

乏燃料后处理和高放废液分离一体化流程研究进展

Progress in Research of Spent Fuel Reprocessing and High-level Liquid Waste Partitioning Integrated Process

刘学刚/LIU Xue-gang, 徐景明/XU Jing-ming, 梁俊福/LIANG Jun-fu, 朱永贻/ZHU Yong-jun

清华大学核能技术设计研究院, 北京 102201

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China

[摘要] 为了减少核电反应堆产生的乏燃料对环境的影响,国际上开展了分离/嬗变和先进核燃料循环的研究。其中,从核废物中分离回收次要锕系和长寿命裂变产物是关键步骤。乏燃料后处理和高放废液分离一体化流程与现有乏燃料处理处置方式相比,流程简单、二次废物少、经济性高,更能满足先进核燃料循环的分离要求。介绍了国内外在乏燃料后处理和高放废液分离一体化流程研究方面的成果和进展情况。

[关键词] 分离/嬗变;后处理;高放废液分离;一体化流程

[中图分类号] TL241, X946

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)07-0077-05

Abstract: In order to minimize the environmental impact of nuclear spent fuel discharged from nuclear power reactors, researches of partitioning/transmutation and advanced nuclear fuel cycle are expanded in several nations. Separation of minor actinides and long-lived fission products is the key process for such purpose. Compared to the current method for spent nuclear fuel treatment and disposal, the

收稿日期: 2006-04-25

作者简介: 刘学刚,男,北京 1021 信箱清华大学核能技术设计研究院,助理研究员,主要研究方向为核燃料化工;

E-mail: liu-xg@mail.tsinghua.edu.cn

- [8] 中共河南省水利厅党组. 关于“75·8”板桥、石漫滩两水库失事的经验教训[A]. 自: 河南省水利厅编. 河南“75·8”特大洪水灾害[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [9] 陈悝. 牢牢记取“75·8”特大水灾的教训[A]. 自: 河南省水利厅编. 河南“75·8”特大洪水灾害[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [10] 方佩英. 反思河南“75·8”特大洪水灾害, 展望 21 世纪治淮工程的设想[A]. 自: 河南省水利厅编. 河南“75·8”特大洪水灾害[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [11] 陈耀曾. 实事求是制定防洪标准, 认真落实防洪措施[A]. 自: 河南省水利厅编. 河南“75·8”特大洪水灾害[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [12] 潘家铮. 千秋功罪话水坝[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [13] 王国安. 论设计洪水及其计算途径[A]. 自: 周孝德, 沈冰主编. 水与社会经济发展的相互影响及作用——全国第三届水问题研究学术研讨会论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [14] 中华人民共和国国家标准 GB50201-94 防洪标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1994.
- [15] 王国安. 可能最大暴雨和洪水计算原理与方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社; 郑州: 黄河水利出版社, 1999.
- [16] 王国安. 中国设计洪水及标准问题[J]. 水利学报, 1991(4): 68-76.
- [17] 王国安, 李文家. 水文设计成果合理性评价[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.
- [18] “纪念‘75·8’洪水灾害 20 周年暨防洪减灾对策学术讨论会”会议纪要[J]. 河南水利, 1995(4) (纪念“75·8”洪水灾害 20 周年及防洪减灾对策学术讨论会专刊): 3-4.
- [19] 泌阳县水利局. 总结经验教训, 狠抓除险加固, 全力抗洪抢险, 确保

