

Energía nuclear

Energía liberada durante la fisión o fusión de núcleos atómicos. Las cantidades de energía que pueden obtenerse mediante procesos nucleares superan con mucho a las que pueden lograrse mediante procesos químicos, que sólo implican las regiones externas del átomo.

El Atomo:

El átomo está formado por un pequeño núcleo, cargado positivamente, rodeado de electrones. El núcleo, que contiene la mayor parte de la masa del átomo, está compuesto a su vez de neutrones y protones, unidos por fuerzas nucleares muy intensas, mucho mayores que las fuerzas eléctricas que ligan los electrones al núcleo. El número másico A de un núcleo expresa el número de nucleones (neutrones y protones) que contiene; el número atómico Z es el número de protones, partículas con carga positiva. Los núcleos se designan como X ; la expresión U , por ejemplo, representa el uranio 235.

La energía de enlace de un núcleo mide la intensidad con que las fuerzas nucleares mantienen ligados a los protones y neutrones. La energía de enlace por nucleón, es decir, la energía necesaria para separar del núcleo un neutrón o un protón, depende del **número másico A** . La curva de las energías de enlace implica que si dos núcleos ligeros se fusionan para formar un núcleo de mayor peso (o si un núcleo pesado se divide en dos de menor peso, los núcleos resultantes están ligados con más fuerza, por lo que se libera energía.

La fusión de dos núcleos ligeros libera millones de electrovoltios. También se libera energía nuclear cuando se induce la fisión de un núcleo pesado como el ^{235}U mediante la absorción de un neutrón.

Una reacción de fisión nuclear libera una energía 10 millones de veces mayor que una reacción química típica.

Energía nuclear de fisión

La fisión del uranio

El uranio tiene 92 de número atómico y 238 de masa atómica. El número de sus átomos es inestable. Cuando un neutrón golpea un núcleo de uranio, este se escinde en dos núcleos de masa atómica media, liberando una gran cantidad de energía. Las dos mitades también son núcleos inestables y que por tanto, se desintegran fácilmente hasta detenerse sobre núcleos estables.

La escisión afecta casi totalmente al uranio 235, que está presente, en porcentaje mínimo, en el uranio 238, mezcla de 3 isótopos (se dice que dos núcleos son isótopos cuando poseyendo el mismo número atómico, esto es, perteneciendo a un mismo elemento, poseen distinto número másico; lo que significa que, si bien ambos átomos tienen el mismo número de protones, el número de neutrones tiene en su núcleo es distinto de unos casos a otros). En la escisión del núcleo de uranio 235, se emiten neutrones que chocaban con otros núcleos, alargando así la escisión. Se inicia de este modo una reacción en cadena que se expande en avalancha, transformando en brevísimo tiempo la materia en una enorme cantidad de energía. El proceso requiere menos de una millonésima de segundo.

El fenómeno de demolición del uranio recibe el nombre de fisión (escisión). Las sustancias escindibles y generadoras de la reacción se denominan fisiles. El único fisil natural es el uranio 235. El uranio presente en la naturaleza solo contiene un 0,71% de uranio 235; el resto corresponde al isótopo no fisionable uranio 238. Existen, sin embargo, sustancias artificiales físicas, como el uranio 233 y el plutonio 239. Las condiciones para que se realiza la fisión son las siguientes:

- Producir uranio 235, es decir, separarlo de los otros isótopos.
- Producir neutrones, regularizar su velocidad y la de los neutrones liberados en la reacción en cadenas.

Aspectos tecnológicos de su producción

Los reactores nucleares

Son dispositivos que producen energía térmica mediante reacciones nucleares de fisión.

El reactor nuclear más usual consta básicamente de un núcleo, en el cual se almacena el combustible nuclear, formado por una sustancia que varía según el tipo de reactor, pero que en todas las ocasiones contiene cierta cantidad de materia fisionable, como puede ser el U 235. Este material, en forma de pastilla se encuentra encerrado en unas vainas metálicas perfectamente soldadas, que impiden cualquier fuga al exterior del material radiactivo.

El conjunto formado por las distintas vainas de material combustible se encuentra introducidas las denominadas barras de control, construidas de un material que tiene la propiedad de absorber neutrones, como el Cadmio y el Boro. Estas barras son las encargadas de mantener la reacción en cadena al ritmo deseado.

Todo núcleo de reactor se encuentra en una sustancia que recibe el nombre de moderador y que, según el tipo de reactor, puede ser de agua ligera, agua pesada, grafito, etc. Finalmente, el conjunto está rodeado de una sustancia, el refrigerante, cuya naturaleza varía también según los distintos tipos de reactores y cuya finalidad es transmitir el calor producido en el núcleo a los sistemas que transformarán el mismo en electricidad, manteniendo constante al mismo tiempo la temperatura del núcleo. Según el tipo de reactor, el refrigerante suele ser agua ligera o pesada, gas, e incluso metal líquido en los reactores rápidos.

El reactor comienza a funcionar cuando, generalmente mediante una fuente externa, se introducen en su núcleo neutrones capaces de producir las primeras fisiones. Éstas dan lugar a nuevos neutrones, que, al chocar con el moderador, reducen su velocidad hasta el valor adecuado para fisionar los núcleos próximos. Así comienza la reacción en cadena, de forma que cada instante el número de neutrones existente en el núcleo va aumentando progresivamente y con él toma el número de fisiones producidas hasta un valor constante.

Durante todo el proceso, la reacción permanente controlada por medio de la barra de control, encargada de absorber del núcleo los neutrones precisos para que el número de fisiones se mantenga dentro de un nivel prefijado, sin aumentar ni disminuir con el tiempo. Se dice entonces que el reactor se ha hecho crítico.

Las barras de control pueden funcionar de forma manual; sin embargo, normalmente están activadas por sistemas automáticos, que mantienen constantemente la criticidad del reactor. Si en algún momento el número de fisiones aumentase mucho, una serie de circuitos de control obligaría a las barras a introducirse totalmente en el núcleo, absorbiendo de esta forma un número muy elevado de neutrones, con lo que estaría la reacción en cadena y quedaría el reactor apagado.

