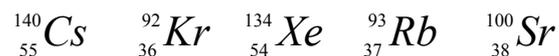


ENERGÍA NUCLEAR. CENTRAL NUCLEAR

Una central nuclear de agua a presión, proporciona diariamente una potencia eléctrica de 1000 MW a la red eléctrica. Posibles “picos de demanda” en determinados días suelen suministrarlos otras centrales como las de gas natural o las hidráulicas . Si el combustible es U (235) y, la energía de enlace por nucleón en dicho núcleo es de 7’59 MeV y la de los núcleos resultado de fisión del mismo es de unos 8.49 MeV , se pide: a) ¿ Por qué se puede obtener energía por la ruptura de núcleos grandes como el del U ó del Pu (239)? b) Sabiendo que, en las reacciones de fisión, se liberan 3 ó 2 neutrones, escribir dos posibles reacciones de fisión del $^{235}_{92}\text{U}$ c) ¿ Cómo se mantiene la reacción de fisión de manera que no sea una “reacción en cadena” explosiva? d) ¿ Cómo se obtiene energía eléctrica a partir de dicha energía de fisión de los átomos de uranio? e) Si el rendimiento de la instalación es del 33% ¿ Cuánto combustible nuclear (U 235) se consume diariamente? ¿Cuánta cantidad de productos radiactivos se obtienen?. Si el U natural contiene sólo el 0’711 % de átomos fisibles de ^{235}U (la mayoría son de ^{238}U) y, en el U enriquecido usado en las centrales es del 3’5 % en forma de pastillas de UO_2 ¿ cuanto combustible en forma de pastillas se consume diariamente?

Datos : $1\text{MeV} = 1’6 \cdot 10^{-13}\text{ J}$; masa del U(235) = 235’118 uma ;
 $1\text{uma} = 1’66 \cdot 10^{-27}\text{ Kg}$, masa atómica del O = 15’994 . El rendimiento de una central nuclear suele ser del 33%.

Átomos que se encuentran entre otros muchos, en las cenizas radiactivas : $^{141}_{56}\text{Ba}$



La teoría de la relatividad de Einstein predice que masa y energía son manifestaciones de una misma magnitud, es decir, que la masa y la energía tal y como las concebimos pueden “convertirse” una en otra y viceversa. Según la teoría de la relatividad, la equivalencia entre la masa y la energía que ésta supone, viene determinada por la expresión:

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

en donde “c” es la velocidad de la luz.

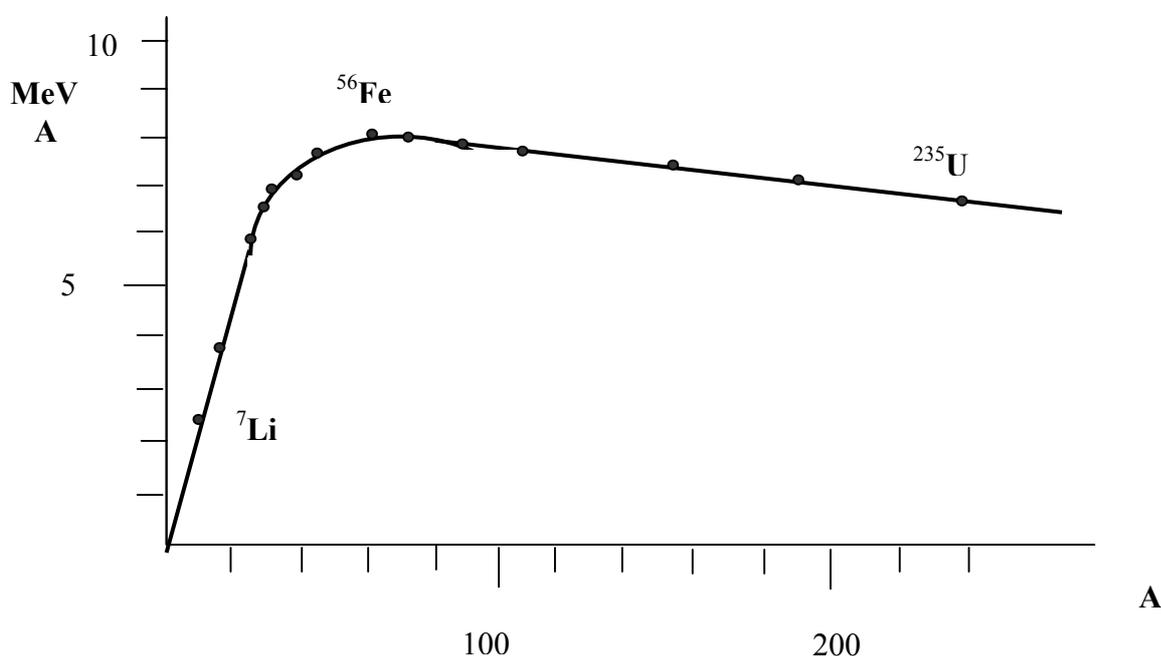
Si un núcleo es estable, significa que en su constitución a partir de protones y neutrones ha tenido lugar una gran liberación de energía. Por tanto, para poder romper la estructura de dicho núcleo hará falta gran cantidad de energía. Las cantidades de energía involucradas en los procesos de “construcción” nuclear son de tal magnitud que se traducen en una sensible diferencia entre la masa de los nucleones constituyentes y el núcleo resultante.

