

原子核反应堆工程原理

格拉斯登著

科学出版社

原子核反应堆工程原理

格 拉 斯 登 著

和 平 等 译

科 学 出 版 社

1 9 5 9

Principles of NUCLEAR REACTOR ENGINEERING

by
SAMUEL GLASSTONE

1 9 5 6

內 容 簡 介

本书比較全面地綜述了原子核反应堆工程所根据的科学原理及工程工艺。由于原子核裂变过程及其有关辐射所具有的特殊性能,致使反应堆工程在具体实践中显得复杂且常导致困难,工程所涉及的范围也非常广泛。本书首先概略介紹有关的核物理基础原理,繼而推导了反应堆理論,然后对反应堆的控制及量測仪器、材料处理、安全防护問題、工程設計問題等等,都一一加以較詳尽的闡述,最后并描述了資本主义国家的一些典型反应堆型例,以使讀者了解其全貌。

本书供从事于与核反应堆有关工作的工程技术人員及研究人員,包括化学工作者、数学工作者、冶金工作者、物理学工作者、甚至生物学工作者們閱讀参考;本书亦可作为高等学校培养核反应堆工作人員的教科书之用。

原 子 核 反 应 堆 工 程 原 理

格 拉 斯 登 著
和 平 等 譯

*

科 学 出 版 社 出 版 (北京朝陽門大街 117 号)
北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1959 年 12 月 第 一 版	书 号: 2041
1959 年 12 月 第 一 次 印 刷	字 数: 884,000
(京) 精: 1—3,000	开 本: 787×1092 1/18
平: 1—2,500	印 张: 36 2/9 插 頁: 3

定 价: 精 装 本 5.00 元
平 装 本 4.30 元

原 序

核反应堆工程的范围包括反应堆的设计、建造和运转；在这种反应堆内，由于某些原子核的裂变而连续地并可控制地释放出能量。本书的主要目的在于描述反应堆工程所依据的基本科学原理。实际上，这些原理并非十分复杂，而且总的说来，都已是众所熟知的；但当将这些原理变为实际时，却由于裂变过程及随伴产生的辐射的特殊性质而遭遇到许多新问题。反应堆工程主要就涉及如何解决这些问题，其中包含着化学、电气、电子、机械、和其他方面的工程师们以及化学工作者、数学工作者、冶金工作者、物理学工作者甚至生物学工作者们的共同合作努力。

为了促进这样的合作，本书内容涉及到很广泛的问题。这样做的目的在于提供一个全貌以帮助各种工程师们理解他本身的工作与整体工作间的关系。这样，工程师们可以最好地运用其在一个或几个熟悉的领域内的知识与经验，来解决当利用核能作为动力来源时所引起的特殊问题。应该强调指出，本书的目的在于从广度上而非从深度上来处理核反应堆工程的问题。因此，几乎每一章都可看作是对反应堆设计的某一具体方面的一个引论，而专家们在这些方面工作时还需进一步的知识与实际经验。

虽然在本书中所包括的某些材料，特别是前几章，也可以在其他书籍中找到，然而，由于下述两个原因，作者认为还是应该将它们列入本书：第一，作者希望在本书的基本目的范围内将它写得尽可能完整一些；第二，如果许多工程师们和工程方面的学生们为了获得核物理及反应堆理论等方面的必要知识而必须去查阅标准教科书时，他们可能会感到困难。对于那些希望深入研究核反应堆工程中更理论方面的人，也可以发现本书所包括的基本要点或可作为进一步研究的有用基础。

在编写本书时，特别注意到两类读者。一类是从事实际工作的工程师们，他们希望了解有关核能对于他们本行活动的关系。对于这类读者，本书可以当作一本指南书；在书中所包括的许多处的相互援引以及相当完整的索引可以帮助他们从书中找到所需的知识，即使不愿系统地阅读本书时亦可能达到如此目的。另一类读者是工程学校中大学四年级或研究院一年级程度的学生。由在洛斯阿拉莫斯 (Los Alamos) 所举办的研究班所得经验看来(该研究班系由新墨西哥大学工学院协助举办)，本书可作为“核反应堆工程原理”的两学期课程的基础。

虽然反应堆的发展是由物理学家们开始的，但在这一领域内工程师们的作用已显得日益重要。由于这两种学者们联合工作，在反应堆工程中采用了某种混合单位制。例如，能量既以电子伏为单位又以瓦小时为单位；中子通量以每秒每厘米²计算而热通量则以每小时每呎²计算。在大型反应堆内，天然铀燃料的重量无例外地以吨计算；而在使用浓集燃料的小反应堆内，一般习惯则以公斤计重。这种混乱状况在最近的将来似乎是无法纠正的，因此从事反应堆工作的工程师们必须习惯于适应它们，本书所作处理的目的之一就是帮助他们做到这一点。

