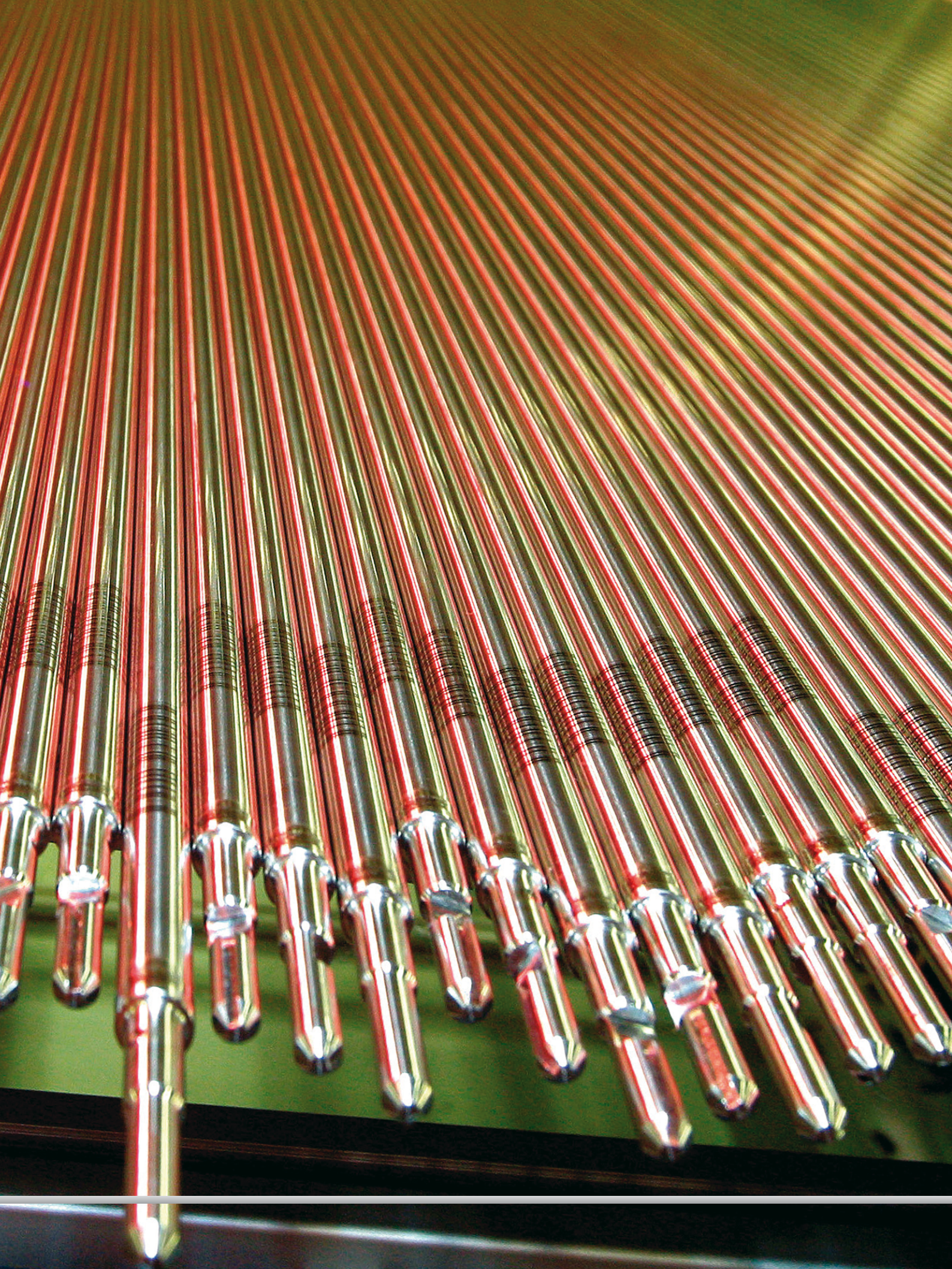




El Uranio, un elemento poco conocido

The uranium is associated with radioactivity and however, its more common isotopes present low radioactivity. This has been used to date the age of the Earth. Its importance is vital to supply electricity from nuclear power. For some years the price of concentrate was decreasing. However, in the last years it has increased dramatically. There are still about 1,500 t of high enrichment uranium from the Cold War. Their blending and use in nuclear conventional power stations would allow their disappearance and the fall of prices. The nuclear fuel waste still keeps a high energetic power. Its reprocessing in a long term seems to be inevitable.

