

研究課題名：電子線形加速器の動作安定化と高性能化の研究

研究代表者：佐藤 勇 (日本大学量子科学研究所)

研究従事者：早川 建、田中 俊成、早川 恭史、横山 和枝、森 啓、

野上 杏子、境 武志 (日本大学量子科学研究所)

菅野 浩一、石渡謙一郎、中尾 圭佐、猪川 弘康、中村 吉宏、

橋本 英子、藤岡 一雅、村上 琢哉、長谷川 崇、宮崎 慎也、

稲垣 学、城所 明生、高崎 寛 (日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻)

共同研究者：福田 茂樹、榎本 收志、大沢 哲、諏訪田 剛、古川 和朗、

道園真一郎 (高エネルギー加速器研究機構)

【研究目的】

日本大学電子線利用研究施設では、125MeV 電子線形加速器からのビームの共同利用を目指して、自由電子レーザー (FEL) の発振とパラメトリック X 線 (PXR) の発生という二つの光源開発を行ってきた。FEL には、特に高性能のビーム、すなわち狭いエネルギー幅、バンチ長が短く高電荷密度、揃ったバンチ間隔、そして小さなエミッタンスが要求される。これらを実現するには、各種電源の出力安定度を高めるとともに、加速管に入力され直接ビーム加速に用いられる大電力マイクロ波 (RF) の電力および位相の安定化を図る必要がある。特に日本大学電子線利用研究施設における短波長 FEL の発振には、従来の S-バンド電子線形加速器に比較し 20 μ s とパルス幅の長い RF を用いるため、長パルスにおいて高い安定度を維持することが要求される。さらに、電子ビーム自身の特性の向上および振舞の安定化も重要となる。電子線利用研究施設で FEL 発振を実現した当初は光強度が極めて不安定で、共同利用には厳しい状況にあった。このために、クライストロンの長パルス運転時の動作安定化、クライストロン電源出力の安定化、RF 位相安定度の改善、電子銃の改良、ビームモニターの開発、さらに線形加速器自体の改良等を行い、共同利用実験に利用可能な安定な光源としての波長可変 FEL を実現した。この加速器の高性能化は PXR の発生においても重要であり、安定な PXR 発生の実現によりその特性の計測等において優れた成果を上げるとともに、信頼できる X 線イメージングデータを得ることが出来た。

【研究概要】

日本大学電子線利用研究施設では電子線形加速器のビームを用いた FEL と PXR の二つの光源を共同利用する体制を確立するため、主に FEL の安定な発振を目指して加速器の動作安定化、ビーム性能の向上など多くの改良を行ってきた。その結果、共同利用実験に利用可能な波長可変 FEL を供給することが可能となった。ここでは加速器の高性能化のために行われた研究のうち、主要な課題と研究成果について概要を述べる。なお、電子線形加速器の高性能化の研究は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) との共同研究の一部として取り組まれてきた。

(1) クライストロンの長パルス運転の実現

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では 0.3~6.0 μ m までの赤外領域から紫外領域の FEL およびパラメトリック X 線放射の開発を進めてきた。特に短波長 FEL の発振においては光の増幅利

得が低くなるため光強度の飽和までに要する時間が長くなり、パルス幅の広いマクロパルス電子ビームが要求され、LEBRA では実用的には RF パルス幅 20 μ s の運転が必要となると考えられた。

LEBRA では KEK フォトンファクトリーの入射器に使用していた三菱電機製 PV-3030A1 クライストロンを使用してきた。このクライストロンは短パルス用であり、パルス幅 6 μ s、繰返し 50Hz、出力電力 33MW の仕様となっていた。LEBRA でクライストロンに要求する仕様は、最大出力電力 30MW、RF パルス幅 20 μ s であり、一方繰返し数は最大でも 10~12.5Hz である。LEBRA では平均電力は低いもの実際に使用を開始すると、RF パルス幅を 10 μ s 以上に広げたときにはクライストロンの RF 出力窓の破損が続出し、パルス幅 20 μ s の長パルス運転を実現することがそもそも難しかった。

RF 窓が破損する原因について検討した結果、RF 窓表面で発生した放電による真空度の劣化が次のパルスにおいてさらに RF 窓での放電を引き起こし、これが何度も繰り返されるとついに窓の破損に至ると考えられた。そこで、クライストロンの RF 窓下流に 8 リットルイオンポンプの引き口を 2 個取り付け、RF 窓表面での放電時に生ずる真空度の悪化を素早く回復させるよう、真空排気の強化を行った。その効果は劇的で、定常時においても RF 窓表面付近での真空度は一桁近く高くなっていることが簡単な計算から推定されたが、窓で放電が発生しても次のパルスで再び放電が起きることはほとんどなくなり、パルス幅 20 μ s での運転が容易に達成されるに至った。このことは RF 窓表面付近の真空度が窓の耐性に関して非常に重要な因子であることを示唆している。初期の仕様通りのパルス幅で RF を増幅できるようになったことから、この段階で漸く FEL 用加速器として使える目処が立った。

この改良後は、RF 窓での放電によって一時的に RF 出力安定度が悪化することがあっても、十分エージングを繰り返すことにより放電が起きなくなり再び正常にクライストロン出力が得られるようになった。これにより RF 窓の破損も起きなくなった。RF 窓の放電が起きなくなったことで電子ビーム加速が安定に行われるようになり、FEL 発振実験が進み、またビーム特性の計測が容易になったことから、ビーム性能の向上を目指した研究を前進させることが可能となった。

また、クライストロン動作の長パルス化について得られた知見に基づき、PV-3030A1 型のクライストロンに対して電子銃カソード廻り、RF 出力窓材料、さらにクライストロン管内真空排気速度の改良を施した PV-3040N 型クライストロンを製作した。これはパルス幅 20 μ s でピーク出力 30MW を達成し 125MeV まで加速エネルギーを増強させることを目的とするもので、現在この型のクライストロンを 1 台使用し出力 23MW で安定に動作している。

(2) クライストロン電源の安定化

LEBRA において自由電子レーザー発振実験を行っている際、1 日の時間帯によって電子ビームのエネルギー変動が大きくなることがあった。特に午後 9 時以降の時間帯での変動が著しく、ビームの制御ができず実験の継続が困難であった。この原因は商用電源電圧の変動にあり、クライストロン出力 RF 電力、クライストロン印加パルス電圧、商用電源電圧を同時に測定したとき、これらの間には明確な相関が存在した。

クライストロンモジュレーター電源の場合、加速器建設段階から高圧直流電源部には $\pm 2 \times 10^{-4}$ の高安定度のものを使用し、パルス形成回路 (PFN) 充電電圧に商用電源電圧の変動が伝わらないようにしてあった。また、加速器の運用直後には、クライストロンヒーターやサイクロトロン制御回路が電源変動の影響を受け、クライストロンにかかるパルス電圧を変動させていることが分かっ

たので、クライストロン電源の低電圧系統全体に対して自動電圧制御器（AVR）を介して商用電源電力を供給するようにしていた。AVR を挿入することにより、細かい変動は残るものの、大きな変動はほぼ完全に補償された。これにより、商用電源変動の影響はかなり改善されたはずであったが、予想に反して依然として商用電源の変動を反映した電圧がクライストロンに印加されていたことになる。この理由は、実は PFN を充電する際に高圧直流電源の高精度電圧安定化回路が負荷に十分電流を供給できず制御可能範囲を超えてしまい、充電している短い時間だけは安定化制御が機能しないために入力側である変動のある商用電源電圧が直接負荷側に現れることにあった。したがって高圧直流電源の出力電圧は、確かにモジュレーター出力パルスが始まる直前では $\pm 2 \times 10^{-4}$ の高安定度が得られていたが、PFN を充電している間は単なる整流回路の出力電圧と変わらない状態になっていた。

高精度電圧安定化回路の機能が充電中に停止するのを防ぐため制御回路の定数の変更を試みたが、入力側である整流回路から充電時に供給される電流量が不足することが根本的問題であったため、解決しなかった。そこで、クライストロンパルス繰り返しの間に共振充電とは異なるタイミングで充電する、コンデンサーと抵抗からなる回路を PFN の共振充電回路の直前に挿入することで、高精度電圧制御回路の瞬時負荷を軽くする方法を採用することにした。この方法は、パルスの繰り返しが速くなると PFN の共振充電電圧が変化する問題はあるが、これまでの出力電圧範囲で利用する限りは高圧直流電源の高精度な機能はそのまま働き、電源自体の容量を変更する大がかりな改造も必要ないという点で好都合であった。

この改造によって、商用電源電圧に 1%の変動が生じても高圧直流電源の共振充電時電圧の変動は、本来の電圧安定化回路によって達成される変動範囲程度まで軽減されることが確認された。電圧安定化回路の制御電圧範囲から推測すると、商用電源の変動 2.5%までは問題なく安定化できると考えられる。これによりビーム加速の安定度は飛躍的に高まり、時間帯によっては運転が困難であった激しいエネルギー変動はなくなり、FEL 発振実験ではより詳細な FEL の挙動を調べられるようになった。

クライストロン電源の安定化はパルス全体についてのクライストロン出力 RF 安定化に寄与するが、クライストロンに引加されるモジュレーター出力パルス電圧の平坦度は、増幅される RF パルス内での振幅と位相の変動に影響する。このため、LEBRA のモジュレーターでは 30 段ある PFN の各インダクタンスを遠隔制御により電源の運転中に調整することで、パルスの平坦度を最良の状態に調整できるシステムを採用している。パルスの平坦度を調整する方法としては、モジュレーター出力パルス電圧を直接モニターしながら調整するのが一般的と考えられるが、LEBRA で要求されるパルス平坦度は測定限界以下であるためパルス出力電圧波形で判断するのが難しかった。その代わりにパルス平坦度がクライストロン出力 RF 位相波形に反映することに注目した。位相波形の各 PFN インダクタンスに対する依存性を測定しておいて、逆算によって位相を平坦にするインダクタンス値の組み合わせを線形近似で求め、機械的にインダクタンスを設定する、という操作を繰り返す方法を採用した。数回の繰り返して雑音レベル近くまで位相波形を平坦化することが出来、この結果次項で述べる低電力 RF 位相安定化による効果もあって電子ビームのエネルギーがパルス全幅にわたって揃うよう調整可能となった。

(3) RF 位相の安定化

LEBRA では 2 台の S-バンドクライストロンを用いて電子ビーム加速を行っている。RF 源であ

る信号発生器からの 2856MHz の RF を分岐してそれぞれ独立したパルス RF アンプで増幅した後、これら 2 台のクライストロンに別々に入力している。2 台のクライストロンのうち 1 台はプリバンチャー、バンチャーおよび 1 本目の 4m 加速管に、もう 1 台は後段の 2 本の 4m 加速管に RF を供給している。したがって、RF 源出力が分岐された後に各クライストロンで増幅されて加速管に供給されるまでの間に、これら 2 系統の RF の間に位相の時間的変化があると、加速される電子が経験する RF 電場が RF パルス内で変化することにより、電子ビームのエネルギー変動が生ずることになる。また、光速度に比べて低い速度で電子が飛行している入射部では、プリバンチャー、バンチャーおよび 4m 加速管での RF のフィリングタイムがそれぞれ異なるため、クライストロン 1 本の出力 RF 位相が変動するだけでも加速電子ビームのエネルギーと位相の変動が生ずる。したがって RF 位相の安定度は加速ビームの質に大きな影響を与える。

クライストロン前段の RF アンプは S バンド用のパルス増幅器で、複数のパワートランジスタを用いて C 級並列増幅を行ない最終段でパワー合成を行っている。このためパルスの立ち上がりからトランジスタに負荷がかかり始め、パルス持続時間の間は回路の発熱が続き、パルスが終わると発熱も止まる。このようなトランジスタの動作から RF 信号増幅時における伝達遅延時間の温度依存性という熱的問題とトランジスタごとの特性のアンバランスが原因と考えられるが、RF アンプの出力にはパルスの開始から指数関数に似た、変化が減衰するような位相のドリフトが発生する。実際に観測された位相の変化は出力電力に依存し、RF パルス 20 μ s の間で 8 \sim 12 $^\circ$ であった。これはパルス内の温度変化依存性を示唆している。C 級増幅を行っている限り、程度の差はあれパルス持続時間の間にこのように位相が変動することは避けられないと考えられる。しかし、A 級増幅にすると電力の無駄が大きすぎ現実的ではない。

このような位相変化が生じている状態での電子ビーム加速では、2 系統の低電力 RF システムにおいて、RF アンプでの位相変化はそれぞれ独立に生じているため、2 台のクライストロンの出力 RF 位相を比較すると、互いに独立に位相が変動していた。この結果、90 $^\circ$ 偏向電磁石系でビームエネルギー幅を 1% に制限された電子ビームは、パルス幅 20 μ s のうち最大でも 10 μ s 程度しか FEL アンジュレーターに導くことが出来なかった。

LEBRA の低電力 RF 系には応答速度が 50ns 以下の高速移相減衰器が挿入されており、このうち減衰器の制御により CW の RF 源からの信号をパルス化している。そこで、最初の改良として RF アンプ出力の位相変化をダブルバランスドミキサーで測定し、その変化の電圧波形を関数発生器に記憶させ信号を反転させて再現した電圧波形を高速移相減衰器の位相制御入力端子に入力する方法を採用した。こうすることで、パルス内での位相変化を高速移相器によって補償することが可能であった。この方法では、さらに室温の変化などにより生ずるクライストロン出力 RF のパルス間位相変動を監視しそれを補償する電圧信号を関数発生器出力信号に重畳することで長時間位相安定化の対策も行った。この結果パルス内においてもパルス間においても加速ビームのエネルギー安定度が大きく改善され、20 μ s のうちトランジェントを除く 18 μ s 以上のパルス幅の電子ビームを FEL アンジュレーターに導くことが出来るようになった。FEL 発振の実現にはこの改善が本質的に重要な役割を果たした。

RF アンプ出力の位相変化波形を関数発生器に記憶させて再現し高速移相器を制御し位相補償を行う、という方法は暫定的には良く機能したが、リアルタイムで位相変化波形を取得し関数発生器で再現することが難しいため、一度記憶させた波形データをビーム加速実験が行われている長時間にわたってそのまま使用せざるを得なかった。しかし、RF アンプでの位相変化は室温や機器の温

度の変化など、周囲の環境の影響により時間的に変動していた。しかも、補償すべき位相変化が大きいため変動も大きかったために、補償後の位相固定は長時間にわたって十分安定とはならなかった。したがって、長時間にわたり加速電子ビームの状態を変化させず維持するためには、さらに位相安定度を向上させる必要があった。

クライストロンに印加するパルスモジュレーター出力電圧の変化に起因する位相変化を別にすれば、位相変化の主要な問題点は、RF アンプにおいて増幅しているパルス時間内での位相変化が大きいことであった。そこで、パルス内で指数関数に似た位相変化の減衰を示すことが確認されていることから、パワートランジスタにおいて増幅する RF のパルス幅を、実際に使用する $20\mu\text{s}$ ではなく $50\mu\text{s}$ まで広げ、2 系統の最終段アンプを持たせて出力部でパワー合成する際に、パルス開始から $30\mu\text{s}$ 後に片側の系統の RF 位相を 180° 反転させることを検討した。こうすると、トランジスタの温度変化等によるパルス開始からの位相変化は $30\mu\text{s}$ の間に十分減衰しており、この間は 2 系統のアンプ出力を逆位相で合成することで RF 出力がなく後の $20\mu\text{s}$ の間のみ出力されるように調整することが可能である。この結果、位相変化の小さい、過渡的な状態をほとんど含まない良好な RF が出力されると期待された。パルス幅が広がることで回路の熱負荷と電源が大きくなるため、元々ピーク出力 800W まで得られる RF アンプを使用していたが、この改良を行ったアンプでは出力を最大 400W に下げた。

実際に製作した RF アンプの位相変化特性を調べたところ、確かに $20\mu\text{s}$ の間に $8\sim 12^\circ$ もあった位相変化は小さくなり、出力 RF の開始からの変化は 2.5° 程度となった。また、位相が指数関数的に一定に落ち着くまでの時間が数 μs とはるかに短くなり、位相の安定度は大きく改善された。位相反転合成により得られた出力は、位相変化がさらに小さいと予想されていたが、RF アンプ内で位相を反転する時間を変化させても出力 RF の先頭における位相変化に違いが見られなかったことから、この位相変化はパワートランジスタの温度変化とは独立の現象と考えられる。いずれにしても、この改良によって位相変化が小さくなったこと、位相変化の素性が良くなったこと、またこの変化の再現性が非常に良くなったことにより、関数発生器では指数関数の波形を生成するだけで良く、関数発生器を利用した位相補償システムの信頼性と長時間安定性が飛躍的に向上した。これにより低電力 RF 系における、RF パルス内位相変動の問題はほぼ解決した。

(4) 電子銃の改良

電子線形加速器入射部の 100kV 直流電子銃は、当初 KEK と全く同じ仕様のもを製作し使っていたが、この電子銃は元々単パルス大電荷密度のビームを取り出す仕様に合わせたウエネルト形状で製作されていた。このため、カソードからの引き出し電流が一桁小さい LEBRA のビーム取り出しには適していなかった。これは E-GUN コードによるビーム引き出しのシミュレーションによっても確認されており、数 A のピークビーム電流では空間電荷効果による横方向のビーム広がりをウエネルトの集束電場を利用して打ち消し平行ビームとして取り出すことが可能であるのに対して、数 100mA の取り出しでは空間電荷効果が小さいためにウエネルトの集束作用が強すぎて、ビーム取り出し直後にビームが大きく発散することが分かっていた。このような電子銃の特性のまま利用する場合、プリバンチャー・バンチャー系に入射すると、まず途中のビームダクトでビームの多くが失われる。この結果、バンチャー出口までのビーム透過率が大きく低下する。また、より大きな問題としてエミッタンスの小さなビームを得ることが難しい。これは FEL に利用する上では非常に好ましくないことであった。線形加速器全体の加速特性を調べる実験を行っていた間は必ず

しもビームの質は大きな問題ではなかったが、次の段階として本格的に FEL 発振実験に進むには電子銃の改良は不可避であった。

そこで、さらに E-GUN によるシミュレーションを進め、実使用のビーム電流において平行ビームが取り出されるよう新たにウエネルト形状を設計し直した電子銃を製作した。また電子銃に使用するカソードも、初期の電子銃では EIMAC の Y646E (カソード直径 11mm) カソードアセンブリを使用していたが、エミッタンスを小さくするために Y646B (カソード直径 7mm) に変更した。また、その後電子銃の高圧が印加された内側ステンレス円筒と外側のセラミックとの間で頻繁に放電が繰り返され、ビーム加速が不安定になったことから、ステンレス円筒の外径を小さくし電場を弱くすることで放電を避ける対策が採られた。

電子銃交換に際して、100kV のビームを引き出した直後の軌道上にワイヤモニターを設置し、マグネティックレンズによるビーム集束の振舞を測定することでエミッタンスを導出した。この結果、改良前の電子銃と改良後の電子銃について規格化エミッタンスがそれぞれ約 $26\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ および約 $13\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ と求まった。加速器設計段階では DC 電子銃を用いた場合に規格化エミッタンスを $20\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下を目標としていたので、改良後の電子銃でそれが達成されていることが確かめられた。

エミッタンスの測定はさらに線形加速器出口において加速後のビームについても四極電磁石による集束の振舞から同様に求められた。その結果は電子銃出口に比べ 50%以上大きな値を示したが、測定当時は加速器の加速自体が不安定な時期であり、また加速器出口の直線部での測定であるためにエネルギーの揃っていない電子を含めた集束の振舞を測定していた事情を考慮すると、十分信頼できる結果とは言えない。

(5) ビーム位置モニターの開発と設置

加速器の制御にはビームの挙動を監視することが不可欠であるが、LEBRA の電子線形加速器には当初から蛍光板式スクリーンモニターとビーム電流モニターを用いており、ビームの位置・断面形状とマクロパルス電流を監視しながら加速器運転を行っていた。このうち、ビーム電流モニターは加速ビームに騒乱を与えないため常時監視に用いられるが、蛍光板式モニターは直接加速ビームを蛍光板に照射し発光させることで初めてビーム形状を知ることが出来るモニターであるので、使用中はビームに騒乱を与え下流のビームラインにビームを輸送できなくなる。また、この際には大量の制動放射線が発生し、これが光核反応による中性子の発生や周辺の機器・機材の放射化を引き起こすことが問題となる。

LEBRA においては、FEL ビームライン中に設置されたスクリーンモニターの使用により、FEL アンジュレーター磁石が放射線照射を受け劣化する問題が発生した。放射線照射は、 90° 偏向電磁石中でのビーム損失により発生する放射線によるものもあり、また生ずる問題としてもこの他に、アンジュレーター間隙を測定する素子の破損や光学式リミットスイッチの破損、監視用 TV カメラの劣化などがある。しかし、アンジュレーター磁石の劣化は明らかにスクリーンモニターの使用が原因であったことから、その後アンジュレーターを修理してからはスクリーンモニターを撤去し劣化を避けることに注意を払うことにした。この結果、アンジュレーター中を通るビームの挙動を知る手段がなくなり、得られる情報はアンジュレーター入口でのビーム電流、ビームダンプに入射したビーム電流、そしてアンジュレーター中のビームライン前方に放射されるアンジュレーター放射のみとなった。FEL の発振はこの状態で辛うじて達成することが出来たが、微妙な調整を必要とす

る FEL 実験においてビームの挙動に関する情報が不足なのは明らかであった。

そこで、KEK で開発されたストリップライン型ビーム位置モニター (BPM) を参考に、LEBRA の 2856MHz でバンチされたビームから誘起される RF をピックアップするよう、真空ダクト内に張るアンテナの寸法を 2856MHz に最適化した BPM を開発することにした。この BPM ではビーム形状を知ることは出来ないが、ビームの騒乱を起こさないため常時監視が可能で、しかもマクロパルス内でのビーム軌道の時間的な挙動を知ることが出来る点で開発の当初から有用性が期待された。計測の原理としては、真空ダクトの中心軸に関し対称にビーム軸に沿って張られた 2 本のアンテナでピックアップされる RF がビームの位置に依存することを利用し、ビームの位置が RF 検波信号の和と差の比から求められる。検波信号を位置情報に変換するための較正は KEK の BPM 用計測ベンチで行った。

最初に 3 台製作した BPM をそれぞれ線形加速器出口直線部のビーム集束位置、アンジュレーター入口、およびアンジュレーター出口に設置した。アンジュレーター入口と出口に設置された BPM では、90° 偏向系を通過して無分散に調整されたビームの軌道位置が観測されるため、理想的には対向するアンテナでピックアップされた RF の検波波形は加速器出口と同様に互いにほぼ相似形となる。ところが、加速ビームは中心エネルギーがマクロパルス内でわずかに変動するため、無分散に調整されていない場合にはエネルギーごとに軌道が異なるため検波波形は相似形ではなくなる。したがってこの波形を観測すると 90° 偏向系でビームを容易に無分散に調整することが出来、非常に役に立つことが分かった。また、線形加速器内に設置された四極電磁石によるビーム集束の調整の際には、ビームが四極電磁石の中心を通過していないとその下流でビーム軌道がずれるため、加速器出口に設置した BPM を監視しながら四極電磁石の中心を通るように上流のステアリングコイルを精密に調整することが出来、有用であることが確かめられた。

このように BPM はビームに騒乱を与え周辺を放射化することを心配せずに使え、また 0.1mm 程度のビーム軌道の変化を十分捉えることが出来、ビームの精密な調整に有用であることから、その後ビームライン上に増設を行った。現在は、線形加速器のバンチャー出口と各加速管出口、および FEL ビームライン偏向電磁石入口の各直線部、FEL ビームライン 45° 偏向後の分散軌道の上流側および下流側、PXR ビームライン 45° 偏向後の分散軌道の上流側、PXR 発生装置入口および出口、以上合計 10 台の BPM が増設されている。

線形加速器の各部に設置した BPM によって、FEL 発振実験の際に観測された発振強度の不安定の原因が、バンチャーより上流において発生していたセラミックの帯電・放電による軌道のわずかな周期的変動にあったことが突き止められた。この例のように、BPM はビーム診断に大いに役立っている。今後、線形加速器中に設置した BPM の信号を利用したビーム軌道自動調整、あるいは偏向電磁石系の分散軌道上に設置した BPM の信号を利用したエネルギー自動調整など、フィードバックシステムへの BPM 信号の利用による加速器自動運転システムへの応用が期待されている。

(6) RF 立体回路系と加速器本体の改良

電子線形加速器の本体・加速管部については、KEK との共同研究に基づいて KEK フォトンファクトリーで稼働していた陽電子生成用線形加速器の 1 セクションを移設して利用している。移設完了後の加速実験開始当初は、KEK での加速方法をそのまま適用した RF 立体回路系となっていた。線形加速器で 3 本使われている 4m 加速管のうち、下流側の 2 本には 1 本のクライストロンからの出力 RF を分岐して供給しているが、立体回路の導波管は全て固定長になっていたため、この 2 本

の加速管は互いに独立に RF 位相を変更することが出来ない構造となっていた。したがって電子の加速エネルギーを広範囲に変更することや、ビームの縦方向位相空間分布を自由に調整することが出来なかった。これは、一つには波長可変 FEL の可変範囲を狭くし、もう一つは電子ビーム調整の自由度が減ることを意味した。この点を改善するために、3 本目加速管の RF 入力直前の導波管部分を改良し、大電力移相器を挿入した。これにより、これまでの実績では加速エネルギー34MeV～100MeV の範囲で正常に加速することが出来た。

加速器の設計段階では電子銃に RF 電子銃を用いる予定であった。この場合、約 1MeV の引出し電子エネルギーで直接 4m 加速管にビームを入射することは入射エネルギーが低すぎ、加速を不安定にする要因となるため、加速実験の初期には 1 本目 4m 加速管の直前に前段加速を行う 30cm 長の加速管を配置していた。これにより約 10MeV の前段加速を行っていたが、30cm 加速管でのビーム損失が次段での加速特性を悪化させる要因になること、また RF 電子銃は開発的要素が多く当面は従来型の DC 電子銃とプリバンチャー・バンチャーの組み合わせによる入射部構成にしたため 30cm 加速管は不要となったことを考慮し、結局撤去することになった。

クライストロン 1 号機からプリバンチャー、バンチャー、1 本目 4m 加速管に RF を供給する立体回路系には、当初バンチャー側に RF を分岐するのに結合度が 7.3dB の方向性結合器を用いていた。加速実験からこの結合度ではバンチャーの入力 RF が不足していることが判断されたため、結合度 5.5dB の方向性結合器を新たに製作しバンチャーへの分岐パワーを増強した。この改造に併せてバンチャーとプリバンチャーの RF 系を組み直し、それまでバンチャー RF の減衰器と移相器を通る前にプリバンチャーにパワーを分岐していたのをやめ、減衰器と移相器を通った後のパワーをプリバンチャーに分岐する回路に変更した。これにより後段の加速管に対してプリバンチャーとバンチャーの位相を一緒にずらす操作が可能になり、バンチャー出口のビーム条件を一定にして 4m 加速管での加速位相の選択により縦方向位相空間分布を調整することができ、特に FEL ビームラインに導かれるビームの条件の変更が容易になった。

バンチャーに供給される RF パワーが増強された結果、電子銃から引き出されたビームの 50%以上が加速器出口直線部まで容易に加速できるようになった。また、これによりビームバンチの特性も改善され、FEL ラインではエネルギー幅 2%以下にビームエネルギーを制限しているが、加速器直線部出口でのビームの 80%以上がアンジュレーターを通過可能になった。

【まとめ】

LEBRA における電子線形加速器の安定化とビーム性能の向上に関する研究は、利用可能な光源を開発し共同利用施設として機能する上で極めて重要な役割を果たした。クライストロンの長パルス運転の実現は FEL パワーの飽和に不可欠な課題であり、加速 RF 位相と振幅の安定化は共同利用施設として FEL 利用者および PXR 利用者の実験に安定した光源を提供する上で重要な課題であった。また、ビーム利用中に加速器の挙動を詳しく知り、正確なビーム制御を行うために BPM の開発とビームライン各部への設置が大いに役立った。さらに、電子銃を初めとして、加速器本体の改造などビーム性能向上のために多くの研究開発が行われ、それらの成果を集積することにより赤外領域の可変波長 FEL と PXR の共同利用が実現できた。

【研究業績等】

・ 発表論文

- (1) I.Sato, I.Kawakami, K.Sato, Y.Matsubara, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, A.Yagishita, S.Yamamoto, Y.Azama, H.Kato, K.Tsuchiya, A.Anami, S.Fukuda, H.Kobayashi, A.Enomoto, S.Ohsawa, T.Shidara, S.Yamaguchi, T.Suwada, T.Kamitani, S.Michizono and K.Yamada
Advanced Status AT LEBRA in Nihon University
Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7)24-28.
- (2) T.Tanaka, K.Hayakawa, I.Sato, Y.Hayakawa, K.Sato, Y.Matsubara, I.Kawakami, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno and T.Sakai
Improvement of the Low Power RF Phase Stabilizer Test Circuit
Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7) 105-107.
- (3) K.Yokoyama, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, K.Sato, Y.Hayakawa, Y.Matsubara, H.Nakazawa, T.Sakai, K.Kanno, H.Inokawa, Y.Nakamura and K.Ishiwata
RF Phase Drift Compensation with a Function Generator
Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7) 108-110.
- (4) K.Kanno, I.Sato, K.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, H.Nakazawa, K.Yokoyama, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, S.Michizono, S.Ohsawa and S.Fukuda
Analysis of Thermionic DC Electron Gun for 125MeV Linac
Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7) 168-170.
- (5) K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, K.Sato, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, H.Kobayashi, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Shinohara, N.Matsunaga, S.Anami, S.Fukuda and H.Homma
Breakdown of the Back-diode of the Pulse Modulator for FEL Linac at Nihon University
Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7) 222-224.
- (6) T.Sakai, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Sato, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, K.Ishiwata, H.Inokawa and Y.Nakamura
Improvement of the Long Pulse Operation of the S-Band Klystron
Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000.7) 228-230.
- (7) I.Sato, I.Kawakami, K.Sato, Y.Matsubara, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, E.Hashimoto, K.Fujioka, K.Nakao, T.Murakami, A.Anami, S.Fukuda, H.Kobayashi, A.Enomoto, S.Ohsawa, T.Shidara, S.Yamaguchi, T.Kamitani, S.Michizono and K.Tsuchiya
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
Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 30-33.
- (8) K.Kanno, I.Sato, K.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, K.Nakao, E.Hashimoto, K.Fujioka, T.Murakami, S.Michizono, S.Ohsawa, S.Fukuda and T.Suwada
電子銃の低エミッタンス化による入射部の高度化
Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 73-75.

- (9) T.Sakai, I.Sato, K.Hemmi, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Sato, K.Yokoyama, K.Kanno, K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, K.Nakao, E.Hashimoto, K.Fujioka and T.Murakami
FEL 用クライストロンのグレードアップ
Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 222-224.
- (10) K.Yokoyama, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, K.Sato, Y.Hayakawa, Y.Matsubara, H.Nakazawa, T.Sakai, K.Kanno, K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, E.Hashimoto, K.Nakao, K.Fujioka and T.Murakami
クライストロンドライブ系の位相安定化
Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 231-233.
- (11) K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Sato, I.Sato, K.Yokoyama, T.Sakai, K.Kanno
商用電源変動とビーム不安定性
Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 285-287.
- (12) H.Inokawa, I.Sato, K.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Ishiwata, Y.Nakamura, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Nakao, E.Hashimoto, K.Fujioka and T.Murakami
LEBRA におけるビームダンプの放射線遮蔽効果の評価
Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 332-334.
- (13) K.Nakao, I.Sato, K.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, E.Hashimoto, K.Fujioka and T.Murakami
電子線利用研究施設における放射線監視システムの概要
Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 346-348.
- (14) K.Ishiwata, T.Tanaka, I.Sato, K.Hayakawa, Y.Hayakawa, K.Sato, H.Inokawa, Y.Nakamura, K.Kanno, T.Sakai, K.Yokoyama, H.Nakazawa, K.Fujioka, E.Hashimoto, K.Nakao and T.Murakami
非破壊型ビームポジションモニターの開発研究
Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001.8) 270-272.
- (15) T.Tanaka, K.Hayakawa, I.Sato, K.Sato, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, K.Kanno and T.Sakai
Improvement of the Long Pulse Operation of the FEL Linac at Nihon University
Proceedings of the 2nd Asian Particle Accelerator Conference (Beijing, China 2001.9) 743-745.
- (16) K.Yokoyama, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, K.Sato, Y.Hayakawa, H.Nakazawa, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata
Suppression of Energy Fluctuation for the Free Electron Laser at LEBRA
Jpn. J. Appl. Phys. 41 Pt.1, No.7A (2002) 4758-4759.
- (17) 佐藤勇、早川建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、菅野浩一、境武志、石渡謙一郎、橋本英子、藤岡一雅、中尾圭佐、村上琢哉、長谷川崇、宮崎慎也、福田茂樹、榎本收志、大沢哲、設楽哲夫、諏訪田剛、山口誠哉、紙谷琢哉、道園真一郎、土屋公央
日本大学電子線形加速器の現状と研究計画
Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)15-20.
- (18) 菅野浩一、佐藤勇、早川建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、境武志、石渡謙一郎、中尾圭佐、橋本英子、藤岡一雅、村上琢哉、長谷川崇、宮崎慎也
日大 FEL 用光陰極 RF 電子銃に関するシミュレーション
Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)151-153.
- (19) 横山和枝、佐藤勇、早川建、田中俊成、早川恭史、境武志、菅野浩一、石渡謙一郎、中尾圭佐

LEBRA クライストロンの位相変動測定

Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)287-289.

- (20) 境武志、佐藤勇、早川建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、菅野浩一、石渡謙一郎、中尾圭佐、橋本英子、藤岡一雅、村上琢哉、長谷川崇、宮崎慎也

FEL 用 S バンドロングパルスクライストロンの動作安定化テスト

Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)293-295.

- (21) 石渡謙一郎、佐藤勇、早川建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、諏訪田剛、境武志、菅野浩一、中尾圭佐、橋本英子

ストリップライン型ビームポジションモニターの研究 – ビームパルス内におけるビーム位置変動 –

Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)350-352.

- (22) 中尾圭佐、佐藤勇、早川建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、境武志、菅野浩一、石渡謙一郎、橋本英子、藤岡一雅、村上琢哉、長谷川崇、宮崎慎也

日本大学電子線利用研究施設における加速器モニタの開発

Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)356-358.

- (23) 早川建、横山和枝、田中俊成、早川恭史、佐藤勇、境武志、菅野浩一、石渡謙一郎
加速器調整履歴の蓄積

Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan (2002.8)374-376.

- (24) T.Sakai, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, K.Kanno, K.Ishiwata, S.Fukuda, K.Hemmi, M.Hino

S-Band Klystron for Long Pulse Operation

Proceedings of the 21st International Linear Accelerator Conference (LINAC2002, Gyeongju, Korea, 2002.8) 712-714.

- (25) K.Ishiwata, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, T.Sakai, K.Kanno, K.Nakao, E.Hashimoto, T.Murakami, K.Fujioka, T.Suwada

Development of Strip-Line Type Beam Position Monitor

Proceedings of the 21st International Linear Accelerator Conference (LINAC2002, Gyeongju, Korea, 2002.8) 179-181.

- (26) 佐藤 勇、早川 建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、菅野浩一、境 武志、中尾圭佐、長谷川 崇、福田茂樹、榎本收志、大沢 哲、設楽哲夫、諏訪田 剛、古川和朗、道園真一郎

日本大学電子線利用研究施設の現状

Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug.1,2003,Tokai) 1-3.

- (27) 早川 建、田中俊成、早川恭史、佐藤 勇、横山和枝、中尾圭佐、境 武志、金井 泉、本郷礼二
商用電源変動とビーム不安定性 II

Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug.1,2003,Tokai) 90-92.

- (28) 菅野浩一、佐藤 勇、早川 建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、境 武志、石渡謙一郎、中尾圭佐、奥 洋平、長谷川 崇、宮崎慎也、稲垣 学、城所明生、高崎 寛

LEBRA-FEL 用光陰極 RF 電子銃の設計検討

Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug.1,2003,Tokai) 203-205.

- (29) 境 武志、佐藤 勇、樋野雅司、吉田清彦、福田茂樹、田中俊成、早川 建、早川恭史、横山和

枝、菅野浩一、石渡謙一郎、中尾圭佐、長谷川 崇、宮崎慎也

FEL 用 S バンド大電力クライストロンの長パルステスト運転

Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug.1,2003,Tokai) 351-353.

- (30) 石渡謙一郎、佐藤 勇、早川 建、田中俊成、早川恭史、横山和枝、諏訪田 剛、境 武志、菅野浩一、中尾圭佐、長谷川 崇

LEBRA における BPM によるビーム位置測定

Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug.1,2003,Tokai) 431-433.

- (31) 横山和枝、佐藤 勇、早川 建、田中俊成、早川恭史、諏訪田 剛、境 武志、菅野浩一、石渡謙一郎、中尾圭佐、長谷川 崇

PFN インダクタンスの自動調整システム

Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug.1,2003,Tokai) 464-466.

- (32) K.Yokoyama, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, K.Nakao

Improvement of the PFN Control System for the Klystron Pulse Modulator at LEBRA

Nucl. Instr. and Meth. A 528 (2004) 239-243, Proceedings of the 25th International Free Electron Laser Conference and 10th FEL Users Workshop (Tsukuba, Ibaraki, Japan, Sep.8-12, 2003).

- (33) T.Tanaka, I.Sato, K.Hayakawa, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, K.Nogami, A.Mori, K.Kanno, T.Sakai, K.Ishiwata, K.Nakao, S.Fukuda, A.Enomoto, S.Ohsawa, T.Suwada, K.Furukawa, S.Michizono

Operational Status of 125-MeV Linac at Nihon University

Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 22-24.

- (34) T.Sakai, I.Sato, T.Tanaka, K.Hayakawa, Y.Hayakawa, A.Mori, K.Nogami, K.Kanno, K.Ishiwata, K.Nakao, S.Fukuda, S.Michizono

Development of S-band Traveling Wave RF Window

Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 84-86.

- (35) K.Kanno, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, A.Mori, K.Nogami, T.Sakai, K.Ishiwata, K.Nakao

Test of Multibunch Beam Extraction from LaB₆ Photocathode

Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 377-379.

- (36) K.Ishiwata, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, A.Mori, K.Nogami, K.Kanno, T.Sakai, K.Nakao, T.Suwada

Influence of Harmonics on the Output Signal of Beam Position Monitor Installed near the Slit

Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 567-569.

- (37) K.Ishiwata, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, A.Mori, K.Nogami, K.Kanno, T.Sakai, K.Nakao, T.Suwada

Development of Beam Position Measurement System at LEBRA

Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 570-571.

- (38) K.Yokoyama, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Nakao
Measurement of Electron Bunch Length at LEBRA
Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) 602-604.
- (39) K.Hayakawa, Y.Hayakawa, K.Ishiwata, K.Kanno, K.Nakao, T.Sakai, I.Sato, T.Tanaka, K.Yokoyama
The LEBRA 125MeV Electron Linac for FEL And PXR Generation
Proceedings of LINAC 2004 (August 16-20, 2004, Lubeck, Germany) 90-92.
- (40) K.Yokoyama, K.Hayakawa, Y.Hayakawa, K.Nakao, I.Sato, T.Tanaka
Bunch Length Measurements at LEBRA
Proceedings of LINAC 2004 (August 16-20, 2004, Lubeck, Germany) 411-413.

• 学位の取得状況

- (1) 菅野 浩一：修士（理学），125MeV 電子線形加速器用熱陰極 DC 電子銃の高性能化，2001 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (2) 境 武志：修士（理学），還流型空洞を用いたパルス圧縮による高周波電力増幅の研究，2001 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (3) 猪川 弘康：修士（理学），電子線利用研究施設における放射線遮蔽効果の研究，2002 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (4) 石渡謙一郎：修士（理学），ストリップライン型電子ビーム位置モニターの研究，2002 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (5) 中村 吉宏：修士（理学），電子線形加速器入射部の研究，2002 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (6) 藤岡 一雅：修士（理学），マイクロバンチ計測に関する研究，2003 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (7) 宮崎 慎也：修士（理学），PFN インダクタンスの調整方法に関する研究，2004 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (8) 稲垣 学：修士（理学），電子線形加速器冷却水の放射化に関する研究，2005 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (9) 高崎 寛：修士（理学），電子線形加速器におけるパルス内ビーム変動に関する研究，2005 年 3 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (10) 横山 和枝：博士（理学），FEL LINAC に於ける RF 系の改良によるビーム安定化に関する研究，2002 年 1 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (11) 菅野 浩一：博士（理学），高輝度マルチバンチ高周波電子銃用光陰極特性の研究，2004 年 7 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (12) 境 武志：博士（理学），S バンドクライストロン長の長パルス化に関する研究，2004 年 7 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻
- (13) 石渡 謙一郎：博士（理学），非破壊型ビーム位置モニターシステムの開発研究，2005 年 1 月，日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

PROCEEDINGS OF
THE 25TH
LINEAR ACCELERATOR MEETING
IN JAPAN

July 12 - 14, 2000
Himeji, Japan

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

[12B-04]

ADVANCED STATUS AT LEBRA IN NIPPON UNIVERSITY

I.Sato, I.Kawakami, K.Sato, Y.Matsubara, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, Y.Nakazawa^{A)},
K.Yokoyama^{A)}, K.Kanno^{A)}, T.Sakai^{A)}, K.Ishiwatari^{A)}, H.Inokawa^{A)}, Y.Nakamura^{A)}, A.Yagishita^{B)},
S.Yamamoto^{B)}, Y.Azuma^{B)}, H.Kato^{B)}, K.Tsuchiya^{B)}, S.Anami^{C)}, S.Fukuda^{C)}, H.Kobayashi^{C)}, A.Enomoto^{C)},
S.Ohosawa^{C)}, T.Shidara^{C)}, S.Yamaguchi^{C)}, T.Suwada^{C)}, T.Kamitami^{C)}, S.Michizono^{C)}, Y.Yamada^{D)}

Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Atomic Energy Research
Institute of Nihon University

Narashinodai 7-24-1, Funabashi-chi, Chiba-ken, 274-8501 JAPAN

^{A)} Graduate School of Science and Technology of Nihon University

Kanda Surugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308 JAPAN

^{B)} Institute of Materials Structure Science in High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-chi, Ibaraki-ken, 305-0801 JAPAN

^{C)} Accelerator Laboratory in High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-chi, Ibaraki-ken, 305-0801 JAPAN

^{D)} Electrotechnical Laboratory in Agency of Industrial Science and Technology

1-1-4 Umezono, Tsukuba-chi, Ibaraki-ken, 305-8568 JAPAN

Abstract

We had been troubled with a lot of accidents from the beginning operation of linac, and were damaged to insulation in an oil tank, back diodes of a pulse transformer and a rf window of a high power klystron. After the commission of accelerator, we had been also worried about such troubles as rf phase-shift within pulse duration, fire-trouble of thyatron and radiation damage for FEL system. Recently, the troubles have been extinguished by being settled them. The duty factor of klystron was greatly improved by a strengthening of exhaust power around its rf window. The operation of linac maintains stability. On the other hand, LEBRA proposed a new project i.e. researches and development for advanced application of the variable wavelength, high brightness, monochromatic light sources. It was authorized by the Ministry of Education and continues a five-year program from this fiscal year. The project is application researches that are based on radiation lights which are generated FEL and Parametric X-ray radiation make use of a 125 MeV electron linear accelerator. This paper discusses about advanced status and the new project on LEBRA.

日本大学電子線利用研究施設の現状

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⁾に着手、1998 年 3 月に完成した。1998 年 1 月、90 MeV 20 mA の電子ビーム加速 ³⁾に成功、同年 2 月、自発放射光を観測した。

建設途中、クライストロンのヒーター絶縁トランスが耐圧劣化し、パルストランスのオイルタンクで時々放電 ⁴⁾を起し、次第に印加電圧が低下して使用不能となった。1998 年末、改良絶縁トランスと交換、その結果、放電は皆無となった。制御系やインターロック系も整備され、電子線形加速器は一人で運転可能 ⁷⁾となった。1998 年 10 月、入射部集束系を強化し、その結果、電子ビーム強度は 100 mA から 220 mA に増強した。一方、モノクロメーター、ストリーク・カメラ、高感度 CCD カメラ等の導入によって計測系も徐々に整備され、自発放射光のスペクトルや電子ビームのパンチの計測も可能となった。又、電子ビームのエミッター特性はプロファイル・モニターを変え、計測精度を上げながら精力的に測定し、規格化エミッターが 30 mm·mrad 程度であることを突き止めた ⁸⁾。又、自由電子レーザーが発振に至らない原因を詳細に検討し、その原因の 1 つに、アンジュレータ

ーの永久磁石が放射線損傷 ^{9,10)}を受けていることを突き止めた。そこで、放射線損傷を受けにくい周期長が 2 倍の新しいアンジュレーターが検討され、永久磁石や光学系の設計製作 ¹¹⁾に取りかかり、2000 年 3 月には新しいアンジュレーターが導入された。2000 年 5 月、赤外線レーザー発振に向けた基礎実験を開始した。その結果、レーザー共振波長近傍 (1.5 m) の自発放射光基本波、2 倍と 3 倍の高調波を観測し、高調波スペクトル ¹²⁾は非常にシャープであることが確かめられた。

一方、兼ねてからの念願だったクライストロン性能向上 (高周波電力×パルス持続時間×繰り返し=20 MW× s×12.5 Hz) も幾多の試練を経た後、真空システムの強化により当初の目標仕様値 ¹³⁾に到達することが出来た。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、安定性は大幅に向上した。最近、約 s 幅の電子ビームを自由電子レーザーシステムに入射可能となり、そのビームは約 100% 輸送が可能となった。又、加速器室と実験室の間の放

射線シールドが強化され、研究者が加速器運転中に実験室で計測可能となった。もう 1 つ朗報は、LEBRA 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 年計画で新プロジェクトがスタートすることになったことである。

2. 運転状況

過去 4 年間(1996 年度～1999 年度)の通電時間、稼働日数、ビーム加速時間、ビーム加速日数を表 1 に示す。過去数年間の加速器通電時間の多くは、クライストロンの性能を向上させるためのコンデショニングに費やされた。しかし、1999 年度は加速器通電は 1257 時間に留まったが、ビームの加速日数は 45 日、ビーム加速時間は 248 時間に増加した。又、1 日のビーム加速時間の平均は 5.5 時間であった。残りの通電時間の大部分はクライストロンのコンデショニングに費やされた。一方、加速器不具合の修復、実験環境整備(放射線シールド強化)、アンジュレーター永久磁石交換等の作業のため、運転を中断する場合が多かった。

表 1 電子線形加速器の稼働状況

年度	通電時間	通電日数	ビーム 加速時間	ビーム 加速日数
1996	71	8	0	0
1997	559	61	50	13
1998	1617	159	160	40
1999	1257	127	248	45

3. クライストロンの性能限界動作例

本研究施設では、三菱電機製クライストロン(PV-3030A1)を FEL 用電子線形加速器の長パルス用クライストロン(20MW×20 s×12.5Hz)として稼働させることに挑戦してきた。このクライストロンは元来短パルス用であり、メーカーでは最大出力電力: 30MW、パルス持続時間: 2.5 s、繰り返し数: 50Hz に制限している。

一方、本研究施設で使用するクライストロンの負荷電力は 70MW×12.5Hz×30 s であり、どのクライストロンもこの負荷テストはクリアしたが、目標とする高周波性能仕様(20MW×20 s×12.5Hz)はクリア出来なかった。モジュレーター 1・2 号機でテストした各クライストロンの破損時までの最大性能を表 2 に示す。何れのクライストロンも 12MW×20 s×12.5Hz の性能は満たしていた。しかし、その後、高周波電力テストでは窓破損に至るまで個体差があった。

4. クライストロンの性能向上

クライストロンの高周波電力は、最初、ダミー負荷(水負荷)を使って測定された。その後、加速管負荷に切り替えられた。クライストロンの超性能仕様を満たす条件の見極めには多くの困難が伴った。テスト途中で、パルス・トランスやヒーター絶縁トランスが油中で放電するアクシデントなトラブルにより、クライストロンにも二次的故障が波及し、クライストロン窓も断続的に破損した。この破損により、高周波窓の性能限界が次第に明らかになった。PV-3030A2 型クライストロンでは、表 2 に示すように、繰り返しが 2Hz では、20 s のパルス幅で 26MW の高周波電力が得られるようになったが、しかし、高周

波窓は何れの場合も短時間で破損した。

このテストを通じて奇妙な現象に気がついた。本研究施設の電子線形加速器では、図 1 に示すように、クライストロンと加速管の間の立体回路にはクライストロンの高周波窓以外にもう 1 個の高周波窓(セラミック窓)が設置してある。この 2 つの窓に対する高周波電力の通過条件はほぼ等価である。しかし、これまでのテスト実験では多数のクライストロン窓が破損したが、このセラミック窓は何時も健在であった。この差はどこから生ずるかを追究した。その結果、高周波窓の真空環境の差ではないかとの結論に達した。そこで、クライストロンの高周波窓近傍にイオンポンプ 2 台を取り付けて、窓周辺の排気能力を上げた。この効果は絶大で、パルス持続時間が 20 s を保持し、デューティー・サイクルも 12.5Hz と大幅に改善¹³⁾された。クライストロン(番号: 90507)の高周波窓破損は、パルス電源の PFN を調整中に発生したものであり、又、図 1 に示す接合不良の導波管からの反射波も関連し、最終的な性能は不明である。

表 2 クライストロンの性能限界

品名	番号	性能限界
**PV3030A1	90507	20MW 20 μs 12.5Hz
*PV3030A2	91506	19MW 13 μs 2Hz
*PV3030A1	87514	24MW 20 μs 2Hz
*PV3030A1	88516	21MW 8 μs 2Hz
*PV3030A2	92505	21MW 12.5 μs 2Hz
*PV3030A2	92502	26MW 20 μs 2Hz
*PV3030A2	92503	26MW 20 μs 2Hz

*V: 破損したクライストロン **真空強化後破損

5. アンジュレーターの放射線損傷

平成 10 年 1 月、電子線加速、同年 2 月にはアンジュレーター放射光を観測、同年 3 月に自由電子レーザー発生システムは完成した。更に、光学計測系を整備し、平成 10 年 7 月にレーザー発振波長の 488nm を中心に、アンジュレーター放射光スペクトルを測定⁹⁾したが、所定の特性が得られなかった。その原因追究のため、電子線特性を色々な角度から調べた結果、自由電子レーザー発振に必要な電子ビームの特性は満たされていることが判明した。一方、自発放射光のスペクトルは測定の度に広がっていった。アンジュレーター劣化を疑い磁場分布を測定した¹⁰⁾。永久磁石は、図 1 に示すような放射線損傷を受け、磁束密度が著しく低下していた。特に運転当初は、アンジュレーターのビーム輸送路に於けるビーム損失が多かった。これは、コミッションを開始した当時は、ビームハンドリングに不慣れであったことと、アンジュレーターに設置されているビームダクト(内径: 7mm、長さ: 2.5m)が細長いパイプでビーム調整が難しかったことが、その原因と考えられる。又、加速時にビームが非常に不安定であったことも原因の 1 つである。

6. 新アンジュレーター

LEBRA では、アンジュレーターの永久磁石が放射線損傷を受け使用出来なくなったことを重視し、アンジュレーターを短波長用と長波長用の 2 種類を用意することにした。短波長用は放射線損傷を受けた永久磁石

を再着磁して再生して使用することを試み、長波長用には周期長が 2 倍のアンジュレーター永久磁石を新たに設計製造することにした。短波長と長波長のアンジュレーター仕様を表 3 に示す。短波長用は損傷永久磁石の再生作業を準備している段階であり、長波長用は 2000 年 3 月に完成した。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たことに伴って、実験室で自由電子レーザー計測が可能となった。現在、長波長用自由電子レーザーの基礎実験では、これまでにない高輝度の自発放射光が観測され、2 倍と 3 倍高調波のシャープなスペクトル分布が測定されている。

また、最近では運転技術が向上し、又、加速器の性能が格段に向上したので、自由電子レーザーシステムに於ける電子ビーム損失はほとんどない。

表 3 アンジュレーターパラメーター

パラメーター	アンジュレーター1	アンジュレーター2
型式	ハルバック	ハルバック
全長 m	24	2.4
周期長 mm	24	48
最大磁束密度 G	128	128
K 値	0.65~1.1	0.65~1.1
周期数	100	50
最小磁極間隔 mm	13~25	28~40
ビームダクト径 mm	7	25
レーザー波長 μm	0.35~1.5	0.8~5
平均出力 W	0.3~2	1~6

7. 電子線形加速器の改良

本研究施設の電子線形加速器は電子銃、プレバンチャー、バンチャー、0.3m 加速管、4m 加速管 3 本で構成されている。当初の計画では rf 電子銃を使って短波長自由電子レーザーシステムを完成させる予定であったが、rf 電子銃は開発要素が多く、リスクも大きいので、途中から直流電子銃を使用することになった。従って、rf 電子銃の部分が電子銃、プレバンチャー、バンチャーに置換わった経緯があり、この加速器構成には、0.3m 加速管でビーム損失が発生するとエネルギーが変わり、長パルスの安定したビームを必要とする加速器では致命的な欠点となる。そこで、エネルギー調整を容易にするために、0.3m 加速管を末端部に配置することを考慮して、図 1 に示すように、電子銃、プレバンチャー、バンチャー、4m 加速管 3 本、0.3m 加速管の構成になる。又、カソード面積の小さい電子銃によるエミッタンスの性能向上¹⁷⁾を試み、最適パラメーターをサーチしている。加速器の改造や新しい電子銃のテスト実験を今年中に行う予定である。

8. 利用研究の高度化計画

電子線利用研究施設では、KEK、電総研、東北大学、日本大学の理工、文理、医、歯、松戸歯、生物資源科学部等の協力の下に、FEL とパラメトリック X 線を基本とした光源開発とその光の高度利用研究を推進してきた。可変波長高輝度単色光源の高度利用研究を研究課題として平成 11 年度の学術フロンティアに応募し、このプロジェクト計画の研究拠点に電子線利用研究施設が選定され、平成 12 年度からこの推進事業が 5 年間継続されることになった。この計画では、図 2 に示すように、加速器室にはパラメトリック X 線源¹⁸⁾、既設実験室には赤外線から紫外線までのビームライン

と X 線ビームラインが建設される。X 線ビームラインには、X 線回折装置と生体高分子高次解析装置が設置される。

図 3 に示すように、半導体プロセス、新素材開発、光励起極限プロセス、化学触媒光反応、光電子分光、生命科学、医学、医用 1、医用 2 等の 9 つの実験テーマを取り上げ、9 実験室が用意される。そのための実験棟(約 1300m²)は 2 階建となる。又、それぞれの実験室には自由電子レーザービームラインが設定される。

9. おわりに

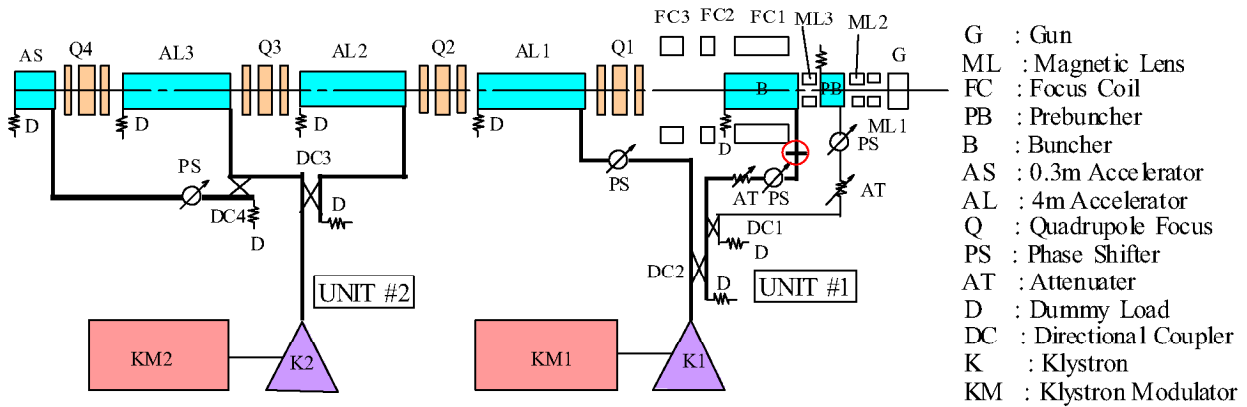
LEBRA の電子線形加速器は、4 年間にわたった、冷却系の腐食防止、パルストランス、クライストロンヒーター絶縁トランスの改良、バックダイオード回路の改良、安定化電源の導入、集束系の強化、加速管配置不具合の修正、クライストロン高周波窓周辺の真空システムの強化、導波管接合不良の改修、高周波増幅器の位相補償、サイクロン微調整等の改善の積み重ね作業によって、加速ビームも安定になり、その性能が大幅に向上した。この間、短パルス用クライストロンを長パルス用として使用するので、その性能限界を見極める非常に難しい作業があったが、この作業もクリアできた。最近、モノクロメーター、ストリーク・カメラ、高感度 CCD カメラ、高速受光素子等が導入され、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計測することが可能となった。一方、自由電子レーザーの基礎実験では、アンジュレーター永久磁石が放射線損傷を受け、発振を断念せざるを得なかった。長波長用アンジュレーターを新たに製作し対応した。自由電子レーザーの発振環境は徐々に整いつつある。

学術フロンティア推進事業では、平成 12 年度に実験棟が増築され、パラメトリック X 線源とレーザービームラインの建設に着手、平成 13 年度から共同利用実験が開始される。

参考文献

- 1) I.Sato, et al., Proc. of 22nd Linear Accel. Meeting in Japan,104(1997).
- 2) K.Hayakawa, et al., Nucl.Instr.and Meth. A375 (1996) ABS25.
- 3) T.Tanaka, et al., Nucl.Instr.and Meth. A407 (1998)II-103.
- 4) T.Tanaka,etal.,KEKProceedings98-10Nov.1998A722.
- 5) T.Tanaka, et al., Proc. of 23rd Linear Accel. Meeting in Japan,25(1998).
- 6) I.Sato, et al.,Proc.of23rdLinearAccel.MeetinginJapan, 22(1998).
- 7) K.Hayakawa.etal.,Proc. of 23rd Linear Accel.Meeting in Japan,167(1998).
- 8) K.Yokoyama, et al., The 12 th Sym. on Accel. Sci. and Tech.,Riken,Japan(1999)473-475.
- 9) H.Nakazawa, et al., The 12 th Sym. on Accel. Sci. and Tech.,Riken,Japan(1999)394-396.
- 10) I.Sato, et al., The 12 th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan(1999)37-39.
- 11)K.Hayakawa,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 12)Y.Hayakawa,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 13) T.Sakai,et al.,Proc.ofthisMeeting.
- 14)K.Ishiwata,et al.,Proc.ofthisMeeting.
- 15)K.Yokoyama,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 16) T.Tanaka,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 17)K.Kanno,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 18) Y.Hayakawa, et al.,The 12 th Sym. on Accel. Sci. and Tech.,Riken,Japan(1999)391-394.

125MeV ELECTRON LINAC



○ 導波管の接触不良部

図1 日本大学の125MeV電子線形加速器の全体図

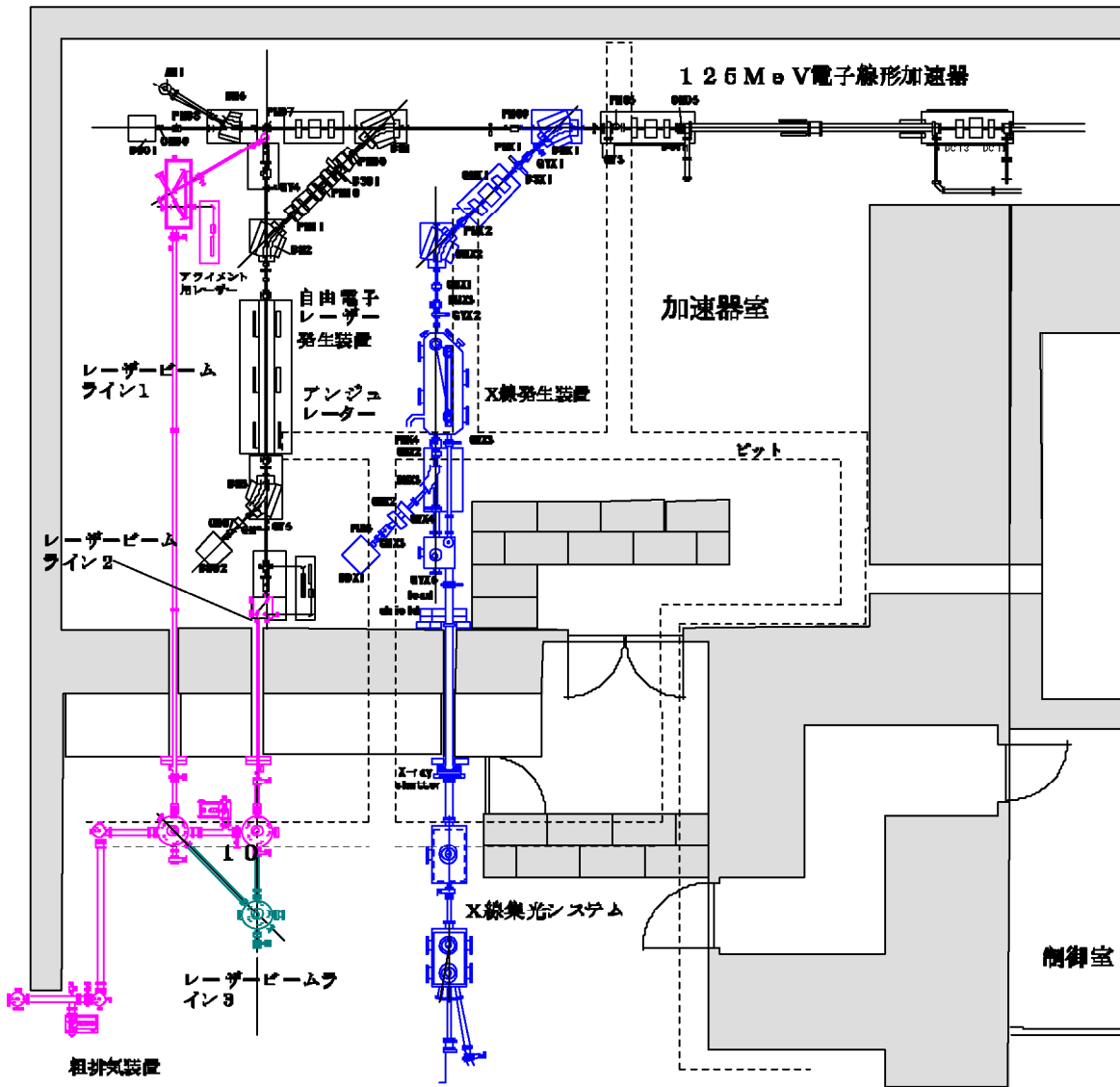


図2 パラメトリックX線源と自由電子レーザー・ビームライン

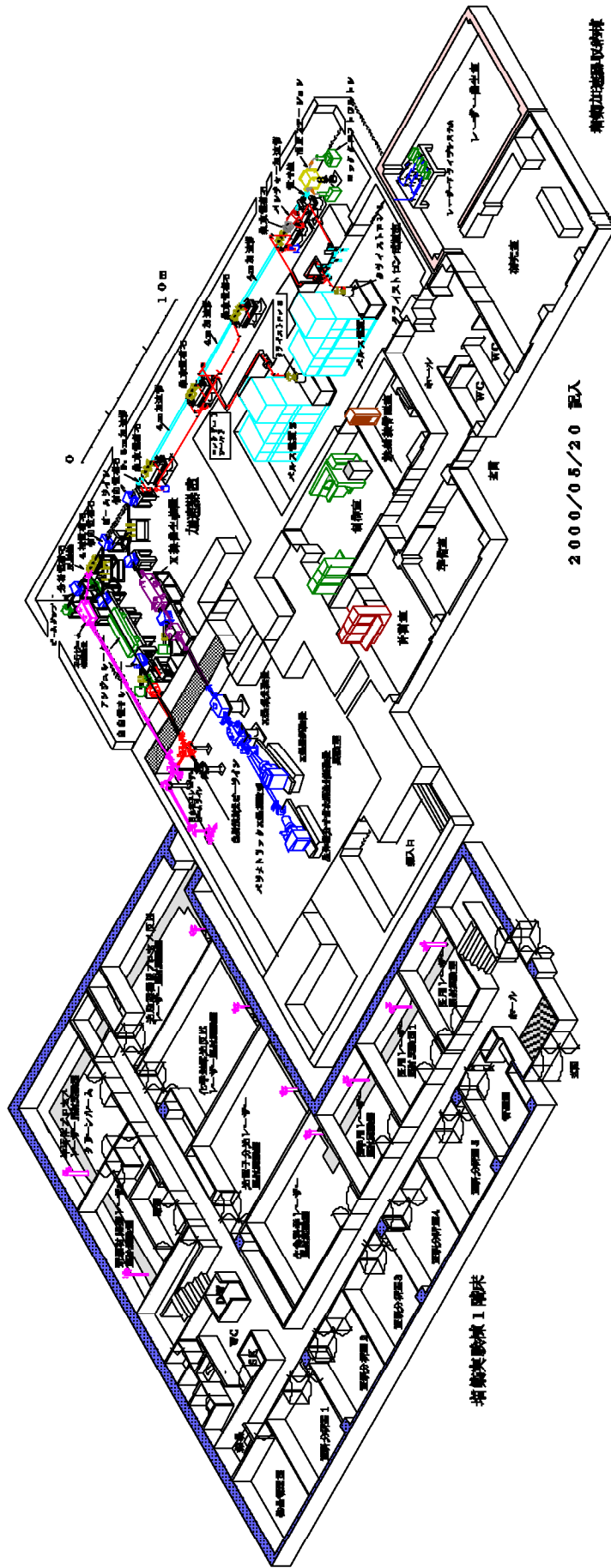


図 3 電子總利用研究施設実験棟の鳥瞰図

[14A-02]

IMPROVEMENT OF THE LOW POWER RF PHASE STABILIZER TEST CIRCUIT

T. Tanaka^{*}), K. Hayakawa, I. Sato, Y. Hayakawa, K. Sato, Y. Matsubara, I. Kawakami, H. Nakazawa^{A)}, K. Yokoyama^{A)}, K. Kanno^{A)} and T. Sakai^{A)}

Atomic Energy Research Institute, Nihon University
^{A)}College of Science and Technology, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan

Abstract

Development of the low power rf stabilizer circuit has been continued at LEBRA, Nihon University. The problem of unstable operation of the test circuit was solved by the replacement of an asynchronous 12bit counter, which was used for the estimation of the correction of the rf phase, with a synchronous one. A long transient time before the phase-locking in each rf pulse was considerably improved by the application of an automatic initial phase offset based on a feed-forward technique. However, the phase stability of the output of the klystron driving rf amplifier has been estimated to be $\pm 0.6^\circ$ with the improved circuit, which is worse than the old result.

低電力RF位相安定化試作回路の改良

1. はじめに

1999年のリニアック研究会において、日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)のFEL用125MeVリニアックRF系の位相安定化回路の試作について報告した[1]。この位相安定化回路は、2856MHz RF源からの出力とクライストロン入力間の移相減衰器とRFアンプで生じる、パルス内およびパルス間の位相変動をデジタルフィードバックにより取り除くために試作したものであるが、フィードバック動作上、いくつか問題があった。

その後、回路の一部を改良することにより、さらに改善の必要はあるものの、20 μ sのRFパルス内で10°以上変動していた位相を、パルス全体にわたって $\pm 0.6^\circ$ 程度の変動まで安定化することができた。

今回は、この試作回路の改良結果について報告する。

2. 安定化回路の原理

前回報告した回路の原理を簡単に説明する。RFの位相調整は、RF源からのRFを位相が90°異なる2つの成分に分割し、ダブルバランスドミキサ(DBM)で振幅を変えた後合成する、という方法で実現している[1]。

合成すべき2成分の振幅はそれぞれ三角関数のsinとcosの関係にあることが理想であるが、DBMの線型性の問題で正確に振幅一定のRFに合成するよう制御信号を与えることは難しい。このため歪みが生ずることを容認し、制御信号そのものをsinと

cosの関係になるようにした。

制御信号である三角関数の数値を13bitアドレスの高速ROMに360/8192-0.044°毎に書き込んでおき、ROMの出力(11bit)を12bit DACに入力し、得られたアナログのsinとcosの出力電圧をDBMに入力することにより大まかにROMのアドレスに対応する位相の出力RFが合成によって得られた。

ROMに指定すべきアドレスは、元のRFとRFアンプ出力との位相差をDBMで検出し位相の進み遅れに従い5MHzで増減を行う12bitカウンタの数値のうち上位11bitを用いた。

これにより、RFアンプ出力位相が元のRFに比べ進んでいるか遅れているかでカウンタ出力が増減するので、自動的にフィードバックが掛かり、位相安定化の動作が実現した。このようにフィードバック量がデジタルで与えられることから、デジタルフィードバックと称している。

3. 以前の問題点と改善

上記の回路で動作試験を行った結果、条件の良い状態では位相変動をほぼ $\pm 0.3^\circ$ 以内に抑制できることが確かめられた。しかし、

- ①合成RFの出力振幅を常に一定に保つ振幅制御回路の動作不良
- ②位相安定化動作の不安定
- ③フィードバックにより位相がロックされるまでの、デジタルフィードバックの速度に起因する長い過渡時間

^{*}) T. Tanaka, 047-469-5489, tanaka@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

など問題が残されていた。これらの改善について以下に述べる。

3.1 動作不安定の改善

RF 出力振幅を安定化する回路部分が動作不良だったこと、位相安定化の動作が不安定だったことには共通の原因があった。

基本的に位相制御回路も振幅制御回路もその原理は全く同じで、TTL 12bit カウンタで位相の進み遅れ、あるいは振幅の大小の情報を数値化して表現していたが、カウンタの動作は非同期であった。

カウントの周波数は 5MHz であったためカウンタアップまたはカウンタダウンのみの動作では問題ないが、高速の動作を期待して 1 周期のカウントパルス中でアップとダウンが連続して可能な回路にして動作させていたため、16 進数の桁上がりが生ずるときにはカウンタの値が異常になり、20 μ s の RF パルス内で位相が突然ジャンプしたり、振幅がジャンプするという現象が生じていた。

これらの問題を解決するために、カウンタを同期カウンタに変更し、安全のために 1 周期の中ではカウンタアップかダウンかのどちらか一方の動作のみが可能ないように改善した。

これによって位相や振幅がジャンプする現象は無くなり、振幅の制御が位相のフィードバックと同時にできるようになった。位相安定化の動作の不安定はこれで解決された。

3.2 過渡時間短縮用位相オフセット回路の導入

図 1 に位相調整のない時の、RF 源と RF アンプ出力間の位相変動、図 2 に以前の回路で位相を制御した結果の位相変動の様子を示す。RF アンプ出力の位相変動は一定ではないが、20 μ s の RF パルス内で大きいときには 10° 以上変動する。

これを位相安定化回路で、位相検出用 DBM の出力が 0V となるようフィードバックを掛けることで、図 2 の例では RF パルスの開始から約 6 μ s 後に位相が $\pm 0.3^\circ$ 以内にロックされ始める。

フィードバック用のデータである 12bit カウンタ出力は、RF パルス終了時にはその瞬間の位相補正量を反映しており、次の RF パルス開始まで保持される。このため次の RF パルス開始から位相がロックされるまでの過渡時間は、RF パルス開始時と終了時の位相差に依存する。

そこで、後に続く RF パルスに対するフィードフォワードの考え方を採用し、パルスの先頭から位相がロックされるよう改良することにした。これは、RF パルス開始時に予めフィードバック用カウンタに、過渡時間の間にずらす必要のある位相量を、最初から位相オフセットとして与えることで実現できる。このために新たに位相オフセット回路を追加し、オフセット用に 12bit カウンタを増設した。こ

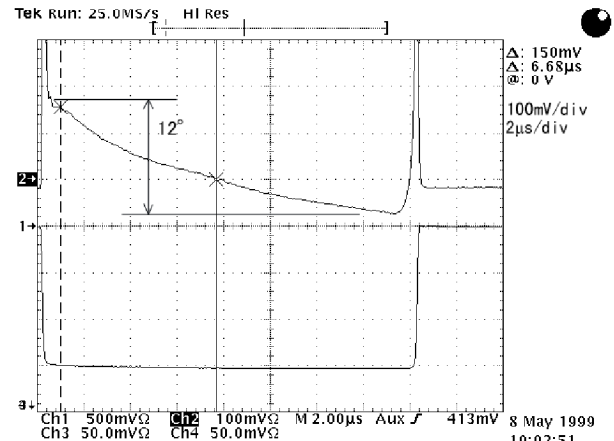


図 1. 位相安定化を行わないときの、RF 源と RF アンプ出力間の位相（上）と、RF アンプ出力電力波形の例。DBM の検出位相信号の振幅（増幅後）は 1.2V。

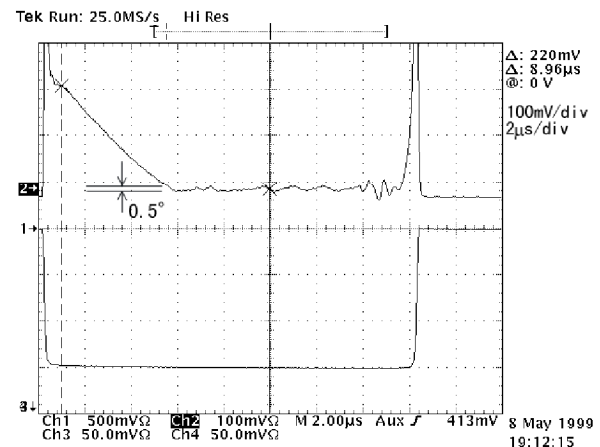


図 2. 改良前の位相安定化回路を動作させたときの、RF 源と RF アンプ出力間の位相（上）と、RF アンプ出力電力波形。

の動作は以下の通りである。

RF パルスの先頭付近での位相の進み遅れに従ってオフセット用カウンタを 1 カウントだけ増減させ、RF パルス終了後にフィードバック用カウンタ出力にこの値を加えてやり、次の RF パルスを待つ。

位相がロックされていれば、フィードバック用カウンタには RF パルス終了時の位相補正情報のみが記録されている。そこに RF パルス開始付近での位相の進み遅れの情報であるオフセット用カウンタの出力を加えてやると、この動作開始からある時間が経過すると、理想的には RF パルス開始付近（実際にはオフセットカウントをさせたタイミング）で位相がロックされるようになる。

オフセット用カウンタは、カウンタが数えるタイミングで位相がロックされるまでカウントを増減させ続け、ロックされた後も常に次のパルスに対するオフセット量を修正し続ける。

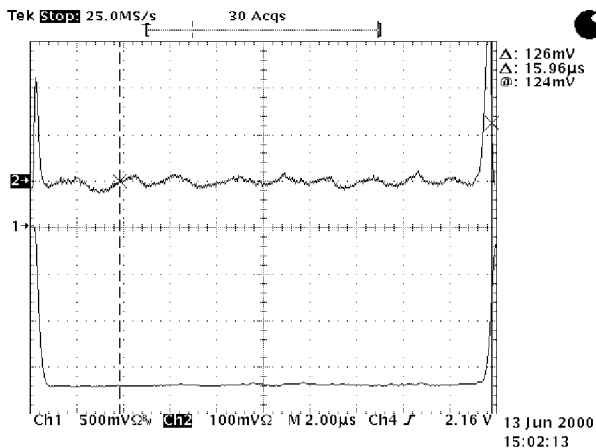


図 3. 位相オフセット回路の効果。これにより RF パルスの先頭から位相のロックがかかる。パルス幅約 $20\mu\text{s}$ のときの位相検出波形（上）と RF アンブ出力電力波形（下）。

位相オフセット回路の効果を図 3 に示す。オフセット用カウンタの位相検出のタイミングは、RF パルス開始から $1\mu\text{s}$ 後に設定してある。DBM における位相検出信号の振幅は 1.3V である。

3.3 その他の変更

- ①フィードバック動作を細かくすることを目標に、カウンタを 10MHz で動作するよう変更した。検討の段階では 20MHz まで速くする予定であったが、TTL のパルス応答の遅延時間を考慮して 10MHz とした。
- ②動作を 10MHz にしたことに伴い、 12bit カウンタの使用ビット数を上位 11bit から 12bit 全てを使うよう変更した。この結果 1 サイクルでの位相調整は 0.18° から 0.09° になった。しかし位相修正速度は $0.88^\circ/\mu\text{s}$ で以前と変わらない。
- ③回路の電源にスイッチング・レギュレータを使用しているため、図 2 のようにノイズの混入による余計な位相変動を生じていることが問題だったが、電源ラインにフェライトコアを取りつけることで改善された。

4. 新たな課題

図 2 と図 3 の位相検出波形を比較すると、以前の回路ではノイズを除けば $\pm 0.3^\circ$ 以内に安定化されていたのが、動作上の問題は改善されたにもかかわらず、位相安定度は $\pm 0.6^\circ \sim 0.7^\circ$ 程度まで悪化している。

図 4 に位相検出信号の拡大された詳細波形と、位相検出後のコンパレータ出力である、カウントの増減を選択する信号を示す。

位相検出信号が鋸歯状波となっているのは、フィードバック用カウンタの増減の方向が切り替わることで位相の進み遅れを制御していることによる。

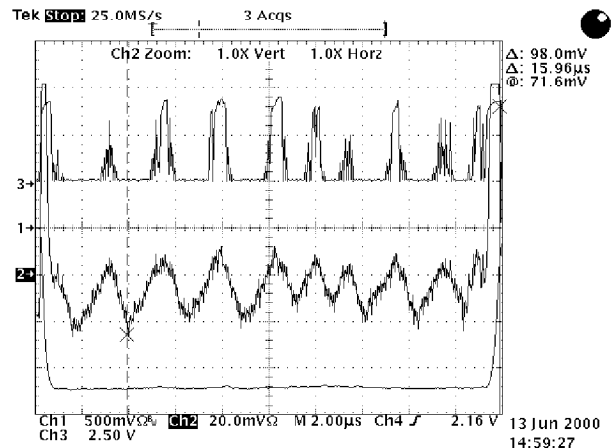


図 4. フィードバック動作時の位相検出波形の詳細（中）。位相スケールはほぼ $0.88^\circ/\text{div}$ 。上はフィードバック用カウンタのカウント増減のためのコンパレータ出力波形。

図から、コンパレータ出力の H、L が切り替わってから $300 \sim 400\text{ns}$ 遅れて位相の変化する方向が切り替わっていることが分かり、これが原因で位相制御の振動が大きくなっているのは明らかである。この回路では 100ns の繰り返しで情報を伝達して制御しているので、見かけ上 $3 \sim 4$ ステップ遅れてカウントの増減が切り替わっているように見える。

この遅れは、DBM の制御信号応答速度とともにカウンタの動作を確実にする改良を行ったことにも原因がある。1 ステップ遅れると約 0.09° 位相を過剰補正するため、4 ステップ遅れると全幅では 0.7° もの安定度悪化を招くことになる。従って、位相安定度をさらに向上させるには、この遅れを最短にする工夫が不可欠である。

5. まとめ

日大 FEL 用リニアックの RF 位相安定化については、日本高周波製の高速移相減衰器に関数発生器で生成した位相補償信号を入力することで安定化を図るテストも行っており、短時間では本報告と同程度の安定度が得られビーム加速の改善に効果を発揮している [2]。位相変動が時間とともに変化するために問題もあるが、本報告で述べたフィードバックによる位相制御法との組み合わせを工夫することで、より高精度の位相安定化システムの構築を図ることが今後の検討課題と考えられる。

参考文献

- [1] T.Tanaka et al., "Low Power RF Phase Stabilizer for LEBRA 125MeV Linac". Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan (1999)110.
- [2] K.Yokoyama et al., "RF Phase Drift Compensation with a Function Generator". Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July 21-14, 2000.

RF PHASE DRIFT COMPENSATION WITH A FUNCTION GENERATOR

K.Yokoyama^{*)}, I.Sato^{A)}, K.Hayakawa^{A)}, T.Tanaka^{A)}, K.Sato^{A)}, Y.Hayakawa^{A)}, Y.Matsubara^{A)},
H.Nakazawa, T.Sakai, K.Kanno, H.Inokawa, Y.Nakamura and K.Ishiwata

College of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274 -8501 Japan
^{A)}Atomic Energy Research Institute, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274 -8501 Japan

Abstract

The fluctuation of the accelerated electron beam energy in the linac at Nihon University has been a serious problem for the application to the FEL experiment. The relative phase drift greater than 7° between the rf source and the rf amplifier output, which was the main reason of the fluctuation, has been improved considerably at the preliminary experiment of a phase compensation. The phase compensation has been performed by applying the phase control signal generated with a function generator to a fast ϕ/A controller. The control signal has been adjusted so as to be proportional to the inverted voltage waveform of the detected phase drift. The phase drift could be suppressed to within $\pm 0.5^\circ$ by this method. Also the fluctuation of the electron beam energy was improved considerably over the rf pulse duration of $20\mu\text{s}$.

