

文章编号: 0258-0926(2017)S2-0115-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2017.S2.0115

核动力装置退役中的低污染金属废物处理

范 凯, 黄文涛, 王用超, 姜圣翰

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要:核动力装置退役拆解时将产生大量金属废物, 对于其中存在放射性污染的部分的处理应遵循相应的分类与处理准则。在分析国际国内标准要求的基础上, 提出了可行的分类与处理方案, 重点在于如何对低污染金属废物进行有限制再利用。通过某核动力装置退役工程的实际应用, 验证了其实现废物最小化、降低处置成本的作用。

关键词:核动力装置退役; 放射性金属废物; 有限制再利用

中图分类号: TL94 文献标志码: A

Disposal of Low-Polluting Metal Wastes in Decommissioning of Nuclear Power Plants

Fan Kai, Huang Wentao, Wang Yongchao, Jang Shenghan

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Nuclear power plant decommissioning will produce large amounts of metal wastes, and the disposal of the parts with radioactive contamination should follow the appropriate classification and processing guidelines. Based on the analysis of international and domestic standards, this paper puts forward the feasible classification and treatment plan, focusing on the restricted use of low-polluting metal waste. The practical application in a nuclear power plant decommissioning project verified that it can minimize the wastes and reduce the cost of disposal.

Key words: Nuclear power plant decommissioning, Radioactive metal waste, Restricted use

0 引言

退役是核动力装置全寿期管理的最终环节。核动力装置及其结构材料完全拆解后将产生上百吨的金属废物, 其中大部分放射性水平很低, 仅略高于清洁解控水平, 如果全部作为低放废物处理与处置, 代价过于高昂。要在工程中贯彻废物最小化原则, 降低处理处置成本, 就需要在符合国家法律、法规、标准的前提下, 分析和论证对低污染的金属废物实施清洁解控和有限制再利用的可行性, 并制定出有可操作性的废物分类与处理方案, 以细化和补充现有的退役废物管理体系。

1 金属废物分类方法

1.1 废物分类标准

由于放射性废物种类繁多, 不同类型的废物

形态、放射性水平、半衰期等不尽相同, 需要采取有差别的管理措施。对放射性废物实行分类管理是国际通行做法, 是国内外放射性废物管理长期经验的总结。我国现行的放射性废物分类标准 (GB 9133—1995) 主要依据国际原子能机构 (IAEA) 1994 年版标准 (IAEA Safety Standards Series No. 111-G-1.1: Classification of Radioactive Waste) 制定, 总体上将放射性废物分为高、中、低 3 个级别。由于该标准发布时间早, 缺乏与处置的直接联系, 已不能适应废物管理现状。随着各国放射性废物处置实践的增加与经验积累, 以处置方式为导向来确定废物分类逐渐成为共识, 其中将再循环、再利用物料和极低放废物与传统的低放废物明确区分尤其受到关注。因此, IAEA 2009 年版标准 (IAEA Safety Standards

收稿日期: 2017-08-10; 修回日期: 2017-11-30

作者简介: 范 凯 (1982—), 男, 高级工程师, 现从事核反应堆运行、维修、退役项目管理工作

Series No. GSG-1: Classification of Radioactive Waste)提出了一套涵盖所有放射性废物来源的分类方法,并相应介绍了不同放射性水平、核素及半衰期的废物的处置原则和处置方式^[1]。

紧跟 IAEA 在废物分类与处置理念上的进步,我国也在总结实践经验的基础上,先后发布了 GB 14500、GB 27742、GB/T 17567、GB/T 28178 等标准,明确提出了免管物料、再循环再利用物料和极低放废物的分类限值,介绍了相应的解控使用^[2]、熔炼再利用^[3]与就近填埋等处理或处置方式。因此,将退役处置产生的金属废物,根据放射性水平和污染程度的高低,进一步划分为免管金属废物、有限制再利用金属废物、低放废物,是符合国际国内标准要求的,与各类废物最终不同的处理与处置去向相适应。