Existen distintos tipos de reactores nucleares:

Reactores de agua ligera y pesada

En el reactor de agua a presión (RAP), una versión del sistema RAL, el refrigerante es agua a una presión de unas 150 atmósferas. El agua se bombea a través del núcleo del reactor, donde se calienta hasta unos 325 °C. El agua sobrecalentada se bombea a su vez hasta un generador de vapor, donde a través de intercambiadores de calor calienta un circuito secundario de agua, que se convierte en vapor. Este vapor propulsa uno o más generadores de turbinas que producen energía eléctrica, se condensa, y es bombeado de nuevo al generador de

vapor. El circuito secundario está aislado del agua del núcleo del reactor, por lo que no es radiactivo. Para condensar el vapor se emplea un tercer circuito de agua, procedente de un lago, un río o una torre de refrigeración. La vasija presurizada de un reactor típico tiene unos 15 m de altura y 5 m de diámetro, con paredes de 25 cm de espesor. El núcleo alberga unas 80 toneladas de óxido de uranio, contenidas en tubos delgados resistentes a la corrosión y agrupados en haces de combustible.

En el reactor de agua en ebullición (RAE), otro tipo de RAL, el agua de refrigeración se mantiene a una presión algo menor, por lo que hierve dentro del núcleo. El vapor producido en la vasija presurizada del reactor se dirige directamente al generador de turbinas, se condensa y se bombea de vuelta al reactor. Aunque el vapor es radiactivo, no existe un intercambiador de calor entre el reactor y la turbina, con el fin de aumentar la eficiencia. Igual que en el RAP, el agua de refrigeración del condensador procede de una fuente independiente, como un lago o un río.

El nivel de potencia de un reactor en funcionamiento se mide constantemente con una serie de instrumentos térmicos, nucleares y de flujo. La producción de energía se controla insertando o retirando del núcleo un grupo de barras de control que absorben neutrones. La posición de estas barras determina el nivel de potencia en el que la reacción en cadena se limita a automantenerse.

Durante el funcionamiento, e incluso después de su desconexión, un reactor grande contiene una enorme radiactividad. La radiación emitida por el reactor durante su funcionamiento y por los productos de la fisión después de la desconexión se absorbe mediante blindajes de hormigón de gran espesor situados alrededor del reactor y del sistema primario de refrigeración. Otros sistemas de seguridad son los sistemas de emergencia para refrigeración de éste, que impiden el sobrecalentamiento del núcleo en caso de que no funcionen los sistemas de refrigeración principales. En la mayoría de los países también existe un gran edificio de contención de acero y hormigón para impedir la salida al exterior de elementos radiactivos que pudieran escapar en caso de una fuga.

En España, la tecnología adoptada en los reactores de las centrales nucleares es del tipo de agua ligera; sólo la central de Vandellós tiene reactor de grafito refrigerado con CO₂.

Reactores de propulsión

Para la propulsión de grandes buques de superficie, como el portaaviones estadounidense Nimitz, se emplean reactores nucleares similares al RAP. La tecnología básica del sistema RAP fue desarrollada por primera vez en el programa estadounidense de reactores navales dirigido por el almirante Hyman George Rickover. Los reactores para propulsión de submarinos suelen ser más pequeños y emplean uranio muy enriquecido para que el núcleo pueda ser más compacto. Estados Unidos, Gran Bretaña, Rusia y Francia disponen de submarinos nucleares equipados con este tipo de reactores.

Estados Unidos, Alemania y Japón utilizaron durante periodos limitados tres cargueros oceánicos experimentales con propulsión nuclear. Aunque tuvieron éxito desde el punto de vista técnico, las condiciones económicas y las estrictas normas portuarias obligaron a suspender dichos proyectos. Los soviéticos construyeron el primer rompehielos nuclear, el Lenin, para emplearlo en la limpieza de los pasos navegables del Ártico.

Reactores de investigación

En muchos países se han construido diversos reactores nucleares de pequeño tamaño para su empleo en formación, investigación o producción de isótopos radiactivos. Estos reactores suelen funcionar con niveles de potencia del orden de 1 megavatio, y es más fácil conectarlos y desconectarlos que los reactores más grandes utilizados para la producción de energía.

Una variedad muy empleada es el llamado reactor de piscina. El núcleo está formado por material parcial o totalmente enriquecido en uranio 235, contenido en placas de aleación de aluminio y sumergido en una gran piscina de agua que sirve al mismo tiempo de refrigerante y de moderador. Pueden colocarse sustancias directamente en el núcleo del reactor o cerca de éste para ser irradiadas con neutrones. Con este reactor pueden producirse diversos isótopos radiactivos para su empleo en medicina, investigación e industria. También pueden extraerse neutrones del núcleo del reactor mediante tubos de haces, para utilizarlos en experimentos.

Reactores autorregenerativos.

Existen yacimientos de uranio, la materia prima en la que se basa la energía nuclear, en diversas regiones del mundo. No se conoce con exactitud sus reservas totales, que podrían ser limitadas a no ser que se empleen fuentes de muy baja concentración, como granitos y esquistos. Un sistema ordinario de energía nuclear tiene un periodo de vida relativamente breve debido a su muy baja eficiencia en el uso del uranio: sólo aprovecha aproximadamente el 1% del contenido energético del uranio.

La característica fundamental de un reactor autorregenerativo es que produce más combustible del que consume. Lo consigue fomentando la absorción de los neutrones sobrantes por un llamado material fértil. Existen varios sistemas de reactor autorregenerativo técnicamente factibles. El que más interés ha suscitado en todo el mundo emplea uranio 238 como material fértil. Cuando el uranio 238 absorbe neutrones en el reactor, se convierte en un nuevo material fisionable, el plutonio, a través de un proceso nuclear conocido como desintegración.

