

三门核电 AP1000 机组无损检验技术 能力验证实践探讨及分析

官益豪

(三门核电有限公司,三门 317112)

摘要:在役检查无损检验技术能力验证是对相应的无损检验技术在实际的检验条件下具备的性能进行确认。AP1000 机组将在役检查项目分为特殊验证项目、综合验证项目、常规验证项目和不需验证项目四类。三门核电 AP1000 机组无损检验技术能力验证实践表明,我国自主实施的能力验证方法适用性较强。

关键词:无损检验;能力验证;在役检查;AP1000 机组

中图分类号:TG115.28,TB302.5 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2014)05-0073-05

Discussion and Analysis of the Practices of Non-destructive Testing Qualification for Sanmen AP1000 Nuclear Power Plant

GUAN Yi-hao

(CNNC Sanmen Nuclear Power Co. Ltd, Sanmen 317112, China)

Abstract: In-service inspection for non-destructive examination(NDE) testing qualification is to demonstrate the performance of the NDE technologies used in In-service inspection being under the realistic situations. The testing qualification items of Sanmen AP1000 Nuclear Power Plant are categorized as special qualification items, synthetic qualification items, general qualification items and non-qualification items. The experiences of sanmen AP1000 nuclear power plant NDE testing qualification practices demonstrate that the domestic NDE testing qualification methods used in china are highly applicable.

Keywords: NDE; Testing qualification; In-service inspection; AP1000 crew

1 概述

为确保核电站具有高度的安全性和可靠性,在核电厂寿命期限内,需根据法规要求使用无损检验方法对核承压设备实施在役检查。为确保核电站在役检查无损检验方法和结果的可靠性和有效性,需对核电站在役检查无损检验技术进行能力验证。

在役检查无损检验技术能力验证是指采用所必要的验证方法(如技术论证和实操考试)对核承压设备在役检查用的无损检验技术(包括检验设备、程序和人员)在实际的检验条件下具备的性能进行确认,

以证明其能满足实际检验条件下的技术规范要求。无损检验技术能力验证是一套涉及人员、设备、程序的整体体系,已被国外核电主要国家如美、法、英等国广泛采用。实践证明其可以有效地验证核电无损检验技术的可靠性,它不仅推动了检验技术的发展,更提高了诸如反应堆压力容器、管道等关键设备在役检查的可靠性,特别是缺陷检出率、缺陷尺寸测量的精度和准确度,有力保证了核设备的安全。

目前,较为成熟的应用于核电站在役检查无损检验技术能力验证的方法主要有以美国 ASME 规范第 XI 卷附录 VIII 验证要求为基准的 PDI(Performance Demonstration Initiative)能力验证方法和欧洲各国核电站运营商联合成立的“欧洲无损检验和能力验证联盟(ENIQ)”发布的“能力验证方法(以下简称 ENIQ 能力验证方法)。

收稿日期:2013-11-05

作者简介:官益豪(1980—),男,工程师,硕士研究生,主要从事核电站在役检查工作。

PDI 能力验证方法的内容在 ASME 规范第 XI 卷附录 VIII 进行了规定,具体由美国电力研究院(EPRI)无损检验中心组织实施。除美国外,其它国家如西班牙(部分)、巴西、斯洛文尼亚、日本、韩国等也均采用 PDI 验证方法实施验证。

ENIQ 能力验证方法是一种适应性较强的能力验证方法,可满足不同国家的法规和要求,现已被欧洲许多国家采用。

我国通过多年的无损检验技术能力验证实践,也已基本形成了较为明确的无损检验技术能力验证方法,即采用 ENIQ 的验证思路、按不同的验证等级、不同在役检查规范的要求,开展各核电站的能力验证工作。这一验证方法已在国内多个在役检查执行 RSE-M 规范的核电站在役检查无损检验技术能力验证活动中得到了应用并取得了良好实践。但国内目前在建和运行核电站类型较多,在建的三代核电项目 AP1000 机组其在役检查规范主要执行 ASME 规范,ASME 规范第 XI 卷附录 VIII 规定的超声检验能力验证要求与目前我国自主实施的能力验证方法存在差异。

通过总结国内已取得的无损检验技术能力验证实践经验,对三门核电 AP1000 机组在役检查无损检验技术能力验证方案及其实施进行了简析,并结合我国自主实施的能力验证方法在三门核电 AP1000 机组无损检验技术能力验证实践的情况,对国内核电站在役检查无损检验技术能力验证体系建设提出了建议。

