

堆芯燃料管理的理论与实践

——从秦山—恰希玛到AP1000

程平东 司胜义 黄锦华 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

堆芯燃料管理的 理论与实践

——从秦山—恰希玛到AP1000

程平东 司胜义 黄锦华 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



内 容 提 要

从秦山—恰希玛 30 万 kW 级压水堆机组的成功建设,到 AP1000 引领的非能动先进核电厂的系列开发,是我国核电从起步走向世界前列的一个缩影。作为我国核电主战场的一支重要方面军,上海核工程研究设计院在技术发展和科研开拓的理念、方法与实践 中都有丰富的积累。本书汇集了作者在长期从事核电技术开发中有关堆芯燃料管理的经验总结与探索思考。在全书 6 章共 15 节和 5 个附录中,长循环、高燃耗、低泄漏在秦山、恰希玛和 AP1000 的实现,揭示了堆芯燃料管理核心理念的内涵;新型可燃毒物的先行先试,以及策略优化软件的技术突破,开启了关键技术环节不断创新的大门;先进核电的新实践和新开拓,铺垫了迈向技术发展前沿的基石。全书内容取自不同时期发表的科技文献,不仅自成一个知识体系,而且可以清晰地看到历史的足迹和未来的前景。

本书适于核能领域的研究所、设计院、核电公司、AE 公司等单位的研究开发、工程设计与技术支持人员阅读,也可供高等学校核能专业高年级学生与研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

堆芯燃料管理的理论与实践:从秦山—恰希玛到 AP1000/程平东,司胜义,黄锦华编著. —北京:中国电力出版社,2013.12

ISBN 978-7-5123-4730-4

I. ①堆… II. ①程… ②司… ③黄… III. ①核燃料管理
IV. ①TL249

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 163513 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 12 月第一版 2013 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 18 印张 316 千字

印数 0001—3000 册 定价 65.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



序

我很高兴能为上海核工程研究设计院专家程平东、黄锦华与国家核电技术公司专家司胜义共同编著的这本书作序。在核电厂堆芯燃料管理这一学科领域，这本书既是技术的精华，也是历史的足迹。

长时期来，上海核工程研究设计院是我国核电园地中的一片沃土。它孕育了我国第一座国内核电站、第一座出口核电站以及第一座引进的重水堆核电站，在成为国家核电技术公司的骨干企业后，又成了我国第一批 AP1000 机组建设的前沿阵地，并在国家级重大专项中承担第一个 CAP1400 项目的研发重担。这片沃土在树起一座又一座历史丰碑的过程中，也培育了一代又一代卓有成就的专家、学者。这本书就是堆芯燃料管理领域中的一个佐证。

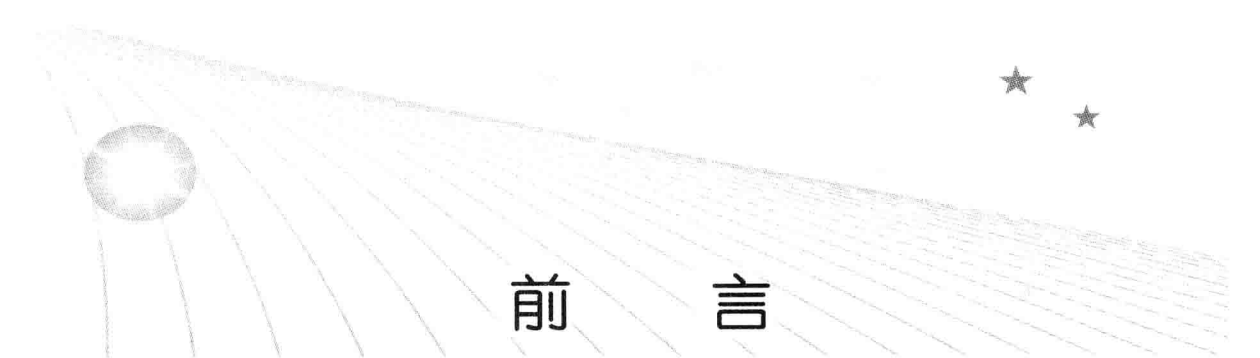
从 1988 年提出最新的理念，到今天形成完整的体系，这本书的时间跨度长达 25 年。人们从这里可以看到知识是怎样积累的，学问是怎样做成的，理论是怎样在实践中发展的。这些问题不仅值得成就了事业的长者回味，更需要刚入门的新手思考。奋斗者的学术道路是要在起步时就规划，用毕生的精力去浇筑的。

