

第六篇

核燃料——核动力之本

大家知道，烧锅炉需要煤，开汽车、开飞机要汽油。拖拉机用柴油就可以，喷汽式飞机则需要用高级航空汽油。不难理解，反应堆和核武器等高科技的设备，需要很高级的燃料。

用于反应堆和核武器的核燃料标准高，提炼和制造技术复杂、难度大，你想了解这里面的许多高技术问题，请你读一读这一篇。

第一章 沙里淘金提铀

1. “分散元素”——铀

世界上 30 多个有核电国家中，产铀的有 19 个国家。不少国家有核电而无铀，或有铀而无核电。中国是既有核电又有铀的国家。

铀矿物具有放射性和荧光性两大特性。此外四价铀矿物和六价铀矿物具有不同特征色泽，四价铀多呈黑色、灰黑色、深褐色或暗绿色；六价铀矿物颜色十分鲜艳。图 6-1 展示了几种铀矿石。

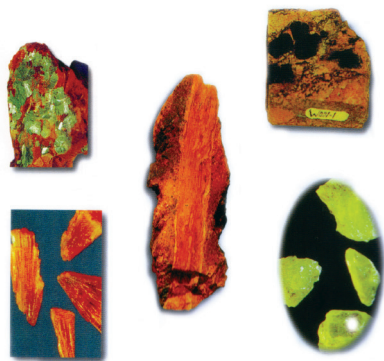


图 6-1 几种铀矿石

铀在地壳中平均含量为 2.5×10^{-6} ，总埋藏量虽然比金、银、汞、钨、钼、锑、铋等还要多，但是，铀在地下的埋藏十分分散，被称做“分散元素”。并且，铀的化学性质很活泼，喜欢和其他元素合道，形成复合矿，已发现的铀矿物约有近 200 种，铀矿的特点是品位低、矿体分散、规模小，找到高品位的铀矿相当不容易，品位高于万分之五就有开采价值。

寻找铀矿的办法很多，除了摸清地质规律以外，可利用铀及其衰变子体具有放射性和释出氦气的特点，采用放射性 γ 测量、能谱测量、射气测量、水化学法等找矿。通过预查、普查、探查和勘探，提交铀资源储量。

铀矿的开采，主要有地下开采或露天开采。铀矿石需要经过破碎、研磨和选矿等处理，再用浸出剂（酸或碱）浸出铀，然后固液分离，对溶液进行离子交换或溶剂萃取，最后得到铀化学浓缩物（见图 6-2）。采矿和选矿，会产生很多的废矿石，浸出会产生许多尾矿砂。还有，铀衰变的子体镭和氡，必须做好防护工作。我国对治理废渣石，总结了“拦、护、填、封、疏、盖、植”七字治理方法，有效减少了空气中氡的析出率和水中铀和镭的浓度。

2. 地浸办法好

近年来开发的地浸法，对砂岩型铀矿，不必将铀矿石挖出来，省去运输、磨碎矿石等许多工序，只要打几口井，往地下注酸（或碱液或 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ ），在地下把铀溶解出来。然后，将铀矿浆从地下抽上来，直接输运到水冶厂去加工（见图 6-2）。这样，

