

### 3.6 レーザー技術の開発と応用

1960年に発明されたレーザーは、最初の数年間で飛躍的に進歩してビーム1cm<sup>2</sup>当りギガワットの出力密度に至るまでになった。しかしそれ以上に出力密度を上げようとする、レーザー媒質中での非線形効果による増幅の頭打ちや光学素子の破壊などを克服することが出来ず、その後の20年間は出力の増大に関しては大きな進歩が見られなかった。しかし、90年代に入るとレーザーの技術革新が急速に進んだことと合わせて産業、医療、原子力、加速器等の広い分野での様々な応用が拡がり、特に、近年はペタワットを超える高出力化の可能性も視野に入ってきたこともあり、レーザー利用技術の新たな展開が期待されるようになってきた。高強度レーザーは21世紀の科学技術を支える重要な先端的基盤研究装置の一つであるばかりでなく、加速器技術や原子力技術に革新をもたらす技術としての期待も大きい。ここでは、高強度レーザー光源の技術開発及び応用の現状と今後を展望する。

#### (1) レーザー光源の開発

##### (a) 短パルス高強度レーザー技術

従来、固体レーザーの出力を上げるためには装置が大きくなってしまおうという困難があったが、1985年G. A. Mourou（ミシガン大学）らのチャープパルス増幅(chirped pulse amplification ; CPA)の発明が、その後の高出力固体レーザーの開発に大きな転換をもたらした。CPA技術と高出力固体レーザー素子の開発によって、1990年代に卓上型レーザーの出力は $10^3 \sim 10^6$ 倍に飛躍的に増大した。現在も、固体レーザーの高出力化は進展しており、これまでのレーザーの限界を越えつつある。即ち、本レーザーは、小型のレーザー素子を使うことで小型化と低価格化を図ることができ、加えて、冷却が容易であることから高繰返し化が可能であるという特徴を有している。例えば、チタンサファイヤと言った広帯域レーザー結晶の開発が進んだこともあり、フェムト秒のパルス幅を有する極短パルスも可能になり、ピーク出力がペタワットという著しい高出力化も実現されつつある。

更に、最近では半導体励起レーザーの開発が急速の進歩をみせている。半導体レーザーは、電気-光の量子変換効率が高く（理論値では90%以上のもあり、実

際でも数十%程度)、小型で高フルエンス(単位面積当たりのエネルギー)のレーザー光が得られ、発振の繰返し数も高いという特徴がある。今後は、半導体レーザーを励起レーザーとして固体レーザーに入力する方式が短パルス高出力レーザー開発の主流となることが予想され、これにより、現在の固体レーザーの低いエネルギー変換効率が格段に上がるものと予測される。

