

文章编号: 1007-4627(2007)02-0151-05

# 核电站乏燃料对生物圈的影响及 ADS 对策\*

史永谦

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 介绍了核电发展状况和核电产生的乏燃料中的锕系及长寿命裂变产物核素, 在毒性方面评述了这些核素对生物圈的影响, 最后提出用加速器驱动的次临界系统嬗变核废物的对策, 以减轻或消除核废物对生物圈的影响。

**关键词:** 核电发展; 乏燃料; 毒性; 加速器驱动的次临界系统

**中图分类号:** TL11      **文献标识码:** A

## 1 引言

能源是人类生存和发展的重要资源, 整个世界对能源的需求量都在增加, 这种趋势至少会持续几十年。在经过了 1979 年美国三哩岛核电站 2 号机组发生严重事故和 1986 年前苏联切尔诺贝利核电站 4 号机组发生严重事故的核能发展低潮后, 现在又迎来核电建设的新高潮。

尽管核电是干净的, 但也还是有一定的废物, 它属于高放射性且半衰期特别长(甚至于某些放射性核素半衰期为几百万年)的废物。这些废物长期储存或固化深埋处理, 需要上百万年才有可能衰变到天然裂变资源所固有的放射性毒性水平。在这样的漫长岁月中, 这些长寿命且有剧烈毒性的核素有可能因地址结构的变动进入生物圈, 具有极大的潜在危险。

20 世纪末提出的加速器驱动的次临界系统(ADS)是国际核能界公认的最佳的嬗变装置(焚烧炉), 为嬗变长寿命、剧烈毒性的高放废物成短寿命的核废物, 降低放射性毒性提供了可能。因此发展 ADS 是减轻或消除核电站高放废料对人类生态环境和生物圈影响的最好对策。

## 2 核能概况<sup>[1]</sup>

目前, 世界核电的供应已经达到总电力供应的 16%。已有不少国家核电占总供电量的 1/3, 反应

堆运行时间也达到约 8 800 多堆年。

2005 年 3 月 21—22 日在法国巴黎召开了“世界核能”部长级会议, 会议由国际原子能机构(IAEA)和经济合作与发展组织组织, 有 29 个国家负责能源和原材料的部长、74 个国家的代表团和 10 个国际组织的成员代表参加。与会者一致认为, 21 世纪核能的增长是必然的。

核能对于我国的可持续发展具有特别重要的战略意义, 将确保我国长期的能源安全, 也将保持核大国地位从而确保我国的国家安全, 还将带动我国相关产业及其高新技术的发展, 将为减少我国的环境污染作出重要贡献。

中国的核电起步并不晚, 早在原子弹、氢弹相继成功爆炸和核潜艇设计基本完成后, 1970 年周恩来总理就指示中国要搞核能发电, 并于 1971 年开始了核电站的设计<sup>[2]</sup>。经过曲折的 30 多年, 已经取得了令人瞩目的成绩。

当前正是中国核电发展的关键时期。最近出台的《电力产业发展政策》中, 有关核电的政策已由过去的“适度发展核电”转向“积极推进核电”。国家将实施更为积极的核电战略中期目标在 2020 年总装机容量达到 36—40 GW, 占总发电量的 4%—6%。根据国家中长期能源发展形势和前景分析, 在《2050 年我国的能源需求》研究报告中指出核电占一次能源的含量提高到 12.5%, 占电力总装机容量

\* 收稿日期: 2007-02-08; 修改日期: 2007-03-22

\* 基金项目: 国家重点基础发展规划资助项目(973)(GT1999022602)

作者简介: 史永谦(1940—), 男(汉族), 河南获嘉人, 研究员, 从事反应堆物理实验、核临界安全、固体径迹探测器和加速器驱动的次临界系统研究; E-mail: shiyq@ciae.ac.cn

的 20%，达到 240 GW。我国以压水堆为主的热中子反应堆核电站在今后 30—40 a 仍然占主导地位。核电站乏燃料处置将是一个世界性的问题。

### 3 核电站乏燃料对生物圈的影响

尽管核电是非常干净的，但还是有一定的废物，属于高放射性且半衰期特别长的废物。表 1 给出了次量锕系(Minor Actinides, 简称 MA)核素成分占乏燃料的含量；表 2 给出了钚各种同位素成分占乏燃料的含量；表 3 给出了几种长寿命裂变产物占乏燃料的含量。

