

TERCER EJERCICIO

GRUPO B. Protección Radiológica

Tema 17: Seguridad y Protección Radiológica en las instalaciones de almacenamiento definitivo de Residuos Radiactivos.

ÍNDICE

1. RESUMEN	2
2. INTRODUCCIÓN.....	3
3. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS	3
Clasificación internacional de Residuos radiactivos, la Guía GSG 1 del OIEA:.....	3
Clasificación de residuos radiactivos en el séptimo plan general de residuos radiactivos de España	4
4. PRINCIPIOS DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS	5
5. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LOS ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIATIVOS	6
Almacenamientos definitivos de residuos radiactivos de media y baja actividad	7
Almacenamientos definitivos de residuos radiactivos de muy baja actividad	7
Almacenamientos definitivos de residuos de alta actividad.....	8
6. ASPECTOS GENERALES DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DEL ALMACENAMIENTO DEFINITIVO DE RESIDUOS RADIATIVOS	10
Requisitos de seguridad en el almacenamiento de residuos radiactivos.....	11
Marco regulador de los almacenamientos de residuos en España	12
7. ANÁLISIS DE SEGURIDAD DEL ALMACENAMIENTO DEFINITIVO A LARGO PLAZO, TRAS LA CLAUSURA	15
Almacenamiento en superficie para residuos de media y baja actividad.....	16
Almacenamiento geológico profundo	19
8. BIBLIOGRAFÍA.	21

1. RESUMEN

En este tema se analizará la seguridad y protección radiológica en última etapa de la gestión de los residuos, su almacenamiento definitivo ya sea en superficie para los de baja y media actividad o en los planteamientos del almacenamiento definitivo de residuos de alta actividad en formaciones geológicas profundas.

Durante la fase operacional de una instalación de almacenamiento prevalecen los requisitos establecidos a nivel internacional y nacional sobre la protección radiológica y la seguridad de los trabajadores y el público en general, pero a diferencia del resto de instalaciones nucleares el principal aspecto de la seguridad de los repositorios o instalaciones de almacenamiento de residuos, sean ubicados cerca de la superficie o en profundidad es la posibilidad de que se produzcan exposiciones a la radiación y consecuencias ambientales a lo largo de periodos que puedan prolongarse hasta un futuro lejano.

Por ello, el propósito de las evaluaciones de seguridad relativas a la fase post clausura es obtener una garantía razonable de que la instalación de disposición final proveerá un nivel de seguridad suficiente.

Este tema se relaciona con los siguientes:

Primer ejercicio:

B-8: Residuos radiactivos. Tipos. Origen. Gestión

Tercer ejercicio:

A-32 Gestión del combustible nuclear irradiado. Métodos de almacenamiento a corto, medio y largo plazo. Almacenamiento temporal y transporte de contenedores.

B.14 Definición, clasificación y gestión de los residuos radiactivos sólidos. Gestión de los residuos radiactivos producidos en las instalaciones nucleares. Gestión de residuos radiactivos producidos en instalaciones radiactivas médicas, industriales y de investigación. Acondicionamiento y almacenamiento.

B 15 Criterios de exención y desclasificación de materiales y fuentes radiactivas. Definición y aplicación práctica.

B 16 Políticas y estrategias de gestión de residuos radiactivos en España. El Plan General de Residuos Radiactivos. Funciones y recursos de Enresa

2. INTRODUCCIÓN

La Ley 25/1964 sobre Energía Nuclear define Residuo Radiactivo como "cualquier material o producto de desecho, para el que no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria y Energía previo informe favorable del Consejo de Seguridad Nuclear".

El objetivo básico para las instalaciones de almacenamiento definitivo de residuos radiactivos es la protección de la salud humana y el medio ambiente ahora y en el futuro sin imponer una carga indebida a las generaciones futuras.

En este tema se describen los principios fundamentales para la gestión de los residuos radiactivos que se indican más adelante, cuyo cumplimiento conducirá al logro del objetivo básico de la gestión de los residuos radiactivos.

3. CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos sistemas de clasificación de residuos radiactivos en función de determinadas características que se consideraban de interés de acuerdo con las circunstancias en las que se gestionaban residuos radiactivos, como, por ejemplo: su estado físico, el tipo de radiación emitida, su período de semidesintegración, su concentración de actividad o su radiotoxicidad.

Clasificación internacional de Residuos radiactivos, la Guía GSG 1 del OIEA:

Con el objetivo de establecer un sistema general para clasificar residuos radiactivos sólidos, el OIEA ha desarrollado la Guía GSG-1 en la que se propone un sistema de clasificación basado principalmente en los aspectos relativos a la seguridad a largo plazo de su gestión.

El sistema propuesto se basa en seis categorías de residuos:

- 1) Residuos exentos (EW): son aquellos que cumplen los criterios necesarios para su exclusión del control regulador.
- 2) Residuos de período muy corto (VSLW): residuos que tras un periodo de almacenamiento temporal limitado a algunos años pueden ser considerados como exentos del control regulador para su gestión posterior
- 3) Residuos de actividad muy baja (VLLW): residuos que por su bajo riesgo (baja actividad y periodo de desintegración corto o medio) no precisan un alto grado de contención y aislamiento y, por consiguiente, se pueden someter a almacenamiento definitivo en instalaciones superficiales bajo una aproximación graduada del control regulador.
- 4) Residuos de actividad baja (LLW): residuos que contienen o están contamiandos con cantidades limitadas de radionucleidos de período largo. Estos residuos requieren un aislamiento y contención sólidos durante períodos de hasta algunos cientos de años y se pueden someter a almacenamiento definitivo en instalaciones cerca de la superficie.

- 5) Residuos de actividad intermedia (ILW): residuos que, debido a su contenido o contaminación, particularmente de radionucleidos de período largo, precisan un grado mayor de contención y aislamiento que el que ofrece el almacenamiento definitivo cerca de la superficie. Los residuos de esta clase requieren un almacenamiento definitivo a mayor profundidad, del orden de decenas de metros hasta algunos cientos de metros.
- 6) Residuos de actividad alta (HLW): residuos que generan cantidades importantes de calor mediante el proceso de desintegración radiactiva o residuos con grandes cantidades de radionucleidos de período largo. El almacenamiento definitivo en formaciones geológicas profundas y estables es la opción más aceptada para su almacenamiento definitivo.

