

343109

中国科学院图书馆
原子能研究所

第二届和平利用原子能国际会议文献

反应堆物理学与 研究用反应堆

5

中国科学院原子核科学委员会编辑委员会编
科学出版社出版

后 記

1958年第二屆和平利用原子能國際會議文獻，由中國科學院原子核科學委員會編輯委員會組織力量選譯了一部分參考價值較大的文章，交由我社陸續出版。

這一冊是“反應堆物理學與研究用反應堆”方面的最後一集。本冊的校訂和編輯工作完全由中國科學院原子核科學委員會編輯委員會負責，限于時間，我社未再進行加工。譯文如有欠妥之處，希讀者指正。

科學出版社

1963年4月

反應堆物理學與研究用反應堆(5)

中國科學院原子核科學委員會編輯委員會編

*

科學出版社出版 (北京朝陽門大街117號)

北京市刊印出版業營業許可證出字第061號

中國科學院印刷廠印刷 新華書店總經售

*

1963年5月第一版

書號：2728 字數：566,000

1963年5月第一次印刷

開本：787×1092 1/16

(京) 0001—1,800

印張：23 7/8

定價：3.20元

目 录

反应堆物理学

P/597	快中子谱测定的一些通用技术	1
P/39	零功率快中子反应堆上的实验工作	11
P/598	ZPR-III 装置上快中子动力反应堆的研究	56
P/2381	在设计中能反应堆时的物理考虑	91
P/2306	实验性重水反应堆的临界实验	103
P/593	无反射层 U^{235} (普通)水溶液临界系统的实验与理论之研究	118
P/1379	双活性区再生反应堆的研究	133
P/594	在含有多棒燃料元件的石墨栅格上的指数实验	146
P/1900	中子燃耗吸收剂的理论与应用	153

原子核数据和反应堆理论

P/11	一些对反应堆很重要的同位素 (Tc^{99} 、 Nd^{143} 、 Nd^{145} 、 Sm^{149} 、 Sm^{152} 、 Eu^{151} 、 Eu^{153} 、 Gd^{155} 、 Gd^{157} 、 Pu^{240}) 的中子截面	180
P/685	Pu^{240} 、 Pu^{242} 和 Am^{243} 的慢中子截面	195
P/2417	某些反应堆结构材料的有效中子吸收	203
P/2149	能量为 3—11 兆电子伏的中子引起的 Th^{232} 和 U^{238} 的裂变截面及能量为 3—8 兆电子伏的中子引起的 U^{235} 、 U^{235} 、 Np^{237} 和 Pu^{239} 的裂变截面	210
P/10	利用飞行时间和积分法测定反应堆能谱	218
P/2148	重介质中中子的热能化与扩散	249
P/1194	水中快中子传播的蒙德卡洛法研究	265
P/2224	昂扎盖尔 (Онзагер) 理论在研究核反应堆吸收介质中中子扩散问题上的应用	288
P/2034	燃料元件棒径向的热中子密度分布	293
P/53	计算小功率反应堆的通量分布的解析方法	303
P/17	蜡制模型的模拟方法在反应堆计算中的应用	309
P/638	沸水反应堆的静力学与动力学理论	319

研究性反应堆

P/415	通用电气公司的 30 兆瓦试验性反应堆的设计与安全措施	329
P/1282	布加勒斯特原子物理研究所 2000 瓦反应堆在过渡条件下性能的预计	335
P/422	1 兆瓦游泳池式研究用反应堆的经验	346
P/2279	巴西游泳池式反应堆以 5 兆瓦工作的最初结果	374
P/2275	用 IEAR-1 游泳池反应堆在 5 兆瓦所观察到的辐射强度及水和空气中的放射性	378

快中子譜測定的~~一些~~通用技術*

腊 曼 罗 伯 兹**

中子譜的知識對於解釋快中子反應堆及成對反應堆系統的實驗結果是很重要的。通過在阿貢 (Argonne) 的兩個零功率堆 ZRP-III^[1] 和 ZPR-V^[2] 上的臨界裝置的工作及實驗快中子增殖堆 EBR-I^[3] 上的測量, 獲得大量有關快中子堆及成對堆系統的性質的資料。

快中子相互作用參數的研究曾經促進了快中子能量及強度的測量技術的發展^[4]。但是這些方法對於 1 兆電子伏以下, 能量分布連續, 強度低而不能用飛行時間技術的中子譜的測定來說, 並不適宜。最近有一種用核乳膠及云室測定 EBR-I 的中子譜的束式測定方法, 不過由於云室靈敏度很低, 因而使這種方法不能廣泛地運用。用箔活化法和把裂變計數管放在 EBR-I^[6] 及零功率堆中的方法都可以提供在寬闊的能量範圍內能譜方面的資料。但是, 為了要更精確地驗證多羣計算所得的譜, 我們用幾種新的方法來測定低功率的稀釋快中子堆 (dilute fast reactor) 裝置中的中子譜。這些方法包括: (1) 用符合反沖式譜儀來測定; (2) 用細顆粒的核乳膠來測定; 以及 (3) 用載 Li^6 的玻璃微粒的核乳膠來測定。

符合反沖譜儀

最近已經改進了一種比一般固體輻射體式的中子譜儀靈敏度更高, 低能極限更低的中子譜儀^[7]。這種中子譜儀由裝在一個普通殼子裡的三個充甲烷的脈沖電離室組成。其中兩個是圓柱形的, 而且結構是一樣的。它們之間用一塊准直板隔開, 板上有很多小孔。第三個區域中含有幾個電極, 這個區域跟第二個計數管部分地同軸, 但其間用柵網分開。當中子束直接射到第一個計數管上時, 其中一部分中子被計數管中的氫氣散射出來。我們只對這樣的事件感興趣: 即中子和質子在第一個計數管中發生碰撞, 而撞出來的質子經過內准直器, 並且把它反沖余留能量在第二個脈沖電離室中消耗掉。對於這樣的事件, 我們把質子在兩個脈沖電離室中失去的能量加起來, 並且把它記錄下來。第三計數管跟前兩計數管反符合, 以便除去那些穿透過前兩個計數管而還沒有走完它的全部射程的反沖質子事件。入射中子束的准直、反沖質子的准直, 以及反符合都使 10 道分析器所記下的脈沖真正對應於起相互作用的中子。

校 正 工 作

這種譜儀對於單能中子的工作情況及其適用的能量範圍以及它的局限性, 曾經有人報導過^[7]。在上述的儀器上加上一個可移動的 α 粒子源, 這個源裝在反符合計數管的外

* Some Current Techniques of Fast Neutron Spectrum Measurements (A/CONF. 15/P/597, 美國, 載于 Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, vol. 12).

