

JAERI-M  
6643

レーザー核融合一次元解析計算コード  
MEDUSAの改良 (MEDUSA-P) と  
エネルギー利得の感度解析

1976年7月

高野 秀機・中野 鴻\*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

レーザー核融合一次元解析計算コードMEDUSAの  
改良(MEDUSA-P)とエネルギー利得の感度解析

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

高野 秀 機・中 野 鴻\*

(1976年7月2日受理)

MEDUSA-Pは、強烈なレーザー照射によるプラズマの流体力学的及び熱力学的な振る舞い、即ち爆縮過程と熱核融合反応を計算するために開発されたMEDUSAの改良コードである。MEDUSAコードの変換において、いくつかのプログラミング上の誤りを訂正し、更にプラズマ流体の急激な空間変動を良く追従するために領域メッシュ数を増加し、諸変数は2倍精度にされた。又物理量、 $\rho$  (密度)、 $u$  (速度)、 $T_i$  (イオン温度)、 $T_e$  (電子温度)、 $P$  (圧力)等を図示できるようにしてプラズマ流体の複雑な時間的・空間的な変動を理解し易くした。MEDUSA-PはFACOM 230/75及びCDC 6600において使用可能である。

ここでは更にMEDUSA-Pで計算したD-T燃料小球の初期条件とエネルギー利得の関係を記述し、更に燃料爆縮の現象記述を行う。

---

\* センチュリーリサーチセンター株式会社

Improvement of the MEDUSA Code for One-Dimensional  
Laser Fusion Analysis (MEDUSA-P) and Sensitivity  
Analysis of the Energy Gain

Hideki TAKANO and Ko NAKANO<sup>\*</sup>

Division of Reactor Engineering, Tokai, JAERI

(Received July 2, 1976)

The MEDUSA-P code is a revised version of MEDUSA which was developed for calculation of the hydrodynamic behaviour (implosion process and thermonuclear reaction) of plasmas irradiated by an intense laser light. In conversion of MEDUSA for JAERI's computer, some programming errors were corrected. In order to express the violent space variation of plasmas, the number of region meshes is increased and the variables are expressed in double precision. And further, graphical representations of the main physical variables, i.e.  $\rho$  (density),  $u$  (velocity),  $T_i$  (ion temperature),  $T_e$  (electron temperature) and  $P$  (pressure), are programmed to understand the complex time and space dependence of the plasma fluid with ease. The MEDUSA-P code is available for both computer FACOM 230/75 and CDC 6600.

In this report, the calculations for spherical D-T pellets are performed with MEDUSA-P. The relation between several initial conditions and energy gain is described, and also phenomenology of the fuel implosion process.

---

<sup>\*</sup> Century Research Center Co., Ltd., Tokyo

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. MEDUSAコードでの差分方程式の解法 .....	3
3. MEDUSA-Pコードの使用法及び入出力形式 .....	7
4. エネルギー利得の感度解析 .....	18
5. おわりに .....	49
謝 辞 .....	49
参考文献 .....	49

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Solution algorithms of finite difference equation in MEDUSA .....	3
3. Usage and input/output format of MEDUSA-P .....	7
4. Sensitivity study for energy gain .....	18
5. Concluding remarks .....	49
Acknowledgments .....	49
References .....	49

## 1. はじめに

現在利用されている核分裂原子炉によるエネルギー供給も、人類の歴史からみれば短い期間しか保障されない。そのために燃料源の非常に安定した“人類最終のエネルギー源”として核融合原子炉の開発研究が世界各国で盛んに進んでいる。現在主に2つの方法が研究されている。一つはトカマクに代表される磁気閉じ込めによる核融合と、もう一つは強力なレーザー光を利用した慣性閉じ込めによる核融合炉である。ここでは後者のレーザー核融合の研究のための計算コードの整備及び改良と、そのコードを用いて行ったレーザー核融合の解析計算結果について述べる。

核融合燃料を単純にレーザー照射によって加熱しても、効率よく核融合反応を起すことは困難である。しかし適当なレーザー加熱によって燃料を液体密度の1万倍に爆縮できるならば、そのとき核融合反応によって十分なエネルギー利得を得ることができる。<sup>(1)</sup>この爆縮と燃焼過程の研究は、米国において重要な軍事機密の下に行われてきたが1972年にAECによって解除されて以来非常に多くの発表がなされている。レーザーによって燃料を照射すると、先ず燃料ペレットの外側近傍（臨界面の附近）の電子が逆制動放射<sup>(2)</sup>や様々の異常現象<sup>(1)</sup>によって加熱される。この熱は熱伝導によって内側へ輸送され、電子とイオンの衝突によってイオンへ移換される。表面温度は急激に上昇し、熱伝導波のプラズマ内への伝播は高い圧力勾配を生じる。一方加熱された電子は燃料小球表面を削りとり、その反作用として内側へ働く力が生じ小球は圧縮されていく。<sup>(1)</sup>熱波面が常にこの削摩面に接触して一種のピストンのような役目をし、小球は高密度に押しつぶされる。高密度に圧縮された小球の温度が点火温度（D-T反応で $10^8$ °K）になると熱核融合反応が生じ、D-T反応においては中性子（14MeV）と $\alpha$ -粒子（3.5MeV）が放出される。このうち $\alpha$ -粒子は小球燃料と更に衝突をし、エネルギーを与え、熱核融合反応前面を伝播して燃焼効率を非常によくする。MEDUSA<sup>(3)</sup>コードはこのような爆縮と燃焼の流体力学的及び熱力学的振る舞いを計算する一次元レーザー核融合解析コードである。

MEDUSAにおいては、プラズマは電荷的に中性な電子とイオンの混合物で、4つの従属変数、 $\rho$ （密度）、 $u$ （速度）、 $T_i$ （イオン温度）、 $T_e$ （電子温度）でもって表わされる。そして各変数は一次元空間座標 $r$ の関数であり、全ての物理量はラグランジュ座標（空間メッシュ点がプラズマと共に変動する）で表わされる。熱力学的には電子とイオンの2つの系に分けて取り扱い、電場は無視される。そしてこの2つの系は2粒子間の衝突によるエネルギー変換でもって関連づけられる。核融合反応によって生じた中性子に対しては、平均自由行程が小球よりも十分に大きいとして、体系内において他粒子との衝突は考えない。従って中性子に対しては質量損失とモーメントムの変化が考えられる。一方レーザー光は臨界密度 $n_c$ よりも低い前方において、逆制動放射によって吸収され、更に臨界面において異常吸収<sup>(1)</sup>を仮定し、全て吸収されると考える。

ラグランジアン座標における一次元の運動及び連続の式<sup>(1)</sup>は

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P \quad (1)$$

$$\rho (dR^g / dM) = g \quad (2)$$

$$u = dR / dt \quad (3)$$

ここで  $u$  はプラズマ流体の速度， $\rho$  は密度， $P$  は圧力， $R$  は空間座標，そして  $g$  は形状因子（ $g=1$  は板状， $g=2$  は円柱， $g=3$  は球形）を表わす。

一方電子とイオンに対する内部エネルギーのバランス方程式は次のように書かれる<sup>(3)</sup>。

$$\frac{dU_e}{dt} = -P_e \frac{dV}{dt} + H_e + K + Y_e + J + X \quad (4)$$

$$\frac{dU_i}{dt} = -P_i \frac{dV}{dt} + H_i - K + Y_i + Q \quad (5)$$

$$U = PV / \gamma - 1 \quad (6)$$

ここで (4)，(5) 式右辺の各項は， $H$  が熱伝導項， $K$  が電子とイオン衝突によるエネルギー交換項で電子に対しては負，イオンに対しては正の値を表わす。 $Y$  は熱核反応による放出エネルギー， $J$  が制動放射項， $X$  がレーザー光の吸収率， $Q$  は衝撃加熱の項を表わす。これら各項に対する MEDUSA で使われている式については，第 2 節で概述される。これらの方程式に対する差分方程式が時間及び空間の各メッシュ点において計算される。各時間間隔はプラズマ流体の最も急激な変化量が表わせるように各時間間隔毎に決定され，又各空間メッシュ点も各タイムステップ毎に変動する。

第 3 節においては，MEDUSA を整備し改良した MEDUSA-P コードの使用法及び入出力形式が説明される。第 4 節においては MEDUSA-P コードを用いて計算したレーザー核融合におけるプラズマ爆縮の現象記述，及び初期条件とエネルギー利得の関係について述べる。

## 2. MEDUSA コードでの差分方程式の解法

電子とイオンに対する内部エネルギーのバランス方程式 (4), (5) の各項及び MEDUSA コードに用いられている差分方程式の解法について以下 Ref. (3) に従って概述する。

## a) 熱伝導 (H)

熱伝導の項は

$$H = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \kappa \nabla T \quad (7)$$

ここで  $\kappa$  は熱伝導係数で Spitzer<sup>(6)</sup> によると,

$$\kappa_e = 1.83 \times 10^{-10} T_e^{5/2} / (Z \ln A) \quad (8)$$

$$\kappa_i = 4.3 \times 10^{-12} T_i^{5/2} / (M^{1/2} Z^4 \ln A) \quad (9)$$

であり,  $\ln A$  は次式で与えられる Coulomb logarithm である。

$$A = 1.24 \times 10^7 T_e^{3/2} n_e^{-1/2} / Z \quad (10)$$

電子の熱流束  $F_e = \kappa_e \nabla T$  に対しては

$$(F_e)_{\max} = a \frac{1}{4} n_e \bar{v}_e \kappa T_e \quad (\text{W/m}^2) \quad (11)$$

なる値を越えないように制限される<sup>(3)</sup>。即ち,

$$\frac{1}{F_e'} = \frac{1}{F_e} + \frac{1}{(F_e)_{\max}} \quad (12)$$

$$\kappa_e' = \kappa_e \left( 1 + a \frac{\lambda_e}{T_e} \frac{dT_e}{dx} \right)^{-1} \quad (13)$$

$$\lambda_e = 7.92 \times 10^9 T_e^2 / n_i Z^2 \ln A (\text{m}) \quad (14)$$

ここで  $a$  は  $(F_e)_{\max}$  を調整する適当な定数である。

## b) エネルギー交換 (K)

イオンと電子間のエネルギー交換は次の割合で起る<sup>(7)</sup>

$$\omega = \frac{M^{-1} Z^2 e^4 n_i \ln A m_e^{1/2}}{32 \sqrt{2\pi} \epsilon_0^2 m_H} (kT_e)^{-3/2} \quad (\text{sec})^{-1} \quad (15)$$

式 (4) と (5) における  $K$  項は, 縮退を考えない古典モデルにおいて

$$K = \frac{1}{\rho} \omega n_e (T_i - T_e) \\ = 0.59 \times 10^{-8} n_e (T_i - T_e) T_e^{3/2} M^{-1} Z^2 \ln A K M^{-1} m_H^{-1} \text{ W/kg} \quad (16)$$

である。

## c) 制動放射 (J)

電子によって放出される制動放射エネルギーは系におけるエネルギー損失で負の値であり, マックスウエル分布を仮定して<sup>(7)</sup>



$$J = - \frac{Z^2 e^6 n_e \bar{v}_e}{24\pi \epsilon_0^3 c^3 m_e m_H Mh}$$

$$= - 8.5 \times 10^{-14} n_e (\delta T)^{1/2} Z^2 M^{-1} \quad (\text{W/kg}) \quad (17)$$

ここで

$$\delta T = T_e - (n_e/n_e^0)^{\gamma_e - 1} T_e^0 \quad (18)$$

d) レーザー光の吸収 (X)

プラズマとレーザー光の振動数の等しくなる臨界密度

$$\rho_c = \frac{\epsilon_0 M m_H m_e}{Z e^2} \omega_L^2 \quad \text{kg/m}^3 \quad (19)$$

以下のプラズマ密度の領域で逆制動放射によって吸収される。吸収係数は<sup>(8)</sup>

$$\alpha = 13.5 \lambda^{-2} \beta^2 (1-\beta)^{-1/2} T_e^{-3/2} [5.05 + \ln(\lambda T_e)] Z^2 \quad (\text{m}^{-1}) \quad (20)$$

ここで  $\beta = \rho/\rho_c < 1$ ,  $\lambda$  はレーザー光の波長である。プラズマ境界に入射するレーザーの出力を  $P_0(R_0, t)$  とすると

$$P(r, t) = P_0(R_0, t) e^{-\alpha(R_0-r)} \quad (21)$$

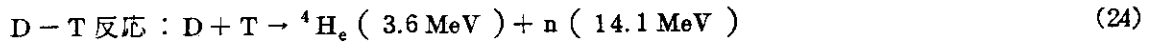
吸収率 X は

$$X(r, t) = P(r, t) (1 - e^{-\alpha(R_0-r)}) / dM \quad \text{W/kg} \quad (22)$$

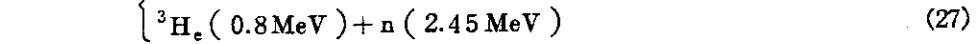
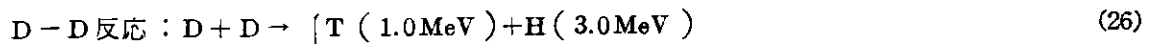
そして臨界表面 ( $r = r_c, \rho = \rho_c, \omega_p = \omega_L$ ) において全て吸収される。

$$X(r_c, t) = P(r_c, t) / dM \quad \text{W/kg} \quad (23)$$

e) 熱核反応過程



$$-\frac{dN_D}{dt} = -\frac{dN_T}{dt} = \frac{dN_\alpha}{dt} = \frac{dN_n}{dt} = N_D N_T (\bar{\sigma v})_{DT} \quad (25)$$



$$\frac{dN_D}{dt} = -N_D^2 (\bar{\sigma v})_{DD} - N_D N_T (\bar{\sigma v})_{DT} - N_D N_{{}^3\text{He}} (\bar{\sigma v})_{D{}^3\text{He}} \quad (29)$$

$$\frac{dN_T}{dt} = -N_D N_T (\bar{\sigma v})_{DT} + \frac{1}{4} N_D^2 (\bar{\sigma v})_{DD} \quad (30)$$

$$\frac{dN_n}{dt} = \frac{1}{4} N_D^2 (\bar{\sigma v})_{DD} \quad (31)$$

$$\frac{dN_{{}^3\text{He}}}{dt} = \frac{1}{4} N_D^2 (\bar{\sigma v})_{DD} \quad (32)$$

各反応率は、イオン温度の関数として次式で表わされる。

$$(\overline{\sigma v})_{DT} = \begin{cases} 3.68 \times 10^{-18} T_i^{-2/3} \exp(-19.94 \times T_i^{-1/3}), & \text{m}^3/\text{sec} \\ 7.5 \times 10^{-22}, & T_i > 35 \text{ keV} \end{cases} \quad (33)$$

$$\quad \quad \quad (34)$$

$$(\overline{\sigma v})_{DD} = 2.33 \times 10^{-20} T_i^{-2/3} \exp(-19.42 T_i^{-1/3}) \quad \text{m}^3/\text{sec} \quad (35)$$

$$(\overline{\sigma v})_{D^3H_e} = \begin{cases} 0, \\ 10^{-23}, & T_i > 50 \text{ keV} \end{cases} \quad \text{m}^3/\text{sec} \quad (36)$$

反応によって生れた荷電粒子H, T,  $^3H_e$ ,  $^4H_e$ のエネルギーは局部的に電子とイオンに deposit すると仮定される。その割合は電子温度の関数として次のように表わされる<sup>(9)</sup>

$$P_{DT} = \frac{T_e}{T_e + 3.71 \times 10^8} \quad (37)$$

$$P_{DD} = \frac{T_e}{T_e + 1.2 \times 10^9} \quad (38)$$

$$P_{D^3H_e} = \frac{T_e}{T_e + 1.2 \times 10^9} \quad (39)$$

熱核反応によって放出されるエネルギー  $Y_i, Y_e$  は

$$Y_i = P_{DD} E_{DD} R_{DD} + P_{DT} E_{DT} R_{DT} + P_{D^3H_e} E_{D^3H_e} R_{D^3H_e} \quad (40)$$

$$Y_e = (1 - P_{DD}) E_{DD} R_{DD} + (1 - P_{DT}) E_{DT} R_{DT} + (1 - P_{D^3H_e}) E_{D^3H_e} R_{D^3H_e} \quad (41)$$

ここでEは、各粒子の放出エネルギー、Rは反応数を表わす。

f) 衝撃加熱(Q)

衝撃加熱項は<sup>(10)</sup>

$$Q = -q V \quad (42)$$

ここでqは粘性圧力を表わす。

$$q = b^2 \frac{1}{2} \rho u \eta \quad (43)$$

$$\eta = \partial_r \nabla u / \partial_r \nabla \cdot u = r^{2-1} \partial u / \partial r^{2-1} u \quad (44)$$

g) 境界条件と差分計算法

内側境界条件：中心において  $u(r=0) = 0, \kappa \Delta T = 0$

外側境界条件：境界点  $R_0$  は動いており次の4つの条件が与えられる。

$$\textcircled{1} \quad P(R_0) = 0, \kappa \Delta T = 0 \quad (45)$$

$$\textcircled{2} \quad u(R_0) = 0, T_i(R_0) = T_i(t), T_e(R_0) = T_e(t) \quad (46)$$

$$\textcircled{3} \quad P(R_0) = P(t), \kappa \Delta T = 0 \quad (47)$$

$$\textcircled{4} \quad u(R_0) = u(t), \kappa \Delta T = 0 \quad (48)$$

case ①はレーザー光の吸収を含む一般的な問題に使う。case ②は熱伝導の問題、例えば外部境界  $R_0 = r$  で

$$T_e(t) = \min[T_{\max}, T_e^0(1+at)] \quad (49)$$

なる温度パルスを与えて電子の熱伝導を調べる。case ③は、例えば

$$P(t) = \min [ P_{\max}, P_0 (1 - t/\tau_0) ]^{-a} \quad (50)$$

なる圧力パルスを  $r = R_0$  で与えてプラズマ流体の圧縮問題を調べる。case ④は逆に膨張問題を調べるのに使われる。

プラズマ流体の運動方程式、連続の式、それからエネルギーバランス方程式及び状態方程式の各式は、時間と空間の有限差分方程式に書きかえることができる。これらの式を数値的に解くにあたって時間、空間メッシュのとり方が工夫される。燃料領域は  $N$  ケのセルに分割され、セルの各境界を  $j$  で表示する。セルの中心は  $R_l = \frac{1}{2} (R_j + R_{j+1})$  と  $l$  で表示する。セルの境界はセル体積  $V_l = \frac{1}{g} (R_{j+1}^2 - R_j^2)$  の変化によって変動する。質量  $dM_l$  はセル  $l$  での熱核反応によってのみ変化する。各タイムステップにおける時間は  $t^n = \sum_1^n \Delta t_i$  と添字  $n$  で表わす。時間  $n-1$  で  $R_j, \rho_l, T_l, f_k, n-\frac{1}{2}$  で  $u_j$ , そして  $n$  で  $R_j, \rho_l$  を与えることによって、時間  $n$  において  $T_l, f_k$  を、 $n+\frac{1}{2}$  で  $u_j$  を、 $n+1$  で  $R_j, \rho_l$  を計算することができる。(4), (5) 式の各項  $H, K, Y, J, X$  の物質的な諸係数は温度  $T_i$  と  $T_e$  に対して非線型であるため各タイム・ステップ毎に数回の繰り返し計算を実行する。エネルギーバランス方程式の詳細な差分式の解法に関しては Ref(10) を参照されたい。差分法は implicit と explicit method<sup>(11)</sup> を用いて計算され、タイム・ステップ  $\Delta t$  の選び方によって精度が決定される。 $\Delta t$  の値は各タイム・ステップ  $n$  において次のように制限される<sup>(11)</sup>

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} < a_1 \text{Min} \left( \frac{R_{j+1}^n - R_j^n}{C_l^n} \right) \quad (51)$$

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} \leq a_2 \text{Min} \left( \frac{V^{n+1} - V^n}{V^{n+1} - V^n} \right)_l \Delta t^{n-1/2} \quad (52)$$

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} \leq a_3 \text{Min} \left( \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{T_i^{n+1} + T_i^n} \right)_l \quad (53)$$

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} \leq a_4 \text{Min} \left( \frac{T_e^{n+1} - T_e^n}{T_e^{n+1} + T_e^n} \right)_l \quad (54)$$

$$\Delta t^{n+\frac{1}{2}} \leq a_0 \Delta t^{n-\frac{1}{2}} \quad (55)$$

ここで  $a_1, a_2, a_3, a_4$  は 1 より小さい定数、 $a_0$  は time-centering のための定数である。 $c_l^n$  はセル  $l$  での音速を表わす。これらの制限条件を満たす最小の  $\Delta t$  が選ばれる。そして各タイム・ステップにおいて

$$\text{Max} \left( \frac{|u^m - u^{m-1}|}{|u^m + u^{m-1}|} \right)_i^{n+1/2} \leq \delta u \quad (56)$$

$$\text{Max} \left( \frac{|T_i^m - T_i^{m-1}|}{|T_i^m + T_i^{m-1}|} \right)_i^n \leq \delta T_i \quad (57)$$

$$\text{Max} \left( \frac{|T_e^m - T_e^{m-1}|}{|T_e^m + T_e^{m-1}|} \right)_i^n \leq \delta T_e \quad (58)$$

が満たされるまで  $m$  回の繰り返し計算が行われる。

### 3. MEDUSA-P コードの使用法及び入出力形式

MEDUSA-Pはレーザー核融合次元解析計算コードMEDUSA<sup>(3)</sup>を整備し改良したものである。MEDUSAコードはCulham研究所において、一般的な初期値問題を解くプログラム・システムOLYMPUS<sup>(3)</sup>の一例として開発されたものである。MEDUSAコードは原研の浅井、岡本氏によってFACOM 230/60に書き換えられたが、テスト・データの計算結果がRobertsのRef.(3)の結果と合わなかった。そのため我々はMEDUSAプログラムの詳細なトレース、ディバックを行い、いくつかのプログラミング上の誤りを訂正した。更に2倍精度にすることによって、テスト・データの計算結果はRef.(3)の結果と良く合うようになった。又整備はFACOM 230/75とCDC 6600の両方の計算機に対して行われた。更にプラズマ流体の複雑な爆縮及び燃焼過程を見易くするために、膨大な量の計算結果の図式化を行えるようにした。一方プラズマの急激な温度、圧力、密度、速度変化を良く追従し、計算精度を向上させるために、領域メッシュ数を40から150まで増加させた。以上のようにMEDUSAを整備し改良したものがMEDUSA-Pコードである。

このコードの入力データの形式は主に“NAMELIST”機能を用いて行われる。配列及び論理変数もname list NEWRUNを通して入力する。入力変数は全てその値のdefault valueが定義されており、入力変数を変更するときのみnamelist NEWRUNを用いて入力すればよい。