関数発生器を用いた日大 FEL 用リニアック RF 系の位相変動補償

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設^[1]では、紫外線領域における自由電子レーザー (FEL) 発振に向けて、電子線形加速器の性能改善を行っている。当施設の電子線形加速器は、DC 電子銃から引き出した電子を 2856MHz の RF で最大 125MeV まで加速する。加速 RF はクライストロン 2 台で供給する。クライストロンのドライブ用 RF アンプにはトランジスタを使用しており、位相がパルス持続時間の間に変動することは避けられない。RF 出力電力の位相変動は、クライストロン相互でも異なっている。その結果、バンチしたビームは加速する RF の位相変動によって、そのエネルギーが時間的に変動する。このようなビームを運動量分析系に輸送しエネルギー幅を 1% 程度に制限すると、ビーム電流が大きく変動する。他のビーム不安定要素も考えられ、これらの不安定性は FEL の発振を難しくしている。この位相変動は、RF アンプの前段にある高速移相減衰器の制御信号により補償する。このテストを行なったので、この方法による位相変動・電子ビームのエネルギー変動の改善結果について報告する。

2. 位相変動補償の方法

2.1 構成

本施設の電子線形加速器は、DC 電子銃、プレバンチャー、バンチャー、4m 加速管 3 本で構成されている。2 本のクライストロンはそれぞれ独立した

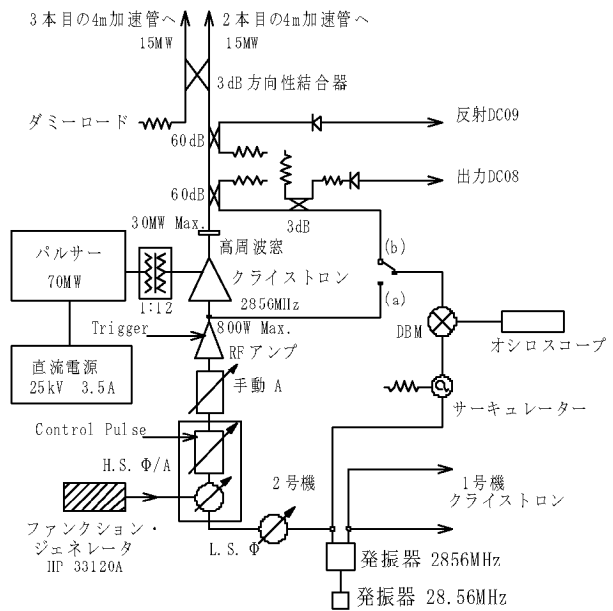


図 1. クライストロン 2 号機 RF 系の構成図。

RF アンプでドライブしている。クライストロン 1 号機は、プレバンチャー、バンチャーと 4m 加速管 1 本の加速ユニットに、2 号機は 4m 加速管 2 本の加速ユニットにそれぞれの RF を方向性結合器で分割して供給している。クライストロン 2 号機 RF 系の構成を図 1 に示す。1 号機もほぼ同じ構成である。

^{*)} K.Yokoyama, yokoyama@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

2856MHz 発振器は 28.56MHz でフェイズロックしている。この信号を図 1 に示すように低速移相器を通し RF アンプに供給する。RF アンプの前段に、位相と振幅の制御、すなわち高速位相減衰回路(PIN ダイオード)を設けてある。低速移相器では、クライストロン1号機と2号機のRF出力の位相を相対的に調整する。高速減衰器では、矩形波の制御信号を入力し、RF出力をパルスにする。このRFは手動の可変減衰器を通してRFアンプに送られ、最大800Wに増幅される。さらにクライストロンで最大30MWに増幅され電子加速に使用している。今回のテスト実験におけるクライストロン運転条件^[2]は、繰り返し2Hz、パルス幅20 μ s、パルスモジュレータ入力電圧は1号機が20kV、2号機が19.5kVである。またフィードバック系を含むRF位相安定化回路^[3]は使用していない。位相変動はダブル・バランスド・ミキサー(DBM)を用いて発振器と出力RFとの間の位相を測定している。

2.2 方法

DBMを使うと、RF源に対するRFアンプ出力位相の時間変化が測定できる。位相と電圧の関係は、DBM出力の正の最大電圧から負の最大電圧までの変化が180°の位相差に相当する。DBMの出力が0V付近では直線性が良く位相変化が高精度で測定できるので、位相は低速移相器であらかじめ0V付近になるように調整した。1号機、2号機ともDBMの出力電圧1mVは約0.5°の位相に相当する。RF源に対するRFアンプ出力位相差(図1中(a))とクライストロン出力位相差(図1中(b))をDBMで検出した電圧を図2に示す。RFアンプ出力位相は、RFの立ち上がりからなだらかに減衰変化している。これは800WパルスRFアンプ(トランジスタアンプ)で位相が時間的に変動していることを意味する。これに対し、クライストロン出力は、RFの立ち上がり直後に大きな変動があり、それ以降は変動しながら減衰している。これは、パルスモジュレータ入力電圧20kVの場合、パルスの始端の変動は過渡電

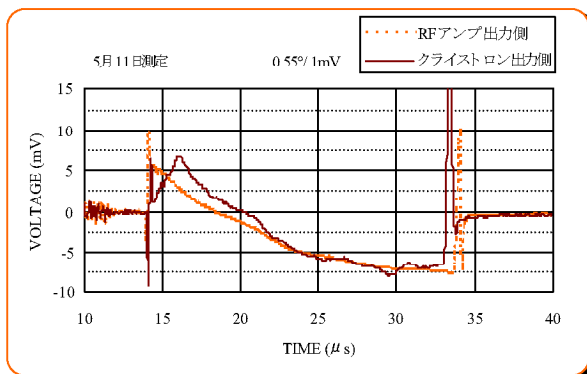


図2. RF源に対するRFアンプ出力(点線)及びクライストロン出力(実線)をダブル・バランスド・ミキサーで検出した電圧変動。

圧の影響であり、以降はPFN不整合による0.3%程度の電圧変動に起因する位相変動で1.6°程度と評価された。

RF系の位相変動補償はRF源とクライストロン出力の位相差をDBMで検出した波形出力(電圧)を基本としている。DBMで検出した信号をオシロスコープからパソコンに読みこみ、受信した波形と同じ形の関数と反転した関数を作り、この関数を関数発生器に送信し位相補償波形を発生させた。関数はRFパルス立ち上がりと立ち下りの過渡部を除く波形に対して作成した。この関数発生器で発生させた電圧信号を高速移相器に入力し位相変動を行なった。このとき、DBMからの検出信号が最も平坦になるように関数の出力振幅と発生タイミングを調整した。また、作成した2つの関数のうち位相変動が抑制される極性を用いた。これらの手順は、2台の関数発生器とオシロスコープをGP-IBにより1台のパソコンに接続し、Visual Basicで作ったプログラムでコントロールされる。関数発生器で発生させた関数波形と関数を発生させる前後のDBMからの位相差検出信号を図3に示す。このグラフからわかるように、関数入力前では $\pm 4.2^\circ$ 程度あった位相変動が、高速移相器を関数制御した結果、位相変動を $\pm 0.5^\circ$ にすることが出来た。

3. 結果と考察

クライストロン1号機および2号機とも、DBMで検出したRF源に対するクライストロン出力位相変動は $\pm 0.5^\circ$ 以内に補償できた。補償したときと補償がない場合の加速器の電子ビーム電流波形を図4に示す。これは、加速器下流の45°偏向電磁石2台(アナライザ)で電子ビームを曲げた後、アンジュレータ下流のビームダンプを使用したファラデーカップで検出した電流波形である。このとき、エネルギー幅は1%、電子ビームエネルギーは98MeV、電子ビーム電流は加速器出口で88mAである。2本の点線は位相変動補償前の電子ビームの電

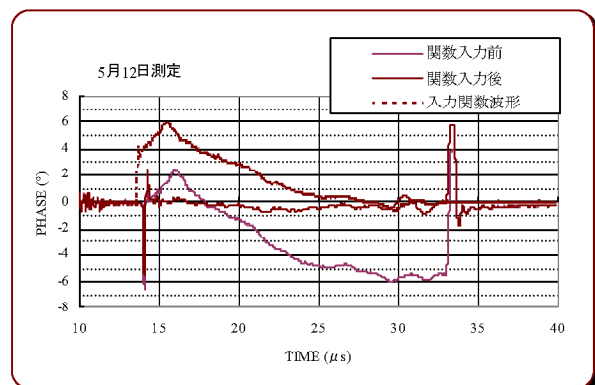


図3. ファンクション・ジェネレータによる位相変動補償の効果。ただし、入力関数に関しては関数の出力振幅と発生タイミング調整をせず、関数の形だけを表示している。

流波形である。入射部で位相調整をしても、パルス幅 $20\mu\text{s}$ の電子ビームは半分程度しかアナライザーシステムを通過しなかった。実線は位相変動補償を行なったものである。パルスの先端部から終端部まで、位相変動補償によってエネルギー変動が大きく改善されてアナライザーシステムを通過していることがわかる。しかし、パルス持続時間内でも各パルス間でもビーム電流の変動は不定期におこり運転中に位相調整が必要であった。位相変動補償を行なった場合にみられるビーム電流の変動波形例を図5に示す。パルスの先頭部と後半 $10\mu\text{s}$ 付近でビーム電流に大きな変動がみられる。この変動は、パルス毎に異なり、関数発生器で位相変動を補償することで改善できないものである。

位相変動補償前のRF源に対するクライストロン出力位相差の検出波形がパルス毎に位相変動する状態を図6に示す。RFの立ち上がり直後の大きな変動①は、RFパルスの先端と終端の位相を位相変動補償によって揃えられたので緩和できた。しかし、パルスの後半 $15\mu\text{s}$ 付近での位相シフト②はパルス毎に発生する時刻が一定でないためにこの変動に対しては補償できない。これは、位相変動補償に使用している関数は固定でフィードバックしていないためである。パルス毎での位相変動をより小さくするためにはフィードバック系を含むRF位相安定化回路も使用する必要がある。

4. まとめと今後の課題

RF源とクライストロン出力位相の比較を行ない、適切な関数を発生させてこれを高速移相器に制御信号として入力し位相変動補償を行なうことに成功した。この結果、位相変動が $\pm 0.5^\circ$ 以内に抑制された。FELシステムを通過する電子ビームは、パルスの先端部から終端部にかけて、ほぼ平坦なビーム電流波形が得られるようになった。加速ビームエネルギーが改善された結果、アンジュレータから得られる自発放射光強度が大幅に改善された^[4]。

RF源とクライストロン出力の位相変動が $\pm 0.5^\circ$ になったが、パルス持続時間内と各パルス間の不規則な位相変動が残っており、電子ビーム電流には依然として変動要素が残っている。また、RFの変動位相は毎日同じ状態ではなく、クライストロン印加電圧や可変減衰器の調整によっても位相変動の様子が変わるので、運転条件を変えたときには位相変動補償用の関数パラメータを変えなければならない。関数の出力振幅と発生タイミングを調整しても位相変動の改善が見られない場合には、関数を作りなおさなければならない。リアルタイムの位相変動補償システムを構築することが今後の課題である。

参考文献

- [1] I.Sato et al., Proc. of this Meeting.
- [2] T.Sakai et al., Proc. of this Meeting.

- [3] T.Tanaka, et al., "Low Power Rf Phase Stabilizer for LEBRA 125MeV Linac". Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting, in Japan, Sapporo, July 7-9, 1999.
- [4] Y.Hayakawa et al., Proc. of this Meeting.

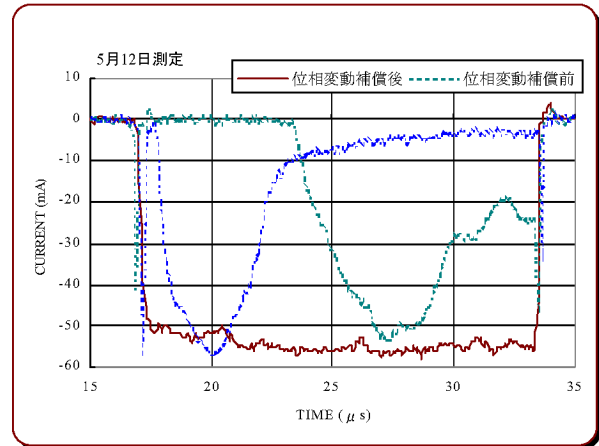


図4. 加速器の電子ビーム電流への位相変動補償効果。点線で示した2つの波形は、クライストロン2号機の位相を変えて測定したものである。

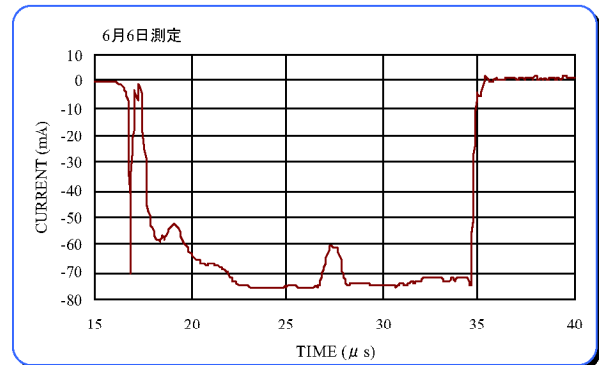


図5. 位相変動補償後の電子ビーム電流波形の変動例。電子ビームエネルギーは96MeV、電子ビーム電流は加速器出口で106mAのとき。

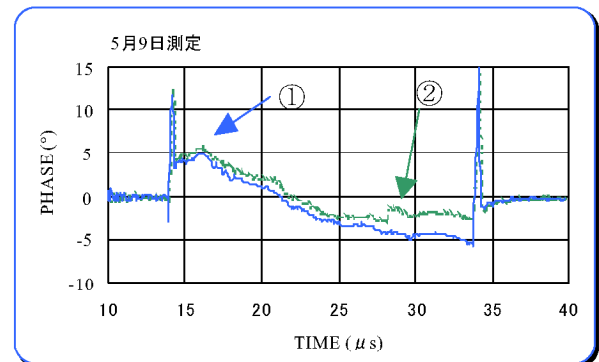


図6. RF源に対するクライストロン出力位相差の位相変動補償前のDBM検出波形。パルス毎に位相変動が異なる場合。

[12P-14]

ANALYSIS OF THERMIONIC DC ELECTRON GUN FOR 125MeV LINAC

K.Kanno^{*}), I.Sato^{A)}, K.Sato^{A)}, K.Hayakawa^{A)}, T.Tanaka^{A)}, Y.Hayakawa^{A)}, H.Nakazawa,
K.Yokoyama, T.Sakai, K.Ishiwata, H.Inokawa, Y.Nakamura, S.Michizono^{B)}, S.Ohsawa^{B)},
S.Fukuda^{B)}

Graduate School of Science and Technology, Nihon University
7-24-1, Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

^{A)}Atomic Energy Research Institute, Nihon University
7-24-1, Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1, Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

Abstract

The beam trace calculation for the 100kV thermionic DC electron gun with EIMAC 646E cathode, which is currently used for the 125MeV linac at Nihon University, has been performed using EGUN code. The result showed a strong focus of the beam at the exit of the anode. A better geometry of the gun has been investigated by varying the shape of the wehnelt electrode. Also the trace calculation has been performed for the case of EIMAC 646B, which showed a considerably small emittance compared with that estimated for the present gun.

125MeV リニアック用電子銃の解析

1. はじめに

自由電子レーザーの発振には高輝度・低エミッタンスの電子ビームが要求される。日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) においても自由電子レーザーの発振とその応用のため高品質の電子ビームを発生させる研究が進められている。その実現には加速器の安定化も必要であるが、ビームの質がある程度決まる、電子銃の高性能化も重要な研究であると思われる。相対論的電子軌道解析コード EGUN[1],[2],[3]を使って、現在 125MeV リニアックに使用している電子銃の解析を行い、エミッタンスを最適化する電極形状の検討、さらにより優れた電子銃の可能性の検討を行ったので報告する。

2. 使用中の電子銃

図 1 に現在使用中である電子銃の断面構造図、表 1 にそのパラメータを示す。グリッドパルサーは TTL とトランジスタ回路を使い 2~20 μ s の間でパルス幅可変である[4]。グリッド・カソードアセンブリは EIMAC 646E を用いている。電極形状は電子ビームにかかる電場を直接に制御するものである。電場の電子進行方向成分 (加速成分) の強さはカソード-アノード間の電圧・距離で、また電場の横方向成分 (集束成分) は陰極と同電位にあるウェーネルト (集束) 電極およびアノード形状で制御される。

使用中の電子銃のアノード形状は電子ビームを集束させるような形状ではなく平板である。

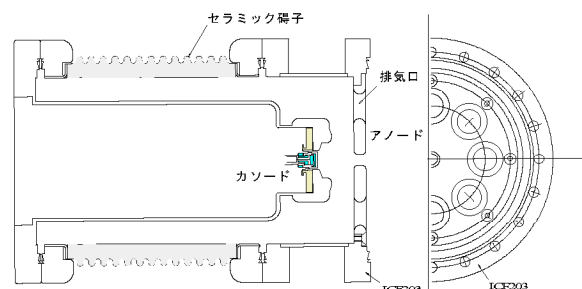


図 1. 電子銃断面構造図

表 1. 電子銃パラメータ

カソードの半径	5.5mm
カソード-グリッド間の距離	0.2 mm
グリッド-アノード間の距離	30 mm
カソードの電位	-100 kV
グリッド電圧	150 V
バイアス電圧	50 V

3. 解析

EGUN では空間電荷効果を考慮して電子軌道を解析することができ、電子銃の設計に広く用いられている。ここでは計算条件としてカソード半径 5.5mm、電流 400mA、引出し電圧 100kV と設定し、

^{*}) k.kanno,047-469-5489,kanno@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

実際の電極形状を与えシミュレーションを行なった。ただし、グリッドは無視し、カソードでの電子の熱運動も考慮していない。図2にカソードからの距離 Z が 80mm の所までの電子軌道と等電位線を示す。図3に $Z=50\text{mm}$ 、60mm、70mm、80mm での電流密度分布とビームの広がり角度を表すパラメータである $\alpha (= \arctan(dR/dZ))$ のグラフを示す。この図は本質的に位相図であり、エミッタンスが小さいほど分布は直線的になる。また、シミュレーションの結果、 $Z=80\text{mm}$ の点でのエミッタンス \mathcal{E} 、および規格化エミッタンス \mathcal{E}_n は

$$\mathcal{E} = 34.96 \pi \text{ [mm} \cdot \text{mrad]}$$

$$\mathcal{E}_n = 22.92 \pi \text{ [mm} \cdot \text{mrad]}$$

と求められた。

EGUN によって得られた図2の電子軌道を見ると、カソードの端部では中心部よりも等電位線が大きく歪んだ電場を電子が通過することにより特に集束されていることがわかる。このため、空間電荷効果を含めても現在の電極形状では集束が効きすぎていてアノードを出たあとの発散が大きいと推察される。アノードから最初の集束系（マグネティッ

クレンズ）までは 100mm ぐらいであるが、図ではアノードから 40mm(カソードから 80mm)のところまで既に大きくビームが広がっている。図3からはビームが広がるにつれ、電流密度が小さくなってゆく様子がわかる。(a)点では電流密度分布が図のようになるのは集束しようとする電子と発散しようとする電子が電子ビームの中に混在しているためである。

4. シミュレーション

現行の電子銃では集束が強すぎてビームの平行性があまりよくなかった。そこでウェーネルト電極を図4のように、電場の集束成分を減らした。形状に変更してシミュレーションした結果を図5に示す。このときのエミッタンス \mathcal{E} 、規格化エミッタンス \mathcal{E}_n は

$$\mathcal{E} = 30.04 \pi \text{ [mm} \cdot \text{mrad]}$$

$$\mathcal{E}_n = 19.69 \pi \text{ [mm} \cdot \text{mrad]}$$

であった。現在のウェーネルト電極形状の場合と比べるとエミッタンスも小さく、電子ビームの平行性もよくなった。

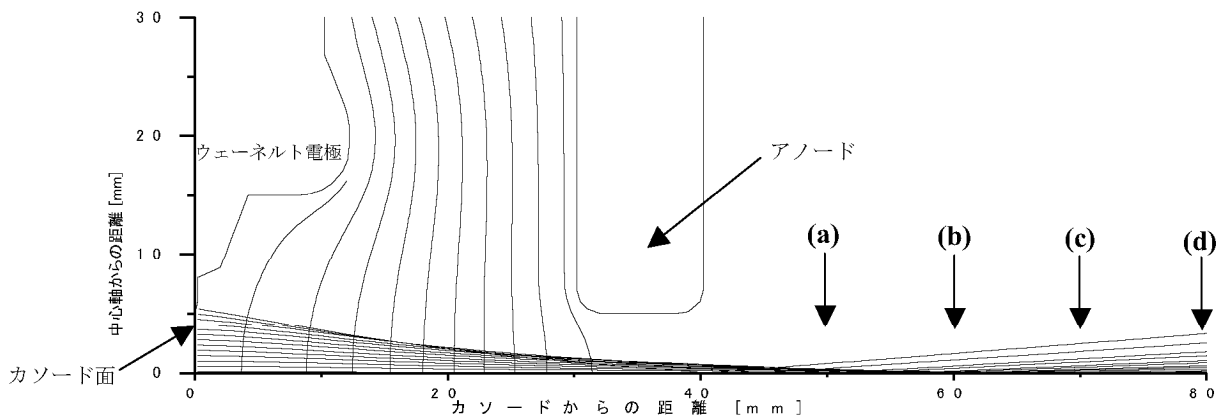


図2. EGUN による計算の結果得られた電子軌道と等電位線

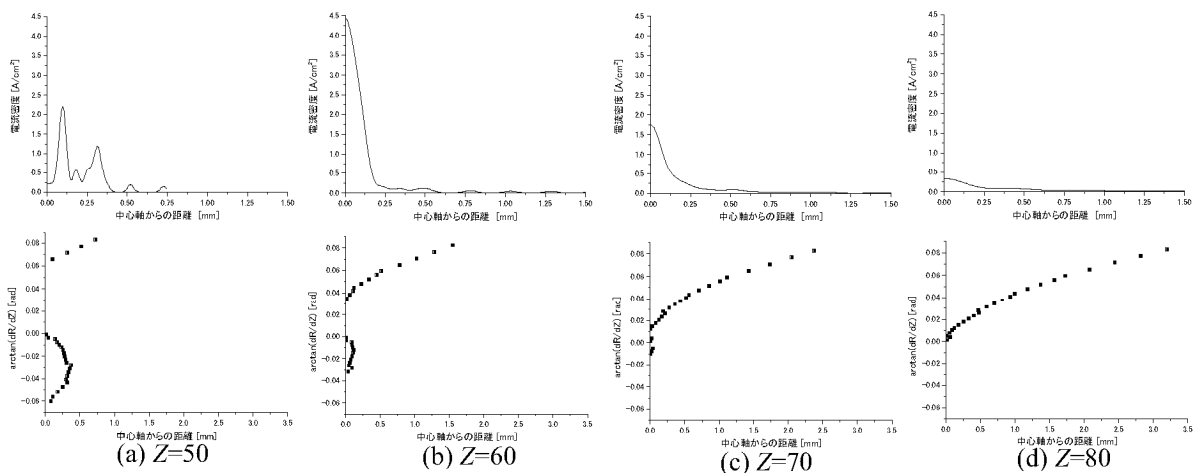


図3. EGUN による計算の結果得られた電流密度分布とビーム角度の広がり。アノードを出た後のビームが広がってゆく様子が示されている。

また、グリッド・カソードアセンブリに EIMAC 646B(カソード半径 3.5mm)を使う場合、つまり放出電流は同じでカソード半径を 5.5mm から 3.5mm に小さくした場合のシミュレーションも行った。このときの電子軌道は図 6 のようになり、エミッタンス ε 、規格化エミッタンス ε_n は

$$\varepsilon = 6.684 \pi \text{ [mm} \cdot \text{mrad]}$$

$$\varepsilon_n = 4.383 \pi \text{ [mm} \cdot \text{mrad]}$$

となった。エミッタンスがこれほど抑えられたのは、中心軸へ行くほど電場の集束成分が小さくなるため、EIMAC 646B のようにカソード径が小さければウェーネルト電極による集束の影響と空間電荷による影響とのバランスがよくなるためと考えられる。

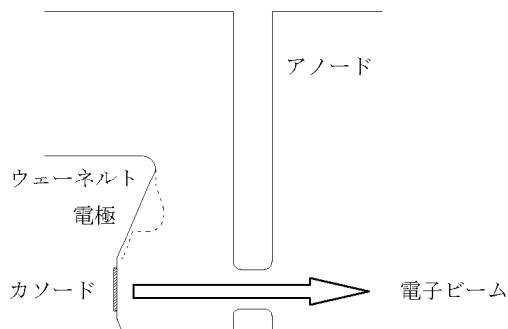


図 4. 集束をおさえたウェーネルト電極。点線部を切り落とすとしたと考えた。

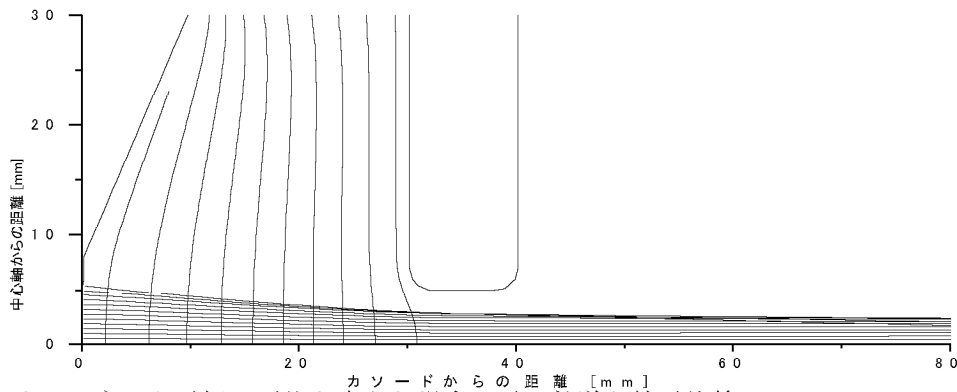


図 5. ウェーネルト電極の形状を変えた場合の電子軌道と等電位線のシミュレーション結果

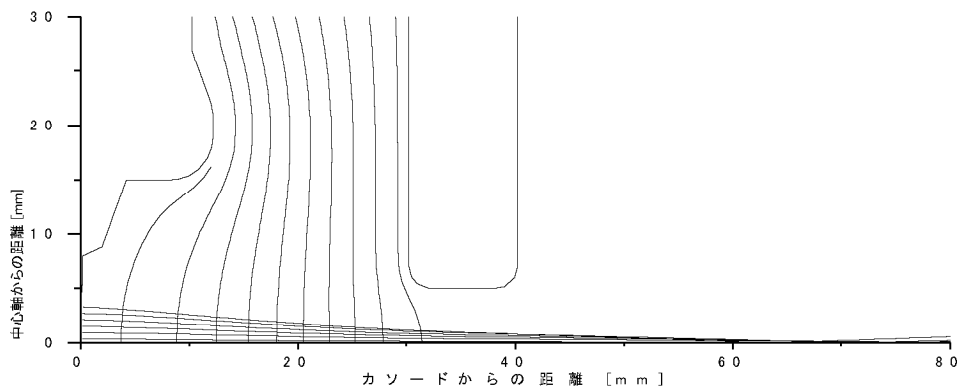


図 6. カソードの半径を 3.5mm した場合の電子軌道と等電位線のシミュレーション結果

5. まとめ

EGUN によるシミュレーションの結果、現在の電子銃ではビームの集束が強すぎるものが推察された。そこで、集束が緩やかになるようにウェーネルト電極の形状を変えたところ、平行性が良くなりエミッタンスの低いビームを得られる可能性があることがわかった。また、放出電流が同じでカソード半径が小さい場合もエミッタンスが小さくなること示唆する結果が得られ、カソードを EIMAC 646E から EIMAC 646B に変更することは有効であると考えられる。

空間電荷による影響で電子ビームが広がるため、ウェーネルト電極で集束を行うが、あまり強く集束させるとかえって質の悪いビームを発生することになる。今後、さらに低いエミッタンスが得られる最適な条件を調べる。

参考文献

- [1] W.B.Herrmansfeldt, "Egun-an electron optics and gun design program". slac report 331,1988.
- [2] W.B.Herrmansfeldt, "Electron Trajectory Program". slac report 166,1973.
- [3] W.B.Herrmansfeldt, "Electron Trajectory Program". slac report 226,1979.
- [4] T.Tanaka, et al., "Proceedings of 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan". 25,1998.

BREAKDOWN OF THE BACK-DIODE OF THE PULSE MODULATOR FOR FEL LINAC AT NIION UNIVERSITY

K.Ishiwata^{*)}, H.Inokawa, Y.Nakamura, K.Sato^{A)}, I.Sato^{A)}, K.Hayakawa^{A)}, T.Tanaka^{A)},
Y.Hayakawa^{A)}, H.Kobayashi^{A)}, H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai,
K.Shinohara^{B)}, N.Matsunaga^{B)}, S.Anami^{C)}, S.Fukuda^{C)} and H.Homma^{C)}

Graduate School of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

^{A)}Atomic Energy Research Institute, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

^{B)}Nihon Koshuha Co. Ltd.,
1119 Nakayama-cho, Midori-ku, Yokohama, 226-0011 Japan

^{C)}High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

Abstract

The breakdown of the diodes and the resistors in the back-diode circuit, which is a protection against damages of the klystron and other elements, was found at the pulse modulator #2 after a series of operations since 1997. The breakdown of the resistor can be explained by assuming a preceding breakdown of the diodes possibly suffered an excessive surge voltage. However, there has been no problem found in the back-diode circuit at the pulse modulator #1. As one of efforts made at LEBRA of Nihon University to reduce the fluctuation of the energy and the current of the beam in the linac, an optimum reservoir voltage of the thyatron in each modulator has been investigated in order to reduce the fluctuation of the modulator output voltage between successive pulses.

日大 FEL 用リニアック パルスモジュレータのバックダイオード破損

1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用研究施設では、自由電子レーザー (FEL)、パラメトリック X 線 (PXR) など複数の光源をさまざまな研究に利用するため、加速器の高性能化を図っている。パルスモジュレータ出力安定度の向上もその1つである。パルスモジュレータは、FEL 用に半値幅 $30\ \mu\text{s}$ の長パルスを出力するため、クライストロン放電時の反射電力やサイラトロンが OFF した後生じる大きな逆電圧パルスを抑え回路全体を保護するためのバックダイオード回路が取り付けられている[1]。最近になってこの回路のダイオードと抵抗が破損していたことが分かったので、それについて報告する。また、バックダイオード回路の修理後、前回のリニアック研究会で報告した[2]パルスモジュレータの出力変動を減少させるため、サイラトロンのリザーバー調整を行い、効果が見られたので、その結果も報告する。

2. パルスモジュレータのバックダイオード破損

2000年4月のモジュレータ運転時に、クライストロン1号機のモジュレータ筐体付近で異常音が顕著とな

り、図1に示すパルスモジュレータの出力部にあるバックダイオード回路で放電が発生していた。調べた結果、この回路でダイオード・アレイと抵抗の破損が確認された。ただし、同時に調べた2号機のモジュレータでは異常は全く見られなかった。

バックダイオード回路は、20個の直列接続のダイオード・アレイと3組並列接続の抵抗ブロックが直列接

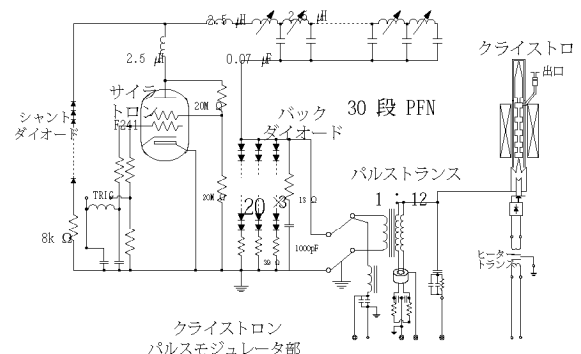


図1. パルスモジュレータ概略図。30段PFN、サイラトロン、バックダイオード、シャントダイオードなどから構成されている。

^{*)} K.Ishiwata, 047-469-5489, ishiwata@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

続されて1組となっており、それを3組並列接続して構成することで、逆電圧とジュール損失容量が確保されるように設計されていた。

ダイオードは、カタログ上では1個当り3kVのサージ電圧まで耐える。抵抗はセラミック抵抗器で1個当たりの抵抗値112.5Ω、定格電力270Wのものを使用していた。

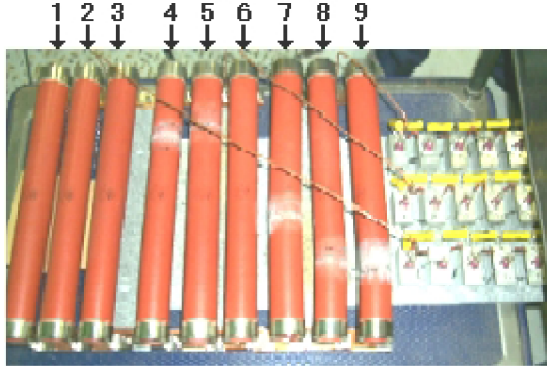


図2.セラミック抵抗器の一部が破損した様子の写真。ダイオード20個直列のアレイに対して、セラミック抵抗器3個並列のブロックが直列に接続してある。抵抗器はダイオード・アレイとの組み合わせで1-2-3、4-5-6、7-8-9のそれぞれ組みになって並列に接続されている。写真で、抵抗体が白く変色している部分は割れている。

表1 抵抗値とバックダイオードの破損状況

番号	セラミック抵抗器の抵抗値[Ω]	バックダイオード
1	115	正常
2	114	
3	116	
4	∞	故障(導通)
5	∞	
6	170	
7	∞	故障(導通)
8	∞	
9	∞	

図2に破損した抵抗の様子を、表1にこのとき測定して得られた各抵抗の抵抗値とダイオードの状態を示す。図2の各抵抗に示した番号が表1の番号に対応している。表1に示すように、3組のバックダイオード回路のうち、1組は抵抗器、ダイオード・アレイ共に特に問題はなく、残り2組は全てのダイオードが完全に導通状態で、抵抗器も1個を除いて途中で割れて電極間抵抗が無限大となっていた。また、完全に破損してはなかったものの6番の抵抗器は抵抗値が約170Ωと定格より高くなっており、やはり損傷を受けていたと考えらる。

そこで、最初に抵抗器が破損したとは考えが難いので、定格を超えるサージ等の原因でダイオードが破損して導通状態になったと仮定し、その後の現象を考え

てみる。この場合、バックダイオード回路は単に抵抗負荷回路となってしまふ。ビーム加速時の運転条件としてモジュール出力パルス電圧20kV、パルス半値幅30μs、繰り返し2Hzとすると、このときの抵抗器1個あたりのジュール損失は約210Wで定格を下回ってはいるが、エージング等では出力電圧18kVで繰り返し10Hz~12.5Hzの運転を行っていたので、このときには明らかに定格を大きく上回っていたはずである。さらに、セラミック抵抗器を複数使用する場合は熱などの影響をうけるため、なるべく間隔をあけなければならないが、実際には9本の抵抗器がパルス64mmの間隔で並んでいるため、定格電力の60%以下で使用しなければならないことがカタログから明らかになった。従って、通常のビーム加速時の条件であっても、ダイオードが破損して導通状態になってしまうと抵抗器が急速に劣化し、いずれ破損してしまうことは十分予想される。

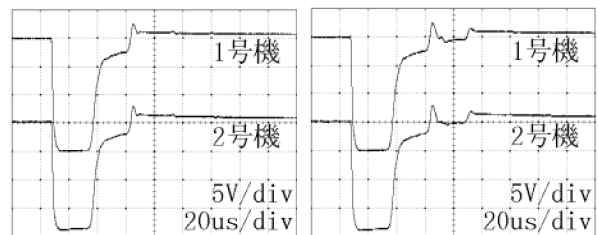
しかし、ダイオードが最初に破損したとしても、その原因・時期を特定できるような顕著な現象や運転状況の記録はされていない。

3. パルスモジュール出力の変動

パルスモジュール出力電圧の変動は、パルスモジュール1号機、2号機で共に起きている。図3-(i)に安定な時の波形、(ii)に変動が生じた時の波形を示す。この変動の頻度については昨年の研究会において、パルス出力電圧に依存していること、またそれがサイラトロンON/OFFの問題として説明できることを報告している[2]。そこでサイラトロン動作条件を調整して、変動の起きる頻度が最小となるような条件を探した。

方法としては、パルスモジュールを繰り返し2Hzで運転し、15kV~20kVの入力DC電圧の間で、サイラトロンリザーバーを5分毎に変え、この5分間にオシロスコープに図3-(ii)の波形が現れる回数を目視で計測した。その結果を図4-(i)と(ii)に示す。1号機においてはリザーバー電圧が3.9Vの時、DC電圧19kV~20kVに対して変動頻度が最小となり、2号機ではリザーバー電圧が4.0Vの時最小となった。この測定範囲ではどちらもリザーバー電圧を下げると頻度が減少する傾向にあった。

実際にビーム加速で使う電圧は、1号機、2号機とも



(i) 安定時 (ii) 変動時

図3.パルス出力電圧の変動 (DC電圧15kVの時)

に 19kV~20kV であるので、繰り返しを 2Hz の時 19kV ~20kV で変動頻度が最小となるリザーバー電圧付近で、繰り返しを 2Hz から 10Hz に上げ、同様の測定を行った。図 4-(iii) にその結果を示す。

1号機では高電圧側で若干頻度の増加が見られるが、2Hz の時と比較して顕著の違いはない。しかし、2号機では、DC 電圧 18kV で頻度の増加が顕著に見られる。そこで 2号機について、さらにリザーバー電圧を下げて見た結果、頻度はさらに下がったがリザーバー電圧 3.95V で、DC 電圧 19kV に頻度のピークが現われた(図 4-(iv))。2号機のサイラトロンは以前には 1号機に使用していたものであり、当時は 1号機において同様の現象が見られたので、以上のような 1号機と 2号機の振舞の違いは、使用しているサイラトロン of 微妙な特性の違いによるものと考えられる。

これらの測定およびサイラトロン of リザーバー電圧調整により、これまで頻繁に起きていたモジュレータ出力電圧変動の頻度を非常に少なくすることができ、その結果パルス間で生じていた加速ビームのエネルギーと電流の変動を改善することができた。

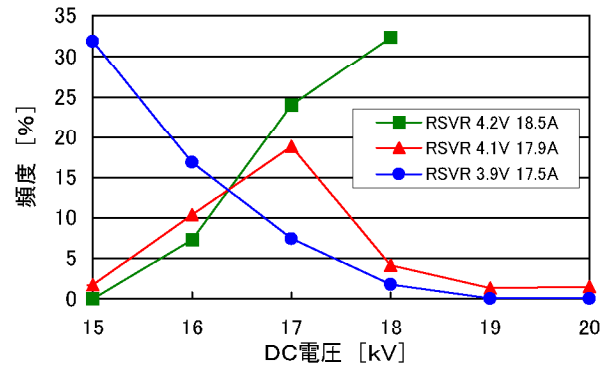
4. まとめ

バックダイオード回路の破損については、原因は明らかではないが、サージによるダイオードの破損がトリガーとなって、正常時には容量的に問題ない抵抗器が容量不足となって劣化を早め、結果として抵抗器が割れるまでに至ったと考えられる。今後ダイオードの破損を避ける対策を講じるとともに、ダイオードが破損しただけでは直後に顕著な動作上の変化が見られないので、破損の影響が他の部分に広がらないようバックダイオード回路の状態をモニターすることも必要と考えられる。

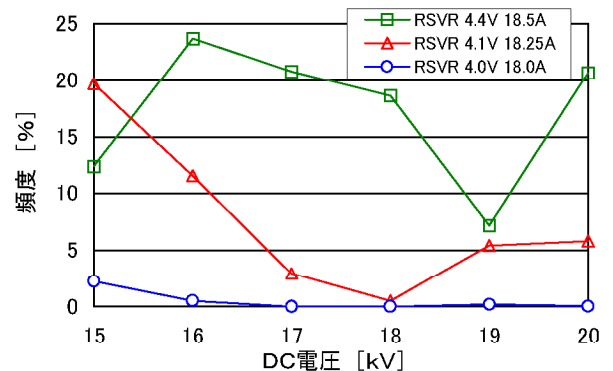
日大リニアックではパルスモジュレータの充電用 DC 電源には約 2×10^{-4} の安定度をもつ直流電源を用い、出力にはディキューイング回路を使っていない。このため出力パルスがサイラトロン of 動作変動の影響を直接受け、出力パルスの電圧変動を生じやすい。今回、我々が行ったサイラトロン of リザーバー電圧調整によって動作の変動頻度を 1% 以下に減少させることができ、実際にビーム加速を行って安定度の大幅な改善が確認された。

参考文献

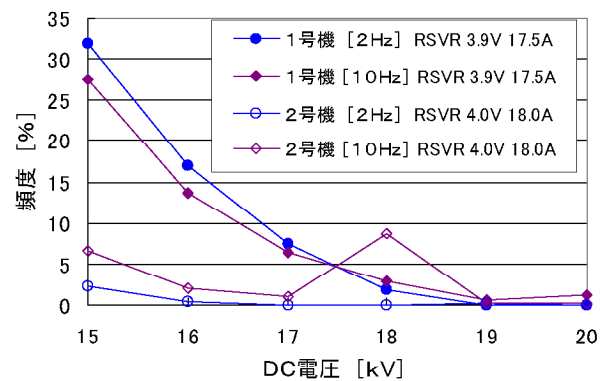
- [1] K. Hayakawa et al., Proc. of 22nd this meeting in Japan, September 9-11 (1997) 41-43.
- [2] T. Sakai et al., Proc. of 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 7-9 (1999) 329-331.



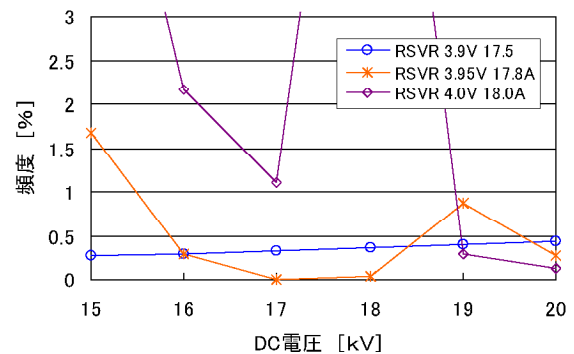
(i) 1号機の変動頻度 (2Hz)



(ii) 2号機の変動頻度 (2Hz)



(iii) 1, 2号機の変動頻度 (2, 10Hz)



(iv) 2号機の変動頻度 (10Hz)

図 4. パルス電圧変動の起こる頻度

[12P-34]

IMPROVEMENT OF THE LONG PULSE OPERATION OF THE S-BAND KLYSTRON

T.Sakai^{*}),[†] I.Sato,[†] K.Hayakawa,[†] T.Tanaka,[†] Y.Hayakawa,[†] K.Sato,
H.Nakazawa, K.Yokoyama, K.Kanno, K.Ishiwata, H.Inokawa and Y.Nakamura

Graduate School of Science and Technology, Nihon University,
7-24-1, Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan
[†] Atomic Energy Research Institute, Nihon University,
7-24-1, Narashinodai, Funabashi, 274-8501 Japan

Abstract

The long pulse operation of the PV3030 klystron for FEL linac at LEBRA in Nihon University has been improved considerably by the additional vacuum system placed immediately downstream the klystron output rf window. With the new vacuum system, the large conductance has enabled a high vacuum in normal operation and a quick recovery when the dielectric breakdown occurred. A high vacuum near the rf window may be essentially important for a stable operation of the high power klystron with long pulse duration. Now the PV3030 klystron can be operated at the condition of 20MW×20μs×12.5Hz.

Sバンドクライストロンの長パルス動作の改善

1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用研究施設(以下LEBRA)では、高エネルギー加速器研究機構(以下KEK)と共同研究を結び、FEL用加速器の高性能化を進めてきた。共同研究の一環として KEK で使われていた三菱電機製の PV3030 クライストロンを 2 台使用している。クライストロンの型には B1、A1、A2 の 3 種ある。LEBRA では、赤外から紫外領域の波長の FEL 発振を目標にしているために、最大エネルギー 125MeV、ビーム電流 200mA 程度が必要である。そのため 2 台のクライストロンにはそれぞれ 30MW×20μs×12.5Hz(出力電力×パルス幅×繰り返し)の出力が要求されるが、このクライストロンは短パルス用であり、仕様上無理があるため暫定的に 20MW×20μs×12.5Hz で動作させ使用することにした。にもかかわらず、テスト運転中にクライストロン出力高周波窓が破損する故障が断続的に発生し、目標値に達することが難しかった^[1]。しかし今年に入り、高周波窓の下流側に 8l イオンポンプを 2 台取り付け、RF 窓周辺の排気能力を強化することで、放電時に生ずるガス放出による真空の悪化を素早く回復することができるようになり、20MW×20μs×12.5Hz での運転が可能となった。

ここでは、改良前に起きていた RF 窓の破損状況と、クライストロン出力窓付近の真空排気系強化後に得られた効果について報告する。

2. クライストロン使用状況

LEBRA で今まで使用してきた各クライストロンの使用状況とそのクライストロンで得られた最高出力値を表 1 に示す。

表 1: クライストロン使用状況

品名	製番	取付日	交換日	交換理由	最高性能
PV3030B1	88501			保存中	
PV3030A1	89510			保存中	
PV3030A1	?	98.02.06	98.02.07	真空不良	
PV3030A1	87514	97.02.25		窓破損	24MW×20μs×2Hz
PV3030A1	90503			窓破損	
PV3030A1	90507	98.02.07 99.05.24	99.02.15 00.04.19	窓破損	20MW×20μs×12.5Hz
PV3030A2	91506	99.02.15	99.05.24	窓破損	19MW×13μs×2Hz
PV3030A1	89511	00.04.19	使用中		20MW×20μs×10Hz
PV3030A1	88516	98.02.09	98.05.26	窓破損	21MW×8μs×2Hz
PV3030A2	91501	98.05.26	98.05.27	真空不良	
PV3030A2	91502	98.05.27	98.06.18	窓破損	26MW×20μs×2Hz
PV3030A2	92505	98.06.19	98.07.08	窓破損	21MW×12.5μs×2Hz
PV3030A2	92502	98.07.08	98.12.10	窓破損	26MW×20μs×2Hz
PV3030A2	91503	98.12.10	98.12.10	真空不良	
PV3030A2	92503	98.12.10	99.06.11	窓破損	26MW×20μs×2Hz
PV3030A2	92501	99.06.11	99.06.12	真空不良	
PV3030A1	89506	99.06.12	使用中		20MW×20μs×12.5Hz

* 3つに区切ったうちの上段が保存中、中段がクライストロン 1 号機、下段がクライストロン 2 号機。

交換理由で「真空不良」とあるのは、イオンポンプに通電しなかったために真空が悪化してしまったものや、据付時の無理な負担、輸送時の損傷など使用前にすでにクライストロン内部の真空が悪化し使用不能になったものである。

^{*})T.Sakai,047-469-5489,sakai@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

LEBRA では KEK で使い込まれたクライストロンを使用しているため、内部は十分にエージングされたものである。しかし表 2 に示すように KEK に比べ LEBRA では使用条件が厳しいために窓の破損を起こしやすかった。LEBRA では KEK に比べ、出力電力、繰り返しは低い、パルス幅を 10 倍広くして使用する。

表 2：KEK と LEBRA での使用条件の比較

	出力電力	パルス幅	繰り返し
KEK	33MW	2 μ sec	50Hz
LEBRA	20MW 以上	20 μ sec	12.5Hz
定格仕様	33MW	6 μ sec	67Hz

3. 高周波窓の破損

LEBRA で高周波窓破損を引き起こした大きな理由は、出力電力×パルス幅×繰り返しを $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ とパルス幅を広げて運転しようとしていることが上げられる。また、特に 2 号機で起きていたクライストロン RF 窓の破損では次の事情も関与していた。LEBRA では 4m 加速管を 3 本使用している。しかし 2 本目と 3 本目の加速管が所定の間隔より 18mm (位相で約 62°) ずれて設置されていた。そのために予定の 90% までしか加速エネルギーが上がり、当初はこれをクライストロンの出力パワー不足と理解し、2 号機のエネルギー利得を上げるために過剰に出力パワーを上げた。その結果、クライストロンを 5 本破損させた。現在加速管の位置は設計通りに直したため、過剰に出力パワーを上げる必要がなくなり、2 号機でこれによる RF 窓の破損は無くなった。

クライストロンの交換理由のほとんどが、表 1 に示されるように RF 窓の破損であった。図 2 に破損した RF 窓の例を示す。

図 2 から明らかなように、放電が RF 窓とフラン

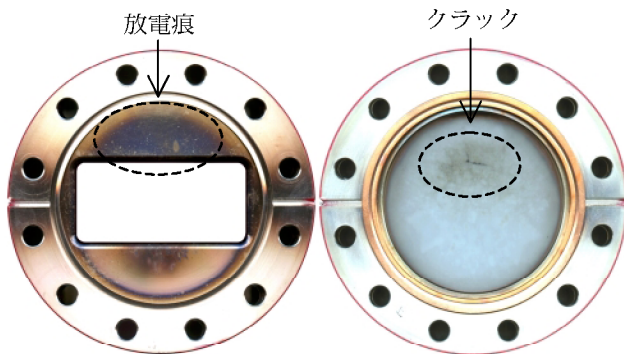


図 2：クライストロン下流側接続部放電痕と RF 窓破損の様子。加速管のずれによる問題で破損を起こした時の高周波窓の図。左：RF 窓と矩形導波管接続部。放電による損傷痕が見られる。右：RF 窓にクラックが成長し、表から裏へ貫通している。

ジの間で発生している。その放電痕から、推測されることは、まずあるとき何らかのきっかけで RF 窓や導波管の表面にマルチパクティングが発生、それにより RF 窓やその周辺の真空が悪化し、放電に至った。この放電によりセラミックが破損したのであろうと考えられる。

4. クライストロン下流側真空強化

LEBRA におけるクライストロン出力部立体回路と真空排気装置の位置を図 3 に示す。

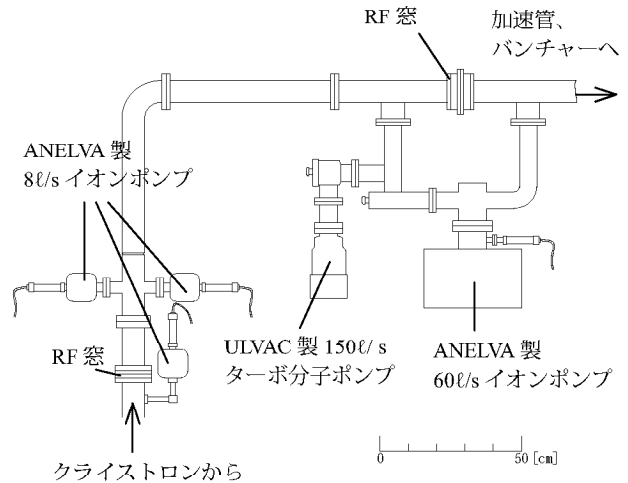


図 3：クライストロン出力部立体回路と真空排気装置位置関係。RF 窓の上流 40cm に ANELVA 製 8 l/s イオンポンプ、RF 窓から 2.4m 下流に ULVAC 製 150 l/s ターボ分子ポンプ (粗排気用)、2.6m 下流に ANELVA 製 60 l/s イオンポンプがそれぞれ 1 台を設置してある。RF 窓下流約 30cm のところに新たに ANELVA 製 8 l/s イオンポンプを 2 台取り付け付けた。

LEBRA におけるクライストロン出力部立体回路に付随する主な真空排気装置は、クライストロンに付属されている ANELVA 製 8 l/s イオンポンプ 1 台 (RF 窓から約 40cm)、ULVAC 製 150 l/s ターボ分子ポンプ 1 台 (RF 窓から約 2.4m、粗排気用)、ANELVA 製 60 l/s イオンポンプ 1 台 (RF 窓から約 2.6m) で構成されていた。しかし先に示したように、RF 窓のフランジとセラミックの間で放電が生じたときには、RF 窓付近の真空状態は極めて悪化していたと考えられる。それは、RF 窓から 60 l/s イオンポンプまで 2.6m も離れており、放電した時、その元の状態に回復するまでに長時間かかっていたことから推測される。実際この真空系でのクライストロン RF 窓周辺でのコンダクタンスは導波管などの形状を考慮に入れた計算^[2]から、約 8.2 l/s である。しかし今回 ANELVA 製 8 l/s イオンポンプを RF 窓から約 30cm の距離にパイプの径を大きく、できるだけ導波管の近くに 2 台取り付け付けたことで全体のコンダクタンスは約 43 l/s まで上がった。仮に RF 窓で一瞬通常の真空度

(10^{-5} ~ 10^{-6} Pa ぐらい)から 10^{-3} Pa ぐらいまで悪くなったとしても、元の真空状態に戻るまでの時間は、今までの真空排気系に比べ半分以上で可能である。また、持続的にガスが出る場合でも新しい真空排気系では今までに比べ、RF 窓の位置での圧力を半分程度まで低くすることが予想される。実際運転中に RF 窓で真空が悪化しても、真空系を強化する前に比べ飛躍的に回復時間が短縮された。

また、図3の 60ℓ/s イオンポンプの2つの引き口に挟まれた RF 窓は、クライストロンに取り付けられているものとまったく同じ 30MW 用 RF 窓であるが、1997 年に取り付けてから今まで一度も破損を起こしていなかった。その理由として RF 窓から 60ℓ/s イオンポンプが近い位置(約 1m)にあり、そこでのコンダクタンスが約 32ℓ/s と大きく、放電によるガス放出が起きても元の真空状態に回復する時間が極めて短かったためと考えられ、今回新たに取り付けられた真空ポンプの有効性を裏づけるものであるといえる。

5. クライストロン長パルス安定動作

8ℓ/s イオンポンプを2台新たに付けることにより、予定の $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ で運転可能な状態になった。 $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ 動作時のクライストロン RF 出力波形を図4に示す。ただし、この図4に示した1号機の波形は、PV3030A1(90507)による波形でこのクライストロンはすでに破損してしまった。現在、次のクライストロン(PV3030A1(89511))では約500時間運転しており、今のところ $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 10\text{Hz}$ が最高値ではあるが、今後エージングを重ねて行き $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ まで上げていく予定である。2号機(PV3030A1(89506))は現在まで約1450時間運転し、丹念に長時間エージングした結果、 $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ で運転できる状態になっている。

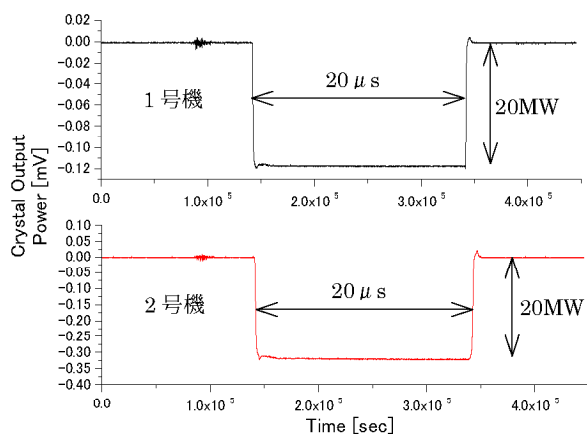


図4： $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ 動作時のクライストロン出力波形。上が1号機、下が2号機の波形。印加電圧1号機 237kV、2号機 219kV で得られた。

6. 今後の方針

クライストロン本体の RF 窓付近についている 8ℓ/s イオンポンプは導波管から約 40cm 離れた位置にあり、15mm 程度の細いパイプを通して排気している。そのためコンダクタンスが約 1.6ℓ/s と悪い。そこで新しく付けたイオンポンプのように引き口のパイプの径をできるだけ大きくし、イオンポンプ引き口を導波管にできるだけ近づければ排気能力も増え、その周辺で放出されるガスを速やかに排気することができ、放電時におけるガス放出からの早い回復が期待できる。これは今後クライストロンの製造過程において考慮すべき重要課題である。

また我々はクライストロンの改良として、電子銃部分を PV3030A3 用に取り替え、さらに RF 窓を今まで使用していた 30MW 用ではなく 50MW 用の耐性の高いものに交換し、さらに出力パワーを上げていくことも検討している。また 60ℓ/s イオンポンプ引き口付近にある RF 窓はすでに 30MW 用から 50MW 用のものに交換済みである。

7. まとめ

これまで LEBRA では、クライストロン RF 窓の破損を経て、その性能限界を探ってきたが、クライストロン出力 $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ で動作させることに成功した。これは、RF 窓の近く(下流約 30cm)に 8ℓ/s イオンポンプを2台取り付けることによって、クライストロン出力立体回路の真空排気系の強化をはかったことによる。実際 60ℓ/s イオンポンプの位置におけるコンダクタンスは約 8.2ℓ/s であり、8ℓ/s イオンポンプの位置では約 43ℓ/s と5倍ほど大きい。そのためポンプ自身の排気容量は小さくても RF 窓の排気能力は大きくなり、RF 窓付近でのガス放出から素早く回復することで、PV3030A1 クライストロンで $20\text{MW} \times 20 \mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ の運転が安定して可能になった。

参考文献

- [1] : I.Sato, et al., "The Present Status of LEBRA in Nihon University". Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sapporo, July 7-9, (1999) p10-12.
- [2] : 真空ハンドブック 改訂版 第3版、(株)アルバック・コーポレートセンター、1989年3月31日、P34-39.

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[6]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 $\gamma=(E+m_e c^2)/m_e c^2$ 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

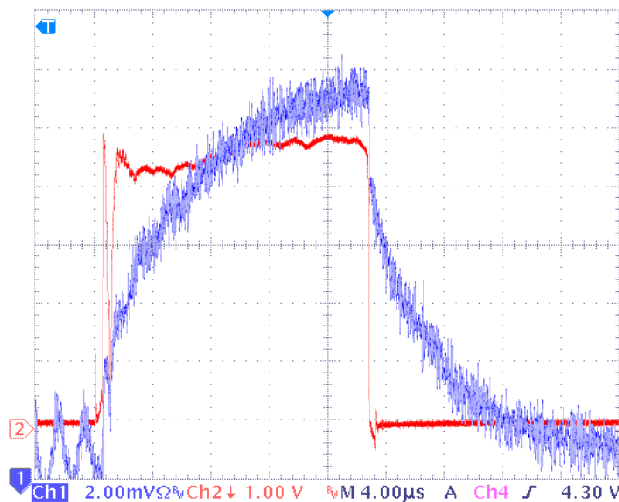


図1：積分波形は光空洞共振器に蓄積されている自発放射光の強度 (V:2mV/div,H:4μs/div)、矩形は電子ビーム波形(V:20mA/div)。

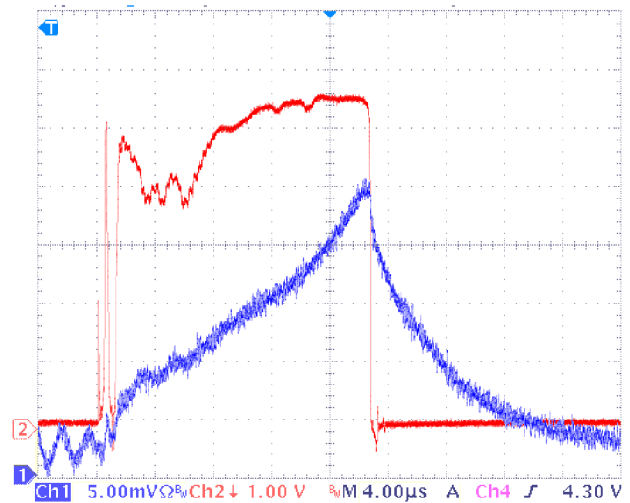


図2：積分波形は光空洞共振器に蓄積された発振レーザーの強度 (V:5mV/div,H:4μs/div)、矩形は電子ビーム波形(V:20mA/div)。

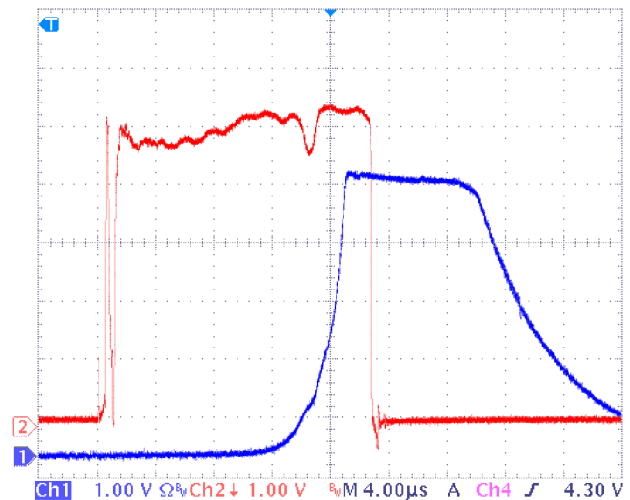


図3：積分波形は光空洞共振器に蓄積された発振レーザーの強度 (V:1.0V/div,H:4μs/div)、矩形は電子ビーム波形(V:20mA/div)。

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、これは反射鏡を介在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。

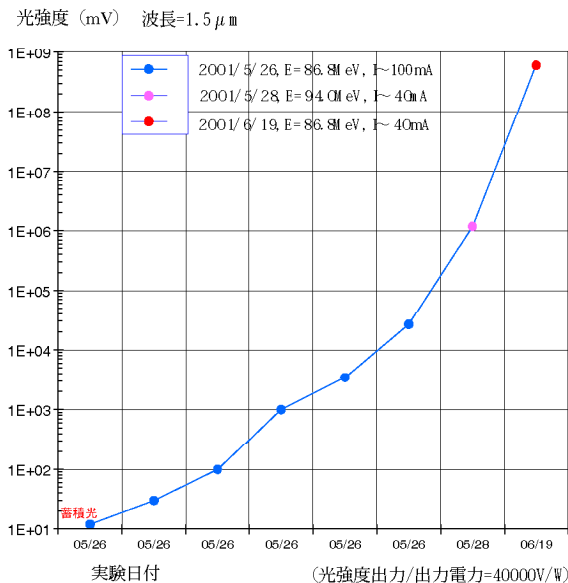


図4：自由電子レーザー発振に於ける光強度の推移

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わ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).

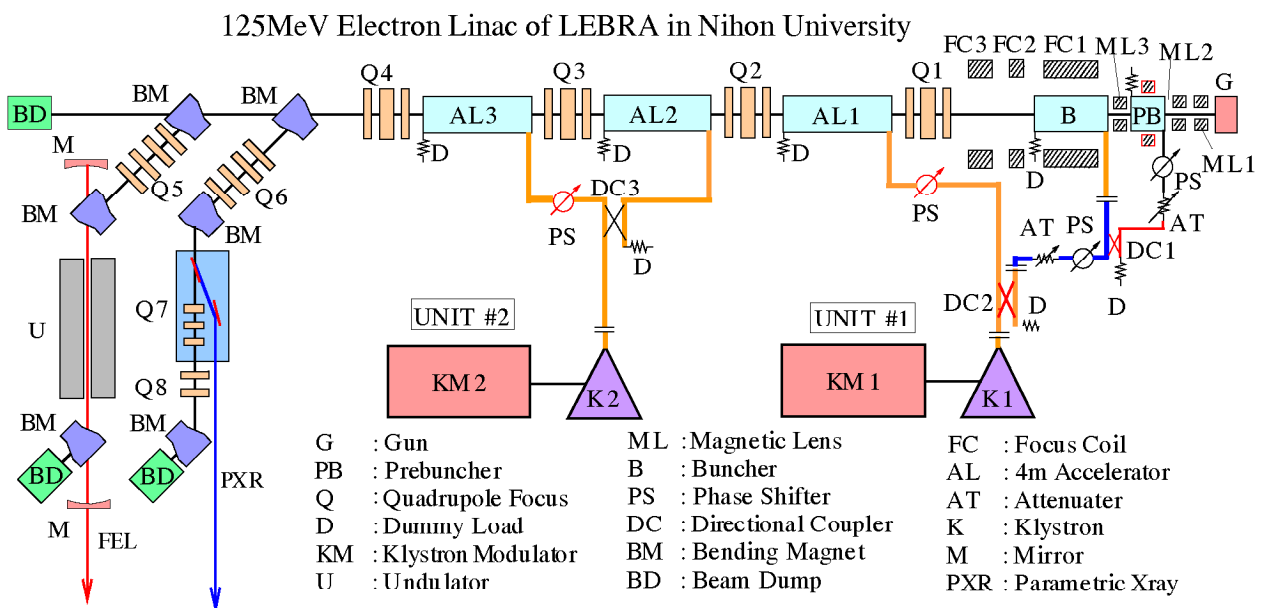


図5：125MeV電子線形加速器の全体図

PROCEEDINGS OF
THE 26TH
LINEAR ACCELERATOR MEETING
IN JAPAN

August 1- 3, 2001

Tsukuba, Japan

URL <http://conference.kek.jp/LAM26/>

High Energy Accelerator Research Organization

電子銃の低エミッタンス化による入射部の高度化

菅野 浩一^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、佐藤 和男^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{A)}、境 武志^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、猪川弘康^{A)}、中村吉宏^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、橋本 英子^{A)}、藤岡 一雅^{A)}、村上 琢哉^{A)}、道園 真一郎^{C)}、大沢 哲^{C)}、福田 茂樹^{C)}、諏訪田 剛^{C)}

^{A)}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

^{B)}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

^{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

自由電子レーザー用 125MeV 電子線形加速器に用いていた DC 電子銃に関して相対論的電子軌道解析コード EGUN を用いて解析を行い、ウェーネルト電極による集束が強すぎると結論した。そこで laminar ビームが得られるように再び EGUN を用いて電子軌道シミュレーションによる電極形状の最適化を行い、低エミッタンス化をはかるため電子放出面積が小さいカソードを取り付けた新電子銃を製作した。そして、新電子銃から放出されるビームと加速後のビームのエミッタンス測定を行った。その結果、新電子銃から得られる電子ビームのエミッタンスは旧電子銃より小さくなっている事がわかった。

1. はじめに

自由電子レーザーを発振させるために日本大学原子力研究所電子線利用研究施設ではクライストロンの高出力化・長パルス化・位相安定化、電子ビームの低エミッタンス化、ビーム診断法の開発など加速器の高度化を進めてきた。その結果、FEL の微細な調整が可能になった。そして、2001 年 5 月に波長 1.5 μm の赤外 FEL 発振に成功し、6 月現在においては、およそ 1kW の尖頭出力を得ることができた。加速器の入射部は電子ビームの資質を大きく左右する。特にエミッタンスは電子銃の性能に強く依存するパラメータである。そこで、電子銃の高度化を行うことで電子ビームの低エミッタンス化・平行化を図った。本施設では可視～紫外領域の FEL 発振もめざしているため、特に低エミッタンスの電子ビームが要求される。ここでは電子銃高度化の詳細とエミッタンス測定の結果について報告する。

2. 電子銃電子軌道計算

本施設では 100kV 熱陰極 DC 電子銃に、電子放出面積が 1.0 cm^2 でグリッド-カソード間距離が 0.2mm の EIMAC Y646E カソードを用いてピーク 400mA、

パルス幅 20 μs のビーム電流を引き出している。この電子銃から得られる電子ビームの電子軌道計算は空間電荷効果を考慮し、EGUN^[1]を用いて行った。このケースではグリッドから電子を放出していると仮定している。その計算結果を図 1 に示す。図 1 のカソード位置より $z=140\text{mm}$ の位置にマグネティックレンズが設置されている。この場合、ウェーネルト電極による電子ビームの集束が強すぎ、集束点がアノード付近にある。そのため、ビームがマグネティックレンズを通る時、ビーム径はカソード径より大きくなってしまおうと推測できる^[2]。そこで、図 2 のように再び EGUN を用いて適切な集束力になるようにウェーネルト電極の傾斜をなだらかにした。また、低エミッタンス化を図るため、電子放出面積が 0.5 cm^2 と小さい EIMAC Y646B を使用すると仮定して計算した。その結果、目的としていた平行ビームが得られることが明らかになった。グリッドカソード間距離は Y646E と同様に 0.2mm であり、ウェーネルト電極は製作が容易な形状にした。

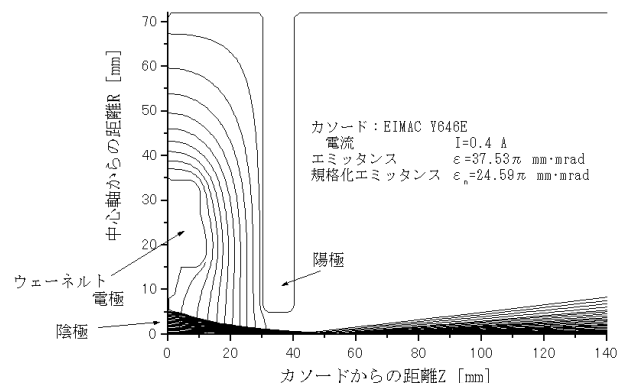


図 1 : 旧電子銃に関する電子軌道計算結果。

¹ E-mail: tekkamen@lebra.nihon-u.ac.jp

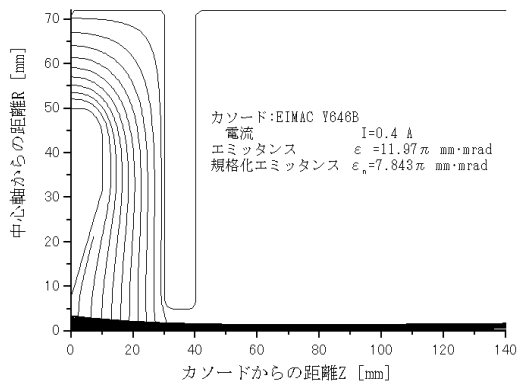


図2：新電子銃に関する電子軌道計算結果。

3. 電子銃の製作

EGUN を用いて最適化したウェーネルト電極形状を取り入れた新電子銃を製作した。図3にはEIMAC Y646B カソードを取り付けた新電子銃の写真を示す。



図3：電子銃ウェーネルト電極形状。左が新電子銃、右が旧電子銃。

4. 電子銃下流に於けるエミッタンス測定

新旧の電子銃から放出されるビームの質を比較することを試み、入射部に於けるエミッタンス測定を行った^[3]。本測定ではエミッタンス位相空間上の電子の分布をマグネティックレンズによって変化させ、ワイヤースキャナーを用いてその分布の大きさを測定した。測定はマグネティックレンズの磁場強度 Q とビームの半径の関係から twiss パラメータの値を求めてエミッタンスの値を評価した。磁場強度 Q は近軸軌道方程式より得られ^[4]、式(1)で表される。ただし、マグネティックレンズを thin レンズと仮定している。

$$Q = \frac{e^2}{4m_0^2 (\gamma^2 - 1)c^2} \int_0^L B(z)^2 dz \quad (1)$$

ここで、 e は電荷素量、 m_0 は電子の静止質量、 γ はローレンツ因子、 c は光速、 L は磁場の実効長、 $B(Z)$ はマグネティックレンズが作り出す軸上の磁場を表す。ワイヤースキャナーには $0.1\text{mm}\phi$ のタングステンワイヤを張り、約 52V のバイアスをかけている。測定に使用するマグネティックレンズがつくる磁場

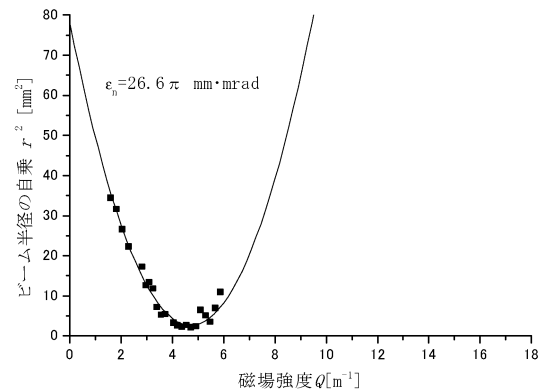
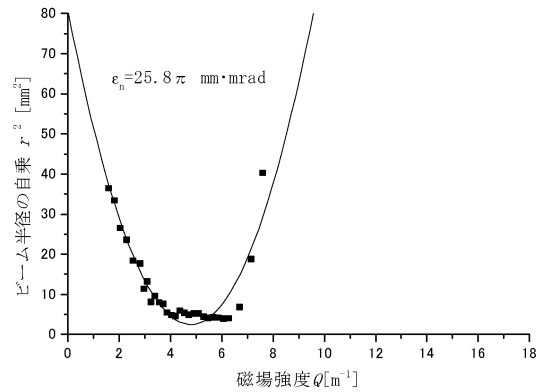


図4：旧電子銃のエミッタンス測定結果。上に水平方向、下に鉛直方向の測定結果を示す。放出電流は 150mA

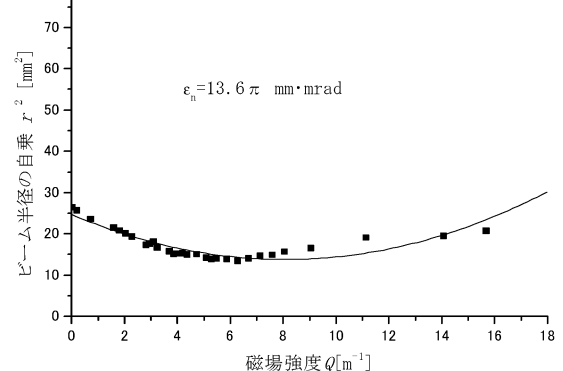
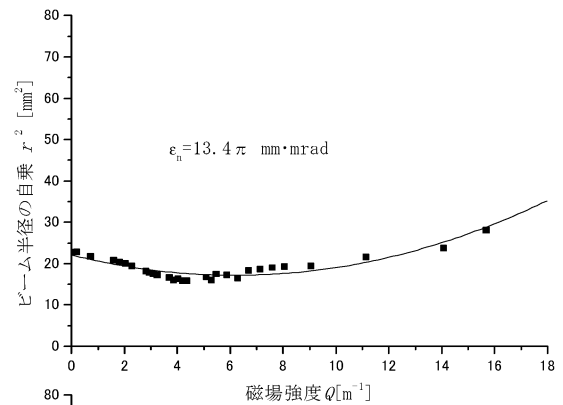


図5：新電子銃のエミッタンス測定結果。上に水平方向、下に鉛直方向の測定結果を示す。放出電流は 170mA

ピークの位置は電子銃カソードからビーム進行方向に42.2cm、ワイヤースキャナーのワイヤーは69.2cmの位置に設置されている。図4、5にマグネティックレンズの集束力に対するビーム半径の測定結果と最小自乗法より求めた規格化エミッタンス ϵ_n の値を示す。しかし、重みをつけていない。新電子銃では旧電子銃より約51%に規格化エミッタンスが小さくなった。これより、電子銃の改良による入射器の高度化がなされたと考えられる。

5. 加速後のエミッタンス測定

次に加速器終端より下流でエミッタンス測定を行い、入射器の高度化によって加速器から得られる電子ビームの低エミッタンス化が実現できたかを調べた。測定方法は入射部に於けるエミッタンス測定と同じだが、エミッタンス位相空間上の電子の分布を変化には四極電磁石を用いている。表1に χ^2 フィッティングを行って得られたエミッタンスの値を示す。これより、入射器の高度化の結果、加速電子ビームの低エミッタンス化がなされたと考えられる。また、入射器に於けるエミッタンス測定と同様に最小自乗法によるエミッタンスの評価も行った。図6にビーム径測定結果と最小自乗法を用いて得られた規格化エミッタンス ϵ_n の値を示す。この計算では水平方向のエミッタンスは非常に大きくなってしまっていることになる。これは、測定時において四極電磁石を通る電子ビームの断面が楕円であるためと考えられる。また、本測定では極性を変えることで集束方向を切り替えており、鉛直方向のビーム径測定の後に極性を切り替え、水平方向の測定を行った。そのため、水平方向のエミッタンス測定に影響が出たと考えられる。

6. まとめ

EGUN を用いてウェーネルト電極形状の最適化を行い、エミッタンスが小さく laminar ビームを得られる電子銃を製作した。入射部での規格化エミッタンスを測定した所、新電子銃では旧電子銃と比較して半分程度に小さくなっていることがわかった。その入射部の高度化によって加速器から得られる電子ビームのエミッタンスも小さくなったことが測定からわかった。しかし、水平方向のエミッタンスは非常に大きい値が得られた。これはビームの調整が完全になされていなかったことと鉛直方向のエミッタンス測定から四極電磁石の極性を変える事で水平方向の測定に移したことによると考えられ、再度測定をする。

入射部のエミッタンス測定にはマグネティックレンズを使用した。そして、エミッタンスはEGUNによる計算値と合う測定結果が得られた。これより、入射部でのビームのエミッタンス測定には、マグネティックレンズを使えば、四極電磁石と同様の方法でエミッタンスの測定が可能であると考えられる。

表1：エミッタンス測定結果
(χ^2 フィッティングによる計算)

入射器高度化後	
加速エネルギー	86.8MeV
規格化エミッタンス	
水平方向	32.8 π mm \cdot mrad
鉛直方向	16.3 π mm \cdot mrad
入射器高度化前	
加速エネルギー	96MeV
規格化エミッタンス	
水平方向	66.13 π mm \cdot mrad
鉛直方向	63.6 π mm \cdot mrad

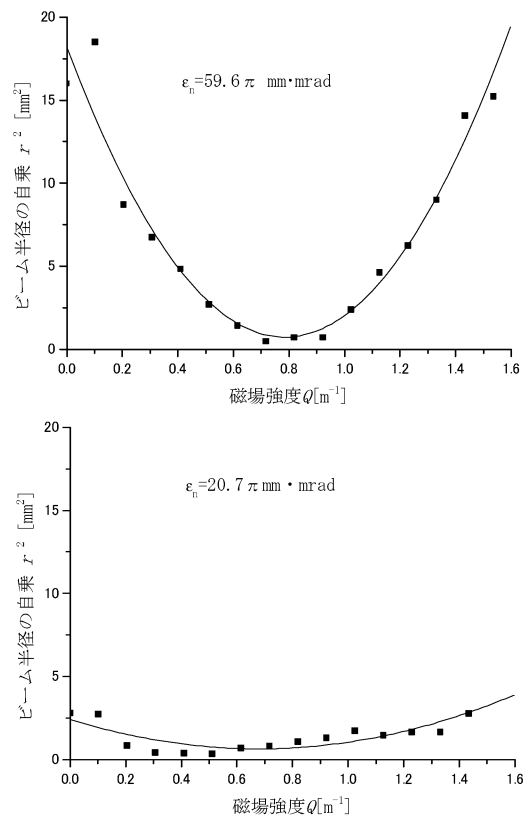


図6：入射器高度化後の加速器下流に於けるエミッタンス測定結果。実線は最小自乗法により求めた時の相関を示す。上に水平方向、下に鉛直方向の測定結果を示す。

参考文献

- [1] W.B.Herrmansfeldt, "EGUN –an electron optics and gun design program" slac report 331 1988
- [2] K.Kanno, et al., "ANALYSIS OF THERMIONIC DC ELECTRON GUN FOR 125 MeV LINAC" Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p168-170
- [3] 酒井文雄, "RF ガンのエミッタンス測定", Proceedings of the Workshop on "Precise Measurement of Electron Beam Emittances", 1997, p266-p271
- [4] 電気学会, 電気学会大学講座 電子・イオンビーム工学、オーム社、p109-p110

FEL 用クライストロンのグレードアップ

境 武志^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、逸見和久^{C)}、早川 建^{B)}、田中俊成^{B)}、早川恭史^{B)}、佐藤和男^{B)}、横山和枝^{A)}、菅野浩一^{A)}、石渡謙一郎^{A)}、猪川弘康^{A)}、中村吉弘^{A)}、中尾圭佐^{A)}、橋本英子^{A)}、藤岡一雅^{A)}、村上琢哉^{A)}

^{A)} 日本大学大学院 理工学研究科 量子理工学専攻 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物理実験 B 棟

^{B)} 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物理実験 B 棟

^{C)} 三菱電機株式会社 通信機製作所

〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

概要

日本大学原子力研究所電子線利用研究施設（以下 LEBRA）では、高エネルギー加速器研究機構と共同研究を結び、FEL 用加速器の性能改善、並びに高度化を進めてきた。

LEBRA では、ビームエネルギー125MeV、ビーム電流 200mA 程度のビームを加速するために、三菱電機製の短パルス用クライストロン PV-3030A1 を 2 台使用している。

今年度、三菱電機製クライストロン PV-3030A3 をベースに、電子銃、RF 窓、クライストロン真空引き口等を強化し、クライストロンの性能強化を行い、クライストロン PV-3040N を製作した。

これまで使用してきている短パルス用クライストロン PV-3030A1 の長パルス化の成功を基盤にしているため、PV-3040N は、LEBRA での要求出力値である 30MW×20μs×12.5Hz（出力電力×パルス幅×繰り返し）の長パルス、高出力動作が見込め、赤外線から紫外線の波長領域（0.3~5.0μm）までの FEL 発振、パラメトリック X 線の発生等に活用されると期待している。

1. はじめに

LEBRA では、赤外線から紫外線の波長領域（0.3~5.0μm）までの FEL 発振、エネルギー3~30keV のパラメトリック X 線の発生を目標としている。これらの線源を発生させるのに必要な電子ビームは、エネルギーが 125MeV、ビーム電流が 200mA 以上必要である。これらの要求を満たすには、加速器本体（プリバンチャー、バンチャー、4m 加速管 3 本）への供給する高周波電力は 60MW×20μs×12.5Hz（出力電力×パルス幅×繰り返し）である。そのため 2 台のクライストロンには、それぞれ 30MW×20μs×12.5Hz（出力電力×パルス幅×繰り返し）の非常に厳しい値が要求される。この場合、クライストロン RF 窓の耐性が問題となるが¹⁾、昨年度、クライストロンの RF 窓下流側すぐ近くに、ANELVA 製 8ℓ/s イオンポンプを 2 台取り付け、耐性を向上させ

た。これは高周波窓付近の真空排気の強化を図ることによって、クライストロン PV-3030A1 が、20MW×20μs×12.5Hz（出力電力×パルス幅×繰り返し）の長パルス、高出力運転を可能にした¹⁾。しかしまだ要求する出力電力値を達成できなかった。

そこで、三菱電機製クライストロン PV-3030A3 をベースとした、電子銃部、RF 窓部、クライストロン真空引き口部の改良を行い、新クライストロン PV-3040N を製作した。現在使用中のクライストロン PV-3030A1 と新クライストロン PV-3040N の特性の比較、検討を表 1、表 2、表 5 に示す。

2. 現在使用中のクライストロン

現在使用中のクライストロン PV-3030A1（図 1）は、現在までに 1 号機が約 1300 時間、2 号機が約 2237 時間運転している。昨年度に行った RF 窓での真空排気強化と長時間にわたるエージングを丹念に行った結果、20MW×20μs×12.5Hz の長パルス動作が可能となった。表 1 に PV-3030A1 の基本特性を示す。

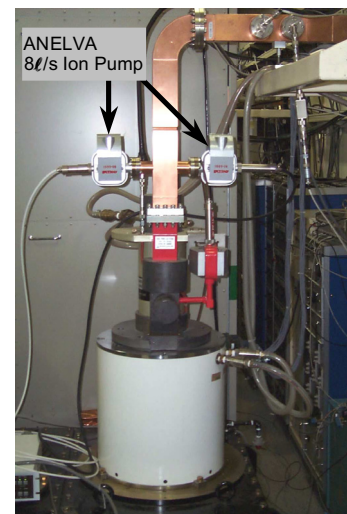


図 1：現在使用中のクライストロン PV-3030A1。ANELVA 製 8ℓ/s イオンポンプを 2 台取り付け RF 窓付近の真空排気強化を行っている。

¹⁾ E-mail: akira28@lebra.nihon-u.ac.jp

表1：クライストロン PV-3030A1 の基本特性

動作周波数	2856	MHz
出力電力	33	MW
出力電力利得	51.0	dB
ビーム電圧	250	kV
ビーム電流	278	A
パルス幅	2.5	μs
パルス繰り返し	67	Hz
電力効率	43	%
パービアン	2.27	μA/V ^{1.5}
全長	1317	mm

3. 新しいクライストロンの製作

3.1 製作の基本方針

既設のヒーターパルストランスを改良せず、そのままクライストロンを交換するのみでできるようにするために、クライストロン PV-3030A1 と基本的に同じ寸法であることが望ましい。そこで、同じ寸法で高出力のクライストロン PV-3030A3 をベースに、各部の高性能化、改良を行うこととした。電子銃のカソードには Scandate タイプの含浸カソードを採用し、RF 窓には 50MW 用の大電力 RF 窓を採用した。クライストロン RF 窓周辺の真空排気強化が、クライストロンの長パルス化、高出力を達成した経験から、クライストロン RF 窓上流側の真空引き口を太く、短くして実行排気量の強化をすることにした。

3.2 真空排気口の改良

今まで使用してきたクライストロン PV-3030A1 の引き口は、図2に示したように内径 15mm の細い円筒パイプを直角に2回曲げて、矩形導波管からおよそ 250mm 位置に ANELVA 製 8ℓ/s イオンポンプを取付け、クライストロン内部 RF 窓上流側の真空を引いている。矩形導波管とイオンポンプの間のダクトが 15mm と細いため排気コンダクタンスが悪く、RF 窓上流側は実行排気量がおよそ 1.2ℓ/s と小さい。(ただし曲がっている部分2箇所は直線で近似して計算したので実際はもう少し小さい。)



図2：クライストロン PV-3030A1 のイオンポンプ引き口の様子。内径 15mm の円筒ダクトを直角に2回曲げて ANELVA 製 8ℓ/s イオンポンプへ繋げている。RF 窓上流部の実行排気量はおよそ 1.2ℓ/s。

そこで一時的に真空が悪くなった場合の回復時間の計算を行った。結果を図3に示す。これより PV-3030A1 では定常圧力 (10⁻⁷Pa 程度) から 10⁻⁴Pa 程度に真空が悪化した場合、元の真空度付近に回復するのに、およそ 3sec かかる。それに対し PV-3040N では、引き口径を PV-3030A1 の約2倍、長さを 1/4 にしたことにより、RF 窓周辺での実行排気速度は約 3ℓ/s に増強された。先ほどと同じ条件で計算すると、図3の破線のようになり PV-3030A1 に比べ真空度の回復は格段に早くなっている。

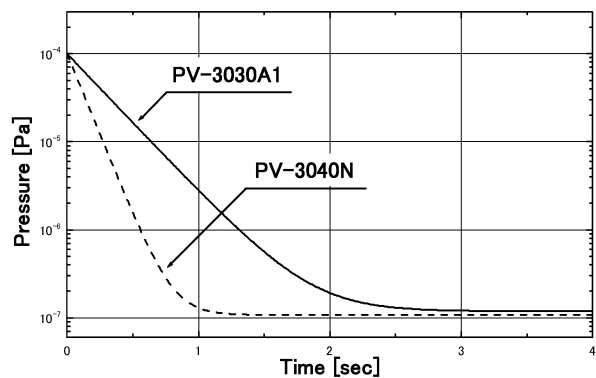


図3：クライストロン真空排気強化における真空回復時間の比較。新しいクライストロンの方が3倍近く真空悪化時からの回復時間が早い。

3.3 PV-3040N 概観

新クライストロン PV-3040N の概観写真を図4に示す。写真を見て明らかのように、真空引き口は太

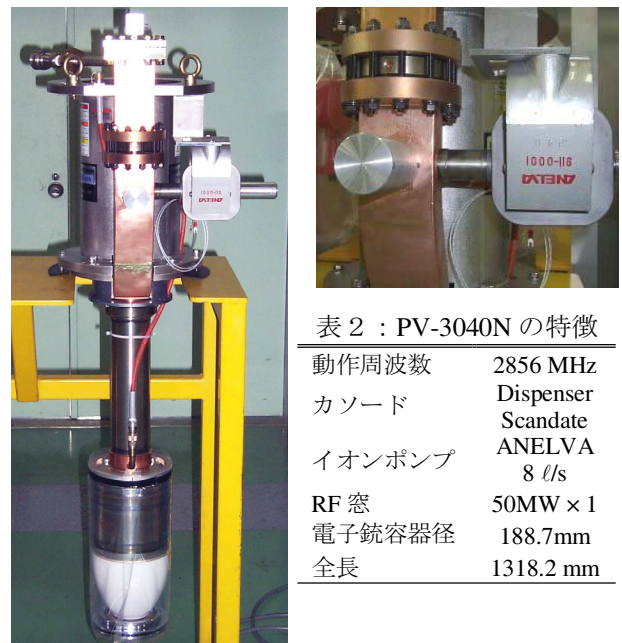


表2：PV-3040N の特徴

動作周波数	2856 MHz
カソード	Dispenser Scandate
イオンポンプ	ANELVA 8 ℓ/s
RF 窓	50MW × 1
電子銃容器径	188.7mm
全長	1318.2 mm

図4：クライストロン PV-3040N の概観写真(左)。引き口を改良した様子(右)。真空引き口を PV-3030A1 のときに比べ約2倍大きくし、長さを 1/4 に縮めた。

くて短い。一方、電子銃容器外形（188.7mm）、全長（1318.2mm）はほぼ同じ寸法であり、現在のヒータートランスに問題なく取り付けることができる。

4. クライストロン PV-3040N の性能試験

4.1 入出力特性

新クライストロン PV-3040N の入出力特性の試験結果と現在使用中のクライストロン PV-3030A1 での短パルス時における入出力特性結果を図5に示す。性能試験は表3に示した各パラメーターで行った。

PV-3040N 入出力試験の結果、RF 入力電力 250W に対して 42.3MW の RF 出力電力が得られ、十分な出力値が得られた。

表3：入出力特性試験時の各パラメーター

	PV-3040N	PV-3030A1	
ヒーター電圧	16.8	18.2	V
ヒーター電流	18.0	19.0	A
RF パルス幅	4.0	4.0	μs
繰り返し	50	100	pps
ビーム電圧	286	252	kV
ビーム電流	309	289	A

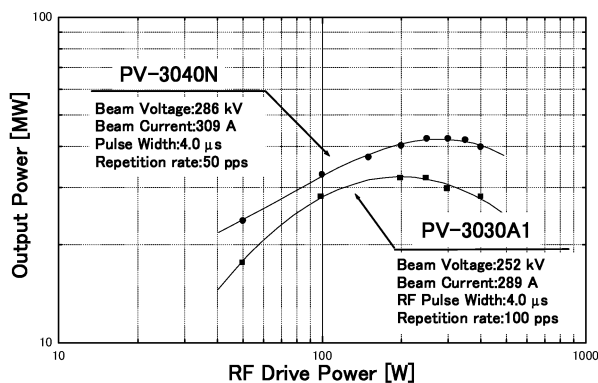


図5：クライストロン PV-3040N の入出力特性（上）、PV-3030A1 の入出力特性（下）。RF 入力電力 250W に対して 42.3MW の RF 出力電力が得られた。

4.2 電圧特性

次に PV-3040N のビーム電圧と RF 出力電力の特性、ビーム電圧と電力効率の特性を図6に示す。試験では、表4に示すパラメーターで行った。

表4：電圧特性試験時の各パラメーター

RF 入力電力	250	W
RF パルス幅	4.0	μs
繰り返し	50	pps
ヒーター電圧	16.8	V
ヒーター電流	18.0	A

ビーム電圧が 286kV のとき、RF 出力電力が 42.3MW 得られ、電力効率は 47.9%であった。

新クライストロン PV-3040N 性能試験の結果をまとめたものを表5に示す。短パルスでの性能試験の結果、現在使用中のクライストロン PV-3030A1 に比べ十分な出力特性をもっている。

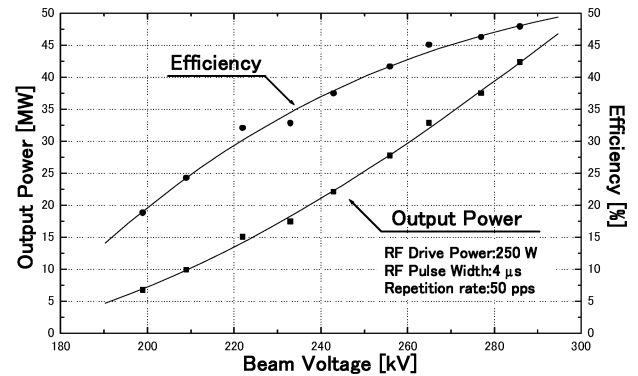


図6：クライストロン PV-3040N のビーム電圧と RF 出力電力の特性（下）と電力効率の特性（上）。

表5：クライストロン PV-3040N の性能試験結果

動作周波数	2856	MHz
出力電力	42.3	MW
出力電力利得	52.3	dB
ビーム電圧	286	kV
ビーム電流	309	A
パルス幅	4.0	μs
パルス繰り返し	50	Hz
電力効率	47.9	%
パービアンス	1.99	μA/V ^{1.5}
全長	1318.2	mm

5. まとめ

新クライストロン PV-3040N は、本格的に長時間にわたるエージングと長パルス、高出力運転を行っていない。しかし現在使用中のクライストロン PV-3030A1 の長パルス、高出力運転化の場合と比較して、短パルス試験の結果から $30\text{MW} \times 20\mu\text{s} \times 12.5\text{Hz}$ （出力電力×パルス幅×繰り返し）の出力値を達成できる目途が立った。今年度クライストロン交換後、長時間エージングを行い、本格的な長パルス、高出力運転を達成する予定である。

参考文献

- [1] T.Sakai, et al., "Improvement of the Long Pulse Operation of the S-Band Klystron", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July.12-14, 2000, p228-230. URL: http://www-linac.kek.jp/mirror/www.spring8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/proc_index.html
- [2] 真空ハンドブック 改訂版 第3版、(株)アルバック・コーポレートセンター、1989年3月31日、P34-39.

