



展 TENBO 望

レーザー光による鉄元素の加速 —原子核フロンティアを目指して—



西内 満美子
Nishiuchi Mamiko



榊 泰直
Sakaki Hironao

(日本原子力研究開発機構)

1 はじめに

通常の光と比して、時間的・空間的に可干渉性が高いというレーザー光が発見されて、50年以上が経過した¹⁾。初期の頃は、そのレーザーのエネルギーを時間・空間的にできるだけ集中して物質に照射したとしても、レーザーが物質に与えられる状態の変化は、物質のエネルギー準位に対して摂動程度であった。しかし、1980年代にレーザー核融合用のドライバレーザーの技術が飛躍的に進歩したことで、レーザーの“高出力化”が実現され、大型で1日の数ショット程度という（シングルショットベース）で運用になるものの、キロジュール（kJ）レベルのレーザーエネルギーをナノ秒のパルス幅で出射できるようなレーザーシステムが実現した。加えて、その後に続いたモード同期²⁾の技術の確立により（広い帯域内の全ての周波数成分の位相を揃えること）それまでナノ秒のパルス幅が最短であったが、ピコ秒、さらにフェムト秒のオーダーまで短縮することが可能とな

った。更なるブレイクスルーは、1985年におけるチャープパルス増幅法（CPA技術）³⁾の発明である。CPA技術とは、モード同期によって発生した短パルスレーザー光を、位相の相関を保ったまま時間的に一度引き伸ばし、光学部品破壊強度を超えないようピーク強度を下げる。その状態で増幅した後に再度時間的にレーザー光の圧縮を行って、これまで到達できなかった強度に到達させる手法である。このCPA技術により、室内に設置可能な実用的な大きさでかつ繰り返しの効くレーザーシステムでも、ピーク強度がテラワット級（ $10^{12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ ）まで達成できるようになった。技術は更に進み、2010年頃からはペタワット級（ $10^{15} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ ）の高強度レーザーが世界において稼働し始めているのが現状である。

このような背景の中、高強度レーザー研究分野において、2000年に超高強度短パルスレーザーを薄膜に照射することで、約60 MeVとい

うエネルギーの陽子線が初めて計測された⁴⁾。この実験では、薄膜ターゲットに対して、kJレベルのエネルギーが照射されており、正にレーザーエネルギーの集中によるブルートフォースで陽子線が引き出された形であった。これがきっかけとなり、レーザー駆動イオン加速の研究が始まったわけだが、このときに計測された陽子線は既存の加速器で発生できる陽子線と全く異なる特徴を持っていたことが理解され、応用を目指して世界各国で精力的な研究・開発が行われるようになった。すなわち、レーザー光のみでイオンを効率的に加速する“超小型レーザー駆動イオン加速器”の実現に向けて世界中で開発競争が始まったわけである⁵⁾。しかし当初から、レーザー駆動イオン加速の研究は、最軽量元素で電荷質量比が最も高く（加速効率がよい）陽子線の加速に焦点が当てられることで進められてきた。

一般的に、レーザー駆動型のイオン加速手法は、被加速イオンが重ければ重いほど、加速器を用いた従来型の加速手法に比してメリットが高くなることが知られている。それは、レーザーと物質との相互作用によって $100 \frac{\text{TV}}{\text{m}}$ 以上もの高勾配の電場を μm 以下の極小空間に生成できるというレーザー駆動型のイオン加速手法の最大の特徴にある。この高勾配電場により一気にイオンを多価状態にし、かつ同時に高エネルギーにして引き出せるため、極めてコンパクトな多価重イオン源が実現できる。さらに、この“イオン化及び加速”の両ステップを、レーザーのパルス幅程度（数十 fs～数百 fs 程度）のごく短時間の間に実現できるという点も、従来型のイオン源には存在しない画期的な特徴である。ゆえに、ここ数年の更なるレーザー技術及び計測技術の発展によって、重い核種のイオンを高エネルギーまで加速することも重要なテーマとなっている。

レーザー駆動型イオン加速の特徴をまとめると、

- ・従来型の技術では不可能な $100 \frac{\text{TV}}{\text{m}}$ 以上も
- の高勾配の電場を μm 以下の極小空間に生成し、コンパクトにイオンを加速し、重元素のイオン源の小型化が可能
- ・レーザー光の時間パルス幅で加速が終了するために、従来型では実現できないような、fs 時間内で多価重イオンの生成、及び加速が可能
- ・加速イオン核種は、照射ターゲットに依存するため、照射ターゲット材料を変えるだけでどのようなイオンビームでも容易に加速可能

