

Repercusiones ambientales de la producción y empleo de la energía nuclear: Resumen de un estudio realizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

por J.U. Ahmed y H.T. Daw

ANTECEDENTES

En su cuarto período de sesiones, celebrado en 1976, el Consejo de Administración del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) pidió al Director Ejecutivo de dicha entidad que realizase un estudio comparativo de las diversas formas de producción de energía. El PNUMA inició dicho estudio reuniendo en 1978, en Varsovia, un grupo de expertos sobre combustibles fósiles. Organizó dos reuniones de expertos dedicadas a la energía nuclear, una en Ginebra, en noviembre de 1978, y la otra en Nairobi, en abril de 1979. En enero de 1980 se reunió en Bangkok un grupo de expertos sobre fuentes renovables de energía. Para la evaluación comparativa se proyecta organizar en 1980 dos grupos de expertos, uno, reducido, para decidir sobre la metodología de comparación y otro, más amplio, encargado de dicha evaluación. El OIEA ha participado en todas las reuniones de expertos celebradas hasta ahora y ha cooperado activamente en la preparación del informe sobre los efectos ambientales de la energía nuclear, Ref. [1]. El OIEA procurará también participar en las dos reuniones de expertos que se encargarán de las evaluaciones comparadas.

Las repercusiones ambientales de la industria nucleoelectrónica son, por lo general, de naturaleza análoga a las de la industria eléctrica alimentada con combustibles fósiles. Ahora bien, en la industria nucleoelectrónica la causa predominante de preocupación son las descargas radiactivas y sus efectos en la biosfera, especialmente en la salud del hombre. En consecuencia, el estudio del PNUMA se ha centrado principalmente en los detrimentos que la producción nucleoelectrónica entraña para la salud.

REPERCUSIONES AMBIENTALES

Con el fin de evaluar las repercusiones ambientales de la energía nuclear, el documento del PNUMA estudia las diversas actividades que abarca la industria nucleoelectrónica. Tales actividades son la extracción y fabricación de uranio, el enriquecimiento, la fabricación de

El Dr. Ahmed y el Dr. Daw son funcionarios de la División de Seguridad Nuclear y Protección del Medio Ambiente, OIEA.

elementos combustibles, la explotación de reactores, la reelaboración de combustibles irradiados (si se opta por el reciclado), la gestión de los desechos radiactivos producidos en todas las fases del ciclo del combustible nuclear, la clausura de las instalaciones nucleares, y el transporte de materiales radiactivos. Las repercusiones ambientales de las diversas actividades se han normalizado con referencia a la producción neta de un gigawatio-año (GWA).

Extracción de minerales de uranio

Las repercusiones radiobiológicas de la extracción de uranio se deben a la exposición al radón y a sus productos descendientes, emitidos por los minerales uraníferos. A consecuencia de la inhalación de radón y de sus descendientes, los tejidos pulmonares y del tracto respiratorio son irradiados con partículas alfa, aumentando así la posibilidad de contraer cáncer de pulmón. En algunas minas de uranio puede ser también significativa la exposición del cuerpo entero a la radiación gamma.

Tratamiento de minerales uraníferos

En la fase de tratamiento, el mineral es sometido a operaciones mecánicas y químicas para extraer la mayor parte del uranio y producir un concentrado de óxido de uranio, denominado "torta amarilla". Las repercusiones radiobiológicas de las actividades de tratamiento se deben a la emisión de polvos que contienen uranio y sus descendientes (torio-226 y torio-230), radón y sus descendientes, etc. Emiten radón los tubos de ventilación de los tanques de lixiviación, las pilas de mineral, el sistema de retención de colas y el sistema de ventilación en la trituración y molienda del mineral. La mayor parte del radio que hay en el mineral es insoluble y permanece en las colas o residuos sólidos; una pequeña parte, aproximadamente un uno por ciento o menos, se disuelve. Las soluciones residuales contienen radio-226, torio-230, uranio y pequeñas concentraciones de radón o de sus descendientes.

Producción de hexafluoruro de uranio

El concentrado de óxido de uranio (U_3O_8) procedente de la fábrica hay que concentrarlo y convertirlo en un compuesto volátil, el hexafluoruro de uranio (UF_6), para poderlo utilizar como material de alimentación de las plantas de enriquecimiento. Las repercusiones radiobiológicas de estas operaciones se deben a la emisión de radionucleidos al medio ambiente, tanto a la atmósfera como a los cauces de agua.