世界核电的前景是光明的。我国核电已经迈入创新发展的新时期，令人自豪的历史重任义无反顾地降落在每一个核电人的肩上。手头的这本书以一个学科领域为载体，向我们传达的技术哲理是有普遍性价值

的。从萌生到发育，从个别到一般，从初级到高级，学术与技术螺旋式上升的发展规律把人们的认知推向前所未有的境界。这本书的最后一章站在核能可持续发展的高度，把堆芯燃料管理的视野扩展到燃料循环大系统，在新一代核电设计中提出独具特色的新思维、新概念，体现的正是这种认知的升华。创新在实践的奋斗中孕育，创新在认知的升华中喷发。这正是我们对未来充满信心的认识论基础。

国家核电技术公司董事长

2013年2月4日



前言

核电厂在国家能源战略中的价值是通过核电厂在自身生命周期内的安全与高效的运转实现的。如果一座核电厂的设计寿命是 60 年，那么，在这 60 年内恰当地配置、调度、运行核电厂反应堆堆芯中的核燃料，按设计预期完成电力生产任务，既是核电厂业主追求的基本目标，更是国家能源建设的基本要求。核电厂反应堆的堆芯燃料管理就是为这样的目标与要求服务的。

在堆芯燃料管理领域，各种专门的论著并不少见。但是，把一些最重要的问题汇集起来，形成有条理的知识体系并不多见，特别是基于工程经验与历史沿革，系统地介绍我国核电从秦山与恰希玛时代到 AP1000 与后 AP1000 时代的技术发展更不多见。针对这种情况，以堆芯燃料管理的理论与实践为主题，提供有启发性的著述，就成为本书的目的。

为了鲜明地反映上述特点，本书的书名配了一个副标题“从秦山—恰希玛到 AP1000”。这个副标题揭示的是用历史的里程碑贯穿的一条创新发展的主线。在这里，值得提及的是，配有同样副标题的另一本书《走向成功的哲学》已在 2012 年 1 月由中国电力出版社出版，那是讲核电工程领域的管理理念的。可以设想，对于上海核工程研究设计院，这样一个副标题还能与研究开发、工程设计、建造服务、运行支持、安全评估等核电厂诸多活动领域，以及诸如物理热工、结构抗震、老化管理、仿真模拟、人因工程、严重事故对策、PSA 方法论等一系列学科、专业的更多专著相配。这是上海核工程研究设计院独特的历史铸就的。在堆芯燃料管理领域，从秦山—恰希玛产生最初的低泄漏理念开始，到形成长循环、高燃耗的方法论体系，到引进 AP1000 的先进设计并在 CAP1400 等后续项目中进一步创新发展，上海核工程研究设计院如同在前述其他领域一样，承载了历史的重托，国家的期望。

