

# 聚变装置用氚运输容器设计现状分析及监管建议

潘玉婷, 曹芳芳, 李城林, 刘念\*  
(生态环境部核与辐射安全中心, 北京 102401)

**摘要:** **目的** 充分了解国内外聚变装置用氚运输容器的设计应用现状, 通过对照国外设计实践经验, 为更好地实现国内运输容器自主研发及监管提出建议。**方法** 调研和分析国际上主要聚变装置用氚的运输容器设计及应用现状, 以及国内运输容器的研发、应用状况, 梳理了自主化研发运输容器的关注点。**结果** 以金属氚化物的形式固定和运输氚是公认最安全的方式。国际上主要核大国已研发的聚变装置用氚运输容器均按 B(U) 型包设计, 装载量多数为几十克氚量级, 考虑到氚的易泄漏和迁移风险, 均设置了多层包容系统, 且结合氚的衰变特性, 容器设计需要考虑衰变产生的氦气 ( $^3\text{He}$ )、衰变热致使压力温度升高下容器的包容性。**结论** 建议结合国际氚运输设计和实践经验, 注重聚变装置用氚运输容器的研发, 并制定相应技术标准和监管细则。

**关键词:** 聚变装置; 氚; 运输容器; 容器设计; 运输监管

中图分类号: TL93

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)21-0009-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.21.002

## Design Status and Regulation Recommendations of Tritium Transport Packages Used in Fusion Devices

PAN Yuting, CAO Fangfang, LI Chenglin, LIU Nian\*

(Nuclear and Radiation Safety Center, MEE, Beijing 102401, China)

**ABSTRACT:** The work aims to understand the current design and application status of tritium transport packages both domestically and internationally and propose recommendations based on the experiences of foreign countries to facilitate the independent development of domestic transport packages and regulations. A survey and analysis of the design and application status of tritium transport packages used in fusion devices at home and abroad were conducted, highlighting key design concerns. It was recognized that the safest method for transporting tritium was in the form of metal tritium. Tritium transport packages for fusion devices were all designed as Type B(U) packages, with a loading capacity typically in the range of tens of grams of tritium. To mitigate the risks of tritium leakage and migration, multi-containment systems were incorporated into the design of these packages. Furthermore, considerations must be made for the decay of tritium, the production of helium-3 ( $^3\text{He}$ ), and the decay heat, which could lead to increased pressure and temperature. Therefore, it is recommended to pay attention to the research and development of tritium transport packages for fusion devices, along with the formulation of corresponding technical standards and regulatory guidelines based on international design experiences.

**KEY WORDS:** fusion devices; tritium; transport package; package design; transport regulate

核能是清洁、安全、高效的绿色能源, 是新型低碳电力系统的必要组成部分。1983 年, 我国首次提

出“热堆—快堆—核聚变堆”核能“三步走”发展战略。自 20 世纪 90 年代起, 我国先后建成运行合肥超

收稿日期: 2024-09-10

\*通信作者

(HT-7)、中国环流器二号(HL-2A)、东方超环(EAST)等核聚变科研装置<sup>[1]</sup>。2006年,我国正式加入国际热核聚变实验堆(ITER)计划,此举为我国核聚变技术的提升与产业化提供了重要契机<sup>[2]</sup>。2020年,中国环流器三号(HL-3A)建成,标志着我国在聚变物理实验方面取得显著进展,超导磁体等工程技术达到世界先进水平。随着核聚变技术的快速发展,我国聚变装置相关安全监管也迎来了新的挑战。

聚变装置作为能源应用时均以氘、氚作为燃料。氚具有很强的放射性,聚变装置涉氚量为千克量级,如果发生氚的大规模泄漏事故,其放射性危害将长达数十年。因此,不仅需要关注氚在聚变装置中的密闭性,更需关注氚在运输环节的安全可靠性。

## 1 聚变装置用氚的运输情况简介

### 1.1 聚变装置用氚的特点

氚是聚变反应所需的一种核燃料,聚变堆氚的盘存量达到几千克,如在ITER中,初始阶段需要加入约6 kg的氚,并且在基本性能阶段计划的实验中每年还需要补充约2 kg的氚<sup>[3]</sup>。

