

SAGA-HIMAT プロジェクト及びそのビーム試験

BEAM TEST OF SAGA-HIMAT

金澤光隆^{#,A)}, 遠藤真広^{A)}, 日向猛^{A)}, 綱島義一^{A)}, 佐藤弘史^{A)}, 新開英秀^{A)}, 工藤祥^{A)}, 塩山善之^{A)}, 北村信^{A)},
十時忠秀^{A)}, 永澤勇一^{B)}

Mitsutaka Kanazawa^{#,A)}, Endou Masahiro^{A)}, Takeshi Himukai^{A)}, Yoshikazu Tsunashima^{A)}, Hiroshi Sato^{A)}, Eishu
Shinkai, Sho Kudo^{A)}, Yoshiyuki Shioyama^{A)}, Makoto Kitamura^{A)} Tadahide Totoki^{A)}, and Yuichi Nagasawa^{B)}

^{A)} Ion Beam Therapy Center, SAGA-HIMAT Foundation

^{B)} Mitsubishi Electric Corporation

Abstract

SAGA-HIMAT is a cancer therapy project with carbon ion beam, which is promoted by Saga prefecture with public private partnership. Designs of the accelerator and irradiation system have been started at beginning of 2010, installation of accelerator devices was from beginning of 2012, and first beam test was end of 2012. Required accelerator performances for therapy have been achieved such as maximum beam intensity of 10^9 pps. After beam commissioning, we will start the treatment at the end of August 2013.

1. はじめに

炭素ビーム専用の重粒子線治療施設（九州国際重粒子線がん治療センター（SAGA-HIMAT））を群馬大学に続いて佐賀県鳥栖市において建築中である[1][2][3]。このプロジェクトのこれまでの重粒子線プロジェクトと異なる最も特徴的なところは、佐賀県がこのプロジェクトに対してイニシアチブを持ちながらも、民間からの出資及び寄付、さらには個人の寄付も広く募って建設費を確保するところにある。これら多様な資金を利用出来るように医療を行う佐賀国際重粒子線がん治療財団の他に、主に建物の建設管理を行う九州重粒子線施設管理株式会社を設立した。本計画では、事業費として150億円を見込んでおり、これをどのように可能にするかはこの計画のもっとも重要な点の一つである。又、治療患者に関しては九州全域及び山口県から来ることを想定して、広報活動に取り組んでいる。2012年度には福岡県からも補助金をもらい、ますます九州全体の計画という性格を強めている。建設場所は、九州新幹線と長崎本線の新鳥栖駅のすぐ前で、さらにここ鳥栖は南北及び東西に延びる高速道路の交わる所であり、九州各地から来院するのに非常に便利な所である。

この計画では、患者さんからの治療費によって、この施設で働くすべての人の人件費を含めて運営していく必要がある、この点が重粒子線治療施設では初めての試みになる。そのため、想定したように治療患者数を増加させる事が重要である。これまで、九州大学、佐賀大学、久留米大学に寄付口座を作り、医師が重粒子線の治療経験を持てるようにした。さらにこれらの大学に粒子線外来を作って、患者の相談にも当たっている。又、SAGA-HIMATではすべて外来で治療を行うため、外部の病院と十分な協力

[#] kanazawa-mitsu@saga-himat.jp

が出来た事は重要であり、近隣の病院含めて九州全域で医療機能連携協定の締結を進めている。さらに治療照射の仕方を規定するプロトコルを議論する「重粒子線がん治療部位別腫瘍検討班」を臓器別に9つ作っている。班長には外部の人になってもらい、班員にも外部の人に入ってもらっていて、すでに7つの班でプロトコルについて議論され、プロトコルの最終案がほぼかたまりつつある。