Cuando el plutonio 239 absorbe un neutrón, puede producirse su fisión, y se libera un promedio de unos 2,8 neutrones. En un reactor en funcionamiento, uno de esos neutrones se necesita para producir la siguiente fisión y mantener en marcha la reacción en cadena. Una media o promedio de 0,5 neutrones se pierden por absorción en la estructura del reactor o el refrigerante. Los restantes 1,3 neutrones pueden ser absorbidos por el uranio 238 para producir más plutonio a través de las reacciones indicadas en la ecuación (3).

El sistema autorregenerativo a cuyo desarrollo se ha dedicado más esfuerzo es el llamado reactor autorregenerativo rápido de metal líquido (RARML). Para maximizar la producción de plutonio 239, la velocidad de los neutrones que causan la fisión debe mantenerse alta, con una energía igual o muy poco menor que la que tenían al ser liberados. El reactor no puede contener ningún material moderador, como el agua, que pueda frenar los neutrones. El líquido refrigerante preferido es un metal fundido como el sodio líquido. El sodio tiene muy buenas propiedades de transferencia de calor, funde a unos 100 °C y no hierve hasta unos 900 °C. Sus principales desventajas son su reactividad química con el aire y el agua y el elevado nivel de radiactividad que se induce en el sodio dentro del reactor.

En uno de los diseños para una central RARML de gran tamaño, el núcleo del reactor está formado por miles de tubos delgados de acero inoxidable que contienen un combustible compuesto por una mezcla de óxido de plutonio y uranio: un 15% o un 20% de plutonio 239 y el resto uranio. El núcleo está rodeado por una zona llamada capa fértil, que contiene barras similares llenas exclusivamente de óxido de uranio. Todo el conjunto de núcleo y capa fértil mide unos 3 m de alto por unos 5 m de diámetro, y está montado en una gran vasija que contiene sodio líquido que sale del reactor a unos 500 °C. Esta vasija también contiene las bombas y los intercambiadores de calor que ayudan a eliminar calor del núcleo. El vapor se genera en un circuito secundario de sodio, separado del circuito de refrigeración del reactor (radiactivo) por los intercambiadores de calor intermedios de la vasija del reactor. Todo el sistema del reactor nuclear está situado dentro de un gran edificio de contención de acero y hormigón.

La primera central a gran escala de este tipo empleada para la generación de electricidad, la llamada Super-Phénix, comenzó a funcionar en Francia en 1984. En las costas del mar Caspio se ha construido una central de escala media, para producción de energía y desalinización de agua. En Escocia existe un prototipo

de gran tamaño.

El RARML produce aproximadamente un 20% más de combustible del que consume. En un reactor grande, a lo largo de 20 años se produce suficiente combustible para cargar otro reactor de energía similar. En el sistema RARML se aprovecha aproximadamente el 75% de la energía contenida en el uranio natural, frente al 1% obtenido en el RAL.

La central nuclear.

Las centrales nucleares más usuales constan de tres bloques claramente diferenciados, si bien esta diferencia no implica una separación física total.

El primer bloque es el del reactor, que se halla encerrado herméticamente en una vasija metálica, y transforma la energía de fisión en energía calorífica. Para lograrlo, cede el calor al agua contenida en la vasija, que en ciertos tipos de central llega a hervir (reactores de agua en ebullición), mientras que en otros se encuentra a la presión suficiente para que nunca llegue a producirse tal ebullición (reactores de agua a presión).

En cualquiera de los dos casos , el vapor de agua producido pasa a través de un intercambiador de calor de un circuito independiente a un segundo bloque, en el que se encuentra las turbinas. En éstas, el vapor genera un movimiento de giro transformándose la energía calorífica en energía mecánica. Este movimiento de giro se transmite mediante unos ejes al tercer bloque de la central donde los alternadores transforman la energía mecánica en energía eléctrica que posteriormente se transmite a la red de distribución para llegar a nuestros hogares.

El reactor y los sistemas asociados a la producción de vapor se encuentran situados en un edificio estanco, denominado recinto de contención, diseñado de tal forma que es capaz de soportar terremotos o impactos de gran potencia, como puede ser la caída de un avión. En el interior del edificio suele haber también unas piscinas para el almacenamiento del material irradiado, así como un conjunto de sistemas de emergencia, que están especialmente diseñados para refrigerar el reactor en cualquier situación de peligro.

Seguridad y medio ambiente:

Combustibles y residuos nucleares

Los combustibles peligrosos empleados en los reactores nucleares presentan problemas para su manejo, sobre todo en el caso de los combustibles agotados, que deben ser almacenados o eliminados de alguna forma.

El ciclo del combustible nuclear

Cualquier central de producción de energía eléctrica es sólo parte de un ciclo energético global. El ciclo del combustible de uranio empleado en los sistemas RAL es actualmente el más importante en la producción mundial de energía nuclear, y conlleva muchas etapas. El uranio, con un contenido de aproximadamente el 0,7% de uranio 235, se obtiene en minas subterráneas o a cielo abierto. El mineral se concentra mediante trituración y se transporta a una planta de conversión, donde el uranio se transforma en el gas hexafluoruro de uranio (UF₆). En una planta de enriquecimiento isotópico por difusión, el gas se hace pasar a presión por una barrera porosa. Las moléculas que contienen uranio 235, más ligeras, atraviesan la barrera con más facilidad que las que contienen uranio 238. Este proceso enriquece el uranio hasta alcanzar un 3% de uranio 235. Los residuos, o uranio agotado, contienen aproximadamente el 0,3% de uranio 235. El producto enriquecido se lleva a una planta de fabricación de combustible, donde el gas UF₆ se convierte en óxido de uranio en polvo y posteriormente en bloques de cerámica que se cargan en barras de combustible resistentes a la corrosión. Estas barras se agrupan en elementos de combustible y se transportan a la central nuclear.

