

総論：エネルギー分野への光利用技術

Application of Optical Technology to Energy and Resources

霜 田 光 一*

Koichi Shimoda

1. はじめに

いうまでもなく、エネルギー分野に利用される光の大部分は太陽の光である。ここでは可視光線だけでなく赤外線も紫外線も含めて光ということにするが、地球が受ける太陽光のエネルギーは、毎秒 1.74×10^{17} ジュール、または光パワーにして 1.74×10^{17} Wすなわち174 PW (ペタワット)である。これに対して人工光源のエネルギーは微々たるもので、しかもその大部分はこれまでは照明に使われてきた。

太陽光は、時間的にも空間的にも、きわめて普遍的である。とはいっても、昼でも朝夕と日中は違うし、赤道地方と極地でも違う。太陽に比べるとランプや電灯などの光のエネルギーは僅かであっても、暗い夜に人類が必要な時間に狭い空間を明るくしたり、昼でも暗い室内やトンネルの中などを明るくするのに利用している。

波長または周波数スペクトルの上でも太陽光は普遍的で、可視光線だけでなく遠赤外線から極紫外線に及んでいる。しかし地上に到達する赤外線や紫外線は時間的にも地域的にも気象状態で左右され、有効利用できる波長域も制限されているので、人工光源の必要性がある。そこで、部分的加熱や乾燥に赤外線ランプやヒーターが使われ、殺菌や光化学反応に水銀灯などが利用されている。そうはいっても、照明以外へのこのような光エネルギー利用はそれほど盛んではなかった。

2. レーザー光の特徴

レーザーの出現によって、光技術の革新が始まった。レーザーは、電灯などの熱放射光源や放電管などのスペクトル光源とは全く異なるコヒーレントな光を発生する。科学者にとって、まさにレーザーは理想的な光源と考えられた。それはレーザー光が次のような特徴

をもっているからである。

2.1 指向性

太陽や電灯の光は本質的に熱放射、すなわち熱的に励起された電子から自然放出された光であって、放電などの励起原子からの自然放出光と同様に、光源からあらゆる方向に放射される。それは、光源の各部分から放射される光の位相がランダムだからである。これに対してレーザーは、その光共振器で共振するモードの光の誘導放出によって発光するので、光波の位相が揃っている。したがって、単一モードのレーザー光は一方方向に鋭い指向性をもって放射される。

しかしレーザー光も波であるから回折によって広がり、光の波長を λ 、レーザービームの直径を d とすると、ビームの広がり角 $\delta\theta$ は、およそ

$$\delta\theta = \lambda/d \quad (1)$$

である。そこで、たとえば波長600nmのレーザーのビーム直径が2mmのとき、ビームの広がり角は 3×10^{-4} ラジアンであって、100m進んで僅か3cmの広がりである。半導体レーザーのように出力の開口が小さいと指向性は良くないが、このようなレーザー光でもその位相が波面全体にわたって揃っているので、適当な光学系を用いて回折限界までビームを絞ることができる。すなわち、レーザー光は空間的コヒーレンスが優れている。

多モード発振レーザーの場合、縦モードはほとんど指向性に無関係であるが、横モードが多重ならば一般に位相分布が不均一に変動するので、指向性は回折限界より悪くなる。ただし多重横モードを同期すると、回折限界の鋭いビームが空間的に振動するダイナミックな指向性が得られる。

2.2 単色性

普通の放電管の発光から1本のスペクトル線を取り出したものは単色光であると通常いわれているが、このような単色スペクトルには少なくともドップラー幅と自然幅がある。しかし、単一モードまたは少数モー

* レーザー学会・会長

〒180 武蔵野市吉祥寺南町1-19-15 (自宅)

ドで発振しているレーザーの光はそれより遥かに単色性がよい。このことは、波長がほとんど等しいレーザー光を混合するとその周波数差のビートが観測されることから明らかであって、レーザー光の時間的コヒーレンスが非常に良いことを示している。

