

原子能译丛

世界各国动力反应堆设计

G. W. K. 福特



“原子能”編譯委員会編
科学出版社出版

原子能譯叢
世界各國動力反應堆設計

9

G. W. K. 福特著

“原子能”編譯委員會編
科學出版社

1960

G. W. K. Ford

Power Reactor Projects Throughout the World

("Engineering" 1955. 10. PP. 490—500)

Two Power Reactors Compared——Pressurised

-Water and Sodium-Graphite Systems

("Engineering" 1956. 11. PP. 727—730)

內 容 簡 介

本书包括福特的两篇文章。

第一篇“世界各国动力反应堆設計”是作者自己对于第一次“和平利用原子能国际会议”中关于动力反应堆設計部分提出的总结。文中简要地分析了当时已运行或正在設計和建造的实驗性反应堆和动力反应堆的构造，列举了各种反应堆的主要参数和特点并加以討論。

第二篇文章中，作者就压力水反应堆与鈉石墨反应堆，两种他认为有发展前途的堆型作了对比討論。

本书对于从事反应堆物理学及热工学研究的科学工作者、工程物理学方面的工作人员及大专高年级学生均有参考价值。

原子能譯丛(9)

世界各国动力反应堆設計

G. W. K. 福特 (英) 原 著
“原子能”編譯委员会 編

*

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1960 年 7 月第 一 版

书号: 2208 字数: 49,000

1960 年 7 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/25

(京) 0001—9,000

印张: 2 插页: 7

定价: 0.39 元

中 譯 本 前 言

这本小册子内收集了福特 (G. W. K. Ford) 所写的两篇文章。第一篇文章“动力反应堆的设计”是作者在 1955 年写的,原载于“工程杂志”[Engineering, 180, 490(1955)]。1956 年译成俄文后由莫斯科动力出版社出版。这篇文章是第一次和平利用原子能国际会议的报告中关于动力反应堆部分的总结。作者根据自己的见解简要地分析了世界各国当时已运行的或正在设计和建造的各种堆型的构造、线路、材料和燃料以及导热方法等,列举了有关反应堆的主要参数和特性,并在此基础上论述了各种反应堆的优缺点和经济特点。第二篇文章“压力水反应堆和钠石墨反应堆的对比”是 1956 年写的,也在“工程杂志”[Engineering, 182, 4735 (1956)]上发表过。在这篇文章中,作者通过对比,讨论了他认为有发展前途的两种堆型。1957 年苏联“原子核动力”“工程杂志”(Вопросы ядерной энергетики, 4 (1957) 曾译载这篇文章。

这些材料主要是根据英文本译来的,但也参照俄文本作了某些修改。这些材料虽不是最新的,但仍有参考价值。

第一篇文章俄譯本編者的話

日內瓦和平利用原子能會議¹⁾的報告對世界各國在建造反應堆方面所做的工作作了最全面和最系統的描述。

福特在他所寫的這篇文章內對日內瓦會議的這部分材料作了概要的論述，並列舉了現在正在建造或正在設計的實驗性反應堆和動力反應堆的主要特性。該文在一定程度上已吸取期刊文獻上所發表的材料來補充日內瓦會議中已有的材料。

在有關各種反應堆的優缺點方面以及傳熱方法方面，福特寫的這篇文章能給人一些概念，也使人能估計這種或那種類型的反應堆對其他類型的反應堆所占的地位。

該文在附表中列舉了各反應堆的參數和特性，通過這個表不難比較各個反應堆的中子通量、活性區結構材料的工作強度、溫度狀態以及其他參數。除了技術特性外，表中也列舉了各種經濟指標——原子動力裝置的設備功率、成本和電價。

