

团 体 标 准

T/BYXT 170-2026

稀土核能机器人长寿命自源电池

Rare earth nuclear power battery for long-life autonomous robot

(征求意见稿)

2026-XX-XX 发布

2026-XX-XX 实施

包头市白云鄂博矿区市场监督管理局
包头市白云鄂博矿区工信和科技局 发布
包头市白云鄂博矿区稀土产业标准化协会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 分类与命名	2
4.1 分类	2
4.2 命名规则	3
5 技术要求	3
5.1 核素与放射防护要求	3
5.2 电性能要求	3
5.3 机械与环境适应性	4
5.4 热管理性能	4
5.5 安全性能	5
6 试验方法	5
6.1 核素与辐射检验	5
6.2 电性能试验	5
6.3 环境适应性试验	6
6.4 机械可靠性试验	6
7 检验规则	6
8 标志、包装、运输、贮存	7
8.1 标志	7
8.2 包装	7
8.3 运输	7
8.4 贮存	7
8.5 退役与回收	7
附录 A（规范性附录）	9
A.1	9
附录 B（资料性）	10
B.1 试验设备	10
B.2 试验程序	10
B.3 合格判据	10
附录 C（资料性）	11
C.1 辐射总剂量	11
C.2 单粒子效应（SEE）	11
C.3 热设计	11

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由包头市稀谷科技有限公司提出。

本文件由包头市白云鄂博矿区稀土产业标准化协会归口。

本文件起草单位：包头市检验检测中心、呼和浩特海关技术中心、包头市白云鄂博矿区市场监督管理局、包头市白云鄂博矿区工信和科技局、包头市稀谷科技有限公司、内蒙古圣飞运营科技有限公司、北京飞创世桥文化科技有限公司、北京炎黄医养科技有限公司、北京稀造科技有限公司、北京稀谷科技有限公司、三河悟筛健康科技有限公司、内蒙古稀都酒店管理有限公司、内蒙古沸石山生物科技集团有限责任公司、内蒙古润蒙稀超矿科技有限公司、乌拉特前旗石山矿业有限公司、内蒙古蒙稀超分子材料科技有限公司、内蒙古白庙子鸿雁农牧业生态科技发展有限公司、内蒙古稀都科技发展有限公司、吉安稀谷科技产业有限公司、包头市白云鄂博矿区稀土新材料和产业应用研究院、包头市白云鄂博矿区稀土产业标准化协会。

本文件主要起草人为：侯权恒、李信福、焦智斌、侯照东、陈媛媛、段羚、王霄鹏、吴天相、李波、延涵、张晓毅、李永滔、白夜明、王丽、赵艳霞、侯倩文、郝广诚、李荣腾、周泉书、任渊、尹志军、王振洲、白瑞、王鸿宇、石晓丽、莘俊莲、张沛宇、崔晓宇、刘雨、冶建荣、张丽华、湛军平、王强、那剑、袁玉静、张文权、韩乐、武小丽、敖日格乐、李明、王乐、池慧。

本文件为首次发布。

稀土核能机器人长寿命自源电池

1 范围

本文件规定了稀土核能机器人长寿命自源电池的分类、技术要求、试验方法、检验规则及标志、包装、运输、贮存与退役。

本文件适用于：

- a) 深海探测机器人（工作深度>6000m，寿命>10年）；
- b) 太空/星球表面机器人（月球、火星，寿命>20年）；
- c) 核设施巡检机器人（高辐射环境，寿命>5年）；
- d) 极地科考机器人（-60℃低温，寿命>10年）。

本文件不适用于：

- a) 家用服务机器人（成本与监管要求过高）；
- b) 地面无人车（民用）（公共安全限制）；
- c) 协作机器人（人机近距离作业，辐射安全等级不符）。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温

GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温

GB/T 2423.10 环境试验 第2部分：试验方法 试验Fc：振动（正弦）

GB/T 4208 外壳防护等级（IP代码）

GB 11806 放射性物质安全运输规程

GB 18871 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GB/T 13625 核安全级电气设备抗震试验

