

神光 II 装置间接驱动 DD 燃料面密度诊断*

曹柱荣† 江少恩 陈家斌 缪文勇 周维民 陈 铭 谷渝秋 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

(2006 年 10 月 24 日收到, 2006 年 11 月 30 日收到修改稿)

面密度是表征惯性约束聚变内爆压缩状态的重要参数. 基于 MULTI 程序模拟了神光 II 间接驱动内爆条件下最大压缩时刻燃料等离子体的物理参数, 计算了 CR-39 的次级质子摄谱范围. 利用 CR-39 背面测量了间接驱动充气燃料聚变次级质子, 给出了燃料平均压缩面密度 ρ_R , 并与理论计算结果做了比较. 结果表明, 在神光 II 条件下, 可以通过 D^3He 次级质子诊断燃料 ρ_R 值.

关键词: 燃料面密度, CR-39, 次级质子

PACC: 5270, 5255P, 2940W

1. 引 言

高增益惯性约束聚变(ICF)内爆是通过球形内爆靶丸的均匀压缩使得燃料在高温高密度状态下保持热核燃烧. 燃料在压缩冲击过程中会形成两个不同的区域: 一个是中心小质量低密度高温度的区域即中心热斑, 另一个是热斑周围大质量高密度低温燃料区. 一旦中心热斑区域产生的初级带电粒子产物被完全阻止在燃料中, 热核燃烧就会在整个燃料区传播, 最后形成能量增益. 面密度(ρ_R)是表征 ICF 靶丸质量和厚度的特征量, 是 ICF 内爆压缩可以与理论模拟相比较的重要参数. 尤其这一参量影响着点火靶的几个关键方面, 如靶自持燃烧程度、燃烧份额和增益^[1]. 点火可以通过直接驱动和间接驱动两种内爆方式实现, 直接驱动是激光束直接辐照内爆靶丸形成压缩, 间接驱动是激光辐照柱腔内壁的高 Z 材料将激光能量转换为软 X 射线后腔内 X 射线驱动靶丸压缩.

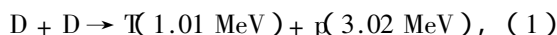
ρ_R 可以通过次级中子、次级质子、knock-on 及 $K\alpha$ 活化等多种方式获得. 近年来国际上 ICF 带电粒子诊断工作已经取得了很好的进展, 尤其在 OMEGA 装置上, 进行了大量的燃料面密度诊断工作, 但主要限于直接驱动内爆实验^[2-5]. 在相同激光功率密度条件下, 间接驱动与直接驱动相比聚变产额小两个

量级以上, 带电粒子探测器必须满足很多要求, 例如高的探测效率, 大的动态范围, 好的能量分辨, 对本底辐射(n, X 射线, γ 射线)和电磁干扰不灵敏等要求, 所以间接驱动带电粒子的诊断比较困难^[3, 4].

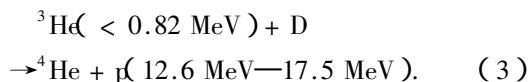
CR-39 固体径迹探测器对 ICF 实验的本底辐射不灵敏, 是很好的带电粒子探测器. 在神光 II (SG II) 间接驱动条件下, 充 D 燃料的次级质子产额只能达到 10^4 量级, 利用固体径迹探测器 CR-39 测量时, 需要考虑初级中子反冲核的干扰. 本工作选择 CR-39 对反冲核有稳定效率的背面作为测量 D^3He 次级质子的探测面, 测量了次级质子产额, 给出了燃料压缩的 ρ_R 值, 并与理论计算的结果做了比较.

2. 实验方法

在充 D_2 燃料内爆实验中, 靶丸被激光直接或间接压缩, 在加热到高温高密度状态时发生热核聚变, 初级聚变反应形式为



由于初级反应产物具有一定动能, 与高温高密燃料等离子体继续发生核反应, 形成次级反应产物. 其中初级产物 3He 与 D 等离子体的次级反应式为



* 中国工程物理研究院科学基金(批准号 20050213)资助的课题.

