

ENERGÍA PARA EL FUTURO

La Opción Nuclear

Documento con la postura de la EPS



Sociedad Europea de Física

más que ideas

ENERGÍA PARA EL FUTURO - La Opción Nuclear

La postura de la EPS

La Sociedad Europea de Física (EPS) es una institución independiente financiada mediante contribuciones de las sociedades nacionales de física, de otras instituciones y de miembros individuales. Representa a más de 100.000 físicos y reúne expertos en todas las áreas relacionadas con la física. Este informe consta de dos partes: la primera parte es un resumen de la postura de la EPS, que resume sus recomendaciones, seguida de una segunda parte científico-técnica. Esta parte científico-técnica es esencial para este informe pues contiene todas las evidencias y argumentos que forman la base de la postura de la EPS.

1. El objetivo de este documento (preámbulo)

El uso de la energía nuclear para la producción de electricidad es objeto de debate a nivel mundial: mientras que algunos países aumentan su explotación apreciablemente, otros la reducen gradualmente y otros decretan su prohibición. Este informe quiere exponer de forma equilibrada los pros y los contras de la energía nuclear, así como informar a los políticos y al público en general, por medio de hechos verificables. Busca en definitiva contribuir a un debate democrático que reconozca los hechos científicos y técnicos así como las preocupaciones de la sociedad.

2. El futuro del consumo de energía y de la producción de electricidad (Sección 1)

El aumento de la población mundial desde los 6.500 millones actuales a los 8.700 millones estimados para 2050, vendrá acompañado de un incremento del 1,7% de la demanda energética anual. Ninguna fuente de energía será capaz de cubrir, por sí sola, las necesidades energéticas de las generaciones futuras. En Europa, aproximadamente un tercio de la energía producida es energía eléctrica, de la cual el 31.0% se genera en centrales nucleares y un 14.7% proviene de fuentes renovables de energía.

Aunque la contribución de las energías renovables ha crecido significativamente desde comienzos de los años 90, la demanda de electri-

cidad no se puede satisfacer de modo realista sin la contribución nuclear.

3. Necesidad de un ciclo energético sin CO₂ (Sección 1)

La emisión antropogénica de gases de efecto invernadero, entre los cuales el dióxido de carbono es el más importante, ha amplificado el efecto invernadero natural y ha conducido al calentamiento global. La contribución principal a este fenómeno proviene de la quema de combustibles fósiles. Un aumento aún mayor tendrá efectos decisivos sobre la vida en la Tierra. Para combatir el cambio climático, es necesario un ciclo energético con la menor emisión posible de CO₂. Las plantas de energía nuclear producen electricidad sin emisión de CO₂.

4. Producción de energía nuclear en la actualidad (Sección 2)

En el mundo hay 435 centrales nucleares en funcionamiento que producen el 16% de la electricidad del planeta. Proporcionan una cantidad fiable de electricidad en los momentos tanto de mayor como de menor demanda de energía. El accidente de Chernobyl originó múltiples discusiones sobre la seguridad de las centrales nucleares, que pusieron de manifiesto preocupaciones muy serias al respecto. En un futuro cercano, la capacidad nuclear europea probablemente no aumente mucho, mientras que sí se prevé un aumento significativo en China, la India, Japón y la República de Corea.

5. Preocupaciones (Secciones 3 y 4)

Al igual que cualquier otra fuente de energía, la energía nuclear no está exenta de peligros. La seguridad de las centrales nucleares, la eliminación de los residuos radioactivos, la posible proliferación nuclear y las amenazas extremistas son aspectos que hay que considerar seriamente. Para valorar hasta qué punto los riesgos asociados a la energía nuclear pueden considerarse aceptables, han de tenerse en cuenta los riesgos específicos de las fuentes alternativas de energía. Esta valoración debe realizarse de un modo racional, en base a argumentos técnicos y evidencias científicas, en una discusión abierta que

tenga en cuenta los hechos comprobables y la comparación con los riesgos de otras fuentes de energía.

6. Producción de energía nuclear en el futuro (sección 5)

Como respuesta a las preocupaciones sobre la seguridad de los reactores nucleares, se ha desarrollado una nueva generación de reactores (Tercera Generación) que incorpora tecnologías de seguridad avanzadas y mejoras en cuanto a prevención de accidentes, con el propósito de que, en el caso extremadamente improbable de producirse una fusión del núcleo del reactor, todo el material radiactivo se mantendría dentro del sistema de contención.

En 2002 un grupo de trabajo internacional presentó los principios de los reactores de Cuarta Generación, que son intrínsecamente seguros. También ofrecen mayor rentabilidad económica en la producción de electricidad, generan menos residuos nucleares que precisen almacenamiento y son más difíciles de usar con fines de proliferación (dificultan el uso militar de la tecnología nuclear civil). Aunque todavía están en fase de investigación, se espera que algunos de estos sistemas puedan estar operativos en 2030.

Los Sistemas Asistidos por Acelerador (ADS) ofrecen la posibilidad de transmutar el plutonio y los actínidos menores, que constituyen el principal riesgo radiactivo en la gestión a largo plazo de los reactores de fisión actuales. En potencia, también podrían contribuir sustancialmente a la producción energética a gran escala, más allá del 2020.

Los reactores de fusión producen energía libre de CO₂, mediante la fusión de deuterio y tritio, dos isótopos del hidrógeno. No producen residuos radioactivos significativos de larga duración, al contrario de lo que ocurre en los reactores de fisión. Esta prometedora opción podría estar disponible en la segunda mitad de este siglo.

7. La postura de la Sociedad Europea de Física (EPS) (sección 6)

Dados los problemas medioambientales a los que nuestro planeta se enfrenta y por el bien de las futuras generaciones, nuestra generación no puede permitirse renunciar a una tecnología que

ha probado su capacidad de producir electricidad de forma fiable y segura, sin emisiones de CO₂. La energía nuclear puede y debe representar una contribución importante dentro del conjunto de las fuentes de energía de baja emisión de CO₂. Esto solo será posible si se consigue el apoyo público por medio de un debate democrático y abierto, que respete las preocupaciones de los ciudadanos y que maneje hechos científicos y técnicos comprobables.

Dado que algunos países europeos se oponen a la producción de electricidad por medio de energía nuclear y además la investigación en fisión nuclear sólo recibe soporte en unos pocos países, el número de estudiantes en este campo está disminuyendo y por tanto también el número de personas con conocimientos en ciencia nuclear. Hay una clara necesidad de formar en ciencia nuclear así como de preservar el conocimiento nuclear y de investigar a largo plazo en fisión y fusión nuclear y en los métodos de incineración, transmutación y almacenaje de residuos nucleares.

Europa necesita mantenerse al corriente de los avances en el diseño de reactores, independientemente de la decisión sobre su construcción en Europa.

Ésta es una importante razón añadida para la inversión en I+D+i de reactores nucleares, y es esencial para que Europa sea capaz de seguir programas en países de rápido crecimiento tales como China e India, que están decididos a construir centrales nucleares, y a garantizar su seguridad mediante, por ejemplo, su participación activa en la AIEA.

**El Comité Ejecutivo de la EPS
Noviembre 2007**

PREÁMBULO

La Sociedad Europea de Física tiene la responsabilidad de expresar su postura sobre aquellos temas en los que la física desempeña un papel relevante y que son de interés general para la sociedad. La siguiente declaración sobre La Opción Nuclear, y su papel en la producción de electricidad futura, sostenible a gran escala y libre de CO₂, está motivada por el hecho de que muchos países europeos altamente desarrollados descartan la opción nuclear en su política energética a largo plazo. El cambio climático, el crecimiento de la población mundial, los recursos finitos de nuestro planeta, el fuerte desarrollo económico de Latinoamérica y Asia, y las legítimas aspiraciones de los países en desarrollo por alcanzar niveles razonables de vida, apuntan inevitablemente a la necesidad de fuentes sostenibles de energía.

Los autores de este informe son miembros del Grupo de Física Nuclear (NPB) de la Sociedad Europea de Física (EPS) que trabajan en los fundamentos de la física nuclear, pero sin relación alguna con la industria de la energía nuclear. Este informe presenta nuestra percepción sobre las ventajas e inconvenientes de la energía nuclear como fuente sostenible para satisfacer nuestras necesidades energéticas a largo plazo.

Hacemos un llamamiento para que se revise la decisión de eliminar progresivamente las centrales nucleares que están funcionando eficientemente y de forma segura y hacemos

notar la necesidad de realizar investigaciones en el futuro sobre la opción nuclear, en particular en los reactores de cuarta generación, que prometen representar un significativo paso adelante en cuanto a seguridad, en el reciclaje del combustible nuclear y en la incineración y eliminación de los residuos radioactivos. Queremos resaltar la necesidad de preservar el conocimiento nuclear a través de la educación y la investigación, en las universidades e institutos europeos.