表 1 次量锕系核素成分在乏燃料中的含量<sup>[3]</sup>

核素	$T_{1/2}/a$	$m/(kg \cdot GWe^{-1} \cdot a^{-1})$	乏燃料中含量(%)
<sup>237</sup> Np	$2.14 \times 10^6$	13.0	0.052
<sup>241</sup> Am	433	1.6	0.006 4
<sup>242m</sup> Am	—	0.03	0.000 12
<sup>243</sup> Am	7 370	3.3	0.013 2
<sup>243</sup> Cm	0.446	0.015	0.000 06
<sup>244</sup> Cm	18.11	1.01	0.004 04
<sup>245</sup> Cm	8.53	0.04	0.000 16

表 2 钚同位素成分在乏燃料中的含量<sup>[4, 5]</sup>

同位素	Pu 中含量 (%)	乏燃料中含量 (%)	$T_{1/2}/a$
<sup>238</sup> Pu	3.6	0.036	87.74
<sup>239</sup> Pu	53.6	0.536	$2.41 \times 10^4$
<sup>240</sup> Pu	23.7	0.237	6 570
<sup>241</sup> Pu	11.8	0.118	14.4
<sup>242</sup> Pu	7.3	0.073	$3.76 \times 10^6$

表 3 几种长寿命裂变产物在乏燃料中的含量<sup>[6]</sup>

核素	$T_{1/2}/a$	$m/(kg \cdot GWe^{-1} \cdot a^{-1})$	乏燃料中含量(%)
<sup>79</sup> Se	$6.5 \times 10^4$	0.17	0.000 68
<sup>93</sup> Zr	$1.5 \times 10^6$	23.16	0.092 64
<sup>99</sup> Tc	$2.14 \times 10^6$	24.66	0.098 64
<sup>107</sup> Pd	$6.5 \times 10^6$	7.28	0.029 12
<sup>126</sup> Sn	$10^5$	0.962	0.003 85
<sup>129</sup> I	$1.6 \times 10^7$	5.78	0.023 12
<sup>135</sup> Cs	$3 \times 10^6$	9.415	0.037 66

对人类造成一定危害。根据《国际电离辐射防护和辐射源安全基本安全标准》(国际原子能机构安全丛书 115 号, 1996 年版), 将放射核素的毒性分组为极毒组、高毒组、中毒组和低毒组。

毒性的标准或参考点是生产 1 t 富集铀所产生的放射性毒性。它不仅包括铀同位素本身, 还包括它的子孙后代的放射性。参考点值为  $10^5$  Sv/t, 它被看作为天然本底。

另外定义的放射性潜在生物危害(Biological Hazard Potential, 简称 BHP)为<sup>[7, 8]</sup>

$$R_i = \frac{A_i}{C_{al}^i}, \quad (1)$$

它表示某种核素  $i$  的活度  $A_i$  (Bq) 与它在饮用水中公众最大容许浓度  $C_{al}^i$  (Bq/m<sup>3</sup>) 之比。

国际上对放射性毒性另外的定义为放射源的活度与规定的放射性活度指标(radioactivity guide)的比值。放射性活度指标有两种定义, 一种是剂量系数(DC), 另一种是年吸入量限制(Annual Limit of Intake, 简称 ALI),

$$R_i = A_i \cdot DC_i, \quad (2)$$

$$R_i = \left[ \frac{A_i}{ALI} \right]_i. \quad (3)$$

在文献[9]和[10]中用此定义比较了长寿命散裂产物和裂变产物的辐射毒性时采用的标准。

总之不管怎样定义, 放射性核素辐射毒性都与放射性活度  $A_i$  有关, 而且是主要因素。另一个因素是衡量毒性的标准。核素  $i$  的放射性活度为

$$A_i = N_i \times \lambda_i, \quad (4)$$

$N_i$  为核素  $i$  的核子数,  $\lambda_i$  为核素  $i$  的衰减常数。由此可知核子数越多, 衰减常数  $\lambda_i$  越长, 放射性核素辐射毒性越大。图 1 给出了压水堆(PWR)电站发电 1 (GWe · a) 所产生的乏燃料的放射性食入潜在生物危害 BHP 随时间的衰减曲线(以公式(1)计算)。图中的中断线是发电 1 (GWe · a) 所消耗的原始铀矿石(当量铀矿石)的放射性食入危害。图中只显示了表 1 和表 2 的总锕系核素(包括铀和钚)和表 3 中的几种长寿命裂变产物的衰减曲线。从图中可看出: 500 a 以内以 <sup>90</sup>Sr 和 <sup>137</sup>Cs 的毒性为主, 它们的半衰期均为 30 a 左右, 1 000 a 内已基本衰减完。500 a 后主要考虑的是锕系核素的影响。而长寿命裂变

