

附件 5

《伴生放射性废水处理与排放技术规范（征求意见稿）》
编制说明

中国辐射防护研究院
生态环境部核与辐射安全中心
中核第四研究设计工程有限公司
二〇二一年九月

目 录

1 任务来源	35
2 编制的目的和必要性	35
2.1 环境形势的变化对标准提出新的要求.....	35
2.2 相关环保标准和环保工作的需要.....	36
2.3 现行标准存在的问题.....	39
2.4 制定伴生放射性废水处理与排放技术规范，推动行业健康发展.....	40
3 主要工作过程	40
4 国内外相关标准研究	42
5 行业产排污情况及污染控制技术分析	43
5.1 相关行业发展概况.....	43
5.2 伴生放射性废水产生及排放现状.....	57
5.3 污染防治技术分析.....	58
5.4 处理实例.....	65
6 主要技术内容及说明	70
6.1 适用范围.....	70
6.2 规范性引用文件.....	70
6.3 术语和定义.....	70
6.4 总体要求.....	70
6.5 源头控制.....	71
6.6 处理要求.....	71
6.7 排放控制.....	72
6.8 运行与维护.....	72
6.9 运行期满后的管理.....	73
6.10 资料性附录.....	73
7 标准实施的环境效益及经济技术分析	73
8 标准实施建议	74

1 任务来源

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国放射性污染防治法》《中华人民共和国水污染防治法》和《建设项目环境保护管理条例》，进一步强化伴生放射性矿开发利用过程中的辐射环境管理与放射性污染防治工作，规范、指导和推动伴生放射性矿开发利用的环境辐射保护工作，完善伴生放射性矿开发利用环境辐射管理标准体系，需要编制《伴生放射性废水处理与排放技术规范》。

我国目前对于伴生放射性废水处理与排放技术规范的内容还是处于空白阶段。遵循“源头控制、多措并举”的方针，在生产中严格控制污染物的产生和排放，规范伴生放射性矿开发利用放射性废水处理设施的建设和运行，生态环境部辐射源安全监管司在 2017 年和 2018 年针对《矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录（第一批）》（以下简称《第一批名录》）中的锆及氧化锆等五个行业布署开展了辐射环境现状调查与评估工作。2019 年 5 月，生态环境部下发了《关于印发〈核与辐射安全监管 2019 年项目计划〉的通知》（环办核设函〔2019〕482 号），其中提出了制定《伴生放射性废水处理技术规范》（项目编号为监管 1975）标准的任务，中国辐射防护研究院、生态环境部核与辐射安全中心和中核第四研究设计工程有限公司等单位联合承担该标准的编制工作。

2 编制的目的和必要性

2.1 环境形势的变化对标准提出新的要求

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国放射性污染防治法》，进一步强化非铀（钍）矿产资源开发利用项目的环境

管理与放射性污染防治工作，规范、指导和推动非铀（钍）矿产资源开发利用项目的辐射环境保护工作，完善环境管理标准体系，需要编制该规范。

2.2 相关环保标准和环保工作的需要

国家逐步加强了伴生放射性矿开发利用辐射安全监管。近年来，生态环境部和各级地方政府加强了对矿产资源开发利用的辐射安全监管，重点是放射性固体废物的监管。《第一批名录》明确要求对于名录中 5 种矿产资源开发利用行业，原矿、中间产品、尾矿（渣）或者其他残留物中铀（钍）系单个核素含量超过 1 贝可/克（Bq/g）的项目需要编写辐射环境影响专篇，以辐射环境影响评价专篇作为放射性固体废物管理的抓手。生态环境部先后多次组织对矿产资源开发利用中的放射性污染进行相关调查，其中包括重点省份的调查（1999 年）、重点行业的细查（2014 年）以及全国范围的普查（2007 年）等。2017 年启动了第二次全国污染源普查，扩展了伴生放射性矿普查的范围。

2013 年原环境保护部发布了《第一批名录》，其中规定：

已纳入《矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录（第一批）》，并且原矿、中间产品、尾矿（渣）或者其他残留物中铀（钍）系单个核素含量超过 1 贝可/克（1Bq/g）的矿产资源开发利用项目，建设单位应当委托具有核工业类评价范围的环境影响评价机构编制辐射环境影响评价专篇和辐射环境竣工验收专篇。

辐射环境影响评价专篇应当纳入环境影响评价文件，与该项目的环境影响评价文件同步编制，一并申报，评价类别按原环境保护

部颁布的《建设项目环境影响评价分类管理名录》执行。环评及验收阶段的辐射监测工作应当委托辖区内具有相应资质的监测单位实施。

2020 年生态环境部发布了《关于发布〈矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录〉的公告》(公告 2020 年第 54 号)(以下简称《名录》)。该《名录》自 2021 年 1 月 1 日起施行,《第一批名录》同时废止。《名录》中规定:

依照《建设项目环境影响评价分类管理名录》环评类别为环境影响报告书(表)且已纳入《名录》中的矿产资源开发利用建设项目,建设单位应在环境影响报告书(表)中给出原矿、中间产品、尾矿、尾渣或者其他残留物中铀(钍)系单个核素活度浓度是否超过 1 贝可/克(Bq/g)的结论。

依照《建设项目环境影响评价分类管理名录》环评类别为环境影响报告书(表)且已纳入《名录》,并且原矿、中间产品、尾矿、尾渣或者其他残留物中铀(钍)系单个核素活度浓度超过 1 贝可/克(Bq/g)的矿产资源开发利用建设项目,建设单位应当组织编制辐射环境影响评价专篇,并纳入环境影响报告书(表)同步报批;建设单位在竣工环境保护验收时,应当组织对配套建设的辐射环境保护设施进行验收,组织编制辐射环境保护验收监测报告并纳入验收监测报告。

在矿产资源开发利用活动中,伴生的放射性核素可能伴随着“三废”进入环境,导致环境中辐射水平的升高,从而影响环境安全和人类健康。国务院高度重视伴生放射性矿产资源开发利用活动的辐射

环境安全，《国务院办公厅关于印发第二次全国污染源普查方案的通知》（国办发〔2017〕82号）中明确将稀土、铀/钍、锆石和氧化锆、锡、铅/锌矿、铜、镍、铁、钒、磷酸盐、煤、铝、钼、金、锆/钛等15类矿产纳入伴生放射性矿普查范围。《国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知》（国发〔2016〕31号）要求：“加强对矿产资源开发利用活动的辐射安全监管，有关企业每年要对本矿区土壤进行环境辐射监测”。《国务院关于核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标的批复》（国函〔2017〕29号）要求：“督促伴生放射性矿开采、利用企业加强周边辐射环境监测和流出物监测”。为了促进矿产资源开发利用的可持续发展，抑制我国土壤污染加重的趋势，切实加强土壤污染防治，逐步改善土壤环境质量，规范相关企业环境辐射监测及信息公开工作，指导地方各级生态环境主管部门对相关企业开展辐射环境安全监管，生态环境部发布了《伴生放射性矿开发利用企业环境辐射监测及信息公开办法（试行）》，该办法已于2019年1月1日正式发布实施。为加强伴生放射性物料贮存及固体废物填埋的辐射环境管理，生态环境部发布了《伴生放射性物料贮存及固体废物填埋辐射环境保护技术规范（试行）》（HJ1114-2020），该标准已于2020年3月3日批准，2020年4月1日起实施。为规范伴生放射性矿开发利用项目竣工辐射环境保护验收监测工作，生态环境部发布了《伴生放射性矿开发利用项目竣工辐射环境保护验收监测报告的格式与内容》（HJ1148-2020），该标准已于2020年12月3日发布，2021年1月1日起实施。

国内明确提及适用于伴生放射性矿开发利用辐射安全监管的法

规条例较少，且多为原则性要求，比较笼统，也没有配套的技术规范等。针对伴生放射性矿产资源开发利用的辐射安全监管，目前并无统一的立法，其有关规定散见于相关的法律法规中。涉及到的法律法规主要有《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性废物安全管理条例》等。《中华人民共和国放射性污染防治法》第四十二条规定：“产生放射性废液的单位，必须按照国家放射性污染防治标准的要求，对不得向环境排放的放射性废液进行处理或者贮存。产生放射性废液的单位，向环境排放符合国家放射性污染防治标准的放射性废液，必须采用符合国务院环境保护行政主管部门规定的排放方式”。但是，目前的环保标准中没有对伴生放射性废水如何处理及排放进行规范，需要尽快制定相关标准予以规范、指导。

综上，虽然我国对矿产资源开发利用已纳入辐射安全管理体系，制定了一些法规标准，明确了管理职责，取得了一些成绩，但仍不是很完善，需要尽快制定相关的辐射环境保护标准以满足辐射环境监督管理的需要。《伴生放射性废水处理与排放技术规范》将与《伴生放射性矿开发利用环境辐射限值》《伴生放射性物料贮存及固体废物填埋辐射环境保护技术规范（试行）》《伴生放射性矿开发利用项目竣工辐射环境保护验收监测报告的格式与内容》等标准共同构成伴生放射性矿开发利用辐射环境保护标准体系，规范非铀（钍）矿产资源开发利用项目的环境管理与放射性污染防治工作，进一步完善我国的环境管理标准体系。

