

## 《印度政府和国际原子能机构 关于对民用核设施实施保障的协定》附加议定书

1. 《印度政府和国际原子能机构关于对民用核设施实施保障的协定》<sup>1</sup> 附加议定书文本复载于本文件，以通报全体会员国。该协定于 2009 年 3 月 3 日经理事会核准，并于 2009 年 5 月 15 日在奥地利维也纳签署。
2. 根据该附加议定书第 9 条规定，该附加议定书已于原子能机构收到印度关于已满足印度法律和（或）宪法有关生效要求的书面通知之日即 2014 年 7 月 25 日生效。

---

<sup>1</sup> 复载于 INFCIRC/754 号文件。

## 《印度政府和国际原子能机构 关于对民用核设施实施保障的协定》附加议定书

鉴于印度政府（以下称“印度”）和国际原子能机构（以下称“原子能机构”）是2009年5月11日生效的“对民用核设施实施保障的协定”（以下称“保障协定”）的缔约方；

意识到国际社会希望通过加强原子能机构保障体系有效性和提高其保障体系效率进一步加强防止核扩散；

认识到印度在行使其主权权利的同时准备与原子能机构合作，以进一步发展核能的和平利用；

鉴于印度作为一个拥有先进核技术的国家希望为促进其国家发展扩大民用核合作；

忆及原子能机构在实施保障时必须考虑：避免妨碍印度的经济和技术发展或和平核活动领域的国际合作；遵守卫生、安全、实物保护和其他有效的安保规定及个人权利；和采取一切预防措施保护原子能机构得知的商业、技术和工业秘密及其他保密资料；

鉴于本议定书中所述活动的频度和强度应保持在与加强原子能机构保障有效性和提高其保障效率目标相一致的最低限度；

为此，印度和原子能机构兹协议如下：

## “议定书”与“保障协定”的关系

### 第 1 条

- a. “保障协定”的条款应在与本议定书条款有关和一致的范围内适用于本议定书。在“保障协定”条款与本议定书条款矛盾时应适用本议定书的条款。
- b. 执行本议定书时应当避免妨碍印度的经济或技术发展，并避免阻碍或以其他方式干扰涉及印度利用其为自身目的生产、获得或开发的超出“保障协定”范围的核材料、非核材料、设备、部件、信息或技术的任何活动。

### 提供资料

#### 第 2 条

- a. 印度应根据本议定书向原子能机构提出含以下内容的申报：
  - (i) 尚未达到适合于燃料制造或同位素浓缩的成分和纯度的以下源材料从印度的每次出口的数量、化学成分和目的地：
    - (a) 10 吨铀，或对于从印度向同一国家连续出口每次少于 10 吨但当年总量超过 10 吨的铀；
    - (b) 20 吨钍，或对于从印度向同一国家连续出口每次少于 20 吨但当年总量超过 20 吨的钍；

对此的理解是，一旦此类材料处于非核最终使用形式，则不需要提供关于此类材料的资料。

- (ii) 关于本议定书附件所列规定的设备和非核材料的以下资料：

对于此类设备和材料从印度的每次出口：名份、数量、接受国打算使用的地点和出口日期或适当时预计的出口日期。

- b. 当原子能机构要求时，印度应对根据本条提供的任何资料以对接受全面保障的国家的保障有意义的方式加以详述或澄清。

#### 第 3 条

- a. 在不损害“保障协定”所载任何其他报告要求的情况下，印度应在每年 5 月 15 日前向原子能机构提供前一日历年期间的第 2.a(i) 条规定的资料。

- b. 在不损害“保障协定”所载任何其他报告要求的情况下，印度应按季度向原子能机构提供第 2.a(ii) 条规定的资料。这种资料应在每个季度结束后的 60 天内提供。

## 原子能机构视察员的指派

### 第 4 条

- a. (i) 总干事应将理事会核准的担任保障视察员的原子能机构任何官员通知印度。除非印度在接到理事会核准的通知后三个月内通知总干事其拒绝此位官员作为对印度的视察员，向印度通知的视察员应视为已向印度作了指派。
- (ii) 总干事应根据印度的要求或按其自己的动议立即通知印度撤销任何官员作为派往印度的视察员的指派。
- b. 上述 a. 款提及的通知由原子能机构以挂号邮件向印度发出之日后七天应认为印度已收到此通知。

## 签 证

### 第 5 条

印度应在收到为此目的之申请书的一个月内向这一申请书中指明的被指派的视察员提供所需的适当的多次入境/出境和/或过境签证，使该视察员能够进入和留在印度领土内行使他/她的职能。所需的任何签证应至少一年有效并应在必要时得以延期，以涵盖该视察员向印度指派的期限。

## 通 信 系 统

### 第 6 条

- a. 印度应允许和保护原子能机构为公务目的在处于印度的原子能机构视察员同原子能机构总部和/或地区办事处之间的自由通信，包括原子能机构封隔和/或监视装置或测量装置所产生信息的非自动和自动传输。经同印度协商，原子能机构应有权使用国际上已有的直接通信系统，包括在印度尚未使用的卫星系统及其他远距离通信方式。当印度或原子能机构要求时，在“辅助安排”中应规定执行本款关于非自动或自动传输由原子能机构封隔和/或监视装置或测量装置所得信息的细节。
- b. 上述 a. 款规定的通信和信息传输应适当考虑保护产权或商业敏感资料或印度认为特别敏感的设计资料的必要性。

## 机密资料的保护

### 第 7 条

- a. 原子能机构应保持一项确保不泄漏其得知的商业、技术和工业秘密以及其他保密信息，包括其在本议定书的执行中所得知的此类信息的严格制度。
- b. 上述 a. 款提及的制度，除其他内容外，应包括下述有关条款：
  - (i) 管理机密信息的一般原则和相关措施；
  - (ii) 有关在机密资料保护方面工作人员的雇用条件；
  - (iii) 对违反或涉嫌违反保密制度案情的处理程序。
- c. 上述 a. 款提及的制度应经理事会核准和定期审查。

## 附 件

### 第 8 条

- a. 本议定书的附件是“议定书”不可分割的一部分。除为修正附件之目的外，本文中所述的“议定书”这一术语表示“议定书”和附件都包括在内。
- b. 附件中规定的设备和材料清单可由理事会根据其设立的一个人数不限的专家工作组的咨询意见修正。任何此类修正案应在理事会通过后四个月生效。

## 生 效

### 第 9 条

- a. 本议定书应于原子能机构收到印度关于已满足印度有关生效的法律和/或宪法要求的书面通知之日生效。
- b. 印度可在本议定书生效前的任何时候声明它将临时适用本议定书。
- c. 总干事应把本议定书的任何临时适用声明和生效及时通知原子能机构的所有成员国。