GJB 150.3A 军用装备实验室环境试验方法 第3部分：高温试验

GJB 150.4A 军用装备实验室环境试验方法 第4部分：低温试验

GJB 150.16A 军用装备实验室环境试验方法 第16部分：振动试验

GJB 151B 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量

HJ 61 辐射环境监测技术规范

T/BYXT 169-2026 稀土核能长航时无人机动力电池

T/BYXT 250.1-2026 稀土核能电池 第1部分：术语定义与核素分类

T/BYXT 250.3-2026 稀土核能电池 第3部分： θ -TaN热界面材料技术规范

EJ/T 20159 放射性同位素热源通用规范

IEC 60068-2-52 环境试验 第2-52部分：试验Kb：盐雾，循环（氯化钠溶液）

3 术语和定义

下列术语和定义中的内容适用于本文件。

3.1

自源电池 autonomous power source

无需外部充电或燃料补给，依靠内部核衰变持续提供电能的装置，设计寿命内完全免维护。

3.2

深海型核动力电池 deep-sea nuclear power battery

设计工作水深 $>6000\text{m}$ ，耐压 $>60\text{MPa}$ ，具备海水腐蚀防护和深海低温启动能力的核动力电池。

3.3

星球型核动力电池 planetary nuclear power battery

适用于地外天体（月球、火星等）表面，具备真空、辐射、极端温差（ $-180^{\circ}\text{C}\sim+120^{\circ}\text{C}$ ）环境适应能力的核动力电池。

3.4

核设施巡检型 nuclear facility inspection type

用于核电站、乏燃料贮存设施等高辐射环境，具备抗辐射加固（总剂量 $>100\text{kGy}$ ）和远程监控功能的核动力电池。

3.5

θ -TaN 耐压壳体 θ -TaN pressure vessel

采用亚稳相氮化钽（ θ -TaN）陶瓷或 θ -TaN/碳化硅复合制造的耐压结构，密度 $>15\text{g}/\text{cm}^3$ ，抗压强度 $>1200\text{MPa}$ ，同时作为辐射屏蔽层和热沉。