2.3 现行标准存在的问题

国内明确提及适用于伴生放射性矿产资源开发利用辐射安全监

管的法规条例较少，且多为原则性要求，比较笼统，也没有配套的技术规范。废水排放是当前伴生放射性矿开发利用企业放射性核素环境释放的主要途径之一。但目前的环保标准中没有对伴生放射性废水如何处理及排放进行规范，需要尽快制定相关标准予以规范、指导。

2.4 制定伴生放射性废水处理与排放技术规范，推动行业健康发展

控制伴生矿开发利用过程中的放射性废水污染，要遵循“源头控制、多措并举”的方针，在生产过程中严格控制污染物的产生和排放，严格相关标准、规范，依法对相关企业进行辐射安全监管。本标准的发布直接对伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理与排放做了规定，可规范伴生放射性矿开发利用放射性废水污染处理设施的建设与运行管理，促进伴生放射性矿开发利用可持续发展，推动行业的整体发展。

本标准的制定符合新的环境标准体系要求，有利于促进行业发展，规范伴生放射性矿开发利用的水污染防治工作，有效控制伴生放射性矿开发利用过程的放射性废水的排放，为落实《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国水污染防治法》的相关要求奠定技术基础。

3 主要工作过程

2017年，中国辐射防护研究院承担了核与辐射安全监管项目（项目编号为监管1721）：铈及氧化铈行业辐射防护和环境保护管理现状研究。在对我国铈及氧化铈行业生产、布局及市场需求情况进行调研分析的基础上，分析了该行业放射性废物的产生环节、类型及数

量。结合前期资料分析，现场调研了我国铈及氧化铈行业辐射防护及放射性废物管理实际水平。在前期开展的现场调查的基础上，对该行业辐射防护与环境保护管理现状进行了评估，编制了《铈及氧化铈行业辐射防护和环境保护管理现状研究报告》。

2018年，中国辐射防护研究院承担了核与辐射安全监管项目（项目编号为监管1815）：铈及氧化铈行业辐射环境安全要求。对部分铈及氧化铈行业典型企业进行了调研，梳理了国内外相关政策法规、管理要求，对铈及氧化铈开发利用过程的辐射环境影响进行了分析。结合我国辐射环境监管的实际，提出了铈及氧化铈开发利用辐射环境安全要求建议，编制了《铈及氧化铈行业辐射环境安全要求研究报告》，提交了《铈及氧化铈矿产资源开发利用辐射环境保护规定》（初稿）及编制说明。

2019年1月，根据生态环境部辐射源安全监管司的要求，在已开展的《铈及氧化铈矿产资源开发利用辐射环境保护规定》编制工作基础上，调整为编制《伴生放射性废水处理与排放技术规范》。中国辐射防护研究院及联合编制单位成立项目编制组，制定了工作计划，确定了任务分工和经费安排。

2019年7月，生态环境部辐射源安全监管司主持召开了《伴生放射性废水处理与排放技术规范》开题论证会，并形成了论证意见。

会后，编制组根据开题论证会审查意见，经过书面函调、现场调研，于2019年12月完成《伴生放射性废水处理与排放技术规范》（初稿）及编制说明的编制。

2020年7月，通过书面函审的形式，开展了《伴生放射性废水

处理与排放技术规范》(初稿)及编制说明的审查。编制组根据审查意见对标准文本和编制说明进行了修改完善,形成了《伴生放射性废水处理与排放技术规范》(初稿)及编制说明的修改稿。

2020年9月,生态环境部辐射源安全监管司在北京组织了《伴生放射性废水处理与排放技术规范》(初稿)专家咨询,对标准初稿及编制说明进行了讨论。编制组根据相关意见对标准文本进行了修改完善。

2021年4月和6月,生态环境部辐射源安全监管司在北京分别组织了《伴生放射性废水处理与排放技术规范》(初稿)专家咨询,对修改的标准文本及编制说明进行了讨论。编制组根据相关意见对标准文本进行了修改,形成了《伴生放射性废水处理与排放技术规范》(征求意见稿),完善了编制说明。2021年9月正式将《伴生放射性废水处理与排放技术规范》(征求意见稿)及编制说明提交至生态环境部,面向社会广泛征求意见。

4 国内外相关标准研究

针对伴生放射性矿开发利用的辐射安全监管,目前并无统一的立法,其有关规定散见于相关的法律法规中。涉及到的法律法规主要有《中华人民共和国放射性污染防治法》《放射性废物安全管理条例》等。相关法律法规对伴生矿的尾矿(渣)处置及再利用以及分级管理制度作了一定的规范要求。综上,国内明确提及适用于伴生放射性矿开发利用辐射安全监管的法规条例较少,且多为原则性要求,比较笼统,也没有配套的技术规范等。

环境工程技术规范制定工作在国外已经开展了多年,国际标准

化组织和美国、法国、德国、日本等发达国家已经发布了数百项环境工程技术规范。各国与环境工程服务相关的技术标准是面向产品或服务的自愿性标准，其技术标准类型主要包括：基础标准、环境质量和污染物监测分析方法标准、产品与设施性能分析测试标准、环境工程服务技术标准以及环保产品标准等方面。国际标准化组织（ISO）与环境工程服务相关的标准很少，几乎没有工程建设和管理类标准。从目前掌握的资料来看，国外有关环境工程的技术标准具有几个特点。首先，与环境工程服务相关的标准在 ISO 和各发达国家标准体系中所占比例较小，总的数量不大。国外的环境工程服务类标准也还处于发展过程中。其次，国外环境工程服务类标准中环境监测分析方法标准和产品标准较多，而特定的工程建设和运行管理标准较少。

虽然我国已将伴生放射性矿开发利用纳入辐射安全管理体系，制定了一些法规标准，明确了管理职责，取得了一些成绩，但仍不是很完善。对于伴生放射性矿开发利用过程中的放射性废水处理与排放技术规范的内容还是处于空白。制定本技术规范，可与《伴生放射性矿开发利用环境辐射限值（制订中）》《伴生放射性物料贮存及固体废物填埋辐射环境保护技术规范（试行）》《伴生放射性矿开发利用项目竣工辐射环境保护验收监测报告的格式与内容》等标准共同构成伴生放射性矿开发利用辐射环境保护标准体系，是对国家环境保护标准体系的有力的补充、完善。

5 行业产排污情况及污染控制技术分析

5.1 相关行业发展概况

5.1.1 伴生放射性矿开发利用基本概念

关于伴生放射性矿，《中华人民共和国放射性污染防治法》第 62 条有明确定义：伴生放射性矿，是指含有较高水平天然放射性核素浓度的非铀（钍）矿（如稀土矿和磷酸盐矿等）。但这个定义只是定性地规定了伴生的天然放射性水平。随着伴生放射性矿辐射环境监管的实践，目前，一般认为除铀（钍）矿外所有矿产资源开发利用活动的原矿、中间产品、尾矿（渣）或者其他残留物中铀（钍）系单个核素含量超过 1 贝可/克（Bq/g）的活动即是伴生放射性矿开发利用。当前，伴生放射性矿开发利用已成为辐射环境管理的重要领域，是各级生态环境主管部门辐射环境监管的重点。

5.1.2 我国伴生放射性矿开发利用行业分布及放射性水平

我国伴生放射性矿开发利用主要包括伴生放射性矿的采选及冶炼加工。在生产过程中，矿物中的天然放射性物质会迁移、浓集和扩散，含有天然放射性核素的产品、废物也会对环境造成一定程度的放射性影响。

我国自 20 世纪 70 年代开始关注伴生放射性矿开发利用中的辐射环境管理问题。到目前为止，国家针对伴生放射性矿开发利用进行过三次较大范围的调查：原国家环境保护总局在 2000 年对四川等 7 个省市的稀土矿、铝矿、磷矿、煤矿、铅锌矿等伴生放射性矿开发利用项目的辐射环境影响进行了调查，掌握了一定的基础数据；2007 年，国务院组织开展了第一次全国污染源普查，伴生放射性矿普查是其中的一项重要内容；2017 年，国务院组织开展了第二次全国污染源普查，扩展了伴生放射性矿普查的范围。

根据《第一次全国污染源普查技术规定之二 放射性污染源普查监测技术规定》以及《伴生放射性污染源普查监测有关问题的说明》，我国在全国范围内对 11 个可能引起天然放射性水平升高的工业行业开展了放射性污染调查，包括稀土、铌/钽、锆石和氧化锆工业、锡、铅/锌、铜、钢铁、磷酸盐工业、煤、铝、钒，不同行业调查范围见表 5-1。

