

原子能译丛

# 有关核反应堆的若干问题

7

“原子能”編譯委員会編  
科·学·出·版·社

原 子 能 譯 丛  
有关核反应堆的若干問題

7

“原子能”編譯委員会編  
科 学 出 版 社

# THE PHYSICS OF NUCLEAR REACTORS

LONDON, THE INSTITUTE OF PHYSICS

1956

## 內 容 簡 介

本书譯自英国应用物理学学报副刊第五期——1956年7月英国物理学协会在伦敦召开的原子能方面的會議的文集。

在这本文集中包括十二篇关于反应堆各方面工作的总结性报告，其中絕大部分討論了反应堆物理学的问题，如反应堆的控制、屏蔽及仪表装置，輻射对固体的物理性质的影响等。此外，还討論了化学和冶金学在原子能事业中所起的作用。

这本书的主要目的是指出核反应堆方面存在的和可能出现的一些科学問題，以使与原子能事业有直接或间接关系的科学工作人員对它們能有一定程度的了解。

本书可供与原子能事业有关的物理学、化学、冶金学工作者及工程師們閱讀。

原子能譯丛(7)

## 有关核反应堆的若干問題

“原子能”編譯委员会編

\*

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 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

\*

1960 年 2 月 第 一 版

1960 年 2 月 第一次印刷

(京) 0001—5,500

书号: 2092 字数: 220,000

开本: 787×1092 1/25

印张: 9 9/25 插頁: 3

定价: 1.20 元

## 前 言

英国物理学协会和原子能协会于 1956 年 7 月在伦敦召开了一次会议讨论与原子能有关的各方面的一些有待解决的科学问题。参加这次会议的除了物理学协会的会员以外，还有直接或间接参加原子能工作的人员。

会议的文献后来以应用物理学报副刊第五期的形式出版。全书共包括十二个讲演及有关的讨论，内容涉及核反应堆物理、堆工程（堆的屏蔽和控制，堆的仪表）、辐射化学及冶金学等各个方面。从这本文集中，不仅可以了解核反应堆存在的和可能出现的一些科学问题，还可以看到英国和加拿大的一些核反应堆的工作概况。因此将这本文集翻译出版，以供我国的直接或间接与原子能事业有关的科学工作人员参考。

从性质上看本文集的材料是比较一般的，适于较广泛的读者阅读。

## 原 序

这本文集中所包括的論文及其討論記錄是在物理学协会召开的一次會議上的报告，这次會議是由英国物理学协会和英国原子能协会共同組織的，它在 1956 年 7 月 3 日至 7 月 6 日在伦敦举行。

这次會議的目的是为了使本会和其他兄弟学会的研究人員能适应核反应堆方面的科学发展，并使他們注意一些必須解决的問題，这次會議也是针对那些与反应堆工作有(已有或可能有)直接或间接关系的工业方面的物理学家、政府方面的物理学家以及教育工作者們而召开的。大約有 500 人参加了这次會議，其中包括許多来自国外的学者。

我认为这本副刊是很有价值的記錄，它对于增进我們目前的知識水平以及弥补缺陷很有帮助。

物理学协会主席

柯克洛夫特 (J. D. Cockroft)

# 目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 前言.....                | i   |
| 原序.....                | ii  |
| 原子能动力发展中的科学問題.....     | 1   |
| 近代反应堆物理学.....          | 17  |
| 实验反应堆物理学.....          | 54  |
| 零功率快中子再生堆 ZEPHYR ..... | 67  |
| 辐照对固体物理性质的影响.....      | 88  |
| 反应堆的屏蔽.....            | 115 |
| 反应堆的控制.....            | 127 |
| 反应堆的仪表装置.....          | 153 |
| 化学在原子能事业中的任务.....      | 192 |
| 冶金学在原子能事业中的作用.....     | 200 |
| 加拿大研究性反应堆及其用途.....     | 210 |
| 英国的研究性反应堆及其用途.....     | 220 |

# 原子能动力发展中的科学問題

約翰·柯克洛夫特 (John Cockcroft, K.C.B.,  
C.B.E., D.S.C., F. Inst. P., F.R.S.)

