

核出口管制清单

说明

一、总说明

下述各段适用于《核出口管制清单》:

(一) 本清单中所涵盖的各类物项既包括未使用过的物项,亦包括使用过的物项。

(二) 如果对本清单中任何物项的说明不含限制条件或技术规格,这种说明是指该物项的全部品种。

(三) 当设施或设备的设计、建造或运行过程所依据的物理过程或化学过程与本清单中确定的相同或相似时,该设施或设备应被视为与受管制设施或设备属于“同种型号”。

(四) 不应通过零部件的转让而绕开对本清单中的物项的管制。

二、技术控制

(一) “技术”转让根据《中华人民共和国核出口管制条例》的规定进行管制。与本清单所列物项直接有关的“技术”将在我国法律法规允许的范围内受到与物项同样严格程度的审查和管制。

(二) 对“技术”转让的管制不适用于“公有领域”资料或“基础科学研究”资料。

三、关于软件的说明

（一）为“研发”、“生产”或“使用”本清单所列任何物项而专门设计或开发的“软件”转让在我国法律法规允许的范围内受到与物项同样严格程度的审查和管制。

（二）“软件”转让与“技术”转让采用同样的管制原则。

四、定义

1. “公有领域”在此是指已经公开使用且进一步传播不受限制的“技术”或“软件”（包括受版权限制的“技术”或“软件”）。

2. “基础科学研究”是指主要为获得关于现象和可观察到的事实的基本原理的新知识而从事的实验性或理论性工作，此类工作主要不是针对某一具体的实用目的或目标。

3. “技术”是指本清单所列物项的“研发”、“生产”或“使用”所要求的特定资料。这些资料可以采用“技术数据”或“技术援助”的形式。其中，“研发”涉及“生产”前的各个阶段，即设计、设计研究、设计分析、设计概念、样机的组装和试验、小规模试生产计划、设计数据、将设计转换成产品的过程、配置设计、集成设计、布局等；“生产”是指建造、生产工程、制造、集成、组装（安置）、检查、试验、质保等各个阶段；“使用”是指运行、安装（包括现场安装）、维护（检查）、修理、大修和翻修等；“技术数据”可以采用蓝图、图纸、图表、模型、公式、工程设计和技术规格、手册与说明书等形式，记载在纸质材料上或记录在诸如磁盘、磁带、只读存储器等其他载体或设备上；“技

术援助”可以采用指导、技能、培训、操作知识和咨询服务等形式，可以包括“技术数据”的转让。

4. “软件”是指固化于有形媒介中的一个或多个“程序”或“微程序”，其中“程序”是指电子计算机可执行形式的或可转换成电子计算机可执行形式的指令序列，用于执行某一进程；“微程序”是指保存在一个特殊的存储器里的基本指令序列，通过将其引用指令存入指令寄存器开始其执行。

5. “其他元素”是指氢、铀和钷以外的所有元素。

五、单位

本清单使用国际单位制（SI）。在任何情况下，以国际单位制规定的物理量为正式管制值。本清单相关单位通常使用的符号（及其表示数量级的词头）如下（按字母顺序）：

A - 安 - 电流

Å - 埃 - 长度

cm - 厘米 - 长度

cm² - 平方厘米 - 面积

cm³ - 立方厘米 - 体积

°C - 摄氏度 - 摄氏温度

° - 度 - [平面]角

g - 克 - 质量

g₀ - 重力加速度（9.80665 米/秒²） - 加速度

GHz - 吉赫 - 频率

kW - 千瓦 - 功率

K - 开 - 热力学温度

m - 米 - 长度

m² - 平方米 - 面积

m³ - 立方米 - 体积

mA - 毫安 - 电流

μm - 微米 - 长度

min - 分 - 时间

mm - 毫米 - 长度

MPa - 兆帕 - 压强

GPa - 吉帕 - 压强

h - 小时 - 时间

H - 亨 - 电感

Hz - 赫 - 频率

J - 焦 - 能量/功/热量

kg - 千克 - 质量

kHz - 千赫 - 频率

kJ - 千焦 - 能量/功/热量

kPa - 千帕 - 压强

nm - 纳米 - 长度

N - 牛 - 力

Ω - 欧 - 电阻

Pa - 帕 - 压强

s - 秒 - 时间

" - [角]秒 - [平面]角

V - 伏 - 电压/电势

VA - 伏安 - 视在功率

第一部分 核材料

核材料系指源材料和特种可裂变材料。其中：

1. 源材料系指天然铀、贫化铀和钍，呈金属、合金、化合物或浓缩物形态。但出于出口管制目的不包括：

（1）国家原子能机构认定仅用于非核活动（如合金、陶瓷的生产）的源材料；

（2）在一个自然年（1月1日至12月31日）内向同一接收国出口：

①少于500 kg的天然铀；

②少于1000 kg的贫化铀；

③少于1000 kg的钍。

2. 特种可裂变材料系指钚-239、铀-233、含铀-235或铀-233或兼含铀-233和铀-235且这两种同位素丰度或其之和与铀-238丰度的比大于自然界中铀-235与铀-238丰度比的铀，以及含有上述物质中的一种或多种的任何材料（不包括源材料），包括核燃料组件。但出于出口管制目的不包括：

（1）钚-238丰度超过80%的钚；

（2）克量或克量以下用作仪器传感零部件的特种可裂变材料；

（3）在一个自然年（1月1日至12月31日）内向同一接收国出口少于50有效克的特种可裂变材料。有效克定义为：

①对于钷，以克计的质量。

②对于铀-233 和铀-235 丰度之和为 1%及以上的铀，以克计的质量与该丰度之和的平方的积。

③对于铀-233 和铀-235 丰度之和小于 1%但大于 0.5%的铀，以克计的质量与 0.0001 的积。

第二部分 核设备和反应堆用非核材料

1. 核反应堆以及专门为其设计或制造的设备和部件

引言

各种类型的核反应堆，无论以所用慢化剂（如石墨、重水、轻水、无慢化剂）、核反应堆内中子谱（如热中子、快中子）、所用冷却剂类型（如水、液态金属、熔盐、气体）为特征，或以功能类型（如动力堆、研究堆、试验堆）为特征进行区分。上述所有类型的核反应堆都属于本节范围并受本节所有可适用小节管制。本节管制范围不包括聚变反应堆。

1.1. 完整的核反应堆

能够运行以维持受控自持链式裂变反应的核反应堆。

注释

核反应堆基本上包括反应堆容器内的或直接与其相连的物项、控制堆芯功率水平的设备和通常容纳或直接接触或控制反应堆堆芯一次冷却剂的零部件。

1.2. 核反应堆容器

专门设计或制造用来容纳上述 1.1 定义的核反应堆的堆芯以及下文 1.8 定义的相关堆内构件的金属容器，以及车间制造的其主要零件。

注释

物项 1.2 涵盖各种压力等级的核反应堆容器，包括反应堆压

力容器和排管容器。物项 1.2 包括反应堆容器顶盖，它是在车间制造的反应堆容器主要零件之一。

1.3. 核反应堆燃料装卸机

专门设计或制造用于向上述 1.1 定义的核反应堆中插入或从中取出燃料的操作设备。

注释

上述物项能够进行不停堆换料，或利用技术先进的定位或准直装置进行复杂的停堆装料操作，例如通常不可能直接观察或接近燃料的操作。

1.4. 核反应堆控制棒和相关设备

专门设计或制造用于控制上述 1.1 定义的核反应堆裂变过程的棒及其支承结构或悬吊结构、驱动机构和导向管。

1.5. 核反应堆压力管

专门设计或制造用于容纳上述 1.1 定义的核反应堆的燃料元件和一次冷却剂的压力管。

注释

压力管是燃料通道的一部分，按设计在高压下运行，压力有时超过 5 MPa。

1.6. 核燃料包壳

专门设计或制造在上述 1.1 定义的核反应堆中作为燃料包壳使用的数量超过 10 kg 的锆金属或锆合金的管或管组件。

注意：锆压力管的管制适用于 1.5，锆排管的管制适用于 1.8。

注释

在核反应堆中使用的锆金属管或锆合金管含铪与锆的重量之比通常低于 1:500。

1.7. 一次冷却剂泵或循环泵

专门设计或制造用于循环上述 1.1 定义的核反应堆的一次冷却剂的泵或循环泵。

注释

专门设计或制造的泵或循环泵包括水冷堆泵、气冷堆循环泵以及液态金属冷却堆用电磁泵和机械泵。这种设备可包括带有防止一次冷却剂渗漏的精密密封系统或多重密封系统的泵、全密封驱动泵，以及有惯性质量系统的泵。这一定义包括鉴定为 NC-1 或相当标准的泵。

1.8. 核反应堆内部构件

专门设计或制造用于上述 1.1 定义的核反应堆的“核反应堆内部构件”，包括堆芯支承柱、燃料通道、排管、热屏蔽体、堆芯围板、堆芯栅板和扩散板等。

注释

“核反应堆内部构件”是反应堆容器内的主要结构，具有一种或多种功能，例如支承堆芯、保持燃料对齐、引导一次冷却剂流向、为反应堆容器提供辐射屏蔽层、引导堆芯内仪表。

1.9. 热交换器

(a) 专门设计或制造用于上述 1.1 定义的核反应堆的一次

冷却剂回路或中间冷却剂回路的蒸汽发生器。

(b) 专门设计或制造用于上述 1.1 定义的核反应堆的一次冷却剂回路的其他热交换器。

注释

蒸汽发生器专门设计或制造用于将反应堆内生成的热量输送到给水以产生蒸汽。对于还有一个中间回路的快堆，蒸汽发生器在中间回路中。在气冷堆中，可利用热交换器向驱动涡轮发动机的二次气体回路传热。本小节管制范围不包括反应堆支持系统如应急冷却系统和衰变热冷却系统的热交换器。