El uranio se asocia a radiactividad y sin embargo sus isótopos más comunes presentan una actividad muy baja, propiedad que ha podido utilizarse para datar la antigüedad de la Tierra. Su importancia es clave para abastecer parte de la demanda de electricidad mundial. Después de varios años a precios muy baratos el precio del concentrado no deja de subir. Hay 1.500 toneladas de uranio altamente enriquecido sobrante de la Guerra Fría, su dilución y uso en centrales nucleares convencionales permitirían su eliminación y favorecerían una disminución de precios. El combustible gastado conserva aún un alto poder energético, su reprocesado a medio plazo parece inevitable.

En un curso sobre radiactividad se pidió a los alumnos que ordenasen intuitivamente de mayor a menor, de acuerdo a su actividad específica, los siguientes isótopos: Iodo 131, cesio 137, plutonio 239 y uranio 235. La mayoría colocaba en primer lugar el ^{239}Pu o el ^{235}U . La respuesta correcta se muestra en la tabla 1.

Se comprueba que, en contra de la percepción popular, la radiactividad del ^{235}U y del ^{239}Pu es insignificante comparada con el I-131 o con el Cs-137. La conclusión es la misma si nos referimos al riesgo radiológico, aunque los valores numéricos serán otros que dependerán de las condiciones de exposición a la que nos refiramos (ingestión, inhalación, exposición externa, etc.). Eso no significa que los isótopos del uranio no tengan riesgo radiológico, lo tienen especialmente por incorporación (inhalación e ingestión). Mayor riesgo presentan algunos descendientes del U-238, particularmente el radio 226 y radón 222 no presentes en el uranio enriquecido. A principios del siglo XVI, cuando los efectos de la radiactividad no se conocían y la existencia de los átomos era una pura especulación filosófica, Georg Bauer, más conocido por su nombre latino Agrícola, trabajando como médico en una mina de plata que también contenía uranio se dio cuenta de la existencia entre los obreros de una enfermedad mortal que lla-

mó *Bergsucht*. En su tratado *De re metallica* nos describe como para evitarlo hizo instalar un sistema de ventilación y animaba a las mujeres de los mineros a hacer filtros respiratorios para sus maridos. Hoy sabemos que esa enfermedad era cáncer de pulmón, asociado a las altas concentraciones de radón que se producían en las minas subterráneas. La minería subterránea de uranio hoy es prácticamente inexistente.

¿QUÉ ES EL URANIO?

El uranio es el elemento químico más pesado de origen natural que se encuentra sobre la Tierra (si excluimos trazas prácticamente indetectables de transuránidos). Fue descubierto en 1789 por M. H. Klaproth quien le llamó así en honor al planeta Urano que acababa de ser descubierto en 1781 por Herschel, aunque ya era utilizado con anterioridad como colorante en la

Tabla 1.- Comparación de la actividad específica, en Bq/g, de distintos isótopos.
(los valores están redondeados).

Iodo 131	4600.000.000.000.000
Cesio 137	3200.000.000.000
Plutonio 239	2.300.000.000
Uranio 235	80.000

Número atómico										
82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
Plomo	Bismuto	Polonio		Radón		Radio		Torio	Protoactinio	Uranio
								^{234}Th 24,1 d	← ^{238}U 4,5.10 ⁹ a	
									^{234}Pa 1,2 m/6,7 h	
^{214}Pb 26,8 m	← ^{214}Bi 19,8 m	^{218}Po 3,05 m	← ^{222}Rn 3,8 d	← ^{226}Ra 1600 a	← ^{230}Th 7,5.10 ⁴ a					^{234}U 2,5.10 ⁶ a
^{210}Pb 22 a	← ^{210}Bi 5 d	^{214}Po 162 μs								
^{206}Pb estable		^{210}Po 138 d								
Tipo de desintegración (emisiones γ no representadas)										
				←	Emisión alfa (α)					
				↘	Emisión beta (β)					

Cadena de desintegración del U-238.

fabricación de pinturas.

