

12

核工程丛书

# 快中子反应堆

R. G. 帕尔麦 A. 潑萊脫著 湯家鏞譯

## 內 容 提 要

本书系“核工程丛书”的第十二册,书中介绍了快中子反应堆的原理、工程及冶金学等方面的主要概况,亦指出了为设计一个经济的、安全的快中子反应堆所必须解决的技术问题。

本书适宜于核工程、核物理系的师生,及从事反应堆工作的科技工作者阅读。

*Nuclear Engineering Monographs*

FAST REACTORS

R. G. Palmer, A. Platt

Temple Press

核工程丛书(12)

快中子反应堆

湯家鏞譯

---

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出093号

---

商务印书馆上海厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印张 3 24/32 排版字数 88,000

1964年11月第1版 1964年11月第1次印刷

印数 1—2,400

统一书号 13119·606 定价(科六) 0.60 元

## 序

当人們認識到在快中子反应堆里可以再生出的可裂变燃料比它消耗掉的燃料来得多时,这种反应堆就开始显得日益重要。由于世界上的鈾儲量似乎不多,一旦人們发现,生产可裂变燃料的工作确乎可以实现时,这种投资于生产可裂变燃料的美好前景立即促使一些国家都制訂了快中子反应堆的发展計劃。

目前,快中子反应堆已經处在实验功率阶段,同时发现,高品位鈾矿的世界儲藏量也要比原先的估計值大得很多。虽然,在近百年內,节省可裂变燃料資源的問題似乎大可不必考虑,但人們对于快中子反应堆的兴趣却仍然是强烈的。正当地质学家已經探查到存在着更多的鈾矿时,快中子反应堆也已經发展到这样的水平,使得創議者敢于断言,快中子反应堆是可以在經濟上与其他任何动力装置(无论是利用可裂变燃料,或是利用燃料煤或石油的动力装置)相竞争的。

在今后十年內,英国将要从事它的核动力計劃的第二阶段工作。人們正在研究,在这一个阶段上,究竟是哪一种或哪几种型的反应堆将是最有价值的。无论如何,有一个事实是有利于快中子反应堆的,那就是,到1970年,那些处在第一阶段的反应堆(例如勃克萊(Berkeley),柏劳特威(Bradwell)等)将会生产出足够数量的鈾,因为鈾是快中子反应堆的最为有利的燃料。

論述反应堆的书籍已經很多,但是在所有这些书籍中,有的完全論述热中子反应堆,或者在大多数情况下,也只是一章述及到快中子反应堆;而事实上,快中子反应堆的技术問題和物理学都是完全不同的。因此,本书作者感到,实有必要写出一本快中子反应堆

的入門书,在这本书里尽量能包括这个領域內的物理、工程和冶金学等方面的主要概貌;同时,也指出一些为了設計一个經濟的和安全的快中子反应堆动力装置所必須要解决的問題。

本书作者衷心地感謝他的同事們对于本书所表示的关怀和帮助;特別應該提到,史密斯(D. C. G. Smith)先生的詳細意見是非常有价值的。对于霍尔(W. B. Hall)教授,史密斯(R. D. Smith)博士和柏格萊(K. Q. Bagley)博士等的批評和指教,亦在此处一并致謝。

# 符 号

## 第 一 章

$b$  = 再生系数  
 $MW_d$  = 兆瓦-天, 能量  
 $MW_e$  = 兆瓦, 电的  
 $MW_t$  = 兆瓦, 热能的  
 $\eta$  = 可裂变物质吸收一个  
 中子后所产生的平均  
 中子数  
 $\nu$  = 每次裂变所释放的平  
 均中子数  
 $\sigma$  = 微观截面

## 第 四 章

$k_{eff}$  = 有效增殖系数  
 $g$  = 微扰函数  
 $U$  = 中子勒 (lethargy)  
 $v$  = 中子速度  
 $\alpha$  = 微扰截面  
 $A$  = 微扰常数  
 $D$  = 扩散系数  
 $E$  = 燃料濃集度 (可裂变  
 原子 / (可裂变原子 +

再生燃料原子))

