

核堆—3008

10—30兆瓦电功率

压水堆动力厂調查报告

中国科学院原子核科学委员会編輯委员会
文 献 編 輯 室 編 輯

內 容 簡 介

美国原子能委员会为了发展高效率的中小型核动力装置，責成橡树岭管理局对三种反应堆型，即沸水堆、压水堆及有机物減速反应堆进行了調查。本文是关于电功率为 10—30 兆瓦的五种压水堆动力装置的調研报告。

报告中首先闡述了压水堆的优越性及今后的发展工作，然后詳細地介紹了五种压水堆动力装置設計方案的調研結果，包括投資費用、成本分析和有关設計情况的說明，值得特別指出的是，在附录中詳細介紹了比利时 BR-3 动力堆及电功率为 12500 瓩的压水堆裝置的設計技术說明书。

本文譯自美国原子能委员会报告 TID-8513, Survey Of PWR Power Plants, 10-30e MW Size, 1959 年。原书中“已經建成、正在建造或計劃建造的核反应堆”和“普通动力厂成本調查”两个附录，因已过时和使用价值不大，已刪去。由聶錦麟翻譯，王戊辰校对。

目 录

1.0 緒 言	1
2.0 初步总结摘要	1
3.0 压水堆装置讨论	2
4.0 調查 結 果	3
4.1 12.5兆瓦 (电), 4 %浓缩铀燃料的压水堆动力厂	3
4.2 11.7兆瓦 (电), 双活性区装料的压水堆动力厂	7
4.3 25 兆瓦 (电), 3.7% 浓缩铀燃料的压水堆动力厂	9
4.4 25 兆瓦 (电), 高浓缩铀燃料的压水堆动力厂	12
4.5 25 兆瓦 (电), 采用燃油过热, 4% 浓缩铀燃料的压水堆动力厂	16
4.6 五个动力厂的单位发电成本总结	19
4.7 五个核动力厂的设计数据总结比较	19
4.8 问题的范围和目前发展概况	21
5.0 参考文献	24
6.0 附 录	25
附录A: 12500瓩电功率核动力厂的投资成本科目摘要	25
附录B: 12500瓩电功率动力装置一次热料循环的燃料流程	29
附录C: 134000瓩电功率核动力厂的成本摘要	32
附录D: 25000(电)瓩压水堆动力厂一次燃料循环的燃料流程	34
附录E: BR-3 反应堆设计数据摘要	37
附录F: 11700瓩电功率BR-3 核动力装置的技术说明	69
附录G: 12500瓩电功率核动力装置的技术说明	89
附录H: 25000瓩电功率压水堆动力厂高浓缩铀燃料的一次循环流程	126

1.0 緒 言

美国原子能委员会橡树岭管理局(AEC, Oak Ridge Operations Office)已被指定負責制訂和执行一个小型核动力厂发展計劃。該計劃的总目标是发展一些电功率为5到40兆瓦能有效发电且电能成本比較低廉的动力反应堆。

計劃的第一步工作是立即着手选择一种能在近期内建成,而且将构成整个計劃发展中的一个必要步驟的反应堆設計方案。开始建造这个核动力厂的預定日期为1960年3月。这个日期显然会使反应堆的設計不得不主要以現有的工艺水平为基础。目前认为工艺上相当先进,且能滿足这种要求的反应堆有三类,即沸水堆、压水堆及有机物減速和冷却的反应堆。

首要的任务是在所考虑的功率范围内比較这三种反应堆概念,从而选择一种在規定的計劃进度内最易实现上述第一步工作目标反应堆型。为了便于作这种比較,曾对这三种堆型的設計概念做了一些調查研究。本报告給出了有关压力水減速和冷却的反应堆的調查結果。

为进行压水堆調查而規定的指导原則是,調查應該是一次精练和集中的研究工作,并写出总结报告。报告須提出下面的資料:

1. 以現有工艺水平为設計基础、电功率在10到30兆瓦范围内的压水堆系統的簡短說明。
2. 在压水堆方面已經完成的一些工作的討論。
3. 在压水堆方面目前正在进行的一些工作的說明。
4. 根据业已积累的适用于所考虑功率范围的經驗,提出初步总结意見。
5. 預先想到的各种問題的摘要。
6. 計劃解决这些預想問題的工作大綱。
7. 涉及压水堆設計各种补充資料的一些重要报告或参考文献。
8. 在所討論的功率范围内,表示不同規模动力厂发电成本和投資費用的各种經濟数据。这些成本或費用应尽可能以实际經驗为基础。

