

# 裂片元素

LIE PIAN YUAN SU

原子能出版社

## 内 容 简 介

本书包括两篇调研报告和十三篇译文，重点介绍长寿命、高产额的裂片元素  $^{187}\text{Cs}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{147}\text{Pm}$ 、 $^{99}\text{Tc}$ 、 $\text{Rh}$ 、 $\text{Pd}$ 、 $^{85}\text{Kr}$ 、 $\text{Xe}$  等。书中概述了这些裂片元素的性质和用途，比较详细地论述了它们的分离和纯化方法。此外，还扼要讨论了混合裂片元素用作辐射源的可能性，以及裂片元素回收与高放废液最终处置相结合等问题。

本书可供从事裂片元素研究和生产、核燃料后处理、放射性三废处理和放射性同位素应用等工作人员及大专院校有关专业师生参考。

## 裂 片 元 素

(译文集)

原子能出版社出版

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本  $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张  $10^{1/8}$ ·字数 223 千字

1978年11月北京第一版·1978年11月北京第一次印刷

统一书号：15175·135

定 价：1.05 元

## 目 录

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 1. 国外裂变产物综合利用概况(调研报告).....                | 1   |
| 2. 用无机离子交换剂从经甲醛处理后的普雷克斯<br>废液中回收和提取铯..... | 29  |
| 3. 法国铯-137 回收和封装设备 .....                  | 48  |
| 4. 从萨凡纳河工厂的废液上清液中去除铯.....                 | 59  |
| 5. 镭-90 热源 .....                          | 77  |
| 6. 铀的工艺 .....                             | 126 |
| 7. 从核燃料后处理废液中回收贵金属铑和钯 (调研<br>报告).....     | 159 |
| 8. 从老后处理废液上清液中回收铑、钯和铱的方<br>法 .....        | 175 |
| 9. 从老后处理废液上清液中回收的铑、钯和铱<br>的纯化方法 .....     | 208 |
| 10. 从六氟化铀中分离铱-99.....                     | 224 |
| 11. 从中和后的普雷克斯废液中回收和纯化铱-99.....            | 235 |
| 12. 从后处理工厂废气中分离惰性气体裂变产物的<br>方法 .....      | 250 |
| 13. 分离氦和回收氩的装置 .....                      | 275 |
| 14. 混合裂变产物作辐射源的可能性 .....                  | 286 |
| 15. 汉福特核燃料后处理废液长期贮存前的处理 .....             | 308 |

---

# 国外裂变产物综合利用概况

(调研报告)

俞 莹

## 一、裂变产物的特性

在核反应堆运行过程中,核燃料( $^{233}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{238}\text{U}$ )发生慢中子或快中子裂变时,分裂为两块质量较小的核,同时放出中子和一定的能量。它们所放出的次级中子又引起其余核燃料裂变的链式反应。核燃料裂变时产生原子序数由30至65的36种元素的300多种同位素,这就是裂变产物(或称裂片元素、裂片同位素)。裂变产物是许多同位素的复杂混合物,其中有些是稳定同位素,大部分是放射性同位素。后者会发生 $\beta^-$ 衰变,其子体往往还是放射性的,这样连续发生 $\beta^-$ 衰变,就形成了一条衰变链。就某一个裂片同位素而言,它可能是裂变过程中直接生成的,也可能是由衰变链中母体衰变生成的。各裂变产物的产额不同,其半衰期的长短也悬殊很大,从小于一秒钟到几百万年,直至稳定同位素。裂变产物的组成随时间而变化。裂变产物的生成、积累和衰变与反应堆的堆型、燃耗深度和冷却时间有关。照射时间越长、冷却时间越长,则长半衰期的核素相对含量越高;相反,则短半衰期的核素相对含量增高。从表1可看出,在冷却三十年后,裂变产物就只剩下 $^{90}\text{Sr}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 了。

目前广泛采用普雷克斯流程进行核燃料后处理。在处理

表 1 主要裂变产物在不同冷却时间中的变化

| 核 素                                   | 照射至3000兆瓦日/吨, 占总裂变放射性的% |         |          |
|---------------------------------------|-------------------------|---------|----------|
|                                       | 冷却 100 天                | 冷 却 3 年 | 冷 却 30 年 |
| $^{85}\text{Kr}$                      | <1                      | 1       | <1       |
| $^{133}\text{Xe}$                     | <1                      | —       | —        |
| $^{131}\text{I}$                      | <1                      | —       | —        |
| $^{137}\text{Cs}$                     | <2                      | 15      | ~49      |
| $^{90}\text{Sr}$                      | <2                      | 15      | ~49      |
| $^{89}\text{Sr}$                      | 7                       | —       | —        |
| $^{140}\text{Ba}$ - $^{140}\text{La}$ | <1                      | —       | —        |
| $^{144}\text{Ce}$ - $^{144}\text{Pr}$ | 45                      | 50      | —        |
| $^{147}\text{Pm}$                     | 3                       | 15      | <1       |
| $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$   | 33                      | —       | —        |
| $^{103}\text{Ru}$ - $^{103}\text{Rh}$ | 5                       | —       | —        |

