

レーザーによる新エネルギーの開発

大阪大学工学部教授

レーザー核融合研究センター長

工学博士 山中 千代衛

1. は じ め に

エネルギーは人類の社会活動にとって最も大切な要素である。これは熱力学の法則によって規制されるから代替がきかない。我が国のエネルギー消費量は、GNPの増大につれ急激に増加し、石油換算が表1に示すような経過をたどっている。又、世界的に見てもエネルギー需要は年々増加の一途で、その伸び率は年3～5%と見積られている。100年後には年間10Q*に達するものと思われる。資源として石油、石炭など化石燃料の埋蔵量は80Q、核分裂原子力の源であるウラン、トリウムの埋蔵量は、1800Qと推定されている。この評価によっても近い将来世界的にエネルギー欠乏の危機が発生することは明らかである。昨今、アラブを中心にした石油供給削減政策は、我が国の産業に大きな打撃を与えているかに見えるが、やや長期のスケールでエネルギー問題を把握すれば、この契機こそエネルギー開発政策を積極的に展開する好機であり、紀元2000年を目標に組織的な研究を開始すべきである。

第1 我が国のエネルギー需要

(10,000 Kcal/ℓ 石油換算)

年 度	需要量 (10 ⁴ KJ)	増加倍率
1955	5,125	1
1960	8,438	1.95
1965	14,576	2.84
1970	21,950	4.28
1975	(30,920)	(6.03)

太陽エネルギーは地球上くまなく分散供給されているから、小規模のエネルギー源として需要部署で直接役立つという意味において極めて魅力的な存在ではあるが、大規模な集中エネルギー源になり難いであろう。風力、潮力も同様である。地熱発電は将来相当規模の開発が可能と思われるが立地条件の制

約は避け難い。従って、将来のエネルギー源としては、まず原子力の開発に特に力を入れる必要がある。核分裂エネルギーの利用は、今後大規模になればなるほど核燃料の再処理や放射性廃棄物の保管などの面より困難な問題が発生する。

核融合は、このような点では放射性廃棄物を伴わないので「きれいな原子力」ということができる。これは太陽や星のエネルギー源である。燃料は水の中に約1/5,000の割合で含まれている重水素である。1ℓの水から取り出せるエネルギーはガソリン300ℓに相当する。地球の表面水は10²⁰ℓであるから、これの中の重水素を利用して得られるエネルギーの総量は5×10¹⁰Qに達する。核融合が実現すれば人

* Q = 10¹⁸ BTU = 2.93 × 10¹⁴ KWh

類は無限に近いエネルギーを享有することができる。

このエネルギー源「人工太陽」を求めて、1955年の第1回原子力平和利用会議を契機に、各国において地道な研究が続けられてきたのである。当時、既に原子力爆弾が生じる高温を利用して重水素を利用させる水素爆弾が完成しており、この知識よりして制御熱核融合反応の実現も比較的容易に達成できるものと予想されていた。

制御された反応を維持するのに比較的低密度の重水素プラズマを磁気容器の中に閉じ込め、これを加熱することにより核融合に到達しようとするプロジェクトが取り上げられてきた。過去20年の研究はようやく磁界中プラズマの特性について定量的な取扱いを許す段階にまで到達し、現在「トカマク」装置というトーラス形テスト機を建設中である。この延長上に核融合炉の炉心プラズマが想定されているがそのことがそのまま将来の核融合炉の原形になるということとは等価ではないようである。更に重厚な研究が必要であろう。

この間に新しい核融合へのアプローチとして出現してきたのがレーザー核融合である。これはレーザーによりエネルギーを集中し、高密度の重水素プラズマを加熱し核融合反応を実現しようとする方法である。この方法は磁界による閉じ込めを必要としないので科学技術的要素ははるかに楽になるものと考えられている。この研究の将来は大出力レーザーの開発にかかっているといっても過言ではない。