#### 3.1 MEDUSA-Pコードの使用法

。FACOM 230/75 で使用するときの標準のJOBコントロールカードは次のようにする。

¥ NO

TIME (5M)

CORE (64K)

PAGE (80)

PCH (0)

, /

PLT /

}プロッターを使う場合必要とする。

¥ GJOB

¥ DLIEDRUN RFNAME = J 2031. MEDUSA, GRFD=ON, PLTLIB=CALL

¥ DISK F20

¥ PLOT (又は¥ DISK F77)

¥ DATA

← 入力データカード

Title カード (4枚)

\$ NEWRUN

入力変数=A, (カンマを忘れないこと)

:

入力変数=Z (最後のデータにはカンマなし)

\$ END

¥ JEND



HELIU3	${}^3\text{H}_e$ の initial fraction $f_{3\text{H}_e}$	(0.0)
HELIU4	${}^4\text{H}_e$ の " " $f_{4\text{H}_e}$	(0.0)
HYDROG	Hの " " $f_{\text{H}}$	(0.0)
LAMDA1	レーザー光の波長 $\lambda$ (m)	(1.0E-5)
NETRAL	中性粒子の initial fraction $f_{\text{N}}$	(0.0)
NTRLMS	中性粒子の原子質量数 $M_{\text{N}}$ (kg)	(0.0)
RHOINI	燃料密度の初期値 $\rho_0$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	(124.0)
RINI	燃料ペレットの初期の大きさ $R_0$ (m)	(4.8E-4)
SCP	圧力Pの入出力形式の scaling factor	(1.0)
SCR	座標 r の " "	(1.0)
SCRHO	密度 $\rho$ の " "	(1.0)
SCTE	$T_e$ の " "	(1.0)
SCTI	$T_i$ の " "	(1.0)
SCTIME	時間 t の " "	(1.0)
TEINI	燃料中の電子の初期温度 $T_e$ ( $^{\circ}\text{K}$ )	(500)
TIINI	燃料中のイオンの " $T_i$ ( $^{\circ}\text{K}$ )	(500)
TINUCL	核融合反応の点火温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )	(1.0E7)
TRITIU	Tの initial fraction $f_{\text{T}}$	(0.5)
TSTOP	許容時間 t の最大値 (sec)	(1.0E-6)
XMASS	任意のイオン X の質量数 $M_{\text{X}}$	(0.0)
XTRA	Xの initial fraction $f_{\text{X}}$	(0.0)
XZ	Xの charge number $Z_{\text{X}}$	(0.0)
MESH	燃料ペレットの分割メッシュ数 $\leq 150$	(40)
NCASE	= 1 境界条件 $P(R_0) = 0$ , zero thermal flux でレーザー照射による爆縮問題: (45)式 = 2 $u(R_0) = 0$ , $T_i(R_0) = T_i(t)$ , $T_e(R_0) = T_e(t)$ : (46)式 = 3 $P(R_0) = P(t)$ , zero thermal flux: (47)式 = 4 $u(R_0) = u(t)$ , zero thermal flux: (48)式	
GEOM	= 1 平板 = 2 円柱 = 3 球形	
NITMAX	繰り返しの最大数	(5)
NP1	各 time step 時における各物理量 ( $T_i$ , $T_e$ , $u$ , $P$ , $\rho$ 等) のプリントの 出発メッシュ番号	(1)
NP2	NP1と同じ意味で最後のプリント番号	(MESH)
NP3	このNP3おきにプリントする	$\frac{\text{MESH}}{20}$
NPRINT	NPRINT回の time step 毎に各物理量が出力される (100)	
NLABS	逆制動放射による吸収を考慮する	(T)

NLBRMS	制動放射を考慮する	(T)
NLBURN	DとTの燃焼を考慮する	(T)
NLCRI1	critical density $\rho_c$ でのレーザー出力をダンプする。	(T)
NLDEPO	deposit thermonuclear energies	(T)
NLECON	electron thermal conduction	(T)
NLFUSE	thermonuclear reactions	(T)
NLICON	ion thermal conduction	(T)
NLITE	solve equations by iterations	(T)
NLMOVE	hydrodynamic motion	(T)
NLPFE	perfect electron gas laws	(T)
NLPFI	perfect ion gas laws	(T)
NLPRNT	プリントする	(T)
NLX	ion-electron energy change	(T)
LASER1(1)	レーザー照射の開始時間 (sec)	(0.0)
LASER1(2)	初期のレーザー出力 $P_0$ (w)	(0.0)
LASER1(3)	レーザーパルス巾 $\tau$ (sec)	(0.0)
LASER1(4)	レーザーパルス波形因子 $q$	(0.0)
LASER1(5)	time to switch off the laser (sec)	(0.0)
LASER1(6)	出力レベルの最大値 (w)	(0.0)
LASER1(7)	レーザー入力の最大エネルギー (joule)	(0.0)
<p>レーザー照射時間がパルス巾(<math>\tau</math>)に等しくなったとき、及び照射全エネルギーが最大エネルギーに等しくなった場合、レーザー照射は打ち切られる。</p>		
PIQ(10)	modify free streaming limit coefficient $a$ ( $\times$ PIQ(10))	
	$a \rightarrow$ (11)式	(0.0)
PIQ(11)	= 1 初期座標メッシュを等体積で分割する	(0.0)
PIQ(12)	= 1 初期の密度分布を変える。namelist INRHOで入力する。	(0.0)
PIQ(13)	= 1 初期の燃料組成比を変える。namelist INFRACで入力する。	(0.0)
PIQ(20)	Coulomb logarithm coefficient $A$ を変える ( $A \times$ PIQ(20))	
	: $A \rightarrow$ (15)と(16)式	(0.0)
PIQ(21)	吸収係数を変更する = $a \times$ PIQ(21) : $a \rightarrow$ (20)式	(0.0)
PIQ(24)	制動放射係数の修正 = $J \times$ PIQ(24) : $J \rightarrow$ (17)式	(0.0)
PIQ(25)	エネルギー変換割合の修正 = $K \times$ PIQ(25) : $K \rightarrow$ (16)式	(0.0)
PIQ(26)	イオン熱伝導係数の変更 = $K_i \times$ PIQ(26) : $K_i \rightarrow$ (9)式	(0.0)
PIQ(27)	電子熱伝導係数の変更 = $K_e \times$ PIQ(27) : $K_e \rightarrow$ (8)式	(0.0)
PIQ(28)	$P_{DT}^n = T_e^n / [T_e^n + 3.71 \times 10^8 (1 + \text{PIQ}(28))]$ : (37)式	(0.0)
PIQ(29)	$P_{DD}^n = T_e^n / [T_e^n + 1.2 \times 10^9 (1 + \text{PIQ}(29))]$ : (38)式	(0.0)
PIQ(30)	$P_{D^3H_e} = T_e^n / [T_e^n + 1.2 \times 10^9 (1 + \text{PIQ}(30))]$ : (39)式	(0.0)

PIQ(31)	座標	} = 1.0 にすると各出力データの見出しを プリントする。	(0.0)
PIQ(32)	速度		(0.0)
PIQ(33)	密度		(0.0)
PIQ(34)	圧力		(0.0)
PIQ(35)	イオン温度		(0.0)
PIQ(36)	電子温度		(0.0)
NPRINT	プリントの logical unit number		(6)
NIN	read (入力) の " " "		(5)
NPUNCH	カードパンチの " " "		(7)
NRUN	実行する time step 数		
NLPLOT	$u, \rho, P, T_e, T_i$ を $t$ 及び $r$ についてプロットする		(F)
NPLOT	プロットする多量のデータを一時ファイル (unit = 20) に書き込む回数で、 NPLOTタイムステップ毎に書く。		
OPT1	プロットにおける log-scale オプション = 0 データをサーベイして任意に書く = 1 horizon ( $\times 4$ ), vertical ( $\times 3$ ) にとる = 2 horizon : vertical = 4 : 3 にとる		
MTIME(I, J)	プロットする time step 番号で NPLOT の整数倍でなければならない。 インデックス(I)は J 図にプロットするデータの種類 (次の MTYPE(I, J) で示される) を表わす。((MTIME(I, J), I=1, 6), J=1, 20) のループで読み込まれる。		
MTYPE(I, J)	J 図にプロットするデータの種類 I = 1 radial coordinate (m) I = 2 hydrodynamic velocity (m/sec) I = 3 density ( $\text{kg/m}^3$ ) I = 4 hydrodynamic pressure ( $\text{J/m}^3$ ) I = 5 ion temperature ( $^{\circ}\text{K}$ ) I = 6 electron temperature ( $^{\circ}\text{K}$ )		
NMESH(I, J)	プロットするメッシュ番号		
NTYPE(I, J)	J 図にプロットする NMESH(I, J) でのデータの種類(I)。読み込みループの順序は MTIME(I, J) と同じである。		
TIMES(20)	プロットしたい最初の時間 (sec)		
TIMEE(20)	プロットしたい最後の時間 (sec)		
# 3 namelist INRHO	if PIQ(12) $\neq$ 0.0 BUF3(J) J = 51 で initial density $\rho_0$ は各メッシュ点 J で BUF3(J) $\times \rho_0$ (RHOINI) と変更される。		
# 5 namelist INFRAC	if PIQ(13) $\neq$ 0.0 各 mesh (cell) での燃料組成比が次のように変更される。		



$$\begin{aligned} \text{BUF 1 (51)} & \quad f_{D'} = f_D \times \text{BUF 1 (J)} \\ \text{BUF 2 (51)} & \quad f_{H'} = f_H \times \text{BUF 2 (J)} \\ \text{BUF 4 (51)} & \quad f_{N'} = f_N \times \text{BUF 4 (J)} \\ \text{BUF 5 (51)} & \quad f_{T'} = f_T \times \text{BUF 5 (J)} \\ \text{BUF 6 (51)} & \quad f_{X'} = f_X \times \text{BUF 6 (J)} \end{aligned}$$

### 3.3 出力形式

- ① タイトルがプリントされる
- ② NAMELIST で入力されたデータが2倍精度型でプリントされる。CDC 6600 では各変数毎に行が変ってプリントされるがFACOM 230/75 ではべた打ちされる。
- ③ 各タイムステップ毎にステップ番号,  $t^n$ ,  $\Delta t^n$ , 外側境界における  $R$ ,  $u$ ,  $P$ ,  $T_i$ ,  $T_e$ ,  $C_s$  (音速), 及び以下の諸量がプリントされる。

$$\begin{aligned} E_{ih} &= PV/\gamma - 1 \quad (\text{熱エネルギー}), \quad E_k = \frac{1}{2} m u^2 \quad (\text{運動エネルギー}), \quad E_f = Y_i + Y_e \\ & \quad (\text{核反応エネルギー}), \quad \Delta E = E_k + E_{ih} - E_f - E_{in} \quad (\text{レーザー入力エネルギー}) - E_b \\ & \quad (\text{制動放射損失エネルギー}), \quad \langle \rho R \rangle = \int_0^{R_0} \rho R \, dr / \int_0^{R_0} \rho \, dr, \quad G = (E_f + E_n) / E_{in} \\ & \quad (\text{エネルギー利得}), \quad N \quad (\text{中性子放出数}), \quad E_n = \left( R_{DT} E_{DT}^{14.1\text{MeV}} + \frac{1}{2} R_{DD} E_{DD}^{245\text{MeV}} \right) \\ & \quad (\text{中性子放出エネルギー}), \quad \text{レーザー照射量 (w)} \quad \text{と入力全エネルギー } P_i \text{ (J)}, \\ & \quad \text{臨界面 (} R_c \text{)}, \quad E_b \end{aligned}$$

そしてこれらの量がプリントされた後, 空間メッシュ毎に  $u_l$ ,  $\rho_l$ ,  $P_l$ ,  $T_{il}$ ,  $T_{el}$  が出力される。

入力データ及び出力プリントの例を以下に示す。タイムステップ毎に出力されるが, 出力量が多いため代表的なもののみを示す。又プロッターの結果も割愛したが, 例としては次節の Fig. 2.1 ~ Fig. 12 を参照されたい。この例題での計算所要時間は CPU 表示で FACOM 230/75 が 3.3 分, CDC 6600 が 5.4 分である。

EXAMPLE OF INPUT DATA

```

.....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
LASER TOTAL INPUT ENERGY SENSITIVITY
PC(1)1.5E-8 TAU(2.0E-8 SHAPE FACTOR=2.0
50-50 DT SPHERE 124 AG/M**3
TOTAL POWER=3.5 KJ
*NEWRUN
LASER(1)=3.5E3,
LAMBDA1=1.0E-5,
LASER(2)=1.50E9,
LASER(3)=2.00E-8,
LASER(4)=2.00E-8,
LASER(5)=2.00E-8,
LASER(6)=2.0,
DELTA1=1.0E-13,
LASER(6)=1.0E16,
DTEMAX=0.2,
DTIMAX=0.2,
DUMAX=0.2,
NLFILM=F,
NLHCPY=F,
NLPE=F,
NFRNT=100,
PI(31)=1.0,
PI(32)=1.0,
PI(33)=1.0,
PI(34)=1.0,PI(35)=1.0,PI(36)=1.0,
NRUN=2000,
TEINI=1.0E3,
TIINI=1.0E3,
NLPLUT=F,
NPLOT=10,
NLDUMP=T,
OPTI=0,
MIYPE=2,3,4,5,6,15*0,
MTIME=5,10060100,15*0,
TIMES=6,1,0E-8,14*0,
TIME=6,1,0E-6,14*0,
NIYPE=1,2,3,4,12,16,14*0,
NMESH=6*0202040,14*0
*END

```

OUTPUT DATA 1

```

*NEWRUN AK0=0.5000000000000000 01, AK1=0.2500000000000000 01, AK2=0.2500000000000000 01, AK3=0.2500000000000000 01,
AK4=0.2500000000000000 01, AK5=0.0, BNEUM=0.1000000000000000 01, DELTAI=0.1000000000000000 01, DELTAD=0.1000000000000000 01,
DEUTER=0.5000000000000000 01, DTEMAX=0.2000000000000000 01, DTIMAX=0.2000000000000000 01, DUMAX=0.2000000000000000 01,
GAMMAE=0.1666666666666667 01, GAMMAI=0.1666666666666667 01, HELIU3=0.0, HELIU4=0.0, HYDROG=0.0,
LAMDA1=0.10000000E-04, NEUTAL=0.0, NTRIMS=0.0, RHOINI=0.1240000000000000 03, RINI=0.4800000000000000 01, SCITE=0.1000000000000000 01,
SCP=0.1000000000000000 01, SCR=0.1000000000000000 01, SCRHO=0.1000000000000000 01, TEINI=0.1000000000000000 04,
SCTI=0.1000000000000000 01, TINI=0.1000000000000000 01, TITIU=0.5000000000000000 01, XTRA=0.0, XZ=0.1000000000000000 01,
TSTOP=0.1000000000000000 04, XMASS=0.1000000000000000 01, XTRA=0.0, NP1=1, NP2=40, NP3=2, NPRNT=100, NREP=0,
NCASE=1, NDUMP=10, NFILE=1, NGEOM=3, NHDCPY=100, NITMAX=5, NLECON=T, NLEMP=T, NLFILM=F, NLFUSE=T, NLHCPY=F,
NLABS=T, NLBRMS=T, NLBURNT, NLCPY=T, NLDEPO=T, NLPRNT=T, NLX=T, LASER1=0.0, PI=30*0.0, 0.15000000E 10, 0.20000000E-07,
NLICONT, NLITE=T, NLMOVE=T, NLPFE=F, NLPFI=T, NLPRT=T, 0.10000000E 17, 0.35000000E 04, 8*0.0, PI=30*0.0, 6*0.1000000000000000 01,
-0.20000000E 01, 0.20000000E-07, NOUT=6, NPRINT=6, NIN=5, NPUNCH=7, NRUN=2000, MXDUMP=10, NADUMP=20*0,
15*0.0, NLEDGE=30, NONLIN=1, NLOMT1=50*F, NLOMT2=50*F, NLOMT3=50*F, NLREPT=F, NPDUMP=20*0, NVDUMP=20*0, NLCHED=F,
TIMEE=6*0.1000000000000000 01, 14*0.0, TIMES=6*0.1000000000000000 01, 14*0.0, MTIME=5*10060100, 15*0, MTYPE=2,
3, 4, 5, 6, 15*0, NMESH=6*2020040, 14*0, NPLOT=10, NTYPE=1, 2, 3, 4, 5, 6, 14*0, OPTI=0,
NLPLOT=T*
    
```

OUTPUT DATA 2

TIMESTEP NUMBER 200

DELTA T = 4.9053484E-11

DELTA T DETERMINED BY CONDITION 1 AT MESHPOINT 36

BOUNDARY : R = 5.977E-03 U = 6.8174E+05 P = 1.000E-16 TI = 0.0 TE = 0.0 SOUND SPEED = 2.634E+05  
 ENERGIES : THERMAL 3.97985E+01 KINETIC 5.37533E+01 NUCLEAR 0.0 ERROR -2.11412E-02 RHO R 8.65163E-02  
 LASER POWER : 2.55584E+10 WATTS TOTAL ENERGY INPUT FROM LASER 9.48890E+01 JOULE ABSORPTION AT R = 8.305E-04  
 RADIATION LOSS -6.82054E-01

COORDINATES (M) *	1.00000E+00	3.6000E-05	4.8000E-05	6.0000E-05	7.2000E-05	8.4000E-05	9.6000E-05	1.0800E-04
0.0	1.2000E-05	2.4000E-05	3.6000E-05	4.8000E-05	6.0000E-05	7.2000E-05	8.4000E-05	9.6000E-05
1.2000E-04	1.3200E-04	1.4400E-04	1.5600E-04	1.6800E-04	1.8000E-04	1.9200E-04	2.0400E-04	2.1600E-04
2.0986E-04	2.1799E-04	2.2623E-04	2.3475E-04	2.4372E-04	2.5320E-04	2.6320E-04	2.7376E-04	2.8489E-04
3.0659E-04	3.1396E-04	3.2203E-04	3.2927E-04	3.3283E-04	3.3633E-04	3.4015E-04	3.4439E-04	3.4904E-04
HYDRODYNAMIC VELOCITIES (M/SEC) *	1.00000E+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	-4.1510E+01	-1.0423E+03	-5.9397E+03	-1.0513E+04	-9.1294E+03	-9.7780E+03	-8.7783E+03
-6.5836E+03	-6.2689E+03	-5.2153E+03	-4.8515E+03	-4.1707E+03	-3.4858E+03	-2.8011E+03	-2.1897E+03	-2.5530E+03
-6.2546E+03	-9.8086E+03	-1.1690E+04	-1.9632E+04	-2.0116E+04	-2.0850E+04	-2.0015E+04	7.0322E+04	2.9375E+05
LOG(DENSITY (KG/M**3) *	1.00000E+00	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342
2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342
2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342	2.09342
2.38381	2.38673	2.37967	2.34220	2.32003	2.29605	2.27102	2.25420	2.30217
2.44865	2.53523	2.61857	2.75862	2.83773	2.81641	1.37449	-0.27729	-2.32420
LOG(HYDRODYNAMIC PRESSURE (JOULE/M**3) *	1.00000E+00	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435
9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435
9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435	9.87435
10.36311	10.36689	10.35433	10.29083	10.25352	10.21328	10.17133	10.14313	10.22553
10.48028	10.61886	10.76086	11.08571	11.11983	11.14528	11.14983	10.23667	8.29514
LOG(ION TEMPERATURE (DEGREE K) *	1.00000E+00	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000
3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000
3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000
3.26801	3.25413	3.23750	3.21696	3.17523	3.15523	3.13490	3.12069	3.19153
3.42448	3.41458	3.50956	3.62763	3.59796	4.03030	5.94311	6.129404	5.33556
LOG(ELECTRON TEMPERATURE (DEGREE K) *	1.00000E+00	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000
3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000
3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000	3.00000
3.26775	3.25449	3.23755	3.21680	3.19601	3.15495	3.13462	3.12078	3.18795
3.42732	3.41689	3.49718	3.63378	3.60388	4.04414	5.96749	6.189880	7.09303

OUTPUT DATA 3

TIME = 1.9830526E-08 DELTA T = 7.5924735E-13  
 Timestep number 800

DELTA T DETERMINED BY CONDITION 1 AT MESHPOINT 12

BOUNDARY : R = 9.694E-03 U = 9.8114E+05 P = 1.000E-16 TI = 0.0 TE = 0.0 SOUND SPEED = 8.538E+05  
 ENERGIES : THERMAL 2.01726E+03 KINETIC 1.45457E+03 NUCLEAR 5.79784E-01 ERROR 3.51891E+00 RHO R 1.53212E+00  
 FUSION : YIELD 1.65054E-04 NEUTRONS 2.03737E+11 KATE 6.44828E+21 ENERGY 4.61298E-01  
 LASER SWITCHED OFF AT STEP 800 TIME 1.9830526E-08 POWER 2.07075E+13 ENERGY 3.51270E+03 R(ABS) 2.70259E-03  
 RADIATION LOSS -3.48367E+01