† E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn

次级质子初始谱为一矩形谱,需要经过适当的能量衰减才能被 CR-39 测到^[6,7].定义 CR-39 探测器对次级质子初始谱的摄谱范围为可探测到次级质子份额占总入射质子份额的百分比,用 ϵ 表示,单位面积上的粒子径迹数为 A ,单位面积上的中子本底 A_n ,CR-39 固本底 A_0 ,单位面积所占立体角份额为 Ω ,则次级质子产额 Y_{2p} 可表示为

$$Y_{2p} = \frac{A - A_n - A_0}{\epsilon \cdot \Omega}. \quad (4)$$

初级中子产额 Y_{1n} 由塑料闪烁体探测器给出,由产额比值可以直接导出燃料平均面密度 $\rho_{R \text{ fuel}}$ ^[8]为

$$\rho_{R \text{ fuel}} = A \cdot B \cdot (Y_{2p}/Y_{1n}) \quad (5)$$

对于 D_2 燃料,式中 $B = 5.2 \text{ g/cm}^2 (\pm 10\%)$;对于热斑模型和均匀模型,式中 A 分别为 1.0 和 1.33.在本文研究的燃料压缩面密度范围内,采用“Hot-spot”模型比较合适^[9].

3. CR-39 摄谱范围计算

Seguin 等人利用加速器 (2 MeV Van de Graaff) 产生的 13.8 MeV 以下单能质子进行了标定^[8],实验发现在常规的蚀刻条件和光学显微镜读数方法下,CR-39 对质子的最大灵敏能区在 0.3 MeV—9.3 MeV.由于次级质子的初始谱能量范围宽,CR-39 灵敏区不能完全接收,所以计算 CR-39 的摄谱范围.

在本工作中,次级质子穿行路径如图 1 所示.燃料区和壳层物质处于高温等离子体状态,在计算次级质子的阻止本领时,需首先计算等离子体温度.基于本实验的气压参数、靶球直径和 CH 壳层厚度,以 SGII 装置驱动条件为作用源,利用 MUTI 程序模拟了一维条件下的气体压缩过程.由于内爆核反应过程发生在靶丸最大压缩时刻,MUTI 程序模拟了最大压缩时刻的离子温度 T_i 、电子温度 T_e 和等离子体密度 ρ .以热斑中心为 X 坐标零点, r 为某一压缩区域到靶球中心的距离,最大压缩时刻 T_i 、 T_e 和 ρ 在一维空间的关系如图 2 所示.由于目前程序在计算纯 D 气体时存在困难,引入状态方程时用 DT 做了近似处理,这一近似不影响电子温度和密度的计算结果.在 OMEGA 装置上已经进行了比较实验,相同靶条件和激光驱动条件下,充 1 MPa 的 DT 和充 1 MPa 的 DD 内爆靶丸压缩过程和压缩状态非常相近,多发实验结果表明,DT 气体在热斑区域的离子温度相对较大,主要是由于 DT 反应截面相对较大,

两者燃料压缩面密度和燃料区电子温度基本相同^[8,9].

带电粒子在等离子体中的能损主要依赖于带电粒子速度 v_p 与等离子体电子热运动速度 v_{th} 之间的相对关系.在这里,等离子体被分为冷 ($v_p < v_{th}$)、温 ($v_p \sim v_{th}$) 和热 ($v_p > v_{th}$) 三种.在 Li 等人的理论^[10]描述和相关实验^[9]中,当 $v_p \approx v_{th}$ 时带电粒子阻止本领达到最大值.在完全离化的等离子体中带电粒子单位距离的能损 (dE/dx) 总体形式如下:

$$-\frac{1}{z^2} \frac{dE}{dx} = \left(\frac{w_p e}{v_p} \right) G \left(\frac{v_p^2}{v_{th}^2} \right) \ln \Lambda, \quad (6)$$

其中 $w_p = (4\pi e^2 / m_e)^{1/2}$ 为电子等离子体频率, Z 为入射粒子电荷数, $v_{th} = (2T/m_e)^{1/2}$ 为等离子体电子热运动速度, $\ln \Lambda$ 为库仑对数, $G \left(\frac{v_p^2}{v_{th}^2} \right)$ 为 Chandrasekhar 方程.由上式可以计算等离子体电子和离子对入射带电粒子的阻止本领.如图 3 给出了 10^{24} ion/cm^2 DD 和 10^{24} ion/cm^2 CH 等离子体物质中不同能量质子的能损计算结果.