把采矿、选矿和水冶连成了一体，不会产生很多污染环境的废石和尾矿砂。地浸是个好办法，但由于地浸开采条件苛刻，找到适用于地浸的铀矿床难度较大。

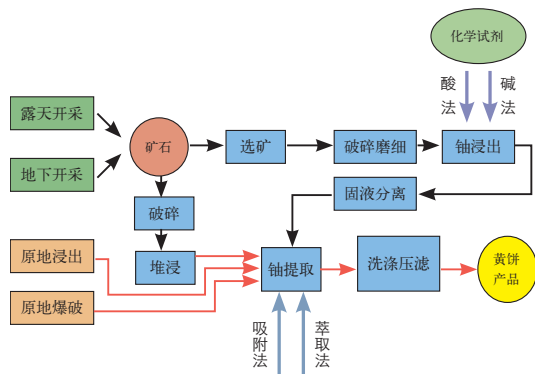


图 6-2 铀选冶工艺流程示意图

除了地浸法外，还有堆浸法、原地爆破浸出法、细菌浸出法等。堆浸法就是把矿石破碎后在地面堆成堆，在上面喷洒稀硫酸，收集浸出液。原地爆破浸出采铀就是将采场内的矿石破碎到一定粒度，在原地用事先配制好的溶液对矿石进行喷淋，再将所形成的浸出液送地面水冶处理的方法。细菌浸出法是利用细菌的氧化作用，少用或不用硫酸，从矿石中浸出铀的一种方法。常用能氧化含铁硫化矿的菌种，如氧化硫杆菌和氧化铁硫杆菌。细菌浸出法还没有得到工业应用。

3. 从矿浆里制取精产品

预处理过的铀矿石经过酸（如硫酸）或碱（如碳酸钠）的浸渍，得到含铀矿浆。矿浆经过化学萃取或离子交换和沉淀处理，获得称为“黄饼”的粗产品（见图 6-3）。黄饼中所含的氧化铀（ U_3O_8 ）仅占 40% ~ 80%，它里面含有很多杂质，并且很多是会“吃掉”维持链式反应的中子的毒物。因此，需要进一步提纯并制备成铀氧化物，该工艺过程，叫作铀的精制。



图 6-3 “黄饼”产品

精制方法有：溶剂萃取法、离子交换法、离子交换与溶剂萃取复合法、沉淀法等。经过精制，获得铀的中间产品。

中间产品还要进行化学转化，制成二氧化铀或金属铀，才可供下一步制造重水反应堆的燃料元件；经过铀-235 富集之后，才可制造成轻水反应堆和研究堆的燃料元件或供做原子弹的装料。

第二章 铀-235 的富集

从铀矿中获得的精铀产品是天然铀产品。在纯天然铀中能够被热中子轰击发生裂变反应的铀-235 仅占 0.71%，99.27% 的铀-238 在热中子轰击下不会发生裂变反应。也就是说，每 1 000 个铀原子中，只有 7 个可被热中子轰击发生裂变，要作为核电厂轻水堆（压水堆和沸水堆）的燃料，需要把铀-235 的

浓度提高到 2.5% ~ 5%。如果要放到研究堆做燃料, 需要把铀-235 浓度提高到 10% ~ 90%。若用来制造原子弹, 则需要把铀-235 浓度提高到 90% 以上。

铀-235 和铀-238 是同一元素的同位素, 它们在化学性质上没有什么差别, 只是在质量上有微小差别, 相差约 1%。因此, 要实现铀-235 和铀-238 分离, 把铀-235 富集起来, 技术上的难度是很大的。提高铀-235 浓度 (称为富集) 的方法, 现在主要有气体扩散法、气体离心法和激光法。

1. 利用分子扩散的气体扩散法

气体扩散法就是把铀转化成六氟化铀气体, 做成高压供料流。当它们通过特制的多孔膜时, 质量较轻的铀-235 分子运动速度大, 容易透过膜。质量较重的铀-238 分子运动速度小, 不易透过膜。气体扩散法分离铀-235 的原理见图 6-4。所用的多孔膜 1 平方厘米上有几亿个微孔, 要求耐腐蚀和能承受很大的压差。气体扩散法使铀-235 和铀-238 分离开来, 实际上, 一次扩散分离的效果是很低的。要将铀-235 的浓度从 0.71% 提高到 3%, 需要 1 000 多个分离单元串联起来, 所以铀扩散工厂是一个庞大的工厂, 并且是一个耗电大户。

