

285332

原子能译丛

热中子核反应堆理论

加朗宁著

4

1958

“原子能”編譯委員会編
科学出版社

А. Д. ГАЛАНИН
**ТЕОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ
НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ**

(Приложение № 2—3 к Журналу
“Атомная Энергия” за 1957 г.)

АТОМИЗДАТ МОСКВА, 1957 г.

內 容 簡 介

本书阐述以热中子工作的原子核反应堆的理论。大部分章节均根据苏联作者的工作写成。某些章节则包括原始性的材料。所叙述的不仅是一般性的理论问题,而且也有许多细节,使得本书可以用作实际计算动力堆和实验堆时的指南。在附录及正文中收集了关于许多常数的实验数据,它们可以在计算反应堆时应用,书中假定读者熟悉初等的原子核物理学,本书对于从事核反应堆设计的工程师和物理学家,对于原子能发电站及实验性反应堆的操作人员,以及对于原子动力和反应堆构造这些专业的大学生,都会是十分有用的。

原 子 能 译 丛 (4)

編輯者 中国物理学会
“原子能”編譯委员会
(北京郵箱 287 号)

出版者 科 学 出 版 社
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

印刷者 中国科学院印刷厂

总經售 新 华 书 店

1958 年 12 月第 一 版	书号: 2378 字数: 328,000
1961 年 8 月第三次印刷	开本: 787×1092 1/25
(京) 5201—9,000	印张: 14 24/25

定价: 2.30 元

序 言

本书闡述热中子核反应堆的理論。同时想为核反应堆的中子計算提供一个指南；堆理論的其它部分，例如取热、輻射防护等問題，在书中一般沒有提到；有些問題（例如，控制理論）只是部分地談到。书中沒有敘述原子核物理及运动論大意的章节，我們假設讀者对这些知識已經熟悉。

一般理論牽涉到所有类型的热中子堆，不过有許多对于各种类型反应堆有特殊性的問題并未得到同样仔細的說明。例如，用普通水作慢化剂的堆的理論就发展得不够。

本书內容在詳細的目录中有足够充分的反映。

某些节写得很簡略因而按照它的性質說与手册相接近。另一方面，作者尽量想作到，不仅敘述核反应堆的一般理論，而且也探討許多小的、但常常对于实际是重要的問題。对这些或那些理論方法的适用限度及誤差給予了很大的注意。許多公式都引入了具体的数字，使得它們可以直接应用到实际計算中去。各种常数的数值尽可能地取自最近文献中的数据，虽然文献的証引不可能認為很完整。

閱讀第一部分不需要很多專門的数学准备；在第二部分中收集了一些問題，它們有时要求应用更多一些的数学工具。

本书第二部分不是象第一部分那样对理論的系統敘述。其中闡述一些个别的理論問題，这些問題都好象是对第一部分各节的补充。材料的选择在某种程度上是偶然的。在一定限度内它与作者关于核反应堆理論的工作內容有关。在第一部分中有許多引証第二部分各节的地方，这使材料的利用更容易。

附录中收集了在堆計算的日常工作中必需的参考性材料。

作者特別愿意提到 И. Я. 坡梅郎丘克 (Померанчук) 对他的巨大影响。这本书中利用了許多属于他的观念。作者对 И. Я. 坡梅郎丘克表示自己的深深的感謝。

作者感謝自己最亲近的同事 Б. Л. 約飞(Иоффе) 及 А. П. 卢狄克(Рудик) 的討論, 批判并帮助写出本书的好几节. § 39 是由 А. С. 克隆洛德(Кронрод) 及 Г. М. 阿德孙-維耳斯基(Адельсон-Вельский) 写出的, § 25 中的实验材料系由 Б. Л. 約飞收集. Б. И. 伊里切夫(Ильичев) 对本书的校訂給予了巨大的帮助. И. И. 古烈維奇, (Гуревич), Г. И. 馬尔丘克(Марчук) 及 Л. Н. 烏沙切夫(Усачев) 曾指出有益的批判性的意見. 对所有这些同志作者都表示自己的謝意.

自然, 远不是所有的問題在这本书中都得到了最好的敘述. 对于一切指出缺点的来信, 作者都将十分感謝.

