

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 ウェルズ スティーブン ロバート

カルシウム (Ca) 同位体は、様々な点から興味深い。Ca-40 および Ca-48 は、陽子、中性子数とも魔法数をもつ原子核である。特に Ca-48 は 2 重ベータ崩壊モードをもつ最軽量原子核である。また Ca-43 は、アルカリ土類元素で核スピンを有することから、イオントラップ冷却イオンにおいて量子ビットとしての利用可能性が追求されている。また、Ca-41 は、支配同位体 Ca-40 が中性子を吸収し生成される核種であり、 10^5 年の半減期で電子捕獲により壊変する。原子力分野では、この反応が、コンクリート放射化の原因の 1 つであり、廃棄物処理の上でクリアランスレベルの確認が望まれる。また、極微量同位体であることから、年代測定やトレーサー利用への可能性も模索されている。一方、壊変エネルギーが小さく、半減期も長いことから、放射線計測が難しい難測定核種の 1 つに挙げられている。以上のように、Ca 元素の同位体選択的な濃縮・分析の実現は、様々な分野で新たな可能性を有している。そこで、本研究では、電子遷移における同位体シフト（原子核の質量数に基づく電子構造の差異）を利用した、複数のレーザー波長を用いた光共鳴励起法に着目し、その可能性を実験により定量的に評価した。

第 1 章では、各 Ca 同位体のもつ特徴を概観したのち、本研究の目的を述べている。特に原子力分野での必要性も踏まえて、Ca-41 に着目することを述べている。また、量子情報の観点からは Ca-43 も同様に興味深く、この 2 核種は同一の核スピンを有していることから、類似の電子構造を持っている。これらに対して、同位体ごとに異なる同位体シフトや超微細分裂を利用した多段階の共鳴励起による選択手法を実験により検討することを第 1 の目的としている。次に、原子の全角運動量の磁気量子数による光学遷移則を利用した選択法の実験的評価を第 2 の目的としている。さらに、イオントラップ・レーザー冷却法による選択率向上の可能性を検討することを 3 つ目の目的としている。また、Ca の分光研究に関するこれまでの研究についてまとめられている。

第 2 章では、本研究で用いた理論についてまとめられている。具体的には、密度行列に基づく光共鳴励起、核スピンの誘起される超微細構造、光スペクトルにおける選択率、光選択則、イオントラップ、レーザー冷却などについて説明がなされている。

第 3 章では、Ca 原子の選択的励起において重要となる励起状態、特に Rydberg

高励起状態の分光実験についてまとめられている。まず、Rydberg 状態の特徴についての説明の後、特に $4s^2\ ^1S_0 \rightarrow 4s4p\ ^1P_1 \rightarrow 4s4d\ ^1D_2$ のスキームを経て励起可能となる $4snp$ あるいは $4snf$ 状態の分光実験を行うことが述べられている。次に、これを実現するための実験装置について説明されている。具体的には光源として 4 台の外部共振器型半導体レーザーと HeNe レーザーを参照する共振器を利用した波長安定化システム、四重極質量分離装置を有する真空容器から構成されている。Ca 原子は、真空容器内で炭素ろつばを抵抗加熱することで発生され、多段階光励起によりイオン化された後、質量分離装置を通すことで、同位体ごとにイオンとして検出される。本装置を利用して、主量子数 25 から 30 までの $4snp\ ^1P_1$ 準位について同位体シフトを測定した。また主量子数 23 から 28 における Ca-43 の $4snf\ ^1F_3$ における $F=13/2$ の同位体シフトを明らかにし、既往の研究と差異がないことを示した。Ca-43 の分光結果を用いて、King plot により Ca-41 の同位体シフトを推定した上で、同位体シフトによる選択率を計算から 10^3 程度と評価した。

第 4 章では、前章での同位体シフトを用いて、同位体選択的励起・イオン化についての実験的考察を行った。同位体シフトに加えて、偏光による磁気量子数の選択則を使って偶数同位体と奇数同位体の選択性を高める手法について述べられている。具体的には、 $4s^2\ ^1S_0 \rightarrow 4s4p\ ^1P_1 \rightarrow 4s5s\ ^1S_0 \rightarrow 4snp\ ^1P_1$ のスキームを用いた実験を行った。各遷移の飽和強度の測定を行い、3 段目のレーザー強度が飽和強度に達していないことを確認した。次に、励起レーザー光の偏光方向を操作し、偶数同位体の遷移を禁制として、奇数同位体のみを励起できるスキームにより、偏光角度依存性を実験により測定した。その結果、偏光による選択率は 10^3 程度であった。

第 5 章では、イオントラップを用いた手法について検討を行っている。ICP-MS で同位体選別された Ca イオンを線形四重極トラップで捕獲した後、2 波長のレーザー光により Ca イオンをレーザー冷却し、イオンが発する蛍光を観測することで捕獲同位体イオンの個数を測定する技術を説明している。Ca-40 により動作確認を行い、個別イオンの可視化を行った後、Ca-43 を対象にした実験を行った。具体的には、超微細構造遷移に対応するために、866nm レーザー光を音響光学素子で波長分割化するためのコンピュータインターフェイスを開発し、それを用いて、Ca-43 イオンの冷却に成功した。

第 6 章では、本論文の結論と今後の展望が述べられている。具体的には、Ca 同位体の高励起 Rydberg 状態の複数の系列について、分光測定を行い、その同位体シフトおよび超微細構造係数を実験により導出した。さらに、それをもとにして、Ca-41 の同位体シフトを予測した。また、異なるスキームを利用して偏光を利用した偶奇同位体選択励起を行い、Ca-40 と Ca-43 の選択率を実験に

より評価した。これらの結果から、同位体シフトと偏光選択励起を同時に利用することで、**Ca-41**において選択率を 10^7 程度と評価した。さらにイオントラップ・レーザー冷却法を用いてさらに高選択率が得られる可能性を示した。

以上を要するに、本論文は、**Ca** 同位体に対してレーザー光励起を行うことで選択的励起を実現できることを実験的に示した研究であり、当該分野への貢献は小さくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。