平成15年6月6日

日本大学量子科学研究所  
電子線利用研究施設  
佐藤 勇

## 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)<sup>1)</sup>では、1994年度に電子線形加速器と自由電子レーザー(FEL)発生装置の建設<sup>2)</sup>に着手したが、開発研究中の高周波電子銃の見直し立たず、熱陰極電子銃に計画変更して1998年3月に完成した。

完成前に試運転を行い、1998年1月には、90MeV、20mAの電子ビーム加速<sup>3)</sup>に成功、引き続き2月には自発放射光を観測した。

短波長FELは、レーザー利得が小さいために、長パルスの電子ビームを必要とした。その上、短波長FEL発振には、高品質のビーム電流を必要としていた。即ち、エネルギーが揃い(低分散)、空間的な広がりが小さく(低エミッタンス)、而も電流密度が高い(高輝度)電子ビームである。

LEBRAの電子線形加速器は、方々から寄せ集めた部品で組み立てられた継ぎ接ぎだらけの加速器であった。このような加速器では高性能ビームを得ることが非常に難しく、FEL発振は不可能であるとの世評であった。

事実、クライストロンの長パルステスト運転では、大電力パルス電源に予想外の放電故障が続出し、更に、ビーム輸送系の整合性が悪くビームの輸送効率が低く所定のビーム強度が得られなかった。そこで、10月に入射部集束系を強化した。その結果、電子ビーム強度は220mAに達した。しかし、熱陰極電子銃から放射される電子ビームの規格化エミッタンス<sup>4)</sup>は大きく約 $60 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ であった。その上、短パルス用クライストロンを長パルスで稼働させると耐性不足から出力窓が次々に破損し、パルス持続時間は $10 \mu \text{ s}$ に制限された。又、クライストロンの前置高周波増幅器では半導体特有のパルス持続時間内において高周波位相が大きくずれることが観測され、このために電子ビームのエネルギーはパルス内で変化し、FEL発生装置へ輸送する途中で電子ビームの強度が減少した。従って、短波長FEL発振の見通しは非常に暗かった。そこで、FELの実用化を目的に、加速器の高性能化への挑戦が始まった。

電子ビームの不安定性が要因で、アンジュレーター永久磁石が放射線損傷<sup>5)</sup>を受け使用不能となったことが1999年9月に明らかになった。FEL計画は可視光領域から赤外線領域にシフトさせ、 $5 \sim 0.8 \mu \text{ m}$ の赤外線用アンジュレーターを新たに製作することになった。

電子線形加速器の高度利用計画を推進するために、1996年度から短波長自由電子レーザーと低速陽電子の利用計画を提案しCOEに応募していた。しかし、低速陽電子より単色X線の利用実験に対する要望が遙かに強かった。そこで、1999年3月にパラメトリックX線源の建設計画を提案し、8月、学術フロンティアに「可変波長高輝度単色光源の高度利用」を研究課題として応募することになった。幸いにも、2000年3月に、電子線利用研究施設が研究拠点に選定され、4月から5年計画でスタートすることになった。

加速器の高度化では、2000年2月に短パルスクライストロンの長パルス化の耐久テストに成功し、前置高周波増幅器の位相シフトも大きく改善された。一方、新アンジュレーターは3月に納入された。赤外線計測器を用意し、6月には光空洞共振器に蓄積する赤外線自発光を確認し、その高調波スペクトル<sup>6)</sup>を測定した。

学術フロンティア推進事業の初年度は、利用研究高度化のために、新実験棟増築、レーザービームライン、パラメトリックX線源、生体高次構造X線解析装置、X線回折装置の設計と製造、FEL利用研究用各種実験装置等の導入、

30MWクライストロンの開発、ビーム計測システムの整備等が実施された。

加速器は、新実験棟増築工事のために、7月から12月までの5ヶ月間運転を中断し、2001年1月に運転を再開した。FELは波長を $1.5 \mu \text{ m}$ に固定し発振を試みた。3月には赤外線自発光の蓄積を確認したが、しかし、レーザー発振に到らなかった。5月中旬に、FEL発生装置の総点検を行い、アンジュレーターの上流部と下流部の空隙に3mmの差違があることが明らかになり、直ちにアンジュレーターの矯正作業を開始した。作業が終了した翌日の5月26日に、エネルギーが86.8MeV、ビーム電流が100mAの運転パラメーターで $1.5 \mu \text{ m}$ のFEL発振に成功した。約1時間後にはその強度が蓄積光の約 $10^3$ 倍に達した。更に、5月28日には約 $10^5$ 倍、6月19日には約 $10^8$ 倍になり、マクロパルス当たりのエネルギーは $15 \text{ mJ/mm}^2$ であった。しかし、FEL飽和現象は確認できなかった。又、FEL発振は非常に不安定であった。その上、強いFEL発振は一過性であり、利用実験に提供できる状態でなかった。

一方、共同利用実験を開始するには、本研究施設が放射線施設検査に合格することが絶対条件であった。1999年に加速器室と実験室間の放射線シールドが強化され、2001年に加速器室の放射線量や加速器から実験室に漏洩する放射線量を減らす作業に着手した。2002年1月、使用変更許可願いを申請し、2003年3月に施設検査に合格した。

高度化の目的はFEL発振安定化に移行し、加速器は交流入力電圧、高周波位相、冷却水温度等、FELは機械的振動、室温等の面から徹底的に追究され、改善作業を実施した。2003年3月には、これらの要因が取り除かれて、電子ビームの安定性は著しく向上し、光空洞共振器の機械的振動は矯正された。しかし、FELの弱発振は持続するが、強発振は依然として不安定で一過性であった。不安定要因は光空洞共振器の反射鏡耐性に絞られ、鏡面の誘電体多層膜は強発振で直ちに破損することが明らかになった。現在、耐性の高い金属鏡を製作中である。又、FEL発生装置と新実験棟を結ぶレーザービームラインの接続工事中であり、2003年7月にはFEL利用実験を開始する。

## 2. 沿革

本研究施設の発祥は、1975年に理工、医、歯の3学部のプロジェクトとして発足した $\pi$ 中間子による癌治療計画( $\pi$ 計画)に遡る。1977年には松戸歯、農獣医(生物資源科学)学部が加わった。1988年に「 $\pi$ 計画」が「放射光計画」に変更され文理学部が加わった。1992年に大学本部と理工、文理、医、歯、松戸歯、生物資源科学によって日本大学の共通研究施設として「電子線共同利用センター」(仮称)を設立し、共同利用研究プロジェクトとして進められ、実験棟が増築された。1997年に「電子線共同利用センター」(仮称)を正式に「電子線利用研究施設」に改称し、日本大学の「電子線高度利用の共通研究施設」として定着したものである。一方、電子線高度利用計画は、高エネルギー物理学研究所(KEK)、電子技術総合研究所、東北大学原子核物理学研究施設、東北大学科学計測研究所、動力炉核燃料サイクル機構等の協力を得て進められた。

1996年に高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同研究として日本大学の「電子線共同利用センター」(仮称)にKEKから電子線形加速器本体を移設し125 MeV加速器の建設が進められた。又、1997年には、COE計画を中心に電子線利用研究施設の研究拠点化を進め、加速器科学、物質科学、生命科学を横断する7つ

