



研究试验堆退役初步分析

刘 兵

中国核动力研究设计院 四川成都 610041

摘 要: 世界上很多研究堆经过几十年的营运后, 大部分已经达到退役年限。研究堆的运行不但产生了万吨级的放射性废物有待处理和处置, 而且反应堆本身也已成为很强的辐射源, 各部位都被不同程度的放射性核素污染和活化, 甚至生物屏蔽内也有很强的放射性。如此大量的放射性物质散置于现场, 随时都有可能污染环境, 危害周围居民的安全。因此有必要对反应堆退役工作开展研究。

关键词: 研究堆; 退役; 放射性; 辐射防护

中图分类号: C35

文献标识码: A

1 引言

核设施退役是核设施达到或超过设计寿期或者因为其他原因终止运行后所应采取的行动, 通过退役可将残留的放射性物质和其他有害物质的危害作用减少到可以接受的水平, 使厂址可以有限制的使用或可以无限制的开放和使用。

一般的设施实施退役是一个简单的过程, 所以不被人们重视。而核反应堆经过几十年的营运后, 不但产生了万吨级的放射性废物有待处理和处置, 而且反应堆本身也已成为很强的辐射源, 各部位都被不同程度的放射性核素污染和活化, 甚至生物屏蔽内也有很强的放射性, 总活度约为 $10^{16} \sim 10^{17}$ Bq。如此大量的放射性物质散置于现场, 随时都有可能污染环境, 危害周围居民的安全。因此, 反应堆退役是一项难度大、时间长、耗资多而非做不可的工作^[1]。

高通量工程试验堆 (HFETR) 建于中国核动力研究设计院, 自1979年12月首次达临界以来, 该堆已安全运行30年。但是HFETR最初的设计周期是20年, 现已超过了设计寿期。众所周知, HFETR是高通量中子研究堆, 它的安全退役将受到各方密切关注, 所以有必要对HFETR的退役做前期分析准备工作^[2]。

2 反应堆退役策略

按照国际原子能机构NUREG-0568的分类, 核设施的退役可以分为3级:

第一类称作立即拆除 (DECON): 核设施经过拆除和去污, 其厂址可以在短时间内达到非限制开放的程度。这种策略的优点是彻底、无后患, 省去了长期封存的维护监督费用和人力, 易于获得了解反应堆设计、运行人员的支持。缺点是拆除时的职业辐射较强, 要求对拆除和拆下的废物的处理处置有成熟可行的工艺。

第二类称作延缓拆除 (SAFSTOR): 核设施拆除后封存一段时期再去污, 其厂址可以达到非限制开放程度。延缓拆除又分为反应堆暂停于退役第一阶段或第二阶段, 即反应堆暂停后不拆除就立即封闭和局部拆除后再将堆芯安全封存, 待以后条件成熟后再拆除。这种策略的优点是拆除时工艺已成熟, 职业辐射也较低, 缺点是封闭或封存期间要安排维护和监管, 厂址也无法利用, 既耗资又耗时。

第三类称作就地埋葬 (ENTOMB): 污染物被置于一个长寿期的永久性构筑物 (如钢筋混凝土结构) 中, 进行适当的长期监护和连续监测, 直到厂址可以达到非限制开放的程度。就地埋葬又分为反应堆就地埋葬和在厂址内移位处置两种方案。就地埋葬适用于厂址污染较重, 难于再利用或事故之后厂址难于收拾的情况^[3]。

针对HFETR的特点, 认为采用第二类退役策略比较合理。

3 退役措施的制定

HFETR作为实验研究堆, 相比于商业规模的反应堆, 它所包容的放射性总活度要少很多。因此, 在编制退役方案时可以适当简化退役程序和措施。

3.1 编制退役方案的原则

核大国编制核设施退役方案, 一般都立足于本国的工业基础和技

术水平; 而发展中国家和一般有核国家编制核设施退役方案, 不排除适当引进国外的退役技术和设备。

假如核设施退役活动中没有提出任何附加要求, 则应按照下述原则编制退役的方案^[4]:

1) 充分利用原有建筑物的剩余寿命, 将放射性核素安全封存监护于原处, 推迟实施退役, 以求减少职业性辐射剂量和放射性废物产生量。

2) 以保证辐射安全为前提, 尽可能采用有效而完善的密闭措施, 最大限度地停运、调整和改造辅助系统, 以求节省管理和监测费用。

3) 退役期间需要增设的去污、废物分类、废物处理和废物暂存等设施, 应尽可能利用或改造原有的建筑物, 少建或不建新项目; 以求减少总体退役工作量、废物产生量、职业性辐射剂量和退役费用。

4) 运行期间和退役期间产生的放射性废物, 避免在退役现场或现场附近长期存放, 尽可能做到退役废物一次到位处置; 否则, 宁可推迟退役; 以求减少职业性辐射剂量和节省退役费用。

5) 实施退役应尽可能利用国内成熟的拆除技术和工具; 以求增加安全度, 减少职业性辐射剂量和退役费用。否则, 宁可推迟实施退役。

6) 完成退役, 恢复地貌。

3.2 退役需要完成的主要工作

核设施无论采用何种方案实施退役, 从最终停闭反应堆到完成退役需完成的主要工作如下:

1) 停堆冷却, 全部卸掉核燃料, 并将核材料运出现场;

2) 对核设施现场进行运行收尾和退役准备, 清理放射性物项;

3) 系统去污;

4) 将公共安全系统维修好, 或设置临时系统, 并正常、定期或不定期的投入运行;

5) 将工艺系统和核设施进行适当的封闭;

6) 拆除反应堆本体以外的全部设备、系统和设施;

7) 将运行废物和退役废物全部处理、处置或贮存起来;

8) 设备、仪表和材料回收;

9) 拆除反应堆本体;

10) 厂址去污, 恢复地貌, 不受限制地开放等。

3.3 退役过程中的辐射防护

核设施退役被人高度重视, 主要原因就是它的放射性作业, 并且是项开创性的工作。核设施退役实际上是一项放射性物类的作业和处置过程, 因此必须对退役过程做好辐射防护工作。而做好辐射防护工作的关键就是, 对退役核设施进行剂量普查和核素分析, 搞清退役核设施内包容的主要放射性核素和活度及其分布情况。

反应堆运行时, 堆芯周围的材料将受到最大程度的辐照, 从而其污染和活化也就自然是最严重的; 其次是一回路系统, 由于冷却剂受到辐照, 并且其中含有的因包壳破损而泄漏的裂变产物以及一些从包壳渗透出来的裂变产物的影响, 使冷却剂一回路中循环时对一回路的

材料也产生了相当大辐照；同时二回路工质也会受到一些影响，但相对较轻；其余的受污染则非常轻微，并且受较多因素影响。这样就比较容易有针对性地进行计算和测量，可以免除很多不必要的工作和费用支出，同时，测量人员的剂量也会减少。

3.3.1 放射性活度估计

靠近核设施堆芯处的材料都会被中子活化。可以对这种材料的感生残余活度进行计算。计算时需要有关数据，包括：中子通量及其能谱，停堆和关闭时间，元件辐照史，相应中子能谱的中子截面，元件材料组成等，了解了这些数据就可以估算出任何长寿命核素的活度值。

在热中子反应堆内，感生放射性核素主要是通过热中子的 (n, γ) 反应产生的。元素的某个稳定核素在热中子辐照下，通过 (n, γ) 反应产生的感生放射性核素的活度（单位：Bq）由下式确定^[5]：

$$Q_{\text{饱和}} = 0.6023 / \Phi \sigma P M A$$

式中， Φ 为靶体内的平均热中子通量密度（ $n/cm^2 s$ ）；

P为靶核的同位素丰度；

M为靶体质量，g；

A为靶核的原子量；

τ 为辐照时间；

3.3.2 退役过程中核素活化及图谱分析

分析其它反应堆退役过程活化产物测量比较结果表明，无论长期管理还是短期管理，只有少数几个元素是重要的。比如对混凝土活化作用影响较大的元素有氯、钙、铁、镍、钴、银、钐，这些元素的浓度与混凝土的原始组成成分即水泥、石子和沙子的特性和来源有关。