Enriquecimiento de uranio

El enriquecimiento de uranio (el aumento de la concentración del isótopo uranio-235) es necesario para fabricar el combustible de los reactores de agua ligera (LWR) y de los reactores refrigerados por gas de tipo avanzado. La concentración del uranio-235 en el uranio natural es aproximadamente de 0,7% y el contenido de uranio enriquecido del combustible actual de los LWR es de 2-4%. Las tecnologías de enriquecimiento en gran escala se basan en la difusión gaseosa o en la centrifugación de los isótopos del uranio en forma de UF_6 .

Las repercusiones radiológicas en esta fase se deben a la descarga de isótopos de uranio al medio ambiente. Cabe señalar que en el estudio del PNUMA se considera que las grandes cantidades de electricidad empleadas en el proceso de enriquecimiento por difusión gaseosa hacen que aumenten los riesgos profesionales. Suponiendo que dos tercios de la electricidad consumida provienen de centrales térmicas alimentadas con carbón, el empleo de electricidad en el proceso de enriquecimiento por difusión gaseosa se traducirá en un aumento situado entre 0,01 y 0,1 de las muertes por GWA, ya que el riesgo derivado de las centrales que

quemar carbón es mucho mayor que el resultante de las centrales nucleares. Este riesgo es menor en las plantas de centrifugación gaseosa, que requieren aproximadamente una décima parte de la electricidad que necesitan las plantas de difusión.

Fabricación de combustible

En una planta de fabricación de combustible, el UF_6 enriquecido se convierte en dióxido de uranio (UO_2) en polvo que luego se transforma en pastillas y se sinteriza para lograr un sólido de la densidad deseada. Las pastillas acabadas se introducen en tubos de aleación de circonio a los que se sueldan casquetes terminales, formando así agujas de combustible herméticas. Dichas agujas, ya terminadas, se montan formando conjuntos fijos denominados elementos combustibles. Los efectos radiológicos de la fabricación de combustible pueden derivarse de la emisión de isótopos de uranio y de torio-234.

Explotación de centrales nucleares

Durante la explotación de los reactores de potencia se forman radionucleidos por fisión del combustible nuclear y por activación neutrónica de los materiales de estructura, productos de corrosión e impurezas del agua de refrigeración del reactor. La mayoría de los productos de fisión permanecen en los elementos combustibles, pero una pequeña parte puede escaparse y pasar al refrigerante por defectos de las vainas del combustible. La mayoría de los isótopos radiactivos que escapan al refrigerante o al moderador son eliminados mediante sistemas de tratamiento del agua en forma gaseosa y líquida. No obstante, es posible que una parte del material radiactivo sea vertida finalmente al medio ambiente.

Entre los numerosos productos radiactivos de fisión y de activación generados durante la explotación de los reactores, interesan en especial las repercusiones ambientales del tritio, del carbono-14 y de los radionucleidos en forma de partículas que se descargan a la atmósfera y a los cauces de agua. Tienen particular interés el tritio y el criptón-85, pues ambos radionucleidos son de período largo y su difusión es mundial. En particular, el criptón-85 merece especial atención por la dificultad intrínseca de su control y por su naturaleza esencialmente arreactiva y móvil en el medio ambiente. A causa del período largo del carbono-14, los compromisos de exposición radiológica derivados de su acumulación en el medio ambiente son considerablemente mayores que los derivados de los gases nobles y el tritio. Algunos radionucleidos, en particular el yodo-131, son radiológicamente significativos en los ambientes locales. El yodo-129 es también significativo globalmente. Los gases nobles, el tritio en forma de vapor de agua tritiada, el carbono-14 y el yodo pasan al medio ambiente en forma de efluentes suspendidos en el aire. Pueden también descargarse como efluentes en suspensión aerosoles que contienen productos de fisión y de activación, así como productos de desintegración de los gases nobles.

El detrimento para la salud humana que se deriva de la generación nucleoelectrónica se debe principalmente a la exposición profesional a los rayos gamma de los productos de fisión y de activación. La exposición de la población es resultado de la descarga de radionucleidos al medio ambiente. Los radionucleidos vertidos al medio ambiente en forma de efluentes suspendidos en el aire o líquidos, durante la explotación de los reactores, experimentan una serie de complejos procesos físicos, químicos y biológicos, antes de llegar al hombre. Tales procesos dependen de la ubicación del reactor, de las condiciones meteorológicas y de las diferentes vías de exposición.

Los radionucleidos descargados en los efluentes líquidos pueden causar dosis en las personas a través de vías como la ingestión de agua y el consumo de pescado, en lo que respecta a las descargas al agua dulce, y el consumo de pescado de mar y mariscos, por lo que se refiere a las descargas en aguas saladas. Parte de la población puede estar expuesta también en las zonas costeras a la irradiación externa por sedimentos radiactivos.

