

# 两岸核电厂放射性废物管理 的实践与挑战

陈胜朗 首席顾问

E-mail: [johnslchen@yahoo.com.tw](mailto:johnslchen@yahoo.com.tw)

MP: +886 912 250 780

核能科技协进会

第二届核电厂放射性废物管理研讨会 于湖南省衡阳

2017.9.21

# 内 容 纲 要

- 一. 引言
- 二. 核电厂放射性废物来源与管理分类
  - (一). 放射性核素来源
  - (二). 核电厂产生的放射性固体废物来源与类别
- 三. 两岸放射性废物运行管理制度
- 四. 两岸低放射性废物减容管理技术的实践
  - (一). 放射性减容处理技术
    1. 运行中核电厂放射性废物处理技术实践情况
    2. 第三代(AP-1000)与华龙一号核电厂放射性废物处理设计情况
  - (二). 废物减源管理实践措施
- 五. 两岸低放射性固体废物处理技术最小化的挑战与待创新发展技术议题
  - (一). 新设核电厂固体废物最小化处理技术要求及评析
  - (二). 核电厂固体废物低产生量的挑战情况
  - (三). 待创新发展废物处理技术议题
- 六. 結束語

- 长期以来，国内核电业界一直有“**重前端、轻后端**”的现象，即重视核电站选址、设计、建设等一系列前端技术环节，而忽视诸如核废料处理及处置等后端环节。这使得目前国内核电站的核废料产生数量**相较国外先进国家高出不少**。据测算，如果以到2020年核电装机达7000万千瓦的目标计，届时国内的核废料量将达3.85万立方米。再者，具国际水平的自创技术品牌也待高举，种种迹象已明确显示出，**核废料高减量比处理技能已成为核安全的主动力和挑战之一**。
- 本报告的目的，为系统化梳理近10年来作者在台湾核能科技协进会服务期间积极经与中国核能行业协会和中国核学会合作，共同推展两岸有关业界专家们在此领域交流合作和调研，並提供相关实践经验反馈和国际上的放废处理技术方法的信息，以及配合核安全与放射性污染防治〈“十三五”规划及2025年远景目标〉要求，并就个人在此领域工作多年的经验和了解，予以汇整，**提出待创新发展废物处理技术数项议题**，期供我核能各有关行业领导和同仁努力参考。

# 二、核电厂放射性废物来源与分类

## 大陆核电机组分布图

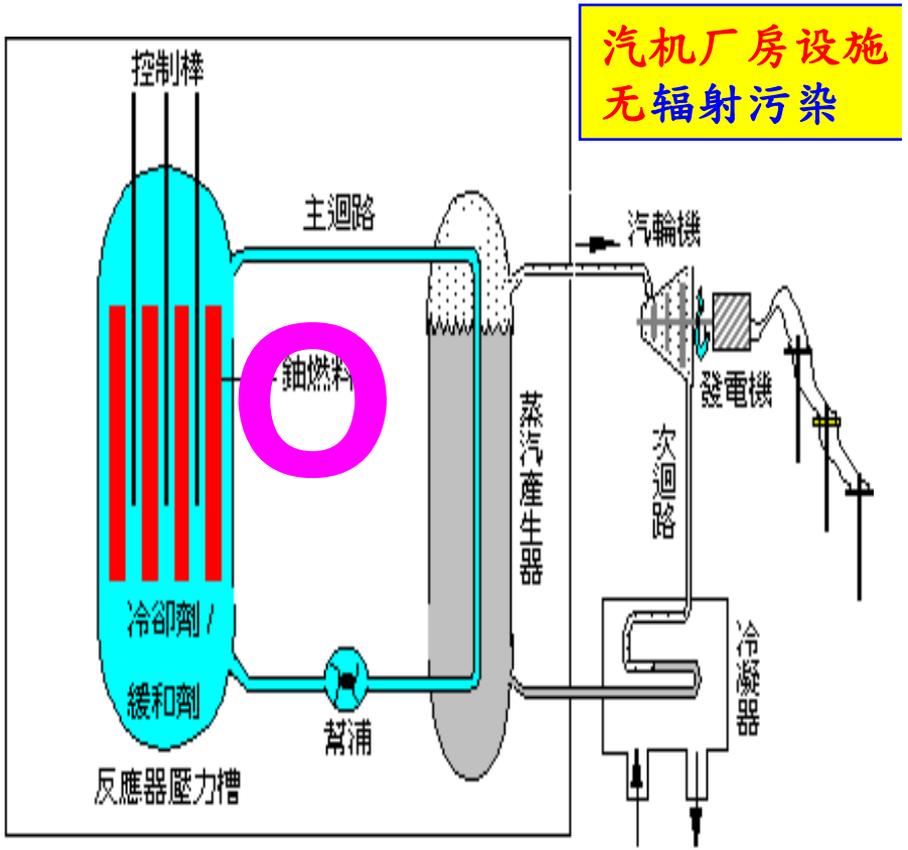


# 台湾核电机组分布图



台湾三座核电厂需退役时程要求： 2017-1- 26「电业法」规定：  
核能发电设备应于2025年以前，全部停止运转!!!

# (一)放射性核素来源



压水式 (PWR)核电厂系统

# 燃料丸填入燃料棒



## (一)放射性核素来源(续)

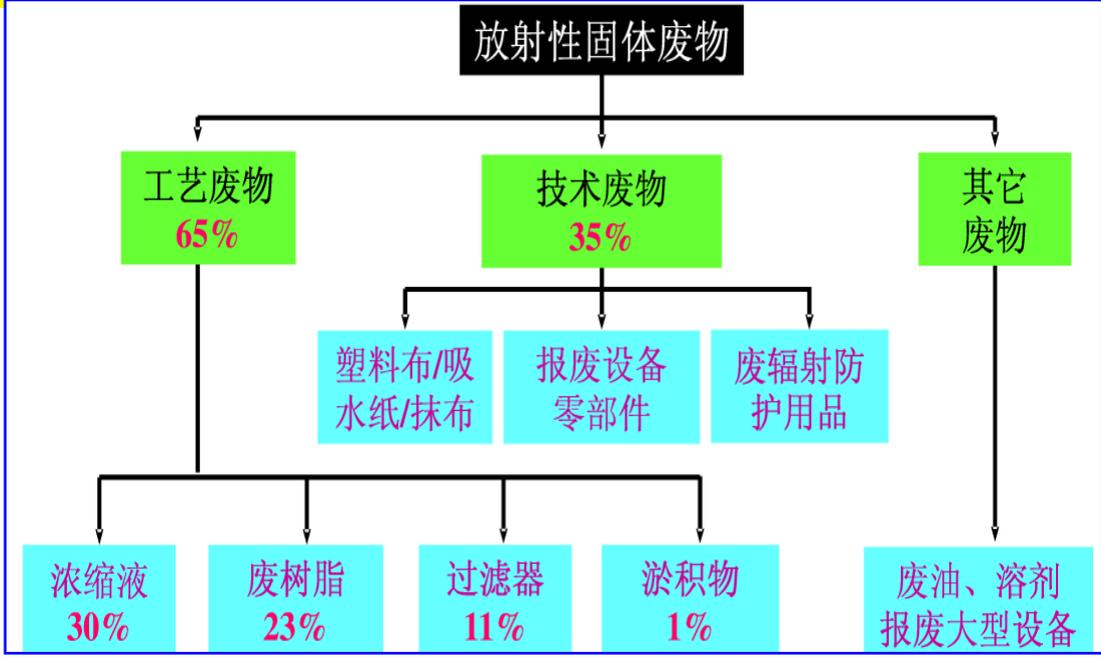
核电厂的放射性核素来源，是在核反应器内的核燃料经核反应后，会产生不少核分裂产物、铀系产物及中子，同时其中子又活化设施组件与运行流体物质而产生的产物，放出 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 的射线。

在液体系统内，由于钢铁组件材料之腐蚀物质受到中子活化而产生的主要代表性放射性同位素核种有Cr-51、Mn-54、Fe-55、Ni-59、Co-60及Zn-65，同时由于核燃料护套裂损而释进液体内的主要代表性放射性同位素核种有Sr-90、Tc-99及Cs-137，是所谓核分裂产物，再者也会有核燃料因核子反应产生的铀系放射性同位素核种Pu-239及Am-241，以及原来的核燃料同位素核种U-238及U-235；

