レーザのエネルギー応用†

専門会員 山中 千代衛*

1. はじめに

レーザは発明されてはや20年になるが、その応用はまずエネルギー分野へいち早く普及した。その一番手が加工への応用であり、最近では医用への応用も著しく発展している。また今後に期待されるものとしてレーザによる同位体分離を中心とする化学への応用があり、さらにはレーザによる核融合の研究も、新エネルギー開発の一環として注目をあびている。

これらの応用にとって基本になるものは、大出力レーザ技術の開発である。以下にレーザのエネルギー的応用に関する問題点を概説しよう。

2. レーザ加工

誘導放出によって、多数の原子(または分子)から同時に放出されるレーザビームは単色でコヒーレントである。コヒーレントな光の第一の特徴は、それがきわめてよく干渉することである。第二の特徴は指向性がよく、レンズや反射鏡で集光したとき、その集光性がすぐれてよいことである。レーザ光のエネルギーを利用するレーザ加工は、コヒーレントな光の第二の特徴を生かしたものである。

2.1 レーザ加工の原理と特徴

直径 D の開口を通して放出される波長 λ のレーザ光は、光の回折によって

$$Q=2.44 \lambda/D \cdots \cdots (1)$$

だけ角度の広がりを生じる¹⁾。

開口径 D を1 cmとした場合、 $\lambda=0.6328 \mu$ (6.328Å) のHe-Ne レーザ光の広がり角は、 $1.54 \times 10^{-4} \text{ rad}(=\theta)$ となる。10.6 μ のCO₂ レーザ光、0.6943 μ のルビーレーザ光、1.06 μ のガラスおよびYAG レーザ光の広がり角は、それぞれ $2.59 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 、 $1.69 \times 10^{-4} \text{ rad}$ 、 $2.59 \times 10^{-4} \text{ rad}$ となる。

平行光線として取り扱っている太陽光線の広がり角は、約 $9.4 \times 10^{-3} \text{ rad}$ (太陽の直径約 $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ 、地球と太陽間の平均距離約 $1.495 \times 10^8 \text{ km}$) であるから、いかにレーザ光の指向性がよいかがわかる。

広がり角 θ のレーザビームを、焦点距離 f のレンズや反

射鏡で集光すると、その焦点面でのスポットの直径 d は次式で与えられる。

$$d=f\theta=2.44 (\lambda/D)f \cdots \cdots (2)$$

たとえば、上記の $\theta=2.59 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の広がり角をもったCO₂ レーザビームを、 $f=5 \text{ cm}$ のレンズで集光した場合のスポット径 d は0.130 mmとなる。CO₂ レーザの連続出力を1 kWとすると、このスポット放射エネルギー密度は約 $8 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ となる。

表1 レーザ加工機の特徴と用途 ($f=50 \text{ mm}$)

レーザ	波長 (μm)	スポット径 ($\text{mm}\phi$)	発振形態と出力	パワー密度 (W/cm^2)	用 途
ルビー	0.69	0.5	出力 尖頭出力 パルス幅 くり返し	5×10^7	穴あけ スポット溶接
ガラス	1.06		～50 J /パルス 100 kW 0.5～10 ms 2 Hz		
YAG	1.06	single 0.018 multi 0.045	尖頭出力 single multi パルス幅 くり返し	single 1×10^9 multi 9×10^8	超微細穴あけ トリミング スクライビング
CO ₂	10.6	0.30	連続出力	～20 kW	切断 溶接 表面硬化処理
		0.10	尖頭出力 パルス幅 くり返し	～3 kW 0.5 ms 0.8～10 kHz	スクライビング (非金属)

表1に代表的なレーザ加工機のレーザビームの広がり角 θ 、焦点面(加工面)でのスポット径 d と放射エネルギー密度が示してある。

実際に得られるレーザビームは、完全なコヒーレントビームでない。発振ビームが多重モードであれば式(2)で与えられる値との差が大きくなり、スポットの放射エネルギー密度は小さくなる。シングルモードであれば式(2)にかなり近い値が得られる。多重モードレーザビームの焦点面における半径方向のエネルギー分布の測定例²⁾を図1に示してある。

