

核燃料循环后端研究进展和一体化新思路

Progress in the Research on the Backend of the Nuclear Fuel Cycle and Its New Thinking

韩宾兵

(清华大学核能技术设计研究院,博士研究生 北京 102201)

吴秋林

(清华大学核能技术设计研究院,副研究员 北京 102201)

朱永贇

(清华大学核能技术设计研究院,教授、中国工程院院士 北京 102201)

最近的《参考消息》以“处理核废料研究取得突破”为题,转载了英国《观察家报》的报道,介绍说欧洲科学家设计了一个能安全处理放射性废料的反应堆,能“把反应堆产生的各种没用的东西都拿过来,并将它们投入到我们设计的反应堆的实体模型中,所有的东西都分解成低放射性的无害垃圾”。这确实是一个突破性的成果,如果原型反应堆能够建成并最终取得成功的话,将带来核能应用的又一个“春天”。

进入 80 年代以来,特别是前苏联发生了切尔诺贝利事故以后,除东亚等少数地区外,世界范围内的核电发展基本处于停滞状态。从 1991 年到 1996 年的 5 年间,世界核电站总数仅由 426 座增加到 443 座,这主要是缘于公众对核能的以下 3 方面的疑虑:核电站的安全运行;核废物的安全处置;核不扩散(保障)问题。

上述 3 个问题中,第一个问题要通过改进现有反应堆的性能和设计更先进和具有自安全性的反应堆来实现,而后两个问题都和核燃料循环后端有关。核燃料循环后端包括了核乏燃料从反应堆卸出后直到地质处置的整个过程,目前在该过程的每一个环节上,都存在着不同的观点。

一、乏燃料后处理上的观点及其流程研究的重点

目前在对从反应堆卸出的乏燃料的处置上主要有两种观点,一种是所谓的“一次通过战略”;另一种是对乏燃料进行后处理,从中提取出铀钚回堆循环的战略。这两种战略的争论集中在对能源的利用、防核扩散能力和经济性等方面。

从对能源的利用上说,后者认为后处理可以提

高对资源的利用率,表 1 中罗列了几种燃料循环中铀的利用率。由表可见,一次通过方案对铀的利用率还不到 1%,而利用钚的快堆循环对充分利用铀资源,保证能源供应有重要意义,而钚燃料的获取必然是通过后处理。而且,为利用储量是铀 3 倍的钚资源,也必须通过后处理。

表 1 几种燃料循环中铀的利用率

燃料循环	铀量 t/GWe.a	铀利用率%
轻水堆一次通过	209.2	0.53
轻水堆铀循环	166.3	0.66
轻水堆铀钚循环	124.5	0.88
快堆循环	—	50~80

从防核扩散角度讲,“一次通过战略”系将钚、镅等核材料不与其他裂变元素分离而共同储存在地质处置库中,从而保证核材料的不扩散。持后处理观点的人认为如果后处理以铀钚的混合硝酸溶液的型式作为钚的接口,然后去制 MOX 元件,则核扩散问题可以解决。目前这种元件的制备已相当成熟。而且将大量的核材料储存在地质库中从长久来看也并不是安全的。

从经济性角度来讲,不同的国家得出的结论也不相同。实际上,很难做出一个严格的比较,因为一方面后处理是一门现存的工业,已在商业合同的基础上运行,而另一方面,因为直接处置目前尚不存在,所有的费用假设可能估计不足。

1996 年经济合作和发展组织核能机构(OECD/NEA)专家组的一份研究报告对两种后端方案进行了整个燃料循环费用的比较,见表 2。

表 2 两种后端方案费用的比较(单位:美元/度)

方 案	平均费用	标准偏差范围
后处理方案	0.00623	0.00517~0.00706
直接处置	0.00546	0.00428~0.00630

可见,这两种方案的费用范围有相当一部分是重叠的。从这两种战略的技术前景看,后处理和再循环技术有可能进一步提高,从而可进一步提高其经济性。例如在后处理中将 MOX 元件作为钚的接口后就有可能简化后处理流程,从而降低后处理的成本。而后处理流程的简化和无盐化研究也会进一步降低乏燃料的处置费用。从中长期目标看,当快堆的商业化为钚的循环找到最合适的出路后,整个后处理的经济性将得到根本的改善。

从废物量上来讲,后处理虽增加了中放废物量,但高放废物的量却是减少了,直接处置大约为 $2\text{m}^3/\text{tHM}$,而后处理则只有 $0.64\text{m}^3/\text{tHM}$ 。随着后处理“无盐化”技术的研究和应用,排出的废物量还会减少。而且后处理如果与核电站及 P-T 循环形成一个整体,则其排出的废物量将会很小。但目前尚不能证明将钚直接处置到最终处置库中不会受到公众的强烈反对,因为直接处置在核安全和监督方面尚存问题。