目 录

序言	(Vii)
----	-------

第 一 部 分

引言	(1)
----	-----

1. 链式反应实现的条件(1).
2. 中子的平衡(3).
3. 堆中能量的释放(4).
4. 反应堆的分类(5).

第一章 中子的扩散和慢化

§ 1. 扩散方程	(6)
-----------	-----

1. 考虑到中子吸收和倍增的扩散方程之导出(6).
2. 边界条件(10).
3. 扩散方程适用的规范和真空的边界(12).
4. 扩散系数和中子寿命的平均值(13).

§ 2. 某些情形下扩散方程之解	(17)
------------------	------

1. 二介质边界上的薄吸收层(17).
2. 各种形状的吸收块附近中子密度的分布(18).
3. 各种形状的吸收块内中子密度的分布(19).
4. 吸收块四周的普通水层(21).

§ 3. 初等慢化理论	(22)
-------------	------

1. 和原子核弹性碰撞一次时中子能量的变化(22).
2. 慢化中子按能量的分布(24).
3. 反应堆中的中子谱(26).
4. 中子在氢中的慢化(28).
5. 慢化密度(30).
6. 在非氢慢化剂中的慢化(31).

§ 4. 慢化中子的空间分布	(32)
----------------	------

1. 扩散理论的方程(32).
2. 扩散理论方程对于最简单的一些情形之解(33).
3. 扩散理论适用的限度(35).
4. τ 的各种公式(36).
5. 非弹性碰撞的影响(38).
6. 裂变时产生的中子的非单能性对慢化长度的影响(39).
7. 热中子非单能性的考虑(39).

第二章 根据单群中子理论的反应堆的临界大小

§ 5. 带有有效扩散系数的方程	(42)
------------------	------

1. 积分方程(42). 2. 带有有效扩散系数的方程的推导(42). 3. 适用条件(44).
- § 6. 没有反射层的反应堆 (44)
1. 边界条件(44). 2. 球形堆(45). 3. 圆柱形堆(45). 4. 长方体形堆(47).
- § 7. 带反射层的反应堆 (47)
1. 带无限反射层的球形堆(47) 2. 带有限反射层的球形堆(49). 3. 侧面具有有限反射层的圆柱形堆(50).

第三章 中子在均匀介质中的倍增,慢化和扩散

- § 8. 普遍方程 (52)
1. 出发的微分方程(52). 2. 边界条件(53).
- § 9. 中子在慢化时的吸收和倍增 (54)
1. 考虑到吸收的慢化方程(54). 2. 考虑到慢化时中子的吸收的初始条件(56). 3. 考虑到慢化时中子的吸收的边界条件(57).
- § 10. 双群方程 (58)
1. 双群理论方程的表述(58). 2. 特征根(59). 3. 适用规范(60). 4. 慢化时中子吸收的考虑(62). 5. 数量 w 及 δ 和共振积分的关系(63). 6. 边界条件的平均(66). 7. 对于多种介质的双群理论公式(67). 8. $\frac{1}{\rho}$ 律的情形(68). 9. 多群方程(70).
- § 11. 均匀介质中的共振吸收 (71)
1. 基本方程(71). 2. 氢慢化剂的情形下基本方程之解(72). 3. 非氢慢化剂的均匀介质中的共振吸收(73). 4. 共振吸收公式的研究(73). 5. 危险区的宽度及适用条件(75).

第四章 非均匀反应堆

- § 12. 热吸收 (77)
1. 均匀堆中的热吸收(77). 2. 块效应(78). 3. 内部块效应(78). 4. 外部块效应(79). 5. 具有复杂壳套的圆柱形棒(81). 6. 铀棒附近普通水的薄层(84). 7. 铀棒附近的空隙(84). 8. 由薄片构成的块(85). 9. 关于块效应的非扩散改正(86).