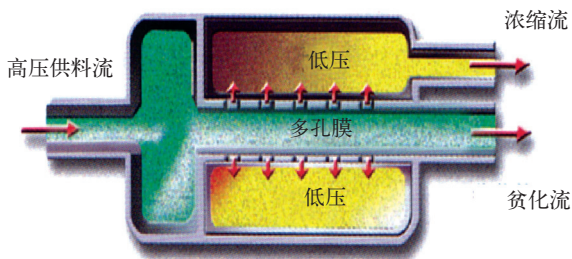


图 6-4 气体扩散法分离铀-235 原理图

2. 利用质量差别的气体离心法

离心法是将铀转化成六氟化铀气体后做供料, 注入高速离心机。离心机的转速很高, 每分钟的转速高达上万转。在高速旋转离心力的作用下, 质量较重的铀-238 甩向离心机转筒的壁面附近, 质量较轻的铀-235 聚集在转筒中心轴线附近。这样, 铀-235 和铀-238 得到了分离。离心法分离铀-235 的原理见图 6-5。因为单台离心机的生产量是很小的, 需要许多台离心机串联起来使用, 才能获得满足需要的分离产品。

离心法比扩散法耗电少,经济性高,设备使用寿命长,已在逐渐替代扩散法富集铀-235,气体离心技术将取代气体扩散技术。气体离心技术已获重大发展,美国开发的第五代离心机转子高达15米多,直径达76.2厘米,转速达到1万转/分,单机生产能力已达1000千克分离功/年。

3. 利用光谱差别的激光法

激光法是根据铀-235和铀-238原子(或分子)吸收光谱的微小差别来实现分离。激光法分为原子激光法和分子激光法。前者直接浓缩金属铀蒸气,而后者则是对六氟化铀气体进行分离。原子激光法的研发比较多。

原子激光法是将金属铀熔化,蒸发形成原子蒸气束。用特定的激光与铀原子蒸气束相作用,有选择性地激发铀原子。铀-235原子被激发电离,形成等离子体,铀-238原子不被激发。受激发的铀-235在电场作用下发生偏转,将其引出来,收集在精料板上。铀-238原子不被激发,仍为中性,收集在贫料板上,这样实现铀-235和铀-238的分离(见图6-6)。

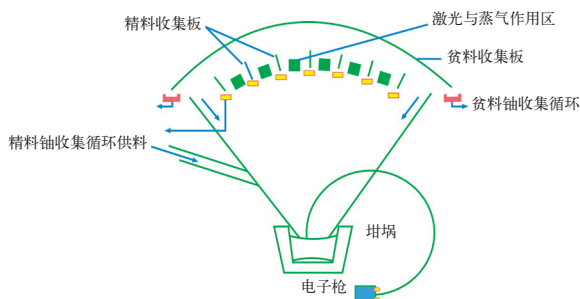


图6-6 原子激光法富集铀-235

激光法分离铀同位素是新开发的技术,具有分离系数高,耗电少,生产灵活,分离级数少,工厂规模小等优点。原子激光法富集成本较高,有转向研发分子激光法富集的趋势。

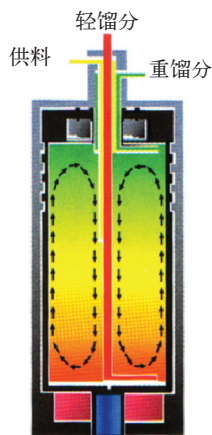


图6-5 离心法分离铀-235原理图

第三章 核燃料元件制造

有了富集铀-235的核燃料，还要做成适于反应堆使用的核燃料部件，这还有许多制作工艺，对制成的核燃料部件要求非常高。

1. 核燃料元件种类繁多

世界上已建有各种各样的反应堆，采用着各种形式的燃料元件。按反应堆类型分，有生产堆元件、动力堆元件和研究堆元件等；按元件几何形状分，有柱状、棒状、板状、条状、环状、球状和棱柱状等；按元件组分特征分，有金属型、陶瓷型和弥散体型等；按物理形态分，有固态核燃料、液态核燃料（溶液堆、熔盐堆）等。一些燃料元件和组件示于图 6-7。