在编写本书时作者曾得到许多人的帮助，其数量之多使作者实际上无法在此一一提名致谢。有相当多的资料是由橡树岭国立研究所的成员和其他人提供的，特别是由第五章至第十一章，其来源都在各该章节的开头一页脚注中注明。然而，所提供的多数资料与文献都是保密的，因此必须用一些既能说明同样的基本原理，又不致违反保密制度的材料代替之。在这一点上，作者特别感谢 A. E. C. 技术情报处的科学顾问 A. F. Owings 博士向作者推荐并提供了许多解密资料与文件。同时还应感谢阿贡国立研究所的 S. McLain 博士，他慷慨地将他的反应堆工程讲义讲稿给予作者使用。本书原稿在不同详细程度上曾由许多工程师与科学家审阅过，其中包括美国工程教育协会的原子能教育委员会的成员。虽然要从其中选出一两个人来表示特殊谢意是不恰当的，但作者仍愿意指出在各方面给予相当帮助的 J. A. Lane 先生，他是橡树岭国立研究所反应堆实验工程部主任。

除了以上诸人之外，作者还要感谢 N. F. Lansing (国立橡树岭研究所) 在开始时对本书一般结构提供意见；W. H. Sullivan 博士(国立橡树岭研究所)担任了研究所人员与作者的联系工作；A. F. Thompson 博士(A. E. C. 技术情报所主任)和他的助手 J. H. Martens 在解决行政手续问题上所表现的协助；C. B. Holmes (橡树岭技术情报所教育科科长) 对图片的准备；和 N. E. Bradbury 博士(洛斯阿拉莫斯科学研究所主任)和 R. C. Smith 博士(该所付主任)在他们的研究所的整个合作气氛下提供了办公室和图书馆。

Samuel Glasstone

洛斯阿拉莫斯，新墨西哥州。

2097/42
03

目 录

原序	(i)
第一章 核反应堆工程的范围	(1)
緒論	(1)
原子的結構	(8)
中子与核的相互作用	(9)
核能的释放	(13)
核反应堆內的裂变鏈	(18)
生产性反应堆及动力反应堆	(28)
反应堆設計問題	(35)
第二章 核反应和核輻射	(41)
引言	(41)
放射性	(41)
輻射与物質的相互作用	(46)
中子与物質的相互作用	(57)
中子反应的截面	(64)
截面随中子能量的变化	(70)
裂变过程	(75)
中子俘获和放射性衰变过程	(90)
第三章 反应堆理論：稳恆态	(95)
引論	(95)
中子的扩散	(96)
中子的慢化	(105)
无限扩展非吸收性媒質內的慢化	(111)
无限扩展吸收性媒質內的慢化	(114)
慢化了的的中子的空間分布	(115)
慢化和扩散性質	(120)
临界方程	(121)
均匀系統	(130)
非均匀天然軸反应堆	(139)
临界大小的实验測定	(147)
具有反射层的反应堆	(149)
中速中子与快中子反应堆	(157)
第四章 反应堆理論：稳恆态的扰动	(162)
反应堆动态学	(162)
温度对反应率的影响	(185)
裂变产物毒性	(190)
第五章 核反应堆仪表	(200)

引論	(200)
核輻射与电离	(200)
电离室	(204)
离子电流的量測裝置	(207)
非界計电离室	(212)
正比計数器	(215)
盖革-弥勒計数器	(217)
閃爍計数器	(219)
脉冲計数器	(220)
計数器的統計誤差	(221)
中子量測的激活法	(223)
第六章 核反应堆的控制	(230)
反应堆控制概述	(230)
控制系統的設計	(234)
仪表环节	(242)
操纵人員和控制环节	(245)
自动环路	(255)
反应堆的运轉	(262)
第七章 核反应堆燃料的处理	(267)
緒論	(267)
重元素的化学	(269)
裂变产物的性質	(280)
分离方法: 沉淀法	(287)
用吸着法分离	(291)
溶剂萃取法	(299)
其他分离方法	(307)
处理过程中废物的处置	(308)
放射化学处理工厂設計	(311)
第八章 核反应堆材料	(317)
反应堆燃料	(317)
鈾金属的性質	(326)
鈾金属的性質	(329)
鈾金属的性質	(330)
鈾同位素的分离	(331)
固体中的輻射效应	(340)
減速剂的生产和性質	(347)
核輻射引起的水分解	(351)
作为減速剂和反射剂的鈹	(354)
作为減速剂和反射剂的石墨	(357)
反应堆結構材料	(359)