以上列出的放射性核废物如果处置得不合理将

产物危害主要来自  $^{99}\text{Tc}$  和  $^{129}\text{I}$ 。这两种核素不仅寿命长, 而且极容易受地下水的侵蚀、浸出、渗透和扩散, 对生物圈的影响最大。

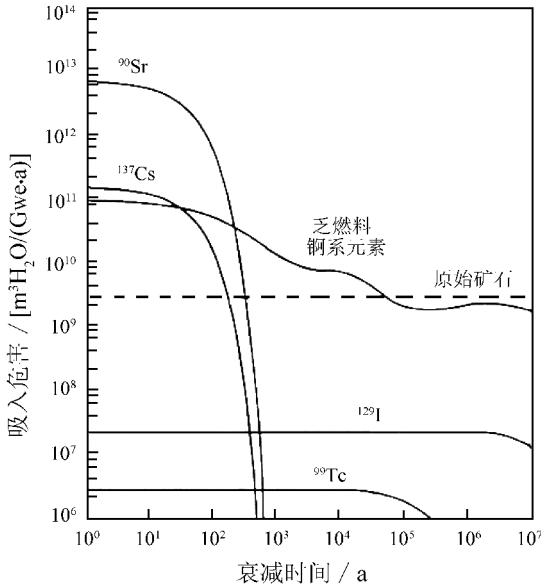


图 1 LWR 一次通过乏燃料放射性衰减

#### 4 针对核电站乏燃料对策

目前国际上对于核电站卸出的乏燃料处置主要有两种路线。一种是以美国、加拿大为代表的一次通过路线, 即经过长时间的冷却后, 选择稳定的地质岩层, 采取多重屏蔽, 直接进行深地层埋藏。这种路线简单, 有利防止核扩散。但在第 2 节提到的对生物圈的影响是无法避免的, 放射性物质极易受地下水的侵蚀和浸出, 核素迁移扩散到生物圈。第二种路线是以法国和日本等为代表的是将乏燃料经过短期存放冷却后, 进行后处理, 回收铀、钚和可用的核素, 对其它废物进行最后处置。它可最大利用核资源, 对生物圈的影响要比第一种方案风险小, 但仍不可避免存在远期的放射性风险, 核资源还存在一定的浪费。

核电站乏燃料对生物圈的远期放射性风险归根到底是长寿命放射性核素。因此早在 20 世纪 60 年代就提出了另外的分离-嬗变(P-T)路线<sup>[11]</sup>。即根据核素性质, 锕系核素可以通过裂变转化为裂变产物, 长寿命裂变产物可通过核反应嬗变为稳定的和短寿命核素。但由于对 P-T 方法的费用-效益-风险评价研究给出了否定的结论<sup>[12-14]</sup>, P-T 方法的研究转入低潮。但对该方法的研究一直在努力进行

中, 包括给出了否定结论的研究小组。

随着 P-T 处置乏燃料废物研究的进展, 国际上 20 世纪 90 年代就提出了一种新的核能系统 ADS<sup>[15]</sup>, ADS 系统包括中能强流质子加速器、外源中子发生器和次临界反应堆。当加速器加速的高能质子轰击重金属靶(如铅)时, 与重金属靶核发生散裂反应, 一个质子引起的散裂反应可产生几十个中子。用散裂产生的中子作为中子源作用于次临界反应堆上, 次临界反应堆发生并维持链式反应, 在一定功率下运行给出能量; 它可以嬗变乏燃料中的长寿命废物。

ADS 与核电站的主要区别在于运行模式: ADS 是次临界的, 它的  $k_{\text{eff}}=0.95-0.98$ , 核电站是临界的, 它的  $k_{\text{eff}}=1$ (装料大于 1)。另外控制模式也不一样: ADS 靠束流停止, 而核电站用的是安全棒。ADS 的运行模式和控制模式决定了它的固有安全性。它可以将分离的 MA 和长寿命裂变产物(LLFP)装入次临界堆内进行嬗变(需要高中子能量和通量)。图 2 给出了对分离的 MA 和 LLFP 不同的嬗变份额放射性 ALI 随时间的衰减曲线(以公式(3)计算)。由图 2 可知, 在没有引进 ADS 进行嬗变下, 要 50 000 a 才能使核废物毒性衰减到标准的参考