$F$  = 通量积分  
 $K$  = 活性区拉普拉斯算符  
 $S$  = 源分布  
 $T$  = 外推反射层厚度  
 $\alpha$  = 任何相互作用的平均  
 自由程的倒数  
 $\beta$  = 在单位路程上发射的  
 次级中子数  
 $\bar{\mu}$  = 弹性散射角的余弦平  
 均值  
 $\mu$  = 中子通量的角分布  
 $\mu$  = 反射层拉普拉斯算符  
 $\Sigma$  = 宏观截面  
 $\sigma$  = 微观截面  
 $\phi$  = 中子通量  
 $\chi$  = 裂变中子的能量分布

## 附 标

$c$  = 俘获  
 $el$  = 弹性  
 $f$  = 裂变  
 $in$  = 非弹性  
 $i, j, k, l$  = 能量组

tr = 輸运

T = 总

## 第五 章

$b$  = 弛豫时间常数的倒数

$a_i$  = 第  $i$  組緩发中子的相

对比例

$c_i$  = 第  $i$  組緩发中子的先

驅元素的密度

$$j = \sqrt{-1}$$

$k_{\text{eff}}$  = 有效增殖系数

$l$  = 瞬发中子的产生时间

$n$  = 中子密度

$G$  = 傳遞函数

$G_0$  = 零能量傳遞函数

$H$  = 反应率反饋函数

$P$  = 反应堆功率

$T'$  = 热量輸运的延迟时  
間

$T_f, T_s$  = 快中子和慢中子的时  
間常数

$X$  = 反应率的功率系数

$\beta$  = 緩发中子比例

$\theta$  = 温度

$\lambda_i$  = 第  $i$  組緩发中子的衰  
变常数

$\rho$  = 反应率

$\omega$  = 角頻率

## 第六 章

$d_o, d_i$  = 环形管的外徑和內徑  
(厘米)

$d_{\text{eq}}$  = 等效直徑,  $4 \times$  面积/  
周长(厘米)

$f$  = 旋动摩擦 (fanning  
friction) 因子 (无量  
綱)

$h$  = 热量傳遞系数 (卡·  
厘米<sup>-2</sup>·秒<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>)

$k$  = 热傳导系数 (卡·  
厘米<sup>-1</sup>·秒<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>)

$q, q_w$  = 热流通量和流經管  
壁的热流通量 (卡·  
厘米<sup>-2</sup>)

$u$  =  $x$  方向的速度 (厘米  
·秒<sup>-1</sup>)

$x$  = 流动方向 (即 导管方  
向) 上的距离 (厘米)

$y$  = 垂直于流动方向 (即  
橫越导管方向) 上的  
距离 (厘米)

$C_p$  = 流体比热 (卡·克<sup>-1</sup>·  
°C<sup>-1</sup>)

$T$  = 在  $(x, y)$  点上的温度  
(°C)

$T_w$  = 管壁温度 (°C)

$T_m$  = 流体的整体 (即 平均混合) 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$u$  = 流体的块流速度, 或  $x$  向的平均速度 (厘米  $\cdot$  秒 $^{-1}$ )

$\alpha$  = 热扩散系数,  $k/C_p\rho$  (厘米 $^2$   $\cdot$  秒 $^{-1}$ )

$\varepsilon_H$  = 热量的涡流扩散系数 (厘米 $^2$   $\cdot$  秒 $^{-1}$ )

$\varepsilon_M$  = 动量的涡流扩散系数 (厘米 $^2$   $\cdot$  秒 $^{-1}$ )

$\mu$  = 粘滞系数 (克  $\cdot$  厘米 $^{-1}$   $\cdot$  秒 $^{-1}$ )

$\nu$  = 动力粘滞系数,  $\mu/\rho$  (厘米 $^2$   $\cdot$  秒 $^{-1}$ )

$\rho$  = 密度 (克  $\cdot$  厘米 $^{-3}$ )

$\tau, \tau_w$  = 切向应力和管壁上的切向应力 (克  $\cdot$  厘米 $^{-1}$   $\cdot$  秒 $^{-2}$ )

$Nu$  = 努赛尔 (Nusselt) 数,  $hd_{eq}/k$  (无量纲)

$Nu_s$  = 块流努赛尔数 (无量纲)

$Pe$  = 丕克莱脱 (Peclet) 数,  $Re \cdot Pr$  (无量纲)

$Pr$  = 柏朗特 (Prandtl) 数,  $C_p\mu/k$  (无量纲)

$Re$  = 雷诺 (Reynolds) 数,  $\frac{\rho d_{eq} U}{\mu}$  (无量纲)