2 国内核电在役检查无损检验技术能力验证现状

我国目前在建和运行核电站的在役检查主要参照 ASME 规范或 RSE-M 规范执行。在新版的 ASME、RSE-M 规范中均提出了无损检验技术能力验证的要求。ASME 规范第 XI 卷和 RSE-M 规范已分别于 1989 年和 1997 年开始提出在役检查无损检验技术能力验证要求。核安全局也明确要求核电站在役检查无损检验技术必须进行能力验证。

从 2008 年起至今,我国已有秦山二期扩建、岭澳等多个核电站实施了在役检查无损检验技术能力验证^[1-2]。从已实施的能力验证经验来看,由于已实施能力验证核电站的在役检查主要执行 RSE-M 规范,而 RSE-M 规范能力验证要求和 ENIQ 能力验证方法在总体思路、基本内容上有很好的一致性,

且在欧洲已有广泛的能力验证实践经验;因此,我国自主实施的能力验证方法,在验证思路上参考了 ENIQ 能力验证方法,采用技术评价和操作考试(明测或盲测)相结合,对检验程序和设备的鉴定采用明测,对人员及系统鉴定采用盲测;验证项目根据安全运行条件等分为不需验证、常规验证、综合验证、特殊验证 4 种类型;不同类型验证项目的验证要求不同,对不需验证和常规验证项目以程序审查验证为主,对综合验证项目以技术评价和明测考核为主,对特殊验证项目以盲测考核为主。此外,考虑不同核电站执行在役检查规范的不同、主设备制造历史及运行经验反馈的差异等,自主实施的能力验证方法在实施时还要考虑不同核电站的特点来实施。

3 AP1000 机组在役检查无损检验技术能力验证实践

三门核电厂 1,2 号机组采用美国西屋 AP1000 堆型,是中国首个第三代核电自主化依托项目。其在役检查参照规范为 ASME 规范 XI 卷 1998 版及其增补。

ASME 规范第 XI 卷附录 VIII 明确规定了相关在役检查无损检验技术需要进行能力验证,依靠在具有代表性测试试件上对检验程序、人员、设备的盲测考核来进行验证,强调检验程序是否通过验证的判定准则的统计方法,胜于对检验技术设计的严格评估要求;对在役检查无损检验技术的技术论证没有严格的形式要求。

考虑到 PDI 能力验证方法需到美国电力研究院无损检验中心实施且实施周期长、费用高,而且我国已经积累了一些核电站在役检查无损检验技术能力验证的实践经验。因此,三门核电 1,2 号机组在役检查无损检验技术能力验证工作最终确定采用我国自主实施的能力验证方法,由国家核安全局监督下的华北核与辐射安全监督站(以下简称验证机构)开展能力验证方案的评审及鉴定工作。

3.1 无损检验技术能力验证方案

在役检查无损检验技术能力验证方案(以下简称验证方案)获得验证机构的审查认可是实施能力验证工作的前提,验证方案主要描述了无损检验技术能力验证实施的方法及流程、验证项目及分类、盲测考核验收准则、验证实施计划等内容,是后续具体实施无损检验技术能力验证的指导文件。

根据国内核电站在役检查无损检验技术能力验

证的实际情况及国家核安全局对现阶段核电站在役检查无损检验技术能力验证的要求。三门核电厂在编制验证方案时,验证项目及验收标准主要依据 AP1000 机组在役检查的范围及 ASME 规范第 XI 卷附录Ⅷ关于能力验证的要求确定,验证项目分类及验证流程主要参考已在国内外取得验证实践的我国自主实施的能力验证方法实施。

选取 ASME 规范第 XI 卷附录Ⅷ(1998 版)中适用 AP1000 机组需要的能力验证项目且检查技术难度较高的在役检查项目作为特殊验证项目,其余在役检查项目参考我国自主实施的能力验证方法要求分为不需验证项目、常规验证项目和综合验证项目三类,项目分类情况见表 1。

表 1 三门核电一期工程能力验证项目情况

检测方法	UT	ET	RT	PT	MT	VT
特殊验证	7	1	0	0	0	0
综合验证	10	2	0	0	0	1
常规验证	17	1	3	0	0	3
不需验证	1	0	0	1	1	1
总计	35	4	3	1	1	5