通常、加工熱源に使用される酸素アセチレン炎、アルゴンアーク、プラズマのエネルギー密度は $10^2 \sim 10^3 \text{ W/cm}^2$ である³⁾。これらに比べてレーザビームの集光性がいかにすぐれているかがわかる。集光レーザビームのエネルギー密度($\geq 10^6 \text{ W/cm}^2$)は、最近実用化された電子ビーム溶接機のもつエネルギー密度と同等、あるいはそれ以上である。したがってレーザ加工は電子ビーム加工に勝るとも劣らない特徴を持つことが期待できる。

エネルギー密度のきわめて高い集光レーザビームは、そ

† Application of Laser to Energy

* 大阪大学工学部

Chiyoee Yamanaka

図1 焦点におけるビームスポットの半径方向のエネルギー分布の測定例(多重モード).
ただし $f=155\text{ mm}$, カッピングホール 径 $D=15\text{ mm}$

のエネルギーだけで材料を溶融、蒸発除去、分離することができ加工が可能になる。レーザービームを材料に照射した場合の加熱条件は、レーザ出力波形、レーザ出力、集光レーザービームの強度と、その分布および材料の熱伝導率、融点、表面状態（温度、反射率）ふん囲気などによって異なる。

照射レーザービームは、材料の表面でその一部が反射され、一部が吸収される。一般に金属表面の反射率は非常に高く吸収率はきわめて低く熱加工率は悪い。しかしレーザービームを吸収して表面温度 T_s が上昇し、表面が酸化したり溶融状態になると、そのレーザ光の吸収率が著しく高くなり材料の加熱が促進される。材料が蒸発し始めると反射率はさらに低下し、レーザービームは材料表面から内部へ進

図2 レーザビーム照射時の軟鋼薄板 (1mm) 厚の表面での温度上昇

入していき穿孔が起こる。

種々の表面状態の軟鋼 (SS 41, 板厚 1 mm) の表面をレーザービームで固定照射し、そのビーム軸上の表面温度の時間変化を測定した結果⁴⁾⁵⁾を 図 2 に示した。温度 400°C で空气中で酸化された軟鋼は吸収率が高く、ただちに温度上昇することがわかる。

非金属材料は、CO₂ レーザビームの吸収率が一般に十分高く、熱伝導率が低く、蒸発除去などに要するエネルギーが小さい。したがって低出力のレーザービームでも切断、穿孔などの加工が容易である。

集光レーザービームは熱集中性がよいので、材料の局所的な熱加工ができる。精度の高い加工を行なうためには加熱条件と材料の温度分布の関係を知らなければならない。

レーザービームを照射中の材料の温度変化は、一定な境界条件の下で熱伝導方式を解けば求まる。しかし実際の境界条件下では解析的な解が得られない場合が多い。

図 1 に示したように、実際のレーザービームの強度はガウス分布に近い。強度がガウス分布の熱源と円形均一分布の熱源による材料の温度分布の差はかなり大きく、熱源の移動速度 v とともに増大する⁶⁾。各種材料のレーザ加工に必要なビームエネルギー最小値、すなわち材料表面温度（照射点）を t 秒間に融点または沸点まで上昇させるに必要なレーザービームの最小エネルギーを概算する必要がある。

高いエネルギー密度のレーザ加工では、電子ビーム加工におけると同様の鋭く深い穿孔作用が起こる。この穿孔作用を理解するためには、表面熱源による熱伝導論的加熱機構だけでは不十分である。溶融金属の対流作用や穿孔内壁によるビームの集束作用 (Wall-Focusing)⁷⁾⁸⁾などを考慮しなければならない。

固定した材料の一点にレーザービームを集光して加工（静止加工）する場合、たとえばパルス幅 0.5 ms のレーザービーム ($\lambda=1.06\text{ }\mu$) を半径百ミクロンに集光して金属に照射したとすると、熱拡散係数の大きな銅などを除いた多くの金属では、その照射面の温度を上昇させるのに必要なエネルギーはほぼ 100 mJ 以内である。熱伝導率が悪く、10 μ 近傍の光をよく吸収するセラミックス、石英ガラスなどの加工には、出力数十 W の炭酸ガスレーザ ($\lambda=10.6\text{ }\mu$) 加工機を用いれば十分である。

