

TERCER EJERCICIO

GRUPO B. Protección radiológica

TEMA 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.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. RESUMEN | 2 |
| 2. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 3. DEFINICIÓN, CLASIFICACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS SÓLIDOS . | 3 |
| Clasificación internacional de Residuos radiactivos, la Guía GSG 1 del OIEA:..... | 4 |
| Clasificación de residuos radiactivos en el séptimo plan general de residuos radiactivos de España | 5 |
| Principios de la gestión de los residuos radiactivos | 6 |
| 4. DESCLASIFICACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS | 7 |
| 5. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS, CONSIDERACIONES GENERALES | 8 |
| 6. GESTIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS PRODUCIDOS EN LAS INSTALACIONES NUCLEARES | 10 |
| Identificación, caracterización y Segregación de Residuos radiactivos..... | 10 |
| Tratamiento y acondicionamiento..... | 11 |
| Residuos radiactivos líquidos..... | 11 |
| Residuos radiactivos gaseosos | 13 |
| Residuos radiactivos sólidos | 14 |
| Almacenamiento temporal de Residuos radiactivos | 14 |
| 7. GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS PRODUCIDOS EN INSTALACIONES RADIATIVAS MÉDICAS, INDUSTRIALES Y DE INVESTIGACIÓN | 16 |
| 8. TRANSPORTE | 19 |
| 9. ALMACENAMIENTO DEFINITIVO..... | 19 |
| 10. BIBLIOGRAFÍA. | 20 |

1. RESUMEN

Se generan residuos radiactivos en la producción de electricidad de origen nuclear, en el desmantelamiento de instalaciones nucleares y en el uso de materias radiactivas, en las actividades médicas, en la agricultura, en la industria o en la investigación.

La Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear, artículo segundo, define residuo radiactivo como "cualquier material o producto de desecho, para el cual 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 del Consejo de Seguridad Nuclear".

Estos residuos, que presentan elementos radiactivos se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios, en función de su vida media, el tipo de radiación que emiten, su estado físico o con vistas a su gestión definitiva, en el caso del almacenamiento de los residuos sólidos.

En este tema, se analiza la definición, la clasificación y el origen de los residuos radiactivos en las diferentes actividades, y las vías de gestión de los residuos radiactivos implantadas en España.

Este tema se relaciona con los siguientes:

Primer ejercicio.

- B 7 Tratamiento de combustibles irradiados, opciones. Sistemas reelaboración. Problemas asociados.
- B 8 Residuos radiactivos. Tipos. Origen. Gestión

Tercer ejercicio:

- 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.
- B 17 (2024) Seguridad y PR en las instalaciones de almacenamiento definitivo de RR

2. INTRODUCCIÓN

Se generan residuos radiactivos en muy distintos tipos de instalaciones, desde las relativas al ciclo de combustible nuclear entre las que se encuentran las instalaciones para extracción y enriquecimiento de uranio, las fábricas de combustible, las plantas de producción de electricidad de origen nuclear, etc. a aquellas que utilizan sustancias radiactivas relacionadas con actividades médicas, la agricultura, la industria y la investigación o las que utilizan materia primas que contienen radionucleidos de origen natural. Esta diversidad de prácticas implica una gran variedad de residuos radiactivos, con una gran variedad de concentraciones de radionucleidos y diversos estados físicos y químicos. Estas diferencias se traducen en una serie igualmente amplia de opciones para su gestión.

A lo largo de este tema se verán las distintas clasificaciones de los residuos, y el origen de los mismos, así como la vía de gestión más adecuada a cada tipología.

3. DEFINICIÓN, CLASIFICACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS SÓLIDOS

3.1 Definición

La Ley de Energía Nuclear de 1964 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 CSN.

3.2 Clasificación de los residuos radiactivos

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos sistemas de clasificación de residuos radiactivos en función de determinadas características que se consideran de interés en función de las circunstancias en las que se gestionaban residuos radiactivos, como, por ejemplo:

Tipo de radiación emitida:

Los radionucleidos contenidos en los residuos radiactivos pueden desintegrarse de diferentes formas, dando lugar a la emisión de diversas partículas o rayos. Desde este punto de vista, los residuos radiactivos se clasifican en emisiones alfa, beta y gamma.

Período de semidesintegración

En función del período de semidesintegración de los radionucleidos contenidos en los residuos los residuos se clasifican:

- Residuos radiactivos de vida corta: aquellos que contienen o están contaminados básicamente con isótopos radiactivos cuyo período de semidesintegración es inferior a 30 años.
- Residuos radiactivos de vida larga: aquellos que contienen o están contaminados con isótopos radiactivos cuyo período de semidesintegración es superior a 30 años.

Concentración de actividad.

Los residuos radiactivos se pueden clasificar por la concentración de actividad por unidad de masa o volumen de material radiactivo (actividad específica). Típicamente se puede definir un umbral por encima del cual se considera al residuo como de alta actividad y reciprocamente, por debajo, como de baja.

Radiotoxicidad

Se pueden clasificar los residuos en función de la radiotoxicidad de los radionucleidos de los que están compuestos. Esta propiedad define la peligrosidad desde el punto de vista biológico.

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.

En su alcance se incluye todo el conjunto de residuos radiactivos: desde el combustible nuclear gastado, cuando se considera como residuo radiactivo, hasta residuos con unos niveles de concentración de la actividad tan bajos que no es necesario gestionarlos o regularlos como residuos radiactivos; incluyendo tanto las fuentes selladas en desuso como los residuos que contienen radionucleidos de origen natural.

