

原子核 动力装置

Д. И. 沃斯科鲍尼克著

国防工业出版社

內容簡介

本書是為沒有受過專業教育的廣大讀者寫的，因此相當詳盡的闡述了原子核動力技術的物理基礎、生產工業的原子核反應堆的構造原理以及核動力的維護特點。

書中介紹了正在供電的蘇聯科學院原子能發電站以及蘇聯與英美資本主義國家書刊上登載的作為各種用途的原子核反應堆的設計。

書中還提供了相當多的篇幅敘述了原子核反應堆需用的材料及特種設備。

本書可供對原子核動力技術有興趣的廣大讀者閱讀，同時也可供有關專業的教師、學生及工程技術人員參考之用。

Д. И. ВОСКОВОЙНИК

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Государственное Издательство

Технико-Теоретической Литературы

Москва 1956

本書系根據蘇聯國防工業出版社

一九五六年俄文版譯出

原子核動力裝置

[蘇] 沃斯科鮑尼克著

嚴克勤、叶宗敬、范志坤 譯

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 號
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

*

787×1092 耗 $1/32 \cdot 4^{17}/8$ 印張·103,000 字

一九五八年九月第一版

一九五八年九月北京第一次印刷

印數：1—2,000 冊 定價：(10)0.76 元

目 录

原序	5
第一章 原子核动力技术的物理基础	7
§1 原子核的构造	7
§2 放射性	11
§3 核反应	15
§4 核分裂	27
§5 核分裂的鏈式反应	35
第二章 原子核反应堆	40
§1 反应堆的类型	40
§2 中子倍增系数	43
§3 临界体积	47
§4 功率的调节	48
§5 核燃料的燃烧与再生	52
§6 分裂能的转化	60
§7 热量的导出	63
§8 对辐射的防护	67
第三章 原子核反应堆的材料和设备	71
§1 对材料的要求	71
§2 初级核燃料的获得	83
§3 次级核燃料的获得	91
§4 控制反应堆功率的仪器	93
§5 测量剂量的仪表	100
§6 水泵及热交换器	102
§7 接触放射性材料的工作设备	106

第四章 原子核动力装置	110
§1 以水作载热剂的动力装置	110
§2 以气体作载热剂的动力装置	118
§3 以液态金属作载热剂的动力装置	121
§4 直接得到蒸汽的动力装置	124
§5 以液态金属作燃料的反应堆	127
§6 运输用核动力装置	132
§7 核动力装置中废料的利用与清除	143
§8 核动力技术的经济意义与资源	150

原子核动力装置

Д. И. 沃斯科鲍尼克著

严克勤、叶宗敦、范志坤译

国防工业出版社

內容簡介

本書是為沒有受過專業教育的廣大讀者寫的，因此相當詳盡的闡述了原子核動力技術的物理基礎、生產工業的原子核反應堆的構造原理以及核動力的維護特點。

書中介紹了正在供電的蘇聯科學院原子能發電站以及蘇聯與英美資本主義國家書刊上登載的作為各種用途的原子核反應堆的設計。

書中還提供了相當多的篇幅敘述了原子核反應堆需用的材料及特種設備。

本書可供對原子核動力技術有興趣的廣大讀者閱讀，同時也可供有關專業的教師、學生及工程技術人員參考之用。

Д. И. ВОСКОВОЙНИК

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Государственное Издательство

Технико-Теоретической Литературы

Москва 1956

本書系根據蘇聯國防工業出版社

一九五六年俄文版譯出

原子核動力裝置

[蘇] 沃斯科鮑尼克著

嚴克勤、叶宗敬、范志坤 譯

*

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 號
機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