2.0 初步結論摘要

压力水減速和冷却反应堆裝置的調查已經証实,这种类型的核动力厂具有切实的可靠性、安全性和稳定性。在这些被調研的裝置中,有两种动力厂設計是可用的,其設計工作量已完成到工业界愿为它們的建造提出确切承包价格的程度。其余三种被調查的核动力厂是这两种可用設計的发展推广方案。虽然这三种設計的成本估价不确切,它們却有力地表明了規模、燃料种类和燃油过热对动力成本的影响。

調查結果表明,籠統說来,这五种动力厂中的任一种都沒有胜过其余几种的显著优点。任何一种动力厂的选定都取决于它的特殊用途。很明显,增加輸出功率必然降低淨发

电成本。然而，增加輸出也会使在現有工艺水平下还不能与普通化石燃料电站竞争的核动力厂投資費用加大。看来多建造几个小型核动力装置，与用同样多的总投資建造少数几个大型动力厂相比，更有利于工艺水平的迅速提高。

化石燃料过热和核动力蒸汽源的結合使用将降低淨发电成本，这一点只有在核热量生产比化石燃料热量生产費用貴得多时才能作到。采用化石燃料过热的主要优点是，可使这种类型的装置成为完善的現代动力源而无需大量增加动力轉換設備的备用机器部分。这一优点必須与这种混成电站核动力源各項实际成本的确定問題权衡考虑。

在世界上动力成本較高的地区，压水堆具有經濟发电的潛力。随着投資費用和燃料成本的降低，这些装置能够在經濟上竞争的地区将会相应扩大。通过进一步建造各种装置和积累更多的运行經驗，这些成本費用的降低是可望实现的。

3.0 压水堆装置討論

为了对建立在現有工艺水平上的各种压水堆动力厂进行一次彻底的調查，曾与一切有助于这次調查的組織进行过联系。目的是使压水堆动力厂的每个設計者均有机会为他們各自的設計提出說明和成本的估計。

联系过的单位中有几个已設計出了一些压水堆动力装置。可是仅有两个公司提出了以現今工艺为基础、电功率范围为 10 到 30 兆瓦的設計方案。在淨动力生产方面，这两个設計是十分类似的，因此，应原子能委员会的要求，对一个 25 兆瓦电功率低浓缩鈾燃料装置，一个 25 兆瓦电功率高浓缩鈾燃料装置及一个采用化石燃料过热的 25 兆瓦电功率装置进行了概念設計研究。上述研究的目的是确定規模、燃料浓缩度和过热对单位发电成本的影响。

这三种概念設計是以目前工艺水平为基础的現有設計的发展，且仅达到能够对投資費用、燃料成本及运轉維護費用作出合理估計的程度。未曾企图使这些发展成为最佳方案。

压水堆在技术上的发展已經远远超过了其他任何类型的反应堆。大部分成就是在軍用計劃所需的高浓缩燃料活性区和大型商业性动力厂的低浓缩燃料活性区发展方面。已經設計、建成和运轉的压水堆数量可以清楚地表明这种堆型的发展程度。

尽管規模、設計机构或燃料浓缩度有所不同，所有建成或正在建造的压水堆动力装置在很多方面都具有基本类似的地方。根据定义，这些动力装置是利用輕水在不发生体内沸騰的条件下从燃料內带出裂变热量。这意味着必須有两个传热系統：一个一次传热系統和一个二次蒸汽发生系統。

这种两系統压水堆核动力装置有两个主要优点：一个优点是核热源的放射性都被限制在一次系統內。因而蒸汽发电設備完全可采用普通的設計。第二个优点是动力装置的負荷控制极为簡單。带有減速剂（亦即一次冷却剂）的活性区，按設計具有負的反应性溫度系数，这就造成一种固有的內部負荷响应。設計适当的动力装置将无需外部控制就能自动适应負荷瞬变，只有在反应堆起动、停堆和需要补偿燃料的燃耗时，才要求移动控制棒。除了紧急事故停堆外，这种操作全部可由手动进行。紧急事故停堆或快速停堆的控制装置設于

