

第一章 核电站发展的概况

§1. 世界核电站发展概述

随着国民经济的发展,对能源的需求量日益增加,当前工业发达国家的能源消耗是以油气为主的,而我国却是以煤为主;世界上油气、煤资源储藏量有限,加之,开采、运输费用均较大,环境污染严重,它们又是化学工业的重要原料,烧掉可惜,因此世界各国都很重视核能的开发。

核能是目前世界上一种比较理想的能源。它在世界能源结构中的地位和作用越来越显得重要了,核能在能源结构中的比例也在逐年提高。根据国际原子能机构公布的数字,截至1990年年底,全世界运行中的核反应堆共424座,总装机容量达32.45万兆瓦。全世界核发电量达1.9亿多千瓦时,相当于1958年的世界总发电量。

一个时期以来,世界核电的发展出现了以下五大趋势:

- 一、能源资源,特别是石油资源相对缺乏的工业化国家,核电建设速度较快。
- 二、核电站的建设正在向第三世界和其他国家扩展。
- 三、在世界电力工业中,核电的发展速度是最快的。
- 四、高科技成果不断向核电事业渗透。
- 五、核安全性能将更加可靠。据国

国际原子能机构预测,世界核发电能力将由1989年的31.827万兆瓦增长到1995年的38.5-40万兆瓦和2000年的44.4-48.5万兆瓦。

§2 核电站的评价

在切尔诺贝利核电站事故五周年之际,著名能源问题专家、英国纽卡索大学的伊安·费尔斯教授认为,核能必将不可避免地取代煤和天然气,以满足人类日益增长的能源需求。他说,今天,核能已占世界总发电量的六分之一。

一种发电方式能否得到发展取决于其资源、安全性和经济性,试从这几方面对核电站作一简单分析。

1. 核燃料资源:

实际可用的裂变燃料有三种同位素:铀-235,钚-239和铀-233。自然界中存在的天然铀是铀-235和铀-238的混合物。铀-235的含量为0.71%,其余为铀-238。铀-235在自然界存在自发裂变,钚-239、铀-233等也易于裂变,在自然界中不存在,需人工生产。

在核电站中,非裂变元素铀-238和钍-232可以转换成裂变

铀-235 和铀-238。在自然界中，铀-238 和钍-232 的含量比铀-235 大千百倍，这样，核燃料的储量就能长期满足核能发电的需求。

2. 安全性；

发展核电人们最担心的是它的安全问题。一个是核电站是否会像原子弹那样爆炸，另一个是强放射性裂变产物对生物环境的污染。

我们说核电站绝不可能像原子弹那样爆炸。原子弹是进行不可控的链式裂变反应，核电站是进行可控的链式裂变反应。在控制方面核电站有多种控制手段，使中子的利用，裂变能量的释放，有效地控制裂变反应的进行。原子弹它是高浓度（>93%）裂变物质（几乎是纯铀-235或钚-239）和复杂精密的引爆系统所组成。当引爆装置点火起爆后，弹内裂变物质被爆炸力迅猛压缩到一起，大大超过了临界体积，于是瞬时形成剧烈的不受控制的链式裂变反应，巨大核能在瞬间内释放出来发生核爆炸。核电站反应堆的结构和特性与原子弹完全不同。发电用的反应堆大都采用低浓度裂变物质作燃料，这些核燃料都分散布置在反应堆内，在任何情况下，都不可能像原子弹那样聚集到一起发生核爆炸。再在反应堆的设计上总考虑其自稳定特性，即当核能释放太快，堆芯温度上升太高时，链式裂变反应自行减弱乃至停止。

核裂变时既产生巨大的能量，伴随有大量的放射性裂变产物的产生。

因此所有國家都制訂了严格的放射性防护安全标准,对个人容许接受的放射性剂量和排放的废气、废液的放射性浓度的允许值,也都有严格的规定。按照当前的技术水平,完全可以保证核电站在正常运行下成为相当安全的能源。无论是运行人员所接受的放射性剂量,或向环境排放的放射性废物,均可做到远低于安全标准的规定的限度,并且受到严密的监测和控制。

