電子線利用研究施設の現状

平成１6 年度

量子科学研究所運営委員会報告書

平成１６年6月４日

佐藤　勇

1. はじめに

日本大学では短波長FELの実用化を目標に、1994年から電子加速器の建設を開始した。1998年1月に電子ビーム加速、同年2月にアンジュレーター放射光観測したが、電子ビームが所定の性能が得られず、不安定であり自由電子レーザーは発振に至らなかった。電子ビームは不安定で且つエネルギー分散が大きく、アンジュレーターの永久磁石は放射線損傷で劣化した。又、短パルス用クライストロンでは所用の長パルス持続時間が確保できないために短波長FEL発振は不可能であった。そこで、高エネルギー加速器研究機構（KEK）と共同研究を提携し、クライストロンの提供を受け短パルス・クライストロンの長パルス化に着手し、加速器の高性能化を進め、2000年1月、短パルス・クライストロンの長パルス運転に成功した。又、同年3月、近赤外線用アンジュレーター用永久磁石が納入された。同年4月には、私立大学学術研究高度化推進事業の研究拠点に選定され、「可変波長高輝度単色光源の高度利用計画」が学術フロンティア推進事業として、5年計画でスタートし、実験棟増築のために2000年7月から約7ケ月間、加速器運転を停止した。この期間を利用して、2000年度には、加速器運転を容易するための大電力立体回路、ビーム輸送系、高周波位相シフト等の改善、アンジュレーター組み立て作業を行った。2001年2月、加速器運転を再開し、自由電子レーザーシステムに輸送される電子ビームの性能が向上し、5月には普通の電子線形加速器による1500nmのFEL発振に成功した。しかし、電子ビームは安定性を欠き、FEL発振は一過性で飽和現象は確認できなかった。2002年度には、自由電子レーザー発振の不安定の原因を追究し、クライストロンパルス電源やビーム電流の変動、高周波増幅器の位相シフト、レーザー発生装置の機械的変形等の不安定要因を削減する作業を行った。一方、研究施設を共同利用実験に使うため、ビーム加速中でも実験室で準備作業が出来るように、放射線管理区域の変更申請を行い、2002年12月に放射線施設検査を受け2003年4月から定常的に使用可能になった。同年6月に、レーザービームラインの途中に、ビームエックスパンダーを設置して自由電子レーザー発生装置と新実験棟の各レーザー照射装置はビームダクトで接続した。一方、自由電子レーザー発振を容易にするためにビーム輸送路に非破壊型ビームモニターを導入すると共に、同年8月、光空洞共振器反射鏡を金蒸着ガラス鏡から銀蒸着金属鏡に交換し耐性を強化した結果、高レベル発振の一過性現象も解消した。又、同年10月、レーザー電力、レーザースペクトルを常時計測出来るようにレーザーモニターシステムを整備し、自由電子レーザーの共同利用実験を試験的に開始した。同年12月には、発振可変波長領域が940nmから6000nmに拡がり、飽和状態は約10μSを持続し、レーザー電力も約15mJ／pulseに増え、FELも安定に発振するようになった。又、2004年4月には、パラメトリックX線の実用化に成功し、実験室でX線特性を測定中である。

2. 電子線形加速器の高度化

短パルス・クライストロンの長パルス化、加速位相シフトの補正などの電子線形加速器の部分的な高度化により、2001年5月26日、特殊装置を用いない極普通の電子線形加速器（エネルギー：86.9MeV、ビーム電流：90mA）による世界最初の近赤外線レーザー発振（波長：1.5μm）に成功した。 光空洞共振器は1.5μm波長で高い反射率（99.5%）の誘電体多層膜鏡で構成されて

いたので、可変波長領域は非常に狭い範囲に制限されていた。

その後、電子ビームや光空洞共振器の微調整により、レーザー電力は次第に増加し、同年7月には電子ビームの自発光が光空洞共振器に蓄積する光強度の約1億倍を越えた。しかし、発振状態は極めて不安定であり飽和状態の兆候は確認できなかった。又、光空洞共振器に帯域の狭い誘電体多層鏡を用いていたにも拘わらず、基本波レーザー発振が高レベルになると、その3次高調波（0.5μm）も同時に観測されていた。更に発振が強烈になると発振は停止した。このような現象が何故起こるのかを対象に、加速器とFEL発振の不安定要因、FEL基本波と高次高調波の関連を多方面から追究した。

これは高エネルギー加速器研究機構（KEK）、高輝度光科学センター、大阪大学産業科学研究所、電子総合技術研究所、分子研究所、日本原子力研究所、東京理科大学等、電子線形加速器を所有する研究機関に共通する問題でもあり、これらの研究機関と情報を交換しながら分析作業を進めた。しかし、不安定要因は、電子線形加速器、自由電子レーザー発生装置本体、施設装置等が電磁気、機械、温度の変化として、更に時間的に短周期、長周期、或いは不規則に複雑な挙動を示すので、その分析作業は単純でなかった。

交流入力電圧変動は研究施設の全装置に共通する課題であり、各種電源の安定性が徹底的に追求された。特に夜の21時から翌朝の9時まで異常変動することが既に明らかになっていた。事実、この時間帯では自由電子レーザー発振の基礎実験を継続することは不可能であった。

電子ビームの不安定要因を軽減する作業は、2002年度に既に次の3項目が実施されていた。
1）電子銃フレーネル構造の支持パイプを細くして放電耐圧を上げ、ビーム電流が熱陰極温度に依存しない領域（空間電荷制限領域）にヒーター電流を設定しビーム電流の安定性を確保、
2）位相ずれを事前に逆シフトさせ電子ビームのエネルギー分散を軽減し軌道安定性を確保、
3）クライストロンとPFNのインピーダンスを整合させサイラトロン遮断揺らぎの解消
等の処置が講じられていた。

2003年度の高度化作業は緊急性を重視して次の7項目を実施した。

「長パルス用クライストロンの大電力テスト」

2001年にはKEKの協力を得て、三菱電機と共同で大電力長パルス用クライストロンの開発に着手し、2002年に排気システムを改良した新クライストロン（PV—3040N）を設計・製作した。これはKEKがBファクトリー用として開発したクライストロン（PV－3030A3：40MW×5μS×50Hz）を長パルスでも稼働するように改造したものである。2本納入されたが、メーカーには長パルス電力テスト装置が無いために長パルス耐久試験は未確認のままでであった。2002年12月末、放射線施設検査中に既設クライストロン（2号機）の出力窓が破損したので、2003年1月6日、急遽破損したクライストロンを新クライストロンに交換し、10日にダイオードテストを行い、14日から昼夜兼行で高周波コンデショニングを開始した。25日にはクライストロンが20MW×20μS×5Hzの耐久性能が得られたので、28日にビーム加速を行い、29日の放射線施設検査に漕ぎ着けることが出来た。

「非破壊型位置モニターの開発」

不安定要因は最終的に加速ビームの挙動に反映されるので、長パルス電子ビームの位置を正

確にリアルタイムで計測できる非破壊型位置モニターの開発が急務であった。2002年、高エネルギー加速器研究機構の協力を得て4極の同軸構造位置モニターを3台製作し、試験的に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設置した。電子ビームの中心位置を±0.1mm の精度で測定できるので、加速器運転が容易になり、更に直線ビーム輸送路では確認が困難なビーム電流の変動、パルス内ビーム軌道の変動、パルス毎のビーム変動等の情報が得られ、不安定要因の分析に非常に役に立った。特にレーザー発振にはアンジュレーターを通過する電子ビームと光空洞共振器の蓄積光の中心軸が高精度で一致する必要があり、このモニターは、ビーム軌道調整にその威力を遺憾なく発揮した。2003年には、更に7台製作し、電子線形加速器とビーム輸送路に設置した。

「クライストロンパルス電源改造」

不安定要因の1つであるサイラトロンの遮断揺らぎが解消したにもかかわらず、入力交流電圧変動に追従して電子ビームの不規則な変動は解消されなかった。一方、クライストロンパルス電源では、パルス発生装置のサイラトロン（スイッチ）が動作する直前の直流高圧電源の充電コンデンサー電圧は常に一定であったが、不思議なことにPFNコンデンサーの充電電圧は入力交流電圧の変動に追従して変動していた。この事実から、最も安定度が高いと思われていた高圧直流電源に不安定性要因が隠れていると考え、高圧直流電源の動作を徹底的に調査した。

電子ビームの不規則な変動はクライストロンパルス電源の直流高圧安定化装置に要因があることが明らかになった。これはPFN充電中に高圧直流電源の3極真空管の負帰還動作が飽和状態になり、安定化装置が働かないためであった。この対応策は高圧直流電源の充電コンデンサーを補充し負荷抵抗を大きくすることであった。2003年3月に改造作業に着手し、4月にはパルス電源の安定化は確保された。