又、レーザー技術の進歩と共に単色性の非常に優れた可変波長光が近紫外、可視、赤外の広い波長領域をカバーしうるようになり、レーザー光を利用した同位体分離が可能となってきた。これは同位体間の吸収スペクトルの違いを利用して、レーザー光の波長を一方の同位体の吸収スペクトルに精密に同調して選択励起し、それが元の状態に戻らないうちに第2の操作により励起された同位体のみを取り出すものである。多光子吸収を用いる方法も提案されている。質量の違いを利用した拡散法や遠心分離法と比較すると、濃縮比が大きくとれ、しかもエネルギー効率が高いと考えられる。筆者は基本的な条件の検討を行い、一例として NH_3 分子について実証実験を実施した。最近各国でCa, Br, B, Ba, Uについて報告されている。

2. 慣性閉じ込め核融合

トカマクで代表される低密度プラズマを対象とする「磁界閉じ込め」方式に比べ、高密度プラズマを用いる「慣性閉じ込め」方式による核融合の研究がここ2・3年の間に著しく発展⁽¹⁾してきた。この代表的な方式がレーザー核融合である。球状の重水素と三重水素のターゲットに高出力レーザー光を投射して加熱し、表面より球対称的にプラズマを噴出させ、その反作用によってターゲット中心部を圧縮し、固体密度の $10^3 \sim 10^4$ 倍の超高密度のプラズマを発生させる。その結果中心は核融合温度に到達し、 10^{-9} sec以下の短時間にレーザーエネルギーの100倍以上もの熱核融合エネルギーを発生する。

トカマクによる核融合では磁界中でのプラズマの保持時間の延長と加熱が問題となるのに対し、レーザー核融合では慣性によりプラズマが静止している間に、爆縮により超高密度を実現することが課題である。従って当然のことながら高出力、高効率のレーザーが必要である。

このように2つの方式は根本的に異なった手法による核融合へのアプローチであって、問題点や特徴も全く相違している。「磁界閉じ込め」方式が連続作動を理想としているのに対し、「レーザー核融合」はパルス作動である。この比較はタービンとガソリンエンジンの作動に対置できよう。両者は核融合によるエネルギー開発への道として、互いに相補的計画として並行して進めるべきものである。ちなみに

アメリカでは現在両者の研究開発がほぼ同等の規模ですすめられている。「レーザー核融合」は本格的に取り上げられてから短時日の中に20年の歴史を有する「磁界閉じ込め」と並びうる状態にまで急速に発展したが、この現状は注目に値する出来事である。

3. レーザー核融合（ローソンの条件）

まず、慣性閉じ込めの概念を明らかにしよう。核融合の条件は、核反応により発生するエネルギーがプラズマの熱エネルギーをはるかに上回ることを必要とし、これはローソンの条件と呼ばれている。

$$(n/2)^2 \sigma v W \tau > 2(3/2) k T n \quad (1)$$

ここに、 n ：プラズマの密度

σ ：核融合反応断面積

v ：プラズマの熱速度

τ ：閉じ込め時間

W ：反応当りの発生エネルギー（D-T反応では17.58 MeV）

k ：ボルツマン定数

T ：温度

従って、左辺は τ sec間に核反応により発生するエネルギーであり、右辺はその時プラズマを加熱したエネルギーである。有効にD-T反応を発生させるには温度 T は 10^8 °Cとなる。これらの数値を代入すると

$$n\tau \sim 10^{14} (\text{/cm}^3 \cdot \text{sec}) \quad (2)$$

となる。

磁界閉じ込め方式の核融合ではプラズマ密度 n は約 10^{14} cm^{-3} であるから、閉じ込め時間はほぼ1 secとなる。慣性閉じ込め方式のレーザー核融合では、固体ターゲットをレーザーで一挙にプラズマ化するとして n は 10^{22} /cm^3 であるから、 τ は 10^{-8} secとなる。これはレーザー光の持続時間と同程度である。

