

# 中英核设施退役 废物管理及运输 合作可能性研究

二〇二二年三月

中国核能行业协会  
英国国际贸易部



CNEA



Department for  
International Trade  
国际贸易部



# 目录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 前言                          | 01 |
| 1. 管理法规和职责                  | 02 |
| 1.1 法律法规                    | 02 |
| 1.1.1 通用法律法规                | 02 |
| 1.1.2 退役有关法规                | 02 |
| 1.1.3 放射性废物有关法规             | 02 |
| 1.1.4 乏燃料运输有关法规             | 03 |
| 1.2 管理职责                    | 03 |
| 1.2.1 国家原子能机构主要职责           | 03 |
| 1.2.2 国家能源局主要职责             | 03 |
| 1.2.3 国家核安全局主要职责            | 03 |
| 2. 退役                       | 04 |
| 2.1 中英两国潜在合作                | 04 |
| 2.1.1 中国退役治理技术能力现状          | 04 |
| 2.1.2 中英两国潜在的合作             | 04 |
| 2.2 建议                      | 06 |
| 2.2.1 可向外方企业公开招标的潜在项目       | 06 |
| 2.2.2 正在寻找国际合作伙伴的分包商        | 06 |
| 2.2.3 推荐第三方代理机构             | 06 |
| 2.3 认证                      | 06 |
| 2.4 核电厂及研究堆现状               | 06 |
| 2.5 退役治理重点企业                | 09 |
| 2.5.1 中国核工业集团有限公司           | 09 |
| 2.5.2 中国广核集团有限公司            | 09 |
| 3. 放射性废物                    | 10 |
| 3.1 中英两国潜在合作                | 10 |
| 3.1.1 潜在合作项目                | 10 |
| 3.1.2 中方合作伙伴                | 11 |
| 3.2 放射性废物管理政策               | 11 |
| 3.3 放射性废物管理制度               | 12 |
| 3.4 认证要求                    | 13 |
| 3.4.1 申请条件                  | 13 |
| 3.4.2 申请贮存许可证               | 13 |
| 3.4.3 申请放射性废物处理许可证          | 14 |
| 3.4.3.1 放射性废物处理设施开工建设前提交的资料 | 14 |
| 3.4.3.2 放射性废物处理设施运行前提交的资料   | 14 |
| 3.4.4 申请从事放射性固体废物近地表处置活动    | 14 |



|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 3.4.5 申请从事放射性固体废物中等深度处置和深地质处置活动 ..... | 15 |
| 3.4.5.1 申请条件 .....                    | 15 |
| 3.4.5.2 选址阶段 .....                    | 15 |
| 3.4.5.3 建造前 .....                     | 15 |
| 3.4.5.4 运行前 .....                     | 15 |
| 3.4.6 申请材料审查 .....                    | 16 |
| 3.5 放射性废气处理现状 .....                   | 16 |
| 3.6 放射性废液处理现状 .....                   | 17 |
| 3.7 放射性固体废物处理现状 .....                 | 18 |
| 3.7.1 放射性固体废物处理常用技术 .....             | 18 |
| 3.8 放射性废物最小化现状 .....                  | 20 |
| 3.9 放射性废物处理研发和关注的技术 .....             | 20 |
| 3.9.1 正在研发的技术 .....                   | 20 |
| 3.9.2 未来关注的技术 .....                   | 21 |
| 3.10 放射性废物处理处置中外合作经验 .....            | 21 |

---

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>4. 乏燃料运输</b> .....        | 22 |
| 4.1 中英两国潜在合作 .....           | 22 |
| 4.1.1 公海铁乏燃料运输的实物保护 .....    | 22 |
| 4.1.2 公海铁乏燃料运输的应急预案及响应 ..... | 23 |
| 4.1.3 乏燃料铁路运输车的开发 .....      | 23 |
| 4.1.4 乏燃料贮运两用容器的研发 .....     | 23 |
| 4.1.5 高放废液运输容器的研发 .....      | 23 |
| 4.2 建议 .....                 | 23 |
| 4.2.1 推荐可向外方公开招标的潜在项目 .....  | 23 |
| 4.2.2 正在寻找国际合作伙伴的分包商 .....   | 24 |
| 4.2.3 第三方代理机构 .....          | 24 |
| 4.3 乏燃料运输容器取证 .....          | 24 |
| 4.4 乏燃料运输活动取证 .....          | 24 |
| 4.5 乏燃料运输现状 .....            | 25 |
| 4.6 公海铁联运及运输装备 .....         | 26 |
| 4.6.1 公海铁联运 .....            | 26 |
| 4.6.2 乏燃料运输容器 .....          | 26 |
| 4.7 运输工具 .....               | 27 |
| 4.7.1 乏燃料运输船 .....           | 27 |
| 4.7.2 乏燃料铁路运输车 .....         | 27 |
| 4.8 国际合作典型案例 .....           | 28 |
| 4.8.1 加纳、尼日利亚乏燃料国际运输 .....   | 28 |
| 4.8.2 放射性超标卫浴配件运输 .....      | 28 |
| 4.8.3 核电站乏燃料运输容器配置 .....     | 30 |



4.9 中英双方交流 ..... 30

结束语 ..... 31

插图

图 -1 中国大陆核电站分布情况 ..... 01

图 -2 核电厂放射性废气处理技术路线图 ..... 16

图 -3 核电厂放射性废液处理技术路线图 ..... 17

图 -4 核电厂常用固体废物处理技术路线图 ..... 18

图 -5 乏燃料运输活动取证的详细流程 ..... 25

图 -6 核电站乏燃料公路运输 ..... 25

图 -7 公海铁联运工艺流程 ..... 26

图 -8 NAC-STC 型乏燃料运输容器 ..... 26

图 -9 欣安吉祥轮 ..... 27

图 -10 D15B 型凹底平车 ..... 27

图 -11 加纳微堆高浓铀乏燃料运输 ..... 28

图 -12 放射性超标卫浴配件运输 ..... 29

图 -13 田湾核电站乏燃料运输 ..... 29

图 -14 中英双方在塞拉菲尔德交流研讨 ..... 30

图 -15 中英双方在巴罗港考察 ..... 31

附表

表 -1 中国已投运核电机组统计表 ..... 07

表 -2 中国大陆主要研究堆信息统计表 ..... 08



# 前言

为落实国家“碳达峰、碳中和”的战略目标，保证能源安全，实现“清洁低碳、绿色发展”的能源结构调整，中国深入推进能源转型，积极安全有序推进核电建设，积极探索核能多用途综合利用。截至 2021 年 12 月 31 日，中国大陆共有在建和运行核电机组 71 台，其中并网运行机组 53 台，装机容量为 54646.95MWe（额定装机容量）。中国大陆核电分布见图 -1。

随着核电批量化建设与运行，放射性废物的安全处理与处置、乏燃料的运输成为国内各方关注的焦点内容。中国大陆发展核电已有三十多年的历史，核电核电站退役工作也逐步提上议事日程，前期技术和政策准备工作已经开始。

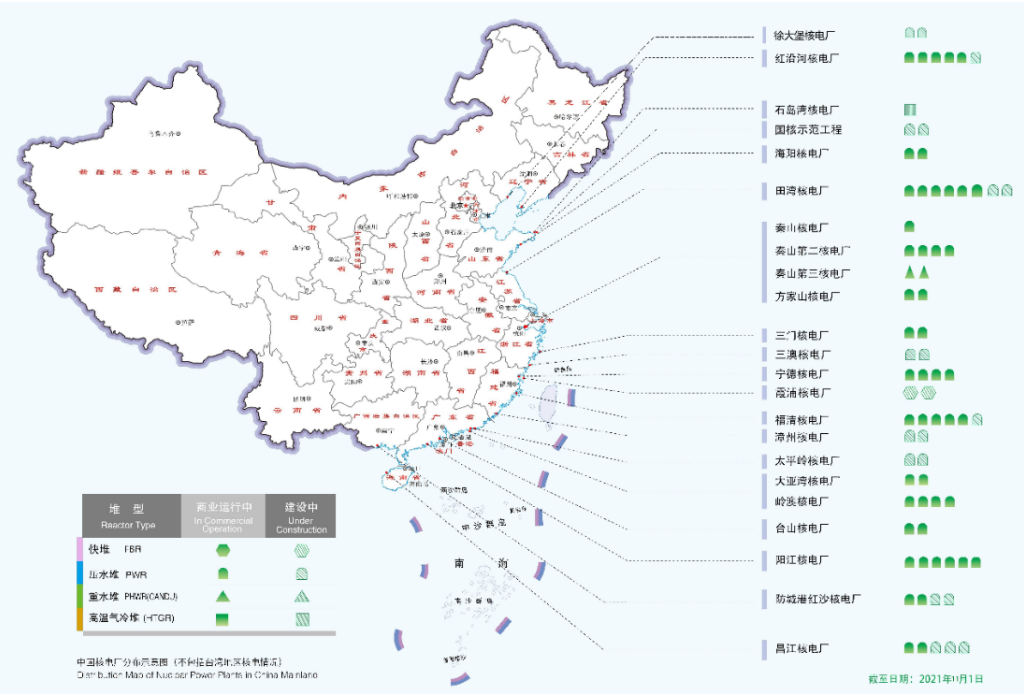


图 -1 中国大陆核电站分布情况



# 1. 管理法规和职责

## 1.1 法律法规

中国法律法规由全国人大颁布的法律、国务院颁布的条例、各部委或地方政府颁布的行政法规以及国家标准和技术导则组成，按关联程度排序如下：

### 1.1.1 通用法律法规

- ▶ 《中华人民共和国放射性污染防治法》（2003）；
- ▶ 《中华人民共和国核安全法》（2017）；
- ▶ 《中华人民共和国突发事件应对法》（主席令第 69 号）；
- ▶ 《中华人民共和国环境保护法》（2015）；
- ▶ 《中华人民共和国安全生产法》（2014）；
- ▶ 《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》；
- ▶ 《中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例》（HAF001，1986）；
- ▶ 《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》（2005）；
- ▶ 《危险化学品安全管理条例》（2011）；
- ▶ 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）；
- ▶ 《可免于辐射防护监管的物料中的放射性核素活度浓度》（GB27742-2011）；
- ▶ 《核动力厂、研究堆、核燃料循环设施安全许可程序规定》（2019）。

