

## レーザー駆動イオン加速用ビーム診断系の開発

### ION BEAM DIAGNOSIS FOR LASER-DRIVEN ION ACCELERATION

榊 泰直<sup>A)</sup>, 西内 満美子<sup>A)</sup>, ドーバー ニコラス<sup>A)</sup>, 近藤 康太郎<sup>A)</sup>, 宮原 巧<sup>B)</sup>, 神門 正城<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> 量研・関西, <sup>B)</sup> 九州大学大学院

Hironao Sakaki<sup>A)</sup>, Mamiko Nishiuchi<sup>A)</sup>, Nicholas Dover<sup>A)</sup>, Kotaro Kondo<sup>A)</sup>, Takumi Miyahara<sup>B)</sup>, Masaki Kando<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> QST-Kansai, <sup>B)</sup> Kyusyu University

#### Abstract

QST (NIRS and Kansai) has been teaming up with four companies to develop a next-generation heavy-ion therapy accelerator that is called "Quantum Scalpel". Kansai aims to early complete an injector by using newly ion diagnostics for laser-driven ion acceleration.

#### 1. はじめに

2000年に米国ローレンスリバモア研究所で、最高エネルギー58MeV陽子が固体薄膜ターゲットとkJ・PWクラスのシングルショットガラスレーザーの相互作用によって生成[1]した事を皮切りに、高強度レーザーと物質との相互作用によるレーザー駆動イオン加速研究の研究が始まった。このメカニズムでは、 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ を超えるようなエネルギー密度を持つ高強度レーザーと物質の相互作用によって発生する電荷分離電場を利用したイオン加速[2]であり、既存の高周波(RF: Radio Frequency)加速器施設におけるRFと加速空洞を用いた加速装置が作りだす電場と比較にならない電場強度( $\sim 1\text{TV}/\text{m}$ )が達成可能で、ターゲット裏面に生じる局所的な加速電場により陽子を数十MeVまで加速することが可能である。

量子科学研究開発機構・関西研(量研・関西)では、この技術の基礎的研究を行いながら、医療応用に向けたレーザー駆動型粒子線装置の開発に挑戦し[3]、繰り返しレーザーショットが可能なフェムト秒パルスをもつチタンサファイアレーザーにより40MeVを超える陽子発生に成功[4]している。

昨年より量研では、量研・放医研が持つ超伝導技術および重粒子線治療技術、また関西のもつレーザー加速、のそれぞれの技術を組み合わせる次世代の小型重粒子線治療装置を開発する『量子メス』プロジェクト[5]を立ち上げた(Fig. 1)。

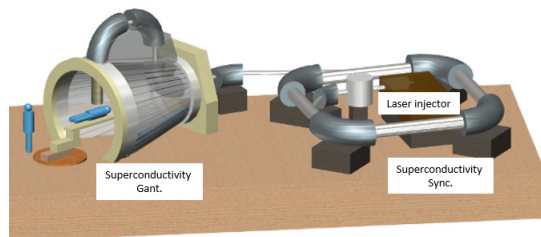


Figure 1: Schematic of "Quantum Scalpel". With the laser-driven acceleration, the injector is less than a few meters.[5]

このプロジェクトにおいて、関西研は比較的に大型になる重粒子線入射器本体をレーザー駆動加速技術により、可能な限りコンパクトにすることがミッションとなっており、レーザー加速入射器に求められる初期計画のスペックは、4MeVで $dE/E = 1\%$ で6価の炭素イオンを安定的に $\sim 10^9$ 個/秒、下流の超伝導シンクロトロンに入射することである。これは、レーザー加速だけで最大200MeVエネルギーの陽子線での粒子線治療器を造る事に比較するとかなり保守的なビーム性能に思えるが、治療に用いる4MeVで安定的に毎秒 $10^9$ 個の炭素イオンを1日に亘って出し続けることは、レーザー加速手法だけでなくレーザーや周辺装置の開発も医療用として同時並行して行わなければならない、世界中の研究機関がまだ実現したことのない極めて挑戦的な開発テーマである。

ここでは、量子メスに適したレーザー駆動イオン加速手法の早期確立のために、我々が開発しているビーム診断系について報告する。

#### 2. レーザー駆動イオンの計測

レーザー駆動イオン加速は非常にコンパクトなサイズで、非常に高エネルギーのイオン加速ができるという反面、レーザーと物質との相互作用が起こった際のホットプラズマ状態から『大量の電子線・X線などの複合放射線』が加速イオンと共に同時発生される。例えば、文献[4]では陽子の最高エネルギーが40MeVであると同時に、電子温度10MeVのマクスウェル分布に従う高エネルギー電子が、加速陽子個数の10倍以上発生する。そして、レーザーと物質の相互作用から発生する副次的に発生する放射線が高エネルギーになればなるほど、計測装置や真空槽などに衝突し2次・3次放射線を発生させ、それらが計測や放射線利用のバックグラウンドとして計測精度を下げる。さらに、ビームとして炭素を利用することを考えて、炭素ターゲットとレーザーを相互作用させて炭素を加速させても、その中に含まれている不純物成分(酸素、水素およびその同位体)が、同時に加速される(ブロードなエネルギーでかつ、

イオン価数も一定ではない) ために、それらを分離した上で、可能な限りリアルタイムで加速核種のスペクトルを診断する必要がある。そこで、我々は古典的な計測手法であるが、ブロードエネルギーで様々な価数のイオンが同時に生成されるレーザー駆動イオン診断には最も適している、電場と磁場を垂直方向に同時にかけて、イオン価数とエネルギーを分離することでビーム診断を行う『トムソンパラボラ分光手法』をレーザー駆動イオン加速において確立してきた (Fig. 2)。

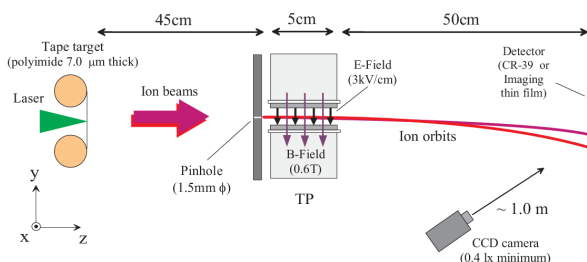


Figure 2: Online Thomson parabola with the scintillator film[6].