レーザーの発振周波数はその光共振器の共振周波数とレーザー媒質のスペクトル特性によってきまる。そこで、安定な共振器を用い、レーザー媒質の温度や励起強度などの環境を安定にすればするほど、発振スペクトルの線幅は狭くなる。安定なレーザーの発振周波数 ν のゆらぎ $\delta\nu$ の理論的極限は自然放出の寄与によって与えられ、レーザー媒質から誘導放出される光パワーを P 、共振器の共振の半値半幅を $\Delta\nu$ とすると

$$\delta\nu = 2\pi h\nu (\Delta\nu)^2 / P \quad (2)$$

となる。ただし h はプランク定数である。

半導体レーザーでは、共振器が小形で安定度が高く、共振の半値半幅が広いので、理論的極限に近いMHzオーダーの線幅が得られる。ただし自然放出に伴う半導体の屈折率変化に基づく線幅増大効果があるので、理論的極限値の数倍の幅になっている。その他の大抵のレーザーでは、理論的線幅は1 HzあるいはmHz以下にもなるので、通常のレーザーの発振線幅はほとんど共振器の安定度によって決まっている。不安定共振器レーザーでは、安定共振器レーザーより広い線幅になるが、それでも、MHz以下あるいはkHz以下の線幅が比較的容易に得られる。すなわちレーザー以外の単色スペクトル光の時間的コヒーレンスがおよそ 10^{-9} 秒 (ns) 以下であるのに、レーザー光の時間的コヒーレンスは少なくとも 10^{-8} 秒 (μ s) あるいは 10^{-3} 秒 (ms) 以上と極めて長い。

2.3 超短パルス

Qスイッチレーザーでは、10ns~100nsの強いパルス光が発生される。多モード発振のモード同期レーザーでは、レーザー媒質の利得帯域幅の逆数程度の狭い幅の繰り返しパルスが得られる。初期のレーザーは利得帯域幅の広い媒質では発振しにくいので、利得帯域幅の狭い媒質を用いているが、それでも気体レーザーのモード同期でナノ秒程度、固体レーザーではピコ秒程度の超短パルスが得られる。最近では、色素レーザー、広帯域固体レーザー (チタン・サファイアなど) のモード同期によって、フェムト秒パルスが発生されるようになっている。

レーザーでこのように幅の狭いパルスが作られるのは、広い帯域幅の中にある発振成分 (モード) の位相

が揃えられるからである。すなわちレーザーは周波数的にもコヒーレンスがよいのである。いうまでもなく超短パルスと単色性とは相補の関係にあるから、高度の単色性は連続発振レーザーで実現され、超短パルス発振は広帯域レーザーで得られる。

パルスレーザーでは、その出力が短いパルス幅の中に集中されているので、非常に高い尖頭出力が得られる。連続発振レーザーの出力はkWオーダー止まりであるが、超短パルスの尖頭出力ではMWどころか、GW, TWも実用的技術になっており、いまではPWパルスの発生も研究されている。

2.4 集束性

太陽光をレンズで集めると、焦点面に太陽の像ができてそれ以上に小さく集光することはできない。それに対してレーザー光の指向性は2.1で述べたようにほとんど平行光線になっているので、凸レンズまたは凹面鏡を使えば小さな焦点に集められる。凸レンズまたは凹面鏡の焦点距離を f とすれば、式(1)の指向性 $\delta\theta$ をもつレーザー光の焦点の半径 δr は、およそ

$$\delta r = f\delta\theta = f\lambda / d \quad (3)$$

となる。集光系の開口数 (numerical aperture) を \overline{NA} とすると、 $\overline{NA} = d / 2f$ であるから、

$$\delta r = \lambda / 2\overline{NA}$$

と表すこともできる。そこで、 $\overline{NA} = 1$ の光学系で集束したとき、焦点の直径はおおよそ1波長になる。

太陽光を集束しても焦点の輝度は太陽面の輝度以上にはならないが、レーザー光を集束すると太陽光以上の輝度が容易に得られる。たとえば波長 $1\mu\text{m}$ で1Wのレーザー光であっても、それを集束したときの焦点のパワー密度は $1\text{TW}/\text{m}^2$ 以上になり、この値は太陽面の光のパワー密度の2万倍に相当する。

3. レーザー利用技術

レーザーの応用は近年ますます広がって、量子力学における観測問題のような基礎研究から、スーパーマーケットのバーコードリーダーやCDプレーヤーまで様々である。その中でレーザー通信やレーザー分光もエネルギー分野に利用されるけれども、本特集で扱うエネルギー分野に直接利用されるレーザー技術について主に論じることにしよう。

3.1 レーザーの効率

レーザーの発振効率は電気機械や熱機関にくらべると極めて低い。大抵の気体レーザーや固体レーザーの総合効率 (総入力に対するレーザー出力比) は0.01%

か0.1%程度であって、1%以上もあれば高効率レーザーとして注目される位である。しかしCO₂レーザーと半導体レーザーだけは10%以上の効率をもっている。CO₂レーザーの波長は中赤外の10 μ mであり、連続発振出力10kW以上の装置も市販されているが、長波長のために用途が限られる。半導体レーザーは近赤外または長波長の可視光で発振するが、単体の半導体レーザーの出力は100mW以下と低い。

