

# 原研フォトカソードマイクロトロン<sup>1)</sup>の現状

神門正城<sup>1, A)</sup>、小瀧秀行<sup>A)</sup>、近藤修司<sup>A)</sup>、金沢修平<sup>A)</sup>、益田伸一<sup>A)</sup>、横山隆司<sup>A)</sup>、的場 徹<sup>A)</sup>、中島一久<sup>A, B)</sup>

<sup>A)</sup> 日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター

〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台 8-1

<sup>B)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センターで建設されたフォトカソード・マイクロトロン<sup>1)</sup>の第一期のビーム試験の結果を報告する。現在は1GeV レーザー加速に向けてのビームライン改造を進めており、その計画の概要と進捗状況について述べる。

## 1. はじめに

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究センターでは、レーザー航跡場加速研究のための高品質電子ビーム入射装置としてフォトカソード RF ガンと race-track 型マイクロトロン (以下、RTM) を組み合わせた加速器を整備してきた<sup>[1]</sup>。この加速器は昨年度ビーム性能試験を行い<sup>[2]</sup>、今年度は当研究所が開発した 100 TW Ti:sapphire レーザー<sup>[3]</sup>をドライブ源としたレーザー航跡場加速研究に使用する。以下では、加速器システムの概要と経過、性能試験結果を述べ、最後にレーザー航跡場加速実験の準備状況について述べる。

## 2. 加速器システム

### 2.1 概要

加速器システムの構成を図 1 に示す。電子銃は、BNL タイプの RF ガン<sup>[4]</sup>を用い、照射用レーザーは、全固体 Nd:YLF レーザーシステムで、エネルギー安定度 0.2% rms である。この RF ガンは、短パルス、高輝度の電子銃で問題となる線形空間電荷力によるエミッタンス増大を補償するソレノイドが装着されているのが特長で、エネルギー 3.5 MeV、エミッタンス 1~10  $\pi$  mm-mrad、パルス幅 5~10 ps、電荷量最大 3 nC の電子シングルバンチを発生させることができる。電子銃からの電子ビームは、入射ビーム輸送系を通して RTM にシケイン磁石の 1 つを通して入射される。シケインを使用する理由は入射軸は RTM の直線部であり、周回軌道にバンチを作るためである。直線部には定在波型加速空洞があり、入射電子は 1 ターン目は約 6 MeV に加速され、主電

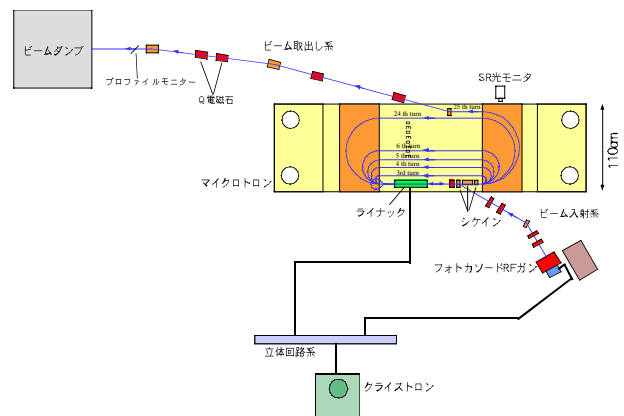


図 1: フォトカソード・マイクロトロン<sup>1)</sup>の構成

磁石前に置かれた逆磁場と主電磁石の磁場により 180°偏向されて再びライナックに入射される。つまり入射方向とは逆方向に加速され、以降は同じ周回方向で 24 回周回する。1 周回あたり 6 MeV の加速を受け最終的には 150 MeV まで到達し、ビーム取出し系を通して射出される。入射時に複雑な方法を採用したのは RTM が本来は熱電子銃の低いエネルギー (80~120 keV) の入射を考慮されて設計されていたためである。取り出し系は RTM での分散を補償する系となっている。

