

< 2 > 新規産業開発研究

< 2 - a > 先導的探索 / 実証研究

サブテーマリーダー：光産業創成大学院大学 土屋 裕

(代理：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 青島紳一郎)

小テーマ： 物質改変～レーザーによる陽電子放出核種生成実験

研究従事者：光科学技術研究振興財団コア研究室 研究員 高橋宏典、藤本正俊、青島紳一郎、
大須賀慎二、松門宏治、沖原伸一郎

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

レーザーによるポジトロン CT(PET)用陽電子放出核種生成を実験的に実証するとともに、これを実用的な装置として有効利用できるような研究をおこない、ノウハウを整備・統合して基盤技術として集大成することができた。さらに、将来を見越して、レーザーイオン源のターゲットとして導電性プラスチックが有望であることを明らかにできた。

研究の独自性・新規性

各国を代表する先端的な大型の研究施設で同様な研究が開始されているが、本事業では、重陽子を用いた閾値が低い反応に着目し、世界で初めてテーブルトップレーザーによる短寿命放射性同位体生成に成功した(プレス発表実施)。また、当該地域ではPET診療施設も運用されており、その現場サイドのニーズを基にして、本事業の他のテーマの成果であるテラワットパルスの波形整形と波面補償を世界で初めて同時に達成した技術を適用して、独自の研究を実施し、新規知見を得た。よって、本共同研究は、独自性・新規性のある研究である。

研究の目標

フェーズ 1 では、短寿命放射性同位体への物質改変に関する調査・検討・試算を進め、可能性を検討するための基礎実験を行う。

平成 12 年度の目標は、短寿命放射性同位体等への物質改変に関する調査・検討を開始することである。

平成 13 年度の目標は、短寿命放射性同位体への物質改変について、前年度に引き続いて試算を進め、可能性を検討するための基礎実験を開始することである。

平成 14 年度の目標は、レーザーによる短寿命放射性同位体 (^{15}O) 生成の可能性を実験的に実証し、それをを用いたポジトロン CT (PET) 用短寿命放射性同位体標識薬剤の合成を検討し、レーザーによる短寿命放射性同位体生成の可能性を実験的に実証し、それをを用いたポジトロン CT 用短寿命放射性同位体標識薬剤の合成について検討することである。また、短寿命放射性同位体生成効率の向上を実験的に検討することである。

フェーズ 2 では、レーザーによる短寿命放射性同位体生成の可能性を実験的に実証するための実験をおこなう。さらに、関連する基礎データを収集・整理し、基盤技術として集大成する。

平成 15 年度の目標は、レーザーによる短寿命放射性同位体生成の可能性を実験的に実証するための実験を行うことである。

平成 16 年度の目標は、レーザーによる PET 用短寿命放射性同位体生成の可能性を実験的に実証することである。

平成 17 年度の目標は、レーザーによる PET 用陽電子放出核種生成を実験的に実証するとともに、これらに関する基礎データを収集・整理し、基盤技術として集大成することである。

(2) 研究の進め方及び進捗状況

フェーズ 1 では、< 2 > 新規産業開発研究 のサブテーマ< 2 - a > 先導的探索研究 において小テーマ 物質改変 として進めた。短寿命放射性同位体等への物質改変の関連する研究項目に関して調査・検討を行ない、本事業で開発する実証システムを用いた実証研究への妥当性・発展可能性を

検討した。それを念頭に基礎実験を開始し、さらに短寿命放射性同位体生成の可能性を実験的に実証した。

平成 12 年度は、本テーマでは、特に新医療分野における検討を行った。具体的には、短寿命放射性同位体等への物質改変の探索研究として、関連する研究項目に関して調査・検討を行ない、本事業での実証システムを用いた実証研究への妥当性・発展可能性を検討した。

平成 13 年度は、短寿命放射性同位体への物質改変については、前年度に引き続いて試算を進め、可能性を検討するための基礎実験を開始した。この基礎実験に際しては、本事業で開発する実証システムを用いた実証研究を念頭に置いて、その妥当性・発展性を検討した。

平成 14 年度は、レーザーによる短寿命放射性同位体生成の可能性を実験的に実証し、それを用いたポジトロン CT 用短寿命放射性同位体標識薬剤の合成について検討した。また、短寿命放射性同位体生成効率の向上を実験的に検討した。具体的な実験としては、超高密度レーザーパルスで重陽子発生ターゲットに照射して重陽子を発生させ、この重陽子を放射性同位体生成ターゲット（窒化物）へ照射して短寿命放射性同位体（ ^{15}O ）を生成する。この際、最適な実験系を構築して基礎実験を行うため、重陽子発生ターゲット、放射性同位体生成ターゲット、放射線計測防御法などについて、昨年途中から開始した浜松ホトニクス株式会社中央研究所 大須賀慎二、伊藤利昭、塚田秀夫の各氏との共同研究の成果を利用した。また、生成実験の結果を検討して、短寿命放射性同位体生成効率の向上を実験的に検討した。さらに、生成した短寿命放射性同位体を用いて PET 用の標識薬剤を合成することを検討し、レーザーで発生した重陽子のエネルギー分布が短寿命放射性同位体生成効率を左右することを明らかにした。

フェーズ 2 では、〈2 - a〉先導的実証研究～物質改変の小テーマ レーザーによる陽電子放出核種生成実験として進めた。超高密度レーザーパルスで重陽子発生ターゲットに照射して重陽子を発生させ、この重陽子を放射性同位体生成ターゲットへ照射して短寿命放射性同位体を生成した。また、実験結果を検討し、レーザーで発生した重陽子のエネルギー分布が短寿命放射性同位体生成効率を左右することを明らかにした。また、ガン治療に有効とされる炭素等の重イオンの発生についても実験的におこなった。さらに、関連する知見やノウハウを整備・統合して、レーザーによる PET 用陽電子放出核種生成のための基盤技術として集大成した。

平成 15 年度は、前年度までの成果を踏まえ、レーザーによる短寿命放射性同位体生成の可能性を実験的に実証するための実験をおこなった。具体的には、レーザーで発生した重陽子のエネルギー分布が短寿命放射性同位体生成効率を左右することが前年度に明らかになったので、高速粒子のエネルギー分布の計測をしながら、レーザーによる短寿命放射性同位体生成の効率向上を検討した。

平成 16 年度は、前年度までの成果を踏まえ、レーザーによる短寿命放射性同位体生成の可能性を実験的に実証する実験をおこなった。浜松ホトニクス株式会社中央研究所との共同研究で試作・改良した重陽子発生ターゲットを用いて高いエネルギーを持つ高速粒子を多量に発生させるためのレーザーの照射条件等を検討した。こうして発生させた重陽子を放射性同位体生成ターゲットへ照射することによって短寿命放射性同位体生成の可能性を実証した。また、ガン治療に有効とされる炭素等の重イオンの発生についても実験的検討をおこなった。

平成 17 年度は、レーザーによるポジトロン CT (PET) 用陽電子放出核種生成を実験的に実証するとともに、これらに関連する基礎技術やノウハウを整備・統合して、レーザーによる PET 用陽電子放出核種生成のための基盤技術として集大成した。

(3) 主な成果

短寿命放射性同位体の生成に関する調査・検討

実験の準備と並行して、平成 12、13 年度を中心に、物質改変、特に、短寿命放射性同位体の生成に関して、その応用や可能性についての調査を行った。

PET (Positron Emission Tomography) において使用される短寿命放射性同位体の核種とその半減期は、 ^{15}O : 2.04 min、 ^{13}N : 9.96 min、 ^{11}C : 20.4 min、 ^{18}F : 109.7 min である。通常は、サイクロトロンを用いて、陽子あるいは重陽子を加速してターゲットに照射し、例えば、 $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ 反応によって短寿命放射性同位体を得ている。

超短パルス高密度レーザーを用いた短寿命放射性同位体核種の生成に関して、米国ミシガン大学

から報告 (Appl. Phys. Lett. Vol.78, p.595 2001) があつた。文献によると、Ti : サファイアレーザーとガラスレーザーのハイブリッドレーザーのピーク出力 10 TW、パルス幅 400 fs、波長 1.053 μm の SHG 光を重陽子化したポリスチレン薄膜ターゲットに対してスポット径 12 μm に集光して 3×10^{18} W/cm² の集光密度を達成し、最大 2 MeV に加速された重陽子を得た。これをボロン試料にぶつけて $^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ によって C の同位体核種を生成し、そこから発生するガンマ線を計測して、その減衰特性から C の同位体核種が生成されたことを確認している。ただし、このレーザーの繰り返し周期は 7 min と長く、大量の核種を生成することはできない。しかし、本事業で想定しているレーザーの高繰り返し化等によって大量に生成できることが期待される。

PET 装置で診断する際に必要となる放射能の量は 5 mCi 程度である。1 mCi = 37 MBq であるから、収量の目標値としては約 200 MBq すなわち、1 s 間に 2 億個の放射線を放出する短寿命放射性同位体を形成しなければならないということがわかった。ただし、これは最終的に利用する薬剤での値であり、薬剤の合成時の損失を考慮するともっと多く生成する必要がある。

短寿命放射性同位体の生成を検討する場合、核反応の衝突断面積も考慮する必要がある。すなわち、核反応を効率良く生じさせるためには、大きな衝突断面積に合わせたエネルギーをもつ加速粒子 (プロトン等) が必要である。サイクロトロンでは所望のエネルギーのみを持つ高速粒子を発生できるが、高密度レーザー励起で生じる加速粒子は比較的低エネルギーの成分が多い。したがって、低いエネルギー領域に大きな衝突断面積をもつ核反応の方が有利であることがわかった。例えば、 $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ 核反応のしきい値は 2.6 MeV であるのに対して、 $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ 核反応のしきい値は 0 MeV であり、レーザーによる発生では後者の方が有利であると考えられる。