の研究班を学内に組織して、FELとパラメトリックX線を基盤とする超分子機能の研究高度化を進めた。更に、2000年3月に私立大学学術研究高度化の研究拠点に選定され、4月に本研究施設を基盤とする学術フロントイア推進事業「可変波長高輝度単色光源の高度利用」が5年計画でスタートした。2001年3月末には、写真1に示すような新実験棟が竣工、パラメトリックX線源、レーザービームライン、生体高次構造X線解析装置、X線回折装置等が完成、各種実験装置が導入された。

2001年5月に1.5  $\mu\text{m}$ の自由電子レーザー発振に成功した。2003年3月、加速器の高度化が終了し、放射線施設検査に合格した。2003年7月、共同利用実験の開始予定。



写真1 電子線利用研究施設に建設された新実験棟

### 3. 自由電子レーザー

自由電子レーザーは、図1に示すように、ウイグラー磁場で電子ビームを蛇行運動させて、電子ビームから発生する自発放射光をウイグラーの両外側に設置した2枚の反射からなる光空洞共振器に蓄積する。

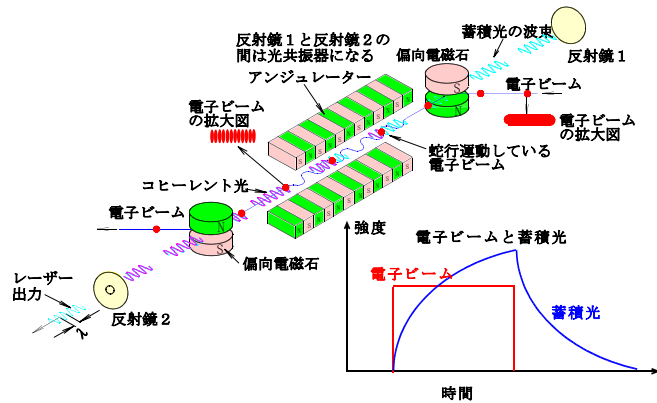


図1 自由電子レーザーの概念図

電子ビームがこの装置を次々通過し、その放射光を蓄積すると、時間経過と共に蓄積光は次第に強くなっていく。この蓄積光によって後続の電子ビームがマイクロに集群するが、この電子ビームが蛇行運動を継続すると電子ビームから蓄積光に強烈な電磁波が放出(誘導放射)され、蓄積光はこの利得Gによって、その強度が指数関数的に増加(発振)する。一方、自由電子レーザーの発振波長 $\lambda_p$ はウイグラー周期長 $\lambda_w$ に比例し、電子ビームのエネルギーEの自乗に逆比例する( $\lambda_p \sim \lambda_w / E^2$ )。又、自由電子レーザー波長 $\lambda_p$ が短くなる程、ウイグラーによる光利得Gが小さくなる。その光利得Gはウイグラー波長 $\lambda_w$ の4乗とウイグラー周期数 $N_w$ の3乗に比例し、電子ビームエネルギーEの3乗に逆比例( $G \sim \lambda_w^4 N_w^3$

／E<sup>3</sup>)する。自由に動き回れる電子ビームは図1に示すような経過を経てレーザーに成長するが、短波長自由電子レーザーを大電力にするには、図1に示すように、長パルスの電子ビームが必要になる。少し詳細に説明すると、光速度に近い電子ビームが磁石を交互に並べた間を通過すると蛇行運動して進行方向に特定の波長の強い光を放出する。その波長は光速度と電子速度の差が小さいほど短くなる(ドップラー効果)。この装置の両外側に2枚の鏡を置いて、一方、後続の電子ビームも蛇行運動すると光を放出するが、次々に追い越していく蓄積光の強烈な電磁場の影響を受けて、電子ビーム自身に光の波長間隔の濃淡(粗密)ができる。蓄積光は電子ビームの濃淡を追い越す度に、電子ビームからエネルギーを受け取り、自由電子レーザーの強度は指数関数的に増大し発振状態に成長する。

### 4. 加速器の高度化

1994年に125MeV電子線形加速器の建設に着手したが、建設コストを切り詰めるために、古い電子線形加速器やマイクロトロン等の部品を可能な限り再利用した。そのために、加速器は継ぎ接ぎだらけであったが、これを高度化することによって、赤外線から紫外線の短波長領域のFEL発振を試みる挑戦的な計画となった。1998年、写真2に示すように電子線形加速器は完成した。

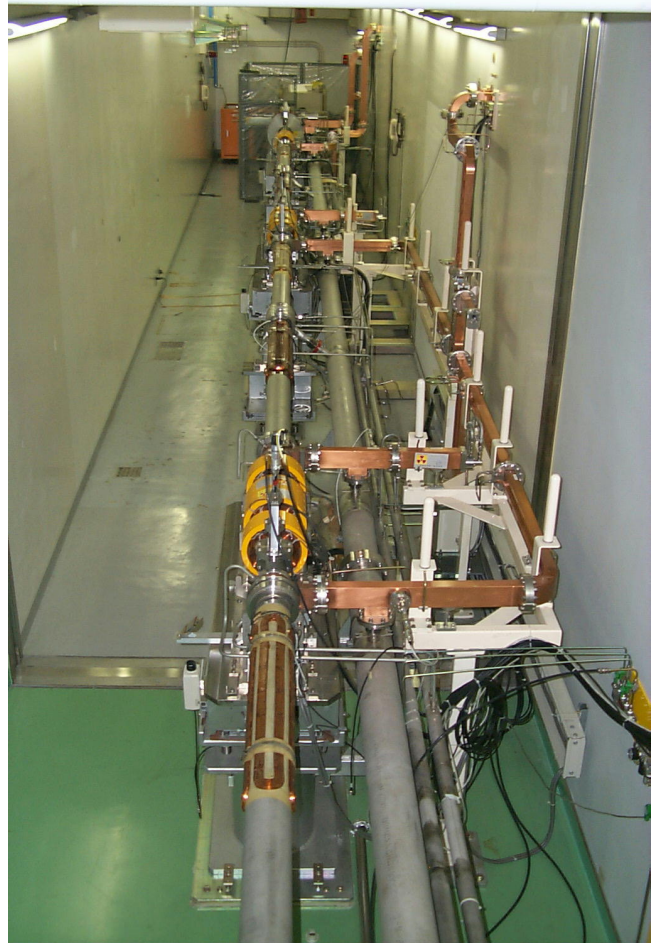


写真2 下流から眺めた125MeV電子線形加速器

又、高周波電子銃は開発の途上であり、電子ビームが長パルスを持続することが困難である理由から、入射部は、写真3に示すように、直流電子銃、プリバンチャー、バンチャーの組み合わせとなった。しかし、試運転の当初から加速器には色々なトラブルが発生した。



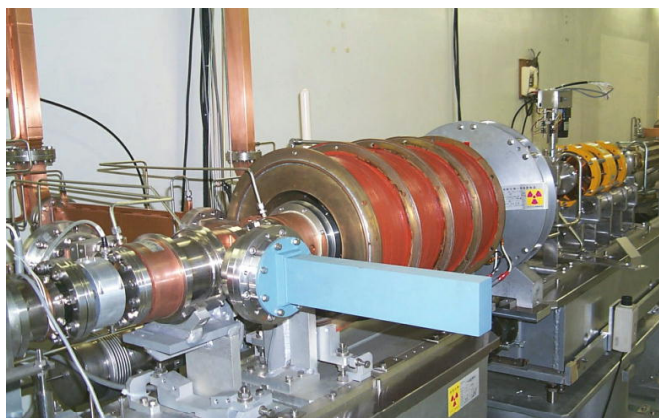


写真3 プリバンチャーとバンチャーからなる入射部

例えば、パルストランスを収納するオイルタンク内のアーク放電である。これはクライストロンのヒーター絶縁トランスの耐圧不足によるものであり、写真4に示すようにトランスの2次側にコロナリング取り付けることで解決した。

