

TEMA 5. Contaminación radiactiva



1. Características generales

Se denomina **contaminación radiactiva** a la presencia no deseada de sustancias radiactivas en el entorno. Ésta contaminación puede ser debida a radioisótopos naturales o artificiales. La primera de ellas se da cuando se trata de aquellos isótopos radiactivos que existen en la corteza terrestre desde la formación de la Tierra, o de los que se generan continuamente en la atmósfera por la acción de los rayos cósmicos. Por tanto existe un **fondo de radiación**. Sin embargo, estos radioisótopos naturales pueden encontrarse en concentraciones más elevadas que las que pueden encontrarse en la naturaleza (dentro de la variabilidad existente), debido a la propia actividad humana (como la minería y las centrales nucleares para generar energía), pudiéndose hablar entonces de contaminación radiactiva.

En el segundo caso, el de los radioisótopos artificiales, los radioisótopos no existen de forma natural en la corteza terrestre, sino que han sido generados por el hombre en reactores nucleares específicos o en pruebas nucleares. En este caso, la definición de contaminación es menos difusa ya que cualquier cantidad presente en la Tierra puede considerarse contaminación. Por ello se utilizan definiciones basadas en las capacidades técnicas de medida de estos radioisótopos, de posibles acciones de limpieza o de peligrosidad (hacia el hombre o la biota).

¿Por qué son tan peligrosos los radioisótopos?

Los radioisótopos son elementos químicos con un núcleo inestable que se desintegran de manera espontánea hasta alcanzar una situación de núcleo estable. Dicha desintegración

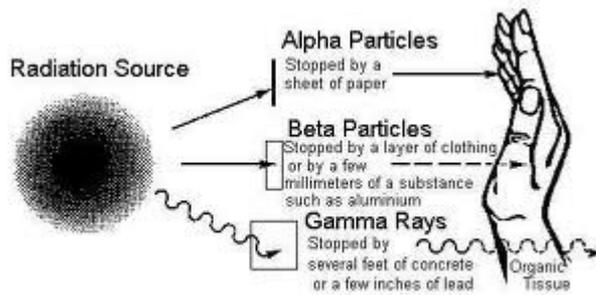
sigue un curso definido a través de la generación de un conjunto de radioisótopos denominado serie, secuencia o cadena de desintegración, ya que los radioisótopos intermedios para cada radionúclido que se desintegra son casi siempre iguales al seguir un camino de mínima energía.

Dicha desintegración produce radiaciones de alta energía que rompen literalmente los tejidos de los seres vivos cuando inciden directamente sobre ellos. En particular, el ADN, pudiendo producir daños irreversibles en función de la dosis recibida. Cuando esas células se dañan lo suficiente como para que tengan que intervenir los mecanismos de reparación, se pueden generar errores en la replicación del material genético inducidos por la propia radiación, pudiendo crear tumores (carácter mutagénico de las radiaciones). Las radiaciones emitidas son de tres tipos, principalmente:

a) alfa: son núcleos de helio, ${}^4\text{He}^{2+}$, emitidos a gran velocidad. Una contaminación exterior es poco probable que produzca daño en el ser humano debido a que su capacidad de penetración es pequeña. Así, en la atmósfera pierden rápidamente su energía cinética, porque interactúan fuertemente con otras moléculas debido a su gran masa y carga eléctrica. En general no pueden atravesar una hoja de papel, y son totalmente detenidas por la propia piel. Diferente situación es si el material radiactivo ha sido ingerido, ya que en ese caso las partículas alfa actúan localmente como proyectiles contra los tejidos causando un gran daño fisiológico. Un isótopo emisor alfa es el plutonio-238.

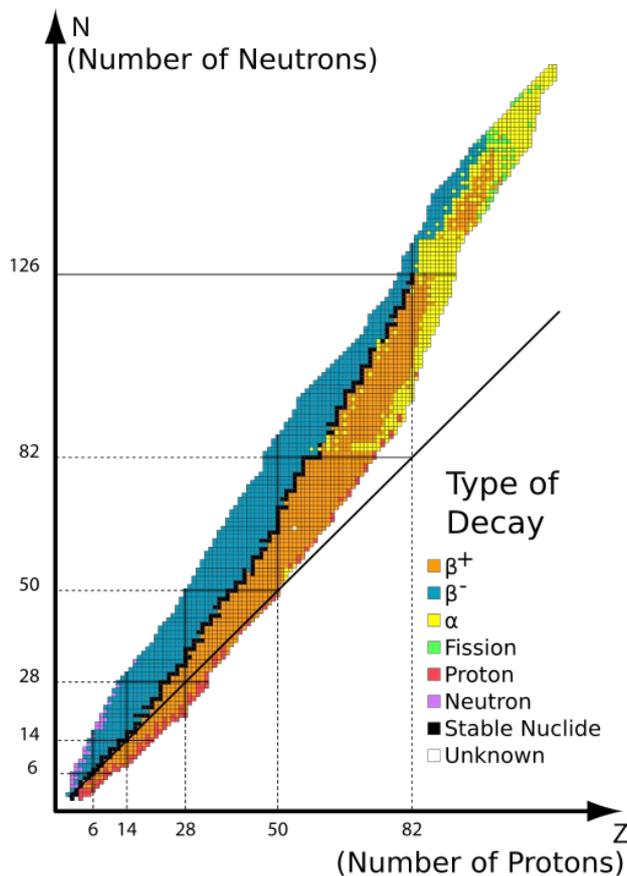
b) beta: son electrones, e^- , y positrones, e^+ , de gran energía debido a la desintegración de neutrones y protones, respectivamente, en el núcleo. Debido a su pequeñísima masa, su poder de penetración es muy superior por lo que sí existe riesgo de una posible contaminación exterior si el material radiactivo está fijado a la ropa. Esta radiación es detenida por una lámina de aluminio o varios metros de aire y puede llegar a penetrar los tejidos hasta unos mm, por lo que una contaminación interna puede provocar daños en el organismo. Un radioisótopo emisor beta puro es el estroncio-90. Un tercer tipo de desintegración beta lo constituye la captura electrónica que tiene lugar en núcleos con exceso de protones, que se interconvierten en neutrones.

c) gamma: γ , es radiación electromagnética de muy alta energía ya que proviene del núcleo atómico, y es emitida cuando el núcleo excitado pasa a un estado de menor energía. Su poder de penetración es tan grande que atraviesan literalmente el cuerpo humano, rompiendo las moléculas a su paso, sean proteínas, paredes celulares, ADN, etc. Son estas radiaciones las más peligrosas en caso de contaminación radiactiva. Normalmente son detenidas por 1 m de hormigón o por varios centímetros de plomo. Emisores gamma son, por ejemplo, el cobalto-60 y el cesio-137.