コヒーレントなレーザービームを熱源として利用するレーザ加工機では、次のような特徴がある。

- (1) 大気中でのビームの減衰、広がりがほとんどなく、

表 2 レーザ加工に必要な最小エネルギー 半径=0.1 mm, パルス幅=0.5 msec

材 料	状 態	使用 レーザ	$P_{\min}$ (W)	$E_{\min}$ (mJ)	材 料	状 態	使用 レーザ	$P_{\min}$ (W)	$E_{\min}$ (mJ)
低 炭 素 鋼	溶融	CO ₂ レーザ	154	69	銅	溶融	CO ₂ レーザ	3,345	656
304 ステンレス鋼	溶融	ガラス, YAG レーザ	67	35	アル ミ ナ	蒸 発	CO ₂ レーザ	2.6	
ニ ッ ケ ル	溶融	CO ₂ レーザ	310	104	石 英 ガ ラ ス	蒸 発	CO ₂ レーザ	1.0	
アル ミ ニ ウ ム	溶融	ガラス, YAG レーザ	1,032	365	ク ラ ウ ン ガ ラ ス	溶 融	CO ₂ レーザ	0.3	
モ リ ブ デ ン	溶融	CO ₂ レーザ	906	162	ベ リ リ ヤ	溶 融	CO ₂ レーザ	167	
タ ン グ ス テ ン	溶融	ガラス, YAG レーザ	1,195	97	シ リ コ ン	蒸 発	ガラス, YAG レーザ		31

エネルギー伝送が容易であるため、レーザ発振器から遠く離れた位置でも加工が行なえる。

(2) 集光ビームのスポット径が小さく、そのエネルギー密度が高い。

(3) 反射鏡で容易に進行方向を変えうるので、形状の複雑な被加工物の加工ができる。

(4) 大気中で容易に使用できる。

(5) 自動制御が容易である。

(6) 無接触加工である。

(7) 入熱が低いので加工ひずみが小さく、加工精度がよい。

(8) 熱影響部が少なく加工品質が高い。

(9) 加工できる材料の種類が多い。

2.2 微細加工

レーザビームの集光スポット径および(尖頭)出力、パルス幅、ビルス繰返し速度を制御することによって、従来の方法では加工困難な硬脆材料の加工、および熱変形の少ないスポット溶接などが高速でできる。レーザ加工法とレーザビームエネルギー、およびパルス幅との関係を図3に示す⁹⁾。

図3 エネルギーとパルス幅によるレーザ加工の分類

一般に薄膜トリミング、厚膜トリミング、バランス取りにはYAGレーザ加工機が、穴あけ、溶接にはルビーおよびガラスレーザ加工機が、セラミックのスクライビングにはQスイッチパルスCO₂レーザ加工機が用いられる。

2.3 切断

最近、材料の高速自動切断技術として連続発振CO₂レーザによる各種材料の切断が注目されている。

高エネルギー密度のCO₂レーザビームを用いて切断するとき、材料の性質に応じて次の三つのメカニズムが考えられる¹⁰⁾。

(1) レーザ切断

蒸発切断：ビーム照射部をレーザビームだけのエネルギーで蒸発分離切断

(2) レーザガス切断

(a) ビーム照射域をビームエネルギーだけによって溶融させ、これを噴流ガスによって吹き飛ばして切断する溶融切断(溶断)。

(b) ビームエネルギーだけでなく、これにガスと材料の反応熱の重量によって溶融させ、(a)と同じ要領でこれを吹

き飛ばす溶断法

(1)の切断法は、加工しきい値の低い(吸収率が高く、熱伝導率が小さい)非金属の切断に用いられる。(2)の切断法は金属に用いられる。(a)は酸化をきらう物質あるいは酸化熱の重量があまり効果的でない場合に利用される。(b)は酸化などの反応エネルギーが利用できる材料(チタン鉄鋼)に利用され、切断の能率・精度を向上させる。

2.4 溶接

最近では、連続出力20kWまでのCO₂レーザ加工装置が市販されている(表1参照)。このような強度の強いレーザビームによる溶接は、すでに実用化されている電子ビーム溶接と多くの点で類似性がある¹¹⁾。

ステンレス鋼などの金属材料に強度の強いCO₂レーザビームを連続した集光照射すると、照射部の金属は溶融・沸騰して激しく蒸発し始める。この蒸発作用の反動が大きいため溶融金属は下方に押し下げられ、溶融池内に生じた穿孔壁の集束作用⁷⁾⁸⁾により、レーザビームはさらに内部に貫入し穿孔が深くなる。

