

## Development of reliable and sophisticated photo injector system and future plan

Hiromitsu Tomizawa

Accelerator Division, Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

### Abstract

Since 2000, I have been researching a photocathode single-cell pillbox rf gun with my colleagues at SPring8, and to date have achieved a maximum field gradient of 190 MV/m with a chemical etching processed cavity. After rf-processing, the quantum efficiency of the copper cathode was  $8.6 \times 10^{-3} \%$  at 156 MV/m. This indicates that chemical etching is considerably effective to improve the inner surface of cavities made of copper. To study the mechanism of rf breakdown phenomena in rf cavities, I developed an imaging spectrograph system. I also conducted spectral imaging for the light emissions from atoms in a vacuum that are excited by rf breakdown. This system makes possible to check the effect of chemical etching process on the cathode and cavity inner surface. For the last three years, I have been focusing on the development of a yearlong stable and 3-D shaped UV laser pulse for the rf gun. I developed an adaptive 3-D shaping (both temporal (1D) and spatial (2D)) short pulse (80 fs~40 ps) UV-laser system as an ideal light source for yearlong stable generation of a low emittance electron beam. In its current form, the laser's pulse-energy stability has been improved to 0.2~0.3% (rms; 10 pps, 0.4 TW in femtosecond operation, with day-by-day measurements) at the fundamental wavelength and 0.7~1.4% at the third-harmonic generation. The pulse-energy stability of a mode-locked femtosecond oscillator has been continuously held to 0.3% (p-p) for 4.5 months (1% for 10 months), 24 hours a day. Such improvement reflects an ability to stabilize the laser system in a humidity-controlled clean room. In addition, the ideal spatial and temporal profiles of a shot-by-shot single UV-laser pulse are essential to suppress emittance growth in an RF gun. We apply a deformable mirror that automatically shapes the spatial UV-laser profile with a feedback routine, based on a genetic algorithm, and a pulse stacker for temporal shaping at the same time. The 3-D shape of the laser pulse is spatially top-hat (flattop) and temporally a square stacked pulse. We apply the Q-scan method to evaluate the emittance of electron beam generated from a 3D-shaped laser pulse. Using a 3D-shaped laser pulse with a diameter of 0.8 mm on the cathode and square pulse duration of 10 ps (rising time: <1 ps), we obtain a minimum horizontal normalized emittance of  $1.4 \pi$  mm mrad with beam energy of 26 MeV, holding its net charge to a 0.4 nC/pulse. At a higher net charge of 1.0 nC/pulse, the minimum beam emittance is  $2.0 \pi$  mm mrad with equivalent diameter and longer pulse duration of 20 ps (rising time: <1 ps). We have a plan to inject from our photoinjector system to NewSUBARU quasi-isochronous storage ring for the bunch circulation for some tens with keeping short bunch length.

## フォトカソードRF電子銃の高安定化・高性能化に関わる技術開発と今後の展望

### 1. はじめに

フォトカソードRF電子銃とは、レーザパルスをRF空洞内のカソード面に照射し、生成された光電子を、RF空洞内の高電界で電子ビームが空間電荷効果で拡散しないうちに一気に加速し、低エミッタンス電子ビームを生成する技術である。レーザパルスの品質がカソード直後の電子ビーム品質を左右するため、本技術はレーザ技術に依存するところが特に大きい。そのためSPring-8加速器部門ではレーザシステムの長期安定化と、極低エミッタンス電子ビーム生成のためレーザパルス形状の最適化に努めてきた。レーザ源安定化においては、恒温恒湿クリーンルーム（環境試験室）の設置、機械構造強化光学ホルダーの開発（一部は商品化<sup>1)</sup>、各機器別の温調による物温コントロールの導入、オシレータのフィードバック

制御を行い、最終的に10ヶ月の連続安定運転（オシレータの出力安定度は4.5ヶ月間連続で0.3% (p-p)、テラワット増幅後はフラッシュランプ交換までの1.5ヶ月間連続）を達成し、2006年度までに実用運転の見通しがたった。

レーザパルスの3次元形状制御では、横方向プロファイルを遺伝的アルゴリズム<sup>[1]</sup>の援用による可変形補償ミラーで、ほぼ均一な円筒強度分布に整形した。レーザの時間プロファイルは、空間位相変調器あるいはパルススタッカーによる方法で、矩形に整形した。均一で対称な円筒形状レーザビームを実現して目標を果たした。この整形されたレーザビームで生成した電子ビームの規格化エミッタンスは、 $1.4\pi$  mm mrad (0.38 nC; 10 ps),  $2.0\pi$  mm mrad (1.0 nC; 20 ps)であった。またこれに先立つ、谷内努氏による独自設計の単セル型RF電子銃空洞を用いて、独自に確立した化学エッチング法による表面処理方法で190 MV/mに達する実用高電界の実現<sup>[2]</sup>、放

<sup>1</sup> <http://www.luminex.co.jp> (UHSシリーズ)

