

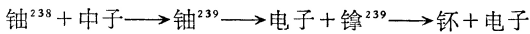
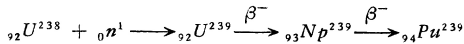
加速器增殖反应堆

中国科学技术大学 赵根深

在世界上,随着人们对能源需要的迅速增长,矿物燃料如煤、石油的价格逐年上升。据估计,世界上原油蕴藏量的六分之一已经被消耗。如果以每年百分之三的增长率继续消耗的话,到二十一世纪初,世界上的石油就将枯竭。与此同时,由于国防、航海等部门,尤其是原子能电站对核燃料的需要急剧增加,高品位铀矿储量迅速减少,核燃料的价格也在不断上涨。近二十年来,原子能电站发展很快,到一九七六年,已有 179 座原子能电站投入运行,总容量达 8,735 万瓩。目前处在建造和设计中的有 503 座,总容量达 5 亿瓩。估计到二〇〇〇年,原子能电站的总容量将达 24 亿瓩,占发电量的 60—70%。以平均每 60 万瓩装机容量,每年消耗 1000 公斤铀 235 计算,到二十世纪末,每年光用于原子能电站的裂变燃料就需要 4,000 多吨!

如何来扩大核燃料的生产?这已成为当今世界上许多国家十分重视的能源问题之一。加速器增殖反应堆就是近几年来作为生产核燃料的一种途径被提出来的。

在自然界中,天然存在的铀(U)238,钍(Th)232 要比裂变燃料铀 235 多得多(天然铀中,铀 238 占 99.3%,而铀 235 只占 0.7%),但是铀 238 和钍 232 通常情况下是不裂变的。不过它们可以俘获一定能量范围内的中子(当中子能量为几十电子伏时,被俘获的可能性最大)。俘获的结果,产生铀的不稳定同位素铀 239,铀 239 经过两次衰变,最后变成重要的超铀元素钚 239 (Pu 239):



钚 239 与铀 235 一样能够吸收任意能量的中子而发生

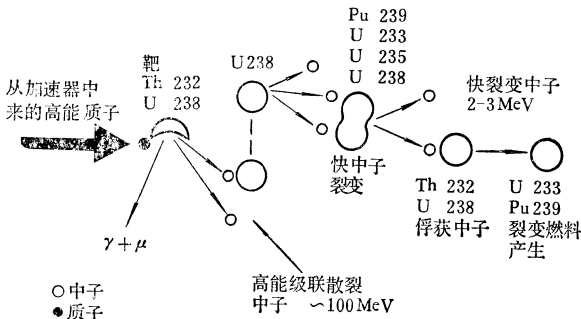


图 1

核裂变。钍 232 俘获中子后,也可以经过类似衰变而转变成一种新的核燃料 U 233。这个过程也就是所谓的核燃料再生过程。从这里可见,要使核燃料再生,必需首先产生中子,产生的中子越多,再生能力就越大。所谓加速器增殖反应堆,就是利用高能加速器中出来的高能质子束或氦核,打在一定的靶上与靶核相互作用,产生中子,使铀 238 或钍 232 发生核反应,来提供新的核燃料。

图 1 所示为加速器增殖反应堆所产生的核反应过程示意图。

从加速器中加速出来的高能质子束与靶核相互作用,

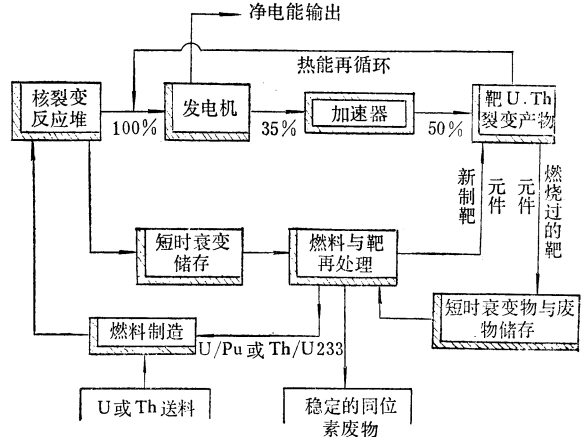


图 2

用,产生许多散裂中子。大部分中子被钍(Th)232 或铀(U)238 俘获生成铀 233 和钚 239,一部分高能级散裂中子由于能量较高(几个 $Mev \sim 100Mev$)可使一部分铀 238 直接发生裂变,并放出中子。由于再生区(即靶区)中,可裂变物质铀 233 和钚 239 以及快中子裂变铀 238 的存在,导致额外中子的倍增,从而提供净裂变燃料。

如果用一台能量为 10 亿电子伏,流强为 300 毫安的质子直线加速器直接来轰击一个钍靶或钚化铀靶,估计每年将能产生 1,000 公斤以上的铀 233 或钚 239。这将可供一座容量为 60 万瓩的大型原子能电站使用一年。

