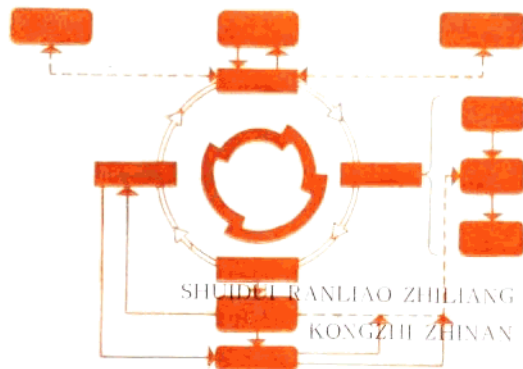




国际原子能机构技术报告丛书 第221号



水堆燃料质量控制指南

原子能出版社

内 容 简 介

本书是一本关于水堆燃料质量控制的指导原则和实践经验的论著,译自国际原子能机构技术报告丛书第221号出版物。全书共分两部分。第一部分是核燃料工艺中有关质量的一般性问题及导则,重点阐述了质量控制与质量保证之间的关系,以及与质量有关的设计准则和质量控制本身。第二部分对典型的质量保证与质量控制体系作了阐述并列举了实例,其中包括对许多国家的质量保证、质量控制情况和经验总结的介绍,轻水堆、重水堆燃料棒及燃料组件质量的有关设计要求,水堆燃料包壳、燃料棒及燃料组件的质量控制,以及二氧化铀粉末、芯块的工艺控制及产品质量检验等。

本书原作者是世界各国有关方面的专家,因而本书具有一定的权威性,对核燃料专业的技术人员具有实际的指导意义。

水堆燃料质量控制指南

国际原子能机构技术报告丛书第221号

刘定钦 姚敏智 译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京通县电子外文印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092:32·印张6.875·字数114千字

1988年9月北京第一版·1988年9月北京第一次印刷

印数:1—5000

统一书号:15175·873 定价:2.15元

ISBN 7-5022-0019-3/T·3

引 言

由于核电在世界供电量中的比重不断增大,核燃料性能的可靠性问题愈来愈受到重视。要求生产出的产品可靠,不仅是出于经济上的理由,而且也是基于安全的考虑。燃料组件在堆内必须承受住对它们的运行要求。在某些情况下,它们还必须长期贮存在水池里,一直到它们被送去后处理或最终被丢弃。稳定而又可靠的燃料生产的关键之一,就是有一个在质量保证系统中起作用的合适的质量控制大纲。

联系到国际原子能机构负责的各种各样的活动,人们早就提议应该出版一本强调核燃料制造中质量控制所起的作用,阐述质量控制和质量保证职能之间相互关系的指导手册。本书的目的是打算对涉及质量的设计要求以及对产品和工艺过程的质量控制两方面的实际经验的现状作一个概述。特定的质量保证要求,对于明确核燃料工艺所涉及的各种各样的活动之间的相互合作关系是重要的。给出的例子中列出了在这个领域的各种特殊类型的经验或对这些经验的特殊需要。

为了明确区别通用准则和规则与具体的实际经验,本书分成了A、B两个主要部分。A部分重点在于指导思想和原则,B部分是以具体的详细的技术描述和例子来补充A部分。

1979年在布宜诺斯艾利斯举行的有关核燃料工艺中的质量问题的地区性学术报告会上所发表的论文都已纳入B部分中,即B-1部分, S. Aas和D. Pomery写的《在核燃料工艺中的质量保证方法》; B-2部分, M. Gacesa等写的《Candu燃料的质量及如何实现》、D. Pickmann写的《涉及质量问题的轻水堆和重水堆燃料棒和燃料组件设计要求》; B-3部分, 由S. Takai所写的《锆合金燃料包壳管制造中的质量保证》; B-4部分, H. Bairiot写的《 UO_2 工艺》以及B-5部分, K. Raab写的《燃料棒及燃料组件的工艺》。

