

重粒子線治療用超小型超伝導回転ガントリーの開発

DEVELOPMENT OF A COMPACT SUPERCONDUCTING ROTATING-GANTRY FOR HEAVY-ION RADIOTHERAPY

岩田佳之#, 白井敏之, 水島康太

Yoshiyuki Iwata #, Toshiyuki Shirai, Kota Mizushima

Department of Accelerator and Medical Physics, National Institute of Radiological Sciences (NIRS),
National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

Abstract

A new compact rotating gantry for carbon-ion radiotherapy is being designed. This gantry consists of three combined-function superconducting-magnets having a bending angle of 90 degrees. The dipole field of the superconducting magnets is designed to be $B_{max}=5.02$ T, corresponding to a bending radius of 1.32 m for transporting carbon ions having kinetic energy of 430 MeV/u. This superconducting magnet also has three independent super-conducting quadrupole-coils, which are to be wound inside of the dipole coil for beam focusing. The dipole and quadrupole coils are to be electrically isolated in the magnet, and connected to independent power supplies, so that each field component can be independently excited. Having used the combined-function superconducting magnets, the size of the rotating gantry would become very compact; the length and radius are 5.1 m and 4.0 m, respectively. The magnetic field distributions of the super-conducting magnets were calculated with a three-dimensional electromagnetic field solver, Opera-3d code. With the calculated fields, the superconducting coils were optimized, so as to obtain uniform field distributions. In this paper, the design of the beam optics as well as the superconducting magnets is presented.

1. はじめに

粒子線がん治療において、粒子ビームを患者に対して任意の角度から照射可能とさせる回転ガントリーは重要な装置であり、陽子線がん治療装置では標準採用されるに至っている。一方、重粒子線治療用回転ガントリーにおいては、治療に必要な重イオンビームの磁気剛性が陽子線用のそれに比べ約3倍高いことから、電磁石群やそれらを支える構造体のサイズ・重量が非常に大型となる。この問題を克服するため、我々は超伝導回転ガントリーの開発を行ってきた[1]。超伝導回転ガントリーは平成27年9月に完成し、その後、コミッションングを続け、平成29年5月に治療利用が開始された[2]。超伝導化により、全長13m、ビーム軌道半径5.5m、重量約300tと従来の常伝導回転ガントリーに比べ大幅な小型・軽量化を実現しているが、依然、大型の装置である。我々は重粒子線がん治療用回転ガントリーの更なる小型化、並びに普及のため、超小型超伝導回転ガントリーの開発に着手した。本稿では超小型超伝導回転ガントリーのビーム光学設計、超伝導電磁石設計の現状に関して報告する。

2. レイアウトとビーム光学設計

超小型超伝導回転ガントリーのレイアウトをFigure 1に示す。この超伝導回転ガントリーは90度の偏向角を有する同一仕様の超伝導電磁石3台により構成される。超伝導電磁石は二極・四極磁場が同時発生且つ、独立励磁可能な機能結合型とし、ビームポア直径は $\phi 50$ mmである。本超伝導電磁石の最大二極磁場を $B=5$ T、最大四極磁場勾配を $G=14$ T/m とすることで、回転ガントリー

を全長約5m、ビーム軌道半径4mと、陽子線回転ガントリー以下のサイズまで小型化が可能となる。また、高速3D スキャニングを行うためのスキャニング電磁石、並びにモニタ類は最後の長直線部(2.5m)に設置される。

3台の超伝導電磁石は機能結合型であり、各超伝導電磁石には一式に二極コイルの他、三式の四極コイルを持たせる。最大二極磁場は5Tであることから、核子あたり最大430 MeVの炭素イオン(磁気剛性 $B\rho=6.62$ Tm)に対する曲率半径は $\rho=1.32$ m である。コイル構造はFigure 2に示した通り、二極コイルの内側に3種の四極コイルを長手方向に配置させる。各四極コイル間には、それぞれ0.2度分の間隔を持たせ、更に端部の四極コイル3にはステアリング用二極コイルも含める。