クライストロンドライブ系の位相安定化

横山 和枝^{1A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、佐藤 和男^{B)}、早川 恭史^{B)}、松原 洋一^{B)}、
中澤 裕之^{A)}、境 武志^{A)}、菅野 浩一^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、猪川 弘康^{A)}、中村 吉宏^{A)}、
橋本 英子^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、藤岡 一雅^{A)}、村上 啄哉^{A)}

^{A)} 日本大学大学院理工学研究科

^{B)} 日本大学原子力研究所

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 物理実験 B 棟

概要

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) ^[1]では、自由電子レーザー (FEL) 光の安定化を目指して、電子線形加速器の性能改善を行っている。安定した FEL 発振のためには、安定な加速電子ビームの供給が確保されなければならない。当施設の加速器は、電子加速に使用している RF のパルス幅が $20\mu\text{s}$ と長いため、パルス内での位相変動の影響が、電子ビームのエネルギー変動として顕在化する。また、入射器の位相の変動は、電子ビームバンチの位相変動の要因であり、FEL の同期条件を崩すことになる。さらに、加速器運転時の RF 位相は、RF アンプの周辺温度に依存したパルス間の変動があることがわかった。そこで、加速 RF の位相を安定化するためのフィードフォワード式補償回路を作製した。この方法による位相変動および電子ビーム変動の改善結果について報告する。

1. はじめに

電子線形加速器は、DC 電子銃から引き出した電子を 2856MHz の RF で最大 125MeV まで加速する。加速 RF はクライストロン 2 台で、それぞれ電子ビーム入射部ユニットと電子ビーム加速ユニットに供給している。1 台の発振器で発生させた RF を 2 系統に分けて、独立した RF アンプでクライストロンをドライブしている。発振器の RF を基準にしてアンプの出力位相を検出し^[2]、長時間の測定を行なった。この結果を図 1 に示す。位相の測定には、ダブル・バランスド・ミキサー (DBM) を用いた。アンプの置かれている部屋は、空調機で室温を $\pm 1^\circ\text{C}$ にコントロールされている。この図 1-(a)、(b) から、アンプの周辺温度に依存して、パルス間の位相変動がおきていることがわかる。室温 1°C の変化に対して、1 号機 RF 系の位相変動は、アンプ出力では 2.5° 、クライストロン出力では 3.0° である。2 号機 RF 系では各々 3.0° 、及び 3.5° である。また、加速 RF は RF アンプの前段で $20\mu\text{s}$ のパルスにしているが、パルス内でも位相変動が生じている。この位相変動は、1 号機 RF 系のアンプ出力では 0.6° 、クライストロン出力では 0.9° である (図 3)。2 号機 RF 系では、各々 8.0° 、及

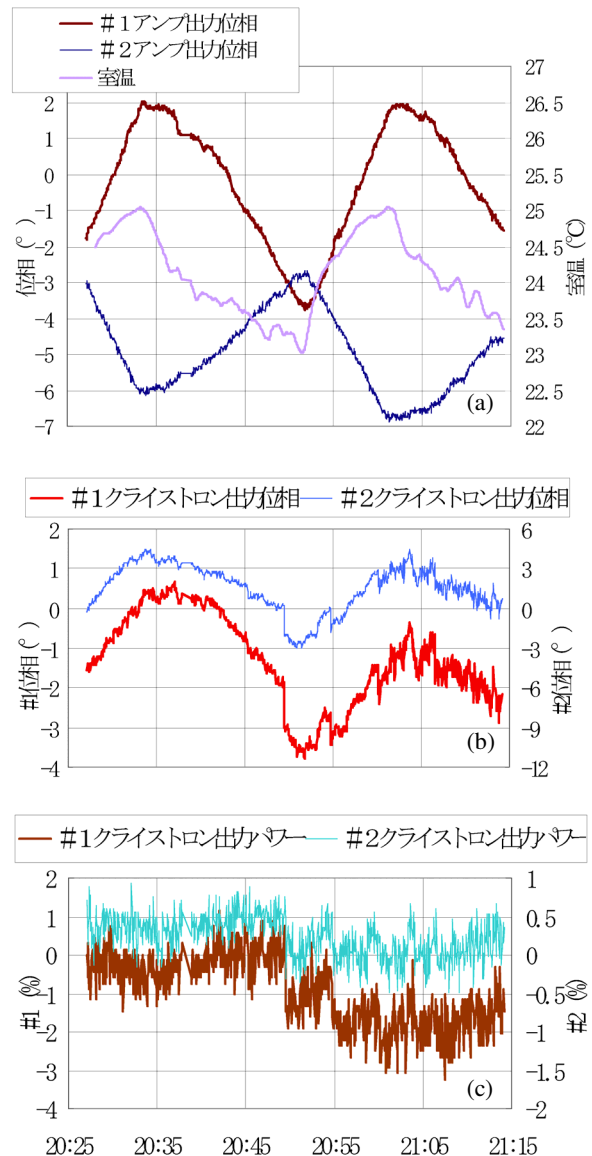


図 1 : 室温と位相補償前の RF の変動
(a) アンプ出力位相、(b) クライストロン出力位相
(c) クライストロン出力パワー
※(a)、(b)、(c)ともに横軸は共通時刻。

¹ E-mail: yokoyama@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

び 10.6° である (図4)。また、図1-(c)で示したように、クライストロン出力パワーも変動している。室温 1°C の変化に対して、1号機クライストロンでは2%、2号機では1%のパワー変動があるように見える。

2. 位相補償回路

位相補償システムの概略を図2に示す。ミキサーからの検出信号は、位相補償ユニットに入力される。この位相検出電圧 (ϕ_{in}) がゼロになるように、位相補償ユニットでは、位相コントロール信号 (PHASE CONT) を高速 ϕ/A に出力する。ゼロからずれた位相量から、次のパルスに対する補償信号を作るフィードフォワード式の制御である。このとき、パルス内での位相変動は、ファンクションジェネレータで作成した補正関数をこの制御信号に重畳することによって補正する。制御信号の例を図3に示す。高速 ϕ/A はパルス電圧で制御する仕様であるため、この図のように、パルス電圧として出力した波形に、ファンクションジェネレータの信号を乗せるように回路を構成した。

パルス内での位相変動は、アンプよりもクライストロンの方が大きい。1号機 RF 系では、アンプのパルス内での位相変動は 0.6° で、クライストロンでは 1° ある。そのため、クライストロンの出力を位相補償するようにした。2号機 RF 系は、現状では RF 系ドライブの構成がクライストロンの入力側で全体の位相を調整するようになっているので、クライストロンで位相補償を行うと2号機の位相が調整できなくなってしまう。このため、アンプの出力を位相補償するようにした。

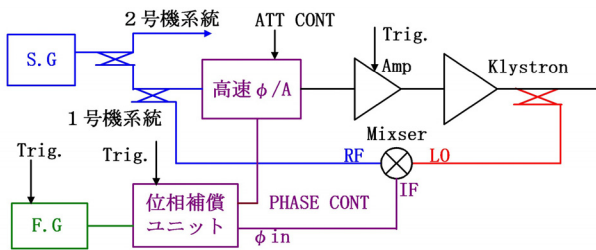


図2：位相補償システムのブロック図

3. 結果

3.1 パルス内での位相変動と電子ビーム

1号機 RF 系の位相補償は、クライストロン出力位相で行った。パルス内での位相変動は、パルスの立ち上がりを除けば、 0.9° から 0.5° 以下に改善された (図3)。2号機 RF 系は、アンプ出力位相で補償した。パルス内での位相変動は、 8.0° から 0.7° 以下に改善された (図4)。このときのクライストロン出力位相は、パルス内で 10.6° から 1.5° 程度に改善されている。位相補償したときの電子ビーム電流波形を図5に示す。電子銃エミッションは、 300mA で加速器出口では 150mA である。このときの電子ビームエネルギーは 85MeV である。また、加速器下流でア

ナライザーシステム (エネルギー幅 1%) を経由し、FEL システムを通過した電子ビームをファラデーカップで検出した。この電子ビームは 100mA である。パルス幅 $20\mu\text{s}$ で加速ビームの $\frac{2}{3}$ の電子ビーム電流を確保できた。

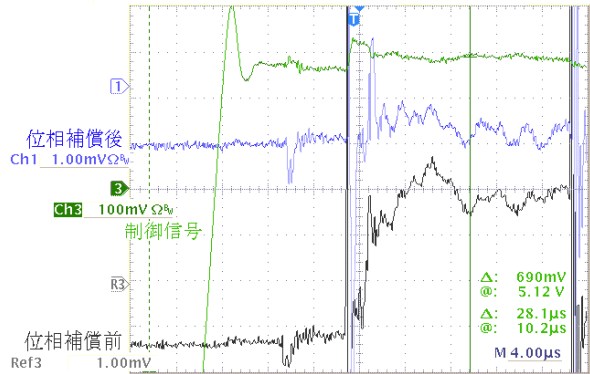


図3：1号機 RF 系

位相補償前後のクライストロン出力位相波形 ($0.46^\circ/\text{div}$) と位相補償ユニット (PHASE CONT) から出力されている制御信号波形。

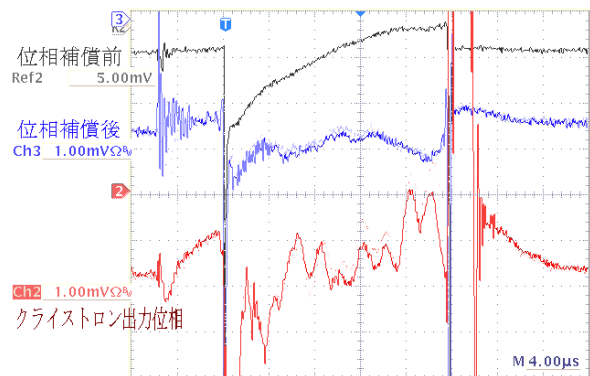


図4：2号機 RF 系

位相補償前後のアンプの出力位相波形 ($0.8^\circ/\text{div}$) とアンプの出力位相で補償したときのクライストロン出力位相波形 ($0.53^\circ/\text{div}$)。

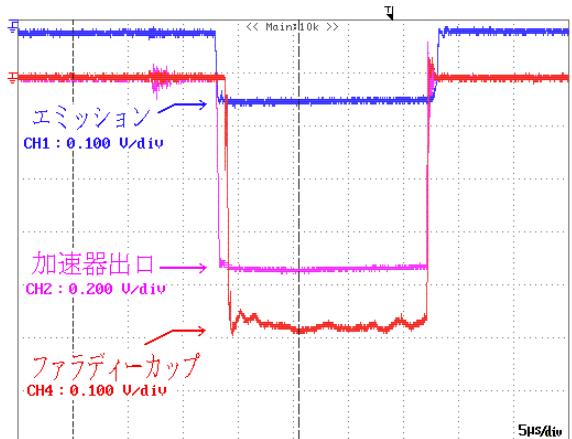


図5：位相補償後のビーム波形

[縦軸] CH1：200mA/div、CH2：40mA/div、CH3：20mA/div、[横軸] $4\mu\text{s}/\text{div}$

3.2 パルス間での位相変動と電子ビーム

位相補償したときのパルス間でのクライストロン出力位相変動と電子ビームの変動を図6-(a)、(b)に示す。パルス間での位相変動は、1号機 RF系では 3.0° から 1° に、2号機 RF系では 3.5° から 1.5° に改善された。位相補償する前の電子ビームは、パルス幅 $20\mu\text{s}$ で加速ビームの $\frac{3}{2}$ の電子ビームを維持し続けるのは困難であった。しかし、位相補償することで、容易に持続可能となった。

4. 考察

加速ビームの安定化には位相を安定にすることが必要である。アンプの周辺温度を一定にすれば、温度変化に追従する位相変動は取り除くことができるが、恒温槽を用いずにフィードフォワード式の位相補償回路でも補償することは可能である。位相補償回路で問題となるのはノイズである。ノイズの発生源は、主にクライストロンのパルスモジュレータである。現在は、十分なノイズ対策をしていないため、回路がノイズを拾って誤動作する可能性がある。ノイズの影響を減らすような回路素子の組み方やケーブルの引き回しを考慮すれば、精度の良い制御ができるであろう。

今回の測定で電子ビームの不安定な原因が加速RF位相以外にもあることがわかった。測定中の電源変動を図6-(c)に示す。電源変動^[3]は21時以降に顕著に現れる。これに連動して、クライストロンの位相及びパワーの変動も大きくなっていることが図1、図6からわかる。特に、パワーの変動は、周辺温度の影響よりも、電源変動による影響が大きいと思われる。また、図6-(a)に示すように、電子銃エミッションも不安定である。加速電子ビームの大きな跳びは、電子銃エミッションが急激に変化することに起因している。これは、電子銃で放電が起こっていることが観測され、電子銃の構造^[4]に問題があることがわかった。また、電子銃エミッションは徐々に変化している。300mAのエミッションが1%変化すると、加速器出口での加速ビームのエネルギーは0.3%程度変化することが計算から予想される。

5. 今後の課題

安定な FEL 発振のための加速ビームにするには、さらにパルス内でのバンチ長が重要である。電子ビームバンチは、入射部のバンチャーで形成されるので、バンチャーでの位相調整は重要な課題である。また、位相補償回路のノイズ対策、電子銃エミッションの安定化、電源変動に伴う位相変動の対処等を行しなければならない。

参考文献

[1] 佐藤 勇、他、“日本大学電子線利用研究施設の高度化と自由電子レーザーについて” Proc. of this Meeting.
 [2] K.Yokoyama, et al., “RF Phase Drift Compensation with a Function Generator”. Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting. in Japan, Himeji, July 12-14, 2000.

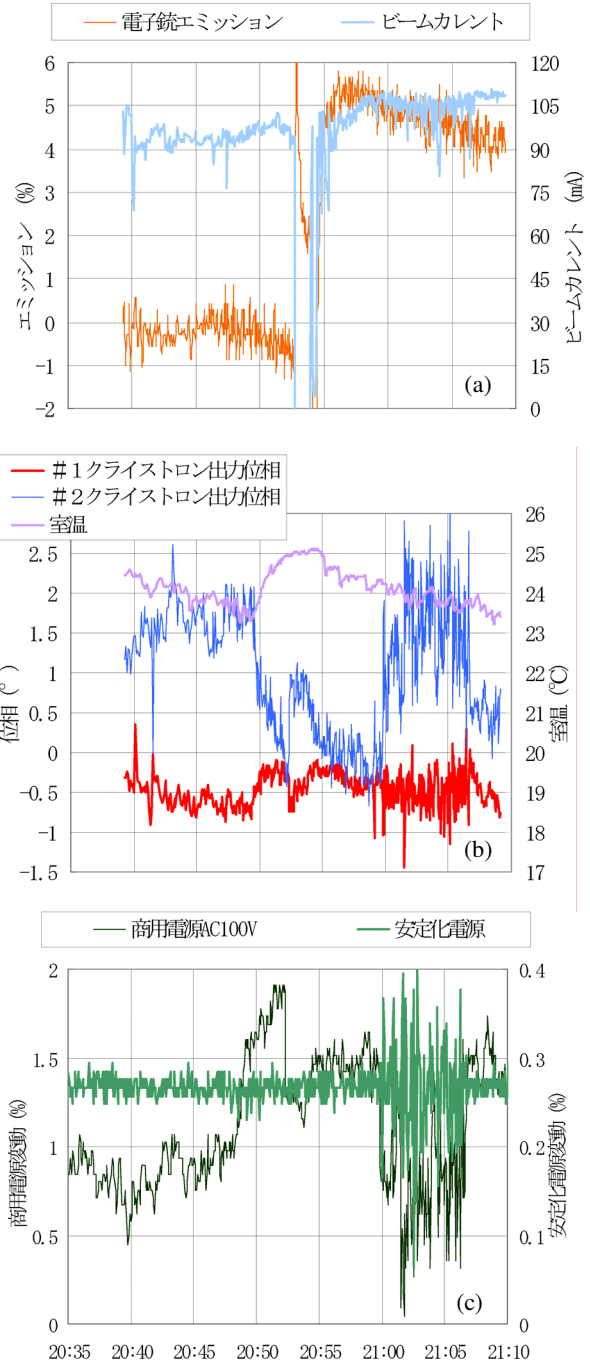


図6：位相補償の効果

- (a) 電子銃エミッションと FEL システムを通過した電子ビーム電流。
 - (b) 室温とクライストロン出力位相。
 - (c) 商用電源と RF 系に用いている AVR 変動。
- ※(a)、(b)、(c)ともに横軸は共通時刻。

[3] 早川 建、他、“商用電源変動とビーム不安定性” Proc. of this Meeting.
 [4] 菅野 浩一、他、“電子銃の低エミッタンス化による入射部の高度化” Proc. of this Meeting.

商用電源変動とビーム不安定性

早川 建^{1,A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、佐藤和男^{A)}、佐藤 勇^{A)}、
横山和枝^{B)}、境 武志^{B)}、菅野浩一^{B)}

^{A)} 日本大学原子力研究所

〒274-6501 船橋市習志野台 7-24-1

^{B)} 日本大学理工学部

〒274-6501 船橋市習志野台 7-24-1

概要

今年度初頭からの自由電子レーザーの実験を通して、周期的で顕著な商用電源変動が見出された。原因は現在のところ不明であるが、このために、電子ビームに著しい不安定性が生じている。一連の測定により、この電源変動が原因となって生ずる加速電場の変動が確認された。また原因解明のために行ったさまざまな測定の結果、上記の変動を直接の原因とはしない RF 系の変動が見出された。

1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用施設 (LEBRA) では、125MeV 電子線形加速器を用い、広帯域・高輝度光源の開発と、その利用実験の準備を行っている^[1]。その一環として、この4月から、集中的に赤外の自由電子レーザーを発振させるべく実験を行ってきたが、運動量幅 1% のアナライザを通過後の電子ビームの不安定性に悩まされている。ここで云うビーム不安定性とは、エネルギー、エネルギー幅、軌道、等の電子ビームの状態が時間的に変動し、その結果、電流が絶えず変動する状況である。電子ビームを変動させる最大の要因は、室温の変化による RF アンプの位相変動であることが分っている。その対策として、本来、パルス内の位相変動を補償する目的で RF アンプの前段に設置された高速φA を利用して、この変動をキャンセルする装置を製作した。未だ完全ではないが、近日中に解決する見込みである^[2]。次に

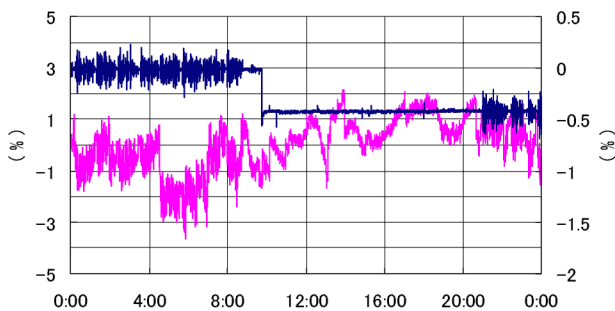


図1：平日の電源変動パターン、上が AVR 出力 (右側目盛り)、下が商用電源。

考えられるのが商用電源の変動である。商用電源が変動すると、サイラトロン周りの電源に影響を与え、その結果がパルス電圧の変動として現れてくる。この問題はサイラトロン周りの電源の前に AVR を挿入することによって解決されたはずであった^[3]。ところが、最近になって、ビーム不安定性の要因を探るために、商用電源及び AVR 出力の電圧を長時間監視したところ、奇妙な事実が判明した。

2. 電源電圧の監視

商用電源は AC100V のラインから、AVR 出力の電圧は AC200V のラインから、夫々、トランスで降圧し、デジタルマルチメーターを用いて測定した。測定したデータはシリアル及び GP-IB インターフェイスを介してパソコンに取り込んだ。

当初、AVR の電圧は、クライストロンパルスモジュレータの LV を入れた状態で測定していたが、その後、問題となる電圧変動は、負荷の有無にほとんど依存しないことが分ったので、パルスモジュレータの LV は入れず、AVR の出力のみ監視することにした。この結果、無人で監視することが可能になり、継続的な監視体制ができた。

電圧の監視は、4月18日から開始し、4月30日夜からは昼夜連続で行っている。

3. 変動パターン

変動は時間帯により、平日か休日かにより、また

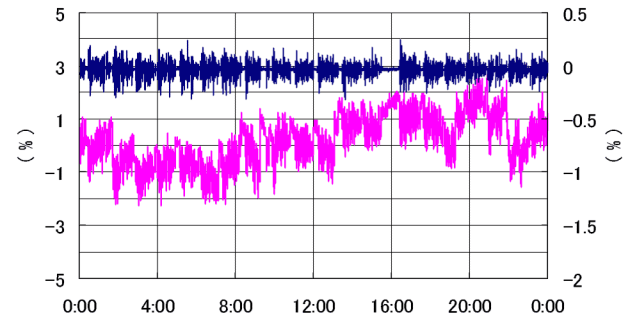


図2：休日の電源変動パターン、上が AVR 出力 (右側目盛り)、下が商用電源。

¹ E-mail: hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp

月によっても変わっている。図1に典型的な平日の変動パターンを示す。この図から商用電源は1日に5%程度変動することが分る。ゆっくりした変動と、急激な変動、小刻みな変動が組み合わされている。しかし、顕著なのは午前9時と午後9時を境に変動の仕方が変わることである。午後9時以降は小刻みな変動の振幅が昼間に比べて2倍から3倍に増えている。昼間の商用電源の変動に対して、AVRの出力の変動は、0.05%以下に抑えられているが、夜間の変動に対しては0.5%程度まで増大している（それでもAVRのスペックはほぼ満足している）。なお、午前10時頃に現れているAVRの段差は、パルスモジュレーターのLV投入によるものである。本報告書では、AVRの出力電圧変動が0.05%のときを安定時、0.5%の時を変動時と呼ぶことにする。

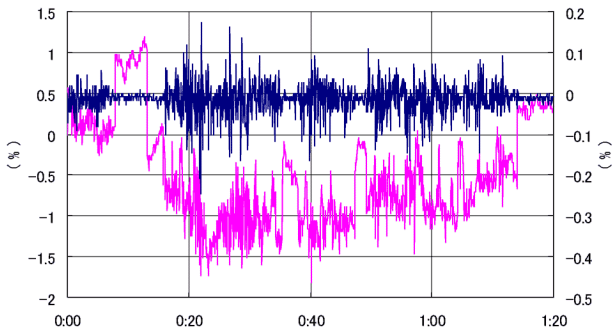
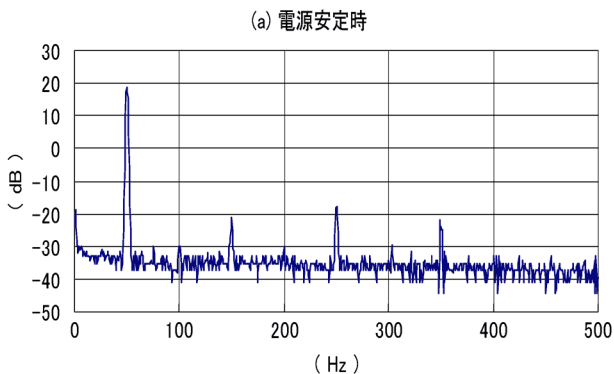


図3：電源変動の基本パターン、周期約1時間。

5月の連休に入って、すこし変化が見られた。図2に示すように、終日、平日の夜間と同じ変動をする日が現れた。5月1日は平日のパターン、2日は終日、3日は平日のパターン、3日の夜から6日の夕方までこの変動が続いた後、6日の夜以降、パタリとこの現象が途絶えた。東京電力の資料によると、4月は電力需要の谷間にあたるので、それと関連する一時的な現象であったと思われる。ところが、5月30日午前0時頃から再びこの現象が現れるようになり、現在に至っている。4月中は土日のデータ無いので何ともいえないが、6月になってからは、平日



は図1のパターン、土日は終日図2のパターンが現れている。6月は祝日が無いので、そのときどうなるかは確認していない。この変動を、もう少し詳しく見ると、図3のような約1時間持続するパターンが繰り返し現れていることが分る。当施設の位置する船橋市は近隣にいくつもの工業団地があり、電源変動の要因には事欠かないが、このはっきりしたパターンは単一のソースを意味していると思われる。それが何であるかは不明である。

4. スペクトル解析

電源変動を除去するために挿入したAVRの仕様を表1に示す、型番SNAC-1Kはサイラトロン社の電源を安定化するために使用していたもの、TAR3002-3はこの事態が発生したため、パルスモジュレーターの低圧部分全体を安定化するために導入したもので、

表1：AVRの概略仕様

	SNAC-1K	TAR3002-3
型	磁気増幅器型	サイリスタ型
定格電圧(V)	200	200
変動幅(%)	±0.5	±0.4
応答速度(Sec)	< 0.3	< 0.08~0.15
$\Delta V = 30V$		

この使用時はSNAC-1Kは外している。結果的には、どちらのAVRを使用しても同じであった。応答速度のカタログ値は0.08~0.15secとあるから、これより早い変動が現れていると思われる。これを確認するためにスペクトル解析を行った。ソニーテクトロニクス社製のオシロスコープTDS3035とそれに付属しているFFTモジュールを用いた。DCから500Hzまでの部分を抜き出したものが、図4(a),(b)である。変動時、2次と4次の高調波は、現れるときと現れないときがあるが、5次の高調波は安定時に比べて常に10dB程度大きくなっている。また、3次の高調波はあまり変わらない。すなわち、この変動は主に5次の高調波歪であると考えられる。

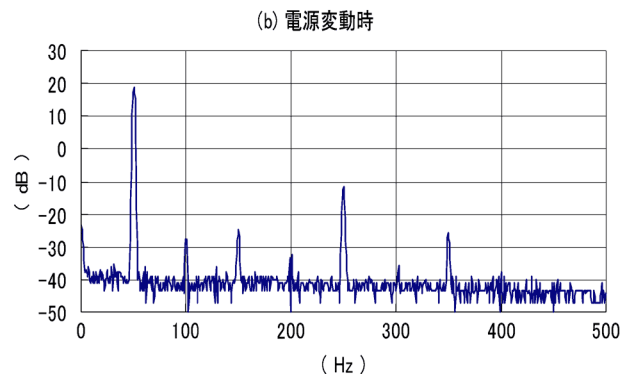


図4：商用電源の安定時のスペクトル(a)、変動時のスペクトル(b)、変動時は5次の高調波の成分が増加する。

5. ビームへの影響

電源変動の影響が電子ビームの変動として現れてくる経路としては、収束系と RF 系が考えられる。収束系の直流電源は、無論安定化されており、また、磁極を持つ電磁石は早い変化には追従しないと考えられるので、問題となるとすれば、ステアリングコイルである。これは、設計当時考えていたのよりかなり少ない(数分の1)電流値で使われているので、安定度が不足している可能性はある。RF 系はシグナルジェネレーターからクライストロンの出力に至るまで、あらゆるステージで電源変動の影響を被る恐れがある。それだけに全て電源は安定化されている。唯一、安定化されていなかったのはパルスモジュレーターであったが、これも前期のように、1998 年の段階で AVR を挿入することにより安定化した^[1]。しかし、今回観測された変動は AVR で完全には除去されていないので、パルスモジュレータが元凶である可能性は高いと思われる。

クライストロンに印加するパルス電圧と、クライストロンの RF 出力を、同時に測定した。図 5 にその一例を示す。パルス電圧はパルストランスタンク内のディバイダーの電圧をオシロスコープを使って観測した。クライストロン出力は、クライストロン直後の導波管に設けられたモニター用方向性結合器にクリスタル検波器を取り付け、その電圧を同じオシロスコープにより観測した。例によって午後 9 時から周期の短い変動が始まっている。パルス電圧の変動は、安定時には 0.3% 程度だが、変動時には 0.5% 以上になっている。またクライストロンの出力を見ると、これはクリスタル検波器の出力電圧であるが、安定時でも周期の短い変動がノイズを含めて 0.5% 程度、明らかに電源変動の影響と分る周期の長い変動が 1% 程度あることがわかる。加速電圧に換算すると、前者が 0.4%、後者が 0.8% ほどになる。これが、不安定時には、周期の長い変動は同程度だが、周期に短い変動が倍以上に大きくなっている。ところが、クライストロン 2 号機では、変動時のほうがいくらか大きくなっているが、大差が無い。クライストロンの印加電圧と出力振幅の関係は効率が変わらなけれ

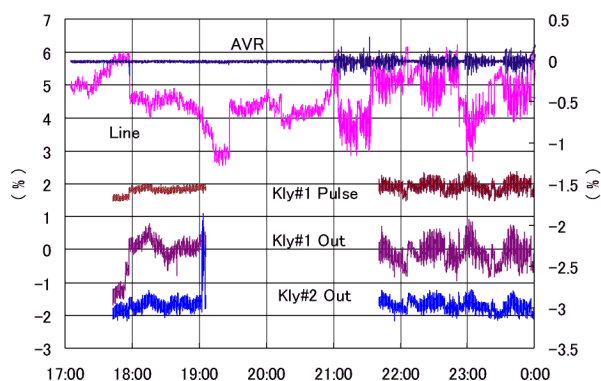


図 5 : 電源変動とパルス電圧、クライストロン出力。上から順に、AVR 出力(右目盛り)、商用電源電圧、1 号機クライストロンパルス電圧、1 号機クライストロン出力、2 号機クライストロン出力。

ば 5/4 乗に比例する。クライストロン 1 号機のパルス電圧変動に対する加速電圧変動の予想値と実測値を表 2 に示す。1 号機の系統では、パルス電圧変動から予想される加速電圧変動に対して、実際はその 2 倍の大きさで変動している。これはクライストロンの動作点問題かも知れず、調査が必要である。一方、2 号機では、ここにはパルス電圧のデータはのせていないが、ほぼ 1 号機と同じ動きをし、加速電圧変動はパルス電圧変動から予想される値と矛盾しない。パルスモジュレーターの AC200V の系統はすべて

表 2 : クライストロン 1 号機のパルス電圧変動と、加速電圧との関係。

	安定時	変動時
Pulse 電圧変動 (%)	0.3	0.5
加速電圧変動 予想値 (%)	0.4	0.6
測定値 (%)	0.8	1.5

AVR を通して給電するようにした。従って、パルスモジュレーター内にパルス電圧を変動させる原因があるのならば、その変動のパターンは全て、AVR の変動のパターンに似なければならない。ところが観測されているのは、むしろ商用電源変動に似たパターンである。他の要因としては、高圧 DC 電源が考えられるが、これは、 10^4 台で安定化されているので、原因とは考えにくい。

いずれにしても、加速電圧が 1% も変動すれば、当然位相も変動するので、運動量幅が 1% に設定されたアナライザーを電子ビームが安定に通過することは難しい。ビーム電流が不安定になるのは当然である。

6. まとめ

平日夜間及び、休日に比較的周波数の高い電圧変動が、商用電源に現れている。この時間帯はエネルギー幅 1% のアナライザーを通過するビーム電流はきわめて不安定になる。安定時でも、クライストロンパルス電圧が 0.3% 程度商用電源の変動に追従して変動する。このパルス電圧変動に起因する考えられる加速電圧の変動が観測された。その変動分は 0.4% と見積もられる。しかし 1 号機ではその倍程度の変動が見られた。電子ビームの安定化は FEL 発振維持のためには不可欠であるため、不安定性の原因究明とその解決は今後引き続き行っていかなければならない課題である。

参考文献

- [1] 佐藤 勇、他、“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” Proceedings of this meeting.
- [2] 横山和枝、他、“クライストロンドライブ系の位相安定化”, Proceedings of this meeting.
- [3] K.Hayakawa, et. al., "TEST OPERATION OF THE PULSE MODULATOR OF THE 125MeV LINAC AT NIHON UNIVERSITY", Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan. p41

LEBRA におけるビームダンプの放射線遮蔽効果の評価

猪川弘康^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、佐藤和男^{B)}、早川 建^{B)}、田中俊成^{B)}、早川恭史^{B)}、
石渡謙一郎^{A)}、中村吉宏^{A)}、中澤裕之^{A)}、横山和枝^{A)}、菅野浩一^{A)}
境 武志^{A)}、中尾圭佐^{A)}、橋本英子^{A)}、藤岡一雅^{A)}、村上琢哉^{A)}

^{A)} 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

^{B)} 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

概要

高エネルギー電子加速器では、ビームダンプで放射線が発生するため遮蔽が重要である。現在、LEBRA で使用しているビームダンプでは、 γ 線、中性子の遮蔽が不十分であるため、放射線遮蔽強化を行う必要がある。そこでビームダンプ内のグラフィットを増強したときの放射線遮蔽効果を調べるために、EGS4 (Electron Gamma Shower Version4) ^[1]を用い、シミュレーション計算を行った。その結果、グラフィットの厚さを 20cm にすれば、銅からの巨大共鳴が発生する中性子の確率が低くなると見積もられた。

1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用研究施設 (LEBRA) では、125MeV 電子線形加速器の高性能化を試みており、その結果として 2001 年 5 月に自由電子レーザー (FEL) の発振するに至った^[2]。また、パラメトリック X 線放射 (PXR) 用のビームラインも完成し、今後実験が行われる予定である^[3]。今後は FEL・PXR の実用化に向け加速器本体以外の周辺機器の性能改善、その他の問題解決も行っていく必要がある。

LEBRA では図 1 に示すように加速器室と実験室が隣接している。そのため、放射線遮蔽は、安全に利用実験ができるという観点から重要な問題である。リニアックでは、45 度偏向電磁石の直後にあるスリットと、ビームダンプが主な放射線源と考えられる。ビームダンプでは、前方方向に強い制動放射線と、制動放射線の光核反応による光中性子が生成されるため、限られたスペースの中で、有効的な放射線遮蔽強化を行う必要がある。本発表では、物質中での電磁カスケードのシミュレーションを行う EGS4 を用いて、ビームダンプで生成される放射線の遮蔽計算を行った。

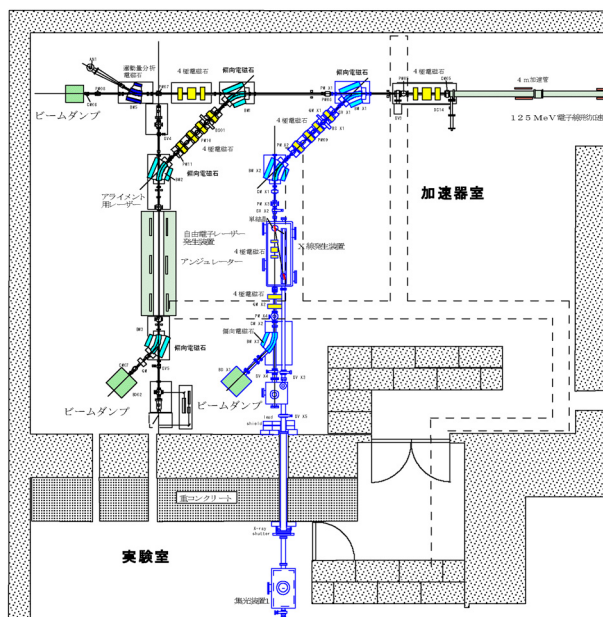


図 1：電子線利用研究施設の配置図

2. LEBRA 用ビームダンプ

LEBRA では、図 2 のようなビームダンプが、加速器の直線部、FEL、PXR 用ビームラインの各々装置向けに計 3 つ設置されている。ビームダンプ内部は、主にグラフィット 5cm、銅 10cm、鉛 15cm で電子と γ 線を遮蔽するように構成されているが、現状では γ 線、中性子の遮蔽に関しては考慮されておらず、不十分である。特に現状の問題点として、スペース上の制約があるため、図 3 のような形での遮蔽強化を検討した。しかし、コストや工事の手間を抑えるために、グラフィットの厚さを 5cm から最大の厚さ 20cm への増強を検討し、その効果を見積もることにした。

¹ E-mail: hiroyasu@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp



図2：PXR用ビームダンプの写真

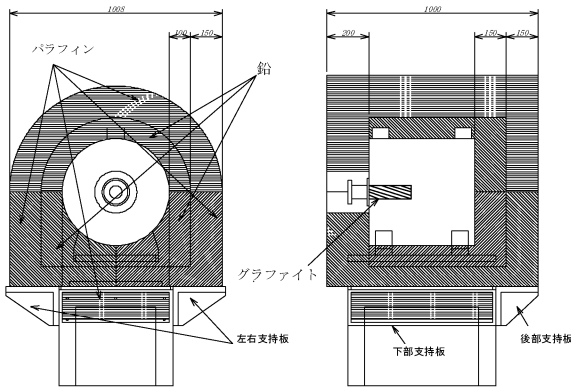


図3：ビームダンプの遮蔽強化概念図

3. ビームダンプ中の電磁カスケード計算

今回は、高エネルギー加速器研究機構が開発、配布しているPC版EGS4を用いて、電子がビームダンプ内の物質中を通過した際の電子、光子のエネルギー等を計算した。

ここでは計算条件として、電子の個数を10,000個、入射エネルギーを100MeVに設定し、形状はグラファイト、銅、鉛の半無限平板として考えた。

そこで現在の5cmの場合と、20cmに増強した場合の2つケースについてシミュレーションした。また、ビームダンプでは、前方方向の放射線が強いことから、今回の計算では後方散乱を無視し、前方散乱のみ評価した。

4. 計算結果と考察

今回の計算で最も考慮しなければならない点は、グラファイトの厚さを増強させた場合の遮蔽効果を確認することである。

4.1 γ 線について

LEBRA用ビームダンプで、グラファイトの厚さを増強させた場合の γ 線の遮蔽効果を考える。始めに、グラファイトの厚さ5cm、20cmでの透過した電子及び光子のエネルギー分布の計算結果を図4に示す。グラファイト5cmでは、ほぼ100%の電子が通過するが、グラファイト20cmにした場合は、約30%の電子のみが通過することが分かった。これは、グラファイトを厚くすると、銅に到達する前に放射損失を起し、大部分のエネルギーを失うためだと考えられる。また、グラファイト20cmと5cmでは、光子の発生数は増えるが、エネルギーが高エネルギー側から低エネルギー側に移行する。

これらの計算結果を考慮した上で、電子と光子が銅を通過し、最終的に鉛においてどの程度、放射線を発生するのか計算した。その結果を図5、6に示す。最終的には、外部の鉛で遮蔽を行う予定である。グラファイト5cmでは、外壁には15cmの鉛が必要であったが、グラファイト20cmでは、10cm程度で遮蔽できることが計算から明らかになった。

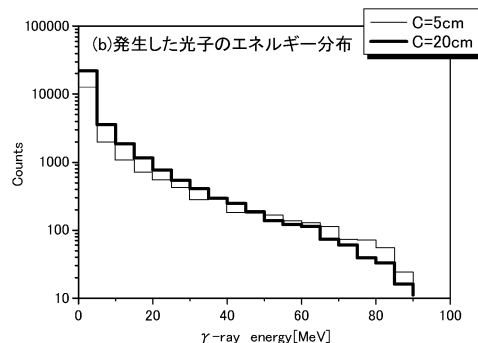
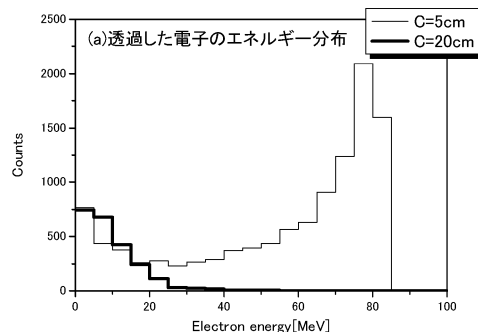


図4：グラファイトの電子と光子のエネルギー分布の比較

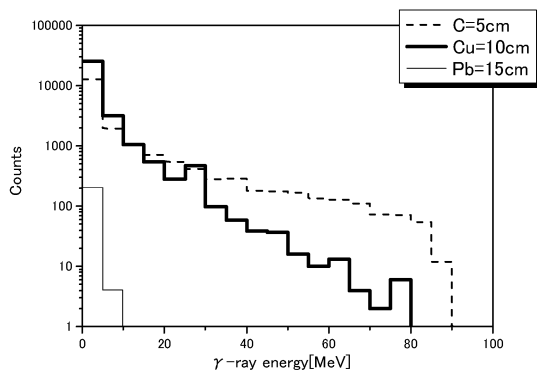


図5 : C=5cm のとき、ビームダンプ中の各層から発生する光子のエネルギー分布

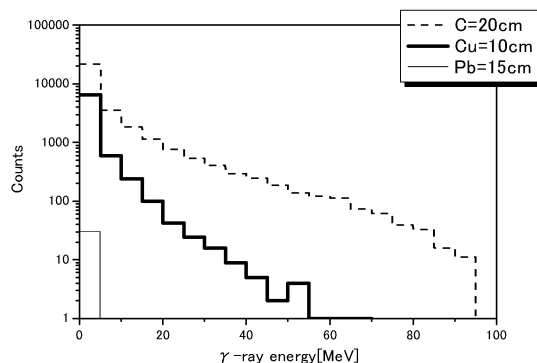


図6 : C=20cm のとき、ビームダンプ中の各層ら発生する光子のエネルギー分布

4.2 中性子について

LEBRA 用ビームダンプでは、巨大共鳴 (Giant Resonance) により中性子が生成されると考えられる^[4]。ビームダンプ中では、中性子の発生源は銅と鉛と考えられるが、EGS4 では、中性子の計算ができないため、光子の発生量で近似的に見積もった。これらの結果を表1に示す。

銅では、電子が入射して発生するγ線とグラファイトからの光子が原因で生成される中性子を考慮しなければならない。そこで、1mm 厚の銅のターゲットでの光子の発生量を求め、グラファイトの厚さが5cm、20cm の厚さになるよう整数倍し、光子数を近似的に求めた。巨大共鳴の起きる光子のエネルギーである 10MeV から 30MeV の範囲にある光子数は、厚さ 5cm のときでは、厚さ 20cm のときに比べ、極端に多く、確率的に高く中性子が発生すると推測される。しかし、グラファイトから透過してくる光子では、厚さを増強させると増える。その結果、20cm

の場合で発生する中性子が増えると推測される。鉛では銅からの電子の透過がないため、銅から発生する光子のみで見積もった。その結果、中性子の発生は電子が銅に当たったときに発生するγ線の影響が大きいことが分かった。以上から、グラファイトを増強することにより、中性子の発生する確率を抑えられると推測できる。

表1 : 銅・鉛から発生する光子数
(光子エネルギー : 10MeV~30MeV)

	C=5cm	C=20cm
銅内部で発生した光子数	48060	4220
グラファイトから透過してくる光子数	2748	4313
銅から透過してくる光子数	2545	1357

5. まとめ

現在のビームダンプでは、遮蔽が不十分なことから、グラファイトの厚さ 5cm からスペース的に増強可能な厚さ 20cm にすることを検討し、その効果を見積もった。グラファイトが薄いと、電子が銅でγ線を発生させるため、中性子の発生数に影響を及ぼすと考えられる。γ線を遮蔽するためには、グラファイト 5cm の場合、外壁の鉛は 15cm の厚さが必要だが、グラファイト 20cm では、およそ 10cm の鉛で遮蔽できることが計算から明らかになった。また、グラファイトを厚くし、電子が銅に到達する前に放射損失を起こさせ、中性子の発生数を少なくできる。よって、グラファイトの厚さを増強することは、放射線遮蔽対策だけでなく、スペース的な制約やコストの問題も同時に解決できる。今後は、さらに粒子数を増やし計算の精度を高めると共に、実際に放射線測定を行い、ビームダンプの遮蔽効果を調べていく。

参考文献

- [1] W.R.Nelson, H.Hirayama and D.W.O. Rogers, "THE EGS4 CODE SYSTEM", SLAC-REPORT 265(1985)
- [2] I.Sato, et al., "日本大学電子線利用研究施設の高度化と自由電子レーザーについて", Proceedings of 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug.1-3, 2001
- [3] Y.Hayakawa, et al, "日大パラメトリック X 線発生装置の概要", Proceedings of 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug.1-3, 2001
- [4] 中村尚司, "放射線物理と加速器安全の工学", 地人図書

電子線利用研究施設における放射線監視システムの概要

中尾圭佐^{1,A)}、佐藤勇^{B)}、佐藤和男^{B)}、早川建^{B)}、田中俊成^{B)}、早川恭史^{B)}、横山和枝^{A)}、菅野浩一^{A)}、
境武志^{A)}、石渡謙一郎^{A)}、猪川弘康^{A)}、中村吉宏^{A)}、橋本英子^{A)}、藤岡一雅^{A)}、村上琢哉^{A)}

^{A)} 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 日本大学工学部船橋校舎

^{B)} 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 日本大学工学部船橋校舎

概要

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、屋外にある3箇所の百葉箱の中に、NaI シンチレーターと BF₃ 検出器を設置し常時環境中のガンマ線と速中性子の計数を監視し、記録するシステムを構築した。これらの検出器のデータは Web で公開され、スタッフ、ユーザ、近隣住民をはじめ、誰でも自由に閲覧することができる。

また 2001 年 6 月からは、検出器の信号にビームに同期したゲートをかけることで、ビームが原因であるガンマ線の計数も測定できるようになった。これによるとビームが原因であるガンマ線は、環境放射線の 0.1% のオーダーであり、建屋による放射線遮蔽は十分であると考えられる。

1. はじめに

加速器施設のように放射線を発生する施設では、放射線を環境中に漏出させないよう最大限の努力をする義務がある。また近年の原子力関連施設における放射能漏れ事故を発端として、近隣住民だけでなく国民的規模で放射線に対する関心と不安が高まっている。

このような中で環境放射線を常時監視し、そのデータを Web で公開するシステムを構築した。

2. ハードウェア構成

ビームダンプ室の上のエリアモニターには NaI シンチレーションカウンタ (NaI No.1) が、加速器本体室の上に BF₃ 検出器 (BF₃ No.1) が、敷地の境界にあるエリアモニターには両方 (NaI/BF₃ No.2) が設置されている。エリアモニターの位置を図 1 及び 2 に示す。

NaI シンチレーターは直径 2 インチ、長さ 2 インチの円筒形で、浜松ホトニクス社製光電子増倍管が接続され、BF₃ 検出器は有効直径 2 インチ、長さ 8.5 インチで、減速材に 100mm 厚のポリエチレンを使っている。

検出器からの信号は、増幅後波高分析されスケーラーでカウントされる。スケーラーは RS232C インターフェースを持っており、このインターフェースを介して、PC にデータを取り込んでいる。検出器以

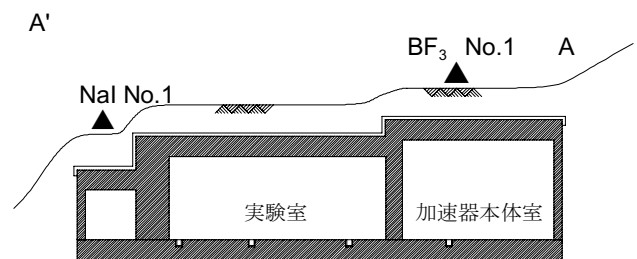


図 1：電子線利用研究施設断面図

▲ NaI/BF₃ No.2

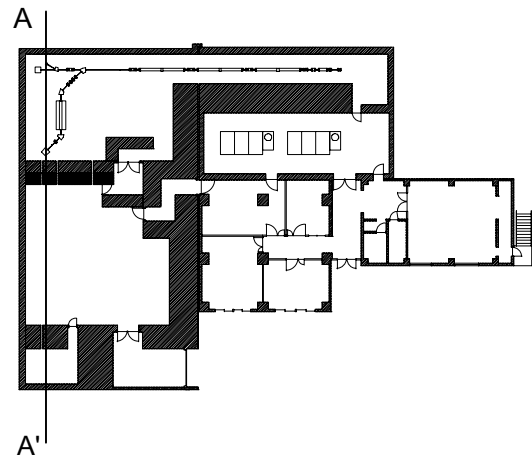


図 2：電子線利用研究施設平面図

外の機器は放射線管理室のラックにマウントされている。

さらに 2001 年 6 月からは、NaI シンチレーターの出力信号にビームトリガに同期したゲートをかけることで、ビームが原因であるガンマ粒子の計数を測定できるようになった。

また ALOKA 社製放射線モニターシステム MSR-600 を用いて、実験室のガンマ線線量当量率を

¹ E-mail: nakao@lebra.nihon-u.ac.jp

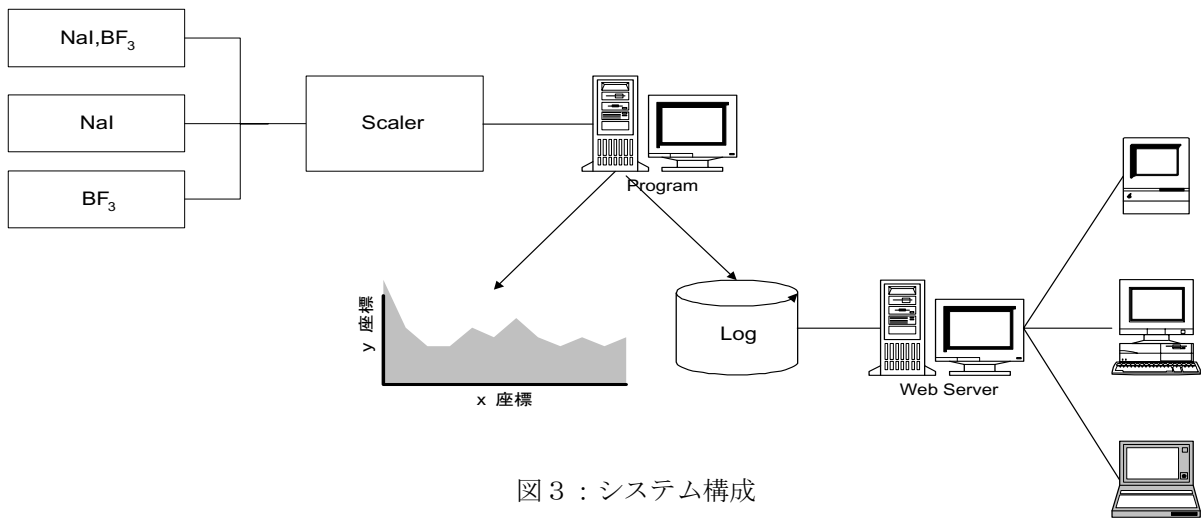


図 3 : システム構成

監視している。これは外部との制御用インターフェースを持たないため、ここで述べる放射線監視システムとは完全に独立して動作している。

3. ソフトウェア構成

ソフトウェア部分は、1分毎にスケーラーと通信しデータの取り込み、カウンタのリセット等スケーラーの制御とデータの保存を行い、各データの時間変化を画面に表示する。

データはカンマ区切りテキスト形式で保存している。1日分のデータ容量は10kByte程度で、1日1ファイルに格納している。

このプログラムは、Microsoft Visual C++で作成し、Microsoft Windows 2000で安定に動作している。

またこのPCでWebサーバが動作しており、このWebサーバ上で動作するCGIによって、前述の画面表示と同等の情報を得ることができる。このCGIはフリーソフトGnuplot²を用いてグラフを生成している。

Webブラウザからリクエストがあると、CGIスクリプトはGnuplotを起動し観測データを入力する。Gnuplotはグラフを画像ファイルとして出力しCGIスクリプトはその画像を表示するHTMLをブラウザに返す。Webブラウザには、各測定器の最新の測定値と、過去6時間分の時間変化が表示される。このCGIを定期的呼び出すことで、準リアルタイムの監視をWebにアクセスできればどこでも行うことができる。システム構成を図3に示す。

4. 観測データ

加速器運転中の環境放射線のガンマ線計数と、ビームに同期したガンマ線計数の時間変化を図4に示す。これからわかるように、ビームが原因の放射線は環境放射線の0.1%のオーダーである。(エネルギー85MeV、ビーム電流155mA、パルス幅20 μ sec、繰り返し2Hz)

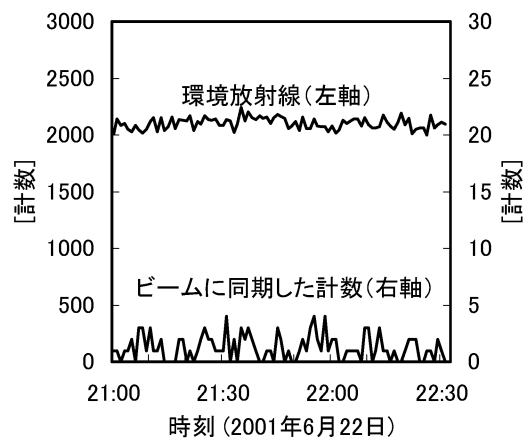


図 4 : 環境放射線と同期粒子計数の比較

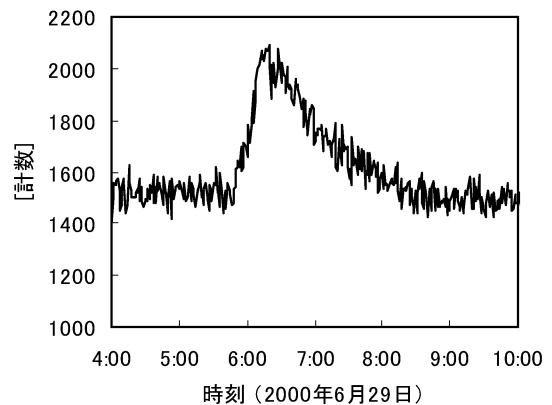


図 5 : 降雨時のガンマ線計数の変化

² <http://www.gnuplot.org>

また降雨時に ^{222}Rn の娘核子の崩壊による環境放射線の増加がよく知られている。降雨時のガンマ線計数の時間変化を図5に示す。これによるとピークで40%の増加が見られる。

これらのデータを比較すると、降雨によるガンマ線計数増加量が、ビームによる同期したそれよりも圧倒的に大きい。よって建屋による放射線遮蔽は十分であると考ええる。

現在ビーム電流をオシロスコープのビーム波形から求め、ビームに同期した計数との相関を調査している。しかし同期粒子の計数が少ないため、相関を求めるに十分なデータがまだ得られていない。

5. 問題点

現在のシステムには、環境放射線の大きな変化が起きた時に警告を発するアラーム機能がない。聴覚や視覚に訴えるアラームの他、インターロックで運転を緊急停止させるといったことが考えられる。降雨時の環境放射線の増加を考慮すると、閾値は降水

量に応じて変化する。よって降水量とガンマ線計数の相関を調べる必要がある。

6. まとめ

日本大学電子線利用研究施設では、環境中のガンマ線計数と速中性子の計数を常時モニターし、Webで公開するシステムを構築した。降雨時の計数の増加と運転時の計数の増加を比較することで、建屋による放射線遮蔽の効果は十分であることがわかった。

今後はビーム電流、降水量とガンマ線計数の相関を系統的に調べ、アラーム機能を付加する予定である。

非破壊型ビームポジションモニターの開発研究

石渡 謙一郎^{1,A)}、田中 俊成^{B)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、早川 恭史^{B)}、佐藤 和男^{B)}、
猪川 弘康^{A)}、中村 吉宏^{A)}、菅野 浩一^{A)}、境 武志^{A)}、横山 和枝^{A)}、
中澤 裕之^{A)}、藤岡 一雅^{A)}、橋本 英子^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、村上 琢哉^{A)}

^{A)} 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

^{B)} 日本大学原子力研究所

〒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

概要

FEL 用ビームラインのアンジュレーターの前後に新しく製作した非破壊型のビーム位置モニターを設置した。これにより実験中にビームを遮ることなく常時モニターが可能になる。そこで、ビーム位置を検出する為に、実際に 125MeV 電子線形加速器のビームを使用して位置検出試験をおこなった。位置検出はステアリング電磁石を用い、電子ビームの軌道を変化させ、ビーム位置モニターの電極から出力される信号電圧をオシロスコープで測定し、それを検出 RF 電力に変換し、各電力の差と和の比により求めた。

1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用研究施設 (LEBRA) では、2001 年 5 月に赤外自由電子レーザーの発振に成功し¹⁾、大強度・波長可変の自由電子レーザーを発生させるために 125MeV 電子線形加速器の高性能化を進めている。レーザーを効率よく発生させるには光共振器中を通過する電子ビーム軌道の高精度の制御が重要になる。

以前に使用していた破壊型のビームプロファイルモニターでは、アンジュレーターの永久磁石を放射化して性能を低下させる恐れがあり使用をやめたため、FEL 用ビームラインにはビーム位置をモニターできるものがなかった。そこで、電子ビームが誘起するマイクロ波をダクト中に挿入したアンテナで検波する、電子ビームを遮ることのない非破壊型のビーム位置モニター (BPM) を 3 台製作した。この BPM をアンジュレーターの上流側と下流側に設置し、下流側の BPM で位置検出特性の試験を行ったので、その報告をする。

2. BPM の構造

BPM については高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で 557MHz のマイクロ波を検波する BPM が既に開発されており²⁾、これを参考にして製作した。

LEBRA の電子線形加速器では加速周波数 2856MHz のマイクロ波と同周期でバンチしたビームが BPM を通過するので、2856MHz のマイクロ波を検波できるように BPM の寸法を決めた。

BPM の電極はストリップライン型で、同軸ケーブルの特性インピーダンス 50Ω に一致するように、電極外径とモニター内径の距離：電極間距離を 2.6mm と決めた²⁾。また、電極長 L は、加速周波数 2856MHz の $\lambda/4$ の長さで共振するので $\lambda/4 \sim 26.24\text{mm}$ より、 $L=26.25\text{mm}$ と決定した。主な寸法を表 1 に示す。

また、フランジは ICF70 のステンレス製で、電極は SUS304 であり、片側をダクトに溶接し、他端をコネクタピンに溶接してある。信号はセラミックス絶縁型 SMA コネクターで出力される。図 1 に BPM の構造、図 2 に BPM の外観を示す。

表 1 : BPM 寸法

全長	85mm
モニター外径	40mm
モニター内径	33mm
電極長	26.25mm
電極内径	25.8mm
電極厚	1mm
電極開口角	45°

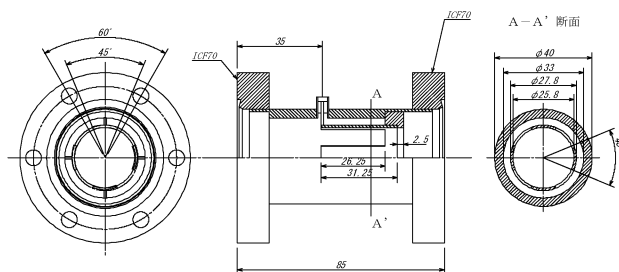


図 1 : BPM の構造

¹⁾ E-mail: ishiwata@lebra.nihon-u.ac.jp



図 2 : BPM の外観

3. BPM の位置検出試験

3.1 測定方法

製作した BPM のうち 2 台は FEL ビームラインのアンジュレーターの上流側と下流側にそれぞれ設置した(図 3)。BPM の位置検出試験では実際に電子ビームを通し下流側の BPM を使って以下のような測定を行った。

まず、電子ビームをほぼ BPM の中央を通過するように調節する。そして、電子ビームをアンジュレーターの上流側に設置されているステアリング電磁石 (STy14) の垂直方向偏向用コイルの励磁電流を変化させることにより、ビーム軌道を垂直方向に変化させ、それをアンジュレーター下流側の BPM で垂直方向に配置した電極から得られる信号を測定した。

電極からの信号は、850cm の長さの RG-55/U 高周波同軸ケーブルを用いて、加速器本体室から実験室まで運び、アッテネーターを通し、クリスタル検波器 (WILTRON 製, 73N50(NEG), 100kHz TO 4GHz) で検波し、オシロスコープで電圧を読み取った(図 4)。

検波器の入出力特性は、あらかじめ測定しておき、検波電圧を RF 電力に換算した。この換算方法は Microsoft Excel の多項式近似曲線を用い、修正を加えた。このときの誤差は 2% 以内である。

また、ケーブル及びアッテネーターによる減衰量が上側と下側で若干異なるので、これを考慮し、電極からの直接の出力に換算した。ケーブルによる減衰量はケーブルの形状により異なり、 $8.04\text{dB} \pm 0.02\text{dB}$ となり、0.5% 以内の誤差が生じている。

3.2 測定結果

測定は、ビームエネルギー 86.8MeV、パルス幅 20 μs 、繰り返し 2Hz で行い、3 回測定した。図 5 に STy14 の励磁電流を 4A にしたときのオシロスコープの波形を示す。また、図 6 に各電極からの出力電力と STy14 に流した励磁電流との関係を示す。図 6 において、ビームが安定していない為にかんがいのばらつきが生じた。また、STy14 を $\pm 4\text{A}$ 以上で励磁すると、電力への換算における誤差が 1% を超える。また、STy14 に $\pm 5\text{A}$ 以上流すとビームが下流のビームライ

ン途中でダクトにあたるようになることがビームダンプで測定していたビーム電流からわかった。

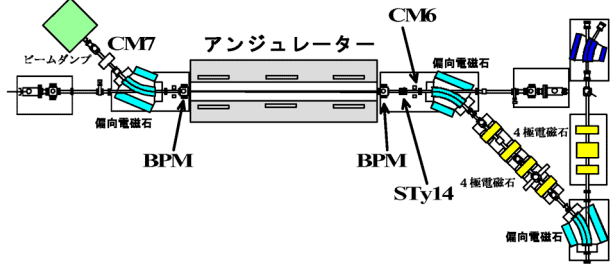


図 3 : FEL ビームライン

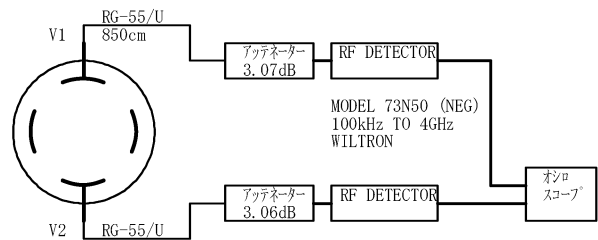


図 4 : 測定方法

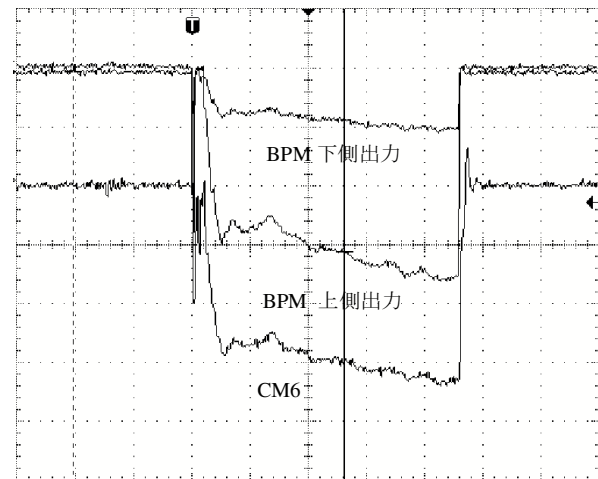


図 5 : オシロスコープ出力 (STy14 : 4A の時)

スケール : 上側出力 : 20mV/div、下側出力 : 10mV/div

CM6 : 20mA/div

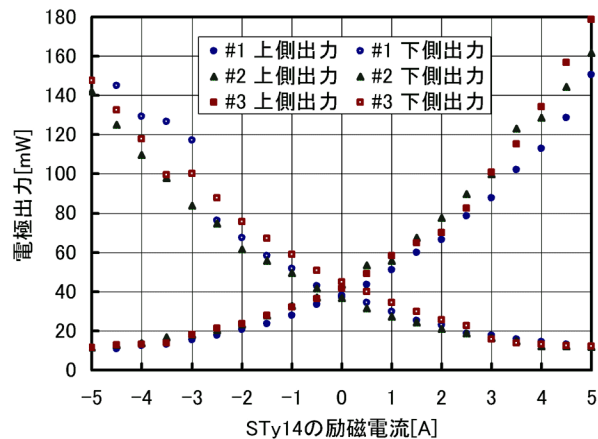


図 6 : 各電極の出力電力

3.3 ビーム位置の評価

BPM 中心から垂直方向のビームのずれ y は(1)式で見積もることが出来る^[2]。

$$y = k_y \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \quad (1)$$

ここで、 k_y は位置感度係数、 P_1 、 P_2 は各電極からの出力電力である。和と差の比と STy14 に流した励磁電流との関係を図 7 に示す。

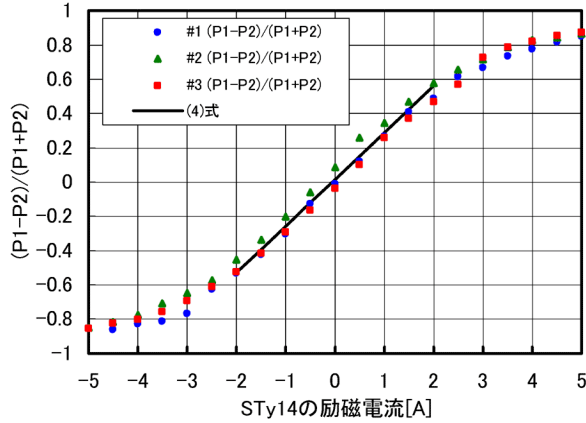


図 7 : STy14 の励磁電流と出力電力の和・差の比

ステアリング電磁石 STy14 によるビーム軌道の変化と BPM の電極からの出力電圧の関係を考える。

まず、STy14 によって曲げられたビームの、BPM における垂直方向のビームの位置 y [mm] はステアリング電磁石で作られる磁場から(2)式で見積もることが出来る。

$$y = \frac{c\mu_0 l N L}{gE} I \quad (2)$$

ただし、 c : 光速、 μ_0 : 真空の透磁率、 l : ステアリング電磁石の有効長(=6cm)、 N : コイルの巻き数(=2×40)、 g : ギャップ(=5cm)、 L : STy14 と BPM 間の距離(=3m)、 E : ビームエネルギー(=86.8MeV)、 I : STy14 の励磁電流である。このとき、

$$\frac{c\mu_0 l N L}{gE} = 1.25 \text{ mm/A} \quad (3)$$

となる。ただし、 l は磁極長をそのまま採用している。

次に、図 7 において、STy14 の励磁電流 -1.5A ~ 1.5A の間で和と差の比の平均を取り、一次式で近似すると、

$$\frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = 0.2727I + 0.0151 \quad (4)$$

となる。

このことから、(3)式と(4)式の傾きのみ考慮に入れて、ビームの位置 y [mm] は、BPM 中心からのずれが 1.5mm 以内のとき、

$$y = 4.58 \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \text{ mm} \quad (5)$$

のように表されると考えられる。

一方、各電極からの出力電力は近似的に(6)式で見積もることが出来る^[2]。

$$P(\delta, \theta, \phi) \propto \left(\frac{R^2 - \delta^2}{R^2 + \delta^2 - 2R\delta \cos(\phi - \theta)} \right)^2 \quad (6)$$

ただし、 R : BPM の中心から電極までの距離(=12.9mm)、 δ : BPM の中心からビームまでの距離である。しかし、今回は望遠鏡を用いたビームモニター^[3]では、水平方向へのずれは見られなかった為、ビームの水平方向のずれを考慮しないことにし、 δ は y に等しいと考えた。

図 8 は中心からの距離と出力電力の和と差の比の関係を示したもので、実験値の平均と(6)式によるものの 2 つが描かれている。

実験値と(6)式から導き出した結果との違いの原因として、ステアリング電磁石の有効長を磁極長に等しいと仮定したが磁場測定で確かめられていないので正しくない値を使っていることが考えられる。

実験値のビームの位置 y を 0.73 倍させることにより、 $y = \pm 3\text{mm}$ の範囲でほぼ (6)式による結果と一致させることができる。

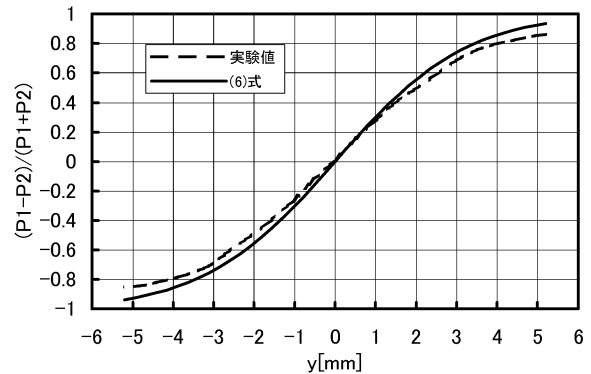


図 8 : 中心からの距離 y と出力電力の和・差の比

4. まとめと今後の課題

今回の測定では、元々検出 RF とビーム位置との関係を較正していなかったためビーム位置の正確な計測はできなかったが、ビーム位置の変化による検出 RF の変化が概ね計算から予想される感度で得られることが確認できた。今後、ステアリング電磁石の磁場測定を行い励磁電流に対するビーム軌道の変位を精度良く求める必要がある。また、テストベンチにおいて BPM にワイヤーを通し、RF を供給してアンテナの検出 RF とビーム位置の関係を較正するための測定が必要である。

参考文献

- [1] 佐藤勇 他, “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”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [2] I.Sato, et al., “Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB”, KEK Report 95-18, March, 1996, A p286-p303
- [3] 田中俊成 他, “アンジュレーター光による FEL ビームラインのビーム診断”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001

IMPROVEMENT OF THE LONG PULSE OPERATION OF THE FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY

T.Tanaka, K.Hayakawa, I.Sato, K.Sato, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, K.Kanno, T.Sakai
 Atomic Energy Research Institute, Nihon University, Funabashi, 274-8501, JAPAN
 S.Fukuda, S.Anami, S.Ohsawa, A.Enomoto
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, 305-0801, JAPAN

Abstract

Some improvements to the high power RF system of the 125 MeV linac have been performed to realize a stable long pulse operation of the linac. The breakdown of the klystron RF window occurred in 8 klystrons at early phase of the linac operation. However, the problem has been avoided by the improvement to the vacuum conductance around the RF windows and by a careful conditioning. The Mitsubishi PV3030 type klystrons, which were moved from KEK, have been operated successfully at the peak output RF power of 20 MW, the RF pulse width of 20 μ s and the repetition rate of 12.5 Hz.

1 INTRODUCTION

The 125MeV FEL linac at LEBRA (Laboratory for Electron Beam Research and Application) in Nihon University has been operated since 1997[1]. The 2856 MHz RF has been supplied with two Mitsubishi PV3030 klystrons. Difficulties in the high power RF system, the dielectric breakdown around the heater transformers in the klystron assembly tanks and the breakdown of the klystron output RF windows, were quite serious problems in accelerating a long pulse electron beam. The specifications required of the high power RF from each klystron are the peak power of 20 MW and the pulse width of 20 μ s for infrared to visible region FEL in LEBRA.

Some improvements to the devices in the high power RF system were made to suppress the above troubles. The details of the improvements are discussed in the following sections.

2 PROBLEMS IN KLYSTRON ASSEMBLY TANK

2.1 Dielectric Breakdown in Transformers

Each klystron pulse modulator offers the pulse with FWHM of 30 μ s and a flattop of 20 μ s. The peak voltage applied to the klystron cathode is about 240 kV at routine operation for infrared FEL. The klystron is mounted together with the focusing coil on the klystron assembly

tank. The klystron assembly tank contains the 1:12 pulse transformer, the heater isolation transformer and the klystron socket, and is filled with the high voltage insulating oil.

In the early phase of operation, there occurred frequent dielectric breakdowns in the tank. Many tracks of the dielectric breakdown were found in the pulse transformer and in the heater transformer. Notably serious damage was found in the secondary winding of the heater transformer.

2.2 Renewal of Transformers

The tracks of breakdown in the pulse transformer were concentrated around the corner of the windings. This has implied that the radius of windings at the corner was not sufficiently large to avoid a strong electric field. Therefore, at the renewal of the pulse transformer, coils have been wound with a larger corner radius than the previous one.

The structure of the heater isolation transformer is shown in a) of Figure 1. The transformer, together with the pulse transformer, was fabricated by Nihon Denji Kogyo Co. Ltd. The corona was found around the edge of

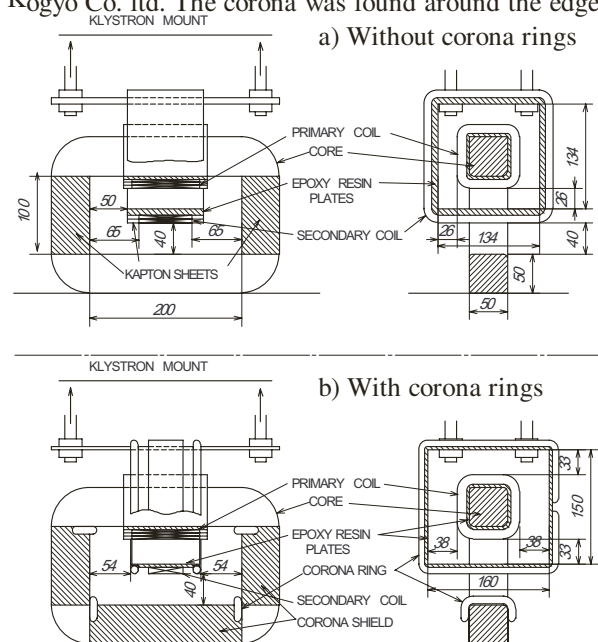


Figure 1. Layout of the heater isolation transformer.

the secondary winding inside the cut core in every pulse. The breakdown was found to occur between the edge and the polyimide (kapton) sheet wrapping the cut core, which was observed with a TV camera through a viewing window in the assembly tank.

Generally, high quality insulating oil has a dielectric strength greater than 30kV/mm. Minimum separation of 26mm between the primary and the secondary coils was enough if the electric field distribution was the same as those between plane electrodes. However, it was evident that the electric field on the thin edge of polyimide sheets wrapping the secondary winding or on the edge of the epoxy resin plates was greater than the dielectric strength.

When the transformer was disassembled, a significant carbonization was found extensively on the surface and the inner layer of the epoxy resin plates.

At the renewal of the heater transformer, the following improvements have been made to the structure of the transformer, as shown in b) of Figure 1:

- 1) The inner size of the secondary coil frame has been extended from 134×134mm to 160×150mm, while the thickness of the epoxy plates has been reduced from 8mm to 4mm. Then minimum separation between primary and secondary coils has been extended to 33mm.
- 2) The ordinary epoxy resin plates used as the coil frame have been replaced with the void-less ones. Also the polyimide sheets that were used to wrap the coils have been replaced with the kraft papers.
- 3) In order to avoid the strong field around the coil edges, copper corona rings have been added at both side edges of the epoxy resin plates of the secondary coil frame.
- 4) The whole edge of the cut core has been rounded off. In the previous cut core, only the inside edge was rounded off.
- 5) The polyimide sheets that were used to wrap the cut core have been removed. The rounded copper sheets have been substituted as the corona shields.
- 6) The corona ring has been added at each inside corner of the cut core.

These improvements were performed by Nihon Denji Kogyo Co. Ltd.

2.3 Results of Improvements

The pulse transformer and the heater transformer in the #2 klystron assembly tank were renewed in December 1998. The running test of the klystron at the diode-mode operation proved that no dielectric breakdown occurs in the tank even with the pulse modulator peak output of 24 kV, which corresponds to 288 kV at the klystron cathode and peak output RF power greater than 30 MW.

The transformers in the #1 klystron assembly tank were also renewed in February 1999. Since then, there has been no incidence of dielectric breakdown in the assembly tank, though the operation time is over several

thousand hours. Therefore the improvements to the transformers as mentioned above are considered to be quite effective for the increase of the dielectric strength.

3 PROBLEM IN KLYSTRON RF WINDOW

3.1 Dielectric Breakdown of the RF Window

The RF pulse width of 20 μ s is out of the design specification for the PV3030 klystron. The most serious problem in the long pulse operation of the PV3030 klystron was the breakdown of the output RF window. As the result of the diode-mode operation with the pulse width of FWHM 30 μ s, no problem was found with the collector or the electron gun up to peak voltage of 288 kV and repetition rate of 12.5 Hz.

Eight klystrons were broken in early phase operation of the linac because of the damage of the output RF windows. All these klystrons were moved from KEK after being used for a long time in the injector linac of Photon Factory. Therefore the klystrons were well aged, but the outer surfaces of the RF windows were exposed to air for a while before reused at LEBRA.

The vacuum in the waveguide was pumped with a 60 l/s ion pump located about 2.6 m downstream the RF window, which is illustrated in Figure 2. The vacuum conductance at the RF window was estimated to be approximately 8.2 l/s[2]. During the aging of the klystrons at LEBRA the long pulse output RF from the klystron, even at quite low power level, led to a considerable degradation of vacuum around the outer surface of the RF window.

At high power output operation, though the klystron was aged carefully, the dielectric breakdown that sometimes occurred at the RF window surface caused degradation of vacuum instantly by 1 to 2 orders of magnitude. Because of low vacuum conductance, the vacuum near the RF window had not sufficiently

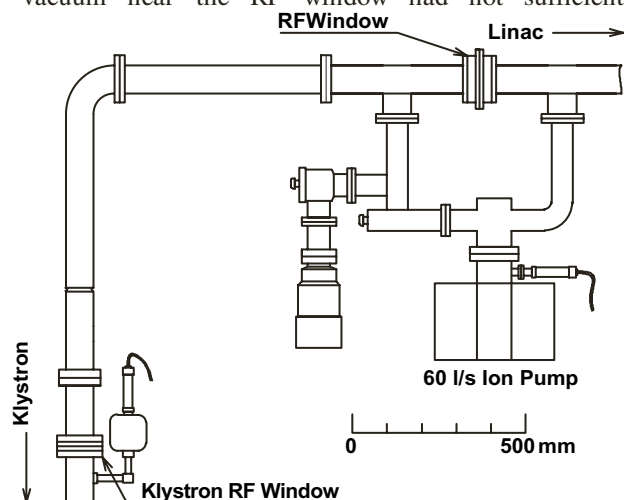


Figure 2. Layout of the waveguide and the vacuum pumping system with a low vacuum conductance.

recovered before the next RF pulse, which caused the dielectric breakdown again. After these conditions were repeated many times in the operation of the linac, the window was finally broken.