*

787×1092 耗 $1/32 \cdot 4^{1/8}$ 印張·103,000 字

一九五八年九月第一版

一九五八年九月北京第一次印刷

印數：1—2,000 冊 定價：(10)0.76 元

目 录

原序	5
第一章 原子核动力技术的物理基础	7
§1 原子核的构造	7
§2 放射性	11
§3 核反应	15
§4 核分裂	27
§5 核分裂的鏈式反应	35
第二章 原子核反应堆	40
§1 反应堆的类型	40
§2 中子倍增系数	43
§3 临界体积	47
§4 功率的调节	48
§5 核燃料的燃烧与再生	52
§6 分裂能的转化	60
§7 热量的导出	63
§8 对辐射的防护	67
第三章 原子核反应堆的材料和设备	71
§1 对材料的要求	71
§2 初级核燃料的获得	83
§3 次级核燃料的获得	91
§4 控制反应堆功率的仪器	93
§5 测量剂量的仪表	100
§6 水泵及热交换器	102
§7 接触放射性材料的工作设备	106

第四章 原子核动力装置	110
§1 以水作载热剂的动力装置	110
§2 以气体作载热剂的动力装置	118
§3 以液态金属作载热剂的动力装置	121
§4 直接得到蒸汽的动力装置	124
§5 以液态金属作燃料的反应堆	127
§6 运输用核动力装置	132
§7 核动力装置中废料的利用与清除	143
§8 核动力技术的经济意义与资源	150

原 序

1954年6月27日世界上第一座有效功率为5000千瓦的核能工业发电站在苏联开始供电了。这个日子有权被認為是一个新的动力技术领域——原子核动力技术的誕生日。除了从前已采用的机械能、热能、化学能、电能以及其它种类的能以外，現在又增加了一种新的能——原子核轉化能。

人类一直在为扩大能源而进行斗争。这是很自然的，因为凡是有人生活与劳动的地方就需要能。工业、运输业、农业都需要能。能可以給我們亮光，使我們的住宅温暖。一个国家的能源决定她的經濟能力。同时，电能比起其它各种能來說，其特点之一在于可以很容易地用导綫輸送到很远的地方，并可以分成許多小份；当人們掌握了它以后，社会生产力便会迅速上升。

現在，我們是动力技术發展中一个嶄新阶段的見証人。到目前为止，我們都會以各种方式使用过太阳在地球上所創造的能量儲藏。煤与石油便是几百万年以前由植物儲存下来的太阳能。河流的水力也与太阳能直接有关，由于太阳热能的作用，海洋里的水便要蒸發，然后以雨水的形式重新回到陆地上。

經過改变的太阳能的儲藏量是巨大的，但是人类对于能量的需要却在不断地增長，因而現有的儲藏量就变得不够了。不仅如此，各种普通燃料中儲藏的能量也不集中。因此，为了保証工业中心的能量供应，就要从事緊急的运输工作。例

如，为了給一个不大的县城供应能量，每天約需燃燒100吨煤；如果要供应像莫斯科那样大的城市，每天就要开进几十列滿載煤或其它燃料的火車。

核能的掌握无限地扩大了世界上的能源。根据最低的統計，仅一种核燃料——鈾所含的能量即比全世界蘊藏的煤与石油中所含的能量超出几十倍。如果考虑到可以从另一种化学元素——釷中获取核燃料，那么这一系数就还要增大好多倍。然而，核能的重大意义并不仅限于此。其突出的，也可以說最重要的特点是能量非常高度集中，比普通燃料的集中度大千百万倍。例如，完全利用一公斤鈾所得到的能量約等于2000万千瓦小时。但是，为了得到这样多的能量，却需要燒去上等煤約2000吨，也就是說，要燒去重量大二百万倍的物質。

这样大的能量从哪里来的呢？怎样利用原子核轉化能以获得常見的能量呢？我們就打算在这本書里对这些問題提出解答，并将讀者引入一个新的原子核动力技术世界中去。

第一章 原子核动力技术的物理基础

§1 原子核的构造

由于研究物质构造，结果发现了实际运用核能的可能性。现代科学确定：化学元素的最小微粒是原子。原子是由重的中央部分，即带正电荷的原子核，以及由带负电荷的粒子——电子所形成的电子壳层组成的。在正常状态下，核电量等于原子中电子电量的总和，因此整个原子是中性的●。

