

# 日本大学電子線形加速器の現状と研究計画

佐藤 勇<sup>A)</sup>、早川 建<sup>A)</sup>、田中俊成<sup>A)</sup>、早川恭史<sup>A)</sup>、横山和枝<sup>A)</sup>、  
菅野浩一<sup>B)</sup>、境 武志<sup>B)</sup>、石渡謙一郎<sup>B)</sup>、  
橋本英子<sup>B)</sup>、藤岡一雅<sup>B)</sup>、中尾圭佐<sup>B)</sup>、村上琢哉<sup>B)</sup>、長谷川 崇<sup>B)</sup>、宮崎慎也<sup>B)</sup>、  
福田茂樹<sup>C)</sup>、榎本收志<sup>C)</sup>、大沢 哲<sup>C)</sup>、設楽哲夫<sup>C)</sup>、諏訪田 剛<sup>C)</sup>、山口誠哉<sup>C)</sup>、  
紙谷琢哉<sup>C)</sup>、道園真一郎<sup>C)</sup>、土屋公央<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

<sup>B)</sup> 日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

<sup>C)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

日本大学では、2001年5月、1.5 μm 自由電子レーザー発振に成功した。自由電子レーザーは超伝導加速器、高周波電子銃、サブハーモニックバンチャーなどを用いない普通の電子線形加速器で短波長自由電子レーザーが発振することを世界で初めて実証した。その後、レーザー強度は光空洞共振器に蓄積される自発光の約1億倍になったが飽和状態に達していない。一方、1.5 μm 自由電子レーザー発振に伴って可視光の強度が強烈になる現象も観測されている。

スペクトル<sup>8)</sup>を測定後、7月から12月まで5ヶ月間、実験棟増築のため加速器運転を中断したが、2001年1月に再開し、3月に自発放射光蓄積を確認、5月に83.6MeV、100mAの電子ビームによる1.5 μmの自由電子レーザー発振<sup>9,10)</sup>に成功した。その後、83.6MeV、40mAの電子ビームを条件でレーザー強度は蓄積光の約 $6 \times 10^7$ に到達した。しかし、飽和に達しない理由を究明している。又、1.5 μm 自由電子レーザー発振が著しくなると3倍高調波波長である0.5 μm 近傍の可視光も同時に閃光するが、この理由について探究<sup>11)</sup>している。

## 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設<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発生装置の建設<sup>2,3)</sup>に着手、1998年3月に完成した。1998年1月には、90MeV、20mAの電子ビーム加速<sup>4,5,6)</sup>に成功、同年2月自発放射光を観測、10月には、電子ビーム強度が40mAに達した。しかし、自由電子レーザーを発振させるには問題点が山積みであり日本大学の自由電子レーザーは専門家の間では発振しないと云う見解が圧倒的に強かった。例えば、クライストロンの高周波電力のパルス持続時間は出力窓が破損するために10 μs が限界であった。又、90度に偏向される電子ビームは高周波増幅器のパルス内高周波位相がシフトするために、パルス持続時間は更に制限を受けた。これらは、アンジュレーター永久磁石に放射線損傷<sup>7)</sup>を与えた。問題点は着実に1つ1つ解決されていった。

そして、新たなアンジュレーターは2000年3月に納入された。一方、2000年2月に短パルスクライストロンは20 μs 長パルス化に成功した。6月に自発放射光の高調波

## 2. 年度別の運転実績

1996年度から加速器の運転を開始し、2000年度には学術フロンティア推進事業による実験棟増築のために7月から12月の5ヶ月間加速器運転を停止した。しかし、ビーム加速日数はこれまで最大となった。年度別の運転状況を表1に示す。

表1 年度別の運転実績

年 度	クライストロン		ビーム加速	
	日数	時間	日数	時間数
1996	8	71	0	
1997	61	559	13	
1998	159	1617	40	
1999	127	1245	39	
2000	136	1551	44	294
2001	123	1346	85	529
2002	153	2000	112	1200
2003	200	2820	180	1920
2004	200	2820	180	1920