### 1.1.2 退役有关法规

- ▶ 《反应堆退役环境管理技术规定》（GB 14588-2009）；
- ▶ 《核设施退役安全要求》（GB/T 19597-2004）；
- ▶ 《核设施退役及放射性废物治理管理规定》（CAEA，2010）；
- ▶ 《核电站乏燃料处理处置基金征收使用管理暂行办法》（2010）；
- ▶ 《核电站乏燃料处理处置基金项目管理办法》（CAEA，2014）；
- ▶ 《生产堆退役的去污技术准则》（EJ/T 941-1995）；
- ▶ 《铀加工及燃料制造设施退役环境影响报告的标准格式与内容》（EJ/T 1037-1996）；
- ▶ 《拟开放场址土壤中残留放射性可接受水平规定（暂行）》（HJ 53-2000）；
- ▶ 《铀矿冶设施退役环境管理技术规定》（GB 14586-1993）。

### 1.1.3 放射性废物有关法规

- ▶ 《放射性废物安全管理条例》（国务院令第 612 号）；
- ▶ 《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871-2002）；
- ▶ 《放射性废物安全管理规定》（GB 14500-2002）；
- ▶ 《放射性废物分类》（2017）；
- ▶ 《放射性废物安全监督管理规定》（HAF401-1997）
- ▶ 《核设施放射性废物最小化》（HAD401/08-2016）
- ▶ 《放射性废物地质处置设施》（HAD 401/10-2020）
- ▶ 《放射性废物处置设施的监测和检查》（HAD 401/09-2019）。

#### 1.1.4 乏燃料运输有关法规

- ▶ 《中华人民共和国铁路法》（主席令第三十二号）；
- ▶ 《中华人民共和国海上交通安全法》（主席令第七号）；
- ▶ 《中华人民共和国港口法》（主席令第五号）；
- ▶ 《放射性物品运输安全管理条例》（国务院令 562 号）；
- ▶ 《中华人民共和国核材料管制条例》（1987 年 6 月 15 日国务院发布）；
- ▶ 《中华人民共和国道路运输条例》（国务院令 406 号）；
- ▶ 《铁路安全管理条例》（国务院令 639 号）；
- ▶ 《国内水路运输管理条例》（国务院令 625 号）；
- ▶ 《公路安全保护条例》（国务院令 666 号）。

---

## 1.2 管理职责

### 1.2.1 国家原子能机构主要职责：

- (1) 负责研究和拟定中国和平利用原子能事业的政策和法规。
- (2) 负责研究制定中国和平利用原子能事业的发展规划、计划和行业标准。
- (3) 负责中国和平利用核能重大科研项目的组织论证、立项审批，负责监督、协调科研项目的执行。
- (4) 负责核材料管制，以及核设施实物保护。
- (5) 负责核出口审查和管理。
- (6) 负责核领域政府间及国际组织间的交流与合作，代表中国参加 IAEA 及其活动。
- (7) 牵头负责国家核事故应急管理工作。
- (8) 负责核设施退役及放射性废物治理。

### 1.2.2 国家能源局主要职责：

- (1) 负责核电管理，牵头拟定核电行业法律法规和规章。
- (2) 拟定核电发展规划、准入条件、技术标准并组织实施。
- (3) 提出核电布局 and 重大项目审核意见。
- (4) 组织协调和指导核电科研工作。
- (5) 核电领域政府间国际合作与交流，负责政府间和平利用核能协定的对外谈判和签约工作。

### 1.2.3 国家核安全局主要职责：

- (1) 负责核安全和辐射安全的监督管理。拟定核安全、辐射安全、电磁辐射、辐射环境保护、核与辐射事故应急有关的政策、规划、法律、行政法规、部门规章、制度、标准和规范，并组织实施。
- (2) 负责核设施核安全、辐射安全及辐射环境保护工作的统一监督管理。
- (3) 负责核安全设备的许可、设计、制造、安装和无损检验活动的监督管理，负责进口核安全设备的安全检验。
- (4) 负责核材料管制与实物保护的监督管理。

- (5) 负责核技术利用项目、铀（钍）矿和伴生放射性矿的辐射安全和辐射环境保护工作的监督管理。负责辐射防护工作。
- (6) 负责放射性废物处理、处置的安全和辐射环境保护工作的监督管理，负责放射性污染防治的监督检查。
- (7) 负责放射性物品运输安全的监督管理。
- (8) 参与核事故应急处理，负责辐射环境事故应急处理工作。
- (9) 负责反应堆操纵人员、核设备特种工艺人员等人员资质管理。
- (10) 组织开展辐射环境监测和核设施、重点辐射源的监督性监测。
- (11) 负责核与辐射安全相关国际公约的国内履约。
- (12) 指导核与辐射安全监督站相关业务工作。

## 2. 退役

中国核设施退役强调全过程管理，明确“便利退役”的理念，对退役实行从工程设计起就要考虑的将退役活动，从单纯的末端行为扩展到设施全寿期考虑。同时，中国核设施退役策略也借鉴 IAEA 推荐的策略进行了调整，由最初的立即拆除、延迟拆除和就地埋葬三种退役策略调整为立即拆除和延缓拆除。

---

### 2.1 中英两国潜在合作

#### 2.1.1 中国退役治理技术能力现状

自上世纪 80 年代末起，中国针对中国大陆绝大部分老旧核设施全面开展退役工作，30 多年来，已成功实施了包括铀矿冶设施、生产堆设施、后处理设施、放化实验室、研究堆等多项退役工程，积累了丰富的实施经验，并掌握了各种源项调查技术、去污技术、拆除解体技术、辐射防护和辐射监测技术；建立了不同废物的处理整备设施，掌握了针对不同类型废物的处理技术；建立了极低放废物填埋场、中低放废物近地表处置场等废物处置设施，形成了完善的放射性废物处理处置能力。同时，中国高度重视科技创新工作，组织开展退役治理难点技术的科研攻关，积极探索退役治理新技术，开展科研基础设施建设，已基本建立了与中国核设施退役实际需求相适应的科研能力体系。

#### 2.1.2 中英两国潜在的合作

##### (1) 英方可参与中方的项目

###### 1) 核电厂退役

目前，中国尚未有核电厂工程退役实践，正在开展核电厂退役准备工作，中英两国可就以下方向开展合作：

###### i. 退役策略及方案研究

核电厂退役标准体系研究，核电厂退役策略研究，核电厂退役总体方案研究，核电厂退役关键设备拆除技术方案研究。

ii. 源项估算

核电厂放射性存留量估算方法，主要针对人员难以接近物项的放射性存留量估算，如堆芯。

iii. 退役数字仿真

核电厂退役数字化平台建设，主要包括三维仿真模型，退役方案中人员剂量及时估算，方案优化，废物流管理，退役设计辅助等；

iv. 退役费用估算

退役定额，成本估算方法及相关软件开发。

2) 专用技术及设备

虽然中国已具备中国大陆设施退役治理技术能力，但是也希望对现有技术进行升级优化，填补不足，中英两国也可以在以下技术上开展交流合作：

i. 源项调查技术方面

狭小空间内的远程放射性测量方法与技术；大剂量场下的实时动态辐射监测技术；关键材料和核素的监测技术；大规模放射性废物快速分类检测技术等。

ii. 去污技术方面

大规模设备、大面积墙体高效去污技术、新型高效去污技术的研究及专用去污设备研制。

iii. 切割解体技术方面

针对核电厂退役的反应堆压力容器、堆内构件等高辐射、大厚度结构的切割解体技术；高辐射场远程拆除与控制技术；屏蔽结构、钢覆面结构、大型罐槽等设施高效拆除技术；远距离遥控拆除工器具开发。

iv. 废物处理技术方面

退役中产生的特殊废物包括： $\alpha$  废物、有机废物、废石墨、放射性泥浆等废物的处理整备技术。

(2) 中方可为英方项目提供的支持

经过 30 多年的退役治理工程实践及科研攻关，目前中国已建立了完整系统的退役专业体系，并培养了一批退役治理技术研发、设计和工程实施的专业化人才队伍，针对英国的退役治理技术需求，中方能够充分发挥自身优势，可在工程设计、工程实施、设备供货、技术输出、联合研发等多种形式参与英方退役治理领域的工程、科研的项目。

(3) 合作开发第三方退役项目

中英两国也可充分发挥自身优势，强强联合，共同寻找国际上核设施退役治理潜在机会，组成联合体共同投标其他国家退役治理项目。

---

## 2.2 建议

### 2.2.1 可向外方企业公开招标的潜在项目

目前中国大陆正在开展一些核设施退役治理技术科研项目，一些关键设备将进行公开招标采购，相关信息会发布在中核集团电子采购平台上，可进行关注。

### 2.2.2 正在寻找国际合作伙伴的分包商

中国大陆各公开招标项目均遵守公开、公正、公平的原则，对供货商 / 分包商一视同仁；请对合作伙伴从技术能力、财务实力和服务水平综合进行评价。

### 2.2.3 推荐第三方代理机构

中核集团下属中国原子能工业有限公司一直承担着涉外项目引进的商务和代理职责，英国企业可与之进行咨询。同时，中国大陆有一些法国、德国等国家技术及设备的代理商，英国企业可与之进行咨询。

---

## 2.3 认证

根据《核安全法》核设施营运单位退役应当向国务院核安全监督管理部门申请许可。核设施退役前，核设施营运单位应当向国务院核安全监督管理部门提出退役申请，并提交下列材料：

- (一) 核设施退役申请书；
- (二) 安全分析报告；
- (三) 环境影响评价文件；
- (四) 质量保证文件；
- (五) 法律、行政法规规定的其他材料。

核设施退役时，核设施营运单位应当按照合理、可行和尽可能低的原则处理、处置核设施场址的放射性物质，将构筑物、系统和设备的放射性水平降低至满足标准的要求。

---

## 2.4 核电厂及研究堆现状

截至 2021 年 12 月 31 日，中国大陆运行核电机组共 53 台，详见表 -1。

按照设计寿期，预计 2050 年左右，将有 7 台机组将面临退役或退役准备阶段，包括秦山核电厂一号机组、大亚湾核电厂、岭澳核电厂一期、岭澳核电厂二期。2021 年 9 月，根据《中华人民共和国核安全法》及《中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例》有关要求，经过严格技术改造和审评，国家核安全局批准秦山核电厂 1 号机组运行许可证获准延续，有效期至 2041 年 7 月 30 日。根据电站运行情况及技术进步，其他 6 台机组有可能会提出延期申请。目前秦山核电厂 1 号机组，大亚湾核电厂提出了退役设想，正在研究核电厂退役总体方案。



