

前 言

核能的发现和利用是人类应用能源的重大里程碑。核能的和平利用，对人类的生活和文明的发展有着非常重大的意义。就核能发电来说，已成为世界各国的政府和科学家们不能不考虑的问题。

根据世界各国能源资料来看，石油贮量仅能供世界各国应用数十年，煤的贮量也只能供给人类应用数百年。为了人类的存在和发展，人们不得不考虑寻找新的能源为人类服务，核能和平利用就是各国科学家们提供的已经具有实用性的能源。利用铀-235 裂变能发电，可相当于世界石油贮量所产生的能量，也就是说可供人类应用数十年，这种可控铀-235 裂变能发电，在应用技术上已经成熟。利用铀-238、钍-232 转变成钚-239 和铀-233 发电，则可供人类应用数千年，这种核裂变的实际应用技术，世界上核电先进国家，已有示范堆在运转。如果科学家们掌握了核聚变能发电的钥匙，这将为人类生活和文明点燃了不灭的长明灯火，海水中的重水，氘与氚，可能为人类提供上百亿年发电的一次能源。这个惊人的数字，可能与地球的寿命相当，提供了人类能源利用的美好前景，世界上科学家们正积极的探索核聚变能用来发电的金钥匙。

当然，事情并不那么简单，利用核能发电并不是一帆风顺的发展，世界上还有不少的人用惊恐的目光看着核电厂。他们记忆犹新，回忆着一颗钚弹，一颗铀弹在长崎、广岛上

空爆炸后的可怕景象；也曾看到核聚变型的氢弹爆炸试验的影响和比基尼的事故；也搬着手指列数着核电厂事故事例，美国三里岛事故、苏联切尔诺贝利事故所造成的财产、人员的损失……。因此不少的人很自然地想，为什么非要利用核能，我们这一代石油、煤炭都够用了，要不就开发太阳能吧，地热能也行，还有温差呀、风力啊、潮汐啊等等。对的，实际上人类中的科学家们对各种能源都在探索着利用的可能和试验，不过比较起来，可能除天然气外，核能是最经济的和比较安全的能源，可惜天然气的贮量在地球中太少了。恩格斯曾说过：人类向自然索取的一切，都要付出生命的代价，这句至理名言，并未被一些人所深思，并未真正认识到。他们想，越原始的办法越安全，如果是烧柴取暖做饭，那该多安全！果真是那样所想象的安全吗？不，不是，除了直接的危险以外，森林被砍伐消失会是怎样的结果？沙漠化、干旱给非洲大陆，对部分亚洲的地区所造成的灾难还轻吗！

回顾一下人类的文明发展史，如果说人类从动物群中分化出来，是由于使用工具解放了双手，站立了起来，从动物圈中走了出来；那么人类学会了用火，则使人类的生活，衣食住行，摆脱了动物的方式。火是多媚人的神圣之物啊！首先敢使用它的人被奉为神明，中国的燧人氏被树为神要早于神农氏、伏羲氏的。但是火同样是不曾被人那样顺服的使用，也没有摆脱作为武器的手段。早在战国的末期，就有过田单大摆火牛阵的以少胜多的战例，也有三国时的赤壁之战，蜀吴联合火烧曹军的战船，以火攻取胜大败曹军的战例；平时不慎使用火造成的火灾，每年因之损失的生命财产，恐怕比几十年核电厂所造成的财物、人员的损失要大得

多。但人们总离不开火，也总是想办法减少火灾事故，防止造成更大的损失。人类对核能发电可能带来的灾难和损失，也是在充分应用现代的知识和技术，千方百计的设法避免其事故的发生，并且已收到很好的效果。几十年发展核电的实践，通过大量的研究和观察，包括工厂和环境，职业人员和附近居民，从医学、生物学和卫生学，从实验室到现场多方面的调查研究结果，并与发展有关能源的利益和代价分析、比较，已有大量资料所证明，发展核电是属于安全性较高的工业，是最清洁的能源之一，是对人类身体健康影响最小的生产活动之一。