§ 13. 共振吸收	(86)
1. 块效应(86). 2. 均匀化半径(87). 3. 受屏的共振吸收(89). 4. 和均匀介质中的共振吸收的比较(93). 5. 未受屏的共振吸收. 共振吸收的半经验公式(94). 6. 平均长度的计算(94). 7. 各种形状块的共振吸收(96). 8. 适用的条件(97). 9. 关于 U^{238} 的共振吸收的实验数据(99). 10. 谱线部卜勒展宽的影响(102). 11. 有限大小的堆中的共振吸收(103).	
§ 14. 快中子引起的倍增	(105)
1. 快中子倍增对倍增系数的影响(105). 2. U^{238} 和快中子相互作用的截面(105). 3. 快中子倍增(106).	
§ 15. 徙动长度, 倍增系数及拉氏参数	(108)
1. 徙动长度(108). 2. 栅中的扩散长度和慢化长度(109). 3. 反应堆中扩散的各向异性(110). 4. 倍增系数及拉氏参数(112). 5. 倍增系数及拉氏参数对单位格子面积及块半径的依赖性(113).	
第五章 反应堆的临界大小	
§ 16. 无反射层堆的临界大小的精确理论	(115)
1. 不计慢化中子吸收时拉氏参数的决定(115). 2. 和年龄理论的偏差及新生中子的非单能性(118). 3. 考虑到中子在慢化中的吸收和产生时拉氏参数的决定(119). 4. 慢化中子吸收弱的情形(122)	
§ 17. 双羣理论中关于堆临界大小的问题的精确解	(122)
1. 问题的提法(122). 2. 活性区及反射层中具有同样慢化剂的球形堆(123). 3. 带任意反射层的球形堆(124). 4. 两端没有反射层的圆柱形堆(126). 5. 关于双羣理论之误差的消去(126).	
§ 18. 有效边界条件法	(127)
1. 方法的观念(127). 2. 对于各种形状的堆应用边界条件(128). 3. 根据边界条件决定临界大小(128). 4. λ 和反射层有效厚度的关系(129). 5. 根据双羣理论为平面问题决定 λ (129). 6. 中子密度的分布(130). 7. 边界条件法应用于所有方面都带反射层的圆柱形堆(131). 8. 边界条件法的误差(133).	
§ 19. 中子密度在堆中的分布	(133)
1. 平均系数(133). 2. 无平坦区的堆之平均系数值(134). 3. 根据边	

- 界条件法决定平坦区的大小(135). 4. 根据双羣理論决定平均系数(136). 5. 非均匀計算的某些結果(139).
- § 20. 关于中能中子堆 (140)
1. 問題的提法(140). 2. 反应堆的拉氏参数(140). 3. 被吸收的中子数对能量的依赖性(142). 4. 临界质量(143). 5. 反射层的作用(145).

第六章 扰动理論

- § 21. 扰动理論对弱吸收体的应用 (148)
1. 扰动理論对单羣中子方程的应用(146). 2. 反应性及中子密度(148). 3. 扩散系数的改变(148).
- § 22. 对于強烈吸收块(控制棒)的扰动理論 (149)
1. 問題的提法(149). 2. 单羣中子理論的应用(150). 3. 控制棒附近中子密度的分布(151). 4. 扰动理論同精确解的比較(152). 5. 倍增介质的积分方程之应用(153). 6. 平方平均系数之值(155).
- § 23. 对于双羣中子方程的扰动理論 (156)
1. 伴随方程(156). 2. 扰动理論(158). 3. 决定伴随函数之例(159). 4. 介质的扩散系数的变化(160).

第七章 核燃料的同位素成分随时间的变化

- § 24. 中毒 (163)
1. 中毒的物理性质(163). 2. 稳定的中毒(164). 3. 中毒和堆工作时间的关系(165). 4. 堆的停止("碘坑")(167). 5. 从一功率过渡到另一功率(169). 6. 中子密度分布不均对中毒大小的影响(169). 7. 对于可裂变同位素之混合物的稳定中毒(171).
- § 25. 結渣 (171)
1. 渣对中子的吸收(171). 2. 各类渣(174). 3. 串级中子吸收(177). 4. 停堆时 Sm^{149} 对过渡过程的影响(178).
- § 26. 一般的动力学方程 (179)
1. 引言(179). 2. 不計慢化中中子吸收的动力学方程(179). 3. 反应堆的特征随时间的变化(182). 4. 时间和燃料消耗的关系(183). 5. 鈴的近似考虑(185). 6. 考虑到慢化中中子吸收的动力学方程(185). 7. U^{236} 的积累(188).

