Gestión de desechos radiactivos

por Wm. L. Lennemann, H.E. Parker y P.J. West*

CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

En la esfera nuclear, los problemas no terminan cuando se consigue que un reactor funcione en condiciones de seguridad o con la explotación sin riesgos de una central nuclear. En efecto, la fisión nuclear plantea problemas muy diversos, algunos de los cuales requieren mucho tiempo para ser resueltos o incluso solo se consigue, de momento, resolverlos a medias. Los programas de energía nucleoeléctrica exigen no solo que se consideren las centrales nucleares y su emplazamiento y explotación, así como la planificación del suministro de combustible nuclear, sino también qué es lo que ha de hacerse con el combustible irradiado y con los desechos radiactivos que contienen. Es preciso, en efecto, adoptar múltiples decisiones en el terreno de la gestión de ese combustible agotado, es decir, acerca de si debe o no ser almacenado y reelaborado (y dónde y cuándo, por añadidura), acerca de la disponibilidad de instalaciones adecuadas y de personal técnico idóneo llegado el momento en que se les necesite, acerca de la gestión y la evacuación de los desechos radiactivos resultantes de toda reelaboración del combustible, y acerca de la salvaguardia y el aprovechamiento de los materiales nucleares recuperados del combustible irradiado al reelaborarlo. La **Figura 1** es un intento de ilustrar esquemáticamente el ciclo del combustible nuclear. Por lo general, el almacenamiento del combustible irradiado no suele incluirse en este ciclo como uno de sus eslabones, pero en este caso lo ha sido ya, que hoy día, ese almacenamiento del combustible puede llegar a constituir una posible solución del problema como medida transitoria antes de su reelaboración en un plazo más o menos largo. En la **Figura 1A**, las zonas sombreadas indican los sectores del ciclo del combustible que estimamos encierran motivo de preocupación inmediata o futura dentro del conjunto de actividades que constituyen dicho ciclo, requiriéndose en todos esos casos una gestión de los desechos radiactivos. Además, se plantea el problema del cierre definitivo y desmantelamiento de las instalaciones nucleares, problema que afecta a todas las que intervienen en el ciclo del combustible nuclear.