La diferencia entre la suma de las masas de las partículas que constituyen el núcleo y la masa del núcleo, se conoce como **defecto de masa**. Su equivalente en energía es la **energía de enlace** de dicho núcleo.

Si calculamos el defecto másico (en uma) y lo pasamos a Kg ($1 \text{ uma} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$), multiplicando por el cuadrado de la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), tendremos la **energía de enlace** de dicho núcleo en Julios. Pero, en Física nuclear, las unidades más apropiadas de energía para dar las energías de enlace nucleares son los MeV (mega electrón voltios), por lo que es interesante conocer la equivalencia entre 1 uma y los MeV. Esta equivalencia es:

$$1 \text{ uma} = 931,47 \frac{\text{MeV}}{c^2}$$

La comparación de la estabilidad de los distintos núcleos puede establecerse atendiendo a los valores de la energía de enlace. Pero, como es evidente, esta energía será mayor para los núcleos que posean muchos nucleones, por ello, para medir la estabilidad nuclear, se utiliza la llamada **energía de enlace por nucleón** que es la relación entre la energía de enlace y el nº de nucleones que posee el núcleo, es decir E/A . Esta energía de enlace por nucleón, varía a medida que aumenta el número de nucleones del núcleo, siendo más estables aquellos que posean una energía de enlace por nucleón mayor. Si representamos la E/A frente al número de nucleones A , obtenemos gráficas como la siguiente:



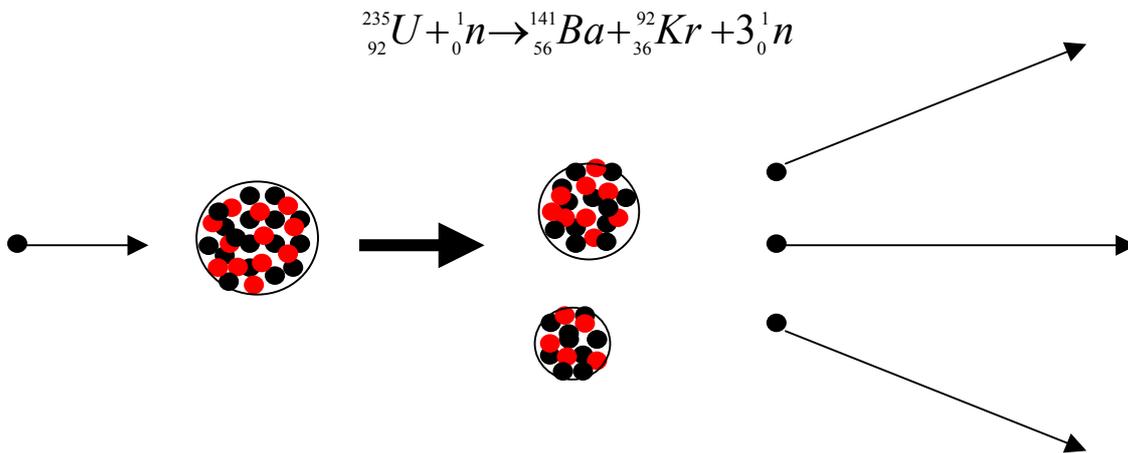
Dos hechos deben destacarse:

- La mayor estabilidad corresponde a los núcleos con número másico próximo a 56, por tanto a los núcleos de masa intermedia.
- La estabilidad crece muy rápidamente con A, para núcleos ligeros y, disminuye lentamente para núcleos grandes.

