

Estudio de las consecuencias ecológicas del uso de la energía nucleoelectrónica

Por Essam E. El-Hinnawi

Desde hace mucho tiempo se considera que la energía es un elemento indispensable para satisfacer las necesidades fundamentales del hombre y para fomentar y apoyar el crecimiento económico y el nivel de vida; tanto es así que a menudo una nación identifica su bienestar con sus insaciables y crecientes necesidades de energía. Los datos estadísticos mundiales del consumo de energía en los últimos años [1] muestran que dicho consumo mundial ha aumentado en un 50% en menos de 10 años. Se ha calculado que el uso de energía per capita se ha multiplicado aproximadamente por dos en los últimos 30 años, y las tendencias en curso indican que en el futuro ese consumo crecerá a una cadencia todavía más rápida. Este aumento es el resultado natural del acelerado crecimiento de las actividades socioeconómicas y de la elevación del nivel de vida.

Hasta ahora, la creciente demanda global de energía se ha satisfecho aumentando el empleo de combustible fósiles y los recursos hidroeléctricos. Solo hace 20 años que se empezó a utilizar la energía nuclear en escala industrial para satisfacer parte de las crecientes demandas energéticas. La capacidad mundial de generación nucleoelectrónica instalada en 1976 era de 79,9 GWe, producida por 187 reactores de potencia que funcionaban en 19 países [2].

El Cuadro I muestra en forma resumida los cálculos más recientes de la posible capacidad de generación nucleoelectrónica para fines del presente siglo. Esas estimaciones indican la amplia gama de posibilidades existentes, que son todavía mayores después de 1985, a causa de posibles cambios de las tasas de crecimiento de la actividad económica y otras consideraciones diversas que pueden afectar la tasa de puesta en servicio de instalaciones nucleoelectrónicas. De acuerdo con los cálculos del OIEA, la energía nuclear aportará un 11–13% del total de la capacidad mundial de generación de electricidad en 1985, y cerca del 17–20% en el año 2000.

A nivel local — y en ciertos casos regional — los aspectos ecológicos de la producción y consumo energéticos han llegado a tener importancia capital y sirven de advertencia de lo que podría ocurrir en mayor escala si no se presta seria consideración a las consecuencias ambientales de la demanda de energía. Estudios recientemente realizados sobre los efectos sobre el medio ambiente de la generación y consumo de energía han puesto de relieve que las naciones no viven aisladas en este respecto y que las actividades de un país pueden causar daño al medio ambiente en un estado vecino. Partiendo de tales consideraciones, la opinión pública, advertida de los problemas, ha pedido que se procure examinar racionalmente los problemas ambientales de una sociedad dependiente de la energía. Si bien las centrales nucleoelectrónicas no descargan cenizas volantes o gases tóxicos en la atmósfera, como ocurre con las centrales que funcionan con combustible fósil, la radiactividad liberada por los productos de la fisión nuclear ha sido el principal foco de la preocupación pública ante la difusión del uso de la energía nuclear, a pesar de las rigurosas medidas de control y de las precauciones tomadas. En numerosas oportunidades se ha tratado de establecer niveles aceptables de radiactividad en el medio ambiente humano, y aunque las

El Dr. El-Hinnawi es Funcionario Superior de Planificación del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Nairobi)

recomendaciones de la CIPR (Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones) tienen aceptación general para la evaluación de los riesgos profesionales, la aplicación de las mismas a grandes poblaciones y al medio ambiente global ha sido objeto de muchas críticas.

CONSECUENCIAS ECOLOGICAS DEL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

El tipo de reactor más utilizado actualmente emplea combustibles de óxido de uranio enriquecido, moderado y refrigerado con agua. El agua puede generar vapor directamente en el reactor (BWR: reactor de agua en ebullición) o puede transferir su calor a un generador de vapor exterior (PWR: reactor de agua a presión). Además de estos reactores de agua ligera (LWR) se han desarrollado otros tipos, la mayoría basados en el uso de grafito de D₂O como moderador. Entre los sistemas experimentales o prototipos se encuentran el reactor de reciclado de plutonio, en el que el plutonio constituye la totalidad o parte del combustible, y el reactor reproductor rápido (por ejemplo: LMFBR), en el que el combustible es una mezcla de óxido de plutonio y de óxido de uranio, natural o agotado. Este último tipo de reactor produce más materiales fisionables, utilizables como combustible de reactor, que los que consume.

El "ciclo del combustible nuclear" se refiere a todo el programa, desde la extracción y tratamiento de uranio, pasando por la fabricación de elementos combustibles para el reactor, el transporte y la reelaboración de combustible irradiado, hasta la gestión de los desechos producidos en todas las etapas del ciclo. En el presente artículo se examinan las consecuencias ecológicas resultantes de todas estas etapas.

Extracción y tratamiento de uranio.

La producción de uranio en 1975 fue de unas 26 000 toneladas y se calcula que en 1980 llegará a 40 000 toneladas [4, 6–8]. Las proyecciones actuales indican que la demanda del combustible de uranio de bajo costo excederá la capacidad de producción hacia 1985. Se estima que las necesidades acumuladas de uranio serán aproximadamente de 0,8 a 1 millón de toneladas en 1990 y de 2 a 3 millones de toneladas para el año 2000 [6, 8]. Actualmente las opiniones no están de acuerdo en cuanto a la cantidad de uranio de bajo costo que existe realmente en los yacimientos poco profundos de la corteza terrestre, de la que podría extraerse económicamente. En todo caso, parece inevitable que se deberán acelerar los esfuerzos de exploración y de explotación de nuevos recursos para satisfacer las crecientes demandas previstas de la industria nuclear [6, 9]¹.

