

レーザー加速イオンの超伝導シンクロトロンへの直接入射の検討

DIRECT INJECTION OF LASER-ACCELERATED IONS INTO A SUPERCONDUCTING SYNCHROTRON

野田悦夫[#], 白井敏之, 岩田佳之, 水島康太, 野田章, 野田耕司

Etsuo Noda[#], Toshiyuki Shirai, Yoshiyuki Iwata, Kota Mizushima, Akira Noda, Koji Noda

National Institute of Radiological Sciences, QST

Abstract

One of the development themes of Quantum Knife Project carried by QST is to miniaturize of the heavy-ion radiotherapy equipment by use of superconductive technology and laser particle acceleration technology. Feasibility study on a direct injection into a synchrotron of a laser-accelerated ions was performed. In the previous report, it was indicated that the consideration with the current heavy-ion therapy synchrotron was made and a possibility of accumulating 1×10^9 particles or more. In this report, the number of captured particles per shot was examined, using the superconducting synchrotron being studied in this project. Furthermore, the beam transport was also studied from the ion production point to the injection point of the synchrotron. As a result, the following was found out. After flying laser-accelerated ions with energy of $4 \text{ MeV/u} \pm 6\%$ during about 1.7 m, energy compression of 1/10 is made by the phase rotation. After that, the beam is shaped and injected into the synchrotron. The number of captured particles in the synchrotron per shot was 1×10^8 on average as a result of taking into consideration the space charge effect, the energy spread of the ions, and the dispersion of the particle number produced by the laser. From this, it is possible to accumulate 1×10^9 or more particles by performing the multiple incidence of 20 times with a 10 Hz laser.

1. はじめに

現在、量研機構で進められている量子メスプロジェクトの開発テーマの一つに、超伝導技術とレーザー加速技術による重粒子線がん治療装置の小型化があげられている。ペタワット(PW)クラスのレーザーをターゲット薄膜上に集光照射すると、核子あたりのエネルギーで数MeVを超えるフルストリップのイオンが引き出される。この加速イオンをシンクロトロンに直接入射することで、入射器を小型化できる可能性がある。

前回の報告では、その第一ステップとして、現状の普及型シンクロトロンを対象とし、ベンディング効果を考慮しない検討を行った。空間電荷効果を考慮すると、レーザー1照射あたりシンクロトロンに入射可能な粒子数の上限は 1×10^8 個程度であること、レーザーの繰り返しを 10 Hz とし、20 回の多重回入射(2秒)を行うと、1入射あたり平均粒子数を 1×10^8 個とした時、目標とする 1×10^9 個以上の粒子を蓄積できることが分かった[1]。

今回は、本プロジェクトで現在検討が進められている超伝導シンクロトロンを入射対象とし、前回無視したベンディング効果を考慮して 1 ターンあたりに入射可能な粒子数を調べた。さらに、イオン発生点からシンクロトロンに入射点までの Beam Transport についても検討を行った。

今回の検討内容を以下にまとめる。

- ① 空間電荷と速度広がり性を考慮してシンクロトロン中での入射ビームの安定性を調べた。
- ② 第4世代量子線がん治療装置として検討中の超伝導シンクロトロンを入射対象とし、前回無視したベンディング効果を考慮に入れた。
- ③ 水平(x)方向の許容されるエミッタンスは、シンクロト

ンのアクセプタンスと同じ $300 \pi \text{ mm mrad}$ とした。垂直(y)方向については、治療に使うことを考慮して、 $8 \pi \text{ mm mrad}$ 以下とした(y方向アクセプタンスは $30 \pi \text{ mm mrad}$)。④ 1 ショットあたりのイオン発生量は、ショットごとのバラツキを考慮して、 $0.5 \sim 2 \times 10^8$ 個/10%b.w./msr の範囲で検討を行った(中心値 1×10^8 個/10%b.w./msr)。⑤ ビーム発生点からシンクロトロン入射点までのエネルギー圧縮を含めた Beam Transport についても検討を行った。

上記①～⑤の各項目を満たし、1 ショットあたり平均で 1×10^8 個以上入射できるスキームを探した。これらの検討は空間電荷効果を考慮したビーム軌道計算により行った。Table 1 に現状の普及型シンクロトロンの、Table 2 に今回の検討で使用した第4世代超伝導シンクロトロンの代表的パラメータを掲げる。