柏克郡-哈威尔原子能研究中心

一般把原子能动力事业发展中的科学問題分成物理学、化学和冶金学上的問題。預計反应堆的原子核特性是物理学家的事情。他們应当能預先定出临界大小，以及在設計的热功率輸出下运转时所需的燃料数量和燃料浓度。他們也应当能指出反应性变化过程——在更換燃料之前从每吨燃料中可以取出多少热量。为了做到这些，他应当較詳細地掌握中子与包括鈷 240 和 241 在內的諸重要重元素同位素的相互作用規律。他們应当知道每次裂变所放出的中子数如何随能量而变化，以及中子被俘获后产生和不产生裂变的相对几率。他們应当知道从燃料元素生成的裂变产物吸收中子的几率，以及冶金学家及工程师們所使用的非裂变物质吸收中子的几率。快中子堆和热中子堆所需要的数据是不一样的。物理学家还应当密切地注意到堆的安全問題——他必須留意是否会因温度或操作条件的改变而引起附加的反应性，以致使堆的功率上升。他也应当研究高速度高强度中子轰击对堆內重要結構材料（如石墨和鋼）的性质所产生的影响。

化学家和冶金学家的任务在于提供各种高純度的原子核材料——裂变的和非裂变的都在內。化学家应当設計出分离再生物质、裂变物质和裂变产物的方法。冶金学家要知道在运转温度下辐照对金属鈷和金属鈷的影响，并提出預防有害作用的方法。为了做到这点，他要研究各种可能的合金和粉末合金，而在研究时要留意物理学家和化学家們的各种禁忌：物理学家不喜欢用吸收中子的材料，化学家則不喜欢处理复杂的合金材料。

化学家和冶金学家也应当研究所有使用的材料和工程师所提出的載热剂之間的适应性。因此，应当測定 400℃ 下当有反应堆辐射存在时石墨和二氧化碳气体的反应；对鈷-石墨型堆則应当測定液态鈷对鈷和不銹鋼在 550℃ 时的适应性；均匀堆內所用的結構材料应当和硫酸鈷

的水溶液能相适应。所有这些問題都要在試驗裝置上或反应堆实驗裝置中长期地加以研究。

由于任何新型的反应堆由开始試用到大規模采用至少需要十年時間，科学家們必須先作計劃。在这段期間中，他們应当对任何可能需要的新材料(例如重水、鈷、鎳和鉍)进行研究，并拟訂发展計劃。这些工作应当在大規模利用肯定下来的若干年前就开始着手进行。

沒有一种事业比在原子能的发展事业中更需要預見性了。

## 引 言

現在在原子能的发展中我們已經达到了这样的阶段，即至少在四个国家內正在修建首批大型的实驗性电站。在英国 1956 年 5 月 22 日卡德尔豪尔 (Calder Hall) 原子能电站的第一个反应堆达到了临界状态。今年(1956 年)十月女皇陛下将正式为电站剪綵，我們希望在 1957 年初能送出 65000 千瓦以上的电力到国家的电力网中去。

原子能管理局进一步在建造三个卡德尔豪尔型的电站。与此同时，四个工业机构在为不列顛各島的电业管理局設計卡德尔豪尔电力站的改良方案。关于这些电站的投标将在年底以前，而英格兰和苏格兰的电业管理局将按政府白皮书內定出的計劃簽訂两个电站的合同，作为政府发展原子能十年計劃的第一部分。預計中央电业管理局第一个电站的輸出功率要比卡德尔豪尔大得多。

虽然中央电业管理局首批电站的設計將較卡德尔豪尔有相当多的改进，但在原子能电站的气体冷却石墨慢化型反应堆的进一步改善中仍有大量研究和发展的余地。使用其他类型反应堆的較新型的原子能电站为科学研究提供了更廣闊的領域。在我們国家內已建議对 8 种类型的原子能电站进行研究。

这些問題一般分为反应堆物理学、固体物理学和化学問題。我将按次序来叙述它們。

## 反应堆物理学問題

堆心結構 反应堆物理学家在設計新型堆时所需考虑的第一个問題是如何决定堆心的最佳参数：格子間距，棒的直径和大小。他們首先

要收集或測量所有有关的原子核数据。这些数据包括所有堆心材料的原子核的裂变、吸收和散射截面,以及每一裂变核吸收一个中子而裂变时所放出的中子数——所有这些都要表成中子能量的函数。

