

日本大学電子線形加速器の高度化と自由電子レーザーについて

佐藤 勇^{A)}、川上一郎^{A)}、佐藤和男^{A)}、松原洋一^{A)}、早川 建^{A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、
中澤裕之^{B)}、横山和枝^{B)}、菅野浩一^{B)}、境 武志^{B)}、石渡謙一郎^{B)}、猪川弘康^{B)}、中村吉宏^{B)}、
橋本英子^{B)}、藤岡一雅^{B)}、中尾圭佐^{B)}、村上琢哉^{B)}
穴見昌三^{C)}、福田茂樹^{C)}、小林 仁^{C)}、榎本収志^{C)}、大沢 哲^{C)}、設楽哲夫^{C)}
山口誠哉^{C)}、紙谷琢哉^{C)}、道園真一郎^{C)}、土屋公央^{C)}

^{A)}日本大学原子力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

^{B)}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

^{C)}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、短波長自由電子レーザー発振を目標に、普通の電子線形加速器を改良し加速器の高度化を進め、2001年5月、1.5 μm 自由電子レーザー発振に成功した。これは、自由電子レーザー用加速器に特有な特殊装置である超伝導加速器、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も、発振することを世界最初に実証した。電子線形加速器の高度化とレーザー発振に至るまでの詳細な経過について報告する。

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) [1]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[2,3]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[4,5]に成功、同年2月自発放射光を観測、10月入射部集束系を強化、電子ビーム強度は220mAに達した。しかし、ワイヤーモニターによる電子ビームの規格化エミッタンス[8]は約 $60\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、電子ビームのパルス持続時間は高周波位相シフトとクライストロンの高周波窓の耐性から10 μs に制限された。一方、1999年9月、アンジュレーター永久磁石の放射線損傷[9,10]が明らかになった。そこで、5~0.8 μm 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り2000年3月に納入された。同年2月に短パルスクライストロンの長パルス化に成功し、6月に自発放射光の高調波スペクトル[12]を測定後、7月から12月まで5ヶ月間、実験棟増築のためビーム加速を中断した。

2001年1月に加速器運転を再開、3月に自発放射光蓄積を確認、5月に83.6MeV、100mAの電子ビームを使って1.5 μm の自由電子レーザー発振に成功した。その後、3回目のテスト実験では83.6MeV、40mAの電子ビームを使ってレーザー強度は蓄積光の約 6×10^7 に到達した。

2. 自由電子レーザー発振までの経過

日本大学では短波長自由電子レーザーを目的とし

ていたが、アンジュレーターが放射線損傷を受けた時点で、2台に役割分担をさせ、それぞれの波長領域を5~0.8 μm と1.8~0.35 μm に設定した。一方、自由電子レーザー計画は、常に利用研究を目指した観点から検討し、それに耐えられる加速器を視野に入れて高度化を進めてきた。

1999年10月、両方に共通する赤外線波長 $\lambda_p=1.5\mu\text{m}$ の自由電子レーザー発振を目標にその準備を開始した。又、新しいアンジュレーターが設計され、そのパラメーターは、 $\lambda_w=48\text{mm}$ 、 $N_w=50$ 、 $K=1.2$ に設定して製作を開始した。ここで、 λ_w はアンジュレーターの1周期長、 N_w はアンジュレーター周期数、 K はアンジュレーターパラメーターを意味し、電子の電荷量 e 、アンジュレーターの最大磁場強度 B 、電子静止質量 m_e 、光速 c とすると、 $K=eB\lambda_w/2\pi m_e c$ で表され、 B 、 λ_w の単位が T 、 m の場合、 $K=93.4B\lambda_w$ となる。 γ はローレンツ因子で、電子のエネルギーを E とすると $\gamma=(E+m_e)/m_e$ となる。

一方、光空洞共振器の反射鏡には反射率が99.5%の誘電体多層膜ミラーが用意された。

発振波長 λ は、良く知られているように

$$\lambda_p=\lambda_w(1+K^2/2)/2\gamma^2 \quad (1)$$

で表されるが、1.5 μm の波長で発振させるには、(1)より、 $\gamma=166$ となる。この場合、電子ビームのエネルギーは $E=84.3\text{MeV}$ であり、当研究施設の現状で充分に対応できる範囲にあった。