また、 ^{18}F の半減期は約 110 分と長いため、この標識薬剤を生産拠点から遠方の使用施設までのデリバリーすることが可能である。しかし、 ^{15}O の半減期は約 2 min と短いためその標識薬剤は遠方の使用施設へのデリバリーに適さず、その場での利用、つまり生産拠点と使用施設の併設が不可避である。したがって、 $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ 核反応による ^{15}O の生成を目指すことはニーズの点からも意義があると思われる。

この研究項目では、まず最初に、高強度レーザーで短寿命放射性同位体が生成できることを実験的に確認する必要があつた。そこで、図 1 に示すような短寿命放射性同位体の生成過程を検討した。なお、その後のプロセス、例えば PET に用いる陽電子放出試薬の合成などにはサイクロトロンを使った既存のシステムと同様の方法を利用する。

高強度レーザーを軸はずし放物面鏡で集光して粒子発生ターゲットへ照射し、陽子等の加速粒子を発生させる。この加速粒子と核反応材料との核反応によって生成された放射性同位体は、短時間で線を放出して崩壊する。そこで、このとき発生する線を検出することによって短寿命放射性同位体の生成を確認する方法を採用することにした。

加速粒子を効率よく発生させるためには、単位面積あたりのピーク集光強度 (W/cm²) を上げることが重要である。例えば、ピーク出力 1 TW (パルス幅 100 fs、エネルギー 100 mJ) のパルス光 (ビーム径 50 mm) を軸はずし放物面鏡 (焦点距離 114 mm) で集光する場合、理論的には直径 2.4 μm まで集光でき、その集光強度は 2×10^{19} W/cm² に達すると予想される。この値は論文等で報告されている海外における数 10 TW のレーザーで得られる集光密度と同等であり、短寿命放射性同位体の生成に必要なレベルに達していると考えられる。

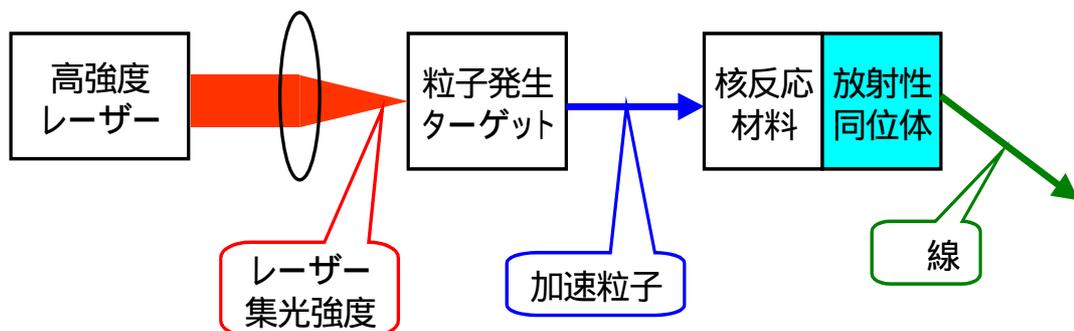


図 1 短寿命放射性同位体の生成過程

しかし、実際には、レーザー光の波面に歪みがあるために上記回折限界まで集光することは困難である。そこで、超短パルス高強度レーザーで高い集光密度を得るための光学系の実験・検討を開始した。

ポジトロン CT で使用される短寿命放射性同位体標識薬剤に使用する短寿命放射性同位体の生成に関して、調査および試算等の検討を行った。検討の結果、高密度超短パルス光照射によって発生する重陽子の性質が放射性同位体生成に大きく影響することが明らかになった。また、重陽子の性質は重陽子発生ターゲットの特性や構造に、また放射性同位体生成効率は同位体生成ターゲットの特性や構造に大きく依存することが明らかになった。そこで、最適な実験系を構築するため、超短パルス光制御・計測技術、重陽子発生、放射性同位体生成に関する知見以外に、重陽子発生ターゲット、放射性同位体生成ターゲット、放射線計測防御法についての専門的かつ実用的な知見を有するチームとの共同研究を開始した(小テーマ：レーザー励起重陽子ターゲットと放射性同位体生成ターゲットの調査検討)。

TW レーザーを用いた真空実験系の構築

高強度レーザーで短寿命放射性同位体が生成できることを実験的に確認するために、図1に示す生成過程を想定して、短寿命放射性同位体の生成過程を検討した。高強度レーザーを集光して粒子発生ターゲットへ照射し、陽子等の加速粒子を発生させる。この加速粒子と核反応材料との核反応によって生成された放射性同位体は、短時間で γ 線を放出して崩壊する。そこで、このとき発生する γ 線を検出することによって短寿命放射性同位体の生成を確認する方法を採用することにした。

以上を踏まえ、平成13年度に整備し実験系の写真を図2および図3に示す。真空排気中の実験の様子を外部から観察するために、側面の角フランジ(図2参照)と上部の各ポートに複数個のビューポートを備えた。また、真空内へ回転機構を導入するための変換ポート等の真空部品を整備した。

図3に、真空環境実験装置内に組み込んだ光学系を示す。真空環境実験装置へ導光された高密度パルス光を軸はずし放物面鏡で集光して、粒子発生ターゲットへ集光する。ここで、粒子発生ターゲットとしてフィルムを用いており、レーザー照射に合わせて回転する治具に保持した。ターゲットの回転、および、ターゲットの位置を真空外から操作できるようにした。具体的には、光学ステージ等の調整軸を延長して、図2に示すように側面フランジへ取り付けられた回転機構へつないだ。

平成14年度第2四半期においては、ターゲット回転治具の改造とレーザーショットに伴う高密度フォトン発生・計測実験装置への戻り光の対策を行った。

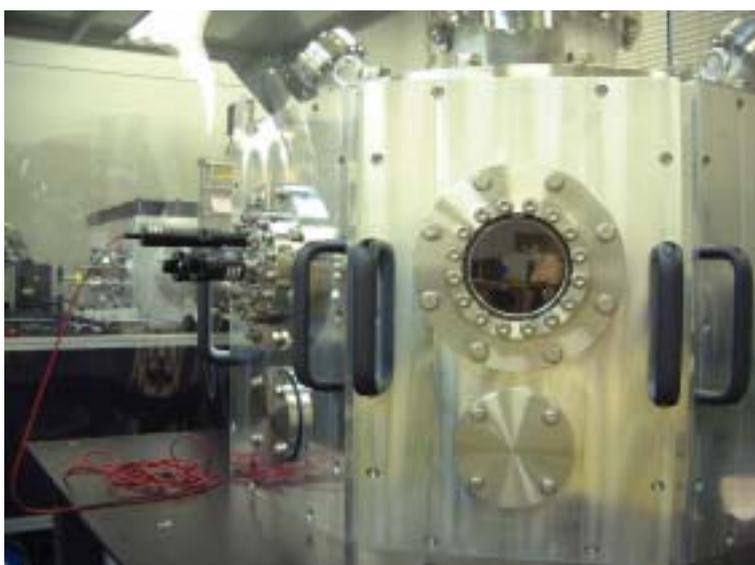


図2 ビューポート、回転導入機構が整備された真空環境実験装置



図3 真空環境実験装置内に設置された軸はずし放物面鏡と回転ターゲット

テラワット (TW) レーザーを金属に集光照射すると金属からその特性 X 線が発生する。従来のターゲット固定治具は、図 4 に示すように回転軸から横木を介して円筒形状の固定治具を支持していた。横木はレーザー集光点から少し奥にずれており発生する X 線量は少ないと推定されるが、こうした金属からの X 線は物質改変の実験には不要であり、作業環境に悪い影響を与える恐れがある。そこで、ターゲット膜回転治具を改造して金属部にレーザー光が照射されないようにした。具体的には図 5 に示すように回転治具を中空ベアリングで支持し、ベアリングの外側からベルトで回転させるようにした。この結果、レーザーを照射するところは中空であり、X 線の発生を押さえることができた。

TW レーザーを用いた実験を行う際、高密度フォトン発生・計測実験装置内の再生増幅器のミラーが破損するという問題が生じた。実験的検討をおこなった結果、この原因はターゲットからの戻り光であることがわかった。具体的には、TW レーザーをターゲットに照射すると、ターゲットから反射した光が実験系を逆向きに戻っていく。通常であれば、この反射光は弱いため問題にはならないと考えられる。しかし、本装置では、この光がマルチパス増幅器に戻った時、Ti:Sapphire 結晶にはまだ励起エネルギーが残っており、戻り光が増幅されて再生増幅器へさらに戻って行く。その結果、再生増幅器の共振器を構成しているミラーに過剰なエネルギーが集中して破損されることが考えられた。



図4 従来のターゲット固定治具



図5 改造したターゲット固定治具

幾つかの解決法が想定されるが、早急に対応できる方法としてマルチパス増幅器に光アイソレータを追加した。光アイソレータは、ファラデー素子の両側に偏光子を配置した光学素子であり、入力光はそのまま透過するが、逆向きの戻り光は遮断させることができる。マルチパス増幅器の初段に光アイソレータを追加したところ、再生増幅器への戻り光はなくなり、ミラーの破損を防ぐことができた。

