

# 未来：放射性废物处理和处置的 创新技术

**使** 废物产生和环境影响最小化的安全、抗扩散和经济高效的核燃料循环是可持续核能的关键。创新方法和技术能够显著减少放射性物质的毒性或对人类的危害以及废物产生量。减少废物量、热负荷和废物需要与生物圈隔离的持续时间将大大简化废物处置概念。

再循环和再利用可使废物体积最小化。这一概念连同优化利用自然资源构成了“闭式燃料循环”的基础。在闭式燃料循环中，乏燃料可再利用部分进行再循环，不被视为废物。

通过对乏核燃料处理，将长寿命放射性元素分离和/或转变成短寿命、危害较小的形式。这一过程称为“分离和嬗变”，导致放射毒性显著降低的较小体积的废物。

**再循环和再利用可使废物体积最小化。这一概念连同优化利用自然资源构成了“闭式燃料循环”的基础。在闭式燃料循环中，乏燃料可再利用部分进行再循环，不被视为废物。**

## 分离和嬗变

从核反应堆卸出的乏核燃料具有高放射毒性，因为它含有三类元素：铀和钚主要锕系元素；镎、镅和锔等次锕系元素；裂变产物。由于存在长寿命锕系元素和释热裂变产物，乏燃料被认为是高放废物，

必须在深地质设施包容并与生物圈隔离数十万年。

长寿命锕系元素对长期放射毒性的贡献最大。裂变产物虽然释热，但为短寿命，仅在前100年对放射毒性有贡献。

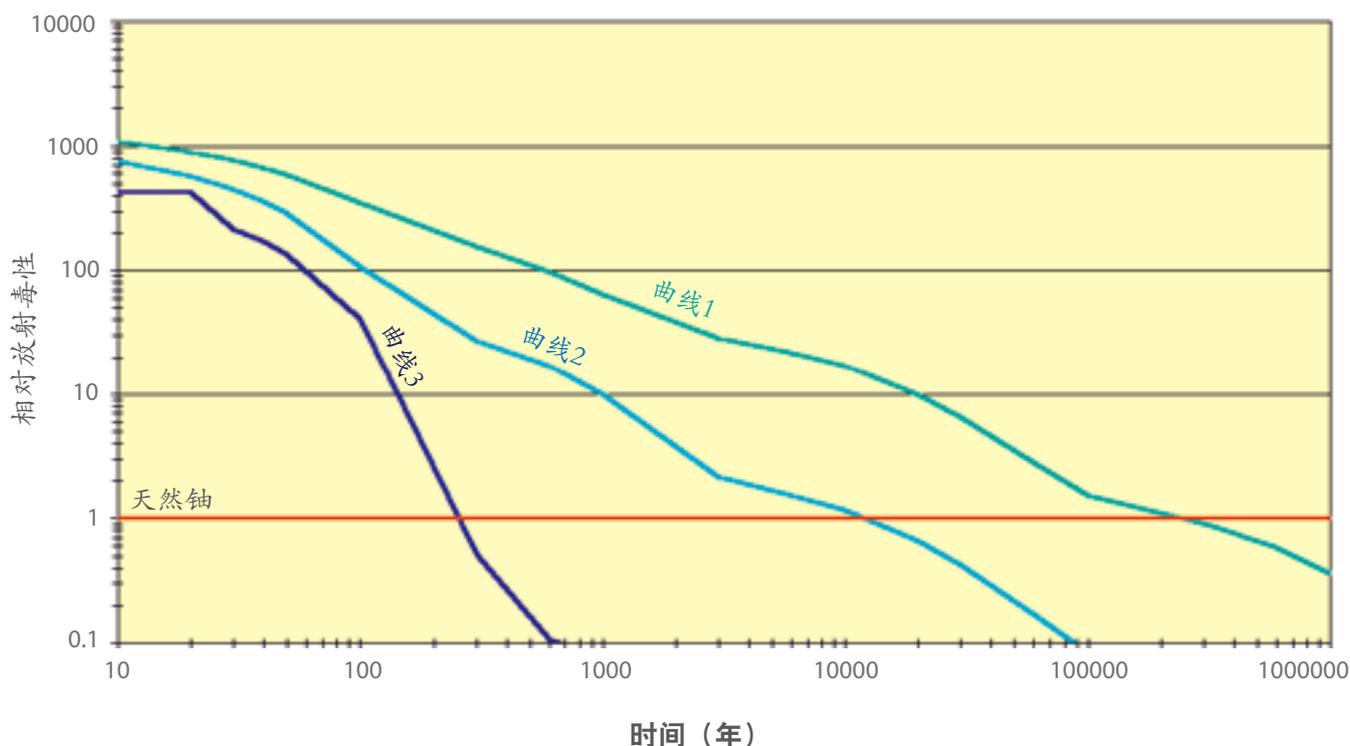
在分离和嬗变中，钚和次锕系元素通过化学分离从乏燃料中提取出来，然后进行嬗变，在专门设计的核反应堆通过裂变对超铀元素（镎、镅和锔）进行破坏。利用分离和嬗变方法可提高放射性废物管理效率，这是因为减小了废物体积，从而形成更具有成本效益的管理方案。

今天，快中子系统是研究最多的破坏长寿命锕系元素的嬗变技术。嬗变也可能在其他反应堆（如压水堆）中进行，但裂变效率较低。

分离和嬗变的一个明显优势是，当快堆与新燃料循环技术结合使用时，可以使主要锕系元素和次锕系元素再循环，而不需要高度提纯，就像在法国、印度、日本和俄罗斯联邦的现有后处理厂那样。该系统具有高度抗扩散性，因为不需要将钚与其他锕系元素分离。目前，印度、俄罗斯联邦和欧盟正在开发和论证快堆（或利用快中子谱）与乏燃料先进高温冶金工艺结合技术。

锕系元素在快堆中再循环可显著减小废物体积、热负荷以及放射毒性降至用作轻水堆燃料的天然铀矿水平所需的时间。当前的研发表明，“天然等效处置”概念是可行的。换句话说，产生在300年至400年

## 不同核燃料循环中核废物放射毒性随时间变化的关系



**曲线1:** 乏燃料直接处置废物包括钚、次锕系元素和裂变产物

**曲线2:** 钚再循环废物包括次锕系元素和裂变产物

**曲线3:** 钚和次锕系元素再循环废物包括裂变产物

快中子技术可将废物的放射毒性在约400年而不是数十万年降至天然铀水平。

内衰变至这种天然水平的放射性废物在技术上是可行的，而直接处置乏燃料将需要25万年衰变至这种水平。或者简单地说，现代核电厂的发展将大幅度减少后代的废物负担。

然而，这是一项复杂的任务，必须加强后处理和再循环技术，以提高锕系元素的分离效率，减少二次废物产生量，以及避免扩散问题。国际原子能机构在快堆开发和创新燃料循环领域的研究表明，这些问题可以得到解决，核工业可推进到更加可持续的新燃料循环。

还有一些重要研发努力侧重于利用钍代替铀，增加利用具有较高燃料燃耗的反应堆系统，如高温气冷堆和熔盐堆。这些努力的目标是在生产相同数量电力的同时减少超铀元素的数量。

---

国际原子能机构副总干事兼核能司司长亚历山大·贝奇科夫