

加速器驱动的核电站

Accelerator-Auxiliary Driven Nuclear Power Reactor

戴光曦
(中国科学院近代物理研究所, 研究员 兰州 730000)

引 言

当前全世界 1/5 的电能来自核电站。目前在运转和兴建中的所有核电站均是依靠自持链式反应,“燃烧”十分昂贵的富集铀核燃料。它们的致命缺点是产生大量核废料,其半衰期在 10 年以上到亿年的就有 20 多种。核废料分两类,一类是在核燃料附近的重铀系核废料;另一类是裂变产物。表 1 列出了一座沸水核反应堆所用过的核燃料棒,从堆芯取出后放置 10 年做出的核废料分析数据。从表可见,该堆每年产生的这些长寿命核废料约为半吨,其中包括许多对人类十分有害的放射性核素。各国为了处理这些核废料,需要对它们进行浓集、压缩、玻璃及水泥固化、密封后,运送到无人居住的地方,置于山洞或深埋地下。这一系列的处理,工程花费巨大。

从原理上看,这些致命的缺点是由于核燃料“燃烧不全”带来的。核裂变(或“燃烧”)需要中子助燃,类似于通常燃烧需氧气一样。而这些中子都是从裂变中产生的,慢化后再引发裂变。在这种循环反复自持的链锁过程中,中子有盈有亏,称作“中子经济”。自持式核堆要求的燃料品质高,也就是热中子裂变截面大、一次裂变放出的平均中子数多等,即“中子经济富”,可以达到临界状态。当自持式核堆运转一些时候以后,中子经济逐渐变差,从而再不能自持达到临界,伴随产生大量的核废料。于是人们设想,在堆芯的中央位置放置一个强中子源,来增加中子经济值,这就会出现两个显著的效果:一是驱动剩余核燃料继续燃烧,并且用“燃烧”(使其裂变)的办法来除去重铀核废料;二是长寿命裂变产物在外加强中子源的辐照下,通过中子引发的各种反应,变成短寿命的甚至稳定的同位素。这样,关键在于做出一个强中子源。经过近 30 年的研究,用 800~1 000 兆电子伏的强流质子轰击铅靶时,平均一个质子可产生 12~15 个中子。若有 100 毫安质子束,产生中子源的通量可达到 10^{16} 中子/秒厘米²,比高通量堆的通量还要强。当然实际上中子在

堆中还要倍增(如 20 倍),而束流做到 1 毫安量级,大致即可使用了。当前,在美国劳斯-阿拉姆斯的介子物理设备(LAMPF),可引出 800 兆电子伏和 1 毫安的质子束。所以作为驱动源的加速器,技术上已成熟,不存在严重困难。

表 1 核废料及其产率

重铀系核废料	半衰期(年)	产率(公斤/年)
²³⁷ Np(镎)	2 100 000	14.5
²³⁸ Pu(钚)	80	4.5
²³⁹ Pu	24 000	166.0
²⁴⁰ Pu	6 600	76.7
²⁴¹ Pu	14	25.4
²⁴² Pu	380 000	15.5
²⁴¹ Am(镅)	430	16.6
²⁴³ Am	7 400	3.0
²⁴⁴ Cm(锔)	18	0.6(共计 322.8)
裂变产物核废料		
⁶⁹ Se(硒)	65 000	0.2
⁸⁵ Kr(氪)	11	0.4
⁹⁰ Sr(锶)	29	13.4
⁹³ Zr(锆)	1 500 000	23.2
⁹⁹ Tc(锝)	210 000	24.7
¹⁰⁷ Pd(钯)	6 500 000	7.3
¹²⁶ Sn(锡)	100 000	1.0
¹²⁹ I(碘)	17 000 000	5.8
¹³⁵ Cs(铯)	3 000 000	9.4
¹³⁷ Cs(铯)	30	31.8
¹⁵¹ Sm(钐)	90	0.4(总计 117.6)

加速器驱动式核反应堆的结构

下图显示了驱动式核堆的原理结构。堆型选用先进的熔盐堆型。在这外型高 8.5 米、直径 7.5 米的圆筒形结构中,其设计功率为 50~100 万千瓦。图中白色箭头指向是液体核燃料(即核燃料溶于熔盐载体的统称)的循环流动方向。堆芯部分是一个 5 米高、4.5 米直径的筒型容积,它放满由石墨细棒做

成的石墨中子减速毯；液体核燃料浸泡着它并流过它。由这减速毯和液体核燃料组成了反应堆的燃烧炉膛。在堆外壳有厚实的石墨中子反射层，使射向它的堆芯中子减速，并反射回去。这些都是常规的溶盐堆的构想。区别在于加上了加速器中子源。从图中可见，堆的中心部位放置有熔化的铅液；将它作为靶子。质子束流穿出加速器的真空密封窗，从堆的上部朝下送入，通过一根细管道进入堆芯轰击铅靶。大致一个 1 000 兆电子伏的质子打到铅靶上可产生 15 个快中子。这些快中子经石墨毯减速后成为热中子，并与流体核燃料作用。这种附加的强中子通量的作用类似于通常锅炉的鼓风作用，将使核燃料燃烧更完全。同时对铀系废物，强化了(n,f)的反应，使这些废物裂变并放出大量的热能，从而清除掉它们。这样促进裂变的结果还可使中子倍增，倍增系数可达到 20，大大增加了堆中可用的中子数。显然，裂变能将很容易在溶盐载体中变成热能，后者在流动中被泵抽到热交换器中。在交换器内热能被蒸汽移到外部相关的涡轮发电机中，进行发电。