第二步是作出堆心参数的近似計算,以指出有兴趣的各参数的大致范围。作了这种指数实验以后,須使用装置或零功率临界装置来确定反应堆系统的一般原子核特性。由这些实验得出的数据可以修正計算方法,从而就可以把堆心的原子核計算与热传递和经济分析结合起来,设计出最好的反应堆。这以后还可以进一步用零功率实验来最后复驗設計。特别是工程设计,它是与理想的原子核物理設計有偏离的,这样所产生的影响要加以測定。

把这一程序应用到气体冷却、石墨慢化堆上,就得出格子間距約为 8 吋,而鈾棒直径約为 1 吋。

由  $U^{235}$  生成鈾的轉換因子是一个重要的堆心参数,因为这是决定反应性在长时間中变化最重要的因素之一。下表是一个好的气冷石墨堆的典型的中子平衡表。从这里可以看出中子損失对确定轉換因子的值(約为 0.85)是很重要的。

#### PIPPA 型反应堆的中子平衡

|                           |      |
|---------------------------|------|
| $U^{235}$ 和 $U^{238}$ 的輸出 | 2.10 |
| 吸收:                       |      |
| $U^{235}$                 | 1.00 |
| $U^{238}$                 | 0.85 |
| 石墨                        | 0.12 |
| 寄生吸收(套层,氙,控制系统等)          | 0.08 |
| 漏逸                        | 0.05 |
| 吸收与漏逸共計                   | 2.10 |

反应性的变化 动力堆燃料的价格是由鈾的价格、制造燃料元件的价格、每一周期中所能达到的燃耗程度以及烧过了的燃料的价格来决定的。所能达到的燃耗程度决定于反应性的变化过程。图 1 表出了这种变化的一般过程。图中最初因  $Sm^{149}$  的生成反应性有些下降,接着便因  $U^{235}$  轉換成  $Pu^{239}$  而上升。轉換因子越大,反应性的上升也就越大。

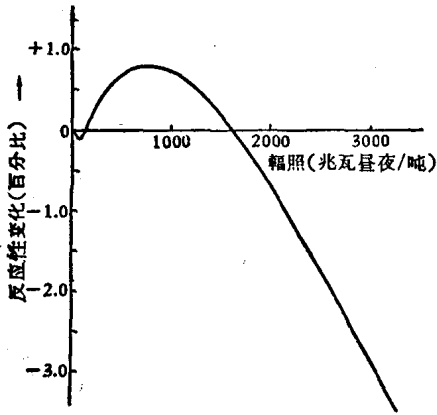


图1 PIPPA型堆中天然铀辐照后的同位素组成

3000 兆瓦日/吨后的同位素组成。我们现在已建造了一个电磁分离器来生产各个钚同位素,预计在明年就可以减少这些常数的不准确性。

决定反应性长期变化的另一重要因素是长半衰期裂变产物所起的作用。这些截面我们还知道的不够精确,现在正开始拟定一个实验计划来增进这方面的知识。我们提议第一步从一根在乔克河(Chalk River)反应堆中受过强烈照射的钚合金燃料棒中提取混合的裂变产物,然后对裂变产物的总和进行测量。我们的化学家也将分离一些重要的裂变产物,然后将对它们进行截面测量。这一工作我们希望和橡树岭国立实验室安排一个合作计划。

当燃烧超过 1000 兆瓦日/吨时,钚向较高同位素  $\text{Pu}^{240}$  和  $\text{Pu}^{241}$  的转换就变得重要了。热中子不能引起  $\text{Pu}^{240}$  的分裂,但  $\text{Pu}^{240}$  以约 1200 靶的吸收截面转换成  $\text{Pu}^{241}$ 。  $\text{Pu}^{241}$  的裂变截面约为 1000 靶,而俘获热中子形成  $\text{Pu}^{242}$  的截面约为 500 靶。这些截面知道得还不够精确;到目前为止,在哈威尔是用含有  $\text{Pu}^{240}$  到 50% 的钚来测定这些截面值的。图 2 表示燃烧到

