創立10周年記念講演

レーザーによるエネルギー開発

山中 千代衛*

Chiyoë YAMANAKA*

近年、新エネルギーの開発が大きく取り上げられているが、国の将来を維持できるエネルギー源を考えてみると、化石燃料の次にはどうしても原子力、あるいは核融合にポイントがしぼられるものと思われる。ここでは、レーザーを使ったエネルギー開発、特にレーザー核融合について主に述べることにしたい。

核融合には、磁場閉じ込め核融合という、いうならば電気工学的なトランスの変形のような形でエネルギーを取り出す方式と、もう一つはレーザーあるいはイオンビームのようなエネルギーを急速に注入できる装置を使って核融合を実現しようとする慣性閉じ込め核融合方式の二つがある。歴史的に見ると、磁場閉じ込め核融合は、30年以上の長い歴史をそなえている。一方、レーザーに関しては、メイマンガルビーレーザーを発振させたのが1960年で、レーザーの歴史そのものが20年程度であり、レーザー核融合は実質的には10年程度の歴史にすぎない。しかし、最近の発展はめざましいものがあり、両方式はほぼ肩をならべている。核融合炉レベルの研究からみると、どのように核融合エネルギーを取り出すかという工学的な問題に対しては、慣性閉じ込め核融合は断然すぐれていると感じられる。レーザー核融合では、燃料ペレットにレーザーのエネルギーを投射し、燃料を反応させ、エネルギーを取り出す。このため核融合炉のセンスは、磁場閉じ込め核融合とは非常に違うものになる。

炉の第1壁をどのように構成するかが大きな

問題である。液体金属を第1壁として用いることにより、炉の構造材は中性子の衝撃から逃れることができ、長寿命の炉の設計が可能となる。磁場閉じ込め核融合の場合には、プラズマに大きな悪影響を与えるため、液体金属を第1壁に用いることはできない。この場合、炉の構造材は中性子、X線等に直接さらされ、設計条件が厳しくなる。これが、近年レーザー核融合の研究が大いに推進されるようになった理由の一つである。この研究には未知の要素が山積しており、それらをひとつひとつ明らかにする必要があるが、このため腰をすえた長期的な研究の遂行が必要である。

レーザーを使ったエネルギー開発を展望すると、大きく分けて二つの分野がある。一つは核分裂反応を使ってエネルギーを生み出すための核燃料 ^{235}U 及び ^{239}Pu などウラン同位体を濃縮する技術である。これには、レーザーの持つ分光学的特徴を十分に利用する必要がある。

^{235}U と ^{238}U では吸収のスペクトルが若干異なり、この吸収スペクトルの違いを利用し ^{235}U の分離が可能となる。この方法は、原理的には1個の光子で1個の原子を取り出すことが可能であり、拡散分離法及び遠心分離法に比べて格段に高効率である。しかし、レーザーがどれほど高出力になりうるか、どれほど安価になりうるか等の技術的な問題は、これから解決しなければならぬ。この方法は、レーザーが持つ単色性、可干渉性及びエネルギーの集中性を使った技術であり、 ^{235}U 及び ^{239}Pu の分離を通してエ

* 大阪大学教授

エネルギー開発にレーザーが示す分野は非常に大きいと思われる。もう一つのレーザーを使ったエネルギー開発は、核融合研究である。これは重水素燃料をレーザーで照射することにより燃料の爆縮を行い、同時に燃料の温度を高め、点火し、燃焼させる方法である。これは言いかえると、超ミニ水爆をいかに燃やすかということに対応する。直径1 cmの燃料ペレットから出てくるエネルギーは、石油1バレル程度であり、水爆とは全く異なっている。このような小さな爆発を何回も反復させて、安全かつ制御された形で、多量のエネルギーを取り出すことが可能になる。最も容易な核融合反応としてDとTを融合させてHeと中性子を発生する反応が考えられる。燃料物質は海水中に含まれているので、ほとんど無限の資源であると言える。次に反応がやや難しいが、DとDの融合反応では発生するエネルギーは、4 MeV～3 MeV程度でDT反応の17 MeVと比較して、中性子のエネルギーを大幅に低減できるという利点がある。すなわち、中性子による機壁の放射化が減少する。BとHの核融合反応では中性子が全く発生しない。またLiとHでも同様で、これらの核融合反応が達成されると、放射化の問題がなくなり、完全にきれいな核融合と行うことができる。しかし、これらの反応では、反応率が非常に低く、かな