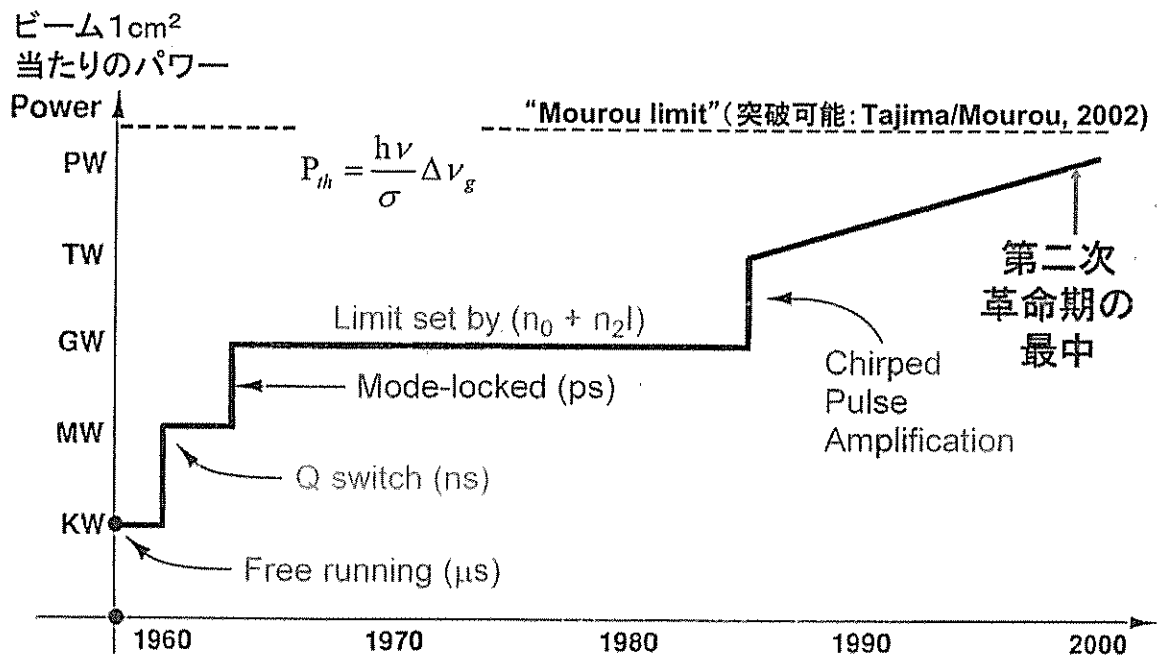


図 3.6-1 レーザーの出力の展開  
 (CPA技術の発明により、現在は第2次革命期の只中にある)

レーザー光源の開発と合わせて、最近、補正光学(アダプティブ光学)技術などによる光波面のミクロン以下の精密な補正や単一レーザーモードでの集光などの光学技術も急速に進歩し、kHzの高繰返しでミクロン以下の空間、フェムト秒以下の時間精度で制御できるレーザー制御技術が台頭して来ている。これらの技術はこれまで不可能とされてきた材料の極微細加工等の応用の可能性を拓くものである。同時に、高出力レーザーを有効に利用するためには、極めてクリーンな単一パルスを生成する必要があり、プレパルス制御と一般に言われている高速の光スイッチ技術の展開により6桁とか8桁落ちのプレパルスパワーが更に

何桁も落とせる技術が望まれている。

#### (b) 自由電子レーザー

高効率で高出力レーザー光源の一つが自由電子レーザー (FEL) である。FEL はレーザー媒質として、固体の代わりに真空 (及び電子の制御源として磁場) を用いるものであり、従来の加速器技術を光技術に展開したものともいえる。80 年代には電子源のエミッタンス (位相空間の体積) が不十分で実用レベルの発振に至らなかったが、90 年代に入り超伝導加速器技術の応用とエミッタンスの向上も図られ、峰原等が安定した FEL 発振に成功し、その後出力の増加が図られている。FEL では、エネルギーは電子ビームに貯えられるためエネルギー流量 (フルエンス) は極めて高い。(一方固体レーザーのエネルギーは固体に貯えられているので、エネルギー密度が極めて高くコンパクトに出来る)。短波長化のためには、電子の高エネルギー化やエミッタンス低下が必要になる。FEL は、RF 加速器による高いエネルギー変換効率に支えられているが、Tigner が提唱したように電子エネルギーの RF 場への回収を行うことにより、一層の高効率化が可能である。

FEL の波長は電子のエネルギーやアンジュレータの周期長できまるので、原理的に可変であるという特徴がある。自由電子レーザーの開発は、米国ジェファースン研究所、ドイツの DESY、我が国では、原研、阪大自由電子レーザー研究施設、産総研などで行われている。原研は、FEL の発振に関して米国ジェファースン研究所と並び世界最高の出力を達成するとともに、超伝導リニアックを利用するエネルギー回収型の FEL 開発を行っており、変換効率出力という点で世界最高レベルの自由電子レーザー装置の開発に成功している。

今後の自由電子レーザーの課題は以下のようなものがある。現在の自由電子レーザーは加速器を基にしていることから、その規模はどうしても大型になる。自由電子レーザーの発振は、電子ビームのエミッタンスに依って決まるので、波長が短くなればなるほど、エミッタンスを小さくせねばならない。更に高強度場に耐えるアンジュレータの開発などが必要である。現在のパワーは 2kW 位であるが、大型構造物の解体などへの応用には、より高い出力が要求される。一方、FEL は固体レーザーに比較してコヒーレンス性が低いという弱点があり、コヒーレンスを良くするためには、低エミッタンスの電子ビーム生成の技術開発が重要である。

## (2) レーザーの応用

### (a) 加速器技術への応用

レーザーカソードやビームのレーザー診断のような比較的小出力レーザーの加速器への応用はかなり前から行われて来ているが、超高強度レーザー光は、物質との相互作用において相対論的な力をもたらす。そのひとつの例として航跡場粒子加速がある。高強度レーザーをプラズマ中に照射することによって生成する航跡場による加速勾配は極めて大きく理論的には、これまでの高周波加速方式で放電による限界となっていた  $100\text{MeV/m}$  を大きく超える  $60\text{GeV/m}$  程度の加速性能も予測されている。