這篇文章對廣泛讀者都是有益的。對於普通讀者，可使他們了解建造反應堆方面的一些主要問題；對於已在原子能部門工作的讀者，該文是一個完整的參考材料。

1) 指第一次會議——譯者注。

目 录

中譯本前言.....	ii
第一篇文章俄譯本編者的話.....	iii
世界各国动力反应堆設計.....	1
压力水反应堆和鈉石墨反应堆的对比.....	46

世界各国动力反应堆設計

第一次和平利用原子能国际會議 所发表的各种方案的比較研究

G. W. K. 福特*

近来有关反应堆的資料发表极多,即使研究其一部分,也是一項巨大的工作。但是,了解何种反应堆設計在电力的有效生产上最有发展前途,对于世界及各国經濟的重要性誰也不会怀疑;本文发表的目的也在于此。本文将日内瓦會議中討論的所有动力堆的計劃、設計及方案加以精簡而系統地描述,并尽量利用表格及相关的方案图。引述會議中发表的文件时均用正式編号:P后加一数字,如P 490。某几种反应堆已在前几期“工程”杂志(Engineering)中加以詳述,但本文偏重比較分析而不在描述。日内瓦會議以前很多資料均未发表,因此本文对这一专题的討論就目前已发表的文章說来可說是最詳尽的了。

动力的需要及燃料供应

本文的目的是将日内瓦會議中所发表的动力堆方案(不論是已建成的或是尚在計劃中的)就其工程上的主要特点作一比較。此外为了便于比較或者是由于历史意义,會議中沒有发表的设计这里也談到一些,并附在表格中。

除了工程以外,还比較了各种反应堆的經濟性,因为这是一个具有重大意义的问题,但是应该認識到这种比較的局限性。首先,应该意識到目前从事于核子动力生产的仅有的五个国家,在其現代的反应堆规划中,动机与目的大不相同。

* G. W. K. 福特是英国原子能管理局唐宁研究中心的临界实验研究的負責人——譯者注。

英国面临着燃料成本迫在眉睫的升涨,因为煤的生产几乎停滞不前价格不断上升,而进口燃料又必然价贵。因此在经济上要求迅速地建设原子动力站,且目前正从事这项工作。由于英国的煤价高,这些早期的原子动力站的动力价格预计与火电站相当,因此它们对现有动力资源甚有贡献。一般认为矿物燃料价格的上升及新型核工程可以期望的投资下降将很快使核动力站有利于竞争。铀副产品的售价所引起的复杂的经济问题也有力地影响天然铀动力站的经济性。

美国并不急需原子核动力生产,但是它也清楚地认识到数十年内,它也需要原子核动力以适应人口的增长,适应按人口平均动力需要的增加,以及适应矿物燃料储量的减少和随之而来的价格上涨。这一段“暂息”时期美国正利用于大规模原子动力工程的实验工作。

虽然美国名义上仅从事于实验性动力计划,但是假使全部计划实现后,美国在1965年所有的原子核动力容量要比英国总容量大两三倍。但是,从原子动力的容量占总动力容量的百分比来看,到那时美国还不如英国。

正由于美国旨在进行多样而又大规模的核动力实验,所以美国在日内瓦会议上发表了很多文章,并展出了多种先进的原子核工程技术。必须认识到,美国在这方面所作出的重要贡献都是属于军事应用方面的,如鸚鵡螺号及海狼号潜艇动力装置及原子航空发动机等。

苏联对原子动力的需要似乎介于英美之间。会议中苏联所发表的实验性动力反应堆并不算经济,但苏联目前正进行一个原子动力站的建设计划。法国现正进行核动力生产的实验,但它对核动力的需要看来不象英国与苏联那样迫切。

加拿大即将进入这样一个时期,即水电站已不足应付需要,特别在某些工业区,因此估计对于核动力的需求可能比美国早些。

投资与扩建成本

除了以上对于核动力的需要直接影响动力堆的计划以外,下述的一些间接因素及附加的考虑在作比较时也必须考虑到。

(1) 有些动力站完全是实验性的,虽然规模与动力站无异。通常

由于是实验性质,其基建投资很大,例如在希平港 (Shipping port) 的压力水堆 (PWR), 其压力保护建筑物只是算作一笔高额保险费, 这是实验性动力站所特有的; 而为数巨大的扩建费用也往往包含在基建投资中, 如 PWR 之扩建费达 4,500 万美元。