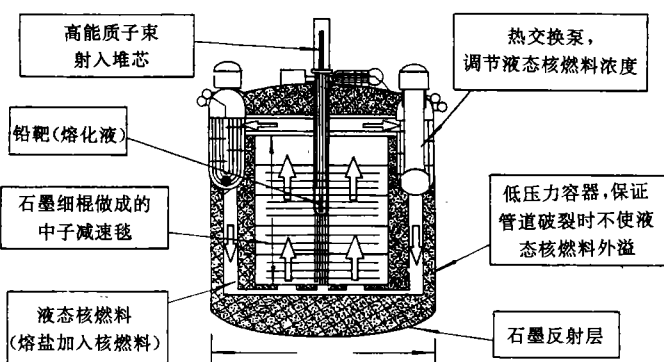


图1 加速器辅助驱动熔盐堆结构图，
典型功率为 50~100 万千瓦。

对于自持堆，也可用加速器辅助强中子源将堆运转中产生的重铀系废料迅速地移去，为自持堆的正常运转创造良好的环境。但是辅助强中子源的应用远不止于此。它可能将较差的核燃料元素（如钍和贫铀）作为燃料直接加以利用。地球上钍元素的天然存量很可观，用它作燃料可供地球几万年的能源消耗。但在现存的自持堆中，钍与贫铀的“中子经济”太贫，达不到临界条件，无法用作核燃料。但是在加速器驱动的反应堆中，强大的中子通量补充了钍的中子不足，从而可以使钍堆运转起来。这时钍先吸收中子变成铀-233，然后再从铀作链式反应来释放裂变能。类似情况对于贫铀也是适用的。这样就极大地拓宽了核的裂变能资源，极大地降低了核

裂变燃料的成本。

驱动式核堆的安全性

核裂变能源其实比化学能源更安全。煤、石油、天然气和木材的大量使用，使二氧化碳急剧增加，破坏了光合作用的平衡条件，造成环境污染，并出现温室效应、臭氧层变薄甚至出现空洞等，地球上气候反常，再没有风调雨顺的“天时”了。但是人类对核裂变能源的挑剔也不是没有道理的。例如，美国三哩岛发生超临界事故，烧毁密封厂房内的所有设备；前苏联的切尔诺贝利核电站，出现严重放射性泄漏事件。这样，使人们认识到必须彻底解决核堆的安全问题。

首先是核废料的产生问题。在驱动堆中，快中子与热中子对于两种核废料均可消除掉 99.99%。如裂变废料在溶盐流体循环中流经一个处理系统，在这系统中将稳定的裂变产物和半衰期短于 30 年的产物过滤出来，并将长半衰期的裂变产物送回驱动堆中再作辐照。这种辐照可通过中子引发的各类反应将核素最终变成稳定的或短半衰期的。所以这种驱动堆是一个自封闭的系统，废料处理在堆内部，仅输出稳定核素与半衰期小于 30 年的核素，它们对人类无害，且有医用和工业价值。驱动堆外壳设计坚固，内部压力比常规的要低，以保证机械上的安全性。

再看安全控制主体。驱动堆用辅助中子源运转堆，一旦撤去中子源，堆将满足不了临界状态而停堆。要撤去中子源只须关闭加速器的质子束流即可。由于加速器是十分精密的电气设备，在微秒量级内快速切断束流是容易办到的事。加速器关闭后，虽无外部中子，次临界反应堆仍有裂变反应存在，即还有余热。如果照过去的作法，用棒状或球状核燃料，则在某一局部区域仍会出现高温。所以驱动堆设计上采用了液体核燃料，这时局部热负荷将很快均匀地散播各处。本堆设计要求“余热”对堆芯的加温控制在一个很低水平上，所以它是绝对安全的。

由溶盐载体与所溶解的核燃料组成的液体燃料，可以很方便地循环到堆芯外部进行核素分离及核燃料添加等过程。现已试验过许多物理化学的分离手段，都是相当成功的。例如用电泳法很容易将铀与重铀系元素和铀与稀土元素分开。这时用一只电解槽，阳极用铍板，阴极用镍板。作为上述有关元素的氟化物，其电化学势若低于氟化铍的 5.6 电子伏时则该氟化物的相关金属元素将沉积在镍电极上；反之则仍然溶于载体溶液中。又例如，采用液体离心机分离法可以高效地将稀土元素与重铀系元