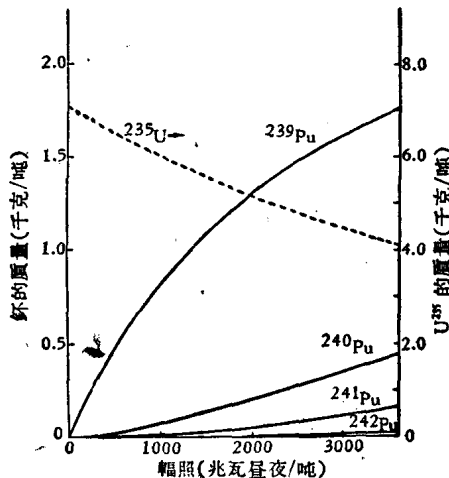


图2 在照射均匀的 PIPPA 型反应堆内反应性随照射的变化

这种计划需要专门的设备,而且包括着大量的工作。即使是把一个受辐照后具有上千居里放射性的钚棒切成几段,也需要相当好的遥控设备。分离裂变产物的实验室必须有很好的屏蔽以及遥控设备。这种操作 1000 居里放射性的设备可能要花 50000 英镑。使反应堆在适宜于产生热功率的温度下运转,就必需知道中子能量高于热能时的有关原子核参数。使用快速机械选择器切断堆内出来的中子束的飞行时间法和脉冲直线加速器中子源是大家都很熟悉的。图 3 是典型的实验结果。我们希望改进测量的准确度,在哈威尔还将采取两种新的改

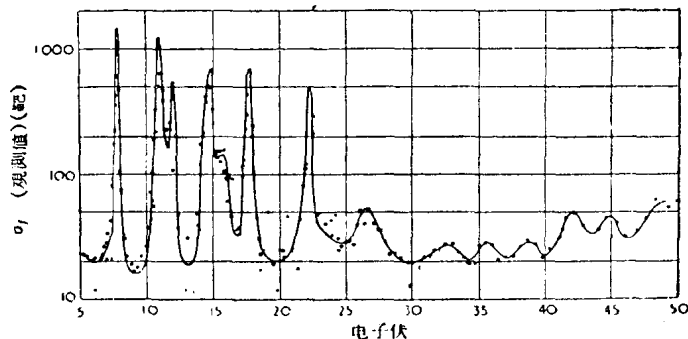


图 3  $\text{Pu}^{239}$  的截面

- 快速选择器 1.20%  $\text{Pu}^{240}$ , 0.08%  $\text{Pu}^{241}$
- 直线加速器  $\sim 4\%$   $\text{Pu}^{240}$ ,  $\sim 0.3\%$   $\text{Pu}^{241}$ .

进来扩大测量范围。首先将使用今年秋天要开始工作的 DIDO 堆出来的中子束,这束的强度将比我们现在从 BEPO 得到的高 40 倍。为这一工作正在建造每分钟 48000 转的新型快速机械选择器,中子的飞行路程将为 100 米。如果中子束的截面为十多毫米,样品约为 100 毫克,我们将能测出直到约 100 伏的共振参数。其次,我们也在建造一个较强的电子直线加速器,它的脉冲电子束电流为 1 安培,电子能量 28 兆电子伏,脉冲宽度  $1/5$  微秒,重复频率 400 次/秒。从重靶上发出的中子强度约比我们现有的 15 兆电子伏直线加速器所能得到的强度大 100 倍,每一脉冲中将有  $5 \times 10^{16}$  中子/秒。我们也计划用裂变材料构成的亚临界装置来作为中子强度的放大装置,以把强度再提高 10 倍。