控制系統內。

就一适当設計的动力装置而言，即使在电气負荷要求发生极大的波动时，一次冷却剂的溫度和压力瞬时波动也可限制在很低的数值內。例如，当 SM-1 固定式中型核动力厂的发电机向貝尔弗堡 (Fort Belvoir) 母綫輸出設計的滿負荷电力时，可能造成該动力厂最大負荷瞬时变化的原因是汽輪机主节汽閥的錯誤关闭。这时一次系統的压力約升高 90 磅/吋²。冷却剂的平均溫度上升 8°F 左右，然后即逐漸恢复正常。全部过程是在控制棒不移动的情况下完成的¹⁾。

所研究的五种設計的調查結果以下列方式提出：

1. 每一設計的簡短討論。
2. 每一設計的經濟数据。
3. 設計数据总结 (各种参数的比較表)。
4. 存在的問題以及对目前为解决这些問題所进行的工作的討論。
5. 包含有补充資料的重要論文、报告等文献的目录。

4.0 調查結果

4.1 12.5 兆瓦 (电)、4% 濃縮鈾燃料的压水堆动力厂

这个动力厂包括各种工程数据在內的完整技术說明見附录 G。这种設計已被引用作为确定具有运轉与性能保証的价格依据。在这个計劃第一阶段預定的三十三个月時間內，最后的設計、建造和动力厂的起動均可順利完成。

該动力厂的各项經濟数据及关于其来源的注释列于下面各頁的表內。

成本摘要

以下各单位成本的依据为：

1. 每年的投資收回率为 7%。
2. 負荷系数为 0.8 和 0.6。
3. 按 0.8 的負荷系数計算，活性区使用寿命为 2.67 年。
4. 按 0.6 的負荷系数計算，活性区使用寿命为 3.56 年。
5. 滿負荷时的淨发电功率为 11700 瓩。
6. 下列各頁中規定的費用。

1) APAE №.18, "Initial Operation and Testing of the Army Package Power Reactor, APPR-1", Aug. 9, 1959.

<u>成本項目</u>	<u>總 計</u>	<u>美厘/瓩·小時</u>	
		<u>負荷系数0.8</u>	<u>負荷系数0.6</u>
投資費用	7754000美元	6.6	8.8
燃料費用	按0.8的負荷系数計		
(每一活性区)	算为1875000美元	8.6	
	按0.6的負荷系数計算为		
	1924000美元		8.8
運轉維護費用(每年)	232800美元	<u>2.8</u>	<u>3.1</u>
	共 計	18.0	20.7

投資費用

<u>科目編號</u>	<u>項目名稱</u>	<u>費 用</u>	<u>備 注</u>
310	a. 場 地	9000美元	見注 1
311	b. 建築和結構		
311.1	1. 場地和土建工作	407000	見注 2
311.2	2. 發 電 站	257170	
312	c. 核 裝 置	2083750	見注 3
312.111和	c. 包 括		
312.112	安裝的反應堆	644000美元 ^①	
	裝好的防護容器	371700	
312	d. 汽輪發電機組	1208400 ^①	見注 3
315	e. 輔助電氣設備	208460 ^①	見注 3
316	f. 雜類動力裝置	<u>42800^①</u>	見注 3
	總的直接費用	4216580美元	見注 3
	g. 間接費用	886600	見注 4
	特殊建造費用	5103180	
389	h. 待攤費用	<u>1952000</u>	見注 5
	共 計	7055180美元	
	i. 其他費用		
	1. 工程建設方面的		
	研究發展費	497000美元	
	2. 起動和試驗費	202000	
	3. 按項目—96的		
	5 % 計算的臨時費	未包括在內	見注 6
	4. 按 5 % 計算的物價		
	變動費	未包括在內	見注 6
	5. 押金和保險費	未包括在內	見注 6

		(續上表)	
科目編號	項目名稱	費 用	備 注
	6. 建造方面的利息支付②	未包括在內	見注 6
		<u>699000美元</u>	
	动力厂的总投資	7754180美元	