公众关心的我国各种核设施的环境质量,在“中国核工业30年质量评价”中已有了科学的结论。我国核工业系统30多年来認真执行环境保护政策,核环境安全始终保持良好水平。

“中国核工业30年质量评价”是由近600名科技工作者化8年的时间对42个核设施长期研究的结果,评价范围总面积达60万平方公里。“评价”中说,我国所有核设施周围居民每年接受的最大辐射剂量,均低于国家规定的剂量限值,其中绝大部分不到天然辐射对居民产生的年平均剂量的十分之一。整个核工业对各核设施80公里范围内的居民(总数约1.5亿人)所产生的年集体剂量,相当于天然辐射对这些居民产生的年集体剂量的二万分之一。与自然存在的和人为活动产生的其他危害相比,核工业产生的危害可以忽略不计。据悉,我国第一座核电站——秦山核电站将在年内投料运行。到公元2000年,我国大陆建成的核电站总装机容量将达到600万

千毫。以30年评价为基础,对到2000年时我国辐射环境质量进行预测,各核设施对80公里范围内的居民产生的年集体剂量总和约为天然辐射在同一范围内产生的年集体剂量的万分之一。这表明核能确实是一种比较清洁的能源。

在核电站设计中,严格考虑防止放射性物质泄漏和扩散。在压水堆设计中有三道屏障:燃料包壳,压力壳,安全壳来防止这些放射性产物外逸,确保不污染环境,不危害人民。

讲起核电站的安全性问题,人们总是会想到世界上次核电站事故的报导。一次为1979年3月28日美国三哩岛核电站事故,由于阀门失灵和操作失误,造成蒸发器的主给水泵故障使一回路失去冷却水,造成严重的失水事故。结果是90%燃料棒受损,部分燃料熔化,元件烧毁,放射性物质泄漏全厂房,少量放射性气体从烟囱排入大气。由于判断错误,以为放射性会大量逸出,当地政府曾劝告居民撤离,因而造成心理恐慌和财产损失。这次事故在美国引起了轩然大波,美国、欧洲和日本到处爆发了反核示威。事实上,这次事故没有一个人死亡,只有4名工作人员受到轻微过量的 γ 辐射。对当地空气、土壤和食品进行抽样检查,都未发现明显的异常。这次事故的危害用煤矿采掘引起一次瓦斯爆炸相比要小得多,相对更说明核电站安全性能好。

另一次是 1986 年 4 月 26 日 苏联切尔诺贝利核电站发生了迄今世界核电史上最严重的一次事故。事故发生在一起正常停堆前进行的一次“电气”试验过程中。试验目的是为了检验一下在全厂断电下用汽轮机惯性发电短期带动一下堆芯应急冷却泵的可能性。试验过程中运行人员错误地把反应堆自动停止保护装置切除并严重地违反操作规程终于引起功率失控，堆芯熔毁，石墨砌体燃烧，大量放射性物质外泄的严重事故。造成核电站工作人员伤亡，后果比较严重。

这二次核电事故不足以说明核电站的不安全性，引起二次事故的主要原因还是人的因素^{和设备的故障}，人的误操作带来的后果。所以今后更要加强运行人员的安全教育，严格操作规程的管理，同时为了核安全性能更加可靠，核科学家和工程技术人员对核电站的安全性能作了全面的改进和更科学的设计。

3. 经济性；

反应堆的结构比蒸汽锅炉复杂，核电站的造价比火电站高，一次性投资高。核燃料的能量很大，消耗的燃料极少，一座 100 万千瓦的压水堆核电站一年只需要铀-235 新核燃料一吨左右，一次总装量为 2~3 吨，可用 2~3 年而一座同功率的燃煤电站，一年煤耗量则要 300 万吨左右，而且不能一次装料，却要依靠源源不断的列车来给它运输。相比之下可以大大节省燃料的运输费用和堆放燃料的场地。这样就显得核燃料的价格相