图 2 为带有燃料再加工和放射性废物处理的加速器增殖反应堆(轻水)动力系统示意图。核裂变反应堆产生大量的热,用来推动发电机发电,电能一方面供加速器使用,一方面送往外界,供其他

负荷使用。加速器出来的束流功率在靶区转变为热，另外由于裂变反应也放出大量热。这些热量也被回收，循环回去发电；被轰击后的靶取出再加工，变成新靶又送回靶区使用。与此同时，靶区产生出来的新裂变燃料经适当处理与新送入的钍或贫化铀矿一起加工浓缩，送入开头的裂变反应堆使用。而裂变反应堆本身，一方面作为发电机的能源，另一方面，它也产生小量的再生核燃料。这部分核燃料同样经再处理送回到反应堆。这样一台错综复杂的加速器增殖反应堆系统，送入的是一般钍或贫化铀矿，而送出来的是源源不断的强大电力。（一些稳定的同位素废物在这过程中被排除。）也就是说，借助于高能加速器的作用，把一般情况下不会裂变的铀 238 或钍 232 转变成裂变燃料钚或铀 233，从而使核裂变反应堆获得足够的新裂变燃料，驱动发电机，输出净电力。

对用来再生核燃料的加速器有什么要求呢？根据现有的实验资料表明，为了能获得足够多的、有效力的中子产额，加速器的能量要 10 亿电子伏左右或更高一些。平均束流强度要几百毫安。另外要求加速器的总效率（加速器输出束功率与运转这台加速器所需要输入的交流线路电源功率之比）达到 50% 以上。因为加速器的效率对裂变燃料的最后价格（成本）影响很大。根据这些要求，比较合适的是采用行波直线加速器。为了提高直线加速器效率，必需研制极端可靠、高效率的速调管和功率放大管，同时要选择最优的分路阻抗和加速梯度，使得加速结构的能量损失达到最小。表 1 所列可为可供选择的一部分直线加速器参数：

图 3 表示束流能量与中子产额之间的关系。图 4 表示直线加速器频率与所允许的最大束流之间的关系。

此外，对靶区材料要很好考虑加速器一次束流的辐射损毁，以及由于一次束流和裂变反应带来的热效

应。

目前采用这种加速器增殖反应堆来生产核燃料成本费用还比较高，很初步的估计，每克铀 233 或钚 239 成本费用要达 100—200 美元，而目前国际市场上每克铀 235 的价格为 30 美元。但

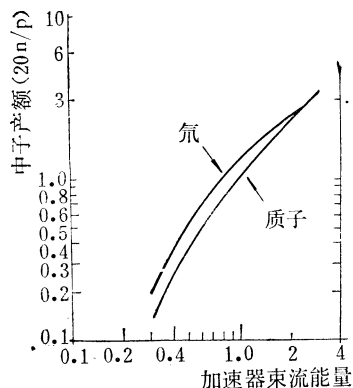


图 3 (注：图中纵座标所示中子产额是归化到当质子能量为 1Gev 时中子产额为 1 的数值)

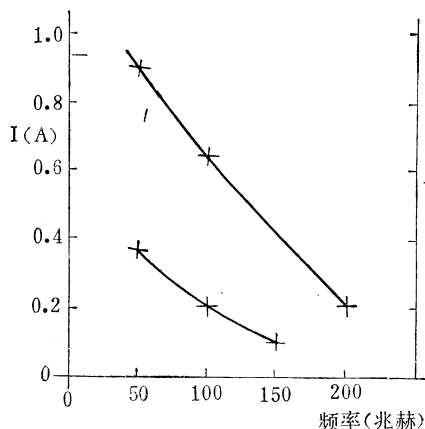


图 4

随着世界各国对核燃料需要量的急增和世界上高品位铀矿储量的不断减少，以及加速器技术的发展，作为高能加速器的一种应用——加速器增殖反应堆，在不远的将来是一定会展现其广阔的前景的。

表 1 直线加速器参数的综合选择

	最高能量 (E_{Max}) (兆电子伏)	束流 I (毫安)	离子类型	频率 (兆赫)	平均束功率 (兆瓦)	激发功率 (兆瓦)	总功率 (兆瓦)	长度 (米)
高梯度 加速器	800	395	P	100~300	316	126	442	440
	1000	300	P	150~450	300	126	426	550
	2000	136	P	300~900	273	170	443	1100
低梯度 加速器	800	300	d	50~150	240	138	378	586
	1000	230	d	75~225	230	140	370	734
	1500	163	d	100~300	244	178	422	1100
高梯度 加速器	800	395	P	100~300	316	63	379	880
	1000	300	P	150~450	300	63	363	1100
	2000	136	P	300~900	273	85	358	2200
低梯度 加速器	800	300	d	50~150	240	69	309	1173
	1000	230	d	75~225	230	70	300	1466
	1500	163	d	100~300	244	89	333	2200