

レーザーによる核融合反応の研究

大阪大学工学部電気工学科教授 山中千代衛
名古屋大学プラズマ研究所

1. まえがき

レーザーの能力が進歩し、大量のエネルギーをきわめて短い時間を対象に投射することが出来るようになって来た。この技術により重水素を加熱し、核融合反応を実現する試みも夢ではなく、理論的に目標とされているローソンの核融合条件をめざした研究が現実を開始されるようになった。図1はこの線にそった各国の研究状況を示したものである。

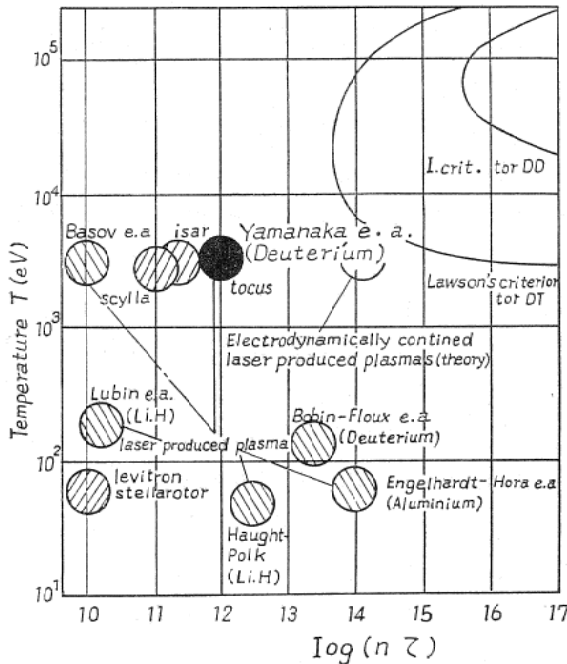


図1 核融合プラズマへのアプローチ

レーザーの投射エネルギーが 10^{16} w/cm^2 に到達するとその電界は原子内電界と同程度になり、たちまち物質をプラズマ化する。

超高温を実現し、核融合を達成しようとするアプローチの原理は散逸によるエネルギー損失を上まわるように急速にエネルギーをプラズマに注入することである。この方法はプラズマのとじこめを実質的に必要としないので慣性ととじこめと呼ばれている。この型の運転方式は性質上パルス運転である。運転のサイクル中にレー

ザーが介在するので、その効率が重要な因子となる。ローソン条件より零出力炉を得る為のレーザーエネルギーは $10^5 \sim 10^8 \text{ Joule}$ と推定されている。

2. 高出力レーザーの現状

高出力¹⁵⁾レーザーには、ルビー、ガラス、液体¹⁰⁾ (SeOCl_2 , POCl_3), 気体 (CO_2) 等が用いられる。ルビーレーザーは大形結晶育成上問題がある為 1 GW 以上を得るには難点がある。この点ガラスレーザー、液体レーザー、 CO_2 レーザーは大形レーザー素子が得られる。

固体レーザーの開発には、光に対する素子の破壊耐力の向上が重要である。ガラスロッド中に含まれた金属微粒子はレーザー光を強く吸収するので、急膨張し、ガラス中にクラックを発生し破壊をもたらす。直径 1μ 程度でも障害となる。白金が混入していると破壊耐力はパルス幅 30 ns で 10 J/cm^2 以下となる。白金フリーの素子では 40 J/cm^2 以上である。表1に各種ガラ

表1 レーザー光に対するガラスの破壊耐力
(パルス幅 30 ns マルチモード, *シングルモード)

(a) バリウムクラウンガラスの破壊耐力

内部	白金不純物による	15 J/cm^2
	不純物含まないもの	400 J/cm^2
表面		22.5 J/cm^2
		* 88 J/cm^2

(b) 処理による表面破壊耐力の変化
(バリウムクラウンガラス)