应便宜得多了,从而也使核发电的成率比火力发电的成率约可低 30~50%。~~我国不仅储量有限,而且分布集中在华北,不仅煤的运输量十分繁重,煤的污染也很严重~~

§3 我国需要发展核电,也有能力有条件发展核电。

我国常规能源虽然比较丰富,水力资源占世界首位,煤炭储量占世界第三位,但人均资源不多,而且分布很不均匀。煤炭资源 60% 集中在华北、西北。水力资源 70% 又在西南。而人口众多,工业发达的沿海地区,能源资源十分紧张。

此外,在我国能源消费结构中,煤炭占 70%,比重很大。若要进一步扩大煤炭的作用,对交通运输会带来极大的困难,而^{煤的污染也很严重}对环境也将造成严重的污染。核

石油气也可作为能源,但它是重要的化工原料,缺乏之

惜。我国应大力发展核电,核能在我国能源结构中应占较大的比重,其地位也会显得极为重要。

先大力发展水电,但水力资源有限。由于能源消耗增长很快,因此经过一段时间以后,随着水能资源开发程度的增加,水电在能源结构中的比重将日渐下降。

我国有一套完整的生产、科研、核监督的管理机构,1984年10月我国成立国家核安全局,作为政府的核安全监督机构,其基本职能是依照我国的法规、法律对民用核设施进行安全审查和监督。同时组织专家进行核安全研究,并在广泛研究国外核安全法规的基础上,参照国际原子能机构的核安全法规,结合国情制定和完善我国的与^{先进}国际水平相当的核安全法规体系。

我国已建立了从地质勘探、采矿到元件加工、后处理等较完整的核燃料循环体系,探明有一定储量的铀矿资源,可为核电发展提供充足的核燃料。

核工业发展已有卅年的历史,形成了较完整核工业体系,已建成多种类型的核反应堆,积累140堆年的安全管理与运行经验,拥有一批专业齐全的技术人才,具有研究、设计、制造核电站设备的能力。~~目前正在建造自行设计的300兆瓦秦山核电站,已投入运行。~~广东大亚湾核电站明年可投入运行。
并网发电

第二章 核反应唯理论基础

§1. 裂变链式反应

一. 原子核的组成. 质子与中子

1911年卢瑟福用 α 粒子轰击金属薄片的散射实验,证实了原子是有核的.这个核的线度至少要比原子的线度小四个量级,大约为 10^{-12} 厘米或更小些.原子的正电荷及几乎全部^{原子}质量都集中在原子核之中.

原子核由 Z 个质子和 N 个中子组成.中子与质子通称为核子,原子核带有 Z 个单位正电荷, Z 就是该原子核所属元素的原子序数. $Z+N=A$, A 为核内的核子数称为该核的质量数. Z, N, A 皆为正整数.

实验证明,质子和中子的质量分别为,

$$M_p = 1.00727 \text{ 原子质量单位} = 1.672648 \times 10^{-27} \text{ 千克}$$

$$M_n = 1.008665 \text{ 原子质量单位} = 1.674954 \times 10^{-27} \text{ 千克}$$

二. 结合能与原子核的稳定性

原子核的相对稳定性可以用结合能的概念加以解释,反应堆所发出的能量,归根结蒂是由原子核结合能提供的.

