

量子ビーム基盤技術開発プログラムにおける STF 加速器での X線生成実験報告

X-RAY GENERATION EXPERIMENT IN STF ACCELERATOR ON QUANTUM BEAM TECHNOLOGY PROGRAM

清水 洋孝^{#, A)}, 明本 光生^{A)}, Alex Aryshev^{A)}, 荒木 栄^{A)}, 加古 永治^{A)}, 福田 将史^{A)}, 福田 茂樹^{A)},
原 和文^{A)}, 早野 仁司^{A)}, 本田 洋介^{A)}, 本間 輝也^{A)}, 片桐 広明^{A)}, 小島 裕二^{A)}, 近藤 良也^{A)},
久保 浄^{A)}, 黒田 茂^{A)}, 松本 利広^{A)}, 松下 英樹^{A)}, 道園 真一郎^{A)}, 三浦 孝子^{A)}, 三好 敏善^{A)},
両角 祐一^{A)}, 内藤 孝^{A)}, 仲井 浩孝^{A)}, 中島 啓光^{A)}, 中西 功太^{A)}, 野口 修一^{A)}, 奥木 敏行^{A)},
大森 恒彦^{A)}, 佐伯 学行^{A)}, 阪井 寛志^{A)}, 佐藤 昌人^{A)}, 設楽 哲夫^{A)}, 宍戸 壽郎^{A)}, 竹中 たてる^{A)},
田内 利明^{A)}, 照沼 信浩^{A)}, 土屋 清澄^{A)}, 梅森 健成^{A)}, 浦川 順治^{A)}, 山口 誠哉^{A)}, 山本 明^{A)},
山本 康史^{A)}, 矢野 喜治^{A)}, 渡邊謙^{A)}, 坂上 和之^{B)}, 細田 誠一^{C)}, 飯島 北斗^{C)}, 栗木 雅夫^{C)},
磯山 悟朗^{D)}, 加藤 龍好^{D)}, 川瀬 啓悟^{D)}, 倉本 綾佳^{E)}, Mathieu Omet^{E)}, Arpit Rawanka^{E)}, Yan You^{F)}
Hirotaka Shimizu^{#, A)}, Mitsuo Akemoto^{A)}, Aryshev Alex^{A)}, Sakae Araki^{A)}, Eiji Kako^{A)}, Masafumi Fukuda^{A)},
Shigeki Fukuda^{A)}, Kazufumi Hara^{A)}, Hitoshi Hayano^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Teruya Honma^{A)}, Hiroaki Katagiri^{A)},
Yuuji Kojima^{A)}, Yoshinari Kondo^{A)}, Kiyoshi Kubo^{A)}, Shigeru Kuroda^{A)}, Toshihiro Matsumoto^{A)}, Hideki Matsushita^{A)},
Shinichiro Michizono^{A)}, Takako Miura^{A)}, Yoshiyoshi Miyoshi^{A)}, Yuuichi Morozumi^{A)}, Takashi Naito^{A)},
Hirotaka Nakai^{A)}, Hiromitsu Nakajima^{A)}, Kota Nakanishi^{A)}, Shuuichi Noguchi^{A)}, Toshiyuki Okugi^{A)},
Tsunehiko Omori^{A)}, Takayuki Saei^{A)}, Hiroshi Sakai^{A)}, Masato Sato^{A)}, Tetsuo Shidara^{A)}, Toshio Shishido^{A)},
Tateru Takenaka^{A)}, Toshiaki Tsuchi^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Kensei Umemori^{A)},
Junji Urakawa^{A)}, Seiya Yamaguchi^{A)}, Akira Yamamoto^{A)}, Yasuchika Yamamoto^{A)}, Yoshiharu Yano^{A)},
Ken Watanabe^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)}, Seiichi Hosoda^{C)}, Hokuto Iijima^{C)}, Masao Kuriki^{C)}, Goro Isoyama^{D)},
Ryukou Kato^{D)}, Keigo Kawase^{D)}, Ayaka Kuramoto^{E)}, Omet Mathieu^{E)}, Rawanka Arpit^{E)}, You Yan^{F)}