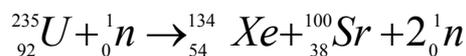
Estas dos consideraciones serán de gran importancia a la hora de plantear la extracción de energía mediante los procesos de **FISIÓN** (de núcleos grandes) y de **FUSIÓN** (de núcleos pequeños). Lo que contesta a pregunta a) del problema.

En 1939, en Alemania, Hahn y Strassman, “bombardearon” el uranio (Z=92) con neutrones y, después de un cuidadoso análisis descubrieron entre los productos de reacción el bario (Z=56) y el cripton (Z=36). A este fenómeno se denominó **fisión** de un núcleo grande en otros de masa intermedia.. No todos los isótopos del U son fisibles por neutrones. El ^{238}U (que es el más abundante) **no lo es**. Sólo resulta fisible el ^{235}U que se encuentra en una proporción pequeña en el uranio natural.. Cuando el ^{235}U experimenta fisión, no sólo se obtienen el Ba y el Kr, sino que los fragmentos de la fisión pueden ser otros elementos, obteniéndose más de 100 isótopos diferentes de distintos elementos. Sin embargo, éstos átomos se encuentran siempre en la zona intermedia del sistema periódico, con números atómicos comprendidos entre 34 y 58, que, recordemos son mucho más estables que el U del que proceden.

Hay dos propiedades que hacen de la fisión del uranio un proceso importante: **en la fisión se liberan neutrones y se libera una gran cantidad de energía**. Un posible proceso de fisión del ^{235}U puede ser el siguiente:

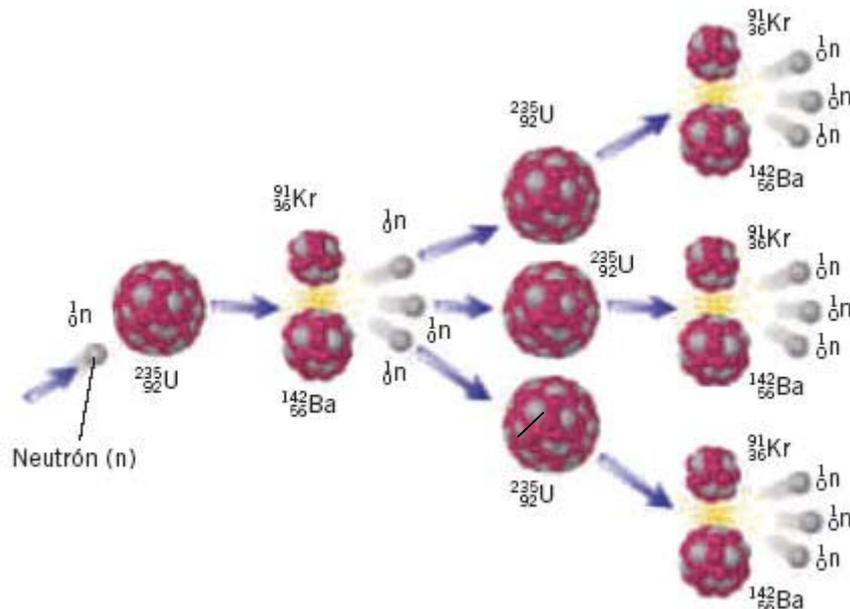


También pueden darse los siguientes procesos de fisión del U (235):



Para cada núcleo pesado como el ^{235}U , la energía de ligadura es de unos 7'6 MeV por nucleón, pero para los núcleos de masa intermedia es de unos 8'4 meV por nucleón, con lo que resulta una liberación de energía de unos 0'8 MeV por cada nucleón. Este orden de magnitud resulta ser de, aproximadamente un millón de veces mayor que la energía liberada en las reacciones químicas más energéticas.

Bajo ciertas condiciones, los neutrones liberados en la fisión de un núcleo de uranio, pueden a su vez, producir nuevas fisiones en átomos de uranio vecinos, desarrollándose lo que se llama **reacción en cadena**.



Para ello, debe haber una relación adecuada entre la producción de neutrones por fisión y la pérdida de neutrones debida a las siguientes causas:

- Captura de neutrones por los núcleos de U sin que se produzca fisión (porque la velocidad no sea la adecuada).
- Captura de neutrones por las paredes del recipiente que contiene la muestra.
- Escape de neutrones de la muestra.