2009年5月15日在维也纳签署，英文文本一式两份。

印度政府代表：

大使

绍拉·库马尔 [签名]

国际原子能机构代表：

总干事

穆罕默德·埃尔巴拉迪 [签名]

**《印度政府和国际原子能机构  
关于对民用核设施实施保障的协定》附加议定书**

**按第 2.a.(ii)条通报出口情况用规定的设备和非核材料清单**

**1. 反应堆及其所用设备**

**1.1. 整座核反应堆**

能够运行以便保持受控自持链式裂变反应的核反应堆，但不包括零功率反应堆，零功率堆定义为设计的钚最大生产率每年不超过 100 克的反应堆。

**注释**

一座“核反应堆”基本上包括反应堆容器内或直接安装在其上的物项、控制堆芯功率水平的设备和通常含有或直接接触或控制反应堆堆芯一次冷却剂的部件。

不打算把那些能适当地加以改进使每年产钚量大大超过 100 克的反应堆排除在外。为在较高功率水平下持续运行而设计的反应堆，无论其产钚能力如何都不被认为是“零功率反应堆”。

**1.2. 反应堆压力容器**

金属容器，作为整体装置或供其使用的工厂预制的主要部件，专门设计或制造用来容纳上述第 1.1.段定义的核反应堆的堆芯，并且能承受一次冷却剂的工作压力。

**注释**

物项 1.2.包括反应堆压力容器的顶板，它是工厂预制的压力容器的主要部件。

堆内部件（例如堆芯用支承柱和板及其他容器内部件、控制棒导管、热屏蔽层、挡板、堆芯栅格板、扩散板等）通常由反应堆供应商提供。在某些情况下，制造压力容器时也包括制造某些内部支承构件。这些物项对于反应堆运行的安全性和可靠性（因此对反应堆供应商的保证和责任）非常关键，因此它们的供应通常不是在反应堆本身的基本供应安排以外。因此，虽然不一定认为单独供应这些专门设计和制造的独特的、关键的、大型和昂贵的物项被排除在考虑的范围之外，但认为这种供应方式未必可能。

**1.3. 反应堆燃料装卸机**

专门设计或制造用于对上述第 1.1.段所定义的核反应堆插入或从中取出燃料，能带负荷进行操作或利用技术上先进的定位或准直装置以便允许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）的操作设备。

#### **1.4. 反应堆控制棒**

专门设计或制造用于控制上述第 1.1.段所定义的核反应堆的反应速率的棒。

##### **注释**

此物项除了吸收中子的部件外还包括该部件所用支承结构或悬吊结构（如分开供应的话）。

#### **1.5. 反应堆压力管**

专门设计或制造用于容纳上述第 1.1.段所定义的反应堆的燃料元件和一次冷却剂的压力管，工作压力超过 5.1 兆帕（740 磅/平方英寸）。

#### **1.6. 铅管**

专门设计或制造用于上述第 1.1.段所定义的反应堆中在任何 12 个月期间数量超过 500 千克，而且其中铅与铍之重量比低于 1:500 的铅金属和合金管或管组件。

#### **1.7. 一次冷却剂泵**

专门设计或制造用于循环上述第 1.1.段所定义的核反应堆用一次冷却剂的泵。

##### **注释**

专门设计和制造的泵可包括防止一次冷却剂渗漏的精密密封或多重密封的系统、全密封驱动泵，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。

### **2. 反应堆用非核材料**

#### **2.1. 氘和重水**

任一收货国在任何 12 个月期间内收到的供上述第 1.1.段所定义的核反应堆用，数量超过 200 千克氘原子的氘、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**

任一收货国在任何 12 个月期间内收到的供上述第 1.1.段所定义的核反应堆用，数量超过  $3 \times 10^4$  千克（30 吨），纯度高于百万分之五硼当量，密度大于 1.50 克/立方厘米的石墨。



## 说明

为了报告之目的，政府将确定出口符合上述技术规格的石墨是否供核反应堆使用。

### 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

#### 按语

辐照核燃料经后处理能使铀和钍从强放射性裂变产物以及其他超铀元素中分离出来。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，接着通过利用磷酸三丁酯与一种有机稀释剂的混合剂的溶剂萃取法分离铀、钍和裂变产物。

各种“普雷克斯”设施的流程功能彼此相似，包括：辐照燃料元件的切割、燃料溶解、溶剂萃取和工艺液流的贮存。还可能有种种设备，用于使硝酸铀酰热脱硝，把硝酸铀转化成氧化铀或金属铀，以及把裂变产物的废液处理成适合于长期贮存或处置的形式。但是，执行这些功能的设备的类型和结构在各个“普雷克斯”设施间可能不同，原因有几个，其中包括需要后处理的辐照核燃料的类型和数量、打算对回收材料的处理和设施设计时所考虑的安全和维护原则。

一个“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主要核材料以及裂变产物工艺液流的设备和部件。

可以通过采取各种避免临界（例如通过几何形状）、辐射照射（例如通过屏蔽）和毒性危险（例如通过安全壳）的措施来确定这些过程，包括铀转换和铀金属生产的完整系统。

可以认为属于为辐照燃料元件后处理“专门设计或制造的设备”这一概念范围的设备项目包括：

#### 3.1. 辐照燃料元件切割机

##### 按语

这种设备能切开燃料包壳，使辐照核材料能够被溶解。专门设计的金属切割机是最常用的，当然也可能采用先进设备，例如激光器。

专门设计或制造供以上确定的后处理厂用来切、割或剪辐照燃料组件、燃料棒束或棒的遥控设备。

### 3.2. 溶解器

#### 按语

溶解器通常接受切碎了乏燃料。在这种临界安全的容器内，辐照核材料被溶解在硝酸中，而剩余的壳片从工艺液流中被去掉。

专门设计或制造供以上确定的后处理厂用于溶解辐照核燃料，并能承受热、腐蚀性强的液体以及能远距离装料和维护的临界安全容器（例如小直径的环形或平板式容器）。

### 3.3. 溶剂萃取器和溶剂萃取设备

#### 按语

溶剂萃取器既接受溶解器中出来的辐照燃料的溶液，又接受分离铀、钚和裂变产物的有机溶液。溶剂萃取设备通常设计得能满足严格的运行参数要求，例如运行寿命很长，不需要维护或便于更换，操作和控制简便以及可适应工艺条件的各种变化。

专门设计或制造用于辐照燃料后处理厂的溶剂萃取器，例如填料塔或脉冲塔、混合澄清器或离心接触器。溶剂萃取器必须能耐硝酸的腐蚀作用。溶剂萃取器通常由低碳不锈钢、钛、锆或其他优质材料，按极高标准（包括特种焊接和检查以及质量保证和质量控制技术）加工制造而成。