レーザビームあるいは、被溶接物を一定速度で移動しながら行なうレーザ溶接では、電子ビーム溶接の場合と同様に照射部の溶融金属が表面張力により熱源の進行方向と逆方向に移動し、照射部の穿孔はだんだん深くなり定常状態に達する。この定常状態はほとんど一瞬にして達成される。その後は一定深さの穿孔を維持しながら溶接が進行される。

2.5 熱処理

金属熱処理には多くの技法が用いられている。一般にこれらの技法は二つの範ちゅうに大別される。一つは高合金材料に対する焼入れ技法で、他の一つはギヤーなどの表面硬化技法である。後者は炭素、窒素あるいはその他のガスを低炭素鋼の表面に熱拡散させる化学処理プロセスと高周波誘導加熱焼入れ技法がある。これに代わる表面硬化技法として、CO₂レーザビームによる金属材料の表面熱処理がある。

レーザビームによる表面熱処理は、これまでの技法とは物理的に異なった原理に基づいて行なわれる。材料の表面に照射されたレーザビームは、表面層のきわめて薄い部分で吸収され熱に変換される。この熱は伝導により表面から材料の内部に伝わっていく。一般に金属表面のレーザビームの吸収率は低いが、表面に吸収率の高い材料で薄い被膜を作ることにより、照射ビームのエネルギーを効率よく表面で吸収できる。

CO₂レーザビームの吸収率は、材料表面へのビームの入射角に依存するが、45°の入射角までその吸収率は十分に高い。CO₂レーザビームは大気中をエネルギーの減衰とビームの拡がりほとんどなしに伝送され、反射鏡で自由にその進路を変えることができる。したがって、形状の複雑なものでも、CO₂レーザビームを用いて容易に熱処理できる。

コヒーレントなレーザビームを熱源として用いるレーザ加工¹²⁾はすぐれた加工法で、その適用範囲が広い。レーザ

加工機の実用化は急激に進んでいる。数値制御化されたレーザー加工機は、各種材料の高速精密加工の自動化を容易にする。これは人間を従来の過酷な労働から解放することになる。

3. 医療への応用

最近に至って各種外科においてレーザーメス、凝固装置を用いた動物実験、臨床例の報告が国内外でみられるようになりレーザーは医用の軌道に乗り始めた。一般にレーザーの医療への応用は計測を除き、直接医療に用いる場合、光による生体組織の凝固性と蒸発、破壊による切断などの能力の利用である。レーザーメスは無血手術の可能性をはじめ従来の機械メス、電気メスに比して幾つかの利点を持つ。

現在、これらレーザメスは発振器および導光系を含めた周辺機器の開発などによって普及化を目指し性能向上、改善がなされている。さらに医療の新技術である内視鏡に光ファイバを組み込んで、非切開で体内患部、消化器系統などの止血治療を行なう内視鏡形レーザ凝固装置の開発も行なわれる。外科用レーザメスに比べると開発は遅れているが、近い将来画期的な医療機器として普及すると考えられる。

レーザを医療に用いる場合、一般的には生体組織に与える熱効果、圧効果、光化学効果および電磁界効果が考えられる(表 3).

表 3 レーザの生体組織への効果

熱効果 (熱による収縮・脱水・炭化・組織中水分の急激な蒸発)	凝 固	切 断
圧効果 (衝撃波)		
光化学効果 (生物化学的变化・細胞障害)		
電磁界効果 (イオン化作用)		

現在のレーザーを用いた治療は、レーザー光の高い集束性と高出力を利用した人体組織の熱破壊による、従来のメスの利用（切開、切断）と、患部組織を直接照射して蒸発、止

図 4 炭酸ガスレーザーによる
生体組織の破壊機構

血（蒸発，凝固）させる方法とに大別される。

生体組織は、一定値以上のエネルギー密度の光照射を受け、それを吸収すると熱により脱水、収縮炭化、爆発的蒸発を起こし破壊される。炭酸ガスレーザーによる生体組織の破壊機構を図4に示した。特筆すべきことは、この過程で血管の収縮が起こり、小径血管、毛細血管は封着しながら切断されるので、出血が起らず無血手術の可能性を持つ点である。したがって通常のメスでは止血不能で施術できない毛細血管の多い内臓器の切断、除去にも有効である。太い血管に対しても少々複雑な手順を要するが不可能ではないとされている。

このような無血手術の実現は、止血操作および出血による患部視認の妨げから生じる手術時間の損失を防ぎ、時間を短縮できる。また輸血の必要をおさえるなど大きな利点を持たらず、これは外科手術にとって画期的な方法である。

さらに非接触であること、熱によって血管、リンパ管を封着しながら切断するので殺菌性があり、感染、悪性細胞の転移を防止しながら手術ができる。

3.1 レーザメス

主として CO₂ レーザメスによって、その特長を上げる¹³⁾.