4 分类与命名

4.1 分类

4.1.1 按工作环境分类

RE-Robot-DS：深海型（Deep Sea），耐压 60-110MPa；

RE-Robot-PL：星球型（Planetary），真空/宽温域；

RE-Robot-NF：核设施型（Nuclear Facility），抗辐射 $>100\text{kGy}$ ；

RE-Robot-P0：极地型（Polar）， -60°C 低温启动。

4.1.2 按功率等级分类

微型（M）： $<10\text{W}$ ，用于微型侦察机器人；

小型（S）： $10\text{-}100\text{W}$ ，用于巡检机器人；

中型（M）： $100\text{W}\text{-}1\text{kW}$ ，用于深海着陆器/火星车；

大型（L）： $>1\text{kW}$ ，用于深海工作站/月球基地。

4.1.3 按核素类型分类

Pu238 型： ^{238}Pu ，87.7 年半衰期，通用型；

Cm244 型： ^{244}Cm ，18.1 年半衰期，高功率短时任务；

Am241 型： ^{241}Am ，433 年半衰期，超长寿命；

Sr90 型： ^{90}Sr ，28.8 年半衰期，微型机器人（贝塔伏特）。

4.2 命名规则

RE-Robot-□-□-□-□

第 1 位：环境类型（DS/PL/NF/PO）

第 2 位：功率等级（M/S/M/L）

第 3 位：核素类型（Pu238/Cm244/Am241/Sr90）

第 4 位：版本号（V1.4 等）

示例：RE-Robot-DS-M-Pu238-V1.4 表示深海型、中型功率、²³⁸Pu 热源、V1.4 版本。

5 技术要求

5.1 核素与放射防护要求

5.1.1 核素纯度与活度

²³⁸Pu、²⁴⁴Cm、²⁴¹Am 纯度要求同 T/BYXT 169-2026 第 5.1.1 条；

⁹⁰Sr 纯度 ≥ 99.0%，用于微型机器人（功率 < 1W）；

活度限值：同 T/BYXT 169-2026 附录 A，深海/太空应用可放宽至 2 倍（远离人口密集区）。

5.1.2 辐射屏蔽

表面剂量率：深海/太空型 < 10μSv/h（距表面 5cm），核设施型 < 100μSv/h（需配合机器人整体屏蔽）；

中子防护：²⁴⁴Cm 型需附加含氢屏蔽层（聚乙烯/水层），中子剂量率 < 20μSv/h。

5.1.3 耐压封装（深海型）

壳体材料：θ-TaN/SiC 复合陶瓷，密度 > 14g/cm³；

抗压强度：> 1200MPa（对应 11000m 水深）；

密封结构：双重 O 型圈（全氟醚橡胶）+ θ-TaN 金属化焊接；

泄漏率：< 10⁻⁹ Pa·m³/s（氦质谱）。

5.2 电性能要求

5.2.1 输出电压

直流输出：24V、48V 或 370V（依功率等级）；

电压稳定度：< ±3%（稳态）；

纹波系数：< 1%（rms）。

5.2.2 比功率与能量密度

深海型：比功率 ≥ 50W/kg（含耐压壳），能量密度 > 1000Wh/kg；

星球型：比功率 ≥ 100W/kg（真空散热优化），能量密度 > 2000Wh/kg；

核设施型：比功率 ≥ 30W/kg（侧重抗辐射加固），能量密度 > 500Wh/kg；

微型 (^{90}Sr)：比功率 $\geq 5\text{W/kg}$ ，体积 $< 10\text{cm}^3$ 。

5.2.3 转换效率

热光伏型： $> 25\%$ （同 T/BYXT 169）；

热电型（TEG）： $> 8\%$ （BiTe 基，低温应用）或 $> 12\%$ （SiGe 基，高温应用）；

斯特林型： $> 30\%$ （大型深海工作站）。

5.2.4 寿命

设计寿命：深海型 > 10 年，星球型 > 20 年，核设施型 > 5 年；

容量保持率：设计寿命末期 $> 70\%$ （考虑核素衰变）。

5.3 机械与环境适应性

5.3.1 深海型特殊要求

静水压：承受 1.5 倍额定工作压力（如额定 110MPa，试验 165MPa），保压 24h 无泄漏；

海水腐蚀： θ -TaN 壳体在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 10 年，腐蚀深度 $< 0.1\text{mm}$ ；

生物附着：表面涂覆 RE-防污涂层（稀土改性硅树脂），抑制藤壶/藻类附着。

5.3.2 星球型特殊要求

真空适应性： $< 10^{-6}\text{Pa}$ 真空下工作，无真空冷焊、无出气污染；

温度循环： -180°C （月夜） $\leftrightarrow +120^\circ\text{C}$ （月昼），循环 1000 次，性能衰减 $< 10\%$ ；

辐射环境：抗宇宙射线总剂量 $> 100\text{kGy}$ （硅漂移探测器耐受水平）；

尘埃防护：IP6X，防止月壤/火星尘埃侵入。

5.3.3 核设施型特殊要求

抗辐射：在 10^4Gy/h 剂量率下连续工作，剂量累积 $> 10^6\text{Gy}$ ，性能衰减 $< 20\%$ ；

电磁兼容：抗机器人自身辐射干扰，信号传输无误码；

远程监控：内置辐射传感器，实时监测封装完整性。

5.3.4 机械强度

振动：随机振动 5-2000Hz，50gRMS（崎岖地形行驶）；

冲击：100g 半正弦波，6ms（跌落/碰撞）；

加速度：20g（各方向，持续 10min，火箭发射或深海抛射）；

倾覆： 360° 翻滚后正常工作（球形深海着陆器）。

5.4 热管理性能

5.4.1 深海热管理

利用海水自然对流（ $-1^\circ\text{C}\sim 4^\circ\text{C}$ ）；

θ -TaN 热阻 $< 0.06\text{K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ (同 T/BYXT 169) ;
热端温度: 300-800°C (依转换方式), 壳体表面 $< 5^\circ\text{C}$ (避免热液喷口生物聚集)。

5.4.2 太空热管理

月昼: 热辐射器散热 ($\varepsilon > 0.9$), RE-KPF₆ 热泵将废热用于设备保温;
月夜: RE-KPF₆ 制冷模式, 维持电子学温度 $> -40^\circ\text{C}$ (防止冷焊);
热开关响应: 月夜 ↔ 月昼切换时, 10min 内达到热平衡。

