

《低、中水平放射性废物固化体性能要求—水泥固化体》（征求意见稿）编制说明

国家环境保护总局核与辐射安全中心

中国辐射防护研究院

二零零八年二月

目 录

1. 任务来源及计划要求.....	3
2. 修订过程.....	3
3. 修订依据.....	4
4. 修订内容说明.....	4
4.1 关于新增“前言”的说明.....	4
4.2 关于“适用范围”一节的修订说明.....	5
4.3 关于“规范性引用文件”一节的修订说明.....	5
4.4 关于“术语和定义”.....	5
4.5 关于“性能要求”一节的修订说明.....	6
4.5.1 总的规定和要求.....	6
4.5.2 抗浸出性.....	6
4.5.3 抗浸泡性.....	7
4.5.4 抗冻融性.....	7
4.5.5 耐 γ 辐照性.....	8
4.6 关于“性能检验方法”一节的修订说明.....	8
4.6.1 抗压强度.....	8
4.6.2 抗冲击性.....	11
4.6.3 抗浸出性.....	12
4.6.4 抗浸泡性.....	12
4.6.5 抗冻融性.....	12
4.6.6 耐 γ 辐照性.....	13
5. 其它需进一步研究的内容.....	13
5.1 抗浸出性.....	13
5.2 耐 γ 辐照性.....	13
5.3 抗生物降解性.....	14
附件 1 核素 42d 累积浸出分数限值的界定.....	16
附件 2 耐 γ 辐照性能检测核素累积吸收剂量值的估算.....	23

1. 任务来源及计划要求

GB14569.1-93《低、中水平放射性废物固化体性能要求—水泥固化体》由国家技术监督局1993年8月发布，1994年7月1日起开始实施。2006年8月，国家环境保护总局科技标准司提出对该标准进行修订。本标准由国家环境保护总局核与辐射安全中心和中国辐射防护研究院联合起草修订。2006年12月签订标准修订合同，要求2008年6月底完成报批稿。

其目的是对我国现行标准规定的低、中水平放射性废物水泥固化体性能要求和检验方法进行修订，使修订后的标准更加适合我国实际情况。

2. 修订过程

修订依据合同的要求按期进行，先初步确定本标准需要修订的内容，包括抗压强度的新检验方法，废物体抗浸出性表征限值的重新界定。在此基础上，对国内外情况进行了调研，内容包括国内水泥胶砂抗压强度检验的相关法规标准，国外放射性废物固化体抗浸出性的标准检验方法和国内外固化体性能研究的相关文献，并收集以往的固化体性能检测数据。同时，针对修订点开展部分的性能补充试验。2007年6月中旬，拟定标准修订征求意见初稿，进行内部讨论和专家咨询。根据讨论结果和专家意见，对征求意见初稿进行修改，于2007年6月底，完成标准修订征求意见稿及修订说明。随后向国内有关单位和专家发送标准修订征求意见稿及修订说明广泛征求各单位专家的意见。共发出了13份，收到10份书面反馈意见，3份口头反馈意见。经过进一步调研、咨询和认真讨论，对所有意见进行了答复，专家意见及答复详见附件1《征求意见稿专家建议汇总表》。同时根据专家意见，对标准修订征求意见稿进行了相应的修改。2007年11月又组织了专家讨论会，进一步征求意见。各位专家对修改后的征求意见稿进行了讨论，综合专家函审意见和专家讨论会的结果（详见附件4征求意见专家讨论会纪要），于2007年12月完成了标准修订征求意见稿及编制说明。

3. 修订依据

本标准的修订在原标准的内容和框架基础上进行。修订时充分考虑我国十余年来实施现行标准对水泥固化体性能进行检验的经验，和我国当前低、中放废物水泥固化的实际情况，保留了现行标准中实践证明适合我国实际情况的那些技术内容。

修订中尽可能全面地考虑了原标准使用中实际反映出的问题，如原标准引用的已经被修订或计划被修订的规范性文件，采用的规范性文件相关条款项或内容有变化。水泥胶砂强度检验新标准的发布，对水泥固化体抗压强度的性能检验方法提出了新的要求，包括试样制备和检验结果的表述。以往低、中水平放射性废物水泥固化体抗浸出性的试验数据对浸出性能检验的结果表述提出了新问题：所有放射性核素第 42d 的浸出率是否能够很好地反应核素的抗浸出性能？

针对标准使用中反映出的上述种种问题，在对以往试验数据的收集、整理，补充试验以及国内外相关文献调研的基础上，对标准进行修订。

4. 修订内容说明

4.1 关于新增“前言”的说明

根据 GB/T 1.1-2000《标准化工作导则第 1 部分：标准的结构和编写规则》，本标准在原标准基础上新增了前言部分，其格式和内容参照了《国家环境保护标准制修订工作管理办法》附件十一《国家环境保护技术法规（标准）前言和内容参考格式》的规定：说明了标准修订的出发点，叙述了标准的主要内容，标准中主要技术内容的来源和主要修订点，规定了标准的强制性，标准修订的提出部门，标准修订的起草单位和主要起草人，以及标准解释权的归属。

根据专家反馈意见，标准规定除第 6 章“性能检验方法”外，其它部分具有强制执行的效力，并在“前言”部分加以说明。

4.2 关于“适用范围”一节的修订说明

在标准修订的征求意见稿初稿中去掉了原标准“最低性能要求”中的“最低”两字。根据征求意见专题讨论结果，“最低”两字不宜去掉。因此，本征求意见稿中仍保留“最低性能要求”的规定。

4.3 关于“规范性引用文件”一节的修订说明

本标准中规范性引用文件的规定，直接参照了《国家环境保护标准制修订工作管理办法》附件十一《国家环境保护技术法规（标准）前言和内容参考格式》的格式要求，规定了最新规范性文件的采用。

原标准中部分引用标准已经被修订，本标准对引用文件作了相应调整。

在征求意见稿初稿中，规范性引用文件 GB 177-85《水泥胶砂强度检验方法》更新为 GB/T 17671-1999《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》，GB 9133-88《放射性废物分类标准》更新为 GB 9133-1995《放射性废物的分类》，去掉了 GB 11806-89《放射性物质安全运输规定》和 GB 13600《低、中水平放射性固体废物的岩洞处置规定》。

