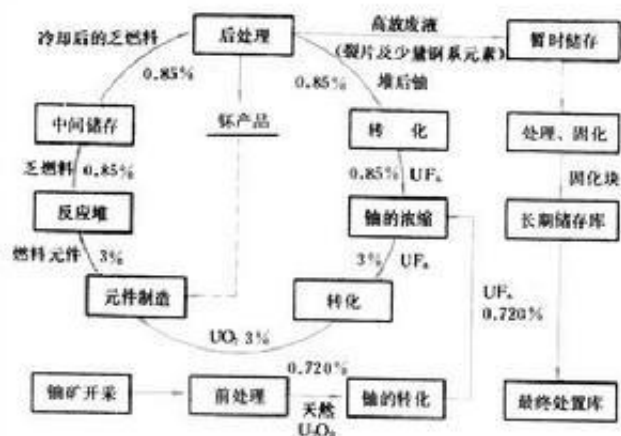


核燃料循环



压水堆核电站核燃料循环图（%表示铀中铀235含量百分数）

简介

核燃料循环（nuclear fuel cycle），为核动力反应堆供应燃料和其后的所有处理和处置过程的各个阶段。它包括铀的采矿，加工提纯，化学转化，同位素浓缩，燃料元件制造，元件在反应堆中使用，核燃料后处理，废物处理和处置等。

核燃料循环有3种主要型式：一次通过。使用过的燃料元件不进行后处理，而直接作为废物加以处置。热中子堆中再循环。使用过的燃料元件经后处理回收其中未用完的铀和新产生的钚，返回重新制造元件，循环使用。快中子增殖堆中再循环。快中子增殖堆燃料由钚和贫化铀构成。使用过后，经后处理回收其中铀和钚，返回循环使用。在这种反应堆中由铀238吸收中子生成的钚比由于裂变而消耗掉的钚还要多，因此可以实现核燃料（钚）的增殖。

另一种不常用的核燃料是钍，它来自自然界的钍矿。钍232在反应堆中吸收中子后可转化为另外一种核燃料铀233。因此，由铀233和钍结合使用也构成核燃料循环。

核燃料循环

核燃料循环以反应堆为中心，划分为堆前部分（前段）和堆后部分（后段）。前段指核燃料在入堆前的制备，包括铀矿的开采、铀矿石的加工精制（即前处理）、铀的转化、铀的浓缩和燃料元件制造等过程。后段指从反应堆卸出的乏燃料的处理，包括乏燃料的中间储存，乏燃料中铀、钚和裂变产物的分离（即核燃料后处理），以及放射性废物处理和放射性废物最终处置等过程。附图表示压水堆核电站的核燃料循环，其中略去三废处理中气体、固体和中低放废液的处理和处置。

前段

核燃料循环从开采铀资源开始。开采出来的铀矿石经过精选，送到前处理厂制成八氧化三铀。压水堆核电站以含铀235约3%的低浓铀作为燃料，但天然铀的铀235含量只有0.720%。为了把天然铀中铀235的含量提高到3%，需要进行铀同位素分离即铀的浓缩。当前工业规模的铀的浓缩工厂以六氟化铀为供料，因此需要把前处理的产品八氧化三铀进行还原、氢氟化和氟化转变为六氟化铀，这就是铀的转化过程。在铀的浓缩工厂中，六氟化铀中的铀235含量被浓缩至3%左右。这样得到的六氟化铀须再经过一个转化过程变为二氧化铀，才能送至元件制造厂制成含铀235约3%的低浓铀燃料元件。至此，核燃料循环的前段完成。

后段

从压水堆卸出的乏燃料中，铀235的含量仍有0.85%左右，高于天然铀；而且每吨乏燃料中还含有约10千克的钚，其中可作为核燃料的钚239和钚241约占7千克。因此，如将这些易裂变核素分离出来，作为燃料返回反应堆，既可节约天然铀，又可节约分离功。据估计，将铀循环使用，可节约天然铀约20%，节约分离功4%左右。如将铀和钚都循环使用

