

ATF/GLC 開発

浦川順治

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

KEK-ATF で得られた主な成果と今後期待できる先端電子加速器研究開発の見通しについて総括する。一方、JLC は、国際的な枠組みの中でリニアコライダー計画のホストになるために GLC(Global Liner Collider)と呼ぶことになった。リニアコライダー技術開発で国際的に優位な戦いを展開するのに必要な GLC 計画の開発研究内容について報告する。

1 ATF の研究成果

KEK の ATF (Accelerator Test Facility -試験加速器、図 1) は 1993 年から建設を開始して、そこを主な拠点としてリニアコライダーで必要になる電子源、入射加速器 (S-バンド線形加速器)、ダンピングリングなどについて、精力的に研究を続けている。その ATF は、マルチバンチビームを生成できる電子源、1.3 GeV の S-バンド線形加速器、1.3 GeV ダンピングリング、ビーム取り出しラインなどで構成されたビーム開発装置である。この章では、リニアコライダーのための入射器システム (高品質マルチバンチビーム供給システム) について、ATF のビーム開発研究成果を報告する。リニアコライダー (GLC) で入射器システムに要求しているビームパラメータは表 1 のようになっている。現在 ATF で確認されているビームパラメータも表 1 に示す。

ACCELERATOR TEST FACILITY FOR LC

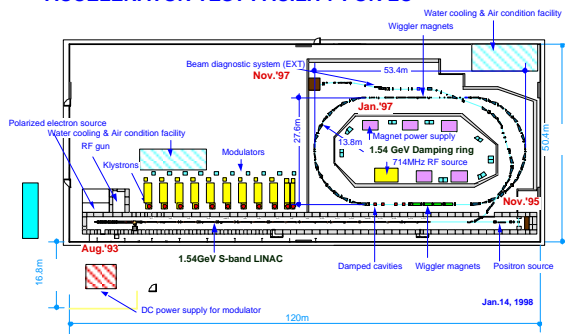


図 1 Layout of ATF

表 1: 入射器システムのビームパラメータ

	GLC	ATF
バンチ強度[electrons/bunch]	0.75×10^{10}	1.0×10^{10}
バンチ数[bunches/pulse]	192	20
繰り返し [Hz]	150	3.125
規格化垂直エミッタンス [m]	2×10^{-8}	1.5×10^{-8}

ATF の繰り返しが少ない主な理由は地上に建設された加速器であるために放射線シールドを十分に行うことができなかったことにある。ATF の最も重要な目標は規格化垂直エミッタンス $3 \times 10^{-8} \text{ radm}$ 以下をマルチバンチ電子ビームで実現することである。この目標値は図 2 に示すように既に達成され、測定値と将来計画の設計値も示した。この達成値を確認するためにレーザーワイヤービームサイズモニター、X 線放射光モニター、放射光干渉モニターなどを開発して、測定誤差範囲内で一致する結果を得ている。バンチ内散乱効果を無視できるバンチ電流値での垂直エミッタンスは 4 pmrad 以下になっている。

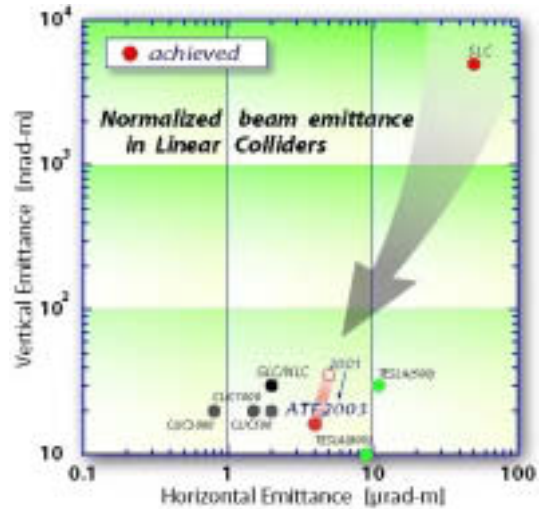


図 2 ビームの規格化エミッタンス

ダンピングリングに入射された電子ビームは放射減衰により水平方向及び垂直方向のエミッタンスが 10^{-9} radm 及び 10^{-11} radm 以下になるまでリング内を回ったのち、取り出される。垂直方向のエミッタンスは 10^{-11} radm で、このような超低エミッタンスは種々の補正を行わない限り得ることができない。ダンピングリングの最終性能を発揮させるには最先端のビーム診断技術と自動制御技術を駆使することになり、こうした技術を ATF で開発している。