因而,许多人认为,直接处置方针是一种从短期的政治和经济角度考虑的行为,从长远来看,后处理比“一次通过”要好得多。英、法、日、印都持后处理的观点,即使是美国,后处理的研究还是非常活跃的。我国也确定了后处理的方针。

经 50 余年后处理工业的发展,Purex 流程是目前乏燃料后处理的唯一流程。但 Purex 流程仍处于不断的发展中,其主要的研究集中在两个方面:一是对流程结构的简化,世界各国都在发展 Purex 两循环流程甚至一循环流程,如美国衣阿华大学提出的处理长冷冷却期乏燃料的简化流程;二是流程的无盐化研究,包括用仅含 H、C、O、N 等元素的无机或有机试剂来取代原来含盐的各种还原剂、洗涤试剂等,或采取电、光等不引入其他物质的方案。最近,值得注意的是用其他萃取剂取代 Purex 流程中所用的 TBP(磷酸三丁酯)萃取剂以及用其他流程来代替 Purex 流程的研究仍十分活跃,如日本发展了结晶精制法流程和新的沉淀法流程。

二、高放废液处置的基本状况以及固化研究和地质处置的现状

对核乏燃料后处理产生的高放废液的处理处置,国际上也存在着不同的观点。一是直接玻璃固

化或陶瓷固化,然后送深地层处置;二是采用化学分离,将超铀元素和 Tc-99、锶、铯分离出来,从而达到对高放废液的减容,对减容后的高放废液或者去玻璃或陶瓷固化,或者采用 P-T 循环技术烧掉。

目前玻璃固化已经工业化,但玻璃固化块却仍然储存在中间储存库中,其最终处置场所的研究仍在进行。高放废液的化学分离流程国际上已经提出了几个,但都还处在积极研究阶段。

化学分离将超铀元素和 Tc-99、锶、铯分离出来。如果将它们在反应堆或加速器中嬗变掉,则不仅可以获得能量,而且可以消除放射性核素的长期危害,因为镎、镅、锔等核素,同铀、钚一样,也是很好的核燃料。如前文所述,欧共体科学家已经在燃烧核废物方面取得了突破性的进展。

从经济性角度讲,采用化学分离减容后玻璃固化的方案,与高放废液直接固化的方案相比,前者更经济。 1m^3 玻璃固化块的生产费用高达百万人民币,而深地层处置的费用也在此数范围。

上述两方面的原因使近年来国际学术界对从高放废液中分离锕系元素和长寿命核素并把它们嬗变为短寿命的或稳定核素的研究非常活跃。日本、法国、俄罗斯、美国和印度都做了大量的工作,并取得了较大的进展。在化学分离方面,已经提出了几个流程,包括中国的全分离流程、美国的 TRUEX 流程、日本的 DIDPA 流程、法国的 DIAMEX 流程、瑞典的 CTH 流程等。其中由清华大学核研院研究开发的对高放废液进行化学预处理的全分离流程,包括从高放废液中分离稀土元素和超铀元素的 TRPO 流程、冠醚萃铯流程和亚铁氰化钾钛除铯流程,已经经过生产堆和动力堆高放废液两次“热实验”验证,在核素回收率和产品交叉率等指标上都达到很高的水平,被国内外专家认为是可望实现工业化的最有前景的流程之一。

后处理厂产生的各种液体和固体废物要经过固化或减容等步骤后最终转变成可以地质处置的形式。对于中低放液体废物,常用的固化方法有水泥固化、沥青固化和塑料固化等,对于高放废液,主要的固化方法是玻璃固化。近年来,一种新的高放废液固化技术即人造岩石固化技术得到了很大的发展。

三、核燃料循环后端一体化研究现状及其新思路

所谓核燃料循环后端的一体化是指从系统化、最优化的角度出发,以最大限度地节约成本、提高安全性、减少废物量为目标,对反应堆卸出的乏燃料的冷却、铀钚等有用核素的回收、高放废液的处理及各种废物的最终处置进行统筹安排而得到的