- 水库安全[A]. 自: 河南省水利厅编. 河南“75·8”特大洪水灾害[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [20] 河南省水利厅勘测设计院. 板桥、石漫滩水库洪水复核情况综合说明[Z]. 1976.
- [21] 水利电力部水文局. 海河流域南运河、子牙河、大清河水系 1963 年 8 月洪水调查报告[R]. 1964.
- [22] 胡明思, 骆承政. 中国历史大洪水(上卷)[M]. 北京: 中国书店, 1988.
- [23] 水利电力部. 水利水电枢纽工程等级划分及设计标准(山区、丘陵部分)SDJ12-78(试行)[S]. 北京: 水利电力出版社, 1979.
- [24] 水利部, 电力工业部. 水利水电工程设计洪水计算规范 SDJ22-79(试行)[S]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [25] 《中国水利》编辑部. “75·8”反思·相关链接[J]. 中国水利, 2005, 538(6): 39.
- [26] 苏联电站部水电建设总局. 水文计算简明手册[S]. 北京: 燃料工业出版社, 1954.
- [27] Committee on Safety Criteria for Dams et al, Safety of Dams - Flood and Earthquake Criteria[M]. Washington, D.C.: National Academy Press, 1985.
- [28] 叶永毅. 水利与创新: 叶永毅选集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [29] 王国安. 关于我国水库的防洪标准问题[J]. 水利学报, 2002(12): 22-25.
- [30] 王国安. 中国: 设计洪水向何处去[A]. 自: 张建云主编. 中国水文学科学与技术研究进展——全国水文学学术讨论会论文集[C]. 南京: 河海大学出版社, 2004.

(责任编辑 苏青)

integrated process of reprocessing and high-level waste partitioning has distinct advantages, such as simplifying processing, reducing the secondary waste and improving economics. The integrated process is much more suitable for advanced nuclear fuel cycle. In this paper the recent advancement and progress on the integrated process of reprocessing and high-level waste partitioning are described.

Key Words: partitioning/transmutation; reprocessing; high-level liquid waste partitioning; integrated process

CLC Numbers: TL241, X946

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)07-0077-05

1 前言

到 2003 年底,全世界共有 439 座核电机组在运行,提供了全球 16% 的电力。国际原子能组织(International Atomic Energy Agency-IAEA)对核电发展前景的研究表明,至少在 2030 年前核能发电量将持续增加^[1]。作为一种安全清洁的能源,核电已经成为电力供应中不可缺少的组成部分。反应堆在产生电力的同时,全世界每年产生的乏燃料也有大约 11 000 tHM,目前乏燃料的累计存量已经超过 150 000 tHM^[2]。乏燃料中含有大量 U、Pu、次要铜系元素(MA)和裂变产物(FP),其中的次要铜系元素和长寿命裂变产物构成了对地球生物和人类环境的巨大的潜在危害。乏燃料的处理处置已经成为制约核能可持续发展的关键问题之一。

事实上,乏燃料处理处置的研究比和平利用原子能的历史还要早。1942 年,美国 Metallurgical 实验室最早开展了乏燃料后处理流程的研究,当时的目的是从乏燃料中提取武器级的 Pu。此后,乏燃料后处理方面又提出了 Redox 流程、Butex 流程、磷酸铋沉淀法流程、Purex 流程和干法后处理等多种流程。这些流程经过不断的改进和优胜劣汰,现在 Purex 流程已经成为唯一大规模使用的后处理流程。受到最初“提钚军用”的影响,各种后处理流程对 U、Pu 回收不仅要求有高收率,还要求产品有高纯度。流程对 U、Pu 的收率一般要求在 99.9% 以上,U、Pu 产品总净化系数的要求一般在 10^7 和 10^8 以上。

然而,随着核能的和平利用,后处理回收的 U、Pu 已经从军事用途转变成民用,主要是以混合氧化物燃料在反应堆中再次焚烧。从资源利用的角度来看,后处理过程提取 U、Pu 再次利用,有效地提高了天然铀的利用率。但是,从核废物处置角度来看,对人类生存构成最长久危害的次要铜系元素(Minor Actinide)和长寿命裂变产物(Long-Lived Fission Products)进入了后处理产生的高放废液中,高放废液必须玻璃固化后,与生物圈隔离几百万年才能消除对人类和环境的威胁。为了保障核能的可持续发展,仅仅通过现有的后处理流程回收乏燃料中的 U、Pu,而不解决 MA 和 LLFP 的问题,是令人难以接受的。

近年来,随着核电在世界范围内的复苏,国际上提出了先进核燃料循环概念,它是一种将分离/嬗变和后处理相结合的核燃料

循环方式。其特点是不但对乏燃料中的 U、Pu 进行回收利用,也分离其中的 MA 和 LLFP。分离后利用核反应堆变成短寿命或者稳定的核素,嬗变过程产生的能量还可以加以利用。先进核燃料循环产生的核废物所需要的地质隔离时间大大缩短^[4](见图 1)。

