

# 俄罗斯海军的核废料

李雨

中图分类号: R75<sup>+</sup>2 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2009)04-0462-03

**【摘要】** 目的 了解俄罗斯海军核废料的产生、处理措施及面临的问题。方法 介绍俄罗斯海军的历史沿革、退役核军事装备的分布及现状。结果 190多艘陈旧核潜艇的退役,大量的核废料等待处理。俄罗斯为此制定了相应的政策和专用处理设备。但仍然面临大量的问题需要解决。结论 对于核废料的处理,俄罗斯的经验教训都值得借鉴。

**【关键词】** 俄罗斯; 海军; 核废料

俄罗斯海军及其前身苏联海军分为几个舰队组成部分: 北方舰队, 太平洋舰队, 波罗的海舰队, 黑海舰队和里海分舰队。俄罗斯及前苏联拥有世界上最为庞大的核动力舰船部队, 因为冷战时期军事任务和海洋地理环境所决定, 俄罗斯海军的核动力舰船主要分布在北方舰队和太平洋舰队, 苏联解体以后, 190多艘旧式核潜艇在短短几年中相继退役。这些型号各异的庞然大物, 多数未及取出核燃料即被弃置于海底“潜艇坟场”中, 迅速对其进行无害化处理就成为俄海军面临的头等大事。

## 1 俄罗斯海军北方舰队核废料问题最为突出

北方舰队是俄海军4大舰队中最年轻和最强大的舰队。1916年, 根据列宁的指示, 苏维埃建立了北德维纳区舰队, 又称北冰洋区舰队, 从苏维埃时期起北方舰队就战功显赫, 在二战期间北方舰队经受了严峻的考验, 顶住了德军的强大攻势, 随后积蓄力量, 为苏军的反攻作出了贡献。俄海军北方舰队主要部署在北莫尔斯科、摩尔曼斯克、波利亚尔内、北德文斯克等10多个基地和军港。司令部所在地和主要基地是位于巴伦支海不冻的科拉湾港口城市北莫尔斯科。旗舰是“彼得大帝”号导弹巡洋舰。

近年资料显示北方舰队装备有潜艇42艘(其中战略导弹核潜艇14艘、攻击型潜艇28艘), 水面作战舰艇18艘(其中航空母舰1艘、巡洋舰8艘、导弹驱逐舰5艘、护卫舰4艘), 海军航空兵装备作战飞机75架、战斗直升机30架。

俄罗斯退役的核潜艇中, 88%属于北方舰队; 52%的潜艇的反应堆里还装有核燃料。已经从潜艇壳体取出了15个反应堆舱待存储。北方舰队退役的核潜艇被废弃在格列米哈基地、北德文斯克、维佳沃基地、什科瓦尔修船厂、谢夫马尔布奇修船厂、加德日耶沃基地等地。第一、二代潜艇的拆除工作在上世纪九十年代中期已经着手进行, 第三代潜艇的拆除工作也在2005年进入了实施阶段。

作者单位: 上海第二军医大学海医系放射医学教研室, 上海 200433  
作者简介: 李雨(1956~), 男, 河南省人, 副教授, 研究方向: 放射卫生学。  
通讯作者: 李雨(E-mail: simu1y@163.com)

北方舰队的海军基地大部分建造于二战之后的“冷战”期间, 当时核潜艇和各种战略导弹系统被赋予最重要的地位。北方舰队的核动力舰船在科拉半岛的5个海军基地活动, 一些基地还分布不止一个区域, 所以核动力舰船的活动地点(驻泊地)可达7个。其中只有2个基地可以在陆上储存乏核燃料, 6个基地可以储存固态和液态放射性废物。

与当年核潜艇建造的急迫发展相比, 其基地和造船厂的技术服务保障设施的建造大大滞后, 一般这个时差约5~8年之多。1958年第一代核潜艇下水, 而相应处理乏核燃料和放射性废物的设施在60年代初期才开始使用, 后续各型核潜艇也存在同样问题。1981年第一艘台风级核潜艇下水, 近10年之后在海军基地的入坞设施未能完工。尤其是前苏联解体以后, 俄罗斯缺乏足够的资金处理大量的报废核潜艇, 使得核潜艇核废料的处理成为一个日益严重的灾难性问题, 这在俄罗斯北方舰队表现尤为突出, 周边国家对此可能造成的环境灾难忧心忡忡。