表 5-1 第一次全国污染源普查伴生放射性矿普查行业范围一览表

序号	行业	调查范围
1	稀土	稀土矿（包括独居石、氟碳铈矿、磷钇矿、离子型稀土矿）的开采、选矿、冶炼（包括酸法和碱法冶炼）和分离；生产稀土氧化物和碳酸稀土。
2	铈/钽	开采铈/钽矿、选矿； 利用烧绿石通过高温化学处理生产铈和铁铈； 用钨铁矿、钽铁矿提取铈和钽； 利用铈/钽精矿生产氧化铈、氧化钽或其他产品。
3	锆石和氧化锆工业	锆石砂开采和选矿；利用锆石生产氧化锆和金属锆。
4	锡	锡矿开采、选矿和冶炼。
5	铅/锌	铅/锌矿开采、选矿和冶炼（包括湿法冶炼和火法冶炼）。
6	铜	铜矿（包括铜氧化物、硫化物和碳酸盐）的开采、选矿、冶炼和精炼。
7	钢铁	铁矿石（ Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 ）开采和冶炼。
8	磷酸盐工业	磷酸盐矿的开采；用酸处理磷酸盐生产磷酸或直接生产磷肥；用磷酸盐高温焚烧形成磷，再用来生产高纯度磷酸。
9	煤	煤和煤矸石的开发利用、燃煤电厂。
10	铝	铝（铝矾土）的开采和冶炼。
11	钒	钒矿的开采、冶炼。

根据第一次普查的结果，原环境保护部从 11 个行业中选取了 5 个重点行业纳入辐射环境监督管理名录，于 2013 年 2 月发布了《第一批名录》，见表 5-2。

表 5-2 矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录（第一批）

序号	行业	工业活动
1	稀土	各类稀土矿（包括独居石、氟碳铈矿、磷钇矿和离子型稀土矿）的开采、选矿和冶炼
2	铈、钽	含铈、钽矿石的开采、选矿和冶炼
3	锆及氧化锆	锆英石（砂）、斜锆石的开采、选矿和冶炼
4	钒	钒矿的开采和冶炼
5	石煤	石煤的开采和使用

2017年,根据《全国污染源普查条例》(国务院令第508号),原环境保护部启动了第二次全国污染源普查工作。根据国际原子能机构(IAEA)关于天然放射性物质(NORM)管理的最新文件,第二次全国污染源普查伴生放射性矿普查对象在第一次11类矿产资源的基础上,新增了钼、金、锆/钛、镍。伴生放射性矿普查相关行业、企业类别和对象见表5-3。

表5-3 第二次全国污染源普查伴生放射性矿普查行业范围一览表

序号	矿产种类	相关企业类别	普查对象
1	稀土	稀土矿(包括独居石、氟碳铈矿、磷钇矿、离子型稀土矿)的开采、选矿、冶炼(包括酸法和碱法冶炼)和分离;稀土氧化物和碳酸稀土的生产。	开采:原矿和废石; 选矿:原矿、尾渣、精矿和废水; 冶炼和分离:废渣和废水。
2	铌/钽	铌/钽矿开采、选矿; 利用烧绿石通过高温化学处理生产铌和铁铌; 用铌铁矿、钽铁矿提取铌和钽; 利用铌/钽精矿生产氧化铌、氧化钽和其他产品。	开采:原矿和废石; 选矿:原矿、尾渣、精矿和废水; 冶炼:废渣和废水。
3	锆石和氧化锆	锆石砂开采和选矿; 利用锆石生产氧化锆和金属锆。	开采和分离:原矿和废渣; 化学法生产氧化锆:废渣和废水。
4	锡	锡矿开采、选矿和冶炼。	开采:原矿、废石和废水; 选矿:原矿、精矿、尾渣和废水; 冶炼:废渣和废水。
5	铅/锌	铅/锌矿开采、选矿和冶炼(包括湿法冶炼和火法冶炼)。	开采:原矿和废石; 选矿:精矿、尾渣和废水; 冶炼:废渣和废水。
6	铜	铜矿(包括铜氧化物、硫化物和碳酸盐)的开采、选矿、冶炼和精炼。	开采:原矿和废石; 浮选、生物浸出(堆浸):精矿、尾矿、残渣和废水; 冶炼:炉渣、废渣和废水。
7	钢铁	铁矿开采、选矿和冶炼。	开采:原矿和废石; 选矿:原矿、精矿、尾矿和废水; 冶炼:铁渣、高炉渣和钢渣,熔炼炉的底灰,废水。
8	钒	钒矿开采、选矿和冶炼。	开采:原矿和废石; 选矿:原矿、精矿、尾矿和废水; 冶炼:钒矿渣、冶炼渣,熔炼炉的底灰,废水。

序号	矿产种类	相关企业类别	普查对象
9	磷酸盐	磷酸盐矿开采；用酸处理磷酸盐生产磷酸或者直接生产磷肥；用磷酸盐高温焚烧形成磷，再用来生产高纯度磷酸。	开采：原矿和废石； 磷酸湿法生产：磷石膏和废水； 磷酸盐热处理：矿渣和废水。
10	煤	煤、石煤和煤矸石的开发利用。	煤和石煤矿开采利用过程中产生的固体物料（原矿、精矿、废渣）和废水； 煤矸石利用过程中产生的固体物料和废水。
11	铝	铝矿开采和冶炼。	开采：原矿和废石； 冶炼：赤泥和废水。
12	钼	钼矿开采、选矿和冶炼。	开采：原矿和废石； 选矿：原矿、精矿、尾矿和废水； 冶炼：废渣和废水。
13	镍	镍矿开采、选矿和冶炼。	开采：原矿和废石； 选矿：原矿、精矿、尾矿和废水； 冶炼：废渣和废水。
14	锆/钛	锆/钛矿开采、选矿和冶炼。	开采：原矿和废石； 选矿：原矿、精矿、尾矿和废水； 冶炼：废渣和废水。
15	金	金矿开采、选矿和冶炼。	开采：原矿和废石； 选矿：原矿、精矿、尾矿和废水； 冶炼：废渣和废水。

根据第二次全国污染源普查调查结果，2020年生态环境部发布了《名录》，新的矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录见表5-4。

表5-4 矿产资源开发利用辐射环境监督管理名录

序号	行业	工业活动
1	稀土	各类稀土矿（包括氟碳铈矿、磷钇矿和离子型稀土矿）的开采、选矿和冶炼；独居石的选矿和冶炼
2	锆及氧化锆、铌/钽、锡、铝、铅/锌、铜、铁、钒、钼、镍、锆、钛、金	开采、选矿和冶炼
3	磷酸盐	开采、选矿和直接以磷酸盐矿为原料的加工活动
4	煤	开采、选矿

5.1.3 典型伴生放射性矿行业概况

5.1.3.1 稀土行业

a) 基本情况

稀土因其独特的物理化学性质，广泛应用于新能源、新材料、节能环保、航空航天、电子信息等领域，是现代工业中不可或缺的重要材料。

我国稀土矿产资源丰富，已探明的稀土工业储量为 5200 万吨，约占世界的 45%，是稀土资源最丰富的国家，同时资源分布广，矿物种类齐全，经济效益可观，全国稀土矿探明储量的矿区有 60 多处，主要分布在内蒙古、四川、江西、山东、广东、广西、福建、湖南等省、自治区。

稀土生产过程中产生气液流出物的环节主要为稀土开采、选冶分离环节。目前大量开采的稀土矿床主要以内蒙古包头为代表的混合型稀土矿（氟碳铈矿和独居石）、以四川冕宁为代表的氟碳铈矿、以江西和广东为代表的离子吸附型稀土矿等，针对以上三大稀土矿产资源，我国形成了各自独立又相互关联的稀土矿采选和冶炼分离技术。此外，部分企业采用独居石作为原料进行稀土冶炼分离，制备稀土化合物。

b) 稀土矿类型及主要采选、冶炼加工工艺

1) 包头混合型稀土矿

包头白云鄂博矿为我国探明的最大的稀土矿，属于铁、稀土、铈共生矿，同时伴生约 4%左右的钍。包头白云鄂博矿露天开采得到原矿，原矿经破碎后，进入选矿厂，采用弱磁—强磁—浮选联合选矿工艺生产铁精矿及稀土精矿。

稀土精矿冶炼分为酸法和碱法两种冶炼工艺，目前主要为酸法工艺，工艺为浓硫酸高温分解—水浸—中和除杂—萃取转型—皂化萃取分离得到单一稀土化合物。

2) 氟碳铈矿

我国的氟碳铈矿主要分布于四川省以及山东省等地，四川稀土矿是我国第二大稀土资源，与铁、钛、钙、磷、钍等伴生。氟碳铈矿以四川牦牛坪为代表，矿山开采为露天开采，选矿工艺基本采用重选—磁选法或重选—浮选法两种工艺。

