

快中子束应用研究现状

赵彦森

在中子物理中，一般将能量大于1MeV的中子称为快中子。它可以从裂变堆、同位素中子源获得，也可以由各种加速器获得。考虑到便于应用、降低费用等因素，目前多由小型加速器产生快中子，其中14MeV中子源居多数。近廿年来，此类中子源的产额提高了约三个量级。美国加利福尼亚大学劳伦兹辐射实验室(LRL)的RTNS—II已于1980年达到 2.2×10^{13} n/s，可提供的最大辐照通量为 5×10^{12} n/cm²·s。它的设计指标 4×10^{13} n/s⁽¹⁾，最大通量 1×10^{13} n/cm²·s。这样强的快中子流虽比氢弹爆炸的中子流只小几个量级，但它可以稳定运行，投资又少，为快中子束应用研究提供了基本条件。国外已经在以下几方面进行了不少研究工作。

一、快中子治疗深部肿瘤⁽²⁾

快中子治疗肿瘤研究开始于1937年，Stone和Larkin在贝克莱实验室回旋加速器上首先进行了试验。由于认识上的错误，到1942年暂停了实验。廿多年之后，伦敦哈默

史密斯医院重新试验了快中子治疗肿瘤的可能性，对快中子生物效应进行了深入地研究，临床实验也显示出快中子治癌的价值，尤其是对缺氧肿瘤的效果远好于电子和X射线。目前国外已有几个放射治疗中心，如Eppendorf大学医院、基督医院、Holt镭研究所及日本一些医院等，都在临床治疗中应用了快中子束，现已成为治疗恶性肿瘤的重要手段之一。

用于治疗的中子源应满足两个条件：一是源强至少在 2×10^{11} n/s以上，由此可在照射部位（焦距约80cm）产生剂量率大于12拉德/分。二是中子能量应在10MeV以上。原子反应堆的中子平均能量约1MeV，不能用于深部肿瘤治疗。镭252的平均中子能量为2.3MeV，只能用作体内照射器。回旋加速器中子是适宜于治疗深部肿瘤的，但费用较高。所以，14MeV中子发生器是最有发展前途的辐照装置。表1为产额大于 10^{12} n/s中子源。其中美国纽约韦斯特堡辐射动力公司制造的Dynagen111型(D, T)中子发生器，在皮焦距80cm处剂量率约为15拉德/分。

表1 一些产额大于 10^{12} n/s的14MeV中子源

名称	RTNS-I	RTNS-II	Dynagen-111	威斯康星大学	IPNS	FNS	CKTA-VIAN	中子管
国家	美	美	美	美	加拿大	日本	日本	联邦德国
产额(n/s)	6×10^{12}	2.2×10^{13}	2.3×10^{12}	1.8×10^{12}	4×10^{12}	5×10^{12}	3×10^{12}	5×10^{12}

二、快中子辐照损伤的研究及应用

任何形式的核辐射对材料都有损伤作用，由于快中子穿透力强，所以引起的损伤

是整体性的，较其它辐射严重的多。从六十年代起，国外已有人围绕着聚变堆材料Nb、Fe、V、Mo等进行过理论研究。据估算，聚变堆第一壁在其使用期内要受到 10^{22} 中子/厘米²的辐照，要在实验上验证它就需要通量 10^{15} n/cm²以上的中子源⁽³⁾。到目前为

还没有能满足上述要求的14MeV中子源，所以对一般金属材料损伤的研究仍处于理论阶段。不过从美国发展14MeV中子源的动态来看，预计八十年代后期快中子材料试验辐照装置(FMIT)可能进入实用阶段⁽⁴⁾。目前多在高通堆(HFIR)或快堆上进行实验，一般要辐照5000小时，积累通量可达 $1.1 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ，主要研究材料微观结构的变化以及由此引起的强度变化，以便找出适合于耐高温的抗辐射的新材料。

由于半导体元器件的中子损伤阈值较一般金属低几个量级，所以快中子对电子元器件损伤的研究早已进入实验阶段并取得了较大的进展。如硅单晶器件积累到 10^{13} n/cm^2 (对 $\bar{E}_n = 1 \text{ MeV}$)就可形成 $10^{14}/\text{cm}^3$ 个缺陷。从微观上分析，这些缺陷对载流子迁移率、多子浓度以及少子寿命都很不利。在宏观上表现为电特性变坏，即增益下降、PN结漏电流增大、饱和电压降升高等。目前该方面的侧重点是选择抗辐射性能好的半导体材料和加固半导体器件即钝化少子寿命。表2为一些电子器件加固后的抗辐射水平，它较未加固的元器件高数十倍。

另外，快中子材料改性也是很有意义的。

表2 经加固后的电子器件抗辐射水平
($\bar{E}_n = 1 \text{ MeV}$)

元器件名称	TTL	ECL	NMOS	CMOS
中子加固水平 (n/cm^2)	$10^{14} \sim 10^{15}$	10^{15}	10^{15}	10^{15}

三、快中子活化分析(FNAA)

在中子活化分析这一技术领域内，几十年来堆中子一直占主导地位。但是14MeV中子源强的提高、ms级“跑兔”系统以及数据获取分析系统的建立，加之堆中子分析固有的某些缺点(如：分析轻元素He、Li、N、P、O、Pb等核的困难，在分析生物样品时产生大量的 Na^{24} 和 Cl^{38})，FNAA有了新的进展⁽⁵⁾。它在农业上可分析植物体内的营养

