

HTR-10 高温气冷堆核安全监督文件的研究与编制

Study and Compilation of Nuclear Safety Inspection Documents for the HTR-10 Test Reactor

高泉源

(苏州核安全中心, 江苏苏州 215004)

摘要: 对具有诸多非能动、固有安全设计特点的高温气冷堆如何实施核安全监督是目前国内外核安全监管领域所遇到的新问题。苏州核安全中心在这方面进行了探索, 编制了一套针对清华大学核研院10 MW高温气冷堆建造、调试和运行各阶段的监督文件, 用于规范和指导对高温气冷堆的核安全监督。本文叙述了在大量调研、分析、研究基础上完成该监督文件的过程和一些具体做法, 介绍了部分监督文件内容, 最后还对该监督文件的应用情况作了简单说明。

关键词: 高温气冷堆 监督文件 研究 编制

Abstract: It is a world-wide issue about the inspection to the advanced high temperature gas-cooled reactor which incorporates many passive, inherent safety design features. Suzhou Nuclear Safety Center has made efforts in this field, and has compiled a set of inspection documents with the purpose to standardize and guide the inspection of HTR-10 constructed at Qinhua University. This paper summarizes the methods adopted in compiling this inspection documents for HTR-10 reactor on the basis of investigation and analysis, and briefly describes the main contents of some inspection documents.

Key words: The HTR-10 test reactor Inspection document Study Compile

中国正在设计、建造10 MW高温气冷堆(HTR-10), 该堆是一种安全、经济的先进反应堆, 它采用全陶瓷包覆颗粒燃料元件、石墨作慢化剂及堆芯结构材料、氦气作冷却剂, 具有很高的热稳定性和自动停堆、非能动余热排出能力, 因此在任何工况下都不会出现如堆芯熔化等导致危害公众和环境安全的严重事故。

如何对这种具有诸多非能动和固有安全设计特点的反应堆进行有效的核安全监督, 并尽快使其规范化、标准化, 从而确保HTR-10在建造、调试、运行各阶段的工作均满足我国核安全法规要求, 这是我国核安全监管当局所面临的一项新的任务。苏州核安全中心受国家核安全局委托, 系统而全面地开展了“高温气冷堆(HTR-10)监督文件的研究和编制”工作, 内容包括: 法规、标准的调研、监督依据确定、监督项目选择原则和重点关注问题确定, 并结合清华大学高温堆建设进度完成了建造、调试和运行各阶段的核安全监督大纲、监督程序等文件的编制。

1 法规、标准文件调研

为编制监督文件, 我们对国内外有关高温堆设计、建造方面的法规、规范和标准进行了调研, 但由于模块式高温堆概念是最近二十年才提出并发展起来的, 因此各国针对高温堆设计、建造的法规、规范和标准并不多。

中国尚没有制定针对高温气冷堆的设计安全要求, HTR-10的设计主要根据核电厂的通用规范、厂址、辐射防护方面的顶级要求及专门编制的HTR-10设计准则进行的。

美国核管会(NRC)在与业主交流合作的基础上, 出版了“核电厂安全分析报告标准格式与内容(高温气冷堆版)”、“高温气冷堆总设计准则”、“动力堆管理导则对高温气冷堆的适用性”等导则、规范, 用

综述
核电设计
工程管理
工程建设
运行维护
核安全
核电前期
核电论坛
核电经济
核电国产化
核质量保证
核电信息

于指导高温堆的审评监督。

德国核安全委员会发布了KTA3102"高温气冷堆堆芯设计"等系列规范用于审评和监督。日本对高温堆的审评监督主要基于核安全委员会（NSC）编纂的"审查导则（通用）"、"轻水堆审查标准"，同时NSC依照法规要求，并根据高温堆特点编制了部分专用标准用于高温堆的监督管理。

2 监督依据的确定

通过对我国现有核安全法规的进一步研究，并结合对外国法规标准的调研和HTR-10的具体情况，我们确定了对HTR-10实施监督的依据和参考文件（也即编制高温堆监督文件的主要依据和参考文件），主要包括：

—我国核安全法规、以及其他与辐射防护、环境保护、卫生等有关的国家法律、法规，如核安全法规HAF001、HAF102、HAF103、HAF003、国标GB8703—88、国家环保法等；