Esta relación adecuada entre los neutrones que se producen y los que se pierden para que tenga lugar la **reacción en cadena** se denomina **masa crítica**. Por encima de esta masa se produce la reacción en cadena, pero, por debajo de la misma, no se produce (pues se pierden más neutrones por unidad de tiempo que los que llegan a provocar fisión). Si la **reacción en cadena** de la fisión del U tiene lugar sin control alguno, se da la explosión nuclear (liberación de una enorme cantidad de energía en un pequeñísimo intervalo de tiempo)..

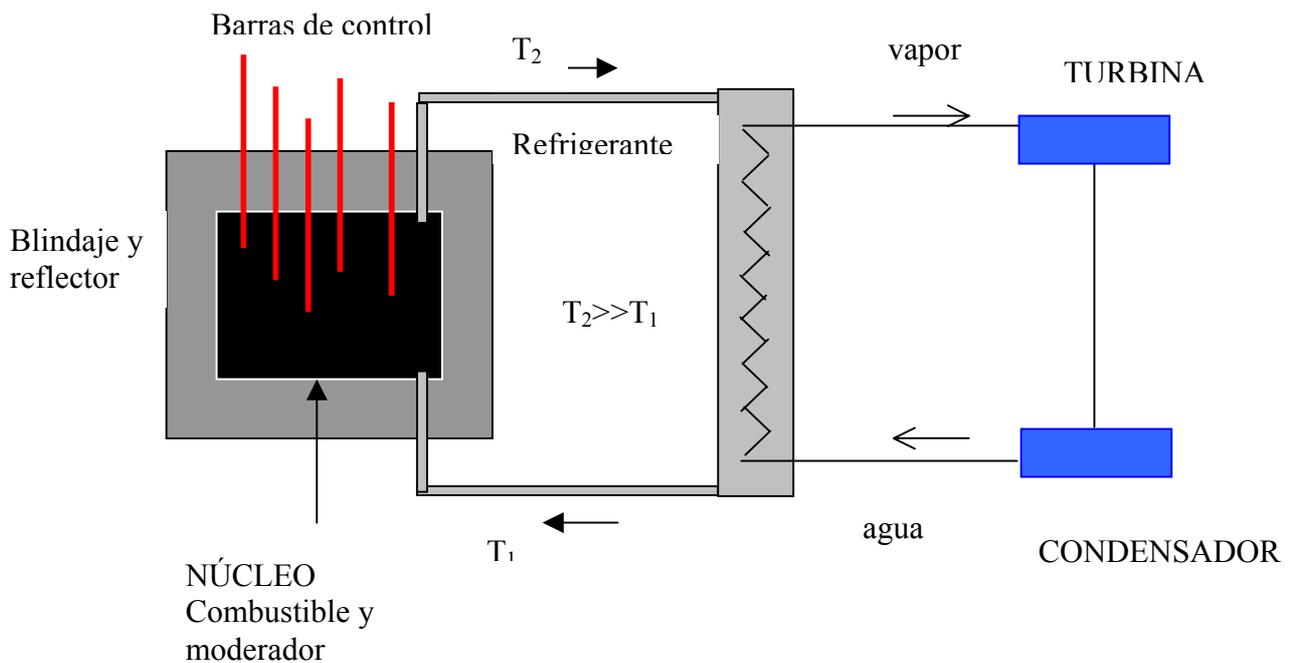
Es posible controlar la reacción de fisión del U, procurando que el número de neutrones que producen fisiones dentro del **reactor nuclear se mantenga constante**. Esto se consigue en dichos **reactores nucleares** con las llamadas **barras de control** (constituidas por sustancias absorbentes de neutrones como el ácido bórico, cadmio ...).

Una consideración importante en el diseño de los reactores nucleares es el hecho de que la fisión del ${}^{235}\text{U}$ es mucho más probable cuando se impacta con **neutrones lentos (térmicos) que cuando se trata de neutrones rápidos procedentes de otras fisiones**. Para ello, hay que reducir su velocidad haciéndolos chocar con núcleos de otra sustancia, llamada **moderador** (grafito, agua, agua pesada...) hasta que la velocidad es la adecuada..