1.10. 中子探测器

专门设计或制造用于测定上述 1.1 定义的核反应堆堆芯内中子通量的中子探测器。

注释

本小节的范围包括用于在大量程范围内测定中子通量的堆芯内和堆芯外探测器，它们典型地从每平方厘米每秒 10^4 个中子或更高起测。堆芯外探测器是指在上述 1.1 定义的核反应堆堆芯外但是位于生物屏蔽层内的探测器。

1.11. 外热屏蔽体

专门设计或制造用于上述 1.1 定义的核反应堆减少热损失、保护安全壳的“外热屏蔽体”。

注释

“外热屏蔽体”是覆于反应堆容器外围的大型结构件，用于

减少反应堆的热损失和降低安全壳内的温度。

2. 反应堆用非核材料

出口

为了出口控制的目的，国家原子能机构将审查出口符合 2.1 和 2.2 所述规格的非核材料是否供核反应堆使用。经审查确认，符合 2.1 和 2.2 所述规格但不供上述 1.1 所定义的核反应堆使用的非核材料，不在管制范围内。

2.1. 氘和重水

在一个自然年（1 月 1 日至 12 月 31 日）内向同一接收国出口的、供上述 1.1 定义的核反应堆使用的、数量超过 200 kg 氘原子的氘、重水（氧化氘）以及氘与氢原子之比超过 1:5000 的任何其他氘化物。

2.2. 核级石墨

数量超过 1 kg、纯度优于 5 ppm（百万分之五）硼当量、密度大于 1.50 g/cm^3 的供上述 1.1 所定义的核反应堆使用的石墨。

注释

硼当量（BE）可以实验测定或以包括硼在内的杂质 BE_z 之总和计算得出（由于碳不被考虑是一种杂质，因此不包括 $BE_{\text{碳}}$ ），其中：

$BE_z (\text{ppm}) = CF \times \text{元素 } Z \text{ 的浓度 (以 ppm 为单位)};$

CF 为转换因子即 $(\sigma_z \times A_B)$ 除以 $(\sigma_B \times A_z)$;

σ_B 和 σ_z 分别为自然界中硼和元素 Z 的热中子俘获截面（以

巴为单位)， A_B 和 A_Z 分别为自然界中硼和元素Z的原子质量。

考虑到硼当量检测的复杂性，经检测灰分按重量计超过500 ppm的石墨，可认定为不属于核级石墨。

3. 辐照燃料元件后处理厂以及专门为其设计或制造的设备

引言

辐照核燃料后处理是从辐照核燃料中去除强放射性裂变产物以及其他超铀元素而分离出钚和铀的过程。有各种技术工艺流程能够实现这种分离。但是，多年来，“普雷克斯”已成为最普遍采用和接受的工艺流程。“普雷克斯”流程包括：将辐照核燃料溶解在硝酸中，然后利用磷酸三丁酯与一种有机稀释剂的混合剂，通过溶剂萃取法分离铀、钚和裂变产物。

各种“普雷克斯”设施具有彼此相似的工艺功能，包括：辐照燃料元件的脱壳和（或）切割、燃料溶解、溶剂萃取和工艺液流的贮存。还可能有设备用于：使硝酸铀酰热脱硝，将硝酸钚转化成氧化钚或金属钚，以及将裂变产物废液处理成适合长期贮存或处置的形式。但是，实现这些功能的设备的具体类型和结构在各种“普雷克斯”设施之间可能不同，原因有多个，其中包括待后处理的辐照核燃料的类型和数量不同、对回收所得材料的处理计划不同和设施设计时所考虑的安全和维护原则不同。

“辐照燃料元件后处理厂”包括通常直接接触和直接控制辐照燃料和含有核材料以及裂变产物的主要工艺液流的设备和零部件。可以通过为避免临界（例如通过几何形状）、放射性照射

（例如通过屏蔽）和毒性危害（例如通过包容性措施）而采取的各种措施来辨认这些工艺流程，包括钚转化和钚金属生产的完整系统。

3.1. 辐照燃料元件脱壳设备和剪切机

专门设计或制造供上述确定的后处理厂使用的遥控设备，用来使燃料组件、燃料棒束或燃料棒中的辐照核材料暴露出来或做其他准备，以便进行处理。

注释

这种设备能以剪切或以其他方式打开燃料包壳，使辐照核材料暴露出来或对其做其他准备，以便进行处理。专门设计的剪切机是最常用的，但也可采用先进设备，例如激光器、剥离机或其他技术。脱壳是指在辐照核燃料溶解前将其包壳脱除。

3.2. 溶解器

专门设计或制造供上述确定的后处理厂使用的溶解容器或采用机械装置的溶解器，用来溶解辐照核燃料，并能耐受高温、腐蚀性强的液体以及能远距离装料、操作和维护。

注释

溶解器通常接收固态辐照核燃料。核燃料若有用锆、不锈钢或这些材料的合金等材料制成的包壳，则在装入溶解器之前，必须进行脱壳和（或）剪切，使酸能接触辐照核材料。辐照核材料通常被溶解在硝酸等强无机酸中，任何未溶解的包壳都被去除。某些设计特点（如小直径容器、环形容器或扁形容器）虽然可用

于确保临界安全，但并非必需，可代之以管理性措施，如小批量操作或使易裂变材料含量保持在低水平。溶解容器和采用机械装置的溶解器通常用低碳不锈钢、钛或锆等材料或其他优质材料制成。溶解器可能包括用于去除包壳或包壳废物的系统，以及用于控制和处理放射性废气的系统。溶解器通常在厚屏蔽体后装料、操作和维护，因此它们可能被远距离放置。

3.3. 溶剂萃取器和其他溶剂萃取设备

专门设计或制造用于辐照燃料后处理厂的溶剂萃取器，例如填充柱或脉冲柱、混合澄清槽或离心接触器。溶剂萃取器必须能耐硝酸的腐蚀作用，通常用低碳不锈钢、钛、锆或其他优质材料，按极高标准制成（包括采用特种焊接和检验以及质量保证和质量控制技术）。

注释

溶剂萃取器既从溶解器接收辐照燃料溶液，又接收分离铀、钚和裂变产物的有机溶液。溶剂萃取设备通常设计成能满足严格的运行参数，例如运行寿命长而且无需维护或易于更换，操作和控制简单，以及可适应工艺条件的各种变化。

3.4. 化学溶液暂存或贮存容器

专门设计或制造用于辐照燃料后处理厂的暂存或贮存容器。这种暂存或贮存容器必须能耐硝酸的腐蚀作用，通常用低碳不锈钢、钛、锆或其他优质材料制造。它们可设计成能远程操作和维护，而且可能具有下述防止核临界的特点：

- (1) 壁或内部结构至少有 2%的硼当量；或
- (2) 对于圆柱形容器来说，最大直径 175 mm；或
- (3) 对于平板形或环形容容器来说，最大宽度 75 mm。

注释

溶剂萃取阶段产生三种主要的工艺液流，它们在进一步处理过程中均使用暂存或贮存容器：

(a) 用蒸发法浓缩纯硝酸铀酰溶液，然后对其脱硝，得到氧化铀。氧化铀可在核燃料循环中再次利用。

(b) 通常用蒸发法浓缩强放射性裂变产物溶液，然后将其以浓缩液形式贮存。此后可进一步蒸发这种浓缩液并将其转化成适合贮存或处置的形式。

(c) 将纯硝酸钚溶液浓缩并贮存，以待运往后续工艺步骤。钚溶液暂存或贮存容器尤其应设计成能避免液流浓度和形状改变导致的临界问题。

3.5. 工艺控制用中子测量系统

专门设计或制造用于与辐照燃料元件后处理厂的自动化工艺控制系统相结合和配合使用的中子测量系统。

注释

这些系统具有主动和被动中子测量和甄别能力，目的是确定易裂变材料的数量和成分。整套系统由中子发生器、中子探头、放大器和信号处理电子学器件组成。

本小节的范围不包括为核材料衡算和保障或任何其他与辐

照燃料元件后处理厂自动化工艺控制系统集成和配合使用无关的应用而设计的中子探测和测量仪器。

4. 核反应堆燃料元件制造厂以及专门为其设计或制造的设备

引言

核燃料元件用本清单第一部分所述的一种或多种源材料或特种可裂变材料制成。对于氧化物燃料这一最常见的燃料类型，其制造常用到芯块压坯、烧结、磨削和分级的设备。对于混合氧化物燃料，它们在密封于包壳前都是在手套箱（或等效的箱体）内操作的。在所有情况下，燃料被密封于一个合适的包壳内，这种包壳被设计成包容燃料的首要包层，能在反应堆运行时发挥恰当的性能和安全作用。此外，在所有情况下，为保证燃料的表现安全、可预测，必须按照极高标准精确控制工艺、规程和设备。

注释

为核反应堆燃料元件制造厂“专门设计或制造的设备”有：

- （a）通常直接接触、直接加工或控制核材料料流的设备；
- （b）将核材料密封在包壳内的设备；
- （c）检验包壳或密封完整性的设备；
- （d）检验密封燃料最后精加工效果的设备；
- （e）用于装配核燃料元件的设备。

这类设备或设备系统可能包括：

- （1）专门设计或制造用于检验燃料芯块最终尺寸和检查其表面缺陷的全自动芯块检验台；

(2) 专门设计或制造用于将端塞焊接到燃料棒上的自动焊接机;