过程中, 几乎全部的裂变产物均转入高放废液中。值得引起重视的是少数具有高产额和长半衰期的同位素, 其中有些同位素是在自然界中找不到的稀有和贵重金属。在废液中还有超铀核素和超钷核素如  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 、 $^{242}\text{Cm}$  等, 这些核素在国防和国民经济各部门有着广泛的用途。表 2 中介绍了一些主要裂变产物和超铀核素的特性及用途。

## 二、裂变产物提取的基本情况

美国从 1948 年开始进行分离和纯化裂变产物的工作。1958 年在橡树岭建成了中间规模的工厂。1960 年在汉福特中间工厂生产了百万居里的  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  和几十万居里的  $^{147}\text{Pm}$ 。六十年代中期, 美国进行了  $^{99}\text{Tc}$  的回收工作, 并开始以工业规模回收  $^{85}\text{Kr}$  和  $\text{Xe}$  等。太平洋西北研究所也设有  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{137}\text{Cs}$

表 2 一些主要裂变产物和超铀核素的特性

| 种类   | 核素                | 半衰期, 年            | 同位素丰度, % | 热功率, 瓦/克 | 比放射性, 居里/克 | 衰变型式               | 裂变产额, %            |                     | 主要用途                      |
|------|-------------------|-------------------|----------|----------|------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|
|      |                   |                   |          |          |            |                    | 自 <sup>235</sup> U | 自 <sup>239</sup> Pu |                           |
| 裂变产物 | <sup>90</sup> Sr  | 28                | 50       | 0.96     | 142        | $\beta$<br>(有韧致辐射) | 5.89               | 2.12                | 热源, $\beta$ 能源            |
|      | <sup>99</sup> Tc  | $2.1 \times 10^5$ | 100      | —        | 0.017      | $\beta$            | 6.13               | 6.32                | 防腐蚀剂、合金、超导体               |
|      | <sup>85</sup> Kr  | 10.7              | 5        | 0.54     | 397        | $\beta$            | 1.32               | 0.563               | 特殊灯源、 $\beta$ 辐射源         |
|      | <sup>137</sup> Cs | 30                | 35       | 0.42     | 87         | $\beta, \gamma$    | 6.26               | 6.65                | 辐射源、能源                    |
|      | <sup>144</sup> Ce | 0.78              | 4.5      | 25.6     | 3190       | $\beta, \gamma$    | 5.39               | 3.8                 | 辐射源、能源                    |
|      | <sup>147</sup> Pm | 2.6               | 100      | 0.33     | 929        | $\beta$            | 2.25               | 2.13                | 热源、发光粉                    |
|      | Rh                | 稳定                | 100      | —        | —          | —                  | 3.12*              | 6.95*               | 工业、电力、装饰                  |
|      | Ru                | 1                 | 3.3      | 33.1     | 3375       | $\beta$            | 0.39               | 4.48                | 热源、 $\beta$ 辐射源           |
|      | Pd                | 基本稳定              | —        | —        | —          | —                  | 0.17**             | 3.5**               | 工业、电力、装饰                  |
|      | Xe                | 基本稳定              | —        | —        | —          | —                  | 6.75***            | 6.92***             | 特殊灯源、医学上的麻醉剂              |
| 超铀   | <sup>237</sup> Np | $2.2 \times 10^6$ | 100      | —        | 0.0007     | $\alpha$           |                    |                     | 生产 <sup>239</sup> Pu 的靶材料 |
| 超钷   | <sup>241</sup> Am | 458               | 50       | 0.1      | 3.25       | $\alpha$           |                    |                     | 热源、 $\alpha$ 源、X 射线源      |
|      | <sup>242</sup> Cm | 0.45              | —        | 0.1      |            | $\alpha$           |                    |                     | 热源、衰变为 <sup>238</sup> Pu  |

\* 指<sup>103</sup>Rh; \*\* 指<sup>107</sup>Pd; \*\*\* 指<sup>133</sup>Xe。

分离、纯化和制源车间。

1947 年,英国在哈威尔和阿默沙姆研究中心开始了分离回收裂变产物的研究工作,至 1957 年已能生产各种高比度的裂变产物数十种。

法国在六十年代提出了一个 Elan 计划,以推广裂变产物的应用,先后建立了 Elan II A  $^{137}\text{Cs}$  粗分离工厂和 Elan II B  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{90}\text{Sr}$  强源制造厂。1970 年法国生产的  $^{90}\text{Sr}$  达 50 万居里,  $^{137}\text{Cs}$  也有几十万居里。