# 目 录

序

符 号

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第一章 导言 .....          | 1   |
| 第二章 快中子反应堆材料的选择 ..... | 17  |
| 第三章 同鈉有关的技术問題 .....   | 30  |
| 第四章 快中子反应堆的静态特性 ..... | 46  |
| 第五章 快中子反应堆动力学 .....   | 74  |
| 第六章 液态金属中的热傳遞 .....   | 89  |
| 参考文献 .....            | 104 |
| 索 引 .....             | 106 |

# 第一章 导 言

## 核动力对于全世界能源的影响

估計全世界地下蘊藏的燃料(石油和煤)总量約为  $57 \times 10^9$  兆瓦-小时。按照現代的技术标准,能够經濟地开采出其中的五分之一左右(魏格納(Wigner)<sup>(1)</sup>)。目前,全世界的能量消耗率約为每年  $20 \times 10^6$  兆瓦-小时,这部分可經濟地开采的儲藏量可以維持 500 年。但是人口还在增长。假定目前的人口增长率和每人平均的能量消耗率都保持不变,則可經濟地开采的儲藏量将維持 100 年还不到一些,而总的儲藏量則将維持 500 年不到一些。

但是,假定核燃料的再生过程得以完全实现,則以鈾和釷的形式貯存着的核燃料将使全世界的能源增长十倍。在这种再生过程中,原先不大容易裂变的  $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$ , 在核动力反应堆內由于俘获了中子,作为反应副产品而分別形成成为新生的裂变燃料  $^{239}\text{Pu}$  和  $^{233}\text{U}$ 。要知道,天然鈾內的 99.3% 都是  $^{238}\text{U}$ , 能够迅速地裂变的  $^{235}\text{U}$  仅占 0.7%; 对天然釷,則完全是同位素  $^{232}\text{Th}$ 。

新生的裂变燃料的数量与消耗掉的初級燃料之比被称作反应堆的再生系数(严格說来,仅仅在初級燃料和次級燃料是同一种物质的情况下,才能用再生系数的名称,否則應該称为轉換系数。但本书对这两种过程,都称为再生系数)。

考虑下面这种极其簡化的核动力体系的情况,在这个体系內,各个反应堆都具有可以达到的最高的再生系数  $b$ 。如果天然鈾內所貯存的  $^{235}\text{U}$  为  $M$  吨,則当所有的  $^{235}\text{U}$  都耗尽以后,将产生出  $bM$  吨  $^{239}\text{Pu}$ 。再假定  $^{239}\text{Pu}$  和  $^{235}\text{U}$  具有相同的核性质,則在釷的

重复循环过程中 ( $^{235}\text{U}$  已耗尽) 因燃耗  $bM$  吨  $^{239}\text{Pu}$  而新产生的  $^{239}\text{Pu}$  将为  $b^2M$  吨, 依次类推. 結果, 总共可以消耗的鈾量就变成  $M + bM + b^2M + \dots$  吨了. 如果  $b < 1$ , 則此級数等于  $M/(1-b)$ , 因此可利用的鈾量比原先的  $^{235}\text{U}$  量 (天然鈾的 0.7%) 增大了  $1/(1-b)$  倍.

在以  $^{235}\text{U}$  为燃料的热中子反应堆內,  $b$  未必可以常超过 0.9. 因此, 按上述公式, 可以利用的鈾量不会大于貯存的天然鈾量的 7%. 实际上, 在核燃料的回收过程中的損失以及  $^{239}\text{Pu}$  的非裂变吸收还会把这数字降低到 2% 左右. 然而, 如果再生系数可以大于 1, 則所有貯存着的鈾和鈷在原則上就都是可以利用的 (不然的話, 世界上的核能貯存量不会大于地下蘊藏着的燃料能, 更不会大十倍).

已經証实, 在快中子反应堆內, 再生系数可能大于 1; 在以  $^{235}\text{U}$ - $^{232}\text{Th}$  燃料循环运转着的热中子反应堆內, 大于 1 也是有可能的.

## 快中子反应堆: 定义和原理

在一个快中子反应堆內, 引致裂变的中子的平均能量为几百千电子伏, 而在一个热中子反应堆內, 則在 1 电子伏以下. 但無論是快中子引起的裂变或热中子引起的裂变, 裂变产生的中子能量都有一个統計分布, 一直延伸到好几个兆电子伏, 其平均能量約为 2 兆电子伏 (參見第 47 頁图 14). 不过即使在快中子反应堆內, 由于这些裂变中子同燃料和結構材料的原子发生非彈性碰撞的結果, 它們的平均能量也是很快地就会降低到 1 兆电子伏以下的.