Hartwig Freiesleben (Miembro NPB),
Universidad Técnica de Dresden, Alemania

Ronald C. Johnson,
Universidad de Surrey, Guildford, Reino Unido

Olaf Scholten,
Instituto de Aceleradores para Física Nuclear (KVI), Groninga, Países Bajos

Andreas Türler,
Universidad Técnica de Munich, Alemania

Ramon Wyss,
Real Instituto de Tecnología, Estocolmo, Suecia

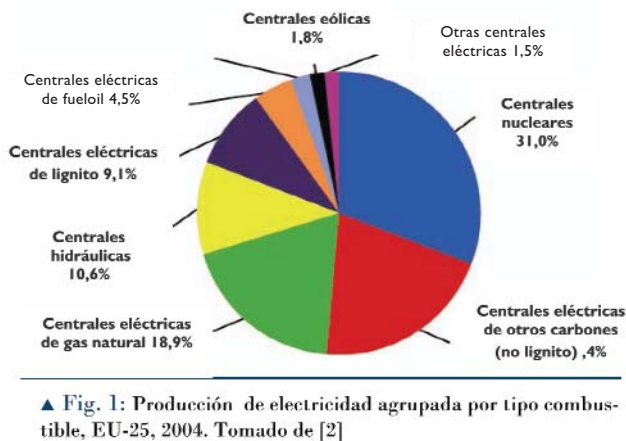
Noviembre de 2007,
Sociedad Europea de Física
6 rue des Frères Lumière
68060 Mulhouse cedex - Francia

ENERGÍA PARA EL FUTURO - La Opción Nuclear >>> Parte Científico/Técnica

1. La necesidad de abastecimiento de energía sostenible mediante un ciclo de energía libre de CO₂

La disponibilidad de energía para todos es un requisito necesario para el bienestar de la humanidad, la paz mundial, la justicia social y la prosperidad económica. Sin embargo, contamos solo con un planeta habitable que debemos legar

sin deterioro a las generaciones venideras. Esta idea viene reflejada en el término “sostenible”, cuya definición aparece en el informe Brundtland[1] de 1987: “El desarrollo sostenible satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la oportunidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas”. Este imperativo ético requiere que cualquier discusión sobre la energía en el futuro incluya aspectos a



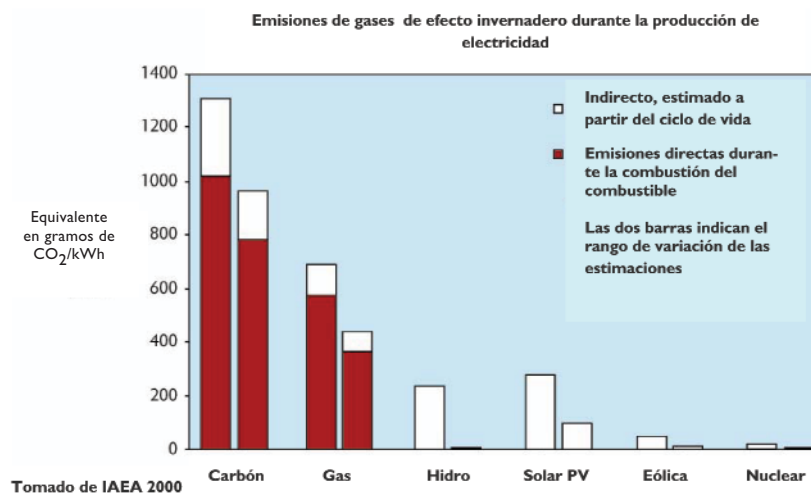
corto y largo plazo de cada posible fuente de energía, tales como disponibilidad, seguridad e impacto medioambiental. Con respecto a este último, la producción de residuos y sus riesgos constituye una preocupación de la máxima importancia, bien sea el CO₂ producido en la quema de combustibles fósiles o los residuos radiactivos del combustible nuclear, por citar sólo dos ejemplos. Los siguientes párrafos resumen la situación de las fuentes de energía primaria a gran escala y de la producción actual de electricidad en Europa, así como el problema de las emisiones de CO₂. También presentan el consumo de energía a nivel mundial.

Fuentes a gran escala de energía primaria

En 2004, la producción total de energía primaria de los 25 países de la Unión Europea fue de 880 millones de toneladas equivalentes de petróleo o 10.2 PWh (1 PWh= 1 Petavatio hora = 1 mi-

llardo de MWh) [2]. Esta energía se obtuvo de varias fuentes de energía primaria (nuclear: 28.9%; gas natural: 21.8%; carbón –antracita y lignitos-: 21.6%; petróleo y sus derivados -coque, gasolina, gasóleo- 21.6% y a menor escala, de fuentes de energía renovable (biomasa y residuos: 8,2%, energía hidráulica: 3,0%, energía geotérmica: 0,6%, eólica: 0,6%; el 12,4% en total). Las fuentes primarias satisfacen la demanda concentrada de energía de la industria, agricultura y hogares, y del transporte. Además, el petróleo y el gas pueden ser usados como fuentes distribuidas, con la versatilidad necesaria para la producción de energía a pequeña escala como la requerida, por ejemplo, en el sector del transporte. Las cifras anteriores ponen de manifiesto, que la energía nuclear constituye una fracción significativa del suministro de energía en la actualidad.

Alrededor del 58,7% del total de la energía generada proviene de la combustión de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural) lo cual conlleva la emisión de CO₂, responsable de hasta el 75% del efecto invernadero antropogénico. Los otros agentes responsables son el metano (CH₄, 13%), el óxido nitroso (N₂O, 6%) y los clorofluorocarbonos (CFC) (5%) [2]. Para combatir el efecto invernadero, debe minimizarse el uso de los combustibles fósiles, o ha de reducirse drásticamente donde sea posible su producción neta de dióxido de carbono. El mayor potencial para la reducción de emisiones de CO₂ se encuentra en la producción de electri-



▲ Fig. 2: Emisión de CO₂ resultante del análisis del ciclo de vida de distintos métodos de producción de electricidad. Tomado de [5]

ciudad, en el sector del transporte y en un uso más económico, por ejemplo, con medidas de ahorro de energía.

Generación de electricidad y emisiones de CO₂

Los 3.2 PWh de electricidad que en total producen los 25 países de la Unión Europea, corresponden al 32.3% de toda la energía producida por dichos países en 2004. El desglose por fuentes de energía se muestra en la Fig.1. Alrededor del 31.0% de la energía eléctrica procede de centrales nucleares, el 10.6% de centrales hidráulicas, 2.1% de plantas de combustión de biomasa, 1.8% de turbinas eólicas, 1.5% de otras fuentes, de las cuales la geotérmica contribuye en un 0.2%; la contribución de la energía fotovoltaica en 2004 fue insignificante[2]. Ninguna de estas fuentes emite CO₂ durante su funcionamiento. Por el contrario, las centrales que consumen gas, petróleo y carbón emiten CO₂; todas ellas juntas contribuyen en un 52,9% a la producción de energía eléctrica.

Es evidente de estas cifras que las centrales nucleares representan un pilar fundamental en el suministro de electricidad europea; a gran escala, satisfacen la carga base estable y, bajo demanda, también los picos de carga adicional¹. La reducción de su contribución al suministro de electricidad causaría un serio déficit de electricidad en Europa.

Todas las fuentes de electricidad requieren la construcción de plantas generadoras a las que se suministra combustible. Estas actividades suponen extracción, procesamiento, conversión y transporte del combustible, que contribuyen

también a la emisión de CO₂ y que forman el ciclo previo de combustible.

Hay también un ciclo posterior de combustible, tras su uso. En el caso de las centrales nucleares, dicho ciclo posterior incluye la manipulación y almacenamiento del combustible usado y, en el caso del carbón o las centrales térmicas de petróleo, la retención del dióxido de azufre (SO₂), el carbón no quemado y, en un caso ideal, el almacenamiento de CO₂ [3] con el fin de evitar su emisión a la atmósfera.

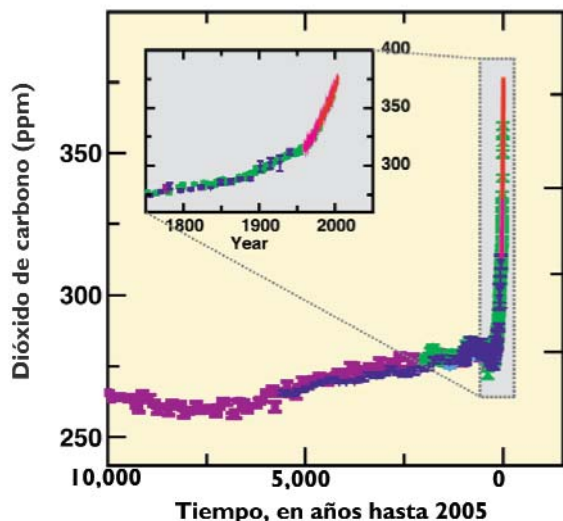
Sin embargo, esta última técnica requiere un profundo estudio, dado que en la actualidad no se conocen los efectos del almacenamiento a largo plazo del CO₂. El desmantelamiento de una planta de energía es también parte del ciclo posterior de combustible. Ambos ciclos de combustible, tanto previo como posterior, conllevan inevitablemente emisiones de CO₂. Las ventajas o inconvenientes de un determinado proceso de producción de electricidad sólo pueden debatirse de forma realista si se considera el ciclo de vida del sistema en su totalidad.

La cantidad de CO₂ emitido por 1 kWh de energía eléctrica producida, también llamada huella de carbono, puede obtenerse como subproducto del análisis de los ciclos de vida [4]. Los resultados dependen de la central productora de energía considerada, lo cual proporciona un rango de valores, mostrados como un par de barras para cada combustible en la Fig. 2. Otros estudios utilizan baremos diferentes y por tanto llegan a valores ligeramente distintos. El Modelo de Emisión para Sistemas Integrados, del Insti-



▲ Fig. 3: Lengua del Glaciar Pasterze con el pico Grossglockner (3798 m.) al fondo. Tomado de [11].

¹ Nota de los traductores: “pico de carga adicional” aquéllos momentos puntuales en los que por circunstancias especiales hay una gran demanda de energía, esto suele suceder, por ejemplo, cuando hace mucho frío o mucho calor.



