

文章编号：0258-0926(2016)S1-0088-05；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0088

核燃料循环设施抗震设防要求的探讨

赵昱龙, 徐建华, 孔庆军, 李 涛

国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080

摘要: 简述了国内外核燃料循环设施抗震设防相关标准规范要求, 以设施存在的潜在风险作为确定抗震设防要求的出发点, 在充分考虑核燃料循环设施特点的基础上, 探讨了抗震设防的主要考虑因素。结合我国核设施抗震设防实践, 提出了典型核燃料循环设施的抗震设防要求建议, 并与国外相应抗震设防要求进行对比, 旨在形成统一的、较为明确的抗震设防尺度, 供核燃料循环设施设计和审评时参考。

关键词: 核燃料循环设施; 抗震设防

中图分类号: TU279.7 文献标志码: A

Discussion on Seismic Fortification Requirements for Nuclear Fuel Cycle Facility

Zhao Yulong, Xu Jianhua, Kong Qingjun, Li Tao

Nuclear Technology Support Center, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing, 100080, China

Abstract: The relevant seismic fortification standards and requirements on both domestic and international nuclear fuel cycle facilities were briefly described in this paper. Taking the facility potential risk as the starting point of seismic fortification and fully considering the specific characteristics of nuclear fuel cycle facilities extensively, this paper discussed the key factors of seismic fortification. In addition, taking the seismic fortification practice in domestic nuclear facilities into account, the requirements and suggestions on typical nuclear fuel cycle facility were made, and the international relevant seismic fortification requirements were compared for the purpose of reaching a clear unified agreement on seismic fortification criterion, to offer suggestions for nuclear fuel cycle facility design and evaluation to some extent.

Key words: Nuclear fuel cycle facility, Seismic fortification

0 前 言

地震是核设施最为关注的外部自然事件, 合理确定核设施的抗震设防水平不仅涉及核设施安全, 也关系到核设施的工程投资。目前, 国内外针对核电厂的抗震设计有较为系统的研究, 并形成了一套相对完善的抗震设防标准体系。而核燃料循环设施类型多、潜在风险差异大, 难以形成相应配套的标准体系。目前, 除后处理设施外, 其他类别核燃料循环设施的抗震设防要求不甚明确, 给核设施设计及相关安全审评工作带来了一定困难。伴随我国核电的快速发展, 近一段时期

内核燃料循环设施将陆续开工, 因此结合我国核设施抗震设防实践, 尽快明确相关核燃料循环设施抗震设防要求是十分必要和紧迫的。

1 国内外核燃料循环设施相关标准的抗震设防要求

我国已颁布的标准规范中, 涉及核燃料循环设施抗震设防的标准规范主要包括铀燃料元件厂和核燃料后处理厂。其中, 《铀燃料元件厂设计准则》(EJ808-2007)^[1], 将在抗震设防烈度情况下仍需维持其安全功能, 并且损坏后直接或间接

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2016-03-10

作者简介: 赵昱龙(1977—), 男, 高级工程师, 现主要从事核设施安全审评工作

造成事故工况的物项，以及执行减轻或纠正设计基准事故后果的物项划为安全重要抗震物项，要求按照常规民用抗震规范的乙类进行抗震设防。最新升版的《核燃料后处理厂（建）构筑、系统和部件分级准则》（EJ/T939-2014）^[2]取消了1995年版中三类抗震物项的划分，将物项分为一类抗震物项和其他类抗震物项。一类抗震物项应保证地震发生时和地震后能执行其安全功能，包括全部放化安全级物项，以及部分经分析、试验或根据经验预期会发生破坏、坠落、移位，从而可能危及抗震三类物项的非安全级物项，按SL-2地震动设计和论证。非安全级物项属于其他类抗震物项，按照常规民用抗震规范进行抗震设防。