2002～2004年度は予測運転である。2002年度に利用実験時間を1200時間に増加させるには、現状のスタッフでは不可能であり、スタッフの増員を要求している。又、2002年度における共同利用実験時間数を1200時間確保するには、加速器が安定になる迄の馴らし運転を含めて13時間/日(8時半～21時半)の運転が120日/年を必要とする。

### 3.現状

可視光領域の自由電子レーザーは光利得が小さくレーザー発振には電子ビームを20 $\mu$ S以上持続させる必要があり、短パルス・クライストロン(2.5 $\mu$ S)の長パルス化はこのプロジェクトの必要条件であった。

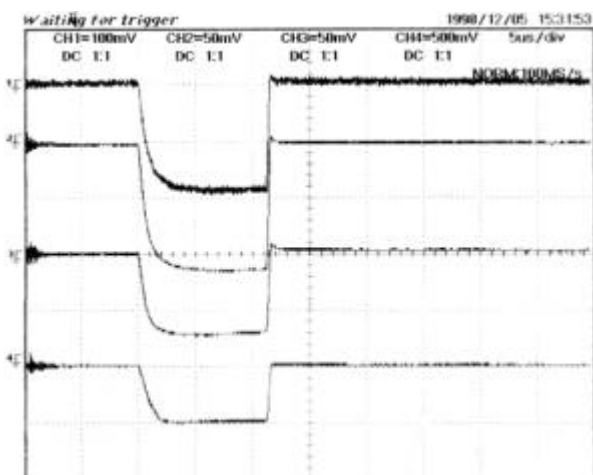


図1a 電流モニターの電子ビーム波形、上からバンチャアの出口、第1加速管入口、第2加速管出口、線形加速器出口、縦軸：100mA/div 横軸：5 $\mu$ S/div

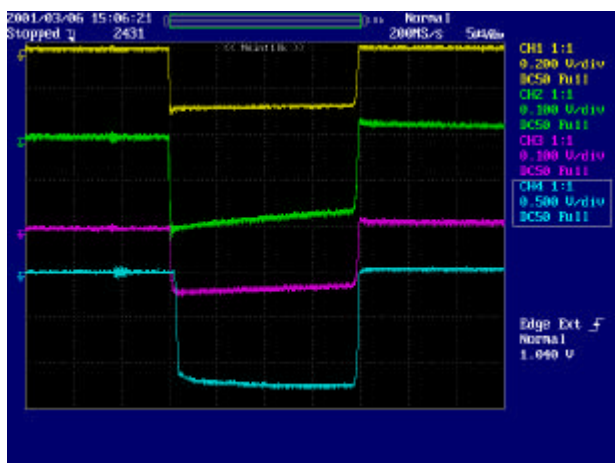


図1b 電流モニターの電子ビーム波形、上からバンチャアの出口、第1加速管入口、第2加速管出口、線形加速器出口、縦軸：100mA/div 横軸：5 $\mu$ S/div

