

聚变堆用的核反应截面测量的新进展

姚立山

(陕西师范大学物理系 西安 710062)

摘要 本文简要叙述了中子、 (n, γ) 和带电粒子发射数据测量的最新进展. 主要侧重于气体产生, 氦再生以及长寿命活化核产物的形成截面等.

关键词 截面, 中子发射, 气体产生, γ 射线发射, 带电粒子发射, 氦再生, 长寿命活化.

1 引言

快中子反应截面对聚变堆第一壁、包层、结构和屏蔽材料的设计都是非常重要的. 除散射和俘获截面外, 还包括大量的中子阈反应, 如 ^{238}U 和 ^{232}Th 俘获中子后可生成 ^{239}Pu 和 ^{233}U , 使裂变燃料增殖, 而慢中子的裂变反应又可使聚变能量倍增. $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 和 (n, f) 反应不但能使中子倍增, 而且还可使包层中聚变燃料再增殖和能量倍增. (n, p) , (n, t) , $(n, ^3\text{He})$, (n, d) , (n, α) , 以及 $(n, n'p)$, $(n, n'\alpha)$ 等带电粒子发射过程产生的(氢, 氦)气泡和出射的带电粒子(包括核衰变)可使材料中原子产生位移, 直接影响结构材料的寿命和反应堆的安全. 这些对高能中子负荷最重的第一壁产生的辐射损伤尤为重要. $^6\text{Li}(n, t)$, $^7\text{Li}(n, n't)$ 反应的造氦过程可使反应堆的氦消耗得到补偿. (n, n) , (n, n') , $(n, 2n)$, (n, x) 和 (n, γ) 反应都是核加热的最主要来源. 在第一壁, 核加热的80%来自核反冲. 活化和核衰变数据主要关系到反应堆的操作运行、诊断设备和人身安全. 长寿命活化反应的截面数据对放射性废物的处理具有非常实际的意义. 关于上述核反应数据的需要及研究现状已在文献[1]中叙述了. 本文着重介绍一下快中子引起的中子发射数据(包括微分数据)、 γ 发射数据、带电粒子发射数据、气体产生和氦再生截面以及活化截面等测量的新进展概况.

2 中子发射

中子反应截面和次级中子发射谱对第一壁、包层材料输运截面的计算以及估价材料的位移损伤和核加热效应都是很重要的.

表1 需要测量 DDNECS 的材料(元素)

组件	元素
结构	Fe, Cr, Ni, V, Ti, Al, W, Mn, Si, Fe
倍增剂	Be, Pb, O
增殖剂/冷却剂	^6Li , ^7Li , F, H, O, Pb, He, Be, Al
屏蔽	Fe, H, O, W, Si, C, Ba, Ca
混合堆	Th, U, Pu

对聚变堆材料, 14MeV 中子反应的发射数据测量较多, 精度较高, 基本上可以提供使用, 其评价已纳入 ENDF/B-6, JENDL-3 以及 CENDL-2 (即将出版的中国核数据库第二版). 对一些重要元素如: H, Li, Be, B, C, Al, Ti, Fe 和 Cu 等还测量了(6~14)MeV 中子的数据, 而对另一些元素如: F, V, Cr, Mn, Ni, Pb 和 W 的测量数据较少, 尤其是双微分中子发射截面(DDNECS). 表1列出了一些需要测量 DDNECS 的材料(元素). 除表中所列元素外, 还应包括 N, Cu, Zr, Nb, Mo, Ta 和 Bi. 表中对 ^6Li , ^7Li 和 ^{16}O 的精度要求在(2~15)MeV 为(3~15)%, 其余, 一般为10%左右.

中子发射数据的测量主要在 Osaka、

CIAE、LLL、JAERI、GeeL、Argonne、Ohio 和 LANL 等实验室进行. DDNECS 的测量主要在 Osaka、Tohoku、Vienna、Dresdon、Obrninsk 以及 CIAE 等实验室进行. 如 Takahashi^[2] 对 Fe、V 和 Be 的测量, 使用 14MeV 强流脉冲中子源, TOF 技术测量了 $15^\circ \sim 160^\circ$ 之间 16 个角度的中子发射截面. 同早期的工作比较, V 的数据与 ENDF/B-4 的差别较大, 而 Fe 的结果则比较一致.