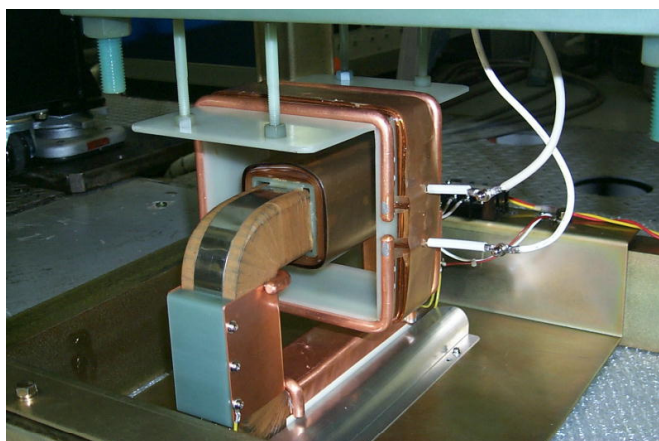


写真4 改良されたクライストロンのヒーター絶縁トランス

短波長自由電子レーザーを利用する研究計画にとっては、短パルスクライストロンの長パルス化は絶対条件であった。そこで、高周波パルス電力の持続性能仕様が $2.5 \mu\text{s}$ である通常電子線形加速器用短パルスクライストロンを長パルスで使用するためのテスト実験を行った。

その結果、高周波パルス大電力が20MWを越える状態では、持続時間が $10 \mu\text{s}$ を越えると、クライストロンの出力窓(セラミック)は判を押したように破損した。このテスト実験で電子ビーム加速すると、電子ビームのパルス電流持続時間は、図2に示すように、 $4 \mu\text{s}$ であった。

パルス持続時間 $4 \mu\text{s}$ では、 $5 \mu\text{m}$ より短い波長の自由電子レーザーを共振させることは不可能であった。一方、 $2.5 \mu\text{s}$ 仕様の短パルス用クライストロンのパルス持続時間を $20 \mu\text{s}$ 以上に延ばす長パルス化の作業は、前代未聞の挑戦的な試みであり、試行錯誤を繰り返す無謀な企てのように思われていた。事実、テスト実験中にクライストロンの出力窓は次々に破損し、その度、新しいクライストロンに交換し、その後、厳しいテスト条件を満たす状態になる迄に、クライストロンのコンデショニングを2~3ヶ月続ける必要があった。このクライストロンの使用限界を見極めるテスト実験は、時間と忍耐を要する暗中模索の作業であった。先の見えなかったこの試みにも、あるヒントを得て具体的な対応策を見つけることが出来

た。これは、写真5に示すクライストロン出力窓の周辺に、イオンポンプ2台(写真6)を取り付け排気速度を増強することによって、短パルスクライストロンの長パルス化は、ほぼ達成できる見通しがあった。2000年1月のテスト実験では、高周波パルス電力が20MW、パルス持続時間が $20 \mu\text{s}$ 、繰り返し数が12.5 Hzを達成<sup>10)</sup>した。その結果、加速器の終端では、写真7に示すように、電子ビーム電流が $20 \mu\text{s}$ のパルス持続を維持するようになった。



写真5 改良前のクライストロン出力窓周辺と立体回路。



写真6 改良後のクライストロンの出力窓周辺に取り付けられたイオンポンプ。



残された課題は、電子ビームのエネルギーの不安定性に絞られた。これは、立体回路接合部接触不良の修復、バックダイオード回路の部品交換、サイクロン・リザーバーの詳細調整<sup>11)</sup>により、加速ビームの安定性は大幅に改善された。

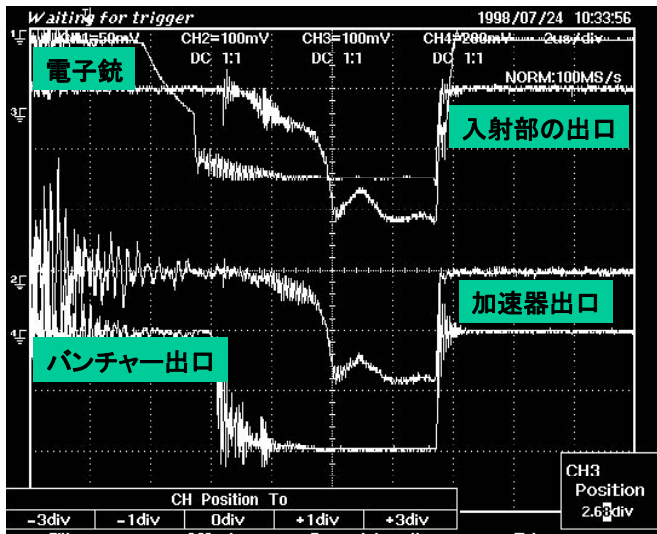


図2 テスト運転開始当初の電子ビーム電流波形。  
横軸:  $2 \mu s / \text{div}$

しかし、電子ビームを45度偏向電磁石2個で90度偏向した後、FELシステムに輸送すると、写真8に示すように、電子ビーム波形の前半部分か或いは後半部分のどちらか一方だけが通過し、残りのビームは、偏向部のスリットで遮られた。この原因は、クライストロンの半導体前置増幅器がパルス持続時間内 ( $20 \mu s$ ) で約10度位相がずれるためであった。これは半導体がパルス動作するときの発生する熱による温度の時間変化によるが、パルス持続時間内の位相ズレを高速帰還回路(フィードバック回路)を使って補償することは回路時定数から困難である。

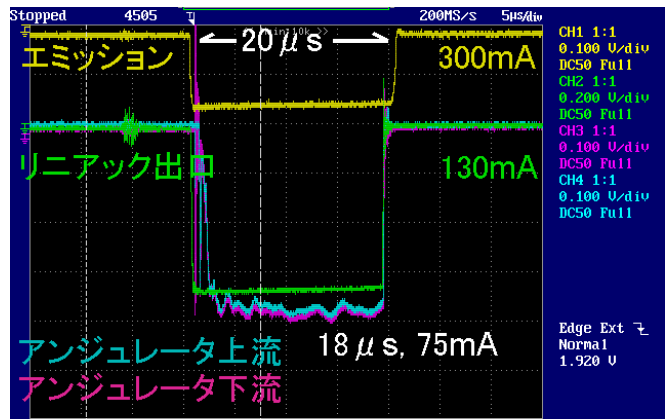


写真9 位相補償された電子ビームのパルス波形、FELの輸送システムの入口と出口にあるビーム電流モニターのビーム波形。

そこで、高周波を高速バラクターにファンクション電圧を加えて予め逆位相にして前置増幅器に供給する回路(フィードフォワード回路)で位相補償を試みた。この高周波位相補償<sup>12,13)</sup>等の作業により、FELシステムにおける電子ビームの透過率は、写真9に示すように、順次に改善された。FELの輸送路の途中でビーム損失が大幅に減少し、100%輸送も可能になった。

実験室の有効利用を目的として、加速器の運転中でも実験室に実験者が自由に入室出来るように、加速器室と実験室の間の放射線シールドが強化された。その結果、FELの実験状態が実験室で直接に検証することや直接に計測することが可能となった。