(3) 专门设计或制造用于检验燃料棒成品完整性的自动化测试和检验台;

(4) 专门设计或制造用于制造核燃料包壳的系统。

典型的第(3)种设备用于:(a)燃料棒与端塞焊缝X射线检查,(b)充压燃料棒的氦检漏,(c)燃料棒 γ 射线扫描,检查内部燃料芯块是否正确装载。

5. 天然铀、贫化铀或特种可裂变材料同位素分离厂以及专门为其设计或制造的除分析仪器以外的设备

引言

在很多情况下,用于铀同位素分离的工厂、设备和技术与用于“其他元素”同位素分离的工厂、设备和技术有密切联系。在某些情况下,本节所述管制也适用于拟用于“其他元素”同位素分离的工厂和设备。对用于“其他元素”同位素分离的工厂和设备的这种管制,是对本清单所涵盖的为特种可裂变材料的加工、使用或生产而专门设计或建(制)造的工厂和设备的管制的补充。本节对相关工厂、设备和技术用于“其他元素”同位素分离的这种补充性管制,不适用于电磁同位素分离法(该工艺在《中华人民共和国两用物项出口管制清单》中列管),但适用于气体离心法、气体扩散法、等离子体分离法和空气动力学工艺,即这些工艺无论是拟用于铀同位素分离,还是拟用于“其他元素”同位素

分离，均受本清单管制。对一些工艺而言，“其他元素”同位素分离与铀同位素分离的关系取决于被分离的元素，这些工艺是：基于激光的工艺（如分子激光同位素分离和原子蒸气激光同位素分离）、化学交换和离子交换。因此，国家原子能机构将对这些工艺逐一进行评估，相应地决定是否对用于“其他元素”的情况实施上述补充性管制。

为铀同位素分离“专门设计或制造的除分析仪器以外的设备”包括：

5.1. 气体离心机和专门设计或制造用于气体离心机的组件和零部件

引言

气体离心机核心部分通常为一个直径 75 mm 到 650 mm 的薄壁圆筒，称为转筒。转筒处在真空环境中，以约 300 m/s 或更高的外周速度旋转，其轴线保持竖直。为达到高转速，制造旋转零部件的材料必须具有高比强度（强度与密度之比），且转筒组件及其零部件必须按很小的公差来制造，使不平衡降至最低。与其他离心机不同，铀浓缩用气体离心机具有如下特点：在转筒室中有一个或多个旋转的盘状挡板和—个固定的管列，后者用来供应和提取 UF_6 气体，其至少有三个单独的通道，其中两个与从转筒轴伸向转筒室周边的收集器相连。在真空环境中还有一些不转动的关键零部件，它们虽然是专门设计的，但不难制造，也不是用特殊的材料制成的。不过，一座离心浓缩设施需要大量的这种零部

件，以至于其数量是能够反映其最终用途的一个重要指标。

5.1.1. 转动零部件

(a) 完整的转筒组件：

用 5.1.1 注释所述的一种或多种高比强度材料制成的单个薄壁圆筒或多个相互连接的薄壁圆筒；若是相互连接的，则圆筒间通过下文 5.1.1 (c) 所述的柔性波纹管或环连接。转筒（如果是最终形态的话）装有下列文 5.1.1 (d) 和 (e) 分别所述的一个或多个内部挡板和顶盖/底盖。但是完整的组件可能以仅部分组装的形式交付。

(b) 转筒：

专门设计或制造的壁厚 12 mm 或更薄的直径 75 mm 到 650 mm 的、用 5.1.1 注释所述的一种或多种高比强度材料制成的薄壁圆筒。

(c) 环或波纹管：

专门设计或制造用于局部支承转筒或将多个转筒连接起来的构件。波纹管是壁厚 3 mm 或更薄的直径 75 mm 到 650 mm 的用 5.1.1 注释所述的其中一种高比强度材料制成的有褶（仅 1 节波纹）短圆筒。

(d) 挡板：

专门设计或制造的直径 75 mm 到 650 mm 的用 5.1.1 注释所述的其中一种高比强度材料制成的安装在离心机转筒内的盘状构件，其作用是将取气室与主分离室隔开，也在某些机型中促进 UF。

气体在转筒主分离室中循环。

(e) 顶盖/底盖:

专门设计或制造的直径 75 mm 到 650 mm 的用 5.1.1 注释所述的其中一种高比强度材料制成的安装在转筒端部的盘状构件,其作用是将 UF₆ 包容在转筒内,在有些机型中还对上轴承进行支承、限位或将其作为集成零件容纳在内(顶盖),或承载马达和下轴承的旋转件(底盖)。

注释

离心机转动零部件所用材料包括:

(a) 极限抗拉强度能达到 1.95 吉帕或更高的马氏体时效钢;

(b) 极限抗拉强度能达到 0.46 吉帕或更高的铝合金;

(c) 适合用于复合结构的丝状材料,比模量应为 3.18×10^6 m 或更高,比极限抗拉强度应为 7.62×10^4 m 或更高(“比模量”是以 N/m^2 为单位的杨氏模量除以以 N/m^3 为单位的比重的商;“比极限抗拉强度”是以 N/m^2 为单位的极限抗拉强度除以以 N/m^3 为单位的比重的商)。

5.1.2. 静态零部件

(a) 磁悬浮轴承:

1. 专门设计或制造的轴承组件,由一个充满阻尼介质的箱体和一个悬浮在其中的环形磁铁组成。该箱体用耐 UF₆ 的材料(见 5.2 的注释)制成。该磁铁与安装在 5.1.1 (e) 所述顶的顶盖上的一个极靴或另一个磁铁耦合。磁悬浮轴承中的磁铁可以是环形

的，外径与内径的比小于或等于 1.6:1。它可能处于这样的形态：初始磁导率 0.15 H/m 或更高，或剩磁 98.5%或更高，或磁能积高于 80 kJ/m³。除具有通常的材料性质外，磁轴对几何轴的偏离限制在很小的公差范围内（低于 0.1 mm）或特别要求磁铁材料有均匀性是先决条件。

2. 专门设计或制造供气体离心机使用的主动磁悬浮轴承。

注释

这些轴承通常同时具有下述特点：按设计可使转速 600 Hz 或更快的转子保持居中；与可靠的电源和（或）不间断电源（以运行 1 小时以上）相连。

（b）轴承/阻尼器：

专门设计或制造的轴承，由架在阻尼器上的枢轴/杯座组件构成。枢轴通常是一种淬硬钢轴，一端呈半球形，另一端能安装在 5.1.1（e）所述底盖上。但这种轴可附有一个动压轴承。杯座呈短圆柱形，一端有一个半球形凹穴。这些零部件通常是分开为阻尼器提供的。

（c）分子泵：

专门设计或制造的圆筒，内部有机械加工出来或挤压出来的螺旋槽和机械加工出来的圆柱形腔。典型尺寸如下：内径 75 mm 到 650 mm，壁厚 10 mm 或更厚，长度等于或大于直径。槽的横截面在典型情况下是矩形，槽深 2 mm 或更深。

（d）电动机定子：

专门设计或制造的环形定子,用于在真空中以 600 Hz 或更高频率、以 40 VA 或更高功率同步运行的高速多相交流磁滞(或磁阻)电动机。定子可由单层典型厚度为 2.0 mm 或更薄的低损耗叠片铁芯和其上的多相绕组组成。

(e) 离心机壳/容器:

专门设计或制造用来容纳气体离心机转筒组件的部件。离心机壳主要为一个壁厚不超过 30 mm 的刚性圆筒,其两端经过精密机械加工用于定位轴承,另有一个或多个用于安装时固定的法兰盘。其两个经过机械加工的端面相互平行,与圆筒轴垂直,误差均不大于 0.05 度甚至更小。离心机壳也可以是一种堆砌型结构以容纳多个转筒组件。

(f) 取料器:

专门设计或制造的管件,用于借助皮托管作用从转筒中提取 UF_6 气体(即利用一个面向转筒内周向气流的开口,如弯折径向布置的管的端部),并且能与中心气体提取系统相固连。

5.2. 为气体离心浓缩工厂专门设计或制造的辅助系统、设备和部件

引言

气体离心浓缩厂的辅助系统、设备和零部件是向离心机供应 UF_6 ,将单台离心机联接成级联(或分离级)从而逐渐提高浓缩度,从离心机中提取 UF_6 。“产品”和“尾料”所需的各种工厂系统,以及驱动离心机或控制工厂所需的设备。

通常采用压热罐使 UF_6 从固态升华，产生的 UF_6 通过级联集管线路被分配到各个离心机。最终从离心机流出的 UF_6 “产品”和“尾料”气流也通过级联集管线路被输送到冷阱（工作在约 203 K 即 -70°C ）， UF_6 先在冷阱中凝华，然后再转入适当的容器运输或贮存。由于一座浓缩厂由连成级联的数以千计的离心机组成，所以级联集管线路数以公里计，内含数以千计的焊缝，管道布局大量重复。上述设备、部件和管道系统是按非常高的真空和洁净度标准制成的。

注释

以下所列一些物项，要么直接接触 UF_6 工艺气体，要么直接控制离心机以及这种气体从离心机到离心机、从级联到级联的流动。耐 UF_6 腐蚀的材料包括铜、铜合金、不锈钢、铝、氧化铝、铝合金、镍或按重量计含镍 60% 或以上的合金以及氟化烃聚合物。