实验表明, Z 个质子和 $(A-Z)$ 个中子结合而成的核 ${}_Z^A X$,其质量 M_A 总比 Z 个质子及 $(A-Z)$ 个中子的质量之和为小.令

$$\Delta M = Z M_p + (A - Z) M_n - M_A \quad (2.1)$$

则恒有

$$\Delta M > 0 \quad (2.2)$$

该差值 ΔM 称为该核的质量亏损。

式 (2.1) 也可以用中性原子的质量来表示。式 (2.1) 可改写为

$$\Delta M = Z (M_p + m_e) + (A - Z) M_n - (M_A + Z m_e) \quad (2.3)$$

式中 m_e 为电子的静止质量。若电子结合到原子中的质量亏损可以忽略不计，

则 $M_p + m_e$ 与氢原子质量 M_H 近似相等， $M_A + Z m_e$ 与所讨论的核的中性原子质量 M 近似相等，有

$$\Delta M \approx Z M_H + (A - Z) M_n - M \quad (2.4)$$

利用上式，即可相当精确地通过中性原子质量 M ，计算相应原子核的质量亏损。

例如一个质子与一个中子结合成氘核。氘的原子质量为 $M_D = 2.014102$ 原子质量单位，氢 (^1H) 的原子质量为 $M_H = 1.007825$ 原子质量单位，中子质量 $M_n = 1.008665$ 原子质量单位。按式 (2.4)，注意 $Z=1$ ， $A=2$ ，有

$$\Delta M \approx 1.007825 + 1.008665 - 2.014102 = 0.002388 \text{ (原子质量单位)}$$

爱因斯坦在狭义相对论中提出的质量与能量相当的著名关系式为

$$E = MC^2 \quad (2.5)$$

式中 c 为光速, $c = 2.99792458 \times 10^{10}$ 厘米/秒。因此, 1 原子单位的质量与 931.5016 兆电子伏 (MeV) 的能量相当。式 (2.2) 表示: 当核子结合成原子核时, 质量总要亏损, 亦即在结合过程中有

$$\Delta E = \Delta M c^2 \quad (2.6)$$

的能量从该原子核系统中释放出来。用能量单位来表示的某原子核的质量亏损值 (2.6) 就等于各核子结合成该原子核时所释放出来的能量。反之, 要把原子核中所有核子完全分开, 就须提供这么多的能量。这个能量称为该原子核的结合能。这样,

$$\Delta E = [Z M_p + (A - Z) M_n - M_A] c^2 \quad (2.7)$$

或

$$\Delta E \approx [Z M_H + (A - Z) M_n - M] c^2 \quad (2.8)$$

大量实验证明指出上述结论是正确的。例如按式 (2.6) 计算所得的氦核结合能为 $0.002388 \times 931.5016 \approx 2.224$ (兆电子伏), 实验又证明, 当质子与中子结合成氦核时要放出能量为 2.231 ± 0.007 兆电子伏的 γ 射线, 该能量值在误差范围内与计算值相等。这个结果表明, 要使氦核的中子与质子完全分开, 至少要对它提供 2.231 兆电子伏的能量。

由此可见, 结合能是使核子保持在 10^{-13} 厘米数量级内组成一个稳定核体系的必要因素。因为存在结合能, 原子核内的核子便不会自动分解开来。

一个铀-235核裂变放出的能量相当 $E = 200 \text{ MeV}$ ^{实验证明} 利用上述质能关系式计算这个值的计称; 铀-235核

裂变前的质量为:

1个铀-235核	235.14 (原子质量单位)
1个中子	1.009
合计	236.133

裂变后的质量为:

1个碎片	94.945
另一个碎片	138.955
两个中子	2.018
合计	235.918

裂变前后的质量亏损为

它们的能量分配为:

裂变碎片的动能	167 MeV
裂变放出射线能量	5 MeV
" " 中子能量	5 MeV
" " β 粒子能量	7 MeV
" 产物产生的 γ 射线能量	5 MeV
" " " 中微子能量	11 MeV

$$\Delta M = 236.133 - 235.918 = 0.215$$

根据质能转化式, 可以求出, 一个铀-235核裂变放出的能量为

$$E = mc^2 = 0.215 \times (3 \times 10^{10})^2 \times \frac{1}{6.023 \times 10^{23}} = 3.237 \times 10^{-4} \text{ 尔格}$$