同時に、レーザーの波長が短く生成面積が小さいのでエミッタンスの極めて良いビームを作り出すことが出来る。高強度レーザーによる相対論的な効果として、イオン、電子、X線などの高エネルギーの粒子や光子を発生させることもできる。これらは、高輝度、高エネルギー、高コヒーレンス、極短パルス、低エミッタンスといった、従来の加速器からの放射線にない特徴を持っており、原子力を始めとする様々な分野で新しい応用を生み出すものとして期待されている。例えば、コンパクトなレーザー加速を利用した小型のPET用の放射性同位体元素製造装置、小型高輝度X線発生装置などが考えられている。

加速器技術と高強度レーザーのハイブリッド技術により、それぞれの技術では到達出来なかった研究領域を開拓することが出来る。例えば、SPring-8の8GeVの蓄積リング電子線と紫外レーザーによって発生したコンプトン $\gamma$ 線(約2GeV)を用いて最近、阪大、原研、JASRIの共同チームが5個のクォークからなる新粒子を発見したのは、その典型である。さらに、エネルギー回収型の加速器(ERL)駆動による第4世代放射光源は、第3世代の光源に比べコヒーレンス性、高輝度性に遥かに優れており、我が国では、原研やKEKなどで技術開発が進められている。また、X線FELは高縮重のX線フォトンという新しいX線光源として、干渉性や高輝度を利用した研究領域を拓くことが期待される。

### (b) 原子力技術への応用

これまで、レーザーによるウラン濃縮、同位体の分離、原子炉等の解体技術、レーザー核融合など、多くのレーザーが原子力技術として利用されてきている。前述したような高出力、極端パルス、高品質のレーザーは、原子力技術に革新を

もたらしことが期待されるが、具体的な利用はこれからである。

表 3. 1 (6) に示すように、これまでに原子力分野に応用された代表例の一つは、慣性核融合の駆動源としての大出力レーザー（ナノ秒）の利用であり、我が国では阪大レーザー研を中心に電通大、産総研などで研究開発が進められている。最近爆縮用のレーザーから切り離し、加熱用のエネルギー源としてより短パルス（ピコ秒）のレーザーを爆縮時に照射し核融合燃料の点火に使う方式が進展し、特に阪大の開発したターゲットの方式は注目されている。こうしたレーザーは爆縮用レーザーのエネルギーの極一部とはいえ、大きなエネルギー（10kJ 以上）をピコ秒の短時間に照射することが必要であり、効率の向上が課題である。現在、大出力の炭酸ガスレーザーや YAG レーザーが、原子炉などの解体に開発されているが、今後、より効率の高い半導体レーザーや FEL がより広く原子力技術に利用されるものと考えられる。

また、原子力の燃料、材料や廃棄物の物質分離のためのレーザー利用も想定される。レーザーによるウラン分離は効率や経済性の点を克服できず不成功に終わったが、原研、分子研、東大、東北大などでより短パルス（フェムト秒）のレーザーを用いた「量子制御」という方法で、よりエネルギー効率の高い、より選択率の高い方法も研究されており、従来の問題を克服することが囑望される。さらに、短パルス（フェムト秒）レーザーによって、熱を与えずに材料を加工すること（非熱加工）が可能であり、切断面は鋭利でしかも多量の切れ屑を出さないなどの優れた特性を持つ。こうした特性を利用して、原子炉のシュラウド等の応力腐食割れの原因になる表面応力層の除去など、画期的な応用も検討されている。

原子力へのレーザー利用のもう一つの重要な柱は、放射線利用への応用である。表 3. 1 (6) で示されているように様々の研究所で研究がなされており、コンパクトな高輝度の電子、陽子、X 線、ガンマ線、陽電子などの放射線源として、様々な利用への挑戦が始まっている。小型の PET 源もその一つである。また、レーザー駆動のコンパクト X 線レーザー技術も、最近では完全空間コヒーレントで高縮重のピコ秒 X 線フォトンが発生に成功している。レーザー加速を受けたフェムト秒で高輝度の電子線を使い、フェムト秒の高輝度 X 線も開発されつつある。こうした電子や陽子は事実上点光源で極短パルスであるという特性を持つので、ラジオグラフィーにも応用される。例えば、核融合爆縮ターゲットの瞬間像を陽子線ラジオグラフィーが電場の構造も含め捉えている。電子線とレーザーの掛け合