随着科学技术和生产发展，人类生活的需要，能源消耗量迅速的增加，于本世纪 50 年代出现了核能发电，仅几十年的时间，目前已有 300 多座核电站在运转，随着时间的推移，核电的比重越来越大，到 21 世纪，核电将成为主要的电能。

我国要实现四个现代化，需要大量的电力，除了继续发展火力和水力发电外，也必定要着手于建设核电，吸取国外发展核电的经验教训，跟上国际核能发电技术的步伐。

本书是想通过对核电站基本常识的介绍，使读者能够把核电站的利弊与其他工业、电站及有害因素相比较，作出正确的选择，以促进核能发电的发展，就象人类用火一样，使核能为人类服务，以推动人类社会的发展。

王瑞发

1990年5月北京

目 录

一、核能与核电	(1)
(一) 什么是核能	(1)
(二) 核能的释放	(3)
(三) 核电站与反应堆	(6)
(四) 核电站的发展趋势	(13)
二、核电站的安全与防护	(20)
(一) 核电站对健康的影响因素	(20)
(二) 防止放射性物质泄漏的三道屏障	(37)
(三) 核电站的纵深防护	(42)
(四) 核电站的三废处理	(48)
(五) 辐照燃料的安全贮存与运输	(55)
(六) 核电站的辐射监测	(58)
(七) 搞好保安全防护, 解除思想顾虑	(59)
三、核电站的放射卫生防护工作	(63)
(一) 经常性的放射卫生防护	(63)
(二) 事故情况下的放射卫生防护	(75)
四、核电站的医疗卫生工作	(93)
(一) 经常性的医疗卫生工作	(93)
(二) 核事故的医疗卫生工作	(94)
(三) 受照人员的抢救治疗方法	(99)
五、核辐射对健康的影响及其预防	(107)
(一) 辐射的种类	(107)
(二) 核辐射如何对人体发生作用	(110)

(三) 核辐射生物效应的类型·····	(114)
(四) 核辐射损伤的预防·····	(122)
六、核辐射与肿瘤及其预防·····	(126)
(一) 什么叫肿瘤·····	(126)
(二) 致癌因素·····	(127)
(三) 核辐射致肿瘤的估计·····	(134)
(四) 对癌症的预防·····	(138)
七、核辐射与遗传及其预防·····	(145)
(一) 遗传与遗传病·····	(145)
(二) 致遗传疾病的因素·····	(155)
(三) 核辐射遗传危害的估计与计算·····	(158)
(四) 遗传性疾病的预防与诊治·····	(163)
八、核能发电是最安全的事业之一·····	(172)
(一) 代价-利益分析, 核电是最安全的职业之一·····	(172)
(二) 从危险度分析, 核电是最安全的工业之一·····	(174)
(三) 核电对环境的污染很小·····	(176)
(四) 核辐射损伤患病率极低·····	(179)
(五) 要安全第一, 防护先行·····	(181)
九、结束语·····	(184)

一、核能与核电

(一) 什么是核能

大家都知道，我们周围的一切物质，包括有机物质和无机物质，当然也包括我们人类的本身，都是由一些不同的元素组成。已知在地球和它周围的大气层中，存在着 92 种天然元素（若包括人工合成的元素目前共有 107 种）。这些元素或单独存在或与其他不同元素构成化合物，就形成了世界上五光十色的各种物质，或为固体，或为液体，或以气体的形式存在着。例如：两个氢原子（气体）和一个氧原子（气体）化合成为一个水分子（液体），一个氯原子（气体）和一个钠原子化合成为一个盐分子（固体）。但是不管什么样的物质，也不管它以什么样的形态存在着，所有物质都是由各种元素的微小粒子——原子组成的。我们要谈的微观世界，指的就是原子世界。

当我们进入到原子的领域时，就可以发现，所有的原子都是由原子核和电子组成，原子核带正电荷，电子带负电荷，在正常情况下原子呈中性。电子按一定的轨道围绕原子核运转，就象行星围绕着恒星运行一样。每个原子实质上就象一个小小的太阳系，运行的电子，也称为电子云，电子云就形成了原子的壳层（图 1）。原子的直径是很小的，仅有 10^{-8} 厘米。原子的体积是由壳层所决定的，就象鸡蛋的大小