Table 1: Current Synchrotron Parameters for Carbon Ion Radiotherapy

現状の普及型シンクロトロンの代表的パラメータ	
シンクロトン半径	10 (m)
シンクロトン周長	63.3 (m)
チューン ν_x	~ 1.75
チューン ν_y	~ 1.25
アクセプタンス ϵ_x	$250 (\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad})$
アクセプタンス ϵ_y	$25 (\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad})$

[#] noda.etsuo@qst.go.jp

Table 2: Next-Generation Superconducting Synchrotron Parameters

第4世代超伝導シンクロトロン代表的パラメータ	
偏向半径 (90°)	1.656 (m)
シンクロトン周長	28 (m)
チューン ν_x	~1.71
チューン ν_y	~1.45
アクセプタンス ϵ_x	300 (π mm·mrad)
アクセプタンス ϵ_y	36 (π mm·mrad)

2. シンクロトロンへの入射パラメータに対する許容範囲の検討

2.1 シンクロトンへの加速イオン入射の概要

レーザー加速イオンビームは、通常の入射器とは大きく異なり、以下の特徴を持っている。

- ・パルス幅 1ns 以下の短パルス。
- ・ブロードなエネルギー幅を持つ。

このように極端な短パルスのため、粒子数が 1×10^8 個程度であっても、イオン密度が桁違いに大きく空間電荷効果の影響が大きくなりすぎる。そのため、入射の前にパルス伸長等により空間電荷を緩和する必要がある。また、ブロードなエネルギー幅を持っていることより、生成イオンを効率的に利用するためにはエネルギー圧縮等を行う必要がある。

今回検討した Beam Transport の概念図を Fig. 1 に、高速キッカーを用いたシンクロトン入射部の概念図を Fig. 2 に示す。

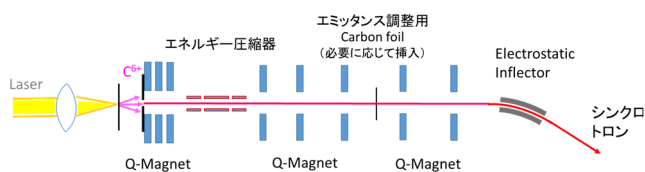


Figure 1: Schematic diagram of the beam transport.

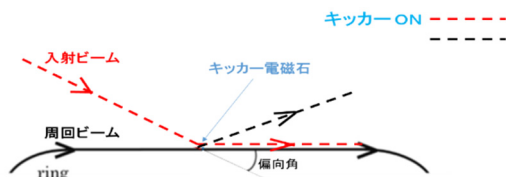


Figure 2: Schematic diagram of injected beam trajectories kicked by Kicker Magnet.

2.2 マッチングビームをシンクロトンに入射

最初にマッチングビーム (Space Charge を考慮しないと

き)をシンクロトンに入射してパラメータ依存性を調べた。

Figure 3 は、入射ビームの速度を $4 \text{ MeV/u} \pm 1\%$ の範囲で変化させたときの 100 周後にシンクロトンに捕捉された粒子数の割合を調べた結果である。ここで、捕捉された粒子とは、第1章の④で述べたように、x 方向のエミッタンス $300 \pi \text{ mm mrad}$ 以下、y 方向のエミッタンス $8 \pi \text{ mm mrad}$ 以下を満たす粒子である。これより、入射エネルギーは $\pm 0.5\%$ 以内が望ましいことが分かる。

次に、入射時のビームのエミッタンスとビーム長を変化させたときの捕捉率を Fig. 4 に示す。これより、入射ビームのエミッタンスは大きい方がよい。少なくとも x 方向のエミッタンスは広げた方がよいことが分かる。また、入射時のビーム長は 0.1 m 以上が望ましい。

Figure 5 は、シンクロトンに 1 ショットで入射する粒子数の依存性を調べた結果である。これより、入射粒子数は 3×10^8 個以下が望ましいことが分かる。

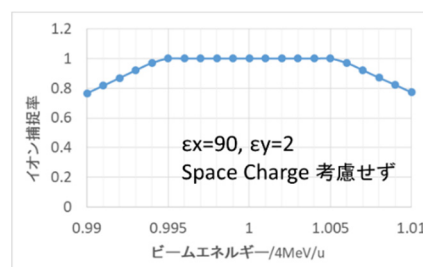


Figure 3: Dependence of injected ion capture rate on beam energy in the synchrotron.