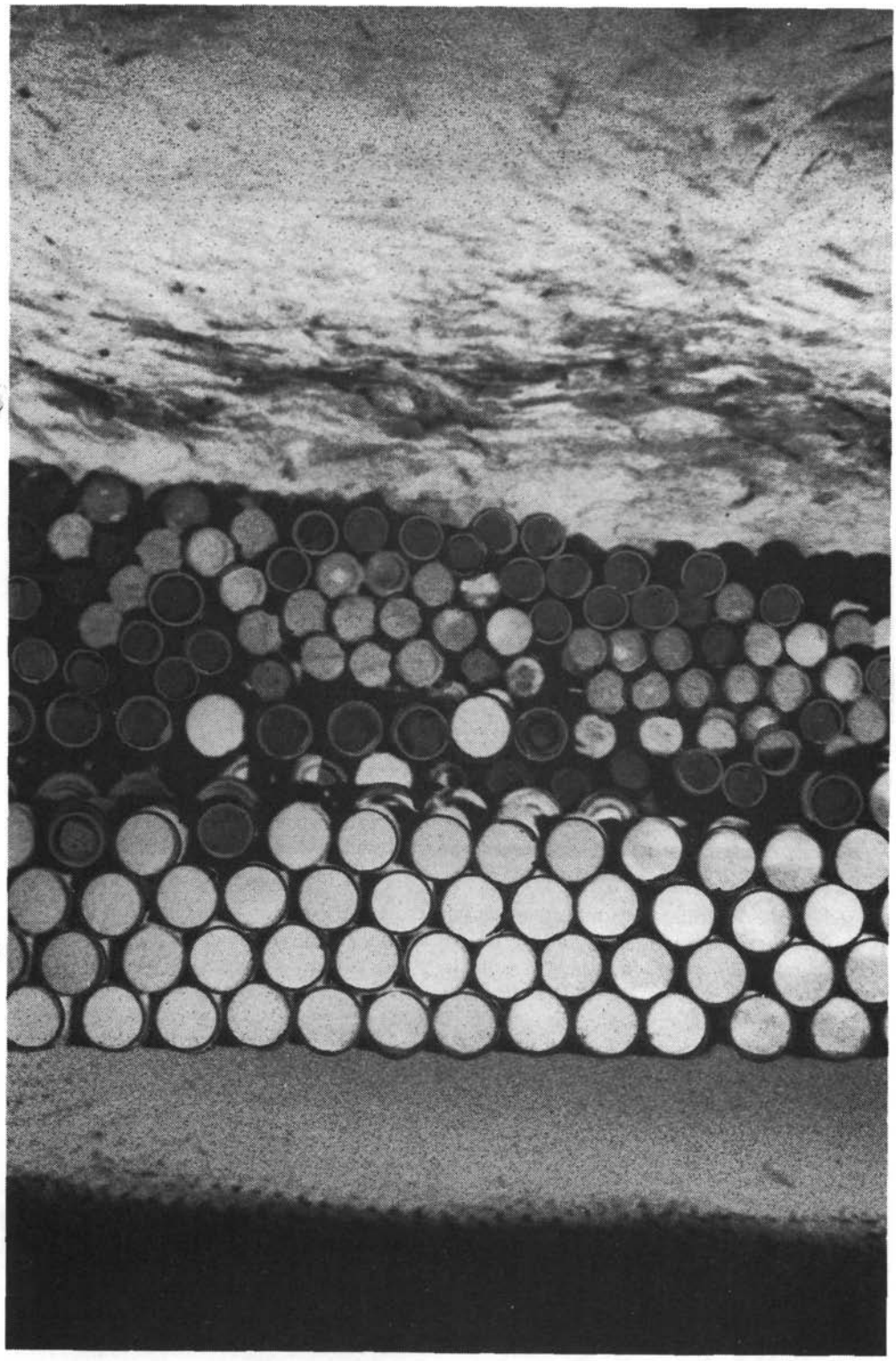
RESIDUOS DE FABRICACION

La actividad de los residuos de fabricación se debe principalmente al radio-226, isótopo que se encuentra presente en la naturaleza. Aunque su concentración en estos residuos es muy baja (aproximadamente 800 picocurios/gramo), no deja de preocupar debido a su largo período (1 620 años) y a los productos de su desintegración. En efecto, el gas radón que emana del radio-226 puede terminar por pasar a la atmósfera. Por consiguiente, existe acuerdo virtualmente unánime en que estos residuos no deben utilizarse ni en materiales estructurales ni en materiales de relleno para la construcción de edificios en los que hayan de vivir o trabajar seres humanos. De aquí la necesidad de un control y vigilancia prologados de los residuos de las plantas de fabricación de uranio.

---

* **Este artículo es un amplio resumen de la memoria que sus autores presentaron en abril en la Conferencia Nuclear Europea celebrada en París.**

Almacenamiento de tambores de desechos radiactivos en la mina de sal abandonada de Asse (República Federal de Alemania). Foto: G.S.F. ▶