前 言

核反应堆在发电方面的应用的不断增长,使核燃料制造工艺具有愈来愈大的重要性。目前约有12个国际原子能机构(以下简称机构)成员国可生产商用核燃料,从而发展了核燃料的制造能力,并在此领域取得了质量保证和质量控制的经验。除此之外,还有4个国家在引进核燃料制造设备方面已处在成熟阶段,3个国家正认真考虑进入此领域的可能性。其它一些国家也有核燃料制造工艺研究和发展方面的计划。所以整理出版核燃料制造质量方面的现有资料和经验是十分重要的,因为使用这些资料是当地工业开始参与核燃料循环工作的第一步。

国际原子能机构从创建初期就有一个有关核燃料的技术规划。自从1960年燃料元件制造(重点为包壳材料)专业会议后,平均每年有一次会议来讨论燃料制造工艺方面的各种问题。1974年,在维也纳召开过一次有关核燃料制造质量保证和质量控制的专题小组会。1976年,在国际原子能机构技术报告丛书第173号中发表了此次会议的一篇报告。

从那以后,核燃料供货者在核燃料的质量稳定性和使用可靠性方面已经取得了重大的改进。这些进展是由于改进了检查设备,使用了严格培训过的人员以及建立了更加精细的质量控制体系,也许最重要的是由于与核燃料设计有关的大规模堆内运行经验的大量反馈。其结果是,对材料和零部件性能方面的设计要求的把握性已经明显地增加了。同时,对工艺特点及制造公差以及它们与核燃料性能要求及运行特性之间的关系也更加清楚明确。

最近几年来,由机构负责组织了一些有关燃料工艺的会议(1976年在奥斯陆,1978年在布拉格,1979年在布宜诺斯艾利斯)。特别是在布宜诺斯艾利斯举行的有关核燃料工艺方面质量问题的地区性学术报告会,对核燃料制造方面的质量控制进行过系统的

评价。

由于工艺状况的进展及新资料的发表，决定对国际原子能机构的技术报告丛书第173号进行审核。该书初版综述了对各种工艺的不同观点。同时感到，现在应该出版一个内容更加协调一致的册子。此外，也认为最好不要试图在一本书里既概括质量保证又概括质量控制两个方面。因此，作为第一步，决定先出版这本《水堆燃料质量控制指南》，该书概括现今的质量控制的经验以及和质量保证有关的方法。机构同时也希望随后再出版一种针对燃料制造质量保证的书。

本书的科学编辑，国际原子能机构的J. Colton, G. Sukhanov和联邦德国埃兰根的卡威屋公司的H. G. Weidinger感谢在B部分中所使用的文章的作者以及许许多多布宜诺斯艾利斯学术报告会上发表过简短文摘的未署名的作者，同时，还感谢H. Bairiot, P. Knudsen以及D. White，因为他们帮助编辑们审核了本书的A部分

目 录

引言

A 部分 核燃料工艺中质量方面的一般性问题及导则	1
1. 在核燃料工艺领域里质量控制和质量保证之间的关系	1
1.1 质量保证的指导思想和定义	1
1.2 关于在核燃料工艺领域里建立特定的质量控制及质量保证的 论证	3
1.3 基本的质量控制办法和质量保证水平	4
1.4 获得核燃料服务的方式及有关各方在质量保证和质量控制中的 各种责任	9
1.4.1 国家主管当局	10
1.4.2 营运单位	10
1.4.3 燃料制造者和供方	11
1.4.4 质量保证和质量控制技术咨询机构	11
1.5 质量保证实践方面的地区性问题	12
1.6 一般性的实际经验及所担心的问题	14
2. 有关质量的设计准则	15
2.1 一般性问题	15
2.2 燃料组件的设计要求	18
2.3 燃料单棒的设计要求	20
2.4 锆合金包壳管的设计要求	22
2.5 燃料特性	22
2.6 燃料单棒质量控制的技术条件	23
3. 质量控制	24
3.1 一般性问题	24
3.2 成本	27
3.3 水堆燃料组件的有代表性的工艺流程图及试验点	30
3.4 基本的质量控制试验	32
3.5 质量控制设备的标定系统	33
3.6 质量控制数据的分析评价	33