苏联在五十年代中期开始分离和纯化裂变产物的研究工作,目前年产  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{137}\text{Cs}$  几十万居里,同时也生产一些  $^{147}\text{Pm}$  和  $^{99}\text{Tc}$ 。

裂变产物分离和纯化工艺流程的发展大致可分为三个阶段。

### 1. 沉淀分离阶段

1958 年美国橡树岭裂变产物中间工厂建成,采用的几乎全部是沉淀流程。主要提取  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{144}\text{Ce}$ 、 $^{147}\text{Pm}$ 、 $^{99}\text{Tc}$  等五种裂片同位素,年产量为几十万居里。产品形式为  $\text{CsCl}$ 、 $\text{SrF}_2$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $^{147}\text{Pm}$  的硝酸盐溶液。

### 2. 沉淀-溶剂萃取流程

为了满足对裂片同位素日益增长的需要,美国于 1960 年在汉福特工厂大规模分离回收几种裂片同位素。先用沉淀法从废液中粗分离  $\text{Sr}$  和稀土元素,然后再用有机溶剂 D 2EHPA [二(2-乙基己基)磷酸]与 BAMBP[4-另丁基-2(2-甲基苄基)酚]萃取法分离纯化,并用无机离子交换剂从萃残液中提取  $^{137}\text{Cs}$ 。汉福特工厂用这种流程回收了近百万居里的  $^{90}\text{Sr}$

等裂变产物。

3. 无机材料的选择性吸附

目前有不少国家仍在积极研究用无机材料分离回收主要裂变产物<sup>90</sup>Sr 和<sup>137</sup>Cs。如用一些天然的硅铝酸盐 沸石可在酸性的高放废液中选择吸附<sup>90</sup>Sr 和<sup>137</sup>Cs，洗脱效果也较好。用无机材料的优点是耐辐照性能好、价格便宜。

美国对几种主要裂变产物的研究和生产方法列于表 3、4、5。

总之，从高放废液中提取裂变产物不外乎是沉淀、萃取和离子交换三个基本的放化分离方法。作为生产流程则力求高回收率、高净化系数、简单易行和产品纯度高。此外，还要求流程中产生的二次废液体积小、放射性水平低、化学成分不复杂等。

三、裂变产物的主要用途

裂变产物在工业、农业、国防以及医疗卫生等方面有广泛的用途，值得重视。从原子能工业的废液中提取裂变产物并加以综合利用，可以变废为宝、化害为利。现将裂变产物

表 3 回收 <sup>99</sup>Tc 的方法

| 进 料    | 回收方法  | 规 模  | 试 剂     | 备 注                                      |
|--------|-------|------|---------|------------------------------------------|
| 气态六氟化铀 | 吸 附 法 | 工厂生产 | 氟化镁     | 用水解吸                                     |
| 酸性废液   | 溶剂萃取  | 工厂生产 | 叔胺类萃取剂  | 用NaOH或Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 反萃 |
| 碱性废液   | 离子交换  | 工厂生产 | 阳离子交换树脂 | 用浓酸解吸                                    |

表 4 从酸性废液中回收  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{144}\text{Ce}$ 、 $^{147}\text{Pm}$  的方法

| 回收项目                                                                             | 回收方法                               | 试 剂 和<br>交 换 剂                                                 | 规 模                           | 备 注                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 从酸性普雷克斯流程的高放废液中回收 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{144}\text{Ce}$ 、 $^{147}\text{Pm}$ 及稀土元素 | 沉淀法<br>溶剂萃取法                       | 硫酸盐<br>$\text{D}_2\text{EHPA}$                                 | 工厂生产<br>工厂生产                  | 硫酸铅载带沉淀<br>在 pH 4—5 萃取                                |
| 从 Ce 和稀土元素中分离 $^{90}\text{Sr}$                                                   | 沉淀法<br>溶剂萃取法<br>离子交换法              | 草酸盐<br>$\text{D}_2\text{EHPA}$<br>阳离子交换树脂                      | 工厂生产<br>工厂生产<br>实验室规模验证       | 利用不同反萃条件分离<br>用于精制 $^{90}\text{Sr}$                   |
| 从稀土中分离 $^{144}\text{Ce}$                                                         | 溶剂萃取法                              | $\text{D}_2\text{EHPA}$                                        |                               | 利用不同反萃条件进行分离                                          |
| 从稀土中分离 $^{147}\text{Pm}$                                                         | 沉淀法<br>溶剂萃取法<br><br>溶剂萃取法<br>离子交换法 | 过醋酸盐<br>$\text{TBP}$<br><br>$\text{D}_2\text{EHPA}$<br>阳离子交换树脂 | 工厂规模验证<br>实验室规模验证<br>同上<br>同上 | 在 pH 4 时沉淀<br>用 100% $\text{TBP}$ 萃取<br><br>用阻滞离子、排代法 |