MA 和 LLFP 的分离是分离/嬗变和先进核燃料循环的必要条件。由于 Purex 流程是为了回收 U、Pu 设计的,萃取剂对 U、Pu 的选择性好,但是对 Np、Am、Cm、Tc 等的萃取能力不强。为了回收 MA 和 LLFP,就必须有新流程从高放废液中将这此核素进行分离。国际上比较有影响的高放废液分离流程有美国的 TRUEX 流程^[5]、法国的 DIAMEX 流程^[6]、日本的 DIDPA 流程^[7]和中国的 TR-PO 流程^[8]等。目前这些流程都经过了真实高放废液的热实验验证,证明对 Np、Am、Cm 等具有良好的分离效果^[9]。

对 MA 和 LLFP 的分离是由于分离/嬗变和先进核燃料循环的提出而出现的。从废物管理角度说,它和后处理流程共同担负了处理乏燃料、满足最终处置要求的任务。MA 和 LLFP 的分离之所以在高放废液体系中进行,是因为过去的后处理只考虑了 U、Pu 回收,使 MA 和 LLFP 进入高放废液,而高放废液处置问题是当前现实的、客观的需要。从长远看,后处理和高放废液分离,如果独立的 2 个流程存在,会造成流程复杂、二次废物增多、增加储存运输环节等问题。解决的办法之一就是综合考虑乏燃料中核材料的回收利用和最终废物的处置要求,建立一个“后处理/分离一体化”流程。一体化流程对乏燃料的分离应当满足以下要求:①回收乏燃料中 U、Pu,满足再循环利用的要求;②分离乏燃料中的 Np、Am、Cm、Tc 等次要铜系元素和长寿命裂变产物,使这些核素能满足嬗变的要求;③一体化流程产生的废物的储存要显著缩短;④一体化流程应当具有尽量少的二次废物、尽量低的成本和足够的核扩散阻力。

近年来,随着先进核燃料循环研究的开展,国际上对核燃料循环后端乏燃料后处理/分离一体化流程的研究也越来越加以重视,陆续提出基于不同思路、不同萃取体系的一体化流程。下面将对近年来这方面的主要成果和研究进展进行介绍。

2 各主要国家对核燃料循环后端乏燃料后处理/分离一体化流程的研究进展

2.1 日本 JAERI 关于 PARC 概念流程的研究

日本 JAERI 在 20 世纪 90 年代提出了 PARC(PARTitioning Conundrum Key)概念流程^[10-12](流程示意图见图 2),并开展了持续的研究工作。JAERI 将研究 PARC 流程的目的归结为:①减少含有超铀元素的废物体积;②减少长寿命核素 I-129、C-14 和 Tc-99 对环境的风险;③强化流程的经济性、核扩散阻力和安全性。

PARC 流程对传统的 Purex 流程进行改进,简化了 U、Pu 纯化循环,形成了一个单循环的流程。流程首端采用一个硅胶柱对 I 进行吸附,吸附柱后增加一个 C 捕捉装置来收集 C-14。在 U、Pu 共萃取工序,将 Np 调价到 Np(VI),使 Np 和 Tc 进入 TBP 有机相。在 U、Pu 分离工序之前,使用正丁醛还原 Np(VI)到 Np(V)从有机相中去除,再用高酸洗涤去除 Tc。U、Pu 分离得到纯 U 产品和 U、Pu 混合物产品。共萃取工序产生的高放废液经过萃取色层来分离去除 Am/Cm,分离后的废液进行固化处置。最终 PARC 流程回收的 U、Pu 可制成 MOX 元件,在热堆或者快堆中再次利用,

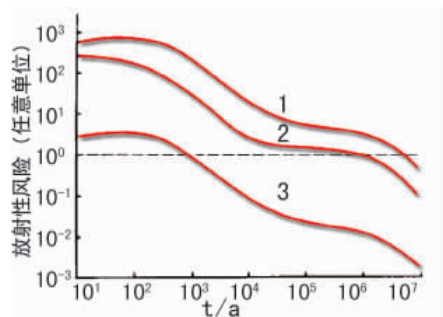


图 1 不同核燃料循环方式产生废物的长期风险^[4]