せによるガンマ線を使った光核反応の断面積の測定も行われ、希少核の中性子反応の逆過程として中性子断面積の観測にも寄与している（産総研、原研、阪大、甲南大など）。

高強度・短パルスレーザーの出現は、広汎な科学技術に新しい可能性を開き新領域や従来の領域の新たな展開に大きな刺激となっている。レーザー技術の加速器技術への導入として小型加速器開発へと発展しつつあるのが一例である。加えて、物質科学や生物科学への利用など広い基盤研究のツールとしても利用されつつある。今後、レーザー技術はペタワットからエクサワットといった高パワー化を辿るものと考えられるが一方、レーザーのエネルギー効率や繰返し数の向上と言った課題が横たわっており、これらの改良のための開発が急務である。このためには、半導体レーザーやFEL技術の開発が重要である。半導体レーザー技術は、レーザー技術と半導体技術の組合わさった極めて重要な将来技術である。またレーザー利用を進展させるためには、レーザーの品質の制御が重要であり、その研究開発も光源の開発と同様に極めて重要である。

表 3.6 レーザーの応用

役割	研究課題	線種/波長	装置の種類	性能	主な実験手法	研究内容	研究機関	状態
レーザー小型加速器	粒子加速	電子	Ti:Sapphire レーザー	100TW, 20fs	プラズマカソード	シングルパルス方式 E>200MeV	日本原子力研究所	電子発生実験
				12TW, 50fs	プラズマカソード	最大加速エネルギー40MeV	東京大学	電子発生実験
				100TW, 20fs	航跡場加速	電子を300MeVまで加速	日本原子力研究所	加速実験
				2.5J, 25fs, 100TW, 10Hz	航跡場加速 イオン加速	超高速の生物、分子反応	LOA (仏)	加速実験
				0.5J, 45fs, $1.5 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$	航跡場加速	PET レーザー加速器	LBNL (米)	加速実験
				100TW, 12fs	航跡場加速	レーザー電子源	University of Michigan (米)	電子発生実験
		電子、陽子	Nd:glass レーザー	40TW	航跡場加速	電子48MeV、プロトン7MeVへ加速	大阪大学	加速実験
		陽子	Ti:Sapphire レーザー	20TW, 1J, 50fs	航跡場加速	10MeV 陽子の生成	電力中央研究所	加速実験
				1TW, 100fs	航跡場加速	陽子加速器	宇都宮大学	計画中
		イオン	Ti:Sapphire レーザー	1TW, 50mJ, 50fs	レーザーイオン源	極薄膜照射	広島大学	イオン発生実験
				10TW, 50fs	イオン加速	癌治療	日本原子力研究所/放射線医学研究所	イオン発生実験
原子力への応用	エネルギー利用	高強度レーザー	Nd:glass レーザー	2kJ, 12beam, 0.1~10ns, 1.053 $\mu\text{m}$	レーザー爆縮	高密度プラズマ物理研究	大阪大学	爆縮実験
				30J, 2beam, 1.053 $\mu\text{m}$				爆縮実験
				~PW, 800J, 0.8ps, 0.53 $\mu\text{m}$		高速点火		爆縮実験
				1.8MJ, 1.053 $\mu\text{m}$		レーザー核融合	LLNL (米)	建設中
				>1PW, 30kJ, ~100fs, 1.053 $\mu\text{m}$		高速点火		
				100TW, 2.8kJ, 1.053 $\mu\text{m}$			Rutherford Appleton Laboratory (英)	増力中
	量子制御	$\gamma$ 線	Ti:Sapphire レーザー	100TW, 20fs	逆コンプトン散乱	量子制御による物質分離 $\gamma$ 線による原子核の研究	日本原子力研究所	基礎研究
		紫外光	自由電子レーザー	239nm	選択励起	物質分離	分子科学研究所	実験計画中
		紫外~遠赤外	自由電子レーザー	165MeV, 2.5kW, 0.23~100 $\mu\text{m}$	選択励起	物質分離 汚染物質解体 創薬	大阪大学	利用実験
	非熱加工	極短パルス	Ti:Sapphire レーザー	100TW, 20fs, 800nm	非熱加工	原子炉解体 耐放射線材料の開発	日本原子力研究所	加工実証実験
		遠赤外光	ERL-FEL	~10kW 連続, 20 $\mu\text{m}$	超電導リナック・エネルギー回収法	原子炉解体 物質分離 汚染物質解体	日本原子力研究所	建設中
		近赤外および紫外		10kW 0.3~10 $\mu\text{m}$		光核反応 物質制御 非熱加工	Jefferson Laboratory (米)	建設中