りの高温が必要である。将来の核融合として望ましい方式である。リチウムや硼素のような比較的原子量の大きな元素を燃料として扱っても、レーザー核融合の場合には磁場閉じ込め核融合のように磁場がないのでサイクロトロン放射によるエネルギーの散逸がない。

この点からも、慣性閉じ込めの核融合は有利であると思われる。Fig. 1はD-T核融合反応のイラストで、DとTが融合してHeとnになるがこの時に若干質量欠損が出る。この質量がエネルギーに変換されて放出される($E=mc^2$)ので反応から発生するエネルギーは多大であり、エネルギー源としては理想的である。磁場閉じ込め核融合と慣性閉じ込め核融合とを対比するのに $n \times \tau$ (燃料密度×閉じ込め時間)という量が有用である。反応そのものは両者共D、Tを融合させてHeと中性子を作り出すプロセスであり、密度が高いほど速く反応が生じ、また閉じ込め時間が長いほど反応量が多くなる。温度としては1億度程度が必要である。核融合研究の評価にはローソンの条件が用いられる。これは燃料の密度と反応時間の積が 10^{15} 秒/cm³より大きくなれば、反応で出てくるエネルギーが燃料を加熱するのに要したエネルギーを上回るという条件である。磁場閉じ込め核融合の場合には、磁場でプラズマを閉じめる。したがって技術的に達成可能な磁場強度が 10^5 G程度であるためこの磁気圧で閉じ込めうる密度は、1 cc当り 10^{14} 個である。この密度をローソンの条件に入れると、反応時間は10秒となり、10秒の間閉じ込めることが要求される。一方、慣性閉じ込めの核融合の場合には、レーザーで燃料を圧縮し、密度を高くすることを目指している。たとえば 10^{25} /cm³の密度になれば 10^{-10} の時間で反応が終わる。実際この密度は、鉛の密度の12倍にあたる。磁場閉じ込めの密度 10^{14} /cm³は、大気密度の10万分の1であり、当然、反応させるのに長い時間かかる。両者のアプローチは非常に異なり、それに伴ない関連技術も全く異なることになる。慣性閉じ込め核融合では、速くエネルギーを注入し密度を高くして、燃料の温度を高

Fig. 1. Schematic diagram of D-T nuclear fusion reaction. Huge amount of energy ($E=mc^2$) is produced by one reaction.

め、速く核融合反応を行い、出力を得ることが重要である。

ちなみに太陽光の強度は、1 cm²当り 0.1 W である。これに対し、レーザーは 1 cm²当り 100 億 W の出力がとれるのでこれを集光し、燃料温度を急激に高めて核反応を起こさせることは容易である。重要なことは、まず、エネルギーを注入するために、レーザーを強力にすること及びそのエネルギーが注入されるべき燃料球を最適化することである。この 2 本柱により燃料の圧縮率が大きく作用される。それではどの程度のレーザーが要求されるか評価してみよう。

結論からいうと、現在のレベルで十分手がとどく技術範囲にある。前述の D, T 反応において、中性子及び He が発生した時、そのエネルギーの配分は、いわゆるライオンズ・シェアで分けられ、 α 粒子に 3 MeV、中性子に 14 MeV が与えられる。この高速中性子は、電荷を持っていないので、燃料の外へどんどん出てゆき、燃料を燃やす上では、あまり重要な役割を果たさない。実際反応を持続させる条件は、 α 粒子 (He の原子核) をいかに燃料球内で減速させるかということに依る。つまり α 粒子の運動エネルギーを熱エネルギーに変換し、燃料の加熱を行い、核融合反応を維持することが重要である。したがって、燃料球の寸法は、 α 粒子の飛程より大きくとる必要がある。飛程は燃料の密度と温度から評価が可能であり、これでペレットの大きさが決定される。

$$R_{\text{pellet}} > R_{\alpha} \sim \frac{2 \times 10^{21} T_e}{n} \quad \begin{matrix} T_e : \text{keV} \\ n : \text{cm}^{-3} \end{matrix} \quad (1)$$

