**《核电厂无损检测缺陷自动识别系统评价方法第1部分：射线》标准编制说明**

**（征求意见稿）**

**一、工作简况**

**1、任务来源**

随着人工智能技术的快速发展，基于深度卷积网络的图像识别技术近年来取得了突破性的进展，并在核电站设备射线无损检测的图像识别与评价中逐步开始应用。未来可能会进一步作为核电站设备无损检测人员的辅助工具甚至替代性工具。但是目前为止，该项技术的提供方、应用方对于该类工具的具体实现过程、能力评价并不统一，可能会给核电站设备射线检测结果的质量和可靠性带来较大的风险。因此对于该类自动缺陷识别与评价技术需要进行评价，并提供统一的标准。为了有效衡量该技术在核电厂射线检测缺陷评定中使用的可靠性，建立规范化、标准化的评价方法，由大亚湾核电运营管理有限责任公司和北京理工大学重庆创新中心提出，中国核能行业协会组织实施《核电厂无损检测缺陷自动识别系统评价方法第1部分：射线》团体标准的立项工作。本标准项目于2023年12月30日向中国核能行业协会提交团体标准项目申报书，并于2024年4月2日经中国核能行业协会组织专家审议通过，由申请单位大亚湾核电运营管理有限责任公司和北京理工大学重庆创新中心筹备标准的编写，项目正式启动。

（一）标准的起草单位及起草人

本标准负责起草单位：大亚湾核电运营管理有限责任公司、北京理工大学重庆创新中心。

本标准参加起草单位：XXX。

本标准主要起草人：XXX。

**2、主要工作过程**

（一）项目筹备

2023年10月，北京理工大学重庆创新中心与大亚湾核电运营管理有限责任公司开始筹备起草组，编制了《核电厂无损检测缺陷自动识别系统评价方法第1部分：射线》团体标准制定工作方案，明确了团标编制工作计划，向核电厂运营公司、工程公司、检测公司、设计公司等核电厂相关专业无损检测技术机构发出编制邀请，最终7家单位企业接受邀请参加团体标准的编制工作，于2023年12月10日确定参与编制单位及人员，项目筹备完成，正式启动。

（二）项目起草组成立及第一次工作会议

标准起草及参与编制单位于2024年4月10日组织召开本标准起草组成立暨第一次工作会议，正式启动标准编写工作。会议就起草组的组建及标准制定的相关问题进行了协商与研究，对标准草案框架进行了认真谈论，通过了《核电厂无损检测缺陷自动识别系统评价方法第1部分：射线》团体标准制定工作方案。

（1）会议对《核电厂无损检测缺陷自动识别系统评价方法第1部分：射线》团体标准的题目、框架、内容进行了认真讨论，通过了《核电厂无损检测缺陷自动识别系统评价方法第1部分：射线》团体标准制定工作方案。

（2）会议确定，本标准的框架为:1、范围；2、规范性引用文件；3、术语和定义；4、人员要求；5、基本要求；6、评价流程；7、标准测试集；8、性能测试；9、评价指标；10、评价结果；附录：评价报告模板。

（3）会议确定，本标准的适用范围是：核电厂金属熔化焊焊接接头射线底片缺陷自动识别系统的应用评价，适用的射线检测图像来源为通过X或伽马射线检测获得的物理底片经底片数字化设备扫描后的图像。通过X射线数字成像（DR）检测直接获取的图像和通过X射线计算机辅助成像（CR）检测拍摄并扫描的图像可参照使用。

（4）会议确定了编制计划，明确了各部分内容的编制单位及完成时间，确定了团体标准编制工作各环节的时间节点。

（5）会议确定：由北京理工大学重庆创新中心负责团标草案的撰写及地标方法的理论和技术支持，由大亚湾核电运营管理有限责任公司等8家单位协助团标草案的撰写，配合标准方法验证相关的技术支持，配合标准方法验证的应用平台及技术支持，配合标准底片的提供。

（6）会议确定：由各参编单位提供的标准缺陷底片的数量、缺陷类型及要求。

（三）项目起草组第二次工作会议

标准起草组于2024年9月26日在线上组织召开了第二次工作会议，对团体标准初稿的内容进行了讨论和研究。由标准执笔人李琰介绍了标准初稿的起草情况及征求起草组成员意见后的修订情况，并进行了讨论。

（1）会议对标准草案的内容和格式进行了全面的梳理。

（2）会议确定，团标中部分内容需进行修订，并明确了修订部分的具体分工。

（3）会议确定，团标修订完成后，再次举行工作会议，对修订部分的内容进讨论。

（四）项目起草组第三次工作会议

标准起草组于 2024 年12月12日组织举行了第三次工作会议，本次会议就第二次会议提出的修订部分进行了讨论和研究，由标准执笔人李琰介绍了第二次会议提出的修订部分的修订情况，并对修订内容进行了逐条讨论。通过讨论，会议确定：团体标准编制内容已初步符合要求，已完成编制目标，可作为征求意见稿进行上报。