一些规划中的和在建中的处理和加工放射性废物的设施, 一直没有能够完成, 例如在阿拉海湾建造的处理液态放射性废物的设施就是这种情况。在核潜艇服役基地进行乏核燃料组件卸载的工作始终未能完整实施, 对放射性废物的处理加工缺乏重视的情况是缺乏技术和财政保障造成的。在这些退役核潜艇中, 有126艘现在仍停在码头, 其核反应堆中的核燃料也没有卸载。全部拆除这些潜艇需要39亿美元资金, 而2005年俄政府用于改进全国核安全措施的预算只有7000万美元。核泄漏的传言令北欧各国都陷入恐慌, 为尽早消除隐患, 俄方现在正积极争取英、德、日等国的援助, 据信将获得总额达20亿美元的资金。官方报告称, 俄海军有望在2012年左右完成退役核潜艇的全部处理工程。

## 2 俄罗斯海军放射性废物的产生及其处理过程

2.1 产生及其早期处理过程 核反应堆的使用, 维修和退役都会生成放射性废物, 这些放射性物质本身又必须被处理, 转运和储存。在正常情况下大量的乏核燃料和放射性废物产生于反应堆更换核燃料的过程。早期的俄罗斯核潜艇通常在运

要2个测点的综合场强大于 $1V/m$  最高为 $1.19V/m$  有97.7%的测点的综合场强小于 $1V/m$  南京市郊区县电磁辐射综合场强处于较低水平。由于电磁辐射看不见、摸不着, 容易引发人们的恐惧心理<sup>[3]</sup>。应该加强电磁辐射知识的普及和宣传, 让人们了解居住环境中电磁辐射水平, 使他们能正确对待电磁辐射问题, 减少不必要的投诉与纠纷, 构造和谐的生活环境。

## 参考文献:

- [1] HJ/T10 2-1996 辐射环境保护管理导则—电磁辐射监测仪器和方法[S].
- [2] GB8702-88 电磁辐射防护规定[S].
- [3] 庄振明, 宋永忠, 谢咏梅, 等. 居民区电信节点机房电磁环境状况调查[J]. 中国辐射卫生, 2008, 17(4): 507.

(收稿日期: 2009-05-04)

行 7~10<sup>a</sup> 更换核燃料, 这个时间长短取决于反应堆使用的铀浓度高低。

目前俄罗斯核潜艇运行 3~5<sup>a</sup> 即需更换核燃料, 自从 1980 年以来, 已经将北方舰队闲置核潜艇的核燃料从反应堆里撤除。早期更换核燃料是在干船坞进行, 现在这个操作可以在停靠码头的潜艇和工作船之间进行, 这项工作相当耗时且危险。

俄罗斯核潜艇需要反应堆熄火冷却 90d 以上方可进行核燃料更换。卸出反应堆核燃料需要历时一个月左右, 而装载新的核燃料则需 2~3 个月, 核燃料的换装需要先将反应堆的顶盖去除, 还需要采取一些预防放射性尘埃产生的措施。将一回路的冷却水阻断, 反应堆核燃料组件逐个被取出。核燃料组件被置于特殊的金属容器, 由工作船的吊车起吊置于船上存放。当全部核燃料组件都被取出后, 进行彻底的反应堆检修, 加入新核燃料, 加注新的一回路冷却剂, 紧固反应堆顶盖并加以封焊。这个更换核燃料过程约生成 10<sup>m<sup>3</sup></sup> 高放射性强度的水, 也有固体放射性废物生成, 如反应堆的控制棒, 堆内的一些残余物, 和在整个操作中被严重污染的设备等等。更换反应堆各种滤过装置会生成大约 1<sup>m<sup>3</sup></sup> 的高放射性离子交换剂和 2~3<sup>m<sup>3</sup></sup> 放射性废水, 被更换的堆内结构部件应被视为放射性废物处理。通常一次更换核燃料会产生总量为 155~200<sup>m<sup>3</sup></sup> 的放射性废物。

储存在北方舰队的放射性废物大多来源于对发生事故核潜艇的修理过程, 而这些事故尤其容易发生于核燃料的更换操作。反应堆运行时经常遇到的问题是核燃料组件的破裂, 结果就导致更频繁地更换核燃料组件。

