

可燃放射性废物的焚烧

译文集

原子能出版社



可燃放射性废物的焚烧

(译文集)

《可燃放射性废物焚烧》翻译组 译

原子能出版社

可燃放射性废物的焚烧

(译文集)

《可燃放射性废物焚烧》翻译组 译

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

重庆印制一厂印刷

(重庆市枇杷山后街)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ · 印张 13 · 字数 418 千字

1984年3月第一版·1984年3月第一次印刷

印数 1—2000 · 统一书号: 15175·443

定价: 1.95元

内 容 简 介

本文集的内容包括：①用明火焚烧处理可燃放射性废物；②用流化床焚烧可燃放射性废物；③用酸浸煮法处理可燃放射性废物；④用熔盐燃烧法处理可燃放射性废物。本文集论述了上述各方法的工艺流程、设备、防火、防爆、核安全及燃烧尾气的处理。

目 录

处理放射性废物的焚烧装置·····	(1)
马库尔 α 放射性废物焚烧炉的工艺、技术和 一般特性的研究·····	(168)
用于处理废石墨和废油的低成本焚烧装置·····	(176)
超铀污染固体废物可控空气焚烧炉·····	(185)
放射性废物的流化床焚烧·····	(198)
美国能源研究与发展署的超铀废物流化床焚烧系统·····	(215)
焚烧放射性废物及为无污染贮存的目的 处理可燃废物的方法和设备·····	(235)
焚烧作业的防火与防爆·····	(252)
可燃废物的酸浸煮法·····	(262)
酸浸煮法处理可燃废物·····	(317)
应用原子国际的熔盐燃烧法处理超铀固体废物 I ·····	(330)
应用原子国际的熔盐燃烧法处理超铀固体废物 II ·····	(373)

处理放射性废物的焚烧装置

珀金斯 (Batty L. Perkins)

本文介绍了美国和其它国家的焚烧装置，其中包括已停止运行的焚烧装置以及正在建造中的焚烧装置。文中着重叙述了每一种装置的特性和运行中的问题。还就放射性组成和数量以及放射性污染类型讨论了放射性废物的焚烧问题。

一、引言

这篇报告的目的是：提供一份在1975年6月以前用焚烧装置处理放射性核素污染的固体废物得到的资料。由于时间和经费的限制，也由于获取资料存在的困难，此文讨论的对象不能包括所有的焚烧装置，例如，苏联的装置就未能提及。

这些资料是从通信询问、电话询问、访问以及公开发表的文章中获得的。除了用电话询问获得的数据外，本报告中的其它资料未加核实。不过，出版的清样送给了各装置的工作人员进行了校核。

一般情况下，没有给出体积减小和费用的详细数字。体积减小的确切数据必须包括下列项目：污染部件的更换周期、产生的放射性液体的处置、污染过滤器的处置、操作者的废弃工作服的处置以及灰的最终固化。在这些焚烧装置运行中，所获得的上述方面的资料不多。

没有进行费用的讨论，这是因为通货迅速膨胀而使这种讨论变得毫无意义。商用焚烧装置和洗涤器等的现行价格可由卖主那里获得。此外，如果没有与桶式贮存、回收、处理及最终贮存等相对比价，那末焚烧过程的成本分析就意义不大了。洛基费拉茨的经验指出，焚烧过程的费用在放射性核素回收费用中不是主要