El mineral de uranio se extrae de minas subterráneas, de excavaciones a cielo abierto, o recurriendo al método de disolución, de acuerdo con el emplazamiento geográfico de los yacimientos. Para una central nuclear del tipo LWR, de 1000 MWe, se necesitan

Cuadro I: Estimación de la capacidad de generación nuclear en KWe para los años 1985 y 2000

Año	OCDE –			
	OCDE [3]	AEN/OIEA [4]	USERDA [5]	OIEA [6]
1985	538–700	479–530	390–488	350–400
2000	2800–4100	2005–2480	1695–2250	1500–1800

¹ La situación es parecida en el caso de otros metales utilizados en la industria nuclear (por ejemplo zirconio, boro, cadmio, grafito). Es necesario administrar de manera adecuada estos recursos para satisfacer las crecientes necesidades de la industria nuclear y otras.

aproximadamente 50 000 a 80 000 toneladas de mineral de uranio (de contenido de 0,2% de U). En la vida útil de una central, que es de unos 30 años, la cifra alcanzará a 1,5 millones de toneladas. Para satisfacer estas necesidades sería preciso extraer una cantidad de mineral de uranio cincuenta veces menor que la cantidad de carbón necesaria para una central termoeléctrica de idéntica capacidad [10].

Las consecuencias ecológicas de la extracción del uranio se pueden clasificar en: 1º, efectos sobre los terrenos y las aguas (efectos de los desechos y aguas servidas provenientes del drenaje de las minas o del agua utilizada en las perforaciones; 2º, riesgos profesionales para la salud. Se considera que el radón, que se produce por la desintegración radiactiva del ^{226}Ra presente en los minerales, es importante factor en el aumento de la incidencia del cáncer entre los mineros de yacimientos uraníferos [11–14]. Hoy se combate normalmente el riesgo de exposición profesional por medio de la ventilación, ya sea natural o artificial y manteniendo dentro de los límites admisibles la concentración del radón. Es igualmente necesario eliminar el polvo generado en los procesos de extracción minera, así como evitar la exposición de los operarios a concentraciones de sílice y de radiación.

Cabe observar que las consecuencias ecológicas y los riesgos profesionales derivados de la extracción del carbón necesario para alimentar una central de 1000 MWe, tienden a ser más importantes que los de la extracción del uranio para alimentar una central de la misma capacidad. El número de accidentes mortales en las minas de carbón por central termoeléctrica alimentada es superior por un factor de tres al de los accidentes de minería relacionados con centrales nucleares [15]. El número de "muertes ambientales" entre los mineros de carbón (a causa de la neumoconiosis) es mucho más elevado que el de los mineros de la industria del uranio.

En el proceso de tratamiento, un 70% de la radiactividad total contenida en el mineral que entra en los molinos, se mantiene presente en los residuos sólidos restantes del tratamiento [16]. Los efectos ecológicos de los escoriales comprenden: la erosión del viento, que afecta áreas muy dilatadas; la contaminación a partir de los ríos de los escoriales situados cerca de las riberas o por la elevación del nivel de agua durante las crecidas, que pueden inundar la base de los escoriales, causando la lixiviación del radium de los materiales y la percolación del agua hacia capas subterráneas [17]. En algunos estudios [17–22] se ha demostrado que se deben estabilizar los escoriales para protegerlos contra la erosión eólica e hídrica durante períodos muy largos (necesarios a causa del período de desintegración de 1620 años del ^{226}Ra). A causa de las emanaciones de radón del radium contenido en los escoriales, estos materiales no deben emplearse en materiales de construcción ni de relleno en edificios destinados a la vivienda humana; asimismo tampoco se deben construir tales edificios en la proximidad de los escoriales.

Fabricación de combustible nuclear

El principal peligro que presenta el proceso de fabricación es la toxicidad del fluoruro de hidrógeno y del flúor utilizados en la producción del hexafluoruro de uranio. La industria fluoroquímica cuenta, sin embargo, con métodos bien establecidos para tratar esos productos químicos. El UF_6 producido es un gas muy corrosivo que circula en los circuitos de las plantas de enriquecimiento, pero como se solidifica a la temperatura ambiente se puede embalar fácilmente en bidones de acero. Es en el punto de descarga de la operación de transformación en tanto que UF_6 cuando los materiales del ciclo del combustible nuclear entran en el sistema de salvaguardia establecido por el OIEA de conformidad con el Tratado de no proliferación. Con arreglo a esas salvaguardias, los materiales nucleares deben estar sometidos a una contabilidad física de gran precisión en su paso por todas las operaciones subsiguientes del ciclo del combustible.

A medida que aumenta el nivel de enriquecimiento del uranio, aumenta también el riesgo de una acumulación accidental de cantidades suficientes de ^{235}U , que pueden dar lugar a una reacción en cadena. Aunque los accidentes de criticidad son muy poco probables, se necesita gran cuidado para velar por que nunca se produzca tal situación. El residuo de uranio agotado de las plantas de enriquecimiento se conserva normalmente para su posible utilización futura como componente fértil del combustible de reactor. Este material es ligaramente radiactivo y gradualmente produce los nucleidos ^{226}Ra y ^{222}Rn , que son mucho más peligrosos. Sin embargo, la producción de estos nucleidos es muy lenta y puede evitar todo riesgo de radiación limitando el acceso al área de las reservas almacenadas.