(2) 基建投资各国都不同, 并且其估价方法也各异, 利息与折旧率相差也很大。由于动力价格大约三分之二是投资 (火力站则为三分之一), 所以这是一个很重要的因素。

表 1——价格比较

表 2 中 之 编 号	电功率 (兆瓦)	每站投资 (美元)	投资利息 %	电力价格, 80% 负荷因素, (美) 厘/千瓦时			
				固定资本	燃料费	运转费	总
2(CEANP)	75	340	6.6	3.7	4.4	0.7	8.8
—[RAPS(F)]	100	—	—	—	—	—	~25
6(HGPWR)	223	—	—	—	—	—	<7.0
9(APPR)	1.0	—	—	27.8	①	25.5	53.3①
13(D ₂ PWR)	{ 200	200~	7.5	3.0~	0.5~	0.5~	4.0~
		300	7.5	7.5	1.5	1.4	10.4
18(BER III)	3.5	—	15	5.9	20.12	8.6	34.6
19(EBWR)	{ 4.5	890	15	19.1	6.6	8.5	34.2
	{ 9.0	445	15	11.4	6.2	4.2	21.8
21(D ₂ BWR)	248	—	12	4.2	2.6②	0.9	7.7
21(D ₂ BWR)	62	—	12	7.7	4.6	2.3	14.6
21(D ₂ BWR)	62	—	12	7.7	5.3	2.3	15.3
(H ₂ BWR)	62.5	—	12	6.8	8.6	2.3	17.7
(H ₂ BWR)	61	—	12	7.2	5.2	2.3	16.8
24(SGR)	{ 75	300	15	6.5	3.2	2.0	11.5
	{ 100	265	15	5.5	2.5	1.5	9.5
	{ 125	<200	15	4.0	2.0	1.0	7.0
25(LMFR)	210	238	16	5.7	1.4	0.7	7.8
27(Fast)	150	300	10	4.28	2.81	1.0	8.09

表 1 附 注

CEANP——中央电业局核动力站

RAPS(F)——苏联原子电站(将来的)

HGPWR——汉福特石墨慢化压力水堆(美国)

APPR——军用可装运动力反应堆(美国)

D₂PWR——重水慢化压力水堆(加拿大)
 BER III——III号实验性沸水(輕水)堆(美国)
 EBWR——发动机用的沸水堆(輕水)(美国)
 D₂BWR——重水慢化沸水堆(美)
 H₂BWR——輕水慢化沸水堆(美)
 SGR——鈉石墨堆(美)
 LMFR——液体金属燃料反应堆(U-Bi)(美)
 Fast——快中子再生反应堆(美)

① 燃料价格包括在固定資本及運轉費中。

*② 包括全部 D₂O 費用。

③ 以 60% 負荷因素計算。

(3) 天然鈾与濃縮鈾的价格各国也都不同。表 I 中的美国反应堆均假設純裂变物質的价格为每克 30 美元。英国动力价格中假定鈾之售价为每克 33 美元(P: 390)而天然鈾之价格为每公斤 55 美元。美国天然鈾价为每公斤 40 美元而加拿大为每公斤 44 美元。若干美国文件論証了裂变物質价格降为每克 15 元时对动力价格的影响。本文中对此不作考虑,虽然这样的价格最終必将在英国及美国达到。

在會議中詳細介紹的反应堆类型并不包括現有的全部核动力方案,如推进用反应堆及可装运的反应堆都沒有介紹。但是可装运的反应堆可能在世界某些地区成为商品,而美国目前在这方面完成的原子核工程实验实际上都是属于可装运反应堆的动力要求范围之内,即自 1000 至 10000 瓩(电功率)。軍用可装运动力堆(APPR)附在表 2 内(第 9 項),以資比較。

目前,推进用反应堆即令用于船舶也不是有商业价值的。航空用动力堆目前則只有軍事价值。铁路機車从經濟上及安全上考虑都不宜用反应堆。鸚鵡螺号动力装置已列入表中(第 7 項),因为它具有历史意义,也是核动力工程上一个里程碑,但若作为商用船舶推进装备,則它是沒有競爭力的。