1.2 金属废物的分类依据

针对固体废物,其所含核素种类及相应核素的比活度是分类的基本依据。通过放射性存留量计算和实际取样分析,退役处置产生的金属材料存在 ^{60}Co 、 ^{55}Fe 、 ^{63}Ni 三种主要核素,且 ^{60}Co 与 ^{63}Ni 活度为同一量级, ^{55}Fe 活度仅比前 2 种核素高 1 个量级。由于标准中 ^{55}Fe 、 ^{63}Ni 的免管水平和清洁解控水平是 ^{60}Co 的 $10^3\sim 10^4$ 倍,且实际工作中, ^{60}Co 易于测量, ^{55}Fe 和 ^{63}Ni 难于测量,所以根据 ^{60}Co 比活度来进行金属废物的分类,既可以保证其他 2 种核素活度在该级别废物相应的限值内,又具有良好的可操作性。此外,个别位置检查到极少量 ^{54}Mn 、 $^{110}\text{Ag}^m$,来源于废液或废树脂污染,由于这 2 种核素的实测活度均比 ^{60}Co 低 2 个量级,而标准中要求的免管水平与 ^{60}Co 相当,所以此类污染金属以 ^{60}Co 比活度作为分类指标是合适的。

虽然金属废物的分类主要考察 ^{60}Co 比活度,但若完全通过取样和能谱分析进行活度测量,工作周期将极为漫长,为此采用了 GB/T 17947 推荐的方法,即建立辐射水平与 ^{60}Co 活度的换算关系,进而判明废物级别^[4]。

1.3 金属废物的分类限值

1.3.1 免管金属废物 免管金属废物指放射性水平极低,可免于辐射防护监管的金属物料,属于豁免废物(EW)。我国现行标准中,GB 27742 适用于大批量(大于 1 t)物料,小批量物料则按

照 GB 18871 附录 A 执行,故此免管金属废物中所含核素的活度浓度上限值见表 1,表面污染的上限值见表 2。

表 1 人工放射性核素免管浓度值

放射性核素	^{54}Mn	^{55}Fe	^{60}Co	^{63}Ni	$^{110}\text{Ag}^m$
免管浓度/ $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$	0.1	1000	0.1	100	0.1

表 2 物料的表面污染控制水平 Bq/cm^2

α 放射性物质		β 放射性物质
极毒性	其他	
0.08	0.8	0.8

1.3.2 有限制再利用金属废物 有限制再利用金属废物指放射性水平略高于清洁解控水平,但经专用熔炼设施去污处理后可在核工业行业内进行有限制再利用的金属物料,此类废物的放射性水平与极低放废物(VLLW)大致相当。

由于污染钢铁中所含的放射性核素在熔炼过程中会部分进入熔渣及尾气中,使得最终形成的钢水、钢锭等材料中放射性水平降低。根据国内熔炼厂商接收处理污染金属废物的实践情况,当来料的表面 α 污染水平 $25 \text{ Bq}/\text{cm}^2$ 、 β 污染水平 $40 \text{ Bq}/\text{cm}^2$ 时,经清洗去污、调配料和熔炼去污后,生产的钢铁中放射性核素比活度满足循环再利用的要求,可用于核行业内再利用。因此将低污染金属废物移交专用熔炼设施去污后有限制再利用的指标确定为 β 污染水平在 $0.8\sim 40 \text{ Bq}/\text{cm}^2$ 范围内。

经熔炼去污后的钢铁材料,应满足 GB/T 17567 中规定的再循环、再利用的清洁解控水平要求,详见表 3。表中所列限值为单一核素的清洁解控水平,当熔炼后的钢铁材料中含有多种放射性核素时,则应满足式(1)的要求:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{li}} \leq 1 \quad (1)$$