表 5 从高放废液中分离  $^{137}\text{Cs}$  的方法

| 废水种类 | 回收方法  | 规 模     | 试 剂            | 备 注                                                          |
|------|-------|---------|----------------|--------------------------------------------------------------|
| 碱性废液 | 离子交换  | 工厂生产    | 沸石             | 用 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 或 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 淋洗 |
| 碱性废液 | 沉 淀 法 | 工厂规模验证  | 亚铁氰化镍          | 用银置换                                                         |
| 碱性废液 | 溶剂萃取  | 实验室规模验证 | $\text{BAMBP}$ | 用稀硝酸反萃                                                       |
| 碱性废液 | 溶剂萃取  | 实验室规模验证 | 六硝基二苯胺         | 用稀硝酸反萃                                                       |
| 酸性废液 | 沉 淀 法 | 工厂生产    | 硫酸铝            | 分步结晶                                                         |
| 酸性废液 | 沉 淀 法 | 工厂规模验证  | 磷钨酸盐           | 用氢氧化钠置换                                                      |

的主要用途分别介绍一下。

### 1. 作特殊能源

将放射性核素的辐射能通过热电转换变成电能的装置叫做核电池。用核电池作能源具有使用寿命长、安全可靠、结构紧凑、长期供电无需维修、基本不受外界条件影响等优点。半衰期从 100 天到 100 年范围内的放射性核素做热源材料是最适宜的，在裂变产物中首先被考虑的是 $^{90}\text{Sr}$ 。尤其是在海洋和无人气象站领域应用的核电池，一般认为 $^{90}\text{Sr}$ 是最可靠的能源。核电池还可用作宇宙飞船、人造卫星、核潜艇、海上灯塔、海面浮标、海下声纳信标、海底电缆中继器、南北极地区和边远地区无人气象站等的能源。

国外应用得最普遍的是 $^{90}\text{Sr}$ 核电池。至 1980 年，仅美国海军对 $^{90}\text{Sr}$ 的需要量即达 1200 万居里。自 1961 年美国在北极建立了第一个用 $^{90}\text{Sr}$ 做核电池的无人自动气象站开始，陆续研制成功的 $^{90}\text{Sr}$ 核电池均分别用于气象及海洋方面，而最大的用户就是海军(见表 6)。据估计，美国海军对 $^{90}\text{Sr}$ 核电池的需要量到 1975 年为 71 个，1990 年为 1700 个。此外，世界气象组织等机构考虑建立一个由几百个气象浮标组成的世界性的气象浮标系统，并建立几百个无线电和电视微波转播站。到那时，用 $^{90}\text{Sr}$ 作热源的核电池的需要量将远远超过目前的估计。

苏联于 1963 年开始在无人自动气象站使用以 $^{144}\text{Ce}$ 做热源的核电池“Beta-1”，1963—1967 年研制成功 $^{90}\text{Sr}$ 热源装置。1968 年又研制成功用 $^{137}\text{Cs}$ 做热源材料的核电池。英国和法国主要是用 $^{90}\text{Sr}$ 做核电池，其研制和使用情况见表 7 及表 8。

表 6 美国研制的主要裂变产物核电池

| 名 称              | 装置日期 | 燃料                | 电功率,瓦 | 使用 者           | 用 途      | 使用情况                   |
|------------------|------|-------------------|-------|----------------|----------|------------------------|
| SNAP-1           |      | $^{144}\text{Ce}$ | 500   | 空军             | 卫星       |                        |
| SNAP-1A          |      | $^{144}\text{Ce}$ | 125   | 空军             | 卫星       |                        |
| 哨兵               | 1961 | $^{90}\text{Sr}$  | 5     | 气象局            | 北极气象局    | 运行 3 年无变化              |
| SNAP-7 A         | 1962 | $^{90}\text{Sr}$  | 10    |                | 航海浮标     | 1963 年功率下降, 重新安装       |
| SNAP-7 B         | 1964 | $^{90}\text{Sr}$  | 60    |                | 灯塔       |                        |
| SNAP-7 C         | 1962 | $^{90}\text{Sr}$  | 10    | 海军             | 南极气象站    | 运行 6 年半后功率下降           |
| SNAP-7D          | 1964 | $^{90}\text{Sr}$  | 60    | 海军             | 流动气象站    | 运行 7 年后功率下降为 43 瓦      |
| SNAP-7E          | 1964 | $^{90}\text{Sr}$  | 6.5   | 海军             | 深海声纳信号   | 1968 年失败               |
| SNAP-7F          | 1965 | $^{90}\text{Sr}$  | 60    | 菲利浦石油公司和原子能委员会 | 浮标警报和控制站 | 防护失败、热元件毁坏             |
| SNAP-21          | 1969 | $^{90}\text{Sr}$  | 10    | 海军             | 各种航海应用   | 进行了海面下 0.6 英寸—50 英尺的试验 |
| SNAP-23          | 1969 | $^{90}\text{Sr}$  | 60    | 海军             | 各种陆地应用   |                        |
| LCG-25 A         | 1966 | $^{90}\text{Sr}$  | 25    | 海军             | 海洋学仪表    |                        |
| MW-3000A         | 1967 | $^{90}\text{Sr}$  | 2.5   | 海军             | 深海       |                        |
| LCG-25 B         | 1967 | $^{90}\text{Sr}$  | 25    | 海军             | 海洋工程计划   |                        |
| URIPS (PI-1002)  | 1966 | $^{90}\text{Sr}$  | 1     | 海军             | 海洋工程计划   |                        |
| URIPS (PI-1001A) | 1967 | $^{90}\text{Sr}$  | 1     | 海军             | 海洋工程计划   |                        |