Como se puede comprobar en la figura 1 de la guía de seguridad, que se incluye a continuación, el sistema propuesto se basa en seis categorías de residuos:

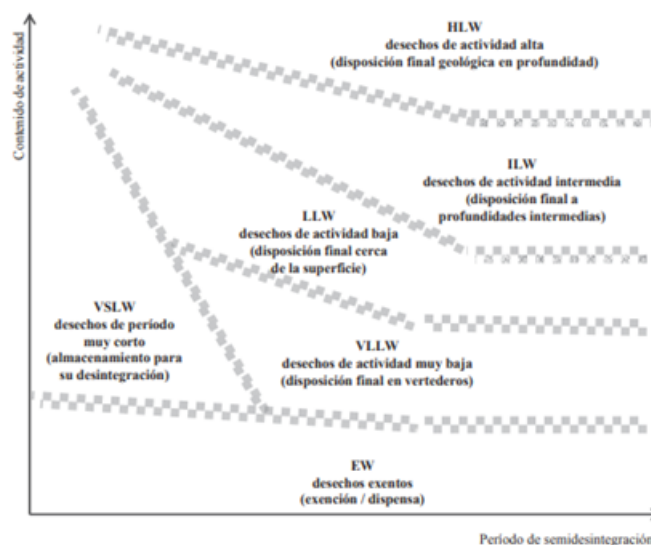


Fig. 1. Ilustración conceptual del sistema de clasificación de desechos.

- 1) Residuos exentos (EW): son aquellos que cumplen los criterios necesarios para su exclusión del control regulador. A pesar de esta denominación, una vez que los residuos se han caracterizado como exentos, dejándose de aplicar el control reglamentario, éstos ya no se consideran residuos radiactivos.
- 2) Residuos de período muy corto (VSLW): residuos que tras un periodo de almacenamiento temporal limitado de algunos años pueden ser considerados como exentos del control regulador para su gestión posterior. Esta clase incluye los residuos que contienen principalmente radionucleidos con períodos de semidesintegración muy cortos utilizados frecuentemente con fines médicos y de investigación.

- 3) Residuos de actividad muy baja (VLLW): residuos que no necesariamente cumplen los criterios de los residuos exentos, pero 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. Por ejemplo: suelen formar parte de esta clase de residuos la tierra y los escombros con baja concentración de actividad. Las concentraciones de radionucleidos de periodo más largo presentes en los VLLW son, por lo general, muy limitadas.
- 4) Residuos de actividad baja (LLW): residuos cuya actividad se encuentra por encima de los niveles de exención, pero que contienen cantidades limitadas de radionucleidos de periodo largo. Estos residuos requieren un aislamiento y lidos durante periodos de hasta algunos cientos de años y se pueden someter a almacenamiento definitivo en instalaciones cerca de la superficie. Esta clase abarca una variedad muy amplia de residuos. Los LLW pueden incluir radionucleidos de periodo corto con un nivel más elevado de concentración de la actividad, así como radionucleidos de periodo largo, pero sólo con niveles relativamente bajos de concentración de la actividad.
- 5) Residuos de actividad intermedia (ILW): residuos que, debido a su contenido, particularmente de radionucleidos de periodo largo, precisan un grado mayor de contención y aislamiento que el que ofrece el almacenamiento definitivo cerca de la superficie. No obstante, en el caso de los ILW no hace falta adoptar disposiciones, o sólo de forma limitada, en relación con la disipación del calor durante su almacenamiento y almacenamiento definitivo. Los ILW pueden contener radionucleidos de periodo largo, en particular radionucleidos emisores de radiación alfa, hasta un nivel de concentración de la actividad que sea aceptable para proceder a su almacenamiento definitivo en instalaciones a mayor profundidad, del orden de decenas de metros hasta algunos cientos de metros.
- 6) Residuos de actividad alta (HLW): residuos con niveles de concentración de la actividad suficientemente elevados para generar cantidades importantes de calor mediante el proceso de desintegración radiactiva o residuos con grandes cantidades de radionucleidos de periodo 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 periodos de semidesintegración inferiores a 30 años, y con actividades que tras un periodo máximo de 300 años en el almacenamiento definitivo resultan inocuas.
- Su contenido en emisores alfa debe ser inferior a 370 Bq/g.

Algunos ejemplos de radionucleidos contenidos en los residuos de baja y media actividad son el Cs-137, el Sr-90 y el Co-60.

Dentro de esta categoría, se incluyen los residuos denominados como de muy baja actividad que se corresponden con aquellos de menor actividad (en general, presentan actividades específicas entre 1 y 100 bequerelios por gramo, 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.

A diferencia del PGRR anterior, el 7º PGRR establece una categoría adicional, ya que considera como Residuos Especiales 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. Algunos ejemplos de estos tipos de residuos son las fuentes neutrónicas, la instrumentación intranuclear usada o los componentes internos del reactor.

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 |

Principios de la gestión de los residuos radiactivos

El objetivo principal de la gestión de los residuos radiactivos es tratar los residuos radiactivos con vistas a proteger la salud del ser humano y el medio ambiente, ahora y 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 transponiendo 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.

Por su lado, el artículo 4 del RD 102/2014 establece que la responsabilidad respecto de los residuos radiactivos será de quienes los hayan generado y éstos instaurarán y aplicarán sistemas integrados de gestión que otorguen la debida prioridad a la seguridad en la gestión global los residuos radiactivos.

Adicionalmente, en conformidad con el artículo 38 bis de la LEN, el artículo 4, anteriormente citado, también declara que la gestión del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos constituye un servicio público esencial que se reserva a la titularidad del Estado, sin perjuicio de las responsabilidades que correspondan a los generadores de estos materiales.

Por último, en el mismo articulado, se encomienda dicha gestión a la «Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S. A.» (ENRESA)”, constituida por Real Decreto 1522/1984..

4. DESCLASIFICACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS

La desclasificación se define como el proceso mediante el que determinados materiales con contenido radiactivo, procedentes de cualquier práctica sujeta a autorización o declaración, pueden ser gestionados sin aplicación del control regulador radiológico. El artículo 76 del Reglamento de Instalaciones Nucleares y Radiactivas (RD 1836/1999) establece el requisito de autorización por la Dirección General de Política Energética y Minas previo informe del CSN, para la eliminación, reciclado o reutilización de sustancias radiactivas o de materiales que contengan sustancias radiactivas procedentes de cualquier instalación.

Establece, asimismo, que la mencionada autorización no será necesaria cuando los materiales contengan o estén contaminados con radionucleidos en concentraciones o

niveles de actividad iguales o inferiores a los establecidos por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, previo informe del CSN.

