

第 十 冊

分裝式核反應器

譯者 呂東輝

目 錄

一磅鈾等於六千桶油

核動力在冰帽地區.....	1
燃料價值的比較.....	3
分裝的大東西.....	6
進一步的報告	8

技術背景

核動力廠如何工作.....	9
將核動力擺在車上.....	13
溫度愈高所需的重量愈小.....	15
利用大氣.....	17
立即建立的動力廠.....	19
重要觀念：能量倉庫.....	20

分裝式核反應器

原著：William R. Corliss

譯者：呂東輝

一磅鈾等於六千桶油

核動力在冰帽地區

像北極和南極這些嚴寒和遼遠的地區，分裝式核動力廠顯然要比燃燒煤炭和石油來得方便。在這些荒涼地帶的科學和軍事基地，距離普通燃料的來源地區，都要上千百哩以上，輪船和飛機根本無法一次就補給幾年的需要。尤其在南極McMurdo Sound 和格陵蘭世紀營地方的人員和裝備更須要有足夠的能源來抵抗零下六十度的寒夜；鈾核子分裂是一種供給較普通燃料尤其便宜和可靠的能源。

一九四二年當自持核分裂反應首次在芝加哥大學那座狹窄的舊式足球場試驗成功時，預言家猜想到煤和油不久將會被淘汰，世界上所有車輛將很快使用核子動力來轉動。

二十幾年來，通往核子動力的道路仍舊困難重重；不僅核動力廠的成本比當初估計的要高，而且煤和油發電廠的效率又獲得改進。目前經濟競爭仍然存在；現在只有在普通燃料成本很高的地方，大核動力站才堪作金錢上的競賽。

有些地區和文明疏遠得像軌道上的太空船，這本小冊子就是針對這些偏遠地區的核能問題作一綜合性的介紹。並且介紹當戰爭和自然災害；如颶風或地震發生而把原有的能源破壞時，以及那些油管和煤車無法到達的地方，如何設計核動力廠？最後，這本書也要告訴讀者，當化石燃料開始匱乏時，如何使用核子動力製造化學燃料，來供給

世界上所有車輛使用。

一九五三年美國原子能委員會和軍事當局着手研究核子動力在這些方面的用途。不久就發現成本只不過是許多要件中的一項。舉個例說，在偏遠地方的一座核動力廠必須可靠、可移動和安全三者兼顧；一座專供給暴風雨災區的核子動力站應該能夠迅速的搬運到該地方建立起來。在解決這些工程上的問題時，一座小型核子動力廠已經被證明是最有效的辦法。

事實上，為這些應用而設計的理想核動力廠，雖然如我們所知的，它們在太空使用上還嫌太龐大了一點，但是在太空方面它們却做了許多的貢獻。供給太空儀器、通訊和控制，只需幾千瓦特的動力，但是一座地面小型動力廠却可產生幾百萬瓦特的功率；這種動力廠跟產生幾百萬瓦特電力的大型、固定核動力廠比較，仍然是微不足道的。

由於有這些指引，聯合美國原子能委員會和陸軍當局的核子動力計劃從研究轉入金屬材料架構的階段，然後再進入動力廠的建造。今天已經有五座小型核動力廠開始操作（圖一），除了供實驗的固定中型動力系統外（在佛琴尼亞州的Fort Belvoir），所有動力廠都設