氟碳铈矿主要采用氧化焙烧—盐酸浸出法为主干流程而衍生出来的化学处理工艺生产稀土产品，主要流程为氧化焙烧—盐酸浸出—过滤—中和除铁铅—皂化萃取—沉淀—焙烧，过滤产生的固体经碱转—洗涤除氟—盐酸优溶—还原浸出处理。

3) 离子型稀土矿

我国风化淋积型（离子吸附型）稀土矿床，主要分布在南方七省区，主要包括江西、广东、广西、福建等地，离子吸附型稀土矿中一般伴生少量铀、钍。

目前离子型稀土矿主要鼓励采用原地浸出工艺进行采矿，典型的冶炼工艺一般为盐酸溶解—净化除杂—皂化萃取分离—沉淀—焙烧。

4) 独居石

独居石矿是生产稀土的原料之一，目前国家已经禁止开采单一独居石矿。我国现有独居石矿并不是从单一独居石矿开采而来，主要来源包括国内选矿企业将进口或国内含锆英砂较高的砂矿提炼锆英石、金红石和钛铁矿后形成的副产品矿，包括磷钇矿和独居石。

独居石冶炼通常采用烧碱液常压分解法，工艺为精矿分解—过滤洗涤—优溶—除镭—皂化萃取分离—沉淀—焙烧。

5.1.3.2 铈钽行业

a) 基本情况

铈和钽都属于稀有金属，铈钽新材料广泛应用于相关高新技术产业领域，在化学工业、电子工业、特种合金、真空技术以及尖端技术方面都具有非常重要的地位。铈钽矿物的赋存形式和化学成分复杂，其中除铈、钽外，往往还含有稀土金属、钛、锆、钨、铀、钍和锡等。

我国钽矿主要分布在江西、内蒙古、广东、湖南、广西、四川等地，铈矿主要分布在内蒙古、湖北、广东、江西、陕西、四川等地。钽矿床规模小，矿石品位低，多金属伴生或共生，造成难采、难分、难选，回收率低，赋存状态差，大规模露采的矿山较少。我国没有独立的铈矿山，铈往往与稀土、钽伴生或共生。

b) 铈钽矿类型及主要采选、冶炼加工工艺

1) 采选工艺

铈钽开采多采用露天开采，采用钻孔爆破、电铲装运、汽车—溜井—电机车联运的开采流程，地下开采相对较少。最常用的三个主要选矿方法是重力选矿、浮选选矿和电磁选矿。因为重选比较简单，成本低于其他选矿方法，所以只要矿石的重选可选性好，一般首先考虑重选。

2) 冶炼工艺

铈钽的提取和分离分湿法和火法两种方法。湿法包括有机萃取、离子交换、分步结晶等方法，火法主要是氯化法，当前国际和国内

主要采取的是湿法，湿法中又以萃取法为主。已经形成了包括氢氟酸体系，MIBK（甲基异丁酮）-HF-H₂SO₄-H₂O 萃取体系，仲辛醇、辛醇萃取体系，草酸溶液萃取体系等。铌钽冶炼基本工艺流程为矿石—磨矿—酸溶（HF 或硫酸）—萃取分离—氨中和沉淀—过滤洗涤—烘干—焙烧—包装。

5.1.3.3 锆及氧化锆行业

a) 基本情况

锆是我国现代化和国防建设的重要战略材料，我国已建成比较完整的锆材料产业体系，包括锆矿物勘探体系，锆砂的采选工业，锆矿物的深加工工业，原生锆、核级锆的生产和锆管板棒丝及各种锆材的生产。我国目前已成为世界上锆英砂消耗量最大、氧氯化锆产量和出口量最大的国家，但高附加值化学锆等产品仍需进口。

锆的优异性能使其具有广泛的用途。作为氧化物及其衍生的化学锆产品，被大量地用于陶瓷、耐火材料、化学、冶金、轻纺和化妆品行业等。金属锆产品则大量地用于各种高温合金、耐腐蚀设备、军事工业等。经过锆、铪分离的核级金属锆则大量用做核反应堆中的核燃料包壳，核级金属铪则用做核反应堆的控制组件。目前主要以硅酸锆、氧化锆的形式应用于陶瓷、耐火材料等领域，这部分的应用占锆消费的90%以上。

b) 锆英砂采选、锆及氧化锆加工工艺

1) 锆英砂采选

我国的锆英砂以进口为主，截至2019年，对外依存度几乎达到了100%，主要进口国为澳大利亚、南非。我国锆资源储量为50万吨，仅占全球的1%。我国的锆矿分为两大类型，即岩矿和砂矿。岩矿主

要分布在内蒙古、辽宁、云南、新疆等地。虽然储量较多，但尚未具有工业开采价值。砂矿分布在以海南为首的七个省区。海南是我国砂矿蕴藏量最多的地区，占全国砂矿总量的71%，目前国内也只有海南滨海砂矿能被开采利用。海南省政府在《关于加强矿产资源开发管理工作的通知》（琼府〔2014〕66号）中严格规定“停止新设探矿权采矿权审批，在生态保护区严禁矿产资源开发”，未来不会再批准锆英砂探矿权和采矿权。

国内外锆英砂的采选目前基本都采用重—电—磁联合选矿的工艺。锆英砂选矿过程一般为螺旋分离—磁选—摇床重选—烘干—电选—磁选，然后得到锆英砂成品。

2) 硅酸锆（锆英粉）生产

硅酸锆和锆英粉的组成都是 $ZrSiO_4$ ，是由锆英砂磨细而成的。它们的性能相同，只是粒度不同。硅酸锆不但是建筑卫生陶瓷的主要原料，同时也是结构陶瓷、部分特种陶瓷、日用陶瓷等的重要原材料。硅酸锆应用于陶瓷行业，包括色料、釉料、熔块、化妆土、陶瓷坯体、陶瓷中坯。锆英粉的用途包括铸型涂料及陶瓷，还用作水泥、食品防腐、制革、纤维的材料。

硅酸锆的生产工艺有气流粉碎、干法粉碎和湿法研磨等。但主要是采用干法和湿法，国外以干法为主，国内以湿法为主。干法工艺简单、流程短、运行费用低、生产投资较少、经济效益显著，但干法生产的粉尘和噪声较大、环境污染不易控制。湿法工艺流程长、设备投资大，但产出的产品质量稳定、粒度均匀。生产陶瓷用硅酸锆是我国锆英砂最主要的消费，约占全年消费的65%~70%。

3) 化学锆生产

锆英砂是生产锆、铪及其化合物的主要原料。因锆英砂非常稳定，首先要使锆英砂分解除去其中的主要杂质二氧化硅，制取所需的锆和锆化合物。我国目前主要是用氢氧化钠分解锆英砂的方法生产氧氯化锆，电熔法生产氧化锆。氧氯化锆是化工生产锆盐和金属的基础原料。有时也通过碳氯化生产四氯化锆，电弧熔炼生产氧化锆和稳定氧化锆。

(1) 氧氯化锆生产

以锆英砂为原料，采用一酸一碱法，其生产过程为碱熔融分解—水洗转型—酸化一次结晶—水溶—浓缩二次结晶—酸洗—离心脱水等。

(2) 碳酸锆、硫酸锆生产

以氧氯化锆、硫酸、盐酸、纯碱等为原料，采用两步法，氧氯化锆和浓硫酸反应转化生成硫酸锆，经洗涤、过滤生成硫酸锆产品，滤液再与碳酸钠反应，经调酸、洗涤、离心后得到碳酸锆产品。

4) 电熔氧化锆生产

电熔氧化锆工艺按原料分为两种：一种是采用锆英砂为原料，在电弧炉内通过一次熔炼，完成脱硅和稳定化两道工序，称为一次熔炼法；另一种是用电熔脱硅锆为原料，与稳定剂一起混合后在电炉内熔炼形成稳定型氧化锆，称为二次熔炼法。

电熔氧化锆的生产方法主要有两个工序：电弧炉熔炼脱硅工序和产品后处理加工工序。借助于锆英砂在高温下碳化还原除硅的原理，熔炼过程控制好碳、还原剂的量和工艺条件，可使硅完全脱去。耐火材料、陶瓷色料和磨料是电熔氧化锆的三大主要市场，三者消耗电熔氧化锆的总量占总消耗量的 70%以上。

5.1.3.4 钒行业

a) 基本情况

钒是一种过渡金属元素，在自然界中分布极为分散，故也称为稀散元素。钒的应用十分广泛，在钢铁、有色金属、化工、合金、超导材料、汽车等工业领域都是不可或缺的重要元素。

我国钒资源类型有 3 种，钒钛磁铁矿、石煤（含钒）、钒矿。目前，钒资源被大规模工业化有效利用的原料形式是由钒钛磁铁矿经过烧结、冶炼和吹炼而成的钒渣；石煤（含钒）属于低品位钒资源，目前没有大规模应用；其他主要是石油和化工工业的含钒废催化剂。