1998年12月までは、図1aに示すように、電子ビームのパルスの持続時間を約10 $\mu$ S以上に延長することは

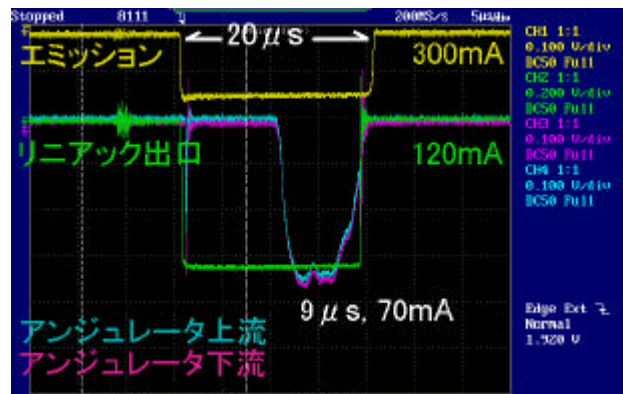


図2a 位相補償方法を採用しない以前の自由電子レーザーのビーム輸送路を通過するビーム電流波形。

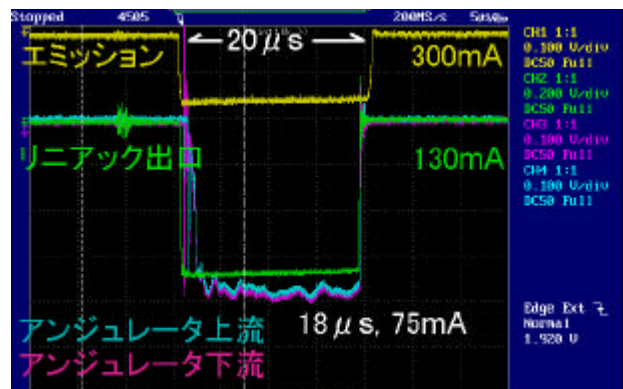


図2b 位相補償方法を採用した以後の自由電子レーザーのビーム輸送路を通過するビーム電流波形。

不可能であった。しかし、クライストロンの出力窓周辺の排気容量を強化することにより、2000年3月には、図1bに示すように、20 $\mu$ Sを越えるパルス持続時間を維持できるようになった。

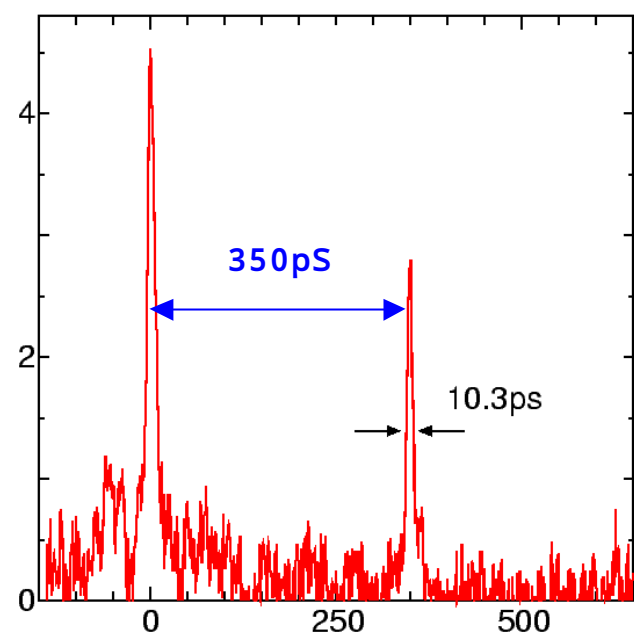


図3 ストリークカメラで測定した電子ビームの集群状態。

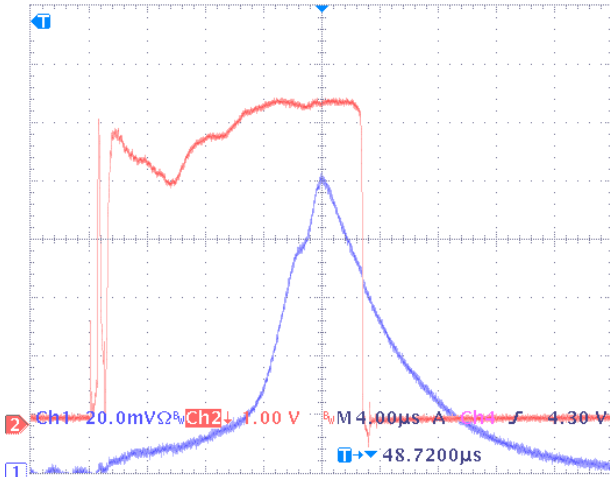


図 4a レーザー強度が蓄積光の約 9 倍の状態における電子ビーム波形 (赤) と赤外線強度 (青) 横軸 :  $5\mu\text{s}/\text{div}$