** W. C. Redman, J. H. Roberts (美國, 伊利諾斯州, 拉蒙特, 阿貢國立實驗室)。

面而跟里面的准直器在一条线上。这就可以很方便地校对谱仪及其所附电子学电路的工作情况。取一只“长计数管”^[1]作为监察器，用 ${}^7\text{Li}(p,n)\text{Be}^7$ 反应中出现的 neutron 可以确定这种谱仪的效率与能量关系。在图 1 比较了 4.76 和 13.70 厘米汞柱气压下的每个数据点与散射截面和反冲质子射程的归一化乘积。每个数据点由 347 个事件平均而得。理论的效率是跟这个乘积成正比的，只要中子通量在比内准直器稍大的面积内是均匀的，而且反冲质子射程 (R) 小于一只计数管的直径 (D)。由于反符合的装置，射程更长时则效率下降，当 $R > 2D$ 时效率变为零。虚线是根据实验指出的偏离得来的。准直器的厚度的作用和电子学仪器偏压的作用使能量灵敏范围有一较低的下限。

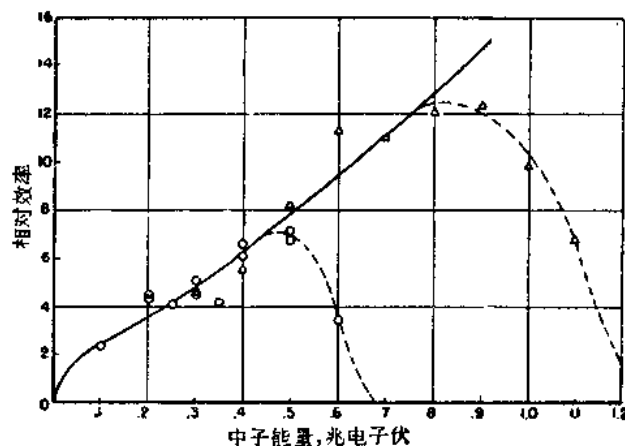


图 1 由实验所测出的符合反冲谱仪对单能中子的效率与反冲射程小于一个计数管直径时的预期能量关系的比较

- 实验数据
 ○ $P = 4.76$ 厘米汞柱
 △ $P = 13.70$ 厘米汞柱
 — 理论曲线, $R < D$
 $\epsilon = KR(E, 0^\circ)\sigma_s^H(E)$
 K 是为了数据与曲线符合用的调节常数
 假设的曲线, $R > D$

在 ZPR-III 上进行的测量

这种谱仪曾用来测定 EBR-I 的一座模型中的中子谱，这座模型是在 ZPR-III 内建成

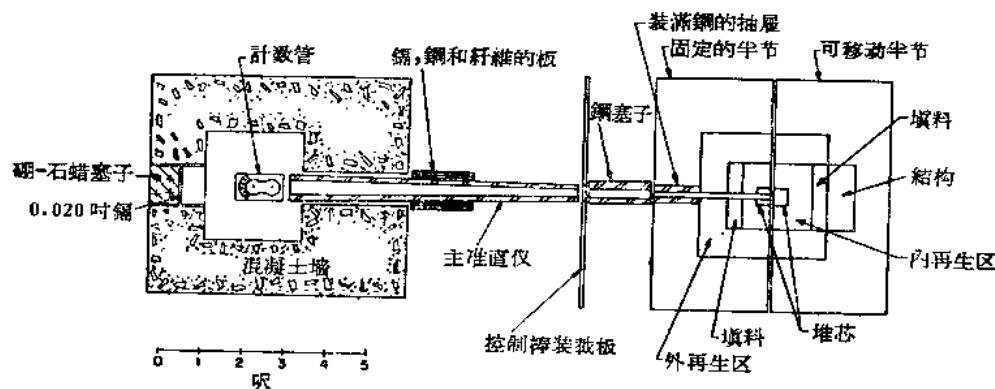


图 2 准直及屏蔽系统的平面图，这个系统是用符合反冲谱仪来测定 ZPR-III 中的一座 EBR-I 模型中心的中子谱的

的。图 2 表示从临界装置的中心引出中子束的系统。2 吋方形的堆芯和再生区的牵引器从装置的固定的半节拉开，以便测量堆芯中心的谱。把准直系统设计得使它减少其他三种中子来源的作用，这三种中子来源是：束孔壁上的中子；与束孔垂直的再生区面上漏出的中子，被墙壁、地板和反应堆小室中的空气所散射而漏出的中子。在谱仪位置上 U^{235} 及 U^{238} 的裂变平均截面对于堆芯中心上它们的裂变平均截面的计算比值 0.55 可以表明所引出的束在怎样的程度上能够代表所测的谱。

真符合计数率正比于谱仪上的中子通量，但由于在两只计数管中同时而又不相关的事件的机遇符合，计数率则正比于中子通量的平方，于是数据累积的速率受到对于机遇事件的修正的精确度的限制，在实际工作中，机遇符合计数率的修正就是这样进行的，即分别测量每一只计数管中的反冲质子的能量分布，计算对于这些分布的机遇符合的能量分布，以及根据测量到的分辨时间和计数率计算出机遇符合计数率。在 ZPR-III 中控制棒的结构使谱仪跟堆芯中心必须隔开 12 呎。对于大约 1 瓦的功率水平，有代表性的计数率是每分钟总的 10 次事件中有一次机遇符合。机遇符合达到 25% 时，在数据的修正中不会引起明显的误差。

对于模拟 EBR-I 的粗元和结构的 ZPR-III 临界装置，图 3 和图 4 表示了在这两个计数管压力下测量的数据。这两个计数管气压是这样选的，使得计数管可测的能量范围从 0.1 到 1.1 兆电子伏，测量结果略有重叠。每一道中所记下的事件次数，用以上所讲的办法对于机遇符合进行修正。要变换到中子谱数

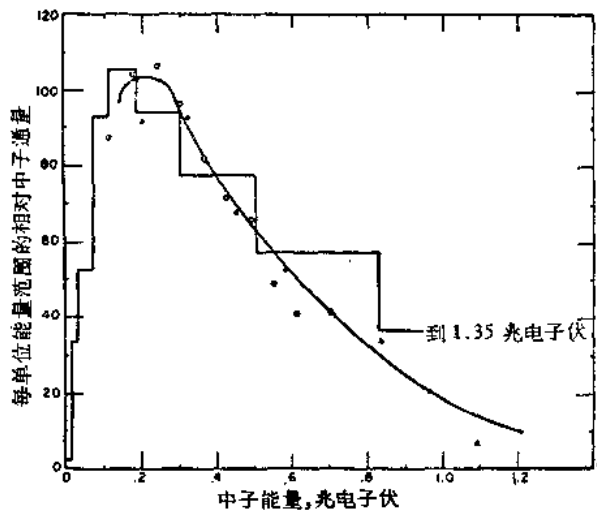


图 3 从模型 EBR-I 中引出的束上初次量得的中子谱与计算出来的堆芯中心的谱的比较，在 0.4 兆电子伏处归一化
 L 10 群扩散理论
 ~ 在原始装置上用谱仪测定的结果
 △ $P = 13.70$ 厘米汞柱， $\Delta E = 128$ 千电子伏
 ○ $P = 4.76$ 厘米汞柱， $\Delta E = 63$ 千电子伏