先提一下，在我们所关心的获取核能的过程中，起主要作用的是原子核，而不是原子的电子壳层。因此，在以后的叙述中，我们不注意原子中有电子的存在，而只研究原子核。由于这个缘故，有必要提出关于术语的问题。在书刊上“原子能”与“核能”这两个概念同样都会碰到。这两者所指的都是原子核转化时释放的能量。因此，“核能”这一术语（我们在本书中将采用它）比过去沿用的术语“原子能”更为确切。后者实质上是“化学能”的同义词，因为，比方说，炭或石油在燃烧过程中所释放的化学能是原子重新组合及其电子重新分配的结果。然而“化学能”这个名词又用得如此习惯，以致用别的名词来代替未必有什么意义。

原子核是由基本粒子——质子（ p ）和中子（ n ）构成

-
- 如果将几个电子加到中性原子上去，中性原子将具有负电荷；如果取走几个电子，则将具有正电荷。这种带电荷的原子称为离子，变更中性原子中电子数的过程称为原子的游离。

的复杂组合体；质子与中子有一个共同的名称——核子。基本粒子也包括电子在内。基本粒子最重要的特征是它的静质量（静态下粒子的质量，亦称为固有质量）与电量。电子的静质量（ m_e ）等于 9.1×10^{-28} 克。电子的电量（即最小的电量）等于 1.602×10^{-19} 库伦[●]。

其它粒子的质量，通常用电子质量或所谓原子质量单位（*AMU*）来表示。原子质量单位，按照定义，等于氧原子（氧原子核含有 16 个核子）质量的 1/16。1 原子质量单位等于 1.66×10^{-24} 克。

质子的质量大约等于 1837 静质量（换句话说，是电子质量的 1837 倍），或者等于 1.00758 原子质量单位。质子的电量，用绝对值来说，等于电子的电量，但是符号相反，即是说等于一个基本的正电量单位。

中子的质量约等于 1839 静质量，或等于 1.00893 原子质量单位。中子不带电，因此是中性的粒子。

原子核非常小，因此，其中物质的密度就非常大。可以完全准确地计算出：原子核的半径等于 $1.5 \times 10^{-13} \sqrt{A}$ 公分，式中 A 是原子核里的核子数。

例如，我们可以计算出由 238 个核子组成的铀原子核的半径与体积：

$$R = 1.5 \times \sqrt[3]{238} \times 10^{-13} = 0.93 \times 10^{-12} \text{ 公分,}$$

而其体积为 3.4×10^{-36} 公分³。

每个核子的质量约等于 1 原子质量单位，或 1.66×10^{-24} 克。因此，铀原子核的质量等于 $238 \times 1.66 \times 10^{-24} = 395 \times$

● 绝对值等于电子电量的电量称为基本电量。

10^{-24} 克。用体积去除这一数字，即得原子核中物質的密度，它等于 $(395 \times 10^{-24}) : (3.4 \times 10^{-36}) = 1.16 \times 10^{14}$ 克/公分³。其它原子核中核物質的密度大致相同。假使可以用原子核紧紧地填满 1 立方公分空間的話，其重量将为 116000000 吨。自然界中物質的密度只是这个数字的几万亿分之一。大家知道，最重的物質是鐵。然而它的密度仅等于 24.5 克/公分³。核中物質本身的密度与普通物体的密度有这样大的差别，是因为在这些普通物体中，原子核并未填满它們所占有的全部空間，比照原子核的大小來說，它們彼此相距还很远。

核电量是用原子核中所含的質子数来計算的。这个数字称为原子序，用字母 Z 表示。元素的原子序便是元素在門捷列夫元素周期表中的順序號碼。氫的原子序最小， $Z = 1$ 。自然界所見的一切元素中，以鈾的原子序为最大($Z = 92$)。原子序更大的元素(現在达到 $Z = 101$)●是用人工方法获得的。其中对核动力技术具有最重大意义的是鈾($Z = 94$)。原子核中核子的总数称为質量数，上面已經提到，用字母 A 来表示。原子核中的中子数通常用字母 N 表示，显而易見， $N = A - Z$ 。

