会議報告

第9回高輝度・高周波電子銃研究会報告

坂上　和之*

Report on the 9th High Brightness/RF Electron Gun Workshop

Kazuyuki SAKAUE*

2012年3月8日から9日に　高エネルギー加速器研究機構（以下KEK）3号館一階会議室において第9回高輝度・高周波電子銃研究会が行われた．本研究会は第1回目がKEKで行われ，その後関係機関を一巡した後に今回KEKに戻って開催された．本研究会は2004年から年に1度の頻度で開催されており，高輝度・高周波電子銃に関連した研究開発に関する議論がなされている．講演内容としては，DC電子銃用の電極構造や高周波電子銃の空胴設計・製作はもちろん，電子銃・電子ビームのダイナミクスやシミュレーション，カソード材料に関する報告や光電子生成用のレーザーシステムの開発，生成した高輝度電子ビームの応用研究や高輝度電子ビームの診断技術にまで渡る幅広い研究領域をカバーする研究会である．より深い議論を交わすために講演時間や質疑応答時間を長くとっているのもこの研究会の特徴であり，今回は30分の講演＋10分の質疑の時間を設けていたが，それでも足りず休憩時間や懇親会中にも熱心に議論する姿が見受けられた．現在，Super KEKBにおいて電子源として高周波電子銃が使用される予定となり，新たな高周波電子銃の開発が進められている．またKEKのSTF（Superconducting Test Facility）においても1msパルストレインの電子ビームを生成するL-band高周波電子銃がまさに稼働を開始している．このような時期にKEKにおいて本研究会を迎えることができ，年度末の繁忙期にも関わらず35名の参加者が集まり熱心に議論がかわされた．

KEK加速器研究施設の早野仁司教授の挨拶で本研究会は開始された．STF責任者の早野教授はSTFにおいて1 msパルストレイン電子ビーム生成に成功したことを紹介され，1・2件目の関連講演に繋げた．1件目の講演は本稿の執筆者の坂上（早稲田大学理工学術院）よりSTF及び2012年度予定しているSTFにおける量子ビームプロジェクト実験の紹介と1 msパルストレイン電子ビーム生成用のレーザー装置の開発に関する報告を行った．2件目の渡邉氏（KEK）のL-band高周波電子銃による1 msパルストレイン電子ビーム生成と合わせてSTFにおける一連の講演にて本研究会が始まった．STFにおける実験では超伝導加速管を用いるため10 mA，1 msというロングパルストレインの電子ビームが要求されており，このような電子ビームを生成するための常伝導L-band高周波電子銃の開発に関して両者より報告がなされた．坂上からは電子ビームの時間構造を決める光電子生成用レーザー装置の開発を報告し，課題として1 msロングパルストレイン中の強度の平坦度が挙げられた．渡邉氏からは1 msの高周波による温度上昇に配慮したL-band高周波電子銃に関する紹介やRFプロセシング，暗電流評価に関する議論がなされ，最後に講演前日に取得した1 msパルストレイン電子ビームの報告があった．**図1**はその際のBPM信号の生データを示している．図中の下に示された波形がBPMの信号であり，1 msに渡ってBPMの信号が得られており，実際に取り出しに成功したことを示している．電子ビームエネルギーは約3.5 MeV，バンチあたりの電荷量は約68 pC/bunch（先頭バンチ），1 msパルス内にバンチが162450個詰まっているパルストレイン構造の電子ビームである．課題としてレーザー光に起因する平坦度や1 ms高周波パルス内における位相フィードバックなどが挙げられた．2012年度内に予定されている量子ビームプロジェクト実験やその後のILCへ向けた開発に対するビーム供給に関して期待の

* 早稲田大学　理工学術院　理工学研究所　Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
（E-mail: kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp）
研究会HP：http://kds.kek.jp/conferenceDisplay.py?confId=9248