La producción de elementos combustibles de dióxido de uranio es ahora un procedimiento bien establecido que parece estar exento de peligros apreciables. No obstante, la fabricación de combustible de mezcla de óxidos es mucho más complicada. Los peligros surgen de la toxicidad del plutonio y del hecho de que la "masa crítica" del dióxido de plutonio, en el cual puede iniciarse una fisión en cadena, es sólo de unos kilogramos. A pesar de todo, los riesgos normales de fabricación relacionados con la producción de combustible de mezclas de óxidos no son difíciles de evitar.

Explotación del reactor

Durante el funcionamiento normal de un reactor nuclear aparecen productos resultantes de la fisión radiactiva y de la activación. En su mayor parte, estos materiales radiactivos quedan retenidos en los elementos combustibles. Los radionucleidos que se difunden en el refrigerante o se forman en el mismo se eliminan mediante sistemas de tratamiento de los desechos gaseosos o líquidos. Las descargas de bajo nivel radiactivo que ocurren durante el funcionamiento normal son rigurosamente controladas para asegurarse de que no se excedan los límites autorizados de tales descargas.

Las descargas radiactivas de los reactores dependen del tipo de reactor y del sistema concreto utilizado para el tratamiento de desechos. Los radionucleidos descargados en los efluentes gaseosos consisten esencialmente en: gases nobles (^{133}Xe), gases de activación (^{41}Ar , ^{14}C , ^{16}N y ^{35}S), vapor y gas de tritio, halógenos y partículas. Las tasas de dosis relacionadas con las descargas de ^{14}C son muy bajas, aunque tienen un largo período de desintegración (5730 años) y ello hace que constituyan una significativa contribución a la dosis colectiva [23–26]. Igualmente, el aumento de las descargas de tritio (especialmente agua tritiada HTO) en la atmósfera exige estudios detallados y evaluaciones periódicas de las consecuencias ecológicas de este tipo de descargas, que producen exposiciones crónicas a niveles sumamente bajos de exposición [27]. Las descargas de efluentes líquidos, comprenden el tritio, ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{58}Co y ^{60}Co , además de un número de productos de corrosión activada tales como ^{51}Cr y ^{51}Mn , bastante comunes en los efluentes líquidos de los reactores del tipo LWR.

En comparación con los riesgos que presentan las emisiones gaseosas de las centrales termoeléctricas alimentadas con combustible fósil, los riesgos de descargas radiactivas de las centrales nucleoelectricas durante la operación normal son insignificantes. Sin embargo, se considera que la contaminación térmica es más acusada en el caso de las centrales nucleoelectricas que en el de las centrales termoeléctricas alimentadas con combustibles fósiles. En el primer caso, las centrales descargan en el agua de refrigeración principalmente todo el calor excedente, en tanto que las últimas descargan aproximadamente el 15% del calor por medio de los escapes de humos, junto con los productos de combustión [28]. Esto quiere decir que una central nucleoelectrica descargará un 50% más de sus excedentes térmicos en el agua de refrigeración que una central termoeléctrica que produzca la misma cantidad de energía eléctrica.

La inquietud de la opinión pública respecto de los reactores nucleares se ha centrado en la posibilidad de accidentes que originen el escape de una cantidad considerable de radiactividad en el medio circundante. Aunque durante la explotación de un reactor nuclear se pueden producir accidentes de diversos tipos, tanto en diseño como los métodos de operación de los reactores nucleares, se han incorporado numerosos dispositivos de seguridad que detienen automáticamente el reactor en caso de una avería grave. Además, la mayoría de los reactores nucleoelectrónicos están encofrados en estructuras de contención cuya finalidad esencial es contener toda la radiactividad que pueda descargarse en caso de accidente grave. Esto no impide que se hayan expresado ciertas críticas respecto a la eficacia de estas medidas de seguridad (especialmente de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo) [13, 29–31].

Utilizando la información de que se dispone sobre el régimen de fallos de diversos componentes técnicos del reactor, se han realizado diversos estudios para determinar la probabilidad de que se produzca un accidente de mucha gravedad en un reactor nuclear. En el más reciente de estos estudios [32], conocido generalmente como el Informe Rasmussen, se calcula que un accidente de fusión del núcleo en un reactor de tipo LWR presenta una probabilidad de 1 en 20 000 reactor-años, y que en el 99% de los accidentes de fusión del núcleo no se producirían accidentes mortales inmediatos. Se pronostica que aproximadamente de 170 accidentes de fusión del núcleo solo 1 causaría más de 10 casos de muerte inmediata y que la probabilidad de un accidente de fusión del núcleo que causara más de 100 muertes inmediatas solo es de 1 en 500 casos de accidente. Las controversias relativas a la exactitud de este estudio son amplias y complejas. Las críticas del mismo se refieren a la validez de los métodos empleados, del cálculo de los riesgos de accidentes y del factor del error humano (véase por ejemplo [33–35]). Otras críticas se centran en la inadecuada consideración prestada en el estudio a los riesgos que entrañan los fenómenos (huracanes, terremotos, etc.), el sabotaje deliberado o las guerras.