El uranio natural está formado por tres tipos de isótopos: uranio 238, uranio 235 y uranio 234. La relación $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$, con rarísimas excepciones, es constante en toda la corteza terrestre. De cada gramo de uranio natural el 99,285 % de la masaⁱ es ^{238}U , 0,71 % ^{235}U , y 0,005 % ^{234}U , de este último puede haber variaciones según el sitio.

La existencia de isótopos radiactivos fue descubierta por azar, en febrero de 1896, por Antoine Henri Becquerel (1852 - 1908), cuando investigaba la posibilidad de que la luz solar provocase la emisión de rayos X, recién descubiertos. Para ello colocó varios cristales junto a placas fotográficas, separados parcialmente por láminas de cobre, envueltas en papel oscuro. El conjunto lo exponía a la luz solar para comprobar si los cristales, bajo el efecto de ésta, emitían rayos X que impresionasen la película en las zonas no protegidas por las láminas de cobre. Algunos de los cristales estaban compuestos de una sal de uranio pues Becquerel creía que el fenómeno buscado podía estar asociado a la fosfo-

rescencia que poseían las sales de uranio). Los días 26 y 27 de febrero aparecieron nublados y guardó las placas en un cajón. Lo que ocurrió entonces nos es relatado por Becquerel con las siguientes palabras: "El sol no salió durante los días siguientes, y revelé las placas el 3 de marzo esperando encontrar sólo débiles imágenes. Las siluetas aparecieron, por el contrario, con gran intensidad...". Dos meses después Becquerel llegaba a la conclusión de que el fenómeno era debido a una radiación activa procedente del elemento uranio presente en dichas sales. Cerca de allí trabajaba Marie Sklodowska Curie quien rápidamente tuvo noticias del experimento. En 1898, junto con su esposo Pierre Curie, descubrieron un nuevo elemento: el radio, que era millones de veces más activo que el uranio. Los Curie consiguieron aislar unos miligramos de radio y observaron que con el tiempo, sorprendentemente, iba desapareciendo del crisol donde estaba depositado. Al fenómeno dieron el nombre de radiactividad. La radiactividad, aunque había sido descubierta por Becquerel y por el

matrimonio Curie a finales del siglo pasado, había estado en la naturaleza desde siempre.

¿CÓMO SE FORMÓ?

Para que exista en la naturaleza el uranio y los elementos más pesados que el hierro se necesitó un proceso bastante especialⁱⁱ. Hace unos 4.600 millones de años tuvo lugar la explosión de una estrella supermáscica (supernova) en las proximidades de la nebulosa de la que se formaría nuestro Sistema Solar y otras estrellas. Esta enorme explosión inyectó en la nube protosolar infinidad de isótopos pesados. Muchos eran radiactivos pero el tiempo transcurrido ha hecho que la mayoría de ellos se hayan desintegrado hasta transformarse en elementos estables. Sólo algunos de vida muy larga son de este origen (primigénios), entre ellos el uranio 238 y el uranio 235, que con el tiempo se fueron homogeneizando en el Sistema Solar en formación, para constituir el elemento uranio donde la relación $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ se mantiene constante. Tal vez haya excepciones a esta regla en el centro de algunos planetas. Se ha propuesto la hipótesisⁱⁱⁱ de que el uranio acumu-

ⁱ A veces la composición isotópica se expresa en porcentaje de átomos de cada isótopo respecto del total de átomos (concepto conocido como: abundancia isotópica). Utilizando esta unidad el uranio natural tiene 0,720 % átomos de U-235. En el uranio enriquecido el U-234 desde el punto de vista de la dosis interna es el más importante, a pesar de que su contenido en el uranio total es pequeño, debido que tiene una actividad específica considerablemente mayor que el U-235 y el U-238.