决定某一特定反应堆内的燃料的另一个重要因素是所选定的燃料

元件更換周期。理想的方法是准連續地卸除燃料元件。假如堆的設計使得堆運轉時能裝卸燃料，就可以做到這一點。

由於中心區燃料所受的輻照較強，首先應該卸除它們，然後進行往外各區的卸除。一般說來，燃耗可以繼續到反應性曲線下的面積等於輻照初期反應性曲線以上的面積時為止。

當不可能連續裝卸時，可以採用分區卸除的操作程序。這樣，各個燃料元件的最大輻照程度可以有相當大的差異，以致平均燃耗會少一些。

以我們現在對核常數不完全的知識來估計燃耗，其不準確度可能為 500 兆瓦日/噸。可能達到的燃耗決定於中子的有效使用情況，特別是決定於起始時的轉換因子。在未來的電力站中可能使用的石墨慢化型反應堆中，燃耗大約可能達到 2500—3000 兆瓦日/噸。

這一點的一個重要結果是，在石墨慢化反應堆中使用低濃集的燃料可能是經濟的。用比較低度濃集的鈾，使  $U^{235}$  的含量提高 3 或 4%，會使反應性增加，燃耗也能隨之增加。這種低濃集的費用可以用美國原子能委員會定的  $U^{235}$  的價格作基礎估計出來。將  $U^{235}$  含量提高 3% 的濃集度需要在一噸金屬鈾中增加 215 克  $U^{235}$ ，所以在每公斤 25000 美元的價格上附加的費用約為每噸金屬 1900 英鎊。這樣，燃料元件的費用要增加 10%。要是增加的燃耗顯著地超過了這附加的 10% 費用，低濃集就成為有利的了。

把鈾和貧化鈾的大部分一起重複使用，並用天然鈾補充系統內燒掉了的  $U^{235}$ ，可以使熱中子堆裂變材料的燃耗增加。

在平衡條件下，堆內各裂變同位素的比例大致保持不變，因為生產出來的鈾和由裂變而破壞的鈾大致相等。芬令 (Fenning) 和西列特 (Syrett) 研究了用這一方法重複使用燃料的再生堆的平衡狀態。他們的分析表明了可達到的總燃耗如何強烈地決定於燃料的初始濃集度，轉換因子以及  $\eta$  值，即每個裂變原子所生的中子數。由於在鈾—鈾循環中，增加堆的溫度會顯著地降低  $\eta$ ，這樣會在減低鈾的利用率方面起重要的作用。圖 4 和圖 5 示出了  $\eta$  變化所起作用的典型曲線。

我們預料，一個氣體冷卻、石墨慢化、轉換因子為 0.8、運轉溫度為

400°C 的反应堆的总燃耗可能达到10000兆瓦日/吨的数量级。

在一个加浓燃料的反应堆，例如我们正在研究的钠石墨反应堆中，能达到的燃耗大约会少得多，尤其是当堆在约500°C下工作的时候，因为这样 $\eta$ 会下降到1.65—1.70。转换因子的数值当然显著地决定于设计，特别是决定于在堆心中使用多少如铅等用来作石墨防护复盖层的吸收中子的物质。它也将显著地决定于堆的尺寸和输出功率的大小。所以，直到设计参数确定时为止，我们不能准确地决定燃耗。虽然如此，就目前的研究情况来说，如能得到较好的燃耗，钠石墨堆似乎还是能用 $U^{233}$ 钍循环来工作的。

刘维斯(Lewis)博士指出了达到高度燃耗的另一方法。他提議說 $U^{235}$ 應該在高转换因子(0.9)堆(如重水堆)中燃烧，而在用氧化钍燃料元件的 $U^{233}$ 钍循环中可以达到超过10000兆瓦日/吨的燃耗。这样，按美国 $U^{235}$ 的价格，每千瓦小时费用的数量级可以缩减到1密尔(0.08辨士)。

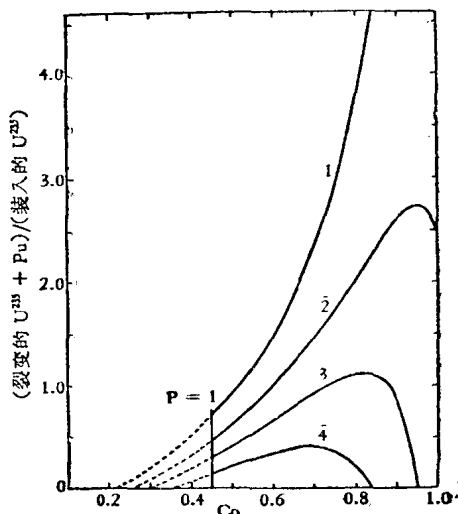


图4 钍的利用率随 $\eta_{49}$ 的变化(根据芬令和西列特的分析)