钒钛磁铁矿是我国钒矿的主要原料形式，平均品位约 1.5%。我国钒钛磁铁矿储量居世界第三位，储量近 100 亿吨，主要分布在四川、陕西、湖南、甘肃等省。

b) 钒矿采选及冶炼工艺简介

1) 钒矿采选现状

目前钒矿的选矿工艺主要有以下 5 种：

(1) 重选工艺：包括跳汰选钒、摇床选钒、溜槽选钒、圆锥选矿机选钒、螺旋选矿机选钒和离心选钒等。

(2) 磁选工艺：包括干式弱磁、湿式弱磁、干式强磁、湿式强磁等。

(3) 焙烧工艺：包括闪速焙烧、沸腾炉焙烧、回转窑焙烧、平炉焙烧、钠化钙化焙烧、直接焙烧等。

(4) 浸出工艺：包括酸浸、碱浸、水浸、助浸剂浸出等。

(5) 其他提钒工艺：包括超细磨工艺、水淬工艺、高炉炼铁—雾化提钒工艺等。

2) 钒矿冶炼工艺

(1) 钒的提取来源

钒钛磁铁矿提钒：50%~60%的钒初级产品来自这种方式，具体方法是从铁水中提取含 10%~25%的 V_2O_5 的钒渣，钒渣经过焙烧、浸出等工艺处理，生产出钒酸盐或氧化钒，再进一步深加工。我国目前处理含钒铁水的方法有三种，分别为吹炼钒渣法、含钒钢渣法以及钠化渣法，其中吹炼钒渣法是从钒磁铁矿生产钒的主要方法。

含钒矿石或石煤等提钒：直接采用焙烧、浸出处理含 V_2O_5 的矿石，生产钒酸盐或钒氧化物。

残渣废物提钒：主要为回收电厂灰尘、废催化剂以及其他残渣中的钒，再通过焙烧、浸出工艺，生成钒酸盐或钒的氧化物。这种方法实现了资源化，有较高的经济效益。

(2) 钒冶炼工艺

提钒工艺大致分为碱法、酸法、钠化法三种。国内目前的提钒工艺，多为食盐钠化焙烧工艺。

5.1.3.5 石煤行业

a) 基本情况

石煤是一种含碳少、发热值低的劣质无烟煤，又是一种低品位多金属共生或伴生矿。我国是少数几个拥有石煤资源的国家之一，主要分布在湖南、湖北、安徽、江西、浙江等省份。

石煤中伴生的天然放射性核素含量明显高于普通煤和土壤。石煤的开采和燃烧会导致放射性核素向环境少量释放，同时大部分富集在煤燃烧后的煤渣、煤灰中。

b) 石煤开采及利用主要工艺

我国石煤资源的主要利用途径是石煤发电、石煤提钒以及建材工业。石煤发电燃烧产生烟尘以及石煤灰渣。放射性核素主要富集在石煤灰渣中，石煤灰渣的露天堆放产生氡及其子体，同时降雨淋渗有渗滤液产生，废水中放射性核素活度浓度有超标的现象。

由于部分石煤伴生钒、钼、镍等金属，可以从石煤中提取钒等有价金属，其中石煤提取钒的工艺及产污环节同钒行业的相关介绍，传统工艺是钠盐焙烧—酸浸。目前国内也有从石煤发电的电炉渣、烟灰中提取钒的研究，剩余的冶炼渣中仍存在一定的放射性核素。

5.2 伴生放射性废水产生及排放现状

根据各行业现状调研汇总，伴生放射性矿开发利用不同行业之间，原料放射性水平不同，生产工艺不同，废水的放射性水平也差别很大。例如，稀土采选过程通常产生选矿废水或尾矿废水，冶炼过程产生的废水一般包括洗涤废水、转型废水、萃余废水、沉淀废水和尾气喷淋废水等。废水中含有铀、钍、镭-226、钋-210、铅-210等；部分废水中铀的浓度达到 1mg/L~2mg/L，钍的浓度达到 0.6mg/L，镭-226 的活度浓度达到 2Bq/L~3Bq/L。铀钍冶炼产生的伴生放射性废水主要包括萃余废水、洗涤废水、结晶母液、沉淀废水等。萃余废水和洗涤废水中放射性水平较高，铀、钍的浓度在 0.8mg/L~9mg/L，镭-226 的活度浓度在 1Bq/L~9Bq/L。对于化学锆生产，由于放射性物质全部溶解到溶液中，废水中放射性水平很高，如某氧氯化锆企业结晶母液中铀的浓度达到 1020mg/L，钍的浓度达到 519mg/L，镭-226 的活度浓度达到 3122Bq/L。某石煤发电综合利用试验厂尾渣渗滤水中铀的浓度达到 1.06mg/L。某石煤钒厂生产循环水铀的浓度达到 210mg/L。

根据第二次全国污染源普查伴生放射性矿普查的初步统计，伴生放射性矿开发利用排放废水中铀的浓度一般小于 0.4mg/L，个别达到 6.1mg/L，钍浓度最高在 0.1mg/L ~0.18mg/L。但是，大部分伴生放射性废水一般与非放射性废水混合后一起处理排放，没有专门对放射性单独处理。经调研，部分建有伴生放射性废水处理设施的稀土企业废水处理后铀、钍为 0.01mg/L~0.2mg/L，某氧氯化锆企业的废水经处理后铀的浓度可达到 0.07~0.11mg/L，镭-226 的活度浓度达到 0.15~0.30Bq/L。

5.3 污染防治技术分析

目前大多数伴生放射性矿开发利用企业未针对伴生放射性废水进行单独处理。生产过程产生的伴生放射性废水除部分回用外，其他排入废水处理站，与其他非放射性废水统一处理后排放。废水中放射性物质的去除效果取决于企业采用的非放射性废水处理工艺的放射性附加去除效率。

目前，废水中天然放射性物质的处理技术包括化学沉淀法、离子交换法、蒸发浓缩法、吸附法、膜处理法、生物处理法、萃取法、离子浮选法等。由于伴生放射性矿开发利用企业生产工艺千差万别，其产生的伴生放射性废水的组分也差异巨大。因此，相关企业应根据废水的水质特征、水量及其变化规律、处理后水的去向及排放标准的要求，经技术经济比较后确定其废水处理工艺。目前，多技术联用应用最为广泛，处理效率也比较高。相关企业宜综合考虑不同处理技术的优缺点，选择一种或者几种方法使用。

a) 化学沉淀法

化学沉淀法是向废水中投放一定量的化学絮凝剂，如硫酸钾铝、

铝酸钠、硫酸铁、氯化铁等，有时还需投加助凝剂，如活性二氧化硅、黏土、聚合电解质等，使废水中的胶体物质失去稳定而凝聚成细小的可沉淀的颗粒，并能与水中原有的悬浮物结合为疏松绒粒。该绒粒对水中的放射性核素具有很强的吸附能力，从而净化水中的放射性物质、胶体和悬浮物。引起放射性核素与某种不溶性沉渣共沉的原因包括了共晶、吸附、胶体化、截留和直接沉淀等多种作用。该方法铀、钍去除率为 70%~90%，镭去除率为 80%~90%，是目前伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理主要的方法。

目前该方法的技术和设施都比较完善，处理费用低廉、去除核素种类较广、耐水力和水质冲击负荷较强。但其产生的污泥需进行浓缩、脱水、固化等处理，易造成二次污染。化学沉淀法可用于处理净化要求不高，低活度，低盐度，体积较大的低水平伴生放射性废水，也可与其他方法联用时作为预处理方法。

已有研究显示，氢氧化镁处理剂具有良好的除铀效果，特别适合于酸溶浸铀后的低水平含铀废水的处理。在一定条件下，能将废水中的含铀量降至 0.05mg/L 以下。用不溶性沉淀粉黄原酸酯处理含金属放射性废水，处理效果较好，适用性宽，去除率大于 90%。利用 NaOH 中和某放射性废物库积存的酸性放射性废水，处理后总 α 和总 β 去除率分别为 99.35%和 96.17%。利用 Fe^{3+} 絮凝处理含铀、钍的高盐废水时，pH 在铀的去除过程中起着重要作用，最佳 pH 为 6，铀的去除率最高可达 95.5%。

b) 离子交换法

离子交换剂与废水接触时，废水中的放射性离子与离子交换剂上的可交换离子进行交换而转移到离子交换剂上，从而使废水达到

净化的目的。目前，离子交换法已广泛应用于核工业生产工艺及放射性废水处理工艺中。在没有非放射性离子（少数是阴离子）干扰的情况下，离子交换能够长时间有效工作。离子交换树脂是主要的离子交换剂，分为阳离子交换树脂和阴离子交换树脂两种，属于有机离子交换剂。此外，还有无机离子交换剂，如沸石、磺化煤、硅酸铁凝胶、磷酸锆等，它们大都具有耐辐照、价格低廉的优点，并且很多无机离子交换材料也能对特定核素有好的选择性。除离子交换树脂之外，还有用磺化沥青作离子交换剂的，其特点是能在离子交换饱和后进行熔化—凝固处理，这样有利于放射性废物的最终处置。