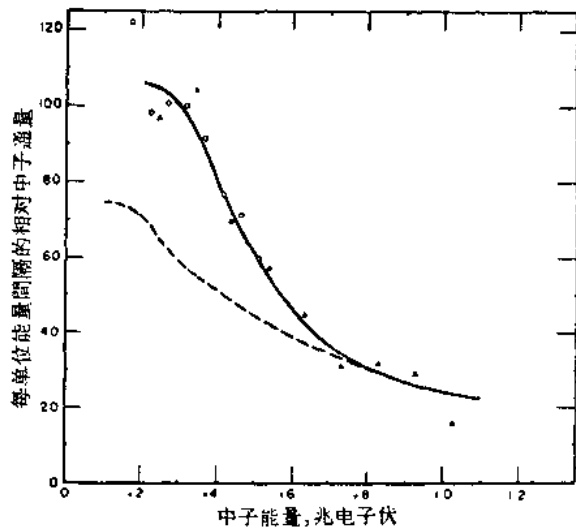


图 4 从 ZPR-III 中的模型 EBR-I 的改建装置引出的束上观察到的中子谱与用别的技术从真正的 EBR-I 所得的谱相比较。这两种情形中束孔都沿着堆芯的轴通到中心，不过从不同的两端起始
 — 谱仪在重建的装置上测得的结果
 ○ $P = 4.76$ 厘米汞柱， $\Delta E = 49$ 千电子伏
 △ $P = 13.07$ 厘米汞柱， $\Delta E = 56$ 千电子伏
 云室和核乳胶在 EBR-I 上测量的结果

据则需要除以：(1)道的能量间隔，这种间隔从 α 峰的能量及预先作的关于脉冲高度与中子能量的函数关系的校正曲线定出来；(2)监察器上的读数和(3)从图1的实线和虚线上读出来的能量间隔的探测器的效率。不同气压的结果要求一种任意的归一化措施。用静电加速器作的中子校正中所不存在的效率随气压的变化，可以用由准直系统限制了束的面积，并使通量不均匀的作用来说明。

在图3及图4中分别表示了这个装置建立开始时的数据和重建之后经过几个月所测得的数据。根据3200次及6311次真符合的两次测定的结果符合相当好。将原始测定的结果与这个装置所用的十群扩散理论计算所预示的谱相比较。从真的EBR-I^[5]的中心引出的束上测量到的谱和第二套数据列在一起。归一化是任意的，ZPR-III的结果表明，中子谱比计算的或用来作比较的实验值都更软。用谱仪的数据不能肯定在0.15兆电子伏附近是否有极大通量值存在。对于改建后的装置，在1.84厘米汞柱气压所得的数据表明中子能谱的软化更显著。这些结果没有包括在内，因为作为校正用的监察计数管的未知动力特性的影响很厉害，这种作用以下要讨论。

误差的来源

这里报告的谱仪，在测量中有两种已知的系统误差来源，每一种误差的效果是使平均中子能量显然减少。第一种误差是由于准直系统产生的软化谱，这可以从谱仪处和在堆芯中心处 U^{238} 对于 U^{235} 裂变比减少45%的情形看出来。在EBR-I上测量观察到减少 $20 \pm 20\%$ 。附加的测试证实，探测器周围的屏蔽可以除去从装置上漏出的中子。在探测器上的谱是由几方面的中子组成的：即直接从束孔底来的中子，从堆芯填料和再生区的束孔壁上来的中子，以及从这些源的任一个所发出的通过准直系统时作小角度散射的中子。

第二种系统误差是来自在测定谱仪效率时所作的一个假定。用静电加速器产生的中子作校正时，得到中子能量和脉冲高度之间的关系，而中子峰的强度提供了有关探测器效率方面的资料。在逐次观察的相互关系中假定了：用作监察器的“长计数管”的动力特性是独立的，但在本校正工作中用的探测器类似于曾经有人报告过^[9]的一样，其效率要减少到0.5兆电子伏以下。这种变化将使低能效率的实验数值增加，因此会使导出来的低能量的表现中子通量值减少。

附 注

已知的系统误差的存在（这种误差至少可以说明ZPR-III测量结果与理论值和从前在类似系统上测量结果之间的偏离）鼓励我们用符合反冲式中子谱仪继续对低密度的快中子堆和成对反应堆谱进行测量。采用这种技术最后所能达到的精确度主要决定于能引出不畸变的束的准直系统的设计和测定谱仪效率所能达到的精确度。

核乳胶中反冲质子的径迹

这个方法在于测量所测定的乳胶体积中的所有反冲质子的径迹的射程。每一能量的中子通量正比于质子谱在该能量处的斜率。这个方法与入射中子的方向分布无关，因此可以直接用在快中子临界装置上。

在这个方法中对伊耳福德 (Ilford) C-2 乳胶的采用以前已经描述过^[10]。能量小到 0.40 兆电子伏的径迹仍能测量。这里描述了新的伊耳福德细颗粒的 L-2 乳胶。使用这种乳胶就能把上述这种方法扩大到测量 0.20 兆电子伏的能量。

在核乳胶中用一般的反冲质子法来测定中子通量的低能极限是由下述三种情况来决定的：(1) 在径迹上的颗粒数是有限的；(2) 短径迹与中子束方向的夹角是不容易测得很准确，以致接受稜锥体不容易定准确；(3) 当有杂乱颗粒存在时，特别是如果同时有 γ 辐射本底存在时，测定短径迹有困难。

把所有径迹都测出来就可以克服第二种困难，但这要测量大量的径迹后才能得到可以比较的统计精确度。用伊耳福德 L-2 乳胶代替 C-2 乳胶降低了由于另外两个原因所造成的低能极限。由于对与 C-2 乳胶片的颗粒大小一样的乳胶（而对 γ 射线的灵敏度较低的乳胶）没有作过试验，本报告不能肯定，在测定中低能极限的降低是由每个径迹上颗粒密度增加起的作用大呢，还是降低 γ 射线的灵敏度起的作用大。