	処理前	処理後
HF処理	* 88 J/cm^2	* 140 J/cm^2
	22 J/cm^2	40 J/cm^2
化学強化処理	23 J/cm^2	13 J/cm^2
SiO_2 コーティング	22 J/cm^2	23 J/cm^2
MgF_2 コーティング	22 J/cm^2	10 J/cm^2

スのレーザー光に対する破壊耐力を示す。

ガラスの屈折率はレーザー光強度に正の依存性があるため、セルフフォーカスの現象が発生し、局部のビームエネルギー密度が上昇し、異常に低い破壊耐力を示すので注意を要する。またロッドの端面の破壊は表面研摩状態¹⁷⁾に依存し、この改良は実用上きわめて大切である。このほか、ガラス素子としてはNa³⁺イオン最適濃度、ソーラリゼーション、蛍光寿命等について対策を考慮する必要がある。

液体のPOCl₃をガラスの代わりに基材に用いるレーザーは誘導放出断面積が8×10⁻²⁰cm²とガラスよりも1桁大きい為増幅率が大き増幅器として非常に有効である。また液体であるため永久破壊を受けない上、表2に示す如く発振スペクトル幅が小であるから、これまた増幅段に適した素材である。

表2 発振波長とその波長幅

エレメント	発振波長(μ)	波長幅(Å)
シリケートガラス	1,063	80
バリウムクラウンガラス	1,059	50
SeOCl ₂	1,056	10
POCl ₃	1,052	6

このほか高気圧CO₂レーザー¹⁸⁾は効率が10~25%と高く、CO₂ 1 lあたり20 J程度のエネルギーを取り出せるためプラズマ応用に非常に

有望であると思われる。電子ビームを用いた圧力10気圧程度の放電技術が確立すれば今後5年以内にガラスレーザーにとってかわる可能性がある。しかし現時点ではガラスレーザーが最も適したレーザーであろう。

表3に大出力レーザーの性能一覧を示す。

励起用ランプに関しては、ガラスロッドの蛍光寿命が500μsec程度である為、ランプ発光時間はこの程度にするのが望ましい。現在入力20 kJ、電極間距離60cm急速放電に耐えるものが国産で開発されている。

高輝度のレーザーを実現するには、TEM₀₀モードでビーム発散角が回折の極限にあり、かつ発光パルス幅が小であることが望ましい。特に高温プラズマ発生用としてはパルスの立ち上がり時間が1 nsec以下であることが必要である。大出力を得るには多段の増幅段を連続構成し、レーザー素子中でのエネルギー密度を破壊値以下に保持し損傷を防止するため、後段ほど素子径を大にとる必要がある。増幅段付レーザーの性能は主として発振段レーザーで定められる。

1) 発振段 使用目的に応じてパルス幅を変えられるように構成する必要がある。パルス幅はパルス整形Qスイッチ式によるnsec領域と可飽和色素や音響光学素子によるmode lockingを用いたpsec領域とに分かれる。

表3 大出力レーザーの性能

レーザー(波長)	エネルギー	パルス幅	くり返し	発散角(rad)	効率(%)
CO ₂ レーザー (10.6 μ)	CW	25KW		10 ⁻³	10~25%
	パルス	100MW	1μs		
ガラスレーザー (1.06 μ)	1 kJ	1 ms	1/min	10 ⁻³	5%
	500 J	30ns	1/min	2×10 ⁻⁴	0.1~0.2%
	250 J	4ns	1/min	10 ⁻²	0.1~0.2%
	10~30 J	10~1 ps	1/min	?	?
ルビーレーザー (6,943 Å)	30 J	500μs	1/s	10 ⁻²	0.2%
	3 J	30ns	1/4s	10 ² ~10 ⁻²	0.1%
	1 J	30ns	1/4s	10 ³ ~10 ⁻²	0.1%
YAGレーザー (1.06 μ)	CW	20W		10 ⁻²	
	パルス	0.1 J	25ns	50/s	10 ⁻²