表 -1 中国已投运核电机组统计表

| 核电厂 / 机组 | 机组 | 装 机 容 量<br>(MWe) | 设计寿命<br>(年) | 投运日期    | 备注      |
|----------|----|------------------|-------------|---------|---------|
| 秦山核电厂    |    | 330              | 30          | 1994.4  | 延寿 20 年 |
| 大亚湾核电厂   | 1# | 984              | 40          | 1994.2  |         |
|          | 2# | 984              | 40          | 1994.5  |         |
| 秦山第二核电厂  | 1# | 650              | 40          | 2002.4  |         |
|          | 2# | 650              | 40          | 2004.5  |         |
|          | 3# | 660              | 40          | 2010.1  |         |
|          | 4# | 660              | 40          | 2011.12 |         |
| 岭澳核电厂    | 1# | 990              | 40          | 2002.5  |         |
|          | 2# | 990              | 40          | 2003.1  |         |
|          | 3# | 1086             | 40          | 2010.9  |         |
|          | 4# | 1086             | 40          | 2011.8  |         |
| 秦山第三核电厂  | 1# | 728              | 40          | 2002.12 |         |
|          | 2# | 728              | 40          | 2003.7  |         |
| 田湾核电厂    | 1# | 1060             | 40          | 2007.5  |         |
|          | 2# | 1060             | 40          | 2007.8  |         |
|          | 3# | 1126             | 40          | 2017.12 |         |
|          | 4# | 1126             | 40          | 2018.10 |         |
|          | 5# | 1118             | 40          | 2020.9  |         |
|          | 6# | 1118             | 40          | 2021.5  |         |
| 红沿河核电厂   | 1# | 1119             | 40          | 2013.6  |         |
|          | 2# | 1119             | 40          | 2014.5  |         |
|          | 3# | 1119             | 40          | 2015.8  |         |
|          | 4# | 1119             | 40          | 2016.6  |         |
|          | 5# | 1150             | 60          | 2021.6  |         |
| 宁德核电厂    | 1# | 1089             | 40          | 2013.4  |         |
|          | 2# | 1089             | 40          | 2014.5  |         |
|          | 3# | 1089             | 40          | 2015.6  |         |
|          | 4# | 1089             | 40          | 2016.7  |         |
| 福清核电厂    | 1# | 1089             | 40          | 2014.11 |         |
|          | 2# | 1089             | 40          | 2015.10 |         |
|          | 3# | 1089             | 40          | 2016.10 |         |
|          | 4# | 1089             | 40          | 2017.9  |         |
|          | 5# | 1161             | 60          | 2021.1  |         |
|          | 6# | 1161             | 60          | 2021.12 |         |
| 阳江核电厂    | 1# | 1086             | 40          | 2014.3  |         |
|          | 2# | 1086             | 40          | 2015.6  |         |
|          | 3# | 1086             | 40          | 2016.1  |         |
|          | 4# | 1086             | 40          | 2017.3  |         |
|          | 5# | 1086             | 40          | 2018.7  |         |
|          | 6# | 1086             | 40          | 2019.7  |         |
| 方家山核电厂   | 1# | 1089             | 40          | 2014.11 |         |
|          | 2# | 1089             | 40          | 2015.1  |         |
| 三门核电厂    | 1# | 1250             | 60          | 2018.6  |         |
|          | 2# | 1250             | 60          | 2018.12 |         |

| 核电厂 / 机组 | 机组 | 装机容量<br>(MWe) | 设计寿命<br>(年) | 投运日期    | 备注 |
|----------|----|---------------|-------------|---------|----|
| 海阳核电厂    | 1# | 1250          | 60          | 2018.8  |    |
|          | 2# | 1250          | 60          | 2018.10 |    |
| 台山核电厂    | 1# | 1750          | 60          | 2018.12 |    |
|          | 2# | 1750          | 60          | 2019.9  |    |
| 昌江核电厂    | 1# | 650           | 40          | 2015.12 |    |
|          | 2# | 650           | 40          | 2016.8  |    |
| 防城港核电厂   | 1# | 1086          | 40          | 2016.1  |    |
|          | 2# | 1086          | 40          | 2016.10 |    |
| 石岛湾核电厂   | 1# | 211           | 40          | 2021.12 |    |

截至 2021 年 12 月 31 日，中国大陆主要研究堆相关信息见表 -2。

表 -2 中国大陆主要研究堆信息统计表

| 序号 | 设施名称             | 类型            | 热功率<br>(kW) | 状态   | 运行时间    | 退役时间    |
|----|------------------|---------------|-------------|------|---------|---------|
| 1  | 启明星 -1           | 次临界           | 0.00        | 运行   | 2005.7  |         |
| 2  | 中国先进研究堆          | 池式            | 60000.00    | 运行   | 2010.5  | 2040.5  |
| 3  | 中国实验快堆           | 快堆            | 65000.00    | 运行   | 2011.7  | 2041.7  |
| 4  | 医用微堆             | 微堆            | 30.00       | 运行   |         |         |
| 5  | 游泳池式反应堆          | 池式            | 3500.00     | 运行   | 1964.12 | 2032    |
| 6  | 微型反应堆            | 微堆            | 27.00       | 运行   | 1984.3  | 2036.2  |
| 7  | 零功率临界反应堆         | 快堆            | 0.050       | 延寿   | 2000.6  |         |
| 8  | 重水研究堆            | 重水堆           | 15000.00    | 退役中  | 1958.6  | 2007.12 |
| 9  | 高通量工程堆           | 池式            | 125000.00   | 运行   | 1981.12 | 2030    |
| 10 | 脉冲堆              | 池式、铀氢<br>锆核燃料 | 1000.00     | 运行   | 1990.7  | 2035    |
| 11 | 零功率装置高通量堆        | 标准组件          | 0.00        | 运行   | 1982.10 | 2050    |
| 12 | 岷江堆              | 池式            | 5000.00     | 运行   | 1992.12 | 2050    |
| 13 | 中国核动力院<br>零功率反应堆 | 标准组件          | 0.00        | 永久关闭 | 1966.1  | 1984    |
| 14 | 中国绵阳研究堆          | 池式            | 20000.00    | 运行   |         |         |
| 15 | 深圳微堆             | 微堆            | 30.00       | 待退役  | 1988.11 |         |
| 16 | 10 兆瓦高温气冷堆       | 高温气冷          | 10000.00    | 运行   | 2003.1  |         |
| 17 | 5 兆瓦低温堆          | 热保护           | 5000.00     | 运行   | 1989.11 |         |
| 18 | ESR-901          | 池式 - 双核       | 1000.00     | 关闭   |         |         |

目前，正在开展重水研究堆退役工作研究，深圳微堆处于待退役状态。

## 2.5 退役治理重点企业

中国目前退役治理活动主要针对早期老旧核设施、放化实验室、研究堆等，目前尚无核电厂工程退役实践。中国开展退役治理工作的企业主要有中国核工业集团公司、中国广核集团公司。

#### 2.5.1 中国核工业集团有限公司

中国退役治理的主要技术力量集中于中核集团，中核集团作为中国早期核设施退役治理的主体力量，承担了中国大陆绝大部分老旧核设施的退役工作，已成功实施了多项重大退役工程，涵盖了铀矿地质勘探、铀矿冶、核燃料循环设施、反应堆、后处理设施、废物处理处置等全产业链，形成了完整的核工业退役治理技术研发体系和工程实践能力，培养了一批涵盖核设施退役治理技术研发、设计和工程实施的专业化人才队伍，拥有较强的核退役治理技术能力和工程实施能力。中核集团退役力量主要在中国核电工程有限公司、中核环保有限公司、中核四 0 四有限公司、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院等。

中国核电工程有限公司是退役治理工作总体设计、工程总承包，退役工程技术研发单位，完成了中国早期多个核设施退役工程设计、放化实验室退役设计、上海微型研究堆退役总承包工作，多个废物处理整备设施工程设计、工程总承包工作。

中核环保有限公司是 2017 年 12 月 26 日正式揭牌成立的退役治理专业化公司，旗下成员单位包括中核四川环保工程有限公司、中国辐射防护研究院、中核清原环境技术工程有限公司等。其中，中核四川环保工程有限公司是主要的待退役设施及放射性废物处理处置设施的运营单位和退役治理工程实施单位，中核清原公司是放射性废物处置设施的运营单位，中国辐射防护研究院具有一定的研究设计能力。

中核四 0 四有限公司是主要的待退役设施及放射性废物处理设施的运营单位、退役治理工程实施单位，完成了多个核设施、放化实验室、研究堆的退役。中国原子能科学研究院是核设施运营单位，承担着部分设施退役治理工作及退役治理基础技术研发工作。

中国核动力研究设计院是核设施运营单位及退役治理工程设计和实施单位，承担着部分设施退役治理工作。

#### 2.5.2 中国广核集团有限公司

中国广核集团有限公司的退役治理业务由其下属中广核工程有限公司、中广核铀业发展有限公司负责。

中广核工程有限公司是集团退役业务、退役能力建设的责任单位，负责退役项目的组织实施，核心技术和产品的研发。

中广核铀业发展有限公司作为中广核后端业务总揽单位，积极参与公海铁联运体系，拥有放射性物质（7 类）铁路商运资质。

## 3. 放射性废物

为实现放射性废物最小化的管理要求，中国大陆核电站放射性废物处理在减少废物源项、引进先进技术和集中处理模式等方面开展了大量的工程实践与研究，取得了卓有成效的成果。同时，中国也在推进建设核电站中低放废物集中处置场取得一些进展。

当然，中国在放射性废物处理方面也存在一些急需解决的问题，而且中国三代核电发展对废物最小化提出了更高的要求。由于英方在核电站放射性废物有着先进的处理与处置技术和管理经验，中英双方可以探索在满足中国法规政策要求的前提下开展合作。