最近、高出力半導体レーザーの要望が高まり、アレイ(array)にしてWクラス、さらにアレイを集積することによってkW/cm²クラスのものまで研究開発が進められている。他のレーザーでも高効率化、高出力化の研究が進められているが、レーザーの効率が電機機械のように90%以上になることは考えられない。

多分、50%ぐらいが実質的限界であろう。もちろんレーザー素子だけの効率、すなわち励起エネルギーに対するレーザー出力は、固体レーザーでも色素レーザーでも半導体レーザーでも80%を越えるものがある。自由電子レーザーでも、電子ビームエネルギーに対するレーザー出力エネルギーは高効率であっても、電子加速器の効率を含めた総合効率はそれほど上げることはできない。

3.2 レーザー光のエネルギー集中

前項で述べたように、レーザー光は空間的にも、時間的にも狭い領域に集中することができるので、レーザーの出力がそれほど大きくなくても、極めて高いエネルギー密度にすることができる。はじめに述べたように、電灯は太陽より暗くても、室内とか街路とか必要な小面積の照明として役立っている。レーザー光は、電灯よりもずっと小さな部分をより強く照らすので、照明よりは光パワー技術として活用されている。その最先端技術であるレーザー核融合については、本特集では別に解説(2)があるので、ここでは一般的レーザー加工について考える。

レーザーの発振効率は低いが、発振されたレーザー光は極めて効率よく所望の場所に所定の時に集中して利用することができる。たとえばCO₂レーザーやYAGレーザーの連続発振出力を波長の10倍程度のスポットに集束すると、光パワー密度は1GW/m²~1TW/m²以上になる。パルスレーザーではさらに数桁も高いパワー密度に達するので、どんな固体でも溶融し、蒸発し、プラズマ化される。その動的過程はレーザー波長、パルス幅などの照射条件や照射される材料によって様々であるが、およそ100GW/m²以上ではおもに

蒸発プラズマ化によるアブレーション(ablation)、100MW/m²以下では表面加熱加工が行われる。そして、その中間のパワー密度では溶接や切断加工の工業的利用がもっとも多い。

レーザーアブレーションでは、中性の原子分子、イオンの他、クラスターやラジカルも放出される。そこでレーザーアブレーションはクラスター生成や表面微量物質の分析や化学的処理に利用される。各種粒子の放出過程は熱的過程でないから、その速度分布は一般にマクスウェル・ボルツマン分布になっていない。そして真空蒸着ではできないアモルファス物質の蒸着、有機材料の蒸着や各種のドーピングができるので、今後は複合化機能性薄膜形成に向かっての研究開発が進むと思われる。

より低いパワー密度のレーザーで行う表面加工にはアニーリング、表面改質、クリーニングなどがある。高いパワー密度を利用するレーザー加工には、切断、穴あけ、溶接、蒸着、クラスター生成、その他いろいろある。単独のレーザーによる加工でなく、異なる2波長のレーザーを用いる加工や、CVD(chemical vapor deposition)にレーザー照射を重ねて反応を選択的に促進するレーザーアシストCVDなど、複合照射レーザー加工技術の発展が期待されている。

3.3 レーザー光の制御

レーザー加工においては、集束光学系とレーザー動作条件を選択し制御することによって、照射パワー密度や照射パターンを任意に調整することが望まれる。レーザー光は単色光であるから、光学系の色収差は問題にならない。しかし、コヒーレンスが良いので幾何光学的考察だけでは不十分なことが多い。干渉縞を作って照射するには良いが、一様照射しようとするときには、インコヒーレント光より困難なことが多い。レンズ表面からの僅かな反射光、きずや欠陥からの散乱光などに起因する縞模様やスペckルを抑制する技術が必要である。

レーザー光の時間的制御技術は、ほぼ確立されているとあって良いだろう。光強度の低速度制御はレーザー励起強度の直接変調で行われる。低速度といっても半導体レーザーではナノ秒程度、その他のレーザーでもマイクロ秒程度の応答時間である。安定に発振させたレーザー光を外部で制御するには、音響光学変調器または電気光学変調器が使われるが、これらの変調素子はあまりハイパワーには使えない。それに、実用的レーザー加工では通常それほど高速度の要求はないので、