《含有有限量放射性物质核设施的抗震设计》（IAEA-TECDOC-348）^[3]是国际原子能机构（IAEA）早期颁布的、涉及核燃料循环设施抗震的技术文件。鉴于在该文件应用过程中获得更多可利用的运行经验和数据，IAEA于1992年出版了《除核动力外的其他核设施设计中对外部事件（以地震为主）的考虑》（IAEA-TECDOC-1347）^[4]。该文件旨在提供一种具有保守性的简化方法和程序，指导地震等外部事件相关安全设计，并为选择适当的、与安全裕量相一致的设计标准规范提供统一依据，其强调的是与设计有关的安全问题，而不是试图取代设计规范。IAEA-TECDOC-1347根据设施风险程度的高低将核设施分为1级（高度风险）、2级（中度风险）、3级（低度风险）和4级（常规风险），不同级别核设施的地震年平均超越概率水平分别为 1×10^{-4} 、 5×10^{-4} 、 1×10^{-3} 和 2×10^{-3} 。在具体物项的抗震设计时，需对不同风险程度核设施受外部事件影响的物项进行识别和分级（外部事件1级、2级和3级），以确定相应物项的抗震设防及相关设计要求。如，对于安全重要建筑物的结构：1级核设施要求在设计基准地震情况下保证全部安全功能，不允许出现积累损坏，整个结构保持准弹性状态；2级核设施要求结构需保证支撑安全相关部件、设备和系统的能力，要求有限的非弹性变形；3级核设施要求结构在非弹性状态时不倒塌；4级核设施执行常规抗震设计规范。

美国能源部（DOE）已形成从法规、命令到导则和具体技术标准相对完整的核设施抗震设计

法规标准体系，综合考虑辐射安全、生命安全、任务使命、有害物质、资源配置优化等多种因素，并从核设施地震危害风险角度出发，形成了一套确定核设施抗震设防要求的基本程序和方法，能够较好地指导和应用于核设施的抗震设防。

《适用于DOE核与非核设施的自然现象危险缓解导则》（DOE420.1-2）^[5]将设施建（构）筑物、系统和部件按其安全重要性分为5个抗震性能级别：PC-0类主要是那些没有必要考虑外部自然事件的物项，不考虑抗震设防；PC-1类需预防重大结构损坏、倒塌和其他危及人员（生命安全）的故障，对物项无封闭包容要求，并不考虑维持其功能能力，抗震设计执行美国民用设计规范的较低要求；PC-2类需保证结构损坏是有限的，能够维持设施的基本运转能力，并防止设施内工作人员受到身体伤害，安全分析确定低度危险物质的密封包容对工作人员安全是必要的，其抗震设计执行美国民用设计规范的较高要求；PC-3类应限制设计基准自然事件对设施的损坏，有害物质能够得到控制和包容，避免执行安全功能的物项失效时对公众和环境造成影响，安全分析确定高度危险物质的密封包容对工作人员安全是必要的，其地震年超越概率水平为 4×10^{-4} ，按动态法进行抗震设计；PC-4类物项遵循反应堆类核设施的物项分级思路，设施内有害物质数量及严重事故工况下未缓解释放的潜在后果，与大于数十兆瓦的反应堆相似，其地震年超越概率水平为 1×10^{-5} ，按动态法进行抗震设计。

从国内外有关核燃料循环设施抗震设防标准规范可以看出：

（1）核燃料循环设施的抗震设防要求从根本上取决于地震事件发生的概率以及假设未实施抗震设计的情况下地震事件所造成的后果。

（2）美国DOE与IAEA针对核燃料循环设施的抗震设防要求基本一致，如：“IAEA-TECDOC-1347”中所规定1级和2级核设施的安全重要物项的抗震设防水平，分别与DOE中PC-4类和PC-3类物项相当。

（3）美国在确定核设施抗震设防水平时，综合考虑放射性后果、有毒有害化学物质释放、人员安全、任务使命等各种因素，较好地体现了核设施的安全特征和实际情况。如：部分核燃料循

环设施具有显著的化学危害(如 UF_6)，且化学危害可能明显高于其放射性物质释放潜在影响。

(4) 核燃料循环设施抗震设计的传统做法或是归为常规民用标准规范，或是遵照核电厂的设计规范。为避免采用过于复杂与昂贵的核电厂抗震设计方法，“IAEA-TECDOC-1347”提出了具有一定保守性的简化方法和程序。

(5) 美国制定了一套通过风险分析及抗震性能评价确定核设施抗震设防水平的基本程序和方法。需指出的是，按照上述方法确定具体核设施的抗震设防水平时，部分具有特殊要求核设施可能处于所规定 2 个抗震性能级别之间，如：萨凡纳河混合铀钚氧化物(MOX)燃料厂抗震设防的地震重现期为 6500 a。