5.4.3 核设施热管理

被动散热 (空气自然对流), 壳体温度 $< 80^\circ\text{C}$;
应急冷却: 温度 $> 100^\circ\text{C}$ 时, RE-KPF₆ 启动, 利用机器人自带水箱冷却。

5.5 安全性能

5.5.1 深海安全性

失压保护: 耐压壳破裂时, 核素固化于 ZrC 基体, 不溶于海水 (溶解度 $< 10^{-6}$ g/L);
回收设计: 内置声学信标 (铯酸锂, 自供能), 失事后定位回收;
生物屏障: 确保深海热液生态系统不受核热影响 (热扩散范围 $< 1\text{m}^3$)。

5.5.2 太空安全性

发射安全: 火箭发射失败坠入海洋时, 耐压壳承受 $> 50\text{MPa}$ 冲击 (同深海型);
行星保护: 防止地球微生物随核电池污染地外天体 (干热灭菌+封装);
碎片防护: 抗空间碎片撞击 (1cm 铝球@3km/s)。

5.5.3 核安保

防盗窃: θ -TaN 陶瓷极难机械加工 (硬度仅次于金刚石), 化学提取需强酸 (HF+HNO₃);
追踪定位: GPS/北斗 (星球型使用轨道器中继), 异常移动报警;
自毁: 非法拆解时, 电容器放电熔毁电路 (防止逆向工程)。

6 试验方法

6.1 核素与辐射检验

同 T/BYXT 169-2026 第 6.1 条, 增加:
⁹⁰Sr 能谱分析: 液闪计数器测量 β 能谱, 确认无 γ 杂质 (如 ¹³⁷Cs)。

6.2 电性能试验

同 T/BYXT 169-2026 第 6.2 条。

6.3 环境适应性试验

6.3.1 深海高压试验

按附录 B 进行，使用高压釜模拟 110MPa（或 1.5 倍额定压力）；
保压 48h，监测泄漏率、绝缘电阻、输出电压。

6.3.2 太空模拟试验

热真空试验：真空度 $<10^{-4}$ Pa，温度 $-180^{\circ}\text{C}\sim+120^{\circ}\text{C}$ 循环；
月尘模拟：真空环境下喷射模拟月壤（粒径 $<1\text{mm}$ ），测试密封性；
紫外线辐照：200-400nm，1000 等效太阳小时，材料老化测试。

6.3.3 盐雾腐蚀试验

按 IEC 60068-2-52，循环盐雾（喷雾 2h+干燥 22h），10 周期；
检查 θ -TaN 壳体表面腐蚀、质量损失、绝缘性能。

6.3.4 辐射环境试验

^{60}Co γ 辐照，剂量率 10^4 Gy/h，累积 10^5 Gy；
监测输出性能、材料机械性能变化。

6.4 机械可靠性试验

6.4.1 崎岖地形振动

模拟机器人翻越岩石地形：随机振动 20-500Hz，10g RMS，三轴各 24h；
监测焊点、键合点疲劳。

6.4.2 跌落试验

高度：10m（模拟深海抛射或着陆器跌落）；
地面：岩石/混凝土；
检验：结构完整性、泄漏率。

6.4.3 翻滚试验

球形机器人： 360° 翻滚 100 次；
检验：内部结构位移、电气连接。

7 检验规则

同 T/BYXT 169-2026 第 7 章，增加：
深海型：每台进行 10MPa 气压预检（氦质谱粗检漏）；
星球型：每台进行热真空筛选（ $-40^{\circ}\text{C}\sim+85^{\circ}\text{C}$ ，10 循环）；

核设施型：每台进行 10^4 Gy 辐照预筛选。

8 标志、包装、运输、贮存

8.1 标志

同 T/BYXT 169-2026 第 8.1 条，增加：

应用标识：深海型（submarine symbol）、星球型（planet symbol）、核设施型（radiation symbol with building）；