- ① 所有設備和材料費數字均按本設計特有設備（如所有一次迴路的設備）市場價格或最近一些設計中類似設備的費用計算。
- ② 通常在建造期間，按“特殊建造”預算總額的 6 % 年利率計算。

注 1 —— 本費用是根據該动力厂將建在康內提克特州地區的哈特弗德（Hartford, Conn. Area）估計的。在該地區內，這樣大的动力厂的厂址費用為 9000 美元（參閱 APPA “Survey on Power Costs”，Part A, p. 1.1956）。

注 2 —— 在東北地區建造這樣大小的普通动力厂所需的場地和土建平均費用為總投資的 11.2 %。每安裝一瓩電功率設備的平均費用約為 265 美元。因此一個電功率為 12500 瓩普通發電站的這個科目費用將為 371000 美元左右。根據核裝置費用與普通設備費用不同的經驗，在普通动力厂的這個科目費用基礎上尚需增加 10 % 的臨時費。

注 3 —— 本費用所包括的實用項目細節均列於后面的附錄 A “標準科目”中，即 310.0 到 316.0 諸科目。由於蒸汽條件不同，汽輪發電機組增加的費用差額估計為 12200 美元，該數值是參考西屋電氣公司汽輪發電機組的價格清單得到的。

	节流蒸汽条件	費 用
核动力厂	375 磅/吋 ² 飽和蒸汽	705800 美元
普通电站	1250 磅/吋 ² , 950 °F	693600
	差額	<u>12200 美元</u>

主要影響是在熱循環效率上，不是汽輪發電機組的費用。這兩種機組的重量差不多相同，因此設備的基礎和安裝費用不會受到影響。

冷凝器和輔助設備方面的費用可能減少一些，但這一點將因主聯箱管、閥門等由於壓力較高所增加的費用而抵消。

注 4 —— 包括原子工程建造者的全部正常辦公費和承包者的費用。

注 5 —— 待攤費用包括：主承包者（設計者）及原子工程建造者為完成所有最後技術說明書和圖紙、活性區的零功率實驗及危險性分析和呈報等所需的全部工程和設計費用；主承包者在反應堆建造和起動期間所需的管理費用和工程費用；商業贏利；占待攤科目總費用 10 % 的臨時費。

注 6 —— 這些項目未包括在成本費用表內，原因是這些費用的計算基礎必須依據最終估價中的一些“共同性的因素”。

运 行 费 用

燃料費用

這個动力厂的燃料費用是以附錄 B 為基礎估計的，

<u>項目名称</u>	<u>費 用</u>
加工費用（包括轉換費）	675000美元
燃 耗	828500
再 加 工	161000
使 用 費	298300
	<u>共計1962800美元</u>
鉅 收 益	-87800
每一活性区的总燃料費	<u>1875000美元</u>

① 加工費中包括正常的商业赢利

运行費用和維護費用

<u>人 員</u>	<u>人 数</u>	<u>每人全年的工資</u>	<u>全年总工資</u>
<u>值班人員</u>			
值班工程師	4	8500美元	34000美元
反应堆操纵員	4	7500美元	30000美元
設備操纵員	4	5000美元	20000美元
<u>日班工作人員</u>			
电站管理負責人	1	12000美元	12000美元
仪表技術員	1	7000美元	7000美元
机械技術員	1	5000美元	5000美元
电气技術員	1	5000美元	5000美元
保健物理和化驗員	1	8000美元	8000美元
速記員	1	3500美元	3500美元
事務員	1	3500美元	3500美元
杂务工	<u>2</u>	4000美元	8000美元
	21人		
总的运行劳动工資			111000美元
总的維護劳动工資			<u>25000美元</u>
总的劳动工資			136000美元
办公管理費，按30%			
計算			<u>40800美元</u>
总計			176800美元
每年的維修補貼費			<u>56000美元</u>
总的运行費用和維護費用			232800美元