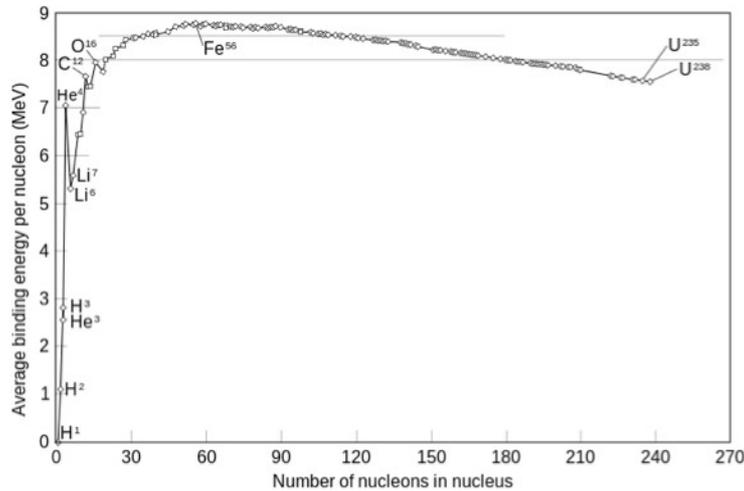


No obstante, pueden también emitirse otras partículas, como neutrones, protones, neutrinos y antineutrinos, en ocasiones acompañando procesos de interconversión o captación de nucleones. Por ejemplo, un neutrón puede convertirse en un protón emitiendo un electrón y un neutrino. Pero también pueden emitirse otras radiaciones, como rayos-X, menos energéticas que las gamma al provenir de la corteza electrónica.

En general son radiactivas las sustancias que no presentan un balance correcto entre protones o neutrones, tal como muestra el siguiente gráfico (diagrama de Segré). Cuando el número de neutrones es excesivo o demasiado pequeño respecto al número de protones, se hace más difícil que la fuerza nuclear fuerte debida al efecto del intercambio de piones pueda mantenerlos unidos. Eventualmente, el desequilibrio se corrige mediante la liberación del exceso de neutrones o protones, en forma de partículas α y β , y de radiación gamma.



El núcleo más estable (aquel que presenta la mayor relación entre la energía nuclear y el número de partículas del núcleo) es el del ^{56}Fe (ver gráfica siguiente). El resto de núcleos son menos estables. Precisamente este es el principio en el que se basa la desintegración espontánea de núcleos muy pesados, y los procesos de fisión nuclear de átomos ligeros que tienen lugar en las estrellas.



Existen 4 cadenas de desintegración naturales diferentes: la del torio-232 (familia del torio), la del neptunio-237 (familia del neptunio), la del uranio-238 (conocida como la familia del radio), la del uranio-235 (conocida como la familia del actinio); de estas, en la actualidad, solo tienen lugar 3, ya que la del neptunio-237 ya ha desaparecido al presentar períodos de semidesintegración mucho menores que la edad de la Tierra. Estas cadenas se denominan, respectivamente, $4n$, $4n + 1$, $4n + 2$, y $4n + 3$, donde n es el número másico, de tal forma que se puede coger este y restarle el número que suma en las anteriores expresiones y dividirlo por cuatro para dar un número entero. De esta forma se puede identificar qué isótopos pertenecen a cada una de las cadenas. Por ejemplo, supongamos que alguien nos habla del radón-219, ¿a qué serie de desintegración pertenece?

$$4n \rightarrow 219 / 4 = 54,75$$

$$4n + 1 \rightarrow (219 - 1) / 4 = 54,5$$

$$4n + 2 \rightarrow (219 - 2) / 4 = 54,25$$

$$4n + 3 \rightarrow (219 - 3) / 4 = 54$$

Por tanto, el radón-219 pertenece a la familia del actinio ($4n + 3$) ya que es el que da un número entero. De hecho, al ver estos resultados, vemos que van disminuyendo en 0,25 unidades al pasar de una serie a otra por lo que solo dividiendo entre 4 podemos saber inmediatamente la serie a la que pertenece sin probarlas todas (si al dividir por 4 nos diera un número con un cinco como decimal, ya sabríamos que pertenece a la serie $4n + 2$, ya que tendríamos que bajar dos veces 0,25 para que nos diera un número entero).

Período de semidesintegración

La desintegración de un núcleo radiactivo es un proceso espontáneo y es imposible predecir cuándo un átomo se transmutará. Ahora bien, cuando hay una gran cantidad de átomos radiactivos, se puede demostrar que la cantidad de núcleos iniciales disminuye con el tiempo de tal forma que, estadísticamente, el número de átomos que se desintegran en un tiempo dado es directamente proporcional al número de átomos presentes en la muestra, según la ecuación siguiente:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

con N_0 el número de núcleos iniciales y N los que quedan sin desintegrar.

La constante de proporcionalidad, λ , es conocida como la constante de desintegración. Se llama período de semidesintegración, $t_{1/2}$, al tiempo para el cual el número de núcleos iniciales se reduce a la mitad. Cada sustancia radiactiva tiene un período de semidesintegración característico, y puede deducirse de la expresión anterior que $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$. Se emplea esta medida debido a la aleatoriedad del proceso de desintegración. Otro concepto diferente, aunque relacionado, es la vida media de un radioisótopo, τ , que no es más que la inversa de la constante de desintegración:

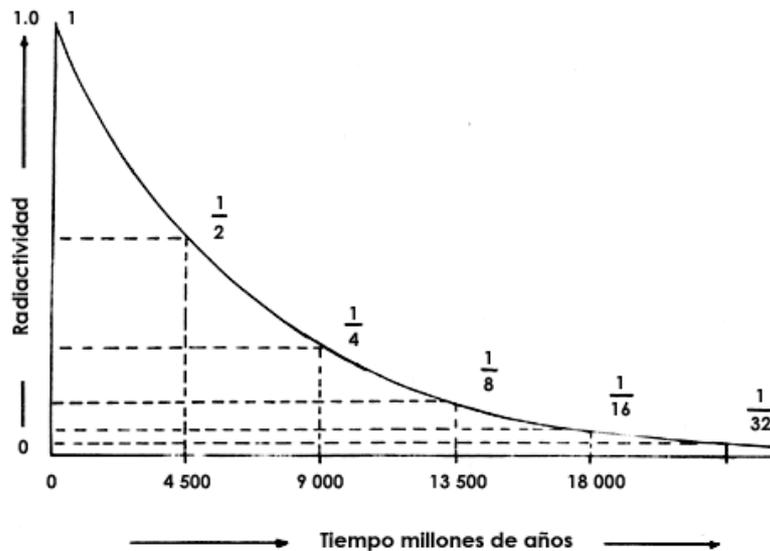
$$\tau = 1 / \lambda, \text{ de donde } t_{1/2} = 0,693 \tau$$

Dichos períodos de semidesintegración van desde segundos a millones de años, por lo que la radiactividad inicial terrestre, aunque menor ahora, seguirá manteniendo su actividad mucho tiempo más con el agravante del uso que el hombre hace de estos materiales concentrándolos y expandiéndolos por la superficie terrestre, materiales que no nos afectarían en absoluto si permaneciesen en sus depósitos minerales originales.

Algunos períodos de semidesintegración de isótopos naturales:

| | | | |
|------------|---------------------------|--------------|--------------|
| Rubidio 87 | $4,88 \cdot 10^{10}$ años | Bismuto 207 | 31,55 años |
| Uranio 238 | $4,468 \cdot 10^9$ años | Cesio 137 | 30,07 años |
| Potasio 40 | $1,28 \cdot 10^9$ años | Estroncio 90 | 28,90 años |
| Uranio 235 | $7,038 \cdot 10^8$ años | Cobalto 60 | 5,271 años |
| Calcio 41 | $1,03 \cdot 10^5$ años | Cadmio 109 | 462,6 días |
| Carbono 14 | 5760 años | Yodo 131 | 8,02 días |
| Radio 226 | 1602 años | Radón 222 | 3,82 días |
| | | Oxígeno 15 | 122 segundos |

Nótese que cuando pasa un período de semidesintegración (al que podemos llamar T), se ha desintegrado el 50% de los átomos iniciales. Para el resto, se sigue cumpliendo lo mismo, por lo que pasado un tiempo $2T$, solo quedarán sin desintegrar el 25%, y así sucesivamente. Se puede entonces afirmar que cada período T transcurrido, se reduce la radiactividad de un radionúclido a la mitad. Esto puede verse en la curva de desintegración siguiente correspondiente al uranio-238, para el que la radiación se reduce a la mitad cada 4500 millones de años:



Ejercicio: Si tenemos un miligramo de carbono-14, ¿cuántos miligramos de dicho radioisótopo tendremos después de 10000 años?