质子在金柱腔、滤片和 CR-39 中的能量损失则是利用 TRIM^[11]的计算结果,图 4 给出了质子在三种物质中的阻止本领.由此从次级质子的初始谱出发,就可以得到实验测试条件下 CR-39 的摄谱范围.由以上计算可得,在 SG II 驱动条件下,本实验布置中 CR-39 背面记录时 ϵ 为 $61\% \pm 6\%$,误差主要来自高温等离子体温度的影响.

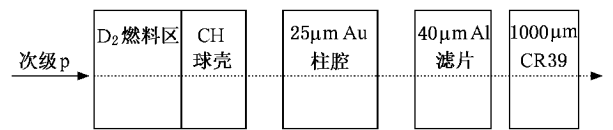


图 1 次级质子到达探测器前穿透的几种物质

4. 实验布置

实验在 SG II 上进行,靶室南北各有四路激光入射,打靶条件为 $8 \times 260 \text{ J/1ns}/3\omega_0$,间接驱动内爆靶条件为 D_2 气压 1 MPa,靶丸内径 $\phi 300 \mu\text{m}$,CH 壳层 $14 \mu\text{m}$,金柱腔壁厚 $25 \mu\text{m}$.初级中子产额由布置在靶室外围的塑料闪烁体探测器^[12]给出,测量次级质子的探测器主要布置在靶正下方.

