

## SAGA-HIMAT でのスキャニング照射装置の建設

### CONSTRUCTION OF A SCANNING SYSTEM AT SAGA-HIMAT

金澤光隆<sup>#,A)</sup>, 遠藤真広<sup>A)</sup>, 溝田学<sup>A)</sup>, 日向猛<sup>A)</sup>, 綱島義一<sup>A)</sup>, 佐藤弘史<sup>A)</sup>, 工藤祥<sup>A)</sup>,  
塩山善之<sup>A)</sup>, 北村信<sup>A)</sup>, 十時忠秀<sup>A)</sup>, 中川原章<sup>A)</sup>

Mitsutaka Kanazawa<sup>#,A)</sup>, Masahiro Endo<sup>A)</sup>, Manabu Mizota<sup>A)</sup>, Takeshi Himukai<sup>A)</sup>, Yoshikazu Tsunashima<sup>A)</sup>,  
Hiroshi Sato<sup>A)</sup>, Sho Kudo<sup>A)</sup>, Yoshiyuki Shioyama<sup>A)</sup>, Makoto Kitamura<sup>A)</sup>, Tadahide Totoki<sup>A)</sup>, and Akira Nakagawara<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Ion Beam Therapy Center, SAGA-HIMAT Foundation

#### Abstract

In SAGA-HIMAT, 620 cancer treatments were done by use of two irradiation rooms in 2015 financial year. To increase treatment capacity of our facility, we have started the construction of the third treatment room C with a scanning irradiation system at the beginning of 2014. This construction was required to do without interruption on the treatment in room A and room B. With this requirement, installations of the beam line and irradiation devices were carried out in the night time and weak end, and beam tests were also. Though there are many things to improve, test irradiation is becoming possible. In this talk, we will present our development status.

#### 1. はじめに

九州国際重粒子線がん治療センター (SAGA HIMAT) [1,2]では、2013年8月末にB室1室での治療がスタートし[3]、2014年の4月には2室目のA室での治療もスタートさせることが出来ている。又、治療患者数については2014年度の治療患者数は554名、2015年度には620名の治療を行うことが出来、現在も増加傾向にある。この傾向が継続すれば、2治療室のみの利用では治療できる患者数が制限され、患者の治療希望に応えられなくなる予想される。そこでさらに治療患者数の増加に対応できるように、3室目 (C室) の利用が必要になってきている。現在使用している照射室では技術が確立されているパッシブ照射法を採用し、順調な治療の立ち上げを可能にした。一方、放射線医学総合研究所にて研究開発が進められていたスキャニング照射法が実用化され、この照射法を使った治療が順調に立ち上がっている。そこでSAGA-HIMATでも、C室ではこのスキャニング照射法を採用する事にした。

この3室目の整備の判断は、治療希望患者の多さを確認できた、治療開始したのと同じ年の2013年にされている。2014年度からは正式にメーカーとC室整備の契約し、3年間で完成させる計画とした。その際条件としたのは、A及びB室での治療には影響しないようにという事で、建設作業のための特別な治療休止期間は設けなかった。したがって建屋の工事、装置設置及び装置立ち上げは、センターがビームを使わない夜間、週末も使って行う必要があった。又、7月後半に設けている2週間の装置メンテナンス期間も有効に利用した。現在、薬機申請のためのビームデータがすべて取り終えており、治療照射に

向けてビームテストを行っている所である。本講演では、SAGA-HIMATでのスキャニング照射室の立ち上げの現状について報告する。

#### 2. 制御系

C室のスキャニング照射装置を立ち上げようとした場合、現在の制御システムにC室用のものを組み込み、完成時には3室が一体としてスムーズに運用できる必要がある。これを治療を止めないで行うために、マンマシンインターフェイス計算機及びサブシステム (シンクロトロン、高エネルギー輸送系) を制御しているPLC (統括PLC) は既設の物と新設のものをそれぞれ用意した。スキャニングテストを行う時には制御システムを既設のものから新設のものに繋ぎ変えてテストを行い、テスト終了後に既設のものに繋ぎ戻すことにした。

