核电厂退役探讨

——对我国核电厂退役的几点建议

李民权,关玉蓉①
(南华大学 老年科技工作者协会,湖南 衡阳 421001)

[摘　要] 文章简介核电厂退役三阶段和某些国家实施核电厂退役三阶段的实例,主要提出了对我国核电厂退役尚待完善的几点建议:即核电厂退役法律法规;核电厂退役资金;核电厂退役的去污;核电厂退役拆卸技术;放射性废物处理处置。

[关键词] 核电厂; 退役; 法规; 去污; 拆卸; 放射性废物处理处置
[中图分类号] F407 [文献标识码] A [文章编号] 1673-0755(2011)05-0001-04

核电厂退役是指核电厂使用期满或其他原因(如技术已经落后或事故等)停止运行,永不再使用,为了保证工作人员和公众不受剩余放射性物质及其它潜在风险的危害,而对这样的核电厂有计划地实施必要的善后处理,使其安全永久地退出服役的过程。退役的最终目的是实现场址不受任何限制的开放使用。

一　核电厂退役三阶段

商用核电厂的建设,始于 20 世纪 50 年代末,各国进行试探性和反应堆选型,其电功率较小(低于 30 万千瓦)属于初期阶段;从 70 年代初~80 年代中期,其电功率多为 60 万千瓦;90 年代至今则有建设大电功率(100~135 万千瓦)核电厂的势态。在建设核电厂的时候,很少考虑或几乎没有考虑对它们的最后拆除问题。然而一座 110 万千瓦的核电厂,经过几十年营运后,将产生几十万吨级的放射性废物[1]有待处理和处置,且反应堆本体也有被激活成具有很强的放射性物体(总活度约 1×10^6 居里),所有放射性厂房建筑物结构又非常坚固(可防 8 级地震),要将它们彻底清除又不引起环境污染、不危害周围居民的安全,显然是一项难度大、耗资多、时间长的工程。

自 1973 年 9 月国际原子能机构(IAEA)首次提出核电厂退役课题以后,各有核电的国家对核电厂退役均给予极大的重视,并组织相关机构研发新的技术和方法。目前退役的方式有立即拆除(停堆后把乏燃料元件运出场地,封存 3 年左右立即开始拆除管制区内的所有设备和设施,整个退役过程约需 15 年时间)和延缓拆除(停堆后先把核电厂的设备和设施安全封存一段时间约 30~50 年或更长,然后再安排拆除)两种,它们各有优劣,各有核电国则视本国情况而定,如德国、日本则优先选择前者,美国则优先选择后者。无论选择哪种方式退役,根据安全因素和以后其它方面的需要,世界各有核电的国家已公认国际原子能机构规定的退役三阶段:

第一阶段,也称一级退役(监护封存期),就是安全地长期封存。反应堆已关闭,把核燃料元件、放射性物料和放射性废物运出场地,以及主回路、辅助设施和工艺厂房的去污,其他一切原封不动地保存,设备敞开部分安全密封,安全壳的穿墙孔永久性封闭。为保证核设施处于安全状态,要实施连续的监护、监测和检查,这一阶段可能延续 3~5 年。

第二阶段,也称二级退役(局部拆除期,厂址有限制地开放),就是将生物屏蔽层以外的全部放射性和非放射性系统及建筑物拆除或去污至允许水平,并按规范处理、存贮或处置放射性废物,而将放射性活度很高的堆本体封闭在坚固可靠的构筑物中。使放射性物质与人和环境长期而安全地隔离,使场址达到限制性开放标准,使要继续实施监护、监测和检查的剩余部分缩减到最小体积。虽然在此阶段退役中会产生大量的放射性废物,通常不需要十分复杂的操作技术。这一阶段可能延续 30~50 年。主要是使堆内构件的活化核素如 ^{55}Fe、^{60}Co 等衰减,可使退役活动中的辐射防护大大简化。

第三阶段,也称三级退役(最后处置期,场址无限制的开放或使用),就是把厂内所有带放射性的设备、器材和部件全部拆除运出,经去污后场址和厂房无需再进行监测和检查。可供无限制地使用。这一阶段需要完成大量的解体、去污和运输工作,需要遥控操作设备,工作环境有大量的低中放废物,既要防外照又要防内照,工作难度与花费远大于前两阶段。时间可能延续 3~5 年。