となる。すなわちレーザーイオン源は、このような従来型イオン源にはない特徴を有しており、次世代の加速手法の1つとしてこれらの特徴を際立たせるような利用法を視野に入れることも重要になる。そこで、筆者らはこの特徴の具体的な利用法について検討を始めた。

再掲するが、レーザー駆動型のイオン加速は、照射ターゲットを変更するだけで加速イオンの核種を変更することが、比較的簡単であるという特徴がある。これは安定核種に限ったことではなく、ターゲットが極めて短寿命な不安定な重イオンでできていたとしても、例外なく適応できるため、重元素の不安定核子であってもレーザーのパルス幅程度の極短時間（fs）で多価状態にしてターゲットから高エネルギー状態で引き出せる。この特徴は、これまで地球上で実際観測することができなかった短寿命の重元素を、従来の加速器技術を駆使した元素合成により実験室で模擬的に生成後、それらが崩壊する前に、レーザー駆動型イオン加速技術で多価状態にして瞬時に高エネルギー状態にして取り出すことに利用できると期待される⁶⁾ (図1)。

実際、最先端の原子核物理の分野においては、不安定な重元素の性質を調べることは重要な課題である。例えば、宇宙における元素生成過程において、鉄よりも重い元素は、星がその一生の最後に起こす超新星爆発中で生成される

と考えられている。爆発によって様々な不安定原子核が生成され、そして次々と消滅・生成の元素合成過程を踏みながら、鉄より重い元素が生成されるに至る。だが、この元素過程を実験的に再現することは困難であるために、現状は全ての元素合成の過程が明確に理解されているわけではない。よって、自然界において超新星爆発の中でしか存在しないような元素生成過程を実験的に再現するには、宇宙創成時の極限的な状況を実験室内で再現することが必要となり、この状況を創り出すための巨大加速器施設が世界中で稼働し精力的な研究が日々行われている。元素生成において重要となる短寿命不安定核の分析を試みる場合、生成元素が崩壊する前にその存在を詳細に調べる必要があり、崩壊時間までに計測装置まで当該元素をイオン化制御した上でターゲット内から取り出さねばならず、特に μs 程度以下の崩壊時間の重元素の場合は計測装置まで輸送させることは基盤技術では困難であり、新たなブレイクスルーが望まれている状況である。

このように、最先端の原子核物理の分野において、現状技術で実現不可能な実験を、超高強度レーザーの技術を融合させることで実現できれば、原子核フロンティアにおける新たな基盤技術をもたらすことが期待され、新しい物理的発見や原子力エネルギー産業に貢献できる成果が期待できると考えられる。本稿においてはレーザー駆動型のイオン加速の研究について紹介し、2つの異なる分野の意義のある融合を行うために、必要な取組みについて展望する。

2 レーザー駆動イオン加速とは

ペタワットレーザー光は、直径数 μm という小さな領域に集光させることができれば、その

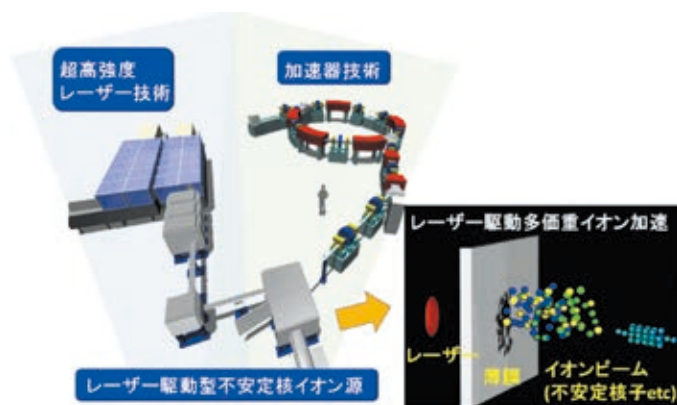


図1 超高強度レーザー技術と加速器技術を融合させた不安定核のイオン源のイメージ

ピーク強度 (I) は非常に強くなり $I=10^{21} [\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}]$ を超える。このような集光スポットにおいてレーザーの電場自身が持つ強度を計算すると、 $I=E^2/8\pi$ より、