Reelaboración

Los elementos combustibles agotados procedentes de los reactores de agua ligera contienen uranio sin quemar, plutonio, actínidos superiores y productos de fisión altamente radiactivos. El uranio y el plutonio de dicho combustible agotado son valiosos recursos energéticos y pueden ser reutilizados separándolos de los productos de fisión. El uranio puede volver a enriquecerse y utilizarse en nuevos elementos combustibles para reactores, o bien puede utilizarse como base del combustible de "óxidos mixtos" a la que se añade una cantidad adecuada de plutonio separado.

En el caso de los LWR hay tres opciones: ningún reciclado, reciclado únicamente del uranio, y reciclado del plutonio y del uranio. Estas tres opciones suscitan una serie de consideraciones desde el punto de vista técnico-económico, de la salud, la seguridad y la protección del medio ambiente, que requieren diferentes soluciones. El reciclado del plutonio y del uranio supone la aparición del comercio con plutonio purificado, que requerirá salvaguardias adicionales a las que ya se aplican. El plutonio reciclado es esencial para el desarrollo de los reactores reproductores.

En los elementos combustibles agotados de los LWR, prácticamente todos los gases radiactivos de fisión quedan atrapados física o químicamente en la vaina de circonio, en la matriz misma del combustible, y en la cámara para gases de fisión situada en el extremo de cada aguja de combustible. Estos gases se liberan en las primeras fases de la reelaboración, generalmente cuando se trocean los elementos combustibles o se disuelve el combustible. Los efluentes gaseosos contienen criptón-85, yodo-129, algo de tritio y carbono-14. Se han elaborado técnicas para eliminar cada uno de dichos elementos de la corriente de gases residuales.

Con el fin de estimar las repercusiones ambientales de la reelaboración, se toma como ejemplo la Thermal Oxide Fuel Reprocessing Plant (THORP), a construir en Windscale (Reino Unido). Esta planta posee una capacidad máxima nominal de 1 200 toneladas de uranio irradiado por año (equivalente aproximadamente a 40 GWa). En el Cuadro 1 figura el riesgo pronosticado para la población mundial a causa de la explotación de THORP.

Cuadro 1. Riesgo pronosticado para la población mundial a causa de la explotación de THORP

Grupo expuesto al riesgo	Naturaleza del efecto	Riesgo* (por cada año de explotación)	Observaciones
Población mundial (incluido el personal de THORP)	Muerte por cáncer radioinducido	2 (en toda la población mundial)	Se estiman en 8 millones las muertes por cánceres espontáneos (todas las causas)
Población mundial (incluido el personal de THORP)	Defecto genético grave	1 (en toda la población mundial)	Aplicable al total de las generaciones sucesivas

* Riesgo basado en la integración, para un período total de 100 años, de la dosis resultante de un año de explotación a la capacidad nominal (1 200 t/a, lo que equivale a 40 GWa).

Gestión de desechos radiactivos

Se generan desechos radiactivos en prácticamente todos los sectores de la industria nuclear, y se acumulan en forma de líquidos, sólidos o gases con diversos niveles de radiación. La parte más voluminosa de los desechos se produce en las fases iniciales del ciclo del combustible nuclear, que comprenden la extracción y el tratamiento, mientras que los desechos más radiactivos se producen en las fases finales del ciclo, que comprenden la explotación de reactores y la reelaboración del combustible (en caso de optarse por el reciclado). En el caso de que no haya reciclado o de que se recicle únicamente el uranio, el plutonio no se recupera y se considera, por tanto, como desecho transuránico.

Los desechos radiactivos se dividen en desechos de actividad baja, intermedia y alta y desechos contaminados por elementos transuránicos. Con ellos puede procederse como sigue: a) Evacuación inmediata, según se vayan produciendo, en el caso de los desechos gaseosos y sólidos de actividad baja; b) Los desechos de actividad intermedia pueden requerir acondicionamiento y almacenamiento antes de su evacuación; c) Los desechos de actividad alta y los transuránicos exigen acondicionamiento y prolongado almacenamiento antes de su evacuación. Para las dos primeras clases de desechos se ha demostrado que existen métodos seguros y aceptables de evacuación.

La gestión de desechos sólidos contaminados por elementos transuránicos exige diversas fases de tratamiento antes de su envío al cementerio o lugar de evacuación. Los desechos solidificados de actividad alta se conservan generalmente en un almacenamiento provisional antes de su envío al lugar de enterramiento o evacuación.