细颗粒乳胶的试验

用 200 微米厚的 L-2 乳胶经 0.40 和 0.90 兆电子伏的单能中子照射。那些中子是在 $Li^7(p,n)$ 反应中产生的，锂靶厚约 10 千电子伏。放在镉盒中的 L-2 乳胶片在照射时要旋转，这样使入射各向同性^[11]。在这两个能量上的相对通量是用一只“长计数管”来测定的^[6]。

用双溶液低温法^[12]来处理，使乳胶片有高的反差。径迹由四名测量员，用累兹-欧斐卢克斯 (Leitz Ortholux) 和装着 100 倍的科利斯卡 (Koristka) 物镜和 12.5 倍的包奇 (Bausch) 和郎布 (Lomb) 目镜的包奇和郎布 CTB 型显微镜测量。选择的准数取决于要测定到 1.5 微米的真正射程。投影长度用目镜中的标尺来测量，且估计到最近的 0.1 微米。深度差也估计到最近的 0.1 微米。总共量了 4450 条径迹，共用 160 小时的观测时间。

主要的径迹数据都在 IBM 卡片上打了洞。在 IBM-650 上建立起计算每 0.5 兆电子伏间隔的“计数”径迹数的程序，四名观察者的数据都很一致。图 5 上画着质子谱的结果。显然在 0.15 到 0.20 兆电子伏间的径迹是遗漏了的。

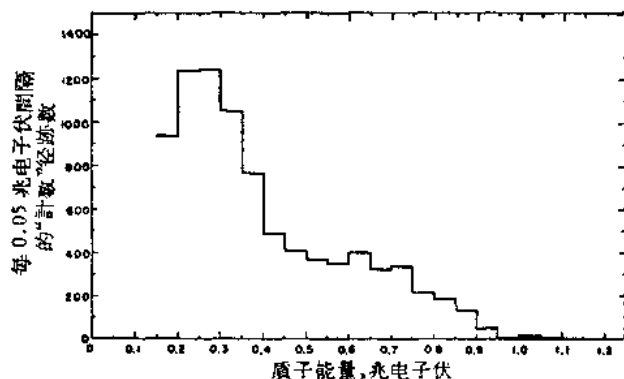


图 5 经 0.40 及 0.90 兆电子伏单能中子照射的核乳胶中的反冲质子谱
每兆电子伏间隔的中子通量时间积分可以从下式计算：

$$F(E) = \frac{E}{n\sigma(E)} \frac{dM(E)}{dE} \quad (1)$$

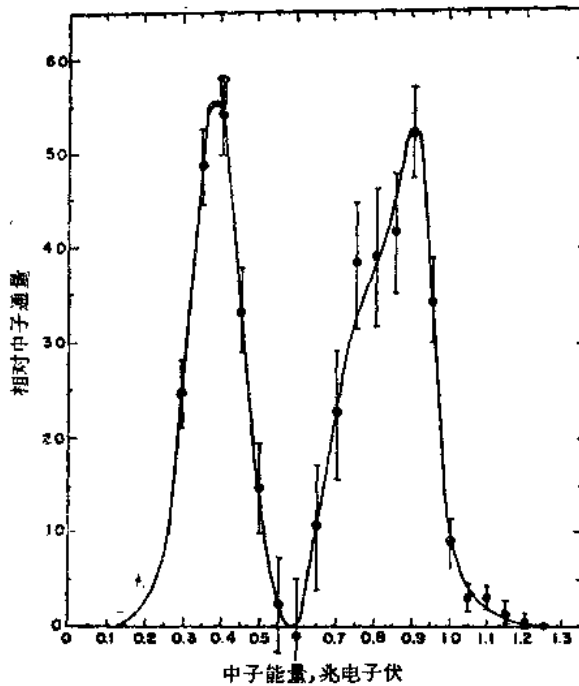


图6 从图5的数据用方程1计算出来的相对中子谱

其中 E 是中子或质子的能量, n 是乳胶中每立方厘米的氢原子数, $M(E)$ 是乳胶中每立方厘米每兆电子伏的质子径迹数, 而 $\sigma(E)$ 是在能量 E 的 $n-p$ 散射截面. 象从前那样^[10], 斜率是按每相邻的 0.1 兆电子伏间隔中质子径迹数的差来估计. 计算得的中子谱画在图6中. 对于与在较高能量照射下所产生的 Be^7 中的初次激发态有关的中子谱作 7% 的修正之后, 那两组的中子通量的比例和“长计数管”读数的比很一致. 但是这种试验并不能说明在 0.20—0.25 兆电子伏间隔中没有记录下来的 10% 左右的径迹.

ZPR-V 通量的测量

曾用反冲质子法测定在 ZPR-V^[2] 中心的中子谱, ZPR-V 装载了含有 35 体积百分比的铀, 其中 U^{238} 对 U^{235} 的比为 5. 其他的成分是 10% 的铁, 14% 的铝和 41% 的空穴. 有一个两吋厚的铀再生区把这个区域跟热环路分开.

总共测量了 19,600 条质子径迹, 14000 条在 C-2 乳胶片中 (从 3.5 到 50 微米), 而 5600 条在 L-2 乳胶片中 (从 1.5 到 25 微米). 在 C-2 乳胶片中的 14,000 条径迹中, 约有 11000 条因各观察者所得结果相一致而采用了. 被更有经验的观察者所获得的 L-2 乳胶片的全部数据都被采用了. C-2 乳胶片用约为 10^8 中子/厘米³ 的积分中子通量照射, L-2 乳胶片所照射的通量约小三倍, 这样可以减少本底, 使比较多的短径迹更为显著. 在 C-2 乳胶片中径迹末端的投影长度和深度差量到最近的 0.5 微米. 径迹按 0.200 兆电子伏间隔分组, 以便得到质子谱.

图7中画着 C-2 乳胶中每 0.200 兆电子伏每立方厘米乳胶中径迹计数^[10] 的对数. 用最小二乘法以尽量使曲线与数据相符合. 看来不能把整个曲线用一个多项式来拟合, 因为较高能区间的形状应该和较低能的区间无关, 而在 ΔE 带中较高能中子在较低能量上只贡献一个不变的“本底”.

从 0.40 兆电子伏到 1.40 兆电子伏的数据可以用一根抛物线来表示, 而从 0.70 到 2.20 兆电子伏的数据则用一根直线来表示. 在计算中子谱时需用到的两根曲线的斜率在重迭区域的中心地带 (1.10 兆电子伏处) 相差不超过 10%. 假定抛物线把 0.90 兆电子伏处的斜率定得最好, 而直线则在 1.30 兆电子伏处.

从 L-2 乳胶上得到的径迹按 0.10 兆电子伏间隔分组. 一组中每一条径迹的投影长度及深度差估计到最近的 0.1 微米, 结果表示在图7上. 从 0.25 到 0.95 兆电子伏的区域中的数据用抛物线来表示最符合.