Los accidentes con los reactores reproductores rápidos pueden tener consecuencias más graves que los del tipo LWR. La posibilidad teórica de que el núcleo de un reactor reproductor rápido pueda adquirir una configuración crítica si llega a fundirse, es más inquietante. Otros factores que pueden incrementar aún más los riesgos son el empleo del sodio como refrigerante, la más elevada densidad energética, el flujo neutrónico más intenso y las mayores temperaturas de funcionamiento.

En todo caso, las consecuencias de un accidente grave dependerían no solo de la cantidad de radiactividad descargada en el medio ambiente, sino también de muchos otros factores: por ejemplo, la edad promedio de los productos de fisión; la cantidad relativa de elementos actínicos presentes, el tipo de descarga (por ejemplo en la atmósfera o en un río); las condiciones meteorológicas, la densidad de población de la región y la rapidez con que se pueden aplicar medidas correctivas. Aparte de estas consideraciones, el hecho de que no se haya producido hasta la fecha ningún accidente grave en un reactor, y de que el cálculo de probabilidades de que se produzca da un valor muy bajo, hace bastante difícil cuantificar las consecuencias ecológicas de un posible accidente grave de un reactor.

La desmantelación completa de una central nucleoelectrónica después de su vida útil (fijada normalmente entre 20 y 30 años) será difícil y peligrosa a causa de la radiactividad inducida en la estructura del reactor durante su período de actividad. El bombardeo de neutrones en los materiales utilizados para construir un reactor produce una gama de nucleidos radiactivos. Algunos de éstos emiten radiación gamma muy penetrante y tienen un período de desintegración de varios años. Sin embargo, la experiencia adquirida con el cierre definitivo de pequeños reactores de potencia permite cierto optimismo acerca de la posibilidad de desarmar totalmente los reactores nucleoelectrónicos después de su cierre

definitivo, aunque todavía queda mucho por conocer respecto de las consecuencias ecológicas de esta operación.

Reelaboración de combustible

Los elementos de combustible agotado que se retiran de los reactores en las operaciones de recarga son los materiales más intensamente radiactivos del ciclo del combustible. El principal peligro estriba en la enorme cantidad de radiación gamma emitida por la desintegración y los productos radiactivos de la fisión. Los elementos agotados se depositan en estanques profundos de agua conocidos denominados "piscinas de desactivación" donde permanecen cierto tiempo. Es necesario almacenarlos en piscinas para evitar que la considerable cantidad de material fisionable presente en ellos (^{235}U y Pu) alcance una concentración crítica. Después de que los productos de fisión de corto período de desintegración presenten niveles de actividad bajos — lo cual exige algunos meses — se puede reelaborar el combustible.

El número de elementos de combustible agotado almacenados crece rápidamente y es evidente que su número irá en aumento durante cierto tiempo. Las piscinas de desactivación son satisfactorias para un almacenamiento de corto plazo, puesto que resulta evidente que no pueden servir de depósito permanente para el combustible agotado. Las piscinas exigen vigilancia continua y, a pesar de la reducción de radiactividad durante el almacenamiento, los actínidos presentes en los elementos agotados permanecen peligrosamente radiactivos durante centenares o millares de años. En las plantas de reelaboración, el combustible agotado se trata con disolventes químicos, recuperándose el material residual del combustible. Durante este proceso la mayor parte de los productos de fisión, además de los productos radiactivos inducidos presentes en el revestimiento del combustible, se convierte en materiales de desecho sólidos y líquidos. Hasta el momento actual, del conjunto todo de la industria nuclear las plantas de reelaboración de combustible son las que han constituido la fuente más importante de contaminación radiactiva del medio ambiente.

Durante la reelaboración, las pastillas de combustible descargan los productos de fisión gaseosos (especialmente ^{85}Kr y ^{129}I) contenidos en los elementos de combustible. También se descargan el tritio y los compuestos volátiles de ^{14}C . Gran parte de los materiales radiactivos se elimina de los gases efluentes, pero las plantas existentes descargan en la atmósfera el ^{85}Kr (período de desintegración: 10,8 años) y tritio (período de desintegración: 12,3 años). Cuando comience a aplicarse en gran escala el procedimiento de reelaboración de combustibles de óxidos será ciertamente necesario eliminar gran parte de las descargas de estos dos gases por las chimeneas de humos, si se quiere respetar las normas relativas al nivel de radiación.

Durante la reelaboración también pueden descargarse en el medio ambiente desechos líquidos de bajo nivel de radiactividad. Por lo general, la mayor parte de la pequeña cantidad de tritio se descarga con estos desechos. Será pues necesario desarrollar métodos perfeccionados de almacenamiento o de eliminación de estos desechos. Las plantas de reelaboración producen también desechos sólidos de nivel intermedio y bajo de radiactividad. La reelaboración del combustible utilizado durante un año por una central LWR de 1000 MWe producirá unos 20–60 m^3 de tales desechos. El principal componente de los desechos sólidos de nivel intermedio de radiactividad es el material de revestimiento del combustible, cuya radiactividad depende de su composición y de la irradiación a que ha estado sometido. Está además contaminado con pequeñas cantidades de combustible agotado. Haste el momento, la mayor parte de este tipo de desecho se evacúa bajo tierra o se vierte en el océano encofrado en receptáculos adecuados. La OCDE/AEN supervisa regularmente la eliminación de 7000 toneladas anuales a una profundidad de 4500 metros en el Océano Atlántico [36, 37]. Existen otros métodos de eliminación entre los que se encuentra el

Cuadro II: Proyección del número de expediciones relacionadas con el ciclo del combustible nuclear hasta el año 2000 [40]

	Expediciones/año en		
	1980	1990	2000
Combustible	670	2500	5 400
Combustible agotado	2000	6400	12 000
Plutonio	20	143	438
Desechos y productos de fisión	630	2450	5 500

almacenamiento a gran profundidad en minas abandonadas o en formaciones geológicas adecuadas [38, 39].