反应堆的三种主要类型

本文所描述的反应堆从技术上可分成下列三类。(I)气冷堆;(II)水冷堆——包括(1)非沸騰压力水堆及(2)沸騰水堆。这二种类型(1)

与2)或者使用重水,或者使用輕水,有非均匀堆(所討論的类型中只有固体燃料元件),也有均匀堆(水溶液或悬浮液);(Ⅲ)液体金属冷却:(1)液体金属仅作冷却剂(一般用鈉),(2)液体金属用作燃料及載热剂。此外荷兰提出某些有趣的方案(Ⅳ类),用干燃料粉末作为循环燃料及載热剂,但这个方案尚在研究是否可行。

气冷堆 只有英国与法国从事于巨大的气冷动力堆规划,并且公布的有关設計及运行情况的技术資料极为有限。會議中介绍的几类气冷堆的优点是:当冷却剂中断时具有內在的核物理稳定性;反应堆温度过高时冷却剂与燃料的化学作用极小,可略去不計;可以用天然鈾作燃料;以及相当高的冷却剂出口温度。与压力水堆一样,气冷堆必需用巨大的高压容器,卡尔德霍尔(Calder Hall)高压容器的大小受制于現場电焊的可能性(2吋厚的鋼板)。气冷堆的总輸出中有很很大一部分消耗在气体循环中。但是英国原子能管理局証明,在英国这种类型的气冷堆可与燃煤的电力站竞争,这是很重要的一件事。

水冷反应堆 这又分成二大类,非沸騰型及沸水型。會議中发表的大部分設計及方案均为非沸騰型即压力水堆。其所以如此,理由有二:首先,在阿貢(Argonne)实验室的試驗以前,普遍认为反应堆活性区中的沸騰会造成不可接受的核物理不稳定,其次,在自然循环下沸騰,能导出的热量較之压力水在强制循环下为低,因为沸騰时蒸汽的逸出受制于自由水面的大小。用强制循环通过沸騰区将大大改变这种情况,但这会引起其他麻煩。这两种类型的共同缺点是:堆活性区必須放在高压容器內,并且供給动力站的蒸汽温度較低。从表Ⅱ可看出,这种类型范围很广:在燃料方面从天然鈾直至純裂变物质;有非均匀型(全部为固体燃料元件)及均匀型(液体燃料);在慢化剂方面有輕水、重水或石墨;在冷却剂方面有輕水或重水。这些类型的优缺点以下尚需作进一步分析。

与气冷堆比較起来,水堆高压容器故障所产生的后果要严重得多,因为大量的活化水将溅入蒸汽,冷凝后其中可能带有裂变产物,这种裂变产物是水与燃料作用后而帶入水內的。对于均匀反应堆,裂变产物与燃料溶质混和在水中,其情况更要严重得多。

表 2——世界动力反应堆之比较

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
图号, 文件, 国家	所有者, 设计者, 所在地	名称, 计划(用途), 何时开始工作	燃料, 燃料装载量, 热比功率	再生原料, 再生率, 产物	慢化剂, 功率密度, 温度	冷却剂, 功率密度, 出口温度	燃料复盖层, 热流量, 最高温度	功率, 兆瓦	投资 (百万美元) 每千瓦 (美元), 动力价格, (厘/千瓦时)
								热	电

I. 气冷反应堆

1. 图 1 P 406(a) 英国	英国原子能 管理局 卡尔德霍尔	卡尔德霍尔 钚(b) 1956	(c) — —	U ²³⁵ — Pu	石墨 — —	CO ₂ 105p — 350°C	— — 400°C	— 30	21—28 350—555 7(d)
2. 图 1 P 390(a) 英国	中央电业局 企业界 —	CEANP 动力(b) —	天然铀 125 吨 ~2.5 廷/公斤	U ²³⁵ — Pu	石墨 — —	CO ₂ 或 H ₂ — —	— — —	— 75	27 350 7
3. 图 2 P 333 法国	— — 马柯尔 (Marcoule)	GI(a) 钚 1956	天然铀 100 吨 0.4 廷/公斤	U ²³⁵ — Pu	石墨 — —	空气(大气压) — 220°C	铍 — —	40 (总) (b)	— — —
4. 图 3 P 337 法国	— — 马柯尔	G2 钚 1957	天然铀 100 吨 ~1.2 廷/公斤	U ²³⁵ — Pu	石墨 — —	CO ₂ — 300°C	铍 — 400°C(a)	— 30	— — —