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

$$N_0? N_0 = 10^{-3} \text{ g} \times 6,023 \cdot 10^{23} \text{ at at}\cdot\text{gr}^{-1} / 14 \text{ g at}\cdot\text{gr}^{-1} = 4,3 \cdot 10^{19} \text{ at}$$

$$\lambda? \lambda = \ln 2 / t_{1/2} = 0,693 / 5760 \text{ años} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ años}^{-1}$$

$$t? t = 10000 \text{ años}$$

Sustituyendo, se tiene que: $N = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ at}$

Reconvirtiendo en masa: $\text{at gr} = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ at} / 6,023 \cdot 10^{23} \text{ at at}\cdot\text{gr}^{-1} = 2,16 \cdot 10^{-5} \text{ at gr}$

De donde: $\text{masa} = 2,16 \cdot 10^{-5} \text{ at gr} \times 14 \text{ g at}\cdot\text{gr}^{-1} = 3,0 \cdot 10^{-4} \text{ g, o sea } 0,3 \text{ mg.}$

Efectivamente, se comprueba que después de un período de casi 2T para el carbono-14, queda aún sin desintegrar aproximadamente el 25% (0,25 mg) de la cantidad inicial.

Medida de la actividad

La actividad de una sustancia radiactiva se determina por el valor del número de transformaciones o desintegraciones que sufre por unidad de tiempo. La unidad establecida en el Sistema Internacional es el Becquerelio (Bq). 1 Bq = 1 transformación por segundo.

Otra unidad, más antigua pero por motivos prácticos muchas veces más usada, ya que el Bq es una cantidad demasiado pequeña, es el Curio (Ci), definida inicialmente como la actividad de un gramo de ^{226}Ra , hoy se define como exactamente $3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo, es decir, $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

El Sievert (Sv), por otro lado, equivale a un julio de energía recibida por kilogramo de materia viva (J kg^{-1}). Esta unidad ofrece un valor numérico con el que se pueden cuantificar los efectos estocásticos producidos por las radiaciones ionizantes.

Síntomas en los humanos a causa de la radiación acumulada durante un mismo día

0 – 0,25 Sv: Ninguno

0,25 – 1 Sv: Algunas personas sienten náuseas y pérdida de apetito, y pueden sufrir daños en la médula ósea, ganglios linfáticos o en el bazo.

1 – 3 Sv: náuseas entre leves y agudas, pérdida de apetito, infección, pérdida de médula ósea más severa, así como daños en ganglios linfáticos y bazo, con recuperación solo probable.

3 – 6 Sv: náusea severa, pérdida de apetito, hemorragias, infección, diarrea, descamación, esterilidad, y muerte si no se trata.

6 – 10 Sv: Mismos síntomas anteriores con más deterioro del sistema nervioso central. Muerte probable.

> 10 Sv: parálisis y muerte.

Síntomas en humanos por radiación acumulada durante un año en milisieverts

2,5 mSv: Radiación media anual global.

5,5 – 10,2 mSv: Valores naturales medios en Guarapari (Brasil) y en Ramsar (Irán). Sin efectos nocivos.

6,9 mSv: Escáner de tomografía computarizada (CT).

50 – 250 mSv: Límite para trabajadores de prevención y emergencia, respectivamente.

En la naturaleza no existe ningún material que tenga radiactividad cero. Nosotros mismos somos radioactivos. Además, no sólo eso, sino que el mundo entero está constantemente bombardeado por rayos cósmicos, que generan carbono-14 que se incorpora a los organismos vivos (incluidos los humanos). Otro radioisótopo que se encuentra en cualquier material, incluidos los seres vivos es el ⁴⁰K. Estas radiaciones provenientes de elementos radiactivos han convivido con el ser humano a lo largo de toda su existencia, por lo que se presupone que en los niveles naturales (que pueden llegar a provocar en las personas que viven en ciertos ambientes niveles superiores a los 10 mSv al año), no son dañinos. De hecho, se ha postulado que los mecanismos de reparación genética que poseen nuestras células pudieron evolucionar gracias a las radiaciones que nos envuelven. Sin embargo, hoy en día, aplicando las normas internacionales de protección radiológica, se aconseja reducir estas radiaciones naturales hasta niveles considerados razonablemente bajos (< 10 mSv / año).

Contaminación radiactiva

Cuando se habla de contaminación radiactiva, en general se tratan varios aspectos:

- a) La contaminación de las personas. Esta puede ser interna cuando han ingerido, inyectado o respirado algún radioisótopo, o externa cuando se ha depositado el material radiactivo en su piel.
- b) La contaminación de alimentos. Del mismo modo puede haberse incorporado al interior de los mismos o estar en su parte exterior.
- c) La contaminación de suelos. En este caso la contaminación puede ser solo superficial o haber penetrado en profundidad.
- d) La contaminación del agua de bebida. Aquí la contaminación aparecerá como radioisótopos disueltos en la misma.

La contaminación radiactiva de las personas puede producirse de forma externa o interna. En la externa, pueden contaminarse la ropa o la piel de forma que cierta cantidad de material con contenido radiactivo se adhiera a ellos. De forma interna se puede producir por la ingestión, absorción, inhalación, o inyección de sustancias radiactivas.

Cuando existe material radiactivo en forma gaseosa, de aerosol, líquida o sólida (esta última en forma de polvo), parte puede impregnar las ropas o la piel de las personas

que entren en contacto con este material. También puede ser ingerido, ya porque los alimentos o el agua estén contaminados, ya de forma accidental al llevarse las manos contaminadas a la boca, o inhalado al entrar en un ambiente donde existe polvo contaminado en suspensión, aerosoles o gases con contenido radiactivo.

En el primero de los casos la contaminación permanece en el exterior de la persona, con lo que dosis recibida procede de las radiaciones emitidas que depositan parte o toda su energía en el organismo. En el segundo de los casos el material entra al organismo, y durante su recorrido hasta que es excretado (por el sudor, la orina o las heces) deposita a su vez la energía emitida por esas radiaciones en los órganos por los que se transfiere. Estas contaminaciones pueden darse en todas aquellas prácticas en las que se manejan materiales radiactivos, hablándose de contaminación, principalmente, cuando esta se produce de forma accidental. Sin embargo, mientras que una contaminación exterior es fácilmente controlable, la contaminación interior puede resultar fatal. Es por ello, que se hace necesario el uso de equipos de protección adecuados para evitar tocar, o inhalar cualquier partícula contaminada, impermeabilizando así al operario del exterior contaminado. De esta forma se suprimen la totalidad de las radiaciones alfa y beta, igualmente muy perniciosas si resultan incorporadas al organismo.

En el caso de accidentes radiactivos o nucleares, o de ataques terroristas con material radiactivo (como por ejemplo con una bomba sucia), pueden producirse contaminaciones de las personas, tanto de forma interna como externa. Posibles radioisótopos que pueden utilizarse con fines no pacíficos son: cobalto-60, selenio-75, estroncio-90, cesio-137, iterbio-169, tulio-170, iridio-192, polonio-210, radio-226, plutonio-238, plutonio-239, americio-241, curio-244 y californio-252.