一方、学術フロンティア推進事業では、新しい実験棟以外に、パラメトリックX線源<sup>14)</sup>、レーザービームラインが建設された。

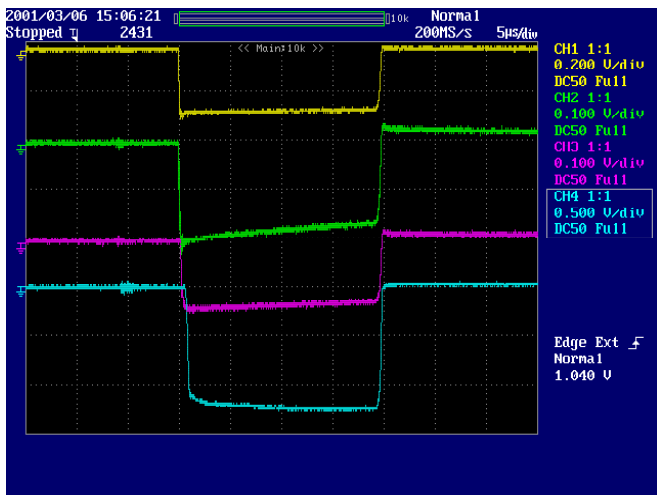


写真7 電子ビームのパルス持続波形。横軸:  $5 \mu s / \text{div}$

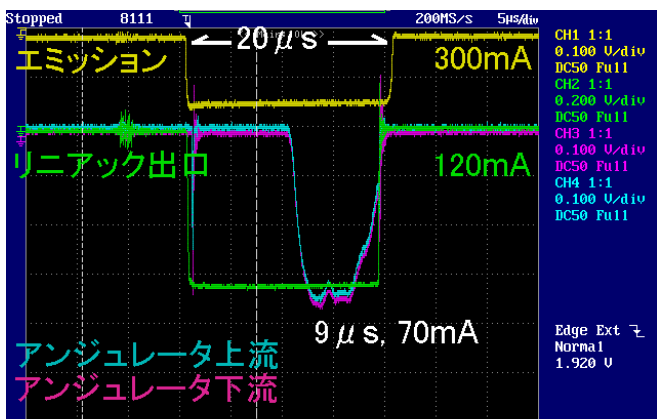


写真8 位相補償されない電子ビームのパルス波形、FELの輸送システムの入口と出口にあるビーム電流モニターのビーム波形。



写真10 パラメトリックX線発生装置(左)とFEL発生装置(右)

FELシステムとパラメトリックX線源のビームラインは、加速器のビームラインに挿入された45度偏向電磁石2個を使ってそれぞれ45度偏向され、更に、45度偏向電磁石で、加速器ビームラインに垂直(90度)に偏向され、それぞれ平行になるように設計された。写真10には加速器室に設置されたFELシステムとパラメトリックX線源の鳥瞰を示す。(加速器と光源の配置は図6を参照)

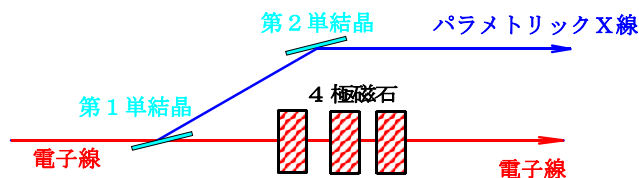


図3 パラメトリックX線発生装置の概念図

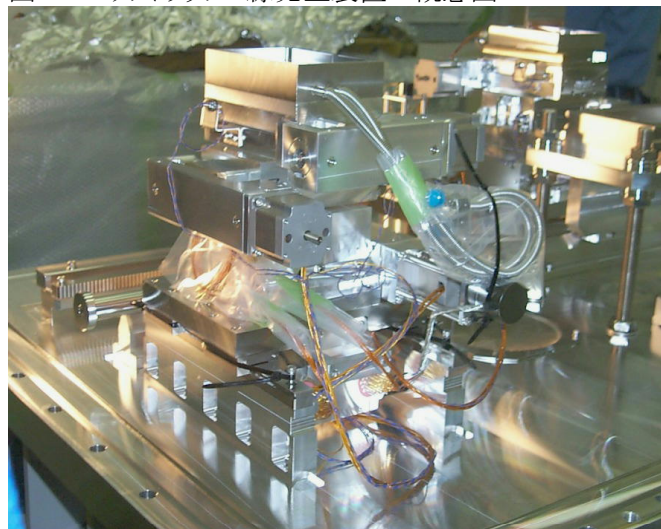


写真11 パラメトリックX線発生装置の真空槽に搭載された第1単結晶の多軸制御架台

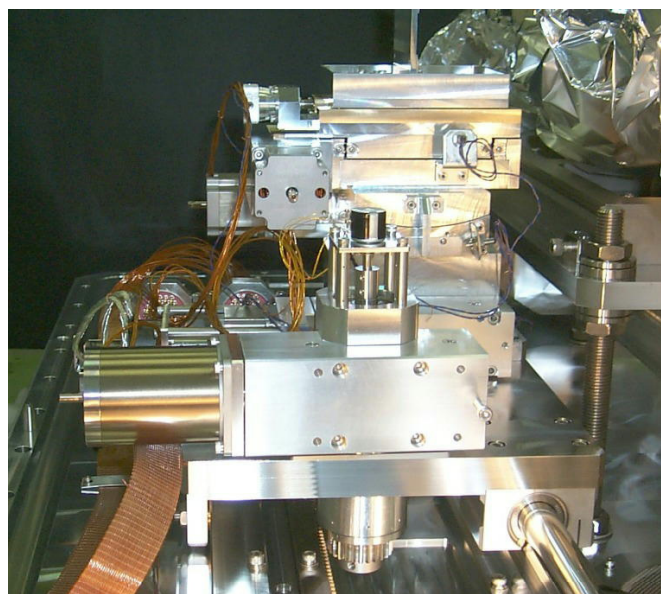


写真12 パラメトリックX線発生装置の真空槽に搭載された第2単結晶の多軸制御移動架台

パラメトリックX線発生装置は、図3に示すように、電子ビームの進行方向に対してある角度を成す薄い単結晶

(第1単結晶)に高エネルギーの電子ビームを照射すると、第1単結晶から干渉X線が放射される。このX線を第2単結晶で更にブラック反射させて電子ビームラインから離れたラインに取り出す。

パラメトリックX線は電子線ビームのエネルギーに比例して指向性が強くなる。電子ビームに対する第1単結晶の回転角度を変えることによって放射X線のエネルギーを変えることができる。X線の放射角度に応じて第2単結晶もその位置と角度を変える必要があり、第1・第2単結晶はそれぞれの多軸制御台に搭載される。写真11・12には第1・第2単結晶架台を示す。一方、単結晶を通過する電子ビームは分散するので4極磁石(永久磁石)で集束し、ビームダンプに輸送するように設計されている。



写真13 新電子銃(左)と旧電子銃(右)

更に、電子銃の低エミッタンス化、短パルスクライストロン長のパルス化、半導体増幅器の位相シフト制御、クライストロン出力電力の変動制御等の改善に成功し、電子ビーム加速は安定し、エネルギー分散も小さくなった。その結果、光空洞共振器の微細な調整が容易になった。電子銃の低エミッタンス化は、写真13に示すように、電子銃の陰極半径を縮小し、陰極電極構造を改造する事によって達成された。電子銃のエミッタンスは入射部の集束レンズを使って測定され、 $H=13.4\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 、 $V=13.6\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ であった。旧電子銃と比較すると新電子銃のエミッタンスは、約半分になった<sup>15)</sup>。