3.7 质量控制数据的文件编制	38
3.8 质量跟踪能力及跟踪卡的使用	40
3.9 组织、责任及人员的资格	42
3.9.1 组织	42
3.9.1.1 质量保证	43
3.9.1.2 工厂管理部门	43
3.9.1.3 燃料元件设计管理部门	45
3.9.2 人员职责及资格	46
3.9.3 质量文件	48
3.10 不合格的材料和纠正措施	50
3.11 尚未解决的质量控制问题	51
A 部分的参考文献	52
B 部分 典型的质量保证和质量控制系统的描述及范例	53
B-1 在核燃料工艺技术领域里的质量保证和质量控制	
A. A. 斯特拉瑟 (A. A. Strasser)	53
1. 引言	53
2. 质量保证或质量控制的目标	54
3. 质量保证的基本要求及其现状	57
美国	57
德意志联邦共和国	58
芬兰	59
瑞典	59
英国	59
国际原子能机构	60
4. 参与核燃料循环领域的各单位在质量保证方面的 责任	62
5. 质量保证系统的详细要求及其最重要的方面	63
B-2 轻水堆及重水堆燃料棒及燃料组件与质量有关的 设计准则 D. 怀特 (D. White)	77
1. 引言	77
2. 燃料棒的设计要求	78
2.1 二氧化铀燃料	78
2.1.1 浓缩度	78

2.1.2	成分	79
2.1.3	密度	80
2.1.4	晶粒度	80
2.1.5	芯块直径和表面粗糙度	81
2.1.6	表面掉边掉角及碎裂	81
2.1.7	抗热及抗辐照致密化的稳定性	82
2.1.8	化学计量比	83
2.1.9	杂质	84
2.1.10	芯块的完整性	85
2.2	燃料包壳	86
2.2.1	热处理及机加工历史	86
2.2.2	成分	90
2.2.3	尺寸变动	90
2.2.4	表面处理和清洁度	91
2.2.5	缺陷和夹杂	92
2.3	燃料棒	93
2.3.1	充气	93
2.3.2	端塞及密封焊接	93
2.3.3	堵漏密封	94
2.3.4	内部氢化	97
2.3.5	芯块堆叠	97
2.3.6	其它内部部件	98
2.3.7	表面处理	99
3.	燃料组件	99
3.1	燃料棒的支撑结构	101
3.2	燃料组件	102
3.3	其它部件	102
4.	质量保证的作用	103
5.	结论	107
B-2	部分的参考文献	108
B-3	水堆燃料元件用钎合金工艺的质量控制 H. G. 魏定格 (H. G. Weidinger)	110
1.	引言	110

2. 工艺及产品管理	112
2.1 建立质量控制程序	113
2.1.1 工艺步骤的敏感部分的分析	113
2.1.2 产品性质的敏感部分的分析	115
2.1.3 数据评定及分析解释	115
2.1.3.1 数据分布的类型或功能	116
2.1.3.2 置信度区间	116
2.1.3.3 分辨与解释	117
2.1.4 数据处理及文件编制	117
2.2 工艺控制检验及鉴定	120
2.3 产品特征化状况	121
2.3.1 海绵锆	122
2.3.2 锆锡合金铸锭	123
2.3.3 锆锡合金半成品: 管坯、薄板、棒材	123
2.3.4 锆锡合金成品: 包壳管和导向管	125
3. 控制检验和试验技术状况	129
3.1 无损检验技术	130
3.2 破坏性检验技术	134
3.2.1 拉伸试验	134
3.2.2 多轴应力下的机械性能试验	135
3.2.2.1 蠕变试验	135
3.2.2.2 爆破试验	137
3.2.2.3 加工性能试验	138
3.2.2.4 弯曲试验	138
3.2.2.5 刚性凸起试验	138
3.2.3 微观组织和织构试验	138
3.2.4 表面状况试验	138
3.2.5 化学分析	138
3.2.6 腐蚀试验	140
3.3 工艺控制方法	142
4. 结束语	144
B-3部分的参考文献	144
B-4 反应堆燃料氧化物粉末和芯块的生产工艺及产品管理	