5.2.1. 供料系统/产品和尾料提取系统

专门设计或制造用于浓缩厂的工艺系统或设备，由耐 UF_6 腐蚀的材料制成或用这种材料进行保护，包括：

（a）供料压热罐、供料炉或供料系统，用于将 UF_6 送往浓缩工艺线；

（b）凝华器、冷阱或泵，用于从浓缩工艺线中取出 UF_6 ，待以后加热后转运；

（c）固化站或液化站，通过压缩 UF_6 并使其转化成固态或液态，从而将其从浓缩工艺线中取出；

(d) “产品”站和“尾料”站，用来将 UF_6 转入容器。

5.2.2. 离心机集管管道系统

专门设计或制造用于在离心机级联中输送 UF_6 的管道系统和集管系统。它们组成的管道网络通常是“三路”集管系统，即每个离心机连接供料、“产品”、“尾料”各一路集管。因此，该网络在形式上有大量重复。所有管道系统和集管系统全部用耐 UF_6 的材料（见本小节注释）制成或用这种材料进行保护，并按很高的真空和洁净度标准制成。

5.2.3. 特种截止阀和控制阀

(a) 专门设计或制造的作用于单台气体离心机中的供料、“产品”或“尾料” UF_6 气流的截止阀。

(b) 专门设计或制造用于气体离心浓缩厂主系统或辅助系统的手动或自动的截止型或控制型波纹管密封阀，用耐 UF_6 腐蚀的材料制成或用这种材料进行保护，内径 10 ~ 160 mm。

注释

典型的专门设计或制造的阀门包括波纹管密封阀、速动封闭阀、速动阀和其他阀门。

5.2.4. UF_6 质谱仪/离子源

专门设计或制造的质谱仪，能从 UF_6 气流“在线”取样，并具有所有以下特点：

1. 能测量 320 原子质量单位或更重的离子，且分辨率高于 1/320；

2. 离子源用镍、镍铜合金（按重量计含镍 60%或以上）或镍铬合金制成或保护；
3. 电子轰击电离离子源；
4. 有一个适合于同位素分析的收集系统。

5.2.5. 频率变换器

为向 5.1.2(d) 定义的电动机定子供电而专门设计或制造的频率变换器（又称变频器或逆变器）或这类频率变换器的零件、构件和部件。这类频率变换器具有所有下述特点：

1. 多相频率输出 600 Hz 或更高；
2. 稳定性高（频率控制优于 0.2%）。

5.3. 专门设计或制造用于气体扩散浓缩的组件和部件

引言

用气体扩散法分离铀同位素时，主要的技术组件是一个特制的多孔气体扩散膜、用于冷却（经压缩过程加热的）气体的热交换器、密封阀和控制阀以及管道。由于气体扩散技术使用的是六氟化铀（ UF_6 ），所有的设备、管道和仪器仪表（与气体接触的）表面都必须用同 UF_6 接触时能保持稳定的材料制成。一个气体扩散设施需要许多这样的组件，因此其数量是能够反映最终用途的一个重要指标。

5.3.1. 气体扩散膜和扩散膜材料

（a）专门设计或制造的由耐 UF_6 腐蚀的金属、聚合物或陶瓷材料（见 5.4 小节**注释**）制成的很薄的多孔过滤膜，孔的大小为

100 ~ 1000 Å, 膜厚 5 mm 或以下, 对于管状膜来说, 直径为 25 mm 或以下; 和

(b) 为制造这种过滤膜而专门制备的化合物或粉末。这类化合物和粉末包括镍或含镍 60% (或以上) 的合金、氧化铝或纯度 99.9% (或以上) 的耐 UF_6 的完全氟化的烃聚合物 (见 5.4 小节**注释**), 粒度小于 10 μm , 粒度高度均匀。这些都是专门为制造气体扩散膜制备的。

5.3.2. 扩散室

专门设计或制造的密闭式容器, 用于容纳气体扩散膜, 由耐 UF_6 的材料 (见 5.4 小节**注释**) 制成或用这种材料进行保护。

5.3.3. 压缩机和鼓风机

专门设计或制造的压缩机或鼓风机, 吸气能力为 $1 \text{ m}^3 \text{ UF}_6/\text{min}$ 或更大, 出口压力高达 500 kPa, 其被设计成在 UF_6 环境中长期运行。这种压缩机和鼓风机的压力比 10:1 或更低, 用耐 UF_6 的材料 (见 5.4 小节**注释**) 制成或用这种材料进行保护。

5.3.4. 转动轴封

专门设计或制造的真空密封装置, 有密封式进气口和出气口, 用于密封把压缩机或鼓风机转子同传动马达连接起来的转动轴, 以保证可靠的密封, 防止空气渗入充满 UF_6 的压缩机或鼓风机的内腔。这种密封装置通常设计成将缓冲气体泄漏率限制到小于 $1000 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。

5.3.5. 冷却 UF_6 的热交换器

专门设计或制造的用耐 UF_6 材料（见 5.4 小节**注释**）制成或保护的热交换器，在压差为 100 kPa 下渗透压力变化率小于 10 Pa/h。

5.4. 专门设计或制造的用于气体扩散浓缩的辅助系统、设备和部件

引言

气体扩散浓缩工厂用的辅助系统、设备和部件是向气体扩散组件供应 UF_6 ，把单个组件相互联接组成级联（或多级）以便使浓缩度逐步增高并且从各个扩散级联中提取 UF_6 。“产品”和“尾料”所需的工厂系统。由于扩散级联的惯性很大，级联运行的任何中断，特别是停车，会导致严重后果。因此，在所有工艺系统中严格持续地保持真空、自动防止事故、准确地自动调节气流对气体扩散工厂是很重要的。所有这一切，使该工厂需要装备大量专用的测量、调节和控制系统。

通常 UF_6 从置于高压釜内的圆筒中蒸发，以气态形式经级联集管管路被分配到进口。从出口流出的 UF_6 。“产品”和“尾料”气流通过级联集管管路被分配到冷阱或压缩装置， UF_6 气体在那里液化，然后再进到适当的容器以便运输或贮存。由于一座气体扩散浓缩工厂由排成级联式的大量气体扩散组件组成，所以级联的集管管线数以公里计，内含数以千计的焊缝而且管道布局大量重复。上述设备、部件和管道系统都按非常高的真空和洁净度标准制造。

注释

耐 UF_6 腐蚀的材料包括铜、铜合金、不锈钢、铝、氧化铝、铝合金、镍或含镍 60% 以上的合金以及氟化烃聚合物。

以下所列物项直接接触 UF_6 气体或直接控制级联中的气流：

5.4.1. 供料系统/产品和尾料提取系统

为浓缩厂专门设计或制造的工艺系统或设备，由耐 UF_6 腐蚀的材料制造或用这种材料进行保护，包括：

(a) 供料釜、供料炉或供料系统，用于将 UF_6 送入气体扩散级联；

(b) 凝华器、冷阱或泵，用于从扩散级联中取出 UF_6 以便随后在加热时转送；

(c) 固化站或液化站，将来自级联的 UF_6 气体压缩并冷凝成液态或固态，使其离开气体扩散级联；

(d) “产品”站或“尾料”站，用来把 UF_6 收集到容器中。

5.4.2. 集管管路系统

专门设计或制造用于在气体扩散级联中操作 UF_6 的管路系统和集管系统。

注释

这种管路网络通常是“双路”集管系统，每个扩散单元连接一路集管。

5.4.3. 真空系统

(a) 专门设计或制造的大型真空歧管、真空集管和抽气能

力为 $5 \text{ m}^3/\text{min}$ (或以上) 的真空泵。

(b) 专门设计的在含 UF_6 气氛中使用的真空泵，用耐 UF_6 腐蚀的材料制成或保护 (见本小节**注释**)。这些泵可以是旋转式或正压式，可有排代式密封和碳氟化合物密封并且可以有特殊工作流体存在。

5.4.4. 特种截止阀和控制阀

专门设计和制造的由耐 UF_6 材料制成或保护、手动或自动的波纹管密封阀、截流阀和控制阀，用来安装在气体扩散浓缩工厂的主系统和辅助系统中。

5.4.5. UF_6 质谱仪/离子源

专门设计或制造的质谱仪，能从 UF_6 气流“在线”取样，并具有所有以下特点：

1. 能测量 320 原子质量单位或更重的离子，且分辨率高于 $1/320$ ；
2. 离子源用镍、镍铜合金（按重量计含镍 60%或以上）或镍铬合金制成或保护；
3. 电子轰击电离离子源；
4. 有一个适合于同位素分析的收集系统。

5.5. 专门设计或制造用于气动浓缩厂的系统、设备和部件

引言

在气体动力学浓缩过程中，要压缩气态 UF_6 和轻气体（氢或氦）的混合气，然后使其通过分离元件。在这些元件中，通过在

一个曲壁几何结构面上产生的高离心力，完成同位素分离。已经成功地开发了这种类型的两个过程：喷嘴分离过程和涡流管过程。就这两种过程而言，一个分离级的主要部件包括容纳专用分离元件（喷嘴或涡流管）的圆筒状容器、气体压缩机和用来排出压缩热的热交换器。一座气动浓缩工厂需要若干个这种分离级，因此其数量是能够反映最终用途的一个重要指标。由于气动过程使用 UF_6 ，所有设备、管线和仪器仪表中与这种气体接触的表面，都必须用同 UF_6 接触时能保持稳定的材料制成或加以保护。

注释

本小节所列物项，要么直接接触 UF_6 流程气体，要么直接控制级联中的这种气流。所有接触工艺气体的表面，均需用耐 UF_6 材料制成或用耐 UF_6 材料保护。就本节有关气动浓缩物项而言，耐 UF_6 腐蚀的材料包括：铜、铜合金、不锈钢、铝、氧化铝、铝合金、镍或含镍 60% 或以上（按重量计）的合金以及氟化烃聚合物。