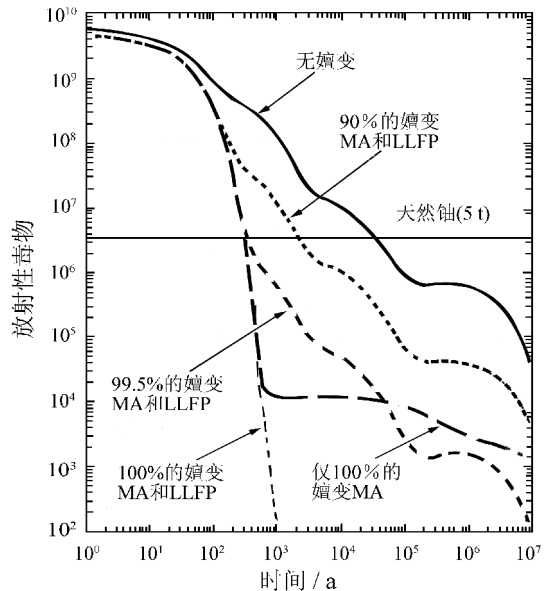


图 2 不同嬗变份额下的衰减

点, 如果引进 ADS 嬗变 90% 的 MA 和 LLFP, 可降低一个多量级为几千年, 嬗变 99.5% 的 MA 和 LLFP, 可降低到 500 a。在 500 a 内有关自然灾害等是可预料的, 就可避免放射性物质核素迁移扩散到生

物圈,使风险变得很小。

研究者普遍认为 ADS 将与常规的压水堆、快堆共同构成今后相当长期的裂变能利用模式(国外文献上有的称核能“公园”或“方案”,一般认为 ADS 在嬗变核废物方面的能力为可支持同功率 8 台左右的 PWR 电站),各自发挥其独特的作用使裂变能得以大规模、可持续地发展,它是目前世界核能界公认的解决大量放射性废物、降低深埋储藏风险的最具潜力的工具<sup>[16]</sup>。IAEA 把它列入新型核能系统中称之为“新出现的核废物嬗变及能量产生的核能系统”。研究成果将具有良好的资源效益、安全效益、环境效益,是我国核裂变能可持续发展值得探索的新技术途径,也是国际上目前研究的一个热点。

我国于 1999 年 11 月科技部批准了“973 项目”“加速器驱动洁净核能系统的物理及技术基础研究”,于 2005 年 10 月通过结题验收。主要承担单位是中国原子能科学研究所和中国科学院高能物理研究所。这 5 年的研究内容为反应堆物理及外源驱动零功率次临界反应堆实验、强流加速器物理及相关的单项技术、核物理基础、ADS 系统物理性能研究等诸方面,其标志性成果是建成了脉冲外源驱动的零功率次临界反应堆——启明星 1 号及脉冲强流 RFQ 注入器。目前我国 ADS 研究整体上达到国际水平,有些已经达到国际先进水平,得到了国际同行的认可。

我国研发的 ADS“启明星 1 号”<sup>[17, 18]</sup>——高压倍加器驱动的零功率次临界装置为进行次临界反应堆中子学研究、校核理论计算程序及检验核数据、ADS 运行时  $k_{\text{eff}}$  的监测方法研究、某些核素的嬗变研究提供了研究平台。其设计指标为  $k_{\text{eff}}$  在 0.95—0.98 之间可变,堆芯包括快中子能谱区和热中子能谱区,在快中子能谱区可进行 MA 的嬗变研究,在快中子能谱区和热中子能谱区之间形成的超热中子能谱区可进行 LLFP 的嬗变研究等。

## 5 结论

人们在享受核电带来的巨大好处时,也不得不面对核电产生的核废料尤其是长寿命核废料对人类生态环境和生物圈的影响。分离和嬗变可以在充分利用资源的同时,大大降低核废料的毒性和体积,采用分离和嬗变的技术路线,结合必要的少量高放