一方、この電子ビームを  $90^\circ$  偏向すると、図 2 a) に示すように、電子ビームのエネルギーが時間と共に変動しビーム輸送路の運動量分散幅を制限すると電子ビームは通り抜けることが出来ず、ビームの持続時間は  $9\mu\text{s}$  に減少した。これはクライストロンの前置増幅器が高周波パルス出力を持続する間に位相がずれることに起因していた。特に、前置増幅器 (2 台) の位相ズレに個性があり、この位相差がエネルギー変動になった。この対策として、位相差の時間変化を予測して、関数発生器を使って前置増幅器の入力位相を予め逆にずらす位相補償方法を採用した結果、図 2 b) に示すように、ビーム電流が  $18\mu\text{s}$  通過するようになった。更に、電子銃を改良し低エミッタンス化を進めた結果、電子ビームの性能が大幅に向上した。又、古いストロークカメラを改造し、アンジュレーターを通過する電子ビームの自発放射光を使って、ビームの

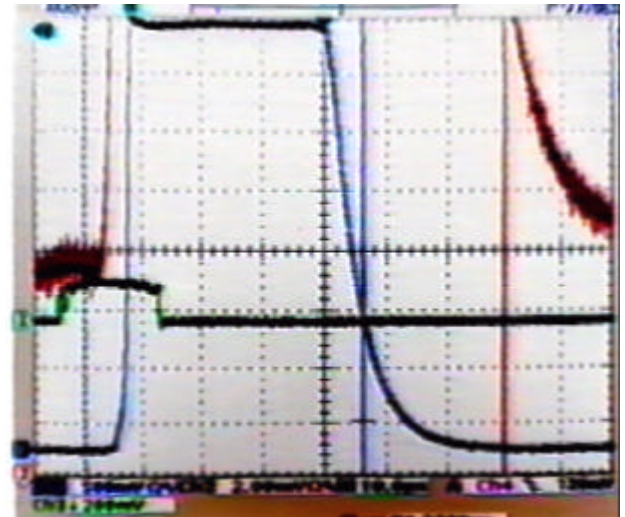


図 4b レーザー強度が蓄積光の約 1 億倍に達した状態における電子ビーム波形 (黒) と赤外線強度 (青) 横軸 :  $10\mu\text{s}/\text{div}$

集団状態も測定できるようになり、その結果を図 3 に示す。このように加速器の高度化が進められ、自由電子レーザー発振の条件が整った。しかしながら、なかなかレーザー発振の兆候が見られなかった。

そこで、自由電子レーザー発生装置に問題点があると考えて総点検を行い、予想もなかったアンジュレーターのギャップの不平行が見つかった。それを是正した結果、次の日に、自由電子レーザー発振が実現した。しかしながら、自由電子レーザーは、非常に不安定でありパルス毎に発振状態が異なった。図 4 a) には自由電子レーザーの発振が不安定な状態における電子ビーム波形と赤外線レーザー強度、図 4 b) には最も激しく発振した状態における電子ビーム波形と赤外線レーザー強度の関係を示す。

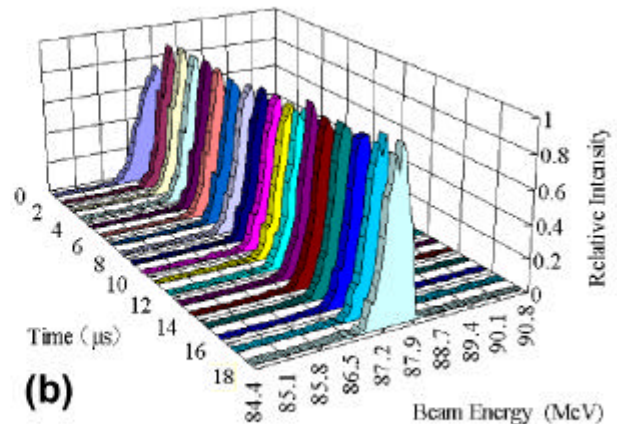
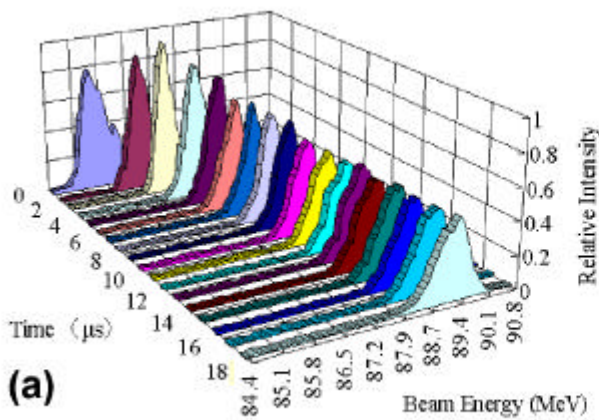