The rapid degradation of the vacuum after the dielectric breakdown was never resolved even by a careful aging for a long time.

3.2 Increase of Vacuum Pumping

The second RF window on the way to the linac accelerating tubes is shown in upper side of Figure 2, which is placed because of convenience in the maintenance of the linac. Although there was no essential difference from the klystron RF window on the material or the RF power suffered, the window was never damaged. The important difference seemed to be the distance from the ion pump, which means the difference of the vacuum conductance.

The vacuum conductance at the second RF window was estimated to be approximately 20 l/s, which is about 2.5 times greater than that at the klystron RF window. It suggests that a quick recovery from the degraded vacuum at the window surface is essential to avoid the damage of the klystron RF window.



Figure 3. The photograph of the waveguide with two additional vacuum pumps downstream the klystron RF window

Considering these factors, additional two vacuum ports were put to the waveguide at about 40cm downstream the klystron RF window as shown in Figure 3. The vacuum conductance at the RF window associated with these ports is estimated to be 43 l/s. For easier installation ANELVA 8 l/s ion pump has been connected to each port.

3.3 Effect of additional pumps

A vacuum recovery simulation suggests that a fast recovery of the vacuum is expected around the klystron RF window as shown in Figure 4, where the simulation has been performed with an assumption that the vacuum at the surface of the klystron RF window changes instantly from 1×10^{-6} Pa to 1×10^{-4} Pa by the dielectric breakdown.

The dielectric breakdown in successive RF pulses has been considerably suppressed since the vacuum system was improved. The peak output RF power of 20MW from PV3030 klystrons has been achieved at the pulse width of 20 μ s and the repetition rate of 12.5Hz. The klystrons have been operated more than 1000 hr at 2 Hz without damage to the RF windows since the vacuum pumping was increased.

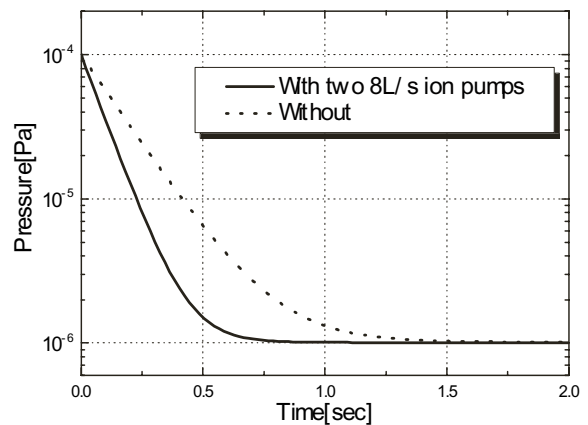


Figure 4. The result of simulation for the vacuum recovery after the dielectric breakdown at the klystron RF window.

4 SUMMARY

The problems in the high power long pulse RF system have been solved by the improvements to the pulse transformer, the heater isolation transformer and the waveguide vacuum system. Specifically, the vacuum pumps closed to the klystron RF window are quite effective for the protection against damage to the window.

REFERENCES

- [1] T.Tanaka et al., "Performance of the FEL Linac at Nihon University", APAC'98, Tsukuba Japan, March 1998. KEK Proceedings 98-10 (1998)722.
- [2] ULVAC Corporation Center, "Vacuum Handbook III", 1989.

Suppression of Energy Fluctuation for the Free Electron Laser at LEBRA

Kazue YOKOYAMA*, Isamu SATO¹, Ken HAYAKAWA¹, Toshinari TANAKA¹, Kazuo SATO¹, Yasushi HAYAKAWA¹, Hiroyuki NAKAZAWA, Koichi KANNO, Takeshi SAKAI and Ken'ichiro ISHIWATA

Graduate School of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan

¹Institute of Quantum Science, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan

(Received November 9, 2001; revised manuscript received March 7, 2002; accepted for publication March 27, 2002)

The first lasing of the free electron laser (FEL) was achieved in May 2001 at Nihon University. Problems occurred regarding the energy stability of the electron beam in the pulse duration and the long operation time for the FEL. The energy stability has been improved by compensation of the RF phase drift with a function generator and a feedback circuit.

[DOI: 10.1143/JJAP.41.4758]

KEYWORDS: FEL, RF, electron linac, feedback control, near-IR

The LEBRA (Laboratory for Electron Beam Research and Application) electron linac has been developed to produce a high-power visible-to-infrared free electron laser (FEL).^{1–3} FEL lasing in the short-wavelength region requires an electron beam with a long pulse duration due to a small amplification gain. In addition, a narrow energy spread and low-emittance electron beam is required.

The linac consists of a dc electron gun, a prebuncher, a buncher and three 4 m accelerating structures. The accelerating RF power is supplied from two klystrons, which are operated at 2856 MHz with a pulse repetition rate of 2 Hz and a peak output power of approximately 20 MW. Each klystron is driven by a pulsed 800 W RF amplifier.

The specifications for the beam pulse duration and the normalized emittance are 20 μ s and 20 π mm·mrad, respectively. The beam extracted from the linac is transported to the FEL system through a momentum analyzer which consists of a slit, a collimator, four quadrupole magnets and two 45° bending magnets. The energy spread of the beam for the FEL is restricted to 1% by the momentum analyzer.

In the actual operation of the linac, the transmission of the beam in the analyzer was poor. In order to reduce the beam loss, the beam energy must remain constant in the pulse duration. The energy gain of the linac is proportional to the integration of the accelerating field that the electrons experience along the accelerator. The field is expressed as $E \cos \theta$, where E is the amplitude of the axial electric field and θ is the accelerating phase of the bunched electrons. The fluctuation of the phase leads to beam energy fluctuation. In the LEBRA linac the energy fluctuation is caused by fluctuation of the relative phase between the two klystrons, which was found by measurement of the phase and energy spectra in the pulse duration. Figure 1(a) shows the waveforms of the beam current detected using a current transformer at the dc gun, the exit of the linac and on the FEL line. The pulse duration of the beam was found to be reduced to 10 μ s in the analyzer. This is consistent with the result of the measurement of the energy spectra, which was carried out by utilizing the first 45° bending magnet as a spectrometer. The energy spectra are shown in Fig. 2(a); an energy shift of about 4 MeV is observed during the pulse. The phase difference between the reference RF and the klystron output was detected for each klystron using the double-balanced mixer (DBM), as shown in Fig. 3(a). The

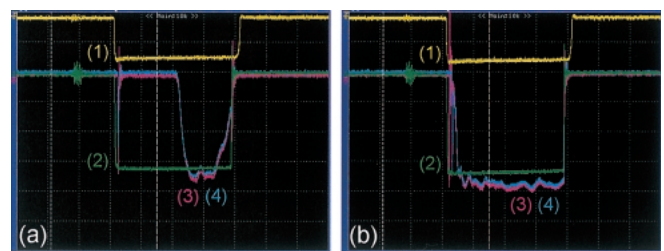


Fig. 1. The waveforms of the beam current detected using core monitors placed on the beam line and a Faraday cup at the end of the beam line: without (a) and with (b) phase drift compensation. 1) Emission from the dc gun (200 mA/div), 2) exit of the linac (40 mA/div), 3) upstream of the FEL system (20 mA/div), 4) end of the beam line (20 mA/div). Horizontal scale is 5 μ s/div.

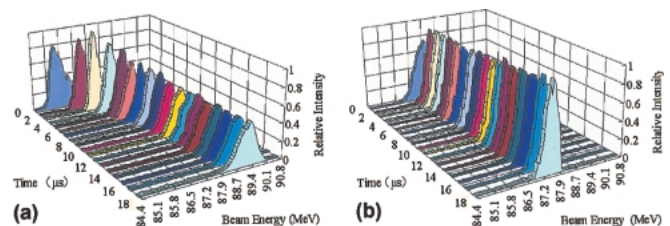


Fig. 2. Time-dependent energy spectra obtained every 1 μ s except for the transient time region: without (a) and with (b) phase drift compensation.

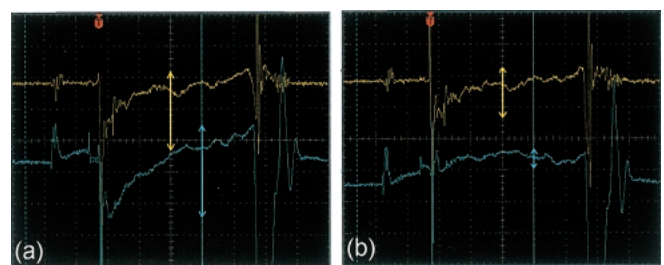


Fig. 3. The waveforms of the klystron output phase compared with the reference RF over a pulse duration of 20 μ s: without (a) and with (b) phase drift compensation. Upper: output RF of klystron No. 1 (0.9°/div). Lower: output RF of klystron No. 2 (2.7°/div). Horizontal scale is 4 μ s/div.

reference is a cw RF from a master oscillator. As a result of the measurement, the phase shift in the RF pulse duration of 20 μ s was greater than 2° for klystron No. 1 and greater than 6° for klystron No. 2. Phase drift was also observed during long operation, depending on the change in the temperature

*E-mail: yokoyama@acc.phys.cst.nihon-u.ac.jp

around the RF amplifier. It has been considered that the energy shift of the beam in the pulse duration and the long operation time was due to the phase shift of the accelerating RF.

The CLIO⁴⁾ and FELI⁵⁾ linacs are also operated with a long pulse duration. The FEL gain in these facilities is much greater than that in the present case. Therefore, the improvement in the RF phase stability achieved at these facilities is not necessarily applicable to the LEBRA linac. The phase fluctuation observed in the LEBRA RF system comes from the semiconductor RF amplifier that drives the klystron. For FEL lasing, it is necessary to compensate for the phase fluctuation in order to suppress the energy shift in the pulse duration.

The phase drift compensation in LEBRA was achieved by means of a fast phase shifter (FPS) inserted before the input of the RF amplifier, as shown in Fig. 4. The output phase of the FPS was controlled with an output voltage from the function generator.

The IF output signal from the DBM is approximately proportional to the phase difference between two input signals having the same frequency if the signal is detected around the zero-cross region. The output phase shift of the FPS is proportional to the voltage applied to the control input. Therefore, the phase signal detected with the DBM is useful as a source for the control signal of the FPS to compensate the phase fluctuation. From the above considerations, the control signal for the phase compensation in the pulse duration is produced from the phase signal with the function generator. The phase signal as shown in Fig. 3(a) is accumulated and processed in a personal computer, and the processed data is transferred to the function generator. The voltage and timing of the output from the function generator

are adjusted so that the waveform of the detected phase signal becomes flat. Since the phase drift pattern in the pulse duration is conserved in a long operation time, no frequent updating of the function is necessary in this method.⁶⁾ As a result of the compensation, the phase drift was reduced to within 1° for each klystron, as shown in Fig. 3(b). The beam current and the energy drift were greatly improved by including this system, as shown in Figs. 1(b) and 2(b), respectively. These figures indicate that the energy drift was reduced from 3.3% to 0.5% and the beam pulse duration in the FEL line was extended from 10 μs to 18 μs.

In addition to the phase compensation in the pulse duration, the slow drift of the klystron output phase is canceled using the slow feedback circuit in Fig. 4. Thus, the resultant control voltage for the FPS is a combination of the output from the function generator and the offset voltage from the feedback circuit. From the specifications of the FPS, the offset is applied as a pulsed voltage. The phase drift due to a change in room temperature was reduced from 3° to 0.5° for each amplifier.⁷⁾

With the phase drift compensation system, the fluctuation of the RF phase in the pulse duration and the long operation time have been suppressed simultaneously. The system is useful for the stabilization of beam acceleration. As a result of the improvement, the lasing of 1.5 μm FEL has been achieved at LEBRA.

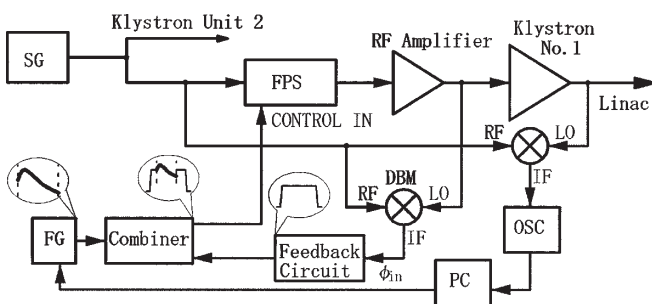


Fig. 4. Block diagram of the phase drift compensation system. SG: signal generator, FG: function generator, PC: personal computer, OSC: digital oscilloscope.

- 1) Y. Hayakawa, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, H. Nakazawa, K. Yokoyama, K. Kanno, T. Sakai, K. Ishiwata, A. Enomoto, S. Fukuda, S. Ohsawa, T. Tsuchiya and M. Kato: Nucl. Instrum. & Methods Phys. Res. A **482** (2002) 29.
- 2) T. Tanaka, K. Hayakawa, K. Yokoyama, Y. Matsubara, K. Sato, I. Sato, I. Kawakami, S. Fukuda, S. Ohsawa and S. Anami: Proc. First Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'98), Tsukuba, Japan, 1998. KEK Proc. 98-10, p. 722.
- 3) T. Tanaka, K. Hayakawa, I. Sato, K. Sato, Y. Hayakawa, K. Yokoyama, K. Kanno, T. Sakai, S. Fukuda, S. Anami, S. Ohsawa and A. Enomoto: to be published in Proc. Second Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'01), Beijing, China, 2001.
- 4) R. Chaput, B. Kergosien, P. Joly, J. Lesrel and O. Marcouille: Proc. 4th European Particle Accelerator Conf. (EPAC'94), London, England, 2001, p. 728.
- 5) Y. Morii, Y. Miyauchi, T. Keishi, A. Koga, S. Abe, I. Bessho, A. Nagai and T. Tomimasu: Proc. 18th Linear Accelerator Meet. Japan, Tsukuba, 1993, p. 182 [in Japanese].
- 6) K. Yokoyama, I. Sato, K. Hayakawa, T. Tanaka, K. Sato, Y. Hayakawa, Y. Matsubara, H. Nakazawa, T. Sakai, K. Kanno, H. Inokawa, Y. Nakamura and K. Ishiwata: Proc. 25th Linear Accelerator Meet. Japan, Himeji, 2000, p. 108 [in Japanese].
- 7) K. Yokoyama *et al.*: Proc. 26th Linear Accelerator Meet. Japan, Tsukuba, 2001, p. 231 [in Japanese].

PROCEEDINGS OF
THE 27TH
LINEAR ACCELERATOR MEETING
IN JAPAN

AUGUST 7-9, 2002

Kyoto, Japan

URL <http://lam27.iae.kyoto-u.ac.jp>



Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Institute for Chemical Research, Kyoto University

日本大学電子線形加速器の現状と研究計画

佐藤 勇^{A)}、早川 建^{A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、横山和枝^{A)}、
菅野浩一^{B)}、境 武志^{B)}、石渡謙一郎^{B)}、
橋本英子^{B)}、藤岡一雅^{B)}、中尾圭佐^{B)}、村上琢哉^{B)}、長谷川 崇^{B)}、宮崎慎也^{B)}、
福田茂樹^{C)}、榎本収志^{C)}、大沢 哲^{C)}、設楽哲夫^{C)}、諏訪田 剛^{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

^{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、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。

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設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^{4,5,6)}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度偏光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⁷⁾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

スペクトル⁸⁾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^{9,10)}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 6×10^7 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¹¹⁾している。

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 μ 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 μ 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。

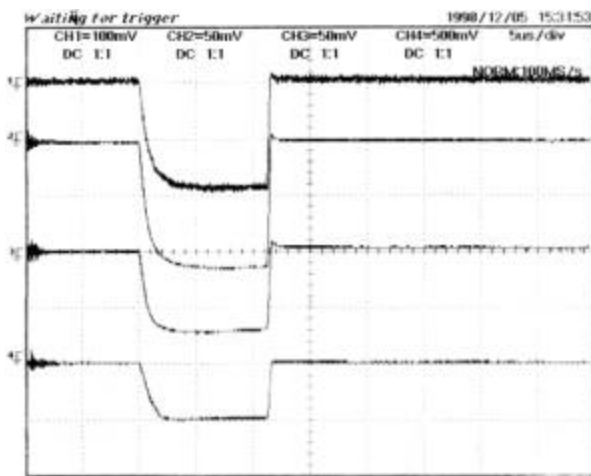


図1a 電流モニターの電子ビーム波形、上からバンチャターの出口、第1加速管入口、第2加速管出口、線形加速器出口、縦軸: 100mA/div、横軸: 5 μ S/div

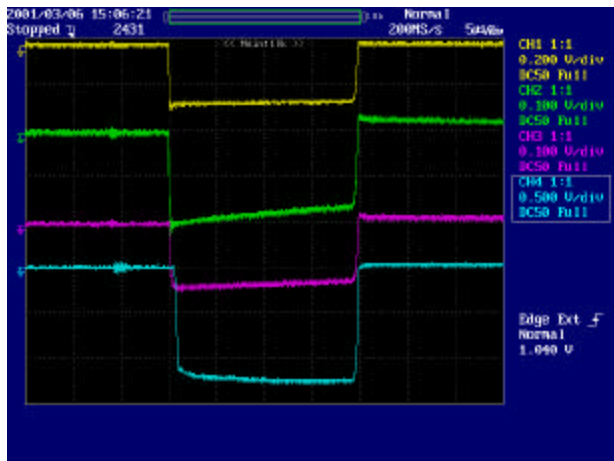


図1b 電流モニターの電子ビーム波形、上からバンチャターの出口、第1加速管入口、第2加速管出口、線形加速器出口、縦軸: 100mA/div、横軸: 5 μ S/div

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 μ S以上に延長することは

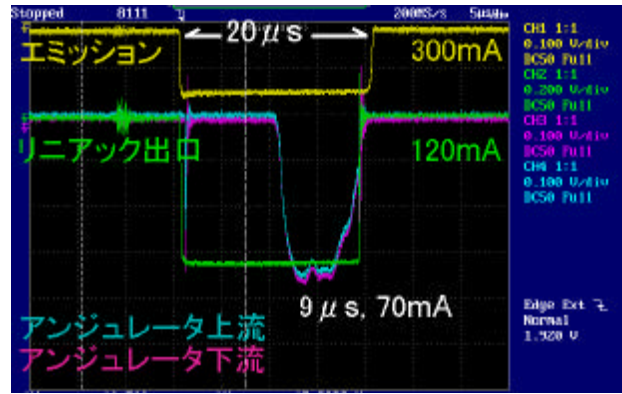


図2a 位相補償方法を採用しない以前の自由電子レーザーのビーム輸送路を通過するビーム電流波形。

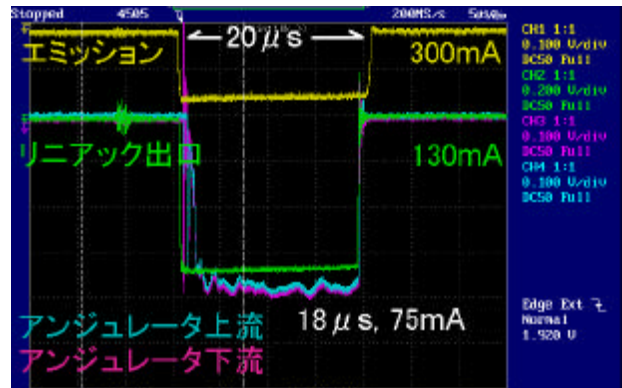


図2b 位相補償方法を採用した以後の自由電子レーザーのビーム輸送路を通過するビーム電流波形。

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 μ Sを越えるパルス持続時間を維持できるようになった。

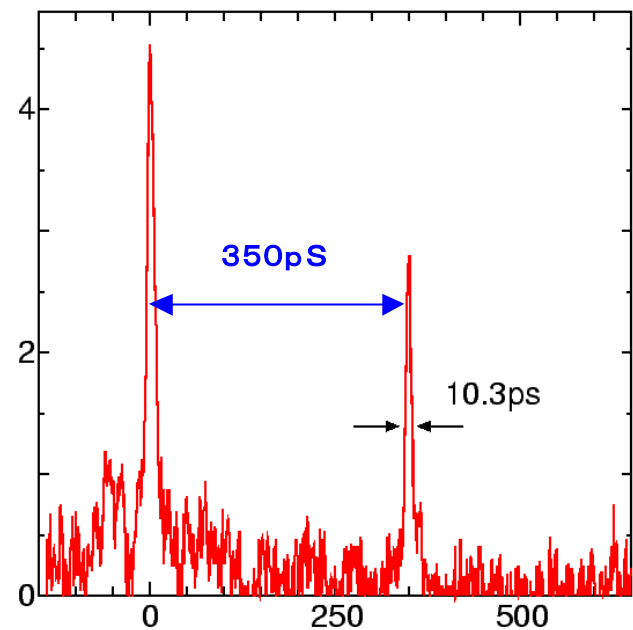


図3 ストリークカメラで測定した電子ビームの集群状態。

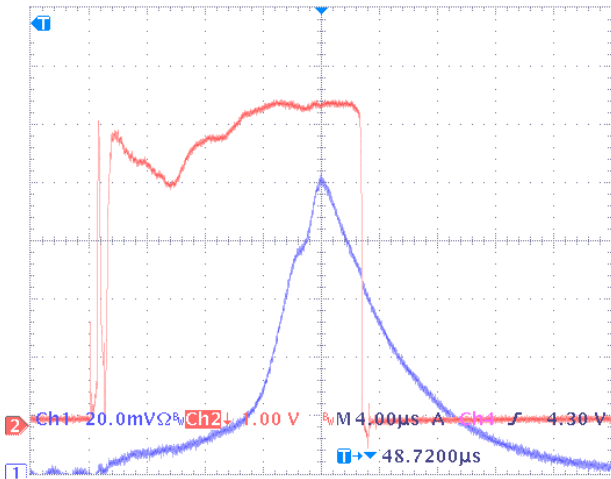


図4a レーザー強度が蓄積光の約9倍の状態における電子ビーム波形(赤)と赤外線強度(青)、横軸: $5 \mu\text{s}/\text{div}$

一方、この電子ビームを90度偏向すると、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継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2b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、古いストリークカメラを改修し、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

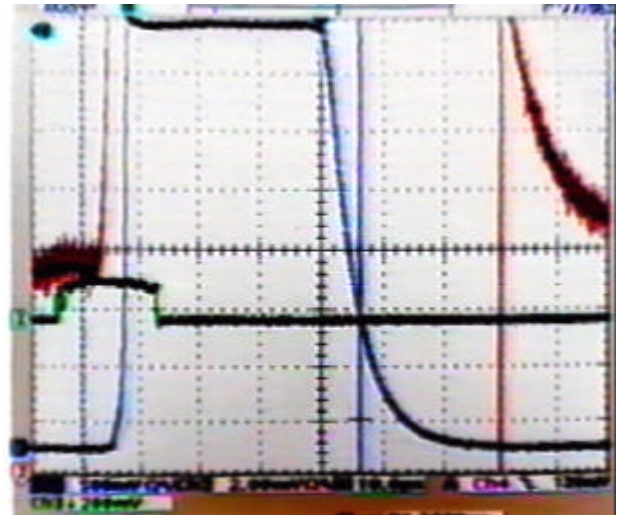


図4b レーザー強度が蓄積光の約1億倍に達した状態における電子ビーム波形(黒)と赤外線強度(青)、横軸: $10 \mu\text{s}/\text{div}$

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。

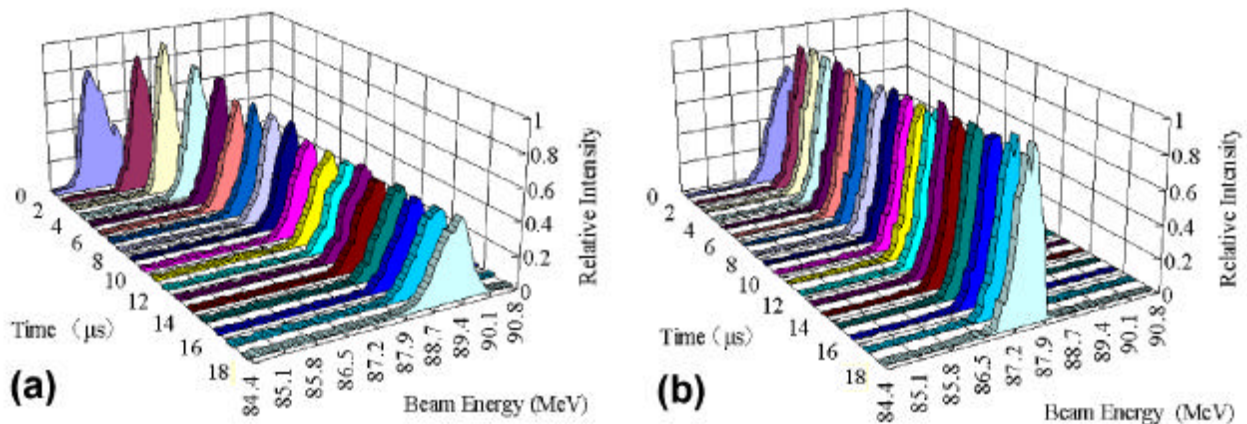


図5 位相補償がないとき(a)、位相補償があるとき(b)、における電子ビームのパルス持続時間内エネルギー変動状態例。

図4a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を示す例である。

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)には、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¹²⁾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 μ Sまでは電子ビーム電流の尖頭エネルギーが約1 MeV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(± 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。

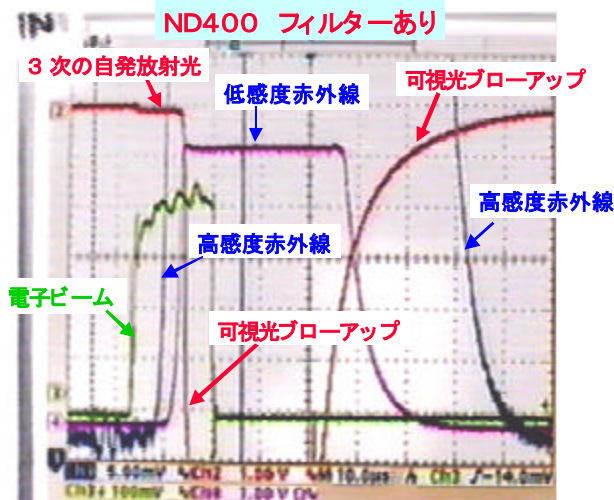


図6 自由電子レーザー発振時における赤外線と可視光の強度の比較。

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かった。

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 μ m)の自由電子レーザー発振、ノラメトリック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 μ mから0.35 μ 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 μ mから0.8 μ mとするが、次の段階で1 μ mから0.35 μ mに広げる。

又、X線利用実験は、写真1に示すように、ノラメトリック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。

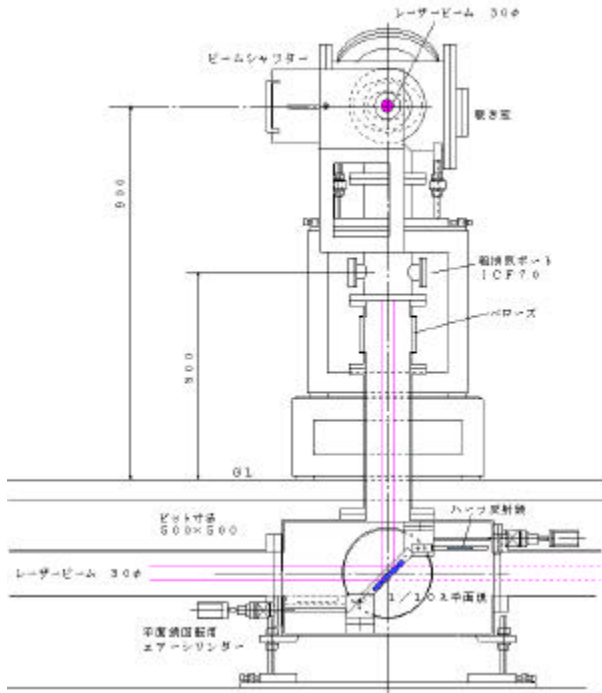


図7 レーザー導入装置

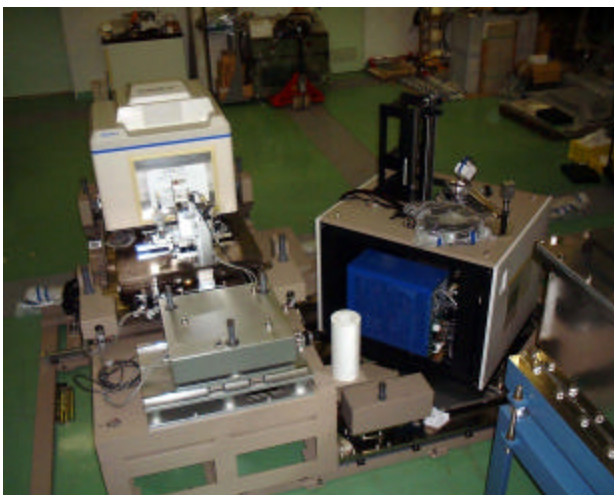


写真1 実験室に完成したパラメトリックX線用測定装置 (タンパク質X線高次構造解析装置、微小部X線回折装置)

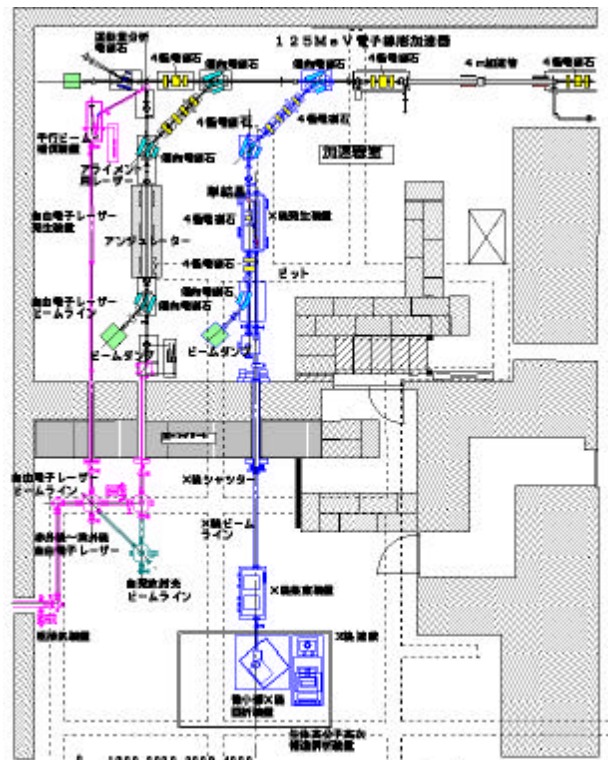
研究テーマは、次のような18項目が取り上げている。物質科学系

- 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線線の配置

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播磨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。

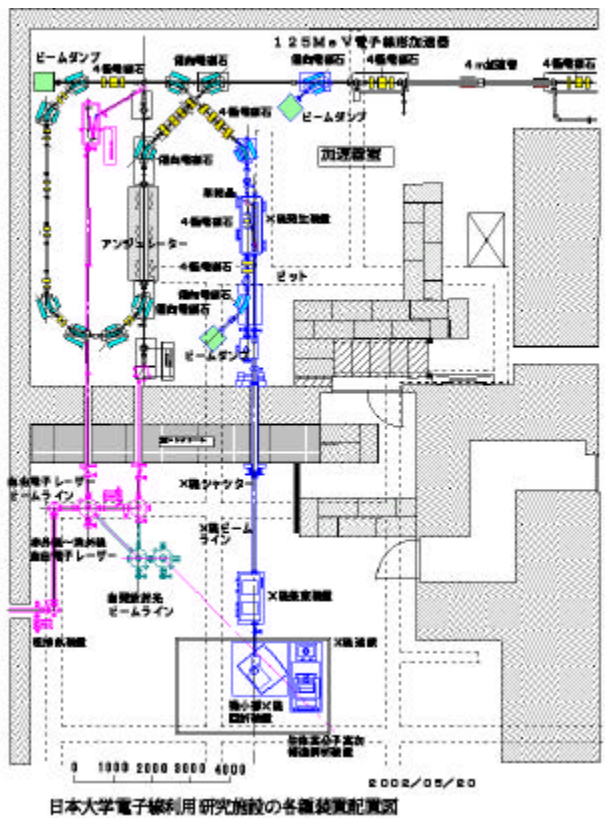


図9 利用研究計画の各種装置配置の凡例

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共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言うまでもない。

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ニ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. PR 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.

日大 FEL 用光陰極 RF 電子銃に関するシミュレーション

菅野 浩一^{1A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、境 武志^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、橋本 英子^{A)}、藤岡 一雅^{A)}、村上 琢哉^{A)}、長谷川 崇^{A)}、宮崎 慎也^{A)}

^{A)} 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

^{B)} 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

概要

日本大学電子線利用研究施設 (Laboratory for Electron Beam Research and Application, 以下 LEBRA) では 100kV DC 電子銃、プリバンチャー、バンチャーから構成されている入射部を持つ 125MeV S-band リニアックを用いて、125MeV、20 μ sec の電子ビームを発生させ、近赤外領域 FEL 発振に成功した。しかし、紫外領域 FEL 発振の為には、現在より良質で安定な電子ビームが必要で、更なるリニアックの高度化が要求されると考えられる。その高度化の一環として、より小さいエミッタンスを得る為に、光陰極 RF 電子銃の開発を検討している。そこで RF 電子銃の空洞解析を行った。

1. はじめに

LEBRA では、2001 年 5 月の 1.5 μ m 赤外領域 FEL 発振^[1]以降、高度かつ先端的な利用研究に充分活用し得る良質なレーザーを利用施設に供給する為、電子ビームの安定化に関する研究を行ってきた。利用に向けての準備が進み、今年度中に開始される予定である。LEBRA が供給する FEL の波長領域は 0.3~5.0 μ m で、紫外から赤外までの広い範囲にわたっている。現在のリニアックから得られる電子ビームを用いて 1.5 μ m の赤外領域 FEL 発振を達成したが、紫外領域 FEL 発振の為にはより小さいエミッタンスの電子ビームが必要であると考えられる。そこで、電子を高電場で引き出し、加速することができる RF 電子銃^[2]を開発し、電子が低エネルギー状態にある時間をできるかぎり少なくして空間電荷による影響を抑え、エミッタンスの悪化を防ぐことを検討している。LEBRA では、熱陰極を採用した RF 電子銃の研究を行ってきた^[3,4]。今回は光陰極を採用した RF 電子銃を開発する。これにより、熱陰極を使った場合に問題となるバックボンバードメントによるパルス幅の制限を取り除くことができる。光陰極 RF 電子銃^[5]はよくバンチした電子を放出することができ、熱陰極に比べ電流密度の高いビームを得られる為、国内外を問わず、FEL 施設で活発に研究開発が進められている。しかし、LEBRA では電子励起時のパルス幅

は短くせず、電子銃の下流にアルファマグネットを設置してバンチングを行うことにする。

2. 現在の電子ビームの質

LEBRA 125MeV リニアックは 100kVDC 電子銃、プリバンチャー、バンチャー、4m 加速管 3 本で構成されている。表 1 に現在、リニアックより得られる電子ビームのパラメータを示す。電子銃から得られる電子ビームの規格化エミッタンスはマグネティックレンズを、加速器下流においては四極電磁石を用いてビーム径を変化させ、その集束力とビーム径の関係から求めた。ビーム径はワイヤースキャナーを用いて測定を行った^[6]。バンチ幅は電子ビームが放出する自発放射光をストリークカメラで測定して得られた。表に示されるような電子ビームを、アンジュレータに入射し、1.5 μ m の赤外 FEL 発振に達している。LEBRA では DC 電子銃からバンチャーまでの入射部の代わりに RF 電子銃とアルファマグネットを設置することで電子ビームの低エミッタンス化を目指す。

表 1. 電子ビームパラメータ

エネルギー	86.8 MeV
	最大 125 MeV
パルス幅	20 μ sec
繰り返し	2~12.5 Hz
規格化エミッタンス	
電子銃	8.93 π mm \cdot mrad
加速器下流	20.7 π mm \cdot mrad
電流	
電子銃放出電流	200 mA
加速器下流	100 mA
エネルギー分散	1 %
バンチ幅	<10 psec

現在の入射部に関して、マグネティックレンズが考慮できるように作り直された PARMELA を用いて、電子軌道計算を行った。粒子数は 999 個で、初期条件として、電子銃用相対論的電子軌道解析コード EGUN^[7]を用いて得られた結果を使用した。ここでは電子銃から 200mA の電子ビームが放出されていると

¹ E-mail: tekkamen@lebra.nihon-u.ac.jp

仮定した。その結果バンチャー出口において水平方向規格化エミッタンスが $46.9\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、鉛直方向は $43.5\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、ビームは放出電流の 76%に減った。また、図 1 にはバンチャー出口での電子ビームのプロファイルを示す。加速管出口でのエミッタンス測定結果と比べるとシミュレーションでは大きくなっているが、これは集束系のモデル化が不十分であるためと考えられる。エミッタンスが最適となるリニアック運転時のソレノイド、マグネティックレンズ、フォーカスコイルの磁場強度はシミュレーションに使った値と比べ小さい。各集束系の数値解析をし、その結果をもとに電子軌道計算を行う必要があると考えられる。

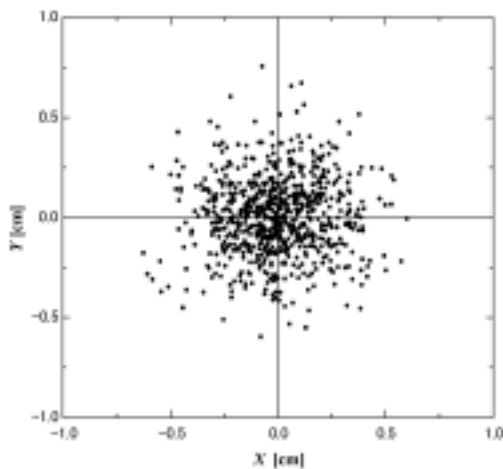


図 1：PARMELA で計算した結果得られたバンチャー出口でのビームプロファイル

3. LEBRA 用 RF 電子銃開発の現状

LEBRA では、以前より紫外領域 FEL 発振を目指し、RF 電子銃の研究開発を行い、単セル空洞にノーズコーンをつける方法やビームの進行方向に対して垂直に弱い磁場 (50~75G) をかける方法、またはサブハーモニック RF 電子銃にすることによるバックボンバードメント低減の効果に関する解析や、エミッタンスを小さく抑えるための形状を検討し、シミュレーションを行っていた。^[3,4] また、テスト空洞を製作し、リニアックの入射部にアルファマグネットとともに設置して、RF 系の試験運転を行った^[8]。現在、短パルス用クライストロン PV3030A1(三菱電機)を 2 本、20 μsec のパルス幅で使用し、1 本はプリバンチャー、バンチャー及び一本目の加速管へ、もう 1 本は下流 2 本の加速管にマイクロ波を供給している。RF 電子銃を設置する場合はプリバンチャーとバンチャーに入力している分を RF 電子銃空洞に入力する。

新しく開発する RF 電子銃では光陰極を採用する。ドライブレーザーには、LIGHTWAVE 社の CW モードロック Nd:YAG レーザーを種レーザーとし、POSITIVELIGHT 社のアンプシステムを用いて増幅し、パルス切り出しを行い、第 3 高調波 (355nm) にした光を使用する。アンプシステム出口でマイクロパ

ルス幅が 50psec、繰り返し 89.25MHz でマクロパルス幅 20 μsec 、繰り返し 12.5Hz、平均パワー 1W、ジッター 5psec のレーザーが得られる。ジッターは位相にして約 1° でありこれによるエネルギーの変動は問題ないと考えられる。また陰極材質は LaB_6 を使用する予定である。

4. 空洞解析

RF 電子銃空洞の設計を SUPERFISH^[9]を用いて、1.6cell 型 RF 電子銃空洞についてシミュレーションを行った。ピーク電場が 100MV/m 程度になるようにして計算を行った。図 2 にその結果を示す。図の上部に RF 電子銃空洞形状と電磁場分布を、図の下部に電子進行方向の電場、半径方向の電場を示す。半径方向電場に関しては中心軸上から 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4mm ずれた位置における計算結果を示す。さらに、陰極付近の電場が半径方向の成分を持ち、電子ビームの拡がりを防ぐための工夫がなされた空洞形状に関してシミュレーションを行った。図 3 にはハーフセルの陰極がある面に突起をつけた形状をもつ RF 空洞を、図 4 には DC 電子銃のウェーネルト電極のような形状をもつ RF 空洞に関する結果を示す。この場合ハーフセルでのビーム進行方向最大電場は陰極面ではなく少し出口側にずれる。半径方向電場 E_r は電子ビームのエミッタンスを悪くする要因となると考えられる。図より E_r はディスクの角のあたりがピークになっている。また、電場は中心軸からずれるほど、半径方向成分が増え加速成分が減る為、RF 電子銃ではビームはできるかぎり細く保つ必要があると考えられる。突起をつけた場合に比べ、ウェーネルト電極のような傾斜を持たせた場合のほうが E_r のピークが陰極面に近い所に位置しており、優れていると推測される。

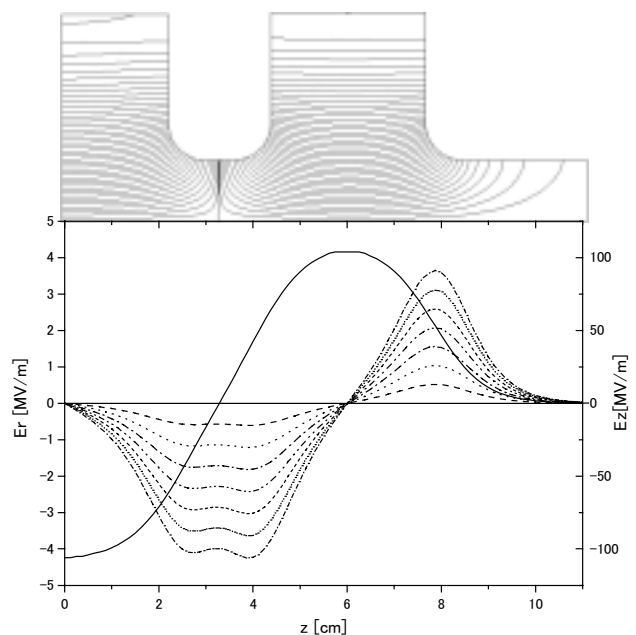


図 2：SUPERFISH で計算した結果得られた 1.6cell 型 RF 電子銃の電磁場分布。点線が半径方向電場、実線がビーム進行方向電場。

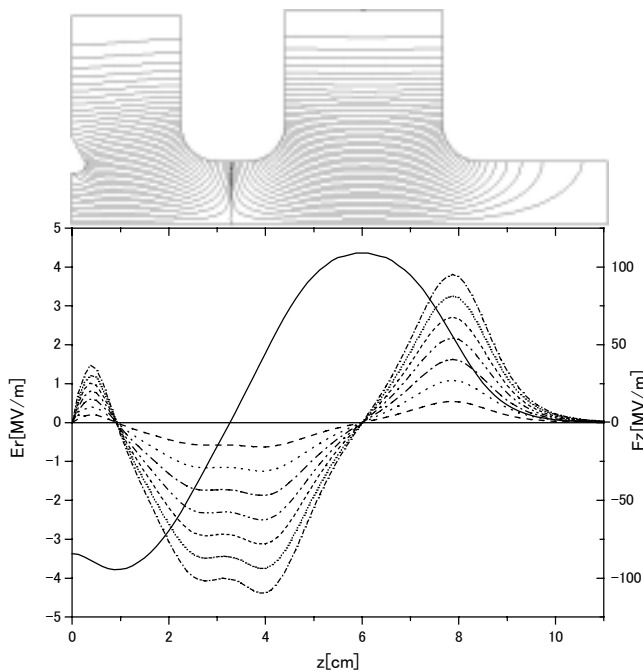


図3：SUPERFISH で計算した結果得られた陰極付近に突起をつけた RF 電子銃の電磁場分布。点線が半径方向電場、実線がビーム進行方向電場。

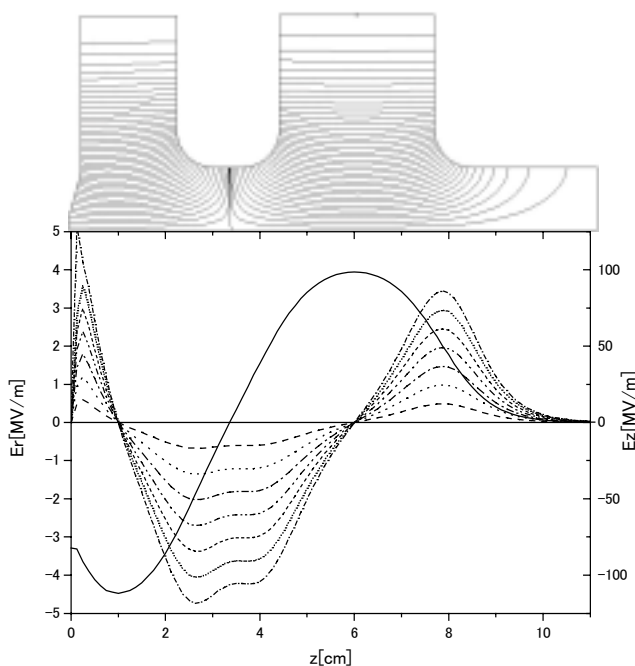


図4：SUPERFISH で計算した結果得られた陰極付近をウェーネルト電極のような形状にした RF 電子銃の電磁場分布、点線が半径方向電場、実線がビーム進行方向電場。

5. まとめ

FEL 用 125MeV 電子リニアックの入射部に関する軌道解析を PARMELA で、光陰極 RF 電子銃空胴の電磁場解析を SUPERFISH で解析した。RF 電子銃空

胴に関しては陰極付近に電子ビームが集束するような電場ができるような 2 種類の空胴形状に関して計算を行った。その結果より陰極付近に突起をつけるより、DC 電子銃のウェーネルト電極のような形状にしたほうがエミッタンスを小さく抑えることができると推察した。

6. 今後の課題

陰極付近をウェーネルト電極のようにするとエミッタンスが小さく抑えることができると推察したが、このことに関して電子ビーム軌道解析を行って検証する。その他の空胴形状などについても検討したのち、LEBRA リニアック用の RF 電子銃として最適な形状・パラメータを決定し空胴の製作をする。ただし、PARMELA ではアルファマグネットのシミュレーションを行うことができない。そこで、LEBRA で独自に作成したコードを用いて計算する。このコードは SPREAD (Simulation Program for Electron Accelerator Design) と呼んでおり、アルファマグネットを考慮した電子軌道解析が行える。そして、RF 電子銃空胴の低電力試験、空胴内に励振される電磁場分布の確認および導波管との結合係数の調整などを行う。また、大電力試験を行う為のテストベンチ組み立て、大電力投入時の熱的変形、空胴内放電の有無の確認を行う必要があると考えられる。

光陰極に関しては、LaB₆ 陰極の量子効率の測定を行う。光陰極からの電子放出は表面状態に強く依存する。また、LEBRA 用電子銃ではマクロパルス幅が 20μsec という長い電子ビームを放出する必要があるため陰極に関する工夫が必要と考えられる。

また、加速 RF を 32 分周した信号により、ドライブレザーにトリガーをかけ、RF に同期したレーザーパルスになる為の調整や RF 電子銃を加速器に組み込むためのレーザービームライン設計などシステムの構築を行う。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et al., "First lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5μm" Nucl. Instr and Meth.A(2002),Vol483/1-2,pp.29-33(NIMA18811)
- [2] C.Travier,Particle Accelerators.36,(1991),33
- [3] K.Hayakawa, et al., "Study of an RF-GUN" Proceedings of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 20-22, 1994
- [4] K.Hayakawa, et al., "Study of an RF-GUN II" Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Osaka, Sep. 6-8, 1995
- [5] J. Clendenin, et al., "RF Guns and the production of polarized electrons" NLC-Note-20
- [6] K.Kanno, et al., "電子銃の低エミッタンス化による入射部の高度化" Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [7] W.B.Herrmansfeldt, "EGUN -an electron optics and gun design program" slac report 331 1988
- [8] T.Tanaka, et al., "Test operation of the RF system of the 125MeV LINAC at Nihon University" Proceedings of the 22th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Sep. 9-11, 1997
- [9] James H. Billen and Lloyd M. Young "POISSON SUPERFISH", LA-UR-96-1834,

LEBRA クライストロンの位相変動測定

横山 和枝^{1A)}、佐藤 勇^{A)}、早川 建^{A)}、田中 俊成^{A)}、早川 恭史^{A)}、
境 武志^{B)}、菅野 浩一^{B)}、石渡 謙一郎^{B)}、中尾 圭佐^{B)}

^{A)} 日本大学量子科学研究所

^{B)} 日本大学大学院理工学研究科

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 電子線利用研究施設

概要

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) ^[1]では、自由電子レーザー (FEL) 光の利用実験のために、電子リニアックの性能改善を行っている。光利用を目的とした FEL に於いては、安定した発振が望ましい。リニアックに於いても、安定な加速電子ビームが要求される。そのためには、加速高周波を供給するクライストロン出力の安定化が特に重要である。クライストロンの位相や振幅の変動は、ビームのエネルギー変動の要因になるからである。クライストロンの位相や振幅の変動には、クライストロン入力に用いる RF アンプの変動以外の要因も考えられる。本件は、クライストロン周辺環境温度と位相との相関を調べた結果について報告する。

1. はじめに

LEBRA の RF 系に於いては、クライストロン RF 出力の位相変動は、主にドライブ系の 800W 出力 RF アンプの位相変動に因ることが報告された^[2,3]。そこで、800W 出力 RF アンプの出力位相を関数発生器及びフィードバック方式を使用して平坦且つ安定にしてクライストロン入力に用いることによって、クライストロンで生じる位相変動を調べた。実際には、RF アンプ出力位相が平坦且つ安定であっても、クライストロンの出力位相には変動が見られる。LEBRA では、位相がパルス内フラットトップにおいて $\pm 0.5^\circ$ 以内の部分²が 20 μ s 以上取り出せる 400W RF アンプ (日本高周波株式会社製) を導入する予定であるので、クライストロン RF 出力位相変動に及ぼす RF アンプに依存しない他の要因を明らかにする必要があると思われる。

2. 位相測定

位相測定系の概略を図 1 に示す。位相測定には、ダブル・バランスド・ミキサ (DBM) を用いた。位相のリファレンスには、マスターである 2856MHz 発振器の RF 源を用いた。クライストロンモジュレーターから発生するノイズの影響を減らすために、位相を検出した直後に信号を増幅してから、制御室のオシロスコープに接続してデータを取得している。このアンプを使用したときには、位相と DBM での

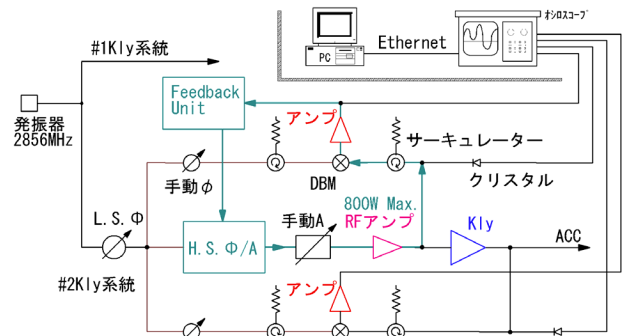


図 1 : RF アンプ及びクライストロン RF 出力の位相と振幅測定の設定アップ。

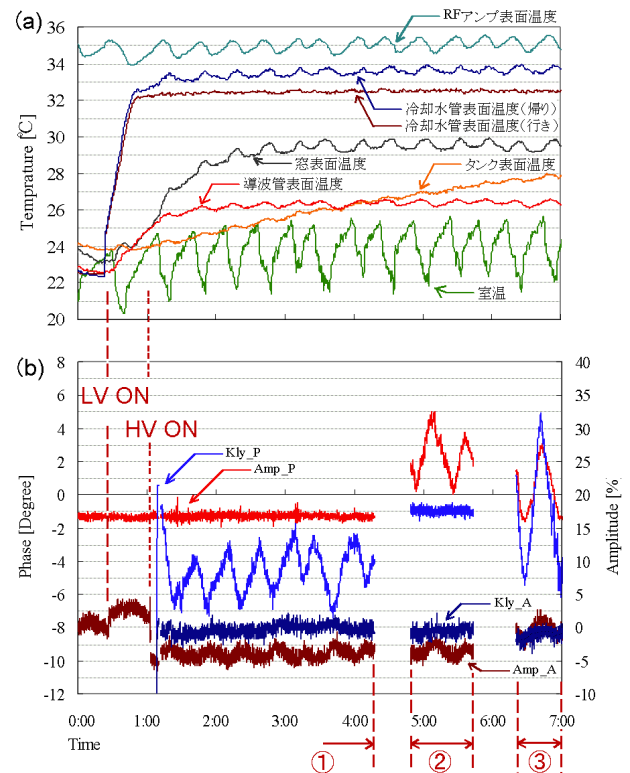


図 2 : 温度と位相及び振幅の日変化。

(a) 温度変化。(b) RF 系の位相と振幅。

① RF アンプ出力位相をフィードバック補償した場合。② クライストロン出力位相をフィードバック補償した場合。③ フィードバック補償しない場合。

¹ E-mail: k_yokoyama@lebra.nihon-u.ac.jp

検出電圧は、RF アンプ出力では $0.05^\circ / \text{mV}$ 、クライストロン出力では $0.04^\circ / \text{mV}$ に相当する。同時に、室温と RF アンプ、クライストロン窓、冷却水、導波管、クライストロンパルス伝送タンクの表面温度をモニターした。

3. 測定結果

3.1 周辺環境温度の日変化

図 2 に各々の(a)温度と(b)位相及び振幅の日変化を示す。この結果から、低電圧系統 (LV) を通電してからこれらの温度が一定の周期で変化するようになるまでには約 2 時間程度を要することがわかる。この周期は、約 30 分である。クライストロンモジュレーター室は、空調機 (定速式) で室温を $\pm 1^\circ\text{C}$ にしているが、クライストロン周辺で測定された室温は設定値よりも高めに観測されている。また、クライストロンパルス伝送タンクの表面温度は 7 時間以上経っても上昇し続けているが、これは熱容量が大きいと思われる。

3.2 クライストロンの印加電圧と位相変動

RF アンプ出力位相にフィードバック補償をかけ、変動を $\pm 0.2^\circ$ におさえた状態で、RF 系の位相と振幅を測定した。この結果を図 2 (b)の①期間に示す。高電圧 (HV) のかけ始めでは、クライストロンの印加電圧は低く設定しており、15.0 (×12, 以下省略) kV である。その後、徐々に 19.5kV まで上げていき、約 18MW 出力にしてビーム加速に使用している。図 3 に RF アンプ出力を 600W にして、クライストロン印加電圧を 16.0kV から 20.5kV まで変えたときのクライストロン出力位相の変化を示す。この測定は、周辺温度が十分に安定になってから行った。実線は、ドリフト管長約 405mm、周波数 2856MHz とした場合の計算値である。印加電圧変化 0.5kV に対して位相は約 13° 変化していることがわかる。パルス電圧の安定度は 0.3% であるので、印加電圧が 19.5kV であれば 1.5° の位相変動が予想される^[4]。これは、温度に依存しない変動である。

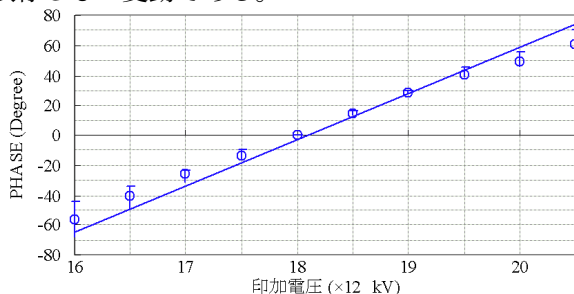


図 3 : クライストロン印加電圧と位相の変化。実線は計算値。

3.3 RF アンプ出力と位相変動

周辺温度が一定の周期で変動するようになってからのクライストロンの位相変動は、RF アンプの出力

変動の傾向に近い。この変動は、室温に依存して RF アンプ周辺温度が変化することに起因すると思われる。図 4 に RF アンプ出力とクライストロン出力位相の変化を示す。測定時の印加電圧は 19.5kV である。このグラフから、RF アンプ出力 100W の変動に対して、位相は 3.5° 変化することがわかる。図 2 (b)の①期間では RF アンプ出力は 3% 程度の変動をしているので、位相変動は 0.6° に見積もられる。これは室温 1°C あたり 0.2° の位相変動に相当する。

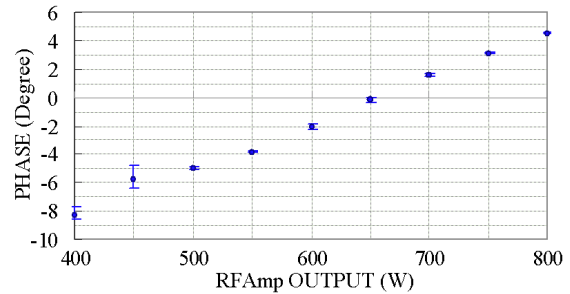


図 4 : RF アンプ出力とクライストロン位相の変化。

3.4 クライストロンの位相変動

図 2 中の③期間はフィードバック補償をしない場合である。フィードバック補償をしない場合、室温変化に対して、RF 系の位相変動は、RF アンプ出力では $1.3^\circ / \text{C}$ 、クライストロン出力では $2.9^\circ / \text{C}$ である。さらに、測定時の RF アンプ出力変動 0.5% を考慮すると、位相変動は $2.5^\circ / \text{C}$ となるから、クライストロン単独では $1.2^\circ / \text{C}$ の位相変動を生じていると思われる。一方、RF アンプ出力位相にフィードバック補償をして、温度に依存する RF アンプの位相変化を取り除くと、クライストロンの位相変動は、 $1.1^\circ / \text{C}$ となる (①期間)。同様に RF アンプ出力変動 0.3% を考慮すると、クライストロンで生じている位相変動は $0.9^\circ / \text{C}$ となる。したがって、クライストロンで生じている位相変動の値として、①と③の両期間において矛盾しない。

3.5 クライストロン窓の温度と位相変動

図 5 にパルス幅を変えてクライストロン窓の温度を変えたときのクライストロン出力位相の変化を示す。これは、RF アンプ出力位相にフィードバック補償をして、それぞれ、温度変化の 1 周期分を測定して算出した。この図から、クライストロン窓の温度変化は位相変化には影響していないと思われる。

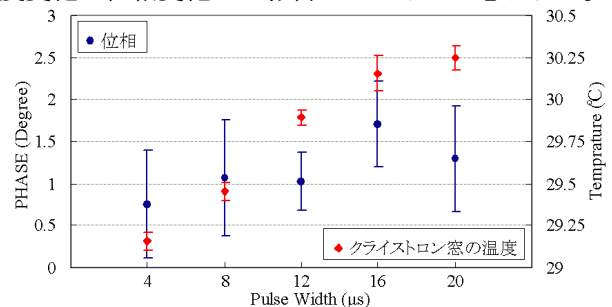


図 5 : パルス幅とクライストロン窓の温度及び位相の変化。

3.6 周辺環境温度と位相変動

その他のクライストロン位相変動の要因を表1にまとめる。これらの変動は小さいので、RF アンプの位相変動に依存しないクライストロンの位相変動を説明できる要因ではないと思われる。

表1. 位相変動の諸要因

要因	変化率 (°/°C)	温度変 化 (°C)	位相変 動 (°)
冷却水温度変化 ^[5]	0.6	±0.1	0.12
ケーブル (10m)	10 ⁻²	3.5	0.035
ドリフト管長の収縮 ^[5]	10 ⁻⁴	-	-

3.7 パルス内の位相変動

RF が長パルスの場合、半導体増幅器での半導体ジャンクションの温度の上昇は無視できず、それによるパルス内の位相変動は大きい。パルス内での位相変動の測定では、RF アンプ出力よりもクライストロン出力の方が大きく観測されている^[2]。図6に、パルス内の位相変動波形を示す。RF アンプのパルス内位相変動は±0.6° (Ref2)で、クライストロンでは±1.5° (Ref4)ある。関数発生器でRF アンプ出力位相を補償して±0.4° (Ch1)にした場合、クライストロンの出力位相は±1.3° (Ch3)になる。RF アンプで除去された位相変動の±0.2°は、クライストロン出力でも同じように除去されている。この補償の結果から、RF アンプの位相変動が直接起因していないクライストロン位相変動が、±0.9°あることがわかる。

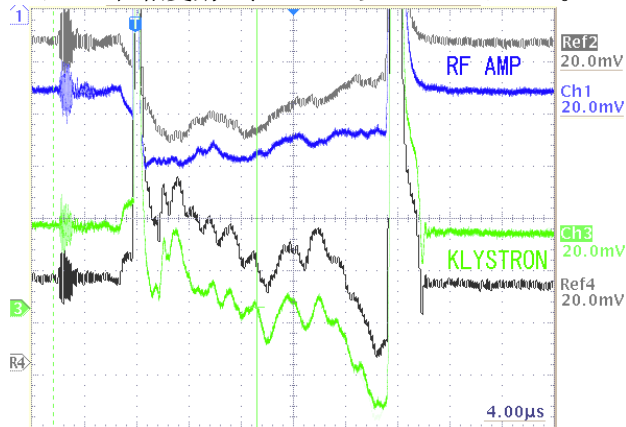


図6：パルス内の位相波形。Ch1、Ref1：0.05°/mV、Ch3、Ref4：0.04°/mV。

3.8 パルス内での長時間の位相変動

図7にクライストロンの印加電圧を19.5kVにしてから、30分ごとに記録したパルス内のクライストロン出力位相波形を示す。これは、クライストロン出力位相にフィードバック補償をして測定した。パルス内の位相波形は、ほぼ保存されているように見えるが、パルスの後ろの部分はやや変化しているように見える。関数発生器を用いてのパルス内の位相変動補償では、パルスの先頭の2µsを除けば平坦部は±0.3°である。しかし、pulse-to-pulseでは位相の形がパルス内でも変化していることが観測されている。

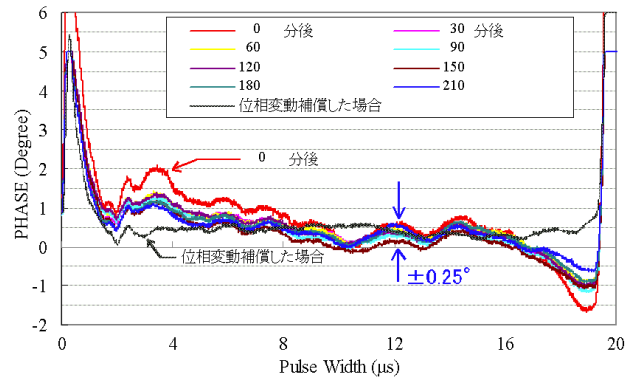


図7：30分ごとに測定したパルス内位相波形と位相変動補償した場合の位相波形。

4. 考察

以上の結果から、クライストロンで生じる位相変動は0.9°/°Cと見積もることができる。クライストロン出力のこの位相変動の要因は明らかでない。一方、パルス内でのクライストロンで生じる位相変動は±0.9°である。この変動の原因としては、PFN調整があげられるが、PFN調整によって位相をどの程度まで平坦にできるかは、今のところは明らかでない。

5. まとめ

クライストロンで生じる位相変動が見積もられたが、今回、この原因の特定はできなかった。クライストロンの位相変動補償はビームの安定化には必要不可欠であり、今回の位相測定結果から、温度変化が主因と考えられる長時間のクライストロン出力位相変動は、フィードバック補償をすることで±0.2°に制御でき(図2②期間)、パルス内の位相変動はフィードフォワード的に関数発生器で平坦部を±0.3°に補償可能であることが明らかになった。しかし、現状ではこの方法では除去できないパルス間の位相変動^[6]や電源変動^[4]による不安定性があり、加速ビームの安定性は充分でない。

参考文献

- [1] 佐藤 勇、他., "日本大学電子線利用研究施設の現状と研究計画" Proc. of this Meeting.
- [2] 横山 和枝、他., "RF Phase Drift Compensation with a Function Generator", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.108, 2000. URL: http://www-linac.kek.jp/mirror/www.spring8.or.jp/JA-PANESE/conference/li-me00/proc_index.html
- [3] 横山 和枝、他., "クライストロンドライブ系の位相安定化", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.231, 2001. URL: <http://conference.kek.jp/lam26/PosterPr.htm#L5>
- [4] 早川 建、他., "商用電源変動とビーム不安定性", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.285, 2001. URL: <http://conference.kek.jp/lam26/PosterPr1.htm#P3>
- [5] K.Nakao. et al., "PHASE VARIATION OF HIGH POWER KLYSTRON AT KEKB LINAC", Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, p.137, 1997. URL: <http://conference.kek.jp/lam26/PosterPr1.htm#P3>
- [6] 境 武志、他., "FEL用Sバンドロングパルスクライストロンの動作安定化テスト" Proc. of this Meeting.

FEL 用 S バンドロングパルスクライストロンの動作安定化テスト

境 武志^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、菅野 浩一^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、橋本 英子^{A)}、藤岡 一雅^{A)}、村上 琢哉^{A)}、長谷川 崇^{A)}、宮崎 慎也^{A)}

^{A)} 日本大学大学院 理工学研究科 量子理工学専攻 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物理実験 B 棟

^{B)} 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物理実験 B 棟

概要

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設(以下LEBRA)では、2000年度から行っているクライストロン RF 窓下流側の真空排気能力強化によって、短パルス用クライストロン PV-3030A1 (三菱電機製)をくり返し 12.5Hz、パルス幅 20 μ s で出力電力 20MW の厳しい運転条件で動作させることに成功した。しかし高出力、長パルス動作が可能になったが、出力電力パルス内での位相変動、位相変動による FEL 発振不安定性等の問題が起きている。ここではクライストロン入力空洞からの反射電力、クライストロン出力電力内位相変動、RF 窓周辺の放射線量等をモニターしながら、集束磁場の条件を変えて調整を行いクライストロンの動作安定化を行った。その結果調整前に比べクライストロン出力電力が安定した。

1. はじめに

LEBRA では赤外線から紫外線波長領域(0.3~5.0 μ m)の FEL 発振、エネルギー範囲 3~30keV のパラメトリック X 線放射の発生を目指しており、2001年5月に 1.5 μ m の FEL 発振に成功している^[1]。そして各線源の実用化のために発生装置には安定で良質な電子ビームの供給が必要であり、リニアックの安定化、及び高度化を現在行っている。リニアックの安定動作にとって RF 源安定化は特に重要である。

今回クライストロン 1号機に使用していたアンプの交換を行った。アンプのクライストロンへの接続前の出力動作試験では出力位相には変動が目立たなかったが、クライストロンに接続したところ急に変動が起き始めた。そこでクライストロンから RF 入力部分への反射電力を測定したところ、反射電力とアンプ位相変動の間には何らかの関係があることがわかった。そこでクライストロン出力電力、出力電力パルス内位相変動をモニターし、さらに出力空洞から RF 窓周辺部の放射線量を測定しながらクライストロン集束磁場調整を行った。ここではクライストロンからの反射測定、集束系調整について報告する。

2. クライストロン集束磁場調整

今回パルス内の位相変動の小さい S バンドアンプ(前置アンプ)への交換を行ったが、アンプからクライ

ストロンに供給するラインを接続すると、アンプの出力位相と振幅がパルスごとに変動することがわかった。これはアンプ単体で行ったテスト試験の時には起きていなかったが、供給ラインを繋ぐと変動が生じた。この現象は交換前のアンプでも起きていたようだが、新しいアンプでは位相に特に注目していたので、詳しく原因を追求することにした。クライストロン入力空洞からの反射が何らかの影響を与えていると考え、空洞からの反射を測定することにし、クライストロン集束磁場調整を行うこととした。

2.1 使用中の S バンドククライストロン

LEBRA では KEK の RF 入射部で使用していた短パルス用クライストロン PV-3030A1 を移設し、真空排気強化を行い 2 台使用している^{[2][3]}。使用しているクライストロンを図 1 に、運転スペックを表 1 に示す。



表 1:LEBRA でのクライストロン PV-3030A1 運転スペック

動作周波数	2856MHz
出力電力	18~20 MW
パルス幅	20~21 μ s
パルスくり返し	2~12.5 Hz
ビーム電圧	210~249kV
ビーム電流	195~226A

図 1: クライストロン PV-3030A1(三菱電機製)。RF 窓下流で真空排気強化を行っている。

2.2 反射電力測定

クライストロンの電力入力端子の前に方向性結合器をつけ、クライストロンから反射してくる電力の測定を行った。反射電力は校正した検波器を用いて測定した。測定方法の概略図を図 2 に示す。

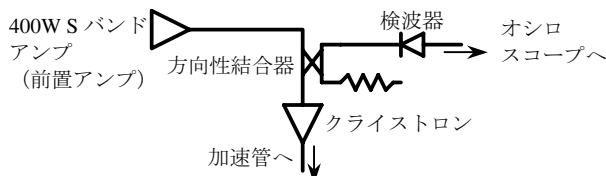


図 2: 反射測定での概略図。クライストロンからの反射は方向性結合器で取り出し、検波器を用いて測定した。

¹ E-mail: sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

反射電力測定の結果、クライストロンを動かしていないときは入力電力約 100W に対して、およそ 27W も反射し、クライストロンを動かしている場合(ビーム電圧 249kV 時)でもおよそ 7W 反射していることがわかった。クライストロン停止時に反射電力が多いのはクライストロンとのマッチングが取れていないため、ビームを通し、ビーム電圧を上げていけばマッチングが取れ始め、反射が減少する。

2.3 反射とアンプ位相との相関関係

クライストロン入力空洞からの反射電力とアンプ位相との相関関係を見るために、2つの値を同時に測定し比較した。測定ではクライストロン集束コイルの電流値をいくつか変えて行った。測定した中で大まかに 2つのパターン(パルスごとの反射電力の変動が大きい時と小さい時)があった。図3に反射電力とアンプ位相角の相関関係を示す。しかし、アンプにはサーキュレーターが入っているため反射の影響は通常考えにくい、反射電力とアンプの位相の間には何らかの相関関係があると思われる。

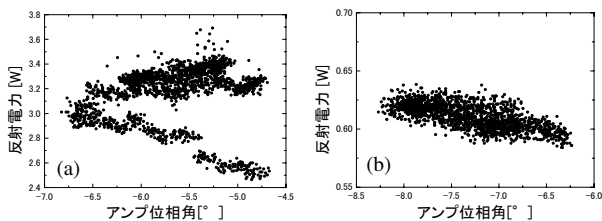
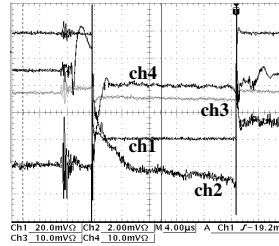


図3：反射電力とアンプ位相角の相関関係。(a)パルスごとの反射電力の変動が大きい時。いくつかの島に分かれている。(b)パルスごとの反射電力の変動が小さい時。

2.4 クライストロン集束磁場調整

2.2節で述べたように、クライストロンの反射の測定からクライストロン入力空洞からの反射電力が以外に多いことがわかり、現在のクライストロン集束磁場があまり最適化されていないと考えられた。また2.3節で示したように、反射電力とアンプ位相角の間に何らかの関係がある。そこで、反射電力とクライストロン出力電力、出力電力位相、アンプ出力位相を主にモニターし調整を行うことにした。また集束の状態によってはドリフト管にビームがあたり、そこからの放射線量の増加があると考えられるので、クライストロン出力空洞から RF 窓周辺部の放射線量のモニターも行うことにし、合計 5つの値をモニターしながらクライストロン集束磁場の調整を行うことにした。この調整では、クライストロン出力電力値のみを見るのではなく、位相変動に注意しながら、クライストロンから戻ってくる反射をできるだけ少なくなるようにし、なおかつ、放射線量もできるだけ低くなるように調整を行うこととした。放射線量の測定はアロカ製のγ線サーベメータを用い、RF 窓部に取り付けてある鉛ブロックを外して行った。集束磁場調整前の出力電力、反射電力、クライストロン出力位相、アンプ位相を図4に示す。このときの放射線量は 1.5μSv/h であった。



ch1:クライストロン出力電力
ch2:アンプ出力の位相
ch3:クライストロンからの反射
ch4:クライストロン出力位相
(出力電力 18MW、反射電力 7W、放射線量 1.5μSv/h、パルスごとのアンプの位相変動 2°、パルスごとのクライストロン位相変動 0.8°)

図4:クライストロン1号機における出力電力、反射、アンプ位相、クライストロン出力電力位相。

2.5 調整結果

クライストロン集束磁場の調整はいくつかのパターンで行った。図5にクライストロン集束コイルと各空洞の位置関係を示す。同図内に過去に三菱電機で行った動作テスト時の磁場分布を示した。はじめに、図5で示した磁場分布にするために集束コイルの電流値を設定し、その値を基準として集束磁場調整を行った。表2に各調整条件を示す。

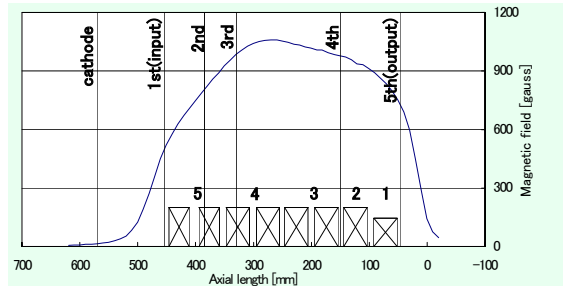


図5：各空洞と集束コイルの位置、及び磁場分布。

表2：各調整条件

- (a):三菱電機での動作テスト時の磁場分布(図5参照)
- (b):設定(a)からコイル1の電流を30%下げ、コイル5を30%上げる
- (c):設定(a)からコイル3~5の電流を10%上げる
- (d):設定(a)からコイル3を25%、コイル5を10%上げる

調整条件(a)では、図6-(a)のような結果になった。このとき出力電力 18MW、反射電力 0.8W、放射線量 1.0~1.3μSv/h であった。次に調整条件(b)では、図6-(b)のようになり、出力電力波形の形や出力値にはあまり変化が見られなかったが、後半部分の位相と反射波が部分的に欠ける現象が見られた。このときの出力電力 19.8MW、反射電力 0.9~2W、放射線量 2.0μSv/h であり、(a)より全体的に悪くなった。次に調整条件(c)の結果を図6-(c)に示す。このとき各波形の後半部分が乱れてしまった。このときの出力電力 17MW、反射電力 1.2W、放射線量は(a)、(b)の時より多く 2.5~3.0μSv/h であった。この磁場分布では、クライストロン内部で電子ビームがドリフト管等に当たっている可能性が高いと考えられる。図6-(d)には調整条件(d)の場合を示す。このとき、出力電力 18MW、反射は十分に抑えられ約 0.6W であった。また放射線量も 0.5~1.0μSv/h と低く抑えることができ、位相の変動量も少なくなった。表3に各条件での反射電力、パルスごとの変動量(温度による長期変動は含んでいない)、放射線量をまとめた(条件(c)は変動計測を行っていないので未記入)。以上の調整より、調整前に比

べ出力電力は減少したが、電子ビーム加速ための必要電力値は満たしているため、調整(d)を採用した。

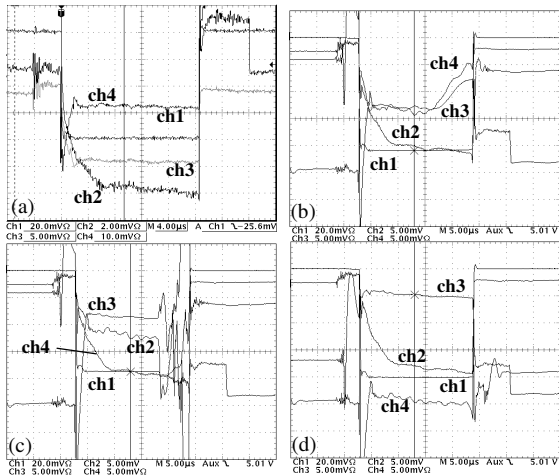


図 6: クライストロン集束磁場調整による反射と位相の波形 (*各 ch は図 4 と同じ)。 (a)三菱電機での動作テストで用いた磁場分布の場合。この時を基準に調整。 (b)コイル 1 の電流を 30%下げ、コイル 5 を 30%上げた場合。 (c)コイル 3~5 の電流を 10%上げた場合。 (d)コイル 3 の電流を 25%、コイル 5 を 10%上げた場合。

表 3:各調整におけるパルスごとの安定度の比較

調整条件	kly 出力 変動[%]	kly 位相 変動[°]	Amp 位相 変動[°]	反射電力 [W]	放射線量 [μSv/h]
調整前	±1	0.8	0.2	7	1.5
(a)	±1	0.5	0.2	0.8	1.0~1.3
(b)	±2	0.3	0.15	0.9~2	2.0
(c)	—	—	—	1.2	2.5~3.0
(d)	±0.8	0.3	0.15	0.6	0.5~1.0

*温度変化による長期変動⁽⁴⁾は含んでいない。

3. 反射波の周波数成分測定

クライストロンから反射してくる波の中に高調波成分やサブハーモニックな周波数成分が含まれている可能性が懸念されたので、反射波の周波数成分測定を行うことにした。始めにスペクトラムアナライザを用いた測定を行ったが、2856MHz の周波数成分があることの確認が取れただけで、高調波、サブハーモニック成分は無かった。また同時にミキサーを用いた測定も行った。測定方法の概略図を図 7 に示す。測定では反射してくる波とシグナルジェネレータ(SG)の CW の信号をミキサーに入れ、周波数を変化させながら測定を行った。しかし、反射波に対して周波数の低い周波数帯域をカットできるフィルターが無かったので、ミキサーでの測定も 2856MHz の測定しか行えなかった。図 8 に SG 入力信号の周波数が 2856MHz の時と、1MHz ずれた時の信号を示す。

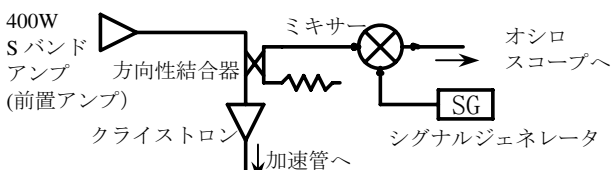


図 7: 反射波の周波数成分測定の概要図。反射信号と SG からの信号をミキサーに入れ測定。

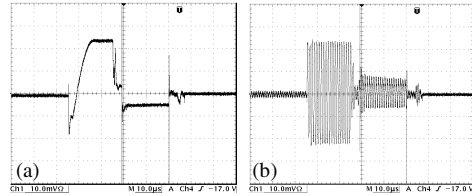


図 8: 反射波の周波数成分測定結果。 (a)SG からの信号の周波数が 2856MHz のとき。反射波には 2856MHz の周波数成分が含まれていることがわかる。 (b)SG からの信号が 2856MHz から 1MHz ずれたとき。反射波と SG からの信号との周波数のずれが見えている。

4. まとめ

クライストロン入力空洞からの反射電力、出力電力、出力電力パルス内の位相、アンプ位相、放射線量をモニターしながらクライストロン集束磁場の調整を行ったが、集束磁場の調整により反射を抑えながら位相変動もできるだけ小さい状態にし、なおかつ放射線量を下げないように調整を行うことで、変動をある程度まで抑えることができたといえる。クライストロンの長パルスでの安定動作のためには、単に出力電力のみに注目して集束調整を行うのではなく、クライストロン入力空洞からの反射電力、クライストロン出力電力位相、アンプ位相、放射線量等の複数のパラメーターをモニターしながら調整を行うことが必要といえる。

5. 今後の課題

今回の集束磁場調整では、1号機だけの調整を行ったが、2号機でも同様の調整を行い、実際に加速する電子ビームの安定度、自由電子レーザー発振での安定度と比較した確認を行う予定である。

また、LEBRA でのロングパルス運転条件におけるクライストロンの最適な集束条件に関して、今回の調整条件と結果とを考慮しシミュレーションを行い、クライストロン内部での状態を調べ、出力電力のより高い安定化を行っていく。

3章で述べたスペクトラムアナライザ、ミキサーを用いた反射波周波数測定では高調波成分等が存在するかどうかの確認ができなかったため、バンドパスフィルターを用いて反射波の周波数成分に 2856MHz 以外の周波数成分が含まれていないかどうかの測定を行い確認する予定である。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et al., "First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5μm", Nucl. Instr. and Meth. A (2002), Volume483/1-2, pp.29-33 (NIMA18811)
- [2] T.Sakai, et al., "Improvement of the Long Pulse Operation of the S-Band Klystron", Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July.12-14, 2000, p228-230. URL: http://www-linac.kek.jp/mirror/www.spring8.or.jp/JAPANESE/conference/li-me00/proc_index.html
- [3] 境 武志,その他, "FEL 用クライストロンのグレードアップ", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, August.1-3, 2001, p222-224. URL: <http://conference.kek.jp/LAM26/>
- [4] 横山 和枝,その他, "クライストロンドライブ系の位相安定化", Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, August.1-3, 2001, p231-233. URL: <http://conference.kek.jp/LAM26/>

ストリップライン型ビームポジションモニターの研究 —ビームパルス内におけるビーム位置変動—

石渡 謙一郎^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、
諏訪田 剛^{C)}、境 武志^{A)}、菅野 浩一^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、橋本 英子^{A)}

^{A)} 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

^{B)} 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

^{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

加速器を運転中にビームを遮ることなくビーム位置を知るためにストリップライン型ビームポジションモニターを製作した。製作した BPM の較正を高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のテストベンチを用いて行い、ビームテストは LEBRA の FEL 用ビームラインのアンジュレーターの入口・出口および加速器出口付近に設置した。これにより実験中にビームを遮ることなく常時モニターが可能になる。今回、125MeV 電子線形加速器の電子ビームを使用して、各 BPM の 4 つの電極から出力される RF をクリスタル検波器で検波し、オシロスコープで電圧を測定し、RF 電力に換算し較正曲線よりビーム位置を求めた。電子ビームのパルス幅が長く $20\mu\text{s}$ ある特徴から、ビームパルス内におけるビーム位置変動の測定と FEL ビームラインにおけるビーム軌道の測定を同時に行った。

1. はじめに

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 (LEBRA) では、KEK との共同研究により、赤外線自由電子レーザー (FEL) 用アンジュレーターによって、2001 年 5 月に $1.5\mu\text{m}$ 赤外線 FEL の発振に成功し^[1]、波長領域 $0.8\sim 5\mu\text{m}$ の FEL 実用化に向けて大強度・波長可変の自由電子レーザーを発生させるために 125MeV 電子線形加速器の高性能化を進めている。また、パラメトリック X 線放射 (PXR) 用ビームラインが完成し実用化に向けて基礎実験を開始した。

FEL を効率よく発生させるには光共振器中を通過する電子ビーム軌道の高精度の制御が重要になる。FEL ビームラインで以前に使用していた破壊型のビームプロファイルモニターでは、強い放射線が生じアンジュレーターの永久磁石の磁場を劣化させた。そのため、破壊型のモニターの使用をやめたため、FEL 用ビームラインにはビーム位置をモニターできるものがなかった^[2]。そこで、電子ビームが誘起する RF をダクト中に挿入したアンテナで検波する、電子

ビームを遮ることのない非破壊型の BPM を 3 台製作し破壊型のかわりに使うことにした^[3]。この BPM の較正を KEK のテストベンチを用いて行なった。そして BPM をアンジュレーターの入口と出口および加速器出口付近に設置し (図 1 参照)、パルスビーム内におけるビーム位置変動の測定と FEL ビームラインにおけるビーム軌道の測定を同時に行ったので、その報告をする。