3.1.1 特殊验证项目

特殊验证项目的选取原则是参照 ASME 规范的 PDI 要求,另外考虑时将一些容易产生缺陷的重要部件的验证列为特殊验证项目。此外,三门核电厂在特殊验证项目的选择上还综合考虑了国内核电验证工作的发展现状、验证项目的技术特点、AP1000 堆型设计等方面的内容,选择适用于 AP1000 机组的反应堆压力容器(RPV)进出水接管与安全端连接焊缝超声检验、RPV 筒体环焊缝和底封头环焊缝超声检验、RPV 堆焊层/母材结合面超声检验、奥氏体不锈钢管道环焊缝(含主管道及常规管道各一种)超声检验、RPV 进出水接管与筒体连接焊缝超声检验、RPV 进出水接管内圆角区超声检验、RPV 封头螺栓超声检验等 7 个项目作为特殊验证项目进行明测或盲测考核。

另外考虑到蒸汽发生器传热管涡流检验重要性,将该项目也作为特殊验证项目,对采集操作和数据分析进行能力验证考核。

3.1.2 综合验证项目

综合验证项目应用于在相似设备的部分部件或区域,认为这些设备可能出现缺陷(基于概率分析或国内外运行经验反馈),其缺陷可能影响装置的安

全^[3]。三门核电厂选取 RPV 进出水接管安全端与主管道连接焊缝超声检验、RPV 内侧表面内窥镜检验、蒸汽发生器进水接管与安全端连接焊缝超声检验、堆芯补水箱封头与筒体连接焊缝超声检验、非能动余热导出热交换器传热管涡流检验等 13 个项目作为综合验证项目。

3.1.3 常规验证项目

常规验证项目的验证是为了确保对装置安全有重要影响的设备的完整性,从纵深防御的角度出发,即使没有设计或运行数据证明会出现对装置安全性或完整性有害的缺陷,也会认为有必要检查这些设备的某些区域。三门核电厂选取蒸汽发生器(二次侧)主给水接管内圆角区超声检验、堆芯补水箱接管焊缝超声检验、稳压器波动接管与安全端连接焊缝超声检验等共 24 个项目作为常规验证项目。

3.1.4 不需验证项目

不需验证项目的验证是特殊验证项目、综合验证项目和常规验证项目之外的,在设备上进行的预防性维护措施。如果检测方法与制造时相同,检测阈值和灵敏度水平的设置至少应与制造期间相当。如果检测方法与制造时不同,所采用的检测技术的灵敏度水平至少相当于规范对该级别设备的要求。三门核电厂选取核 1,2 级焊缝及焊接附件液体渗透检验、铁素体钢环焊缝超声检验、核 1,2 级焊缝及焊接附件磁粉检验、核 1,2,3 级部件目视检验等 4 个项目作为不需验证项目。

3.2 无损检验技术能力验证实施准备

3.2.1 测试试件

特殊验证用盲测试件的制作,应满足 ASME 规范第 XI 卷附录Ⅷ的相关要求,主要包括试件结构尺寸以及缺陷类型、分布、取向和尺寸信息。

盲测试件应能代表被检部件的尺寸和几何结构,包含典型的扫查约束条件(如单边可达结构)。对于试件材料(含焊缝),一般要求其化学成分、冶金结构等与被检部件相近。就三门核电的特殊验证项目而言,盲测试件的尺寸、结构、材料、焊接工艺等与被检部件基本相同。

对于试件缺陷的制作,由验证机构组织设计,由有资质的制造厂具体制作。按照被检部件类别应分别给出测试试件中缺陷的类型、数量、分布、取向以及尺寸规定或允许范围,其主要模拟在役运行阶段受检部件中可能产生的缺陷,如热疲劳裂纹或应力腐蚀裂纹。

如 RPV 进出水接管与安全端连接焊缝超声验证盲测试件需满足 ASME 规范第 XI 卷附录 VIII 附件 10 的要求,要求试件含晶间应力腐蚀裂纹、热疲劳裂纹、机械疲劳裂纹三种类型的裂纹。裂纹方向有轴向和周向区分,但定量用试件中的裂纹只要求周向布置,裂纹高度必须大于壁厚的 10%,最低数量为 10^[4]。