当一个裂变核吸收了一个中子以后, 一般有两种可能的反应方式. 它可能进行裂变, 同时釋放出更多个中子; 或者阻留住这个中子, 形成质量数大一个单位的不易裂变的同位素, 例如  $^{236}\text{U}$  或  $^{240}\text{Pu}$ . 对于它們來說, 中子的能量必須要分別高于 0.8 兆电子伏

和 0.6 兆电子伏, 才能使它们发生裂变。

裂变核吸收了一个中子以后所释放的中子数目通常表为

$$\eta = \nu \sigma_f / (\sigma_c + \sigma_f) = \nu / (1 + \sigma_c / \sigma_f). \quad (1.1)$$

在所产生的  $\eta$  个中子内, 除了一个需要用来延续链式反应以外, 其余  $\eta - 1$  个中子都可以用来使再生燃料 (fertile)  $^{238}\text{U}$  或  $^{232}\text{Th}$  增殖为裂变燃料<sup>[1]</sup>。但实际上, 中子总会有些泄漏, 冷却剂和结构材料对中子也必然会有些寄生吸收, 以致只有当  $\eta - 1$  约大于 1.1 时, 再生系数才有可能大于 1。

从  $\eta$  的方程可以见到,  $\nu$  和俘获截面与裂变截面之比都是很重要的参量。对于三种可裂变燃料来说, 当中子能量增大时,  $\nu$  也增大 (每兆电子伏约增大 10%), 但  $\sigma_c / \sigma_f$  却减小。因此, 在一个快中子反应堆的能谱中, 中子的有效使用就会比在热中子反应堆的能谱中来得高。表 1 中所列出的是各种截面和在速度为 2200 米/秒<sup>(2)</sup> (热中子谱的最可几速度) 时的  $\eta - 1$  以及在一个 200 升的快中子反应堆活性区内的数值。

表 1 在快中子反应堆和热中子反应堆内的一些核参量的比较

|                       | $^{235}\text{U}$ |      | $^{239}\text{Pu}$ |      | $^{233}\text{U}$ |       |
|-----------------------|------------------|------|-------------------|------|------------------|-------|
|                       | 热 堆              | 快 堆  | 热 堆               | 快 堆  | 热 堆              | 快 堆   |
| $\nu$                 | 2.47             | 2.51 | 2.91              | 2.97 | 2.51             | 2.55  |
| $\sigma_f$ (巴)        | 582              | 1.59 | 746               | 1.83 | 527              | 2.37  |
| $\sigma_c$ (巴)        | 112              | 0.32 | 280               | 0.32 | 54               | 0.20  |
| $\sigma_c / \sigma_f$ | 0.19             | 0.2  | 0.375             | 0.18 | 0.102            | 0.085 |
| $\eta - 1$            | 1.07             | 1.09 | 1.12              | 1.53 | 1.28             | 1.35  |

如果考虑到存在着相当的寄生吸收和泄漏, 则从表 1 可以看出, 对热中子反应堆来说, 只有以  $^{233}\text{U}$  为燃料时才有可能使再生

[1] fertile 通译为“肥料”, 含意不甚妥切。实际过程是:  $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$  俘获一个中子以后, 分别形成  $^{239}\text{U}$  和  $^{233}\text{Th}$ , 它们再各自接连发生两次  $\beta^-$  衰变, 过渡为可裂变元素  $^{239}\text{Pu}$  和  $^{233}\text{U}$ 。——译者注

系数  $b > 1.0$ 。还可以见到，对各种快中子反应堆来说，如果以  $^{239}\text{Pu}$  和  $^{233}\text{U}$  为燃料，则其再生系数  $b$  将比热中子体系大得很多；但以  $^{235}\text{U}$  为燃料时，其差别不甚显著。然而，在快中子反应堆内，另外还存在着一个可以增大再生系数的因素，那就是再生燃料  $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$  的快中子裂变。在热中子反应堆内，只有约 2% 动力是由再生燃料的快中子裂变贡献的，而在快中子反应堆内却可以大到 25%。一般称之为再生燃料快中子裂变的额外增益。