在气体系统内，会含有核燃料护套裂损而释进的主要代表性放射性同位素核种I-131，以及来自液体系统受到中子活化而产生的主要代表性放射性同位素核种H-3、O-19、N-13及杂质Na-24、Mg-27、Ca-45。

核电厂或设施在运行及维修时，作业人员所使用的防护衣物、手套及工具以及部分更换组件材料，多少会受到放射性物质污染而形成固体低放射性废物。再者，部分设施系统因改善、拆除及清理或退役等亦会产生低放射性废物。

# (二). 核电厂产生的放射性固体废物来源与类别



工艺废物  
(制程废物)



技术废物  
(操作维修废物)



可燃及不可燃乾性廢料



废物收集站

>2msv/h 废物收集站

### 三. 两岸放射性废物运行管理制度

- 法规和标准---导引废物处理及其设施在设计及运转的重要安全及技术依据
- 管理体系和机制

#### 大陆方面

1. 中央主管机关: 环保部国家核安全局  
辐射源安全监管司

- (2012年福岛事故后强化设置)  
民用核燃料循环设施许可证颁发  
核燃料循环设施环境影响评价  
放射性物品运输流程  
放射性废物贮存、处置行政许可  
限制进出口目录的放射性同位素进出口审查批准

2. 核电集团核后端管理部门:  
环保营运公司

3. 核电厂核废料处(管)理单位:  
(例子) 中广核维修部环境工程科

#### 台湾方面

1. 中央主管机关: 原子能委员会  
放射性物料管理局

- (1979年设置放射性待处理物料管理处)  
负责放射性物料处理、贮存与处置设施之建造、运转与除役之审核与发照, 以及放射性物料输入、输出、处理、贮存、运送与处置等相关作业之安全管制与检查等事项

2. 台电公司核后端管理部门:  
2.1. 核能发电处--放射性废料处理  
2.2. 核后端处--放射性物/废料处置

3. 各核电厂核废料处(管)理单位:  
放射性废料组—厂属专责单位

## 四. 低放射性废物减容管理技术实践

### (一). 放射性减容处理技术

#### 放射性废物处理设施的设置目的

- 任何核能设施在运转过程中，无可避免会产生一些气体、液体和湿性及干性固体废物
- 由于这些废料含有活度强弱不等的放射性，其不能未依规定加以妥适安全处理，而任意弃置或排放外界，否则设施即不能运作。
- 针对不可再利用回收的放射性废物，藉由焚烧、压缩、固化等等技术，进行废物的减容处理。
- 使放射性废物量最小化。

(低放射性废物最终处置费用:~~2至5万元人民币/55加仑桶)

#### 废物处理主要诉求：

高减容比、高减量比并使外贮物质稳定安全，  
且符合处置的废物接收准则

# 放射性废物近地表处置的废物接收准则

## 1 放射性核素含量

- 1.1 废物包装体中废物的放射性比活度不应超过GB 9132 规定的管理限值。
- 1.2 废物包装体中易裂变物质的含量应该加以限制，以保证不会达到核临界条件。

## 2 表面辐射水平

废物包装体外表面上任意一点的最大辐射水平和1m 远处任意一点的辐射水平，必须满足 GB 12711—91中7.1 规定的要求。

## 3 表面污染

废物包装体表面放射性物质非固定污染，必须满足GB 12711—91中8规定的要求。

## 4 机械稳定性

- 4.1 废物包装体的承压能力和完好性，必须满足GB 12711—91中6.2规定的要求。
- 4.2 水泥和塑料固化体的机械稳定性，必须满足GB 14569.1和GB 14569.2中规定要求

## 5 抗浸出性

废物固化体的抗浸出性，必须满足GB 14569.1—93和GB 14569.2—93中4.3.1 以及GB 14569.3—1995中 规定的要求。

## 6 游离液体

- 6.1 废物固化体不应有游离液体泌出。 6.2其他废物体应尽量减少或没有游离液体泌出
- 6.3 废物容器中游离液体体积应小于固体废物体积的1%。

## 7 化学组分

- 7.1 废物体内螯合剂和络合剂的含量必须低于废物重量的1%。
- 7.2 废物体内如下组分的含量必须加以控制，以避免发生有害的化学作用 a) 氧化性物质； b) 腐蚀性物质； c) 水。
- 7.3 废物体内不得含有如下物质：  
a) 自燃物质； b) 易爆物质； c) 接近环境温度的低沸点或低闪点的有机易燃物质

## 8 热和辐射稳定性

废物体必须具有足够的热稳定性和抗辐照性。

水泥和塑料固化体的耐 $\gamma$ 辐照性必须满足GB 14569·1—93和GB 14569·2—93中4·5规定的要求。

沥青固化体的耐 $\gamma$ 辐照性必须满足GB 14569·3—1995中4·7规定的要求。

## 9 抗着火性

9·1 塑料和沥青固化体的抗着火性，必须满足GB 14569·2—93和GB 14569·3—1995中4·6规定的要求。

9·2 可燃的压缩减容废物必须依赖包装，使其着火可能性大大减少。

## 10 防微生物破坏性

10·1 废物体中不得夹带有未经处理的易腐烂的动物尸体等生物体。

10·2 废物体中易被微生物破坏的有机废物含量应受到限制。

## 11 气体产生

废物包装体中由于辐射分解、放射性衰变、废物和固化材料之间的化学反应，以及有机物质的分解而产生的气体不应导致处置系统效能的破坏。

## 12 包装容器

废物包装容器的设计、制造必须满足GB 11806—89中7和GB 12711—91中6规定要求

12·1 废物包装容器可采用碳钢、不锈钢、铸铁、混凝土、聚合物浸渍混凝土，或玻璃钢等材料。对于易锈材料必须涂防腐涂料。

12·2 废物包装应采用国家标准容器。

12·3 超过一定重量的废物包装体，其包装容器必须带有坚固且又利于安全装卸的卡槽或提吊结构部件。

## 13 包装容器填充量

包装容器中的填充量必须大于85%（以体积计）。

## 14 标志、编号和标签

14·1 废物包装体外表面上必须带有GB 12711—91中9·1和9·2规定的标志和编号。

14·2 废物包装体标签填写内容与技术要求必须与GB 12711—91中9·2和9·3的规定相一致。<sup>12</sup>

# 1. 运行中核电厂放射性废物处理技术实践情况

## 表1.1放射性废液处理

类别//来源	主要内容物	处理程序 (注说)	备注
1. 工艺废水 //一回路系统泄漏水、 冲洗水和疏水，除盐器 冲洗水和排水	● 化学物质含量单一且活性浓度较高	◎ 过滤、除盐(离子交换)/ (蒸发)	田湾使用蒸发， 冷凝液再经离子交换
2. 化学废水 //化学去污水、 放化实验室等	● 化学物质含量高且活性浓度较高	◎ 蒸发	
3. 地面排水 //系统和设备泄漏水	● 活性浓度不高	◎ 过滤/(蒸发)	
4. 服务排水 //洗衣废水和洗澡水	● 极低活性浓度	◎ 过滤	
5. 潜在放射性排水 //可能污染的二回路 排水及汽机厂房排水	● 极低活性浓度	◎ 监测排放/ (除盐)	