ダンピングリングに蓄積されている電子ビームは今までに得られていなかった微小サイズの状態になっているので、そのビームの性質を研究することがビーム物理の新しい発見に繋がる可能性がある。そこで、電子ビームの性質と高品質電子ビームの利用実験について述べる。

ATF ダンピングリングのビーム寿命は Touschek 効果 (数分程度) で決まっている。これはバンチの体積が非常に小さいためにバンチ内での電子間の散乱が激しくなり、電子リングのエネルギーアクセプタンスから電子が飛び出してビーム寿命が短くなることを意味している。このバ

ンチ内での電子間の散乱の激しさはバンチ電流密度にリニアに依存している。一方、エネルギーアクセプタンスから散乱電子は飛び出さないが、バンチ内の衝突の激しさによってバンチの体積やエネルギー巾は増加する。この現象を Intra-beam Scattering 効果と呼ぶ。この効果によって、Touschek 寿命が長くなる。バンチ長、エネルギー巾、ビームサイズ及びビーム寿命等のバンチ電流依存性を測定した。その結果から残留ガスによる散乱効果を評価して、垂直エミッタンスと水平エミッタンスの比が

0.5% 以下であることが推定できる。この比が正確に決定できないのは、残留ガスの成分測定が行われていないためである。

電子リングの真空が良くなくてビームと残留ガスの散乱によってビーム寿命が決まる場合もある。通常 10^{-7} Pa 以下の高真空度でビーム運転した場合、1.3GeV のビームに関して残留ガスによる散乱の効果は無視できる。しかし、量子励起やバンチ内散乱と比較して頻度の少ない残留ガスによる散乱はビームテールを作ることが理論的に知られている。このビームテールの測定はワイヤースキャナーを使って行うことができる。しかし、非常に統計を上げる必要があるのと、ビームの軌道ジッターの問題を解決しなければならない。パルスごとのビームの軌道ジッターの問題を解決するため、ビーム軌道を同時測定して補正する技術を開発した。ATF の位置測定システムの軌道測定分解能は1回のビーム通過で $3\mu\text{m}$ 程度である。

レーザー逆コンプトン散乱による偏極陽電子生成実証実験のために、取り出し電子ビームとレーザーを衝突させて円偏向ガンマー線生成実験を行ってきた。取り出し電子ビームをマイクロサイズにして、マイクロサイズのパルスレーザーと衝突させることによって、効率良く高エネルギーガンマー線を生成できる。1.3GeV の電子ビームと532nm の円偏向レーザーの衝突では、超前方に50MeV 以上の円偏向ガンマー線がブーストする。このガンマー線を厚さ1mm 程度のタングステン標的に衝突させて、対生成によって生まれる偏極陽電子を検出する実験である。3段階の素過程をへて偏極陽電子を検出することになる。既に陽電子の検出と円偏向ガンマー線の偏極度測定には成功

している。今年度中に偏極陽電子を生成して、その偏極度測定を行う予定である。

超低エミッタンス電子ビームを取り出して、薄い金属から数十マイクロメートル離れた場所を通過させるとコヒーレントな回折放射が観測できる。ATF の場合電子ビームをマイクロサイズにして、0.2mm 程度の金属スリットを通過させることが可能になる。この薄い小さな金属スリットがバンチの長さ以上のコヒーレントな高輝度遠赤外線源として利用できる。また、バンチ長の測定を非破壊で行うことができる。

以上の詳しい研究成果は参考文献に述べられている。[1-10]

2 今後の ATF の目標

今後の ATF の役割は、より高度なビーム診断技術とビーム調整法を開発しながら、減衰時間の短縮実験・ナノビーム軌道調整実証試験を行うことである。開発研究で常に最も重要なことは、多くの優秀な若手の研究者を育てることである。ATF の今後の目標は以下のようにまとめることができる。