Se calcula que los desechos de alta radiactividad resultantes de la reelaboración de combustible agotado se elevarán a 20 000 m³ en 1990 [22]. Estos desechos contienen más del 99% de los productos de fisión presentes en el combustible, junto con cantidades más pequeñas de actínidos. Los desechos de alto nivel de radiactividad se almacenan actualmente en forma líquida, y algunos productos constituyentes permanecen peligrosamente radiactivos durante varios centenares de millares de años. No existe hasta el presente ningún medio generalmente aceptado para aislar permanentemente los desechos de alto nivel de radiactividad del medio ambiente y conservarlos aislados durante muy largos períodos de tiempo. Se han concebido métodos para convertir en sólidos relativamente inertes los desechos de alto nivel de radiactividad [22]. Se considera que la eliminación permanente de desechos sólidos de este tipo en formaciones geológicas estables es la solución más acertada, aunque todavía no se ha demostrado su fiabilidad. No se tiene la certidumbre de que ni tales métodos ni los lugares de almacenamiento eviten totalmente las fugas radiactivas en el caso de producirse perturbaciones debidas a fenómenos naturales o a actividades humanas. Los vertimientos en el mar de desechos de alto nivel de radiactividad están estrictamente limitados por convenios internacionales y regionales que son obligatorios para numerosos países que poseen industrias nucleoelectricas. La eliminación de desechos en la Antártica está prohibida en virtud de un tal tratado.

Transporte de materiales radiactivos

Un aspecto importante de la industria nuclear es el transporte sin riesgos de materiales radiactivos. Las instalaciones que se ocupan del ciclo del combustible nuclear se encuentran dispersas, aun dentro de un mismo país, por lo que los materiales radiactivos en sus diversas formas se deben transportar entre tales instalaciones. El volumen del transporte de materiales radiactivos ha crecido y continúa creciendo al mismo ritmo al que se desarrolla la industria nucleoelectrica. Los materiales radiactivos resultantes del ciclo del combustible nuclear se transportan generalmente en camiones, trenes o buques. El transporte por vía aérea se utiliza corrientemente para pequeñas cantidades de las sustancias empleadas con fines médicos y de investigación. En el Cuadro II se presenta un cálculo del número de expediciones relacionadas con el ciclo del combustible nuclear en los Estados Unidos de América (para reactores de agua ligera, reactores de gas a alta temperatura y reactores rápidos reproductores de metal líquido).

Es poco probable que el transporte de minerales radiactivos desde la mina a la planta de tratamiento tenga consecuencias ecológicas de importancia, tanto en condiciones normales

como en caso de accidente. Es igualmente improbable que tenga consecuencias ecológicas el transporte del producto de la planta de tratamiento, es decir la "torta amarilla", o el transporte ulterior del UF₆ y UO₂ en contenedores adecuados.

Los elementos combustibles se expiden en embalajes diseñados de manera que no se produzca criticidad accidental, aun en las condiciones extremas de un accidente grave. La radiactividad del combustible nuevo no irradiado no puede tener fundamentalmente ninguna consecuencia ecológica y, en condiciones normales, sus efectos sobre el personal expuesto profesionalmente durante el transporte son insignificantes. Aun en caso de accidente, las propiedades físicas y la baja actividad específica del combustible limitarían los efectos de la radiación a niveles sumamente bajos. Teóricamente, la criticidad accidental pudiera ser causa de efectos ecológicos adversos de importancia ya que son concebibles dosis equivalentes superiores a 500 rem en las personas que se encuentren en las cercanías inmediatas del accidente; la zona adyacente a éste puede necesitar contaminación minuciosa y tal vez costosa. Sin embargo, gracias al estricto control ejercido y a las normas obligatorias respecto al diseño y construcción del contenedor, se ha podido eliminar prácticamente la posibilidad de que se produzca criticidad durante el transporte.

Los elementos combustibles agotados se transportan en cofres blindados refrigerados con aire o con agua que pesan 20 a más toneladas. El espeso blindaje de los cofres debe reducir la radiación de los elementos de combustible agotado por debajo de los niveles preestablecidos por los reglamentos del OIEA; de otra manera, el cofre se debe transportar en conformidad con arreglos especiales. En condiciones normales de transporte, las dosis de irradiación de los operarios de transporte debe mantenerse dentro de los valores permisibles mediante la limitación de las radiaciones alrededor de los contenedores. Si los operarios manipulan cantidades importantes de expediciones o envíos puede resultar necesario estudiar e introducir medidas complementarias de control, tales como la rotación de personal en los trabajos. Un accidente grave que resultara en el derrame del contenido por rotura de las paredes del casco, podría tener consecuencias graves en el público y el medio ambiente, pero la posibilidad de tal ruptura se ha minimizado mediante la estricta observancia de las normas reglamentarias relativas al diseño, la prueba de la construcción y la aprobación de los cofres.