平成14年第3四半期においては、高速エネルギー粒子の種類とそれらのエネルギーを評価するための検討を行った他、以下に示す真空実験系の改良を行った。

ピーク出力がTW以上のチャープパルスアンプ(CPA)方式の超短パルス高密度レーザーでは、最終段のコンプレッサーを真空内に設置する必要があり、また、そのレーザーパルスが大気中でレーザー光を集光すると空気がプラズマ化されてしまい高い集光密度が得られない。我々の装置では、当初、レーザーシステム最終段のコンプレッサーと高エネルギー粒子発生装置を同一の真空環境内に設置する方式を採用した。

物質改变の実験を進めるにつれて、コンプレッサー内の光学部品(グレーティング、ミラー)が黒色化してきた。この結果、コンプレッサーの透過率が据付時の60%以上から36%に低下し、レーザー特性が劣化していることがわかった。黒色化の原因は、レーザー照射によってアブレーションされたターゲット材料(炭素、水素、フッ素等)がコンプレッサー内に飛散し、そこへパルス圧縮されたTWレーザーが照射されて炭化されたことがわかった。そこで、両真空系を分離するために真空系の改造を行った。

真空実験系の構成図を図6(a)に示す。(a)は改造前の構成図である。コンプレッサーと実験チャンバーはガラス窓付きゲートバルブによって分離されており、コンプレッサーを真空に保ったまま実験チャンバー内を大気にして実験準備をすることができる。高密度レーザー光をゲートバルブのガラス窓に通すことは危険であるが、レーザー光を減光すれば、上記ガラス窓を通して実験チャンバー内に導き光路調整に使用することができる。物質改变の実験を行う場合には、このゲートバルブを開けて両方の真空系を結合させた。

改造後の構成図を図6(b)に示す。コンプレッサーと実験チャンバーをつなぐパイプを改造し、ペリクルとバイパスバルブを追加した。設置されたペリクルとバイパスバルブの様子を図7に示す。コンプレッサーを真空排気する際はバイパスバルブを開けて、ペリクルを介さずにガラス窓付きゲートバルブまで排気する。レーザー照射実験をおこなう場合、実験チャンバーを真空排気後、バイパスバルブを閉じてからガラス窓付きゲートバルブを開ける。この結果、コンプレッサーと実験チャンバーはペリクルによって分離される。

ペリクルは、厚さ $2\mu\text{m}$ のニトロセルローズ薄膜でできており、透過率92%(反射率8%)、面精度 $1/2$ 波長(1インチ当たり)である。従って、TWレーザーを通して吸収が非常に少なく、膜厚が薄く分散量が小さいためパルス幅が広がることなく、面精度が高いのでレーザー光を歪ませることも少ない。

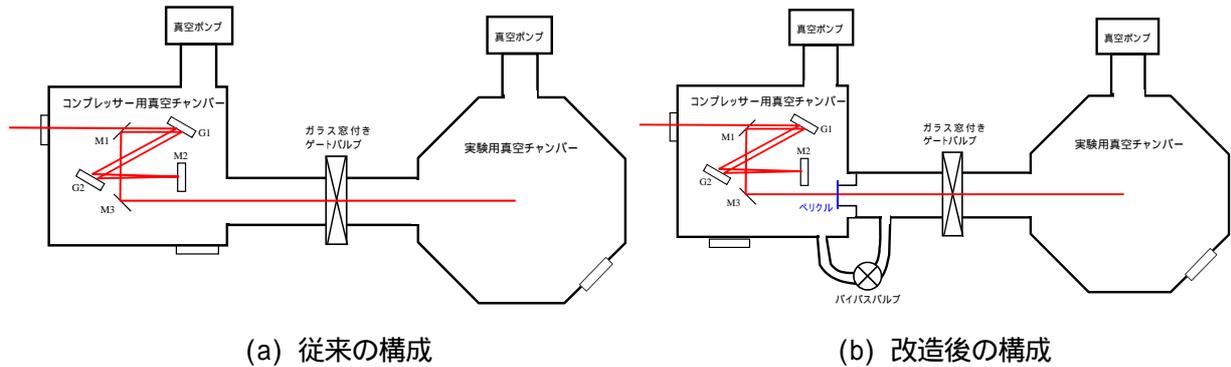


図6 真空実験系の構成図

上記改造を行った結果、コンプレッサー内の光学部品に新たな黒色化はなくなった。さらに、黒色化した光学部品を交換したところ、コンプレッサーの透過率は63%に回復し、ほぼ、レーザー設置時と同等の性能が得られるようになった。

以上と 高速粒子の検出 に示す作業とをもって、本テーマに必要最小限の実験装置を構築することができ、以下(重陽子発生、 陽電子放出核種生成 の項参照)で示すように、実際の実験を行うことができた。しかしながら、原理実証のみに留まらず、より実用的なイオン源の開発を行うためには、重陽子をより安定かつ大量に供給できるターゲットシステムと発生した重陽子の特性を迅速かつ確実に計測できるシステムが必要である。そこで、平成17年度は、これらの整備を行った。

レーザーによる陽電子放出核種の生成量を増加させるためには、連続して多くのレーザーショットが出来るようにする必要がある。そのためには、高エネルギー粒子発生ターゲットをテープ状にしてこれを駆動するとともに、テープ状ターゲットをレーザーの集光点に長時間正確に保つようなテープ状ターゲット駆動装置が必要不可欠である。そこで、テープ状ターゲット駆動装置にテープ状の PTFE メンブレンフィルター(重陽子は含まない)を装着して真空中でレーザーショットを実施した結果、以下のことがわかった。

- ・ 2 mm 程度の間隔でレーザー照射が可能であり、500 shots/mの所期の性能を確認できた。
- ・ 2 mm 間隔でのレーザー照射は、10 Hz でのレーザー運転時も可能であった。
- ・ 同時に行った X 線の観測では線量のショット毎の変動は小さく、ターゲット位置の変動が極めて小さいことが確認できた。

以上の事から、例えば、20 m の長さのテープターゲットを 10 Hz で照射した場合、1000 s 程度の照射を安定した条件で続けて行うことが可能であり、従来の 100 s 程度から大幅に改善できる。図8にレーザーショットを実施中のテープターゲットの様子を示す。

また、遠隔操作システムおよびテープ状ターゲット駆動装置用インターフェースを製作し、パソコン上からの遠隔操作を可能にした。この装置を用いて、真空中でのレーザーショットの動作確認を実施し、予定通りの性能が達成されていることを確認した。

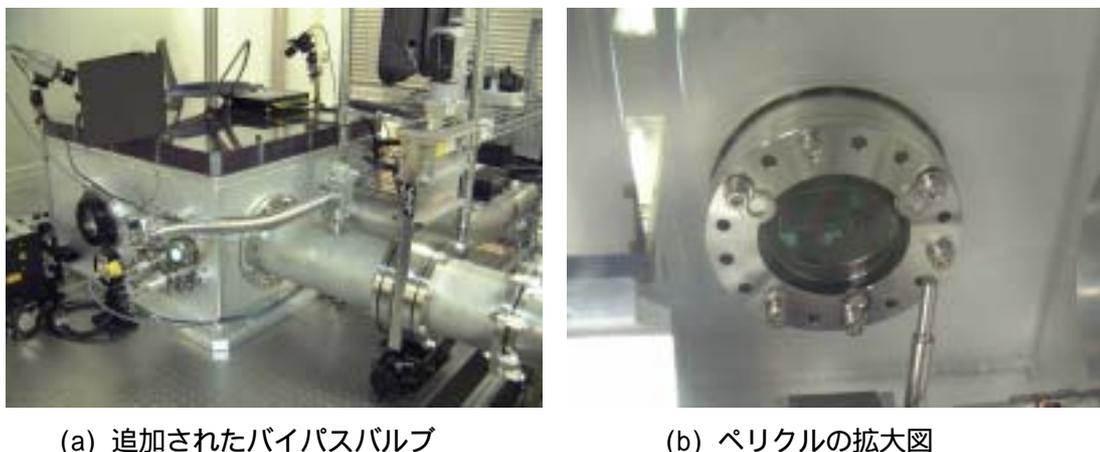


図7 改造後の写真



図8 10 Hzでのレーザーショットを実施中の様子
(テープは下から上に移動している)

高速粒子の検出

平成14年第1四半期では、平成13年度に改造した高密度フォトン発生・計測実験装置のマルチパス増幅パルス光からのピーク強度が約2 TWのフェムト秒光パルスを、ターゲットフィルムへ集光して照射し、高速粒子である陽子を発生させ、これを固体飛跡検出用の一般にCR-39と呼ばれるプラスチック板で検出する実験を行った。

CR-39は陽子等の荷電粒子が入射すると損傷を受け易い。従って、高速粒子を入射させた後に加熱アルカリ溶液で化学エッチングをおこなうことによって、損傷部分がエッチピットとして容易に観察することができる。一方、X線やγ線には影響を受けないので、加速粒子が発生したかどうかを確認することができる。

図9にレーザー照射用のターゲット治具の写真を示す。一発のレーザー照射によってターゲットフィルムには穴が開いてしまうため、以下に述べる機構を用いてレーザー照射位置を順次ずらすようにした。すなわち、真空チャンバーの側面フランジへ取付られたモーターの回転を真空チャンバー内へ導き、ターゲットを回転させる。この時、同時にターゲットの回転機構をXステージを利用して横方向に手動で移動させる。マルチパス増幅パルス光は周波数10 Hzで繰り返してターゲットへ照射されるが、こうした機構を利用することによって、ターゲット膜の中心から周囲に向かって螺旋状にレーザー光を照射することができ、連続して高速粒子を発生させることができる。