(1) 毛細血管をはじめ、小直径血管（定量的に決めるに
くいが、約 1.5 mm ϕ 以下としておく）は、熱効果により自
然に凝固封着されながら切断されていくので、止血性が良
好であり無血手術が可能である。したがって輸血の必要が
少なくなる。

(2) 手術中の止血操作が省略され、術部の目標視認が出血で妨げられないので手術の所要時間が短縮される。

(3) 太い血管に対しては、血流を一時しゃ断してアウトフォーカスで照射し、徐々に凝固収縮させ細くしてから切断するなど工夫を要する。

(4) 毛細血管の多い臓器の切開，除去は通常のメスでは止血不可能で施術できない箇所もあるが，レーザーメスでは可能な場合もある．たとえば肝臓などの患部切除も期待される．

(5) 切開によって破壊される組織層（壊疽層）が薄く（約 50 μm : CO₂ の場合）、術後の回復が速い。また通常の手術で起こる術後の痛みが少ない。

(6) 非接触で、熱によって血管、リンパ管を凝固封着しながら同時に殺菌し、悪性細胞などを破壊するので感染転移などを防止できる。

(7) 電気メスと異なり、測定機器への電氣的干渉がなく、また感電の恐れもない。

3.2 眼底凝固

眼科では、レーザ出現以前に開発された光凝固装置 (Photo coagulator) の光源を、クセノンランプからレーザに替えることにより、早くからレーザ凝固装置が完成し、すでに眼底治療に活躍している。レーザ光の平行性は眼底での集束性を高め、光強度と相まって眼底治療にきわ

めて有効である。眼透光体（前眼房、瞳孔、水晶体）を通過した光が網膜に達する。眼透過体の透過率と網膜の吸収率の積を網膜凝固能率と称し、光が眼底に影響を与える目安となる。現存するレーザーでは、アルゴンの $0.5145 \mu\text{m}$ （緑）が最も有効である。外部よりこのようなレーザー光を照射すると眼底網膜上に集束され、その熱効果により網膜のたん白凝固反応を生じ、剝離した網膜を眼底にゆ着することができる。このほか糖尿病性網膜障害、高血圧性眼底障害にも用いられる。

3.3 内臓凝固

YAG レーザ光は、他のレーザーに比べて生体組織に対する浸透性をも止血凝固に適している。最近 YAG レーザを用いた内視鏡付き凝固装置が発達してきた。YAG レーザの波長 $1.06 \mu\text{m}$ が、光ガラスファイバの透過域にはいるため、体外より直接消化器内部へ光を投射することができる。一方、内視鏡も医療の新技術として発達、普及してきたので、YAG レーザと光ファイバを用いた内視鏡との結合によって、消化器系統の潰瘍などによる出血を開腹手術をせずに治療する装置が開発されつつある。一部ではすでに臨床例もあり好成績をあげている。

レーザー技術の急速な進歩によって、医療への応用は爆発的に広がるのではないと思われる。しかし、医用レーザーの普及に伴って生じるレーザー障害に関して、十分配慮する必要がある。人体の治療に有効であることは、人体に何らかの影響を与えることであり、有効性と危険性は表裏である。したがって患者の患部にだけ影響を与え、患者はもちろん医師、看護婦を始め、立ち会う医療関係者に影響を与えない安全対策がたいせつである。このためには医療人が十分レーザーの性能を理解することが必要であり、また安全基準の制定も考慮されている。

4. レーザによる新エネルギーの開発

レーザーを用いた将来のエネルギー開発としては、レーザー核融合とレーザーによるウラン濃縮、重水素分離が主要な課題である。ここではまずレーザーによる核融合炉実現のための問題点と、レーザーによるウラン同位体分離について簡単に触れることにしよう。