§ 27. 小损耗 (188)

1. 环系数(188).
2. 对反应堆有限大小的改正(189).
3. Np^{239} 的考虑(190).
4. 倍增系数随时间的变化(191).
5. Pu^{240} 及 Pu^{241} 的积累(193).
6. 同位素在堆中的平均浓度(193).
7. Np^{239} 对中子的吸收(194).

§ 28. 动力学的特殊情形 (195)

1. 用钍及 U^{233} 的反应堆(195).
2. 平衡浓度(196).
3. 随时间的动力学(197).
4. 从用 U^{235} 的堆过渡到用 U^{233} 的堆的动力学(199).
5. 块由纯粹可裂变同位素组成时的动力学(200).
6. 中子利用系数(201).

第八章 考虑缓发中子的动力学, 温度效应及控制

§ 29. 考虑缓发中子的动力学 (203)

1. 问题的提法(203).
2. 缓发中子的周期(203).
3. 没有缓发中子时的动力学(205).
4. 考虑一组缓发中子时的动力学(206).
5. 反射层的影响(208).
6. 考虑到所有各组缓发中子的动力学(209).
7. 考虑两组缓发中子的过渡过程(213).
8. 堆的上升周期(216).
9. 停堆后放热的动力学(217).

§ 30. 温度效应 (217)

1. 温度对反应性的影响(217).
2. 慢化剂密度的变化(218).
3. 中子温度的变化(219).
4. 铀变热时共振吸收的变化(222).
5. 普通冷却水的温度变化(223).
6. 反射层的变热(224).
7. 温度系数的号及数值(225).

§ 31. 控制 (225)

1. 控制系统的使命(225).
2. 控制棒的效率同半径的关系(226).
3. 控制棒及散射介质间的空气隙(227).
4. 控制棒的效率同它插入深度的关系(227).
5. 控制棒的干涉(229).
6. 控制棒栅(233).

第 二 部 分

§ 32. 单速运动论方程 (237)

1. 引言(237).
2. 运动论方程的推导(237).
3. 扩散近似(239).
4. 运动论方程对于无限空间的精确解(241).
5. 运动论方程的精确解的研究(244).
6. 散射各向异性的考虑(246).
7. 派耳司方程(248).
8. 同真空的交界(249).

§ 33. 运动論方程的近似解	(250)
1. 平面問題(250). 2. 扩散近似(252). 3. P_3 近似(253). 4. 同真空的交界(255). 5. 圆柱几何形(258). 6. 无限非吸收介质中的圆柱形吸收棒(263). 7. 变分法(265). 8. 黑球及黑圆柱(267).	
§ 34. 对热利用系数的非扩散改正	(270)
1. 問題的提法(270). 2. 对屏蔽系数的改正(270). 3. 对外部块效应的改正(272). 4. 計算結果(273). 5. 对能量的平均(274). 6. 結論(276).	
§ 35. 热能中子譜	(277)
1. 問題的提法(277). 2. 对于单原子气体型慢化剂的运动論方程(278). 3. 氢中的慢化(280). 4. 重慢化剂的情形(284). 5. 中子的有效温度(286). 6. 徙动长度(292).	
§ 36. 含非氢慢化剂的均匀介质中的共振吸收	(293)
§ 37. 含有慢化剂的块之共振吸收	(296)
§ 38. 带反射层堆按照双羣理論的临界大小	(300)
1. 平板形堆(300). 2. 侧面带反射层的圆柱形堆(302). 3. 球形堆(303).	
§ 39. 反应堆临界大小的数值計算	(305)
1. 扩散方程的有限差形式(305). 2. 問題的提法(306). 3. “追逐”法(308). 4. 对于方程(39.5)及(39.6)之系数的公式(311). 5. 具有多区的圆柱形堆之临界大小的半解析計算(312). 6. 边界条件(314). 7. 临界条件(316). 8. 解的构成(318).	
§ 40. 非均匀堆理論	(319)
1. 基本方程(319). 2. 弱共振吸收(320). 3. 关于决定非均匀堆临界大小的問題之提法(321). 4. 向均匀堆的过渡(323). 5. 柵的特征方程(324). 6. 热吸收中的块效应(326). 7. 热中子密度在单位格子中的分布(327). 8. 复合柵(328). 9. 对棒半径有限性的改正(330). 10. 反应性及中子密度(332). 11. 非均匀边界条件(335).	
§ 41. 临界质量的极小值及中子在堆中的分布	(339)
§ 42. 控制棒附近中子密度的陡度	(344)
附 录	(349)
一、常数及轉換系数(349). 二、鎢及鈾的同位素截面(349). 三、某些物质的扩散常数(351). 四、慢化长度(353). 五、快中子倍增系数(355). 六、对于拉氏参数之特征方程的图解法(356). 七、按边界条件法决定带反射层的圆柱形堆的临界半径(358). 八、中毒及結渣(359). 九、停堆后释放的热(361). 十、绝对吸收圆柱的有效半径(362). 十一、重水堆中 H_2O 渗杂成分对反应性的影响(362).	

