

SERIE DE ARTÍCULOS SOBRE ENERGÍA ALTERNATIVA: LA NUCLEAR

ENTREGA N° 6

LOS RESIDUOS NUCLEARES

Noviembre 2010

Autor: Ing. Jorge Bertoni

Para la opinión pública, el tema mas preocupante respecto al uso de la energía nuclear con fines pacíficos, está dejando de ser la seguridad y los riesgos que ello pudiera implicar, sino el qué hacer con los residuos.

Este comentario está basado en las reacciones adversas que se están produciendo en localidades principalmente europeas, (es el continente donde se encuentran la mayor parte de las centrales nucleares en operación) donde se menciona la posibilidad de instalar un depósito de larga duración de desechos nucleares.

¿Las centrales nucleares son las principales generadoras de residuos radiactivos? La respuesta es **Sí**. Estos quedan almacenados dentro de los combustibles gastados.

Pero antes de definir cuantitativa y cualitativamente estos residuos, conviene observar qué sucede en materia de radiaciones, en el entorno donde vive el hombre, sobre la superficie de la Tierra.

Desde la formación de este planeta, hace 4.500 millones de años existieron en su corteza, mas o menos uniformemente distribuidos, “**radionucleidos naturales**”, porque no han sido creados por el hombre, que se han ido desintegrando desde entonces formando una gran familia de elementos radiactivos.

El material inicial es el Uranio 238, que termina siendo plomo 206 debido a las desintegraciones sucesivas. De esa larga cadena de elementos que se van desintegrando, principalmente por emisión de radiación alfa y beta, hay uno que por su condición de ser gaseoso, el Radón 222, constituye una de las fuentes de radiación natural en la que se encuentra inmerso el ser humano. (Radiación de fondo, promedio anual en el mundo dosis efectiva: 2,4 mSv)¹

La dosis máxima recomendada por la ICRP para el público es de 50 mSv/año.
pag.1 .

¹ La radiación se puede medir con distintas unidades, p.e: curie, bequerel, rad, rem, sievert, siendo ésta la más comun. Equivalencia: 1 rem = 10 mSV. La ICRP es la Comisión Internacional de Protección Radiológica, que hace recomendaciones que adoptan las respectivas autoridades de los distintos países en materia de dosis de radiación permitidas.

El por qué, después de tanto tiempo de haberse creado la Tierra sigue habiendo uranio en su corteza, es porque la vida media del uranio (tiempo en que se reduce a la mitad el número de átomos iniciales por su desintegración natural) es de $T = 4,468 \times 10^9$ años (4,4 seguido de nueve ceros). Tiempo demasiado largo como para que se haya desintegrado todo el uranio.

Si comparamos en la corteza terrestre, la abundancia entre algunos minerales, encontramos que el uranio es del orden de 20.000 veces menos abundante que el hierro, 20 a 30 veces menos abundante que el cobre, el nickel o el zinc, pero 30 veces más abundante que la plata o el mercurio, y 500 a 600 veces más abundante que el oro o el platino.

La concentración promedio es de 1 a 3 kg de metal por tonelada de mineral.

El agua de los océanos también contiene cantidades importantes de uranio pero en una forma muy diluida: del orden de 2 a 3 mg por metro cúbico.

¿Por qué hemos definido a modo de introducción, el medio ambiente natural ya radiactivo? Porque pone luz en una falsa creencia y principal temor de la gente. Esto es con respecto a los residuos nucleares. La gente cree que son **LA** fuente más importante de radiación y de posible contaminación del medio ambiente y que si llegaran a pasar al aire o a las napas freáticas del agua potable, ocurriría una contaminación generalizada. En general se desconoce que el hombre ya está inmerso en un medio radiactivo, aunque de baja y aceptable intensidad.

EL REACTOR NATURAL EN OKLO

Hemos hablado de la corteza terrestre y su radiactividad, y en relación con este tema mencionaremos un hecho insólito y muy poco conocido.

Se comprobó que hace millones de años se produjo en la corteza terrestre, de forma natural, un reactor atómico que generó energía durante muchos miles de años.