電分光装置開発とその評価分析手法の確立<sup>[3]</sup>などの、空洞およびカソード表面に関する基礎研究が、一連の成果の背景にあることは言うまでもない。

ここで、SPring-8加速器部門での極低エミッタンスビーム生成の歴史を簡単に述べる。RF電子銃の開発は1996年に開始された<sup>[4]</sup>。著者が入所する2000年まではYLFレーザの4倍波(262 nm)で実験し、エミッタンスは $15\pi$  mm mradを切ることがなかった。2001年、Ti:Saレーザ源を新規に導入して以来、その不安定と不均一な3倍波(263 nm)レーザプロファイルに悩まされることになった。それ以来、レーザシステムの長期安定化とレーザパルス形状の最適化に努めてきた。すなわち、マイクロレンズ・アレイを用いたレーザ横方向形状の整形<sup>[5]</sup>、可変形ミラーを用いたさらに自由度の高いレーザパルス整形システムの開発<sup>[1]</sup>、レーザ光源の長期安定化<sup>[6]</sup>、ダイヤモンドカソードを目標にした4倍波(197 nm)源の開発<sup>[7]</sup>など、電子源用レーザシステム開発の実績を積み上げてきた。また研究基礎ツールとして、水野明彦氏による3次元ビームシミュレーションコードの開発<sup>[8]</sup>や、出羽英紀氏によるRF系とレーザ系の総合同期システム開発など、ほとんど総てに関してSPring-8独自あるいは自主開発している。2004年以降、加速管1本を設置してビームエネルギーを30 MeVに増強し<sup>[9]</sup>現状に至っている。

## 2. 高電界に耐える表面技術とその評価法

### 2.1 加速空洞内壁およびカソード表面改質のための化学エッチング方法

高圧超純水洗浄の失敗<sup>[10]</sup>から、銅金属に最適な化学エッチング方法の研究を始めた。70サンプルに及ぶ基礎テストと次節の放電分光方法の確立により、一定の条件で再現性を持って高電界に最適な表面が達成できた。この方法はさらに加圧エッチング方法に発展し、特許出願<sup>[11]</sup>したので公開後に詳細は明細書を参照して頂きたい。この表面形態観察の結果から、実際に使用した濃度のエッチング液で処理後の銅は、浸漬時間(20°C)が1分未満でも結晶粒塊が綺麗に表出すること、エッチング量が $0.3 \mu\text{m}$ 以下では表面粗度があまり変化しないことがわかった。一方、フーリエ変換赤外分光装置(SPring-8ビームラインBL43のFTIR)による測定から、エッチング後の銅表面には分子結合による振動吸収が観測されないことが示され、以前に試みた高圧超純水洗浄<sup>[10]</sup>等と比べ、化学的に表面が汚染されないことが分かった。

一連のサンプル試験で決定された最適条件で、RF電子銃空洞をエッチング処理し、実機試験を行った。21日間( $1.9 \times 10^7$  shots)のRFコンディショニング進行過程で変化するダーク電流を測定した。その結果を図1に示す。図中でNon-treatmentとは、比較のための無処理の空洞コンディショニング( $3.3 \times 10^7$  shots)時のデータで、残りはエッチングした空洞において、コンディショニングの進行に合わせて逐次測定した結果である。ダーク電流がコンディショニングを繰り返すたびに、

減っていくのが分かる。

この21日間の結果として、RFパルス幅が700 ns(10 pps)のとき、カソード表面最大電界強度は183 MV/mに到達し、その後のレーザ照射しながらの運転で最終的に世界最高のカソード表面最大電界:190 MV/m<sup>[1]</sup>に達した。コンディショニング終了時に測定した量子効率<sup>[1]</sup>は、 $8.6 \times 10^{-3}\%$ (波長:263 nm;表面電界:156 MV/m;電子ビームの加速エネルギー:3.6 MeV)であった。