### 3.4. 化学溶液保存或贮存容器

#### 按语

溶剂萃取阶段产生三种主要的工艺液流。进一步处理所有这三种液流所用的保存或贮存容器如下：

- (a) 用蒸发法使纯硝酸铀酰溶液浓缩，然后使其进到脱硝过程，并在此过程中转变成氧化铀。这种氧化物再次在核燃料循环中使用。
- (b) 通常用蒸发法浓缩强放射性裂变产物溶液，并以浓缩液形式贮存。随后可蒸发这种浓缩液并将其转变成适合于贮存或处置的形式。
- (c) 在将纯硝酸钚溶液转到下几个工艺步骤前先将其浓缩并贮存。尤其是，钚溶液的保存或贮存容器要设计得能避免由于这种液流浓度和形状的改变导致的临界问题。

专门设计或制造供辐照燃料后处理厂用的保存或贮存容器。这种保存或贮存容器必须能耐硝酸的腐蚀作用。保存或贮存容器通常用低碳不锈钢、钛或锆或其他优质材料制造。可将保存或贮存容器设计成能远距离操作和维护，而且它们可具有下述控制核临界的特点：

- (1) 壁或内部结构至少有百分之二的硼当量，或
- (2) 对于圆柱状容器来说，最大直径 175 毫米（7 英寸），或
- (3) 对于平板式或环形容器的来说，最大宽度 75 毫米（3 英寸）。

### 3.5. 硝酸铀到氧化铀的转化系统

按语

在大多数后处理设施中，这个最后的流程包括将硝酸铀溶液转变成二氧化铀。这个流程的主要功能是：流程进料贮存和调节、沉淀和固/液分离、煅烧、产品装运、通风、废物管理和流程控制。

专门设计或制造用于将硝酸铀转化为氧化铀，经特别配置以避免临界和辐射影响并且将毒性危害减到最小的完整系统。

### 3.6. 氧化铀到金属铀的生产系统

按语

这个流程可能与后处理设施有关，它涉及：通常用强腐蚀性氟化氢使二氧化铀氟化，产生氟化铀；然后用高纯度钙金属使氟化铀还原，产生金属铀和氟化钙渣。这个流程的主要功能是：氟化（例如涉及用贵金属制造或作衬垫的设备）、金属还原（例如用陶瓷坩锅）、渣的回收、产品装运、通风、废物管理和流程控制。

专门设计或制造用于生产金属铀，经特别配置以避免临界和辐射影响并且将毒性危害减到最小的完整系统。

## 4. 燃料元件制造厂

“燃料元件制造厂”包括的设备有：

- (a) 通常直接接触、或直接加工或控制核材料生产流程的设备，或
- (b) 将核材料封入包壳中的设备。

## 5. 铀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）设备

可以认为属于为铀同位素分离“专门设计或制造的（除分析仪器外）的设备”这一概念范围的设备项目包括：

### 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构件

按语

气体离心机通常由一个（几个）直径在 75 毫米（3 英寸）和 400 毫米（16 英寸）之间的薄壁圆筒组成。圆筒处在真空环境中并且以大约 300 米/秒或更高的线速度旋转，旋转时其中轴线保持垂直。为了达到高的转速，旋转构件的结构材料必须具有高的强度/密度比，而转筒组件因而及其单个构件必须按高精度公差来制造以便使不平衡减到最小。与其他离心机不同，为浓缩铀用的气体离心机的特点是：在转筒室中有一个（几个）盘状转板和一个固定的管列用来供应和提取六氟化铀气体，其特点是至少有 3 个单独的通道，其中 2 个通道与从转筒轴向转筒室周边伸出的收集器相连。在真空环境中还有一些不转动的关键物项，它们虽然是专门设计的，但不难制造，也不是用独特的材料制造的。不过，一座离心机设施需要大量的这种构件，因此其数量能提供最终用途的重要迹象。

#### 5.1.1. 转动部件

(a) 完整的转筒组件：

用本节**注释**中所述的一种或一种以上高强度/密度比的材料制造成的若干薄壁圆筒或一些相互连接的薄壁圆筒；如果是相互连接的，则圆筒通过以下 5.1.1.(c)节中所述的弹性波纹管或环连接。转筒（如果是最终形式的话）装有以下第 5.1.1.(d)和(e)节所述内档板和端盖。但是完整的组件只能以部分组装形式交货。

(b) 转筒：

专门设计或制造的厚度为 12 毫米（0.5 英寸）或更薄直径在 75 毫米（3 英寸）和 400 毫米（16 英寸）之间，用本节**注释**中所述一种或一种以上高强度/密度比材料制造成的薄壁圆筒。

(c) 环或波纹管：

专门设计或制造用于局部支承转筒管或把数个转筒管连接起来的构件。波纹管是壁厚 3 毫米（0.12 英寸）或更薄，直径在 75 毫米（3 英寸）和 400 毫米（16 英寸）之间，用本节**注释**中所述一种或一种以上高强度/密度比材料制成的有褶短圆筒。

(d) 转盘:

专门设计或制造的直径在 75 毫米 (3 英寸) 和 400 毫米 (16 英寸) 之间, 用本节**注释**中所述各种高强度/密度比材料之一制造成的安装在离心机转筒内的盘状构件, 其作用是将排气室与主分离室隔开, 在某些情况下帮助六氟化铀气体在转筒的主分离室中循环。

(e) 顶盖/底盖:

专门设计或制造的直径在 75 毫米 (3 英寸) 和 400 毫米 (16 英寸) 之间, 用本节**注释**中所述各种高强度/密度比材料之一制造成的装在转筒管端部的盘状构件, 这样就把六氟化铀包容在转筒管内, 在有些情况下还作为一个被结合的部分支承、保持或容纳上轴承件 (顶盖) 或支持马达的旋转件和下轴承件 (底盖)。

**注释**

离心机转动构件所用材料是:

- (a) 极限抗拉强度为  $2.05 \times 10^9$  牛顿/平方米 (300 000 磅/平方英寸) 或更高的马氏体钢;
- (b) 极限抗拉强度为  $0.46 \times 10^9$  牛顿/平方米 (67 000 磅/平方英寸) 或更高的铝合金;
- (c) 适合于复合结构用的纤维材料, 其比模量应为  $12.3 \times 10^6$  米或更高, 比极限抗拉强度应为  $0.3 \times 10^6$  米或更高 (“比模量”是用牛顿/平方米表示的杨氏模量除以用牛顿/立方米表示的比重; “比极限抗拉强度”是用牛顿/平方米表示的极限抗拉强度除以用牛顿/立方米表示的比重)。

### 5.1.2. 静态部件

(a) 磁悬浮轴承:

专门设计或制造的轴承组合件, 由悬浮在充满阻尼介质箱中的一个环形磁铁组成。该箱要用耐六氟化铀的材料 (见 5.2.节的**注释**) 制造。该磁铁与装在 5.1.1.(e)节所述顶盖上的一个磁极片或另一个磁铁相组合。此磁铁可以是环形的, 外径与内径的比小于或等于 1.6:1。它的初始磁导率可以是 0.15 亨/米 (120 000 厘米·克·秒制单位) 或更高, 或剩磁 98.5%或更高, 或产生的能量高于 80 千焦耳/立方米 ( $10^7$  高斯-奥斯特)。除了具有通常的材料性质外, 先决条件是磁轴对几何轴的偏离应限制在很小的公差范围 (低于 0.1 毫米或 0.004 英寸) 或特别要求磁铁材料有均匀性。

(b) 轴承/阻尼器:

专门设计或制造的包括架在阻尼器上的枢轴/盖组件的轴承。枢轴通常是一种淬硬钢轴，一端成半球形，而另一端能连在 5.1.1.(e)节所述底盖上。但是这种轴可附有一个动压轴承。盖是球形的，一面有一个半球形陷穴。这些构件通常是单独为阻尼器提供的。

(c) 分子泵:

专门设计或制造的内部有已加工或挤压的螺纹槽和已加工的腔的泵体。典型尺寸如下：内直径 75 毫米（3 英寸）到 400 毫米（16 英寸），壁厚 10 毫米（0.4 英寸）或更厚，长度等于或大于直径。刻槽的横截面是典型的矩形，槽深 2 毫米（0.08 英寸）或更深。

(d) 电动机定子:

专门设计或制造的环形定子，用于在真空中频率范围为 600—2000 赫兹，功率范围为 50—1000 伏安条件下同步运行的高速多相交流磁滞（或磁阻）式电动机。定子由在厚度为 2.0 毫米（0.08 英寸）或更薄一些的典型薄层组成的低损耗叠片铁芯上的多相绕组组成。

(e) 离心机壳/收集器:

专门设计或制造用来容纳气体离心机的转筒组件的部件。离心机壳由一个壁厚达 30 毫米（1.2 英寸）的刚性圆筒组成，它带有经过精密机械加工的两个端面以便固定轴承和一个或多个便于安装的法兰盘。这两个经过机械加工的端面相互平行，并以不大于 0.05 度的误差与圆筒轴垂直。离心机壳也可是一种格状结构以适应几个转筒。这种机壳通常用耐六氟化铀腐蚀的材料制造或是用这类材料加以保护。

(f) 收集器:

专门设计或制造的内径达 12 毫米（0.5 英寸）的一些管件，它们用来借助皮托管作用（即例如扳弯一个径向配置的管的端部而形成一个面迎转筒内环形气流的开口）从转筒内部提取六氟化铀气体，并且能与中心气体提取系统相连。这类管件用耐六氟化铀腐蚀的材料制造或用这类材料加以保护。

## 5.2. 为气体离心浓缩厂专门设计或制造的辅助系统、设备和部件

### 按语

气体离心浓缩工厂用的辅助系统、设备和部件是向离心机供应六氟化铀，把单个离心机相互连接起来以组成级联（多级）从而逐渐提高浓缩度并且从离心机中提

取六氟化铀“产品”和“尾料”所需工厂的各种系统，再加上驱动离心机或控制该工厂所需要的设备。

通常利用经加热的高压釜将六氟化铀从固体蒸发，气态形式的六氟化铀通过级联集管线路被分配到各个离心机。通过级联集管线路使从离心机流出的六氟化铀“产品”和“尾料”气流通到冷阱（在约 203 K (-70°C) 下工作），气流在冷阱先冷凝，然后再送入适当的容器以便运输或贮存。由于一个浓缩工厂由排成级联式的好几千个离心机组成，所以级联的集管线路有好几公里长，含有好几千条焊缝而且管道布局大量重复。上述设备、部件和管道系统都是按非常高的真空和净度标准制造的。

### 5.2.1. 供料系统/产品和尾料提取系统

专门设计或制造的流程系统包括：

供料釜（或供料器），用于以高达 100 千帕（15 磅/平方英寸）的压力和 1 千克/小时（或更大）的速率使六氟化铀通向离心机级联；

凝华器（或冷阱），用于以高达 3 千帕（0.5 磅/平方英寸）的压力从级联中取出六氟化铀。凝华器能被冷却到 203 K (-70°C) 和加热到 343 K (70°C)；

“产品”和“尾料”器，用来把六氟化铀收集到容器中。

这种设施、设备和管路全部用耐六氟化铀的材料制成或用它作衬里（见本节的**注释**），并且按很高的真空和净度标准制造。

### 5.2.2. 机械集管系统

专门设计或制造用于在离心机级联中操作六氟化铀的管路系统和集管系统。管路网络通常是“三”集管系统，每个离心机连接一个集管。这样，在形式上有大量重复。所有的都用耐六氟化铀的材料（见本节**注释**）制成并且按很高的真空和净度标准制造。

### 5.2.3. 六氟化铀质谱仪/离子源

专门设计或制造的磁质谱仪或四极质谱仪，这两种谱仪能从六氟化铀气流中“在线”取得供料、产品或尾料的样品，并且具有以下所有特点：

1. 原子质量单位的单位分辨率高于 320；
2. 离子源用尼赫罗姆合金或蒙乃尔合金制成或以这些材料作为衬里或镀镍；
3. 电子轰击离子源；

4. 有一个适合于同位素分析的收集系统。

#### 5.2.4. 频率变换器

为满足 5.1.2.(d)中定义的电机定子的需要而专门设计或制造的频率变换器(又称变频器或变换器)或这类频率变换器的部件、构件和子配件。它们具有下述所有特点:

1. 多相输出 600—2000 赫兹;
2. 高稳定性(频率控制优于 0.1%);
3. 低谐波畸变(低于 2%);
4. 效率高于 80%。

#### 注释

以上所列物项不是直接接触六氟化铀流程气体就是直接控制离心机和直接控制这种气体从离心机到离心机以及从级联到级联的通路。

耐六氟化铀腐蚀的材料包括不锈钢、铝、铝合金、镍或含镍 60%以上的合金。

#### 5.3. 专门设计或制造用于气体扩散法浓缩的组件和部件

##### 按语

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(经压缩过程所加热)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,所有的设备、管道和仪器仪表(与气体接触的)表面都必须用同六氟化铀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,因此其数量能提供最终用途的重要迹象。

##### 5.3.1 气体扩散膜

- (a) 专门设计或制造的由耐六氟化铀腐蚀的金属、聚合物或陶瓷材料制成的,很薄的多孔过滤膜,孔的大小为 100—1000 埃,膜厚 5 毫米(0.2 英寸)(或以下),对于管状膜来说,直径为 25 毫米(1 英寸)(或以下);
- (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)的耐六氟化铀的完全氟化的烃聚合物,颗粒大小低于 10 微米。颗粒大小高度均匀。这些都是专门为制造气体扩散膜准备的。