Clasificación de residuos radiactivos en el séptimo plan general de residuos radiactivos de España

El marco legislativo y regulador español no ha establecido una clasificación legal de los residuos radiactivos. No obstante, en el 7º Plan General de Residuos Radiactivos (PGRR) se clasifican los residuos radiactivos en función de su gestión definitiva en los siguientes grupos:

a) Residuos de baja y media actividad, cuyas características principales son:

- No generan calor.
- Contienen radionucleidos emisores beta-gamma con períodos de semidesintegración, inferiores a 30 años, y con actividades que tras un período máximo de 300 años en el almacenamiento definitivo resultan inocuas.
- Su contenido en emisores alfa debe ser inferior a 370 Bq/g.

Dentro de esta categoría, se incluyen los residuos denominados como de muy baja actividad, que presentan actividades específicas entre 1 y 100 bq/gr, pudiendo llegar hasta varios miles en el caso de algunos radionucleidos de baja radiotoxicidad o tratándose de cantidades pequeñas.

b) Residuos de alta actividad, cuyas características principales son:

- Contienen radionucleidos emisores alfa de vida larga en concentraciones apreciables por encima de 370 Bq/g (0,01 Ci/tonelada).
- Pueden desprender calor.
- Los radionucleidos contenidos en residuos de alta actividad tienen un período de semidesintegración superior a 30 años, llegando algunos a alcanzar decenas de miles de años.

Adicionalmente, el 7º PGRR define los Residuos Especiales como aquellos que no son susceptibles de ser gestionados en las instalaciones del CA El Cabril, dado su contenido en radionucleidos de larga vida y actividad significativa. Su gestión se plantea de una manera similar a la de los residuos de alta actividad.

Por último, el 7º PGRR establece la siguiente correlación entre la clasificación nacional y la propuesta por el OIEA:

Tabla 1. Clasificación de los RR

Clasificación sistema nacional		Clasificación GSG-1 OIEA
RBBA	Residuos de muy baja actividad	VLLW
RBMA	Residuos de baja y media actividad	LLW
RE	Residuos especiales	ILW
RAA	Residuos de alta actividad	HLW

4. PRINCIPIOS DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS

El almacenamiento definitivo de residuos radiactivos plantea ciertas complejidades tanto éticas como tecnológicas porque su objetivo principal es tratar los residuos radiactivos con vistas a proteger la salud del ser humano y el medio ambiente no solamente ahora, sino en el futuro sin que ello suponga una carga para las generaciones futuras.

Los principios fundamentales de seguridad establecidos por el OIEA en el SF-1 son de aplicación a las actividades relativas de gestión de residuos radiactivos. Además, en base a los principios establecidos en la convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de residuos radiactivos y como consecuencia de la transposición de la Directiva 2011/70/Euratom del Consejo, de 19 de julio de 2011, por la que se establece un marco comunitario para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos, el real decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos en su artículo 3. establece los siguientes principios básicos en la gestión de residuos radiactivos aplicables en España:

1. La generación de residuos radiactivos se reducirá al mínimo razonablemente posible, tanto en actividad como en volumen, mediante la aplicación de medidas adecuadas, incluidos el reciclaje y la reutilización de los materiales.
2. Se tendrá en cuenta la interdependencia entre todas las etapas de la generación y la gestión del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos.
3. Se gestionarán con seguridad el combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos, incluso a largo plazo con sistemas de seguridad pasiva.
4. El coste de la gestión del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos será soportado por quienes hayan generado dichos materiales.
5. La aplicación de las medidas destinadas a la gestión segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos responderá a un proceso de aproximación graduada.

6. Se aplicará un proceso decisorio basado en pruebas empíricas y documentado en todas las etapas de la gestión del combustible nuclear gastado y de los residuos radiactivos.

Para la International Commission on Radiological Protection(ICRP), en su publicación, 81, sobre los principios de protección radiológica aplicables a la evacuación de residuos radiactivos de vida larga, el principio básico es la protección del público, considerando las exposiciones como exposiciones potenciales dado que se originarían a causa de procesos futuros con unas probabilidades de ocurrencia asociadas.

Así, la ICRP recomienda que el nivel de protección a generaciones futuras sea como mínimo el nivel exigido en la actualidad en términos de dosis, riesgo, etc. Aplicando, así mismo los principios de limitación y optimización de las dosis.

5. CARACTERISTICAS FUNDAMENTALES DE LOS ALMACENAMIENTOS DE RESIDUOS RADIATIVOS

Al igual que para otros tipos de residuos, existen básicamente tres opciones de gestión: dilución y dispersión; retención en espera de la desintegración, la concentración y contención para su almacenamiento definitivo.

En cualquier caso y con independencia de las estrategias seguidas, incluyendo la transmutación nuclear, siempre será necesaria una estrategia para el aislamiento a largo plazo de una fracción de residuos radiactivos ya sean residuos radiactivos sólidos como algunos líquidos de actividad y periodo no despreciable.

El confinamiento total de los residuos radiactivos se consigue mediante la interposición de una serie de barreras entre los residuos radiactivos y el hombre que impidan o retarden lo suficiente la llegada de los radionucleidos al medio ambiente hasta que hayan perdido la mayor parte de su actividad.

La primera barrera (barrera química) se constituye, mediante un proceso de acondicionamiento del residuo, inmovilizando el residuo radiactivo en una matriz sólida, estable y duradera, capaz de evitar la dispersión del material radiactivo al medio ambiente.

La segunda barrera (barrera física) la constituye el contenedor donde se confina el residuo radiactivo, ya acondicionado. Este contenedor ha de quedar completamente sellado para constituir una buena barrera frente a la dispersión del material radiactivo de su interior. El residuo acondicionado y embalado, listo para su almacenamiento, constituye lo que se denomina bulto de residuos radiactivos.

La tercera barrera (barrera de ingeniería) la constituye la instalación donde se almacenan los residuos radiactivos, cuyo diseño incluye estructuras, blindajes y todos aquellos sistemas requeridos en función de las características de los residuos radiactivos a albergar.

Los residuos de alta actividad, provistos de las tres barreras anteriores, se sitúan en el seno de un medio geológico, cuya misión es detener y retardar el acceso de su contenido radiactivo a la biosfera y al ser humano.

Almacenamientos definitivos de residuos radiactivos de media y baja actividad

El principal objetivo de la instalación es la protección del público y del medio ambiente, lo cual se consigue mediante el confinamiento de los residuos y la limitación de la actividad máxima vertida al medio a través de distintas barreras entre el residuo y el medio ambiente mediante la limitación de la actividad total y de la concentración de actividad a almacenar en la instalación.

Las estrategias más habituales para la disposición final de los residuos radiactivos de baja y media actividad son mediante almacenamientos definitivos construidos, con o sin estructuras de ingeniería, sobre el nivel del suelo o a poca profundidad. Las técnicas principales de almacenamiento son mediante túmulos artificiales, trincheras o mediante estructuras de almacenamiento.