的部分。

二、国外焚烧装置

1. 英 国

1) 哈威尔

在哈威尔运行初期,明显地看到放射性固体废物不经处理就地贮存是不行的。由于废物中大约60% (体积) 是可燃性的,所以希望通过焚烧来减少容积。

(1) 试验性焚烧装置 在1952年,建造了一座小型试验性焚烧装置 (图1),用于探索焚烧中可能出现的难题。尽管操作上存在一些困难,该装置还是运行了三年。

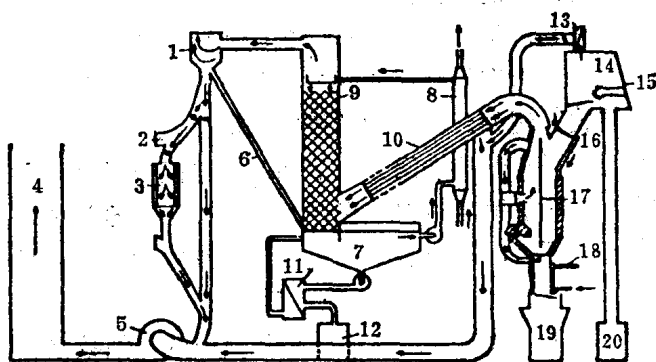


图1 哈威尔试验性焚烧装置

1—旋风分离器; 2—去备用过滤器支路; 3—玻璃棉; 4—18.3米烟囱; 5—风机; 6—排水管; 7—洗涤液槽; 8—洗涤液冷却器; 9—洗涤塔; 10—烟道气冷却器; 11—洗涤液过滤器; 12—过滤器反洗容器; 13—纸过滤器; 14—分选和供料箱; 15—有机玻璃窗; 16—助燃空气进口; 17—不锈钢栅格; 18—水冷却的灰斗; 19—灰容器; 20—不可燃物容器。

(2) 第二座焚烧装置 1954年建成了一座较大的焚烧装置 (图2), 它的燃烧室是用无衬里的不锈钢制成的。为避免由钢材本身带来的问题, 势必在较低的温度下运行, 这样, 完全的燃烧常常是不可能的。此外, 燃烧的酸性产物, 特别是来自聚氯乙烯

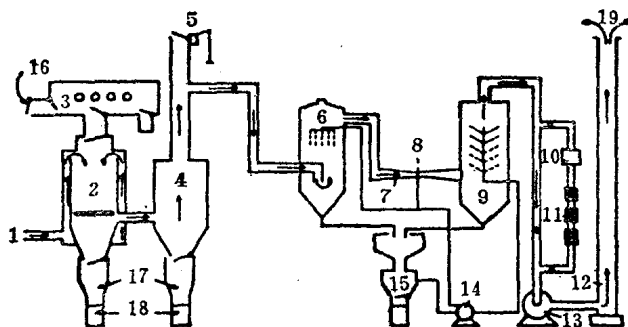


图 2 哈威尔第二座焚烧装置

- 1—空气入口；2—焚烧炉；3—分选柜；4—飞灰沉降器；5—安全挡板阀；
6—绝热冷却器；7—文丘里洗涤器；8—喉管式水喷嘴；9—旋风式洗涤器；
10—气体加热器；11—过滤器；12—排灰烟囱；13—风机；14—循环泵；15—
一过滤器；16—废物进口；17—灰斗；18—贮存箱；19—气体排至大气。

和类似物质中的氯化物迅速地腐蚀了金属部件。在运行的头几年里，故障频繁。因此，维修费用很高。后几年，由于采取了下列措施，故障次数减少了：①对于更换部件采用其它材料；②实行适宜的pH控制；③洗涤液进行很好的过滤；④改进操作技术。在这第二座装置中，约95%的放射性滞留在炉灰中，约45%的放射性在洗涤系统中，约0.5%在过滤器中。