一方、自由電子レーザーでは、ウイグラー(アンジュレーター)を通過する電子ビームは蛇行運動する間に光へエネルギーを供給するが、その利得 G はアンジュレーターの構造や電子ビームの特性によって特定され、電子ビームの状態を考慮しなければ、

$$G\sim\lambda_w^2 N_w^3 K^2/\gamma^3 \quad (2)$$

に比例する。日大の場合、 $G\sim 9\times 10^5$ であり、他の研究機関で自由電子レーザー発振に実績のあるシステムと比較して、遜色がなかった。しかし、エミッタンス、ビーム電流、バンチング等の電子ビーム状態を考慮に入れると、この値は反射鏡の損失より大きくなければならない。残された問題は、これらの電子ビーム状態をどう改善するかにあった。そこで、2000年10月、低エミッタンスはカソード径の小さい

新電子銃を用意し、ビーム電流、バンチングについては、入射部の高周波電力増強とプレバンチャーに集束コイルを装着することにより、これらの改善に対応した。又、光空洞共振器の蓄積光の微細な挙動を探るために高感度赤外線検出器 (InSb:Kolmar Technologies KISDP-1-J8 40000V/Watt)が用意された。

3. レーザー発振のドキュメント

2001年3月、赤外線自由電子レーザーの基礎実験を開始した。しかし、電子ビームの自発光は光空洞共振器に良好な状態で蓄積されるが、共振器長を変えても一向に自由電子レーザーは発振のきざしが感じられなかった。

これまでに色々な研究機関の自由電子レーザー研究施設で発振が遅れた理由の1つに光空洞共振器長のフィッティングが上げられていた。光空洞共振器長が大きすぎて可能性もあるので、最も原始的な方法でその長さを確認した。引き続き実験を継続したが、依然として、発振のきざしは感じられなかった。そこで、これはレーザー利得に関するパラメーターが大きすぎていないと考えると、アンジュレーターのセッティングを疑った。そこで、聖域を設けずに、自由電子レーザーのビームラインに関連する全装置のセッティングを見直すことにした。

その結果、アンジュレーターは上流と下流で空隙間隔に約3mmの違いを生じていることがわかった。この寸法差は、アンジュレーターの上流と下流で、その磁場強度が約20%の違いとなる。従って、その周期数 $N_w=50$ は実効的に約5と評価され、利得は実質的に、(2)式より1000分の1以下に減少していたことになる。この空隙間隔は直ちに矯正されて、その翌日に試行された基礎実験で自由電子レーザーは発振した。この時、電子ビームのエネルギーは83.6MeV、ビーム電流は約100mAであった。

