

特集

高度エネルギー源としての光

産業基盤技術としての高度レーザーの利用

High Level Laser Application for Industrial Generic Technology.

今 崎 一 夫*

Kazuo Imasaki

1. はじめに

高度レーザーすなわち、現在のレーザーを性能上、機能上、上まわり進展させたものとして、自由電子レーザー（波長可変・高平均出力）、X線レーザー（100～10Å）極短パルスレーザー（10～100fs）、LD励起固体（波長可変）レーザー（コンパクト、高繰返し）等があげられる。それぞれ今までにない特長を有したレーザーでありその産業応用の有用性が注目されている。

このような高度レーザーは、産業のより一層の高度化・高付加価値化に対する基盤として位置づけられており、次世紀のわが国の重要な技術に育成していく。

高度レーザーはエレクトロニクスにおいては、半導体の高集積化にともない要求される高精細化、高純度化をにない、化学工業においては、従来の高温・高圧プロセスにかわる光誘起プロセスを基として光化学プラントを可能とし、医学においては生物分子レベルのプロセス治療に用いられ、エネルギー産業においてはレーザー同位体分離・群分離等を利用した高効率核燃料サイクルの確立に寄与できるものと考えられる。ここでは主として自由電子レーザーの応用念頭において、話を進める。

2. 高度レーザー応用

高度レーザー自体まだ開発途上であり、今後、応用技術開発が開始されるものであるが、現在活発化しているレーザー応用を基盤とし、産業、科学研究等広汎な分野への応用が期待されている。高度レーザーの応用の波長域での分類を図-1に示す。

遠赤、ミリ波域では高勾配加速¹⁾が興味をもたれている。また遠赤外、中赤外域では波長可変性を生かした物性研究が考えられている²⁾。半導体や超伝導の絶

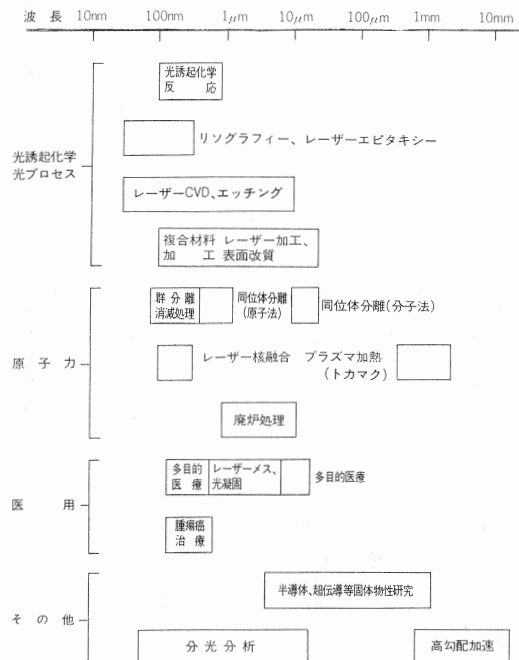


図-1 高度レーザーの応用と波長における分類

縁ギャップに対応した波長走査性が大きな武器となる。図-2にこの概略を記す。近赤外領域では平均出力を生かした廃炉等への応用が期待される。特に波長を変化させて切断する方式は従来のエネルギーに依存した方式に対して、大きな利点があると期待できる。また任意波長を高効率で発生できることを利用し、種々の同位体分離³⁾や放射性廃棄物の群分離への応用の可能性が検討されている⁴⁾。レーザー誘起光化学では、レーザー特異反応をより高収率で、広汎に行うことができ、光誘起化学プラントの実用化レーザーの候補として考えられている⁵⁾。レーザーによる超LSI等のマイクロプロセッシングでは低温プロセスの絶对的な優位性を生かしながら波長可変レーザーにより、より一層高純度で高機能化することができる。また生体の計測、バイオプロセッシングにも応用が可能となる。