#### 3. シンクロトロン

今回のスキャニング照射法では、照射ビームのレンジはシンクロトロンのエネルギーと照射装置のレンジシフターとの組み合わせで調節する。このためにシンクロトロンのエネルギーは100MeV/uから400MeV/uまで11段のエネルギーステップを用意する。したがってシンクロトロンは運転パルスごとにビームエネルギーを変えられる必要があり、しかも高い再現性が要求される。そこで現在治療に使っている運転パターンを使い、400MeV/uから290MeV/uに切り替えて、直後のビームの安定度をシンクロトロンのCODモニターで測定した。その結果、図1に示すようにエネルギー切り替え直後に最大6mmと大きなビーム位置変動が起こることがわかった。これの対策としてフラットトップの最後に最大磁場まで励磁するパターンを付け加えることに

<sup>#</sup> kanazawa-mitsu@saga-himat.jp

した。その結果は図 2 に示すようにエネルギーを切り替えても切り替え直後のビーム位置変動を 0.5mm 程度に抑えることができた。

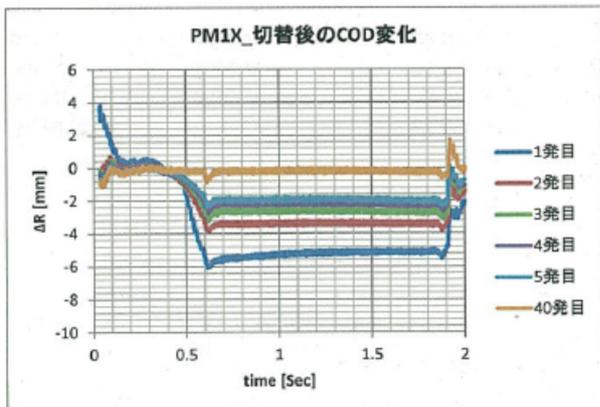


Figure 1: COD drift after energy switch to 290MeV/u from 400MeV/u operation.

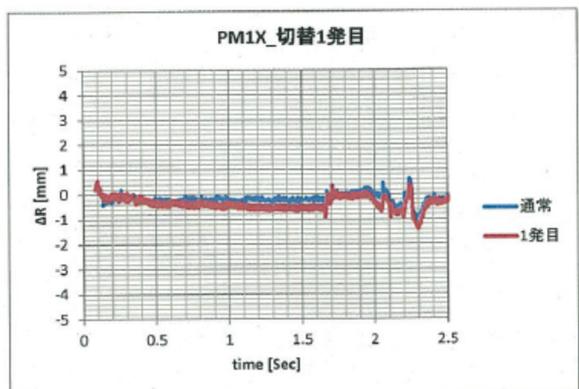


Figure 2: COD comparison with maximum excitation at the end of flat top.

#### 4. ビーム輸送系

図 3 に SAGA-HIMAT のビームラインを示すが、センターの運用開始時点では C 治療室へのビームラインは偏向電磁石の設置及びケーブル配線のみがされていた。今回の工事ではその他の四極電磁石、ステアリング電磁石、ビームモニター、及び真空システムを新たに取付けた。当初の設計では A 及び B 治療室と同じ twiss パラメータがアイソセンターで実現されるように設計されていたが、C 室でスキャンニング照射を行うことに対応して、よりシャープなビームが得られるビーム옵ティクスにしている。

スキャンニング照射をするにあたって、ビーム位置の安定性が重要である事から、朝立ち上げたシンクロトロンからのビームが 1 日のうちでどのように輸送系内、及びアイソセンターで変化するかスクリーンモニターを使って 2 時間ごとにビーム軸を測定した。その時に使った垂直ビームラインの옵ティクスを図 4 に示す。ビームエネルギーは最大エネルギーの 400MeV/u で行った。その測定結果の x 方向について図 5,6 に示すが、シンクロトロンから出た