Corresponde al CSN, por lo tanto, en su cometido de supervisión y control de la gestión de los residuos radiactivos, establecer un sistema de condiciones para que la gestión de los residuos de muy bajo contenido de radiactividad se realice de forma óptima y segura.

Existe un sistema de desclasificación basado en los requisitos de directiva 2013/59 de Euratom, que ha quedado establecido, entre otras normas, en la Orden ETU 1185/2017 para la desclasificación de material residual en instalaciones nucleares y la Orden ECO/1449/2003, de 21 de mayo, sobre gestión de materiales residuales sólidos con contenido radiactivo generados en las instalaciones radiactivas de 2.ª y 3.ª categoría en las que se manipulen o almacenen isótopos radiactivos no encapsulados.

5. GESTIÓN DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS, CONSIDERACIONES GENERALES

Existen tres estrategias básicas para gestionar los residuos radiactivos de forma segura:

Retención en espera de la desintegración. Consiste en retener los residuos durante un período de tiempo corto pero suficiente para que se desintegren los radionucleidos que contienen. Es aplicable a los residuos que contienen radionucleidos con $T_{1/2}$ muy corto y sólo se aplica si no se pueden retener. Los ejemplos más significativos son: el Xe-133 ($T_{1/2} = 3$ d) o I-131 ($T_{1/2} = 8$ d), el Xe-133 es retenido en tanques herméticos y el I-131 en filtros de carbón durante unas semanas que son suficientes para su desintegración.

Dilución y dispersión. Consiste en diluir los radionucleidos en un medio inactivo y dispersarlos directamente en el medio ambiente. Es apropiada para pequeñas cantidades de residuos líquidos y gaseosos con bajas concentraciones de radionucleidos de $T_{1/2}$ relativamente largo. Sólo se pueden descargar después de evaluar su impacto y demostrar que es inferior a los límites establecidos.

Concentración y contención. Consiste en concentrar los radionucleidos e inmovilizarlos en matrices sólidas muy estables (cemento, vidrio, etc.) para almacenarlos en una instalación adecuada de forma indefinida en condiciones seguras. Se aplica a los residuos que contienen radionucleidos de $T_{1/2}$ largo.

Todos los residuos radiactivos que se generen deben ser controlados. La generación de los mismos se hará considerando el principio de minimización que consiste en reducir tan bajo como sea razonablemente posible los residuos radiactivos producidos tanto en términos de cantidad como de actividad. Este concepto engloba la reducción en origen, el reciclado y la optimización de la gestión del residuo.

Los residuos que se generen, deben ser caracterizados, clasificados y segregados en función de sus propiedades físicas, mecánicas, químicas, radiológicas y biológicas.

La figura siguiente, obtenida de la edición de 2022 del glosario del OIEA, presenta de forma ordenada las etapas fundamentales en la gestión de los residuos radiactivos.

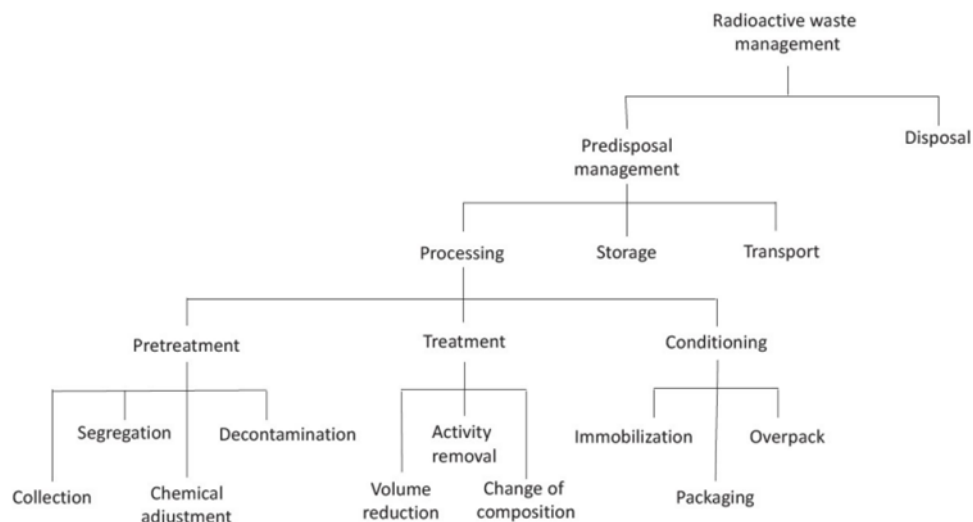


Figura 1 Etapas fundamentales de la gestión de los residuos radiactivos.

El procesado de los residuos radiactivos tiene por objetivo aumentar la seguridad de éstos produciendo una forma de residuo que cumpla con los criterios de aceptación para cada una de las etapas posteriores hasta llegar a su almacenamiento definitivo y se basará en el examen apropiado de las características de los residuos y de las exigencias que imponen las diferentes etapas de su gestión.

A este respecto, el artículo 11 del Real Decreto 102/2014 para la gestión responsable y segura del combustible nuclear gastado y los residuos radiactivos establece la obligación de que los titulares de las instalaciones ya sean nucleares o radiactivas suscriban las especificaciones técnico-administrativas de aceptación de su combustible nuclear gastado y residuos radiactivos, con vista a su recogida y gestión posterior por Enresa.

Mientras que, de acuerdo con los contratos establecidos por Enresa y los titulares de las Centrales Nucleares, son estos últimos los responsables del acondicionamiento de sus residuos radiactivos de acuerdo con los criterios de aceptación del CA El Cabril, en el caso de las instalaciones radiactivas médicas, industriales y de investigación, se realizan contratos de retirada con Enresa en el que se establece que la responsabilidad en el acondicionamiento de los residuos producidos por estos productores recae en Enresa

El tratamiento previo abarca las operaciones previas a su tratamiento incluyendo procesos como la recolección, la segregación, el ajuste químico, troceado o la descontaminación. También puede incluir un período de almacenamiento provisional.