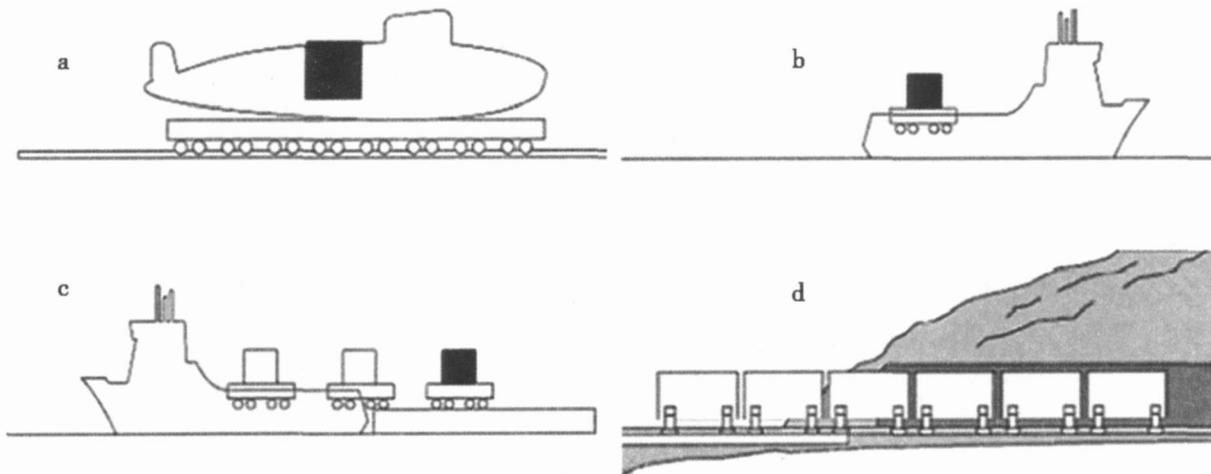
在科拉半岛各个海军基地之间有相当大量的乏核燃料运输。目前一共有大约 7 000<sup>m<sup>3</sup></sup> 中低活度的放射性液体废物存在, 其总的放射性强度约为 3 7TBq, 高放射性活度的废水则置于浮于岸边的槽罐或者在工作船和其它运输船中储存。每

年放射性废水的生成量约 2 000~2 500<sup>m<sup>3</sup></sup>。科拉半岛所有的储存设施已经告罄, 情况已经比较危急。

还有约 8 000<sup>m<sup>3</sup></sup> 中低放射性活度的固体放射性废物储存在北方舰队的基地和造船厂。总放射性强度约为 37TBq, 这些固体放射性废物被储存在混凝土结构, 置于船上或者旷野。每年生成约 1 000<sup>m<sup>3</sup></sup> 的固体放射性废物, 鉴于退役核潜艇的增加, 固体放射性废物的量也会大量增加。北方舰队没有处理固体放射性废物的设施, 这类经过焚烧和压缩的放射性废物也占据不少相应的储存场地。

上世纪八十年代中期大量老旧核潜艇在苏军服役。多数的潜艇逐渐老化需要修理, 有些甚至会在船只修理厂待上 10 年。当时真正退役的只是那些核燃料组件严重损坏而不能补给燃料的潜艇。这些潜艇要么被废弃, 要么被沉进了大海。上世纪九十年代中期继续退役了 6 艘发生过意外损坏核燃料组件的核潜艇, 这六艘核潜艇 4 艘属于太平洋舰队, 2 艘属于北方舰队。因为这些潜艇不能按常规方法拆除, 孔雀石设计局专门为这些潜艇的拆除制定了计划, 并且向俄罗斯海军申请了专项资金。

科拉半岛阿拉湾基地内有一个 400<sup>m</sup> 长的大型隧道, 最初是计划用来隐藏和保护核潜艇。现在被提议可以用来存储 100~130 个反应堆舱(图 1) 位于塞瓦斯托波尔的造船厂制造了起重机, 专门将反应堆舱从驳船提到隧道。俄罗斯联邦政府发行的存储许可证中规定反应堆舱能在该隧道内存放 70~100 年。但是该隧道使用的前提是这些隧道必须保持干燥, 利用阿拉湾隧道进行长期存储的计划遭到了许多方面的批评, 海水淹没隧道导致放射性泄露的可能性引起了极大的关注。该储存方案及其贮存环境与俄罗斯环境保护法案发生冲突, 当前的法律禁止将放射性废物存放在可能发生重大泄露入海的危险地方。