续表

| 名 称       | 装置日期 | 燃料                | 电功率,瓦          | 使用 者   | 用 途             | 使用情况    |
|-----------|------|-------------------|----------------|--------|-----------------|---------|
| 哨兵 25 D   | 1969 | $^{90}\text{Sr}$  | 25             | 海军     | 陆地和海下1000英尺用的浮标 |         |
| 哨兵 25 E   | 1969 | $^{90}\text{Sr}$  | 25             | 海军     | 海洋学材料站          |         |
| LCG-25C1  | 1968 | $^{90}\text{Sr}$  | 25             | 海军     | 询问记录和测量系统       |         |
|           | 1962 | $^{137}\text{Cs}$ | 500            | 原子能委员会 | 深海验证装置          | 初步试验后停止 |
|           | 1963 | 混合裂片源             |                | 原子能委员会 | 深海验证装置          | 热试验后停止  |
| Iromite A | 1968 | $^{147}\text{Pm}$ | 0.02           |        | 热离子验证装置         | 在试验中    |
| Douglas   | 1968 | $^{147}\text{Pm}$ | 0.0005—0.00025 |        | 心脏起搏器           | 在试验中    |

表 7 英国研制  $^{90}\text{Sr}$  核电池的情况

| 名称<br>性能 | RIPPLE II        | RIPPLE IV        | RIPPLE V、VI      | RIPPLE VII—XII   |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 用 途      | 陆地使用的验证          | 海底电缆转送器          | 海洋航海灯            | 各种地面应用           |
| 燃料形式     | $\text{SrTiO}_3$ | $\text{SrTiO}_3$ | $\text{SrTiO}_3$ | $\text{SrTiO}_3$ |
| 载量, 居里   | 700              | 4600             | —                | —                |
| 初始电功率,瓦  | 0.078            | 0.75             | 1.0              | 5—100            |
| 寿命, 年    | 10               | 5                | 5                | —                |
| 情 况      | 1965年3月后连续运行     | 等待实地实验           | 等待实地实验           | 设计和制造阶段          |

表 8 法国研制  $^{90}\text{Sr}$  核电池的情况

| 名称<br>性能 | SPIREE           | 无                | MARGU-<br>RITE   | GETER-1          |
|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 用途       | 原型(空间)           | 验证(地面)           | 灯塔(海中)           | 验证(地面)           |
| 燃料形式     | $\text{SrTiO}_3$ | $\text{SrTiO}_3$ | $\text{SrTiO}_3$ | $\text{SrTiO}_3$ |
| 载量, 居里   | —                | 15000            | 800              | 900              |
| 电功率, 瓦   | 10(结束时)          | 3(开始时)           | 0.09(开始时)        | 0.25(开始时)        |
| 寿命, 年    | 5                | —                | —                | 5                |
| 情况       | 发生器试验<br>(1968)  | —                | 电加热试验            | 设计               |

这种特殊能源还可以使用在医学上作心脏起搏器的能源。当病人的心脏正常传导系统阻塞时, 起搏器能以 60—80 次/分的恒定速率给心脏一个有规律的电刺激, 促使心脏产生正常脉搏, 将起搏器植入人体的胸腔或腹腔内, 用导管与心脏相连。起搏器的示意图见图 1。用核电池作心脏起搏