「ビーム輸送系電源の改修」

電子線形加速器ではステアリング磁場が変動すると、電子ビームの進行方向が変わり、多数の集束電磁石を通過する電子ビームは蛇行運動し、電子ビーム軌道は不安定になる。特に、パルス持続時間が長い電子ビームは加速管の中心軸から外れると加速管に横波成分を持つ電磁場を誘起し電子ビームの空間的拡がり（エミッタンス）を増大し電子ビームの品質が悪化する。しかし、ビーム輸送系電源の大多数は、マイクロトロン用として導入した電源であり、最大電流定格が10Aと5Aの2種類に統一され、ステアリング電源としては電流容量が大きすぎ、ビーム制御の整合性を欠き、又、既に耐用年数を超え不安定な挙動を示す電源もあり、2003年3月に電源の一部が新電源に交換された。

「パルストランスの改良」

1996年の試運転時からパルストランスを収納タンクの絶縁油汚れが原因でタンク内で放電が頻発していた。1998年に、絶縁油とパルストランスのコイルを同時に交換した結果、タンク内の放電は解消した。2002年、クライストロンの不安定動作の確認テスト中に2号機のタンク内で放電が発生した。その要因は確認できなかったが、パルストランス2次コイルの変形が目視された。その後、時々タンク内で放電するようになった。これは1次コイル線径が細く且つコイル巻きの曲率半径が

小さいため、コイル角の電界強度が高くなったことが原因と推定した。1次コイル線径を太くし、1次コイル巻き曲率半径を大きくする改良をおこなった。2003年6月、クライストロンの集束コイルから水漏れがあり集束コイルを交換する際、パルストランスの交換作業をおこなった。タンク内の絶縁ヒータートランスではコロナ放電が発生していたが、それ以降、パルストランスで放電は発生していない。

「絶縁ヒータートランスの改修」

クライストロンの絶縁ヒーター・トランスには1次・2次コイル間に約280kVのパルス電圧を印加するので絶縁油中で使用している。コンパクトに設計したために絶縁耐圧不足から、1999年に2次コイル枠から放電によってコイル枠(ガラスエポキシ樹脂)が炭化したため使用不能になった。2次コイルにコロナリングを設ける改良を行い使用していたが、2003年6月、パルストランスを交換時に絶縁ヒータートランス(2号機)に放電痕を見つけた。その後、動作状態を注意深く観測した結果、コロナ放電は1次コイル角と2コイルのコイル枠の間に集中していた。1次コイルと2次コイルが等電位になるように1次2次コイルの形状を円形にコイル端にコロナリングを取り付ける改良を行った。2003年10月、2号機タンク内で放電があり、11月、2号機の絶縁トランスを交換した。その後、コロナ放電は発生していない。

「PFNインピーダンス整合の自動化」

本研究施設のクライストロン・パルサーは直流電源から充電チョークを通してPFNに直接充電する方式を採用しているために、クライストロンの印加パルス電圧を変えるとインピーダンスが変化し、PFNインピーダンスと整合がズレ、反射パルス電圧がPFNに残留する。この欠点を補うために、クライストロンに印加する電圧を変える場合は、その都度PFNを調整できるようにPFNのインダクタンスを遠隔操作で変えられるように設計されていた。従って、インピーダンスが不整合の場合、クライストロンに印加されるパルス電圧がパルス毎に変わり、電子ビームのエネルギーが不安定になる。しかし、インピーダンス整合作業は、クライストロンに印加するパルス電圧波形を観測しながら、PFNコイルのインダクタンスを遠隔操作で増減しパルス電圧が平坦になるように微調整を繰り返すので、長時間を要し大変根気のいる作業であった。従って、インピーダンスが少し不整合でもクライストロンを動作させていたが、加速器の高度化が進むに従って、この状態はFELの安定な発振を阻害する要因になってきた。2003年5月、計算機によるPFNインピーダンス整合の自動化に着手し、8月に完成した。8月のFEL発振ではFELパルス幅が5μSに広がりFEL飽和現象が観測された。更に微細な調整により、12月にはFELパルス幅が10μSを越えるようになった。

3. 電子線利用研究施設の放射線施設検査

加速器の運転中でも、実験室で実験準備ができるように、加速器室と実験室の間の放射線シールドの強化し、2002年10月に放射線管理区域の変更申請を行った。12月10日に放射線施設検査が原子力安全技術センターによって実施されたが、実験室と加速器室を結ぶレーザービームライン上の放射線レベルは基準値を越え、又、中性子線量計ではアナログ線量とデジタル線量に食い違い生じたので、後日改めて検査を行うことになった。レーザービームラインの放射線遮蔽を強

化し、パルス中性子を正確に計れる計測器を用意して、12月25日に検査した。しかし、検査の直前に、クライストロン（2号機）が不調で、26日に再開したがクライストロン出力窓が破損したため放射線計測が不可能になった。施設検査は2003年1月下旬に延期された。1月初旬、破損したクライストロンを新規に開発したクライストロンに交換し、長時間コンデショニングを行った結果、ビーム加速ができるようになり、1月末に検査を再開した。しかし、加速器室と実験室間の配線用ピットに不備があり、2月末に再検査することになった。この検査では、旧建屋と増築建屋の接合部隙間から放射線が漏れる恐れがあることが指摘され、建屋接合部の放射線シールドを強化し、更に放射線施設変更申請を行い、3月末に再検査した結果、ようやく放射線施設検査に合格することができた。この結果、FELビームラインは常時使用可能になった。

一方、パラメトリックX線ビームラインを使用するには、新たに放射線施設の使用変更申請をする必要があり、文部科学省に申請書を2003年6月に提出し、9月に使用許可証が交付されたので、施設検査の準備を開始した。申請書に記載された放射線防御の対応策を講じ、2004年3月に放射線施設検査に合格した。この結果、パラメトリックX線ビームラインでX線取り出しが可能になった。

4.短波長自由電子レーザーの進展

2001年5月、近赤外線レーザー発振（波長：1.5μm）に成功し、レーザー電力は次第に増加し、同年7月には電子ビームの自発光が光空洞共振器に蓄積する光強度の約1億倍を越えた。しかしながら、発振状態は極めて不安定であり飽和状態の兆候は確認できなかった。一方、光空洞共振器には1.5μm波長で高い反射率（99.5%）の帯域が狭い誘電体多層膜鏡を用いていたが、基本波FEL発振が高レベルになると、その3次高調波（0.5μm）も同時に観測されていた。

FEL発振の不安定性要因を多方面から追究した。更にFEL発振が高レベルになると発振は持続できず停止し、再発振させるには光空洞共振器を再調整する必要があった。このことから、高レベルFEL発振では光空洞共振器の反射鏡表面が瞬時に破損していることが想定された。2002年7月、誘電体多層膜鏡の取り出して調べた結果、その表面は痘痕状に破損していた。近赤外線領域で高耐性反射鏡の開発は急務であり、赤外線FELで良く使用されている金蒸着鏡の導入を検討したが、誘電体多層膜鏡がFEL発振実験で破損の報告例が見あたらず、又誘電体多層膜鏡は金蒸着鏡より耐性が高いと云う理由から引き続き誘電体多層膜鏡を使用することになり、新誘電体多層膜鏡と交換してFEL発振の基礎実験を継続した。

「光空洞共振器架台の強化」

2002年6月、光空洞共振器にHeNeのガイドレーザーを導入し、2枚反射鏡による干渉縞を観測したが非常に不安定であった。一方、加速器の高度化が進展して、電子ビームが徐々に安定性を増していったが、FEL発振の安定性は一向に改善されなかった。これはFEL発生装置自体にも不安定要因があることを示唆していた。特に空調機や冷却装置が作動すると干渉縞が消滅することから、光空洞共振器架台の強度が脆弱であることが明らかになった。2003年1月に超高精度レーザー変位計をKEKから2台借用し、上流と下流の光空洞共振器の固有振動や室温変化に対す

る変形状態を正確に測定した。その結果、架台の固有振動は約8Hzと低く、その振幅は±２μｍを越えていた。この振動はFEL発振に大きな影響を与え、低レベルFEL発振が不安定になる主な要因になっていることが明らかになった。2月に架台の剛性を強化し、再度測定した結果、固有振動数は約30Hzに上昇し、その振幅は±0.1μｍ以下に減少した。しかし、放射線施設検査が進展しないため、FEL基礎実験が再開できず、その効果を確認出来なかった。