^{A)} KEK

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 305-0801

^{B)} School of Advanced Science and Engineering, Waseda University
3-4-1 Okubo, Shinjyuku-ku, Tokyo, Japan, 169-8555

^{C)} Graduate School of Advanced Science of Matter, Hiroshima University
1-3-2 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, Japan, 739-8511

^{D)} The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, Japan, 567-0047

^{E)} The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI
Hayama-town, Miura, Kanagawa, Japan, 240-0193

^{F)} Tsinghua University

Tsinghua University, Beijing, 100084, P.R. China

Abstract

To obtain high brightness quasi-monochromatic X-ray via Inverse Compton Scattering, highly intensified laser beam is designed and implemented in a new beam line of KEK Superconducting RF Test Facility (STF) accelerator, under the program of "Quantum Beam Technology Program". The STF accelerator is a superconducting Linac using ILC technology, operated with a 5 Hz repetition, 1ms electron bunch train, and 40MeV beam energy. The intensified laser beam was generated by a 4-mirror optical cavity with beam-synchronized burst-amplified laser input. The high brightness X-ray is generated by the collision between incoming electron beam and stored laser beam in the 4-mirror cavity. The 4-mirror optical cavity technology has been selected for their stable laser storage with long mirror distance,

[#]hirotaka@post.kek.jp

where electron beam is coming in and out for head-on collision between them. On this report, STF accelerator construction including collision laser system, and also collision results are described.

1. はじめに

「量子ビーム基盤技術開発プログラム」における「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」として、KEK の超伝導リニアック試験棟 (KEK-STF) において行ってきた加速器及び衝突用レーザーシステムの開発及び X 線生成実験において得られた結果について報告を行う。

この計画の具体的な内容としては、1.3GHz 9セル超伝導空洞 2 台からなるクライオモジュールと電子銃、ビームラインを完成させて「STF 加速器」を構成し、衝突点を含むシケイン部分を内包する形状の 4 枚鏡光共振器を加速器に組み込み、共振器内部に蓄積されたレーザーと電子線とによる逆 Compton 散乱過程を通して得られる高輝度 X 線の生成・検出を目的としたものである。

計画の最終年度である平成 24 年度に高電界運転とビーム加速運転を行い、生成 X 線の検出に成功した。ここでは構築された STF 加速器でのビーム性能及び X 線生成実験の結果についてそれぞれ報告を行う。

2. STF 加速器のビーム性能

STF Accelerator Operation Parameter Table	
Pulse Length	1ms
Repetition Rate	5Hz
Bunch Spacing	6.15ns (162.5MHz)
Number of Bunch / Pulse	162,500
Bunch Charge	62pC
Total Charge / Pulse	10,000nC
Beam Current	10mA
Bunch Length	12ps (FWHM)
Maximum Beam Energy	40MeV

Figure 1: Beam Parameter of STF Accelerator

図 1 に量子ビーム実験において STF 加速器に必要なとされているビームパラメータを示す[1]。特徴としては、1ms,10mA という非常に長いパルス長を目標としているところで、162.5MHz のバンチ間隔から、その達成には 162500 バンチもの非常に多くのバンチを、超伝導空洞を通して加速する必要がある。STF 加速器に組み込まれた L-band 光電子銃によって、1GHz 帯以上の繰り返し周波数を持つ光電子銃としては最長となる 1ms ビームの生成に成功した。生成

されたパルスは、クライオモジュール内に納められた超伝導加速空洞 (MHI-012/013) によって加速され、40MeV のエネルギーに到達して衝突点へと送り込まれる。RF 電子銃空洞への RF の供給および超伝導加速空洞に蓄積される供給 RF の振幅と位相の安定化にはデジタルフィードバックの技術が適用されており、実際の衝突実験を通して、その安定性が確かめられた。到達エネルギーの 40MeV は、偏向電磁石に添え付けられた gauss meter による磁場強度測定から計算された値である。後で示す通り、STF 加速器では、ビームパイプの口径の改良や放射線シールドの増強等を経て、1ms の大電流ビームの加速に無事成功した事を実験的に確認した。