图 6-7 核燃料元件和组件

2. 核燃料元件标准高

核燃料元件一般由包壳和芯体组成。包壳材料有铝合金、镁合金、锆合金、不锈钢和石墨等。芯体有铀-铝合金、二氧化铀、铀碳化物、铀钚氧化物、铀硅铝弥散体等。芯体一般经过烧结加工制成，为防止芯体膨胀变形后损害包壳，芯体和包壳间留有微小空隙（约 0.1 毫米），中间充以氦气（20 ~ 30 大气压），然后严格焊封。因为核燃料元件在反应堆中所处的条件十分恶劣，长期受到强辐照、高温、高流速，甚至高压的作用，所以要求核燃料元件具有耐温、耐压、耐辐照、耐冲击和耐腐蚀等高指标品质，以保证使用期间其性能、形状和尺寸保持稳定不改变。

由核燃料元件按一定排列方式组成的组合构件称核燃料组件。核燃料组件插入反应堆中（见图 6-8），在反应堆中“燃烧”之后产生很强的放射性。

元件如果发生破损就会造成放射性泄漏释出。所以核燃料元件不仅在反应堆“燃烧”过程中，而且从反应堆中卸出之后，保存在贮存水池中和直到后处理之前，都不希望出现破损和泄漏。

3. 核燃料元件反复受考验

堆型不同，核燃料组件也有别。核燃料组件要模拟反应堆的安装和使用条件，做各种堆外试验和堆内考验，包括：结构强度和刚度试验；水力阻力和流速分布试验；临界热流密度试验；格架流场和水流交混试验；水力冲刷试验；吊装运输试验；装换料试验等，考验核燃料组件的力学性能、热工水力学性能和辐照性能。图6-9展示在堆外检查压水堆新燃料组件。



图 6-9 堆外检查压水堆新燃料组件

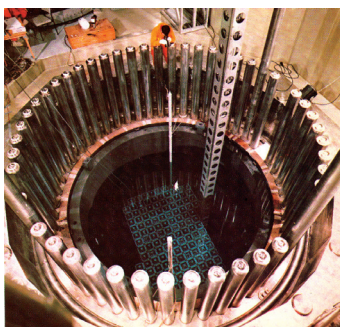


图 6-8 核燃料组件插入反应堆中

由于反应堆专家和工程师们不断改进材料的品质和制造工艺，使核燃料元件的性能不断提高，目前核燃料元件的破损率已从万分之一降低到百万分之一。

第四章 从乏燃料中提取铀和钚

1. 什么是乏燃料

从反应堆中卸出的受过中子辐照且不回到该反应堆中再使用的燃料，称为“乏燃料”。压水堆乏燃料中，含有未“烧完”的易裂变物质铀-235（它比天然铀中的铀-235浓度还高），新生的易裂变物质钚-239，还有大量的铀-238（约占95%）、少量裂变产物（如锶-90、铯-137、钨-99、钷-147，贵金属

钒、铈、钇等)和次锕系元素(也称超铀元素,如镎-237、钚-241、镅-242)(见表6-1),许多是宝贵的同位素。所以,有人称它为“核废料”是不合适的。现在全世界400多座运行发电的反应堆,每年卸出的乏燃料约1万吨。

表6-1 压水堆乏燃料中所含核素

铀		钚 约1%	次锕系元素(MA)	裂变产物(FP)
铀-235	铀-238		镎, 钚, 镅	锶-90, 铯-137, 钨-99, 钷-147, 贵金属等
约0.9%	约95%		约0.1%	约3%

乏燃料中含有大量放射性物质,放射性很强,释热率很高,需要冷却贮存一段时间,才能作运输等处理。乏燃料通常贮存在反应堆附近的水池中(见图6-10),称为湿法贮存。压水堆乏燃料冷却贮存时间一般不少于3~5年(生产堆乏燃料冷却贮存时间较短)。当水池贮存容量不足而需要继续贮存的时候,可转入干法贮存(图6-11)。

