

元件输送、切断浸取、离心萃取等
有关设备的国外资料调研报告

第二研究设计院

1974.7.10

一、元件运输:

随着军用核反应堆动力堆的大力发展,辐照燃料元件的产生量将急剧增加,据报导,美国1980年的核发电量可达150,000兆瓦,而至1985年可增加一倍.需运输的辐照燃料元件量从1970年每年50公吨,到1980年几乎每年达3000公吨,英国从1964年的300吨/年,增长到1971年的1400吨/年,法国从1960年以来运输的吨量已达数千吨.

虽然堆的吨量与年俱增,但后处理厂,从经济角度出发,其规模愈大,开工率愈高,则成本费愈低.因此就采取“多堆-化”的情况.反应堆吨量与后处理厂吨量的比值约为10:1 ~ 15:1;

这是辐照燃料元件要求运输的前提,因此元件运输问题也就越来越引起重视並有了较快的发展.

1) 运输方式:

几乎所有的运输方式都可用于辐照燃料元件的运输.元件运输方式的选择取决的因素有:工厂的地理位置,气候条件,本国工业基础,交通状况以及元件的运输量和燃耗深度,冷却时间等.无论采取什么方式,其考虑原则不外乎既经济又要安全可靠.

根据反应堆与后处理厂的距离不同,运输分厂区内和厂际之间(包括国际间)的运输两种情况.运输方式则分:公路,铁路,水路,空运和联运(混合)方式.

2. 运输工具

将热元件送至后处理厂是元件回收的很重要的一部分，特别是对于动力堆元件比生产堆元件要大些，重些，也更复杂些，例如为防护中子就要设置5~6吋厚的水防护层。

(4) 公路用车辆：

公路用车辆一般为牵引车和拖车组合形式。公路情况比较复杂，因此公路运输考虑因素也就较多，如牵引车的拖力，荷重，拖车的轮胎数，车辆尺寸，制动装置，出口，速度和道路等。

例如美国公路车辆多为法定重量卡车和超重卡车。法定重量卡车的车辆总重量限制为73,000磅（约33吨），而使用这种运输方式的出口重量限制为24吨。如果出口使用的是铅屏蔽，则出口的总重量限制为：出口的总重量为1根压水堆或两根沸水堆的燃料组件。如果采用铀作屏蔽，则出口的总重量可增加到2根压水堆和4根沸水堆组件。对一座大型堆来说，如果打堆后三个月开始运输，则用法定重量车运输时需50-75批次。而法定超重卡车总重量限制为90,000磅（约40吨），出口重量限制为58,000磅（26吨）。

另外还有一种大型超重卡车，车辆总重量限制为110,000磅（约50吨），出口重量可增至80,000磅（约36吨），上述两种超重卡车皆为铅屏蔽。

法国圣哥本公司为马库尔设计的公路和铁路两用拖车，一般由汽车牵引，必要时可将拖车导入铁路上由火车牵引。该牵引车重11吨，拖车重16吨，出口重20吨。

(2) 铁路用车辆:

机车可选用一段通用的,但车厢必须专门设计制造,用铁路运输可以在2~4周内用5~7批次处理完一大罐的装卸料。铁路运输的主要问题是倒运时间长,为了缩短倒运时间,美国将采用“接通定位”(On-location)发送队以避免交替延长时间,并且采用及时板间轻轨等措施。美国做过对列车装2~6个罐头的实验研究,指出,最佳罐数数目和最佳总运输费用大大取决于罐头迅速装货的能力,并且认为在4~5天内装3个罐头是可行的,从而使装货速度相应的总费用降低。

一般说来运输时大罐头比小罐头经济,超立卡车比一般卡车经济,而火车则更加经济。在统一标准的基础上,运输一吨油的小罐头装卸人工需200人时,超立卡车则只需80人时,火车运输则只需30人时。(人时—指人一十时)超立卡车将使运输次数减少二、三倍,而火车可减少五—十倍。