第一部分

引言

1. 鏈式反应实现的条件 讓我們来考察一个中子从它在鈾原子核裂变时产生开始直到被某一原子核吸收为止的全部遭遇。順便我們要确定以后将要使用的基本术语^[1,2]。

設 U^{235} 的原子核^{*)} 吸收了一个中子,而且形成的核进行了分裂。裂变的結果平均产生 ν_0 个中子,它們的主要部分即刻放出来,而某一(小)部分則延緩一段时间后从裂变的殘余碎片飞出。一小部分中子的延緩在研究反应堆的动力学(見第八章)时必须加以考虑。裂变时产生的中子的平均能量約为 2 兆电子伏。这些中子中的某些,在通过鈾块时,可以被 U^{238} 的原子核吸收并引起它們裂变,結果代替 ν_0 个中子我們將得到 $\nu_0 \epsilon$ 个。数量 $\epsilon > 1$ 称为快中子增殖系数(詳見 § 14)。

中子同鈾原子核的碰撞使它的能量改变极少^{**)} 。当中子从鈾块飞出并落到慢化剂(重水,石墨)中时,它的能量就因为同慢化剂的輕原子核碰撞的結果开始很快减小。经过几次碰撞之后,中子的能量就会减小这样多,以致它已經不再能引起 U^{238} 原子核的裂变了^{***)}。在进一步慢化时中子数保持不变,直到它們的能量降到几十或几百电子伏为止。

在 7 电子伏, 20 电子伏附近及以上(見 § 13)的某些狹窄的中子能量区域中, U^{238} 的原子核具有強烈吸收中子的能力(共振吸收),結果产生 U^{239} ,它在 β -衰变之后变成 Np^{239} ,然后再变成 Pu^{239} (見第七章)。讓我們用 ϕ 表示中子在這一能区中不被 U^{238} 的核吸收的几率(在美国

*) 为确定起見,我們假設,反应堆中除 U^{235} 以外沒有其它可以裂变的核,虽然这一点在此并无重大的意义。

**) 也有可能在中子和鈾核的这种碰撞时产生核的激发,因而中子丧失自己能量的一大部分(非彈性碰撞),但在这里这情况并不重要。

***) U^{238} 裂变閾約在 1 兆电子伏附近。

文献中不用 φ 而用 p 来表示)。于是, 能量小于 U^{238} 的共振能级的能量的中子数, 将等于 $\nu_0 \varepsilon \varphi$ 。

当中子的能量变到同慢化剂分子的平均运动能量可以相比时, 它们的进一步慢化就会终止。具有这一能量的中子叫作热中子。实际上热中子具有各种能量(它们的能量近似地按麦克斯韦定律分布)而且和慢化中子并没有截然的界线分开(见 § 35)。

热中子运动时, 和各种原子核相碰撞, 直到它们被 U^{235} , U^{238} 或反应堆中存在的任何其他元素的原子核所吸收为止。多数物质的吸收及裂变截面随着中子速度的减小而增大。因此, 被吸收的中子多数是在慢化已经終了的热能处被吸收, 虽然, 严格地说, 在慢化过程中也有一些中子被吸收(除 U^{238} 的共振吸收以外)(见第三章)。