¿Como se hizo el descubrimiento? En la década del 50 del siglo pasado, un físico nuclear hizo el siguiente razonamiento; la vida media del uranio 238 es de 4.468 millones de años, mientras que la del uranio 235 (que es el que fisiona en un reactor) es de 700 millones. Esto significa que hace mucho, mucho tiempo, la presencia actual del 0,7 % del U235 en el uranio natural, ($Unat. = 99,3 \text{ U238} + 0,7 \text{ U235}$) tendría que haber sido mayor. (Esto es porque el uranio 235 se desintegra más rápidamente que el 238 y extrapolando hacia atrás, la proporción del U235 habría sido mayor).

Una empresa francesa dedicada al enriquecimiento de uranio (aumentar la proporción de 0,7% al 3,5% necesaria para los reactores actuales) comprobó que una partida de mineral llegada de una mina en Gabon (30.000 km² en el sudoeste de Africa), tenía una proporción inferior al 0,7 % de uranio 235.

Para estudiar la anomalía se hicieron mediciones adicionales, y se encontró mineral hasta con 0,44 % de U235, La única explicación factible es que se hubiera encendido un reactor de forma natural cuando la abundancia del 235 hubiera sido del orden del 3% y que el U235 faltante se hubiera fisionado.

Se comprobó la hipótesis cuando se encontraron restos de neodimio que es un producto de la fisión, como una huella digital de la fisión del uranio 235.

Se descubrió además que el moderador para facilitar la fisión había sido el agua, y en abundancia.

La conclusión de la investigación fue que: hace 1.800 millones de años, se dieron las condiciones naturales para que se generara energía de fisión de forma mantenida (15.000 megavatios/año) durante 500.000 años. Este descubrimiento se limita, hasta ahora, solo a Gabon, en Africa.

LOS RESIDUOS

Tratemos de entender tanto como sea posible, ¿de qué tipo de residuos nucleares hablamos y donde aparecen?. Estos son los que producen los reactores nucleares y aparecen en las barras combustibles de los mismos (Equivalente a los gases de combustión de un coche que salen por el escape, o como el aceite que se tira en cada recambio).

¿De qué cantidad y calidad de residuos estamos hablando en cada parada y recarga de reactor? ¿Tenemos idea del volumen de los residuos acumulados a la fecha por el funcionamiento de reactores en el mundo, y en nuestro país?

Cuando se fisiónan los núcleos de uranio 235 en un reactor, por estar sometidos a un intenso bombardeo del flujo de neutrones, además de energía térmica, se generan productos de fisión, átomos de nuevos elementos, que son fracciones del átomo original de U235 fisiónado, la mayoría de ellos radiactivos.

Es decir que la cantidad de productos de fisión acumulada, dependerá de la tasa a la cual las fisiones se producen, y del tiempo que el uranio permanezca en el reactor manteniendo dicha tasa.

El grado de irradiación del combustible se indica con un parámetro que considera estos dos factores, y se denomina **grado de quemado**. Expresa la energía térmica liberada durante la permanencia del combustible en el reactor.

El grado de quemado se mide en **megavatios.día por tonelada de uranio**. También se puede expresar en kilovatios.hora/ton.uranio. En ese caso:

$$1\text{MW} = 1000 \text{ KW} ; 1\text{día} = 24 \text{ hs. } \quad \mathbf{1 \text{ MW.día} = 24.000 \text{ KW.h}}$$

Debemos recordar que la fisión de un gramo de uranio 235, genera una energía térmica aproximadamente de 1MW.día es decir 24.000 KW.h.

Cada gramo de uranio que se fisiona, produce en consecuencia, además de energía térmica, un gramo de productos de fisión, entre los que se encuentran no menos de cuarenta nuevos elementos químicos con sus isótopos radiactivos.

Estas simples relaciones indican que la cantidad de productos de fisión acumulados en los elementos combustibles, se corresponde con el *grado de quemado* alcanzado por el uranio durante su permanencia en el reactor.

Los reactores de uranio enriquecido que funcionan actualmente (PWR) alcanzan un grado de quemado de unos 33.000 MWd/ton de U, y por lo tanto, **cada tonelada de uranio habrá generado 33.000 gramos = 33 Kg de productos de fisión**.

Al hacer un balance cuantitativo de todos los nucleidos presentes en los productos de fisión, se encuentran 699, de los cuales 579 nucleidos son radiactivos y 120 nucleidos son estables.