ただし、Fig. 2 の手法では、同位体および、質量・イオン価数比が 1 である陽子は、比較的簡単にオンラインで計測できることが実証されたが、質量・イオン価数比が 0.5 など多数のイオンでパラボラ・ラインが重なる元素 (酸素や炭素など) の分離が困難であり、各元素のスペクトルを得るには、新しい手法開発が必要であることが確認された。

### 3. 改良版トムソン分光器

レーザー駆動イオン加速を実施している世界の他の研究機関では、トムソン分光において、幅広いダイナミックレンジを持つイメージングプレート (IP) をイオン検出器として利用している。そこで、我々も IP を用いることで、トムソン分光手法の中において、様々な元素が混ざり合う中から、炭素元素固有のスペクトルを得る手法を開発することにした。

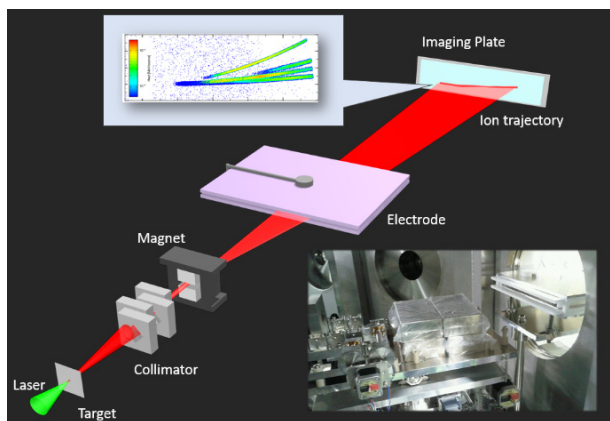


Figure 3: Measured system of Thomson parabola with a solid state ion detector.

Figure 3 にその診断系の概略図を示す。レーザーショットによって発生される加速イオンは、 $250 \mu\text{m}$   $\phi$  のピンホールを通して、磁場、電場を通過後、ターゲットから約 1.5m 離れた位置にあるイメージングプレートにて検出する。

今回開発された、診断系を関西研 J-KAREN レーザーシステムにて、 $0.5 \mu\text{m}$  厚のチタン・ターゲットに  $\sim 5\text{J}$  のレーザーショットを行い、IP で計測したものを Fig. 4 に示す。プロトンは、最大エネルギーで 20MeV が観測されている。このとき、イメージングプレートで検出された粒子トラックは、ピンホール径をコントロールすることで、図中左上に表示されるように粒子 1 個の軌跡を弁別可能となる。検出器に記録された 1 個の特性が理解できれば、核種弁別なども可能となるはずである。現在、我々はレーザーによる加速イオンデータを利用しながら、弁別手法を確立しているところで、その弁別手法の完成が近い。

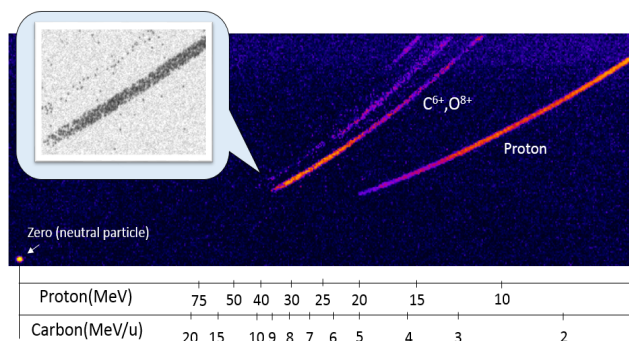


Figure 4: Experimental data of laser-driven ion acceleration by using the J-KAREN laser system. Maximum proton energy is about 20MeV are measuring on this shot.

### 4. おわりに

量研では、量子メス・プロジェクトをスタートさせた。ここでは、レーザー駆動イオン加速による炭素イオンの安定的な発生を実現しなければならない。レーザー駆動で加速される不純物だらけのイオンの中から、炭素イオンのスペクトルや、そのビーム形状、エミッタンスを精度よく得ることが今後の研究課題である。レーザー駆動入射器の実現に向けて、ビーム診断の開発を進めて、入射器に必要な性能をひとつひとつ実現して行きたいと考えている。

### 参考文献

- [1] R. A. Snavely *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, (2000) 2945.
- [2] S. P. Hatchett *et al.*, Phys. Plasmas **7**, (2000) 2076.
- [3] H. Sakaki *et al.*, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010) 312.
- [4] K. Ogura *et al.*, Optics Letters, Vol. 37, **14**, (2012) 2868.
- [5] T. Shirai *et al.*, Proceedings of this conf., (2017).
- [6] H. Sakaki *et al.*, Rev. Sci. Instr. **84**, 013301 (2013).