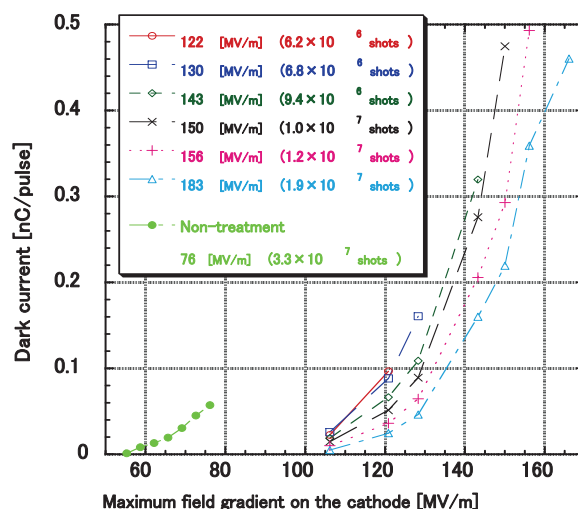


図1:コンディショニング進行過程でのダーク電流の変化

プロット説明には、到達したカソード最大表面電界強度とその時点までの通算ショット数を記した。

### 2.2 系を乱さない空洞内壁清浄度計測法の放電分光

同時に、コンディショニング状態を観察するため、放電時の脱ガス分析も合わせておこなった。このために、四重極質量分析装置と我々が開発している放電分光法<sup>[3]</sup>を用いた。2002年当時、KEKの山口誠哉氏の指導下で、総研大の五十嵐康人氏が高電界試験を博士課程のテーマにしていたので、谷内氏と共にKEKとの共同研究に参加していた。放電分光法は、共同研究の一環としてRFブレークダウンの解明に取り組み、その分析手法の一つとして独自開発されたものである。カプラでの放電に伴う発光の観測点での強度はかなり弱く、I. I. カメラを用いても分光観測できない。そこで空洞内壁表面や残留ガス中に存在する元素の種類を、SPring-8放射光ビームライン(BL43とBL15)なども使用して明らかにした。この結果から波長分解能の下限値が2 nmと割り出され、分光撮像に初めて成功するに至った。各輝線スペクトルの空間上に拡散した様子も同時に撮像できることが、この方法の特徴である。この放電分光法は、KEKB入射器用Sバンド2 m加速管の高圧超純水洗浄の処理の有無でのコンディショニング中の表面元素分布状態の変化を観察するために導入された。加速管高圧超純水洗浄を行った加速管は、無処理の加速管に比べて半分以下のコンディショニング時間で45 MV/mの平均加速電界に到達することができた<sup>[12]</sup>。図

2に示すようにコンディショニングが進むにつれ、不純元素種が減少する。最後まで残る元素は銅、炭素、水素であるが、無処理では炭素が、洗浄処理したものは銅がそれぞれ最も発光強度が強かった。

前述のエッチング処理したRF電子銃空腔のRFコンディショニング中に行われた放電分光では、可視光の計測にかかる大放電を途中で起こすことはなかった。コンディショニング後に度々起きた放電においては、656 nm (H: Balmer alpha)と740 nm (Cu II)のみ確認され、電子銃空腔内の清浄度が確認された。

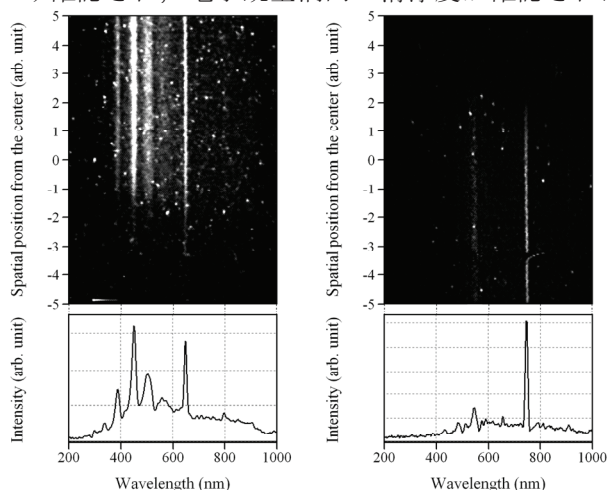


図2：高圧超純水洗浄処理した加速管カプラー内のRFブレイクダウンに伴う発光のスペクトル撮像<sup>[3]</sup>

スペクトログラム(上)と空間積分した輝線スペクトル(下)。撮像された時の積算コンディショニング時間は、左図が307時間(平均加速電界:42 MV/m)で右図が677時間(45 MV/m)。左図で確認された輝線は395 nm (O I), 515 nm (Cu I), 570 nm (Cu I), 578 nm (Cu I), 459 nm (O II) and 656 nm (H: Balmer alpha), 右図では538 nm (C I), 656 nm (H: Balmer alpha), 740 nm (Cu II)。

### 3. 精密制御UVレーザーパルスの数値目標

#### 3.1 SPring-8のレーザー光源

当初、東大とJASRIは、逆コンプトン散乱によるフェムト秒X線生成も視野に入れたRF電子銃開発の共同研究を進めていた。そのため、レーザー光源を更新する際、この逆コンプトン散乱のための衝突用レーザー光源(50 fs)とフォトカソード用レーザー光源(20 ps)は、それらの同期性を重視して同一のフェムト秒テラワット・レーザーから分岐して作ることとし、図3のようなレーザー装置を発注した。

このチタンサファイア(Ti:Sa)レーザーの構成は、種光を作る発振器であるレーザーオシレータ(繰り返し周波数:89.25 MHz;Sバンドの32分周)と、その後種光を増幅する外部増幅器(繰り返し周波数:10 Hz)から成る。この増幅器は2段構成から成り、初段が再生増幅器、後段がマルチパス増幅器で、両方とも共通のフラッシュランプ励起YAGレーザーを分岐して励起光源としている。再生増幅器では共振

器内のポッケルス・セルにより、10 Hzでパルス列を切り出して選択増幅する。このレーザーパルスを次のマルチパス増幅器で同じ結晶を4回往復させ、30 mJ/pulseにまで増幅するようになっている。増幅された赤外フェムト秒パルスは、後段の非線形光学効果を利用した3倍高調波生成器(THG)により263 nmの紫外線に変換される。最後に、紫外パルスを石英ロッド入射直後に広帯域化し、ロッド伝搬中にチャープしてパルス伸長されるようになっていた。

