热中子探测器校准规范（制定）

编制说明

1 任务来源

中国计量科学研究院向全国电离辐射计量技术委员会提出申请，申请制定《热中子探测器校准规范》，2023年6月，依据市监计量函 [2023] 56号“市场监管总局办公厅关于印发《2023年国家计量技术规范项目制定、修订及宣贯计划的通知》的通知”等有关文件的要求，经各专业计量技术委员会委员专家评审、上报市场监管总局批复后，下达了2023年国家计量技术规范制修订计划项目表，其中《热中子探测器校准规范》（制定）计划项目编号为：MTC15－2023－02，由中国计量科学研究院和中国原子能科学研究院作为第一起草单位负责起草，全国电离辐射计量技术委员会归口。

热中子探测器是中子测量最常用的探测器类型，广泛用于核能、国防、医学、环保、资源开发和科学研究等中子物理涉及的各个方面。热中子探测器可以用来测量反应堆中的热中子注量，帮助控制反应堆的运行状态，此外，中子防护仪表和采用慢化原理的中子能谱测量设备的中心探测器也均为热中子探测器，因此热中子探测器性能与中子物理研究及应用技术发展密切相关，需要进行校准，同时热中子探测器校准也是热中子探测器设计研制过程的重要环节。

近年来，随着包括散裂中子源、加速器驱动次临界核能系统（ADS）、钍基熔盐堆和聚变堆在内的中子科学装置的建立，以及新一代核能技术的发展，对于热中子探测器的需求逐年增加。同时，随着电子学及核探测技术的发展，各类新型探测器层出不穷，热中子探测器的型号规格、技术性能也发生了相应的变化，据此有必要制定热中子探测器校准规程，以保证检定项目及其技术要求科学合理、符合应用实际需求，并有助于促进产品性能提升。

目前国内尚无热中子探测器的校准规范，规范的编制不仅可以规范国内热中子探测器校准方法，统一热中子注量率量值，支持国内热中子探测器的研发和生产，还可以帮助我国在国际上更好地参与热中子标准的建立和维护。同时，该规范作为中子计量重要的技术法规文件，将完善我国中子计量的技术法规体系。

2 编制过程

本规范由中国计量科学研究院，与中国原子能科学研究院共同起草，负责制定。规范制定计划任务的完成时间为2024年第4季度。

自2023年2月起，规范起草小组开始查阅收集相关资料，并依据国内、国际相关标准进行部分试验，取得预期的效果，在此基础上形成校准规范初稿；完成初稿后，据此开展相应的校准方法验证试验，针对试验中发现的问题，起草小组对初稿进行讨论、修改，就规范的编写依据、校准项目和校准方法等达成共识，于2023年10月完成校准规范的征求意见稿，向全国电离辐射计量技术委员会全体委员及部分专家征求意见。

3 规范名称和适用范围

3.1规范名称

根据上报的规范制定计划（MTC15-2023-02），规范名称不变，为《热中子探测器校准规范》。

3.2 适用范围

在适用范围中规定了本规程适用于热中子探测器的校准，热中子探测器包括气体探测器、半导体探测器、闪烁体探测器等。探测器通常为中子正比计数器（3He计数器、10BF3计数器、涂硼计数器）、裂变电离室、涂硼电离室、闪烁探测器（6Li玻璃闪烁探测器、含10B ZnS (Ag)闪烁探测器）和半导体探测器（涂硼半导体探测器、6LiF夹心半导体探测器）等。

4 编写依据

本规程主要依据JJF 1001-1998《通用计量术语及定义》、ISO 8529-1 中子参考辐射第1部分：辐射特性及产生方法（Neutron reference radiations fields – Part 1: Characteristics and methods of production）的相关要求编制。同时也参考了JJG 2081-1990《热中子注量率计量器具》、EJ/T 676-1992《中子正比计数管》和GB/T 7164-2022《用于核反应堆的辐射探测器特性及测试方法》。