(3) 第三座焚烧装置 五十年代后期，需要焚烧的固体废物量增加，在1959年建造了另一座焚烧装置(图3)，设计处理能力为180公斤/时。

这座装置的燃烧室内衬有耐火砖，从而允许在高温下操作。安装了干式过滤系统，它由编织的玻璃纤维袋及后面的高效过滤器组

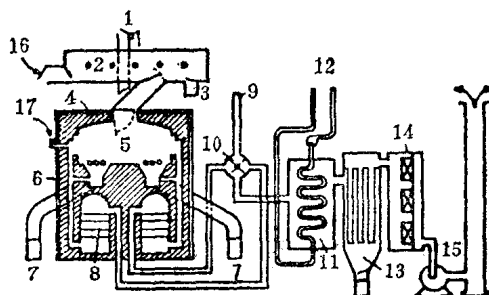


图 3 哈威尔第三座焚烧装置

- 1—压力安全阀；2—分选柜；3—不可燃物出口；4—耐火衬里；5—炉子；6—耐火保护层；
7—灰箱；8—蓄热器；9—空气入口；10—换向阀；11—热交换器；12—废热；13—袋式粗过滤器；14—高效过滤器；15—风机和烟囱；
16—废物入口；17—城市煤气。

成。在开头的六个月里，有三次捕集在袋式初滤器上的物质着了火。因此，用第二座焚烧装置的湿法系统代替了干法排气系统。

采用湿法排气系统的第三座焚烧装置，操作能力大约为 100 公斤/时。洗涤液的 pH 值用添加 NaOH 来控制。洗涤液用砂床过滤以除去夹带的物质。

(4) 第四座焚烧装置 在 1962 年，建成了一座小型的试验性焚烧装置，以便进一步研究放射性固体废物焚烧过程和排气净化问题(图 4)。这座试验性装置的设计准则是要简便和能维修。

该焚烧装置由砖衬里的第一和第二燃烧室组成。第二燃烧室有耐火砖隔板。在第一燃烧室内可以从燃烧区上下方鼓入助燃空气。

冷却器使气体冷却到低于 200℃。由于第三座焚烧装置在进行净化试验时出现了困难，故该冷却器设计得易于清洗。干式排气净化系统包括旋风分离器和静电沉降器。静电沉降器内装有缓慢转动的收集板，板上带有固定刮刀叶片。同时也装有高效过滤器和湿法洗涤系统，作为备用或作为干法系统后的附加措施。该装置上装有压力计、温度计、CO/CO₂ 分析仪表及粒子、气体的监测和取样设备。按计划该试验性焚烧装置的主要目的是：①比较从火区上方和火区下方引入助燃空气时燃烧状况的差异；②在非放“冷”运行中，确定最佳的操作条件；③在放射性运行中，确定放射性核素的滞留效率；④比较干法排气净化系统和湿法排

气净化系统的净化效率；⑤根据上述第④项比较结果，在干法和湿法净化系统中选用最有希望者；⑥以常规方式焚烧低放废物，并在此期间，研究结构材料寿命，考查装置总的辐射安全情况。

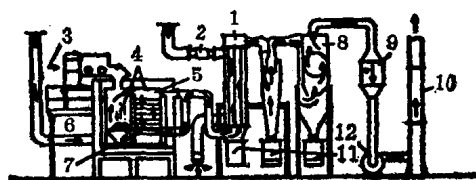


图 4 哈佛第四座焚烧装置

- 1—热交换器；2—冷空气鼓风机；3—废物进口；4—油燃烧器；5—第二燃烧室；6—炉子；7—灰斗耙；8—静电沉降器；9—高效过滤器（如果需要的话）；10—烟囱；11—灰斗；12—主风机。

若该系统第一燃烧室的温度低于800℃、气体中将发现大量烟灰。当进料率为27公斤/时、助燃空气为170米³/时时，重量减少系数为13。

只是在1970年，当人力充裕时，上述计划才得以进行。由于第三座焚烧装置当时正顺利地运行着，所以对该装置未着重进行研究。

资 料 来 源

J. Pradel, P. J. Parsons, and E. Malasek, "The Volume Reduction of Low-Activity Solid Wastes," IAEA Technical Report Series No. 106(1970), pp. 29-32

R. H. Burns, G. W. Clare, A. J. Smith, and D. A. Dunkason, "The Treatment of Low-Level Solid Wastes at the Atomic Energy Research Establishment of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Vienna, December 6-10, 1965

(IAEA, Vienna, 1966), pp. 646—653.