4.2 11.7兆瓦（电）双区活性区装料的压水堆动力厂

这里轉載的資料是以目前正在比利时莫耳城（Mol）建造的BR-3 核电站設計为基础的。該电站计划在1960年初达到临界和初步带功率运行。

BR-3的工程和設計数据摘要見本报告的附录E。这个动力厂的技术說明見附录F。BR-3核电站正处在設計、制造及建設的最后阶段。

BR-3 裝置的設計工艺是“鸚鵡螺”反应堆、希平港和杨基原子电站工作中所得經驗的直接产物。类似于BR-3 的核动力厂可在为时33个月的計劃日期內毫无困难地建成。

这个动力厂的經濟数据是以在西部宾夕耳法尼亚地区重新建造另一个BR-3 型动力裝置为依据。成本数字是这个仿建动力站的确切价格。然而，任一根据現今市场情况命价的动力裝置还应当考虑到諸如燃料循环成本和系統設計的有關重大改进。这些改进可望降低动力厂的总費用。

成本摘要

以下单位成本的依据为：

- 1. 每年的投資回收率为7%。
- 2. 負荷系数为0.8和0.6。
- 3. 按0.8的負荷系数計算，活性区使用寿命为一年。
- 4. 按0.6的負荷系数計算，活性区使用寿命为1.33年。
- 5. 滿負荷时的净发电功率为10,500瓩。
- 6. 下列各頁中規定的費用。

成本項目	總 計	美厘/瓩·小时	
		負荷系数0.8	負荷系数0.6
投資費用	10794000美元	10.3	13.7
燃料費用	按0.8的負荷系数計算为		
（每一活性区）	1613000美元	22.0	
	按0.6的負荷系数計算为		
	1627000美元		22.1
运行維護費用	275000美元	3.7	4.9
（每年）	共 計	36.0	40.7

投資費用

項目名称	費 用	备 注
a. 场 地	9000美元	見注 1
b. 建 造	4973000美元	見注 2
c. 核 系 統	4700000美元	見注 3
d. 二 次 系 統	1112000美元	見注 4
總 計	10794000美元	見注 5

注 1 —— 由于这个动力厂的大小与电功率为12.5兆瓦的核动力厂相似，所以采用相同的场地費用。

注 2 —— 建造費用包括以下各項目：

一般的场地准备

地面平整及公用設施

动力厂主要建筑物

下例各項設備的安裝（包括劳动工資、監督管理和材料費用。核蒸汽发生器的監督管理除外）：

- a. 反应堆
- b. 一次冷却剂系統
- c. 反应堆輔助設備
- d. 管道及絕热設施
- e. 包括管道和冷凝裝置的汽輪发电机設備
- f. 电气輔助設備
- g. 蒸汽容器
- h. 燃料裝置

現場办公費用

临时建筑設施

工 程

注 3 —— 核系統費用是根据下列各項估計的：

設備、高压管道和閥門，以及用于以下各系統的箱槽容器：

- a. 主冷却剂
- b. 压力控制調节
- c. 注水和体积控制
- d. 取 样
- e. 淨 化
- f. 停堆冷却
- g. 部件冷却
- h. 化学停堆
- i. 安全噴射

运 行 费 用

燃料費用

BR-3 双区活性区的燃料費用是以下列各項費用为基础，按 0.8 負荷系数計算的。如果按 0.6 的負荷系数計算，則燃料裝載的費用，在四个月期間內，其增加值为初始鈾价值的：4 %

初裝鈾价	1045000美元
最后鈾价	868000美元
最后鈹价	68000美元
直接費用，裂变材料	109000美元
燃料裝載	96000美元
UF ₆ 轉变为UO ₂ 的費用	57000美元
活性区加工費	1068000美元
活性区投資	68000美元
損失及碎料再加工	30000美元

废活性区再加工	96000美元
送至现场的装运费 及装运时的保险费	115000美元
废活性区的装运费 及装运时的保险费	<u>61000美元</u>
	1613000美元

运行費用和維護費用

运行費用和維護費用是按整个动力厂共需30个操作和維護人員考虑的。

按每人每年的平均工資为7500美元計算，

30个工作人員的費用共	225000美元
-------------	----------

每年的補助津貼	<u>50000美元</u>
---------	----------------

	275000美元
--	----------

4.3 25兆瓦（电）3.7%濃縮鈾燃料的压水堆动力厂

这个动力厂的設計是从4.1节中所述动力厂的設計外推得到的。这个設計仅仅是概念性的，并没有打算使系統最佳化。当进行詳細設計估計时，动力厂的許多参数将会有所变化。然而，規模更小和更大的动力厂的實際設計和建造經驗，使这个外推設計要比沒有工艺支持而进行外推的概念設計更为可靠。