由于次级质子产额低,实验布置探测距离 R 应

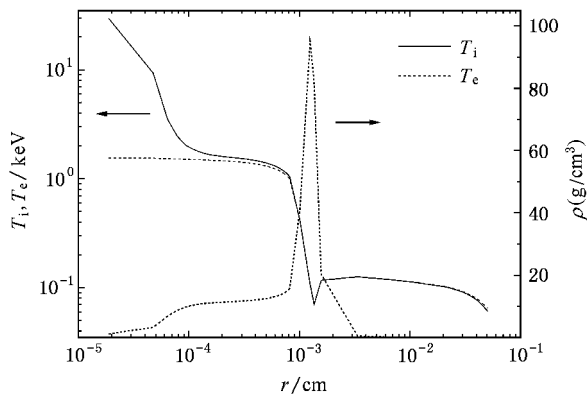


图 2 MULTI 程序计算结果

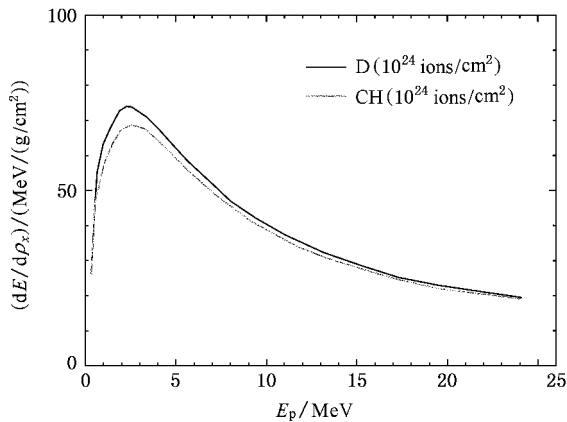


图 3 质子在燃料和壳层中的能量损失

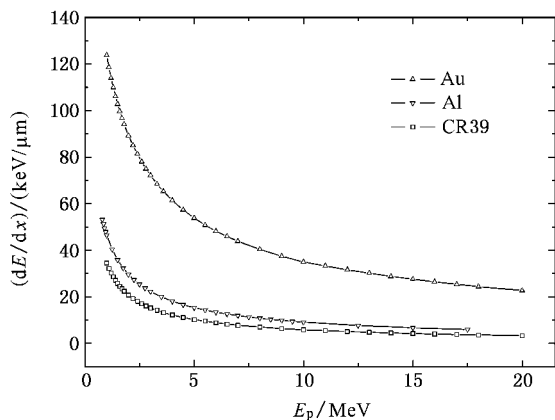


图 4 质子在金柱腔、滤片和 CR-39 中的能量损失

来.入射点的蚀刻速率称为径迹蚀刻速率(V_T),CR-39 整个表面的蚀刻速率称为体积蚀刻速率(V_B),由于 $V_T > V_B$,蚀刻后会在入射点形成小的锥形坑.当离子斜入射时,入射角为 V_T 与 V_B 之间存在夹角 θ ,这时要产生有效蚀刻需要 V_T 在 V_B 方向的投影大于 V_B ,否则 CR-39 探测效率为 0,出现探测效率为 0 时的 θ 称为临界角^[13].实验表明,质子能量越高临界角越小^[14].对本实验测量能区的质子,需要保证次级质子 θ 角度小于 15° .本实验单个 CR-39 探测面 S 采用 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 规格,最大 θ 角为 9.5° ,次级质子入射角不影响 CR-39 探测效率.

探测器布置如图 5,实验在 5 个不同方位进行探测.为保证足够的探测面积和小的 θ ,在设计时将次级质子探测面分为三个成一定角度并同时正对靶心的结构,如图中 S_1 , S_2 和 S_3 .他们与靶心距离都为 30 mm , S_2 为水平放置, S_1 和 S_3 两个面的法向与内爆靶柱腔轴向垂直.在初级中子产额低于 1×10^5 时,这三个面上接收的次级质子应远小于本底,这时可用来检测实验打靶环境下探测器的本底噪声. S_4 在 6 mm 厚铝制成的探测器支架下,可以完全屏蔽次级质子,用来测量初级中子的噪声水平. S_5 布置于靶室内壁,在布置的探测器中距离靶心最远,通过在 CR-39 挡足够厚的金属盘,可以获得没有中子影响的探测器本底.

CR-39 蚀刻选择在恒温 80°C 条件下, NaOH 溶液浓度 6.25 mol/L ,蚀刻时间 7 h , $V_B = 1.85\ \mu\text{m/h}$.径迹使用 Nikon MM-40 光学测量显微镜读取,水平 x 和 y 方向不确定度为 $0.5\ \mu\text{m}$,法向 z 方向不确定度为 $2.5\ \mu\text{m}$.

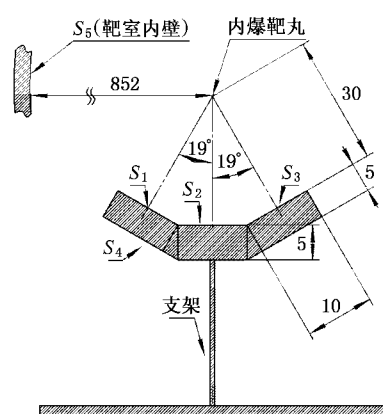


图 5 探测器布置

尽量小,探测面 S 应尽量大.在 R 较小时,使用 CR-39 诊断带电粒子需要考虑离子入射角对探测效率的影响.从 CR-39 实验原理来看,入射离子对 CR-39 表面的辐射损伤会通过入射点的蚀刻速率表现出

5. 实验结果与分析

由于粒子径迹的数密度较小,在显微镜下扫描时,为提高读取精度,采取多人多次读取的方式.粒子径迹的辨认主要依据蚀刻坑的光照对比度和几何形状,对比度过小和形状为椭圆或者不规则形状的不予考虑.图 6 给出了两发打靶数据的粒子径迹谱.这些径迹主要由三种情况组成,第一部分为摄谱范围内次级质子产生的真实径迹,第二部分为初级中子与 CR-39 作用产生的反冲质子产生的径迹.在 CR-39 背面,这种径迹的发生概率与初级中子的产额有非常稳定的线性关系^[14,15],标定的系数为 3.0×10^{-4} .第三部分为 CR-39 固有的本底,只与产品的质量相关,与聚变反应产物的作用无关.本实验中在 S_5 方位和初级中子产额低于 1×10^5 时 S_1 , S_2 和 S_3 位置进行了固有本底测试,本底水平 $(38 \pm 5) \text{ cm}^2$.

