レーザー スポット

Lawrence Livermore 研究所における
レーザー核融合計画

横 山 昌 弘*

Laser Fusion Program at Lawrence Livermore Laboratory

Masahiro YOKOYAMA*

1. まえがき

昨年末よりの世界的なエネルギー危機と共に新エネルギー開発の一つとして改めて核融合研究の重要性が認識されるようになってきている。最近の米国原子力委員会 A E C の予想では核融合の Scientific feasibility の実現は1980—82年で、これに要する費用は一つの実験当り3,000—5,000万ドルであり、D-T 燃料をもやす Physics Test Reactor は1986—87年で、1億ドルを要し、Power Reactor の実現は1990年代中期であろうというのがその予想である¹⁾。そして Fusion feasibility を実現するための3重要計画として A E C では Princeton における Princeton Large Torus PLT と Los Alamos における Scyllac device と Lawrence Livermore における 2 XII mirror device をとりあげている²⁾。

最近、これらの磁場閉じ込めによる制御核融合 C T R に対して、レーザーによる慣性閉じ込めと高圧縮を利用したレーザー核融合が出現し、野球のたとえでいうならば C T R は1塁をまわって2塁にむかって走りだしているランナーであるのに対し、レーザー核融合はまさに1塁にむかって走りだしたランナーであると言われている。ここでは世界で最大規模のレーザー核融合計画をもっている米国の Lawrence Liver-

more 研究所でのレーザー核融合計画について述べてみることにする。

2. レーザー核融合の背景

核融合反応を実現するためにはよく知られているように先ず次の条件が満たされねばならない。燃料として D T を用いたとき第1は ignition temperature として 10^8°K が必要であり、第2は融合反応に寄与する粒子数 n と閉じ込め時間 τ の積いわゆる Lawson number $n\tau = 10^{14} \text{ sec/cm}^3$ の達成が必要なことである。磁場閉じ込め方式による C T R では比較的低密度で $n \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ であるため、 $\tau \approx 1 \text{ sec}$ 程度を必要とする。これに対してレーザー核融合による慣性閉じ込め方式では $\tau \approx 10^{-12} \text{ sec}$ 、 $n = 10^{26} \text{ cm}^{-3}$ となる。それ故 liquid deusity よりも少くとも $10^3 \sim 10^4$ 倍程度圧縮する必要がある。

このようにしてレーザー核融合はマルチレーザー光を集光照射することによって D T 燃料が爆発的に飛散する前に非常に短い時間内に explosion による反作用としての Implosion による高圧縮により充分な高密度で 10^8°K まで加熱することを目標としている。このため、C T R の磁場閉じ込めに必要な磁場装置を必要としない利点がある。更にプラズマの不安定性は C T R の場合程大きな障害とはならない。難点としてはレーザー光が D T ペレットに吸収さ

* 大阪大学工学部

* Faculty of Engineering, Osaka University.

れた時に高エネルギーの superthermal 電子が発生し、これが中に深く進入し、過早にペレットを加熱して圧縮をむつかしくする Preheating の現象と superthermal 電子の飛程が長いために cold electron との衝突が少なくなり、ペレットとその周りの atmosphere との熱交換の割合が減少し、ペレット自身による implosion が難かしくなる Decoupling の問題とがある。いずれにせよ、二次元のコンピューター計算 LASNEX プログラムの示す所によれば、もしレーザー効率として10%が達成できるならば、核融合エネルギーと入力レーザーエネルギーの比即ち $\text{gain} = 75$ がレーザー核融合炉に必要となる。このときの所要レーザーエネルギーは300 kJ, $\sim \text{ns}$ のパルス幅のものとなり、 10^4 倍の圧縮が起れば丁度そこで最大75の gain が得られる。このような300kJ, 10%効率のレーザーを用いると毎秒100回の microexplosion を行うことによって1GWパワープラントの建設も夢ではない。³⁾ 現在の所この出力を有するレーザーはまだないが physical breakeven と呼ばれる $\text{gain} \geq 1$ を実証することは可能と考えられる。そのための最少レーザーエネルギーとして5kJが必要となると言われている。レーザーのタイプとして固体レーザーではルビー、ガラス、ガスレーザーでは、 CO_2 , Iodine があるが、現在の時点では Fusion feasibility の目的にはガラスレーザーが最も有力である。このため Lawrence での計画の主力は10kJ ガスレーザーの開発においている。一方 Los Alamos では CO_2 レーザーを主として開発している。