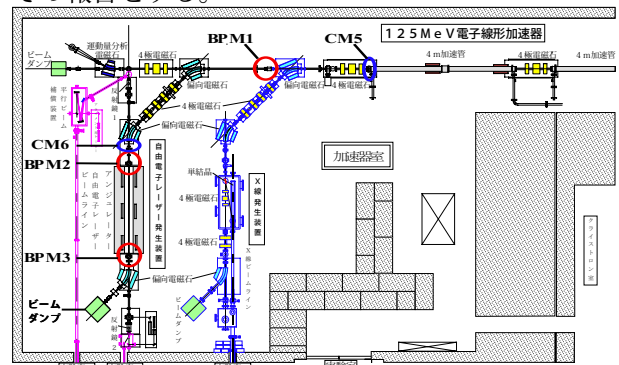


図 1. BPM1,2,3 と CM5,6 の設置箇所

2. BPM の構造

LEBRA の電子線形加速器は加速周波数 2856MHz の RF と同周期でバンチしたビームが BPM を通過する際、誘起された 2856MHz のマイクロ波が電極とビームの距離に依存した強度で検出される。BPM の電極はストリップライン型で、同軸ケーブルの特性インピーダンス 50Ω に一致するように作られている。また、電極の長さは 26.25mm としてある^[3]。

3. BPM の較正

BPM の較正は Signal Generator から周波数 2856MHz, CW, 5dBm の RF を RF アンプを用いて増幅し、約 25dBm の RF を直径 0.5mm のタングステンワイヤーに伝送させることにより擬似ビームを作り、各電極から出力される RF をクリスタル検波器で検

¹ E-mail: ishiwata@lebra.nihon-u.ac.jp

波し、ワイヤーの位置と検波信号をオシロスコープで測定することにより行なった。また、BPMの各電極に取り付けた長さ12mのRG-55/U高周波同軸ケーブルの減衰量を含め校正係数 k_{xij}, k_{yij} を求めた^[4]。このとき、校正係数の次数を3次までとると、BPMの中心から半径4mm以内の範囲で校正曲線からビーム位置に変換した値とワイヤー位置との差が0.1mm以内で校正ができた。

4. ビームパルス内におけるビーム位置の検出

4.1 測定方法

BPMの各電極からの信号は、長さ12mのRG-55/U高周波同軸ケーブルを用いて、加速器本体室から実験室まで運び、クリスタル検波器（Agilent Technologies製, 423B, 0.01~12.4GHz）で検波し、オシロスコープで検波電圧を読み取った。

この電圧をRF電力に換算し(1)式の校正曲線よりビーム位置を導出する^[4]。

$$X = \sum_{i,j=0}^3 k_{xij} \left(\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \right)^i \left(\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \right)^j \quad (1)$$

$$Y = \sum_{i,j=0}^3 k_{yij} \left(\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \right)^i \left(\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \right)^j$$

$$\Delta_x = \sqrt{P_1} - \sqrt{P_3}, \quad \Sigma_x = \sqrt{P_1} + \sqrt{P_3}$$

$$\Delta_y = \sqrt{P_2} - \sqrt{P_4}, \quad \Sigma_y = \sqrt{P_2} + \sqrt{P_4}$$

ここで、 X : BPM中心から水平方向のビーム位置、
 Y : BPM中心から垂直方向のビーム位置、
 k_{xij}, k_{yij} は校正係数、 P_1, P_2, P_3, P_4 はそれぞれ+X側,+Y側,-X側,-Y側の各電極からのケーブル減衰量を含めたRF出力電力である。

4.2 測定結果

測定は、ビームエネルギー86.8MeV、パルス幅20 μ s、繰り返し2Hzで行った。このときBPM電極出力の検波波形を図2に示す。また、ビーム電流の波形を図3に示す。各モニターの設定箇所は図1に示した。

4.3 ビーム位置の評価

得られたデータから式(1)を用いてビーム位置を求めた。オシロスコープで取り込んだデータはS/N比が30倍程度あり、ノイズによりビームが0.2mm程度の変動してみえるため、80nsごとにデータ20個の平均を取り、S/N比が120倍程度にしノイズを除去した。ノイズ除去後のパルス内におけるビーム位置の変動を図4に示す。加速器出口付近のBPM1のX,Y方向ともに、パルス内におけるビーム位置変動が0.1mm程度で安定しているが、45°偏向電磁石で2回曲げられたFELビームラインのBPM3のX,Y方向

ともにパルス内においてビーム変動が0.3mm程度起きていることがわかった。

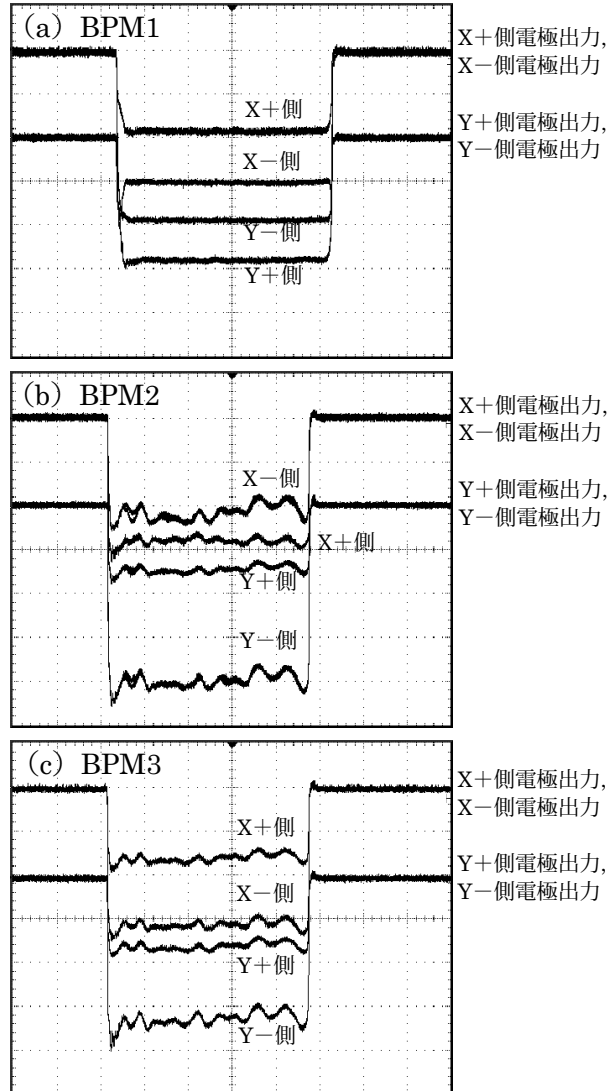


図2. BPMの電極出力の検波波形

(a),(b),(c): BPM1,2,3の電極出力の検波波形

(a),(b),(c)ともに、縦軸: 20mV/div 横軸: 4 μ s/div

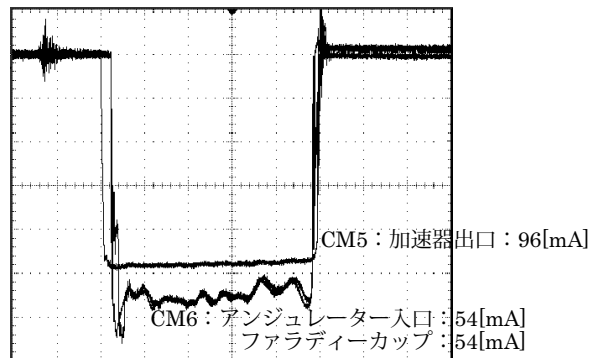


図3. CM5,CM6,FCの出力波形

縦軸 CM5: 20mA/div, CM6: 10mA/div, FC: 10mA/div
 横軸: 4 μ s/div

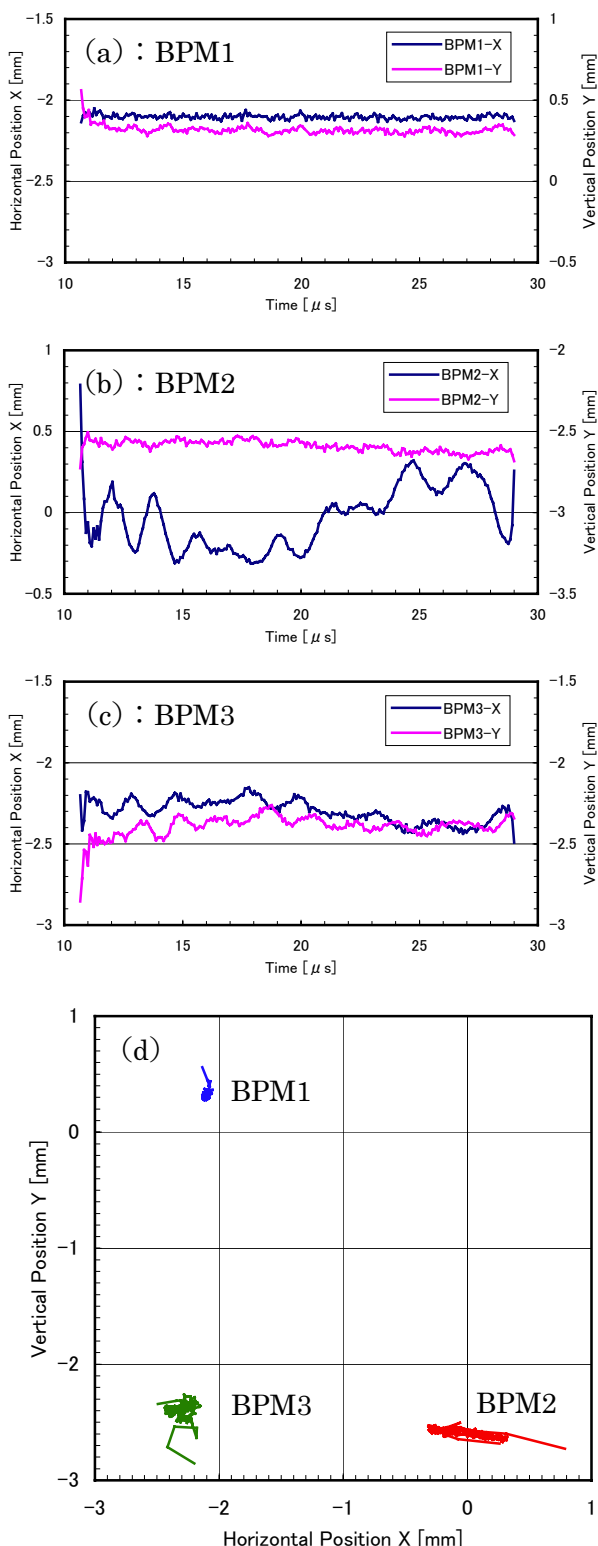


図4. パルス内におけるビーム位置の変動
 (a),(b),(c) : BPM1,2,3 のパルス幅 $20\mu\text{s}$ における時間とビーム位置 X,Y の位置変動。
 (d) : パルス内において 80ns 間隔でビーム位置 X-Y をプロットしたものを線で結んだ。プロットの塊から伸びた線はビームの立ち上がりと終わりである。

しかし、BPM2 の X 方向のビーム位置は最大 0.65mm 変動している。この波形はビーム電流の波形 (図3の CM6) の形が顕著に表れていることから、図2の X+側電極出力波形と X-側電極出力波形を比較すると、X+側波形の方が出力が大きいにもかかわらず、波形が平坦になっており、異常な信号出力だと考えられる。原因としては、まず、検波器の特性が考えられるが Signal Generator の出力を加速周波数 2856MHz で測定したときには検波器の出力電圧 120mV 以下の範囲で検波出力の飽和は起こらなかった。また、 45° 偏向電磁石直後に設置してあり水平方向のビーム進行方向右側の電極であり、ビームによる影響などが考えられるが、原因は不明である。

また、BPM2 の信号に異常があるが、図4(d)において BPM2 と BPM3 を比べると FEL ビームラインでビーム軌道はダクトに対して斜めに通過していると考えられる。

5. まとめと今後の課題

パルスビーム内におけるビーム位置の変動が BPM 3 台中アンジュレーター出口に取り付けた BPM2 で確認できた。しかし、アンジュレーター入口に取り付けた BPM では電極の1つに異常な信号出力が検出されたので、今後原因を追求する。

今回、FEL の発振実験を BPM 取り付け後行なっていないので、FEL 発振時のビーム軌道のデータを取り、FEL 発振とビーム軌道の関係を追及していく。

現在この BPM により実験中にビームを遮ることなくビーム位置がオシロスコープを使用してモニターが可能になった。しかし、各電極の出力を同じ電圧にすればビームがダクトの中心を通過していることになるわけではない。これではビーム位置の変化とおおよその位置は確認できるが、運転時にビームの正確な位置が知ることができない。今後の課題として、クリスタル検波器で検波した電圧を 10bit ADC で AD 変換しパソコンに読み込み、ビーム位置に換算を行い、随時正確なビーム位置を表示できるようにする。位置検出を 0.1mm の精度で行う予定なので S/N 比を今回の測定から推測すると 100 倍以上にすることが必要と考えられるのでノイズ対策も必要となると考えられる。

参考文献

- [1] 佐藤勇 他, “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”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001, p30-33
- [2] I.Sato, et al., “Advanced Status at LEBRA in Nihon University”, Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July. 12-14, 2000, p24-28
- [3] 石渡謙一郎, “非破壊型ビームポジションモニターの開発研究”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001, p270-272
- [4] T.Suwada and H.Kobayashi “Test-Bench Calibration System of Stripline-Type Beam-Position Monitors for The KEKB Injector Linac”, Proceedings of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, September.16-18, 1998, p175-177

日本大学電子線利用研究施設における加速器モニタの開発

中尾圭佐^{1,A)} 佐藤勇^{B)} 早川建^{B)} 田中俊成^{B)} 早川恭史^{B)} 横山和枝^{B)} 境武志^{A)} 菅野浩一^{A)} 石渡謙一郎^{A)}
橋本英子^{A)} 藤岡一雅^{A)} 村上琢哉^{A)} 長谷川崇^{A)} 宮崎慎也^{A)}

^{A)} 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 日本大学工学部船橋校舎 電子線利用研究施設

^{B)} 日本大学量子科学研究所

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学工学部船橋校舎 電子線利用研究施設

概要

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では、電子線形加速器の周辺機器及び周辺環境を常時モニタするシステムを開発している。現在商用電源変動及び実験室内 γ 線量モニタが稼動しており、監視データは Web で公開し簡単にアクセスできるようになっている。本稿ではこのシステムの概要を述べる。

1. はじめに

LEBRA では、2001 年 5 月に自由電子レーザー(FEL)発振に成功し、今年の秋以降 FEL を使うユーザ実験が始まる予定である¹⁾。ユーザ実験が始まると運転停止期間を最小にする要求があるが、そのためには加速器及びその周辺機器の健康管理が必須である。しかし現状では健康管理に必要な長期間の連続したデータがない。また航空機のフライトレコーダのような、トラブル時の手がかりになるものが必要である。そこで加速器とその周辺機器及び周辺環境を常時モニタし、その記録を公開するシステムを構築している。

2. 何を測るか

上記のような要求から、測定点は網羅的にならざるを得ない。そこで以下のような測定点を考えている。

- ビーム電流
- ビームエネルギー
- 電子銃のエミッション電流
- Klystron 出力 Power
- RF アンプの出力 Power
- 偏向電磁石の入力電圧及び電流
- 加速管、導波管内の真空
- 加速器及び周辺機器付近の温度
- 冷却水温度
- 商用電源電圧
- 運転者の操作量

商用電源電圧を測定する理由は、商用電源電圧の変動がビームに影響することがわかっているからである²⁾。運転者の操作量は、トラブル時に運転者の意

図を推測するための手がかりであり、加速器制御プログラムによって記録される³⁾。

3. システム構成

システム構成を図 1 に示す。本システムは、測定機器のアナログ信号を A/D 変換してデータベースに記録する Device Server と、測定データを保持する Database と Database に格納されたデータを公開する Web Server からなる。

ユーザは Web ブラウザで Web サーバにアクセスし、データの種類、期間、フォーマットを指定して Submit ボタンを押すと指定されたデータを閲覧することができる。現在サポートしているフォーマットは、グラフ表示とカンマ区切りテキストである。Submit ボタンを押すと Web ブラウザは CGI を呼び出す。CGI は Web サーバ上で動作するプログラムで、ユーザからのリクエストを受け取ると、データベースにアクセスし指定された種類、期間のデータを取得し表示する。フォーマットに「グラフ表示」が指定された場合は、取得したデータを gnuplot に渡してグラフを画像として生成し、その画像を表示する HTML を出力する(図 2)。カンマ区切りテキストは表計算ソフトで解析が必要な場合の利便性を考えたもので、Web ブラウザでダウンロードすることができる。

これらの CGI、Device Server プログラムは C++ で書かれている。

4. 測定対象の追加

2 章であげた測定対象以外の測定点を追加したいという要求が出てくるのは想像に難くない。そのためにはまず Device Server で動作しているプログラムに追加する測定対象を A/D 変換するように書き換えなければならない。この書き換えが簡単でなければ、測定対象を追加する度にバグが混入し不安定になってしまう可能性が高いだけでなく、柔軟性の低いシステムの烙印を押されてしまう。

しかし各測定対象は、測定間隔が異なっていたり、瞬時値が必要なもの、サンプリングが必要なものなど様々である。

¹⁾ E-mail: nakao@lebra.nihon-u.ac.jp

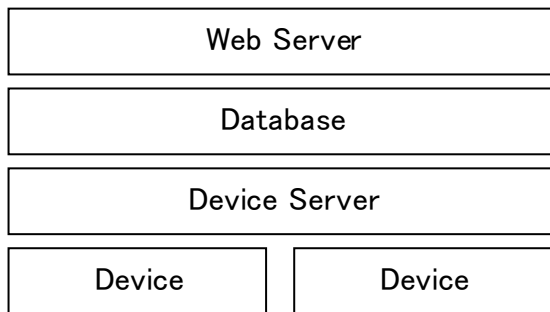


図1 システム構成

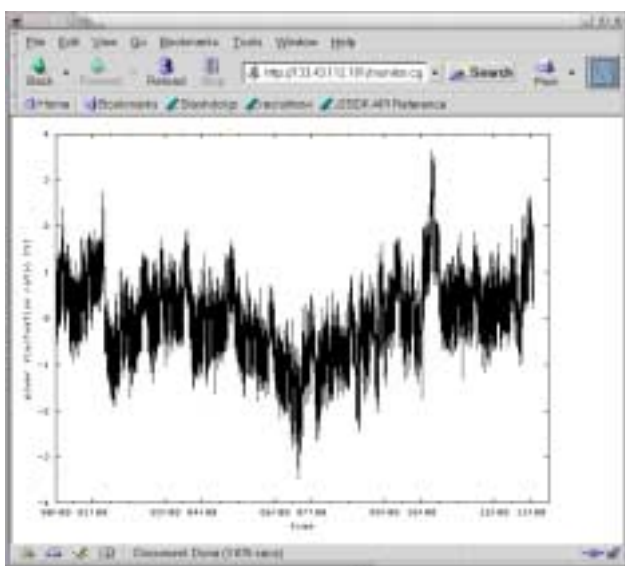


図2 商用電源変動グラフ表示例

例えば商用電源変動を記録する場合、実効値を記録したいので、交流波形をサンプリングして実効値を計算する必要があるが、 γ 線量を記録する場合は γ 線量計の瞬時値で十分なのでサンプリングする必要はない。

そこで、C++のオブジェクト指向という特徴を生かし測定対象毎の処理をクラスで隠蔽し独立性を高めた。このクラス構造を図3に示す。ここではデザインパターンの一種であるCommandパターン^[4]を適用した。Commandパターンは処理をカプセル化する。クラス構造の一部を図3に示す。

クラスDataTakerA、DataTakerBは、測定対象A及びBのデータ取得処理をカプセル化することを目的としたクラスで、抽象クラスObserverから派生し、その処理をtakeInメンバ関数に記述する。

TimerTaskは複数のObserverオブジェクトを持ちそのObserverオブジェクトのtakeInメンバ関数を順次呼んでいくexecuteメンバ関数を持っている。

プログラムは複数のスレッドを持ち、各スレッドでひとつずつTimerTaskオブジェクトを生成する。スレッドを一定時間待機させた後executeメンバ関数

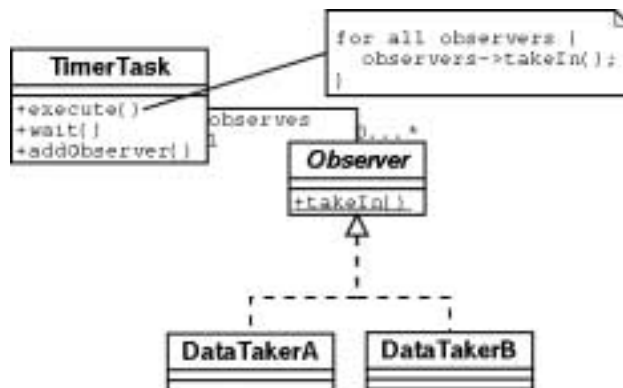


図3 クラス図 クラス図はクラスやインターフェースなどの相互の静的な関係を表す。クラスTimerTaskはexecute, wait, addObserverの3つのメンバ関数を持つ。DataTakerA及びBは抽象クラスObserverから派生させ、takeInメンバ関数を再定義している。

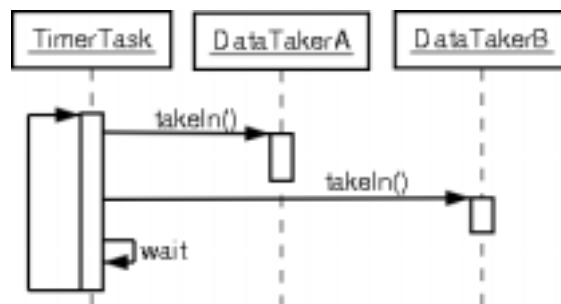


図4 シーケンス図 シーケンス図はオブジェクト間の相互作用を時系列で表している。オブジェクトTimerTaskはDataTakerA及びBのtakeInメンバ関数を呼び出し後一定時間待機し、これを繰り返す。

を呼ぶループを作れば、一定時間毎に測定を行うことができる(図4)。

測定対象を追加するには、Observerクラスを派生し、派生したクラスのtakeInメンバ関数にデータを取得する処理を記述した後、任意のTimerTaskオブジェクトにその派生クラスを登録すればよい。

5. 実装

現在商用電源変動及び実験室 γ 線量常時モニタが本システムで稼動している。現在クライストロンの真空度とアンジュレータ付近の気温の常時モニタの追加作業中である。

Device Server は、Microsoft Windows2000 で動作している。Web Server には Apache HTTP Server²を、データベースには PostgreSQL³を使用している。

Apache と PostgreSQL は同じ PC 上で稼動しておりこの PC の OS には Debian GNU/Linux⁴を採用した。

6. 評価

本稿執筆時点で稼動開始から約 3 週間が経過しているが、稼動開始当初 Device Server が Database にアクセスできないとプログラムが強制終了するというバグがあったが、修正後安定して稼動している。

Device Server 及び Database/Web Server に使用している PC は買い替えで余った PC を使用しており、また Windows2000 と開発環境のライセンス料、A/D 変換ボード代を除けば無料であるため、開発コストは低く抑えられている。

動作速度に関しては CGI の動作が遅い。これは CGI が Database に接続する処理が遅いためである。これを改善するために、起動時に Database との接続をあらかじめ確立しておく、コネクションプールを保持しておくことが一般に有効とされているが CGI はブラウザからアクセスされたときに起動するため、コネクションプールでは改善できない。現状では我慢できるレベルであるが、測定点が多くなるにつれてデータベースの負荷が大きくなるので CGI の処理がいつそう遅くなることが予想される。アクセスの多いデータをキャッシュするなどの対策が必要になるかもしれない。

ビーム電流等の加速器の運転に有用なデータのモニタが始まると、制御室でリアルタイムに表示したいという要求が出てくることが考えられる。前述のとおり CGI の動作は遅く、そもそも HTTP にはリアルタイム性は考慮されていない。そのため Web/CGI に変わるデータ公開法として CORBA を検討している。^{[5][6]}

6. まとめ

日本大学電子線利用研究施設では加速器及びその周辺機器のパラメータや周辺環境を常時モニタするシステムを開発しており、商用電源電圧モニタと、実験室 γ 線量モニタが、現在安定に稼動している。モニタしたデータは Web ブラウザを用いて誰でも閲覧することができる。

今後は測定点を増やすとともに、リアルタイム性をもつ監視データの公開方法を探っていく。

参考文献

- [1] 佐藤勇 他 「日本大学電子線利用研究施設の現状と研究計画」 Proceedings of this meeting.
- [2] 早川建 他 「商用電源変動とビーム不安定性」 the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001, p285-287
- [3] 早川建 他 「加速器調整履歴の集積」 Proceedings of this meeting.
- [4] Eric Gamma, et al., 「デザインパターン」 Softbank, ISBN4-89052-797-4
- [5] 上窪田紀彦 他 「Java と CORBA を使った加速器状態リアルタイム表示システム」 the JPS meeting in Osaka, Apr.2000, http://www-linac.kek.jp/~kami/report/jps00_osaka/ohp/html/JPS00.htm
- [6] T.Tanabe, et al., “Distributed-Object Based Design of RIBF Control System Using Java/Corba” Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Suita, Osaka, Japan, Oct. 2001, p108-

² <http://httpd.apache.org>

³ <http://www.postgresql.org>

⁴ <http://www.debian.org>

加速器調整履歴の蓄積

早川 建^{1,A)}、横山和枝^{A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、佐藤 勇^{A)}、
境 武志^{B)}、菅野浩一^{B)}、石渡謙一郎^{B)}、

^{A)} 日本大学量子科学研究所

〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

^{B)} 日本大学理工学部理工学研究科

〒274-8501 船橋市習志野台 7-24-1

概要

日大 LEBRA の電子線形加速器はビームを維持するために、オペレーターが付いて調整していなければならない。オペレーターの負荷を軽減するために、半自動もしくは自動運転ができることが望まれる。加速器運転中はビーム維持のために、オペレーターはマイクロ波の位相とステアリングコイルを含む収束系の調整を行なっている。この調整操作を記録し、その記録を解析することによって、加速器の挙動と運転制御の手法を評価する。この結果とビーム変動要因の解析に基づいて自動運転のシステムを構築する予定である。

1. はじめに

現在加速器の運転操作は、タイミングの調整、クライストロンパルス電圧の昇降、電子銃の操作を除いて、全てパソコンを通して行なっている^[1]。従って、オペレーターの行った調整行為を記録するのは比較的容易である。第2章で、制御システムのハードウェアの概要を、第3章でデータ集積を含むソフトウェアを簡単に説明する。第4章で、蓄積されたデータの例を紹介する。

2. 制御システム

制御用に使っているパソコンはクロック 1GHz の

Celeron プロセッサを搭載しており、この用途には十分な性能を持っていると思われる。各機器の配置を図1に、パソコンと各種機器との接続形態を図2に示す。制御用パソコンからは3系統のインターフェイスを通して機器との間で信号のやり取りを行なっている。一系統はシリアルインターフェイス (RS232C) を介して OMRON 社製のシーケンサー3台に接続されている。クライストロンのパルス変調器から発生するノイズの影響を避けるため、信号を光に変換して伝送している。シーケンサーの内、2台はパルス変調器の制御に使われ、1台が収束系の電源制御その他に使われている。

シリアルインターフェイスのもう一つのポートは、もう1台のパソコンに接続されている。このパソコンは GP-IB バスを介して、運動量分析系の90度偏向電磁石及び、四極電磁石の電源に接続されている。このパソコンはサーバーとして動作しており、制御用パソコンで動く制御プログラムからの指令により、電流値の設定及び、読み込みを行なう。このような方式にした理由は GP-IB バスのアクセス時に発生するオーバーヘッドを軽減するためである。また、バスの延長とパルスモジュレーターのノイズの影響を避けるため、光延長ケーブルを採用している。

移相器及び減衰器は制御用パソコンの PCI バスに接続された汎用の16bit 入出力ボードを介して制御している。

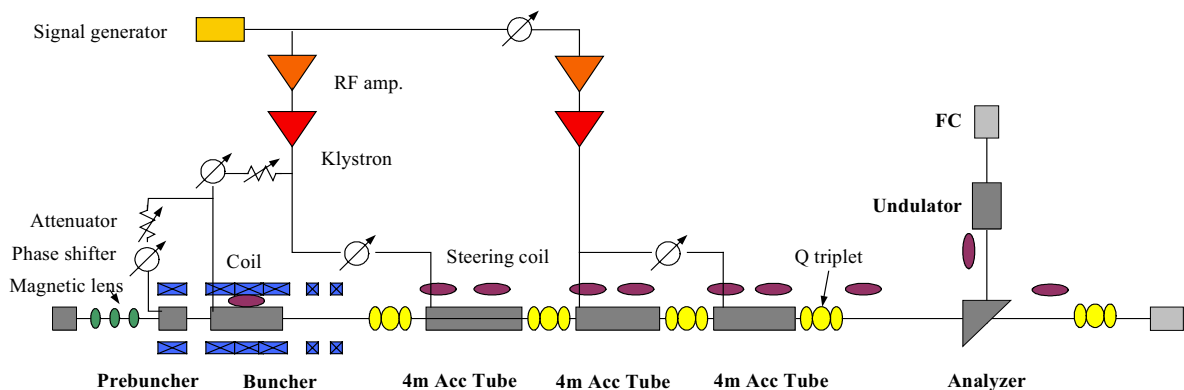


図1. マイクロ波伝送系及びコイル、電磁石の配置図。

¹ E-mail: hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp

2.1 収束系

収束系の制御は1台のシーケンサーが受け持っており、12組のxyステアリングコイル、3組のアンジュレーター内ステアリングコイル、5組のQトリプレット、3台のマグネティックレンズ、3台のソレノイドコイル及び、数台の補助的コイルの電源が含まれる。ここに繋がれている電源は全て制御電圧に比例した電流を出力する方式で制御されている。シーケンサーは電源の数に対応するチャンネル数のDAコンバーターを持ち、制御用パソコンからのデータに基づいて制御電圧を発生し、電源に印加している。また、ステアリングコイルなど、極性の切換えが必要なものは、出力部にリレーが取り付けられており、これもシーケンサーからの信号によって切換えられる。

2.2 移相器、減衰器

移相器、減衰器は新旧取り混ぜ、様々な形式のものが使われている。RFアンプの入力段に使われている高速φAを除いては、全て可動部を持ち、それらをモーターで動かすことにより位相及び減衰量を調節している。モーターにステッピングモーターが使われている機器と、ACモーターが使われている機器とがあり、ACモーターの場合は、リレーを使って直接接点を開閉し、ステッピングモーターの場合は、以前マイクロトロン制御用に使っていたステッピングモーターコントローラーを流用している。移相量及び減衰量はモーターの移動量をポテンシオメーターで読み取る方式になっている。このコントローラーはデジタルの電圧計が組み込まれており、同じイ

ンターフェイスを介して、モーターの駆動量を読み取っている。高速φAは、位相と振幅の補償を行なうためのフィードバックループの構成要素であり、調整には使わない。

3. 制御プログラム

制御プログラムはWindows2000の元で動くプログラムとして、簡便性と、メンテナンスしやすさからVisual Basicで記述した。マイクロ波系と、その他の系統は別のプログラムとして製作したが、別プログラムにする意味は特に無く、単に開発の都合によるものであり、いずれ統合する予定である。

移相器・減衰器の制御プログラムは指定された機器の選択とON/OFF操作、デジタル電圧計の読み取りをするだけである。ディスプレイに表示されたフォーム上には機器を選択し、ON操作をするためのコマンドボタンと電圧計から読み取った値を表示するためのテキストボックスが配置され、位相は角度(相対値)に変換して表示し、減衰量は対応するポテンシオメーターから読み取った電圧の値をそのまま表示している。入出力ボードへのアクセスは、ボードに付属のコントロールを使って行なった。調整履歴は、1分毎及びどれかのコマンドボタンが押されるたびにハードディスク上のファイルに記録している。

収束系を操作するプログラムは加速器全体の制御と、監視を行なっているプログラムの一部である。シリアルインターフェイスを介して、シーケンサーのモジュールを操作することにより制御を実現している。マン・マシンインターフェイスは2台のディスプレイとマウス及びキーボードである。ほとんど

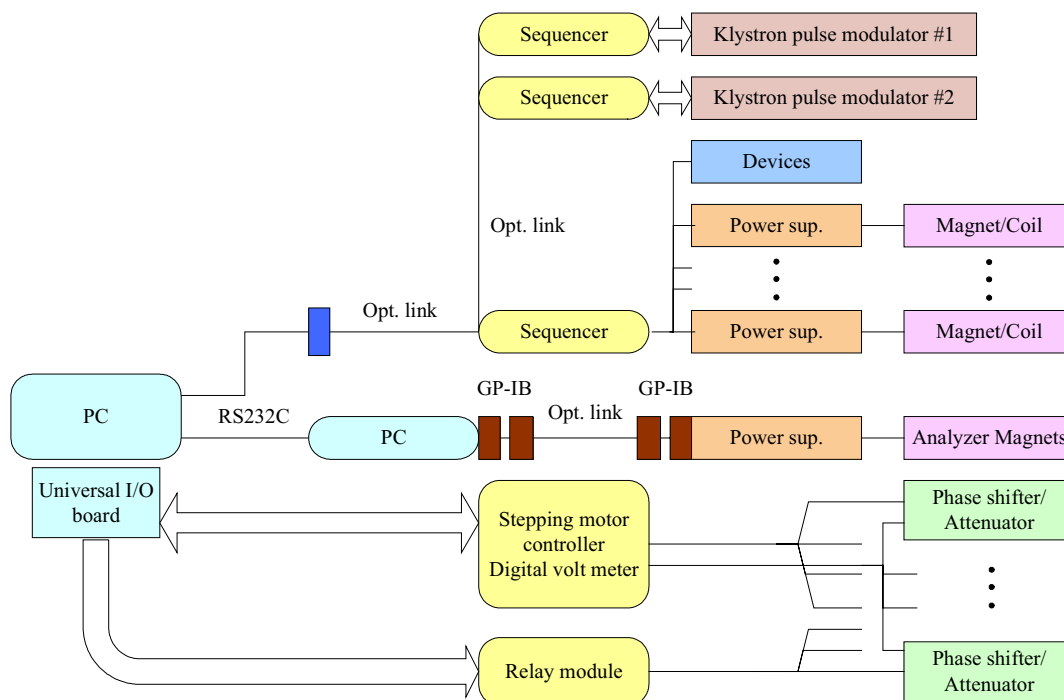


図2. 制御系接続図。三系統のインターフェイスが使われている。シリアルインターフェイスの2系統は電磁石とパルスモジュレーターの制御に使われ、汎用入出力ボードを介して、移相器と減衰器を制御している。

の操作はマウスによって行なう。対象が多いので、操作性を高めるため、ディスプレイ上に加速器の概略図を描き、各電磁石・コイルの置かれている位置に、対応する処理を呼び出すコマンドボタンを配置した。操作履歴の記録は、シーケンサーへのアクセスを全て記録することにより実現した。制御プログラムは、立ち上がった直後に、シーケンサーに設定されているデータを全て吸い上げるので、この方式で、データを取り落とすことはない。

4. 調整履歴

概要で述べたように、本研究の当面の目的は電子線形加速器のビーム維持の自動化である。現在は保存されている収束系と移相器・減衰器などの値を使えば、再現性良くビームを出すことができる。只エネルギーを合わせるための微調整は必要である。加速器は電源投入後、クライストロン、導波管、加速管などの温度が上昇する。おおむね2時間程度で定常状態に達するが^[2]、定常状態に達した後も、±1℃程度変動する室温と、±0.2℃程度変動する加速管冷却水および商用電源変動の影響によって、ビームの状態が変化する。マイクロ波の位相は、高速φAを利用した位相補償回路によって、クライストロンの出口では、±0.3度程度に安定化されている。しかし、これは立体回路および加速管の変動を補償するものではない。これらの変動によって、電子ビー

ムの状態は絶えず変化している。オペレーターはこのビームの変動を抑制するように調整を行なっているのである。

一例として図3から5に5月31日における移相器と減衰器の調整記録を示す。この日は午前10時頃クライストロンパルスモジュレーターのLVを入れ、10時半頃HVを投入している。ビーム加速を行なったのは12時からで、ビーム調整後、12時40分から午後2時20分頃まで中断し、その後9時頃まで連続的にビーム加速及びFELの実験を行なっている。図3は全移相器の位相調整の記録で、12時頃のビーム立ち上げ時と、14時20分頃の再開時に比較的大きく位相を動かしているのがわかる。図4はバンチャーの位相と減衰量を調整した記録で、最初の調整時に、減衰量の調整も試みていることが読み取れる。また、約2時間半の周期で、バンチャーの位相が動かされている。これはFELの発振を維持させるための操作だと思われるが、この周期は加速器室の室温の変動周期にほぼ一致しているの、何か関連がありそうである。図5はクライストロン2号機と加速管#3の位相である。図1からわかるように、クライストロン2号機の位相は加速管#2の位相と同じで、加速管#3の位相はこれに相対的な位相である。この2本の加速管の位相を調整することによって、エネルギーとスペクトルの両方を調整することか出来るので、最も頻繁に操作する位相である。この日も14時20分以降実験が終了するまで継続的に操作が行なわれている。

自動運転を実現するためには勿論ビームの状態をデータとして取り込めるようにすることが不可欠である。この部分は準備中である。これらの記録を蓄積し、環境因子と合わせて解析することにより、加速器の挙動が明らかになり、変動の予測ができるようになると期待される。それによって、自動運転を実現する予定である。

参考文献

- [1] K.hayakawa, et al, "CONTROL SYSTEM OF FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY" Proceedings of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Sep. 16-18, 1998
- [2] K.Yokoyama et al, these Proceedings.

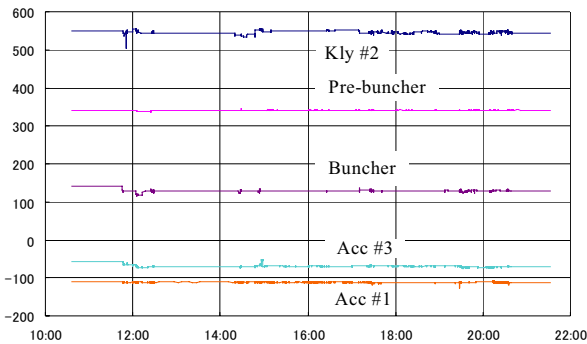


図3. 全移相器の調整記録横軸は時刻、縦軸は相対位相(度)。

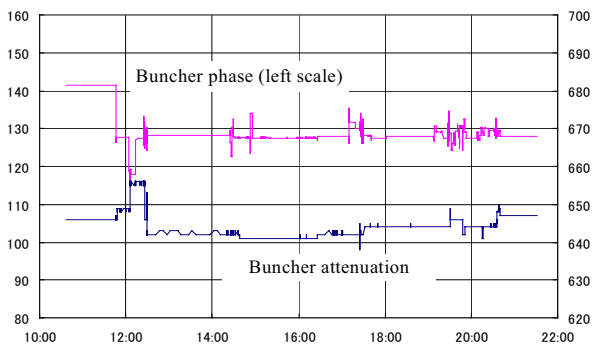


図4. バンチャーの位相(左目盛)と減衰量(右目盛、数字が大きいほど減衰量が大きい)。

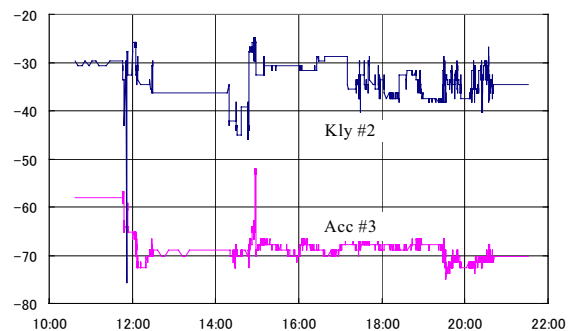


図5. クライストロン2号機と加速管#3の位相の推移。

S-BAND KLYSTRON FOR LONG PULSE OPERATION

T.Sakai^{†*}, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, K.Kanno^{*}, K.Ishiwata^{*},
 Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Institute of Quantum Science,
 Nihon University, Funabashi, 274-8501, Japan
 S.Fukuda, Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
 Tsukuba, 305-0801, Japan
 K.Hemmi, M.Hino, Mitsubishi Electric Corporation (MELCO), Amagasaki, 661-8661, Japan

Abstract

The electron linac for infrared to ultraviolet free electron laser has been developed at the Laboratory for Electron Beam Research and Application in Nihon University. Each S-band klystron is required to provide a peak RF output power of 30MW with the pulse duration of 20 μ s at the repetition rate of 12.5Hz. The output power of the current Mitsubishi PV-3030A1 klystrons is restricted to approximately 20MW due to damage to the output RF windows at higher output powers. An upgrade version of PV-3030A3 type, i.e. a PV-3040N klystron was fabricated for a durability test of the RF window at an output power around 30MW. The PV-3040N klystron has an improved vacuum port to protect the RF window from breakdown by quick vacuum recovery. Furthermore, the material of the RF window has been replaced by the one used in PV-3050 type, which will improve the output power limit at long pulse operation.

1 INTRODUCTION

A high performance electron linac for free electron laser (FEL) has been studied at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University as collaboration with High Energy Accelerator Research Organization (KEK) [1]. The S-band high power RF has been supplied by two Mitsubishi PV-3030A1 klystrons, which were moved from KEK after being used for several years in the injector linac of photon factory (PF). The maximum operating power of the klystrons has been restricted to approximately 20MW at the pulse duration of 20 μ s due to damage to the klystron output RF windows.

The FEL system in LEBRA currently serves infrared (IR) FEL at a wavelength of 1.5 μ m [2]. The klystron output RF power of 30MW is necessary to achieve lasing in the visible to ultraviolet range. Although the PV-3030A1 klystron was designed for relatively short output pulse, operation with the pulse duration of 20 μ s has been attained at the peak output of 20MW and the repetition rate of 12.5Hz by the increase of the vacuum pumping system downstream the RF window. However, increase of the output power up to 30MW seemed quite difficult without improvement of the dielectric strength at the RF

window. Thus, a PV-3040N klystron was fabricated as an upgrade version of PV-3030A3 type. This paper reports about the effect of increased vacuum pumping on the RF window and the property of the PV-3040N klystron.

2 PROBLEM IN KLYSTRON RF WINDOW

2.1 Status of klystron operation

The status of klystron operation from 1997 through 2001 is listed in table 1. In this period nine klystrons were broken due to the dielectric breakdown frequently repeated at the RF window surface [3]. The breakdown phenomenon was monitored with the power supply current of the ion pump placed downstream the RF window. However, the current of the ion pump power supply for the klystron indicated no signal of breakdown. The klystrons had been already used for a long time in the injector linac of PF at KEK, therefore the inside the klystrons might be sufficiently aged. These facts suggest that the damage to the RF window was caused by the breakdown on the outer surface of the RF window and instant degradation of the vacuum in the waveguide.

Table 1: Status of the klystron operation

Kly No	Tube Type	Number	Mounted	Dismounted	Status	Max. Performance
#1	A1	87514	97.02.25		Broken	24MW \times 20 μ s \times 2Hz
	A1	90503			Broken	
	A1	90507	98.02.07 99.05.24	99.02.15 00.04.19	Broken	20MW \times 20 μ s \times 12.5Hz
	A2	91506	99.02.15	99.05.24	Broken	19MW \times 13 μ s \times 2Hz
	A1	89511	00.04.19		Running	20MW \times 20 μ s \times 10Hz
#2	A1	88516	98.02.09	98.05.26	Broken	21MW \times 8 μ s \times 2Hz
	A2	91502	98.05.27	98.06.18	Broken	26MW \times 20 μ s \times 2Hz
	A2	92505	98.06.19	98.07.08	Broken	21MW \times 12.5 μ s \times 2Hz
	A2	92502	98.07.08	98.12.10	Broken	26MW \times 20 μ s \times 2Hz
	A2	92503	98.12.10	99.06.11	Broken	26MW \times 20 μ s \times 2Hz
	A1	89506	99.06.12		Running	20MW \times 20 μ s \times 12.5Hz

2.2 Damage of klystron RF window

The photograph of a sample of damage at an RF window is shown in figure 1. There are notable tracks of

[†]sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

*also, Graduate School of Science and Technology, Nihon University

dielectric breakdown on the flange surface and pinholes at the ceramic window plate.

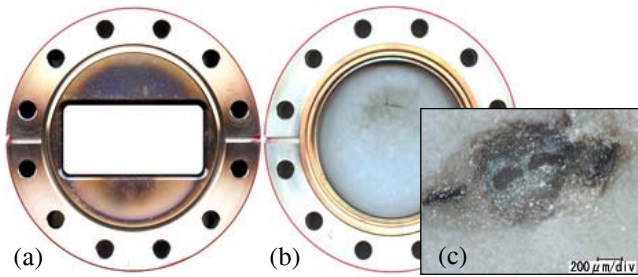


Figure 1: Damage to the klystron RF window. (a) A photograph of the flange surface. (b) The ceramic RF window. (c) Close-up of a pinhole.

2.3 Waveguide vacuum pumping system

The layout of the vacuum pumping system downstream the klystron RF window is illustrated in figure 2. The vacuum in the waveguide is pumped with a 60l/s ion pump located about 2.6m downstream the klystron RF window. The vacuum conductance of the waveguide between the klystron RF window and the ion pump was estimated to be 8.2l/s [4]. The second RF window isolating the vacuum between the klystron and the linac has the same structure as the klystron RF window. The RF power passing through the second window is almost the same as that passed through the klystron RF window. However, the second RF window was never damaged by the RF power. The conductance between the second RF window and the ion pump was estimated to be 20l/s, which is about 2.5 times larger as compared to that for the klystron RF window. This suggests that the difference of performance between the two RF windows was caused by the difference of the vacuum conductance.

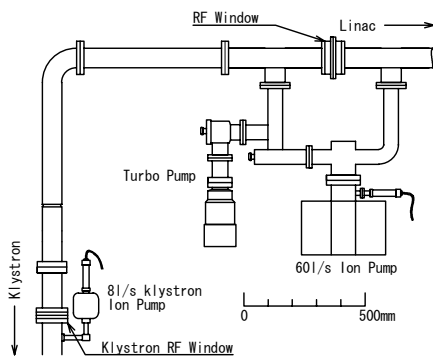


Figure 2: Layout of the waveguide and the vacuum pumping system downstream the klystron RF window.

3 IMPROVEMENT TO VACUUM PUMPING

A quick recovery of the vacuum around the RF window is important to suppress further dielectric breakdown at the next RF pulse. In order to increase the pumping speed around the klystron RF window, two vacuum pump ports were added at the waveguide close to the RF window, as shown in figure 3. These ports were estimated to increase

the conductance from 8.2l/s to 43l/s. By the combination with ANELVA 8l/s ion pumps the effective pumping speed around the RF window was estimated to be 17l/s, which is greater than the effective pumping speed of 15l/s at the second RF window.

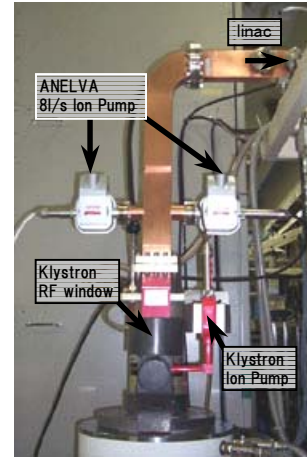


Figure 3: The photograph of the waveguide with two additional ANELVA 8l/s ion pumps located about 40cm downstream the klystron RF window.

The behaviour of the vacuum recovery in the waveguide around the klystron RF window has been simulated on the basis of the pumping speed as discussed above. Figure 4 shows the result of the simulation after the pressure suddenly changed from 10^{-6} Pa to 10^{-4} Pa by the emission of gases out of the RF window surface carried by the dielectric breakdown. An improvement of the vacuum recovery time by the additional pumps is evident in the figure 4.

By the increase of the vacuum pumping system, the output power of 20MW was achieved at the pulse duration of 20μs and the repetition rate of 12.5Hz. Although nine klystrons were broken by damage to the RF windows before the improvement of the vacuum pumping system, no klystron was broken in the operation of the linac over 3,900 hrs after the improvement. However the operation has been restricted to the output power of 20MW due to possible damage to the RF windows at higher output powers.

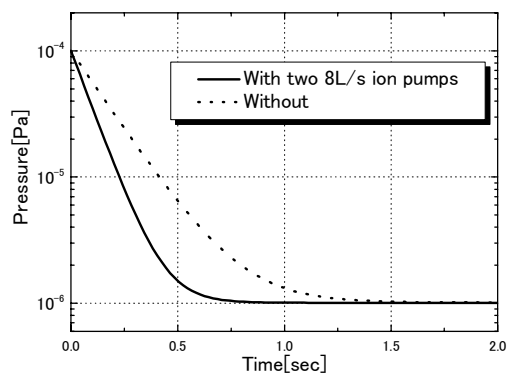


Figure 4: The result of simulation for the vacuum recovery after the dielectric breakdown at the klystron RF window.

4 FABRICATION OF PV-3040N KLYSTRON

4.1 PV-3040N klystron

A new klystron, PV-3040N type, was fabricated for a durability test at higher output powers than 20MW, provided that the pulse duration is 20 μ s and the repetition rate is 12.5Hz. The PV-3040N klystron is an upgrade version of PV-3030A3 type that has common configuration with PV-3030A1 type [5]. Therefore, no change is required for the klystron assembly tank.

Figure 5 shows the photograph of the PV-3040N klystron. The klystron vacuum pump is located close to the waveguide as compared with PV-3030A3 type, as the vacuum duct was replaced with a short and thick one. The RF window was replaced with the same one as used in a higher power PV-3050 type.



Figure 5: The Photograph of the PV-3040N klystron. (a) Overview of the PV-3040N klystron. (b) Close-up around the klystron ion pump.

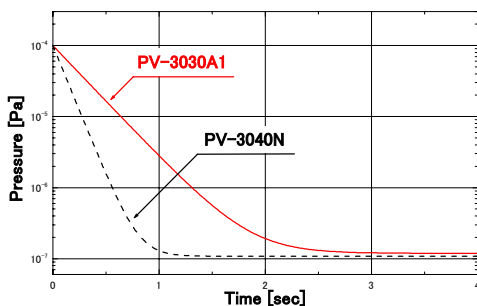


Figure 6: The results of vacuum recovery simulation for PV-3030A1 and PV-3040N klystrons.

4.2 Operation test of PV-3040N klystron

A preliminary high power test of the PV-3040N klystron was performed at a bench in Mitsubishi Electric

Corporation. Figures 7 and 8 show the characteristics of the PV-3040N klystron, the power transfer curve, efficiency and output power obtained in the test, where the operating condition was the repetition rate of 50Hz and the RF pulse width of 4 μ s. The power transfer curve of the PV-3030A1 klystron is also shown in figure 7 for the comparison. The maximum output power of 42.3MW was obtained in the test operation at the above condition.

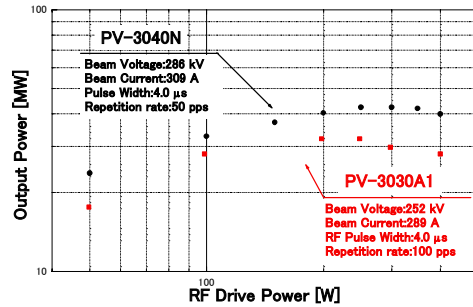


Figure 7: Typical power transfer characteristic as a function of RF drive power.

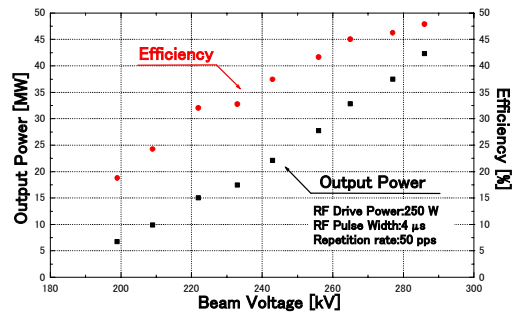


Figure 8: Typical efficiency and RF output power characteristics at saturation as a function of beam voltage.

5 CONCLUSION

A quick vacuum recovery around the klystron RF window is effective to avoid window breakdown, especially for the klystron operation at high power, long pulse width and high repetition rate.

The PV-3040N klystron is expected to achieve the output power of 30MW at the pulse width of 20 μ s and the repetition rate of 12.5Hz. High power test of the PV-3040N klystron at a long pulse width and high repetition rate is intended in 2002.

6 REFERENCES

- [1] T.Tanaka et al., Proc. 1st Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'98), Tsukuba, Japan (1998) 722.
- [2] Y.Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A 483** (2002) 29.
- [3] T.Tanaka et al., Proc. 2nd Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'01), Beijing, China (2001) [to be published].
- [4] ULVAC Corporation Center, "Vacuum Handbook III", (1989) [in Japanese].
- [5] S.Fukuda, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A 368** (1996) 561.

DEVELOPMENT OF STRIP-LINE TYPE BEAM POSITION MONITOR

K.Ishiwata^{†*}, I.Sato, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama, T.Sakai*, K.Kanno*, K.Nakao*, E.Hashimoto*, T.Murakami* and K.Fujioka*

Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Institute of Quantum Science, Nihon University, Funabashi, Chiba, 274-8501, Japan

T.Suwada

High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan

Abstract

In the Free Electron Laser (FEL) system at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) of Nihon University, the destructive fluorescence beam profile monitors were removed from the FEL beam line since the undulator permanent magnets were degraded by strong gamma and/or neutron radiation produced at the profile monitors. Thus strip-line type, non-destructive beam position monitors (BPMs) have been developed for the FEL beam line. The beam position can be deduced from the measurement of the RF power induced by the electron beam. The calibration of these BPMs has been made at the test bench in KEK. A preliminary experiment has been performed with the electron beam from the linac at LEBRA where three BPMs have been inserted at the exit of the linac, and the entrance and the exit of the undulator, respectively. Since the BPM is expected to have a high resolution of the beam position, a correlation characteristics of FEL lasing and the beam position has been investigated on the LEBRA FEL system.

1 INTRODUCTION

First lasing of FEL at LEBRA succeeded in a wavelength of 1.5 μ m on May 2001[1,2]. The performance of the linac has been improved for the application of the FEL experiment. Highly precise control of the electron beam orbit passing through the undulator is important for lasing FEL effectively. Therefore a non-

destructive beam position monitor is required.

Installation points of the BPMs and the current monitors are shown in figure 1.

The structure of the BPM and calibration method are described in Chapter 2. Results of the preliminary in beam experiment are presented in Chapter 3.

2 BEAM POSITION MONITOR

2.1 Structure of BPM

The monitor geometry and a photograph are shown in figure 2 (a) and (b), respectively. The beam position can be deduced from the measurement of the RF power induced by the electron beam. The RF power is picked up by use of the electrode located in side of the vacuum pipe. The angular width of the electrode, viewed from the center position of the BPM, is 45degrees. The inner surface of the vacuum pipe and the electrode comprise a 50ohm transmission line. The length of an electrode is $\lambda/4=26.25$ mm, where λ is a free-space wavelength of fundamental frequency of 2856MHz [3].

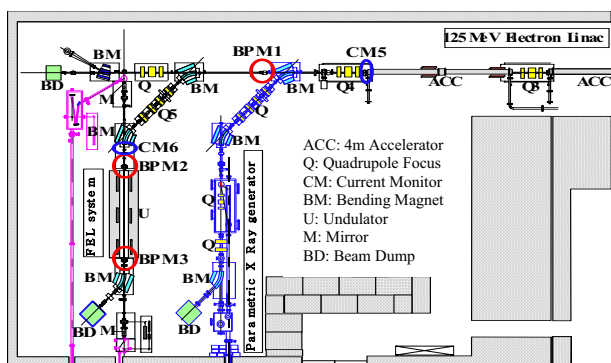


Figure 1: Installation points of the BPMs and the current monitors in the 125MeV electron linear accelerator and FEL system.

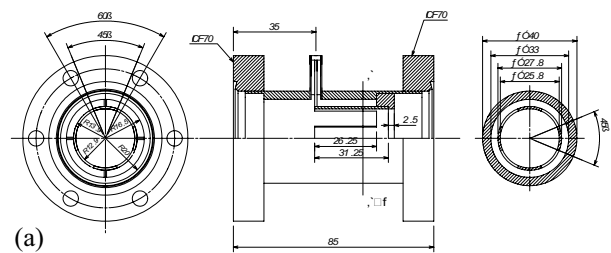


Figure 2: Geometrical drawing (a) and photograph (b) of the Stripline-type Beam Position Monitor.

[†]ishiwata@lebra.nihon-u.ac.jp

*also, Graduate School of Science and Technology, Nihon University

2.2 Measuring Method of Beam Position

A signal from each electrode of the BPM is inputted into a RF detector (Agilent Technologies, 423B, 0.01-12.4GHz) through RF coaxial cable (RG-55/U) of 12m long. The detected voltage waveform is measured by means of an oscilloscope, as shown in figure 3.

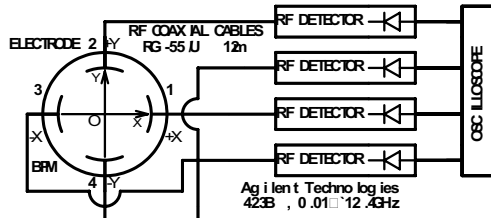


Figure 3: Measuring method.

Measured voltage is converted to RF power. Horizontal (X) and vertical (Y) beam position are represented by map functions up to sixth-order polynomial, as follows;

$$X = \sum_{i,j=0}^6 k_{xij} \left(\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \right)^i \left(\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \right)^j, \quad (1)$$

$$Y = \sum_{i,j=0}^6 k_{yij} \left(\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \right)^i \left(\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \right)^j. \quad (2)$$

Here,

$$\Delta_x = \sqrt{P_1} - \sqrt{P_3}, \Sigma_x = \sqrt{P_1} + \sqrt{P_3}, \quad (3)$$

$$\Delta_y = \sqrt{P_2} - \sqrt{P_4}, \Sigma_y = \sqrt{P_2} + \sqrt{P_4}, \quad (4)$$

where k_{xij} and k_{yij} ($i, j=0-6$) are the coefficients of the map functions [4,5]; P_1 and P_3 (P_2 and P_4) are the horizontal (vertical)-pickup RF power including cable attenuation.

The monitor has been calibrated by means of a thin wire to simulate an electron beam. The microwave of fundamental frequency transmits through the thin wire. The coefficients of the map functions were chosen so that the difference between the position of the wire and the calculated one from the map function is less than $50\mu\text{m}$ within a mapping region of a radius of 5mm from the center of a BPM.

3 THE CHANGES OF BEAM POSITIONS DURING A BEAM PULSE

3.1 Measurement Results

The beam position was deduced at FEL not lasing and at lasing. The accelerator was operated on a beam energy of 86.8MeV, pulse duration of $20\mu\text{s}$ and repetition rate of 2 Hz.

Wave patterns detected by electrodes in each BPM are shown in the figure 4, and wave patterns of the beam currents and IR detector are shown in figure 5. The installation point of the BPMs and the current monitors are shown in figure 1. In figure 4 (a-2) and (a-3) we can

see that a beam position change from the electrode of $-X$ side to $+X$ side during the pulse duration time. On the other hand, in figure 4 (a-1), (b-1), (b-2) and (b-3) in each BPM, the signal from each electrode is similarity.

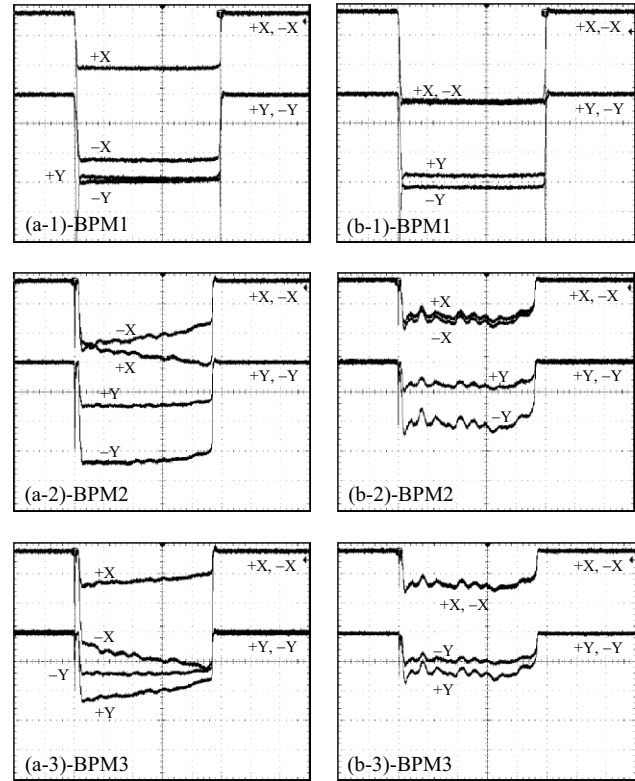


Figure 4: A detection wave pattern of each electrode on each BPM (V: 20mV/div). Horizontal scale is $4\mu\text{s}/\text{div}$. The detected voltage was measured with an oscilloscope. (a-): at FEL not lasing, (b-): at FEL lasing.

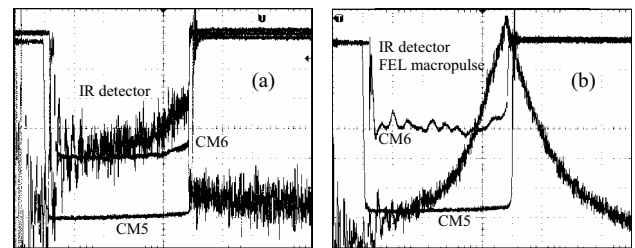


Figure 5: Wave forms of output of infrared detector (IR detector) and electron beam detected by use of current monitor. (a) at FEL not lasing, (b) at FEL lasing. CM5: exit of the linac (20mA/div), CM6: entrance of the undulator (20mA/div), IR detector: (a): 2mV/div, (b): 5mV/div Horizontal scale is $4\mu\text{s}/\text{div}$.

3.2 Evaluation of Beam Position

The absolute beam position was deduced from measured RF power and the equations (1), (2), (3) and (4). The data taken from an oscilloscope, signal-to-noise ratio is about 1/30. This noise level is corresponding to the beam position uncertainty of 0.2mm. To reduce influence of the noise, the averages of 20 data were taken every

80ns, and signal-to-noise ratio became about 1/120. From accuracy of map-function and this ratio, a beam position includes an error of about $\pm 0.1\text{mm}$. The beam positions during a beam pulse after noise reduction processing is shown in figure 6 and figure 7.

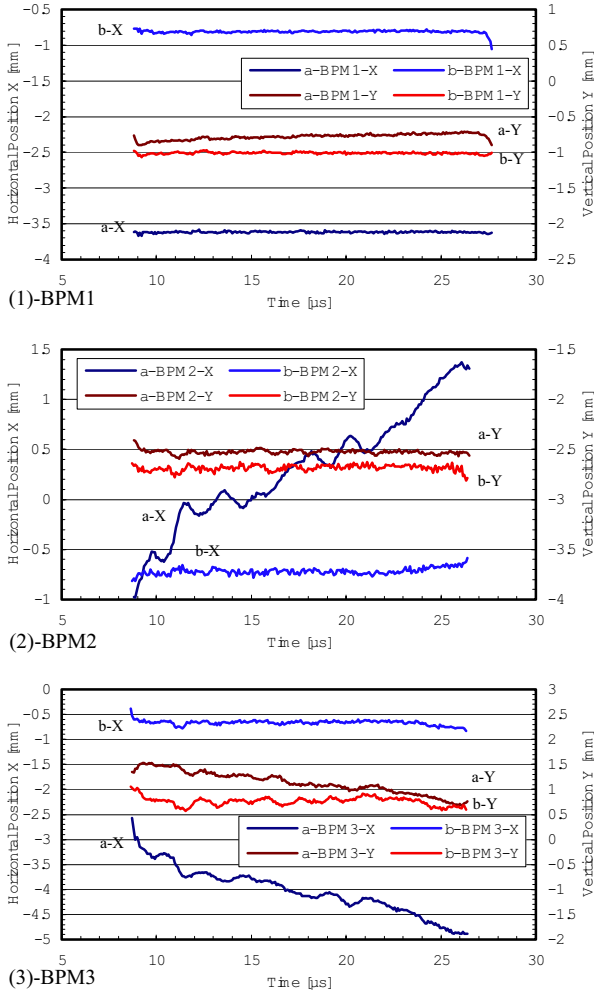


Figure 6: The changes of beam positions in a beam pulse in pulse duration of $20\mu\text{s}$. (a-) at FEL not lasing, (b-) at FEL lasing.

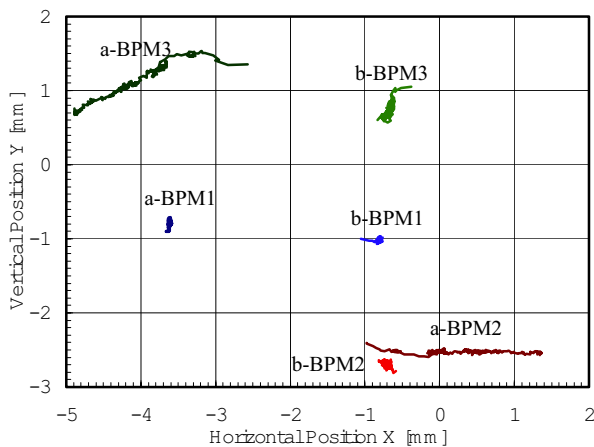


Figure 7: The changes of beam positions in a beam pulse every 80ns. (a-) at FEL not lasing, (b-) at FEL lasing.

Curves a-X and a-Y in figure 6 show the beam positions under adjustment of the linac. Vertical position at the exit of the linac (BPM1-a-Y) moves monotonously up during the pulse duration time about 0.2mm. Horizontal position is kept constant (BPM1-a-X). In the FEL beam-line, at the entrance of the undulator, horizontal position (BPM2-a-X) moves significantly over 2 mm. At the exit, horizontal position (BPM3-a-X) move same span but reverse direction. These movement of the horizontal positions caused by residual dispersion of the 90 degrees bending system.

Curves b-X and b-Y in figure 6 show the beam positions under lasing FEL. In this case, the linac and beam transport line are well tuned. Then both horizontal and vertical beam positions are kept constant. In the FEL beam line, beam positions are nearly constant during the pulse duration time without small ripple. It is considered that the shape of the beam current which is not able to be rectified is appearing.

4 CONCLUSION

Three BPMs have been inserted into the exit of the linac, and at the entrance and the exit of the undulator beam line, respectively. In this way beam position get possible to be measured, and it became very easy to synchronize the beam orbit with a light axis of the optical resonator.

As a beam position includes an error of about $\pm 0.1\text{mm}$, and it is pursued beam position, it is thought enough as position search precision because a diameter of electron beam is about 0.6 to 1 mm.

The FEL was very weak poor lasing at this measurement. As a result, for lasing FEL, a beam position change during beam pulse has to be less than 0.2mm when other factors are not taken into account.

5 REFERENCES

- [1] Y.Hayakawa, et al., "First lasing of LEBRA at Nihon University at a wavelength of $1.5 \mu\text{m}$ ", Nucl. Instr. Meth. A (2002), (Not yet publication)
- [2] I.Sato, et al., "Infrared FEL lasing at Nihon University and blow up visible light", Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology in Japan, Suita, Osaka, Japan, October 29-31, 2001, p117-121
- [3] I.Sato, et al., "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB" KEK Report 95-18 March, 1996
- [4] T.Suwada, et al., "Stripline-type beam-position-monitor system for single-bunch electron/positron beams", KEK Preprint 98-236, March, 1999 (Submitted to Nucl. Instr. Meth.)
- [5] T.Suwada, et al., "Beam-Position Monitor System for the KEKB Injector Linac", Presented at the 8th Beam Instrumentation Workshop, SLAC, Stanford, California, U.S.A., May 4-7, 1998

Proceedings of
the 28th
Linear Accelerator Meeting
in Japan

July 30th - August 1st, 2003

Techno community square RICOTTI
Tokai, Japan



JAERI

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute



東京大学大学院工学系研究科
附属原子力工学研究施設

Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute
And
Nuclear Engineering Research Laboratory, Graduate School of Engineering,
The University of Tokyo

日本大学電子線利用研究施設の現状

佐藤 勇^{A)}、早川 建^{A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、横山和枝^{A)}、
菅野浩一^{B)}、境 武志^{B)}、石渡謙一郎^{B)}、中尾圭佐^{B)}、長谷川 崇^{B)}、宮崎慎也^{B)}、
福田茂樹^{C)}、榎本収志^{C)}、大沢 哲^{C)}、設楽哲夫^{C)}、諏訪田 剛^{C)}、古川和朗^{C)}、道園真一郎^{C)}

^{A)}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

^{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、普通の電子線形加速器を高性能し、短波長の自由電子レーザー (FEL) 発振を試み、更に利用実験を目指して準備を進めてきた。2001 年 5 月、1.5 μm 波長の FEL 発振に成功したが、FEL 発振は非常に不安定であった。不安定性の要因は、線形加速器以外にも色々な不安定要素が複雑に絡み合っていた。これらの不安定要因がどの様にして除去されたかについて報告する。

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 FEL 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 の電子ビーム加速に成功、同年 2 月自発放射光を観測した。10 月入射部集束系を強化し、電子ビーム強度は 220mA に達したが、高周波出力電力のパルス持続時間を延ばすと短パルス・クライストロン (PV-3030) の出力窓が破損し、電子ビームのパルス持続時間は 10 μs に制限された。又、クライストロンのヒータートランスやパルストランスの放電破壊、バックダイオードの破損等故障が続出していた。更に深刻な事態は、最初に設置されたアンジュレーターの永久磁石は放射線損傷⁴⁾を受け使用不能になったことであった。永久磁石は可視光用と赤外線用に分けて、赤外線用を新たに製作した。一方、最大の懸案であった短パルスクライストロン (PV-3030) の長パルス化は同年 2 月に成功し、学術フロンティア推進事業をスタートさせることができた。この推進事業に伴って実験棟が増築することになり、7 月から 12 月まで 5 ヶ月間、加速器運転を停止した。この期間に、半導体高周波増幅器の位相シフト対策、熱陰極電子銃の低エミッタンス化、非破壊型ビーム位置モニターの開発、FEL 用ビーム拡張装置の開発、

長パルス大電力クライストロンの開発、パラメトリック X 線源の開発、X 線計測装置の開発等が進められた。

2001 年 1 月に加速器運転を再開し、3 月には自発放射光蓄積を確認し、5 月に 1.5 μm の FEL 発振に成功した。その後、テスト実験では、FEL 強度は蓄積光の約 10^8 を越えたが、FEL 発振は不安定で継続せず、飽和状態に到達しなかった。FEL 不安定性の原因は、色々な角度から徹底的に追究しその要因は明確になった。

2. FEL 発振の不安定要因

FEL は、86.3MeV、90mA で 1.5 μm 波長のレーザー発振⁵⁾に成功したが、しかし、発振状態は極めて不安定であった。FEL の不安定性を詳細に分析すると、短時間変動と長時間変動に分類され、変動要因としては、電気的変動、機械的変動、環境変化等が、不規則に複雑に重なり、その分析作業は単純でなかった。短時間の電気的変動要因としては、パルス内ビーム軌道の変動とパルス毎のビーム電流変動があり、前者は半導体高周波増幅器の高周波位相シフトに、後者はクライストロン・パルサーの PFN インピーダンスとクライストロン・インピーダンスのミスマッチ、並びに、PFN 電圧が充電中に変動することであった。短時間の機械的変動要因は、光空洞共振器に HeNe レーザーを導入すると、2 枚の反射鏡による干渉縞の変化によって明らかになり、この変化は空調機や冷却装置の動作に連携していた。

更に、深刻な要因は、FEL 発振が強烈になると発振は瞬時に停止し、再び発振させるには共振器を再調整する必要がある、レーザー飽和は観測できなかった。その要因は、レーザー飽和に達する以前に光空洞共振器の反射鏡が破損するのではと考えたが確証はなかった。反射鏡には 1.5 μm 波長で 99.5% の反射率をもつ帯域の狭い誘電体多層膜鏡を使用して

いたが、レーザー強度が高まると 3 次高調波 ($0.5 \mu\text{m}$) の強度も強くなることが観測されていた。反射鏡を取り出して調べた結果、上流下流とも反射鏡の多層膜が痘痕状に破損していた。破損要因が基本波か 3 次高調波かは定かでない。長時間変動は室温変動や入力交流電圧変動に伴う環境変化に依存していた。これは環境変化により電磁気回路の特性変化や各種装置形状の機械的変形が主な要因であり、対応方法は容易であった。

3. 不安定要因の対応策

「交流入力電圧変動」

交流入力電圧変動は全装置に共通する課題であり、FEL 発振以降は特に丹念に調査した。その結果、夜の 21 時から翌朝の 9 時まで約 12 時間は、変動周期が早いことが明らかになった。この時間帯では自由電子レーザー発振を継続することは不可能であった。

異常電圧変動は金曜日の 21 時から月曜日の 9 時まで継続することが多かった。この異常電圧変動を東京電力と共同で調査したが、その原因の出所を突き止めることは出来なかった。

全電源変動を同時に監視することは不可能であり、ビーム不安定に最も影響力の大きい装置を選択して、連続測定を行った。特に異常な電源は見付からなかった。

「高周波位相シフト対策」

半導体高周波増幅器は、パルス動作を開始してから $10 \mu\text{s}$ を経過する間に位相が約 10 度ずれた。電子ビームを 90 度偏向して FEL 発生装置へ輸送するシステムにとっては、この高周波位相シフトは深刻であった。当面の対応策は、単位時間当たりの位相ずれを計測し、入力高周波位相を逆にシフトさせることであった。出力位相シフトを 1 度程度に押さえ込み、90 度偏向ビーム輸送路を通過するビーム損失は改善された。その結果、FEL 発振に成功した。他に、室温変化による遅い緩やかな位相変化もあり、これは位相負帰還回路を付け加えて抑制した。

不規則であるが、パルス内とパルス毎の位相シフトは観測され、無視できない値であった。そこで、位相シフトの少ない半導体素子を用い長パルスで稼働する高周波増幅器を開発し導入した。その結果、パルス内の高周波位相シフトは更に抑制され、パルス持続時間内のビーム・エネルギー変動⁶⁾も改善された。

「サイラトロン動作の揺らぎ対策」

モジュレーターのサイラトロンは動作停止時に揺らぎがあった。サイラトロン・ヒーターの安定化に

よって、揺らぎ頻度が縮小された。モジュレーターの出力パルス変動はサイラトロン動作停止時に揺らぎが要因と思われていたが、PFN インピーダンスを微調整した結果、サイラトロンの遮断揺らぎは解消した。

「高圧直流電源の改造」

モジュレーターの高圧直流電源は 3 極真空管を使って高精度に制御されることから、クライストロン・モジュレーターには DeQ 回路を採用しなかった。

モジュレーターのサイラトロンが動作する直前の充電コンデンサー電圧が常に一定であった。しかし、PFN 電圧は入力交流電圧変動に依存していた。

PFN の充電電圧変動と入力交流電圧変動の相関を徹底的に調査した結果、負荷の電圧降下が大きい時、高圧直流電源は制御不能になり、交流入力電圧変動に対応しないことが明らかになった。

充電コンデンサーを補充し負荷電圧降下を小さくするとともに、高圧直流電源とパルス発生装置間の抵抗を大きくする対応策を講じた。その結果、パルス毎のビーム・エネルギー変動は大幅に改善された。

「光空洞共振器架台の強化」

電磁石等の冷却水を循環させるとその振動が光空洞共振器反射鏡架台に伝達し、架台は最大振幅が $0.6 \mu\text{m}$ 固有振動数が約 8 Hz で振動していた。これは架台の剛性不足が原因であり、FEL 発振の不安定要因の 1 つになっていた。光空洞共振器架台に鉄板を貼り付けた結果、最大振幅は 20nm、固有振動数は約 30Hz になり、剛性は大幅に改善された。

「ビーム電流の変動対策」

小径熱陰極の活用とウエーネルト構造の最適化によって、電子銃低エミッタンス化に成功し FEL 発振に寄与したが、不規則なビーム電流変動以外にビーム電流が約 40~50 分周期で 10~20% 鋸歯状波的に減少する現象が観測され、電子銃の絶縁耐圧不足を示唆していた。

絶縁ガイシの支持フランジ構造と電子銃の支持パイプを細くし放電耐圧を上げた結果、ビーム電流の鋸歯状変化は消滅した。又、グリッド制御の応答時間を早まるように回路構成を改良し、電子銃のヒーター電流を空間電荷制限領域に設定した結果、不規則なビーム電流変動は改善された。

4. 研究施設の現状

本研究施設の懸案事項であった放射線施設検査は 2002 年 12 月 10 日に実施され、2003 年 3 月に合格した。

2002 年度に於ける電子線利用研究施設の保守・改

善を要約すると次の如くであった。

1) 30MWクライストロン(PV-3040N)テスト実験
放射線施設検査の実施中に2号機クライストロン(PV-3030A1)が破損し、2003年1月に新クライストロン(PV-3040N)に交換し、テスト運転をした結果、20MW×20 μ S×5Hzの耐久テストはクリアした。

2) ビーム位置モニター

電子ビームの中心位置を±0.1mmの精度で常時電子ビームの位置観測が可能であり、電子線形加速器の終端、アンジュレーターの上流と下流にそれぞれ3台設置され、FEL発振にその威力を遺憾なく発揮している。このモニターは、レーザー発振の不安定要因探索には不可欠な計測装置であり、2003年度には電子線形加速器の入射部、各集束電磁石の前に設置する予定である。

3) 制御室の整備

研究者の実験室入出を簡便にするために、制御ラックの配置替えを行い、新たに制御卓を設けて、その背後に通り抜ける通路を確保した。制御室と各装置を結ぶケーブルが乱雑になったので整理し、ビームモニター用オシロスコープを増強した。加速器運転を容易にするためにディスプレイを増強する予定である。

4) レーザービーム輸送システム

ビーム・エクスパンダーが加速器室に設置され、FEL発生装置と新実験棟のレーザー照射室を結ぶビームレーザーラインが完成した。ビーム・エクスパンダーは、楕円鏡と放物線鏡の組み合わせ、レーザービームを平行ビームにする装置である。

5) パラメトリックX線源の整備

パラメトリックX線発生装置は既に完成し、加速器室に設置されており、このX線源を使う蛋白質X線構造解析装置やX線回折装置も既に導入された。X線ビームラインの使用許可は、現研究施設の放射線施設検査に合格後に、申請書を提出し合格後可能になる。

6) 直流電流安定化電源の整備

ビーム輸送系に使用している直流電流安定化電源は、マイクロトロン用ビーム集束電磁石用として導入した直流電流安定化電源である。最大定格で性能仕様が補償されているが、電流容量は10Aと5Aの2種類に統一される。しかし、電子線形加速器入射部の大多数ステアリング電磁石は0.5A以下の低電流で制御されており、ステアリング電源としては電流容量が大きすぎ、ビーム制御に整合性を欠いていた。電子線形加速器では、入射部(電子銃、プレバンチャー、バンチャー)の集束コイルやステア

リング電磁石の磁束密度が低く励磁電流も小さい。更に、4極電磁石用直流電流安定化電源は最大定格が10Aであるが、既に耐用年数を超過しており、電源が時々不安定な動作をするようになってきた。短波長FEL用電子線形加速器では、パルス持続時間が長い電子ビームを加速するために、加速管の中心軸から外れた電子ビームは、加速管に横波成分を持つ電磁場を誘起し、加速管の周期構造によって共鳴増幅され、エミッタンスが増大する可能性がある。

2002年度は、低電流高安定化電源を導入し、近々開始される共同利用実験に対応できるように、ビーム輸送系を整備した。

5. おわりに

日本大学に於ける短波長FEL計画は、FELの高度利用研究を目的としており、FEL実用化は必須条件であった。又、短波長FELの実用化には電子ビームの高性能、超安定、長パルス化が要求されるために、特に通常電子線形加速器の高度化による短波長FEL実用化は、予想以上に実現の壁が高かった。更に、通常の電子線形加速器性能限度を超え、これまでの加速器技術の常識が通用しない世界に踏み込んだ思いであった。特に短パルス・クライストロンの長パルス化は糸口が見えない無謀な挑戦に挑んでいるように思われた。

続発する故障や立ち塞がる性能限界に悩まされたが、これらの問題を一つ一つ克服し、短波長FELの実用化に耐えうる加速器が実現しつつある。残された最大の課題は、赤外線から可視光領域で反射率(99.5%以上)が高く、尖頭電力が0.5GW、負荷率が4000分の1に耐える金属反射鏡の開発にある。

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) I.Sato, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken, Japan, 37-39(1999).
- 5) Y.Hayakawa, et al., Nucl.Instr.and Meth. A82002, Vol 483, 1-2, pp.29-33.
- 6) K.Yokoyama, et al., Jpn.J.Appl.Phys.41(2002)pp-47 58-4759

商用電源変動とビーム不安定性Ⅱ

早川 建^{1,A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、佐藤 勇^{A)}、横山和枝^{A)}、中尾圭佐^{B)}、境 武志^{B)}、

金井 泉^{C)}、本郷礼二^{C)}

^{A)} 日本大学量子科学研究所

〒274-6501 船橋市習志野台 7-24-1

^{B)} 日本大学理工学部

〒274-6501 船橋市習志野台 7-24-1

^{C)} 東京電子株式会社

〒327-0103 佐野市石塚町 568-11

概要

前回、同じタイトルで報告した¹⁾時には原因不明であったクライストロンパルス電圧と電源変動の相関が明らかになった。問題は PFN の充放電に伴う大きな負荷変動にあった。高压直流電源は、この変動を補償するように動作するが、その変動幅が補償範囲を超えていたのである。この状態になると、DC 電源は単なる整流平滑回路になってしまうので、商用電源の変動が PFN の充電電圧の変動として現れていた。

1. はじめに

当施設の所在地（船橋市習志野台）に於ける、商電源電圧の変動の状況は前回の報告時に比べて好転はしておらず、むしろ悪化していると言ってよい。すなわち周期が数秒の速い変動（ $\sim 1.5\%$ p-p）は平日は夜間午後 9 時から、翌日の午前 9 時まで続き、週末は終日現れている。平日の昼間はこの変動の振幅が比較的小さい（ $\sim 0.5\%$ p-p）ののだが、夜間と同じ程度の変動を示す日もある。長い周期の変動は昼夜を問わず存在する。これらの様子を図 1 に示す。この

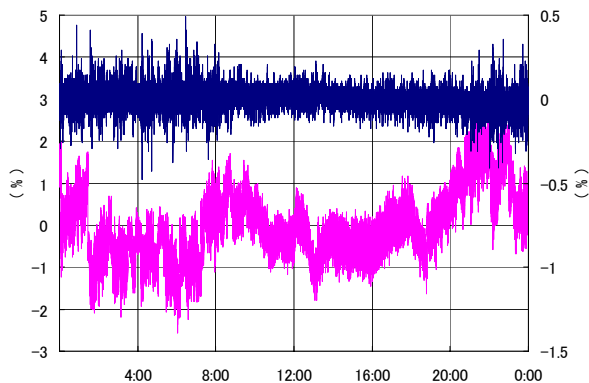


図 1. 平日の電源変動パターン、上が AVR 出力（右側目盛り）、下が商用電源。

日は平日にもかかわらず、日中も振幅の大きな変動が起きていた。しかし、AVR の出力を見ればわかるように、夜間の変動とは異なる性質を持っている。商用電源に我々の求める安定度を期待することはできないが、せめて夜の部の変動が何とかならないか東京電力に申し入れしたのだが、解決しなかった。

昼の部の変動でも、そのためにパルス電圧が変動していることには変わりなく、その浸入経路を見つけてこれを遮断しなければ、自由電子レーザーの安定化は果たせない。商用電源が変動すると、パルスモジュレーター内の装置、特にサイラトロンが影響を受け、その結果がパルス電圧の変動として現れる。この問題はサイラトロン周りの電源の前に AVR を挿入することによって解決した。しかしそれでもパルス電圧が電源変動のパターンで変化するので、パルスモジュレーターの給電ラインに大型の AVR を挿入して安定化をはかった。パルストランスのバイアス電源まで含めて AVR の内側に入れたのにもかかわらず、依然としてパルス電圧の変動は止まなかった。図 2. に示すように、電源変動に対応して、全く同じパターンでパルス電圧、RF 出力などが、変動している。