\*\*\*

COORDINATES (M) *	1.00000E+00	1.2814E-05	1.6087E-05	1.9370E-05	2.2361E-05	2.4573E-05	2.6099E-05
0.0	3.5340E-06	9.8678E-06	1.2814E-05	1.6087E-05	1.9370E-05	2.2361E-05	2.4573E-05
2.6847E-05	2.7300E-05	2.7944E-05	2.8302E-05	2.8684E-05	2.9096E-05	2.9532E-05	2.9998E-05
3.0974E-05	3.1456E-05	3.1941E-05	3.2443E-05	3.2954E-05	3.3483E-05	3.4111E-05	3.4789E-05
1.5599E-04	2.2557E-04	3.1486E-04	4.3096E-04	5.8459E-04	7.9513E-04	1.0947E-03	1.5438E-03
2.2625E-03	2.2625E-03	2.2625E-03	2.2625E-03	2.2625E-03	2.2625E-03	2.2625E-03	2.2625E-03
HYDRODYNAMIC VELOCITIES (M/SEC) *	1.0000E+00	-5.1197E+04	-1.2558E+04	2.4077E+04	-2.9911E+04	-1.5144E+05	-3.1640E+05
0.0	-5.1197E+04	-1.2558E+04	2.4077E+04	-2.9911E+04	-1.5144E+05	-3.1640E+05	-3.7410E+05
-3.9447E+05	-4.1172E+05	-4.0468E+05	-4.0058E+05	-4.0131E+05	-3.9650E+05	-3.9221E+05	-3.8859E+05
-3.8415E+05	-3.8678E+05	-3.8544E+05	-3.8482E+05	-3.8419E+05	-3.8354E+05	-3.8278E+05	-3.8207E+05
8.7146E+05	9.8122E+05	1.0436E+06	1.0759E+06	1.0803E+06	1.0615E+06	1.0201E+06	9.5679E+05
LOG(DENSITY (KG/M**3) * 1.0000E+00)	3.80398	3.84111	3.80259	3.79804	3.84226	3.99567	4.19900
3.68617	3.73297	3.80398	3.84111	3.79804	3.84226	3.99567	4.19900
4.85264	5.08769	5.11008	5.13924	5.17534	5.19274	5.20134	5.21756
5.28309	5.30827	5.31895	5.33518	5.34380	4.34239	3.44206	2.80614
1.89129	1.50945	1.14326	0.77995	0.40241	-0.44152	-0.94156	-1.54713
LOG(HYDRODYNAMIC PRESSURE (JOULE/M**3) * 1.00000E+00)	14.9922	15.02475	14.91419	14.77477	14.66961	14.70593	14.70148
14.92045	14.94160	14.9922	15.02475	14.91419	14.77477	14.66961	14.70593
14.85193	14.87646	14.90636	14.95172	14.98984	15.01105	15.04002	15.08129
15.19049	15.23245	15.25024	15.27729	15.29167	15.29338	15.28782	14.89636
13.50079	13.12778	12.76780	12.40934	12.03566	11.63686	11.19750	10.69891
LOG(ION TEMPERATURE (DEGREE K) * 1.00000E+00)	7.39187	7.38431	7.29969	7.15310	7.00489	6.89060	6.67966
7.43809	7.40456	7.39187	7.38431	7.29969	7.00489	6.89060	6.67966
6.07964	5.15914	5.07787	5.04891	5.05759	5.06856	5.07279	5.08358
5.12679	5.14349	5.15043	5.16126	5.16722	7.10507	7.45619	7.36362
7.06823	6.92567	6.78438	6.64395	6.49723	6.17241	5.98062	5.74409
LOG(ELECTRON TEMPERATURE (DEGREE K) * 1.00000E+00)	7.3229	7.32809	7.34204	7.28342	7.16022	7.00927	6.88838
7.38933	7.37229	7.32809	7.34204	7.28342	7.16022	7.00927	6.88838
6.07807	5.15900	5.07679	5.04482	5.05661	5.06782	5.07254	5.08333
5.12675	5.14344	5.15044	5.16125	5.16715	7.14346	7.76051	7.94237
8.04739	8.06942	8.08452	8.09552	8.11026	8.11511	8.11854	8.12056

OUTPUT DATA 4

TIME = 2.0187002E-08  
 DELTA T DETERMINED BY CONDITION 3 AT MESHPOINT 13  
 DELTA T = 3.1680678E-12  
 Timestep number 1600  
 BOUNDARY : R = 1.0061E-02 U = 1.0342E+06 P = 1.000E-16 II = 0.0 TE = 0.0 SOUND SPEED = 4.144E+05  
 ENERGIES : THERMAL 1.89671E+03 KINETIC 2.01408E+04 NUCLEAR 1.02257E+05 ERROR -9.43598E+02 RHO R 4.43374E-03  
 FUSION : YIELD 2.91107E+01 NEUTRONS 3.59469E+16 RATE 4.28657E+21 ENERGY 8.13205E+04  
 RADIATION LOSS -1.458640E+03

COORDINATES (M) * 1.00000E+00	0.0	6.2060E-05	1.2377E-04	1.8491E-04	2.4539E-04	3.0542E-04	3.6549E-04	4.2594E-04	4.8693E-04	5.4841E-04
6.1028E-04	6.7268E-04	7.3597E-04	8.0007E-04	8.6331E-04	9.2628E-04	9.8716E-04	1.0080E-03	1.0331E-03	1.0561E-03	1.0797E-03
1.0797E-03	1.1006E-03	1.1249E-03	1.1482E-03	1.1694E-03	1.1877E-03	1.2049E-03	1.2205E-03	1.2345E-03	1.2455E-03	1.2618E-03
1.2803E-03	1.2987E-03	1.3148E-03	1.3298E-03	1.3436E-03	1.3564E-03	1.3682E-03	1.3791E-03	1.3891E-03	1.3982E-03	1.4065E-03
HYDRODYNAMIC VELOCITIES (M/SEC) * 1.00000E+00										
0.0	2.0845E+05	4.1570E+05	6.2116E+05	8.2587E+05	1.0302E+06	1.2415E+06	1.4535E+06	1.6667E+06	1.8797E+06	2.0928E+06
2.0928E+06	2.3076E+06	2.5265E+06	2.7251E+06	2.9045E+06	3.0900E+06	3.0140E+06	2.8882E+06	3.0375E+06	3.0436E+06	3.1320E+06
3.1320E+06	3.2286E+06	3.2552E+06	3.3085E+06	3.4341E+06	3.3861E+06	3.5028E+06	3.6003E+06	3.5388E+06	3.6444E+06	3.7673E+06
3.7673E+06	3.7505E+06	3.7262E+06	3.8491E+06	3.9462E+06	3.3697E+06	2.0478E+06	1.2037E+06	1.0155E+06	9.0194E+05	8.0689E+05
LOG(DENSITY (KG/M**3) * 1.00000E+00)										
-0.06892	-0.06255	-0.07543	-0.06682	-0.05944	-0.05700	-0.05987	-0.06310	-0.06417	-0.06601	-0.06679
-0.07027	-0.07770	-0.08499	-0.08209	-0.07797	-0.07203	-0.62807	0.62874	0.72735	0.83169	0.79380
0.53529	0.49721	0.62241	0.60377	0.62807	0.63784	0.63784	-0.10686	-0.60821	-1.06479	-1.62693
0.81338	0.85626	0.92962	0.90751	0.63784	0.63784	0.63784	-0.10686	-0.60821	-1.06479	-1.62693
LOG(HYDRODYNAMIC PRESSURE (JOULE/M**3) * 1.00000E+00)										
10.88396	10.88852	10.89606	10.90529	10.91343	10.91728	10.91753	10.91553	10.91319	10.91124	10.90929
10.90810	10.90196	10.92021	11.10404	11.20607	11.31498	11.67975	11.74400	11.82615	11.85406	11.85406
11.94534	11.92076	12.05767	12.05050	12.09069	12.20033	12.17960	12.22300	12.33447	12.30410	12.30410
12.33235	12.42277	12.46245	12.44728	12.18915	11.46137	10.93166	10.93166	10.40175	9.61850	8.03247
LOG(ION TEMPERATURE (DEGREE K) * 1.00000E+00)										
5.64794	5.65637	5.66894	5.68372	5.69823	5.70898	5.71667	5.72147	5.72560	5.73022	5.73022
5.73416	5.73723	6.36225	7.30320	7.51946	7.61185	7.65213	7.67057	7.69065	7.70883	7.70883
7.72660	7.74488	7.76137	7.77629	7.79174	7.80320	7.81439	7.82627	7.83586	7.84590	7.84590
7.85740	7.86734	7.87562	7.88490	7.89951	7.92025	7.87783	7.76757	7.35686	5.36531	5.36531
LOG(ELECTRON TEMPERATURE (DEGREE K) * 1.00000E+00)										
7.40688	7.40709	7.40753	7.40817	7.40902	7.41008	7.41137	7.41286	7.41457	7.41646	7.41646
7.41852	7.42076	7.42316	7.42566	7.42818	7.43060	7.43209	7.43284	7.43376	7.43464	7.43464
7.43561	7.43785	7.43994	7.44216	7.44426	7.44613	7.44785	7.44936	7.45076	7.45204	7.45311
7.45476	7.45699	7.45913	7.46115	7.46306	7.46485	7.46651	7.46806	7.46951	7.47091	7.47236

## 4. エネルギー利得の感度解析

核融合燃料としてはD-T, D-D,  ${}^1\text{B-H}$ の3つの組成が考えられるが, 最も燃やし易いのはD-T燃料である。しかし中性子でのエネルギー放出が非常に少なく, 理想的な燃料は ${}^1\text{B-H}$ 反応であるが, 燃焼条件がきつく現在のレーザー技術においては考えがたい<sup>(4)</sup>。MEDUSA-PコードにおいてはD-T及びD-D反応が取り扱い可能である。この節ではD-T燃料を考え, この燃料小球をレーザー照射によって液体密度の1万倍に爆縮し, 十分なエネルギー利得(熱核融合反応による放出エネルギーとレーザー照射エネルギーの比)の得られるような条件を考える。その場合照射に用いるレーザーのどのような波形が最適であるかが重要な問題となる。このレーザーの波形は以下のように見出すことができる<sup>(5)</sup>。

燃料小球にレーザを照射したとき, 燃料要素は表面から中心に向かって速度 $v = -dR/dt$ で動き出すとする。Rは小球の半径(通常0.5 mm以下)である。同様に, Rよりも少し内側の表面Sでの速度を $w = -ds/dt$ とする。巾 $\Delta R = R(t) - S(t)$ に対する殻における質量を $\Delta m$ とすると密度は $\rho = \Delta m / (4\pi R^2 \Delta R)$ となる。t=0における各境界値を $R = R_0$ ,  $S = S_0$ ,  $\Delta R = \Delta R_0$ と表わす。今, 最適なレーザーパルスは, パルス巾 $t = \tau$ のときに $\Delta R$ の殻及び削磨面から発生する全ての衝撃波が小球の中心に同時に到達するものと定義される。このような断熱的な圧縮過程において, 電子温度はFermi-Dirac統計に従って $T \sim \rho^{\gamma-1}$ , 即ち殻の流体速度uは

$$u \sim v \sim w \sim T^{1/2} \sim \rho^{(\gamma-1)/2} \quad (59)$$

のように密度とspecific heat ratio  $\gamma$  によって関係づけられる。

燃料小球が小さく, 殻 $\Delta R$ が中心へ近づいて行くということから $\Delta R \sim R$ と仮定すると $v \sim w \sim R^{-3(\gamma-1)/2}$ となる。従って2つの微分方程式 $\frac{dR}{dt} = v$ と $\frac{ds}{dt} = w$ を境界条件 $t = \tau$ において $R = 0$ ,  $S = 0$ のもとに解いて再び仮定 $\Delta R \sim R$ を用いると

$$v = \frac{R_0}{(1+\alpha)\tau} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^{-\alpha(1-\alpha)}, \quad \alpha = 3(\gamma-1)/2$$

を得る。レーザー照射によって最終的になされる仕事は $w \sim 4\pi R^2 \rho T v \sim v^3/R$ であるから期待される最適なレーザー出力は

$$P(t) = \begin{cases} P_0 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^{-q}, & P(t) \leq P(\tau_0) \\ 0, & P(t) > P(\tau_0) \end{cases} \quad (60)$$

ここで $P_0 = v_0^3/R_0$ で初期レーザー出力であり,  $q = \frac{3\alpha+1}{1+\alpha}$ で $\gamma = \frac{5}{3}$ のとき $q = 2$ で波形因子と呼ばれる。

MEDUSAコードにおいても(60)式に従ってレーザー照射を得ることができる。今MEDUSAのテストデータ<sup>(3)</sup>を用いてMEDUSA-Pで計算した結果を次に述べる。計算モデルのD-T燃料小球の初期半径 $R_0$ は0.48 mm, D-T燃料の初期密度は $\rho_0 = 124 \text{ kg/m}^3$ である。照射に用いるレーザーの波長は $\lambda = 10 \mu\text{m}$ で初期出力 $P_0 = 1.5 \times 10^9 \text{ (w)}$ である。波形因子 $q$ は2.0, パルス巾 $\tau = 20 \text{ nsec}$ である。レーザー照射の全出力エネルギー $P(\tau_0)$ は

4 KJ で (60) 式から分るように  $P(t) \geq 4 \text{ KJ}$  の時点で照射は打ち切られる。Fig.1 はレーザー出力エネルギー  $P(t)$  のレーザー Shut down time  $\tau_0$  までの時間変化を示す。Shut down time  $\tau_0$  は 19.8508 nsec でそのときのレーザー全出力エネルギーは 4.0015 KJ である。Fig.1 から分るようにレーザーは初期においては出力をゆっくりと上げ、19 ns 付近から急激に出力は上昇する。即ち初期においては弱い Shock を発生させ、徐々に衝撃を強くし、衝撃波を小球中心に同時に到達させる機構と考えることができる。Fig.2.1~Fig.2.3 に、電子温度変化は Fig.3.1~Fig.3.3 に、イオン温度変化は Fig.4.1~Fig.4.3 に、圧力変化は Fig.5.1~Fig.5.3 に、そして速度変化は Fig.6.1~Fig.6.3 に各々示されている。これらの図を互いに比較し、注意深く見ることによって、D-T 燃料小球は最適なレーザー照射によって、うまく圧縮され初期密度の 10000 倍以上に達し、かつイオン温度は点火温度 ( $\geq 1$  億度) になっていることが分る。そして熱核融合反応によって放出されたエネルギーはレーザー出力全エネルギーの 2.7 倍になっている。

燃料小球はまず比較的弱いレーザー照射によって表面の粒子は高温に加熱され、表面から飛び散ると同時に弱い最初の shock が発生し、削磨面を境界にして Fig.6.1 から分るように速度の向きがかわり、小球は中心に向って圧縮され始める。各タイムステップ毎に最適化されたレーザー強度の照射によって連続的に shock を発生させ、それらは中心に同時に到達させるようにする。Fig.3, 4, 5 から分るように急激に温度 ( $T_e, T_i$ ) 及び圧力の変化する熱波面は、断熱的に小球を圧縮して行くある種のピストンのような役目をしている。この様子をもう少し詳しく定量的に眺めてみると、 $t = 5.36 \text{ nsec}$  において  $\rho/\rho_0 \cong 2$  倍となり最初の衝撃波は 0.34 mm 近くへ進んでいる。15.13 nsec では  $\rho/\rho_0 \cong 5.1$  倍と 0.33 mm で圧縮され、電子温度は  $10^7 \text{ }^\circ\text{K}$  になっている。 $t = 19.61 \text{ ns}$  では  $\rho/\rho_0 = 251$  倍となり衝撃波は中心まで 71  $\mu\text{m}$  へと進んでいる。削磨面は 0.1 mm 近傍にありプラズマの流れの向きが変わっている。イオン温度も  $10^7 \text{ }^\circ\text{K}$  へと上昇している。しかし熱核反応はまだ殆んど起っていない ( $Y_i = 2 \times 10^{-6}$ )。  $t = 19.83 \text{ ns}$  は laser Shutdown time 寸前で、最初の衝撃波は中心に到達し、中心においても  $\rho/\rho_0 = 40$ ,  $T_i \sim T_e \sim 2.5 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{K}$  となっている。 $t = 19.87 \text{ ns}$  には  $\rho/\rho_0$  は 11  $\mu\text{m}$  近傍において 7400 倍に、中心においても約 100 倍になっている。そして熱核反応が始っている ( $Y_i = 1.9 \times 10^{-3}$ )。  $t = 19.897 \text{ ns}$  においては  $\rho/\rho_0$  は中心において 47200 倍にもなり、中心から 20  $\mu\text{m}$  が  $\rho/\rho_0 \geq 10000$  と高密度に圧縮されている。すでに点火が起り、放出された  $\alpha$  粒子のエネルギーが deposit され、 $R \cong 20 \mu\text{m}$  の高密度の小球において  $10^{9.4} \geq T_i > 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$ ,  $10^9 > T_e > 10^8 \text{ }^\circ\text{K}$  の高温に上昇している。そして核反応により 94.4 KJ の大部分のエネルギーが放出されている ( $Y_i = 23.5$ )。7.7 psec 後には 110.2 KJ ( $Y_i = 27.5$ ) の全エネルギーが放出される。 $t = 19.928 \text{ ns}$  においては燃焼は殆んど完了し燃焼波が  $R = 0.2 \text{ mm}$  附近を  $u \cong 5/\mu\text{s}$  で伝播していく。プラズマの外径は  $R = 9.76 \text{ mm}$  に膨張している。

Fig.7~12 までにはある空間点 (時間と共に変動している) における  $v, \rho, T_e, T_i, P, r$  の変化が時間に対して示してある。これらの量は中心に近いメッシュ番号 MESH = 19 においては特に点火時期において急激に変化している。

以上の例においては期待されたように燃料小球は初期密度の 1 万倍以上に、温度 ( $T_i$ ) も 1



億度以上に十分に成り、放出エネルギーはレーザー入力エネルギーの27倍にもなった。しかし最適なレーザー出力(60)式を用いればこのようなエネルギー利得は容易に得られるであろうか。この利得( $Y_i = 27.5$ )は初期条件： $\rho_0 = 124 \text{ kg/m}^3$ ,  $R_0 = 0.48 \text{ mm}$  のD-T小球、 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ ,  $P_0 = 1.5 \times 10^9 \text{ w}$ ,  $q = 2.0$ ,  $\tau = 20 \text{ nsec}$ ,  $P_{\text{total}} = 4 \text{ KJ}$ のもとに得られた。次に我々はこれらの幾つかの初期条件の中の1つだけを変化させて、エネルギー利得がどのように変動するかを調べる。

Fig.13は燃料小球の初期半径 $R_0$ が密度 $\rho_0$ を一定にして変化させたときのエネルギー利得の変化を示す。エネルギー利得は球半径 $R_0$ に対して非常にsensitiveである。 $R_0 = 0.48 \text{ mm}$ で $Y_i = 27$ であったのが $R_0 = 0.47 \text{ mm}$ と $0.01 \text{ mm}$ 小さくなると利得は殆んどゼロである。 $R_0 = 0.45 \text{ mm}$ を利得の最大値にして半径が少しでも小さくなると急激に利得は減少する。半径が大きい場合は少し変化はゆるいが、利得 $Y_i \geq 10$ を得るためには5~6%のずれしか許されない。このことは燃料球製造に高度の技術を要求することになるであろう。特に半径が $R_0 = 0.48 \text{ mm}$ より小さくなると利得が急激に減少する理由としては、衝撃波の進行が速く中心近傍において点火温度に達する前に( $\alpha$ 粒子の十分なdepositが起る前に)流体は中心で反射をし膨張を始めてしまうためである。

Fig.14はレーザーの初期出力 $P_0$ を変え、全出力は4KJとしたときのエネルギー利得の変化を示す。初期入力レベルは小さい方が良い利得をえることができる。 $Y_i \geq 10$ を満たすのは $\rho_0 = 1.2 \times 10^9 \sim 1.6 \times 10^9 \text{ w}$ である。初期出力が $P_0 = 1.6 \times 10^9 \text{ w}$ を越えるとエネルギー利得は急激に減少する。これは燃料小球が十分に圧縮される前に中心の温度が上昇してしまい、preheatingを起すためであると考えられる。

Fig.15はレーザー照射の全入力エネルギー $P_{\text{total}}$ を変えたときのエネルギー利得の変化を示す。 $P_i = 3.25 \text{ KJ}$ のとき標準データ $P_i = 4.0 \text{ KJ}$ のときよりもエネルギー利得は大きく $Y_i = 29$ となる。 $P_i \geq 3.2 \text{ KJ}$ においては $Y_i$ の変動は小さい。

Fig.16にはレーザーパルス波形因子 $q$ とエネルギー利得との関係が示されている。 $q > 2.0$ の条件で利得 $Y_i$ は急激に減少する。これは初期レーザー出力 $P_0$ と利得との関係に良く似ている。

Fig.17は初期密度 $\rho_0$ とエネルギー利得との関係を示す。これは初期燃料球の半径 $R_0$ の場合と同様に非常に $\rho_0$ と $Y_i$ との関係はきびしい条件にある。

Fig.18はレーザー光の波長とエネルギー利得との関係を示す。この $\lambda$ と $Y_i$ との関係は $\lambda \geq 3$ において殆んど一定である。波長 $\lambda$ は勿論レーザーの種類に固有のものであり炭酸ガスレーザーは $\lambda = 10.6 \mu$ である。

以上記述された事から分るように、最大のエネルギー利得 $Y_i$ を得るためには、燃料とレーザーに対する多くの初期条件の要求精度は非常に厳しいものである。高い利得をえるためにはレーザー照射を非常に慎重に時間的に整形しなければならないことが分る。