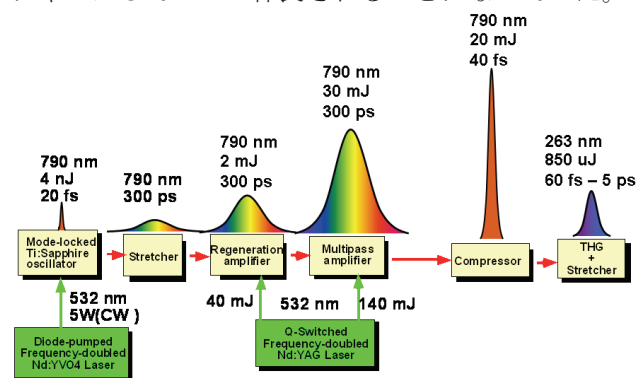


図3：SPring-8 RF電子銃用レーザー光源(改造前)のブロック図  
図中のパルスの虹色は、正チャープ(長波長側が先頭)を表わす。最終段のTHGストレッチャーは、現在は使用していない。

しかし、90 cmの石英を通して5 ps程度が限度で、よほど集光しない限り10 psを超えなかった<sup>[4]</sup>。同時に、フィラメンテーションという一種の非線形光学効果を石英ロッド内で起こすことにより、紫外レーザーパルスの横方向強度分布(空間プロファイル)が著しく不均一な、しかも出力安定度が劣った低品質な光源であった。このレーザーを用いて実測されたエミッタンスは、目標値の $1\pi$  mm mradにはほど遠い値だったのである。超低エミッタンスビームを生成する鍵がレーザー光源にあることは明らかであり、フォトカソード用レーザー光源の長期安定化と高品質化に的を絞った研究開発が始まった。

#### 3.2 レーザー光源安定化の指針

最初にSPring-8レーザー光源の目標として定めた安定度の条件を以下に示す。これらは、営業運転用加速器に期待される安定度などを考慮して定めた。

- レーザー・パルスエネルギーの安定度(rms)は3倍波で1%程度。
- レーザーの連続長期安定度は1年。
- レーザーパルスとRFの同期のタイミング・ジッタ(rms)は100fs程度。
- 紫外レーザー(3倍波)のポインティングは、カソード面で $10\mu\text{m}$ (p-p)程度(THG発振点からの伝播距離:20 m)。

#### 3.3 レーザーパルス形状整形の指針

RF電子銃のエミッタンスが増大する支配的要因を



以下に列挙する。これらが互いに独立ならば、これらの自乗和の根で全体のエミッタンスが決まる。

- 1) 熱 (初期) エミッタンスの増大  
レーザー径と発生光電子の運動量広がり積
- 2) 加速電界広がりによるエミッタンス増大:  
空胴内の電場広がりや非対称性による増大
- 3) RF の時間変動によるエミッタンス増大:  
RF 電磁場での加速による増大
- 4) 空間電荷効果によるエミッタンス増大:  
プロファイルの歪み等で、ソレノイド磁場で補正不能な非線形空間電荷効果による増大

このように、レーザーパルスの 3 次元形状がエミッタンス増大を左右する。従って、エミッタンス増大を抑えるためには、レーザーパルスの最適化が必須である。この他にも、我々が実現した前述の高電界加速することも低エミッタンス化に有効である。

まず、レーザービームの横方向の光強度分布は均一な円筒形状が理想的である。また縦方向としては、適切な入射位相を選ぶことにより、パンチ圧縮させることを念頭に、レーザーパルスは長めにとることにした。水野氏のシミュレーションの結果から、S バンド RF 電子銃では 20 ps (位相にして $\pm 10^\circ$ ) を目標のレーザーパルス幅とした。最終的に、目標とするレーザーパルス 3 次元空間形状を、「長さ 20 ps, 直径 1 mm 程度の密度が均一な円筒」とし、この整形パルスをカソード面に垂直入射する光学配置とした。

## 4. レーザ光源の安定化<sup>[13]</sup>

### 4.2 レーザの不安定要素

まずレーザーオシレータであるが、その発振原理であるモードロックは本来安定なものである。従って、不安定要素は発振原理以外の外乱要因である。以下に、オシレータの不安定要素となるものを列記する。

- 1) オシレータの光共振器長 (光路長) 変化
- 2) 励起光源のレーザー結晶照射位置変化

同様に、後段増幅器については以下の通り。

- 3) オシレータからの種光の入射軸変化
- 4) 増幅器励起光源のレーザー結晶照射位置変化

以上は、環境を安定化して熱膨張変化を抑え、光学ホルダーの機械安定度とレーザー架台の除振性能を上げるだけで解決する問題である。もちろん光学素子の劣化の問題があるが、ガラスなどの誘電体光学系が帯電することで埃を集塵し、それがレーザーにより焼き付き損傷するのが原因である。これを防ぐには、クリーンルーム内を適正に加湿し、誘電体 (光学素子) 表面の静電気を除電する方法が有効である。

### 4.3 不安定要素の抑制

まず、環境温度および湿度を適正值に保つため、新しく恒温恒湿のクリーンルームを設置した。また、レーザー機器の配置も室内の風速分布計測から、その影響が少なくなるように配慮した。レーザー定盤上で、相対湿度が 55% ( $\pm 2\%$ )、温度が 21°C ( $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ) になるように、通年 24 時間制御運転している。