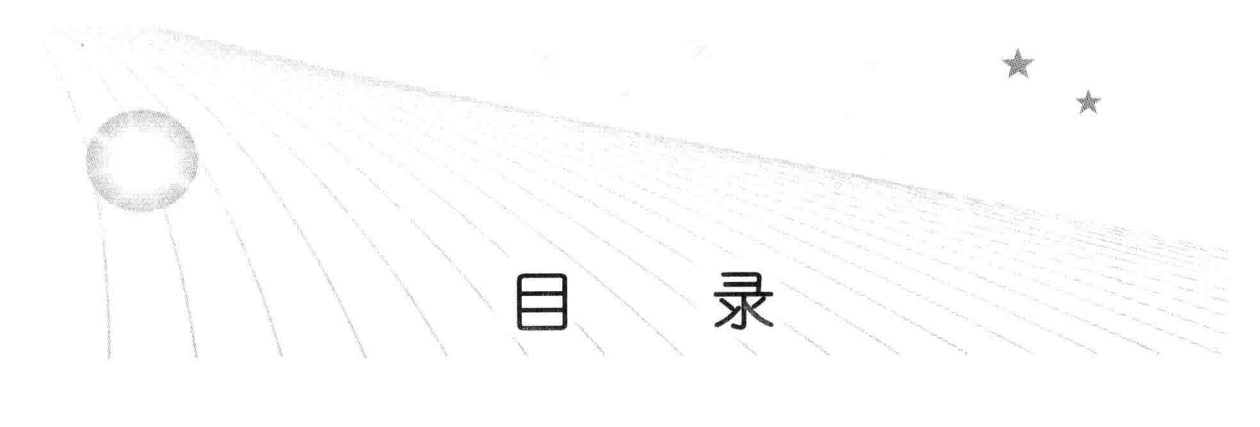
本书由 6 章共 15 节和 5 个附录组成。全书的 6 个主题已在各章开头的概述中阐明。从这些主题可以看到，技术不是僵死的客体，技术的创新与发展、渐进与飞跃是无止境的，人对新技术的追求以及人的技术创造力是没有尽头的。但是，创新灵感不是无源之水、无本之木，在学习中进行创新，在实践中进行创新，在前进中进行创新，这是本书希望表达的关于技术进步的科学发展观。本书以核电厂堆芯燃料管理为描述对象，通过追踪具有典型意义的技术足迹，在介绍相关技术内容的过程中，表达的正是编著者心目中的这种技术哲理。

上海核工程研究设计院是我国核电主战场上的一支重要方面军。她在四十多年的奋斗中，在各个技术领域培育了一大批能征善战的专业团队。堆芯燃料管理也不例外，大量的工程任务都是依靠团队的力量完成的。本书的技术内容同样是团队成果的结晶。编著者永远铭记前辈专家的贡献，他们中的一些人已经英年早逝，但是，他们的心血留在了后人的成果中。编著者欣慰地看到，团队的战斗力在新陈代谢的自然更替中不断壮大，新一代技术骨干正以更加广阔的视野、更富激情的创新，谱写着新的篇章。本书在汇编历史文献的同时，增添了一些注解，力图尽可能多地反映这一历史进程。当然，新增的一些注解也使技术内容得到了必要的补充与说明，有助于全书更好地成为一个有机的整体，并且为早期或先前的预测提供有价值的验证。

在纳入本书的各篇文献中，编著者在不同时期的合作者付出了辛勤的劳动，没有他们的配合与支持，相关的工作是难以完成的。他们是邵天伟、沈炜、钱元春、沈六华、孙谋安、邢辉以及刘正纶、蔡剑平、朱鑫官、钟友琴、叶建青等诸位同仁。在编撰本书的过程中，编著者还得到杨支娜女士在编辑事务方面的热心帮助。编著者对同事们的合作与帮助表示诚挚的感谢，对关爱本书的领导与读者表示敬意。编著者企盼得到对本书的批评指正。

编著者

2013 年 1 月



目 录

序

前言

第一章 秦山孕育了我国核电的堆芯低泄漏理念	1
第一节 秦山核电厂堆芯低泄漏燃料管理和低寄生设计	1
第二节 压水堆低泄漏燃料管理最佳化程序 L-LEAKO	10
第二章 与长循环、高燃耗的国际潮流同步前行	23
第一节 长循环、高燃耗燃料管理实施策略的国外案例	23
第二节 秦山和恰希玛核电厂堆芯燃料管理策略选择	36
附 录 秦山 CANDU 堆燃料循环优化策略	46
第三章 新型可燃毒物的先行先试	52
第一节 几种新型可燃毒物的特性及在我国的应用前景	52
第二节 新型可燃毒物设计与现代堆芯燃料管理	61
第三节 可燃吸收体燃料的反应性效应与经济性分析	66
第四章 设计优化软件的技术进步	83
第一节 压水堆核电厂换料方案的整数排列规划方法	83
第二节 低泄漏堆芯燃料管理的一种多循环优化方法	101
第三节 先进的堆芯核设计和燃料管理软件包	108
附录一 几种先进节块法的偏通量展开技术	123
附录二 堆芯节块程序 SHANG 的升级及工程应用	132
第五章 先进核电推动现代堆芯燃料管理不断发展	141
第一节 我国百万千瓦级压水堆核电厂堆芯优化设计的方向	141