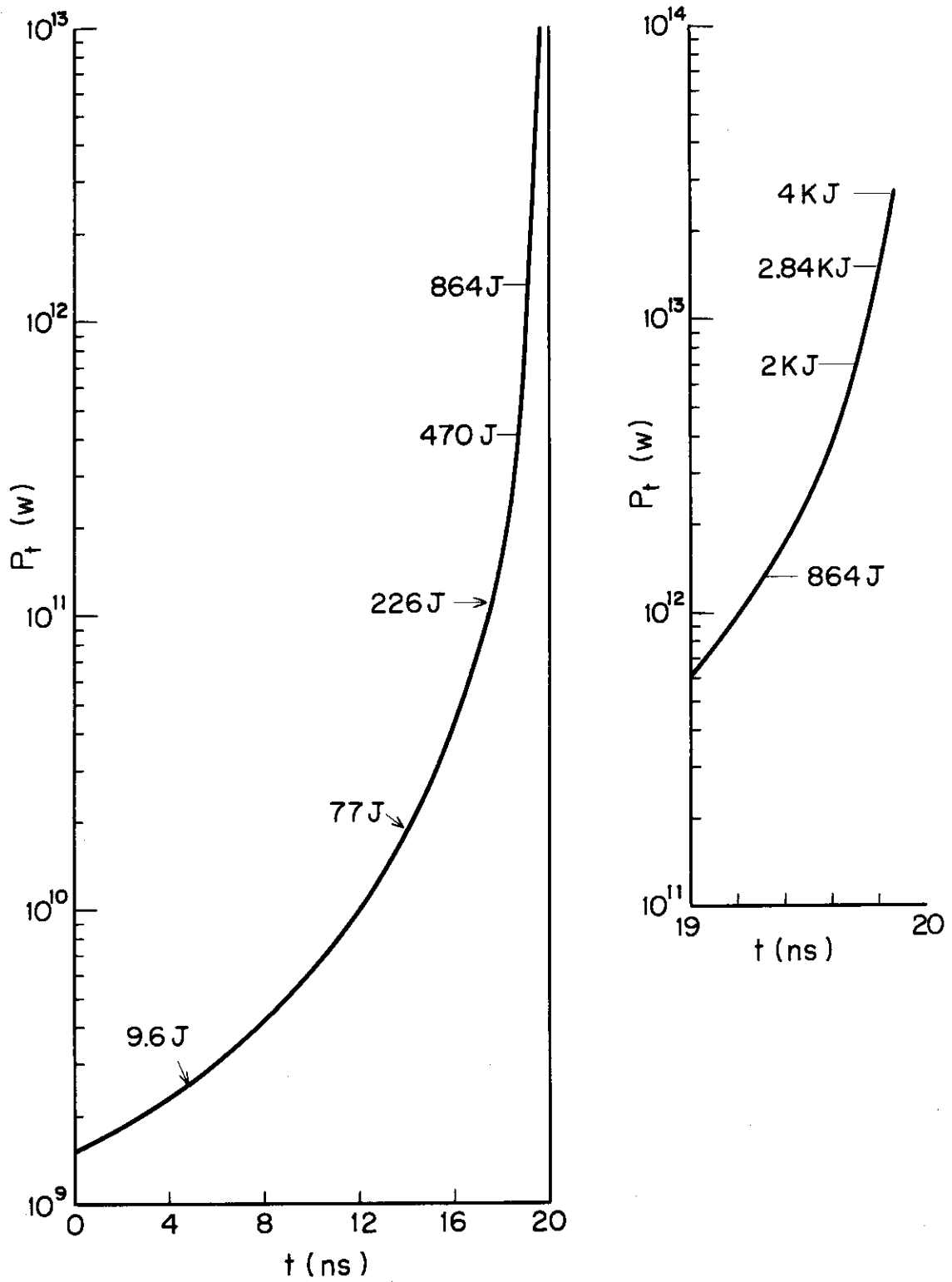


Fig. 1 Optimized laser pulse shape

DATE 76-04-16

PAGE 2

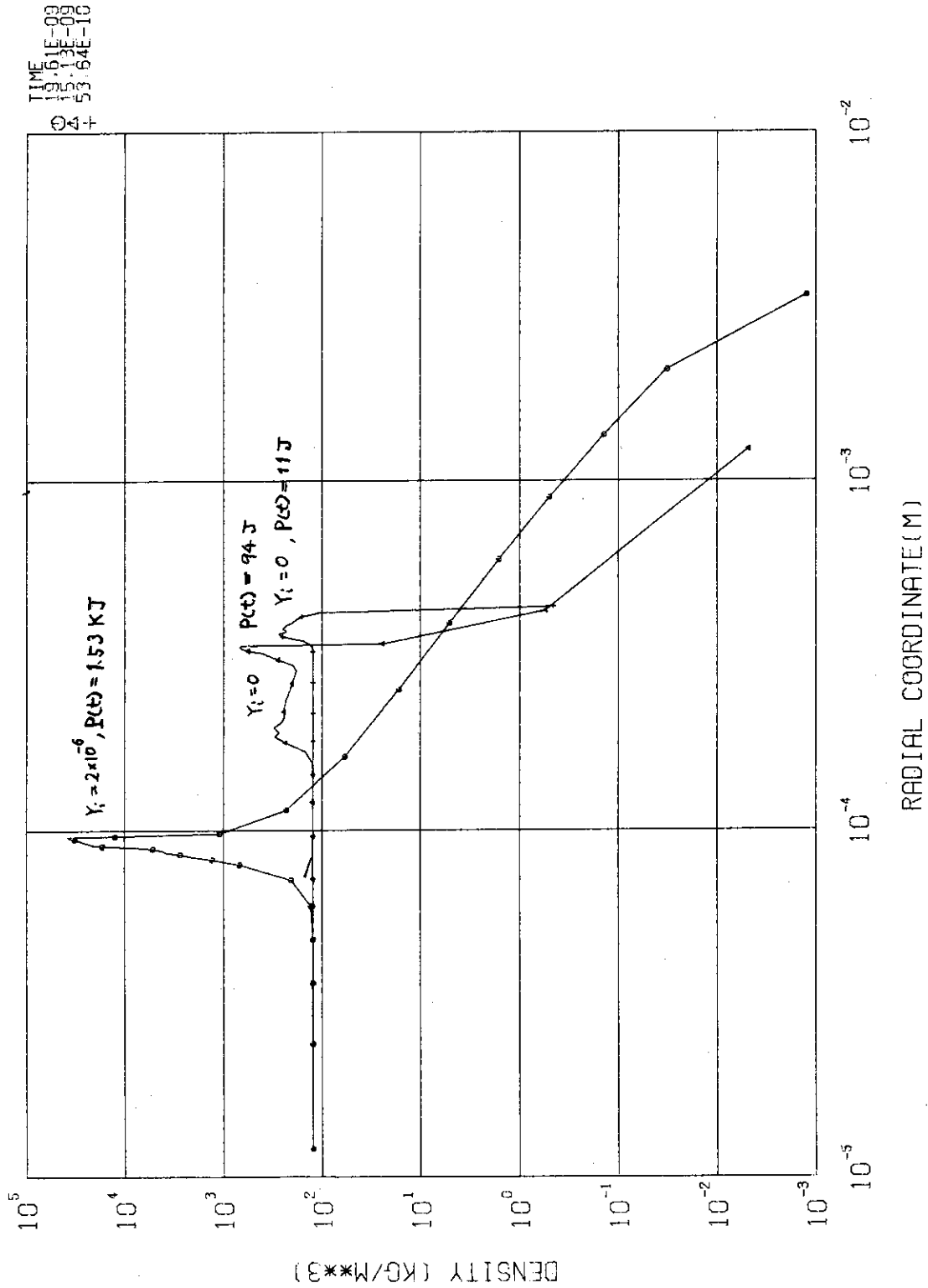


Fig. 2.1 Space variations of D-T fuel pellet density at early times of implosion

DATE 76-04-08  
PAGE 2

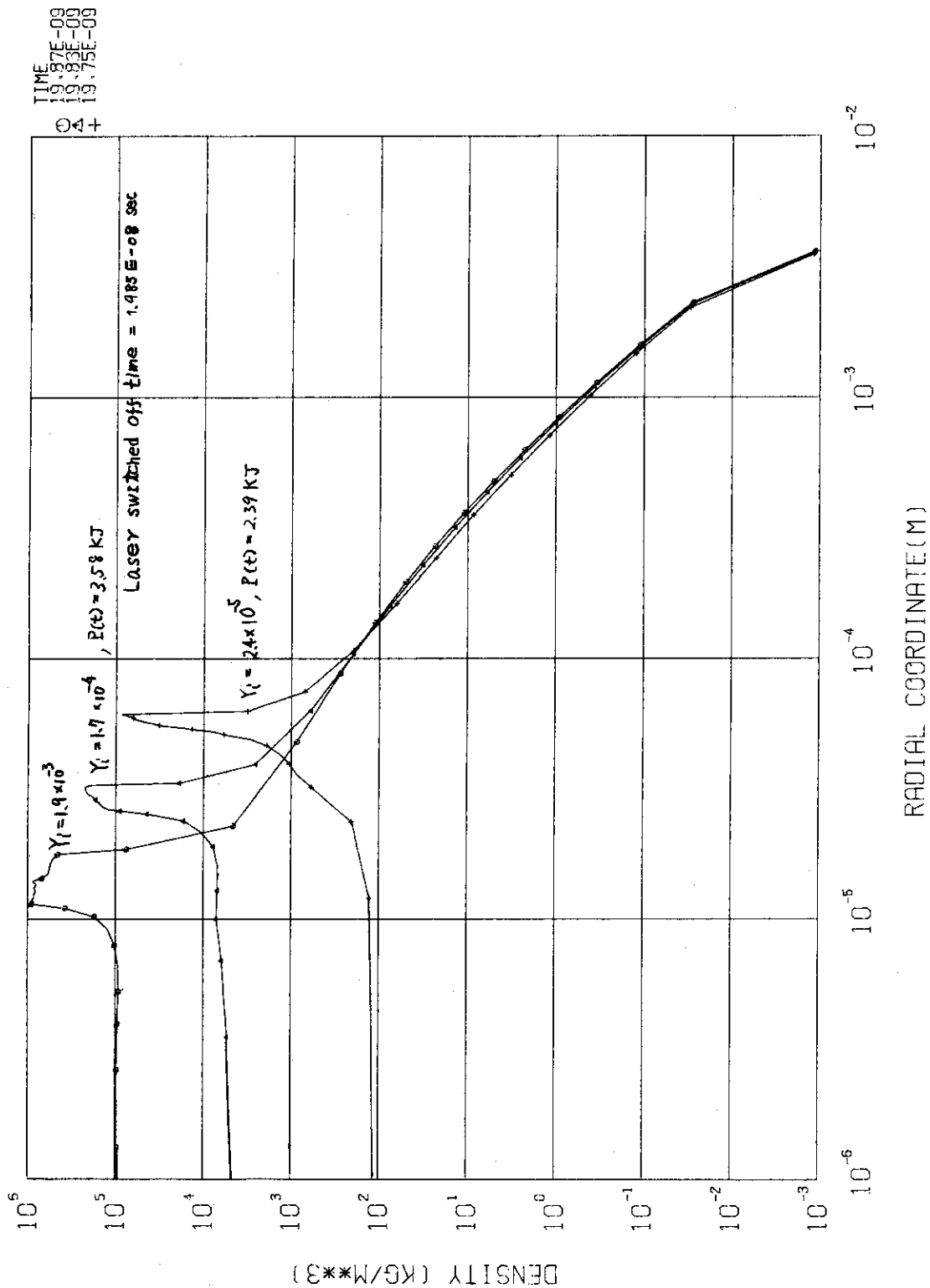


Fig. 2.2 Space variations of D-T fuel pellet density at times around the laser switched-off