* (財)レーザー技術総合研究所主任研究員
〒565 吹田市山田丘2-6

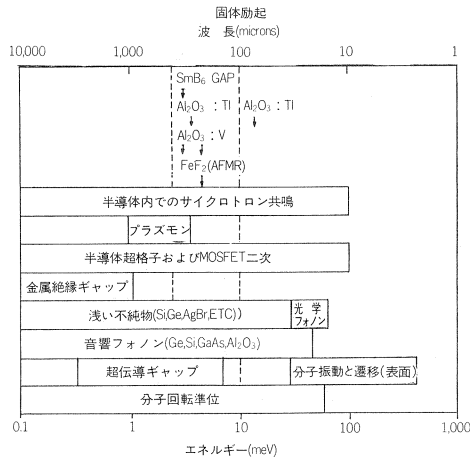


図-2 固体物性研究に必要な励起エネルギー

慣性核融合用エネルギードライバー⁶⁾ トカマク加熱⁷⁾、宇宙空間でのエネルギー伝送に用いることも考えられており、21世紀の先端産業、科学において自由電子レーザーは大きな役割を果たすものと期待されている。表1に応用性についてまとめを示す。

2.1 量子プロセッシングへの応用

超々LSI等の製作には、100を超えるプロセッシングがあり、それぞれ熱プロセスを伴う場合が多いため、結晶欠陥やウェハーの歪が発生し、高集積化の上で、大きな問題となっている。一方、光は1μmの波長において光量子のエネルギーは約1eVであり、これは

表1 高度レーザーの応用性

一般的利用性	大気、特殊ガス、真空、遠隔性、コヒーレント 高精度
機械的加工性	大型～小型加工、微細加工 (溶接一切断—マーキング)
新材料開発	高純度レアメタル精製、高温超伝導 ダイヤモンド薄膜III—V属、II—VI属化合物半導体 ファインセラミックス、傾
超LSI プロセッシング	プロセッシング過程の選択性、一様性 純度向上、 プロセッシングの連続性、無放射線損傷、高速処理
化学応用	光誘起反応、光連鎖・触媒反応 光特異化学反応
原子力応用	同位体分離、群分離、廃炉、放射性廃棄物消滅処理 炉用新材料
分析・評価	高空間(～100Å)分解能 超高時間(～ps)分解能 コヒーレンス性、波長捜査性 非破壊分析、遠隔性
その他の応用	医用、バイオ、リモートセンシング、通信、 情報処理、エネルギー輸送

約10000° kの温度に等しい。そのため直接的に、量子遷移を選択的に行なえる。このような量子論的選択性を利用したプロセッシング=量子プロセッシングは今後高集積化の過程で、重要になってくると思われる。

量子プロセスを用いると、高いエネルギーを要する反応を低温で起こさせることができ、従来の方式では不可能であった、新物質の合成の可能性もある。一般的なレーザープロセッシングの特長は、高エネルギー荷電粒子による基板や堆積膜への損傷がなく、線スペクトルをもつことにより反応の選択性、制御性があるという特長がある。特に光励起プロセスに用いられる物質は、ほとんど紫外域に吸収帯をもっており、強い紫外光源を必要とする。一方従来レーザーは波長固定性により薄膜形成への応用に関しては、利用可能な材料に制限があり、より短波長で、且つ任意波長レーザーの出現が望まれている。

波長可変短波長の自由電子レーザーを用いることにより、プロセッシングはより高速化、高精度化、高純度化される。また、新規材料への適応も可能となる。表2にそれぞれのプロセッシングにおける可能性を示す。

表2 高度レーザーによるプロセッシング

超LSI製造工程	光プロセスの適用	自由電子レーザーの有用性
基 板	エピタキシャル成長 (ALE)	高純度化、高浄化、低温化
リソグラフィ	短波長—コヒーレント光源	高精度化、高速化
拡 散	ドーピング	一様性向上、構成度化
推 積	CVD、PVD パターン直描	材料の多様化、高速化 高精度化
エッチング	加工、直描加工 パターン転写	多様化、高速化
そ の 他	マスク修理、洗浄	高速化・高精度化

2.2 高度レーザーを用いて新材料開発

波長可変性により従来の光源では不可能な多様な材料に対して、選択的な適用が可能である。表3にその応用可能な例を示す。

表3 高度レーザーによる新材料開発

高温超伝導薄膜	アブレーション率の制御、 材料の選択性・多様化
傾斜機能材料	傾斜性の制御、材料の多様化
高純度ダイヤモンド薄膜	反応プロセスの制御と高純度化
高純度レアメタル 精製	精製収率の向上、高純度化 高出力による高速度
化合物半導体	高純度化、新対応プロセス