ところでターゲットはレーザー照射によりプラズマ化するが、その運動は双極性拡散でおさえられる。すなわち、より高速な電子の拡散が始まると中心部のイオンとの間に静電界が発生し、結局イオンの速度で膨張が規定される。その速度を S とすると、

$$S \sim \sqrt{\frac{k(T_e + T_i)}{M}} \quad (3)$$

であって、ここに T_e 、 T_i は電子、イオンの温度、 M はイオンの質量、従って S は音速である。

球状ターゲットの半径を R とし、慣性閉じ込め時間 τ は半径の $2R$ までの膨張を目安として、

$$\tau \sim R/S \quad (4)$$

で与えられる。 10^8 °Cの水素プラズマの音速は $10^8 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ であるから $\tau \sim 10^{-8} R$ である。

レーザーにより与えるべきエネルギー E_i は、

$$E_i \sim \frac{4}{3} \pi R^3 n 3kT \quad (5)$$

ターゲット径を1 mm、固体密度のプラズマを 10^8 °Cにするには 10^6 Jのエネルギーが必要である。

nsec の中にこのエネルギーを与える⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁸⁾にはレーザーパワーは 10^{15} W に達する。MJ のエネルギーは現状のレーザー技術をもってしても多分のギャップがある。

爆縮による密度の上昇を考える。式(4)を式(2)に代入した形でローソンの条件を与えると、

$$nR \sim 10^{22} \text{ 又は } \rho R \sim 0.2 \text{ (gr/cm}^2\text{)} \quad (6)$$

このパラメータは爆縮方式で重要である。

なんらかの方法で球状ターゲットを圧縮して密度の上昇をはかると、所要レーザーエネルギーは式(5)に式(6)を代入してわかるように、 R に比例して減少する。寸法にして $1/10$ ，容積にして $1,000$ 倍の圧縮⁽³⁾を行うと、レーザーエネルギーは $10 \text{ KJ}^{(7)}$ でよいことになる。

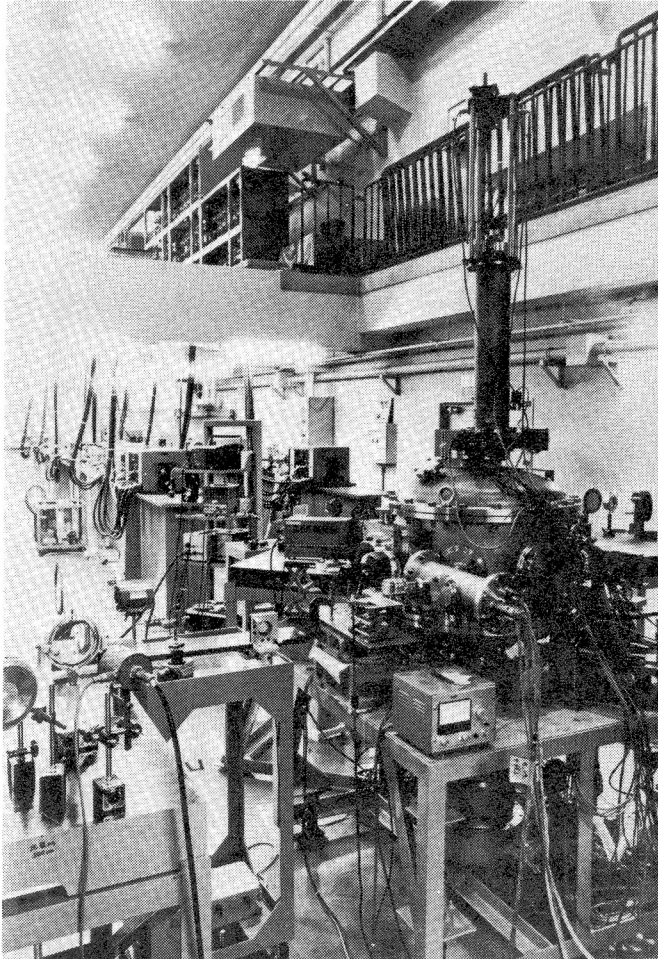


図1. 大出力ガラスレーザー装置
激光4号 出力1 KJ I TW 4 ビーム

4. レーザーによるアイソトープの分離

4.1 分離の基本的条件

光を利用してアイソトープを分離するという考えはレーザーの出現以前からあった。Hgの単一同位元素放電管やA1のスパーク放電を用いてHgやClあるいはCなどについて1930年ごろから実験が行われてきたが、スペクトル幅や光強度の点で困難があり、実用化には至らなかった。レーザー技術の進歩と共に単色性の優れた可変波長のレーザー光が、近紫外、可視、赤外の広い波長領域をカバーしうるようになり、レーザーによるアイソトープの分離が注目を浴びている。