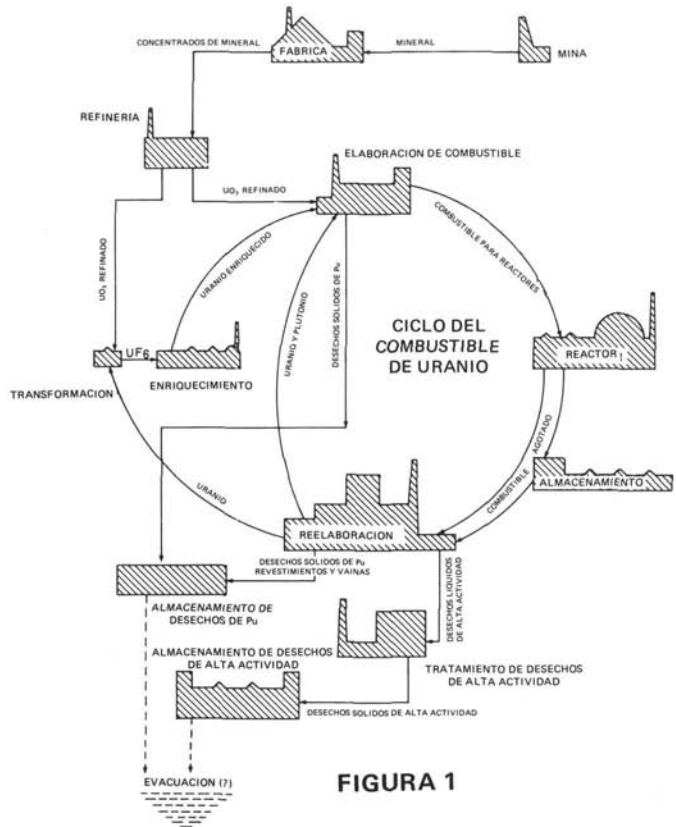


FIGURA 1

Las radiaciones emitidas por los residuos de fabricación (trituración y molienda, etc. del mineral de uranio) no presentan ningún riesgo grave para la salud cuando se trabaja en locales con huecos al exterior o bien ventilados, o al aire libre. No obstante, el riesgo subsistirá durante milenios. Debido a ello, la elección del lugar de almacenamiento, y la evacuación de esos residuos deberán planificarse y llevarse a cabo teniendo siempre presente cuanto antecede. Cuando deje de utilizarse una determinada zona de evacuación de residuos, deberá consolidarse el terreno y dotarlo de vegetación en la medida que sea posible con el fin de protegerlo contra la erosión por el viento y por el agua. La ubicación del terreno deberá quedar bien señalada, de la forma más duradera posible, y registrarse ante las autoridades catastrales, imponiéndose a perpetuidad las debidas restricciones a su futuro uso o aprovechamiento.

ALMACENAMIENTO DEL COMBUSTIBLE

Desde un principio parece haberse supuesto tácitamente que, llegado el momento de descargar el combustible agotado de un reactor, se dispondría inmediatamente, o en plazo muy breve, de servicios de reelaboración del combustible y de géstión de los desechos, cuyo costo quedaría compensado por el valor del material fisionable recuperado en el proceso