このペレット寸法を用い、ペレット燃料を核融合温度まで高める条件から、必要なレーザーのエネルギーが決定される。レーザーのパルス幅は、燃料球のペレットが、レーザーの加熱を受けて温度が高くなり、熱速度で自己分解する時間で評価できる。1 億度の温度の水素の熱速度は、約 300 km/sec であり、ペレットの寸法が決まれば、パルス幅が決まる。さてローソンの条件は

以下のように表わされる。

$$\left(\frac{n}{2}\right)^2 \sigma v W \tau > 3 k_B T n \quad (2)$$

ここで n , σ , v , W および τ はそれぞれ燃料密度、反応断面積、相対速度、反応当りの発生エネルギー及び反応時間である。左辺は τ 秒間に核反応で発生するエネルギーであり、右辺は、燃料を 1 億度の核融合温度まで加熱するために必要な熱エネルギーである。(2) 式にそれぞれ既知の定数を代入すると、 $n \tau > 10^{15}$ 秒/cm³ となる。この時間 τ は、ペレットの自壊する速度を用いて、ペレット寸法 (R) で書き直すことができ、また密度を質量密度 (ρ) で書き直すと、 $\rho R > 0.1 \text{ g/cm}^3$ となり、これが、慣性閉じ込め核融合用のローソン条件になる。この条件が実現すれば、核反応で発生するエネルギーが加熱エネルギーを上回る。

ペレットに投与すべき必要エネルギー (E_{th}) は以下のように表わされる。

$$E_{th} = \frac{4}{3} \pi R_{\text{pellet}}^3 \cdot 3 n k_B T \quad (3)$$

R_{pellet} はペレットの半径であり、(2) 式の右辺、つまり加熱に要するエネルギーにペレットの体積をかけたものである。レーザーの必要投射エネルギー E_L は、レーザーのエネルギーが燃料の加熱に使われる効率 ϵ_f を用いて次のように表わされる。

$$E_L = 4.6 \times 10^8 \cdot \frac{4}{3} \pi (\rho R)^3 / \rho^2 \cdot 1 / \epsilon_f \quad (4)$$

定数 $\rho R = 0.1 \text{ g/cm}^3$ を (4) 式に代入すると、必要エネルギーは $E_L \propto 1/n^2$ となり、密度の 2 乗に逆比例する。言いかえると、燃料球が圧縮されて、密度が高くなれば、必要エネルギーが大幅に減ることになる。燃料の燃焼率 f は ρR を用いて次のように表わすことができる。

$$f = \rho R / (6 + \rho R) \quad (5)$$

これから明らかなように ρR が大きくなれば、燃焼率が増加し、発生エネルギーが増加する。発生エネルギー E_{out} は燃焼率 f と燃料の質量 m を用いて次のように表わされる。

$$E_{out} = 4.2 \times 10^{11} f m \text{ [J]} \quad (6)$$

ここで明らかに $m = \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot \rho$ である。出力エネルギー E_{out} とレーザーの投射エネルギー E_L の比がペレット利得 Q であり、

$$Q = E_{out} / E_L = 913 \epsilon_f \rho R / (6 + \rho R) \quad (7)$$

と表わされる。ペレット利得 Q は、 ρR と ϵ_f を用いて表わされる。ここで $Q = 1$ 、すなわちレーザーでつぎ込んだエネルギーと発生するエネルギーが等しいという条件を代入し、 $\epsilon_f = 0.03$ とすると、 $\rho R = 0.2 \text{ g/cm}^2$ となる。固体の燃焼を考えると $\rho = 0.2 \text{ g/cm}^3$ であるから、 $R = 1 \text{ cm}$ となり、(4)式よりレーザーの必要エネルギーは 10^{10} J になる。ところがもし、燃料球が圧縮されて元の密度に比べ1000倍になったとすると、密度は 200 g/cm^3 になり、必要投射エネルギーは(4)式より 10^4 J つまり 10 kJ となる。これは楽観的な評価であって、種々の損失を考慮すると、 100 kJ 程度のエネルギードライバが必要となる。これでブレークイーブンつまり $Q = 1$ が実現できると考えられる。したがって、我々のレーザー開発への努力は、 100 kJ レベルのレーザーをいかにして作るかということにポイントが注がれている。