回收责任方：标明制造商回收联系方式（10 年/20 年/50 年后）。

8.2 包装

8.2.1 深海型

防水包装：IP68，可承受临时浸水；

防震：聚氨酯泡沫密度 $>100\text{kg/m}^3$ （深海高压预适应）。

8.2.2 星球型

洁净室包装（Class 100），防止地球微生物污染；

真空包装或氮气保护，防止运输中氧化。

8.2.3 核设施型

铅屏蔽包装（表面剂量率 $<2\mu\text{Sv/h}$ ，便于人工搬运）；

抗震包装（可承受搬运跌落 1m）。

8.3 运输

同 T/BYXT 169-2026 第 8.3 条，深海型需注意：

海运：符合 IMDG Code，深海机器人电池作为货物时，需固定在甲板下（防浪击）；

潜艇搭载：核动力潜艇运输时，需考虑舱内辐射累积。

8.4 贮存

8.4.1 长期贮存

深海型：干燥环境，相对湿度 $<40\%$ ，防止 θ -TaN 表面水解（虽耐蚀，长期贮存需干燥）；

星球型：洁净室，氮气保护，定期（每年）检漏；

贮存期限：同 T/BYXT 169，但机器人任务周期长，允许贮存 5-10 年后使用（需核素半衰期修正）。

8.5 退役与回收

强制性要求：

制造商负责回收：机器人任务结束后（或事故损毁），核电池必须回收至 404 厂或指定后处理设施；

深海回收：声学信标有效期 >20 年，确保失事后可定位打捞；

太空回收：星球型电池设计为可携带返回（采样返回任务）或长期封存（表面就位）；

环保要求：禁止将核电池遗弃于深海或地外天体（行星保护协议）。

附录 A

(规范性附录)

机器人应用场景核素选型指南

A.1

应用场景	推荐核素	功率范围	设计寿命	选型理由	注意事项
深海着陆器	^{238}Pu	100W-1kW	10-20 年	半衰期匹配任务周期, α 辐射易屏蔽	耐压壳质量大, 需优化结构
深海微型探测器	^{90}Sr	<10W	10-20 年	贝塔伏特直接转换, 体积小	β 穿透力强, 需薄层屏蔽
火星车	^{238}Pu	100W-500W	20 年	成熟技术, 温差发电可靠	沙尘防护, 散热设计
月球基地	^{241}Am	1-10kW	100 年	极长寿命, 功率密度要求低	质量不敏感, 可用厚重屏蔽
核设施巡检	^{238}Pu	50-200W	5-10 年	抗辐射加固经验丰富	中子本底高, 注意核素杂质
极地科考	^{238}Pu	100W-1kW	20 年	低温启动性能好	雪地反射热辐射, 影响散热

附录 B

(资料性)

深海高压环境试验方法

B.1 试验设备

高压釜：容积>核电池体积 3 倍，压力范围 0-200MPa，精度±1%；

海水模拟液：3.5% NaCl，pH=8.0，温度 2℃±1℃；

电气贯穿件：绝缘耐压>500V，耐压>200MPa。

B.2 试验程序

将电池放入高压釜，注入海水模拟液；

以 10MPa/min 速率升压至 1.5 倍额定工作压力；

保压 48h，记录压力下降（泄漏指示）、绝缘电阻、输出电压；

以 5MPa/min 速率降压至常压；

取出检查：壳体变形、密封圈状态、内部积水。

B.3 合格判据

压力下降<1%（48h）；

绝缘电阻>100MΩ（500V DC）；

输出电压波动<±5%；

无可见变形、裂纹。

附录 C

(资料性)

太空辐射环境适应性设计准则

C.1 辐射总剂量

火星表面：约 0.7Gy/年（考虑太阳粒子事件）；
设计余量：10 倍，即 7Gy/年，20 年任务 140Gy；
抗辐射加固：电子学采用 SOI（绝缘体上硅）工艺，屏蔽 >5mm 铝等效。

C.2 单粒子效应（SEE）

存储器采用 EDAC（纠错码）；
功率 MOSFET 采用抗辐射加固型（RHA）；
关键电路三模冗余（TMR）。

C.3 热设计

月昼：散热片指向深空（3K 背景），黑漆表面（ $\varepsilon=0.9$ ）；
月夜：核电池废热全部用于设备保温，RE-KPF₆ 热泵停止工作（无散热需求）。
