

附件 2

核安全法规
技术文件

NNSA-HAJ-0001-2020

放射性废物处置安全全过程系统分析

国家核安全局
2020 年 3 月

前 言

国家核安全局历来高度重视并大力推进核与辐射安全法规的制修订工作。核与辐射安全法规包括法律、行政法规、部门规章、导则和技术文件。技术文件作为国家核安全局核与辐射安全监管的技术指导性文件，一般是以国际原子能机构或其他机构的技术出版物作为蓝本，借鉴国外核与辐射安全技术方面的资料，并结合我国的具体工程和管理实践而编制的，供有关部门和人员参考使用。

《放射性废物处置安全全过程系统分析》是以国际原子能机构 2012 年发布的 “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste” 为蓝本，参考世界各国放射性废物处置安全全过程系统分析的最新研究成果，并结合我国放射性废物处置安全评价的实际情况编写而成的。本技术文件与我国现行核与辐射安全法规和标准协调一致，可作为我国放射性废物安全管理的参考资料。

中国原子能科学研究院为本技术文件编写的技术支持单位。

国家核安全局

2020 年 3 月

目 录

1 引言	32
1.1 目的.....	32
1.2 范围.....	32
2 安全目标和基本安全要求	32
2.1 放射性废物处置的安全目标.....	32
2.2 安全全过程系统分析的基本安全要求.....	32
2.3 安全评价的基本安全要求.....	33
3 安全全过程系统分析在各阶段的主要内容	34
3.1 阶段与更新.....	34
3.2 处置概念研究阶段.....	34
3.3 选址阶段.....	35
3.4 设计和建造阶段.....	36
3.5 运行和关闭阶段.....	37
3.6 关闭后阶段.....	37
4 安全全过程系统分析的组成	38
4.1 安全全过程系统分析的组成.....	38
4.2 安全全过程系统分析的背景.....	38
4.3 安全策略.....	40
4.4 处置系统的描述.....	41
4.5 安全评价.....	42
4.6 迭代和设计优化.....	45
4.7 不确定性管理.....	46
4.8 限值、控制和条件.....	47
4.9 安全论据的整合.....	47
5 关闭后阶段的辐射影响评价	49

5.1 关闭后阶段辐射影响评价的主要内容.....	49
5.2 评价背景.....	49
5.3 关闭后景象的构建.....	51
5.4 模型的开发.....	52
5.5 计算与结果分析.....	53
5.6 不确定性管理.....	54
5.7 评价模型的优化.....	56
5.8 与评价准则的比较.....	56
6 安全全过程系统分析的文件编制.....	57
6.1 安全全过程系统分析的文件组成.....	57
6.2 摘要.....	57
6.3 背景和处置系统的描述.....	57
6.4 安全策略.....	58
6.5 质量保证大纲.....	58
6.6 总结及结论.....	59
名词解释.....	60

1 引言

1.1 目的

编制本技术文件的目的是为放射性废物处置设施的营运单位在放射性废物处置设施处置概念研究、选址、设计和建造、运行和关闭以及关闭后等各阶段开展安全全过程系统分析提供指导，也可为监管部门的审评工作提供参考。

1.2 范围

1.2.1 本技术文件适用于近地表处置设施和地质处置设施的安全全过程系统分析，不适用于极低放填埋场、铀矿冶和伴生放射性固体废物处置设施。

1.2.2 放射性废物处置安全全过程系统分析的重点是处置设施的安全性能及其关闭后的辐射影响评价。本技术文件包括非放射性危害的评价，不包括安保相关内容。

2 安全目标和基本安全要求

2.1 放射性废物处置的安全目标

放射性废物处置是放射性废物管理的最后步骤。放射性废物处置的安全目标是保护人和环境免受电离辐射的危害。为实现此安全目标，应确保放射性废物在一定时间内得到有效包容和隔离，使辐射照射保持在可合理达到的尽量低的水平。

2.2 安全全过程系统分析的基本安全要求

2.2.1 营运单位应在处置设施的处置概念研究、选址、设计和建造、运行和关闭以及关闭后等各阶段开展安全评价，这五个阶段的安全评价是相互联系的、系统的、不断深入的过程，这个不断深入的过程就形成了安全全过程系统分析。安全全过程系统分析包括各阶段的安全评价、经整合的与安全评价相关的信息。

2.2.2 在选址阶段，应进行场址特性调查与评价，其详细程度应足以支持全面了解该场址的特性及其演化，包括场址的现状，与场址设施安全相关的特征、事件和过程，场址的自然演化和可能出现的自然事件，可能影响设施安全的人为活动等。

2.2.3 在设计和建造阶段，应按照有利于保持处置环境安全功能的方式进行设计和建造。

2.2.4 在运行和关闭阶段，应按照许可证条件和监管要求运行，以保证设施的安全运行；应严格按照批准的关闭计划进行处置设施的关闭。

2.2.5 在处置概念研究、选址、设计和建造、运行和关闭以及关闭后各阶段，应对以下方面进行迭代评价：场址、设计、建造、运行和管理的选定方案，以及处置系统的性能和安全。

2.2.6 应能够向相关方证明处置设施对人和环境的保护水平满足安全要求。安全全过程系统分析包括对场址、设计、管理和监管的所有安全相关问题的系统描述，相关文件应明确说明不确定性和限制条件及其对安全的影响。

2.2.7 安全全过程系统分析的各类文件应全面详实、结构合理、透明且可追溯，以便于相关方获取和理解文件中的信息；应清楚地说明关键假设的正当性理由和理论基础，并评价不确定性对最终结果的影响程度；应确保在开发处置系统和安全全过程系统分析时所遵循的程序和所做关键决策都是可追溯的。

2.2.8 在处置设施的建造和运行期间，应对安全全过程系统分析的各类文件进行定期更新，推荐每十年更新一次。如果出现以下一类或几类情况时应对安全全过程系统分析文件进行及时更新：场址资料得到了较为系统地完善，场址条件发生了重大变化（如发生地震、滑坡等自然灾害），发生了事故，发现存在安全问题或安全隐患，以及对设计或运行进行重要修改等。

2.2.9 营运单位的质量保证体系应覆盖与安全全过程系统分析相关的所有工作，以保证与安全全过程系统分析相关的所有活动处于质量受控状态。

2.3 安全评价的基本安全要求

2.3.1 营运单位应负责开展安全评价。各阶段的安全评价是指支撑相应阶段安全全过程系统分析的所有评价。安全评价随着处置设施各阶段的进展而不断深入并因阶段不同而存在不同的重点关注内容。

2.3.2 安全评价的基本目的是确定处置设施或活动是否达到足够的安全水平，是否满足基于《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB18871）等法规和标准所确定的相关安全要求。

2.3.3 对于新建处置设施或新开展的处置活动，近地表处置设施应从选址阶段开展安全评价工作，地质处置设施应从处置概念研究阶段开展安全评价工作；对于已运行处置设施和已开展的处置活动，应按照监管要求定期更新安全评价，更新过程中应考虑新标准、新技术、场址特性变化、设计或运行修改及老化的影响。

2.3.4 在安全评价中应论证处置设施正常运行、预计运行事件和事故工况下的所

有辐射风险；对于预计运行事件和事故情况，还应考虑可能出现的故障及其后果。对于关闭后的长期安全评价，还应考虑处置系统的演化、处置系统性能的评价和人类闯入活动的评价。

2.3.5 在安全评价中应对以下方面进行充分论证：已采取充分的措施将辐射风险控制到了可接受的水平；构筑物、系统、部件和屏障满足所要求的安全功能；对预计运行事件和事故情况采取了预防和缓解。

