

## STATUS OF TEST ACCELERATOR AS COHERENT THz SOURCE DEVELOPMENT AT TOHOKU UNIVERSITY

Shigeru Kashiwagi <sup>#A)</sup>, Masayuki Kawai<sup>A)</sup>, Yoshinobu Shibasaki<sup>A)</sup>, Ken Takahashi<sup>A)</sup>, Yuu. Tanaka<sup>A)</sup>,  
Ikuro Nagasawa<sup>A)</sup>, Ken-ichi Nanbu<sup>A)</sup>, Fujio Hinode<sup>A)</sup>, Toshiya Muto<sup>A)</sup>, Xiangkun Li<sup>A)</sup>, Hiroyuki Hama<sup>A)</sup>,  
Fusashi Miyahara<sup>B)</sup>, Nuan-Ya Huang<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University,  
1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, Miyagi, Japan, 982-0826

<sup>B)</sup> Accelerator laboratory, KEK,  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan 305-0801

<sup>C)</sup> Institute of Photonics Technologies, National Tsing Hua University,  
Hsinchu, Taiwan 30013

### Abstract

A test accelerator as a coherent terahertz source (t-ACTS) project has been under development at Tohoku University, in which a generation of intense coherent terahertz (THz) radiation from sub-picosecond electron bunch will be demonstrated. We will supply a wide-band coherent radiation from bending magnets in an isochronous ring and a narrow-band coherent THz radiation using an undulator in a linac. Stable generation of very short electron bunch is one of the key issues in the t-ACTS project. The injector system consists of a thermionic RF gun with two independent cavity cells, an alpha magnet and an accelerating structure. A velocity bunching scheme is employed to produce the very short electron bunch. Components of the t-ACTS injector except the accelerating structure have already been installed and we have started a high power RF processing of the gun cavities. The characteristics of electron bunch extracted from the RF gun are measured by varying phase and amplitude of input RF fields for the gun cavities. The status of t-ACTS project will be presented in the conference.

## 東北大学コヒーレント THz 光源試験加速器の開発状況

### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センター(旧核理研)では、熱陰極 RF 電子銃を電子源とする先端加速器を使い 100fs 以下の超短電子バンチを生成し、その電子バンチをアンジュレータや完全な等時性 (アイソクロナス) を持つリングへ入射することによって、狭帯域および広帯域のテラヘルツ波領域のコヒーレント放射光を発生する試験光源加速器 (t-ACTS: test Accelerator as Coherent THz Source) を開発している<sup>[1,2]</sup>。これまでに、RF 電子銃を含む入射器部の主要機器の設置を完了し、現在、RF 電子銃空洞の RF プロセッシングと並行し、大電力 RF を電子銃に入力しての空洞評価や試験的な電子ビーム発生実験を行っている。本研究では、t-ACTS 入射器部での極短電子バンチ生成実験に向けた加速器開発状況について報告する。

### 2. コヒーレント THz 光源加速器

コヒーレントテラヘルツ光源試験加速器である t-ACTS は、超短電子バンチ生成用線形加速器とアイソクロナスリング、アンジュレータビームラインで構成されている。超短電子バンチを生成する入射器部は、独立 2 空洞型熱陰極高周波電子銃 (ITC RF-gun) と  $\alpha$  電磁石、S-band 加速管で構成され、 $\alpha$  電磁

石による縦方向位相空間制御と加速管での velocity bunching により 100fs 以下の電子バンチを生成する<sup>[3]</sup>。これまでに、入射器部の主要コンポーネントである最大出力 50MW の高周波源、大電力移相器・減衰器を含む RF 立体回路、ITC RF-gun、 $\alpha$  電磁石の設置を完了した(図 1)。アイソクロナスリングについては、そのビーム光学設計を終え半周分の電磁石の製作を行っている。また、テラヘルツ発生用の 2.5 m 長のアンジュレータは製作および磁場調整を終え、現在は当センター内で Vibration Wire 法による磁場測定を行う準備を進めている<sup>[4]</sup>。