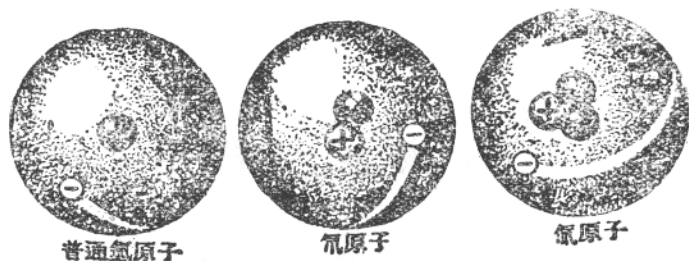


图1 原子壳示意图

是由外壳决定的一样。原子核的直径就更小了，仅是原子直径的万分之一，它的直径仅为 10^{-13} 厘米。用个形象的比喻来说：如将一个原子放大到 30 层的大楼那样大小时，原子核则相当于大楼餐厅桌子上的一个苹果。原子核虽小，但占整个原子重量的 99.9% 以上，假设将原子核集积成一个立方厘米的体积，其重量将有一亿吨以上，具有这样质量的物质在地球上是没有的，也许天体中的“黑洞”星体的质量能接近这种推算出来的质量，或者比推算的质量还要高呢。

原子核主要是由质子和中子组成，中子是不带电荷的粒子，质子是带正电荷的粒子，核内有几个质子，原子的壳层就有多少个电子，核内的质子数决定了原子的序数，如氢原子核内仅一个质子，所以氢的原子序数为 1，氦原子核内有 2 个质子，氦原子序数为 2，碳原子核内有 6 个质子，碳原子序数为 6，以此类推。质子和中子的质量都是电子的 1 846 倍，因此，原子的质量几乎都集中在核内。

以上我们对原子这个小小世界的简单结构作了粗略的介绍，下面我们将介绍什么是核能？

原子核的质量很大，也就必然蕴藏着巨大的能量。这首

先是伟大的科学家爱因斯坦，在质量与能量的关系上给出了一个数学定义，即：能量 = 质量 $\times$ 光速²。

而光速是每秒 30 万公里 (3×10^{10} 厘米/秒)。由这一公式可看出，当质量发生很小的变化，就必然发生非常巨大的能量变化。现在已经实验和计算而证实，某些元素的原子核发生裂变或聚变时，发生了质量亏损。所亏损质量的多少和所产生能量的大小成正比。

核能没有被利用前，人类所获得的能量可概括为化学能，例如柴草、石炭、石油、天然气的燃烧，黑色炸药、黄色炸药等的爆炸；生物的食物中能量的利用等，都是在化学能的范围。化学能的释放，只是分子的变化，所接触到的仅仅是原子的外壳中轨道电子的变化，是原子壳电子与电子之间的结合或分离。当原子核发生变化时，如分裂或聚合，则释放出来的能量比原子壳层的电子变化所放出的能量大数百万倍。因此科学家们粗略而概括的表示，化学燃烧只是利用了原子壳层中的一点点能量，裂变反应则仅利用了原子内部能量的千分之一，而聚变反应利用了原子内部能量的百分之一而已。然而，目前人类最高的知识能力，仅知道这一点，以为聚变能是释放能量的当前的最高手段，也是目前已知的最高知识，挂在人类头上的并给予地球上一切生命源泉的太阳，就是一个聚变反应堆。

(二) 核能的释放

我们要想利用原子核内的能量，就必须设法引起原子核发生变化，使核内的能量释放出来。目前所知，释放原子核内能量的办法有二，一是把某些质量大的核，称为可裂变

核，用中子打击后可发生分裂，称为核裂变（图2）。如铀-235，被一个外来的中子打入核内后，原子核就变得不稳定而分裂成为两个质量较小的核。核分裂的同时，产生2~3个中子，发射出辐射和释放出巨大的能量；如果每次裂变时，放出的中子其中至少有一个再打入另一个铀-235的核内，并引起新的核裂变，这样就能连续不断地反应下去，这就是所谓的链式裂变反应。在这种反应过程中，巨大的核能就连续不断地被释放出来。如果对核的这种链式裂变反应不加控制，物质的裂变能量将瞬时释放出来，如原子弹的爆炸，以及不以爆炸方式释放能量的反应堆的超临界事故等，称为无控或失控核裂变，见示意图（图3）。如果利用能吸收中子的物质，将过多的中子吸收掉，以保持较恒定的裂变过程，称为受控核裂变（图4）。各种类型的核反应堆就是利用可控核裂变，来完成其使命的。二是把某些轻的原子