(a) 切除反应堆部分。(b) 然后将反应堆部分装上停在岸边运输船, 将其运到阿拉湾。(c) 在阿拉湾反应堆被带到陆上。(d) 放进隧道进行长期存储。

图 1 俄罗斯北方舰队处理退役潜艇反应堆的方法。

2.2 阿拉湾基地的核废料场 在科拉半岛多处海军基地中, 阿拉湾基地是唯一不停泊核潜艇的地方。它坐落在整个基地群的西侧, 可以经水路和公路抵达。俄罗斯北方舰队最大的放射性废物和乏核燃料储存场就在这里(图 2 图 3)。它的使用面积约 2 公顷, 其中一些主要建筑设施如下。

a 从船舶卸载乏核燃料到汽车的码头。 b 码头设施。 c 对相关工作人员进行辐射监护和处理的辐射防护场所。 d 液态放射性物质的净化装置, 一直未能使用, 后改为它用目的。 e 是乏核燃料储存池, 1989 年被清理后停止使用。 f 是 3 个大型的半地下混凝土设施, 用来“干式储存”乏核燃料。 g 用于乏核燃料转运的吊车。 h 装有乏核燃料容器的储存位置。 i 用于储存固态放射性废物的混凝土窖, 它被分成不同的隔间和敞开

部分。

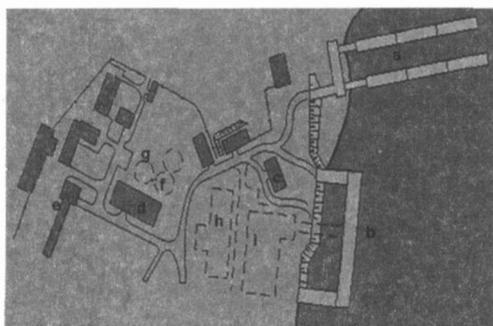


图 2 阿拉湾基地核废料场功能分佈示意图

a将各个海军基地和造船厂的乏核燃料组件容器用工作船运送到阿拉湾。 b工作船本身的起重设备将核燃料容器(运输容器)吊装到码头上的自卸卡车上。 c卡车行使 300m以外到达储藏窖。 d起重机将运输容器从卡车卸载到储藏窖旁边的混凝土平台。 e稍后起吊这些核燃料组件容器放入储藏窖内。

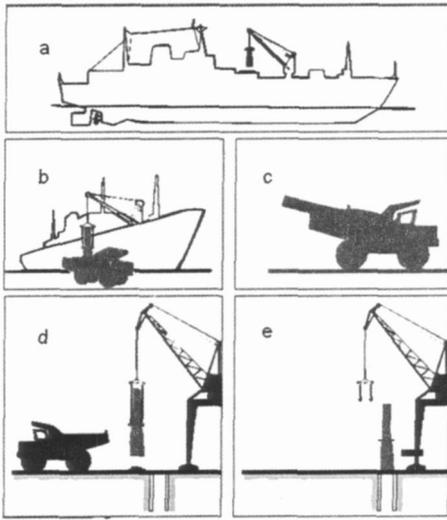


图3 乏核燃料组件被转运到阿拉湾储藏窖的步骤示意图

除了3个储藏窖以外,在阿拉湾还有一个露天存放52个乏核燃料组件容器的地方。这是在1962年前苏联第一代核潜艇最早更换的核燃料。经历近半个世纪的锈蚀,这些容器的详细状况已经很难得知。一些容器的顶盖破裂,水分进入直接与核燃料接触使之损坏,导致无法用常规的方法转运进行运输和加工处理,这个储存点已经被放射性污染。

2.3 俄罗斯的核燃料循环 核反应堆乏核燃料组件含有大量复杂的放射性同位素成分(表1、表2)将其分离纯化后重新加以应用是一个世界各核大国为之努力多年的目标。前苏联制定了“封闭循环应用”的核燃料政策,其处理程序是将乏燃料组件溶解于酸中,使铀和钚与其它元素分离,再经过一系列步骤制造成新的核燃料组件。在解决了一系列技术问题之后,于上世纪60年代中期在俄罗斯乌拉尔中部玛雅克化学联合企业建立了处理乏燃料的专用设施,称之为“RT-1”。1976年首次使用该设施,首次专列在1973年从摩尔曼斯克驶抵玛雅克。