Se están investigando varias posibilidades como alternativas futuras para la evacuación de desechos radiactivos en la tierra, a saber, el aislamiento en el fondo del mar, el aislamiento en un manto de hielo y el aislamiento en formaciones geológicas continentales profundas. Se han adelantado varias concepciones de cada una de estas alternativas, cuyas características concretas dependen del emplazamiento, la forma de los desechos y el medio y método de colocación elegidos. Entre estas alternativas, se considera prometedora la de aislamiento en formaciones geológicas continentales profundas.

Clausura de instalaciones nucleares

La clausura de una instalación nuclear puede definirse como las medidas adoptadas al final de la vida útil de cada instalación para garantizar la continua protección del público contra la radiactividad residual y otros riesgos potenciales inherentes a la instalación clausurada. A este respecto se adoptan en general dos enfoques fundamentales, uno es el de *desmantelamiento inmediato* y el otro el de *almacenamiento en condiciones de seguridad* con o sin desmantelamiento diferido. Los métodos para la clausura de las instalaciones nucleares van desde una mínima eliminación y fijación de la actividad residual con actividades de mantenimiento y vigilancia, hasta una limpieza general, descontaminación y sepultamiento. Cada uno de estos métodos de *almacenamiento en condiciones de seguridad* exige vigilancia y cuidado durante el tiempo de espera, que puede variar de unos años a unos decenios. Cada método termina con el desmantelamiento diferido de la instalación nuclear.

Transporte de materiales radiactivos

En el transporte de materiales radiactivos, las cantidades que intervienen son pequeñas en comparación con los enormes volúmenes de transporte que requieren las centrales alimentadas con carbón, lo que en efecto implica una mayor repercusión ambiental de estas últimas. Es solamente la radiactividad la que suscita la preocupación pública por las repercusiones ambientales del transporte de materiales radiactivos. Ha aumentado el volumen de los materiales radiactivos transportados y seguirá aumentando a medida que

Cuadro 2. Mortalidad inferida por cáncer para los trabajadores y el público resultante del ciclo del combustible de los LWR (ningún reciclado), por GWa

Fase del ciclo del combustible	Trabajadores	Público
	Mortalidad inferida por cáncer	Mortalidad inferida por cáncer
Extracción	0,03-0,1	0,02-0,04
Tratamiento	0,036	0,005-0,04
Transformación en UF ₆	0,0004	0,001
Enriquecimiento	0,0005	despreciable
Fabricación de combustible de UO ₂	0,01	despreciable
Generación de electricidad en LWR	0,13	0,06
Clausura (inmediata)	0,004	despreciable
Gestión de desechos (inclusive almacenamiento del combustible irradiado)	4×10^{-5}	despreciable
Transporte	4×10^{-5}	1×10^{-5}
Total para la industria	0,28	0,14

crezca la industria nucleoelectrica. Los materiales radiactivos que se producen en el ciclo del combustible nuclear son transportados generalmente por camión y en grado menor por ferrocarril o por barco.

RESUMEN

Si se considera la opción de ningún reciclado, la mortalidad inferida por cáncer resultante de la industria nuclear, por GWa, para los trabajadores y el público, se resume como sigue (Cuadro 2).

Los detrimentos resultantes de la industria nucleoelectrica constituyen una pequeña fracción del detrimento que supone para la población mundial la exposición a las radiaciones naturales y a otras fuentes de radiación, según muestra el Cuadro 3.

Cuadro 3. Compromisos globales de dosis resultantes de diversas fuentes de radiación (según la Ref. [2] p.16)

Fuente de exposición	Compromiso global de dosis (días)**
Un año de exposición a fuentes naturales	365
Un año de viajes en aviones comerciales	0,4
Uso de los fertilizantes fosfatados producidos en un año, considerando el ritmo actual de producción	0,04
Un año de producción mundial de energía eléctrica por centrales alimentadas con carbón, considerando la actual potencia instalada mundial (1 000 GWe)	0,02
Un año de exposición a los bienes de consumo que emiten radiaciones	3
Un año de producción de energía nucleoelectrónica, considerando la actual potencia instalada mundial (111 GWe)	0,83
Un año de explosiones nucleares promediado con respecto al período 1951–1976	30
Un año de empleo de radiaciones para diagnóstico médico	70

** El compromiso global de dosis, para cada una de estas fuentes de radiación se expresa en forma de duración de la exposición de la población mundial a las radiaciones naturales que originaría el mismo compromiso de dosis. Se incluye la contribución debida a la exposición profesional.

Referencias

- [1] The Environmental Impacts of Production and Use of Energy: Part II – Nuclear Energy, UNEP Energy Report Series, PNUMA, Nairobi (Septiembre de 1979).
- [2] Fuentes y efectos de la radiación ionizante, Informe del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas a la Asamblea General, Naciones Unidas, Nueva York (1977).