該动力厂的物理特性和系統設計非常类似于附录H中所描述的12.5兆瓦电功率核动力裝置的設計。这个25兆瓦电功率动力厂的一些已經确定的主要数据与其余四个被調查的裝置参数一起均列于4.7节的表內。这种表示方法便于讀者对所調查的五种动力厂設計进行迅速比較。

这个25兆瓦电功率3.7%濃縮鈾燃料压水堆动力厂的經濟数据将在以下各頁內提出。确定投資費用各科目的方法在附注中有所說明，运行費用是专对这个电站估計的。

成 本 摘 要

以下单位成本的依据为：

1. 每年的投資回收率为7%。
2. 負荷系数为0.8和0.6。
3. 按0.8的負荷系数計算，活性区使用寿命为2.56年。
4. 按0.6的負荷系数計算，活性区使用寿命为3.53年。
5. 滿負荷时的淨发电功率为23600瓩。
6. 下列各頁中規定的費用。

成本項目	總 計	美厘/瓩·小時	
		負荷系数0.8	負荷系数0.6
投資費用	11309000美元	4.8	6.4
燃料費用	按0.8的負荷系数計算为		
(每一活性区)	3170000美元	7.2	
	按0.6的負荷系数計算为		
	3272000美元		7.4
运行維護費用	271600美元	1.6	2.2
(每年)	共 計	13.6	16.0
投 資 費 用			
科目編號	項目名称	費 用	备 注
310	a. 场 地	19000美元	見注 1
311	b. 建筑和結構		
311.1	1. 场地和土建工作	565000美元	見注 2
311.2	2. 发 电 站	380000美元	見注 2
312	c. 核 系 統	3011000美元	見注 3
	c. 包 括		
312.111及312.112	(反应堆837000美元)		
312.113	(蒸汽容器464000美元)		
314	d. 汽輪发电機組	1815000美元	見注 4
315	e. 輔助电气設備	350000美元	見注 5
316	f. 杂类动力裝置	50000美元	見注 6
	总的直接費用	6190000美元	
	g. 間接建造費用	1260000美元	見注 7
	特殊建造費用	7450000美元	
389	h. 待攤費用	2860000美元	見注 8
	共 計	10310000美元	
	i. 其他費用		
	1. 工程建設方面的		
	研究发展費	722000美元	見注 9
	2. 起動和試驗費	277000美元	見注10
	3. 按項目 1 到96的		
	5%計算的临时費	未包括在內	見注11
	4. 在一年半建造期間內		
	按5%計算的物价波动費用	未包括在內	見注12
	5. 押金和保險費	未包括在內	
	6. 建造方面的利息	未包括在內	
	支 付	999000美元	
	动力厂的总投資	11309000美元	

注1——建在俄亥俄州彭茲維耳城（Painesville）的相同容量的动力厂场地費用为 19000 美元（参閱APPA的“Fourth Survey on Power”）。

注2——这些費用是由一家原子工程公司就这个具体的动力厂建在具有砾石型土质的东北 地区而估計的。全部河道工程距建筑物200呎。

注3——312科目的总費用是根据科目內各项費用的重新定价或外推計算得来的，因为当动力厂电功率輸出由12.5兆瓦增到25兆瓦时，个别項目可能受到影响，如蒸汽容器科目費用增加25%，燃料操作的工具費用增加三倍，因为需要采用机动的工具。

一次冷却剂泵价格为175000美元。

注4——这一科目的主要設備是根据制造商产品目录作价的。較小項目的費用是按照普通电站类似設備費用加以“权重百分数”的更动而得。

注5——这个科目費用，对电功率为 12500瓩（4 %的浓缩燃料）的核动力厂而言，每瓩电功率約为17美元；对电功率为22500瓩的普通电站而言，每瓩为14美元。对于电功率为25000瓩的核动力厂，每瓩14美元被认为是合理的。

注6——这个科目費用，对电功率为12500瓩（4 %的浓缩燃料）的核动力厂而言，每瓩电功率約为 3 美元；对电功率为 22500 瓩的普通电站來說，每瓩为 1 美元。因此可以設想，对于电功率为 25000 瓩的核动力厂，估計每瓩 2 美元是穩妥的。

