



中核四〇四有限公司国外核科技文献翻译丛书（第2套）

快堆规划：历史和现状

主编 王俊峰 胡晓丹



中国原子能出版社

国外核科技文献翻译丛书 (第2套)

快堆规划：历史和现状

主编 王俊峰 胡晓丹
翻译 刘雪花 房莹莹 陈效楠 潘 锋
审校 杨廷贵 李 迅 那娟娟 康翠英



中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

快堆规划：历史和现状 / 王俊峰，胡晓丹主编．

—北京：中国原子能出版社，2014. 7

ISBN 978-7-5022-6322-5

I. ①快… II. ①王… ②胡… III. ①快堆—研究

IV. ①TL43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 149465 号

快堆规划：历史和现状

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 王 丹

装帧设计 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 中国文联印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 850 mm×1168 mm 1/32

印 张 4

字 数 108 千字

版 次 2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-6322-5 定 价 20.00 元

网址：<http://www.aep.com.cn>

发行电话：010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

《中核四〇四有限公司国外核科技文献翻译丛书》 (第2套)

编委会

编审委员会

主 编 王俊峰 胡晓丹

执行主编 丁戈龙

委 员 (按姓氏笔画排序)

王 邵 邓锡斌 代云水 孙银峰 刘彩兵

刘开明 刘文彬 张文祥 杨 莉 杨 杰

张钟文 徐玉杰 贾瑞和 蒋建国

总序

核科技是一个相对年轻的专业科技领域，其起源和发展到现在不过百年历史。我国的核科技起步晚、发展快，有着广阔的市场发展潜力。随着我国大力发展核电，加快推进后处理技术发展，完善核燃料循环系统，我国核科技事业面临着前所未有的挑战。在新形势下，加强核科技交流与技术引进就显得尤为重要。

科学技术是第一生产力，科技的发展离不开交流与借鉴。2010年，中核四〇四有限公司组织专业科技人员翻译出版了第一套《国外核科技文献翻译丛书》，涵盖了核燃料生产、衡算控制、后处理、辐射防护等众多领域，对更好地借鉴先进技术，提升我国核科技水平，起到了很好的促进作用，在核工业界引起了剧烈反响。

应广大科技工作者的迫切需求，在四〇四各位同仁的继续努力下，第二套《国外核科技文献翻译丛书》即将出版发行。本套丛书致力于推介核工业最新技术，翻译了大量美、英等国的专业文献，涉及专业广，有着很强的技术性和指导性；同时也介绍了国际原子能机构发布的行业标准、政策等。

相信第二套《国外核科技文献翻译丛书》的出版，将为我国核科技事业的发展提供有力支撑，为我国核工业科

技工作者开阔眼界，探索新技术、新领域提供有益参考。
在此，我向本套丛书的翻译者表示感谢，并向广大科技工作者推荐这套丛书。希望四〇四的科技工作者再接再厉，期待着第三套、第四套《国外核科技文献翻译丛书》的出版发行。

中国工程院院士

潘自强

2014年5月28日

目 录

第 1 章 钚增殖反应堆的兴衰	(1)
1.1 快堆	(3)
1.2 商业化增殖反应堆失败的原因	(5)
1.3 增殖反应堆的前景	(12)
尾注	(14)
第 2 章 法国的快中子增殖反应堆	(18)
2.1 狂想曲堆, Cadarache	(19)
2.2 凤凰反应堆, 马尔库尔	(19)
2.3 超凤凰反应堆, Creys-Malville	(21)
2.4 来自凤凰反应堆的军用钚	(27)
2.5 研究和开发, 建设, 运行和退役成本	(28)
2.6 法国快中子增殖反应堆项目的安全问题	(30)
尾注	(34)
第 3 章 印度的快中子增殖反应堆	(39)
3.1 历史	(39)
3.2 快中子增殖实验堆经历	(40)
3.3 原型快中子增殖反应堆	(42)
3.4 钚用于核武器	(48)
3.5 未来预测	(49)
3.6 结论	(50)
尾注	(51)