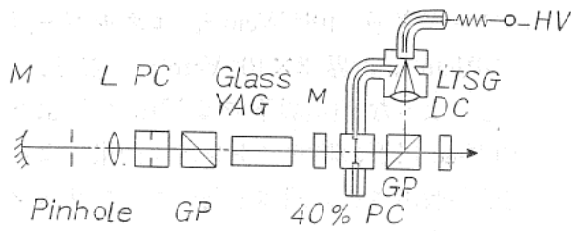
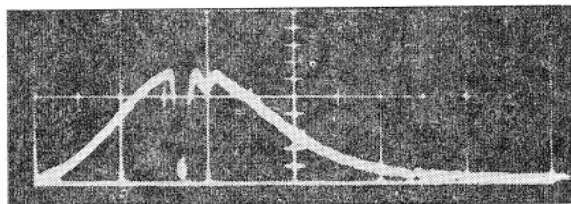
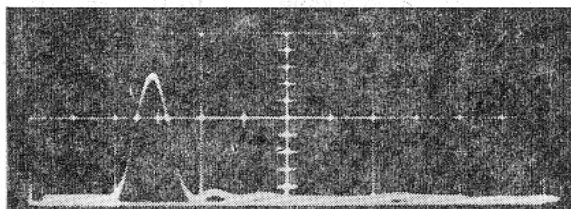


図2 TEM₀₀モード nsec パルス発生法
M: 反射鏡, L: レンズ,
PC: ポッケルセルシャッター
GP: グランプリズム,
DC: 可飽和色素

図2にPTM法¹⁸⁾²⁰⁾によるTEM₀₀モードのnsecパルスの発生法を示す。Qスイッチは共振器中のポッケルセルシャッターによる横モードの選択は反射率100%の球面反射鏡の焦点に設置されたピンホールで行なう。パルス幅の制御は1組の偏光子の間に設置されたポッケルシャッターと高気圧レーザートリガースイッチ(LTSG)による。パルス幅はポッケルセルシャッターの終端ケーブル長により決定される。図3に2nsecのレーザーパルス波形及びLTSGへの入射レーザー光波形を示す。



LTSG入射レーザー波形
10 nsec/div



整形レーザーパルス
5 nsec/div

図3

psec領域ではモードロックパルスのパルス幅が発振スペクトル幅 $\Delta\nu$ の逆数で与えられることを利用して、パルス幅を変える。単一パルスの取り出しは上記PTM法による。スペクトル幅10Åのガラスレーザーではパルス幅は3.3psec, また0.1ÅのYAGレーザーでは0.3nsecとなる。

2) 増幅段 大エネルギー励起を行なうため各段とも水冷にし、励起に不要なスペクトルを除去し、レーザー素子の温度上昇、ソーラリゼーションを除去するためフィルターを用いる。増幅段自体での自己発振を避けるため端面をブリュースター角又は7度カットにする。さらに各段間でのカップリングによるスパラディエーションによる逆転密度の損失を防止し、主パルスエネルギーと背景エネルギー比を大にするため各段間の距離を十分に取りデカップルの手段を講ずる、これはpsecパルスの場合特に重要である。ビーム径の拡大はアフォーカルレンズを用いる方法もあるが、自然発散を利用の方がよい。輝度を上げ、ビームの平行度を上げるためにレーザー光の中心のみを使用するようにする。

プラズマ発生時プラズマ表面よりの反射レーザー光が増幅段を逆進し、レーザー素子を破壊する恐れがあるため反射防止の手段を十分講ずる必要がある。反射光防止用にはファラデー回転素子、筆者の考案によるユニガイドプラズマスイッチ、色素セルを用いる。図4に名古屋大学プラズマ研究所に設置されている最大出力100GW 5段増幅ガラスレーザー⁷⁾²⁰⁾の構成図を示す。表4はその特性である。発振段にはガラスレーザー、YAGレーザーを用い、nsec, psecパルスを発生する。特にYAGレーザーは発振スペクトル幅が狭いため、そのSHGによりプラズマの光散乱計測⁷⁾を実施するのに適している。各増幅段ロッドはNa₁NO₂のフィルター液で保護する。発振段直後に設置された色素セル(D, C)により整形パルスと背景光とのS/N比の向上を計る。発生プラズマよりの反射光はファラデー回転素子(F, R)とプラズマスイッチ(u, S)により10⁻⁴に減少させる。