本講演ではこのプロジェクトの現状とビームテスト結果について報告する。

2. 建設のこれまでの経過

施設の設計は2009年の初めに開始された。又、2011年2月から開始された建屋の建設は予定どおり2012年10月15日に竣工し、財団へ引き渡されている。装置に関しては2012年1月に搬入を初め、同じ年の12月15日にはビーム試験を開始している。その結果、2013年2月には放射線の施設検査にパスし、4月には2つのエネルギー(290MeV/u, 400MeV/u)について2室4コースすべてにビームを通し、加速器の調整に関してはいったん終了して、照射系の試験を開始している。これと平行して、SAGA-HIMAT施設で治療照射を行うために必要な情報システムの整備が進められた。1つは病院情報システム(HIS)であり、2013年3月から設置を開始し、6月からの患者相談受付開始に向けて準備をし、5月下旬に全体試験を経て、現在実稼働している。又、放射線治療情報システム(RIS)に関しても同時期に設置を開始し、HISとの接続試験を始め照射装置、治療計画装置との接続試験を行っている。7月に入ってから、RISを接続した上での治療照射テストについても行った。8月にはテスト用データを使って治療システム全体を動作させ、システム全体の運用テストを行い、実治療照射に備える予定である。ただし最初、治療は1室（水平コースと垂直コースが利用出来るB室）のみを使って前立腺だけ

であり、照射条件は限定されている。装置の性能をすべて発揮して利用できるようになるのは 2014 年度からの予定である。

3. ビーム試験

3.1 イオン源

イオン源は放医研にて開発された永久磁石のみをつかった 10GHz のマイクロ波を利用する ECR イオン源で、30kV の引出電圧で 4 荷の炭素イオンを取り出す。SAGA-HIMAT のイオン源を製作するに当たっては、同設計の群馬大学イオン源の運用経験に基づいて制作されている。必要とされているビームのピーク強度は 200 μ A である。図 1 にイオン源直後の偏向電磁石下流のファラデーカップで測定したスペクトルであるが、4 荷の炭素イオンが 300 μ A 弱のビーム強度で得られている。

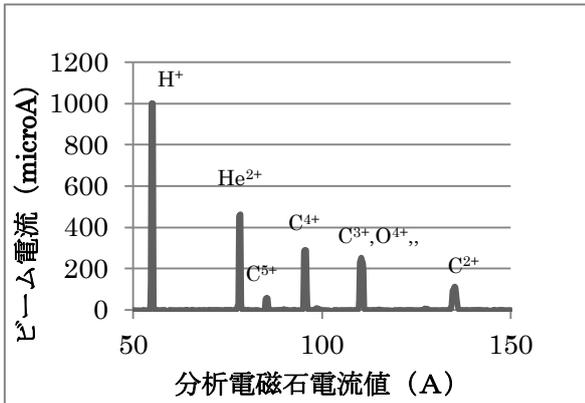


Figure 1: Beam current on faraday cup at downstream of bending magnet as a function of magnet current.

Table 1: Operational parameters of ECRIS

Microwave	Frequency : 10.038 GHz Power : 260 W
Bias disk	25 V
Gas	CH ₄ 0.03 cc/min
Vacuum	ion source : 1.9 $\times 10^{-4}$ Pa (upstream of ECRIS) Einzel lens : 7.7 $\times 10^{-5}$ Pa (downstream of ECRIS)

図 2 は同じファラデーカップでの電流波形である。このときの運転パラメータを表 1 に示すが、さらにビーム強度を上げた運転もガス流量を増やすことによって出来るが、その場合炭素が引出電極やセラミックスに付着する事により、放電を起こしやすくなると考えられる。そこで実際の運転では比較的ガ

ス(メタンガス)の流量を絞って運転しているが、必要なビーム強度を得ることが出来ている。この放電をさらに起きにくくするには、引き出し電極部の真空度を現在よりも改善すれば良く、次回のメンテナンスの時に改善したいと考えている。

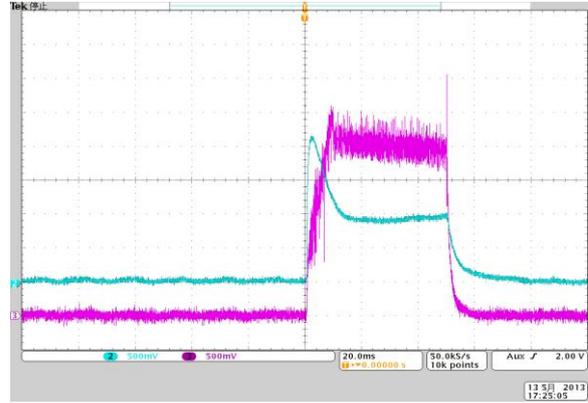


Figure 2: Beam current of C⁴⁺ on faraday cup and current of extraction electrode. Pulse width is 50ms.