作为反应堆材料的锆	(363)
反应堆用的陶瓷材料	(367)
反应堆冷却剂	(370)
第九章 辐射防护	(380)
辐射危险和保健物理	(380)
辐射的生物效应	(383)
辐射剂量单位	(386)
生物防护的标准	(394)
人员的防护	(399)
放射性废物的处置	(408)
第十章 核反应堆系统的屏蔽	(412)
反应堆的屏蔽问题	(412)
屏蔽几何学	(421)
γ 射线源的屏蔽	(431)
反应堆屏蔽的设计	(434)
附录	(444)
第十一章 核反应堆系统的热工问题	(452)
反应堆设计中的热工问题	(452)
冷却系统的设计	(454)
反应堆系统内的热源	(457)
由传导和对流传热	(465)
有内源的系统中的热传递	(470)
沿反应堆冷却剂通道的温度分布	(478)
流体的输热特性	(483)
冷却系统的压强降及抽送动力	(492)
沸腾液体内的热传输	(497)
反应堆部件内的热应力	(504)
第十二章 核反应堆设计参数	(513)
反应堆设计的主要方面	(513)
反应堆实验装置	(514)
研究用反应堆	(515)
生产性反应堆或转化堆	(522)
动力反应堆	(525)
原子核系统	(527)
反应堆的成分	(530)
散热系统	(538)
初步设计计算	(555)
核动力的经济问题	(560)
第十三章 核反应堆的描述	(566)
附 录	(604)
索 引	(612)

第一章

核反应堆工程的范围¹⁾

緒 論

全世界的动力资源

1-1 1939 年原子核裂变的发现是具有划时代意义的事件,因为它开辟了一个全新的动力资源的远景,使人类能够利用原子核的内能。铀和钍是能进行裂变并释放出核能的两种主要物质。含有这两种元素的矿物在地壳上分布极广,因此,如下面即将说明的,它们是具有很大的潜力的动力资源。

1-2 过去半世纪中,全世界所需动力的绝大部分是由化石燃料(即煤、石油和天然气)供应的。但是,早就已经证实,这些动力资源在不太久的将来就将大部用完。目前世界各国的总动力消费大约每年为 0.1×10^{18} 英热单位 (Btu),²⁾ 即 $0.1 Q^3$ 。若将世界人口的不断增长和每人所需动力的增多估计在内,到公元 2000 年全世界动力的消耗可能每年要达到 $1Q$ 。然而,根据最可靠的估计,世界上所有的煤、石油和天然气储量中,能够用比目前价格贵两倍的成本开采出来的数量,只能供应不到 $40Q$ 的能量。这就意味着,在 100 年之内,所有可以经济地利用的化石燃料资源储备将被消耗殆尽。

1-3 即使前面的估计有若干误差需要修正,但仍然不可避免地要得出这样的结论:如果地球要能供应日益增长的人口和提高一些生活水平的需要,那末在今后 50 年内必需找到新的动力资源。有两种资源曾经被考虑过:太阳能和原子(核)能。太阳能的直接利用是很引人注意的,但迄今除了通过种植绿色植物的方法以外,还远远没有找到一种更合适的方法能够大规模地利用太阳能。但是,随着裂变的发现,核能的利用却成为现实了。

1-4 核能的特点之一就是从小量的活性物质中可以释放出极大量的能量。例如,一磅铀完全裂变时可以释放出大约 3.6×10^{10} Btu 的热能;这相当于燃烧 1400 吨³⁾ 的 13,000 Btu/磅的煤所产生的全部能量。

1-5 在地壳表面以下三哩深的地层之内,铀和钍的总储量大约有 10^{12} 吨。然而,其中大部分存在于极贫矿之中,它们的提炼是全然不经济的。假设,按照技术发展的可能,由中等贫矿提炼铀和钍的价格会下降到每磅金属 100 美元,那末根据目前不完全的矿产地图估计,全世界可以开采出 2500 万吨铀和 100 万吨钍⁴⁾。后面就会看到,在这样多的裂

1) 本章由 R. A. Charpie 审阅。

2) 符号 Q 代表 10^{18} Btu, 这样就可以用通常的数目字来表示最大的能量;这一方面可以参看 P. C. Putnam, "Energy in the Future", D. Van Nostrand Co. Inc. 1953. 这儿所用的数据都是从这本书上取材的。

3) 本书所用的“吨”均指“小吨”,即 2000 磅。

4) 参看前述 P. C. Putnam 的著作,第 214 页。

变物质中,并不是全部都可以很经济地用来产生裂变的;在最有利条件下大约只有三分之一可以被利用。根据上一节所给的能量换算单位,从这些金属中由裂变所得出的热量是

$$\frac{1}{3} \times 26 \times 10^6 \text{ 吨} \times 2000 \frac{\text{磅}}{\text{吨}} \times 3.6 \times 10^{10} \frac{\text{Btu}}{\text{磅}} = 624 \times 10^{13} \text{ Btu} = 624 \text{ Q.}$$

因此,在铀和钍中所可能得出的能量比化石燃料要多上好多倍;如果适当地加以利用,它们对于全世界的动力资源有着很重大的意义。

1-6 应该扼要地指出,裂变能的产生并不是利用核能问题的最终解决。科学家们对于由极轻核聚变而获得可控制能量的可能性发生很大兴趣,这种过程正是太阳和星球能量的来源。如果这一点成为现实,水就会变成能量的主要来源;因为从理论上说,每磅水所含的氢核如果都聚变成氦核的话,就可以产生 3×10^{11} Btu 的能量。即使只有水中的氘核(重氢核)能够进行聚变(这看来是更容易实现的),那末原则上也可能由每磅水中获得 10^8 Btu 的能量。