(3) 船舶:

普通民用船舶不适于运输燃料元件,各国都设计了专用船舶。

美国化学协会和海湾委员会核服务社(AGNS)在承运设备的概念设计与经济比较方面作了很多研究。其研究内容包括驳船—拖船,艀驳船—拖船以及专用自动推进摩托船设计等。普通驳船由于事故太频繁,考虑安全与可靠性,认为不适于用来运输辐照燃料。

3) 容口設計:

随着核动力工业的不断发展, 辐照燃料元件的形状、大小、比功率以及燃料更是种类繁多。就美国萨凡那河工厂而言, 已处理 3 125 种以上不同形式的燃料(大多数为试验性的), 运输容口的规格就有 40 多种。这不仅影响容口的非通用性, 而且也使运输容口的设计大大复杂化。

1) 容口类型:

国外常用的辐照燃料元件运输容口的类型一般有平壁圆筒容口(方型)和圆筒形容口。

目前国外通常的研究性容口重量范围从 10 吨—20 吨, 动力堆用燃料的容口重量从 20—30 吨。多燃料元件容口重量从 10—100 吨。容口的发展集中对结构材料的选择, 屏蔽试验, 热力学计算和有关包壳材料腐蚀, 冷却剂及辐照分解等问题。国外普遍应用的是钢护套, 内衬罐头的屏蔽容口。

(2) 散热:

对设有运输容口在正常和事故热取环境中都应计算确定它们的温度响应。特别应该确定正常情况下容口表面最高温度和燃料元件最高温度以及事故情况下屏蔽的温度分

佈知燃料元件最高温度。

正常的运行温度根据规定是 $-40 \sim +130^{\circ}\text{F}$ 。暴露在这种温度下，从装载空口里不会有放射性物质释放出来。所谓事故情况就是空口做设计承受 1475°F 的水灾0.5小时，这时从空口里释放出来的放射性物质不超过表A所给的限制。

表A.

除气溶胶被占有的冷却剂外，从空口里不会有放射性物质释放出来；冷却剂中的放射性物质含量不超过空口装载物总放射性的0.1%，或为不超过下列设计限值：

运输类别	这里
I	0.01
II	0.5
III和IV	10
挥发性气体	1000

(二) 热负荷

正常运行条件下空口表面温度所散给周围的热量有限。热负荷有两个：所装材料里同位素放射性衰变引起的衰变热负荷和太阳辐射空口表面所接受的太阳能热负荷。虽然这两个热负荷都随时间的变化，但所装材料同位素衰变热负荷的变

他一般是很小的。在要散去的总热负荷中表变热通常是佔主要部份。

(丙) 表变热负荷

从已经用过的燃料元件中产生的表变热是与燃料元件在堆内使用的时间(辐照时间)、元件内单位时间发生的裂变数和这堆前元件表变的时间(即冷却时间)有关。现代的轻水反应堆在设计燃料元件下经过120天的冷却,预期会放出4~10%的热。

(丁) 太阳热负荷

在地球大气层以上与太阳光成法线方向的他一正地球表面,断太阳辐射的强度是1420瓦特单位/小时·呎²或10,600瓦特单位/呎²·天,这个值的太阳光常数在12月份(或6月份)增大(或减小)3.5%。当太阳在天顶且天气晴朗时,地球表面上接受的太阳光辐射量会变化,但在工程上取太阳光常数值的70%就是够准确。

若已知表面可以计算出它的太阳光热负荷值,这些值之和就是总的太阳热负荷,一般的名词即表变热负荷上,以便与反应堆散发的热量。

2) 散热方法

反应堆的遭受火災的可能性是小的,但是其后果则造

成的1管壳制壳损失是大的。当壳口温度增加时，壳内钢更迅速地膨胀，而钢通常包裹它。所以，壳内钢壳破裂钢壳而流出。壳内压力会增加，特别是假如在制壳体冷却剂，这会造成壳破裂，并伴随冷却剂的丧失，因而使破裂处产物传播开来。