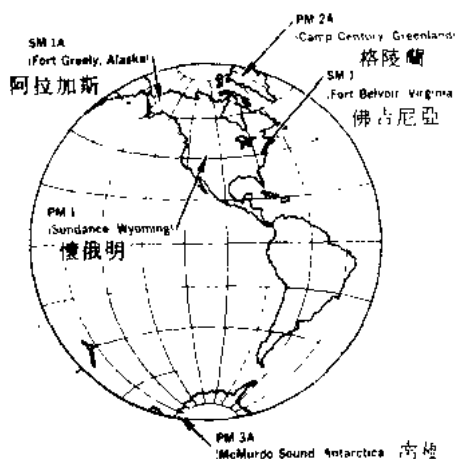


圖 1. 在美國原子能委員會和陸軍當局的核子動力計劃下建造的五座小型核動力廠在地球上的位置

置在世界偏遠地方。現有動力廠的資料和正在建造的動力廠在下一頁的表上可以看出大概的情形。

美國大多數反應器用字碼來表示型式。這本書上所提到的小型核動力廠表示法也不例外，它們都有一個特殊的字碼。

第一字母	第二字母
S：固定的	L：低功率（低於一百萬瓦特）
P：可攜帶的	M：中功率（一至一千萬瓦特）
M：可移動的	H：高功率（一千萬瓦特以上）

在每兩個字母群的不同動力廠，則標出號碼；例如PM-1 如PM-3 A可攜帶的中功率廠等。

燃料價值的比較

不管工程師如何仔細的設計，小型核動力廠（比方說在南極）的成本一定比普通燃料動力廠的成本都要高，這似乎跟前面所提到，在偏遠地區，核動力廠要比燃油動力廠的成本為低的事實互相矛盾；目前要使核動力廠更加便宜，仍然還有一段過渡時期。時間加重了一項原子能的基本事實，那就是說每磅的核燃料可以供應高於相同重量的煤和石油等普通化學燃料百萬倍以上的能量。

大多數分裝式核動力廠的心臟部分是由充滿鈾管或大小如桶的鈾棒組合體。當鈾分裂時，產生熱能；熱能由液體介質帶動渦輪和發電機。有件很重要的經濟事實是鈾燃料每磅的價格非常昂貴，但是用來帶動渦輪的每單位熱量却又出奇的便宜。一磅含百分之百鈾-235的濃化鈾；在美國約值一萬美元，而普通內燃機燃料的價格只不過美元三分而已，也就是鈾要貴出三十三萬三千三百三十三倍；然而，一磅鈾完全分裂却可產生二百萬倍油所產生的熱能。當我們考慮運輸普通燃料到南極的成本時，核動力尤其居於有利地位。而目前普通內燃機燃料在冰帽地區每磅值三十分錢。

如圖二所示，由於許多的核機械成本甚高，因此使得核動力廠的

可攜帶和可移動的

名稱 ^a	位置 ^a	用途	使用單位	設計者 ^a	臨界日期 ^b	操作日期	電力輸出 (百萬瓦特)
原型							
SL-1 ^c	NRTS, Idaho	試驗 訓練	陸軍	ANL	8-58	10-58	0.2
SM-1	Ft. Belvoir, Va.	試驗 訓練	陸軍	A.L.Co.	4-57	4-57	1.88
操作廠							
SM-1A	Ft. Greely, 阿拉斯加	動力熱能 基地	陸軍	A.L.Co.	3-62	8-62	1.64
PM-1	Sundance, 懷俄明	雷達 基地	空軍	Martin Co.	2-62	6-62	1.0
PM-2A ^d	Camp Century, 格陵蘭	動力熱能 基地	陸軍	A.L.Co.	10-60	3-61	1.8
PM-3A	McMurdo Sound, 南極	動力熱能 基地	海軍	Martin Co.	3-62	8-62	1.6
設計階段的動力廠							
PL-1; PL-2	-	遙遠 地區	-	C.E.	-	-	0.2; 0.8
SM-2	-	導彈 庫	-	A.L.Co.	-	-	6.0
MH-1A	-	船上	陸軍	Martin Co.	-	-	10.0
Island Baitoon	-	南極	-	A.C.	-	-	1.3
Standard Plant	-	隨意的	-	Burns & Roe, Inc.	-	-	3.8
Advanced/ Portable Plant ^e	未定	動力熱能 基地	未定	Not selected yet	-	-	-
SL-1	NRTS	陸軍戰場	陸軍	Aerojet- General	3-61	-	0.33
MCR ^f	-	陸軍戰場	陸軍	G.M.	-	-	3.0

^a縮寫字 (名稱)

第一字母

第二字母

S = 固定的 L = 低功率 (低於一百萬瓦特)
 P = 可攜帶的 M = 中功率 (一至一千萬瓦特)
 M = 可移動的 H = 高功率 (一千萬瓦特以上)

