

## RCNPにおける Duoplasmatron 導入に向けた開発 DEVELOPMENT FOR INTRODUCTION OF DUOPLASMATRON IN RCNP

森田泰之<sup>#,A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 依田哲彦<sup>A)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 畑中吉治<sup>A)</sup>, 中尾正夫<sup>A)</sup>,  
安田祐介<sup>A)</sup>, 鎌倉恵太<sup>A)</sup>, 原周平<sup>A)</sup>, Koay Hui Wen<sup>A)</sup>, 武田圭次郎<sup>A)</sup>, 原隆文<sup>A)</sup>

Yasuyuki Morita<sup>#,A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Kichiji Hatanaka<sup>A)</sup>, Masao Nakao<sup>A)</sup>,  
Yuusuke Yasuda<sup>A)</sup>, Keita Kamakura<sup>A)</sup>, Shuhei Hara<sup>A)</sup>, Hui Wen Koay<sup>A)</sup>, Keijirou Takeda<sup>A)</sup>, Takahumi Hara<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RCNP

### Abstract

At RCNP, it is required to supply ion beam with high quality and high intensity, and we plan to introduce Duoplasmatron as a new ion source for proton and deuteron. It is expected that the quality of the accelerated beam can be improved by reducing the emittance of the beam from ion source. For the introduction, it is necessary to evaluate the influence of Duoplasmatron's operating parameters on the output beam and establish a method to extract the beam with low emittance. Also, in order to increase the intensity, it is necessary to reduce the beam loss during transportation, but the position of the magnet on the existing beam line can not be changed. Therefore, it is necessary to adjust the magnets and the drift distance from Duoplasmatron to the existing beam line and design for the efficient beam transport. This time, we will summarize the beam line design for beam transport without loss based on influence on output beam's envelope calculation using Graphic Transport which is matrix calculation software.

### 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター(Research Center for Nuclear Physics, RCNP)では、2019年より、ビーム強度の大幅な向上のための、AVFサイクロトロンアップグレードを計画している[1,2]。その一環として、AVFサイクロトロンの中心領域の見直し、入射効率向上のために入射半径の変更、イオン源の引き出し電圧を現行の15kVから50kVまで上げることなどが予定されている。そのため、イオン源からAVFサイクロトロンへの入射までのビーム輸送(LEBT: Low Energy Beam Transport)が現行のもので輸送が可能であるかを検討し、必要に応じて磁石配置の最適化を行い、輸送効率の向上を図る必要がある。

さらに、軽イオンの低エミッタンスビーム生成を目的と

して、新たなイオン源、Duoplasmatron (2JA022264: NATIONAL ELECTROSTATICS CORP.)を導入した。本発表では、上記のアップグレード後を見据え、既存のLEBTへの接続方法と効率的なビーム輸送方法を行列計算による粒子輸送計算ソフトを用いて、エンベロープを計算し、それをもとにマグネットの配置や磁場強度の設計を行った結果について述べる。

### 2. 現在のLEBT

現在、RCNPで使用されているイオン源として、偏極イオン源(HIPIS)、超電導 ECR イオン源(SCECR)、大強度陽子イオン源(HIPECR)、ネオマフィオス ECR イオン源の4台を使用している。現在のLEBTを上から見た際の概