「光空洞共振器反射鏡の問題点」

2002年7月に誘電体多層膜鏡を交換後も高レベルのFEL発振はこれまでと同様に持続できず瞬時に停止し、飽和状態も観測できなかった。高耐性反射鏡の開発は急務であり、2003年2月、金蒸着ガラス鏡と金蒸着金属鏡の2種類を先行発注した。光空洞共振器架台強化の効果は4月、FEL発振実験を再開し、低レベルのFEL発振が安定したことによって証明された。一方、高レベルFEL発振の一過性は継続していた。5月、反射鏡を取り出して確認した結果、上流と下流の鏡面に多数の痘痕があり、高レベルFELに対して耐性不足が明確になった。誘電体多層膜鏡を金蒸着ガラス鏡に交換し、FEL発振のテスト実験を再開した。しかし、FEL発振の兆候も現れず、その上、蓄積光の減衰も大きかった。金蒸着ガラス鏡の反射率劣化が予測され取り出して見ると、表面が汚れていた。新しい金蒸着ガラス鏡に交換しFEL実験を再開した。蓄積光の強度は数倍になったが発振の兆候は現れなかった。近赤外から可視光領域で高耐性・高反射率反射鏡の開発が急務となった。一方、銀蒸着面は大気に晒さない真空中では、近赤外から可視光領域で非常に高い反射率を示すが、真空中から大気中に取り出すと表面が錆び反射率が低下する欠陥があった。日本では銀蒸着の防錆技術がないために、金蒸着金属鏡が主に用いられ、銀蒸着金属鏡の使用は皆無であった。しかし、近赤外から可視光領域で銀蒸着金属鏡の特性は非常に魅力的であり、その可能性を探った結果、大気中に晒しても1～5μｍの波長領域で99.3％の高反射率を保つ銀蒸着金属鏡を製作する企業が米国にあることが分かり、5月末に銀蒸着金属鏡をテスト的に先行発注した。一方、FEL実験中に立体回路（2号機）のセラミック窓が破損したために真空漏れ発生したのでセラミック窓を交換したが、クライストロンのコンデショニングを長期間行う必要があり、当分の間、ビーム加速が出来ない状態になった。

「FELビームラインの整備」

一方、この期間を利用して、FELビームライン迷路の整備とビームエックスパンダーを設置することにした。ビームエックスパンダーは、光空洞共振器反射鏡に金属鏡を用いることを想定して、用意されていた。即ち、光空洞共振器に金属鏡を用いた場合、光利得を大きくするために光の出射孔を小さくする必要があるが出射孔を小さくすると、長波長FELでは出射光の発散角が大きくなり新実験棟終端のレーザー照射室（約55m）までFELを輸送できない可能性があり、赤外線領域FELを新実験棟へ効率よく輸送するため、FEL発生装置の近傍でFELを平行ビームにする必要があった。FELの平行化は、楕円鏡と放物線鏡の組み合わせて設計され、2001年10月に完成していた。この設置作業により、FEL発生装置と新実験棟の各レーザー照射装置は真空ダクトで接続された。一方、光空洞共振器に半導体レーザーを導入しその出射光を使って、ビームエックスパンダーのアライメントと性能テストを行い、性能仕様を確認した。又、FELビームラインアライメントも同

様な方法で行った。

「金蒸着ガラス鏡の損傷」

2003年7月11日、加速器運転が再開され、24日に金蒸着鏡による1.5μmFEL発振、25日に1.376～1.9μm可変波長FEL発振に成功、26日にストリークカメラでFELを計測した。しかし、8月初旬に高レベルのFEL発振が不安定になる現象が観測され、その後、FELが2つになる現象が発生した。金蒸着ガラス鏡の耐性に疑念を持ち、8月21日、金蒸着ガラス鏡を取り出して調べた結果、上流の反射鏡は中心からずれた場所に小さな多数の孔が集中し、下流の反射鏡中心部は金蒸着面がなかった。金蒸着ガラス鏡の耐性に問題があるので、銀蒸着金属鏡と交換し、銀蒸着金属鏡の耐性テストを行うことにした。

「銀蒸着金属鏡による発振」

8月26日、ビーム加速を再開した。28日、1.5μmのFEL発振テストでは高レベルFEL発振が非常に安定で長時間継続するようになった。又、FEL強度は15mJ／パルスに達し、FELパルス幅も5μSを越え飽和現象を初めて観測できた。その後、一度大気に晒したが、鏡の特性に変化は認められなかった。FELの可変波長範囲も徐々に拡がり、11月末には発振波長が1μmの壁を世界最初に突破し、0.97μmのFEL発振に成功した。12月には、可変波長範囲が更に0.914～6.0μmに拡がり、FEL強度も1.115μmで最大25mJ／パルスに達し、近赤外FELとしては世界のトップレベルにとなった。現在、反射鏡に耐性劣化の兆候は現れていない。

「FEL監視モニター」

2003年10月からFEL利用実験を試験的に開始するには、常時監視モニターは不可欠であり、そのためのモニターシステムの整備が急務であった。FEL監視モニターは、FEL発振、スペクトル、パワーレベルを常時測定するための装置であり、これらの計測を常時継続するには、FELビームラインに高透過率の波長領域が広いCaF2 平面板を挿入し、高レベルFELの一部の光を取り出して、光学素子を使って高感度赤外線検出器(InSb)、分光器、パワーメーターに輸送しなければならない。しかし、FELを発振させる時は光強度が微弱なため、全反射平面鏡をFELビームラインに導入し、高感度赤外線検出器(InSb)に同様に輸送する必要がある。この2つの条件を満足するように、CaF2平面板と全反射平面鏡をFELビームライン上で遠隔操作によって切り替えられる光取りだし装置を2台製作し、実験室を通過するFELビームラインに設置した。1台は高感度赤外線検出器(InSb)用に他の1台は分光器やパワー測定用に用いている。

5. パラメトリックX線源の進展

本研究施設では、1998年にシリコンの薄い単結晶を高エネルギー電子ビームで照射したときに単結晶内の原子が摂動されて放射するコヒーレントなX線(パラメトリックX線放射:PXR)の開発研究に着手し、2000年度には、FELシステムと平行なビームラインを新設し、単結晶から放射されるPXRを更にシリコン単結晶でブラック反射させ、γ線と分離して実験室へ輸送する装置を完成させた。又、2001年度には実験室に輸送されるX線を2枚の楕円鏡を使って集束させるビームラインとこのX線源を使う蛋白質X線構造解析装置や微小部X線回折高次解析装置も完成した。

しかし、先行した放射線施設検査（FELビームライン）の合格（2003年3月）が遅れたために、X線ビームラインの使用許可も順次遅延し、前述のように2003年6月に申請、9月に認可され、PXR源のビーム輸送効率、単結晶を照射した時のビーム損失、実験室の放射線線量を測定して、X線ビームラインの施設検査準備を行い、放射線施設検査を2004年3月に実施し合格した。

2004年4月初旬にPXRテスト実験を開始し、4月14日、パラメトリックX線を実験室に取り出したことが確認され、世界最初のパラメトリックX線の実用化に成功した。現在、X線の可変エネルギー範囲、強度分布、エネルギー分散等のX線パラメーターを測定しているが、引き続き、楕円反射鏡2枚使って発散X線を集束する作業を行う必要があり、共同利用実験の開始は速くて7月以降になる見込みである。

6. 施設の運転状況

1996年4月から2004年5月末までのクライストロンの通電時間と通電日数、電子線加速の時間数と日数、利用実験の時間数と日数を表1に示す。但し、1996年4月から2000年3月まで1996～1999年度とし、2000年4月～2000年12月は2000年度としている。2001年1月から2004年5月までは3年度半のクライストロンの運転、ビーム加速、共同利用状況を示してある。又、2004年度は1月1日から5月31日まで半年間のデーターである。

表1　クライストロンの慣らし運転とビーム加速

年　度	クライストロン通電		通電時間	ビーム加速		共同利用実験	
	通電時間	通電日数	／日	時間数	日数	時間数	日数
1996	71	8	8.88		0		
1997	559	61	9.16	9	3		
1998	1617	159	10.16	228	41		
1999	1257	127	9.89	230	47		
2000	958	70	13.68	176	26		
2001	1557	138	11.28	544	87		
2002	1558	144	10.82	452	72		
2003	2277	180	12.65	642	87	70	8
2004	966	98	9.85	613	86	205	25
合　計	10820	985		2894	449	275	33

7. 今後の方針

平成16年度は、学術フロンティア推進事業が1年後に控え、より良い実験結果が得られるように、研究環境の整備に全力注ぐ。FELやPXRの共同利用実験を円滑に進めるには、研究施設と利用研究者が1体となって、大学の共通研究施設としての役割を担うことが重要であると考えている。
研究施設としては、特別に開発研究を行う時間的余裕は皆無であるが、しかし、利用研究の活性

化と進展を計るには、
1）2色レーザーによる励起と分析同時計測の可能性を探る
2）自動制御システムと故障診断システムを開発する
3）自発放射光自己増幅プロセスの解明
等をテーマに開発研究を続ける必要がある。

8．おわりに

2003年3月、放射線施設検査に合格し、FEL基礎実験を本格的に開始した。又、加速器高度化の進展と銀蒸着金属鏡の採用により、FELは飽和に達し安定に発振している。2003年10月から試験的にFEL共同利用実験を開始することが出来た。2003年12月には可変波長領域も0.94～6μmに拡張し、近赤外の可変波長FELとしては世界最初に1μmの壁を破ることができた。最近は発振パルス幅は10μSを越え、FELパワーは20mJ／マクロパルスを越えるようになった。

一方、X線ビームラインが放射線施設検査に合格し、ビームラインが使用可能になるとパラメトリックX線の基礎実験は急激に進展し、2004年4月には世界最初のパラメトリックX線実用化に成功することができた。