### 5.3.2. 扩散室

专门设计或制造的直径大于 300 毫米（12 英寸），长度大于 900 毫米（35 英寸）的密闭式圆柱形容器或尺寸相当的方形容器；该容器有直径都大于 50 毫米（2 英寸）的一个进气管和两个出气管，容器用于容纳气体扩散膜，由耐六氟化铀的材料制成或以其作为衬里，并且设计成卧式或垂直安装。

### 5.3.3. 压缩机和鼓风机

专门设计或制造的轴向离心式或正排量压缩机或鼓风机，以及这类压缩机和鼓风机的单独组件。压缩机或鼓风机吸气能力为 1 立方米六氟化铀/分（或更大），出口压力高达几百千帕（100 磅/平方英寸），设计成在具有或没有适当功率的电动机的六氟化铀环境中长期运行。这种压缩机和鼓风机的压力比在 2:1 和 6:1 之间，用耐六氟化铀的材料制成或用其作为衬里。

### 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，防止空气渗入充满六氟化铀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 立方厘米/分（60 立方英寸/分）。

### 5.3.5. 冷却六氟化铀的热交换器

专门设计或制造的，用耐六氟化铀的材料（不锈钢除外）制成或以其作为衬里或以铜或这些金属的复合物作衬里的热交换器，在压差为 100 千帕（15 磅/平方英寸）下渗透压力变化率小于每小时 10 帕（0.0015 磅/平方英寸）。

## 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

### 按语

气体扩散浓缩厂用的辅助系统、设备和部件，是向气体扩散组件供应六氟化铀，把单个组件相互联结组成级联（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六氟化铀“产品”和“尾料”所需要的工厂系统。由于扩散级联的很高惯性，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、准确自动调节气流对气体扩散工厂是很重要的。所有这一切，使得该工厂需要装备大量特别的测量、调节和控制系统。

通常六氟化铀从置于高压釜内的圆筒中蒸发，以气态经级联集管管路通到进口。从出口流出的六氟化铀“产品”和“尾料”气流通过级联集管管路通到冷阱或压缩装置，六氟化铀气体在这里液化，然后再进到适当的容器以便运输或贮存。由于一个气体扩散浓缩工厂由排成级联式的无数个气体扩散组件组成，所以级联的集管管线有好几公里长，含有好几千条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净度标准制造。

#### **5.4.1. 供料系统/产品和尾料提取系统**

专门设计或制造的能在 300 千帕（45 磅/平方英寸）或以下的压力下运行的流程系统，包括：

供料釜（或供料系统），用于使六氟化铀通向气体扩散级联；

凝华器（或冷阱），用于从扩散级联中取出六氟化铀；

液化器，将来自级联的六氟化铀气体压缩并冷凝成液态六氟化铀；

“产品”或“尾料”器，用来把六氟化铀收集到容器中。

#### **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六氟化铀的管路系统和集管系统。这种管路网络通常采用“双”集管系统，每个扩散单元连接一个集管。

#### **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 立方米/分（或以上）的真空泵。
- (b) 专门设计的在含六氟化铀气氛中使用的真空泵，用铝、镍或含镍量高于 60% 的合金制成或以其作为衬里。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存在有特殊工作液体。

#### **5.4.4. 特种关闭阀和控制阀**

专门设计和制造的，由耐六氟化铀材料制成，直径 40 至 1500 毫米（1.5 至 59 英寸）手动或自动的关闭阀和控制波纹管阀；用来安装在气体扩散浓缩工厂的主要和辅助系统中。

#### 5.4.5. 六氟化铀质谱仪/离子源

专门设计或制造的磁质谱仪或四极质谱仪，这些谱仪能从六氟化铀气流中“在线”取得供料、产品或尾料的样品，并且具有以下所有特点：

1. 原子质量单位的单位分辨率高于 320；
2. 离子源用尼赫罗姆合金或蒙乃尔合金制成或以这些材料作为衬里或镀镍；
3. 电子轰击离子源；
4. 有一个适合于同位素分析的收集系统。

#### 注释

以上所列物项不是直接接触六氟化铀流程气体就是直接控制级联中的气流。所有接触流程气体的表面都要完全由耐六氟化铀材料制成或以其作为衬里。对于与气体扩散物项有关的本节来说，耐六氟化铀腐蚀的材料包括不锈钢、铝、铝合金、氧化铝、镍或含镍 60%以上的合金以及耐六氟化铀的完全氟化的烃聚合物。

#### 5.5. 专门设计或制造用于气体动力学浓缩厂的系统、设备和部件

#### 按语

在气体动力学浓缩过程中，要压缩气态六氟化铀和轻气体（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。一座气体动力学浓缩工厂需要若干个这种分离级：因此其数量能提供最终用途的重要迹象。由于气体动力学过程使用六氟化铀，所有设备、管线和仪器仪表中与这种气体接触的表面，都必须用同六氟化铀接触时能保持稳定的材料制成。

#### 注释

本节所列物项不是直接接触六氟化铀过程气体就是直接控制级联中的这种气流。所有与六氟化铀这种过程气体接触的表面，均需用耐六氟化铀材料制造或用耐六氟化铀材料保护。就本节有关气体动力学浓缩物项而言，能耐六氟化铀腐蚀的材料包括：铜、不锈钢、铝、铝合金、镍或含镍 60%或 60%以上的合金；和耐六氟化铀完全氟化的烃聚合物。

### 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 毫米（一般为 0.1 毫米至 0.05 毫米）的耐六氟化铀腐蚀的弯曲通道组成，喷嘴中有一刀口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，用耐六氟化铀腐蚀材料制成或加以保护，其直径在 0.5 厘米至 4 厘米之间，长径比率为 20:1 或更小，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六氟化铀腐蚀材料制成或加以保护的轴向离心式或正排量压缩机或鼓风机其体积吸入能力为 2 立方米/分或更大的六氟化铀/载体气（氢或氦）混合气。

#### 注释

这些压缩机和鼓风机的压力比一般在 1.2:1 和 6:1 之间。

### 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，用作密封与压缩机或鼓风机转子连接起来驱动马达的轴，以便保证可靠的密封，防止过程气体外漏或空气或密封气体内漏入充满六氟化铀/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六氟化铀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六氟化铀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。