- (1) 210mA までの電子ビームをダンピングリングに蓄積して目標以下の垂直エミッタンスが達成されていることを確認する。
- (2) ウィグラー電磁石によって減衰時間を短縮しても、目標以下の垂直エミッタンスが開発した種々の補正によって得られることを確認する。
- (3) ダンピングリング内のビーム軌道ジッターを $1\mu\text{m}(\text{rms})$ 以下にする。
- (4) 取り出した電子ビームの軌道ジッターを $1\mu\text{m}(\text{rms})$ 以下にして、垂直・水平エミッタンス測定を行い全ての目標値が達成できていることを確認する。
- (5) 取り出した電子ビームでナノメートルの軌道測定と軌道補正が技術的に可能であることを実証する。

以上の研究成果を2006年度末までに報告できるように開発を進める。[11]

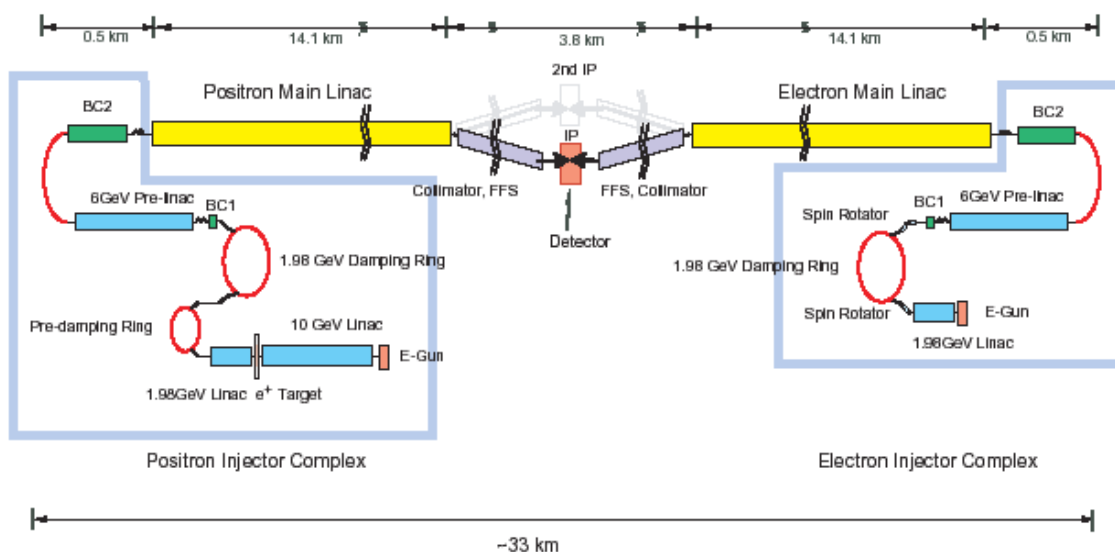


図3 Layout of GLC

3 GLC 加速器

3.1 GLC と GLCTA

JLC は GLC と呼ぶことになった。これは国際的な枠組みの中で日本がホストになって、リニアコライダー計画を推進したいという意志表明でもある。ここでは GLC 加速器計画の概略とその研究開発状況について報告する。電子陽電子リニアコライダーの実験エネルギーを 500GeV から 1.2TeV まで考慮した場合、図 3 の全長約 33km 直線型衝突加速器になる。

電子ビーム源、陽電子生成系等の入射器システムの役目は、大強度の電子/陽電子流(ビーム)を発生し、そのビームとしての質を極限まで高めた上で、主ライナックに安定に送り込むことである。ビームの強度は、短い時間間隔でパルス状に並ぶ粒子群(バンチ)に分散させて実現する。ここで生成しなければならない高品質ビームは $10\text{pm} \cdot \text{rad}$ 以下の位相空間拡がり(エミッタンス)を持ったもので、リニアコライダーの衝突点で数 nm まで絞り込めるものである。このようにビームの断面を極めて小さくして衝突させることによって、ルミノシティを向上させる。これに必要なすべての要素技術と全体制御技術を開発し実証しようというのが、ATF/GLCTA(KEK 試験加速器)での研究の主目的である。この技術開発の電子源部に関しては既に実現していると言える。陽電子源部については、KEKB などの加速器物理・技術における問題点を取り入れて、より信頼できる設計を行う必要がある。