$$E=\sqrt{8\pi I}\sim 90 [\frac{\text{TV}}{\text{m}}]$$

となる。一方において、水素原子の原子内電場の強度を考える。水素原子の周りの束縛電子が、原子核から受ける電界の強度は、

$$E=U/ea_B=e/a_B\sim 0.5 [\frac{\text{TV}}{\text{m}}]$$

ただしここで、 $a_B=\hbar^2/me^2$ はボーア半径と見積もれるため、この電界強度に比べて、集光スポットにおける電磁場の強度は2桁以上高い値であることが分かる。集光スポットにおけるレーザーの電磁場の強度は桁違いに強い。

さらに、このような強さの電磁場中にさらされた電子は、瞬時にして電場によって揺動され (quiver 運動と呼ぶ)、相対論的速度まで加速を受ける。例えば、 $I=10^{21} [\frac{\text{W}}{\text{cm}^2}]$ のレーザー強度

度において、揺動される電子の持つ運動エネルギーは約 10 MeV にも相当する。

しかしイオンは、一番軽い陽子であっても電子の 2,000 倍の質量を持つために、現状、直接

光で加速するのは難しい。現状のレーザー強度における加速メカニズムは、照射するターゲットの形状によって様々であるものの、共通点がある。レーザーによって加速された電子群によって誘起された、電場あるいは磁場の効果によって、イオンは2次的に加速を受ける。

高強度レーザーを物質、特に固体薄膜に照射すると、レーザーによる電離過程によって表面にプラズマが形成される。原子の外に掃き出された電子は、前記のようにレーザーの電磁場を感じて quiver 運動する。このような電子の運動方程式は、

$$m\gamma(dv/dt) = e(E_0 + (v/c) \times B), \gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$$

と記述できる。例えば、 $I = 10^{21} [\frac{W}{cm^2}]$ のレーザー強度においては、電子の動きが相対論的になるため、前式の第2項で記述される運動が無視できなくなる。結果として、電子はレーザー進行方向に垂直な向き（電場の向き）に振動されつつ、レーザー進行方向に集団的に加速を受ける。このときに電子がレーザーから輸送される運動エネルギー (kT_e) は quiver 運動の時間平均エネルギー

$$U_p = m_e c^2 (\sqrt{1 + q_0^2} - 1)$$

とほぼ等しくなる。例えば、 $I = 10^{21} [\frac{W}{cm^2}]$ の強度においては、約 10 MeV にも達する。このような高速電子の平均自由行程は、ターゲットの厚みよりもはるかに大いため、加速された電子はターゲットの裏面（ターゲットの照射面と反対側）を突き抜けて真空中へと逃げ去る。それと同時にターゲットはプラスにチャージアップすることでターゲット自身がポテンシャルを持つようになる。このポテンシャルを超えることができる高エネルギーの電子のみターゲットを離れて無限遠に逃げ去るが、そうでないものは逃げ去ることができずターゲットの周りに捕われる。これらのターゲット周りの電子群と、

プラスにチャージアップしたターゲットとの間に生じた電荷分離電場の強度は、プラズマのデバイ長を λ_D とし、

$$E_{acc} \sim T_e / e\lambda_D$$

と見積もることができ、例えばレーザー強度が

$$I = 10^{21} [\frac{W}{cm^2}] \text{ の場合、電場強度は } \sim 100 [\frac{TV}{m}]$$

にも達する。一般にイオン加速に用いられる高周波加速器の加速管の中に立てることのできる加速勾配は、加速管内部の放電現象によって制限を受け、おおよそ $\sim MV/m$ 程度となっていることを考えると、この加速電場の強烈な強さが分かる。この強烈に高い電場にさらされた原子及びイオンは、一気に周りの電子をはぎ取られ多価状態となり、同時に加速を受け、高エネルギーのビームとしてターゲットの裏面より飛び出す。

このように、既存の加速器のイオン源と比較すると、レーザー駆動型のイオン加速手法は、極短時間に、それもレーザーの照射時間に同期した形で、多価の重イオンビームを高エネルギーにまで加速できるという特徴を持つ一方で、現状は高強度レーザーによるブルトフォースでイオンを引き出ししているという段階である。実際に応用に資するには、加速されたビームが発散角を持った状態であること、エネルギーが広がり持っていること、粒子数が少ないこと等の課題を克服していくとともに、レーザー駆動イオン加速手法の制御法を確立していかなければならない。