通常壳内具有热旁路热流传递即壳内表层的通道。但是这也造成热旁路壳内表层即壳内的一旁通道。因为，在火烧时，大量热量通过辐射进行传递，即设计壳内表层的冷却剂散热，而又不能接受热辐射能量。HAP0壳内的设计是采用了个围绕壳内的同心钢壳作缓冲层。正常情况下，壳内靠周围壳内流动，壳内通过壳内，最后在缓冲层顶部处来冷却冷却。在火烧时，估计热量不会通过壳内缓冲层，壳内缓冲层的外表将阻挡火烧的辐射热。

由于附加的火烧屏蔽会增加成本，所以壳内从30cm高落下来后，火烧屏蔽的原有作用也难以保证。即使用这种方法也是有限制。

第二种防护方法是设计内外两层屏蔽：内屏蔽壳内和外屏蔽壳内或湿的熟石膏。当火烧时，外层材料受到破坏，壳内的壳内从设计壳内壳内的孔中流出（在壳内情况下）

或者是水蒸汽从压力容器中排出（在显热的石膏情况下）。由于产生的空隙会造成与热缓冲层，阻挡火焰发生的连续不断的辐射能。

总之，散热方式通常有：a) 用水或其它液体以自然对流或强制对流的方法热量从燃料直接传给容器的内壁；b) 一次冷却剂与燃料不直接接触，它通过或强制循环的方式把热量从一次冷却剂传给外壁二次冷却剂；c) 放在腔穴内的燃料盒直接与腔壁接触。d) 腔与壳之间是合金管；e) 散热依靠熔焊或钎焊与壳传热；f) 散热依靠熔焊与壳；g) 燃料匣架随匣壁升高而膨胀，使之与壳内壁有良好的接触；h) 如采用强制冷却要需用成对的机械装置。

5) 燃料匣架的设计

燃料运输容器匣架（或吊篮）的作用如下：

- 1) 在运输和贮存中，保护和屏蔽燃料元件。
- 2) 促进衰变热的消散。
- 3) 控制剂量。

对衰变热的消散所是正常情况下的限制容器的主要因素之一，因而耐热材料的选择是一个重要的设计因素。

在运输和贮存时燃料的屏蔽和密封

燃料框架用梁分隔各个燃料组件，并且使组件在运输过程中避免互相碰撞。从试验堆出来的燃料组件，通常是立式运输，即与其运行时安装方向相同。设计燃料框架时要考虑这一点，应使其易于从容器中取出。同时也要易于装卸或卸料水池中安置地移动燃料。而立式燃料组件较长，通常是水平方向运输。而立式组件在池内进行时是试的，因此，如果组件在水平移动时没有足够的（足够）的支持时，那么燃料棒会有严重变形。燃料框架必须按整支燃料组件长度进行设计，并且应能提供均匀的支持。在发生撞击事故时，设计的燃料框架应能限制各个组件的移动和防止组件歪。（除组件自重之外）。

选择燃料框架材料时应考虑以下几点。

1. 燃料、部件和容器壁材料相容性。

这相容性包括在容器壁内或情况下的腐蚀倾向，以及设备在工作时和贮存期间高的热膨胀性能。

2. 在满足相容性、强度、燃料元件保护、辐射屏蔽和结构完整性的要求下，应合理地利用容器的内部空间。

3. 选择制造工艺和成本的最佳方案。

4. 适用于各种类型燃料元件的通用性。

5. 燃料框架和单根元件的修理要求。

燃料匣盖应具有足够的通路，使反应热传递到壳壁。设计放入匣盖中的元件时，应考虑其上部与下部具有有效通路，可作循环冷却水进行冷却。在要求从冷却剂的情况下，燃料匣盖的结构也应提供从热燃料元件到屏蔽层的热传导通路。当使用固定位置时（焊接在固定位置）时，热的通路将由燃料元件通过屏蔽层，从而造成一个很有效的散热系统。