レーザー照射ターゲットはマイラー（ポリエステルフィルム）を用い、図10に示すようにターゲットの前方（レーザー照射方向）と後方にCR-39を配置した。

レーザー照射後、CR-39を6規定の水酸化ナトリウム水溶液を入れたポリ容器へ入れて、温度65で5時間放置した。エッチング終了後、水道水で充分洗浄し乾燥させた。

エッチング処理後のCR-39の様子を図11に示す。前方、後方に置いたプラスチック板ともに白濁した領域（写真中の白い枠内）が観測されており、高速粒子が前方と後方の両方向に放出されたことがわかった。図11の白濁した領域を顕微鏡で観察した時の写真を図12に示す。写真の全幅は約170 μmである。白濁部分には多くのエッチピットがあることがわかった。



図9 回転と移動機構を備えたターゲット治具

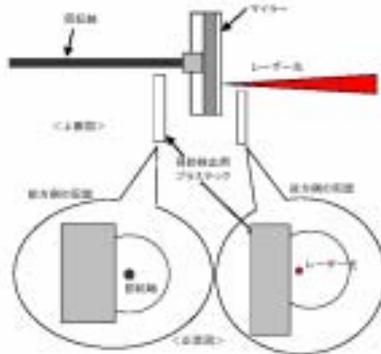


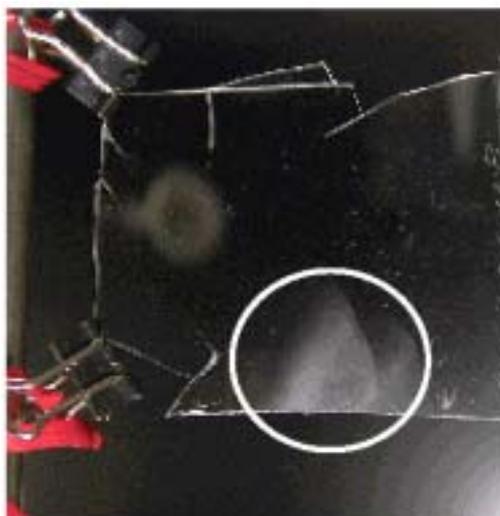
図 10 固体飛跡検出用プラスチック板の配置図

今回の実験のターゲットに用いたマイラーは、水素H、炭素C、酸素Oから構成されており、レーザー照射によって最も軽いHから電子がはぎ取られた陽子が放出したと考えられる。

以上、レーザー照射の前方と後方の両方向に陽子が放出されていることがわかった。

同位体生成を行うためには、ターゲットにレーザーを集光照射して高速の重陽子を効率良く発生させることが重要である。これまではCR-39を用いて、高エネルギー粒子がターゲットの前方と後方の両方向に照射されることを確認していた。しかし、固体飛跡検出用プラスチックを用いた高速粒子検出方法では粒子の種類・エネルギーを知ることができないという問題点がある。そこで、レーザー励起により発生させた高速粒子に関してより詳細な情報を得るための計測方法として、トムソンパラボラ型イオン分析器等の調査・検討を平成14年度においておこなった。

重陽子発生ターゲットとして、重水素化ポリスチレンを多孔質のフィルム状フィルターへ染み込ませたものを試作し、重陽子発生実験を開始した。このターゲットへレーザーを集光照射すると重陽子が発生できるものと期待される。しかし、このターゲットに不純物あるいは付着物として水素が存在したとすると、より軽い陽子が発生する可能性も否定できない。既に報告している固体飛跡検出用プラスチックを用いた方法は、高速粒子の存在を確認するためには簡便な方法であるが、粒子の種類を同定することはできないという問題点がある。もし、高速粒子の種類が既知であれば、検出面の前面にエネルギーフィルター（例えば、マイラーフィルム、アルミ薄膜）を付加することによって、粒子の加速エネルギーを大まかに知ることができる。しかし、粒子の痕跡を顕在化するためには数時間のエッチングが必要であり、リアルタイムに実験条件を変えた場合のモニター計測方法として利用することができない。



(a)前方配置



(b)後方配置

図 11 エッチング後の CR-37 の様子

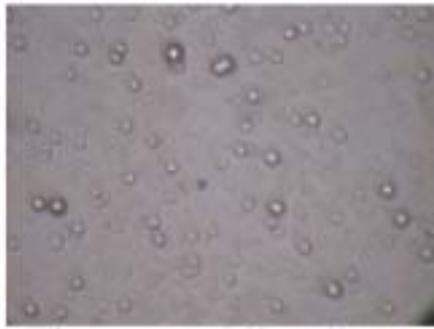


図 12 顕微鏡によるエッチピットの観察像 (画面全幅 : 約 170 μm)

高速粒子の種類 (質量) および、エネルギー (速度) 等を計測する方法を調査した結果、トムソンパラボラ型イオン分析器が適していることがわかった。トムソンパラボラ型イオン分析器の原理図を図 13 に示す。ターゲットから放出された高速粒子は 2 個のピンホールを通り、真っ直ぐ進む成分のみが取り出される。その後、粒子は進行方向と垂直な向きに電場と磁場を印加された領域を通り、電場によって X 方向に、磁場によって Y 方向に曲げられる。最後に粒子は検出面まで直進して検出される。ここで、検出器として上記プラスチック板を用いることもできるが、マイクロチャンネルプレート (MCP) と蛍光板の組み合わせを用いると、リアルタイムで計測できるという利点もある。

トムソンパラボラ型イオン分析器において粒子が検出される位置は、以下の式で与えられる。

$$x = (ZeE / Am_p v^2) L(D + L/2),$$

$$y = (ZeB / Am_p v) L(D + L/2)$$

Z: 粒子の電荷、A: 粒子の質量、v: 粒子の速度

E: 電界、B: 磁界、L: 偏向板の長さ、d: 偏向板の間隔、D: 検出器までの距離

e: 電子の電荷量、m_p: 陽子の質量

トムソンパラボラ型イオン分析器によって得られる測定結果 (図 13 参照) は以下のように解釈することができる。

単一の高速粒子のみの場合 : 一本の曲線が得られる。ここで、高速な粒子ほど原点近くで、低速の粒子ほど原点から離れて検出される。

複数種類の粒子がある場合 : 複数の曲線が得られる。ここで、重い粒子ほど原点近く (緑) で検出される。従って、重陽子と陽子は容易に区別することができる。

電荷量が異なる場合 : 同じ原子であっても、持っている電荷量が異なると別の曲線になる。例えば、同じ炭素 C のイオンであっても、そのイオン化価数が多いほど遠く (青) で検出され、容易に区別することができる

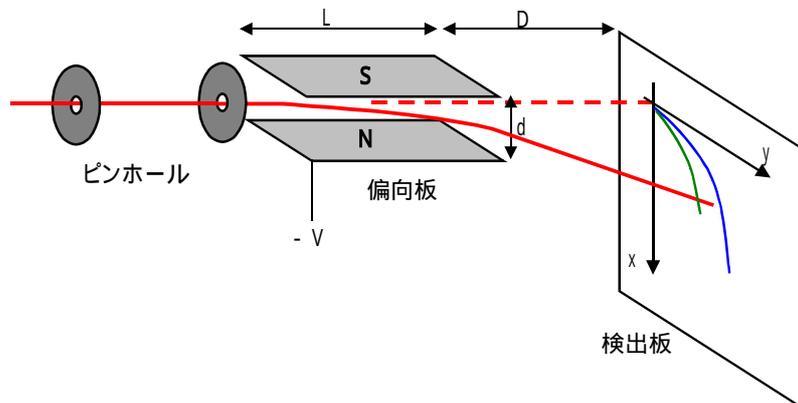


図 13 トムソンパラボラ型イオン分析器の原理図

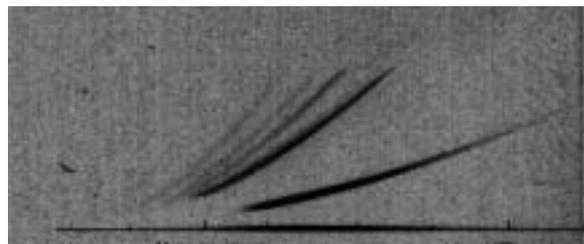


図 14 真空チャンバー内に設置されたトムソンパラボラ型イオン分析器(黄色い枠の中)

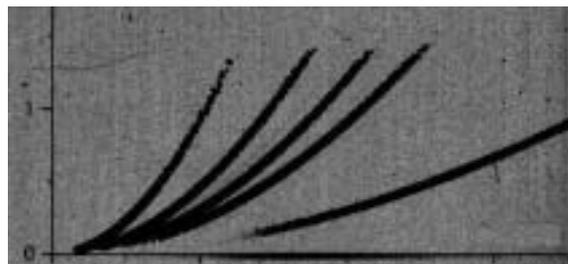
図 14 に真空チャンバー内に設置されたトムソンパラボラ型イオン分析器を示す。進行方向の長さ $L = 30 \text{ mm}$ 、電極間隔 $d = 5 \text{ mm}$ であり、磁場は角形のネオジ磁石（表面磁束密度 3 kG ）を対向して設置した。偏向板に印加する電圧は 2 kV とし、検出面には CR-39 を用いた。

平成 17 年度には、発生した重陽子の特性(エネルギー、個数など)を正確に計測し、かつ高速にデータ処理するために、トムソンパラボラ型イオンエネルギー分析器の高度化を試みた。この分析器を使用した場合の磁場分布の実測を行い、それを元にイオンの軌道解析計算プログラムを作成した。予備実験で得られたトレースと、計算ソフトで求めたトレース(陽子、1~4 価の炭素)の比較を行い、図 15 に示すように良く一致していることを確認できた。これにより、粒子同定とエネルギー分析を高精度におこなうことが可能になった。