El cuerpo humano puede incorporar radioelementos de varias maneras:

a) Por la respiración: cuando los átomos que componen el gas radón se desintegran mientras están en los pulmones, sus productos de desintegración se fijan en otras partículas más pesadas que a su vez se pueden fijar en los pulmones, y continúan su cadena radiactiva y sus emisiones en el interior del organismo.

b) Por la alimentación: Cuando se contamina un suelo, las plantas, y los animales que comen estas plantas, pueden a su vez contaminarse. Ciertos organismos son particularmente radioacumulantes, como algunos tipos de setas o los mejillones. También hay órganos que son más radiosensibles que otros, y también los distintos radioisótopos se fijan mejor en unos o en otros. Por ejemplo, la tiroides fija el yodo (radiactivo o estable), y por este motivo cuando se producen emisiones importantes de yodo radiactivo (como en caso de accidente grave en una central nuclear), una medida para mitigar los daños que puede producir consiste en la distribución de pastillas de yodo estable a las personas que pudieran verse afectadas de forma que la tiroides quede saturada con este yodo y se evite la incorporación de yodo radiactivo.

Niveles de radiación muy elevados, tanto externa como internamente, pueden llegar a causar la muerte. Estos niveles pueden alcanzarse en un accidente nuclear muy grave o por la contaminación producida en la explosión de armas nucleares, donde se involucran grandes cantidades de material radiactivo.

Para evitar las contaminaciones en situación normal en aquellas actividades que conllevan el manejo de material radiactivo y que puede suponer un riesgo a alguna persona, se suelen emplear varias barreras (todas empleadas en las actividades con otro tipo de material peligroso):

a) Información de los riesgos a las personas que llevan a cabo la actividad: forma de

manejar el material y de evitar las contaminaciones.

b) Uso de equipos de protección individual que sean adecuados a la posible contaminación. Así, en unas prácticas puede ser suficiente el uso de guantes de algodón y mascarilla de aerosoles, mientras que en casos extremos pueden necesitarse equipos autónomos de respiración, doble mono, calzas, guantes de algodón, guantes de plástico, etc.

c) Uso de símbolos y barreras físicas, tales como puertas cerradas, cadenas, cordones, alarmas o luces, que indican la presencia de material radiactivo.

d) Uso de personal de vigilancia que evite el acceso a aquellas personas no autorizadas a las zonas donde puede producirse la contaminación.

e) Medidas sobre los materiales que pueden producir contaminación. Esto es especialmente importante en las llamadas *fuentes selladas*, donde el material radiactivo puede fugarse al exterior si se produce una ruptura del sello, por lo que se realizan periódicamente controles de contaminación.

En los casos accidentales no solo debe protegerse el personal de emergencias, sino también a las personas que puedan verse afectadas. En estos casos el personal sanitario, de emergencias, la policía u otros deben actuar para disminuir o evitar la contaminación, además de participar en las tareas de descontaminación. En estos casos las posibles medidas a tomar son las siguientes:

a) Información a las personas susceptibles de verse afectadas por la contaminación.

b) Confinamiento de las personas que se encuentren en una zona afectada.

c) Evacuación de las personas que se encuentren en una zona donde la contaminación pueda ser importante.

d) Evitar el acceso de personas a las zonas contaminadas, mediante personal de vigilancia, barreras físicas o señales de advertencia.

e) Descontaminación de las zonas hasta niveles tolerables. Esto no significa alcanzar un nivel nulo de contaminación, que en ocasiones es irrealizable, sino alcanzar niveles por debajo de los cuales el riesgo de daño a las personas es despreciable.

f) Descontaminación de las personas que se hayan contaminado.

g) Tratamientos mediante medicamentos que eviten la absorción del material radiactivo (son muy conocidos los tratamientos mediante cápsulas de yodo estable que se administran de forma previa a una posible contaminación interna mediante yodo radiactivo), que produzcan una eliminación más rápida del radioisótopo ya incorporado al organismo (por ejemplo con productos quelantes) o que reduzcan el daño que puede producir al organismo.

En los casos extremos, en los que los accidentes o los ataques terroristas conlleven la contaminación de grandes extensiones de territorios, las medidas además pueden incluir:

a) Tratamientos de descontaminación de los suelos o de reducción de la dosis. Esto puede realizarse mediante la retirada de la capa exterior, mediante la dilución con capas más profundas llevando a cabo un arado o añadiendo capas de terreno no contaminado sobre las superficies contaminadas.

b) Tratamientos de descontaminación de los alimentos, mediante su lavado.

c) Prohibición del consumo de alimentos o bebida con contaminaciones muy elevadas,

que podrían producir daños a las personas.

d) Evacuación permanente de las zonas contaminadas.

Cuando se realizan tratamientos médicos (de diagnóstico o de medicina nuclear) que conllevan la incorporación de material radiactivo al organismo no suele hablarse de contaminación, si bien su comportamiento es idéntico. Así por ejemplo, la inyección de sustancias radiactivas se practica con fines de diagnóstico o terapéuticos. Los pacientes que se someten a este tipo de tratamientos son confinados temporalmente, en ocasiones evitándose incluso las visitas de familiares, hasta que su organismo, o la propia desintegración del elemento, elimina la contaminación hasta niveles tolerables. Las excreciones de estos pacientes son recogidas en los hospitales y tratadas como residuos radiactivos cuando es necesario.

La inhalación de gas radón se produce continuamente en cualquier lugar de la Tierra. Sin embargo, en algunas ocasiones los niveles pueden ser muy superiores a los *normales*. Esto suele suceder en zonas donde los suelos poseen niveles elevados de radiactividad natural (principalmente uranio), como puede ser en la zona noroeste de la península ibérica, en el interior de sótanos poco ventilados o en la minería, ya que en estas ocasiones la acumulación de este gas puede ser superior a la encontrada en la atmósfera. En estos casos tampoco suele hablarse de contaminación.

Procedencia de la contaminación

Las radiaciones pueden tener varios orígenes: natural como el radón o artificial, como el plutonio.

En el caso de radioisótopos naturales sobre los que la acción del hombre no ha incrementado la exposición o la probabilidad de la misma a las personas o a los animales, no se habla de contaminación, sino que dicho término se reserva para indicar la presencia indeseada de radioisótopos de procedencia artificial. En este último caso sus principales orígenes son:

a) Médica: en Medicina Nuclear y Radioterapia se generan residuos contaminados (metales de las jeringas irradiadas, material de laboratorio, excretas de pacientes tratados, aguas residuales, etc.)

b) Industrial: por la producción de energía nuclear: estas centrales emiten a la atmósfera sustancias radiactivas, limitadas legalmente para estar por debajo de los límites legales. Igualmente, los residuos radiactivos pueden ser fuentes de contaminación.

c) Otras industrias: las sustancias radiactivas tienen un sinnúmero de aplicaciones en muchos campos, lo que conlleva una cierta generación de residuos radiactivos en diferentes industrias, que cumplen las mismas restricciones que los residuos generados en medicina o en la producción de energía nuclear de igual nivel. Esto sucede, por ejemplo, en la minería con el radón o en ciertas industrias que generan materiales en los que se ha aumentado la concentración en radioisótopos naturales (que se han denominado TENORM, TNORM o simplemente NORM).