増幅段のロッド径が60mm以上になると素子全体にわたって一様に励起を行なうことが困難になる。このためブースターとしてディスク²¹⁾型増幅段を設置することが考えられている。

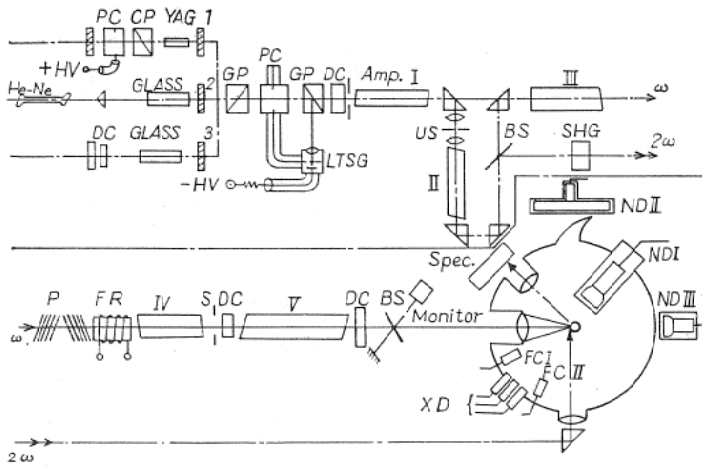


図4 核融合プラズマ生成用5段階増幅ガラスレーザー
 1: ポッケルセルQスイッチ YAG レーザー (前置増幅器付 2ns 6mJ)
 2: 回転プリズムQスイッチガラスレーザー (2ns 9mJ),
 3: モードロックガラスレーザー (50 ps 1mJ),
 PC: ポッケルセル, DC: 可飽和色素 US: 特殊プラズマスイッチ, P: ガラススタック偏光子, FR: ファラデー回転子 XD: X線検出器 ND: 中性子検出器 FC: ファラデーケージ, Spec: 分光器

3. レーザーによるプラズマの生成

レーザー光によりプラズマを生成するとレーザー光が数 ns 以上のパルスである時は、電磁流体的膨張が成長し、レーザー光のエネルギーはまわりに拡散する。しかるにレーザー光パルス幅が数 ns 以下の時は膨張が始まる前にエネルギーの投入が完了するので、極めて有効な加熱が行なわれる。レーザーエネルギーを10 J、パルス幅を 10ps、集光面積を $10^{-4}cm^2$ とすると

パワー密度 $\phi = 10^{16} Wcm^{-2}$ 、エネルギー密度 $10^5 Jcm^{-2}$ 、電界 $3 \times 10^9 Vcm^{-1}$ となる。

このような強電界下では固体表面より $10^{-16}sec$ 以下の時間にトンネル効果により電子が散出され、固体と同密度のプラズマが発生する。

密度 $10^{23}cm^{-3}$ のプラズマのプラズマ周波数 ω_p はガラスレーザー光の周波数 $\omega = 1.7 \times 10^{15}sec^{-1}$ の10倍となる。また電子相互間の衝突周波数 ν は、電子エネルギーは $1/2m eE/m\omega)^2$ であるから 2.5keV の場合 $\nu = 3 \times 10^{13}sec^{-1} = 1.6 \times 10^{-2}\omega$ となり $\omega_p > \omega > \nu$ となる。このような無衝突状態では電子は電磁界に対して斉一運動をなし、レーザー光は表皮層 $\delta = c/\omega_p$ で全反射され、加熱は困難になるものと考えられていたが実験によると、このような条件下で数 keV のプラズマの実現が示され、中性子が検出されている。これは異常吸収⁷⁾²²⁾²³⁾²⁴⁾が存在することを示すものである。