回転ガントリーのビーム光学設計では、回転角に依ら

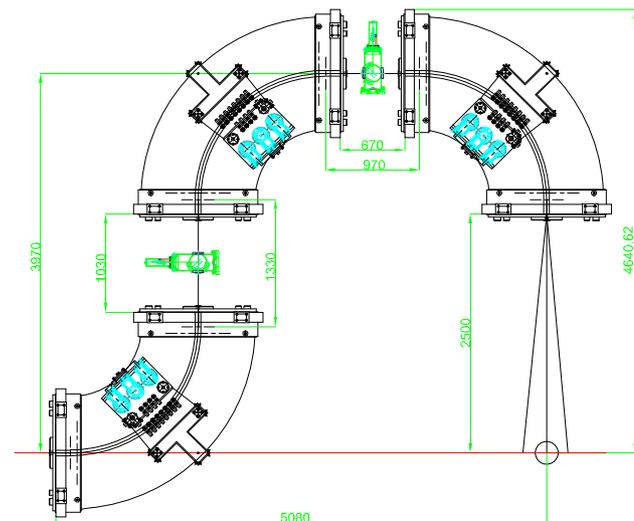


Figure 1: Layout of a compact rotating-gantry.

iwata.yoshiyuki@qst.go.jp

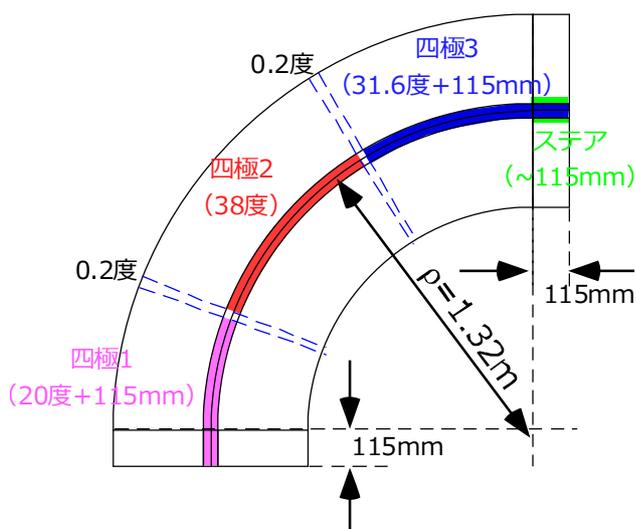


Figure 2: Layout of superconducting quadrupole coils.

アイソセンターにて均一なビームスポットが得られるよう配慮する必要がある。そのため、

- (1) ガントリー入口及び、アイソセンターにて水平・垂直が対称なビーム光学条件とする
- (2) ガントリー入口において、水平・垂直エミッタンスを一致させる(エミッタンス整合)

の2条件を満たすよう設計を行う必要がある。まず、条件(1)に関しては、マッチング計算において以下の条件を課す。

$$\text{回転部入り口: } \beta_x = \beta_y = 18 \text{ m}, \alpha_x = \alpha_y = 0, D_x = D_y = 0 \text{ m}, \\ D'_x = D'_y = 0$$

$$\text{アイソセンター: } \beta_x = \beta_y = 1 \text{ m}, D_x = D_y = 0 \text{ m}, D'_x = D'_y = 0, \\ \Delta\mu_x = 2.5\pi, \Delta\mu_y = 0.5\pi$$

ここで $\Delta\mu_x$ 及び $\Delta\mu_y$ は回転部入り口からアイソセンターまでの水平・垂直位相の進みである。更に、シンクロトロン

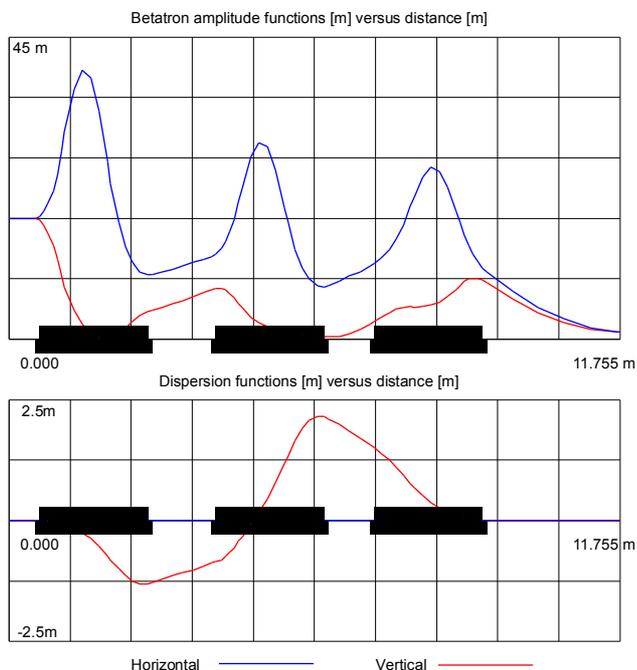


Figure 3: Beta (upper) and dispersion (lower) functions.