El tratamiento de residuos radiactivos incluye las operaciones cuya finalidad es lograr una mayor seguridad o eficiencia económica modificando las características de los residuos. Los conceptos básicos aplicados durante el tratamiento son: reducción del volumen, extracción de radionucleidos y modificación de la composición.

El acondicionamiento de residuos radiactivos que consiste en las operaciones realizadas con el fin de dar a los residuos una forma adecuada para su manipulación, transporte, almacenamiento y evacuación. Estas actividades pueden comprender la inmovilización de

los residuos radiactivos, su introducción en contenedores y el dotarlos de un embalaje suplementario.

En muchos casos, el tratamiento y el acondicionamiento se llevan a cabo de forma estrechamente relacionada, y la elección del mismo viene condicionada por aspectos como:

- La liberación de material radiactivo a la atmósfera ha de ser mínima teniendo en cuenta factores económicos y sociales.
- Las necesidades de manipulación por los operadores han de ser mínimas, a fin de que las dosis que reciba el personal de operación sean lo más bajas posibles.
- Los residuos han de quedar reducidos en volumen en función de las necesidades y costos de las etapas posteriores al tratamiento.
- Los residuos han de ser transformados en formas estables que faciliten la seguridad de las etapas posteriores al tratamiento, incluido el almacenamiento definitivo.
- La formación de residuos secundarios ha de ser evitada o reducida al máximo razonable posible

6. GESTIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE LOS RESIDUOS RADIATIVOS PRODUCIDOS EN LAS INSTALACIONES NUCLEARES

En relación con los residuos radiactivos sólidos de baja y media actividad, los generadores se corresponden con las instalaciones nucleares, la fábrica de elementos combustibles de Juzbado, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

En función de su naturaleza, la estrategia para la gestión de residuos radiactivos procedentes de estas instalaciones consta de dos formas de actuación antagónicas: la dilución y dispersión de la actividad para los residuos radiactivos líquidos y gaseosos y alguno sólidos de muy baja actividad, los cuales presentan una actividad y un periodo de semidesintegración bajos y la concentración y contención de la actividad que se aplica en general, a residuos radiactivos sólidos y a algunos líquidos de actividad y periodo no despreciable.

En general, antes de aplicar una de estas dos formas de gestión se realiza un tratamiento y acondicionamiento de los residuos radiactivos. Cuando éste se orienta al almacenamiento definitivo lo que se pretende obtener son sólidos estables capaces de evitar la dispersión del material radiactivo al medio ambiente, quedándose los residuos radiactivos inmovilizados o incorporados a una matriz sólida.

A continuación se repasan algunas de las etapas más importantes.

Identificación, caracterización y Segregación de Residuos radiactivos

Durante la primera fase se identifica y cuantifica el residuo generado en términos de volumen o masa, estado, actividad, etc., y se establecen las condiciones finales para su segregación, tratamiento, almacenamiento y su gestión final.

La segregación consiste en agrupar los residuos radiactivos en tipos de materiales cuyos constituyentes puedan ser tratados de la misma manera, es decir, han de ser residuos homogéneos.

Consta de dos fases fundamentalmente:

- Separación de lo que es radiactivo de lo que no lo es.
- Separación de los residuos radiactivos según su naturaleza, tipo de radionucleido y concentración de actividad.

Para esto se han de disponer de sistemas adecuados para la recogida de residuos radiactivos y procedimientos donde se establezcan los criterios a seguir para realizar esta segregación.

La caracterización del residuo se realiza tras la identificación del material como radiactivo y es el paso previo para su segregación en función de su naturaleza y actividad. La caracterización debe contemplar y determinar los siguientes aspectos:

- El tipo de residuo
- Una estimación o medición de su actividad
- Una descripción física del residuo
- El volumen y masa total del residuo
- El contenedor, si lo tiene
- El lugar adecuado para su almacenamiento
- El tipo de evacuación prevista

Para realizar una adecuada segregación y caracterización se ha de tener establecidos procedimientos para cada uno de los procesos, especialmente para la medida de actividad, al ser el proceso más delicado. Para la medida de la actividad se ha de establecer el método de medida en función de las características físico-químicas del residuo y de la actividad esperada. Igualmente el equipo de medida ha de ser adecuado para la naturaleza de la radiación presente y su actividad. Se han de establecer otros procedimientos relacionados con la medida como son la calibración y verificación de los equipos, la medida del fondo, el lugar adecuado para la realización de las mediciones, etc.

Los resultados obtenidos han de quedar registrados como parte del control de todo residuo producido en la instalación.

Tratamiento y acondicionamiento

En una central nuclear hay diversas corrientes radiactivas, tanto líquidas, como gaseosas y sólidas. Los residuos radiactivos de operación necesitan ser tratados previamente para concentrar la actividad presente en las mismas, de forma que se minimice el volumen del residuo. De estos tratamientos se van a obtener residuos radiactivos sólidos, tanto húmedos como secos, que junto con los residuos radiactivos sólidos han de ser acondicionados.

El objetivo final de esta etapa es el acondicionamiento del residuo, es decir, la obtención de un sólido monolítico y estable para su evacuación y almacenamiento definitivo. Para la consecución de este objetivo se dispone de numerosas técnicas de tratamiento.

Residuos radiactivos líquidos

Un aspecto muy importante de cara a aplicar un tratamiento u otro va a ser si se trata de residuos de baja conductividad, limpios, o de alta conductividad, sucios. Esta distinción no se refiere a la concentración de material radiactivo sino a la cantidad global de sólidos

disueltos (radiactivos y no radiactivos), lo que afecta a los métodos de concentración y separación a aplicar.

En una central nuclear tipo PWR proceden principalmente de drenajes de equipos (limpios), drenajes de suelos (sucios), escapes controlados del circuito primario para su purificación y desgasificado (limpios), de la purga del generador de vapor (sucios), de procesos de descontaminación y lavado y de laboratorios (sucios)

En una central nuclear tipo BWR proceden de drenajes de equipos (limpios), drenajes de suelos (sucios), de la regeneración de desmineralizadores del tratamiento de condensado (sucios), de procesos de descontaminación y lavado y de laboratorios (sucios)

El sistema de tratamiento de residuos líquidos ha de disponer en primer lugar de tanques de recolección y almacenamiento. Estos tanques han de tener la capacidad suficiente para albergar los residuos que se prevea que se produzcan en operación normal de mantenimiento y en condiciones accidentales. Además han de estar dotados de las conducciones y conexiones necesarias, de alta integridad, y disponer de sistemas de control de nivel y detección de fugas. Por último han de estar provistos de estructura de soporte, contención y blindaje necesarios.