R. H. Burns and J. H. Clarke, "Harwell Experiences in Waste Management," in Proc. Symp. Developments in Management of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Aix-en-Provence, September 7-11, 1970(IAEA, Vienna, 1970), pp. 424-426.

Visit to Harwell by LaMar Johnson, LASL, 1974.

B. Owen, Rockwell International, Rocky Flats, personal communication, 1975.

R. H. Burns, "The Disposal of Radioactive Solid Wastes," in *Radioactive Wastes, Their Treatment and Disposal*, J. C. Collins, Ed.(John Wiley and Sons, New York, 1960), pp. 190-196.

2) 温茨凯尔试验性焚烧装置

1973年1月，英国在温茨凯尔的一座小型试验性焚烧装置中(图5)，开始焚烧含放射性物料的废物。到1974年5月，当焚烧装置因为检修而停车时，共运行了217天，焚烧了含钚15.5公斤的

废物13400公斤，焚烧后留下600公斤灰。每次运行期间，加料速率大约为5公斤/时。该装置现仍在温茨凯尔使用着。

(1) 废物预处理 容量为250升的装有钡污染废物的桶，用推车送入系统。打开桶，从桶中提出废物袋（用钳子和增强长手套）并转移至废物接收箱。打开口袋筛选，以保证除去不可燃物，切碎大废物块，然后将废物装到直径为12.7厘米、长为22.8厘米的纸板箱中，每一个纸板箱重约800到1000克。按重量计，废物中约含40%的聚氯乙烯、30%的橡胶、20%的聚乙烯、10%的纤维质等。

纸板箱转动着通过计数器以进行钡的监测，计数器监测385 keV（千电子伏特）的 γ 射线。（当系统装入2公斤钡后，焚烧装置即停车清理和检查。

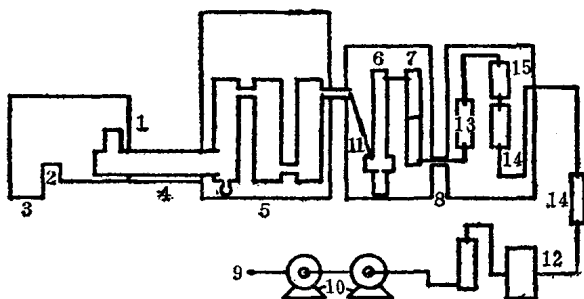


图5 温茨凯尔试验性焚烧装置

1—纸箱加料；2—分选与监测；3—桶入口；4—第一燃烧室；5—第二燃烧室；6—喷淋柱；7—冷却器；8—气体冷却和净化；9—至烟囱；10—风机；11—冷却器；12—高效过滤器；13—粗过滤器；14—加热器；15—除雾器。

(2) 装料 纸箱通过一个双重门的斜槽装入焚烧炉的冷端，并有一根推杆将纸箱推入燃烧区。加料管道用螺钉固定在炉子筒体上，并用水冷却，以便降低加料手套箱的温度。加料时，为避免大量空气进入炉子和倒流，在任何时候只能打开斜槽的一个门。

(3) 焚烧炉设计 第一燃烧室是一座直径为30.48厘米、长

度为167.4厘米的卧式炉，其材料是厚度为0.95厘米的因科镍尔合金-600(Inconel-600)。第一燃烧的后端是双层壁结构，它伸入到第二燃烧室的砖砌墙体内部。在双层壁间形成了一个环形通道，第二燃烧室的助燃空气通过此环形通道进入。焚烧炉内有一长91.4厘米的推杆加料器，推杆的前端是月牙形的。推杆不但可将废物装入炉子的加热区，同时也可防止灰和正在燃烧的废物堵塞炉内的气流通路。