Un reactor de agua a presión típico de 1.000 megavatios tiene unos 200 elementos de combustible, de los que una tercera parte se sustituye cada año debido al agotamiento del uranio 235 y a la acumulación de productos de fisión que absorben neutrones. Al final de su vida, el combustible es enormemente radiactivo debido a los productos de fisión que contiene, por lo que sigue desprendiendo una cantidad de energía considerable. El combustible extraído se coloca en piscinas de almacenamiento llenas de agua situadas en las instalaciones de la central, donde permanece un año o más.

Al final del periodo de enfriamiento, los elementos de combustible agotados se envían en contenedores blindados a una instalación de almacenamiento permanente o a una planta de reprocesamiento químico, donde se recuperan el uranio no empleado y el plutonio 239 producido en el reactor, y se concentran los residuos radiactivos.

El combustible agotado todavía contiene casi todo el uranio 238 original, aproximadamente un tercio del uranio 235 y parte del plutonio 239 producido en el reactor. Cuando el combustible agotado se almacena de forma permanente, se desperdicia todo este contenido potencial de energía. Cuando el combustible se reprocesa, el uranio se recicla en la planta de difusión, y el plutonio 239 recuperado puede sustituir parcialmente al uranio 235 en los nuevos elementos de combustible.

En el ciclo de combustible del RARML, el plutonio generado en el reactor siempre se recicla para emplearlo como nuevo combustible. Los materiales utilizados en la planta de fabricación de elementos de combustible son uranio 238 reciclado, uranio agotado procedente de la planta de separación isotópica y parte del plutonio 239 recuperado. No es necesario extraer uranio adicional en las minas, puesto que las existencias actuales de las plantas de separación podrían suministrar durante siglos a los reactores autorregenerativos. Como estos reactores producen más plutonio 239 del que necesitan para renovar su propio combustible, aproximadamente el 20% del plutonio recuperado se almacena para su uso posterior en el arranque de nuevos reactores autorregenerativos.

El paso final en cualquiera de los ciclos de combustible es el almacenamiento a largo plazo de los residuos altamente radiactivos, que continúan presentando peligro para los seres vivos durante miles de años. Varias tecnologías parecen satisfactorias para el almacenamiento seguro de los residuos, pero no se han construido instalaciones a gran escala para demostrar el proceso. Los elementos de combustible pueden almacenarse en depósitos blindados y vigilados hasta que se tome una decisión definitiva sobre su destino, o pueden ser transformados en compuestos muy estables, fijados en material cerámico o vidrio, o encapsulados en bidones de acero inoxidable y enterrados a gran profundidad en formaciones geológicas muy estables.

Seguridad nuclear

La preocupación de la opinión pública en torno a la aceptabilidad de la energía nuclear procedente de la fisión se debe a dos características básicas del sistema. La primera es el elevado nivel de radiactividad que existe en diferentes fases del ciclo nuclear, incluida la eliminación de residuos. La segunda es el hecho de que los combustibles nucleares uranio 235 y plutonio 239 son los materiales con que se fabrican las armas nucleares.

En la década de 1950 se pensó que la energía nuclear podía ofrecer un futuro de energía barata y abundante. La industria energética confiaba en que la energía nuclear sustituyera a los combustibles fósiles, cada vez más escasos, y disminuyera el coste de la electricidad. Los grupos preocupados por la conservación de los recursos naturales preveían una reducción de la contaminación atmosférica y de la minería a cielo abierto. La opinión pública era en general favorable a esta nueva fuente de energía, y esperaba que el uso de la energía nuclear pasara del terreno militar al civil. Sin embargo, después de esta euforia inicial, crecieron las reservas en torno a la energía nuclear a medida que se estudiaban más profundamente las cuestiones de seguridad nuclear y proliferación de armamento. En todos los países del mundo existen grupos opuestos a la energía nuclear, y las normas estatales se han hecho complejas y estrictas. Suecia, por ejemplo, pretende limitar su programa a unos 10 reactores. Austria ha cancelado su programa. En cambio, Gran Bretaña, Francia, Alemania y Japón siguen

avanzando en este terreno.

El Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) es el organismo encargado de velar en España por la seguridad nuclear y la protección radiológica. Informa sobre la concesión o retirada de autorizaciones, inspecciona la construcción, puesta en marcha en explotación de instalaciones nucleares o radiactivas, participa en la confección de planes de emergencia y promueve la realización de trabajos de investigación.

Riesgos radiológicos

Los materiales radiactivos emiten radiación ionizante penetrante que puede dañar los tejidos vivos. La unidad que suele emplearse para medir la dosis de radiación equivalente en los seres humanos es el milisievert. La dosis de radiación equivalente mide la cantidad de radiación absorbida por el organismo, corregida según la naturaleza de la radiación puesto que los diferentes tipos de radiación son más o menos nocivos. En el Reino Unido, cada individuo está expuesto a unos 2,5 milisieverts anuales por la radiación de fondo procedente de fuentes naturales. Los trabajadores de la industria nuclear están expuestos a unos 4,5 milisieverts (aproximadamente igual que las tripulaciones aéreas, sometidas a una exposición adicional a los rayos cósmicos). La exposición de un individuo a 5 sieverts suele causar la muerte. Una gran población expuesta a bajos niveles de radiación experimenta aproximadamente un caso de cáncer adicional por cada 10 sieverts de dosis equivalente total. Por ejemplo, si una población de 10.000 personas está expuesta a una dosis de 10 milisieverts por individuo, la dosis total será de 100 sieverts, por lo que habrá 10 casos de cáncer debidos a la radiación (además de los cánceres producidos por otras causas).

En la mayoría de las fases del ciclo de combustible nuclear pueden existir riesgos radiológicos. El gas radón, radiactivo, es un contaminante frecuente en las minas subterráneas de uranio. Las operaciones de extracción y trituración del mineral producen grandes cantidades de material que contiene bajas concentraciones de uranio. Estos residuos tienen que ser conservados en fosas impermeables y cubiertos por una capa de tierra de gran espesor para evitar su liberación indiscriminada en la biosfera.