式中, C_i 为放射性核素 i 在所考虑物料中的活度

表 3 污染钢铁再循环、再利用的清洁解控水平

核素	^{54}Mn	^{55}Fe	^{60}Co	^{63}Ni
解控水平/ $\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$	0.4	1×10^4	0.1	1×10^4

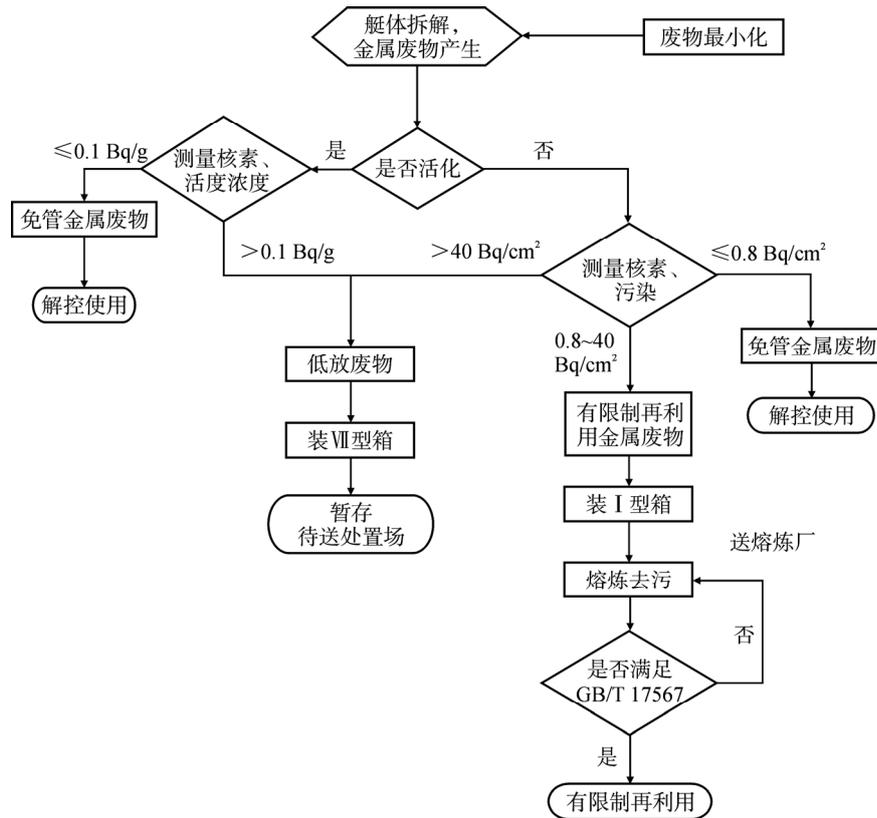


图 1 金属废物分类与处理流程

Fig. 1 Process of Classification and Treatment of Metal Waste

浓度，Bq/g； C_{li} 为放射性核素*i*在物料中的清洁解控水平，Bq/g；*n*为物料中放射性污染核素的种类数。

1.3.3 低放废物 低放废物指其放射性高于有限制再利用水平，需进行严格的隔离和限制，只能在近地表形式的放射性固体废物处置场中处置的废物。确定其分类的限值为：对于体污染的金属废物，当所含核素的活度浓度高于免管水平，同时不超过 4×10^6 Bq/kg 时，即为低放废物；对于仅存在表面污染的金属废物，当其 β 污染水平高于 40 Bq/cm^2 时，即为低放废物。

2 金属废物来源

某退役核动力装置结构污染与活化取样分析结果显示，反应堆底部金属结构材料已活化，平均活度浓度为 56.06 Bq/g ，是低放废物；反应堆顶部金属结构污染轻微，活度浓度范围为 $0.04 \sim 0.07 \text{ Bq/g}$ ，是免管物料；其余反应堆及一回路厂房金属结构材料表面 β 污染水平未超过 40 Bq/cm^2 ，是有限制再利用金属废物。