根据征求意见专题讨论建议，重新考虑了 GB 11806 的取舍，在本征求意见稿中仍保留，并将 GB 11806-89《放射性物质安全运输规定》更新为 GB 11806-2004《放射性物质安全运输规程》。

4.4 关于“术语和定义”

标准修订版（征求意见稿初稿）中增加了“水泥固化体”的定义，并根据专家意见定义为“放射性废物与水泥基材按照一定配方通过物理包容或化学固定形成的均匀固化体”。

“游离液体”的定义与新的放射性废物术语汇编中“游离液体”的定义无差别，但考虑到新的放射性废物术语汇编尚未出版，本征求意见稿保留了征求意见稿初稿中的“游离液体”的定义。

4.5 关于“性能要求”一节的修订说明

在征求意见稿初稿中，性能要求分为一般性能要求和特殊性能要求两章，这样可以有重点地分别加以考虑。函审专家反馈意见有赞成，也有反对。征求意见专家讨论会的结果是：就性能而言，本标准中的特殊性能无特殊之处，因此不要对性能要求作一般和特殊的区分。在本征求意见稿中采纳了专家讨论的结果。

4.5.1 总的规定和要求

在征求意见稿初稿中，去掉了 GB 11806-89《放射性物质安全运输规定》和 GB 13600《低、中水平放射性固体废物的岩洞处置规定》中的固化体性能要求。

在专家讨论会上，专家提出水泥固化体的抗冲击性能就是根据 GB 11806 第 8 章中的有关要求制订的。根据专家建议重新考虑了 GB 11806 的取舍。本征求意见稿中对固化体性能的总要求规定：水泥固化体的性能应满足 GB 9132 和 GB 11806 第 8 章中的有关要求。

4.5.2 抗浸出性

根据专家意见，标准修订稿改正了原标准述不够确切的地方，保留了原标准中的浸出率限值要求，即“水泥固化体试样在 25℃的去离子水中浸出，第 42d 的核素的浸出率应分别低于下列限值”： ^{60}Co : $2 \times 10^{-3} \text{cm/d}$; ^{137}Cs : $4 \times 10^{-3} \text{cm/d}$; ^{90}Sr : $1 \times 10^{-3} \text{cm/d}$; ^{239}Pu : $1 \times 10^{-5} \text{cm/d}$ 。对水泥固化体中其它 β 、 γ 放射性核素（不包括 ^3H ），其浸出率应低于 $4 \times 10^{-3} \text{cm/d}$ 。水泥固化体中其它超铀核素的浸出率应低于 $1 \times 10^{-5} \text{cm/d}$ 。”

标准修订后新增加了对核素 42d 的累积浸出分数的限值要求：“核素 42d 的累积浸出分数应不大于： ^{137}Cs : 0.26 cm; 其它放射性核素(不包括 ^3H): 0.17 cm。”核素 42d 累积浸出分数限值的规定详见附件 2。

另外，根据专家反馈意见和专题讨论结果，将“其他 β 、 γ 放射性核素”改为“其他重要 β 、 γ 放射性核素”，加“重要”两字的含义是从放射性意义上来说，一是指“核素含量多”，二是指“核素半衰期较长”，而对于“含量少，半衰期较短的核素”可以不考虑；将“其它超铀核素”改为“其他 α 核素”，其原因

是考虑了核燃料前处理过程产生的放射性废物水泥固化体。

4.5.3 抗浸泡性

样品抗浸泡性能的检验从两方面来验证，一是浸泡后样品的外观；二是在外观没有明显的裂缝或龟裂情况下，试样抗压强度值的变化。

在征求意见稿初稿中，参照美国核管会（NRC）1991 版的废物体技术观点报告规定：水泥固化体试样抗浸泡试验后，其外观不应有明显的裂隙或龟裂，抗压强度损失不超过 25%，且抗压强度不应小于 7MPa。

根据专家意见，本征求意见稿中只保留了标准修订版（征求意见稿初稿）中对浸泡后试样表观质量的修订，去掉“且抗压强度不应小于 7MPa”的规定。

4.5.4 抗冻融性

征求意见稿初稿中，抗冻融性能作为特殊性能要求来规定，类似于抗浸泡性能的要求，增加了试样的表观质量和最小抗压强度限值的规定。

根据专家意见，本征求意见稿中抗冻融性不作特殊性能要求提出，只保留“水泥固化体试样抗冻融试验后，其外观不应有明显的裂缝或龟裂，抗压强度损失不超过 25%”的规定，去掉“且抗压强度不应小于 7MPa”的规定。

检验水泥固化体抗冻融性能主要是要看在 5 年贮存环境下废物体是否能经受住一年四季冷热变化的考验。通常认为，在气温高于 0℃的环境下贮存不会有水泥冻结情况的出现。因此，根据专家函审意见，将不要求进行检验的条件改为“当水泥固化体在极端最低气温高于 0℃的环境下贮存时，可不进行本项试验。”最后，根据专家讨论会的意见，又将不要求进行检验的条件改为“当水泥固化体在常年最低气温高于 0℃的环境下贮存、运输和处置时，可不进行本项试验。”将“极端最低气温”改为“常年最低气温”便于理解；将“贮存”改为“贮存、运输和处置”，这就增加了运输和处置方面对气温的要求，如大亚湾核电站的水泥固化体抗在广东深圳地区贮存、运输和处置时，可不进行抗冻融性检验，但大亚湾核电站的水泥固化体在广东深圳地区贮存后，若要运输到其他常年最低气温低于 0℃的地区去处置时，运输和处置的时机必须避开冬季。

4.5.5 耐 γ 辐照性

征求意见稿初稿中，耐 γ 辐照性作为特殊性能要求来规定，性能要求中增加了试样的表观质量和最小抗压强度限值的规定。

根据专家意见，本征求意见稿中耐 γ 辐照性不作特殊性能要求提出，只保留“水泥固化体试样耐 γ 辐照性试验后，其外观不应有明显的裂缝或龟裂，抗压强度损失不超过 25%”的规定，去掉“且抗压强度不应小于 7MPa”的规定。