図 5 位相補償がないとき (a) 位相補償があるとき (b) における電子ビームのパルス持続時間内エネルギー変動状態例。

図4dは途中で電子ビームの状態が変わり自由電子レーザーが発振を持続出来なかったこと示す例である。

これは位相補償しても、電子ビームがパルス持続時間内でエネルギー変動したことを示す例である。

図5(a)(b)は、位相補償がないときと位相補償があるときにおける電子ビームのパルス持続時間内エネルギー変動状態の例<sup>12)</sup>を示す。

図5(b)から明らかなように、位相補償をしても、パルスの先頭から10 $\mu$ Sまでは電子ビーム電流の尖頭エネルギーが約1MeV変動している。この間、電子ビームの自発放射光の波長が異なり、光利得が小さいものと思われる。従って、レーザー発振が飽和に達するための電子ビームのエネルギー条件が満たされていないことを示している。

その原因は、パルス内の高周波位相シフト、パルス毎のクライストロン出力変動、制御信号のノイズ捕捉等、加速器自身に起因することは明白である。これ以外に、外的要素である商用入力電力の夜間騒擾(21時~9時)、空調による鋸歯状の室温変動( $\pm 1$ 度)の影響等の対応策に苦慮している。更に、現在は利用実験開始に向けて懸命の努力を払っている。

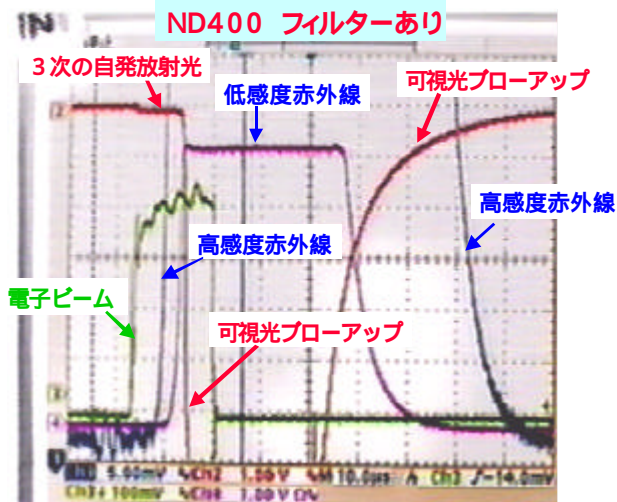


図6 自由電子レーザー発振時における赤外線と可視光の強度の比較。

可視光の閃光は、図6をそのまま解釈すると、3次高調波の自発放射光強度に比較すると約 $10^3 \sim 10^4$ 倍以上強度が大きく、3次高調波自発光の1過程増幅では説明が付かない。その上、パルス電子ビームが通過後の可視光の光強度曲線は、恰も光空洞共振器に可視光が蓄積されているかのような現象を示している。又、パルス電子ビームの初頭部では電子ビームがアンジュレーターを通過する時点から3次高調波自発光は観測されるが蓄積されて行くようには思えない。従って、自由電子レーザーが

発振し光強度が大きくなると、恰も光空洞共振器の反射鏡は突然、可視光の反射率が高くなるように見える不思議な現象とも思える。しかし、可視光検出器の特性が明確でないので、更に色々な面から検討中である。しかし、このスペクトルは自発光より明らかに狭まった。

#### 4. 2002年度の作業予定

2002年度からビーム利用実験を開始するには、放射線施設検査に合格、赤外線領域(0.8~5 $\mu$ m)の自由電子レーザー発振、パラメトリックX線の実用化テストに成功しなければならない。又、共同利用実験を実施するには、電子線形加速器の更なる高度化を進め、自由電子レーザー発振を安定しなければならない。今年度には、下記の7項目を重点に作業を実施する。