第二节	基本的评估体系与 AP1000 的堆芯燃料管理	152
附录一	百万千瓦级压水堆核电厂的堆芯围筒效应	192
附录二	装载 50%MOX 燃料的 AP1000 堆芯设计	206
第六章	向更高的目标迈进	220
第一节	高能耗的实现和锆合金的改进	220
第二节	压水堆内钍—铀燃料增殖循环的技术路线设计	239
第三节	铀—钍循环大系统中的原位增殖焚烧堆	255

第一章 秦山孕育了我国核电的 堆芯低泄漏理念

秦山核电站（一期）是我国大陆的第一个核电工程，于1985年3月开工，1991年12月建成，1994年4月投入商业运行。秦山揭开了我国核电建设的序幕。作为能源大家庭的新成员，核电必须在确保安全的前提下具有经济竞争力。改善核电站反应堆的堆芯燃料管理是改善商业核电站运行经济性的重要手段。秦山核电站在开发的初期，就遵循周恩来总理提出的“安全、适用、经济、自力更生”原则，积极吸取和及时跟踪国际先进设计思想，率先在我国压水堆堆芯燃料管理领域引入“低泄漏”概念和种种配套措施，并逐步形成完整的、有自主特色的方法论体系。本章的两节，分别取材于1988年8月和1992年3月公开发表的两篇文献。这两节不仅阐明了低泄漏等理念的科学内涵，还推出了把新理念运用于工程实际的设计工具。

第一节 秦山核电站堆芯低泄漏 燃料管理和低寄生设计

这里以保证安全为前提、追求高的经济效益为目的，首次详细讨论了秦山核电站堆芯用硼硅酸盐玻璃作可燃毒物实现低泄漏燃料管理和用锆合金结构材料实现低寄生设计的概念性设计方案，为电厂建成后快速改善运行经济做预开发。

一、改善经济性的重要途径

堆芯采用低泄漏燃料管理和低寄生设计是改善核电站经济性的重要途径。

为了提高秦山核电站首炉装料的燃料利用率、加深平衡循环卸料燃耗，设计中已将首装堆芯的硼不锈钢可燃毒物改为硼硅酸盐玻璃，并把换料富集度从3.0w/o提高到3.4w/o。这两项措施可使秦山核电站获得显著的经济效益。如果在此基础上进一步实现低泄漏燃料管理，必将产生更大的经济效益。

堆芯燃料管理的优化与固体可燃毒物的合理设置密切相关。堆芯设置固体可



燃毒物可以抑制一部分慢变化的过剩反应性（也称后备反应性），使各循环初慢化剂中的运行硼浓度降低到适当的值，以保证不出现正的慢化剂反应性温度系数。合理布置的固体可燃毒物的另一个重要作用是改善和控制堆芯功率分布，使其满足安全准则的要求。这些作用不仅对首装堆芯是必要的，而且在低泄漏燃料管理中对各循环再装堆芯更是必要的。早期设计的压水堆曾采用含硼不锈钢管作为可燃毒物。为了节省中子，现代压水堆则多采用装在不锈钢管内的硼硅酸盐玻璃或装在 Zr-4 合金管内的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 弥散体烧结锭片^①。而装在 Zr-2 合金管内的 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 弥散体烧结锭片主要用于沸水堆，在压水堆中也有采用。

硼硅酸盐玻璃和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 弥散烧结体都具有基体中子吸收截面低的优点。但是，前者更易于加工，价格也低廉，硼的均匀性好，而且辐照肿胀和芯块包壳相互作用（PCI）倾向都较低；后者比前者有低得多的氢气释放率（便于利用可燃毒物棒的内腔通水）和较高的强度，但辐照肿胀和 PCI 倾向都较明显，而且包壳一旦破损， B_4C 就迅速损失，对设计与制造提出了较高要求。国内已有生产硼硅酸盐玻璃的经验，用它制成的可燃毒物样品已通过初步的辐照试验考验（这正是它在首装堆芯中取代硼不锈钢的依据）。 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 弥散烧结体也已研制成功。基于这些情况，这里提出的低泄漏燃料管理方案选用硼硅酸盐玻璃作为主要的可燃毒物材料，也用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 弥散烧结锭片进行了对比分析。