DATE 76-06-09  
PAGE 2

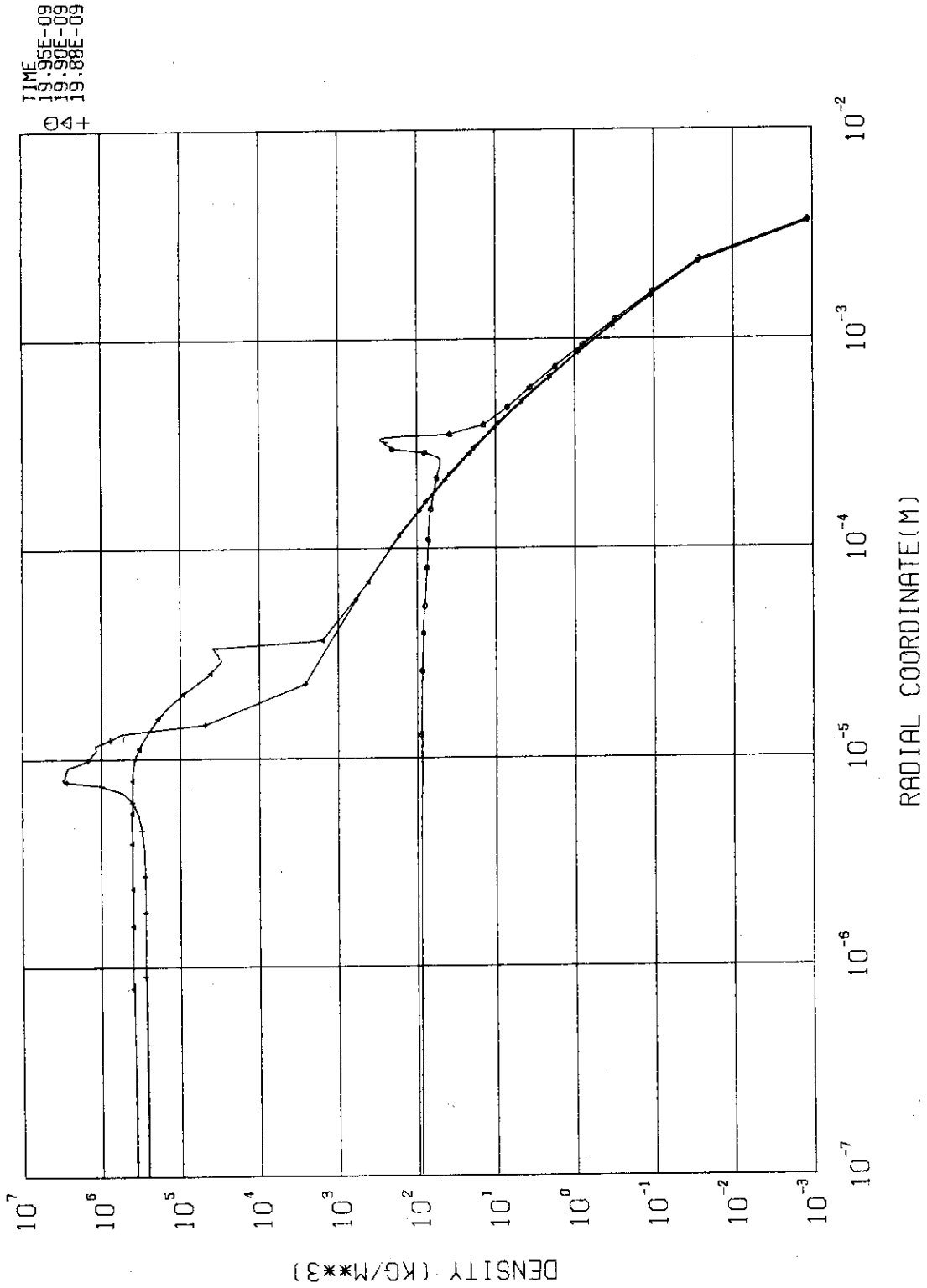


Fig. 2.3 Space variations of D-T fuel pellet density at times of burning

DATE 76-04-16,  
PAGE 5

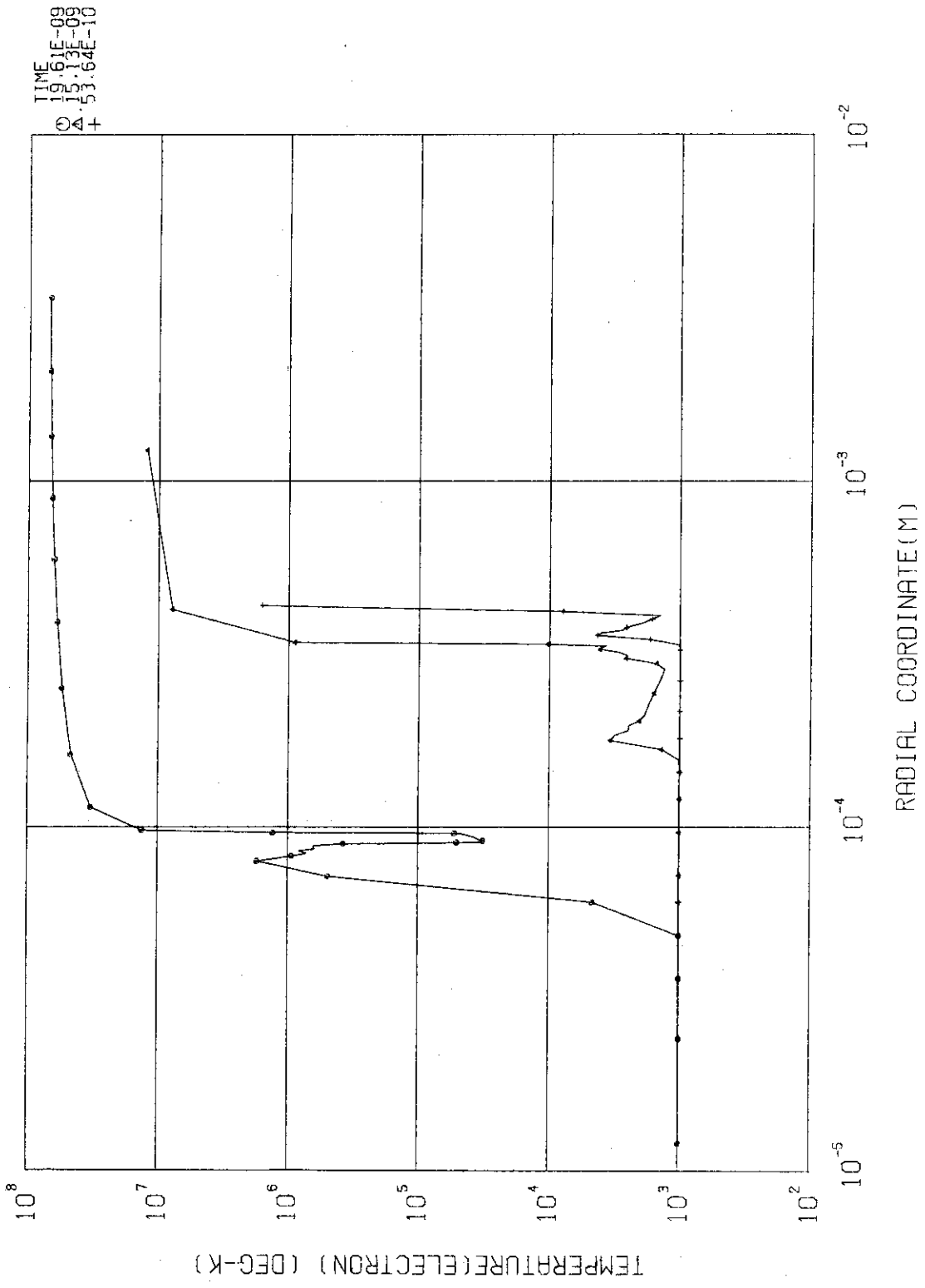


Fig. 3.1 Space variations of T<sub>e</sub> at early times of implosion

DATE 76-04-08<sub>Thu</sub>  
PAGE 5

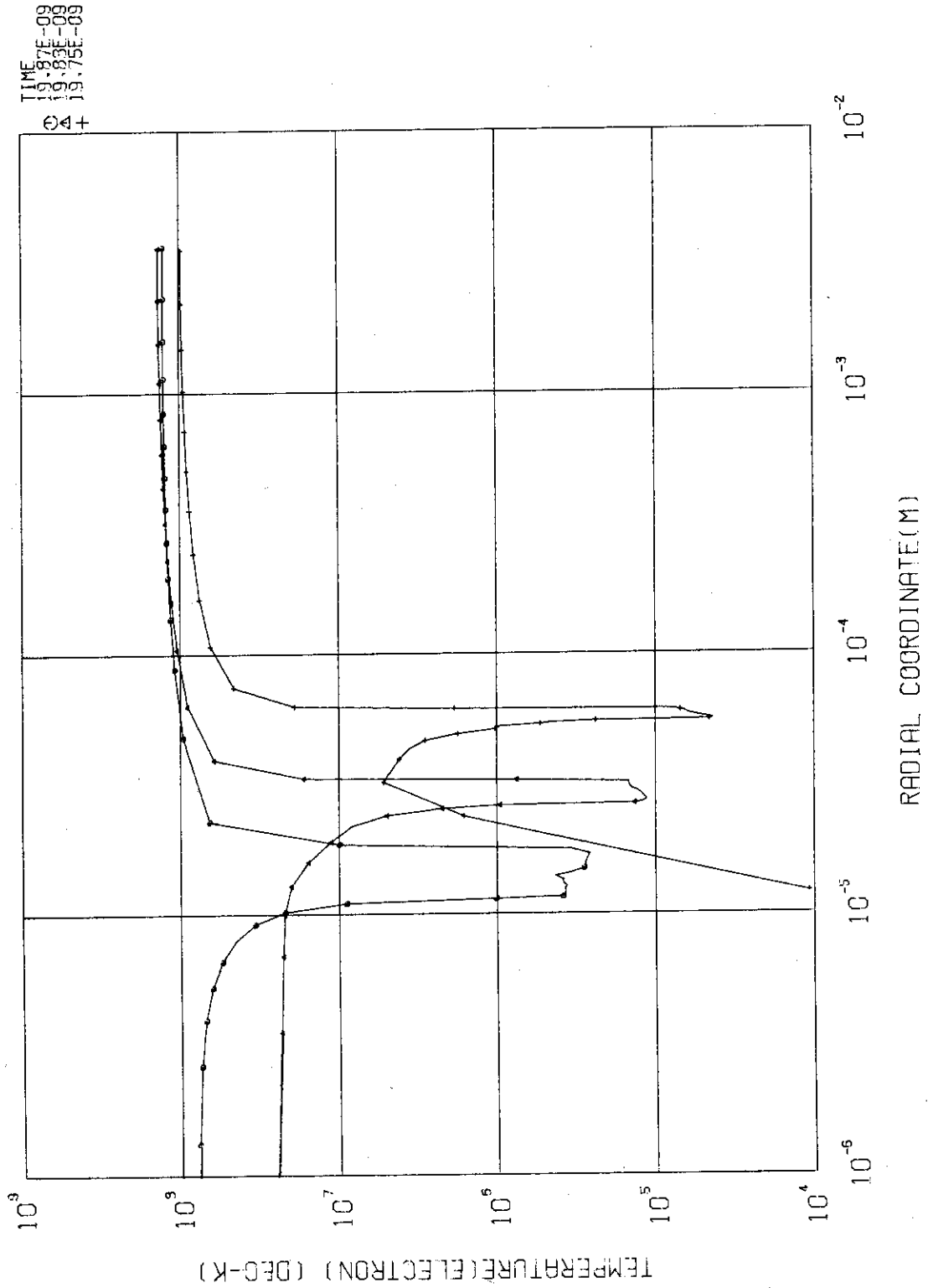


Fig. 3.2 Space variations of  $T_e$  at times around the laser switched-off

DATE 76-06-09  
PAGE 5

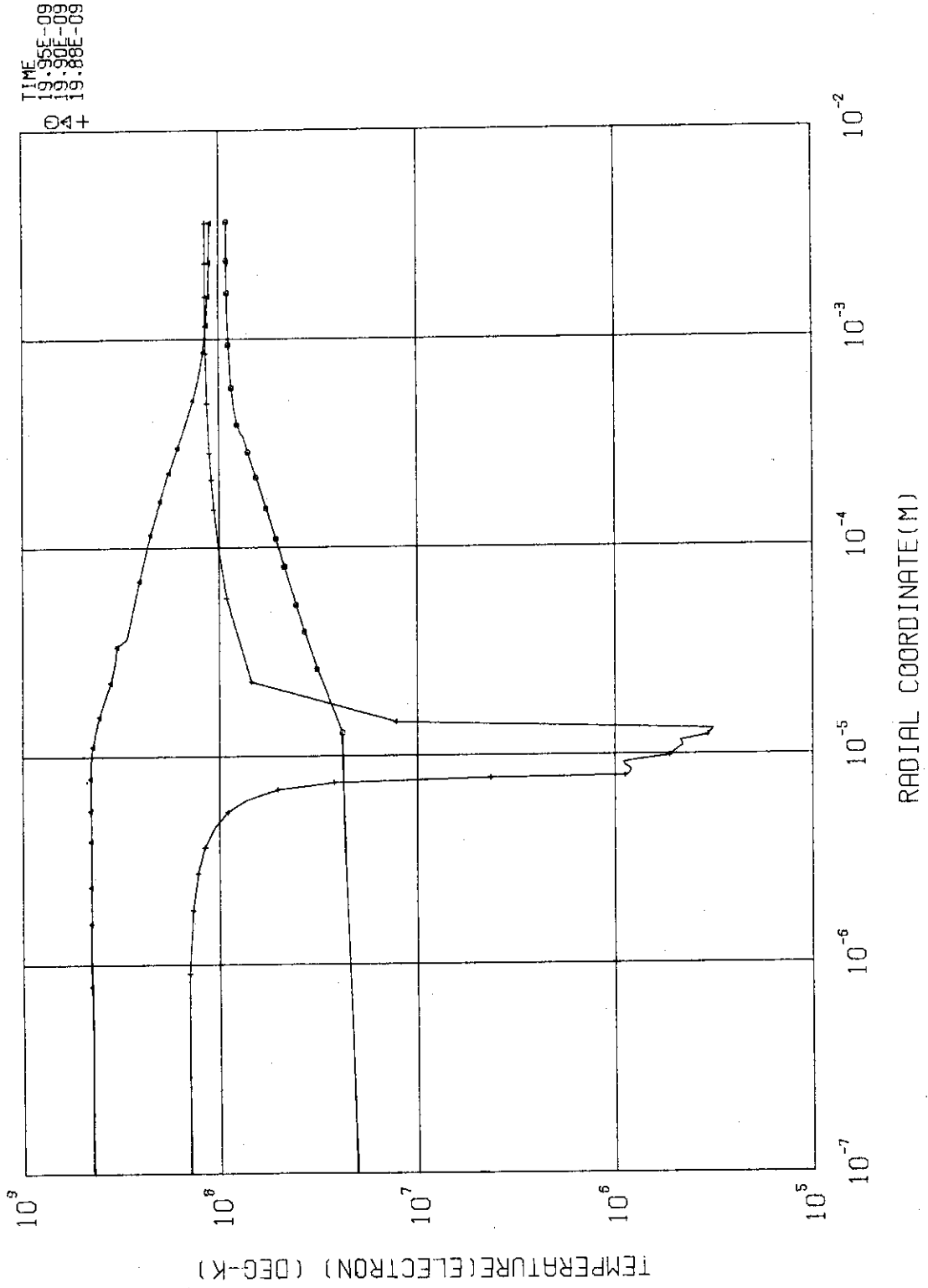


Fig. 3.3 Space variations of  $T_e$  at times of burning



DATE 76-04-16  
PAGE 4

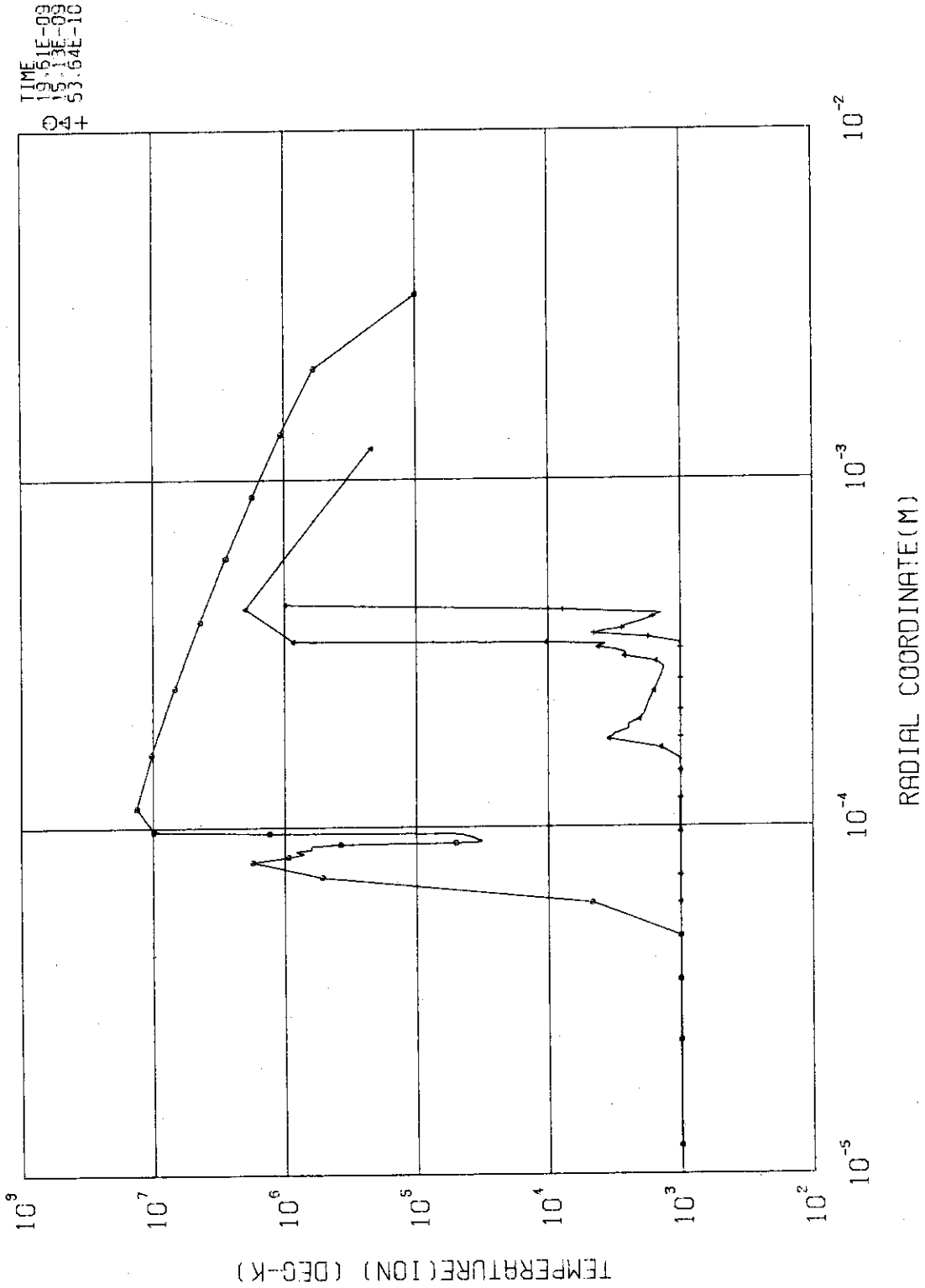


Fig. 4.1 Space variations of  $T_i$  at early times of implosion

DATE 76-04-08  
PAGE 4

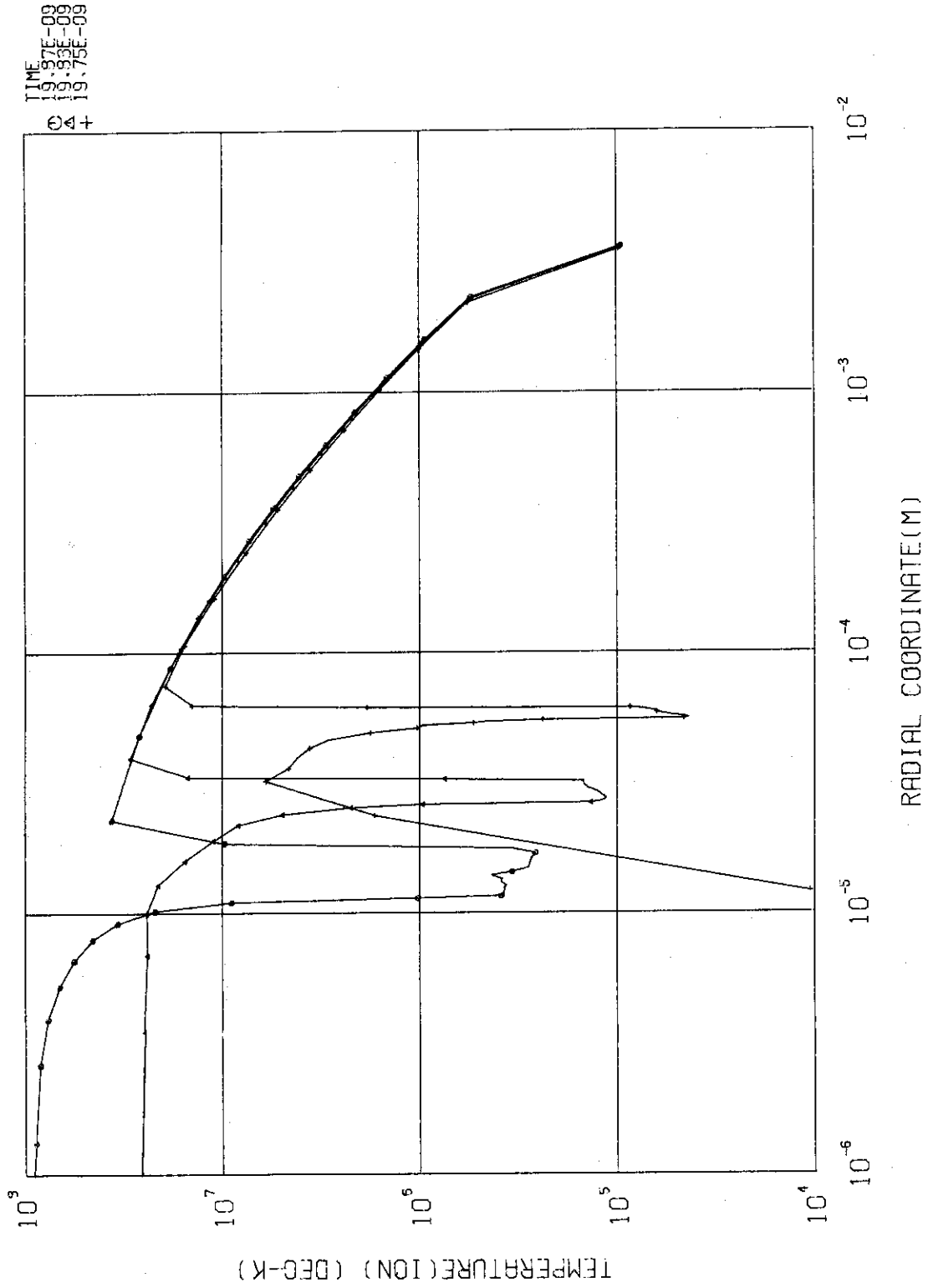


Fig. 4.2 Space variations of  $T_i$  at times around the laser switched-off

DATE 76-06-09  
PAGE 4

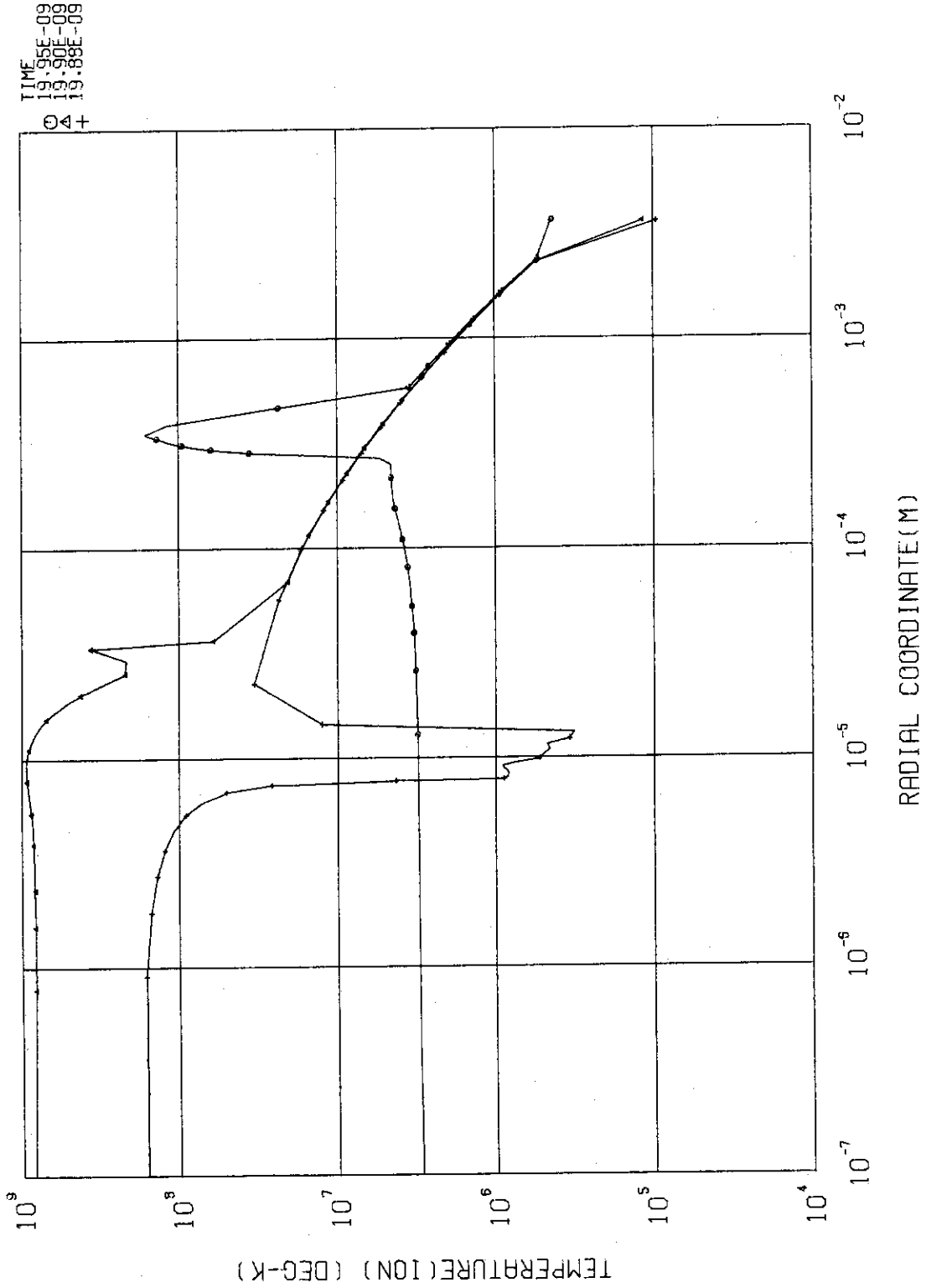


Fig. 4.3 Space variations of  $T_i$  at times of burning

DATE: 75-04-16  
PAGE: 3

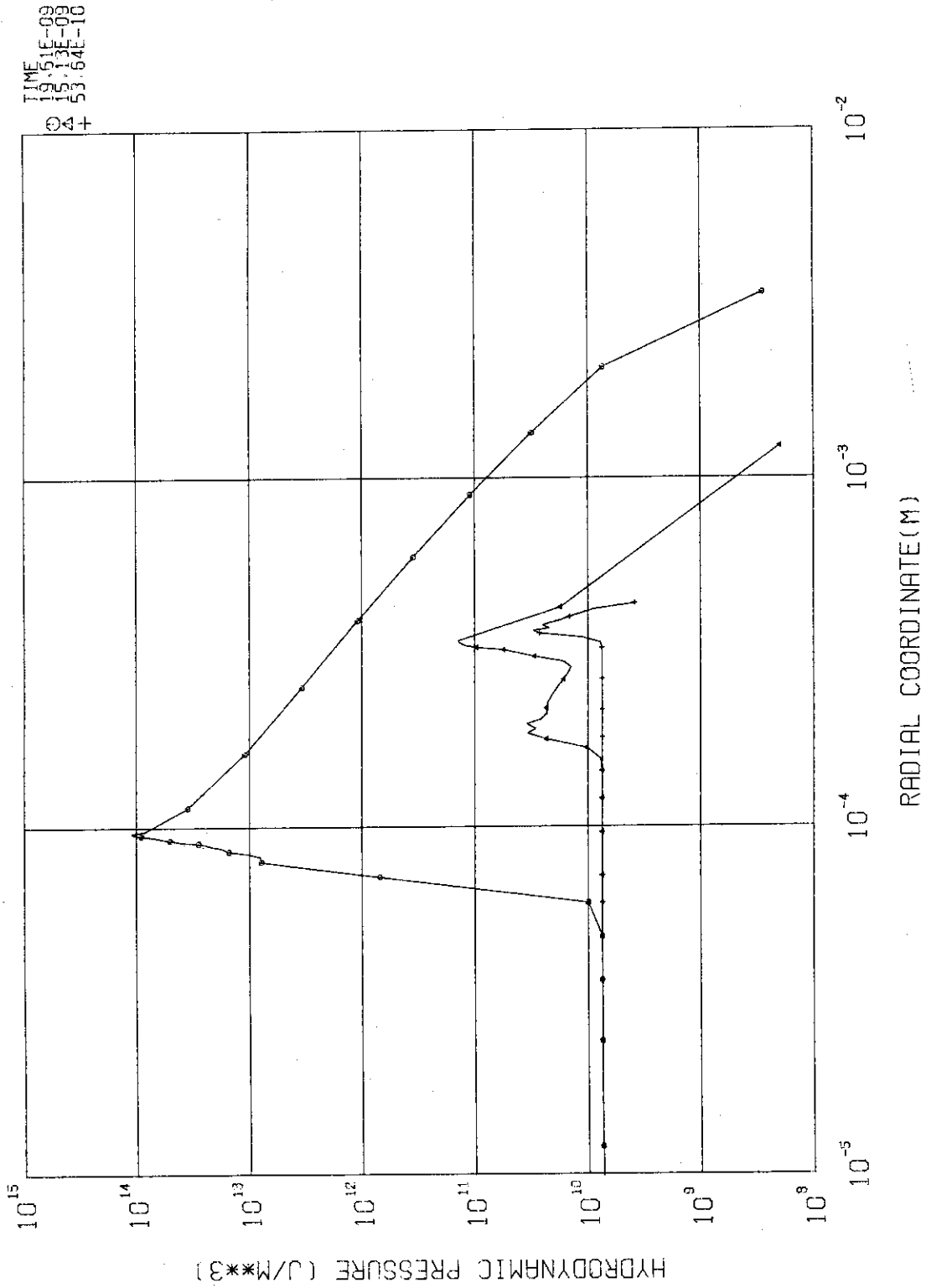


Fig. 5.1 Space variations of hydrodynamic pressure at early times of implosion

DATE 75-04-08  
PAGE 3

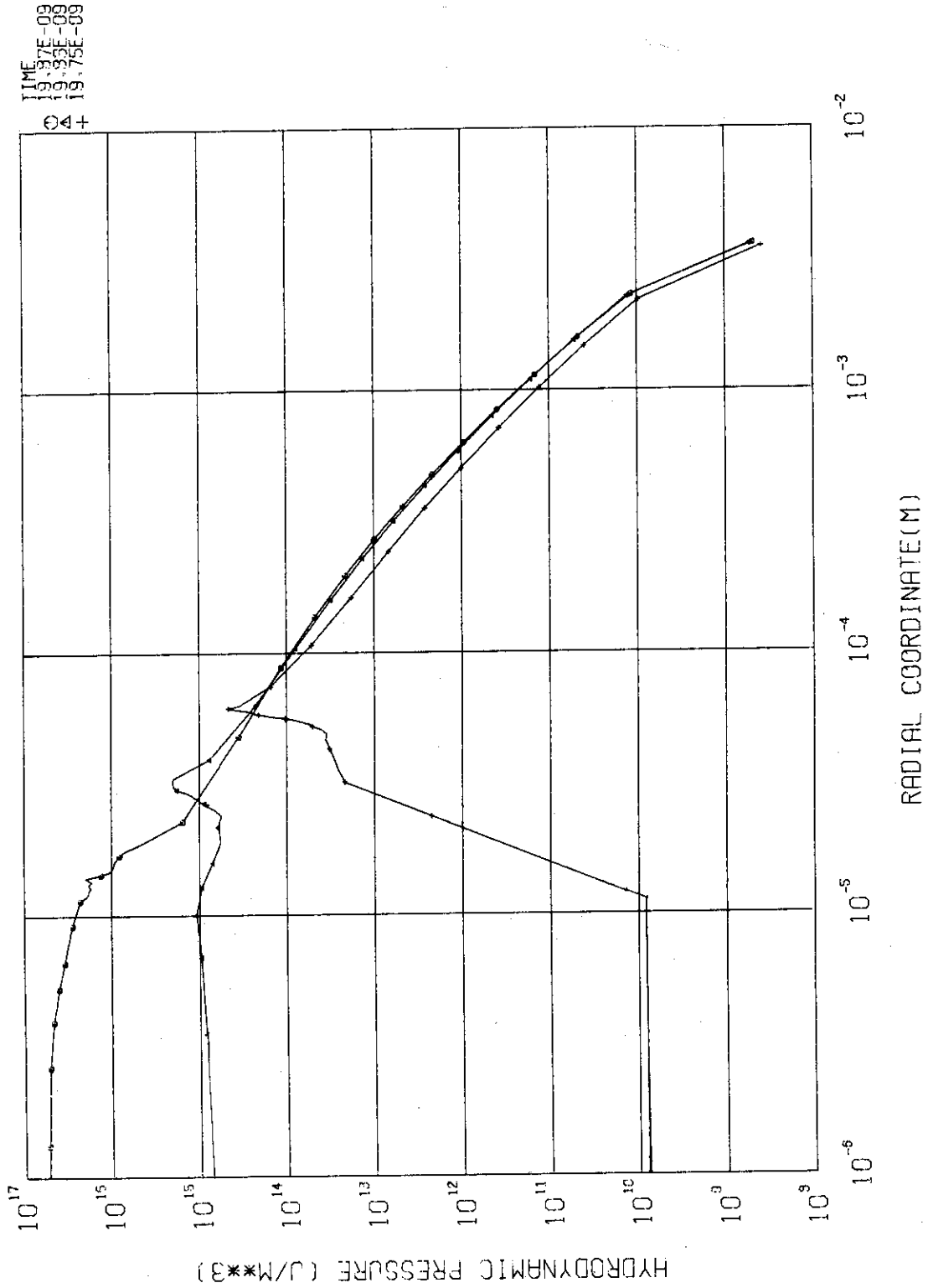


Fig. 5.2 Space variations of hydrodynamic pressure at times around the laser switched-off