日本大学における近赤外 FEL の進展

日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設

１．はじめに

１．１ これまでの経過

日本大学では短波長FELの実用化を目標に、1994年から電子加速器の建設[1, 2, 3]を開始した。1998年1月に電子ビーム加速[4]に成功したが、電子ビームは不安定で且つエネルギー分散が大きく、アンジュレーターの永久磁石は放射線損傷で劣化した。その上、短パルス用クライストロンでは所用の長パルス持続時間が確保できないために短波長FEL発振は不可能であった。その後、電子線形加速器の高度化を進めて、短パルス・クライストロンの長パルス運転に成功し、電子ビームのエネルギー分散を縮小した。又、赤外線用アンジュレーターを製作し、2001年5月には1500nmのFEL発振[5,6]に成功した。しかし、電子ビームは安定性を欠き、FEL発振は一過性で飽和現象は確認できなかった。その後、更なる安定化と光空洞共振器の反射鏡の耐性を強化した結果、2003年12月には、発振可変波長領域が940nmから6000nmに拡がり、飽和状態は約10μSを持続し、更に、FELシステムにビーム電流を60mAから100mAに増強することにより、レーザー電力も約10mJ／pulseから約30mJ／pulseに増え、FELも安定に発振するようになった。

１．２　短波長ＦＥＬの難しさ

短波長FELでは、電子ビームに対して低エミッタンス、低分散エネルギー、大電流、長パルス、超安定性等の相矛盾する特性が要求され、このような高品質の電子ビームを、品質を損なわないで高エネルギーに加速し、電子ビームの特性を最大限に活用することによってその目的が達成されている。一方、FELシステムでは電子線形加速器で加速された先進の電子ビームが蛇行運動して放射する光を光空洞共振器に蓄積し、後進の電子ビームが蛇行運動する間に、この蓄積光が電子ビームを更に微細に集群して、更に蓄積光へ電磁エネルギーを放出する離れ業を行って光増幅を行うが、これは電子ビームと光の相互作用を最大限に活用する究極の加速器とも言える。

FELの最大の特徴は波長を任意に選択できることであるが、しかしながら、光空洞共振器に蓄積する課程では、反射鏡の反射率が波長依存性を持ち利用波長領域を制限する。特に短波長では反射率が低下して、アンジュレーターの光利得を実質的に減少しFEL発振を著しく困難にする。最近は反射鏡を使わないで、電子ビームが蛇行運動する際に放射する光を電子ビームが直接光増幅（SASE）を行う方法が試みられている。

FEL発振をより確実するために、これまでにFEL用加速器では、高周波電子銃（低エミッタンス）やサブハーモニックバンチャー（大電流）を開発し、或いは超伝導リニアックや蓄積リング（長パルス・低分散エネルギー）等の特殊な加速器を使ってその目的（FEL発振）を達成してきた。

日本大学のFEL計画は、これまでの常識を破る、極普通の電子線形加速器による短波長FELへの挑戦であった。日本大学では極普通の電子線形加速器の構成要素に改善・改良を積み重ねて加速器の性能を高度化する努力を続けてきた。その結果として、普通の電子線

形加速器による短波長領域の可変波長FELを実現することができた世界最初の例となった。

2.　加速器の高度化

日本大学のFEL計画は、歴史的な経緯から、ダブルサイド・マイクロトロンを使って長波長FELの実用化と利用研究の推進を目的としていた。しかし、マイクロトロンによるFELの実用化は非常に困難であることが予測された。FEL計画は電子線形加速器による短波長FELの実用化に変更された。従って、FELの建設費（3．5億円）で加速器を含む短波長FELの建設を余儀なくされた。又、短波長FELを実現するには、電子ビームに高品質を保証する特性（大電流、低エミッタンス、長パルス、高安定化）が要求され、これらのビーム特性は互いに矛盾する要因を含んでおり、開発要素も多かった。「短波長FELの実用化は普通の電子線形加速器を使ってその目的を達成」することを要請された。又、建設経費は電子線形加速器の本体は、KEKから導入し、長パルス用パルサ電源等はマイクロトロンの使用部品を可能な限り活用して製作された。このように電子線形加速器は新旧の構成部品が混在したために、所定の性能が得られず、又、高電圧部分は放電等で破損や故障が続出した。パルス電源のオイルタンク内に設置されたクライストロンビーター用絶縁トランスの放電やパルストランスのバックダイオード破損対策等電子線形加速器の性能を向上させる高度化が急ピッチで進められたが、2.5μS仕様の短パルス用クライストロンの出力窓は高周波電力のパルス幅が10μSを越えると確実に破損した。高度化の最重要課題は、クライストロンの出力窓が20MWを越える高周波電力と20μS越えるパルス幅に耐える状態を確立することであった。

2.1　短パルス・クライストロンの長パルス化

KEKで使用済みになったクライストロンを譲り受け、コンデショニングを行いながら出力窓の耐性テストは続けたが、何ら成算を得られないまま、出力窓は次々に破損した。しかし、クライストロンの出力窓が次々と破損するが、約1．5m下流に設置されたセラミック窓は同じ高周波電力が通過するにも拘わらず、奇妙にも全く破損していないことに気づいた。この違いはセラミック窓面からの放出ガスを窓の両側から真空ポンプで強力に排気していることであった。図1に示すように、クライストロン出力窓の近傍にイオンポンプ2台設置して大電力テストした結果[7)]、出力窓は20MWの高周波電力で20μSのパルス幅を確保し12.5Hzの運転ができるようになった。

図1　イオンポンプ強化の立体回路の構成による長パルス運転に成功したクライストロン

2.2　電子ビームの低エミッタンス化

日大では計画当初、FELに高周波電子銃を使うことを想定し、0.35～5μm波長領域のFELの実用化を試みていた。短波長FELでは、アンジュレーターの光利得が小さいために、電子ビームには尖頭電流が大きく、エネルギー分散が小さく、低エミッタンスで、長パルスを持続することが要求された。しかし、高周波電子銃は開発途上であり、特にバック・ボンバードによる電流暴走を確実に阻止する方法が確立されておらず、20μSを越える長パルス運転を継続できる見通しは立たなかった。

そこで、当面は、高エネルギー加速器研究機構で使用済みになった電子銃、プリバンチャー、バンチャーを導入し、熱陰極電子銃を用いてテスト実験を進めることになった。この入射システムを使って、電子ビーム加速テストに成功した。導入した電子銃（EMAC製：464E）をそのまま用い、高電圧電源にはマイクロトロン用電子銃電源を流用した。電子銃の印加電圧は－100KVと低いために、エミッタンスの悪化が懸念され、加速器の終端で4極電磁石とプロファイル・モニター（デマルケット）を使ってエミッタンスを測定した。その結果、電子ビームのエネルギーが80MeVで測定した規格化エミッタンスは[8] εx＝107±14πmm・mrad、εy＝63±14πmm・mradであった。しかし、蛍光板にデマルケットを用いた測定法には不確定要素が残るために、電子ビームのエネルギーが90MeVに設定して、ワイヤースキャンナーを使って測定した。その結果、規格化エミッタンス[9]はεx＝77±29πmm・mrad、εy＝48±5πmm・mradに減少したが、依然として電子銃から放出された電子ビームがプレバンチャーやバンチャーで集群され、加速管で加速される課程でエミッタンスが大きくなる要因があり、エミッタンスの測定には不確定要素が残った。何れにしても、このエミッタンスでは短波長FELの発振は困難と判断し、熱陰極電子銃の低エミッタンス化に着手した。EGUNを使って、低エミッタンスを満たす電子銃構造が徹底的に追究[10]された。熱陰極の直径が小さいEMACの464Bをモデルにウエネルト形状を最適化した新電子銃を製作した。一方、新旧の電子銃から放出される電子ビームのエミッタンスをマクネテックレンズとワイヤースキャンナーで直接測定[11]した。その結果、旧電子銃ではビーム電流150mAで、εx＝26.8πmm・mrad、εy＝26.6πmm・mrad、新電子銃ではビーム電流が170mAで、εx＝13.4πmm・mrad、εy＝13.6πmm・mradであった。又、新旧電子銃について、電子線形加速器の終端でエミッタンス測定を行った。旧電子銃では加速エネルギーが96MeVの規格化エミッタンスは、εx＝66.3πmm・mrad、εy＝63.6πmm・mrad、新電子銃では加速エネルギーが86.8MeVの規格化エミッタンスは、εx＝32.8πmm・mrad、εy＝16.3πmm・mradであった。この測定結果にはワイヤースキャンモニターが二次電子を捕捉している可能性が否定できず測定値に疑問が残った。

2.3 電子ビームの不安定要因

日大のFEL装置は、建物の空間的制限から図2に示すように、電子線形加速器に直交して設置された。

電子ビームは2台の電磁石で90度偏向されてFEL装置に供給される。この90度偏向システムでは、電子ビームに対する規制が厳しく、電子ビームが空間的にも時間的にもエネルギー分散が大きくなるとスリットを通過することが出来ない。事実、電子ビームがパルスの途中で欠落する現象が出現した。これはパルス毎の電子ビームのエネルギー変動とクライストロ