(0.478MeV) 非弹性散射似乎作为一个单个峰出现的 $(n, n_0 + n_1)$, 第二个峰 (n, n_2) 是 4.63 和 6.54MeV 能级的散射叠加在三体反应 ${}^7\text{Li}(n, n't){}^4\text{He}$ 和两步反应 ${}^7\text{Li}(n, t){}^5\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + n'$ 形成的连续谱上. 对弹性散射部分积分得到的截面与最新评价结果很好一致. 而对其它中子发射过程积分得到的截面, 系统地偏高于 ENDF/B-5 约 15%. 作者同时对 Be 核也进行了研究.

3 γ 射线发射

γ 发射数据主要应用于核加热和屏蔽的计算. 对聚变堆来说, 最重要的仍是 14MeV 的 γ 发射或 (0.1~20)MeV 范围内的一些数据. 目前测量的数据之间仍存在一些分歧, 需要进行高精度的测量和新的评价.

γ 发射数据的测量主要在 Tokyo 技术研究所、JAERI、北师大、ORNL 和 LANL 等实验室进行. Ramakrishnan^[4] 用散裂中子源, 中子能量可达到 60MeV, 预计可达 (100~400) MeV. BGO 探测器可以测量的 γ 射线能量到 25MeV, 而采用多探头装置可以测量 γ 射线的角分布. 图 2(a), (b) 分别给出 (9~10) MeV 的测量结果. 图 2a 是在 90° 测量的 Be 和 Ta 的 γ 谱. 在 $E_\gamma = 2\text{MeV}$ 时, Be 与 Ta 的计数比值 $\sim 3\%$, 而在 $E_\gamma = 10\text{MeV}$ 时比值为 (15:20)%. 很显然, 高 Z 元素的 γ 产额较低 Z 元素要高. 这种情况在低能 γ 发射时尤为突出. 图 2b 给出了 ${}^{181}\text{Ta}(n, x\gamma)$ 反应的积分截面. 由图可知, 积分截面随 E_n 增大而增大. 当 $E_n = 7.5\text{MeV}$ 时, 截面达到较大值, 此后开始下降, 当 $E_n > 15\text{MeV}$ 时, 又呈上升趋势. 这和 ORNL 早期的测量具有相似的能量关系, 但绝对值却低 (20~30)%. 对于 $E_n > 20\text{MeV}$ 的测量则是重核范围内 $(n, x\gamma)$ 反应的首次测量. 比较各种不同入射中子能量的 γ 产生截面发现其角分布是各向同性的, 这意味着低能 γ 射线的发射也是各向同性的.

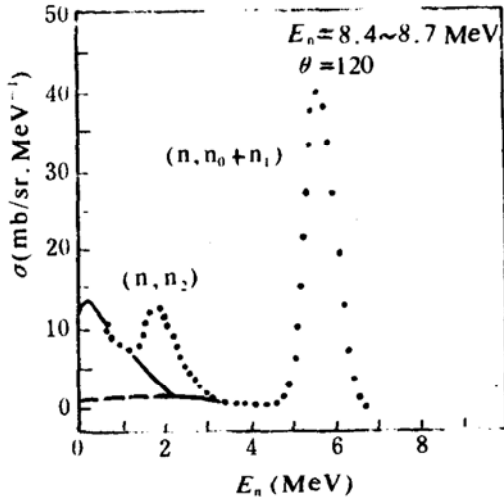


图1 ${}^7\text{Li}(n, n't)$ 双微中子发射截面

对包层组件中两个最重要的元素 Li 和 Be(Pb) 的数据要求具有较宽的能量范围和较高的精度. Dekempeneer^[3] 对 ${}^6\text{Li}(n, t)$, ${}^7\text{Li}(n, n't)$ 的测量使用白光脉冲中子源, 一次可得到所有入射中子能量范围的发射截面. 由于拉长了源与样品的距离, 本底条件比单能中子有较大的改进. ${}^7\text{Li}(n, n't)$ 次级中子谱是在 (1.6~13.8)MeV 范围内, $24^\circ \sim 150^\circ$ 之间的 6 个角度下进行测量, 结果为图 1 所示. 由图可清楚的看到, ${}^7\text{Li}$ 的弹性散射和第一个能级