2.3.6 在安全评价中应评价处置设施的运行或活动所导致的对关键人群组的所有辐射风险。

2.3.7 在安全评价中应考虑当前和长期的辐射风险。

2.3.8 安全评价应包括一系列的定量分析，应采用确定论方法和（或）概率论方法对不同景象下的各种安全影响进行评价。

2.3.9 安全评价的方法应是合理、透明且可追溯的，以便于监管部门及其他技术审查者遵循其中的逻辑、理解评价中所使用的假设，并在需要时可复现评价结果。

3 安全全过程系统分析在各阶段的主要内容

3.1 阶段与更新

3.1.1 安全评价应随处置设施的进展而发展，处置设施的进展阶段包括：处置概念研究阶段、选址阶段、设计和建造阶段、运行和关闭阶段，以及关闭后阶段。其中处置概念研究阶段主要适用于地质处置设施。这几个阶段的安全评价是互相联系的、系统的、不断深入的过程，这也构成了安全全过程系统分析的主体部分。

3.1.2 安全全过程系统分析随着安全评价的不断深入而更新，在更新过程中可能需要进行迭代。

3.2 处置概念研究阶段

3.2.1 处置概念研究阶段，应提出安全策略及实现该策略的方式，并说明安全策略及处置概念研究相关的关键问题，建立质量保证体系 and 不确定性管理方法。

3.2.2 该阶段安全评价应说明处置设施设计方案和建造的可行性、处置系统性能的合理性、具体实施步骤中存在的 uncertainty、处置系统部件如何满足安全要求、设计方案的技术可行性。

3.2.3 此阶段安全全过程系统分析文件应包含质量保证体系的描述，包括处置项

目的组织结构、所需资源、项目规划以及管理程序。

3.3 选址阶段

3.3.1 选址阶段的安全评价应满足支持场址的许可申请和获得批准的需要。

3.3.2 近地表处置设施应在本阶段同时开展3.2.1和3.2.2中的相关工作。

3.3.3 应提出选取场址的准则，且安全评价应能支持从一个或多个备选场址中提出推荐场址。

3.3.4 安全评价的重点是场址特性。应以能说明在现有处置系统设计方案下其工程部件和自然条件可实现安全功能的方式来描述场址基本特性。主要包括以下内容的描述：

(1) 处置系统每个部件实现其预期安全功能的概述，包括在可能的干扰事件下的情况；

(2) 证明处置概念研究阶段所确定的场址预期特性的研究与开发方案，在高水平放射性废物地质处置设施开发方案中可能还包括地下实验室的建造和运行计划；

(3) 对推荐场址的处置能力（包括处置总容量和核素总活度）是否能够满足现有的和预期的废物容纳能力所开展的评价；

(4) 对处置设施的整体和各部件可能承受的扰动所开展的初步评价，包括来自内部的扰动（如热、化学、力学、辐射或反应性变化）和外部扰动（如人类闯入、气候变化、地震活动）；

(5) 对有利于处置设施安全的部件材料（如金属、粘土和混凝土）的特性调查；

(6) 对如何通过适当的条件和处置系统性能验证来证明处置系统技术可行性的建议；

(7) 对多个场址和设计方案的比选过程和结果；

(8) 对处置系统各部件的互补作用及整体兼容性的评价，以确认满足纵深防御要求；

(9) 鉴别和说明可能存在的安全相关的不确定性的领域。

3.3.5 应确保景象与评价模型开发的先进性，辐射影响估算值的置信度应是合理的，构建的景象应涵盖处置设施的预期演化和主要的潜在扰动事件。应对景象和评价模型中的主要假设和简化进行正当性说明，并应进行敏感性分析。

3.3.6 应对处置概念研究阶段构建的质量保证体系进行更新，应建立明确的组织

结构和工作程序，确保安全评价和数据采集（特别是场址相关数据）的质量得到控制，确保活动的整体计划合理（特别是涉及监管部门及其他相关方的计划，例如场址审批、申领建造和运行许可的计划，以及后续阶段的安全全过程系统分析的计划），确保信息管理系统的良好运行，确保资源的合理配置等。

3.4 设计和建造阶段

3.4.1 设计和建造阶段的安全评价应满足支持建造和运行许可申请和获得批准的需要。

3.4.2 应在选址阶段工作的基础上进一步开展安全相关论据的收集、分析，论证处置方案可行并满足安全要求，并持续开展设计优化。

3.4.3 安全评价应能证明处置系统任一部件安全功能的丧失不会危及处置系统的整体安全，对建设工程以及它们对处置系统的影响开展深入评价。

3.4.4 安全评价应包括对处置设施运行安全和长期安全的评价。应制订适用于该阶段的监测和检查程序并实施。

3.4.5 安全全过程系统分析及相关安全评价都应考虑对已实施的设计进行任何修改所带来的影响，包括：

（1）应对在处置设施预期演化和扰动事件（包括预期的事件和极不可能的事件）下，处置系统各个部件发挥其预期安全功能的信息进行更新。这些更新信息包括全面的场址特性调查结果、处置设施拟处置的废物清单（包括该设施最大废物处置容量、废物的放射性和其他特性）、得到试验结果支撑的设计特征、确定的关键部件原型验证等；

（2）施工技术的选择及验证，即证明这些可在一定程度上保证天然屏障的包容和隔离特性的技术满足安全要求；

（3）鉴定和说明可能存在的安全不确定性的领域，并把它们作为安全验证的一部分进行管理。

3.4.6 安全全过程系统分析文件应包括证明评价质量的信息，特别是关于景象和评价工况的范围、模型和程序的合理性及充分性的信息。

3.4.7 应进行敏感性和不确定性分析，包括识别和说明不确定性的主要来源，评价不确定性对结果的影响，并制订减小或避免不确定性的方案。

3.4.8 应对质量保证体系进行更新，确保质量管理满足本阶段的工作需求。组织

机构和程序要适应开发研究、场址特性鉴定和本阶段安全评价工作的需要。应对处置设施建设整体计划的推进进行评估，特别是申领建造和运行许可的计划，以及后续阶段的安全全过程系统分析计划。信息管理应该覆盖数据、信息和决策记录，设计基准、设计修改及其验证应可追溯。

3.5 运行和关闭阶段

3.5.1 运行和关闭阶段的安全评价用于支持处置设施的安全运行和持续改进，也用于支持安全关闭。

3.5.2 在运行前，应制订详细的监测和检查程序并实施。

3.5.3 根据处置设施建造的详细资料以及获取的进一步的信息，对安全评价进行更新。

3.5.4 安全评价中应考虑正常运行及预计运行事件和事故情况所引起的所有辐射风险，应对工作人员和公众的辐射剂量进行评估。

3.5.5 安全评价应论证关闭方案的安全性和可行性。

3.5.6 应对质量保证体系进行更新，确保质量管理满足本阶段的工作需求。组织机构和程序要适应本阶段安全评价工作的需要。信息管理应该覆盖数据、信息和决策记录，并可追溯。

3.6 关闭后阶段

3.6.1 在处置设施关闭后，仍应继续开展安全全过程系统分析工作，用于验证处置设施关闭后处置系统的性能。

3.6.2 在处置设施关闭后，一段时间的安全监护将有助于保持特定处置设施的安全性（特别是近地表处置设施）。安全监护包括采取一些主动措施（监测、维护等），也包括一些被动措施（土地使用限制等）。

3.6.3 在安全监护期间，对环境介质中放射性核素活度浓度的监测是一项重要工作，监测结果将用于对屏障性能及其完整性的验证。

3.6.4 应对质量保证体系进行更新，确保质量管理满足本阶段的工作需求。组织机构和程序要适应本阶段安全评价工作的需要。信息管理应该覆盖数据、信息和决策记录，并可追溯。

4 安全全过程系统分析的组成

4.1 安全全过程系统分析的组成

安全全过程系统分析的组成部分包括：安全全过程系统分析背景，安全策略，处置系统的描述，安全评价，迭代和设计优化，不确定性管理，限值、控制和条件，以及安全论据的整合，如图1所示。