d) Militar: Debido a los ensayos, a cielo descubierto o subterráneos, de las bombas atómicas, a su fabricación o a la investigación asociada. Mencionar el caso de la munición que utiliza uranio empobrecido, ya que, aunque se ha demostrado que el riesgo radiactivo es despreciable (el uranio empobrecido es menos radiactivo que el natural), suele asociarse este isótopo natural ("uranio") a la radiactividad. Las pruebas nucleares más peligrosas son las que se realizan en la atmósfera ya que hacen que la fuerza producida

por la explosión disperse el material radiactivo a lo largo de kilómetros. Después, la acción del viento y las lluvias son capaces de arrastrar las partículas radiactivas a lugares remotos afectando al agua y al suelo, al contaminar ríos, lagos, océanos suelo, cultivos A este tipo de contaminación se le denomina contaminación radiactiva indirecta y afecta a los diferentes niveles tróficos por la alimentación pudiendo, ocasionalmente, dar lugar a mutaciones genéticas impredecibles, aunque esto último es completamente probabilístico; de hecho, la leche es uno de los principales medios de contaminación por estroncio-90 en humanos, especialmente en los niños.

e) Accidental: la contaminación radiactiva artificial puede ser resultado de una pérdida del control accidental sobre los materiales radiactivos durante la producción o el uso de radioisótopos. Por ejemplo, si un radioisótopo utilizado en imágenes médicas se derrama accidentalmente, el material puede dispersarse por las personas que lo pisen o puede ocurrir que se expongan a él demasiado tiempo. También cuando ocurren grandes accidentes nucleares, en los que se pueden dispersar elementos radiactivos en la atmósfera, el suelo y las masas acuáticas (ríos, mares, capa freática, etc.).

El confinamiento (o sellado) es la forma de evitar que el material radiactivo contamine. El material radiactivo que se encuentra en envases especiales sellados no es contaminación ni puede contaminar a menos que se rompa su sello. En los casos en los que el material radiactivo no pueda ser confinado, se puede diluir hasta concentraciones inocuas.

La descontaminación de la contaminación externa es frecuentemente tan sencilla como eliminar las ropas contaminadas y limpiar la piel contaminada. La descontaminación interna puede ser mucho más difícil, dependiendo de los isótopos radiactivos de que se trate.

Dos de los contaminantes más perjudiciales para el bienestar de los seres vivos son el uranio enriquecido y el plutonio.

El uranio enriquecido se origina en instalaciones médicas y de investigación, en reactores nucleares, en la munición blindada, en submarinos y en satélites artificiales. La exposición a este tóxico provoca enfermedades en el riñón, en el cerebro o en el hígado. El plutonio no es natural y se origina únicamente en los reactores de fisión, por lo que cualquier presencia de plutonio en el medio ambiente es completamente debida a la actividad humana. Es una sustancia muy tóxica para el hombre y el medioambiente porque permanece contaminándolo decenas de miles de años.

Existen otros contaminantes radiactivos con graves consecuencias para el hombre, las plantas y los animales. El yodo-131 (subproducto de la fisión nuclear) afecta inmediatamente y deja mutaciones en los genes, el estroncio-90 (formado en explosiones nucleares) se acumula en los huesos, sustituyendo al calcio, un mínimo de 30 años, y el cesio-137 (formado igualmente en procesos de fisión nuclear), tremendamente tóxico, se deposita en los músculos emulando al potasio provocando todo tipo de cánceres.

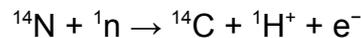
Carbono-14

Existen tres isótopos naturales del carbono: el ^{12}C (98,89%), el ^{13}C (1,11%), ambos estables, y el ^{14}C , que es radiactivo ($1 \cdot 10^{-10}\%$).

Los seres vivos somos radiactivos principalmente debido al carbono-14. Su período de semidesintegración (5760 años) indica que la radiactividad de carbono-14 originario en la Tierra debería de haber desaparecido hace millones de años. Y así es. Lo que sucede

es que es continuamente renovado al ser producido por los rayos cósmicos.

En efecto, los rayos cósmicos están formados en un 90% por protones. Cuando estos interactúan con las moléculas de la atmósfera (principalmente nitrógeno y oxígeno) generan, entre otras partículas, neutrones, los cuales chocan a su vez con átomos de nitrógeno. La entrada de un neutrón en el núcleo del átomo de nitrógeno provoca la salida de un protón y un electrón, originando así un carbono con un núcleo inestable formado por seis protones y ocho neutrones.



El carbono-14 formado es un isótopo inestable que poco a poco va transmutándose nuevamente en nitrógeno-14 estable al convertirse un neutrón en un protón, emitiendo un electrón y un neutrino, desapareciendo así según la reacción:



Rápidamente los átomos de ^{14}C así formados se oxidan a CO_2 radiactivo y se difunden y se mezclan por toda la atmósfera con el resto del CO_2 , del cual gran parte es absorbido por los océanos, y otra por las plantas durante la fotosíntesis. De esta forma, los tejidos de las plantas vivas y los de los animales vivos que se alimentan de esas plantas continuamente están intercambiando ^{14}C con la atmósfera, manteniendo un equilibrio, de tal forma que la relación $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ es prácticamente idéntica en los seres vivos y en la atmósfera. Sin embargo, tras la muerte de un organismo vivo no se incorporan nuevos átomos de ^{14}C a los tejidos, y la concentración del isótopo va decreciendo conforme va transformándose en ^{14}N por decaimiento radiactivo. Por tanto, los fósiles no están expuestos a este intercambio de carbono, por lo que el cálculo de la pérdida de ^{14}C en ellos se puede utilizar y se utiliza para datarlos.

Como sabemos, la masa en isótopo ^{14}C de cualquier espécimen disminuye a un ritmo exponencial, que es conocido: a los 5760 años de la muerte de un ser vivo la cantidad de ^{14}C en sus restos se ha reducido a la mitad. Así pues, al medir la cantidad de radiactividad en una muestra de origen orgánico, se calcula la cantidad de ^{14}C que aún queda en el material. Así puede ser datado el momento de la muerte del organismo correspondiente. Es lo que se conoce como "edad radiocarbónica" o de ^{14}C , y se expresa en *años BP (Before Present)*. Esta escala equivale a los años transcurridos desde la muerte del ejemplar hasta el año 1950 de nuestro calendario. Se elige esta fecha por convenio y porque en la segunda mitad del siglo XX los ensayos nucleares provocaron severas anomalías en las curvas de concentración relativa de los isótopos radiactivos en la atmósfera. Así, el método de datación por radiocarbono es la técnica basada en isótopos más fiable para conocer la edad de muestras orgánicas siempre y cuando su edad sea inferior a 60 000 años.

Al comparar las concentraciones teóricas de ^{14}C con las de muestras de maderas de edades conocidas mediante dendrocronología, se descubrió que existían diferencias con los resultados esperados. Esas diferencias se deben a que la concentración de carbono radiactivo en la atmósfera también ha variado respecto al tiempo. Hoy se conoce con suficiente precisión (un margen de error de entre 1 y 10 años) la evolución de la concentración de ^{14}C en los últimos 15.000 años, por lo que puede corregirse esa estimación de edad comparándolo con curvas obtenidas mediante interpolación de datos conocidos. La edad así hallada se denomina "edad calibrada" y se expresa en *años Cal BP*.