D T 核反応では、発生エネルギーの80%を中性子が持ち、20%を α 粒子が持っている。 α 粒子は燃料の自己点火に使われる。中性子の有効な利用方法として核融合核分裂複合炉構想がソ連とかアメリカあたりで考えられている。すなわち、核反応の起っている炉心のまわりに欠損ウランなどのブランケットを設け、中性子により核分裂を発生させる。このため大幅にエネルギー利得が増える。核反応により発生したエネルギーによる発電効率は

$$E_{out} / E_{in} = \eta_L Q \eta_T (0.8 M + 0.2) \quad (8)$$

となる。ここで η_L , Q , η_T , M はそれぞれレーザーの効率、ペレット利得、熱電気変換効率、ブランケットの増倍率である。この M が大きければ、レーザーの効率が低くても、あるいは熱効率が低くても、十分エネルギーバランスが成り立つ。たとえば、レーザーの効率を5%とする。これは、炭酸ガスレーザーで実現可能であり、現に大阪大学の炭酸ガスレーザーでは効率8%が実験的に得られている。ペレット利得を50、熱効率を40%とすると、(8)式より $M = 1$ となり、この場合純正核融合発電が可能である。

ガラスレーザーを考えると、効率が0.2%、ペレット利得100にとると、 $M = 16$ が必要となる。要するにブランケットで16倍のエネルギーが稼げたら、現状でもガラスレーザーで核融合炉の設計が可能となる。Fig. 2 にブランケットのエネルギー増倍率に対する核融合エネルギー利得すなわちレーザーの効率とペレット利得の積の特性を示す。純正な核融合炉に対して、発正したエネルギーを全部自分で使ってしまう、つまり電気を外に供給しないという条件では、 $\eta_L Q = 2.5$ で自立する。電気エネルギーの90%を外部へ、10%を内部へ供給するという条件では、 $\eta_L Q = 25$ が要求される。しかし、ブランケットでエネルギー増倍を行うと、必要な $\eta_L Q$ は大幅に減少する。たとえば前述の例のガラスレーザー装置で自立しようとする $M = 16$ であった。このためのブランケット材としては、天然ウランが考えられる。核分裂、核融合複合炉を考えると、核融合発電が成立しやすいのである。

現在にたち戻って今、何をなすべきかという、強力ドライバの開発、レーザービームとターゲットとの結合、賦与されたエネルギーにより発生する爆縮および核反応点火の特性を解明することである。これらの結果から、慣性核融合の可能性を科学的に明らかにすることができよう。次の段階は、発電所として経済的に成り立つかどうかという評価がポイントになる。

ここで核融合研究の重要課題であるエネルギ

ードライバーについて述べよう。

エネルギーードライバーの進歩を Fig. 3 に示す。現在、アメリカのリバモア研究所の「ノベット」装置が最大であるが「激光Ⅷ号」が完成すると世界最大のレーザー装置となる。現在の最大の

炭酸ガスレーザーは、アメリカのロスアラモス研究所の「ヘリオス」装置及び「烈光Ⅷ号」であり、共に10kJ級のレーザーである。ロスアラモス研究所で「アンタレス」が建設中であり、出力40kJを持つ予定である。粒子ビーム装置

Fig.2. Required fusion energy gain(product of laser efficiency and pellet gain) as a function of energy multiplication in a blanket. The required gain is drastically reduced by fission fusion hybrid concept.

Fig.3. Progress of ICF (Inertial Confinement Fusion) drivers.

Fig.4. Photograph of glass laser system "GEKKO MII". Output power per beam of 3 TW/beam is highest in the world.