- 1) 制御システムの整備、
- 2) 30MW大電力クライストロンのテスト、
- 3) 高周波電源変動の抑制、
- 4) 高周波位相の安定化、
- 5) 自由電子レーザー可変波長テスト
- 6) レーザービーム輸送テスト実験
- 7) PXRの実用化実験

#### 5. 利用実験の現状

学術フロンティア推進事業における利用研究の高度化は、プロジェクト研究を物質科学系と生命科学系と2系統に分け、理工、文理、工、医、歯、松戸歯、生物資源科学が互いに連結しながら進められている。

自由電子レーザー利用実験には実験室が9室用意されている。一方、自由電子レーザーの光空洞共振器から各レーザー実験室までは、トロイダル鏡と放物面鏡を組み合わせた光学装置を開発し、レーザーを平行ビームにして輸送されるが、この光学系は2002年3月に完成した。これは自由電子レーザーが安定に稼働した時点で加速器室に設置される。

各実験室には、図7に示すようなレーザー導入装置が設置され、3種類(0%、1%、100%)のレーザー強度を選択できる。出力窓にはサファイアを用意し、5 $\mu$ mから0.35 $\mu$ mまでほぼ平坦な波長特性を保つようにしてある。自由電子レーザーは、当面の間、赤外線用のアンジュレーターを用い、可変波長範囲を5 $\mu$ mから0.8 $\mu$ mとするが、次の段階で1 $\mu$ mから0.35 $\mu$ mに拡げる。

又、X線利用実験は、写真11に示すように、パラメトリックX線用測定装置(タンパク質X線高次構造解析装置、微小部X線回折装置)が完成し大実験室に設置されている。これとは別個に3台のX線回折解析装置(粉末結晶X線回折装置、タンパク質X線高次構造解析装置、微小部X線回折装置)が用意され資料解析室に設置されている。

本研究施設では、これらのX線実験装置を使って、X線回折の予備実験ができるようになっている。最近、コールド室で卵白リゾチームや血液中のヘモグロビンを結晶に成長させることができるようになり、又、卵白リゾチームを使って普通のX線によるタンパク質の立体構造の分子モデル化に成功している。

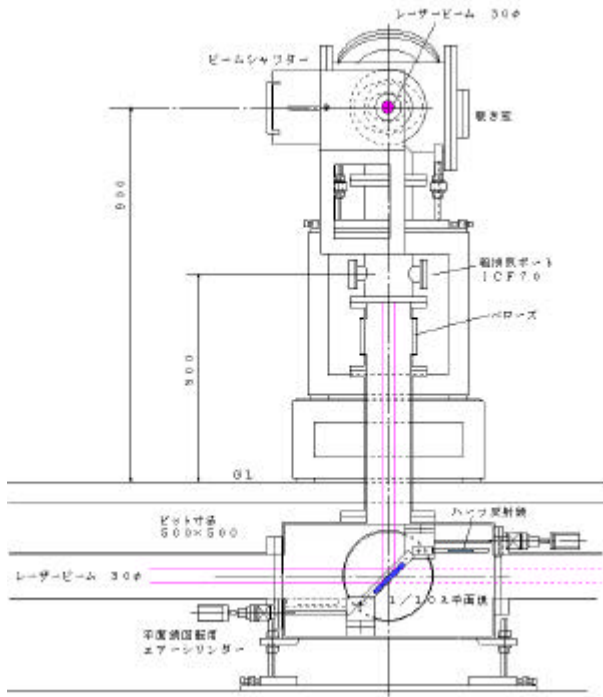


図7 レーザー導入装置

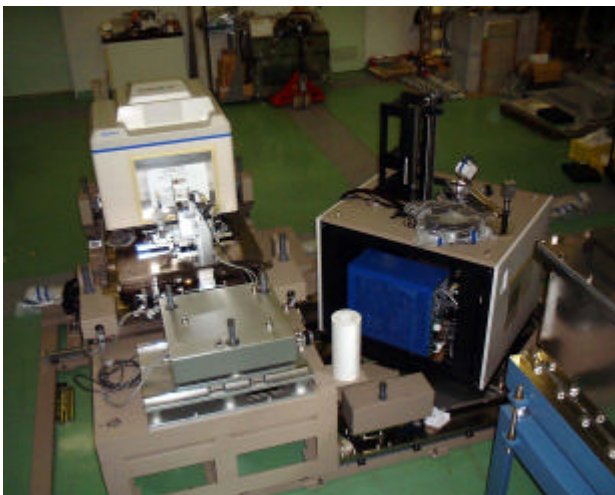


写真1 実験室に完成したパラメトリックX線用測定装置 (タンパク質X線高次構造解析装置、微小部X線回折装置)