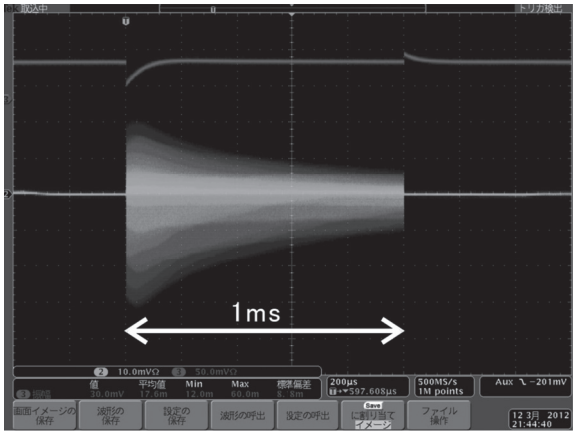

図1　KEK STF にて L-band 高周波電子銃によって生成された 1ms パルストレイン電子ビームの BPM 信号

持てる講演であった．

午前中は引き続き KEK における電子銃のアクティビティに関する報告がなされた．夏井氏（KEK）からは Super KEKB 用の高周波電子銃開発に関する報告があった．Super KEKB では 5nC/bunch の高電荷量かつ低エミッタンスの電子ビームが求められるため，この要求を満たす DAW（Disk And Washer）型高周波電子銃の開発を行っており，すでにテストビームラインにおける電子ビーム生成も確認している報告があった．今後 Super KEKB において安定運転を達成するために新たな擬似進行波型サイドカップル電子銃の設計や光電子生成用レーザーシステムに関しても報告があり，様々な議論が行われた．続いて佐藤氏（東京工業大学理工学研究科）からも Super KEKB 用電子銃に関連した LaB_6 カソードの特性測定に関する報告があった．レーザークリーニングによるカソードの量子効率改善に関する詳細な条件出しの結果や熱処理との比較，新たなカソードとしての Ir_5Ce の可能性が示唆され，試験結果が紹介された．Super KEKB 用高周波電子銃・STF の L-band 高周波電子銃と新たに稼働を始めた高周波電子銃に関する紹介から始まり，当初から非常に活発な議論が交わされた．

昼食休憩を挟んで午後は NEA GaAs カソードに関する講演から始まった．松葉氏（広島大学）からは NEA GaAs カソードから生成した電子ビームのエミッタンス・バンチ長（時間応答特性）に関する報告があった．KEK の ERL 用電子銃テストスタンドでは GaAs カソードの厚さや GaAs のベースとなる材料を反射型と無反射型で作製し，それぞれに関して評価を行った結果が報告された．低エミッタンスを得るためには GaAs の厚さは関係なく，レーザー光の波長を長くすることが条件として挙げられ，時間応答特性を速くするためには GaAs を薄くし，無反射型を用いる方が良いことが示された．低エミッタンス化としてはカソード表面の粗さが今後の課題として挙げられた．飯島氏（広島大学先端研）からは NEA GaAs カソードにおける量子効率と表面状態に関する報告があった．NEA GaAs カソードの長寿命化のために表面状態の変化を理解することを目的としていた．NEA GaAs 作製中及び劣化中の量子効率スペクトルの時間変化解析を行い，NEA GaAs の表面状態変化がモデル計算と合わせて議論された．細田氏（広島大学先端研：代理報告　栗木氏）からは極高真空確立のためのガス放出係数測定に関する報告があった．NEA GaAs カソードの長寿命化のために極高真空を確立するため，ガス放出係数を評価できるビルドアップ法を用いた装置を開発している．Q-mass を用いて分子量毎のガス放出係数を評価できる装置となっており，今後の真空容器材料評価に期待が持てる講演であった．課題としては測定装置としての再現性が挙げられた．

永井氏（日本原子力研究開発機構）からは単色ガンマ線レーザーコンプトン散乱光源用の光共振器に関する報告があった．使用済み核燃料中の Pu などの定量を目指した 0.01%という単色ガンマ線源の実現に向けた検討がなされた．また，この単色ガンマ線を生成するためのレーザー光として非対称共焦点型ファブリペロー共振器を検討しており，放物面鏡を用いて共振器を構成することによって非常に理想的なレーザー光ターゲットが生成できるとの結果であった．水野氏（高輝度光科学研究センター）からは空間電荷効果によるエミッタンス低減効果に関する報告があった．我々の常識では空間電荷効果でエミッタンスは増大するが，その逆の低減もありえるのではという非常に興味深い講演であった．本内容は前回の研究会において増田氏（京都大学）が報告した内容から派生しており，本研究会の意義を示す講演であったと言える．現時点では計算のみであるが，高周波電子銃でも条件がそろえば空間電荷効果によってエミッタンスが減少していく結果が報告され，活発な議論が行われた．

