

[12A-04]

## COMMISSIONING OF PHOTOCATHODE RF GUN BASED MICROTRON AT JAERI-KANSAI

M. Kando<sup>1\*</sup>, H. Kotaki<sup>1</sup>, S. Kondo<sup>1</sup>, T. Hosokai<sup>1</sup>, T. Yokoyama<sup>1</sup>, S. Kanazawa<sup>1</sup>  
H. Dewa<sup>1†</sup>, K. Nakajima<sup>1,2</sup>, F. Sakai<sup>3</sup>, T. Ishizuka<sup>3</sup>, and T. Hori<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), Umemidai, Kizu, Souraku, Kyoto 619-0215, Japan

<sup>2</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

<sup>3</sup> Sumitomo Heavy Industries, Ltd. (SHI), Tanashi, Tokyo 188, Japan

### Abstract

We started to construct a high quality electron beam injector that consists of a photocathode rf gun and a racetrack microtron last summer. This injector will be used the second generation laser wakefield acceleration experiment at JAERI-Kansai. Beam commissioning of the system is started from this March and we succeeded in generating a 150 MeV electron single bunch with a charge of 91 pC at 10 Hz. Overview of the system and the present status of beam commissioning are described.

## 原研関西フォトカソード RFガン - マイクロトロンのコミッショニング

### 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は、高ピーク出力レーザーの開発とその応用研究に関する研究を行っている。昨年5月に京都府相楽郡木津町に新しい研究施設が完成し、本格的に研究が開始された。我々のグループでは、レーザー航跡場加速による従来の原理検証実験から一歩進んだ、エネルギー利得1 GeVおよびエネルギースペクトルの改善を目標とした第二世代の実証実験を行うために準備を進めており、その中で高品質な電子源は欠くことのできない装置である。我々は高品質電子入射装置として、高品質電子源であるフォトカソード RF 電子銃 (以下 RF ガン) [1] を用い、また、小型でブースターとして住友重機械工業 (SHI) 製のレーストラック型マイクロトロン (RTM) [2] を組合わせた、世界でも初めてのシステムを構築することにした [3]。

RFガンの性能試験は平成9年度から東京大学、KEK、SHIと共同して進めてきた。同時にRTMの改造設計を行い、SHIによる製作も進められた。平成11年8月から関西研究所の新しい実験施設にRTMの搬入設置が始まり、同年12月までにはほとんどの機器の据付けが終わり、RFガンのエージングを開始した。平成12年3月からはRTMへのビームコミッショニングを開始した。本発表では、この加速器システムの概要と性能、およびビームコミッショニングの現状について報告する。

### 2. 加速器システムの概要

加速器システムの構成を図1に、全景を図2に示す。電子銃は、BNLタイプのRFガンを用い、照射用レーザーは、全固体Nd:YLFレーザーシステムで、世界最高水準のエネルギー安定度を誇っている。このRFガ

ンの特性については、昨年の研究会でも報告した [4] ので詳細は述べないが、エネルギー 3.5 MeV、エミッタンス  $\sim 1-10 \pi \mu\text{m}$ 、パルス幅 5-10 ps、電荷量最大 3 nC の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、周回軌道にバンブを作るためである。直線部には定在波型加速空洞 (ライナック) があり、入射電子は1ターン目は約6 MeVに加速され、主電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23回周回し、1周当たり6 MeVの加速を受け最終的には150 MeVまで到達し、ビーム取り出し系を通して射出される。1-2ターン目で複雑な加速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るからである。取り出し系はRTMでの分散を補償する系となっている。この加速器システムの主要な設計パラメータを表1に示す。

### 2.1 計算器コードによる設計

RTMは熱電子銃を用いて稼働実績のある装置であるが、今回のRFガンの採用によりRTMと入射系の改造が必要となった。RTMでは、入射エネルギーの増大に伴い、1ターン目のエネルギー利得を従来の6 MeVから2.5 MeVに下げ、かつ、2ターン目以降のエネルギー利得は6 MeVとしなければならない。このため、ライナックの位置の調整が必要となった。また、入射に用いるシケイン電磁石の強度も高くなるため、シケインでのバンブ軌道も大きくなり、周回軌道への影響も考慮する必要が生じた。これらの見積みにはRTMの設計に製作されたコードMICを使用した