在第一燃烧室，采用外热式电热扩散板加热，使炉温升到900℃。加热板上装有6根18瓩的镍丝元件（两排，每排三根）。第一燃烧室运行时，加入的空气量是按化学当量计算的10—20%计，因此，大量废气是挥发产生的，而不是氧化的产物。用热电偶监测炉温，如果温度超过预定值，炉子自动停车。在第一燃烧室中对压力也进行测量，并限制它不得超过—50帕（—0.2英寸水柱），若超压，则切断空气供给。如果压力超过—250帕（—1英寸水柱）时，则切断第一燃烧室的另一气源——氮气的供给。

出第一燃烧室的蒸气和碳粒子进入由三个单独的立式炉串联在一起组成的第二燃烧室。这些燃烧室用耐火砖砌成，内衬特种上釉混凝土。其尺寸为30.48×45.72×167.64厘米，这个尺寸使气体通过此燃烧室的停留时间为15秒。

这些焚烧炉用 Crusilite 型碳化硅电热元件加热。气体温度控制在900—1000℃之间。往这些焚烧炉内供给过量的空气，以促进完全的氧化。当任何一个炉子的正压偏差达13800—34500帕时（2—5磅/英寸²），气体通过防爆膜排入扩大室，此扩大室能够安全地容纳过量的气体。作为一项安全措施，炉子的所有外包物均处于氮气保护之下。

（4）废气净化 整个气体冷却和净化系统封装在两个手套箱内（见图5）。两个手套箱由三段聚氯乙烯制件焊接而成，并进行高标准泄漏率试验。

出第二燃烧室的热气体经一根不锈钢管进入壁厚为1.27厘米的气-气热交换器。补进炉子的空气，在进入炉子前，经热交换

器预热，与此同时，热烟道气被冷却到约 700°C 。然后，气流通过一个立方体形的石墨罐进入用两段石墨制成的填料柱。柱内填料为石墨环。在柱顶部，用水喷淋冷却并充分饱和气体。在此过程中，除去了热废气中90%的HCl和一些颗粒物。气体出洗涤器时温度约为 100°C 。

然后，气体通入两个玻璃的水冷冷凝器，在此，大部分水蒸气冷凝，气体被进一步冷却。水同样从冷凝器顶部喷入，以进一步从气体中除去HCl。

冷却和干燥后的废气通入另一个手套箱系统，在这里，气体通过一个聚乙烯毡粗过滤器和一个聚乙毡除雾过滤器。此手套箱系统还包括液体过滤、监测、处置和再循环系统，目的是为了洗涤来自喷淋洗涤冷却器和除雾过滤器的液体。该液体处理系统是专门由抗HCl腐蚀的材料制成的。

从气体中除去夹带的雾沫以后，气体再预热到 60°C ，然后通过高效过滤器，经风机排入大气。风机系统中有两台聚丙烯风机，风速为0.236米/秒，可以供给系统5220帕（21英寸）的真空度。

（5）排灰 第一燃烧室底部的残渣逐渐移出第一燃烧室，散落到第二燃烧室的第一个炉子的底面上。在这里，碳渣被烧尽，同时留下灰。它的底面也同时收集气流中被夹带出的任何微粒残渣烧成的灰。虽然灰渣的含碳量可高达22%，但一般在2—4%，所以说碳未完全燃烧。

一根直径为15.24厘米的因科镍合金管把灰坑和后燃烧室表面的法兰连接起来。排灰时，将一个钢容器接到法兰出口处，并用人工将灰耙出管道。当灰冷却后，将灰装入铝桶，以便监测和贮存。因为灰中只允许有2公斤的钷，故至少每四天必须排灰一次。重新加料前，装置必须清理合格。

（6）废液处理 液流先通过一个过滤器，然后通入带屏蔽的聚丙烯脂小室，在此用17keV的监测器面向小室对液流进行监测。监测后的液流排至放射性下水。排出液体中含有约0.5M的