Si se agrupan los nucleidos radiactivos (átomos caracterizados por el número de protones y neutrones y el estado energético del núcleo) por su período de semidesintegración, en forma creciente, se obtiene la siguiente tabla:

277 nucleidos cuyo período es inferior a 1 minuto
142 nucleidos cuyo período está comprendido entre 1 minuto y 1 hora
102 nucleidos cuyo período está comprendido entre 1 hora y 1 mes
21 nucleidos cuyo período está comprendido entre 1 mes y 1 año
13 nucleidos cuyo período está comprendido entre 1 año y 30 años
3 nucleidos con un periodo entre 30 años y 1000 años
21 nucleidos con un periodo de más de 1000 años
120 nucleidos estables

Autor: C. Chelet, La Radioactivite – Ediciones NUCLEON, S.A. PARIS, Francia

La tabla anterior indica que 521 nucleidos radiactivos tienen un período menor que un mes, y 21 nucleidos tienen un período mayor que 1000 años.

Ejemplo: Cómo se transformó el combustible inicial en un reactor que produjo en tres años 792.000 Mwh (a 33.000 Mwd/ton)					
Estado del combustible	Unidad de medida	Elementos que lo componen	cantidad	Unidad de peso	
inicial	1 tonelada	U238	967,00	Kg.	
		U235	33,00	Kg.	
			1000,00	Kg.	total
usado	1 tonelada	U238	943,00	Kg.	
		U235	8,00	Kg.	
			951,00	Kg.	subtotal
		Productos de fisión	35,00	Kg.	
		Isótopos de plutonio	8,70	Kg.	
		U236	4,60	Kg.	
		Neptunio 237	0,50	Kg.	
		Americio 243	0,14	Kg.	
		Curio 244	0,06	Kg.	
			1000,00	Kg.	total

La tabla anterior muestra la transformación que sufre el combustible uranio al ser “quemado” en un reactor (para una tonelada). Se indican la composición inicial y la final, al ser extraído.

En los elementos combustibles gastados, quedan materiales valiosos que es necesario recuperar y reciclar, como el uranio que se vuelve a enriquecer, y el plutonio, que es fisiónable y ambos se pueden usar en nuevos combustible.

Estos mismos valores expresados para la carga completa de una central de 1300 Mwe, suficiente para abastecer de electricidad a una población de un millón de personas, serían los siguientes:

- 33.000 Kg. (33 ton.) de uranio enriquecido en U235 al 0,9%
- 360 Kg. de Plutonio.
- 14 Kg. de Neptunio.
- 12 kg de Americio.
- 1 kg de Curio.
- 1200 kg de productos de fisión.

Con el reprocesamiento del combustible usado, se recuperan para ser reciclados el 97% de los productos obtenidos, es decir el uranio que ha quedado ligeramente enriquecido en U235, y el plutonio que servirá como nuevo combustible. **El 3% restante, es el verdadero residuo nuclear que es necesario almacenar por muy largo tiempo.**

La operación de reciclado se inicia con la separación de los elementos. Se realiza mediante solventes selectivos. Se ha desarrollado la técnica del MOX (Mezcla de óxidos de uranio y plutonio), por la que se reemplaza el enriquecimiento inicial del uranio natural en U235.

Para contestar uno de los interrogantes planteados más arriba sobre el volumen de los residuos a guardar en lugar seguro y durante mucho tiempo, en nuestro ejemplo de reactor para un año de operación, serían 1227 Kg. que por su densidad ocuparían el volumen de un cubo de 40 cm de lado, algo más que algunas cajas de zapato.

Su contenido sería una mezcla de productos de fisión y transuránidos (actínidos)² los desechos radiactivos a almacenar definitivamente. Esto es ese 3% del que hablamos en nuestro ejemplo anualizado.

Los combustibles de uranio natural, como los utilizados en nuestro país, no son reprocesados, y por lo tanto se almacenan como salen del reactor, primeramente en piletas bajo agua, dentro mismo de la central, y en el caso de la central de Embalse, después de unos meses se trasladan al exterior en recipientes especialmente diseñados para el almacenamiento en seco. Recordemos que después de utilizados, los elementos combustibles siguen generando calor residual hasta que su radiactividad decaiga y por eso al principio se los almacenan bajo agua para refrigerarlos.