Se puede deducir también el origen del CO_2 atmosférico a partir de técnicas de

datación radiométrica de ^{14}C . Como se ha mencionado, este isótopo debería de estar en equilibrio en la atmósfera y en la materia viva, ya que se está asimilando constantemente a partir de las plantas mediante la fotosíntesis. Sin embargo, en el caso del metano, existe un desequilibrio, encontrando que la fracción de carbono-14 atmosférico es menor que la que existe en los tejidos vivos. Eso indica que debe de existir un fuente de carbono orgánico antiguo que provoca estos desequilibrios. La mayor de estas fuentes se debe al petróleo y a las minas de carbón (en el carbón, durante la carbonificación, quedan atrapados en el mineral grandes cantidades de gases que se denominan de forma genérica grisú, el cual tienen diferentes composiciones y que es generalmente de naturaleza explosiva. En general, se genera en poca cantidad una vez que el carbón es expuesto al aire ya que disminuye la presión superficial y se abren poros, y así el gas escapa. El principal componente del grisú es el metano). Con estas medidas radiométricas se pueden detectar incluso la presencia de fugas en gaseoductos. Otra fuente de metano antigua es el permagel de latitudes muy septentrionales, cuando las temperaturas en esta zona eran mayores y había plantas.

Radiactividad del ^{222}Rn

El radón tiene un gran número de isótopos, aunque naturales solo 3: el 219, el 220 y el 222, todos ellos radiactivos. El más estable es el radón-222, perteneciente a la familia del radio ($4n + 2$), con un período de semidesintegración de (tan solo) 3,8 días.

Muchas rocas y suelos graníticos, contienen uranio-238, que tiene un período de semidesintegración de 4500 millones de años, un valor tan grande que este tipo de desintegración sucede continuamente bajo nuestros pies. Así, el radioisótopo ^{238}U emite una partícula alfa, transformándose en ^{234}Th .

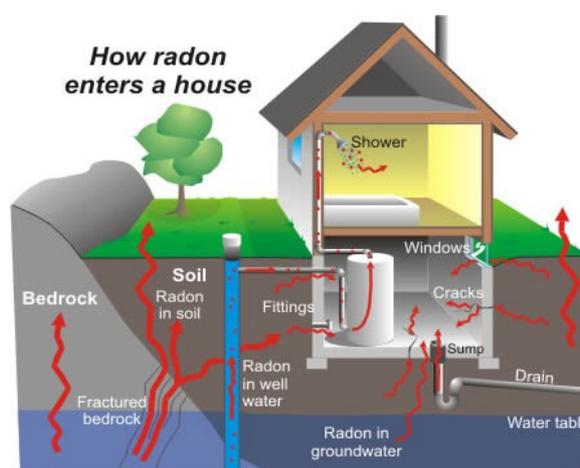
Este es el primer proceso de los 14 secuenciales que sufre el núcleo de uranio-238 hasta llegar a la formación de plomo-206 (ver siguiente figura) cuyo núcleo es estable (estable quiere decir que su período de semidesintegración es tan grande que no se puede medir), que no sigue desintegrándose.

| Núcleo | Modo de desintegración | Período de semidesintegración | Energía desprendida (MeV) | Producto de desintegración |
|--------|--|-------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| U 238 | α | $4.468 \cdot 10^9$ a | 4,270 | Th 234 |
| Th 234 | β^- | 24,10 d | 0,273 | Pa 234 |
| Pa 234 | β^- | 6,70 h | 2,197 | U 234 |
| U 234 | α | 245500 a | 4,859 | Th 230 |
| Th 230 | α | 75380 a | 4,770 | Ra 226 |
| Ra 226 | α | 1602 a | 4,871 | Rn 222 |
| Rn 222 | α | 3,8235 d | 5,590 | Po 218 |
| Po 218 | α 99.98 % β^- 0.02 % | 3,10 min | 6,115 0,265 | Pb 214 At 218 |
| At 218 | α 99.90 % β^- 0.10 % | 1,5 s | 6.874 2.883 | Bi 214 Rn 218 |
| Rn 218 | α | 35 ms | 7.263 | Po 214 |
| Pb 214 | β^- | 26.8 min | 1.024 | Bi 214 |
| Bi 214 | β^- 99.98 % α 0.02 % | 19.9 min | 3.272 5.617 | Po 214 Tl 210 |
| Po 214 | α | 0.1643 ms | 7.883 | Pb 210 |
| Tl 210 | β^- | 1.30 min | 5.484 | Pb 210 |
| Pb 210 | β^- | 22.3 a | 0.064 | Bi 210 |
| Bi 210 | β^- 99.99987% α 0.00013% | 5.013 d | 1.426 5.982 | Po 210 Tl 206 |
| Po 210 | α | 138.376 d | 5.407 | Pb 206 |
| Tl 206 | β^- | 4.199 min | 1.533 | Pb 206 |
| Pb 206 | - | estable | - | - |

De todas estas etapas es de especial interés la que involucra al radón-222, ya que es el único de toda la secuencia que es un gas y, por tanto, móvil, mención aparte de los núcleos de helio emitidos durante las etapas de desintegración. El precursor inmediato del radón-222 es el radio-226, que tiene una vida media de 1600 años, que lo genera por emisión de una partícula alfa, según la ecuación



La mayor parte del radón así formado escapa a la atmósfera por difusión procedente del primer metro bajo el suelo de nuestras casas, o de los materiales de construcción. A más profundidad, el radón continuará la secuencia de desintegración antes de poder escapar, generando polonio-218, que es un elemento no gaseoso y, por tanto, inmóvil. La muy pequeña radiación de fondo que genera es la responsable de alrededor de la mitad de la radiación que soportamos, siendo la otra mitad rayos gamma procedentes fundamentalmente de la actividad solar. En suelos arenosos la difusión es mucho mejor y puede proceder de más profundidad. En cambio, en suelos helados, compactados y arcillosos se inhibe su flujo. En el siguiente gráfico puede verse la forma habitual de acceso del radón a una vivienda situada a nivel del suelo.



Debido a su estabilidad química (gas noble) y a su baja solubilidad en los fluidos corporales, este gas no supone mucho peligro en sí mismo. La probabilidad de que se desintegre en nuestros pulmones mientras lo respiramos es pequeña, y el recorrido de los átomos de radón en el aire antes de que pierda la mayor parte de su energía es de unos 10 cm. El peligro proviene de la radiactividad producida por los tres siguientes radioisótopos en la secuencia de desintegración a partir del radón: Po, Pb y Bi, los llamados hijos del radón (se llaman hijos a los radioisótopos obtenidos a partir de otros), que una vez formados en el aire se adhieren a partículas de polvo y pueden ser igualmente respiradas, permitiendo que algunas queden adheridas a los tejidos pulmonares. En particular, tanto el ^{218}Po como el ^{214}Po emiten partículas alfa que pueden dañar las células bronquiales, al ser mucho más energéticas por su volumen y masa que las beta, por lo que causan mucho más daño. De hecho, esta es la segunda causa de cáncer de pulmón, aunque muy lejos de la incidencia originada a causa del tabaco. Uno de los problemas adicionales es que hay un parón de 22 años en el ^{210}Pb , suficiente tiempo para que se acumule en las hojas de las plantas y pase a la dieta. La mayor exposición a este tipo de partículas la tienen los mineros de las minas de uranio subterráneas poco ventiladas.