### 2.2 経過

平成 12 年 3 月に 150 MeV のビーム加速に成功し、同年 6 月に施設検査に合格した。その後、RF コンディショニング中に RF 窓から RF ガン内に SF6 ガスがリークするトラブルが発生した。これは、コンディショニング中の反射等で RF 窓が局部的に加熱され、ピンホール状のリークが発生したと考えている。修理完了後、ビーム性能試験を開始した。この結果については、次の章で述べる。平成 12 年 12 月には、運転時の実験室内での線量分布を測定した。この加速器は、平成 13 年 2 月をもって第一期の運転を終了し、3 月からはレーザー航跡場加速実験に向けたビームライン延長作業に入った。放射線申請の条件にビームダンプの位置を確定しているため、現在は運転できない。ビームライン延長完成に合わせて変更申請を進めており、本年 9 月からの運転再

<sup>1)</sup> E-mail: kando@apr.jaeri.go.jp

開を計画している。また、レーザー航跡場加速で 1GeV のエネルギー利得を目指しているため、そのための変更申請も準備中である。

### 3. 性能試験結果

#### 3.1 ビーム電流・透過率

RTM のビーム輸送実験を行なった。入射電荷量は入射 BT 系の銅製ファラデーカップで、150 MeV 電子の電荷量をビームダンプで測定した。ビームダンプはビームキャッチャー部がアースと電氣的に切り放されており、平均電流値を読みとれるようになっている。現在までのところ最大電荷量 95 pC (このときの透過率 77%)、最大透過率 92% (このときの電荷量 68 pC) が達成されている。シミュレーションによれば入射電荷量が 1 nC のときの透過率は 26%、電荷量が低い場合はほぼ 100% が達成されると予測されている。フォトカソードの量子効率が  $1\sim 2 \times 10^{-5}$  程度と期待される値よりも 1 桁程度低く、入射電荷量が 100~200 pC に制限されているため、透過率は高くなっていると考えている。

#### 3.2 エミッタンス

ビーム取出し部の四重極電磁石の励磁電流値を変え、ビームサイズの変化を測る Q-scan 法を用い RTM のエミッタンス測定を行った。ビームのプロファイルモニタは、合成石英基板 (20×25×1t) に Al を 300 nm 蒸着したもので、電子ビームが通過する際に発生する Optical Transition Radiation (OTR) 光を Image Intesifier 付の CCD カメラ (Princeton Instruments、IMAX-CCD) で測定した。この箇所は、RTM の取出し時における分散補償系の途中であり、水平方向の分散関数は零になっていないため、測定される水平方向のビームサイズは分散による拡がりを含んだ量となる。今回はスクリーンにおける分散によるビームサイズの拡がりを形式的に

$$\sigma_x = (\beta\epsilon + (D \cdot \Delta p / p)^2)^{1/2}$$

として評価を行った。ここで、第一項はエミッタンスで決まるビームサイズで第二項が分散による拡がりを表す。

Q の位置での分散関数 D、D' は、RTM の配置と励磁電流から決定でき、 $D=0.3795 \text{ m}$ 、 $D'=-0.05700 \text{ rad}$  であった。これからビームサイズの測定点であるスクリーンの位置での分散関数は、Q の集束の強さ (焦点距離を f とする) に依存し、