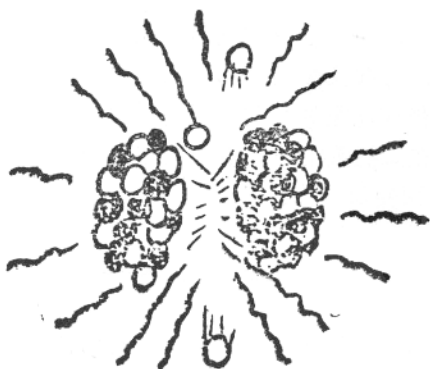


图2 铀原子核分裂

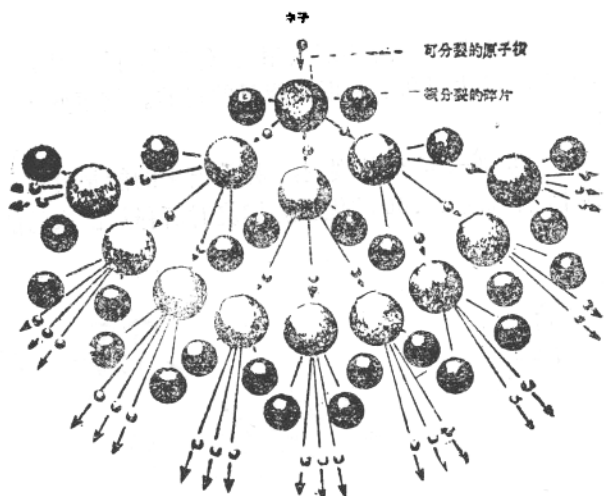


图 3 无控制的链式反应

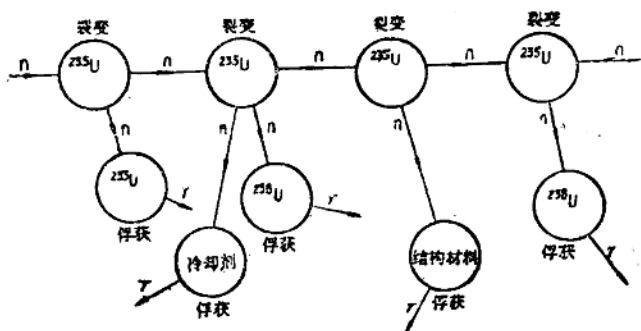


图 4 受控核裂变示意图

(图中也画出了裂变产生的中子被堆内的某些材料吸收掉的情况)

核，在非常高的温度下使其“熔化”在一起，合并成新的比较重的原子核，称为核聚变。核聚变比核裂变放出的能量更

大。同样核聚变也分为非控核聚变（如氢弹的爆炸），及可控核聚变，以达到和平利用其能量的目的。核聚变示意图见图5。

若一磅铀-235全部裂变，释放出来的能量可以相当于6 000桶石油或1 000吨优质煤燃烧时所释放出来的能量。

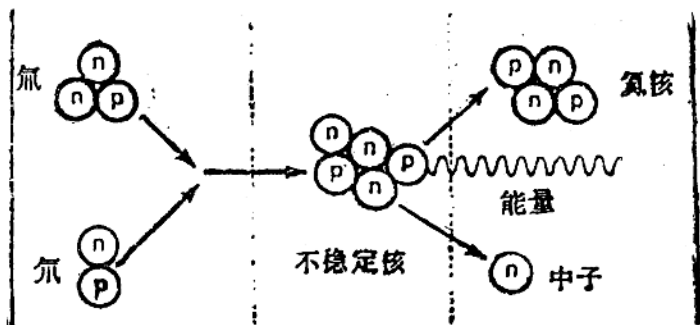


图5 核聚变示意图

当氢的两种重同位素——氘和氚——聚合以后，就形成了一个不稳定的核。这个核放出能量和一个中子，变成一个稳定的氦核。除此以外，还存在其它几种类型的轻核聚变反应，它们也是有很大潜力的（n代表中子，P代表质子）