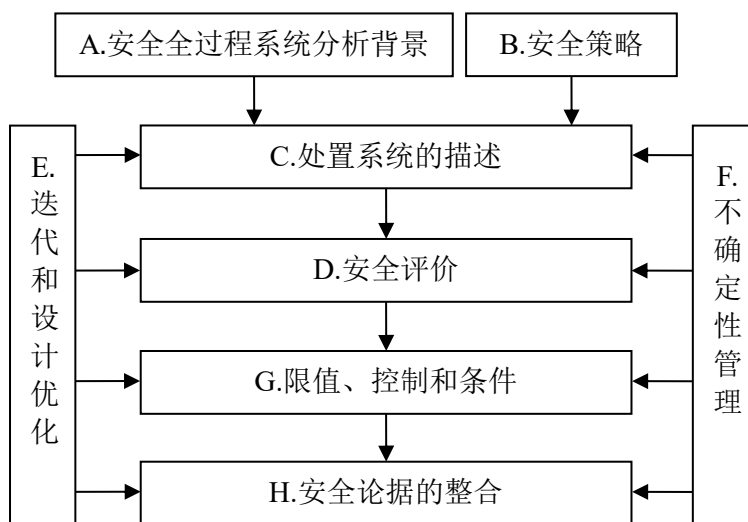


图 1 安全全过程系统分析的组成

4.2 安全全过程系统分析的背景

安全全过程系统分析文件中应说明安全全过程系统分析工作的背景信息，对于安全全过程系统分析文件的后续修订，也应对其背景信息进行必要的更新。背景应阐述安全全过程系统分析的目的、安全目标、安全原则、安全准则以及安全论证的方法等。

4.2.1 安全全过程系统分析的目的

安全全过程系统分析的目的是为处置设施在各阶段的监管和技术决策提供依据。安全全过程系统分析文件的每次修订可能与多种因素有关，应依据处置设施所处的不同阶段对其修订的原因和目的进行清晰地说明，可能包括：

- (1) 安全概念初始设想的检验；
- (2) 场址的选择；
- (3) 处置设施的安全论证；
- (4) 处置设施设计的优化；
- (5) 研究与开发方案中安全相关问题的确定；
- (6) 限值、控制与条件的确定或修改，如废物接收准则；

- (7) 放射性废物最大处置容量的评估;
- (8) 安全监护持续时间的合理性;
- (9) 监测大纲和数据获取方案的输入;
- (10) 法规或标准所要求的定期更新或评价;
- (11) 处置范围扩展或处置设施升级改造, 或在同一场址建造新的废物管理设施;
- (12) 处置设施寿期结束或因不符合规定所致的设施关闭;
- (13) 处置设施关闭后的重新启动;
- (14) 确定是否需要补救行动。

4.2.2 安全论证

4.2.2.1 安全论证中应包括处置设施的安全目标和应遵循的安全原则。

4.2.2.2 安全目标是指应以一定的方式选址、设计、建造、运行和关闭处置设施, 以实现在考虑社会和经济因素的情况下处置设施关闭后的防护最优化。安全目标还应提供合理的保证, 使公众受到的长期辐射剂量和风险不会超过相应约束值。

4.2.2.3 所遵循的安全原则应与核与辐射安全监管的基本原则相符, 保护当前和未来的人与环境免受不适当的辐射风险。所遵循的安全原则应包括工作人员和公众(包括当代和后代)的辐射剂量限值和一些定性安全准则。

4.2.2.4 安全论证还应说明如何对不确定性进行处理, 至少应涵盖不确定性的辨识与明确、表征以及管理方法。

4.2.3 分级

4.2.3.1 对于不同类型的处置设施, 应根据其辐射风险水平、场址特性、处置设施设计等因素, 采用分级方法, 由营运单位提出安全全过程系统分析及其支撑性安全评价的范围、广度和详细程度, 并获得监管部门确认。

4.2.3.2 分级需要考虑的因素包括:

(1) 处置设施可能的辐射风险。该准则应用于处置设施的运行和关闭后阶段。应根据在正常运行、预计运行事件和可能出现的干扰事件中放射性物质的释放以及具有潜在严重后果的小概率事件来分析设施潜在的辐射风险。

(2) 处置设施开发过程中相关方法、技术的成熟度。如: 采用的实践、程序和设计是否经过检验, 类似设施或实践的情况, 以及制造商、建造商和安全评价人员是否具备丰富经验。通常情况下, 成熟度越高, 相关评价工作所需的深度越小。

(3) 复杂性。一般情况下，处置设施不需要复杂的主动系统或部件。处置设施的复杂设计在安全评价中的表述也会相应复杂，因此营运单位应考虑是否能够通过采用简单的设施设计来避免复杂的安全评价。

4.3 安全策略

4.3.1 应在处置设施开发的早期阶段制订明确的安全策略。随着项目的进行，安全策略应当是保持持续有效的。对安全策略的任何改变应进行正当性分析和记录。

4.3.2 在安全策略中应包括下列关键要素：多重安全功能和纵深防御、废物的包容和隔离、被动安全特性、处置系统的坚稳性、安全相关特性的论证、与废物处置前管理的相互依赖、不确定性的管理方法及其他问题。

4.3.3 多重安全功能和纵深防御

4.3.3.1 处置设施应提供多重安全功能，即安全性不过分依赖任何单一的安全功能，并确保某一安全功能没有如预期实现时，会由其他安全功能进行弥补。

4.3.3.2 在安全策略中应说明各项安全功能及其有效期限，还应说明各项功能之间的相互弥补机制。

4.3.3.3 在安全策略中应说明如何验证各项安全功能的充分性，例如评价、类推和测试等。此外，还应对各项安全功能纵深防御的充分性进行论证。

4.3.4 包容和隔离

4.3.4.1 在安全策略中应说明包容放射性核素的方式、验证包容充分性的方法，以及包容时限的合理性。

4.3.4.2 隔离包括了两方面，一是指将放射性废物与环境进行物理隔离，二是避免外界干扰对安全功能的破坏。在安全策略中，应说明隔离方法及其合理性，以及验证隔离充分性的方法。

4.3.5 被动安全特性

应尽可能利用处置设施的被动安全功能。在安全策略中应说明这些功能如何实现，还应指出需要采用主动控制或主动措施的情况并说明其可靠性。

4.3.6 处置系统的坚稳性

在安全策略中应说明如何提供安全功能的坚稳性，以及如何验证其充分性。

4.3.7 安全相关特性的论证

在安全策略中应说明如何验证处置设施能够实现其预期功能。可利用模拟设施或

在处置设施现场进行验证。

4.3.8 与废物处置前管理的相互依赖

在安全策略中应说明废物处置与处置前管理的相互依赖，以确保待处置废物与处置设施设计和运行的相容性。

4.3.9 不确定性的管理方法

在安全策略中应说明拟采取的管理不确定性的方法。在安全全过程系统分析中对于处置设施及其演化的最新信息和评价有足够的深度的情况下，也要确保不确定性管理覆盖了决策过程。

4.3.10 其他问题

在安全策略中需考虑的其他问题包括：

- (1) 决策时的谨慎程度以及多重推理方法的使用；
- (2) 评价方法、时间尺度和评价时间窗口选择的合理性；
- (3) 如何进行同行评议；
- (4) 其他论据。

4.4 处置系统的描述

处置系统的描述应记录处置系统的所有信息，为开展所有安全评价提供基础。关于处置系统的信息会随着项目进程和迭代评价而不断发展和完善。

4.4.1 依处置设施的类型而定，处置系统的描述应包含下列信息：

(1) 近场的信息，包括：(a) 废物的类型（如废物的来源、性质、数量和特性及所含放射性核素）；(b) 系统工程（如废物的整备和包装、处置单元、工程屏障、处置设施的顶盖或掩蔽体及排水特征）；(c) 任何工程所扰动区域的范围和特性；

(2) 远场的信息，如地震、地质构造、工程地质、水文地质、水文、地球化学、侵蚀速率；

(3) 生物圈的信息，如气候和大气、水体、附近居民、人为活动、生物群、土壤、地形、处置设施的地理范围和位置。

4.4.2 对于确定的处置设施，处置系统的描述应包含下列信息：

- (1) 对系统部件及其接口和相关的不确定性的描述；
- (2) 总体安全概念和安全功能；
- (3) 对于系统的预期演化和较小可能事件情况下，系统部件将如何继续执行其