## 注释

这种外壳可以是直径大于 300 毫米长度大于 900 毫米的圆筒状容器，或是与上述相近尺寸的矩形容器，并可设计成便于水平安装或垂直安装的形式。

### 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六氟化铀腐蚀材料制成的或加以保护的流程系统或，包括：

- (a) 供料高压釜、供料加热炉或供料系统，用作把六氟化铀送入浓缩过程；
- (b) 凝华器（或冷阱），用于从浓缩过程中移出六氟化铀，供下一步加热转移；
- (c) 固化器或液化器，用于通过压缩六氟化铀并将其转化为一种液态形式或固态形式，从浓缩流程中移出六氟化铀；
- (d) “产品”器和“尾料”器，用于将六氟化铀转移入各容器中。

### 5.5.8. 集管管路系统

专门为操作气体动力学级联中的六氟化铀设计或制造的用耐六氟化铀腐蚀材料制成或保护的集管管路系统。这种管路系统通常采用“双”集管设计，每级或每个级组连接一个集管。

### 5.5.9. 真空系统和泵

- (a) 为在含六氟化铀气氛中工作而专门设计或制造的吸入能力为 5 立方米/分或更大的由若干真空歧管、真空集管和真空泵组成的真空系统，
- (b) 为在含六氟化铀气氛中工作而专门设计或制造的，用耐六氟化铀腐蚀的材料制成或保护的真空泵。这些泵也可用氟碳密封和特殊工作流体。

### 5.5.10. 特种截流阀和控制阀

为安装在气体动力学浓缩工厂的主系统和辅助系统而专门设计或制造的，用耐六氟化铀腐蚀材料制成的或保护的，直径为 40—1500 毫米的手动或自动截流阀和控制波纹管阀。

### 5.5.11. 六氟化铀质谱仪/离子源

专门设计或制造的磁质谱仪或四极质谱仪，这些谱仪能从六氟化铀气流中“在线”取得供料、产品或尾料的样品，并且具有所有以下特点：

1. 质量的单位分辨率高于 320;
2. 用尼赫罗姆合金或蒙乃尔合金制成或以这些材料为衬里或镀镍的离子源;
3. 电子轰击离子源;
4. 适合于同位素分析的收集器系统。

#### 5.5.12. 六氟化铀/载体气分离系统

为将六氟化铀与载体气（氢或氦）分离开来而专门设计或制造的过程系统。

##### 注释

这些系统是为将载体气中的六氟化铀含量降至 1ppm 或更低而设计的，并可含有下述的设备：

- (a) 能以-120°C 或更低温度工作的低温热交换器和低温分离器，或
- (b) 能以-120°C 或更低温度工作的低温致冷设备，或
- (c) 用于将六氟化铀与载体气分离开来的分离喷嘴或涡流管设备，或
- (d) 能以-20°C 或更低温度工作的六氟化铀冷阱。

#### 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

##### 按语

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的小的变化。这用来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（包括用氟碳聚合物）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的系统中完全再生，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防腐材料制作或保护。

#### 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，有机械动力输入的逆流液-液交换柱（即带有筛板的脉冲柱、往复板柱和带有内部涡轮混合器的柱）。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（例如氟碳聚合物）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 秒或更短）。

#### 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。为了能耐浓盐酸溶液的腐蚀，这些接触器一般用适当的塑料（例如碳氟聚合物）来制作或衬里，或衬以玻璃。离心接触器的级停留时间被设计得很短（30 秒或更短）。

#### 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四价铀移出、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：将有机相流中的四价铀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，以及用来将六价铀或四价铀还原为三价铀的电解槽组成。这些系统产生只含几个 ppm 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。处理高纯三价铀的系统的若干部分的建造材料包括玻璃、碳氟聚合物、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三价铀氧化为四价铀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

这些系统可含有诸如下述设备：

- (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四价铀萃入由级联的产品端返回的已被反萃取过的有机相的设备，
- (b) 使水与盐酸分离开来，以便可使水和加浓了的盐酸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备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/吸附剂有 0.2 毫米或更小的直径，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 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 毫米的圆筒状柱。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 100—200℃ 的温度范围内和高于 0.7 兆帕（102 磅/平方英寸）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三价钛作为还原阳离子，在这种情况下，所用还原系统将通过还原四价钛使三价钛再生。

离子交换浓缩过程可使用例如三价铁作为氧化剂，在这种情况下，所用氧化系统将通过氧化二价铁来使三价铁再生。

## 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

#### 按语

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的蒸气的系统。这样一些过程的通常名称包括：第一类 — 原子蒸气激光同位素分离；第二类 — 分子激光同位素分离和同位素选择性激光活化化学反应。用于激光浓缩工厂的系统、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（用于光离解或化学活化）；(b) 第一类中作为“产品”和“尾料”的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”的离解的或反应的化合物和作为“尾料”的未发生变化材料的收集装置；(c) 用于选择性地激发铀-235 的激光过程系统；和 (d) 供料准备设备和产品转化设备。鉴于铀原子和铀化合物能谱的复杂性，可能需要同现有激光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，或由六氟化铀或六氟化铀和其他气体的混合物组成的过程气体。所有与铀或六氟化铀接触的表面，都

全部地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的腐蚀的材料包括：氧化钽涂敷石墨和钽；耐六氟化铀腐蚀的材料包括：铜、不锈钢、铝、铝合金、镍或镍含量不低于 60% 的合金和耐六氟化铀腐蚀的完全氟化的烃聚合物。

#### **5.7.1. 铀蒸发系统（原子蒸气激光同位素分离）**

专门设计或制造的铀蒸发系统。这些系统含有大功率条带式或扫描式电子束枪，其供到靶上的功率大于 2.5 千瓦/厘米。

#### **5.7.2. 液态铀金属处理系统（原子蒸气激光同位素分离）**

专门设计或制造由一些坩埚及其冷却设备组成用于处理熔融铀或铀合金的液态金属处理系统。

##### **注释**

这种系统的坩埚和其他接触熔融铀或铀合金的部分，要用有适当的耐腐蚀和耐高温性能的材料制成或保护。适当的材料包括钽、氧化钽涂敷石墨、用其他稀土氧化物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（原子蒸气激光同位素分离）**

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（例如氧化钽涂敷石墨或钽）制成或保护。这类部件可包括用于磁的、静电的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（原子蒸气激光同位素分离）**

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，用于电源电缆、供水管、激光束窗、真空泵接头和仪器诊断和监测。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（分子激光同位素分离）

专门设计或制造的超声膨胀喷嘴，用于冷却六氟化铀与载体气的混合气至 150K 或更低的温度。这种喷嘴耐六氟化铀腐蚀。

#### 5.7.6. 氟化铀产品收集器（分子激光同位素分离）

专门设计或制造的五氟化铀固态产品收集器。这种收集器是过滤式、冲击式或旋流式收集器，或其组合；并且耐五氟化铀/六氟化铀环境的腐蚀。

#### 5.7.7. 六氟化铀/载体气压缩机（分子激光同位素分离）

为在六氟化铀环境中长期操作而专门设计或制造的六氟化铀/载体气混合气压缩机。这些压缩机中与过程气体接触的部件用耐六氟化铀腐蚀的材料制成或保护。

#### 5.7.8. 转动轴封（分子激光同位素分离）

专门设计或制造的有密封的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六氟化铀/载体气混合气的压缩机内腔。