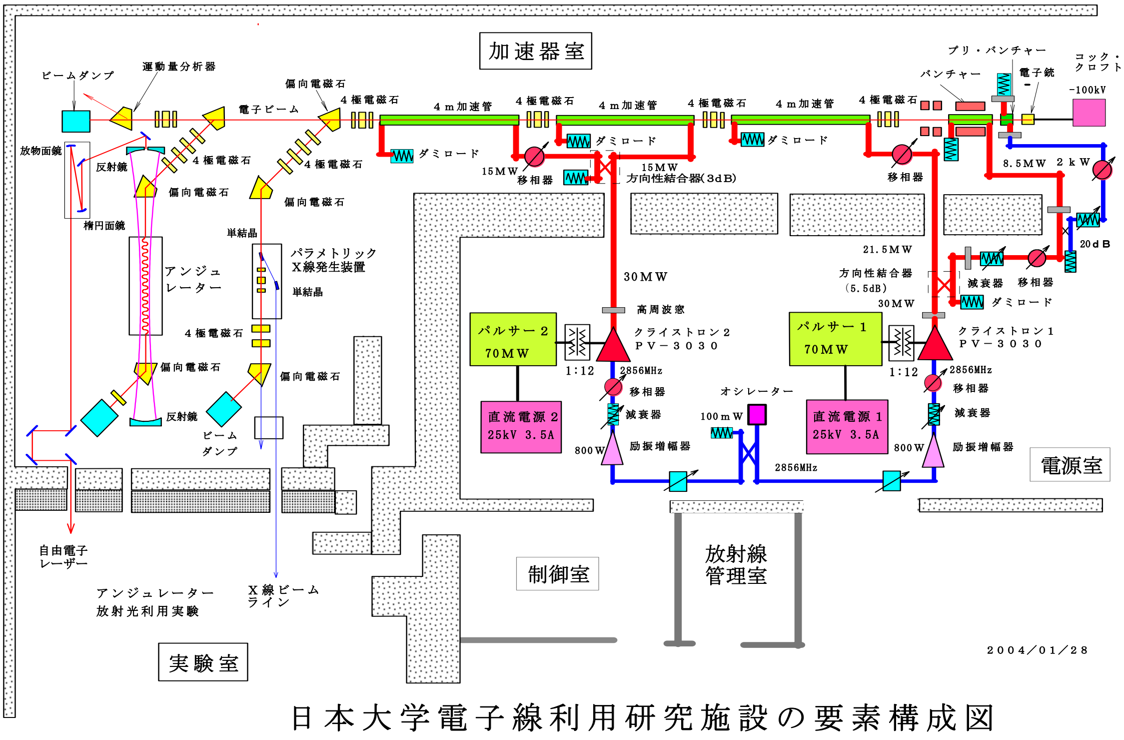

図２　日本大学の電子線形加速器（右）とＦＥＬ（左）並びにパラメトリックＸ線発生源（中）

ンの前置高周波増幅器が10μSの間に高周波位相が約8度のシフトすることが原因であった。

このような電子ビームのエネルギー変動は、電子ビームがアンジュレーターのビームダクトや永久磁石に衝突する割合が大きく、特に永久磁石は放射線損傷[12)]を引き起こした。部分的に磁場は約10%程劣化しアンジュレーターの利得は大幅に減少した。赤外線用の永久磁石を新たに製作[13)]するとともに、その対応策が急がれた。電子ビームの安定化は当面の最重要課題であった。電子ビームの不安定要因は、高周波位相が時間的にシフトする以外に、加速器を構成する各種装置の動作特性が複雑に絡み実に厄介な問題であった。それぞれの装置の電源、温度、圧力、振動等の時間的な変化を徹底的に調査した結果、入力交流電圧変動[14)]に電子ビームの不安定性が連動していることが明らかになった。しかし、どの装置が主要因であるかは、明らかにできなかった。

2.4　高周波位相シフト対策

前置高周波増幅器の位相シフトは、大きな尖頭電力を得るために、半導体素子を高レベルのパルス負荷で稼働させることが原因であった。その主要因は半導体素子がパルス的な温度上昇によるものと考えられるが定かではなかった。しかし、高レベル負荷で作動する半導体素子は、動作パラメーターがパルス内で大きく変わり、高周波位相シフトは指数関数的に減衰を繰り返していた。この位相シフトを高速の負帰還システムを使ってロックすることは、負帰還回路の周波数利得を考慮すると成功する可能性は低く、パルス動作でも位相シフトの小さい高周波増幅器を新たに開発する必要性に迫られた。そこで、一時的な対応策として、フィードフォワード方式による位相シフトの矯正を

試みた。これは、高周波増幅器の位相シフトを測定して、それと同量な逆シフト位相を高周波増幅器に入力し、出力位相を一定にするようにピンダイオードにファンクションジェネレーターからバイアス電圧を印加する方式[15]である。この結果、高周波増幅器の位相は約±0.6 度、クライストロンの出力位相は約±1度に揃えることができ、電子ビームのエネルギー分散は大幅に改善されて、90度偏向システムを通過する電子ビームがパルスの途中で消滅する現象は解消された。

2.5 FEL観測系の整備

光空洞共振器に自発放射光が蓄積される状況は制御室で直接観測していたが、光源と制御室間の距離が長いために、光蓄積の詳細な変化を把握しにくく、光源に最も近い実験室で直接観測する必要があった。加速器室と実験室間の放射線シルードが強化され、加速器運転中でも実験室に常時立ち入りが可能となった。光計測は実験室で行えるようになり、測定精度を上げることができた。

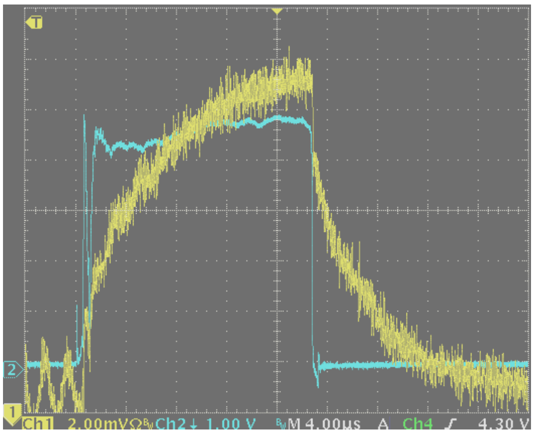

図3 光空洞共振器に蓄積された自発放出光の強度波形（V:2mV／div、H:4μS／div）とビーム電流波形（50mA）

一方、可視光用アンジュレーターの永久磁石は赤外線用に、光空洞共振器反射鏡は1.5μm用誘電体多層膜鏡にそれぞれ交換された。又、赤外線用の高感度計測器（InSb）や外線用分光器も導入されて、図3に示すように光空洞共振器に蓄積された自発放射光の減衰を観測できるようになった。この結果、自由電子レーザーの基礎実験は飛躍的に進展した。

2.6 赤外線用FEL発振

光空洞共振器に蓄積される光を観測する限り、自由電子レーザー発振の条件は整っていると思われ、光空洞共振器長を変えてFEL発振を試みたが、FEL発振の気配は全く感じられなかった。そこで、FELシステムに大きな見落としがあると思い徹底調査した。その結果、予想もしていなかったことが起こっていた。アンジュレーターの空隙が不平行で上流と下流の空隙に約3mmの差があることがわかった。不平行のアンジュレーターの長さは実質的な有効長が約10分の1と評価された。これでは、FEL発振は不可能であった。原因は駆動機構を固定するボルトの緩みであつた。しかし、ボルトが緩んだ原因は不明であった。駆動機構の寸法を再調整した。その結果、その翌日に1.5μm波長のFEL発振に成功した。FEL強度は、光空洞共振器や電子ビームの微細な調整により徐々に増加したが、飽和状態には到らず、又、極めて不安定であった。又、FEL発振が、電子ビームの不安定は依存しており、更なる不安定要因の追究が開始された。

2.7 電源安定化

電子ビームの不安定の主要因は、各種電源の安定性欠如にあるとの判断から、商用交流入力電圧変動と各種電源の出力直流電圧変動の相関関係を徹底的に調査した。その結果、電子ビームが不安定であるにも関わらず、各種電源の出力直流電圧変動には異常がないが、商用交流入力電圧変動とは明らかに連