试件制作完成后,由有资质的第三方单位进行缺陷位置和尺寸等信息的测试(即缺陷超声测试答案的检验)。结果要求给出缺陷性质、长度、高度及位置等信息。

3.2.2 检验技术规范书及检验程序

验证方案批准后,三门核电厂根据在役检查大纲及 ASME 规范第 V 卷及 XI 卷的要求编制各检验项目的检验技术规范书。检验技术规范书主要包括检验目的、被检对象基本信息;缺陷类型描述;检验技术要求;检验现场条件;辐射防护、检验时间等基本信息。其中检验对象基本信息主要描述检查对象名称、所在厂房位置区域、焊缝坡口图、焊缝焊接及热处理工艺、材料和规格及可达性等;缺陷类型描述主要依据相关经验反馈及制造工艺,对需要检出缺陷的基本信息进行描述;检查技术要求主要描述受检区域及范围、检查设备的要求、检验技术要求、记录及验收标准、检查间隔等;检验现场条件主要描述检验工作环境、脚手架、保温等检验配合条件的要求。

检验单位根据检验技术规范书的要求及采用的检验技术编制检验程序。检验程序主要包括目的,适用范围、适用规范、标准和文件,检验人员资格、检验对象和检验区域,检验条件,检验使用的设备和材料,检验技术,检验实施,记录和验收标准,检验报告要求等信息。

3.2.3 技术论证报告

三门核电厂在役检查无损检验技术能力验证中,也使用了技术论证进行验证的形式。技术论证报告形式不一,其主要内容为检验单位为论证所选用的检验技术和设备满足检验技术规范书要求的证据,其中包括:技术应用经验,技术分析、试验研究等内容。

3.2.4 功能测试

对于综合验证和特殊验证项目中使用自动检验系统的验证项目,检验单位还应根据检验技术规范书及检验程序的要求,对自动检验系统进行功能检测。功能测试依据功能测试大纲实施,功能测试大纲描述了检验系统的组成、功能测试内容和要求、测

试方法和步骤及测试记录等内容,以指导检验系统的功能测试,并以功能测试报告的形式记录测试结果。

3.2.5 明测或盲测

对于特殊验证和综合验证项目,检验单位需采用相应的程序和设备对测试试件进行明测或盲测。明测或盲测的流程及要求,应在验证实施方案中具体明确,包括测试试件的结构尺寸、材料、焊缝坡口(如有时)以及缺陷要求。对于明测试件,还应给出明测缺陷的缺陷类型、取向、尺寸、位置等信息。而盲测试件,所有缺陷信息都必须严格保密。明测或盲测的考核验收标准也应在实施方案中明确。

对于盲测,要求在程序、设备验证合格后,对操作和分析人员进行盲测考核。

盲测考核验收标准主要依据 ASME 规范第 XI 卷附录 VIII 中相应部件的考核验收准则制定。如 RPV 进出水接管与安全端连接焊缝超声验证的盲测验收准则需满足 ASME 规范第 VIII 卷附录 VIII 附件 10 的要求,对缺陷定量的验收准则为同缺陷实际长度相比,超声测量缺陷长度均方根误差不超过 19 mm(0.75 in),同缺陷实际自身高度相比,超声测量缺陷自身高度均方根误差不超过 3.2 mm(0.125 in);对缺陷探测验收准则需满足表 2 的要求。

表 2 缺陷探测验收准则

含缺陷等级 单元数量	缺陷探测验收准则		缺陷误判验收准则	
	最少检出 数量	不含缺陷等级 单元数量	最大误判 数量	数量
5	5	10	0	0
6	6	12	1	1
7	6	14	1	1
8	7	16	2	2
9	7	18	2	2
10	8	20	3	3
11	9	22	3	3
12	9	24	3	3
13	10	26	4	4
14	10	28	5	5
15	11	30	5	5
16	12	32	6	6
17	12	34	6	6
18	13	36	7	7
19	13	38	7	7
20	14	40	8	8

3.3 无损检验技术能力验证实施

在完成检验技术规范书、检验程序及功能测试报告等文件后,由检验单位向验证机构提出验证申请,验证机构根据验证方案规定的验证方法及验证计划对能力验证项目实施分批验证。简明的能力验证实施流程见图 1。

对不需验证项目和常规验证项目,由验证机构对照检验技术规范书和规范要求对检验程序进行验证,对修改后的检验程序进行认可;验证机构编写验证报告。

对综合验证项目,由验证机构对照检验技术规范书和规范要求对检验程序、功能测试报告及技术论据报告等文件进行审查;检验单位根据功能测试大纲对检验系统进行功能测试,验证机构对功能测试过程及结果进行见证及验证;验证机构选择部分综合验证项目对检验系统进行明测考核,并对考核过程及结果进行见证及评定;验证机构编写验证报告。