核反应堆与裂变过程

1-7 在 §1-4 中提到每一磅核燃料完全裂变以后放出的热量相当于 1400 吨煤(或 300,000 加仑石油)燃烧的热量,这种说法本来是基本正确的,但曾经导致某种错误的结论。有人描述过这样一种幻想的可能性:只要在汽车里装上像豌豆那么大的一粒裂变物质,就可以在汽车的整个寿命期内用之不竭。为了说明这种可能性为什么不能实现,必须对裂变过程有一些了解。虽然在本书的后面还要详细加以讨论,我们在这儿先要作一个概括的说明。

1-8 裂变是由于一定类型的核俘获了一个核子——中子——而产生的。这个核会分裂成为两个较轻的部分(初级裂变产物),同时释放出能量。此外,在每一次裂变时都平均放出 2—3 个中子,假如其中至少有一个能被另一可裂变核俘获,那末就有可能形成一个连续释放能量的链式反应。那种产生、维持并控制核裂变链式反应的装置,能够以一定的功率释放出能量,它就叫做核反应堆(nuclear reactor)¹⁾。

1-9 因为中子会由于洩漏或受到各种非裂变俘获而损失,所以这样一种装置只有当它超过一定大小(通常叫“临界”大小)时,才能维持链式反应。这种大小虽然对于某一系统有一个固定的值,但是由于结构物质的性质和份量以及几何形状的不同,这种临界大小可以有有很大的变化。因此,一个反应堆如果主要由纯裂变物质(铀-235或钚-239)构成,它的临界大小很粗略地可以说成“象足球一样大”²⁾。由已知的金属铀密度很容易算出,这样一个反应堆大约含有 100 磅可裂变物质。如果可裂变物质比这个数量少,那末就不可能连续产生能量。然而,其他型的反应堆的临界质量,可能比这小些或大些,这要视不同的情

1) “堆(pile)”这一名词虽然在描述新式反应堆时已不常用,但仍然有其一定的适用范围。它的来源是由于第一个成功的反应堆是由石墨板(其中有些含有铀)堆砌(piling)而成的,因此叫“pile”。

中文“反应堆”一词原由“pile”译出。现在通用的“reactor”如译成“反应器”则更为恰当。但因“反应堆”沿用已久,暂不改变。——译者注。

2) W. H. Zinn, *Nucleonics*, 10, No. 9, 8 (1952).

况而定。例如,利用天然金属铀作燃料的反应堆需要好几吨金属才能达到临界;而另一极端,有些反应堆却只要几磅燃料就可以工作了。

1-10 因此,纵使一磅可裂变物质可以产生相当于本身重量三百万倍的煤的能量,但为了产生这些能量,反应堆却需要包含由几磅到几吨重的核燃料。在临界质量(这是最低限度必需有的质量)之外,还要加上因释放能量而必须耗去的燃料。不过这种超额的燃料不能太多,太多了不仅从各种原因看来是一种浪费,而且会使得反应堆难于控制。因此,实际上在反应堆“更换”燃料以前能够产生的能量有一个限度。但无论如何,只要在临界质量以外多有10磅裂变物质,就可以产生一亿瓩小时这样大的热功率。

核燃料的利用

1-11 在目前,裂变能的绝大部分只能以热能的形式被利用¹⁾。因此,在某种意义上,核反应堆可以看作是一种炉子。例如,在生产电能时,反应堆可以当作锅炉内燃烧室的代替品。这时锅炉本身实际上变为一个热交换器,但得出的水蒸汽(或其他蒸汽)则仍然用来推动通常的透平发电机组。图1-1中表示一个燃烧煤的蒸汽发电厂和一个用核反应堆

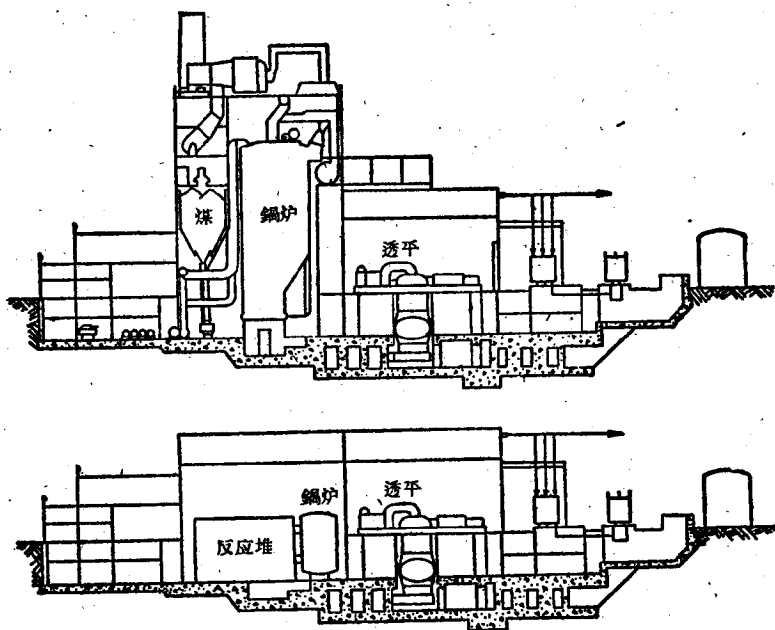


图 1-1 燃煤及核蒸汽动力厂的比较 (P. Sporn and S. N. Fiola)