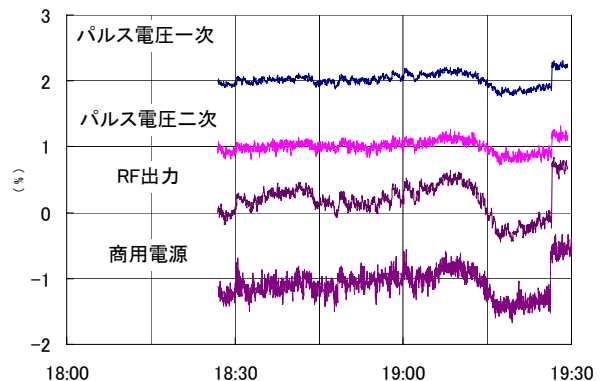


図 2. 電源変動とパルス電圧，クライストロン・マイクロ波出力。上から順に、一次側パルス電圧、二次側パルス電圧、マイクロ波出力（検波器出力）、商用電源電圧。

¹⁾ E-mail: hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp

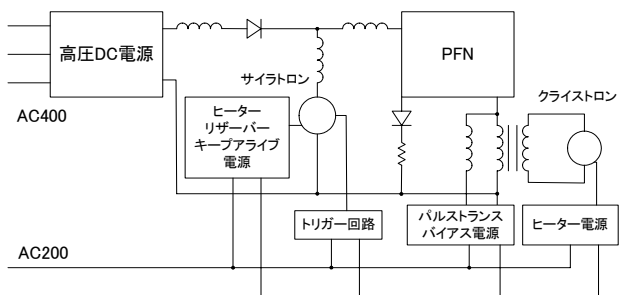


図3. パルスモジュレーター、直流電源、クライストロンアッセンブリ概略図

2. 電源変動の侵入経路

図3にパルスモジュレーターのブロック図を示す。この図から分るように、商用電源から電力を供給されているのは、高圧直流電源、サイラトロンヒーター電源、サイラトロンリザーバーヒーター電源、トリガー回路、クライストロンヒーター電源、パルス変圧機バイアス電源、および図には示さなかったが、クライストロン収束コイル電源である。最後のクライストロン収束コイル電源については、たとえこの電流が変動してもパルス電圧に影響するとは考えられないので、除外した。前記のように、サイラトロン周りの電源が変動すると確かにパルス電圧が変動していた。そこで、商用電源変動の影響を除去するために、電力供給ラインにAVRを挿入した。この結果、パルス電圧変動は劇的に低下した。しかしそれでも商用電源変動のパターンでパルス電圧が変動していた。商用電源の比較的長時間スケールの長い変動はAVRによってほぼ完全に除去できるので、AVRから給電される装置はこのパターンでは変動しないはずである。そこで、大容量のAVRを導入して、サイラトロン周りだけでなく、高圧直流電源を除く全ての電源をAVRから給電するようにした。ところが状況は一向に改善されないのがであった。高圧直流電源は仕様どおり 10^{-4} 程度の安定度を示しており、全く問題ないように見えた。あるいは、測定系の問題なので

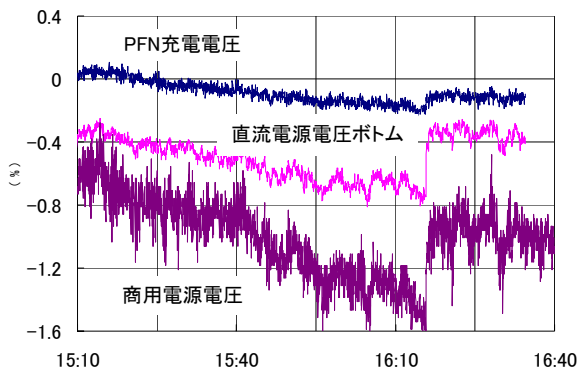


図4. 充電中の高圧直流電源電圧とPFNに充電された電圧の変動。商用電源と同じパターンで変動している。

はないかと思ひ至り、バッテリー駆動のオシロスコープによる測定も試みたが、結果は同じであった。サイラトロン周りを安定化したにもかかわらず変動していることから明らかであったが、PFNの充電電圧もまた変動していた。ここに至って、電源変動の侵入経路は高圧直流電源以外に考えられなくなった。そこで、充電中の電圧を測定する事にした。チャージングチョークの電源側に高圧プローブが取り付けられているので、これを利用した。充電中の電圧波形は、充電電流波形をひっくり返したような形の落込みを示している。充電電流を多く流す時には、供給側の容量が不足して、電圧が落込むのである。この電圧の落込んだ底の部分の電圧を長時間に渡って測定した。この測定の結果を図4に同じ時刻の電源変動と共に示す。明らかに、同じパターンで変動している。高圧直流電源が充電中に変動していることが分かってしまえば、その侵入経路を推定することは容易である。すなわち、充電中、高圧直流電源は安定化されていないのである。

3. 高圧直流電源

高圧直流電源は前記のように、仕様どおり 10^{-4} 程度の安定度を示しており、それで安心しきっていたのだが、元々は定負荷用に作られた電源であるので、パルスモジュレーターのように変動の大きな負荷に接続した時の振る舞いをもっとよく考えておくべきであった。直流電源回路のブロック図を図5に示す。この図では、昇圧トランスと整流回路を電池の記号で表している。破線及び括弧内の数値は改造前の状態である。これから分るように、トランスで昇圧した後整流した3kV程度の電圧を制御用電子管のカソード・アノード間に印加する。その電圧にIVRで昇圧後、整流した約20kV程度の電圧を積み重ねている。定負荷時は、電子管の吸収電圧が1.5kV程度になるようにグリッドのバイアス点を定める。この場合出力は21.5kV程度になる。入力あるいは負荷変動によって、検出点Aの電位が動かないように吸収電圧を調整する。パルス負荷の場合、負荷変動が大きすぎて、電子管による調整範囲を超えてしまったと考えられる。実際、充電中のカソード・アノード間の電圧

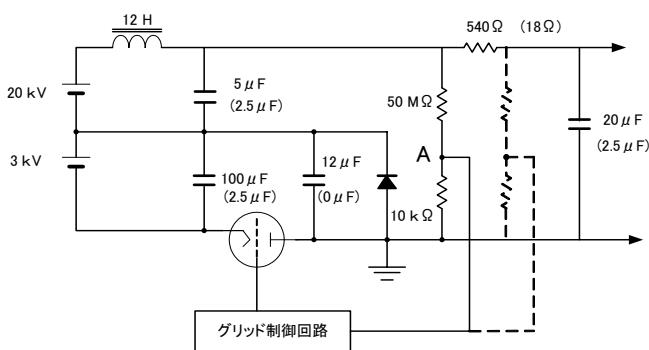


図5. 高圧直流電源のブロック図。破線及び括弧内の数値は改造前の状態。出力抵抗増強と検出点の移動、コンデンサーの容量増加が変更点。

を測定した結果を図6に示す。充電が開始されると、測定点 A の電位の落ち込みを補償するように電子管は吸収電圧を小さくしてゆくが、遂には放出すべき電圧を全て失ってしまう。こうなってしまうと、この電源は入力変動にも負荷変動にも対応できないただの整流回路になってしまう。従ってこの時の商用電源電圧が、そのまま出力に反映するようになってしまうのである。

4. 電源の改造

問題は電源の制御系が、負荷変動に追随しようとして、結局追従しきれず、全く制御を失ってしまうことにある。負荷変動の最大の要因は無論、放電によって PFN の電圧が一気にゼロまで落ち込む現象である。これに、PFN のコンデンサーやインダクターの室温変動による容量変化、サイラトロンの変動等が重畳されるのであるが、これらは電源変動に比べて十分小さいと仮定できる。そうであれば、電源は必ずしも負荷変動を見る必要が無い。電源変動だけを補

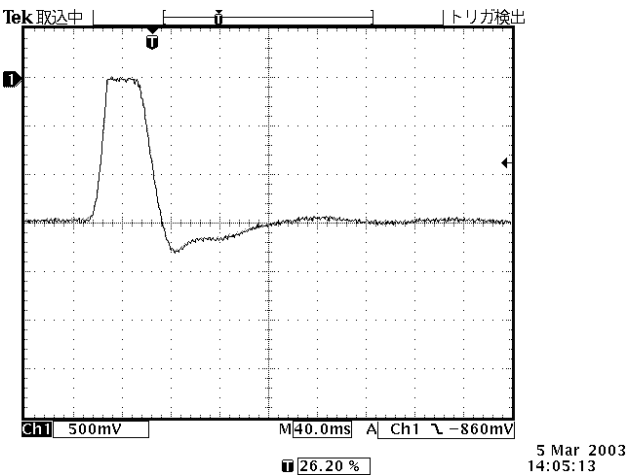


図6. 改造前の電圧制御用電子管の吸収電圧波形、充電中に吸収電圧を全て放出してしまっている。

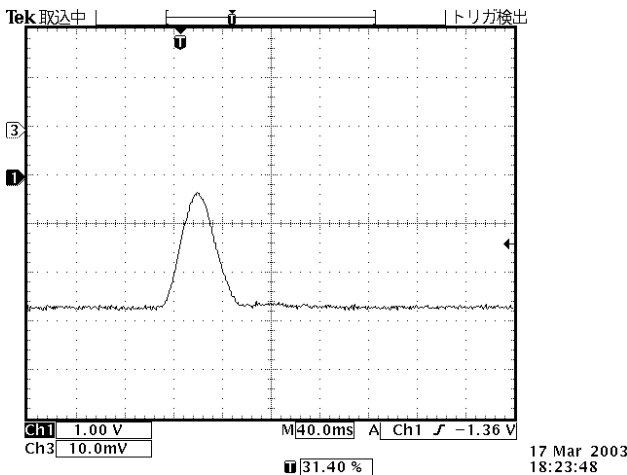


図7. 改造後の電子管の吸収電圧波形。充電中大きくスウィングするが、制御可能範囲を超えていない。

償するように働けば良いのである。負荷変動はむしろ見えないほうが良い。負荷を電源から隠蔽する方法は幾つか考えられたが、ここでは、システムの挙動になるべく影響を与えないように、出力抵抗を大きくする方法を採用した。出力抵抗を 18Ω から 590Ω に増強し、かつ、電圧の検出点を出力抵抗の電源側に移動した。またこの措置による充電電圧の低下を軽減するため、負荷側のコンデンサーを増強した。検出点を出力抵抗の電源側にしたのは、前述のように負荷を隠蔽するためである。改造の結果、図7に示すように、吸収電圧波形の振幅は小さくなり、充電中も調整範囲に収まるようになった。調整できる範囲は $\pm 500V$ ほどあるので、 $20kV$ に対して、 $\pm 2.5\%$ の商用電源変動を補償することができる。改造後、充電時の電圧を測定した結果を図8に示す。このときは、 $\pm 1\%$ 程度、商用電源が変動していたが、充電電圧はほとんど変化していない。これは直流高压電源本来の安定度を示しているように見える。

5. ビームへの影響

直流高压電源の改造によって、商用電源変動の影響が取り除かれるようになった結果、定量的な評価は未だ行なっていないが、以前より安定な電子ビームを FEL に供給できるようになった。また、夜間の大変動時においても影響なく実験ができるようになった。

6. まとめ

長年の懸案であった商用電源変動のパルス出力への回り込みの現象は、今回の一連の研究によって、充電時における高压直流電源の挙動にその原因があることが判明し、電源の改造によって、解決を見た。

わかってみれば、もっと早い時期に気がついてしかるべき問題ではあった。

参考文献

[1] 早川建、他、”商用電源変動とビーム不安定性”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan. p285

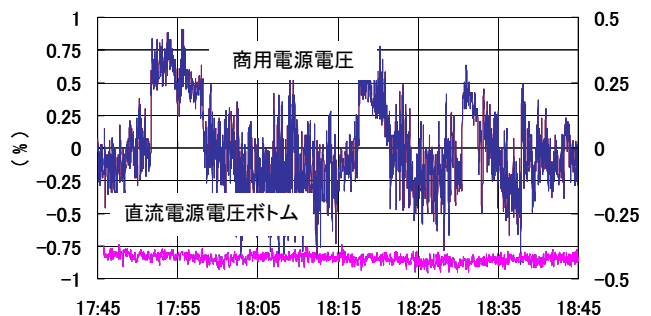


図8. 改造後、充電中の高压電源電圧変動(右側目盛)と商用電源電圧の変動(左側目盛)。商用電源電圧の変動はほぼ完全に排除され、直流電源本来の安定度を示している。

LEBRA-FEL用光陰極RF電子銃の設計検討

菅野 浩一^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、境 武志^{A)}、石渡 謙一郎^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、奥 洋平^{A)}、長谷川 崇^{A)}、宮崎 慎也^{A)}、稲垣 学^{A)}、城所 明生^{A)}、高崎 寛^{A)}

^{A)} 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 物理実験B棟

^{B)} 日本大学量子科学研究所

〒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 物理実験B棟

概要

高品質なFELを発生させるためには、光共振器に入射する電子ビームの電荷量、エミッタンスなどのパラメータが十分に要求される値を満たしていなければならない。エミッタンスは主に加速器入射部、特に電子銃の性能に依存する。高電界加速が可能なRF電子銃を採用すれば、空間電荷によるエミッタンスの増大を防ぐことが可能である。また、光陰極を用いれば、バックボンバードメントを防ぐことができる。そこでLEBRAでは光陰極を採用したRF電子銃の設計を行う。

1. はじめに

LEBRAの125MeV電子リニアックは100kVDC電子銃、7セルプリバンチャー、バンチャー、4m加速管三本とその他集束電磁石等で構成されている。このリニアックは電流200mA、エミッタンス $20\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 、エネルギー広がり1%の電子ビームを光共振器に供給し、 $1.5\mu\text{m}$ の赤外領域自由電子レーザーの発振を可能にした¹⁾。しかし、可視光・紫外領域発振のためには、より良質の電子ビームの供給が要求されると予想される。そこで、低エミッタンス化、大電流化が期待できる光陰極RF電子銃の導入を検討している。LEBRA用RF電子銃の目標値を表1にまとめた。

光陰極用材料には量子効率の高いCs₂Teなどが有望視されているが、取り扱いは決して易しくはなく、システムも複雑になり、寿命も短い。そこでLEBRA用光陰極には、量子効率は劣るが、取り扱いやすく寿命が充分長いLaB₆を陰極材料に採用し、その分レーザーパルス幅を50psと長めに取り十分な電荷を得られるようにし、電子加速後にバンチするようなシステムを検討する。今回はシケインを用いてバンチ圧縮をするRF電子銃システムに関して検討する。

表1. RF電子銃目標値

電荷量	0.36 nC/bunch以上
バンチ長	3.5 psec以下
マクロパルス幅	20 μs
規格化エミッタンス	10 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下
エネルギー	3 MeV

2. シケインを用いたRF電子銃システム

2.1 システム概要

図1にシケインを用いた場合のRF電子銃システムの概略を示す。このシステムは大まかに光電子発生用のドライブレーザーと光陰極、RF電子銃空洞、集束用ソレノイド、バンチ圧縮用シケインからなる。

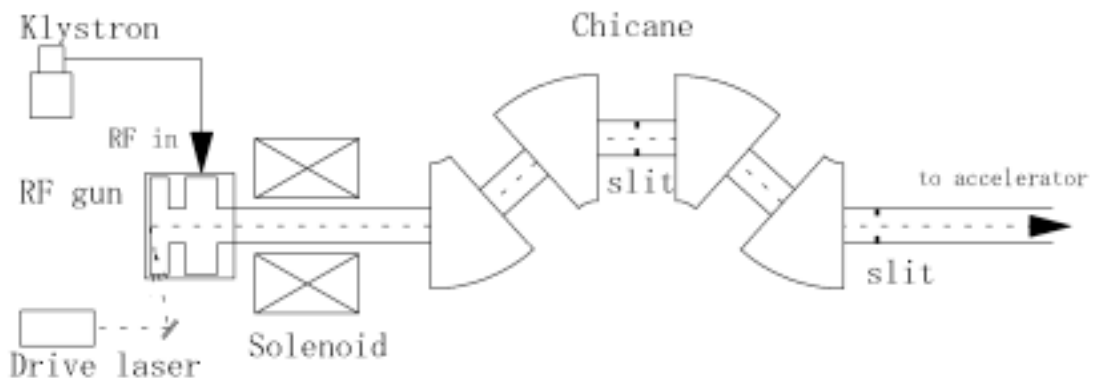


図1. シケインを用いた場合のRF電子銃システム概略図

¹⁾ E-mail: tekkamen@lebra.nihon-u.ac.jp

2.2 ドライブレーザーと光陰極

光電子励起用レーザーはLIGHTWAVE社のCW mode-locked Nd:YAGレーザーをPOSITVELIGHT社のアンプシステムで増幅しパルスを切り出して繰り返し89.25MHz、エネルギー40 μ J/pulse、パルス幅50psのNd:YAGレーザーの第三高調波(355nm)を使用する。陰極材料は 10^{-4} の量子効率が得られるLaB₆^[2]を想定すると電荷は1nC/bunch程度得られる。

2.3 RF電子銃空洞

シケインを用いてバンチ圧縮を行う場合、電子の引き出し・加速だけでなく、バンチ内前方の電子エネルギーは低く、後方の電子は高くなるようなエネルギー差をもつ電子ビームバンチを発生できるRF電子銃空洞を設計しなければならない。そこで、第一セルで電子を引き出し、第二セルでバンチ後方に前方より大きな電場がかかるような役割を持たせたS-band 1.5cell π モードのRF電子銃空洞を設計する。表2に今回検討したRF電子銃空洞のパラメータを示す。

表2. RF電子銃のキャビティ特性

周波数	2856	MHz
モード	π	
Q値	14500	
シャントインピーダンス	27.6	M Ω / m
入力電力	5.0	MW
カップリング	2.5	
加速エネルギー	3.2	MeV
カソード表面最大電場	66	MV/m
ピーク電場	86	MV/m

2.4 シケイン

シケインに入射される電子のエネルギーが高ければ飛行距離は短く、エネルギーが低ければ飛行距離は長くなる。従って、前方の電子が持つエネルギーが後方の電子が持つエネルギーより低いバンチをシケインに入射すると、後方の電子は前方の電子に比べ飛行距離が短いので前方電子に追いつきバンチすることができる。シケインは同じ偏向角 θ 、軌道半径Rをもつ四つのベンディングマグネットを使用すると仮定する。

3. シミュレーション

前節に述べた内容を考慮し、電荷1nC/bunch、レーザースポット径1mm、パルス幅50psを初期条件とし、RF電子銃からシケイン出口までの電子軌道シミュレーションを行った。図2に計算結果の最適化された電子軌道と電子のドリフトとともに変化するバンチ長の変化を示す。図2-B)のバンチ長は半値幅であらわしている。バンチ長1mmはおよそ3.5psに相当する。図3には陰極から1.74m程飛行した電子

のエネルギー分布と

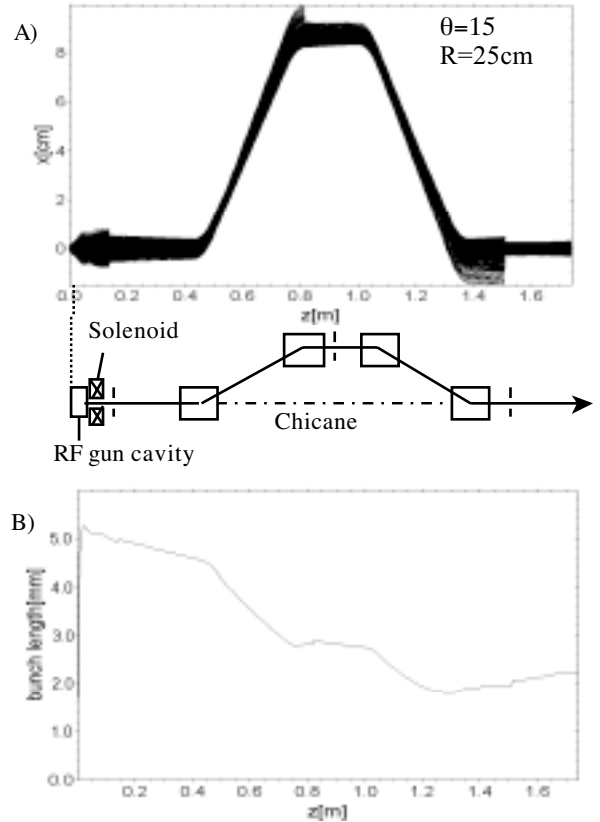


図2：シケインによるバンチ圧縮を用いたRF電子銃システムに関するシミュレーション結果。A)電子軌道と各装置の位置、B)バンチ長の変化。

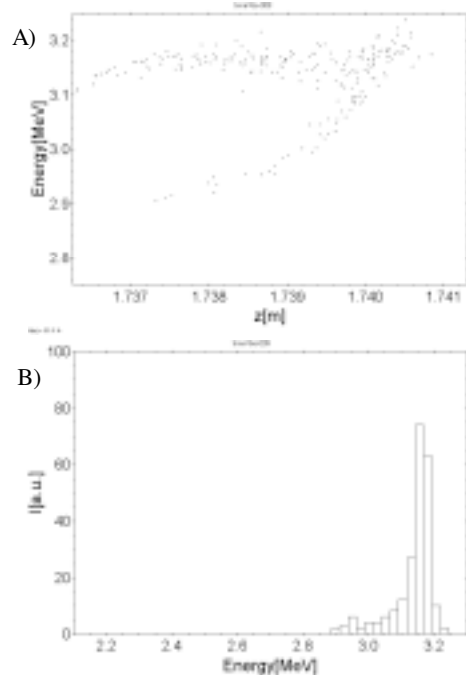


図3：陰極から1.74mはなれた位置でのエネルギー分布。A)ビーム進行方向位置に対するエネルギー分布、B)エネルギースペクトル。

スペクトルを示す。この電子ビームのエネルギー広がり率は2.3%である。シケイン下流に設定したギャップ5.6mmのスリットで規格化エミッタンスを $10\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ に制限した場合、電荷は0.22nC/bunchしか得られず、目標値に達していない。次に、RF電子銃空洞の陰極の周りにDC電子銃のwehnelt電極に相当するようなスロープを設けた場合のシミュレーションを行った。図4にバンチ長とエネルギー分布の計算結果を示す。

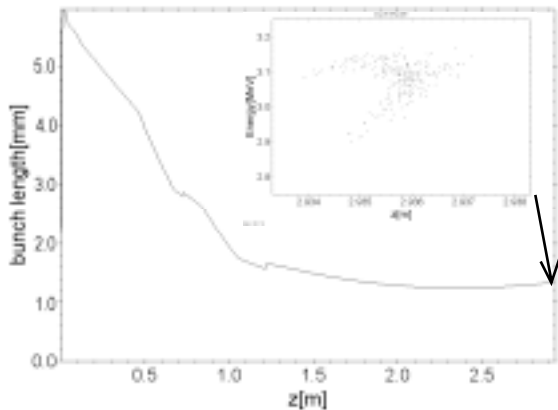


図4：RF電子銃空洞にスロープがある場合のバンチ長変化とシケイン直後のエネルギー分布。

シケイン下流に設定したギャップ4.0mmのスリットでエミッタンスを $12\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ に制限した場合、電荷量は0.27nC/bunchとなった。バンチ長に改善の効果が現れたが、これは、陰極周辺でのスロープによる集束効果でシケインに入射される電子ビームのエミッタンスが良くなったためと考えられる。しかし、シケインの効果が認められるものの、依然目標値には達していない。ここで、シケインを通さない場合についてのシミュレーション結果を図5に示す。ただし、陰極から0.75mの位置にギャップ6.5mmのSlit1、1.44mの位置にギャップ6mmのSlit2を配置した。この時、得られる電子ビームの電荷量は0.39nC/bunchで規格化エミッタンスは $12\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ であった。また、エネルギー分布の変化を表す。図6より、バンチ先頭部にある低エネルギー電子が取り除かれていることがわかり、大きな広がり角を持っているとわかる。速度変調の影響があることもこの図よりわかる。以上より、今回検討した電子銃は、電子エネルギーの割にバンチ長が長いことエネルギー広がりが大きくなってしまっている。そのため、速度変調の影響がありエネルギー分布が変化してしまっていることがわかる。3.2MeV程度で50psの電子ビームをシケインでバンチする場合は速度変調が起こりにくい程度のエネルギー差をバンチ内につくる必要があると考えられる。

6. まとめ

シケインを用いてバンチ圧縮をするRF電子銃システムについて検討した結果、今回検討したRF電子銃

は速度変調の影響が強く、シケインも充分には活かされていないことがわかった。今後、バンチ内のエネルギー差を小さくできるパラメータを模索しシケインを効果的に活用すること、また、 α マグネットを用いた場合についても検討し目標値を満足するRF電子銃システムの開発を進める。

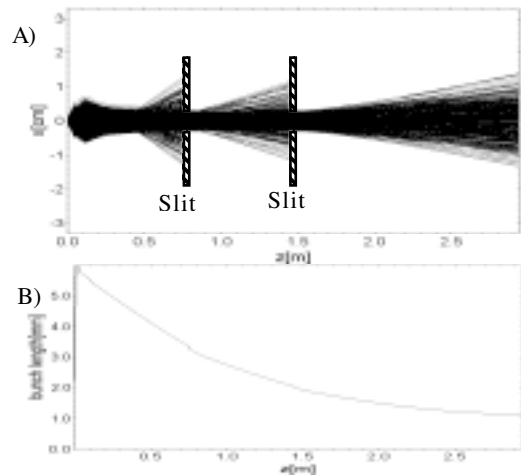


図5：シケインを通さない場合の電子軌道解析結果。A)電子軌道、B)バンチ長変化。

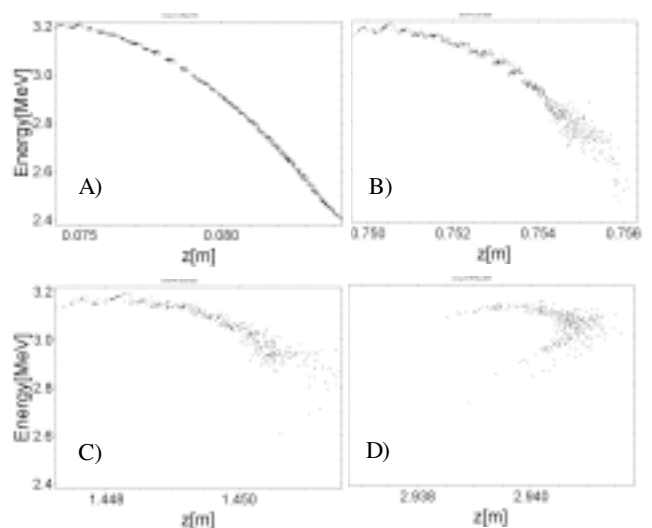


図6：エネルギー分布変化。A)RF電子銃直後、B) Slit 1直後、C) Slit2直後、D)システムの最後。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et. al. "First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5 μm " Proceedings of the 23rd International Free Electron Laser Conference and 8th FEL User's Workshop (Darmstadt, Germany 2001.8), NIM A483 (2002) pp. 29-33.
- [2] 浅川誠 他、"自由電子レーザー用光電陰極の開発", The review of Laser Engineering, Vol. 23, No. 1 January 1995,pp.55-67.

FEL用Sバンド大電カクライストロンの長パルステスト運転

境 武志^{1A)}、佐藤 勇^{B)}、樋野 雅司^{C)}、吉田 清彦^{C)}、福田 茂樹^{D)}、田中 俊成^{B)}、
早川 建^{B)}、早川恭史^{B)}、横山和枝^{B)}、菅野浩一^{A)}、石渡謙一郎^{A)}、中尾圭佐^{A)}、長谷川 崇^{A)}、宮崎慎也^{A)}

A) 日本大学大学院 理工学研究科

〒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物理実験B棟

B) 日本大学 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物理実験B棟

C) 三菱電機株式会社 通信機製作所

〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町8-1-1

D) 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

概要

日本大学FELリニアックのクライストロンRF窓下流側の真空排気強化を2000年度に行い、RF窓表面で放電等が生じたときに起きる真空悪化からの早い回復が可能となり、RF窓の破損を避けることができるようになった。この成果を基に、2001年度に真空排気強化、電子銃、RF窓の改良を行った三菱電機製クライストロンPV-3040Nの製作を行った。三菱電機で行ったテスト運転では、これまで使用していたPV-3030A1と比較して、良好な結果が得られた。2003年に入り、これまで使用していたクライストロン(PV-3030A1)1台をPV-3040Nへ交換し、RFパルス幅20 μ sの長パルステスト運転を行った。RFパルス幅20 μ s、出力電力21.1MW、繰返し5Hzを達成するまでにPV-3030A1に比べ、長パルスでのRFコンディショニングは短い時間で達成した。この結果は改良を行った効果が十分に現れており、丹念にコンディショニングを続けていけば目標値達成が十分期待できると考える。

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設では、KEKとの共同研究の一環として、加速管に供給するRF電力増幅用に、これまでKEKのフォトンファクトリーの入射部で使用していた三菱電機製PV-3030A1クライストロンを移設し、2台使用してきた^[1]。このクライストロンはもともと短パルス用であるため、RFパルス幅を広げて使用することは難しく、クライストロンRF窓の破損を引き起こしやすかった。そこでクライストロンRF窓下流側の真空排気系の強化を行い、窓での放電等で生じたガス放出による真空悪化からの回復速度を向上させることにより、RF出力窓が1つのクライストロンにおいて、RFパルス幅20 μ sという厳しい条件のもとで、RF出力電力20MW、繰返し5~12.5Hzでの運転が実現している^[2,3,4]。これにより、2001年5月に1.5 μ mのFEL発振に成功したが^[5]、もともとのリニアックの仕様では、赤外線から

紫外線領域のFEL発振や、パラメトリックX線放射利用のためにRFパルス幅20 μ sでの運転が要求され、RF出力電力30MW、繰返し12.5Hzで、ピーク電子ビーム電流200mA、最大電子エネルギー125MeVまで加速できるように設計されている。この広いパルス幅がRF窓に大きな負担をかけ、耐久性が十分ではないために、この仕様を満たすRF出力電力値は達成していない。

そこで、クライストロンRF窓下流側の真空排気強化により出力電力を20 μ sのパルス幅で、電力20MW、繰返し12.5Hzを達成できたことから、クライストロン側の真空排気強化も行うことで、さらにRF窓の耐久性を向上させることが可能と判断し、30MW出力達成を目標にクライストロンPV-3040Nを製作した。ここではこれまでの主な真空対策、PV-3040Nクライストロン、およびそのテスト運転結果に関して述べる。

2. PV-3040Nクライストロン

PV-3040Nクライストロンは、これまで使用しているクライストロンアッセンブリータンクを変更せずにクライストロンの交換だけですむよう、これまで使用してきたPV-3030A1と同寸法で、出力電力の高いPV-3030A3クライストロン^[6]の本体をベースに製作を行ったものである^[7]。主な改良点としては、

(1) 電子銃のカソードはScandateタイプの含浸カソードを使用、(2) RF窓にKEKBで用いられ実績のある50MWクライストロンPV-3050のセラミック材を採用、(3) RF窓上流のクライストロン内部用引き口パイプの内径を大きく、長さを短くして実効排気速度を改善、等が挙げられる。

図1に製作したPV-3040Nクライストロンの概観写真を示す。図1からわかるように、引き口をできるだけ導波管に近い位置に持ってきている。またこの改良により引き口部分の真空排気コンダクタンスはPV-3030A1に比べおよそ17倍大きくなり、実効排気量は約1.2l/sから約3.3l/sになった(気温20℃の場合に換算)。これにより、真空度が一時的に悪化した

¹ E-mail: sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

場合でも格段に早く回復することが可能となっている。なお、PV-3040Nクライストロンの最後の文字”N”は、日本大学の英語頭文字にちなんでつけられており、日本大学電子線利用研究施設での使用のために改良・開発されたことを意味している。



図1：PV-3040Nクライストロン外観写真。PV-3030A3をベースに改良している。真空引き口の内径を大きく、長さを短くして真空排気能力を向上させ、PV-3030A1（約1.2l/s）に比べ実効排気量はおよそ3.3l/sに増加している（気温20℃の場合に換算）。

3. RF 窓下流側の真空排気システム

図2にクライストロンRF窓下流側の真空排気強化後の導波管と各真空排気システムの配置を示す。クライストロンRF窓下流側約40cmの位置にANELVA製8l/sイオンポンプを2台設置し真空排気速度を向上させている。クライストロンRF窓周辺の実効排気量は追加前に比べ、約2.4倍の約17 l/sに増加している^[2]。（気温20℃の場合に換算）

クライストロンRF窓の下流側の真空排気系を強化することにより、クライストロンRF窓付近での真空悪化からの回復速度を向上させ、短パルス用クライストロン（PV-3030A1）において、RFパルス幅20 μ sという厳しい条件のもとで、繰返し5~12.5Hz、出力RF電力20MWが実現している。

4. テスト運転結果

4.1 短パルステスト運転

PV-3040Nクライストロンの短パルスでのテスト運転は三菱電機で行った。動作試験は、RF入力電力250W、RFパルス幅4 μ s、繰返し50Hzで行い、カソードビーム電圧286kVのとき、RF出力電力42.3MWが得られ、出力電力効率は47.9%であった。

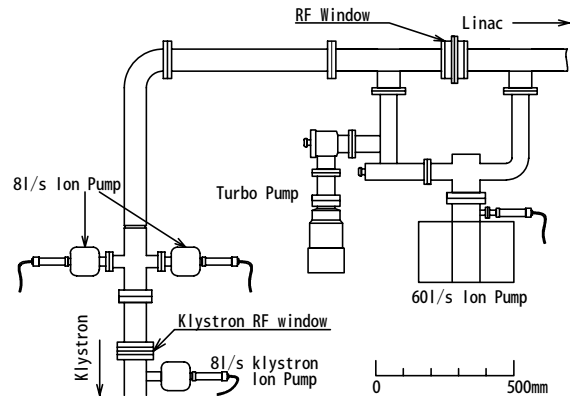


図2：クライストロン下流側の導波管と真空排気システムの配置。クライストロンRF窓下流側約40cmに8l/sイオンポンプを2台設置し、周辺の実効排気量が約2.4倍（約17l/s）に増加している（気温20℃の場合に換算）。

表1に得られた各値を、図3に電圧特性のグラフを示す。PV-3030A1クライストロンの出力電力定格は同じRFパルス幅、繰返し等の条件で、30MWである。このことを考慮すると、PV-3040NはPV-3030A1に比べ、出力電力に対するRF窓の耐性に余裕があり、長パルスの厳しい条件でも出力電力を維持できると考えられる。

表1: PV-3040N クラストロンパラメータ

Frequency	2856 MHz
RF pulse duration	4.0 μ s
Repetition rate	50 Hz
Output power	42.3 MW
PV-3040N引き口	Bea m
voltage	286 kV
Beam current	309 A
RF power efficiency	47.9 %
Gain	52.3 dB
RF input power	250 W
Heater voltage	16.8 V
Heater current	18.0 A
Perveance (10^{-6})	1.99 A/V ^{1.5}
Total length	1318.2 mm

4.2 長パルステスト運転

三菱電機には長パルス用のテストベンチが無いため、長パルス（RFパルス幅20 μ s）でのテスト運転は、本研究施設にて行うことになった。

PV-3030A1クライストロンからの交換後、真空リーク等の問題も特に無く、20時間ほどで順調に立ち上がった。三菱電機からの移設後しばらくテスト運転をすることができず、長期にわたり保管していたので、ダイオード動作でクライストロン内壁や、電子銃部分のコンディショニングを約70時間行い、パルス幅30 μ sで、ビーム電圧238.5kV、ビーム電流231A、繰返し5Hzまで達した。その後、RFを入れた

コンディショニングを370時間ほど連続で行った（ベーキングは行わずRFコンディショニングを行った）。今回の長パルスでのテスト運転では当面の間、RFパルス幅20 μ s、RF出力電力20MWで使用することを目標とし、20MW付近で出力電力効率が最大になるように集束コイルのパラメータ調整を行った。その結果、RF入力電力240W、RFパルス幅20 μ s、繰返し2~5Hz、ビーム電圧214.5kV、ビーム電流203Aで出力電力21.1MWを達成した。それから計算すると、出力電力効率は48.5%となる。図3にPV-3040Nの長パルスでのテスト運転結果を示す（三菱電機で行ったテスト運転の結果も同図に示してある）。またRFパルス幅20 μ sのテスト時の波形を図4に示した（RF電力18.6MW、繰返し2Hz時）。テスト運転からRFパルス幅20 μ sで出力電力20MW、繰返し5Hz動作は特に問題はなかった。

これまで使用してきたPV-3030A1クライストロンでの長パルス運転では、RFパルス幅を20 μ sまで広げ、

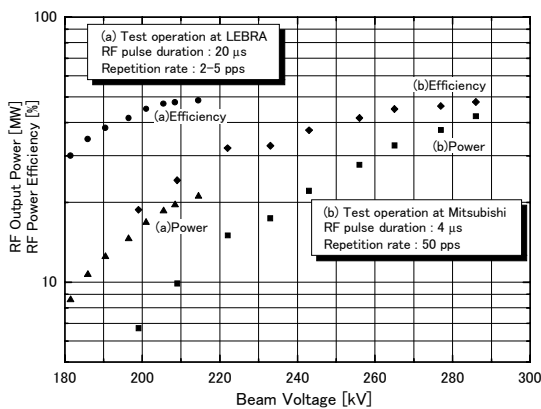


図3：PV-3040Nクライストロン電圧特性。(a)LEBRAで行った長パルス（パルス幅20 μ s）でのテスト運転結果。(b)三菱電機のテストベンチで行った（パルス幅4 μ s）テスト運転結果。

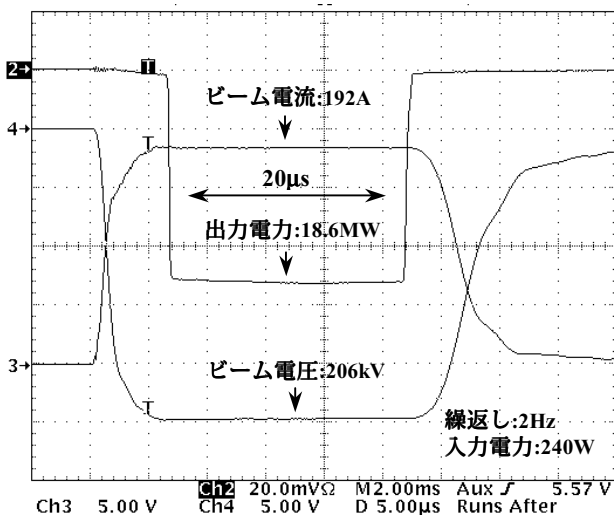


図4：長パルステスト運転時の出力RF電力、ビーム電圧、ビーム電流波形。（RFパルス幅：20 μ s、RF出力電力：18.6MW、繰返し：2Hz 運転時）

出力電力が20MW、繰返しが5~12.5Hzに到達するには千数百時間のRFコンディショニングが必要であった^[2]。しかし、それと比較すると短時間でRFパルス幅20 μ s、出力電力20MW、繰返し2~5Hzを達成したことから、真空排気強化等の改良の効果が十分あったといえ、今後もRFコンディショニングを続けていけば、最終目標値である30MWの達成が十分期待できると考える。

出力電力の安定度等に関しては、2003年3月に、パルスモジュレーター電源の改良を行うことにより、これまでの商用電源変動によっておきていた出力変動の問題が解決し^[8]、またPFNの微調整もPCによって遠隔操作で制御できるようになり^[9]、大きな問題はほぼ無くなってきている。

5. まとめと今後の課題

PV-3040Nクライストロンのテスト運転の結果、RFパルス幅20 μ sで、出力電力21.1MW、繰返し5Hzのテスト運転が可能になった。また、RFパルス幅20 μ sで出力電力20MW、繰返し5Hzでの運転は問題ないことが確認できた。これまで使用していたPV-3030A1に比べ、RFコンディショニング時間が短かったことから改良の効果が顕著であり、PV-3040NクライストロンはRFパルス幅20 μ s、RF出力電力30MW、繰返し12.5Hz達成への目処が付いたと考えられる。

今後は、目標値である、RFパルス幅20 μ s、RF出力電力30MW、繰返し12.5Hzの達成を目指す。また同時に長パルス動作で安定した出力が得られるようRF窓の改良も行っていく予定である。

参考文献

- [1] T.Tanaka et al., "PERFORMANCE OF THE FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY" Proc. 1st Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'98), Tsukuba, Japan (1998) p722-724.
- [2] T.Sakai et al., "Improvement of the long pulse operation of the S-band klystron" Proc. 25th Linear Accel. Meeting in Japan, Jul. 2000, Himeji, Japan, p228-230.
- [3] T.Tanaka et al., "IMPROVEMENT OF THE LONG PULSE OPERATION OF THE FEL LINAC AT NIHON UNIVERSITY" Proc. 2nd Asian Particle Accelerator Conf. (APAC'01), Beijing, China (2001) p743-745.
- [4] T.Sakai et al., " S-Band Klystron for Long Pulse Operation" Proc. The XXI International Linac Conference (LINAC2002), Gyeongju, KOREA (2002) p712-714 URL: <http://linac2002.postech.ac.kr>
- [5] Y.Hayakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A 483** (2002) 29.
- [6] S.Fukuda, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A 368** (1996) 561.
- [7] T.Sakai et al., "FEL用クライストロンのグレードアップ" Proc. 26th Linear Accel. Meeting in Japan, Aug. 2001, Tsukuba, Japan, p222-224.
- [8] K.Hayakawa, et al., "商用電源変動とビーム不安定性II", 本予稿集.
- [9] K.Yokoyama, et al., "PFNインダクタンスの自動調整システム", 本予稿集

LEBRAにおけるBPMによるビーム位置測定

石渡 謙一郎^{1,A)}、佐藤 勇^{B)}、早川 建^{B)}、田中 俊成^{B)}、早川 恭史^{B)}、横山 和枝^{B)}、
諏訪田 剛^{C)}、境 武志^{A)}、菅野 浩一^{A)}、中尾 圭佐^{A)}、長谷川 崇^{A)}

A) 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 日本大学理学部船橋校舎 物理実験B棟

B) 日本大学 量子科学研究所

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1 日本大学理学部船橋校舎 物理実験B棟

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

2003年1月に45° 偏向電磁石のコイル破損による磁場設定の見直し、2003年4月に自由電子レーザー(FEL)ビームライン用90° 偏向系の四極電磁石位置の修正、さらにモジュレーター電源の改良が行われた。加速器出口付近とアンジュレーターの入口と出口に設置した3台のビーム位置モニター(BPM)でビームパルス内におけるビーム位置を測定したところ、FELビームラインにおいてビームパルス内におけるビーム位置の変動は改善された。さらにBPMを利用して電子ビームをアクロマティックに通す調整が容易になった。

1. はじめに

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設(LEBRA)では、高エネルギー加速器研究機構(KEK)との共同研究により2001年5月に1.5 μm 赤外線FELの発振に成功した^[1]。波長領域0.8~5 μm のFEL発振、

および共同利用実験にむけて125MeV電子線形加速器の高性能化を進めている^[2]。FELを効率よく発生させるには高品質の電子ビームから放出された光を、後続電子ビーム軌道と高精度で重ね合わせることが絶対条件になる。そのため、ビーム軌道を知ることができるBPMが重要な役割をはたす。

2003年1月に45° 偏向電磁石のコイル破損による磁場設定の見直しを行った。また、2003年4月にFELビームライン用の90° 偏向系の四極電磁石列(Q5; 図1参照)において上下流の偏向電磁石フィールドクランプ外側面から直近の四極電磁石ヨークの対向面までの距離を調べたところ、上流側にはほぼ3.5mmずれていたため位置の修正を行った。さらに、モジュレーター電源の安定化^[3]等により、BPMを用いてビーム位置の調整後、FELビームラインにおけるビームパルス内でのビーム位置の変動は改善され、パルス内においてビームが斜めになる現象^[4]もなくなり、電子ビームをアクロマティックに通す調整が容易になった。

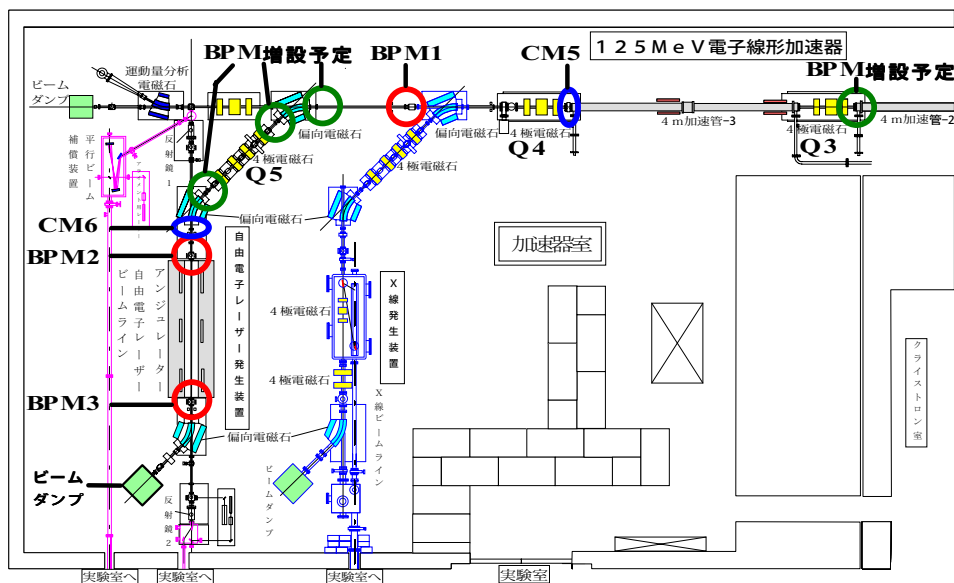


図1. BPM1,2,3とCM5,6の設置箇所及びBPM増設予定箇所

¹ E-mail: ishiwata@lebra.nihon-u.ac.jp

2. ビーム位置の測定

2.1 測定

測定はビームエネルギー86.8MeV、パルス幅20 μ s、繰り返し2HzでFEL発振時に行った。この時のオシロスコープで読み取ったBPM電極出力の検波波形を図2に示す。また、CM6のビーム電流の波形と赤外線検出器の波形（FELマクロパルス）の波形を図3に示す。各モニターの設定箇所は図1に示した。

図2において、(a)BPM1と(b)BPM2のX+側とX-側およびY+側とY-側の電極出力の検波波形、また(c)BPM3のX+側とX-側の電極出力の検波波形は重なっている。この様な状態でのFEL発振は今回が初めてである。だが、(c)BPM3のY+側とY-側の電極出力の検波波形は一致していない。(b)BPM2のX方向の波形が重なっていることからアクロマティックにビームが通っていると思われる。

また、ビーム位置の導出方法は昨年プロシードディングを参照してもらいたい^[5]。

2.2 ビーム位置の評価

得られたデータから80nsごとにデータ20個の平均を取り、S/N比が100倍程度にし、ノイズを除去後のパルス内における時間とビーム位置X,Yの変動の関係を図4に示す。どのBPMにもビーム位置で0.04mm程度のノイズの様な波形が現れているが、X,Y方向ともにパルス内におけるビーム位置の変動は、BPM3の垂直方向Y(図4-(c)BPM3-Y)を除き0.1mm以内でありFELの発振に十分なビームになった。

また、パルス内において80ns間隔でビーム位置X-Yをプロットしたものを図5に示す。(a)は図4をX-Y表示にしたものであり、(b)は昨年7月に測定したものである^[4]。測定条件はほぼ同じだが、(a)は(b)よりビーム電流が少ない。ここで、(a)と(b)を比較すると、パルス内におけるビーム位置の変動は小さくなっていることがわかる。また、BPM2のビーム位置とBPM3のビーム位置を比べると、ビーム位置読み取り誤差は ± 0.1 mm以内であることから、+Y方向に斜めにビームが通っていることがわかる。

3. BPMの信号読み取りシステム

現在PCIバス用10MHz,12ビットAD変換ボード(Interface社,PCI3525)を用いて、ビーム位置のモニターリングシステムを作っている。だがAD変換ボードではコストがかかるためこれとは別に信号処理回路の製作を考えている。

4. BPMの増設

設置したBPMがビーム軌道の制御に有効であることが確認されたので、同等のBPMを設置4m加速管3本の各上流側に1台ずつとFELビームラインの90°偏向系に3台(図1参照)の計6台をこの夏に増設する予定でBPMの較正後設置する。

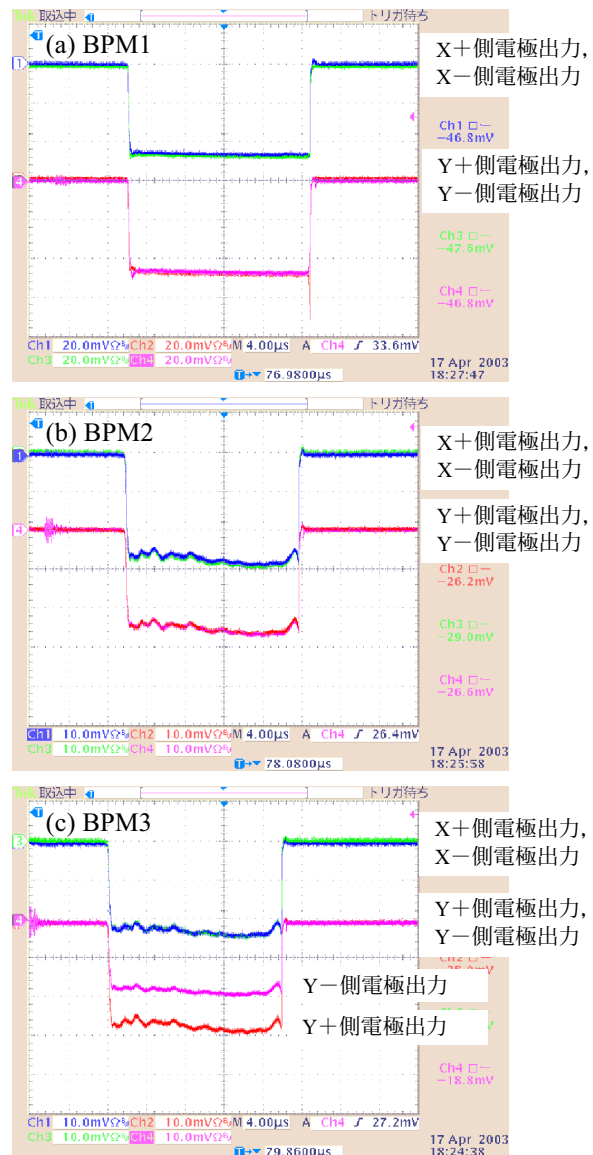


図2. BPMの電極出力の検波波形

(a)BPM1、縦軸：20mV/div 横軸：4 μ s/div
(b)BPM2,(c)BPM3、縦軸：10mV/div 横軸：4 μ s/div
(a)と(b)の“X+側とX-側”および“Y+側とY-側”の電極出力の検波波形は重なっている。また、(c)の“X+側とX-側”の電極出力の検波波形は重なっている。

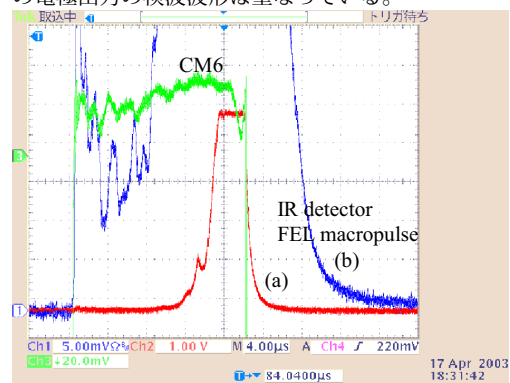


図3. 赤外線検出器の出力波形とCM6の出力波形
赤外線検出器：(a)1V/div,(b)5mV/div、4 μ s/div。

光強度が強く検出器は飽和している。
CM6：20mV/div、4 μ s/div (ピーク部分の拡大)

これによりFELビームラインでは、加速器出口より下流のストレート部、90°偏向系の4極電磁石Q5の入口と出口、アンジュレーター入口と出口の各直線部においてBPMが各2台となりビーム軌道・ビームの傾きを確実にモニター可能となる。

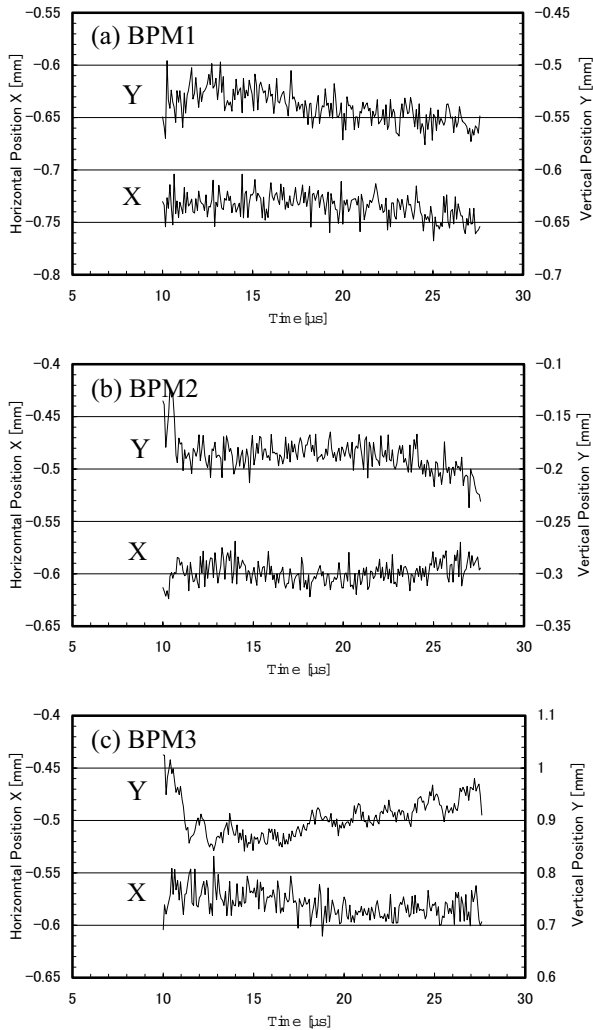


図4. パルス内におけるビーム位置の変動Time-X,Y。(a),(b),(c):BPM1,2,3のパルス幅18μsにおける時間とビーム位置X,Yの位置変動。

5. まとめと今後の課題

FELビームラインにおいてビームパルス内におけるビーム位置の変動は改善された。さらにアクロマティックに電子ビームを通すことが可能になった。今後の課題は、FELを波長可変光源として利用するには、共振器ミラーを金属コートミラーに交換する必要があり、これまでの誘電体多層膜ミラー時のアンジュレーター光によるビーム診断^[6]が困難になり、FELビームラインにおけるビーム軌道のモニタリングは重要となるので、早急にビーム位置をリアルタイムにモニターできるシステムをつくりあげることである。

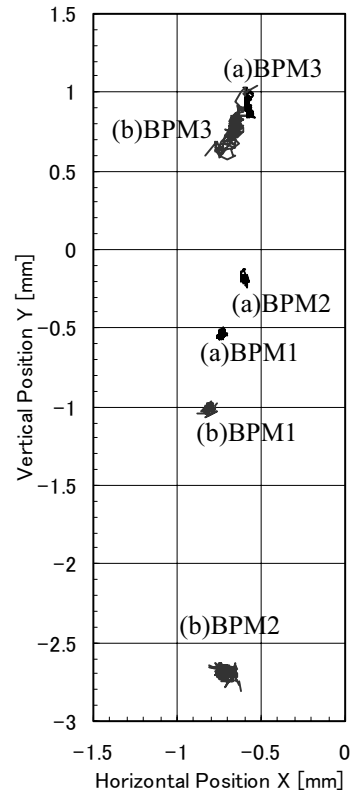


図5. パルス内におけるビーム位置の変動X-Y。パルス内において80ns間隔でビーム位置X-Yをプロットした。(a)2003/4/17測定、図4をX-Y表示にした図。(b)2002/7測定。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et al., “First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5μm”, Nucl.Instr. and Meth. A(2002), Volume 483/1-2, pp.29-33(NIMA18811)
- [2] 佐藤勇 他, “日本大学電子線利用研究施設の現状” Proceedings of this Meeting.
- [3] 早川建 他, “商用電源変動とビーム不安定性II” Proceedings of this Meeting.
- [4] K.Ishiwata, et al., “Development of Strip-Line Type Beam Position Monitor” Proceedings of the 21st International Linear Accelerator Conference (LINAC2002, Gyeongju, Korea, August 19-23, 2002) (to be published)
- [5] 石渡謙一郎 他, “ストリップライン型ビームポジションモニターの研究ービームパルス内におけるビーム位置変動ー” Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002, p350-352.
- [6] 田中俊成 他, “アンジュレーター光によるFELビームラインビーム診断”, Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001, p246-248.

PFNインダクタンスの自動調整システム

横山 和枝^{1A)}、佐藤 勇^{A)}、早川 建^{A)}、田中 俊成^{A)}、早川 恭史^{A)}、
境 武志^{B)}、菅野 浩一^{B)}、石渡 謙一郎^{B)}、中尾 圭佐^{B)}、長谷川 崇^{B)}

A) 日本大学量子科学研究所、B) 日本大学大学院理工学研究科
〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1 電子線利用研究施設

概要

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) ^[1]では、クライストロンモジュレータのパルス形成回路 (Pulse-Forming-Network: 以下PFNと略す) のインダクタンス調整をすべて遠隔操作できるようにしてある^[2]。そのため、パルス波形の平坦度が容易に調整できるという利点がある。これまでは30段のPFNのインダクタンス調整を手動で行っていたが、今回、パソコンを通して操作できるように改良した。また、最適な平坦度を出すために適切なインダクタンスの組み合わせを計算し、これを基にPFN調整を行った。

1. はじめに

FEL高利得のためには、光共振器のミラー間を往復する光パルスと入射電子ビームのマイクロパルスのタイミングを一致させることが必要不可欠である。クライストロンの印加電圧の変動は、マイクロ波出力の振幅と位相の変動となる。この位相変動は共振器内での光パルスと電子パルスの空間的重なりを不安定にする要因の一つである。そのため、FEL用電子ビームには平坦度の良いパルスが得られるPFNが要求される。LEBRAのRFリニアック (加速周波数2856MHz、パルス幅20 μ s) の電子ビームバンチ長は5ps程度である^[3]。光パルスと電子パルスを10%以内の精度で重ねることを要求すると、パルス内の位相変動を0.5°以内に抑える必要がある。印加電圧変動とクライストロン出力RFの位相変動の関係^[4]から、これに要するパルス平坦度は0.08%である。また、

このときの加速電圧変動は、クライストロン出力RFの電力変動の関係式^[5]から0.1%である。

2. パルス形成回路

図1にパルスモジュレータの等価回路を示す。PFNは30段のインダクターとコンデンサーから成る。インダクタンスは、図2の写真のようにコイルを巻きつけた筒にモーター駆動によってアルミシリンダーを出し入れすることにより変えることができる。シリンダーの挿入長はポテンショメータを利用して、パネルメータに電圧表示される。モーターはデジタルI/Oボードを通してパソコンで制御される。

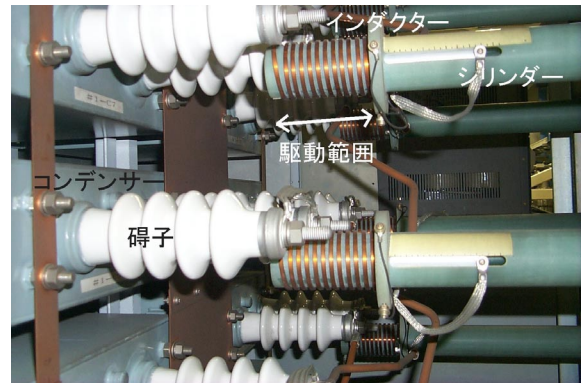


図2：PFNの一部。右側がインダクター部で、筒の中にアルミシリンダーがあり、これをコイルの巻いてあるボビンに出し入れすることにより、インダクタンスを変える。アルミシリンダーの駆動範囲は約9cmである。

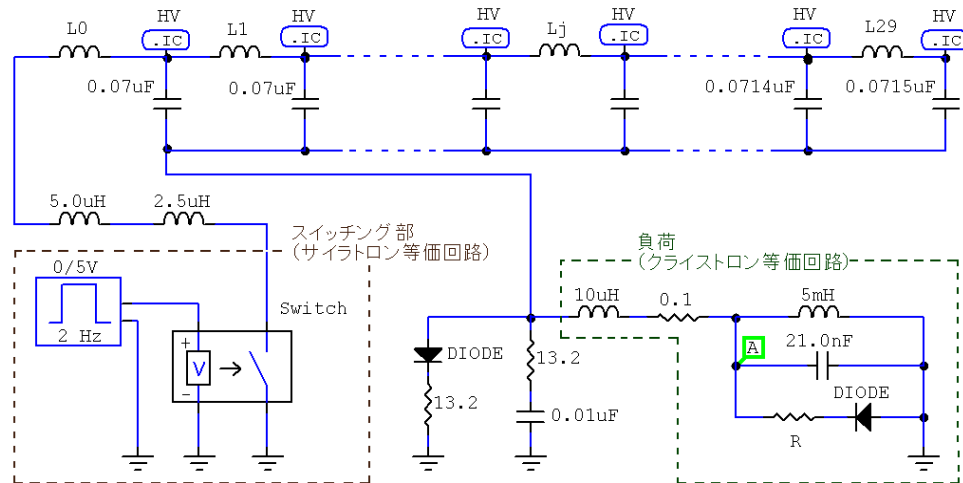


図1：パルスモジュレータ等価回路。

¹ E-mail: k_yokoyama@lebra.nihon-u.ac.jp

インダクターは、コイルの巻き方等に個性があり、インダクタンスの値も異なるので、それぞれのインダクタンスを測定した。測定結果を図3に示す。アルミシリンダーが筒に挿入されていないときが、インダクタンスの最大値に対応する。また、接触抵抗、ケーブルの直列インピーダンス、ケーブルや端子間の浮遊容量による誤差が大きいため、試験的に3つのインダクターを選んで数回測定を行った。その結果、±5%程度のばらつきがあった。また、インダクタンスの可変量の設計値は、1.73μH~3.56μHであるので、高めに測定されていると思われる。

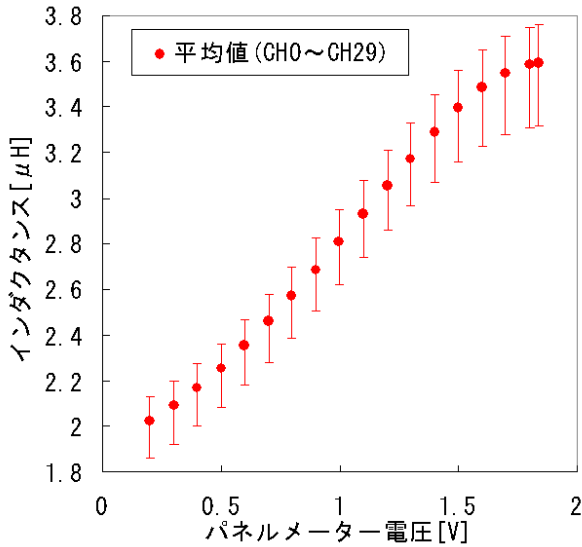


図3：インダクタンスの変化。(インダクタンスの最大値が筒にアルミシリンダーを挿入していないとき。) 測定器 (LCRメータ) は、ZM 2355^[6]。

3. 計算

3.1 方法

平坦度の良いパルス電圧波形を求めるために、次のような計算を行った。目標とするパルス電圧波形の関数を $g(t_i)$ とし、基準になる電圧を V 、そのときのパルス波形を $f(t_i)$ 、インダクタンスを L_j 、変化分を ΔL_j 、($i=0, n$ 、任意の時刻、 $j=0, 29$ 、インダクタンスの番号)とすると、一次の近似では次式のように表わされる。

$$g(t_i) = f(t_i) + \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} \Delta L_0 + \dots + \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \Delta L_j$$

この関数が、電圧 V の平坦部を持つように二乗偏差 $\Sigma(V-g(t_i))^2$ を最小にする ΔL_j を求める。すなわち、

$$\frac{\partial}{\partial L_j} \sum_{i=0}^n \{V - g(t_i)\}^2 = 0$$

を求める。これを展開すると、

$$V \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} = \sum_{i=0}^n f(t_i) \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} + \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{29} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_k} \Delta L_k$$

となる。ここで、それぞれのマトリックスを次のように置き換えると、

$$A = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_{29}} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n f(t_i) \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n f(t_i) \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^n f(t_i) \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_{29}} \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} \Delta L_0 \\ \vdots \\ \Delta L_j \\ \vdots \\ \Delta L_{29} \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} & \dots & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_k} & \dots & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_{29}} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} & \dots & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_{k=j}} & \dots & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_{29}} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_{29}} & \dots & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_k} & \dots & \sum_{i=0}^n \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_{29}} \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_{29}} \end{pmatrix}$$

$$VA = B + C \cdot D$$

$$D = C^{-1} \cdot (VA - B)$$

となり、 D が求まれば、それぞれのインダクタンス L の最適値が求まる。ただし、 ΔL が小さい場合に成り立つ近似であり、基準にする電圧 V には制限があるため厳密には成り立たない。また、図2の測定結果より L_j も制限される。

3.2 シミュレータ

3.1で説明した計算方法が有効であるかどうかを調べるために、SPICEを用いた回路シミュレータ (CircuitMaker2000)^[7]を利用して、パルス電圧波形の計算を行った。シミュレーションには、図1で示したように、PFNとスイッチング部 (サイラトロン等) と負荷 (クライストロン等) から構成される等価回路を使用した。HVは充電電圧、 R はパルストランスの1次側からみたクライストロンのインピーダンス、A点はパルス電圧の計算点である。コンデンサーの容量は、クライストロンモジュール作成時に測定したデータを利用した。 R は、 $Z_k = 1/K \cdot V_k^{-1/2}$ (K はクライストロンのパービアンス、 V_k は印加電圧) から求まる^[5]が、PFNのインピーダンスとのマッチングを取る必要がある。実際に設定されている L の絶対値が精密にはわからないため、回路シミュレータで用いる R は、パルス電圧を測定し、その波形に近くなるような値にした。また、 L 値は、図2の測定から設定されている値に近いと思われる $L_j = 3.0\mu\text{H}$ に統一して計算した。図4にHVを20.5kVにしたときに測定したパルス電圧と回路シミュレータで得られた波形を示す。

3.3 計算例

図4からわかるように、回路シミュレータで得られた波形は、測定したパルス電圧波形に近い。さらに、平坦度の高いパルスを得るために、回路シミュレータと図1の等価回路を用いて、3.1の計

算を行った。計算では、

$$\frac{\partial f}{\partial L_j} \cong \frac{f(L_j + \delta L_j) - f(L_j)}{\delta L_j}$$

で近似した。ここで、 $f(t_i)$ は、 $L_j=3.0\mu\text{H}$ と値を全て同じにした関数で、インダクタンス変化量は $\delta L_j=0.01\mu\text{H}$ にした。また、 V の値は $18.5\text{kV}\sim 22.5\text{kV}$ で 0.05kV ステップで計算し、 $2.0 < L_j < 3.5 [\mu\text{H}]$ で制限した。さらに、目標とするパルス電圧波形 $g(t_i)$ を決めるパルス幅 t_i も制限されるので ΔL_j を絞り込むことができる。 t_i の計算ステップは $0.1\mu\text{s}$ にした。図4の測定したパルス電圧波形と計算で得た L_j 値を使ったシミュレータ波形を図5に示す。計算の結果、 V の値が 20.6kV で良い解が得られた。計算結果(1)は $2.0 < t_i < 22.0 [\mu\text{s}]$ 、計算結果(2)は $2.2 < t_i < 24.2 [\mu\text{s}]$ で計算した解を用いたパルス波形である。計算結果(1)は、パルスの平坦度はパルス幅 $16.5\mu\text{s}$ で 0.06% である。計算結果(2)は、パルス幅 $18.5\mu\text{s}$ で平坦度 0.1% である。この計算結果から測定データよりも平坦度を良くすることは可能であると思われる。

4. PFN調整

実際のPFN調整では、各インダクタンスを $\delta L_j=0.02\mu\text{H}$ (パネル電圧表示で 0.018V) ずつ変化させて各々のパルス電圧波形を測定し、3.1の方法で計算を行った。パルス電圧波形の測定データには、ノイズが 0.04% 程度 ($0.01\text{V}/24.5\text{V}$) 含まれているので、この影響を小さくするために20パルスのアベレージ波形をさらに移動平均を取って処理した。 L 値の絶対値はわからないが、図3の曲線から局所的にはパネル電圧と L 値が比例すると思われるので、 ΔL_j から相対値はわかる。図6にこの方法でPFN調整を行う前と行った後のパルス電圧波形を示す。調整後(1)は $2.1 < t_i < 23.1 [\mu\text{s}]$ 、調整後(2)は $1.9 < t_i < 23.6 [\mu\text{s}]$ で計算した解を用いた。調整前は、湾曲になっていた波形(平坦度は 0.16%)が、計算で得られた ΔL_j の分を変えたことによって平坦度が改善された。調整後(2)では、 $17.5\mu\text{s}$ のパルス幅で、 0.12% の平坦度が得られている。

5. まとめ

パルス電圧波形の平坦度は改善されたが、ノイズの影響があるので、この調整方法ではパルス平坦度 0.1% までが限界と思われる。今後は、パルス電圧波形平坦度の評価として、クライストロン出力RF位相を利用する方法を試みる予定である。また、調整精度をあげるためにはパネル電圧と L 値の対応関係を較正する必要がある。さらに、計算で得られるインダクタンスの組み合わせが複数あるので、PFNインダクタンスの自動調整システムを確立するためにはインダクタンスの最適値を求める

アルゴリズムの改良が必要である。

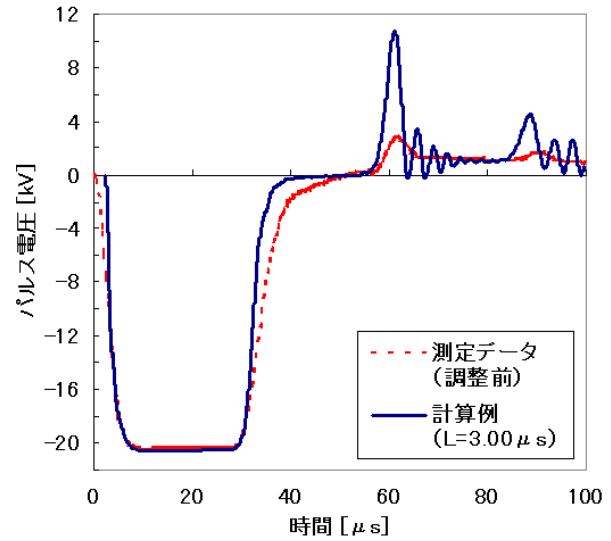


図4：パルス電圧波形。測定データ (HV=20.5kV) と回路シミュレータでの計算例 ($L=3.0\mu\text{s}$)。

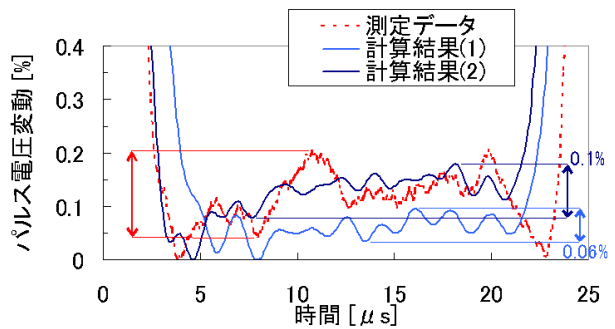


図5：パルス電圧の測定データと計算結果を使って得られた平坦度の高いシミュレータ波形。

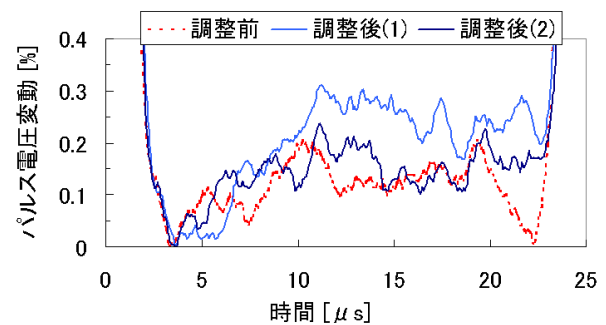


図6：PFN調整結果 (パルス平坦部)。

参考文献

- [1] 佐藤 勇、他., "日本大学電子線利用研究施設の現状", Proc. of this Meeting.
- [2] 早川 建、他., "日大FELの建設", Proceedings of the 21th Linear Accelerator Meeting in Japan, p.20, 1996.
- [3] Hiroyuki Nakazawa, et al., "Radiation from the FEL Undulator at Nihon University", Proceedings of the 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, p.394, 1999.
- [4] R.B.Neal, General Editor, "THE STANFORD TWO-MILE ACCELERATOR", W.A.Benjamin, Inc., p.294, 1968.
- [5] 設楽哲夫, "高周波源", OHO'90, p.III-5, 1990.
- [6] URL: <http://www.nfcorp.co.jp/>
- [7] URL: <http://www.circuitmaker.com/>



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 528 (2004) 239–243

**NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH**
Section Awww.elsevier.com/locate/nima

Improvement of the PFN control system for the klystron pulse modulator at LEBRA

K. Yokoyama^{a,*}, I. Sato^a, K. Hayakawa^a, T. Tanaka^a, Y. Hayakawa^a, K. Kanno^b,
T. Sakai^b, K. Ishiwata^b, K. Nakao^b

^aLaboratory for Electron Beam Research and Application, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan

^bGraduate School of Science and Technology, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi 274-8501, Japan

Abstract

The short-wavelength free electron laser (FEL) requires a stable electron beam with long pulse duration, narrow energy spread, and high current density. The pulse forming network (PFN) for the klystron pulse modulator at LEBRA was designed to realize pulse flatness error within 0.05%. The PFN consists of 30 capacitors and adjustable inductors. A PFN adjustment was performed to suppress changes of the RF phase difference between the input and the output of the klystron. The flatness of the pulse voltage applied to the klystron has been adjusted to an error within 0.06% as a result of the phase flatness error within 0.3° achieved by the PFN adjustment. Furthermore, the time dependence of the energy spectrum in the pulse duration has also been suppressed.

© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

PACS: 41.60.Cr.; 29.27.Fh.; 29.17.+w.; 29.27.Bd.

Keywords: FEL; Infrared; Electron linac; RF; Modulator

1. Introduction

The quality of FEL is seriously affected by the performance of the accelerator in terms of the stability of the RF power and phase, the bunch length, the beam emittance, the current density and the energy spectrum. Essentially, RF linac-based FELs require a stable and long RF pulse

from klystrons [1,2]. Generally, the fractional change in the electron energy gained in an accelerator section due to the fractional change in voltage of the klystron is expressed as

$$\frac{\delta V_m}{V_m} = \frac{5}{4} \frac{\delta V_k}{V_k} \quad (1)$$

where V_m is the maximum possible electron energy that can be obtained from a given length of accelerator supplied with a given level of RF power, and V_k is the voltage applied to the klystron [3]. The phase shift that arises in the klystron, which can occur both during a pulse and

*Corresponding author. Tel.: +81-47-469-5489; fax: +81-47-469-5490.

E-mail address: k.yokoyama@lebra.nihon-u.ac.jp
(K. Yokoyama).

from pulse-to-pulse, is caused by modulation of the klystron beam-voltage pulse. This follows that

$$\Delta\theta_k = -2\pi f \frac{l_k}{c} \frac{1}{\left(\sqrt{1 - 1/(1 + M_k)^2}\right)^3} \times \frac{1}{(1 + M_k)^3} M_k \frac{\Delta V_k}{V_k} \quad (2)$$

where M_k is substituted for eV_k/m_0c^2 , f is the RF frequency, l_k is the klystron drift tube length, m_0 is the rest mass of the electron, c is the velocity of light, and e is the electron charge [3].

A change in the applied voltage is a serious problem in the LEBRA linac since the accelerating RF is provided by two klystrons driven with separate pulse modulators. The different phase shift between the klystrons causes fluctuations in the beam energy at the exit of the linac, resulting in the orbit length variation of the beam in the momentum analysing magnet system. Therefore, the bunched electron beam can be easily mistuned to the light pulse accumulated in the optical cavity [4]. The LEBRA FEL requires voltage fluctuation within 0.05% at 240 kV, which corresponds to the phase fluctuation of 0.26° for PV3030 klystron, as deduced from Eq. (2).

The inductances in the PFN have been optimized to reduce the time dependence of the RF phase difference between the input and the output of the klystron in the pulse duration. Then, the voltage fluctuation was deduced from the phase fluctuation.

2. The RF system for the LEBRA linac

2.1. Performance of new RF amplifiers

The klystron output power is nearly independent of small fluctuations in the input RF power. But phase fluctuations are introduced through the drive amplifier. A new solid-state RF amplifier was developed to obtain a pulsed high-power microwave with constant phase to drive a klystron. Since the phase of the amplifier output RF changes rapidly at the head of the pulse, the RF power within the last 20 μ s in a total 50 μ s pulse duration

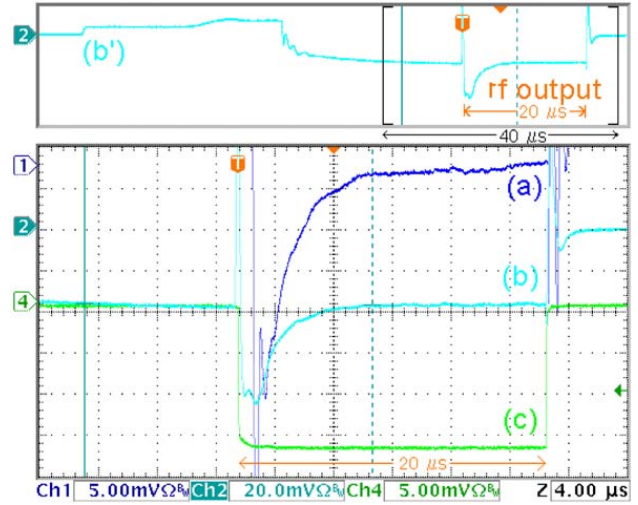


Fig. 1. The phase and the amplitude of the RF amplifiers. (a) RF phase of amplifier #1 ($0.3^\circ/\text{div}$), (b) and (b') are the RF phase of amplifier #2 ($0.7^\circ/\text{div}$) that differ in horizontal scale and that are equal in vertical full scale, (c) RF amplitude of amplifier #2 ($120\text{ W}/\text{div}$).

is coupled to the output port of the amplifier as shown in Fig. 1(b'). The resultant phase shift of the RF amplifier output is less than $\pm 0.5^\circ$ over 18 μ s at the maximum output power of 400 W, which was measured for each klystron driving RF amplifier using the double-balanced mixer (DBM) as shown in Fig. 1. The RF amplifier input is a cw RF from a master oscillator (Agilent Technologies E4425B-ATO-11188). Both amplifiers have similar phase shift characteristics at the start of the RF output. The phase shift during the pulse duration is compensated with a function generator and the RF amplifier output is supplied to a klystron [5]. Therefore, the effect of these phase shifts on the beam energy will be reduced; however, the effect on FEL lasing is not negligible.

2.2. The PFN control system

The pulse modulator consists of a PFN circuit with 30 LC sections. Each variable inductor system consists of an air-core coil, a motor-driven aluminum slug, and a potentiometer for readout of the slug position. The tuning slug is controlled by a personal computer (PC) through an I/O board [6].

2.3. The method of PFN adjustment

The optimal value of each inductance, which produces the flat-pulsed voltage, is deduced from the following calculation [6]. If the target waveform, which could have a high flatness voltage or phase signal, is denoted as $g(t_i)$ in a simplified manner (i.e., a function of the inductances L_0-L_{29} and time t_i); the initial waveform is denoted as $f(t_i)$; the reference voltage is V ; the j th inductance is L_j and the variation of L_j is ΔL_j , where t_i is i th time in the pulse duration partitioned into n ($i = 0-n$); and j is the channel number of the inductor ($j = 0-29$), then $g(t_i)$ is approximated as the first order expansion by

$$g(t_i) = f(t_i) + \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_0} \Delta L_0 + \dots + \frac{\partial f(t_i)}{\partial L_j} \Delta L_j. \quad (3)$$

Thus, when the sum of squares of deviations $\Sigma(V - g(t_i))^2$ is minimum, the function $g(t_i)$ represents the high flatness pulse [3]. It means

$$\frac{\partial}{\partial L_j} \sum_{i=0}^n \{V - g(t_i)\}^2 = 0. \quad (4)$$

Indeed, the differential function can be replaced with

$$\frac{\partial f}{\partial L_j} \cong \frac{f(L_j + \delta L_j) - f(L_j)}{\delta L_j} \quad (5)$$

where δL_j is the change in L_j . ΔL_j should be within the range of 2.0–3.6 μH and t_i should lie within the pulse duration. The value of δL_j is set so that the change in the waveform signal is sufficiently larger than the noise level. From the measurement of the waveform dependence on each change δL_j , Eq. (4) is solved for ΔL_j . Then, the target function $g(t_i)$ is constructed. The value of ΔL_j is set on the PFN inductor using a PC. The fluctuation of the modulator output voltage is not large enough to analyze for deriving the differential coefficient in Eq. (5) due to a poor signal-to-noise ratio. Instead, the RF phase difference between the input and the output of the klystron is useful for this method as can be expected from Eq. (2).

3. Improvement of energy spectrum

Waveforms of the RF phase difference between the input and the output of the klystron before (A)

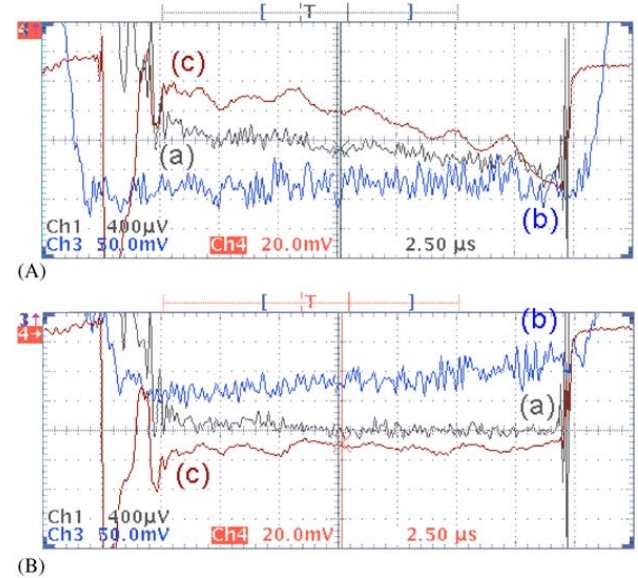


Fig. 2. The RF flatness of klystron #1. (A) Before adjusting the PFN inductance, (B) after adjusting the PFN inductance. (a) RF amplitude (0.5%/div), (b) waveform of the PFN (0.2%/div), (c) RF phase (0.6°/div).

