



A Study on Precise Measurements and On-Line Diagnosis for Laser-Accelerated Ion Beams

Kanasaki, Masato

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2014-03-25

(Date of Publication)

2015-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6136号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006136>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 金崎 真聡

専 攻 海事科学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

A Study on Precise Measurements and On-Line Diagnosis for Laser-Accelerated Ion Beams

(レーザー駆動イオン加速におけるイオン計測の高精度化
とオンライン化に関する研究)

指導教員 山内 知也 教授

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

【緒言】

近年、レーザー駆動による粒子線がん治療装置用小型加速器の開発を目的として、高強度レーザーを用いたイオン加速実験が世界各地の高強度レーザー施設にて盛んに行われている。

集光強度が 10^{18} W/cm² を超えるような高強度レーザーを固体やガス、クラスターなどのターゲット物質に集光すると、レーザーの強い電場の影響を受け、ターゲット物質中の電子が相対論領域にまで加速される。さらに電子はレーザーの電場及び磁場によりレーザー進行方向に加速される。電子が加速された後、ターゲット物質は正に帯電し不安定な状態となり、やがて前方に飛び出した電子を追いかけようとしてイオンが加速される。このようなレーザー駆動イオン加速は、その加速電場が従来の高周波加速器に比べて 100 万倍高く、最大で TV/m にまで達するため、加速器装置の大幅な小型化が期待できる。最近では、レーザー装置の発展とともに、レーザーによって加速されるイオンのエネルギーも増加しており、医療応用可能な 80 MeV 以上の陽子線発生領域に到達しつつある。

レーザー駆動型の加速器を開発するためには、発生するイオンのエネルギースペクトルや空間分布等の特性を明らかにしなければならないが、レーザー加速イオンの計測手法は、確立されたものが少ない。なぜならば、レーザー駆動イオン加速実験では、イオン検出器に対してノイズとなり得る高エネルギー電子線や X 線領域を含む幅広いエネルギースペクトルを有した光子がイオンと同時に発生しており、さらには、高エネルギー電子線に起因する光中性子も発生しているからである。

そこで、レーザープラズマが形成する複雑な混成放射線場におけるレーザー加速イオンの高精度な計測手法開発と、レーザーのショットごとにイオンの特性を評価可能なオンライン型の診断手法開発を目的として研究を行った。

【固体飛跡検出器 CR-39 の利用及びイオン計測用蛍光薄膜の開発】

固体飛跡検出器 CR-39 は、イオンの飛跡を強アルカリ溶液によって光学顕微鏡観察が可能な大きさのエッチピットにまで拡大してイオンを計測する検出器であり、エッチピットの形状からイオン種や入射エネルギー、入射角度が特定できる。一方で CR-39 は、広い領域に損傷を及ぼす電子線や光子に感度を示さないため、混成放射線場においてもイオンのみを選択的に検出できるという特性を有しており、これまでもレーザー加速イオンの計測に用いられていた。しかし、レーザー駆動イオン加速の分野では、一つ一つのエッチピットに着目した解析が行われていなかったため、その計測精度は十分なものではなかった。そこで本研究では、CR-39 を用いたレーザー駆動イオン計測の体系を見直すために、解析手法を含む CR-39 の諸特性について基礎的な研究を行った。さらに、エッチングと顕微鏡観察を繰り返し行う多段階エッチング法をレーザー加速イオン計測に初めて適用することで、イオンの入射エネルギーと入射の向きを高精度に特定する解析体系を整備した。

CR-39 は積算型検出器であるためレーザーショットごとのイオンの特性をオンラインで評価することができない。また、プラスチックシンチレータ等の既存のオンラインイオン検出器は電子線や X 線に対する感度が高くレーザープラズマ中で利用することは困難である。そこでオンライン型検出器として ZnS(Ag)蛍光膜の開発を行った。Bethe-Bloch のエネルギー付与に関する方程式を基に、イオンと電子がそれぞれ付与するエネルギーの比が、検出器の厚みに依存して変化することを見出し、薄い検出器ほど電子に対するイオンの発光が強くなる傾向を得た。蛍光膜の設計には、モンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS を利用し、付与エネルギーを計算することで検出器の厚みを最適化した。その結果、レーザー加速電子線が入射した場合でもイオンの発光を明確にとらえることが可能な厚さ 4 μm のポリプロピレン薄膜に 20 μm の ZnS(Ag)蛍光体をアクリル樹脂で固着した蛍光膜の開発に成功した。また、開発を行った蛍光膜については、イオンビームに対する応答特性を明らかにするため、高周波加速器を利用し、陽子線の入射粒子数と入射エネルギーに対する発光強度を評価した。