注7——包括原子工程建造者的全部正常办公費和承包者的費用。

注8——待摊費用包括：主承包者（設計者）和原子工程建造者为完成所有最后技术說明书和图紙、活性区的零功率实验、危险性分析和呈报等所需的全部設計和工程費用；主承包者在建造、試驗等工作期間所需的管理和工程費用；商业性赢利收入；占待摊科目总費用10%的临时費。

注9——研究发展費用包括燃料加工、燃料操作工具、控制棒驅動装置、活性区的基本試驗研究等項目，也包括收入和赢利及研究发展工作用的25%临时費。

注10——这个科目包括：进行动力厂設備检查及完成各項試驗（包括高低功率試驗）所需全体人員的費用；运行补充費用（包括100000加仑的脫盐淨水）；全体工作人員在此期間內（約为四个月）的出差費和供养費用。

注11——为了合理地估計費用，每个項目都有10—20%的临时費，因此在总投資費用上无需再考虑临时費，否則将不合理。

注12——过去的經驗表明，在建造期間，在总估計費用上加 5 %的物价波动机动費是必要的。

运 行 费 用

运行費用和維護費用

<u>人 員</u>	<u>人 数</u>	<u>每人全年的工資</u>	<u>全年总工資</u>
值班人員			
值班工程师	4	8500美元	34000美元
反应堆操纵員	4	7500美元	30000美元
設備操纵員	4	5000美元	20000美元
日班工作人員			
电站管理負責人	1	14000美元	14000美元
仪表技术員	1	7000美元	7000美元
机械技术員	2	5000美元	10000美元
电气技术員	2	5000美元	10000美元

(續上表)

人 員	人 数	每人全年的工資	全年总工資
保健物理和化驗員	1	8000美元	8000美元
速記員	1	3500美元	3500美元
事務員	1	3500美元	3500美元
雜務工	3	4000美元	12000美元
24人			
总的运行劳动工資		113000美元	——
总的維護劳动工資		39000美元	——
总的劳动工資		152000美元	——
办公管理費，按30%計算		45600美元	——
总 計		197600美元	——
維修補貼費		74000美元	——
总的运行費用和維護費用		271600美元	——

燃 料 費 用

这个动力厂的燃料費用是根据附录D估計的。

項目名称	費 用
加工費用 (包括轉換費)	1150000美元 ^①
燃 耗	1381000美元
再 加 工	316600美元
使 用 費	593700美元
共 計	3441300美元
鉅 收 益	—271300美元
每一活性区的总燃料費	3170000美元

① 活性区加工費包括正常的商业赢利。

4.4 25兆瓦 (电) 高濃縮鈾燃料的压水堆动力厂

这个动力厂与4.3节中所述的 25 兆瓦电功率 3.7% 濃縮鈾燃料的压水堆动力厂十分相似。主要差別是核燃料不同。

动力厂反应堆活性区采用95%濃縮的二氧化鈾作燃料。二氧化鈾包含在燃料板內，成为一种完全用不銹鋼包盖的二氧化鈾不銹鋼弥散燃料。这种板状燃料是利用“框式”技术制成的。“框式”技术原来是为制造材料試驗堆燃料板而发展起来的，以后为加工 SM-1 (APPR-1)反应堆二氧化鈾不銹鋼板又作了改进。这种型式的燃料板目前正在 SM-1 堆內使用，第一个活性区已接近使用寿命的末期，而第二个活性区 (类似的设计) 正在加工制造中。SM-1A，SM-2 及 PM-2A 諸反应堆也将采用高濃縮二氧化鈾不銹鋼燃料元

件。这种活性区用的燃料工艺已得到了很好的发展。

这种高浓缩燃料活性区所占的体积约为低浓缩铀活性区的四分之一，包容的活性区越小，反应堆压力壳也越小，它所需的屏蔽体积和蒸汽容器（即防护外壳——译者注）也较小。一次系统的冷却剂流量为17000加仑/分，而低浓缩铀反应堆装置的这个流量为19000加仑/分。17000加仑/分流量用的蒸汽发生器设计将略有变化，但对成本无显著影响。