$$D(\text{scr}) = -0.01412 + 0.3795(0.9914 - 1.510/f)$$

と与えられる。以下で分散を補正する場合は、エネルギー分散として計算値である 0.1% を仮定して行った。

垂直方向には分散は生じないので、偏向磁石を含んだ上記測定系でも原理的には通常の Q-scan 法と変わらない。

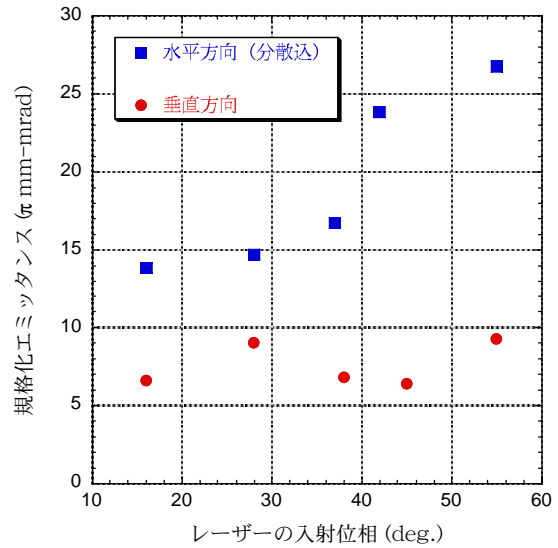


図 2 : 入射位相に対するエミッタンス

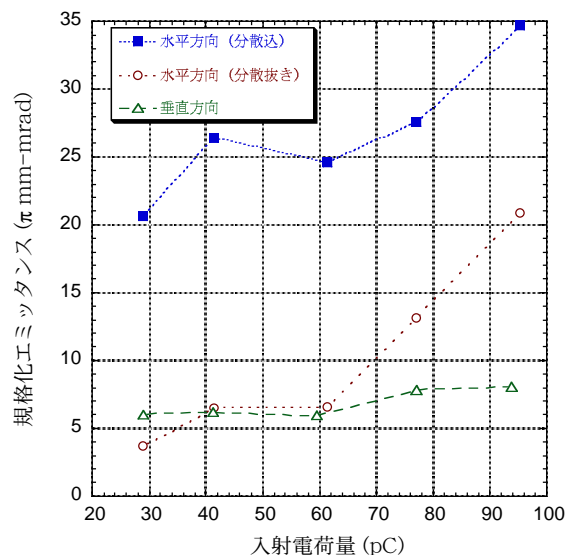


図 3 : 入射電荷量に対するエミッタンス

図 2 は電荷量を一定 (50 pC) に固定して規格化エミッタンスとレーザーの RF に対する入射位相を描いたグラフである。垂直方向は、入射位相に対してほとんど変化が見られないが、水平方向は入射位相が小さくなるにつれてエミッタンスが減少する様子が見て取れる。これはフォトカソード RF 電子銃の特性として、入射位相が小さくなるにつれてエネルギーが高く、またエネルギー幅が小さくなることから、入射系の分散によるエミッタンス増大が抑えられているためと考えている。

図 3 に入射電荷量に対する規格化エミッタンスを描いたグラフを示す。電荷量が増大するにつれ、水平方向のエミッタンスは分散を含んだものも、分散を補正したものも増大しているが、垂直方向はほとんど一定である。この測定結果と測定時には、入射ビーム輸送系の電磁石の値は固定していた事実を考慮すると、この水平方向のエミッタンス増大は入射系での分散によるエミッタンス増大が原因として挙

げられる。その根拠は、いわゆる線形空間電荷効果によるエミッタンス増大では、水平垂直共にエミッタンス増大するべきであるのに非対称であること、および電荷量が変われば入射系が非分散となるパラメータは変わるべきであるという2点である。今後、PARMELA などの計算機コードと実験値の詳細な比較が行われればより定量的に確認されるであろう。

### 3.3 パルス長

RTM 内での電子ビームのパルス長の測定を行った。RTM の主偏向電磁石内で発生するシンクロトロン放射光 (SR 光) を Al 蒸着ミラーで 200fs の分解能を持つストリークカメラに導き測定を行った。ストリークカメラには電動ズームカメラレンズ (Canon) を取付けてあり、20 周目から 25 周目までのビームからの発光を集光し、掃引のタイミングを変えてそれぞれのターンでのパルス長を測定した。RTM の磁場の強さは 1.2 T、各周回での nominal energy から放射光の臨界波長は 25 周目で 70 nm 程度である。SR 光は臨界波長から長い領域まで広がったスペクトルを持ち、測定系の光学系の分光透過範囲は、400~1000 nm である。このように可視領域でスペクトルが広がっているため、レンズ系の色収差によりパルス長が実際よりも長く見えてしまうが、この効果はパルス長が 2~3 ps 程度以下でない顕著にならない。今回の測定では、光量が少ないこともあり、バンドパスフィルター等は使用せずに測定を行った。20~25 周回のパルス長を測定した結果、およそ 10 ps(rms)の結果を得た。これは設計値の 5 ps (FWHM)に比べて長い。今後は、取り出し系の後でのパルス長の測定および短パルス化を目指したパラメータ探索を行ってゆく。