第 4 章	日本的钚增殖反应堆及其燃料循环	(57)
4.1	规划概况——历史和现状	(57)
4.2	文殊原型快堆事故后发展重点的转变	(61)
4.3	现状	(62)
4.4	日本坚定承诺开发快中子增殖反应堆技术背后的 社会政治因素	(63)
4.5	未来前景和主要问题	(64)
4.6	结论	(65)
	尾注	(66)
第 5 章	苏联/俄罗斯的快中子反应堆计划	(68)
5.1	第一个十年, 1949—1959 年	(68)
5.2	第二、三个十年, 1960—1980 年	(69)
5.3	快中子增殖反应堆的安全性	(72)
5.4	经济性	(73)
5.5	需要处理的, 已解决的和遗留的科学问题	(73)
5.6	发现的, 已解决的和遗留的技术问题	(74)
	尾注	(75)
第 6 章	英国的快中子增殖反应堆	(79)
	尾注	(93)
第 7 章	快堆在美国的发展	(94)
7.1	阿贡国家实验室对增殖反应堆的综合研究	(96)
7.2	美国努力复苏快堆	(109)
7.3	国际合作	(110)
7.4	结论	(112)
	尾注	(112)

第1章 钚增殖反应堆的兴衰

第二次世界大战期间，美国原子弹计划的科学家首次提出以钚为燃料的反应堆产出的燃料可能比消耗的更多（增殖反应堆）。在之后的20年里，苏联、英国、法国、德国、日本和印度紧随美国建立了国家钚增殖反应堆计划。与此同时，比利时、意大利和荷兰以合作伙伴的身份加入了法国和德国的计划。在所有计划中，主要的驱动力是希望部署大规模的核能用于发电，解决能源长期供应问题。钚燃料增殖反应堆的出现，提供了一个解决低价铀的需求潜力不足的办法，并为其他类型反应堆的广阔应用前景提供了支持。

事实证明铀储量比最初预计丰富得多。经过一个快速的起步阶段后，20世纪80年代后期，核能增长速度急剧下降。今天全球核电装机容量只是20世纪70年代初预计的十分之一左右。因此部署快中子反应堆（简称“快堆”）以实现钚的增殖需求就没有那么迫切了，至少在西方经济合作和发展组织（OECD）国家中如此。但是印度和俄罗斯更担心近期持续潜在的铀资源短缺，所以正在建立新的示范增殖堆。中国目前正在快速提升核电机组容量，并且正在评估建设两个俄罗斯设计的增殖反应堆的可行性。由于成本高以及可靠性和安全性的问题（下文将详细介绍），还没有部署商用增殖堆。

OECD国家对快堆一直感兴趣的一个新原因就是贮存或处置乏燃料的政治难题。乏燃料后处理不能排除地质处置的选址问题，但是后处理厂已成为一个阶段性目标，为许多国家的乏燃料处置问题提供一条路径。

乏燃料后处理最初是在国家部署增殖反应堆计划时提出的。他们想用分离钚作为第一座增殖反应堆的启动燃料。标准的轻水堆乏

燃料包含 1% 的钚。没有增殖堆，分离的钚就会面临处置问题，而一些国家已决定将其回收并作为燃料应用于产生它的相同反应堆。慢中子反应堆效率相对较低，但利用一些钚同位素的裂变仍可以逐步建立燃料循环。

快中子反应堆的倡导者们认为，如果乏燃料中的钚和其他长寿命超铀元素可以完全裂变，那么为由短寿命裂变产物组成的放射性废物寻找地质处置点的政治问题将会变得更加容易。在所有超铀同位素的裂变中，快堆也会变得更有效。通过去除堆芯周围的钚增殖铀层，以及把堆芯压扁成“薄煎饼”形状，会使更多的中子泄漏，快堆将被转化成超铀元素“燃烧炉”反应堆。

本报告评判了法国、印度、日本、苏联/俄罗斯、英国和美国关于增殖反应堆计划的经验和状态。表 1-1 中列出了这些国家已建立的主要的增殖反应堆。德国也建造了两个用钠作冷却剂的增殖反应堆。

表 1-1 主要试验性的示范快堆^[1]

	电功率/MW	热功率/MW	运行时间
法国			
Rapsodie		40	1967—1983
凤凰	250		1973—2009
超凤凰	1 240		1985—1998
印度			
FBTR		40	1985—
PFBR	500		2010?
日本			
Joyo		140	1977—
Monju	280		1994—1995, 2010?
苏联/俄罗斯			
BR-5		5	1959—2004
BOR-60	12		1969—