**注说:**大亚湾、岭澳、田湾、秦山一二及在建的机组都采用的处理方法

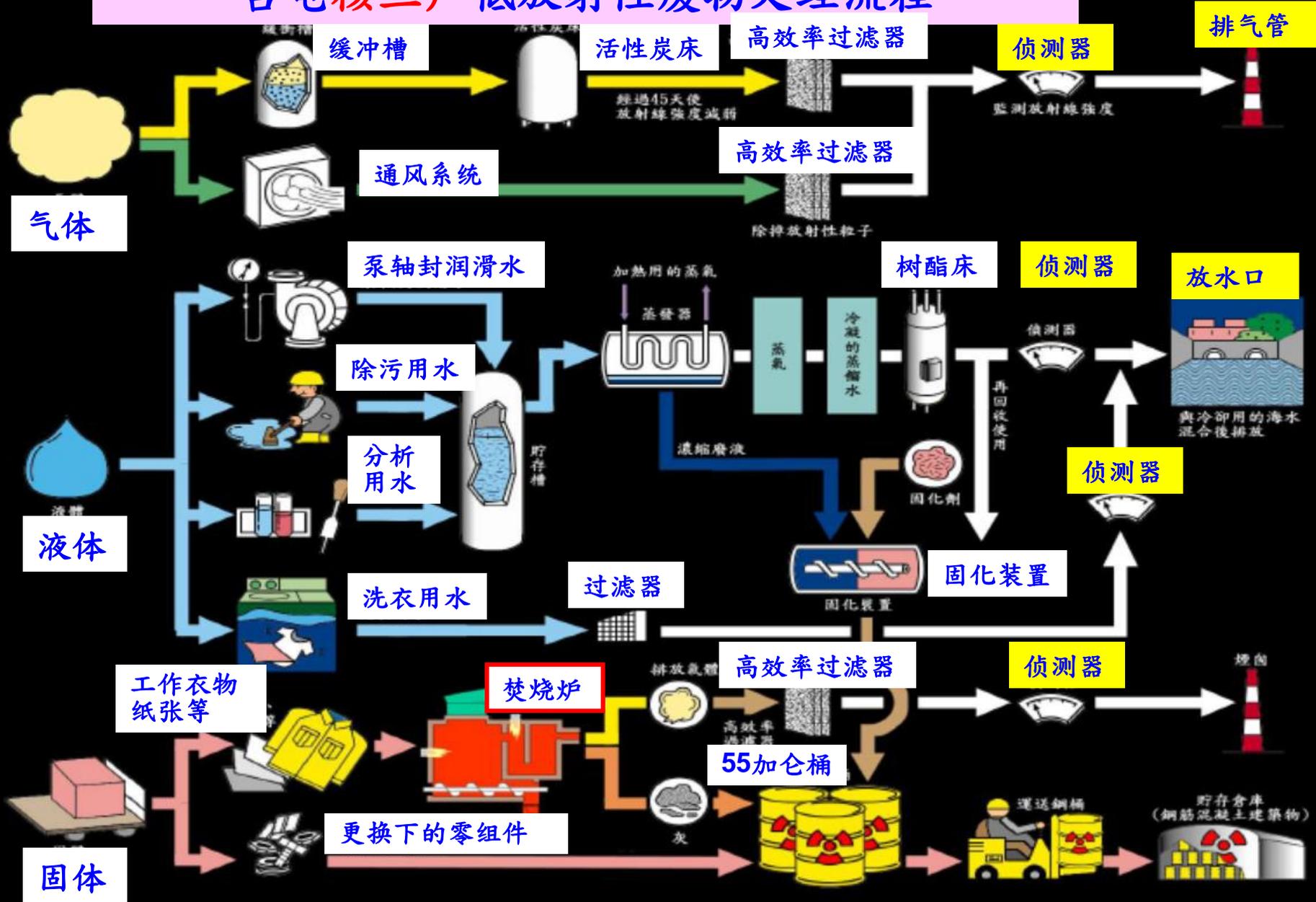
## 表1.2 放射性废气处理

类别//来源	主要内容物	处理程序	使用的核电厂
<p>1. 含<b>氢</b>废气 //反应炉冷却剂的容器和系统的排气</p>	<p>● 氢气、氮气及少量的分裂产物Kr、Xe、I活化产物N-16、C-14</p>	<p>◎压缩贮存衰变处理 管道收集后以压缩机至0.7-0.8MPa, 送到压缩贮存衰变处理约45-60天, 再经检测合格后到辅助厂房通风系统进一步处理和监测排放</p>	<p>大亚湾、岭澳、秦山一、二及在建的大多数机组</p>
		<p>◎氢氧复合后活性炭延迟处理 管道收集后进入干燥器除湿, 再进入高温氢氧复合器合成为水, 气体经加压进入干燥器之后活性炭延迟处理</p>	<p>田湾及在建的台山机组</p>
<p>2. 含<b>氧</b>废气 //与空气接触的放射性介质的容器排气</p>	<p>● 空气、水蒸气及少量的放射性气体如I</p>	<p>◎收集后通过碘吸附器和高效率微粒过滤器后, 再与厂房通风排气混合处理、监测和排放</p>	<p>各电厂</p>
<p>3. 厂房<b>HVAC</b> //通风排气</p>	<p>● 空气及少量的放射性气体如I, 活性浓度很低</p>	<p>◎收集后通过碘吸附器和高效率微粒过滤器处理后监测和排放</p>	<p>各电厂</p>

# 表1.3 放射性固体废物处理

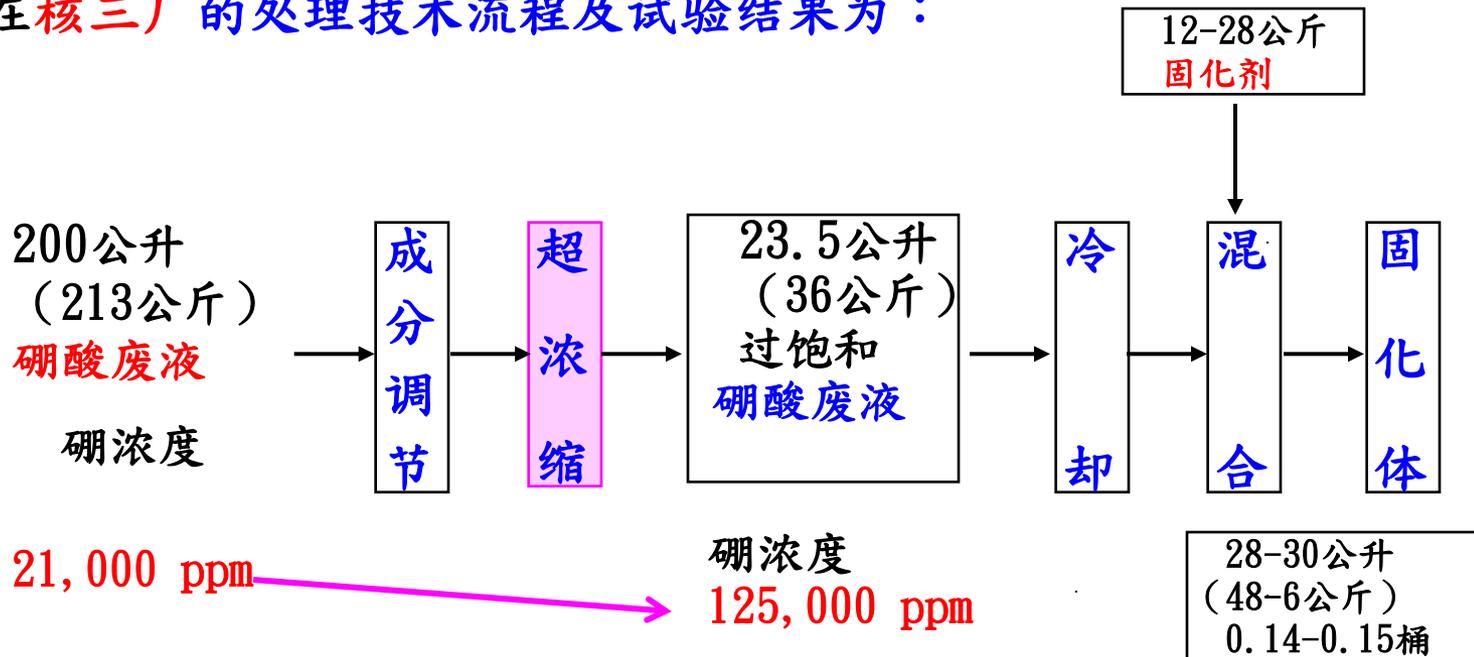
类别//来源	主要内容物	处理程序	使用的核电厂
1. 废树脂 //各系统的除盐器	●放射性活度有高低 一回路活度高， 二回路活度较低	◎活度高者以水泥固化(有桶内固化及桶外固化两种方式)…(增容，存放后膨胀) ◎活度低者直接或待衰变后为解控处理	各电厂
2. 废过滤器蕊 //各系统的液体过滤器	●放射性活度有高低	◎一混凝土桶或金属桶仅装一个废过滤器蕊以水泥固化(核三同) ◎现在则先放进屏蔽容器待衰变后，再数个废过滤器蕊装入容器中水泥固化	大亚湾、岭澳、秦山一、二
3. 蒸发浓缩液 //液体处理系统的蒸发器	●放射性活度中等 硼浓度约40,000 ppm	◎以水泥固化 浓缩液体积/固化体体积=0.4…(增容)	各电厂
4. 杂项干废物 //污染的各种固体废物，及检修更换的设备零组件	●如工作衣物、擦拭布、纸张、塑料及设备零组件放射性活度低	◎可压实废物(大多为可燃)在桶内以20吨压实机后暂存…(未焚化) ◎不可压实废物装桶后水泥固化…(未解控管制)	田湾:90吨 岭澳:1500t