En el caso instalaciones sin estructuras de ingeniería, tipo de túmulos artificiales, los bultos de residuos radiactivos se apilan en varias alturas, se recubre el conjunto con una cobertura de baja permeabilidad compuesta por capas sucesivas de tierra arcillosa, plantas y arbustos, hasta reponer completamente el paisaje. En el caso de las trincheras el almacenamiento se realiza en zanjas excavadas en el terreno a una profundidad de unos pocos metros de la superficie del suelo. En la trinchera y, al igual que para los túmulos, se recubre el conjunto con una capa de terreno restaurando el paisaje.

El otro concepto de almacén definitivo en superficie, en estructuras de almacenamiento, consiste en introducir los bultos de residuos generalmente bloqueados en una matriz de inmovilización (principalmente de cemento), dentro de contenedores de hormigón que a su vez son inmovilizados con más conglomerante hidráulico.

El conjunto de los bultos de residuos y de los contenedores de almacenamiento o unidades de almacenamiento son depositados en el interior de las estructuras o celdas de almacenamiento de hormigón, sobre las que se establece una cobertura a largo plazo, estable y suficientemente impermeable durante, como mínimo, el período de vigilancia y control.

En España, para el almacenamiento definitivo de residuos de media y baja actividad se optó por la construcción de una instalación en estructuras, en el centro de almacenamiento de El Cabril en la provincia de Córdoba que es parte esencial del sistema nacional de gestión de este tipo de residuos.

Aunque su objetivo fundamental es el almacenamiento definitivo de este tipo de residuos de baja y media actividad en forma sólida, también cuenta con diversas capacidades tecnológicas, incluyendo instalaciones de tratamiento y acondicionamiento donde se procesan los residuos procedentes de las instalaciones radiactivas, así como los resultantes de intervenciones en instalaciones no reglamentadas. Igualmente se realizan algunos tratamientos complementarios sobre residuos de instalaciones nucleares.

Almacenamientos definitivos de residuos radiactivos de muy baja actividad

Al igual que en el caso de los residuos radiactivos de media y baja actividad, el aislamiento y contención de los residuos almacenados estará asegurado por un conjunto de barreras que minimizarán el agua que llegue a los residuos y que limitarán la cantidad de sustancias radiactivas liberadas al medio ambiente.

Este objetivo de protección debe ser alcanzado por el sistema de almacenamiento en su conjunto (embalaje, matriz, barreras y emplazamiento) teniendo en cuenta el grado de aislamiento necesario.

El diseño de las barreras y los requisitos reguladores se realizan desde una aproximación graduada por el riesgo, son aspectos especialmente relevantes el inventario de radionucleidos a almacenar y los límites de actividad específica.

El periodo para el que se requiere la conservación de propiedades de las barreras de aislamiento de los residuos es del orden de varias decenas de años, tiempo en el que se estima que los radionucleidos existentes habrán decaído considerablemente o, incluso, desaparecido completamente.

En España, el centro del almacenamiento de residuos de muy baja actividad de El Cabril tiene autorizada la explotación de cuatro celdas para este tipo de residuos.

A diferencia de las celdas de media y baja actividad, el almacenamiento definitivo de los residuos de muy baja actividad se realiza, en celdas construidas mediante el cierre con diques de escollera, acondicionando su fondo y laterales con un sistema de barreras y de drenajes para minimizar la posible influencia del nivel freático sobre el que se disponen estas unidades de almacenamiento.

Con el fin de minimizar la recogida de líquidos durante la fase de explotación se contempla un techado modular y móvil. En la base de los diques de contención de cada celda se sitúa el colector del sistema de drenaje de lixiviados que los conduce hasta un pozo de muestreo. Las celdas dispondrán también de un sistema de recogida de pluviales.

Almacenamientos definitivos de residuos de alta actividad

La estrategia de almacenamiento definitivo consiste en aislar los residuos de la biosfera durante períodos de tiempo muy prolongados, asegurar que las sustancias radiactivas residuales que lleguen a la biosfera estén en concentraciones admisibles y reducir a niveles aceptables el riesgo de la intrusión humana inadvertida.

El almacenamiento definitivo en formaciones geológicas a una profundidad de entre 500 a 1000 m es el método más ampliamente propuesto para conseguir los objetivos anteriores. Es una solución esencialmente pasiva y permanente y no requeriría ninguna intervención o control institucional por parte de las generaciones futuras, aun cuando ésta sería siempre posible, si así se precisara. El confinamiento geológico ofrece una gran estabilidad a largo plazo, asociada a la lentitud de los procesos naturales y al alejamiento de posibles procesos disruptivos asociados al hombre y a la inestabilidad histórica de sus estructuras sociales.

Como se ha comentado anteriormente, en un almacenamiento geológico profundo (AGP), el aislamiento de los residuos de la biosfera se consigue mediante la interposición de un sistema de barreras múltiples, tanto naturales como artificiales.

La primera barrera la va a constituir la capsula que contiene el combustible o el propio residuo acondicionado y sellado.

Como segunda barrera se utiliza un material de relleno y sellado, para rellenar el espacio entre bidones.

La tercera barrera es la construcción de ingeniería que puede estar constituida por galerías horizontales o verticales, que sería equivalente al almacenamiento de residuos de media y baja actividad.

La barrera geológica que hospeda el sistema de almacenamiento es la barrera fundamental a largo plazo, ya que protege a las barreras de ingeniería. La barrera geológica genera un ambiente químico, mecánico, térmico e hidrogeológico estable, limitando el flujo de agua (principal agente movilizador y de transporte de radionucleidos en este contexto) y retardando la migración hacia la biosfera de los radionucleidos potencialmente liberados. Las principales características deseables del medio geológico envolvente, denominado Almacenamiento Geológico Profundo (AGP), van a ser:

- a) Ausencia de agua o escaso movimiento de aguas.
- b) Buena estabilidad tectónica: carencia de fallas activas y baja sismicidad.
- c) Buenas propiedades térmicas y mecánicas que permitan la viabilidad de la construcción y de la operación.
- d) Suficiente profundidad.
- e) Buena capacidad de retención de radionucleidos para el caso de fallo de las barreras anteriores y química favorable de las aguas subterráneas.