(6) 我国相关标准所规定的铀燃料元件厂和核燃料后处理厂的抗震设防要求，基本可以体现我国核燃料循环设施前端和后端抗震设防的总体思想，分别遵照常规民用设施或核电厂的抗震设防要求。其中，核燃料后处理厂与国外同类核设施的抗震设防要求相同；但以铀燃料元件厂为代表的前端核燃料循环设施未全面考虑设施的特殊安全要求。如：部分具有临界风险的设施，在地震工况下应至少保证建筑结构处于有限的非弹性变形范围内，且保持安全重要物项锚固的安全功能。

2 我国典型核燃料循环设施抗震设防实践

2.1 后处理设施

我国新建的后处理设施主要有乏燃料后处理中间试验工厂(中试厂)和核燃料后处理实验设施(放化大楼)。中试厂主要由独立乏燃料储存设施和主工艺厂房组成，均按照《核燃料后处理厂(建)构筑、系统和部件分级准则》(EJ/T939-95)进行抗震设防，对于在地震发生时或发生后需执行安全功能的 Ⅰ类抗震物项按 SL-2(极限安全地震动)进行抗震设计，对于在地震期间可能危及

Ⅱ类抗震物项执行其安全功能的 Ⅲ类抗震物项按 SL-1(运行安全地震动)进行抗震设计。放化大楼由甲级、乙级和丙级放化实验室组成，分别按照民用建筑的甲类、乙类和丙类进行抗震设防。从我国后处理设施的抗震设防实践来看，中试厂抗震设防要求符合我国当时相关标准规范要求；放化大楼鉴于处理放射性物质有限且运行频度不高，通过相应安全分析所确定的抗震设防要求遵

循民用建筑相关要求，是合适的。

2.2 核燃料循环前端设施

我国核燃料循环前端设施尚未出台具有权威性和强制性的规定，造成在确定设施的抗震设防要求时难以把握。目前，在核燃料循环前端设施的抗震设计和审评中，主要遵循了国内民用建筑相关要求，并将根据具体设施的潜在风险，确定不同类型核设施的抗震设防要求。如：核燃料元件生产设施，将具有临界风险的厂房提高到甲类(或特殊设防类)进行抗震设防，而不是铀元件厂相关标准规范所规定的乙类；铀转化设施，考虑到 UF_6 释放的化学毒性，将贮存和处理大量 UF_6 的厂房按甲类(或特殊设防类)抗震设防；铀浓缩设施，将涉及铀富集度较高的厂房或工段按甲类(或特殊设防类)抗震设防。从我国核燃料循环前端设施抗震设防的实践来看，鉴于其所处理物项核素单一，批次操作量小，按照国内民用建筑的相关要求进行抗震设防，总体上是合适的。但是，部分核燃料循环前端设施具有高度临界风险，此类设施按照国内民用建筑标准规范进行抗震设计，不符合国际上类似设施的抗震设防要求。

3 核燃料循环设施抗震设防的主要考虑

核设施抗震设防要求与其潜在的放射性风险直接相关，通常需进行设施相关的风险评价，以确定与抗震设计相关的安全裕度。针对抗震设防，风险被定义为地震发生的概率与放射性后果的乘积。核燃料循环设施设计、厂址特征、放射性物质质量和特性以及运行模式及使用目的等差异大，风险评价需考虑的因素较多，并且只有根据实际情况具体分析，在详细的概率安全分析后才能进行合理可信的风险分级。因此，目前国内外针对确定抗震设防要求时所需考虑的设施风险主要基于经验。目前，美国、IAEA 通过制定相应分级准则，将设施潜在风险仅与放射性物质贮量建立关系，简化了抗震设防要求的确定过程。这一特定的分级假定需通过相应的安全分析证明是恰当的；但部分特殊核设施并不是完全适用于这种特定的分级假定，需通过完整风险评价及抗震性能评估以确定其抗震设防要求。结合国内外核燃料循环设施抗震设防实践及相关标准要求，提出以下抗震设防的主要考虑：

(1) 放射性物质包容是核燃料循环设施最为重要的安全功能。铀加工处理的核燃料循环前端设施,处理的核素单一,多为批次操作,多数设施操作量有限,其放射性物质释放对不会造成明显的厂外后果;这已被大量相关核设施的安全分析实践所证实。此类设施可遵照国内民用抗震规范进行抗震设防。