3.2 線形加速器

入射器としては初段に RFQ 型線形加速器、後段には APF-IH 型線形加速器を使い、rf 周波数は両方の線形加速器とも 200MHz にしている。2 つの線形加速器間には小さな 3 連の空冷 Q マグネットのみを配置して、RFQ で加速されたビームがバンチしたまま APF-IH に入るようにしている。電場分布の測定及び調整は工場にて行い、調整後の RFQ 及び APF-IH 型線形加速器の Q 値はそれぞれ 7625 及び 11281 (設計値に対する割合はそれぞれ 63%及び 75%) であった。図 3 には APF-IH の電場分布を調整した後の値を設計値と共に示すが、ほぼ 1%以内で合わせることが出来ており、加速には十分な精度であると考えられる。ビーム調整では RFQ と APF-IH の間にはビームを観測出来る物は何も無いので、RFQ は設計値にセットし、APF-IH のパラメータを調整して加速効率が大きくなるように調整した。

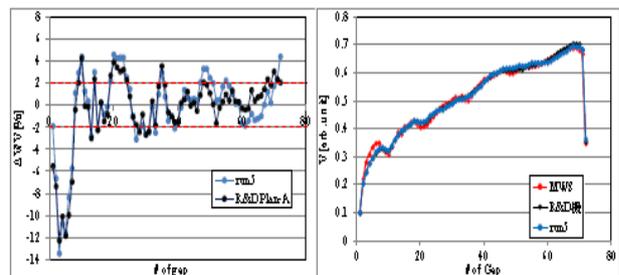


Figure 3: Tuned electric field of IH linac with R&D ones as a reference values. In both figures, horizontal values are number of acceleration gap. In left figure, vertical axis is deviation(%) from calculated values.

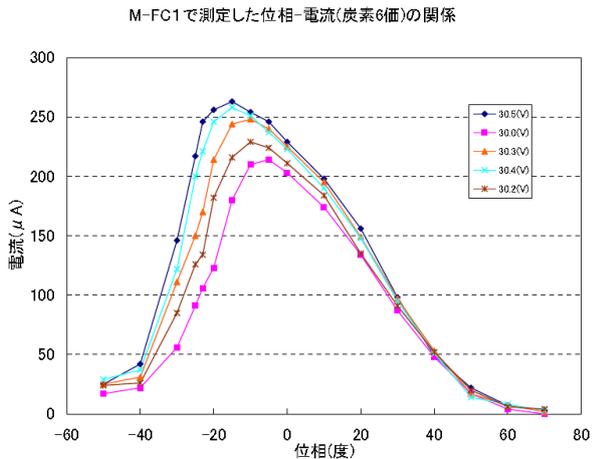


Figure 4: Accelerated beam currents as a function of acceleration voltage of IH linac and phase between RFQ and IH linac rf.

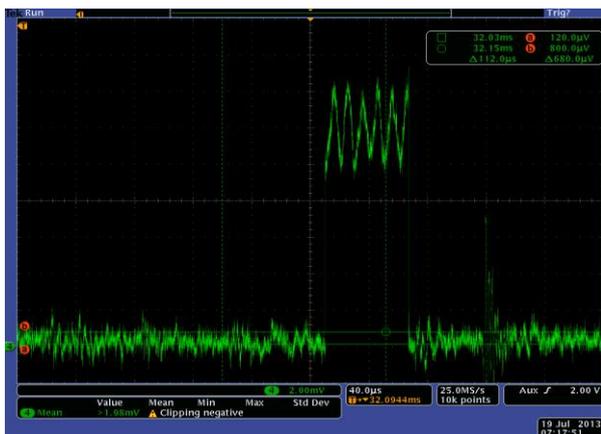


Figure 5: Accelerated beam current with IH linac.

図 4 は APF-IH の電圧を徐々にあげ、各電圧値の所で RFQ と APF-IH 間の位相を変えて APF-IH 直後のファラデーカップの電流値を測定した結果である。この調整により RFQ と APF-IH を通した加速効率として 79%が得られた。この値は放医研での R&D 機での値 80%と同等であり、線形加速器のビーム調整は十分であると考えた。図 5 に加速されたビーム信号を示すが、線形加速器に高周波電力を入れている時間は 500μ秒であるが、RFQ の上流に設置された静電チョッパーにより 57μ秒幅のビームにされて線形加速器で加速される。

3.3 シンクロトロン

入射器で加速された C⁴⁺ビームは APF-IH 線形加速器直下流に設置した、厚さ 50μg/cm² の炭素荷電変換膜で残りの 2 個の電子もはぎ取られて C⁶⁺状態で、シンクロトロンに多重回入射される。