应用(4)式和(5)式可分别得到次级质子产额和燃料的平均压缩面密度.在近 30 发次实验数据中,取信号噪声比大于 10 的读取结果计算次级质子产额.结果如表 1 所示,误差主要来源于统计涨落.由表 1 可见,在 SG II 间接驱动条件下,次级质子产额低于初级聚变产额三个量级,燃料面密度在 5 mg/cm^2 左右,而且具有一定的稳定性.说明在 SG II 条件下采用次级质子诊断燃料 ρ_R 值是可行的.第

表 1 ρ_R 测量结果

发次	$E_{\text{Laser}}/\text{J}$	Y_{In}	Y_{2p}	ρ_R (mg/cm^2)
050508053	2173	$1.2 \times 10^7 (\pm 10\%)$	$9.75 \times 10^3 (\pm 14\%)$	$4.23 (\pm 23\%)$
050516074	2060	$9.1 \times 10^6 (\pm 10\%)$	$5.84 \times 10^3 (\pm 18\%)$	$3.34 (\pm 25\%)$
051020079	2173	$1.2 \times 10^7 (\pm 10\%)$	$7.70 \times 10^3 (\pm 13\%)$	$3.34 (\pm 12\%)$

在低面密度 DD 内爆实验中,初级³He 和 T 能够穿出整个热燃料区域,利用“Hot-spot”模型从次级质子和次级中子两种途径推导燃料面密度,所得结果基本一致,并且与热燃料区域面密度的真实值非常接近.在 SG II 全能量($\sim 2 \text{ kJ}$)间接驱动条件下,通过 DD 内爆次级质子的诊断可以获得燃料面密度,但是由于次级反应产额低,次级质子能谱和角分布测量比较困难,获得的燃料压缩状态信息比较有限.随着激光器的不断升级,间接驱动燃料压缩面密度和次级反应产额将有量的变化,利用次级产物诊断可以获得更多燃料压缩状态的信息.

050508053 发和第 051020079 发在激光能量与靶条件完全一致的情况下,获得了相同的初级中子产额,而次级质子产额和 ρ_R 值有一定的差异,说明在低面密度实验中次级反应发生概率有一定的角度分布.基于 MUTI 程序模拟的一维压缩过程可以给出任意时刻燃料密度分布,进而可以推出面密度分布.整个燃料燃烧过程中的平均面密度是指中子发射的时间过程中面密度的平均,在本实验的驱动条件和靶条件下,模拟结果给出的靶丸最大压缩时刻 ρ_R 值为 7.3 mg/cm^2 ,这与实验结果基本一致.目前 MUTI 程序模拟内爆动力学过程只能做到在一维数值空间内进行,无法考虑压缩过程中流体力学不稳定和混合的影响,程序功能还有待进一步优化.

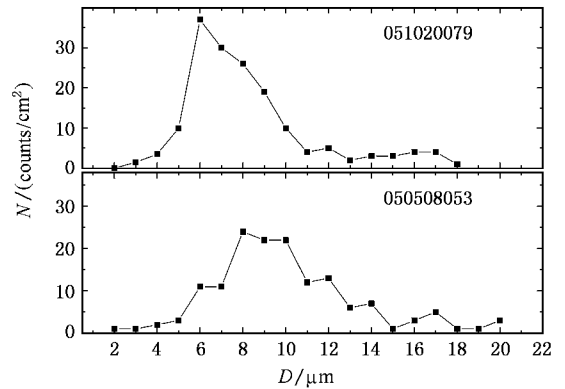


图 6 第 051020079 发和第 050508053 发径迹直径分布比较

6. 结 论

在 SG II 间接驱动条件下,利用 CR-39 背面测量了间接驱动充气燃料聚变次级质子,基于 MULTI 程序模拟了最大压缩时刻燃料等离子体的最大压缩时刻的电子温度和密度,计算了 CR-39 的次级质子摄谱范围,利用 $D^3\text{He}$ 次级质子方法给出燃料平均压缩面密度 ρ_R ,与 MULTI 程序模拟结果基本一致.结果表明,在充纯氘燃料的初级聚变达到 10^7 条件下,可以利用 CR-39 诊断次级质子的产额,通过次级质子诊断得到的燃料面密度能够准确反映内爆压缩

状态.

算得到中国工程物理研究院九所李芸生研究员的指导,在此一并致谢.