作热源的发电厂的一般比较。图的上半是一个燃煤电厂的示意图,下半表示用核反应堆供热时所需要进行的改装。图内的反应堆尺寸大致按布鲁克哈汶(Brookhaven)国立实验室的反应堆的大小,并包括它的厚混凝土屏蔽层在内(见§1-31)。可以看到,在核动力厂

1) 只有极小一部分能量(远小于1%)以裂变产物的放射能形式出现,这一部分是可以直接转变为电能的。

里,煤处理装置已经省去,而且锅炉(或热交换器)也比通常电厂小些。至于发电设备则并无改变。

1-12 这里还要简单地提出核反应堆另一方面的问题。前面说过,铀和钍是产生核能的基本物质;这种说法需要一些补充。实际上,普通的钍不能直接用在反应堆内作为燃料,而天然铀中也只含百分之 0.7 的可裂变物质(即铀-235)。然而,天然铀中的主要成分铀-238 和钍都可以转化成反应堆燃料。

1-13 当铀-238 和普通钍(钍-232)俘获中子后,它们一般并不裂变,而是形成一种产物,后者能够通过自发蜕变最后形成可裂变物质。这样一来,这两种非活性物质,或称为“肥料”,就分别转化为另外两种元素:钷-239 和铀-233,后面这两种元素都可以当作核燃料使用。

1-14 可以回忆一下(§1-8),当核裂变时会发出两个或三个中子,但是要维持链式反应,却只需要一个中子。因此,如果没有其他损失,就会有一个(或几个)过剩的中子使肥料核转化成一个可裂变核。象前面所说的,有一些中子不可避免地会经过种种方式损失掉;但是,要设计一个除产生能量外还能使肥料转化为燃料的反应堆是有可能的。通过这种方式才能使天然存在的非活性铀-238 和钍-232 转变成为可裂变物质。

核 燃 料 的 处 理

1-15 初看起来,由于在裂变中每消耗一个可裂变核,都可以使肥料产生或多或少(可能更多)的新的可裂变核来代替它,因而反应堆似乎可以在肥料没有被耗尽之前一直工作下去,而不需要添加燃料。不幸得很,事实上并非如此。在前面的讨论中并没有估计入裂变产物(或称原子核“炉灰”)的影响。当反应堆工作时,由许多种不同核所组成的裂变产物聚集起来了。所有这些核都能俘获中子,因而它们与裂变过程相竞争。在一段时间之后,它们所造成的中子损失大到一种程度,使得核裂变链不可能再持续下去了。

1-16 因此,反应堆燃料必须常常取出并加以处理,以便清除聚集的裂变产物。此外,由于各种放射性(§1-26)的连续作用所致燃料棒的尺寸和结构的改变,也使得有必要常常取出后者重加制造。作为一个粗略的概念,可以假定肥料消耗到 1% 就需要重新处理。这就是说,包含肥料和可裂变物质的核燃料,在它里面的肥料被完全利用来产生核能的过程之前,需要进行一百次处理。因此,如果要使铀和钍得到有效的利用,那末 §1-5 中所曾提到的每磅不到 100 美元的初始价格,实际上只占它们全部价格中的一小部分而已。

核 动 力 的 价 格

1-17 由于某些作者没有了解核动力的实际情况,结果常常有人认为利用核裂变可以得到非常廉价的电能。根据目前的了解,这在事实上是不可能的,因为在用户电费中有 65—75% 是属于配电费用的。现在所能预期的只是核裂变能在发电过程中代替燃料(煤或石油)或水力的地位。因此,即使核燃料的成本可以完全不计,用户所获得电力的成本最多也只能降低 15—20%。

1-18 事实上,在最近 10—20 年内,核能动力在一般情况下能否与普通燃料的电力相竞争,还是一个疑问。然而,在一段时间以后,核能技术无疑会有新的发展,而化石燃料因日益稀少而昂贵起来,由核反应堆供应的动力就很有可能比其他燃料便宜。同时还不要忘记,在不远的将来,我们就会面临这样一种形势,那时动力的价格是次要问题,而能否获得动力却成为主要问题了。

1-19 由于下面的一些原因使得核反应堆会在潜水艇、军舰和军用飞机上获得应用。因为核反应堆不需要氧气供应,因而,装有核动力的潜水艇可以在水下潜行很长的时间。此外,由于核燃料包含的能量极大,装有核动力的海軍船只与飞机可以航行很长的距离而毋需添加燃料。这时燃料的大量节省可以抵消反应堆和它的附件的较大质量而有余。