(2) 核燃料循环后端设施处理源项核素组成复杂、放射性水平高,除有严格的放射性物质包容要求外,部分工序需保证有可靠的衰变热移出功能,主要工艺系统及设备应在地震工况下应保证完整性、稳定性及相应可运行性,其放射性物质释放具有显著的厂外潜在后果。此类核设施的抗震设防要求与核动力厂等同。

(3) 临界安全是核燃料循环设施区别其他一般工业设施的重要内容。对于存在临界安全风险的核燃料循环设施,若所加工处理为液态物料,按照我国已颁布的用于评估核临界事故潜在辐射后果假定的相关标准^[6-7],其临界事故后果可能对厂区边界产生影响;若所加工处理的固态物料,尤其是核材料暂存库,尽管采取严格技术和行政手段后发生临界事故的概率较低,但临界事故将可能严重威胁公众和环境安全。针对涉及临界风险的核燃料设施,应较一般核燃料循环设施具有更高的抗震设防要求,以保证在地震工况下安全重要物项的几何结构和相互作用(空间、位置、形状和大小的限制)。部分涉及临界安全的核燃料循环设施的抗震设防完全套用民用抗震规范是不合适的,除非安全分析证明其临界安全风险是有限的。

(4) 针对涉铀核燃料循环设施,鉴于其所处理物料的特性,在等操作量的情况,其放射性物质释放的潜在风险显著高于铀加工处理设施,安全重要物项具有更为严格的放射性物质包容要求。此类核设施抗震设防要求应介于一般工业厂房和核电厂之间,需根据具体设施风险评价予以确定。上述涉铀核燃料循环设施抗震设防要求的确定与美国 DOE 相关标准规范是一致的。

(5) 部分核燃料循环设施的化学危害可能显著高于放射性危害。此类设施在确定抗震设防要求时,需结合设施化学物质存量、安全系统及设备的配置等因素,全面考虑化学危害的潜在风险。

同时,部分设施具有特定使命任务,或间歇性生产,或限定有限的运行期,在确定设施抗震设防水平时,应适当考虑上述因素,如我国在建玻璃固化工程(VPC工程)运行期约为5a,抗震设防的地震重现期按2000年考虑,其设防地震在运行基准期内的超越概率低于运行寿命为40a的核动力厂。

(6) 采用一般民用抗震标准规范的核燃料循环设施,采用“小震不坏,中震可修,大震不倒”三级设防的设计要求。对未按一般民用抗震标准的核燃料循环设施,抗震设防目标按一级控制,即要求安全重要物项在设计基准地震作用下保持其正常安全功能,必须处在承载能力极限之内,不出现超出允许的应力和应变极限。

4 典型核燃料循环设施抗震设防建议及相关分析

参考国内外核设施抗震设防的相关标准规范,并结合我国核燃料循环设施抗震设防实践以及以往安全分析的实际情况,综合考虑典型核燃料循环设施潜在安全风险,提出以下典型核燃料循环抗震设防要求的建议(表1)。

表1中提出的抗震设防建议,出于在设计和审评过程中可操作性的考虑,对典型核燃料循环设施抗震设防要求予以明确,力求避免在确定抗震设防尺度存在过多的争议性。

尽管本文中未提及核设施的抗震分级准则,但实际上所提出的抗震设防建议体现了不同危险类别设施分级设防思想,并且与IAEA、美国DOE抗震设防要求基本保持了一致(表2)。

从表2可以看出,本文所提出的抗震设防要求,除核燃料后处理厂外,与IAEA、美国DOE的抗震分级准则并非完全对应。这主要是由于国内外核燃料后处理厂具体抗震设计方法均主要参考了核电厂。而针对其他核燃料循环设施,目前我国抗震设计所遵循的标准规范与IAEA、美国DOE存在一定的差异,且不具有可比性。在确定核燃料循环设施的抗震设防要求时,一方面考虑了与我国现行抗震标准规范有更好的衔接,另一方面考虑了核燃料循环设施的特殊情况(如:包容放射性物质的量和特性、临界安全、化学危害等)。但总体来说,本文所提出的抗震设防建

表 1 典型核燃料循环抗震设防要求的建议

Table 1 Proposal of Earthquake Fortification on Typical Nuclear Fuel Cycle Facility