注:1. 乏燃料直接处置;2. 后处理回收 99.5% 的钚铀;

3. 后处理并回收 99.5% 的 MA

Fig. 1 Long-term radioactive risk of different nuclear fuel cycles

致分离流程变长,第二循环在 TPE 和 REE 分离之前还要进行脱硝来降低酸度,有可能生成沉淀。

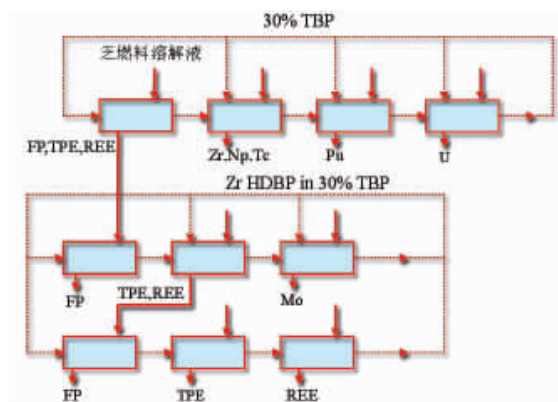


图 4 SuperPurex 流程示意图

Fig. 4 SuperPurex process principal flowsheet

2.4 中国 Purex-TRPO 一体化流程

清华大学核研院朱永贻等提出了混合三烷基氧膦 (TRPO) 为萃取剂的高放废液分离流程^[8],可以从高放废液中分离铀系元素和 Tc。该流程已经经过了动力堆乏燃料后处理产生的高放废液热实验验证,取得了良好的分离效果,被认为是“最具应用前景的分离流程之一”^[9]。为了使乏燃料后处理和分离流程的衔接更加合理,在对 TRPO 流程改进和完善的同时,核研院也开展了后处理和高放废液分离一体化流程的研究工作。

韩宾兵^[23]提出了采用不同萃取剂的 3 类一体化流程,分别是:采用 TBP 和 TRPO 两种萃取剂的一体化流程、采用混合 TBP/TRPO 为萃取剂的一体化流程和采用 TRPO 作为唯一萃取剂的一体化流程,并基于不同萃取体系建立了 6 个一体化概念流程。通过对 6 个流程的比较研究,得出以下结果。

1) 采用 TRPO 为唯一萃取剂直接处理乏燃料溶解液的一体化流程的经济性不好、技术成熟度低;采用混合 TBP/TRPO 混合萃取剂直接处理乏燃料溶解液的一体化流程是有前景的研究方向,但是在 U、Pu 反萃、萃取剂复用、裂片去污等方面存在很多问题,短期内无法应用;采用 2 种萃取剂,将 Purex 流程和 TRPO 流程直接衔接的流程是最成熟、最可行的一体化流程。

2) 计算研究的结果表明,改变 Purex 流程共萃取循环的操作条件,适当降低 U、Pu 收率,可以提高裂变产物的去污系数,可使后续纯化循环得到简化。采用 2 种萃取剂的 Purex-TRPO 一体化

流程,可以在 Purex 流程部分通过降低收率来提高去污系数,使后续流程缩短;TRPO 流程部分可以专注于 U、Pu、Np 的回收,而无需考虑回收核素的去污和相互分离。此后的研究中,考虑到一体化流程中 TRPO 回收的 U、Pu 都将返回 Purex 部分进行净化,刘学刚等研究了以碳酸铵、碳酸胍为反萃剂的 TRPO 简化流程^[24-25],使 TRPO 萃取的铀系核素分为 Am/Cm/RE 和 U/Pu/Np 两个物流。前者进一步分离 Am/Cm 与稀土后可以进行嬗变处理,后者返回 Purex 流程净化处理。