废物的深埋处置是处理、处置 MA 和 LLFP 的合理选择。ADS 是嬗变核废料的最强有力工具,它将是我国核裂变能可持续发展值得探索的新技术途径,我国的 ADS 研究应该受到更大重视,在今后相当长的时期内 ADS 将在常规的压水堆、快堆共同构成的裂变核能“公园”内为一个清洁的环境和经济发展的社会发挥各自优势。

## 参考文献 (References):

- [1] Shi Yongqian. *Energy Engineering*, 2007, (1): 1 (in Chinese).  
(史永谦. 能源工程, 2007, (1): 1.)
- [2] Shi Yongqian. *The First Step of Nuclear Power in China, the Past Glorious Years*. Beijing: Atomic Energy Press, 2006, 184—186 (in Chinese).  
(史永谦. 中国核电第一步, 岁月如歌, 北京: 原子能出版社 2006, 184—186.)
- [3] Zhou Peide. *Nuclear Science and Engineering*, 2000, **20**(1): 11 (in Chinese).  
(周培德, 核科学与工程, 2000, **20**(1): 11.)
- [4] Liu Shengwu. *Nuclear Power in Foreign Countries*, 1998, **19**(2): 24 (in Chinese).  
(刘胜吾, 国外核动力, 1998, **19**(2): 24.)
- [5] Qiu Xiaoping, Tan Jia. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2005, **25**(1): 84 (in Chinese).  
(邱小平, 谭健. 核电子学与探测器技术, 2005, **25**(1): 84.)
- [6] Fan Sheng, Zhao Zhixiang, Ding Dazhao. *Atomic Energy Science and Technology*, 2001, **35**(1): 73 (in Chinese).  
(樊胜, 赵志祥, 丁大钊. 原子能科学技术, 2001, **35**(1): 73.)
- [7] Standards for Protection Against Radiation; Final Rule. US Nuclear Regulatory Commission, 1991.
- [8] Gromov B F, Belomitcev Yu S, Yefimov E I, *et al.* *Nuclear Engineering and Design*, 1997, **173**: 207.
- [9] Gromov B F, Yefimov E I, Pankratov D V, *et al.* Final Report on Agreement 2266V0015—35 between IPPE and LANL (USA). 8th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, ICENS'96. Obninsk, 1996.
- [10] Shubin Yu N. Calculation of Activity and Residual Energy Release in Liquid Lead-Bismuth Target of 1 MW Power. Obninsk, 1998 (in Russian).
- [11] Steinberg M, Wotsak G, Manowitz B. BNL, 1964, 8 558.
- [12] Croff A G, Tedder D W, Drago J P. ORNL/TM-5808, 1977.
- [13] Croff A G, Blomeke J Q. ORNL/TM-5566, 1980.

- [14] IAEA Technical Report, Series 214, 1982. Science and Technology, 2005, **39**(5): 447(in Chinese).
- [15] Rubbia C, Rubio J A, Buono S, *et al.* CERN/AT/95-44 (ET), 1995. (史永谦, 夏 普, 罗璋琳等. 原子能科学技术, 2005, **39**(5): 447).
- [16] Gandini A, Salvatores M. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002, **39**(6): 673. [18] Shi Yongqian, Xia Pu, Luo Zhanglin, *et al.* Nuclear Technology, July(2007) (to be published).
- [17] Shi Yongqian, Xia Pu, Luo Zhanglin, *et al.* Atomic Energy

## Radiation Effect of Spent Fuel of Nuclear Power on Biological Circle and ADS Strategy<sup>\*</sup>

SHI Yong-qian<sup>1)</sup>

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The current status of nuclear power development and the actinides and some Long Lived Fission Products (LLFPs) in nuclear power spent fuel have been introduced. The radiation effect of spent fuel on biological circle in the viewpoint of Biological Hazard Potential (BHP) and Annual Limit of Intake were evaluated. The Accelerator Driven Sub-critical System (ADS) as a strategy to transmute Minor Actinides (MAs) and LLFPs was recommended in order to reduce or eliminate the radiation effect of spent fuel on biological circle.

**Key words:** nuclear power development; spent fuel; radiation toxicity; accelerator driven sub-critical system

\* Received date: 8 Feb. 2007; Revised date: 22 Mar. 2007

\* Foundation item: Major State Basic Research Program(973)(GT1999022602)

1) E-mail: shiyq@ciae.ac.cn