（三）核电站与反应堆

什么是核电站，核电站就是利用原子核裂变反应时所放出来的能量发电。核电站的反应堆相当于火电站的锅炉，把水加热成蒸气推动涡轮机而产生电能，当然核电站的反应堆要比火电站的锅炉复杂得多，工艺技术要求高得多，但两者的作用是相近的。

利用核裂变时产生的能发电，当今在技术上已经成熟，并已成为世界上的常规能源。核裂变能发电，由于使用的原料不同而分为两类：一类是用 2~3% 的低浓铀-235、铀-233 及未浓缩的天然铀作为燃料发电。另一类是使用可转化的铀-238 和钍-232 作为核电站的燃料，后者称为增殖堆。

利用低浓缩铀-235 等作燃料发电，由于冷却剂的不同，而有不同的堆型。最普通的冷却剂是使用轻水，即普通的水作冷却剂，称为水冷堆。这种堆型由于水冷却的方式不同，而又分为沸水堆（BWR）及压水堆（PWR）。沸水堆顾名思义，就是水冷却剂直接在堆中加热到沸腾，然后将多余的水蒸汽分离掉后直接送到汽轮机去发电（图 6）。压水堆则是在高压下使水保持在不会沸腾的状态，而在反应堆外面有一套蒸气发生器，通过蒸气发生器把一次冷却剂中的热量转移到二回路的水中去，二回路的水流在较低的压力下立即沸腾，产生蒸汽去驱动汽轮机转动发电，目前世界上的核电站有一半是采用压水堆型（图 7）。

使用铀-233 裂变产生能发电有其优越性，因为铀-233 来源于钍，钍的储量多于铀的储量，也是一个重要能源。使用铀-233 作为燃料的为高温气冷堆（HIGR）堆型之一，就是高温、高压循环的气流来冷却反应堆。使用的气体通常为氦气。高温气冷堆发电的示意图见图 8。