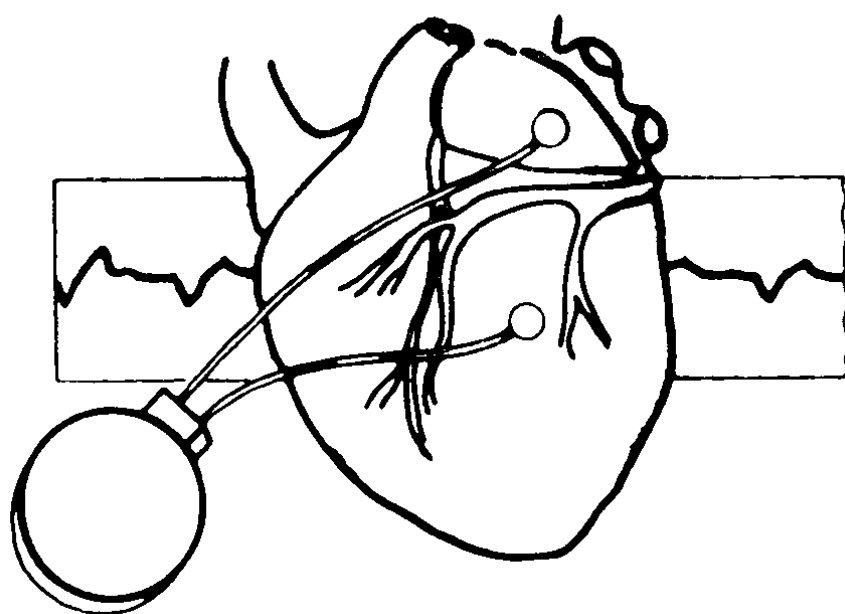


图 1 心脏起搏器示意图

器的能源，其最大优点是比用化学电池能源的使用寿命长。目前所用的化学电池能源的使用寿命大约在两年左右；用具有软  $\beta$  射线的  $^{147}\text{Pm}$  核电池做能源，使用寿命可达 5—8 年；如用  $^{238}\text{Pu}$  时则使用寿命可达十年以上。世界上不少国家都有研究心脏起搏器的计划。用裂变产物  $^{147}\text{Pm}$  做能源时，由于它的衰变子体在化学性质上与母体相似，因此在使用期间可保持几乎同样的化学性质，由于这个优点，目前美国、澳大利亚等国均在研制  $^{147}\text{Pm}$  作能源的心脏起搏器。目前植入体内的主要是  $^{238}\text{Pu}$  心脏起搏器。心脏起搏器外形构造见图 2。

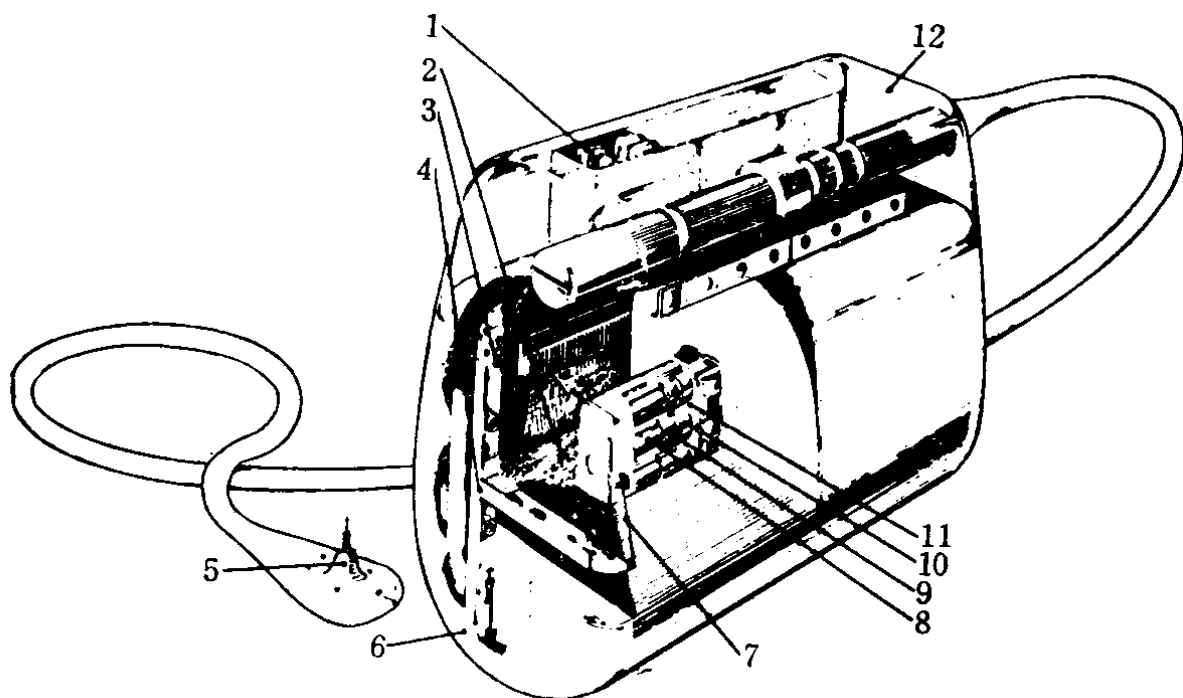


图 2 放射性同位素作能源的心脏起搏器

- 1——电子学线路部分；2——热电堆；3——弹簧夹；4——包壳支架；5——心脏导管；6——外壳；7——包壳支架导线；8——燃料；9——第一层包壳；10——第二层包壳；11——第三层包壳；12——环氧树脂包壳。