Las plantas de enriquecimiento de uranio y de fabricación de combustible contienen grandes cantidades de hexafluoruro de uranio (UF₆), un gas corrosivo. Sin embargo, el riesgo radiológico es menor, y las precauciones habituales que se toman con las sustancias químicas peligrosas bastan para garantizar la seguridad.

Sistemas de seguridad de los reactores

Se ha dedicado una enorme atención a la seguridad de los reactores. En un reactor en funcionamiento, la mayor fuente de radiactividad, con diferencia, son los elementos del combustible. Una serie de barreras impide que los productos de fisión pasen a la biosfera durante el funcionamiento normal. El combustible está en el interior de tubos resistentes a la corrosión. Las gruesas paredes de acero del sistema de refrigeración primario del RAP forman una segunda barrera. El propio agua de refrigeración absorbe parte de los isótopos biológicamente importantes, como el yodo. El edificio de acero y hormigón supone una tercera barrera.

Durante el funcionamiento de una central nuclear, es inevitable que se liberen algunos materiales radiactivos. La exposición total de las personas que viven en sus proximidades suele representar un porcentaje muy bajo de la radiación natural de fondo. Sin embargo, las principales preocupaciones se centran en la liberación de productos radiactivos causada por accidentes en los que se daña el combustible y fallan los dispositivos de seguridad. El principal peligro para la integridad del combustible es un accidente de pérdida de refrigerante, en el que el combustible resulta dañado o incluso se funde. Los productos de fisión pasan al refrigerante, y si se rompe el sistema de refrigeración, los productos de fisión penetran en el edificio del reactor.

Los sistemas de los reactores emplean una compleja instrumentación para vigilar constantemente su situación y controlar los sistemas de seguridad empleados para desconectar el reactor en circunstancias anómalas. El

diseño de los RAP incluye sistemas de seguridad de refuerzo que inyectan boro en el refrigerante para absorber neutrones y detener la reacción en cadena, con lo que la desconexión está aún más garantizada. En los reactores de agua ligera, el refrigerante está sometido a una presión elevada. En caso de que se produjera una rotura importante en una tubería, gran parte del refrigerante se convertiría en vapor, y el núcleo dejaría de estar refrigerado. Para evitar una pérdida total de refrigeración del núcleo, los reactores están dotados con sistemas de emergencia para refrigeración del núcleo, que empiezan a funcionar automáticamente en cuanto se pierde presión en el circuito primario de refrigeración. En caso de que se produzca una fuga de vapor al edificio de contención desde una tubería rota del circuito primario de refrigeración, se ponen en marcha refrigeradores por aspersión para condensar el vapor y evitar un peligroso aumento de la presión en el edificio.

Accidentes en centrales nucleares

A pesar de las numerosas medidas de seguridad, en 1979 llegó a producirse un accidente en el RAP de Three Mile Island, cerca de Harrisburg (Pensilvania, EEUU). Un error de mantenimiento y una válvula defectuosa llevaron a un accidente de pérdida de refrigerante. Cuando comenzó el accidente, el sistema de seguridad desconectó el reactor, y el sistema de emergencia para enfriamiento del núcleo empezó a funcionar poco tiempo después según lo prescrito. Pero entonces, como resultado de un error humano, el sistema de refrigeración de emergencia se desconectó, lo que provocó graves daños en el núcleo e hizo que se liberaran productos de fisión volátiles procedentes de la vasija del reactor. Aunque sólo una pequeña cantidad de gas radiactivo salió del edificio de contención (lo que llevó a un ligero aumento de los niveles de exposición en los seres humanos), los daños materiales en la instalación fueron muy grandes, de unos 1.000 millones de dólares o más, y la tensión psicológica a la que se vio sometida la población, especialmente las personas que vivían cerca de la central nuclear, llegó a ser muy grave en algunos casos.

La investigación oficial sobre el accidente citó como causas principales del mismo un error de manejo y un diseño inadecuado de la sala de control, y no un simple fallo del equipo. Esto llevó a la entrada en vigor de leyes que exigían a la Comisión de Regulación Nuclear estadounidense que adoptara normas mucho más estrictas para el diseño y la construcción de centrales nucleares, y obligaban a las compañías eléctricas a ayudar a las administraciones de los estados y los condados a preparar planes de emergencia para proteger a la población en caso de que se produjera otro accidente semejante.

Desde 1981, las cargas financieras impuestas por estas exigencias han hecho tan difícil la construcción y el funcionamiento de nuevas centrales nucleares que las compañías eléctricas de los estados de Washington, Ohio, New Hampshire e Indiana se vieron obligadas a abandonar centrales parcialmente terminadas después de gastar en ellas miles de millones de dólares. En 1988, se calculaba que el coste acumulado para la economía estadounidense por el cierre de esas centrales, sumado a la finalización de centrales con unos costes muy superiores a los inicialmente previstos, ascendía nada menos que a 100.000 millones de dólares.

El 26 de abril de 1986, otro grave accidente alarmó al mundo. Uno de los cuatro reactores nucleares soviéticos de Chernobil, a unos 130 km. al norte de Kiev (en Ucrania), explotó y ardió. Según el informe oficial emitido en agosto, el accidente se debió a que los operadores del reactor realizaron unas pruebas no autorizadas. El reactor quedó fuera de control; se produjeron dos explosiones, la tapa del reactor saltó por los aires y el núcleo se inflamó y ardió a una temperatura de 1.500 °C. Las personas más próximas al reactor recibieron una radiación unas 50 veces superior a la de Three Mile Island, y una nube de lluvia radiactiva se extendió hacia el oeste. La nube radiactiva se extendió por Escandinavia y el norte de Europa, según descubrieron observadores suecos el 28 de abril. A diferencia de la mayoría de los reactores de los países occidentales, el reactor de Chernobil carecía de edificio de contención. Una estructura semejante podría haber impedido que el material saliera del reactor. Unas 135.000 personas fueron evacuadas en un radio de 1.600 kilómetros alrededor de la central, y más de 30 resultaron muertas. La central fue sellada con hormigón; en 1988, sin embargo, los otros tres reactores de Chernobil ya estaban funcionando de nuevo.