HCl, 液流的排放量大约为70—90升/时。

(7) 钷的平衡 装入焚烧炉内的15.5公斤钷物料中, 大部分留在灰中。排水中含有65克钷, 排气中总含量 <20 微克。

每隔几天就需要更换粗过滤器。在大部分除雾过滤器和所有的高效过滤器(大约每隔六周更换一次)上, 钷的放射性量是相当低的(<50 计数/秒), 故允许沟埋处置。未经稀释排至大气的气流中放射性浓度很少超过 $4\text{ dpm}/\text{米}^3$ (dpm——每分钟的衰变数)。

在整个系统中, 都发现有一种很细的褐色的灰, 但是文献中没有报道它的化学组分。

(8) 问题 在温茨凯尔的焚烧装置运行中, 遇到下列五个主要的问题:

① 当焚烧炉中加入橡胶手套时, 产生了大量的烟灰, 这个问题已得到一定程度的解决, 办法是增加第一燃烧室的温度, 使其达到 1000°C , 并供给第二燃烧室足够的氧以及比较严格的控制加料成份。

② 碳化硅加热元件的寿命有限, 需要定期修理。

③ 废气除雾不完全。与常规运行相比, 高效过滤器更换频繁了一些。

④ 气体净化系统中手套箱的腐蚀严重, 因此一切可以不使用金属部件的地方, 应尽可能不用金属部件。

⑤ 在第一燃烧室中, 管道的腐蚀是一个问题, 这种腐蚀估计是由于形成一种镍/镍硫化物的结果, 它是一种低熔点的共晶体, 而橡胶手套可能是产生硫的来源。目前, 正使用一种可更换式炉床系统, 并开展着试验工作, 研究减少管道腐蚀的方法和材料。

资 料 来 源

G. Mathews, "The Windscale Pilot Plant for the Incineration of Active Wastes," October 1974.

H. A. Taylor, R. H. Allardice, J. G. Boyle, L. P. O'Conner, and M. J. S. Smith, "UK Experience in the Management of Pu Contaminated Solid Wastes," in Proc. Seminar Management of Plutonium-Contaminated Solid Wastes, Marcoule Center, France, Oct. 14-16, 1974 (ERDA report CONF-741026).

J. G. Boyle, and H. A. Taylor, "Plutonium Waste Incinerator Pilot Plant," "UK-USA Plutonium Waste Management Information Exchange Meeting, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, NM, Aug. 30-31, 1973.

3) 英国的其它装置

在布拉德威尔 (Bradwell) 电站、伯克利 (Berkeley) 核实验室和亨特斯顿 "A" (Hunterston "A") 正使用着焚烧装置来减少可燃性低放废物的体积和重量。来自中央电力局和苏格兰南方电力局核电站运行中产生的废物不在产地贮存。废物通常包括空气过滤器、防护物品、保护地面的覆面、拖布、手帕、纸和毛巾。废物数量和废物控制方面的数据见表1。

表 1 三台英国放射性废物焚烧装置运行数据

	布拉德威尔	伯克利	亨特斯顿"A"
取数据的时间	1967年	1965.11—1966.12	1967年
燃烧废物重量	18160公斤	38644公斤	73.6米 ³ (燃烧体积)
生成灰的重量	454公斤	2186公斤	/
生成灰的体积 ⁽¹⁾ (大约)	2.04米 ³	9.74米 ³	3.4米 ³
废过滤器的体积	10.19米 ³	3.82米 ³	无
适用于燃烧废物的控制范围	<7.6毫仑/时仅是废物容器表面剂量	<15毫仑/时仅是废物容器表面剂量	<3毫居 ³⁵ S+<1毫居其它核素。每月运交的废物

(1) 灰密度为224公斤/米³。

布拉德威尔焚烧装置的排气用旋风分离器、高效过滤器净化。伯克利装置的处理过程由水洗涤、高效过滤器过滤组成。这两套装置都采用了第二燃烧室。焚烧后的灰堆积在焚烧场地。

为了维修和改进设备,布拉德威尔和伯克利焚烧装置在相当

长的时期内停止了运行。因此有大量的废物积压起来，已考虑让每一个电站在本地的小焚烧装置中焚烧一些放射性水平很低的可燃性废物，这样减少了大焚烧装置的积压。

资 料 来 源

I. Dougall and J. E. Newell, "Management of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes at the Nuclear Power Stations of the United Kingdom Central Electricity Generating Board," in Proc. Symp. Developments in Management of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Aix-en-Provence, Sept. 7-11, 1970(IAEA, Vienna, 1970), pp. 282-283.