此外，正在研究利用裂变同位素的衰变热，通过热-动力转换系统变成机械能的机械泵。将这种机械泵植入人体代替心脏，可维持病人正常的血液循环，这种泵称为血泵或血

液循环维持装置。图 3 为同位素的衰变热-动力转换系统示

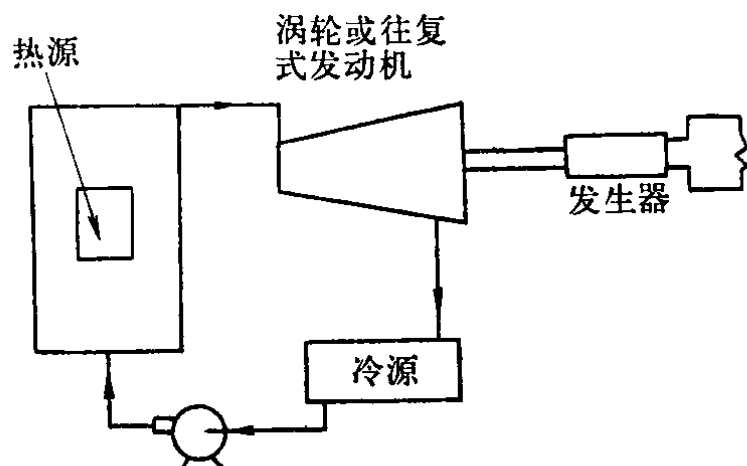


图 3 热-动力转换系统示意图

意图。人造心脏植入人体的情况见图 4。

用放射性同位素作能源的人工心脏与电动装置相比，其优点是重量轻、体积小、安装在病人体内不影响病人的日常活动。现有的电动装置都严重的限制了病人的活动。美国原子能委员会曾与三个科研机关订了合同，并拨款二百万美元从事这方面的研究工作。美国国家心肺协会从 1967 年起就针对有关放射性同位素的纯度、能源的几何形状、未转成机械能的那部分衰变

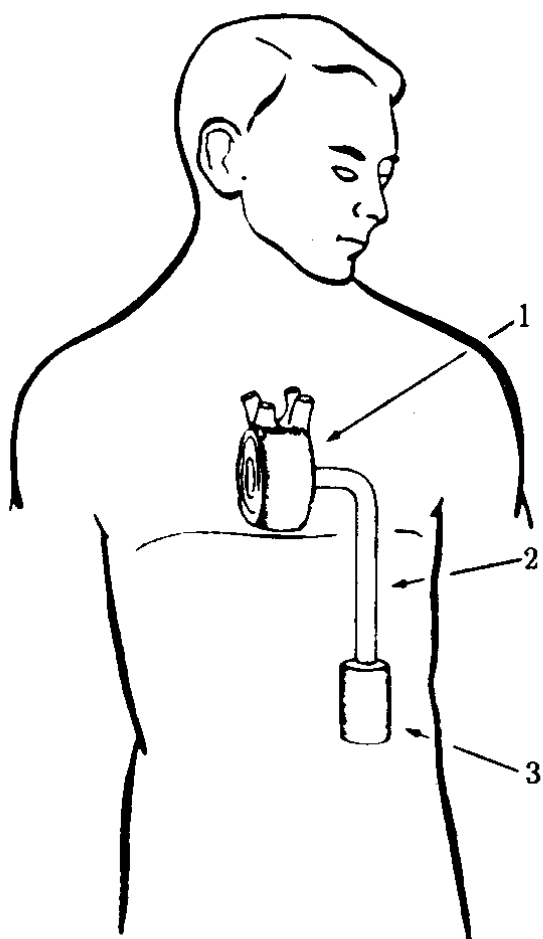


图 4 人造心脏示意图  
1——血泵；2——动力传送导管；  
3——能源。

热、辐照剂量、重量、源包装材料等因素的影响进行了一系列的研究，他们认为用  $^{238}\text{Pu}$  和  $^{147}\text{Pm}$  做能源的人工心脏植入人体是完全有可能实现的。

## 2. 作 辐 射 源

放射性同位素辐射源已广泛应用在工业、农业、医疗和科学研究各部门。以前主要是用堆照同位素  $^{60}\text{Co}$  作  $\gamma$  辐射源，随着核工业的发展，裂变产物日益增多，用裂片同位素  $^{137}\text{Cs}$  作的辐射源已开始与  $^{60}\text{Co}$  相竞争。与  $^{60}\text{Co}$  相比， $^{137}\text{Cs}$  的  $\gamma$  能量低些，但  $^{137}\text{Cs}$  有价格便宜、防护要求较低及半衰期长的优点。 $^{137}\text{Cs}$  的半衰期是  $^{60}\text{Co}$  半衰期的五倍多。在许多方面用  $^{137}\text{Cs}$  辐射源代替  $^{60}\text{Co}$  辐射源是有可能的。