4.6 关于“性能检验方法”一节的修订说明

4.6.1 抗压强度

与 GB177 相比，GB/T 17671-1999 《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》规定了水泥抗压强度检验的新方法。规定中与水泥固化体性能检测密切相关的有水泥试块的制备试模、养护、测量结果的误差控制和特殊情况的处理。

（1） 试样

GB/T 17671-1999 规定水泥抗压强度的测定使用 40mm×40mm×160mm 的棱柱体试模（JC/T 《水泥胶砂试模》）来制备试样。关于在标准修订中是否采用棱柱体试样，开展了相关文献调研和比对试验。

根据调研的情况看，除了罗马尼亚，其它国家在中、低放水泥固化体抗压强度性能检测中都采用圆柱体的试样。

同时，从圆柱体和棱柱体两种不同试样的抗压强度比对试验来看，从试验结果来看，使用两种试样的抗压强度值和测量误差没有明显差别。试验结果参见 GB 14569.1 修订版（征求意见稿初稿）的修订说明附件 2：水泥固化体抗压强度数据收集和相关性能检验补充试验。

为此，保留原标准中水泥试样为直径 5cm、高 5cm 圆柱体的规定（大小不变，单位改为 mm，即改为直径 50mm、高 50mm）。

（2） 养护

GB 14569.1-93 规定：“在密闭条件下、温度为 25±5℃、不受阳光直接照射的室内环境中养护”。这一规定不是很严格的，操作起来变数很大：如何密闭？温度为 25±5℃如何控制？室内环境能否保证达到养护要求？试验室温、湿度对

水泥物理性能的影响很大，因此各国水泥强度检验方法中对试验室温、湿度均有严格限制，GB 17671-1999 中规定：“试体带模养护的养护箱或雾室温度保持在 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不低于 90%。”

一般情况下，试验室温、湿度一年四季很难控制，而养护箱或雾室温、湿度是可以控制的。为了统一养护条件，在征求意见稿初稿中参照 GB 17671-1999 的规定，将水泥养护条件的规定为：“将按规定配方制备的水泥浆倒入圆柱体试模，抹平后放入养护箱内养护 28d，养护温度为 $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 90\%$ 。脱模后试样进行打磨，保持上下端面平行。试样的直径与高度应保持为 $\phi 50 \times 50\text{mm}$ 。”

根据专家讨论会的结果，保留养护箱内养护的规定，养护温度保留原标准的规定即， $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

另外，考虑到除游离液体性能检测外，其它性能检测中试样的制备方法均相同。根据专家建议，本征求意见稿中将试样的制备作为单独的一条列出（见 GB 14569.1 本征求意见稿中 6.2.1 条）。

（3）偏差控制

水泥固化体的各项性能要求中，最具有统计意义的就是水泥试块的抗压强度值。与抗浸出性能一样，抗压强度是一个非常重要的性能参数。

从水泥固化体的抗浸泡性、抗冻融性和耐 γ 辐照性试验后的抗压强度损失不超过 25% 的要求来看，这仅仅是一个理论上的要求值。实际上试验后的抗压强度损失包括了两方面：①水泥固化体在抗压强度测定时，每个试样的抗压强度测定值都会与平均值有正负偏差；②试验后水泥固化体抗压强度的变化造成的损失。因此，首先有必要限制抗压强度测量值的正负偏差，实现对水泥固化体抗压强度的合格性检验。

根据专家们的意见，标准修订稿直接参照 GB/T 17671 中误差控制的规定性要求。修订标准时，在有关水泥固化体抗压强度性能检验中增加合格性检验方法，并对相对偏差提出了一个合理的可达到的要求。

GB17671 中规定，水泥抗压强度的测定结果以一组 3 个棱柱体抗折后得到的 6 个抗压强度测定值的算术平均值表示。如果 6 个测定值中有 1 个超出 6 个平均值的 $\pm 10\%$ ，应剔除这个结果，而以剩下 5 个的平均值为结果。如果 5 个测定值中再有超过它们平均值的 $\pm 10\%$ ，则此组结果作废。

水泥固化体抗压强度测定，其相对偏差为 0 的几率很小很小；相对偏差小于 10%又很难达到；而相对偏差大于 25%时，对于进行水泥固化体的抗浸泡性、抗冻融性和耐 γ 辐照性试验来说，其试验结果是毫无意义的。但必须确定一个合适的相对偏差值要求。规定相对偏差值在 10%~25%之间是合理可达到的，结合收集到的试验数据（如表 1 所示），本标准修订版（本征求意见稿）对这个相对偏差值定在 $\pm 20\%$ ，即：

“抗压强度性能检验应至少对六个水泥固化体平行样品进行测量。以一组六个抗压强度测定值的算术平均值为试验结果。

如六个测定值中有一个超出六个平均值的 $\pm 20\%$ ，应剔除这个结果，而以剩下五个的平均数为结果。如果五个测定值中再有超过它们平均值 $\pm 20\%$ 的，则此组结果作废。”

表 1 水泥固化体抗压强度测试数据

样品编号	抗压强度 P, MPa	平均抗压强度, MPa	偏差, MPa	相对偏差/%
c-05	17.6	15.6	2	12.8
c-07	17.4		1.8	11.5
c-08	14		-1.6	-10.3
c-18	12.7		-2.9	-18.6
c-20	15.9		0.3	1.9
c-35	16		0.4	2.6
B-09	11.3	12.5	-1.2	-9.6
B-11	13.2		0.7	5.6
B-14	10.3		-2.2	-17.6
B-18	12.7		0.2	1.6
B-31	14.8		2.3	18.4
B-38	12.5		0	0
T1-1	7.7	10.7	-3	-28.0
T1-6	12.5		1.8	16.8
T1-7	11.1		0.4	3.7

T2-3	11.7		1	9.3
T2-4	10.2		-0.5	-4.7
T2-5	10.9		0.2	1.9
SZH-1	19.8		0.5	2.6
SZH-2	20.7		1.4	7.3
SZH-3	22.3	19.3	3	15.5
SZS-1	22.3		3	15.5
SZS-1	18.3		-1	-5.2
SZS-1	12.4		-6.9	-35.8