安全功能；

- (4) 设施设计中如何考虑系统部件的要求；
- (5) 可能影响处置系统的辐射、热、水力、力学、化学和生物过程；
- (6) 系统部件之间的相互作用；
- (7) 废物空间不均匀性及相关的不确定性；
- (8) 系统部件及其接口的特性和行为随时间的变化及相关的不确定性；
- (9) 可能的环境变化及其对处置系统部件的影响；
- (10) 系统的预期演化和较小可能事件情况下的放射性核素的迁移途径。

4.4.3 处置系统的描述应提供用于安全评价的数据信息，包括：

- (1) 所有采用的安全相关数据的质量保证；
- (2) 所使用的数据的来源；
- (3) 场址特性调查方案的合理性，数据采集计划应反映先前安全评价对后续迭

代的信息需求；

(4) 用于表征场址和收集监测数据的技术，以及与这些技术和数据相关的不确定性；

(5) 对放射性核素存量的估计及其相关不确定性；

(6) 预测处置设施区域内未来可能的人为活动的信息。

4.4.4 处置系统的描述中所提供信息的深度和范围会受到处置设施类型的影响，对于处置较长寿命或较高活度废物的设施，情况将相对广泛和复杂。特定设施描述的实际范围和复杂性取决于多种因素，包括废物量、放射性特性、所选场址的性质和复杂性以及相关的气象和水文特征。应提供描述范围和复杂性的合理性分析，并且在处置设施发展的全过程中持续进行讨论。

4.4.5 如果处置设施的设计选择了可回取废物的方案，那么安全全过程系统分析中应体现出相应的管理和技术安排，以确保在设计时间范围内具备有效的回取条件。

4.5 安全评价

4.5.1 安全评价的内容

安全评价涵盖安全全过程系统分析中的所有评价，其随着处置设施的进展而不断深入并在不同阶段存在不同重点关注内容，主要包括关闭后的辐射影响、场址和工程、运行安全、非放射性环境影响等方面的评价，核心是以辐射剂量和辐射风险为依据的

处置设施关闭后对人和环境的辐射影响评价。

4.5.2 关闭后阶段的辐射影响评价

关闭后阶段的辐射影响评价宜采用景象分析来预测处置系统和环境的可能演化，采用概念模型和数学模型定量分析放射性核素从处置设施的释出、在环境中的迁移以及由此产生的辐射影响。

4.5.3 场址和工程

4.5.3.1 应对处置系统的演化进行定性和定量评价，得到所选场址或推荐场址及预期的设计的适宜性的结论。

4.5.3.2 处置系统演化的定性和定量评价结果应提供：

- (1) 场址和工程适宜性的充分论证；
- (2) 遵守相关安全要求的合理保证；
- (3) 实施安全策略的保证。

4.5.3.3 坚稳性

(1) 应论证处置系统的各个部件、处置系统整体和安全评价的坚稳性。

(2) 处置系统部件的坚稳性是指尽管可能会发生合理预期的干扰，但部件仍将继续执行预期安全功能的特性。

(3) 处置系统的坚稳性不局限于系统部件的坚稳性，还包括部件之间的相互作用。处置系统坚稳性的评价应包含下列信息：

- ①单个屏障及其安全功能的坚稳性论证；
- ②纵深防御的评价；
- ③核实良好的工程实践（可能性和可行性）的应用；
- ④论证可通过非能动措施实现的安全。

(4) 应将基本景象与各种干扰景象的分析结果进行比较，以评价处置系统的坚稳性。在各种干扰中，最常见的假设是某个部件或某项功能失效。

(5) 安全评价的坚稳性是指安全评价的结果对于景象、模型和数据中的不确定性不敏感。安全评价的坚稳性取决于设施的设计，因为评价相关的不确定性程度是由处置系统部件的物理和化学性质以及它们与环境的相互作用来确定的。

4.5.3.4 被动安全

(1) 处置设施关闭后的安全主要由天然屏障和工程屏障提供保障。应尽可能证

明处置系统的安全是通过非能动措施来保证的，即设施的长期安全无需能动部件或主动行动。

(2) 在处置设施的设计中应优先考虑被动安全措施，以便使运行和关闭后阶段的安全对能动系统的依赖性最小化。

(3) 在设施的设计中若考虑了废物的回取，任何提高可回取性的措施都不应危及处置设施的长期被动安全性。

4.5.3.5 多重安全功能和纵深防御

(1) 应对“纵深防御”进行评价，即论证处置设施提供了多重安全功能，以确保处置设施的安全不过分依赖于单一部件或单一安全功能。

(2) 对纵深防御的评价应包括明确处置系统的各项安全功能，确保处置设施（特别是工程屏障）的设计能够实现这些安全功能，以及评价处置系统和屏障实现其安全功能的能力。

(3) 应证明处置系统的设计对于包容和隔离放射性核素的多项安全功能是互相补充的。应证明可通过处置设施的多个要素实现对放射性核素的包容和隔离，在处置设施的一个要素没有完全执行或不再完全执行其安全功能时可由其他要素予以弥补。

(4) 应对各个时期不同安全功能实现互补的能力进行评估。每项安全功能都应尽可能地独立于其他安全功能，以确保屏障在单一故障模式下的有效性。在安全全过程系统分析文件中，应说明每个屏障提供的功能及其合理性，并应明确各个屏障执行其安全功能的时间期限，以及某个屏障不能完全发挥作用而由可替代安全功能发挥作用的时间期限。

(5) 对于地质处置设施，安全监护可提供另外一个层次的纵深防御。对于近地表处置设施，安全监护是实现安全目标的必要手段之一，只要废物仍然具有潜在危害，都应持续开展。

(6) 安全监护可以是主动的（如监测、检查等），也可以是被动的（如土地使用限制等）。安全监护的功能应包括阻止人类闯入，通过监测和检查程序确保屏障维持安全功能的有效性，以及应对不利于屏障完整性的影响。

4.5.3.6 科学实践和工程实践原则

(1) 良好科学实践的要素包括观测、提出和检验假设、评价再现性和同行评议等。

(2) 应说明是如何在处置设施的设计中应用良好工程实践原则。应论证已充分了解处置设施拟采用的材料和技术，并通过类似应用证实这些材料适合预期用途。应采用良好的施工技术，并充分考虑在使用这些技术时获得的经验反馈。

4.5.3.7 场址特性调查的质量

(1) 应说明处置设施选址时采用的方法和准则，并证明所选场址是符合安全策略和相应准则的。应提供足够全面的场址及周围环境的信息，以便能够通过建模来了解处置系统可能出现的演化。

(2) 以下情况可提高评价结果的置信度：高质量的场址特性调查和安全评价方案；收集的场址数据与其他现有数据所采用的参数值和测量方法是一致的；建立的安全评价模型对于场址是适用的；对场址的了解和安全评价模型的不断改进，能与关于场址的任何新信息相适应。

4.5.4 运行安全

4.5.4.1 运行期间的安全评价应采用与放射性废物处置前管理的安全评价相类似的方法，并参考其他核设施运行的相关安全要求。

4.5.4.2 安全评价中也应考虑其他安全问题，如地质处置中巷道挖掘安全、职业健康等方面的安全问题。

4.5.4.3 在设施的设计中若考虑了废物的回取，则在引入提高可回取性的措施时，还需引入与某些运行方面相关的额外的保障要求，如废物包在设施运行工况下的长期耐久性和设施关闭的各项规定。

4.5.5 非放射性环境影响

放射性废物可能包含具有潜在危害的非放射性成分（如重金属、病原体）。处置设施非放射性环境影响的评价应符合生态环境保护相关法规和标准的要求，如建造和运行期间噪声污染方面的限制，建造和运行期间水管理所要求的限值、控制和条件，以及为关闭后排水控制所制定的规定。安全论据的整合中应考虑非放射性影响，证明处置设施符合有关法律和监管要求。