截至 2019 年 12 月 31 日，中国大陆的 16 个核电厂营运单位共配套建设了 69 个放射性废物处理和贮存设施；3 个研究堆营运单位共配套建设了 11 个放射性废物处理和贮存设施；4 个核燃料循环设施营运单位共配套建设了 14 个放射性废物处理和贮存设施；建成 1 个专门的放射性废物贮存设施。

此外，中国大陆共建成并运行有 31 座核技术利用放射性废物贮存库和 1 个国家废放射源集中贮存库。

中国大陆已有 3 座低、中放固体废物处置场投入运行。高放废物地质处置北山地下实验室项目（简称龙泰工程），已于 2021 年开工建设。项目总投资 27.23 亿元，预计 7 年完成。广东阳江和甘肃金塔正建设两个近地表放射性废物处置场，辽宁徐大堡核电厂也规划了一个近地表处置场，其中甘肃金塔处置场预计 2022 年 7 月投运。

---

### 3.1 中英两国潜在合作

随着中国政府碳达峰、碳中和目标的提出，中国核电项目迎来较好的发展窗口，目前有较多的拟建核电工程，将会有更多的放射性废物处理设备招标项目，为英方企业提供潜在机遇。在乏燃料循环处理方面，中国也在积极推进商用后处理厂工程，对放射性废物的检测、分类、处理、去污解控、智能化水平等均提出了更高的要求，且部分技术（如废气去除 C-14 技术、废液除氚技术、蒸汽裂解等）在中国大陆尚无成熟工程应用，也为英方企业供货、双方共同研发等提供了历史机遇。

目前中国核电厂址在总体的废物最小化综合治理策略和代价利益分析方面还存在一定的提升空间，英方企业可以借助相应运行经验和专业软件向中国核电厂提供相应技术服务。

#### 3.1.1 潜在合作项目

目前徐大堡 3、4 号机组核电项目正在进行放射性固体废物处理设备的国际公开招标，技术路线为废树脂锥形干燥器烘干、浓缩液桶内烘干、废过滤器芯水泥固定和杂项干废物分拣压实。

后续会有浙江金七门核电、连云港核能供热项目、华能霞浦核电等多个核电项目拟采用公开招标（国内或国际）进行设备采购，也可关注后续可能的核电技改项目等。

目前中国高放废物处置地下实验室将开展以下科研课题，英方企业和研究机构有机会参与这些方面的研究工作中：

- (1) 《地下实验室场址深部地质环境研究》
- (2) 《地下实验室场址水文地质特性研究》
- (3) 《地下实验室深部围岩力学特性和长期稳定性研究》
- (4) 《地下实验室场址环境长期监测和影响研究》
- (5) 《地下实验室深部岩体开挖关键技术研究》
- (6) 《处置坑机械开挖设备研究》
- (7) 《地下实验室示范处置巷道结构布置及处置概念研究》
- (8) 《地下实验室条件下缓冲材料原位试验安装技术研究》
- (9) 《深部围岩条件下核素释出和迁移行为研究》

#### 3.1.2 中方合作伙伴

中核集团下属中国原子能工业有限公司一直承担着涉外项目引进的商务和代理职责，英国企业可与之进行咨询。另外，中核清原环境技术工程有限责任公司、中国核电工程有限公司、中核环保有限公司、中广核环保产业有限公司、国核铀业发展有限责任公司等都是可能的合作伙伴。

---

### 3.2 放射性废物管理政策

- (1) 放射性废物产生单位承担放射性废物管理的全面安全责任。核设施营运单位、放射性废物处理处置单位应当对放射性废物进行减量化、无害化处理、处置，确保永久安全；高水平放射性废物实行集中深地质处置，由国务院指定的单位专营。
- (2) 对放射性废物实施分类管理。低水平放射性固体废物实行区域近地表处置，中水平放射性固体废物实行集中的中等深度地质处置，对高水平放射性固体废物实行集中的深地质处置，对铀（钍）矿冶固体废物实行就地相对集中填埋处置；
- (3) 环境友好原则。通过合理选择和利用原材料，采用先进的生产工艺和设备，实施物料的再利用和再循环，使放射性废物的产生量和向环境的排放量达到合理可行尽量低的水平；
- (4) 放射性废物管理设施应与主体设施同时设计、同时建造、同时投入使用；
- (5) 核技术利用放射性废物以省、自治区、直辖市为单位集中收贮。向环境排放放射性废气、废液，必须符合国家放射性污染防治标准；
- (6) 禁止在内河水域或海洋上处置放射性固体废物。禁止将放射性废物和被放射性污染的物品输入中华人民共和国境内或者经中华人民共和国境内转移。
- (7) 实施放射性废物最小化管理。在核设施设计、建造、运行和退役过程中，通



过废物的源头控制、再循环与再利用、清洁解控、优化废物处理和强化管理等措施，经过代价利益分析，使最终放射性固体废物产生量（体积和活度）可合理达到尽量低。

### 3.3 放射性废物管理制度

- (1) 中国大陆实行放射性废物活动的许可证审批制度，并禁止无许可证运行乏燃料和放射性废物管理设施。
  - ▶ 国家实行核设施安全许可制度，国家核安全局负责核设施安全许可证的批准和颁发。许可证件包括核设施厂址选择审查意见书、建造许可证、核设施运行许可证，以及核设施退役批准书。核设施包括核电厂、研究堆、核燃料循环设施，以及放射性废物处理和处置设施等民用核设施。上述核设施的营运单位在进行核设施选址、建造、运行、退役等活动前，必须申请领取相应许可证。设施营运单位领取有关许可证或审批文件后，方可进行相应的建造、装料、运行、退役等活动。
  - ▶ 专门从事放射性固体废物贮存、处置活动的单位应当取得放射性固体废物贮存、处置许可证。放射性固体废物贮存、处置许可证由环境保护部（国家核安全局）审批、颁发。
- (2) 监管检查、文件和报告制度。
  - ▶ 国家实行放射性污染监测制度、放射性气态和液态流出物排放许可制度、流出物与环境监测制度，以及核事故应急制度等。
  - ▶ 国家核安全局及其派出机构对核设施开展例行检查。县级以上人民政府环境保护主管部门和其他有关部门依据《中华人民共和国放射性污染防治法》和《放射性废物安全管理条例》的规定对放射性废物处理、贮存和处置等活动的安全性进行监督检查。
  - ▶ 核设施营运单位应当对乏燃料和放射性废物管理设施的试验程序、运行程序、质量保证记录、试验结果和数据、运行维修记录，以及缺陷和异常事件记录等实行文件化管理。放射性固体废物贮存、处置单位应当建立放射性固体废物贮存、处置情况记录档案，如实记录与贮存、处置活动有关的事项。
  - ▶ 放射性固体废物贮存单位应当按照环境保护部（国家核安全局）的规定定期如实报告放射性废物产生、排放、处理、贮存、清洁解控和送交处置等情况。放射性固体废物处置单位应当于每年 3 月 31 日前向相关部门如实报告上一年度放射性固体废物接收、处置和设施运行等情况。
  - ▶ 出现核与辐射事故应急状态时，核设施营运单位必须立即向相关部门报告。放射性固体废物贮存单位和处置单位应当向相应的主管部门报告发现的安全隐患或构成的辐射事故。

- (3) 强制执行乏燃料和放射性废物管理相关法规和许可证条款。对于违反法规和许可证条款的许可证持有者，国家核安全局在必要时有权采取强制性措施，责令许可证持有者采取安全措施或停止危及安全的活动。国家核安全局可依其情节轻重，给予警告、限期改进、停工或停业整顿、吊销许可证件的处罚；对于不履行处罚决定，逾期又不起诉的，由国家核安全局申请人民法院强制执行。

---

## 3.4 认证要求

### 3.4.1 申请条件：

申请面向外方机构开放。申请从事放射性废物贮存、处理活动的单位，应当具备下列条件：

- (1) 有法人资格；
- (2) 有能保证设施安全运行的组织机构，包括负责设施运行、安全防护（含辐射监测）和质量保证等部门；
- (3) 有三名以上放射性废物管理、辐射防护、环境监测方面的专业技术人员，其中至少有一名注册核安全工程师；
- (4) 有符合国家有关放射性污染防治标准和国务院生态环境主管部门规定的放射性检测、辐射防护和环境监测设备；
- (5) 有健全的管理制度以及符合核安全监督管理要求的质量保证体系，包括运行操作规程、质量保证大纲、运行监测计划、辐射监测计划、应急预案等。

### 3.4.2 申请贮存许可证

申请领取贮存许可证的单位，应当在放射性废物贮存设施运行前，向国务院核安全监督管理部门提出申请并提交以下材料：

- (1) 放射性废物贮存许可证申请表；
- (2) 最终安全分析报告（含选址安全分析报告）；
- (3) 环境影响评价文件的批复文件；
- (4) 企业法人营业执照正、副本的复印件，或者事业单位法人证书正、副本的复印件，以及法定代表人身份证的复印件；
- (5) 从事放射性废物贮存管理和操作人员的培训和考核证明，注册核安全工程师证书复印件；
- (6) 放射性检测、辐射防护和环境监测设备清单；
- (7) 放射性废物贮存管理制度证明文件，包括操作规程、质量保证大纲及程序文件清单、辐射监测计划、贮存设施运行监测计划、应急预案、记录档案管理文件等；
- (8) 法律、行政法规规定的其他材料。国务院核安全监督管理部门依法对上述文件进行技术审查，审查时间通常不超过 3 个月。

### 3.4.3 申请放射性废物处理许可证

#### 3.4.3.1 放射性废物处理设施开工建设前提交的资料

申请领取处理许可证的单位，应当在放射性废物处理设施开工建设前，向国务院核安全监督管理部门提出建造申请并提交以下材料：

- (1) 初步安全分析报告（含选址安全分析报告）；
- (2) 环境影响评价文件的批复文件；
- (3) 质量保证大纲（建造阶段）；
- (4) 企业法人营业执照正、副本的复印件，或者事业单位法人证书正、副本的复印件，以及法定代表人身份证的复印件；国务院核安全监管部门依法对上述文件进行技术审查，审查时间通常不超过 3 个月。