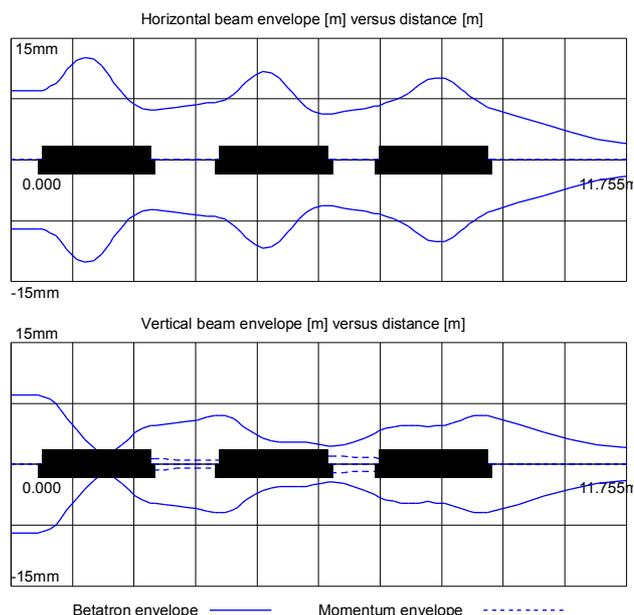


Figure 4: Beam envelope functions. Beam emittances of $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 4 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ and momentum spread of $\Delta p/p = \pm 0.05\%$ were assumed.

出射点からガントリー回転部入口までの水平位相を $(n+0.5)\pi$ に設定する (n : 整数)。これにより、シンクロトロン出射点からアイソセンターまでの水平位相を、回転角に依らず常に $m\pi$ とすることができるため (m : 整数)、シンクロトロン出射角変動によるアイソセンターでのビーム揺れを最小限に抑えることができる。

以上の条件でマッチング計算を行い、得られたベータ及びディスパージョン関数を Figure 3、ビームエンベロープ関数を Figure 4 に示す。ビームエンベロープ関数の計算においては、 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 4 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、運動量分散 $\Delta p/p = \pm 0.05\%$ を仮定した。ベータ値も最大で 40 m 程度と、ビームサイズも抑えられている。また、ビームサイズも $\pm 15 \text{ mm}$ 以下であり、ボア ($\phi 50 \text{ mm}$) とのクリアランスも十分である。計算から、四極コイルに必要なとされる最大磁場勾配は 12.8 T/m であるが、余裕を見て $G_{max} = 14 \text{ T/m}$ を四極磁場勾配の要求仕様とした。

一方、条件(2)に関しては、シンクロトロンからガントリー回転部入口までの間に薄い散乱体を設置し、散乱体によるビーム散乱を利用したエミッタンス整合を行うことで実現する。シンクロトロンから取り出されるビームの水平・垂直エミッタンスは一般に異なる値を持ち、且つ、エネルギーにも依存するが、適切な厚さの散乱体をビームライン上に配置し、エネルギーに応じて回転させて実効厚を制御することで、全ビームエネルギー範囲 ($E = 430 \sim 50 \text{ MeV/u}$) に対して水平・垂直エミッタンスを整合させることが可能であり、また同手法は現用回転ガントリーで実用化されている[3]。

3. 超伝導電磁石の磁場設計

ビーム光学設計に基づき、超伝導電磁石の要求仕様が Table 1 の通り決定された。この要求仕様を満足するような超伝導電磁石の設計を以下の通り行った。

超伝導コイルは現用回転ガントリー用超伝導電磁石

のそれと同様に、湾曲形状を有する外半径 $\phi 50$ mm の巻き枠上にサーフェースワインディング法によって超伝導線を 3 次元巻線する構造とする。使用する超伝導線

Table 1: Specifications of the Superconducting Magnet as Determined by the Beam Optics Calculations