热中子将被铀所吸收, 而不被堆中所有任何其它物质所吸收的几率叫作热利用系数; 我们将用 θ 来表示它(在美国文献中通常用 f 来表示)。 θ_0 将用来表示被铀吸收的中子将被 U^{235} 核所吸收并引起它裂变, 而不被 U^{238} 核所吸收(或被 U^{235} 吸收, 但不引起裂变)的几率。于是, 再一次引起 U^{235} 裂变的中子数等于:

$$k = \nu_0 \varepsilon \varphi \theta_0 \theta = \eta \varepsilon \varphi \theta, \quad (0.1)$$

式中

$$\eta = \nu_0 \theta_0. \quad (0.2)$$

有时候不用 η 而用记号 ν_{eff} ——对于铀各种同位素的混合物, 次级中子数的有效值。数量 k 叫作倍增系数。

如果反应堆无限大因而中子不可能离开它, 那末保证实现链式反应的条件就会是:

$$k = 1. \quad (0.3)$$

这时中子数不随时间变化。如果 $k > 1$, 那末中子数就会增加, 而在相反的情形下则减少。

实际上反应堆总是具有有限的大小, 因此某一部分中子会从堆中跑出并在堆外被吸收, 而不参予链式反应的维持。这时只有

$$k = k_{\text{крит}} > 1 \quad (0.4)$$

时中子数才不会随时间变化。

和 $k_{\text{крит}}$ 的每一数值相应, 有反应堆的一定体积, 叫作临界体积. 我们将考虑那些中子数 (亦即堆中释放的功率) 随时間不变的情形. 因此我们以后将把 $k_{\text{крит}}$ 就叫作倍增系数并且用字母 k 来代表它. 这样定义的倍增系数常常被叫作无限堆的倍增系数并且用 k_{∞} 来表示; 这时常用字母 k 表示 k_{∞} . 与从堆中跑出的中子数之差, 在稳定情况下, 此差恆等于 1.

2. 中子的平衡 关系式 (0.3) 或 (0.4) 表示出中子的平衡, 即, 确定在什么条件下反应堆中的中子数量不会随时間变化. 让我们用稍微不同一些的形式来表示出这一中子平衡. 代替 ν_0 , 我们考虑 U^{235} 的原子核吸收一个中子时产生的快中子数:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sigma_f}{\sigma_a}, \quad (0.5)$$

式中 σ_f —— 裂变截面, 而 σ_a —— 总吸收截面 (即, 裂变截面及辐射俘获截面之和). U^{235} 核吸收一个中子的结果产生 ν 个中子. 这些中子分配如下:

1. 一个中子分去维持链式反应.
2. x_p 个中子被 U^{238} 的原子核 (在热能区或共振能区) 俘获. 结果产生 x_p 个钍核. 数量 x_p 叫作按钍的中子利用系数, 或者就叫作钍系数.
3. x 个中子被专门放在堆中来生产人造同位素的某种物质的原子核所俘获. U^{235} 核每吸收一个中子所产生的同位素的核数刚好等于 x . 数量 x 叫作中子利用系数.
4. $\sum q_i$ 个中子无益地被慢化剂、载热剂、工艺材料以及反射层和防护层所吸收*).

因此, 如果反应堆稳定地工作, 就会满足下列等式:

$$\nu = 1 + x_p + x + \sum_i q_i. \quad (0.6)$$

数量 x 可以意味着在堆中生产可裂变的同位素. 于是, 若 $x + x_p$

*) 如果在反射层中摆放用来生产人造同位素的物质, 那末中子在反射层中的有益吸收是可能的.