实验得到神光 II 激光器运行组人员的大力配合,理论计

- [1] Jiang S E ,Zheng Z J ,Sun K X ,Huang T X ,Yang J M ,Cui Y L , Chen J S ,Guo S ,Hu X ,Tang X Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 730 (in Chinese) 江少恩、郑志坚、孙可煦、黄天暄、杨家敏、崔延莉、陈久森、郭素、胡昕、汤晓青 2001 物理学报 **50** 730]
- [2] Yang H Q ,Yang J L ,Wen S H ,Wang G X ,Guo Y Z ,Tang Z Y , Mu W B ,Ma C 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2408 (in Chinese) 杨洪琼、杨建伦、温树槐、王根兴、郭玉芝、唐正元、牟维兵、马驰 2001 物理学报 **50** 2408]
- [3] Ye W H ,Zhang W Y ,He X T 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 762 (in Chinese) 叶文华、张维岩、贺贤士 2000 物理学报 **49** 762]
- [4] Petrasso R D , Li C K , Cable M D , Pollaine S M , Haan S W , Bernat T P , Kilkenny J D , Cremer S , Knauer J P , Verdon C P , Kremens R L 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 2718
- [5] Shi B R 2005 *Chinese Physics* . **14** 172
- [6] Petrasso R D , Frenje J A , Li C K , Seguin F H , Radha P B , Stoeckl C , Soures J A , Delettrez J A , Glebov V Yu , Meyerhofer D D , Sangster T C 2003 *Rev. Phys. Lett.* **90** 95002
- [7] Kurebayashi S , Frenje J A , Seguin F H , Rygg J R , Li C K , Petrasso R D , Glebov V Yu , Delettrez J , Sangster T C , Meyerhofer D D , Stoeckl C , Soures J M , Amendt P A , Hatchett S P , Turner R E 2004 *Phys. Plasmas* **12** 32703
- [8] Seguin F H , Frenje J A , Li C K , Hicks D G , Kurebayashi S , Rygg J R , Schwartz B E , Petrasso R D , Roberts S , Soures J M , Meyerhofer D D , Sangster T C , Knauer J P , Source C , Glebov V Yu , Stoeckl C , Phillips T W , Leeper R J , Fletcher K , Padalino S 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 975
- [9] Hicks D G 1999 *Ph. D. Thesis* (Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology) p103
- [10] Li C K , Petrasso R D 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3059
- [11] Ziegler J F , Biersack J P , Littmark U 1985 *The Stopping and Range of Ions in Solids* (New York : Pergamon) Vol 1
- [12] Chen J B , Zheng Z J , Peng H S , Zhang B H , Ding Y K , Chen M , Chen H S , Wen T S 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 3534
- [13] Dorschel B , Bretschneider R , Hermsdorf D , Kadner K , Kuhne H 1999 *Radiat. Meas.* **31** 103
- [14] Collopy M T , Carpenter P , Harmon C D , Vandenberg J , Cooper G W 1992 *Rev. Sci. Instrum.* **63** 4892
- [15] Frenje J A , Li C K , Seguin F H , Petrasso R D , Meyerhofer D D , Soures J A , Radha P B , Glebov V Yu , Skupsky S , Roberts S , Stoeckl C , Sangster T C 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 2597

Diagnosics on DD fuel area density for indirect drive on Shengguang II *

Cao Zhu-Rong[†] Jiang Shao-En Chen Jia-Bin Miao Wen-Yong Zhou Wei-Min Chen Ming Gu Yu-Qiu Ding Yong-Kun
(National Key Laboratory of Laser Fusion , Research Center of Laser Fusion , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

(Received 24 October 2006 ; revised manuscript received 30 November 2006)

Abstract

Area density is a an important parameter for measuring compression in inertial confinement fusion experiment. Using the MULTI code , physical parameters of fuel plasma are simulated at time of maximum suppression in indirectly driven implosion experiment at Shengguang II . Secondary proton energy range in CR-39 is calculated. The average area density ρ_R of fusion fuel is obtained by measuring secondary protons from D₂-filled fuel in the back of CR-39 for the first time. The result shows that CR-39 can be used to measure secondary proton yields of Shengguang II . Secondary fusion reaction is affected largely by the suppression state in indirect drive.

Keywords : fuel area density , CR-39 , secondary proton

PACC : 5270 , 5255P , 2940W

* Project supported by the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics , China (Grant No. 20050213).

[†] E-mail : cao33jin@yahoo.com.cn