日本大学では当初、アンジュレーター(周期長を24mmにして $0.35\mu\text{ m}\sim 5\mu\text{ m}$ のFELを発生させることを試みた。しかし、加速器試運転時、FELの基礎実験中にアンジュレーターのウィグラー磁石が放射線損傷で劣化した。その原因は、調整時の電子ビームエネルギー分散が大きく、その上、アンジュレーターの細いビーム輸送パイプ(内径:7mm)による電子ビーム損失が大きかったためと考えている。

そこで、FELは当面の間、赤外線( $1.5\mu\text{ m}$ 波長)で発振させることを目標に $0.8\mu\text{ m}\sim 5\mu\text{ m}$ 赤外線用アンジュレーターを設計し、周期長を48mmとするウィグラー磁石を製作した。ウィグラー磁石は写真14に示すように、アンジュレーター架台に取り付けられた。FEL光空洞共振器のアライメントを容易にするために、光空洞共振器の反射鏡には、狭い帯域の誘電体多層膜を用いた基礎実験を行っている。従って、可視光やアライメント用HeNeレーザーは反射鏡を透過する。写真15にはFELの上流光空洞共振器用真空槽を示す。図4には、赤外線用ウィグラー永久磁石の磁極空隙と尖頭磁場特性を示す。日本大学のFEL計画は、サブハーモニック・バンチャーや高周波電子銃などの特殊装置を用いない普通



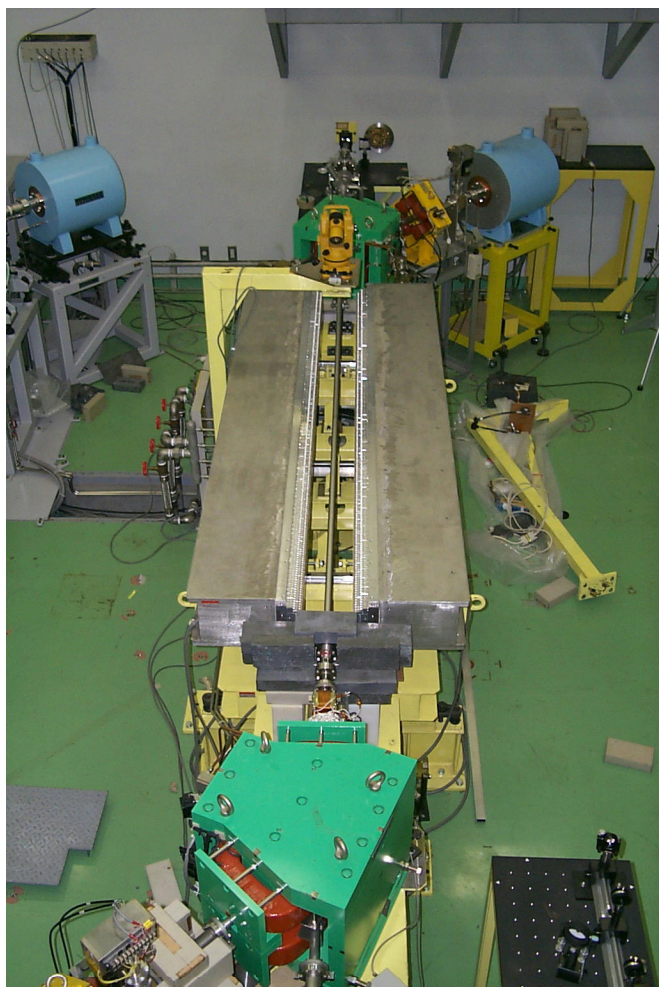


写真15 上流から眺めたアンジュレーター架台(中央)、磁極空隙は左右に開き、赤外線用ウィグラー磁石はアンジュレーター架台の左右壁に取り付けられている。

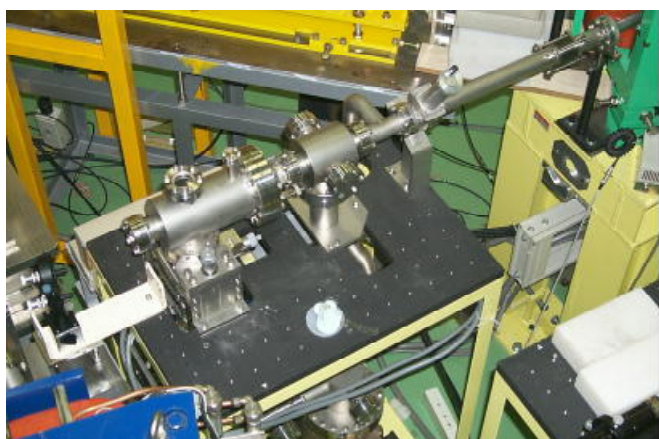


写真16 上流光空洞共振器用真空槽(左)、ビームスプリッター用真空槽(左)

の電子線形加速器の高度化により、短波長FEL発振を試みる特異なケースである。

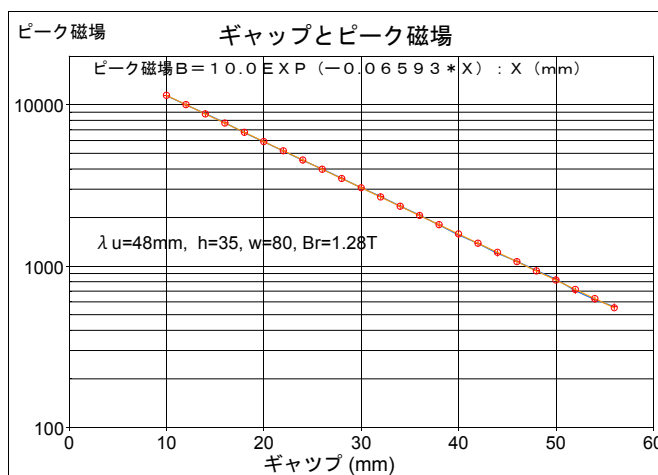


図4 赤外線用ウィグラー永久磁石の磁場特性

### 5. 加速器と光源の性能仕様

本研究施設における電子線形加速器、近赤外線から紫外線波領域までのFEL、赤外線から近赤外線領域までのFEL、アンジュレーターの自発放射光、パラメトリックX線等の最終目標の性能仕様を Table1 ~ Table5 に示す。又、図6には、加速器と光源の全体構成配置を示す。

Table 1 Electron linac

Beam energy	125 MeV
Beam Intensity	200 mA
Beam pulse duration	25 μs
Peak currents	20 A
Beam bunch width	3.5 ~ 10 ps
Beam energy spread	< 0.5 %
Repetition rate	12.5 pps
Maximum beam power	6.25 kW
Frequency	2856 Mhz
Accelerator structure	4 m×3
Dc gun	- 100 kV
Klystron power	30 MW×2

Table2 FEL from near infrared to ultraviolet

Undulator structure	Halbach
Total length of undulator	2,400 mm
Gap space of magnet pole	13 ~ 25 mm
Periodicity	24 mm
Periodic numbers	100
Ordinary k-value	0.65 ~ 1.1
Length of optical cavity	6,718 mm
Mirror	multi-coated
Photon wave length	0.3 ~ 1.5μm
Average power	0.3 ~ 3 W