1) レーザーエネルギーのプラズマ中での緩和²³⁾²⁴⁾

レーザーパワー密度が $10^{11}Wcm^{-2}$ 以下で、プラズマ温度が数 100eV以下の領域では電子イオン衝突によりエネルギー緩和が行われる。初め電子は逆制動転射過程により加熱され、イオンは電子との衝突により加熱される。

電子~電子の緩和時間 $\tau_{ee} \sim 10^{-13}sec$ で、電子~イオン緩和時間 τ_{ei} 、膨張の特性時間 τ_s は次のようになる。

表4 増幅段特性

Amp.	I	II	III	IV	V
Rod Dimension	$\phi \times l$ 20 × 320	$\phi \times l$ 20 × 320	$\phi \times l$ 30 × 320	$\phi \times l$ 30 × 320	$\phi \times l$ 40 × 600 mm
Nd ₂ O ₃	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5 wt%
Flash Lamp	4	4	6	6	10
Pumping Energy (Max. Pump. Energy.)	9 (20)	9 (20)	13.5 (30)	13.5 (30)	60 KJ (200)
Gain	7	5	4.5	4	3.5

$$\tau_{ei} = \frac{3}{8\sqrt{2}\pi} \frac{m_i T_e^{3/2}}{m_e^{1/2} e^4 Z^2 n_e \ln A}$$

$$\tau_s \sim x_0 / v_{ac} = x_0 \left(\frac{5Z T_e}{3m_i} \right)^{-1/2}$$

ここで x_0 はプラズマの特性長で 10^{-2} cm 程度, m_e, m_i は電子イオン質量, z は電荷量, n_e は電子密度 v_{ac} は音速である. $T_e = 200$ eV, $n_e \sim 10^{21}$ cm^{-3} とすると $\tau_{ei} \sim 10^{-10}$ sec, $\tau_s \sim 10^{-9}$ sec である. 初期電子温度が増大すると τ_{ei} は大となり緩和の進行は低下するが, プラズマの膨張は進展する. $\tau_{ei} = \tau_s$ なる温度を T_e^* とすると $T_e < T_e^*$ ではイオン加熱が有効である. プラズマの断熱膨張により温度が低下する前に緩和が起る. $T_e > T_e^*$ の時は加熱は有効でない. D_2 プラズマに対して $T_e \sim 400$ eV である. これより初期電子温度の最適値があることがわかる.

電子温度の上昇をレーザー入力パワ ϕ に対し見積るとレーザー光が電子に吸収され, これが衝突によりイオンに移行し, プラズマ中で電磁流体的運動が発生するとして計算すると, レーザー光とプラズマの相互作用が1次元的であると T_e は $\phi^{2/3}$ に比例するという結果が求められる.

これはレーザーパワーが比較的小なる所で実験と一致している.

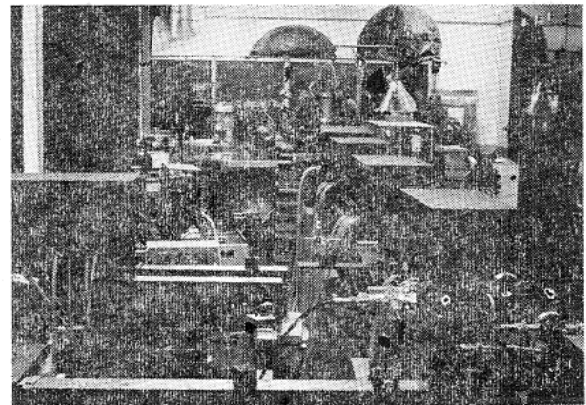
2) 光の異常吸収²³⁾²⁴⁾

レーザーパワーが増大して来ると異常吸収という現象があらわれる. これによると高温で無衝突状態になったプラズマ中にもエネルギーが有効に注入される. これはプラズマ中の非線形異常抵抗に原因する. いま電子は荷電流体であり, この中にポテンシャル的にスパイク状のイオンが存在するとする. 電子がある適当な周波数で振動し, スパイクがこれと共鳴すると, プラズマ中に波動が発生し, 光のエネルギーは波にうつる. この波が不安定性のため崩壊すると異常抵抗が発生し, 有効な加熱が行なわれる. 換言すれば一様電界 (波数 = 0) が有限の波数 k をもつプラズマ波とイオン波とに共鳴し, 光のエネルギーが異常吸収される. これはプラズマ中のパラメトリック不安定と名付けられている. このような異常吸収過程はわが国において