对特殊验证项目,由验证机构对检验程序、功能测试报告及技术论据报告等文件进行审查;检验单

位根据功能测试大纲对检验系统进行功能测试,验证机构对功能测试过程及结果进行见证及评定;验证机构对检验系统进行盲测或明测考核,并对考核过程及结果进行见证及评定;验证机构编写验证报告。

在检验单位完成所有验证项目的技术能力验证后,验证机构向检验单位颁发证书,以证明其无损检验技术能力满足 AP1000 机组役前及在役检查的无损检验技术能力要求。

4 建议

我国自主实施的能力验证方法基本满足国内在役检查执行 RSE-M 规范的核电机组的在役检查无损检验技术能力验证要求。虽然 ASME 规范第 XI 卷附录 XI 规定的能力验证要求与目前我国自主实施的能力验证方法存在差异,但通过三门核电 AP1000 机组无损检验技术能力验证实践表明,我国自主实施的能力验证方法适用性较强,也可以用于在役检查执行 ASME 规范的核电机组的在役检查无损检验技术能力验证活动,基本符合 ASME 规

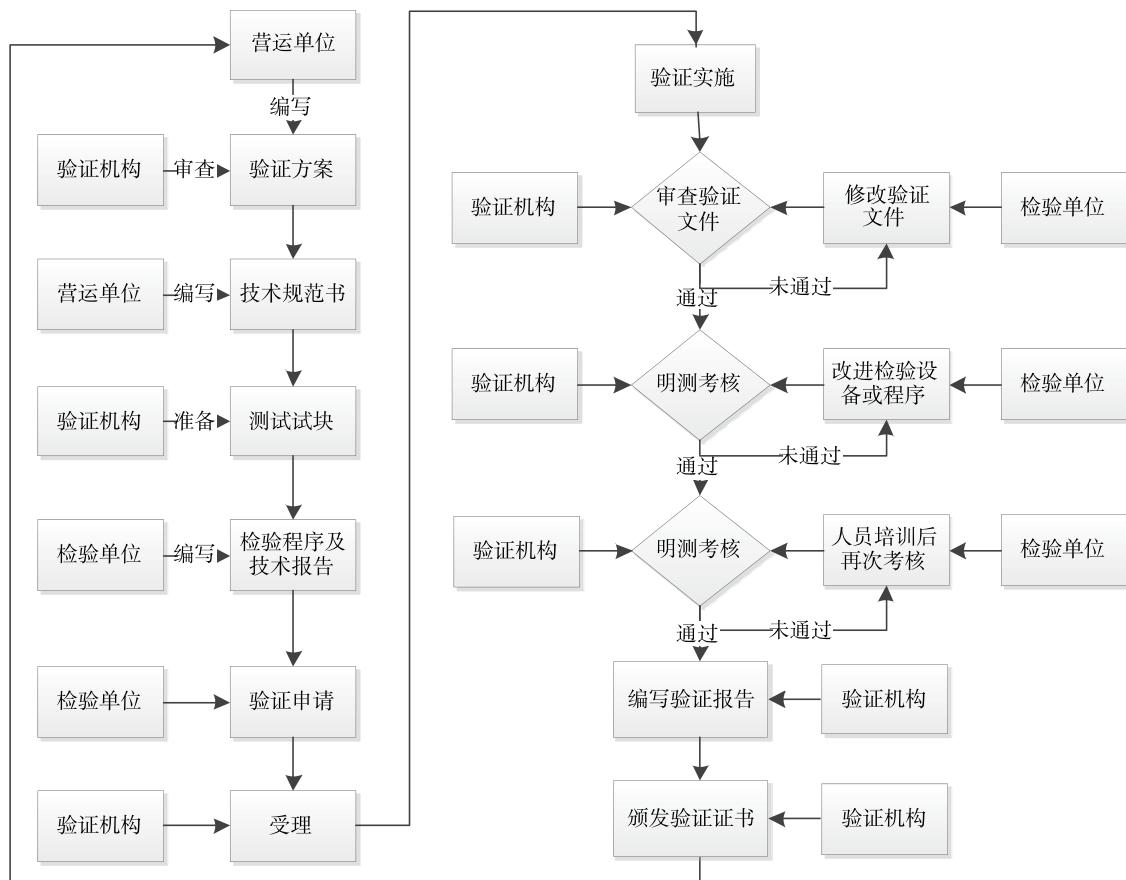


图 1 能力验证流程

(下转第 79 页)