Los desechos de bajo nivel de radiactividad se embalan en contenedores sellados, tales como bidones de acero de 200 litros, que se expiden por los medios de transporte corrientes a los lugares de evacuación subterránea. Los desechos solidificados de alto nivel de radiactividad se depositan en almacenamientos recuperables en lugares tales como formaciones geológicas, minas de sal o instalaciones de superficie, en contenedores parecidos a los cofres utilizados para la expedición de combustible agotado.

El embalaje y el transporte de materiales radiactivos se rige por reglamentos nacionales e internacionales. El OIEA ha publicado reglamentos para el transporte sin riesgos de materiales radiactivos, que han sido virtualmente adoptados por todas autoridades internacionales de transporte y sirven a la mayoría de los Estados Miembros como base de sus propios reglamentos. El OIEA hace constantes e importantes esfuerzos para mantener actualizado desde el punto de vista técnico sus reglamentos para el transporte sin riesgos de materiales radiactivos y para fomentar su adopción y su aplicación.

El problema del plutonio

El plutonio-239 (que no es separable de los otros isótopos del Pu) es el isótopo que plantea los más graves problemas; es la sustancia empleada en las bombas atómicas y constituye el 70%, al menos, de la cantidad total de plutonio producido en los reactores de potencia. Tiene un período de desintegración de 24 400 años. Abundan pruebas de que sería posible generar y tratar cantidades relativamente grandes de plutonio en un importante programa

nuclear mundial, especialmente si se adoptan en amplia medida los reactores reproductores rápidos. Actualmente se producen unas 20 toneladas anuales, la mayor parte de las cuales queda en la forma no tratada de barras de combustible agotado. Hacia el año 2000 la producción anual podría llegar a varios centenares de toneladas.

Solo se necesitan seis kilos de ^{239}Pu en forma metálica para producir una reacción en cadena, tal vez unos 9 kilos en forma de PuO_2 y una cantidad algo mayor de plutonio en reactor que contenga varios isótopos del elemento. Existe el peligro de que, si se acumula por descuido una cantidad suficiente de plutonio de reactor — posiblemente durante el proceso de reelaboración del combustible — se pueda producir una reacción en cadena, con la consiguiente y poderosa emisión de radiaciones mortales, y la dispersión, posiblemente violenta, del plutonio. Las rigurosas medidas de control que se aplican en forma regular han sido eficaces hasta la hora actual.

Con respecto a la toxicidad y a los efectos carcinógenos del plutonio, existen diversas opiniones contradictorias (véase, por ejemplo, [41–43]). El plutonio es sumamente tóxico; su toxicidad absoluta es comparable al de las toxinas biológicas [43]. Sin embargo, estas últimas son inestables, como la mayoría de las proteínas, y sometidas a ebullición en solución pierden su actividad en pocos minutos. En cambio, el plutonio conserva su peligrosidad durante un tiempo que llega hasta 20 veces su propio período de desintegración, o sea casi medio millón de años. A diferencia de las toxinas, el plutonio actúa lentamente; pequeñas dosis carcinógenas en los pulmones pueden producir cáncer tras 10, 20 o 40 años. (Algunos contaminantes tienen también un largo período de latencia y no se desintegran fácilmente.) Diversos autores han solicitado, en consecuencia, que se revise la dosis máxima admisible de 40 nCi de ^{239}Pu fijada por el CIPR.

SALVAGUARDIAS NUCLEARES Y PROTECCION DEL MEDIO AMBIENTE

Durante el entero ciclo del combustible, incluido el transporte de materiales nucleares, es menester aplicar estricta vigilancia y cuidado, tanto a nivel nacional como internacional, de manera que los materiales nucleares no caigan en poder de personas que podrían servirse de esos materiales para actividades ilegítimas que pudieran tener efectos perjudiciales tanto para la población en general como para el medio ambiente. Se requiere, en consecuencia, un enorme esfuerzo, en el plano nacional e internacional, para evitar el desvío de materiales nucleares o el sabotaje de instalaciones nucleares.

El establecimiento y la aplicación a nivel nacional de un sistema de protección física es primordial responsabilidad de los Gobiernos y tienen estrecha relación con sus sistemas nacionales de contabilidad para la salvaguardia y el control de materiales nucleares. Estos sistemas deben velar por que la utilización, almacenamiento y transporte de los materiales nucleares en todo el ciclo del combustible, tanto en el plano nacional como en el internacional, se lleven a efecto en las condiciones debidas a nivel internacional, el OIEA ha iniciado y puesto en ejecución un sistema de salvaguardias nucleares.

