

研究性重水反应堆

林 诚 格

在北京郊区绿树成荫的原子能研究所里，有一座大型实验装置——研究性重水反应堆。这座反应堆于1958年9月投入使用，是我国第一座原子反应堆。在二十余年时期内，这座反应堆完成了许多科学研究和实验工作，培养了一大批核科学技术人员。为了满足核科学研究更高的要求，也为了更新经过二十年使用的已经陈旧和磨损腐蚀的部件，1979年1月开始对这座反应堆进行改建，1980年6月完成改建工程，达到了当代同类型研究性反应堆的世界水平，以最少的投资和较短的时间为我国提供又一个现代化的实验装置。

一、用 途

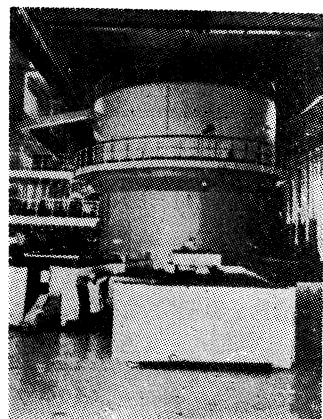
研究性反应堆有什么用处？它对科学技术现代化起些什么作用？原子能研究所的重水反应堆又能进行那些工作？

让我们追溯到四十年前，从恰德威克（Chadwick）1932年发现中子后，经过了十年才在费米（Fermi）领导下在美国建成了第一个裂变反应堆CP-1。CP-1的临界证明铀和慢化材料（如石墨或重水等）组成的热中子体系可以维持自持的链式反应，这是一个划时代的事件。现在世界上已经有上百座大大小小的各种研究性和实验性反应堆。在研究性反应堆发展的基础上，核电站（动力反应堆）获得高速发展，目前世界上有259座核电站在运行，装机容量达到一亿六千万千瓦。

核反应堆在进行链式反应时，一方面放出大量能量，同时放出中子和射线。动力反应堆只利用核裂变产生的能量来发电或供热。研究性反应堆则只利用核裂变产生的中子和射线以供科学研究和实验用。二者由于用途不同，在设计和构造上有很大的不同。

核裂变放出的中子和 γ 射线具有各种能量，也就是说有一个连续的能量分布，称为能谱。从应用角度反应堆的中子按能量大致划分成四个有些重叠的能区：热中子从0.01电子伏到0.3电子伏；超热中子从0.3电子伏到 10^4 电子伏；共振中子从1电子伏到100电子伏；快中子从 10^3 电子伏到10兆电子伏。

利用反应堆的中子和射线可以进行多学科多方面的研究和实验工作，例如，核物理和中子物理的研究；生产放射性同位素，中子源和辐射源等；中子活化分析；中子照相；中子掺杂；中子辐照；以及辐射化学研究等等。不少国家建造了专门用途的研究性反应堆供单项使用，如专为中子辐照考验核电站用材料燃料的材料试验堆，专供中子照相或活化分析用的反应堆等。



原子能研究所的重水反应堆是一座多用途的研究用堆，它可以适应各方面的工作。进行实验研究或辐照生产时，既可以把实验装置或实验样品放到反应堆中去，也可以把中子引出来加以利用。前者通过垂直实验管道来实现，后者从水平实验孔道引出中子束来实现。

1. 核物理研究 中子与各种原子核的相互作用是一个广泛的研究领域。过去已经在重水反应堆上测量了许多物质的中子反应截面。利用水平实验孔道的中子束流还可进行晶体学、磁学和晶格动力学的中子散射研究。在重水反应堆水平孔道上将要安装冷中子源和中子导管。在反应堆中已经充分慢化的热中子将再在一个液氢低温介质中慢化和扩散，使其能量接近液氢温度，即低于0.01电子伏。这种冷中子对于固体物理、液体物理、核物理化学和生物化学等研究都是非常有用的。

2. 生产放射性同位素，中子源和辐射源 同位素的应用是和平利用原子能的一个很重要的方面。工业、农业、国防和科学研究都离不开使用同位素。放射性同位素可以由反应堆照射和加速器照射二种方法获得，目前反应堆照射的同位素占压倒多数。

照射的方法是这样的，先把靶料装入铝制照射容器中，然后把铝容器放入反应堆实验管道中照射，照射时间根据所需的放射性强度而定。靶料经中子轰击后生成放射性同位素，从反应堆中取出后经过分装或化学处理即可应用。可以分别利用三种核反应来生成放射性同位素：（1）中子裂变反应。利用 ^{235}U （ ^{233}U 或 ^{239}Pu ）在反应堆中分裂成各种不同碎片成分，可以产生170种以上的放射性同位素。（2）热中子俘获反应。用元素或化合物作靶料，在反应堆中俘获热中子放出 γ 射线后生成放射性同位素。（3）快中子（n, p）和（m, α ）反应。选定专门的靶料与快中子反应放出质子或 α 粒子后生成另一种放射性元素。这种生成的元素与原来靶料的元素不同，因此可用化学方法分离制得无载体放射性同位素。

目前重水反应堆内已可生产一百多种放射性同位素。在医用同位素中，最常用的品种有 ^{32}P ， ^{51}Cr ， ^{60}Co ，

^{125}I , ^{131}I , ^{131}Cs , ^{198}Au , $\text{Mo}-^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器和 $\text{Sn}-^{113\text{m}}\text{In}$ 发生器等。这些医用同位素制成注射液或分析药盒供货。在工业用同位素中有各种 γ 源和中子源供无损探伤、工业测厚、火警自动预报、油井探油等各种用途。