# 台电核三厂低放射性废物处理流程

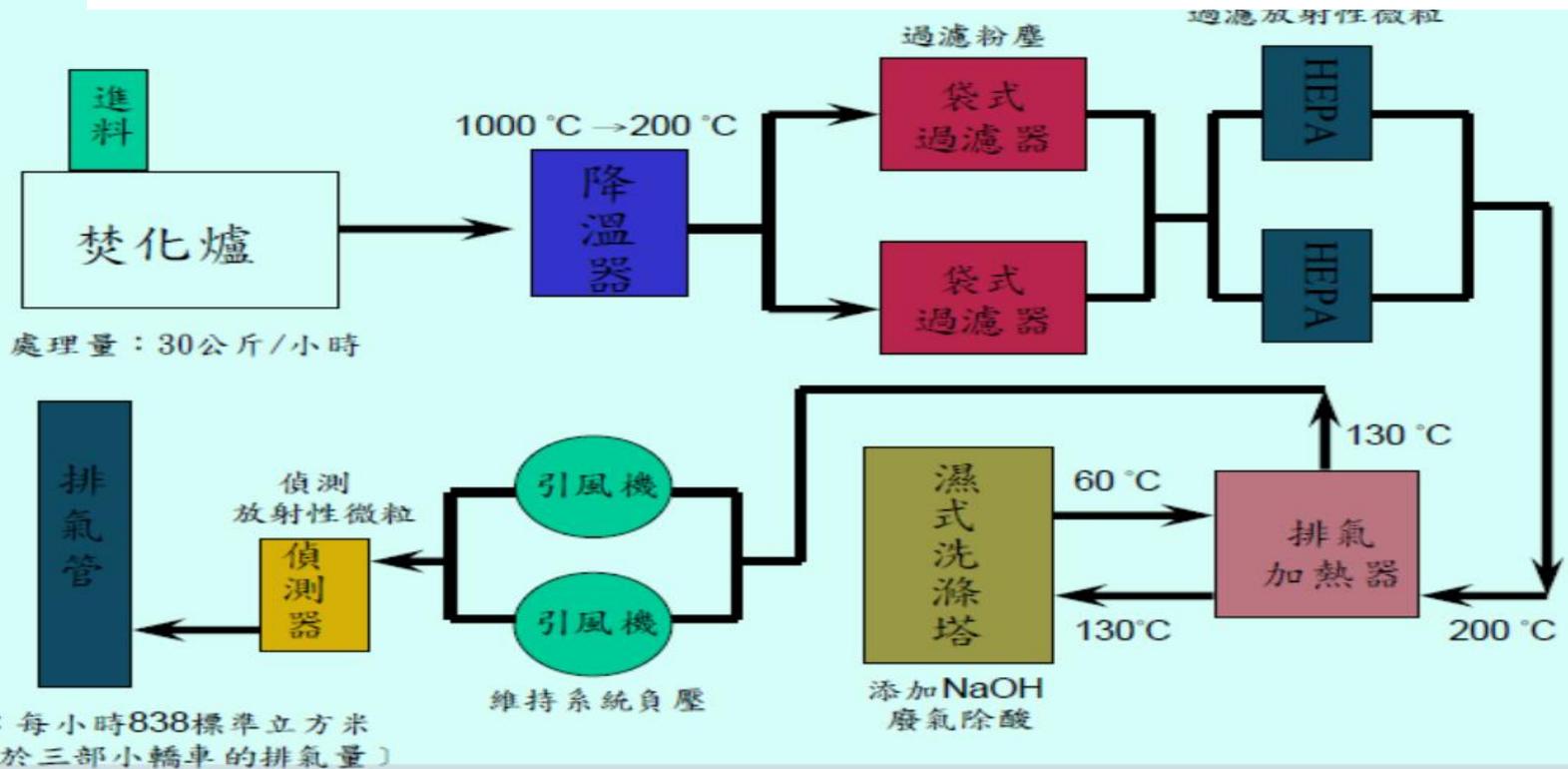


# 高效浓缩硼酸废液固化技术

- 对于核能电厂的**湿性废液**的处理技术，核能研究所的研究团队，发明的独特傲人技术，业已分别在**核三厂**（压水式电厂）测试运转，获得优异高效率减容成果：其中**固化体容积仅为传统水泥固化法的1/6**制备过饱和硼酸盐溶液，使形成高聚合的 **polyborate** 后加以固化
- 在**核三厂**的处理技术流程及试验结果为：



# 低放射性废料焚烧减容系统流程



可燃低放射性  
廢物焚燒爐

可燃性廢物  
紙盒

焚燒爐

# 核三厂 低放射性废物焚烧爐运转概况

年度	焚化桶數			焚化重量數	焚化後灰桶數
	LLW	BRC	小計		
91	385	205	590	45,117	76
92	785	226	1011	90,339	128
<b>減重比約15</b>  <b>減容比約8</b>		120	947	98,777	116
		125	961	98,477	105
		105	882	97,633	121
		269	754	80,342	96
97	116	451	267	23,330	32
98	35	51	86	14,241	17
99	43	53	96	17,120	42
合計	4290	1305	5595	564,376	733

2017.3.24 国务院核准的:

<核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标>中在三、重要任务  
 (三) 统筹推进, ..... 放射性废物处理处置..... 建设秦山、大亚湾核电基地放射性废物集中处理示范工程, 推广可燃放射性固体废物焚烧.....的明确要求

## 2. 第三代(AP-1000)与华龙一号核电厂放射性废物处理设计情况

- 近二十年来，全世界核电厂的放射性废料产生量大幅度的减少，主要是采用先进的新技术系统及强化源头减量管理等措施。
- 第三代核电技术的AP1000，在设计时就十分重视放射性废料量的产生，主要的特色有几方面：
  - ◎系统简化并使用免维修设备，以减少因保养、维护及他日退役时产生放射性废料。如放射性废液处理系统是以离子交换技术而不是采用老的蒸发技术，此由于蒸发器体积大、复杂且维护困难，同时，蒸发的残渣处理会产生较多的放射性固体废物。
  - ◎一回路循环系统的主要设备选用耐腐蚀的材料，并进行表面处理，以减少活化产物。如在反应炉的冷却剂添加醋酸锌以防止设备系统被活化腐蚀。
  - ◎引用国际先进的废物处理技术，合理设计三废处理系统，使对于设备和环境少污染，便于退役。
  - ◎将核电厂的放射性废料处理分为：核岛废物处理系统和厂址废物集中处理设施(SRTF)两大部份的专业管理模式。

# 集中废物处理设施(SRTF)内的废物流处理系统

<p>SRTF内的废物流 处理系统//处理的废物 //来源</p>	<p>核心处理 工艺和减容效果</p>
<p>1. 过滤器滤芯处理系统(FCS)</p> <p>//核岛和移动式处理设备(MBS)产生的过滤器滤芯</p> <p>//化学和容积控制系统(CVS)、核岛废液系统(WLS)、用过燃料冷却系统(SFS)等的过滤器</p>	<p>● 处理工艺是水泥固定，待活度衰变后，采用200L钢桶为容器，每个200L钢桶装数个废过滤器滤芯。</p> <p>(核三厂工艺一样，但仅装一个)</p>
<p>2. 废树脂处理系统(RES)</p> <p>//一、二次回路系统和MBS产生的废树脂</p> <p>//化学和容积控制系统(CVS)、核岛废液系统WLS)、用过燃料冷却系统(SFS)等的废树脂</p>	<p>● 三门核电厂处理工艺是采用德国HANSA公司热超压，使用超压机压缩呈热态的废树脂和添加剂混合物，添加剂的作用是加强传热和在超压过程中填充颗粒状树脂间的微小缝隙，减少超压后压缩饼回弹。</p> <p><u>减容因子约为3。</u></p> <p>● 海阳核电厂处理工艺是采用美国Energy Solution公司聚合物高整体容器(HIC)如图三盛装后脱水送暂存库。</p> <p><u>减容因子约为1</u> 21</p>