このレーザー発振では色々な研究機関がこれまでにレーザー発振に成功している例は、参考にならな

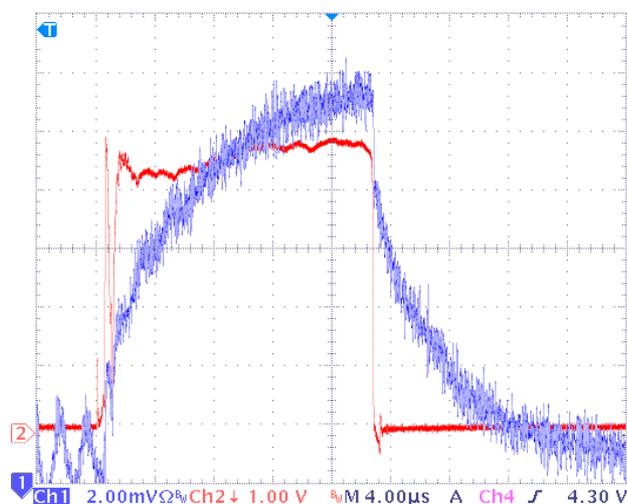


図1：積分波形は光空洞共振器に蓄積されている自発放射光の強度 (V:2mV/div,H:4μs/div)、矩形は電子ビーム波形(V:20mA/div)。

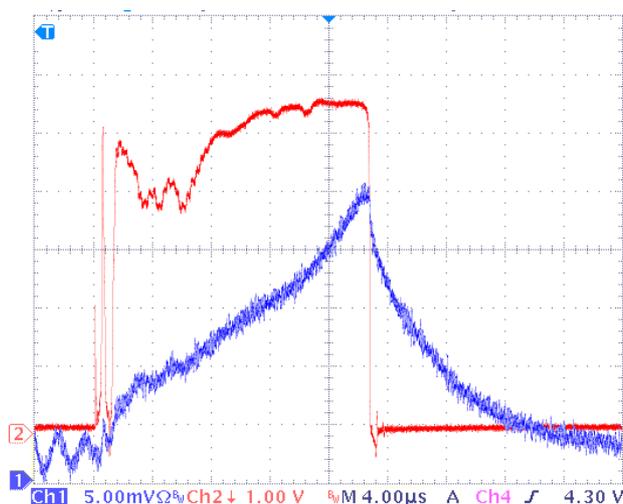


図2：積分波形は光空洞共振器に蓄積された発振レーザーの強度 (V:5mV/div,H:4μs/div)、矩形は電子ビーム波形(V:20mA/div)。

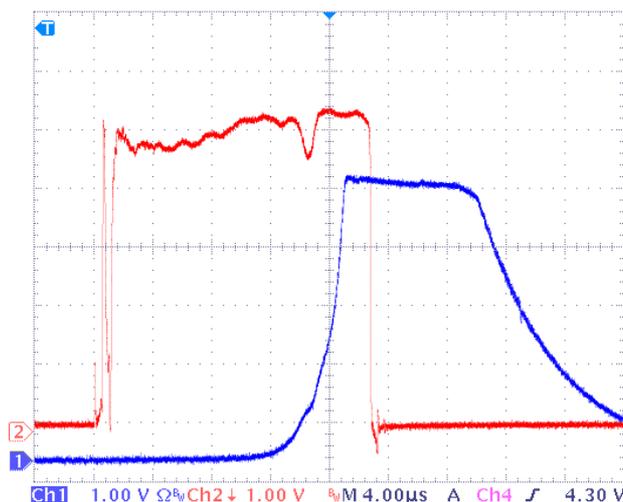


図3：積分波形は光空洞共振器に蓄積された発振レーザーの強度 (V:1.0V/div,H:4μs/div)、矩形は電子ビーム波形(V:20mA/div)。

かった。つまり、光空洞共振器の蓄積光が発振に成長する過程を詳細に記述したデータが入手できなかった。幸いにも、この経過を詳しく観察する貴重な機会に恵まれた。

光空洞共振器に蓄積されている自発放射光の強度を1mm²のインジウム・アンチモン検出器で測定すると、図1に示すような積分波形が常時観測されているが、この状態を保ちながら、加速ビームのバンチ間隔の64倍に相当する光空洞共振器長を数～数10μmシフトさせると、その積分波形は次第に変化し、図2に示すような光強度波形になった。

これは先進電子ビームから放出された光を空洞共振器に蓄積し、その光に後進電子ビームがエネルギーを放出したことを意味している。即ち、蓄積光の増幅であり、これは反射鏡を介させた光増幅回路のポジティブ・フィードバックであり、まさに自由

電子レーザー発振である。引き続き、光学系の調整に加えて、電子ビームの軌道、集束、加速位相を調整すると、光強度は次第に大きくなり、図3に示すように、出力信号は4Vを越えて検出装置の増幅器はついに飽和した。このときの出力電圧は、光強度波形の減衰曲線から約24Vと推定され、レーザー強度は蓄積光の約2000倍に増強された。2回のテスト実験を経た後、レーザー強度は図4に示す経過を辿り、蓄積光の約1億倍の光強度に到達した。