直ぐに実証しなければならない重要な技術は 65MV/m 以上の高電界発生である。図 4 に KEK-SLAC 日米協力で行なった最近の高電界試験結果を示す。この放電回数をさらに減らして、安定に 65MV/m 以上の高電界が維持できることを示さなければならない。この成果の見通しはほぼ確認できているが、実際に半年以上高電界運転を行い、何も問題が起きないことを実証する必要がある。

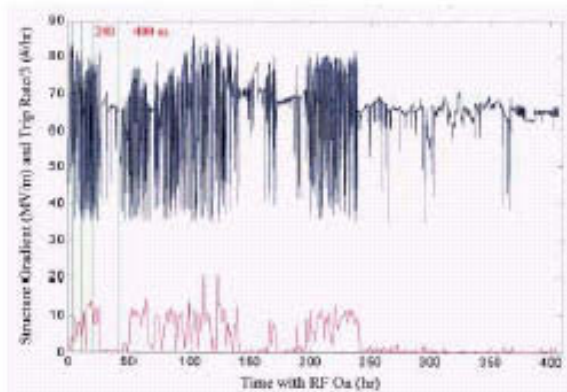


図 4 X-band 60cm 加速管の高電界試験結果

一方、日本がホストになるためには全ての必要な技術を熟知する必要がある。そこで今年度から ATF からの電子ビーム入射を将来展望として、アセンブリホール西側に

GLCTA (GLC Test Accelerator) を作りはじめた。ここで高出力 X-band 高周波源や高電界加速管等による高電界総合試験を開始することになった。写真は 7 月中旬の装置設置状況を示している。9 月から X-band 高周波発生試験を行い、10 月から 12 月にかけて小規模システムによる高電界実験を行う予定である。高周波のパルス圧縮も含めた総合試験は 2005 年の始めと考えている。高電界発生実験が順調に行えれば、2005 年度中に電子ビーム加速を行うことになる。



図 5 GLCTA 写真

3.2 GLCTA 開発目標

GLC の主加速器 1 ユニットは 8 本の 60cm 加速管、2 本の 75MW, 1.6 μsec パルス幅出力のクライストロン、大電力高周波パルス時間圧縮装置 SLED-II 及び大電力パルス電源で構成される。8 本の加速管に 475MW, 400nsec パルス出力がビームと同期して送り込まれる。主加速器 1 本当たり 1200 ユニットが必要である。バンチ当たり 10^{10} 個の 200 バンチ程度の電子及び陽電子パルスビームを 150Hz で安定に 150GeV から 500GeV 以上まで加速して、衝突点でビームを数ナノメートル(垂直方向)まで収束・衝突させる。ATF でビーム生成・診断・制御技術の開発を行いながら、主加速器 1 ユニットでの安定な高電界発生実験を行うことが最も重要な課題になっている。65MV/m を生成できる見通しがでてきたが、システムとして機能するためにはそれぞれの装置の高い信頼性を見極めなければならない。また、2005 年度末までに信頼性も評価できる主加速器ユニット試験を終了して、量産体制を構築しなければならない。

3.3 X バンド常伝導リニアコライダーと超伝導リニアコライダーの開発状況

ICFA (International Committee for Future Accelerator) の組織下にリニアコライダーの技術・価格・信頼性等を総合比較検討する Accelerator Sub-Committee が組織された。今後 2 年間で超伝導リニアコライダーと常伝導リニアコライダーのシステム比較を行い、報告書を提出することになった。そこで今超伝導リニアコライダーで問題になっている項目を以下に示す。

- (1) ダンピングリング用高速入射・取出しキッカーの開発 (20nsec, 3MHz の高速高繰り返しキッカー)。
- (2) 大強度陽電子生成用に 150GeV 大強度電子ビームと 100m 長以上のアンジュレータが必要であること。
- (3) 300K から 2.7K へ大電力高周波を導くためのインプットカプラーの大量生産と加速器ユニット試験設備。