【固体ターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速】

レーザー駆動イオン加速実験では、薄膜などの固体ターゲットが最もよく利用されており、数十 MeV 級の陽子線発生に成功している。これまでのレーザー加速陽子線に対する最大エネルギーの計測手法は、CR-39 を積層し、エッチピットが観察された最終層まで到達するエネルギーを最大エネルギーと評価していたため、エネルギー決定精度は数 MeV 以上の不確かさが存在していた。そこで、本研究では CR-39 を積層した検出器を用い、エッチピットが観察された最終層の CR-39 中におけるレーザー加速陽子線の飛程を、多段階エッチング法により直接求めることで最大エネルギーを決定した。この手法を用いることで、エネルギー決定精度の不確かさ $\Delta E=0.1$ MeV を実現し、これまでに行われていた計測精度を 10 倍以上高精度化した。

また、レーザーのショットごとにイオンの特性を評価するため、開発した ZnS(Ag)蛍光膜を検出部に利用したオンライン型トムソンパラボラシステムの開発を行い、ポリイミド薄膜から発生するレーザー加速イオンの計測を行った。トムソンパラボラとは、発生したイオンを平行にかけられた電場と磁場の中を通過させ、質量電荷比に固有の二次曲線に分光した後、二次元検出器でイオンを計測する手法である。本システムを用い、固体ターゲットから陽子線だけではなく、炭素や酸素の多価イオンもレーザーによって加速されていることを明らかにした。また、検出部に CR-39 を用いた計測も行い、蛍光膜の結果と比較することで、システムの校正を行った。

【クラスターガスターゲットを用いたレーザー駆動イオン加速】

レーザー駆動イオン加速実験の新たなターゲットとしてクラスターガスターゲットが注

目を集めている。クラスターガスターゲットは固体とガスのプラズマ密度の間であるサブ臨界密度プラズマを形成するため、レーザー光の吸収効率が高く、イオンの加速効率が固体ターゲットに比べて 10 倍程度高い。しかし、クラスターガスターゲットを用いた場合、固体ターゲットの場合と異なり、イオンが加速される方向と電子が加速される方向が同じであるため、固体ターゲットと同じイオン検出器体系を用いることが難しい。さらに、固体ターゲットに比べて、より高エネルギーイオンの発生が期待できるため、新たなイオンビーム検出手法開発が必要である。

そこで、プラスチック散乱体と CR-39 を組み合わせた後方散乱粒子による高エネルギーイオンビームの診断手法を開発した。CR-39 を一枚だけ検出器として用い、その直後にアクリルとテフロンで構成される散乱体を設置した。本診断手法は、CR-39 の検出閾値を超えるエネルギーのイオンを直接計測するのではなく、散乱体中で後方に散乱されたイオンを検出器の裏面で計測するものである。サイクロトロン加速器による原理検証実験を行い、多段階エッチング法によってイオンの入射の向きを特定したところ、検出器の裏面に後方散乱されたイオンのエッチピットが多数観測された。また、エッチピットの空間分布はイオンビームの強度分布をよく再現しており、本手法を用いれば簡便に高エネルギーイオンビームの診断が可能であることを証明した。さらに本手法は、検出部に CR-39 を用いているため、電子線の影響を受けずにイオンのみを計測可能である。