レーザーの直接変調が一般的である。

レーザー加工は被加工物からの反作用が殆どないので、自動化（ロボット）が遠隔作業（リモコン）にも適している。電子ビーム加工のように真空を必要とせず、大気中で加工できるのが特徴であるが、場合によっては真空中または希ガス雰囲気中で加工して不純物の混入を避けることができる。

そこで、エネルギー分野へのレーザー加工の利用は放射性材料の切断、高温や有毒ガスなどの悪環境で発電所施設の溶接、欠損の修理修復等々、他の方法が使い難い作業である。いわゆる加工ではないが、パワー密度を下げた大面積のレーザー照射は表面の汚染物を除去するのに有効である。今後、レーザー加工がより簡便、多機能、高性能になれば、利用範囲はそれだけ拡大して行くであろう。

上述のレーザー加工でも、仕事に応じてレーザーの波長を選ぶ必要があるが、あまり詳細な波長制御の必要はない。しかし、選択的レーザー誘起化学反応を利用するCVDやレーザー化学エッチングには、ある程度のレーザー周波数（波長）制御が必要である。とくに共鳴イオン化、レーザー同位体分離、レーザー冷却、単一原子操作などは、高度のレーザー周波数制御技術の利用によって初めて実現されたものである。

3.4 レーザー計測

レーザー計測には比較的小出力のレーザーが用いられているが、他の計測法にくらべて次のような特徴がある。箇条書きにすると、

- (1) 非接触測定である。
- (2) 2次元的、3次元的測定ができる。たとえばレーザーレーダー（ライダー）、ホログラフィー干渉、光CTなどが使える。
- (3) 高速度測定、高速度のデータ取得ができる。
- (4) 電氣的磁氣的その他の擾乱に強い。
- (5) 測定対象が発光体であったり、強い光で照らされたりしていても、レーザーの輝度が高いので測定可能である。
- (6) 各種の分光測定（飽和吸収、二重共鳴、コヒーレンス過渡分光、通常ラマン散乱、CARS、多光子吸収、レーザー誘起蛍光、レーザーイオン化分光など）が利用できる。
- (7) 在来の光学素子の他に、光ファイバーや光導波路も利用できる。
- (8) 測定精度が高い。すなわち、空間的分解能も時間的分解能もスペクトル分解能も理論的極限までの高

分解能が得られる。

その一方で欠点としては、

- (1) 装置が複雑で、大型になりやすいこと、
 - (2) 高価であること、
 - (3) 信頼性、安定性が不十分であること、
- などが挙げられるが、これは技術の進歩とともに急速に改善されつつある。

そこで、以前には精密計測、素粒子実験などの科学計測に限られていたレーザー計測が次第に実用的、産業的分野に利用されるようになってきている。エネルギー分野では、ダム水量による変位のモニター、プラズマ計測、各種発電所の諸計測、原子力ロボット、などがある。

4. 新しい光技術

レーザーの発明以来、非線形光学、量子光学、レーザー分光、レーザー化学、光エレクトロニクス、近接場光学などが発展してきた。その結果、古典的光学技術では達成できないような高性能、高機能をもった光技術が生まれている。そしてレーザー以外の光についても、新しい技術が発展しているので、将来エネルギー分野に利用されると思われる光技術の新しい研究を思い付くままに列挙して見よう。

4.1 シンクロトロン放射

シンクロトロン放射とは、高エネルギー電子が磁場によって偏向されて周囲軌道を回るときに放射される電磁波であって、放射光と呼ばれている。電子が曲線軌道を加速度運動することによって発生する電磁波であるから、ラジオ波からX線領域まで広がった連続スペクトル分布をもち、軌道面内に鋭い指向性を示す。したがって放射光は白色光といっても、熱放射とは全く異なる光である。

シンクロトロンまたは蓄積リングの電子は高周波加速によってパンチされているので、磁場によって曲げられるとき、とくにアンジュレーターで周期的に曲げられるときの放射光は、レーザーに準じるコヒーレンスをもっている。放射光の詳細とそのエネルギー分野への応用については、別項（4）に譲る。

4.2 自由電子レーザー

自由電子レーザー（free electron laser, FELと略称）とは、真空中の高エネルギー電子によって光共振器の共振モードの光を増幅し発振する装置である。さまざまな原理のFELが提案され、研究されているが、理論的にも実験的にも研究が最も進んでいるのは、

電子加速器とウィグラー（放射光を発生するアンジュレーターと同じ、またはさらに強い交番磁場で電子を蛇行させる装置）とファブリーペロー型光共振器で構成されるFELである。