位置

NRTS = 依達荷州國立反應器試驗站

^a設計者

ANL = 阿岡國家實驗室

A.L.Co = 美國機車公司

C.E = 內燃機工程

A.C = 阿里斯即勒摩製造公司

GM = 通用公司阿里森分廠

核動力廠計劃表

爐心生命 ^c (百萬瓦一年)	反應器型式 ^a	主要冷卻劑	主要壓力 ^d (psi)	核心出口溫度 ^e (°F)	動力循環	總重量 (噸)	包裝數目
6.3	BWR	水	300	422	Rankine	-	-
15	PWR	水	1200	450	Rankine	-	-
16.4	PWR	水	1200	443	Rankine	-	-
16.7	PWR	水	1300	479	Rankine	405	27
20	PWR	水	1750	518	Rankine	310	27
16.7	PWR	水	1300	479	Rankine	450	33
30.0	BWR	水	600	469	Rankine	299	31
28.9	PWR	水	2000	515	Rankine	550	-
67.5	PWR	水	1500	510	Rankine	-	-
16.2	PWR	水	1300	477	Rankine	410.5	41
19.2	PWR	水	1300	483	Rankine	-	-
-	PWR	水	-	-	Rankine	-	-
3.78	GCR	氦	300	1240	Brayton	40	4
-	LMCR	液態金屬	-	-	Brayton	-	-

反應器型式

b 得到自滋生核反應的點

BWR = 沸水式

c 熱百萬瓦一年，不是電的

PWR = 壓縮水式

d 每平方吋磅，絕對的

GCR = 氣體冷凝式

e 試驗完成；反應器重新安置

LMCR = 液態金屬冷凝式

g 尚在研究階段

c Military Compact 反應器

原始成本大大的增加；但是核動力廠僅需每一年或兩年纔換一次燃料，即使需要新的燃料，也可以利用小包裹運至所在地。用過的燃料先行移開，然後再運送回來，不必像普通燃料需要固定的飛機或輪船來運送。

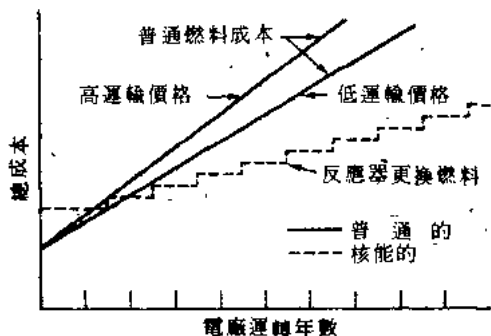


圖2. 核動力廠和非核動力廠在操作時間上的總成本。對非核動力廠有利的最初成本，由於運輸燃料到偏遠地區很快就消失掉。

並不需要很大的倉庫足夠來儲存燃料；當我們把輸送的成本加到普通燃料裏頭時，像圖二所示的總成本不久將超出階梯式的核燃料成本，這種情形將會因運送成本的提高而很快發生。這些經濟問題很重要，此外似乎仍然隱藏另外一項事實，就是說，不管普通燃料是多麼便宜，有時候核動力可以做普通燃料所無法完成的事，舉個例說，一座軍事指揮站由於要避開氫彈的爆炸必須埋在幾千呎的岩石下；這種地方並沒有足夠的空氣供給油或煤的燃燒，外面的空氣因為核武器的攻擊而污染也無法使用，貯存在岩石下的空氣必須供給人員的呼吸。核動廠不像油或煤動力廠，它們不需要空氣而能在很深的地下，海底或外太空繼續操作。這種特性解釋了為什麼核子潛艇有如此高的工作能力，和為什麼我們對於發展核子火箭感到極大的興趣。

分裝的大東西

一座足夠供給南（北）極某個基地所需的電力和熱能的核動力站，可能佔有好幾幢建築物，而每一幢建築物跟普通的房屋大小相當。

在美國，大半地區沒有運輸上的困難，因為即使很大的設備也可由貨車運至適當地點，就像巨大的土星火箭經內陸水路由密西西比駁運至甘迺迪角的情形一樣；但是在世紀營和McMurdo Sound並沒有駁運的業務，裝備必須由海洋航道，運輸機和牽曳雪車運往。動力廠的包裝必須小得能够裝進這些運送的工具；而且應該只要使用簡單的工具就能把它們接合起來。要極力避免精巧的焊接技術。

現在在懷俄明山頂操縱雷達站的分裝式中型動力廠（PM-1），是分由二十七個小包裝運送的，每個包裝重三萬磅。每個包裝必須擠到運輸機裏頭，而且尺寸的大小限制為八呎八吋長，八呎八吋寬，三十呎高。