4.6 迭代和设计优化

4.6.1 对设计方案做出决策的过程是多方面的，在多数情况下，决策过程是迭代的，迭代的次数取决于设施的发展阶段、所做决策的性质及数据和模型的可用性。

4.6.2 评价过程中应持续进行迭代，直至已充分达到评价目的。决策可能需要一

个或多个方面的迭代，这可能涉及安全全过程系统分析中若干组成部分的修订，包括：

- (1) 修改安全全过程系统分析的背景；
- (2) 调整安全策略；
- (3) 更新场址数据和（或）进一步开发设计；
- (4) 由于这些变化或其他因素（如同行评议），需要对安全全过程系统分析部分文件进行修订和改进。

4.6.3 处置设施的防护最优化要求采用良好的工程与技术方法及管理原则，以确保处置设施所有安全相关工作的质量。

4.6.4 对于防护与安全最优化的某些简单决策，可基于专家判断和最佳可用的或成熟技术的定性方法。对于相对复杂的问题则应进行最优化论证，应提供以下重要论据：

- (1) 对处置设施各种设计方案的长期安全影响已经给予了适当的关注；
- (2) 可合理保证处置系统的预期演化所导致的剂量和风险不会超过约束值；
- (3) 通过选址或设计使可能扰动处置设施性能并引起较高剂量或风险事件的可能性降到合理、可行和尽量低的水平。

4.6.5 在设计和建造阶段，通常会考虑项目的各种不同设计方案。在安全全过程系统分析文件中应描述基于既定准则来选择最适宜方案的过程。除安全准则外，用于比较备选方案的准则还应包括环境和社会经济因素。

4.6.6 应详细描述各备选方案，明确回答以下问题：

- (1) 不同备选方案的描述；
- (2) 每个备选方案的影响，特别是其优缺点的分析；
- (3) 首选方案的选取理由。

4.6.7 应完整记录对不同方案的评判标准和分析，用于支持推荐设计。应记录设计改进及设计相关决策的依据。

4.7 不确定性管理

4.7.1 在每个步骤（即每一个主要决策点），应当评估当前对处置系统的认识水平，并且在做出决策继续进行下一个步骤之前对相关不确定性进行评估。

4.7.2 应采用定量方法和（或）基于专业判断对安全评价中不确定性的来源、性质和程度进行评价。在不确定性和敏感性分析中，应对与安全评价结果和基于该结果

所作决策的相关不确定性进行说明。

4.7.3 关于关闭后阶段安全评价中的不确定性管理参见5.6。

4.8 限值、控制和条件

4.8.1 安全全过程系统分析应有助于限值、控制和条件的制定。这些限值、控制和条件将应用于对设施安全具有影响的所有工作和活动，以及待处置废物。例如，对建造过程、废物就位、回填材料和技术的控制；为了确保运行和长期安全针对可能处置的废物类型、活度和数量制定场址特定的限值；以及对监测和人员培训的要求。

4.8.2 应通过对各种景象的分析制定针对单个废物包或设施的废物接收准则。可接受的废物总量和（或）废物中特定放射性核素的活度浓度是重要的限值和条件，对于近地表处置设施，应考虑人类闯入景象，用于确定长寿命放射性核素的可接受水平；应考虑短寿命放射性核素，用于确定处置容量和活度浓度限值。此外，安全全过程系统分析还用于确定废物或工程屏障中可能导致天然屏障和工程屏障性能退化的物质的浓度水平。

4.8.3 安全全过程系统分析及其支撑性安全评价也用于场址和周围环境区域的监测和检查程序文件的制订，以证明在特定时间内处置设施能按照预期运行且部件能执行预期安全功能。

4.8.4 应根据设施情况配备适当数量、具备相应专业技能的运行管理人员，并根据潜在危害及为防止预计运行事件和事故发生需采取的措施来确定人员的培训需求。

4.9 安全论据的整合

4.9.1 安全证据、论据和分析

4.9.1.1 应对工作中可获得的证据、论据和分析进行整合。整合过程中应说明是如何考虑相关数据和信息的、如何检验模型的，以及如何遵循相应评价程序的。应强调用于判断可继续开发处置系统的主要依据，也应承认当前证据、论据和分析存在的局限性。此外，还应包含用于说明遗留问题和管理不确定性的方法。如果这些证据、论据和分析不足以支撑一项决策，那么可能需要对安全相关文件、设施的设计或者处置概念进行修改。

4.9.1.2 处置设施各个阶段的安全全过程系统分析文件应包含用于保证处置设施的质量和支撑性能评价的所有证据、论据和分析。对于与安全全过程系统分析中的论据相矛盾的结果和不确定性，也应予以讨论和分析。因此需要详细地讨论下述问题：

- (1) 安全全过程系统分析及其支撑性安全评价中不确定性的处理;
- (2) 作为安全全过程系统分析基础的科学和设计工作的质量与可靠性;
- (3) 安全评价的质量和可靠性, 包括景象的构建、景象范围的合理性、景象可能性的评价, 以及方法、模型、计算机程序和数据库的适用性;
- (4) 对安全评价中计算的要求。

4.9.2 与安全准则的比较

安全评价的目的之一是将安全评价的结果与安全准则进行比较。值得注意的是, 安全评价计算得到的剂量或风险低于相应剂量或风险的约束值并不足以说明该处置设施安全全过程系统分析的可接受性, 因为还需要满足其他要求, 而且还需要进行安全优化。在一些可能性不大的情况下, 计算得到的剂量可能超过剂量约束值, 但不一定需要否决该安全全过程系统分析。

4.9.3 辅助安全和性能指标的使用

4.9.3.1 除剂量和风险以外的辅助性指标, 包括安全指标和性能指标, 以及某些情况下辐射影响评价的结果, 可用于安全全过程系统分析以提高其可信度。辅助安全指标的概念主要应用于地质处置设施, 也可应用于其他类型的处置设施。

4.9.3.2 常用的辅助安全指标包括放射性核素活度浓度和通量。还有一些指标基于与放射性核素贮量无关的特性, 也可用于论证工程屏障的性能。其他辅助安全指标包括用于验证设施性能的监测计划的目标。

4.9.3.3 辅助安全指标可与相应指导值、准则和参考值进行比较, 以判断处置设施或单个部件性能的有效性。参考值可由许多来源推导得出, 如法规、标准或其他考虑。

4.9.4 多重推理方法

4.9.4.1 应使用多重推理方法, 提供一系列不同的论据, 共同建立数据、假设和结果的置信度。

4.9.4.2 应通过半定量和定性的其他推理方法对定量评价结果予以补充, 例如, 可以选择与天然情景和人类遗址进行类比的推理方法。

4.9.5 未解决问题的处理计划

4.9.5.1 安全全过程系统分析的每次文件修订都应包括未解决问题及后续工作计划, 例如, 通过改变系统部件的设计来减少重要的剩余不确定性或减少它们的相关性或完全避免它们。

4.9.5.2 在处置设施开发的初期,存在较多未解决的问题和不确定性,因而安全全过程系统分析应包括在不同阶段来处理这些未解决的问题和不确定性的明确计划(如,通过场址特性调查工作或系统设计的优化来解决问题)。随着处置设施的开发,安全全过程系统分析中应说明对安全相关不确定性和未解决问题的处理方式。剩余不确定性是不可避免的,安全全过程系统分析中应说明剩余不确定性不会削弱安全论据有效性的理由。

5 关闭后阶段的辐射影响评价

5.1 关闭后阶段辐射影响评价的主要内容

关闭后阶段辐射影响评价是安全评价的重要部分,它的主要内容包括评价背景、处置系统的描述(参见4.4节)、关闭后景象的构建、模型的开发、计算与结果分析、不确定性管理、评价模型的优化以及与安全准则的比较等。