1-20 在缺乏煤、石油及水的边远区域,核动力的较高价格可能获得某些补偿。例如,在这些区域中,如果需要动力来提炼贵重的金属,用核动力就可节省将矿石运出所需的运费。遥远地区的军事基地目前还依靠油船来供应石油燃料;在这种情况下利用核动力或会有利的,特别由于在战争时期航运要遭受攻击。最后,无论是在平时或战时,核动力都可能在遇到紧急情况或灾害时被当作可移动的动力装置使用。

反应堆的设计问题

1-21 可能有人会感到惊异:为什么核动力实际应用的可能性发展得如此之慢。即使在目前看来也还是如此。这并非由于设计方案的缺乏。正因为需要在很多的设计参数中进行选择,在设计核反应堆时,就可以有许多不同的方案。然而,由于实际经验的缺乏,不可能确定在某一组已知条件下,那一种方案是最好的方案。

1-22 例如,考虑一下潜水艇中应用的两种反应堆:潜水艇热中子反应堆(STR)和潜水艇中速中子反应堆(SIR)。在 STR 中裂变链由相对低(热)能中子维持,而热量由受压的水传出。另一方面,在 SIR 中多数裂变是由中速中子引起的,而传热剂则为液态钠。这两种类型各有优缺点,但是在建成并经过运转之前,谁也不能说那一种设计更为优越。

1-23 另一个例子也可以说明不可能很确定地选择最好的设计:1952 年四个企业组合¹⁾所作的研究结果表明,虽然它们都根据同样的原始资料,但所提出的两用反应堆(即以比较合理的价格生产电能同时也为军事目的生产钚)的四种设计,却彼此有很大的差异。

反应堆的材料问题

1-24 在本书后面即将看到,反应堆设计所依据的一般科学原理已经建立得很完善了,然而目前还有许多工艺性质的问题尚未解决。在热力学中有一个熟知的定理是:要得到较高的热效率,必须由较高的温度取得热量;例如,现代锅炉中蒸汽温度高达 1050°F

1) 最初的四个企业组合是: Commonwealth Edison Co. and Public Service Co. of Northern Illinois; Dow Chemical Co. and Detroit Edison Co.; Monsanto Chemical Co. and Union Electric Co.; Pacific Gas and Electric Co. and Bechtel Corp. 这些企业所作工作报告的不保密部分以 "Reports to the U. S. Atomic Energy Commission on Nuclear Power Reactor Technology" 的标题于 1953 年 5 月由 U. S. Government Printing Office 出版。到 1954 年底,差不多已批准 20 个组合(包括了很多企业)参加对工业有用的核能研究工作。

(565°C)。如果要在核反应堆的热交换器内产生同样的高温,反应堆就必须在 1100°F 下工作。但是,在这个温度附近金属铀要发生相变而引起密度变化。这时反应堆内铀制燃料棒的尺寸和形状就会起变化,结果产生不可容许的变形。曾经有人建议采用熔化的铀合金或混合盐类作为燃料,但这些液体在高温下的操作并不是一件简单事情。在核能生产中,利用比一般新式电厂的温度(和压力)为低的蒸汽可能反而会得到最好的总经济效益。

1-25 在反应堆结构中所用的材料必须满足比一般锅炉中更为严格的要求。除开高强度、抗应变以及耐高温等性质以外,反应堆材料还必须满足中子俘获截面较小的要求。这一要求不仅意味着要采用特殊材料,而且这些材料必须具有极高纯度。因此,比较稀有的金属锆虽具有许多适用于反应堆结构的宝贵特性,然而,与锆极端相近的钆却具有相当大的中子俘获能力,而在自然界中它不可避免地与锆共存。因此,除非采用特殊的步骤将锆内的钆完全分离出去,则锆就不能用在反应堆内。

1-26 对反应堆材料的另一个要求也是通常不会遇到的,这就是抵抗反应堆内各种核辐射(包括中子)轰击的能力。这些辐射会改变固体的内部结构,结果就严重地影响它们的物理和力学性质。因此必须采用不受所谓“辐射损害”的材料。

散 热 问 题

1-27 因为反应堆基本上是一个产生热的装置,所以必须用某种方式把这些热量连续地散出。一般采用一种流态传热媒质(或称冷却剂)循环经过反应堆,然后通过一个产生蒸汽的热交换器。因此,一种好的冷却剂在具备良好的热传导性质之外,还需要对高温和辐射作用具有稳定性,同时它还应该只吸收很少的中子。由于冷却剂要在反应堆和热交换器之间循环,因此它必须是无腐蚀性和无侵蚀性的,而且所需的输送动力要比较低。

1-28 核反应堆的不寻常的特点之一就是功率输出原则上与它的大小无关;它基本上取决于这一系统的散热率。只要能够具备极高的散热率,从很小的反应堆内也能设计出很大的功率。因此,要发展功率密度高的紧凑的反应堆,就取决于这种特殊散热问题之能否解决。