元素N、P、K、Mg、Ca等，是一种快速无损的分析方法；在工业上，即使中子产额为 $\sim 10^{19}/\text{s}$ ，也能鉴定一些材料的性能指标⁽⁶⁾(表3)。

表3 14MeV中子分析耐高温材料杂质

所分析材料	杂质	含量 (%)	分析精度 (%)	灵敏度 (%)	测定时间(分)
钨与钨制品	O	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	5—15	$(3-5) \cdot 10^{-4}$	≤ 5
	Si	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	10—20	10^{-3}	5—8
	Al	10^{-2}	10—20	$5 \cdot 10^{-3}$	25—30
	Mo	$10^{-2} \sim 1.0$	5—10	10^{-3}	15—20
	Y	1.0—3.0	3—7	$5 \cdot 10^{-4}$	≤ 5
	F	$10^{-2} \sim 1.0$	15—20	$5 \cdot 10^{-3}$	25—30
钼制品	O	$10^{-2} \sim 1.0$	5—15	10^{-3}	≤ 5
	Fe	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10—20	10^{-2}	20—30
	W	$10^{-1} \sim 1.0$	10—20	10^{-1}	5—10

除了14MeV中子活化分析之外，在同样装置上产生(D, D)中子(能量在2.5~3.0MeV)用于活化分析也引起人们的兴趣。因为它可以在许多核上产生半寿命适当的同质异能素，其反应截面大⁽⁷⁾，干扰反应较14MeV中子小。

表4 2.997MeV中子引起一些核的同质异能素截面实验值

同质异能素	$^{204\text{m}}\text{Pb}$	$^{111\text{m}}\text{Cd}$	$^{87\text{m}}\text{Sr}$	$^{199\text{m}}\text{Hg}$	$^{115\text{m}}\text{In}$	$^{113\text{m}}\text{In}$
非弹性散射截面 (mb)	21	1200	350	490	2750	2560

另外，利用反应堆里快中子束也已受到科学工作者的重视。虽然通量较热中子低1~2量级，但对一些核的活性较热中子强的多，如反应 $^{14}\text{N}(n, 2n)^{13}\text{N}$ 较 $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$ 高100多倍。

四、短寿命同位素的制备

放射性同位素在工业、农业、医学等方面

应用都是相当广泛的，尤其是医用短寿命、低能量、射线单一的核素。它使其诊断治疗某些疾病手段发展到先进水平，如体外试验、放射免疫分析、饱和分析法等。用快中子生产同位素的主要反应道是 (n, p) , (n, α) 和 $(n, 2n)$ ，其特点是无载体的。国外文献曾报导了 14MeV 中子制备 ^{24}Na , ^{27}Mg , ^{56}Mn 等核素的情况。当时，由于中子通量只有 10^8 — $10^9\text{n/cm}^2\cdot\text{s}$ ，仅能制备出几十到几百微居里的同位素。波兰核子所 M. Kucharski 在静电加速器上用 14MeV 中子照射 TeO_2 靶制得了纯 ^{128}Sb 源。据估算，在源强为 10^{13}n/s 时，生产半寿命小于一天的同位素，约有四十六种的强度可达 $15\text{mc/g}\sim 300\text{mc/g}$ 。这从品种上和产量上都能满足诊断的要求。再考虑到中子发生器的费用（一台 Kaman A-71 约 51 万美元）较回旋加速器低（一台 Cs-30 型约 95 万美元），体积小，所以用 14MeV 中子发生器制备医用同位素还是有发展前途的。

五、快中子束在聚变堆研究中的应用

可控热核反应是人类最理想的能源之一。实现这种取之不尽、用之不竭能源的关键之一是能否建成聚变堆。近廿年来，各种结构的聚变堆已经提出并进行了理论计算，现在国外已进入实验验证阶段，所以快中子在这一技术领域中的应用是特别令人瞩目的。主要应用在以下几方面：

1. 聚变堆中子和 γ 能谱的实验测定。在 ORNL⁽⁸⁾ 就应用 14MeV 中子发生器对不同

结构材料的再生区中子和 γ 谱进行了测量。当未加 Hevinete 合金时，实验同理论计算符合较好；加上 Hevinete 合金，符合不好，尤其是 γ 谱相差 25%~500%。

2. 产氙率是维持聚变堆稳定运行的关键性指标之一，理论上已有计算。日本东京大学核工程系用 14MeV 中子源测量了一维 LiF 平板几何条件下的产氙率。LASL 测量了 ^6LiD 球中氙的径向分布，结果同理论值在 $\pm 5\%$ 以内符合。

3. 屏蔽性能实验。

六、其它方面的应用

快中子育种、微生物繁殖、生物吸收剂量研究等，都是科学工作者感兴趣的领域。

参 考 文 献

1. D. W. Heikkinen, C. M. Logan, IEEE, Vol. NS-28, №2 (1981)
2. Bernd-Peter Offermann, Kerntechnik 18, Jahrgang (1976) №7. p.293—303.
3. 水野幸雄, 核融合研究 28 (1972) 1.
4. The Technology of Controlled Nuclear Fusion (Proceedings of the Fourth Topical Meeting Vol.3 p.1670, 1980)
5. 赵彦森, 核物理动态 Vol. 1, №1, p.21.
6. Навалихия Л. В. 等, Атомная энергия, 1976, Т.41 Вып. 4 стр.277.
7. H. L. Finston 等, J. Radioanal. chem. 43 (1978) 534
8. R. T. Santoro, Nucl. Sci. and Eng. Vol. 78 №3 (1981)
9. A. Hemmendinger 等, Nucl. Sci. and Eng. Vol. 70, p.274—280 (1979).