3 原子力機構関西研での重イオン加速実験

日本原子力研究開発機構関西光科学研究所において、レーザーを用いたイオンの加速研究が行われている。我々の用いているレーザーは、核融合の実験などに使用される大型かつシングルショットベースのレーザーとは違い、比較的小型の繰り返しの効く、超短パルス超高強度レ

ーザーと呼ばれる部類のレーザーである⁷⁾。エネルギー 10 J 以下のパルスを 30 fs という極短時間に圧縮し、かつ空間的に 3 μm という極小空間に絞り込んで物質に照射することができる。このときのレーザーの集光強度は、 $\sim 10^{21}$ W に達しており、世界でも最高のレーザー集光強度を誇る。この集光強度においては、前記のように強烈に高い電場強度が実現されている。このようなレーザーと薄膜とを相互作用させると、わずか 10 J 以下のレーザーエネルギーで、40 MeV の陽子線の加速が可能である⁸⁾。

この J-KAREN システムを用いることで、重イオンの加速実験を行った結果を以下に紹介する。

J-KAREN システムからの、波長 800 nm、エネルギー 8 J、パルス幅 30 fs のレーザー光をターゲット上に伝送し、ピーク強度を最高で $2 \times 10^{21} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ で集光した⁸⁾ (図 2)。用いたターゲットは、0.8 μm のアルミニウム薄膜を基板とし

て、表面に加速したい鉄の原子（被加速粒子と呼ぶ）を薄膜裏面にごく少量均等に分布させたものである（原子の個数比でアルミニウムの約 0.5% 量に相当する）。加速したい原子、今の場合鉄を効率良く多価状態にし、高エネルギーにまで加速するための必要条件は、できるだけ強い加速電場を生成することである。これを達成するのに重要なのは、J-KAREN レーザーのパラメータに対して最適なターゲットの素材、及び厚みを選ぶことである。素材に関しては、比較的価格面で安価なことや、扱いやすさなどからアルミニウムを選択した。最適なターゲットの厚みに関しては、様々な厚みのターゲットをレーザーで照射し、重イオンとともに加速される陽子の最高エネルギーをモニターすることで、ターゲット裏面に形成される加速電場の強度が一番強くなる厚みを選択した。最適なターゲットの厚みが存在する理由は以下のように理解できる。すなわち、ターゲットの厚みが厚すぎると、ほとんどのレーザーのエネルギーがプラズマ化したターゲット表面で反射されてしまい、結果としてレーザーのエネルギーのほとんどがプラズマとの相互作用に使われることなく無駄になる。その反対に、ターゲットが薄すぎると、レーザーのエネルギーはターゲットに吸収されることなく通り抜けてしまい、この場合もレーザーのエネルギーは使われることなく捨てられてしまう。

超高強度短パルスレーザーを物質に照射すると、物質表面に生成されるレーザー生成プラズマから、加速したいと考えている重イオンだけでなく、様々な種類の放射線、すなわち電子、X 線、 γ 線、中性子線などが発生する。このような高いノイズの環境場においては、検出したいと思っている重イオンの信号のみを計測することは決して容易ではない。さらに、我々がイオン加速の実験で通常的环境とする真空チェンバー内部の真空度は、決して良いとは言え

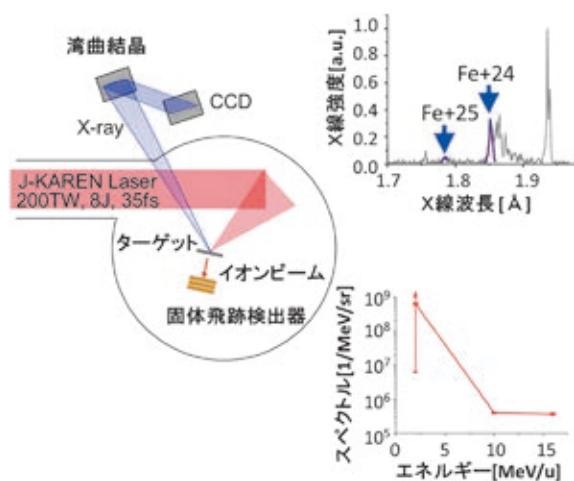


図 2 レーザー駆動重イオン加速の実験セットアップ

超高強度短パルスレーザーを固体薄膜ターゲットに照射し、加速された鉄の多価イオンを固体飛跡検出器で検出。加速された鉄のイオン化状況は X 線分光技術で計測。右上：加速された鉄イオンのイオン価数を X 線分光技術で計測した結果、少なくとも +25 価までイオン化が進んでいることが明らかになった。右下：固体飛跡検出器で検出した鉄イオンのスペクトル。最高で 16 MeV/u まで加速されている