基于传统的 Purex 流程和高放废液分离的 TRPO 流程,建立的 Purex-TRPO 一体化流程的流程图^[26]如图 5 所示。

乏燃料溶解液调制工序控制 Np 为五价,在共萃取工序使 Np 进入高放废液^[27]。有机相负载的 U、Pu 在 U、Pu 分离工序采用羟胺衍生物为还原剂^[28]。钚线得到 U、Pu 混合物,可以直接用于 MOX 元件制造,如果要获得纯钚产品则需要增加 Pu 纯化循环。铀线 TBP 负载有机相用一个稀硝酸洗涤工序代替铀线纯化循环,对有机相中 Np(IV)、Pu(IV)和裂变产物进行洗涤去污。为了满足铀线的净化要求,允许洗涤过程有少量 U(<4%)进入洗涤水相。洗涤水相将和高放废液合并进入 TRPO 流程。合并时通过调节高放废液和稀酸洗涤液的比例来调整料液酸度,满足 TRPO 萃取要求。TRPO 萃取工序将合并料液中的 U、Pu、Am、Cm、Np(IV)、RE 等完全萃取,经过 5.5 mol/L 硝酸和碳酸胍反萃形成:① Am/Cm/RE 物流,可进一步分离或直接固化处置;② U/Pu/Np 物流返回乏燃料溶解调制工序。高放废液中来自共萃取工序的 Np 主要是 Np(V),在 TRPO 中分配比较低,进入萃残水相。经过调价后用 TRPO 将这部分铀萃取分离,最终高放废液中不含 U、Pu、Np、Am、Cm 等核素。

Purex-TRPO 一体化流程使用稀硝酸洗涤代替铀线纯化循环,只用了 1 个溶剂萃取循环得到了 U、Pu 产品,使 Purex 流程得到简化。TRPO 流程反萃段由于不需要对 U、Pu 分离和纯化,所以反萃工序也得到了简化。Purex-TRPO 一体化流程中稀酸洗涤工序的计算研究表明,在 U 收率 96%左右时,有机相中 Pu、Np、裂变产物的去污系数均大于 500。TRPO 简化流程的反萃段也经过了试管串级实验的验证,证明萃取的 U、Pu、Np 等能够被碳酸胍完全反萃,经过浓硝酸加热处理后,U、Pu、Np 可以被 30% TBP 萃取。TRPO 对五价 Np 的萃取也进行了试管串级实验,结果表明,三级萃取、二级洗涤时,TRPO 对 Np(V)的萃取率小于 5%。流程的主要不足是:① 稀硝酸洗涤液和 1 AW 废液合并后增加了料液体积,使 TRPO 流程处理量增加;② 一体化流程为了分离 Np,需要专门的 Np 调价萃取和反萃工序;③ Purex-TRPO 一体化流程稀酸洗涤工序尚处于计算研究阶段,需要进一步实验数据验证。

3 结论和建议

为了满足分离/嬗变和先进核燃料循环的需要,对乏燃料的处理处置不仅要回收其中的 U、Pu,还要对 MA 和 LLFP 进行分离。国内外因此提出了多个后处理和高放废液分离一体化流程。这些流程具有如下特点。

1) U、Pu 的分离回收仍然使用 TBP 为萃取剂,对传统 Purex 流程进行改进简化,用 1 个溶剂萃取循环得到 U 产品和 Pu (或 U、Pu 混合物)产品。

2) 均考虑了 Np、Am/Cm 等次要铀系元素的分离,不同的流程还可以分离 Tc、I、Zr、C 等。分离过程注意实现无盐化,流程产生的高放废液所需的储存时间大大缩短。