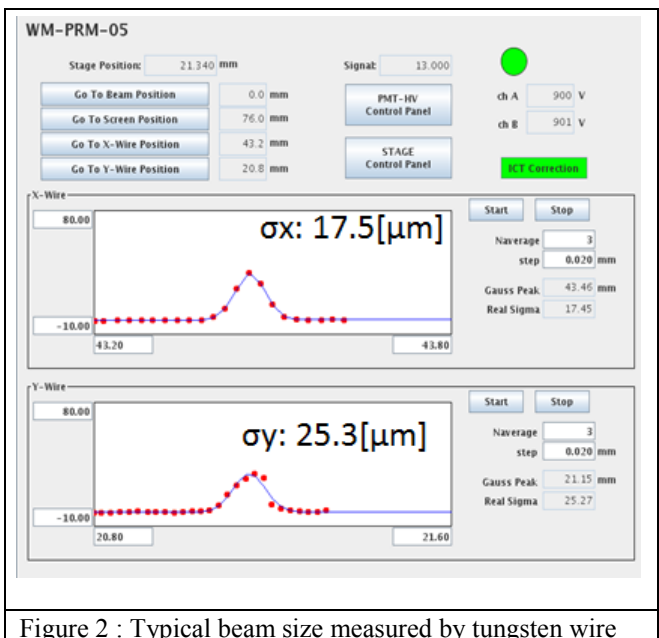


Figure 2 : Typical beam size measured by tungsten wire

超伝導加速空洞を使った大電流加速と同等に、本実験計画において重要な課題である X 線生成実験においては、衝突点でのビームサイズを小さく保つ事が非常に重要な課題である。目標となるビームサイズは、衝突点に置いて $\sigma = 10\text{-}20\mu\text{m}$ となっている。この値を達成する為に、STF 加速器では擬似衝突点を含むラティス構造を採用しており、原理的にディスページョンが無い擬似衝突点においてまず目標のビームサイズを達成する様に調整を行い、次に実際の衝突点でのビームサイズを最少にする様に微調整を行うと言う方式を採った。擬似衝突点と衝突点でのビームサイズは、それぞれの位置に組み込まれた太さ 10 μm のタングステンワイヤによって測定される。図 2 に、擬似衝突点で実際に測られた、ビームサイズの測定結果の例を載せる。縦方向・横方向共に、概ね 20 μm 程度のビームサイズが達成されている事が確認出来る。