因为 1 尔格 = 6.238×10^5 兆电子伏特 (MeV), 所以上式也可写成

$$E = 3.237 \times 10^{-4} \times 6.238 \times 10^5 \approx 200 \text{ MeV}$$

现在我们来计算一克铀-235核裂变释放的能量, 根据阿伏伽德罗常数, 1 克铀-235 的原子数为

$$\frac{6.023 \times 10^{23}}{235.14} = 2.562 \times 10^{21}$$

因此, 1 克铀-235 核全部裂变时, 释放出的总能量有

$$E = 200 \times 2.562 \times 10^{21} = 5.11 \times 10^{23} \text{ MeV}$$

它相当于 1.9×10^7 千卡热量。而燃烧 1 克标准煤平均只能得到 7 千卡热量。可见, 铀-235 核裂变释放出的能量比燃烧煤大 270 万倍。

原子核内一个核子的平均结合能, 称为比结合能 f 。按式 (2.8)

$$f = \frac{\Delta E}{A} \approx \left[M_n - \frac{Z}{A} (M_n - M_H) - \frac{M}{A} \right] c^2 \quad (2.9)$$

比结合能随质量数变化的曲线见图。曲线表明, f 先随 A 增加很快, 而且有几个 A 较小的核素, 它们的比结合能远在光滑曲线之外, 从而出现一系列的极大值。这些极大值与中子数 N 和质子数 Z 皆为偶数的偶-偶核 (如 ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$ 等

核) 相对应。从 A 为 50-60 开始, 曲线随 A 下降, 且比较平稳, 在 A 从 40 到 120 之间, f 基本上为一个常数, 约等于 8.5 兆电子伏; 在 $A > 120$ 后, f 逐渐下降即 7.5 兆电子伏左右。

三. 裂变反应的液滴模型,

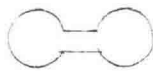
利用浅显的液滴模型来解释铀核的分裂, 水滴是由许多水分子紧密排列而成的, 它们之间几乎没有一莫空隙, 分子之间的吸引力把它们凝聚在一起, 使水滴成圆球状。如果水珠受到外力作用, 分子就扰动起来, 圆球状就变成哑铃状。外力消失后, 水珠就恢复原来的形状; 如果作用的外力很大, 超过液滴本身的凝聚力, 水珠最终就裂成两滴水珠。



液滴



长椭圆状



哑铃状



分成两粒

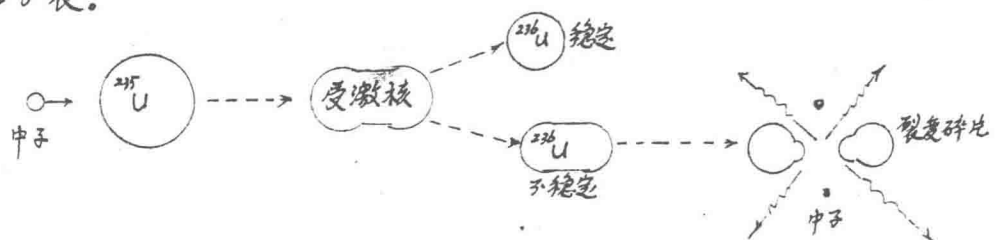


形成两液滴

铀核裂变的情形与此类似。铀-235 核内包含着许多质子和中子, 这些核子在核中按一定的次序排列, 它们之间存在着一种相互作用力, 即核力。这种核力使所有核子互相吸引在一起, 起着“凝聚作用”。核力是很强的, 但它的作用范围却很小, 力程大约为 1×10^{-13} 厘米, 超过这个距离, 核力就不起作用。

除了核力之外,因为质子带正电,核内质子之间还存在着一种互相排斥的力叫做库仑力,它的力程比较大,库仑力的大小与核内质子数有关,铀-235核内质子较多,斥力也较大.当然在一般情况下,库仑斥力总是比核力小,总是核力的“数量”起主导作用.