5.5.1. 分离喷嘴

专门设计或制造的分离喷嘴及其组件。分离喷嘴由一些狭缝状、曲率半径小于 1 mm 的耐 UF_6 腐蚀的弯曲通道组成，喷嘴中有一分离楔尖能将流过该喷嘴的气体分成两部分。

5.5.2. 涡流管

专门设计或制造的涡流管及其组件。涡流管呈圆筒形或锥形，用耐 UF_6 腐蚀材料制成或加以保护，并带有 1 个或多个切向

进口。这些涡流管的一端或两端装有喷嘴型附件。

注释

供料气体在涡流管的一端切向进入涡流管，或通过一些旋流叶片，或从沿涡流管周边分布的若干个切向位置进入涡流管。

5.5.3. 压缩机和鼓风机

专门设计或制造的用耐 UF_6 /载气（氢或氦）混合气腐蚀材料制成或加以保护的压缩机或鼓风机。

5.5.4. 转动轴封

专门设计或制造的带有密封式进气口和出气口的转动轴封，用于密封把压缩机或鼓风机转子同驱动马达连接起来的转动轴，以保证可靠的密封，防止过程气体外漏或空气或密封气体渗入充满 UF_6 /载气混合气的压缩机或鼓风机内腔。

5.5.5. 冷却气体用热交换器

专门设计或制造的用耐 UF_6 腐蚀材料制成或加以保护的热交换器。

5.5.6. 分离元件外壳

专门设计或制造的用耐 UF_6 腐蚀的材料制成或加以保护的用作容纳涡流管或分离喷嘴的分离元件外壳。

5.5.7. 供料系统/产品和尾料提取系统

专门为浓缩工厂设计或制造的用耐 UF_6 腐蚀材料制成的或加以保护的流程系统或设备，包括：

（a）供料釜、供料炉或供料系统，用于将 UF_6 送入浓缩过程；

(b) 凝华器、冷阱，用于从浓缩过程中移出 UF_6 ，供下一步加热转移；

(c) 固化器或液化器，用于通过压缩 UF_6 并将其转换为液态形式或固态形式，从浓缩流程中移出 UF_6 ；

(d) “产品”站或“尾料”站，用于把 UF_6 收集到容器中。

5.5.8. 集管管路系统

专门为操作气动级联中的 UF_6 设计或制造的用耐 UF_6 腐蚀材料制成或保护的集管管路系统。这种管路系统通常是“双路”集管系统，每级或每个级组连接一路集管。

5.5.9. 真空系统和泵

(a) 为在含 UF_6 气氛中工作而专门设计或制造的由真空歧管、真空集管和真空泵组成的真空系统；

(b) 为在含 UF_6 气氛中工作而专门设计或制造的用耐 UF_6 腐蚀的材料制成或保护的真空泵。这些泵也可用碳氟化合物密封和特殊工作流体。

5.5.10. 特种截止阀和控制阀

专门设计或制造的由耐 UF_6 腐蚀材料制成或保护的直径为 40 mm 或更大的可手动或自动的波纹管密封阀、截止阀和控制阀，用来安装在气动浓缩工厂的主系统和辅助系统中。

5.5.11. UF_6 质谱仪/离子源

专门设计或制造的质谱仪，能从 UF_6 气流“在线”取样，并具有所有以下特点：

1. 能测量 320 原子质量单位或更重的离子，且分辨率高于 1/320；

2. 离子源用镍、镍铜合金（按重量计含镍 60%或以上）或镍铬合金制成或保护；

3. 电子轰击电离离子源；

4. 有一个适合于同位素分析的收集器系统。

5.5.12. UF_6 /载气分离系统

专门设计或制造的将 UF_6 与载气（氢或氦）分离开来的过程系统。

注释

这些系统是为将载气中的 UF_6 含量降至 1 ppm 或更低而设计的，并可装有下列的设备：

（a）低温热交换器和低温分离器，能承受 153 K（-120℃）或更低的温度；或

（b）低温制冷设备，能承受 153 K（-120℃）或更低的温度；或

（c）用于将 UF_6 与载气分离开来的分离喷嘴或涡流管设备；或

（d）能冻结分离出 UF_6 的冷阱。

5.6. 专门设计或制造用于化学交换或离子交换浓缩工厂的系统、设备和部件

引言

铀的几种同位素在质量上的微小差异，能引起化学反应平衡小的变化。这可用作同位素分离的基础。已经开发成功两种工艺过程：液-液化学交换过程和固-液离子交换过程。

在液-液化学交换过程中，两种不混溶的液相（水相和有机相）作逆流接触，结果给出数千分离级的级联效果。水相由含氯化铀的盐酸溶液组成；有机相由载氯化铀的萃取剂的有机溶剂组成。分离级联中使用的接触器可以是液-液交换柱（例如带有筛板的脉冲柱），或是液体离心接触器。在分离级联的两端要求实现化学转化（氧化和还原）以保证各端的回流要求。一个重要的设计问题是避免这些过程物流被某些金属离子沾污。所以，一般使用塑料的、衬塑料的（包括用碳氟化合物聚合物）和（或）衬玻璃的柱和管线。

在固-液离子交换过程中，浓缩是由铀在一种特制的作用很快的离子交换树脂或吸附剂上的吸附/解吸完成的。使铀的盐酸溶液和其他化学试剂，从载有吸附剂填充床的圆筒形浓缩柱中通过。就一个连续过程而言，需要有一个回流系统，以便把从吸附剂上解吸下来的铀返回到液流中，这样便可收集“产品”和“尾料”。这是通过使用适宜的还原/氧化化学试剂来完成的。这些试剂可在单独的外部系统中完全再生，并可在同位素分离柱内部分地再生。由于在这种工艺过程中有热的浓盐酸溶液存在，使用的设备应该用专门的耐腐蚀材料制造或保护。

5.6.1. 液-液交换柱（化学交换）

为使用化学交换过程的铀浓缩工厂专门设计或制造的有机机械动力输入的逆流液-液交换柱。为了耐浓盐酸溶液的腐蚀，这些交换柱及其内部构件一般用适宜的塑料（例如氟化烃聚合物）或玻璃制作或保护。交换柱的级停留时间一般被设计得很短（30 s 或更短）。

5.6.2. 液-液离心接触器（化学交换）

为使用化学交换过程的铀浓缩工厂而专门设计或制造的液-液离心接触器。此类接触器利用转动来达到有机相与水相的分散，然后借助离心力来分离这两相。为耐浓盐酸溶液的腐蚀，这些接触器一般用适当的塑料（例如氟化烃聚合物）或玻璃来制造或保护。离心接触器的级停留时间被设计得很短（30 s 或更短）。

5.6.3. 铀还原系统和设备（化学交换）

（a）为使用化学交换过程的铀浓缩工厂专门设计或制造的、用来将铀从一种价态还原为另一种价态的电化学还原槽。与过程溶液接触的这种槽的材料必须能耐浓盐酸溶液腐蚀。

注释

这种槽的阴极室必须设计成能防止铀被再氧化到较高的价态。为了把铀保持在阴极室中，这种槽可有一个由特种阳离子交换材料制成的抗渗的隔膜。阴极一般由石墨之类适宜的固态导体组成。

（b）装在级联的产品端，为将有机相流中的 U^{+4} 移出、调节酸浓度和向电化学还原槽供料而专门设计或制造的系统。

注释

这些系统由以下设备组成：将有机相流中的 U^{+4} 反萃取到水溶液中的溶剂萃取设备，完成溶液 pH 值调节和控制的蒸发设备和（或）其他设备，以及向电化学还原槽供料的泵或其他输送装置。一个重要的设计问题是要避免水相流被某些种类的金属离子沾污。因此，对该系统那些接触这种过程物流的部分，要用适当的材料（例如玻璃、碳氟聚合物、聚苯硫酸酯、聚醚砜和用树脂浸过的石墨）制成或保护的设备来构成。

5.6.4. 供料准备系统（化学交换）

专门设计或制造的用来为化学交换铀同位素分离工厂生产高纯氯化铀供料溶液的系统。

注释

这些系统由进行纯化所需的溶解设备、溶剂萃取设备和（或）离子交换设备，以及用来将 U^{+6} 或 U^{+4} 还原为 U^{+3} 的电解槽组成。这些系统产生只含几个 ppm 的铬、铁、钒、钼和其他两价或价态更高的阳离子金属杂质的氯化铀溶液。处理高纯度 U^{+3} 系统的若干部分的建造材料包括玻璃、氟化烃聚合物、聚苯硫酸酯或聚醚砜塑料衬里的石墨和用树脂浸过的石墨。

5.6.5. 铀氧化系统（化学交换）

专门设计或制造用于将 U^{+3} 氧化为 U^{+4} 以便返回化学交换浓缩过程的铀同位素分离级联的系统。

注释

这些系统可装有如下设备：

(a) 使氯气和氧气与来自同位素分离设备的水相流相接触的设备以及将所得 U^{+4} 萃入由级联的产品端返回、已被反萃取过的有机相的设备；

(b) 使水与盐酸分离开来，以便水和加浓了的盐酸可在适当位置被重新引入工艺过程的设备。

5.6.6. 快速反应离子交换树脂/吸附剂（离子交换）

为以离子交换过程进行铀浓缩而专门设计或制造的快速反应离子交换树脂或吸附剂包括：多孔大网络树脂，和（或）薄膜结构（在这些结构中，活性化学交换基团仅限于非活性多孔支持结构表面的一个涂层），以及处于包括颗粒或纤维在内的任何适宜形式的其他复合结构。这些离子交换树脂/吸附剂的直径有 0.2 mm 或更小，而且在化学性质上必须能耐浓盐酸溶液腐蚀，在物理性质上必须有足够的强度因而在交换柱中不被降解。这些树脂/吸附剂是专门为实现很快的铀同位素交换动力学过程（低于 10 秒的交换速率减半期）而设计的，并且能在 373 ~ 473 K (100 ~ 200℃) 的温度范围内操作。