3) 一体化流程的研究距离实际应用还有一定距离,各种流程的分离效果、物流衔接和分离产品的处理方法等,还需要进一步验证。

我国已经确定了“积极推进核电建设”的方针,预计 2020 年

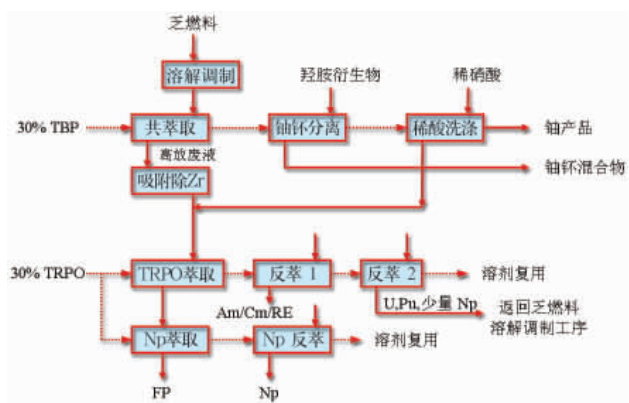


图 5 Purex-TRPO 一体化流程

Fig. 5 Purex-TRPO integrated process

我国核电总装机将达到 40 GWe 左右。面对核电发展的大好形势,对我国动力堆乏燃料的商用后处理和核废物处理处置研究及建设,应当具有足够的前瞻性。未来核燃料循环后端采用的化工分离流程应当在借鉴国外 20 世纪 80 年代流程的基础上,尽量自主创新,以具有自己的特色和一定的先进性;而建立“后处理-高放废液分离一体化流程”是努力的方向之一。

参考文献 (References)

- [1] IAEA annual report 2003, IAEA, 2004
- [2] KAPLAN P, BABIKIAN R. Using vitrified and compacted wastes to optimize repository use [CD]// in global 2003. New Orleans: LA November, 16–20, 2003 (CD-ROM): 1318–1324.
- [3] 姜圣阶,任凤仪,等.核燃料后处理工学[M].北京:原子能出版社,1995.
- [4] 顾忠茂,叶国安.先进核燃料循环体系研究进展[J].原子能科学技术,2003,36(2):160–167.
- [5] HORWITZ E P, SCHULZ W W. The TRUEX process: a vital tool for disposal of U.S. defense nuclear waste. New separation chemistry techniques for radioactive waste and other specific application[C]// Barking UK; Elsevier Applied Science, 1991
- [6] CUIILLERDIER C, MUSIKAS C, HOEL P, et al. Malonamides as new extractants for nuclear waste solutions[J]. Sep. Sci. Technol. 1991, 26 (9): 1229–1244.
- [7] MORITA Y, KUBOTA M, GLATZ J P, et al. Actinide partitioning from HLW in a continuous DIDPA extraction process by means of centrifugal extractors[J]. Solv Extr Ion Exch, 1996, 14(3):385–400.
- [8] Zhu Y J, Song C L. Recovery of Neptunium, Plutonium and Americium from Highly Active Waste, Trialkyl Phosphine Oxide Extraction. Proceedings of Transuranium Elements[C]// Washington DC. US; American Chemical Society, 1992
- [9] Bush R P, Mills A L, Stearn M L. Comparison of the plant requirements, process performance and waste arising for potential processes for the partitioning of high level waste. Global'95: International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems [C]// Versailles, France; The French Section of ANS and the Fuel Cycle and Waste Management Division, 1995
- [10] MAEDE M, FUJINE S, UCHIYAMA G, et al. A Process Conception of an Advanced Reprocessing Based on PUREX Process Incorporating the Partitioning Function. Global'95: International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems [C]// Versailles, France; The French Section of ANS and the Fuel Cycle and Waste Management Division, 1995.
- [11] Sachiic Fujine, Gunzo Uchiyama, et al. Separation of Mobile Long-lived Nuclides in a Simplified Reprocessing. Global'97: International Conference on Future Nuclear System [C]// Pacifico Yokohama, Japan, 1997.
- [12] UCHIYAMA G., MINEO H, et al. PARC process for an advanced process[J]. Progress in nuclear energy, 2000, 37(1–4): 151–156.
- [13] UCHIYAMA G, MINEO H, ASAKURA T, et al. Advanced technologies for long-lived nuclides separation in reprocessing[C]// Proc. Global2001, Paris, France, September 9–13, 2001.
- [14] MINEO H, UCHIYAMA G, ASAKURA T, et al. PARC Process for