動していた。クライストロン・パルス電源の直流高圧電源はマイクロトロン加速管の高周波電力増幅管（CWクライストロン）の直流高圧電源を改造して使用した。この電源単体の電圧安定度は10^{-4}以下であった。この高安定性を活かすために、クライストロン・パルス電源にはdeQ回路を設けなかった。クライストロン・パルス電源の直流高圧電圧が変動していないにも関わらず、しかしながら、クライストロンに印加されるパルス電圧は変動していた。この理由には、パルス電源のスイッチ管（サイラトロン）遮断（off）時間の不安性、パルス・フォーム・ネットワーク（PFN）のインピーダンスとその負荷であるクライストロンのインピーダンスとの不整合が上げられていた。この2つの事象は1つに集約されると考え、PFNを微細に調整しクライストロン・インピーダンスと整合をとった。その結果、スイッチ管（サイラトロン）遮断（off）時間は安定した。一方、クライストロン・パルス電源の直流高圧電圧が安定であるにも拘わらず、PFNに充電された電圧は相変わらず変動していた。その変動は商用交流入力電圧変動と関連していた。直流高圧電源の安定性と測定に疑問を抱き、動作特性を詳細に調査した。その結果、PFNに充電中（10mS）は直流高圧電源の負荷が大きく、電圧安定度が保てないことが判明した。その対策として、直流高圧電源のコンデンサー容量と、パルス電源の直列負荷抵抗を増やし、負帰還回路の基準点を変えた。その結果、クライストロン・パルス電源の商用交流入力電圧変動の影響は解消され、PFNの充電電圧は安定した。又、電子ビームも非常に安定になった。

2.8 モニターの整備

加速器の安定性を調べるためには、パルス電圧は0.1％、パルス電流は1％、高周波電力は3％、高周波位相は0.2°、ビーム電流は1％、ビーム位置は0.1mmの精度で常時観測する必要があった。特に、FELの発振は、光空洞共振器内を通過する先進電子ビームから放射される自発光を共振器に蓄積し、後進電子ビームが蓄積光に光エネルギーを供給する課程を経るので、電子ビーム軌道と蓄積光路がパルス持続時間内で常に一致していることが要求される。当初、電子ビームで発光セラミック（デマルケット）を直接照射して、電子ビーム位置を観測していたが、測定精度が悪く、その上二次放射線を発生し、アンジュレーターの永久磁石が放射線損傷を受けたために、4極ストリップ・ライン型位置モニターを開発し非破壊型ビーム位置モニターに切り替えることになった。ビーム位置モニターはリニアックの出口、アンジュレーターの入口と出口の3ヶ所に設置した。非破壊型位置モニターは、電子ビームの水平・垂直（XY）位置をリアルタイムで常時観測でき、電子ビーム位置とFEL発振状態の相関が明確になり、FEL発振再現に大変有効であった。

3. FEL発振の不安定要因

2001年5月に1．5μm波長のFEL発振に成功し、その後、光空洞共振器の微細修正や電子ビーム軌道の微細調整により、FEL強度は次第に上昇し、同年7月には、FEL強度は発振寸前の光空洞共振器蓄積光の約1億倍に達した。しかし、FELは不安定であり、発振レベルが高まると瞬時に停止した。更に、光空洞共振器反射鏡の調整や電子ビーム軌道の修正により発振は一時的に回復するが、直ぐに停止する一過性現象に悩まされた。又、飽和現象は出現しなかった。

この要因の1つはFEL発振強度が上昇する

と光空洞共振器反射鏡（誘電体多層鏡）の表面が瞬時に破損すると判断して、反射鏡の反射率を蓄積光の減衰率から測定した結果、反射率は次第に減少していることが明らかになった。反射鏡を取り出して見ると、図4に示すように、上流と下流鏡面に剥離したような無数の痘痕が認められた。反射鏡を交換して、低いレベルの発振動作でも、パルス毎の不安定は依然として存在していた。

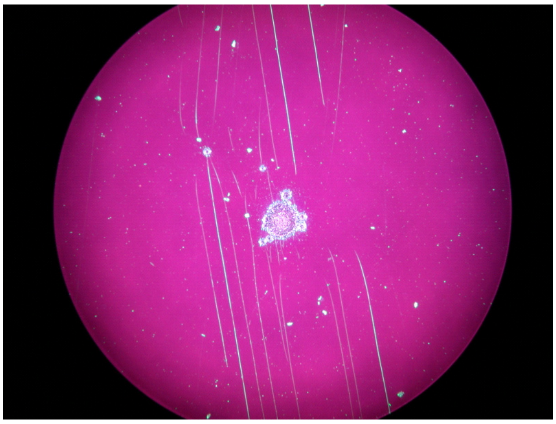

図4　高レベル発振で破損した反射鏡の誘電体多層膜。

線形加速器の高度化により、電子ビームの安定性は次第に向上して行ったが、不安定性は一向に改善されなかった。機械的振動に要因があると推定し、光空洞共振器に半導体レーザーを導入し、冷却系を稼働させて反射鏡間の干渉パタンを観測した。その結果、光空洞共振器架台は剛性不足で固有振動は約8Hzと低く、振幅は約±2μmであった。これはFEL発振の不安定の主な要因になっていた。架台の剛性を強化した結果、固有振動数は約30Hzに上昇し、振幅は±0．1μm以下に減少し、低レベルFEL発振の安定性は大幅に改善された。

4. 短波長 FEL の進展

誘電体多層膜鏡は耐久性に難があり、広い波長範囲で反射率が高く且つ耐久の高い反射鏡開発が急務であった。高レベル発振で耐久性の高い反射鏡として、2003年3月、金蒸着金属鏡を発注したが入手に3～4ヶ月を要するので、比較的入手が容易な金蒸着ガラス鏡で発振テストを試みたが、図5に示すように、高レベル発振では金蒸着面に孔があき、破損の原因は熱的か電界強度によるものかは不明であった。

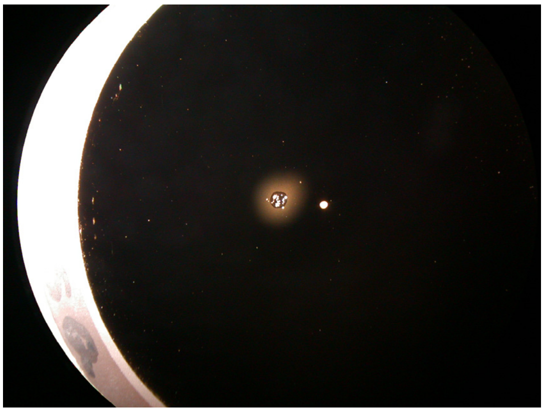

図5　破損した金蒸着面（中央左側）、0.5mm径の出射孔（中央）

又、金蒸着反射鏡は短波長の反射率が低いこともあり、銀蒸着金属鏡も対象に再検討することになった。真空中では金より銀の反射率が高いが、空気中では銀が酸化するために、金の反射率が銀より高いということが定説であった。真空中で銀蒸着をした金属鏡に、真空中でコーテングできる特殊技術を持っているメーカーで銀蒸着金属鏡を製作することになった。反射鏡の反射率は1～5μmの波長範囲で99.3％以上、曲率半径は4000mm、出射孔は0．3mm径に設定し、6718mmの共振器長に対して焦点がクロスオーバーになるように設計した。一方、2000年度に学術フロンティア推進事業により実験棟が増築され、レーザー照射実験室（9室）が設けられた。又、各レーザー照射実験室にはレーザービームライン

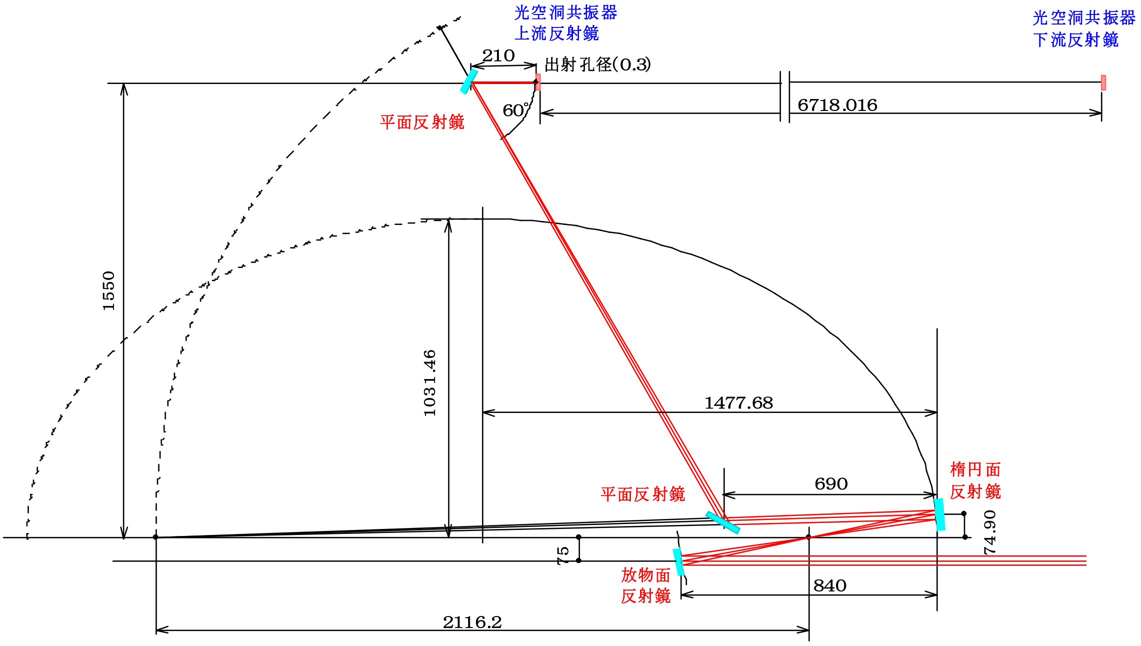

図6　回転楕円鏡と放物面鏡を組み合わせたビーム・エックス・パンダー構成図

が敷設された。FEL発生装置と実験室間の距離が最大60m離れているために、FELがどの実験室でも有効に活用できるように、ビーム・エックス・パンダー（平行光補償装置）を設置することになった。