—国家核安全局审查批准或认可的文件，如HTR-10的33个设计准则、HTR-10的初步安全分析报告（PSAR）和最终安全分析报告（FSAR）、安全分析报告评价报告、各阶段的质保大纲等；

—国外的一些规范、标准和导则作为参考，如美国的HTGR格式内容、HTGR总设计准则、RG管理导则（适用高温堆）、ASME规范、IEEE标准、德国的KTA规范（KTA3102高温堆堆芯设计）等；

—鉴于HTR-10较好的固有安全性、反应堆功率不是很大的特点，对于部分与现有法规、规范和标准不适用的情况，针对具体问题作具体分析。

3 监督项目选项原则的制定

监督文件编制工作中一项关键工作是监督项目的选择，根据法规要求、结合高温堆的具体情况，我们制定了高温堆各个阶段总的选项原则，具体如下：

（1）安全上重要的构筑物、系统、部件（建造阶段设备选项主要是核1、2级、部分3级，调试和运行阶段系统选项主要是确保完成三大安全功能及限制元件受化学侵蚀的系统）；

（2）国内外审评和监督中重点关注的内容和 / 或与压水堆不同，高温堆独特的重要系统、设备；

（3）HTR-10高温堆在建造、调试过程中曾出现的较大不符合项；

（4）在监督项目总数不能太多的情况下，除保证基本的安全系统外，应优先考虑燃料系统和放射性管理系统的项目。

4 监督中需重点关注的问题确定

在选项总原则确定后，我们通过对HTR-10设计、建造方面资料及PSAR和FSAR审评中重点关注问题的研究，确定了较具体的各监督阶段需重点关注的问题和方面。

（1）反向自然循环问题

由于反转将导致压力容器温度超设计准则，故该问题在调试阶段进行试验验证并重点监督；

（2）蒸汽发生器传热管

蒸汽发生器传热管是审评关注问题，由于国外类似堆曾出现过蒸汽发生器传热管破裂事故，因此考虑在建造（制造）、调试、运行各阶段对此进行重点检查和关注；

（3）燃料元件的制造及辐照考验问题

由于取消了安全壳，燃料元件作为第一道屏障在PSAR、FSAR审评中备受关注，同时国外类似堆曾出现元件批量破损事件，故燃料元件的制造及辐照考验问题应分别作为制造阶段和调试阶段的重点检查内容；

（4）石墨堆内构件的制造质量

石墨材料辐照后先缩后胀，变化较复杂，在设计、制造经验不足的情况下，石墨堆内构件的制造质量需作为建造阶段重点内容进行检查；

(5) 临界及零功率阶段的物理试验（空气和氦气气氛下）

石墨球床堆物理计算的经验不是太多，为校核设计的不确定性，临界及零功率阶段的物理试验（空气和氦气气氛下）应作为重点检查内容；

(6) 一回路压力边界设备、部件的制造、试验

同样由于取消安全壳的原因，作为限制放射性释放的关键屏障，一回路压力边界设备、部件的制造、试验应作为建造、调试、运行各阶段的重点检查内容；

(7) 数字化保护系统

先进数字化技术在国内试验堆中首次使用，设计及监督方面均有经验不足问题，故数字化保护系统的制造及调试应作为重点检查内容；

(8) 吸收球停堆系统

作为新型的第二停堆系统，技术上有个磨合过程，同时国外类似堆运行中该系统曾出现过事件，故吸收球停堆系统需作为调试和运行阶段重要检查项目进行关注；

(9) 余热排出系统

模块式高温堆特点之一，即利用非能动手段将堆芯余热排出，为验证失冷事故下余热排出能力，余热排出系统需作为建造和调试阶段检查项目进行关注；

(10) 燃料装卸系统

燃料装卸系统是新型不停堆换料设备，其中有关键的燃耗测量装置等设备，国外启动阶段该系统经常发生故障，故我们在各个阶段的监督检查中都应对该系统进行关注；

(11) 蒸汽发生器卸压排放系统（包括主给水和蒸汽隔离阀）

蒸汽发生器卸压排放系统是限制水进入堆芯的关键系统，在调试和运行阶段应重点关注；

(12) 负压通风系统

负压通风系统作为配合包容体代替传统安全壳，起一定量限制放射性释放的一个较重要的系统，在建造和调试阶段需关注；

(13) 一回路放射性监测系统和包容体内放射性监测系统

放射性监测系统是反应堆运行状况以及堆是否满足基本核安全要求（放射性指标）的重要系统，应作为高温堆各阶段的主要检查内容进行关注；

(14) 包容体的建造

高温堆包容体虽仅在正常运行工况和小破口事件情况下起限制放射性物质向环境释放的功能，但仍是某种意义上的最后一道屏障，故包容体的建造应作为建造阶段重点检查项目进行关注。