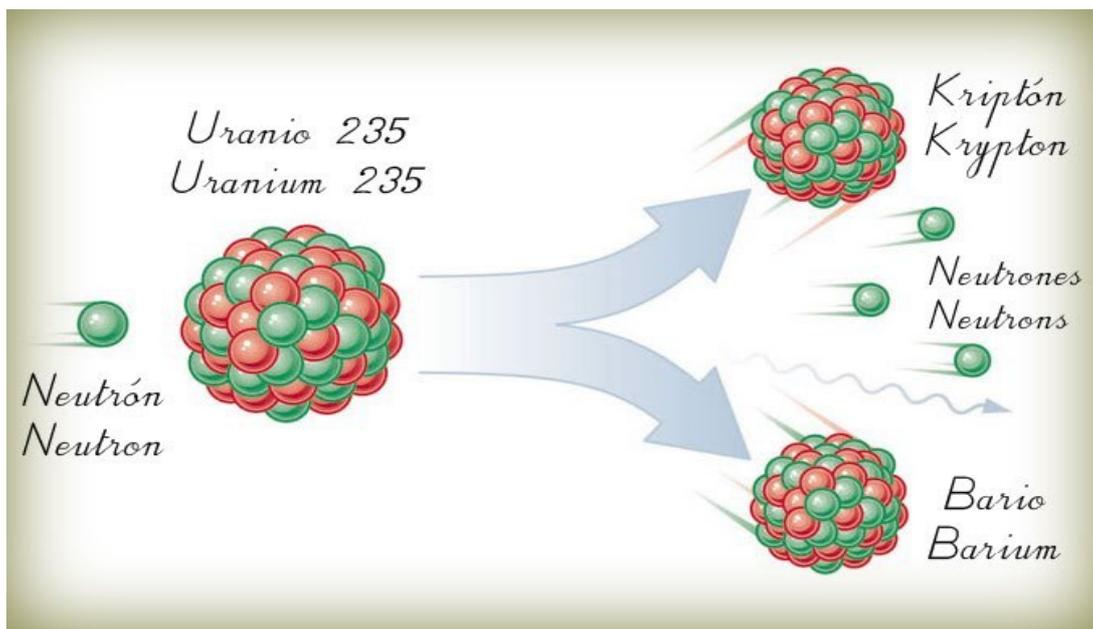
Los otros isótopos del radón (el radón-220, de la familia del torio, y el radón-219, de la familia del actinio), presentan períodos de semidesintegración demasiado cortos como para ser tenidos en cuenta.

La energía nuclear

Aunque el debate sobre si será la energía del futuro probablemente esté perdido, a corto-medio plazo será un aporte irremplazable dentro de las fuentes de energía al ser una energía limpia, en el sentido de que no aporta gases invernadero a la atmósfera. Su aporte de energía es inmensamente superior al de la combustión, ya que la energía entre partículas del núcleo es mucho mayor que la que existe entre enlaces químicos. Dado que los núcleos más estables son los de tamaño intermedio (coronados por el hierro), los núcleos más grandes son intrínsecamente inestables, por lo que pueden romperse (fisión) para formar otros más pequeños, y los más pequeños también son más inestables por lo que van a poder combinarse (fusión) para formar otros más grandes. En ambos procesos el resultado es el mismo, la liberación de una gran cantidad de energía.

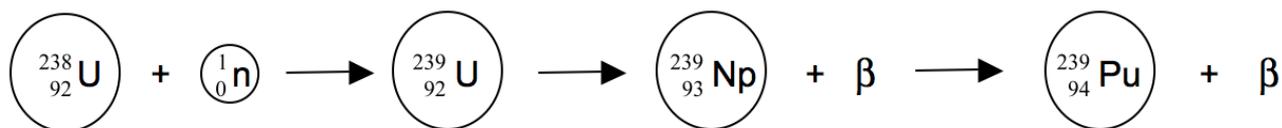
Reactores de fisión

El ejemplo de fisión más útil económicamente es la serie inducida por la colisión de un núcleo de ^{235}U con un neutrón (procedente comúnmente de californio-252, que es un emisor de neutrones). Los productos de descomposición generados son típicamente un núcleo de bario, ^{142}Ba , otro de kriptón, ^{91}Kr , y tres neutrones.



No todos los núcleos de uranio que absorben un neutrón forman exactamente los mismos productos, aunque se originan siempre dos núcleos de tamaño similar y varios neutrones. Los dos nuevos núcleos, así como los neutrones generados, se mueven a gran velocidad, lo que genera nuevos choques y nuevas roturas. La energía calorífica procedente de este proceso exotérmico, continuo y automantenido es el que se utiliza para generar energía eléctrica a través del calentamiento de una gran masa de agua que se transforma en vapor y mueve turbinas que generan electricidad. En España, alrededor del 19% de la energía eléctrica se genera mediante este proceso.

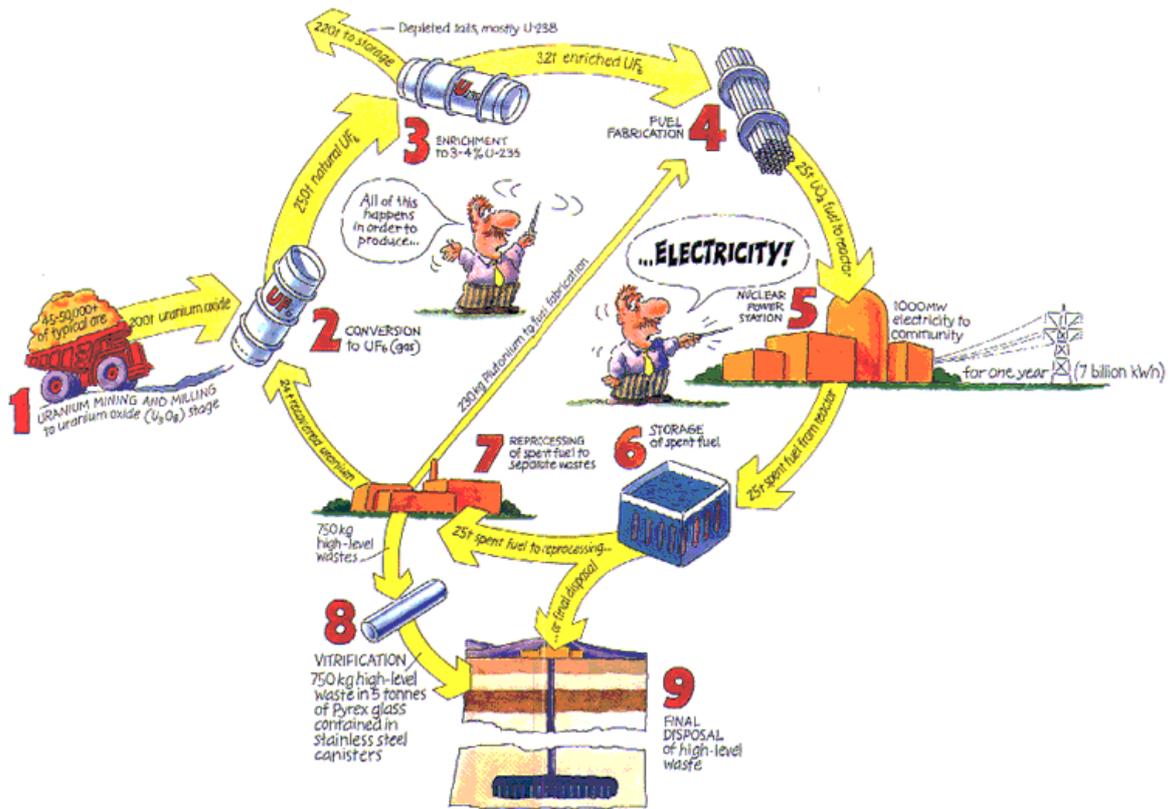
El único isótopo natural del uranio que puede sufrir fisión mediante neutrones es el ^{235}U , el cual representa sólo el 0,7% del elemento (7 Kg de cada 1000 Kg), siendo el resto ^{238}U (99,8% de abundancia natural). Por ello, las barras de mineral de uranio han de enriquecerse previamente en uranio-235 hasta un 3-5%. Con estas cantidades no hay riesgo directo de explosión espontánea y puede mantenerse el material refrigerado con agua normal. El enriquecimiento del uranio es un proceso muy caro y energéticamente costoso ya que han de darse muchos pasos en procesos físicos ya que químicamente todos los isótopos son idénticos. Cuando uno de los neutrones eliminado por el uranio-235 choca con un átomo de uranio-238 se origina uranio-239 el cual se descompone espontáneamente emitiendo radiación beta y se transforma en neptunio-239 el cual, a su vez, emite más radiación beta pasando a plutonio-239. Por tanto, como resultado de la operación de los reactores se generan diferentes núcleos y plutonio (con una vida media de 24000 años) que son, en su conjunto, mucho más radiactivos que el uranio original.