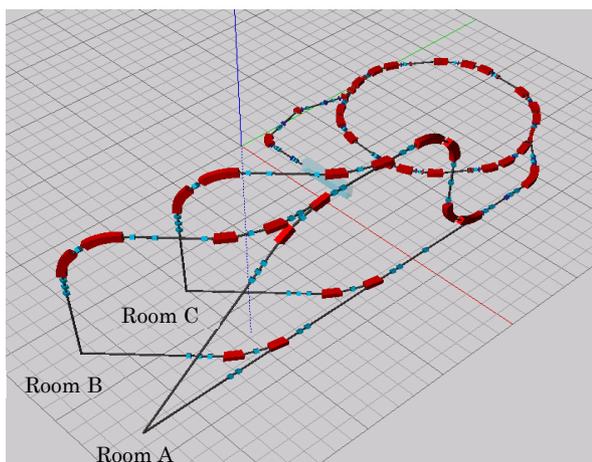


Figure 3: The beam line structure of SAGA-HIMAT.

直後のところでは 0.5mm 程度変動がみられるにもかかわらず、アイソセンターでは変動が小さくなっている。同じ種類の図は示していないが、y 方向の測定データでは、ディスページョンがゼロでない立ち上げ部のところで変動が観測された。このことから運動量の変化があると考えられ、その変化量は옵ティクスで計算されたディスページョンの値と測定された変動量を比較して、 $dP/P=0.013\%$  と求められた。図 7 に 0.013% 運動量が増加した場合のトラックと共に 1 スピルの間の変動の平均値をとったものを点で示す。この原因を考えるためにシンクロトロンのパラメータ間の関係式を書き出すと、

$$dB/B = \gamma_{tr}^2 df/f + ((\gamma^2 - \gamma_{tr}^2) / \gamma^2) dP/P.$$

今回の場合 rf 周波数に関しては信号源のシンセサイザーは常時 on で一定の温度になっていることから  $df=0$  と考えることができる。したがって今回観測された運動量の変化はシンクロトロンの偏向電磁石の磁場が変化したためと考えることができる。その量はビーム取り出し時の  $\gamma_{tr}=1.712$ (設計値)を使い、

$$\begin{aligned} dB/B &= ((\gamma^2 - \gamma_{tr}^2) / \gamma^2) dP/P \\ &= -0.435 dP/P \\ &= -5.7 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

となる。朝 8 時にシンクロトロンを立ち上げて 9 時から 2 時間ごとに測定しているの、その間にシンクロトロンの偏向電磁石が温度上昇したためと解釈できる。このような運動量の変化があったとして x 方向の変動を計算したものを図 8 に 1 スピルの間の変動の平均値をとった測定値と共に示すが、この運動量の変化だけで x 方向の軸変動の測定データをほぼ説明できる。このようなビーム軸の変動があっても、アイソセンターのところでは小さくなっており、水平コースと垂直コースそれぞれで、x、y 方向とも ±0.1mm 以内に収まっている。もし ESD のところで出射角の変化が主要因であったとすれば、ビームラインの各モニターの軸変動が違ってくるはずで、今回測定された結果は出射角の変化は小さいことを示している。又、低いエネルギーでは同じ磁場変化率  $dB/B$  に対しても  $dP/P$  は小さくなる。さらにエネルギーが低いために電磁石の温度上昇も低くなり  $dB/B$