これまでトムソンパラボラの検出面に使ってきた CR-39 は、イオンの照射後、3 時間程度のエッチングをしてイオンが作ったピットを拡大した後、顕微鏡でピットを観測することでイオントレースを解析しなければならず、解析に時間がかかるという欠点があった。そこで、CR-39 の代わりにイメージングプレートを用いる実験を行った。イメージングプレートは、専用のリーダーにかけることで、数分でイオンのスペクトル分布をパソコン上にデジタルデータとして取り込むことが可能である。図 16 に照射結果を示す。図の左側に、陽子が作ったトレースが確認できる。X 線であろうと思われるバックグラウンドを被っているものの、適当なデータ処理でイオンのスペクトルを抽出できる。鉛板の遮蔽を取り付けることで、X 線などのバックグラウンドを十分に除去すれば、実用になることを確認できた。



(a) 予備実験で得られたトレース



(b) 計算ソフトで求めたトレース

図 15 高精度化したトムソンパラボラ型イオン分析器による結果

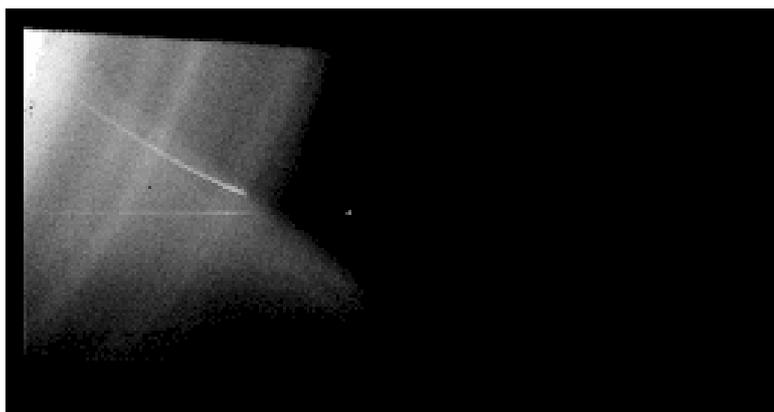


図 16 トムソンパラボラ型イオン分析器の検出面上に置かれたイメージングプレートで得られた陽子のトレース

重陽子発生

同位体生成を行うためには、レーザーをターゲットに集光照射して高速の重陽子を効率良く発生させることが重要であり、平成 15 年度第 1 四半期において、重陽子発生用ターゲットにレーザーの焦点を合わせる光学調整を行う方法を確立した。真空チャンバー内において集光位置の評価をすることは難しい。そこで、ターゲットへの最適な集光位置を知るために、レーザー照射によって生じる穴径と X 線発生量の関係を実験的に調べた。さらに、ターゲットへレーザー光を集光照射した際に発生するプラズマ発光のスペクトルを測定し、最適な焦点位置でプラズマ発光色が異なることを見出した。

図 17 に実験配置図を示す。ターゲットフィルムを固定している治具は実験チャンバーの外部から微動できる構造になっている。レーザー照射した時に発生する X 線を電離箱式サーベイメータで計測した。レーザー照射によって生じる穴の大きさは、CCD カメラで観察するとともに、実験終了後、チャンバー外にターゲットを取り出してデジタルカメラで近接撮影して穴径を評価した。

ターゲットを 5 mm 移動させた時の測定結果を図 18 に示す。焦点位置から大きくはずれていると大きな穴が開いているが、焦点位置に近づくにつれて穴は小さくなる。そして、2.5 mm 近辺で X 線が計測され、その時の穴径は近傍に比べて大きくなることがわかった。つまり、最適な焦点位置においてレーザーの集光強度が高くなり、ターゲット膜が大きく吹き飛んで X 線が発生した。

同様にターゲット位置を変化させながらプラズマ発生を計測した。図 17 に示すように、ターゲットフィルムからのプラズマ発光をファイバー付の分光器（オーシャンオプティクス社製 HR2000）に導いて計測した。なお、ファイバーの前にレーザー用のミラーを置いてレーザー光（波長 800 nm）を遮断し、プラズマ光のみを観測できるようにした。

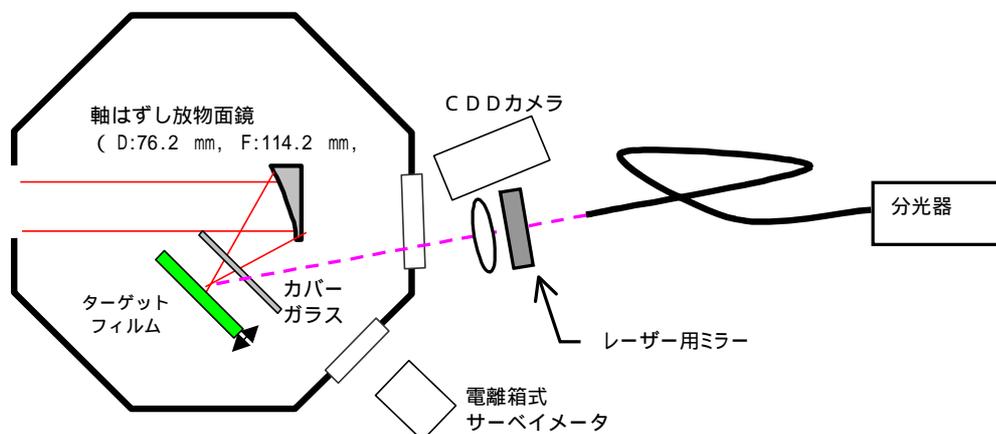


図 17 実験配置図

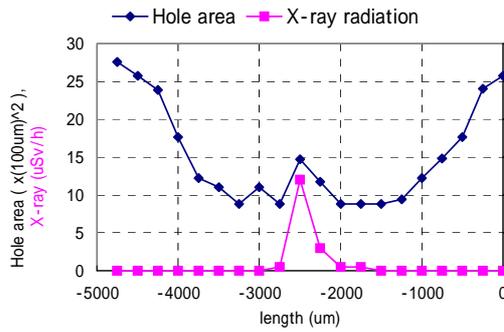


図 18 焦点位置を変えた場合の穴径と X 線発量の関係

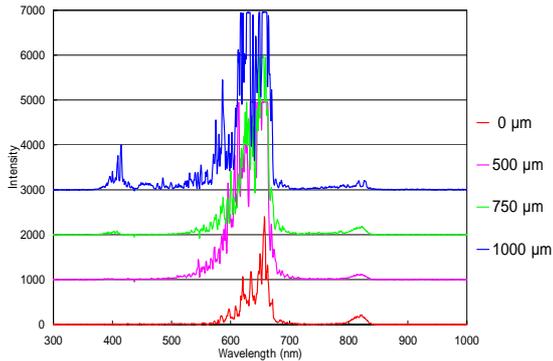


図 19 位置を変えた時のプラズマ発光

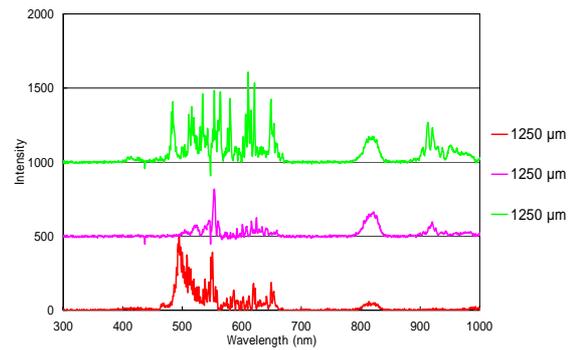


図 20 最適位置におけるプラズマ発光

図 19、20 に測定結果を示す。図 19 に示すように、ターゲットを前方に 1 mm 移動していくと、しだいに 600 nm 付近の赤いプラズマ発光が強くなるのがわかった。さらに、穴径を観測して最適であると考えられる位置 (1.25 mm) では、図 20 に示すように 450-600 nm の広い波長範囲にわたってプラズマ発光が生じており図 19 との違いは明確であった。

以上のように、穴径、X 線発生量、プラズマ発光のスペクトルからターゲットの最適位置を知ることができるのがわかった。本知見をもとに、「高速粒子発生装置」(出願番号: 2003-119029) を特許出願した。

以上の準備の下、平成 15 年度第 2 四半期に実施した実験では、浜松ホトニクス株式会社と共同で試作した重陽子ターゲット (PTFE メンブレンフィルターに染み込ませた重水素化ポリスチレン) と、比較用として厚さ 6 μm のマイラー (ポリエステルフィルム)、PTFE メンブレンフィルターを用いた。レーザーはピーク出力約 2 TW (パルス幅 約 50 fs) であった。実験結果を図 21 に示す。

図 21 (a) に示すように重陽子ターゲットの場合、複数の粒子による飛跡が観測された。このうち、は、マイラーの場合にも観測されていることから、陽子によるものと考えられる。は と比べると弱い、陽子よりも重い粒子によるものであり、重陽子によるものであると考えられる。は さらに重いイオンであり、これらは PTFE に含まれる炭素 C またはフッ素 F が多重イオン化したものであると推定される。

なお、は、レーザー調整時に電圧を印加していなかったために、このときに磁場のみによって X 方向に曲げられた粒子による飛跡である。(b)、(c) では、調整時にも電圧を印加したため、に相当する線は見られない。

重陽子ターゲットでは、ポリスチレンのすべての水素 H を重水素 D に置換してあり、本来、水素 H は含まれていない。そのため陽子は観測されないはずである。また、同様に、(c) PTFE メンブレンフィルターの場合、PTFE の成分である炭素 C とフッ素 F のみの粒子が観測されるはずである。しかし、(b) と同様に陽子による の線も観測されている。これらのことから、重陽子ターゲットの基板として用いている PTFE メンブレンフィルターに水分等の不純物が吸着し、レーザーを集光照射した際に陽子が発生したと考えられる。