勿論、これらに関する技術開発や設計変更が行われて、新しい提案がなされる可能性がある。一方、常伝導リニアコライダーの問題点は安定な高電界ビーム加速実証以外に下記の問題も解決しなければならない。

- (1) ビームによる装置破壊を防ぐための高速インターロックシステムの開発。
- (2) 陽電子標的の保守維持。

4 その他の重要な開発要素

4.1 アライメント技術

第3世代放射光リングをはじめ建設予定の種々の加速器でも高性能のビームを得るために高精度のアライメント技術が重要視されているが、リニアコライダー (GLC) ではさらに高精度のアライメントが要求されている。ナノ

地盤の変動に関しては、人間の生活活動に伴ういわゆるカルチャーノイズ (2~50Hz)、海の波打ちによるノイズ (0.05~2Hz) および微小地盤振動 ($\leq 0.05\text{Hz}$) の領域で比較測定が行なわれている。また地盤をモデル化したシミュレーションによりその変動を予測する試みもなされ、それによると 10km で 10 μm の横方向偏差は 1日程度で現れるなどの結果を得ている。

4.2 ビーム制御及び診断

リニアコライダーは電源同期でパルス運転される。高速でリニアック内を通過していく電子や陽電子のパンチビームがどの場所を通過しても、同様な高周波電場で加速されなければならない。従って数千台のクライストロンの RF 位相を光の速度に合わせてづれるように制御する必要がある。これは、全長 30km 以上の距離での位相精度は 1ps 以下にしなければならないことを意味する。同軸ケーブルや導波管では温度による位相のドリフトが防げないので、温度補償型の光ファイバーケーブルを用いて 11.424GHz や 2.856GHz の基本高周波を送る基礎実験を行なっている。

クライストロンの電源には一次電圧電流波形、RF 出力波形、RF フォワード並びにバックワード波形等をモニタ

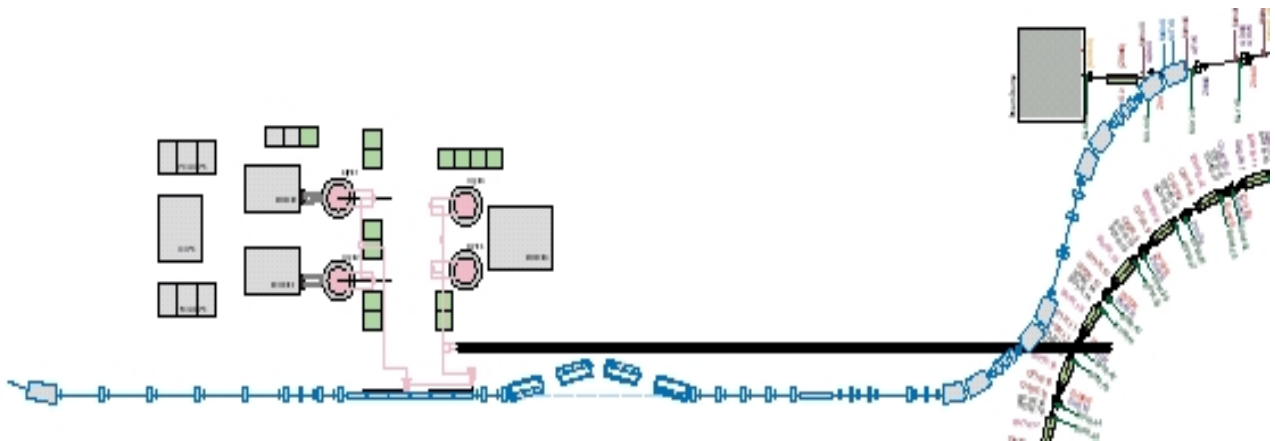


図 6 GLCTA ビーム加速試験装置配置

メーターの断面のパンチを安定に衝突させるためには、加速器部品のアライメント、特に垂直方向のアライメントを超高精度で行わなければならない。要求される精度は振動の周波数成分に依存し、約 10Hz 以下の低周波成分に関しては、入射用 S-バンドリニアックの場合は 200 μm 以下、ダンピングリングやパンチコンプレッサー及び前段 S-バンドリニアックでは 50 μm 以下、主リニアックの加速管は 10 μm 以下、主リニアックの 4 極電磁石に関しては 0.1 μm 以下、最終収束系に至っては 50nm 以下になるように、電磁石、ビームモニターや加速管の架台をフィードバック制御する必要がある。最終収束系のアライメントの研究開発も進められており、現在レーザー測量技術、サーボモーター並びにピエゾアクチュエーターを用いて数トンの重量の収束電磁石の位置を 50nm の精度でフィードバック制御することに成功している。