元素的化学性能是由中性原子外壳中的电子数决定的。这个数目等于原子核中的質子数，也就是說等于該元素的原子序，而与原子核中的中子数无关。有这样一些原子，它們的原子核含有同等数量的質子，但中子数却不同。这些原子的化学性能是相同的，因为它們的原子序相同。这些原子叫做同位素，因为它們在門捷列夫周期表中占着同一个位置。

● 不久前發現的 $Z = 99, 100$ 和 101 的元素，分別称为鑷(E)，鑷(Fm)和釷(Mv)，以紀念 A. 愛因斯坦、Э. 費爾米和 Д. 門捷列夫三位學者。

但是同位素的原子核性能却不相同，因为它们是由原子核中全部核子数决定的，而对于同一元素的各种同位素来说，核子数却有差别。

同位素的表示方法是在该化学元素符号的右上方注明质量数（有时在左下方还标明元素的序号）。例如，氢的同位素是这样表示的： ${}_1\text{H}^1$ （轻氢，或氕）及 ${}_1\text{H}^2$ （重氢，或氘）[●]；锂的同位素： ${}_3\text{Li}^6$ 和 ${}_3\text{Li}^7$ 等等。因此，根据同位素的符号便可以判断它的原子核的组成。上端的数字（ A ）等于原子核中的核子数，下端的数字（ Z ）等于质子数，两数之差（ $A - Z = N$ ）就是中子数。所以同位素 ${}_3\text{Li}^7$ 的原子核有7个核子，其中质子3个，中子4个。

对于不同的元素来说，各该元素原子的天然混合物中的同位素含量（或称为相对含量）都不一样；有一些元素，例如氟或钠，只由一种同位素—— F^{19} 和 Na^{23} 构成。由于中子与质子的质量，就其各自的数值来说，接近于1原子质量单位，所以这些原子核的质量数总是接近于各该元素的原子量。然而大多数的元素是由几种同位素组成的，这些

表1 天然铀中的
同位素组成

同 位 素	相对含量 (%)
U^{234}	0.006
U^{235}	0.712
U^{238}	99.282

这些元素的原子量就是相应同位素原子量的平均加权值。其中可注意的是，氢含有同位素 H^1 99.985%（按原子数）和同位素 H^2 0.015%。对原子核动力技术有最密切关系的元素——铀是由三种同位素组成的。表1里列出了天然铀的同位素组成百分比。从这个表中可以看出，

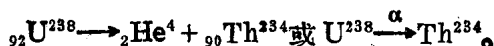
● 重氢也常用D表示；重氢的原子核称为氘核，用 α 表示。

含量最多的是同位素 U^{238} 。在天然铀中， U^{234} 含量太少，可不予考虑。

§2 放射性

我們在上面已經指出，原子核的性能是由核中全部核子数决定的。因此，同一元素的各种同位素的原子核性能也就各不相同。这种不同表现在某些同位素是稳定的，而另一些则是不稳定的，即具有放射性。放射性同位素能自发地嬗变成其它元素的同位素。在嬗变过程中，原子核放出快速运动的粒子，在许多情形下并还产生电磁辐射。由于放射出的粒子的种类不同，放射性嬗变可分为下列数种：

α -蜕变，即原子核放射出 α -粒子，后者便是氦原子 ${}_2He^4$ 的原子核。这种现象是 Z 数值大的元素所特有的。在 α -蜕变过程中，形成一种比原有同位素的质量数小4、核电量小2的新同位素，即是说形成这样一种元素，它处在门捷列夫周期表中原有元素左面的第二个位置上。例如， ${}_{92}U^{238}$ 由于 α -蜕变便嬗变成钍的同位素 ${}_{90}Th^{234}$ 。这个嬗变可以按下列方法用符号表示出来：

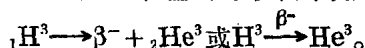


β -蜕变，即原子核中一个质子变为中子，或者由中子变为质子。大多数放射性同位素都具有这种现象。 β -蜕变可由不同方式进行：在蜕变时放出电子，放出正子 $\oplus$ ，以及原子核从电子壳层中俘获电子。

