

外97-17

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

ウラン同位体分離用レーザーシステムの  
高性能化に関する研究

申請者

藤井 隆

TAKASHI FUJII

1997 年 10 月

軽水炉型の原子力発電では燃料として、天然ウランにおいて0.71%しか存在しない $^{235}\text{U}$ を3%程度まで濃縮した濃縮ウランが用いられる。このウラン濃縮技術として、現在ガス拡散法や遠心分離法などが用いられているが、これらに比べて濃縮効率が良く低コスト化が期待できる方法として、原子レーザー法ウラン同位体分離が提案され、各国で研究・開発が行われている。

原子レーザー法ウラン同位体分離は、 $^{235}\text{U}$ と $^{238}\text{U}$ 原子の電子エネルギーレベルがわずかに異なる同位体シフトを利用し、レーザーにより $^{235}\text{U}$ を選択的に分離するものである。分離すべき $^{235}\text{U}$ と $^{238}\text{U}$ の光吸収波長の差は数GHzと小さく、しかも $^{235}\text{U}$ に比べて $^{238}\text{U}$ の光吸収強度は極めて大きい。さらに $^{235}\text{U}$ の光吸収スペクトルは超微細構造を有する場合が多い。このため、スペクトル幅の狭い高出力・高繰り返し回のレーザー光を発生し、そのレーザー波長を $^{235}\text{U}$ の光吸収スペクトルに正確かつ安定に同調する必要がある。このようなレーザーとして銅蒸気レーザー励起色素レーザーシステムが選択され、開発が行われてきた。

日本において原子レーザー法の実証的な研究がスタートした当時、レーザーの長寿命化、波長制御等、レーザー開発において解決すべき問題は山積みであった。また上記のレーザーは、原子レーザー法の実証的な研究がスタートした当時最も完成されたレーザーとして選択されたが、銅蒸気レーザーは気体レーザーであり色素レーザーは液体レーザーであるため、どちらも取り扱いが大変で装置も大型化する。原子レーザー法の実用化研究が本格化した時からすでに10年以上が経過しており、その間、半導体レーザーの短波長化・高出力化、Nd: YAGレーザー等各種固体レーザーの高出力化が著しく進展した。原子レーザー法のコストを低減し、技術的により優れたものにするためには、現在のシステムにとらわれず、新しいレーザー技術を適用していくことが重要である。

本研究では、原子レーザー法ウラン同位体分離の低コスト化を目的とし、レーザーシステムの長寿命化および波長制御に関する研究を行った。まず、現在用いられている銅蒸気レーザー励起色素レーザーシステムの高性能化に関して、基礎的な研究を行った。次に、全固体化された次世代のレーザーシステムを提案し、その基礎特性を測定した。本論文は6章から構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、目的および概要を述べている。

第2章では、銅蒸気レーザー励起電源の長寿命化を目的とした、10kW固体化電源の開発について述べている。まず、磁気パルス圧縮回路における過飽和インダクタの磁心損失に関して検討を行い、磁心に生じる渦電流損失は磁束密度変化速度の最大値 $(\text{dB}/\text{dt})_{\text{max}}$ に比例することを実験により示した。この結果より、磁性体に生じる損失を圧縮段数をパラメータとして解析する手法を開発した。この手法を用いて、パルス幅 $10\mu\text{s}$ の電流パルスを各段において均等の圧縮率で300nsまで圧縮する場合、磁気パルス圧縮回路のエネルギー伝送効率および操作性の観点から、2段または3段の圧縮が最も適していることを示した。

上記の知見を元に、スイッチ素子として並列化した2個のGTOを用い、電流パルスを磁気パルス圧縮回路で圧縮する方式の銅蒸気レーザー用固体化電源を開発した。模擬放電抵抗を接続して運転を行ない、GTOスイッチングエネルギー13.7kW、電源出力8.2kW、パルス繰り返し4kHzを達成した。これは100W級の銅蒸気レーザーに適用可能であり、スイッチ素子としてサイリスタを用いた銅蒸気レーザー用固体化電源としては当時世界最大級であった。この電源を口径70mm、電極間長1.5mの放電管に適用し、パルス繰り返し4kHzにおいて出力30Wの銅蒸気レーザー発振に成功した。

以上の結果より、銅蒸気レーザー励起電源の長寿命化の見通しを得た。本電源は、原子レーザー法ウラン同位体分離の実験機レベルの銅蒸気レーザーに適用可能であり、将来的に長寿命電源として有望である。

第3章では、半導体レーザーの直接変調による高速波長変化を利用して、 $^{235}\text{U}$ の原子共鳴線の超微細構造にレーザー波長をマッチングさせる新しい手法を提案している。本手法の適用可能性を評価するため、原子レーザー法ウラン同位体分離に適用が期待される600nm帯半導体レーザーの、高速波長変化特性を測定している。