ⁱⁱ El universo primitivo sólo contenía elementos ligeros. Estrellas de tamaño medio, como el Sol, en su combustión sólo son capaces de llegar a producir elementos de masa atómica intermedio y bajo (el de mayor masa es el hierro), para producir elementos más pesados es necesario fenómenos violentos como son las supernovas y la interacción con estrellas de neutrones.

lado en el centro de estos planetas, como sería el caso de la Tierra, habría dado lugar a reacciones de fisión y formación de transuránicos, que haría que su composición isotópica fuese muy diferente a la que se da en la superficie terrestre. Según esta hipótesis la energía generada en estas reacciones de fisión es la explicación de que aún persista el campo magnético terrestre.

LA ANTIGÜEDAD DE LA TIERRA

El uranio ^{238}U y el uranio ^{235}U son los padres de las dos cadenas naturales de desintegración radiactiva más importantes. El ^{238}U se desintegra, a través de 13 isótopos intermedios, en ^{206}Pb que es estable. Por su parte el ^{235}U , a través de 10 isótopos intermedios, finaliza en ^{207}Pb . Midiendo las relaciones $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ y $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ puede determinarse la edad de una roca e incluso de la propia Tierra^{iv}. La edad estimada para la Tierra por este método a partir de los meteoritos más antiguos es 4.550 millones de años. Los fenómenos orogénicos han impedido que queden sobre la Tierra rocas procedentes de aquella época. Las muestras terrestres más antiguas corresponden a cristales de circon procedentes del monte Narryer, en Australia occidental, que podrían llegar a tener algo más de 4.000 millones de años, lo que demostraría que ya existía una corteza continental en aquella época.

LA FISIÓN NUCLEAR

Sabemos que el uranio ^{235}U normalmente se fisiona al ser bombardeado por neutrones emitiendo a su vez nuevos neutrones que pueden originar una reacción en cadena. La fisión del uranio ^{235}U es conocida desde 1937. La reacción en cadena fue puesta en práctica por Fermi quien en 1942 fabricó, en los vestuarios del estadio de fútbol de la Universidad de Chicago, una pila nuclear. Sin embargo en la Tierra ya se había producido reacciones en cadena durante miles de años liberando probablemente mucha más energía que todas las centrales nucleares actuales juntas. En 1972 en un análisis isotópico rutinario en un rico yacimiento de uranio en Oklo (Gabón) se observó que el contenido de U-235



era inferior al 0,71%, lo que no era coherente con todas las observaciones anteriores hechas en el uranio natural. Un análisis más detallado encontró elementos químicos descendientes del plutonio que demostraba^v que en aquel lugar habían tenido lugar reacciones de fisión. Esto fue posible porque en el pasado el grado de enriquecimiento del uranio natural era superior al actual (mayor mientras más atrás vamos en el pasado) debido a que el periodo de desintegración del U-235 aunque lento es 7 veces mayor que el del U-238. El yacimiento de Oklo tiene una antigüedad de 2.000 millones de años, entonces el enriquecimiento era el 3 % y las reacciones de fisión eran posibles en las partes del yacimiento más ricas cuando eran atravesadas por aguas subterráneas. Este caso no es excepcional, con posterioridad se han observado estas anomalías isotópicas en otros yacimientos. Este tipo de lugares son un excelente laboratorio para estudiar el comportamiento de los cementerios radiactivos en plazos larguísimo.

EL URANIO EN LA NATURALEZA

Y SUS USOS

El principal uso del uranio en la actualidad es obtener combustible para los reactores nucleares que producen el 17% de la electricidad mundial. Es bien conocido que el uranio natural para su empleo en los reactores nucleares necesita ser enriquecido en U-235, excepto en el caso de reactores de grafito o deuterio de escasa implantación. Para ello se parte del concentrado de uranio (U_3O_8), que se transforma en UF_6 (que es gas a unos 60°C). Con el uranio en forma de gas se aprovecha la ligera diferencia entre la masa atómica del U-235 y U-238 para separar el uranio de alimentación del proceso en dos fracciones: una enriquecida en U-235 y otra empobrecida en U-235. Este último es un subproducto conocido como uranio empobrecido. El UF_6 enriquecido es transformado en polvo de UO_2 (muy estable químicamente y con un alto punto de fusión), a partir del cual se fabrican los elementos combustibles utilizados por los reactores nucleares. El UF_6 empobrecido resultante se almacena y la mayor parte de él se transforma en óxidos de uranio o uranio metal.