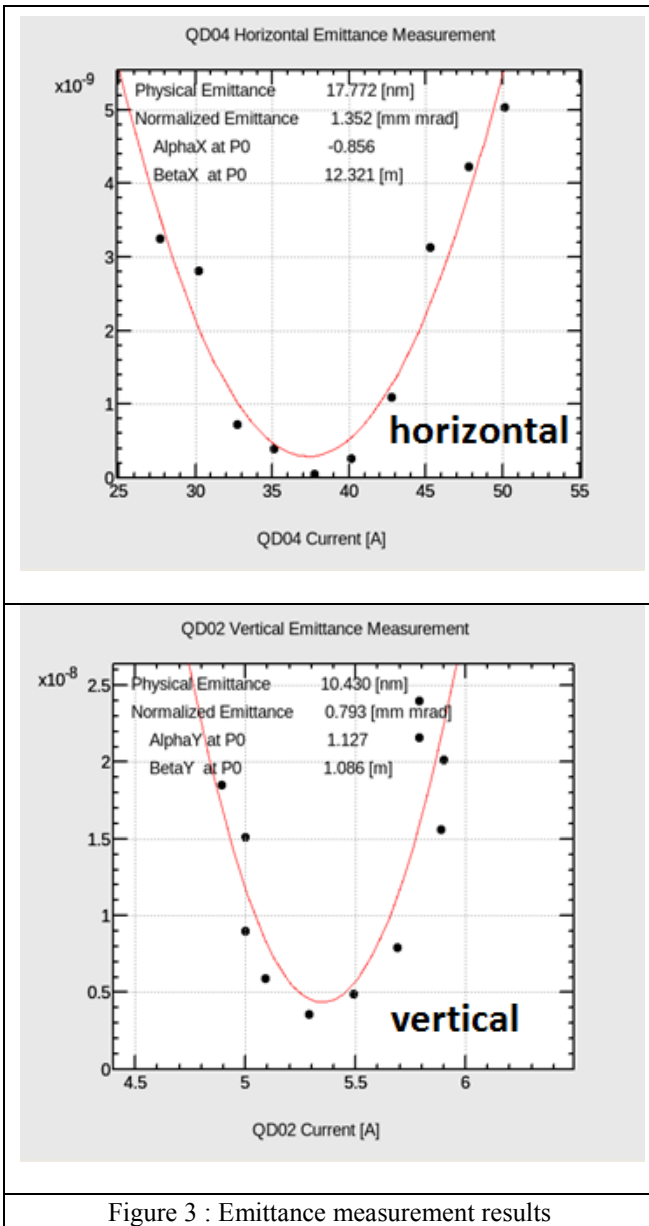


Figure 3 : Emittance measurement results

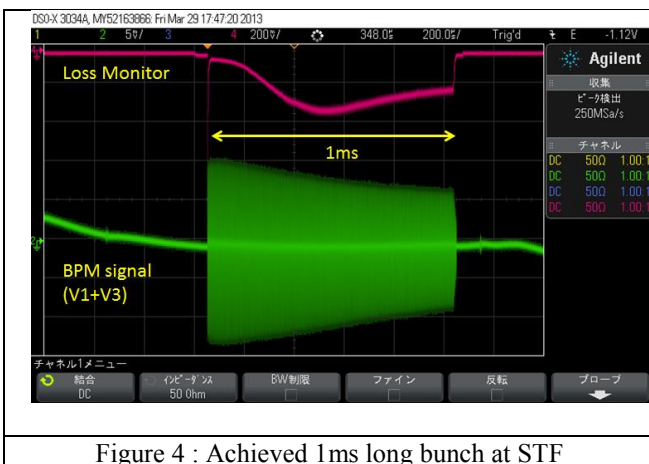


Figure 4 : Achieved 1ms long bunch at STF

STF 加速器において達成されたエミッタンスの測定の様子を図3に載せる。超伝導加速空洞を通して40MeVにまで加速後、Q マグネットの電流値を変えながらワイヤモニタを使用して、対応するビームサイズを測定する事でエミッタンスを求めた。設計時における目標値としては、縦方向・横方向共に1mm.mrad以下である。図3の例では、X 方向規格化エミッタンスが1.35mm.mradであり、Y 方向の規格化エミッタンスが0.79mm.mradであった。

図4に1ms ロングバンチ運転時の測定結果を載せる。緑のラインがBPMで測定したビーム電荷の様子で、赤のラインがロスモニタで測定したビームロスの様子である。1msの最初と最後ではBPMの信号強度が変わっている。これはバンチの最初としては9mAが達成されていたが、バンチの最後の部分ではピークカレントが6mAに落ちていた事を示している。この事から、STF 加速器としては平均7.5mAの電流の加速に成功した。

STF 加速器の構築としては、RF 電子銃からの低エミッタンス大電流ビームの取り出しと共に、暗電流の低減化が重要な課題であったが、ロスの無いビーム調整を行う事によって運転に伴う放射線量の減少に成功し、各空洞RFの振幅と位相のデジタルフィードバックによる制御安定化、カソードへの照射レーザーの安定化等の開発課題を越えて、安定な運転の実現とX線生成実験に必要なビームパラメータの達成が確認された。