5.6.7. 离子交换柱（离子交换）

为以离子交换过程进行铀浓缩而专门设计或制造的用于容纳和支撑离子交换树脂/吸附剂填充床层的直径大于 1000 mm 的圆柱。这些柱一般用耐浓盐酸溶液腐蚀的材料（例如钛或碳氟塑料）制成或保护，并能在 373 ~ 473 K (100 ~ 200℃) 的温度范围

内和高于 0.7 MPa 的压力下操作。

5.6.8. 离子交换回流系统（离子交换）

（a）专门设计或制造的用于使离子交换铀浓缩级联中所用化学还原剂再生的化学或电化学还原系统。

（b）专门设计或制造的用于使离子交换铀浓缩级联中所用化学氧化剂再生的化学或电化学氧化系统。

注释

离子交换浓缩过程可使用例如 Ti^{3+} 作为还原阳离子，在这种情况下，所用还原系统将通过还原 Ti^{4+} 使 Ti^{3+} 再生。

离子交换浓缩过程可使用例如 Fe^{3+} 作为氧化剂，在这种情况下，所用氧化系统将通过氧化 Fe^{2+} 来使 Fe^{3+} 再生。

5.7. 专门设计或制造用于以激光为基础的浓缩工厂的系统、设备和部件

引言

目前利用激光的浓缩过程的系统有两类：一类是过程介质为原子铀蒸气的系统，另一类是过程介质为铀化合物蒸气（有时与另一种或几种气体混合在一起）的系统。这些过程的通用名称包括：第一类——原子蒸气激光同位素分离（AVLIS 或 SILVA）；第二类——分子激光同位素分离（MLIS 或 MOLLS），包括同位素选择性激光活化化学反应（CRISLA）。

用于激光浓缩厂的系统、设备和部件包括：（a）铀金属蒸气供料装置（用于选择性光电离）或铀的化合物蒸气供料装置（用

于选择性光离解或选择性激发/活化); (b) 第一类中作为“产品”和“尾料”浓缩的铀金属和贫化的铀金属收集装置, 和第二类中作为“产品”的浓缩的铀化合物和作为“尾料”的贫化的铀化合物的收集装置; (c) 用于选择性地激发铀-235 的激光过程系统; (d) 供料准备设备及产品转化设备。鉴于铀原子和铀化合物能谱的复杂性, 可能需要与现有激光和激光光学技术中的任何一种联合使用。

注释

本节所列的许多物项将直接接触铀金属蒸气、液态金属铀, 或由 UF_6 或 UF_6 和其他气体的混合物组成的过程气体。所有与铀或 UF_6 接触的表面, 都全部由耐腐蚀材料制造或保护。就有关基于激光的浓缩的物项而言, 耐铀金属或铀合金蒸气或液体腐蚀的材料包括: 氧化钇涂敷石墨和钽; 耐 UF_6 腐蚀的材料包括: 铜、铜合金、不锈钢、铝、氧化铝、铝合金、镍或镍含量 60% (按重量计) 或以上的合金和氟化的烃聚合物。

5.7.1. 铀蒸发系统 (AVLIS)

专门设计或制造的铀蒸发系统, 供用于激光浓缩。

注释

这些系统可能含有电子束枪, 设计供到靶上的功率 (1 kW 或更大) 足以按激光浓缩功能要求的速率产生铀金属蒸气。

5.7.2. 液态或蒸气铀金属处理系统 (AVLIS) 和部件

专门设计或制造的用于激光浓缩的熔融铀、熔融铀合金或铀

金属蒸气处理系统，或为这些系统专门设计或制造的部件。

注释

液态金属铀处理系统可包括坩埚及其冷却设备。这种系统的坩埚和其他接触熔融铀、熔融铀合金或铀金属蒸气的部分，要用有适当的耐腐蚀和耐高温性能的材料制成或保护。适当的材料可包括钽、氧化钇涂敷石墨、用其他稀土氧化物（见《中华人民共和国两用物项出口管制清单》）或其混合物涂敷的石墨。

5.7.3. 铀金属“产品”和“尾料”收集器组件（AVLIS）

专门设计或制造用于收集液态或固态铀金属的“产品”和“尾料”收集器组件。

注释

这些组件的部件由耐铀金属蒸气或液体的高温和腐蚀性的材料（例如氧化钇涂敷石墨或钽）制成或保护。这类部件可包括用于磁、静电或其他分离方法的管、阀、管接头、“出料槽”、进料管、热交换器和收集板。

5.7.4. 分离器组件外壳（AVLIS）

专门设计或制造的圆筒状或矩形容器，用于容纳铀金属蒸气源、电子束枪，及“产品”与“尾料”收集器。

注释

这些外壳有多种样式的开口，用于供电线路、供水管、激光束窗、真空泵接头及仪器仪表诊断和监测。这些开口均设有开闭装置，以便整修内部的部件。

5.7.5. 超声膨胀喷嘴 (MLIS)

专门设计或制造的超声膨胀喷嘴，用于冷却 UF_6 与载气的混合气至 150 K (−123℃) 或更低的温度。这种喷嘴耐 UF_6 腐蚀。

5.7.6. “产品”或“尾料”收集器 (MLIS)

专门设计或制造的用于在激光照射后收集铀产品材料或铀尾料材料的部件或设备。

注释

例如，产品收集器的作用是收集浓缩 UF_5 固态材料。这种收集器可包括过滤式、冲击式或旋流式收集器，或其组合；并且耐 UF_5/UF_6 环境的腐蚀。

5.7.7. UF_6 /载气压缩机 (MLIS)

为在 UF_6 环境中长期操作而专门设计或制造的 UF_6 /载气混合气压缩机。这些压缩机中与过程气体接触的部件用耐 UF_6 腐蚀的材料制成或保护。

5.7.8. 转动轴封 (MLIS)

专门设计或制造的带密封进气口和出气口的转动轴封，用于密封把压缩机转子与驱动马达连接起来的转动轴，以保证可靠的密封，防止过程气体外漏，或空气或密封气体漏入充满 UF_6 /载气混合气的压缩机内腔。

5.7.9. 氟化系统 (MLIS)

专门设计或制造的用于将 UF_5 (固体) 氟化为 UF_6 (气体) 的系统。

注释

这些系统是为将所收集的 UF_5 粉末氟化为 UF_6 而设计的。其 UF_6 随后将被收集于产品容器中, 或作为进料被转送进行进一步浓缩。在一种方案中, 这种氟化反应可在同位素分离系统内部完成, 以便一离开“产品”收集器便反应和回收。在另一种方案中, UF_5 粉末将被从“产品”收集器中移出/转送到一个适当的反应容器(例如流化床反应器、螺旋反应器或火焰塔式反应器)中进行氟化。在这两种方案中, 都使用氟气(或其他适宜的氟化剂)贮存和转送设备, 以及 UF_6 收集和转送设备。

5.7.10. UF_6 质谱仪/离子源 (MLIS)

专门设计或制造的质谱仪, 能从 UF_6 气流“在线”取样, 并具有所有以下特点:

1. 能测量 320 原子质量单位或更重的离子, 且分辨率高于 1/320;
2. 离子源用镍、镍铜合金(按重量含镍 60%或以上计)或镍铬合金制成或保护;
3. 电子轰击电离离子源;
4. 有一个适合于同位素分析的收集器系统。

5.7.11. 进料系统/产品和尾料提取系统 (MLIS)

为浓缩厂专门设计或制造的工艺系统或设备, 用耐 UF_6 腐蚀的材料制成或保护, 包括:

- (a) 供料釜、供料炉或供料系统, 用于将 UF_6 送入浓缩过程;

(b) 凝华器、冷阱，用于从浓缩过程中移出 UF_6 ，供下一步加热转移；

(c) 固化或液化器，用于通过压缩 UF_6 并将其转换为液态形式或固态形式，从浓缩过程中移出 UF_6 ；

(d) “产品”站或“尾料”站，用于把 UF_6 收集到容器中。

5.7.12. UF_6 /载气分离系统 (MLIS)

为将 UF_6 从载气中分离出来专门设计或制造的工艺系统。

注释

这类系统可装有如下设备：

(a) 低温热交换器或低温分离器，能承受 153 K (-120°C) 或更低的温度；或

(b) 低温冷冻器，能承受 153 K (-120°C) 或更低的温度；或

(c) 能冻结分离出 UF_6 的冷阱。

载气可为氮、氩或其他气体。

5.7.13. 激光系统 (AVLIS, MLIS 和 CRISLA)

为铀同位素分离专门设计或制造的激光器或激光系统。

注释

在以激光为基础的浓缩过程中有重要意义的激光器和激光部件包括《中华人民共和国两用物项出口管制清单》中所列的那些激光器和激光部件。激光系统一般包含用于管理激光束（一个或多个）和向同位素分离室发射激光束的光学和电子部件。AVLIS