▲ Fig. 4: Concentración de CO₂ (partes por millón, ppm) en la atmósfera durante los últimos 10.000 años. La figura insertada muestra la concentración desde 1750. Tomado de [10].

tuto Alemán Oke [6] proporciona los siguientes valores de gramos de CO₂ por kWh emitido: carbón (aprox. 1000), gas de ciclo combinado (aprox. 400), nuclear (35), hidráulica (33) y eólica (20) (citado por [7]). Estos valores reflejan probablemente la situación de Alemania y pueden no ser típicos de otros países [8]. Por ejemplo, Francia genera el 79% de su electricidad en plantas nucleares (Alemania el 31%) y por tanto tiene niveles de emisión de CO₂ inferiores a los de Alemania. Pero incluso si se adoptan los valores de la ref. [4], una central térmica de carbón emite de 29 a 37 veces más CO₂ que una central nuclear. Esto significa que la generación de electricidad nuclear (31,0% de 3,2 PWh) evita la emisión de entre 990 y 1270 millones de toneladas de CO₂ cada año, mientras que todas las fuentes de energía renovables juntas (14,7% de 3,2 PWh) evitan menos de la mitad de dicha cantidad.

El ahorro de emisiones que supone la energía nuclear supera los 704 millones de toneladas de CO₂ emitidas por toda la flota de automóviles de Europa cada año (4,4 Tkm/año [2], 1Tkm = 1 Terakilómetro = 1 millón de millones de km; 160 g/km [9]). En Europa, reemplazar la producción de electricidad nuclear por combustibles fósiles equivaldría a más que duplicar las emisiones de la flota europea de coches. Si en el mundo el combustible nuclear fuese sustituido por combustibles fósiles, las emisiones mundiales de CO₂, que están en torno a 28 millardos de toneladas [3], aumentarían entre 2.6 y 3.5 millardos de toneladas al año.

Estos ejemplos de análisis de ciclo de vida muestran sin lugar a duda que la electricidad de origen nuclear no contribuye de forma significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero y que este resultado es independiente de la actitud hacia la energía nuclear que tenga la organización que lleve a cabo el análisis.

Cambio climático

Desde el comienzo de la industrialización el mundo ha experimentado un aumento de la temperatura media que, casi con total certeza, está ocasionado por el incremento, provocado por el hombre, del efecto invernadero natural, debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero [10]. Indicios de este aumento de temperatura incluyen la descongelación acelerada de los glaciares (Fig.3), de las zonas de permafrost (hielo permanente de las capas superficiales del suelo) y de la capa de hielo ártico.

En el mismo periodo, la concentración en la atmósfera de los gases antropogénicos de efecto invernadero, entre los cuales el dióxido de carbono es el máximo contribuyente, ha alcanzado un nivel nunca observado en varios cientos de miles de años; la Fig.4 muestra la evolución de la concentración de CO₂ en los últimos 10.000 años.

Hay consenso entre los científicos en que un aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera tendrá efectos perjudiciales para la vida en la Tierra [10, 12]. Por tanto, la emisión creciente de gases de efecto invernadero, procedentes principalmente de la quema de combustibles fósiles, debe ser controlada, tal y como se acordó en el protocolo de Kioto [13].

Fuentes Mundiales de energía primaria

Los escenarios de fuentes de energía primaria futuras (que incluyen no sólo fuentes de electricidad) en el mundo han sido objeto de muchos estudios detallados. El escenario de desarrollo sostenible del estudio de la Agencia Internacional de la Energía AIE/OCDE [14] predice la progresión mostrada en la Fig. 5 en Gtoe (1 Gtoe = 1 Giga tonelada equivalente de petróleo = 11.63 MWh) para una población mundial que pasará de 6.500 millones de hoy a los 8.700 millones estimados para el 2050. Con el fin de sa-

tisfacer la creciente demanda de energía, todas las fuentes disponibles hoy tendrían que adecuar su contribución. Después de 2030, cuando los combustibles fósiles comiencen a aportar menos energía primaria, como se indica en la Fig. 5, las fuentes de energía nuclear, biomasa y renovables (hidroeléctrica, eólica, geotérmica) tendrán que utilizarse cada vez más. De acuerdo con el “World Energy Outlook, 2004” de la AIE [16], tanto la demanda de energía como las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía aumentarán hasta el año 2030, a un ritmo compuesto de alrededor de un 1,7% anual.

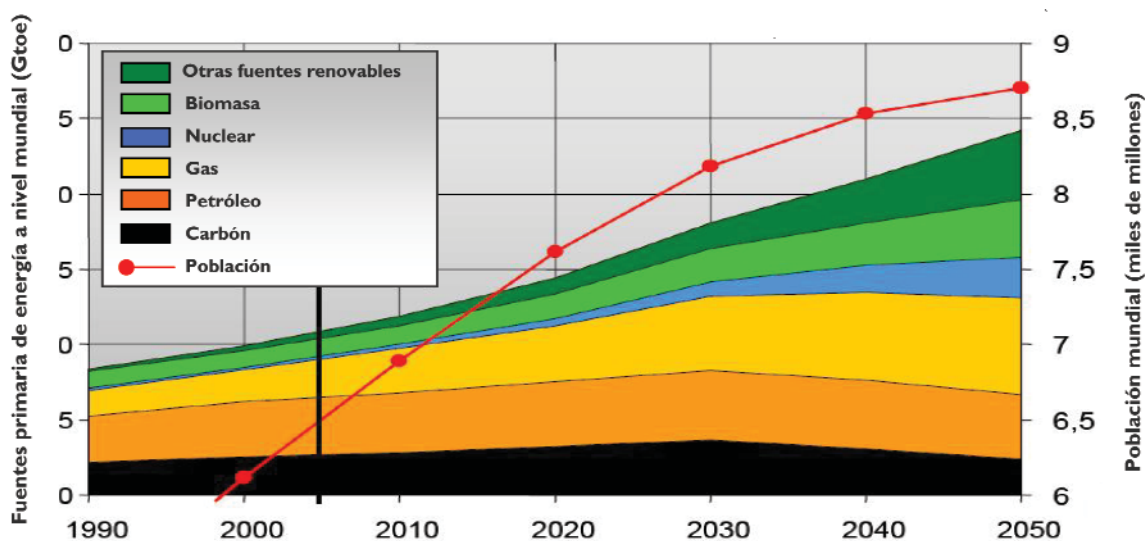
Debe tenerse en cuenta que la principal fuente renovable de energía eléctrica es la hidráulica (cf. Fig. 1), y que su aportación no podrá ser incrementada significativamente en Europa en un futuro inmediato [17]; lo mismo sucede para la electricidad que proviene de fuentes geotérmicas [17].

Desde 1990, se han construido en Europa un gran número de parques eólicos para la producción de electricidad. Sin embargo, es difícil imaginar que la producción de electricidad a partir del viento sustituya en un futuro próximo a la generada por gas, petróleo o carbón (52,9% en total) o nuclear (31,0%); su incremento anual no es suficiente, como se deduce de la Fig. 5. Por lo tanto, todas las posibles fuentes deben ser explotadas con el fin de poder enfrentarse a la creciente demanda de energía.

El plan más reciente y ambicioso de la UE para reducir en 2020 las emisiones de CO₂ a un 20% por debajo del nivel de 1990 [18] se basa en una reducción significativa de las emisiones de CO₂ en el sector del transporte, pero también implícitamente en un crecimiento mucho más rápido que en el pasado de los parques eólicos y fotovoltaicos. Sin embargo, la generación de electricidad, por ejemplo, por medio de aerogeneradores, debería incrementarse, aproximadamente en un factor 17 para acercarse al nivel de producción de la energía nuclear. Es difícil imaginar

La sustitución de centrales nucleares por centrales de carbón no es una opción, ya que esto incrementaría de manera significativa el total mundial de emisiones de CO₂. Las fuentes renovables no crecerán lo suficientemente rápido como para sustituir a la energía nuclear en un futuro cercano. Para afrontar simultáneamente la creciente demanda de electricidad, el objetivo reciente de la UE de reducción de CO₂, y evitar los desastres potenciales del cambio climático, la elección no es energía nuclear o renovable, sino energía nuclear conjuntamente con energías renovables.

▲ Fig. 5: Escenario para un futuro sostenible de fuentes primarias de energía a nivel mundial. Tomado de [14], ver también [15]. Nótese que la escala de población (a la derecha) no comienza en cero).



cómo este crecimiento podría alcanzarse en 2020. Y este cálculo ni siquiera incluye el aumento previsto de la demanda de energía del 1,7% anual. Además, serán necesarios mecanismos de almacenamiento de energía, no disponibles en la actualidad, que garanticen un suministro de energía independiente de las condiciones meteorológicas.

Por tanto, el objetivo de sustituir por completo la energía nuclear por fuentes renovables es discutible y poco realista (ver también [12]). Así pues, la consecución del plan de la UE de reducción de CO₂ depende fuertemente de la disponibilidad de electricidad proveniente de centrales nucleares.

2. La producción de energía nuclear hoy

La energía nuclear ya se usa para la generación de electricidad a gran escala y está en la actualidad basada en la fisión del uranio 235 (U-235) y plutonio 239 (Pu-239) en centrales eléctricas. Representa aproximadamente el 5% de la producción mundial de energía, suministra en torno al 16% (2.67 PWh) de la electricidad mundial [19] y evita entre 2.6 y 3.5 millones de toneladas de emisiones de CO₂ al año. Por medio de las nuevas soluciones que se mencionarán más adelante, la energía nuclear tiene potencial para continuar como una fuente principal de energía a largo plazo, con instalaciones que incineren los residuos nucleares y produzcan energía al mismo

tiempo, e incorporen elementos de seguridad intrínseca en su diseño. En la actualidad, (a 31 de mayo del 2007) 435 centrales nucleares están en operación en el mundo, 196 de ellas en Europa [19]. Hay varios tipos de reactores en uso: 264 reactores de agua a presión (PWR), 94 reactores de agua en ebullición (BWR), 43 reactores de agua pesada a presión (PHWR o CANDU) y 18 reactores refrigerados por gas (AGR y Magnox). Además, hay 11 reactores de agua ligera moderados con grafito (RBMK) en funcionamiento en Rusia y uno en Lituania, y cuatro reactores rápidos (FBR) en Japón [19]. Hay otras 37 nuevas unidades en construcción, principalmente en países de Europa del Este y Asia, que proporcionarán una potencia adicional de 32 GW.