3. X線生成実験

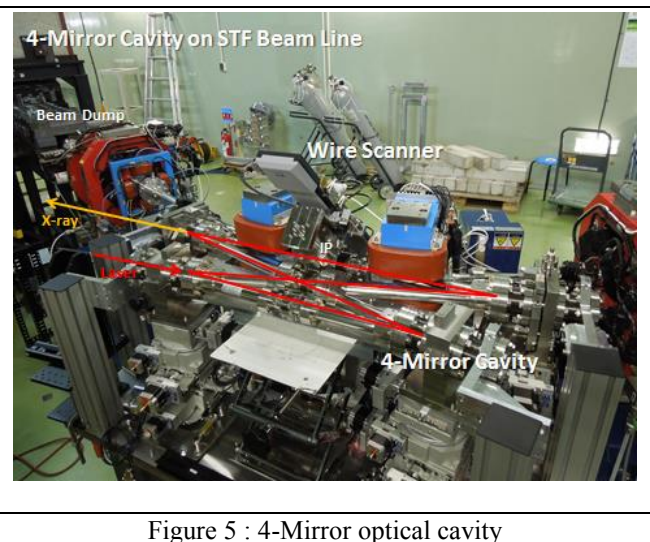


Figure 5 : 4-Mirror optical cavity

「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」として、STF棟で行ってきた実験の一つの大きな目標として、超伝導加速空洞を用いて加速された電子ビームとレーザーとの逆Compton散乱過程を通じたX線生成実験の実証が挙げられる。先に示した通り、STF 加速器の性能としてはこの実証実験に必要な条件を満たしており、残る課題としては、

逆 Compton 散乱の為のもう一つの始状態である、高強度レーザーを用意する事にある。STF 加速器として新しく設計されたビームラインでは、最もビームが絞られる衝突点を含むシケインを組み入れ、そのシケインを囲い込む様に光共振器の鏡を配置する事によって、レーザーと電子線との正面衝突の実現を試みた。この方式では有限の衝突角度を持つ場合に比べて、生成 X 線の数が一桁程度上回る利点があるが、光共振器の焦点を含む辺が、シケインを構成する偏向電磁石 2 台を含む長さになる為、これまでに加速器に組み込まれてきた光共振器に比べ、違った構成の物を考える必要があった[2]。この事を踏まえ、4 枚の鏡それぞれにアクチュエータが付加され、大気中での制御が可能となった光共振器システムを STF 加速器に組み込んだ。

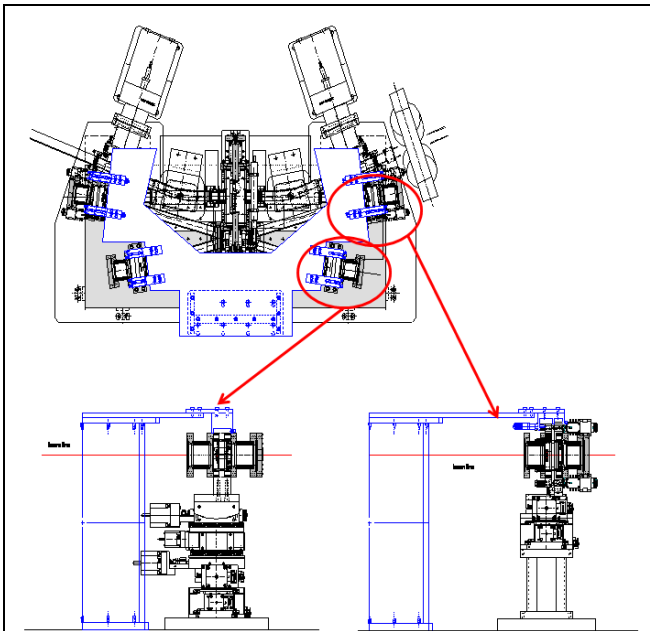


Figure 6 : Additive support system for the optical cavity

図 6 に、防振用に取り付けられた、補助板と鏡ホルダーの固定用治具の組み込みの様子を載せる。この防振システムを導入する以前は、光共振器にレーザーが蓄積された状態で、蓄積光強度を一定に保つフィードバックを安定的にかける事に成功しておらず、衝突実験をとおして X 線を生成する事が出来なかった。この問題を解決するべく、振動計を用いた環境振動測定を行った結果、共振器を構成している鏡付近(鏡ホルダー)が数十 Hz 程度のゆっくりした周波数で機械的に揺れている事が明らかになった。これは強度安定化の為のフィードバックに用いるエラー信号からも同様に読み取られた外乱であり、この機械的な揺れを取り除く事が、共振器安定化に必須と考えられたため、鏡毎に取り付けられたアクチュエータが供給する調整の自由度を固定してしまう事と引き換えに、蓄積される光強度の安定化を選んだ。