電子加速器には、静電加速器、誘導加速器、マイクロ波線形加速器、マイクロトロン、シンクロトロンなどが用いられている。ウィグラーは永久磁石または電磁石で電子ビームに垂直方向に周期的磁場を作るが、磁場の方向が電子ビームに沿って回転するヘリカル磁場を作るものもある。静磁場でなく、マイクロ波または他のレーザーの作る高周波磁場を利用するウィグラーも研究されている。

電子の静止エネルギー mc^2 を含む全エネルギーを γmc^2 、ウィグラーの周期長を λ_w とすれば、レーザーの発振波長 λ は

$$\lambda = (\lambda_w / 2 \gamma^2) \sqrt{1 + K^2 / 2} \quad (4)$$

で与えられる。ただし K は電子の蛇行の大きさを表すパラメーターであって、ウィグラーの最大磁場（磁束密度）を B とすると、

$$K = eB \lambda_w / 2 \pi mc \quad (5)$$

である。そこでFELの波長は、電子ビームのエネルギーやウィグラー磁場の強さを変えることによって、連続的に変えることができる。

通常のレーザー媒質の反転分布原子密度にくらべると、FELの有効電子密度は低いので、単位長さあたりのFEL利得は比較的低い。しかしFELには吸収物質が存在しないので、長い光路を用いて発振を実現している。エミッタンスの良い電子ビームを作ること、反射損失の少ないミラーを使って Q の高い長い共振器を構成することによって、FEL発振が得られている。したがってFELは、他のレーザーと同様に時間的にも空間的にもコヒーレンスが高く、しかもシンクロトロン放射のように広い波長範囲で一層高輝度であると

いう特徴を持っている。FELは光共振器の中には吸収体がないので、本質的に高効率、高出力の装置である。

米国では、一時戦略防衛構想(SDI)の重点的計画として大出力FELの研究が推進された。しかし欧州や日本では、超LSIなどのリソグラフィ加工、新材料の創製、構造解析その他への応用を目指して開発が進められてきた。詳細は省略するが、今では国内に多数のFELが作られていて、マイクロ波から紫外領域まで稼働しており、いろいろな応用研究が始まっている。

エネルギー分野への応用では、同位体分離、原子燃料の再処理（群分離、有用希元素の単離精製、燃料棒加工など）、原子炉の解体作業、プラズマ加熱、レーザー加速などが考えられている。特殊構造材料や機能性材料の製造、加工、計測への応用もある。

4.3 チャープパルス増幅 (chirped pulse amplification)

レーザーパルスを増幅して高出力を得ようとするとき、最大出力はレーザー媒質や光学素子の光学的破壊が限界になる。超短パルスを増幅するとき、光学的破壊はパルスの尖頭出力（ピークパワー）によって決まるので、下記のようにしてパルス幅を広げて尖頭値を下げて増幅し、増幅後にパルス幅を狭めれば、それだけ尖頭値の高い超短パルスが得られる。

大抵の光学媒質は光の強さとともに屈折率 n が増加し、光電場を E とすると、

$$n = n_0 + n_2 E^2 \quad (6)$$

と表される。このような非線形屈折率をもつ媒質に超短光パルスを入れると、パルスの先端（前縁）は線形屈折率 n_0 の位相速度で進むが、パルスが立ち上がるにつれて屈折率 n が増すので位相速度が遅くなる。そこで非線形媒質を通過したパルスは図-1のように広げ

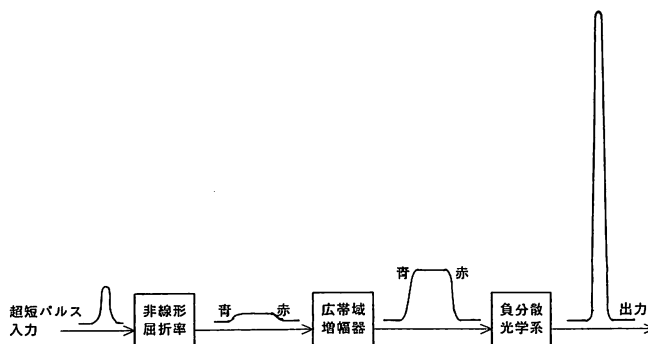


図-1 チャープパルス増幅による超高尖頭出力パルス発生

られ、パルスの前半は位相が遅れるので周波数が低く、後半は位相が進んで周波数が高くなっている。このように周波数（したがって波長）が変化するパルスをチャープされたパルスまたはチャープパルスと呼ぶ。