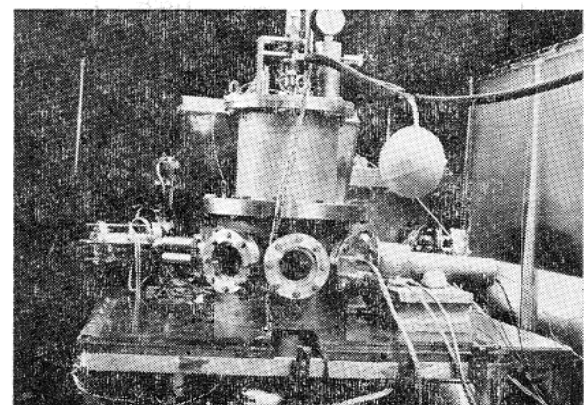
理論的²³⁾にくわしく研究されており, 実験とうまく一致することが始めてプラズマ研究所でつきとめられた.

4. 核融合中性子の検出

図5に5段増幅ガラスレーザーによる核融合プラズマ発生装置を示す. プラズマ化ターゲットは2%角長さ10%の固体重水素である. これ



(a) 大出力ガラスレーザー



(b) 固体重水素ターゲット用
液体ヘリウムクライオスタット

図5 核融合プラズマ実験装置

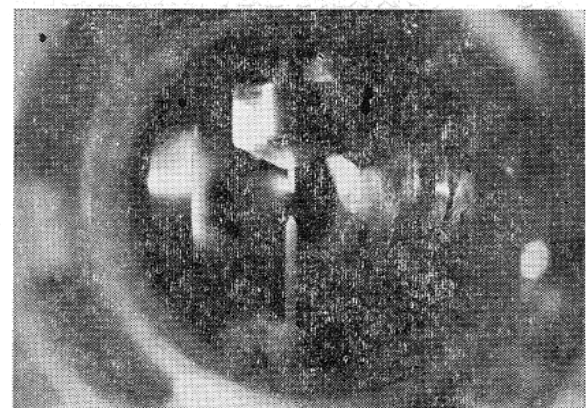


図6 固体重水素プラズマ

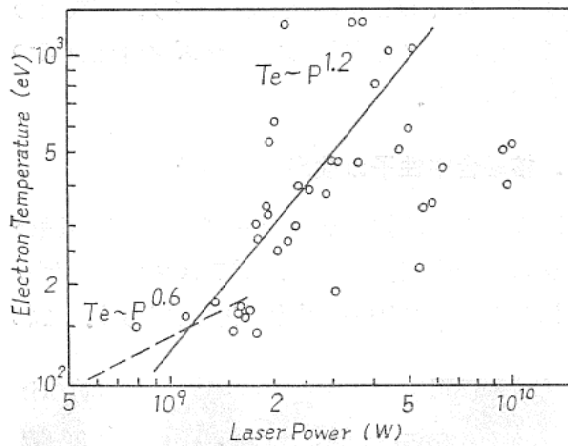


図7 電子温度とレーザーパワー

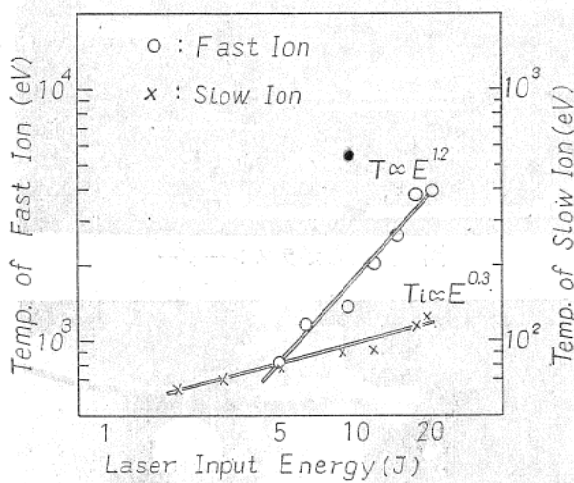


図8 イオン温度とレーザーエネルギー

は液体ヘリウムにより冷却して設定される。レーザー光集光レンズは $F \approx 1$ 、焦点距離50%の非球面レンズである。重水素プラズマを図6に示す。

図7に発生プラズマの電子温度とレーザーパワーの関係を示す。電子温度の決定は吸収係数の異なる2枚の吸収膜を透過したX線強度比により決定した。レーザーパワー1GW(パワー密度 10^{13}W/cm^2)以下では電子温度はレーザーパワー P の0.6乗に比例し増大する。