4.6.2 抗冲击性

抗冲击性能要求中，在水泥固化体试块外观没有明显的裂隙或龟裂情况下，以试体抗压强度的损失来限定抗冲击性能是否满足标准要求。因此，抗冲击试验的试体首先应满足抗压强度的要求，征求意见稿初稿规定“对满足抗压强度要求的水泥固化体试样进行抗冲击试验”。

在征求意见稿初稿的专家函审过程中，对水泥固化体的抗冲击性能要求和性能检测方法的争议较多，问题主要围绕（1）对水泥固化体的抗冲击性规定是否需要？（2）9m 高度的冲击试验是否能够反映固化体的抗冲击性能？

国家对放射性物质运输有严格的规定，运输放射性物质的车辆在高速路开快车是不会允许的，但运输放射性物质的车辆的最大车速限定为多少？9 m 高坠落试验是模拟 50 km/h 速度行驶的车辆翻车时的情景。征求意见稿初稿中保留了原标准的规定。

征求意见专家讨论会上专家提出：是否需要对废物体的抗冲击性给予规定，应依据 GB 11806-2004 中是否有对非弥散性废物体的抗冲击性能作出规定。GB 11806-2004 第 8.3 条规定了特殊形式放射性物质（其定义为“不弥散的固体放射性物质或装有放射性物质的密封件”）应开展的试验内容和相应的试验方法。结合 GB 11806-2004 第 8.3.2.1 款和第 8.5.3 条的冲击试验方法规定，本征求意见稿中保留对水泥固化体的抗冲击性能要求和性能检测方法的规定。

4.6.3 抗浸出性

类似抗冲击性能的检验规定，固化体的抗浸出性能检测规定“对满足抗压强度要求的水泥固化体试样进行抗浸出试验”。浸出试验方法仍遵照 GB 7023 中规定的方法进行。抗浸出性的限值要求按核素第 42d 浸出率和 42d 累积浸出分数的限值要求来执行（见 GB14569.1 征求意见稿中 5.3.1 条）。

4.6.4 抗浸泡性

类似抗冲击性能的检验规定，固化体的抗浸泡性能检测规定“对满足抗压强度要求的水泥固化体试样进行抗浸泡试验”。

在征求意见的过程中，专家指出“GB 14569.1-93 规定抗浸泡试验用的浸出剂“应采用处置场的模拟地下水”。使用处置场的模拟地下水存在一定的不确定性，且处置场模拟地下水的配制不容易操作，而且与 GB 7023《放射性废物固化体长期浸出试验》的规定不符，GB 7023 中规定的浸出剂，依照浸出试验的具体用途有：去离子水、合成海水和典型的处置场水”。在本征求意见稿中采纳专家的建议，将抗浸泡试验用的浸出剂改为去离子水。

4.6.5 抗冻融性

类似抗冲击性能的检验规定，固化体的抗冻融性能检验规定“对满足抗压强度要求的水泥固化体试样进行抗冻融试验”。

原标准中规定“冻结时间不少于 3h，3h 后取出试样”，该表述不确切，为此，将“3h 后”改为“冻结完毕后”。

在征求意见的过程中，有专家提出建议将抗冻融性能检测方法中“冻结完毕后取出试体（连同塑料袋），立即放在 15-20℃ 的水槽中融解，”的解冻方法该为室温下自然解冻，解冻时间延长。专家建议很合理，因为水槽中融解存在水浸入塑料袋的风险。但是目前水泥固化体在室温空气中自然解冻的时间不确定，本征求意见稿中暂保留原标准的规定。

4.6.6 耐 γ 辐照性

类似抗冲击性能的检验规定，固化体耐 γ 辐照性能检验规定 “对满足抗压强度要求的水泥固化体试样进行耐 γ 辐照试验。

5. 其它需进一步研究的内容

5.1 抗浸出性

有专家提出用快速浸出试验方法来测定水泥固化体的抗浸出性能。从调研的情况看，美国有水泥固化体快速浸出试验标准方法。我们目前还是处在快速浸出试验方法的探讨阶段，数据收集和积累还不是很多，需要进一步做一些研究工作。建议尽快确定制订一个“水泥固化体快速浸出试验方法”的国家标准，为本标准的再修订作准备。

另有专家提出：“考虑到含有有机废物的废物固化体对环境的影响，建议检测溶解有机碳（DOC）的浸出率。” “是否在浸出性能检验方面增加对有毒物质的特殊要求，包括有毒或无毒的金属，如 Fe、Cu、Zn、Mn、Ni、B 等？” 这些问题都是需要做进一步的调研。

5.2 耐 γ 辐照性

有专家提出，耐辐照性中要求实体累积吸收剂量达到相应比活度水泥固化体所可能受到的累积吸收剂量时，取出玻璃管的提法不够明确，难以操作，包括如何确定水泥固化体的累积吸收剂量值等。建议根据近地表处置的周期，放射性废物分类的限值和固化体中的典型核素给出一个偏安全的累积吸收剂量值为宜。

根据专家意见，取放射性废物近地表处置周期为 300a，参照 GB 9133-1995 《放射性废物的分类》规定的中放固体废物活度浓度限值，以固化体中的典型 γ 放射性核素 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 为例来计算耐 γ 辐照试验中核素的累积吸收剂量值（详细结果详见附件 3），吸收剂量计算结果如下：

对 ^{137}Cs 来说，活度浓度为 $3.7 \times 10^{11} \text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量

值为 $2.0 \times 10^7 \text{Gy}$ ；活度浓度为 $3.7 \times 10^{10} \text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $2.0 \times 10^6 \text{Gy}$ ；活度浓度为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $2.0 \times 10^4 \text{Gy}$ ；活度浓度为 $1.8 \times 10^8 \text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $1.0 \times 10^4 \text{Gy}$ ；

对 ^{60}Co 来说，活度浓度为 $3.7 \times 10^{11} \text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $4.7 \times 10^7 \text{Gy}$ ；活度浓度为 $3.7 \times 10^{10} \text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $4.7 \times 10^6 \text{Gy}$ ；活度浓度为 $3.7 \times 10^8 \text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $4.7 \times 10^4 \text{Gy}$ ；活度浓度为 $8.0 \times 10^7 \text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $2.0 \times 10^4 \text{Gy}$ 。