各レーザー機器については、パッシブな安定化方針に基づいて以下の対策を行なった。

- 機械的に安定な各種光学ホルダーの開発
- 新型オシレータの温調水コントロール
- ポッケルス・セルおよびレーザー結晶の温調水コントロール
- YAG レーザ筐体の温調水コントロール

以上のパッシブな安定化により、オシレータのモードロックは 25 日間保持でき、レーザー光の安定度は 24 時間計測で、コンプレッサー後の増幅基本波において 0.3% (rms)、3 倍波で 1.4% (rms) 以下にそれぞれ落ち着いた (以前の安定度は 1 時間計測で、3 倍波で 3~10% (rms))。

次に、不安定要素として列記した 1) および 2) を解決するため、アクティブなフィードバック制御する機構を導入した。アクティブ制御の導入後の最初の結果として、0.3% (p-p) の出力安定度が 4.5 ヶ月間保持することを確認した。

## 5. レーザパルス 3 次元形状の制御

3 章で目標としたレーザーパルスが実現できたとして、そのレーザービームを RF 電子銃のフォトカソードに照射しても、電荷分布が均一な円筒形状を有する理想的な電子ビームが得られるとは限らない。フォトカソード面の量子効率が均一である保証は無いからである。そこで、電子ビームが理想的な形状となるように、レーザービームの形状のフィードバック制御を行うことも併せて検討した。

レーザービームの横方向の空間プロファイルと、縦方向の時間プロファイルの両方が、自由に制御できる方法として考えたのは、可変形補償ミラーで横方向プロファイルまたは波面を整形し、パルススタッカーで時間プロファイルを整形する方法である。

### 5.1 横方向プロファイルの整形<sup>[1]</sup>

可変形補償ミラー (DM: Deformable Mirror) とは、薄膜のミラーを分割して電氣的に歪ませることにより複雑な鏡面を創り出し、波面整形等を行なう光学素子である。この可変形補償ミラーにより反射されたレーザービームを輸送光学系によりフォトカソード面に投射する。可変形補償ミラーを調整する際は、フォトカソード上で目標とする強度分布が得られる

ように、輸送光学系の途中から CCD (フォトカソードに相当する位置に設置) にレーザービームを導き、測定されたプロファイルが目標に近づく (評価関数の値を最大化する) ように、電圧調整を繰り返す。この整形システムの全体図は、図 4 の通りである。

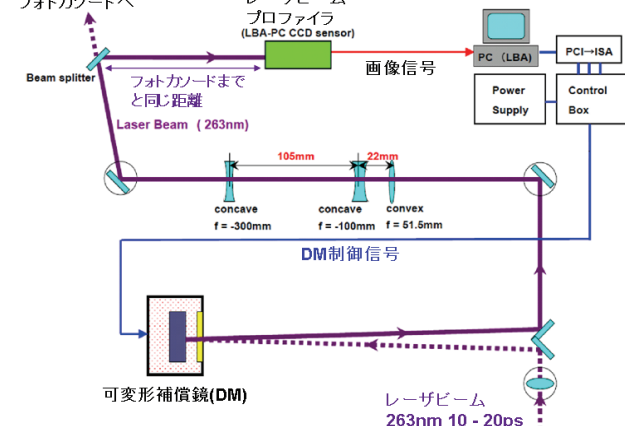


図4：可変形補償ミラーを用いた横方向プロファイル自動最適化(整形)システム

SPring-8 で採用した可変形補償ミラー (OKO社製特注品) の場合、ミラーのセル数は 59 個、各セルの制御電圧ステップが 256、すなわち  $256^{59}$  の組み合わせが可能である。しかし、これだけあると巧みに制御ソフトウェアを作成しないと最適化に膨大な時間を要する。我々の場合は、遺伝的アルゴリズムを採用してこの問題を回避した。そのソフトウェア開発は共同研究者の松井多志氏 (福井県工業技術センター) が担当した。その結果、図 5 に示すような、円形でほぼ均一な分布の空間プロファイルを完全自動最適化で実現した。

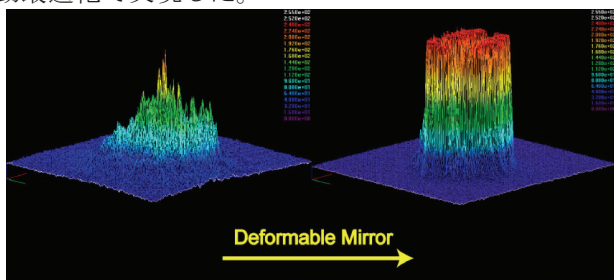


図5：可変形補償ミラーによるフラットトップ整形結果(左右とも縦軸はピークパワーで規格化している。)

## 5.2 時間プロファイルの整形

自在な時間プロファイル (時間パルス波形) 整形の方法として UV レーザパルス・スタッカーによる矩形パルス整形方式<sup>[13]</sup>を採用した。各種光学部品から開発し、後にキット商品化<sup>2</sup>された。パルススタッカーとは、幅の狭いレーザーパルス複数個にそれぞれ適当な遅延時間を与えて再合成し、幅の長いパルスを作り出す光学系である。実際には図 6 のように波