3 处理方案

3.1 整体情况

按金属废物的放射性活度浓度和污染水平由低到高分为 3 类，分别是免管金属废物、有限制再利用金属废物、低放废物，免管金属废物解控使用，有限制再利用金属废物送专用熔炼设施去污处理后再利用，低放废物装箱暂存送最终处置场。方案的分类与处置流程见图 1。

3.2 免管金属废物处理

根据 GB 27742 的规定，免管物料在获得审管部门同意后，只要不用于标准中明确限制的用途，可以直接解控使用，其放射性管制的要求相对较低。一般情况下，免管物料的处置方式有以下 2 种：可直接解控使用；到普通的钢铁熔炼厂熔炼后成为原材料使用，制造成更为广泛的产品。

3.3 有限制再利用金属废物处理

对于退役拆解产生的略超过免管水平的低污染金属废物，经专用熔炼去污设施处理后，其污染水平降低，可满足再循环、再利用的清洁解控

原则。因此,低污染的可再利用物料应认真区分,根据其放射性水平略高于免管物料的特点采取适当的管制措施,如定点收集和存放、保持隔离与加强监测等。由于该类物料处理需外运至熔炼厂,为保证路途安全,将其装入符合 EJ 1076 标准的型钢箱中。

3.4 低放金属废物处理

该类废物的放射性水平高于有限制再利用金属废物,需采取相对严格的管控措施,及时装入型废物包装箱中,装箱完成后进行放射性水平和污染水平测量。低放金属废物经暂存后,最终送国家中低放固体废物处置场永久处置。

4 方案的适用性和可行性分析

(1) 废物分类依靠的判别指标是所含放射性核素的活度浓度或表面污染检测结果。这 2 种检测项目需采用的方法和设备成熟可靠。通过对待处置物项进行放射性水平和污染检测,较为全面地掌握源项情况,拆解现场还具备各类废物的收集、存放和转运条件。因此,金属废物分类方案是适用和可行的。

(2) 退役拆解产生的免管金属废物的再加工或熔炼处理工艺与普通的废旧金属处理相同,在相关行业现有的技术条件下成熟可行。且金属物料的解控使用可以实现废物量的减少,利于发展循环经济,从废物处置的经济性来看也适宜。

(3) 退役拆解产生的有限制再利用金属废物通过专用的熔炼去污设施处理达到再循环、再利用标准后可进行有限制的再利用,是具有同类项目的成功应用为基础的,国内某核设施退役已采用过该方式处置相应的废金属。这些低污染的金

属废物通过送至国内熔炼厂商的熔炼去污设施处理后,进一步加工成铀矿开采机械设备易损零部件,成功实现了再利用,具备良好的可行性。从废物管理角度,低污染金属废物的再循环、再利用与免管物料的解控使用相结合,可以最大程度减少放射性金属废物量,降低废物处置成本,能够创造较好的社会效益,因此这样的处置方案是适宜的。

5 结束语

在某核动力装置退役处置工程实践中,采用了本文提出的将金属废物按放射性水平高低划分为免管金属废物、有限制再利用金属废物、低放废物并分类释放、利用、处置的方案,其中一百余吨有限制再利用金属废物送至专业厂商熔炼去污后进行再循环再利用,相比作为低放废物处置节省经费数百万元,最终在符合安全要求的情况下,实现了废物最小化,降低了废物处置成本,创造了良好的环境和社会效益。

参考文献:

- [1] Safety Standards Series No. GSG-1: Classification of Radioactive Waste[S]. VIENNA: IAEA, 2009.
- [2] GB 27742-2011 可免于辐射防护监管的物料中放射性核素活度浓度[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [3] GB/T 17567-2009 核设施的钢铁、铝、镍和铜再循环、再利用的清洁解控水平[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [4] GB/T 17947-2008 拟再循环、再利用或作非放射性废物处置的固体物质的放射性活度测量[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

(责任编辑:张祚豪)