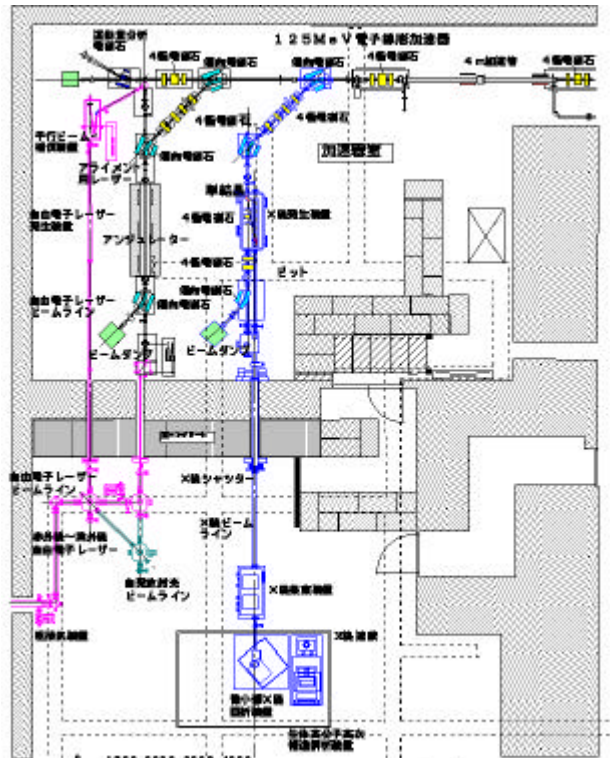
研究テーマは、次のような18項目が取り上げている。物質科学系

- 1) 光励起によるダイヤモンド的結合による

- 2) 半導体素子材料に対する電離照射効果
- 3) 金属磁性物質の高圧下のXANESの研究
- 4) 希土類金属酸化物の分子クラスター
- 5) ナノ結晶の光誘起可逆的相転移  
3次元フラレンポリマーの合成
- 6) 炭素フラレン光誘起化学反応の解明
- 7) 新光機能素材の開発
- 8) 大気汚染物質の光化学過程の追跡

生命科学系

- 1) 歯の硬組織に及ぼす光の影響
- 2) 歯科合金の金属疲労
- 3) インプラント界面構造と組織の解明
- 4) 金属タンパク質のNO補足能
- 5) ヘモグロビンの高次構造解析
- 6) ヘモシニアンの高次構造解析
- 7) カルシウム結合タンパク質の高次構造解析
- 8) 組織再生の光効果
- 9) レーザー波長と歯質切削条件
- 10) レーザーの炎症メディエーター産生への影響



日本大学電子線利用研究施設の各種装置配置図  
図8 自由電子レーザーとパラメトリックX線原の配置

## 6. 利用研究計画

現在、タンパク質などの超分子はつくば学園都市にあるフォトンファクトリーや西番唇にあるスプリングエイト等の大型放射光実験施設に設置されている電子貯蔵リングのシンクロトロン放射光(X線)を使って、タンパク質の構

造解析が行われている。しかし、本研究施設では、高分子の構造解析にパラメトリックX線を使うことを試みている。又、タンパク質X線構造解析や微小部X線回折の計測には、X線フィルムやシンチレーションカンターの代わりに、2次元のX線回折像が検出できるエネルギー蓄積型放射線検出器イメージングプレート(IP)が使用されている。イメージングプレートはX線フィルムより約1桁分解能は劣るが、検出器感度は約2桁高く、ダイナミックレンジは2桁広く、感度が一様で大面積の2次元検出ができる利点がある。更に、検出はフレキシブルで湾曲した状態で露光でき、1枚の検出器で露光、読み取りが繰り返し使用可能であり、2次元の大面積を測定する時間を大幅に短縮できる。即ち、X線露光、読み取り、消去を一連の動作で制御ができ構造解析が可能となる。