图 8 表示了从符合于 L-2 乳胶的数据及 C-2 乳胶的低能极限部分数据的抛物线上得来的质子谱斜率 $dM(E)/dE$ 的对数 (以 10 为底)。由于这两种乳胶所受到照射的中子通量绝对值的比不能知道得很精确, 在 L-2 乳胶中径迹的质子谱的斜率在 0.65 兆电子伏处跟 C-2 乳胶的斜率搭配在一起。在广大的重迭区域中符合是好的。

图 9 是从以上结果计算出来的中子通量 $F(E)$ 与中子能量的关系的曲线。从 $\log_{10} M(E)$ 方程中的系数精确度而估计出的 $F(E)$ 的统计精确度对于大多数能量点来说都在百分之几以内。但是, 为了凑合数据而作的曲线的选择和能量间隔的选择是比较任意的。如果质子谱一直到零能都已知道, 则在 0.20 兆电子伏处符合得最好的将会是另一不同的函数。因此对于这一点的中子通量的计算有不确定性。用这种方法可以得到 0.15 兆电子伏以下的可靠的数据, 所以对于 0.20 兆电子伏处斜率的测定就更可信。

图 9 上还包括其他的一些数据。图上还有只用 C-2 乳胶在离快速区边缘 3 吋处进行同时测量的结果, 而对于这个装置的多羣扩散理论计算的结果也列在图上以便作比较。这个图上还有三个能量间隔中的相对中子通量, 这种通量是象下节所描写的用含 Li^6 的乳胶来测量到的。各种结果相当一致。

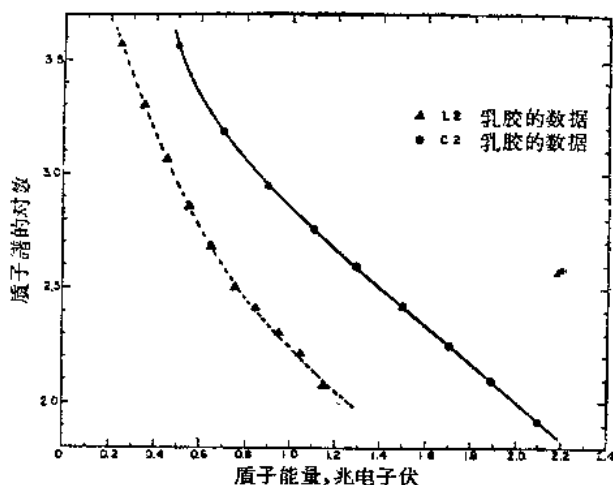


图 7 放在 ZPR-V 的中心辐照过的 C-2 及 L-2 乳胶片上的质子能谱的对数 (以 10 为底)

对于 C-2 乳胶, 曲线给出 $\log_{10} [M(E) \times 10^{-8}]$, 其中 $M(E)$ 是每立方厘米的乳胶中每 0.2 兆电子伏的计数径迹数。对于 L-2 乳胶, 曲线给出 $\log_{10} T$, 其中 T 是每 0.10 兆电子伏间隔中的“计数”径迹数。

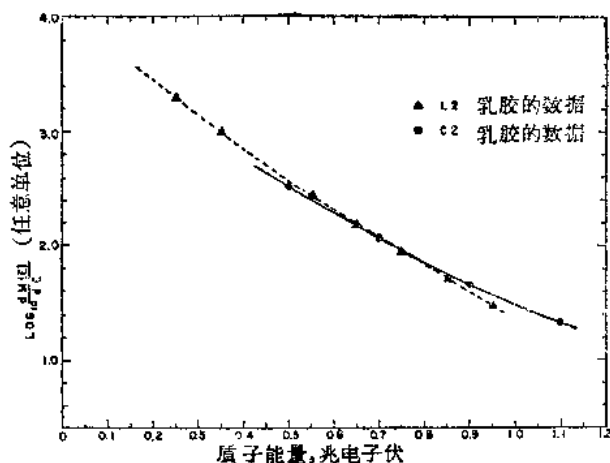


图 8 图 7 中的在 L-2 及 C-2 乳胶片中质子谱的对数 (以 10 为底) 的数据的斜率。斜率在 0.650 兆电子伏处相合

载 Li^6 的核乳胶

曾用 $Li^6(n, \alpha)H^3$ 反应来测定中子谱。用的是载有平均直径约 3 微米的玻璃微粒的伊耳福德 E-1 乳胶片, 玻璃微粒中含有浓缩 Li^6 。这个方法在别的地方已经详细描述过^[13]。这跟中子方向无关, 但其所用能量范围很有限, 主要因为反应截面随中子能变化很厉害。只要在 10 千电子伏以下的中子通量很小, 这个技术对于一直到 100 千电子伏的谱

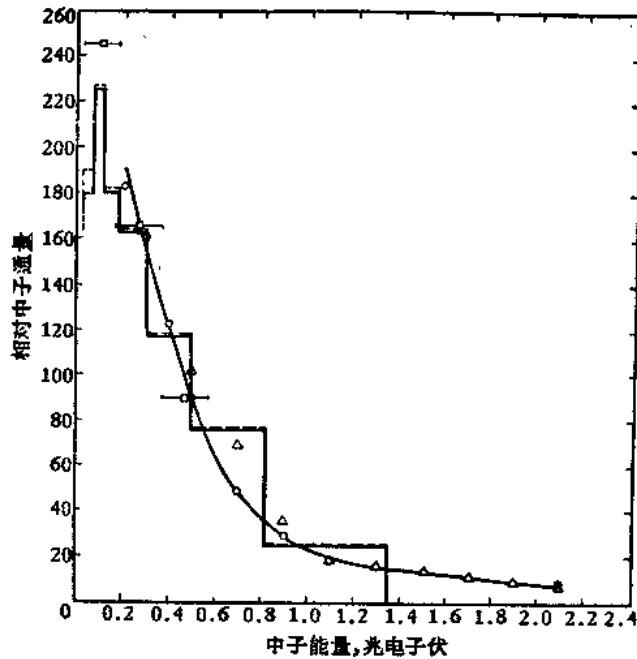


图9 在 ZPR-V 堆芯中两个位置的中子谱的比较, 这两个谱一个是用核乳胶测量得到的, 另一个是用扩散理论计算出来的
堆芯中心的 Li^6 数据在 0.270 兆电子伏处与反冲质子数据符合