\* Email:kando@apr.jaeri.go.jp, Phone:0774-71-3384

† 現在、高輝度光科学研究センター所属

[5]. RTMのアクセプタンスは、水平方向  $54 \pi \mu\text{m}$ 、垂直方向  $34 \pi \mu\text{m}$ 、縦方向  $0.11 \text{ deg. MeV}$  (バンチ長  $6 \text{ ps}$ 、エネルギー分散  $7\%$ ) であった。入射系の設計は、輸送行列による計算、TRACE-3D、PARMELA を用いて行われた。入射系は短バンチの効果による空間電荷効果の影響が大きく、現状では最適化されていない。シケインの効果を入れた計算では、入射電子に対する射出電子の数の割合(透過率)は  $26\%$  が得られた。これは従来の熱電子銃を用いた場合(約  $8\%$ ) に比べて大幅に向上している。

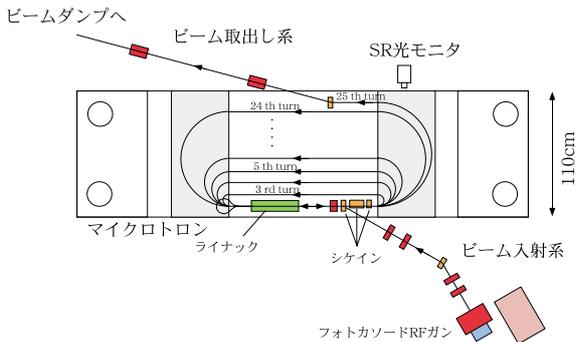


図 1: フォトカソードマイクロトロンシステムの概観。

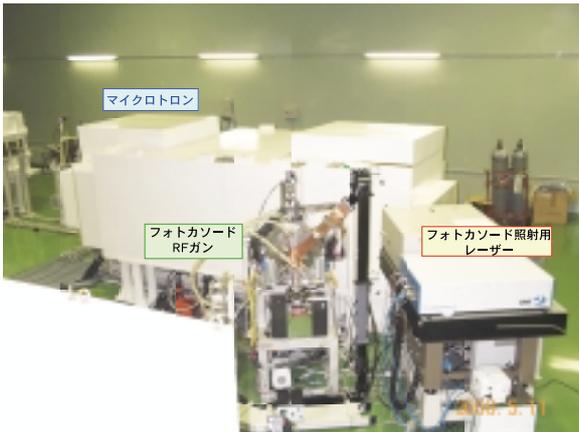


図 2: フォトカソードマイクロトロンの全景。

## 2.2 高周波・トリガー系

クライストロンは Thomson 製の TH2129 を使用し周波数は  $2856 \text{ MHz}$ 、最大出力は  $15 \text{ MW}$  で、そのうち  $10 \text{ MW}$  が RF ガンに、 $5 \text{ MW}$  が RTM のライナックに使われる。それぞれの RF 立体回路系にはモータ駆動のパワーバリエータが付いており、それぞれの電力を可変にできる。また、ライナック側には移相器があり、RF ガンに対するライナックの位相を調整できる。RF のパルス幅は、半値全幅で  $6 \mu\text{s}$ 、平坦部で  $1.5 \mu\text{s}$ 、パルス電圧平坦度は  $0.3\%$  である。導波管内は  $2 \text{ kgf/cm}^2$  の圧力の  $\text{SF}_6$  ガスで満たされている。立体回路系にはアーク検出器が 3ヶ所に取付られ、立体回路内でのアーク放電を監視している。

レーザーとの同期は次の様に行っている。まず  $2856 \text{ MHz}$  の発振器から分岐させたものを  $1/36$  に分周し ( $79.33 \text{ MHz}$ ) タイミングスタビライザーに入力し、レーザー発振器の周波数および位相を一定となる

表 1: フォトカソード RTM の設計仕様

Photocathode RF gun	
入射エネルギー	3.5 MeV
入力電力	6 MW (10 MW max.)
加速電場	100 MV/m
量子効率	$0.5\text{--}1 \times 10^{-4}$
Racetrack Microtron	
射出エネルギー	150 MeV
エネルギー分散	0.1 %
rms エミッタンス	$\sim 10 \pi \mu\text{m}$
パルス長	$\sim 5 \text{ ps}$ (FWHM)
主磁場強度	1.23 T
磁場勾配	0.14 T/m
逆磁場強度	0.3 T
入力 RF 電力	3 MW (5 MW max.)
透過率	26%
RF	
周波数	2856 MHz
RF パルス幅	$6 \mu\text{s}$
パルス電圧平坦度	0.3 %
繰返し	60 Hz