续表

	电功率/MW	热功率/MW	运行时间
苏联/俄罗斯			
BN-350 (哈萨克)	350		1972—1999
BN-600	600		1980—
BN-800	800		2014?
英国			
DFR	15		1959—1977
PFR	250		1974—1994
美国			
EBR-I	0.2		1951—1963
EBR-II	20		1963—1994
Fermi 1	66		1963—1972
SEFOR		20	1969—1972
Fast Flux Test Facility		400	1980—1993

以下章节描述了国家案例研究中发现的问题。这些问题是不争的事实，由海军上将 Hyman Rickover 于 1956 年根据他对美国早期核潜艇上的钠冷堆研制经验总结得出。他指出该类反应堆“造价昂贵、操作复杂，微小的故障就会导致长时间的停堆，且维修困难、耗时严重”^[2]。

1.1 快堆

裂变同位素是核反应堆和核武器的重要核材料。它们吸收中子后分裂，平均而言，释放的中子比吸收的更多。这使得“超临界质量”中的持续链式反应成为可能。这个超临界质量必须包含一定浓度的易裂变同位素，而且必须足够大，即使小部分中子逃逸也不会产生影响。

^{235}U 和 ^{239}Pu 是重要的裂变材料。 ^{235}U 占天然铀的 0.7%。 ^{239}Pu 是由 ^{238}U (占天然铀的 99.3%) 吸收一个中子生成的 (见图 1-1)。

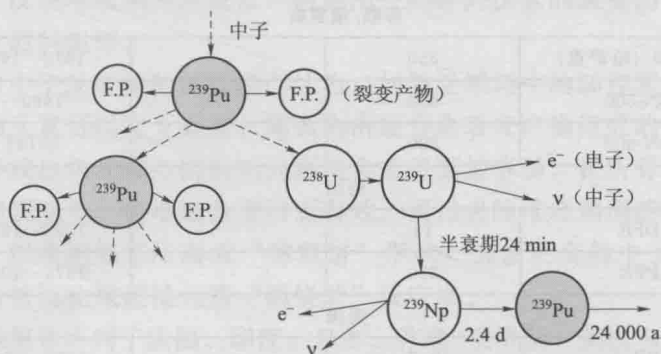


图 1-1 钚增殖

注：钚增殖反应堆通过利用额外的裂变中子把 ^{238}U 变成 ^{239}U ，再衰变成 ^{239}Np 和 ^{239}Pu ，从而使产生的钚比消耗的钚更多。

世界上绝大多数反应堆是以低浓铀为燃料并使用中子慢化剂。大多数情况下使用普通水（也可作为反应堆冷却剂）慢化中子并增加 ^{235}U 捕获中子的概率，以产生裂变。这样的反应堆称为轻水反应堆，它使用富集度为 $4\%\sim 5\%$ 的 ^{235}U 作为燃料。之所以命名轻水反应堆是区别于加拿大以天然铀为燃料的重水反应堆。在两种反应堆中，中子与氢原子发生碰撞而失去大部分能量。普通氢原子存在于轻水反应堆，重氢或氘原子存在于重水反应堆。在两种反应堆中， ^{235}U 裂变产生的一些额外中子被 ^{238}U 捕获，通过链式反应转换成 ^{239}Pu ，但是不足以取代裂变的 ^{235}U 。

为使中子在传播过程中保持活力（快速）以便产生链式反应，几乎所有的增殖反应堆计划都集中在不使用水作为反应堆冷却剂上。

为了用快中子达到超临界,增殖反应堆的堆芯须包含超过20%的易裂变材料(通常有 ^{239}Pu)与天然铀或贫铀(铀浓缩厂从

天然铀提取 ^{235}U 后的残渣)混合。环绕堆芯的是一个“增殖层”，常由天然铀或贫铀组成。“增殖层”上的 ^{238}U 吸收堆芯泄漏出来的中子后转换成钚。因为这样的反应堆产生的钚比消耗的要多，所以它的最终燃料是 ^{238}U ，比 ^{235}U 多140倍。