# 集中废物处理设施(SRTF)内的废物流处理系统(续2)

<p>SRTF内的废物流 处理系统//处理的废物 //来源</p>	<p>核心处理 工艺和减容效果</p>
<p>3.化学废液处理系统(CTS)  //不适合用离子交换处理的化学废液 //化学废液和浓缩废液</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 处理工艺是桶内干燥，蒸发装置得到的蒸残液送进桶内干燥，经过反复多次进料，干燥形成化学废液盐块后再超压。超压的作用为除去盐块顶部的空气而不压缩盐块本身，最终目的是提高装桶(200L)的水泥灌浆量，以确保化学废液压缩饼的完整性。</li><li>● 一般化学废液固体含量约为10%，减容因子约为7.5。</li></ul>
<p>4.移动式处理设施(MBS)  //极端情况下超出核岛废液处理系统(WLS)处理能力的放射性废液</p>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 处理工艺是采用过滤、吸附、反渗透(R/O)和离子交换技术处理0.25%燃料包壳破损率下的冷却剂类疏水、洗涤废液、二次侧回路系统含放射性废液，以及其他超出WLS处理能力的各类疏水。</li><li>● 反渗透(R/O)的减容因子约为50，即每处理50m<sup>3</sup>废液，可获得49m<sup>3</sup>的产水和1m<sup>3</sup>的浓缩液。浓缩液再由容器送到化学废液处理系统；产生水送到核岛废液处理系统。</li></ul>

# 集中废物处理设施(SRTF)内的废物流处理系统(续4)

## SRTF内的废物流 处理系统//处理的废物 //来源

## 核心处理 工艺和减容效果

### 5. HVAC过滤器滤芯、干废物和混合废物 处理系统(HVS)

//HVAC过滤器滤芯；可压缩干废物；  
不可压缩干废物；混合废物

//核岛HVAC的过滤器和

碘吸附器(活性炭)

// 围阻体空气过滤系统(VFS)、  
放射性废气系统(WGS)、  
放射性废物厂房通风系统(VRS)、  
核岛保健物理和热检维修间通风  
系统(VHS)、SRTF及热检维修间通  
风系统的空气过滤器；

- 核电厂在维修、检查、清理除污活动产生的零组件材料，分为可压缩废物和不可压缩废物。其中，大部分为可燃性和可压缩废物

- 处理工艺是采用切割/分捡/预压等预处理方法，以及超压缩减容技术来处理核岛与SRTF产生的HVAC过滤器滤芯、干废物和混合废物，其处理能力取决于废物的来源与种类。

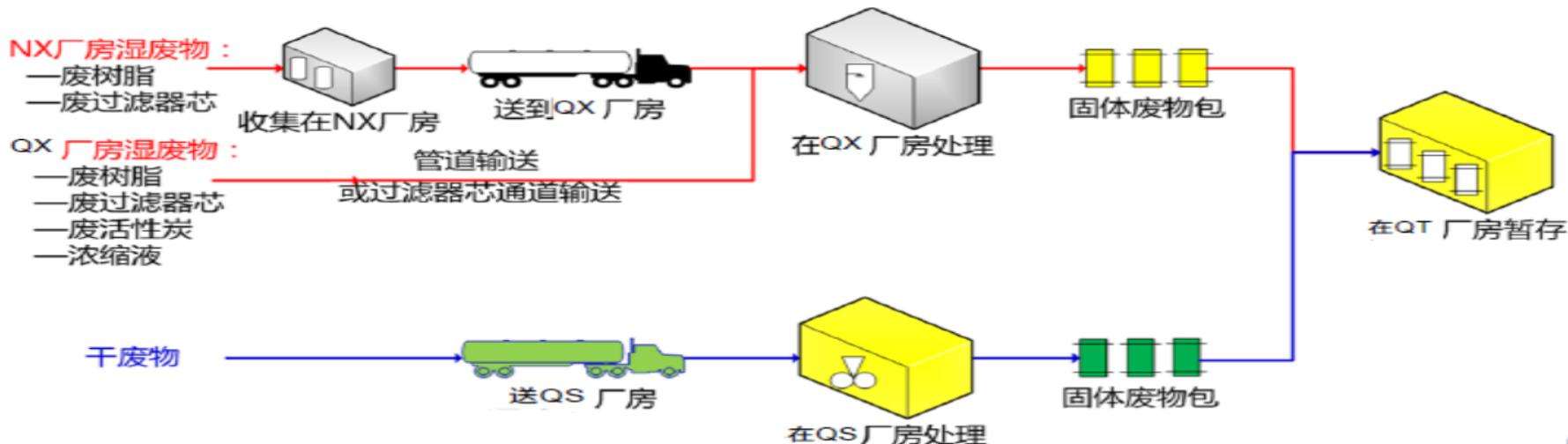
- HVAC过滤器滤芯的减容因子约为**6**。  
可压缩干废物的减容因子约为**4.5**。  
不可压缩废物的减容因子约为**0.75**。

### 待创新推展技艺

- 1.自动化分割滤芯与外框回收再利用技术
- 2.清洁解控废物软、硬件技能
- 3.焚烧炉

# 华龙核电厂固体废物处理工艺

## 废物分类收集、运输、处理和贮存



### 湿废物处理系统

废树脂  
浓缩液  
活性炭 } 水泥固化  
水废过滤 --- 水泥固化

- 废树脂、浓缩液和活性炭分别经脱水、计量后在400L钢桶内与水泥和添加剂混合搅拌，然后用封盖装置进行封盖，经养护后送入固体放射性废物暂存库。
- 废水过滤器通过废过滤器芯下降通道装入带有对中装置的400L钢桶，装入湿混料，然后用自动封盖装置封盖、养护后送入固体放射性废物暂存库。
- 浓缩液、废树脂、活性炭的体积包容率分别为：**50%、35%、30%。**（增容）
- 采用400L钢桶作为废物包装容器。

# 干废物处理 -----主要使用超级压实机(压实力为2000t)设备

用于处理杂项干废物（包括低污染的抹布、塑料、纸、防护用品和不可压实固体部件等），也可以处理地坑淤泥和低放废过滤器芯（表面剂量率 $\leq 2\text{mSv/h}$ ）。

## 处理过程



用塑料袋收集  
或塑料膜包裹  
送到WB厂房

按特性分拣  
(袋装废物)  
初级压实  
(软废物)

烘干  
(潮湿废物)  
剪切装桶 (大  
尺寸废物)

超级压实  
(200L桶装  
废物)

水泥固定  
(桶饼和不可  
压实废物)

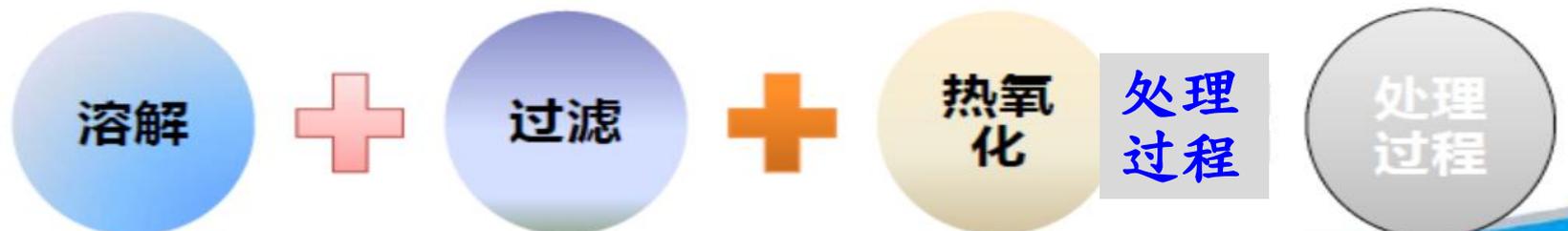


压实力2000t

## 可降解辐射防护用品废物处理系统

采用可降解辐射防护用品，并设置相应的处理装置，可有效减少需压实处理的干废物量。

溶解器每批次180kg，溶解处理约6小时，产生溶解废液约0.6m<sup>3</sup>。



--将用过的可降解防护用品放入溶解处理器内，然后加入热水，防护用品溶解后，加入一定量的氧化剂和催化剂，溶解废液经冷却后进入缓冲罐。溶解器底部不溶的残留物取出作为固体废物进行处理。