H. 阿斯曼 (H. Assmann) 和 H. 贝莱阿德 (H. Bairiot)	146
1. 粉末的化工转换及精整	147
1.1 AUC 工艺	147
1.1.1 六氟化铀的蒸发	147
1.1.2 三碳酸铀酰胺的沉淀	148
1.1.3 悬浮物的过滤	149
1.1.4 煅烧及还原工序	149
1.1.5 二氧化铀粉末的稳定化	150
1.1.6 二氧化铀粉末均匀化	150
1.2 一体化干法工艺	151
1.2.1 转换	151
1.2.2 制粒	152
2. 芯块的制造	153
2.1 芯块成型	153
2.2 烧结 (标准工艺)	154
2.3 UO_2 的低温烧结	155
2.4 无芯研磨	155
3. 质量控制计划	156
3.1 六氟化铀的质量控制计划	156
3.2 二氧化铀粉末的质量控制计划	157
3.3 二氧化铀芯块的质量控制计划	159
4. 二氧化铀粉末的质量控制技术	163
4.1 浓缩度 (铀-235)	163
4.1.1 多带表面电离质谱分析法测定同位素成分	163
4.1.2 无源 γ 射线能谱分析法测定浓缩度	163
4.2 氧铀比	163
4.2.1 极谱分析法	164
4.2.2 库仑计分析法	164
4.2.3 滴定分析法	164
4.3 铀含量	165
4.3.1 杂质校正灼烧 (重量) 法测定铀和氧铀比	165
4.3.2 在磷酸介质中硫酸亚铁还原, 重铬酸钾滴定法	

测定铀	165
4.4 水含量	166
4.4.1 库仑计电解分析法测定水含量	166
4.5 氟与氯	166
4.5.1 高温水解法或分光光度计法测定氟和氯	166
4.5.2 高温水解法或离子选择电极法测定氟与氯	166
4.6 金属杂质	166
4.6.1 光谱化学法(载体蒸馏)测定金属杂质	166
4.6.2 原子吸收法测定金属杂质	167
4.7 表面积	167
4.7.1 BET法(容量分析或重量分析)测定比表 面积	167
4.7.2 氮吸收法(动态法)测定比表面积	168
4.8 流动性	168
4.8.1 Hall 流量计测定流动性	168
4.9 松装密度、振实密度和振动密度	169
4.9.1 松装密度(按ASTM B212-48)	169
4.9.2 振实密度	169
4.9.3 振动密度	169
4.10 粒度测定(筛分试验)	169
4.11 压缩性能和烧结性能	169
4.11.1 压缩性能	169
4.11.2 烧结性能	169
5. 二氧化铀芯块的质量控制	170
5.1 化学成分和同位素成分	170
5.1.1 铀-235 浓缩度	170
5.1.2 氧铀比	170
5.1.3 铀含量	170
5.1.4 非金属杂质(氟、氯、氮、碳)	170
5.1.5 金属杂质	171
5.1.6 残余气体含量	171
5.1.7 总氢含量	171
5.2 密度和微观结构特性	172