**二、标准编制原则和主要内容**

**1、标准编制原则**

（一）标准编制原则

本标准按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则进行编写，力求依据科学、定义准确、表述明确、适宜操作。本标准的编写符合核电行业设备可靠性评价方法发展的原则，本着先进性、科学性、合理性和可操作性的原则以及标准的目标、统一性、协调性、实用性、一致性和规范性原则来进行本标准的制定工作。

（1）先进性原则

本标准对核电厂射线检测缺陷自动识别系统评价方法进行了大量实测数据验证，并参考了国际先进标准ASTM E3327/E3327M -21《Standard Guide for the Qualification and Control of the Assisted Defect Recognition of Digital Radiographic Test Data》对于缺陷自动识别系统的定义及划分，标准更具有先进性。

（2）适用性原则

本标准规定了核电厂射线检测缺陷自动识别系统评价工作的全过程，包括评价前人员要求和基本要求，评价时对于标准测试集、标准底片及标注样本的加工过程、性能测试方法、评价指标、评价后系统分级和潜在使用风险分析、评价报告编制等环节建立规范，以统一核电厂射线检测缺陷自动识别系统评价方法，使其向科学化、合理化方向迈进，减少核电厂射线检测缺陷自动识别系统评价的主观性、随意性，增加科学性、客观性，从而达到提高核电厂行业检测评价设备可靠性的目的。

（3）统一性原则

本标准制定中充分考虑了核电厂对于射线检测底片缺陷识别的要求与性能，参考了NB/T 47013.2《承压设备无损检测 第2部分：射线检测》、RCCM《MC3000射线照相检验RCCM中文版法国民用核电标准》、ASME三部分标准中对射线检测缺陷评定的要求及检出缺陷类型的要求，标准测试集中的重点关注缺陷范围与缺陷类型要求与以上标准统一，达到统一性原则，方便标准的具体实施。

**2、标准主要内容的依据**

1、范围

本章规定了本标准的使用范围。介绍了本标准适用于核电厂无损检测（射线）缺陷自动识别系统的评价方法。规定本文件适用于核电厂金属熔化焊焊接接头射线底片缺陷自动识别系统的应用评价，适用的射线检测图像来源为通过X或伽马射线检测获得的物理底片经底片数字化设备扫描后的图像。通过X射线数字成像（DR）检测直接获取的图像和通过X射线计算机辅助成像（CR）检测拍摄并扫描的图像可参照使用。X或伽马射线检测仍是核电厂设备焊缝做最主要的射线检测手段，因此本标准的技术及应用范围也主要围绕这两种检测手段。

2、规范性引用文件

本章规定了本标准需要引用的、必不可少的文件。本章的引用文件主要分类四类：一是人员标准（规定了评价人员的要求）；二是软件及设备标准（规定了软件及底片扫描仪的质量要求）；三是无损检测标准（规定了缺陷的识别范围及评级要求）；四是缺陷智能识别系统标准。

3、术语和定义

本章参考相关标准、规范及行业惯例，对适用于本标准表述的“缺陷自动识别系统”、“自动评片”、“辅助评片”、“正检”、“误检”、“漏检”、“误判”、“位置准确率”、“尺寸准确率”等做了名词定义。由于本标准属于首次发布，标准对应的技术也属于新技术范畴，为了标准的理解及推广，本章规定了必要的相关术语。

4、人员要求

本章规定了核电厂射线检测缺陷自动识别系统评人员资质要求及技能要求。人员要求主要参考中华人民共和国生态环境部令第6号《民用核安全设备无损检验人员资格管理规定》对于人员的规定。

5、基本要求

本章规定了核电厂射线检测缺陷自动识别系统的基本要求，包括识别效率、软件功能、运行环境、系统可靠性、系统安全性及系统升级的要求。射线检测缺陷自动识别系统的载体是一套软件，本章是在应用实践的基础上总结了软件的具体要求。

6、评价流程

本章规定了核电厂射线检测缺陷自动识别系统性能评价的流程步骤，包括标准测试集、性能测试、评价指标及评价结果四个步骤。本标准的核心内容是对缺陷自动识别性能的测试及评价，因此建立一套客观完善的标准化评价流程至关重要。本章通过流程图的形式描述了缺陷自动识别系统性能的评价流程，为接下来的第7章、第8章、第9章及第10章内容奠定基础。