Parameter	Value	Units
Bending angle	90	Degrees
Bending radius	1.32	m
Aperture diameter	50	mm
Reference radius	20	mm
Number of dipole coil	1	-
Maximum dipole field	5.02	T
Effective field length of dipole field	2.07	m
Field integral of dipole field	10.4	Tm
Required homogeneity of a BL product within the reference radius	$<1.0 \times 10^{-3}$	-
Number of quadrupole coil	3	-
Maximum field gradient of quadrupoles	14	T/m
Effective field length of quadrupole-1	0.517	m
Effective field length of quadrupole-2	0.817	m
Effective field length of quadrupole-3	0.784	m

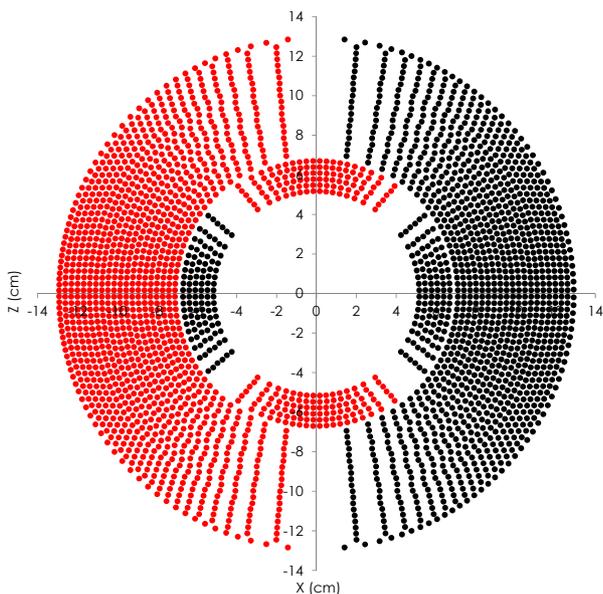


Figure 5: Profile of the superconducting coil. The coil consisted of the 6 layers of the quadrupole coils and 20 layers of the dipole coils. The dipole and quadrupole coils were electrically isolated, and can be independently excited.

は、素線径 0.92 mm の NbTi モリス線を (6+1) 構成とした撚り線であり、絶縁処理後の直径は 3 mm である。

超伝導コイルの断面形状は Figure 5 に示したとおり、内側に 6 層からなる四極コイルが巻かれ、その外側に 20 層の二極コイルが巻かれ、各コイルは $\cos(n\theta)$ の電流分布を形成するように配置されている。更に、その外周には積層鋼板からなるコールドヨークを配置するが、磁場分布は主として超伝導線の配置によって決定される。

超伝導電磁石の磁場設計は 3 次元磁場計算コード Opera-3d を用いて行った[4]。Opera-3d コードにおいて、54 ターン/ポール の四極コイル、618 ターン/ポール の二極コイル、並びにヨーク等を精密にモデル化し、磁場計算を行った。はじめに、二極コイルのみ励磁した際の Opera-3d による計算結果の一例を Figure 6 に示す。計算では、二極コイルの通電電流 $I=920$ A とし、その結果、ほぼ定格磁場である $B=5.012$ T を得ている。この他、

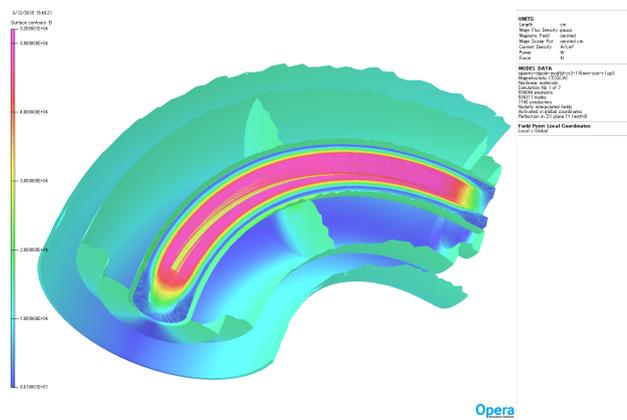


Figure 6: Calculated magnetic field for the superconducting dipole coil. In the calculation, the coil current of 920 A was applied. The maximum field on the dipole coil was 5.21 T.