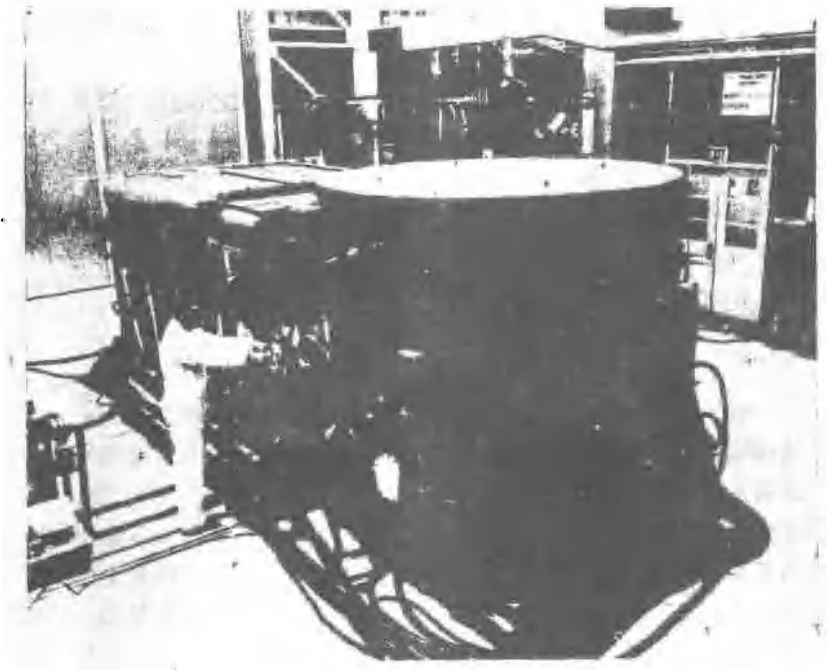


圖3. 正在試驗的一種可移動的低功率（PM-1）包裝。這單元反應器在右邊，是設計供給車子的機器使用。注意“沙丁罐”的形狀。

如圖三所示，小包裝的核動力廠在沒有道路、鐵軌和運河系統的地區是用來供給現代文明的源泉——電力的。落後地區的國家可利用這些動力系統來做為技術現代化的種子，這些技術可使落後地區的工業迅速成長。

怎樣使一座核動力廠小得能放到飛機、卡車或貨車裏頭呢？這就跟一九四〇年代，帶著一個大盒子的無線電不同於今天袖珍晶體無線電一樣。這種袖珍化和電晶體的發明一樣，都是由於工程上的進步，但是核反應器却只能小到不違背物理定律的程度。體積的減小主要是由於把蒸發器，管子和活塞緊縮在小包裝裏面。普通的核動力廠並非要限制在一個小房間裏頭，因此設計上可儘量擴張建築物。相反的，可運輸的動力廠的設計家們却要把機器像鯊丁魚擠在小罐子裏一般，盡可能使動力廠縮小。

如果你要進一步分析無線電，而把晶體無線電蓋子打開的話，你會發現電晶體取代無線電的理由並不完全由於它的體積很小。電子設備的線路現在都由銀墨水來取代電線，相同的情形顯示核動力廠的建築可以做得很小“想得更小”，像南極（北極）第一代核動力廠一樣，仍然在研究的階段。

進一步的報告

包含早期設計或想像的操作動力廠的典型，可攜帶核動力廠的革命從第四頁的表上可以看出。在已經建造的兩種發展和實驗操作典型的研究中，導致了第一個操作單元的產生。這些單元，換句話說，在新的設計上有所改良。五座動力廠現在已在世界不同的角落操作。另外還有八個以上的研究和建造計劃正在進行。新設計的核動力廠形式將會從供戰場使用的ML-1式，到供低成本大量生產和整個世界都可設置的標準動力廠。

關於每個動力廠的技術數據都包括在這個綜合表上。這本書上“技術背景”這一段就是定義和討論表列特性的意義。

表上所提核心壽命是根據動力廠裏面生命期最短的核心燃料估計

的。當然，當燃料無法再使用時，可以隨時替換。

主要壓力尤其重要，因為它可決定導管和壓力管的重量。就工作效率觀點說，壓力要儘可能提高，但是當我們考慮到整個體系的重量時，壓力却要盡量的減低。顯然地，工程師必須要在這問題上做個適當的折衷。