初日の講演が終了した後，講演内容に関わらず今後の研究会運営に関しても活発な議論がなされた．今後の研究会では若手研究者や学生に向けた『レクチャー』を行ってはどうかという提案があり，今後の研究会でのアクティビティに期待したい．夜は研究学園駅そばのしゃぶしゃぶ店にて懇親会が行われた．つくばエクスプレスの開通から 6 年以上が経ち，駅周辺の様子は大きく変化している．特に研究学園駅周辺の発展は目

図2　第9回高輝度・高周波電子銃研究会講演の様子（その１）

図3　第9回高輝度・高周波電子銃研究会講演の様子（その２）

を見張るものがあり，常に新たな施設やマンションなどの建設が行われている．このような中で懇親会が行われ，懇親会中も尽きることなく非常に活発な議論がなされた．研究学園駅周辺の発展に負けじと本研究会も広く発展していくことを期待したい．

２日目も引き続き様々な講演があった．青木氏（早稲田大学理工学術院）からは3.6 Cell 高周波電子銃設計及び製作に関する報告があった．これまで用いられてきた単 Cell 空胴や 1.6 Cell 空胴の構造を 3.6 Cell に拡張することによってより高エネルギー電子ビームを電子銃から取り出すことができる．Cell 数の増加に伴う共振モード間隔を広げるための構造設計や製作を経て 3.6 Cell 空胴製作を完了した報告がなされた．福田氏（KEK）からは青木氏の 3.6 Cell 空胴を用いたエージングとビーム生成試験の結果に関する報告があった．KEK の LUCX 実験ではレーザーコンプトン散乱による小型高輝度 X 線源を目指して開発を行っており，加速器の小型化のために 3.6 Cell 高周波電子銃が開発された．研究会時点ではまだエージング途中とのことであったが，暗電流も減少傾向であるとのことであった．ビーム試験としては，電子銃単体で9.6 MeV の電子ビーム生成を確認しており，エミッタンスとしても 1.6 Cell 高周波電子銃と同程度であるとのことであった．今後レーザーコンプトン散乱 X 線の強度を増強する予定との報告であり，これからの実験結果が注目される．

楊氏（大阪大学産業科学研究所）からは高周波電子銃を用いた MeV 電子ビームエネルギーの時間分解透過型電子顕微鏡開発の講演があった．MV クラスの電子顕微鏡は国内にも少なく，10 m を超える非常に大きな装置となるが，高周波電子銃を用いることで１m 程度での実現と合わせてフェムト秒バンチによる時間分解計測も可能となる．レンズなどの設計も完了し，来年度試験予定とのことであった．高周波電子銃の利用として非常に興味深い内容で，来年度の研究会でぜひ良い結果を期待したい．管氏（大阪大学産業科学研究所）からはコヒーレントチェレンコフ放射によるテラヘルツ光発生に関する報告があった．誘電体管中を電子ビームが走行することによるコヒーレントチェレンコフ放射を検出することによって計算と一致する周波数のテラヘルツ光を検出したとの報告であった．また，グレーティングを用いたスミス・パーセル放射の利用も検討し，計算と一致する放射角と周波数スペクトルを得たとの報告がなされた．高周波電子銃の短バンチ性を利用したテラヘルツ光源としての利用が期待できる内容であった．冨澤氏（高輝度光科学研究センター）からは，フェムト秒分解能の３次元 EO サンプリングの進捗に関する報告があった．これは８個以上の EO 結晶を同時に，単一の円環レーザパルス（搬送波）でプローブし，３次元バンチ形状を非破壊でリアルタイム計測する方法である．特に，時間方向では SACLA XFEL のバンチ長である 30 fsec（FWHM）を時間分解能の目標値に設定し，有機 EO 結晶を用いたモニター開発を行っている．その原理から１オクターブの超広帯域プローブレーザー光に関する設計，EO 結晶の選定や事前試験に至る詳細な説明があった．また，SCSS 試験加速器で有機 EO 結晶 DAST を用い，その電子バンチ計測に世界で初めて成功したという報告があった．この時間分解能の限界はまだ明らかではないが，50 fsec（FWHM）が得られる可能性を示唆する結果が示された．コンパクトなシステムであるため，今後は大型施設である XFEL だけでなく，利用が拡がる小型フェムト秒バンチ加速器でも超高速・非破壊バンチモニターとして完成が期待される．