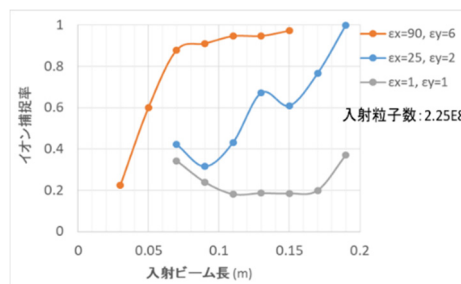


Figure 4: Dependences of injected ion capture rates on beam length in the synchrotron.

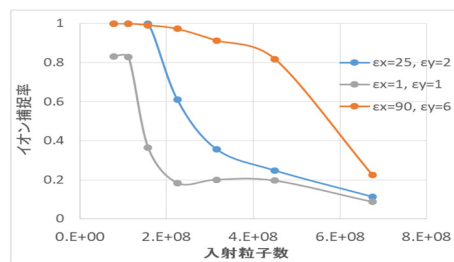


Figure 5: Dependences of ion capture rates on injected ion number in the synchrotron.

以上の結果に基づいて、Beam Transport の検討を行った。

2.3 イオン生成点からシンクロtron周回後までの検討

第1章④に述べたように、レーザーのショットごとのバラツキを考慮して、 $0.5 \sim 2 \times 10^8$ 個/10%b.w./msr のイオンが発生するとして検討を行った。実際に利用するビームは、 $E=4 \text{ MeV/u} \pm 6\%$ 、立体角 $1.9 \text{ msr} (\pm 24.6 \text{ mrad})$ とした。この中に含まれる粒子数は $1.1 \sim 4.5 \times 10^8$ 個となる。

ビーム生成点から広がって出てきたビームを Q magnet で収束させながら、約 1.7 m 飛ばした後、高周波電場を用いた縦方向位相回転により、エネルギー広がりを $1/10$ 以下に圧縮する。位相回転前後のエネルギー広がり の計算結果の一例を Fig. 6 に示す。

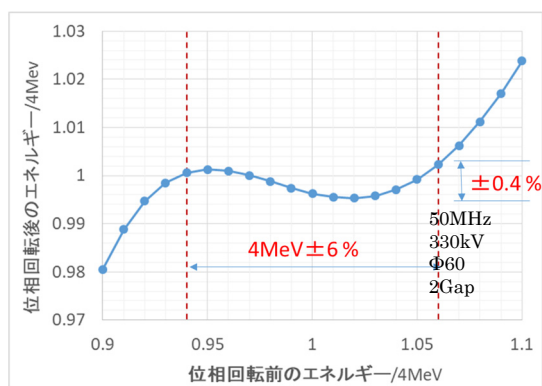


Figure 6: Energy spreads before and after the phase rotation.

エネルギー圧縮を行うことで、 $4 \text{ MeV/u} \pm 6\%$ のエネルギー広がりが、 $4 \text{ MeV/u} \pm 0.4\%$ にまで圧縮された。位相回転部出口における位相空間面でのビーム形状を Fig. 7 に示す。

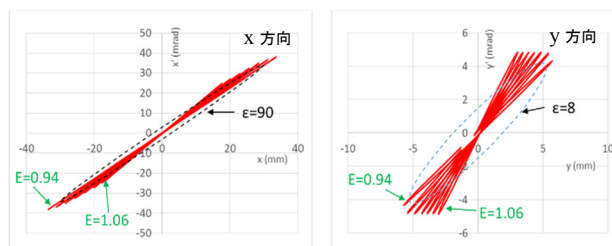


Figure 7: Horizontal and vertical beam shapes in phase space at the phase rotation exit.