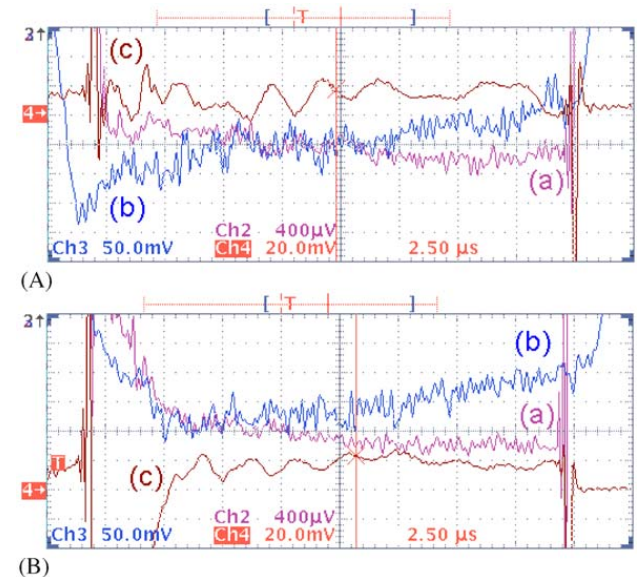


Fig. 3. The RF flatness of klystron #2. (A) Before adjusting the PFN inductance, (B) after adjusting the PFN inductance. (a) RF amplitude (0.5%/div), (b) waveform of the PFN (0.2%/div), (c) RF phase (0.5°/div).

and after (B) the optimization of the PFN inductances carried out by this method are shown in Figs. 2 and 3 for klystron Nos. 1 and 2, respectively. Before adjustment, the phase shift in the RF pulse duration of $17\ \mu\text{s}$ was greater than 2° for klystron No.1 and greater than 1° for klystron No.2. Each phase shift has been reduced to around 0.3° over $17\ \mu\text{s}$ by the optimization. This corre-

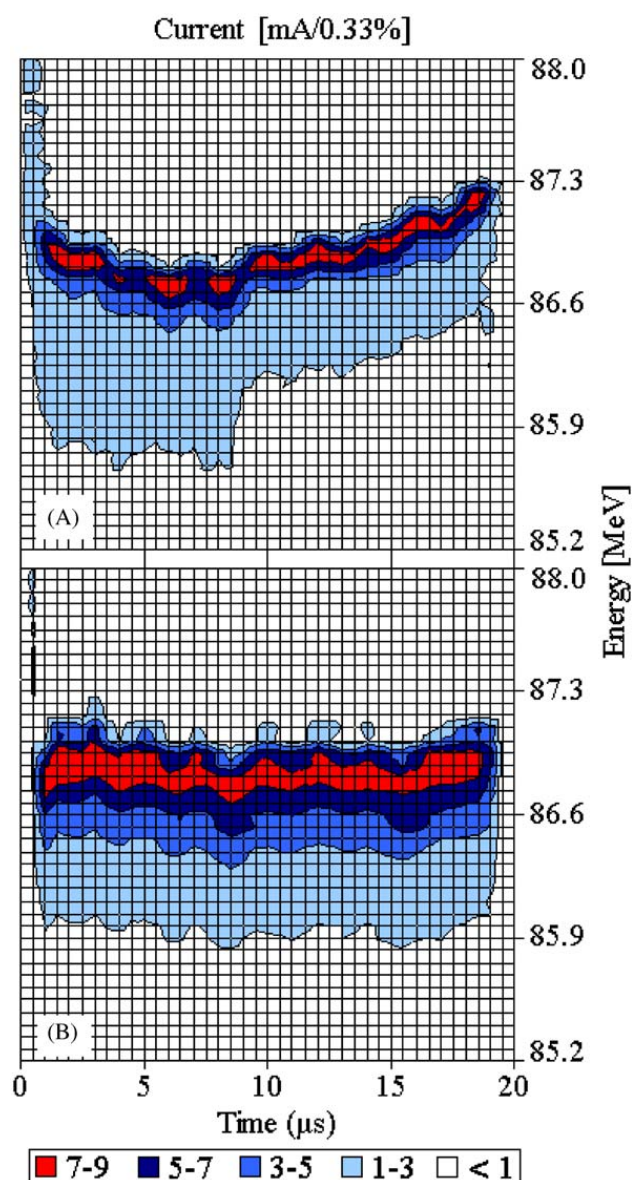


Fig. 4. Energy spectra around 86.8 MeV that were carried out, utilizing the first 45° bending magnet as a spectrometer. (A) Before adjusting the PFN inductance, (B) after adjusting the PFN inductance.

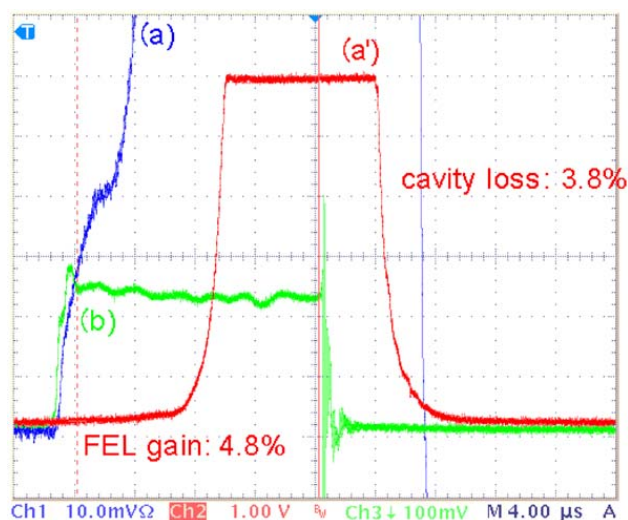


Fig. 5. FEL oscillation. (a) FEL pulse shape, (a') is (a) displayed on a different vertical scale, (b) electron beam current (50 mA/div). The IR detector is saturated.

sponds to the modulator output voltage fluctuation of approximately 0.06%.

The difference of the electron beam energy spectra between the two situations is compared in Fig. 4. Waveforms of the electron beam current and the FEL power are shown in Fig. 5. The uniformity of the central energy over the pulse duration has been considerably improved. The average energy spread (FWHM) over the pulse duration is 0.5%. The drift of central energy during the pulse duration is also much improved. As a result of this improvement, the growth of the FEL optical power is found to be initiated at the head of the beam pulse. However, energy fluctuation is still observed in the pulse duration due to residual phase fluctuation of the relative phase between the two klystrons. The fine fluctuation of the central energy possibly has a considerable effect on the intensity of the FEL or SASE [4].

4. Conclusion

The method of PFN adjustment described in this report is shown to be simple and effective to obtain uniform energy spectra over the RF pulse duration. The set of proper PFN inductances depends on the voltage applied to the klystron.

Therefore, this method will be useful to develop a database of various sets of proper inductances for different PFN output voltages in order to realize a reliable wavelength variability of FEL.

References

- [1] R. Chaput, et al., Proceedings of the Fourth European Particle Accelerator Conference (EPAC'94), London, England, 2001, p. 728.
- [2] E. Oshita, et al., Proceedings of the 16th IEEE Particle Accelerator Conference (PAC'95), Dallas, Texas, 1995, p. 1608.
- [3] P.M. Lapostolle, A.L. Septier, Linear Accelerators, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1970, p. 324.
- [4] T. Tanaka, et al., Nucl. Instr. and Meth. A, (2004) these Proceedings.
- [5] K. Yokoyama, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 41 Pt.1 (7)A (2002) 4758.
- [6] K. Yokoyama, et al., Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting, Tokai, Japan, 2003, p. 464 (in Japanese).

第1回 日本加速器学会年会・ 第29回 リニアック技術研究会

PROCEEDINGS OF THE 1st ANNUAL MEETING OF
PARTICLE ACCELERATOR SOCIETY OF JAPAN AND
THE 29th LINEAR ACCELERATOR MEETING IN JAPAN

August 4—6, 2004
Funabashi Japan

日本大学量子科学研究所
Institute of Quantum Science, Nihon University

OPERATIONAL STATUS OF 125-MeV LINAC AT NIHON UNIVERSITY

T.Tanaka^{1,A)}, I.Sato^{A)}, K.Hayakawa^{A)}, Y.Hayakawa^{A)}, K.Yokoyama^{2,A)}, K.Nogami^{A)}, A.Mori^{A)}, K.Kanno^{B)},
T.Sakai^{B)}, K.Ishiwata^{B)}, K.Nakao^{B)}, S.Fukuda^{C)}, A.Enomoto^{C)}, S.Ohsawa^{C)}, T.Suwada^{C)}, K.Furukawa^{C)},
S.Michizono^{C)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba 305-0801

Abstract

The pulse-to-pulse fluctuation of the electron beam from the 125-MeV linac has been suppressed by the stabilization of commercial AC power source and the improvement of the klystron DC power supply. Use of silver-coated copper mirrors for the optical resonator allowed us to achieve a saturation of free-electron laser (FEL) in the range of 0.885 - 6.13 μm . As an FEL user's facility, service of 1 - 6 μm FEL started at the laboratory for electron beam research and application (LEBRA) of Nihon University in 2003. The beam line for parametric X-ray (PXR) generation has been successfully operated for preliminary experiments of X-ray extraction and X-ray imaging characteristics.

日大125MeVリニアックの稼働状況

1. はじめに

1996年以来、日本大学と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) との電子線形加速器高度化に関する共同研究に基づき、日本大学に移設されたPF陽電子リニアックの高性能化と、自由電子レーザー (FEL) の実用化を目指した研究が進められてきた^[1]が、2003年10月にFELの共同利用が開始され、加速器の高度化に関する共同研究は新たな段階を迎えた。

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、2003年3月に施設検査に合格し、それまで試験運転を行っていた電子リニアックの利用が可能になって以来、FELとパラメトリックX線 (PXR) の学内共同利用開始に向けて加速器と光源の性能向上、及び運転のルーチン化が計られてきた。FEL輸送光学系の整備を経てFEL共同利用の開始に伴い、調整・試験運転を含めたリニアックの運転時間は大幅に増加している。

FELの共同利用を開始する上で重要な課題の一つであったリニアックのビーム安定化は、2003年春に行った高精度のAVRの導入及びクライストロン電源の改良等により大きく促進された^[2]。これにより商用電源に起因する変動が抑制され、FELの発振安定度が大幅に向上したことから、共同利用に向けたFEL光強度の増加と波長可変性能向上の試験運転が効率的に進められた。現在まで、リニアックの加速エネルギーを45~100MeVの間から選択することにより、1台の赤外用アンジュレーターを用いて885nm

~6.13 μm の波長範囲でFELの発振が確認されている。

さらに、2004年4月にはPXRの取り出しに成功し、これによりLEBRAではFELとPXRの二種類の光源を持つこととなった。PXRについては、暫定的に5~20keVのX線の取り出しに成功しており、システム全体の性能試験等の基礎実験を繰り返しながらX線イメージング・X線回折への共同利用に向けた準備が進められている^[3]。

以下の章では、この1年間のリニアックの稼働状況とともにFEL、PXR、共同利用状況等施設の現状について報告する。

2. リニアックの現状

2.1 運転時間の推移

図1に2003年4月以来のパルスモジュレーター通電時間、クライストロン高圧印加時間、ビーム加速時間の推移を月単位で示してある。モジュレーター通電時間は、2本使用しているクライストロンに関してほぼ同じで、クライストロンのカソードヒーター通電時間に等しい。クライストロン1号機 (#1) は三菱電機製PV3030A1、2号機 (#2) は同社製PV3030A3を改良したPV3040N^[4]である。この間の積算運転時間は1号機が約1960時間、2号機が約2270時間、ビーム加速時間は1160時間となっている。また、1997年の稼働開始以来モジュレーターの総通

¹ E-mail: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

² 現在の所属：高エネルギー加速器研究機構

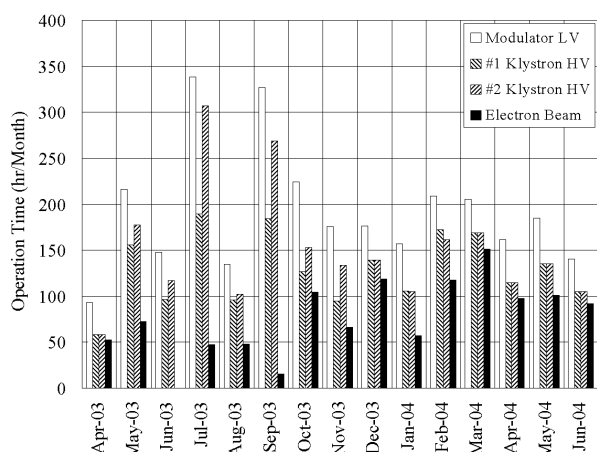


図1. 2003～2004年における日大LEBRAリニアックの月間運転時間の推移。

電時間は2004年4月～5月にかけて1万時間を超えた。通常運転ではリニアックには各クライストロンからそれぞれピーク電力20MW、パルス幅20 μ sのRFを繰り返し2Hzで供給し、リニアック出口での最高エネルギー100MeV、ピークビーム電流最大200mA以上を実現している。加速エネルギーの上限はRF電力の他、加速器の使用許可申請条件による制限に基づいている。

クライストロン1号機はRF窓下流に真空排気能力強化の改良を行った2000年以来、RFパルス幅20 μ s、ピーク出力20MWの運転に耐え使用を続けている。2号機は2003年1月に新たに使用を開始し、エージングにより出力20MWが得られた段階でビーム加速を開始したが、RF窓で放電が頻繁に発生し動作が安定しなかったため、特に7～9月に長時間にわたるエージングを繰り返した。1号機に比べ運転時間が約300時間長いのは主にこの事情によるが、この結果長パルスでの安定動作を実現することができた。

ビームの安定加速は共同利用の開始を控えて重要な課題だったが、10月からユーザーにFELの供給を開始して以来、ビーム加速時間が月平均約100時間で推移し、ほぼユーザーの要求通りの日程でFELを供給できている。これには、2号機の集中的な長時間のエージングの効果が大きく寄与している。

2.2 部品更新

2003年度以降、更新した主な加速器構成部品及びその要因として以下の事が挙げられる。

1) パルスモジュレーター出力のパルス幅は半値幅30 μ sと長いため、クライストロンアセンブリを納めたオイルタンク内の、特にヒータートランスの耐電圧が不足し、放電による劣化・破損が生じた。そこで2003年6月にコイル形状を改良したヒータートランスに更新した。また2号機ではヒータートランスの放電による絶縁油の劣化が激しく、その影響がパルストランスにも波及し放電損傷を受けていたため同時に更新した。しかし、オイルタンク内での放

電は依然として1日約1回の頻度で発生している。

2) 1号機のパルストランスに逆バイアス電流を供給していた多芯コネクタが発熱・焼損したため更新するとともに、1号機2号機ともにコネクタの接触抵抗が上昇した場合に備え、電流供給用のコネクタピン数を2回路分使用して発熱を抑制する対策を採った。

3) 2号機の集束コイル冷却配管に漏水が発生し、応急措置としてKEKから代替品を借用して使用している。この間に新しい集束コイルを製作した。

4) 電子銃にはEIMAC Y646Bカソードを用いているが、この間に2回更新している。2003年7月にはカソードグリッド間が短絡したため、短絡部をジュール損失で焼き切る処置を施したが、引き出しビーム電流が低下し更新せざるを得なくなった。更新したカソードはグリッドメッシュに欠陥があったものの代替品がなくそのまま使用していたが2004年1月にやはりカソードグリッド間が短絡した。再び短絡部を焼き切ったが、DC電流が発生したため、グリッドバイアス電圧を60Vから140Vに変更してDC電流を抑制した。しかしDC電流の抑制は不十分で、バンチャー後部の溶接ペローがこの電流により破損し加速器全体の真空が破れた。内径の大きな成形ペローに交換して破損を避けることが出来たが、引き出し電流に不安定化が生じ、4月末に新たなカソードをKEKから借用して更新した。

2.3 ビームポジションモニター増設

ビーム誘起RFをアンテナで検出するタイプのビームポジションモニターはFELビームラインに用いて有用性が確認されたため、2003年9月にリニアック各加速管の前後とFELビーム偏向系に合計7台、さらに2004年4月にPXRビームラインに3台設置した^[5]。ビーム軌道の常時モニターシステムは未完成だが、ビーム軌道調整、ビーム軌道変動の観測に役立っている。

2.4 ビーム軌道安定化

リニアック出口の直線部ビームラインに設置されたビームポジションモニターによりビーム軌道の周期的変動が観測され、これがFEL発振の主要な不安定要因の一つであった。この変動はバンチャー後部に新たに設置したモニターでも観測されたため、入射部で発生している変動であることが確認された。

ビーム軌道の変動は、徐々に水平方向に移動し、10分程度で突然元の位置に戻る、という鋸歯状の周期性を持ち、バンチャー付近のビーム波形モニター用CTの出力信号に放電と思われる雑音が頻繁に観測されていたことから、使用を停止したビームプロファイルモニターの蛍光板、CTのセラミックダクト部、プリバンチャーRF窓の帯電が原因として疑われた。

そこで、不要なプロファイルモニターを取り外し、CTのセラミックダクトをビームから隠すスリーブ

を長くし、さらにプリバンチャーのダミーロード側RF窓の直前にHベンドを取り付けビームラインから遠ざける対策を施したところ、原因の特定には至らなかったものの放電らしき雑音は観測されなくなり、ビーム軌道の鋸歯状の変動が解消しFELの安定度も改善した。

3. FELの現状

加速器本体室からユーザー実験室までのFEL輸送光学系は2003年6月に設置が完了した。これに伴う2ヶ月の中断を挟み、4月末から8月中旬までガラス基板金蒸着ミラーを用いてFEL発振実験を行っていたが、ミラーの耐性不足が明らかだったため、8月後半からは高耐電力・高反射率の銅基板銀蒸着ミラーに切り替えて、FELの飽和状態を実現し現在まで全く支障なく使用している。

現在LEBRAで実現しているFEL発振波長は、電子ビームエネルギー45~100MeV、アンジュレーター間隙24~36mmで調整を行ない、885nm~6.13 μ mの範囲に渡っている。

FELは電子ビームに対し上流側に位置するミラーに開けた直径0.3mmの結合穴を通して光共振器から取り出され、エキスパンダー光学系により平行ビームに変換された後、最長約50mの輸送光学系を通じて実験室まで導かれている。

この輸送光学系は、真空ダクト内径の最小が約50mmであり、さらに途中には ϕ 50mmのCaF₂ビームサンプラーを用いたFELパワーモニターポートがあるため、水平方向透過幅が30mmに制限されている。単純に幾何学的に考えて実験室に到達するFELビームは短径30mm×長径50mmの楕円形の断面となり、光共振器ミラーの結合穴からエキスパンダーまでの間の回折によるFELの拡がりやを考慮すると、6 μ m付近で70%以上の輸送損失が見込まれている。

このように長波長側での損失が大きい輸送系となっているのは、元々共振器ミラーの結合穴径として0.5~1mmを想定し光の広がりやを小さく見積もっていたことと、長波長側を最長でも5 μ m以下と想定しむしろ短波長FELの利用を目標としていたことによる。

モニターポートから取り出した光をパワーメータで測定した結果では、2~2.5 μ mで光強度が最大となりマクロパルス当たり最大25mJ以上の光が実験室に導かれている。FELのマクロパルス波形は、安定に発振している状態で半値幅10~12 μ sが得られている。FEL強度に対する制限は輸送光学系での損失の他、結合穴径による取り出しパワーおよび発振強度の波長依存性、さらには電子ビームのバンチ特性に基づくと考えられるが、実験結果からはこれより短波長でも長波長でも強度が落ち、マクロパルス幅も狭くなる傾向が顕著に現れている。発振強度は電子ビームと共振器ミラーの調整に強く依存し、運転条件によって数倍のパワーの差がある。

4. PXRの現状

PXR発生用のビームラインは、FELとは独立のラインとなっているため、新たにビームダンプを必要とした。使用に当たっては施設検査に合格する必要があったが、X線を隣の実験室に導くための放射線遮へい壁貫通ダクトを抜けてくる放射線量の問題から管理区域内の立ち入り可能領域を変更し、2004年3月に合格した。

この間に電子ビームの集束調整に起因すると思われる、電子ビーム照射用第1シリコン結晶に貫通穴が発生する現象が一回起き、シリコン結晶の交換を行なっている。

4月にはシリコンの2結晶光学系によって実験室に取り出されたX線がイオンチェンバーによって初めて観測され、その後X線強度の結晶方向依存性、X線エネルギー選択性及び単色性、X線イメージング特性の測定などが行なわれている。これまでの実験では取り出しX線のエネルギーはほぼ5~20keVの範囲で選択でき、水平方向にエネルギー勾配を持ち、それらの特性は理論的予測と良く一致している。

PXRはX線回折に利用するため、現在X線集束用グレーティングミラーの調整を行っている。

5. まとめ

日大の赤外FELは加速器の安定化等様々な改善を計り漸く安定に飽和状態を維持するようになり、2003年度後半から1~6 μ mのFELとその高調波アンジュレーター光を共同利用に提供できるようになった。また、2004年4月には初めて隣の実験室へのPXRの取り出しに成功した。

現在までに医学、歯学、理工学分野の実験に利用されたマシンタイムの日数は40日以上になり、それ以外のマシンタイムが主にFELとPXRの試験・調整運転に使われている^{[6][7]}。電子ビームの使用時間は共同利用開始後ほぼ100時間/月となっている。

FELに関しては今後RFパワーの増強により電子ビームエネルギーを125MeVまで上げ、バンチ特性の改善を計ることで、より短波長での発振・利用とFEL出力の増強を目指している。

参考文献

- [1] I.Sato et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 30 - Aug. 1, 2003 (2003) p1.
- [2] K.Hayakawa et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 30 - Aug. 1, 2003 (2003) p90.
- [3] Y.Hayakawa et al., "Present Status of the Parametric X-ray Generator at LEBRA", in these proceedings.
- [4] T.Sakai et al., Proc. of the 21st International Linear Accelerator Conference (LINAC2002, Gyeongju, Korea, Aug. 2002) 712-714.
- [5] K.Ishiwata et al., "Development of Beam Position Measurement System at LEBRA", in these proceedings.
- [6] K.Hayakawa et al., "Measurements of the pulse length of the FEL nonlinear harmonic radiation at LEBRA", in these proceedings.
- [7] A.Mori et al., "Measurement of FEL output fluctuation at LEBRA", in these proceedings.

DEVELOPMENT OF S-BAND TRAVELING WAVE RF WINDOW

T.Sakai^{1,A)}, I.Sato^{B)}, T.Tanaka^{B)}, K.Hayakawa^{B)}, Y.Hayakawa^{B)}, A.Mori^{B)}, K.Nogami^{B)},
K.Kanno^{A)}, K.Ishiwata^{A)}, K.Nakao^{A)}, S.Fukuda^{C)}, S.Michizono^{C)}

^{A)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University

1-8-14 Surugadai, Kanda, Chiyodaku, 101-8308

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK

1-1 Oho, Tukubashi, 305-0801

Abstract

A cold model of a traveling-wave-in-ceramic (TWC) type S-band (2856MHz) RF window was designed and fabricated. The ceramic in the RF window has the same dimensions as those used in S-band pillbox type windows. The impedance matching between the rectangular waveguide and the cylindrical waveguide was adjusted with irises located on the boundary. The dimensions of the window were determined by calculations using the simulation code HFSS.

Sバンド用進行波型高周波窓の開発

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では0.3~6.0 μm までの紫外領域から赤外領域の自由電子レーザー (FEL) 発振、パラメトリックX線放射 (PXR) を目標に開発研究を進めている。

現在は0.885~6.0 μm の範囲のFEL発振^[1,2]、2004年4月にはPXR発生に成功している^[3]。特に紫外領域でのFEL発振では利得が低くなるので、長パルスの電子ビームが要求され、LEBRAではクライストロンRFパルス幅20 μs で運転を行っている。これまで行ってきたクライストロン下流側排気能力強化や^[4]、クライストロン内側の排気強化等を行い新しく試作したPV-3040Nクライストロンでは、出力高周波窓一つのクライストロンで20 μs のパルス幅での運転に成功している^[5]。

本研究では長パルスモードでのさらなる安定動作を目指すために、高周波窓の構造に関して検討を行った。高周波窓の構造に関する研究はこれまで数多くなされており、その中でセラミック表面での電界を下げる事が出来る、進行波型高周波窓がある。この進行波型高周波窓は、BINPのSergey Kazakov氏によって考案されたもので、セラミック中で電界が進行波となり、セラミック表面での電界を下げる事が可能で、また窓に対して垂直方向の電界が存在しない、といった特徴がある^[6]。

製作する高周波窓は、Sバンドクライストロンに実用できるサイズが望ましく、矩形導波管から円形導波管に変換する部分にアイリスを入れるタイプで設計を行うこととした。この窓はアイリスとセラミックの片面で整合を取ることで定在波が生じるのはセラミックとアイリスの間だけとなり、セラミッ

ク内は進行波となる。設計は以下の手順で行った。初めにアドミッタンスチャートを用いるKEKの竹内保直氏の方法から半解析的に進行波となる寸法を決め^[7]、次にHFSSを用いて全体計算、共振モードの計算を行い、各寸法の調整を行った。HFSSによる計算結果から低電力モデルを製作し、周波数特性測定を行った。

2. セラミック部分の選択と共振モード

通常、進行波型高周波窓に用いるセラミック材の厚さは、帯域が最も広く取れるように、セラミックの管内波長の1/4付近が選ばれる (Sバンドでは7~8mm程度)。しかし、新たな厚さや純度を変えたセラミック材を用いる場合、セラミック材の接合の問題や、セラミックでの共振モードに関する考慮等を行う必要が出てくる。そこで、セラミック部分には、すでにKEKBのSバンドピルボックス高周波窓で用いられ、実績のある日本特殊陶業製の窓部分 (HA-997 (純度99.7%)、径84.7mm、厚さ3.2mm) をそのまま用いた進行波型高周波窓の検討を行う事とした。また現在使用中の窓部分をそのまま使用できるため、導波管部分の交換のみで置き換えることができるというメリットもある。

設計の前に、使用するセラミックの共振モードの確認を行った。計算ではセラミック表面でのフィールドマッチングを用いる解析的な計算法から^[8]、セラミックに無限長の円形導波管が接続されているとして、セラミックの局在モードを計算している。結果を図1に示す。これより、運転周波数の2856 MHz \pm 100MHzに共振は無いことを確認した。

¹ E-mail: sakai@lebra.nihon-u.ac.jp

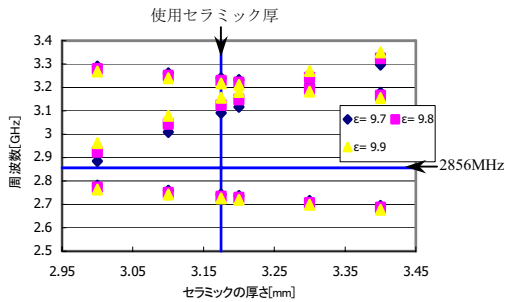


図1：セラミック局在モードの周波数とセラミック厚の関係。セラミック径84.7mm、誘電率9.7～9.9での計算した結果。2856MHz±100MHzに共振は無い。

3. 竹内法を用いた基本寸法の決定

図2にピルボックス型高周波窓の等価回路を示す。ここで、 B は矩形導波管から円形導波管へのステップで生じるサセプタンス、 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 はそれぞれ、矩形導波管、円形導波管、円形導波管内部に誘電率 ϵ のセラミックを入れた場合の特性アドミタンスである。また T はセラミックの厚さ、 L はセラミック表面から矩形導波管までの長さである。伝送モードは、矩形部分は TE_{10}^{\square} モード、円形部分は TE_{11}° モードを仮定する。使用する矩形導波管寸法、円形導波管の径、及びセラミックの誘電率が決まっているため、アイリスの長さ等を変化させ整合が取れるように決めると、 B/Y_1 、 Y_1/Y_2 、 Y_2/Y_3 が決まる。 $Y_2/Y_3=0.225$ はインピーダンスの比から求め、 $B/Y_1=1.07$ 、 $Y_1/Y_2=1.93$ の値はHFSSを用いて求めた。

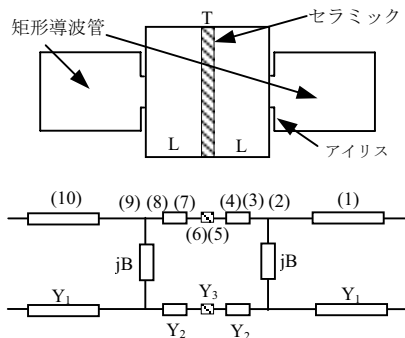


図2：ピルボックス型高周波窓の等価回路

図3にアドミタンスチャート上での整合解を示す。各番号は等価回路上のそれぞれの番号位置から負荷側を見た時のアドミタンスに対応している。これより、基本寸法は $L=70\text{mm}$ 、irisの長さ $=14.5\text{mm}$ 付近、厚さ 3mm とした。この基本寸法を基にHFSSを用いて全体計算を行い、各寸法の調整を行う。

4. HFSSによる計算

アドミタンスチャートから求めた寸法を基にHFSSを用い各寸法の調整を行った。図4に計算に用いた窓の1/4の模式図を示す。矩形導波管から円形導波管変換部にアイリスを入れた構造をし、また矩形から円形のステップ部には R をつけ計算を行った。

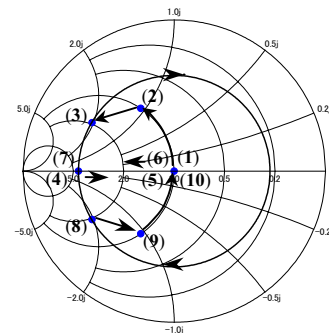


図3：アドミタンスチャート上での整合解。等価回路上のそれぞれの番号位置から負荷側を見た時のアドミタンスに対応。

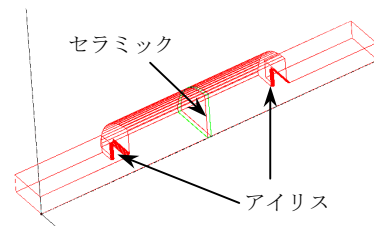


図4：進行波型高周波窓の模式図(1/4カット図)

計算では透過電力50MW時での従来窓のセラミック中心電界 3.7MV/m 、端部 1.7MV/m 、最大電界 6.0MV/m (HFSSでの計算値)を下回り、パスバンド(VSWRが1.2以下の帯域)は過去に製作されている他の進行波窓での100MHz付近を目標とした^[6,9]。計算より、 $L=71.7\text{mm}$ 、 $\text{iris}=13.2\text{mm}$ のときに、運転周波数でのVSWR1.02、パスバンド68MHz、セラミック中心電界 2.5MV/m という結果が得られたが、2827MHzに図5に示すような体積共振が現れる事がわかった。そこで、電界は 2.6MV/m とわずかに上がるが、少しずらした、 $L=72.5\text{mm}$ 、 $\text{iris}=13.1\text{mm}$ を基本寸法とした。これよりVSWR1.06、パスバンド68MHzとなり、共振周波数は2813MHzとなる。

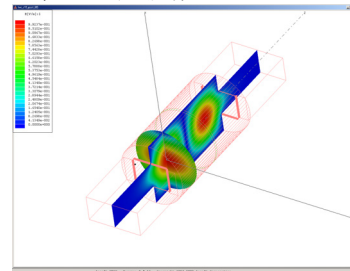


図5：体積共振計算例。 $L=72.1$ 、 $\text{iris}=13.2$ のときの周波数2827MHzでの体積共振の様子。

またパスバンドは70MHz程度と狭いが、LEBRAではSLED等を用いる予定は無く、またクライストロン、加速管等と比較して広いために、問題は無いと判断した。また基本寸法の L 、アイリスの値を±0.2mmずらした場合のVSWR特性の様子を図6に示す。この結果より、 $L=72.3\text{mm}$ 、 $\text{iris}=12.9\text{mm}$ では運転周波数でのVSWRは下がる傾向にあり、パスバンドは200MHz付近まで広がる事が分かった。しかし少しの寸法のずれにより、折り返している部分の

VSWRが1.2以上になり、その場合、パスバンドが半分以下に急に下がってしまうため、それを避けるために全体の精度を $\pm 0.1\text{mm}$ 程度とし、その領域を避けるようにした。

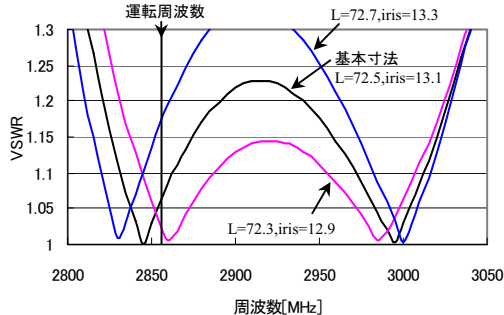


図6：基本寸法からL、irisを $\pm 0.2\text{mm}$ ずらした場合のVSWR特性の比較。

5. 低電力試験

HFSSの計算結果を基に図7に示す低電力モデルを製作した。導波管部分は真鍮で製作し、円筒部分は長さ調整用に2つに分離し、パーツの組合せにより基準値 $\pm 1\text{mm}$ の範囲を 0.1mm 間隔で調整できるようにしている。アイリス部も基準値 $\pm 0.2\text{mm}$ ずらしたものを3パターン用意した。

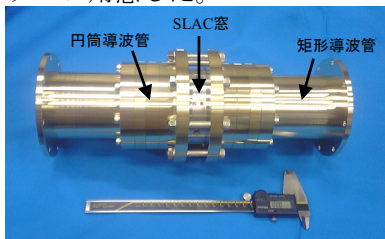


図7：低電力モデル概観写真。導波管部は真鍮、窓部分は実際に使われていたSLAC窓を使用。

VSWR特性測定の結果を図8に、共振周波数の測定結果とHFSSでの計算結果を図9に示す。Lが計算値から少しずれ、 $L=72.1\text{mm}$ 、 $\text{iris}=13.1\text{mm}$ で計算とほぼ一致し、VSWR1.06、パスバンドは少し狭くなり61MHzが得られた。共振周波数はそれぞれほぼ計算通りの周波数にあることが確認できたが、 $L=72.1\text{mm}$ と基本寸法から少しずれたため、体積共振が2819MHzとなり、運転周波数に近づいている。また計算では2737MHz付近での共振周波数を求めていたが、今回の測定では、見つからなかった。

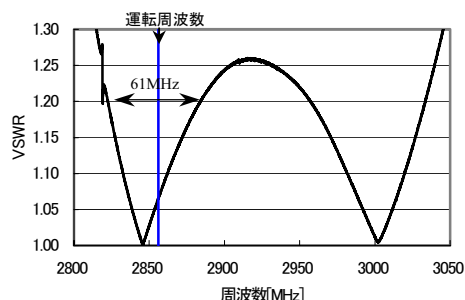


図8：VSWR特性測定結果。L=72.1mm、iris=13.1mm、パスバンド61MHz、 $\text{VSWR}@2856=1.06$ 。

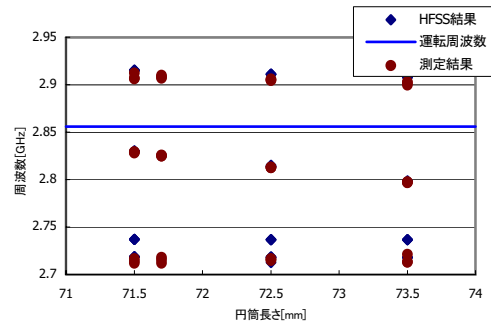


図9：共振周波数の測定値と計算結果。計算値とほぼ一致。2737MHzは測定では見つからなかった。

6. まとめと今後の課題

Sバンドpillボックス型高周波窓部分(HA-997(純度99.7%)、直径：84.7mm、厚さ：3.2mm)を用い、Sバンド用進行波型高周波窓の設計、及び低電力テストによる周波数特性の測定を行った。試験の結果、パスバンドは60MHz程度と狭いが、VSWR等は計算値にほぼ近い値であり、セラミック表面に水平方向の電界は従来のpillボックス型に比べ、30~35%程度低い $2.6\text{MV/m}@50\text{MW}$ となることが予想された。

今後はビーズ法により、窓表面での電界を測定し、今回の測定結果と計算値との比較を踏まえ大電力モデルの製作、及び、試験を行っていく予定である。またこの窓のクライストロンへの実装も検討を行う予定である。

参考文献

- [1] T.Tanaka, et al., "Operational Status of 125-MeV Linac at Nihon University", in these proceedings.
- [2] Y.Hayakawa, et al., "Analysis of the Gain Saturation in LEBRA FEL Using GENESIS", in these proceedings.
- [3] Y.Hayakawa, et al., "Present Status of the Parametric X-ray Generator at LEBRA", in these proceedings.
- [4] T.Sakai et al., " S-Band Klystron for Long Pulse Operation" Proc. The XXI International Linac Conference (LINAC2002), Gyeongju, KOREA (2002) p712-714.
- [5] T.Sakai, et al., "FEL用Sバンド大電力クライストロンの長パルステスト運転", Proc. 28th Linear Accel. Meeting in Japan, Aug. 2003, Tokai, Japan, pp.351-353.
- [6] Sergey Kazakov, "Development of New Type of High Power RF Windows", Doctoral dissertation(2003).
- [7] Yasunao Takeuchi, "高周波窓のインピーダンス整合解 (Pillbox型、及び同軸平板型について)", KEK Preprint 2002-124, December 2002, A, 4th Superconducting Linear Accelerator Meeting in Japan, KEK, Tsukuba, Ibaraki, JAPAN, Mar. 12-13, 2002.
- [8] M.P.Forrer and E.T.Jaynes, "Resonant Modes in Waveguide Windows", IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Volume MTT-8 March, 1960 Number 2, pp.147-150.
- [9] S.Michizono, et al., "High-power Test of Pill-Box and TW-in-Ceramic Type S-Band RF windows", 17th International Linac Conference (LINAC94), Tsukuba, Japan, August 21-26, 1994.(KEK Preprint 94-157 December 1994 A).

Test of multibunch beam extraction from LaB₆ photocathode

K.Kanno^{1,A)}, I.Sato^{B)}, K.Hayakawa^{B)}, T.Tanaka^{B)}, Y.Hayakawa^{B)}, A.Mori^{B)}, K.Nogami^{B)}
T.Sakai^{A)}, K.Ishiwata^{A)}, K.Nakao^{A)}

^{A)} Graduate School of Nihon University,
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

Abstract

A photocathode RF gun for Free Electron Laser (FEL) system covering wavelength from 0.3 μ m to 0.8 μ m is being developed at LEBRA of Nihon University. FEL lasing in the short-wavelength region requires an electron beam with a long pulse duration due to a small amplification gain. Therefore, the photocathode RF gun needs to generate multibunch electron beam with a long macropulse duration and high micropulse repetition rate. Then LaB₆ which has long lifetime and small work function was experimented for generation long macropulse multibunch electron beam.

LaB₆によるマルチバンチ光電子発生試験

1. はじめに

自由電子レーザー、リニアコライダーや逆コンプトン散乱X線源のような非常に質の良い電子ビームが必要な装置の開発が活発である。そのような加速器の高度利用のための高輝度電子源として、RF電子銃の研究開発も活発に行われている。RF電子銃はDC電子銃に比べ高電界加速が可能のため、電子のエネルギーが相対論領域になるまでの時間が短い。従って、空間電荷による影響が少なくでき、低エミッタンス電子ビームを得ることが可能である。日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、すでに赤外自由電子レーザーの発振に成功し^[1]、現在では0.885~6.13 μ mにわたる発振波長領域を連続的に得ることに成功している。さらにLEBRAでは、0.3~0.8 μ mの紫外-可視領域自由電子レーザーの利用も目指しているが、この場合、現在よりさらに良質の電子ビームが必要になると考えられる。そこで、高周波電子銃の開発が検討されている。本施設で計画しているような、紫外-可視光領域の自由電子レーザーは利得が低いため、レーザーが飽和にいたるまでの時間が長く、長マクロパルス電子ビームが必要である。そのため本施設のリニアックは20 μ sと比較的長い値になっている。しかし、このパルス幅を熱陰極RF電子銃で実現しようとする、高周波電場の逆加速位相によるバックボンバードメントがおり、電子放出を不安定になり、マクロパルス幅を長くすることができないと考えられる。そこで、高出力短パルスレーザーによって陰極を照射して得られる光電子を利用する光陰極RF電子銃の開発を進めている。また、自由電子レーザーを用いた実験は長時間にわたるため、陰極寿命は十分に長くなければならない。

RF電子銃に使用できる光陰極材質は、銅などの寿命が長い純金属陰極やCs₂Teなどの量子効率が大きいアルカリ系金属陰極などが使用されている。この二種類の陰極は様々な施設で開発、研究が実施されており成果を上げているが、純金属陰極では仕事関数が高いのでレーザーシステムに負担がかかり、アルカリ系金属では寿命が短すぎ、本施設で使用することは難しい。そこで、本施設ではLaB₆の仕事関数の低く、活性化が容易であるなどの優れた特長に着目し高輝度マルチバンチ電子ビーム発生用の陰極として検討している。

2. 要求性能

自由電子レーザーの利得はピーク電流に比例し、波長の二乗に比例する。従って紫外や可視光などの短波長の自由電子レーザーでは、赤外領域に比べ非常に利得が小さくなり、50A以上の大きなピーク電流が必要と考えられる。また、利得が小さくなると自由電子レーザーが飽和に達するまでの時間が長くなり、マクロパルス幅が長い電子ビームが必要となる。このように短波長FELは大電流・長マクロパルス電子ビームが必要である。LEBRAの短波長FEL計画は0.3~0.8 μ mの紫外-可視光領域でリニアックは20 μ sと長いマクロパルス幅で運転をしている。従って、LEBRAの紫外-可視光領域FELにはマクロパルス幅20 μ sの大電流、低エミッタンス電子ビームが必要で、つまり20 μ sのマルチバンチ電子ビームが必要となる。

¹ E-mail: tekkamen@lebra.nihon-u.ac.jp

3. LaB₆陰極の特徴

LaB₆は電子ビーム描画装置や電子顕微鏡用電子銃の熱陰極として用いられているが、DUKE大学の蓄積リング用の電子銃では光陰極として使用されている^[2]。酸化物について低い仕事関数を持ち、Nd:YAGレーザーの第三高調波（波長355nm）の一光子吸収による光電子励起が可能である。純金属の仕事関数は4~6eV程度で、Cs₂Teは3.6eVである。従って、Nd:YAGレーザーの場合、第四高調波（266nm）を照射する必要がある。この波長を得る際にさらにレーザーパワーが小さくなるので効率が悪い。また、活性化操作が酸化物や単原子層陰極陰極に比べて容易でありイオン衝撃や残留気体の影響も受けにくく、酸化物のように一旦活性化したあとで大気にさらしてしまうと、その後は使用できなくなるということはない。B₂O₃やLaBO₄など、表面の酸化物の蒸気圧がLaB₆に比べ高いので、1200°Cに加熱することで容易に除去が可能。従って常に高温にすると洗浄表面に近い状態が保てる。光陰極では熱電子放出を抑える必要があるためあまり高温にはできないが、使用する前に加熱による脱ガスをすることで洗浄表面が得られる。高量子効率のアルカリ系金属や酸化物陰極の耐久性はあまり高くないが、LaB₆は2710°Cと高融点物質であり、レーザー照射に対する耐久性が高い。これらの特徴は長マクロパルスマルチバンチ光電子ビーム生成用陰極として期待できる。

4. 光電子励起用レーザーシステム

LaB₆光陰極用ドライブレーザーとして光電子励起用ドライブレーザーはNd:YAGレーザーの第三高調波が使用可能である。Nd:YAGレーザーはレーザー加工などでよく使用される赤外高出力固体レーザーで、熱伝導や熱への耐性が強く、強い光を励起することができる。また、十数ps程度の短パルス発振が可能でバックボンバードメントがおきない程度のバンチした電子ビームの励起が可能である。このシステムはLIGHTWAVE社のCW-Modelocked Nd:YAGレーザー発振器で得られた、波長1064nm、マイクロパルス幅50ps、繰り返し89.25MHzのレーザー光を、POSITIVELIGHT社のNd:YAG増幅システムを用いて増幅している。本施設のリニアックはマクロパルス幅20μs、繰り返し12.5Hzであるため、この増幅システムのポッケルセルによりパルス切り出しをしている。また、波長355nmの光を得るため波長変換素子LBOとBBOを使用している。このレーザーシステムより平均1W程度の出力が得られる。

5. 実験概要

5.1 実験内容と構成

マルチバンチ光電子ビーム測定を二極管構造にして行った。図1に実験装置の構成図を示す。Nd:YAGレーザーシステムから得られる355nmの光を真空度10⁻⁸Torr台に保たれた真空チェンバー内の陰極に照射する。図2にLaB₆陰極を示す。本実験で使用する単結晶LaB₆陰極はAPTECH社のCAMBRIDGEマウントの直熱型熱陰極で、直径2mmのボタン型である。結晶面は仕事関数が2.6eVと小さい[100]面である。レーザーを陰極面に垂直に照射するために陽極には図3に示すような切かきがある。これにより、陰極面に対して全角度で照射することが可能である。量子効率の角度依存を測定できるようにするためである。陰極-陽極間のギャップ長は3mmである。チェンバーをアースとし、アースに対して陽極に最大3kVの静電位をかけることができる。また、陰極はアースに対して電氣的に浮いている。これは光電子電流を陰極とアースの間に設置したシャント抵抗に流れる電流として測定するためである。この電流は1GHz、最大5Gs/sのTektronixTDS5104を用いて観察する。また、比較のためのレーザー光はNd:YAGレーザーシステムの下流のミラーでできる裏面反射がある。この光は使用する光の軌道から完全に外れている。そこで、この光をフォトダイオードで検出し、オシロスコープで観察する。陰極へヒーター電力を投入するための電源と陰極アセンブリの間には、ヒーター電源に光電流が流入しないように、チョークトランスとコンデンサーを取付けた。

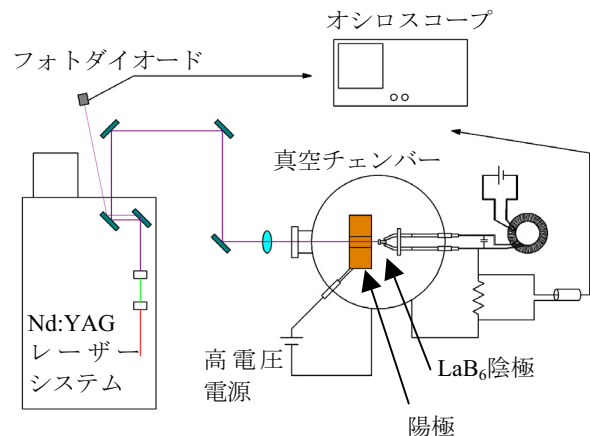


図1. 実験装置構成図。励起レーザーは陽極の切りかきを通り、LaB₆陰極表面に垂直に入射する。チェンバー内の真空度は10⁻⁸Torrに保たれている。

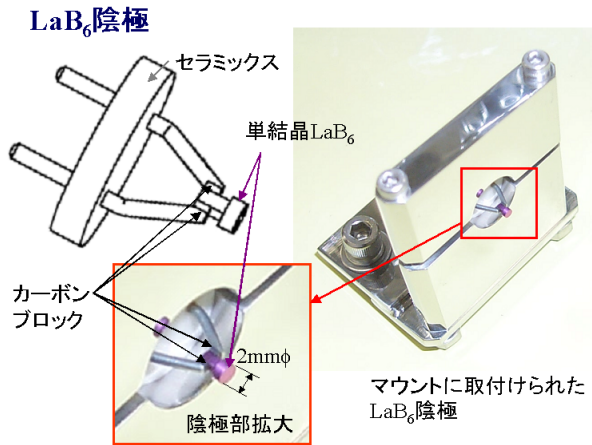


図2. 単結晶LaB6光陰極。直熱型LaB6陰極を光陰極として使用した。そのためヒーター電力を供給するフィードスルーのあるアッセンブリとなっている。

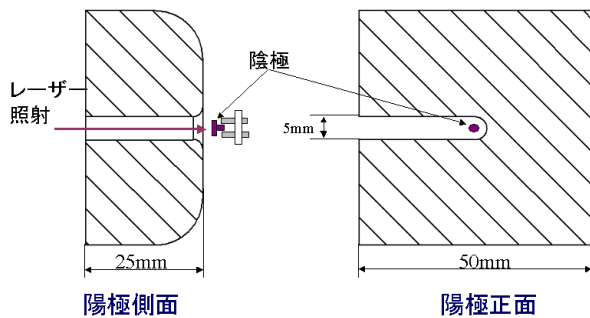


図3. 陽極形状と陽極の陰極に対する配置。陰極に対して正面入射のみならず、光電子励起レーザーの照射角度を変えることが可能な形状になっている。

5. マルチバンチ光電子ビーム発生試験

図1の装置構成で得られた光電子電流波形を図4に示す。現在のところ光軸が完全にあっておらず、レーザーの位置不安定性が顕著に表れる状態にある。そのため観測される光電子電流波形も不安定である。光電子電流波形のマクロパルス先頭部で光電子が観

測されていない原因はレーザーの不安定性のためであると考えられる。マイクロパルス構造はレーザーと同じ周期で現われている。パルス幅が広がり、アンダーシュートが観測されているが、50psと非常に高速の現象であるため、リード線のインダクタンスなどの影響が出ていると考えられる。

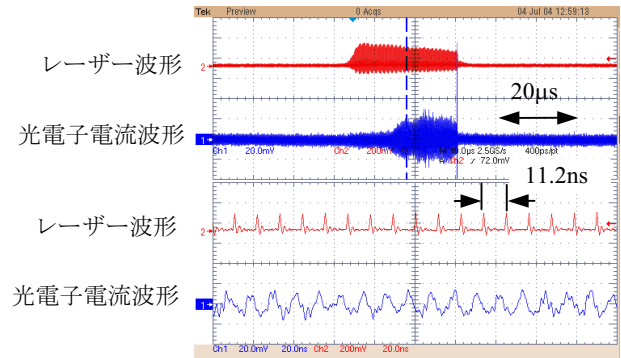


図4. 光電子電流測定結果。上段がマクロパルス波形、下段が上段点線部の拡大図を示す。

6. まとめと今後の課題

Nd:YAGレーザーの第三高調波を単結晶LaB6陰極に、陰極表面に対して垂直に入射し、長パルスマルチバンチ発生試験を行った。今後、光電子放出の角度依存性を調査する。また、同じホウ化物であるCeB6陰極についても同様の実験を実施しLaB6と比較検討をする。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et al., "First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5 μm ", Proceedings of the 23rd International Free Electron Laser Conference and 8th FEL User's Workshop (Darmstadt, Germany 2001.8), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A483(2002) 29-33.
- [2] P.G.O'Shea, et al., "Single bunch injection system for an electron storage ring an RF photoinjector", Appl. Phys. Lett. 73, 411(1998)

Measurement of FEL output fluctuation at LEBRA

A.Mori^{1,A)}, K.Hayakawa^{A)}, I.Sato^{A)}, T.Tanaka^{A)}, Y.Hayakawa^{A)}, K.Yokoyama^{A)}, K.Nogami^{A)}, T.Sakai^{B)},
K.Kanno^{B)}, K.Ishiwata^{B)}, K.Nakao^{B)}, A.Kidokoro^{B)}, M.Inagaki^{B)}, H.Takasaki^{B)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Nihon University
Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi-Shi, Chiba 274-8501 Japan.

^{B)} Collage of Science and Technology, Nihon University
1-8-14 Kanda-Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo, Japan. 101-8308

Abstract

It is one of the most important themes to supply the stable light when FEL is operated. However, the output of the FEL fluctuates in Laboratory for Electron Beam Research and Application. Therefore, we researched the source of fluctuations and stabilized the output. As the result of this research, we found that a dominant factor of the output fluctuation is the voltage fluctuation at the gun power supply. When the voltage fluctuation at the gun was decreased from 1.0% to 0.1%, the emission fluctuation was decreased from 1.5% to 0.2%.

電子線利用施設におけるFEL出力変動の測定

1. 緒言

自由電子レーザー(FEL)を運用するに当たって安定した光を実験者に常時供給することは最も重要なテーマの一つである。日本大学電子線利用施設(LEBRA)でも2001年5月に発振に成功して以来レーザー出力の増強とともに出力の安定化に努めてきた。しかし現段階に於いてもレーザーの出力が変動しておりオペレーターが制御しているものの変動幅が大きく装置そのものの安定化が未だに課題になっている。この原因は色々複雑に混在していると考えられる。そこで電子銃やクライストロンの出力などの変動を測定し、その相関より主たる変動の原因を調査し安定化を行うことを進めている。本稿ではレーザー出力及び電子線のエネルギーの変動からその主要因が電子銃からのエミッションに有ることを突き止めその変動の解消を行った結果について報告する。

2. 装置の構成

本施設のFELの概略図を図.1に示す。電子銃、125MeV S-band電子リニアック、運動量アナライザ、平面アンジュレータ、光共振器で構成されている。電子銃の概略は図.2に示す様にカソードから熱放出された電子はコック・クラフト電源により100kVに加速され取り出される。熱電子の取り出しのタイミングはグリッドに

印加するパルスにより制御している。

取り出された電子は2台のクライストロンにより駆動されるプレバンチャー、バンチャーと3台の加速管により100MeVに加速される。これを45° 偏向電磁石2台とスリットによる運動量アナライザ、そして50周期のアンジュレータを通りビームダンプに捨てられる。アンジュレータで放出された光は6718mmの光共振器で増幅され外部に取り出される。

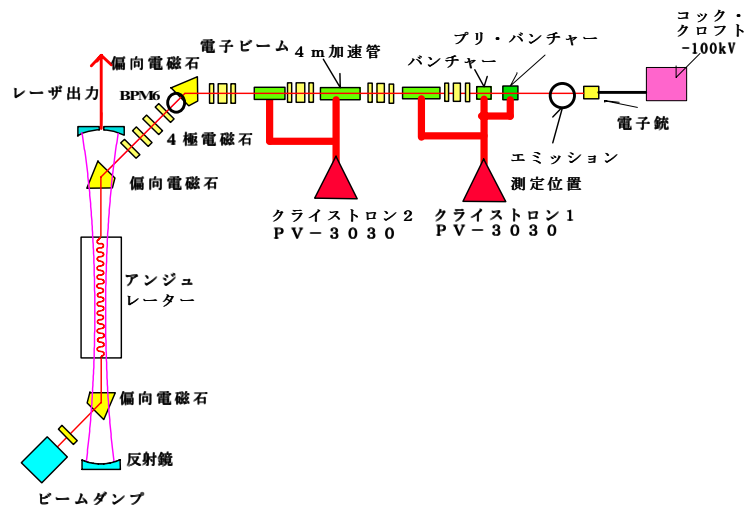


図.1 FELラインの構成

¹ E-Mail: amori@lebra.nihon-u.ac.jp

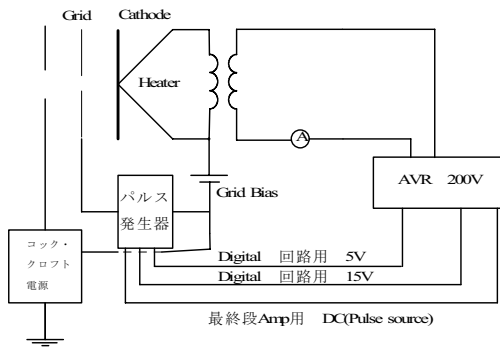
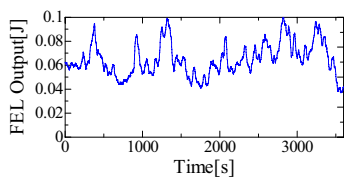
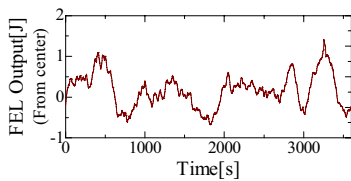


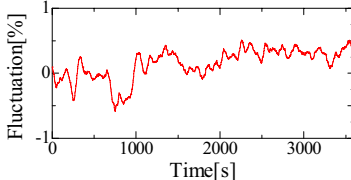
図.2 電子銃の概略



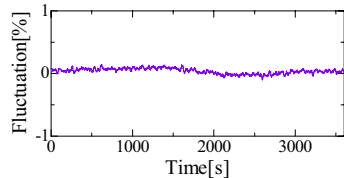
(a) FEL output



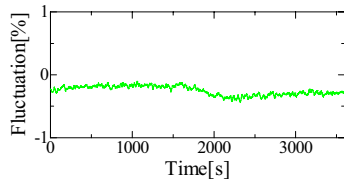
(b) Beam position at BPM6



(c) Emission

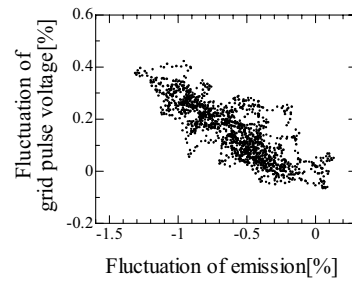


(d) Klystron#1 Output

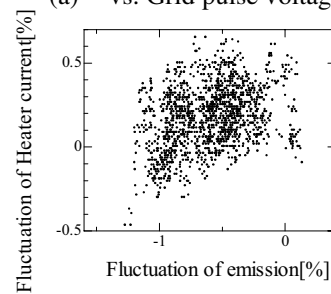


(e) Klystron#2 Output

図.3 FEL出力及び周辺の変動



(a) vs. Grid pulse voltage



(b) vs. Heater current

図.4 エミッション変動の要因

3. レーザ出力変動の要因の調査

3.1 レーザ出力と加速器周辺の変動

図.3 (a)にFELの出力変動の一例を示す。100MeVの電子ビームをギャップ間隔26mmのアンジュレータで $1.5\mu\text{m}$ の波長のFELを発振させた場合である。測定は熱電対式のパワーメータの出力をオシロスコープ(Tektronix製、TDS3014)に取り込み2秒おきにサンプリングを行った。出力の変動とともに見ているのは運動量アナライザ内の1台目の偏向電磁石直後(図1のBPM6地点)のビーム軌道の変動、エミッションの変動、及び2台のクライストロンの出力変動である。ビーム軌道の変動はエネルギーの影響を受ける水平方向の変動をビームポジションモニタにより測定した。エミッションの変動はCTで、クライストロンの出力は検波器で測定している。

FELの出力は時間とともに大きく変動し、最大出力に対して50%の変動が生じている。またFELの出力とビーム軌道の変動は相関係数が0.49と大きな相関を示した。最大1.7mmに及ぶビーム軌道の変動がFELに大きな影響を与えていると考えられる。

ビーム軌道の変動の原因をさらに上流に追求し、2台のクライストロンの出力変動に注目するとその相関係数は0.1以下で相関はほとんど無かった。それに対し、電子銃からのエミッションの変動に対しては0.4以上の相関を示し、エミッションの変化が大きな影響を与えていると考えられる。

3.2 電子銃の電源変動とエミッションの変動

エミッションの変動の原因を調べるために電子銃の回路の電圧変動を測定した結果を図.4に示す。測定はグリッドパルス電圧と陰極加熱用のヒーター電流を調べたがエミッションの変動はグリッドパルス電圧の変動に大きく依存していることが判明した。なおグリッドパルスの電圧変動はエミッションが始める電圧からさらに加わった電圧に対する比で求めている。グリッドパルス電圧は最大0.5%変動し、それによりエミッションは最大1.5%の変動になる影響を受けていることが判明した。

表1はグリッドパルス電圧の変動の要因をつかむためグリッド回路の各電圧を測定して相関係数を求めた結果である。グリッドのバイアス、デジタル回路の電源電圧、パルス発生回路の最終段の電源電圧を調べた。パルス発生回路の最終段の電源電圧の変動が非常に大きな相関を持っていた。この2つの相関図を図.5に示す。このときは全体的に変動が激しかったがパルス発生回路の最終段の電源電圧は最大1.5%変動しそれによりグリッドパルス電圧は最大0.25%変動していることが判明した。

4. 電子銃の電源の改良によるエミッションの安定化

パルス発生回路の最終段の増幅器の電源は変動幅が1.0%以下のAVRを用いて安定化させていたが安定度に限界があるためパルス発生回路の電源に変動幅0.1%の直流安定化電源を投入してさらなる安定化を図ることとした。電源を安定化させた後のパルス発生回路の最終段の電源電圧、グリッドパルス電圧、エミッションの変動の相関を測定した結果を図.6に示す。

パルス発生回路の最終段の電源電圧の変動幅が0.1%以内に収まり、それによってグリッドパルス電圧は0.08%、エミッションは0.2%の変動幅に変化した。改良前が0.25%、1.5%であったのでグリッドパルス電圧は1/3にエミッションは1/7以下に変動を抑えられることが判明した。

5. 結言及び今後の課題

以上の結果より日本大学電子線利用施設のFELにおいて現在までの出力変動の大きな要因はグリッドパルス電圧の変動であることが判明した。グリッドパルス電圧の変動がエミッションを変動させ、ビームのエネルギーを変化させレーザー出力の変動につながっている。

そこでグリッドパルス電圧の電源を従来の変動幅1.0%のものから0.1%のより安定な電源にすることでエミッションの変動を1.5%から0.2%まで抑えることができた。

今後はエミッションの変動を抑えたことがレーザー出力をどの程度安定化できるか調べていく必要がある。またビームのエネルギーやレーザー出力がエミッションとの相関が0.5程度であったことから他にも

表.1 グリッド回路の変動

	Digital 15V	pulse source Voltage	Grid bias voltage
Grid pulse	-0.007	-0.969	-0.398

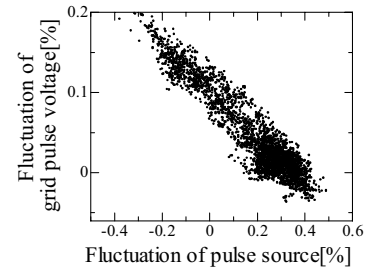
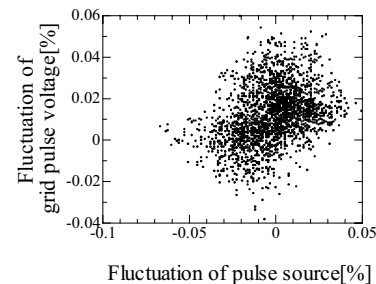
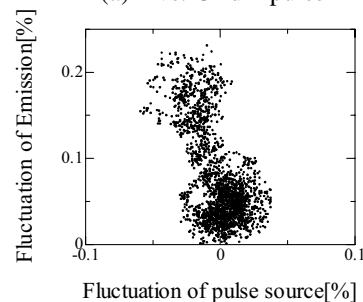


図.5グリッドパルスとパルス電源電圧相関



(a) vs. Grid pulse



(b) vs. Emission

図.6パルス電源電圧の変動を小さくした効果

大きな原因が潜んでいると考えられる。今後はエミッションの変動を抑えることで浮き上がってくるこれらの原因について追及していきたい。

6. 参考文献

[1], K.Yokoyama et al., "Stability of the LEBRA infrared FEL", Nuclear instruments & methods in physics research A, 507, pp.357-361 (2003)

[2] K.Yokoyama et al. Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, pp287-289, 2002

Influence of Harmonics on the Output Signal of Beam Position Monitor Installed near the Slit

K.Ishiwata^{1,A)}, I.Sato^{B)}, K.Hayakawa^{B)}, T.Tanaka^{B)}, Y.Hayakawa^{B)}, K.Yokoyama^{B)}, A.Mori^{B)}, K.Nogami^{B)},
K.Kanno^{A)}, T.Sakai^{A)}, K.Nakao^{A)}, T.Suwada^{C)}

^{A)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801

Abstract

Three Beam Position Monitors (BPMs) have been already inserted into the end of the linac and the entrance and the exit of the undulator beam line. The phenomena that interact of the signal from the BPMs installed near the slit is depended on the slit width are observed. Higher harmonics excited at the slit can propagate to the BPM through the beam duct and influence the signal. The change of this output signal was removed with the low-pass filters. Therefore, there was not influence to reading of the beam position.

ビーム位置モニターの出カ信号への高調波の影響

1. はじめに

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設 (LEBRA) では、2001年5月に1.5 μm 赤外線自由電子レーザー (FEL) の発振に成功し^[1]、2003年度後半から自由電子レーザー (FEL) の本格的な共同利用実験が開始している^[2]。FELを効率よく発生させるには高品質の電子ビームから放出された光を、後続の電子ビーム軌道と高精度で重ねあわせることが絶対条件になる。そのため、ビーム軌道を知ることができるビーム位置モニター (BPM) が重要な役割をはたす。また、2004年4月にパラメトリックX線放射 (PXR) によるX線の観測に成功している^[3]。PXRにおいては電子ビームの入射角度が非常に重要になってくるので、こちらもBPMが重要な役割をはたす。

最初に設置したBPM3台がビーム軌道の制御に有効であることが確認されたので^[4,5]、同等のBPMを2003年9月に加速器直線部に4台とFELビームラインの90° 偏向系に2台の計6台増設した。さらに、2004年4月には加速器直線部、PXRビームラインの90° 偏向系、PXR発生装置の入口と出口にそれぞれ1台の計4台増設した^[6]。

2004年3月にFELビームラインの90° 偏向系にあるスリット上流部に設置したBPM6において、スリット幅を変化させるとBPMのからの信号が変化する現象がデジタルオシロスコープで観測された。この状態ではビーム位置の読み取りに影響があるので、スリット幅を変化させた際のBPM6・BPM7の出カ信号およびビーム位置の測定を行った (BPMの設置

場所は図1に示す)。

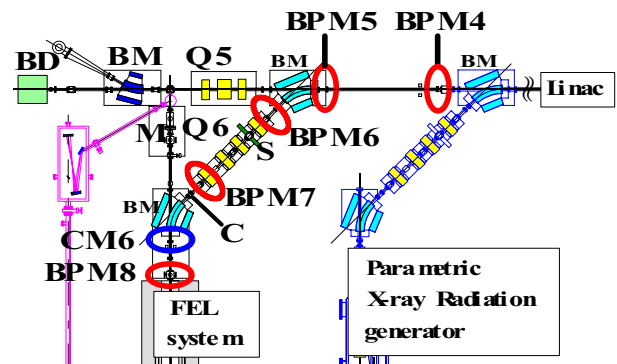


図1. FELビームラインの90° 偏向系。

(BM : Bending Magnet, Q : Quadrupole Focus, S : Slit, C : Collimator, CM : Current Monitor, M : Mirror, BD : Beam Dump)

2. スリット近傍に設置したBPMの出カ信号の測定

FELビームラインの90° 偏向系は図1に示したとおり、45° 偏向電磁石・BPM6・Q・スリット・Q・Q・Q・BPM7・コリメータ・45° 偏向電磁石で形成されている。測定はビームエネルギー90MeV、パルス幅20 μs 、繰り返し2Hz、加速管出口のビーム電流140mAで、スリット幅を1mm間隔で開けながら (ただし初期値は0.5mmである) BPM6,7の電極出カ信号

¹ E-mail: ishiwata@lebra.nihon-u.ac.jp

をクリスタル検波器 (Agilent Technologies 製, 423B, 0.01~12.4GHz) で検波しデジタルオシロスコープで検波電圧を測定した。ただしBPM6,7の電極は45°傾けて設置してあり、電極1,2,3,4の設置角度は順に $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ である。

この測定結果を図2に示す。検波電圧はパルス幅18 μ sの前後2 μ sを除いた14 μ sの平均をとったものをプロットしてある。BPM6はスリットの上流側に338mmの位置に設置してあるためスリットによる影響は考えていなかった。しかし、図2(a)に示すようにスリット幅により検波電圧が顕著に変化しており、スリット幅が4mmの時はあたかもビーム電流が2倍以上に増えたかのような振る舞いを示した。これをビーム位置に換算した結果を図3に示したが(ローパスフィルターなし)、BPM6, 7ともにビーム位置がランダムに飛んでおり、電子ビーム以外の信号を検波していると考えられる。BPM6はスリットによる影響であり、BPM7はスリットもしくはコリメータによる影響であることが明らかである。

BPMは電子ビームが誘起する加速周波数2856MHzのRFを電極で検波するストリップライン型である。円形導波管の基本モードはTE₁₁で遮断周波数は次式で求めることができ^[7]、

$$f_c = \frac{c}{2\pi a / 1.841}$$

(ただし、c:光速、2a:ダクト内径である。)ビームダクトの内径は38.7mmなので、遮断周波数は4540MHzとなり電子ビームの加速周波数2856MHzは遮断されビームダクト内の伝播はしなくなることで、バンチされた電子ビームがスリットを通過するときに励振されるマイクロ波(基本波、及び高調波)がスリットチャンバーに同調したとき大きな信号となり、このマイクロ波がビームダクト内を伝播して、BPMの信号に影響を与えると考えられる。

3. ローパスフィルターを設置後の再測定

高調波が原因と考え、電極出力信号をクリスタル検波器で検波する直前にローパスフィルター(日本高周波(株)製、型式:FL-S-01B、特性を図4に示す。)を設置し同様に測定を行なった。この結果を図5に示す。BPM6は図2にみられたスリット幅により検波出力が著しく変化する現象はなくなり、BPM7の検波電圧も若干低くなった。またビーム位置に換算した結果を図3に重ねて示す(ローパスフィルターあり)。BPM6のビーム位置は、垂直方向の変動は0.1mm以内となり正常な値となったと考えられる。また、水平方向は1mm程度変動しているが、電子ビームのエネルギー変動によるものである。ただし、BPM7はスリットにより電子ビームが切られているため検波電圧が低い時のビーム位置は測定精度が悪いため、ばらつきがある。この結果より、ローパスフィルターを用いて、高調波を検波していた信号を除去できた。

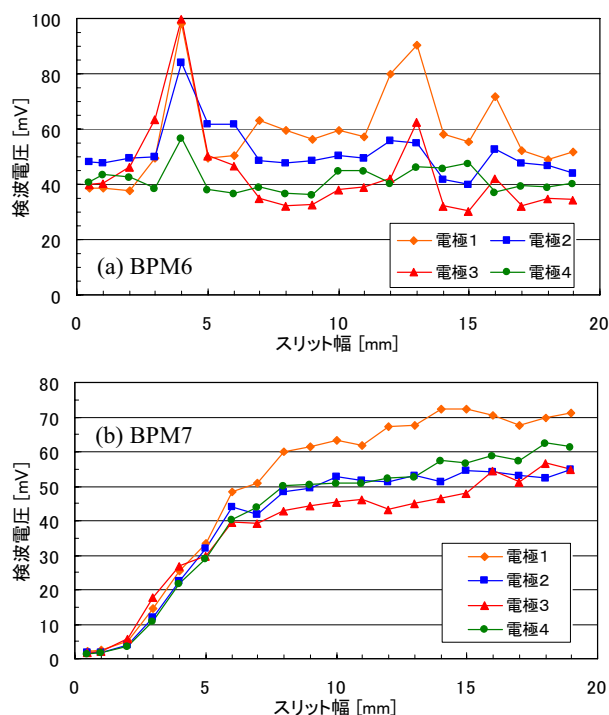


図2. スリット幅と検波電圧の関係。

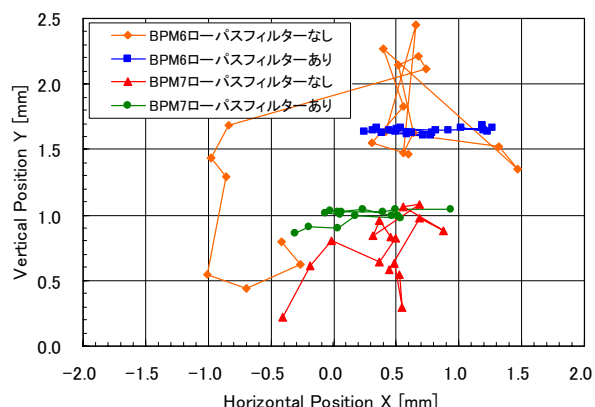


図3. ローパスフィルターを設置する前後のスリット幅を変化させた時のビーム位置。

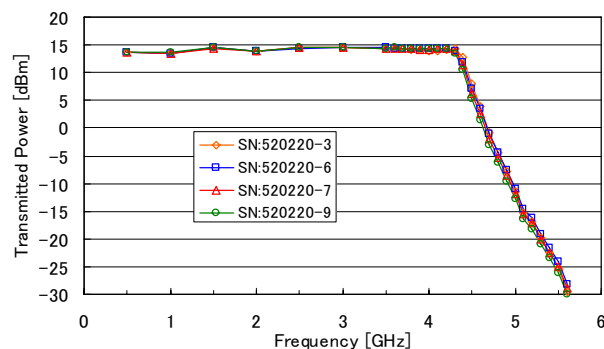


図4. ローパスフィルターの特性。
Signal Generatorから15dBmのRFをローパスフィルターに供給し、透過電力をPower Meterを用いて測定した。

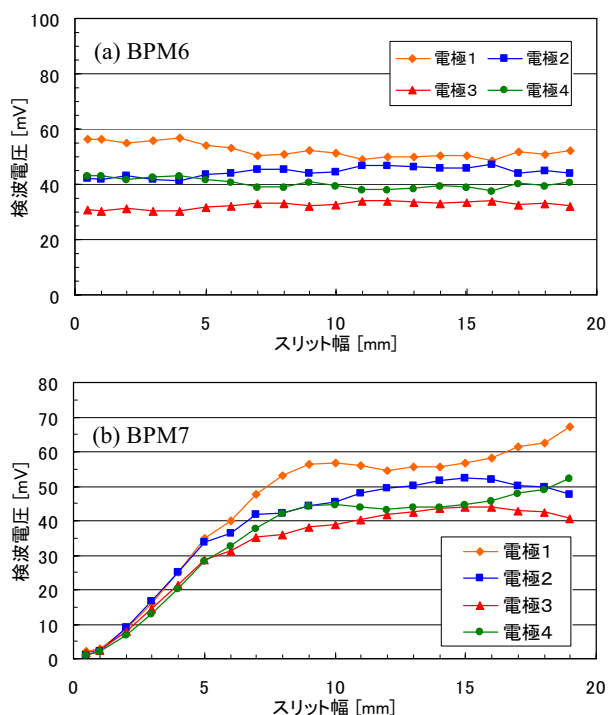


図5. ローパスフィルター設置後のスリット幅と検波電圧の関係。

4. 今後の課題

現在、LEBRAにおけるBPMは全13台設置されているが、他のBPMの出力信号に高調波による影響があるか確認していない。しかしPXRビームラインの90°偏向系に設置したBPMは同様の現象が起きるので、早急に必要箇所のBPMにはローパスフィルターの設置を考えている。

5. まとめ

FELビームラインの90°偏向系に設置したBPM6,7において、スリット幅を変化させるとBPMのからの信号が変化する現象が観測された。これはバンチされた電子ビームがスリットを通過するときに励振されるマイクロ波がスリットチェンバーに同調したとき大きな信号となり、このマイクロ波による高調波がビームダクト内を伝播して、BPMの信号に影響を与えると考えられる。この出力信号の変化はローパスフィルターにより除去することができ、ビーム位置の読み取りへの影響がなくなった。

参考文献

- [1] Y.Hayakawa, et al., “First Lasing of LEBRA FEL in Nihon University at a wavelength of 1.5 μm ”, Nucl. Instr. and Meth. A(2002), Volume 483/1-2, pp.29-33(NIMA18811)
- [2] T.Tanaka, et al., “日大125MeVリニアックの稼働状況” Proceedings of this Meeting.
- [3] Y.Hayakawa, et al., “日大パラメトリックX線源の現状” Proceedings of this Meeting.
- [4] K.Ishiwata, et al., “Development of Strip-Line Type Beam Position Monitor” Proceedings of the 21st International Linear Accelerator Conference, LINAC2002, Gyeongju, Korea, August 19-23, 2002, p178
- [5] K.Ishiwata, et al., “ストリップライン型ビームポジションモニターの研究” Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 30 – August 1, 2003, p431
- [6] K.Ishiwata, et al., “LEBRAにおけるビーム位置計測システムの開発” Proceedings of this Meeting.
- [7] 岡田文明, “マイクロ波工学—基礎と応用—”, 学術社, p171, 1993

Development of Beam Position Measurement System at LEBRA

K.Ishiwata^{1,A)}, I.Sato^{B)}, K.Hayakawa^{B)}, T.Tanaka^{B)}, Y.Hayakawa^{B)}, K.Yokoyama^{B)}, A.Mori^{B)}, K.Nogami^{B)},
K.Kanno^{A)}, T.Sakai^{A)}, K.Nakao^{A)}, T.Suwada^{C)}

^{A)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, KEK
1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801

Abstract

Ten BPMs were added into the beam line at LEBRA, and the total number of BPMs becomes 13 (six BPMs are in an accelerator straight line, four BPMs are in FEL beam line, three BPMs are in PXR beam line). A signal from each electrode of BPM is inputted into a RF detector through RF coaxial cable. The detected voltage is measured by means of the AD conversion board on PC. The beam position is derived from the voltage digitized data by a PC. It is reported about this signal acquisition system.

LEBRAにおけるビーム位置計測システムの開発

1. はじめに

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設(LEBRA)では、高エネルギー加速器研究機構(KEK)との共同研究により、電子線形加速器の高度化とその高度利用に関する開発が進められている。その中の1つとして自動制御システムがある。電子ビームの位置、エネルギー、ビーム電流の変動を制御する制御システムを構築してビーム軌道の長時間安定を試みる。全ビームラインにおいて電子ビームの位置および軌道を知るために、2003年9月および2004年4月にビーム位置モニター(BPM)の増設を行いBPMは全13台となり、ほぼ全ビームラインにおいてビーム位置のモニターが可能となった。これにより自由電

子レーザー(FEL)およびパラメトリックX線放射(PXR)の安定供給につながっていく。

2. BPMの増設

最初に設置したBPM3台がビーム軌道の制御に有効であることが確認されたので^[1,2]、同等のBPMを2003年9月に加速器直線部に4台(BPM1,2,3,5)とFELビームラインの90°偏向系に2台(BPM6,7)の計6台増設した。さらに、2004年4月には加速器出口に1台(BPM10)とPXRビームラインに3台(BPM11,12,13)の計4台増設した。これによりBPMは全13台となり全ビームラインにおいて電子ビームの位置および軌道を知ることが可能となる(BPMの設置場所は図1に

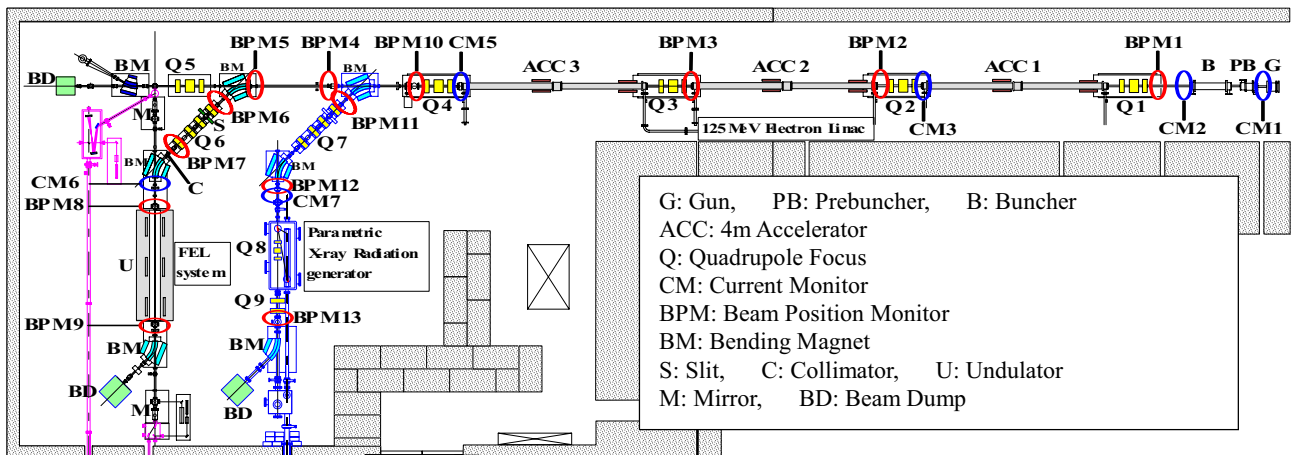


図1. ビーム位置モニターの設置箇所。

¹ E-mail: ishiwata@lebra.nihon-u.ac.jp

示す)。大半のBPMの増設には使用を中止した蛍光板ビームプロファイルモニターと交換することにより設置した。しかしBPM13は空間的余裕がなかったため、4極電磁石のビームダクトを新たに設計・製作したBPM付ビームダクトに交換した。このBPMの主な寸法を表1に示す。

表1. BPM13の寸法

全長	550 mm
モニター外径	67.5 mm
モニター内径	53 mm
電極長	26.25 mm
電極内径	42.8 mm
電極厚	1 mm
電極開口角	45°

3. ビーム位置計測システム

ビーム位置計測システムの概念図を図2に示す。BPMの各電極からの信号はRG-55/UもしくはRG-9B/U高周波同軸ケーブルを用いて、クリスタル検波器(Agilent Technologies製, 423B, 0.01~12.4GHz)に入力される。検波器で検波された信号は高速オペアンプ(National Semiconductor製, LM6364N)に入力され20倍に反転増幅される。この信号をビームパルス幅20μsの中心部で電圧のサンプル/ホールド(National Semiconductor製, LF398N)を行う(20倍反転増幅・サンプル/ホールド回路の写真を図3に示す)。これをPCIバスに接続されたインタフェース社の12ビットAD変換ボードPCI-3177Cをもちいて全BPM13台×4電極のサンプル/ホールドされた電圧をPCに取り込み、PCに取り込まれた電圧をRF電力に換算し次式によりビーム位置を導出する^[1]。

$$X = \sum_{i,j=0}^3 k_{xij} \left(\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \right)^i \left(\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \right)^j$$

$$Y = \sum_{i,j=0}^3 k_{yij} \left(\frac{\Delta_x}{\Sigma_x} \right)^i \left(\frac{\Delta_y}{\Sigma_y} \right)^j$$

$$\Delta_x = \sqrt{P_1} - \sqrt{P_3}, \quad \Sigma_x = \sqrt{P_1} + \sqrt{P_3}$$

$$\Delta_y = \sqrt{P_2} - \sqrt{P_4}, \quad \Sigma_y = \sqrt{P_2} + \sqrt{P_4}$$

ここで、 X : BPM中心から水平方向のビーム位置、
 Y : BPM中心から水平方向のビーム位置、
 k_{xij}, k_{yij} は較正係数、 P_1, P_2, P_3, P_4 はそれぞれ+X側,+Y側,-X側,-Y側の各電極からのケーブルケーブル減衰量を含めたRF出力電力である。

4. まとめと今後の課題

2003年9月に加速器直線部に4台とFELビームラインの90°偏向系に2台の計6台増設した。さらに、2004年4月には加速器出口に1台とPXRビームラインに3台の計4台増設した。これによりBPMは全13台となり全ビームラインにおいて電子ビームの位置およ

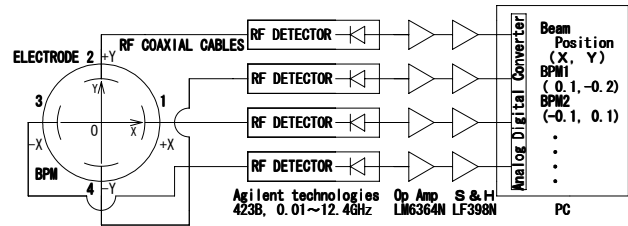


図2. ビーム位置計測システムの概念図。

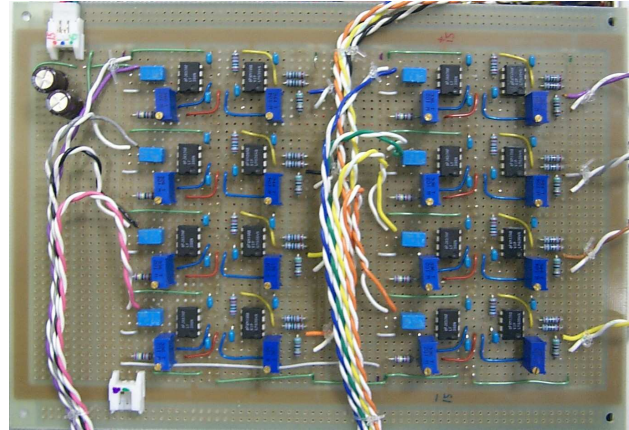


図3. 20倍反転増幅・サンプル/ホールド回路。基盤1枚にBPM2台分8回路分が組まれている。これが10台分用意されている。FELビームラインとPXRビームラインに設置されたBPMは切り替えることによって使用している。

び軌道を知ることが可能となった。

現在、20倍反転増幅・サンプル/ホールド回路でサンプル/ホールドされた電圧をAD変換ボードを用いてPCに取り込むところまで出来上がっている。しかし、20倍反転増幅・サンプル/ホールド回路の校正が終了していないので校正を行い、性能の試験を行なう必要がある。また、ビーム位置を導出しているPCから加速器を制御するPCにビーム位置を送らなければならない。今後の課題として、加速器の運転条件パルス幅20μsで1点サンプリングでは加速器直線部では十分であるが、FELおよびPXRビームラインではビームパルス幅20μs内でビーム位置変動があり、これを読み取ることができないので、別のシステムを作らなければならない。

参考文献

- [1] K.Ishiwata, et al., "Development of Strip-Line Type Beam Position Monitor" Proceedings of the 21st International Linear Accelerator Conference, LINAC2002, Gyeongju, Korea, August 19-23, 2002, p178
- [2] K.Ishiwata, et al., "ストリップライン型ビームポジションモニターの研究" Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July 30 - August 1, 2003, p431

MEASUREMENT OF ELECTRON BUNCH LENGTH AT LEBRA

K.Yokoyama^{1*,A)}, I.Sato^{A)}, K.Hayakawa^{A)}, T.Tanaka^{A)}, Y.Hayakawa^{A)}, K.Nakao^{B)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} College of Science and Technology, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274 -8501 Japan

Abstract

The bunch length of the electron beam from the FEL linac at LEBRA (Laboratory for Electron Beam Research and Application) was estimated from the phase ellipse coefficient which is deduced from the dependence of the beam spread on the accelerating phase. The bunch length of FWHM was estimated approximately 0.33mm from the results of the experiments. Besides, the pulse length of the FEL lights around the wavelength of 1.5 μ m was measured by means of the autocorrelation. The pulse length was less than 0.06mm according to the number of interfacial waves. These results indicate that the pulse length of the FEL lights isn't equivalent to the electron bunch length.