> 1 , 則堆中每消失一个 U^{235} 的原子核, 就会产生多于一个的新的可裂变的原子核, 就是說, 就会进行可裂变核的再生。

可能再生的条件如下:

$$k_{\infty} > 2. \quad (0.7)$$

3. 堆中能量的釋放 設鈾核每次裂变所放出的能量为 E_f , 于是 m 克 U^{235} 裂变时放出能量:

$$W = \frac{0.602 \times 10^{24} m}{A} E_f, \quad (0.8)$$

式中 m 是 U^{235} 的原子量。每次裂变时放出的能量等于 190 ± 5 兆电子伏^[3]。其中包括: 裂片的动能, 即发 γ -射綫的能量, 裂片的 β -及 γ -輻射的能量(不計中微子的能量), 中子的动能。此外, 某些能量在 U^{235} 核俘获中子而不裂变时以及在 U^{238} 核、慢化剂及堆中杂质俘获中子时放出。这一能量依赖于堆的结构并等于几兆电子伏*)。

裂变的全部能量近似地分配如下^[4]:

裂片的动能.....	162 兆电子伏
即发 γ -射綫能.....	6 兆电子伏
裂片的 β -衰变能.....	5 兆电子伏
裂片的 γ -輻射能.....	5 兆电子伏
裂变时所产生中子的动能.....	6 兆电子伏
中微子带走的能量(不在堆中放出).....	11 兆电子伏
总和(不算中微子).....	134 兆电子伏

由于 $A = 235$, $E_f = 190$ 兆电子伏, 而

$$1.60 \times 10^{13} \text{ 兆电子伏} = 1 \text{ 焦耳},$$

由(0.8)便得:

1.08 克分裂了的 U^{235} 放出的能量等于

$$1 \text{ 兆瓦-日}. \quad (0.9)$$

*) 在純粹 U^{235} 帶着普通水作为慢化剂的堆中(在其中进行决定 E_f 的實驗), 这一能量等于 2.7 兆电子伏^[3]。

同一工作中对于 E_f 引用了下列結果:

$$E_f = 190 \frac{\sigma_{Au}}{95} \cdot \frac{550}{\sigma_f} \text{ 兆电子伏},$$

式中 σ_{Au} ——金的吸收截面; σ_f —— U^{235} 的裂变截面。如果把新的截面值 $\sigma_{Au} = 98.7$ 及 $\sigma_f = 590$ 代入上式中, 便得 $E_f = 184$ 兆电子伏。

相应的裂变数等于 2.76×10^{21} 。假定对于 $U^{235} \frac{\sigma_f}{\sigma_a} = 0.845$ (見附录二), 使得:

1.28 克消失了的 U^{235} 放出的能量等于
1 兆瓦-日。 (0.10)

由于第 2 段中的数量 x_p 及 x 是对于一个消失了的 U^{235} 核来说的, 所以为要得出反应堆中所生产的同位素的绝对量, 就要用 1.28 乘原子量的比值:

$$M = 1.28 \times \frac{A}{235} Wt, \quad (0.11)$$

式中 M ——用克表出的所生产同位素之量, A ——同位素的原子量, W ——用兆瓦表出的堆功率, t ——用日表出的工作时间。对于 Pu^{239}

$$M = 1.30 x_p Wt, \quad (0.12)$$

让我们再定出中子流密度 (1 立方厘米中的中子数 N 和中子速 v 的乘积) 与 1 吨铀中所放出的功率之间的关系:

$$vN = \frac{P}{\sigma_f N_s E_f}, \quad (0.13)$$

式中 P ——1 吨铀中由于产生裂变的結果, 每秒放出的能量, N_s ——每吨铀中 U^{235} 的原子数, 把 $\sigma_f = 590 \times 10^{-24} (\text{厘米})^2$, $E_f = 190$ 兆电子伏 $= 3.04 \times 10^{-11}$ 焦耳代入上式, 使得:

$$vN = 2.2 \frac{P}{c_s} \times 10^{10} \text{ 中子}/(\text{厘米})^2 \cdot \text{秒}, \quad (0.14)$$

式中 P ——用兆瓦表出的每吨铀的功率, c_s —— U^{235} 的加浓度, 即, U^{235} 的原子数和全部铀原子数之比, v ——用厘米/秒表出的中子速。

对于天然铀, $c_s = 7.14 \times 10^{-3}$, 这给出*)

$$vN = 3.08 P \times 10^{12} \text{ 中子}/(\text{厘米})^2 \cdot \text{秒} \quad (0.15)$$