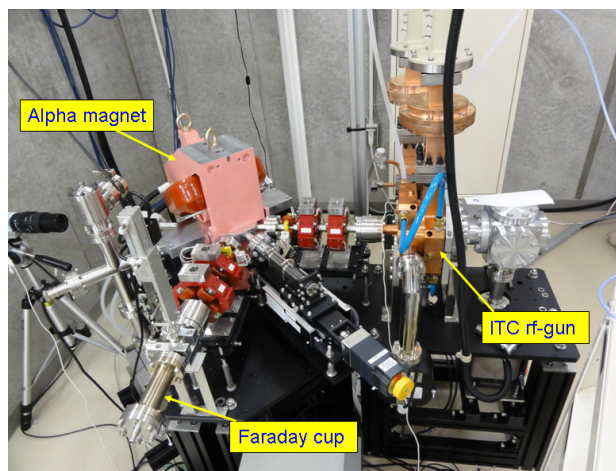


図 1 : t-ACTS の電子発生部 (ITC rf-gun,  $\alpha$  電磁石)

<sup>#</sup> kashiwagi@lms.tohoku.ac.jp

## 2.1 大電力 RF システム

図 2 に t-ACTS の RF 立体回路構成を示す。1 台のクライストロン(TOSHIBA: E3730A)からの最大 50MW の大電力を RF 電子銃 2 空洞と加速管に供給する構成となっている。出力の矩形 RF パルス幅は 3 $\mu$ s までの範囲で可変である。現在、まだ加速管が設置されていないため、加速管への導波管ラインには水冷式ダミーロードが取り付けられている。RF 電子銃の第 1、第 2 空洞に供給する RF は大電力移相器と減衰器を使い振幅と位相を制御する事が可能である。RF 電子銃空洞への導波管は、真空仕様のサーキュレータが無かったため SF<sub>6</sub> 加圧式とした。

## 2.2 ITC RF 電子銃

我々が開発した独立 2 空洞型熱陰極高周波電子銃 (ITC RF-gun) は、2 つの高周波空洞間で電気的な結合がないため、各空洞へ供給する RF 振幅と位相を独立に制御することができる<sup>[5]</sup>。これにより、 $\alpha$  電磁石と加速管でのバンチ圧縮に最適な縦方向位相空間分布を作り出すことが可能である。表 1 に ITC RF 電子銃の基本パラメータを示す。図 3 には、2 つの空洞間の位相差を変化させた場合の RF 電子銃出口での電子ビームの位相空間分布の計算例を示す。超短バンチを生成は、空洞間の位相差を  $\pi + 24^\circ$  とし RF 電子銃出口でのビーム縦方向位相空間分布がリ

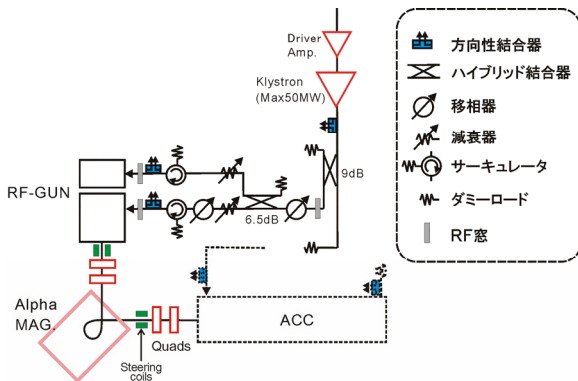


図 2: t-ACTS 大電力 RF 立体回路構成

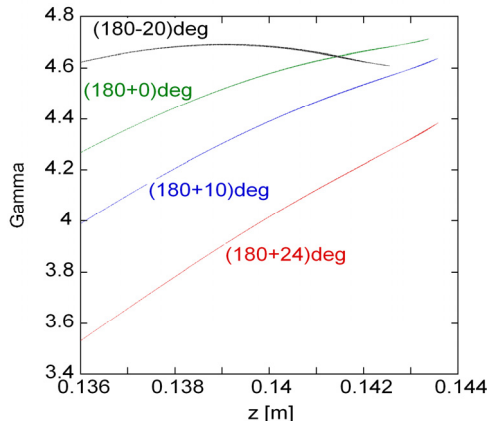


図 3: ITC RF 電子銃の空洞間位相差を変化させた時の縦方向位相空間分布変化 (GPT による計算) E1=25MV/m, E2=70MV/m, カソード電流密度 50A/cm<sup>2</sup>