规范的内容编排和书写格式依据JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》。

5 校准项目与校准方法的有关说明

本规范以热中子探测器的主要计量特性作为校准项目。根据科学、合理、可行的原则，结合校准实验条件和实验结果，确定校准项目和校准方法。对于热中子探测器，最重要的计量特性就是其对热中子的注量响应，即“热中子注量响应”。因此，校准过程中必须确保准确地测量热中子注量响应。在不考虑修正的情况下，热中子探测器注量响应的简化计算公式是“探测器计数率/热中子注量率”，即*n*/*φ*。其中，探测器计数率为热中子核反应在探测器中产生的计数，当热中子参考辐射装置测量位置的镉上中子（0.5 eV能量以上的中子）对响应校准结果的不确定度贡献不可忽略时，采用镉差法测量中子注量响应，即在探测器外部包裹1 mm镉套（图1，1 mm镉对0.5 eV能量以下的热中子强烈吸收，对0.5 eV能量以上的中子是透明的），以扣除镉上中子在探测器中产生的计数，即*n*=*n*0−*n*Cd，；热中子注量率通常采用金箔活化法测量，一方面，是197Au(n, γ)198Au反应截面是IAEA推荐的标准截面，热中子反应截面不确定度为0.14%，另一方面，198Au的半衰期合适（*T*1/2 = 2.69 d），衰变链简单，作为热中子注量率绝对测量的标准方法。

图1　热中子注量率基准装置参考位置的中子能谱

除热中子注量响应外，表征热中子探测器属性的量还包括灵敏度和探测效率，灵敏度是输出信号的变化量除以输入量的变化量，即∆*n*/∆*φ*；探测效率*ε*定义为*n*/(*φ·A*)，其中*A*是探测器横截面积。可以看出，以上三个量之间相互关联，探测效率是总探测器计数除以入射总中子数，而注量响应是探测器计数除以入射热中子注量。因此，探测效率取决于探测器尺寸，对于一般的源和探测器系统，探测效率还需要考虑源和探测器之间几何关系。在进行这些计算时，需要考虑注量的特定要求，例如平面平行束，以及面积至少等于探测器面积。然而，实际辐射场可能无法满足这些要求，而且不同热中子探测器的形状也各不相同，因此在计算探测效率时很难确定横截面积。对于灵敏度，由于辐射场参考位置的热中子注量率很难单独改变，通过改变中子注量率的方法，如改变衰减片厚度或改变源与探测器之间的距离，也可能会影响中子能谱和中子角度分布等参数，因此，国际上目前主要采用注量响应来表征探测器性能。

热中子参考辐射装置是一种能稳定产生热中子的装置，通过慢化放射性核素中子源或加速器中子源发射的中子来产生，也可以通过反应堆热柱孔道直接引出。由于产生方式、慢化材料和装置结构的差异，不同的热中子参考辐射场在中子能谱、中子角度分布等参数上可能有很大差异。考虑到不同校准实验室结果之间的可比性，有必要在标准参考条件下给出热中子探测器的注量响应。参考热中子注量率国际比对CCRI(III)-K8的比对协议，给出标准参考条件，即能量为0.0253 eV的单向平行入射中子束。因此，规范中要求校准实验室需要提供“中子能谱差异修正”、“热中子角度分布差异”、“热中子注量分布不均匀性修正”和“扰动修正”等修正因子。修正因子的计算通常需要使用Monte Carlo计算得到，因此需要送校客户尽可能详细地提供探测器的结构信息和材料信息。如果以上信息不可知或者不便给出，那么校准实验室只需提供本辐射场测试条件下的热中子响应，需要在校准证书中提供热中子辐射场的相关信息，包括中子能谱/中子温度、热中子分布均匀性和热中子角度分布。

对于气体探测器，工作电压的选择可以显著影响探测器的性能。通过测量坪特性曲线，可以确定探测器在不同电压下的性能，从而找到最佳工作电压。因此，规范中要求校准实验室需要确定热中子探测器的坪特性曲线。如果热中子探测器的出厂说明书中规定了探测器的推荐工作电压，不需要再次测量坪特性曲线。

热中子探测器的校准项目和校准方法是确保探测器性能可靠的关键步骤。通过准确测量参考条件下的热中子注量响应，确保了热中子探测器在各种应用领域中的可靠性和可比性，有助于提高核技术和辐射监测领域的测量准确性。