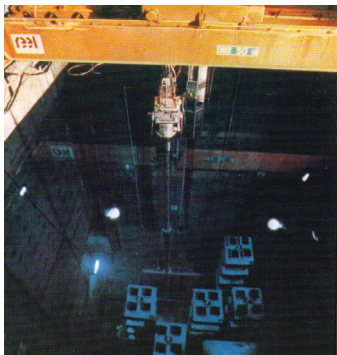


图6-10 乏燃料冷却贮存



图6-11 乏燃料干法贮存

乏燃料要由国家许可的专门容器、专用车辆、专营公司来装卸和运输,以确保公众、工作人员和环境的安全。图6-12示出了我国中核清原环境技术工程有限责任公司运输乏燃料。



图 6-12 中核清原环境技术工程有限责任公司运输乏燃料

2. 何谓“后处理”

“后处理”是指从乏燃料中除去裂变产物，回收、纯化核燃料物质（铀、钚）的工艺过程。

后处理工艺分为水法和干法两大类。现在世界上在用的工艺都为水法后处理普雷克斯（Purex）流程。该工艺包括：燃料棒切割，燃料芯体溶解，有机溶剂萃取分离出强放射性裂变产物，对分离出来的铀和钚分别纯化等步骤。后处理操作有很强的放射性，需要远距离遥控操作和维修；需要确保核临界安全；对铀和钚的分离与纯化技术指标很高，这确实是高难度的高科技工程项目。我国已经自主建设了动力堆乏燃料后处理中试厂。大型动力堆乏燃料后处理厂的建设正在筹划中。

为适应高燃耗乏燃料（如快堆乏燃料）后处理的需要，人们正在研究先进的一体化流程和干法后处理技术。

3. 从乏燃料中取得珍贵的钚

自然界中无天然存在的钚，核燃料钚-239 是通过反应堆（如生产堆）人工制造的易裂变物质（见图 6-13）。

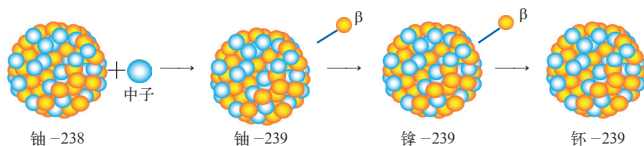


图 6-13 人工核反应制备钚-239

一座 100 万千瓦电功率轻水堆核电站，每年产生大约 25 吨乏燃料，其中含有反应堆级钚约 250 千克（其成分：钚-239 约占 55%，钚-240 约占 23%，此外还有钚-241、钚-238 和钚-242 等）。乏燃料后处理提取的钚是宝贵的财富，可供制造铀、钚混合陶瓷燃料[铀、钚氧化物燃料 $(\text{U}, \text{Pu})\text{O}_2$ （MOX 燃料），铀、钚碳化物燃料 $(\text{U}, \text{Pu})\text{C}$ ，铀、钚氮化物燃料 $(\text{U}, \text{Pu})\text{N}$ 等]，可用做轻水堆和快堆的燃料。铀、钚混合燃料的使用，对提高铀资源的利用率、减少铀的转换和铀的浓缩要求、减少放射性废物的产生量有重要意义，有良好的发展前景。目前世界上工业化生产 MOX 燃料的已有法、比、英等国家，我国也正在研发 MOX 燃料。铀、钚碳化物燃料 $(\text{U}, \text{Pu})\text{C}$ 目前只有印度生产和在其快中子增殖实验堆上使用。

制造核武器的钚要求钚-239 丰度不低于 93%，而反应堆级的钚中，钚-239 丰度不足 60%。反应堆级钚中含有较大比例的钚-240 钚-238 和钚-242 等，带来了很多问题，如自发裂变率高，使核链式反应过早开始（俗称提前点火），威力不确定，比活度高，辐射强，释热高，导致安全问题多，技术难度大，有许多需要克服的难关。

4. 闭路循环和“一次通过式”