理论上，在一个以  $^{239}\text{Pu}$ - $^{238}\text{U}$  为燃料的快中子反应堆内，再生系数可能大于 2。但在实际的工程设计中，大部分活性区内充满着冷却剂和结构材料，通常再生系数都在 1.5~1.8 之间。然而必须着重指出，在一个扩大利用核动力的计划中，重要的并不是再生系数本身，而是新生燃料再生的速率。可以用所谓加倍时间来描写这一速率，它的定义是：在这段时间内，一个反应堆再生出来的燃料足够可以另外再建造一个类似的反应堆。加倍时间可以表为（设燃耗 1 克可裂变物质所放出的能量为 1 兆瓦-天）

$$D. T. = \frac{10^6 M}{365 P \cdot L \cdot (b-1)(1-f)} \text{ 年}, \quad (1.2)$$

式中  $M$  = 在一个燃料循环（包括反应堆和核燃料再生工厂）中的可裂变燃料的质量，

$P$  = 反应堆的热输出，以兆瓦为单位；

$L$  = 负载因子，

$f$  = 快中子裂变的额外增益。

哈威尔 (Harwell) 的实验性快中子反应堆 (ZEPHYR) 的再生系数大于 2，但由于不用冷却剂，输出功率限定为 1 瓦特，结果其加倍时间长达约十亿年。但另一方面，在一个动力反应堆内，加倍时间是可以短到 5 年左右的。

## 快中子反应堆内的技术问题

由于快中子裂变的截面比较小，为了达到临界，快中子反应堆

的活性区内必須要用高濃度的可裂变燃料。要使一个无限大的活性区(即不計中子的泄漏)能够达到临界,  $^{235}\text{U}$  的最小濃集度約为 7%, 而  $^{239}\text{Pu}$  約为 5%。所以, 一个快中子动力反应堆必須要有相当数量的濃集燃料。“恩里科·費米”(Enrico Fermi) 快中子再生反应堆(EFFBR)的临界质量为 444 千克濃集度为 25% 的  $^{235}\text{U}$ 。目前, 这种濃集燃料的价格約为每克 5 英鎊。因此, 如果要一个快中子反应堆能够产生出有竞争价值的經濟动力, 其比功率(每吨可裂变燃料所产生的热功率的兆瓦数)必須高到 500 兆瓦/吨数量級。

正是由于这种高功率密度的需要, 在快中子反应堆內引起了以下的一系列問題:

1. 为了提供大的热傳遞面积, 活性区必須分隔得很精細。結果, 快中子反应堆的燃料元件就变得很复杂, 加工費很貴。

2. 需要有一种热傳遞性质很好但又不使中子减速的冷却剂。液态金属可以同时滿足这些要求, 但使用时会引起质量傳遞和腐蝕等新問題。

3. 即使使用直徑为几毫米的細棒状燃料, 燃料和活性区的温度还是高的, 内部的气态裂变产物容易积聚起来, 使燃料逐漸增粗。所以, 寻找出一种耐燃耗的燃料元件是快中子反应堆的主要問題之一。

4. 所选择的复盖材料必須能够同高温情况下的燃料和冷却剂相适应。

5. 当一个运转了几个月的反应堆停閉以后, 其裂变产物的衰变发热还是很剧烈的, 因此應該让冷却剂再自由对流或加压流动好几天。要知道, 万一冷却剂有泄漏, 这部分热量甚至可以把活性区都熔化掉。由于約有 50% 的活性区是被冷却剂占滿着的, 冷却剂的損失以及其后活性区的熔化都使燃料变得更为密集, 致使活性区趋向于超临界状态。即使其后释放的能量并不大, 活性区的损坏还是会发生的。因此, 設計反应堆时必須要使冷却剂的損失

几率非常小；另外还要有一套安全装置，即使活性区熔化，仍不致导致超临界状态。

以上种种，都是设计经济的和安全的快中子动力反应堆时必须研究并加以解决的一些主要问题。

在核动力的生产过程中，主要的费用是燃料的制备、回收、再制备以及投资费用。但设法提高燃料的燃耗以后，头三种费用可以降低（燃耗 = 裂变了的原子数目与原先的可裂变原子、再生燃料原子以及稀释材料原子等数目之和的比值）。因此，在高燃耗的情况下，快中子反应堆动力工厂的总生产成本接近于总投资额；看来，把燃耗从 0.5% 提高到 2% 是很有益的（但进一步提高的得益并不多）。不过即使按 2% 的燃耗以及预计的投资成本估计，快中子反应堆也将可以在经济上与其他已提出的各种型式的反应堆相竞争。