はエネルギーは非常に大きい、集中性が悪い
ためパワーが小さい。サンディア研究所で建設
中の「PBFA II」はMJクラスの装置である。
この装置は36モジュールからできており、1モ
ジュールを比較すると「励電IV号」とほぼ同じ
である。各種のドライバーの開発が進められて

いるが、どのドライバーが最適であるかは、今
後の問題である。

Fig.4に大阪大学の「激光MII号」を示す。
この装置は「激光XII号」を建設するために必要
な超安定発振器、ディスク増幅器、自動アライメ
ント、像転送等の新しい技術開発のためつくられ

た2ビームレーザーである。この装置には、大阪大学と保谷ガラスが開発したリン酸ガラスが使用されており、その特性は従来のケイ酸ガラスをはるかにしのぐ好結果をえている。アメリカの「シバ」は旧式のケイ酸ガラスを使用したため性能的に劣り、改造を余儀なくされた事実がある。Fig. 5にリバモア研究所の「シバ」装置を示す。Fig. 6が目下建設中の激光Ⅻ号の実験棟である。現在建物ほぼ完成しており、激光Ⅻ号の設置がすすんでいる。

この装置では、実験の効率をあげるための配慮がなされターゲットチェンバーが二つある。Fig. 7は炭酸ガスレーザー烈光Ⅷ号である。この装置はすでに完成しており、出力は10kJである。ガスレーザーのため、高速繰り返し動作が可能であり、また効率が高いため、将来有望なレーザーであるが、波長が $10\mu\text{m}$ と長い点が欠点になっている。Fig. 8にロスアラモス研究所で建設中の「アンタレス」を示す。中心部に電子銃があって、電子ビームが放射

Fig. 5. Photograph of 10kJ glass laser system "Shiva" (LLNL, U. S. A.)

Fig. 6. Photograph of building of largest glass laser system "GEKKO Ⅻ".

Fig. 7. Photograph of 10kJ CO₂ laser system "LEKKO VIII".

Fig. 8. Photograph of 40kJ CO₂ laser system "Antares" (under construction, LANL, U. S. A.)

Fig. 9. Photograph of 100kJ ion beam machine "REIDEN IV".

状にまわりのレーザーガス中に放出される。このような方式で12ビームを1モジュール化することができ、2モジュールで40kJの大出力を発生する魅力的な装置である。Fig. 9に軽イオンビーム装置「励電Ⅳ号」を示す。出力エネルギーは100kJと非常に大きいが、荷電粒子ビームであることにより、集束技術が難しく、いかにして電荷中和を達成するかということがポイントである。

次に慣性閉じ込め核融合のプラズマ物理の問題について述べる。Fig. 10にレーザー照射時の燃料ペレットの様子を模式的に示す。右側から入射したレーザーは臨界密度点(cut off

point) まで到達でき、レーザーのエネルギーがここに注入される。注入されたエネルギーは内部へ(左側へ)伝わり、C-J点を過ぎ、さらに内へ噴出面(ablation surface)まで伝わる。ここからプラズマが外へ噴出をするため反作用により内部に圧力を発生し燃料を圧縮する。以上のプロセスが研究の対象である。つまりどのようにエネルギーが注入されたか、注入されたエネルギーがどのように内側へ伝わるか、いかに噴き出しが起こるか、以上の結果、燃料密度がどのように上がるかが重要である。

以上のような研究対象に対し、数多くの興味ある成果が得られている。例えばレーザーの波

Fig. 10. ρ - x , t - x diagram of ablative compression.

長に対する吸収率の特性をFig. 11に示す。横軸にレーザーのパワーを、縦軸に吸収率をとっている。結論として言えることは短波長レーザーの方が吸収率が高いということで、3倍高調波0.35 μm のガラスレーザーを使うと100%近

い吸収率が得られる。レーザーの波長が長い場合にはレーザーのパワーが上がると吸収率が低下する傾向が見られる。従ってレーザーの使い方としては比較的低いパワーで、つまり吸収率の高い領域で動作させる方法が考えられる。も

Fig. 11. Intensity dependence of absorption for 0.35 μm , 0.53 μm , 1.06 μm and 10.6 μm laser. Extremely high absorption ($\sim 100\%$) is obtained in the case of 0.35 μm laser.

Fig. 12. Ablation pressure as a function of absorbed laser and radiation intensity.