5.2 评价背景

5.2.1 评价背景包括评价目的(参见4.2.1)、评价方法、最终评价指标和评价的时间尺度。

5.2.2 评价方法

5.2.2.1 选择适当的方法、以互补的方式进行关闭后阶段的辐射影响评价,能够提高处置设施安全性能的可信度。可考虑的方法包括:概率论和确定论方法,简单保守模型以及复杂现实模型。采用保守的方法时应尽可能地现实一些,利用经验数据,在辐射景象、概念模型、参数的选择及计算模型的简化中引入专家判断的经验数据。

5.2.2.2 概率论和确定论方法

(1) 确定论方法是指论证来自处置设施的可能的放射性核素迁移所导致的辐射剂量或风险低于预先规定的剂量或约束值,并证明可能的放射性核素释放上限满足约束值的要求。这种方法一般是保守的。

(2) 概率论方法是指通过概率密度分布来描述参数值的不确定性。概率密度分布的获取可基于专家判断引入一个表达式,也可采用观测数据统计分布等其他方法。一些非数值参数相关的不确定性也可量化并表示为概率分布。可采用概率计算的方法,由评价所用参数的概率密度分布推导出评价结果的概率分布。

(3) 确定论方法和概率论方法各有其优势和局限性,两种方法的组合使用有助

于提高评价结果的置信度。

5.2.2.3 保守模型和现实模型

(1) 保守模型和现实模型均有利于提高处置设施安全性的置信度，对关闭后阶段的辐射影响评价都是必要的。若评价采用保守模型，则应说明某些保守参数值的选取或假设的合理性，还应尽可能地定量估计保守的程度。

(2) 保守模型、现实模型或两者结合模型的选择取决于评价的阶段和目标、监管要求、数据的可获取性及科学认识、场址和设施的复杂性，以及可用的资源等。

(3) 早期的安全评价可采用保守模型高效地评价处置设施的部分或整体性能；也可采用简单的保守模型提高复杂模型所得结果的可信度，以及对无法量化的不确定性进行处理。有些参数的评价可采用保守估计，也有些参数的评价则需基于详细的特性调查和更现实的模型的结果。

(4) 应根据可获取的模型输入参数，尽可能开展现实评价。

(5) 当安全裕量足够时，可基于相对简单的模型开展保守分析。基于过分保守或对最不利情形的描述得到的结果并不符合设施的实际性能时，应避免因为此类结果影响决策的有效性。若后续的评价采用了相对现实的（或不太保守的）模型来验证符合监管要求的情况，那么相关方可能质疑评价结果被操纵。为了避免此类情况，应清楚地记录选择及改变（如果有改变的话）保守模型或现实模型的理由，并进行沟通。

5.2.3 评价指标

5.2.3.1 应明确说明所采用的评价指标及理由，包括：

(1) 最终的辐射影响评价指标，如剂量或风险水平。有必要说明所选择的评价指标与评价目的及相关监管要求是一致的；

(2) 其他评价指标，如放射性核素的活度浓度和通量、非放射性污染物的浓度和通量；

(3) 以上评价指标的使用方式，如与标准进行比较，或与天然本底放射性水平进行比较等。

5.2.3.2 评价对象

(1) 本技术文件指定的评价对象为人，不对非人类物种的保护问题作进一步考虑；

(2) 公众的辐射影响评价考虑的是关键人群组，将组内成员个人的受照剂量或

风险作为评价指标；

(3) 预测性评价应采用不同年龄组别来估算关键人群组内成员个人的年剂量，如婴儿、儿童、青少年和成人；

(4) 对于长期剂量评价，由于在比人类寿命长得多的时间内，处置设施的放射性物质释放所引起的对生物圈的污染是相对恒定的，因此可用成人阶段的年剂量代表年平均剂量。

5.2.4 评价的时间尺度

5.2.4.1 评价的时间尺度的界定除了应综合考虑国家法规、标准及特定处置设施、场址和待处置废物的特性等因素之外，还要考虑以下因素：

(1) 宜覆盖足够长的时间以确定最大或峰值剂量，或风险；

(2) 能够显著影响安全评价结果的若干因素可能随时间的变化，例如气候变化可能引起水文条件的变化，继而引发处置系统的演化；

(3) 相关决策可能影响安全评价中所考虑的干扰事件的类型和严重程度。

5.2.4.2 根据评价的目的，可将评价时间尺度划分成若干时间窗口，并证明其合理性。不同时间窗口可采用不同的评价指标。

5.3 关闭后景象的构建

5.3.1 考虑处置系统当前和未来的性能是评价处置设施安全性的重要因素。景象构建是定量评价的重要基础，需考虑未来的人为活动、气候和其他环境变化，以及可能影响处置设施性能的事件或过程等因素。

5.3.2 应说明所构建的景象的合理性，并记录构建过程。

5.3.3 景象构建的方法之一是基于特征、事件和过程筛选的“自下而上”的方法。制订全面的特征、事件和过程清单，筛选排除对处置系统影响极小或出现概率极低的特征、事件和过程，并全面地检查相关的特征、事件和过程及其在适当景象中的组合。这一过程涉及特征、事件和过程的通用清单（国际认同的清单、法规和标准等）的使用，以及有关特定场址和特定系统的特征、事件和过程的确定。特征、事件和过程的筛选准则可能包括与法规、标准要求（或）事件及过程发生的概率或后果有关的规定。

5.3.4 另一种景象构建的方法为“自上而下”的方法，以对可能导致处置系统安全功能失效的事件和过程的分析为基础，再对照适当的特征、事件和过程清单对所构

建的景象进行审核。

5.3.5 评价应考虑可能来自处置设施的所有显著迁移途径和系统的所有可能演化，应涵盖所有可能显著影响处置系统性能的特征、事件和过程，包括评价时间尺度内涉及的可能重复出现的事件（如洪水、地震等）有关的特征、事件和过程。

5.3.6 应对代表系统的正常或预期演化的景象，以及发生概率低或极不确定的事件和过程的景象及其合理性进行说明。应尽可能地提供所考虑的景象的可能性，以便于评估风险。

5.3.7 应根据评价的时间尺度考虑场址未来可能出现的环境条件，并鉴别出潜在受照人群组。通常假定人类存在，且将利用当地资源。一般假定未来的人类具有类似当代人类的习惯，除非该假定与所假定的场址气候条件变化明显不一致。

5.3.8 应描述风险评估中采取的确定风险的方法，并明确是否评价了事件、过程和（或）景象的发生概率，风险评估包含的景象，以及各景象相关的不确定性的处理方式。若考虑了事件和过程的发生概率，则可直接将结果与准则进行比较。若未考虑景象的发生概率，仅计算了以景象发生为条件的剂量或风险，则应说明评价结果与准则的比较方法。

5.3.9 可采用以下两种方法确定是否满足剂量约束值的要求：（1）将剂量及其发生概率整合为风险，把可能对未来个人产生剂量的所有可信过程的总风险与约束值进行比较；（2）单独描述剂量及其发生概率，该方法通过估计的发生概率对辐射影响进行评价，无需准确量化特定景象的发生概率。评估各景象的重要性时还应考虑计算所得剂量或风险的持续时间或空间范围等其他因素。

5.3.10 在无法排除人类闯入可能性的情况下，应根据闯入的性质和行动来设计人类闯入景象，并评价其后果。

5.3.11 应设法评估由于人类闯入所致相关剂量。由于人类闯入概率的估算是确定的，不应试图采用风险的概念。

5.3.12 评价人类闯入的影响时，应考虑受不同类型闯入影响的废物体积及废物的不均匀性。

5.4 模型的开发

5.4.1 评价模型一般包括概念模型、数值模型和计算机程序。

5.4.2 概念模型用于描述系统部件及这些部件之间的相互作用，包括与可获得的

信息和知识相一致的，关于系统的几何结构和化学、物理、水文地质、生物及力学行为的一系列假设。

5.4.3 数值模型可用于开展定量分析，其范围和复杂性取决于对现象或过程的理解，以及可获得的信息与数据。

5.4.4 计算机程序包括用于求解数值模型中方程式的数值计算方案。

5.4.5 通常应为特定的过程和（或）系统部件开发特定的模型。应对复杂模型给出的信息进行整合，以实现处置系统整体性能的评价。若对整合过程进行简化，应适当说明简化处理的合理性，并记录简化过程。