El sistema establecido en el marco del Tratado de no Proliferación (TNP) es el que se aplica con mayor amplitud y parece ser el más eficaz en la mayoría de los diferentes aspectos. Sin embargo, las principales limitaciones y deficiencias de los actuales arreglos de salvaguardias que dan lugar a preocupaciones de carácter ecológico son, en resumen, las siguientes: el hecho de que numerosos Estados no sean partes del TNP; la incapacidad del sistema de salvaguardia para impedir el uso de la tecnología nuclear utilizada en la producción nucleoelectrónica para la producción de armas nucleares; el hecho de que muchas instalaciones nucleares no estén sometidas al sistema de salvaguardia; la existencia de un cierto número de lagunas en los acuerdos de salvaguardia relativos a su aplicación a las explosiones nucleares con fines pacíficos, a materiales destinados a usos militares no

explosivos, y a la cesión de materiales a un tercer Estado; la ausencia, en la práctica, de salvaguardias en los puntos de origen de los materiales; los problemas prácticos que plantea el mantener verificaciones efectivas de los inventarios nucleares; la facilidad con que los Estados pueden denunciar el TNP y la mayor parte de los acuerdos de salvaguardias no relacionados con el TNP; la deficiencia de los procedimientos de contabilidad y de advertencia; y la carencia de sanciones efectivas para prevenir el desvío de materiales sujetos a salvaguardia.

No se debe tampoco olvidar la posibilidad de que se desvíen materiales nucleares mediante actos de terrorismo, ni las oportunidades y consiguientes riesgos de las amenazas y extorsiones de carácter nuclear.

En los últimos años se han hecho más estrictas las medidas tendientes a impedir el robo de materiales nucleares y los ataques a instalaciones nucleares. Por oportunas que sean esas medidas, la experiencia indica que los riesgos son reales e irán seguramente en aumento como consecuencia de la futura diseminación de la tecnología nuclear.

Cuadro III: Consecuencias ecológicas de una central generadora de 1000 MWe

Tipo	Térmica de carbón	LWBR	HTGR	LMFBR
TERMICAS				
Btu/s ^a que se ha de disipar	1,49 × 10 ⁶	1,93 × 10 ⁶	1,43 × 10 ⁶	1,31 × 10 ⁶
EFLUENTES				
Radiactividad (10 ³ Ci/a)	—	2253	2	2
CONTAMINANTES ATMOSFERICOS (t/a)				
SO ₂	45 000	1500 ^b	1200 ^b	—
NO _x	26 000	900	700	—
CO	750	25	20	—
Partículas	3 500	120	95	—
HC	260	9	7	—
DESECHOS (m³/año)				
Radiactivos	—	340	280	230
Cenizas	5 700	200 ^b	140 ^b	—
TOPOLOGICAS				
Hectáreas de explotación minera	80	5	4	0,02
Emplazamiento de la central (hectáreas)	120–160	← 30–60 →		

^a 1 Btu = 1054 × 10³ J.

^b Las emisiones atribuidas a los reactores se calculan a partir de la energía eléctrica consumida en el enriquecimiento.

CONCLUSIONES

El Cuadro III establece una comparación entre las consecuencias ecológicas de una central termonuclear de 1000 MWe alimentada con carbón y tres centrales nucleares de la misma potencia. Las ventajas ecológicas de los reactores son: 1) Con respecto a los efluentes: en tanto que se calcula que los reactores emitirán de 1000 a 1500 toneladas anuales, las centrales termoeléctricas descargan un millón de toneladas de contaminantes atmosféricos; 2) Con respecto a las necesidades de terreno: en tanto que las centrales termoeléctricas exigen de 120 a 160 hectáreas para su instalación, las nucleoelectricas solo requieren de 30 a 60 hectáreas; además, para la extracción del carbón que consume una central térmica se necesitan 80 hectáreas, contra las 5 hectáreas para la minería del uranio consumido por un reactor de tipo LWR y menos de 0,5 hectáreas para los reactores LMFBR. Las necesidades de agua para el sistema de refrigeración son aproximadamente iguales para el LMFBR y la central termoeléctrica, y de 40 a 50% más elevadas para los reactores LWBR. Por otra parte, el efecto de los contaminantes no es medible por peso o volumen. Es la interacción con los elementos indispensables para la vida lo que determina la gravedad del daño. Es cierto que los desechos y los contaminantes no nucleares afectan también al hombre y su medio ambiente y tienen asimismo, en cierta manera, efectos genéticos; pero en el caso de los desechos radiactivos, el daño sería más potencial y menos fácil de reparar.

Si bien algunos países han frenado sus programas de energía nucleoelectrica, no sería acertado ni justificado abandonar la fisión nuclear [45]. Es importante que en esta etapa del desarrollo de la energía nucleoelectrica se consagren mayores esfuerzos para llevar a cabo estudios detallados y profundos de las diferentes consecuencias ecológicas en relación con todas las fases del ciclo del combustible nuclear, y se preparen medidas adecuadas para garantizar la protección del hombre y de su medio ambiente.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente se ocupa del estudio de las consecuencias ecológicas de todas las fuentes de energía. En su cuarto período de sesiones (1976), el Consejo de Administración del PNUMA solicitó que se prepararan estudios detenidos sobre las consecuencias ecológicas de los combustibles nucleares, de la energía nuclear y de las fuentes de energía renovables. Estos estudios, que se llevan a cabo en cooperación con los órganos interesados de las Naciones Unidas y otras organizaciones, permitirán una evaluación global comparativa de esas consecuencias, con la eminente finalidad de establecer una lista de prioridades de las labores de investigación y desarrollo necesarias para salvar las deficiencias de los actuales conocimientos.

Esta memoria fue presentada en la Conferencia Internacional sobre la Energía Nucleoelectrica y su Ciclo del Combustible, celebrada en Salzburgo (Austria) en 1977.