无论是氚在聚变装置中还是储存和运输环节,都应关注其密闭性,一是由于氚资源十分稀缺且价格昂贵(80 000~130 000美元/g),二是由于氚具有辐射危害。氚属于最轻的元素之一,极易从部件结构材料中扩散渗透,且在空气中的迁移能力极强,氚泄漏和迁移将危及工作人员、公众和环境的健康安全。氚的化学性质活泼,氚气氧化、催化或同位素交换形成氚化水(HTO)被人体摄取后会带来高剂量内照射危害。HTO的毒性是气态氚的25 000倍,导致人体患癌率升高甚至死亡<sup>[4]</sup>。

氚既可以氚气( $T_2$ )的形式储存运输,也可以固化为金属氚化物再储存运输。气体储运技术简单、成熟,但易泄漏造成氚污染;金属氚化物方案是公认的最安全的运输方式<sup>[5]</sup>,但会额外增加反应步骤,存在氚回收需在数百摄氏度高温下进行加热、可吸收氚的金属价格较贵等缺点。氚会缓慢发生 $\beta$ 衰变,释放出电子变成氦气( $^3He$ ),同时释放出衰变热,致使容器内的压力与温度会缓慢升高。由于 $\beta$ 射线穿透能力较弱,故运输容器无需过多考虑屏蔽性能,而应重点关注高温、高压下的密闭性,确保不会释放氚。

### 1.2 聚变装置用氚运输要求

氚安全运输的核心是设计制造满足法规标准要求的运输容器。国际上一些国家已研发了聚变装置用氚的运输容器,均按B(U)型包设计。根据国际原子能机构《放射性物质安全运输条例》(SSR-6)<sup>[6]</sup>的规定,B(U)型包需要经受严苛的事故工况下的

试验,保证其能够经受住大多数运输过程中严重事故而包容性不丧失,货包外部辐射水平的增加不会危及工作人员和公众安全。氚运输容器设计时考虑到氚的易泄漏和迁移风险,均设置了多层包容系统,且结合氚的衰变特性,衰变产生的氦气、衰变热,容器设计还考虑了压力温度升高时容器的包容性,从而保证在正常和事故工况下氚运输是安全可靠的。

## 2 国内外氚运输容器设计现状

### 2.1 国外氚运输容器设计现状

对于氚的运输容器,多年来韩国、日本、加拿大、美国等国家均进行了研究,迄今为止,获得设计许可的运输容器并不多,下文将分别论述。

#### 2.1.1 韩国

2009年,韩国原子能研究院(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)受ITER组织的委托,着手开发氚运输容器。ITER对氚运输货包设计提出以下功能要求:1)运输容器设计的氚最小装载量为70 g,氚应以金属氚化物的形式储存,以便安全运输;2)设计适当的内容物装卸方法,便于氚装入和卸出;3)运输容器可在满载状态下安全储存5年以上;4)运输容器可被重复使用,并为重复使用提供额外的污染控制措施。

基于上述功能要求,KAERI设计的运输容器概念图如图1所示<sup>[7]</sup>。

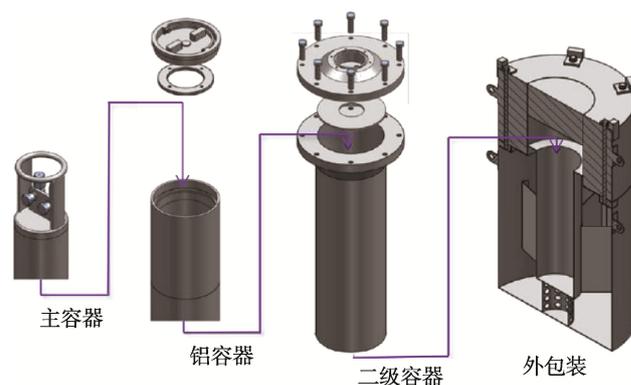


图1 KAERI设计的氚运输容器概念图  
Fig.1 Conceptual diagram of tritium transport package designed by KAERI