4. 辐射屏蔽

运输中核安全的最开始的要求就是，当发生运输事故，运输容器的最大可靠反射性配置形式时，必须保持次临界。事故的核链式反应会引起放射性物质的大量释放。因此设计中必须考虑材料的数量、燃料的布置排列，中慢化和反射中子吸收体之存在，以及中子源位置和其它裂变材料的相互作用等所必须加以考虑。

辐射屏蔽的最好办法之一是在燃料匣盖的结构材料中加入中子吸收材料。考虑中子要求匣盖的结构部分通常厚0.5吋~0.75吋，对于这种厚度，可以有效地控制临界，足以使合金中低合金含量的热中子截面大的材料。据文献资料，运输试验堆铝包壳燃料元件盒时使用硼硅酸盐（35% $B_4C + Al$ ）衬里的内腔所构成的燃料匣盖，成为在壳

试验和理论研究表明在有限上使用硼钢合金的[?]材料。在硼钢合金上使用不锈钢包壳可一[?]取[?]之[?]。这种包壳保证[?]在1400°F以下不[?]受[?]损坏。也可使用合金硼不锈钢陶瓷作[?]吸收剂。虽然这也是一种有效的中子吸收剂，但它的成本高，难以制备，热中子以及大[?]截面与脆化[?]有关。

金钢或硼的合金也是一种很有效的中子吸收材料，此外，它是一种很好的热导体。但这种合金难以制造，而且显著增加燃料[?]架的成本。它也需要包壳以防止[?]冷却被铜[?]污染，④可用硼[?]吸收剂[?]燃料[?]和[?]。

按照适当的燃料[?]架设计也能达到[?]的[?]何或[?]向的控制。但是，这种控制方法与使用吸收材料相比，可能使[?]空间[?]不[?]有效利用。

5) 材 料

1) 结构材料

反应堆设计的主要目的是为[?]屏蔽和包容放射性物质，因此结构材料的性能必须能满足这些要求。结构材料必须在零下(-40°F)温度，环境温度以及提高温度条件下都应具有合适的强度，延性和韧性。此外还需考虑费用，使用价值，是否易于制造并具有抗清洗溶液(如硝酸)腐蚀的能力，邻近材料之间的电腐蚀和应力腐蚀等因素。

通常作容器的结构材料有：铸铁，碳钢，铝（带钢衬）等。

(2) 屏蔽材料

减轻容器的重量是设计者的长远目的，因为容器的重量影响到能否使容口在一定的反应堆装置上操作，而屏蔽材料对 γ 及中子束的完全屏蔽^效是很难的精确算出。

通常大量使用的屏蔽材料有：铅（厚7-9吋）还有用铀，铀钍合金作屏蔽材料的。

由于铅的低成本、高密度以及易于制造并保持其同而成为用 γ 屏蔽的最普遍的结构材料。但它也存在一定的缺点，例如，在制造、保护和处理上的不便，通常必须把铅包在钢内。加之铅由熔融状态凝固时显著收缩（>3%体积），在浇灌大型包钢的屏蔽时就必须防止产生气孔。同时铅对不锈钢的不好的一面（腐蚀性）也会促使造成不必要的孔洞。