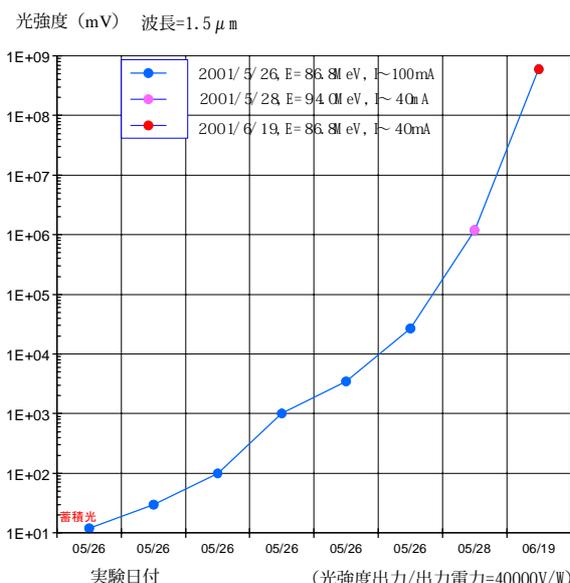


図4：自由電子レーザー発振に於ける光強度の推移

4. ディスカッション

3回目は電子ビームのエネルギーが86.8MeV、ビーム電流が40mAで、レーザー実験を試みた。光空洞共振器の中心で電子ビーム径は約0.5mmφであった。この点より約8000mm離れた地点に設置されている検出器のレーザー電力は、マクロパルス当たり約0.3mJ/mm²に達し、尖頭電力は約8kW/mm²を越えた。このように少ないビーム電流でも、レーザーが発振するのは、電子ビーム密度が高い、即ち、電子ビームのバンチが小さいためであると考えている。その理由として、プレバンチャーは7空洞の進行波型加速管であり、通常のバンチャーのようにバンチと加速の2つの機能をもち、電荷量が小さければ、サブピコ秒にバンチさせる能力を持っていることが上げられる。

5. レーザー発振とその意義

自由電子レーザー発振には、電子ビームのエネルギーが揃い且つ低エミッタンスで大電流、又、小電流では更に長パルスを必要条件としている。従って、これまでの自由電子レーザー用電子線形加速器では、大電流加速用としてサブハーモニック・バンチャー、低エミッタンス化用に高周波電子銃、長パルス化用に超伝導電子線形加速器等の何れかの特殊装置が用意されレーザー発振に成功している。これら

を用いることが自由電子レーザー発振を成功させる7つ道具として定着し、常識となっていた。日本大学の自由電子レーザー用電子線形加速器は図5に示すように、高周波電子銃やサブハーモニック・バンチャーを用いていない。しかし、これまでの常識を破り、普通の電子線形加速器による近赤外領域自由電子レーザー発振の世界最初の成功例となった。

6. 加速器の高度化

日本大学では、短波長自由電子レーザー発振を目標に、普通の電子線形加速器を改良し加速器の高度化を進めてきた。電子銃の低エミッタンス化、短パルスクライストロンの長パルス化、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り、自由電子レーザー発振に導くことができた。

日本大学の自由電子レーザー用電子線形加速器は、高エネルギー加速器研究機構と日本大学の共同研究を基盤にして建設が進められてきた。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ために、継ぎ接ぎだらけの加速器構成であったが、その加速器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自由電子レーザー発振を試みる挑戦的な計画となった。一方、利用計画を重視した結果、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の電子線形加速器による可視光領域の自由電子レーザー発振を試みる特異なケースであった。

建設当初、電子線形加速器は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に悩まされた。短パルスクライストロンの長パルス化はこの計画にとっては絶対条件であったが、高周波窓周辺の排気速度を増強することによって、その目的仕様をほぼ達成できる見通しがたった。2000年1月のテスト実験では、その性能（高周波電力パルス×持続時間×繰り返し）は20MW×20μs×12.5Hzに向上^[13]した。残された課題は、ビームエネルギーとビーム電流の不安定性に絞られた。

これらの問題は、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、サイクロトロン・リザーバーの詳細調整^[14]、クライストロン前置増幅器の高周波位相補償^[15,16]等の作業により順次に改善され、安定性は向上し、約20μs幅の電子ビームを自由電子レーザーシステムに入射できるようになった。ビーム損失も大幅に改善され100%輸送が可能となった。一方、加速器室と実験室の間の放射線シールドが強化され、自由電子レーザーの実験状態が実験室で計測可能となった。一方、本研究施設が学術フロンティアの研究拠点に選定され、平成12年度から5年計画で実施されることになり、新しい実験棟、レーザービームライン、パラメトリックX線源^[17]が建設された。