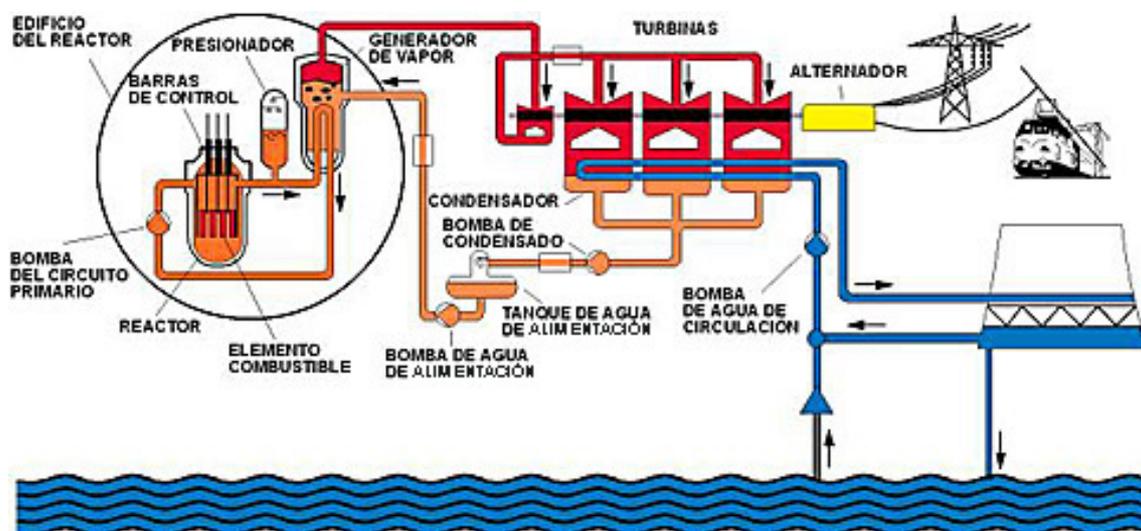
El combustible de un reactor nuclear es el ${}^{235}\text{U}$, en forma de óxido de uranio UO_2 , o de uranio metal. Hay que tener en cuenta que, el ${}^{235}\text{U}$ existe en el uranio natural sólo en un

0'7%, pues la mayor parte de los átomos corresponde a ^{238}U que no es fisible. Así, una operación previa, es preparar el combustible mediante un **proceso de enriquecimiento** (en el que se aumenta el tanto por cien de ^{235}U).

La energía desprendida en un reactor nuclear, es extraída mediante el **refrigerante** (en algunos reactores el refrigerante y el moderador pueden ser la misma sustancia como ocurre en los de agua ligera, o ser distintos, como en los refrigerados por CO_2 , Na ...)
El esquema de un reactor nuclear será el siguiente:



Este esquema podemos ampliarlo con el siguiente:



d) En el NÚCLEO se producen las fisiones del ^{235}U con neutrones térmicos (los que existen a la temperatura ordinaria), lo cual produce un gran desprendimiento de energía, que aumenta la temperatura del núcleo (en las “pastillas” de combustible se puede alcanzar la temperatura de **1700°C** inferior a la fusión de las mismas que es de 2840°C temperatura que **no debe alcanzarse bajo ningún concepto**). Esta temperatura de 1700°C puede controlarse con las **barras de control** (absorbentes de neutrones) que establecen la “reacción en cadena” a un ritmo adecuado. En el interior del núcleo existe el “**refrigerante**” (que puede coincidir con el **moderador** (puede ser agua ligera o agua “pesada” D_2O ...)). Este refrigerante, se extrae del núcleo a elevada temperatura T_2 (315°C) y pasa a un intercambiador de calor, en el que un circuito de agua independiente, se calienta hasta vaporizarse. El vapor obtenido, a elevada presión, pasa a una **turbina** y mueve el rotor. Dicho movimiento de giro se transmite a un **alternador**, en el que se genera **energía eléctrica** (al girar el inducido en el campo magnético del inductor) recordamos la ley de Faraday y Henry. Para la distribución de esta energía se eleva la tensión de la misma en un **transformador**.

De una central nuclear, lo que sale por las torres de refrigeración (chimeneas) es **vapor de agua** no contaminado por los residuos radiactivos del núcleo, ya que pertenece al segundo circuito de transmisión de energía. La **energía eléctrica** sale de la central como corriente alterna a elevada tensión, unos 200.000 V.