燃料包壳、控制棒导向管、燃料组件格架以及堆芯其他构件所用的材料通称堆芯结构材料。压水堆堆芯结构材料除应具有良好的物理和机械性能、良好的加工性能以及满足抗腐蚀、耐辐照的要求以外，从电厂经济性考虑，对中子的寄生俘获低也是十分重要的。在堆芯中，常用的结构材料主要是锆合金、不锈钢和镍基合金。早期压水堆曾用不锈钢包壳材料，目前大都采用锆合金。由于锆合金的中子吸收截面比不锈钢和镍基合金低得多，现代压水堆堆芯的其他结构材料已逐步被锆合金取代，向具有全锆结构的低寄生最佳设计逼近。

秦山核电厂堆芯原设计中，燃料包壳虽然是 Zr-4 合金，但其他结构，如导向管、可燃毒物包壳等仍是不锈钢，燃料组件格架则采用镍基合金。不锈钢和镍基合金在结构材料总量中占有相当大的比重（见表 1-1），这就使堆芯中子的寄生俘获显著增加，是中子利用不经济的一个重要原因。这里以两种主要的燃料管理模式为基础，对秦山核电厂堆芯改用低寄生设计进行了中子经济分析，预示了这些

① 注意，这里是 20 世纪 80 年代的表述，从本书的后续章节不仅可以看到这里所述内容的长远价值，还可以看到进一步的发展。——2012 年 12 月，作者注。

改进的显著效益。

表 1-1 秦山核电厂堆芯结构材料中不锈钢和镍基合金所占比重

材料类型	体积 (%)	重量 (%)
不锈钢	7.8	15.6
镍基合金	3.3	6.6
不锈钢+镍基合金	11.2	22.3

这里，关于结构材料的中子经济分析和堆芯燃料管理计算都是用二维节块燃料管理程序 2D-NB-3 进行的^①。快群微观截面由 B_1 近似谱程序、蒙特卡罗超热谱程序提供快三群数据经过通量谱权重得到；热群微观截面和 g 因子由蒙特卡罗热谱程序提供。

二、低泄漏燃料管理方案

堆芯燃料管理优化涉及的主要问题是燃料装载（包括倒换、卸出）方案以及控制元件，特别是可燃毒物的配置方式。大多数早期压水堆的堆芯燃料管理采用传统的“外—内”模式，即新燃料（它们的反应性较大）装在中子价值较低的堆芯外缘区，而经过一个或一个以上循环的旧燃料（它们的反应性较小）却移入价值较高的堆芯中部。这种模式的优点是可以给出相对平坦的径向功率密度分布，而且通常在换料堆芯中可以不再使用可燃毒物。但是，正因为新燃料装在外缘而造成中子大量泄漏，使得燃料利用率下降，发电的燃料成本增高。另外，在大型堆芯内由于外区燃料与内区燃料的中子耦合较差，致使堆芯中央（尤其是在换料初期）变成一个低功率密度区，从而在不同程度上丧失了功率展平的优点。20 世纪 70 年代以来，国外积极开展低泄漏燃料管理方案的研究和试验工作，由此产生了与传统的“外—内”模式相反的“内—外”模式。基于低泄漏概念的“内—外”型换料模式已成为现代压水堆燃料管理的主要方向。“内—外”模式与“外—内”模式相反，把反应性大的燃料装载在堆芯中部，因而堆芯总的后备反应性大，而把反应性小的燃料移至堆芯外缘，使得因泄漏而损失的中子减少，从

① 参阅程平东 1977 年 12 月发表于全国第一届反应堆物理会议的“耦合反应堆动力学籍贯方程”（收于 1980 年 12 月原子能出版社出版的《反应堆物理》一书），以及程平东、邵天伟 1982 年发表于《核动力工程》Vol. 3 No. 1 的“用于大型轻水堆三维分析的改进型节块法”和 1984 年 9 月发表于《核科学与工程》Vol. 4 No. 3 的“300MWe 核电站压水堆燃料物理的三维节块分析”，当时的程序命名为 NB-1，此后衍生出若干二维与三维 NB 系列程序。——2012 年 12 月，作者注。