### 3.4 ジッター

RTM の電子ビームとフォトカソード用レーザーのジッターを測定した。パルス幅測定で用いたストリークカメラに、25 周回目の SR 光とフォカソードレーザーの基本波を同時にかつ空間的に重ならない様に入射させ、その2つのパルスのピークの時間差を 100 shot 測定してジッターを評価した。図4に shot 毎の時間差を表す。100 shot 取得するのに要した時間は約 30 分であり、その間にドリフトし、不安定な「とび」が出ている様子が分る。このドリフトととびを入れて評価したジッターは、5.5 ps (rms)であった。これらを除いた短時間ジッターは 2.2 ps であり、同様の同期システムで線形加速器で測定した場合とほぼ同じ値を得た。RTM の場合は、軌道は長い、位相安定な加速を行っているので短時間のジッターは線形加速器の場合に比べて悪くはないようである。但し、長時間の安定性は明らかに悪く、ビーム電流安定性のときにも問題となってい

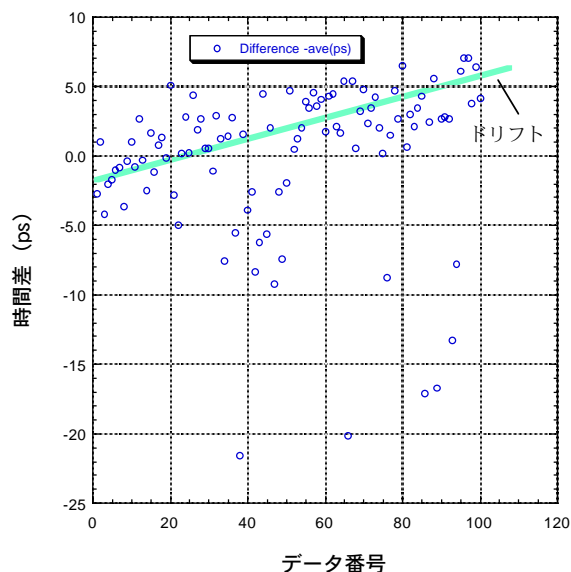


図4：ジッター測定結果

るレーザーの入射位相と RF のドリフト等が関連していると思われる。

## 4. レーザー加速実験

現在、100TW レーザーのトランスポートはほぼ完成し、電子入射器との同期システムを構築中である。電子加速器のビームラインは延長・設置中であり、9月から運転再開する。レーザー加速実験は、来年1月からテスト実験を開始する予定である。当初は、標準型のレーザー加速で、ガスフィルまたはガスジェットを用いて、集光強度  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>、プラズマ密度  $10^{18}$ ~ $10^{19}$ cm<sup>-3</sup>、加速勾配 100 GV/m で 100~500 MeV 程度のエネルギー利得を目指す。また、レーザー加速の加速距離を延長できる Z ピンチ型プラズマ光導波路の 2 号機の開発も平行して行われており、5 cm 程度の導波路で導波路型加速の実証と加速電子の高品質化、高エネルギー化を狙う。

## 参考文献

- [1] 神門 正城ほか, “原研関西フォトカソード RF ガンマイクログロンのコミッションング”, Proceedings of the 25<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Himeji, July 12-14, 2000
- [2] 神門 正城ほか, “レーザー加速のためのフォトカソードマイクログロン”, Proceedings of the Second Symposium on Advanced Photon Reaeearch, Nov.9 10,2000 (in print) .
- [3] K. Yamakawa et al., “100 TW, sub-20 fs Ti:sapphire laser system operating at 10 Hz repetition rate”, Optics Letters, vol.23, pp. 1468-1470, 1998.
- [4] X. J. Wang et al., “Experimental Characterization of High Brightness Electron Photoinjector”, Nuclear Instruments and Methods A, 375, pp.82-86, 1996.