3. Lawrence における核融合計画

米国の Lawrence Livermore 研究所においては AEC の核融合計画として、大別して CTR によるものとレーザー核融合によるものと2つの計画を持っている。

CTR によるものとしては、ここではあまり深く立ち入らないが、L. D. Pearlstein をリーダーとする理論研究、R. F. Post をリーダーとする磁気ミラー部門、ここでは Base Ball II.

2XII ミラー装置などがある。更に N. C.

Christofilos をリーダーとするアストロンがあったが、これは1972年9月 Christofilos の死と共に1973年秋終了となった。この他、トロイダル閉じ込めとして Superconducting Levitron 装置や Plasma and Atomic Research, 融合炉技術、相対論的電子ビームなどがある。⁴⁾

これに対してレーザー核融合計画は歴史的にみると次のような発展段階をへてきている。先ず1960年の後半に James Wilson をリーダーとする B-Division がレーザーの研究を目的として発足し、その後 Joe Fleck の T-Division がレーザーによる種々の過程の基礎物理、即ちセルフフォーカスなどを研究する目的でスタートしている。更に1962年になってレーザー核融合計画は明確な形をとりはじめ、John Nuckolls をリーダーとした A-Division が、レーザー核融合のコンピューター計算とペレット、ターゲット design を目的として発足し、ほぼ同じ頃、Ray Kidder をリーダーとする Q-Division が大出力短パルスレーザーの開発と、レーザープラズマ相互作用の基礎研究と Ignition and burn of DT を目的としてスタートしたのである。この Q-Division は1969年の終りまで8名の科学者、20名の補助者で毎年約100万ドルで運営された。

その後1970年になって本格的なレーザー核融合を目指す Y-program が200万ドルの予算でスタートし、この計画を推進する Y-Division が前に水爆の開発にたずさわったことのある associate director for plans and lasers の Carl Haussmann の監督のもとで、John Emmett をリーダーとして発足した。その後1971年より A-Division, Q-Division, B-Division 等が Y-Program の一部を担当することになった。⁵⁾ しかし夫々の Division はその後も存続している。予算面から見ると、1972年に950万ドル、1974年に1,710万ドルと増大している。Man Power としては1973年251名、1974年285名であり最終的には400名が必要とのことである。Lawrence における Man Power と予

Table 1. LASER PROGRAM RESOURCE PLAN

Through Fiscal Year 1974 (Costs in millions of dollars)		
	1973	1974
Manpower (direct)*	251	285
Operating cost		
Hardcore	10.4	12.5
Major procurements	2.3	3.5
Major instruments	0.8	1.1
	13.5	17.1
Capital equipment	1.0	1.5
Facilities		
GPP	0.3	0.3
Laser fusion facility	6.8	—
High energy laser facility	—	20.0

* Overhead manpower is approximately 60% of direct manpower.