II. 水冷反应堆 (i) 非沸騰堆

5. 图 4 P 615 苏联	— — 莫斯科	RAPS 动力 1954.6.27	U, 5%U ²³⁵ (a) — —	U ²³⁵ 0.32 Pu	石墨 — 600°C	H ₂ O, 1500p. — 270°C	不锈钢(b) 175 瓦/厘米 ² —	30	5(c) — (d)	— — (d)
6. 图 5 P 492 美国	— — 汉福特	HGPWR 研究 —	U, 0.92%U ²³⁵ 45 吨(a) 17.8 吨/公斤	U ²³⁵ — —	石墨(b) — —	H ₂ O, 1800p — 310°C	铝合金(c) — —	800	223	65 289 <7.0
7. 图 6 (a) 美国	美政府 西屋公司 爱达荷	STR 1, 2 鸭嘴螺号槽艇 1953.5.31	U ²³⁵ (b) — —	无 — —	H ₂ O — —	H ₂ O — —	铀 — —	—	—	— — —
8. 图 6 P 815 美国	美政府 原子能委员会 及西屋公司(a) 希平港	PWR 动力示范 1957	天然铀 + U ²³⁵ 12 吨 + 52 公斤 (b) 10 吨/公斤, 1.5 吨/克	U ²³⁵ 0.8 铀	H ₂ O — 285°C	H ₂ O, 2000P 70 吨/升 285°C(c)	铝合金-2 75 瓦/厘米 ² —330°C(d)	200— 340(e)	60— 100(f)	85 ~1000 —
9. 图 6 (a) 美国	美政府 O.R.N.L.(b) 贝尔沃堡 (Forj Belvoir)	APWR 军用 1958	U ²³⁵ (c) 25 公斤 0.4 吨/克	无 — —	H ₂ O — —	H ₂ O — 230°C	不锈钢 — —	10(d)	1	1.7 936 53.3
10. 图 6 — 美国	联合爱迪生 公司 伯布考克公司 派克斯盖 (Peckskill)	H ₂ PWR P. Dem.(a) 1959	— — —	— — —	H ₂ O — —	H ₂ O — —	— — —	500	140 (b)	55 — —
11. 图 6 (a) 美国	YAE(b) 孟山都(c) 罗威, 麻省 (Rowe, Mass.)	(钍基) PDP 1957 (d)	— — —	— — —	H ₂ O(c) — —	H ₂ O(c) — —	— — —	—	100	20~25 — —