以下、位相回転前のビームのエネルギーを 4 MeV/u を基準として 1.0 と表すことにする。例えば、 $4 \text{ MeV/u} + 6\%$ のエネルギーの粒子は 1.06 と表される。Figure 7 中の 7 つのグループは、位相回転前のエネルギー $0.94 \sim 1.06$ までを 0.02 ごとに分けて計算したものである。この速度ごとの回転による広がり は、以後解消されることはないため、シンクロtron入射・周回後のビームエミッタンスは envelop のエミッタンスより良くなることはない。y 方向のエミッタンスは、 $8 \pi \text{ mm mrad}$ 以下が必要であることより、y 方向の envelop の広がりをできるだけ抑えるように Q magnet の設計を行った。

この後、Q magnet によりビーム整形を行い、シンクロtronに入射する。Figure 8 にビーム発生点からシンクロtronに入射するまでのビーム軌道 (envelop) および、磁石の配置を示す。途中の Carbon Foil は、ビームのエミッタンスを拡大するために入れている (Fig. 4 参照)。Carbon Foil の厚さは $1 \mu\text{m}$ で、Foil 通過後のエミッタンスは x 方向で $25 \sim 30$ 、y 方向で約 $2 (\pi \text{ mm mrad})$ となる。入射点の位相空間面でのビーム形状を、Fig. 9 に示す。入射点におけるビーム長とビームパルス幅は、それぞれ 0.17 m 、 6.2 ns となる。上段はイオンの発生量が 1×10^8 、下段は 2×10^8 (個/10%b.w./msr) の場合の計算結果を示している。下段の方が Space Charge 効果が大きいいため、回転量が大きくなっている。

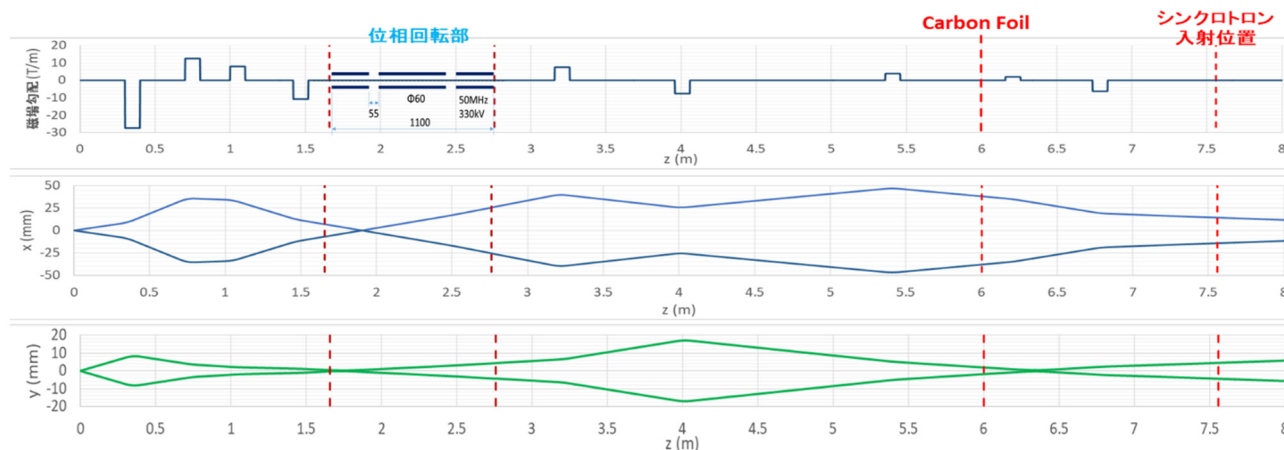


Figure 8: Q-Magnet layout and horizontal and vertical beam envelopes in the beam transport.