まず、イメージンテンシファイアを高速シャッターに用い、正弦波直接変調を行なった時の600nm帯半導体レーザーの波長変化特性を測定した。周波数2MHzでの変調時に300nsで約7GHzの連続的な波長変化が得られた。これは色素レーザーの1パルスのパルス幅である50nsに換算すると、約1.1GHzの波長変化であり、原子レーザー法ウラン同位体分離にほぼ適用可能な値である。また、マッハツェンダー型の干渉系とイメージンテンシファイアを用いて、600nm帯半導体レーザーの波面変化の時間分解測定を初めて行い、高速波長変化時において波面はほとんど変化しないことを明らかにした。この結果より、600nm帯半導体レーザーの高速波長変化ビームはアダプティブ光学系等で制御可能であり、原子レーザー法同位体分離への応用において高ビーム品質レーザー光の長距離伝播が可能であることを示した。

さらに、600nm帯半導体レーザーの発振波長の広帯域化のために、室温から85Kまで温度可変で、かつ各温度において0.01Kの温度安定度を有し、メガヘルツ領域までの変調電流を注入できる液体窒素デュワー型半導体レーザー発振装置を開発した。本装置を用いて600nm帯半導体レーザーの動作温度を室温から85Kまで変化させることにより、発振波長を653nmから625nmまで28nm変化させることに成功した。この波長領域はウラン同位体分離に適用可能である。さらに100Kにおける高速波長変化特性を測定し、モードホップの有無は確認していないが、2MHzの直接変調により13GHzの波長変化が観測された。これらの結果より、600nm帯半導体レーザーは広い波長域で発振可能であり、かつ広帯域・高速波長変化が期待できることが示された。

第4章では、レーザー波長を目的とする原子の共鳴線に安定化する新しい手法を提案している。この手法では、まずレーザーの出射光を進行波型電気光学変調器に入射してサイドバンドを発生させる。その後、このサイドバンドの発生したレーザー光をファブリペロー共振器に入射し、サイドバンドをロックする。この時、ファブリペロー共振器の共振器長を安定化He-Neレーザーに

ロックさせ、FSR (free spectral range) を安定化しておく。これにより、ファブリペロー共振器は安定な波長基準と成り得る。この状態で電気光学変調器の変調周波数を変化させることにより、サイドバンドをロックしたままレーザーのキャリア波長を変化させることができる。このように本方法では、安定な波長基準に電氣的負帰還制御をかけたままレーザーの波長を変化させ、任意の値で安定化することが可能である。本方法は簡便かつ安価であり、また電氣的な制御であるため波長制御が安定かつ容易である。

半導体レーザーに本方法を適用した波長可変レーザーシステムを開発し、その性能を測定した。まず、ファブリペロー共振器の共振器長を市販の安定化He-Neレーザーにロックし、He-Neレーザーの波長安定度に対してファブリペロー共振器のFSRが600kHzで追従することを確認した。次に、上記のファブリペロー共振器に半導体レーザーのキャリアをロックし、ファブリペロー共振器に対する半導体レーザー波長の安定度が10MHzであることを示した。さらに、上記のファブリペロー共振器に半導体レーザーのサイドバンドをロックすることにより、200MHzの波長変化を電氣的負帰還制御をかけたまま行い、ファブリペロー共振器の共振波長から500MHz離れた値において半導体レーザーのキャリア波長を安定化することに成功した。

第5章では、銅蒸気レーザー励起色素レーザーシステムに変わる原子レーザー法ウラン同位体分離用全固体レーザーシステムとして、Cr<sup>4+</sup>ドープフォルステライトレーザーシステムを提案している。このシステムは、銅蒸気レーザー励起色素レーザーシステムに比べ、格段の小型化およびメンテナンスの簡素化が可能であり、大幅な低コスト化が期待できる。

従来よりもCr<sup>4+</sup>ドープ量の多いフォルステライト結晶を用いてレーザー発振器および増幅器を構成し、その基礎特性を測定した。まずレーザー発振器を構成し、最大出力エネルギー1.2mJ、およびフォルステライトレーザーのパルス発振としては世界最高のスロープ効率25%を達成した。この時用いた結晶の大きさは5×5×5mm<sup>3</sup>であり、わずか5mmの結晶長で、励起光の70%を吸収することができた。また、透過率の異なる3つの出力ミラーを用いた時のレーザー出力特性より、この時のフォルステライト結晶内のラウンドトリップロスが13%であることを明らかにした。次に、上記のフォルステライト結晶を光増幅器として用いて特性を測定した。励起エネルギー密度が0.74J/cm<sup>2</sup>の時、5mmの利得長において1パスゲイン1.7が得られた。

第6章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめると共に、工学的応用について論じている。