Table 3 FEL from infrared to near infrared

Undulator structure	Halbach
Total length of undulator	2,400 mm
Gap space of magnet pole	28 ~ 40 mm
Periodicity	48 mm
Periodic numbers	50
Ordinary k-value	0.65 ~ 1.1
Length of optical cavity	6,718 mm
Mirror	multi-coated or metal
Photon wave length	0.8 ~ 5μm
Average power	1 ~ 5 W

Table 4 Spontaneous Emission by the Undulator

Wave length of radiation	0.043 ~ 5 μs
Photon energy	0.24 ~ 29 eV
Energy spread	1 %
Average photon flux	2.5×10 <sup>11</sup> photon/s

Table 5 Parametric X-ray

Energy of X-ray	3 ~ 30 keV
Energy spread	1 %
Average flux	1.2×10 <sup>9</sup> photon /s
Directional angle	~ 4 mrad

6. 研究設備

本研究施設は、図7に完成時における電子線利用研究施設全体の鳥瞰図を示してあるように、鉄筋コンクリート2階建て旧実験棟と新実験棟(写真1)に区分されているが、2回の増築により総床面積が2223m<sup>2</sup>に拡張される。

旧実験棟(920m<sup>2</sup>)には加速器本体室、モジュレーター室、電源室、空調室、制御室、放射線管理室、実験室、測定室、研究室、電子ビーム加速テスト室、搬入室等が設けられている。新実験棟(1303m<sup>2</sup>)にはレーザー照射実験室(9室)、資料分析室(5室)、実験準備室(6室)、研究室(7室)、セミナー室、資料室、物品管理室、管理事務室が用意される。新実験棟のレーザー照射実験室と実験準備室は微光測定も可能なように暗室構造になっており、又、一部の実験室では有機ガスが取り扱えるように強制排気装置(ドラフター)を完備される。

半導体と新素材を開発するレーザー照射実験室はクラス1000とクラス10000のクリーンルームになる。研究設備は、一部建設の途上である。

実験棟のレーザービームラインは、写真17に示すように、各レーザー実験室(9室)を連絡するピット(500×400mm<sup>2</sup>)内に設置される。レーザー取り出し装置は、図

5に示すように、2枚反射鏡により、100%、1%、0%の強度のいずれかを選択出来るように設計され、レーザーは実験室の床から900mmの高さに取り出され反射鏡で±3度以内の実験装置に供給される予定である。