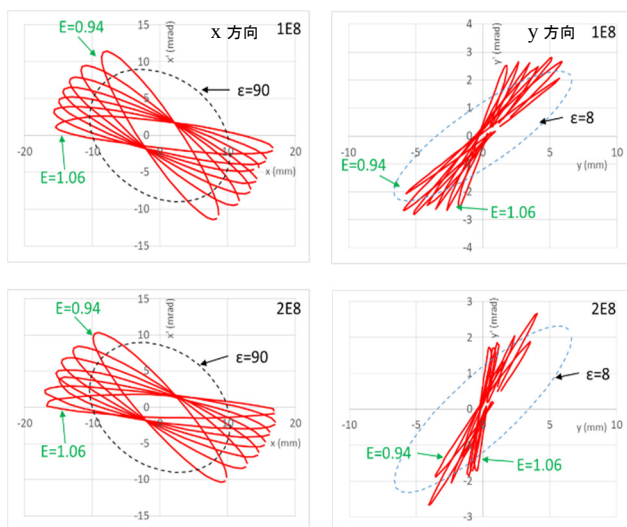


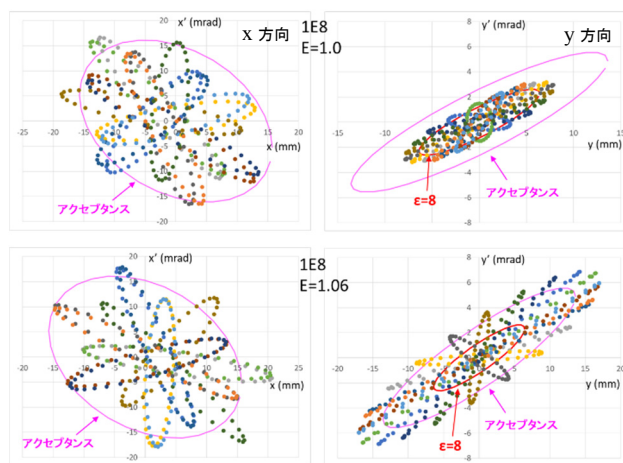
Figure 9: Horizontal and vertical beam shapes in phase space at the injection point of the synchrotron.

次に、このビームをシンクロトロンに入射して、周回計算を行った。ビームのパラメータを変えて行った計算結果の例を Fig. 10 (a), (b) に示す。それぞれ、100 周の計算を行い、89 周～100 周までのシンクロトン内のビーム位置を重ね合わせて示している。左は x 方向、右は y 方向の結果である。

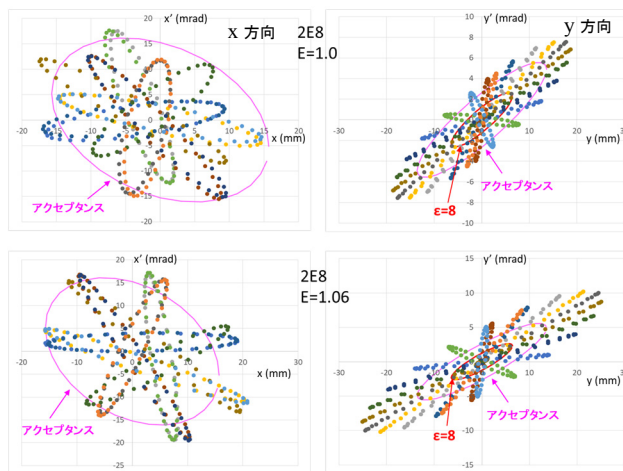
Figure 10 (a) は、 1×10^8 個/10%b.w./msr のイオンが、Fig. 10 (b) は、 2×10^8 個/10%b.w./msr のイオンが発生するとした場合の計算結果である。どちらも、上段は位相回転前のビームのエネルギーが 1.0 (4 MeV/u)、下段は 1.06 (4 MeV/u + 6%) のときの計算結果を示している。今回の Beam Transport の設計は、発生粒子数 1×10^8 、エネルギー 1.0 の条件にある程度合わせたため、この条件でビームが最も安定していることが分かる。

次に、この計算結果を用い、各速度成分についてそれぞれ、1～12 周、及び、61～100 周の間で 1 度でもアクセプタンスをはみ出した粒子を捨てることで生き残る粒子数を調べた (x, y 両方向とも)。さらに、y 方向については、61～100 周の間で、 $\epsilon_y > 8$ となる粒子をすべて除外して、最終的に利用できる粒子数 (最終入射粒子数) を求めた。さらに、各速度成分について得られた結果 (粒子数) をすべて足し合わせることで、発生粒子数ごとの最終入射粒子数を求めた。

その結果を、Fig. 11 (a), (b) に示す。Figure 11 (a) は、シンクロトンに入射した粒子数に対する最終的に利用できる粒子数の比 (捕捉率) を、Figure 11 (b) は、最終的に利用できる粒子数 (最終入射粒子数) を表している。ただし、横軸は、10%b.w./msr あたりの発生粒子数で表している。前述したように、利用するビームのアクセプタンスは $E=4$ MeV/u $\pm 6\%$ 、立体角 1.9 msr であり、発生粒子数 1×10^8 個/10%b.w./msr のとき、シンクロトンに入射する粒子数は 2.25×10^8 個となる。