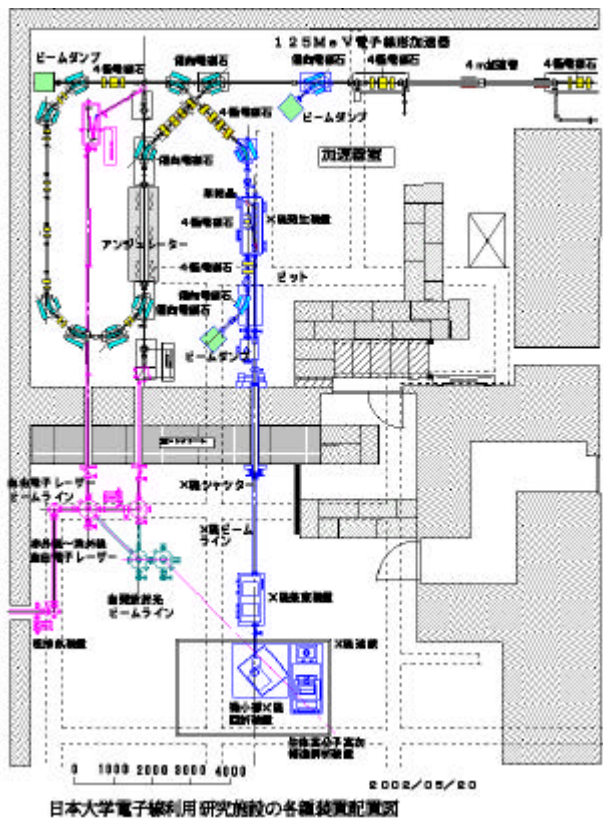


図9 利用研究計画の各種装置配置の凡例

一方、本研究施設では、次期計画として、自由電子レーザーとパラメトリックX線を使って、超分子の機能と高次構造を探究する研究計画を進めている。現在は図8に示すような、ビームラインの配置になっているために、自由電子レーザーとパラメトリックX線は電子ビームをそれぞれ独立にしか利用できないために、自由電子レーザーとパラメトリックX線の利用実験は、電子ビームをタイムシェアして使用する必要があり、電子ビームをチューニングする時間だけ電子ビームの利用効率は悪い。そこで、図

9に示すように、自由電子レーザーに使用した電子ビームをビームダンプに捨てないで、パラメトリックX線源へ輸送して、再び利用する。即ち、電子ビームは、自由電子レーザーを発振させた後にパラメトリックX線を発生させてビームダンプに捨てられる。この場合、自由電子レーザーとパラメトリックX線の利用実験は平行して行うことができる。この利用実験には、更に、超分子、分子、原子などを自由電子レーザーで励起しその振る舞いや状態変化をタイムドメンでパラメトリックX線を使って観測することができる利点がある。この場合、X線測定装置には高感度X線CCDカメラが重要な役割を果たすことは云うまでもない。

## 7. おわりに

本研究施設では、高周波電子銃やサブハーモニックバンチャーを用いない普通の電子リアックによる短波長自由電子レーザー発振に成功した世界最初の例となった。現在、将来計画として、自由電子レーザーとパラメトリックX線を併用し、超分子の機能と分析が同時にできる世界で最初の研究施設になることをめざしている。

## 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) I. Sato, et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, 22-24 (1998).
- 7) I. Sato, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken, Japan, 37-39(1999).
- 8) Y. Hayakawa, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken, Japan, 391-394(1999).
- 9) I. Sato, et al., Proc. of 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, 30-33 (2001).
- 10) Y. Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. P.R A483 (2002) 29-33.
- 11) I. Sato et al., Proc..13th Sym. on Accel Sci and Tech 117-121 (2001)
- 12) K. Yokoyama, et al. J. J. Appl. Phys. 41 (2002) To be published.