El tratamiento posterior a aplicar va a depender de factores tales como: la presencia de partículas sólidas, distinguiendo entre residuos de baja conductividad o limpios y de alta conductividad o sucios, el pH y la composición química, el tipo de radionucleidos y el nivel de actividad, y la posibilidad de reciclado.

Los métodos más frecuentes de tratamiento son:

- a) Filtración: indicada para aguas con moderado o alto contenido de materia sólida en suspensión. Se usa para eliminar esa materia antes de que el líquido pase a los desmineralizadores y evaporadores, así como para el tratamiento de líquidos de muy baja actividad como tratamiento previo a la descarga al medio ambiente.
- b) Desmineralización por intercambio iónico: El fundamento básico del intercambio iónico es la interacción entre iones de elementos radiactivos de la disolución y el material utilizado como intercambiador. Los materiales más usados son los basados en resinas sintéticas, polímeros orgánicos de alta masa molecular, las cuales pueden ser cationicas (los iones que se intercambian son positivos) o anionicas (los iones que se intercambian son negativos). Con este método se alcanzan factores de descontaminación (relación entre la actividad inicial y final)

Este tratamiento está indicado para aguas con bajo o moderado contenido en sólidos disueltos, bajo contenido en insolubles y ausencia de contaminantes orgánicos.

Una vez agotada la resina, esta se ha de tratar como un residuo sólido húmedo, dado que contiene gran parte de la actividad disuelta en el residuo líquido.

- c) Evaporación: Se usa para concentrar soluciones contaminadas con alto contenido en sales (sólidos disueltos) y bajo contenido en partículas sólidas (insolubles), alcanzándose factores de descontaminación del orden de 10 ó 5

El vapor producido se lleva a un sistema de condensado, extrayendo del líquido ya purificado. El vapor no condensado pasa al sistema de tratamiento de residuos gaseosos, mientras que el concentrado que queda en el tanque de evaporación se extrae de él y se lleva al sistema de tratamiento de residuos sólidos.

- d) Centrifugación: una centrifuga es un cilindro o campana que gira a gran velocidad alrededor de su eje, separando los sólidos, que quedan en las paredes mientras que el líquido rebosa y pasa a un tanque.
- e) Desgasificado: consiste en el calentamiento de la corriente de residuos radiactivos líquido mientras se borbotea en su seno vapor que posteriormente se extrae y se pasa a un condensador de venteo, donde se condensa permitiendo escapar al gas.
- f) Ósmosis inversa: se utiliza para aguas con elevado contenido en sólidos disueltos y moderado en sólidos en suspensión. Se basa en la retención de partículas en un filtro, que separa dos cavidades, por el que pasa la corriente acuosa aplicando una condiciones tales que el fluido pasa de la cavidad con mayor concentración de materia a la de menor.
- g) Tratamientos químicos como la coagulación o precipitación selectiva: Se usa para la separación selectiva de determinados isótopos principalmente, como cobalto, o cadmio mediante la adición de sustancias químicas que favorezcan estos procesos.

El uso de esta técnica puede ir seguido de filtración para la separación de la parte precipitada, que será considerada y tratada como un residuo sólido húmedo.
- h) Otros métodos ya menos usados pueden ser la absorción, incineración y la decantación.

Como resultado de estas operaciones de purificación se generan líquidos concentrados que se solidifican, en general, con cemento en bidones para su almacenamiento temporal en las centrales nucleares o bien se desecan en plantas especiales para reducir su volumen final.

También se generan residuos radiactivos secundarios como las resinas y los filtros que pasan a ser residuos radiactivos sólidos húmedos.

Residuos radiactivos gaseosos

En una central nuclear tipo BWR proceden principalmente de los eyectores del condensador principal, las fugas de los sellos de turbina, las purgas del edificio del reactor y de la ventilación de edificios potencialmente contaminados.

En una central PWR proceden de las purgas de vapor del del circuito primario y desgasificación, de la expansión del refrigerante al calentarse, de drenajes y fugas del edificio del reactor y de la ventilación de edificios potencialmente contaminados.

Los métodos de tratamiento más corrientes son:

- a) Adsorbentes de carbón activo: Consisten en lechos de carbón activo. Son los mejores para retener productos de fisión gaseosos, sobre todo yodo radiactivo tanto en su forma elemental como orgánica. También valen para la remoción de gases nobles. Estos materiales adsorbentes se colocan junto con filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) y tras los mismos.
- b) Tanques de almacenamiento de retardo: se utilizan cuando hay presentes radionucleidos de vida corta, de forma que se disminuya su actividad por decaimiento. De esta forma se consigue minimizar las descargas de gases nobles.

- c) Filtración: los efluentes radiactivos gaseosos contienen partes en suspensión demasiado finas para ser retenidas en filtros normales, por lo que se han de usar filtros de alta capacidad de retención.

Para alargar la vida de los HEPA se instalan prefiltros normales, en cuanto a su capacidad y eficiencia, y separadores de humedad. El HEPA es el elemento más importante del sistema de extracción, por tanto se coloca allí donde la concentración de partículas es mayor y como medida de prevención en la descarga de la chimenea previo a la emisión de efluentes.

- d) Recombinación: la radiólisis del agua (separación de una molécula de agua en sus componentes, H₂ y O₂) puede dar lugar a una mezcla explosiva para concentraciones de H₂ mayor del 4%. Mediante aparatos recombinadores el 3H se recombina pasando a formar parte de los residuos radiactivos líquidos en forma de agua tritiada .

Los residuos radiactivos secundarios, como los elementos filtrantes y de adsorción pasan a ser residuos radiactivos sólidos y pasan a su acondicionamiento en bidones, que se almacenan hasta su retirada por Enresa. El gas limpio se puede diluir con ventilaciones de edificios limpios.