4 带电粒子发射和气体产生

(n, xp)和(n, xα)过程产生蜕变产物以及氢和氦气体. 这些产物可能要影响第一壁材料的机械性能, 尤其是产生的氦气可引起材料的最大损伤. 就(n, xp)来说, 较详细的工作是对⁹³Nb核用多重望远镜探测器测量的发射质子的 DDNECS, 总的氢产生截面和早期的测量结果一致性较好. Ahmad^[5] 和 Graham^[6]

用带电粒子 TOF 谱仪测量了 Ni(8MeV), SS316, ⁵⁸Ni, ⁶⁰Ni, ⁶³Cu 和 ⁶⁵Cu (9MeV 和 11MeV)的质子发射截面. 这些工作填补了(6~14)MeV 之间缺能区的数据. 此外, 当 $E_n \leq 10\text{MeV}$ 时, (n, n'p)的贡献可以忽略, 活化法测量的(n, p)截面就可以近似地看成总的发射截面. 另一些作者还用活化法测量了 Mo 的一些同位素的(n, p)反应激发函数(阈~10MeV).

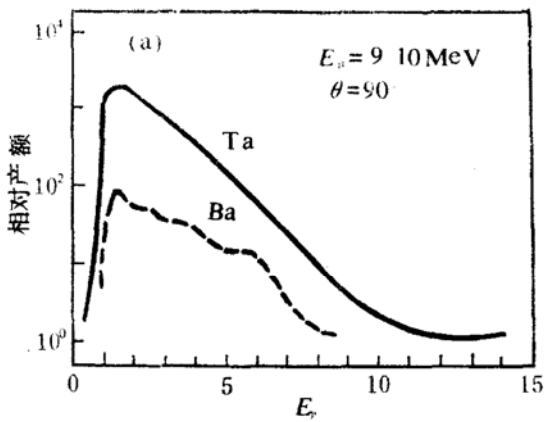


图 2a Be 和 Ta 的 γ 射线谱

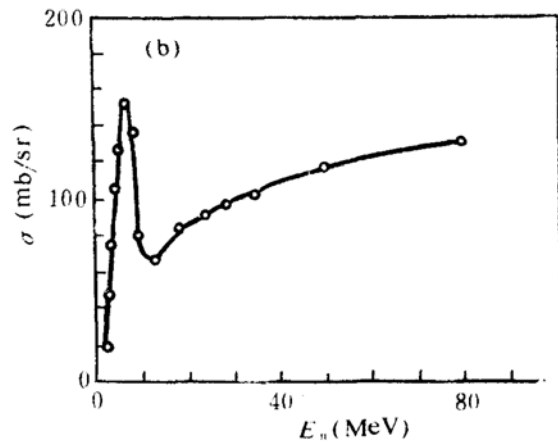


图 2b Ta(n, xp)反应截面

(n, d) 反应截面的测量主要是在 Livermor 对 $E_n = 15\text{MeV}$ 所报告的结果, 对高能(22、27、40 和 61MeV)时角分布的研究, 主要目的是研究这种反应的机制. 14MeV 以下的实验数据很少, 仅有的激发函数的测量是 ⁵⁸Ni(n, d) ⁵⁷Co 和 ⁵⁸Ni, ⁶⁰Ni, ⁶³Cu 在 11MeV 时(n, d)截面的测量^[5,6].

对于中等和重核的(n, t), (n, ³He)过程, 反应截面很小(μb 量级), 这给测量带来了一定的困难. 就仅有的测量数据而言, 不仅数量少而且不确定性较大. 但是, 从收集到的数据仍可以发现(n, t), (n, ³He)反应截面关于不对称参数 $((N - Z)/A)$ 的描绘具有一定的规律性. 因此, 用系统学方法可以计算一些未知核素的反应截面, 同样可达到预期的效果. 14MeV 的系统学关系如图 3 所示. (n, t) 反应激发函数的系统学工作是 Qaim^[7] 所做.

对于非常轻的核, 实验结果表明(n, t)截面很高(mb量级), 在聚变堆中这种反应的重要意义在于能使聚变反应中消耗的氘得到补偿, 即所谓“氘再生”. 因此, (n, t)反应对聚变堆的设计和具有特别重要的意义.