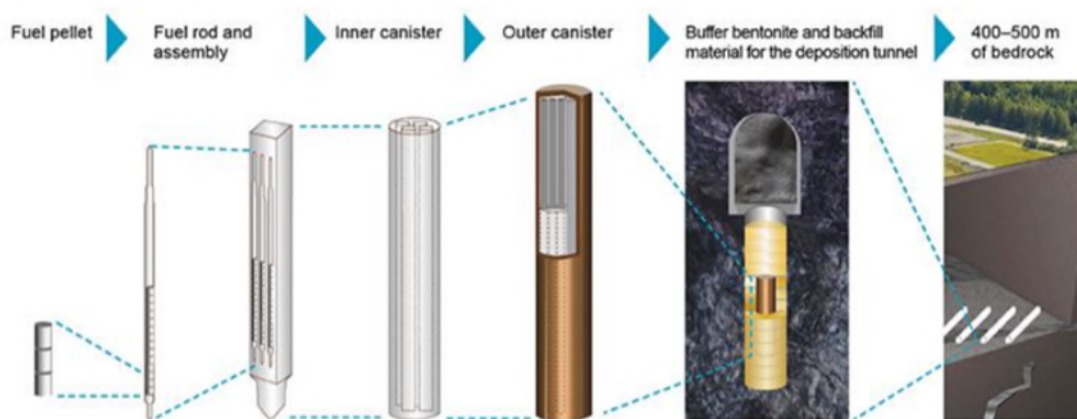


Figura 1 Barreras múltiples en un AGP

No hay un medio que reúna todas las características anteriores de forma óptima por lo que se requiere la elaboración de un balance entre todas ellas. Los medios geológicos o formaciones actualmente en estudio son medios salinos, arcillosos y graníticos.

Las rocas estudiadas que cumplen estos requisitos en mayor o menor medida según sus características son las arcillas, la sal y las rocas cristalinas (magmáticas, metamórficas o volcánicas, tales como granito, gneis, basalto o toba).

Los primeros tienen como principal cualidad su ausencia de agua ya que son medios secos e impermeables. La principal ventaja de los medios arcillosos es su gran plasticidad, de cara a soportar las condiciones térmicas esperadas, mientras que los graníticos destacan por la baja velocidad de movimientos migratorios de aguas que presentan.

La profundidad a la que deben emplazarse los residuos depende en gran medida del tipo de formación seleccionada y de la capacidad de aislamiento de aquellas que rodean a la roca hospedante del AGP.

6. ASPECTOS GENERALES DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN RADIOLÓGICA DEL ALMACENAMIENTO DEFINITIVO DE RESIDUOS RADIATIVOS

El objetivo de los almacenamientos definitivos es el aislamiento de los residuos radiactivos hasta que éstos dejan de ser nocivos considerando los fenómenos de decaimiento por lo que el aspecto más singular de la seguridad de las instalaciones de almacenamiento de residuos, ya sean ubicados cerca de la superficie o en profundidad, es que tras su cierre, existe la posibilidad de que se produzcan exposiciones a la radiación y consecuencias ambientales a lo largo de períodos que puedan prolongarse hasta un futuro lejano.

Por este motivo, los aspectos de protección radiológica aplicables a estos almacenes van a estar relacionados con la protección del medio ambiente y de la población no solo a corto sino también a largo plazo.

Por lo tanto, además de las consideraciones relativas a la seguridad y la protección radiológica operacionales, se deberá considerar el confinamiento y la vigilancia del material radiactivo a largo plazo. El material radiactivo se ha de confinar de forma que no se produzcan liberaciones del mismo dentro de la instalación ni liberaciones al medio ambiente. Por ello, en las instalaciones de almacenamiento definitivo de residuos se han de distinguir dos fases claramente diferenciadas, la fase operacional y la fase de post-clausura.

La fase de post-clausura incluye el periodo de vigilancia institucional, durante el cual se efectúan los controles necesarios para garantizar el comportamiento previsto del sistema de aislamiento, y el periodo de vigilancia post-institucional, durante el cual se considera la liberación del emplazamiento para cualquier tipo de actividad y sin ningún tipo de restricciones. Esta última fase requiere la realización de estudios de seguridad que aseguren el cumplimiento de los criterios de seguridad y protección radiológica a largo plazo.

En este caso también hay que distinguir entre residuos radiactivos de media y baja actividad y periodo corto y residuos de alta actividad ya que van a requerir almacenamientos definitivos distintos. Las diferencias esenciales existentes entre ambos tipos de residuos, la generación de calor y sus muy diferentes periodos de semidesintegración, suponen, por un lado, la necesidad de emplear sistemas y estructuras

de almacenamiento diferentes y por otro lado análisis a mucho mayor largo plazo para la fase post-clausura.

Requisitos de seguridad en el almacenamiento de residuos radiactivos

El OIEA publicó en 2012 los requisitos de seguridad específicos para la disposición final de los residuos radiactivos de referencia, SSR-5, en los que se aglutina el consenso internacional al respecto.

Este documento incorpora requisitos tanto para la protección radiológica durante el periodo operacional y la fase post-clausura.

En relación con la fase operacional, se establece que este tipo de instalaciones son consideradas como instalaciones nucleares autorizadas y su funcionamiento deberá ajustarse a los requisitos que se establezcan en sus licencias de explotación. Por lo tanto, los requisitos aplicables son los establecidos en las normas básicas de seguridad.

Desde la perspectiva de la Protección Radiológica, se trata de situaciones de exposición planificada. Así mismo, no se espera que se produzcan emisiones de radionucleidos al exterior, o en caso de que estas se produzcan deberán ser muy limitadas.

Para la fase post clausura, el OIEA establece como objetivo “emplazar, diseñar, construir, explotar y cerrar una instalación de disposición final para optimizar la protección después del cierre de esa instalación, teniendo en cuenta factores sociales y económicos. Además, se deben ofrecer garantías razonables de que las dosis y los riesgos a largo plazo para los miembros de la población no superarán las restricciones de dosis o de riesgo que se utilizaron como criterios de diseño”.

En coherencia con los principios éticos detallados con anterioridad, se establece como límite de dosis para los miembros de la población 1mSv/año para todo el marco temporal. Adicionalmente, además de contemplar la necesidad de aplicar restricciones de dosis para el individuo crítico, plantea la necesidad de aplicar escenarios de intrusión humana involuntaria tras el cierre.

Los requisitos establecidos en SSR-5 se resumen a continuación:

- Requisitos de Seguridad para la planificación del almacenamiento definitivo de los residuos radiactivos: Incorpora responsabilidades del gobierno en el establecimiento de un marco regulador en pro de la seguridad, en la importancia de la seguridad en el proceso de desarrollo y explotación de las instalaciones y en el diseño conceptual de las instalaciones desde el punto de vista de la seguridad mediante funciones múltiples de seguridad que aseguren la contención y el aislamiento de los residuos mediante sistemas que incorporen varias barreras diferentes.
- Requisitos relativos al desarrollo, la explotación y el cierre de las instalaciones; que incluye requisitos aplicables a la justificación y evaluación de la seguridad con otros aplicables a las etapas de desarrollo, explotación y cierre de las instalaciones.