一方で、クラスターガスターゲットから発生する電子の最大エネルギーは 200 MeV に到達し、レーザー 1 ショットあたり 1 nC の電子線が加速されている。このような高エネルギー電子線が実験装置を構成する物質中に入射した場合、制動放射によりエネルギーの高い光子を放出し、発生した光子は物質中の原子核との光核反応により中性子を発生する。そこで、レーザー駆動イオン加速実験で発生する光中性子について、PHITS コードを用いて実験体系内における中性子束の評価を行った。実際のイオン計測においては、光中性子が CR-39 に入射した場合、CR-39 内部の陽子を反跳することで間接的に飛跡を残すため、バックグラウンドノイズとなり得る。そこで、入射エネルギーと入射角に着目したレーザー駆動陽子線のエッチピットと光中性子に起因するエッチピットを弁別する解析手法の開発を行い、クラスターターゲットを用いたレーザー駆動陽子加速実験に適用した。

【低バックグラウンドノイズを実現したイオン検出器体系の設計】

本研究全体を通して得られた知見を集約し、CR-39 を用いたレーザー加速イオンの計測を行う上で最も大きな問題となる光中性子によるバックグラウンドノイズをでき得る限り低減させるイオン検出器体系の設計を行った。光中性子は高エネルギー電子線に起因して発生するため、高エネルギー電子線を真空容器等に入射させない工夫が必要である。そこで真空槽中にテフロンとポリエチレンを用いた遮蔽を施し、その効果を PHITS コードを用いて評価した。さらには検出器を設置する真空容器の形状も、電子線の軌道に応じて最適化

(氏名： 金崎 真聡 NO. 4)

を行い、イオン検出器に光中性子がほとんど入射しない検出器体系を見出した。本検出器体系を用いることにより、CR-39 を用いた場合にも低ノイズ環境下でイオン計測が可能になると期待される。

氏名	金崎 真聡		
論文 題目	A Study on Precise Measurements and On-Line Diagnosis for Laser-Accelerated Ion Beams (レーザー駆動イオン加速におけるイオン計測の高精度化とオンライン化に関する研究)		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	山内 知也
	副 査	教 授	小田 啓二
	副 査	教 授	岡村 秀雄
	副 査	准教授	蔵岡 孝治
	副 査		
要 旨			
集光強度が 10^{18} W/cm² を超える高強度レーザーによるイオン加速実験において、エッチング型飛跡検出器及び ZnS(Ag)蛍光体を活用することで、電子線や X 線、さらには光中性子線が含まれる複雑な混成放射線場におけるイオン計測の高精度化とオンライン化を試みた研究である。医療応用も可能な 80 MeV 級のプロトンが加速されるような段階に入っているが、計測技術に山積している諸課題を丁寧に整理している。高強度レーザーを集光する固体やクラスターなどのターゲット物質中の電子は、レーザーの強い電場の影響で一気に相対論領域にまで加速されるが、レーザーの電磁場との相互作用の結果としてレーザーと同じ方向に進行し、その後、前方に飛び出した電子を追いかけるようにしてイオンが加速される、といった物理的な過程を分かりやすく概説している。このような一連の過程は、電子や X 線などが同時に発生する複雑な混成放射線場で生じ、さらには電子線に起因するエネルギーの高い光子や光中性子といった副次的な放射線が発生するので、イオンのみを選択的に計測することは困難を極めるといった課題がよく整理されている。次いでエッチング型飛跡検出器として用いた CR-39 検出器の特性を、基本的なエッチピット成長挙動から展開し、後述されるレーザー加速イオン計測における個々の具体的分析の基礎を与えている。また、ZnS(Ag)蛍光体についてはその発光特性を古典的なベテ・ブロッホの理論に基づいて議論し、更に、モンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS を使用して最適な構造を設計し、後の実験に役立てている。同コードを利用した検出器の設計は、当該分野では先進的な試みである。一方で、CR-39 検出器は以前から知られているイオン検出器であるものの、その測定原理にさかのぼった考察は当該分野では普及しておらず、金崎真聡君が筆頭著者として執筆した総説がレーザー駆動イオン加速の分野の研究者らに広く読まれることによって適切な使用法を伝えたことは特筆できる（参考論文を参照）。固体ターゲットとした実験では、CR-39 のスタックと ZnS(Ag)蛍光体を検出部に利用したトムソン・パラボラ計測システムを設計し実験が行われている。前者においては CR-39 のスタックが利用され、エッチピットが観察された最終層の CR-39 に対して多段階エッチング法によってエネルギーを決定しているが、従来の手法と比べて 10 倍以上高精度な結果を導き出している。トムソン・パラボラからはプロトンだけでなく、炭素や酸素の多価イオンも加速されていることをオンライン計測で明らかにしており、これらは先駆的な成果となっている。トムソン・パラボラに CR-39 を検出部として使用した校正実験も行っており、システムの校正も十分に行われている。固体ターゲットと比べてイオンの加速効率が高いクラスターガスターゲットからは CR-39 の検出限界を超えた高いエネルギーのイオンが発生し、更に、イオンと同じ方向に電子が加速されるため、イオンの弁別計測は難しくなる。CR-39 の検出限界としてはエネルギーが高いこととイオンのフルエンスが高いことの 2 つがあるが、この制限を回避するために後方散乱イオンを計測する簡便な手法を独自に開発している。この手法はサイクロトロンを使った実験において実証されており、レーザー駆動イオン加速実験でも活用されている。この場合にはエッチピットの形状や成長パターンからイオンの入射方向を決定する必要があるが、ここでも CR-39 検出器の測定原理に遡った考察が活かされている。精度の高いイオン計測には減速材を組み入れた CR-39 のスタックが必要となるが、高エネルギー電子線に起因して減速材等の中で発生する光中性子がプロトン計測のノイズとなる。そこで、入射角と入射エネルギーに着目し、光中性子が作るエッチピットとプロトンのそれらとを弁別する手法を提案している。極めて丹念な分析を行い、高いエネルギーのプロトンがクラスターガスターゲットから生じている可能性を明らかにしている。このような実験に合わせて PHITS を用いたシミュレーションが展開されており、最終章に記述されている光中性子が事実上無視できる、低バックグラウンドのイオン検出システムの設計と製作に成果としてまとめられている。放射線計測学の視点からは、最も難しいと言えるパルス状の混成場に最適な検出器群を理論とシミュレーションを組み合わせで挑んだ研究成果であると言える。			
以上より、本研究には十分な新規性と独創性が認められるので、博士（工学）の学位に相応しい研究であるとした。			