この光学系は、図6に示すように、5μm波長のFELが光空洞共振器反射鏡の出射孔（半径：0．5mm）から放射される光の第1回折像が30mm径の平行光になるように、回転楕円鏡と放物面鏡を組み合わせた構成である。

図7　加速器室の放射線シールド壁のペネトレーションダクトの出口（実験室側）のレーザー回折像

この装置は、2003年6月、光空洞共振器の上流に設置された。一方、ハーフミラーにより光空洞共振器内に導入された半導体レーザーは、光空洞共振器やレーザービームラインのアライメントに有用であった。又、ビーム・エックス・パンダーの特性はレーザー使って計測され、図7に示すようなクリアな回折像が得られ光学的に優れた特性を示した。

写真　ビームレーザーラインに設置されたFELモニター

7月末、銀蒸着金属鏡は納入され、8月末にFEL発振テストを行った。その結果、高レベルの一過性発振も解消しFELも比較的安定に

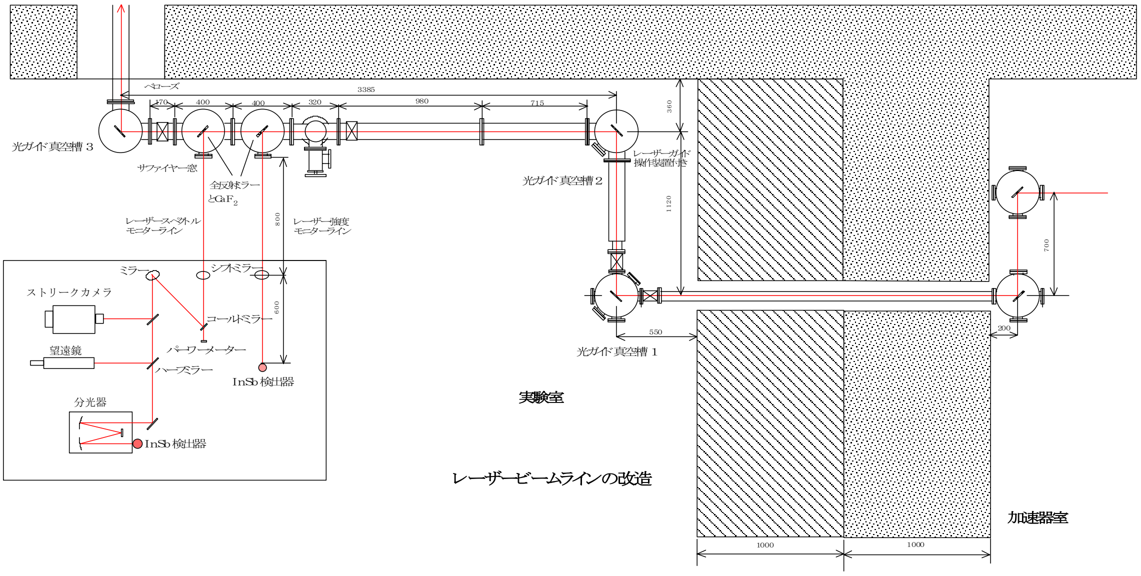

図8　実験室のレーザービームラインに設置されたレーザーモニターシステム

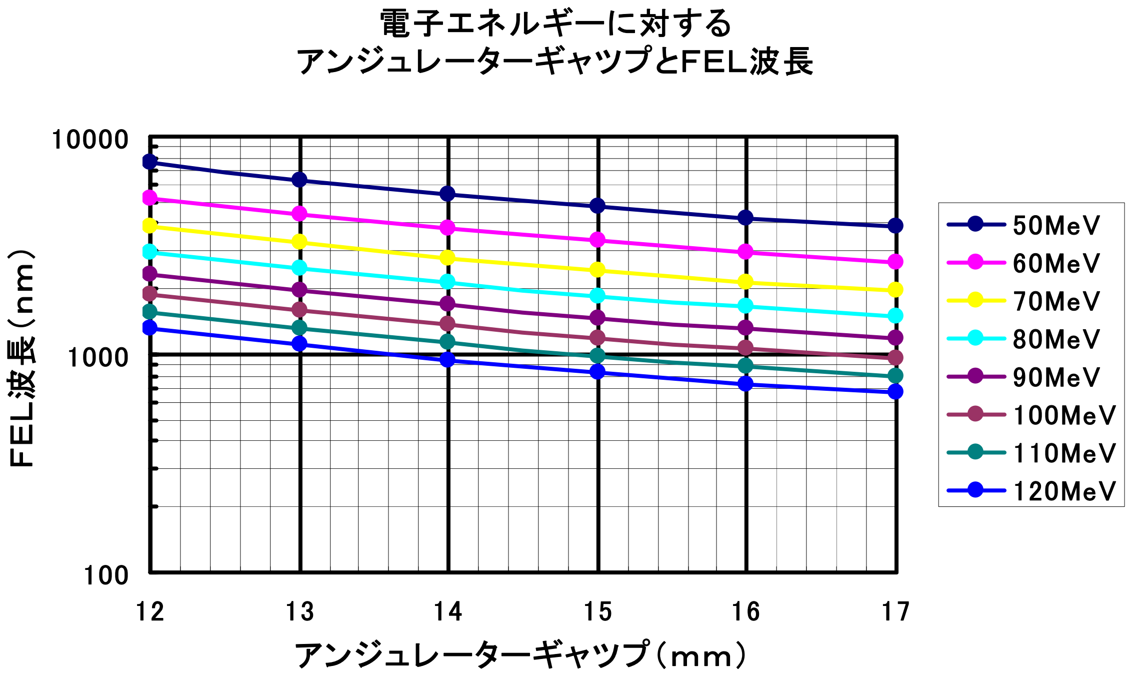

図9　アンジュレーター空隙（1／2）と電子ビームエネルギー（MeV）とFEL波長の相関

なった。又、10月には、図8に示すようなFELモニターシステムがレーザービームラインに導入し、FEL強度とその高調波スペクトルの常時モニターが可能になった。又、波長領域も１．３～５μmに広がり、飽和と思われる現象も観測された。ＦＥＬの共同利用実験をテスト的に開始した。11月末には、可変波長FELとしては1μmの壁を破る0.97μmの世界最初のFEL発振に成功した。12月には、可変波長領域は0.94μm～6μmに広がった。更に、2004年1月には、アンジュレーターのビームダクトを27mm径から21mm径のパイプに交

換して、アンジュレーターの最小空隙を30mmから24mmに縮小することにより、磁場密度が0.3085Tから0.4588Tに、K値は1.383から2.057になり、アンジュレーター利得も約10%増加した。図9に示す如く、アンジュレーターギャツプを変えた場合、電子エネルギー(50～120MeV)に対するFEL波長の可長範囲は0.8～8μmと大幅に拡張された。しかし、実用波長範囲はレーザー照射装置の出射窓(サファイアー)で制限されている。 この結果、レーザー照射室のFELエネルギーも2μm～3μm波長領域では5mJ/pulseに達した。