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
图号, 文件, 国家	所有者, 设计者, 所在地	名称, 计划(用途), 何时开始工作	燃料, 燃料装载量, 热比功率	再生原料, 再生率, 产物	慢化剂, 功率密度, 温度	冷却剂, 功率密度, 出口温度	燃料复盖层 热流量, 最高温度	功率,兆瓦 热 电	投资 (百万美元) 每瓦投资 (美元), 动力价格, (厘/千瓦时)
12. 图7 (a) 加拿大	加拿大原子能 公司 加拿大通用电 气 施庆(Des foachims) (b)	D ₂ PWR NPD(c) 1958	天然铀 — —	U ²³⁵ — Pu	D ₂ O — 127°C	D ₂ O — 260°C	锆 — —	— 20 —	11 550 —
13. 图7 P 11 加拿大	— — —	D ₂ PWR 设计研究(a) —	天然铀(b) — —	U ²³⁵ 0.8(c) Pu	D ₂ O(d) — —	D ₂ O 或 H ₂ O — —	锆 — —	200 — —	— 259(f) 4~10
14. 图8 — P 498 美国	美国原子能委 员会 O.R.N.L. 橡树岭	HRT-1(a) 动力示范 1956	U ²³⁵ 或 U ²³⁸ 2.8公斤(b) 1.8 廷/克	钍(c) 1.1~1.15 U ²³⁸	D ₂ O(d) ~3 廷/升 300°C	D ₂ O, 2000p 17 廷/升 300°C	无; 均匀堆 — —	2 5~10 —	3 — —
15. 图8 P 496 美国	美国原子能委 员会 O.R.N.L. —	HTR 动力示范 1959	U ²³⁵ 或 U ²³⁸ 30公斤(a) 14.6 廷/克	钍(b) 1.1~1.15 U ²³⁵	D ₂ O(c) 36 廷/升 300°C	D ₂ O, 2000p 190 廷/升 300°C	无; 均匀堆 — —	100 440 (d)	20~25(e) — —
16. 图9 — P 936 荷兰	— — —	均匀堆 (设计研究)	U(a) — —	U ²³⁸ — Pu	H ₂ O — —	H ₂ O, 750p — —	无; 均匀堆 — —	0 — —	— — —

(ii) 沸水堆

17. 图10 P 879 挪威	— — —	PWR/BWR (设计研究)(a)	天然铀 9 吨 1.7 吨/公斤	U^{238} — Pu	D_2O (b) ~1.0 吨/升 60°C(平均)	D_2O , 400p — 230°C	铝合金 — (c)	10(d) 15(e)	2.5	— — —
18. 图10 P 851 美国	美国原子能 委员会 A.N.I.(a) 爱达荷	BER-III(b) — 已运行	U , 90% U^{235} 11.8 公斤 U^{235} 1.3 吨/瓦	无(c) — —	H_2O — 240°C	H_2O , 300p 35 吨/升 240°C(l)	铝 12.5 瓦/厘米 ² 215°C(e)	15 — —	3.5 — —	0.55(f) 100 34.6
19. 图10 P 497 美国	美国原子能 委员会 A.N.I. (Lenont)	EBWR 动力示范 1956	天然铀 + U^{235} (a) 4.5 吨 + 19 公斤 2.8 吨/公斤; 0.39 吨/瓦	U^{238} 0.7 Pu	H_2O (b) — 252°C	H_2O , 600p 25 吨/升 252°C	铝合金-2 12.5 瓦/厘米 ² (c) 265°C(d)	20 — —	5 — —	4 800 21.8(e)
20. 图10 — 美国	N.P.G 通用电气公司 芝加哥	H_2BWR PDP(a) 1960	— — —	— — —	H_2O — —	H_2O — —	— — —	670 — —	180 — —	— — —
21. 图11 P 495 美国	—(a)	D_2BWR	天然铀 43.4 吨 23 吨/公斤	U^{238} 0.901(c) Pu	D_2O (d) 8.3 吨/升 90°C	D_2O , 600p 110 吨/升 250°C(e)	铝合金-2 50 瓦/厘米 ² (平均)	1000 — —	248 — —	— — 7.7
图11	设计研究	D_2BWR	U , 0.92% U^{235} 10.8 吨(b) 18.5 吨/公斤	U^{238} 0.869 Pu	D_2O — 90°C	D_2O , 600p — 250°C	— — —	250 — —	62 — —	— — 14.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
图号, 文件, 国家	所有者, 设计者, 所在地	名称, 计划(用途), 何时开始工作	燃料, 燃料装藏量, 热比功率	再生原料, 再生率, 产物	慢化剂, 功率密度, 温度	冷却剂, 功率密度, 出口温度	燃料层盖层, 热流量, 最高温度	功率,兆瓦 热 电	投资 (百万美元) 每千瓦投资 (美元), 动力价格, (厘/千瓦时)
图11		D ₂ BWR	U, 0.85%U ²³⁵ 10.8吨 18.5 廷/公斤	U ²³⁵ 0.766 Pu	90%D ₂ O — 90°C	+10% H ₂ O, 混合, 600p — 250°C		250 62	— — 15.3
图10		H ₂ BWR	U, 1.1%U ²³⁵ 72吨 3.5 廷/公斤	U ²³⁵ 0.84 Pu	H ₂ O — 250°C	H ₂ O, 600p 40 廷/升 250°C (F)		250 62.5	— — 17.7
(g)		H ₂ BWR	U, 1.15%U ²³⁵ 36吨 7 廷/公斤	U ²³⁵ 0.82 Pu	H ₂ O — 250°C	H ₂ O, 600p 50 廷/升 250°C		250 61	— — 16.8
22. 图12 P 624 苏联	— (a) —	均匀沸騰堆 — —	U ²³⁵ 或U ²³⁵ (h) — 1.5~3 廷/公 斤	Th(c) — U ²³⁵	D ₂ O 或 3.5 廷/升 —	H ₂ O — —	— — —	— — —	— — —