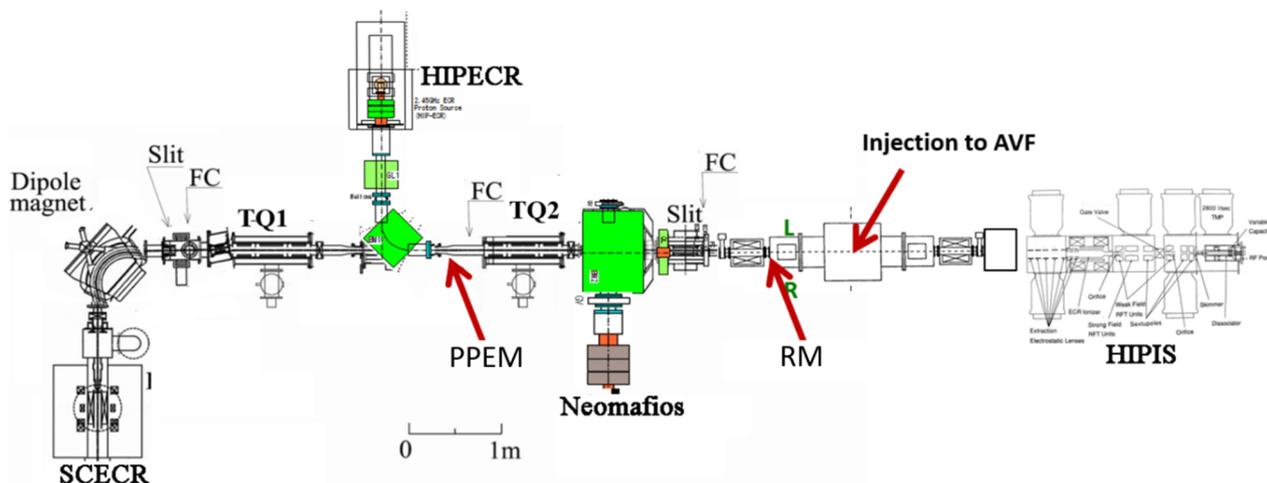


Figure 1: Layout of ion sources and their LEBT line (Top View).

<sup>#</sup> morita16@rcnp.osaka-u.ac.jp

略図を Fig. 1 に示す。SCECR からは、 $^{12}\text{C}$  や  $^{86}\text{Kr}$  などの重イオンビームを、ネオマフィオスイオン源からは陽子ビームや重陽子ビーム、He などを供給している。HIPIS からは偏極陽子ビームを供給しつつ、さらなる大強度化、偏極度の向上に向け、開発を行っている。これら各イオン源にて生成、引き出されたビームを、ダイポールマグネット(BM)や四重極レンズ(QM)、トリプレット(TQ)、グレーザーレンズ(GL)などを用いて輸送され、ビームは Injection にて垂直に曲げられ、AVF サイクロロンへと入射される。また、ファラデーカップ(FC)を用いたビーム電流の測定、Pepper Pot Emittance Monitor (PPEM) [3]や Rapid Emittance Monitor (RM) [4]を用いたエミッタンス測定を行うことでビーム診断を行い、イオン源からのビームの大強度・高品質化に向けた開発を行っている。

### 3. 行列計算による設計

Duoplasmatron からグレーザーレンズ、ダイポールマグネット、四重極レンズ、ダイポールマグネットの順に通過し、既存のビームラインにつなげられる(Figure 2)。Duoplasmatron から AVF サイクロロン入射口までのエンベロップを行列計算により計算し、設計を行った。Duoplasmatron のカタログ値は次の通りである。

- ビーム強度(@30kV)
  - $\text{H}^+$ : 10mA
  - $\text{He}^+$ : 2mA
- エミッタンス
 
$$\varepsilon_{\text{nominal}} = 7 (\pi \text{ mm mrad}) \times \sqrt{E(\text{MeV})}$$

マグネットは既存の LEBT 上のもの、追加のものを合わせ、グレーザーレンズが6台、四重極レンズが3台、ダイポールマグネットが3台使用する。追加のマグネットはグレーザーレンズ、四重極レンズは既存の LEBT にあるものと同じものを、ダイポールマグネットはタカノ技研製の MB400-40 モデルを使用した。

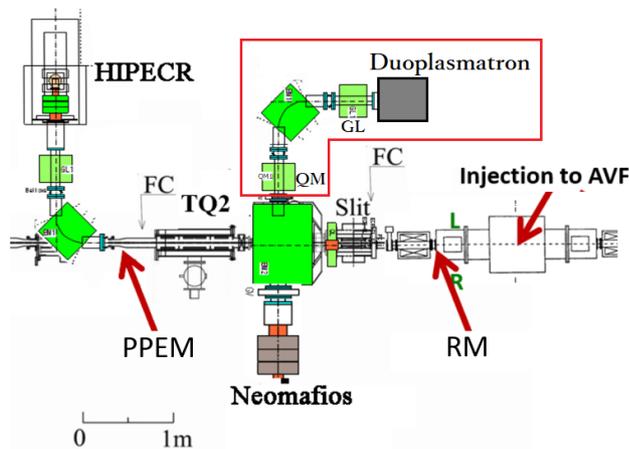


Figure 2: Layout of Duoplasmatron and its LEBT line (Top View).