## 快中子反应堆的发展概况

一种类型的反应堆的发展通常包括四个阶段。首先，利用临界装置和零功率反应堆（即不用冷却剂的反应堆）来获得关于反应堆的静态特性和低功率动力过程的情况。第二步，建造一个实验性的动力反应堆，以便在接近于实际的情况下研究一些有关的工程问题。建造实验性反应堆的主要目的是为了找出一种可适用于第三个阶段——模式反应堆的燃料元件。在第三个阶段上，经济效果是必须追求的，动力价格必须达到和其他体系一样低，或者必须证明在第四个阶段——已建成为十足尺寸的民用动力反应堆时——可能如此。

在美国，快中子反应堆的发展开始于建造一系列的小指数堆和零功率体系，然后导致建立克列曼汀（CLEMENTINE）反应堆（功率 20 瓩，以钚为燃料，以汞为冷却剂，1946~1953 年间运转）。但有关该计划的工作后来由于有一根复盖着不锈钢的燃料

元件发生了故障而停止了。1951年,以 $^{235}\text{U}$ 为燃料的实验性再生反应堆I号(EBRI)达到临界,其最大热功率为1.4兆瓦,也是各种型式的反应堆中第一个用来发电的反应堆(功率为200瓩)。所用的冷却剂是鈉-鉀低共熔合金。这个反应堆的一些建造历史在第五章中叙述。在不久的将来,将以鈰代替 $^{235}\text{U}$ 作为裂变物质。

EBRI的运转经验已经用到EBRII的设计上,它是在1961年达到临界的,当时的热功率为62.5兆瓦。开始时以 $^{235}\text{U}$ 为燃料,以后代之以鈰,而冷却剂是鈉。紧靠着反应堆,建立了一个受过辐照的燃料的回收设备,在回收设备中大部分裂变产物都由渣化过程撇除掉。由于大部分元素在快中子通量中的吸收截面都较小,在把燃料重新放回活性区以前,对裂变产物分离的要求可以不象热中子反应堆体系那么严格。另外,还要研究一下燃料的迅速再循环的可能性,从经济观点来看,这对快中子反应堆是很重要的,因为它的临界质量和功率密度都很大。

EBRII反应堆在1958年日内瓦会议文献P/1782中有完全的叙述。

与EBRII的建造计划同时,美国的私人企业正在建造“恩里科·费米”快中子再生反应堆(EFFBR),热功率300兆瓦,净电功率90兆瓦,以 $^{235}\text{U}$ 为燃料。为了资助这个计划,由一些动力利用企业以及另外一些感兴趣的单位组成了动力反应堆发展公司(P. R. D. C.),并聘请原子动力发展学会(A. P. D. A.)作为设计顾问。到正式生产可出售的动力时,这个反应堆将由底特律(Detroit)的爱迪生(Edison)公司负责管理。

ZPRIII是一个有多种用途的零功率临界装置,现在正在用它来模拟EBRII和EFFBR的活性区,同时也用来对快中子体系作一般的物理研究。

为了长期发展的需要,正在研究以液态金属为燃料的体系,为此制订了以熔融的鈰作为燃料的洛斯-阿拉莫斯(Los Alamos)反

应堆計劃(LAMPRE計劃)。在这个計劃中,第一步是建造一个热功率为1兆瓦的反应堆(參見第21頁)。

在哈威尔,快中子反应堆的研究开始于1951年。到1952年,在里斯莱(Risley)开始考虑一个实验性的动力反应堆的模型。最后把它的热功率确定为72兆瓦,准备建造在凱治奈斯(Oaithness)的多恩瑞(Dounreay)。这个反应堆的建造早在1955年就开始了。1954年,在哈威尔作为物理研究用的、以钷为燃料的装置ZEPHYR达到零功率反应堆阶段。在1955~1957年間运轉着的零功率鈾装置ZEUS是多恩瑞反应堆活性区的零功率模拟。1959年11月,多恩瑞快中子反应堆(DFR)用 $^{235}\text{U}$ 达到临界,它的主要目的是想探索一下在工程上建造尽可能大型的反应堆的可能性。这个反应堆的工程設計是非常保守的,因为主要目的是把它作为模式动力反应堆燃料元件( $^{235}\text{U}$ 或Pu)的試驗台。在写作本书的时候,模式反应堆的設計研究正在里斯莱进行之中。