高温超伝導薄膜に対しては、レーザーアブレーション法の高度化により、アブレーション率の制御、材料の多様化等により、新しい物性値を持つ材料の開発も可能と考えられている。傾斜機能材料においても傾斜性の制御等をより高度に且つより多様な材料に対して行なえる。またダイヤモンド薄膜の高純度結晶化、レヤメタルの精製、II-VI属半導体の光エピタキシー等が考えられており、極めて多様で新しい材料の開発が高度レーザーにより進むものと考えられる。

2.3 化学工業への応用

レーザーを用いた化学反応の有用性は、今まで多くの文献で述べられている。最大の課題は光のコストであるといえよう。これは化学反応の収率と反応生成物の価格、およびレーザー装置の維持費によって決定されている。図-3に従来のレーザーでの光子コストを示しているが、採算に合うものとしてはビタミンD等の

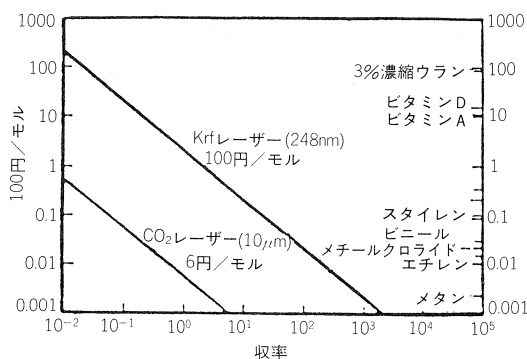


図-3 光子コストと収率および化学合成品コスト

ファインケミカルや連鎖反応を利用した高収率化合物に限られてしまう⁸⁾。自由電子レーザーはこの点、レーザー媒質がないため、初期の装置コストをある程度抑えることができれば、CO₂レーザーより低い光子コストが実現できるものと考えられる。また、化学プラントに必要な平均出力10kW、長寿命、高安定発生も実現が可能で、将来の光化学プラント用レーザーの有力候補と考えられる。

2.4 原子力産業への応用

同位体元素の分離技術に関しては現在ウラン濃縮を目標に原子法、分子法の開発が行われており、遠心分離法や化学交換法とともに、経済性の評価を受けることになる。また中性子吸収断面積の大きいGdやBの同位体、中性子吸収の小さいZrやTiの同位体の分離にもレーザー法が注目されている。このようなレーザー法の実用化において、自由電子レーザーがその主導的

役割をはたすものと考えられる。

高レベル放射性廃棄物の群分離、有用金属元素の回収は、化学性質の似た物質を分離することになる。化学反応を用いた分離では反応物質を加えるため廃棄物の容量が増加する。波長可変レーザーによって、着目物のみを励起し、望む方向に化学反応を制御して分離することが可能である。

分離の対象元素は遷移元素、(d電子系)とランタノイド、アクチノイド元素(f電子系)である。d電子元素分離のため光化学反応は酸化還元が主である。反応が共存種より複雑に変化するため波長可変性が重要となる。f電子元素の分離をより良くするためには2段階励起が考えられる。選択性のよい可視部のf-f遷移吸収を励起し、その励起状態よりさらに励起を行い、1段階の紫外光に相当するエネルギーを与える。そのため多波長出力、波長可変性が重要である。溶液中での反応はこの方式が特に有用である。

また、極短波長狭スペクトル光を効率よく発生させ、放射性廃棄物の消滅処理も原理上可能である。

原子力材料、施設等のレーザー加工技術としては廃炉の解体、切断、使用済燃料集合体の解体切断、高レベル固化廃棄物へのレーザー応用が考えられており大出力自由レーザーの応用が期待されている。

廃炉の解体を目指してCO₂レーザー、COレーザーによる基礎研究が開始されているが、レーザーの性能向上とともにレーザー光を導く耐放射光ファイバーの開発が重要であるが、自由電子レーザーを用いるとファイバー材料に適した波長を任意に選べる点で有利である。