该方法可以通过控制末端塔尾溶液中铀的浓度来控制排放浓度，目前广泛应用于铀矿冶、核燃料循环生产产生的放射性废水中铀的处理，铀去除率能达到 90%以上，且有利于资源回收。根据铀矿冶放射性废水处理实践经验，处理后废水中铀的浓度小于 0.3mg/L。

离子交换法的缺点是：对原水水质要求较高，对于处理含高浓度竞争离子的废水，往往需要采用二级离子交换柱，或者在离子交换柱前附加电渗析设备，以去除常量竞争离子；离子交换剂的再生和处置较困难，在有机离子交换体系中，有机溶剂和有机离子交换树脂不耐辐射和高温，且分解产物不便于再生和处置。同时，在面对悬浮物较多，含盐量较高的情况下，会使树脂很快达到饱和，大大缩短使用周期，并且失效的树脂在更换后不能回收利用。

已有研究显示，用流化床从含铀废水中离子交换吸附铀，铀初始浓度 15~36 mg/L，吸附后尾液中的铀浓度低于 0.1mg/L。

c) 蒸发浓缩法

蒸发浓缩法的基本原理是进入蒸发器的废水通过蒸汽或电热器加热至沸腾，废水中的水分逐渐蒸发成水蒸气，经冷却凝结成水。蒸发浓缩法能够使放射性核素大都留在残余液中而得到浓缩。

该方法理论与技术相对成熟，安全可靠，去污因子高($10^4\sim 10^6$)、灵活性大(可以单独使用，也可以与其他方法联合使用)，处理废水所达到的去污因子一般比化学沉淀和离子交换法要高。常用于处理高盐度，高活度的废液。但蒸发浓缩法也存在着一些缺点：该方法热能消耗大运行成本较高；在设计和运行时还要考虑腐蚀、结垢、爆炸等潜在威胁。

已有研究显示，利用真空蒸发浓缩装置处理中低水平放射性废水，对总 α 和总 β 的去污因子能达到 4.37×10^4 和 2.49×10^4 。

d) 吸附法

吸附法是用多孔性的固体吸附剂处理放射性废水，使其中所含的一种或数种元素吸附在吸附剂的表面上，从而达到去除的目的。吸附法可分为物理吸附、化学吸附和离子交换吸附三种类型。物理吸附是废水处理中最常用的吸附法。在对放射性废水的处理中，常用的吸附剂有活性炭、沸石、高岭土、膨润土、黏土等。其中，沸石价格低廉，安全易得，与其他无机吸附剂相比，沸石具有较大的吸附能力和较好的净化效果。

吸附法的价格低廉，吸附能力大，净化效果好，大多数一次性使用后废弃，一般不考虑再生。如硫酸锰吸附法除镭，该法处理放射性废水的盐度范围较宽，在伴生放射性废水的处理中也有广泛的应用。

e) 膜处理法

膜处理法是借助选择性透过的薄膜，以压力差、温度差、电位差等为动力，对放射性液体混合物实现分离。膜处理技术具有物料无相变、能耗低、设备简单、操作方便和适应性强等特点。对于中、低水平放射性废水，经两级反渗透净化，一般都能达到排放标准，可以取代电渗析-离子交换流程。目前国内外在放射性废水处理中采用的膜技术主要有微滤(MF)、超滤(UF)、反渗透(RO)、纳滤(NF)、电渗析(ED)、膜蒸馏(MD)等。其中，微滤、超滤、反渗透、纳滤和电渗析几种技术所用膜的性能稳定、品种多，且工艺成熟，处理效果最好的是反渗透技术。在核工业系统，超滤一般用于脱除放射性废水中的 α 核素，特别是以胶体形式或以伪胶体形式存在的铀、钍等锕系废物。放射性废水中的金属离子通过预处理使其形成固体颗粒、络合物或者其他难溶化学形态后也可以用超滤法进行脱除。膜分离技术处理放射性废水常与其他废水处理技术相结合，如化学沉淀、过滤、吸附等。若要高度浓缩，可能还需要蒸发过程。

不同的膜技术由于去除机理不同，所适用的水质及现场条件也不尽相同。此外，由于对原水水质要求较高，一般需要预处理，膜处理法常与其他方法联用。比如铁絮凝沉淀-超滤法，适用于处理含有能与碱生成金属氢氧化物的放射性核素离子的废水；水溶性多聚物-膜过滤法，适用于处理含有能被水溶性聚合物选择吸附的放射性核素离子的废水；化学预处理-微滤法，通过预处理可以大大提高微滤处理放射性废水的效果，且运行费用低，设备维护简单。

已有研究显示，超滤对铀、钍等 α 核素的去污因子为1000，对 β 核素和 γ 核素的去污因子为100，放射性废液体积减少倍数可达 10^4

数量级。用超滤（UF）-反渗透（RO）-电渗析（ED）组合工艺（简称 URE 流程）来处理低水平放射性废水，超滤工艺废水体积减缩比高，运行稳定，操作方便；反渗透既可除去离子，也可除去复杂的大分子等物质，使净化效果提高。在用复合反渗透膜去除放射性废水的盐及核素时，通过机械过滤器和活性炭过滤器分别除去大颗粒的杂质和残留的有机物、胶状物、微小的颗粒及余氯。用聚丙烯微孔膜对含铀废水进行真空膜蒸馏处理，铀的截留率最高为 99.1%。核燃料元件生产废水经过蒸馏—超滤—反渗透—电渗析组合工艺处理后，工艺废水中的铀和硝酸根的去除率几乎达到 100%，有机物的去除率为 95.2%。此外，沙特布赖代中心饮用水厂通过采用纳米陶瓷平板超滤膜结合水合氧化锰的工艺，使得水中的镭去除率达到 95% 以上。此外，加拿大原子能公司采用反渗透法处理反应堆冷却剂净化回用废水、美国 Pilgrim 核电厂采用传统预处理+反渗透法处理沸水堆地面排水等、美国 Rocky Flats 工厂采用微滤法处理放射性污染地下水、美国 Diablo Canyon 核电厂采用超滤法处理放射性废树脂浸泡废水等。

f) 生物处理法

生物处理法包括植物修复法和微生物法。植物修复是指利用绿色植物及其根际土著微生物共同作用以清除环境中的污染物的一种新的原位治理技术。主要有人工湿地技术、根际过滤技术、植物萃取技术、植物固化技术、植物蒸发技术等。但目前多处于试验研究阶段。微生物法是用微生物菌体作为生物处理剂，吸附富集回收存在于水溶液中的铀等放射性核素，效率高，成本低，耗能少，而且没有二次污染物。但是菌种对水质适应能力差，培养过程困难，易

突变。

已有研究显示，用浮萍修复铀尾矿水中的铀污染，7天内能将水中的铀从 $100\ \mu\text{g/L}$ 降低至 $30.0\ \mu\text{g/L}$ 。向日葵根系积累铀的浓度比水中高 5000~10000 倍。将硫酸盐还原菌和零价铁联用可有效去除铀矿山废水中的污染物 U(VI)，U(VI) 的去除率最高可达 99.4%。还有研究对真菌、满江红鱼腥藻等微生物，菱角等植物对低浓度铀的去除，法国梧桐树叶对放射性废水中钍的去除进行了探索。微生物、动植物衍生产品在废水的处理方面的应用研究也较多，如使用虾壳作为生物吸附剂处理硝酸溶液中的铀，使用改性壳聚糖作为吸附剂处理低浓度含铀废水，使用廉价的农林废弃物作为吸附剂处理低浓度铀、钍废水等。

g) 萃取法

萃取法是选用与水互不相溶的溶剂，使废水中的放射性核素溶入溶剂中，从而将其转移出来达到分离去除放射性核素的目的。随着学科交叉和新技术的引入，萃取法结合其他技术，形成了一系列的分离技术（超声萃取、微波萃取、离子液体萃取等），同时萃取剂的种类也丰富多样。采用萃取法处理放射性废水，具有选择性强、高效、废水处理量大、可重复使用、稳定性好及可连续萃取等优点。但该方法具有处理费用较高，产渣量大等缺点。

h) 离子浮选法

离子浮选法属于泡沫分离技术范畴。该方法基于待分离物质通过化学作用力和物理作用力与捕集剂结合在一起，在鼓泡塔中被吸附在气泡表面而富集，藉气泡上升带出溶液主体，达到净化溶液主体和浓缩待分离物质的目的。离子浮选法的分离作用，主要取决于