また、計算を行うにあたり磁石やビームダクトなどの主な条件を以下とした。

初期条件	
• ビームサイズ	2.5mm
• 広がり	4mrad
Focus Point	
• FC	$\leq 10\text{mm}$
• AVF Injector	$\leq 3\text{mm}$
ビームダクト	
• Drift Space	$\varphi=30\text{mm}$
• グレーザーレンズ	$\varphi=30\text{mm}$
• 四重極レンズ	$\varphi=30\text{mm}$
• BM1	$\varphi=40\text{mm}$
• BM2	$\varphi=80\text{mm}$
• BM3	$\varphi=80\text{mm}$
ダイポールマグネット	
• 入口角(BM1)	$28^\circ$
• 出口角(BM1)	$28^\circ$
• 入口角(BM2)	$45^\circ$
• 出口角(BM2)	$0^\circ$
• 入口角(BM3)	$25^\circ$
• 出口角(BM3)	$0^\circ$

これらの条件のもと、各マグネットの磁場、および Fig. 2 にて赤い枠で囲まれた領域のマグネットの配置を変えることで上の条件を満たす配置を探る。エンベロップの計算には、PSI で開発された行列計算による粒子輸送計算ソフトである Graphic Transport [5]を用いた。Graphic Transport の FITTING CONSTRAINTS 機能を用いることで、磁場の最適化を行うことができるため、まずはその機能を用いてマグネットの配置を変更しながらビームがダクト等に当たらず、FC、AVF サイクロロン入射口で十分に収束させられる配置を探した。その結果をもとに、より良い解がないかを調べるために微調整を行い、各要素の配置、磁場を決定した。その際のエンベロップ、各マグネットの磁場をそれぞれ Fig. 3, Table 1 に示す。

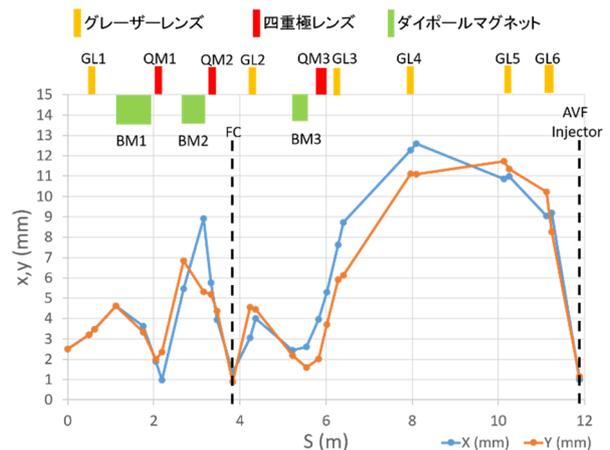


Figure 3: Envelope from Duoplasmatron to AVF Injector.

Table 1: Field of Magnets

Name	Effective magnetic field length (m)	Field (kG)
GL1	0.125	1.000
BM1	$0.4 \times \pi/2$	0.808
QM1	0.14	0.669
BM2	$0.294 \times \pi/2$	1.099
QM2	0.14	-0.299
GL2	0.125	3.328
BM3	$0.206 \times \pi/2$	1.570
QM3	0.19	-0.075
GL3	0.125	1.700
GL4	0.125	0.950
GL5	0.125	0.700
GL6	0.125	2.000