ニアチャープするようにする。そのバンチ先端部分の高エネルギー部分を $\alpha$ 電磁石内に設置してあるスリットを使い切り出すと同時に縦方向位相空間で回転させ、その後、加速管で velocity bunching を行う。最終的に、マイクロバンチ当り 20pC、100fs 以下の短バンチ生成を目指している。

RF 電子銃カソードには直径 1.75mm の LaB<sub>6</sub> 単結晶を用いている。このカソードはサイズが小さいために初期エミッタンスが低く抑えることができ、ヒータ電力も 20W 程度と小さい。熱陰極の RF 電子銃では、バックボードメントが安定したビーム生成の妨げになる場合があるが<sup>[6]</sup>、我々のグループではそのメカニズムや対策について研究を進めている<sup>[7]</sup>。その他、RF 空洞と導波管の結合度を大きくとりフィリングタイムが短い設計になっている。

## 3. 大電力 RF 試験

### 3.1 空洞評価

クライストロンより大電力 RF(約 40MW, 2  $\mu$ s) を出力し、各 RF 電子銃空洞入口の方向性結合器で入

表 1: ITC RF 電子銃パラメータ (設計値)

共振周波数	2856[MHz]
結合度: $\beta$	~ 4
$Q_0$ (1 <sup>st</sup> / 2 <sup>nd</sup> 空洞)	~9500 / ~12500
加速勾配: Ez (1 <sup>st</sup> / 2 <sup>nd</sup> 空洞)	25 / 70 [MV/m]
空洞間の RF 位相差	$\pi + 24^\circ$
カソード電流密度	50 [A/cm <sup>2</sup> ]

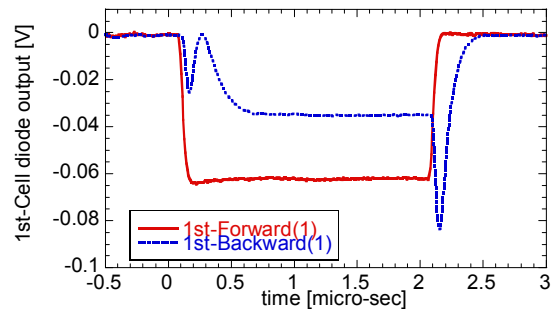


図 4: RF 電子銃の第一空洞入力・反射波形

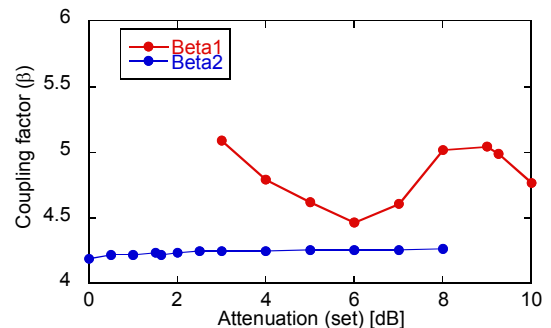


図 5: RF 電子銃空洞結合度、横軸: 入力パワー減衰率

射・反射 RF パワーを測定することにより(図 4)、導波管と RF 電子銃空洞の結合度測定を行った。図 5 に各空洞に供給する RF 電力を減衰器で変化させた時の結合度を示す。入力電力を変化させても空洞結合度は変化しないはずだが、第 1 空洞の結合度 ( $\beta_1$ ) は約 4.5~5.2 の範囲で周期的に変化した。この原因については現在調査中である。また、第 2 空洞の結合度 ( $\beta_2$ ) は約 4.3 であった。