除了燃料元件本身外，核心出口的溫度是最高的。怎麼樣去得到高的核心出口溫度，則要依靠投資在研究發展上的時間和金錢

技術背景

核動力廠如何工作

任何一座動力廠的最重要部份是能源。供給許多城市電源的油力或火力發電廠，是用火爐把水煮沸成蒸汽。而核電廠，像第十二頁 PM-1 式反應器核心一樣，是由充滿鈾的棒子取代火爐。由幾磅分裂鈾產生的熱，可以取代一大堆煤所產生的熱量。

除了水力發電廠外，所有的動力廠都須要能量交換器把熱轉變成電。通常一個渦輪可以把熱蒸汽的能量轉移到轉動軸上，發電機連接

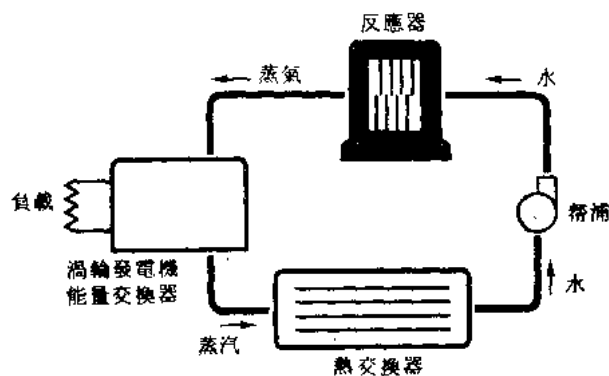


圖 4 . 一般動力廠素描圖，顯示有能源（反應器），能量交換器（渦輪交換器），和熱交換器（冷凝管）。一座沸水式核動力廠要利用這種循環。

這根軸，便可產生供給家庭和工業用的電力。電廠所需的⁵一部分是熱交換器。熱力學第二定律告訴我們，任何一部熱機中，不可能把所有熱變成有用的功。因此我們也須要設計一種裝置把廢熱排除掉。熱交換器把廢熱排到冷液體去；這種液體通常是利用河流或湖泊，但有時候是空氣本身。

圖四表示如果水在反應器中心直接沸騰的話，一座核動力廠如何操作，這是稱為單循環系統的簡單排列法。但是，這本書所提的大部分核動力廠，如圖五所示，都是用壓縮水的反應器。在壓縮水反應器的爐心，水並不沸騰，相反的，它在高壓（通常高於每平方英寸一千磅的壓力，超出沸點的壓力）下加高溫，然後抽到中間的熱交換器，在這裏面，熱量傳到第二水流，因第二水流之壓力較低，故其中的水可沸騰成為蒸汽。然後第二循環的蒸汽再帶動渦輪。這種動力廠是雙循環系統的。