Table 2. LASER PROGRAM SOURCES

Operating	Funding by Laboratory	
	FY 1973	FY 1974
LASL	6.5	11.4
LLL	13.5	17.1
Sandia	2.7	3.5
NRL	0.5	0.5
Total	23.2	32.5
Facilities	FY 1973	FY 1974
LASL R & D lab	5.2	
LLL laser fusion lab	6.8	
LLL high energy laser facility		20.0

算についての表を Table 1 に示す。1973 年における 251 名の人員および予算の割りふりは固体レーザーの研究、開発に 110 名、590 万ドル、ターゲットの開発に 39 名、220 万ドル、気体および化学レーザーに 100 名、530 万ドル、アイソトープ分離に 2 名、10 万ドルである。これらの予算はいずれも operating cost であるが、Table 1 から分るようにこの他に Facilities の予算がある。Table 2 に Los Alamos, Sandia, NRL 研究所におけるレーザー計画の

予算との比較を示す。注目すべきは Lawrence は全レーザー予算の半分以上を占めていることと、1974 年に High energy laser facility として 2000 万ドルの巨額の予算を手に入れていることである。このレーザー核融合計画では 90% が公開で、ターゲット関係を含む約 10% が非公開となっている。Lawrence では 1 つの発振段より 1 mJ, 20ps—1 ns の出力を得て、これを 12~20 のビームに分け夫々パラレルにして増幅段を動作させ最終的に 10kJ を DT ターゲットに集光照射するシステムを 1977 年初頭に完成させる計画である。現在までの所、2 ビームでピーク 1 TW のレーザーが動作可能で、これで 2 方向からの照射によるレーザーターゲット相互作用の実験を行う予定である。1975 年には 6~12 本のビームでピーク 5~10 TW システムを動作させ球対称の照射によって high compression にいたる中間段階の implosion の実験と implosion の診断技術の開発を計画している。更にその次の段階として 1977 年には spherical symmetrically facility としてピーク 50~100 TW を動作させ、集光照射によって 10kJ, 100~500ps 又は 50kJ, 数 ns のエネルギーによる高圧縮によって光エネルギーの入力が熱核融合イールドに等しくなる Scientific feasibility が検証可能であると考えている。

燃料として solid ペレットを用いる場合、レーザー出力として 300kJ, ピーク 1000 TW 必要であるが、hollow ペレットを使用すれば、前者に比較して面積、体積共に大きくより長い時間の相互作用が可能であるのでレーザー出力として 100 TW でよいと言われている。³⁾ Fig. 1 に現在建設中の 10kJ ガラスレーザーによる 12 ビーム照射の Laser Fusion Laboratory の建物断面図を示す。⁶⁾ この 7 月には建物が完成し、移転を終ったということである。

Lawrence ではこのようなガラスレーザーの他に CO₂ レーザーとして 1974 年度中に 50~100 J, 1 ns を完成、動作させる予定である。このレーザーは発振段と Pre-amp, UV 光電離 amp と 2 段冷陰極型電子ビーム制御増幅段のシステ

Fig. 1. Sectional view of the 12 beams, 10kJ High-Energy Laser Facility.
(Lawrence)

ムからなっている。

ケミカルレーザーとしてはパルス幅 100ps の Iodine レーザーを開発中であるがまだ基礎研究の段階である。現在の所、ガラスレーザーはレーザー核融合の Scientific feasibility の検証には最適であるが、実際の核融合炉には不適當である。DT を燃料とする出力 1 GW のパワープラントでは効率 10% として 300kJ, くりかえし 100pulses/sec の新レーザーが必要となる。

効率 10% のレーザーの媒質中で発生する平均熱量は 300MW であり、冷却の観点からレーザー媒質として高流速の流体が必要である。液体は非線形光学係数が大きいので、気体の方がよ

いが、気体の場合 optical breakdown の threshold が λ^2 に逆比例する。例えば $10.6 \mu\text{m}$ で 1 気圧の気体に対する threshold が 10^9 W/cm^2 であるのに対し、 $1.06 \mu\text{m}$ では 10^{11} W/cm^2 となり、短波長のレーザーの方が望ましいことが分る。更にターゲットで生じたプラズマの不安定性の方から見ても短波長の方がよい。しかし、波長が短くなりすぎると 2 光子吸収による光電離のため、レーザー光は増幅されるより吸収される。これらの理由でレーザー核融合のための最適波長は $0.3 \sim 0.8 \mu\text{m}$ で、動作圧力は数気圧以下で、superfluorescence と parasitic oscillation 防止のため specific