役割	研究課題	線種/波長	装置の種類	性能	主な実験手法	研究内容	研究機関	状態
	放射線利用	X線、γ線、高エネルギーイオン	Ti:Sapphire レーザー	300mJ, 140fs, 10Hz	超高強度場と物質の相互作用	核励起、原子核振動観察 同位体分離	大阪大学	発生実験
		コヒーレントX線、極短パルスX線		200mJ, 35fs, 800nm		コヒーレント軟X線源開発・アト秒パルス発生	理化学研究所	発生実験
				22TW, 10Hz		アト秒パルス光発生、高次高調波発生	東京大学	実験中
		高エネルギー粒子、X線		850TW, 20fs		高エネルギー粒子、極短パルスX線発生	日本原子力研究所	実験計画中
		極短パルス		10TW, 100fs		高強度場物理 医療応用	University of Michigan (米)	利用実験
		陽子		~PW		医療応用 PET	LOA (仏)	装置開発中
		高エネルギー粒子、高エネルギーγ線	10TW, 10Hz	クーロン爆発	医療応用 プロトン加速	京都大学	粒子発生実験・利用実験	
	GeV photon beam	アルゴンレーザー	350nm	逆コンプトン散乱	クォーク核分光、核物理、5クォーク重粒子の発見	大阪大学、甲南大学、原研、JASRI、他	基礎研究	
	コヒーレント軟X線	X線レーザー	~μJ, ~ps, 8.8nm	過渡衝突励起	短波長での極微細観察	日本原子力研究所	利用実験	
			~μJ, ~ps, 12nm		干渉計測	LLNL (米)	利用実験	
			~μJ, ~ps, 14nm		干渉計測	Paris-Sud University	利用実験	
		X線 FEL	1GeV, 0.1~3.6nm	真空アンジュレーター	生体観察	SCSS/Spring-8	装置開発中	
			230MeV, 80nm 1GeV, 6nm (目標 0.1nm)			DESSY (独)	増力中 建設中	
			217MeV, 530nm (目標 51nm)		高輝度・光時間分解放射光源の提供	Argonne National Laboratory	増力中	
	極短パルスX線	ERL-LS	7GeV, 100mA, 100fs, 1.3GHz	超電導ライナック	X線研究	Cornell University (米)	装置開発計画 中	
			100fs, 10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup> photons/pulse		超高速プロセス計測、構造生物学	BNL (米)	装置開発計画 中	
	極短パルスX線	自由電子レーザー		逆コンプトン散乱	遠赤外レーザーと電子衝突によるγ線発生	高輝度光科学財団	基礎研究	
	紫外光		500MeV, 595~198nm	低損失誘電体多層膜ミラー	表面科学	産業技術総合研究所	実験中	
	γ線		500MeV, 1~40MeV	逆コンプトン散乱	原子核物理、光核反応、γ線CT		Duke University (米)	実験中
			1GeV, 193~400nm		光核反応 固体物理	実験中		
				~W, 4~16μm, 300~1000μm	赤外自由電子レーザーの高度化	物性研究	東京理科大学	装置開発 中



### 3. 6 極短パルス・超高強度レーザーの利用研究

#### (1) 極短パルス・超高強度レーザーの開発

1960年に発明されたレーザーは、最初の数年間で飛躍的に進歩した。ビーム出力密度が1 cm<sup>2</sup>あたりギガワット(10<sup>9</sup> W)にいたるまでになったが、その後は、レーザー媒質中での非線形効果による技術的困難が克服できず、出力密度の向上は頭打ちになっていた。ところが1985年に、新しいパルス圧縮技術チャープパルス増幅法(CPA)が開発されて、パルス幅を大幅に短縮し、ピーク出力を10<sup>3</sup>~10<sup>5</sup>倍に増幅することが可能になった。この方法を発展させて、レーザーのパルス幅をフェムト秒以下まで短縮しピーク強度を飛躍的に上げる試みが現在も続いており、今後の発展が期待されている。とくに重要な技術開発項目は、電気・光変換効率の向上、発振の繰返し数の改善、安定性や制御性など信頼性の向上であり、また、短波長化や小型化も重要な開発目標である。