#### 3.4.3.2 放射性废物处理设施运行前提交的资料

申请领取处理许可证的单位，应当在放射性废物处理设施运行前，向国务院核安全监督管理部门提出申请并提交以下材料：

- (1) 放射性废物处理许可证申请表；
- (2) 最终安全分析报告；
- (3) 环境影响评价文件的批复文件；
- (4) 企业法人营业执照正、副本的复印件，或者事业单位法人证书正、副本的复印件，以及法定代表人身份证的复印件；
- (5) 从事放射性废物处理管理和操作人员的培训和考核证明，注册核安全工程师证书复印件；
- (6) 放射性检测、辐射防护和环境监测设备清单；
- (7) 放射性废物处理管理制度证明文件，包括操作规程、质量保证大纲（运行阶段）及程序文件清单、辐射监测计划、贮存设施运行监测计划、应急预案、记录档案管理文件等；
- (8) 法律、行政法规规定的其他材料。国务院核安全监督管理部门依法对上述文件进行技术审查，审查时间通常不超过 3 个月。

### 3.4.4 申请从事放射性固体废物近地表处置活动

申请从事放射性固体废物近地表处置活动的单位，应当具备下列条件：

- (1) 有国有或者国有控股的企业法人资格，有不少于三千万元的注册资金；
- (2) 有能保证近地表处置设施安全运行的组织机构，包括负责处置设施运行、安全防护（含辐射监测）和质量保证等部门；
- (3) 有十名以上放射性废物管理、辐射防护、环境监测方面的专业技术人员，其中注册核安全工程师不少于三名；
- (4) 有符合国家有关放射性污染防治标准和国务院生态环境主管部门规定的放射性检测、辐射防护和环境监测设备，以及必要的辐射防护器材；
- (5) 有能保证其处置活动持续进行直至安全监护期满的财务担保。

### 3.4.5 申请从事放射性固体废物中等深度处置和深地质处置活动

#### 3.4.5.1 申请条件

申请从事放射性固体废物中等深度处置和深地质处置活动的单位，除满足本 3.3.4 节第（2）项、第（4）项、第（5）项规定的条件外，还应当具备下列条件：

- (1) 有国有或者国有控股的企业法人资格，有不低于一亿元的注册资金；
- (2) 有二十名以上放射性废物管理、辐射防护、环境监测方面的专业技术人员，其中注册核安全工程师不少于五名。

#### 3.4.5.2 选址阶段

申请领取处置许可证的单位，应当在处置设施选址阶段向国务院核安全监督管理部门提交处置设施选址安全分析报告。

#### 3.4.5.3 建造前

申请领取处置许可证的单位，应当在处置设施开始建造前，向国务院核安全监督管理部门提出建造申请并提交以下材料：

- (1) 初步安全分析报告；
- (2) 环境影响评价文件的批复文件；
- (3) 质量保证大纲（建造阶段）；
- (4) 企业法人营业执照正、副本的复印件，或者事业单位法人证书正、副本的复印件，以及法定代表人身份证的复印件。国务院核安全监督管理部门依法对上述文件进行技术审查，审查时间通常不超过 12 个月。

#### 3.4.5.3 运行前

申请领取处置许可证的单位，应当在处置设施接收放射性固体废物前，向国务院核安全监督管理部门提出申请并提交以下材料：

- (1) 放射性废物处置许可证申请表；
- (2) 最终安全分析报告；
- (3) 环境影响评价文件的批复文件；
- (4) 企业法人营业执照正、副本的复印件，或者事业单位法人证书正、副本的复印件，以及法定代表人身份证的复印件；
- (5) 从事放射性固体废物处置管理和操作人员的培训和考核证明，注册核安全工程师证书复印件；
- (6) 放射性检测、辐射防护和环境监测设备清单；
- (7) 财务担保证明；
- (8) 放射性固体废物处置管理制度证明文件，包括处置操作规程、质量保证大纲（运行阶段）及程序文件清单、处置设施运行监测计划、辐射监测计划、应急预案、记录档案管理文件、信息管理系统证明文件等；

- (9) 法律、行政法规规定的其他材料。国务院核安全监督管理部门依法对上述文件进行技术审查，审查时间通常不超过 12 个月。

#### 3.4.6 申请材料审查

国务院核安全监督管理部门对收到的许可申请材料进行形式审查，申请材料不齐全或者不符合法定形式的，在五个工作日内告知申请人需要补正的全部内容；对于申请材料齐全、符合法定形式，或者申请人按照要求提交全部补正申请材料的，应当予以受理；否则不予受理。国务院核安全监督管理部门对于受理或者不予受理的许可申请，应当出具书面凭证；需要技术审查的，一并告知预计的技术审查时间。

### 3.5 放射性废气处理现状

根据放射性废气的来源和特性，核电厂产生的放射性废气分为含氧废气和含氢废气。含氢废气主要由氢气、氮气、气态裂变产物（Kr、Xe、I 等）和气态活化产物（N-16、C-14）等组成，放射性水平较高。含氧废气的主要成分为空气、水蒸汽和少量放射性气体和气溶胶。对于含氢废气，中国采用加压贮存衰变和活性炭滞留滞留衰变技术处理惰性气体；对于含氧废气，中国采用活性炭吸附和高效过滤去除碘和气溶胶。中国核电厂目前放射性废气处理技术路线见下图。

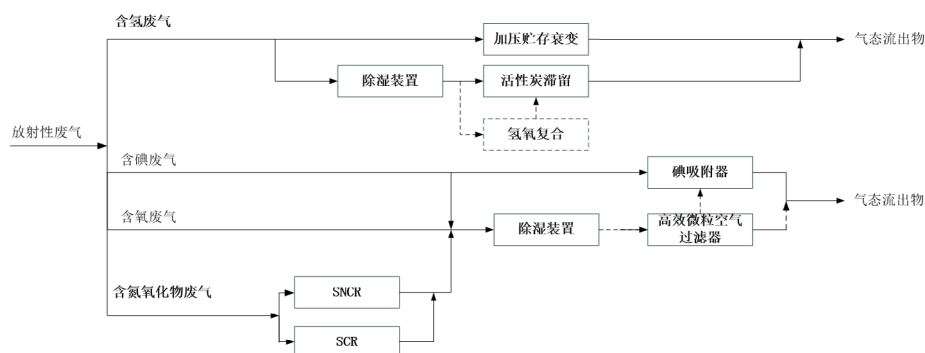


图-2 核电厂放射性废气处理技术路线图

惰性气体加压贮存衰变已在中国大陆 M310、二代加、华龙一号等型号机组工程应用。惰性气体滞留衰变技术已在中国大陆 AP1000、VVER、EPR、国和一号、华龙一号和玲珑一号（模块式小堆）等型号机组中工程应用，利用活性炭对惰性气体的动态物理吸附原理衰变短寿命的 Kr 和 Xe 核素。活性炭吸附除碘技术和高效过滤除气溶胶技术已在中国大陆 M310、二代加、VVER、EPR、国和一号、华龙一号和玲珑一号等型号机组工程应用。

对于核电厂含氢废气，为降低氢气爆炸风险，提高核电机组的安全性，华龙一号及后续机型正在开展含氢废气的氢氧复合技术的工程化应用研究，将在后续核电项目中实现工程应用，中广核和中国核电工程有限公司正在进行氢氧复合技术研

究。同时在等离子熔融处理放射性废物过程中，由于产生含氮氧化物的放射性废气，中国正在开展 SCR 和 SNCR 处理氮氧化物的工程应用研究。

### 3.6 放射性废液处理现状

根据放射性废液的来源和特性，核电厂放射性废液根据化学组成和放射性分为工艺排水、化学排水和地面排水三类，主要化学成分为硼酸，主要放射性核素为 H-3、C-14、Co-58、Co-60、Ag-110m 等。对于工艺排水，通常采用离子交换技术或者絮凝 + 离子交换技术处理放射性核素；对于地面排水，通常采用过滤技术去除固体颗粒杂质；对于化学排水，采用自然循环蒸发、强制循环蒸发和热泵蒸发技术进行浓缩处理。中国核电厂放射性废液处理技术路线见下图。

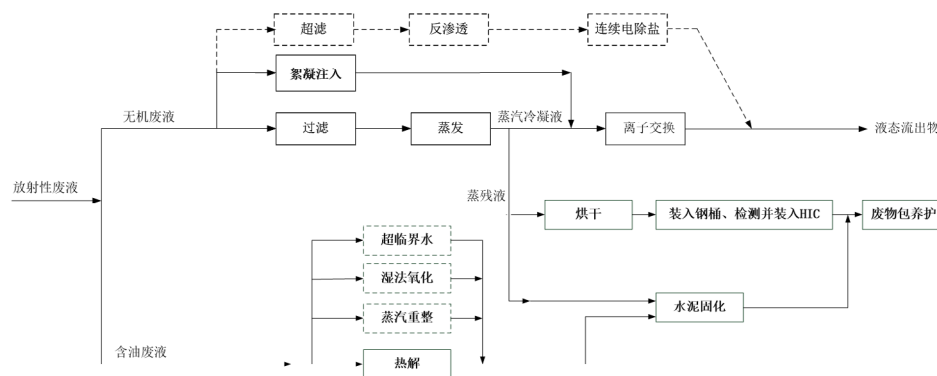


图 -3 核电厂放射性废液处理技术路线图

离子交换技术利用有机树脂去除离子态放射性核素，已在中国大陆 M310、AP1000、VVER、国和一号等型号机组工程应用。针对核电厂放射性废液中所存在的胶体态核素（如 Co-60、Ag-110m），华龙一号机组采用絮凝注入及活性炭吸附技术，用于去除放射性废液中的颗粒物及放射性核素，实现保护离子交换床和减少废树脂的产生量的作用。

自然循环蒸发技术是利用热虹吸作用使料液在加热器和蒸发器之间循环蒸发，该技术已在 M310、二代加、VVER、华龙一号等型号机组中工程应用；强制循环在蒸发过程中利用循环泵对料液进行循环以增强传热效果，该技术已在 M310 型号机组中应用；热泵蒸发技术是利用蒸汽压缩机对蒸发产生的二次蒸汽进行压缩升温后作为蒸发热源的节能技术，该技术已在 AP1000、EPR、国和一号和华龙一号等型号机组中工程应用。