材料の表面処理という点でも又、レーザーによる選択的気相化学反応(CVD)や界面化学反応を利用した耐放射性を有する機能性膜のコーティングやレーザー誘起エッチングを利用した材料表面の耐放射性の向上も、原子力分野において重要なレーザー応用技術となる可能性があり、短波長領域での大出力、可変波長光源として自由電子レーザーの期待は大きい。

2.5 その他の応用

i) 高勾配加速への応用

自由電子レーザーはマイクロ波、ミリ波域においてマイクロ波管をしのぐ大出力源となっている。これを用い、高勾配加速器の可能性が指摘され、米国、日本等で研究が進められている。

高勾配加速としては100~1000MeV/m程度が考えられ現状の10~100倍程度を得ることが理論的に可

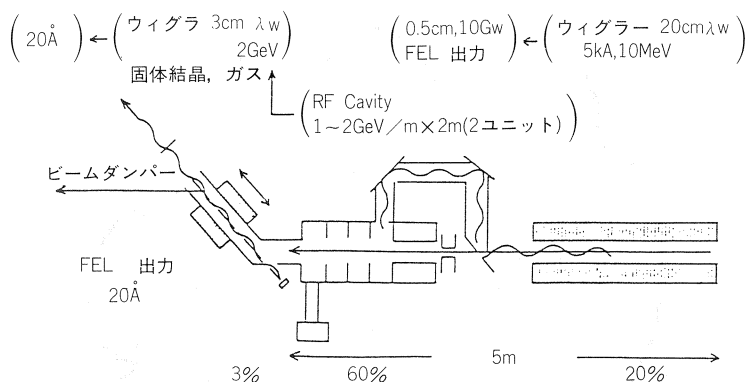


図-4 高勾配小型加速器

能である。この用途として Supper Collider, 小型短波長FEL装置等が挙げられている。前者はTeV程度のエネルギーをkm程度の距離で発生させ、素粒子研究に供する³⁾。後者は産業応用のγ線, X線XUV光を発生するための数m長の小型GeV加速装置である¹⁾。いずれも従来のものに比べて小型化できるという特長がある。

図-4にこの小型高エネルギー加速システムの概略を示す。

ii) 医用応用

初期にはレーザーエネルギーを熱的に利用したレーザーメス等の応用が中心であったが、最近では光化学的作用を利用した殺菌、殺癌などの細胞等に直接作用する新しい方式が考えられている。これらに用いられるレーザーは生体組織に浸透性を有し、可変波長であることが必要で、広い波長領域で同調性を有する自由電子レーザーが望まれる。

特に1 μm~数10 μmでの波長領域は細胞分子の振

動レベルが多く存在し、分子サイズのプロセッシングが可能と考えられる。これらのレベルはまだ十分理解されておらず、今後の研究が必要である。特にガン細胞の選択的溶解が、短パルス(〜10ps)で非熱的に行われる可能性があり、注目されている。これ以外にも神経外科への応用等医用における高度レーザーの広い分野の応用が期待されている。

図-5に骨の切断状態を示す。CO₂レーザーでは熱的な切断のため切口がかなり広がる。一方3 μmに同調された自由電子レーザー出力では、光化学的に分子を解離すると考えられ、極めてシャープに切断がおこなわれている。この点からも波長の可変性の重要性が理解できる。

3. 高度レーザーによる計測・解析

高度レーザーを用いれば、波長捜査機能を有した高時、空間分解の解析が可能で、ピコ秒、オングストロームの精度で解析・評価できる。特に非破壊、遠隔性、コヒーレンスといった特長がある。

計測・解析の方式は①フォトルミネセンス②ラマン散乱分光法③ブリルアン散乱分光法④光励基準位探査法⑤光電子分光法⑥差分分光法⑦干渉・ホログラフィー、が挙げられる。

波長可変性により、新材料の物性評価、プロセッシング過程の解析等が可能であり、従来のレーザーや放射光での計測に比して、より多量の情報量を現場で早急にとることが可能である。

原子力計測などでは、上記性能を利用し、超高感度分光分析や同位体の分析に応用可能である。レーザー励起色素レーザーを遠心分離機内でUF₆の濃度、温度の計測に応用している例もある。このような分光分析