ように制御している。また、繰返し周波数はライン同期モードのときは、ライン周波数  $60 \text{ Hz}$  の整数分の 1 まで対応できる。外部同期の場合は繰返しは  $60 \text{ Hz}$  を越えない自由な値が許される。この繰返し周波数と RF 周波数は同期回路によって RF ( $79.3 \text{ MHz}$ ) に同期させ、ポッケルスセル用のトリガとして用いている。このシステムでの電子ビームとレーザービームのタイミングジッターについては今後測定を行う予定であるが、過去の実績から数 ps 程度と予想している。

## 2.3 冷却系

冷却系は、RF ガン、ライナック、RTM 磁石系等の 3 系統から構成され、おのこの温度制御は独立に行われる。それぞれの設定温度は、 $42^\circ\text{C}$ 、 $32^\circ\text{C}$ 、 $28^\circ\text{C}$  であり、三方弁により温度は制御され、RF ガン、ライナックの水温安定度は  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  が目標値となっている。現状では、 $10 \text{ Hz}$  運転においては RF ガンは  $0.1^\circ\text{C}$  以内は達成されており、ライナック側の水温は、 $-0.1 \sim +0.9^\circ\text{C}$  の範囲と悪く、現在原因を調査している。

## 2.4 真空系

RTM は  $550 \text{ l/s}$  のターボ分子ポンプ 2 台で排気され、真空度は  $1 \times 10^{-7} \text{ Torr}$  である。RF ガンは高量子効率を達成するために高真空が要求されるため、 $300 \text{ l/s}$  のイオンポンプと  $500 \text{ l/s}$  NEG (nonevaporable getter) ポンプで排気され、RF を印加しない場合の真空度はイオンポンプ部で  $1 \times 10^{-9} \text{ Torr}$  となっている。RF 印加時には  $1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-8} \text{ Torr}$  となる。

## 2.5 モニター系

入射系には圧空可動式の銅製ファラデーカップ (FC)、アモルファスコアモニター (ACM)、4-ポジションプロファイルモニター (FPM) がある。FPM には、OTR 測定用の Al ミラー、厚さ  $100 \mu\text{m}$  のデマルケスト製蛍光板 (AF995R)、 $0.1 \text{ mm}$  刻みのスケールがあり、圧空によって各ポジションに駆動されるようになっている。RTM にはライナック前後と 5 ターン目までの軌道上

にデマルケストプロファイルモニタ (PM) があり、1 ターン目と 3 ターン目には 100 倍の電圧増幅器付きのコアモニタがある。また、RTM の主電磁石で発生するシンクロトロン放射光を測定する CCD カメラ (SR 光モニタ) が 2 台取り付けられている。1 つは全ターン (実際には 5-25 ターン) の放射光をモニタするもので、もう 1 つは 24, 25 ターンを拡大して観察できるようにしており、どちらもズーム、フォーカス、絞りをリモートで制御できる。ビーム取出し系 (以下 BT 系) には ACM, 2 つの PM, 入射系と同等の FPM が整備されている。最下流のビームダンプは電流計としても機能する。

### 3. コミッショニング

ビームコミッショニングの当面の目標は、エネルギー 150 MeV, 平均電流値 0.5 nA 以上の電子ビームを発生させ、施設検査 (6 月 13 日予定) に合格することである。施設検査時には上記電流値をある程度保持しなければならないため、安定度も要求される。平均電流値で 0.5 nA とは繰返し 10 Hz でパルス当たりの電荷量 50 pC に相当する。

RF ガンは、加速電界が高い (100 MV/m) のが特長であるが、反面、RF エージングに時間を必要とする。我々は昨年 12 月後半から RF ガンのエージングを開始した。詳細は小瀧の発表 [6] を参照されたい。現状では 10 Hz, 7 MW の入力が可能となっている。しかし、高周波立回路系でのアーク放電の頻発や 4 月上旬の RF ガンの RF 窓からのリークトラブルなどのため、現状では、繰返しを定格の 60 Hz までは上げられず、10 Hz まででビーム調整を行った。調整時の RF ガンの量子効率  $\eta$  は  $0.2-0.5 \times 10^{-4}$ , 電界放出暗電流は、入射系 FC で  $\sim 100$  nA (10 nC/pulse) であった。