[收稿日期] 2011-07-16
[作者简介] 李民权(1937-),男,湖南衡阳人,南华大学老年科技工作者协会教授。
①南华大学高级工程师。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

核电厂退役原则上要经历上述三个阶段,这些阶段不一定按顺序在某一规定时间内完成,如实施第一阶段退役后,立即采取进一步措施向第二阶段发展,而把第三阶段的退役工作推迟几十年甚至上百年后再进行。

二 某些有核电厂退役国家的具体做法

早期建造的一些小型核电厂,如美国的桃花谷(希平巷和印第安哥等)核电厂;德国的贡多瑞明根和林根等核电厂以及法国、英国、日本等均有小型核电厂退役,他们的具体做法所采用的手段我们已作过调研[2]。目前欧美一些国家,已经开展对大、中型核电厂的退役作业,有些国家有已完成退役的核电厂,还有一些国家有正在实施核电厂退役作业或者有计划进行的退役项目,但各国的退役过程差别很大(见表1)。这些国家在大、中型核电厂退役各阶段的经验和教训值得我们借鉴。

表1 某些商用核电厂的退役过程和估计费用

国 家	堆 型	功率(MW)	退役过程	估计费用(1990)百万美元
加拿大	PHWR	600	第一阶段+32 年+第三阶段	238
芬 兰	PWR	2×465	即行第三阶段	237
	BWR	2×735	第一阶段+30 年+第三阶段	198
瑞 典	PWR	920	即行第三阶段	130
	BWR	708	即行第三阶段	152
日 本	PWR	1160	第一阶段+(5~10)年+第三阶段	225
	BWR	1100	第一阶段+(5~10)年+第三阶段	234
德 国	PWR	1204	1 方案 即行第三阶段	218
			2 方案 30 年+第三阶段	205
西班牙	GCR	500	第一阶段+第二阶段+25 年+第三阶段	410
英 国	GCR	2×219	第一阶段+第二阶段+90 年+第三阶段	1048
	AGR	2×660	第一阶段+第二阶段+90 年+第三阶段	993
美 国	PWR	1175	即行第三阶段	120

这些国家对核电厂退役有非常严格的监管部门、法规制度、退役方案、废物处置措施、有必要的技术手段和一支训练有素的技术队伍,以及充足的退役基金。不具备上述这些条件就无法实施核电厂退役,即使实施了也将导致人力、物力和资金的巨大损失。以英国的温斯凯尔改进气冷堆(WAGR)的退役为例,它是作为一个安全退役示范项目来筹划的,应该说各方面会给予大力支持,当时计划10年左右完成退役,即第一阶段2~3年;第二阶段1~3年;第三阶段5年。但是火焰切割机和机械切割工具的远距离拆除机,研制成功并安装就位就用了8年时间(1986~1994年)。到2006年要拆除生物屏蔽层和安全壳时,因产生大量低中放废物,被迫停工,须待2020年有了足够的废物贮存场后,退役才能继续进行,相应提高已监护封存费用。

核电厂的具体退役计划还受其他因素影响,如多机组的核电厂,当其他核电机组尚在运营时,首座关闭的机组先封存,以便所有机组一起按顺序退役。这样使人和用于退役的设施和专用设备得到充分合理的应用,大大降低了退役成本。美国的三里岛核电厂2号机组在1979年发生事故后,经全面去污封存至今,等待运营的1号机组运行期满后(2014年)两个机组一起进行退役。

三 对我国核电厂退役的建议

我国大陆第一座并网发电的核电厂,是秦山核电厂一期机组,装机容量30万千瓦,设计寿命30年,于1991年运营,至今已20年,快到退役之期。紧跟其后的大亚湾核电厂(2×90万千瓦)和秦山二期(2×60万千瓦)……。根据国际社会有关核电厂退役经验,核电厂退役是涉及国家的法律法规、经济、环保、科学技术、社会和人们的心理承受能力等诸多因素的一项系统工程,稍有不慎,后果严重。我们在调研各国对退役的管理程序法规和导则[3]的制定时,各国间有较大的差别,因此我国核电厂退役,应在国家核安全局监督和指导下,使退役的管理程序更科学和更规范。