Table 3. Lasers for Fusion

LASERS FOR FUSION

Property	CO ₂	Nd: Solid	New: Gas
Wavelength	10.6μ	1.06μ	$0.3 \sim 0.5 \mu$
Efficiency	5 %	0.1%	> 5 %
Energy density	15 J/l (3 atm)	500 J/l	100—1000 J/l
Small signal gain	.045—.053 cm ⁻¹	.04—.08 cm ⁻¹	0
Pulse width	≥ 1 ns	≥ 20 ps	0.1—1.0 ns
Demonstrated	200 J (1 ns)	350 (1 ns)	$10^5 \sim 10^6 \text{ J}$
Energy output	0 (0.1 ns)	350 (0.1 ns)	(0.1—1.0 ns)
Scalability	Partially defined	Defined to 10^4 J	Scalable
Wavelength } conversion }	Not demonstrated	Demonstrated $0.265 \sim 1.9 \mu$ (≥ 40% eff)	Not required
Average power capability	High (flow)	Very low	High (flow)

gain coefficient の小さい新レーザーが必要となる³⁾。Table 3 に CO_2 、ガラスレーザーに対する新ガスレーザーの必要諸元を示す。このような新レーザーの可能性として、Excimer レーザーがあり、 $\text{Ar} + \text{N}_2\text{O}$ 混合ガス中の $\text{O} (^1\text{S}_0)$ による $5577\text{\AA}$ のレーザー発振や、同じ系列の S, Se, Te などが考えられているがまだ適当なものは見つかっていない。

4. まとめ

以上 Lawrence Livermore 研究所におけるレーザー核融合計画についてその概要を述べて来たが、Lawrence では1977年に世界最大の12ビーム、10kJ ガラスレーザーによる球対称照射によって breakeven を実現しようという遠大な計画が着々と実現に向かっている有様は注目

Table 4. Progress of Fusion

Table 5. Laser Applications Program

に値する。本年4月に、ドイツ、Garching で行なわれた第7回レーザープラズマ国際会議出席者の予想では、世界ではじめて breakeven の実験に成功するのは Lawrence のグループであろうということであった。過去および将来にわたっての核融合の歩みを CTR との比較と共に示したのが Table 4 である。この表から分ることは DT fuel experiment はレーザーの方が早く、一方 Reactor は CTR の方がやや早くなるというのがその予想である。いずれにしても、Reactor の実現は1980年代の後半である。Table 5. にレーザーとレーザー核融合の1970年代後半から展開すると思われる応用プログラムについての予想を図で表わしたものを示す。レーザーとしての応用は photochemistry, Isotope Separation などがあり、レーザー核融合としての応用は Nuclear design 即ち X-ray/neutron source, code normalization の他、1990年代になって Propulsion, Fuel などが予想される。ただ注意すべきことは、この表を見

ても分るようにレーザー核融合の発想は核兵器から出発しており、又、レーザー応用としての Isotope Separation は平和的利用と軍事的利用は相半ばしている。このように新しいエネルギー開発の一つのアプローチとしてのレーザー核融合もこれまでのような奇麗事の考えだけでなく、我々としてはあくまで平和的利用に徹する覚悟をきめてかかる必要があると思われる。

参考文献

- 1) Physics Today: Oct. p. 77 (1973).
- 2) Physics Today: Feb. p. 69 (1973).
- 3) J. L. Emmett et al: Sci. American June. p. 24 (1974).
- 4) Controlled Thermonuclear Research, UCRL-50002-72 (1972).
- 5) Newline, vol. 4, No. 10 (1973).
- 6) Laser Fusion Program, UCRL-50021-73-1 (1973).