基本的にはアイソトープ間の吸収スペクトルのわずかな違いを利用して一方のアイソトープの吸収スペクトルに精密に同調したレーザー光によって一方のアイソトープあるいはそれを含んだ分子を選択的に励起し、それが元の状態にもどらないうちに第2の操作によって励起されたアイソトープのみを取り出すものである。従来の質量の違いを利用する拡散法や遠心分離法と比較し、レーザー法の特長は、

1) 高い分離比が得られる、2) エネルギー効率が高い、3) 従って経済的であると考えられる。

レーザーによるアイソトープの分離については、既に基本的な条件の検討が行われて数種類の原子や分子については実験の成功が報告されている。

レーザーによるアイソトープ分離が可能であるためには、

- i) 吸収スペクトルに充分分解できるアイソトープシフトがある。
- ii) 一方のアイソトープのみを選択励起できる単色性のよい可変波長のレーザーがある。
- iii) 励起された原子(あるいは分子)のみに作用し、非励起のものとは作用しない第2の化学的、物理的操作を用いる。
- iv) 励起原子から非励起原子へのエネルギー移動のような選択性のスクランブルを引き起こす過程がないこと、あるいはあってもiii)の過程に比べてゆっくりしている。

などの条件を満足していなければならない。

i) の条件は一般に気体の状態で満足される。ii) は色素レーザー、光パラメトリック発振器、半導体レーザーなどにより $0.4\mu\text{m}$ ～数十 μm の波長領域で実現されてきた。iii) の過程は後述のように光電離、光解離、光化学反応、その他の幾つかの方式が提案⁽⁸⁾⁽⁹⁾されている。iv) の条件を満足させるのはかなり問題があるが、動作圧力を低くしたり、原子あるいは分子ビームを用いたり、バッファガスを導入して共鳴的なエネルギー移動の割合を減少させるとか、第2の強力なレーザー光により光電離あるいは光解離の速度を上げることなどが必要である。

5. む す び

新しいエネルギー源の開発は人類の急務とされ、核融合が公害のない明日のエネルギーとして期待されている。又、レーザーによる同位体分離の研究が急に展開をみせ始めレーザーによるエネルギー新時代に大きく一歩近づいたといえそうである。

このためには、レーザーの大出力化、レーザーとプラズマとの相互作用、レーザーによる化学反応、核融合炉に対する技術的展望を強力に進める必要がある。米・ソにおいては大きな計画が進行中で、基礎的研究が着実に進められている。我が国においても総合的なプロジェクトを立案し、レーザー工学、プラズマ物理学、化学工学、流体力学、数値解析などの専門家が相協力して問題解決にあたるようにしなければならない。

- (1) H. Schwarz and H. Hora(ed.) : " Laser interaction and related plasma phenomena ", Vol.3A, 3B(1974).
- (2) C. Yamanaka, et al.: Phys. Rev., A6, p.2335(1972).
- (3) E. Teller :レーザー研究, 1, 7 (昭48).
- (4) 山中千代衛:電学誌, 94, p.285 (昭49); 信学誌, 27, 5, p.584 (昭49-05); 電学誌, 96, p.105 (昭51).
- (5) C. Yamanaka (ed.) : Proc. Fuji Seminar on Laser Interaction with Plasma (1974).
- (6) C. Yamanaka : Phys. Rev. Lett., 32, p.1038 (1974); Phys. Rev., A, 11, p.2138(1975).
- (7) L. A. Booth, et al : Proc. IEEE, 64, p.1460(1976).
- (8) 井沢, 山中, ほか:応用物理, 44, p.898 (昭50).
- (9) 山中 正:レーザー研究, 4, p.3 (昭51).