長回転板と偏光ビーム・スプリッターで構成され、波長板で  $45^\circ$  直線偏光にされたパルスレーザー光を偏光スプリッターキューブにより各偏光成分 (S と P 偏光パルス) に分岐し、再びスプリッター (この場合は合成用) にて光路差をつけて再合成する光学系である。このことを段数分だけ繰り返す構成になっている。例えば 3 段の場合は 8 個のパルスに分岐して時間をずらして配列することになる。このとき合成パルスに干渉が起きないように、図 6 に示すように S と P 偏光のパルスを交互に並べるのがポイントである。

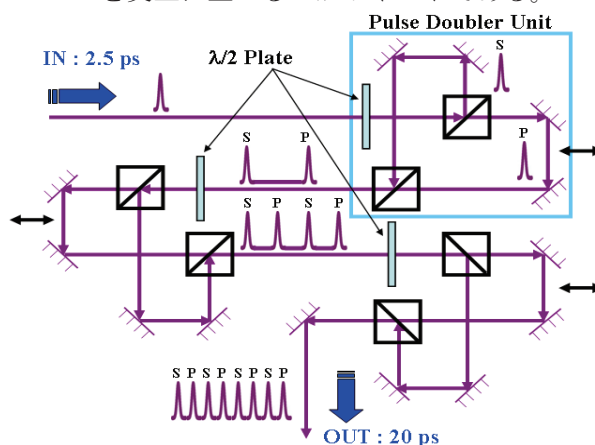


図6：UV レーザパルス・スタッカーの構成

今回は、図 6 のように約 2.5 ps 幅の紫外レーザーパルスを 8 個並べてフラットな 20 ps 幅の紫外レーザーパルスを作る。この場合の技術的問題点は 2 つある。最初の 2.5 ps 幅のレーザーの生成方法、および紫外レーザーの時間パルス形状の計測方法である。前者は最終的に A0 変調器の導入で解決した。後者に関連する紫外レーザーパルスの時間プロファイル測定は、ストリークカメラの時間分解能が紫外線に対して十分な特性がないため、意外に難しい。例えば、浜松フォトニクス社製 Fesca200 でも、300 nm 以下の波長での分解能は 800 fs 程度である。そこでレーザーパルス形状計測法として、フェムト秒時間分解能で 8 個の個々のパルス形状と各間隔を同時に計測できる方法を発案し特許出願<sup>[14]</sup>した。しかしまだ実現していないため、当面は RF 電子銃下流の分散部において、電子ビームのエネルギースペクトルを測定し、以下の要領で各段のパルス間隔を決定している。

まずレーザー入射位相を意図的に電子ビームのエネルギー拡がりが大きくなる RF 位相にする。こうすると、電子の時間差がそのエネルギー差に変換できる (完全に線形ではないが)。ビームエネルギーは、下流の偏向電磁石で曲げたところにあるプロファイラで測定する (図 7 参照)。ビームエネルギーの RF 位相依存性が分かっているので、ビームエネルギーから電子バンチのパルス長やバンチ間隔が計算できる。

パルススタッカーを調整する場合は、8 個のパルスの RF 位相差と各パルスの重なりを計測し (図 7 参照)、この結果をもとに、各パルス間の時間差をパル

<sup>2</sup> <http://www.luminex.co.jp> (パルススタッカーキット)

スタッカー各段で、S に対する P 偏光の光路差を適正にマイクロメータで微調整する。

このように時間プロファイルを調整後、前述の補償ミラーでの横方向の自動最適化を合せて行い、円筒形状ビームの生成に世界で初めて成功した<sup>[15]</sup>。

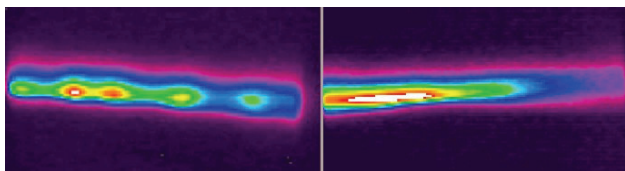


図7：パルススタッカーを調整中に観測された電子ビームのエネルギースペクトル(左の調節中のスペクトルでは個々の電子バンチが不均一な間隔をおいて明瞭に見え、右の最適化後ではバンチが一つに連なった状態に観測される。)

また、このパルススタッカーを用いると、各段の P 偏光側をマスクすることで段階的にパルス幅を変えた実験ができる。さらに、このことを応用すれば、電子ビームバンチ内で局所的にマスクされたエキセントリックなビーム実験が可能となり、ビーム物理としても面白い実験が可能になった。

## 6. RF電子銃のビームエミッタンス測定

整形されたレーザービームを単空洞型 RF 電子銃に入射して生成した電子ビームの規格化 X エミッタンスについては、目標に迫る測定値が得られている。特に 1 nC のビーム生成において、理想に近いレーザーパルス形状が空間電荷効果によるエミッタンス増加を抑制していることがわかる。

実験結果<sup>[16]</sup>として規格化エミッタンスはそれぞれ、レーザーパルス長が 10 ps の時に  $1.4\pi$  mm mrad (0.38 nC)、15 ps の時で  $1.8\pi$  mm mrad (0.52 nC)、20 ps の時は  $2.0\pi$  mm mrad (1 nC) であった。