而有效地利用中子，达到尽可能加深燃料燃耗的目的。

低泄漏概念的产生不仅给降低发电的燃料成本开拓了更加乐观的前景，而且与堆芯设计思想的变革——降低功率密度、允许较大的功率不均匀因子——相得益彰。低的中子泄漏率还使反应堆压力容器辐照水平明显降低，从而延长设计寿命。秦山核电厂虽属中小型堆芯，但是，利用设计余量，把原设计采用的“外—内”换料模式改成低泄漏的“内—外”模式仍然在经济上、安全上具有诱人的魅力。秦山核电厂反应堆的总体结构（包括控制棒及其驱动机构的设置）以及首装堆芯已经定型，因此，这里讨论的各种低泄漏燃料管理方案都以此为基础，并且不再改变已经确定的换料富集度和 1/3 卸料方式。各种换料方案还必须满足安全准则要求，其中最主要的是：① 核功率不均匀因子不突破设计限值；② 各循环初期临界硼浓度控制在使慢化剂反应性系数为正；③ 最大局部燃耗低于容许值。

在 1/3 卸料的框架内，典型的“内—外”模式实际上是“内—内—外”模式（可以称为低—低泄漏模式）。显然，介于典型的“内—外”和典型的“外—内”（即“外—内—内”）之间存在着属于低泄漏范畴的“内—外—内”模式。对于秦山核电厂堆芯，具有实际意义的“内—外—内”与“内—内—外”换料装载模式见图 1-1 与图 1-2（这里均为 1/8 对称堆芯，下同）。

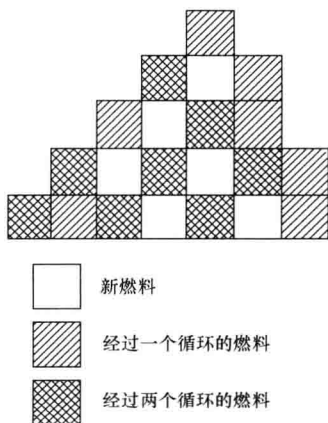


图 1-1 秦山堆芯“内—外—内”换料模式

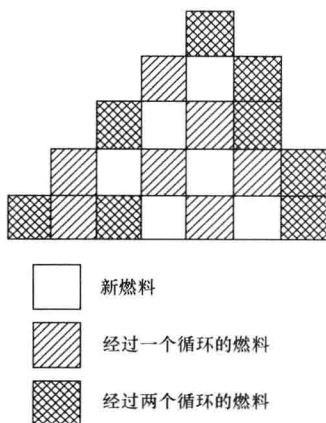


图 1-2 秦山堆芯“内—内—外”换料模式

按照图 1-1 与图 1-2 所示换料模式得到的平衡循环寿期 (T) 以及组件归一化功率峰因子 ($F_j^{\max}$) 和初始临界硼浓度 ($C_B^{k,0}$) 列于表 1-2。表 1-2 还列出了原设计“外—内—内”模式的有关结果，以作比较。表中结果都是在换料堆芯中不加

可燃毒物得到的。

表 1-2 不同换料模式的比较（平衡循环，换料富集度：3.4w/o）

换料模式	T (EFPD)	F_j^{max}	$C_B^{k,0}$ (ppm)
外—内—内	360	1.22	1274
内—外—内	376	1.81	1513
内—内—外	381	1.72	1623

从表 1-2 可以看出两个基本事实：

(1) 低泄漏装载能产生显著的经济效益。在换料富集度不变的条件下，它使每个循环的运行寿期增加 16~21EFPD（等效满功率天）。如果把运行寿期限定为 360EFPD，那么，“内—外—内”和“内—内—外”的富集度节省分别约为 0.1w/o 和 0.13w/o。