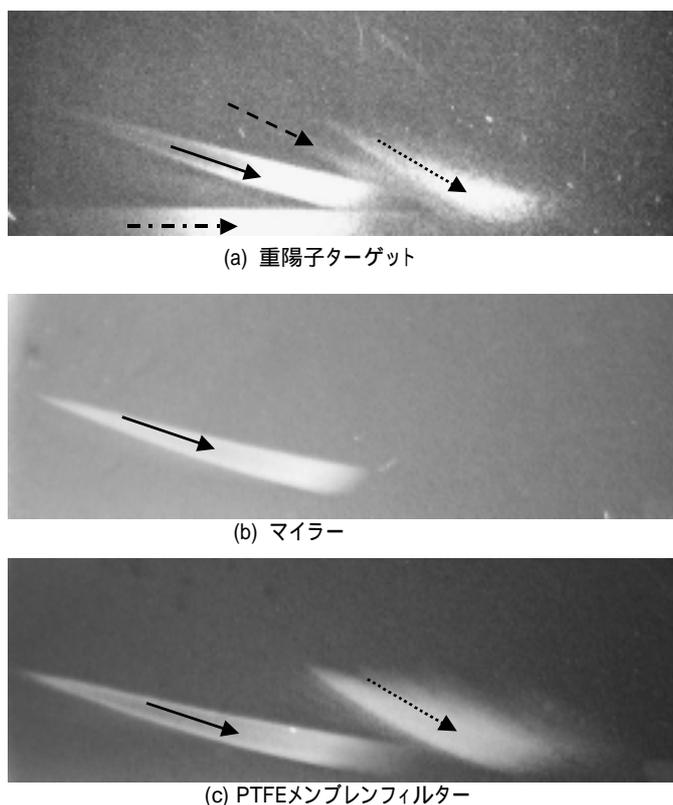


図 21 トムソンパラボラ型イオン分析器による実験結果

平成 15 年度第 3 四半期において、このデータをより詳細に解析した。図 22 に重陽子発生用ターゲット (PTFE メンブレンフィルターに染み込ませた重水素化ポリスチレン) を用いた場合のトムソンパラボラ型イオン分析器による測定結果と解析結果を示す。

レーザー照射の実験条件は、パルス幅 50 fs、パルスエネルギー 123 mJ、ピーク出力約 2.5 TW である。なお、実験時のレーザーショット数は 640 発であった。トムソンパラボラ型イオン分析器の設定は、ピンホール直径 0.4 mm、電界 6 kV/cm、磁界 510 mT、検出器 CR-39(バリオトラック)とした。

図 22 には、重陽子 D^+ と陽子 H^+ を仮定した場合に得られる粒子の持つ主なエネルギーの位置の計算値も実験結果と一緒に示した。この図から重陽子と陽子がともに 1 MeV 以上の最大エネルギーを持つことがわかった。

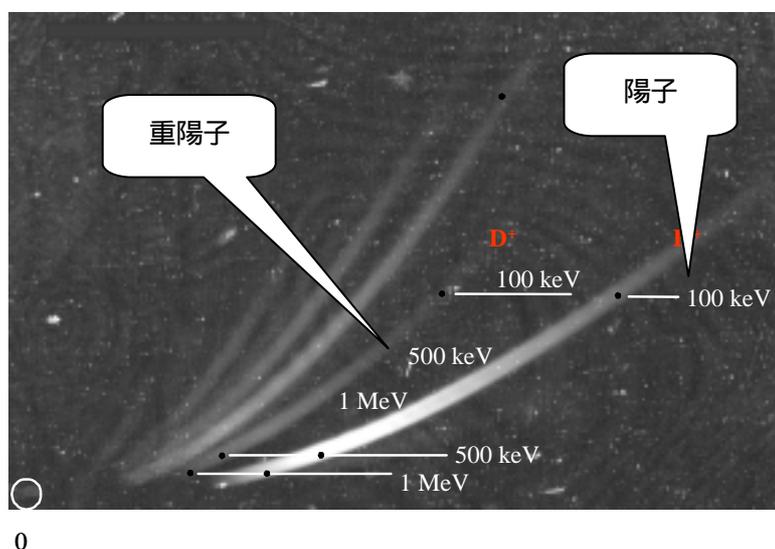


図 22 重陽子発生ターゲットを用いた場合の測定・解析結果

平成 16 年度は、15 年度までの結果を受けて、ターゲットの最適化条件の実験的検討をおこなった。実験配置図を図 23 に示す。厚さ 75 μm の多孔質 PTFE フィルターへ重水素化ポリスチレンを染み込ませた重陽子発生ターゲット(D_PTFE)に対して垂直に 2.4 TW(120 mJ, 50 fs)のレーザーを軸はずし放物面鏡(OAP)を用いて集光照射した。集光強度は約 3×10^{18} W/cm² である。ターゲットの裏面垂直方向に発生したイオンをピンホール(0.4 mm)でコリメートし、これをトムソンパラボラ型イオン分析器で測定した。CR-39 上に得られたイオントレース(エッチピット群)の各点におけるエッチピット密度を計測し、立体角を考慮してエネルギー分布を算出した。また、D_PTFE ターゲットによる重陽子発生の有効性を確かめるため、厚さ 6 μm のマイラー(Mylar)へ重水素化ポリスチレンを 3 μm 厚でコートしたターゲット(D_Mylar)を比較用サンプルとして別途作成し、同様に実験・測定をおこないその結果を比較した。

得られたエネルギー分布の測定結果を図 24 に示す。重陽子に注目すると、D_PTFE ターゲットから得られる最大エネルギーは 1.6 MeV であり、D_Mylar ターゲットから得られる 0.9 MeV より大きかった。また、発生量についても D_PTFE ターゲットでは、D_Mylar ターゲットよりも 1 桁以上多いことがわかった。これにより、多孔質膜に染み込ませたターゲットが高速重陽子生成に有効であることが実験的に確認できた。

D_PTFE ターゲットを用いた場合に D_Mylar ターゲットに対して優位な重陽子発生をおこなうことができた理由として、このターゲットの内部構造がサブミクロンスケールかつファイバー状の多孔質構造であることが考えられる。すなわち、多孔質構造によってレーザー光の透過率が向上してイオン化領域がターゲット裏面にまで増大し、その結果、裏面より抜け出る高速電子数が増加して、静電場加速機構によってターゲット内部から引き出されるイオンの数が増加したと推測される。

今回、水素 H を含まない D_PTFE ターゲットを用いたにも関わらず、D_Mylar と同様に多くの高速重陽子が発生し、かつその最大エネルギーも高かった。これは、先の静電場による加速機構が生じていたことを示している。

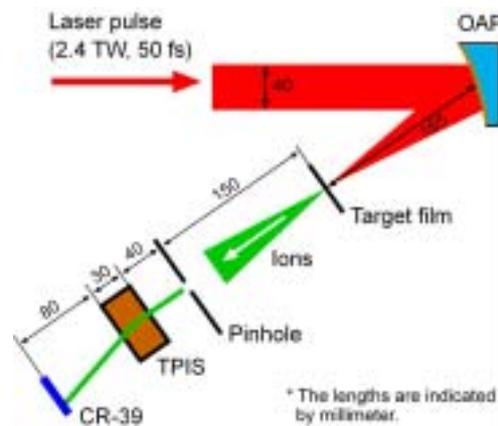


図 23 実験配置図

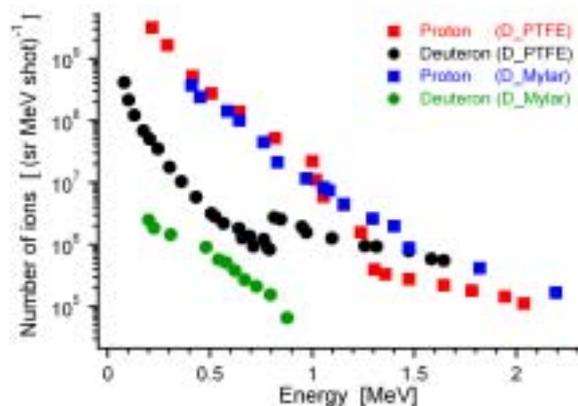


図 24 各薄膜ターゲットにおける重陽子と陽子のエネルギー分布

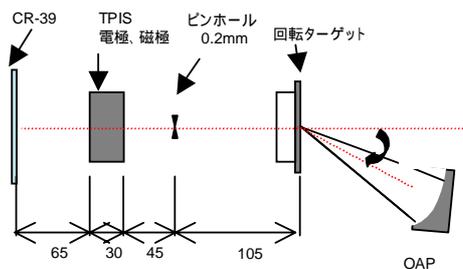


図 25 実験配置図

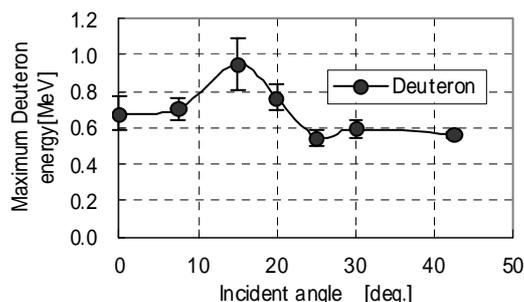


図 26 重陽子に対する実験結果

平成 16 年度第 3 四半期では、高エネルギーイオンの発生効率を向上させるのに最適なレーザー照射条件を決定するための実験をおこなった。

レーザーをターゲット面に対し P 偏光で入射させる時、入射角度に依存してターゲットによるレーザーのエネルギーの吸収率が変化する事が理論的に予想されている^[1]。そこで、最適な入射角度を決定するために図 25 に示す配置で実験をおこなった。真空度 10^{-3} Pa のチェンバー内にパルスエネルギー 120 mJ、パルス長 50 fs、ビーム径 40 mm のレーザーパルスを入射し、焦点距離 185 mm の放物面鏡(OAP)を用いて集光した。ターゲットへの入射角度()を変化させ、それぞれの角度におけるイオンの発生状況を観測した。ターゲットには、D_PTFE を用いた。発生イオンのエネルギーおよび生成量の測定はトムソンパラボラ型イオン分析器(TPIS)を用い、イオンの検出には CR-39 を用いた。