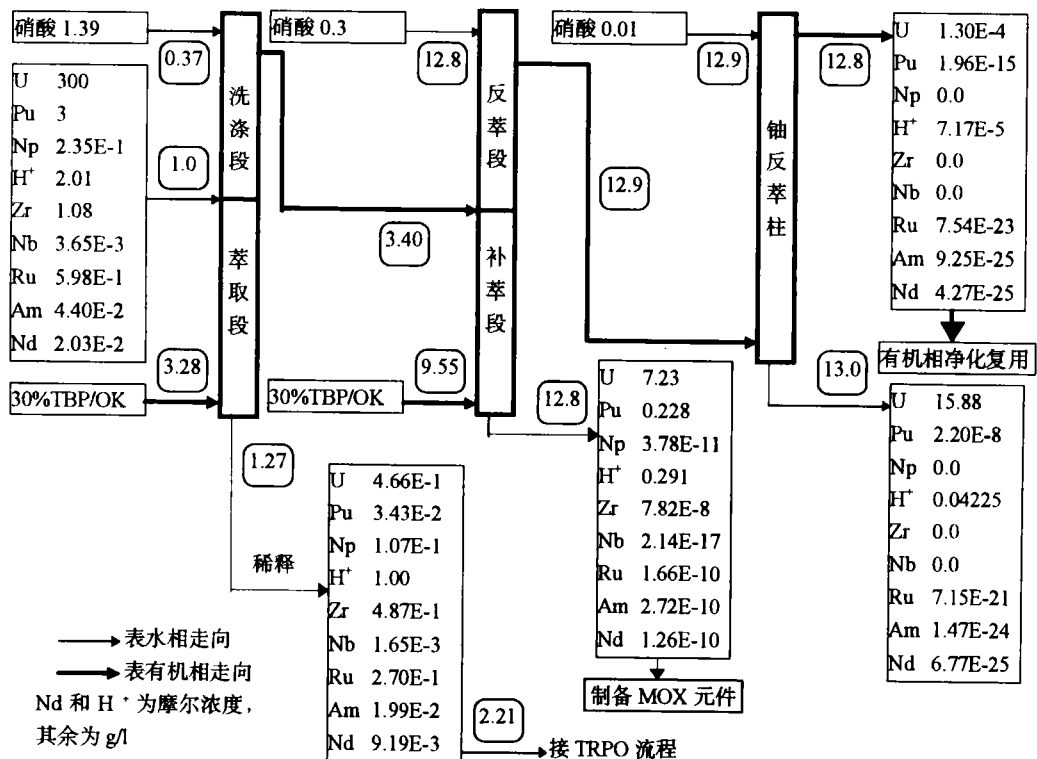


图 1 后处理一体化概念流程之(1)

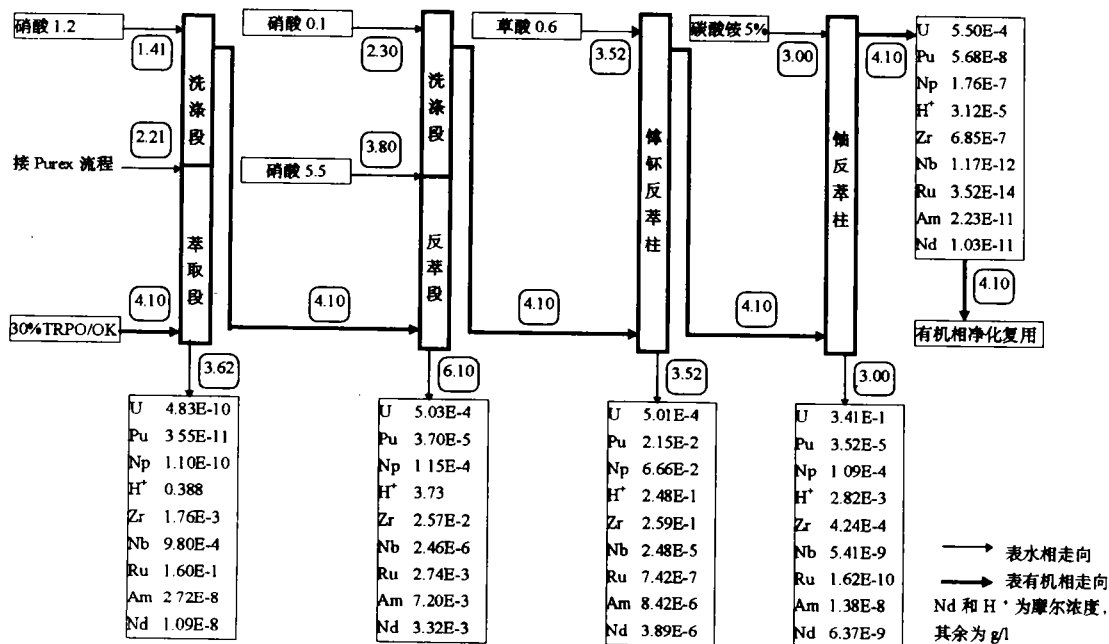


图 2 后处理一体化概念流程之(2)

最优后端方案。由于后处理 Purex 流程研究的进展,各种高放废物处置流程的提出和新的反应堆燃料元件的出现,使得核燃料循环后端一体化研究成为后处理领域的前沿课题之一。