5.4.6 开发评价模型时应尽可能确保：

（1）考虑处置设施建设计划的状态、处置系统的评价背景与现有认知水平，适当权衡模型的精细程度，及其现实性与保守性之间的平衡；

（2）概念模型合理地描述了处置系统，数值模型充分地表达了概念模型；

（3）详细记录了考虑过的所有问题，或评估过的备选概念模型和数值模型。这一过程可作为所选模型充分性的支撑性论据；

（4）为模型的验证和评估开展了适当的演练，并进行了记录，以建立模型适宜于其预期目的的置信度；

（5）对所使用的软件采取了充分的质量保证和质量控制措施。

5.4.7 开发模型时有必要识别并选择可量化的参数（即模型数字化），并应对参数数值进行选择。在此过程中应确保：

（1）详细记录了用于评价计算的模型以及程序中所采用的参数值，并说明理由，模型数字化的过程可追溯到源数据；

（2）记录如何通过场址和系统相关的特性数据导出评价计算所使用的参数值；

（3）采用确定论方法时，证明了计算所选保守的或现实的参数值的合理性；

（4）采用概率论方法时，证明了所用概率分布的合理性。

5.5 计算与结果分析

5.5.1 模型数字化后可用于确定论和（或）概率论下不同景象的评价计算。

5.5.2 评价文件中应充分说明景象所使用的概念模型、场址信息和设计信息，以及范围足够的敏感性和不确定性分析。应以适当的方式识别、处理不确定性和参数相关性。

5.5.3 计算结果应能够与评价指标进行比较。为使评价具有可追溯性，应适当提供过程参数。

5.6 不确定性管理

5.6.1 不确定性的来源

处置设施关闭后阶段的辐射影响评价的不确定性的来源主要有：

(1) 景象的不确定性：指处置系统未来状态的不确定性，包括处置系统的演化、人类对环境的利用、地质与其他长期过程以及人类闯入的不确定性；

(2) 模型的不确定性：来源于必然不完美的对过程的认知，包括对概念模型的数学表达进行简化时产生的不确定性，以及数值模型的数值解的误差等；

(3) 数据和（或）参数的不确定性：指用于评价模型的参数值的不确定性，通常包括系统部件固有属性的不确定性，如废物、废物包、处置设施、岩石圈、生物圈的特性。

5.6.2 不确定性和敏感性分析

5.6.2.1 评价中应尽可能地了解不确定性的显著程度，并尽量减少或限制不确定性。

5.6.2.2 不确定性分析是对由输入数据和模型参数的不确定性引起的评价结果的不确定性的估计，是计算过程必不可少的内容。敏感性分析用于确定不确定的参数输入对评价结果的影响程度。

5.6.2.3 对不确定性的分析应尽可能覆盖全部计算过程，报告的结果应说明取值范围并标明每个范围代表的含义，而不是仅提供数值。应根据评价的目的展开充分的不确定性分析。

5.6.2.4 由变量的随机变化引起的变量数值的不确定性为偶然不确定性，由于知识缺乏而引起的不确定性为认知不确定性。建模过程中通常对二者采用相似的处理方法，但量化和降低这两类不确定性的方法与可能性是不同的。原则上，偶然不确定性可客观地根据测量结果进行量化，并用概率分布描述。认知不确定性的量化是主观的，某些情况不可能量化。认知不确定性有时可通过进一步研究而降低。某些情况下可对认知不确定性赋予概率以研究其影响。量化方法不同，降低认知不确定性的可能性也不同，应对认知不确定性的概率和偶然不确定性的概率加以区分。

5.6.2.5 应区分景象的不确定性、模型的不确定性以及数据和（或）参数的不确定

性，以便明确其处理方法。

5.6.3 景象不确定性的处理

景象的不确定性通常是通过对一系列景象进行评价来处理的，这一系列景象是由基本景象和若干替代演化景象组合构成的。应通过适当的和良好规定的程序（所谓良好规定是指选项、决策是结构化的、有指导的和有文件支撑的）得到景象，并进行记录。对不同景象评价的比较可显示出场址和处置系统演化的不确定性的显著程度，可确定景象的不确定性在安全全过程系统分析的整体背景下是否可接受，如不可接受，这种比较还指向是否应考虑对设计进行变更。

5.6.4 模型不确定性及数据和参数不确定性的处理

5.6.4.1 应论述每一种景象所使用的模型和参数值的不确定性。不确定性的处理应考虑参数间的关联。某些不确定性可通过采取行动来降低，但不确定性总是存在的。对不确定性的处理方式应确保能够从评价结果得出结论并做出决策。

5.6.4.2 处理模型不确定性的常用方法是对备选模型进行比较，以及在某些情况下对模型预测值和经验观测值进行比较。

5.6.4.3 有时可通过敏感性和（或）不确定性分析证明，某个给定的不确定性，对处置设施的安全性而言是不显著的。如可采用敏感性分析表明，模型对某些参数不敏感，即使这些参数在其所有可能的取值范围内变化。

5.6.4.4 另一种常用的不确定性处理方法是采用保守的假设，如对所使用的模型进行简化时的保守假设，以及给模型参数赋值时的保守假设。此方法在验证与监管准则的符合性方面具有优势。但某些情况下，在过于保守的假设条件下开展的评价可能代表了极端不现实的或不可能的情况。若多个参数被赋予保守值，计算结果则可能过于保守，并可能成为决策的不良依据。此外还需要考虑的是，对某个景象或某个核素保守的假设，对于其他的景象和核素可能并不保守，如高估放射性核素从设施迁移的假设可能低估来自关闭后闯入景象的长期风险。应通过对评价终点影响的判定，来证明这些假设保守的合理性。

5.6.4.5 概率论评价能够量化与景象相关的风险。概率论评价应避免把与系统状态相关但可能性很小的参数进行组合。蒙特卡罗模拟中若不考虑关联性，从不同变量的概率分布中抽取样本时则会产生不可能的参数的组合。概率论评价也应避免不恰当的“风险稀释”，即当与事件的发生概率相乘时，在风险的整体评价中，对设施寿期内

某一时刻非常重要的事件后果给予很小的重要度，从而掩饰了非常重要事件的影响。

5.6.4.6 为了便于与决策者和其他相关方就概率论评价结果进行沟通，可以通过确定性计算和分析虚拟景象来说明不确定性是如何影响处置系统的性能的。处理不确定性时，应判断其与安全性的相关性，并提出处理不确定性的策略。

5.7 评价模型的优化

5.7.1 所开发的模型的详细程度及所需数据的数量和质量取决于评价的背景。早期在选址或初步调查时，基于筛选的目的，可提出和使用相对简单的模型，采用相对简单的计算机工具以及容易获得的数据。此后可改进某些模式并收集更多的数据，并采用更复杂的计算机程序来完成计算。安全全过程系统分析的后期版本，需要更全面的模型和数据。

5.7.2 模型开发过程中的假设应吸取模型应用和结果解释中获得的经验反馈。可识别特别重要的特征、事件和过程或敏感参数进而对模型进行改进。

5.8 与评价准则的比较

5.8.1 应将结果与相应的准则进行比较，以论证处置设施可达到各阶段的安全目标。

5.8.2 对未来人类产生的辐射剂量仅可估算，相关不确定性将随着时间的增加而增加。基于当前对处置系统的认识，可以对很长时间段的剂量和风险进行估计，并与适当的准则进行比较，以明确处置设施是否可接受。这种估算不应视作对未来健康危害的预测。

5.8.3 将计算的剂量和天然存在放射性核素可能产生的剂量进行比较，可用于说明处置系统长期辐射影响的显著程度。还应考虑其他指标，如环境中的核素活度浓度或处置系统的滞留能力等。