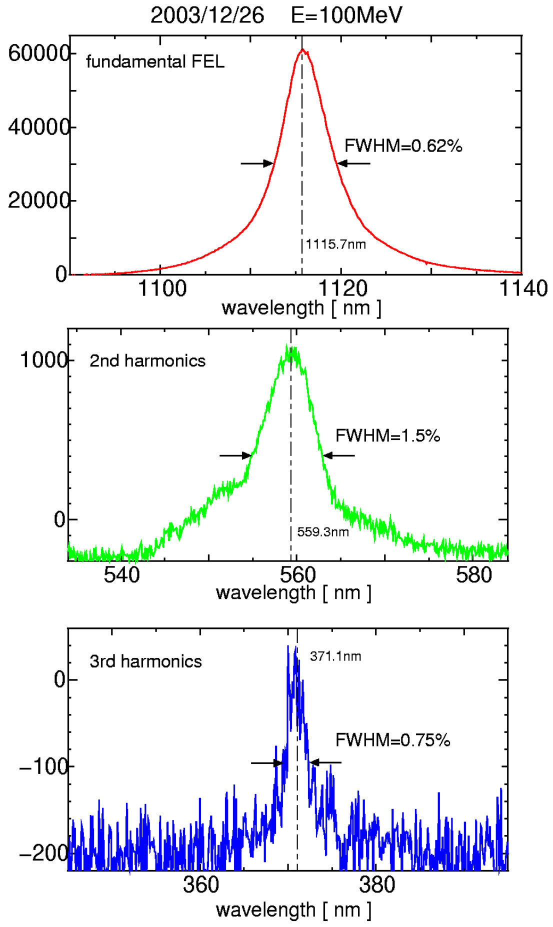

図10 基本波、2倍波3倍波のスペクトル

又、図11に示すようにFEL発振の飽和状態が確認でき、発振も非常に安定になった。図10にはFELの基本波、3倍波、5倍波のスペクト

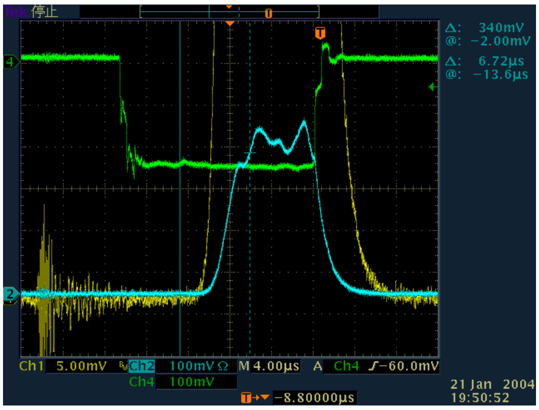

図11 FEL発振の飽和現象、ビーム波形(上図:ビーム電流＝50mA)、FEL波形(下図:4μS/div)

ルを示す。新実験棟には、半導体プロセス(無塵室)、新素材開発(無塵室)、光励起極限プロセス、化学触媒反応、光電子分光、生命科学、医学用、医療1、医療2、等の多目的のレーザー照射室(9室)があり、FELは床下のピットに敷設された真空ダクトを通じて供給されている。

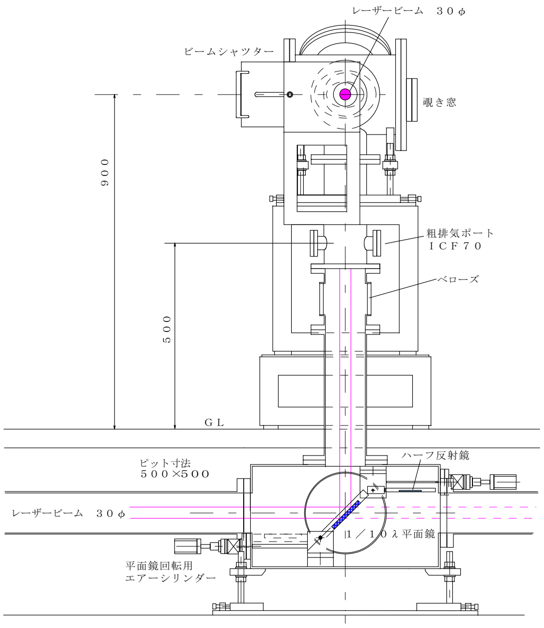

図12 各実験室に配置されたFEL照射装置の断面図

図12、写真2には、各実験室に設置されて

いるレーザー照射装置断面と全体像の1例を示す。

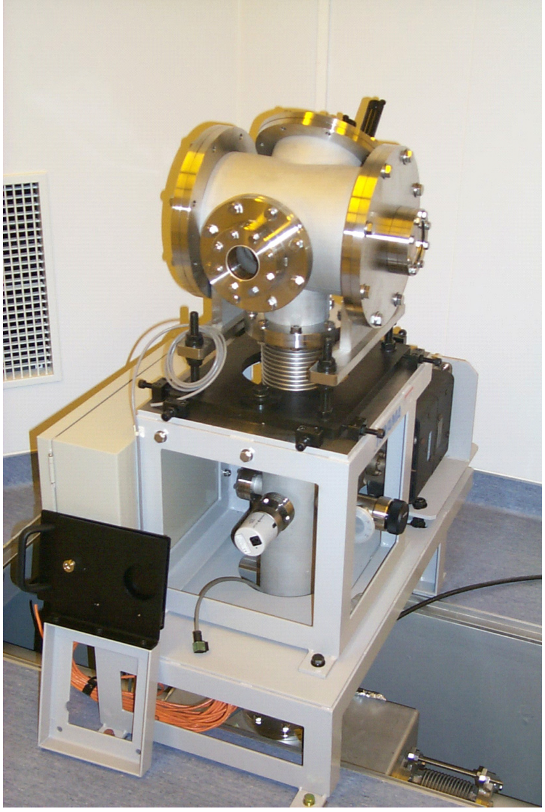

写真2　半導体プロセス実験室（無塵）に設置されたレーザー照射装置の全体像

日本大学電子線形加速器の特徴の1つは、クライストロンの出力電力を一定のまま、電子ビームエネルギーを大幅に変えられることにある。これは、図2に示すように、クライストロン2号機から供給される2本の加速管の間に大電力位相器を挿入し、加速管に供給される高周波電力位相を変え電子ビームのエネルギーを加減速できるためである。この対応策により、FELの可変波長領域を大幅に拡張し、更に、相対論的な電子ビームの磁気的圧縮を可能にした。即ち、電子ビームを高レベルに集群（バンチ）し、ビーム電流の尖頭値を高くするために、FELは発振し易くなる。従って、この処置は最初のFEL発振が小さいビーム電流（約40mA）で達成できた要因の一つでもあった。しかし、電子ビームのバンチ幅が減少し、蓄積光と電子ビームの相互作用時間が短縮するために、パルスあたりのFELパワーは必ずしも大きくならない。最近、光加工を試みるFEL照射実験では高レベルのレーザーパワーが要求されるようになり、2004年度は、クライストロンを調整し電力増強を図り、200mAの電子ビームを加速しFEL発生装置に供給するとFELパワーを100mJ／パルスにできる可能性があり、このテストに挑戦することを試みる。

5．まとめ

日本大学の短波長FELは極普通の電子線形加速器を高度化することにより、ほぼその目標を達成することが出来た。高度化の障害は電子線形加速器の長パルス運転であり、これまでの短パルス運転では予想出来ないような故障が続出した。その対応策に追われ、高度化は段階的にしか進められなかった。

高度化の難関は2．5μSの短パルス用クライストロンを20μSの長パルスで稼働させることであった。而も1個の出力窓のクライストロンで20MWを越える大電力を増幅することは、世界に例のない常識からかけ離れた試みであった。幸いにも、試行錯誤の末にこの難関を突破できたことは全く幸運であった。これを突破口にして、電子銃の低エミッタン化、高周波位相の制御、電子ビームの安定化等の懸案事項が、1つ1つ着実に克服することができた。

FEL波長領域は当初の目標より長波長側にシフトしたが、これはアンジュレーターの永久磁石の放射線による劣化と光空洞共振器反射鏡の反射率特性から制限された処置であるが、可変波長 FEL としては世界最短波長（0.94～6.0μm）を達成することができたことは、幸運であった。現在、レーザー照射室では約

5mJ／パルスの出力が得られ、FELを集束して衝撃波を利用できる状態である。又、FELの共同利用実験を2003年10月に開始し、最近はFEL利用実験グループも徐々に増加している。

今後の課題として、1）レーザービームラインの反射鏡の枚数を減し光輸送中の損失を軽減する。2）可視光領域のFEL発振を試み、クライストロンの出力高周波電力を30MWに増強し、電子ビームのエネルギーを125MeVに増強する。3）100mJ／パルスのFELパワー増強を試み、クライストロンの出力高周波電力増強による200mAビーム電流を加速しビームパルス幅を拡げて、電子ビームと蓄積光の相互作用時間を延ばす。4）短波長領域における広帯域で高反射率反射鏡の開発を試みる。

これは可変波長の短波長FELに共通する問題であり、ここに突破口を見出さない限り、紫外可視光領域FELに今後の展望は望めない。

Reference

1) I. Sato, et al., Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan (1997) 104-106.

2) K.Hayakawa, et al., Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan (1997) 41-43

3) T.Tanaka, et al., Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan (1997) 172-174.

4) I.Sato, et al., Proceedings of the 23rd Linear Accelerator Meeting in Japan (1998) 22-24.

5) I.Sato, et al., Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 30-33.

6) Y.Hayakawa, et al.,Nucl.Instr.and Math.A8 (2002) Vol483,1-2,p29-33

7) T. Sakai, et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000) 228-230.

8)K. Yokoyama, et al., Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan (1999) 359-361.

9) K. Yokoyama, et al., The 12th Symposium on Accelerator Science and Technology (1999) 359-361.

10) K. Kanno, et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000) 168-170.

11) K. Kanno, et al., Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 73-75.

12) I. Sato, et al., The 12th Symposium on Accelerator Science and Technology (1999) 37-39.

13) I.Sato, et al., Proceedings of the 25th Linear Accelerator Meeting in Japan (2000) 24-28.

14) K.Hayakawa, et al.,Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 285-287.

15) K.Yokoyama, et al.,Proceedings of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001) 231-233.