En la central de Vandellós I, situada en la provincia de Tarragona (España), y con un reactor de tipo

grafito-gas, se produjo, el 19 de octubre de 1989, un accidente que se inició por un incendio en un edificio convencional de la central, que generó una serie sucesiva de fallos de sistemas. Pese a todo, se consiguió llevar la central a la situación de parada segura. No se produjo eliminación de CO₂ del circuito de refrigeración, ni se produjo daño alguno a las personas que intervinieron en el control de la central.

Reprocesamiento del combustible

La fase de reprocesamiento del combustible plantea diversos riesgos radiológicos. Uno de ellos es la emisión accidental de productos de fisión en caso de que se produzca una fuga en las instalaciones químicas y los edificios que las albergan. Otro podría ser la emisión rutinaria de niveles bajos de gases radiactivos inertes como el xenón o el criptón. Una instalación británica llamada THORP (acrónimo inglés de Planta Térmica de Reprocesamiento de Óxido) ha empezado a funcionar en Sellafield, en la región de Cumbria. Esta planta reprocesará combustible agotado de centrales británicas y extranjeras. En Francia también se lleva a cabo este proceso, y Japón está desarrollando sus propias plantas de reprocesamiento.

Una gran preocupación en relación con el reprocesamiento químico es la separación de plutonio 239, un material utilizado en la fabricación de armas nucleares. En Estados Unidos por ejemplo, no se reprocesa en la actualidad ningún combustible por temor al uso ilegal de este producto. El empleo de medios no tanto técnicos como políticos parece ser la mejor forma de controlar los peligros de su desviación subrepticia o su producción secreta para fabricar armas. La mejora de las medidas de seguridad en los puntos sensibles del ciclo del combustible y el aumento de la inspección internacional por parte de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA) parecen las medidas más apropiadas para controlar los peligros de la desviación de plutonio.

Almacenamiento de residuos

El último paso del ciclo del combustible nuclear, el almacenamiento de residuos, sigue siendo uno de los más polémicos. La cuestión principal no es tanto el peligro actual como el peligro para las generaciones futuras. Muchos residuos nucleares mantienen su radiactividad durante miles de años, más allá de la duración de cualquier institución humana. La tecnología para almacenar los residuos de forma que no planteen ningún riesgo inmediato es relativamente simple. La dificultad estriba por una parte en tener una confianza suficiente en que las generaciones futuras estén bien protegidas y por otra en la decisión política sobre la forma y el lugar para almacenar estos residuos. La mejor solución parece estar en un almacenamiento permanente, pero con posibilidad de recuperación, en formaciones geológicas a gran profundidad. En 1988, el gobierno de Estados Unidos eligió un lugar en el desierto de Nevada con una gruesa sección de rocas volcánicas porosas como el primer depósito subterráneo permanente de residuos nucleares del país. En el Reino Unido no se ha escogido ningún lugar, aunque las investigaciones geológicas se centran en Sellafield.

Aplicaciones de la energía nuclear:

Fines pacíficos:

En las explosiones nucleares, la energía liberada se presenta en forma de energía cinética de las partículas expulsadas por el combustible. El gas radiactivo se expande muy rápidamente en forma de energía térmica, con temperaturas del orden de millones de grados centígrados y, finalmente, en forma de radiaciones muy penetrantes. En la actualidad la energía nuclear se utiliza sobre todo para la producción de energía eléctrica. Los costes son todavía elevados, pero se hallan en continua disminución gracias a los grandes procesos tecnológicos y a la construcción de centrales nucleares de mayores dimensiones. La reciente crisis petrolífera, como es natural, dará nuevo impulso a la búsqueda de métodos competitivos de utilización de la energía nuclear, ya empleada en la propulsión naval, donde las ventajas son evidentes gracias a la elevada velocidad de desplazamiento que con ella se obtiene.

Los reactores nucleares son de enorme utilidad en zonas aisladas, como las tierras árticas y antárticas, de difícil acceso para la energía hidroeléctrica y térmica. Desmontados, se transportan fácilmente en barco o avión y, una vez en su destino se instalan de nuevo fácilmente.

También podrían convertirse en fuente de energía para los trabajos submarinos (extracción de sustancias alimenticias o minerales de yacimientos marinos).

Es prometedor el empleo de la energía nuclear en la desalación del agua del mar mediante la destilación, utilizando el calor residual de los reactores nucleares. El agua salada, aspirada hacia el interior de una serie de tubos, se evapora con el calor y en el fondo se deposita la salmuera. El vapor ya desprovisto de las sales, se condensa posteriormente dentro de los tubos refrigerantes.

Existen, así mismo, proyectos para lanzar al espacio cohetes de propulsión nuclear, más pesados que los de combustibles químicos y concebidos para viajes cada vez más largos.

Aplicaciones de la radiactividad en medicina y agricultura.

En el campo médico se suelen utilizar las irradiaciones con sustancias radiactivas para destruir tejidos malignos, como los productores de cáncer.

La acción del radio se debe a los rayos que éste emite en grandes cantidades en el curso de sus sucesivas desintegraciones. Su empleo es muy arriesgado, ya que en los tejidos pueden fijarse pequeñísimas cantidades que podrían producir lesiones irreparables. Por ello, se prefiere el empleo de su primer descendiente, el radón, cuya vida media es sólo de pocos días y su acción contaminante mucho menor que la del radio. En los últimos tiempos se tiende a sustituir el radio por isótopos radiactivos, ya que la actividad de éstos cesa pronto y disminuye, por lo tanto el peligro de lesión.