5.8.4 近地表处置设施人类闯入景象的分析结果应与法规、标准要求进行比较。地质处置设施基本消除了人类闯入的可能性，此类设施对人类闯入景象的评价可用于检验处置系统的坚稳性。

6 安全全过程系统分析的文件编制

6.1 安全全过程系统分析的文件组成

6.1.1 安全全过程系统分析的文件组成是汇总目前已经形成的安全评价和其他安全有关文件，汇总编制应符合现行法规和标准的要求，一般包括：

- (1) 摘要；
- (2) 安全全过程系统分析背景和处置系统的描述；
- (3) 安全策略；
- (4) 质量保证大纲；
- (5) 安全分析报告和环境影响评价报告；
- (6) 总结及结论，包括安全论据的整合；
- (7) 支持性文件清单。

6.1.2 针对具体场址和不同阶段，营运单位可通过与监管部门协商确定具体的文件编制格式。

6.2 摘要

6.2.1 应简要地描述项目、与项目有关的主要安全相关问题、证据、论据和主要评价结果、拟议后续行动和缓解方案、任何不确定性及公众关注的问题。

6.2.2 应清晰、完整和准确地描述项目的关键问题及总体情况，可使用汇总表格、图形或流程图清晰和准确地传达信息，尽可能避免使用复杂的专业术语。

6.3 背景和处置系统的描述

6.3.1 安全全过程系统分析的背景应概述以下内容，具体内容描述参见4.2节：

- (1) 项目的简要信息，说明其具体的目标和背景、所涉及各个阶段及其现状，项目的关键时间节点；
- (2) 依据的政策和监管背景；
- (3) 参与决策过程的各个组织的作用和职责，包括公众咨询和参与的框架；
- (4) 用于决策过程的指导；
- (5) 与其他类似项目的比较；
- (6) 所采用技术的现状和成熟度；
- (7) 项目的必要性和重要性；
- (8) 多个替代方案的比较选择；

- (9) 项目规划过程中的关键决策；
- (10) 项目的迭代和设计优化过程；
- (11) 营运单位的质量保证制度和监管部门的监管要求；
- (12) 营运单位的质量保证要求及其能力。

6.3.2 处置系统的描述应提供处置系统的所有信息和知识，包括近场、远场和生物圈的相关信息，并应提供用于开展安全评价和环境影响评价的所有基础资料。具体内容描述参见4.4节。

6.4 安全策略

6.4.1 应概述用于实现安全的方法，以证明在设计、评价、开发和管理该处置设施中所采用的总体安全方案和方法是适当的。具体内容描述参见4.3节。

6.4.2 应说明有利于对设施安全建立信心的论据，与安全策略有关的论据主要包括：

- (1) 针对处置设施不同阶段所采用的策略和方法；
- (2) 采用良好工程原则和实践的策略；
- (3) 不确定性的管理和降低；
- (4) 决策时的慎重程度和多重推理方法的使用；
- (5) 处置设施设计中的安全特性及多重安全功能；
- (6) 处置系统抵御自然事件和人类影响的预期坚稳性；
- (7) 选择评价方法以及评价的时间尺度和时间窗口的理由；
- (8) 所开展的同行评议及其与国际上相关导则和实践的一致性。

6.5 质量保证大纲

6.5.1 营运单位应制定质量保证大纲。处置设施从开发直至许可证终止的所有步骤中的与安全相关的活动、系统和部件都应纳入质量保证的范围，以保证所有安全相关工作和活动的质量。

6.5.2 质量保证大纲应包含项目的组织机构、整体规划及一系列有计划的、系统化的程序，用于开展和记录为输入数据、模型和结果的质量满足要求而提供保证的各项工作。质量保证大纲的格式和内容应满足现行核安全法规的相关要求。

6.5.3 在制定质量保证大纲的过程中，应考虑以下方面：

- (1) 制定明确的、协调一致的准则，根据这些准则对安全全过程系统分析进行

评估并作出决策；

(2) 建立内部和外部监查机制，以确定质量保证的充分性；

(3) 通过培训和参与国际项目提升开展安全全过程系统分析及其支撑性安全评价的人员的资质、能力和信誉；

(4) 安全全过程系统分析的开发和审评过程应透明并建立公众参与机制；

(5) 安全全过程系统分析的开发应考虑国际建议、安全目标、安全评价方法、时间尺度和处置概念等；

(6) 营运单位应具备的能力和知识。

6.5.4 为提高处置设施安全的置信度，营运单位应确保相关方的适当参与。相关方的参与应在一个公开的、透明的咨询框架内进行，并具有明确的参与机制。

6.5.5 营运单位宜组织开展独立的同行评议，特别是对于地质处置设施，以提高安全全过程系统分析的置信度。应由未直接参与安全全过程系统分析的开发并且与工作成果没有直接利益关系的专家或专家组来执行同行评议，对工作的技术方案或特定问题进行检查并形成正式记录。

6.6 总结及结论

总结及结论应考虑以下方面：

(1) 归纳安全评价的关键结果；

(2) 强调证明处置设施安全性的主要证据、分析和论据；

(3) 说明不确定性评估结果和遗留问题，并给出解决计划。描述安全全过程系统分析开发后续阶段的必要活动，例如收集补充数据或建模改进计划；

(4) 描述补充性的安全证据，例如超出已开展定量评价的时间尺度的安全证据；

(5) 说明对安全评价结果予以补充的其他证据和论据的考虑。

名词解释

安全全过程系统分析（Safety Case）

支持和说明处置设施或活动安全的科学、技术、行政和管理等方面论据和证据的文件集成。处置设施的安全全过程系统分析应涵盖：场址的适宜性，设施的设计、建造和运行的安全性，辐射风险评价的合理性，以及所有与处置设施安全相关工作的充分性和可靠性。

安全评价是安全全过程系统分析的关键组成部分。

安全策略（Safety Strategy）

为了满足安全目标、原则和监管要求，确保废物处置设施采用良好的工程实践并实现安全与防护最优化，所采取的处置设施的规划、运行和关闭等各种活动的总体管理策略，包括选址和设计、安全全过程系统分析的开发、安全评价、场址特性调查、废物特性表征，以及研究与开发。安全策略包括多重安全功能和纵深防御、废物的包容和隔离、被动安全特性、处置系统的坚稳性、安全相关特性的论证、与废物处置前管理的相互依赖、不确定性的管理方法及其他问题等关键要素。

坚稳性（Robustness）

处置系统部件的坚稳性是指在发生合理预期干扰的情况下，这些部件继续保持预期的一项或多项安全功能的特性。处置系统的坚稳性则是指处置系统在各个部件结构、稳定性和安全特性等条件和参数变化情况下，维持其安全性能的特性。安全评价的坚稳性是指在情景、模型和输入参数等条件合理变化的情况下，能持续证明处置系统安全水平满足监管要求的特性，亦可以理解为安全评价结果对处置系统特定不确定性的受纳特性。

被动安全（Passive Safety）

处置系统的安全应尽可能通过非能动措施来保证。这意味着主要依靠天然屏障和工程屏障确保处置设施关闭后的长期安全，而无需能动部件（即依靠触发、机械运动或动力源等外部输入而行使功能的部件）或行动（如监测）。应在设施的设计中考虑被动安全措施，以使处置系统对能动部件或行动的依赖性最小化。

纵深防御（Defence in Depth）

处置设施的纵深防御指选择围岩环境和设计工程屏障以通过多重安全功能确保处置设施的安全，实现废物的包容和隔离，使得处置系统的整体性能不必过分地依赖于单个部件或控制程序，或单个安全功能的执行。每个安全功能都应最大可能地独立于其他安全功能，以确保它们是互补的。处置系统多个实体屏障的安全功能是通过各种物理和化学过程实现的。安全功能的作用和相对重要性可能随时间而变化。应考虑各实体屏障执行其安全功能的时间段，确保不同时期的各个安全功能互补。