En el núcleo quedan todas las cenizas radiactivas procedentes de las rupturas de los átomo de U (235).

e) Si el rendimiento de la instalación es del 33% , y queremos obtener 1000 MW durante un día, se trata de una cantidad de energía en Julios de:

$$E = 1000MW \cdot 10^6 \frac{W}{MW} \cdot 24h \cdot 3600 \frac{s}{h} = 8'64 \cdot 10^{13} W \cdot s = 8'64 \cdot 10^{13} J$$

Como el rendimiento de toda la instalación es del 33%, la energía que nos debe proporcionar el combustible (**uranio enriquecido**) será:

$$E = \frac{8'64 \cdot 10^{13} J}{0'33} = 2'62 \cdot 10^{14} J$$

Si se fisiona un átomo de ^{235}U se obtiene una energía que debemos calcular como la diferencia entre la energía de enlace de los nucleones en el ^{235}U y la de los núcleos resultado de la fisión.

$$E_{\text{enlace núcleo}}^{235}\text{U} = 7'59 \frac{\text{MeV}}{\text{nucleón}} \cdot 235 \text{nucleones} = 1783'65 \text{MeV}$$

Energía que se desprendió en su formación a partir de los nucleones correspondientes.

Para calcular la energía de enlace de los núcleos resultado de la fisión, haremos un cálculo aproximado, ya que la energía de enlace de cada uno de ellos depende del mismo. Ademán, como en la fisión quedan en libertad 3 ó 2 neutrones, el n° de

nucleones que queda enlazados en los núcleos correspondiente es de 233 nucleones o 234 nucleones, con lo que, considerando igual de probable una fisión u otra, contabilizaremos como n° de nucleones enlazados el de 233'5.

$$E_{\text{enlacenucleosfisión}} = 8'49 \frac{\text{MeV}}{\text{nucleón}} \cdot 233'5 = 1982'42 \text{MeV}$$

Energía que se desprendió en su formación a partir de los nucleones correspondientes (de manera aproximada).

Con lo cual, la energía que se libera en la fisión de un núcleo de uranio 235 será:

$$E_{\text{fisión}} = 1982'42 - 1783'65 = 198'77 \approx 200 \text{MeV}$$

Esta energía se obtiene como energía cinética de los productos de fisión, pero, además debemos considerar la energía cinética de los neutrones rápidos y la energía en forma radiación beta, rayos gamma y rayos X. En total, en cada fisión, consideraremos que se desprenden unos **200 MeV**.

Recordando la equivalencia entre el MeV y el Julio:

$$E = 200 \text{MeV} \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{\text{MeV}} \cdot 1'6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{C}}{\text{e}} = 3'2 \cdot 10^{-11} \text{C.V} = 3'2 \cdot 10^{-11} \text{J}$$

Como se trata de la fisión de un solo átomo de ^{235}U , veamos a cuantos gramos equivale:

$$1 \text{átomo} = 235'118 \text{uma} \cdot 1'66 \cdot 10^{-27} \frac{\text{Kg}}{\text{uma}} = 3'9 \cdot 10^{-25} \text{Kg}$$

Si cada $3'9 \cdot 10^{-25} \text{Kg}$ de ^{235}U , producen $3'2 \cdot 10^{-11} \text{J}$, y, queremos obtener $2'62 \cdot 10^{14} \text{J}$, los kilos consumidos del combustible serán:

$$\text{masa} = \frac{3'9 \cdot 10^{-25} \text{Kg}}{3'2 \cdot 10^{-11} \text{J}} \cdot 2'62 \cdot 10^{14} \text{J} = 3'19 \text{Kg}$$

Como el combustible nuclear, no consta sólo de átomos de ^{235}U , sino fundamentalmente de átomos de ^{238}U , si el llamado **uranio enriquecido** consta del 3'5 % de átomos del uranio fisible, los Kg de uranio enriquecido serán:

$$\text{masa} = \frac{3'19 \text{Kg}}{0'035} = 91'2 \text{Kg}$$

Esto sería la masa de U, pero la correspondiente a las pastillas de UO_2 será:

$$masaUO_2 = \frac{270}{238} \cdot 91'2 = 103'5 Kg$$

ya que la masa del UO_2 es 270, de las cuál 238 son de U.