Las centrales nucleares proporcionan el 16% de la electricidad mundial y constituyen uno de los principales pilares de la producción eléctrica europea, suministrando el 31% de su electricidad. En Europa, se están construyendo unas pocas centrales nuevas, mientras que se espera una expansión significativa de la producción de energía nuclear en el Sur de Asia y Extremo Oriente.

	Producción de electricidad nuclear 2006		Reactores en funcionamiento Mayo 2007		Reactores en construcción Mayo 2007		Reactores en proyecto Mayo 2007	
	TWh	%e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe
Bélgica	44.3	54	7	5728	0	0	0	0
Bulgaria	18.1	44	2	1906	0	0	2	1900
Re. Checa	24.5	31	6	3472	0	0	0	0
Francia	22.0	28	4	2696	1	1600	0	0
Finlandia	428.7	78	59	63473	0	0	1	1630
Alemania	158.7	32	17	20303	0	0	0	0
Hungría	12.5	38	4	1773	0	0	0	0
Lituania	8.0	69	1	1185	0	0	0	0
Holanda	3.3	3.5	1	485	0	0	0	0
Rumanía	5.2	9.0	1	655	1	655	0	0
Rusia	144.3	16	31	21743	3	2650	8	9600
Eslovaquia	16.6	57	5	2064	0	0	2	840
Eslovenia	5.3	40	1	696	0	0	0	0
España	57.4	20	8	7442	0	0	0	0
Suecia	65.1	48	10	8975	0	0	0	0
Suiza	26.4	37	5	3220	0	0	0	0
Ucrania	84.8	48	15	13168	0	0	2	1900
Reino Unido	69.2	18	19	10982	0	0	0	0
Europa	1194.4	35.4	196	169966	5	4905	15	15870

▲ Tabla 1: Centrales Nucleares europeas. Tomado de [19].

En la Tabla 1 se enumeran los reactores de Europa que suministran corriente eléctrica a la red, así como aquéllos en construcción o en proyecto (la letra “e” se refiere a la potencia eléctrica). Esta capacidad se mantendrá probablemente sin cambios en un futuro próximo, con algunas mejoras (principalmente en países de Europa del Este) y extensiones de la vida productiva. Algunos países (Bélgica, Alemania, Holanda y Suecia) están planeando un abandono gradual de la energía nuclear, y en otros (Austria, Dinamarca, Grecia, Irlanda, Italia y Noruega) el uso de la energía nuclear está prohibido por ley. La situación en el Extremo Oriente, Sur de Asia y Oriente Medio es bastante distinta: hay 90 reactores en funcionamiento y se espera una expansión significativa, especialmente en China, India, Japón y la República de Corea [19].

3. Preocupaciones

Riesgos y seguridad

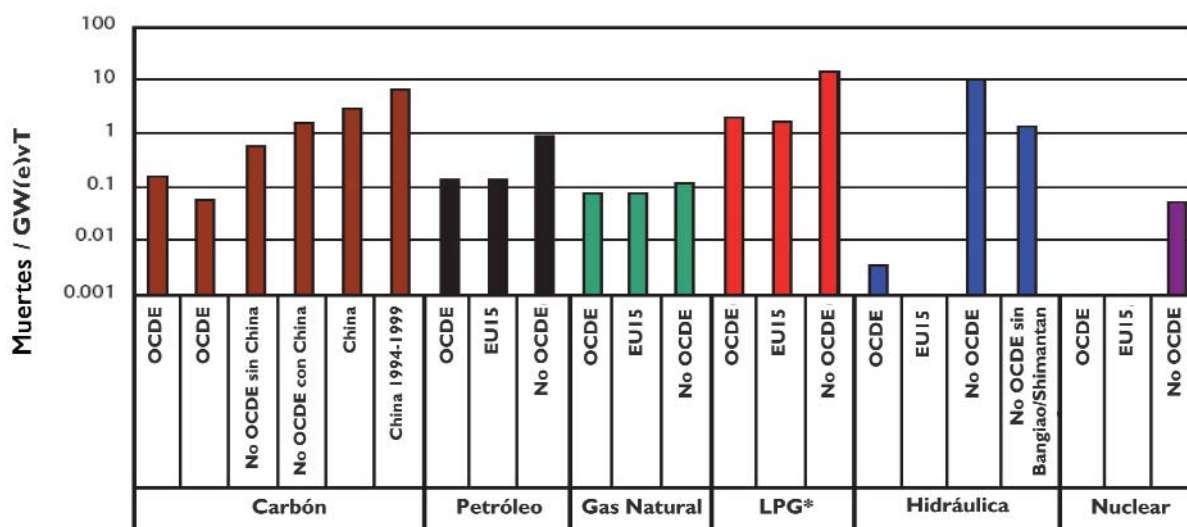
Nuestra vida diaria conlleva riesgos que están asociados a ciertos peligros. Esto también es cierto para la producción de energía. Dado que la humanidad depende de la energía, uno debe valorar los riesgos inherentes a las distintas fuentes de energía, con el fin de juzgar sus méritos. Los científicos han desarrollado herramientas

para cuantificar el nivel de riesgo.

Por ejemplo, un análisis comparativo de riesgos fue llevado a cabo por el Instituto Paul-Scherrer, Villigen, Suiza [20], centrado en accidentes graves relacionados con la energía entre los años 1969 y 2000. Se muestra un resultado en la Fig. 6, en la que aparece el número de muertes inmediatas por gigavatio (de electricidad) al año (nótese que la escala vertical no es lineal).

Las plantas de energía nuclear son las instalaciones menos propensas a tener víctimas mortales. En el caso del accidente de Chernobyl, sin embargo, las consecuencias a largo plazo deben ser consideradas. Éstas fueron investigadas por un grupo de estudio de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2005 [21], formado por 8 agencias especializadas de Naciones Unidas, los gobiernos de Bielorrusia, la Federación Rusa y Ucrania. El informe consideró 50 víctimas inme-

▲ Fig. 6: Comparación de los índices de accidentes mortales relacionados con la producción de la energía (normalizados en conjunto), en base a la experiencia histórica de accidentes ocurridos en la OCDE, en los países fuera de la OCDE y en los países de EU-15 durante los años 1969-2000, con excepción de los datos del “Libro anual de la industria del carbón en China”, que están disponibles sólo durante los años 1994-1999. Para el caso de la energía hidráulica, los valores de los países de fuera de la OCDE se muestran incluyendo y sin incluir el mayor accidente ocurrido en China que representó el solo la muerte de 26.000 personas. Nótese que solo se consideran las muertes inmediatas. Tomado de [20].



* LPG: Gases licuados del petróleo

dias de trabajadores del servicio de emergencia que murieron de síndrome de radiación grave y nueve niños que murieron de cáncer de tiroides. La pregunta sobre el número total de muertes futuras relacionadas causalmente con la liberación de cantidades importantes de material radiactivo en el medio ambiente es compleja y también se trata en detalle en el informe de la OMS [21].

Aunque resulta posible investigar accidentes en el pasado, es sin embargo difícil evaluar el impacto de accidentes que pueden tener lugar en el futuro. Una valoración de dichos riesgos futuros fue llevada a cabo por B.L.Cohen quien, para cuantificar el riesgo, introdujo una cantidad que denominó “pérdida de esperanza de vida” [22]. Este análisis científico muestra que el riesgo asociado a la producción de electricidad en centrales nucleares es mucho menor que otros riesgos de la vida diaria [22].

Esta valoración objetiva de los riesgos relativos tiene que competir con el hecho de que frecuentemente hay una diferencia significativa entre el riesgo percibido de un hecho y la posibilidad real de que dicho suceso ocurra. Un riesgo bajo de que se produzca un gran accidente es percibido de forma distinta que un riesgo alto de que se produzca un accidente leve, incluso si el número total de víctimas por año es el mismo en los dos casos. Esto es particularmente cierto en la percepción pública de la energía nuclear, donde la radiactividad entra en juego.

La radiactividad – el fenómeno de la desintegración espontánea o transformación de núcleos atómicos en otros, acompañada de la emisión de radiación alfa, beta o gamma, denominadas radiaciones ionizantes – es un fenómeno natural que existe desde mucho antes de la formación de nuestro planeta. Elementos radiactivos como el torio o el uranio se encuentran en distintas regiones del mundo. Su abundancia en la corteza terrestre es aproximadamente de 7.2 mg de torio por kg de corteza [23] y de 2.4 mg de uranio por kg de corteza terrestre [24].

Ambos elementos se desintegran y producen radio y radón, un gas noble radiactivo, que se escapa desde los depósitos que contienen los minerales y constituye una fuente particularmente destacada de radiactividad natural cerca de estos depósitos. La radiactividad natural se

encuentra también tanto en la flora como en la fauna. Como ejemplo, el carbono-14 (C-14) radiactivo, que se produce continuamente en reacciones nucleares en la atmósfera de la tierra inducidas por el intenso flujo de radiación cósmica presente en el sistema solar, entra en la biosfera y la cadena alimenticia de todos los seres vivos. Además, los huesos de los animales y los seres humanos contienen, por ejemplo, el elemento potasio (K); su isótopo radiactivo K-40 (con una abundancia del 0.0117%) tiene un tiempo de vida mayor que la edad de la Tierra. En total, en el cuerpo de una persona de mediana estatura, 25 años de edad y 70 kg de peso, tienen lugar unas 9.000 desintegraciones radiactivas por segundo [25].