DATE 76-06-08  
PAGE 3

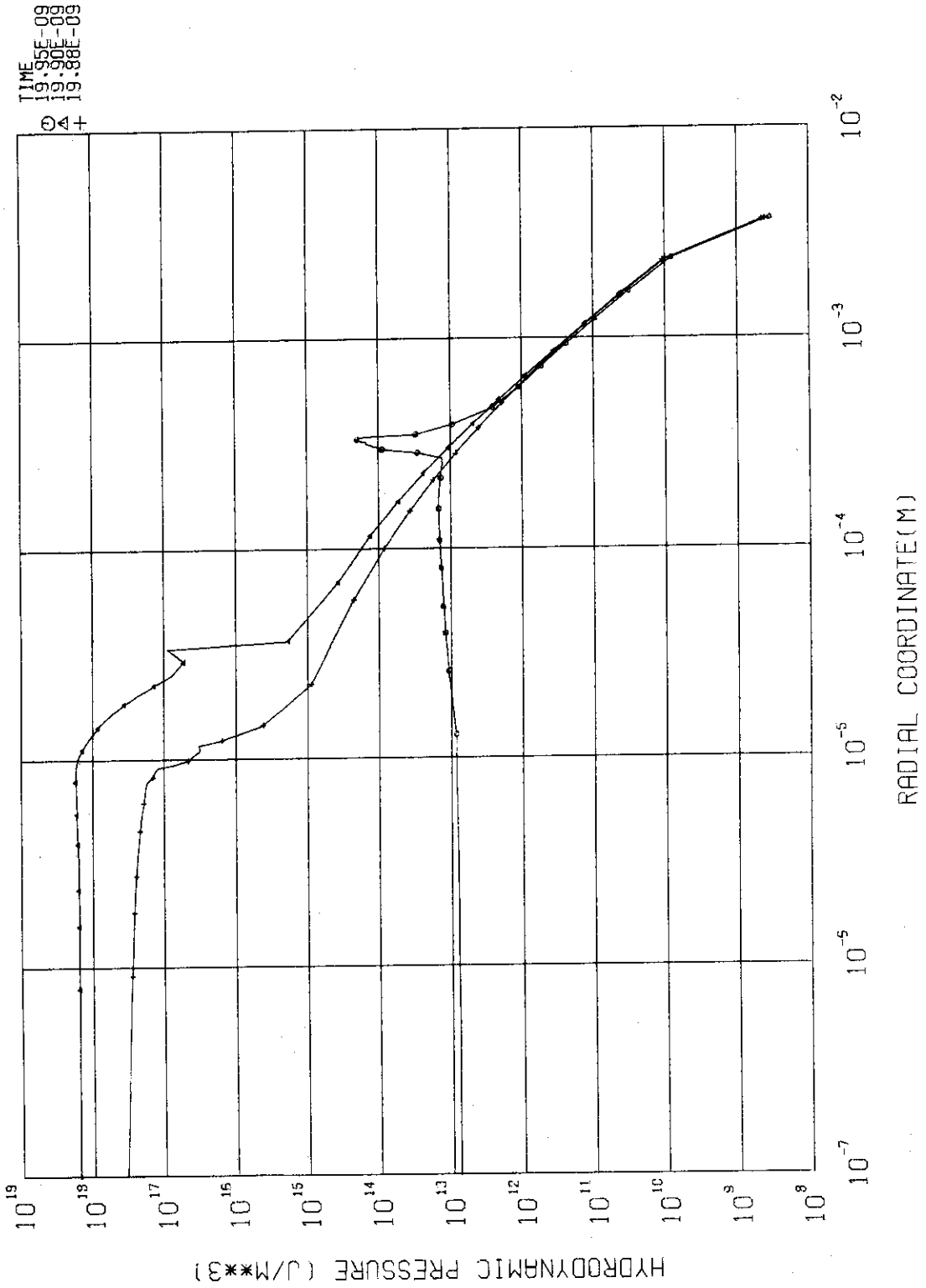


Fig. 5.3 Space variations of hydrodynamic pressure at times of burning

DATE 76-04-16  
PAGE 1

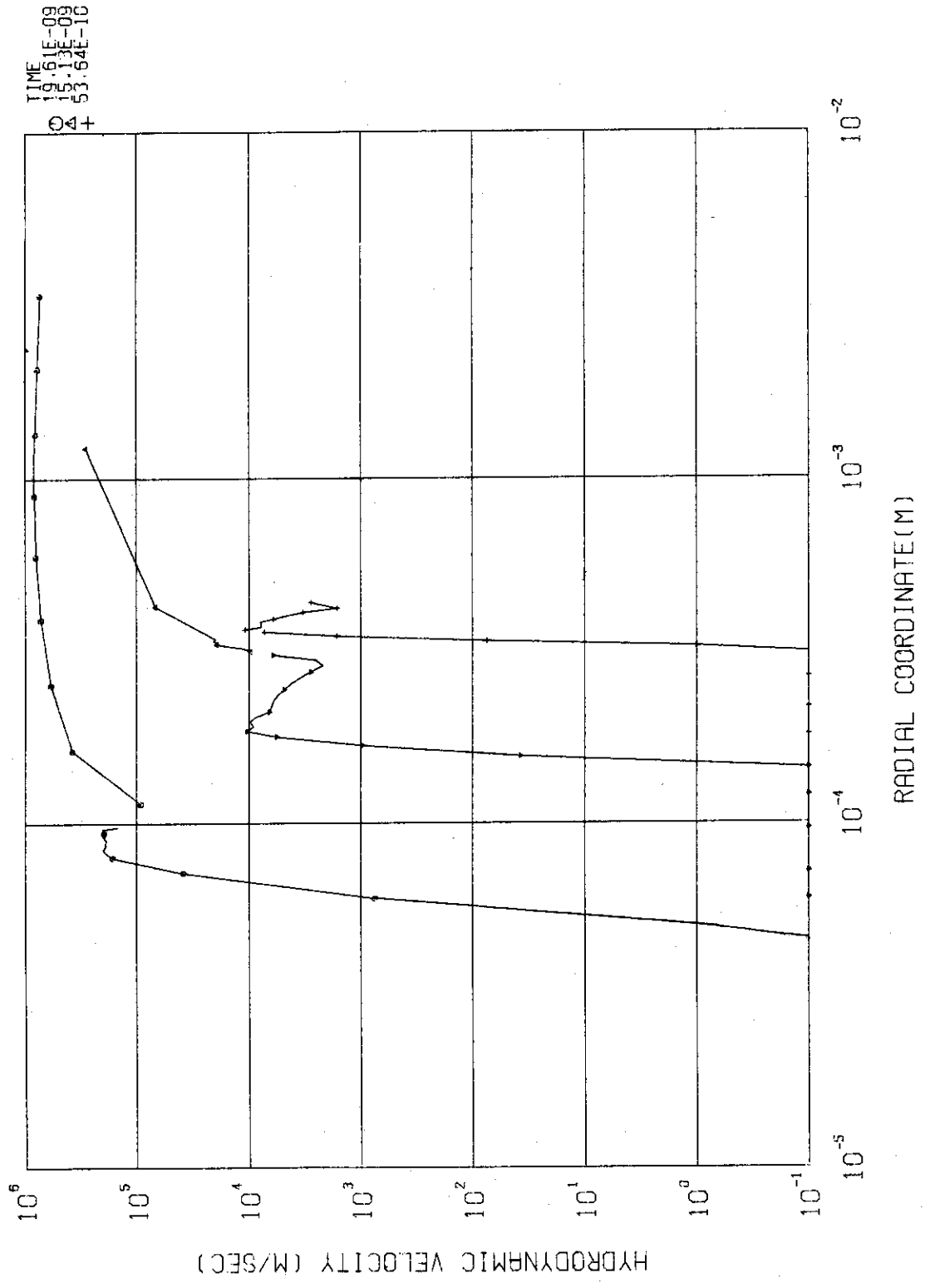


Fig. 6.1 Space variations of hydrodynamic velocity at early times of implosion

DATE: 75-04-08<sub>THU</sub>  
PAGE: 1

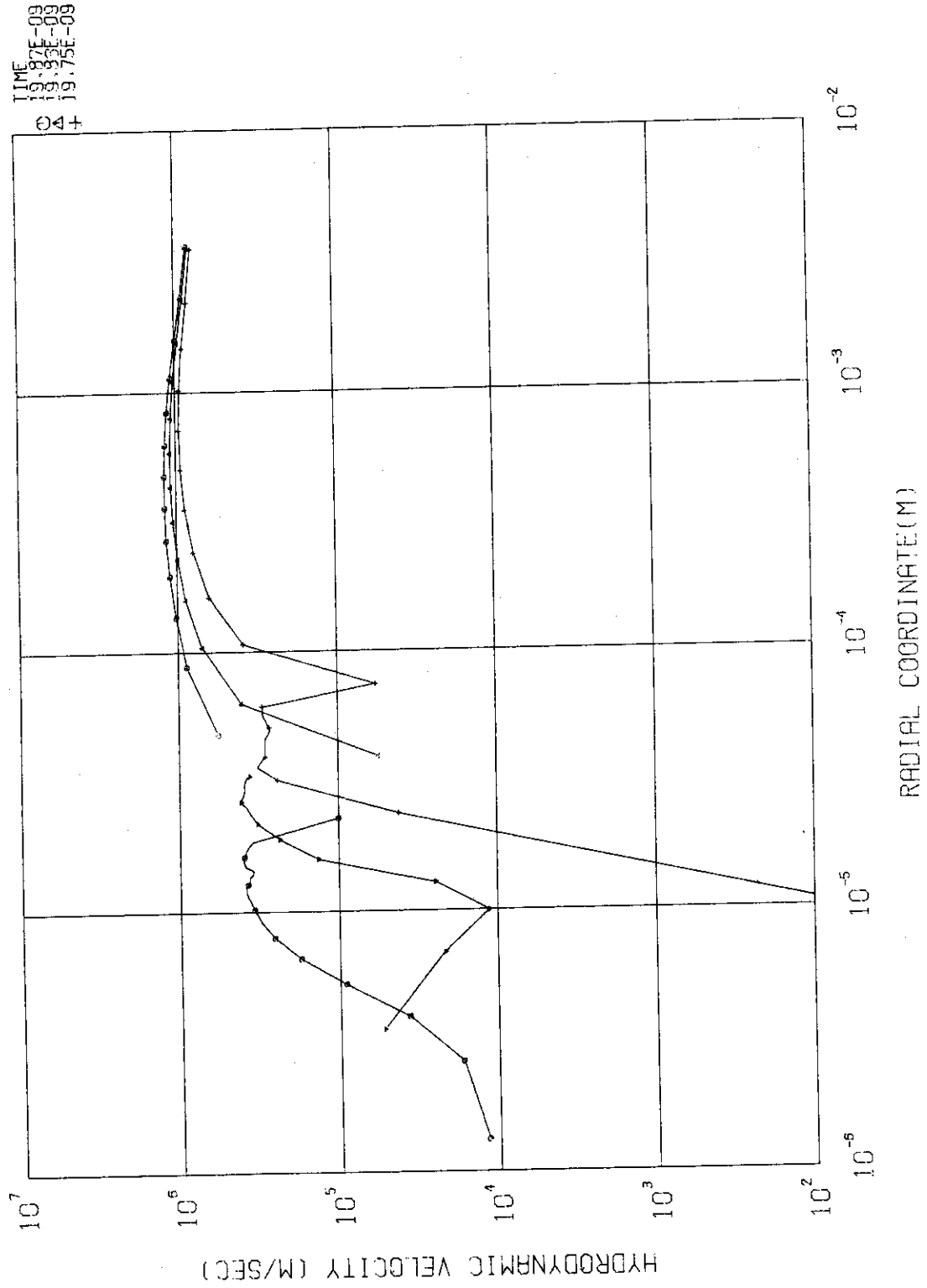


Fig. 6.2 Space variations of hydrodynamic velocity at times around the switched-off



DATE 76-06-09  
PAGE 1

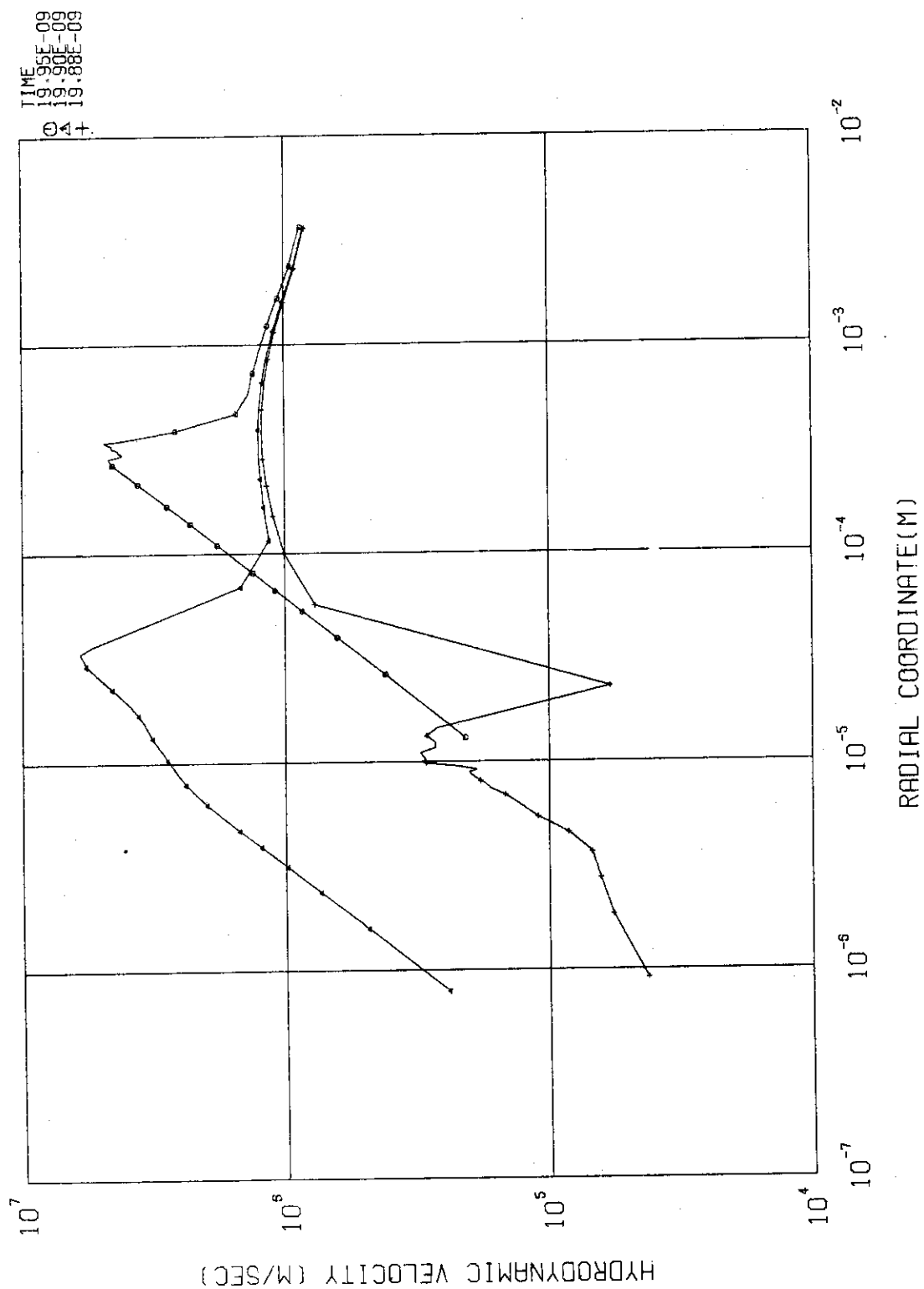


Fig. 6.3 Space variations of hydrodynamic velocity at times of burning

DATE 76-04-16  
PAGE 7

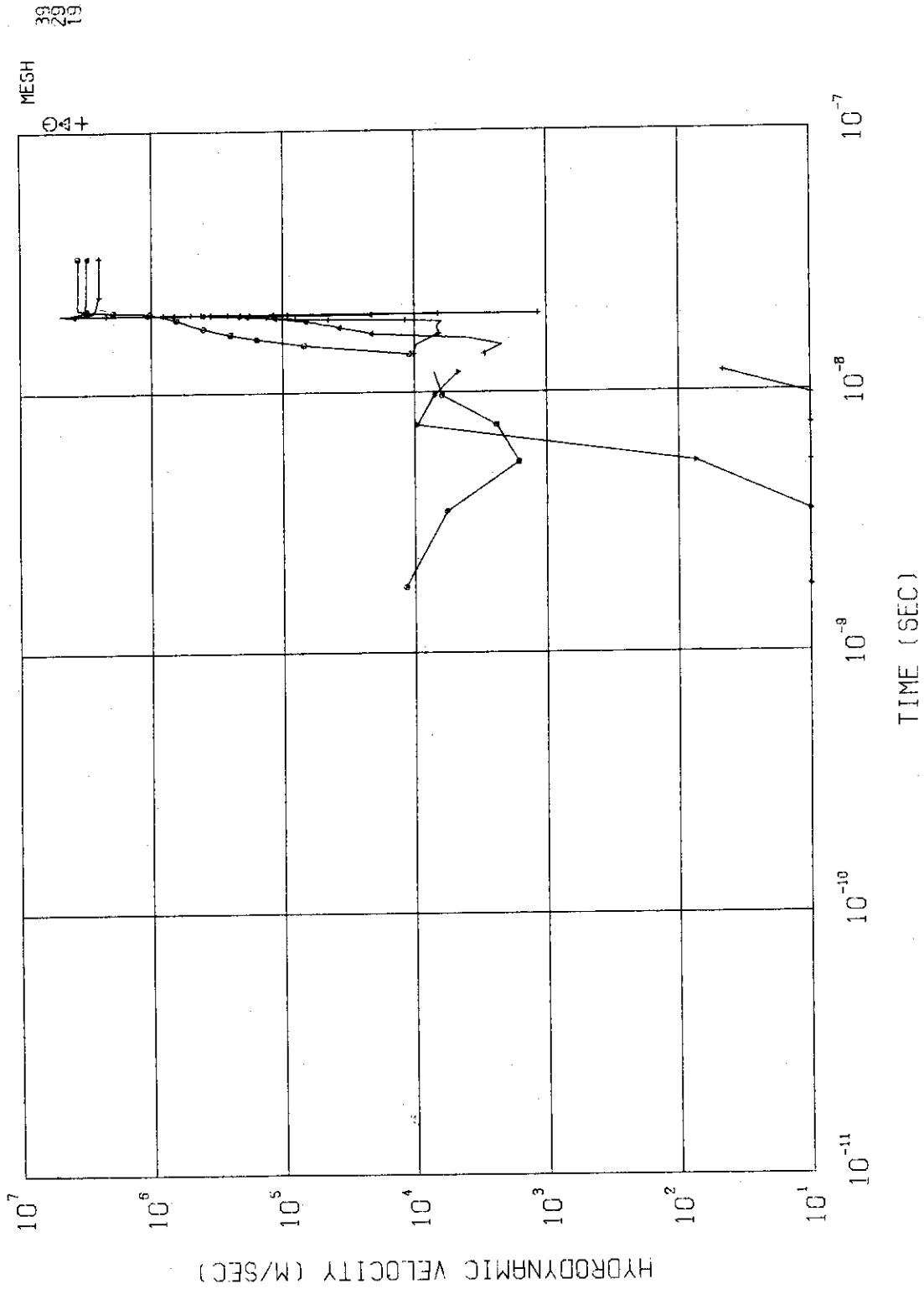


Fig. 7 Time variations of hydrodynamic velocity at three Lagrangian mesh points

DATE 76-04-16  
PAGE 9

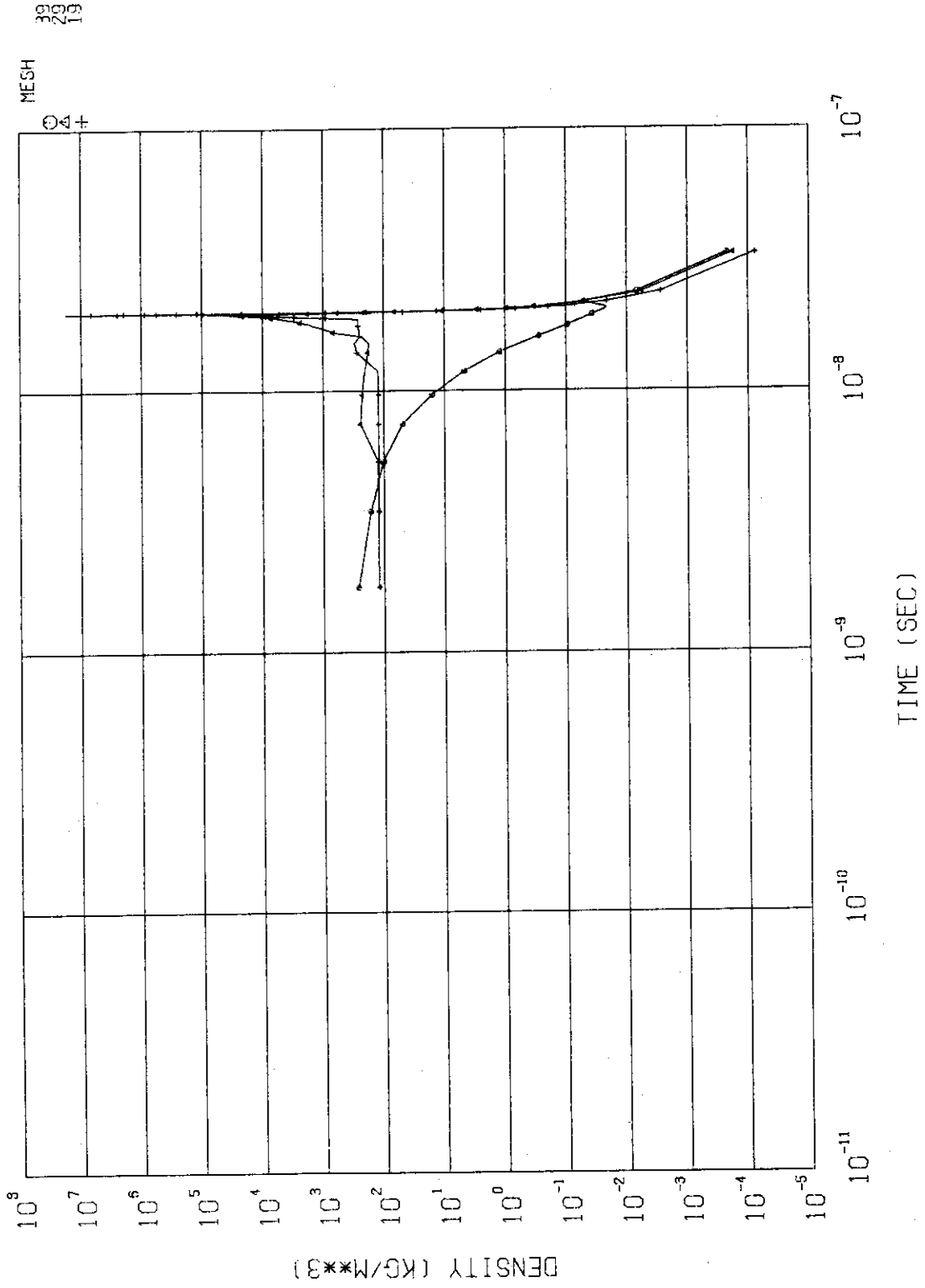


Fig. 8 Time variations of D-T fuel pellet density at three Lagrangian mesh points