ず $\sim 10^{-6}$ Torr 程度であるため、積極的に取り除こうとしない限りは、ターゲット薄膜の表面には、水やハイドロカーボンなどの 10 nm 程度の不純物層が存在する。レーザーをこのようなターゲットに照射すると、重イオンとともに水素、炭素、酸素なども同時に加速されて出てくるために、検出器の方で明確に分離する必要がある。

そこで、神戸大学が有する固体飛跡検出器の技術を応用し⁹⁾、高ノイズ環境下においても、ネオンよりも重い原子核にしか感度を示さないという特徴を持つポリイミドを検出材料とした固体飛跡検出器をレーザー駆動型の重イオンの検出に用いた。固体飛跡検出器はイオンビーム照射後、次亜塩素酸溶液でエッチングし、イオン起因のピットを顕微鏡で計測する必要がある。そのため、繰り返し照射・計測が面倒だという問題点がある一方で、固体飛跡検出器自体がイオン以外の放射線に感度を示さないことから、類希な放射線混成場にも適用することができ、設置位置もレーザー照射位置に比較的近いところを選べるというメリットがある。すなわち、レーザー生成プラズマを広い角度視野で計測することが可能となる。また固体飛跡検出器を何枚も重ねることで、イオンの持つブラッグピークという特徴を活かして検出されたイオンにエネルギー分解を掛けることも可能である。固体飛跡検出器によって取得した鉄イオンのエネルギースペクトルを図 2 (右下) に示す。加速された鉄イオンは最高で 16 MeV/u のエネルギーを持ち、加速された個数は 10 $\sim$ 16 MeV/u のエネルギー領域で、10⁶ 個/shot 以上であることが分かった。

加速された鉄イオンの荷数を、湾曲型 X 線結晶分光器 (マイカ) による分光を行い計測した。図 2 (右上) に示すように、鉄に電子が 1 つのみ、あるいは 2 つのみ残された状態の鉄イオン (Fe^{+24} , Fe^{+25}) からの X 線のラインを計

測し、鉄が効率良く多価状態にまで電離されていることを証明した。イオン源においてここまで高いイオン化状態に持っていけるのは、レーザー駆動型の特徴である。

4 今後の展望

今回、レーザー駆動加速によって重イオンである鉄の加速に成功した。現状、レーザー駆動型のイオン源は実際に応用されるには、加速されるイオンの個数の増加や、加速されたイオンのエネルギースペクトルの単色化、価数分布の単一化等を、実験で要求される条件に最適化制御していくことが必要不可欠である。また、鉄以外の元素についての加速手法も確立していく必要がある。原子力機構関西研において、重イオンの加速条件の制御を目指し、レーザー装置の高度化改修が実施されている。この改修によって、前に記したような問題点を着実に一つ一つ解決することで、レーザー駆動重イオンビーム技術を確立し、次世代フロンティア開拓に資することができるよう今後も努力したい。

参考文献

- 1) Maiman, T.H., *Nature*, **187**, 493–494 (1960)
- 2) Keller, U., *Appl. Phys.*, **B58**, 347–363 (1994)
- 3) Strickland, D. and Mourou, G., *Opt. Commun.*, **56**, 219–221 (1985)
- 4) Clark, E.L., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 670–673 (2000); Snavely, R.A., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 2945–2948 (2000)
- 5) Daido, H., Nishiuchi, M. and Pirozhkov, A., *Rep. Prog. Phys.*, **75**, 056401 (2012)
- 6) Nishiuchi, M., *et al.*, *Phys. Plasmas*, **22**, 033107 (2015)
- 7) Kiriya, H., *et al.*, *Opt. Lett.*, **37**, 3363–3365 (2012)
- 8) Ogura, K., *et al.*, *Opt. Lett.*, **37**, 2868–2870 (2012)
- 9) Yamauchi, T., *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **6**, 046401 (2013)