后处理回收的铀和钚，返回反应堆中去再利用，这就是闭路循环（见图 6-14）。做成混合氧化物燃料用到快堆中去“燃烧”，可使铀资源利用率提高 50~60 倍。闭路循环除充分利用铀资源外，还减少深地质处置高放废物的负担。

但是，对于不值得做后处理的乏燃料，如重水堆用天然铀做燃料，它的乏燃料中铀-235 的含量已很低，不值得进行后处理；对于难以进行后处理的乏燃料，如高温气冷堆的乏燃料，按现有的技术条件不适宜作后处理。对于这些乏燃料，只能等待充分冷却之后，经过适当包装，进行直接深地质处置，这就是所谓“开路”路线，也称为“一次通过”式（见图 6-15）。

后处理闭路循环路线被法国、英国、俄罗斯、日本、印度等国家所采纳，我

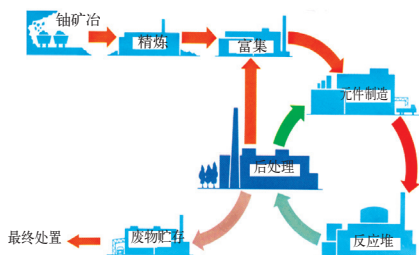


图 6-14 核燃料闭路循环

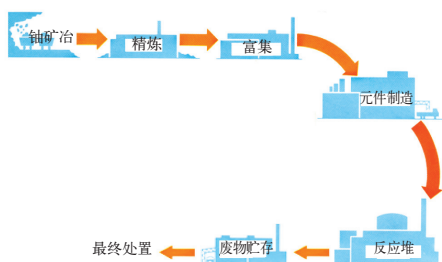


图 6-15 核燃料“一次通过”

国也采取这种后处理路线。美国、加拿大、瑞典、芬兰、西班牙等国，现在宣布走“一次通过式”路线。世界上多数有核电的国家，还是采取“等着瞧”的态度。

除了铀燃料外，钍矿中提取的钍-232，经过中子辐照可以转化成铀-233。铀-233也是易裂变核素，可以用作核燃料。目前，世界上只有印度开发利用钍燃料。

第五章 轻核材料的制备

原子弹和裂变反应堆，使用重核材料的裂变反应所释放的能量。氢弹和聚变反应堆，使用轻核材料的聚变反应所释放的能量。

前面介绍了重核材料的生产和制备，这一章要谈谈轻核材料的生产和制备。轻核材料这里主要介绍氘、氚化锂-6和氦-3。

1. 氢家三兄弟 品性有差异

氢有三兄弟，人们称之为氕（即氢）、氘和氚（见图6-16）。氢在自然界中很丰富，氘的量不多，氚的量非常少。氢与氧化合生成普通水；而氘和氧化合生成重水，氚化水；氚与氧化合生成氚水、氚化水、氚氘水。

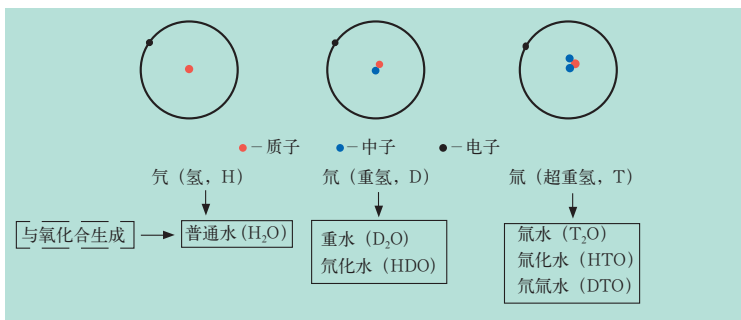


图 6-16 氢家三兄弟

2. 反应堆产氚和重水提氚

氚在自然界中储量很少，实用的氚靠人工制造，目前主要采用反应堆产氚和重水提氚。反应堆生产氚是通过锂-6或氘的中子核反应。

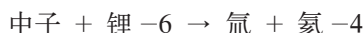
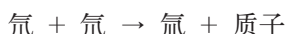
锂的中子核反应，是用高富集度锂-6的合金或陶瓷体做成的靶件，放到反应堆中去辐照。两靶件相比，以陶瓷靶生产氚效果更好。陶瓷靶是用含锂的陶瓷做芯体，不锈钢或铝合金做包壳，制成靶件。靶件受中子辐照之后，除产生氚之外，还会产生许多其他同位素，所以必须进行纯化。常用的纯化方法，有热扩散法和靶热置换法。