，可节约天然铀约40%，节约分离功15%左右。

为了进行铀和钚的循环，须将乏燃料中的铀和钚分离并净化到所含裂变产物的放射性低到人们可以接近的水平，这就是后处理厂的任务。刚从反应堆中卸出的乏燃料放射性太强，一般需要在冷却水池中存放3~5年，使放射性大大衰减之后，才送到后处理厂去处理。这个存放步骤称做中间储存。从后处理厂得到的含铀235约0.85%的铀产品（称做堆后铀），又须经过转化过程变为六氟化铀，并送至铀的浓缩工厂，浓缩到含铀235约3%，然后再转化为二氧化铀，以便制成燃料元件。从后处理厂得到的钚产品通常是二氧化钚，可储存起来以备将来利用；也可和二氧化铀一起制成混合氧化物燃料，返回压水堆使用，或作为快中子增殖堆的燃料使用。

从后处理厂出来的放射性废物，均须经过妥善处理和处置，以确保在长期储存条件下也不转移到生物环境中。其中最重要的是占全部废物放射性约99%的高放废液的处理和处置。处理的方法是先将高放废液在不锈钢大罐中暂时储存一段时间，然后根据各国不同的要求，或将高放废液直接固化成为硼硅酸盐形态的玻璃块，或先将其其中极长半衰期（如钚239需几十万年才能衰变到无害水平）的 α 放射性核素移除，加以利用，或单独处置，然后再固化成玻璃块。固化块经包装后一般要求在地面长期储存库储存数十年，待其发热量衰减到较低时，再送至最终处置库，在地下深层永久埋藏起来。至此，核燃料循环的后段就完成了。

循环方式

除了前面讲到的压水堆（轻水堆）的铀（钚）循环方式以外，还有快中子增殖堆（简称快堆）的铀-钚循环方式以及钍-铀循环方式等。

快堆铀-钚循环 从最大限度利用铀资源的角度来看，应发展快中子增殖堆。这种堆以钚239为燃料，并装载铀238，在堆中所装铀238转化成为钚239的量大于烧掉的钚239的量，将占天然铀99%以上的铀238也利用起来，进行铀-钚循环。铀-钚循环就是在快堆中将铀238转化为钚239，并通过后处理把钚分离出来，作为快堆的燃料循环使用。在发展初期，可用压水堆后处理得到的钚作为装料；发展到一定规模后，就可用快堆自己增殖的钚作为燃料。

钍-铀循环 指在热中子堆中把钍232转化为另外一种核燃料铀233，通过后处理把铀233分离出来返回堆中循环使用。适于采用这种核燃料循环的堆型是高温气冷堆，其科研工作现已接近商业化阶段。在重水堆甚至轻水堆中，也可采用这种燃料循环方式，科研工作尚处于开始阶段。

一次通过

有些国家考虑对压水堆电站乏燃料不进行后处理，而直接包装或经切割后包装，然后送到深地层的最终处置库永久储藏起来。这样未经后处理也就是没有封闭的核燃料循环，称做一次通过。加拿大核发电用的是重水堆，燃料用天然铀，烧过后其中铀235含量只有0.3%，所以对核燃料循环一直采取一次通过的方针。有些国家对于压水堆电站的核燃料循环也考虑采取一次通过的方针，这是因为这些国家的后处理和高放废液处理的费用十分高。

当前国际市场上天然铀价格疲软，浓缩铀市场饱和，而商业钚价格既低，又未商品化。因此，对于这些国家来说，搞一次通过在经济上较为合算。但是，一个1000兆瓦的压水堆电站卸下燃料中所含铀系元素的 α 放射性高达10万居里左右，把这样大量的极长半衰期的 α 放射性核素长期埋在地下能否保证安全尚未肯定，把大量可以利用的铀238和钚239埋在地下废弃不用也是不合理的。因此，大多数国家如英、法、联邦德国、日本、意大利、苏联、阿根廷和印度等皆采用核燃料循环的方针，对于压水堆电站乏燃料进行后处理，以大大减少需要最终处置的 α 放射性核素，并把铀和钚循环使用。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/baike/2921.html>