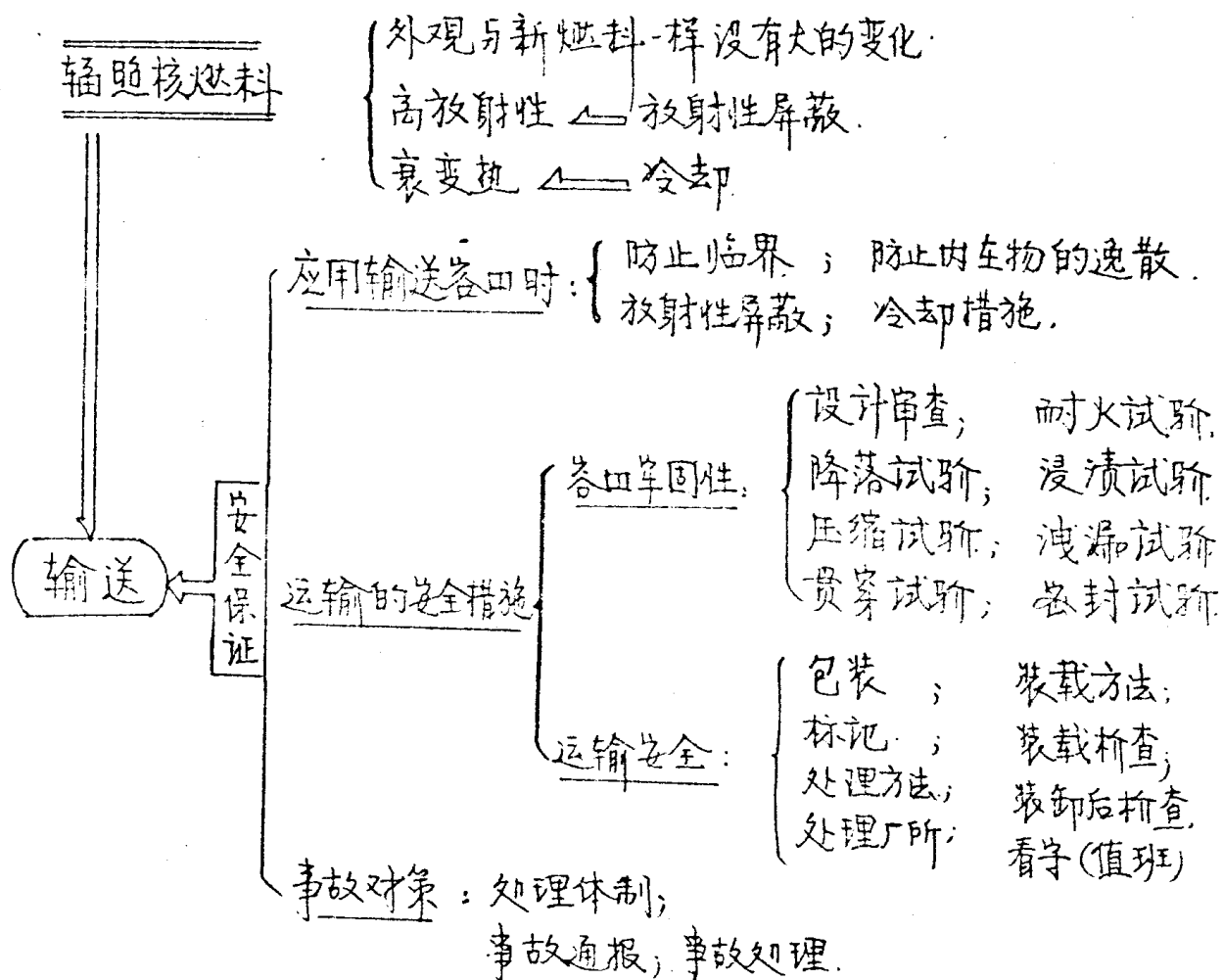
应用其它一些屏蔽材料，包铅铀和钢也是有利的。美国已用铸铁或铸钢制造了若干大容器，它也不含铅或其它高密度材料。这就能防止包钢铅芯中由于不同的热膨胀而引起的应力。此外造价成本一般较低。

钢容器的主要缺点是，对于相同的空腔尺寸，钢容器就比铅屏蔽容器更大些，更重些。

(6) 输送容器的安全考虑.