过程使用的激光系统通常由两个激光器组成：一个铜蒸气激光器或某些固体激光器和一个可调染料激光器。MLIS 使用的激光系统通常由一个 CO₂ 激光器或受激准分子激光器和一个多道光学栅组成。这两种方法使用的激光器或激光系统都需要有一个谱频稳定器以便能够长时间地工作。

5.8. 专门设计或制造的用于等离子体分离浓缩厂的系统、设备和部件

引言

在等离子体分离过程中，铀离子等离子体通过一个调到铀-235 离子共振频率的电场，使铀-235 离子优先吸收能量并增大它们螺旋状轨道的直径。具有大直径径迹的离子被捕集从而产生铀-235 被浓集的产品。由电离的铀蒸气组成的等离子体被约束在由超导磁体产生的高强度磁场的真空室内。这个过程的主要技术系统包括铀等离子体发生系统、带有超导磁体（见《中华人民共和国两用物项出口管制清单》）的分离器组件和用于收集“产品”和“尾料”的金属移出系统。

5.8.1. 微波动力源和天线

为产生或加速离子专门设计或制造的微波动力源和天线，具有以下特性：频率高于 30 GHz，且用于产生离子的平均功率输出大于 50 kW。

5.8.2. 离子激发线圈

专门设计或制造的射频离子激发线圈，用于高于 100 kHz 的

频率并能够输送的平均功率高于 40 kW。

5.8.3. 铀等离子体发生系统

为产生铀等离子体专门设计或制造的系统，供等离子体分离浓缩厂使用。

5.8.4. 铀金属“产品”和“尾料”收集器组件

专门设计或制造的用于固态铀金属的“产品”和“尾料”收集器组件。这类收集器组件由抗热和抗铀金属蒸气腐蚀的材料构成或由这类材料作防护层，例如有钽涂层的石墨或钽。

5.8.5. 分离器组件外壳

专门设计或制造的圆筒形容器，供等离子体分离浓缩厂用来容纳铀等离子体源、射频驱动线圈及“产品”和“尾料”收集器。

注释

这种外壳有多种形式的开口，用于供电线路、扩散泵接头及仪器仪表诊断和监测。这些开口设有开闭装置，以便整修内部部件；它们由适当的非磁性材料例如不锈钢构成。

5.9. 专门设计或制造的用于电磁浓缩厂的系统、设备和部件

引言

在电磁过程中，由一种盐原料（典型的是四氯化铀）离子化产生的金属铀离子被加速并通过一个能使不同同位素离子沿不同轨迹运动的磁场。电磁同位素分离器的主要部件包括：同位素离子束分散/分离用的磁场、离子源及其加速系统和收集经分离的离子的系统。这个过程的辅助系统包括磁体供电系统、离子源

高压供电系统、真空系统以及产品回收及部件的清洁/再循环用多种化学处理系统。

5.9.1. 同位素电磁分离器

为分离铀同位素专门设计或制造的同位素电磁分离器及其设备和部件包括：

(a) 离子源

专门设计或制造的单个或多个铀离子源由蒸气源、电离器和束流加速器组成，用石墨、不锈钢或铜等适当材料制造，能提供总强度为 50 mA 或更高的离子束流。

(b) 离子收集器

收集器板极由专门为收集浓缩和贫化铀离子束而设计或制造的两个或多个槽和容器组成，用石墨或不锈钢一类的适当材料制造。

(c) 真空外壳

为铀电磁分离器专门设计或制造的真空外壳，用不锈钢一类适当的非磁性材料制造，设计在 0.1 Pa 或以下的压力下运行。

注释

外壳专门设计成装有离子源、收集器板极和水冷却管路，并有用于扩散泵连接结构和可用来移出和重新安装这些部件的开闭结构。

(d) 磁极块

专门设计或制造的磁极块，直径大于 2 m，用来在同位素电

磁分离器内维持恒定磁场并在毗连分离器之间传输磁场。

5.9.2. 高压电源

为离子源专门设计或制造的高压电源，具有以下所有特点：能连续工作，输出电压为 20000 V 或更高，输出电流为 1 A 或更大，电压稳定性在 8 小时内高于 0.01%。

5.9.3. 磁体电源

专门设计或制造的高功率直流磁体电源，具有以下所有特点：能在 100 V 或更高的电压下持续产生 500 A 或更大的电流输出，电流或电压稳定性在 8 小时内高于 0.01%。

6. 生产或浓集重水、氘和氚化物的工厂以及专门为其设计或制造的设备

引言

重水可通过多种工艺生产，此处列举五种。其中，两种传统工艺已证明具有商业可行性：水-硫化氢交换法（又称戈德勒-硫化物法或 GS 法）和氨-氢交换法。另三种较新的工艺在 21 世纪初首次演示，它们均基于氢-水催化交换，也已显示出以良好经济性实现重水工业规模生产或提浓的潜力：联合电解-催化交换法、联合工业重整-催化交换法、双温氢-水交换法。

GS 法基于氘与氚在水和硫化氢之间的交换。这种交换在一系列顶部冷、底部热的交换塔内进行，其中水向下流动，而硫化氢气体从塔底向塔顶循环。使用一系列多孔塔板促进硫化氢气体和水之间的混合。低温下氘向水中迁移，高温下氘向硫化氢中迁移。

富集过氘的硫化氢气体和水从第一级塔热段和冷段接合处排出，然后在后续各级塔中重复上述过程。最后一级产品即氘富集至按重量计不超过 30% 的水送入精馏单元，制备反应堆级的重水，即按重量计 99.75% 的氧化氘。

在催化剂作用下，氨-氢交换法通过合成气（氮气和氢气混合物）同液氨接触从前者中提取氘。合成气先被送进交换塔，后被送往氨合成塔。在交换塔内合成气从塔底向塔顶流动，而液氨从塔顶向塔底流动。氘从合成气内的氢中被交换出来并在液氨中浓集。然后液氨流入塔底氨裂化器，而合成气流入塔顶氨合成塔。进一步的富集在后续各级中进行，最后通过精馏产出反应堆级重水。合成气进料可由氨厂提供，而氨厂也可联合氨-氢交换法重水厂一起建造。氨-氢交换法也可用普通水作为氘的供料源。

采用 GS 法或氨-氢交换法生产重水的工厂所用的许多关键设备与化学工业和石油工业某些领域所用的相同。对于采用 GS 法的小厂而言尤其如此。然而，这些设备很少有“现货”供应。GS 法和氨-氢交换法要求在高压下处理大量易燃、有腐蚀性和有毒的流体。相应地，为采用这些工艺的工厂和设备制定设计和运行标准时，要求高度关注材料的选择及其规格，以保证服役寿期长、安全系数和可靠性系数高。规模的选择主要取决于经济性和需求。因此，大多数设备将按照客户的要求制造。

最后应指出，在 GS 法和氨-氢交换法中，那些单独而言并非专门设计或制造用于重水生产的设备可组装成专门设计或制造

用于生产重水的系统。氨-氢交换法所用的催化剂生产系统和在上述两种工艺中将重水最终浓集至反应堆级所用的水精馏系统就是此类系统的实例。

在三种主要的基于氢-水交换的重水生产工艺中，两种（联合电解-催化交换法、联合工业重整-催化交换法）仅在与大型制氢工艺（氢气为其他商业用途生产）结合时才具有实用性。第三种工艺双温氢-水交换法有潜力用于独立工厂。这些工艺均需大量特制的疏水性铂催化剂，这些催化剂安装于很高的交换柱中，以确保与向下流动的水充分接触。联合电解-催化交换法中，疏水性铂催化剂交换柱向电解水装置供水，电解水装置向这些交换柱供氢。如此，较重的同位素氘在电解水装置中逐渐浓集，最终可接近纯重水水平。实践中该工艺以多级方式进行，大型第一级装置氘浓集因子通常为 5~20。联合工业重整-催化交换法与其类似，但以蒸汽-烃类重整装置为氢源，交换柱为重整装置提供蒸汽水源。在所有这些工厂中，联合电解-催化交换法通常用作生产反应堆级重水的最终级。应指出的是，全球最大的制氢厂产出的氢若采用联合电解-催化交换法或联合工业重整-催化交换法，足以每年提取约 20~60 吨重水。双温氢-水交换法在概念上与 GS 法相同，但使用的是氢气而非硫化氢，并通过催化剂加快氘迁移。与 GS 法类似，双温氢-水交换法利用了温度对水与氢之间氘平衡比的影响——平衡比随温度升高而降低。随着水自上而下流经上部冷交换塔和下部热交换塔，氢气自下而上依次通过热交换塔和

冷交换塔，氘在冷热塔之间富集，在此取出的水送往更高级进一步富集。双温氢-水交换法可用于任何规模的生产。上述三种工艺关键部件显然是特制的疏水性铂催化剂，其以合理的成本大规模生产已被证明具有较高难度。上述工艺运行条件温和：工艺流体和催化剂无毒，压力范围为常压至约 4 MPa，温度范围为 293 K (20℃) 至 473 K (200℃)。除疏水性铂催化剂外，其他设备与化学过程工业各领域所用设备无显著差异。

为采用上述任何一种技术生产重水而专门设计或制造的设备包括：

6.1. 水-硫化氢交换塔

为 GS 法生产重水专门设计或制造的交换塔，直径 1.5 m 或更大，能在 2 MPa 或更高的压力下运行。

6.2. 鼓风机和压缩机

为 GS 法生产重水专门设计或制造的用于循环硫化氢气体(指按重量计含 H_2S 多于 70% 的气体)的单级、低压头(即 0.2 MPa)离心式鼓风机或压缩机，吸入压力 1.8 MPa 或更高时通量可达 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 或更大，有针对湿 H_2S 工况设计的密封。