也许有人会说,我国核电厂退役要到2025年以后,现在提出来探讨为时过早。其实不然,因为核电厂的退役基金,在该电厂投入运营时就从电费中提取,就开始为核电厂退役积累资金,现在有些国家在设计建造核电厂的同时,就已思考将来的退役工作。我国虽有一些核设施的退役经验,其经费全部从国家财政支付,但核电厂退役不能由国家财政拨款,因在组建核电厂时,其资金来源是多样的,如:秦山核电厂是由国家出资;大亚湾核电厂则是国家与港澳合资;岭澳核电厂则是国家与地方(广东省)共建。这与国外某些核电厂在筹集资金建厂时有类似之处,国外核电厂退役时的许多经验值得我们虚心学习和认真探索:

(一)国外核电厂退役有比较完善的核电厂退役法律法规和管理程序

国外核电站退役有比较完善的法律法规和管理程序。目前我国有关核电厂退役的一些标准和导则与国外一些法规和管理程序相比还有待完善,如核电厂退役操作和验收标

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

准; 清洗解控标准; 免管放射性废物标准; 极低放废物标准以及一些实施细则等。因为这些法则、标准、导则和实施细则,是实现退役的准则和评价退役的依据,要向有退役经验的国家学习,使我国核电厂退役的法律法规和退役的管理程序,既与国际社会接轨又符合我国的国情,使实施退役作业者,在安全监督部门的监督和指导下,按照既定的法津法规进行和验收。

(二) 核电厂退役费用的积累

核电和其它电力(火电、水电) 工业一样,都是国家管制的垄断行业,各国政府都把核电厂退役作业视为企业的一种投资行为,并将费用计入电价中,最终从消费者手中提取。如美国的电力公司每度电收取 0.1 ~ 0.2 美分作为将来的退役基金,由美国核管理委员会(UANRC) 掌控。我国过去没有统一的规定,如秦山核电厂没有提取退役基金,而大亚湾核电厂则在每度电的成本中提取,现在我国在"国家核电发展中长期发展规划(2005 ~ 2020)"中,明确规定核电厂投入商业运营后,即可从核电成本中强制提取以积累核电厂退役基金,并存入中央财政设立的核电厂退役专项基金账户中。一座 100 万千瓦的核电机组其退役费是多少? 我们应提取多少退役基金? 美国现已将全部核电厂退役基金约 250 亿美元提取,而且还留有 100 多亿美元作为美国现正在运营的 104 个机组的核责任赔偿金,这样提取退役基金是否过多? 现在美国许多电力公司还纷纷下调核电厂退役基金,平均约 3.5 亿美元/堆。按世界经济合作与发展组织(OECD) 2003 年调查的退役费: 对压水堆(PWR) 大多为 200 ~ 500 美元/千瓦(电); 对沸水堆(BWR) 为 300 ~ 500 美元/千瓦(电),略高于表 1 所列数据。

我认为现在应组建一支专业技术队伍,对核电厂退役工程定额和概(预) 算办法进行调研,进而提出符合国情的、各种不同堆型的核电厂退役费用计算方式,再经核电经济专家和有关职能部门认同,并由国家核安全局行文执行,同时在实践中不断修改完善。