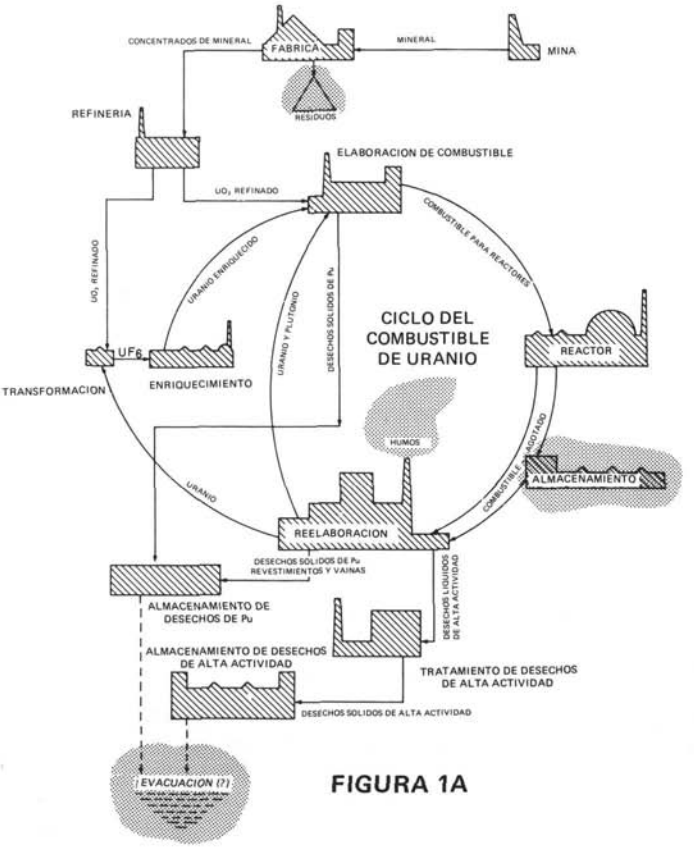


FIGURA 1A

de reelaboración. Es más, se suponía también que quien se ocupase de reelaborar el combustible estaría dispuesto a prestar cuantos servicios de gestión de desechos se precisasen respecto de los que se produjeran en el curso de la reelaboración, hasta el punto de que los encaragados de la explotación propiamente dicha del reactor se verían libres de toda responsabilidad en cuanto se refiriese a la gestión de esos desechos. Los costos de los servicios de gestión se cargarían a los gastos de reelaboración del combustible. Ahora bien, excepción hecha del caso de los reactores de agua pesada alimentados con uranio natural, parece que apenas se ha prestado atención a la posibilidad de que se planteen situaciones en las que los servicios de reelaboración del combustible no sean fáciles de obtener o no ofrezcan incentivo alguno desde el punto de vista económico. En consecuencia, y por cualquiera de estas dos razones, todo parece indicar que la escasez de espacio para el almacenamiento del combustible irradiado o agotado se está convirtiendo en un problema acuciante al que es preciso prestar atención sin mayor demora.

Si bien en la mayoría de los regímenes económicos nucleares el combustible irradiado o agotado no es hoy día considerado como material de desecho, su gestión mientras se encuentra almacenado con carácter transitorio no difiere mucho de la gestión de los desechos solidificados de alta actividad. En efecto, en ese combustible irradiado se encuentran

presentes todos los productos de fisión que generan calor y que se hallan en los referidos desechos, e incluso contienen plutonio en mayor cantidad, así como los nucleidos gaseosos tritio, yodo y criptón. Aunque tanto el recipiente como la forma del combustible puedan tal vez no reunir los requisitos que el encargado de la gestión exige en el caso de los desechos solidificados de alta actividad, no hay que olvidar que ese combustible ha resistido un trato un tanto rudo en el reactor, y que lo ha resistido satisfactoriamente. Los problemas que plantea su almacenamiento no consisten en que no se disponga de recursos tecnológicos adecuados, sino en la carencia de instalaciones y de procedimientos que aseguren una refrigeración continua del combustible almacenado, una vigilancia radiológica que permita detectar posibles escapes de radiactividad de los recipientes, un tratamiento adecuado de los efluentes, una vigilancia que impida la introducción o la retirada no autorizadas de materiales, así como medidas adecuadas que hagan possible sustituir por otros los recipientes defectuosos o deteriorados o bien proteger estos con un nuevo embalaje.

Ahora bien, si ha de considerarse como desecho el combustible irradiado o agotado – es decir, si se decide no reelaborarlo – se tropieza simultáneamente con todos los problemas que plantean los desechos ordinarios de alta actividad y, por añadidura, con otros tales como tener que hacer frente a los desechos gaseosos, decidir si el material en forma de óxido debe ser sometido a un proceso de transformación, decidir si puede ser encerrado en un embalaje complementario y, seguidamente, almacenado, o si, con o sin escape de gases, puede ser evacuado en la forma en que se recibe del reactor. Es más, a no ser que se disponga de un método de evacuación para los desechos que contienen emisores alfa, se tropezará con la necesidad de recurrir al almacenamiento por tiempo ilimitado o a la reelaboración de ese combustible como medio para evacuarlo.