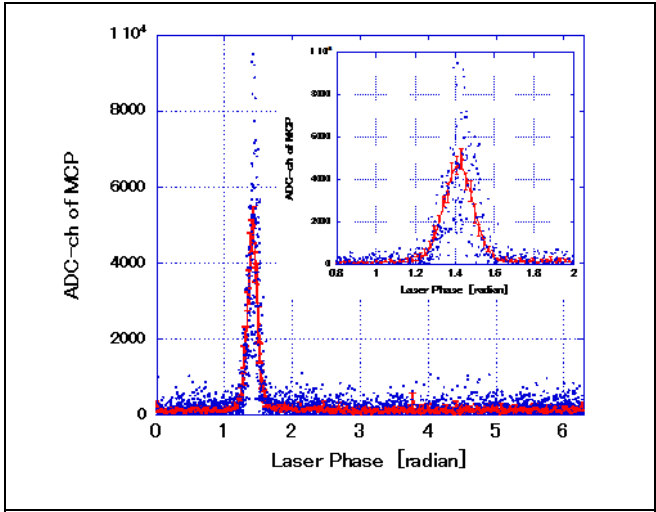


Figure 7 : Obtained Signal using MCP detector

図 7 に、MCP 検出器を使った際の、検出された X 線信号の様子を載せる。横軸は加速器の RF(162.5MHz)に対する衝突用レーザーの相対位相の値である。0~2π [rad]の周期的な位相ずれは、電子ビームバンチとの衝突タイミングをスキャンしている事に等しい。図から分かる様に、1.4 rad. 付近において、明らかに MCP からの信号を受けている ADC の信号が変化しており、他の領域に比べて信号の有意な増加が測定された。(青点による散布図)

赤点は横軸のレーザー位相を各瓶に割り振った時、MCP の信号値の平均とその RMS をプロットしたもので、ガウス関数を用いてフィッティングを行った線も併せて載せた。図 7 の右上の枠内は信号部分の拡大図である。

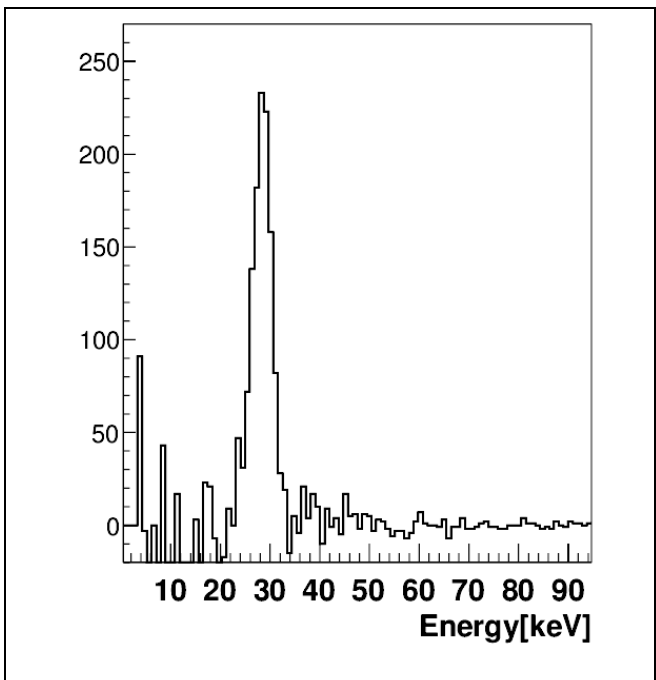


Figure 8 : Detected X-ray spectrum on SOI detector

Laser Cut [ch]	Fitting Amplitude [ch]	# of X-ray
5000	3699±135	915±33
6000	3928±136	972±34
7000	4045±145	1001±36
8000	4659±183	1153±45
9000	4763±245	1178±61