(2) 如果换料堆芯不加固体可燃毒物，那么“内—外—内”与“内—内—外”模式的组件归一化功率峰因子和初始临界硼浓度都太高，无法满足安全准则的要求。

固体可燃毒物的合理配置在低泄漏燃料管理中具有特别重要的地位，它必须满足以下几方面要求：

(1) 足够的总量，借以控制每个循环初期的过剩反应性，使初始临界硼浓度适当压低。

(2) 合理的分布，借以控制每个循环的功率峰。在设置了可燃毒物的换料堆芯中，不仅功率峰的位置随燃耗而不断变化，功率峰值也随燃耗而缓慢波动。功率峰的最大值往往出现在燃耗中后期。这样，可燃毒物在堆芯的分布就必须适应这一动态过程，而使自身的燃耗与燃料的燃耗有一个适当的空间匹配关系。

(3) 高的消耗程度和低的寄生俘获，借以把可燃毒物束缚的反应性在燃耗过程中逐渐地、最终充分地释放出来。

图 1-3 给出秦山核电厂堆芯按图 1-2 所示“内—内—外”模式进行装换料的一个实例。这个实例合理地配置了不锈钢包壳的硼硅酸盐玻璃可燃毒物（它的设计参数与首装堆芯所用相同），是从多方案比较中挑选出来的。

图 1-4 和图 1-5 给出按图 1-3 规定的换料方式进行多循环燃耗计算得到的第八循环（平衡循环）初始和末期的功率分布与燃耗分布。

从图 1-4 和图 1-5 看到，图 1-3 规定的装料方式是一个可供选用的实例。它的初始临界硼浓度和功率分布都已得到适当的控制，而且堆芯外缘组件（即 7、13、

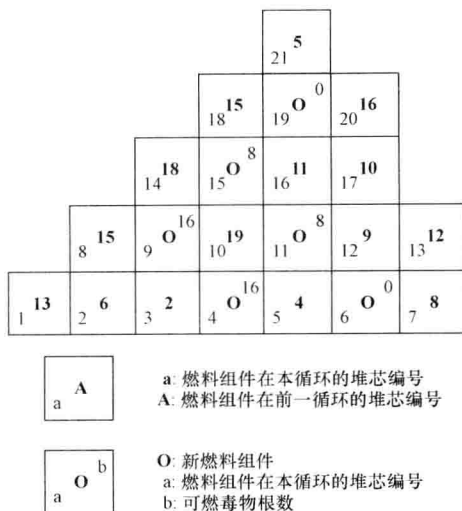


图 1-3 按“内—内—内—外”模式设计的装换料流程

				0.551 26755	— F_j — BU_j	
			1.347 13786	1.197 0	0.345 21820	
		1.040 26025	1.330 0	1.224 10398	0.563 26968	
	1.288 13786	1.073 0	1.300 13223	1.288 0	0.913 13167	0.331 21870
1.198 25207	1.331 10860	1.038 23395	1.138 0	1.322 13725	1.197 0	0.392 26781

图 1-4 组件归一化功率 F_j 和组件燃耗深度 BU_j 的堆芯分布，

“内—内—内—外”第八循环，BOL

17、20、21 号组件) 的平均功率密度在循环寿期中变化很小(它们的归一化平均值初期为 0.450, 末期为 0.457)。与原设计的“外—内—内”方式相比, 这些组件的总的功率水平下降了约 44%。

图 1-3 规定的装换料方式使平衡循环寿期延长了 14.5EFPD, 已达到“内—内—内—外”极限值 21EFPD 的 70%。可燃毒物的改进可使寿期延长的潜力进一步挖掘出来。已有的经验表明, 在传统的堆芯装载方式中, 标准不锈钢包壳硼硅酸盐玻璃的反应性损失约为 1% (秦山首装堆芯为 0.9%), 其中因残留硼、包壳吸收和毒物元件挤水而引起的反应性损失约各占 1/3。可燃毒物在低泄漏堆芯中的合理分布可使硼的耗尽程度提高。改用锆合金作为包壳材料可使寄生俘获降低。在

					0.510 31733	$-F_j$ $-BU_j$
				1.170 26030	1.012 10392	0.435 25927
		1.146 37513	1.349 13779	1.110 21828	0.564 32397	
	1.256 26791	1.358 13164	1.339 26970	1.303 13218	0.877 21870	0.367 25222
1.021 36040	1.190 23404	1.156 34959	1.403 13723	1.261 26752	1.066 10857	0.412 30626