チャープパルスは初めのパルスより幅が広がって、それだけ尖頭値は低くなっている。これを広帯域増幅器で増幅すると、幅が広いままで尖頭値の高いチャープパルスになる。このチャープパルスを負分散光学系に入れると、長波長（赤方）成分が遅れ、短波長（青方）成分は進むので、パルスは圧縮されて幅が狭まり尖頭値の非常に高いパルスになる。負分散光学系は2枚の回折格子を平行に向かい合わせて、長波長の光は光路が長く短波長の光は光路が短いようにした後、再び重ね合わせるように作ったもので、パルス圧縮器と呼ばれることもある。たとえば、非線形媒質でパルス幅を100倍に広げ、増幅後にパルス圧縮器で100分の1に狭めれば、パルスを直接増幅する場合の100倍の尖頭を持つ超高出力の超短パルスを得ることができる。

チャープパルスをチタンサファイアレーザーで増幅し、パルス圧縮することによって、パルス幅100fs以下で尖頭出力1TW以上もある超高パワーのフェムト秒パルスを集束したときの尖頭パワー密度は $10^{21} \sim 10^{23} \text{ W/m}^2$ に達する。このときの光電場を計算してみると $10^{12} \sim 10^{13} \text{ V/m}$ という尖頭値になる。これは原子の中の束縛電子が受ける電場より強い電場である。

4.4 VUV～軟X線の発生

波長にして200nm以下の真空紫外（vacuum ultraviolet, VUV）からX線までの高輝度光源は、これまでシンクロトロン放射光だけだったが、より小型の装置でVUVから軟X線までの波長（XUVと略記する）のコヒーレント光が発生できるようになってきた。まだXUVの発生が確認されている研究段階で、その本格的応用はこれからであるが、次のような研究が進められている。

(1) 高次高調波発生

非線形光学結晶はXUVを強く吸収するので、使えない。希ガスや金属蒸気に強いレーザーパルスを照射すれば、奇数次の高調波を発生するが、位相整合しても高次高調波への変換効率は低い。ところが数年前から、He、NeまたはArにガラスレーザーやチタンサファイアレーザーのサブピコ秒パルスを照射して、光強度を 10^{19} W/m^2 程度以上にすると、100次以上までの奇数次高調波で波長10nm以下までコヒーレント光が発生されることが知らされている。高調波の次数が

10程度以上では、変換効率があまり下がらないのが特徴であり、その機構は強い光電場で励起された原子の半古典的理論でほぼ説明されている。

(2) X線レーザー

固体ターゲットに高出力レーザーを照射して生じるプラズマ中で、多価イオンに反転分布ができて軟X線を増幅する研究が10年あまり前から進められ、細管放電X線レーザーなど新型X線レーザーも現れて注目されている。

反転分布の生成機構には、プラズマ中の電子衝突によるものと再結合によるものと2通りある。Ne様イオン（ Yb^{26+} , 15.72nmなど）またはNi様イオン（ Yb^{42+} , 5.02nmなど）の反転分布は電子衝突で生じ、Li様イオン（ Al^{10+} , 10.57nmなど）またはH様イオン（ Al^{12+} , 3.88nmなど）の反転分布は再結合過程で作られる。軟X線に対しては良い反射鏡がないので、共振器モードの発振でなく、進行波増幅が実現されている。

(3) レーザー光の逆コンプトン散乱

レーザー光と高エネルギー電子とを正面衝突させることによって、コヒーレントなX線または γ 線が得られることは30年以上前に提案されていた。これはコンプトン散乱の逆過程に相当し、コンプトン散乱断面積が小さいため実験が困難であった。最近、高出力のレーザーを用いて高い光子密度が得られるようになったので、各地で逆コンプトン散乱の実験が行われている。まだ原理実証研究の程度であるが、やがて応用研究も始まろうとしている。

5. おわりに

エネルギー分野への光技術利用の歴史はまだ浅い。そして光技術はレーザーの発展に伴って、著しく変容し拡大している。ここでは近い将来エネルギー分野での利用が重要になると思われる光技術を選んで解説した。光のコヒーレンス制御技術、レーザーによる単原子操作、高性能の光学素子などは紙数の都合で割愛した。その他の新しい光技術も多かれ少なかれ将来エネルギー分野に導入される可能性がある。

この解説では文献の引用を省略したので、必要な読者は参考文献¹⁾とその引用文献を参照されたい。

参考文献

- 1) レーザー学会編：レーザー技術の新展開（1994）、学会センター関西