5 具体编制工作

5.1 监督大纲编制

按照法规HAF001“中华人民共和国民用核设施安全监督管理条例”及其有关导则的要求，参考国内外有关资料，并结合高温堆建造、调试、运行各阶段的具体特点，分别编制高温堆建造、调试、运行阶段监督大纲，监督大纲内容包括检查目的、适用范围、检查依据、组织机构和职责分工、检查实施、大纲管理六个方面。

5.2 监督项目表的确定

根据确定的选项原则，即HTR-10构筑物、系统、部件在安全上的重要性，最终安全分析报告中重点审评和遗留问题，以及高温堆在实际建造、调试过程中发生的较大不符合项和修改，适当参考国外高温堆调试监督中关注的问题等，确定了高温堆建造、调试、运行各阶段的监督项目。

建造阶段项目共选了33项，其中土建分阶段选了核岛基础、包容体、质保检查等3项；设备制造分阶段选了燃料元件制造、核1/2/3级机械设备、1E级仪控设备、特殊的非安全级设备及质保检查等25项；安装分阶段选了安全级设备安装、质保检查等5项。具体项目详见表1“HTR-10高温气冷堆建造阶段监督检查项目清单”。

表1 HTR-10高温气冷堆建造阶段监督检查项目清单

编号	程序名称	编号	程序名称
1-3-1	核岛基础	26-6-3	二回路隔离系统给水电动阀
2-3-2	反应堆厂房（包括一回路舱室和反应堆大厅）	27-6-4	事故负压通风系统逆止阀
4-17-1	土建阶段质量保证检查	29-7-2	吸收球触发系统
5-3-1	控制棒驱动机构	32-7-5	功率量程探测器
7-4-1	包覆燃料颗粒制造	34-7-7	线性功率测量装置
8-4-2	燃料元件尺寸	41-8-2	柴油发电机组
12-5-1	反应堆一回路压力壳材料检查	44-9-3	燃料装卸系统主要设备
13-5-2	反应堆压力容器焊接检查	45-10-1	蒸汽发生器安全阀
14-5-3	反应堆一回路压力壳出厂试验检查	49-17-1	设备制造营运单位的质量保证检查
15-5-4	反应堆蒸汽发生器传热管及连接管的材料检查	52-17-4	核承压设备制造单位的质量保证检查
16-5-5	蒸汽发生器有关部件制造的检查	54-4-1	堆内构件安装
17-5-6	蒸汽发生器的压力试验和氦检漏检查	55-5-1	反应堆一回路压力壳安装定位检查
19-5-8	一回路泄放系统安全阀样机鉴定试验	61-9-3	燃料装卸系统安装竣工检查
20-5-9	一回路泄放系统安全阀出厂试验	63-17-1	机械设备安装活动质量保证检查
21-5-10	一回路第一道隔离阀样机鉴定试验	64-17-2	仪控电安装活动质量保证检查
22-5-11	一回路第一道和第二道隔离阀出厂试验	65-6-5	一回路舱室爆破膜及通风泄压系统电动阀
25-6-2	事故负压通风系统风机		

调试阶段项目共选了28项，其中保证停堆功能的系统选了10项，保证冷却功能的系统选了7项，保证包容功能的选了7项，防止石墨燃料元件受化学侵蚀（包括氧化）的系统2项，其他2项。具体项目详见表2“HTR-10高温气冷堆调试阶段监督检查项目清单”。

运行阶段项目共选了25项，其中综合性检查项目，包括质保、运行安全监督、安全重要的修改、运行事件管理、辐射防护等选了11项，定期试验检查项目选了14项，主要是仪控、电源、系统设备等涉及三大功能的项目。具体项目详见表3“HTR-10高温气冷堆运行阶段监督检查项目清单”。