う一つのアプローチとしてはレーザーパワーが非常に高くなると非線形効果により一度低下した吸収率が再び高くなることを使う方法である。この場合には発生するプラズマが非平衡状態になり、高いエネルギーを持った高速電子が大量に発生し、このためペレットのデザインに工夫を要する。

Fig. 12 にレーザーの波長を変えた場合に圧縮圧力はどの程度得られるかのデータを示す。簡単に言えば50Mbar程度の圧縮圧力がどの波長でも得られ、これでもって燃料を所定の密度まで圧縮することは十分可能である。燃料の構造の違いによる圧縮の変化をFig. 13に示す。燃料球をプラスチックでカバーし、その厚さを $0.5\mu\text{m}$ 、及び $10\mu\text{m}$ とした場合の計算機シミュレーション結果である。プラスチック層が $0.5\mu\text{m}$ の場合には、レーザーが照射されると同時に右と左に対称的にプラズマの噴出が起り、半分のエネルギーを外に、内向の半分だけで圧縮が生じる。これは爆発型の圧縮 (explosive compression) と呼ばれる。それに対し $10\mu\text{m}$ のプラスチック層を設けた場合には最初プラズマの噴出は外側 (右側) だけにおこり、ペレ

ットの殻が徐々に内側 (左側) に動き出す。この時、図からも明かなように高い燃料の圧縮が得られる。これは噴出型の圧縮 (ablative compression) といわれる。以上のように、ペレットのデザインにより圧縮状況が大きく変化することに注意したい。ペレットのデザイン研究の重要なことがよく分る。アメリカでさかんに用いられているペレットの構造の一つに、上に述べた厚いプラスチック層を持ったペレットがある。この圧縮過程はロケットモデルで説明されるが、このときのロケットの効率はFig. 14で示されている。捨てたMassが大きい程、効率は高くなるが、全部捨てることはできない。ロケット的発想に対して我々は新しいタイプのキャノンボールターゲットを考案した。これは図中にも示されているように、砲身と弾丸との間にレーザーのエネルギーを注入する。もし砲身が弾丸よりずっと質量が大きければ圧縮効率は100%になり、非常に効率の良い圧縮ができる。実験及び計算シミュレーションでこのようなターゲットの有効性を調べている。Fig. 15 にシミュレーション結果の一例を示す。上部のレーザーを注入する穴からレーザーが入り、内球と

Fig. 13. Plasma flow diagram of D_2 gas filled GMB (Glass Microballoon) with various thickness coating of CH_2 .

外球の間をレーザーが反射されながら一様に吸収されてゆく様子を示している。このとき均一な圧縮が達成される。

Fig. 16 にX線によるペレットのイメージを

示す。用いたレーザーは激光M II号で、ビーム数は2本であるが、均一な圧縮コアの像が見られる。この時、中性子が 10^8 個程度発生した。

Fig. 17 に従来のターゲットを使ったX線のイ

Rocket Model

$$\begin{aligned}\eta_H &= \left(\frac{v}{u}\right)^2 \left[\exp\left(\frac{v}{u}\right) - 1 \right]^{-1} \\ &= \left(\frac{M_0}{\Delta M} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{\Delta M}{M_0}\right) \right]^2 \\ &\approx \frac{v}{u} \approx \frac{\Delta M}{M_0}, \quad \left(\frac{\Delta M}{M_0} \ll 1\right)\end{aligned}$$

Cannonball Model

$$\eta_H = \frac{M}{M+m}$$

Fig. 14. Schematic diagrams of rocket model and cannonball model with hydrodynamic efficiencies.

Fig. 15. Ray traces of laser beam in the cannonball target. The uniform irradiation of inner shell is achieved by multiple reflections on inner and outer shells.

Fig. 16. X-ray image of compression core of cannonball target. The compression core is quite uniform by two beams irradiation.

Fig. 17. X-ray image of compression core of simple GMB target.

メージを示す。レーザーが左右から照射されており丁度両側から押しつぶされたような形で圧縮され、均一性が著しく損なわれている。このため多くのレーザービームをターゲットに均一に照射する方式で、圧縮の均一性を保持するのが一般的であるがキャノンボールのようにターゲットデザインを工夫することによってすぐれて均一な圧縮を達成することができる。

慣性閉じ込め研究用ターゲットは直径1mm以下であり、しかも多層構造のターゲットが要求されるので超細密加工及び各種コーティング法等の技術開発が必要である。同時にシミュレーションコードが不可欠となる。慣性閉じ込め核融合用ターゲットの最適構造、材料、及びその寸法等はあらかじめ計算機シミュレーションで求めることがターゲット製作に重要である。一次元のコードにより大略設計を行い、二次元のコードにより不安定性の有無及び均一性等さらに詳細な項目を調べながら設計を進める。