6.3. 氨-氢交换塔

为氨-氢交换法生产重水专门设计或制造的氨-氢交换塔，高度不低于 35 m，直径不小于 1.5 m，能在高于 15 MPa 的压力下运行，至少有一个用法兰联接的轴向开口，其直径与交换塔筒体相等，通过此开口可装入或取出塔内构件。

6.4. 塔内构件和级间泵

为氨-氢交换法生产重水所用的交换塔专门设计或制造的塔内构件和级间泵。塔内构件包括专门设计的促进气液密切接触的逐级接触器。级间泵包括专门设计的用于在多接触级交换塔内跨接触级循环各接触级内的液氨的潜液泵。

6.5. 氨裂化器

为氨-氢交换法生产重水而专门设计或制造的工作压力为 3 MPa 或更高的氨裂化器。

6.6. 催化燃烧器

为氨-氢交换法生产重水而专门设计或制造的将富集过氙的氢气转化成重水的催化燃烧器。

6.7. 完整的重水精制单元、提浓系统或其蒸馏柱

为将重水提浓至反应堆级氙浓度而专门设计或制造的完整的重水提浓系统或其直径 0.1 m 或更大的精馏柱。

注释

重水提浓系统通常用于支持重水慢化核反应堆的运行，或用作 GS 法重水生产厂的一部分（这种情况下它们通常被称为“精制单元”）。提浓系统将重水与轻水分离，经常采用水精馏法，但也可基于联合电解-催化交换法。在重水慢化核反应堆中，提浓系统用于维持堆芯内的重水浓度。

6.8. 氨合成塔或合成单元

为氨-氢交换法生产重水专门设计或制造的氨合成塔或合成

单元。

注释

这类合成塔或合成单元从氨-氢高压交换柱取得合成气（氮气和氢气混合物），将合成的氨返给交换柱。

6.9. 装填氢同位素交换催化剂的交换柱或交换塔

完整的为氢同位素交换而专门设计或制造的交换柱或交换塔，满足以下所有条件：

1. 无规则装填或规则装填疏水性铂催化剂；
2. 用碳钢或不锈钢制成；
3. 可在 0.1 ~ 4 MPa 压力范围内运行；
4. 可在 293 K（20℃）至 473 K（200℃）温度范围内运行。

注释

重水生产工艺中，初级催化交换柱典型直径大于 0.5 m，典型高度大于 10 m。重水提浓装置中，最小实用直径通常为 0.1 m。

7. 用于第 4 节和第 5 节所分别定义的燃料元件制造和铀同位素分离的铀和钚转化厂以及专门为其设计或制造的设备

出口

只有遵照《中华人民共和国核出口管制条例》所规定的程序，才能出口本节范围之内的成套主要设备。在本节范围之内的所有工厂、系统和专门设计或制造的设备可用于加工、生产或使用特种可裂变材料。

7.1. 铀转化厂以及专门为其设计或制造的设备

引言

铀转化厂和系统可对铀进行一种或几种转化，使其从一种化学形式转变为另一种化学形式，包括：从铀矿石浓缩物到 UO_3 的转化；从 UO_3 到 UO_2 的转化；从铀的氧化物到 UF_4 或 UF_6 或 UCl_4 的转化；从 UF_4 到 UF_6 的转化；从 UF_6 到 UF_4 的转化；从 UF_4 到金属铀的转化；以及从铀的氟化物到 UO_2 的转化。铀转化厂所用的许多关键设备与化学过程工业某些领域所用的相同。例如，上述过程中使用的各类设备可能包括：加热炉、回转炉、流化床反应器、火焰塔式反应器、液体离心机、蒸馏柱和液-液萃取柱。不过，这些物项很少有“现货”供应，大部分须按客户的要求和规格制造。在某些情况下，为应对所处理的一些化学品（ HF 、 F_2 、 ClF_3 和铀的各种氟化物）的腐蚀性和核临界问题，设计和制造相关物项时须作特别考虑。最后应指出，在所有铀转化过程中，那些单独而言不是为铀转化专门设计或制造的设备，可被组装成专门为铀转化设计或制造的系统。

7.1.1. 为将铀矿石浓缩物转化为 UO_3 而专门设计或制造的系统

注释

从铀矿石浓缩物到 UO_3 的转化可通过以下步骤实现：首先，用硝酸溶解铀矿石浓缩物，再用磷酸三丁酯之类的溶剂萃取经纯化的硝酸铀酰（ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ）；然后，硝酸铀酰通过浓缩和脱硝转化为 UO_3 ，或用气态氨中和产生重铀酸铵，再通过过滤、干燥和煅烧转化为 UO_3 。

7.1.2. 为将 UO_3 转化为 UF_6 而专门设计或制造的系统

注释

从 UO_3 到 UF_6 的转化可直接通过氟化实现。该过程需氟气 (F_2) 源或三氟化氯 (ClF_3) 源。

7.1.3. 为将 UO_3 转化为 UO_2 而专门设计或制造的系统

注释

从 UO_3 到 UO_2 的转化可用裂解的氨气或氢气还原 UO_3 实现。

7.1.4. 为将 UO_2 转化为 UF_4 而专门设计或制造的系统

注释

从 UO_2 到 UF_4 的转化可用氟化氢气体 (HF) 在 $300 \sim 500^\circ C$ 与 UO_2 反应实现。

7.1.5. 为将 UF_4 转化为 UF_6 而专门设计或制造的系统

注释

从 UF_4 到 UF_6 的转化用氟气在塔式反应器中与 UF_4 发生放热反应实现。然后使流出的高温气体通过冷却到 $-10^\circ C$ 的冷阱，将其中的 UF_6 冷凝下来。该过程需氟气源。

7.1.6. 为将 UF_4 转化为金属铀而专门设计或制造的系统

注释

从 UF_4 到金属铀的转化用镁 (大批量) 或钙 (小批量) 还原 UF_4 实现。该反应在铀熔点 ($1130^\circ C$) 以上的温度进行。

7.1.7. 为将 UF_6 转化为 UO_2 而专门设计或制造的系统

注释

从 UF_6 到 UO_2 的转化有三种方法。第一种是用氢气和水蒸气将 UF_6 还原并水解为 UO_2 。第二种是首先将 UF_6 溶解于水、将其水解，然后加入氨沉淀出重铀酸铵，最后在 820°C 用氢气将重铀酸铵还原为 UO_2 。第三种是先将气态 UF_6 、 CO_2 和 NH_3 通入水中，沉淀出三碳酸铀酰铵，后在 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ ，三碳酸铀酰铵与水蒸气和氢气反应生成 UO_2 。

从 UF_6 到 UO_2 的转化通常是燃料制造厂第一道工序。

7.1.8. 为将 UF_6 转化为 UF_4 而专门设计或制造的系统

注释

从 UF_6 到 UF_4 的转化用氢还原实现。

7.1.9. 为将 UO_2 转化为 UCl_4 而专门设计或制造的系统

注释

从 UO_2 到 UCl_4 的转化有两种方法。第一种是在 400°C 左右 UO_2 与四氯化碳 (CCl_4) 反应。第二种是在 700°C 左右 UO_2 在炭黑、一氧化碳与氯气存在的条件下反应生成 UCl_4 。

7.2. 铀转化厂以及专门为其设计或制造的设备

引言

铀转化厂和系统对铀进行一种或几种转化，使其从一种化学形式转变为另一种化学形式，包括：从硝酸铀到 PuO_2 的转化；从 PuO_2 到 PuF_4 的转化；以及从 PuF_4 到铀金属的转化。铀转化厂通常附属后处理设施，但也可能附属铀燃料制造设施。铀转化厂所用的许多关键设备与化学过程工业某些领域所用的相同。例

如，上述过程中使用的各类设备可能包括：加热炉、回转炉、流化床反应器、火焰塔式反应器、液体离心机、蒸馏柱和液-液萃取柱。也可能需要热室、手套箱和遥控机械手。但是，这些物项很少有“现货”供应，大部分须按客户的要求和规格制造。在设计时应特别注意钚所独有的放射性、毒性和临界危害。在某些情况下，为应对所处理的一些化学品（例如 HF）的腐蚀性，在设计和制造相关物项时须作特别考虑。最后应指出，在所有钚转化过程中，那些单独而言不是为钚转化专门设计或制造的设备，可被组装成专门为钚转化设计或制造的系统。

7.2.1. 为将硝酸钚转化为氧化物而专门设计或制造的系统

注释

该工艺包括的主要功能有工艺原料贮存和调配、沉淀和固液分离、煅烧、产品搬运、通风、废物管理和工艺控制。相关工艺系统经过特别适配，避免发生临界或产生辐射后果，且使毒性危害最小。在大多数后处理设施中，该工艺将硝酸钚转化为 PuO_2 。其他工艺可能生成草酸钚或过氧化钚沉淀。

7.2.2. 为生产钚金属而专门设计或制造的系统

注释

该工艺通常涉及 PuO_2 的氟化（通常用氟化氢，其具有强腐蚀性），由此获得氟化钚，然后用高纯钙金属还原氟化钚生成金属钚和氟化钙炉渣。该工艺包括的主要功能有氟化（可能涉及采用贵金属制成或作为内衬的设备）、金属还原（可能使用陶瓷坩埚）、

炉渣回收、产品搬运、通风、废物管理和工艺控制。相关工艺系统经过特别适配，以避免发生临界或产生辐射后果，且使毒性危害最小。其他工艺如首先进行草酸铀或过氧化铀的氟化，然后还原得到金属。