- Requisitos relativos a la garantía de seguridad. Que incluye requisitos sobre el inventario de residuos de las instalaciones, los criterios de aceptación y los programas de vigilancia de la instalación

A su vez, la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y de los Residuos Radiactivos establece disposiciones para la seguridad en la gestión del combustible gastado y los residuos radiactivos que, evidentemente, son de aplicación a las instalaciones de almacenamiento de residuos radiactivos.

Además, el OIEA, también ha desarrollado la guía de seguridad SSG-23 sobre el análisis y evaluación de seguridad para el almacenamiento definitivo de residuos radiactivos cuyo objetivo es dar recomendaciones sobre como evaluar, demostrar y documentar la seguridad de todo tipo de almacenamientos de residuos radiactivos. Incluye consideraciones sobre como evaluar aquellos aspectos más relevantes tras el cierre de la instalación y recomendaciones sobre el análisis de seguridad de los almacenamientos y la evaluación del impacto radiológico tras la clausura de la instalación.

Todos estos requisitos y compromisos se han ido transponiendo en la legislación española por lo que, a continuación, se resumen algunos aspectos relevantes.

Marco regulador de los almacenamientos de residuos en España

Según el artículo 11 del Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RINR), RD 1836/1999, toda instalación de almacenamiento de sustancias nucleares se considera instalación nuclear, por lo que estas instalaciones están sometidas al régimen de autorizaciones establecido en el Título II del RINR.

Así, el régimen de autorizaciones establecido en el artículo 12 consta de las siguientes:

- Autorización previa o de emplazamiento: cuya obtención faculta al titular para solicitar la autorización de construcción de la instalación e iniciar las obras de infraestructura preliminares que se autoricen.
- Autorización de construcción: faculta al titular para iniciar la construcción de la instalación y para solicitar la autorización de explotación.
- Autorización de explotación: faculta al titular a operar la instalación dentro de las condiciones establecidas en la autorización.
- Autorización de modificación: faculta al titular a introducir modificaciones en el diseño de la instalación o en sus condiciones de explotación, en los casos en que se alteren los criterios, normas y condiciones en que se basa la autorización de explotación.
- Autorización de ejecución y montaje de la modificación: faculta al titular a iniciar la realización, ejecución y montaje de aquellas modificaciones que, por su gran alcance o porque implique obras y montajes significativos, se considere necesario autorizar expresamente, a juicio de la Dirección General de Política Energética y Minas o del Consejo de Seguridad Nuclear.

- Autorización de desmantelamiento y cierre: faculta al titular a iniciar los trabajos que se requieran para garantizar la seguridad a largo plazo del sistema de almacenamiento, así como las actividades de desmantelamiento de las instalaciones auxiliares que así se determinen, permitiendo la delimitación de las áreas que deban ser en su caso objeto del control y de la vigilancia radiológica, o de otro tipo, durante un periodo de tiempo determinado, y la liberación del control de las restantes áreas del emplazamiento.

El proceso de desmantelamiento y cierre terminará en una declaración de cierre emitida por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, previo informe del Consejo de Seguridad Nuclear.

La operación de los almacenes definitivos de residuos, al igual que la del resto de instalaciones nucleares, se considera como una situación de exposición planificada por lo que le son de aplicación todos los requisitos establecidos en el título III del RD 1029/2022, el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes.

El CSN ha desarrollado la Guía de Seguridad 7.6 (Rev. 1), sobre el contenido de los manuales de protección radiológica de instalaciones nucleares radiactivas del ciclo de combustible nuclear cuyas recomendaciones aplican a los Manuales de Protección radiológica que estén vigentes entre los documentos oficiales de explotación en las autorizaciones de explotación de los almacenamientos definitivos de residuos radiactivos.

En relación con los planes de protección física, le son de aplicación los criterios establecidos, bajo una aproximación graduada, en la Instrucción IS-09 de 14 de junio de 2006, del Consejo de Seguridad Nuclear, por la que se establecen los criterios a los que se han de ajustar los sistemas, servicios y procedimientos de protección física de las instalaciones y materiales nucleares seguridad física.

Adicionalmente, y al igual que en cualquier otra Instalación Nuclear, se han de establecer planes de emergencia interiores, programas de vigilancia radiológica ambiental en el entorno de la instalación que verifique el cumplimiento de los criterios establecidos y programas de garantía de calidad que afecte a todo el proceso, tanto técnico como administrativo.

Entre las particularidades de las instalaciones de almacenamiento definitivo de residuos, destacan la existencia de criterios de aceptación que son los límites tanto cualitativos como cuantitativos impuestos para la aceptación de los bultos de residuos previo a su almacenamiento y que son incorporados en la autorización de operación en forma de un documento oficial de explotación. Entre los criterios de aceptación destacan, límites la actividad y de concentración de actividad; criterios relativos a la estabilidad de los bultos o la ausencia de agua libre.

Por su lado, los titulares de las instalaciones nucleares o radiactivas están obligados a suscribir especificaciones técnico administrativas de aceptación de sus residuos para su gestión posterior por Enresa, de acuerdo con el artículo 11 del RD 102/2014 para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos.

El Centro de Almacenamiento de El Cabril fue diseñado tomando como referencia el centro de almacenamiento de l'Aube, en Francia; por lo que la normativa de este país se considera de especial interés. En relación con los análisis de seguridad, cabe destacar la "Règle fondamentale de sûreté" (RFS) 1.2 sobre principios generales de diseño e instalación de almacenamientos de residuos radiactivos en superficie que señala dos objetivos fundamentales en el diseño de los almacenamientos definitivos superficiales:

- La protección inmediata y diferida de las personas y del medio ambiente. Que cubre tanto la fase de explotación como la fase de vigilancia tras el cierre.
- la limitación de la duración de la fase de vigilancia (que no deberá superar los 300 años): transcurrido este intervalo, no será necesario establecer restricciones en el uso del emplazamiento.

Además, esta norma, establece las siguientes bases en el diseño del almacén:

1. Seguridad intrínseca a largo plazo basada en la fiabilidad de las barreras de confinamiento que deberán ser concebidas para impedir la transferencia de los elementos radiactivos durante el tiempo de la fase de vigilancia.
2. Definición de la naturaleza y cantidad de radionucleidos que podrán ser almacenados. Se realizarán estudios que consideren todas las vías plausibles de transferencia al medio ambiente con el objeto de determinar la naturaleza y cantidad de radionucleidos que puedan almacenarse en la instalación. Generalmente, se clasifican en transferencias al medio ambiente vía agua y vía aire y en cualquier caso se realizarán considerando hipótesis conservadoras.