反冲质子乳胶
 ○ 堆芯中部
 △ 离堆芯边缘 3 吋处

Li^6 乳胶
 □ 堆芯中部

扩散理论
 — 堆芯中部
 离堆芯边缘 3 吋处

的数据都能用, 其分辨本领为 ± 75 千电子伏。对于反应堆谱学, 这种反应的 250 千电子伏宽的共振峰使得用起来比较复杂。能量较高时截面很小, 这使这个方法适用的高能极限在 500 千电子伏左右。但是, 这种技术提供一种检验方法, 并且使上述的反冲质子法稍为扩大测定中子谱的能量范围。

把 100 片含有高度浓缩 Li^6 的玻璃微粒的 50 微米厚的伊耳福特 E-1 乳胶, 放在 ZPR-V 内, 与放置 C-2 及 L-2 乳胶差不多同样的中心位置上, 并暴露在大约 5×10^9 中子/厘米² 的积分中子通量中。

所测量的 3000 条径迹中约有 30% 落在质心坐标系中与中子方向成 75° 或比 75° 更小的角度的径迹的体中。所得数据归在四个能量间隔 0.02—0.170, 0.170—0.370, 0.370—0.570 和 0.570—0.970 兆电子伏中来分析, 这四个间隔相当于校正数据^[13]。令 P_{ij} 表示在 ΔE_j 中的中子所产生的在 ΔE_i 中的径迹的分数, P_{ij} 可以从用单能中子群的校正^[13] 数据计算出来; 假定从反冲质子法所得的 $F(E)$ 的半对数图而直接地外推到较低能量时, 可以给出中子谱近似的形状。这些系数对于一个光滑地改变的谱的形状不太灵敏。

μ_i 給出在 ΔE_i 中的中子产生的在 ΔE_i 中的径迹分数, μ_i 从以下四个方程計算出来,

$$\sum_j \mu_j P_{ji} = n_i/N; \quad i, j = 1, 2, 3, 4$$

其中 n_i/N 是在 ΔE_i 中径迹的分数, N 是对于 $\phi_0 \leq 75^\circ$ 的径迹的总数, 而 $\sum n_i = N$. 这个計算的結果总结在表 1 中, 表上还有每一能量間隔的相对中子通量 $F(E)$. 这从 μ_i 以 $\langle \sigma f \rangle_i$ 和 ΔE_i 除后定出来. $\langle \sigma f \rangle_i$ 是 $\text{Li}^6(n, \alpha)\text{H}^3$ 截面的平均值乘以在 75° 錐体中 ^{11}B 每一能量的径迹分数.

表 1 对 Li^6 乳胶片的数据的分析結果

能量間隔 兆电子伏	μ_i	相对 $\langle \sigma f \rangle_i$	相对 $F(E)$
0.020—0.170	0.212	0.0363	5.84 ± 0.53
0.170—0.370	0.578	0.148	3.91 ± 0.39
0.370—0.570	0.117	0.054	2.17 ± 0.96
0.570—0.970	0.094	0.040	2.35 ± 0.58

我們相信, 低能羣的結果比 0.570—0.970 兆电子伏羣的更可靠. 这一羣校正数据还不够使我們算得好的 P_{ij} 值, 而且所得結果对于小量的质子径迹的本底很灵敏, 这种径迹偶然通过玻璃微粒而被看作为氦- α 对偶. 在这个能量区中反冲质子法显得优越得多. 能量較低的三組的結果在图 9 上与在 270 兆电子伏反冲质子数据的光滑曲綫湊在一起, 跟反冲质子法的符合是滿意的.

附 注

将低能閾选在 0.020 兆电子伏处是比較任意的. 但是, 如果在更低能量处有相当的中子通量, 則大的 $\text{Li}^6(n, \alpha)\text{H}^3$ 截面就会使低能羣中产生太多径迹. 在试图測量更軟化的中子譜时, 曾看到 0.170—0.370 兆电子伏羣中的預期通量中产生一个大的下陷. 既然在 ~ 0.3 兆电子伏处可以用反冲质子法来測定 $F(E)$, 把采用两种乳胶測量的方法結合起来就可以得到几个千电子伏的区域中的一些資料. 目前对于最低能量羣的 Li^6 玻璃微粒的結果最适宜于估計在 0.170 兆电子伏以下的每平方厘米的中子数, 此时在大約 0.020 兆电子伏以下的中子数可以忽略不計.

参 考 文 献

- [1] B. C. Cerutti, H. V. Lichtenberger, D. Okrent, R. E. Rice and F. W. Thalgott, ZPR-III, Argonne's Fast Critical Facility, *J. of Nuclear Sci. and Eng.*, 1, 126—134 (1956).
- [2] H. H. Hummel et al., Experimental and Theoretical Studies of the Coupled Fast-Thermal System: ZPR-V; P/599, Vol. 12, these Proceedings.
- [3] H. V. Lichtenberger, F. W. Thalgott, W. Y. Kato and M. Novick, Operating Experience and Experimental Results Obtained from an NaK-Cooled Fast Reactor, Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1955, P/813, Vol. 3, p. 345, United Nations, New York (1956).
- [4] Collected Papers on Equipment and Techniques Used in Measuring Cross Sections Important to Reactor Design, Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1955, Vol. 4, pp. 3—124, United Nations, New York (1956).
- [5] C. Egger, C. M. Huddleston, V. E. Krohn and G. R. Rigno, Measurement of the Neutron Spectra

- of the Experimental Breeder Reactor, *J. of Nuclear Sci. and Eng.*, **1**, 391—408 (1956).
- [6] S. G. Kaufmann, F. S. Kirn and W. B. Loewenstein, Fission and Activation Ratios in the EBR, *J. of Nuclear Sci. and Eng.*, **1**, 193—203 (1956).
- [7] G. J. Perlow, Recoil Type Neutron Spectrometer for 0.05 to 1 Mev, R.S.I., **27**, 460—467 (1956).
- [8] A. O. Hanson and J. L. McKibben, A Neutron Detector Having Uniform Sensitivity from 10 Kev to 3 Mev, *Phys. Rev.*, **72**, 673 (1947).
- [9] R. A. Nobles, R. B. Day, R. L. Henkel, G. A. Jarvis, R. P. Kutarnia, J. L. McKibben, J. E. Perry Jr. and R. K. Smith, Response of the Long Counter, R.S.I., **25**, 334—335 (1954).
- [10] J. H. Roberts, Absolute Flux Measurements of Anisotropic Neutron Spectra with Proton Recoil Tracks in Nuclear Emulsions, R.S.I., **28**, 677 (1957).
- [11] J. H. Roberts, W. O. Solano, D. E. Wood and H. B. Billington, Measurement of the Energy of Isotropic Fast Neutrons with Li^6 Loaded Plates, R.S.I., **24**, 920 (1953).
- [12] L. Rosen, Nuclear Emulsion Techniques for the Measurement of Neutron Energy Spectra, *Nucleonics* **11**, No. 7, 32—38 (1953).
- [13] J. H. Roberts and F. E. Kinney, Measurement of Neutron Spectra by Use of Nuclear Emulsions Loaded with Li^6 Glass Specks, R.S.I., **28**, 610—615 (1957).