虽然辐照燃料与一般货物的输送没有很大的区别,但由于燃料的特殊性,就使得在输送过程中引起很大重视,並要从各方面考虑可能发生的一些问题.如:汽车输送时撞车事故及由此而引起的火灾事故;铁路运输时脱轨,翻车及撞车,及火灾事故,船舶海上运输时的撞船,火灾或沉船事故等都必须予以慎重考虑.在这方面为了确保绝对安全的设计阶段的审查,特别是要进行降落试验,洩漏试验,压缩试验,贯穿试验,耐火试验,浸渍试验,密封试验等.

其内容及要求为:(日本)



(7) 美国“萨瓦娜”核商船燃料元件输运方案:

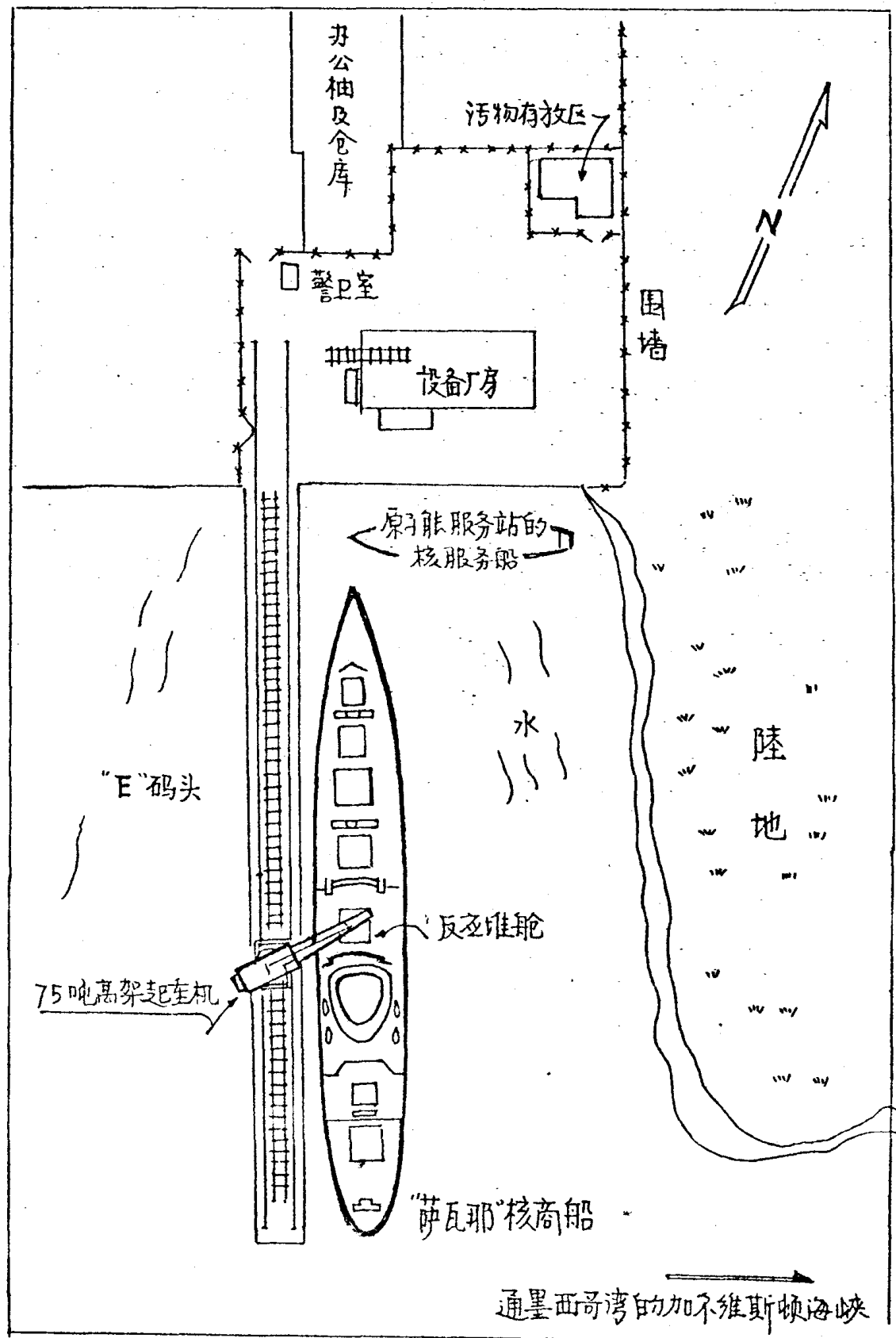
商船的反应堆有两个回路, 功率为 80 兆瓦。

反应堆压力容器内装有 32 个燃料元件, 21 根控制棒, 燃料元件的横截面为边长 8 1/2 吋的正方形, 长 76 1/2 吋, 每根元件重 735 磅。

“萨瓦那”号核商船的换料设备装设在得克萨斯州加尔维斯顿鵜鴬島上的德固造船公司。进行核子工作的隔离区 (exclusion area) 位于船厂的最东端。隔离区包括停泊船的码头“E”, 核设备的厂房, 在码头上的 75 吨的高架起重机, 沾污物的贮存区和适当的供应服务设施 (见下备)。

设备厂房是一个 60×120 呎的高跨建筑物, 有一 30 呎深的 15×25 呎水池。一台 75 吨的桥式起重机横跨在厂房上方, 水池上方有一座带有链式提升装置的可移动的人桥。此链式提升装置用于处理水池中的轻的构件。从上方可移动的人桥, 远距离操纵抓取与处理燃料元件和控制棒的抓持工具, 以及水下检查的潜望镜。水池底部有燃料贮存架和支承反应堆内部构件的台架。