（下转第 58 页）

要重视我国横断山脉地区的保护和开发。在山区中特别要重视横断山脉。我国的山脉以东西间为主,妨碍南方水汽北上。唯有横断山脉夹峙着南北向的山谷,成为水汽北上的通道。现武都至玉树一线每年约输入南来水汽 600 亿立方米^[4]。横断山脉自古多少民族,吐蕃和南诏在唐代已有很高文化水平,在创造文化的同时不得不以破坏森林为代价,以致环境逐渐退化。建国以来,四川和云南的森林进一步减少。在 50~70 年代岷江上游森林覆盖率下降 10~15%,洪水增加 38.27 立方米/秒。岷江上游和阿坝州积雪减少,雪线上升。元代岷江上游的森林覆盖率估计达 50%,1980 年只剩下 18.8%。阿坝州有白河和黑河,是黄河上游的支流,古代流入黄河的水量比现在大,输送的水汽也比现在多。

云南怒江、澜沧江、金沙江流域自然灾害频仍,森林减少是主要原因;虽不是唯一原因。怒江边上的碧江县因滑坡毁坏县城,于 1986 年被迫撤消县建制。金沙江南岸禄劝县曾发生面积达 4.5 亿立方米的大滑坡,444 人死亡。金沙江每年流失土石约 1.25 亿吨。公元 1300~1979 年之间有 132 年发生洪灾。1970~1990 年之间因洪灾平均每年死亡 244 人。怒江和澜沧江的水资源流出国境,这是自然规律。但古代森林茂密,拦蓄降雨多,蒸腾和向北方输送的水汽多,流出国境的水可能比现在少。

我们不知道西藏东部的森林比古代减少了多少。有报导说,高原东南部林区目前的采伐量为生

长量的 2 倍,有的大工厂一年烧柴 3 万立方米,林芝附近川藏公路旁古柏树林已被破坏。森林减少的历史趋势仍在继续。总之,循横断山脉河谷北上的水汽一直在减少。

简短的结束语

青藏高原隆起、干旱区自动干旱化、森林减少是西北乃至华北干旱化的三大原因。其中森林减少有部分可逆性,特别有意义。我们要加倍努力造林,首先是在多雨地区,特别是在藏东、川西、云南横断山脉,以及伊犁河、额尔齐斯河造林。东北、西南、中南、东南造林,有可能解除华北旱象,使西北旱情有所缓和,并能增加金沙江、雅砻江、大渡河上游水源,对南水北调西线工程亦有益。

参考文献

- [1]祁明荣:《黄河源头考察文集》,青海人民出版社,1982,P171
- [2]中国科学院:《青海湖综合考察报告》,科学出版社,1979,P21
- [3]宋建军:“南水北调西线工程与西北地区生态环境改善”,《科技导报》,1995.6
- [4]见南京水文水资源研究所崔玉琴对华北和西北水汽输送的研究;中国科学院成都分院对三峡库区水汽输送的研究;Huang Fujun 和 Shen Rujin 对青藏高原水汽输送的研究。(责任编辑 蔡德诚)

(上接第 39 页)

素分开,分离因子可达 1 000 : 1 到 10 000 : 1 的高水平。

驱动堆与其它各种新型核能源设想的比较

当今只有自持式裂变堆电站是业已实现的能源。人类从中积累了大量的知识与经验,为驱动堆的建造提供了现实可行的依据。驱动堆使用的加速器技术已十分成熟,兰州近代物理所和北京高能所在自行建造加速器中也培养了一大批技术人才,积累了丰富的经验。所以驱动堆在我国进行预研与建设,在技术上、工艺上应是没有太大的困难。

驱动堆是干净、便宜的能源。另一种核能源是聚变核能源,它也是干净的能源,燃料来源(海水)不成问题。聚变研究中首先要解决的是得失相当的问题,也就是产生的电功率要等于自身的消耗。目前估计仅可达到得失相当的情况,而驱动堆的自身消耗仅 1/5。从原理上看,裂变能释放主要由裂片动能担当,而裂片在介质中射程很短,可立即变成介质热能。而聚变能释放主要由 14 兆电子伏中子担

当,中子能量在停阻时释放并给予介质,其过程要复杂得多。所以裂变堆的能量转换更直接,几乎立即变成介质的热能,少了很多停阻设备。

聚变能源研究,包括托克马克式的实验研究、重离子束的惯性约束研究和激光束的惯性约束研究等。此外还包括聚变反应可自持后如何将快中子能量变成热能并产生氦的聚变堆的设计等。近年来在聚变堆设计中考虑加入裂变材料的包层,以生产氦和转换次临界贫铀与钍为可用的裂变燃料,称为混合堆。而本文所建议的驱动堆则可直接用贫铀与钍作核燃料使用,从而省去了混合堆后处理等繁冗的工艺流程。当前,瑞典、韩国和意大利等国已对驱动堆进行了研究。日本的 OMEGA 方案集中研究快中子对锕系元素进行燃烧(裂变);法国则进行燃料循环的再处理工艺研究。在美国与瑞典科学家的指导下,挂靠到国际 ISTC 组织的近 200 名俄国科学家对驱动堆各部分进行研究。可以预计,20 世纪核科学的两朵鲜花:原子堆与加速器,在 21 世纪将结合成为人类谋福利的驱动堆。

(责任编辑 刘先曙)