3 月中旬からマイクロトロンへのビーム入射試験を開始した。ビーム調整には、5 ターン目まで配置されている蛍光板と 1 ターンと 3 ターン目に配置されたコアモニタ (CM) を使用した。当初は 1 ターン目の CM は正常に動作せず、調整には使えなかったが、現在では最も有効なモニタとなっている。その理由は、我々のビームはシングルバンチであり、25 ターンの全てのビーム信号がこの 1 ターン目の CM で観測できるからである (図 3)。コミッショニング当初は 6 ターン目以降のビーム確認は、RTM の主電磁石内でのシンクロトロン放射光を観測する SR 光モニタを利用した。調整当初は透過電荷量が少ないため、放射光が見えなかったが、3 月末には 25 ターン周回し、初ビーム加速に成功した。図 4 に SR 光モニタの観測例を示す。ビーム調整を行った者は RTM の調整は初挑戦であったが、結果的には 1 カ月足らずで調整を終え、このシステムの運転の容易さを示していると言えるだろう。

6 月初旬現在までの最高ビーム電荷量は、91 pC であり、そのときのビーム透過率は 26% であった。これはシケインの効果を入れたビームトラッキングの計算と非常に良く一致した。また、RF ガンで発生した電界放出暗電流はビームダンプでは観測されなかった。

### 4. まとめと今後の予定

高品質電子発生装置としてフォトカソード RF 電子銃とマイクロトロンを組合わせた世界初のシステムを構築し、エネルギー 150 MeV, 電荷量 91 pC の電子ビームを 10 Hz で発生させることに成功した。このと

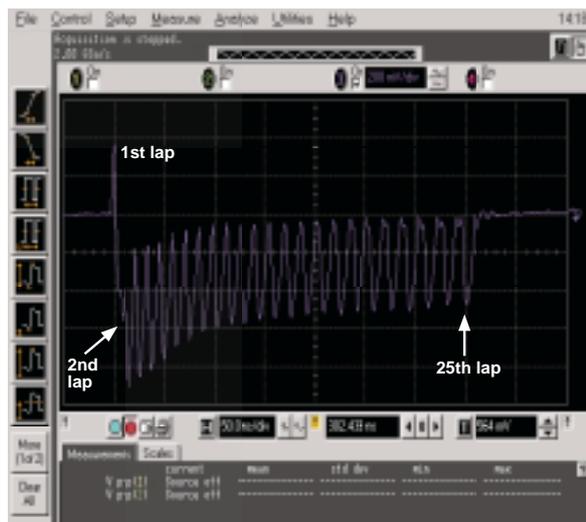


図 3: ライナックの軌道上に置かれたコアモニタの出力。

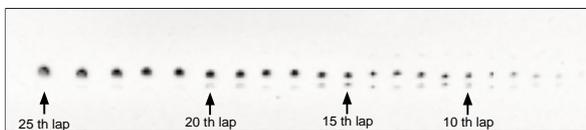


図 4: SR 光モニタの測定例。ビームの (上) 下に見えるスポットは、磁極面で反射されたものである。

きのビーム透過率は 26% であり、計算器コードによる見積もりと良く一致した。

今後はエミッタンス、バンチ長などのモニターを整備し、ビーム性能を測定して設計通りの性能を発揮できるように細かい調整を行っていく予定である。また、レーザー加速実験のための予備実験として、Z ピンチプラズマ導波路を用いたプラズマレンズ実験やアンジュレータとフェムト秒レーザーを用いたバンチスライスによるフェムト秒電子パルスの生成実験などを計画している。

### 5. 謝辞

マイクロトロン設置と調整に際して、量子科学研究所センターおよび住友重機械工業の多数の人に援助を頂きました。また、東京大学の上田氏には実験装置等を貸して頂きました。この場を借りてお礼を申し上げます。

### 参考文献

- [1] X. J. Wang *et al.*, NIM A 375, p. 82 (1996); D. T. Palmer *et al.*, Proc. of PAC'97; D. T. Palmer, Ph.D Dissertation, Stanford University (1998).
- [2] T. Hori *et al.*, Proc. of the 22th Linear Accel. Meeting in Japan, pp.16-18 (1997).
- [3] M. Kando *et al.*, Proc. of the 1999 Part. Accel. Conf., pp.3702-3704 (1999).
- [4] M. Kando *et al.*, Proc. of the 24th Linear Accel. Meeting in Japan, pp.128-130 (1999).
- [5] M. Sugitani *et al.*, Proc. of the 1st Europ. Part. Accel. Conf. p.596 (1988).
- [6] H. Kotaki *et al.*, in these proceedings.