これ以上では数100keVのX線の放射をともない $P^{1.2}$ で増大する。これはレーザーパワー密度の増大によりレーザー光の異常吸収が起り加熱がより有効になった結果であると考えられる。また電子温度はレーザーパルス幅2.3nsec~10nsecでは変化がない。これよりプラズマの加熱はレーザー光の初期の1ns程度で完了し、それ以後のレ

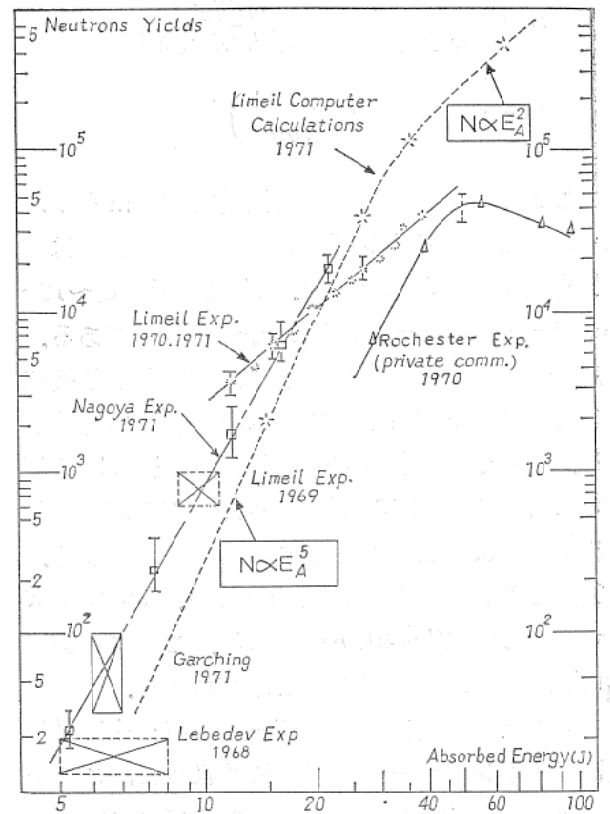


図9 発生中性子数と吸収されたレーザーエネルギーの関係

ーザーエネルギーはプラズマの運動エネルギーとなって散逸するものと考えられている。

Time of Flightより測定したイオン温度とレーザーエネルギーの関係を図8に示す。高温状態においては粒子エネルギー数keVの低温イオン(Slow ion)と粒子エネルギー10keV以上の高温イオン(fast ion)よりなる。この高エネルギーイオンの出現にはしきい値がありレーザーパワー密度 10^3W/cm^2 以上で電子温度の異常上昇と一致する。高エネルギーイオンの発生にともない核融合反応による中性子が発生する。

図9にレーザーエネルギーと中性子発生量との関係を示す。発生中性子量はレーザーエネルギーの低い所では、プラズマの膨張がほぼ1次元的であるため吸収エネルギー E のほぼ5乗で増大する。エネルギーの増大にともないプラズマの膨張速度が増大し2次元的になり、中性子の発生割合は低下し2乗則にしたがう。