在项目表中，对每个选定的项目，还列出了主要的检查内容、检查的类别、频度等。

表2 HTR-10高温气冷堆调试阶段监督检查项目清单

编号	程序名称	编号	程序名称
66-3-1	控制棒驱动机构热态试验	79-7-2	反应堆保护系统整定值确认和报警功能试验
67-3-2	吸收球停堆系统功能验证试验	80-9-1	燃料装卸系统试验（A2子阶段）
9-4-3	燃料元件辐照试验	81-9-2	防火
68-4-1	包覆燃料颗粒氧化腐蚀试验	82-9-3	放射性三废处理系统试验

69-4-2	装料并首次临界试验	83-9-4	燃料装卸系统试验 (B3子阶段)
70-4-3	控制棒价值及停堆深度测量	84-9-5	氦辅助系统试验
71-4-4	吸收球停堆系统的停堆反应性价值测量	85-9-6	氦净化系统试验
72-4-5	慢化剂温度系统测量	86-10-1	主蒸汽安全阀试验
73-5-1	一回路泄压系统试验	87-6-2	主蒸汽和给水隔离阀试验
74-5-2	一回路压力试验	88-6-3	蒸汽发生器卸压排放阀试验
75-5-3	一回路泄漏率测量试验	89-12-1	辐射和剂量监测系统试验
76-5-4	一回路主要参数设计值的校核试验	90-14-1	外电网断电试验
77-6-1	一回路舱室冷却系统能力验证试验	91-17-1	质量保证检查
78-7-1	反应堆保护系统的联锁功能试验	92-18-1	备用停堆点功能试验

表3 HTR-10高温气冷堆运行阶段监督检查项目清单

编号	程序名称	编号	程序名称
93-17-1	运行质保大纲实施有效性监督检查	106-13-4.4	核测量装置检查
94-13-1	运行安全监督	107-13-4.5	反应堆保护系统的功能检查
95-9-1	防火检查	108-13-4.6	反应堆保护系统整定值确认和报警功能检查
96-16-1	安全重要的修改活动	109-13-4.7	备用停堆点功能试验
97-10-1	安全有关的实验	110-13-4.8	一回路系统隔离检查
98-13-2	运行事件管理	111-13-4.9	主氦风机及风机挡板检查
99-13-3	运行人员的配备和培训	112-13-4.10	主蒸汽安全阀试验检查
100-9-2	核燃料贮存	113-14-4.11	主蒸汽和给水隔离阀试验检查
101-11-1	放射性废物管理	114-13-4	蒸汽发生器卸压排放阀试验检查
102-12-1	辐射防护检查	115-13-4.13	电源系统检查
103-13-4.1	控制棒驱动机构检查	116-5-1	一回路冷却剂系统泄漏检查
104-13-4.2	吸收球停堆系统检查	117-5-2	核一级承压设备的在役检查
105-13-4.3	燃料装卸系统试验检查		

5.3 检查程序的编制

在开始编制检查程序前，对核安全法规和导则、高温堆的PSAR/FSAR及其评价报告、高温堆建造、调试、运行等各方面资料进行了更详细的研究、分析，同时对相关的高温堆调试/运行规程进行审查，并就有关问题与营运单位进行对话、交流。在此基础上，严格依据法规要求并结合高温堆的具体特点，适当参考国内外有关资料，编制出HTR-10建造、调试、运行三个阶段共86份监督检查程序。每份检查程序包括：监督检查目的、监督检查范围和条件、监督检查内容和步骤、判定标准和监督检查结果、监督检查结论和评价。

6 结束语

编制完成的高温堆各个阶段的监督文件中的部分文件已在堆的建造和装料前调试过程中得到了很好实施，监督员使用这些监督文件发现并纠正了一批设计、建造、调试中存在的问题。但由于本监督文件主要是针对HTR-10高温气冷堆进行编制的，还不适合所有类型的模块式高温气冷堆，同时本文件尚未涉及到氦气透平、高温工艺热方面的内容，故在今后一段时间内需作进一步的完善。

(本文英文版被选入第13届太平洋地区核能大会论文集)