Los desechos gaseosos una vez tratados son descargados a la atmósfera si su actividad está por debajo de los límites establecidos por las autoridades reguladoras, en nuestro caso el Consejo de Seguridad Nuclear.

Residuos radiactivos sólidos

Como ya hemos visto, estos residuos pueden proceder del tratamiento de residuos y de efluentes líquidos y gaseosos (resinas, filtros, concentrados de evaporador, lodos) o de aquellos procesos cuyo resultado ha sido una contaminación superficial (vestimentas, material, etc.) o de la activación de componentes en zonas de alta irradiación. Los residuos sólidos acuosos se han de desecar como un pretratamiento previo a su tratamiento y acondicionamiento.

Los posibles tratamientos a aplicar van a ser el troceado, el compactado y prensado y la incineración, según sea posible, con el fin de reducir volumen de material radiactivo al máximo o disgregarlo para su mayor facilidad de manejo.

El acondicionamiento del residuo sólido persigue la inmovilización y el confinamiento del material de modo que se garantice su estabilidad a largo plazo, optimizando las propiedades físico-químicas del producto en relación con el medio que ha de contenerlo.

La inmovilización de residuos radiactivos de media y baja actividad se realiza a través de la mezcla del residuo radiactivo con material aglomerante como el cemento, formándose un bloque compacto libre de sustancias acuosas. Esta mezcla se realiza en bidones normalizados que actúan de contenedor.

Los residuos de alta actividad se inmovilizan en matriz sólida, estable, más duradera (recordemos que su almacenamiento se ha de prever para miles de años), principalmente se utilizan vidrios y borosilicatos, o también materiales cerámicos.

Almacenamiento temporal de Residuos radiactivos

El almacenamiento temporal es una etapa intermedia de la gestión en la que se proporciona a los residuos radiactivos el confinamiento, la vigilancia y la protección

durante un periodo de tiempo limitado, cumpliendo con el criterio de la recuperabilidad y el principio de la interdependencia con las posteriores o futuras etapas de la gestión y las interfases entre las distintas organizaciones involucradas.

Las centrales nucleares, según la Ley 25/64 de energía nuclear, han de disponer de un almacén propio para albergar sus propios residuos radiactivos hasta su retirada por Enresa.

Existen actualmente dos tipos de almacenamiento temporal en centrales nucleares: almacenamiento para residuos radiactivos de media y baja actividad y para residuos de alta actividad.

- Almacenes temporales para residuos radiactivos de baja y media actividad: Su objetivo es regular el envío a los almacenamientos definitivos y disminuir su actividad por decaimiento. Igualmente en los emplazamientos definitivos debe de haber instalaciones de almacenamiento temporal donde los residuos radiactivos se reciben, controlan y clasifican para su distribución final.

Estos almacenes deben reunir ciertos requisitos. Han de estar contruidos sobre el nivel freático de las aguas subterráneas y estar protegidos de posibles entradas de agua. Han de estar blindados y ventilados de forma controlada y disponer de una red de drenajes que conduzca posibles líquidos hasta un sumidero controlado y vigilado. Han de disponer de un sistema de vigilancia radiológica integrada por los adecuados monitores de radiación provistos con alarmas. Por último han de disponer de sistemas de protección contra incendios.

- Almacenes temporales para residuos radiactivos de alta actividad: Los residuos de alta actividad, además de problema por su actividad, presentan problemas de generación de calor y hay que evitar situaciones de criticidad en el caso del combustible gastado. Por lo tanto los objetivos de estos almacenes van a ser, conseguir un enfriamiento de los elementos combustibles, mantener condiciones de subcriticidad, vigilar y controlar la integridad del elemento combustible de cara a su posterior recuperación y actuar de blindaje contra la radiación.

Hay dos tipos principales de almacenamiento temporal: almacenamiento en seco, mediante contenedores, y almacenamiento en húmedo, en piscinas de la propia instalación.

Almacenamiento en piscinas:

El combustible gastado que se extrae del reactor se deposita en piscinas diseñadas y contruidas expresamente para su almacenamiento provisional. Es la tecnología más extendida, ya que el agua es un medio muy apropiado para enfriar. Además presenta buenas propiedades como blindaje de la radiación neutrónica y gamma. Por añadidura sus características de transparencia, disponibilidad y coste hacen que sea el medio de almacenamiento temporal por excelencia.

Almacenamiento en seco (contenedores):

Este tipo de almacenamiento se está considerando en la actualidad principalmente por la saturación de las piscinas de combustible. La experiencia actual en este campo es más reducida que la de las piscinas, sin embargo esta tecnología ha sido probada a nivel internacional y resulta ser segura, estable, flexible y progresiva.

Actualmente hay contenedores licenciados de varios tipos y tecnologías, pueden ser metálicos (NAC) o de hormigón, disponer de ventilación forzada o natural para la refrigeración del combustible, pueden estar diseñados con un solo propósito, el de su almacenamiento o ser de doble propósito (para transporte y almacenamiento) e incluso multipropósito (pensado para el almacenamiento definitivo y el almacenamiento temporal intermedio).

7. GESTIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS PRODUCIDOS EN INSTALACIONES RADIATIVAS MÉDICAS, INDUSTRIALES Y DE INVESTIGACIÓN

Se pueden distinguir tres grandes grupos diferentes de instalaciones radiactivas en función del fin para el que los isótopos radiactivos son utilizados: instalaciones sanitarias, industriales y centros de investigación.

a) En las instalaciones médicas y hospitalarias, el uso de isótopos radiactivos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades ha ido creciendo a lo largo de los últimos cincuenta años. Así, elementos radiactivos no encapsulados, normalmente en estado líquido, son utilizados para fines diferentes como son el diagnóstico mediante trazadores (Tc-99, Tl-201, Ga-67, I-131, I-125) que permiten el estudio de órganos como el corazón, glándula tiroides, hígado y glándulas hormonales, o bien para el tratamiento de enfermedades del tiroides (I-131) o de la sangre (P-32), o bien para investigación (H-3 ó C-14).