零功率快中子反应堆上的实验工作*

司密斯 桑德尔司**

在哈威尔已经建成并运转的两个实验性快中子反应堆塞弗尔 (Zephyr) 与塞厄司 (Zeus) 具有双重目的。首先,这两个反应堆系统是用来获得快中子反应堆系统中子物理基本知识的;其次,利用塞厄司装置还可对目前在唐瑞 (Dounreay) 快要建成的快中子动力增殖反应堆作详尽的性能测量。

塞弗尔堆有一个小的圆柱形堆芯,其中含有大约 15 公斤的铀,1954 年 2 月首次达到临界。这个堆曾详细地介绍过,大多数实验结果已在别处发表。1957 年堆芯周围的铀壳曾用石墨代替。这里将说明利用这种“热-快”系统所作的某些测量。

塞尔司是以 U^{235} 为燃料的低功率反应堆装置(设在哈威尔),从 1955 年 12 月开始运行直到 1957 年 9 月为止。它的主要尺寸类似于唐瑞反应堆,但是没有冷却剂,堆芯结构建造得很容易改变,而且能给予实验工作以最大方便。曾经建造了临界质量从 190 公斤到 210 公斤 U^{235} 的几种不同装置。利用这些堆芯作了大量测量:其中一部分与唐瑞反应堆的详细性能有关,但对堆芯结构类似的快中子堆系统大部分都适用。

塞 弗 尔

在以纯石墨为主壳的塞弗尔堆的一个方案上作了一些实验性研究。这是研究具有慢化材料壳系统的一系列工作的开始,同时还准备进一步研究包含各种二次燃料原子和轻原子的混合物。对这种类型的壳感到兴趣的理由如下:

(1) 由于和铀壳比起来,在含有轻原子的壳中中子能谱较软,当维持快中子堆高增殖比的特性时,二次燃料的较大俘获截面有可能使系统中对二次燃料的总投资减少很多。可以用一个未经稀释的二次燃料区把堆芯和低能中子“绝缘”开来。

(2) 在这种类型的壳中,较软的中子谱将使安全棒的吸收效应增大,比起在非慢化壳中的棒,它具有更大的停堆反应性的变化。

(3) 几种二次燃料原子-轻原子化合物壳的生产和处理费比金属壳生产和处理费更便宜。

(4) 和纯快中子反应堆堆相比,较大的二次燃料的多普勒 (Doppler) 效应以及较长的热-快系统的中子寿命将使功率激增事故的安全性得到改变。

从堆物理观点出发,对这种混合物系统的研究也是很有内在兴趣的,对系统性能的解释也就是对多组理论的重要检验。

* Experimental Work with Zero Energy Fast Reactors (A/CONF. 15/P/39, 英国,载于 Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, vol. 12).

** R. D. Smith 和 J. E. Sanders (哈威尔,原子能研究中心,英国原子能管理局)。

很清楚,經過某些修正的一組处理对估計非慢化壳(金屬鈾和鈾)系統的性能是相当滿意的,但在目前情況下,中子能譜变化范围較寬,在堆芯中部近于裂变譜,而在石墨壳中則近于热譜,因此必須使用多組近似。由于沒有可以和早先使用的鈾裂变室相比的“平滑特性曲綫”探測器,实验一开始就会把情况弄复杂,因此总中子通量的直接測量是不可能的。作为处理实验結果的第一步,曾經利用8組和10組理論計算过堆的簡化球模型。

系統的描述

具有石墨壳的塞弗尔快中子堆的截面和平面图如图1所示,堆已在文献^[1,2]中介绍过。

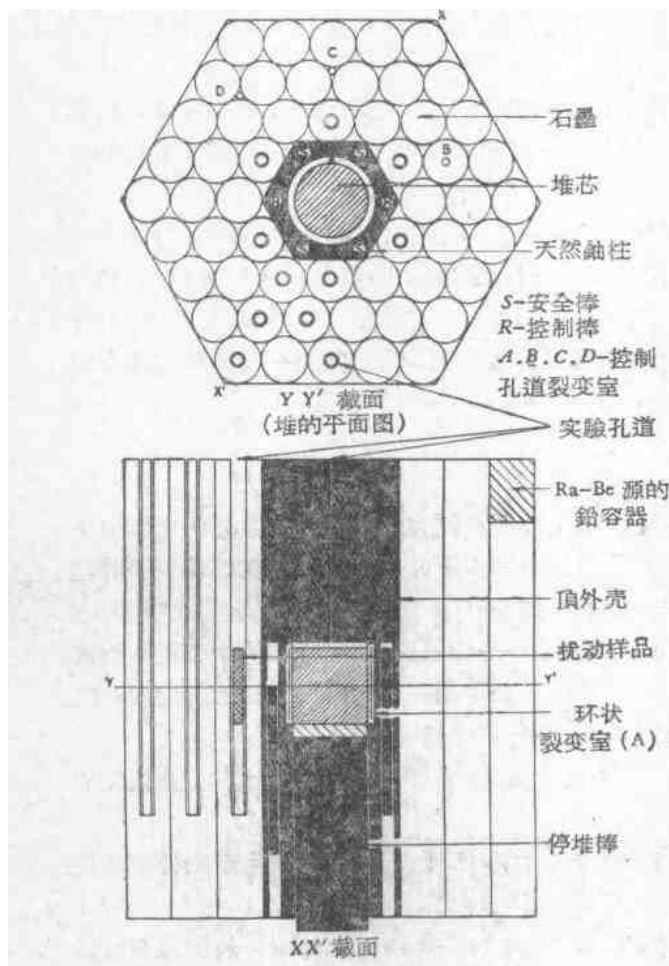


图1 具有石墨主壳的塞弗尔堆

在塞弗尔堆的原始方案中主壳是用天然鈾做的,在本文所描述的工作中,壳体用直径为9.2厘米的石墨柱填满,形成一个有效密度为1.45克/厘米²的石墨壳,它的径向厚度为34厘米,垂直的鈾柱形成堆的积分部分,而且不能改变。因此,在石墨系統的情况下,反应堆不再是一个近似球形对称的鈾壳方案,这就給解答实验結果带来一些麻煩。