7. 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^[18]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常識を破るシステム構成で、短波長自由電子レーザー発振に至った。しかしながら、自由電子レーザーの出力は安定性に難があり、共同利用実験に耐え得る状態にするため、加速器の更なる高度化を進めている。

謝辞

日本大学における自由電子レーザー発振は、日本大学を始め本プロジェクトに係られた多くの研究機関、並びに、建設に参加された多くの企業の方々のご支援によるものであり、関連された方々に心から感謝いたします。

又、レーザー発振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最大の研究成果であり、本プロジェクト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。

さらに、瀬在日大総長、並びに、小嶋原研所長には本プロジェクト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] I.Sato, et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, 22-24 (1998).
- [7] K.Hayakawa, et al., Proc. of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, 166-168 (1998).
- [8] K.Yokoyama, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan, 473-475(1999).
- [9] H.Nakazawa, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan, 394-396(1999).
- [10] I.Sato, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan, 37-39(1999).
- [11] K.Hayakawa, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,56-58 (2000).
- [12] Y.Hayakawa, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,358-360 (2000).
- [13] T.Sakai, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,228-230 (2000).
- [14] K.Ishiwata, et al.,Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, 222-224 (2000).
- [15] K.Yokoyama, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,108-110 (2000).
- [16] T.Tanaka, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan,105-107 (2000).
- [17] Y.Hayakawa, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan, 391-394(1999).
- [18] K.Kanno, et al., Proc. 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, 168-170 (2000).

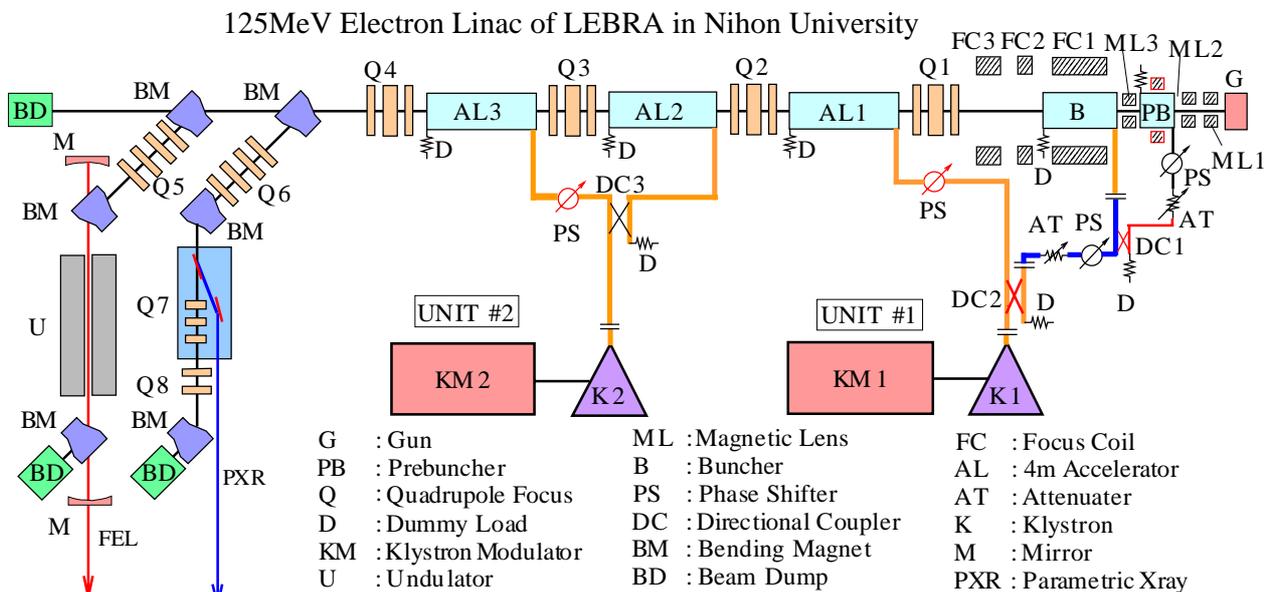


図5：125MeV電子線形加速器の全体図