(n, xα)反应截面主要是用带电粒子探测器, 质谱仪和活化技术进行测量的, 能区为(14~15)MeV. 图 4 给出了天然同位素 α 发射的总截面. 为便于比较, 图中还划出了纯(n, α)反应截面的实验结果. 虽然对非常轻的核, (n, 2 α)过程中发射几个 α 粒子的几率将占主要地位, 但当 $Z > 10$ 时, (n, xα)的截面大部分是(n, α)反应的贡献. 一些作者还用活化法测量了几个重要核的 14.7MeV 的(n, n α)反应截面, 发现其结果是(n, α)截面的(10~15)%之间. 于是可以认为在总的氦产生过程中, (n, n' α)的过程远不象在氢气产生中(n,

$n'p$)过程那么重要. 对 $E_n \geq 14\text{MeV}$ 角分布的研究表明, α 粒子的发射具有前向性; $E_n < 14\text{MeV}$, 文献[5, 6]已完成 Ni(8MeV), SS316, ^{58}Ni , ^{60}Ni , ^{63}Cu 和 ^{65}Cu (9, 11MeV) 的测量. 此

外, $E_n \leq 10\text{MeV}$ 时, $(n, n'\alpha)$ 截面的贡献可以忽略不计. 所以, 活化测量的 (n, α) 截面的结果可以看成总的 α 产生截面.

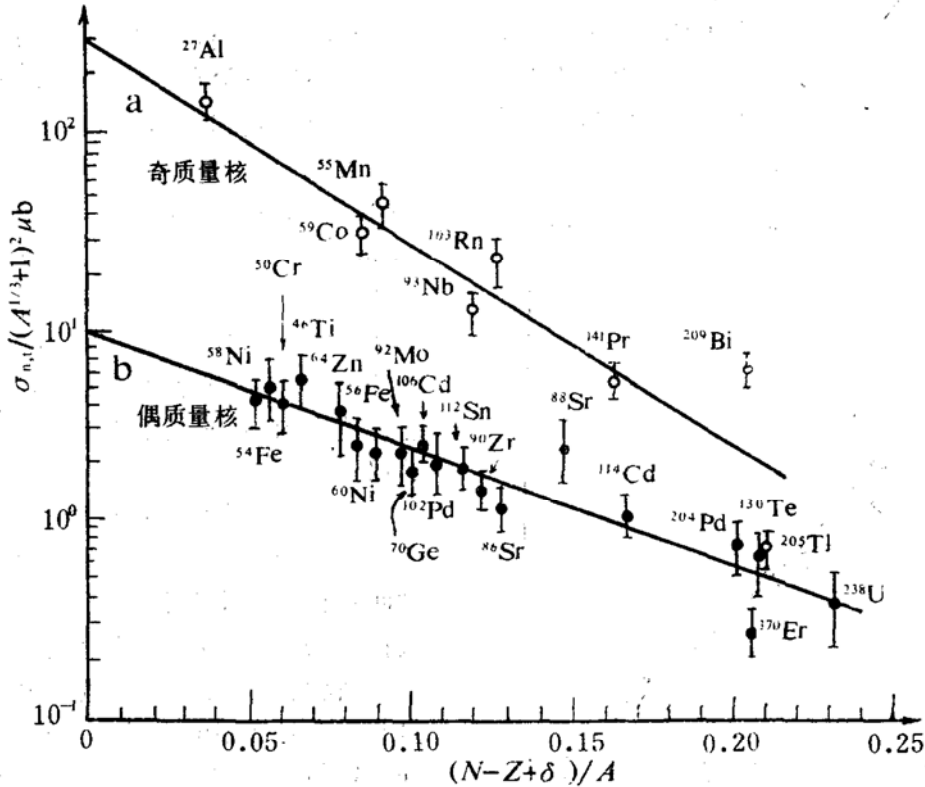


图 3 (n,t)反应截面的系统学关系

a. $\sigma_{nt}/(A^{1/3} + 1)^2 = 327.60\exp[-24.95(N - Z)/A]$
 b. $\sigma_{nt}/(A^{1/3} + 1)^2 = 9.57\exp[-14.03(N - Z + 1)/A]$

5 氚发射

氚发射的数据对于估价反应堆芯部, 周围环境以及大气中氚的产生都具有重要的意义. 在聚变堆中, 对氚燃料循环的计算更是至关重要.