该容器由主容器(储存容器)、铝容器(污染控制容器)、二级容器(安全壳容器)和外包装4个部分组成,总质量约为120 kg。

1)主容器(储存容器)。主容器的作用为约束氚,可以金属氚的形式储存70 g氚,并至少能在5年内抵抗氚衰变产物 $^3He$ 产生的高压,持续5年不释放氚。选定贫化铀作为储氚材料进行实验,结果如表1所示。

表 1 氚衰变导致主容器内压力随时间升高情况  
Tab.1 Pressure rising in main package caused by tritium decay

储存时间/年	氚/mol	氦/mol	半衰期/年	体积/mL	压力/MPa
0	23.33	0.00			0.00
1	22.05	1.28			1.50
2	20.85	2.49			2.91
3	19.70	3.63	12.3	2 646.4	4.25
4	18.62	4.71			5.52
5	17.60	5.73			6.71
12.3	11.67	11.67			13.67

由表 1 可知, 储存 5 年后容器内压力为 6.71 MPa, 而主容器的设计抗压能力高达 9.30 MPa, 安全裕度约为 38%。此外, 容器主体必须能够耐受 500 °C 的高温, 这是氚卸载操作期间容器主体的预期温度。

2) 铝制容器 (污染控制容器)。考虑到氚在卸载操作过程中会扩散到主容器壁上, 故设计铝制容器以保护二级容器免受氚污染。污染控制容器也是氚厂内运输过程中的最小装卸单元, 采用铝制是为了尽量减小质量, 便于操作。

3) 二级容器 (安全壳容器)。二级容器的作用为提供严格的安全壳边界, 满足 B (U) 型货包的运输要求。

4) 外包装。外包装的功能是提供保护, 防止运输过程中的热冲击或结构冲击, 设计上应轻便、能吸收较高的机械能, 并具有阻燃性, 可在火灾事故中保护内容物。外包装为不锈钢外壳, 内部安装铜制散热片以增强散热性能, 并选用巴沙木作为减震材料, 其尺寸经过优化设计, 既能减小包装质量, 又能在运输过程中提供足够的机械冲击保护。

KAERI 设计的氚运输容器可以装载 70 g 氚, 以金属氢化物形式储存。70 g 氚的放射性为 686 000 Ci, 归类为 B (U) 型包<sup>[8]</sup>。该容器已通过 9 m 自由下落试验、1 m 击穿试验, 以及正常运输工况 (-40~38 °C) 下的热分析、事故条件下 (800 °C, 30 min) 的热分析、装卸料过程中 (400 °C, 10 h) 的热分析的模拟计算<sup>[9]</sup>。

### 2.1.2 日本

目前, 日本原子能研究所 (Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI) 研发的 25 g 氚容量金属 (锆-钴) 氟化物型胶囊运输容器, 已在日本、加拿大和美国获得许可, 为 B (U) 型货包。自 1995 年以来, 该运输容器已成功完成 2 次氚的国际运输<sup>[10]</sup>。然而, 该货包容量有限, 无法满足未来聚变反应堆实际氚供应的需要。基于此, JAERI 设计了一种新的氚运输容器, 以锆-钴 (Zr-Co) 合金为储氚材料, 氚容量为 250 g<sup>[11]</sup>。运输容器概念图见图 2。

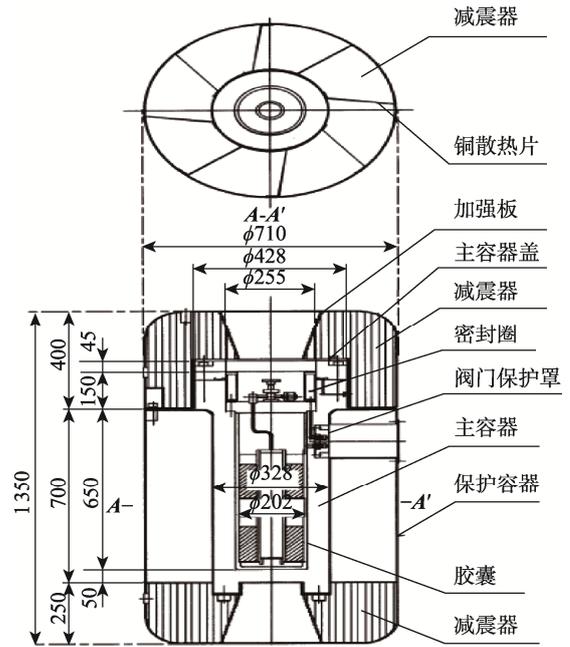


图 2 JAERI 设计的氚运输容器概念图  
Fig.2 Conceptual diagram of tritium transport package designed by JAERI