La mayor parte de los productos comunes de fisión del uranio emiten radiación beta o gamma. Así, el bario-142 se desintegra emitiendo radiación beta (su vida media es de 11 minutos) transformándose en lantano-142, el cual también emite radiación beta. Después de 10 años, la mayoría de la radiactividad de las barras de combustible es debida al estroncio-90 (vida media de 28 años) y al cesio-137 (vida media de 30 años). La dispersión de estos metales radiactivos en el medioambiente supone un grave problema ya que ambos se incorporan rápidamente al cuerpo humano.

Durante la extracción del uranio, hay contaminación del medio ambiente ya que el material desechado es en sí mismo radiactivo, al desintegrarse el uranio de forma natural para dar lugar a otras sustancias que son radiactivas (la secuencia que involucra al radón-222). El residuo radiactivo se encuentra ahora en forma de líquido y de polvo. Los restos líquidos permanecen en estanques hasta que se separan los sólidos por lo que puede haber filtraciones al subsuelo contaminando acuíferos locales si se producen fugas o desagües. Los restos sólidos expuestos a la intemperie van a poder ser lixiviados por el agua de lluvia, pudiendo contaminar fuentes locales de suministro de agua. La utilización de restos sólidos en vertederos sobre los que se construyen luego edificios puede dar lugar a acumulaciones de radón-222. Éste es particularmente peligroso para los mineros que extraen el uranio ya que hay grandes acumulaciones del gas en las minas que no se encuentran suficientemente bien ventiladas, pudiendo ocasionar cáncer de pulmón.

Ciclo biogeoquímico autoexplicativo del uranio



El plutonio-239

Este isótopo, producido durante la fisión del uranio-235, es un emisor de partículas alfa y tiene una vida media larga (24000 años). Después de 1000 años, las fuentes principales de radiactividad de las barras de combustible serán el plutonio y otros elementos muy pesados, ya que los núcleos medios producidos durante la fisión se habrán desintegrado en una gran extensión transcurrido este tiempo. Así pues, la radiactividad a largo plazo de las barras de combustible 'consumidas' puede reducirse mucho si se eliminan químicamente los elementos pesados.

El plutonio-239 que se forma es por sí mismo fisionable y, una vez que su concentración en las barras se hace lo suficientemente alta, sufre fisión y contribuye a la producción de energía del reactor. El plutonio que se acumula en las barras puede eliminarse químicamente por medio de lo que se conoce como **reprocesado**. Este se realiza en Francia, Gran Bretaña y Rusia, pero no en Estados Unidos ni Canadá. El plutonio se puede utilizar para la fabricación de bombas atómicas. De hecho existen reactores denominados **reproductores**, que están diseñados específicamente para maximizar la producción de plutonio como subproducto. El plutonio que sale directamente de las centrales no puede ser usado en la fabricación de bombas ya que se encuentra muy mezclado con otros isótopos que impedirían la reacción en cadena necesaria que sólo proporciona el isótopo 239.

Se cree que existen unas mil toneladas de plutonio en el mundo, aunque esta cantidad sigue creciendo. El plutonio no es un elemento natural, así que su presencia en la Tierra se debe a las bombas atómicas lanzadas en Japón, a las numerosas pruebas

nucleares que se hicieron al aire libre hasta la década de los 50 y a los reactores nucleares.

Se han dispuesto dos métodos para la disposición del exceso de plutonio:

- 1) Mezclarlo con otros residuos radiactivos y vitrificar la mezcla en bloques de vidrio que pueden ser enterrados a grandes profundidades encerrados en contenedores metálicos capaces de resistir hasta 100000 años.
- 2) Convertirlo en dióxido de plutonio (PuO₂) y mezclarlo con óxido de uranio para producir **combustible de mezcla de óxidos**, que se simboliza por MOX, y que podría emplearse como combustible en las plantas existentes. De hecho, ya se utiliza en diferentes plantas a lo largo del mundo.

Reactores de fusión

Las reacciones de fusión nuclear constituyen la fuente de energía de las estrellas, transformando continuamente su hidrógeno en helio. Las reacciones en la estrella están autocontroladas en parte por la gigantesca masa que contienen, salvándolas de un cataclismo nuclear. ¿Cómo hacer en la Tierra una pequeña estrella que pueda autocontrolarse? La energía de activación para iniciar el proceso es muy alta, debido a la elevada repulsión nuclear ya que la fuerza que mantiene unidas a las partículas del núcleo es de muy corto alcance. Así pues es muy difícil iniciar y mantener una reacción de fusión de tal forma que provea de más energía de la que consume.

Las reacciones de fusión que tienen el mayor potencial como productores de energía comercial involucran a los dos isótopos pesados del hidrógeno: el deuterio (D), ²H, y el tritio (T), ³H. El deuterio es un isótopo natural que se encuentra en un 0,015% del hidrógeno (1 átomo en 6500 átomos de hidrógeno), por lo que su aporte es relativamente barato al poder obtenerse fácilmente del agua.

Con el deuterio se pueden obtener dos series de productos:



La energía liberada de las reacciones anteriores es de unos 4×10^8 kJ mol⁻¹, que es un millón de veces más que la producida en una típica reacción química exotérmica.

Para la reacción entre el deuterio y el tritio se requiere una menor energía de activación, ya que el núcleo tiene dos neutrones y un solo protón, siendo las interacciones repulsivas algo menores:

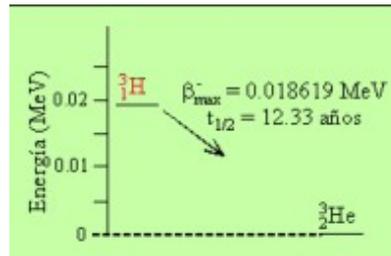


Sin embargo el tritio es tan escaso (1 parte en 10²⁰ partes de H) que hay que generarlo de forma artificial. Es un isótopo radiactivo (emisor beta) con un período de semidesintegración relativamente corto (unos 12 años) y puede obtenerse a partir de la fisión del litio con neutrones.



El ${}^6\text{Li}$ (7,5% de abundancia isotópica) es 26000 veces más eficaz capturando neutrones térmicos. El tritio se autogeneraría a partir del recubrimiento del núcleo del reactor con compuestos cerámicos de Li.

Decaimiento radiactivo del tritio



Las consecuencias ambientales de este tipo de reactores deberían de ser mucho menos graves que las producidas por los reactores de fisión. El único residuo radiactivo producido en cantidad sería el tritio, cuya radiación no puede penetrar la piel. Su mayor peligro sería la inhalación, ya que se incorporaría rápidamente a los tejidos orgánicos del organismo. Actualmente, el tritio en el agua de consumo constituye un 3% de nuestra exposición a la radiactividad.