根据上述计算结果可以看出，当水泥固化体中 ^{137}Cs 的活度浓度小于 $1.8 \times 10^8 \text{Bq/kg}$ (^{60}Co 为 $8.0 \times 10^7 \text{Bq/kg}$) 时，可不进行耐 γ 辐照性试验。当水泥固化体中 ^{137}Cs 的活度浓度大于 $1.8 \times 10^8 \text{Bq/kg}$ ，(^{60}Co 为 $8.0 \times 10^7 \text{Bq/kg}$) 时，必须进行耐 γ 辐照性试验。耐 γ 辐照性试验的实体累积吸收剂量应大于 $1.0 \times 10^6 \text{Gy}$ (相当于核素活度浓度值为 $3.7 \times 10^{10} \text{Bq/kg}$)，或者按照实体的活度浓度值经过计算来确定。

水泥固化体中的核素不会是单一的，当有两种或两种以上的 γ 放射性核素存在时，可以用上面的方法对各个核素通过其放射性活度浓度单独计算它们在 300a 内对累积吸收剂量的贡献，随后加和得到总的累积吸收剂量值。若该值小于 $1 \times 10^4 \text{Gy}$ 时，可不进行耐 γ 辐照性试验。

5.3 抗生物降解性

有专家提出在修订中增加对水泥固化体抗生物降解性的性能要求和性能检测。美国核管会 (NRC) 技术观点报告中指出：水泥固化体本身不能提供真菌或细菌生长所需要的碳质源，在废物流缺少碳质的情况下，生物无法获得其内部的食物来源。因此，水泥固化体不需要开展抗生物降解性能检测，除非废物体中有碳类物质 (如，离子交换树脂或油类)。

我国的放射性废物中有一大类为有机废树脂，目前对该类废物的处理采用水泥固化。因此，从实际角度来考虑，有必要增加水泥固化体的抗生物降解性要求。但是，手头上现有的资料还无法以标准形式提供相应的性能要求和性能检测方

法。我们将根据专家建议，开展水泥固化体的抗生物降解性能的进一步研究，收集相关资料和数据，为本标准的再修订作准备。

附件 1 核素 42d 累积浸出分数限值的界定

1. 固化体抗浸出性能的检验方法

水泥固化体的抗浸出性要通过浸出试验来确定。IAEA 在 1971 年推荐一个浸出试验的标准方法, 并提出浸出试验的结果用样品中放射性核素的累积浸出分数对应于总的浸出时间的函数关系曲线来表示^[1]。即:

$$\frac{\sum a_n / F}{A_0 / V} \text{ 对 } \sum t_n \text{ 或 } \frac{\sum a_n}{A_0} \text{ 对 } \sum t_n ,$$

也可以用浸出率 R_n 对浸出时间 t (d) 的函数曲线表示:

$$R_n = \frac{a_n / A_0}{(F / V)t_n}$$

上式中: R_n 为浸出率, cm/d; a_n 为第 n 浸出周期中浸出的放射性核素的活度 (Bq) 或质量 (g); A_0 为样品中放射性核素的初始活度 (Bq) 或质量 (g); F 为样品的暴露表面积, cm^2 ; V 为样品的体积, cm^3 ; t_n 为第 n 浸出周期的持续天数, d。

国际标准化组织在 1982 年发布了 ISO 6961-1982 (E) “放射性固化体长期浸出试验” 的国际标准^[2]。

该标准仅规定浸出试验结果以浸出率 R_n 同浸出时间 t 的关系表示:

$$R_n = \frac{a_n}{A_0 \times F \times t_n}$$

式中的 a_n 为第 n 次浸出周期中某核素浸出的放射性 (Bq) 或质量 (kg); A_0 为样品中某核素原有的放射性比活度 (Bq/kg), 或质量分数。浸出率 R_n 的单位为 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 或 $\text{Bq}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

美国没有采用 ISO 的浸出试验标准, 在 1986 年就低水平放射性废物固化体编制了“低水平放射性废物固化体抗浸出性能测定的短期浸出试验程序” 的美国国家标准 (新版本为 ANSI/ANS-16.1-2003) ^[3]。

美国 ANSI/ANS-16.1-2003 国家标准中规定, 在核素累积浸出百分数小于

20%时，一个均匀、形状规则的固体，其浸出行为接近于一个半无限介质的浸出行为。标准中指出 20%是一个足够精确的近似值。此时，通过质量迁移方程可以计算出“有效扩散系数” D 和“浸出因子” L：

$$D = \pi \left[\frac{a_n/A_0}{(\Delta t)_n} \right]^2 \left[\frac{V}{S} \right]^2 T \text{-----} \quad (1)$$

式中： $(\Delta t)_n = t_n$ ，第 n 次浸出周期的持续时间，s；

T 为平均浸出时间，由下式计算而得：

$$T = \left[\frac{1}{2} \left((\sum (\Delta t)_n)^{1/2} + (\sum (\Delta t)_{n-1})^{1/2} \right) \right]^2$$

$$L = \frac{1}{7} \sum_1^7 \left[\log \left(\frac{\beta}{D} \right) \right]_n \text{-----} \quad (2)$$

式中：β 为常数 1，cm²/s。

在核素累积浸出百分数大于 20%时，根据累积浸出百分数 F 值 ($F = \frac{\sum a_n}{A_0}$)，从 ANSI/ANS-16.1-2003 标准附表上查得相应的 G 值。扩散系数再由下式计算而得：

$$D = \frac{Gd^2}{t} \text{-----} \quad (3)$$

式中：G 是与累积浸出分数和圆柱体长径比相关的一个时间因子（无量纲）；

d 为圆柱形固化体样品的直径，cm；

t 为累积的浸出时间，s。t = Σ(Δt)_n。

中国国家标准 GB7023-1986《放射性废物固化体长期浸出试验》规定浸出试验结果应以浸出率 R_n 及累积浸出分数 P_t 同浸出时间 t 的关系表示^[4]：

$$R_n = \frac{a_n/A_0}{(F/V)t_n} \quad (\text{cm/d})$$

$$P_t = \frac{\sum a_n/A_0}{F/V} \quad (\text{cm})$$

但在中国国家标准 GB14569.1-1993《低、中水平放射性废物固化体性能要求 水泥固化体》中仅规定了放射性核素浸出试验后第 42 天的浸出率限值。

2 水泥固化体抗浸出性检测数据比较

要全面反映水泥固化体的抗浸出性，可以采用如下两种方法：一是参考美国的方法，浸出试验的结果采用“浸出因子”L表示。二是浸出试验的结果以浸出率和累积浸出分数表示。前一方法目前是不可能的，因为目前我国只有 GB 7023-86 的国家标准，没有新的浸出试验方法的国家标准，采用“浸出因子”L 没有法规标准的依据。后一方法是可以实现的，因为有 GB 7023-86 “放射性废物固化体长期浸出试验” 的国家标准作为依据。