(a)

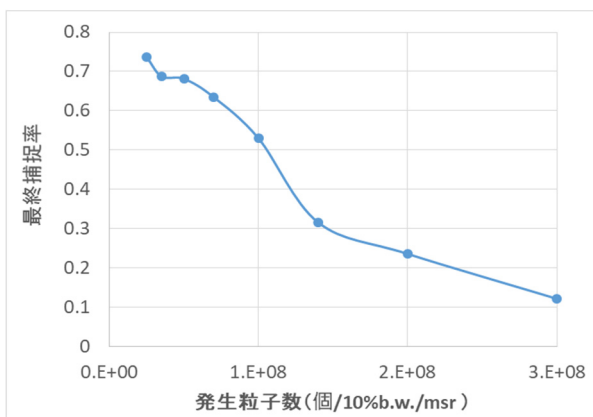


(b)

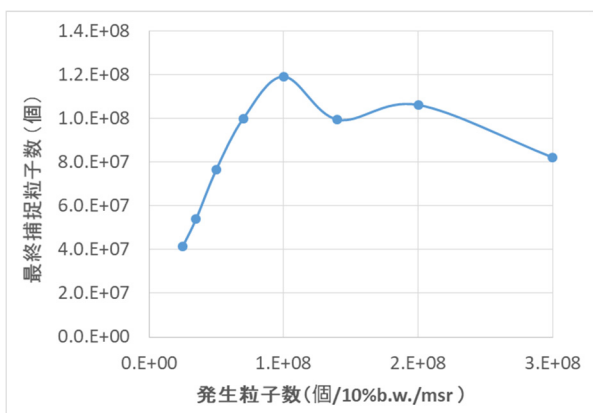
Figure 10: Time history of horizontal and vertical beam shapes and positions from 89th to 100th turns after injection in the phase space, in the case (a) produced ion number is 1×10^8 /10%b.w./msr, (b) produced ion number is 2×10^8 /10%b.w./msr.

Figure 11 (a) より、発生粒子数が多くなるほど、捕捉率が下がっていることが分かる。これは、発生粒子数が多くなると粒子密度が高くなり空間電荷効果が大きくなるためである。生粒子数が 2×10^8 個/10%b.w./msr のとき、捕捉率は 20% まで低下している。次に、Fig. 11 (b) を見ると、発生粒子数 1×10^8 個/10%b.w./msr のあたりで補足粒子数が最大となっている。これは、この点より左では捕捉率は高いが発生粒子数が少ないため、逆に右では発生粒子数が多くても捕捉率が低下するため、最終補足粒子数が少なくなるためと考えられる。

1 ショットごとの発生粒子数のバラツキが $0.5 \sim 2 \times 10^8$ 個/10%b.w./msr の間で同じ頻度で起きると仮定して、Fig. 11 (b) の結果を用いて計算すると、1 ショットあたりの最終補足粒子数の平均は、 1.0×10^8 個 となる。よって、今回目標とした最終補足粒子数を達成することができた。



(a)



(b)

Figure 11: (a) Dependence of the injected ion capture rates on produced ion numbers. (b) Dependence of the captured ion numbers on produced ion numbers.

3. まとめ

今回は、量子メスプロジェクト中で現在検討が進められている超伝導シンクロトロンを入射対象として1ショットあたりに入射可能な粒子数を調べた。

その際、空間電荷と速度広がりを考慮して、イオン発生点からシンクロトロンまでの Beam Transport、および、シンクロトロンに入射した後のビームの挙動を調べ、1ショットあたり平均で 1×10^8 個以上捕捉可能なスキームを探した。

今回の検討の結果、最終補足粒子数が、1ショットあたりの平均で 1.0×10^8 個となるスキームを見つけることができた。これより、前回の検討結果を踏まえると[1]、レーザーの繰り返しを 10 Hz とし、20 回の多重回入射(2秒)を行うことで、目標値である 1×10^9 個以上の粒子をシンクロトロン中に蓄積できる可能性があることが示された。

謝辞

本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A1 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] E. Noda *et al.*, “レーザー加速イオンのシンクロトロンへの直接入射の検討”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1246-1250.