山本氏（KEK）からは ERL 用の高輝度電子源に関す

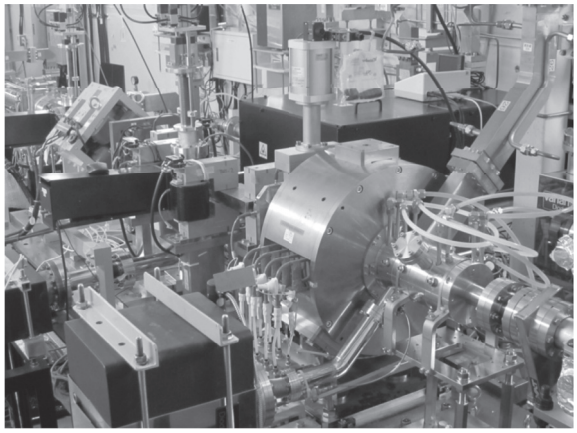

図 4　LUCX 加速器ビームラインに設置された 3.6 Cell 高周波電子銃の写真（KEK　福田氏提供）

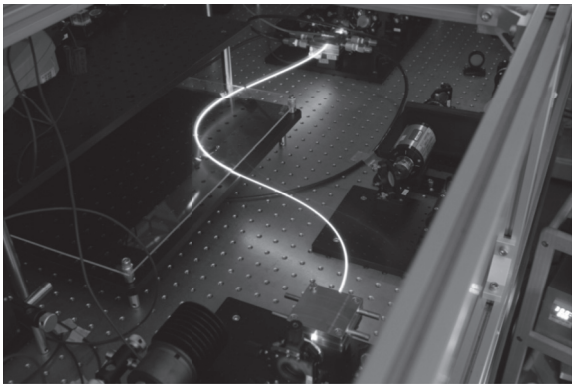

図 5　励起光によって光るフォトニッククリスタルファイバ（KEK　本田氏提供）

る報告があった．これまで ILC 用に開発してきた 200 keV 電子銃及び現在製作中の ERL 用 500 keV 電子銃に関して詳細な報告がなされた．これまでの 200 keV から ERL 用の 500 keV を達成するためのハードルとして特に電流量が大きいことがカソードの寿命を下げる要因として認識されており，電極構造や極高真空到達のための材料選択から真空排気装置に至るまで様々な議論がなされた．本田氏（KEK）からは cERL 電子銃用のレーザーシステム開発に関して報告があった．増幅器として Yb をドープしたフォトニッククリスタルファイバを用いる予定であり，その最適化をモデル化と実験を比較して行っていた．モデルは実験結果を非常によく再現しており，ファイバレーザーの一般的な設計ツールとして，ファイバ径や長さなどの最適化に利用できそうである．現時点まででコンポーネントの試験は終了しており，残りは組み上げる作業とのことである．また，ビーム調整モード用にパルス増幅器を用いるシステムも構築しており，ERL 電子銃テストラインにてビーム試験を行った結果に関しても報告があった．大電流では空間電荷効果が問題となっているようであるが，前発表者の山本氏の 500 keV 電子銃との組み合わせによって ERL 用の入射器が達成されることが期待できる内容であった．

本研究会は最後に幹事の吉田氏（KEK）より挨拶があり，閉会した．次回は高輝度光科学研究センター（SPring-8）での開催が予定されており，開催時期は未定であるが，例年 12 月～ 1 月ごろに開催されることが多い．本稿を読んで興味を持たれた方にはぜひ気軽にご参加いただければと期待したい．