75 吨起重机可为整个码头“E”的全长工作, 并且在海岸上有足够的行程以便能将重的负载装到有轨车上。此有轨车可进出处理厂房。起重机设有柴油发电机供电, 并用沿码头全长铺设的电缆引线作为备用电源。在发生事故时, 起重机的发电机可向岸上的处理厂房供电。



二 核燃料元件首端处理设备

动力堆的操作温度高,压力高,损耗深,燃料元件的包壳材料用不锈钢或锆合金。首端处理就是除去包壳材料及溶合铀芯,燃料元件在经过一段时间冷却后,在处理前两端合金部分先拆卸,然后除去包壳。

根据动力堆元件的特性,化学去壳有的有一定的效果,而机械去壳也因受到复杂形状燃料的限制,如材料试验堆和包壳粒子燃料元件。对于较先进类型的燃料元件包括压水堆(PWR),沸水堆(BWR)和新型快堆的元件,国际上倾向于采用切割—浸取法。

切割—浸取法,主要用于处理不锈钢或锆合金包壳的 ^{235}U 、 ^{238}U — ^{235}U 、 ^{238}U — ^{235}U 和 ^{238}U — ^{235}U 的动力燃料。

切割—浸取法通常用机械手装置把燃料元件从贮存场送到切割机或锯床上,切割机和锯床装有摩擦轮和输送托架,在这里依次使两端与元件主体分开。切割后元件是用另一个机械手装置把元件主体从切割机或锯床上取下,放在剪床,剪床上的滚轮落入这个多孔兰中送至溶介池中,溶介后提起带有三层的滚介兰兰格入运输系统去贮存。

此法使用稀酸浸取燃料芯,所以要求用不锈钢管道和工艺设备的结构材料。这个芯的小段包壳在贮存,比化学脱壳贮存元件废渣方便,估计其贮存费用仅为化学脱壳贮存的 $\frac{1}{20}$ 。此法又可以选择较小的溶介设备,对各种尺寸的燃料元件都适用,因此目前,有的后处理厂通常是采用此法。