Los radioisótopos se utilizan en diagnósticos y en terapia. El mercurio 197, por ejemplo, es un isótopo del mercurio y es radiactivo. Tiene mucha utilidad para radiografiar el cerebro, donde se concentra. El radiólogo, analizando las placas obtenidas desde distintos ángulos, proporciona al cirujano la localización exacta de los tumores cerebrales. El radioisótopo del hierro 59, se utiliza para estudiar la formación de la sangre. Se inyecta en la médula ósea, donde se forman las nuevas células de la sangre, cuyo curso puede seguirse mediante las radiaciones que emite este radioisótopo.

Menos conocida es la aplicación, cada vez más amplia, que la radiactividad está teniendo en el campo de la agricultura. La irradiación de ciertas plantas puede producir mutaciones genéticas perfectamente controladas, que modifiquen determinados aspectos perjudiciales para las cosechas. Así, se ha conseguido que con algunos cereales sometidos a irradiación se obtengan dos cosechas al año. Es importante resaltar que dichas plantas no poseen ningún grado de radiactividad; son sólo descendientes de plantas que fueron irradiadas, en las que se han producido alteraciones genéticas favorables.

Fines bélicos:

La bomba atómica

Es el resultado de una fisión incontrolada de un elemento como el U 235. Ahora bien, si una muestra de éste es pequeña, la mayor parte de neutrones que libera se escapan por su superficie sin provocar nuevas reacciones, con lo cual no tienen lugar la reacción en cadena. Para llegar a la bomba se requiere, pues, enriquecer el uranio en su contenido de U 235 y una vez superada una cierta masa de éste, denominada masa crítica, la cantidad de neutrones que escapan por las paredes ya no es suficiente para impedir la reacción en cadena. Así, al poner en contacto dos masas subcríticas de uranio enriquecido, de manera que en conjunto supere la masa crítica, se producirá la reacción en cadena y la explosión. La bomba atómica se consigue

manteniendo separadas dos masas subcríticas mediante un grueso tabique captador de neutrones, el cual, en el momento en que se tiene que provocar la explosión, se rompe mediante un explosivo convencional.

Ventajas de la energía nuclear de fisión.

1. Es fiable. Las centrales nucleares se han encontrado con algunas dificultades en sus inicios, pero en la actualidad ya están corregidas. La energía de origen nuclear vio frenado su incremento a mediados de la década de los ochenta, debido a las grandes inversiones que necesita y a la sensibilización de la opinión pública mundial respecto su peligro y contaminación, a la vez que se producía una desaceleración de las expectativas de consumo de energía.
2. El precio del kwh es competitivo. Si el precio de construcción de las centrales nucleares es superior al de las centrales clásicas, por el contrario, el coste de energía producida expresado en combustible es de menos de la mitad: la economía del combustible compensa ampliamente el coste de producción de las centrales nucleares.
3. Permite una seguridad de provisión. El uranio contiene gran cantidad de energía en poco volumen. Una tonelada de combustible nuclear para reactores de agua ordinaria corresponde a 80 000 t de hulla de buena calidad. Sin embargo la utilización de la energía nuclear, según sus detractores, presenta riesgos importantes.

Inconvenientes:

1. Agrava, en relación a las centrales térmicas, el problema de evacuación del calor no transformado en electricidad. El agua de los ríos utilizada con este fin en algunas centrales sufre un aumento de la temperatura que destruye el equilibrio ecológico.
2. Produce grandes cantidades de residuos radiactivos, algunos de los cuales son de larga vida. De este modo, el almacenamiento durante siglos de estos radioelementos plantea unos problemas que siguen sin resolverse. Algunos temen fugas de consecuencias genéticas dramáticas.
3. Finalmente, utilizando plutonio, elemento muy peligroso empleado también en las armas nucleares, para los sobregeneradores, se crea la necesidad de tomar medidas de seguridad muy severas, hecho que acentúa el carácter centralizador de este sistema de producción de energía.

ENERGÍA NUCLEAR DE FUSIÓN:

La liberación de energía nuclear puede producirse en el extremo bajo de la curva de energías de enlace a través de la fusión de dos núcleos ligeros en uno más pesado. La energía irradiada por el Sol se debe a reacciones de fusión de esta clase que se producen en su interior a gran profundidad. A las enormes presiones y temperaturas que existen allí, los núcleos de hidrógeno se combinan a través de una serie de reacciones y producen casi toda la energía liberada por el Sol. En estrellas más masivas que el Sol, otras reacciones llevan al mismo resultado.

La fusión nuclear artificial se consiguió por primera vez a principios de la década de 1930, bombardeando un blanco que contenía deuterio (el isótopo de hidrógeno de masa 2) con deuterones (núcleos de deuterio) de alta energía mediante un ciclotrón. Para acelerar el haz de deuterones se necesitaba una gran cantidad de energía, de la que la mayoría aparecía como calor en el blanco. Eso hacía que no se produjera una energía útil neta. En la década de 1950 se produjo la primera liberación a gran escala de energía de fusión, aunque incontrolada, en las pruebas de armas termonucleares realizadas por Estados Unidos, la URSS, Gran Bretaña y Francia. Una liberación tan breve e incontrolada no puede emplearse para la producción de energía eléctrica.

En las reacciones de fisión estudiadas anteriormente, el neutrón, que no tiene carga eléctrica, puede acercarse

fácilmente a un núcleo fisionable (por ejemplo, uranio 235) y reaccionar con él. En una reacción de fusión típica, en cambio, los dos núcleos que reaccionan tienen ambos una carga eléctrica positiva, y antes de que puedan unirse hay que superar la repulsión natural que ejercen entre sí, llamada repulsión de Coulomb. Esto ocurre cuando la temperatura del gas es suficientemente alta, entre 50 y 100 millones de grados centígrados. En un gas formado por los isótopos pesados del hidrógeno, deuterio y tritio, a esa temperatura se produce la reacción de fusión que libera unos 17,6 MeV por cada fusión. La energía aparece en un primer momento como energía cinética del núcleo de helio 4 y el neutrón, pero pronto se convierte en calor en el gas y los materiales próximos.