#### 5.7.9. 氟化系统（分子激光同位素分离）

专门设计或制造的用于将五氟化铀（固体）氟化为六氟化铀（气体）的系统。

##### 注释

这些系统是为将所收集的五氟化铀粉末氟化为六氟化铀而设计的。其六氟化铀随后将被收集于产品容器中，或作为进料被转送到为进行进一步浓缩而设置的分子激光同位素分离单元中。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，五氟化铀粉末将被从“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，以及六氟化铀收集和转送设备。

#### 5.7.10. 六氟化铀质谱仪/离子源（分子激光同位素分离）

专门设计或制造的磁质谱仪或四极质谱仪，这些质谱仪能从六氟化铀气流中“在线”取得供料、“产品”或“尾料”的样品，并且有以下所有特点：

1. 质量的单位分辨率高于 320；
2. 离子源用尼赫罗姆合金或蒙乃尔合金制成或以这些材料作为衬里或镀镍；

3. 电子轰击离子源；
4. 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（分子激光同位素分离）

为浓缩厂专门设计或制造的工艺系统或设备，由耐六氟化铀腐蚀的材料制造或用这种材料保护，包括：

- (a) 进料高压釜、加热炉或系统，用于使六氟化铀进入浓缩过程；
- (b) 凝华器（或冷阱），用于使六氟化铀离开浓缩过程以便随后在受热时转移；
- (c) 固化或液化器，用来通过压缩六氟化铀和把它转变成液态或固态，使六氟化铀离开浓缩过程；
- (d) “产品”或“尾料”器，用于把六氟化铀收集到容器内。

#### 5.7.12. 六氟化铀/载体气分离系统（分子激光同位素分离）

为将六氟化铀从载体气中分离出来专门设计或制造的工艺系统。载体气可为氮、氩或其他气体。

##### 注释

这类系统可装有设备例如：

- (a) 低温热交换器或低温分离器，能承受-120℃或更低的温度；
- (b) 低温冷冻器，能承受-120℃或更低的温度；
- (c) 六氟化铀冷阱，能承受-20℃或更低的温度。

#### 5.7.13. 激光系统（原子蒸气激光同位素分离，分子激光同位素分离和同位素选择性激光活化化学反应）

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

原子蒸气激光同位素分离过程使用的激光系统通常由两个激光器组成：一个铜蒸气激光器和一个染料激光器。分子激光同位素分离使用的激光系统通常由一个二氧化碳激光器或激发激光器和一个多道光学栅（两端有旋转镜）组成。这两种过程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**

### **按语**

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，这样铀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具有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，带有超导磁体的分离器组件和用于搜集“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 千兆赫兹，和用于产生离子的平均功率输出大于 50 千瓦。

### **5.8.2. 离子激发蛇形管**

专门设计或制造的射频离子激发蛇形管，用于高于 100 千赫的频率并能够输送的平均功率高于 40 千瓦。

### **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，这种系统可装有高功率条带式或扫描式电子束枪，靶上的释热高于 2.5 千瓦/厘米。

### **5.8.4. 液态铀金属操作系统**

专门设计制造的用于熔融的铀或铀合金的液态金属操作系统，包括坩埚和坩埚用冷却设备。

### **注释**

这种系统中与熔融的铀或铀合金接触的坩埚和其他部件由适当的抗腐蚀和抗热材料构成或由这种材料作防护层。可适用的材料包括钽、有钒涂层的石墨、有其他稀土氧化物或这类氧化物的混合物涂层的石墨。

### **5.8.5. 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汽腐蚀的材料构成或由这类材料作防护层，例如有钒涂层的石墨或钽。

### 5.8.6. 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、射频驱动蛇形管及“产品”和“尾料”收集器。

#### 注释

这种外壳有多种形式的开口，用于供电装置、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离浓缩厂的系统、设备和部件

#### 按语

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流经不同径迹的磁场。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. 电磁同位素分离器

为分离铀同位素专门设计或制造的电磁同位素分离器及其设备和部件包括：

#### (a) 离子源

专门设计或制造的一种或多种铀离子源由蒸汽源、电离剂和射束加速器组成，用石墨、不锈钢或铜等适当材料建造，能提供总强度为 50 毫安或更高的离子束流。

#### (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建造。

#### (c) 真空外壳

为铀电磁分离器专门设计或制造的真空外壳，用不锈钢一类的非磁性适当材料建造，设计在 0.1 帕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 米，用来在电磁同位素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 20 000 伏或更高，输出电流为 1 安或更高，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 伏或更高的电压下连续产生 500 安或更高的电流输出，电流或电压稳定性在 8 小时内高于 0.01%。

## 6. 生产重水、氘和氘化物的工厂以及专门为其设计或制造的设备

### 按语

重水可以通过多种方法生产。然而只有两种方法已证明具有商业意义：水-硫化氢交换法和氨-氢交换法。

水-硫化氢交换法是基于在一系列塔内（通过顶部冷和底部热的方式操作）水和硫化氢之间氢与氘交换的一种方法。在此过程中，水向塔低流动，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。在低温下氘向水中迁移，而在高温下氘向硫化氢中迁移。氘被浓缩了的硫化氢气体或水从第一级塔的热段和冷段的接合处排出，并且在下一级塔中重复这一过程。最后一级产品（氘浓缩至高达 30%的水）送入一个蒸馏单元以制备反应堆级的重水（即 99.75%的氧化氘）。

氨-氢交换法可以在催化剂存在下通过同液态氨的接触从合成气中提取氘。合成气被送进交换塔，而后送至氨转换器。在交换塔内气体从塔底向塔顶流动，而液氨从塔顶向塔底流动。氘从合成气的氢中洗涤下来并在液氨中浓集。液氨然后流入塔底部的氨裂化器，而气体流入塔顶部的氨转换器。在以后的各级中得到进一步浓缩，最后通过蒸馏生产出反应堆级重水。合成气进料可由氨厂提供，而这个氨

厂也可以结合氨-氢交换法重水厂一起建造。氨-氢交换法也可以用普通水作为氘的供料源。

利用水-硫化氢交换法或氨-氢交换法生产重水的工厂所用的许多关键设备项目是与化学工业和石油工业的若干生产工序所用设备相同的。对于利用水-硫化氢交换法的小厂来说尤其如此。然而，这种设备项目很少有“现货”供应。水-硫化氢交换法和氨-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。因此，在制定使用这些方法的工厂和设备所用的设计和运行标准时，要求认真注意材料的选择和材料的规格，以保证在长期服务中有高度的安全性和可靠性。规模的选择主要取决于经济性和需要。因而，大多数设备项目将按照用户顾主的要求制造。