Es frecuente afirmar que las centrales nucleares emiten material radiactivo en niveles potencialmente peligrosos. Muchos países tienen regulaciones que establecen los límites máximos, tanto para las emisiones de material ionizante a través de descargas a la atmósfera y efluentes² como para las inmisiones³ en el medio ambiente (por ejemplo, la Ley Federal de Control de Inmisiones de Alemania [26]), y conforme a ellas se mantienen bajo estricta vigilancia. Además, tanto la operación de centrales nucleares industriales como la de los reactores de investigación está sujeta a una regulación estricta cuyo cumplimiento es vigilado por agencias gubernamentales independientes, que pueden incluso autorizar el cierre de una planta eléctrica en caso de infracción.

Se ha encontrado que tanto la emisión como la inmisión cerca de las centrales nucleares están dentro de las fluctuaciones espaciales esperables del fondo de radiactividad natural [27]. Debe destacarse que las centrales de carbón también emiten material radiactivo, ya que el carbón contiene de 0,05 a 3 mg de uranio por kg [28]. Ni el uranio ni sus productos de desintegración radiactiva pueden ser detenidos completamente por filtros y por tanto son emitidos al medio ambiente [29]. Otra afirmación ampliamente extendida es que son más frecuentes los casos de leucemia cerca de instalaciones nucleares. Sin embargo los estudios han mostrado que “la agrupación local de casos de leucemia ocurre con bastante independencia de las instalaciones nucleares” [30], ver también [31]. El número de casos de cáncer resultantes del accidente de

² Nota de los traductores: líquidos que procede de una planta industrial.

³ Nota de los traductores: inmisión es la recepción de contaminantes en el medio ambiente (aire, suelo, agua) procedentes de una fuente emisora. La inmisión es consecuencia directa de la emisión.

Chernobyl fue investigado por la OMS [21]. Estos resultados han sido discutidos anteriormente.

La seguridad de las centrales nucleares es un tema importante. El devastador accidente de Chernobyl estuvo relacionado con un reactor de agua ligera moderado con grafito (RBMK), un tipo de reactor todavía utilizado en Rusia y Lituania; un accidente similar es imposible en el resto de reactores nucleares existentes en el mundo, debido a la tecnología usada. Una mejora aún mayor de la seguridad es una de las razones que impulsan el desarrollo de los reactores de próxima generación. Éstos se construyen de tal modo que, o bien sea físicamente imposible una fusión del núcleo del reactor, o bien dicho escenario de peor desastre posible se ha incorporado en el diseño del reactor de forma que sus consecuencias queden limitadas al sistema de contención, sin afectar al medio ambiente. El sistema de contención del reactor se diseña también para soportar el impacto de cualquier avión.

Residuos

Anualmente, se descargan 10.500 toneladas de combustible gastado originadas en los reactores nucleares de todo el mundo [32]. El combustible gastado ha de ser o reprocesado o bien aislado del entorno durante cientos de miles de años, con el fin de prevenir daños a la biosfera. Todos los núcleos radiactivos de los residuos decaerán con el tiempo en núcleos estables. En caso de ser ingeridos o inhalados, varios de los nucleidos presentes en los residuos radiactivos plantean diferentes amenazas para los seres humanos, en función de sus propiedades de desintegración, ritmo de decaimiento y tiempo de retención en el organismo. Esta amenaza se cuantifica como radiotoxicidad, una medida de cómo de nocivo es un material radiactivo. Ejemplos de nucleidos con alta radiotoxicidad son los isótopos de larga vida del plutonio y los actínidos menores (MA), principalmente neptunio, americio y curio, mientras que los productos de fisión de vida corta son generalmente menos radiotóxicos y su radiotoxicidad disminuye rápidamente con el tiempo. Los residuos radiactivos se originan no solo a causa del funcionamiento y desmantelamiento de centrales nucleares, sino también en medicina nuclear y laboratorios de investigación científica. El almacenamiento de estos residuos

de baja y media actividad en lugares adecuados no conlleva gran dificultad y se lleva a cabo en la actualidad en muchos países. Debe tenerse en cuenta que todos los países europeos que tienen centrales nucleares (ver Tabla 1) y otros que hacen uso de material radiactivo o radiación ionizante han firmado la “Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos” de la AIEA [33].

Sin embargo, la gestión a largo plazo del combustible gastado sí supone una seria preocupación. A corto plazo, la gestión del combustible gastado se ha realizado con seguridad desde la operación de los primeros reactores nucleares. Tras su descarga del reactor, el combustible gastado se almacena temporalmente bajo el agua en el mismo emplazamiento del reactor, a la espera de que los núcleos radioactivos con una vida más corta se desintegren. Posteriormente, el combustible gastado o bien es reprocesado de forma que el uranio y el plutonio se separan químicamente, para ser reutilizados como combustible del reactor o bien, en el caso de ciclo de un solo paso, es empaquetado (principalmente por vitrificación) para su futuro almacenamiento a largo plazo en profundos depósitos subterráneos. En los ciclos de un solo paso, el combustible gastado ha de ser almacenado durante al menos 170.000 años hasta alcanzar los mismos niveles de radiotoxicidad que el uranio del cual fueron extraídos.

Si se elimina el 99.9% del plutonio y uranio, se reduce el tiempo de almacenamiento a unos 16.000 años y las futuras tecnologías avanzadas de reciclaje, que también eliminan los actínidos menores (MA), reducirían a poco más de 300 años el tiempo de seguridad de almacenamiento de los restantes productos de fisión [34]. Los MA recuperados han de ser transmutados en productos de fisión de vida corta, o bien incinerados en instalaciones especiales, tal y como se discute más adelante.

La eliminación a largo plazo de todo contacto con agua es el principal problema a considerar en los depósitos geológicos profundos. En varios países se han identificado lugares posibles para estos almacenes, y se ha investigado en detalle su seguridad geológica a largo plazo (por ejemplo puede consultarse la gestión del combustible gastado en el reactor finlandés en construcción en Olkiluoto [35]). Este tipo de

almacenamiento elimina el problema de los residuos, al menos temporalmente, y en algunos casos no excluye la recuperación de este material para su futuro reprocesamiento [35,36].

Proliferación y la amenaza extremista

La utilización no pacífica de material fisible es un asunto de máxima preocupación; ver [37]. En el debate de este tema, debe distinguirse entre la fabricación de cabezas nucleares por las potencias nucleares mundiales, por un lado, y la fabricación de simples bombas por parte de extremistas, por el otro. Las potencias nucleares construyen cabezas nucleares a partir de uranio altamente enriquecido (HEU o highly enriched uranium) o de plutonio adecuado para armas nucleares. Este último no se produce en los reactores de las centrales nucleares que producen electricidad, sino en reactores especialmente diseñados para producir principalmente Pu-239 [38]. El uranio poco enriquecido (LEU, de low enriched uranium) que se usa como combustible de las centrales nucleares, no es adecuado para construir dispositivos explosivos. El plutonio extraído del combustible nuclear gastado no tiene la composición isotópica adecuada para la producción efectiva y eficiente de cabezas nucleares. Debe resaltarse, por tanto, que el plutonio producido en las centrales nucleares no es útil para la fabricación de cabezas nucleares. La posibilidad de que un determinado país desarrolle un programa de armas nucleares no depende sólo de la presencia de centrales nucleares en el país, sino también de la disponibilidad de plantas de reprocesamiento y/o enriquecimiento.

Otra cuestión distinta es el uso de material fisible por extremistas. Puede encontrarse un estudio sobre esa amenaza, por ejemplo, en [39]. El material fisible químicamente extraído de combustible nuclear utilizado puede, en principio, ser usado por extremistas para construir un dispositivo nuclear de capacidad explosiva relativamente baja, quizá de unas pocas kilo toneladas equivalentes de TNT [40], pero que libere

cantidades grandes de cenizas radiactivas al medio [41].

También es concebible que una bomba convencional pueda usarse para vaporizar una barra de combustible gastado y dispersar su contenido radiactivo. Para evitar este tipo de actos, las localizaciones de material fisible están estrictamente vigiladas por agencias internacionales como la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA), ver también [42]. Debido a que el reprocesamiento del combustible nuclear requiere una gran planta industrial, el proceso puede ser objeto de estricta vigilancia y la desviación o robo de material puede impedirse de modo efectivo. En el futuro previsible, algunos reactores de cuarta generación producirán mucho menos plutonio, en comparación con los reactores actuales (ver sección 5) [43].

Otra amenaza que no puede ignorarse es la posibilidad de que grupos extremistas pudieran adquirir armas nucleares directamente a partir del desmantelamiento de los arsenales de armas nucleares. Está claro que en este caso la amenaza terrorista no tiene conexión con el uso pacífico de la tecnología nuclear.

4. Ciclos de Combustible

Como cualquier otra fuente de energía, la energía nuclear no está exenta de peligros. La seguridad de las centrales nucleares, la eliminación de residuos, la posible proliferación nuclear y las amenazas extremistas son todas cuestiones de seria preocupación. Para valorar hasta qué punto los riesgos asociados pueden considerarse aceptables, deben tenerse en cuenta los riesgos de las fuentes de energía alternativas (no nucleares). Esta valoración debe realizarse de modo racional, en base a hechos científicos a través de una discusión abierta de las evidencias y en comparación con los riesgos de otras fuentes de energía.

La mayoría de los reactores hoy en uso están basados en la fisión del U-235, que se produce cuando éste es bombardeado con neutrones térmicos (lentos). El mismo proceso sucede en el Pu-239 y el U-233, que se crean en reactores térmicos a través de la captura de neutrones por parte del U-238 y el Th-232, respectivamente. Por el contrario, la reacción en cadena en reactores rápidos se mantiene con neutrones rápidos (energéticos). Otros reactores térmicos incluyen el reactor de sales fundidas (ver capítulo 5) y los del tipo CANDU. Estos últimos se refrigeran y moderan con agua pesada y son capaces de funcionar con uranio natural. Ambos tipos de reactores pueden producir suficiente U-233 como para mantenerse en funcionamiento, pero los productos de fisión tienen que ser retirados a intervalos regulares.