Con independencia del resultado de los estudios, la norma fija una actividad específica máxima para el total de radioisótopos emisores alfa al finalizar la fase de vigilancia de 370MBq/Ton.

3. Vigilancia, mantenimiento e intervenciones. El diseño permitirá la vigilancia fiable, continua y eficaz de la instalación durante las fases de operación, y de vigilancia institucional (tras el cierre) para comprobar la ausencia de diseminación de sustancias radiactivas mediante el control de las aguas de escorrentía, de las aguas infiltradas y drenadas y de las aguas subterráneas.
4. Protección del almacenamiento contra la erosión y contra la intrusión humana. Tanto la selección del emplazamiento como el diseño y selección de los materiales de cobertura deberá ser suficiente para proteger los residuos durante la fase de vigilancia
5. Protección del almacenamiento contra los riesgos debidos a la intrusión de agua. La selección del emplazamiento y la concepción de las zonas de almacenamiento deberá permitir evitar que la capa freática alcance los residuos almacenados. Adicionalmente, las eventuales aguas infiltradas deberán ser recogidas.
6. Protección contra los seísmos y estabilidad del almacenamiento. El almacenamiento deberá situarse en una zona de sismicidad débil y estable tectónicamente. La estabilidad del almacenamiento deberá asegurarse durante la fase de vigilancia.

7. Sistema de control de calidad. Se aplicará durante el diseño, construcción y operación, un sistema de control de calidad que se basará en acciones de control planificadas y sistemáticas establecidas en procedimientos escritos.

De forma coherente con lo establecido en la RFS 1.2 y los criterios de la ICRP, entre los criterios radiológicos definidos por el Consejo de Seguridad Nuclear para los almacenamientos definitivos de residuos radiactivos de media actividad, destacan los siguientes:

- El criterio de riesgo establecido es de 10^{-6} /año, lo que equivale a una dosis de 0.1 mSv/año de dosis efectiva. Así, la dosis vía agua subterránea considerando la evolución en el tiempo esperada del almacenamiento, no supondrá una dosis efectiva anual a ningún miembro del público superior a 0.1 mSv
- La dosis a cualquier miembro del público debida a una situación accidental ha de ser inferior a 5 mSv/año y el promedio en toda la vida inferior a 1 mSv/año.
- Se limita la dosis máxima en los escenarios relacionados con una posible futura intrusión humana inadvertida; estipulado con una restricción de dosis de 1 mSv/año.

7. ANÁLISIS DE SEGURIDAD DEL ALMACENAMIENTO DEFINITIVO A LARGO PLAZO, TRAS LA CLAUSURA

Se define la evaluación de seguridad a largo plazo como el análisis del comportamiento futuro del conjunto de los residuos radiactivos depositados en sistema de almacenamiento, y su potencial impacto radiológico sobre las personas y el medio ambiente, seguido de una comparación de los resultados obtenidos en el análisis con unos apropiados estándares de seguridad.

Esta evaluación tiene implicaciones especiales debido a las incertidumbres en la evolución del conjunto del almacenamiento y de las actividades humanas futuras; estas incertidumbres aumentarán con el marco temporal que se considere.

El OIEA, en la guía de seguridad SSG-23 sobre el análisis y evaluación de seguridad para el almacenamiento definitivo de residuos radiactivos ha incluido una serie de recomendaciones sobre la evaluación del impacto radiológico tras la clausura de la instalación, destacan los siguientes componentes clave en la metodología para realización de la evaluación a largo plazo:

- Definición de los objetivos de la evaluación, los requisitos de seguridad y los criterios sobre comportamiento
- Adquisición de información y descripción del sistema de almacenamiento, de los residuos, de las características del emplazamiento y de las estructuras.
- Determinación de las características, sucesos y procesos (FEPs, Features, Events and Processes) que podrían influir en el comportamiento a largo plazo.
- Elaboración y ensayo de modelos conceptuales y matemáticos del comportamiento del sistema y de sus componentes.

- Determinación y descripción de los escenarios de interés.
- Determinación de las vías potenciales de transferencia de radionucleidos desde el almacenamiento hasta los seres humanos y el medio ambiente.
- Ejecución de la evaluación mediante la aplicación de modelos conceptuales y matemáticos.
- Valoración de la solidez de la evaluación
- Comparación de los resultados de la evaluación con los requisitos de seguridad asignados.

La guía propone realizar una aproximación graduada por el riesgo de las distintas instalaciones.

La validez de los resultados de los modelos matemáticos debe ser considerada con respecto a la incertidumbre de los datos usados para los modelos, las hipótesis dentro de las diferentes partes de los modelos, las hipótesis acerca de las interrelaciones entre los diversos componentes del modelo global y las incertidumbres asociadas a la evolución a largo plazo del sistema de almacenamiento.

Almacenamiento en superficie para residuos de media y baja actividad

Tras la clausura, durante la etapa de vigilancia institucional, se puede suponer que la posibilidad de intrusión humana no intencionada será insignificante siempre que los controles institucionales activos resulten plenamente efectivos, pero, tras la liberación del emplazamiento, esta probabilidad podría aumentar.

Por otro lado, se asume que tras la liberación del emplazamiento y a lo largo del tiempo, los radionucleidos irán liberándose por, entre otras razones, el deterioro de las barreras por lo que se deberá calcular el impacto sobre la población cercana.

Por todo ello, para analizar las consecuencias, se deberá realizar mediante las evaluaciones de la seguridad, que deberían ofrecer una garantía razonable en cuanto a que el almacenamiento cumplirá con los objetivos de diseño, las normas de funcionamiento y los criterios reglamentarios.

Este análisis trata de estudiar sistemáticamente el comportamiento presente y futuro de las barreras establecidas mediante el desarrollo y aplicación de modelos que sean capaces de cuantificar la capacidad de cada una de las barreras y del conjunto de todas ellas.

En las evaluaciones de seguridad de los almacenamientos en superficie los escenarios que se consideren, requerirán la elaboración de modelos del comportamiento de la instalación en condiciones supuestas que deben realizarse con un nivel de confianza adecuado. Para ello se deben determinar las vías de exposición más relevantes y los fenómenos naturales y las actividades de los seres humanos que podrían alterar las características del sistema mediante un conjunto de sucesos.