Table I に、慣性閉じ込め核融合用に開発されたコードを示す。一次元コードでは、イギリスで開発された「MEDUSA」及びその改良型の「Updated MEDUSA」があり、各所で利用されている。我々のところで開発したものには

HIMICO (Hydrodynamic Implosion Investigation Code) 及び EXPLD がある。これらのコードは、いろいろな物理現象をモデル化してとりこんでおり、きわめて有用である。二次元のコードでは、アメリカには秘密の「LASNEX」コードがある。我々にはこれに対応する HISHO 及び IZANAMI がある。

もう一つ重要なテーマである診断技術にふれなければならない。扱う密度は低密度から超高密度 (10^{26} /cm³) まで広い範囲にわたり、温度は10 keV と非常に高温である。また測定する対象の寸法が非常に小さいミクロンのオーダーであり、時間がピコ秒のオーダーである。高温、高密度の対象を時間および空間について高分解で測定するためX線、中性子等を使った新しい計測法の開発が進められている。

最後に大阪大学で実施したレーザー核融合炉の概念設計を示そう。Fig. 18 は炉設計委員会がまとめた核融合炉の原案である。8ビームのレーザーが炉の中心に置かれたターゲットに照射され、そこで核融合反応が発生する。この設計案の特徴は炉の内面に厚さ60cmのリチウムの液体が磁場でガイドされて流れていることである。このリチウム流が核融合炉の第一壁を防護

Table I. Available codes in ICF researches.

	Code Name (Developed by)	Properties
One-Dimensional Hydrodynamic Code	MEDUSA (Culham, UK)	Two temp.
	LILAC (LLE, U.Rochester)	Multi-group radiation
	PHD-IV (U. Wisconsin)	One temp., No flux limit
	MINIHY (MPQ, FRG)	Single group radiation diffusion
	Updated MEDUSA (KfK, FRG)	Fast ions, radiation diffusion
	EXPLOD (ILE, Osaka)	Multi-group hot electror Multi-group radiation
	HIMICO (ILE, Osaka)	Two temp. Diffusion of α
	1D Code of Frascati, Italy	Diffusion of α , radiation and neutron
	1D Code of TIT, Tokyo	P3-S6 multi-group time dependent transport
Two-Dimensional Hydrodynamic Code	NORCLA (Spain)	?
	LASNEX(1D) (LLNL)	?
	LASNEX (LLNL)	?
Particle code	ORCHID (LLE, U.Rochester)	Lagrange Rezoning 2D Ray trace, Multi-group hot electroi
	HISHO (ILE, Osaka)	fluid particle code 2D Ray trace, moving grid , Multi-group radiation and hot electron
	IZANAMI (ILE, Osaka)	2D Code (ILE, Osaka) ZOHAR (LLNL)
Others	DIAGNOSTICS (ILE, Osaka)	Relativistic and electro- magnetic field
		X-ray line profile

する。すなわち、発生した14MeV の中性子はリチウム流により、そのエネルギーが一桁低下し、中性子が壁に与える影響を現在の原子炉壁のそれと同じレベルまで引き下げることができる。この点から、核融合炉の設計に関して、慣

性閉じ込め方式は非常に見通しが明るいと言える。アメリカにおいても1980年のフォスタレポートは「慣性閉じ込め核融合は、どうしても越えることができない問題点は見あたらない。技術的な開発事項は山積しているが、2000年に向

Fig.18. Concept of a laser fusion reactor.

け核融合発電を実現するため国家的努力を投入すべきである」と結論している。レーザー核融合研究の関連する分野は非常に多く、大阪大学レーザー核融合研究センターだけでは到底カバーできない。レーザー研究者、材料研究者、計測の専門家等各分野からの協力が必要である。幸いわが国では学官民あげての研究体制ができつつある。例えば通産省もレーザー核融合に取り組み始めており、全国的に緊密な協力体制を

作り、各分野の人々の協力を得て、1980年代には慣性閉じ込め核融合により、ブレークイーブンを達成したいと考えている。

おわりに一言、レーザー核融合の研究はレーザーの技術や光精密工学に多くの波及効果を与え、すばらしい新技術が幾多完成されていることに言及して、レーザー学会10周年記念講演のむすびとしたい。