该容器由胶囊、主容器、保护容器 3 部分组成, 所用材料与规格见表 2。

表 2 JAERI 所设计氚运输容器的材料与规格  
Tab.2 Materials and specifications of tritium transport package designed by JAERI

部件	质量/kg	结构材料
胶囊	87	Zr-Co 合金 (氚吸附材料)
		304 不锈钢 (胶囊主体材料)
主容器	470	630 不锈钢
		金属密封圈
保护容器	323	304 不锈钢 (外壳)
		巴沙木 (减重材料)
		铜散热片

1) 胶囊。胶囊内部分为 2 层, 主体由 304 不锈钢制成, 并用小铜球分隔出数个区域, 用于储存 Zr-Co 合金粉末。该设计是为了增强导热性, 并维持对氚的吸收能力。储存 250 g 氚需要 4~7 kg 的 Zr-Co 合金粉末。

2) 主容器。主容器主体和盖子均由不锈钢制成, 用金属垫片密封。在主容器的外表面和保护容器的不锈钢板壁内侧之间放置了 8 个铜制散热片, 以散发氚的衰变热。

3) 保护容器。保护容器由不锈钢外壳、铜散热片和填充不锈钢外壳和内壳之间的巴沙木组成。外壳采用 4 mm 厚的不锈钢板焊接结构, 巴沙木在发生事故时可起到减震和隔热的作用。

该货包具有以下特点。1) 氚被吸附到装载 Zr-Co

合金粉末(1 kg的Zr-Co合金粉末可以吸收超过100 L的氙)的“胶囊”中,以氟化物形式保存,极大地减小了货包体积,仅比之前设计的氙容量25 g运输货包大50%左右。2)为了尽量减少“胶囊”内Zr-Co合金粉末因氙的 $\beta$ 衰变而引起的升温,“胶囊”采用空心结构设计。含有Zr-Co合金粉末的“胶囊”可以从主容器中分离出来,进行装入和卸出氙的操作。3)氙被“胶囊”和主容器双重约束。该容器用金属垫圈或金属O形圈密封,其厚实的不锈钢壁可防止氙扩散,并可承受6 000 m深的深海高压。

JAERI对运输过程中的假想事故条件进行了结构和热分析,包括采用体积位移法(Volumetric Displacement Method, VDM)进行9 m自由下落试验条件下的结构分析,采用ABAQUS程序进行800 °C、30 min热试验条件下的热分析,并检验货包在6 000 m深的深海中下沉时主容器的完整性。货包已通过9 m自由下落试验,800 °C热评价以及6 000 m深海压力的抗压试验<sup>[11]</sup>。

### 2.1.3 加拿大

加拿大研发的氙运输容器可按内容物分为2类:运输含氙重水的货包和运输金属氟化物的货包。

1)运输含氙重水的货包。安大略省水电公司设计了一种直接运输含氙重水的货包<sup>[12]</sup>。它由1个不锈钢容器和1个外包装组成,为B(U)型货包,容量高达5 000 kg,最大氙含量为20 PBq。该货包设计没有特殊的屏蔽要求,重水的装卸需易于操作,便于运输,在高速公路上行驶不需要特别许可证。

该货包内容器为不锈钢圆柱体,直径约为1.83 m,高约为2.08 m。外包装为不锈钢和聚氨酯泡沫结构,呈垂直圆柱体形,在正常、测试和事故工况下起到减震和隔热的作用。