非常轻核的 (n, t) 反应截面的系统学研究主要是 Qaim 等人^[7]的工作. 除截面测量外, 还研究了 $^9\text{Be}(n, t)^7\text{Li}$ (12.5~19.5)MeV, $^{10}\text{B}(n, t)2\alpha$ (热能~10.6MeV) 以及 $^{14}\text{N}(n, t)^{12}\text{C}$ (5~10.6)MeV 等反应的激发函数. $^9\text{Be}(n, t)$ 反应激发函数的极大值~30mb, $^{10}\text{B}(n, t)$ 反

应激发函数极大值~200mb. 而 $^{14}\text{N}(n, t)$ 反应的激发曲线则呈现涨落现象, 这是由于激发核能级的衰变特性引起的. 另外, Zadro^[8]用带电粒子探测器对 $^9\text{Be}(n, t)^7\text{Li}$ 反应截面 (14MeV) 的测量也得到了较好的结果.

在聚变堆中, $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 和 $^7\text{Li}(n, n't)^4\text{He}$ 反应对氚再生具有极其重要的意义. $^6\text{Li}(n, t)$ 反应截面的测量结果基本上满意的, 但 $^7\text{Li}(n, n't)$ 反应截面值各家的测量有一定的差别. Qaim^[7]用氚计数法给出了一些较新的截面数据, 同时对不同的测量方法所得结果还进行了评价. 除早期的数据偏大外, 各数据间

的一致性还是比较好的, 尤其从阈 ~ 9.5 MeV. 但从 (10.5 ~ 13) MeV 数据仍然很少, 14 MeV 数据显得有些分散. 实际要求的 3% 精度尚未实现. 实验分析指出, 似乎从目前使用的技术来看, 要在几个能量范围内达到 < 5% 的精度几乎是不可能的. 目前对 ${}^7\text{Li}(n, n't){}^4\text{He}$ 反应的测量还须扩展能区和提高精度. 关于中子与 ${}^7\text{Li}$ 生氦截面的详细评价可参见于保生等人^[9]的工作.

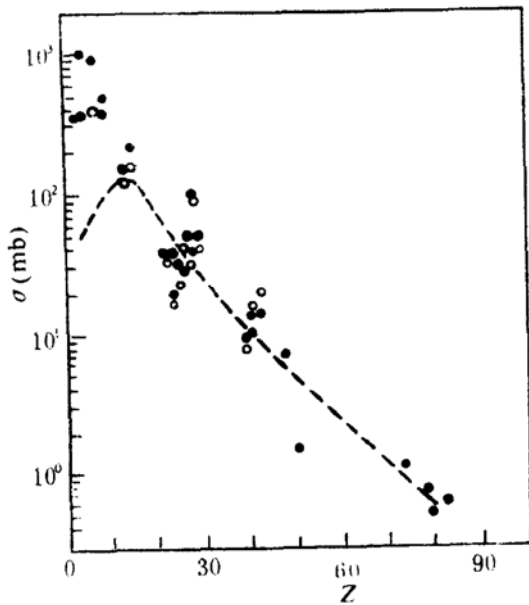


图 4 14 MeV 中子的氦发射截面

6 活化与蜕变

在聚变堆的设计中, 组件的活化是值得非常重视的问题. 目前, 对于 14 MeV 中子活化截面的测量主要在 JAERI、CIAE、Vienna、Debrecen 和 Argonne 等实验室进行. 其它能量范围的测量除在上述实验室进行外, 还有 Julich、Warsaw 和 Zagreb 等实验室也在做. 二个重要的反应是 ${}^{115}\text{In}(n, n'\gamma)$ 和 ${}^{93}\text{Nb}(n, n'\gamma)$ ${}^{93\text{m}}\text{Nb}$, 分别由 CIAE, Derecen (13 ~ 15) MeV 和 Vienna, Geel, Harwell (1 ~ 8) MeV 进行了详细的研究. 对 ${}^{93}\text{Nb}(n, 2n){}^{92\text{m}}\text{Nb}$ 的测量数据多集中在 (14 ~ 15) MeV, 在 10.6 MeV 和 (12.5 ~ 19.5) MeV 能区也有少量数据. 因此, 在这些能量范围内, 新的测量将会提供更为有用的数据.