Referencias

- [1] UNITED NATIONS, UN Statistical Yearbook, 1975: UN Publ. Sales No. E/F. 76.XVII.1 (1976).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Power Reactors in Member States, IAEA, Vienna (1976).
- [3] OCDE, Energy Prospects to 1985, OCDE, Paris (1974).
- [4] OCDE-AEN/OIEA, Uranium: Resources, Production and Demand, Rep. OCDE, Paris (1976).
- [5] HANRAHAN, E.J., Demand for uranium, Atomic Industrial Forum, Phoenix, 1976.
- [6] KRYMM, R., y WOITE, G., Boletín del OIEA 18 (1976) 6.
- [7] KENWARD, M., New Sci. 69 (1976) 686.
- [8] HANSEN, M., Boletín del OIEA 18 (1976) 16.
- [9] JOHNSON, D.M., In Proc. 9th World Energy Conf., Detroit, 1974, US Natl. Energy Conf., London (1975), Paper 3.1-14.
- [10] DIECKAMP, H., Trans. Am. Geophys. Union 52 (1971) 756.
- [11] SAGON, L.A., Science 177 (1972) 487.

- [12] NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE, The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation (BEIR Report), Washington (1972).
- [13] EDSTALL, J.T., *Environ. Conservation* **1** (1974) 21.
- [14] FOX, R.W., et al., Ranger uranium environmental inquiry, Australian Govt. Publ. Service, Canberra (1976).
- [15] ROSE, D., et al., *Am. Sci.* **64** (1976) 291.
- [16] BEVERLY, R.G., in Proc. Int. Symp. Radiation Protection in Mining and Milling of Uranium, Bordeaux, 1974.
- [17] CLARK, D.A., State of the Art, Uranium Mining, Milling and Refining Industry, US Environmental Protection Agency Rep. EPA-660/2-74-038 (1974).
- [18] SNELLING, R.N., SHEAR, S.D., *Radiol. Health Data Rep.* **10** (1969) 475.
- [19] SNELLING, R.N., *Radiol. Health Data Rep.* **11** (1970) 511.
- [20] SNELLING, R.N., *Radiol. Health Data Rep.* **12** (1971) 17.
- [21] RUBIN J.H., Management of Radioactive Wastes (Proc. Symp. Paris), OCDE, Paris, 1973.
- [22] PARKER, H.E., WEST, P.J., in 9th World Energy Conf. Detroit 1974, US Natl. Energy Conf., London (1975), paper 4.2-15.
- [23] MAGNO, P.J., et al., 13th AEC Air Cleaning Conference, San Francisco, 1974.
- [24] KUNZ, C., et al., Health Physics Soc. Rep. CONF-74/018 (1974).
- [25] KUNZ, C., et al., Proc. Am. Nucl. Soc. Mtg. New Orleans, 1975, Trans. Am. Nucl. Soc. **21** (1975).
- [26] RUBLEVSKIJ, V.P., et al., USAEC Rep. CONF-730907-P1 (1974); Proc. 3rd Int. Congress of the Int. Radiation Protection Assoc., Washington, 1973, Vol. 1, p.296.
- [27] ROHWER, P.S., WILCOX, W.H., *Nucl Saf.* **17** (1976) 216.
- [28] MASTERS, G.M., Introduction to Environmental Science and Technology, Wiley, London (1975).
- [29] FORD, D.F., KENDALL, W.H., An assessment of the ECC's rulemaking hearing, Union of Concerned Scientists, MIT, Cambridge (1973).
- [30] HENDRIE, J.M., *Annu. Rev. Energy* **1** (1976) 663.
- [31] LEWIS, H.W., et al., *Rev. Mod. Phys.* **47** Suppl. No.1 (1975).
- [32] USAEC, Rasmussen Report, WASH-1400 (1974).
- [33] EDSALL, J.T., *Environ. Conservation* **2** (1975) 205.
- [34] KENDALL, H.W., MUGLEWER, S., Preliminary Review of the AEC Reactor Safety Study, Sierra Club (1974).
- [35] LOVINS, A.B., Nuclear Power: Technical Bases for Ethical Concern, Friends of the Earth, London (1974).
- [36] OCDE/AEN, Radioactive Waste Disposal Operation into the Atlantic, OCDE, Paris (1967).
- [37] WEBB, G.A.M., MORLEY, F., UK National Radiation Protection Board Rep. NRPB-R14, Harwell (1973).
- [38] OCDE/AEN, Radioactive Waste Management Practices in Western Europe, OCDE/AEN, Paris (1972).
- [39] KRAUSE, H., Disposal of Radioactive Waste, Rep. AEN/OCDE, Paris (1972).
- [40] BLOMEKE, J.O., et al., *Nucl. News* **18** (1975) 62.
- [41] BAIR, J.W., THOMPSON, R.C., *Science* **183** (1974) 715.
- [42] TOMPLIN, A.R., COCHRAN, T.B., Radiation Standards for Hot Particles, Natural Resources Defense Council Rep., Washington (1974).
- [43] EDSALL, J.T., *Bull At. Sci.* **32** (1976) 27.
- [44] FOWLER, J.M., Energy and the Environment, McGraw Hill, New York (1975).
- [45] FLOWERS, B., Nuclear Energy and the Environment, Royal Commission on Environmental Pollution, Rep. No.6, London (1976).