$$E_f = 1, \quad E_0 = 1.25, \quad \frac{\epsilon}{1 + K^2 L_g^2} = 1$$

| 曲线 | $\eta_{49}$   |
|----|---------------|
| 1  | 2.00          |
| 2  | 1.80 (~400°K) |
| 3  | 1.75 (~600°K) |
| 4  | 1.65 (~900°K) |

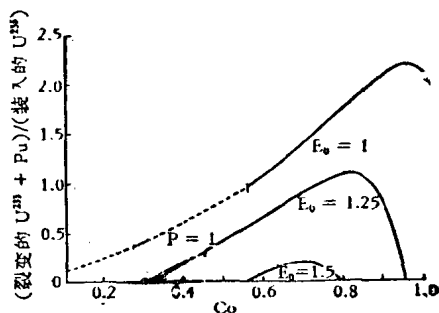


图5 钍的利用率随起始浓集度和转换因子的变化(按照芬令和西列特的分析)

$$E_f = 1, \quad \eta_{49} = 1.75, \quad \frac{\epsilon}{1 + k^2 L_g^2} = 1$$

快中子堆問題·使用裂变中子譜的快中子部分的反应堆的問題完全不同于热中子反应堆的問題。

在英国,对堆心临界大小的純粹数学計算,首先就得出了不准确度为  $\pm 25\%$  的結果。从那时起建成了分别使用鈾和  $U^{235}$  的两个零功率堆 ZEPHYR 和 ZEUS,我們对于快中子堆性能的知識就大大地增加了。

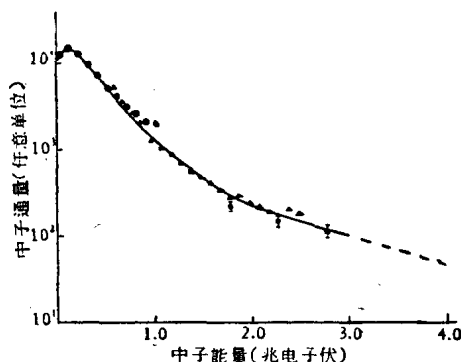


图 6 ZEPHYR 外围层内的中子譜,亦即由堆心中心算起半径为 28 厘米处的中子譜(根据荷尔蒙斯(Holmes)和他的合作者的資料)

●—— $He^3(n,p)$  正比計数器, ▲——反冲氦核正比計数器, ■——反冲氦核照相底片

較重要的尚不清楚的問題之一是沿半径由堆心到外层間裂变中子能譜如何因非弹性散射而递降的問題。图 6 是測量結果中典型的例子。

对鈾,  $U^{235}$  和  $U^{238}$  在堆心及外层各处裂变速度的变化也作了重要的測量<sup>1)</sup>。由这里弄清了,  $U^{238}$  的裂变对堆内中子的經濟使用的貢獻是很重要的。总的結果是,在不用冷却、不充分慢化的 ZEPHYR 中得到超过 2 的增殖系数。在将来的高功率鈾快中子堆中,增殖系数大約可以达到 1.6—1.7,这是很好的現象。ZEPHYR 的工作最近表明,如用鈾心和鈾外壳,每燃耗一个鈾原子将生成 1.6 个  $U^{233}$  原子。

### 固体物理学問題

核反应堆的固体物理学或冶金学問題甚至比核物理問題还重要,因为在所有問題中最难的是获得可靠的燃料元件的問題<sup>2)</sup>。

1) 参看本文集第四篇論文。

2) 参看本文集第十篇論文。

第一类問題是关于燃料元件的輻照稳定度問題。这些問題因燃料元件中用的是金属还是氧化物以及运转温度而有所不同。

第一批企业性石墨慢化、空气冷却的反应堆将在燃料元件表面温度略超过  $400^{\circ}\text{C}$ 、而中部金属温度低于鈾的  $\alpha - \beta$  相轉化点  $665^{\circ}\text{C}$  的状况下工作。鈾石墨堆和快中子堆金属表面温度可能会是  $500^{\circ}\text{C}$ ，而将来的堆因使用粉末合金或氧化物燃料元件可能在更高的温度下工作。