- 正子是一种基本粒子，其质量等于电子的质量；其电量，就绝对值来说，等于电子的电量，但符号相反。由原子核放出的电子与正子亦称为 β -粒子。

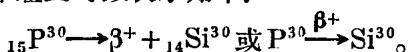
放射电子 (β^-) 是由于原子核中的一个中子嬗变成为质子而發生的。这时产生一种具有同样質量数的同位素，但是核电量大 1，即是說产生这样一种元素，其位置是在門捷列夫周期表中原有元素右边的一格上。

例如，氫的放射性同位素 ${}_1\text{H}^3$ (氚)● 放出一个电子后便变成氦的同位素 ${}_2\text{He}^3$ 。这个嬗变可以表示如下：



放射正子 (β^+) 是由于原子核中一个质子嬗变成为中子而發生的。在射出正子的过程中，形成的同位素具有同等質量数，但是核电量小 1，即是說所形成的元素处于門捷列夫周期表中原有元素左面的一格上。

例如，磷的同位素 ${}_{15}\text{P}^{30}$ 射出一个正子，并变成矽的同位素 ${}_{14}\text{Si}^{30}$ 。这个嬗变可以表示如下：



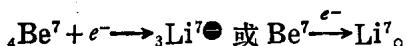
原子核从电子壳層俘获电子 (e^-) 的情形 (即所謂第一層的 K 層俘获，偶尔为第二層的 L 層● 俘获)，同放出正子一样，是原子核中一个质子嬗变成中子的結果。

在这种嬗变方式下所产生的同位素具有同样的質量数，但核电量小 1，即所产生的元素在門捷列夫周期表中处于原有元素左面的一格上。

例如，同位素 ${}_4\text{Be}^7$ ，由于自 K 層俘获电子的結果，变成鋰的同位素 ${}_3\text{Li}^7$ 。这个嬗变可以表示如下：

● 氚通常用符号 T 表示；氚的原子核称为氚核，用 t 表示。

● 随着元素序号的增加，原子的电子壳層的層数也要增加。氫与氦的層数最少，仅一層；鈾及其邻近的重元素的層数最多有七層。从原子核往外数，各層的标号是 K 、 L 、 M 、 N 、 O 、 P 、 Q 。



某些放射性变化可以产生新的原子核，即平时所说的激发状态下的“子”核。在大多数情形下，所产生的激发原子核会在顷刻之间进入非激发状态，并将激发能消耗于放出电磁辐射。这种辐射也具有可见光或X光的性能，所不同的只是具有更高的能量。这种辐射通常称为 γ -辐射[●]。在少数情况下，激发原子核放出 γ -辐射不是在一瞬间，而是经过某一段可测出的时间。在此种情况下，激发原子核称为非激发原子核的同质异能体。

钴的同位素 Co^{60} 的蜕变可作为第一种嬗变的例子。蜕变所形成的镍同位素 Ni^{60} 的原子核是激发性的，并在顷刻之间放出能量非常高的 γ -辐射。钍的同位素 Th^{234} 的蜕变则可作为第二种嬗变的例子，蜕变结果是形成镤 Pa^{234} 的原子核。这些原子核的一部分是在激发状态下形成的，但平均经过1.64分钟后就进入非激发状态，这时会放出 γ -量子。

各种同位素各有其独特的放射性蜕变速度，而不受元素物理状态及化学状态的影响，至少可以说，不受目前在实验室的条件下所产生的温度与压力的影响。在一短时间(Δt)内，正在蜕变的原子核数(ΔN)是与尚未蜕变的放射性原子核的总数(N)以及该物质所特有的蜕变常数(λ)成正比，

● 为了说明 β -蜕变过程中原子核嬗变的许多特点(这些特点我们在本书中将不涉及到)，必须假设：在放出电子或正子，或者在俘获电子壳层的电子的同时，原子核也放出中性的基本粒子——中微子(其本身的质量比电子的小得多)。

● 据现代的看法， γ -辐射以及其它种类的电磁辐射并非不间断地产生与传播开去的，而是像几束间断的称为光子的 γ -量子。光子用 γ 表示。