4.1 レーザ核融合炉実現への展望

レーザー核融合研究開発にあたっては、次の三つの柱が重要である。

- (1) 燃料ペレットの設計、製作
- (2) エネルギードライバの開発
- (3) 炉システム設計とデータベースの整備

第1の燃料ペレットに関しては、極短レーザーパルス照射によるエネルギー吸収過程、爆縮過程、核融合点火、燃焼過程を研究し、より効率的なターゲットの構造が追及されている。今後の研究で問題点が解決されるものと思われる。

第2のエネルギードライバに関しては、大出力レーザーやイオンビームの開発により、ブレークイーブンの検証へ

図5 核融合研究の現状

の手掛りが得られ、炉への展望が開けるものと考えられる。図5は諸国において建設中のレーザーを示したものである。

第3の炉設計・構造については、高温高压に耐える材料研究の進展とともに、中性子工学や熱工学的検討を重ね将来への見通しを確立することがたいせつである。炉第一壁の損傷防御に、リチウムの流体壁を用いる構想が検討されており、炉設計に明るいデータが得られつつある。

慣性閉じ込め核融合は、磁界閉じ込め方式の30年近い研究歴に比べると10年の歴史にすぎないが、急速に進展し、ブレークイーブンを射程内に収めるところまで到達した。1985年ごろには出力数100Jのエネルギードライバによりブレークイーブンが実現するものと思われる。両方式間の優劣の比較はまだ時間尚早であり、今後の工学的要素を含めた総合的システム評価に待つ必要がある。ここでは両者の持つ特徴の比較にとどめたい。レーザー方式では磁界を用いないことから炉構造が簡単になり、不純物制御の制約から開放され、P-¹¹B 反応など、中性子の発生を伴わない

図6 レーザ核融合開発の展望

核融合への展望が持たれる。もちろん強力なエネルギードライバの完成が大きな要素である。

図 6 はローソン条件で示した各種核融合装置の現状を示したもので、パラメータとして示した D-T 利得が 1 になるところがブレイクインプンに相当する。

4.2 レーザ核融合燃料

DT 反応は、他のいずれの反応よりも低い温度で反応が起きるので最初に取り上げられる。しかし三重水素は天然に存在せず、Li プランケットを用い Li-n 反応により増殖を行なわなければならない。DT 反応では 14 MeV の中性子が発生するので、これによる器壁の誘導放射能の問題がきびしい。DD 反応では T の増殖が不要であり、発生する 3 MeV の中性子では、炉材放射化の問題は大幅に軽減されるが所要温度が 2 倍になる。さらに B-¹¹P 反応が用いられれば、発生エネルギーをになうものは荷電粒子だけとなり、直接発電も可能となる。しかし DT 反応に比べ格段に高温を必要とするので今後のテーマである。

4.3 ペレット利得

レーザの効率 ϵ_L とペレット利得 Q との積は、大よそ 10 程度が必要となる。図 7 に示すように熱機関の効率を 40 % とすると、レーザ炉で発生したエネルギーの 25 % を内部に循環させるとすれば、 $\epsilon_L Q \sim 10$ で純粹の核融合炉が成立する。もしレーザの効率を 10 % とすればペレット利得 100 が要求される。これよりブランケットにおいて核融合中性子を核分裂に利用する複合炉が、工学的には容易に成立することがわかる。

図 7 世界主要研究所のレーザ核融合のプログラム

レーザー光が燃料ペレットに入射すると、しゃ断密度近傍の電子にレーザーエネルギーは吸収され、主に電子の熱伝導によって、そのエネルギーは内部へ伝えられる。この熱波の波頭でペレットは急激に加熱され、外側にプラズマの噴出が発生し、その反作用でペレット内部が圧縮される。発生するエネルギーは燃料密度 ρ の二乗に比例する。圧縮に要するエネルギーが小なるほど、ペレット利得は増加す

る。

入射エネルギーの流れは、レーザ吸収過程ペレット圧縮過程、燃焼過程を通る。

したがってペレット利得は

$$Q = \varepsilon_a \varepsilon_c g_f = \frac{E_a E_p E_f}{E_L E_a E_n}$$

ここに, ϵ_a : レーザ吸収率 $0.3 \sim 0.5$ ($\epsilon_L = \epsilon_a \epsilon_c$)

 ϵ_r : ペレット圧縮効率 0.08~0.14 q_f : ペレット燃料利得 E_a : 吸収エネルギー E_L : レーザエネルギー E_P : プラズマ内部エネルギー E_f : 燃料出力エネルギー