次に、ローレベル RF 測定から求めた  $Q_0$  値 ( $Q_{01} = 7500$ 、 $Q_{02} = 10200$ ) と上記の空洞結合度をもとに、空洞内の加速勾配が設計値である 25MV/m (第 1 空洞)、70MV/m (第 2 空洞) になるよう入力 RF パワーを調整した。2 $\mu$ s の RF パワーを供給し設計の加速電場が空洞内に励振した状態で、RF 電子銃の直下流(電子銃空洞下流端部から 160mm)に設置した電流モニターで暗電流を測定した。暗電流はマクロパルス平均で約 0.4mA、電荷量にすると 1 つの RF パルスあたり約 0.8nC であった。暗電流量は 2 空洞間の位相関係によっても変化するが、今回は暗電流量が最大となる位相で測定を行った。図 6 に空洞内の加速電場を変化させた時の暗電流量の変化を示す。この時、第 1 空洞と第 2 空洞内の加速電場勾配の比率 (25MV/m : 70MV/m = 5:14) と空洞間の位相差は一定とした。

### 3.2 ビーム発生試験

カソードヒータに通電し、電子ビーム発生の実験を行った。RF 電子銃空洞内の加速電場は暗電流測定の時と同じく、25MV/m と 70MV/m になる様に減衰器を使い RF 入力パワーを調整した。

カソードヒータへの電流量を 8A から 9.6A の範囲で 5 段階変化させ、発生した電子ビームの電流量を RF 電子銃直下流の電流モニターで測定した。空洞に供給する RF パルス幅が 2 $\mu$ s の時に電流モニターで測定されたビーム時間プロフィールを図 7 に示す。(ビーム電流が最大となる RF 位相に設定、図 9 参照) 図 7 において、カソードから放出されるビーム電流の増加にともない、ビームパルス後半にいくに従ってバックボンバードメントによるビーム電流の増加が見られる。また、図 7 の横軸 0.5~

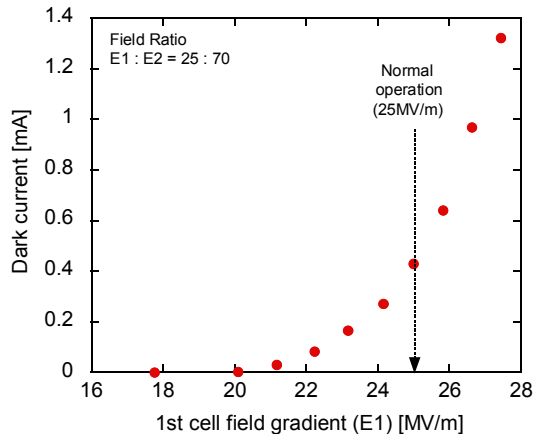


図 6 : 第 1 空洞加速電場強度と暗電流量 (第 1・第 2 空洞の電場強度比は 25 : 70 で一定)

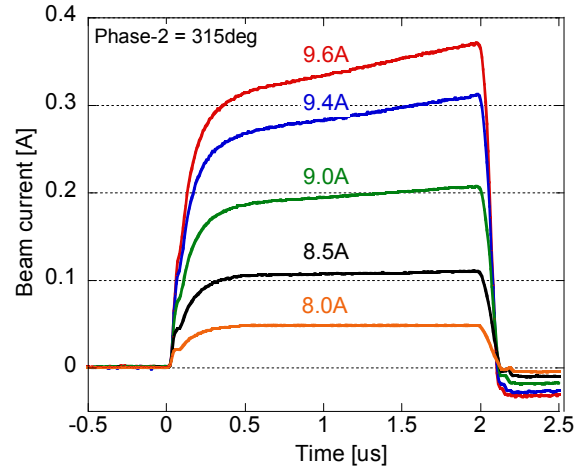


図 7 : RF 電子銃出口電流モニターで計測されたビーム時間プロフィール

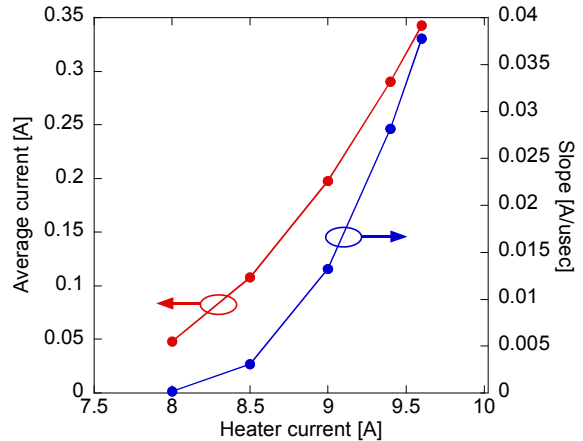


図 8 : カソードヒータ電流値に対する、ビームパルス平均電流値(A)と電流増加の傾き(A/ $\mu$ s)