动力厂系统和设备的其余部分实际上与25兆瓦电功率的动力厂系统和设备相同。在下列各页中提出了25兆瓦电功率高浓缩铀燃料压水堆动力厂的经济数据。

成本摘要

下列单位成本的依据为：

- 1. 每年的投资回收率为7%。
- 2. 负荷系数为0.8和0.6。
- 3. 按0.8的负荷系数计算，活性区的使用寿命为1.25年。
- 4. 按0.6的负荷系数计算，活性区的使用寿命为1.67年。
- 5. 满负荷时的净发电功率为23600瓩。
- 6. 以下各表中规定的费用。

成本项目	总 计	美厘/瓩·小时	
		负荷系数为0.8	负荷系数为0.6
投 资	10568000美元	4.5	6.0
燃料费用	按0.8的负荷系数计算为		
(每一活性区)	1623000美元	7.9	
	按0.6的负荷系数计算为		
	1692000美元		8.2
运行维护费用	271600美元	1.6	2.2
(每年)	共 计	14.0	16.4

投资费用

科目编号	项目名称	费 用	备 注
310	a. 场 地	19000美元	见注1
311	b. 建筑和结构		
311.1	1. 场地和土建工作	565000美元	见注2
311.2	2. 发电站	380000美元	见注2
312	c. 核 系 统	2770000美元	见注3
314	d. 汽轮发电机组	1815000美元	见注4
315	e. 辅助电气设备	350000美元	见注5
316	f. 动力厂杂类设备	50000美元	见注6
	总的直接费用	5949000美元	

		(續上表)	
科目編號	項目名稱	費 用	備 注
389	g. 間接建造費用	1260000美元	見注 7
	特殊建造費用	7209000美元	
	h. 待攤費用	2860000美元	見注 8
	共 計	10069000美元	
	i. 其他費用		
	1. 工程建設方面的		
	研究發展費	222000美元	見注 9
	2. 起動和試驗費	277000美元	見注10
	3. 按項目 1 到96的		
	5 %計算的臨時費	未包括在內	見注11
	4. 在 1 年半的建造期間內		
	按5%計算的物價波動費	未包括在內	見注12
	5. 押金和保險費	未包括在內	
	6. 建造方面的利息支付	未包括在內	
		499000美元	
動力廠總投資		10568000美元	

注 1 ——場地費用不因燃料的濃縮程度而變。

注 2 ——這些費用是一個原子工程公司為25兆瓦電功率 3.7% 濃縮鈾動力廠建在具有礫石型土質的東北地區而估計的。全部河道工程距建築物200呎。

注 3 ——本科目費用是根據前述 25 兆瓦電功率 3.7%濃縮鈾活性區反應堆裝置相應的費用作以下外推縮減而計算出來的：

1. 控制棒驅動裝置的數目由13減少到 9 。
2. 反應堆壓力殼的費用約減少20%。在每次與製造廠商討論時，都認為這是一個樂觀的縮減數字，因而應被認為是一個上限值。
3. 根據 4 %濃縮鈾反應堆裝置的估計考慮，第一及第二屏蔽層、蒸汽容器、冷卻劑水泵和管道、測量裝置（更少數的控制棒等）以及其他項目的最大減少取為 5 %。

注 4,5,6——這些科目費用不因燃料的濃縮度而變化。

注 7 ——這個間接費用不因燃料濃縮度的改變而變化。

注 8 ——待攤費用包括：主承包者（設計者）及原子工程建造者為完成所有最後技術說明書和圖紙、活性區的零功率實驗、危險性分析和呈報等所需的全部工程和設計費用；主承包者在建造、試驗等工作期間的管理和工程費用；商業贏利；占待攤科目總費用10%的臨時費。這些費用均不隨燃料濃縮度的改變而變化。然而，根據最後設計可以更精確地判定估計的運行性能，因為有關燃料板的工藝比燃料細棒的工藝發展得要完善一些。

注 9 ——研究發展費用包括燃料操作工具、控制棒驅動裝置、活性區的基本試驗研究，也包括贏利及研究發展工作作用的25%臨時費。

注10——這個科目包括：進行動力廠設備檢查及完成各項試驗（包括高低功率試驗，所需全體人員的費用；運行補充費用（包括100000加侖的脫鹽淨水），全體人員在此期間內（四個月）的出差費和供養費。