沾污包括许多种核素，各种核素所占的比例受到各种因素的影响，包括：

- 1) 核设施类型；
- 2) 设施运行时间，设施关闭后的闲置时间；
- 3) 设施运行期间的事故；
- 4) 沾污物的属性，如水、CO₂、气溶胶等；
- 5) 沾污时的条件：包括温度，常规沾污或是偶然沾污等；
- 6) 受沾污的材料属性：例如钢铁、混凝土等。

然后可对每一主要部件或每一类废料确定其典型核素谱，从而可以从某一核素的活性及其相关核素谱对沾污程度做出估计。

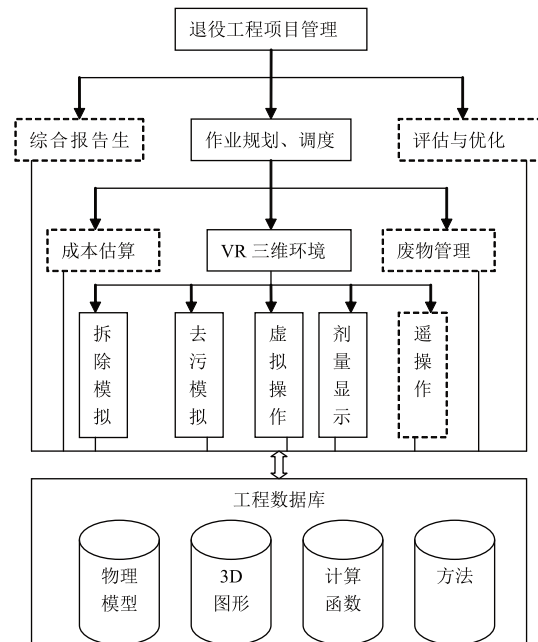
以上讲述的是核设施正常退役的情况。如果核设施运行期间，由于发生不可消除的事故，或事故虽然已被消除，但已不能恢复正常运行，因而迫使核设施退役，这时应弄清事故的性质，其次将事故的影响后果估量准确。编制退役措施的时候可以采用两种方法，其一是先排除事故影响，然后按正常方式退役，其二是编制事故核设施退役方案。

4 先进反应堆退役技术展望

当前世界上有多座反应堆相继进入退役期，相信退役工作将会受到空前重视，并且随着科学技术的发展，世界各国将退役工作的重点放在了开发适用于退役工艺的最优化方法和途径，应用虚拟现实技术实现了反应堆设施模拟、环境控制事先分析等^[6]。

虚拟现实技术具有沉浸性、交互性、构想性的特点，基于虚拟现实技术实现反应堆退役模拟系统，可提供在虚拟堆环境中进行观察、分析、操作和控制的能力。通过在虚拟堆上做各种“试验”，辅助设计多种可行的退役方案，计算人员受照剂量，进行废物分类、数量估算和可视化相关数据，进行培训、演练等，从而为退役在“稳妥”和“可控”两个方面的决策提供可靠的技术依据。

鉴于退役工程的复杂性，退役的模拟系统属于系统工程，应该按阶段、分步骤进行。对退役工程主要技术问题进行分析的基础上，确定出阶段目标：初期实现对于反应堆的本体和周边环境、去污过程、拆解过程、辐照剂量分布的模拟；中期主要研究废物管理、遥操作和退役成本估算等；长远目标是实现退役方案的优化、比较等。系统功能结构见下图：



5 结论

现在我国的核反应堆很多正在和已经运行到设计寿命期，但相关的技术和经验比较缺乏，而随着中国核能利用力度的加大，将有越来越多的反应堆面临退役的问题。国际上已经有很多反应堆退役，其退役技术和经验也积累了很多，但真正让退役反应堆达到无害程度的尚无样例，仍有待人们进一步研究和解决。国家要想在尽可能低地污染或不污染环境的情况下大规模的利用核能，那么除了做好利用过程的防护外，核设施对环境无影响的退役将是最为重要的，这就要求我们进一步加强退役技术的研究工作。

参考文献：

- [1] 滕雁，俞继阳等. 核反应堆退役初期辐射特性的探讨. 核安全，2005年第3期。
- [2] 高通量工程试验堆（HFETR）运行十年论文集. 四川科学出版社。