其组分在气—液界面上的选择性和吸附程度。所使用捕集剂的主要成分是，表面活性剂和适量的起泡剂、络合剂、掩蔽剂等。

已有研究显示，用离子浮选法处理含铀量为 50mg/L 的废水，经二次离子浮选处理后，含铀量可降至 0.02mg/L，浓缩废液体积约为原液体积的 1%。

表 5-5 为几种放射性废水处理工艺的去污效果比较。

表 5-5 几种处理方法去污因子对比

处理工艺	去污因子 (DF)
絮凝沉淀	$10 < DF < 10^2$ (β, γ 核素) 10^3 (α 核素)
离子交换 (有机离子交换树脂)	$10 < DF < 10^3$
离子交换 (无机离子交换树脂)	$10 < DF < 10^4$
蒸发浓缩	$10^4 < DF < 10^6$
生物吸附	$DF < 10^3$
反渗透	$10 < DF < 10^3$
电渗析	$10 < DF < 10^2$
膜蒸馏	$DF \rightarrow \infty$

5.4 处理实例

a) 某稀土冶炼企业伴生放射性废水的处理

某稀土冶炼企业产生的伴生放射性废水包括：高钠萃余废水、高镁萃余废水和白云石预处理废水。其中，高钠萃余废水是皂化剂（氢氧化钠溶液）与萃取剂混合后与稀土料液接触，使有机相负载稀土后产生的废水；高镁萃余废水是皂化剂（氢氧化镁溶液）与萃取剂混合后与稀土料液接触，使有机相负载稀土后产生的废水；白云石预处理废水是在白云石制备过程中，与稀土料液接触并多次循环

使用产生的废水。高钠萃余废水和高镁萃余废水各核素活度浓度为 ^{238}U : 16.8Bq/L; ^{232}Th : 2.57Bq/L; ^{226}Ra : 2.49Bq/L; 白云石预处理废水各核素活度浓度为 ^{238}U : 2.64Bq/L; ^{232}Th : 0.84Bq/L; ^{226}Ra : 1.20Bq/L。

高钠萃余废水含氯化钠盐分浓度较高，经过车间预处理（氢氧化钠中和沉淀）和软锰矿床吸附去除放射性核素后进入蒸馏系统回收氯化钠，蒸馏后的冷凝水循环利用。高镁萃余废水含氯化镁盐分浓度较高，经过车间预处理（氢氧化镁中和沉淀）和软锰矿床吸附去除放射性核素后进入蒸馏系统回收氯化镁，蒸馏后的冷凝水循环利用。萃余废水中所含天然放射性核素分别进入中和渣、软锰矿渣和结晶盐中。白云石预处理废水经蒸发浓缩后进行硫酸转化，回收硫酸盐（ CaSO_4 ），产生的蒸馏废水等回收循环使用。

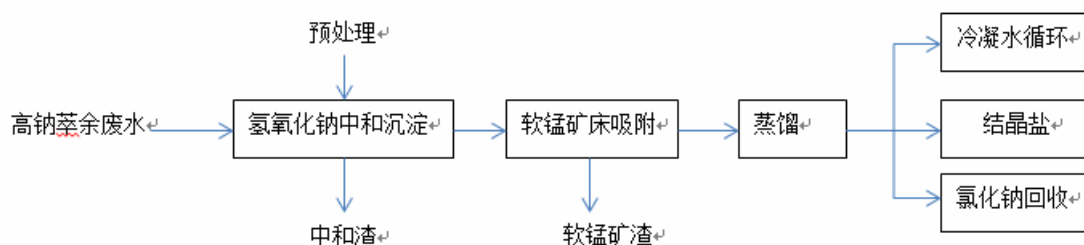


图 5-1 某稀土冶炼企业高钠萃余废水处理工艺流程图

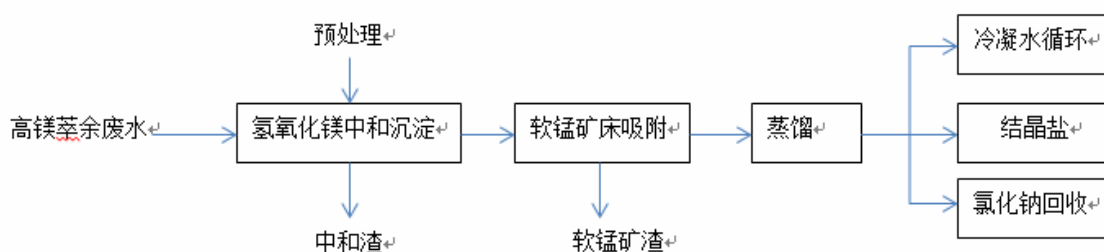


图 5-2 某稀土冶炼企业高镁萃余废水处理工艺流程图

上海跃龙化工厂（以独居石为原料的稀土冶炼企业）采用化学

沉淀法，BaCl₂共晶载带，聚丙烯酰胺絮凝处理工艺，处理后废水中铀含量为 0.11mg/L，钍未检出，²²⁶Ra 浓度为 0.12Bq/L。

b) 某氧氯化锆生产企业伴生放射性废水的处理

该企业采用一酸一碱法生产氧氯化锆。产生的伴生放射性废水主要为三次废酸（经过三次浓缩结晶后的母液）和萃取废水中。其中废酸中铀的浓度为 0.214~0.248g/L，钍的浓度为 0.155~0.185g/L；萃取废水中铀的浓度为 0.309g/L，钍的浓度为 0.309μg/L。

生产废水经过调节池（氢氧化钠）调节 pH 至中性，后经过絮凝反应池加絮凝药剂（聚合氯化铝、聚丙烯酰胺）后进行絮凝沉淀；然后经过斜管沉淀池、中间水池、过滤器等过滤沉淀后排放（铀、钍浓度低于 0.1mg/L、镭浓度低于 1.1Bq/L）。

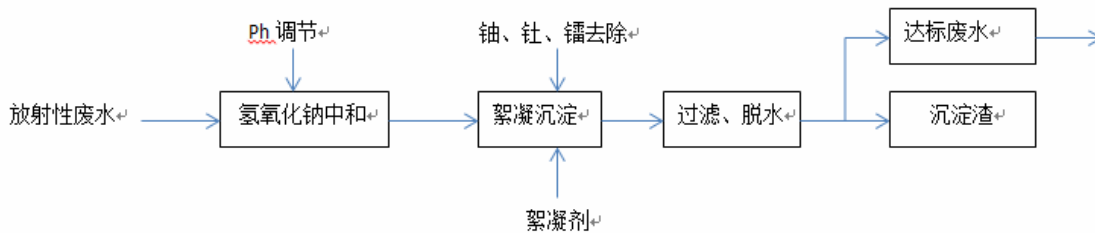


图 5-3 某氧氯化锆生产企业废水处理工艺流程图

c) 某独居石共伴生铀资源综合企业

该企业采用独居石生产稀土产品过程采用铀提取工艺回收铀产品。该企业产生的伴生放射性废水包括工艺废水和地面冲洗水。工艺废水为磷酸三钠晶体经固液分离后的液体、酸不溶渣洗涤后的液体以及铀合格液经沉淀过滤后产生的滤液；地面冲洗水主要是各生产厂房的地面冲洗产生的伴生放射性废水。废水中铀浓度约为 0.7mg/L，钍浓度约为 2.0mg/L。

该企业采用“电氧化+絮凝沉淀+蒸发结晶”的废水处理工艺。伴生放射性废水进入调节池进行均质均量后，泵入两级电氧化池，通过电化学反应去除废水中的有机物。之后，进入曝气絮凝沉淀池，加入絮凝剂，并曝气氧化、搅拌，通过絮凝沉淀作用进一步去除废水中的铀、钍和稀土物质。经以上物化处理，废水中的大部分有机物、铀、钍、稀土等物质已去除，废水中剩余的主要为氯化钠，通过蒸发结晶装置进行蒸发，将废水中的氯化钠固体等结晶出来，蒸发的冷凝液返回工艺使用；结晶母液再经过曝气絮凝沉淀池物化处理，去除废水中的铀、钍离子，之后回流至调节池。经处理后，蒸发冷凝液中铀钍总量为 0.14mg/L，去除率为 95%。

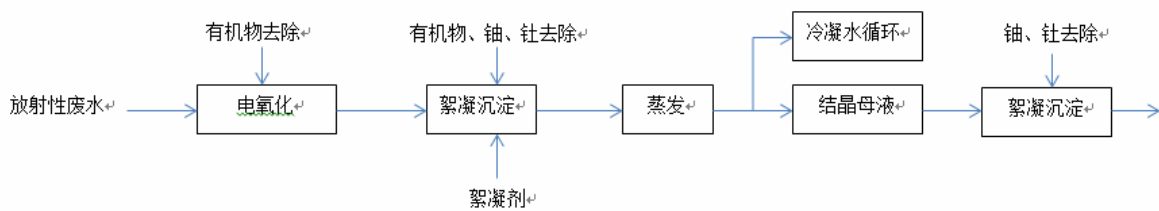


图 5-4 某独居石冶炼企业伴生放射性废水处理工艺流程图

d) 某堆浸采铀企业放射性废水的处理

该企业采用堆浸方式生产铀化学浓缩物“111”产品。该企业产生的放射性废水包括矿井废水、尾渣库渗水和工艺废水。

该企业对矿井水采用离子交换树脂进行吸附处理后，能够实现矿井水中污染物达标排放，处理后吸附尾液的铀浓度小于 0.05mg/L，²²⁶Ra 浓度小于 1.1Bq/L。树脂饱和后进行淋洗、转型，贫树脂返回继续进行矿井水处理。