(1) 在农业上：可利用  $^{137}\text{Cs}$  辐射源辐照农作物的种子，改良农作物的品种、提高农作物抵抗病虫害的能力、并促进种子的发芽率、提高单位面积产量等。目前许多国家都在从事这方面的研究工作。苏联在 1966 年制成了一种 1 居里的  $^{137}\text{Cs}$  小型辐照器(见图 5)，每次辐照 1 公斤种子。在播种前对种子进行小剂量照射，促进种子发芽，全部装置(包括防护外壳)重 350 公斤，移动方便，适用于农村。

(2) 食物辐射保存：各种食物经一定剂量的辐照后，能使食物防腐、灭菌、延长保存期、抑制发芽等。辐射保存较普通的冷冻、干燥和制成罐头等方法有明显的优点，它能使水果、蔬菜、鱼肉等保鲜，不影响食物的外形和质量，又延长了贮存期限。例如，美国制成了 17 万居里的  $^{137}\text{Cs}$  移动式辐照机组，重 18 吨，从 1967 年开始照射各地的粮食和其他产品。据国际原子能机构报道，加拿大、美国、法国、西德、苏联等国家均先后开展了利用辐照抑制马铃薯生芽和以辐照

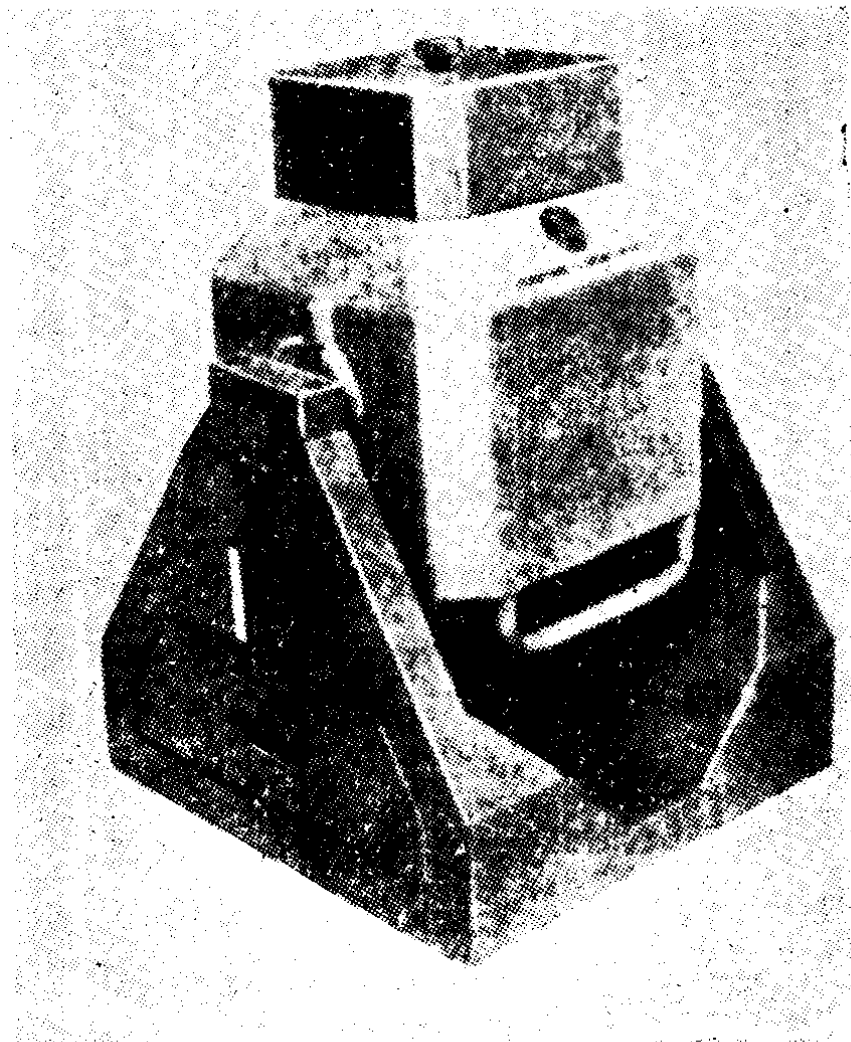


图 5  $^{187}\text{Cs}$  小型辐照器

延长马铃薯贮存时间等工作。

(3) 辐射消毒：利用放射性同位素的高能电离辐射进行消毒。一般的消毒方法均采用高温，辐射消毒不需要加热，因此也称为“冷消毒”。它特别适用于某些不耐热的药品和器料。被消毒物品及其包装可一起进行消毒，包装材料的选择范围较宽，并可使消毒过程自动化，节约大量人力物力。例如，法国于 1966 年在一辆载重 35 吨的汽车上安装了一个 40