El uranio se encuentra distribuido en

ⁱⁱⁱ G. Sánchez, ¿Un reactor en el centro de la Tierra?, Nuclear España (Noviembre 2004).

^{iv} G. Sánchez, Los isótopos radiactivos y nuestro pasado, Mundo Científico (Mayo 1994).

^v El tema de Oklo fue dado a conocer por primera vez en 1972 por Neuilly y otros (acta de conferencia de prensa recogida por el Commissariat à l'Energie Atomique) aunque es en 1976 en un artículo de Cowan [A Natural Fission Reactor, Scientific American, 7/76:3647] cuando se difunde este extraordinario fenómeno.



La dilución del uranio altamente enriquecido precedente del desmontaje de las cabezas nucleares desmanteladas permitiría cubrir las necesidades del parque nuclear mundial durante 6 años.

la corteza terrestre, en promedio las rocas contienen 3 gU por tonelada y el agua de mar unos 3 mg por tonelada. Aunque escaso es mil veces más abundante que el oro. En los yacimientos uraníferos la concentración sobrepasa 1 kg por tonelada del mineral aunque en la actualidad para que sean rentables su contenido debe exceder 10 kg/t. En Canadá, primer productor mundial, se encuentran los mejores yacimientos (En Key Lake/MacArthur River hay explotaciones que alcanzan 210 kg U/t.) Otros grandes productores son: Australia, Níger, Namibia, Uzbekistan, EE. UU. y

Kazakhstan. La producción mundial está en torno a 32.000 t U. En la Unión Europea no hay yacimientos económicamente explotables. En España el único yacimiento en explotación estaba en Saelices El Chico (Salamanca) que está en fase de clausura por agotamiento de las reservas (menos de 1 kg U/t) a los precios actuales de mercado.

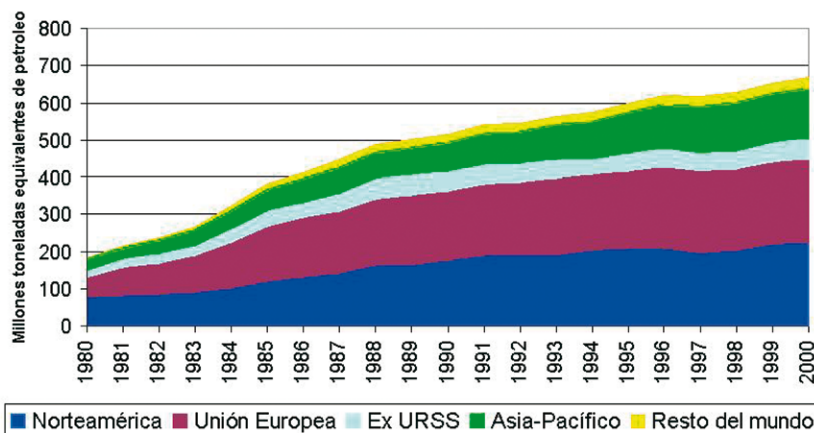
Durante unos años el precio del concentrado de uranio no dejó de caer, en gran medida por la puesta en el mercado de concentrado procedente de países de la desaparecida Unión Soviética a precios por debajo de los

reales de obtención. Esta situación ha acabado y hoy estamos asistiendo a una vertiginosa subida de los precios del concentrado que ha pasado, en menos de 5 años, de 5\$ a 25\$ la lb U_3O_8 . Esta situación se produce tras el cierre masivo de minas de uranio y la práctica desaparición de la capacidad de conversión de la Unión Europea, a lo que se une el previsible incremento de demanda de uranio por países asiáticos, en particular por China.