--缓冲罐内废液经筛检程序过滤后进入热氧化单元进行热氧化处理。热空气被吹入到热氧化装置中，热氧化形成的CO、CO<sub>2</sub>和水蒸气与热空气一起进入到催化处理室，一氧化碳转化成二氧化碳，蒸汽经冷凝冷却后形成冷凝水，不凝气体通过厂房通风系统排出。

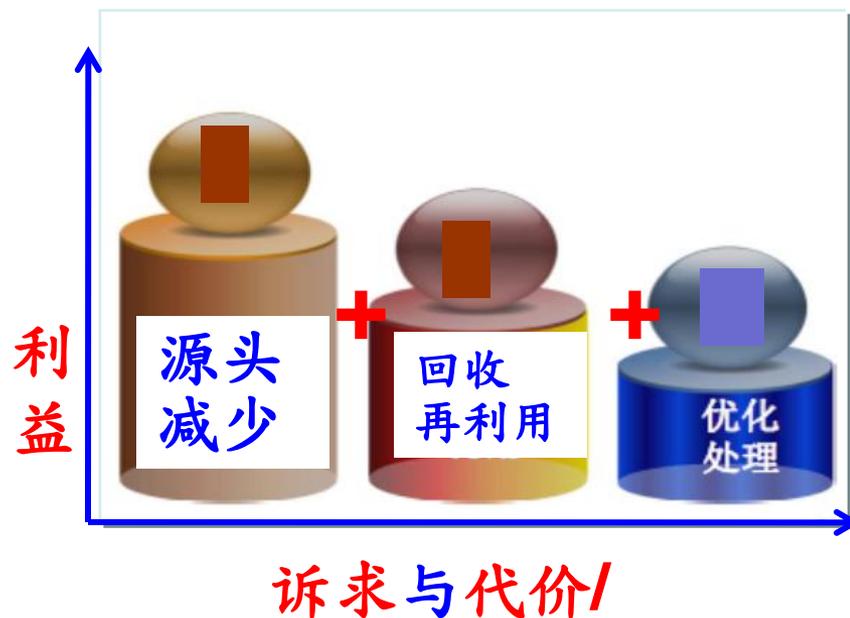
--冷凝水进入废水监测槽监测排放；若超过排放控制值，则送入废液处理系统（ZLT）进行处理。

## (二). 废物减源管理(减废)实践措施

做好大修的废物管理十分重要！

核电厂设管理专责(專業)部门:废料课(台电) VS 保物课/环工科(大陆)

- 干性廢棄物减量管理策略所执行的方向共分为源头、制程及管末减废三个阶段，主要是以「减源管制」、「动态管理」与「除污减量」为减废之三大策略主轴，
- 其中「减源管制」和「除污减量」在抑减干性废弃物产量工作上具有举足轻重的份量



### 废物减源管理(减废)措施

#### 1. 减少来源(减废)

废物最小化，最重要即是避免废物的产生，如防范不必要对象进入管制区域，产生废料严格分类分区存放；以防止交叉污染；降低泄漏及避免二次污染物生成之处理程序等

#### 2. 极低微污染废物的解除管制及再利用(减废)

藉由精确检测仪器的量测和法规程序规范的机制把关，尽可能的将废物进行回收再利用

### 3. 来源减废规范(程序书)

- 退役现场作业严谨管制措施外，其围篱应使用金属器具使可供再利用。
- 制订**源头减废管理有关作业程序书**。
  - § 进入监测区人员管制程序书
  - § 进出辐射管制区管控，**来源减量**，及**废物之分类**管理作业程序书
  - § 泄水监视及查漏程序书(大修期间防止由于设备隔离和在线错误导致大量泄漏和跑水的措施)
  - § 污染的**厂房、机件、工具除污**作业程序书
  - § 加强**放射性物质及设备**管理措施要点
  - § 一定活度或比活度以下放射性废物管理作业程序书
  - § 一定活度或比活度以下放射性**废金属外释**程序书

上述各作为均需经由**严谨的训练**，使所有作业人员熟悉瞭解管制区域作业方式

4. **核电厂设置废物专业专责管理部门**，负责协调全厂废物管理工作，制定废物最小化长期规划和年度考核目标，并监督执行情况。

#### 除污减量措施：

本措施，系将污染干性可回收的废弃物以**除污方式**转变成可符合清洁解控标准的废物，藉以达成**管末减废**之目标。设置除污设备(如电解抛光除污机及污染物件冲洗机)，以及组件除污自动化设备(如放射性污染对象处理机及超高压水刀除污机)，建立完整的除污机制

## 五. 两岸低放射性固体废物处理技术最小化的挑战与待创新发展技术议题

### (一). 新建核电厂固体废物最小化处理技术要求及评析

#### 法规要求:

核设施放射性废物最小化—核安全导则 HAD 401/08-2016  
(2016年10月21日国家核安全局批准发布)

#### 1). 总体目标

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。

#### 2). 基本原则

核设施废物最小化应以确保安全为前提，以废物处置为核心，通过技术和管理措施实现废物最小化，遵循源头控制优先、全过程管理、全员责任和持续优化的原则。

#### 3). 废物最小化目标值

应通过采取切实可行的技术设计和管理措施，并与国际最佳实践相比对，使得核设施放射性固体废物年产生量可合理达到尽量低。

## 附录--新设核电厂固体废物最小化管理(技术)要求

序号	技术名称	适用处理的废物	技术特点	推荐建造方式	台湾已设装置场地
1	固体废物分类和分拣	主要适用于各类干废物,如抹布、废纸、塑料布、棉织品、废弃零部件等	通过高效的检测设备快速确定废物特性	废物产生地和废物处理设施	核四厂
2	焚烧	可燃干废物(包括PE制品、废纸、木头、棉织品、PVC制品、低放废树脂)、废油、废有机溶剂等	减容、减重比高,产生二次废物少,废物无机化,处置安全性好	多堆厂址及核动力厂集中区域,推荐在废物处理中心设置焚烧设施	核二厂 核三厂 核四厂 核研所
3	超级压实	适用于干废物、低活度的废筛检过滤芯、焚烧灰、干燥的废树脂等。超级压实可对桶装废物连桶一起压实,还可直接对一些薄壁的小型金属箱体和管体进行压实	处理工艺简单,减容比随废物特性不同有差别	废物处理中心、废物处置场	核一厂 核二厂 核三厂 核四厂 核研所
4	高效固化	废树脂、浓缩液	废物减容比高	废物处理中心	核三厂
5	废物固定	污染金属、废过滤器芯、废液处理产生的泥浆、超级压实产生的废物饼块	工艺简单,使废物固定在混凝土胶结材料中,固定后有不同程度的增容	废物处理中心	核四厂
6	干燥	废树脂、浓缩液、泥浆、废过滤芯、湿抹布、吸水材料,被水浸湿的其他干废物	使废物含水率满足处置要求,可直接装入包装容器或高整体容器中送处置场进行处置	废物处理中心	核四厂 (湿抹布—可焚烧)
7	高整体容器	废树脂、浓缩液干燥后形成的盐、废过滤芯、焚烧灰等	废物增容小、处理工艺简单,废物包装满足处置要求。可直接装入高整体容	废物处理中心	(废过滤芯直接装桶、焚烧灰以

## 附录--新设核电厂固体废物最小化管理(技术)要求(续)

序号	技术名称	适用处理的废物	技术特点	推荐建造方式	台湾已设装置场地
8	湿法氧化	废树脂	实现废物无机化, 残渣经高效固化后形成稳定的废物体, 废物减容比较高, 尾气处理较简单	废物处理中心	核二厂 (待装置热试车)
9	蒸汽重整	废树脂、活性炭、有机干废物等	废物减容比高, 实现废物无机化, 处理后产物可直接装高整体容器	废物处理中心	
10	去污	污染设备、管道、工具、地面、墙面	防止污染扩散, 可回收利用被放射性污染的工具和材料(包括零部件), 实现废物污染水平的降级或清洁解控	污染设施现场或核动力厂内专设去污设施	核四厂 各核设施
11	金属熔炼	低水平放射性污染金属	可实现无条件或有条件再利用	区域金属熔炼设施	核研所
12	清洁解控	轻微污染的金属、保温材料、混凝土等	可大幅减少需处置的放射性废物量	废物收集点或废物贮存设施	核研所 (200L废物金属桶全量测)
13	辐射防护用品降解技术	用降解材料制成的连体服、内衣、鞋套、手套、袜子、薄膜、拖布、抹布、废物袋等	减少需作为放射性废物处理的干废物量	废物处理中心	

1. 技术名称栏位中蓝色字者为大陆核电厂已使用或新建者

2. 焚烧、高效固化和蒸汽重整(或湿式氧化)的高减容比技术待积极评价使用!