3. 中子活化分析 中子活化分析是把被分析的样品用中子激活,再测量样品的放射性计数,从而算出样品中各种元素含量。活化分析的特点是灵敏,快速,精确,样品用量少,非破坏性和多种元素可以同时分析。利用反应堆的中子作为活化源具有灵敏度高的特点,因为它热中子通量高,对于多数元素的活化截面大,所以目前大多数活化分析都利用反应堆进行。

分析样品由气动快速输送系统送入和送出反应堆。快速输送系统俗称“跑兔”装置,含意是分析样品好似一只“兔子”,快速“跑入”反应堆内照射,然后快速“跑”出,由配有电子计算机的多道分析器进行测量。“跑兔”装置对于分析短半衰期的样品特别重要。

活化分析在生命科学,宇宙化学,地球化学,环境科学和半导体工艺研究等方面得到了广泛的应用。在生命科学方面,利用堆中子活化分析可以研究微量元素与生命的关系,能够定量测定痕量元素,达到千万分之一到十亿分之一的浓度的灵敏度。在半导体工艺研究中如测定硅、锗、砷化镓中的痕量杂质。在宇宙化学方面,分析陨石雨中成份以研究陨石的形成和演化过程。在地球化学方面分析各种岩石和矿物以研究矿床成因和测定矿物含量。在环境科学方面,测定水源,空气,泥及生物样品中的微量元素,以便对环境污染防治提供依据。

4. 中子照相 中子照相是一项较新的非破坏性检查技术。在核工业、爆炸工业、宇航和航空工业中特别有用。中子不带电荷,可以穿透外层电子云与原子核直接作用,因此对材料和部件既可作宏观检查又可作微观检查。 γ 射线和X射线通过物质时,随着物质密度的增大而衰减加大,因此重材料用X光或 γ 射线照相有困难,而中子照相却不存在这个问题。

从反应堆水平孔道射出的中子束经过中子飞行管射到被试物体上。穿透被试物体的中子经转换体在胶片上感光。因为不同能量的中子与被试材料的作用特性不同,可以视具体情况分别采用热中子照相,超热中子照相,共振中子照相和冷中子照相以取得最佳的分辨率和清晰度。反应堆射出的中子通过各种特殊设计的中子过滤器或冷源装置就可以分别得到热中子,超热中子,共振中子或冷中子。

5. 中子掺杂 半导体工业过去传统采用冶金掺杂方法来使材料达到所需的性能。这种掺杂方法均匀性差,器件成品率低。近年来,国际上大量采用反应堆中子掺杂的方法,它具有均匀性好,器件性能和成品率高的优点。目前大规模应用的是硅单晶的中子掺杂。

当前各国正在研究对锗、镓砷也应用中子掺杂。

在改建后的重水反应堆中新装了不同直径的垂直管道,专门装有中子掺杂辐照装置来进行这项工作。

6. 中子辐照 核工业使用的材料常常要求经得起中子和射线的长期轰击,即要求良好的耐辐照性能。核电站的动力反应堆用的燃料和其他材料要求先在研究反应堆中进行实际中子辐照,以考验其性能。

研究性重水反应堆的一项重要用途就是供中子辐照。核电站动力反应堆的燃料及其设计和结构可以放入研究堆中让中子长期轰击。现在辐照空间的最大直径可达120毫米。还有一个150大气压,330℃的高压高温冷却水回路与试验件相连,以带出被中子轰击后试验件所产生的热量并符合试验件的使用工况。

研究性反应堆的用途非常广泛,以上介绍的只是最常用的几个方面。

二、改建和特点

从研究性反应堆的用途可以看出,一座多用途的研究堆应具备以下性能:

1. 中子通量高 提高中子通量可以提高实验的灵敏度和精确度,缩短实验时间,提高同位素比强度和产量。特别是有些科学研究也只有在高通量下才能进行。

2. 要有足够大的实验辐照空间以便同时进行多种实验。

3. 要具有中子能谱分离的特点 不同实验常常只要求某一能区的中子,如有的只需热中子,有的只需共振中子。反应堆内不同位置的实验管道应具有不同的中子能谱,如果还不能满足特定的实验要求,就需要加装中子能量过滤器来达到。

4. 要有过剩中子供实验使用、对于多种实验同时进行或吸收中子能力很强的材料放在反应堆中,更要求有足够多的过剩中子。

为了改进研究性重水反应堆的性能,做到一堆多用,进行了改建设计,随后进行改建施工。在一座经过二十年运行的已经有很强放射性的反应堆上进行改建,在我国还是首次。反应堆活性区和重水管路设备都有强放射性,这使改建工作比常规做法要困难得多。相当一部份工作要采取远距离遥控操作,还要采用严格的防护放射性的措施,工作人员要穿专门的工作服和塑料衣及面罩。

全部改建工作用了十八个月,包括拆除强放射性活性区,吊出旧的反应堆内壳,安装新设计的活性区和新内壳,对重水管路和设备进行改造和革新,对所有附属系统进行改建和维修。

改建后的实测结果说明,新的重水反应堆全面达到了设计指标。

现在反应堆已经顺利运行一年了,使用实践说明改建十分成功,设计正确,性能改善,运行良好。