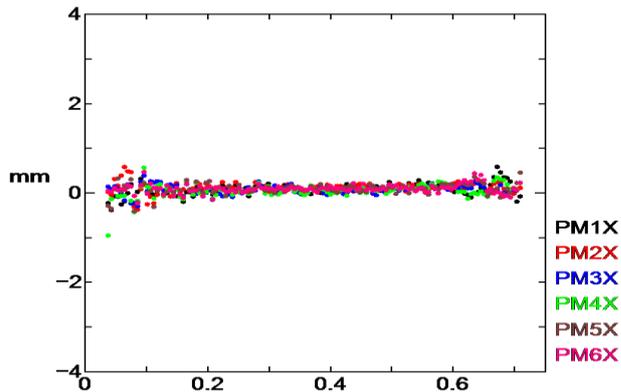


Figure 6: Horizontal COD during acceleration. Horizontal axis is timing(second) from master pulse.

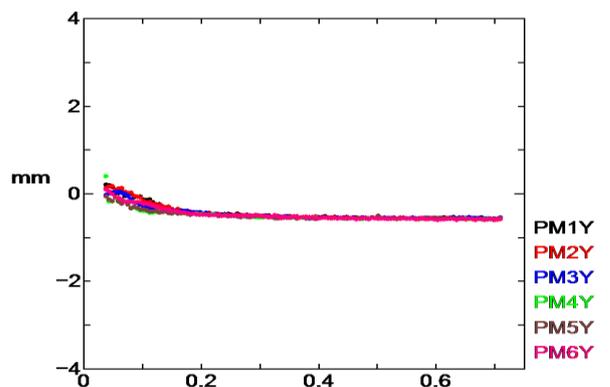


Figure 7: Vertical COD during acceleration. Horizontal axis is timing(second) from master pulse.

入射ビーム幅は 57μ秒にして実効入射ターン数は 12 ターン程度に抑え、位相空間の中心付近にビームを入れないようにしている。これはビーム取りだしを高周波で捕獲したまま加速して 3 次の共鳴に近づけて取り出しているため、より大きく周波数を掃引しなければ取り出せない部分にビームを入れたいためである。このようなビームの分布にすることで、空間電荷効果を抑制する事にもなっている。表 2 にシンクロトロンのパターン運転に関する主要タイミングを示すが、ビーム入射後 1.17ms には高周波捕獲を初め、1.6667ms の捕獲期間が終わってすぐ、磁場を立ち上げて加速に移っている。

Table 2: Timings of the synchrotron operation

cycle period	3.0666 s
injection timing (from master timing)	32.1018 ms
rf capture timing	33.333 ms
rf capture period	1.6667 ms
field ramp timing	35 ms
field ramping period	575+2×50 ms
field smoothing period	50 ms
flat top period	1312 ms

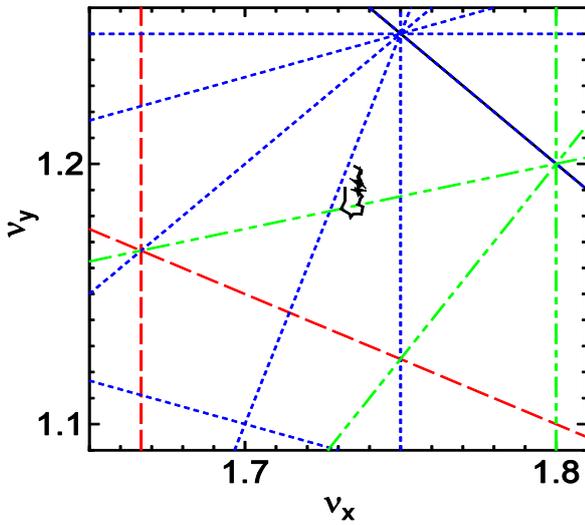


Figure 8: Measured tune values during acceleration.