(三) 去污方法与去污器具的研发

对放射性污染的去除,在我国核工业的起步阶段就开始,并研发了一些有效的去污试剂,但比较单一,且可供选择的品种有限。改革开放后,我国科技工作者,向国外学习去污方法和去污试剂配伍技术[4,5],并结合国内实际开发了许多去污效果好的配方和剥离机械设备。如在化学去污方面: 利用表面活性剂产生的泡沫去污剂、氧化剂与酸碱联合去污、电化学去污、凝胶去污等都有喜人的成果; 在物理去污方面的表层剥离和超声去污等技术,以及机械去污用的高压水冲刷、磨、刮、刨等技术,这些技术对浅表面层污染的去除效果很好。但是对堆本体和堆内构件的去污,则显得无能为力。因为这些物件在强中子通量长期照射下被活化,如不锈钢中非放射性的^{54}Fe、^{59}Co、^{62}Ni,被活化成具有放射性的^{55}Fe、^{60}Co、^{63}Ni 。即: 钴-59 在中子的轰击下,吸收一个中子同时辐射出 γ 射线变成具有放射性的钴-60。而这些被活化了的同位素,又能与不锈钢内的非放射性同位素,进行同位素交换,于是具有放射性的^{55}Fe、^{60}Co、^{63}Ni 由表向里迁移(渗透) ,使一般的去污试剂与方法无法将它们清除。针对这种情况,国外正研究激光去污、微波去污[6] 等新技术应对(我国也在研发中) ,此外我们还要深入研究污染形成机理、污染物存在的物理和化学特性、去污染机制以及基材表面结构对去污的影响等,进而开发出一些有特效的去污试剂(渗透能力强可将深层内的污染物浸取出来) 和二次污染量少的去污方法。现在各种去污试剂和去污方法均有一定的局限性,所以实际的去污过程是多种技术措施的综合应用。

对那些污染严重、辐射强的设施或场地,我们必须采用一些远距离操作器具和遥控设备如远距离焊接与切割机、机器人等,这些器具在 20 世纪 80 年代我国已开始研制,但由于机构调整,至今尚显力不从心。现在使用的大型主从机械手、机器人等基本上是从国外进口的。其实我国不缺这方面的人才,建议有关部门精心组织、协调和给予财力的大力支持。我们相信在这一领域内,将来使用的机器人等遥控设施主要是本国产品。

去污的目的是降低器材、设施、厂房、场址等的放射性活度,以期达到安全地继续使用或不受限制地开放场址。各有核电厂退役的国家,均制定严格的控制标准,如美国已公布[7] 允许场址开放时,残存放射性主要指标[7] 我国已有军用核设施退役及场址无限制开放的实例,我们认为他们执行的标准,稍加修订就可以用于核电厂退役。

(四) 拆卸(毁) 技术

核电厂退役中的拆卸(毁) 工作,贯穿整个退役工程,它既要拆卸工艺系统、设备和仪表,又要拆卸(毁) 设施和厂房等建筑物,可以说它在退役工程中是十分关键的部分,工作量大持续时间长耗资最多且风险也最大。有核电厂退役的国家对此项工作十分重视,并将本国新的科技成果用于此项工程,保证资金充足,对重要工器具组织军工和民用工业共同攻关,提高了这项工程的现代化作业水平。在拆除(毁) 实践中使用了等离子孤切割、电弧锯切割、激光技术、微波技术、控制爆破和带磨料超高压水喷射技术等。

在核电厂退役工程中,要实施解体(拆毁) 技术的大致有: 堆本体(压力壳、格纳容器) 、堆内构件、主循环泵、一回路管道、稳压器、蒸汽发生器、生物屏蔽壁等。各国比较一致的做法是: 利用压力壳作为拆毁操作时的辐射屏蔽体和防尘罩,先将堆内放射性污染较强的组件(如热屏障等) 拆毁,使整个作业现场的辐射剂量大大降低。

我国已有 20 多年的核设施退役的经验,曾有从事核设施拆除和大型设备解体的队伍,他们中有掌握像等离子切割、电弧切割等的技术人才, 但却分散在不同的单位, 没有形成一支专业的骨干队伍, 也难追赶世界先进的拆除(毁) 技术。因为在国外,随着若干大型核设施先后完成退役任务,其退役技术又取得了重大进展,如在高辐射作业场所,使用遥控技术和行走机器人。有人预测在欧美主要核大国,将会出现提供核设施退役服务的专业公司和核设施退役市场。

我们认为建立适合我国各种堆型的规范化拆卸(毁) 方法和程序以及组建一支专业技术骨干队伍非常必要,他们可以在生产堆、实验堆的退役实践中积累经验,提高技能和创

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

建新的功能更好的拆卸(毁)工器具,克服我国目前生产的工器具和设备质量低、品种少的弊端。希望到 2025 年左右,我国实施核电厂退役工程时,所用的高精密 γ 谱仪、层析 γ 扫描仪、摇控切割设备、遥控取样装置和各具专长的机器人等均为国产品。