7、标准测试集

本章规定了用于评价系统性能的标准测试集的要求，包括标准底片的质量要求、缺陷类型要求、测试集构建要求及标注样本的加工过程。

8、性能测试

本章规定了自动识别结果的性能测试过程，包括生成预测样本、样本偏离程序及生成混淆矩阵三部分。

1. 评价指标

本章规定了使用8节中的性能测试结果计算缺陷自动识别系统的评价精度指标，包括缺陷识别精度和质量判级精度。

1. 评价结果

本章规定了基于评价指标对缺陷自动识别系统的分级结果、使用潜在使用风险分析及评价报告内容。

1. 附录

本章为资料性附录，规定了评价报告的模板。

**3、解决的主要问题**

在制造业数字化与智能化转型中，无损检测技术也开始数字化、智能化建设落地实践。目前，在核电站设备在役检查中主要依靠人工评片的方式来确保产品品质，但面对大量的检测样本，无损检测检验人员单纯依靠观片灯等方式进行缺陷检定，在长期高亮度环境下，难免出现缺陷的误判，同时也受检验人员技能限制或者主观因素影响，限制了检测水平的提升。目前，数量巨大的检测图片由检验人员逐一完成，检测效率低且存在一定的漏检，影响核电站设备在役检查的进度及质量。

随着人工智能技术的快速发展，基于深度卷积网络的图像识别技术近年来取得了突破性的进展，并在核电站设备射线无损检测的图像识别与评价中逐步开始应用。未来可能会进一步作为核电站设备无损检测人员的辅助工具甚至替代性工具。但是目前为止，该项技术的提供方、应用方对于该类工具的具体实现过程、能力评价并不统一，可能会给核电站设备射线检测结果的质量和可靠性带来较大的风险。因此对于该类自动缺陷识别与评价技术需要进行评价，并提供统一的标准。

目前该技术已完成技术性的突破，智能评片系统已经在多个核电厂上线使用，具有出台标准的基础。但欠缺规范化、标准化约束，导致不同技术方、应用方难以衡量该技术在射线检测中使用的可靠性，因此迫切需要标准化工作的引领、指导、规范和约束。本标准从系统缺陷识别算法性能、系统软件功能、运行效率、可靠性及安全性等几个角度出发，规定了缺陷识别精度和质量判级精度2套评价性能指标，并建立了一套完整的评价方法流程，基于识别性能对系统进行了分类分级，适用于核电厂设备焊接接头射线底片缺陷自动识别系统的应用评价。

**三、主要试验（或验证）情况**

本标准主要研究基于深度学习技术的射线检测缺陷自动识别系统的评价方法，主要实验内容涉及研究标准测试集、性能测试方法及评价指标，开展的专题研究及实验主要围绕这三方面展开。

1. 针对核电厂行业标准测试集的研究实验

标准测试集是指一套测试射线检测缺陷自动识别系统性能的标准数据集，该数据集包括缺陷测试集和评级测试集，而数据集的质量要求、数量要求、焊缝类型、缺陷类别要求都是需要经过大量测试专题实验研究得到，这是保障测试准确性、客观性及全面性的基础。

在焊接接头射线检测中，包括对缺陷的识别和焊接接头的质量评级。因此我们在制定标准测试测集时也分为缺陷测试集和评级测试集。缺陷测试集用于测试系统对缺陷识别的精度，评级测试集用于测试系统对焊接接头质量评级的精度。缺陷识别是质量评级的基础，质量评级是缺陷自动识别系统性能的综合表现，这两部分测试对于缺陷自动识别系统的性能各有侧重。

在标准研制过程中，起草组联合整理2套标准测试集，包括1套承压设备熔化焊焊接接头测试集与1套承压设备管子及压力管道熔化焊环向焊接接头测试集。

（2）性能测试方法的研究实验

性能测试方法是研究如何表征预测样本（缺陷自动识别系统预测缺陷结果）

对于标注样本（人工标注缺陷的标准答案）的偏离程度，以验证测试样本的准确率。本标准经过大量实验验证，引入IOU（交并比）的计算方法以表征预测样本对于标注样本的偏离程度，并经过实验验证得到了IOU的阈值范围，同时引入正检、误检、漏检、误判等四种表示偏离程度的判据。

（3）评价指标的研究实验

计算机机器学习领域有召回率、准确率、MAP等指标来评价模型的性能，但是对于核电厂行业无损检测人员来说这些指标很难理解，而且不能直观反映模型性能对使用的影响。因此有必要站在核电厂行业无损检测人员的角度对计算机机器学习领域提出的召回率、准确率、MAP等指标进行转化，并提出适用于实用性评价的漏检率、误报率、危害性缺漏率等指标，且给出其计算方法。本标准根据实验情况，提出了4个单类别缺陷识别精度指标和4个综合缺陷识别精度指标。