5.2.1 密度	172
5.2.2 热稳定性 (再烧结试验)	172
5.3 微观结构	173
5.4 外观和几何尺寸	174
5.4.1 外观	174
5.4.2 表面粗糙度	175
5.4.3 芯块几何形状和尺寸	175
B-4 部分参考文献	175
B-5 水堆燃料棒和燃料组件的质量控制 P. H. 法兰克 (P. H. Franke), K. 罗布 (K. Raab)	177
1. 引言	177
2. 质量保证大纲	177
3. 组织机构	179
4. 工艺过程的记录	179
4.1 概述	179
4.2 检查计划	180
4.3 记录的分发	180
5. 采购	181
5.1 子供货商的鉴定	181
5.2 采购文件	182
5.3 供货商的评价和选择	182
5.4 购入件的管理	182
6. 材料的识别	183
7. 操作处理、贮存和运输	185
8. 工艺过程的鉴定	186
9. 产品管理	188
10. 工艺过程管理	193
10.1 设备的工艺过程管理	193
10.2 产品的工艺过程管理	194
11. 监督	194
12. 测量和试验设备的标定和管理	195
13. 质量数据的管理及文件编制	196

14. 未来的发展	197
名词术语	198

A 部 分

核燃料工艺中质量方面的 一般性问题及导则

1. 在核燃料工艺领域里质量控制和 质量保证之间的关系

1.1 质量保证的指导思想和定义

质量控制和质量保证是相互联系的，并可通过定义这两个术语和指出它们的重要功能是如何相互作用的，以取得对它们的最好的了解。

欧洲质量控制机构（EOQC）把质量控制定义为：“在一个组织机构里规划并协调各部门工作的一种系统，用以检查或保持质量，或在一个合适的经济水平上改善质量”。在美国，把质量控制定义为：“按规定要求为控制和测量某一物项、工艺和装置的性能提供手段的所有质量保证活动”。看来，质量控制是属于质量保证这个范畴的。

质量控制的功能是巨大的，因为有效的生产管理的目的是稳定操作或工艺，并对那些由某种条件造成的不应有的质量偏离或倾向提出适当的警告，因为这些偏离或倾向若不改正，可能最终导致产品报废。通过选择采取措施的一些条件，可以评估和预测生产过程中出现问题的统计概率，并能以已知的计算出来的风险，制定出取样计划。鉴于特别强调必须完成哪些操作，所以，质量控制的成功在很大程度上取决于在开始生产之前对各工艺过程的功能试验是否有效。这些功能试验正是根据采用各有关工艺设计的。

应当强调，质量控制系统和规程还必须在和制造工艺一样的状况下进行开发、试验和鉴定。质量控制及制造大纲两者的统一结合要在工艺过程的早期设计阶段实现，以确保得到一个最有效、最经济的系统。如果从工艺过程的开始起不能设计一个合适的质量控制系统，那么，在以后为加进去这样一个系统可能需要投入两倍的人力和设备。

质量保证是人们常常讨论和定义的一个课题。国际原子能机构已经为核电站制定了一个实施法规及一系列安全导则。虽说人们认识到对核电站的质量保证要求与对燃料循环设施，例如燃料制造厂的质量保证要求，只有少许不同，但许多建议都是类似的。在实施法规中指出，质量保证是“良好的管理”的一个核心问题。良好的管理要通过分析所完成任务、对所要求的技能进行鉴定、选择和培训合适的人员、选用合适的设备以及创造一个令人满意的能够开展工作的环境，和使执行任务的每个人都能认识到自己责任等为取得质量方面的成就作出贡献。简而言之，一般认为，一个质量控制大纲应当对影响质量的所有工作环节提供一套严格的管理办法，包括验证每一项任务的执行是否满意以及必须的改正措施是否执行。质量保证大纲还应当提供生产的证明文件以证明所要求的质量水平已经达到。

美国国家标准所定义“质量保证”如下：“质量保证是为了对某一物项和某套装置在未来的使用中确能满足工作树立信心而进行的所有有计划有组织的活动。”（ANSI N-45.2）

欧洲质量控制机构定义“质量保证”如下：质量保证是一个工作系统，其目的是对全面质量控制工作实际的有效性提供保证和证据。

在所有的情况下，质量保证系统包括对全面质量控制大纲的合理性和有效性进行连续不断的评定，着眼于在需要时采取补救纠正措施。对某一特定的产品或服务项目而言，它包括验证、审查及评定那些影响产品或服务项目的技术条件、生产、检验及使用的质量因素。