对于低放废液深度净化技术，中国正在开展新型废液处理技术进一步提高净化系数和废物最小化水平，如超滤、反渗透和连续电除盐等膜处理技术的工程验证研究，已在大亚湾核电站开展工程应用。

内陆厂址由于受纳水体和稀释能力有限，对液态流出物排放浓度要求更高，内陆



核电放射性液体废物的处理将会成为新的挑战，近年来中国大陆在积极开展内陆厂址废液的深度净化技术研究。

### 3.7 放射性固体废物处理现状

在放射性固体废物处理方面，中国大陆核电站早期普遍采用水泥固化技术处理废树脂和蒸残液，用水泥固定技术处理废过滤器芯和不可压实废物，用锥形干燥技术处理废树脂，用桶内干燥技术和流化床干燥技术进行蒸残液和放射性废液烘干，采用高完整性容器（HIC）整备烘干后的废树脂、蒸残液烘干盐桶、焚烧灰桶、以及脱水后的废树脂和废过滤器芯，采用分拣和超级压实技术处理杂项干废物，采用焚烧技术处理可燃固体废物和放射性废油，采用降解和热氧化技术处理可降解防护用品，对废弃金属废物进行拆解、去污和熔炼等。中国核电厂常用的固体废物处理技术见下图。

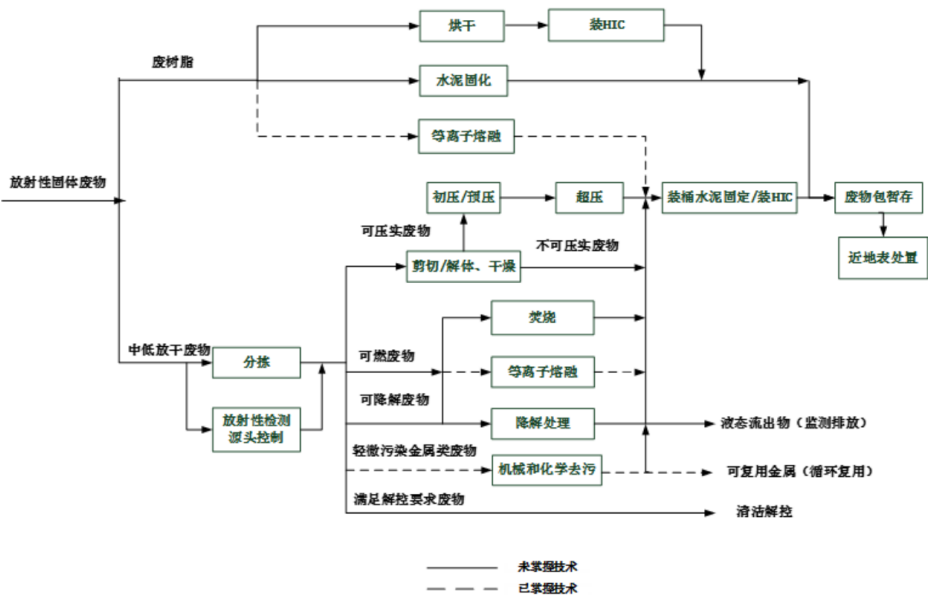


图-4 核电厂常用固体废物处理技术路线图

#### 3.7.1 放射性固体废物处理常用技术

(1) 树脂和蒸残液处理技术：二代加改进型核电机组、华龙核电项目等项目采用 200L 和 400L 钢桶桶内搅拌和桶外搅拌水泥固化技术，包括关键设备设计和不同化学成分的水泥固化配方研发，适用于废树脂和蒸残液等湿废物的处理。

在田湾核电基地废物处理中心的设计中，与德国 NUKEM 公司合作采用的是废树脂和蒸残液烘干技术，主要设备为德国 NUKEM 公司供货。目前，三门核电厂、田湾核电厂、霞浦核电厂、漳州核电厂等多个核电项目采用了废树脂和蒸残液烘干技术，装有烘干废树脂或烘干蒸残液干燥盐的 200L 废物桶，装入混凝土 HIC，能够满足近地表处置要求。

- (2) 过滤器芯处理技术：在多个核电项目中废弃的水过滤器芯采用水泥固定技术路线处理，是中国大陆目前最常见的水过滤器芯处理技术。

通风过滤器芯按照放射性水平和核素类型的不同，采用贮存衰变的方案，废通风过滤器芯的金属框架可以在拆卸去污后进行清洁解控；或采用三向压实装入钢桶再超级压实和水泥固定的方案，对放射性水平相对较高的废通风过滤器芯进行减容处理。

- (3) 可燃固体废物：由于可燃废物都属于可压实废物，在多个核电项目中，采用初级压实、超级压实和水泥固定技术路线处理可燃固体废物。

在田湾核电站和华龙一号核电项目中，采用可降解防护用品并尊和相应降解装置来降低可燃固体废物产生量，能够在不具备可燃废物焚烧炉建造条件的核电厂址使用来降低待处置废物包产生量。

- (4) 可压实固体废物：目前中国大陆核设施有较多采用超级压实机处理低放固体废物的工程实例，中国大陆自主研发的干废物压实打包设备能够实现自主设计和自主供货。

- (5) 不可压实固体废物：在多个核电厂采用了水泥固化技术处理不可压实固体废物。水泥固定技术是一种常用的固体废物整备技术，将容器内的废物浇注水泥浆固定在水泥基体中，废物体性能满足近地表处置要求，用于对放射性废滤芯、超压减容后的桶饼和不可压实干废物进行水泥固定，处理后产生 200L 和 400L 钢桶废物包。已经在 M310 改进型核电机组和华龙一号机组上采用。

- (6) 混凝土高完整性容器（HIC）包装技术：将不满足近地表处置要求的 200L 钢桶（例如装有烘干盐、烘干树脂等的废物桶）装入混凝土 HIC 并封盖，装混凝土 HIC 后能够满足近地表处置要求，已经在田湾废物处理中心、三门厂址废物处理设施采用。

- (7) 放射性废物厂内运输技术：采用特种车辆和装卸系统，在核电厂内部，将放射性废树脂、浓缩液、废滤芯、干废物运送到集中处理设施进行处理，三门核电厂和田湾核电厂的废树脂、废液和废滤芯运输系统（包括装卸部分）由西屋德国公司和 NUKEM 公司供货。

- (8) 废物暂存库技术：各类固体废物处理以后形成废物桶、箱、容器，需要在核电厂或核设施内的废物暂存库进行贮存，贮存库一般采用数控起重机和自动吊具遥控搬运废物包，贮存一定年限后运往处置场处置。在多个核设施工程设计中，采用不同类型的放射性固体废物暂存库设计，包括数控吊车调运的贮存区、贮存竖井式废物库。在核电项目和核化工项目上完成了多种类型的高、中、低放废物库工程设计，经验比较丰富，能够进行自主设计和自主供货。

---

### 3.8 放射性废物最小化现状

随着华龙一号等三代核电机组规模化建设，中国大陆积极开展核电厂废物最小化战略研究，从源项管理、引进先进技术和新的管理模式等多方面实现废物最小化目标。目前在建的华龙一号核电机组废物包年产生量目标值 $\leq 50\text{m}^3/\text{堆}\cdot\text{年}$ ，根据中国先进压水堆用户要求文件（CUR）后续新建核电机组废物包年产生量应 $\leq 30\text{m}^3/\text{堆}\cdot\text{年}$ 。

中国已经开展新型废液膜处理、可降解废物处理、废树脂锥形干燥、浓缩液桶内干燥、HIC、可燃废物焚烧和等离子熔融等先进技术的工程化应用，并逐渐在新建核电厂应用。同时还在开展废树脂湿法氧化、超临界水氧化、蒸汽重整、聚合物固化等新技术的研究。

新建核电站多采用“分散与集中”的场内废物管理模式，已经运行很久的核电站也在寻求废物管理的优化。华龙一号新建核电机组已实现废物集中处理，配置全厂的废物处理中心，集中处理全厂废物，提高废物的处理水平。

目前三门核电站采用了“分散与集中”的放射性废物管理模式，核岛废物处理设施属于单机组配置，厂址废物处理设施（SRTF）属于多机组共用。三门核电站的废物管理模式在中国大陆尚属首次运用，虽然在前期运行阶段可能会遇到一些问题，但是这种模式提供了流水线式的废物处理流程，提高了设备利用率，有利于采用大型的、高减容的废物处理设备，这样既提高了经济性，又有利于实现废物最小化的目标。随后中国山东海阳和江苏田湾等核电站也完成了厂址废物处理中心的集中处理模式工程应用。

---

### 3.9 放射性废物处理研发和关注的技术

#### 3.9.1 正在研发的技术

对于核电厂异常或事故工况下放射性水平较高的废液，中国大陆正在开展移动式废液处理技术工程应用研究，采用活性炭、沸石等高选择性的无机吸附介质处理放射性核素。

中国辐射防护研究院开发了废树脂湿法氧化技术，能够将放射性废树脂氧化成无机废液，再进行蒸发和水泥固化处理，目前该技术已经在秦山核电站完成了热试。

对于洗涤、淋浴等废水，中国正在开展电芬顿和紫外线等处理技术工程化研究。此外，对于核电厂产生的少量含油废液，中国已开展了超临界水氧化技术工程研究。

中国核电正在研发或进行工程化的技术包括：采用等离子熔融技术处理干废物、废树脂和保温材料，采用含硼浓缩液高效固化处理蒸残液，采用湿法氧化技术处理废树脂，采用蒸汽重整技术处理废树脂和可燃废物，采用聚合物固化技术处理

废树脂和可燃废物，采用聚合物固化技术处理废树脂和蒸残液烘干盐，这些技术还没有实现工程上应用。

### 3.9.2 未来关注的技术

然而中国在 C-14 和 Kr-85 去除、应用及长期贮存方面还尚待开展研究与合作。

中国关注的放射性废液处理研究技术方向包括含油废水处理、内陆核电站除氙和液态流出物“近零”排放技术。

中国关注废物深度减容（例如废树脂等离子熔融处理）后产生中放废物的中等深度处置问题。此外，中等深度处置技术也在研发进程中，包括中等深度地质处置以及深地质处置的包装、处置、评价等技术是中国关注的方向。