(五) 放射性废物的处置

核电厂退役过程中将产生大量放射性废物(含二次污染物)。一座大型(如 100 万千瓦) 核电机组,退役时将产生几十万吨放射性废物,在这些放射性废物中,所含放射性核素的种类、比活性、半衰期、毒性、辐射类型等差别很大,对他们的处理、处置、贮存、运输、环境评价和安全分析也要采取不同的方法。因此在核电退役过程中,从一开始就对放射性废物分类收集、分类存放、分类处理处置是十方重要的。IAEA 推荐过放射性废物分类标准,但各国并没有完全采用,而是根据本国情况提出分类系统。我国本着保障公众的健康和环境安全的原则,提出了技术上可行经济上合理尽量与 IAEA 标准一致的适合国情的“放射性废物分类标准”[8],它为我国核工业的发展和环境安全起到重要的作用,但是随着核工业的发展和公众安全意识的提高,我国的“放射性废物分类标准”有待完善,如在核电厂退役过程中产生的大量低放废物,其中有相当数量远低于低放废物标准,但又大于自然本底的极低放射废物,我国的分类标准中对它没有界定。对这类废物的研究,国际上各有不同,没有统一的定义[9]。我国对这类废物也尚未公布分类标准和规范的处置方法,但有科技工作者在做这方面的研究工作[9,10]。我们认为对极低放废物标准和规范处置方法的制定,是十分重要和势在必行的。

对核电厂退役中的中低放废物,完全可以采用正常运营时,产生的废物处理处置方法,但对高放废物的安全处置,因涉及确保核能可持续发展和环境保护的重大问题,还涉及到法律、道德、生态环境和人民群众心理等诸多问题。各国都十分重视,目前普遍认同的可行性方案是深部地质处置,即把高放废物处置在距地表深约 500 ~ 1000 米的地质体中,使之与人类生活圈隔离起来,这种处置高放废物的地下工程称为深地质层(高放废物) 处置库。美国建在尤卡山的深地质层处置库,花费 100 多亿美元后,奥巴马政府 2010 年已宣布停建,至今世界上尚无建成的深地质层处置库。我国在甘肃省北山地区选址建库,如无意外,2015 年选定场址,2035 年完成地下实验室的建造和有关实验,2050 年建成深地质层处置库,为我国核电厂的退役排忧解难。

[参考文献]

[1] 赵世信,林森. 核设施退役[M]. 北京: 原子能出版社, 1994.

[2] 李民权. 核电站退役问题的调研——兼论我国生产堆的退役处理[J]. 科技通讯,1987(1):12-17.

[3] IAEA. Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors IAEA,WS-G-2.1, Vienna 1999.

[4] Robert Noyes. Nuclear Waste Cleanup Technology and Opportunities[M]. New Jersey: Noyes Publications 1995.

[5] C. W. Blankingship, G. J. Carter, et al. Removal Action Report for the 233-S Plutonium Concentration Facility [R]. DOE/RL-97-08 1997.

[6] Joyce G. Freiwald et al. Laser-Based Coatings Removel DOE/MC/30359-96/C0594 1997.

[7] Enserch Inc., Department of Engergy Office of Environment Restoration [R]. D ecommissioning Handbook. DOE/EM-0142P, 1994.

[8] 国家环境保护局. 辐射防护规定[Z]GB8703-88.

[9] 罗上庚. 极低放废物的填埋处置[J]. 核安全,2009(1):31-38.

[10] 陈晓谋,等. 某极低放废物填埋场稳定性初步评价研究 [J]. 物探化探计算技术,2009, 31(4):405-408.

Investigation and Study of Nuclear Power Plant Decommission

——Some suggestions of nuclear power plant decommission in China

LI Min-quan, GUAN Yu-rong

(*University of South China*, *Hengyang* 421001, *China*)

Abstract: This article first introduced some stages of nuclear power plant decommission, and the example of some national of nuclear power plant decommissioning. Then it focus on further improvements of nuclear power plants decommission that should be considered, which includes five aspects: Laws and Regulation; Financial funds; Decontamination method; Disassembly/Demolition (Teardown); Radioactive waste treatment and disposal.

Key words: nuclear power plants; decommission; regulation; decontamination; disassembly/demolition(teardown); radioactive waste treatment and disposal

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net