は小さくなるため、同じ軸変動を測定した場合さらに小さくなると考えられる。

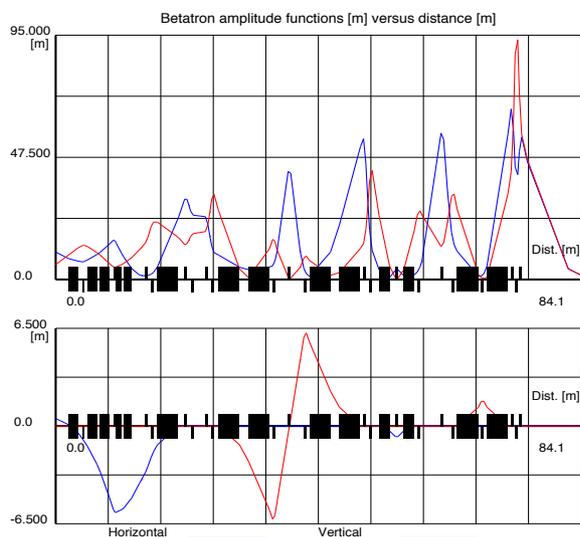


Figure 4: Beta functions (upper figures) and dispersion functions (lower figures) in the vertical beam line.

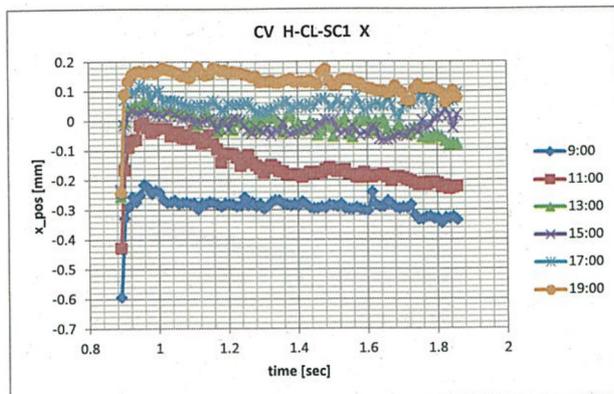


Figure 5: Drift of horizontal beam position between 9am and 7pm measured with a screen monitor at the exit of the extraction channel from synchrotron. Data lines of each color show beam position in one synchrotron cycle.

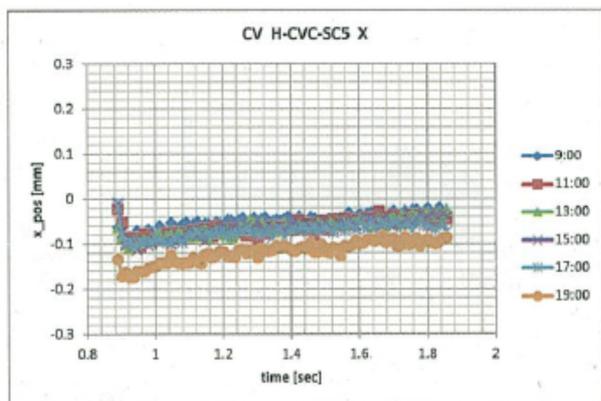


Figure 6: Drift of Beam position of x direction between 9am and 7pm at the iso-center.

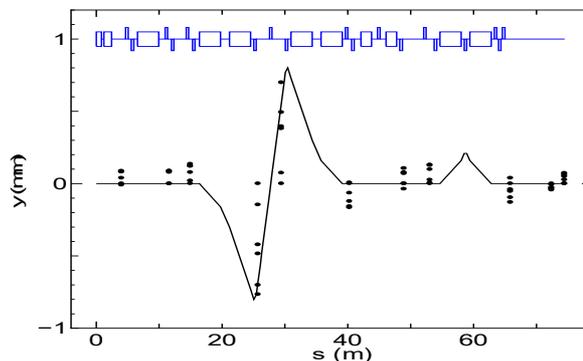


Figure 7: Drift of vertical beam position in the vertical beam line, and an estimated track with momentum increment of 0.013%.