5. あとがき

表5はプラズマ研究所で得られたレーザープ

表5 レーザープラズマの特性
Laser Pulse Width: 2.3ns

Input Energy (J)	Electron Temp. T_e (keV)	Fast Ion		Slow Ion		Total Neutron Yield
		E_k (keV)	T_i (keV)	E_k (keV)	T_i (eV)	
3	~0.2	—	—	0.6	70	—
5	~0.5	9	0.8	0.9	30	~300
12	2	18	2.1	1.5	90	~5,000
20	4	27	4	2	140	~20,000

ラズマの特性であって、これによるとレーザーパワーが 10^3 W/cm^2 を越すと異常加熱が発生し、電子温度は急上昇を示し、高速イオンが出現し、プラズマ反射に異常が認められ、中性子が出現する。このような相関はわが国の実験が最初と思われ、ひろく注目されている。これらの点に関して1971年のレーザープラズマに関するゴードン国際会議において熱心な討議が重ねられた。わが国の研究現状は世界の第一線にある。

しかし米、ソのみならず仏、独も今後一層の努力を傾けるものと思われるので、わが国においても、レーザーの大出力化に力を尽すとともにさらに強力なプラズマ研究の推進が要求されるのである。

参考文献

- 1) 山中：電学誌，**90**，1271 (1970)
- 2) 山中他：電学誌，**88**，774 (1968)
- 3) 山中他：電学誌，**88**，950 (1968)
- 4) 山中，山中：電学誌，**87**，1858 (1967)
- 5) N.G. Basov: IQEC Miami (1968)
- 6) F.Floux: IQEC Kyoto (1970)
- 7) C. Yamanaka et al: Gordon Conf. on "Laser Interaction with Matters" (Aug. 1971) : IInd Workshop on "Laser Interaction and Related Plasma Phenomena" (Aug. 1971)
- 8) C. Yamanaka et al: XIth COSPA A-12 (1968), IIIrd Conf. Plasma Phys. (1968)
- 9) A.F. Haught et al: IIIrd Conf. Plasma Phys. (1968)
- 10) 有賀，的場：第26回物理学年会 2P-Q-2 (1971)
- 11) 関口，他：第26回物理学年会 2P-Q-1
- 12) C. Yamanaka et al: Japan. J. Appl Phys **7** 84 (1968)
- 13) C. Yamanaka et al: ibid **7** 954 (1968)
- 14) A.F. Haught, D.H. Polk :Phys. Fluids **9** 2047 (1966)
- 15) C. Yamanaka et al: Japan. J. Appl. Phys **8** 1037 (1969)
- 16) C. Yamanaka et al :Conf. Laser Eng & App (Washington 1971)
- 17) C. Yamanaka et al :Conf. Damage in Laser Materials Boulder 1971) Laser Interaction with matters Peryernon Press (1972)
- 18) 中塚正大，山中千代衛：量子エレクトロニクス研究会資料 QE 71-26 (1971)
- 19) 佐々木，山中，山中：量子エレクトロニクス研究会資料QE 69-11 (1969)
- 20) K. Yoshida, T. Yamanaka, C. Yamanaka: Japan. J.Appl. Phys. **10** No 11 (1971)
- 21) J.E. Swain et al :J. Appl. Phys. **40** 3973 (1969)
- 22) I.R. Gekker et al: Sov. Phys. JETP Letters **9** 243 (1969)
- 23) K. Nishikawa: J. Phys. Soc. Japan **24** 916 (1968)
- 24) P.K. Kaw J.M. Dawson: Phys Fluid **12** 2586 (1969)
- 25) C. Fauguignon. F. Floux :Phys. Fluids **13** 386 (1970)
- 26) F. Floux et al IInd Workshop on "Laser Interaction & Related Plasma Phenomena" (Aug. 1971)
- 27) N.G. Basov et al: Quantum Radiophysics Lab Preprint No 60 (1970)