货包适用于普通的牵引车+半挂车,见图3。当满载4 900 L含氙重水时,每个货包的质量约为16 800 kg。每台半挂车可携带2个货包。

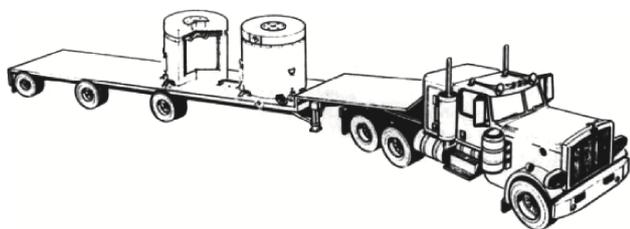


图3 含氙重水运输示意图

Fig.3 Schematic diagram of transportation of tritium containing heavy water

2)运输金属氟化物的货包。加拿大原子能有限公司已经研究出钛、锆、钇和铈作为候选氙吸附材料的运输容器,运输容器被设计为2层结构,分别为主容器以及外包装,可装载500 000 Ci(19 PBq)的金属氙。

主容器为4.5 L的不锈钢容器,见图4,材料为奥氏体不锈钢,设计上可容纳氙衰变产生的 $^3\text{He}$ 。该容器也可用作制备金属氟化物的反应容器,因此它配备了2个阀门,以实现反应过程中的气体循环<sup>[13]</sup>。

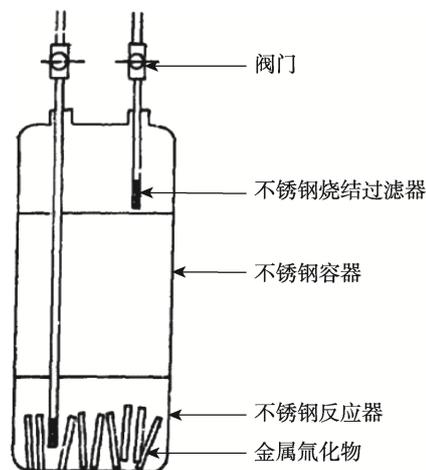


图4 加拿大原子能有限公司设计的主容器概念图

Fig.4 Conceptual diagram of main package designed by Atomic Energy Canada Limited

主容器被放置在另一个不锈钢容器中,并以法兰封闭,这2个容器被放置在1个适当大小的桶中,见图5。桶内装有隔热材料,以便在发生火灾时提供隔热保护。

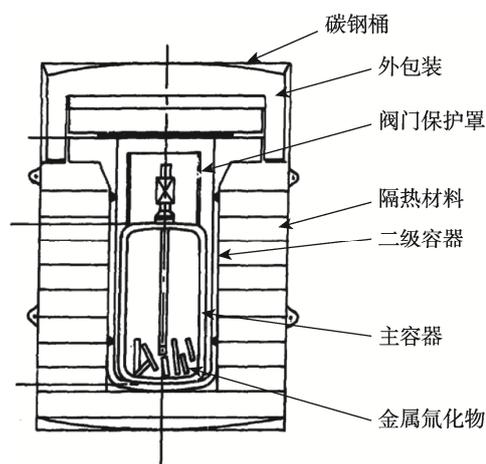


图5 加拿大原子能有限公司设计的氙运输容器概念图

Fig.5 Conceptual diagram of tritium transport package designed by Atomic Energy Canada Limited

隶属加拿大原子能有限公司的乔克河核实验室采用了类似的方案,将氙固定并储存在1个6 L不锈钢容器中。该方案的储氙材料为850 g钛海绵,该容器内可容纳50 g(500 000 Ci)氙。

### 2.1.4 美国

美国 NUREG-1556 (Vol. 2) 第 8.10.8 款规定了对氦的运输要求, 明确指出氦的运输需满足 10 CFR 中适用的 NRC 的要求, 同时应遵守 49 CFR 第 107、171~178 和 390~397 部分中适用于运输方式的 DOT (交通部) 法规的要求。美国 10 CFR 对放射性物品的运输要求同 IAEA 相关法规一致。

美国西屋萨凡纳河公司设计的运输容器以氟化铀粉末装载氦, 容量为 18 g 氦<sup>[14-15]</sup>。橡树岭国家实验室采用了类似设计, 尝试以贫铀粉末装载氦, 最大容量较低, 仅为 5 g, 且氦无法完全反应, 吸收率约为 91.5%。