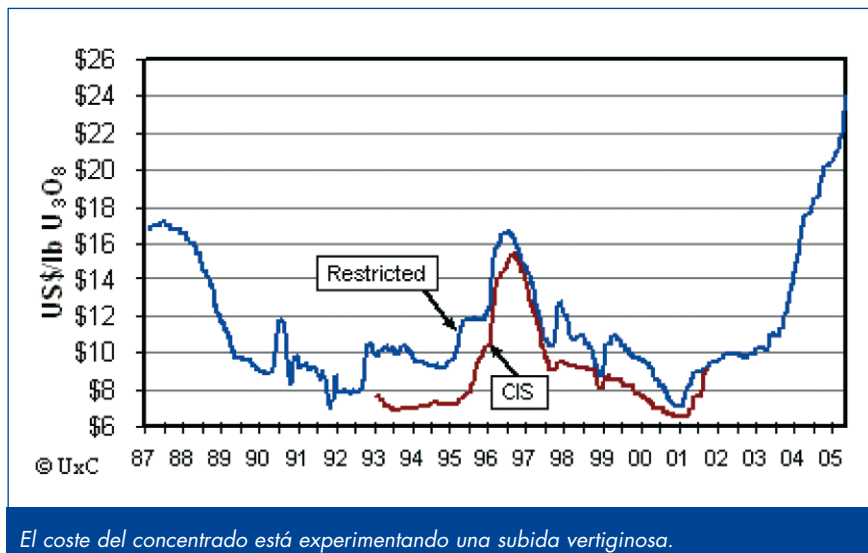
LOS EXCEDENTES DE URANIO ALTAMENTE ENRIQUECIDO

La búsqueda y explotación del uranio se inició para su aplicación a fines militares. En una endiablada carrera armamentista llegaron a construirse unas 50.000 cabezas nucleares, entre 1950 y 1980, conteniendo uranio altamente enriquecido (UAE) y/o plutonio militar (rico en plutonio 239). Con el fin de la Guerra Fría y la firma de los acuerdos START I (1991) y START II (1993) EE UU y Rusia se comprometían a reducir sus arsenales nucleares estratégicos. Esta situación, deseable desde todos los puntos de vista, plantea un problema: ¿Qué hacer con las cabezas nucleares sobrantes? Dar respuesta satisfactoria a esta pregunta es cada vez más urgente cuando se ha comprobado el interés de países en manos de dictadores y de grupos terroristas en aprovechar esta situación para hacerse con alguna de estas armas directamente o con el material fisionable sobrante. Deshacerse de este material de forma efectiva no es fácil. En total, con el desmantelamiento parcial de los arsenales rusos y estadounidenses se producirá un excedente de más de 1.500 t de UAE. A esto hay que añadir más de 200 t de plutonio militar sobrante. Mientras no se inutilice, este material es susceptible de uso para montar bombas nucleares, además de persistir un riesgo latente de tráfico ilícito, situación que se puede ver favorecida por el descontrol y bancarrota en algunos países de la ex URSS. Deshacerse para fines militares de estas 1.500 t de UAE es técnicamente sencillo. Basta con diluirlo en uranio natural o de muy bajo enriquecimiento obteniendo del orden de 40.000 t uranio ligeramente enriquecido que puede utilizarse en centrales nucleares civiles para originar electricidad. Sólo con este material podría abastecerse todo el parque nuclear civil mundial –más de 400 reactores– durante más de 6 años. El proceso realmente ya ha empezado pero se es-

Evolución del consumo de electricidad de origen nuclear (Fuente: BP)



La producción de electricidad de origen nuclear no ha dejado de aumentar, a pesar de que en los últimos años han entrado en operación muy pocas centrales. Esto ha sido posible por las mejoras en el combustible y de la operación de las centrales.



tá desarrollando a un ritmo mucho más lento del previsto. Tres grandes compañías occidentales (Cameco, Cogema y Nukem) firmaron en 1999 un contrato con la rusa Techsnabexport para hacerse con el 70% de este uranio y comercializarlo en el mercado civil antes del 2013, los plazos no se están cumpliendo y probablemente se prolongue más años. La Unión Europea debería comprometerse en este proyecto.

¿URANIO GASTADO O URANIO POCO UTILIZADO?