由于获得良好的、稳定的质量依赖于资料，所以质量保证的“监查”功能有重要作用。欧洲质量控制机构写道：监查就是监督各阶段的质量，并提供资料。这些资料可能是顾主所要求并确实可得到的，以验证质量保证的职能，特别是验证质量控制的职能是否正在按规定执行。核燃料制造者将经常促使对有关质量的各项工作进行审查，以便确保这些质保系统正在执行它们预定的职能。常有这种情况，引进了科学而可靠的质量保证和质量控制系统，但过一个时期后，当外部因素有了稍微的变化时，最初的计划已不再合适。所以，在质量保证和质量控制系统之间应始终保持联系，以发现质量控制系统中存在的有问题的环节或确认质量控制是灵敏的，足以探测质量水平的动向。没有全面质量保证系统是不可能进行质量控制的，因为很难建立一个在核燃料制造中始终有效的检查计划。

有关核燃料工艺质量保证概念的更详细的考虑已经由 G. Randers 及 L.G. Archer 发表在国际原子能机构奥斯陆专题学术会议会报的一号专题上。

1.2 关于在核燃料工艺领域里建立特定的 质量控制及质量保证的论证

一些国际协议要求核燃料工艺具有类似于对压力容器、热交换器及水泵等反应堆部件的质量控制和质量保证的要求。

每一种具有高性能和安全要求的工艺，基本上都包含前一节里讨论过的质量控制和质量保证的指导思想。为了了解这种系统的重要性，应当考虑下面两个要点：

(a) 大量的相似的堆芯部件(例如芯块、包壳管、燃料棒等)需要有一种生产及检验方法，以使单个部件保持同一性。这就要求每一个生产步骤都有高度的重复性，而且要求原材料在长时间内始终稳定不变。这种重复性只有通过工艺努力及通过对工艺过程及产品的特殊检验方法才能得到。

(b) 和其它反应堆部件相比较，核燃料经过一段相当短的时间

期（3～5年）就要更换，因此，对核燃料的许多技术要求就与其它长期使用的堆部件的技术要求不同。例如，长期蠕变、长期裂纹扩展、高周疲劳以及长期腐蚀，在绝大部分情况下都不适用于核燃料。然而，它们对压力容器或反应堆一回路管道可能是很重要的。

紧接着上面两点，还应当考虑第三点。由于相同的产品数量大、要求对生产工艺及产品有高度的重复性以及反应堆内的时间短等特点，就有可能和需要对工艺过程及产品性质建立统计分析。为了适应核燃料工艺的需要，这些技术都有了很好的发展。由于这一类分析的置信度水平在很大程度上取决于对所研究的产品具有的大量数据，因而这种方法很少用到其它反应堆部件上去。所以，当每部件需要单独处理，而且只有很少一点数据时，其它办法就更为重要了。

1.3 基本的质量控制办法和质量保证水平

多年来，许多国家在燃料工艺领域中的成功经验证明，在制定成功的计划时，必须考虑两个基本问题。在各种不同的工艺过程内，特定的细节与精细之处可以忽略，因为它们可能是属于工艺过程或工艺技术的。但为了解释这两个共同的问题，应当指出下面几点：

(a) 质量不能只靠检验控制来得到，产品的质量必须在每一道工艺过程中制定计划、进行实施和验证，在工艺过程的设计阶段初期，还必须考虑对监督和验证系统进行开发。

(b) 质量不是一个公式化措施的产物，质量是在运行操作要求的限制下，基于对产品及其工艺过程科学和技术了解的基础上进行逻辑性工作的结果。

这两点意见涉及到从燃料设计阶段到乏燃料的后处理所建立起的整个“质量保证圈”（图1）。必须了解，在质量圈内的每一步都是由专门的质量保证和质量控制子圈组成的。图2以某种更详细的方式说明了这些相互关系。它表明了在与质量信息有关的