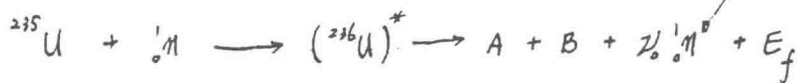
如果用中子轰击铀-235核,情形就会有变化.铀-235核吸收一个中子后,首先形成复合核铀-236.因为入射中子本身有一定的动能,铀核吸收中子组成新的结合体 ^{236}U 时也会放出一定的结合能,这两部分额外增加的能量,就引起复合核剧烈扰动,出现一连串的振荡,产生较大的变形.最后,这个变形超过一定的限度,铀核就不再恢复原来的形状.这时,库仑斥力突破核力“凝聚作用”,铀核开始分裂.



^{235}U 的核裂变过程.

裂变反应的物理意义: 当中子击中靶核, 完全和靶核结合而形成一个激发态的“复合核”, 此“复合核”经过一个短暂的时间 (约 10^{-14} 秒) 分裂成两个中等质量的原子核 (称之为碎片), 释放出大量的核能 E_f , 并放出若干个 (平均为 2.1 个) 新中子, 这种反应称核裂变反应, 并以 (n, f) 表示之.

其裂变反应过程可用下式表达。



式中 A, B 代表裂变的产物, ν 代表裂变产生的中子平均数 (^{235}U $\nu=2.43$)

E_f 代表每次裂变释放的能量 $^{236}\text{U}^*$ 代表激发态 ^{236}U 复合核。

A, B 为裂变碎片其特点: 碎片有 90 多种之多, 具有放射性, 通过 β 衰变成为稳定的核, 有些碎片仍对反应堆内中子的吸收损失, 对链式反应不利。

利用原子核的液滴模型以及一些实验结果, 可以得到结合能的半经验公式对 $f-A$ 曲线作出一定的解释。

$$\Delta E = 14.0 A - 13.0 A^{2/3} - 19.3 \frac{(A - 2Z)^2}{A} - 0.585 \frac{Z^2}{A^{1/2}} \pm 33 A^{-3/4}$$

式中第一项为吸引能, 第二项为表面张力能, 第三项为核成分效应, 第四项为排斥能, 最后一项为自旋效应, 偶-偶核取正, 奇-奇核取负, 其它核取零。

释放出的中子, 具有不同的能量, 各种不同能量的中子占有不同的比例或份额, 形成一个分布, 这个能量分布称为裂变中子能谱。对于 ^{235}U 其裂变谱用下列经验公式表达:

$$f(E) = 2 \times 0.775 \left(\frac{0.75E}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-0.775E}$$

E : MeV 作单位, 表示裂变中子的能量, $f(E)\Delta E$ 表示中子能量在 E 与 $E+\Delta E$ 间隔内的裂变中子数。

核裂反应的另一个重要结果是生成裂变碎片和放出中子。其绝大多数裂变成两个碎片。裂变碎片的质量—产额曲线如图

从图中可以看出，引起裂变的中子能量不同，曲线的形状也是不同的。图中给出14兆电子伏的中子和热中子引起铀-235核裂变时的裂变碎片质量—产额曲线。目前已发现有60种以上的裂变碎片，这说明铀-235核差不多要以30种以上的不同途径分裂。裂变碎片质量数的范围大约分裂在72到158之间。从曲线显然可以看出，裂变方式一般不是对称的。对称裂变（两个碎片的质量相等，如 $A=118$ ）的产额只有0.01%；非对称裂变（如两个碎片的质量分别为95和139）的最大产额为6%。

裂变^{碎片}产物大部分是不稳定的，往往要经过衰变，有的要对中子的吸收才能趋于稳定，这种裂

$$20 \times 20 = 400$$