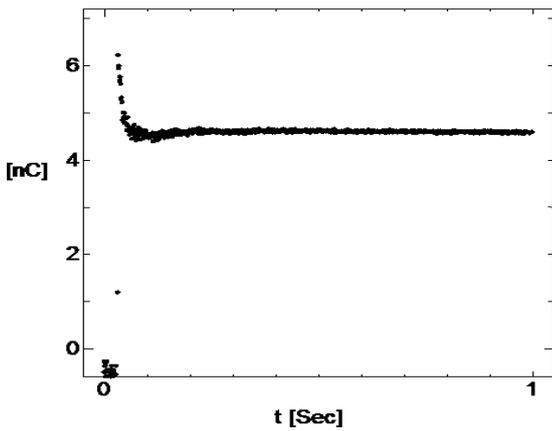


Figure 9: Charge in the ring, that is divided DCCT values with revolution frequency.

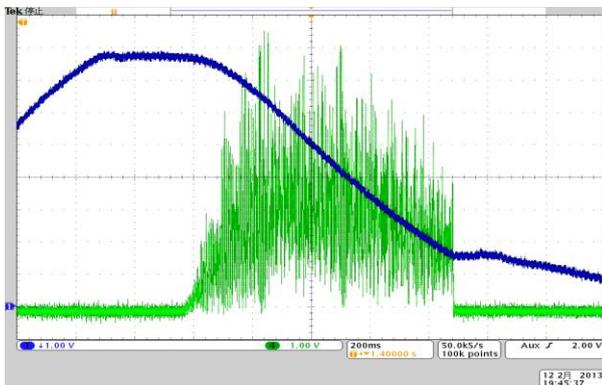


Figure 10: DCCT trace and extracted beam spill that was measured with faraday cup at the downstream of extraction septum magnet.

図 6, 7 には COD 補正した後の水平方向と垂直方向の値を示すが、どちらも高周波捕獲した直後からフラットトップまで 0.5mm 以下に補正できている。補正前は水平方向で -20~20mm、垂直方向で -4~6mm あり、この COD 補正がビーム強度を上げることに大きく寄与した。又、ベータートロン振動数の調整をした結果を図 8 に示す (加速途中 400ms まで測定)。図 9 にはこれらの調整をした後に DCCT で測定したビーム電流の値から求めたリングに入っている電荷量を示す (入射からフラットトップまで)。入射後に約 25% 程度のビームロスがあるが、その後は目立つロスはない。この入射後のロスの割合は日々の運転でビーム強度が変化してもほぼ一定の割合になっている。

図 10 に遅いビーム取りだしのビームスピルとその時の DCCT の値を示す。取りだしには $v_x=5/3$ 共鳴を使い、ビームを捕獲したまま rf 周波数を掃引する事により行っている。図から分かるように 8 割ほどリングのビームが無くなった所で取りだしの為の周波数掃引を停止し、取りだしビームの運動量幅が広がり過ぎるのを避けている。なお、この取り残されたビームは減速されて放射線の発生を防いでいる。

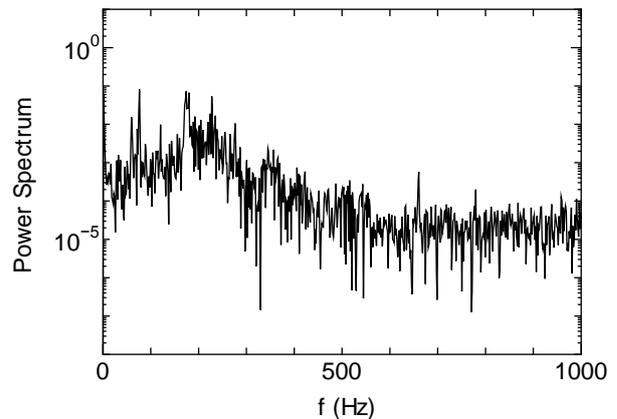


Figure 11: Frequency spectrum of extracted beam spill.

現在、ビームの取りだし効率 (フラットトップにリングから無くなったビーム量に対して取り出されたビームの割合) は 90% 以上にする事が出来ている。この結果取り出されたビーム強度はシンクロトロンの運転周期 3 秒での設計値である 1.0×10^9 pps (particle per second) を達成出来ている。又、図 11 にはビームスピルの周波数分布を示すが、180Hz の所にピークがありその他 60Hz、240Hz 付近にもピークが見える。これらは電力周波数の 3 倍高調波、基本周波数、4 倍高調波に対応している。その他に 200Hz を中心にして幅広の盛り上がりが見える。しかしながら偏向電磁石電源及び四極電磁石電源の電流にはこれらの周波数の所に特段のピークは見えず[4]、ビームリップルの改善は今後に残された課題である。