这次修订后的标准，在水泥固化体抗浸出性要求方面要与国标 GB7023-1986 规定一致，同时要按实践情况确定出一个既能照顾到以往已经产生的水泥固化体性能，又能限制今后产生的水泥固化体性能的累积浸出分数限值要求。

当核素累积浸出百分数小于 20%时，浸出因子 L 与浸出率 R_n 有如下关系：

$$L = \frac{1}{7} \sum_{n=1}^7 \left[\lg \left(\beta / (\pi R_n^2 T) \right) \right] \dots \dots \dots (4)$$

通过按美国 ANSI/ANS-16.1-2003 计算浸出因子 L 的方法，与按 GB 7023-86 测定的浸出率数据进行比较，可以从中找出一些规律性的东西，作为修订标准的参考。

按式 (4) 将核素累积浸出百分数小于 20%的情况下国标 GB 14569.1-93 中规定的重要核素的 R_n 限值所对应的 L 值列于表 1。

表 1 与 R_n 限值相对应的 L 值

核素	R_n /(cm · d ⁻¹)	L
⁶⁰ Co	≤2×10 ⁻³	≥8.3
¹³⁷ Cs	≤4×10 ⁻³	≥7.7
⁹⁰ Sr	≤1×10 ⁻³	≥8.9
²³⁹ Pu	≤1×10 ⁻⁵	≥12.9
其它 β、γ 放射性核素 (不包括 ³ H)	≤4×10 ⁻³	≥7.7
其它超铀核素	≤1×10 ⁻⁵	≥12.9

中国辐射防护研究院在过去几年，曾对大亚湾核电站（以下简称大亚湾）、秦山核电站（以下简称秦山）、清华大学核能院（以下简称核能院）和中核总国营四 0 四厂（以下简称四 0 四厂）四家单位的真实或模拟放射性废物水泥固化体样品按国标 GB 7023-86 规定的方法做过浸出率测定。现将原有的测试数据重新收集整理，计算各样品各个核素第 42d 浸出率、42d 的累积浸出分数和“浸出因子”L。计算结果与浸出率 R_n 和累积浸出分数 P_t 一起列于表 2 和表 3 中。

表 2 浸出率、累积浸出分数与浸出因子计算结果比较

样品来源	编号	参数	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	⁶⁰ Co	总 γ	³ H	¹⁴ C	⁶³ Ni
大亚湾	NF1	Rn ,cm/d	2.17E-3	2.77E-4	1.09E-5				
		Pt ,cm	0.26	1.31E-02	1.27E-03				
		L	7.7*	10.6	12.6				
	NF2	Rn ,cm/d	1.53E-3	8.01E-4	1.46E-5				
		Pt ,cm	0.23	2.02E-02	1.56E-03				
		L	7.8*	10.3	12.6				
	NF3	Rn ,cm/d					1.04E-3	1.10E-3	8.83E-5
		Pt ,cm					1.22E-01	1.32E-01	7.51E-03
		L					8.5	8.5	10.9
	SZ1	Rn ,cm/d	2.80E-3	2.40E-4	8.52E-6				
		Pt ,cm	0.44	3.10E-02	6.32E-03				
		L	7.0*	9.4	11.7				
	SZ2	Rn ,cm/d	9.15E-3	7.71E-4	1.85E-5				
		Pt ,cm	1.16	7.47E-02	5.64E-03				
		L	6.0*	8.9	12.2				
	SZ3	Rn ,cm/d					4.14E-4	3.71E-5	1.16E-7
		Pt ,cm					8.04E-02	2.90E-03	1.88E-05
		L					8.9	11.8	16.2
NS1	Rn ,cm/d	2.10E-3	3.08E-4	2.26E-5					
	Pt ,cm	0.44	1.14E-02	3.28E-03					
	L	7.0*	10.7	11.8					
NS2	Rn ,cm/d	1.31E-3	5.81E-4	1.17E-5					
	Pt ,cm	0.51	1.29E-02	3.81E-03					
	L	6.7*	10.8	11.9					
秦山	T1-3	Rn ,cm/d	3.21E-4		2.54E-4	3.08E-4			
		Pt ,cm	1.10E-01		2.40E-02	1.05E-01			
		L	8.9		10.0	9.0			
	T1-4	Rn ,cm/d	6.99E-4		3.44E-4	6.91E-4			
		Pt ,cm	9.72E-02		2.18E-02	9.36E-02			
	L	9.0		10.0	9.0				
核研院	1#	Rn ,cm/d	5.67E-5	1.80E-4	2.58E-7				
		Pt ,cm	4.29E-03	8.55E-03	1.94E-05				
		L	11.4	10.9	16.1				
	3#	Rn ,cm/d	5.22E-5	1.69E-4	2.07E-7				
		Pt ,cm							
	L	11.4	10.9	16.0					