## (二). 核电厂固体废物低产生量的挑战情况

大亚湾, 岭澳核电站和秦山核电厂 单台机组放射性固体废物产生量  
(单位:m<sup>3</sup>)

核电厂	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
大亚湾核电站	78.6	79.2	67	68.8	67.2
岭澳核电站	48.9	49.5	58	66.8	66.2
秦山第二核电厂	94.8	97.8	86.3	115.3	100.3

(葉奇薰,張志銀-大陸核電廠放射性廢料管理發展及挑戰,2010)

# AP-1000 核电厂六部机组放射性物流年预期值

SRTF 預期廢物流	體積/m <sup>3</sup>	減容比	200L 鋼桶數量/個	包裝體積/m <sup>3</sup>
過濾器濾蕊	6 (30)	1	30	6
廢樹脂(核島)	55	3	91	18.2
化學廢液(核島)	60	75	4	0.8
化學廢液(SRTF)	20	75	2	0.4
HVAC 過濾器濾蕊	8(72 個)	6	12	204
可壓縮乾廢物	608	4.5	676	135.2
不可壓縮乾廢物	40	0.7 5	266	53.2
<b>全廠址年包裝廢物量</b>			<b>1081</b>	<b>216.2</b>
<b>單機組年包裝廢物量</b>				<b>36</b>
SRTF 偶發廢物流				
過濾器濾蕊(MBS)	0.4	1	2	0.4
廢樹脂(二次側)	22	3	36	7.2
廢樹脂(MBS)	1.5	3	3	0.6
0.25%核燃料護套破損率下產生的一次側流出液	300	25	60	12

## 华龙核电厂 单机组废物包设计及预期年产生量

废物类别	处理方法	原生废物量 (设计值)	废物包产生 量 (设计值)	原生废物量 (预期值)	废物包产生 量 (预期值)
废树脂	水泥固化	11m <sup>3</sup>	35.2m <sup>3</sup>	4m <sup>3</sup>	12.8m <sup>3</sup>
废活性炭	水泥固化	1m <sup>3</sup>	3.2m <sup>3</sup>	0.5m <sup>3</sup>	1.6m <sup>3</sup>
浓缩液	水泥固化	8 m <sup>3</sup>	18 m <sup>3</sup>	3 m <sup>3</sup>	6.8m <sup>3</sup>
废过滤器芯 ( >2mSv/h)	水泥固化 (每桶一个)	45个	18m <sup>3</sup>	23个	9.2m <sup>3</sup>
废过滤器芯 ( ≤2mSv/h)	水泥固定 (每桶三个)	40个	5.2m <sup>3</sup>	17个	2.4m <sup>3</sup>
杂项干废物	分拣、压实、 水泥固定	140m <sup>3</sup> (可降解 废物79m <sup>3</sup> )	29.6m <sup>3</sup>	108 m <sup>3</sup> (可降解 废物67m <sup>3</sup> )	16.4m <sup>3</sup>
<b>单台机组废 物包 年产生量</b>		<b>109.2m<sup>3</sup> (设计值)</b>		<b>49.2 m<sup>3</sup> (预期值)</b>	

# 台电核三厂 至2011年2月底放射性废物处理方式概况

(单位:55加仑桶)

類別	累积數	处理數	现存數	目前处理方式	未來处理方式
固化	8896	6336	2560	贮存	外运至处置废物场
废树脂	1682	72	1610	小量焚化	湿式氧化法
可燃废物	5577	4234	1343	焚化	焚化
不可燃废物	2754	355	2399	贮存/熔铸/固化	电浆融熔 或其他方法
小计	18909	10997	7912		

注：1.不可燃废物包括:废铁、废保温棉、爐底灰、废濾芯、污泥等。

2.固化废物处理6336桶送至蘭屿储存场 3.本报告期内另有至2015年储存數

## 核三厂 2015年 各类废物产量 (55加仑桶)

类别	固化废物	废树脂	可燃废物	可压废物	其他
产量值	42桶	55桶	86桶	22桶	12桶

注：1. 其他类为污泥与废濾芯。

3. 55 gal=0.2 cubic meters

2. 废树脂的减容处理技术是待发展目标

# 两岸运转中及(AP-1000)核电厂放射性废物年产生量(2座机组计)

单位:立方公尺/年

大亚湾 岭澳 秦山 三门 海阳 核三厂

废料类型	最大值	最大值	最大值	(预估值)	(预估值)	最大值
	最小值	最小值	最小值			最小值
废树脂	88	86	134	4.2	15.1	16
	-----	-----	-----			-----
	36	28	84	0.1		6
蒸发浓缩液			6			2.4
	-----	-----	-----			-----
废过滤器蕊	15.6	25.2	23	1.4	0.26	(未统计)
	-----	-----	-----			
	3.8	4.8	11			
可压实废物	105.6	60.27	79.6	26	30	(30)未焚化前
	-----	-----	-----			-----
						(16)未焚化前
不可压实废物	37	25.2	53	12.3	10	8
						-----
						2.4

备注:1. 各核电厂规模及其核废物处理方法不同 2. 区块者指其废料类型未区分

## 第三代压水堆核电站单机组固体废物包预期年产量

机 型	AP1000 (三门)	AP1000 (海阳)	EPR (台山)	华龙 (福清5-6)	URD/EUR
单机组废物包 预期年产生量，m <sup>3</sup>	48.7 (1)	52.9	76	49.2	50
.....					
注1：未包括部分废物需要装入HIC。					

## 世界主要核能国家压水堆核电站单机组固体废物包年产量(2000年)

国 家	美国	法国	日本	西班牙	比利时	韩国	核三
单机组废物包年产生量中位值，m <sup>3</sup>	20	84	8	46	23	52	24 (树脂暂存)
单机组废物包年产生量最优水平，m <sup>3</sup>	7	45	6	30	21	11	

我们废物产生量相较国外实在有很大的改善空间!

### (三). 待创新发展废物处理技术议题

#### ● 如前评析：

- 1). 我们核电厂废物产生量相较国外实在有很大的改善空间！
- 2). 依循大陆新颁法规:核安全导则 HAD401/08-2016  
    <核设施放射性废物最小化>指导规范中, 应积极评价使用:焚烧、高效固化和蒸汽重整(或湿式氧化)的高减容比技术！
- 3). 近日已核定的<核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标>, 在重点任务中明确指出:建设秦山、大亚湾核电基地放射性废物集中处理示范工程, 推广可燃放射性固体废物焚烧、放射性污染金属熔炼技术应用, 推进核电厂放射性废物减容与清洁解控。

两岸在核电厂放射性废物管理的技能全貌已概知  
我们需要: 知己知彼! 展现及追求卓越!

#### ● 个人愿提出下列数发展议题供参考

## 发展议题一. ---极致减容减量比技术

可燃废物焚化炉+废树脂裂解(蒸汽裂解重整)  
+共享废气处理系统

树脂裂解技术(设备采购)自力设置

示范设施论证!



整合成为

举世优异独特技能

# 关于废树脂的处理挑战和管理-国际趋势和未来的期望

The nuclear grade

strongly(阳树脂) (R-SO<sub>3</sub>-H<sup>+</sup>) and

strongly(阴树脂) (R-CH<sub>2</sub>-N(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>+OH<sup>-</sup>)

Resins are used in the nuclear power plants.