表1 俄罗斯动力堆乏燃料含有中、长寿命裂变产物种类及其半衰期

| 核素名称          | 半衰期 $T_{1/2}$ (a) |
|---------------|-------------------|
| Sr-90, Cs-137 | 30                |
| Sn-15         | 87                |
| Sn-126        | 10.5              |
| Tc-99         | $2.1 \times 10^5$ |
| Zr-93         | $1.5 \times 10^6$ |
| Cs-135        | $2.3 \times 10^6$ |
| Pd-107        | $6.5 \times 10^6$ |

表2 俄罗斯 VVER-1000 和 RBMK-1000 反应堆乏燃料冷却 0.5 a 以后长寿命裂变产物和铀系核素的浓度 (g/t)

| 核素     | VVER | RBMK | 核素     | VVER | RBMK |
|--------|------|------|--------|------|------|
| Se-79  | 5.9  | 3.5  | Np-237 | 620  | 150  |
| Sr-90  | 680  | 390  | Pu-238 | 126  | 69   |
| Zr-93  | 910  | 530  | Pu-239 | 5330 | 2630 |
| Tc-99  | 590  | 600  | Pu-240 | 2420 | 2190 |
| Pd-107 | 250  | 200  | Pu-241 | 1470 | 710  |
| Sn-126 | 22   | 15   | Pu-242 | 580  | 510  |
| I-129  | 220  | 140  | Am-241 | 72   | 36   |
| Cs-135 | 420  | 220  | Am-243 | 120  | 74   |
| Cs-137 | 1460 | 900  | Cm-242 | 6.1  | 5.2  |
| Sm-151 | 15   | 4.0  | Cm-244 | 46   | 8.1  |

因为铁路线不能抵达储存乏燃料组件的阿拉湾和其他海湾,所以将核潜艇反应堆的乏燃料组件运往玛雅克处理工厂需要经过2个步骤:①用北方舰队的特种运输船将乏燃料组件经海路从上述海湾运至转运场。②在转运场将北方舰队特种运输船装载的乏燃料组件转卸到火车上。按照俄罗斯核工业部和海军的规定,使用特殊的运输包装容器“TUK”实施乏核燃料的转运。每一TUK有防护罩(外层容器)和封闭罐(内套管)两部分组成,从科拉半岛到乌拉尔玛雅克有专用的核乏燃料转运路线,使用TUK-18专用列车将其从摩尔曼斯克运至目的地。俄海军装备有50个TUK重型核材料容器,其中一半以上归北方舰队所有,可以一次运输2~3个反应堆堆芯。

俄罗斯的核燃料循环遵循以下几点原则:①自大功率沸腾管式反应堆(RBMK)的乏燃料不进行后处理,暂时贮存在核场址。②来自水-水型动力堆(VVER-1000)的乏燃料不进行后处理,一部分贮存在电站场址,一部分贮存在核能部的克拉斯诺亚尔斯克。③VVER-440反应堆、研究堆、BN-600快堆和海军核反应堆的乏燃料在玛雅克企业RT-1厂进行后处理。再生出来的铀用于制造RBMK反应堆的燃料组件。④乏燃料的后处理使用“湿法”,即普雷克斯(磷酸三丁酯)工艺。该工艺的放射性核素的分离因子很高,但会产生大量长寿命放射性废液。其中钚和镅被分别萃取出来再直接贮存,不进行使用。镅和镅的同位素留在裂变产物混合物中不被萃取出来。这一混合物部分以液体形式贮存,部分以固体形式贮存。分离Am和Cm的技术尚未开发成功。俄罗斯的国防工业产生大量的核废物,目前俄罗斯积存的乏燃料大约有14000吨,总放射性为  $1.85 \times 10^{11}$  GBq。

俄罗斯政府批准的“21世纪前半期俄罗斯核能的发展策略”确定了核燃料闭合循环的核能策略。其中武器级钚的使用是发展未来闭合核燃料循环技术的第一阶段。这一目标可在BN-800和BREST-1200快堆启动以后实现。但是使用这些技术将会增加高放长寿命裂变产物和铀系元素的产量。

(收稿日期:2009-04-04)

参加期刊编校无差错承诺活动