El CSN desarrolló en 2013 la Guía de Seguridad 9.4 sobre la Evaluación de seguridad a largo plazo de los almacenamientos superficiales definitivos de residuos radiactivos de media y baja actividad que tiene por objetivo describir el contenido mínimo de estas evaluaciones en la que se propone una metodología coherente con la establecida en la guía SSG 23 del OIEA. En el que se recomienda un proceso iterativo de para realizar el análisis de seguridad, que se resume en la figura siguiente.

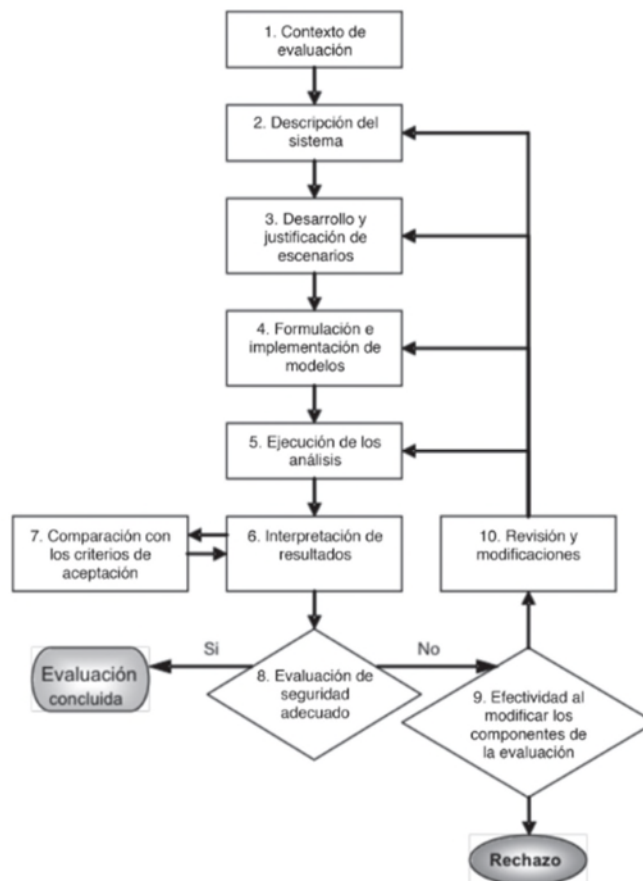


figura 2 Metodología de Evaluación de almacenamiento superficiales, según GS 9.4

Un primer paso en la realización del análisis consiste en adquirir un conocimiento preciso de los residuos radiactivos y de las características de los componentes y subsistemas del sistema global. A partir de aquí se ha de realizar el estudio incluyendo las siguientes etapas:

- Identificar y desarrollar escenarios actuales y previsiones futuras.
- Desarrollar e implementar modelos conceptuales y matemáticos del sistema de almacenamiento para evaluar su comportamiento futuro.
- Evaluar las consecuencias potenciales para cada escenario de evolución.

- Realizar análisis de sensibilidad e incertidumbres de los distintos componentes del sistema.
- Comparar los resultados con criterios de seguridad establecidos.

El primer paso para la selección de escenarios es la elaboración de un inventario de todos los factores concebibles que pueden influir en el comportamiento del sistema, incluyendo las características de los distintos componentes, eventos y los procesos (features, events and process, FEPs) que influyan en el funcionamiento del mismo.

Los factores se pueden clasificar en función de varios criterios como pueden ser el origen, su probabilidad de ocurrencia, la localización, etc. Los escenarios se pueden clasificar en dos categorías, en procesos de origen natural y en procesos de intrusión humana.

Una vez definidos los escenarios se establece el denominado modelo conceptual asociado al mismo que comprende una serie de suposiciones en relación con los procesos y sucesos asociados al escenario.

Finalmente, el modelo conceptual para cada escenario se expresa en forma matemática como un grupo de ecuaciones matemáticas algebraicas y diferenciales. Los resultados obtenidos se comparan con las consecuencias radiológicas establecidas como aceptables.

Por ejemplo, si consideramos el escenario de una liberación gradual de actividad por vía acuática habría que estudiar la cantidad de actividad liberada y su evolución en el tiempo, el transporte de los radionucleidos en el medio geológico y su evolución en la biosfera, en las vías de acceso al hombre.

Esto requiere la estimación de dichas liberaciones, la modelización de las barreras y de los medios geológicos y biológicos, así como la simulación del transporte de material radiactivo en el medio acuático.

Marco Temporal de los análisis de seguridad.

En lo que respecta a la liberación del emplazamiento, se establece una duración máxima de la fase de vigilancia y control de hasta 300 años.

Por ello se asume que la posible intrusión humana inadvertida tiene lugar tras el momento de la liberación; a los 300 años; aunque en determinados escenarios se puede suponer en un momento posterior, como, por ejemplo; en el escenario de residencia con actividades de agricultura en el emplazamiento, Enresa supone que el escenario tiene lugar a los 500 años de la clausura.

Por último, para todos los escenarios, se considera adecuado evaluar el comportamiento del sistema de almacenamiento durante un periodo de tiempo de hasta los 10000 años porque permite evaluar el comportamiento de las barreras de ingeniería y del emplazamiento, y estimar los picos de dosis de la mayoría de los radionucleidos de vida larga y de movilidad media-alta.

Almacenamiento geológico profundo

De forma muy similar a los residuos de media y baja actividad, La gestión definitiva del combustible gastado y de los Residuos de alta Actividad se apoya en dos objetivos fundamentales:

- *Estrategia de Seguridad y Protección Radiológica:* Los residuos radiactivos de alta actividad deben ser acondicionados y aislados para evitar la emisión de sustancias radiactivas que pueden alcanzar la biosfera en concentraciones inaceptables, antes de que su decaimiento las haga inocuas. Por tanto, es necesario asegurar la protección radiológica de acuerdo con los principios establecidos en las directivas internacionales, que se basan en las recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, en concreto la ICRP 122.
- *Responsabilidad con las generaciones futuras:* Por las características del CG/RAA, el aislamiento de los residuos debe garantizarse durante largos periodos de tiempo (desde cientos de miles de años hasta un millón de años), sin la necesidad del mantenimiento permanente de la integridad del sistema de almacenamiento y sin la necesidad de establecer medidas activas para garantizar el objetivo de seguridad.

Los resultados de los ejercicios de evaluación de la seguridad realizados hasta la fecha muestran una fuerte robustez y coinciden en que el Almacenamiento Geológico Profundo (AGP) es una solución que, mediante el sistema de barreras múltiples, permite, en emplazamientos adecuadamente seleccionados, aislar el combustible gastado y los residuos de alta actividad durante periodos de tiempo suficientemente largos como para que su radiotoxicidad no suponga ningún riesgo apreciable para la salud humana y la de los ecosistemas.