1-29 曾经设计过一些反应堆,其中不用固定式燃料棒和循环的冷却液,而采用熔化的铀合金、混合盐类或铀化合物的水溶液这些流态燃料本身之进行循环。如果使燃料直接通过热交换器,就可以不用冷却母液之作中间媒介而产生蒸汽。虽然这样做就需要在高温下(可能还在高压下)输送强放射性的液体,但是这种方案还是很有前途的。此外,它的另一个缺点是在反应堆外的循环系统所产生的中子都白白地损失了。

1-30 流态燃料之所以引起人们的兴趣,还由于当裂变产物聚集到使反应堆不能继续工作时,用它可以大大简化燃料处理的过程。固体燃料棒必须首先熔化,然后经过处理再重新制造。上面已经提到,如果要充分利用铀和钍的资源,反应堆燃料必须经常加以处理,这样就会大大增加核动力的成本。因此,如果要使核动力的采用在经济上成为可能,那末改进工艺过程使燃料处理简化就成为一个根本问题了。

反应堆設計的安全問題

1-31 反应堆的安全問題与一般工程师所熟悉的安全問題不同,这是由于裂变产物发射出危险的中子和乙种(β)及丙种(γ)射线的緣故。特别是裂变产物的辐射在反应堆关闭或废燃料棒取出后相当长的时间内,都长久存在着,虽然它的强度不断衰减。因此,必須用适当的屏蔽来保护工作人员不受放射性伤害,这种屏蔽可能是六呎以上的混凝土层。这种屏蔽使反应堆的大小和重量大为增加,这也成为設計一个可移动式动力设备的主要困难之一。

1-32 当在反应堆中装入新燃料棒和在工作一段时期后取出它时,都必須采用特殊的方法。废燃料处理需要在遙远控制下进行,而且对目前还没有用处的放射性废物的处置,也需要采取合适的方法。

1-33 核反应堆是經常存在着发生事故以致失去控制的可能性的。这时裂变所产生的热量大于冷却剂所散出的热量,結果温度就升高了。反应堆一般設計得使它具有負的温度系数,那就是說,当温度升高时它們趋向于使自己停止工作。然而,局部的温升仍然可能使反应堆损坏,并且可能有放射性物质逸散出来。为了减少发生这种事故的可能性,在反应堆設計中要加进許多安全装置。这些装置的灵敏程度必須大得使反应堆的任何事故跡象一經出現就能将反应堆关闭,但又不能过分灵敏,否则当反应堆发生不可避免的瞬时起伏时,就会阻止它繼續工作。

1-34 为了冷却或其他目的而流过反应堆的液体或气体很可能变为有放射性的。因此象水泵、鼓风机、閘門、热交换器等輔助设备都必須能經過长期使用而毋需检修,如果必須检修,也要在遙控下进行。同时,这些輔助设备必須絕對气密或液密,因为任何一点洩漏,縱使在其他情况下是可以容許的,在反应堆內也是完全不許可的。

1-35 在大多数其他工程建筑中,結構部分或设备在工作中损坏以后进行更換并不困难。但是,在反应堆中由于有辐射危险,这样做就很困难了。因此在建造反应堆时,要对各个部件作更多的分析設計和先期試驗,以保証在装配好以后损坏的可能性降到最低。此外,設計中还应該保証,万一在所有預防措施以外仍然发生事故的話,这种事故不應該引起严重的后果。

反应堆发展中的問題

1-36 由前面几节可以清楚地看到,当选择最好的反应堆設計时,为什么象§1-21中所說那样存在着很大的不确定性。这是由于在反应堆建造中还有一大堆工艺性质的問題尚未得到滿意的答案。这些必要的答案只有在实际建成了各种型式的反应堆并进行运转之后才能得到,然而,即使是最简单的反应堆也有很高的造价,这就是核动力发展相对地緩慢的原因。

1-37 目前对于完整的核能发电厂的可能造价还没有一致的結論,估計大約在每瓩容量 200 到 1000 美元的范围之內,在美国 Shippingport, Pa. 正建造着一座 60,000 瓩电

能的核能发电站,它足够供应一个 100,000 人口的中等美国城市所需的动力。美国原子能委员会拨出了 85,000,000 美元作为建厂之用,但这笔费用的大部分是用作研究試驗經費的,因此每瓩的造价就高得惊人了。然而,到 1957 年左右,当这座发电厂开始运转之后,反应堆工艺中的一部分(并不是全部)問題就可以获得解答了。

1-38 前面的討論都是针对动力反应堆而言的,因为这种反应堆無論在目前或将来,都可能是工程师最感兴趣的。然而前面所述的运转、設計和結構上的特点,对于其他用途的反应堆也同样适用。在美国和其他国家里,有好几个反应堆是用来做中子实验的,它們与动力生产没有什么明显的联系。此外,有些反应堆被用来生产各种研究工作和工业中广泛应用的同位素。