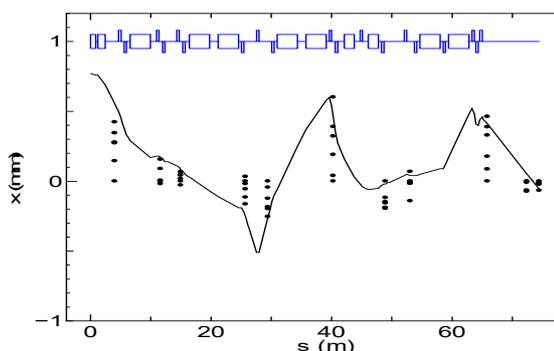


Figure 8: Drift of horizontal beam position in the vertical beam line, and an estimated track with momentum increment of 0.013% and  $dB/B = -5.7 \times 10^{-5}$ .

## 5. スキャンング照射装置

照射機器の配置はアイソセンターからの距離が水平と垂直で同じ位置関係になるように配置されている。上流からスキャンング電磁石(x,y)、正副線量モニター、正副位置モニター(x,y)、リップルフィルター、レンジシフターが配置されている。位置決めのための X 管はスペースの制約で線量モニター及び位置モニターと同一のフレームに取り付けられて、それぞれ利用するときにはビームライン上に移動させる。

### 5.1 制御系機器

スキャンング制御系では高速動作が必要なスキャンング電磁石、線量モニター、位置モニターの制御は FPGA を使い、スポットの照射シーケンス管理をスポット ID の送受信を行いながら照射を進める。この FPGA の上位には PLC があり、C 室に閉じたネットワークにつながり、このネットワークを介して照射系全体のネットワークにつながっている。

### 5.2 スキャンング電磁石及び電源

スキャンング電磁石と電源の仕様は  $240 \times 240 \text{mm}^2$  の範囲を走査できるように、かつ呼吸同期照射に対応できるようなスキャンスピードが得られるように決められた（体軸方向： $100 \text{mm/ms}$ 、横方向： $50 \text{mm/ms}$ ）。図 9 には  $400 \text{MeV/u}$  のビームで  $240 \times 240 \text{mm}^2$  の領域に  $20 \text{mm}$  間隔でアイソセンターに置かれたガフクロミックフィルムを照射した結果である。この照射された各スポットの中心位置を計画位置と比較した結果すべて  $\pm 0.5 \text{mm}$  以内に入っており、精度良くスキャン出来ている事を確認できた。

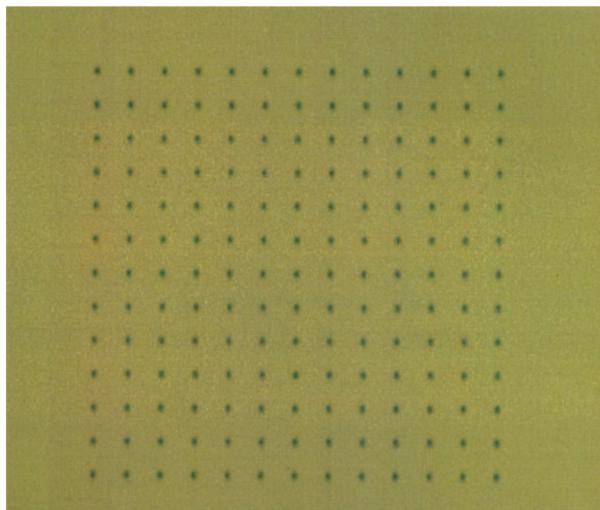


Figure 9: Irradiation for accuracy check of scanning magnet and power supply.

### 5.3 線量モニター

線量モニターは有効面積が  $200 \times 200 \text{mm}^2$  で、アルミ  $12 \mu$  厚の電荷収集電極を挟んで両側にギャップ  $5 \text{mm}$  で高圧電極があり、さらにギャップ  $5 \text{mm}$  で両側にアース電極がある。各ビームスポットの照射線量を制御するために使われ、したがって出力のビーム位置依存性を確認しておく必要があり、スキャンング電磁石でビーム位置を変えて、アイソセンターに置いた平行平板電離箱との出力比（アイソセンター平行平板電離箱/線量モニター）を測定した。その結果、全領域で変化が  $1.6\%$  以内に収まっている事を確認できた。ただし中心付近で線量モニターの出力が大きくなっていて、この出力の位置依存性の原因はこれから調査する予定である。