I. Dougall, "The Management of Radioactive Wastes from Commercial Nuclear Power Stations in The United Kingdom," in Management of Radioactive Wastes at Nuclear Power Plants, IAEA Safety Series No. 28 (IAEA, Vienna, 1968), pp. 124-127.

2. 法 国

1) 卡德拉西 (Cadarache) 核研究中心

(1) 低放废物焚烧 ①废物预处理：目前在卡德拉西焚烧含有低放射性的可燃性废物几乎全部是纸张、木材、碎布、棉花和石墨。这些废物放置在现场的200升的金属桶内。桶装满后，收集并转运至处理区。在此处打开盖，捡出不可燃物，再将可燃物重新装入聚乙烯袋或纸袋中。

②装料：分选后的固体废物借助于进料联锁装置送入焚烧炉。液体废物通过一个喷嘴喷入焚烧炉。

③焚烧：废物在第一燃烧室(1000—1100℃)中挥发和氧化燃烧后，排气在与第一燃烧室温度相近的第二燃烧中进一步氧化燃烧。气体离开第二燃烧室后，便进入耐火砖扩大室，这时夹带的粒子进一步得以氧化燃烧，并与气体同时冷却。出扩大室的气体进入冷却室。所有这四个室都安放在一个外形为箱式的装置内。

④废气净化：出冷却室的气体进入废气净化系统，在该系统中，气体用空气稀释冷却至 $<200^{\circ}\text{C}$ ，然后通过装有拉西环的喷淋塔。喷淋水的pH值维持在7—8之间，冷却和洗涤后的气体重新从 45°C 加热至 80°C 后，经过一台玻璃棉预过滤器、一台高效过滤器、一台引风机和烟囱排入周围大气(图6)。

⑤特性：卡德拉西焚烧装置的生产能力大约是30公斤/时的固体废物和10公斤/时的液体废物。在通常情况下，每季度持续运行2周或3周的时间。

(2) 为焚烧铀污染废物进行的改进 “Rapsodie” 和 “Phoenix” 反应堆的燃料生产厂位于卡德拉西，因此最近几年卡德拉西含铀废物量增加了。这些铀污染废物中，大约80—90%是可燃性的。目前，正在进行一项研究，以确定如何改进炉子，使得现有的焚烧装置能够焚烧铀污染废物。该项研究包括焚烧工艺的改进，以便使来自燃料生产厂的所有非金属废物都能焚烧。还包括焚烧炉废气的简化处理以及为保证装灰和转运处的密封而作的改进。此外，塑料量要保持一个最小量，聚氯乙烯要尽可能地除去，因为在焚烧时由于氯的存在会引起许多问题。

资 料 来 源

A. Barbreau, J. Marcaillou, J. Mery, D. Pinto, and D. Rancon, “Evolution de la Gestion des Dechets de Basse Activite et d’Activites Intermediaire au Centre de Cadarache,” in Proc. Symp. Developments in Management of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes, Aix-en-Provence, Sept. 7-11 1970 (IAEA, Vienna, 1970), pp. 297—371.

J. Mery and J. Marcaillou, “Gestion des Dechets Solides Contamines par du Plutonium au Centre de Cadarache,” Proc. Seminar Management of Plutonium-Containing Solid Wastes, Marcoule Center, France, Oct. 14—16, 1974 (ERDA report CONF-741026), Paper 4.

J. Pradel, P. J. Parsons, and E. Malasek, “The Volume