因为快中子引发 ^{239}Pu 核裂变时产生的次级中子数比其他速度的中子与其他易裂变同位素的组合产生的次级中子数都要多，所以钚增殖反应堆计划都集中在快堆上了^[3]。因此，以钚为燃料的快堆产生额外裂变材料的速度比任何其他反应堆都快。虽然快堆有安全性、成本和可靠性问题，但这一事实决定其在一段时间内成为了首选技术，以实现全球核能惠及人口的数量在十年内翻一番。将快堆产生的额外钚用于另一个钚增殖反应堆的启动燃料，会使增殖反应堆的数量保持高增长率。

在俄罗斯，考虑到钚燃料的成本和相关安全问题，示范快堆中所用燃料为高浓铀， ^{235}U 的富集度在20%~30%。

1.2 商业化增殖反应堆失败的原因

追求增殖反应堆的理由——有时明确，有时含糊——主要基于以下假设：

- 1) 铀很缺乏，如果大规模发展裂变能，高品位的矿床会很快耗尽；
- 2) 与轻水堆相比，增殖堆会很快具备经济竞争力，成为今天核能的主宰；
- 3) 增殖堆与轻水堆一样安全可靠；
- 4) 增殖堆所带来的核扩散风险，可以通过“闭合”燃料循环对钚进行回收和管理。

这些假设中的每一个都已被证明是错误的。

(1) 铀是廉价而且充足的

增殖反应堆被视为解决铀缺乏的方法，因为通过链式反应可以

将 ^{238}U 转换成钚，可以潜在增加 100 倍的裂变能量，这些在经济上相当于从低品位铀矿中提炼出 1 kg 的铀^[4]。

2007 年，全球核动力反应堆的铀需求量为 67 000 t——一个十亿瓦发电机组每年约需要铀 180 t。随着全球核电机组装机容量的增加，到 2030 年，国际原子能机构（IAEA）预计铀需求量每年会增加 94 000~122 000 t^[5]。

在 2008 年，OECD 核能委员会在每两年发布一次的报告——《铀 2007：资源、生产和需求》（即“红皮书”）中指出，尽管通货膨胀，全球已知的低于 130 美元/千克的可回收常规铀资源已经从约 470 万 t 提高到了约 550 万 t。红皮书也报道，随着未来的勘测，在相同成本范围上，将会额外勘测到 760 万 t 铀，这些估算来自 27 个国家^[6]。130 美元/千克的铀成本对电费成本的贡献为 0.3 美分/千瓦时。

从长远来看，在世界范围内可回收利用的低成本铀的总量几乎可以肯定会远远超过“红皮书”所报道的。如果用于估算丰度的数值是合理的，有待发掘的铀量在 5 000 万~12 600 万 t，这样回收成本仍会高于 130 美元/千克^[7]。这相当于 2030 年预计需求的 500~1 000 倍。

从图 1-2 可以看出，20 世纪 70 年代末，铀的价格在现货市场上明显高于 130 美元/千克，2005 年后又是如此。除上述供需不平衡的两个时期外，铀价一直低于 50 美元/千克。20 世纪 70 年代的价格高峰是由于对核电装机容量剧烈扩张的期望所致。这个期望没有实现，以至于大量的铀库存积压，在随后的几十年里不得不廉价销售，最终导致很多铀矿倒闭。俄罗斯卖给美国的低浓铀掺混了冷战武器中过剩的 500 t 武器级铀，足以满足美国核能装机量低迷时期对新开采铀需求量的一半^[8]。贮存的天然铀已被大量使用，俄罗斯的武器级铀将于 2013 年使用完。最近的铀价格高峰至少部分反映了在铀矿产量得到提升之前相对于铀资源需求出现了短缺，但也有部分炒作因素。

与以石油或天然气为燃料的发电厂的情况不同，在任何情况



图 1-2 1970 年以来铀的历史价格^[10]

下，铀燃料成本的翻倍对核电成本的影响不大。如上所述，130 美元/千克的铀，每千瓦时的成本仅为 0.3 美分，这仅仅是新型轻水反应堆发电成本的 5%^[9]。

(2) 增殖反应堆的建设和运营成本较高

OECD 成员国联合报告，他们已经花费了 500 亿美元（2007 年的美元汇率）用于研究和发展增殖反应堆（见图 1-3）。其中，美国报告，它已经花费了 150 亿美元，日本花费了 120 亿美元，英国花费了 80 亿美元，德国花费了 60 亿美元，意大利花费了 50 亿美元。法国的报告虽然仅为 10 亿美元，但显然这样的报道是不完全的。单是超凤凰示范工程的总成本估计为 650 亿法郎（1998 年的法郎汇率）或 140 亿美元（2007 年的美元汇率）（见第 2 章）。