### 5.4 位置モニター

スポットビームの位置モニターとしては MWPC を使っている。エネルギーが高い場合  $\sigma = 1 \text{mm}$ （水平方向）以下のビームになることからアノードワイヤーは  $1 \text{mm}$  ピッチ、ギャップ  $3 \text{mm}$  で、ワイヤー直径は  $20 \mu\text{m}$  にしている。ガスにはモニターの応答を速くするために通常物理実験で使われる Ar ガスではなく、He ガスに  $20\% \text{CO}_2$  を混ぜたものを選択した。図 10 に  $15 \mu\text{s}$  周期で測定した例を示す。実際スキャンング

中に位置フィードバック及びインターロックに利用する場合は 8 サンプルの平均をとって行う予定である。この様に 8 サンプルの平均をとってビーム重心と幅を 2000 サンプルのデータを使って求めたものを図 11,12 に  $400 \text{MeV/u}$  でビーム強度が  $2 \times 10^8 \text{pps}$  の場合に示すが、バラつきはビーム重心では  $\pm 0.1 \text{mm}$  以内に、ビーム幅  $\sigma$  では  $\pm 0.2 \text{mm}$  に入っている。位置モニターに関してはさらに S/N の改善、及びビーム重心及び幅の演算方法の改善を行う事を考えている。特にビーム位置及び幅とも信号レベルが小さいところで改善を必要としている。そのうえで、フィードバック及びインターロック試験を行う事を計画している。

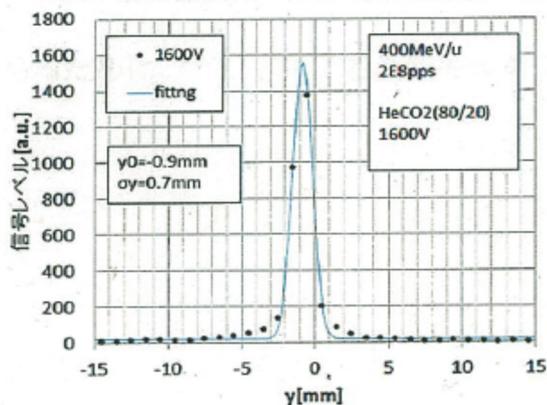


Figure 10: One sample data of position monitor.

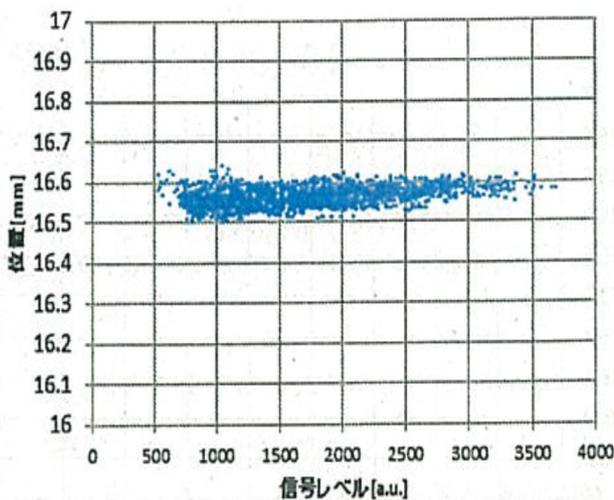


Figure 11: Obtained beam centers with position monitor.

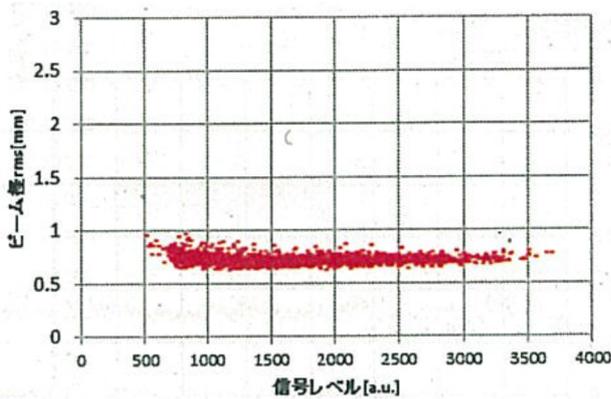


Figure 12: Obtained beam widths with position monitor.