ALMACENAMIENTO DEFINITIVO

Las centrales nucleares también producen durante su operación, desechos de bajo y medio nivel de radiación, consistentes en ropas usadas, guantes, elementos de limpieza, líquidos, resinas, filtros contaminados, etc. Estos desechos se concentran, y se solidifican dentro de una matriz de vidrio u hormigón, dentro de tambores metálicos, y se almacenan dentro de edificios construidos a tal efecto dentro del predio de la central, o en centros especiales de almacenamiento fuera de la misma. En otros casos, los tambores conteniendo los desechos

² Tienen mayor número de protones en su núcleo que los 92 del uranio. Son elementos artificiales, que se forman con el bombardeo de neutrones del uranio 238 en el reactor.

de baja y media radiactividad, se almacenan en fosas al nivel del suelo, que luego se recubren con tierra.

Por ejemplo, Francia, país con experiencia en la operación de una cincuentena de centrales nucleares, ha destinado una extensión de 100 ha (1 Km. x 1 Km.) para almacenar los desechos de baja actividad, donde se podrán depositar hasta un millón de metros cúbicos, es decir los provenientes de todas las centrales nucleares y usos médicos, hasta el año 2040.

Los grupos ecologistas llamarían a este depósito, **basurero nuclear**, sin tener en cuenta que por el escaso volumen del material depositado y el permanente control que de ello se realiza, aquél dista mucho de ser un basurero, y es en realidad un depósito controlado, sin riesgo alguno para el personal de operación ni mucho menos el público.

Se insiste en el hecho de que los residuos de una central nuclear, son de escaso volumen y por lo tanto, son fácilmente tratados y controlados. Si se compararan con los desechos gaseosos y sólidos de centrales de combustible fósil, para generar la misma cantidad de energía eléctrica, estaríamos hablando en este caso, de millones de toneladas, en particular de gases nocivos para la salud humana, sin ningún tipo de control, vertidas al medio ambiente, y gran cantidad de cenizas.

Los desechos de alta radiactividad y larga vida media, remanentes del reprocesamiento del combustible gastado, son tratados y acondicionados para su almacenamiento por la planta que realizó el reprocesamiento. Son compactados, vitrificados y colocados en tambores de acero.

En la actualidad, ningún desecho de alta actividad y vida media larga, ha sido depositado en su lugar definitivo de almacenamiento, el que deberá ser de por vida. Este tipo de depósito final, está siendo estudiado todavía, pero la preferencia de los especialistas y de gran parte de la opinión pública, se inclina por los llamados repositorios. Estos son grandes cavidades a mucha profundidad, de hasta 1000 metros, en formaciones geológicas muy estables e impermeables, como el granito, donde serían depositados los tambores conteniendo los residuos vitrificados.

Los países que están estudiando este método de disposición definitiva de los desechos radiactivos, son Bélgica, Canadá, Finlandia, Francia, Alemania, Japón, Suecia, Suiza y Estados Unidos. El parlamento en este último país, estaría por aprobar la construcción del primer repositorio del mundo en la localidad de YUCA MOUNTING, en su propio territorio.

EL MARCO REGULADOR Y TÉCNICO

El manejo de desechos radiactivos y su disposición final, está sujeto a un proceso de licenciamiento, que está basado en los criterios fijados por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) de limitación de dosis.

Estos criterios cubren el ciclo completo del combustible nuclear, y también la aplicación de radioisótopos en procesos industriales, aplicaciones médicas o de investigación, y tienden a evitar sistemáticamente los riesgos radiológicos que pudieran surgir durante el manejo de los desechos incluyendo su transporte.

El control en el manejo de desechos, tiene los siguientes objetivos de seguridad y de protección ambiental:

- **Satisfacer** los principios de la protección radiológica en el presente y para las generaciones futuras.
- **Conservar** la calidad del medio ambiente.
- **Minimizar** cualquier tipo de restricciones para las generaciones venideras, tanto como sea practicable.

Lograr estos objetivos en el presente y a corto plazo, resulta relativamente fácil, pero difícil en el caso de desechos de larga vida media que permanecerán radioactivos por períodos de miles de años. Sin embargo, el compromiso a largo plazo para resolver este problema, ha sido aceptado sin reservas, tanto por las autoridades reguladoras como por la comunidad nuclear internacional.

El principio básico, es que las futuras generaciones deberán estar protegidas por lo menos al mismo nivel que las presentes, y por lo tanto los mismos reglamentos sobre protección radiológica que rigen ahora, deberían ser aplicados en un futuro a largo plazo.