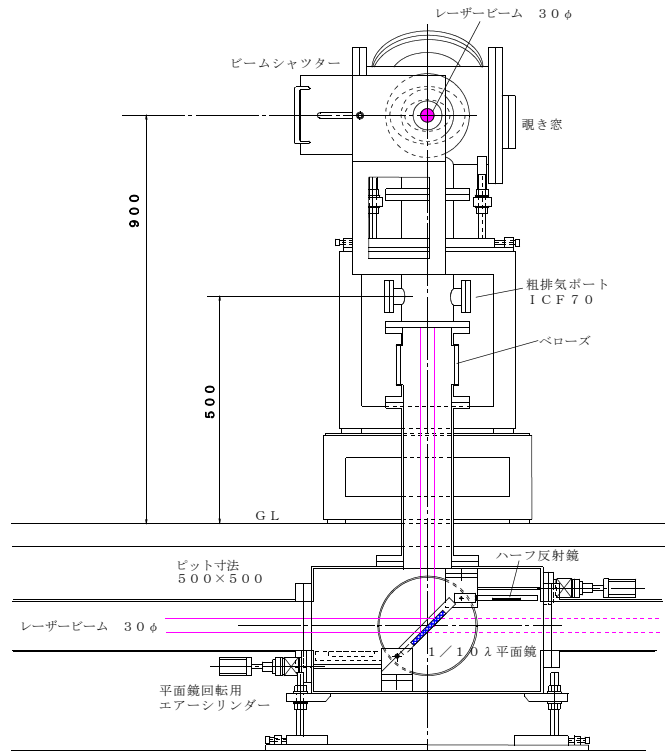


図5 各レーザー照射実験室に設置されるレーザー取り出し装置の断面図

125MeV Electron Linac of LEBRA in Nippon University

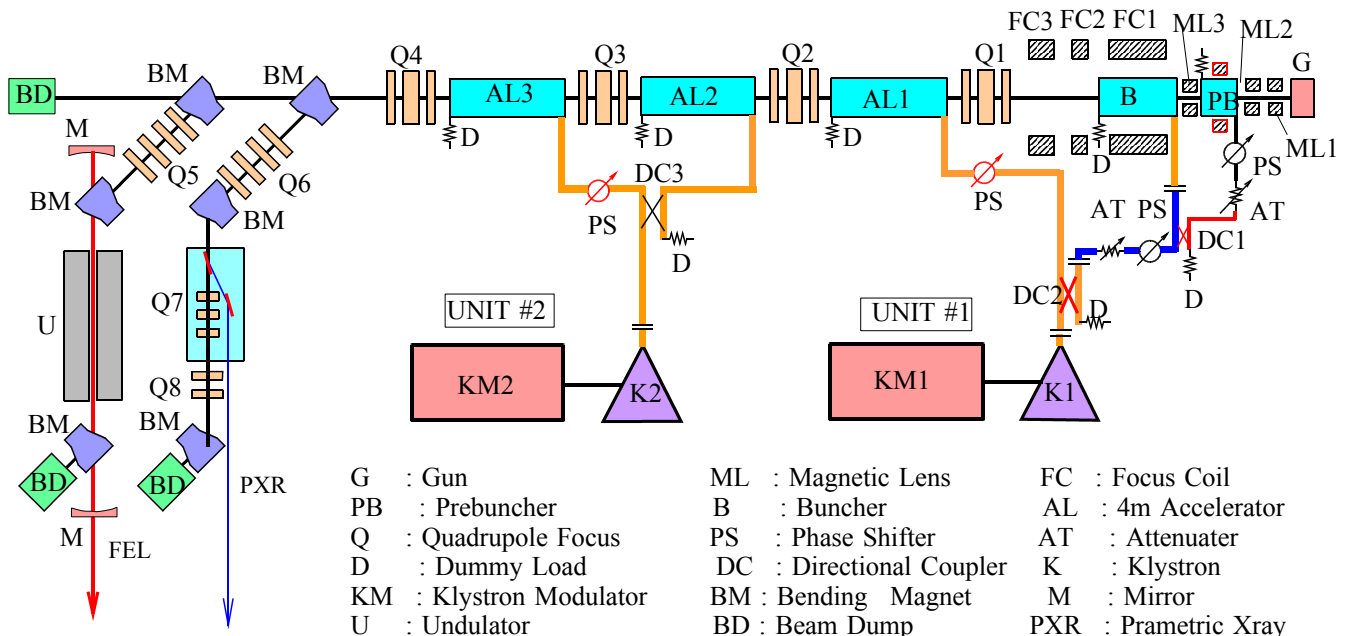


図6 本研究施設の125MeV電子線形加速器と光源の構成



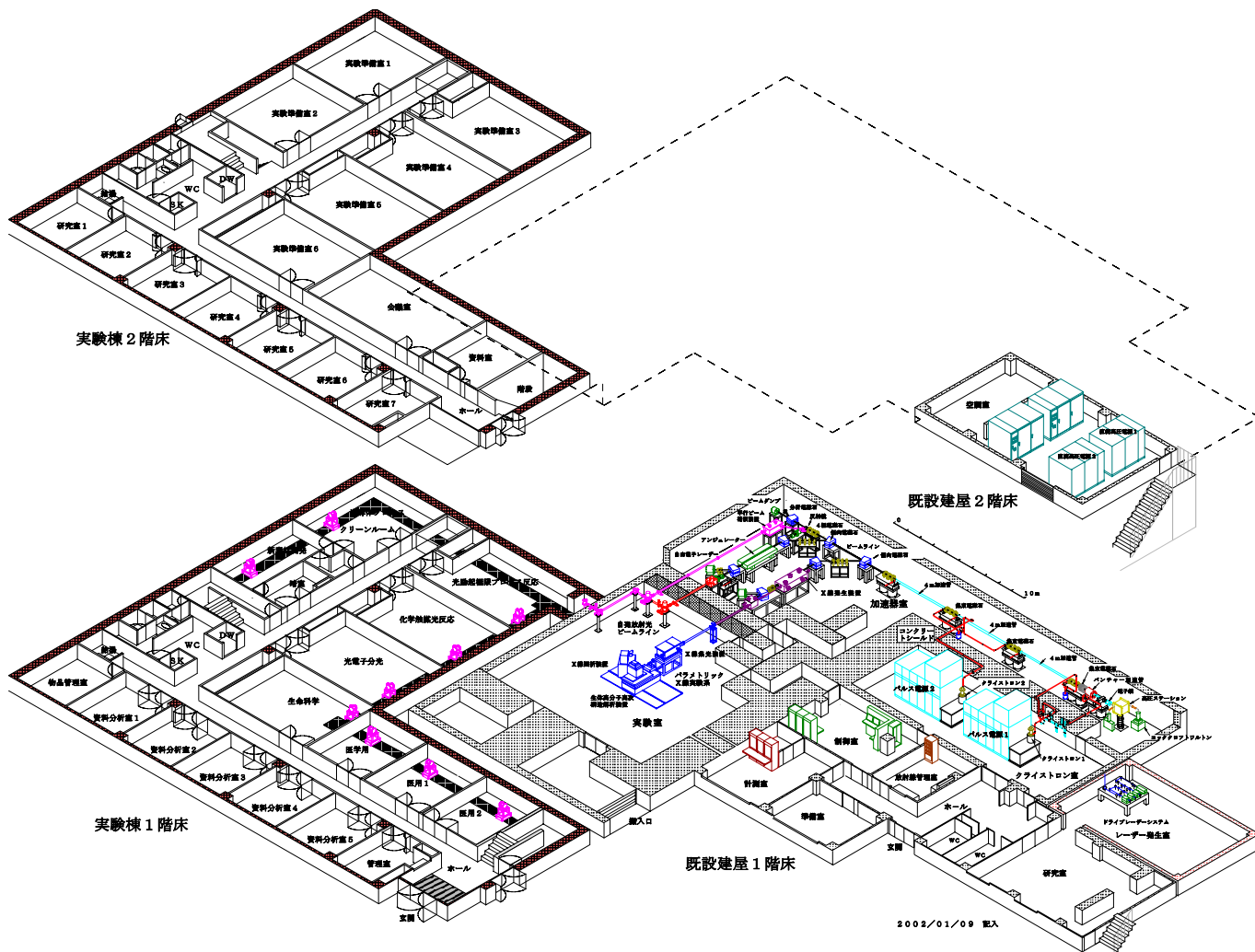


図7 完成時における電子線利用研究施設全体の鳥瞰図



写真17 新実験棟に建設中のレーザービームライン(左)とレーザービームラインと接合したレーザー取り出し装置(右)。



写真18 資料分析室に設置中の予備実験用タンパク質自動X線高次解析装置の資料分析部(左)と予備実験用拡張型粉末X線回折装置の全体(右)。

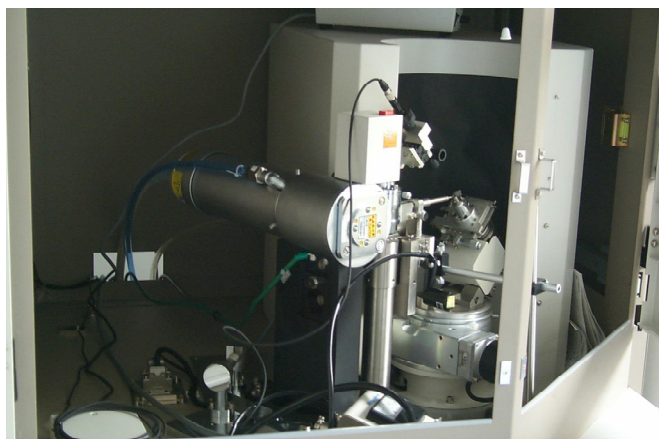


写真19 資料分析室に設置された微小部自動X線回折装置の資料分析部。

レーザー照射実験室には、イオン放電槽とダイヤモンドアンビル、イメージ増強型極低迷光高分解能分光装置、時間飛行質量分析装置、フーリエ変換高分解能自動認識分光器、マイクロアレイ解析システム(遺伝子アレイ読みとり用)、他関節自由腕レーザー導入装置等、又、新実験棟の資料分析室には、拡張型粉末X線回折装置、タンパク質自動X線高次解析装置、微小部自動X線回折装置、コールドルーム(タンパク質結晶成長用)、化学洗浄処理装置、バイオベンチ等が用意される予定であり、これらは大学全体の共同利用実験に提供される。X線回折装置には、2次元イメージングプレートが用意される予定であり、この装置を導入することによって、X線回折によるタンパク質など生体高分子の高次構造解析や微小部のX線回折の自動解析が容易になる。

## 7. 研究内容

本研究施設は、日本大学の理念と戦略に基づく「未来創造プロジェクト」に沿い、「21世紀における自然科学の必然的な発展」を見据え、全世界的に要請されるテーマで且つ一私立大学でも他の研究機関と協力することによって対応できる高分子の研究を目的としている。

特に赤外線からX線領域の可変波長高輝度単色光源を基盤として、これらの光源によって高分子を合成しその新機能を探索し高次構造解析を行って、分子の集合体が色々な特殊機能をもつようになるメカニズムの解明を研究目的としている。

これらの基礎研究は「21世紀の先端的な物作り」Super Molecular Factory (超分子工場) であり、無機質生命体への挑戦でもある。

本研究施設の特徴は、1) FEL利用研究では事前実験準備を、2) パラメトリックX線利用研究ではX線回折装置で事前に予備実験を、本研究施設内で出来ることである。即ち、これは特殊機能を持つ分子クラスターや多機能を持つ巨大分子を可変波長のFELによる光触媒反応や光酵素反応を用いて創生し、これらの機能や構造を可変波長高輝度単色光(FELやパラメトリックX線)を使って系統的に探究する一大プロジェクトである。

現在、本プロジェクトをその第一段階(phase I)と位置づけて、光源開発、物質科学、生命科学に分類し、多分野から多くの研究提案があり、その中から下記のような研究テーマを取り上げて、開発研究と実用化を推進している。