LEBRA - FEL用リニアックの電子ビームバンチ長の測定

1. はじめに

電子ビームのバンチ長を測定する簡単な方法は、ビームによって発生する光をストリークカメラによって測定することである。本施設では、アンジュレータを通過する電子ビームの自発放射光を使って、バンチ長の測定を行った^[1]。しかし、FEL発振時の3次高調波による測定の際には、観測光がストリークカメラの分解能を超えてしまい、良いデータが得られなかった。FELシミュレーションによれば、観測されているFELは高ゲインであり、電子ビームのバンチ長は1ps程度に相当する^[2]。本施設では、LINAC最終段の加速管で電子ビームの加速位相を適当に合わせると、下流のアナライザによってビームバンチコンプレッションが起こるため、このような短いバンチが生成していると思われる。そこで、加速位相を変えてエネルギースペクトルを測定し^[3]、ビームの位相空間における楕円係数からFEL発振時のバンチ長を推定した。また、1.5 μ m付近のFEL光を用いて自己相関干渉法^[4]によるバンチ長の推定も試みたので、これらの結果について報告する。

2. 測定方法

2.1 FEL用LINAC

LEBRAのLINACの主加速部は、4mの加速管3本からなる。運転時は、クライストロン2本を使用しており、クライストロン#1は入射部と加速管#1へ、クライストロン#2は、出力を2分割して加速管#2と#3それぞれにRFを供給している。LINACの構成を図1に示す。クライストロン#2の入力RF位相を低速移相器で変えることができる。さらに、加速管#3に供給されるRF位相は加速管前段で独立に変えることができる。

電子ビームのバンチ長を推定するために、以下のような測定を行った。

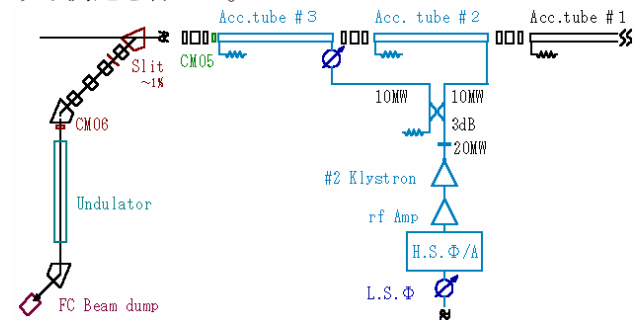


図1：加速器構成図。

2.1.1 最大加速電圧 E_p

加速管#3の位相を変え、各々のエネルギースペクトルからRFの最大加速電圧 E_p を求めた。 E_0 を加速管#2までの加速エネルギーと加速管#3のビームローディングの和とし、 E_i を加速管#3を出た後のエネルギーとすると、加速管#3の位相 ϕ_i に対して、

$$E_i = E_0 + E_p \cos \phi_i \quad \dots (1)$$

と表せる。 E_i と ϕ_i のデータから、(1)式の係数 E_0 、 E_p を求める。但し、 ϕ_i は、最大エネルギーが得られたところを0とおく。

2.1.2 Twiss parameter

ビームの位相空間における分布を楕円と仮定すると

$$\gamma_0 \Delta l^2 - 2\alpha_0 \Delta l \Delta E + \beta_0 \Delta E^2 = \epsilon \quad \dots (2)$$

と書ける。このとき、 $\sqrt{\epsilon \beta_0}$ はバンチ長、 $\sqrt{\epsilon \gamma_0}$ はエネルギー幅を表す^[5]。

加速管#2の入り口における縦方向の位相空間ベク

¹ E-mail: kazue.yokoyama@kek.jp

* Present affiliation: High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

トルを $\begin{pmatrix} \Delta I_0 \\ \Delta V_0 \end{pmatrix}$ と書く。 ΔI_0 は、中心軌道を通る電子に対する進行方向の位置のずれ、 ΔV_0 は同じく、中心軌道を通る電子に対するエネルギーのずれを表す。これが、加速管#2、#3を通過してリニアックの出口で $\begin{pmatrix} \Delta I \\ \Delta V \end{pmatrix}$ となるとすると、

$$\begin{pmatrix} \Delta I \\ \Delta E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ g(\theta, \Delta\theta) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta I_0 \\ \Delta E_0 \end{pmatrix} \quad \dots (3)$$

で表されるから、(2)式の係数は、

$$\begin{pmatrix} \beta & \alpha \\ \alpha & \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ g & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 & \alpha_0 \\ \alpha_0 & \gamma_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & g \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (4)$$

のように変換される。これを解いて、

$$\alpha(g) = \beta_0 g(\theta, \Delta\theta) + \alpha_0 \quad \dots (5)$$

$$\beta(g) = \beta_0$$

$$\gamma(g) = \beta_0 g(\theta, \Delta\theta)^2 + 2\alpha_0 g(\theta, \Delta\theta) + \gamma_0$$

を得る。但し、

$$g(\theta, \Delta\theta) = -2V_2 \cos \frac{\Delta\theta}{2} \sin \left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \frac{2\pi}{\lambda} \quad \dots (6)$$

である。これは、次のようにして求められる。

加速管#2と#3の最大加速エネルギーは等しく V_2 とおく。加速管#2の位相を θ とすると、加速管#3の位相は $\theta + \Delta\theta$ と書ける。($\Delta\theta$ は加速管#2と#3の位相差を表す。)

加速管#2と#3を合わせた加速電圧 V_3 は、

$$\begin{aligned} V_3(\theta, \Delta\theta) &= V_2 \cos \theta + V_2 \cos(\theta + \Delta\theta) \\ &= 2V_2 \cos \frac{\Delta\theta}{2} \cos \left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \quad \dots (7) \end{aligned}$$

となり、位相が $\delta\theta$ だけずれた電子の加速電圧は、

$$\begin{aligned} V_3(\theta + \delta\theta, \Delta\theta) &= V_2 \cos(\theta + \delta\theta) + V_2 \cos(\theta + \delta\theta + \Delta\theta) \\ &= 2V_2 \cos \frac{\Delta\theta}{2} \cos \left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2} + \delta\theta \right) \end{aligned}$$

となる。これは最大加速エネルギーが $2V_2 \cos \frac{\Delta\theta}{2}$

の加速管で中心加速位相が $\theta + \frac{\Delta\theta}{2}$ のときと等価である。

$\delta\theta$ の一次の項までを取ると、

$$\begin{aligned} V_3(\theta + \delta\theta, \Delta\theta) - V_3(\theta, \Delta\theta) & \\ \approx -2V_2 \cos \frac{\Delta\theta}{2} \sin \left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \delta\theta & \equiv g(\theta, \Delta\theta) \delta\theta \quad \text{となる。} \end{aligned}$$

一方、エネルギー幅は、 $\delta E = \sqrt{\epsilon \gamma}$ なので、(5)式より、

$$\delta E^2 = \epsilon \beta_0 g(\theta, \Delta\theta)^2 + \epsilon 2\alpha_0 g(\theta, \Delta\theta) + \epsilon \gamma_0 \quad \dots (8)$$

となる。

従って、 θ と $\Delta\theta$ に対する $g(\theta, \Delta\theta)$ とそのエネルギースペクトルから求めたエネルギー幅 δE から、(8)式の係数が求まる。つまり、twiss parameterも

(3)の変換行列に従って変換するから、LINACを出た後のスペクトルを θ と $\Delta\theta$ の様々な位相の組み合わせで測定することによって、加速管#2の入り口での twiss parameter を求めることが出来るので、これより下流のビームの振る舞いを知ることが出来る。

2.1.3 アナライザーを通過後のバンチ長

アナライザーを通過した後の twiss parameter は、次のように変換される。

$$\begin{pmatrix} \beta' & \alpha' \\ \alpha' & \gamma' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta(g) & \alpha(g) \\ \alpha(g) & \gamma(g) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (9)$$

ここで、 $h \equiv \frac{2\rho(45^\circ - \sin 45^\circ)}{E_M} = 0.00125$ である。

但し、 $\rho = 550\text{mm}$ 、 E_M はスペクトル測定時の中心エネルギーである。(9)式は、

$$\begin{aligned} \alpha' &= \alpha(g) + h \cdot \gamma(g) \\ \beta' &= \beta(g) + 2h \cdot \alpha(g) + h^2 \gamma(g) \\ \gamma' &= \gamma(g) \end{aligned} \quad \dots (10)$$

となり、(5)式に(8)式の係数と $g(\theta, \Delta\theta)$ を代入して、 $\alpha(g)$ 、 $\beta(g)$ 、 $\gamma(g)$ が求まる。(10)式のそれぞれに ϵ を掛けた式から、 $\epsilon\alpha'$ 、 $\epsilon\beta'$ 、 $\epsilon\gamma'$ が求まる。このとき、アナライザーを通過した後のバンチ長(半値全幅)は、 $2\sqrt{\epsilon\beta'}$ より求まる。

FELが発振している時のバンチ長を調べるために、FEL発振波長が一定であるためのビーム条件として、 E_M が一定であるような位相の組み合わせにする。つまり、これは、(7)式の $V_3(\theta, \Delta\theta) = \text{Const.}$ の条件を満たすような θ と $\Delta\theta$ に対する $g(\theta, \Delta\theta)$ とそのエネルギースペクトルから求めたエネルギー幅 δE から(8)式を求めることに相当し、(10)式から、アナライザー通過後のバンチ長の変化がわかる。測定時には、アナライザーの偏向電磁石の励磁電流を一定にして、ビームダンプで観測される電流値が大きくなるような θ と $\Delta\theta$ の組み合わせを選ぶ。ただし、 θ と $\Delta\theta$ はFEL発振が観測された付近で探す。

2.2 自己相関干渉法

FEL光の自己相関による干渉パターンから、バンチ長の推測を行う。干渉計はマイケルソンタイプで、半透鏡と固定鏡と操査鏡からなる^[4]。入射した光束は半透鏡で2つに分割され、固定鏡と操査鏡によって生じる行路差で生じる干渉パターンから光パルスの長さを測定することができる^[6]。

3. 結果と考察

3.1 測定結果

3.1.1 最大加速電圧 E_p

加速管#3の位相を変えて測定したエネルギースペクトルから求めたピークエネルギーの結果を図2に示す。最小二乗法より、(1)式を求めると、

$$E_i = 62.02 + 40.35 \cos(\phi_i' - 70)$$

となり、 $E_p = 40.35$ と求まった。LINACの構成から、この値が(6)式の I_2 に相当する量である。

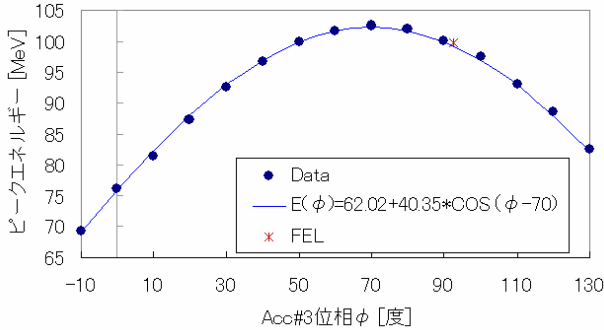


図2：加速管#3に於ける加速位相とビークエネルギー。
(*はFEL発振が最も強く観測された点。)

3.1.2 Twiss parameter

θ と $\Delta\theta$ に対する $g(\theta, \Delta\theta)$ とそのときに測定したエネルギースペクトルから求めたエネルギー幅 δE を図3に示す。最小二乗法より、(8)式を求めると、

$$\delta E^2 = 1.94 \times 10^{-7} g(\phi)^2 + 2.75 \times 10^{-4} g(\phi) + 0.397$$

となり、 $\epsilon\alpha$ 、 $\epsilon\beta$ 、 $\epsilon\gamma$ が求まる。このとき、LINACを出たときのバンチ長は、0.88mm(2.9ps)と求まった。

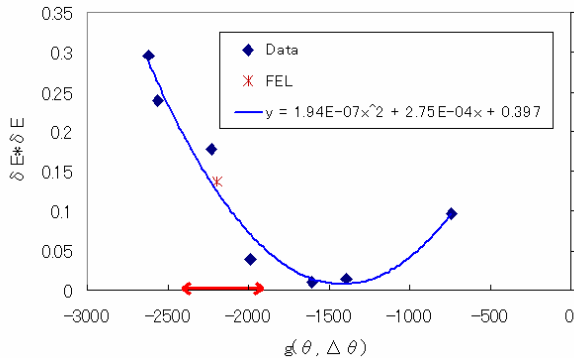


図3： $g(\theta, \Delta\theta)$ と δE^2 の測定結果と楕円係数。(↔はFEL発振が観測された範囲を示す。)

3.1.3 アナライザーを通過後のバンチ長

アナライザーを通過した後のバンチ長とエネルギー幅を図4に示す。測定時の電子ビームのエネルギーは100MeVで、アンジュレータを通過する電流はマクロパルス内平均で80mAであった。*点は、FEL発振がもっとも強く観測された時で、この時のエネルギー幅は半値全幅で0.74%、バンチ長は0.33mm(1.1ps)である。

3.2 自己相関干渉法による光パルス幅の測定結果

測定された干渉パターンを例を図5に示す。測定には、位相空間でのバンチ長測定と同じビーム条件の時に観測された約 $1.5\mu\text{m}$ (3rd: 512nm)のFEL光を用いた。干渉実験ができるFEL光強度の範囲で位相組み合わせを変えた測定も行った。撮査鏡ステージの移動量は、ステップ当たり $0.1\mu\text{m}$ とした。この干渉パターンで観測された波の数にFELの半波長を掛け

た値が光パルスの幅になる。図4に、光パルス幅と電子ビームのエネルギー幅を示す。光パルス幅は0.06mm程度である。この結果から、FELの光パルス幅は電子ビームのバンチ長よりかなり短いことがわかる。

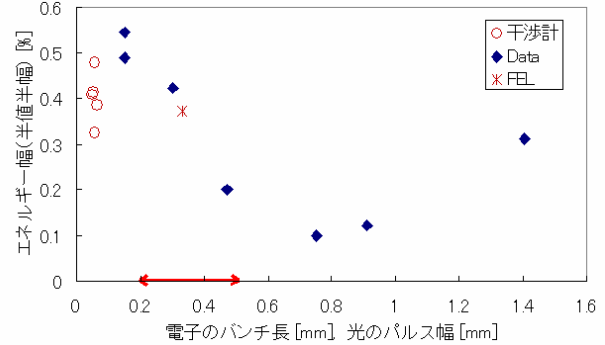


図4：電子のバンチ長及びFEL光のパルス幅とエネルギー幅。(↔は図3に対応したFEL発振範囲を示す。)

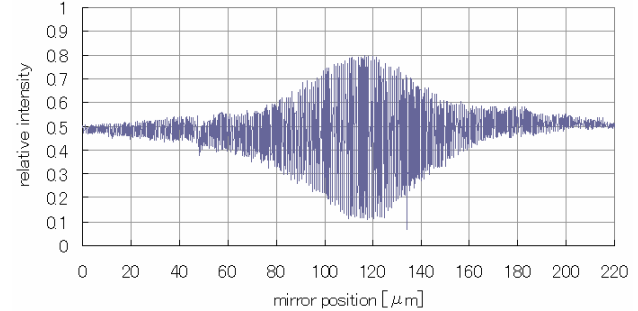


図5：FEL光の自己相関による干渉パターン。

4. まとめ

FEL発振時に於ける電子のバンチ長は約1psかそれ以下であり、これはFELシミュレーションの結果と矛盾しない。

位相空間から求めた電子のバンチ長とFEL光のパルス幅は5倍以上違う結果になった。今後、電子のバンチ長と光パルス幅についての解析を検討する予定である。

参考文献

- [1] I.Sato et al., "日本大学電子線形加速器の現状と研究計画", Proc. of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug.7-9, 2002.
- [2] Y.Hayakawa et al., "Characteristics of the Fundamental and 3rd Harmonic FEL at LEBRA", Nucl. Instr. and Meth. A507, 404-408 (2003), FEL 2002, Proc. of the 24th Int. FEL Conference and 9th FEL Users Workshop (Argonne, Illinois, U.S.A., 2002.9).
- [3] K.Yokoyama et al., "日大FEL用リニアックの加速ビーム特性", Proc. of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, September.16-18, 1998.
- [4] K.Hayakawa et al., Proc. of this Meeting.
- [5] A.W.Chao, Handbook of Accelerator Physics and Engineering, World Scientific, 57(1998).
- [6] C.Settakorn et al., "Impact of Experimental Conditions on Autocorrelation Bunchlength measurements", Proc. of the 2nd APAC, Beijing, China, 2001.

THE LEBRA 125 MEV ELECTRON LINAC FOR FEL AND PXR GENERATION

K.Hayakawa[#], T.Tanaka, Y.Hayakawa, K.Yokoyama^{*}, I.Sato,
LEBRA, Nihon University, Funabashi, Japan
K.Kanno, K.Nakao, K.Ishiwata and T.Sakai,

Graduate School of Science and Technology Nihon University, Funabashi, Japan

Abstract

A 125MeV electron linac has been constructed at Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Nihon University for Free Electron Laser (FEL) and Parametric X-ray (PXR)[1] generation. Electron bunches of 3 - 4 psec width formed at the injector are compressed to within 1 psec during passing through the magnetic bunching system. Peak current of the electron beam injected to the FEL system is expected to be about 50 A. FEL lasing has been achieved at the wavelength range from 0.9 to 6 μm . Estimated peak power of the extracted FEL light pulse is about 4 MW. Applied researches using the FEL started last autumn. Preliminary experiment for the PXR generation has been proceeded. First light of the PXR is observed at April in this year.

To generate monochromatic X-ray, PXR beam line has been installed next to FEL beam line. Several interesting results are obtained.

LINAC

The electron linac has a conventional configuration. It consists of a DC electron gun with a dispenser cathode, a prebuncher which is a 7-cell travelling wave structure, a buncher which is a 21-cell travelling wave structure and three 4-m long normal accelerator sections.

Table 1: Specifications for LEBRA 125MeV linac.

Accelerating rf frequency	2856	MHz
Klystron peak output rf Power	30	MW
Number of klystrons	2	
Electron energy	30~125	MeV
Energy spread (FWHM)	0.5~1	%
Macropulse beam current	200	mA
Macropulse duration	20	μsec
Repletion rate	12.5	Hz

INTRODUCTION

The specifications of the electron linac are listed in Table 1. The beam injection system and the regular accelerator sections of the linac were moved from KEK Photon Factory positron injector linac as a part of collaboration on development of a high quality electron linac. Schematic layout of the accelerating structures and RF system are shown in Fig.1.

FEL beam line has been installed to feed near infrared laser for application users [2]. To improve FEL gain, magnetic bunch compressor has been adopted.

RF System

Two klystrons feed rf power of approximately 20MW peak and 20 μsec pulse duration each to accelerating structures. Phase of the rf fed to each component is controlled independently.

Output RF phase of the solid state RF amplifier and the klystron drifts with a room temperature variation. Since RF amplifier is operated in pulse mode, RF phase change

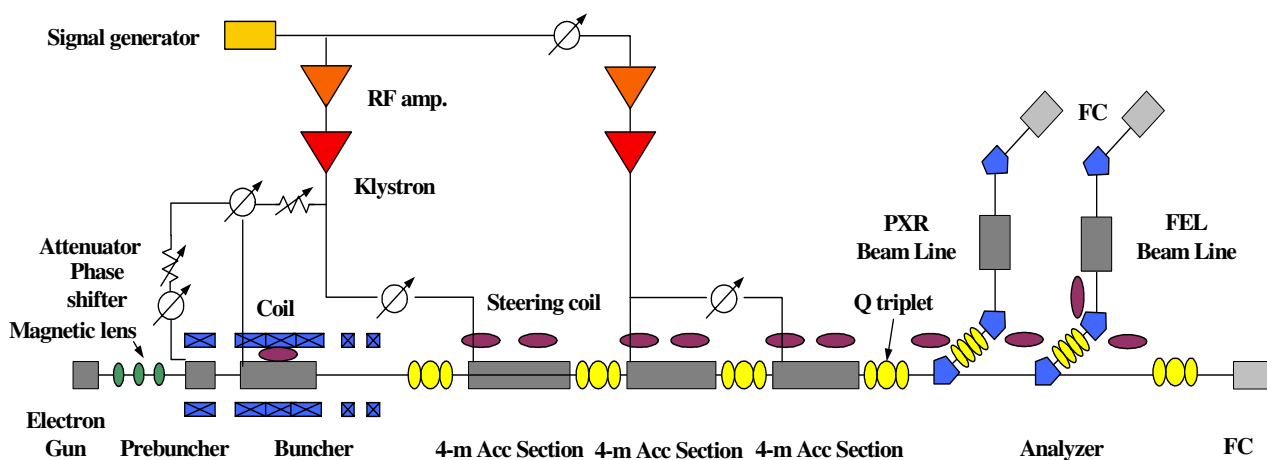


Figure1: Schematic layout of the LEBRA linac and the FEL and the PXR beam line.

[#]hayakawa@lebra.nihon-u.ac.jp

^{*}Present affiliation: KEK, Tsukuba, Japan

during the pulse duration. Phase drift is compensated by using a slow feedback circuit and feed forward compensation is adopted for phase deviation during the pulse duration. Both feedback and feed forward signals are combined and fed to the fast phase shifter installed just upstream of the RF amplifier. Phase stability is achieved within 0.5 degree both long term and during the pulse duration [3].

Magnetic Bunch Compression

Last two accelerator sections are connected to the second klystron as shown in Fig.1. Accelerating phase of the third accelerator section is controlled independently of the second one using a phase shifter attached in the RF feed line of the third accelerator section. Then, the electron beam can be accelerated to same energy by various combination of the phase. Accelerating energy E without beam loading term in this section is described as follow.

$$\begin{aligned} E &= E_0(\cos(\phi) + \cos(\phi + \Delta\phi)) \\ &= 2E_0 \cos(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}) \cos \Delta\phi \end{aligned}$$

Where E_0 is the maximum accelerating energy for each accelerator section, ϕ is the accelerating phase of the second accelerator section dependent on the klystron output phase and $\Delta\phi$ is the relative phase between the second and the third accelerator sections. Electron energy within a bunch is transformed in the first order approximation as

$$\begin{aligned} \delta E &= \delta E_0 + \frac{\partial E}{\partial \phi} \delta \phi_0 \\ &= \delta E_0 - 2E_0 \sin(\phi + \frac{\Delta\phi}{2}) \cos(\Delta\phi) \delta \phi_0 \end{aligned}$$

where $\delta\phi$ and δE are phase and energy relative to the central position and mean energy of the bunch. Suffix 0 of these variables means initial value. Even if the combination of the phase that gives the same energy, the effect on the energy distribution is different. Therefore we can handle the distribution of the electrons in the longitudinal phase space. Injection beam line to the FEL is a 90 degrees achromatic bending system as a momentum analyzer. It consists of two 45 degrees bending magnets, four quadrupole magnets and a momentum slit. In the case of achromatic bending, relative phase $\delta\phi$ is transformed as

$$\delta\phi = \delta\phi_0 + 2\rho(\theta - \sin\theta) \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\delta E}{E_{total}}$$

where ρ and θ are a orbital radius and bending angle of the bending magnets, λ is a wavelength of the accelerating RF in free space and E_{total} is an electron mean energy at the exit of the linac. If we select proper phase combination, which brings the required accelerating energy, bunch compression mechanism will be realized. By the bunch compression, about 3 psec of the bunch length at the exit of the linac becomes 1 psec at the entrance of the undulator[4]. Peak current of the electron

beam also increases about three times. In the present operation condition, the peak current is estimated about 30 A. And it will be increased to 50 A or more in near future.

FEL

The undulator consists of a planar Halbach type permanent magnet, where the electron beam is wiggled in the vertical plain. The specifications of the FEL system are listed in Table 2. At the beginning of the FEL experiments, dielectric or Au coated quart based mirrors were used. Because of the poor thermal conductance of the quart, coated material was frequently damaged according to increasing the optical power at lasing. To avoid these kinds of trouble, copper based silver coated mirrors are used. Optical power is extracted through the small hall excavated at the mirror center. Laser light beam extracted from the optical cavity is parallelised using beam expander that consists of spheroidal and parabolic mirrors and transmitted to the experimental rooms through the vacuum ducts.

Lasing of the LEBRA FEL has been achieved from 0.9 to 6 μm of wavelength. Typical FEL signal detected using an InSb photo detector, which indicate macro pulse structure is shown Fig. 3. Duration of the electron beam

Table 2: Parameters for LEBRA infrared FEL system

Resonator length, L	6.718	m
Rayleigh range	1.467	m
Coupling hall	0.3	mm
Undulator period	48	mm
Undulator length	2.4	m
Number of periods	50	
Maximum K (rms)	1.35	

pulse is about 18 μsec , FEL is saturated after 8 μsec from start of the electron beam pulse and continued about 10 μsec . Output FEL energy per macro pulse is dependent on wavelength and beam current. Maximum power is

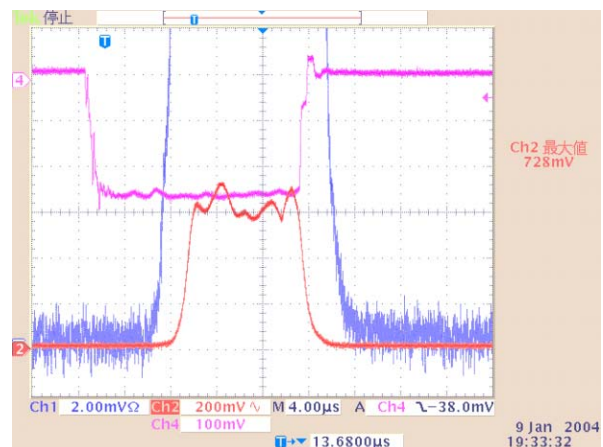


Figure 2: Typical waveform of the electron beam (upper trace) and FEL (lower trace).

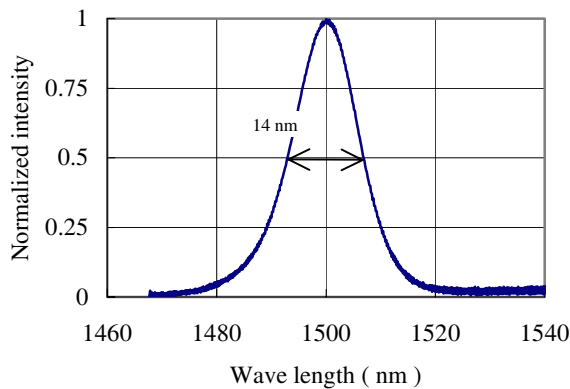


Figure 3: Spectrum of the FEL. Spectral width is about 14 nm.

accomplished wavelength of from 2 to 3 μm . Maximum energy per macro pulse obtained until now is 30 mJ.

Spectra were measured at up to wavelength of 1500nm by means of a monochromator and an InGaAs photo diode array. Typical one is shown in Fig. 3. Spectral width is about 14 nm (FWHM) at mean wavelength of 1500 nm. Assuming Gaussian shape wave packet, about 70 μm (FWHM) of optical pulse length is deduced from inverse Fourier transformation from the spectrum. This value agrees well with what was obtained from the autocorrelation experiment[4]. If maximum energy of 30mJ per macro pulse of 10 μsec converts simply, peak power is about 4 MW

Experiments of applied researchers started at last autumn.

PXR

The PXR beam line is installed parallel to the FEL beam line as shown in Fig. 1. The PXR system consists of two silicon single crystals. One of them is the radiator for PXR and another one is a reflector for X-rays. The reflector is movable parallel to the electron beam axis in order to extract X-rays with any defined wavelength through the fixed output port[5].

First light of the PXR was observed at April 14, this year. X-rays signal was detected by means of ionization chamber set at the output port. X-rays energy range in present setup is from 5 to 20keV. In principle, PXR has the spatial distribution with the energy gradient in the reflection plain. From the preliminary measurement, relation between X-ray direction and energy at incident electron energy of 100MeV is 0.7%/mrad. A photograph in which the Br-K α absorption edge is seen as the

boundary of light and darkness is taken by direct exposure at output port with the Polaroid film shown in Fig. 5. XAFS appears in the photograph but cannot be seen clearly in this figure.

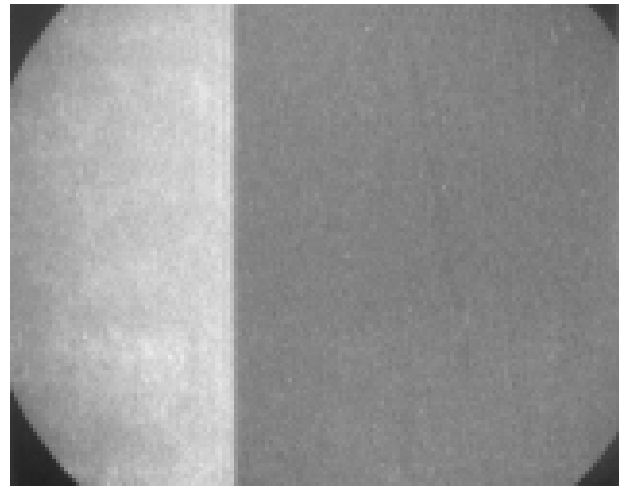


Figure 4: A photograph in which the Br-K α absorption edge (13.5keV) is seen as the boundary of light and darkness.

REFERENCES

- [1] A.V.Shchagin and X.K.Maruyama, Accelerator-Based Atomic Physics Techniques and Applications, S.M.Shafroth and J.C.Austin, Eds, New York: American Institute of Physics, 1997,ch9 pp 279-307
- [2] T.Tanaka, I.Sato, K.Hayakawa, Y.Hayakawa and K.Sato, "Status of Infrared Free Electron Laser at Nihon University", Jpn. J. Appl. Phys. 41(2002)Suppl. 41-1,pp.34-40
- [3] K.Yokoyama, et al. "Suppression of Energy Fluctuation for the Free Electron Laser at LEBRA," Jpn. J. Appl. Phys. 41(2002)4758
- [4] K.Yokoyama, et al. "Bunch Length Measurements at LEBRA", proceedings of this conference.
- [5] Y.Hayakawa, "Simulations to the project of a PXR based X-ray source composed of an electron linac and a double-crystal system", to be published.

BUNCH LENGTH MEASUREMENTS AT LEBRA

K.Yokoyama^{#,*,A)}, I.Sato^{A)}, K.Hayakawa^{A)}, T.Tanaka^{A)}, Y.Hayakawa^{A)}, K.Nakao^{B)}

A) Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science,
Nihon University 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

B) College of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274 -8501 Japan

Abstract

The high-gain FEL amplification in near IR and SASE have been observed at LEBRA (Laboratory for Electron Beam Research and Application). A very short bunch of the electron beams have been achieved by the achromatic bending system, as the bunch compression system due to apt on the accelerating phase in the last accelerating section. The bunch length was estimated from the phase ellipse parameters which is deduced from the dependence of the beam spread on the accelerating phase. The bunch length of FWHM was estimated approximately 0.33 mm from the results of the experiments. Besides, the pulse length of the FEL lights around the wavelength of 1.5 micrometer was measured by means of the autocorrelation. The pulse length was less than 0.06 mm according to the number of interference waves. The pulse length of the FEL lights corresponds to around 20% of the electron bunch length.

INTRODUCTION

The high-gain FEL amplification has been obtained and the result of the simulation extracted from the FEL gain indicates that the bunch length could be around 1 ps or less [1]. SASE has also been observed using the electron beam with a low macropulse beam current and a very short bunch with considerable bunch compression in the achromatic bending system [2]. In order to investigate the bunch length which yields the high gain FEL amplification, the electron bunch length was measured by means of the simple theory about the phase ellipse instead of using a streak camera, which provides a direct and convenient way to measure bunch lengths but a high-accuracy one is very expensive. The pulse length of the FEL lights around the wavelength of 1.5 μm was also measured by means of the autocorrelation to compare the results of the bunch length.

The part of the main accelerating at LEBRA consists of three 4-m accelerating sections [3, 4]. The accelerating RF is provided by two 20-MW klystrons, which are operated at 2856 MHz with a pulse length 20 μs . The Phase flatness of the pulse error within 0.3° was achieved [5]. Klystron #1 is used for the injector and the first accelerating section and klystron #2 is used for the two accelerating sections. The electron beam accelerated in the linac is transported to the FEL system through the 90° achromatic bending and analyzer magnet system. The

[#]kazue.yokoyama@kek.jp

* Present affiliation: High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801 Japan

energy spread of the beam is restricted to about 1% by a slit of the momentum analyzer. The FEL system consists of an undulator of 50 periods of a Halbach-type permanent magnet array and an optical cavity and the cavity length is about 7 m.

EXPERIMENTAL METHOD [6]

The input RF phase of klystron #2 and the accelerating phase in accelerating section #3 can be changed by two phase shifters independently as shown in Fig. 1. The energy spectrum can be obtained by utilizing the first 45° bending magnet of the momentum analyzer as a spectrometer. The bunch length was estimated from the energy spread by using the method as below.

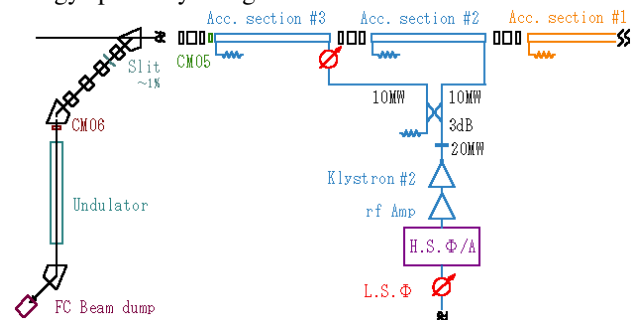


Figure 1: Layout of the FEL LINAC at LEBRA.

Maximum Energy Gain

The maximum electric field of the accelerating RF, E_p , is obtained from the maximum energy of the energy spectrum depending on the accelerating RF phase. E_0 is the total accelerating energy which beams obtain until acc-section #2 and the beam loading in acc-section #3, E_i is the beam energy after acc-section #3 and ϕ_i is the accelerating phase in acc-section #3. This correlation can be written

$$E_i = E_0 + E_p \cos\phi_i \quad (1),$$

where the original point of ϕ_i is based on the phase with the maximum energy. E_0 and E_p can be obtained by the least-square method from the experimental data of E_i and ϕ_i .

Ellipse Parameters

To describe a beam in phase space, assuming that the distribution of the beam at any other place along the transport line is to be an ellipse space, it can be expressed

$$\gamma_0 \Delta l^2 - 2\alpha_0 \Delta l \Delta E + \beta_0 \Delta E^2 = \epsilon \quad (2) [7],$$

where α_0 , β_0 , γ_0 and ε are ellipse parameters and $\sqrt{\varepsilon\beta_0}$ represents the bunch length and $\sqrt{\varepsilon\gamma_0}$ represents the energy spread of the electron beam.

The vector in the longitudinal phase space at the entrance of acc-section #2 can be represented as $(\Delta l_0, \Delta E_0)$ and it can be transferred to $(\Delta l, \Delta E)$ at the linac exit, the electron beam passing through acc-section #2 and #3. Δl_0 and ΔE_0 represent position and energy relative to the electron along the central orbit, respectively. The matrix formulation can be expressed by

$$\begin{pmatrix} \Delta l \\ \Delta E \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ g(\theta, \Delta\theta) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta l_0 \\ \Delta E_0 \end{pmatrix} \quad (3).$$

By using the same transfer matrix, the ellipse parameters are transformed as

$$\begin{pmatrix} \beta & \alpha \\ \alpha & \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ g & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_0 & \alpha_0 \\ \alpha_0 & \gamma_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & g \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4).$$

Three equations below can be obtained from Eq.(4);

$$\alpha(g) = \beta_0 g(\theta, \Delta\theta) + \alpha_0 \quad (5)$$

$$\beta(g) = \beta_0 \quad (6)$$

$$\gamma(g) = \beta_0 g(\theta, \Delta\theta)^2 + 2\alpha_0 g(\theta, \Delta\theta) + \gamma_0 \quad (7),$$

where the accelerating phase in acc-section #3 is expressed as $\theta + \Delta\theta$ when θ represents the accelerating phase in acc-section #2 and V_2 represents the maximum energy gain of acc-section #2 and #3. Approximating by the first order, $g(\theta, \Delta\theta)$ can be defined as;

$$g(\theta, \Delta\theta) = -2V_2 \cos \frac{\Delta\theta}{2} \sin \left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2} \right) \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8).$$

At this time, Eq.(7) becomes Eq.(9) by multiplying both sides by ε because the energy spread is $\delta E = \sqrt{\varepsilon\gamma_0}$.

$$\delta E^2 = \varepsilon\beta_0 g(\theta, \Delta\theta)^2 + \varepsilon 2\alpha_0 g(\theta, \Delta\theta) + \varepsilon\gamma_0 \quad (9)$$

Hence, the whole electron beam can be described by knowing the ellipse parameters of Eq.(9) which are obtained from the energy spread as a function, $g(\theta, \Delta\theta)$, of θ and $\Delta\theta$ and the bunch length can be also calculated from Eq. (6).

Bunch Length Through the Analyzer System

The ellipse parameters are also transferred to Eq. (10) after the achromatic bending system;

$$\begin{pmatrix} \beta' & \alpha' \\ \alpha' & \gamma' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta(g) & \alpha(g) \\ \alpha(g) & \gamma(g) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$h \equiv \frac{2\rho(\vartheta - \sin\vartheta)}{E_M} = 0.00125 \quad (11)$$

where ρ is the orbital radius (550 mm) and ϑ is the bending angle (45°) and E_M is the central energy depending on the purpose of experiment, respectively. The matrix formulation Eq. (10) becomes;

$$\alpha' = \alpha(g) + h \cdot \gamma(g) \quad (12)$$

$$\beta' = \beta(g) + 2h \cdot \alpha(g) + h^2 \gamma(g) \quad (13)$$

$$\gamma' = \gamma(g) \quad (14)$$

These equations can be calculated from the ellipse parameters in Eq. (9) and Eq. (5), (6), (7). The bunch length through the achromatic bending system can be also calculated from Eq. (13).

To investigate the bunch length of the electron beam at FEL oscillation, the energy spectra with the same central energy, which means E_M is constant, depending on the combination of θ and $\Delta\theta$ are measured.

Autocorrelation Method

The pulse length of the FEL lights around the wavelength of $1.5 \mu\text{m}$ was measured by using the interferometer based on the autocorrelation [8]. The interferometer is a Michelson-Moley type, which consists of two beamsplitters, a movable mirror and a fixed mirror as shown in Fig. 2. The interferogram is derived from the difference in path length between the light pulses split into two by a beamsplitter1 which works as a half mirror around $1.5 \mu\text{m}$. Detector1 measures a fundamental light of the FEL and Detector2 is used for a reference. The movable mirror can move in steps of $0.1 \mu\text{m}$. The optical pulse length is roughly estimated from multiplying the number of the interference wave by the half of the FEL wavelength.

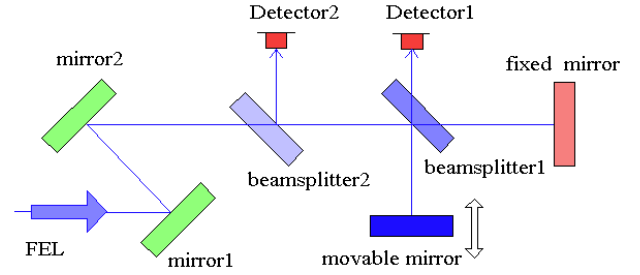


Figure 2: Layout of the interferometer.

RESULTS AND DISCUSSION

Electron Bunch Length

The result of the peak energy extracted from the energy spectrum as a function of the accelerating phase on acc-section #3 is shown in Fig. 3. Applying the least-square method, Eq. (1) was obtained as;

$$E_i = 62.02 + 40.35 \cos(\phi_i - 70) \quad (15)$$

where $E_p = 40.35$ comes from the result. The value of E_p corresponds to V_2 in the Eq. (8).

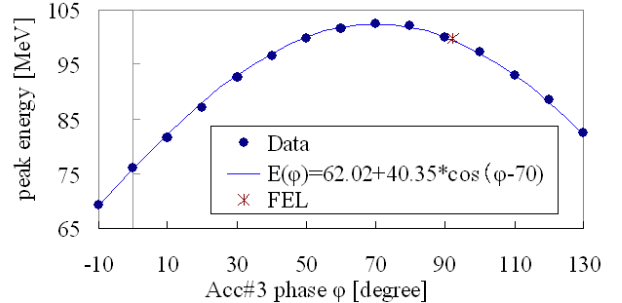


Figure 3: The electron peak energy depends on the accelerating phase. (*) means the point of the observation of the maximum FEL power.

The energy spread extracted from energy spectrum which measured was by changing the accelerating phase are shown in Fig. 4. From fitting experimental data,

$$\delta E^2 = 1.94 \times 10^{-7} g(\phi)^2 + 2.75 \times 10^{-4} g(\phi) + 0.397 \quad (16)$$

was obtained. The bunch length (FWHM) at the linac exit is 0.88 mm (2.9 ps) from $2\sqrt{\epsilon\beta_0}$ given by Eq. (6).

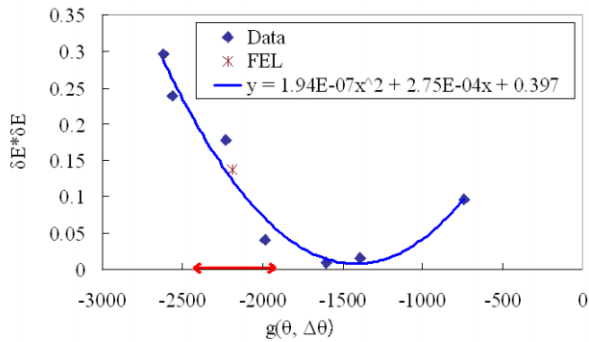


Figure 4: $g(\theta, \Delta\theta)$ and δE^2 as a function of accelerating phase and the ellipse parameters. (* means the point of the observation of the maximum FEL power. \leftrightarrow means the region of the FEL observed.)

Figure 5 shows the bunch length and the energy spread of the electron beam which supplied to FEL system. The central energy E_M is around 100 MeV and the macropulse current is about 80 mA. The point of (*) means the experimental data of which the highest power of the FEL was observed. The FEL gain was around 9% and the power was approximately 8 mJ/macropulse. The energy spread is 0.74% and the bunch length is 0.33 mm (1.1 ps) at this time. The peak current is expected to be 20 A or more.

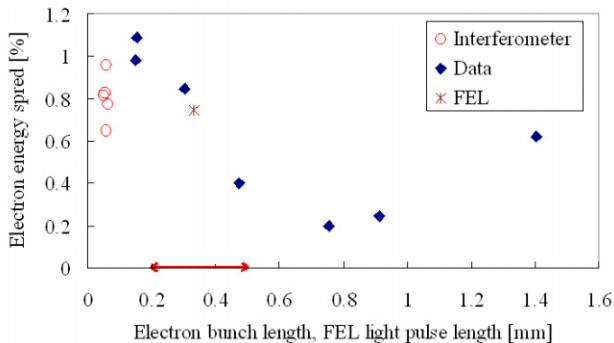


Figure 5: Electron bunch length and pulse length of the FEL light depending on the electron beam energy spread (FWHM). (* and \leftrightarrow mean the same as Fig. 4.).

Optical Pulse Length

The typical interferogram of the autocorrelation is shown in Fig. 6. The experimental beam parameter is the same as the bunch length measurements and the FEL wavelength is around 1.5 μm (3rd: 512 mm). The pulse length of the FEL light depending on the accelerating phase was measured when the FEL power is strong enough to get the interference wave from 5 to 8 mJ/macropulse. The results were shown in Fig. 5. The pulse length of the FEL light is around 0.06 mm (0.2 ps). The optical pulse length is 20% or less of the electron bunch length from the experimental results. The distribution of the electron beam which is high-density and attributable to the FEL oscillation could be narrow as interacting with

the optical pulse emitted from the electrons in the undulator.

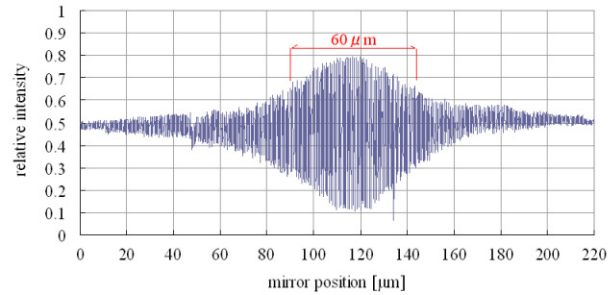


Figure 6: The typical interferogram of the autocorrelation.

CONCLUSION

It was confirmed experimentally that the bunch length at the FEL oscillation was 0.6-1.7 ps, by measuring the energy spread vs accelerating phase. The bunch length of the electron beam at the high-gain FEL amplification was around 1ps. This experimental result is consistent with the simulation [1].

The pulse length of the FEL light was extremely narrow to compare with the electron bunch length. The simulation about the correlation between the bunch length of the electron beam and the pulse length of the FEL light has proceeded at LEBRA.

REFERENCES

- [1] Y.Hayakawa et al., "Characteristics of the Fundamental and 3rd Harmonic FEL at LEBRA", Nucl. Instr. and Meth. A507 (2003) 404.
- [2] T.Tanaka et al., "Observation of SASE in LEBRA FEL system", To be published in Nucl. Instr. and Meth. A, Proc. of the 25th International Free Electron Laser Conference and 10th FEL Users Workshop (Tsukuba, Ibaraki, Japan, Sep.8-12, 2003).
- [3] K.Hayakawa et al., "Performance of the FEL Linac at Nihon University", Proc. of this Conf.
- [4] T.Tanaka et al., Proc. of the 1st Asian Particle Accelerator Conference (1998) 722.
- [5] K.Yokoyama et al., "Improvement of the PFN Control system for the Klystron Pulse Modulator at LEBRA", To be published in Nucl. Instr. and Meth. A, Proc. of the 25th International Free Electron Laser Conference and 10th FEL Users Workshop (Tsukuba, Ibaraki, Japan, Sep.8-12, 2003).
- [6] D.H.Dowell et al., "Longitudinal emittance measurements at the SLAC gun test facility", Nucl. Instr. and Meth. A507 (2003) 331.
- [7] H.Wiedemann, Particle Accelerator Physics 1, Springer (1993) 152.
- [8] C.Settakorn et al., "Impact of Experimental Conditions on Autocorrelation Bunchlength measurements", Proc. of the 2nd APAC, Beijing, China, 2001, p.728.

論文題名：FEL LINAC に於ける RF 系の改良によるビーム安定化に関する研究

論 文 要 旨

平成 14 年 1 月

申請者 日本大学大学院理工学研究科博士後期課程量子理工学専攻 横山 和枝

1. 序論

1.1 本研究の背景

日本大学電子線利用研究施設 (Laboratory for Electron Beam Research and Application : LEBRA) では、自由電子レーザー (Free Electron Laser : 以下 FEL と略す) を実用化するために、FEL 用電子源に用いる電子線形加速器 (linear accelerator : linac : 以下リニアックと略す) の性能改善を行っている。光利用実験を目的とした FEL 開発では、FEL を安定に発振させるため、電子ビームの安定化は特に重要な課題である。リニアックでは、高周波電場を使って電子を加速するので、電子ビームを不安定にしている最大の要因は、高周波 (radio frequency : 以下 RF と略す) の不安定性であると考えられる。したがって、リニアックでは、高品質なビームを実現するため加速用の RF が高品質でなければならない。

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、電子ビームのエネルギー広がりを抑え、安定な電子ビームを FEL に供給できるような RF ドライブシステムの開発を行うことである。本研究では、始めに、FEL システムに供給する電子ビームを不安定にしている主な要因として加速 RF の変動を測定した。RF 系、及び加速ビームの測定を行った結果、RF 出力の位相変動は、クライストロン用 RF ドライブ系に使用している半導体 RF アンプによってパルス内で起こるものと、周辺温度に伴う長時間のゆっくりとしたものがあることがわかった。これらの変動は、パルス内の電子ビームのエネルギーシフトを引き起こし、FEL システムに供給する電子ビームを不安定にしていた。そこで、RF 出力のこの二つの変動を抑制するような位相変動補償システムを開発・製作し、RF ドライブ系に導入する。

2. 自由電子レーザー用電子線形加速器の概要

FEL 発振には、厳しい電子仕様が要求される。FEL 発振の過程は、電子ビームがアンジュレータと光空洞共振器からなる FEL 発生装置で光電場を増幅するものである。アンジュレータに入射された先発の電子ビームが磁場の働きで蛇行運動したとき加速度を受けて放射する光

を共振器に蓄積し、後続の電子ビームが同様に蛇行運動するとき、電子ビームの電荷が蓄積光の電場に作用して、光電場を増幅する。電子ビームの空間的な広がりも光空洞の蓄積光の空間的な広がりと同じ程度でなければならない。FEL 利得は原理的に小さいので、尖頭電流が大きく、パルス持続時間（パルス幅）が長い電子ビームが必要である。

リニアック装置の構成は、RF パワーを発生させるためのクライストロン、電子ビームを発生させるための電子銃、ビームを速度変調して集群（バンチ）させるバンチャー系、バンチビームを高エネルギーまで加速するための加速管、及び加速されたビームを伝送するためのビームトランスポートからなる。電子銃では、静電場（本研究施設では DC-100kV）で直流電子を引き出す。次に、プリバンチャー及びバンチャーで位相変調して一定の加速位相に集めるとともに幾分加速（約 5MeV）したのち、通常の加速管で所定のエネルギーまで加速する。この場合、バンチャーの出口で電子の速度は既に光速の 99%以上になっているので、その後の加速ではバンチ幅が大きく変化することはない。原理的には、電子の進行方向に電子の成分をもつ進行波の位相速度を、電子がいつも加速位相に乗って、加速電場の作用をうけるように調整することによって、効率よく加速を行う。リニアックからの電子ビームは、RF の一波長内にバンチした電子パルスの列である。FEL 発振させるために電子ビームが満足しなければならない条件を作り出すためには、電子パルスの列が RF のパルスごとに同じ特性で一定間隔に生成されていなければならない。

FEL 用電子ビームのエネルギー広がり条件は、アンジュレーターの周期数から上限がきまる。レーザーの高利得のために、ビームパルス内で、エネルギー広がりが 0.5%以下に揃ったビームにすることが、加速器の目標値である。

3. RF ドライブシステム

リニアックは、RF を利用して加速管の周期構造内に加速電場を作り、電子銃から静電場で引き出した直流電子を加速する。加速管に供給される大電力 RF の位相変動は電子ビームエネルギーの時間変動とバンチ間隔の変動につながる。RF 源の位相と電力レベルは加速ビームのエネルギー広がりに関わるため、安定性を要求する。バンチ間隔の変動は、電子パルスと光パルスの重なりを変えるので、FEL 発振を不安定にする。そこで、ビーム安定性に影響する RF ドライブシステムの主要パラメータについて評価した。

RF ドライブシステムでは、発振器で数 mW 程度の RF パワーを作り出し、この信号を 2 つのクライストロンドライブ系に分配する。独立した RF アンプでそれぞれ 800W に増幅し、最後にクライストロンで 20MW 程度に増幅される。発振器の連続振幅（continuous wave : 以下 CW と

略す) 信号をリファレンスシグナルとして、RF アンプ出力とクライストロン出力の RF 位相と振幅を 2 台のクライストロンドライブ系において測定した。位相測定は、パルス内の変動と長時間のパルス間におけるゆっくりとした変動に対して行った。

その結果、RF 出力の 20 μ s のパルス内で位相ドリフトは 1 号機クライストロン側で 5 度[°] あり、2 号機側では 12[°] であった。また、RF アンプの位相変化に伴って 3 度の位相変動があった。この位相変動の結果として現れるエネルギー変動は、運動量アナライザの下流のコアモニターでビーム電流を測ることで確認された。エネルギースペクトルを測定した結果、パルス内でのエネルギー広がり観測され、FEL システムに供給される電子ビームのエネルギーも長時間にわたってゆっくりとした変化をしていることがわかった。

4. 位相変動補償の方法

RF 系、及び加速ビームの測定を行った結果、RF 出力の位相変動は、クライストロン用 RF ドライブ系に使用している半導体 RF アンプによってパルス内で起こるものと、周辺機器の温度変化に伴う長時間のゆっくりとしたものがあることがわかった。これらの変動は、パルス内の電子ビームのエネルギーシフトを引き起こし、FEL システムに供給する電子ビームを不安定にしていた。FEL 発振のためには位相変動を抑制しなければならないことが明らかになった。そこで、加速 RF の位相制御によって、ビームのエネルギー広がりを抑え、同時にバンチ間隔を一定にしてビームの安定性を考慮した RF ドライブシステムの開発を試みた。

位相補償システムの方式は、パルス内の変動と長時間のパルス間におけるゆっくりとした変動を同時に取り除くことを目的として検討した。パルス内の位相変動補償は、パルス毎に波形が再現されるので、ファンクションジェネレータによって、フィードフォワードの補償信号を作成する方式にした。また、長時間の位相変動補償は、次のパルスを補償するような遅いフィードバック回路の方式にした。ファンクションジェネレータとフィードバック回路からのシグナルが結合されて、パルス電圧で高速移相減衰器 (Phase shifter / Attenuator : 以下 ϕ/A と略す) に送られ、位相制御を行う。位相変動補償回路は、高速 ϕ/A に送信される信号を作る。位相変動補償回路によって作られた位相補償信号で高速 ϕ/A を制御することによって位相変動補償を実現した。

5. 位相変動補償の結果

RF ドライブに位相変動補償回路を導入した結果、2 本のクライストロンの位相ドリフトはパルスの立ち上がり 2 μ s を除いた 18 μ s のパルス持続時間で約 5 度から 0.5 度に、約 12 度から 0.5 度にそれぞれ減少させることができた。温度変化と関係がある RF アンプの長時間のパルス間

位相ドリフトは、 ± 0.25 度に減少し、クライストロンの長時間の位相変動も抑制された。電子ビームのエネルギースペクトルを測定した結果、パルス内でのエネルギー広がり、約 4MeV から約 0.4MeV に改善された。また、長時間の電子ビームのエネルギー変動も改善された。さらに、エネルギー広がりによる FEL 光の強度の違いも確認した。

6. 考察

位相変動は改善されたが、FEL システムに供給される電子ビームを不安定にしている要素が他にあることがわかった。そこで、リニアックの運動量分析する前のビームカレントを長時間測定した。その結果、加速 RF の変動には関係のない他の要因があることがわかった。

FEL 発振を安定にするためには、FEL システムに供給される電子ビームの質が常に同じでなければならない。また、光共振器空洞の距離は各発振波長に応じた正確な間隔を維持し続けなければならない。したがって、リニアックばかりではなく、FEL 装置にも工夫が必要である。

7. 結論

電子リニアックを用いた FEL 用電子ビームを高品質化するために、加速 RF の変動を測定した。特に、RF の二つの位相変動に注目して、位相変動補償システムを開発・製作し、RF ドライブ系に導入した。

位相変動補償回路を作成し、クライストロン RF 出力位相のパルス内変動は 1 度/20 μ s に、クライストロン入力位相の長時間のゆっくりとした変動は周辺温度に関係なく、 ± 0.3 度に抑制することに成功した。また、電子ビームのエネルギーシフトは 10 分の 1 に抑えられ、安定した電子ビームを FEL システムに供給できるようになった。加速器の収束系やプレバンチャー、バンチャーの移相器の調整によって、ビームパルス内のエネルギーシフトは 0.15MeV、このときのエネルギースペクトル半値全幅は平均 0.4% になった。加速器のエネルギー広がり目標値は達成された。

2001 年 5 月に 1.5 μ m での FEL 発振に成功した。

論文題名：高輝度マルチバンチ高周波電子銃用光陰極特性の研究

論 文 要 旨

平成 16 年 7 月

申請者 日本大学大学院理工学研究科博士後期課程量子理工学専攻 菅野 浩一

1. はじめに

自由電子レーザー (FEL)、リニアコライダーや逆コンプトン散乱 X 線源のように粒子同士が衝突する装置では、非常に良質な電子ビームが必要であり、その開発が活発である。そのような良質な電子ビーム発生には、高輝度 (低エミッタンス・大電流) 電子ビームが得られる高周波電子銃が有効である。高周波電子銃は直流電子銃に比べ高電場加速が可能のため、電子のエネルギーが相対論領域になるまでの時間が短い。従って、空間電荷による影響を受けにくく、低エミッタンス電子ビームを得ることが可能である。日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、すでに赤外領域 FEL の発振に成功し、更に波長領域 $0.885 \sim 6.13 \mu\text{m}$ の連続可変発振に成功している。現在、LEBRA では、 $0.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$ の紫外・可視光領域 FEL の発振・利用も目指しているが、FEL の発振波長が短波長ほど低エミッタンスで大電流の電子ビームを要求されるため、高周波電子銃の開発を進めている。また、このような短波長 FEL は利得が小さく、レーザーが飽和にいたるまでの時間が長い。従って、マクロパルス幅の長い電子ビームが必要である。この理由から、LEBRA の FEL 用リニアックは $20 \mu\text{s}$ と長いマクロパルス幅で運転している。しかし、熱陰極高周波電子銃では、高周波電場の逆加速位相によって、電子が陰極に衝突するバックボンバードメントが発生し、陰極表面の温度が上昇する。その結果、マクロパルス後半では放出電流が急激に増大し高周波空洞及び加速管の電子ビーム負荷が増大して、加速エネルギーが減少し、マクロパルス幅が長い電子ビームでは加速エネルギーの安定性が欠落する。この欠点を補うために、短パルスレーザーによる光電効果を利用した光陰極を用いてバンチした電子ビームを引き出し、バックボンバードメントが発生しないようにすることが試みられている。光陰極は光電子励起用レーザーとそれを陰極へ輸送するための光学系を必要とする。そのため、熱陰極に比べシステムが複雑になるが、バックボンバードメントをなくすることができる上に、大きなピーク電流を得ることができるなどの利点がある。LEBRA では光陰極高周波電子銃のために、加速器の上流に Nd:YAG レーザーシステムとそれを稼動するためのレーザー発生室が設けられており、光陰極の採用は現実的な対応策であるといえる。

高周波電子銃用光陰極には、Cu や Mg などの電子放出特性が長時間保てる純金属陰極

と Cs₂Te に代表される高量子効率材料のアルカリ系金属が主に検討されている。純金属は仕事関数が高いため、より波長が短い(光子エネルギーの大きい)レーザーが必要である。一般に、短波長レーザーの出力は低い。従って、光電子発生数が小さい。アルカリ系金属は仕事関数が低く、量子効率が高いので、大電荷を得るためによく使用されているが、電子放出特性を長時間維持することは難しく、大気にさらすことができない、蒸気圧が高く不安定であるなど取扱が非常に難しい。一方、ホウ化物は酸化物について低い仕事関数を持つ。六ホウ化ランタン (LaB₆) は 2~3eV であるため、Nd:YAG レーザーの第三高調波(波長 0.355μm、光子エネルギー3.5eV)の使用が可能である。さらに、LaB₆は酸化物や単原子層陰極に比べて活性化操作が容易でありイオン衝撃や残留気体の影響も受けにくく、一旦活性化後に大気にさらしてしまっても再使用が可能である。LaB₆表面の酸化物の蒸気圧は LaB₆ に比べ高いので加熱することで容易に除去が可能であり、常時高温にすると洗浄表面に近い状態が保てる。また、加速器用光陰極では大電荷を得るため、高出力のレーザーを照射するので、レーザー照射に対する耐久性も重要である。高量子効率のアルカリ系金属や酸化物陰極に対して、LaB₆は高融点物質であり耐久性が高いことから、光陰極用材質として優れた特徴を持っている。

LEBRA のような長マクロパルスマルチバンチ電子ビーム生成用光陰極には耐久性、安定性が陰極選定の重要な要素となる。アルカリ系金属は大電荷マルチバンチ電子ビーム発生用光陰極としてよく用いられているが、寿命が短く、取り扱いに難があり、短波長自由電子レーザー発振・応用のための光陰極としての適応性が欠けている。以上の理由から、LaB₆に期待が寄せられている。そこで、日本大学紫外・可視光領域 FEL 用電子銃の高輝度化のため、高輝度・長マクロパルスマルチバンチ電子ビーム発生が可能な光陰極の材質として LaB₆の採用を試みた。

2. マルチバンチ光電子ビーム発生実験

2.1 実験内容と構成

LaB₆から得られる光電子放出電荷量測定を、直流電場によって光電子を引き出すことで実施した。光電子励起レーザーは陰極の電子放出面に対して垂直に入射(直入射)した。この実験により、光電子放出電荷量のレーザーエネルギー量依存性を測定し、量子効率を求めた。

光電子励起用レーザーには、Nd:YAG レーザーの第三高調波を使用した。実験で使用したレーザーシステムは、CW-Modelocked Nd:YAG レーザー発振器で得られた波長

1.064 μm 、マイクロパルス幅 50ps、繰り返し 89.25MHz のレーザー光を、Nd:YAG レーザー増幅システムを用いて高出力にし、非線形結晶を用いて第三高調波を得ている。さらに、LEBRA のリニアック運転モードに合わせるため、マクロパルス幅 20 μs 、繰り返し 12.5Hz のマクロパルス切り出しを行なっている。

実験は真空度 10^{-6}Pa 台に保たれた真空チェンバー内に、陽極との距離が 3mm となるように LaB₆ 陰極を設置した。光電子励起光を直入射するため、陽極には切かきがある。チェンバーをグラウンドとし、グラウンドに対して陽極に最大 3kV の正電位をかけることができる。また、陰極はグラウンドに対して電氣的に浮いている。光電子電流は、陰極とグラウンドの間に設置したコンデンサーに一時的に電荷として貯め、そのコンデンサーと並列に設置した抵抗に流れる電流として検出する。

2.2 実験結果

陰極温度が室温における光電子放出の照射レーザーエネルギー量依存性を測定した。レーザーの照射エネルギー量を上げると、それに比例した光電子放出電荷量が得られた。しかし、1.2mJ/macropulse 以上を照射するとエネルギー量の増加とともに急激に放出電荷量が上昇した。本実験では、レーザースポットサイズを各エネルギー量に対して一定の条件で実験を行っており、エネルギー量を上げるとレーザーエネルギー密度が上がる。その結果、レーザーによる陰極加熱が電子放出に寄与したと考えられる。この時のレーザーのピーク強度は 4.7MW/cm² であった。一方、物質の量子効率測定は放出電荷量と照射エネルギー量が比例の関係から求める必要がある。従って、4.7MW/cm² 以下における実験結果から量子効率を求めたところ、室温では 4.79×10^{-5} であることがわかった。同様に陰極温度 1243K 及び 1563K の場合の量子効率を測定し、それぞれ 5.70×10^{-5} 及び 7.90×10^{-5} と得られ、室温に比べ量子効率の改善が見られた。

3. 紫外-可視光領域 FEL 用陰極への適用可能性

FEL では発振波長が短くなるほど利得が小さくなるため、紫外線や可視光のような短波長発振にはより大きいピーク電流が要求される。光陰極からの放出電荷量はレーザーのエネルギー量と量子効率によって決まる。日本大学光陰極用 Nd:YAG レーザーシステムで利用できる第三高調波のエネルギー量は、44.8 $\mu\text{J}/\text{micropulse}$ である。この場合、ピーク強度を、量子効率を測定した領域 (<4.7MW/cm²) にするには、レーザースポットサイズを 0.2cm² 以上にすればよい。室温における LaB₆ の量子効率は 4.79×10^{-5} であり、このシステムにおいて得られる光電子放出電荷量は 611pC/bunch となる。3.5ps にバンチ圧縮する

ことを考えれば、ピーク電流が 170A のマルチバンチ電子ビームの発生が可能になる。この値は大阪大学における誘電体多層膜ミラーを用いた波長 0.3 μm の FEL 発振実験で使用された電子ビームのピーク電流値 60A を上回り、紫外-可視光領域 FEL 発振条件を満たしているといえる。また、現在の LEBRA のリニアックに関するピーク電流 20A に比べると 8 倍以上の向上が予想される。

4. まとめ

紫外-可視光領域 FEL 用高輝度電子源の光陰極として、LaB₆ の優れた性質に着目し、適用に関する基礎的な研究を行った。そして、LaB₆ 陰極による長マクロパルスマルチバンチ電子ビーム発生と光電子励起レーザーを直入射した場合の量子効率の測定を行った。陰極温度が室温における量子効率は 4.79×10^{-5} で、陰極温度を 1563K に上げると 7.90×10^{-5} に量子効率が改善される。さらに、室温の LaB₆ 陰極と日本大学光陰極用 Nd:YAG レーザーシステムを用いて放出可能なピーク電流は、170A と見積もられた。これより、陰極温度が室温でも、現在の LEBRA のリニアック入射器に比べて、十分大電流化が達成でき、紫外-可視光領域 FEL 発振に十分な電流が得られると推測できた。

論文題名 : Sバンドクライストロンの長パルス化に関する研究

論文要旨

平成16年7月

申請者 日本大学大学院理工学研究科博士後期課程量子理工学専攻 境 武志

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)では0.3~6.0 μm までの紫外から赤外領域の自由電子レーザー(FEL)発振を目標としている。特に短波長FEL発振では長パルス電子ビームが要求され、LEBRAではRFパルス幅20 μs の運転が必要となる。高周波源のクライストロンにはKEKと共同研究を提携して、フォトンファクトリーの入射器に使用していた三菱電機製PV-3030A1を使用している。このクライストロンは短パルス用で、仕様がパルス幅6 μs 、出力電力33MWである。LEBRAでのクライストロン要求仕様は、最大出力電力が30MW、パルス幅が20 μs であり、パルス幅を10 μs より広げると、高周波窓破損が続出し、長パルス運転に適応できなかった。一方、KEKの短パルス運転では、高周波窓の平均寿命は1.9万時間に達しているが、LEBRAの10 μs を超える運転では、数百から千数百時間程度でクライストロン窓は完全に破損した。クライストロンは高周波出力窓破損が致命的な損傷となるので、長パルス用クライストロンは出力窓を2個設けて、出力窓の負担軽減を図っている。したがって、出力窓1個のクライストロンでは、出力電力が20MW、パルス幅が20 μs を超える大電力長パルス運転例は無かった。

本研究目的は、高周波出力窓1個のクライストロンで出力電力が30MW、パルス幅20 μs で安定に動作させることである。主な研究テーマは、

- ・ 短波長FEL発振のためのクライストロンの長パルス化
- ・ 長パルス運転時に発生する、クライストロン窓の破損問題の改善

である。また、クライストロン窓破損の原因が、多数のクライストロン窓破損の経緯から、窓周辺の排気能力不足にあると想定し、排気強化した結果、パルス幅20 μs の長パルス運転が可能となり、その改善に至ったメカニズムを追求した。また、排気強化の重要性を考慮して、短パルス大電力クライストロンPV-3030A3をベースに、パルス幅20 μs を超える長パルス運転を目的とする高周波出力窓1個の30MW大電力クライストロンPV-3040Nを製作し、新クライストロンのコンディショニング、入力特性、電圧特性を既設のクライストロンと比較し、その効果を調べた。

2. クライストロン高周波窓の破損原因

破損高周波窓を詳細に調べた結果、セラミック面にフランジとセラミック間に発生した放電による痕が確認された。高真空中でベーキングしたセラミックは放出ガスを低減するが、セラミックは多孔性の磁器である事から、何らかのきっかけで表面にわずかな損傷が発生するとガス放出等がおき、放電が誘発されセラミック表面が熔融することがある。この状態が更に継続してクラックが表から裏へ成長し、セラミックに貫通孔が生じるものと想定された。セラミック高周波窓はクライストロン故障時等の交換作業の軽減を考慮して、加速管とクライストロンを結ぶ導波管にもセラミック高周波窓を挿入している。この挿入窓はクライストロン出力窓と構造、材質は同じで、さらに透過電力もほぼ同じである。しかし、この窓の故障率は極端に低くかった。またKEK入射器では、加速構造システムがLEBRAと同じであるが、どちら側の窓も同程度破損が起きており、このように片側が集中して壊れることは起きていない。これらの破損の原因として、加速管入力カップラーで反射が発生しやすいことから、クライストロン窓部分に反射によって定在波が立ち電界が高くなることが考えられた。しかし、クライストロン窓と挿入窓のどちらもほぼ同じ位相条件であるため、これが原因とは考えにくかった。一方、クライストロン窓を主に排気している60l/sイオンポンプまではクライストロン窓から約2.6m離れているが、加速管側窓は約1mしか離れていない。この事実より、クライストロン窓の破損が、挿入窓より多いのは、真空度の違いに起因していると想定した。即ち、窓の破損は、窓からのガス放出時に真空度の違いや、真空回復に原因があると推定した。

3. コンダクタンスの評価

クライストロンに接続される導波管形状を考慮に入れたコンダクタンスから、クライストロン窓での実効排気速度をおよそ8.1l/s（気温20℃の場合）、挿入窓部分の実効排気速度を約16.7l/sと見積もられた。この実効排気速度を用い導波管及び窓からのガス放出量を $10^{-6}\text{Pa}\cdot\text{l}/\text{s}\cdot\text{m}^2$ と仮定し、真空度が正常時の 10^{-6}Pa 程度から短時間に 10^{-4}Pa まで悪くなった場合を想定し、真空度の回復時間を比較すると、クライストロン窓付近は挿入窓に比べて倍以上の時間を要している。またクライストロン窓と、挿入窓管の導波管の正常時における圧力分布を計算すると、挿入窓面に比べクライストロン窓表面付近は約1.5倍高く、真空度が悪い。

排気速度、窓表面の真空度の比較から、クライストロン窓表面付近では、挿入窓面に比べ、真空の回復時間が遅く、さらに、正常時における真空度が低い。そこで、クライストロン窓付近での排気速度を上げ、かつ、窓表面での真空度を下げるためにクライストロン下流側の排気強化を行った。

4. クライストロン下流側排気強化と効果

クライストロン窓のセラミック表面から約30cmの位置に8l/sイオンポンプを2台設置し、排気強化を行った。これより、クライストロン窓付近での実効排気速度は約19.5l/sまで増加した。先ほどと同様に真空度が短時間に悪化した場合を想定し計算を行うと、回復時間は半分以下となり、加速管側窓よりも早く回復するようになる。また下流側の真空度は、クライストロン窓表面付近では強化前に比べ約1/3まで下がった。即ち、排気速度向上に加え、正常時の真空度も合せて改善された。

排気強化により、コンディショニングと加速器運転を合わせて約1500時間を行った結果、当初目標としていた、パルス幅20 μ s、繰返し12.5Hz、出力電力20MWを達成し、高周波窓1個のクライストロンにおける世界最初の大電力、長パルス動作に成功した。

LEBRAにおける1997年のリニアック建設当時のクライストロン使用状況を比較すると、排気強化後からクライストロン出力窓の故障は格段に減り、また、2001年5月には波長1.5 μ mのFEL発振に成功し、長パルス運転の安定動作が促進した。

5. 大電力クライストロンの製作と動作試験

これまで使用しているクライストロンPV-3030A1では、導波管部分から内径15mmの排気パイプを直角に2回曲げ、出力窓近傍の8l/sイオンポンプで排気している。このためにコンダクタンスが小さく、実効排気速度が1.3l/sと著しく小さい。そこで排気パイプの口径を約2倍、長さを1/4にした場合のコンダクタンスで排気速度を評価すると、実効排気速度は1.3l/sから約3.7倍の4.8l/sに増強できる。出力窓でガス放出が発生し、正常時圧力（ 10^{-7} Pa程度）から短時間に 10^{-4} Pa程度に真空度が悪化した場合、1/3以下の時間で真空度が可能となる。これは3030A1に比べ、クライストロンの内部真空度の回復時間が短縮され、クライストロンコンディショニングが軽減されることが予測された。

新クライストロンは、旧クライストロンと同一寸法にすることを基本方針にした。これは、既設のヒータートランス、パルストランス、クライストロン窓以降の導波管も変更無しで行える事が必須条件となるためである。そこでKEKで開発された3030A1と同寸法で、高出力のクライストロン3030A3をベースに製作し、PV-3040Nクライストロンと命名した。各寸法はほぼ3030A1と同じであるが、真空引き口は太く短くし、電子銃は高出力用を用いるように設計した。

三菱電機には長パルスモード(パルス幅20 μ s)用のテストベンチが無いため、パルス幅4 μ sでの短パルスモード動作試験を行い、LEBRAでは長パルスモード実証試験を行った。短パルスモード試験の結果、パルス幅4 μ s、繰返し50Hz、入力電力250Wに対して、出力電力42.3MWが

得られ十分な出力特性が得られた。長パルスモード試験では、時間的制約から、パルス幅 $20\mu\text{s}$ 、出力電力 20MW を当面の目標にRFコンディショニングを行った。370時間のコンディショニングにより、出力電力 20MW を達成し、パルス幅 $20\mu\text{s}$ 、繰返し 5Hz 運転では、出力電力が 21.1MW まで達した。これまで使用していた3030A1クライストロンと比較して、パルス幅 $20\mu\text{s}$ の安定動作を達成するのにコンディショニングを1500時間以上必要としていたことに比べ格段に早く達成し、排気強化等の効果が認められた。更にコンディショニングを進めることにより、出力電力 30MW に達成することが期待される。

6. まとめ

1997年にリニアック建設を開始以来、10台のクライストロン高周波出力窓が破損した。その原因として挿入窓に比べ、クライストロン窓では窓表面のガス放出により真空が悪化したとき、真空度回復に倍以上の時間を要していた。そこでクライストロン出力窓周辺の排気強化を行い、挿入窓側と同程度まで排気能力が強化され、また正常時のクライストロン下流側の真空度も大幅に改善した。その結果、加速器運転時の微小なガス放出に対する真空回復時間が大幅に短縮した。更に1500時間のコンディショニング後に、パルス幅 $20\mu\text{s}$ 、繰返し 12.5Hz 、出力電力 20MW の安定動作を達成し、高周波出力窓1個のクライストロンの長パルス、大電力動作に成功した。

また、主に排気強化を行い新しく製作した3040Nクライストロンはこれまで使用していたクライストロンに比べ、早急に長パルスで安定な稼動が可能となった。これまで大電力クライストロンでは、出力電力が 20MW 、パルス幅 $20\mu\text{s}$ 以上の長パルス運転では、高周波出力窓が2つで対応していたが、コストや場所等の制約が大きかった。この研究開発の結果から、高周波出力窓1個のクライストロンでも長パルス運転が可能であることが実証された。

論文題名：非破壊型ビーム位置モニターシステムの開発研究

論文要旨

平成 17 年 1 月

申請者 日本大学大学院理工学研究科博士後期課程量子理工学専攻 石渡 謙一郎

1. はじめに

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設では、高エネルギー加速器研究機構との共同研究により赤外から紫外線領域における自由電子レーザー(FEL)の発振にむけて電子線形加速器(リニアック)の性能改善および高度化が進められ、現在、赤外領域における FEL の利用実験が行われている。加速器の性能はビーム計測を行って初めて知ることができ、ビームモニターは加速器のビーム輸送ラインの調整運転、実用運転、故障時の診断になくてはならない装置である。ビーム計測には破壊型計測と非破壊型計測があり使い分けされている。

以前、可視から紫外線領域における FEL 発振実験を行っていたが、アンジュレーター
の磁場の劣化により使用が不可能になった。これはビーム位置とビームの分布を測定する
破壊型の蛍光板モニターで発生する放射線が主な原因であった。可視から紫外 FEL 用ア
ンジュレーターが使用不可能となったので赤外 FEL 用アンジュレーターに変更した際、
アンジュレーター入口・中央・出口に設置されていた蛍光板モニター3 台を取り外した。
これにより FEL 共振器軸のビームラインにはビーム軌道をモニターできるものが無くな
ったため、破壊型の蛍光板モニターに代わる非破壊型ビーム位置モニター(BPM)を設計・
製作し、リニアック出口部およびアンジュレーター入口・出口にそれぞれ 1 台ずつ計 3 台
設置した。この BPM はビーム軌道の計測に非常に有効であった。その後、加速器直線部
に 6 台・FEL ビームラインに 4 台・X 線ビームラインに 3 台の計 13 台に増設を行った。

本研究の目的は、BPM を用いてリニアックの運転・調整時における電子ビーム位置を
非破壊的に複数の場所でモニターすることにより電子ビーム軌道を安定させ FEL 発振を
容易にするシステムを構築することである。

2. 非破壊型ビーム位置モニター

導入した BPM は集群した電子ビームの電荷分布の重心位置を非破壊的に計測する装置
である。リニアックの加速周波数 2856MHz のマイクロ波(RF)で集群した電子ビームが
BPM を通過する際、電子ビームが誘起するウエーク場を電極でとらえビーム位置を測定

する。BPM はストリップライン型の電極を、高周波同軸ケーブルの特性インピーダンス 50Ω に整合させ、また、電極長を加速周波数 2856MHz の $1/4$ 波長の長さで共振するように設計した。また、水平方向と垂直方向に向かい合うように 4 電極から構成されている。各電極からの信号は放射線の影響が小さい場所に高周波同軸ケーブルを用いて伝送され、RF 検波器に入力される。ビーム位置はこの検波電圧の関数として求められる。この BPM の利点は (1)ビーム位置を 0.1mm 以内の高精度で測定できる、(2)ビーム位置の測定とビーム使用とが両立できる、(3)パルス内のビームの挙動がわかる、などがあげられる。しかし欠点は蛍光板モニターのようにビームの断面分布が測定できない点である。

3. BPM の較正とビームラインへの設置

BPM の較正は、直径 0.5mm のタングステンワイヤーに 2856MHz の RF を伝送して擬似ビームをつくり、ワイヤーを中心軸に、BPM を 1mm ステップで $\pm 5\text{mm}$ の範囲を格子点状に移動させ、4 電極の出力を同時に計測し、その信号からビーム位置を換算して行った。また、この較正では、BPM の中心から半径 5mm の範囲内で換算誤差を 0.05mm 以内にする事ができた。

リニアック直線部の BPM 3 台は四極電磁石近傍にトランシットでその位置を確認しながら設置したが、電子ビームにとっては四極電磁石の磁場中心が軌道に対する中心となるために、その軸からずれた設置は誤差をとまなう。ビームが四極電磁石の磁場中心を通過すれば磁場を変化させても、下流の BPM ではビーム位置の変化は観測されない。このとき、四極電磁石近傍に設置した BPM で計測したビーム位置が磁場中心となる。この原理を用いて電子ビームによる四極電磁石の磁場中心と BPM 中心とのズレを測定した。測定の結果、1 台の水平方向を除き、四極電磁石の磁場中心と BPM 中心とのズレは 0.4mm 以内におさまっていることがわかった。

4. FEL ビームラインに設置した BPM の有効性

電子ビームはリニアック直線部から FEL 発生装置へ 45° 偏向電磁石 2 台と四極電磁石 4 台とを用いて輸送され、この輸送系では 90° 偏向後のビームを無分散に設定できるようにパラメーターを設定できる。

無分散パラメーターは、FEL ビームラインのアンジュレーター入口に設置した BPM の各電極の検波波形をオシロスコープで測定することにより設定できる。分散が残っている場合、電子ビームは 90° 偏向系通過後エネルギー変動によりビーム位置が変動するため

BPM の水平対向電極の検波波形が逆相になるので、同相になるようにビーム輸送系のパラメーターを調整すると、ビームは無分散に設定されたビームの輸送系を通り安定する。また、無分散にビーム輸送系が設定されるとアンジュレーター入口の BPM で計測されるパルス内のビーム位置の変動は水平方向・垂直方向ともに 0.2mm 以内になっている。このような場合は FEL 発振に長パルスを有効に使用することが可能になり、FEL 発振は飽和し安定になる。

また、FEL では光共振器中に蓄積された光の中心軸を後続の電子ビーム軌道と重ね合わせることが発振の条件となるため、高精度のビーム軌道計測が必要であり、アンジュレーターの入口と出口に設置された BPM によるビーム軌道の同時観測は FEL 発振を容易にしている。

5. 高調波によるビーム位置算出への影響

FEL ビームライン 90° 偏向は 2 回の 45° 偏向によって遂行されるが、45° 偏向部に設置された BPM のビーム位置計測はエネルギー変動の測定に有効である。しかし、偏向部に設置されているスリット幅を調整するとスリットから 338mm 上流部に設置されている BPM の RF 検波出力が異常になる現象が観測された。これはバンチされた電子ビームがスリット周辺でマイクロ波を誘起し、そのマイクロ波が上流に伝播して BPM の信号に加算されることが原因と想定された。ビームダクトは円形導波管でありその遮断周波数は 4540MHz であることから、加速周波数 2856MHz はビームダクトを伝播しない。従って検波出力の異常は高調波によるものと想定された。これを確認するため、検波器の直前に 4.2GHz が上限のローパスフィルターを設置し、再度スリット幅を調整しながら検波出力を測定した。その結果、高調波はローパスフィルターによって除去され、ビーム位置の読み取りが正常になり、エネルギー変動の測定が可能となった。

6. ビーム位置の計測システム

ビーム軌道の調整を容易にし自動調整を可能とするために、リニアック直線部および FEL ビームラインに設置された BPM 10 台の全パルスのビーム位置を記録・表示を行うシステムを開発した。リニアック直線部の BPM 6 台では 20 μ s のパルス内のビーム位置変動は微少でありビーム位置の検出は、パルス内の 1 点で行えば十分である。FEL ビームラインの BPM ではパルス内において変動するが計測点を 1 点に絞ってビーム変動を測定することにした。

各 BPM の各電極の検波信号を高速オペアンプに入力し 20 倍に反転増幅する。この信号は、ビームパルス幅 20 μ s の中心時点でサンプル/ホールドされる。BPM 10 台 \times 4 電極のサンプル/ホールドされた信号の電圧は PCI バスに接続された 12 ビット AD 変換ボードでデジタル化され PC に取り込まれる。このように PC に取り込まれたデータからビーム位置を計算し、さらに、記録・表示するシステムを製作した。

PC 画面には各 BPM の 4 電極の検波電圧、現在のビーム位置、ビーム位置の履歴が表示できた。これにより、ビーム位置の常時モニターが可能となり、ビーム軌道の調整が非常に容易になった。

7. まとめ

非破壊型 BPM を 13 台設計・製作し、擬似ビームを使って較正後、ビームラインに設置した。この BPM を用いることによりビーム位置・軌道の常時モニターが可能となった。また、パルス内におけるビーム位置の変動もモニター可能となった。

45° 偏向部に設置した BPM を活用し、そのビーム位置計測により電子ビームのエネルギー変動が測定可能となった。

FEL ビームラインに設置した BPM は、90° 無分散偏向系の設定を容易にし、FEL 発振のビーム特性の診断およびアンジュレーター内のビーム軌道調整に重要な役割を果たしている。

ビーム位置の計測システムは、2Hz の電子ビーム繰り返しで、常時、各 BPM におけるビーム位置の同時計測が可能になり、これを PC 画面に表示し、ビーム軌道の調整を容易にしている。

さらに、BPM の導入により、電子ビームの安定輸送が可能になり FEL 発振を容易にしている。