Los reactores rápidos pueden producir, incluso, más combustible (plutonio) del que consumen (reactores reproductores rápidos). Además de esta clasificación, se pueden distinguir dos clases distintas de reactores, en función de su ciclo de combustible: los de un solo paso (principalmente empleados en EEUU) y los de ciclo cerrado (empleados por ejemplo en Francia). Estos dos tipos serán analizados por separado, dado que cada uno tiene sus problemas y ventajas específicas. Sin embargo, en primer lugar, es necesario tratar el tema de las reservas de uranio.

Reservas de Mineral de uranio

Las fuentes convencionales de uranio se estiman en unos 14,8 millones de toneladas. Entre éstas hay unos 4,7 millones de toneladas en fuentes identificadas, listas para su acceso y extracción a un coste menor de 130 dólares (100 euros) por kg de uranio [44,45]. El balance restante de unos 10 millones de toneladas es una estimación a partir de investigaciones detalladas y exploraciones y conocimientos geológicos que apuntan a áreas geográficas probables. Este cálculo está probablemente subestimado, dado que sólo 43 países han proporcionado datos al respecto.

Otras reservas incluyen fuentes no convencionales de uranio (uranio en baja concentración) y otros combustibles nucleares posibles (como el torio). La mayoría de estas reservas no convencionales están asociadas con el uranio en fosfatos (alrededor de 22 millones de toneladas),

pero existen otras fuentes posibles, por ejemplo, el agua del mar y los esquistos. Es probable que estas fuentes se exploten si el precio del uranio aumenta. El torio es abundante, con reservas de más de 4.5 millones de toneladas [46], aunque esta estimación no incluye datos de muchos países con posibles depósitos de torio.

La cifra de 4.7 millones de toneladas de uranio en yacimientos identificados ha de compararse con las necesidades anuales mundiales de unas 67 kilotoneladas en 2005 [19]. Las necesidades mundiales de uranio asociadas a los reactores se espera que aumenten hasta entre 82 y 101 kilotoneladas para el año 2025. Se estima que la demanda de América del Norte y de Europa Occidental se mantendrá prácticamente constante o disminuirá ligeramente mientras que aumentará en el resto del mundo [44].

A partir de estas estimaciones se deduce que hay suficiente uranio en las fuentes identificadas como para proporcionar combustible a los reactores nucleares de ciclo de un solo paso durante otros 50 años. Teniendo en cuenta las fuentes convencionales (unos 10 millones de toneladas) y no convencionales (unos 22 millones de toneladas) que probablemente se explotarán si existe demanda, las reservas de mineral de uranio durarán varios cientos de años incluso si el uranio es usado en un ciclo de un solo paso. Si se usa un ciclo de combustible cerrado, habrá uranio suficiente para miles de años (ver más adelante).

El ciclo de un solo paso, o ciclo abierto

Después de su extracción en la mina, el mineral de uranio es convertido en hexafluoruro de uranio, UF_6 . El UF_6 es enriquecido isotópicamente con el fin de aumentar su concentración de núcleos fisionables de U-235 hasta el 4.6%. La concentración de U-235 en el uranio natural es del 0.72%, demasiado baja para su uso en la mayoría de reactores excepto en los del tipo CANDU, que pueden funcionar con uranio natural.

El fluoruro se convierte a continuación en óxido de uranio enriquecido, UO_2 , a partir del cual se fabrican las pastillas de combustible que se insertan en las barras. Estas barras se mantienen en el reactor hasta cuatro años, durante los cuales la reacción en cadena de fisión nuclear controlada libera continuamente la energía que se transforma en electricidad. Cada paso de la

producción representa un proceso industrial completo.

Debido a que las barras de combustible gastadas no son reprocesadas, todos los actínidos menores y, en particular el plutonio, permanecen en las barras de combustible en una forma que no puede ser usada de manera práctica y eficaz para producción de armas. Esta seguridad inherente con respecto a la proliferación armamentística es la principal ventaja del ciclo de combustible de un solo paso. Se pueden encontrar más ventajas de este tipo de proceso en [47].

El principal inconveniente de este proceso es que produce residuos radiactivos que han de ser almacenados durante cientos de miles de años, hasta reducir sus niveles de radiotoxicidad a los del mineral natural. Este ciclo desperdicia uranio y plutonio fisionable. Por ejemplo, en los reactores de agua ligera en funcionamiento, el enriquecimiento inicial de U-235 es el 3.3% y en el combustible consumido es aún del 0.86% [48]. La abundancia de U-235 en el uranio natural es del 0.72%.

El ciclo cerrado de combustible

Los procesos en un reactor de ciclo cerrado de combustible, en gran medida, siguen el mismo procedimiento que los de ciclo de un solo paso. La principal diferencia es que el combustible gastado se procesa químicamente (recuperación de plutonio-uranio por extracción, PUREX), y el plutonio y uranio son recuperados para su uso posterior como combustible de óxido mixto (MOX) [49]. La extracción de uranio y plutonio del combustible nuclear irradiado se realiza de modo rutinario en La Hague (Francia), Sellafield (Reino Unido), Rokkasho (Japón) y Mayak (Rusia). Los MA no se extraen y constituyen los principales componentes de los residuos radiactivos de vida larga, y deben ser almacenados de un modo seguro (ver el capítulo anterior sobre “Residuos”) o incinerados / transmutados (ver a continuación: Futuras perspectivas de gestión del combustible gastado).

Por supuesto, el reprocesado es un proceso a gran escala, cuyos riesgos asociados ya han sido tratados (ver el capítulo “Proliferación y la amenaza extremista”). En las instalaciones actualmente en funcionamiento, los isótopos separados se controlan estrictamente por

instituciones internacionales que mantienen un registro del lugar en que se encuentran. Una ventaja del ciclo cerrado de combustible es que requiere mucho menos mineral de uranio. El material reciclado puede ser usado en reactores reproductores rápidos, que son cien veces más eficientes. Con las reservas de uranio que se conocen en la actualidad, los reactores de fisión de ciclo cerrado podrían funcionar durante 5.000 años, en vez de varios cientos de años como harían en las de ciclo de un solo paso. La menor demanda de mineral de uranio reduciría el impacto medioambiental de la actividad minera y los conflictos geopolíticos y económicos por el suministro de mineral de uranio.

Otro posible ciclo cerrado de combustible es el basado en el torio [50], que es entre 3 y 4 veces más abundante que el uranio.

Tanto los reactores de ciclo abierto de combustible como los de ciclo cerrado generan energía por fisión inducida por neutrones en los núcleos pesados que constituyen el combustible, pero tratan los residuos producidos de manera diferente. Los sistemas de ciclo abierto son atractivos desde el punto de vista de la seguridad. Los sistemas de ciclo cerrado recuperan combustible, que puede ser usado de nuevo, a partir de los residuos y tienen, por tanto, menor demanda de mineral de uranio.

Perspectivas futuras de la gestión del combustible gastado

La alternativa al almacenamiento de larga duración del combustible consumido es su incineración en reactores especiales ([43], ver más adelante) o la transmutación de isótopos de vida larga en otros de vida corta mediante sistemas asistidos por acelerador (ADS). Ambos procesos requieren no solamente la separación efectiva del U/Pu, sino también de los MA. La eficiencia de la separación es de hasta un 99.9%; mientras

CFR	Reactor refrigerado por gas	Utilización eficiente de los actínidos. Ciclo de combustible cerrado. Proporciona electricidad, hidrógeno y/o calor.
LFR	Reactor rápido refrigerado por plomo	Pequeña planta nuclear construida en fábrica. Ciclo cerrado de combustible con intervalo de reabastecimiento muy largo (15-20 años). Se puede transportar a donde sea necesario para la producción distribuida de energía, agua potable o hidrógeno. También se están estudiando reactores LFR más grandes.
MSR	Reactor de sales fundidas	Diseñado para un quemado eficiente de Pu y MA. Su combustible líquido evita la necesidad de fabricación de combustible; es inherentemente seguro. Ocupa el primer puesto de sostenibilidad; es el más adecuado para el ciclo del torio.
SFR	Reactor rápido refrigerado por sodio	Utilización eficiente de los actínidos, conversión de U fértil, ciclo cerrado.
SCWR	Reactor enfriado por agua supercrítica	Generación eficiente de electricidad; posibilidad de utilización de actínidos; ciclo de uranio de un solo uso en su forma más simple; también es posible su uso con ciclo cerrado.
VHTR	Reactor de muy alta temperatura	Ciclo de uranio de un solo paso. Generación de electricidad y calor para la industria petroquímica, producción termo-química de hidrógeno.

▲ **Tabla 2:** Reactores de cuarta generación (GenIV) y algunas de sus características específicas extraídas de [43].

que la del proceso de incineración / transmutación se espera que sea del 20%. Por tanto, se necesitarán varios ciclos de separación e incineración / transmutación para reducir significativamente la cantidad de material radiactivo de vida larga [34]. Tras dicho procedimiento y después de poco más de trescientos años, un periodo durante el cual un almacenamiento seguro es fácilmente concebible, la radiotoxicidad del combustible gastado se encontraría por debajo de la del uranio del que proviene el combustible. En las últimas décadas se han estudiado esquemas prometedores basados en sistemas asistidos por acelerador (ADS) [51], especialmente en Europa y en Asia. La idea básica consiste en utilizar un reactor híbrido que combine un reactor de fisión con un acelerador de protones de alta energía e intensidad. Este último se usa para producir un flujo intenso de neutrones que induce la fisión en un blanco de uranio, plutonio y MA. Los neutrones se necesitan para iniciar y mantener el proceso de fisión y no hay involucrada ninguna reacción en cadena autosostenida. En principio, un sistema híbrido como éste podría transmutar residuos radiactivos en productos de fisión de vida corta, produciendo energía al mismo tiempo.