氏名	金崎 真聡
学位論文を構成する論文は以下の4件である。 (1) M. Kanasaki, A. Hattori, H. Sakaki, Y. Fukuda, A. Yogo, S. Jinno, M. Nishiuchi, K. Ogura, K. Kondo, K. Oda, and T. Yamauchi: A high energy component of the intense laser-accelerated proton beams detected by stacked CR-39, Radiation Measurement, 50 (2013) 46-49. (2) H. Sakaki, M. Kanasaki, Y. Fukuda, M. Nishiuchi, T. Hori, A. Yogo, S. Jinno, and K. Niita: Development of a single-shot-imaging thin film for an online Thomson parabola spectrometer, Review of Scientific Instruments, 84 (2013) 013301(7pages). (3) M. Kanasaki, Y. Fukuda, H. Sakaki, T. Hori, M. Tampo, K. Kondo, S. Kurashima, T. Kamiya, K. Oda, and T. Yamauchi: The Diagnosis Method for High-Energy Ion Beams Using Backscattered Particles for Laser-Driven Ion Acceleration Experiments, Japanese Journal of Applied Physics, 51 (2012) 056401(4 pages). (4) 金崎真聡、福田祐仁、榊 泰直、近藤公伯、小田啓二: CR-39 を用いたレーザー駆動陽子線計測における光中性子起因エッチビット弁別手法の開発、レーザー研究、第42巻2号 印刷中。 先に言及した総説は次のものである。 (1) 金崎真聡、福田祐仁、榊 泰直、西内満美子、近藤公伯、倉島 俊、神谷富裕、服部篤人、小田啓二、山内知也: イオンビーム特性評価を目的とした固体飛跡検出器 CR-39 の利用、日本プラズマ核融合学会誌、第88巻5号 (2012) 261-275.	
	以上