表 1: MCP からの信号による X 線の収量の見積り

Laser Cut [ch]	Stacked Power [kW]	Simulation
5000	3.059±0.007	3826±8
6000	3.155±0.006	3947±8
7000	3.279±0.005	4101±7
8000	3.453±0.004	4319±6
9000	3.631±0.004	4541±5

表 2: 数値計算による生成 X 線量の見積り

バックグラウンド処理を行った後に、フィッティングから得られる最大信号量と MCP 検出器の換算係数を用いる事によって、生成された X 線の個数が見積られ、248-bunch/train あたりの信号量として、約 450 個の X 線が検出された事になる。MCP 検出器に入る X 線は、共振器内の衝突点で生成された後、共振器を構成する厚さ 3 mm の凹面鏡を一度通過して検出器に到達する為、合成石英での吸収がどうしても無視出来ない大きさになる。上の表 1 では、鏡基盤での吸収率 0.45 を加味して、衝突点から MCP の立体角を見込んだ範囲に入る X 線数を載せてある。下の表 2 では、数値計算を用いて同様の条件の下に算出した、X 線の収量の期待値が載せてある。概ね 4 倍程度の収量の差が確認出来る。この食い違いが生じる最も大きな原因としては、laser の蓄積強度の安定化を図るために共振器側での衝突点の scan の自由度を無くしてしまった為に、laser pulse と電子ビームとの空間的な重なり合いが不十分な点で衝突を行っていた事が挙げられる。また一度信号検出が成された場合、信号量の統計を上げる為に、電子ビーム側を使った scan も十分に出来なかった事から、最も X 線が生成される点を走査する事が出来なかった。

MCP 検出器によって一応の衝突が確認された後に、本プログラムにおいて、X 線生成実験に向けた新しい検出器として開発が同時に進められてきた SOI 検出器を用いたスペクトルの測定も行った。図 8 に得られた実験結果を載せる。40MeV の電子線と波長が約 1 μ m の赤外線レーザーを用いて正面衝突を行った際に期待される生成 X 線のエネルギーは、計算から約 28keV となるが、SOI 検出器から得られた信号は、該当するエネルギー領域にのみピークを示しており、測定された X 線が逆コンプトン散乱を通して生成されたものである事と、正しいエネルギースペクトルを持っている事を示している。

以上に述べた MCP と SOI の両検出器で得られた結果から、STF 加速器における X 線生成実験の実証に成功したと結論出来る。

4. まとめ

「量子ビーム基盤技術開発プログラム」における「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」として、KEK の超伝導リニアック試験棟において STF 加速器の構築を行い、1ms ロングバンチ運転を成功させ、超伝導加速空洞を用いた大電流加速に成功した。また衝突実験に向け期待される、低エミッタンスビームの生成に成功した事を確認した。衝突点でのビームサイズは、目標値の 10 μ m に対して、30~40 μ m 程度の大きさが達成された。これ以上の収束が難しかった理由として、photo-cathode 上での seed laser の size の最適化がまだ十分で無かった点等が考えられている。

X 線生成実験においては、組み込まれた 4 枚鏡からなる光共振器内へのレーザーの蓄積に成功し、高強度化されたレーザーと電子線の空間的位置を合わせる事によって、X 線生成に成功した。生成された X 線の個数は MCP 検出器を用いて、そのスペクトルは SOI 検出器を用いてそれぞれ測定した。衝突点から 6 m 下流に置かれた SOI 検出器の受光面積を使うと、ちょうど今考えている逆 Compton 散乱を通して生成される X 線のエネルギーの約 1%-bandwidth 相当が検出出来る事が計算から分かる。先に見積もった MCP での検出個数から計算すると、 3.4×10^5 個の X 線が SOI 検出器で捕えられる事になる。(1%-bandwidth / sec.)

参考文献

- [1] K.Watanabe, et al., "Beam commissioning of STF accelerator at KEK" 第 9 回日本加速器学会年会プロシーディングス
- [2] H.Shimizu, et al., "Laser stacking cavity development for Quantum Beam STF collision experiment" 第 9 回日本加速器学会年会プロシーディングス