世界各国已经提出的核燃料循环后端一体化概念流程有美国的 CURE 流程,前苏联的 RT-2 工厂全分离流程、EFTRP 概念流程、PARC 概念流程以及与 Truex 流程相配套的 Purex 流程一体化流程和 RP1-1 概念流程。其中除了前苏联的 RT-2 工厂全分离流程正在动工兴建外,其他仍然停留在概念设计阶段,因而对一体化流程的经济性、安全可靠性和废物管理等方面还都停留在估计的阶段,没有现成的经验可供参考。但应该看到,国际上对一体化流程的研究正日益活跃,而且已经形成了后处理领域的又一个热点。我国有国际上领先的高放废液分离的 TRPO 流程,有长期运行后处理乏燃料的经验,而且正在建设动力堆乏燃料后处理中试厂,因而具备探索并提出具有我国特色的有世界先进水平的核燃料循环后端一体化流程的条件。

针对我国核燃料循环后端的研究现状,整个一体化研究应基于以下几个出发点:

(1) 我国铀资源的相对缺乏和核能的进一步发展要求我国走后处理的技术路线。

(2) MOX 元件的成功使用对 Purex 流程的产品形式提出了新的要求,Purex 流程不再需要分别得

到高纯度的铀产品和钚产品,而仅需得到一定钚浓度的铀钚混合产品即可。

(3) 新的高放废液处理流程特别是我国提出的全分离流程也具有回收各种核素的能力,因而 Purex 流程不必对铀钚达到很高的回收率。

从以上的思路出发,我们提出了核燃料循环后端一体化的新思路,该流程中包括了从乏燃料中回收铀钚的 Purex 流程,从高放废液中回收各种核素的全分离流程,并用优化算法对该概念流程方案进行了优化计算,其简化结果见上页图 1 和图 2。

该概念流程有以下几个特点:

(1) 以 MOX 元件作为 Purex 流程中钚产品的接口,减少了钚的纯化循环。

(2) 在 Purex 流程中用稀酸部分分离铀钚,从而减少了其它试剂的引入,带来了流程操作的简化。

(3) 将部分铀钚放到 TRPO 流程中去回收,从而降低了 Purex 流程对铀钚回收率的要求,有利于 Purex 流程的去污。

当然以上流程只是计算得出的概念流程,还有待大量的实验工作去证实。

(编者注:参考文献共 24 篇,全部删去,需者请与作者联系)

(责任编辑 王宏章)

(上接第 32 页)

通过提高农产品质量,创造具有各自特色的农产品“品牌”和营销策略。经过几年的努力,使重点农产品“品牌”的市场形象、系列化程度及市场占有率有较大的改观。

(2) 市场要为农产品“品牌”的形成营造良好的营销环境 实际上,市场和“品牌”是紧密联系的,市场为“品牌”的形成提供桥梁和舞台,而“品牌”是市场声誉、社会形象的关键,为市场发展提供物质后盾。所以,各地的市场都应有自己的特色,围绕本地的优势农产品生产拓展市场,努力塑造具有地方特色的农产品“品牌”。市场为社会消费提供的农产品“品牌”越多、越持久,其相应的声誉就越高,发展的潜力就越大。

(3) 制定鼓励农产品“品牌”形成和发展的政策 政府在质量农业战略实施过程中的主导作用是任何部门都无法替代的。在质量农业初期,政府有必要采取针对性政策,重点支持农产品“品牌”的形成和发展,用政策调动社会促进农产品“品牌”创新的积极性,当然,最终仍应由市场成为检验农产品“品牌”的主体。

鼓励农产品“品牌”形成和发展的政策,关键是要确立消费者的主体地位。“品牌”必须得到消费者

的认可才有长久的生命力,消费者主体地位有助于“品牌”的不断更新和发展。就是说,农产品“品牌”形成和发展的动力,来自消费需求的发展。

鼓励采用高新技术更新和发展农产品“品牌”的政策,应该是政府农业政策的重点。在相同的投入、自然资源条件下,新技术的集成度就成了决定“品牌”档次的核心。在某些情况下,高技术的应用可以大幅度地节约农业资源,提高自然资源的产出率和社会经济效益。只有这样,农产品“品牌”的形成和发展过程中,自觉运用新技术的社会机制才能形成。也只有这样,政策引导市场、市场引导消费、消费决定农业商品生产发展的我国社会主义市场经济机制才能建立和不断完善。

主要参考文献

[1]张培刚,新发展经济学,河南人民出版社,1993 年版
[2]吴家骏等,九十年代中国经济的改革与发展,经济管理出版社,1992 年版
[3]王元瑞等,中国改革与发展理论研讨综述,人民日报,1997 年 2 月 23 日第 7 版
[4]夏珏,从量的扩张到质的提高,人民日报,1997 年 2 月 17 日,第 10 版

(责任编辑 刘先曙)