- (1) 光源開発
  - 1) 波長可変コヒーレント光の基礎研究
  - 2) 新機能物質探索用2色同期光の開発
- (2) 物質科学における利用研究

- 3) 光励起によるスーパーダイヤモンドの合成
- 4) 半導体素子材料に対する電離照射効果
- 5) 金属磁性物質の高圧下のXANESの研究
- 6) 分子クラスターの光誘起相転移
- 7) 光誘起触媒化学反応の解明
- 8) 新光機能素材の開発
- 9) 大気汚染物質の光化学過程の追跡
- (3) 生命科学における利用研究
  - 10) 歯の硬組織に及ぼす光の影響
  - 11) 歯科合金の金属疲労
  - 12) インプラント界面構造と組織の解明
  - 13) 金属タンパク質のNO補足能
  - 14) ヘモグロビンの高次構造解析
  - 15) ヘモシニアンの高次構造解析
  - 16) カルシウム結合タンパク質の高次構造解析
  - 17) 組織再生の光効果
  - 18) レーザー波長と歯質切削条件

## 8. 今後のスケジュールと研究体制

本研究施設は放射線による施設検査がまだ実施されていないので、加速器の性能向上テスト実験しか出来ない状態である。本研究施設で共同利用実験を開始するには、加速器運転中でも研究者が常時実験室に立ち入るように実験室の研究環境を整備する必要がある。

しかし、今後、加速器の性能が向上して、電子ビーム出力が6.25kWに到達すると、迷路から漏洩放射線で法定放射線レベルを越える可能性がある。共同利用実験の開始時期は、放射線対応が終了し、放射線による施設検査に合格した後、10月頃と予想している。

4月～5月には1.5 μmのFELを発振させ、6月以降に本格的な耐久テストを行い、7月に0.8～5 μmの波長可変実験を行う。8月～9月には、FELやパラメトリックX線のテスト実験を行い、FEL利用実験の開始時期は10月頃と予想している。一方、パラメトリックX線の共同利用実験は、パラメトリックX線のビームライン新設の申請を行い、許可が下りた後に、本格的な実用化テストを行って利用実験に移行することになる。しかし、放射線対策や加速器高度化の良否によっては、共同利用の開始時期が大幅に遅れて平成14年4月以降になる可能性もあると思われる。

一方、本格的共同利用実験を開始するには、研究支援体制を確立する必要がある。本研究施設の実質的なスタッフは、教授3名、助教授1名、助手1名、ポスト・ドクター(学術フロンティア支援スタッフ)2名と事務員(パート)1名の合計7名で構成される。

定常状態のユーザー時間は、1日に8時間、1週に5日を予定している。本格的な利用研究が始まると、加速器の運転、維持、改善にFELとパラメトリックX線の調整、実験室整備が加わり、現在の陣容で運営することは困難であり、大学本部にスタッフの増員を要求している。

学術フロンティア推進事業には学内(理工、文理、工、医、歯、松戸歯、生物資源科学の6学部)から35名と学外(KEK、東京理科大、明海大、ニューヨーク大、徳島大、筑波大、東北大)から7名が研究分担者として参加し、15の研究グループに組織されている。これ以外に、学内は生産工と薬学部、学外は東京大学と北海道大からも実験参加希望がある。

## 9. おわりに

過去6年間にわたって改修作業を進めた結果、冷却系の腐食、パルストランス、クライストロンヒーター用絶縁トランス、バックダイオード回路等に発生していた故障は消滅した。安定化電源の導入、集束系の強化、加速管配置の補修、クライストロン高周波窓周辺の真空システムの強化、導波管接合不良の改修、高周波増幅器の位相補償、サイクロトロン微調整等によって加速器の安定性が向上した。短パルス用クライストロ



ンの長パルス化、電子銃の低エミッタンス化<sup>18)</sup>が達成され、加速器の高度化は着実に進行し、加速ビームの性能が著しく向上した。又、モノクロメーター、ストリーク・カメラ、高感度 CCD カメラ、高速受光素子等、計測システムが整備され、自発放射光のスペクトルや電子ビームのバンチ状態をリアルタイムで測定が可能となった。一方では、短波長自由電子レーザー用アンジュレーター<sup>19)</sup>の永久磁石は放射線損傷を受けて使用不能になり、短波長自由電子レーザー発振は遅延せざるを得なかった。そこで、周期長が 2 倍のアンジュレーターを導入し、レーザー発振の実験環境を整え、自由電子レーザーの発振は間近のものと思われるが、なかなか発振に至らないので何か見落としをしているのではないかと、その対策に苦慮している。一方、加速器性能には難があり、共同利用実験に耐え得る状態にするため更なる高度化を進めている。

利用研究については、将来に大きな期待を持っている。それは、地球上に存在する超分子(生命体を含む)は多水素結合を基盤としている。多水素分子は、個々の水素結合力は弱い、多水素結合でその結合力の弱さを補い、しなやかで丈夫な分子として存在している。又、部分的に結合が切断されても、親水作用を通じて簡単に修復する仮想機能を取得し、このメカニズムは炭素や窒素の元素を媒介し触媒や酵素により複雑な生命体のような超分子に成長している。

この水素結合エネルギー領域は、太陽が照射する可視光領域とほぼ一致し、特に生物はその恩恵に浴している。しかし、この波長領域では水の光吸収が極端に弱いことが、超分子形成に大きな役割を果たしている。

本研究施設では、上の事実に基づき、プロジェクトの第二段階(phase II)として、水の可視光特性に注目し、可視光FELによる光触媒化学反応や光酵素化学反応を活用して超分子の創生を行い、超分子の新機能の解明を目指している。このためには、本研究施設への多くの研究者のご参加と関連する研究機関のご支援をお願いする次第である。

## 10. 謝辞

短波長自由電子レーザー計画がここまで進展しましたのは、日本大学と本計画に係わられた多くの研究機関、並びに、建設に参加された企業のご支援によるものであり、関連された多くの方々に深く感謝いたします。

又、本計画では加速器が基盤であり、加速器性能がここまで向上したのは、日本大学と高エネルギー加速器研究機構の共同研究における研究成果であります。本計画を支えてくれた高エネルギー加速器研究機構の方々に心からの御礼申し上げます。

本計画は学術フロンティア推進事業によって研究環境が整備され、利用研究を具体的に大きく進展させることができました。利用研究計画を積極的に推進し熱意のある支援に感謝致します。

さらに、瀬在日大総長、並びに、小嶋原研所長には本計画に対して終始変わらぬご厚情のご支援を頂き改めて謝辞を表します。

## 参考文献

- 1) I.Sato, et al., Proc. of 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 104-106 (1997).
- 2) K.Hayakawa et al., Nucl.Instr.and Meth. A375, ABS25-26(1996).
- 3) T.Tanaka, et al., Nucl.Instr.and Meth. A407, II103-104(1998).
- 4) T.Tanaka, et al., KEK Proceedings 98-10 Nov. 722-724, 1998A.
- 5) T.Tanaka, et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, 25-27 (1998).
- 6) K.Yokoyama, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan, 473-475(1999).
- 7) H.Nakazawa, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech.,

- Riken,Japan, 394-396(1999).
- 8) I.Sato, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan, 37-39(1999).
- 9) Y.Hayakawa, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,358-360 (2000)
- 10) T.Sakai, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,228-230 (2000).
- 11) K.Ishiwata, et al.,Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, 222-224 (2000).
- 12) K.Yokoyama, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,108-110 (2000).
- 13) T.Tanaka, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,105-107 (2000).
- 14) Y.Hayakawa, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan, 391-394(1999).
- 15) K.Kanno, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, 168-170 (2000).