Hay una obligación ética de evitar consecuencias inaceptables en el futuro, incluyendo la libertad de explotar cualquier recurso natural y el libre uso del suelo, y se percibe muy bien en el caso de los desechos radiactivos de larga vida, tal vez en mayor grado que para cualquier otra actividad del hombre que pueda afectar a futuras generaciones.

Un análisis objetivo de los conceptos usados en el tratamiento de desechos radiactivos y su implantación, muestran que junto con los criterios restrictivos que se aplican en esta actividad, son consistentes con esta obligación.

NOTICIA RECIENTE

El 27 de agosto de 2010, la central nuclear francesa de Gravelines, en la que hay seis reactores de 1000 Mwe c/u, es la primera en el mundo en haber alcanzado una producción de enrgía eléctrica de 1000 billones de KWh es decir un **Petavatiohora**.

1 KWh = 1000 Wh	Kilovatio
1 MWh = 1000 KWh	Megavatio
1 GWh = 1000 MWh	Gigavatio
1 TWh = 1000 GWh	Teravatio
1 PWH = 1000 TWh	Petavatio

La central de Gravelines no es ni la más grande ni la más antigua del mundo. Sus reactores comenzaron a funcionar entre 1980 y 1984. Está previsto que operen durante 60 años cada uno.

La energía eléctrica que ha producido hasta ahora, equivale a dos veces el consumo anual de toda Francia.

Para producir esa energía con combustibles fósiles se hubieran utilizado:

350 millones de toneladas de carbón o
220 millones de toneladas de fueloil o
60 billones de metros cúbicos de gas.

El uso del uranio como combustible ahorró la emisión a la atmósfera de mil millones de toneladas de anhídrido carbónico (gas de efecto invernadero).

Todos los residuos de alta radiactividad remanentes del reprocesamiento del combustible utilizado, tienen el volumen de un tercio de una pileta de natación olímpica.

SÍNTESIS

El hombre, en la superficie de la Tierra, está sometido en forma permanente a una radiación natural de fondo. La operación de una central nuclear, o la instalación de un depósito de residuos radiactivos de larga duración, no aumenta el nivel de esa radiación de fondo en su proximidad.

El almacenamiento definitivo de los residuos nucleares, es el principal motivo de preocupación en la opinión pública, en relación con el uso pacífico de la energía nuclear.

Los países que utilizan centrales nucleares con uranio enriquecido, deben reprocesar los elementos gastados y recuperar el 97% de su material para reciclarlo en futuros combustibles.

Solo el 3% restante, compuesto por los productos de la fisión y los actínidos tienen que ser compactados y encerrados en tambores rodeados con un blindaje de plomo o de hormigón.

Son elementos altamente radioactivos, pero sólidos, químicamente inertes, es decir no pueden entrar en ignición ni producir una explosión, ni se diluyen.

Estos tambores especiales, se habrán de almacenar en repositorios a muchos metros de profundidad bajo tierra y en formaciones geológicas muy estables, con nula posibilidad de ser inundadas.

El riesgo real y objetivo que significan para el ser humano, es despreciable, sin embargo, las poblaciones involucradas, de inmediato asocian su presencia con un aumento en la probabilidad de producir cáncer.

Se puede concluir diciendo que esta animadversión, es puramente emocional y subjetiva. Tan solo con una buena campaña de información que tenga como objetivo a la opinión pública ésta podrá diferenciar temor de peligro. Se deberá explicar una y otra vez hasta que se entienda que **no hay peligro** en el manejo de los residuos nucleares.

Los países que utilizan centrales nucleares con uranio natural, no tienen la obligación económica de reprocesar el combustible utilizado y por lo tanto los elementos combustibles se almacenan tal como salen del reactor, después de estar unos meses en piletas con agua. Se almacenan dentro del predio de la central.

No se descarta la posibilidad de que llegado el momento, los elementos combustibles se manden a reprocesar y se dispongan los residuos radiactivos de muy larga vida media en los ya mencionados tambores para ser enviados a un repositorio.

El presente escrito no tiene el propósito de desvirtuar o minimizar la importancia y la seriedad del tema del almacenamiento de los residuos nucleares, sino el de informar de forma objetiva, el completo conocimiento del tema y el estado actual de la tecnología disponible y prevista, y contribuir a disipar las dudas y temores que por desconocimiento aún tiene la opinión pública.

Residuos nucleares,