(IAEA-TECDOC-1527 Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, 2006)

## 废树脂的各种处理方法

- 水泥固化--增加容积约9倍
  - 固化体长期稳定性很差-有机物质未破坏-防火性能差
- 柏油固化--增加容积和有机物分解问题
  - 有可燃性和辐解产生气体的问题
- 焚烧--技术复杂因为可燃性差 incineration of IX resins generates polyaromatic hydrocarbons (PAHs), soot, SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> [2] which are toxic and corrosive to structural materials at high temperatures [>1000oC] encountered in incinerators.
  - 污染砖炉衬维护作业困难-烟气中的Cs核种问题
- 热压缩--略为减少容积
  - 需与现有设备(超高压及固定化设备)的协同作业
  - 有机物质未破坏
- 裂解(Pyrohydrolysis) - 无有机物质-减重比约为97-98%
- 湿式氧化处理--无有机物质-减容比约为1/3 --废液产生

## 大陆一些核电厂废树脂年产出量及处理方式

核电厂 (双机组)	废树脂年产出量	处理方式	备注
泰山核电厂	低放废物: 5.8m <sup>3</sup> /a 中放废物: 3.5-5.7X10 <sup>7</sup> Bq/kg	6个不锈钢大罐贮存 4000直径X6000mm	单机组
泰山第三核电 有限公司	低放废物: 15m <sup>3</sup> /a 中放废物: 1X10 <sup>6</sup> Bq/cm <sup>3</sup>	2个废树脂贮存槽 200 m <sup>3</sup>	
核电秦山联营 有限公司	低放废物: 12 m <sup>3</sup> /a 中放废物: 22m <sup>3</sup> /a	水泥固化 干废树脂重量包容率 8%	
大亚湾(宁澳) 核电厂	低放废物: 12 m <sup>3</sup> /a 中放废物: 22m <sup>3</sup> /a	水泥固化 干废树脂重量包容率 8%	产出量范围 13-22m <sup>3</sup> /a
江苏核电 有限公司	低放废物: 10.8 m <sup>3</sup> /a 中放废物: 26.2m <sup>3</sup> /a	水泥固化 干废树脂重量包容率 10%	

(陈斌, 上海核工程设计院, 核电厂低放废树脂处理工艺, 2010)

处理方式: 暂存或水泥固化(增加很大废量物)

# 台电各核电厂低放射性廢棄物贮存现况表(至2017年1月)

单位：桶(55 加仑)

厂别/ 种类	固化 废弃物	脱水 树脂	可燃性	可压性	其他	合计
核一厂	8,758	6,268	8,736	11,229	9,478	44,489
核二厂	26,516	9,037	1,867	1,110	15,854	54,384
核三厂	2,759	1,910	1,324	1,563	1,152	8,708
合计	38,033	17,235	11,927	13,902	26,484	107,581

注：可燃可压性放射性废弃物可再经减容处理后，降低桶数。

核研所：脱水树脂165桶

台湾早年运送到兰屿贮存场的废树脂固化桶，经检查后发现有破裂或粉化的情况。台湾三座核电厂自1987年起均不再进行水泥固化，而实行脱水后予存放。



英国核集团 (British Nuclear Group) 曾尝试几个封装在水泥基体中的废树脂实验得知，树脂在纯普通硅酸盐水泥(OPC)的固化形式最初是获得令人满意的结果，但是，后来在仅仅几个星期后此固体碎成了粉末。

[R. Streatfield, Examples of cement formulation development work on organic Ion Exchange Resin., Presentation 15 th meeting of the Radioactive Waste Information Network(RWLN), 31 January 2006. British Nuclear Group.]

# 发展议题二. ---废液浆直接浓缩蒸干装桶(不添加固化剂)

## 蒸发浓缩器+HIC盛装容器

速研究和论证(参考德国方式):

废液浆直接浓缩蒸干装桶后

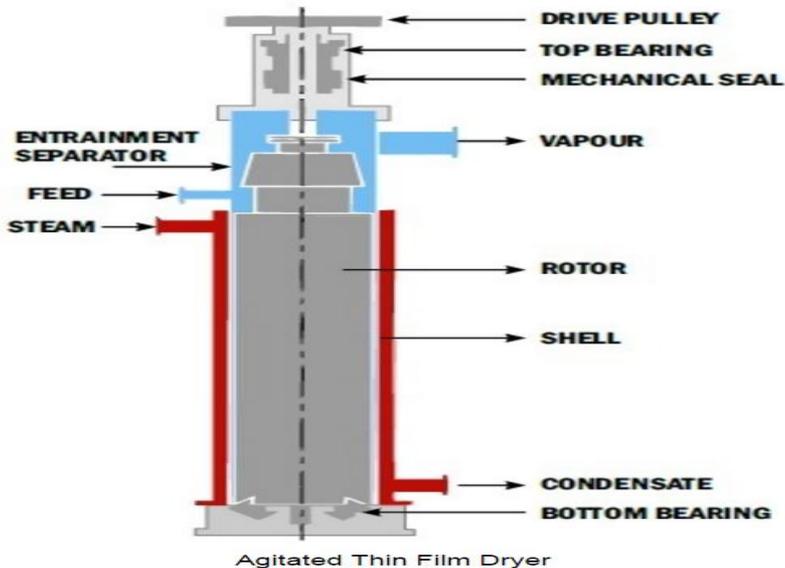
(不必固化, 大幅减容!)

可完全符合最终处置场接受标准



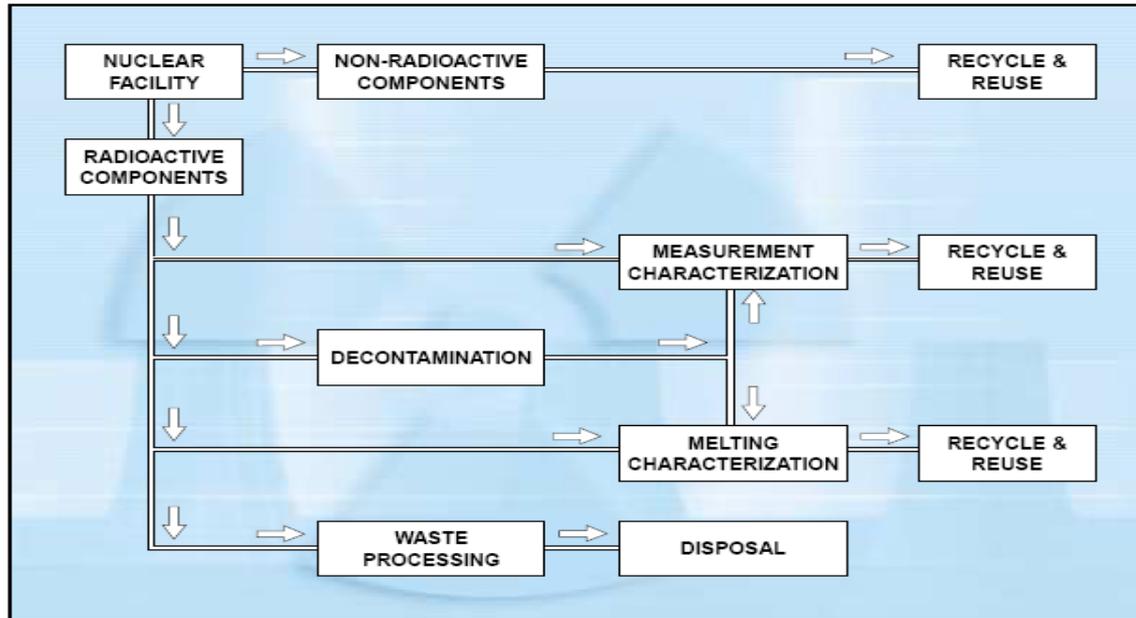
- 真空操作模式 获得较低的腐蚀率和更好的传热效果.
- 能够获得干式, 自由流动颗粒状粉末.

### Agitated Thin Film Dryer



蒸发器为可拆装车移动式

# 发展议题三. --移动式污染金属熔融减积及去污技术



TECHNICAL REPORTS SERIES No. **401**

(Methods for the Minimization of Radioactive Waste from Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA 2001)

Co-60污染钢铁熔融时, 添加氧化铝可将其构成结合物至熔渣中, 与铸锭分离, 有去污效能

移动式金属熔融设施在一个电厂完成操作后, 熔融炉可除污清理后组件拆解装置进货柜车再运到另一个电厂使用

国产化



熔融炉

移动式金属熔铸设施

## 发展议题四. --- HVAC 绝对过滤器 处理技术



用过绝对过滤器: 体积大暂存需要大空间, 而滤芯污染低微的特性

研创自动割除滤芯后,  
将几乎无污染金属外框除污  
(以水刀, 化学或熔炼)后回收再利用的技术

## 六. 結束語

由以上報告內容已知，

兩岸在核電廠放射性廢物管理的目前技能全貌，  
我們更是需要：

知己知彼！國家在

（核電廠放射性廢物處理技術發展項目）亦須加重視，  
編列計劃，導引有關核電集團實行吸收、消化、創新戰略，  
在世界上也如同華龍核電技術一樣，

展現及追求卓越！推出响亮新技术品牌！

# 谢谢聆听