长寿命活化核的数据是反应堆废物处理所需. 中等半衰期 (几年或一年) 活化截面的测量已在几个实验室进行, 并有大量的新数据发表. 而长寿命放射核的研究则刚开始不久, 收集到的测量结果列于表 2. 所有的测量几乎全是在强流中子发生器上, (14 ~ 15) MeV 能量范围内进行的. 几个重要核活化产物 ${}^{92}\text{Nb}$ (10^8 a), ${}^{93}\text{Zr}$ (1.5×10^6 a), ${}^{93}\text{Mo}$ (3.5×10^3 a) 尚没有看到有数据发表. 长寿命核

表 2 某些长寿命活化核的形成截面*

放射性产物	$\tau_{1/2}$ (a)	核反应	测量方法	14 MeV σ (mb)
${}^{26}\text{Al}$	7.5×10^5	${}^{27}\text{Al}(n, 2n){}^{26}\text{Al}$	γ 射线	30 ± 5
${}^{55}\text{Fe}$	2.7	${}^{56}\text{Ni}(n, \alpha){}^{55}\text{Fe}$	化学分离, X-射线	125 ± 20
${}^{59}\text{Ni}$	7.5×10^4	${}^{60}\text{Ni}(n, 2n){}^{59}\text{Ni}$	液体闪烁	104 ± 25
${}^{63}\text{Ni}$	1.0×10^2	${}^{63}\text{Cu}(n, p){}^{63}\text{Ni}$	化学分离, 液体闪烁	55 ± 4
${}^{91}\text{Nb}$	7.0×10^2	${}^{92}\text{Mo}(n, 2n){}^{91}\text{Nb}$	γ 射线, 系统学	603 ± 119
${}^{94}\text{Nb}$	2.03×10^4	${}^{94}\text{Mo}(n, p){}^{94}\text{Nb}$	γ 射线	53 ± 5
		${}^{95}\text{Mo}(n, x){}^{94}\text{Nb}$	γ 射线	17 ± 2

* 兰州大学和北京原子能科学研究院用 3.3×10^{12} n/s 强流中子源测量的结果未包括在内.

产物的测量方法主要是放射性分离法和低本底相结合的技术. 由于半衰期较长, 活性又很

弱, 所以实验测量比较困难. 然而幸运的是实际使用中, 对截面的精度要求不是很严格的

(10~20)%, 甚至于理论计算或系统学的预言结果也可使用, 至少达到一级近似的程度. 但须指出的是对同质异能态截面的计算不很成功, 系统学的计算只能给出总反应截面值.

7 结 论

最近几年, 核数据的测量取得了一定的进展. 利用强流脉冲化的白光中子源可以测量入射中子能量范围很宽的次级中子谱及 γ 射线发射数据. 用计数器望远镜和氚计数法, 活化技术测量了(6~14)MeV 氢, 氦气体产生的数据. 与此同时还基本完成了几个非常轻核的(n,t)截面的测量. ${}^7\text{Li}(n,n't)$ 反应截面的数据除 14MeV 有些涨落外, 基本上趋于一致, 但所要求的 3% 的精度仍未达到. 长寿命活化核数据的测量需要进行和进一步开

展国际间的合作研究.

参 考 文 献

- 1 姚立山. 聚变堆对核数据的需要及研究现状. 核物理动态, 1991, 8(4)
- 2 Takahashi A, et al. Proc. of the Intern. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Techn., Mito, Japan, May 30~June 3, 1988, 205
- 3 Dekempeneer E, et al. Nucl. Sci. Eng., 1987, 97 : 353
- 4 Ramakrishnan P. et al. Nucl. Sci. Eng., 1988, 98 : 348, 357
- 5 Ahmad M, et al. Nucl. Sci. Eng., 1987, 95 : 296
- 6 Graham S L, et al. Nucl. Sci. Eng., 1987, 95 : 60
- 7 Qaim S M, et al. Radiochimica, 1990, 50 : 5
- 8 Zadro M, et al. Nucl. Sci. Eng., 1987, 95 : 79
- 9 于保生等. 中子与 ${}^7\text{Li}$ 作用生氚截面的评价. 1987, CNIC-00071, CNDC-0001

Recent Developments in Cross Section Measurements of Nuclear Reactions for Fusion Reactor

Yao Lishan

(Department of Physics, Shanxi Normal University, Xian 710062)

Abstract A brief review of some recent experimental work on the neutron, (n, γ) and charged particle emission cross sections is given. Reaction cross sections relevant to gas production, tritium breeding and formation of long lived activation production are mainly discussed.

Key Words cross section, neutron emission, γ -ray emission, gas production, charged particle emission, tritium breeding, long lived activation.