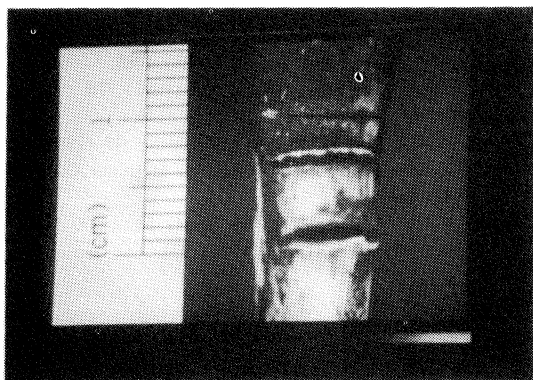


図-5 骨の切断, 下から外科のこぎり, CO₂レーザー, FELで切った結果

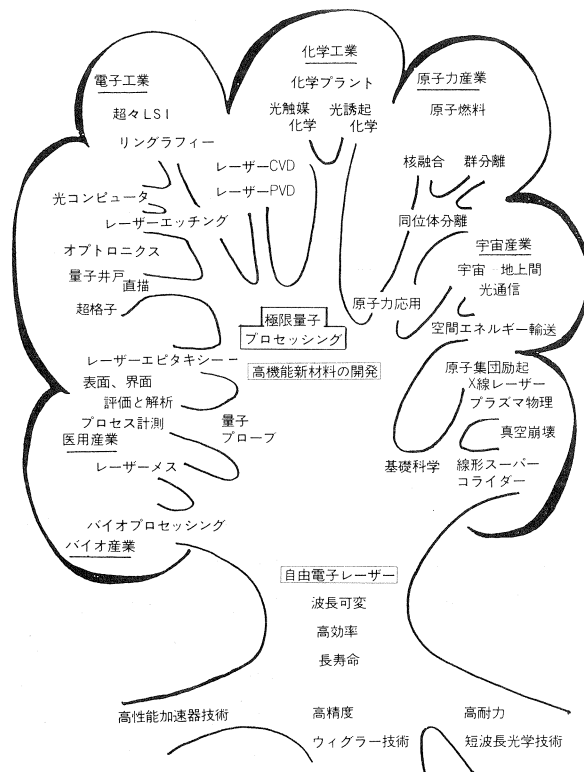


図-6 波及効果

法では可変波長レーザーが必要不可欠であり、広い波長範囲で波長可変の自由電子レーザーの用途は大きい。とくにレーザー法は高線量可変の管理区域とは隔離された非管理区域に設置できるという特長があり、保守等が容易である。

生体計測ではドプラ高出力かを利用したレーザー血流測定や臓器などの立体像を得るホログラフィー計測などに加えて、セルスターによる生体細胞別分離やレーザー蛍光内視鏡による細胞機能の解析、腫瘍の診断、また光CTや果物の熟成度、糖度等の新しい計測法があらわれている。このような新しい計測法では可変波長レーザーが必要であり、高度レーザーの今後の応用性が期待できる。

4. おわりに

レーザー集約光工場、光誘起化学を利用した合成化学プラントやレーザーを用いた高効率原子燃料サイクルの確率、高純度レアメタル精製等の新材料創造工場、光治療病院等が期待できる。

図-6に高度レーザーの波及効果を示す。

参考文献

- 1) A. Sessler AIP Proceedings **91** (1982) 163.
- 2) E. Shaw et. al. Phys. Quam. Elect. **7** (1980) 163.
- 3) 山中千代衛他; 電気学会誌 **105** (1985) 1066.
- 4) 久保田益充; 日本原子力学会誌 **29** (1987) 775.
- 5) 矢部 明; PETOTECH **11** (1988) 1141.
- 6) K. Imasaki etal Rev, Laser Enzncneering. **17** (1989) 71.
- 7) R. A. Jong et. al. Nucl. INstrum & Methods A259 (1987) 254.
- 8) K. V. Reddy Proc. SPIE **458** (1984) 53.
- 9) K. Imasaki et. al. ILF 8724P (1987).