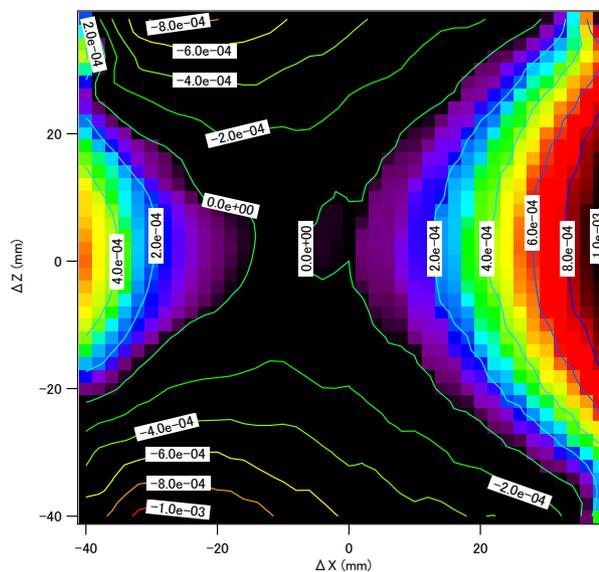


Figure 7: Uniformity of the BL products, $\Delta B \cdot L / B \cdot L$ of the dipole field. The applied coil current in the calculation was $I=920$ A.

様々な通電電流 ($I=200\sim 920$ A) に対して磁場計算を実施した結果、コイル電流が 600 A 以上で鉄ヨークの飽和が始まる様子が確認されたが、飽和の影響はコイル電流 $I=920$ A において約 1.4%程度である。

Figure 7 は、磁石へのビーム入射位置が水平 ΔX 、垂直 ΔZ である際の、ビーム軌道に沿った磁場積分 (BL 積) の均一度を示したものである。計算における二極コイル電流は $I=920$ A である。分布には主に、1) コイルを湾曲させた事によって生じた四極成分、及び、2) コイル端部付近で生じる六極成分が見られる。同様にコイル電流 $I=200$ A 時の BL 積均一度の分布を Figure 8 に示す。同様に六極成分が見られるが、何れの計算結果においても参照半径 ($R=20$ mm) 内において、得られた BL 積の均

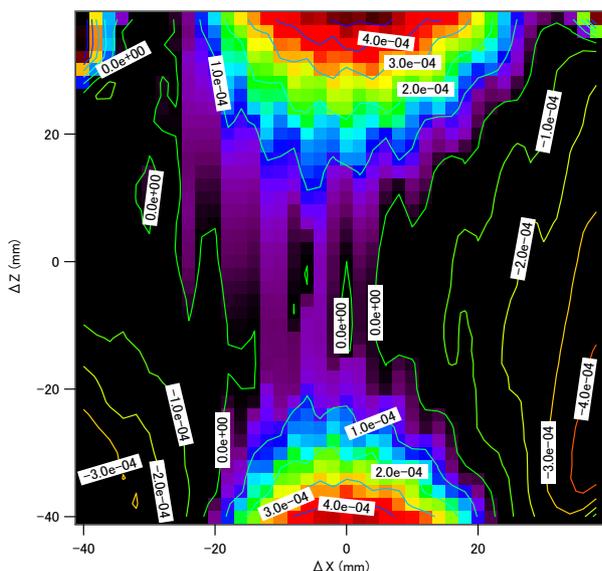


Figure 8: Uniformity of the BL products, $\Delta B_z L / B_z L$ of the dipole field. The applied coil current in the calculation was $I=200$ A.

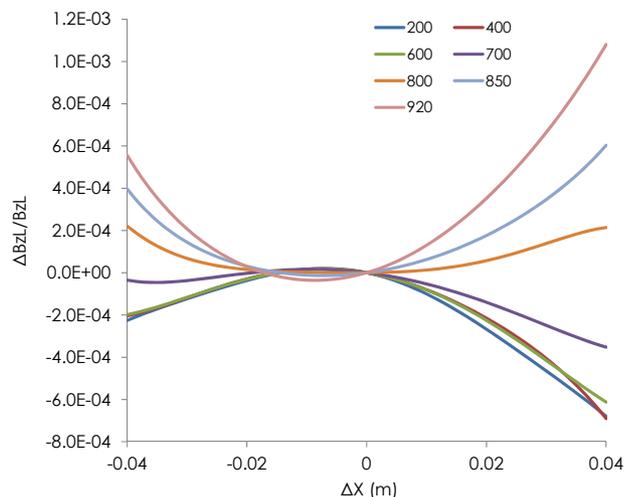


Figure 9: Uniformity of BL products, $\Delta B_z L / B_z L$, of the dipole field for various coil currents of the dipole coil along the X axis, as determined by the three-dimensional field calculations.