En el Sexto Programa Marco de la Comisión Europea se lanzó un proyecto con el obje-

tivo de diseñar la primera instalación experimental que pruebe la viabilidad de la transmutación con ADS. Paralelamente se está desarrollando un diseño de concepto para su realización modular a nivel industrial [52]. Estos estudios deben también incorporar análisis de fiabilidad y competitividad económica.

Tales sistemas híbridos tienen, aparte del quemado de residuos, el potencial de contribuir sustancialmente a la producción de energía a gran escala, más allá de 2020. Los ADS competirán con los reactores de Cuarta Generación, que se diseñan también para conseguir el quemado efectivo de los MA (sobre los reactores de Cuarta Generación, véase el próximo capítulo).

5. La producción de energía nuclear en el futuro

Reactores nucleares avanzados

Los escenarios para la energía de los próximos 50 años muestran que es vital mantener abierta la opción nuclear para la producción de electricidad. Sin embargo, la tecnología de los actuales reactores y los ciclos de combustible basados en el U-235, producen una gran cantidad de residuos potencialmente peligrosos, mientras que en

algunos tipos de reactores el riesgo de un suceso catastrófico es inaceptablemente alto. Como resultado de estos problemas de seguridad y la asociación de la energía nuclear con el accidente de Chernobyl y las armas nucleares, la industria nuclear se enfrenta con una fuerte oposición en algunos países europeos.

Como respuesta, se han desarrollado los reactores de tercera generación (GenIII), tales como el Reactor Europeo a Presión (EPR), que se encuentra en construcción en Olkiluoto, Finlandia, que representa un paso adelante en tecnologías de seguridad [35]. Ofrece prevención avanzada de accidentes para reducir aún más la probabilidad de daño en el núcleo del reactor. El control de accidentes mejorado asegurará que, en el caso extremadamente improbable de una fusión del núcleo del reactor, todo el material radiactivo se mantenga dentro del sistema de contención y que las consecuencias de un accidente de ese tipo se limiten a la propia central. Habrá también una resistencia mayor a impactos directos de aviones, incluidos grandes aviones comerciales de pasajeros.

En 2001, alrededor de 100 expertos de Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea, Sudáfrica, Suiza, Reino Unido, Estados Unidos, la Agencia Internacional de la Energía Atómica y la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE empezaron a trabajar en la definición de las metas a alcanzar por nuevos sistemas, identificando los conceptos más prometedores, evaluándolos y definiendo los esfuerzos requeridos en investigación y desarrollo (I+D). A finales de 2002, este trabajo tuvo como resultado la descripción de seis sistemas y sus necesidades de I+D asociadas [43]. En el desarrollo de los reactores de Cuarta Generación (GenIV) se coloca el acento en la seguridad. Un requisito fundamental es la eliminación de la posibilidad de un accidente como el de Chernobyl. Además, estos reactores producirán electricidad de forma más económica, reducirán la cantidad de residuos nucleares que requieran almacenamiento, aumentarán la resistencia a la proliferación e introducirán nuevas características como la producción de hidrógeno para su aplicación en el transporte [Tabla 2]. Existe también la posibilidad de usar el ciclo de torio-uranio, cuyas ventajas son, por ejemplo, la imposibilidad, según las leyes de la física, de producir plutonio y/o actíni-

dos menores y, por tanto, la reducción de la radiotoxicidad de los residuos en torno a un factor 1000 en comparación con el ciclo de un solo paso. Este tema fue tratado en un reciente artículo [53].

Aunque todavía se necesita más investigación, se espera que algunos de estos sistemas se encuentren operativos en 2030. Con los ciclos de combustible más avanzados, en combinación con el reciclaje, se incinera un gran porcentaje de los materiales fisibles de vida larga, por lo que la necesidad de aislamiento de los residuos se reduce de cientos de miles de años a unos pocos cientos de años.

Es muy pronto para juzgar los méritos relativos de los reactores ADS y Gen IV como medios de producción de energía y sistemas de incineración y transmutación, pero las propiedades en general más ventajosas de ambos, son obvias. Para un estudio comparativo ver [54].

Reactores de fusión nuclear

Una opción más lejana para la producción de energía nuclear sin emisión asociada de CO₂ es el proceso de fusión nuclear. En 2005, tuvo lugar un importante paso hacia su consecución con la decisión de construir el Reactor Termonuclear Experimental, ITER, [55] en Cadarache, Francia. En este reactor el deuterio y el tritio se fusionan para formar Helio-4 y un neutrón que lleva el 80% de la energía liberada. El Helio-4 es la ceniza no radiactiva del proceso de fusión. Una vez en funcionamiento, un reactor de ese tipo genera el tritio que necesita como combustible a partir del Litio. El deuterio es un isótopo del hidrógeno y está disponible en la naturaleza en cantidades virtualmente ilimitadas. Las reservas mundiales de Litio se estiman en unas 12 millones de toneladas [56], suficientes para considerar la fusión nuclear como fuente de energía durante mucho tiempo. La construcción de una central de fusión implica el uso de materiales que tras recibir el impacto de los neutrones de fusión se activarán (es decir, se volverán radiactivos) inevitablemente. Sin embargo, dicha actividad decaerá relativamente rápido, en unos cientos de años, a los niveles normales. Después de ello, el material podrá ser manejado de forma segura incluso en una mesa de trabajo. La experiencia adquirida en el manejo de tritio radiactivo justifica la afir-

mación de que la fusión es una fuente de energía muy segura.

Sin embargo, la fusión nuclear sólo podrá convertirse en una fuente de energía sustancial, como muy pronto, en la segunda mitad de este siglo, dado que la tecnología de los reactores de fusión necesita aún mucha más elaboración.

6. Conclusiones

Nuestras reflexiones han conducido a las siguientes conclusiones:

- Ninguna fuente de energía será capaz de satisfacer por sí sola las necesidades de las generaciones futuras.

Los nuevos conceptos de reactores (GenIV) cumplirán criterios estrictos de sostenibilidad y fiabilidad en la producción de energía, así como de seguridad y no proliferación. La fisión y fusión nucleares poseen el potencial de constituir una contribución sustancial para satisfacer las necesidades futuras de producción de electricidad.

La energía nuclear puede y debe constituir una contribución importante dentro del conjunto de fuentes de electricidad.

- Los reactores nucleares modernos se basan en tecnología comprobada y utilizan prevención avanzada de accidentes que incluyen sistemas pasivos de seguridad. Todo ello hace que sea prácticamente imposible que se repita un accidente como el de Chernobyl con todas sus consecuencias.

- Debe iniciarse o continuarse la investigación extensa y a largo plazo, con programas de desarrollo, innovación (I+D+i) y demostración, que incluyan todas las opciones posibles de producción sostenible de energía. La I+D+i en opciones específicas debería estar dirigida a la realización y evaluación de sistemas pilotos funcionales, por ejemplo, basados en un reactor de cuarta generación.

- Debería continuarse con los esfuerzos para conseguir la transmutación de los desechos radiactivos, por medio del prometedor sistema asistido por acelerador (ADS) o los reactores de cuarta generación. De nuevo, los pasos necesarios son desarrollos de ingeniería e instalaciones piloto.

- Debería estudiarse la posibilidad de ampliar la vida operativa de los reactores actuales.

- Merece considerarse la opción nuclear para la generación de energía, tanto en el proceso de fisión como en el de fusión.

- En vista del largo periodo de tiempo que ha de transcurrir entre la demostración y la realización de cualquiera de los esquemas propuestos, el potencial de la energía nuclear a partir de 2020, sólo podrá ser juzgado tras un considerable aumento del esfuerzo en I+D+i. Tales esfuerzos necesitan la cooperación de científicos y políticos, para evaluar la seguridad a largo plazo y los aspectos económicos de la producción de energía.

- Debe llevarse a cabo la propuesta de mayo de 2006 de la Comisión Europea para una política energética europea común. Esta política pretende que Europa sea capaz de afrontar los retos del suministro de energía en el futuro y los efectos que conllevará en el crecimiento y el medio ambiente. Esta propuesta respeta el Libro Verde de la Comisión Europea sobre estrategia europea para la seguridad en el suministro energético.

- Los programas de I+D+i sobre la opción nuclear requieren además apoyo financiero para la investigación básica en física nuclear y en los temas relevantes de física de materiales, dado que solo así se logrará la experiencia necesaria para encontrar nuevas soluciones tecnológicas.

- Europa necesita estar al corriente de los avances en el diseño de reactores, independientemente de cualquier decisión sobre instalación de reactores nucleares en Europa. Ésta es una razón importante que aconseja financiar la I+D+i en reactores nucleares, y es esencial para que Europa participe en los programas nucleares de países de rápido crecimiento, como China e India, que están decididos a construir centrales nucleares y para ayudar a garantizar su seguridad, por ejemplo, a través de una participación activa en la OIEA.

- Es necesario realizar I+D+i a escala global. Los problemas relacionados con la producción sostenible de energía a gran escala, tales como los residuos, la seguridad, la no proliferación y la aceptación pública, sobrepasan las fronteras nacionales.

- Los políticos deben darse cuenta de la necesidad urgente de resolver el problema de los gases de efecto invernadero dentro de una estrategia de energía definida, mediante el estímulo y apoyo financiero a la I+D+i, incluyendo la opción nuclear. La Comisión Europea ya ha tomado en cuenta este concepto fundamental [59].