重水在反应堆中受中子照射，通过 $\text{D}(\text{n}, \gamma)\text{T}$ 反应而生成氚。从重水反应堆的重水中提氚的方法有多种，例如：利用化学性质差异的化学交换法（如催化交换法）；利用迁移率不同的电解法；利用挥发度不同的蒸馏法；此外，还有色谱法、热扩散法和激光法等。现在，用得比较多的是催化交换法和联合电解的催化交换法。在法国、加拿大、印度、韩国等国家中，有的已进入工业应用，有的尚在开发研究。图 6-17 展示了提氚装置。



图 6-17 提氚装置

利用加速器生产氙是通过核反应获得，如：



这些方法生产氙，还没有形成规模生产，或者使用者尚不多。

3. 怎样制备氘化锂-6

谈氘化锂-6，首先要说一说氘。氘是稳定同位素，不带放射性，用“D”来表示。氘所形成的水称为重水（D₂O）。在天然水中，它以氘化水（HDO）形式出现，丰度约为0.015%。氘的制备比氙要简单，可以从天然水中提取，其提取方法有双温交换法、水电解法和液氢精馏法等。氘的用途可以重水形式作反应堆的慢化剂，以氘或氘-氘形式作聚变堆的燃料，还可以做成氘化锂-6，作氢弹的装料。

重水和天然水的密度、冰点、沸点、蒸汽压等性质有差异。工业规模生产重水有蒸馏法、电解法和化学交换法。我国秦山三期核电站用重水做慢化剂，不用低浓铀，而以天然铀作燃料。

氘和重水的制备相对于氙来说容易得多，但重水的价格相当于黄金的价格。

再谈一谈锂-6，锂在自然界中分布很广。在天然锂中，有锂-6和锂-7两种同位素，锂-6占7.5%，锂-7占92.5%。

锂-6和锂-7的分离方法很多，有物理法和化学法。物理法如电磁法、电解法、电迁移法、蒸馏法和激光法等。化学法如萃取法、沉淀法、离子交换法和锂汞齐法等。图6-18展示分离锂同位素的装置。目前工业上用得最多的分离法是锂汞齐-锂溶液化学交换法。锂汞齐法有汞污染的缺点。冠醚化学分离法等新分离技术正在开发研究中。得到锂-6之后，将氘气和金属锂-6在坩锅中加热达到700～750℃，就可合成氘化锂-6，用作氢弹的装料。



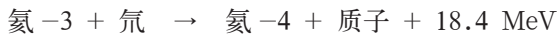
图 6-18 分离锂同位素

4. 向月球索取核材料氦-3

氦-3 有多种多样的用途，它是核聚变的重要核材料。

氦-3 是氦气的一种稳定同位素，没有放射性。在大气和矿物质中，氦-3 的含量很少。但是，人们探月发现，月球上蕴藏着丰富的氦-3。它储藏在钛矿层里，分布在月球表面的浅土层中。据估算，月球上的氦-3 的贮量为 100 万~500 万吨，可供全球数十万年之用。将这种富钛土加热到 700℃，氦-3 就会释放出来。

用氦-3 进行核聚变，以氦-3 和氘为原料，核反应的产物是氦-4 和质子（见下面反应式），不使用氚，不产生中子，无放射性核素和感生放射性核素，是完全清洁的能源。



所以，向月球索取核材料氦-3，已成为核科学家和工程技术人员奋斗的重要目标之一。