1-39 还曾經建造过一些反应堆来試驗核动力厂可能采用的各种設計部件和試驗結構材料对放射性的稳定性。最后,还应该注意到,有許多生产性反应堆的唯一(或主要)目的就是为軍事目的生产可裂变物质——钚,这些堆内的热能一般是很少利用的。不过,前面 §1-23 提到的几个企业組合所考虑的两用反应堆,則在生产钚的同时还利用热能来生产动力。

核 反 应 堆 工 程

1-40 核反应堆工程的范围包括各种型式反应堆以及它們的輔助設備的設計、建造和运转。应该強調指出,反应堆工程仍然以过去已建立起来的各方面的工程技术为基础,虽然它們在这方面应用时具有一些特点并且受到裂变过程性質带来的种种限制。为了使有經驗的工程师能够运用他們的知識和經驗来解决上述問題,必須先使他們了解释放核能所取決的那些基本原理。本书的主要目的就是要說明这些原理。

1-41 在这个緒論性的第一章的后一部分里,将要論述反应堆設計和运行的广泛基础。希望能由此給出建造核反应堆所必須考虑的許多因素的一幅总图象。显然,一个反应堆的完整設計,需要生物学家、化学家、数学家和物理学家与工程师們共同的努力。因此,一个核反应堆工程师最好能熟悉各門科学中与解决反应堆問題有直接关系的那些方面的知識。

原 子 的 結 构

原子序数与質量数

1-42 核反应堆的运转取決于中子与原子核的各种反应。为了了解这些反应的性質和特点,最好首先简单地討論一下原子物理和原子核物理的某些基本方面¹⁾。

1-43 原子由一个带正电荷的核和圍繞着它的許多带負电的粒子(叫做电子)所組成;因此整个原子是电中性的。原子核由两种初級粒子(即質子和中子)組成。質子帶有

1) 并見 S. Glasstone, "Sourcebook on Atomic Energy", D. Van Nostrand Co., Inc., 1950.

一个单位的正电荷,其数值等于电子的电荷。事实上它就是氢原子核,即氢原子減掉它的一个电子。质子的质量等于 1.00758 原子质量单位(amu)¹⁾。中子是电中性的粒子,不带电荷;它的质量为 1.00897 amu。

1-44 任一元素的原子核内所含的质子数就等于核所带的正电荷数,它叫做这一元素的原子序数,一般用符号 Z 代表。它与该元素在众所周知的元素週期表内的序数相同。因此氢的原子序数是 1,氦是 2,锂是 3,如此类推,一直到铀是 92,这是自然界中已可测知份量存在的原子量最高的元素。用人工方法已经造出许多更重的元素;其中原子序数为 94 的钚对于释放核能是很重要的。

1-45 原子核内质子与中子的总数叫做这一元素的质量数,用 A 代表。上面已说过,质子的数目是 Z ,因此原子核内的中子数目等于 $A-Z$ 。由于中子和质子的质量以原子质量单位计算时都近于 1,因此质量数显然就是最接近于所讨论物质的原子量的一个整数。

同 位 素

1-46 决定某一元素的化学性质的是原子序数,即核内的质子数。这是由于化学性质取决于围绕核的(轨道)电子,而後者的数目必定等于质子数,因为原子整个看来是电中性的。因此,核内含有同样数目质子(即原子序数相同)、但质量数不同的原子,在化学性质上是完全一样的,虽然它们在原子核的特性上常常有显著的差异。这些原子序数相同但质量数不同的物质,叫做同位素。它们一般在化学上是无法区分的,但却具有不同的原子量。

1-47 目前对释放核能最重要的元素铀在自然界中至少存在着三种同位素,其质量数分别为 234, 235 和 238。为了区别各种同位素,一般将质量数写在元素名称或符号之后;这样,铀的最重同位素可以表示成铀-238, U-238, 或 U^{238} 。天然铀内存在的各种同位素的比例以及相应的原子量都列在表 1-1 内。可以看到,铀-238 是含量绝对丰富的同位素,但所有天然铀内还含有略超过 0.7% 的铀-235。这两种同位素在核能领域中都占据着重要的位置。铀-234 的比例则很小,可以略去不计。

1-48 从核能观点看,最后有可能成为很重要的另一种元素就是钍,原子量为 90。它在自然界中几乎只以唯一的单种核物质存在着,即质量数为 232 的核。虽然也存在着微量其他同位素,但後者的比例很小,可以忽略。

表 1-1 天然铀的同位素成分

质量数	%	原子量 amu
234	0.006	234.11
235	0.712	235.12
238	99.282	238.12

中子与核的相互作用

散 射 过 程

1-49 中子与极少数几种核物质(其中一种就是铀-235)间的某种特定形式的相互作用

1) “原子质量单位”等于 1.660×10^{-24} 克。任何原子的实际质量等于它用质量单位表示的(物理)原子量。