- Para conseguir aceptación pública y apoyo, se necesita un programa de información, responsable y neutral, sobre todos los aspectos de la producción de energía nuclear, apoyado por un programa de concienciación ciudadana que ayude al público en general a apreciar y juzgar los riesgos tecnológicos y la evaluación de dichos riesgos en las economías industriales. Se necesitan grandes esfuerzos para informar al público en general sobre los aspectos de seguridad a corto y largo plazo y del impacto ecológico de las diferentes tecnologías en las regiones de Europa altamente industrializadas. Si la tecnología nuclear ha de contribuir a satisfacer las necesidades energéticas futuras de Europa y ayudar a mitigar los severos efectos medioambientales de otras fuentes de energía, será esencial conseguir su aceptación por el público. De no ser así, los desarrollos innovadores podrían ser dificultados e incluso detenidos por la opinión pública.

Ninguna fuente será capaz de satisfacer por sí sola las necesidades de energía de las generaciones futuras. La opción nuclear que incorpore los recientes avances importantes en tecnología y seguridad, debería formar parte de las principales componentes del suministro futuro de energía. Hay una necesidad clara de programas de investigación, desarrollo e innovación a largo plazo, así como de investigación básica en fisión y fusión nuclear y en métodos de incineración, transmutación y almacenamiento de residuos.

Hay que encontrar los medios de informar a la opinión pública sobre cómo estimar riesgos relativos de las diferentes fuentes de energía de modo racional. Todos los participantes en el proceso de toma de decisiones necesitan estar bien informados sobre todos los aspectos de la energía y su producción. Asegurar esto es una tarea importante de la ciencia e investigación europea.

Referencias (las direcciones de Internet están actualizadas al 1 de junio de 2007)

- [1] *World Commission on Environment and Development, Our Common Future* (New York: Oxford University Press, 1987)
- [2] Statistical Office of the European Communities <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> See also: Europe in figures, erostat 2006-07, ISBN 92-79-02489-2, Elec. ver.: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-CD-06-001-ENERGY/EN/KS-CD-06-001-ENERGY-EN.PDF
- [3] Helmut Geipel, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, Germany, at Greenpeace Workshop on "Klimaschutz durch CO₂-Speicherung – Möglichkeiten und Risiken" (in German) http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/Geipel_BMWA_CCS_50926.pdf
- [4] Externalities of Energy. A Research Project of the European Commission; <http://www.externe.info>
- [5] Uranium Information Centre Ltd., GPO Box 1649N, Melbourne, Australia <http://www.uic.com.au/nip100.htm>
- [6] Öko-Institut e.V. (Institute for Applied Ecology) Postfach 50 02 40, 79028 Freiburg, Germany, <http://www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm>
- [7] World Information Service on Energy (WISE), P.O. Box 59636, 1040 LC Amsterdam, The Netherlands, <http://www.nirs.org/mononline/nukesclimatechangereport.pdf>
- [8] see also: Parliamentary Office of Science and Technology (October 2006, No. 268): Carbon Footprint of Electricity Generation; <http://www.parliament.uk/documents/upload/postpn268.pdf>
- [9] http://auto.ihs.com/news/2006/eu-en-auto-emissions.htm?wbc_purpose=Ba
- [10] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, Working group I, www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf
- [11] Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., Frohschammerstr. 14, 80807 München <http://www.gletscherarchiv.de/202006past1.htm> (in German)
- [12] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, WG III: <http://www.ipcc.ch/SPM040507.pdf>
- [13] Kyoto-Protocol: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>
- [14] Energy to 2050: Scenarios for a Sustainable Future (2003), International Energy Agency (IEA/OECD) Paris, France.
- [15] The Role of Nuclear Power in Europe, World Energy Council, 2007, www.cna.ca/english/Studies/WEC_Nuclear_Full_Report.pdf
- [16] World Energy Outlook, International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France, www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/weo2004.pdf
- [17] Institute of Physics Report: The Role of Physics in Renewable Energy, RD&D, 2005
- [18] http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2007/com2007_0002en01.pdf
- [19] World Nuclear Association, 22a St James's Square, London SW1Y 4JH, United Kingdom, <http://www.world-nuclear.org>
- [20] Paul Scherrer Institut (PSI), 5332 Villigen, Schweiz, Technology Assessment/ GaBE <http://gabe.web.psi.ch/research/ra/>
- [21] World Health Organization, Avenue Appia 20, CH 1211 Geneva 27, Switzerland <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/index.html>
- [22] Bernard L. Cohen: Before it's too late; Springer 1983, ISBN-13: 978-0306414251, and http://www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Bernard.Cohen.rankRisks.htm
- [23] Mineral Information Institute, 505 Violet Street, Golden CO 80401, USA, www.mii.org/Minerals/photolithium.html
- [24] Deutsche Zentrale für Biologische Information, www.biologie.de/biowiki/Uran (in German)
- [25] Martin Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz (in German), Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-45-3, new edition (in German): http://www.ktg.org/r2/documentpool/de/Gut_zu_wissen/Materialien/Downloads/013radioaktivitaet_strahlenschutz2005.pdf
- [26] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit,

- Alexanderstraße 3, 10178 Berlin, Germany
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anhang_a.pdf, (in German)
- [27] Niedersächsischen Umweltministerium; Archivstraße 2, 30169 Hannover, Germany
http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C24150382_N23066970_L20_D0_I598.html
- [28] Zur Geochemie und Lagerstättenkunde des Urans, (in German)
 Gebrüder Borntraeger, Berlin Nikolassse, 1962, ISBN 3-443-12001-6
- [29] Strahlenschutzkommission, Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlen-schutz, Postfach 12 06 29, 53048 Bonn, Germany
<http://www.ssk.de/werke/volltext/1981/ssk8102.pdf> (in German)
- [30] Deutsches Krebsforschungszentrum, Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg, Germany,
http://www.dkfz.de/epi/Home_d/Programm/AG/Praevent/Krebshom/texte/englisch/204.htm
- [31] R. Neth: Radioaktivität und Leukämie, Deutsches Ärzteblatt 95, Ausgabe 27, 03.07.1998, S.A-1740/B-1494/C 1386 (in German), <http://www.aerzteblatt.de/v4/archiv/artikeldruck.asp?id=12227>
- [32] www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51Inf/Documents/English/gc5inf-3_en.pdf
- [33] www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm
- [34] A. Geist et al.: Reduzierung der Radiotoxizität abgebrannter Kernbrennstoffe durch Abtrennung und Transmutation von Actiniden: Partitioning, NACHRICHTEN-Forschungszentrum Karlsruhe Jahrgang 36(2004) p. 97-102
<http://bibliothek.fzk.de/zb/veroeff/58263.pdf>
- [35] Posiva Oy, 27160 Olkiluoto, Finland,
<http://www.posiva.fi>
- [36] The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability;
 A Position Paper of International Experts, IAEA 2003 http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/LTS-RW_web.pdf
- [37] Gerald E. Marsh and George S. Stanford: Bombs, Reprocessing, and Reactor Grade Plutonium; Forum on Physics and Society of the American Physical Society, April 2006, Vol. 35, No. 2
<http://units.aps.org/units/fps/newsletters/2006/april/article2.cfm>
- [38] Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, National Academy of Sciences (U.S.), Panel on Reactor-Related Options, 1995
http://www.ccnr.org/reactor_plute.html
- [39] NuclearFiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation,
 1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA,
<http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclear-weapons/issues/terrorism/introduction.htm>
- [40] J. Carson Mark, Science & Global Security, 1993, Vol. 4, pp 111-128
http://www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/sgs04mark.pdf
- [41] Making the Nation Safer - The Role of Science and Technology in Countering Terrorism. In: The National Academy Press (Washington DC, USA) 2002; http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=10415
- [42] nuclearfiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation 1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA
<http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclear-weapons/issues/proliferation/fuel-cycle/index.htm>
- [43] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System, issued by the U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, Decembre 2002, <http://www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm>
- [44] Resources, Production and Demand, A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency ("Red Book", 21st edition)
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf>
- [45] International Atomic Energy Agency, P.O. Box 100, Wagramer Strasse 5
 A-1400 Vienna, Austria
<http://www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html>
- [46] The 2005 IAEA-NEA "Red Book", quoted in
<http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html>
- [47] Frank N. von Hippel: Plutonium and Reprocessing of Spent Nuclear Fuel; Science, 293 (2001) 2397-2398

<http://www.princeton.edu/~globsec/publications/pdf/Sciencev293n5539.pdf>

Golden CO 80401, USA
<http://www.mii.org/Minerals/photolith.html>

- [48] Martin Volkmer, Kernenergie Basiswissen (in German), Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-44-5, new edition (in German): <http://lbs.hh.schule.de/klima/energie/kernenergie/basiswissen2004.pdf>
- [49] AREVA Head Office, 27 – 29 rue Le Peltier, 75433 Paris cedex , France
http://www.arevaresources.com/nuclear_energy/datagb/cycle/indexREP.htm
- [50] Shaping the Third Stage of Indian Nuclear Power Programme, Government of India, Department of Energy;
<http://www.dae.gov.in/publ/3rdstage.pdf>
- [51] http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/askArchive.php?bse=agenda&categ=a04210&id=a04210s122t8/lecture_notes
- [52] <http://nuklear-server.ka.fzk.de/eurotrans/>
- [53] S. David et al. in *europhysicsnews* 2007, Vol. 38, no.2, p. 24
- [54] ECD Nuclear Energy Agency, Le Seine Saint-Germain12, boulevard des Îles, F-92130 Issy-les-Moulineaux, France
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109.html>
- [55] <http://www.iter.org/>
- [56] Mineral Information Institute, 505 Violet Steet,
- [57] SCADPlus: Green Paper:
A European strategy for sustainable, competitive and secure energy
<http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l27062.htm>
- [58] http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green_paper_energy_supply_en.pdf
- [59] <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/doc/brusselsfdemay2002.pdf>