図 26 に重陽子に対して得られた実験結果を示す。横軸はレーザーの入射角を、縦軸は重陽子の最大エネルギーを示している。図中のエラーバーは、TPIS のアクセプタンスの大きさに起因する不定性を考慮したものである。入射角度が 15 度の時に重陽子の最大エネルギーが得られた。放射性同位体を生成させる上で有効な 100 keV 以上の重陽子の生成量は、7.5 度、20 度、及び 25 度において、顕著な増加が見られた。以上の結果より、従来は 0 度入射で実験をおこなっていたが、角度 10 ~ 20 度の方がより効率的に重陽子を発生できることが明らかになった。

[1] “The Physics of Laser Plasma Interactions”, W.E.Kruer The Advanced Book Program, 2001.

平成 17 年度第 2 四半期では、ターゲットの材質についての研究をおこなった。レーザーイオン源のイオン加速のメカニズムは、まずレーザーによってターゲット内の電子が加速され、その電子に引っ張られてイオンが加速されると考えられている。そこで、自由電子を多量発生させることで発生粒子の高エネルギー化と粒子数の増加を検討した。自由電子を多量発生すると予想される金属とプラスチックの両方の利点を併せ持つターゲット材料として、導電性プラスチックに着目し、以下の 2 種類のシートについて、レーザー照射実験を行った。

(A)炭素を大量に練りこんで導電性を持たせたオーソドックスな導電性プラスチック

半導体保存用の袋として市販されている。厚さは 50 μm 、抵抗値は、テスターのピンを 1 cm 程度の距離で当てた場合、4 k 程度であった。

(B)導電層と絶縁層を有す 2 層構造の導電性シート

厚さは 80 μm 。導電面は、上と同じ測定法で 5 M 程度。導電面側にレーザーを照射した。

結果は、トムソンパラボラ型イオンエネルギー分析器で得られたトレースをスキャナーで読み取ることによって評価した。その結果、(A)の場合、炭素(4 価)とプロトンの最大エネルギーが、それぞれ、 950 ± 50 keV、 1.1 ± 0.1 MeV であることがわかった。顕微鏡下で、より詳細に観察すれば、さらに高エネルギーイオンの発生を示すピットが見つかると思われるが、スキャナー観測でも十分に高エネルギーなイオンが確認できた。一方、(B)の場合、ほとんどイオンが確認できなかった。



図 27 PTFE ターゲットから放出された各種粒子のトレース

重イオンの発生に関しては、PTFE ターゲットにレーザー光を集光照射して発生した粒子をトムソンパラボラ型イオン分析器を用いて計測・評価した。得られた各種粒子のトレースを図 27 に示す。トムソンパラボラ型イオン分析器では、磁場による水平方向の偏向から運動エネルギーを求め、電場による垂直方向の偏向量からイオンの比電荷を求めることによって、粒子のエネルギーと種類を同時に同定することができる。図 27 に示されたトレースを解析した結果、陽子の他に、1~4 価までの炭素イオン(C^{1+} - C^{4+})が放出されていることを確認できた。

陽電子放出核種生成

平成 14 年度において、実験系の整備と並行して行った短寿命放射性同位体生成の基礎実験では、浜松ホトニクス株式会社中央研究所との共同研究により試作された重陽子発生ターゲット（PTFE タイプメンブレンフィルターに染み込ませた重水素化ポリスチレン）と放射性同位体生成ターゲット（メラミン樹脂）を用いた。

メラミン樹脂には炭素 C と窒素 N が含まれており、加速された重陽子によって $^{12}C(d, N)$ ^{13}N 、 $^{14}N(d, N)$ ^{15}O の反応が生じる。これらはポジトロン CT 用短寿命放射性同位体に適した反応であり、例えば窒素 ^{14}N ガスをターゲット材料に用いることによって酸素 ^{15}O ガスを作りだし、これを水に溶かし込むことによってポジトロン CT 用標識薬剤としての水を合成することができると考えられる。

短寿命放射性同位体生成の実験配置を図 28 に示す。ピーク強度 2 TW のフェムト秒光パルスをも、重水素化ポリスチレンターゲットへ集光照射し、前後方向に高エネルギーの重陽子を発生させ、回転治具に接近させて配置したメラミン樹脂へ重陽子を入射した。この時、ターゲット治具を回転させると同時に水平方向に移動することによって、レーザーを螺旋状にターゲットフィルムに照射した。本実験では連続照射時間は 2 min 40 s であった。

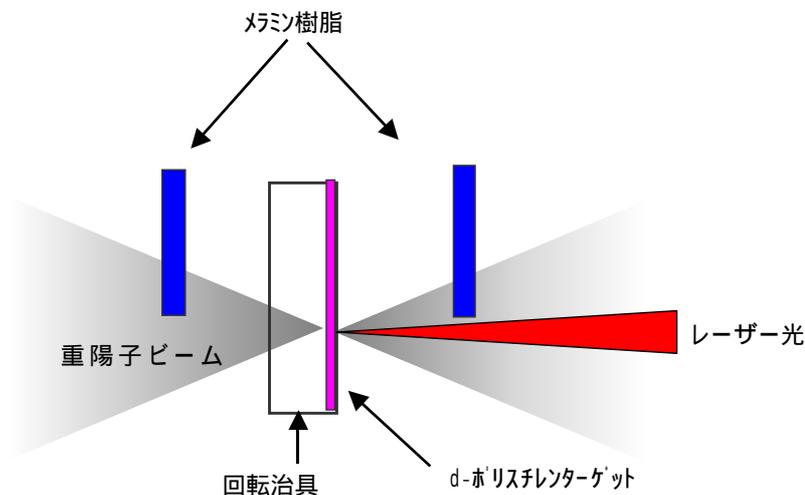


図 28 短寿命放射性同位体生成の実験配置図

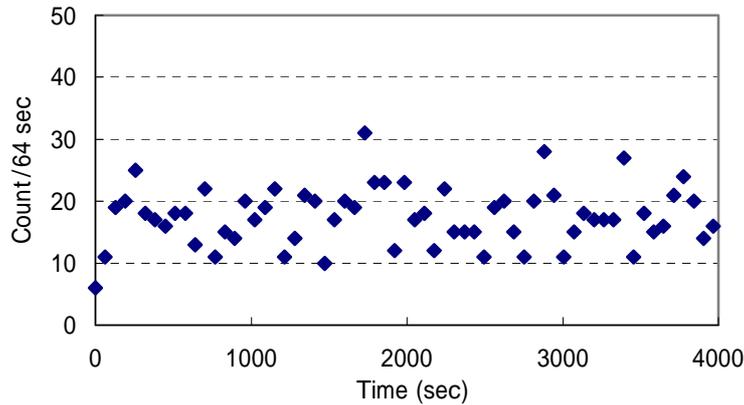


図 29 メラミン樹脂放射化実験後の放射線計測結果

レーザー照射終了後、実験チャンバーを急速にリークしてメラミン樹脂を取り出し、放射線計測器を用いてメラミン樹脂から放出される放射線量を計測した。陽電子は電子と結合し対向する方向に 511 keV の線を放出する。従って、放射線計測器では、511 keV の線のみを計測し背景ノイズを減らすために、エネルギーウィンドウを設定してコインシデンス計測（同時計数）を行った。今回の実験では、両方の検出器のウィンドウを 100 keV 以上に設定した。

レーザー照射終了後、65 s 経過してからの測定結果を図 29 に示す。メラミンターゲットの場合、上述したように $^{12}\text{C}(\text{d},\text{N})^{13}\text{N}$ 、 $^{14}\text{N}(\text{d},\text{N})^{15}\text{O}$ の反応が生じて、 ^{13}N からは半減期 9.96 min の放射線の減衰が、 ^{15}O からは 2.04 min の減衰が計測されるはずである。しかし、今回の実験では図 29 に示すように定常な背景ノイズ信号しか観測されておらず、メラミン樹脂の放射化は確認できなかった。

この結果を受けて、放射化を確認するためのデータ解析法について、次のような検討をおこなった。放射化を確認するための実験は、放射化ターゲットを対向するシンチレータ付光電子増倍管の間に置き、陽電子の対消滅に伴い放出される対向線を計数することによりおこなう。放射化されていれば、特徴的な指数関数的な計数値の減衰がみられる。

図 30 は、半減期 597.6 s の ^{13}N が生成されその計数値 N が

$$n = A + B \exp\left(-\frac{0.693}{597.6}t\right) \quad A = 10, \quad B = 3$$

で与えられると仮定したシミュレーションによって生成した計数値である。実験で得られたこのようなデータに、次の 2 つのモデルを適合させ、どちらが尤もらしいかを比較して、放射化されたかどうかの判断規準とする。