像鈉這種液體金屬或氦這種氣體也可用來攜帶燃料元件的熱量。

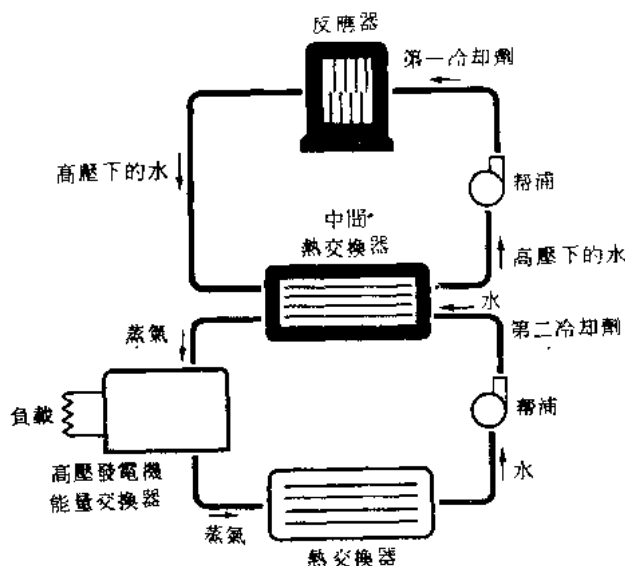


圖 5. 雙循環壓縮水式核動力廠略圖。



1 懷俄明 *Sundance* 地方的球形核動力雷達站，三個圓形的東西包括雷達天線；PM-1 式核動力廠在地下的底端。



2 PM-1 動力廠輪廓。反應器在這三個垂直圓柱體的尾部。反應器供給1300 *Psia* 和 479°F 的熱水到鍋爐（在圖右），從鍋爐來的蒸汽帶動渦輪發電機。在右上角，熱交換器以空氣冷卻。

可攜帶核動廠：圖例

下列圖畫和照片為可攜帶PM-1式中型動力廠的歷史，這種動力廠現在使用在懷俄明北部山頂的雷達站。這些圖片顯示出從原始觀念以後的進步情形；包括空運經過整個新大陸，到達地點後的設置，以及最後反應器的連續操作。雖然我們選PM-1式當做這圖片的歷史，其他在這本書上提到的動力廠的歷史仍然是很有趣的。



8 在建造PM-1的時候，同時訓練操作的人員，這裏他們正在檢查反應器核心的一個模型



9 反應器核心集中在埋好的容器裏面。



10 建築外表已將完成反應器在左邊建築物的地底下，熱交換器在前面



3 PM-1 核反應器。熱由底下一大束燃料元件產生。控制棒在核心上面面動力的低。



PM-1 核動力廠燃料元件是一種中空管。有 33.25 吋長，外徑 0.506 吋，內徑 0.416 吋。濃化鈾壓在裏頭，外面是不銹鋼。水流過管內並沿著管四周，受核分裂而使之加熱。

5 檢查反應器設計，並決定軸量，工程師和物理學家在模型反應器核心做實驗。



6 在巴爾的摩附近的工廠經過許多次的試驗之後，PM-1 運送到蒙塔那阿爾德斯空軍基地 C-130 運輸機上。



7 從阿爾德斯空軍基地拖運而來，機件都未裝置。準備建造雷達站，動力廠容器由起重機搬到最後位置，這容器稍後便埋在地下。



11 整個反應器浸在水裏。水用作冷卻劑，減速劑和反射器。



12 在建造和試驗完成後，PM-1 準備操作。



13 利用核燃料產生電供給天線使用，Sundance 雷達站負起洲際空中防衛的責任。

像這些流體，通常是用在需要極高溫的動力廠，諸如正在發展中的氣體冷卻ML-1式Military Compact反應器。

原子能委員會已經做過了用水、氣體和液體金屬在小包裝反應器中當冷卻劑的實驗。如今，在運轉中的五座動力廠，正如許多其他龐大的商用核動力廠和所有美國核子潛艇一樣，都是使用壓水式反應器來操作的。

將核動力擺在車上

當把核子裝備拆成小包裝來運送仍然還有困難時，使核動力廠可以搬動，就跟從手推車演變到汽車的過程一樣。這本書的第一部份，

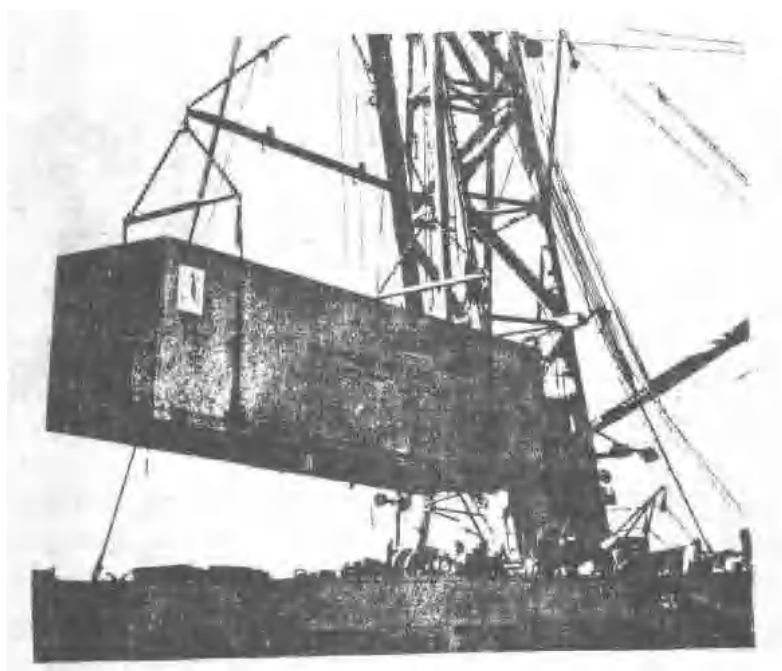
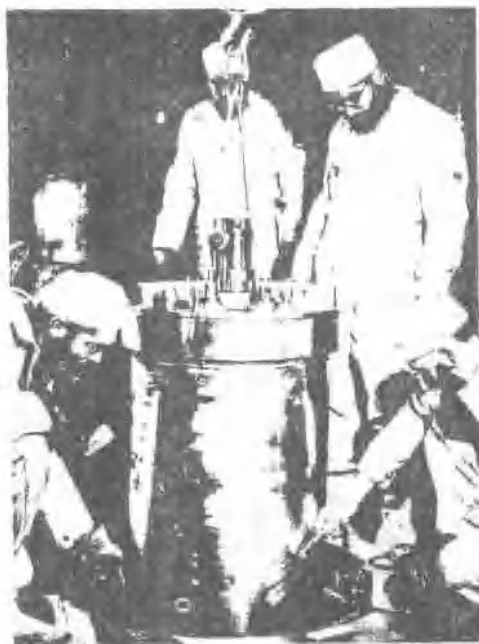