使用天然铀作为燃料的反应堆的冷却剂，一般是重水或气体，使用重水的堆称为重水堆（HWR）（图 9）。气体冷却剂尚可用二氧化碳。

此外，还可使用液态金属（通常是钠或钠、钾混合物）以及熔盐等流体等作为反应堆的冷却剂。

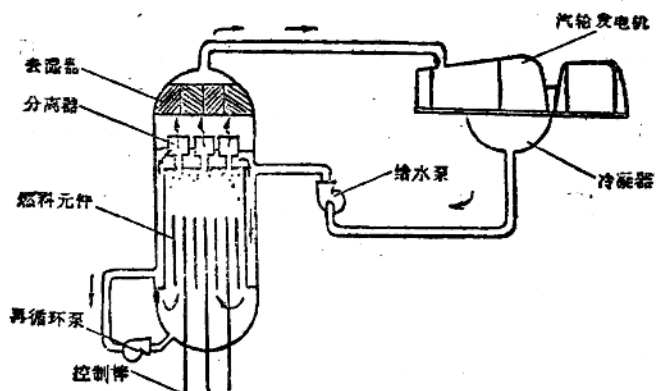


图 6 沸水堆发电原理

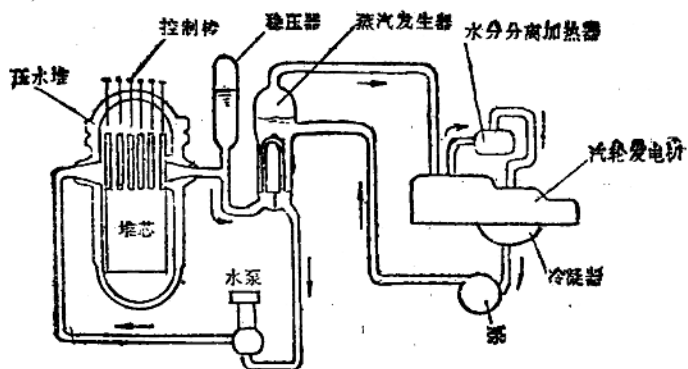


图 7 压水堆发电原理

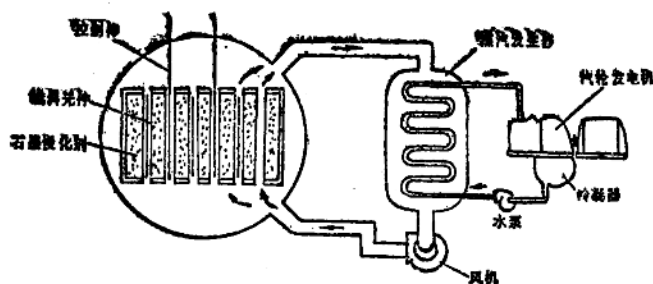


图 8 高温石墨气冷堆发电原理

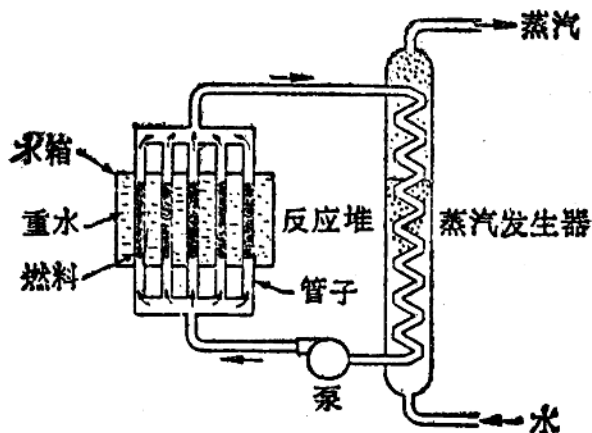


图 9 重水反应堆的核蒸汽供应系统简图

增殖堆的燃料使用“可转换”的同位素，这种同位素即铀-238 和钍-232，前者在中子的作用下可转换成裂变同位素钚-239，后者在中子的作用下可转换成新的裂变同位素铀-233。

素铀-233，这样一来就为人类丰富了能源，正如我们在前言中曾说过的，增殖堆发电可为人类服务数千年。增殖堆的原理就是每消耗一个核燃料的原子核，能够创造出一个以上的可分裂的核，铀-238 转换示意图见图 10。钚-239 转换示意图见图 11。

增殖堆可分为两种，一为快中子增殖堆，一为热中子增殖堆，快中子增殖堆的优点比热中子增殖堆的优点是有更大的比例的中子被可转换核所吸收，而创造出更多的可裂变核，快中子增殖堆不能用水作冷却剂，因为水能慢化中子，甚至将中子吸收掉，因此，快中子增殖就必须使用不易减缓中子的材料作冷却剂，如液态钠、氦气体等。当然热中子增殖堆也有其优点，如轻水增殖堆 (LWBR)，可利用普通的压水堆，只要把堆芯更换一下就变成增殖堆了，这有着巨大的经济价值，同时又可以把将来过时的压水堆更新成新的