中国的高温气冷堆和重水堆会产生比较多的 C-14 类废物，快堆将会产生放射性废钠，这些废物的最小化、处理和处置技术是中国未来技术研发和国际合作关注的重要内容。“问题”废物处理方面，根据废物的物理、化学性质采取适宜的检测分类、拆解切割、湿燃烧、水法或干法贮存、衰变处理等方法进行处理。这些“问题”废物的处理也是中英重要的潜在双方合作点，对于 C-14 废物可采用先无机化再进行 C-14 回收的处理方案，对于半衰期较短的放射性废钠，优先进行衰变后处理或回用。总体思路是采取精准分类、依据原则降级、减少放射性扩散危害、尽量回收复用的思路来解决这些“问题”废物。

随着 5G 通信、工业自动化等高速发展，中国在放射性废物处理领域也在关注无人驾驶运输、放射性废物智能化整备、处理和暂存等技术的研发和应用。

---

## 3.10 放射性废物处理处置中外合作经验

目前中国大陆企业重点关注更有利于放射性废气废液净化、废物减容、去污解控、废物包安全性能和设备自动化水平的技术研究，旨在提升放射性废物处理及管理水平。中国大陆企业已掌握了过滤、离子交换、絮凝、活性炭吸附、自然循环蒸发、强制循环蒸发、热泵蒸发、水泥固化/固定、废树脂和浓缩液烘干、HIC 整备、废物压实减容、低放废物焚烧等技术，正在进行膜处理（UF、RO、CEDI）、无机吸附、等离子熔融处理多类型废物技术等已实现工程化应用或即将实现工程化应用，具有较强的研发、设计和运行能力。在放射性废物处理领域，中国也欢迎国外企业参与，实现强强联合。

目前已经与西屋、法马通、NUKEM 等国外供货商在核电、核化工的放射性废物处理领域进行过较大规模的合作，建造了相应工程设施。国外企业可以考虑以设施设计、设备供货、技术输出、联合研发等多种形式参与中方放射性废物处理领域的工程、科研的项目。

中国在福清、方家山、海南等核电项目中与西屋（德国）公司合作，开展了水

泥固化设施和干废物分拣和超级压实设备的设计供货，在三门核电厂与西屋公司合作进行核岛三废系统和厂址废物处理设施的设计供货，在田湾项目中与德国 NUKEM 公司合作进行了放射性废物处理中心的设计供货。在山东海阳核电厂与美国 ES 公司合作，进行了厂址废物处理设施的设计供货。在台山核电厂与 AREVA 公司合作，进行了三废处理系统的设计供货。

以中德合作的 VPC 玻璃固化项目为例，中方以国际招标的形式进行公开招标，最终德方的联合体（EVONIC、WAK、KAH、KIT）中标，中德双方分工如下：德方完成概念设计（CD）、中德双方共同完成基本设计（BD）、中方完成详细设计（DD）德方审查确认、德方供货核心设备、德方提供现场技术服务、德方确保设施性能，简而言之，德方提供设计和核心设备供货。

此外，在核设施退役及放射性去污领域，中国辐射防护研究院与法国 COGEMA 公司开展了技术研究合作，购买了 5 项专利；在高放废液玻璃固化领域，中核集团八二一厂与德国 KAH 公司在工艺和熔炉技术方面开展合作，与德国 STEAG 公司在机械、电气、通风方面开展合作，与德国 WAK 公司在技术总负责和运营方面开展合作；在核电厂放废处理领域，秦山、田湾、福清等核电厂与德国 NUKEM 公司在低放废液水泥固化工艺和设备供货方面开展合作，田湾核电与美国 Eastern Technologies 公司在可降解 PVA 防护服及其降解工艺技术和装备供货方面开展合作，中国 AP1000 项目与美国 ES 公司在放射性废物处理工艺、主设备方面开展合作。

## 4. 乏燃料运输

中国大陆自 20 世纪 80 年代起确立了核燃料闭式循环方针政策，乏燃料在核电站和后处理厂间的运输是核燃料闭式循环体系的重要一环。同时，随着部分核电站乏燃料水池的逐渐满容，将乏燃料外运进行离堆贮存或进一步后处理的需求日益突出。

根据中国核电的建设运行情况及核电站服役寿命，在可预见的未来，中国大陆乏燃料运输的需求量将会持续大规模增长。

---

### 4.1 中英两国潜在合作

#### 4.1.1 公海铁乏燃料运输的实物保护

为确保乏燃料公海铁联运运输途中和换装安全，需要参照乏燃料运输及核设施实物保护法规要求，确定安保系统设计方案，设计建造乏燃料公海铁联运安保系统。安保系统必须将人防措施和技防措施有机的结合，人防由乏燃料运输单位组织实施，技防根据乏燃料运输工具、运输容器及重要设备的分布，合理设置实体屏障、出入口控制系统、安保照明、视频监控系统及通信等技术措施，对乏燃料运输环



境周围的人员和车辆进行控制，对可能的敌对分子或敌对团伙的入侵行为，能做出及时、快速、准确的响应。

中国自 2003 年首次实施乏燃料公路运输以来，已经确立了完备的适用于乏燃料公路运输的实物保护方案。随着中国乏燃料公海铁联运体系初步运行，海路运输、铁路运输及换装站的实物保护方案还需要进一步吸收国际运输经验进行优化。

#### 4.1.2 公海铁乏燃料运输的应急预案及响应

自 2003 年起依托核电站乏燃料公路运输项目，中国大陆逐渐建立起了一套能够满足乏燃料公路运输事故应急响应的应急预案及响应措施，填补了中国大陆在放射性物质运输事故应急响应领域的空白。

随着乏燃料公海铁联运体系的逐步运行，需要针对中国乏燃料海路运输、铁路运输事故情景研究相应的应急预案和响应措施。

#### 4.1.3 乏燃料铁路运输车的开发

中国现用于乏燃料铁路运输的 D15B 型凹底平车是在原 D15 车的基础上，采用了新的技术，运行速度提高到 120km/h，可装载百吨级乏燃料货包。未来可以对乏燃料铁路运输车辆进行优化开发，如研究封闭式车厢或隔离罩装载乏燃料货包，更有利于运输途中的安全保卫。

#### 4.1.4 乏燃料贮运两用容器的研发

中国目前正在开展乏燃料集中干式贮存设施的研究和建设，以满足快速增长的乏燃料离堆贮存需求。研发配置乏燃料贮运两用容器，将会提高乏燃料集中干贮和运输的效率，便于乏燃料进一步后处理。未来，中英双方可以在贮运两用容器研发领域寻求开展相关合作的机会。

#### 4.1.5 高放废液运输容器的研发

随着中国大陆核设施退役工作的开展，核设施内高放废液的运输需求逐步显现。高放废液的运输存在放射性水平高、液态物品运输、气体分解释放等技术难点，有必要借鉴国际成熟经验研发配置专用的高放废液运输容器。

---

## 4.2 建议

### 4.2.1 推荐可向外方公开招标的潜在项目

未来中国乏燃料运输领域可能向外方公开招标的潜在项目有：

- (1) 乏燃料等放射性物品国际运输；
- (2) 乏燃料等放射性物品运输容器等进口；
- (3) 乏燃料公海铁联运实物保护方案研究；
- (4) 乏燃料公海铁联运应急预案研究；
- (5) 乏燃料铁路运输车开发；
- (6) 运输容器维修维护工艺及设备研究等。



#### 4.2.2 正在寻找国际合作伙伴的分包商

中核清原是中国大陆首家从事乏燃料运输的企业，自 2003 年首次实施乏燃料运输至今，多年的运输实践积累了丰富的乏燃料运输经验，培养了一批乏燃料运输行业的优秀人才，拥有一支高素质乏燃料运输专业团队，具备多种运输容器、运输工具等专用装备。近年来，中核清原积极推进中国大陆乏燃料公海铁联运体系的建立，并逐步投入联运运行。

中核清原与英国、美国、俄罗斯等多国企业合作开展过容器设计制造、运输方案研究、乏燃料国际运输等工作，并一直在乏燃料运输领域积极寻求国际合作伙伴。

#### 4.2.3 第三方代理机构

中核清原作为中国大陆最富经验的乏燃料运输企业，秉承积极开放的合作态度，具备与英方企业进行乏燃料运输领域相关合作的能力和意愿。

---

### 4.3 乏燃料运输容器取证

根据《放射性物品运输安全管理条例》等法规要求，乏燃料运输容器的设计，应当在首次用于制造前报核安全监管部门审查批准。设计单位应当向国务院核安全监管部门提出书面申请，并提交下列材料：

- (1) 设计总图及其设计说明书；
- (2) 设计安全评价报告书；
- (3) 质量保证大纲。

从事乏燃料运输容器制造活动的单位，应申请领取一类放射性物品运输容器制造许可证，制造许可证有效期为 5 年。

使用境外单位制造的乏燃料运输容器，应在首次使用前报核安全监管部门审查批准。申请使用境外单位制造的乏燃料运输容器的单位，应当向国务院核安全监管部门提出书面申请，并提交下列材料：

- (1) 设计单位所在国核安全监管部门颁发的设计批准文件的复印件；
- (2) 设计安全评价报告书；
- (3) 制造单位相关业绩的证明材料；
- (4) 质量合格证明；
- (5) 符合中华人民共和国法律、行政法规规定，以及国家放射性物品运输安全标准或者经国务院核安全监管部门认可的标准的说明材料。

乏燃料运输容器使用单位应当对其使用的乏燃料运输容器每两年进行一次安全性能评价，并将评价结果报国务院核安全监管部门备案。

---

### 4.4 乏燃料运输活动取证

根据《放射性物品运输安全管理条例》等法规要求，实施乏燃料运输活动的托运

人应当编制核与辐射安全分析报告书、运输事故应急预案等专项报告，并报国家主管部门审查批准。乏燃料运输前，托运人应向国家主管部门申请办理道路通行、转移、启运批准，并向启运地环境保护主管部门备案乏燃料运输活动取证的详细流程见下图。