一する必要がある。一台の電源に対して 10~16 点の波形をモニターしなければならない。種々の高信頼測定装置を開発する必要がある。数 nm 程度の分解能をもつビーム位置モニターとして候補にあげられるものはマイクロ波空洞のビーム偏向モードを利用したものである。この測定技術の一部はスタンフォード線形加速器センターで既に実証された。

4.3 ATF/GLC の応用と波及効果

ATF からの電子ビームが設計仕様を十分満たすものになると水平方向に 10 μm 、鉛直方向 1 μm 以下にビームを絞ることが可能になる。この電子ビームを利用してレーザー逆コンプトン散乱による準単色ガンマ線生成の実験が可能となるので、その開発が大学等との共同実験として進められている。また、近い将来に試験パンチコンプレッサーも建設

使用できる状況になれば One Pass FEL(Self Amplified Spontaneous Emission, SASE) に関する基礎実験が可能になる。

GLC 水準の極小エミッタンスビームは、新しい光の発生源としての可能性を秘めていることが知られている。そこで 10GeV~50GeV のビームを取り出し、200m 程度のアンジュレータを利用してコヒレント X 線 (波長 0.2nm ~ 0.02nm) を発生させるセクションを組み込むことも検討している。このような短波長のコヒレント光を利用すれば、種々の物質の 3次元構造が原子レベルで容易に見ることができよう。こうしたコヒレント X 線の応用は、これまでにない新しい研究を創出し物性物理学にも革命的な進歩をもたらすものと期待されている。

4.4 GLCTA ビーム加速実験計画

図 6 にダンピングリングから取り出したマルチバンチ電子ビームの加速実験装置配置案を示す。ビーム輸送ライン後にバンチ長圧縮用 S バンド加速管と 4 台のシケーン電磁石を電子ビームが通過すると、電子バンチ長は 300 μ m 以下にできる設計になっている。これでマルチバンチ電子ビームのエネルギーをさらに 260MeV 増やす計画である。

ATF や GLCTA という先端的な加速器研究プロジェクトでは、加速器研究者の国際的な協力が大きな力となっている。同時に、国内大学チームとの共同開発研究も、重要な役割を果たしてきた。東北大学、東北学院大学、東京都立大学、東京理科大学、早稲田大学、横浜国立大学、名古屋大学、京都大学、東京大学等との共同研究は、プロジェクトの推進とともに、優れた若手研究者の育成にも貢献している。また、民間等との共同開発研究も、加速器技術の発展に重要な役割を担っている。

参考文献

- [1] T.Okugi, et al., Phys, Rev. ST Accel. Beams 2, 022801-10 (1999).
- [2] K.Dobashi, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 437, 167-177(1999).
- [3] T.Okugi, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 455 207-212(2000).
- [4] H. Sakai, et al., Phys, Rev. ST Accel. Beams 4, 022801 (2001).
- [5] K.Kubo , et al., Physical Review Letters, Vol.88, No.19, 194801-1(2002).
- [6] K.L.Bane, et al., Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams 5, 084403 (2002) .
- [7] H.Sakai, et al., Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 5, 122801(2002).
- [8] H.Sakai, et al., Jpn.J.Appl.Phys.41, Vol. 41, pp. 6398-6408. (2002) .
- [9] T.Muto, et al., Physical Review Letters, Vol.90, No.10, 104801-1 (2003).
- [10] I.Sakai, et al., Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 6, 091001(2003).
- [11] Ed. Asian Committee for Future Accelerators, Japan High Energy Physics Committee and High Energy Accelerator Research Organization, GLC Project