该企业工艺废水包括酸性萃余液和碱性吸附尾液。工艺废水中酸性萃余液的铀浓度小于 10mg/L，碱性吸附尾液的铀浓度小于

3mg/L。处理工艺为：碱性废水经苛化后通过泵将废水打入浓密池，上清液溢流再与酸性废水混合，向混合废水中加入氯化钡溶液以除镭，然后用石灰乳中和并使铀等得以沉淀而转入沉淀渣内，沉淀渣经过滤后运至尾渣库存放，上清液进入槽式排放池，经检测合格后绝大部分返回再利用，剩余部分用于尾渣库洒水抑尘或厂内绿化灌溉。经处理后的废水中铀浓度小于 0.05mg/L，²²⁶Ra 浓度小于 1.1Bq/L。

该企业的尾渣库渗水采用锰砂吸附工艺除镭。尾渣库渗水通过排水井自流至消力池，经泵输送至高位池后自流至锰砂吸附池，经锰砂吸附后外排。

e) 某铀转化企业放射性废水的处理

该企业以精制二氧化铀为原料生产同位素分离品级的六氟化铀。该企业的放射性废水包括淋洗废水和地面冲洗水，废水中的铀浓度小于 2mg/L。

该企业将放射性废水送至消石灰反应器中，用盐酸调配至 pH 小于 7，然后在搅拌作用下缓慢加入消石灰乳，搅拌、静置、进入厢式压滤机过滤，滤液由排放槽接收，经取样分析合格（铀浓度小于 50μg/L）后排放，若不合格则返回再处理。

f) 某饮用水厂高放射性本底水源的处理

沙特阿拉伯盖西姆区首府布赖代的饮用水来源于深层地下水。水中含有镭的浓度达到 2.40~4.44Bq/L。该水厂使用纳米陶瓷平板超滤膜，采用投加水合氧化锰工艺组合进行过滤，使得供水中的镭活度浓度低于 0.11Bq/L。吸附镭的氧化锰颗粒通过滤膜被拦截，形成滤饼层，滤饼层通过反洗进入高浓度废物工艺段。该系统不需要复杂的预处理和絮凝工艺，并且陶瓷膜对于铁、锰有较大的适用范围。

该工艺实现了 95% 以上的镭去除率，可以被应用于含镭废水的处理，具有操作简单、反洗频率低、维护成本低的特点。

6 主要技术内容及说明

6.1 适用范围

规定了本标准的主要内容和适用范围，明确了对伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理与排放的技术指导作用。本标准规定了伴生放射性矿开发利用企业的放射性废水处理与排放的辐射环境保护原则与一般技术要求，适用于伴生放射性矿开发利用企业的放射性废水处理与排放，其他矿产资源开发利用企业可参照执行。

6.2 规范性引用文件

本标准引用了相关的标准，共 2 个规范性引用文件，其中国家标准 1 个，生态环境部行业标准 1 个。

6.3 术语和定义

本标准规定了伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理与排放涉及到的有关术语及定义，给出了伴生放射性矿、伴生放射性废水、流出物 3 个术语，并进行了定义和解释。

6.4 总体要求

本节主要介绍了伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理与排放的总体要求，具体包括：

(1) 辐射防护基本原则。伴生放射性废水的污染防治应遵循实践的正当性、防护与安全的最优化和剂量限制要求。

(2) “三同时”原则。伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理设施应符合环境影响评价文件和相关设计文件及指标的要求，与主体工程同时设计、同时施工、同时投产使用。

(3) 一致性原则。伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理设施的建设规模和工艺配置应与企业生产系统相协调，与企业当地排水规划相符合。

(4) 放射性污染风险防控。伴生放射性废水的污染防治应贯穿伴生放射性矿开发利用的规划、设计、建设、运行、关闭与整治等过程，均应满足有关法律法规和标准的要求。鼓励开发和应用先进的废水处理工艺，减少废水产生量并尽可能降低废水的放射性核素活度浓度。伴生放射性废水处理应采取二次污染防治措施。

6.5 源头控制

本节主要从源头控制方面针对伴生放射性废水处理提出要求，包括：伴生放射性废水应与其他废水分别收集、处理。同时，鼓励伴生放射性废水回用，提高水的循环利用率，减少伴生放射性废水排放量。

6.6 处理要求

本节主要介绍了废水处理设施的布置、废水处理设施的规模与工艺、防腐与防渗、事故应急、污泥处理与处置等伴生放射性废水处理要求。

6.6.1 废水处理设施的布置

本节主要规定了伴生放射性废水须在产生车间或独立的废水处理设施进行处理，相关设施宜就近布置，以降低废水输送过程潜在的辐射环境风险。

6.6.2 废水处理设施规模与工艺要求

本节主要规定了伴生放射性废水处理设施设计规模应以伴生放射性废水产生量为依据，并适应生产波动的要求，提出了相关设施

设备的技术要求。

6.6.3 防腐与防渗

本节主要规定了伴生放射性废水处理设施应按照国家有关标准和规范的要求采取防腐与防渗措施。

6.6.4 事故应急

本节主要规定了伴生放射性废水处理设施应设置事故应急池(槽),并采取相应的污染防治措施。

6.6.5 污泥处理与处置

如果采用沉淀法等进行伴生放射性废水处理,会产生污泥。本节主要规定了伴生放射性废水处理产生污泥应符合的要求。

6.7 排放控制

本节主要规定了伴生放射性废水处理达标后排放相关的要求,提出了排放口设置以及排放方式的技术要求。

6.8 运行与维护

排放达标是伴生放射性废水处理的目的,维护和管理是保证系统长期正常运转的关键。本节主要规定了伴生放射性废水处理设施运行管理、维护保养和应急相关的要求。

6.8.1 运行管理

本节主要介绍了企业应建立伴生放射性废水处理与排放相关管理制度以及运行异常时应及时采取措施进行调整。

6.8.2 维护保养

本节主要介绍了应定期对伴生放射性废水处理设施、设备进行检查和维护,并纳入全厂维护保养计划。

6.8.3 应急措施

本节主要介绍了伴生放射性废水处理应考虑各种可能的突发事故，建立完善的应急处理机制。

6.9 运行期满后的管理

本节主要规定了伴生放射性废水处理设施运行期满后相关的厂房、设备、场地等的辐射环境管理要求。

6.10 资料性附录

本附录给出了伴生放射性废水的处理方法、工艺路线及环境保护要求。需要说明的是，由于伴生放射性矿开发利用企业生产工艺千差万别，其产生的伴生放射性废水的组分也差异巨大。因此，相关企业应根据废水的水质特征、水量及其变化规律、处理后水的去向及排放标准的要求，综合考虑不同处理技术的优缺点，经技术经济比较后确定其废水处理工艺。

7 标准实施的环境效益及经济技术分析

本标准对伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理与排放的辐射环境保护原则与一般要求等进行了规定，对我国伴生放射性矿开发利用企业放射性废水处理设施的建设和管理具有较强的指导意义和实用价值，同时有利于生态环境主管部门进行相关的管理。本标准实施的效益主要体现在社会效益和环境效益上。

本标准的实施将有效减少伴生放射性矿开发利用企业放射性污染物的排放量，确保伴生放射性矿开发利用企业放射性废水的达标排放，对水环境的治理和可持续发展起到有力的保障作用。本标准的实施对我国伴生放射性矿开发利用辐射环境管理具有较强的指导意义和实用价值，有利于辐射环境改善，同时有利于生态环境主管

部门开展监管工作，对伴生放射性矿开发利用的可持续发展起到有力的保障作用，进而保障社会经济的可持续发展，促进人与环境的和谐发展。

8 标准实施建议

本标准为首次制订，由于伴生放射性废水处理技术将随着环境保护管理要求而不断发展与创新，目前技术上不成熟、应用上不广泛的技术在将来会不断发展，不断投入使用。因此，本标准中的相关技术会发生相应的变化，相应的技术要求也应随之进行相应的调整。

建议在本标准实施过程中，广泛听取和收集各方面的意见与建议，根据实际应用情况，对本标准进行不断的修订和完善，使其实用性和可操作性与时俱进，不断满足环境管理和工程建设的需要。