## 2.2 国内氦运输调研情况

经调研, 我国聚变装置拟用氦的持有量: HL-3 为 10 g 氦, EAST 预期为 100 g 氦。氦的运输拟采用金属氟化物形式, 吸附载体为锆。

目前国内还没有设计成熟的民用氦运输容器, 但部分科研单位开展了相关的初步研究。在吸附材料方面, 考虑到金属氟化物作为内容物开展运输活动的优异性, 锆、钛等合金材料的改性和吸附行为研究被关注<sup>[14-15]</sup>。同时, 已有研究院所开展了氦在贮存容器中的渗透、扩散行为研究<sup>[16]</sup>, 相关数据和模型能够为运输容器研制研究提供参考和借鉴。在核能发展的需求下, 中国辐射防护研究院等容器设计单位提出了初步的设计理念, 包括应针对密封包容性能、热工性能、压力变化影响等方面考虑特殊设计, 尽快实现我国民用氦运输容器自主化发展。

## 3 氦运输容器设计现状分析与监管建议

### 3.1 氦运输容器设计现状分析

针对上述国内外氦运输容器设计现状调研情况进行分析, 主要结论如下。

1) 氦的放射性活度很高, 1 g 氦的活度约为 360 TBq。根据《放射性物品安全运输规程》(GB 11806—2019), 氦总活度 > 40 TBq 时, 运输容器需按照 B(U) 型货包设计。即运输超过 0.11 g (40 TBq) 的氦即须用 B(U) 型货包装载, 聚变装置用氦的持有量总活度达到了 GB 11806—2019 规定的 B(U) 型货包限值。根据《放射性物品运输安全管理条例》的要求, 此类氦运输容器设计、制造及运输活动应按一类放射性物品进行管理。

2) 氦既可以氦气 ( $T_2$ ) 形式运输, 也可以固化为金属氟化物再运输。目前认为金属氟化物运输氦是最安全的, 国际上已基于氟化铀粉末、Zr-Co 合金粉末等金属氟化物设计了相应的运输容器。

3) 结合氦的  $\beta$  衰变特性, 运输容器设计需要考

虑衰变产生的氦气 ( $^3\text{He}$ )、衰变热致使压力温度升高下容器的包容性, 确保不会释放出氦。多数已设计成型的氦运输容器都设置了多层结构, 如韩国为 ITER 设计的氦运输容器有 4 层结构, 日本设计并在日本、加拿大和美国获得许可的氦运输容器有 3 层结构。

4) 已设计或使用的氦运输容器装载量多在几十克数量级, 如日本原子能研究所设计并获得日本、加拿大、美国许可的氦运输容器, 最大装载量为 25 g 氦; 美国西屋萨凡纳河公司设计的氦运输容器, 最大装载量为 18 g 氦; 韩国原子能研究院为 ITER 设计的氦运输容器, 最大装载量为 70 g; 日本正在设计最大装载量为 250 g 的氦运输容器。

### 3.2 氦运输的监管建议

根据我国《放射性物品运输安全管理条例》及其配套法规要求, 结合我国聚变装置拟用氦的持有量, 氦属于一类放射性物品, 其运输容器的设计、制造和运输活动均应按照一类放射性物品进行监管。

1) 氦运输容器需取得生态环境部 (国家核安全局) 颁发的设计、制造许可。氦运输容器设计需开展 GB 11806—2019 规定正常运输条件和事故运输条件下的一系列力学、耐热、水浸没试验等。

2) 氦运输活动需要编制运输核与辐射安全分析报告书, 并获得生态环境部 (国家核安全局) 批准。

3) 目前国内氦运输实践较少, 相关法规标准尚不完善, 随着聚变装置技术发展, 未来氦的运输需求增加。建议尽快制定氦运输相应技术标准和监管细则。

4) 氦运输容器设计和监管的主要关注点包括: 考虑到氦极易从部件结构材料中扩散渗透, 在制定运输容器相关标准及监管细则时应明确正常和事故运输条件下, 氦运输容器包容性的接受准则; 结合氦衰变特性, 产生的衰变热致使容器内压力温度升高, 可在氦运输容器设计标准中基于 GB 11806—2019 对 B(U) 型货包事故运输条件试验, 开展针对性的抗压试验, 如日本氦容器设计的 6 000 m 深海高压试验; 结合金属氟化物卸载温度要求, 对氦运输容器设计和监管还应考虑高温下容器本体的耐受性。