1.95 $\mu$ s の範囲の平均電流[A]と電流増加の傾き[A/ $\mu$ s]をカソードヒータ電流値の関数としてプロットしたものが図 8 である。RF 電子銃出口でのビーム電流量が 50mA 以上になると、バックボンバードメント効果によるマクロパルス内での電流増加の傾きが現れる事が分かる。

次に、カソードヒータ電流を 9.6 A に設定し、第 2 空洞の RF 位相を 15 $^\circ$ ステップで変化させた時の RF 電子銃直下流でのビーム電流を測定した。図 9 に第 2 空洞 RF 位相と RF 電子銃出口のビーム電流の関係を示す。図 10 には、異なる幾つかの位相でのビーム時間プロフィールを示す。ここで、図 9 の縦軸の電流量は、図 10 の点線の位置 (t = 1.42 $\mu$ s) の電流量をプロットしたものである。また、図 9 には測定結果と共に GPT による計算結果も合わせてプロットした。計算に用いたパラメータは、カソード電流密度が 50 A/cm<sup>2</sup>、各空洞の加速電場は E1 = 25 MV/m、E2 = 70 MV/m とした。測定結果と GPT による計算結果は位相 360 度にわたり良く一致しているが、位相が 100 $^\circ$ 以下の部分で少し差が見られる。図 9 でプロットした電流値は図 10 の t = 1.42 $\mu$ s の時

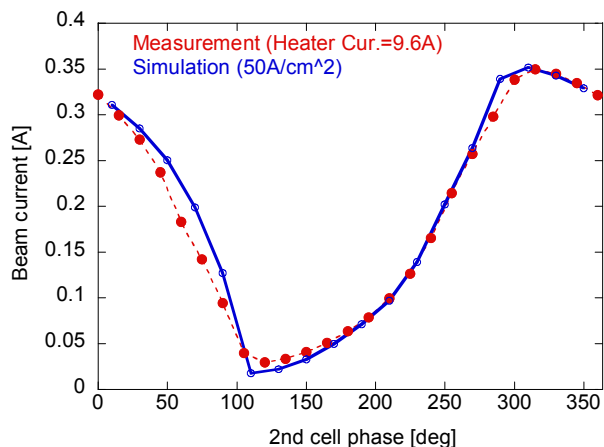


図9：第2空洞位相とITC RF電子銃出力電流。  
 (赤)：測定値(図9中1.41 $\mu$ sの時間でのビーム電流)  
 (青)：GPTによる計算(E1=25MV/m, E2=70MV/m, カソード電流密度50A/cm<sup>2</sup>)