4. 反应堆的分类 在第 1 段中考虑一代中子的历史时, 我们心目中的是热中子反应堆。这意味着, 反应堆中的中子主要是在到达热速后才被吸收, 虽然它们的某一 (小) 部分总是在慢化过程中被俘获。除

*) 公式 (0.13) — (0.15) 中, 没有考虑 U^{238} 裂变时放出的能量。

了热中子堆外,也可以有快中子堆和中能中子堆,快中子堆中没有慢化剂,因而中子被吸收时所具有的能量和核裂变时所产生的中子带有的能量差不太多。在中能中子堆中,有慢化剂,但很少,因此中子的吸收主要发生在比热能高相当多而比新生中子能低的很宽能域内。本书中只探讨以热中子工作的反应堆。

除了按照中子谱的种类来分反应堆的类外,也可以按照其它的特征来分它们的类:按照燃料的种类——天然铀,同位素 U^{235} 加浓了的铀,纯粹的可裂变同位素(U^{233} , U^{235} 或 Pu^{239});按照慢化剂的种类——石墨,重水,普通水,铍;按照燃料布置的特性——均匀的(当铀均匀地分布在堆体积中时);或非均匀的(当铀一块一块地布置着时);按照载热剂的种类——普通水,重水,气体,液态金属;按照用途——为实验研究用的反应堆,为生产电能、钚或同时生产二者用的反应堆。

一般的理论适用于所有这些反应堆,只有个别的问题才对这种或那种堆具有更大或更小的意义。

参 考 文 献

- [1] Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон, ЖЭТФ 9, 1425(1939); 10, 29, 477(1940).
- [2] Э. Ферми, УФН 32, 54 (1947).
- [3] J. L. Мест, Phys. Rev. 94, 759 (1954); Nucleonics 12, No. 5, 62 (1954).
- [4] С. Глассон и Эдлунд, Основы теории ядерных реакторов. Изд. ИЛ, Москва, 1954.

第一章 中子的扩散和慢化

§1. 扩散方程

1. 考虑到中子吸收和倍增的扩散方程之导出 我们将假定,所有热中子具有同一(按大小说,而不是按方向说)速度

用 N 表示热中子密度,即,每立方厘米内的热中子数。体积 V 中中子的数量等于 $\int_V N(\mathbf{r}) dV$.

此数随时间的变化,即, $\frac{\partial}{\partial t} \int_V N(\mathbf{r}) dV$, 包括下列几项.

第一, 某一数量的中子从所考虑的体积中跑出. 中子流比例于中子密度的坡度. 比例系数叫作扩散系数^{*)}. 总中子流, 即, 每秒从体积 V 跑出的中子数, 等于

$$-D \oint_S \text{grad } N(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S};$$

这儿积分积过包围体积 V 的表面 S . 应用高斯-奥斯特洛格拉得斯基定理, 我们有

$$D \oint_S \text{grad } N(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = D \int_V \Delta N(\mathbf{r}) dV,$$

式中 Δ ——拉氏算符 $\left(\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$.

第二, 体积 V 中的中子数由于吸收而变化.

如果用 T_0 表示中子的寿命, 那末体积 V 中每秒钟被吸收的中子数就会等于

$$\frac{1}{T_0} \int_V N(\mathbf{r}) dV.$$

第三, 体积 V 中的中子数由于有所产生^{**))}而变化.

如果源密度, 即, 单位体积内每秒钟产生的中子数, 等于 $Q(\mathbf{r})$, 那末体积 V 中每秒产生的中子总数就等于

$$\int_V Q(\mathbf{r}) dV.$$

写出中子的平衡, 便得

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V N(\mathbf{r}) dV = D \int_V \Delta N(\mathbf{r}) dV - \frac{1}{T_0} \int_V N(\mathbf{r}) dV + \int_V Q(\mathbf{r}) dV.$$

(1.1)

由于这一等式对于任何体积都适用, 所以积分号内的函数之间应当有等式.

^{*)} 更精确的考虑在 §32.

^{**))} 所谓产生, 我们在本情形下是指由慢化中子转到热能的中子.