最后，应该指出，对水-硫化氢交换法和氨-氢交换法而言，那些单独地看并非专门设计或制造用于重水生产的设备项目可以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方法中将重水最终加浓至反应堆级所用的水蒸馏系统就是此类系统的实例。

专门设计或制造用于利用水-硫化氢交换法或氨-氢交换法生产重水的设备项目包括如下：

### **6.1. 水-硫化氢交换塔**

专门设计或制造用于利用水-硫化氢交换法生产重水的用精制碳钢（例如 ASTM A516）制造的交换塔。该塔直径 6 米（20 英尺）至 9 米（30 英尺），能够在大于或等于 2 兆帕（300 磅/平方英寸）压力下和 6 毫米或更大的腐蚀允量下运行。

### **6.2. 鼓风机和压缩机**

专门为利用水-硫化氢交换法生产重水而设计或制造的用于循环硫化氢气体（即含硫化氢 70% 以上的气体）的单级、低压头（即 0.2 兆帕或 30 磅/平方英寸）离心式鼓风机或压缩机。这些鼓风机或压缩机的气体通过能力大于或等于 56 立方米/秒（120 000 标准立方英尺/分），能在大于或等于 1.8 兆帕（260 磅/平方英寸）的吸入压力下运行，并有对湿硫化氢介质的密封设计。

### **6.3. 氨-氢交换塔**

专门设计或制造用于利用氨-氢交换法生产重水的氨-氢交换塔。该塔高度大于或等于 35 米（114.3 英尺），直径 1.5 米（4.9 英尺）至 2.5 米（8.2 英尺），能够在大于 15 兆帕（2225 磅/平方英寸）压力下运行。这些塔至少都有一个用法兰联结的轴向孔，其直径与交换塔筒体部分直径相等，通过此孔可装入或拆除塔内构件。



#### 6.4. 塔内构件和多级泵

专门为利用氨-氢交换法生产重水而设计或制造的塔内构件和多级泵。塔内构件包括专门设计的促进气/液充分接触的多级接触装置。多级泵包括专门设计的用来将一个接触级内的液氨向其他级塔循环的水下泵。

#### 6.5. 氨裂化器

专门设计或制造的用于利用氨-氢交换法生产重水的氨裂化器。该装置能在大于或等于 3 兆帕（450 磅/平方英寸）的压力下运行。

#### 6.6. 红外吸收分析器

能在氘浓度等于或高于 90%的情况下“在线”分析氢/氘比的红外吸收分析器。

#### 6.7. 催化燃烧器

专门设计或制造的用于利用氨-氢交换法生产重水时将浓缩氘气转化成重水的催化燃烧器。

### 7. 铀转化厂及专门为其设计或制造的设备

#### 按语

铀转化厂和系统可以对铀进行一种或几种转化使其从一种化学状态转变为另一种化学状态，包括：从铀浓缩物到三氧化铀的转化；从三氧化铀到二氧化铀的转化；从铀的氧化物到四氟化铀或六氟化铀的转化；从四氟化铀到六氟化铀的转化；从六氟化铀到四氟化铀的转化；四氟化铀到金属铀的转化，和从铀的氟化物到二氧化铀的转化。铀转化工厂所用许多关键设备物项与化学加工工业的若干生产工序所用设备相同。例如，这些过程中使用的各类设备可以包括：加热炉、回转炉、流化床反应器、火焰塔式反应器、液体离心机、蒸馏塔和液-液萃取塔。不过，这些物项中很少有“现货”供应，大部分将须按用户要求和规格制造。在某些情况下，为了适应所处理的一些化学品（氟化氢、氟气、三氟化氯和各种铀的氟化物）的腐蚀性质，需要作专门的设计和建造考虑。最后应该指出，在所有铀转化过程中，那些单独地看不是为铀转化专门设计或制造的设备物项，可被组装成专门为铀转化而设计或制造的系统。

### **7.1. 为将铀浓缩物转化为三氧化铀而专门设计或制造的系统**

#### **注释**

从铀浓缩物到三氧化铀的转化可通过以下步骤实现：首先，用硝酸溶解铀浓缩物，用磷酸三丁酯之类溶剂萃取纯化的硝酸铀酰；然后，硝酸铀酰通过浓缩和脱硝转化为三氧化铀，或用气态氨中和产生重铀酸铵，接着通过过滤、干燥和煅烧转化为三氧化铀。

### **7.2. 为将三氧化铀转化为六氟化铀而专门设计或制造的系统**

#### **注释**

从三氧化铀到六氟化铀的转化可以直接通过氟化实现。该过程需要一个氟气源或三氟化氯源。

### **7.3. 为将三氧化铀转化为二氧化铀而专门设计或制造的系统**

#### **注释**

从三氧化铀到二氧化铀的转化，可以用裂解的氨气或氢气还原三氧化铀来实现。

### **7.4. 为将二氧化铀转化为四氟化铀而专门设计或制造的系统**

#### **注释**

从二氧化铀到四氟化铀的转化，可以用氟化氢气体在 300—500℃与二氧化碳反应来实现。

### **7.5. 为将四氟化铀转化为六氟化铀而专门设计或制造的系统**

#### **注释**

从四氟化铀到六氟化铀的转化，可以用氟气在塔式反应器中与四氟化铀发生放热反应来实现。使流出气体通过一个冷却到-10℃的冷阱把热的流出气体中的六氟化铀冷凝下来。该过程需要一个氟气源。

### **7.6. 为将四氟化铀转化为金属铀而专门设计或制造的系统**

#### **注释**

从四氟化铀到金属铀的转化，可用镁（大批量）或钙（小批量）还原四氟化铀来实现。还原反应一般在高于铀熔点（1130℃）的温度下进行。

## 7.7. 为将六氟化铀转化为二氧化铀而专门设计或制造的系统

### 注释

从六氟化铀到二氧化铀的转化，可用三种方法来实现。在第一种方法中，用氢气和水蒸气将六氟化铀还原并水解为二氧化铀。在第二种方法中，通过溶解在水中而将六氟化铀水解，然后加入氨沉淀出重铀酸铵，接着可在 820℃用氢气将重铀酸铵还原为二氧化铀。在第三种方法中，将气态六氟化铀、二氧化碳和氨气通入水中，结果沉淀出碳酸铀酰铵。在 500—600℃，碳酸铀酰铵与水蒸气和氢气发生反应，生成二氧化铀。

从六氟化铀到二氧化铀的转化，通常是燃料制造厂的第一个工序。

## 7.8. 为将六氟化铀转化为四氟化铀而专门设计或制造的系统

### 注释

从六氟化铀到四氟化铀的转化，是用氢还原实现的。