En nuestra central, suministrando 1000 MW , se consumen diariamente 103'5 Kg de "pastillas" de UO_2 con el uranio enriquecido.

e) La masa de productos radiactivos será de **3'19 Kg** (ya que la masa resultante al fisionarse el U(235) tendremos que obtenerla restando de la masa fisionada, la que se ha convertido en energía que, por la ecuación de Einstein resulta ser $m = E/c^2 = 2.88 \cdot 10^{-3}$ Kg insignificante) y los núcleos radiactivos serán : ^{141}Ba , ^{92}Kr , ^{140}Cs , ^{93}Rb , ^{134}Xe , ^{100}Sr ... cada uno con su "periodo de semidesintegración correspondiente (ver problema de RADIATIVIDAD). El aspecto del producto ya utilizado como combustible y que se extrae del reactor, es muy parecido al original (pastillas de UO_2) pero, **con una enorme radiactividad**. Por esto, no es adecuado llamarlo "cenizas radiactivas".

Hoy en día hay 443 centrales nucleares en el mundo que suponen el 17% de la producción eléctrica mundial. De esas el país que más tiene en la actualidad es EEUU con 104, más sorprendente son las 58 centrales de Francia, más de la mitad de EEUU con caso 15 veces menos superficie. Actualmente España cuenta con 8 reactores nucleares.

Los accidentes en las centrales nucleares, recordemos que han sido: El de Three Mile Island (EEUU) en 1979, donde se emitió una gran cantidad de gases radiactivos a la atmósfera. El de Chernóbil (RUSIA) en 1987, en donde, por errores humanos en el control del reactor, se expulsaron al medio ambiente materiales radiactivos del núcleo que quedó al descubierto y que supuso un desastre superior a 500 veces el liberado a una bomba atómica. Y, por último, el de la central de Fukushima (JAPÓN) que ha puesto de manifiesto la peligrosidad de las mismas centrales frente a fenómenos naturales (poco probables pero posibles) , con lo que se está cambiando la política sobre su mantenimiento como generadores de energía, aún con la ventaja económica que pueda suponer el KW.h producido por las mismas así como su no contaminación frente al efecto invernadero, ya que no emiten CO_2 a la atmósfera.

El problema fundamental, es el **almacenamiento de los productos radiactivos (cenizas)** de residuos de elevadas vidas medias en su desintegración.

EN RESUMEN:

Los pasos para la obtención de Energía eléctrica a partir del proceso de FISIÓN NUCLEAR son los siguientes:

- Extracción del mineral de URANIO.
- Proceso de enriquecimiento del mismo en ^{235}U pasando del 0'711 % que existe en el U natural, al 3'5 % que es necesario para la reacción en cadena en el **uranio enriquecido**.
- Preparación de las pastillas de UO_2 con el uranio enriquecido.

- Elección del **moderador** de la velocidad de los neutrones rápidos procedentes de la fisión (agua ligera o agua pesada D₂O). La nuestra sería de agua ligera H₂O.
- Preparación de las **barras de control** (absorbentes de neutrones como B, Cd...), que nos permitan controlar la temperatura del núcleo del reactor y por tanto, el nº de fisiones que se producen por segundo para que no se supere la temperatura de unos 1700°C.
- Elección del **material refrigerante** que transporte la energía térmica del núcleo al intercambiador de calor, saliendo del núcleo a unos 315°C y volviendo al mismo a unos 275°C. Puede coincidir con el moderador.
- Vaporización del agua extraída del río o del mar para que dicho vapor a elevada presión y temperatura, mueva las **turbinas**.
- El movimiento de las turbinas se transmite al **alternador** que transforma la energía mecánica en energía eléctrica.
- Para el transporte de dicha energía eléctrica, se utilizan **transformadores**, que elevan la tensión hasta 200.000 V.
- Extracción del combustible utilizado que contiene **productos de elevada radiactividad (cenizas)**.
- Guardar dichas cenizas en **cementerios nucleares** con todas las medidas de seguridad adecuadas, dada su alta peligrosidad.

Como ventaja de éste tipo de centrales tenemos:

- El bajo coste de la Energía eléctrica producida.
- Que no contaminan la atmósfera con CO₂
- El proporcionar una potencia de 1.000MW, supone que, puedan estar funcionando **simultáneamente** 166.600 neveras (0'15KW), 166.600 lavadoras (1.2KW), 166.600 lavavajillas (3'35KW), 166.600 microondas (1KW), 166.600 TV (0'125KW), 166.600 ordenadores (0.1KW), 166.600 bombillas de bajo consumo ...
-

Como desventajas tenemos:

- La producción continua de cenizas de alta y baja radiactividad que es necesario almacenar durante miles de años.
- Su peligrosidad ante accidentes naturales o fallos humanos.