- Reprocessing Spent Fuels from Advanced Nuclear Reactors[C]// The 13th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC 2002), Shenzhen, China, October 21–25, 2002.
- [15] MINEO H, ASAKURA T, HOTOKU S, et al. An advanced aqueous reprocessing process for the next generation's nuclear fuel cycle [C]// In Global 2003. New Orleans, LA November 16–20, 2003 (CD-ROM): 1250–1254.
- [16] OZAWA M, HIRANO H, KOMA Y, et al. Enhancing actinides separation by consolidated PUREX and TRUEX processes intensified by salt-free requisite [C]// Global'95, International Conference on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems. Versailles, France: The French Section of ANS and the Fuel Cycle and Waste Management Division, 1995(1): 585–594.
- [17] OZAWA M, SANO Y, NOMURA K, et al. A new reprocessing system composed of purex and TRUEX processes for total separation of long-lived radionuclides [C]// fifth OECD/NEA Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Session 2: partitioning, Mol Belgium, 1998.
- [18] MASAKI OZAWA, YOSHIKAZU KOMA, KAZUNORI NOMURA, et al. Separation of actinides and fission products in high-level liquid wastes by the improved TRUEX process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 1998:538–543.
- [19] KIYOTO AIZAWA. R&D activities based on fast reactor cycle technologies for transmutation of TRU and LLFP by JNC [J]. Progress in Nuclear Energy, 2002, 40: 349–356.
- [20] ZILBERMAN B YA, FEDOROV YUS, MISHIN EN, et al. Separation of Long-lived Radionuclides from NPP Spent fuel and its Processing Wastes using SUPERPUREX as TBP-compatible Process [C]// Proc Int Conf. “Global'2001”(CD), pap. #156, SFEN, Paris, 2001.
- [21] ZILBERMAN B Ya, FEDOROV Yu S, MISHIN E N, et al. SUPERPUREX as a TBP-compatible Process for Recovery and Partitioning of Long-lived Radionuclides from NPP Spent Fuel[C]//Proc. Int. Symp. “NUCEF'2001” JAERI, Tokai-mura, 2002.
- [22] ZILBERMAN B Ya, FEDOROV YU S, MISHIN E N, et al. Superpurex as an optimized TBP-compatible process for long-lived radionuclide partitioning[CD]//Global 2003 (CD-ROM).
- [23] 韩宾兵.核燃料循环后段后处理与分离一体化的研究 [D].北京:清华大学核能技术设计研究院,1999.
- [24] LIU XUEGANG, LIANG JUNFU, XU JINGMING. Simplified chinese TRPO process to extract and recover transuranium elements from high-level liquid waste [J]. Solvent Extraction and Ion Exchange, 2004, 22(2): 163–173.
- [25] 刘学刚,肖学文,梁俊福,等.碳酸胍用于 TRPO 流程中反萃 U、Np、Pu 的工艺研究[J].原子能科学技术,2005,39(5):339–403.
- [26] 刘学刚.核燃料循环后端一体化研究[D].北京:清华大学核能与新能源技术研究院,2004.
- [27] 叶国安.新型萃取剂英醚的萃取性能及铈在 Purex 流程的走向[D].北京:中国原子能科学研究院,2000.
- [28] 何辉,胡景炘,张先业,等. N,N-二甲基羟胺用于铀钍分离多级反萃实验研究和相应的计算机程序 [J]. 原子能科学技术,2002,36(2): 101–106.

(责任编辑 李慧政)

·读者·作者·编者·

读者来信摘登

收到贵刊 2006 年第 5 期后,发现本人撰写的“中国的珠峰高程测定”一文中几处有误,特此更正如下。

① 第 9 页图 2 的英文图名中的“1982”应为“1992”;② 第 9 页图 4 的英文图名应改为“Leveling lines in 2005 campaign”;③ 第 10 页图 5 图名中的“水准路线”应删除,英文图名应改为“Trigonometric leveling in 2005 campaign”;④ 第 10 页图 6 图名

中的“岩面地形”应为“雪面地形”,英文图名中的“scar”应改为“ice”;⑤ 第 10 页图 7 图名中的“雪面地形”应为“岩面地形”,英文图名中的“ice”应改为“scar”。

上述错误中的③、④和⑤条均属本人疏忽所致,在此谨向读者表示歉意。

——国家测绘局科技委陈俊勇院士