これらの一連の実験の際、レーザーパルス長が 15 ps 以下の時はレーザー強度を上げても電荷量が 1 nC に達しない、すなわち電荷量が抑制されてしまう現象が見られた (カソード表面電界: 156 MV/m)。また、ほぼ完全な円形レーザースポットをカソード面上に実現しても Y エミッタンス測定値は、X エミッタンス測定値の 1.5 倍程度の値である。現在、それらの原因を調査中である。

## 7. まとめ

SPring-8 で私が中心となって行なった部分の RF 電子銃に関する研究開発は以下の通りである。

### 7.1 空洞内壁面およびカソード表面処理と評価

世界最高のカソード表面最大電界: 190 MV/m<sup>[6]</sup>に達し、その表面状態を維持している。量子効率も2桁上昇の  $8.6 \times 10^{-3}\%$  (銅カソード; 波長: 263 nm; カソード表面電界: 156 MV/m) であった。

また、著者が開発した放電分光法と分析手法は、

SLACで開かれた偏極電子銃会議でもJ. Clendenin等によって、現状で超高真空を必要とするNEAフォトカソード等の空洞内での様子を観察する唯一の方法として紹介されている<sup>[17]</sup>。

### 7.2 レーザ源の長期安定化

恒温恒湿クリーンルームの設置や各機器別の温調水制御など、環境の影響を排除する工夫の結果、最終的に長期の連続安定運転を達成した。

これにより、テラワット級レーザー源を加速器に組み込んだの実用運転の見通しがたったと言える。

### 7.3 レーザパルス3次元形状の最適化

均一な電荷分布を有する円筒状の電子ビームは、非線形空間電荷効果によるエミッタンス増加が少ない。そこでレーザーパルスそのような電子ビームを生成できるように、横方向プロファイルは均一な分布の円形を、時間プロファイルは矩形パルス状を目標として開発を行ない、ほぼ均一で対称な円筒形状レーザービームを世界で初めて実現した。

横方向プロファイルの整形については、可変形補償ミラーを採用し、遺伝的アルゴリズムに基づいた制御ソフトウェアでの最適化制御を実現した。時間プロファイルの整形では、紫外レーザーパルスをパルススタッカーにより複数個つないで矩形パルスを作る方法を採用した。

実際に、実現された円筒形状レーザービームを RF 電子銃に入射してエミッタンス測定したところ、1 nC のビーム生成で、規格化エミッタンス  $2.0\pi$  mm mrad を達成し、空間電荷効果によるエミッタンス増加は良好に抑制されていることが確認された。

## 8. 今後の展望

以上のように、高品質電子ビームを安定に供給する加速器構成要素として使用可能な、実用的高性能レーザー源は、3章に挙げた数値目標をクリアし、ようやく手に入ろうとしている。さらに、安定度と取り扱いに優れる機械共振器を持たないファイバ・レーザーの開発も長足の進歩<sup>[13]</sup>を遂げており、著者が ERL/ILC用レーザー光源としての可能性を SPring-8 Internal Report<sup>3</sup>にまとめてあるので参照されたい。

また、円筒ビームであるがフォトカソードではレーザースポット径が $\sim$ mm、パルス幅が 10 ps 程度であり、実際はアスペクト比から円筒の端の効果による非線形の空間電荷効果を見逃すことができない。これを解決するための 3 次元形状としてエリプソイド (ラグビーボール型)<sup>[18]</sup>が知られている。2005 年に SLAC の LCLS から SPring-8 のようなレーザーシステムを導入したいという問い合わせがあり、その際にエリプソイ

<sup>3</sup> [http://www.spring8.or.jp/ja/support/download/publication/report\\_series/publicfolder\\_view](http://www.spring8.or.jp/ja/support/download/publication/report_series/publicfolder_view)



ド形状整形方法<sup>[19]</sup>についても相談された。当時、SLACのC. Limborg女史との検討結果を著した論文<sup>[20]</sup>があるので興味のある方は参照されたい。

このエリプソイド案も電子ビームが等速直線運動している場合にしか成り立たないように思う。本来は電子銃空洞内での急速に加速されるとともに最適な3次元形状に変形して行かなければならない。また、電子ビーム発生時の金属カソード近傍では、鏡像電荷による効果も考慮しなければならない。その解決案の一つとして、カソード面上で円盤(Pancake)形状から出発し、バンチ内の電荷密度を均一に保ちながら自身の空間電荷効果を利用して膨張していくWater Bagモデルが提案されている<sup>[21]</sup>。原理的にはフェムト秒レーザーの照射で可能だが、安定な金属カソードでさえ、現状の仕事関数と量子効率から必要とされる紫外レーザー強度ではカソードの損傷を招く。

これを解決するには、金属カソードの仕事関数を下げ、量子効率を上げなければならない。そこで、著者は光源レーザーをZ偏光化してレーザー電場を有効利用する、平面フィールドエミッター電子銃を考案した<sup>[22]</sup>。この新方式はRF電子銃にもDC電子銃にも適用でき、~GHzの高繰り返し運転とシステムのコンパクト化を実現できる。現在、レーザー基本波で光電効果にゲートをかける試験を準備中である<sup>[23]</sup>。まだこの辺は、カソード面における素過程の物理も含めて研究段階と言えよう。