La principal objeción al uso pacífico de la energía nuclear es la existencia de residuos de alta actividad que durará milenios. Esto es un hecho si asumimos que el combustible gastado es el producto final del ciclo nuclear. En los últimos 20 años casi se ha duplicado el grado quemado del combustible nuclear, eso significa que en la actualidad por kWh nuclear producido se utiliza la mitad de uranio que hace 20 años y por tanto el volumen de residuos generados se ha reducido en la misma proporción. Sin embargo, el combustible gastado aún contiene más del 95% del uranio, además de plutonio, susceptible de ser reutilizado. De hecho, sólo el 3% de los átomos de uranio se han fisionado. Por tanto, el combustible nuclear gastado realmente es un producto que aún conserva la mayor parte de su potencial energético que puede ser aprovechado con tecnologías disponibles, incluso comercializadas.

La tecnología del reprocesado es ofrecida por algunos países como Francia y el Reino Unido. Consiste en separar el uranio y plutonio de los

productos de fisión (PF). Los PF al tener una actividad muy elevada en un tiempo relativamente breve se desintegran en elementos estables dejando de constituir un riesgo. Los transuránidos constituyen probablemente el mayor problema de la energía nuclear. Hasta hace poco se contemplaba como única posibilidad su enterramiento definitivo en almacenamientos profundos. Sin embargo, la transmutación de la mayor parte de los transuránidos en elementos de vida corta, generando a su vez energía, se vislumbra como una posibilidad factible aunque lejana. Que se desarrolle o no depende del compromiso que se tenga con la continuación en el uso de la energía nuclear de fisión para fines civiles (su uso para fines militares, desgraciadamente está sobradamente garantizado). Por lo pronto, la actitud de muchos países, entre ellos España, es renunciar a construir un repositorio definitivo para deshacerse del combustible gastado, sin asumir ningún compromiso de futuro.

El uranio enriquecido, en cantidades pequeñas, probablemente encuentre otra utilidad en un futuro no muy lejano. La NASA se ha convencido que los viajes interplanetarios tripulados no serán posibles mediante el uso de propulsores químicos. Recientemente ha empezado a probar propulsores iónicos, para cantidades y periodos largos, con la tecnología actual, la única fuente viable de alimentación de estos propulsores es uso de minireactores de fisión. El viaje a Marte se reduciría a la mitad. Hay que tener en cuenta que este tipo de reactores solo funcionarían una vez en órbita, y que en el lanzamiento el combustible no estaría irradiado y por tanto su radiactividad

sería muy baja. No estamos refiriéndonos a proyectos de ciencia ficción, existe planes concretos para probar en órbita reactores de fisión en propulsores iónicos en torno a 2010.

EL FUTURO

La energía va a ser, ya lo es, uno de los grandes problemas de nuestro siglo, especialmente en Europa que necesita importar la mayor parte de lo que consume. El relanzamiento de la energía nuclear parece inevitable si, como es previsible, el precio del petróleo y el gas continua subiendo y si los políticos se toman en serio el asunto del efecto invernadero. Mientras más se retrase peor será la solución, así lo han comprendido algunos de los ecologistas más cualificados.

Con la tecnología actual los reactores nucleares sólo podrán hacerse frente a una mínima parte del problema. La infrautilización que hacen del uranio sólo garantiza su disponibilidad a precios razonables para pocas decenas de años. Además, gran parte del problema energético y de contaminación procede del transporte. Los reactores de IV generación pueden ayudar en ese terreno mediante la obtención de hidrógeno. Todo ello exige investigación y compromiso a largo plazo con los problemas del planeta. La paradoja es que se ha producido una disminución, cuando no la desaparición, de los planes de estudio universitario de la enseñanza de física y tecnología nuclear, a lo que hay que añadir las prejubilaciones de miles de expertos cuyo conocimiento es inapreciable.



Guillermo SÁNCHEZ, trabaja en ENUSA Industrias Avanzadas, S.A. en el Departamento de Logística y Suministro de la Fábrica de Juzbado. Imparte clases como profesor asociado en la Universidad de Salamanca.