これらの結果より、現行の磁石配置のままでもビーム輸送が可能である。

#### 4. 他のイオン源との比較

今回の結果を SCECR と HIPECR の設計時、引き出し電圧を 15kV として MAD-X[6]によって計算されたエンベロープと比較する。SCECR と HIPECR のエンベロープを Fig. 4 に示す。Duoplasmatron の結果とこれらの結果を比較すると、 $x, y$  の最大値が SCECR ではそれぞれ 35.8mm, 57.0mm, HIPECR では 31.6mm, 41.9mm であるのに対し、Duoplasmatron では 12.6mm, 11.7mm と、大幅に広がりを抑えることに成功している。これは、引き出し電圧の差により、エミッタンスが大きくなっていることが大きな原因と考えられる。Duoplasmatron が初期条件として  $2.5(\text{mm}) \times 4(\text{mrad}) \times \pi = 10\pi(\text{mm mrad})$  のエミッタンスを仮定しているのに対し、SCECR では  $5(\text{mm}) \times 40(\text{mrad}) \times \pi = 200\pi(\text{mm mrad})$  を、HIPECR では  $2.5(\text{mm}) \times 40(\text{mrad}) \times \pi = 100\pi(\text{mm mrad})$  を仮定している。事実、イオン源から出た直後の部分で大きくビームが広がっていることがわかる。一方で、引き出し電圧 15kV の場合ではビームの条件として、SCECR ではエミッタンスが  $200\pi(\text{mm mrad})$  の陽子ビーム、HIPECR ではエミッタンスが  $100\pi(\text{mm mrad})$  の陽子ビームを仮定しているが、引き出し電圧を 50kV に上げることで、それぞれおよそ  $110\pi(\text{mm mrad})$ 、 $55\pi(\text{mm mrad})$  までエミッタンスを低く抑えることができる。このように、引き出し電圧を上げることで、HIPECR は現在の LEPT で輸送が可能であると期待される。一方、SCECR の場合はビーム透過率向上の余地があるため、今後、配置等を新たに設計・検討する。

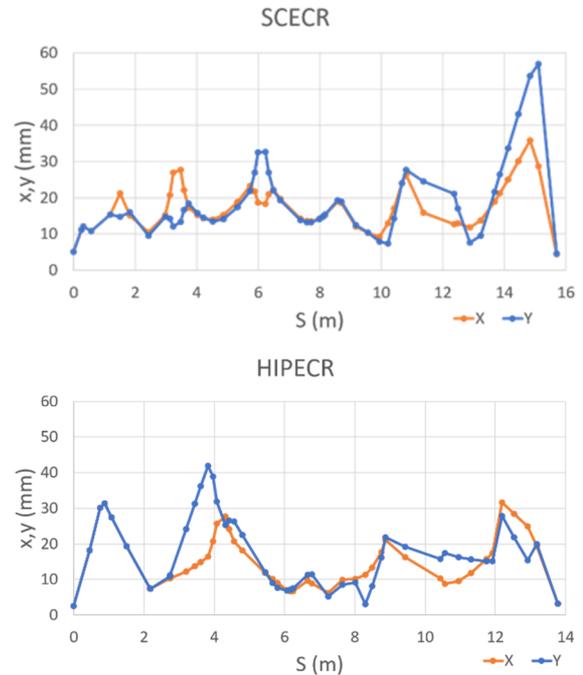


Figure 4: Envelope from SCECR and HIPECR to AVF injector

#### 5. まとめ

今回、行列計算による粒子輸送計算ソフトの Graphic Transport を用いて Duoplasmatron から、既存の LEPT、そして AVF サイクロロン入射部までの設計を行った。今後、Duoplasmatron のパラメーター等によるビームへの影響や空間電荷による広がりの影響などを詳細に検討し、導入に向けた準備を進めてきた。計算などによる検討の結果、Duoplasmatron の性能面や、引き出し電圧を上げたことにより、既存のイオン源からのビームに比べ、広がりを抑えたビーム輸送が可能であり、これによりロスのないビーム輸送が可能となり、大強度化が期待される。また、他のイオン源に関しても引き出し電圧が向上することにより初期のエミッタンスが抑えられ、輸送効率が向上することが期待される。

#### 参考文献

- [1] Yusuke Yasuda *et al.*, Proceedings of PASJ in 2017. WEOL06.
- [2] Hiroki Kanda *et al.*, Proceedings of this conference. FROL08.
- [3] Yasuyuki Morita *et al.*, Proceedings of PASJ in 2017. TUP079.
- [4] Keita Kamakura *et al.*, "Development of a Rapid Beam Emittance Measurement System using a Real-Time Beam Profile Monitor", IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 63, NO. 3, JUNE 2016.
- [5] [http://aea.web.psi.ch/Urs\\_Rohrer/MyWeb/trans.htm](http://aea.web.psi.ch/Urs_Rohrer/MyWeb/trans.htm)
- [6] <http://madx.web.cern.ch/madx/>