*累积浸出百分数大于 20%，用公式 (3)、(2) 计算。

表 3 浸出率、累积浸出分数与浸出因子计算结果比较

样品来源	编号	参数	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	总	总 β	²³⁹ Pu
四零四厂	404-1	Rn ,cm/d	5.90E-04	1.34E-04	6.26E-06	7.44E-04	1.13E-06
		Pt ,cm	0.23	1.21E-02	1.06E-03	0.25	4.58E-04
		L	7.4*	10.6	12.8	7.4*	13.8
	404-2	Rn ,cm/d	6.82E-04	1.33E-04	1.04E-05	5.68E-04	2.47E-06
		Pt ,cm	0.28	1.03E-02	1.10E-03	0.19	3.77E-04
		L	7.3*	10.6	12.6	7.9*	13.8
	0.55-1	Rn ,cm/d	5.00E-04	5.20E-05		4.72E-04	
		Pt ,cm	0.24	9.63E-03		0.23	
		L	7.5*	10.9		7.5*	
	0.55-2	Rn ,cm/d	5.93E-04	6.14E-05		5.59E-04	
		Pt ,cm	0.25	1.12E-02		0.24	
		L	7.4*	10.8		7.5*	
	0.55-3	Rn ,cm/d	5.07E-04	1.84E-05	4.15E-06	4.77E-04	2.62E-06
		Pt ,cm	0.21	3.64E-03	7.12E-04	0.20	5.29E-04
		L	7.6*	11.7	13.1	7.6*	13.4
	0.6-1	Rn ,cm/d	4.60E-04	5.13E-05		4.36E-04	
		Pt ,cm	0.24	1.24E-02		0.23	
		L	7.5*	10.8		7.5*	
	0.6-2	Rn ,cm/d	4.89E-04	6.24E-05		4.62E-04	
		Pt ,cm	0.23	1.39E-02		0.22	
		L	7.5*	10.8		7.6*	
	0.6-3	Rn ,cm/d	4.68E-04	1.45E-05	3.69E-06	4.42E-04	2.23E-06
		Pt ,cm	0.20	3.58E-03	7.14E-04	0.19	5.57E-04
		L	7.7*	11.9	13.1	7.9*	13.3

*累积浸出百分数大于 20%，用公式（2）、（3）计算。

3 累积浸出分数限值的确定

从表 2 和表 3 可以看出：

（1）在核素累积浸出百分数小于 20%（累积浸出分数值小于 0.17）条件下，固化块抗浸出性能能满足国标 GB 14569.1-93 中规定的要求，同时也能满足与浸出率 R_n 限值相对应的浸出因子 L 值的要求；核素累积浸出百分数在 20~31%（累积浸出分数值在 0.17~0.26）之间时，则固化块抗浸出性能虽然能满足国标 GB 14569.1-93 中规定的要求，但有的固化块能满足与浸出率 R_n 限值相对应的浸出因子 L 值的要求，有的就不能满足与浸出率 R_n 限值相对应的浸出因子 L 值的要求；当核素累积浸出百分数大于 31%（累积浸出分数值大于 0.26）时，固化块抗

浸出性能虽然能满足国标 GB 14569.1-93 中规定的要求，固化块均不能满足与浸出率 R_n 限值相对应的浸出因子 L 值的要求。

(2) 水泥固化体中除了 ^{137}Cs 外，其余核素累积浸出百分数均小于 20% (累积浸出分数值小于 0.17)，固化体抗浸出性能都能满足国标 GB 14569.1-93 中规定的要求，同时也都能满足与浸出率 R_n 限值相对应的浸出因子 L 值的要求。因此，为使问题简单化，水泥固化体中除了 ^{137}Cs 外，其余核素累积浸出百分数的限值可以确定为 $\leq 20\%$ (累积浸出分数值 ≤ 0.17)。

根据上面所述，对 ^{137}Cs 来说，水泥固化体中 ^{137}Cs 的累积浸出百分数的限值可以确定为 $\leq 31\%$ (累积浸出分数值 ≤ 0.26)。

也就是说，当水泥固化体中 ^{137}Cs 的累积浸出百分数小于 20% (累积浸出分数值小于 0.17) 时，其浸出因子 L 值都大于 7.7，固化体抗浸出性能除了能满足国标 GB 14569.1-93 中规定的浸出率 R_n 限值的要求外，同时也都能满足与浸出率 R_n 限值相对应的浸出因子 L 值的要求，因此，可以视其为合格水泥固化体。

当水泥固化体中 ^{137}Cs 的累积浸出百分数在 20~31% (累积浸出分数值在 0.17~0.26) 之间时，其浸出因子 L 值并不是都大于 7.7 (据现有的数据， >7.0)，固化体抗浸出性能都能满足国标 GB 14569.1-93 中规定的浸出率 R_n 限值的要求，由于其浸出因子 L 值在 7.1-7.8 之间。根据国内实际情况，可以视其为合格水泥固化体。

当水泥固化体中 ^{137}Cs 的累积浸出百分数 $>31\%$ (累积浸出分数值 >0.26) 时，其浸出因子 L 值总是小于 7.7 (据现有的数据， ≤ 7.0)，虽然固化体抗浸出性能都能满足国标 GB 14569.1-93 中规定的浸出率 R_n 限值的要求，由于其浸出因子 L 值已 ≤ 7.0 ，因此视其为不合格水泥固化体。

4 结论

综上所述，在新标准中保留原来标准中的浸出率限制，同时规定了核素的累积浸出分数限值。新标准规定：

水泥固化体试样在 25℃ 的去离子水中浸出，应满足浸出率和累积浸出分数的限值要求。

核素第 42d 的浸出率应低于下列限值：

- ^{60}Co : $2 \times 10^{-3} \text{cm/d}$;
- ^{137}Cs : $4 \times 10^{-3} \text{cm/d}$;

- ^{90}Sr : $1 \times 10^{-3} \text{ cm/d}$;
- ^{239}Pu : $1 \times 10^{-5} \text{ cm/d}$;
- 其它重要 β 、 γ 放射性核素（不包括 3H ）: $4 \times 10^{-3} \text{ cm/d}$;
- 其它 α 核素: $1 \times 10^{-5} \text{ cm/d}$ 。

核素 42d 的累积浸出分数应低于下列限值:

- ^{137}Cs : 0.26 cm;
- 其它放射性核素（不包括 3H ）: 0.17 cm。

5. 参考文献

- [1] HESPE, E. D. (Ed), Leach Testing of Immobilized Radioactive Waste Solids [J], Atomic Energy Review, 1971, 9 (1): 195.
- [2] International Organization for Standardization, ISO 6961[S], Long-Term Leach Testing of Solidified Radioactive Waste Forms, (1982-10-15).
- [3] American Nuclear Society. American National Standard, “Measurement of the leachability of solidified low-level radioactive wastes by a short-term test procedure” [S], ANSI/ANS-16.1 - 2003, American Nuclear Society, 555 North Kensington Avenue, La Grange Park, Illinois 60526 USA, 2003.
- [4] 核工业标准化研究所. GB 7203-1986 放射性废物固化体长期浸出试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.