在苏联,第一个快中子反应堆,零功率堆BR-1,在1955年投入运轉。1956年,功率为150瓩、以汞为冷却剂的BR-2也运轉了。1958年以来,以鈉为冷却剂的反应堆BR-5(热功率为5兆瓦)亦已开始工作。不过迄今为止,在苏联的工作几乎完全集中在以钷为燃料的反应堆方面。一个热功率为50兆瓦的反应堆目前正在設計研究阶段;在稍后的計劃中,可能还包括着建造一个电功率为250兆瓦的发电站。

## 快中子动力反应堆

在表2中,把三个快中子动力反应堆DFR,EBR-II和EFFBR同其他型式的反应堆作了比較。可以見到:(a)它們的临界质量要比类似功率的其他体系大5~10倍,(b)热中子通量和功率密度也要大得多,(c)以液态金属为冷却剂的反应堆的热傳遞系数只比以水为冷却剂的反应堆大1~3倍。

表 2

某些动力反应堆的比较

| 名称            | 类型                                                  | 热量输出<br>(兆瓦) | 地址  | 冷清洗 $^{235}\text{U}$<br>的临界质量<br>(千克) | 再生<br>系数 | 每升活性区的<br>功率<br>(兆瓦/升) | 每<br>吨<br>$^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$<br>的功率<br>(兆瓦/吨) | 最高的<br>燃料温<br>度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 热传递系<br>数(瓦/<br>时 $^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ) | 在燃料表<br>面的最大<br>热通量<br>(瓦/时 $^2$ ) | 达到临<br>界的日<br>期     |
|---------------|-----------------------------------------------------|--------------|-----|---------------------------------------|----------|------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| Hinkley Point | 热中子反应堆, 减<br>速剂为石墨, 冷却<br>剂为 $\text{CO}_2$          | 960          | 英国  | 225                                   | 0.85     | 0.7                    | 2.5                                                          | 560                                       | $0.036 \times 10^{-2}$                        | 0.34                               | 1961 <sup>[1]</sup> |
| Shippingport  | 热中子反应堆, 以<br>加压的“轻”水作为<br>减速剂和冷却剂                   | 225          | 美国  | 28.7                                  | —        | 75                     | 354 <sup>[2]</sup><br>(22.4) <sup>[4]</sup>                  | 430                                       | 0.033                                         | 0.85                               | 1957                |
| Vallecitos    | 热中子反应堆, 以<br>沸腾的“轻”水作为<br>减速剂和冷却剂                   | 50           | 美国  | 15                                    | 0        | 50                     | 1300 <sup>[3]</sup><br>(81) <sup>[4]</sup>                   | —                                         | —                                             | 0.4                                | 1957                |
| NPD-2         | 热中子反应堆, 以<br>加压的 $\text{D}_2\text{O}$ 作为减<br>速剂和冷却剂 | 88.9         | 加拿大 | 33.4                                  | 0.8      | 2.6                    | 5.5                                                          | 2250 <sup>[5]</sup>                       | 0.025                                         | 0.46                               | 1961                |
| SRE           | 热中子反应堆, 减<br>速剂为石墨, 冷却<br>剂为 $\text{Na}$            | 21           | 美国  | 42.4                                  | 0.5      | —                      | 7                                                            | 680                                       | —                                             | 0.7                                | 1957                |
| DFR           | 快中子再生反应堆                                            | 72           | 英国  | 210                                   | 1.2      | 476                    | 75                                                           | —                                         | 0.039                                         | 4.3                                | 1959                |
| EBR-II        | 快中子再生反应堆                                            | 62.5         | 美国  | 170                                   | 1.15     | 890                    | 154                                                          | 710                                       | 0.084                                         | 2.1                                | 1961                |
| EFBR          | 快中子再生反应堆                                            | 300          | 美国  | 444                                   | 1.12     | 800                    | 157                                                          | 710                                       | —                                             | 2.4                                | 1961                |

摘自 I. A. E. A. *Directory of Nuclear Reactors*, Vol. 1, 1959, 以及 1958 日内瓦会议文献 P/1782 和 P/2427.

[1] 指两个反应堆中的第一个。

[3]  $\text{UO}_2$  与不锈钢之比为 23% (重量百分比)。

[5] 烧结的天然铀。

[2] 铀与锆合金 (Zircaloy) 之比为 6.33%。

[4] 折算为每吨金属铀的体积的兆瓦数。