Estas actividades generan residuos radiactivos sólidos: algodones, guantes de goma, jeringuillas, etc. así como residuos líquidos, fundamentalmente líquidos de centelleo.

En el tratamiento de tumores se emplean fuentes encapsuladas, siendo muy frecuente el uso del Co-60. Estas fuentes, frecuentemente de mucha actividad, han de ser cambiadas debido al decaimiento cuando su actividad disminuya por debajo de un determinado nivel y por tanto, dejan de ser útiles para estos fines. Estas fuentes constituyen un residuo radiactivo que es necesario gestionar.

b) En las aplicaciones de los isótopos radiactivos en los procesos industriales, está especialmente extendido el uso de fuentes encapsuladas. Mediante el uso de este tipo de fuentes –generalmente de baja actividad–, se suelen obtener medidas de nivel, humedad, densidad o espesor en procesos continuos o de difícil acceso. También se utilizan fuentes encapsuladas de mayor actividad en aplicaciones como la gammagrafía de construcciones industriales o en la esterilización industrial.

Al igual que las fuentes encapsuladas utilizadas en medicina, cuando decae su nivel de actividad, deben ser retiradas considerándose residuos radiactivos a gestionar.

c) Los residuos procedentes de centros de investigación nuclear, de reactores de enseñanza e investigación, celdas calientes, metalúrgicas (instalaciones auxiliares de investigación donde se realizan ensayos, manipulaciones, pruebas, etc.) plantas piloto o servicios de descontaminación son de naturaleza física, química y radiactiva muy variable debido a la gran diversidad de isótopos utilizados y la amplia gama de procesos.

Existen básicamente dos vías de gestión:

1.- Evacuación por vía convencional: evacuación directa o evacuación con decaimiento previo

1.1 Evacuación directa.

En la legislación española están claramente definidos los niveles de exención, es decir las actividades de isótopos que quedan fuera del control regulador pero no están definidos los niveles de desclasificación, es decir las actividades por las que se puede salir del control regulador, no obstante, en el artículo 51 el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes se indica que toda evacuación de residuos radiactivos al medio ambiente requerirá autorización administrativa expresa y se efectuará, en las condiciones que dicha autorización se especifiquen.

Para materiales residuales sólidos, los valores se establecerán por las Autoridades Reguladoras bien de forma general o bien de forma específica, según propuestas del Titular de la práctica que los ha originado y con la necesaria justificación de la capacidad de cumplimiento de los mismos. Lo más práctico es utilizar valores de referencia avalados internacionalmente, en lugar de derivar valores propios, que resulta muy poco práctico. Un ejemplo de niveles genéricos de referencia por debajo de los cuales sería posible evacuar convencionalmente residuos sólidos se encuentra en la Tabla V del documento IAEA-TECDOC-1000 "Clearance of materials resulting from the use of radionuclides in medicine, industry and research".

Estos niveles de desclasificación recomendados por OIEA son idénticos a los niveles de exención recomendados por dicho organismo en su publicación International Basic Safety Standards for Radiation Protection and Safety of Radiation Sources (General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3, IAEA, Vienna 2014).

Estos mismos valores han sido incluidos en la Guía del CSN 9.2 "Gestión de materiales residuales sólidos con contenido radiactivo generados en instalaciones radiactivas" que incorpora además las recomendaciones para ayudar a los titulares de estas instalaciones para elaborar los proyectos para la gestión de dichos tipos de materiales residuales en condiciones de seguridad y protección radiológica.

Adicionalmente, en la Orden Ministerial ECO/1449/2003 de 21 de mayo, sobre gestión de materiales residuales sólidos con contenido radiactivo generados en las instalaciones radiactivas de 2ª y 3ª categoría en las que manipulen o almacenen isótopos radiactivos no encapsulados se recoge: "Los materiales residuales sólidos generados en las instalaciones radiactivas, para los que no esté previsto un uso posterior y que presenten contaminación de radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad inferiores o iguales a los establecidos en el Anexo de la presente Orden, no tendrán la consideración de residuos radiactivos y su gestión podrá ser realizada de acuerdo a la normativa que les sea de aplicación"

1.2 Evacuación con decaimiento previo

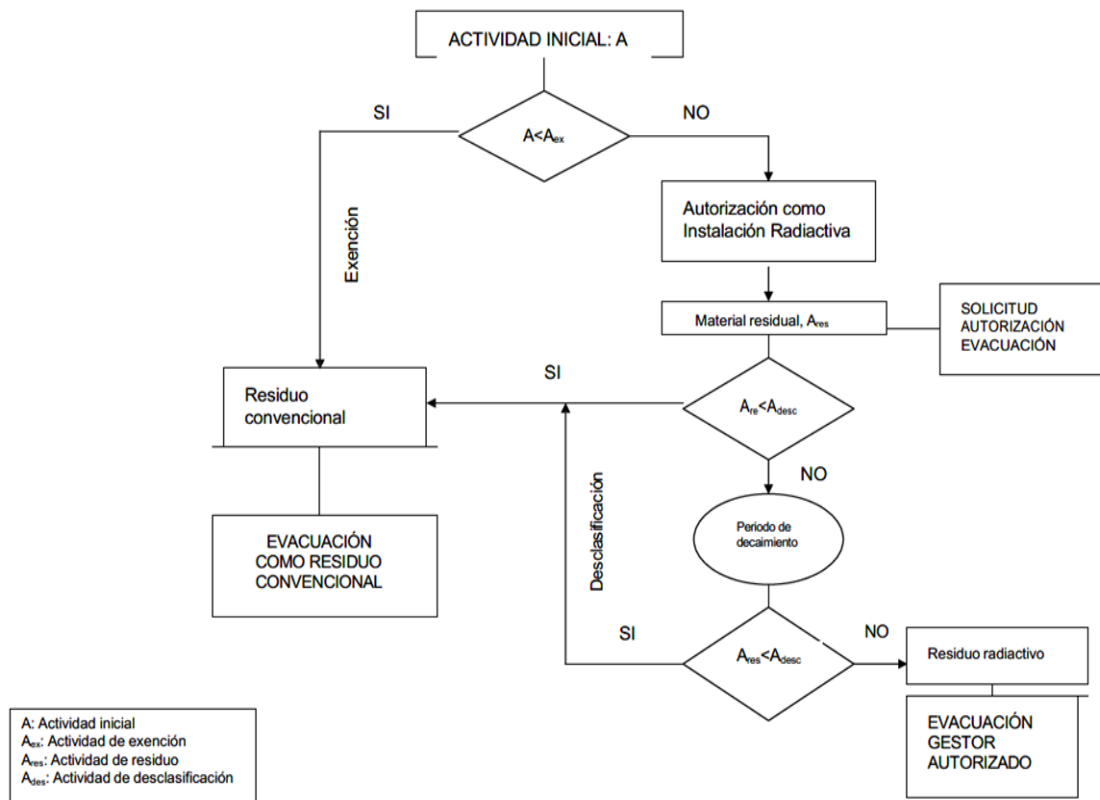
Se establece este método para aquellos residuos radiactivos que no pueden ser gestionados de la forma anterior. En este caso habrá que realizar un estudio de decaimiento para cada uno de los isótopos de tal forma que partiendo de la actividad inicial y teniendo en cuenta el periodo de semidesintegración, se obtenga el tiempo necesario de decaimiento y por lo tanto de almacenamiento en condiciones de seguridad antes de la aplicación de la gestión como residuo convencional.