**四、标准中涉及专利的情况**

*本标准不涉及专利问题*。

**五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况**

随着劳动力成本上升，人口红利拐点来临，降本增效及智能化转型的需求，推动国内基于Al人工智能的质量检测技术发展进入快速通道，应用领域随之逐步扩大，由电子制造业和半导体生产企业，逐步发展到核电厂无损检测领域，基于人工智能的射线检测缺陷的识别与评定在核电厂设备逐步开始应用。射线检测领域，无损检测技术逐步向智能化及数字化转型，因此需使用标准对技术进行约束、指导，当前该领域目前国内外仍未形成相关的标准，而本标准的制定可弥补空白。

核电厂射线检测缺陷自动识别系统主要应用在核电厂焊接质量无损检测场景中，此类设备往往具有运行工况要求高、使用时间长、质量风险大、事故危害大等特点，直接影响到社会的安全生产，而确保风险降低的关键则在于质量检测的可靠性。使用自动缺陷识别系统可实现射线检测由人为主观评定缺陷升级为计算机系统自动识别质量缺陷，在实现检测速度大幅度提升的基础上，发挥计算机客观、高精度的检测优势，提升核电厂质量检测水平，强化核电厂质量管控，为社会安全生产提供一定程度的保障。而本标准的建立、可以对该技术进行规范化、标准化约束，解决不同技术方、应用方难以衡量该技术在射线检测中使用的可靠性的问题，加速这项技术的产业化应用。

**六、与国际、国外对比情况**

（一）采用国际标准、国外先进标准情况

无

（二）本标准查阅参照采用的相关国家标准、行业标准

本标准制定时参考了以下依据：

GB/T 25000.51《系统与软件工程 系统与软件质量要求和评价（SQuaRE） 第51部分：就绪可用软件产品（RUSP）的质量要求和测试细则》

GB/T 28452《信息安全技术 应用软件系统通用安全技术要求》

NB/T 2709《核电厂射线照相底片数字化技术规范》

NB/T 47013《承压设备无损检测 第2部分：射线检测》

1. 发展趋势

标准化的工作是伴随着技术的成熟度逐步开展的，前一技术阶段的标准为下一阶段的技术应用及标准工作奠定了基础。射线检测缺陷自动识别系统技术是随着射线检测数字化技术的应用逐步发展并应用的。目前我国射线检测数字化的标准分为两大类：一类是数字射线检测技术，包括DR及CR等技术；一类是射线检测底片数字化技术，主要指底片扫描技术。核电厂射线检测目前主要使用的仍是以胶片为主的传统射线检测技术，其数字化应用重点在胶片成像后的底片扫描技术。围绕底片数字化及智能缺陷识别技术，底片扫描仪标准及底片数字化技术标准目前已经发布了相关国家、行业及团体标准，智能缺陷识别技术（主要指AI技术）应用仍在起步阶段，因此与其相关的标准目前在国内仍是空白。下一阶段随着智能缺陷识别技术在核电厂设备检测中的应用逐步扩大，其相关的标准化工作也将逐步开展，其内容包括AI模型的数据、训练、测试及应用标准，为AI评片应用提供了标准支撑。

底片扫描仪标准（设备标准）主要有两个国家标准：由中国上海材料研究所牵头制定的GB/T 26141.1-2010《无损检测 射线照相底片数字化系统的质量鉴定》和由中国核电厂检测研究院牵头制定的GB/T 28266.1-2012《承压设备无损检测射线胶片数字化系统的鉴定方法》。这两个标准规定了底片数字化仪器的分类分级指标，其主要内容是对ISO国际标准（ISO 14096-1：2005）的引进及转化。

底片数字化自2020年开始，逐步在核电厂底片存储管理中开始应用，多个核电厂开展了相关工作，中核核电运行管理有限公司牵头制定了行业标准NB/T 2709—2023《核电厂射线照相底片数字化技术规范》。该标准规定了核电厂底片扫描工艺及质量的评价内容及对比试块、验证片等内容，该标准也是核电厂底片扫描应用的实践总结，为缺陷自动识别系统的数据质量提供了参考依据。

**七、在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及标准，特别是强制性标准的协调性**

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。

**八、重大分歧意见的处理经过和依据**

本标准制定过程中没有出现重大分歧意见。

**九、标准性质的建议说明**

建议本标准的性质为团体标准。

**十、贯彻标准的要求和措施建议**

本标准发布后，将在中国核能行业协会组织协调下，标准编写项目组成员积极配合，成立宣贯小组。由宣贯小组编撰宣贯材料，争取标准发布后尽快在核电厂射线检测缺陷自动识别系统评价中得到实施，引领规范该类系统的使用。

**十一、废止现行相关标准的建议**

不存在可废止的现行有关标准。

**十二、其他应予说明的事项**

无。