DATE 75-04-16  
PAGE 11

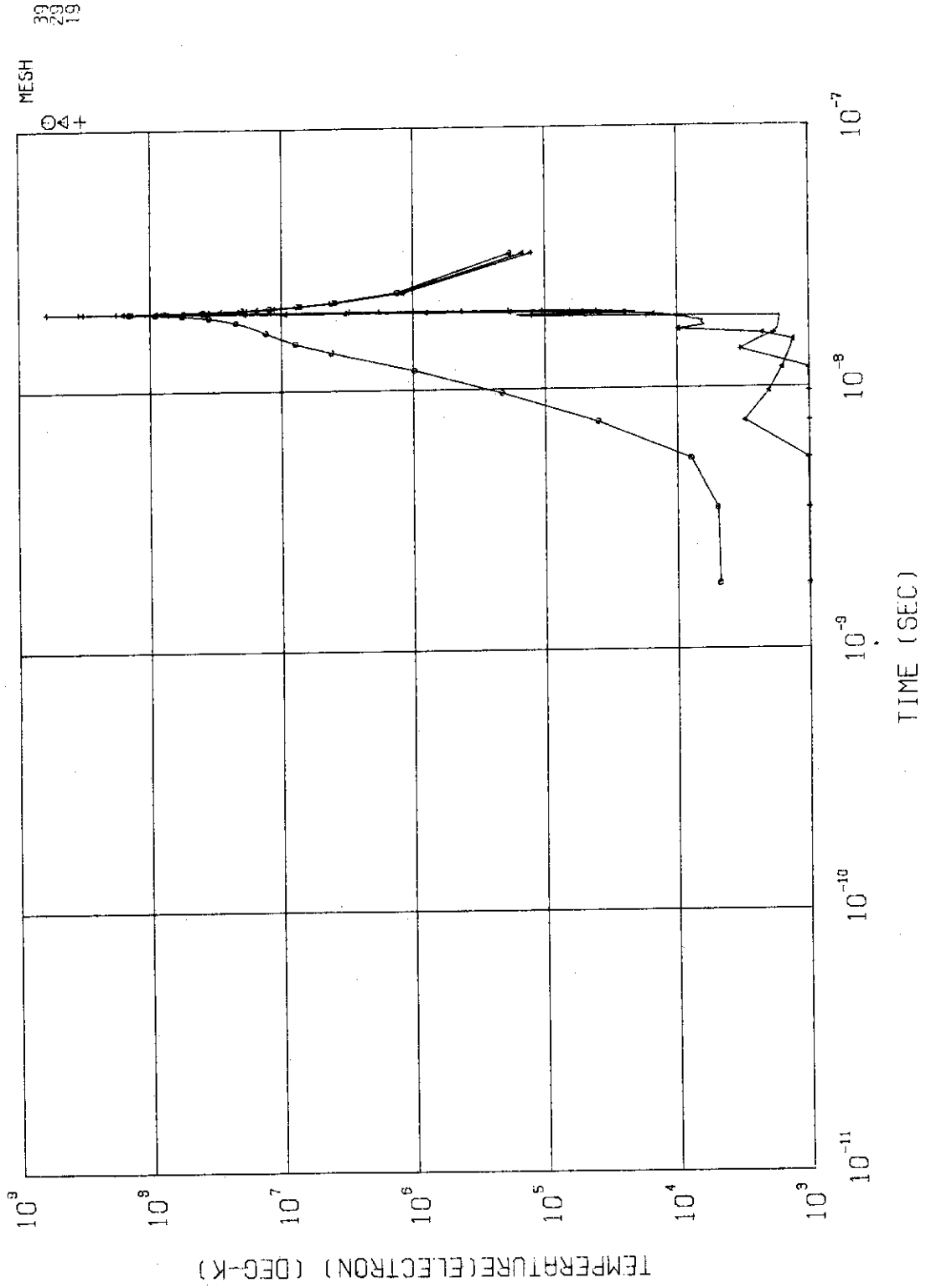


Fig. 9 Time variations of  $T_e$  at three Lagrangian mesh points

DATE 76-04-16  
PAGE 10

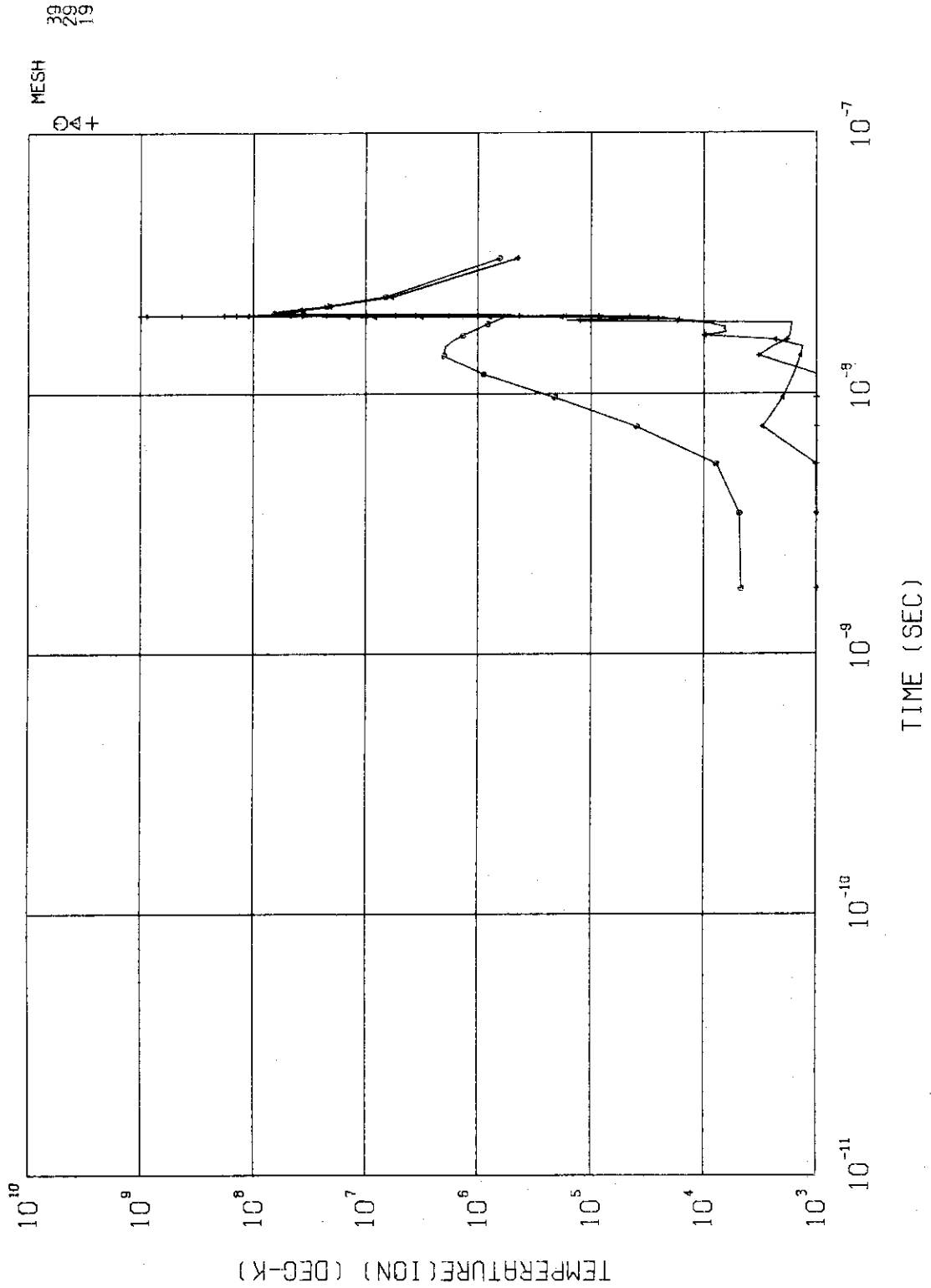


Fig. 10 Time variations of  $T_i$  at three Lagrangian mesh points

DATE: 75-04-16  
PAGE 9

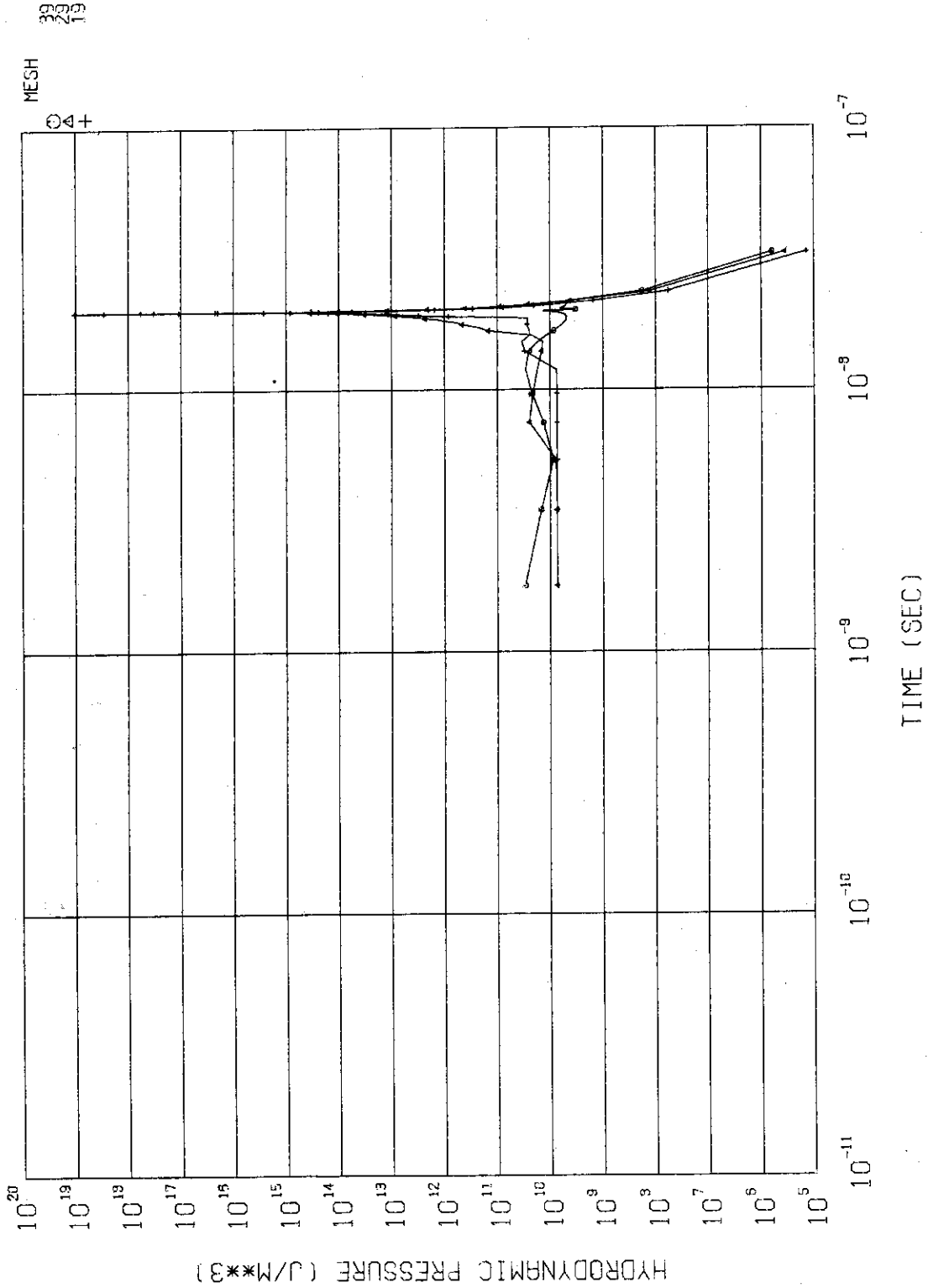


Fig. 11 Time variations of pressure at three Lagrangian mesh points

DATE 76-04-16  
PAGE 6

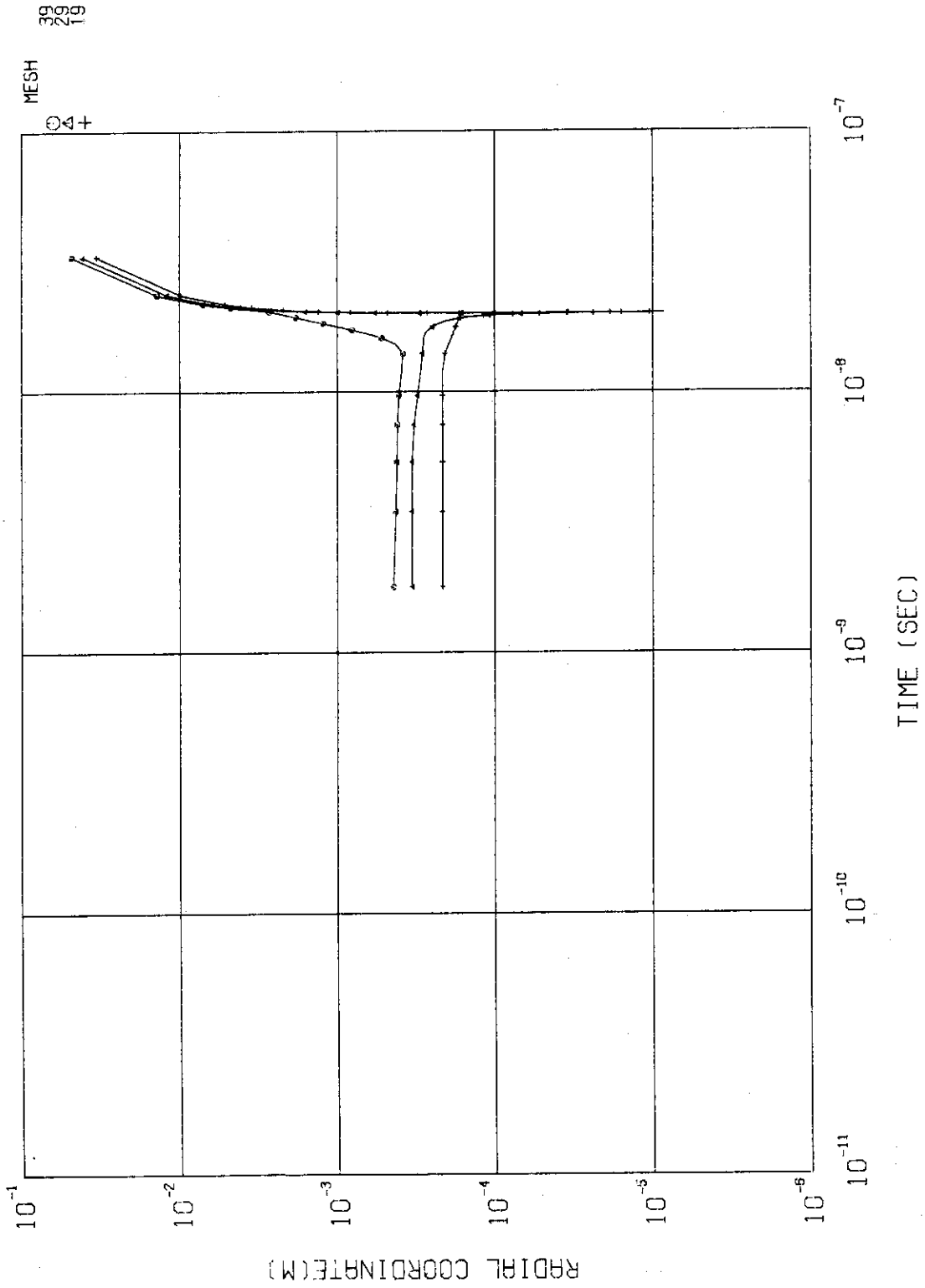


Fig. 12 Time variations of radial coordinate at three Lagrangian mesh points

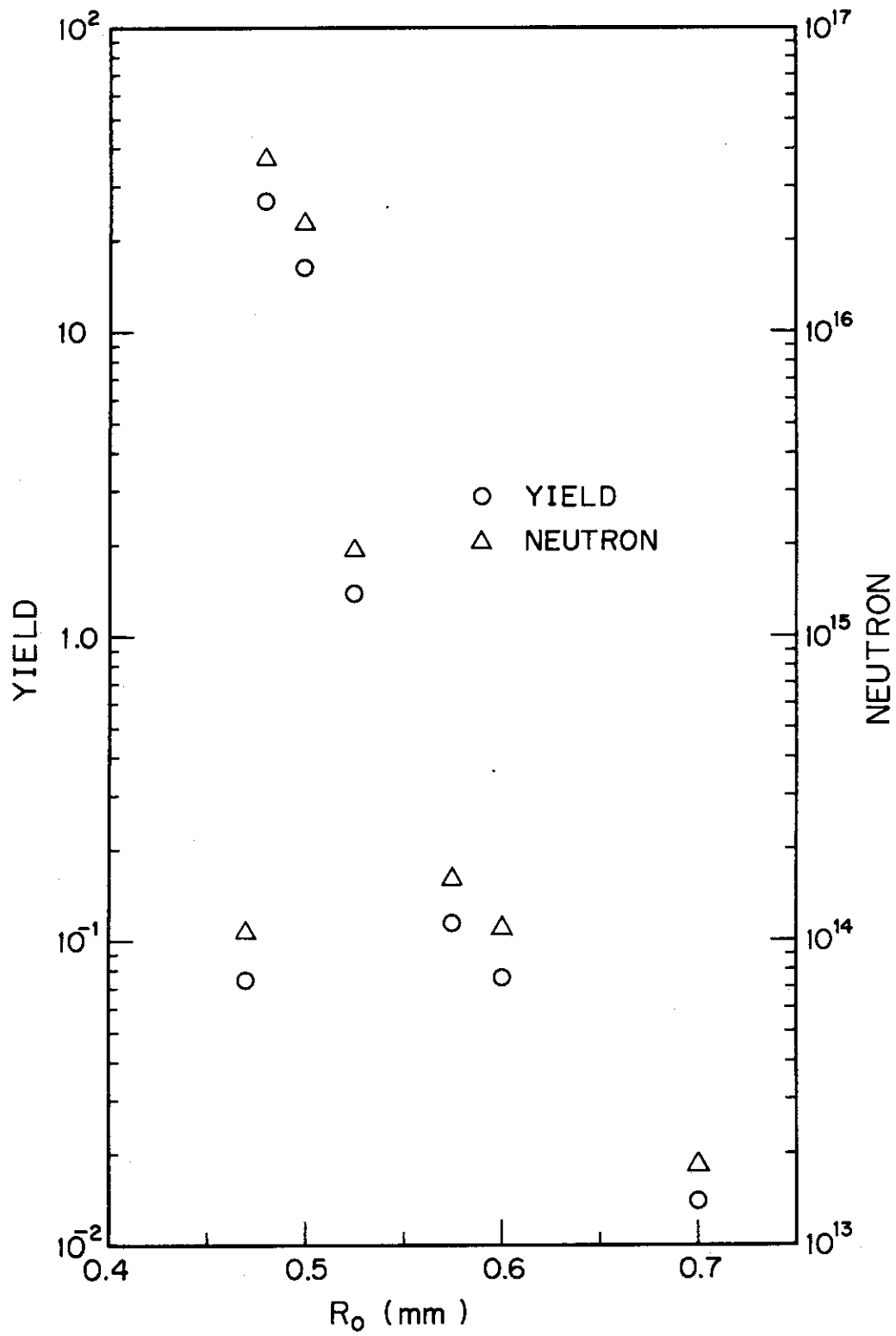


Fig. 13 Radius dependence of energy gain



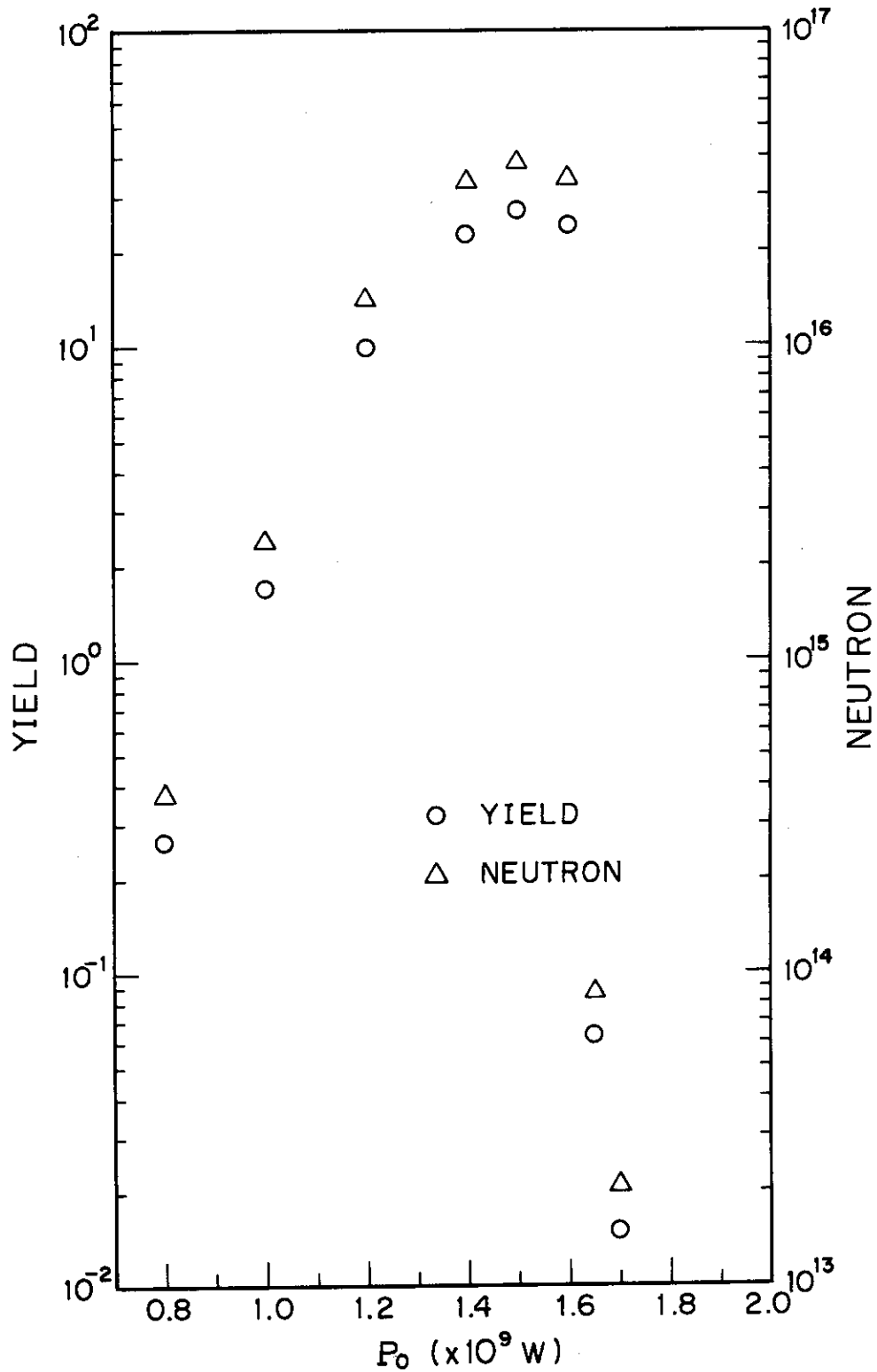


Fig. 14 Initial laser power dependence of energy gain

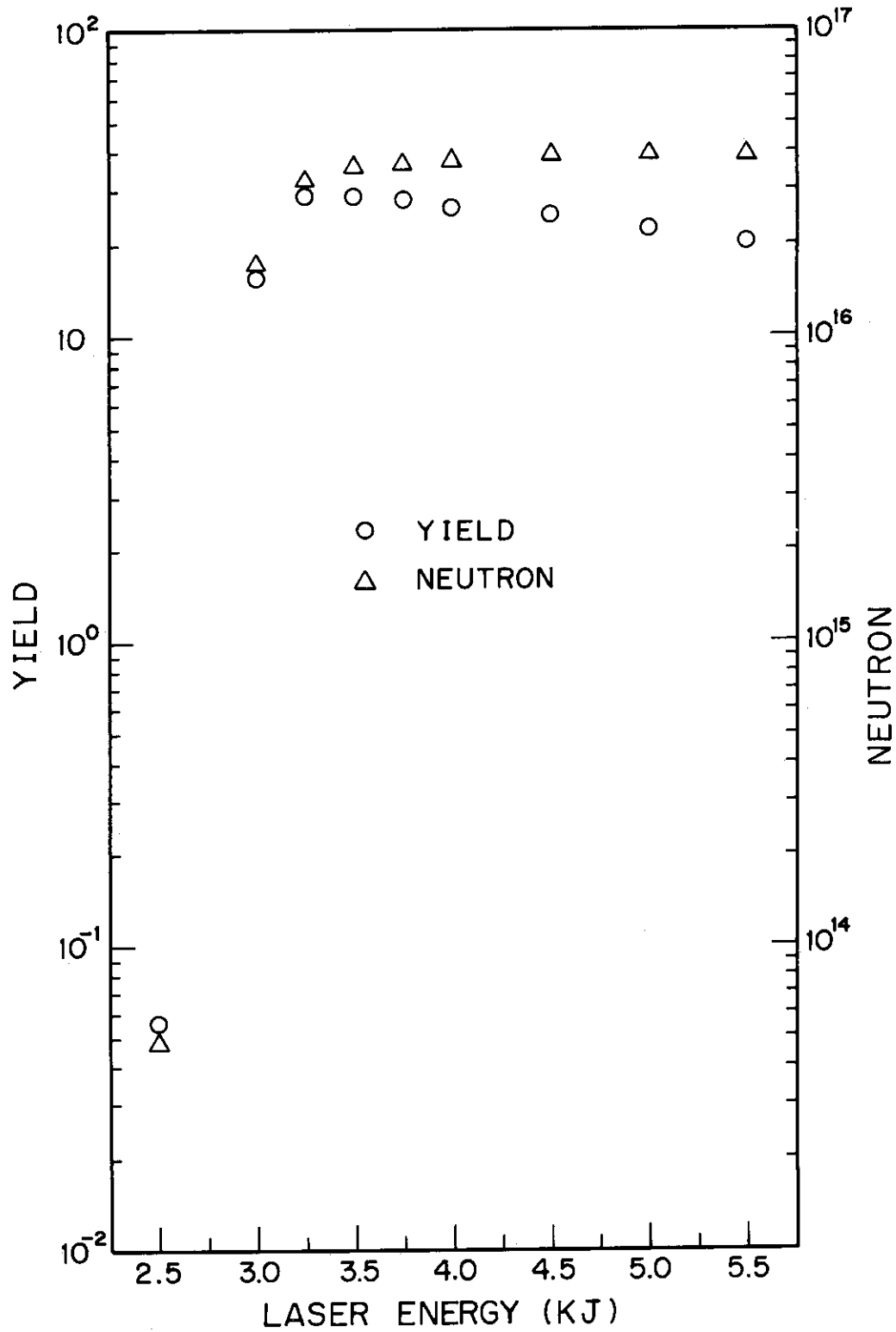


Fig. 15 Total input laser power dependence of energy gain

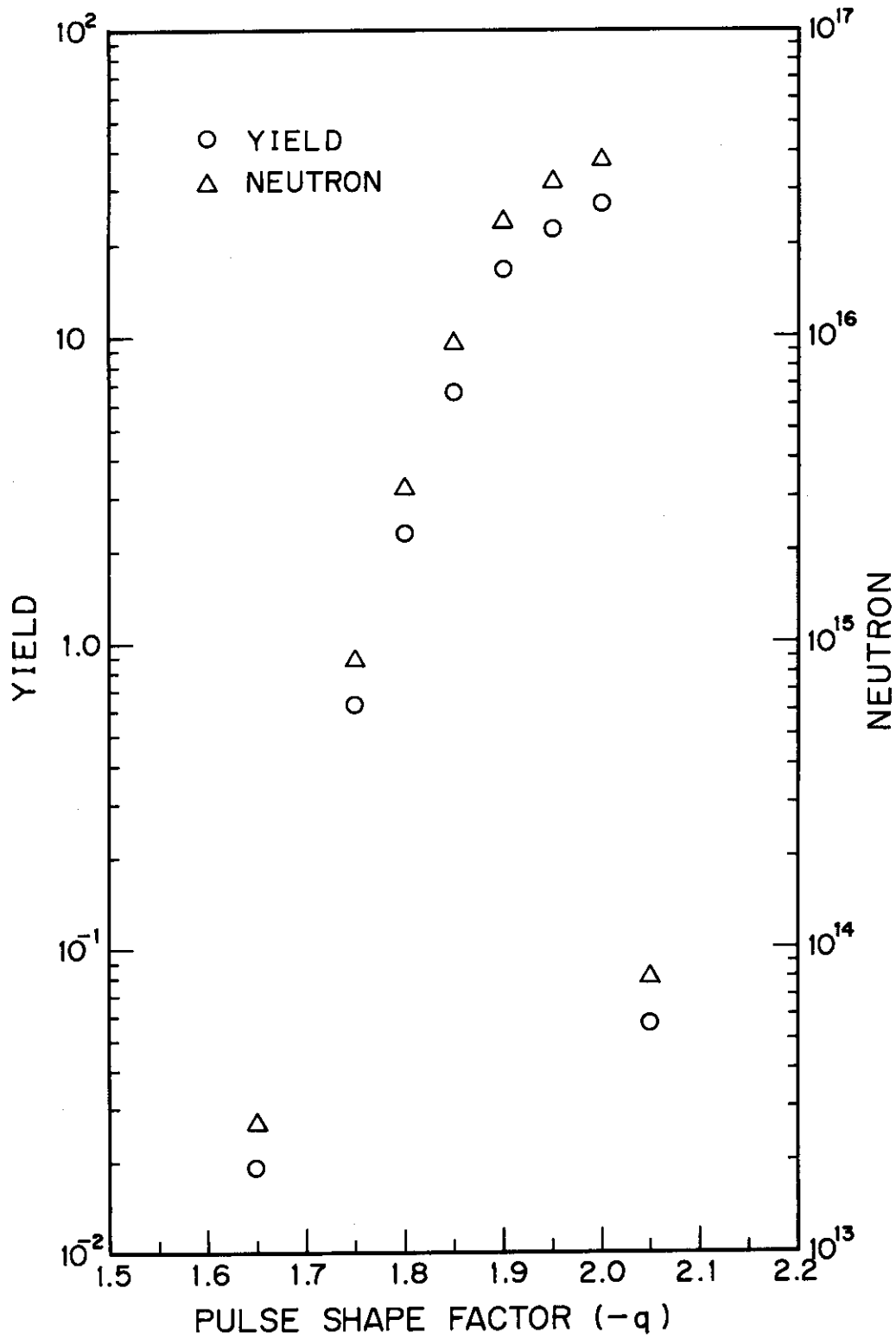


Fig. 16 Pulse shape factor dependence of energy gain

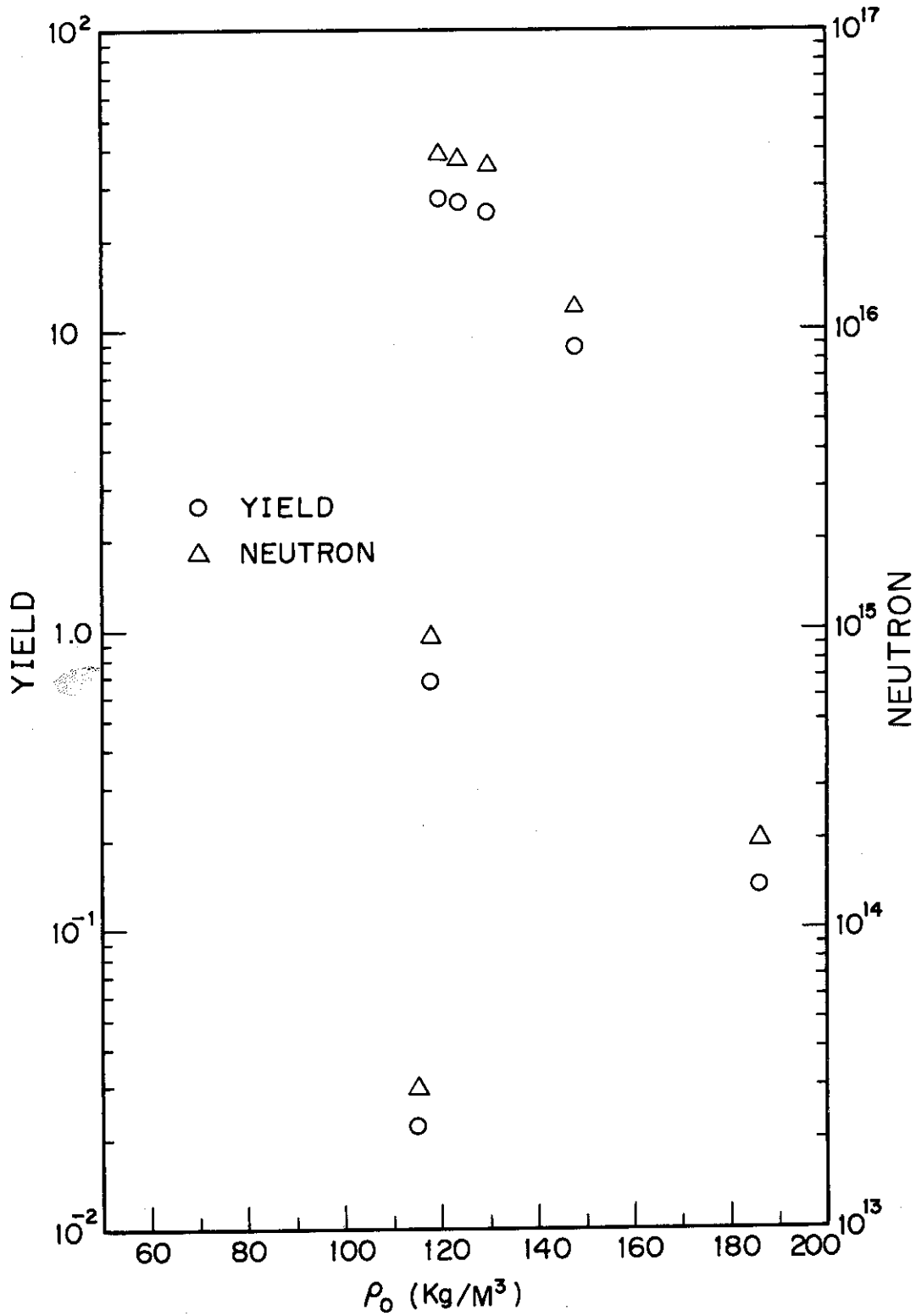


Fig. 17 Initial density dependence of energy gain

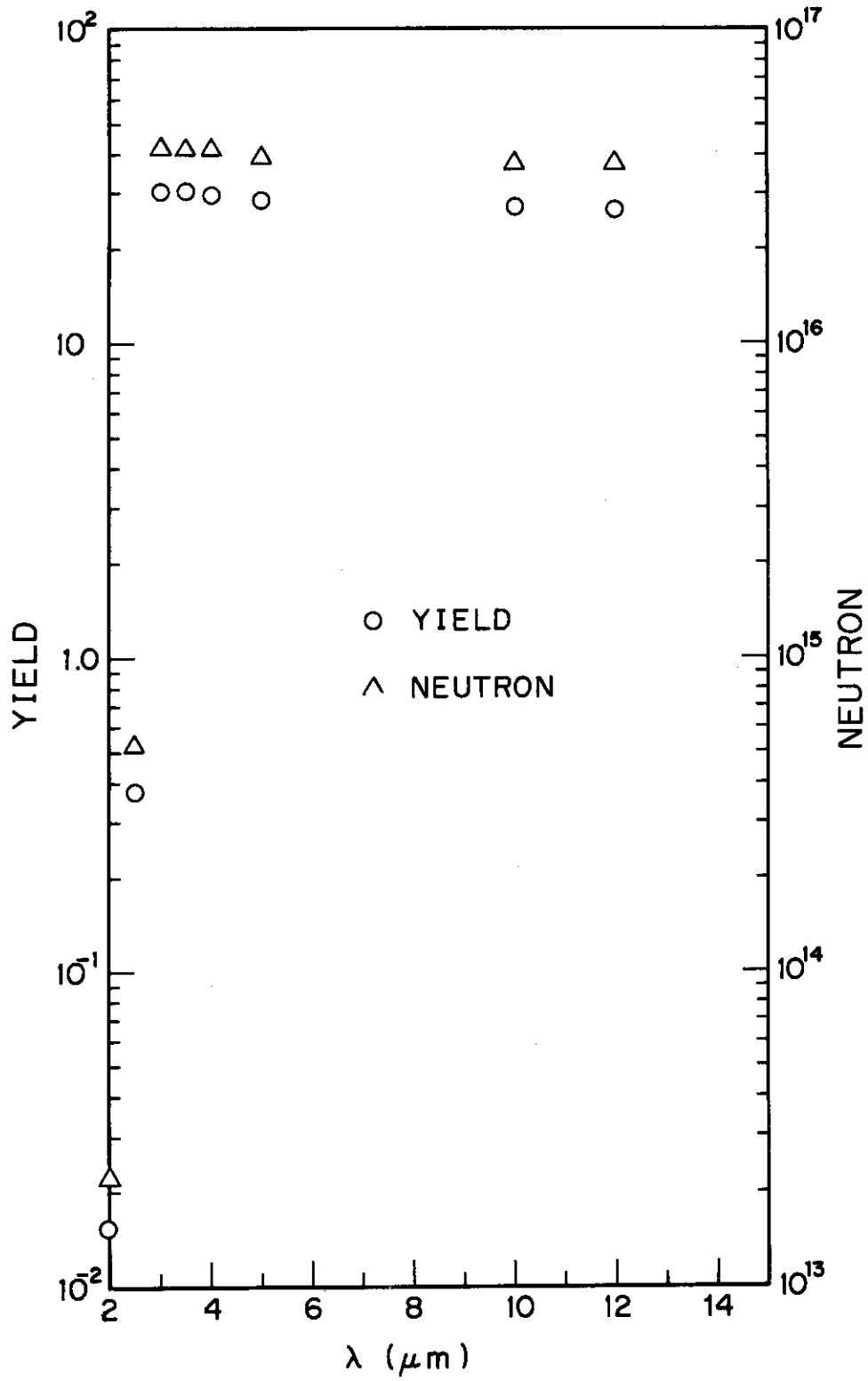


Fig. 18 Wavelength dependence of energy gain

## 5. お わ り に

燃料小球を効率よく爆縮・燃焼させて最大のエネルギー利得を得ることのできる最適な初期条件を見い出すには、非常に多くのテスト・ランを行わなければならない。最適な初期条件を見い出すもっと効率良い方法が研究されるべきである。更にエネルギー利得を引き出すためには、燃料小球モデルにおいて中空シェルや圧力シェルを含んだ解析計算ができるようにコードの改良が必要である。又燃焼においては核反応によって放出された $\alpha$ -粒子のプラズマへの deposit の評価が重要であり、正確に $\alpha$ -粒子の飛行程を考慮した取り扱いが望まれる。それにつれて中性子の deposit energy も考慮する必要があるだろう。更に空間的には2次元コードの開発が望まれる。

## 謝 辞

OLYMPUS システムの使用方法、及びこのシステムを使つてのMEDUSAコードの作成について種々御指導して下さった計算センターの浅井 清氏に深く感謝致します。核融合研究室の岡本正雄氏には心よくMEDUSAコードの資料及びカード一万枚を提供していただき、計算センターの斎藤直之氏にはOLYMPUS-MEDUSA プログラムのオリジナルテープの内容出力について御協力をいただいた。又本研究を行うにあたって種々の御配慮と御指導をいただいた石黒幸雄氏に感謝致します。

## 参考文献

- (1) BRUECKNER, K.A., JORNA.S.: Rev.Mod.Phys., 46, No.2, 325(1974).
- (2) HEITLER, W.: "The Quantum Theory of Radiation", Oxford U.P., Oxford, 3rd Ed.(1954).
- (3) ROBERTS, K.V.: Comp. Phys. Comm., 7, 237 (1974).
- (4) EMMETT, J.L, et al., : Scientific American , 8, 34 (1974).
- (5) MASON, R.J, MORSE, R.L.: Phys. Fluids, 18, 7, 814 (1975).
- (6) SPITZER, L, : "Physics of fully ionized gases", 2nd Ed., Interscience, New York (1961).
- (7) ROSE, D.J., CLARKE, M.: "Plasma and Controlled Fusion", John Wiley and Sons Inc., New York-London (1961).
- (8) KIDDER, R.E.: "Interaction of intense photon and electron beams with plasmas", Proc.Int. School Phys., Academic Press (1971).
- (9) KIDDER, R.E., BARNES, W.S.: "WAZER, a one-dimensional two temperature hydrodynamic code", UCRL-50583 (1969).
- (10) CHRISTIANSEN, J.P, et al.: "MEDUSA, A one-dimensional numerical model for laser fusion calculation", CLM-RBO (1973).
- (11) RICHTMEYER, R.D., MORTON, K.W.: "Difference methods for initial-value problems", 2nd Ed.Interscience Publishers (1967).

## 5. お わ り に

燃料小球を効率よく爆縮・燃焼させて最大のエネルギー利得を得ることのできる最適な初期条件を見い出すには、非常に多くのテスト・ランを行わなければならない。最適な初期条件を見い出すもつと効率良い方法が研究されるべきである。更にエネルギー利得を引き出すためには、燃料小球モデルにおいて中空シェルや圧力シェルを含んだ解析計算ができるようにコードの改良が必要である。又燃焼においては核反応によって放出された $\alpha$ -粒子のプラズマへの deposit の評価が重要であり、正確に $\alpha$ -粒子の飛行程を考慮した取り扱いが望まれる。それにつれて中性子の deposit energy も考慮する必要があるだろう。更に空間的には2次元コードの開発が望まれる。