## 4 结语

1) 氦的活度很高, 装运超过 0.11 g (40 TBq) 的氦即须用 B(U) 型货包装载。结合氦的  $\beta$  衰变特性, 运输容器设计需要考虑氦衰变产生的氦气 ( $^3\text{He}$ )、衰变热致使容器内压力温度升高下容器的包容性, 多数容器设计采取了多层包容系统。

2) 氦以金属氟化物的形式运输是公认最安全的运输方式, 目前贫化铀粉末、Zr-Co 合金粉末为常见的氦吸附金属载体。

3) 随着聚变装置技术发展, 未来氦的运输需求将逐渐增加, 建议制定氦运输相应技术标准和监管细则。

## 参考文献:

- [1] 彭先觉, 高翔, 李建刚, 等. 聚变能源研究态势及展望[J]. 中国工程科学, 2024, 26(4): 190-197.  
PENG X J, GAO X, LI J G, et al. Fusion Energy Research Situation and Prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4): 190-197.
- [2] 高翔, 万元熙. 磁约束聚变能源的发展机遇与挑战[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 59-65.  
GAO X, WAN Y X. Opportunities and Challenges for the Development of Magnetic Confinement Fusion Energy[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(19): 59-65.
- [3] ITER. Technical Basis for the ITER Final Design Report, Cost Review and Safety Analysis (FDR)[M]. International Atomic Energy Agency, 1998.
- [4] 魏世平. 中国聚变工程实验堆氚工厂内燃料循环与氚运输模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.  
WEI S P. Simulation Study on Fuel Cycle and Tritium Transport in Tritium Plant of China Fusion Engineering Experimental Reactor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [5] MURDOCH D, GLUGLA M. Tritium Plant Building Layout and General Systems Footprints[C]//ITER Design Review Meeting, 2007.
- [6] International Atomic Energy Agency. Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material: IAEA Safety Standards Series No. SSR-6[S]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018: 652-666.
- [7] LEE S, LEE M S, LEE J C, et al. Development of Tritium Transport Package for ITER SDS Supply[C]//Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, 2012.  
U.S. Nuclear Regulatory Commission. Packaging of Radioactive Material for Transport and Transportation of Radioactive Material under Certain Conditions: US NRC 10 CFR Part 71[S]. USA: Nuclear Regulatory Commission, 2005.
- [8] LEE S, LEE M S, LEE J C, et al. Development of ITER Tritium Transport Package[J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(3): 136-144.
- [9] K. Okuno, et. al. Proc. 11th International Conference on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM '95), 1996, p. 1217.
- [10] O'HIRA S, SUZUKI T, HODE S, et al. Design Study of a Tritium Transport Package for Future Fusion Reactors[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 45(2): 187-195.
- [11] K.K.LO, J.F.Tanaka. Ontario Hydro Tritiated Heavy Water Transportation Package. IAEA-SM-286/249.
- [12] W.J. Holtzlander, J.M. Yaraskavitch. Tritium Immobilization and Packaging Using Metal Hydrides. Atomic Energy of Canada Limited, 1981.
- [13] 张诚. 锆、钛及高熵合金的储氢/氚行为研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.  
ZHANG C. Study on the Hydrogen/Deuterium Storage Behavior of Zirconium, Titanium and High-entropy Alloys[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019
- [14] 程贵钧, 彭述明, 龙兴贵, 等. 氚在真空贮存容器材料中的吸附和渗透行为[J]. 同位素, 2010, 23(3): 129-133.  
CHENG G J, PENG S M, LONG X G, et al. Adsorption and Permeation Behavior of Tritium in Vacuum Storage Vessel Materials[J]. Journal of Isotopes, 2010, 23(3): 129-133.
- [15] 尹益辉, 梁浩, 范志庚. 储氚组件中氚依次渗透到相邻腔体的规律研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2024, 43(2): 1-9.  
YIN Y H, LIANG H, FAN Z G. The Rule of Tritium Permeation into Adjacent Cavities in Tritium Storage Assembly[J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2024, 43(2): 1-9.