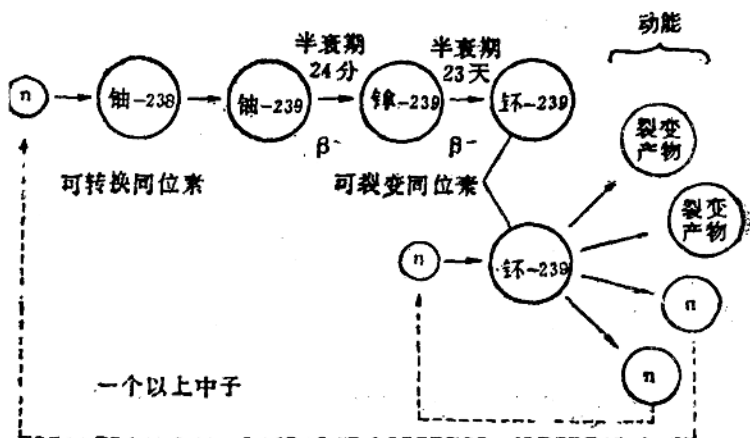


图10 铀的增殖循环示意图

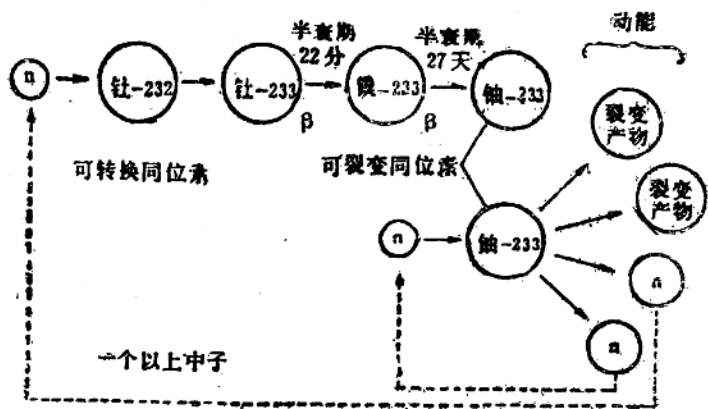


图11 钍增殖循环示意图

增殖堆。以熔盐作冷却剂的增殖反应堆称熔盐增殖堆 (M-SBR)。轻水增殖堆和熔盐增殖堆都可以用铀-233作燃料，以钍-232作为增殖更多燃料的可转换物质，这种能利用钍来扩大核燃料能源的热 (中子) 增殖堆，将成为消耗铀燃料的快 (中子) 增殖堆的补充。

钠冷快 (中子) 增殖堆，也叫液态金属冷却快中子堆 (LMFBR)，将成为典型的快 (中子) 增殖堆发电站的心脏，钠冷快 (中子) 增殖堆发电的示意图见图12。

核裂变反应发电，最终都是把蒸气导入汽轮发电系统，推动汽轮机发电。

利用核聚变产生的能量发电，目前还在研究阶段。但是聚变核电站如获成功，将给人类带来取之不尽、用之不竭的能源。因聚变站是燃烧海洋中的重氢，为此，将会给人类带来完全崭新的电能时代。等离子体的能量可以直接转变为动力，而不必走陈旧的热发电装置的老路，大大地提高效率，

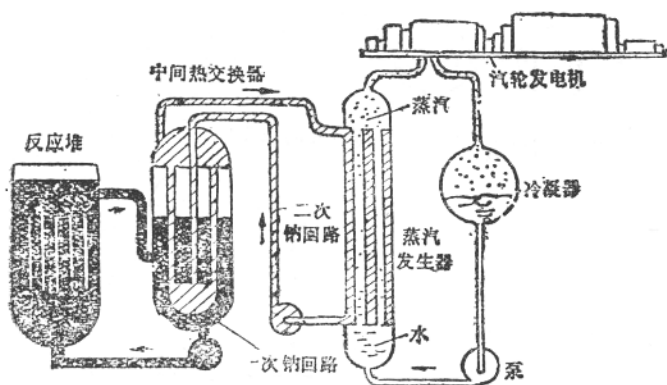


图12 用钠作载热剂的快中子堆

核废料和热污染问题也可得到减少，并达到可以控制的程度。氘-氚聚变反应发电的设想见图13。

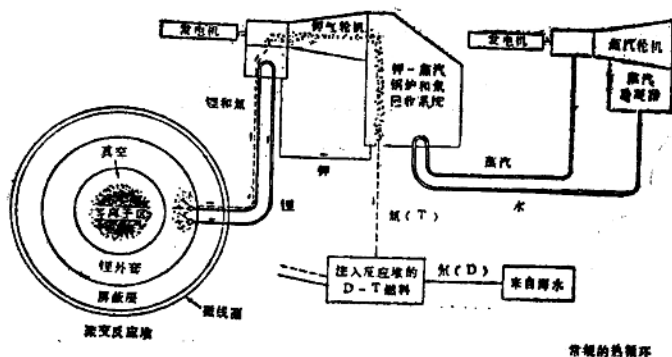


图13 氘-氚聚变反应发电设想图