一度は $|\Delta B_z L / B_z L| \leq \pm 4 \times 10^{-4}$ と十分良好である。

更に、様々な二極コイル電流に対しても磁場計算を行い、BL 積均一度 ($\Delta B_z L / B_z L$) を求めた。水平位置に対する BL 積均一度の分布を Figure 9 に示す。図から、全通電範囲においても $|\Delta B_z L / B_z L| \leq \pm 4 \times 10^{-4}$ の BL 積均一度を得た。

次に、超伝導四極コイルに関しても同様に Opera-3d による磁場計算を行った。その一例として、四極コイル 1 に対する計算結果を Figure 10 に示す。計算では、四極コイル電流を $I=760$ A とし、その結果、磁場勾配は $G=15.2$ T/m であった。従って、定格磁場勾配 (14 T/m) を得るための必要なコイル電流は $I \sim 710$ A である。四極コイル 2 及び、四極コイル 3 においても計算を行い、同様の結果が得た。

最後に、超伝導コイルの最大経験磁場及び、鉄ヨークの最大磁場を調べるため、二極コイル及び、四極コイルを全て定格励磁した場合の磁場計算を行った。計算では、二極コイルの電流は $I=920$ A、3 種の四極コイルの電流は全て $I=710$ A とした。計算の結果、超伝導コイルの最大経験磁場は $B_{coil}=5.86$ T であり、二極コイルのみ励磁した場合 (5.21 T) と比べ、約 0.65 T 程度の上昇が見られた。また、鉄ヨークの最大磁場は $B_{yoke}=2.97$ T であり、コイル周辺の鉄心には飽和が見られるが、磁場は主にコイル形状で決定されることから、磁場分布への影響は少ない。

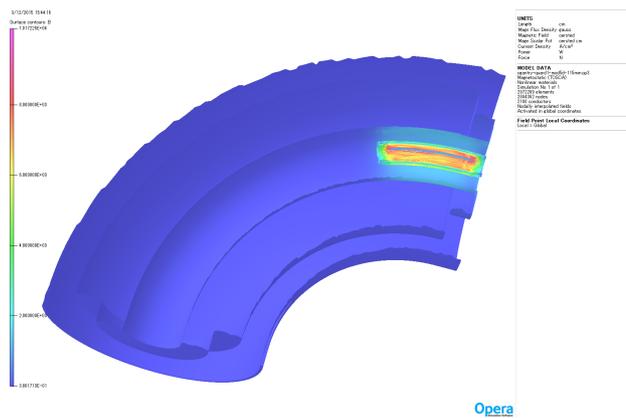


Figure 10: Calculated magnetic field for the superconducting quadrupole coil-1. In the calculations, the coil current of $I=760$ A was applied.

4. まとめ

重粒子線がん治療用回転ガントリーの更なる普及のため、超小型超伝導回転ガントリーの設計を行った。最大中心磁場約 5 T を生成する機能結合型超伝導電磁石を採用することで、回転ガントリーのサイズは全長約 5 m、ビーム軌道半径 4 m と、陽子線回転ガントリーのサイズ以下まで小型化が可能となる見通しである。ビーム光学設計を行い、その結果に基づき超伝導電磁石の磁場設計を実施した。3 次元磁場計算コードによる計算の結果、所望の磁場及び均一度を得ることができた。今後は機械設計等、より詳細な設計を進めて行く予定である。

参考文献

- [1] Y. Iwata *et al.*, “Design of a superconducting rotating gantry for heavy-ion therapy”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 15, (2012) 044701.
- [2] Y. Iwata *et al.*, “Beam commissioning of a super-conducting rotating-gantry for carbon-ion radiotherapy”, *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A* 834 (2016) 71.
- [3] T. Fujimoto *et al.*, “Emittance matching of a slow extracted beam for a rotating gantry”, *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B* (2017) (in press);
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.038>
- [4] Cobham Opera-3d code; <http://operafea.com/>