Ⅲ. 液体金属冷却的反应堆

23. 图13 P 499 美国	美国原子能 委员会 N.A.A.(a) 南苏山那 (S.Susana)	SRE(b) 动力示范 1956	U, 2.8%U ²³⁵ 2~2.5 吨 ~10 廷/公斤	U ²³⁵ ~0.7 Pu	石墨(c) — ~550°C	鈾(d)(e) — 515°C	不銹鋼(f)	20 (g)	0 4(h)
------------------------	---	------------------------	--	--------------------------------	----------------------	-----------------------	--------	-----------	-----------

24. 图13 P 493 美国	C.P.P.D.C(a) N.A.A. 内布拉斯加	SGR PDP(b) 1959	U(c) (d) 10.6 缸/0.7 /公斤 缸/克	U ²³⁸ 0.7 Pu	Th 0.9 U ²³⁵	石墨	钠 — 510°C	不锈钢 — — 400(c)	250 — —	75 100 125	— 300~200 11.5~7.0
25. 图14 P 493 美国	— 伯鲁梅文 (Brookhaven)	LMFR(a) 研究(b) —	U ²³⁸ (c) ~170 公斤 3.2 缸/克	Th 1.05 U ²³⁵	— — —	石墨(d)	钠 22 缸/升(c) 550°C	无 — —	550 210 238	— — 7.8	
26. 图15 P 813 美国	美国原子能 委员会 A.N.L.(a)	EBR(b) — 1951.12	U, 90%U ²³⁵ 52 公斤 ~0.03 缸/克	U ²³⁸ 1.01 Pu	— — —	无(c)	NaK(d) — 316°C	不锈钢 — (c)	1.4 — —	~0.2 (f) —	— — —
27. 图16 P 501 美国	美国原子能 委员会 A.N.L. 爱达荷	EBR II(a) 动力示范 1958	Pu-U 合金 500 公斤(b) (1.0 缸/克)	U ²³⁸ (1.5) Pu	— — —	无	钠 — 480°C	— — —	60 (500) —	20 (150) —	(45) (300) (8.09)
28. 图15 (a) 美国	A.P.D.A A.P.D.A(b) 密歇根—	快中子再生堆 PDP(c) 1958	Pu-U 合金 — —	U ²³⁸ — Pu	— — —	无	钠 — —	— — —	300 — —	90 — —	29 323 —
29. 图15 P 405 英	英国原子能 管理局 唐宁	快中子再生堆 实验 —	U ²³⁵ 或Pu — —	U ²³⁸ — Pu	— — —	无	钠 — —	— — —	60 — —	— — —	— — —

IV. 流体化固体冷却之反应堆

30. 图17 P 938 荷兰	— — —	— 设计研究 —	UO ₂ (天然铀) 175 吨 1.7 缸/公斤	U ²³⁸ — Pu	D ₂ O 3 缸/升 冷	流体化UO ₂ — — 1200°C	石墨 — — —	300 — —	— — —	— — —
------------------------	-------------	----------------	--	-----------------------------	--------------------------------	--	-------------------	---------------	-------------	-------------