El procedimiento general para realizar este tipo de gestión consistirá en:

- Identificación y segregación de los isótopos susceptibles de esta gestión en contenedores y señalización de los mismos.
- Cierre, sellado y etiquetado del contenedor una vez completo. Deberá figurar fecha de cierre, radioisótopos presentes y actividad de los mismos. Una vez realizadas estas operaciones se transportarán al almacén de residuos radiactivos de la instalación radiactiva.
- El almacén tendrá el blindaje y las condiciones radiológicas necesarias para garantizar que no se superan los límites de dosis para el público en las áreas adyacentes. Se realizarán las medidas de seguridad adecuadas durante el almacenamiento, como medidas periódicas de tasa de dosis y de contaminación.
- Se dejará decaer el tiempo necesario. Un criterio de seguridad radiológica general que se aplica en estos casos, para residuos de baja actividad y semiperiodo corto, es de un tiempo de almacenamiento de hasta 10 semiperiodos, lo cual reduce la actividad específica por un factor de 1024. Los radionucleidos más utilizados en las instalaciones radiactivas médicas y de investigación son tratados de esta forma.
- En el caso de las fuentes encapsuladas o selladas se aplicarán las recomendaciones internacionales recogidas en la guía de gestión de fuentes encapsuladas en desuso derivada del Código de Conducta del OIEA. Esta guía recomienda el reciclaje, reutilización, almacenamiento temporal o su gestión por entidad autorizada (ENRESA) pero estas fuentes no se pueden desclasificar ni declararlas exentas después de decaimiento.

2.- Evacuación a través de una empresa autorizada

Como se ha comentado anteriormente, los titulares deben establecer un contrato de retirada con ENRESA. Este contrato es un contrato tipo aprobado por el Ministerio de Economía, en el que se establecen las obligaciones de los productores en cuanto a la preparación y documentación de los residuos radiactivos, para que estos puedan ser retirados. Asimismo, se establecen las tarifas que serán facturadas por la retirada de los mismos. ENRESA, por su lado, asume a su vez la responsabilidad civil y nuclear de los residuos radiactivos en el momento en que se produzca la retirada de los mismos



8. TRANSPORTE

El transporte fuera de la instalación generadora hacia otra instalación u otra etapa de la gestión, normalmente, la gestión definitiva o el tratamiento, también es una etapa en la gestión de los residuos radiactivos.

El transporte de materiales radiactivos se ha de realizar de forma segura, considerando tanto condiciones normales como accidentales, y, por supuesto, ha de estar vigilado y controlado.

La principal normativa viene establecida en el Reglamento para el transporte sin riesgos de material radiactivo, establecida por el OIEA. Este establece la filosofía que ha de regir estos transportes. En primer lugar deja bien claro que el material radiactivo es una mercancía peligrosa más, y como tal hay que tratarla. Establece la seguridad del transporte en el bulto acondicionado y asigna la responsabilidad del transporte al expedidor.

9. ALMACENAMIENTO DEFINITIVO

El almacenamiento definitivo es la etapa final del sistema de gestión de residuos radiactivos. Se trata fundamentalmente de su disposición con una garantía razonable de seguridad, sin intenciones de recuperarlos. Esta seguridad se logra fundamentalmente mediante su concentración, su inmovilización y aislamiento en una instalación diseñada para tal fin.

El aislamiento se consigue mediante un sistema de barreras múltiples (tecnológicas y geológicas) que proporcionen una contención absoluta durante un período de tiempo determinado. Durante el período en que el sistema de barreras sirve de contención a los residuos radiactivos, se desintegran los radionucleidos en ellos contenidos evitando su emisión al medio ambiente.

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 radiactivo.

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 situarán en el seno de un medio geológico, cuya misión es detener y retardar el acceso de los mismos a la biosfera y al ser humano.

El 7º PGRR establece un ciclo abierto para la gestión del combustible gastado. La estrategia de gestión planteada es su almacenamiento temporal previo al diseño y puesta en marcha de un almacenamiento geológico profundo. Este almacenamiento temporal se realiza de dos formas diferentes en vía húmeda, en las piscinas de las centrales nucleares, o bien en vía seca, en contenedores de combustible gastado situados en almacenes temporales individualizados ubicados en el emplazamiento de las propias centrales nucleares.

10. BIBLIOGRAFÍA.

OIEA. SF-1, Principios fundamentales de seguridad

OIEA Requisitos de seguridad Generales, Parte 5, GSR Part 5, Gestión previa a la almacenamiento definitivo de desechos radiactivos

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 Normas Basicas Internacionales de Seguridad. GSR parte 3, Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación.

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.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre la seguridad en la gestión de residuos radiactivos". Primer y Segundo informe nacional. España. 2003, 2006.

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.