Si la densidad del gas es suficiente a esas temperaturas, basta una densidad de sólo 10^{-5} atmósferas, casi un vacío el núcleo de helio 4 puede transferir su energía al gas hidrógeno circundante, con lo que mantiene la temperatura elevada y permite que se produzca una reacción de fusión en cadena. En esas condiciones se dice que se ha producido la 'ignición nuclear'.

Los problemas básicos para alcanzar las condiciones para la fusión nuclear útil son: 1) calentar el gas a temperaturas tan altas; 2) confinar una cantidad suficiente de núcleos durante un tiempo lo bastante largo para permitir la liberación de una energía mayor que la necesaria para calentar y confinar el gas. Un problema importante que surge después es la captura de esta energía y su conversión en electricidad.

A temperaturas superiores a los 100.000 °C, todos los átomos de hidrógeno están ionizados. El gas está formado por un conjunto eléctricamente neutro de núcleos con carga positiva y electrones libres con carga negativa. Este estado de la materia se denomina plasma.

Los materiales ordinarios no pueden contener un plasma lo suficientemente caliente para que se produzca la fusión. El plasma se enfriaría muy rápidamente, y las paredes del recipiente se destruirían por las altas temperaturas. Sin embargo, como el plasma está formado por núcleos y electrones cargados, que se mueven en espiral alrededor de líneas de campo magnético intensas, el plasma puede contenerse en una zona de campo magnético de la forma apropiada.

Para que un dispositivo de fusión resulte útil, la energía producida debe ser mayor que la energía necesaria para confinar y calentar el plasma. Para que esta condición se cumpla, el producto del tiempo de confinamiento, t , y la densidad del plasma, n , debe superar el valor 1014.

Desde 1950 se han llevado a cabo numerosos proyectos para la confinación magnética de plasma en Estados Unidos, la antigua Unión Soviética, Gran Bretaña, Japón y otros países. Se han observado reacciones termonucleares, pero el número de Lawson fue pocas veces superior a 1012. Sin embargo, uno de los dispositivos el tokamak, sugerido originalmente en la URSS por Ígor Tamm y Andréi Sajárov comenzó a arrojar resultados prometedores a principios de la década de 1960.

La cámara de confinamiento de un tokamak tiene forma toroidal con una sección de aproximadamente 1 m de diámetro y un diámetro total de alrededor de 3 m. En esta cámara se establece un campo magnético toroidal de unos 5 teslas mediante grandes electroimanes. La intensidad de este campo es unas 100.000 veces mayor que la del campo magnético de la Tierra en la superficie del planeta. Las bobinas que rodean la cámara inducen en el plasma una corriente longitudinal de varios millones de amperios. Las líneas de campo magnético resultantes son espirales dentro de la cámara, que confinan el plasma.

Después de que en varios laboratorios funcionaran con éxito tokamaks pequeños, a principios de la década de 1980 se construyeron dos dispositivos de gran tamaño, uno en la Universidad de Princeton, en Estados Unidos, y otro en la URSS. En el tokamak, el plasma alcanza una temperatura elevada por el calentamiento resistivo producido por la inmensa corriente toroidal, y en los nuevos aparatos grandes, un calentamiento adicional mediante la inyección de haces neutrales debería producir condiciones de ignición.

Otra posible vía para obtener energía de la fusión es el confinamiento inercial. En esta técnica, el combustible (tritio o deuterio) está contenido en una pequeña bolita que se bombardea desde distintas direcciones con un haz láser de pulsos. Esto provoca la implosión de la bolita y desencadena una reacción termonuclear que causa la ignición del combustible. Los avances en la investigación de la fusión son prometedores, pero probablemente hagan falta décadas para desarrollar sistemas prácticos que produzcan más energía de la que consumen. Además, las investigaciones son sumamente costosas.

Sin embargo, en los primeros años de la década de 1990 se realizaron algunos avances. En 1991, se generó por primera vez en la historia una potencia significativa (unos 1,7 megavatios) a partir de la fusión nuclear controlada, en el laboratorio de la Cámara Toroidal Conjunta Europea (JET, siglas en inglés), en Gran Bretaña. En diciembre de 1993, los investigadores de la Universidad de Princeton emplearon el Reactor Experimental de Fusión Tokamak para producir una reacción de fusión controlada que generó 5,6 megavatios. No obstante, tanto el JET como el Reactor Experimental de Fusión Tokamak consumieron más energía de la que produjeron durante su funcionamiento.

Aplicaciones:

La fusión no tiene todavía aplicaciones, sobre todo porque se desconoce aun el método para contener la reacción dentro de un espacio limitado, en el que se pueda recoger la energía. En realidad, dada la elevadísima temperatura que se precisa, no existe un material suficientemente resistente para construir el recipiente que contenga y controle la fusión nuclear.

En búsqueda de soluciones, los científicos han ensayado diferentes sistemas, entre los que destacan los métodos de confinamiento magnético y el de confinamiento inercial. En el primero, los núcleos de hidrógeno se mantienen concentrados, a altísimas temperaturas, no mediante un recipiente cerrado, sino merced a intensos campos magnéticos, que impiden su salida. Bajo estas condiciones, se hace incidir sobre los núcleos de hidrógeno nuevos núcleos a altísima velocidad, cuya energía es capaz de iniciar el proceso de la fusión nuclear.

En el terreno militar, los intentos de aplicación de la fusión nuclear a la bomba de hidrógeno, de potencia muy superior a la bomba atómica, y cuya fusión incontrolada tiene lugar en el espacio.

Ventajas:

Si la energía de fusión llega a ser practicable, ofrecería las siguientes ventajas:

- Una fuente ilimitada de combustible, el deuterio procedente de los océanos.
- Imposibilidad de un accidente en el reactor, ya que la cantidad de combustible en el sistema es muy pequeña.
- Residuos mucho menos radiactivos y más sencillos de manejar que los procedentes del sistema de fisión.