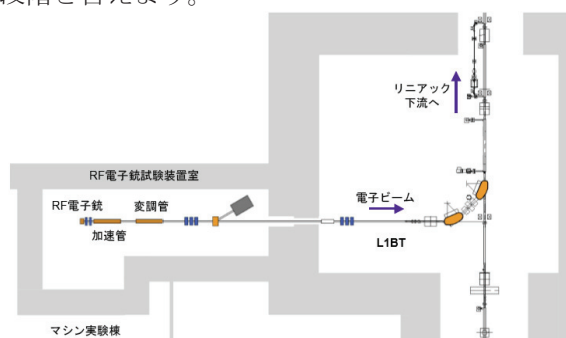


図8：アイソクロナス・リング(NewSUBARU)極短バンチ周回のための入射系(RF電子銃試験施設(マシン実験棟)から線形加速器に極短バンチビーム入射可能となっている。)

図8にあるようにRF電子銃試験加速器は最初からSPring-8の線形加速器に入射できるように設置されている。SPring-8研究サイトでの短バンチ周回試験は、兵庫県立大の修士課程(庄司善彦准教授)に在籍していた松原貴裕氏が、鈴木伸介氏を中心とする入射器のグループと協力して実施された。この時は、熱電子銃からの電子ビームをアクロマティックBT系とECSエネルギー変調用加速管を用いてバンチ圧縮し、アイソクロナス・リングであるNewSUBARUに入射した。結果として、50ターンの短バンチ周回に成功している<sup>[24]</sup>。RF電子銃からの極短バンチビームを入射することで、さらなる極短バンチ周回を今後5年以内に試験することを目指している。

このような周回極短バンチビームを用いた高時間分解の放射光実験が可能であると共に、リングにおける高次までのモーメント・コンパクションファクター等のパラメータに関するビーム物理を詳細に研究できる。このようにSPring-8では、ERL等を実現するにあたり直面する周回極短バンチビームの挙動に関する基礎研究を既存施設で行うことができる。

## 謝辞

今回の加速器学会賞という名誉に与れたのは、ひとえに加速器学会事務局をはじめとする諸先生方のご尽力のお陰である。この場をお借りして御礼申し上げます。我々が欧米技術の単なる流用でなく、独自技術を開発しながら研究を進められたのは、SPring-8加速器部門の懐の深さのお陰である。同部門が研究サイト内に築いてきた安定化に拘る“文化”の中で研究できたことは幸運であった。この“文化”は同部門と理研の合同で進むXFEL計画に引き継がれるであろうことを予測して結びとしたい。

## 参考文献

- [1] H. Tomizawa, et al., FEL'05, Stanford, 2005, p.138.
- [2] H. Tomizawa, et al., Proc. 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2004, p.147.
- [3] H. Tomizawa, et al., Applied Surface Science, 2003, p. 214.
- [4] T. Taniuchi, et al., FEL'96, Rome., Rome, 1996, p.137.
- [5] H. Tomizawa, et al., EPAC2002, Paris, France, 2002, p.1819.
- [6] H. Tomizawa, et al., NIM A 557, 2006, p.117.
- [7] 先進小型加速器の要素技術の普及事業 平成16年度成果報告書(独)放射線医学総合研究所, p.A115.
- [8] A. Mizuno, et al., NIM A 528, 2004, p.387.
- [9] T. Taniuchi, et al., FEL'04, Trieste, 2004, p.431.
- [10] H. Tomizawa, et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2003, p.132.
- [11] 出願番号：特願2007-84245; 富澤宏光, 大塚博士
- [12] Y. Igarashi, et al., Proc. of the PAC2003, Portland, Oregon, 2003, p.2838.
- [13] 富澤宏光, 加速器学会誌, Vol.3, No.3, 2006, p.251.
- [14] 出願番号：特願2007-197232; 富澤宏光
- [15] H. Tomizawa, et al., Russian Journal of Quantum Electronics, 2007, in printing
- [16] H. Dewa, et al., FEL'06, Berlin, 2006, in press.
- [17] Polarized RF Gun meeting Note 11/7/05, SLAC, 2005.
- [18] I.M. Kapchinskij, V.V. Vladimirkij, Conference on High Energy Accelerators and Instrumentation, CERN, Geneva, 1959, p.274.
- [19] 出願番号：特開2006-249059; 富澤宏光, 佐々部順
- [20] C. Limborg-Deprey and H. Tomizawa, Proc. of the Physics and Applications of High Brightness Electron Beams, Erice, Italy, 2006, in press.
- [21] J. Luiten, et al., EPAC2004, Lucerne, Switzerland, 2002, p.725.
- [22] 出願番号：特願2007-133183; 富澤宏光, 小林実
- [23] 富澤博光, 小林実, Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Japan, 2007, to be published.
- [24] T. Matsubara, et al., AIP Conference Proc. 879, 2007, p.17.