Aunque las diferencias en la gestión de los residuos y en las instalaciones son significativas; en lo relativo al análisis de seguridad a largo de las instalaciones la principal diferencia la escala de tiempo, pasando del orden de miles de años para los almacenamientos de residuos de media y baja actividad a centenares de miles de años para los AGP, por lo que el análisis de seguridad de estos últimos resulta mucho más complejo y con mayores incertidumbres.

Este estudio requiere definir escenarios a muy largo plazo, modelizar el término fuente y la biosfera y estimar la evolución de estos radionucleidos hasta su llegada al hombre, considerando evoluciones no conocidas en su totalidad.

La realización de análisis probabilísticos para poder comparar el riesgo estimado con el riesgo aceptable y las metodologías asociadas se encuentran en continuo desarrollo, donde para la demostración de la seguridad a largo plazo, se desarrolla un proceso iterativo de aproximaciones sucesivas, seguido por todos los países con programas de AGP avanzados.

Este proceso iterativo permite la incorporación progresiva de los desarrollos habidos en otras actividades del programa nacional y en el ámbito internacional en cuanto a bases

científicas y metodologías de evaluación, modificaciones de diseño y marco legal y regulador.

Los programas nacionales de gestión de residuos que más han avanzado en los últimos años, han escogido una aproximación iterativa a la implementación de un AGP, mediante un proceso de toma de decisiones mediante etapas claramente definidas en un proceso de concertación social y con apoyo parlamentario. Esto permite la flexibilización del proceso de toma de decisiones y la adaptación a los desarrollos (o involuciones) político-sociales y científico tecnológicos.

Existe un retraso generalizado en el desarrollo de los Almacenes geológicos Profundos de los distintos países. Sólo existe un AGP en funcionamiento, se trata del Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) situado en Nuevo México (en EEUU) en la que se almacenan transuránicos producidos en actividades de origen militar y que no permite el almacenamiento de combustible gastado. El proyecto más adelantado para el almacenamiento de combustible gastado es el planteado en Finlandia, cerca de la central nuclear de Olkiluoto que dispone de la autorización de construcción desde el año 2015.

Antes de poder iniciar la construcción del AGP, Posiva, titular de Onkalo, desarrolló un laboratorio en profundidad (en formación de roca cristalina a 455 metros de profundidad) que, durante más de 15 años le ha permitido conocer el comportamiento del lecho de rocas en el que se ha planeado construir el emplazamiento ya que es la última barrera que separará los residuos de alta actividad de la biosfera y permite las condiciones adecuadas para el resto de las barreras. Por ello, han debido realizar un estudio minucioso que permite evitar aquellas zonas menos deseables por sus características mecánicas o químicas.

También destaca por su grado de avance, el proyecto francés, Cigéo, emplazamiento elegido en Meuse/Haute-Marne. Andra, agencia nacional francesa para la gestión de los residuos radiactivos ha desarrollado una detallada hoja de ruta del proceso. En 2023 presentó la solicitud para la autorización de construcción del AGP en arcillas a unos 490 metros de profundidad.

Al igual que en el caso de Finlandia, cabe destacar, el esfuerzo realizado para establecer un diálogo social con el público y cualquier parte interesada, mediante debates públicos, conferencias ciudadanas, comités locales de información y los comités de acompañamiento del proceso.

En Suecia, la SKB (Compañía sueca para la gestión del CG y los RR) dispone de un laboratorio subterráneo en Äspö, al norte de Oskarshamn (a 460 metros de profundidad) y emplazamientos para la planta de encapsulamiento y para el AGP (en los municipios de Oskarshamn y Östhammar, respectivamente). En 2022 el gobierno sueco concedió dos licencias diferentes para construir y operar la instalación de encapsulamiento y el AGP y se espera que en 2024 se otorgue la autorización para iniciar la construcción de ambas instalaciones.

En el caso español, recientemente se han reactivado los trabajos necesarios para la concepción de un proyecto de AGP, mediante el desarrollo de una Hoja de Ruta elaborada por el grupo de trabajo entre el MITERD, el CSN y Enresa en el que se define la estrategia a seguir.

Alineado con la mencionada hoja de ruta, el Séptimo Plan General de Residuos Radiactivos establece que la puesta en marcha del AGP tendrá lugar en 2073; previamente, el combustible gastado y los residuos de alta actividad quedarán almacenados en una serie de almacenes temporales descentralizados en los mismos emplazamientos en los que están actualmente las CCNN.

Para conseguir este objetivo, plantea un calendario según el cual entre 2029 y 2039 tendrá lugar la selección del emplazamiento; su caracterización tendrá lugar entre el año 2040 y 2049 y su construcción a partir del año 2060.

En resumen, el desarrollo de un AGP es, por lo tanto, un proceso dilatado en el tiempo y que afecta, en su implementación, al menos a dos o tres generaciones. La evaluación de su seguridad es un proceso iterativo, que integrará el conocimiento adquirido en I+D sobre el comportamiento de los componentes del sistema de almacenamiento y las modificaciones y optimizaciones del diseño, produciendo, a través de sucesivos análisis, estimaciones del funcionamiento a largo plazo cada vez más precisas y fiables.

8. BIBLIOGRAFÍA.

OIEA Guía de Seguridad GSG-1. Clasificación de residuos radiactivos.

OIEA Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response, 2022

OIEA . SSR-5 Disposición final de desechos radiactivos

OIEA Guía de Seguridad SSG-23 The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste..

ICRP Radiation Protection Recommendations as applied to the disposal of long lived Solid Radioactive Waste, publication nº 81. 2000.

ICRP Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, publication 122, 2013

NRC Standard Format and Content of a License Application for a Low-Level Radioactive Waste Disposal Facility (NUREG-1199, Rev 2) .

WENRA: Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels, WGWD

CSN, Guía de Seguridad, Evaluación de seguridad a largo plazo de los almacenamientos superficiales definitivos de residuos radiactivos de baja y media actividad , GS 09-04 (Abril 2013).

Real Decreto 102/2014, de 21 de febrero, para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos.

El séptimo Plan General de Residuos Radiactivos. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Diciembre 2023.

El almacenamiento geológico profundo de los residuos de alta actividad. Principios básicos y tecnología. ENRESA. 2001.

Ilustre Colegio Oficial de Físicos "Origen y gestión de residuos radiactivos" (2000).

Gestión de residuos radiactivos: Situación, Análisis y perspectiva. Volumen 1. Fundación para estudios sobre la Energía. 2007.

Curso Gestión de Residuos Radiactivos. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat) y Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Serie ponencias.