临界时堆芯栅障中装有261根元件,相当于重为14.9公斤的鈾,形成大約6.3厘米直径的近似圓柱体,其余栅障填以天然鈾元件。

反应性的貢獻

控制組件与燃料元件

系統控制組件与鈾燃料元件的相对反应性本領是利用次临界增殖装置測定的。表1中給出了控制棒在它的橫截面中心移动1厘米时所相当的反应性。

控制棒移动1厘米所相当的反应性是利用动力学測量法以緩发中子份額 β 为单位而測定的:測出系統的功

率上升和下降的周期,并用倒时公式去符合就可得出結果。还測量过突然停堆后功率的突变。在表1所列出的計算的絕對反应性中,所用的有效緩发中子份額为0.30%。

利用热中子控制反应性

在完成本文所描述的实验之后,用鈾屏蔽的六角形鈾柱做成了第二个临界装置。在

表 1 反应性的刻度

組 件	相当于控制棒 1 厘米的 反应性	绝对反应性 $\times 10^{-2}$ ($\beta = 0.30\%$)
1 根控制棒	12.7	0.14
2 根安全棒	23.9	0.26
停堆棒	100.4	1.1
中心铀元件	26.9	0.30
外圈铀元件	9.7	0.11

此情况下利用热中子(或者不如说是次籍中子)所控制的反应性是 $(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-2}$. 误差的主要来源是来自绝对反应性刻度中的不定性.

反应率的分布

裂变室测量

利用 6.3 毫米直径的裂变室(其中含有 Pa^{231} , Th^{232} , U^{233} , U^{235} 及 Pu^{239} 的箔片)在堆的中間平面上测定了堆芯、鈾六角柱和石墨壳中的水平分布. 計数率的测量是相对于堆芯中部的数值作出的(以一个堆功率监视器的計数率为准作了归一化). 为了进一步获得有关壳中鈾六角柱范围内的中子譜的资料而作了籍比测量, 水平分布的结果如图 2 和图

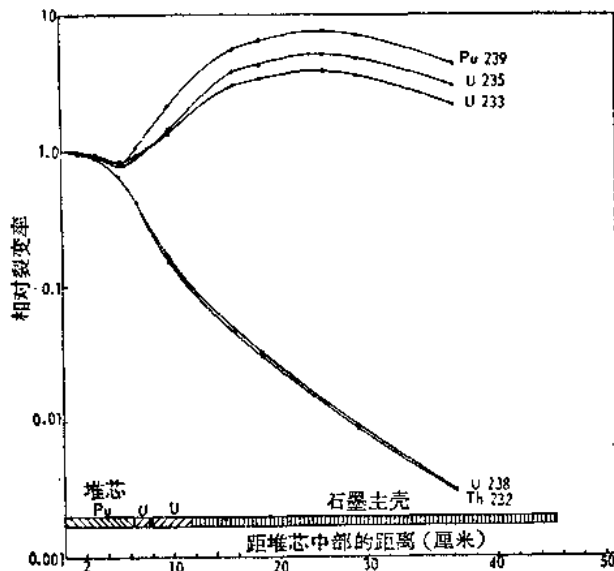


图 2 堆芯与石墨主壳内相对于堆芯中部的裂变率

3 所示. 如所预料的那样, 石墨壳中热中子的存在使得 U^{233} , U^{235} 及 Pu^{239} 的裂变率在此范围内达到峰值. 籍比的测量表明, 石墨壳内这些核的大多数裂变是由于热中子(或者不如说是次籍中子)所引起的: 籍屏蔽的有效截止值约为 0.6 电子伏. 利用小型 U^{235} 裂变室在鈾六角柱和堆芯所做的测量表明, 即使在堆芯边缘, 在这些核中大约 13% 的裂变也是热中子引起的: 这和下面所讨论的 10 组理论的预言是一致的.

沿堆纵轴方向垂直分布的一些结果表示在图 4 中. 对鈾主壳系统的相应测量也包括在内. 热裂变率和阈探测器計数率的比较表明, 石墨主壳系统中顶壳内的中子谱和鈾壳

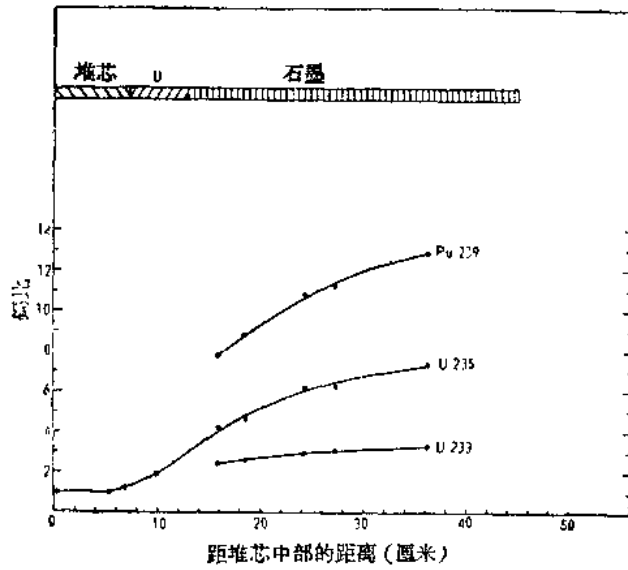


图3 塞弗尔堆中的钚比

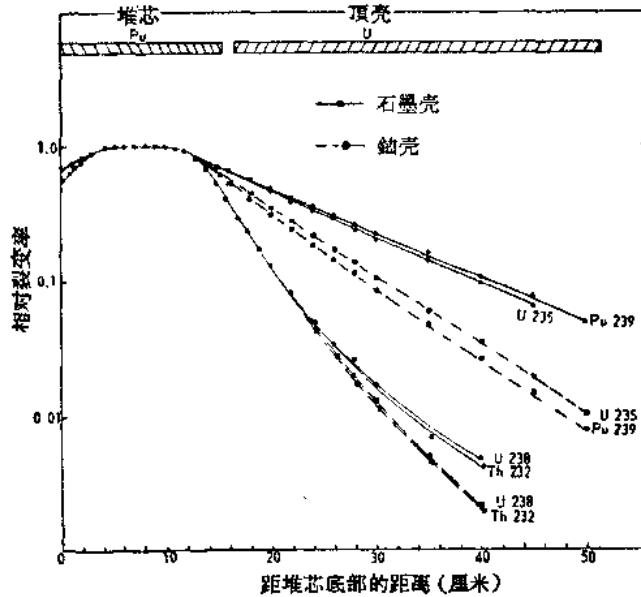


图4 垂直地通过堆芯中部到顶壳的相对于堆芯中部的裂变率

系统相比是较软的。

活性测量

曾在堆内各种位置上测量过由于钠、锰及 U^{238} 样品俘获中子而产生的 β 活性。在 U^{235} 情况下曾对裂变产物进行彻底的化学分离。

与理论比较

塞弗尔的简单球模型的通量分布(利用对 Ferranti I* 商标计算机所作的10组扩散