设施名称	设防地震水平	抗震分析方法	备注
铀纯化设施	乙类	二阶段设计, 第一阶段, 承载力验算, 满足第一、二水准设防目标; 第二阶段, 弹塑性变形验算, 实现第三水准设防目标	—
铀转化厂	乙类或甲类		具有显著化学危险的设施, 根据相应安全分析结果, 按甲类设防
铀浓缩厂	乙类或甲类		具有显著临界风险的高浓铀设施按甲类设防
铀燃料元件制造厂	乙类或甲类		具有显著临界风险的化工转化工序, 以及设施内设置中间暂存库的设施按甲类设防
核燃料后处理厂	年超越概率 1×10^{-4}	动态法	独立乏燃料暂存库、高放废液处理和贮存设施可根据风险评估结果, 抗震设防年超越概率介于 $4 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$ 之间。其他配套三废处理设施可按一般民用标准规范进行抗震设防
涉铀核材料加工设施, 及大量铀、钚核材料贮存库	年超越概率 $4 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$	等效静力法或动态法	此类设施抗震设防年超越概率不应低于 4×10^{-4} , 通常根据风险评估结果, 抗震设防年超越概率介于 $4 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$ 之间

注: 此表是以典型核燃料循环设施主工艺的安全物项为对象提出的抗震设防建议, 并不能完全覆盖所有设施的特殊情况

表 2 与 IAEA、美国 DOE 相关抗震设防要求的对比

Table 2 Comparison of Anti-Seismic Requirements with IAEA and DOE

设施名称	设防地震水平	IAEA	美国 DOE
铀纯化设施	乙类	3 级 ~ 4 级, 但高于 4 级	PC-1 类 ~ PC-2 类
铀转化厂	乙类或甲类	2 级 ~ 4 级, 但低于 2 级	PC-1 类 ~ PC-3 类, 但低于 3 级
铀浓缩厂	乙类或甲类	2 级 ~ 4 级, 但低于 2 级	PC-1 类 ~ PC-3 类, 但低于 3 级
铀燃料元件制造厂	乙类或甲类	2 级 ~ 4 级, 但低于 2 级	PC-1 类 ~ PC-3 类, 但低于 3 级
核燃料后处理厂	年超越概率 1×10^{-4}	1 级	PC-4 类
涉铀核材料加工设施, 及大量铀、钚核材料贮存库	年超越概率 $4 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$	2 级	PC-3 类 ~ PC-4 类, 但低于 PC-4 类

议, 从根本上是基于核燃料循环设施风险评估, 与 IAEA、美国 DOE 所考虑抗震设防目标一致, 具体的抗震设防要求相当。

5 结论

从核燃料循环设施潜在风险角度出发, 提出了典型核燃料循环设施抗震设防要求建议, 其与 IAEA、美国 DOE 相关要求相当。同时, 本文在确定核燃料循环设施设防要求时, 结合我国多年抗震设防实践及以往安全分析开展的实际情况, 重点考虑了与我国抗震设计相关标准的衔接, 旨在设施设计和审评中能形成统一的、较为明确的抗震设防尺度, 并具有更好的操作性。不同类型核燃料循环设施差异巨大, 本文所提出的抗震设防建议涵盖全部是不现实的。针对一些特殊的核燃料循环设施应开展更为详细的风险评价研究, 以合理确定相应的抗震设防要求。目前, 国内核燃料循环设施抗震设防要求的确定仍以定性评价

为主, 应尽早研究建立以定量风险评估为基础的核设施抗震设防确定方法。

参考文献:

- [1] EJ/T808-2007. 铀燃料元件厂设计准则[S]. 2007.
- [2] EJ/T939-2014. 核燃料后处理厂(建)构筑、系统和部件分级准则[S]. 2014.
- [3] HAF.J0002. 含有有限量放射性物质核设施的抗震设计[S]. 国家核安全局:核安全法规技术文件, 1991.
- [4] NNSA-0078. 除核动力厂之外的其他核设施设计中对外部事件(以地震为主)的考虑[S]. 国家核安全局:核安全译文, 2001.
- [5] DOE G 420.1-2. Guide for The Mitigation of Natural Phenomena Hazards for DOE Nuclear Facilities[S]. 2000.
- [6] EJ/T 988-1996. 用于评估铀燃料制造厂核临界事故潜在辐射后果的假定[S]. 1996.
- [7] EJ/T 967-1995. 用于评估核燃料后处理厂核临界事故潜在辐射后果的假定[S]. 1995.

(责任编辑: 刘胜吾)