燃焼利得を評価してみよう。まず核融合点火時のプラズマの内部エネルギーを求める。圧縮された燃料中では DT 反応で発生した α 粒子は燃料中で吸収され、自己加熱が効率よく進む。点火層の大きさは α 粒子の平均自由行程 λ_α の 4 倍くらいにとると熱損失を上回って着火が安定となる。すなわち $\rho_I R_I \sim 4 \rho_I \lambda_\alpha \sim 0.8 \text{ g/cm}^2$ 、点火温度を 5 keV とすると点火層の内部エネルギー E_I は、

$$E_I = \frac{4}{3} \pi R_I^3 3 \frac{\rho_I}{m_i} T_I = 4 \pi \frac{(\rho_I R_I)^2}{m_i \rho_I^2} T_I \text{ (eV)}$$

ここに, m_i は DT の平均質量 $4.2 \times 10^{-24} \text{g}$ である. 添字 I は点火層を示す.

まわりの主燃料の部分は断熱圧縮を受けるので、温度 T は ρ の $2/3$ 乗に比例し、その半径 R とすると

$$E_c = \frac{4}{3} \pi (R^3 - R_I^3) 3 \alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{2/3} \text{ (eV)}$$

 $\alpha \geq 1$: 非縮退 $\alpha \sim 1$: フェルミ縮退

主燃料は、フェルミ温度以下で圧縮することが効率的に望ましい。

次に出力エネルギー E_f を求めよう。核融合反応波は加速度的に燃え広がるので一様な燃焼を仮定する。燃焼率 Y は、

$$\frac{dY}{dt} = \frac{1}{t_r} \frac{1}{4} \frac{\rho}{m_i} (1-Y) \langle \sigma v \rangle$$

慣性閉じ込め核融合の閉じ込め時間は、 v_s を音速とすると $\tau = R/v_s$ 程度であるから反応率 $\langle \sigma v \rangle$ を一定とすると

$$Y = \frac{\rho R}{a + \rho R}, \quad a = \frac{2 m_i v_s}{\langle \sigma v \rangle}$$

プラズマの温度は反応時間 t_r に比べ急激に上昇し、60～100 keV に達する。また閉じ込め時間はペレットの外周にタンパーを設けることで十分長くなる。 $a \sim 2-6$ 程度となる。

$$E_f = \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{\rho}{2m_i} Y E_R$$

$$= \frac{2}{3} \pi \frac{(\rho R)^3}{m_i \rho^2} \frac{\rho R}{a + \rho R} E_R (\text{eV})$$

DT 反応で $E_R \sim 17.6 \text{ MeV}$ である. そこで燃料利得は,

$$g_f = \frac{E_f}{E_P}$$

$$= 2.9 \times 10^6 \frac{\rho R}{a + \rho R} \frac{1}{\left[\alpha \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{2/3} + \left(\frac{\rho_1 R_1}{\rho R} \right)^3 T_I \right]}$$

以上のことがらより g_f 最大となる ρR が存在する.

$\partial g_f / \partial (\rho R) = 0$ より

$$g_{fM} = 2.9 \times 10^6 \frac{\rho R}{a + \rho R} \frac{a + 3\rho R}{13a + 12\rho R} \left(\frac{\rho R}{\rho_1 R_1} \right)^3 \frac{1}{T_I}$$

これより内部エネルギー E_P が求まるから, これに相当するレーザエネルギー $E_L = E_P / \epsilon_a \epsilon_c$ も求められる.

表 4 レーザ効率 ($\epsilon_a \epsilon_c$) と爆縮パラメータの計算結果

	($\epsilon_a \epsilon_c = 0.07, \alpha = 1$)	($\epsilon_a \epsilon_c = 0.05, \alpha = 2$)
Q	860	250
ρR (g/cm ²)	4.34	3.37
ρ (g/cm ³)	302	368
R (μ m)	70	92
ρ/ρ_0	1,510	1,840
M_F (mg)	3.75	1.19
Y (%)	68	63
E_L/E_P	0.19	0.18

1 MJ レーザにおいて数値計算の結果を示すと, 表 4 のようになる. ただし, に $T_I = 5 \text{ keV}$, $2 m_i v_s / \langle \sigma_v \rangle = 2 \text{ g/cm}^2$ にとつてある.