俄罗斯和印度虽然没有加入 OECD，但他们已经在增殖反应堆的研究发展和演示验证上花费了大量资金。仅苏联/俄罗斯就已花费了约 120 亿美元（见第 5 章）。然而他们都没有研制出与轻水堆



图 1-3 比利时、法国、德国、意大利、日本、荷兰、英国、美国等 OECD 成员国在核裂变和增殖反应堆研究中投入的费用 (1974—2007 年)^[11]

经济效益有竞争力的增殖反应堆。

个别国家的研究清楚地表明，如果没有天文数字般的铀价，增殖反应堆在经济性上是不可能竞争过轻水反应堆的。对于“示范”液态钠冷反应堆来说，每千瓦发电量的成本是水冷反应堆成本的两倍以上。由于没有大量建造增殖反应堆，所以由此可预见，随着生产应用，该成本比率将会降低。现在对增殖反应堆的成本可能会低于 25%，且发电能力高于类似的水冷反应堆几乎没有任何争论。大约每生产 1 kW 的差别为 1 000 美元。10% 的资本支出和 90% 的平均容量系数，将转化为约 1.3 美分/千瓦时的成本差异。

通过轻水反应堆和增殖反应堆在不同增殖率、乏燃料处理和制造成本、资本成本等的详细经济性比较，在一个宽泛的假设条件下，直接处置轻水反应堆燃料的花费将比后处理和回收增殖反应堆中的钚少得多^[12]。

(3) 快中子反应堆的特殊安全问题

正如已经指出的那样，因为中子在水中与氢核碰撞而迅速失去大部分动能，水不可以作为快堆的冷却剂。另外，为了保持快中子的链式反应，堆芯中的易裂变材料必须更加集中。结果，快中子反应堆堆芯均小于同功率的轻水反应堆。这就需要冷却剂有效地带走热量。目前在增殖反应堆中广泛使用的冷却剂是液态金属钠。

与水相比，钠具有安全性上的优势，但也有一些不足。它的主要安全优势是堆运行是在液态钠沸点（883℃）以下，因此压力也更小。相比之下，水冷堆运行压力更大（压水堆超过 15 MPa）。因此，假如水冷堆管道中有一个较大的裂缝，水就会以蒸汽的形式喷出，使得反应堆中密布的燃料非常热而且得不到冷却，除非堆芯有应急冷却水。但是，在钠冷堆中除非是堆芯顶部以下部位有裂缝，否则钠会持续覆盖堆芯并吸收热量。

钠的主要缺点是：它与水相遇会发生强烈的反应且暴露在空气中会自燃。在蒸汽发生器中，熔融的钠与高压的水用薄金属隔离开，这也是增殖反应堆最麻烦的缺点之一。反应中任何的泄漏都会引起管道爆裂并引发钠水反应的火灾。

如国家研究报告中所述，大部分已建的液态钠冷堆由于钠火灾的原因已经被长时间关闭。俄罗斯的 BN-350 曾经发生过巨大的钠火灾。后续 BN-600 反应堆的蒸汽发生器设计了具有分离的仓体，可以遏制钠水反应产生的火灾，并设计有额外的蒸汽发生器。当一个蒸汽发生器发生火灾损坏时，可以对其进行修复，另一个蒸汽发生器可以使反应堆继续运行。1980—1997 年，BN-600 发生了 27 次泄漏，其中 14 次是由钠火灾引起的（见第 5 章）。

钠从管道泄漏到空气中也会引起严重火灾。在 1995 年，日本的文殊原型快堆发生了严重的钠与空气反应引起的火灾。重新启动被一再推迟，直到 2009 年末，该反应堆仍旧处于关闭状态。法国的 Rapsodie、凤凰和超凤凰增殖堆和英国的敦雷快堆和原型快堆都受到过钠泄漏的严重危害，其中一些还导致了严重的火灾。