## 謝 辞

OLYMPUS システムの使用法、及びこのシステムを使ってのMEDUSAコードの作成について種々御指導して下さった計算センターの浅井 清氏に深く感謝致します。核融合研究室の岡本正雄氏には心よくMEDUSAコードの資料及びカード一万枚を提供していただき、計算センターの斎藤直之氏にはOLYMPUS-MEDUSA プログラムのオリジナルテープの内容出力について御協力をいただいた。又本研究を行うにあたって種々の御配慮と御指導をいただいた石黒幸雄氏に感謝致します。

## 参考文献

- (1) BRUECKNER, K.A., JORNA. S.: Rev.Mod.Phys., 46, No.2, 325(1974).
- (2) HEITLER, W.: "The Quantum Theory of Radiation", Oxford U.P., Oxford, 3rd Ed.(1954).
- (3) ROBERTS, K.V.: Comp. Phys. Comm., 7, 237 (1974).
- (4) EMMETT, J.L, et al., : Scientific American , 8, 34 (1974).
- (5) MASON, R.J, MORSE, R.L.: Phys. Fluids, 18, 7, 814 (1975).
- (6) SPITZER, L. : "Physics of fully ionized gases", 2nd Ed., Interscience, New York (1961).
- (7) ROSE, D.J., CLARKE, M.: "Plasma and Controlled Fusion", John Wiley and Sons Inc., New York-London (1961).
- (8) KIDDER, R.E.: "Interaction of intense photon and electron beams with plasmas", Proc.Int. School Phys., Academic Press (1971).
- (9) KIDDER, R.E., BARNES, W.S.: "WAZER, a one-dimensional two temperature hydrodynamic code", UCRL-50583 (1969).
- (10) CHRISTIANSEN, J.P, et al.: "MEDUSA, A one-dimensional numerical model for laser fusion calculation", CLM-RBO (1973).
- (11) RICHTMEYER, R.D., MORTON, K.W.: "Difference methods for initial-value problems", 2nd Ed.Interscience Publishers (1967).

## 5. お わ り に

燃料小球を効率よく爆縮・燃焼させて最大のエネルギー利得を得ることのできる最適な初期条件を見い出すには、非常に多くのテスト・ランを行わなければいけない。最適な初期条件を見い出すもっと効率良い方法が研究されるべきである。更にエネルギー利得を引き出すためには、燃料小球モデルにおいて中空シェルや圧力シェルを含んだ解析計算ができるようにコードの改良が必要である。又燃焼においては核反応によって放出された $\alpha$ -粒子のプラズマへの deposit の評価が重要であり、正確に $\alpha$ -粒子の飛行程を考慮した取り扱いが望まれる。それにつれて中性子の deposit energy も考慮する必要があるだろう。更に空間的には2次元コードの開発が望まれる。

## 謝 辞

OLYMPUS システムの使用方法、及びこのシステムを使つてのMEDUSAコードの作成について種々御指導して下さった計算センターの浅井 清氏に深く感謝致します。核融合研究室の岡本正雄氏には心よくMEDUSAコードの資料及びカード一万枚を提供していただき、計算センターの斎藤直之氏にはOLYMPUS-MEDUSA プログラムのオリジナルテープの内容出力について御協力をいただいた。又本研究を行うにあたって種々の御配慮と御指導をいただいた石黒幸雄氏に感謝致します。

## 参考文献

- (1) BRUECKNER, K.A., JORNA. S.: Rev.Mod.Phys., 46, No.2 325(1974).
- (2) HEITLER, W.: "The Quantum Theory of Radiation", Oxford U.P., Oxford, 3rd Ed.(1954).
- (3) ROBERTS, K.V.: Comp. Phys. Comm., 7, 237 (1974).
- (4) EMMETT, J.L, et al., : Scientific American ,8, 34 (1974).
- (5) MASON, R.J, MORSE, R.L.: Phys. Fluids, 18, 7, 814 (1975).
- (6) SPITZER, L. : "Physics of fully ionized gases", 2nd Ed., Interscience, New York (1961).
- (7) ROSE, D.J., CLARKE, M.: "Plasma and Controlled Fusion", John Wiley and Sons Inc., New York-London (1961).
- (8) KIDDER, R.E.: "Interaction of intense photon and electron beams with plasmas", Proc.Int. School Phys., Academic Press (1971).
- (9) KIDDER, R.E., BARNES, W.S.: "WAZER, a one-dimensional two temperature hydrodynamic code", UCRL-50583 (1969).
- (10) CHRISTIANSEN, J.P, et al.: "MEDUSA, A one-dimensional numerical model for laser fusion calculation", CLM-RBO (1973).
- (11) RICHTMEYER, R.D., MORTON, K.W.: "Difference methods for initial-value problems", 2nd Ed.Interscience Publishers (1967).