3.4 高エネルギー輸送系

シンクロトロンから各治療室までの輸送系を図 12 に示すが、3室とも水平ビームラインと垂直又は 45 度ラインがアイソセンターで交差するようになっている。この輸送系では、シンクロトロン直後の各コース共通な所で運動量分散及びその微分をゼロにしている。又、各治療室のアイソセンターでも運動量分散及びその微分をゼロに設計している。さらに、遅い取りだしではセパトリクスが重なるように設計し、取り出されたビームのエミッタンスが小さく、かつビームがスピル内で動かないようにしているが、それでも実際のビームは動きが残ってしまっている。これを止めるために輸送系にパターン運転出来るステアリング電磁石を水平と垂直共に一対ずつ設置した。このステアリング電磁石の利用により、スピル内でのビームの動きは全アイソセンターで 0.2mm 以下に抑えることが出来ている。図 13 に B 治療室の垂直ラインにビームを通した場合に、アイソセンターでのビームの動きを測定した結果を示すが、補正前には 0.2mm 程度動いていたが、ダイナミックな補正をすることによって 0.1mm 以下にする事ができている。

4. 謝辞

加速器及び照射系の設計にあたっては放医研・物理工学部の方々に議論に加わっていただいた事を感謝いたします。又、群馬大学・重粒子線医学研究センターの方々の協力に感謝いたします。本計画の施設の建設は九州重粒子線施設管理株式会社が担当しており、建設の資料等については甲斐慎一郎、嶋田昭彦の両氏及び大成建設の山田隆則氏にお世話になりました。又、公益財団法人・佐賀国際重粒子がん治療財団の光武亨剛氏を始めとする財団の各位及び佐賀県健康福祉本部・粒子線治療普及グループの各位のその熱心なサポートに感謝いたします。

参考文献

- [1] 九州国際重粒子線がん治療センター、事業計画 Ver.2.0, Jan, 29, 2010.
- [2] M.Endo, et al., SAGA-HIMAT (Heavy Ion Medical in Tosu), PTCOG49, May 2010.
- [3] M.Kanazawa, et al., SAGA-HIMAT PROJECT FOR CARBON ION RADIOTHERAPY, 加速器学会 2011.
- [4] C.Yamazaki, et al., Development of a Power Supply for Electromagnets of Heavy Ion Medical Accelerator, 加速器学会 2013.

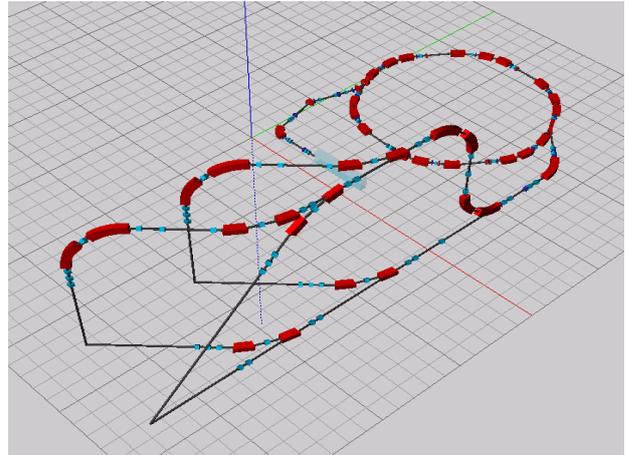


Figure 12: Beam transport lines with synchrotron and injector.

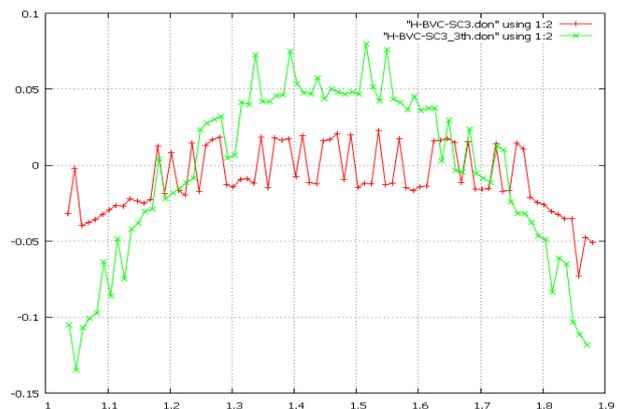


Figure 13: Position of beam centers during beam spill with and without dynamic orbit correction. Horizontal axis values are timing(second) from master pulse. Vertical is in mm.