DT 燃料によるレーザ核融合では, 14 MeV の核融合中性子による劣化ウラン²³⁸U や ²³²Th からの ²³⁹Pu や ²³³U の増殖が, きわめて有効であることに着目したい. 核融合核分裂増殖炉は有望なテーマである.

5. レーザによるウラン同位体の濃縮

レーザによる同位体分離の最も重要な応用は, ²³⁵U の分離であろう. よく知られるように濃縮ウランはわが国や米国を中心とした軽水形分裂炉の燃料として使われている. 天然ウランでは²³⁵U の含有率は0.71%であるから, 燃料として使える3%にまで濃縮する必要がある. 従来の熱拡散法遠心分離法などは大電力の消費を必要とするため, 電気効率の改善や設備投資の軽減を招く方法が確立されれば, 経済的効果は測り知れない.

レーザ法では二つのアプローチが試みられている. 一つはウラン原子を対象とした二段階選択光電離の方法である. レーザによるウラン濃縮は, この方法により実験的にはじめて示された. しかしウラン原子蒸気発生などに難点があるため, 他の方法として蒸気圧の高いウラン化合物 UF₆ の選択励起が試みられている. しかし UF₆ の場合には, 室温では多くのホットバンドを含んだ吸収スペクトルを示すため, スペクトルを単純化する方法, すなわち選択振動励起の方法を確立することが必要である. さらに,

UF₆ の振動励起に必要な強力な新赤外レーザの開発も今後の大きな課題である. このような新赤外レーザに要求される波長は 16 μ m, 200 pps で 1m/pulse の出力エネルギーが必要とされている. 現在, このような要求を満たす新レーザ開発が多くの研究所にて行なわれている. 以上の問題から, UF₆ で分離に成功したという確固たる報告はまだない. 米国においてはレーザによるウラン濃縮の試験プラントが1985年ごろに実現可能といわれている.

5. おわりに

大出力レーザを駆使して開発されたレーザエネルギー応用技術を概説した. 内容がきわめて広範にわたるためレーザ加工, レーザ医療, レーザ核融合, レーザ同位体分離技術の一端をかい間見るに止まった. 関心をお持ちの向きは参考文献^{(14)~(19)}を参照されることをおすすめする.

参 考 文 献

- (1) F. A. Jenkins and H. E. White: Fundamentals of Optics, 3rd edition (McGraw-Hill Inc., Tokyo Kogakusha comp. Ltd. 1970, p. 304)
- (2) E. T. Gerry: "Gasdynamic Lasers", IEEE Spectrum 7-11 (1970)
- (3) 荒田: "レーザ溶接", 電子装置研究会資料 EDD-73-8 (昭48)
- (4) 荒田, 宮本, 久保田, 草野: "大出力炭酸ガスレーザの熱源的研究(3)" 溶接学会秋季全国大会講演 (昭43)
- (5) Y. Arata, I. Miyamoto and M. Kubota: IIW Doc.-IV-4-69 (1969)
- (6) 荒田, 宮本: "大出力炭酸ガスレーザの熱源的研究 (第3報)" 溶接学会誌 41-2 (昭47)
- (7) 荒田, 宮本: "同上 (第1報)", 溶接学会誌 39-12 (昭45)
- (8) 秋葉, 吉田, 若林: "レーザ加工 (第2報)" 精機学会秋季大会講演 (昭48)
- (9) Raytheon Co; Laser and Material Processing Outline Information (1971)
- (10) 荒田, 宮本: 溶接学会誌 43-8 (昭49) 82~89
- (11) 荒田, 宮本: "大出力炭酸ガスレーザの熱源的研究 (第4報)", 溶接学会誌 41-3 (昭47)
- (12) レーザ学会: レーザセミナーテキスト (昭49)
- (13) 久保: 電気学会雑誌 98-4 (昭53) 43
- (14) レーザー学会: レーザーセミナーテキスト (昭53)
- (15) 阪大レーザーセンター: 慣性閉じ込め核融合炉設計検討報告書 (昭54)
- (16) 阪大レーザーセンター: ペレットターゲット開発現状報告書 (昭55)
- (17) 阪大レーザーセンター: ガラスレーザ激光XII号開発委員会成果報告書 (昭54)
- (18) 山中・化学総説 26 (昭55) 131
- (19) 山中: レーザ光線 (東海大出版) (昭55)

(受付1981年1月16日)