在任何新情况下研究輻照损伤都可能总共需要 200 人年的工作量，其中相当大的一部分要花在准备合金成分不同和热处理方法不同的各种試样上。还必须准备在試驗堆上装入并冷却这些試样的迴路，这些迴路应配有控制温度条件的恆温装置。

輻照后，試样的放射性很高，必須在厚混凝土墙后面进行远距离观察研究，并使用遙控装置操作。在哈威尔为了这一目的成功地使用了电视。图 7 表示由电视管得到的輻照后試样的照片。

低温輻照可以导致鈾的严重变形<sup>1)</sup>，我們仍远不能了解这一現象，虽然无疑地这是由于鈾的复杂正交晶系結構所产生的結果。这种效应的总的結果可以使一根鈾棒的长度因晶格排列的不同而伸长或縮短几英寸，如图 8 所示。在輻照下鈾的单个結晶显著地改变它的形状，好象在高速裂变碎片所引起的局部受热下鈾原子穿过晶体而流动一样。要得到在

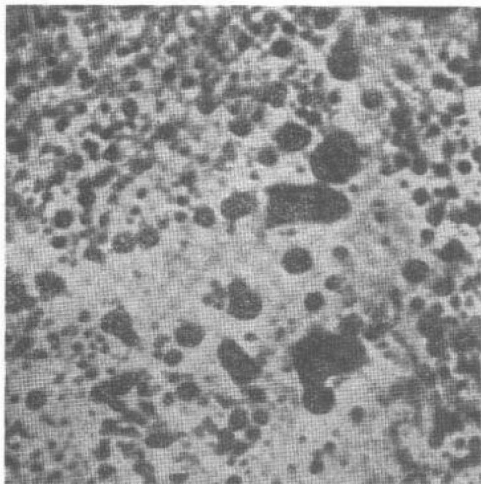


图 7 輻照所引起的密度降低达 13% 的試样

$400^{\circ}\text{C}$  温度下工作的鈾燃料元件，最直接的解决方案是将金属进行热处理以减小晶粒大小，并使晶体在工作棒内成为无序排列。这样可以大大

1) 参看本文集第五篇論文。

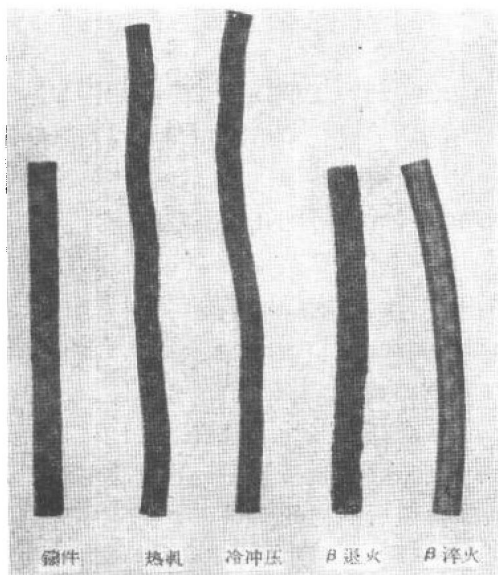


图8 原来等长的铀棒在温度周期性地  
在  $600^{\circ}$  到  $50^{\circ}\text{C}$  之间改变 850 次  
之后的变化

减小铀棒的变形，现在已经感觉到在卡德尔豪尔和中央电业管理局型石墨反应堆内变形已经不是能达到的燃耗的限制因素了。

对快中子堆或钠石墨堆来说，其特征之一是温度可能更高一些，在这种情形下铀的范性更其显著，因此我们就碰到另一个因裂变气体的压力所产生的问题。它们徙动到某些特殊的地方形成高压气包，从而使金属大大隆起。我们还远不能了解是什么因素在决定这些气包的数目和分布。如果金属没有