モデル 1：計数値は、平均値が上式で与えられるポアソン分布に従う。

モデル 2：計数値は、平均値が一定なポアソン分布に従う。

モデルの尤もらしさの規準としては AIC（赤池情報量規準）を用い、より小さい AIC を与えるモデルを選択する。図 30 のデータに対しては、

$$\text{AIC}(\text{モデル 1}) - \text{AIC}(\text{モデル 2}) = -4.82$$

であり、モデル 1 が選択され、放射化によって ^{13}N が生成されたといえる。

AIC によりモデルを選択したときの信頼度は、シミュレーションによって確認できる。図 31 はモデル 2（定常的なポアソン分布のバックグラウンド）から生成した 1000 個のデータセットに指数関数的に減衰する計数値を仮定したモデル 1 をフィッティングして得られた二つの母数 A、B の分布を示したものである。モデル 1 との AIC の差が -4 以下のデータ（赤色で表示した点）の数はデータ 1000 個のうちの 12 個、すなわち 1% 程度である。したがって、実際の計測データに対して AIC の差が -4 以下であるとき、モデル 1 を選択して放射化されていると判断する際の信頼度は 99% 程度であるといえる。

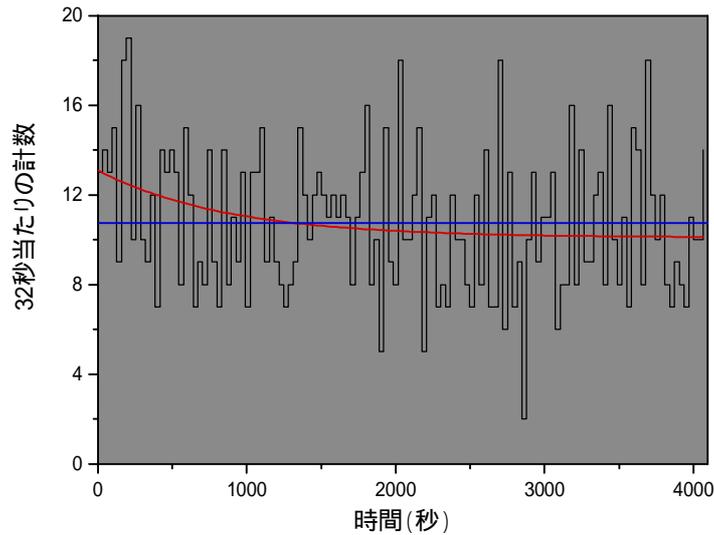


図 30 計数のシミュレーション

黒：計数值、赤：モデル（定常バックグラウンド+指数関数的減衰）
 青：モデル（定常バックグラウンド）

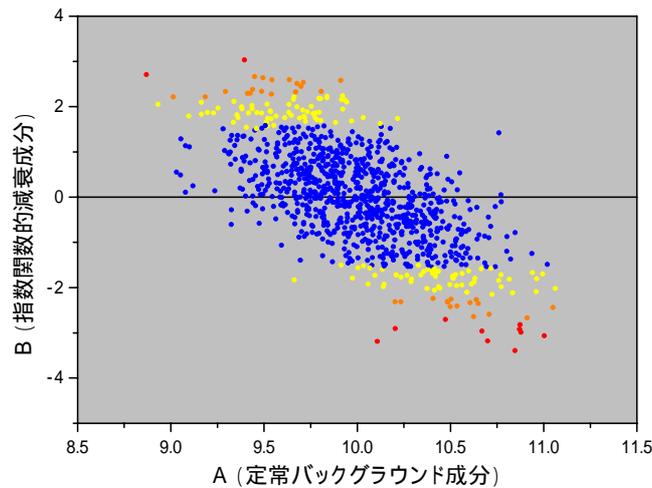


図 31 モデル（定常的なバックグラウンド）のシミュレーションデータ 1000 個に対して、
 モデル（定常バックグラウンド+指数関数的減衰）を適用した場合に得られた
 母数 A、B の値に関して、それぞれの AIC 値を色分けした図。
 モデル とモデル の AIC の差は、青：0 以上、黄：0 ~ -2、橙：-2 ~ -4、赤：-4 以下

以上の準備の下、平成 16 年度において、陽電子放出核種生成実験をあらためて実施した。陽電子放出核種生成実験の概念図を図 32 に示す。重陽子発生ターゲットには D_PTFE ターゲットを用い、2.4 TW(120 mJ、50 fs)のレーザーを軸外し放物面鏡を用いて集光照射した。ターゲットの裏面と表面垂直方向に、D_PTFE ターゲットから 40 mm 離れた距離にメラミン樹脂を置き、発生した重陽子を入射させた。55 s のレーザー照射の後、線対を計数した。測定結果を図 33 に示す。

測定結果の解析では最尤法を用いて、放射化量・崩壊定数などのパラメータを推定した。さらに以下に示す 2 つのモデルを仮定し、どちらが尤もらしいかを AIC を用いて比較し、より小さい AIC を与えるモデルを選択した。

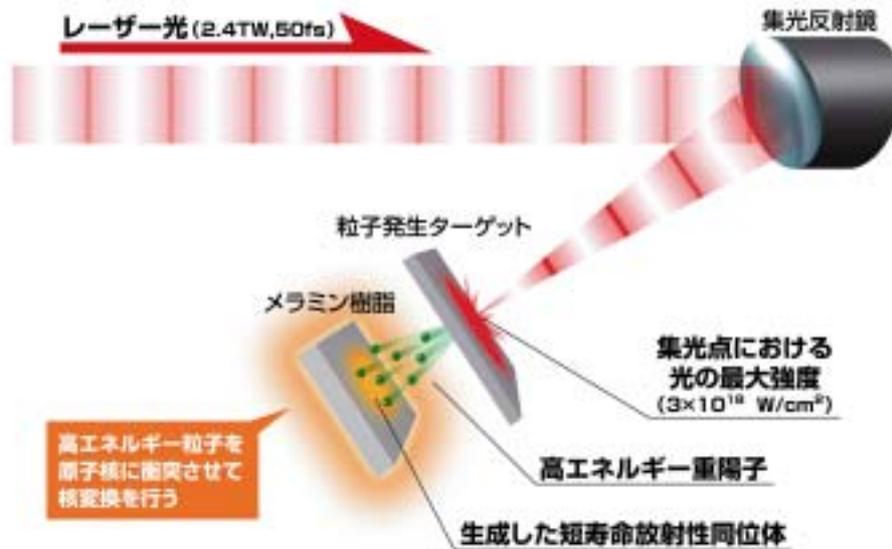


図 32 陽電子放出核種生成実験の概念図

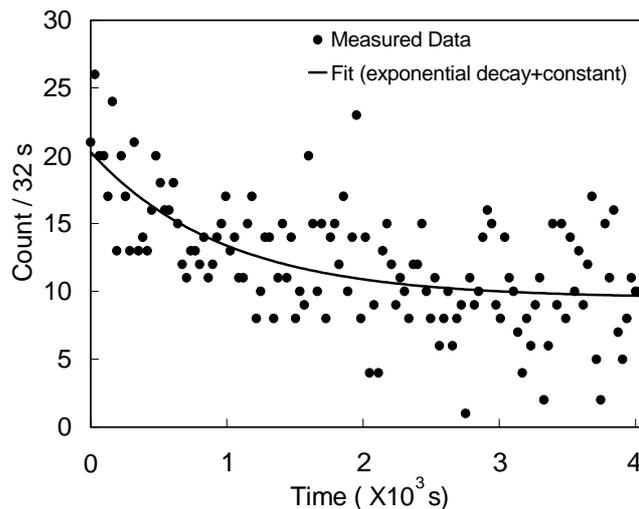


図 33 放射化ターゲットからの対向線の計測結果

モデル : 計数値は、一定の平均値と指数関数的な減衰値との和のポアソン分布に従う。

モデル : 計数値は、一定の平均値 (背景ノイズ) のポアソン分布に従う。

図 33 のデータに対しては、

$AIC(\text{モデル}) - AIC(\text{モデル}) = -71$ であり、モデル が選択され、放射性同位体による指数関数的な減衰があることが確認できた。なお、この減衰特性から、得られた放射性同位体の半減期は 680 s であることがわかった。この値は $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ 反応によって生成される ^{13}N の半減期 9.97 min とほぼ一致しており、 1.00 ± 0.14 Bq の ^{13}N が生成されたと結論づけることができる。

上記のように、高エネルギーの重陽子をメラミン樹脂に照射し、 $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ の過程によって、メラミン樹脂中の炭素を窒素に物質改変して、放射化することに成功した。結果として、世界で初めてテラピルトップレーザーによる短寿命放射性同位体生成を実証した。

特許件数 : 1

論文数 : 7

口頭発表件数 : 13

プレス発表件数 : 1

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

本事業では、世界で初めてテーブルトップレーザーによる短寿命放射性同位体生成に成功した。また、高い技術レベルで実現した波形整形かつ波面補償したテラワットパルスを利用して、先進的な研究を実施し、有効な知見を得た。よって、高い水準で研究を推進し、フェーズ までの研究を完了した。

実用化に向けた波及効果

PETに必要な短寿命放射性同位体を高密度レーザーによって生成できるようになると、大型で放射線の遮蔽が必要なサイクロトロンが不要になるので多くの医療機関においてPETを容易に設置できるようになり、ガン検診等の診断を普及することができる。また、将来的には、車載用のPET診断施設も期待される。

(5) 残された課題と対応方針について

本研究テーマでは、フェーズ 、 における当初の目標を十二分に達成したので、残された課題は特にない。フェーズ では、参画企業においてリーディングプロジェクト等を利用して研究を継続し、実用レベルのレーザーによる短寿命放射性同位体生成を実現するための条件を明確にしてい