图 1-5 组件归一化功率 F_j 和组件燃耗深度 BU_j 的堆芯分布，“内—内—外”第八循环，EOL

选用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 作为可燃毒物时，可因内腔通水而补偿一部分挤水损失。按照图 1-3 规定的装换料方式，对两种可燃毒物和两种包壳材料组合成的四种毒物棒分别进行了平衡循环燃耗计算，结果列于表 1-3。为了便于比较， $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 的硼含量以及毒物棒的结构尺寸都是参照硼硅酸盐玻璃毒物棒选定的。

表 1-3 不同的可燃毒物和包壳材料的影响（“内—内—外”平衡循环）

可燃毒物		T (EFPD)	B10 残留率 (%)	反应性损失 (% ΔK)
基材	包壳			
硼硅酸盐玻璃	S. S	374.5	6.81	0.63
	Zr-4	376.7	6.51	0.48
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$	S. S	375.3	5.65	0.60
	Zr-4	377.8	5.37	0.44

从表 1-3 看到：

(1) 按照图 1-3 的装载方式（可燃毒物集中布置在高功率密度区，而且毒物棒的数目沿堆芯径向从 16、8 直至 0 大幅度递减），毒物得到了充分燃耗，末期 B10 的残留率已达 7% 以下，引入的反应性损失也明显下降。

(2) 包壳改为锆合金后，反应性损失下降 0.15~0.16% ΔK ，寿期延长约 2.2~2.5EFPD。

(3) 采用 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 作为可燃毒物时，由于内腔通水，反应性损失再下降约 0.03~0.04% ΔK ，寿期也再延长约 0.8~1.1EFPD。

(4) 采用锆合金包壳 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 可燃毒物的“内—内—外”平衡循环寿期已达 377.8EFPD，相对于“外—内—内”方式延长了 17.8EFPD，已接近“内—内



—外” 极限值 21EFPD 的 85%。

(5) 如果把 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ 烧结体做成更薄的圆环并尽可能增大通水空腔的直径, 反应性损失还会进一步下降, 寿期也将进一步延长。这样, “内—内—外” 方式的潜力可以更充分地挖掘出来。

三、堆芯结构材料的低寄生设计

秦山核电厂堆芯改为低寄生结构虽然要使用锆合金和增加投资, 但由于锆合金的热群吸收截面比不锈钢和镍基合金低得多 (见表 1-4), 堆芯结构材料的寄生俘获就大幅度下降, 从而燃料利用率显著提高, 或者在不降低燃耗深度的条件下降低燃料富集度, 节省燃料投资, 使电厂总的经济效益提高。因此, 逐步实现低寄生结构已成为改进现代压水堆堆芯设计的必然趋势。

表 1-4 不同结构材料的中子吸收截面 (barn)

材料类型	快 群	热 群
锆合金	0.113~0.115	0.098~0.104
不锈钢	0.041~0.044	1.525~1.620
镍基合金	0.051~0.052	1.996~2.074

为了便于分析, 本文以“外—内—内”和“内—内—外”两种换料模式为基础比较了三种堆芯结构:

- (1) 老的设计, 即秦山核电厂堆芯原设计;
- (2) 初步低寄生设计, 即原设计中的不锈钢 (主要是导向管) 改为锆合金;
- (3) 最佳低寄生设计, 即进一步把镍基合金 (主要是格架) 改为锆合金, 形成假想的全锆合金结构。

在三种设计中, 假定结构材料的体积份额不变, 这是为了明确给出材料性质变化的净效应。实际上, 镍基合金格架改为锆合金格架后, 体积份额略有增大, 这个增大的部分把堆芯含硼水挤走了一些。但是, 由此造成的水体积份额变化比格架本身的变化小两个量级, 加上由此引起的热中子吸收的减弱与慢化性能的变差是两个相反的效应, 最后对结果的影响是很小的。

表 1-5 给出了三种设计的平衡循环计算结果。从表 1-5 看到, 对于相同的换料富集度 (3.4w/o), 初步低寄生设计和最佳低寄生设计的平衡循环寿期比老的设计分别延长约 6% 和 10%, 初始临界硼浓度和寿期中最大归一化功率峰值都在可以接受的范围内。如果用“外—内—内”和“内—内—外”两种管理方式把寿