#### (2) 自由電子レーザー

極短パルス・超高強度レーザーのもう一つは自由電子レーザー(FEL)である。これはレーザー媒質として固体や気体／プラズマの代わりに、真空中の電子制御用周期磁界(アンジュレータ)を用いている。当初は、ミラーと周期磁界で作る光共振器を用いたおり、1980年代に最初のレーザー発振に成功した。これは放射光蓄積リングにアンジュレータと光の上流／下流に設置したミラーを組み合わせた光共振器を用いて、可視光から紫外線領域の分光実験に用いられた。わが国では分子研、電総研(当時)で成功している。最近、原研が超伝導伝電子リニアックを使って光共振器型の赤外領域FELを開発し、世界最高輝度を達成した。しかしこの方式では、ミラー材質など問題があって、これ以上の短波長化は困難である。

最近、電子リニアックから極短パルス・高ピーク強度の電子ビームを取り出してアンジュレータに入射し、レーザー発振・増幅を行う方法が開発されている。これは極短パルス・高ピーク強度の電子ビームがアンジュレータを通過する際に、上流で発生した光が下流側の電子で増幅されてレーザー発振をおこすもので、自己増幅・自発放射(SASE)レーザーと呼ばれている。アメリカ及びドイツでは100~80ナノメートルの波長領域で発振に成功しており、わが国では理研が10ナノメートル近辺の波長領域でSASE FELを建設している。

以上のような極短パルス・超高強度レーザーの出現によって、光技術の新しい領域が開拓される可能性が生じている。

### (3) 極短パルス・超高強度レーザーが拓く新しい応用分野

原子や分子に超高強度レーザー光を照射すると、レーザー光の電界で電子が励振される。レーザー強度がさらに高くなると電離が起こり原子はイオン化する。レーザー光を気体に照射するとプラズマが生じ、プラズマ中にできる「航跡場」の電界勾配は極めて大きくて  $60\text{GeV/m}$  にも達する。この値は電子リニアックなどの実用的な加速勾配  $100\text{MeV/m}$  の数 100 倍になるが、航跡場で粒子を加速するレーザー加速の試みは既に実証実験の段階を過ぎている。また、電子やX線の放出やイオンも生成されるが、これらは高輝度・極短パルスの特長をもつので、安定でエネルギー範囲の広い加速方式が開発されれば、様々な分野で新しい応用を生み出すものと期待されている。

最近、アメリカで超高強度レーザーをプラズマに照射してX線を生成することに成功したが、安定性や単色性に欠けていて、利用実験に供するまでには至っていない。一方わが国では、理研がレーザー光を希ガスに照射して生じる高次高調波で 10 ナノメートルの波長領域のコヒーレントX線を得ている。

フェムト秒レーザーを用いたコヒーレント制御（量子制御）による選択的励起・反応の研究が進められていて、エネルギー効率がよく選択率の高い化学反応制御や物質分離、物質創製の研究が始まっている。また、アト秒からフェムト秒の時間で分子を励起し、反応初期のダイナミクスを解明する研究もおこなわれるなど、極短パルス・超高強度レーザーを用いた新しい研究領域が開拓されている。このほか非熱切断などの加工で、超高強度レーザーの新しい応用が始まっている。

### (4) 原子力分野の応用

大強度レーザーを原子力分野へ応用したプロジェクトとして、ウラン濃縮とレーザー核融合をあげることができる。前者は原子法及び分子法でウラン 238 とウラン 235 の分離法の開発を行い、効率的にウラン 235 を濃縮する技術を確認するプロジェクトであったが、濃縮ウランの需要減で重要性が下がり、既に終了した。一方、後者は大強度レーザーを（重水素／トリチウム）ターゲットに照射し、爆縮を利用して核融合材へ点火する慣性核融合であるが、未だ成功していない。

極短パルス・超強度レーザーの応用で述べたように、コヒーレント制御による選択的化学反应制御を用いた効率的物質分離や切断への応用などが技術的に確立されれば、原子力分野への応用に発展することは明らかであるが、今のところ技術的見通しは不明である。