受到限制，在  $800^{\circ}\text{C}$  时体积的增大可能达到 40%，可以制造坚固的护套来作为对这种变形的直接实验解决方法。这样，胀大可能被限制在 5% 左右。看来，大功率的快中子堆很可能要用液体燃料。

另一个重要的问题是辐照对机械强度和蠕变的作用。在日内瓦会议上有一篇苏联论文指出，在某种情况下辐照可以使蠕变增加 1.5 到 2 倍。柯特列尔 (Cottrell) 博士在哈威尔的 BEPO 堆上辐照有负载的铀弹簧而研究了这一作用。他发现，在  $100^{\circ}\text{C}$  进行辐照的情况下，金属在所受应力仅为金属在这温度下正常蠕变应力的百分之一时亦能很慢地蠕变（一年中变 0.1%）。在铀金属受有强烈应力的特种堆的设计中这一点可能是很重要的。

对堆中所用的受有应变的多数金属来说，都有同样的问题发生，只是程度上不那么尖锐罢了。辐照对反应堆的压力外壳的抗断强度可能产生的作用就是一个明显的例子。

辐照对固体减速剂的作用是另一个重要问题。辐照对石墨的作用是最显著的。由于中子碰撞产生了填隙原子，石墨晶体就沿一个方向伸长，而在另一方面缩短，其结果是在中子通量为  $10^{13}$  中子厘米<sup>-2</sup> 秒<sup>-1</sup> 和温度 150°C 的条件下石墨块每年增长 0.5%。图 9 表示某些典型的结果。同时，物理特性如导热率等也有显著的变化，在这种条件下导热率降低 7 倍。由于这种作用强烈地决定于温度，所产生的损伤效应在高温下便逐步地消失了。

图 10 表示与这种所谓“魏格纳增长”同时出现的因填隙原子而发生的能量贮存。在温度 100°C、中子通量  $10^{13}$  中子厘米<sup>-2</sup> 秒<sup>-1</sup> 下照射一年后贮存的能量是 110 卡/克，在 30°C 时则为 190 卡/克。在高于辐照温度下加热石墨时，大部分热量可以放出来（图 11 是一个典型的例子）。这时石墨试样

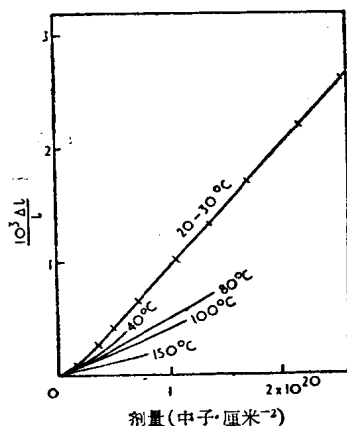


图 9 在不同辐照温度下垂直于冲压方向上的增长 (据 Kinchin)

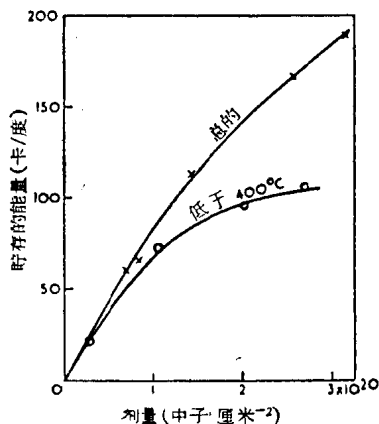


图 10 总贮存能量和在低于 400°C 左右时放出的能量。辐照温度 30°C (据 Kinchin)

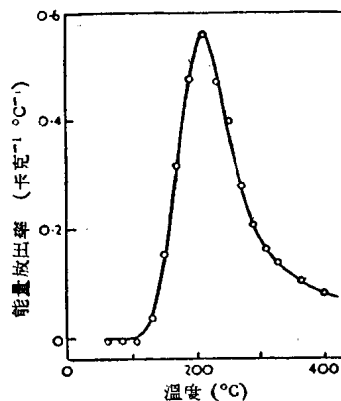


图 11 放出能量的速率。温度以 20°C/分作直线性增加。辐照在 50°C 下  $\sim 2 \times 10^{20}$  中子厘米<sup>-2</sup> 条件下进行