圖 6. 一種PM-3A動力廠包裝正在裝吊至一船上，準備運向極McMurdo Sound。

我們已經建議可攜帶的包裝要做得像擠沙丁魚一般。通常一個包裝完整的動力廠大約是一百萬磅重，而一個可移動的陸上動力廠必須比十萬磅來得輕。爲了要減少這麼多重量，有些劇烈的改革尙待努力。

圖 7. 在McMurdo Sound, PM-3A 核心正下降至反應器。核子工程師穿著“醫生制服”以減少被反應器污染的機會。



減縮重量的主要地方是反應器、輪機發電機和熱交換器。如圖七所示，壓水式反應器已經很小了；但是當我們把水冷却劑用鈉、鉀或鋰等液體金屬來取代時，可使反應器的重量變得更小；液體金屬攜帶熱量的優越性能，更加使核心變小。或者我們可以造一座用快中子來產生分裂的快中子反應器，因爲此時核心分裂產生之中子不需減速，我們就不必用減速劑，反應器的體積就可壓縮得很小。這並非是最大的減縮，但頗值得努力，因爲屏蔽的重量可因核心的變小而迅速減少。

溫度愈高所需的重量愈小

想把動力廠的重量減少，要靠氣體或液體冷卻劑；秘訣在於提高溫度。當動力廠的溫度增加時，發生兩件重要的情況；首先，動力廠的效率增加，就是說有更大部分的熱可轉變成電，熱交換器可以做得小些，因為此時它只需要處理較少的廢熱。把熱交換器的體積再形縮小是可能的，因為在高溫時只需要較小傳送熱量的面積。

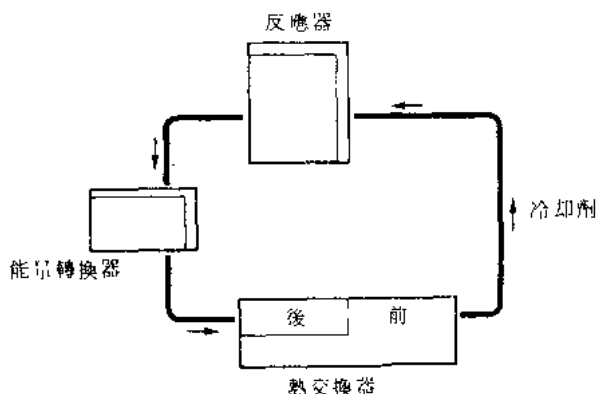


圖 8. 由於達到高溫使小型核動力廠體積減少很容易實現。

許多這些工程上的現象，可在數學式子上使我們容易瞭解。表示效率增加的一個簡單方程式，在 1824 年由一個年輕的法國工程師，沙第，卡諾所發現。卡諾發現一部熱引擎的效率，可以很簡單從這引擎的最熱和最冷的溫度來決定。方程式是：

$$e = \frac{T_h - T_c}{T_h} = \frac{\text{出去的热量}}{\text{進入的热量}}$$

e = 卡諾效率

T_h = 進入渦輪的氣體或蒸汽的溫度 (郎肯 Rankine) 溫度或凱氏