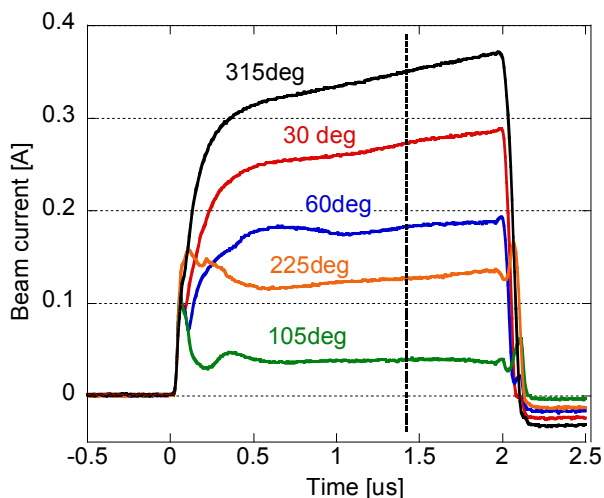


図10：異なる第2空洞RF位相のビーム時間プロフィール

間位置のものであるので、バックボンバードメントによる電流増加分も含まれている。GPTによる計算にはバックボンバードメント効果が含まれていないことなどから、位相によって測定と計算で違いが生じたと考えられる。しかし、測定結果と計算値の間で僅かな絶対値の差はあるが、電流値が最大・最小となる位相など全体的な電流量の変化はよく一致していることから、実際のオペレーションでRF電子銃の位相をこの位相スキャンの結果をもとに決めることが可能である。

今回の測定では、RF電子銃出口でカソード電流密度50 A/cm<sup>2</sup>(設計値)を仮定したのと同じビーム電流量を得る為には、カソードヒータ電流を9.6Aまで上げる必要があった(図9)。カソード納入時の検査成績証からはヒータ電流を9.6Aとした時にカソード表面温度は約2000Kになり、Richardson-Dushmanの式から求まる放出電流密度は約430 A/cm<sup>2</sup>と算出される。(LaB<sub>6</sub>の仕事関数2.4eVとした)Richardsonの式から求まる放出電流密度とRF電子銃出口の電流量から予想されるカソード電流密

度の間に大きな違いがあったので、この原因を明らかにすべくカソードヒータの電源ラインに高速応答電流モニターを取り付け、直接カソード放出電流を測定した。その結果、カソードからの放出電流はヒータ電流9.6A時に約0.6Aであった。この電流値からカソードでの放出電流密度は約50 A/cm<sup>2</sup>である事が分かる。この事から、ヒータの表面温度が何らかの原因で2000Kまで上昇していないか、カソードの表面状態や真空度の関係でLaB<sub>6</sub>の仕事関数が大きくなっている事が考えられる。

#### 4. まとめと今後の予定

現在までに、t-ACTS入射器部の主要コンポーネントである最大出力50MWの高周波源、大電力移相器・減衰器を含むRF立体回路、ITC RF-gun、 $\alpha$ 電磁石の設置し、大電力RF試験やビーム発生試験を行った。

大電力RF試験では、設計加速電場励振時に約0.4mAの暗電流が計測された。設計ではカソード電流密度50A/cm<sup>2</sup>の時、RF電子銃出口でのビーム電流は約300mAであるので、測定された暗電流はビーム電流に対して0.2%以下と小さかった。また、ビーム発生試験では、カソードからの放出電流を増やした際に、バックボンバードメント効果によりビームパルス内での電流量増加が観測された。また、RF位相を変化させた時の電子銃出口でのビーム電流量変化が、実験と計算とで良く一致した。この位相スキャンからRF電子銃2空洞間の位相関係を決められる事が分かった。

今後、継続してRF電子銃により作り出される電子ビームの特性測定を行い、シミュレーションとの比較を行い、バックボンバードメント効果を含めたRF電子銃内でのビーム動力学的理解を深めていく。更に、 $\alpha$ 電磁石の下流にバンチ長モニター<sup>[8]</sup>やエネルギー分析用電磁石を設置し、 $\alpha$ 電磁石によるビーム縦方向位相空間分布制御について詳しく研究調査を行い、3m加速管を設置してのvelocity bunchingの原理実証実験を実施する予定である。

#### 謝辞

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究(S)20226003の助成を受け行われている。

#### 参考文献

- [1] H. Hama and M. Yasuda, Proc. of FEL2009, (2009) 394
- [2] H. Hama et al., New J. Phys. 8 (2006) 292
- [3] F. Miyahara et al., Proc. of IPAC'10, (2010) 4509
- [4] 田中佑 他, 第8回日本加速器学会年会(TUPS061)
- [5] F. Hinode et al., Proc. of IPAC'10, (2010) 1731
- [6] T. Kii et al., Nucl. Instr. and Meth. A 475 (2001) 588-592
- [7] 李相坤 他, 第8回日本加速器学会年会(TUPS032)
- [8] H. Hama et al., Proc. of BIW10, (2010) 79-83