## 6. テスト照射

システムに問題点があれば早くそれらを明らかにするために、できるだけ早い段階でテスト照射を行った。この段階ではまだビーム位置フィードバックは利用していないが、ビーム位置の変動が十分小さいので、スキヤニングテストには問題ないと判断した。初め、その基本的な動作を確認するために、ガフクロミックフィルムに正方形の領域を一樣に照射した。そこで十分な一様性 (<3%) をターゲット内で確認できたので、ロゴの図形を照射してみた。図 13 に結果を示すが、計画した領域を一樣に照射できていることを確認できた。さらに深さ方向でのスキヤニング動作を確認するために、物理線量分布が一定な SOBP (Spread Out Bragg Peak) の照射野を作った。それを水中に取り付けられた線量計を動かして深さ方向の線量分布を測定したデータを図 14 に示す。システム全体としては依然改善すべき点は多いが、十分な精度で一様分布の SOBP を得ることができ、スキヤニング照射の基本動作を確認することが出来た。

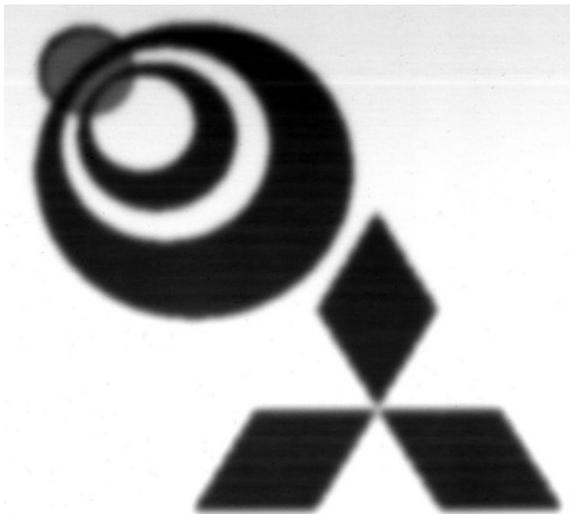


Figure 13: Test irradiation with symbolic marks (logos).

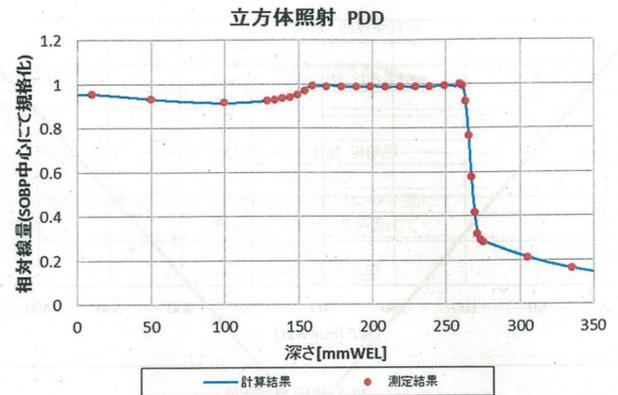


Figure 14: Test irradiation with flat dose distribution at SOBP.

## 謝辞

このスキヤニング照射装置の設計、製作、及びビームテストは、築島千尋氏をサガハイマックプロジェクトマネージャーとする三菱電機(株)に依っています。又、スキヤニング照射装置の設計検討及びビームテストに関して群馬大学・重粒子線医学研究センター及び放射線医学総合研究所・加速器工学部の方々から有益なアドバイスをいただいた事を感謝いたします。

## 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., Beam Test of SAGA-HIMAT, 加速器学会 2013.