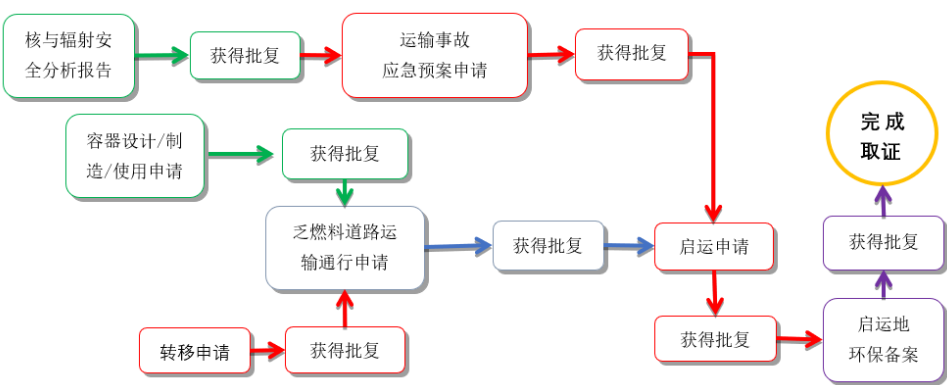


图 -5 乏燃料运输活动取证的详细流程

#### 4.5 乏燃料运输现状

中国一贯支持并积极推动《不扩散核武器条约》成员国在严格履行条约义务的前提下，开展和平利用核能的国际合作。多年来，在乏燃料运输相关领域，中国积极与英国、美国、俄罗斯、德国等许多国家持续进行国际运输、运输方案研究、设备进出口等多种形式的交流与合作。

自 2003 年首次实施了核电站乏燃料公路运输以来，中国大陆建立了以公路运输为主的乏燃料运输体系，包括核电站乏燃料运输容器系统、公路运输装备体系、辐射防护体系、应急响应体系以及安全和质量保证体系，这一体系已持续运行多年，取得了安全运输无事故的良好记录，图 -6 为核电站乏燃料公路运输实拍图。



图 -6 核电站乏燃料公路运输

随着乏燃料运输需求的增长，中国大陆近年来开展了乏燃料公海铁联运体系建设工作，新配置了乏燃料运输容器、铁路运输车和运输船等联运装备，论证确定了联运运输径路。2021 年底，乏燃料公海铁联运体系开始投入运行。

## 4.6 公海铁联运及运输装备

### 4.6.1 公海铁联运

中国当前在运和在建的核电站主要分布在沿海地区，而离堆湿法贮存水池和乏燃料后处理厂均在内陆腹地，实现乏燃料离堆贮存和后处理需要经过数千公里的超长距离运输。面对快速增长的乏燃料运输需求，单纯依靠公路运输模式来实现离堆贮存和后处理将不可持续。

为提高乏燃料运输效率，中国已组织建立了乏燃料公海铁联运体系，即将各个核电站的乏燃料通过短途公路运输 + 海运，通过一个固定的中转港及一条固定的陆上通道（公路 + 铁路，根据实际情况结合短途公路）运至乏燃料接收设施。公海铁联运体系工艺流程详见下图。

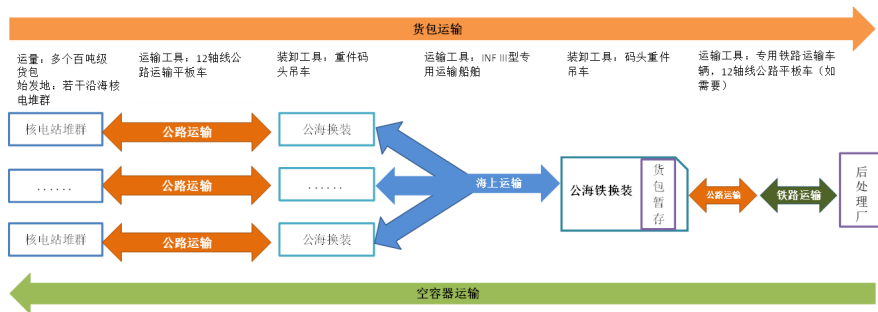


图 -7 公海铁联运工艺流程

### 4.6.2 乏燃料运输容器

自 2003 年首次实施核电站乏燃料运输以来，中国已陆续配置了 NAC-STC、TUK-153、HI-STAR 60、HI-STAR 100MB、CNSC 等多种型号的百吨级核电站乏燃料运输容器，可用于 PWR17×17、VVER-1000 等核电站乏燃料组件的运输。图 -8 为 NAC-STC 型乏燃料运输容器。



图 -8 NAC-STC 型乏燃料运输容器

## 4.7 运输工具

### 4.7.1 乏燃料运输船

根据国际海事组织的规定，运输放射性物质的船只必须满足《国际乏燃料、钚和高放废物运输船安全规范》（INF Code）的要求。中国为乏燃料海路运输自主设计建造了“欣安吉祥”轮（见图 -9），该船于 2021 年取得船舶营业运输证。



图 -9 欣安吉祥轮

“欣安吉祥”船舶入级检验等级为 INF III，适用于载运 unlimited 总放射性活度的辐照核燃料或高放射性废物等物品，船舶货舱可装载多个百吨级乏燃料货包。该船于 2021 年底完成了首次乏燃料海运。

### 4.7.2 乏燃料铁路运输车

经国家铁路局等相关部门组织论证，确定中国乏燃料货包铁路运输车辆采用 D15B 型凹底平车（见图 -10）。该车型为中国自主设计建造，专用于乏燃料铁路运输，其各项技术条件均满足乏燃料运输需要。



图 -10 D15B 型凹底平车



## 4.8 国际合作典型案例

### 4.8.1 加纳、尼日利亚乏燃料国际运输

为加强国际社会核安保、防止核扩散，中国同国际原子能机构、美国、俄罗斯等相关国家和国际组织合作，自 2014 年起先后实施了对加纳、尼日利亚高浓铀微堆的低浓化改造，将高浓铀乏燃料通过国际运输运还中国是低浓化改造项目的一个重要部分。

高浓铀乏燃料国际运输工作是国际原子能机构协调下，中国、俄罗斯、美国、捷克、加纳、尼日利亚等国家共同参与完成。俄罗斯 Sosny 公司、捷克 Skoda 公司负责乏燃料运输容器的设计和配置，从加纳、尼日利亚机场至中国机场的乏燃料空运由俄罗斯 Sosny 公司负责实施，中国机场至乏燃料接收地的乏燃料公路运输由中核清原公司负责实施。中方与各国企业按照上述分工积极合作，在 2017 年、2018 年先后顺利完成了加纳和尼日利亚高浓铀微堆乏燃料的国际运输，图 -11 为加纳微堆高浓铀乏燃料运输图。



图 -11 加纳微堆高浓铀乏燃料运输

### 4.8.2 放射性超标卫浴配件运输

2012 年，科勒公司出口的一批的卫浴弯头铜配件放射性超标，需要通过国际运输将其运还生产地。中国中核清原公司与法国阿海珐 TN 公司共同合作，由中方负责实施从宁波港到江西的公路运输，最终将出口的 25914 只放射性超标卫浴件全部顺利运还。图 -12 为放射性超标卫浴配件运输图。



图 -12 放射性超标卫浴配件运输

#### 4.8.3 核电站乏燃料运输容器配置

大亚湾核电站 1 号、2 号机组于 1993 年正式投入商业运行。为保证核电持续安全运行，需要将卸出的乏燃料外运进行离堆贮存。2003 年，中国通过国际招标从美国 NAC 国际公司进口了 NAC-STC 型乏燃料运输容器及辅助设备，并于同年顺利完成大亚湾核电站首次乏燃料运输，建立了乏燃料运输审管和运行体系。

田湾核电站 1 号、2 号机组自 2007 年正式投入商业运行，随着核电机组的持续运行，同样存在着乏燃料运输的需求。2016 年，中国从俄罗斯 Energotex 公司进口了 TUK-153 型乏燃料运输容器及辅助设备，用于田湾核电站乏燃料运输。容器自 2017 年起投入使用，开展了多次乏燃料运输，保障了核电机组的持续安全运行。图 -13 为田湾核电站乏燃料运输图。



图 -13 田湾核电站乏燃料运输



此外，我国曾于 2007 年、2018 年，通过国际招标的方式先后从美国 Holtec 国际公司进口了 HI-STAR 60 型乏燃料运输容器、HI-STAR 100MB 型乏燃料运输容器；2019 年，从德国 Orano NCS 公司进口了 NCS 45 型乏燃料棒运输容器。

## 4.9 中英双方交流

中英双方在乏燃料运输领域有着长达数十年的交流合作，合作内容涉及乏燃料运输领域的各个方面。

1996 年 -1998 年期间，中国中核清原公司和英国 BNFL 公司合作开展了“中国核运输系统设计研究”。研究中提出了实施中国核电站乏燃料运输的近 / 远期方案，建议中国乏燃料运输近期采用公路运输，远期采用公海铁联运。

2014 年，中国国家原子能机构、中核集团与英国能源与气候变化部、国际核能服务公司（INS），在英国伦敦共同签署了《关于加强民用核工业燃料循环全产业链合作的谅解备忘录》，就中核集团与 INS 在核燃料循环和运输等领域开展合作达成共识。此后两年，中英双方共同制定了《联合工作计划表》，并举行了多次会议，就运输体系建设持续深入交流，对英国的公海铁多式联运体系进行了实地考察，研讨了海上运输、铁路运输、码头运行、码头换装、船舶、铁路车辆、相关审管等公海铁联运体系各方面内容。图 -14 为中英双方在塞拉菲尔德交流研讨中拍摄。



图 -14 中英双方在塞拉菲尔德交流研讨

2017 年，交通运输部、中国铁路总公司、中核集团等中国大陆单位与 NDA、INS、DRS、PNTL 等多家英方企业就乏燃料公海铁联运体系建设工作进行交流研讨，并实地考察了英方塞拉菲尔德后处理厂、巴罗港乏燃料运输专用码头、PNTL

公司乏燃料专用船舶等设施。图 -15 为中英双方在巴罗港考察中拍摄。



图 -15 中英双方在巴罗港考察

## 结束语

英国是世界上最早实现核能民用的国家之一，在核设施退役、废物处理处置和运输领域技术储备好，经验丰富；中国是当前民用核能发展最为迅速的国家，有着全球最大的核电在建市场，在核设施退役、废物处理处置和运输领域有着广泛的需求。希望两国核能界在《中英民用核能合作联合声明》的指引下，坦诚开放，紧密协作，共同打造合作共赢的新局面。