附件 2 耐 γ 辐照性能检测核素累积吸收剂量值的估算

采取专家意见,对耐 γ 辐照性能检测中的核素累积吸收剂量值进行估算。取放射性废物近地表处置周期为 300a,参照 GB 9133-1995《放射性废物的分类》规定的中放固体废物活度浓度限值,以固化体中典型 γ 放射性核素 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 为例来计算耐 γ 辐照试验中核素的累积吸收剂量值。

将废物体视为一无限大体积 γ 源^[1],其任一点的空气比释动能率为:

$$X = \frac{4\pi A_s \Gamma}{\mu} \quad (1)$$

式中, Γ 为空气比释动能常数;

A_s 为放射性物质活度浓度, Bq/m^3 ;

μ 为源物质对 γ 射线的线减弱系数, m^{-1} 。

$$\text{其中, } A_s = A_0 \cdot \rho \quad (2)$$

式中, A_0 为放射性物质的质量活度浓度, Bq/kg ;

ρ 为放射性物质的密度, kg/m^3 。

$$\text{则, } X = \frac{4\pi A_0 \Gamma}{\mu/\rho} \quad (3)$$

在同一点上,某物质的吸收剂量率 D 与 X 有下面关系:

$$D = X(1 - g) \quad (4)$$

式中, g 为次级电子在慢化过程中,能量损失于韧致辐射的份额。在忽略带电粒子产生的韧致辐射效应时, $D = X$ 。

吸收剂量计算结果如下表所示。

表 2 累积吸收剂量计算结果

核素		计算参数					累积吸收剂量/Gy
Cs-137	π	$A_0, \text{Bq}/\text{kg}$	Γ	μ/ρ	$D / \text{Gy} \cdot \text{S}^{-1}$		
	3.14	3.70E+11	2.12E-17	9.00E-03	3.94E+01	2.07E+07	
	3.14	3.70E+10	2.12E-17	9.00E-03	3.94E+00	2.07E+06	

3.14	3.70E+09	2.12E-17	9.00E-03	3.94E-01	2.07E+05
3.14	1.00E+09	2.12E-17	9.00E-03	1.07E-01	5.60E+04
3.14	7.20E+08	2.12E-17	9.00E-03	7.67E-02	4.03E+04
3.14	5.80E+08	2.12E-17	9.00E-03	6.18E-02	3.25E+04
3.14	3.70E+08	2.12E-17	9.00E-03	3.94E-02	2.07E+04
3.14	1.80E+08	2.12E-17	9.00E-03	1.92E-02	1.01E+04
3.14	3.70E+07	2.12E-17	9.00E-03	3.94E-03	2.07E+03
3.14	3.70E+06	2.12E-17	9.00E-03	3.94E-04	2.07E+02
3.14	3.70E+05	2.12E-17	9.00E-03	3.94E-05	2.07E+01
3.14	3.70E+04	2.12E-17	9.00E-03	3.94E-06	2.07E+00
<hr/>					
Co-60					
3.14	3.70E+11	8.67E-17	2.70E-03	5.37E+02	4.71E+07
3.14	3.70E+10	8.67E-17	2.70E-03	5.37E+01	4.71E+06
3.14	3.70E+09	8.67E-17	2.70E-03	5.37E+00	4.71E+05
3.14	8.00E+08	8.67E-17	2.70E-03	1.16E+00	1.02E+05
3.14	3.70E+08	8.67E-17	2.70E-03	5.37E-01	4.71E+04
3.14	8.00E+07	8.67E-17	2.70E-03	1.16E-01	1.02E+04
3.14	3.70E+07	8.67E-17	2.70E-03	5.37E-02	4.71E+03
3.14	3.70E+06	8.67E-17	2.70E-03	5.37E-03	4.71E+02
3.14	3.70E+05	8.67E-17	2.70E-03	5.37E-04	4.71E+01
3.14	1.50E+05	8.67E-17	2.70E-03	2.18E-04	1.91E+01
3.14	3.70E+04	8.67E-17	2.70E-03	5.37E-05	4.71E+00
3.14	3.70E+11	8.67E-17	6.00E-03	2.42E+02	2.12E+07

从表中结果可以看出：

对 ^{137}Cs 来说，活度浓度为 $3.7 \times 10^{11}\text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $2.0 \times 10^7\text{Gy}$ ；活度浓度为 $3.7 \times 10^{10}\text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $2.0 \times 10^6\text{Gy}$ ；活度浓度为 $3.7 \times 10^8\text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $2.0 \times 10^4\text{Gy}$ ；活度浓度为 $1.8 \times 10^8\text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $1.0 \times 10^4\text{Gy}$ ；

对 ^{60}Co 来说，活度浓度为 $3.7 \times 10^{11}\text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $4.7 \times 10^7\text{Gy}$ ；活度浓度为 $3.7 \times 10^{10}\text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $4.7 \times 10^6\text{Gy}$ ；活度浓度为 $3.7 \times 10^8\text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $4.7 \times 10^4\text{Gy}$ ；活度浓度为 $8.0 \times 10^7\text{Bq/kg}$ 的废物体，300a 的累积吸收剂量值为 $2.0 \times 10^4\text{Gy}$ 。

根据上述计算结果可以看出，当水泥固化体中 ^{137}Cs 的活度浓度小于 $1.8 \times$

10^8Bq/kg (^{60}Co 为 $8.0\times 10^7\text{Bq/kg}$) 时, 可不进行耐 γ 辐照性试验。当水泥固化体中 ^{137}Cs 的活度浓度大于 $1.8\times 10^8\text{Bq/kg}$, (^{60}Co 为 $8.0\times 10^7\text{Bq/kg}$) 时, 必须进行耐 γ 辐照性试验。耐 γ 辐照性试验的实体累积吸收剂量应大于 $1.0\times 10^6\text{Gy}$ (相当于核素活度浓度值为 $3.7\times 10^{10}\text{Bq/kg}$), 或者按照实体的活度浓度值经过计算来确定。

参考文献

[1] 方杰主编, 辐射防护导论, 原子能出版社, 1988 年, p.82