CIERRE DEFINITIVO Y DESMANTELAMIENTO

Hasta dentro de veinte o treinta años no se habrá generalizado el problema del cierre definitivo, seguido o no de desmantelamiento, de instalaciones nucleares que intervienen más o menos directamente en la producción de energía nucleoeléctrica. No obstante, la complejidad de la labor que hoy día se requiere para proyectar, construir, explotar y conservar esas instalaciones constituye un buen índice de la magnitud del problema. Un grupo de consultores del OIEA ha distinguido tres etapas en ese cierre definitivo y subsiguiente desmantelamiento; esas etapas son las siguientes:

Etapa 1: Cierre de la instalación y sujeción de ésta a vigilancia

"Por lo general, esta etapa puede considerarse como una medida de carácter transitorio, en espera del momento de realizar otros trabajos, pero en muchos casos puede ser la única que esté justificado adoptar".

Etapa 2: Transformación de la instalación y autorización restringida del uso del terreno en que se encuentra

"Esta etapa puede ofrecer múltiples formas, pero fundamentalmente entraña la transformación de parte o de la totalidad de la instalación para dedicarla a otras actividades".

Etapa 3: Autorización sin restricciones del uso del terreno

"Esta etapa exige el desmantelamiento y desmontaje de toda la maquinaria, equipo y materiales estructurales que revelen un grado considerable de contaminación como condición previa para autorizar un acceso y uso ilimitados del terreno".

Cualquiera que haya desmontado una campana de humos o una caja de guantes contaminadas, u observado de cerca un trabajo de este tipo, podrá hacerse una vaga idea

de los problemas que entraña alcanzar esa Etapa 3 cuando se trata del cierre definitivo y desmantelamiento de una central nuclear. Ahora bien ¿hay alguien que sea realmente capaz de apreciar los problemas con que se tropezaría para llegar a esa misma etapa en el caso de una planta de fabricación de combustible a base de plutonio o de una planta de reelaboración de combustible? Se ha calculado que los costos a tal operación, incluidos los correspondientes a la gestión de los desechos resultantes, serían del mismo orden o incluso superiores a los costos iniciales de construcción de la instalación. Aunque nadie ha tratado de trazar un proyecto de instalación atendiendo a la facilidad de su futuro desmantelamiento, los estudios efectuados a este respecto y las operaciones reales de desmantelamiento llevadas a cabo hasta el presente indican que muchas de las posibles soluciones de un proyecto que mayor atractivo ofrecen "sobre el plano" desde el punto de vista de la construcción y la explotación de la instalación, pueden ser muy bien las que mayores dificultades supongan llegado el momento de su desmantelamiento.

Si se considera antipática la idea de descargar sobre las espaldas de generaciones futuras el peso de una responsabilidad nuclear, tal vez sea preciso reconocer que este problema del desmantelamiento puede haber escapado al debido control en las circunstancias actuales. Ahora bien, esto no quiere decir que deba continuar incontrolado. Los gobiernos, las autoridades reglamentadoras, las empresas de servicios públicos y la industria tienen que encontrar una respuesta adecuada a esta doble pregunta: ¿quién va a encargarse de "la limpieza", y "en qué medida", cuando se decida dar por terminada la explotación de una instalación nuclear? Si va a encargarse de ello un Gobierno, preciso será fijar criterios respecto de las condiciones en que deberá encontrarse la instalación en el momento de su entrega a ese Gobierno para su desmantelamiento. De tratarse de una empresa de servicios públicos, los costos previstos de la operación habrán de sufragarse mediante una subida de las tarifas del suministro de energía eléctrica. Si va a ser la industria la que haya de ser considerada responsable del cierre definitivo y desmantelamiento de sus propias instalaciones nucleares, también deberá cargar en los precios de sus servicios y productos los costos de tal operación. Hoy por hoy no se tienen en cuenta ni criterios para el desmantelamiento ni medidas para el financiamiento de este tipo de operaciones. Ahora bien, independientemente de quien sea el que haya de encargarse del desmantelamiento, la opinión pública insistirá en que los costos totales se reduzcan al mínimo, ya que, a fin de cuentas, será el contribuyente quien tenga que pagar. Esto quiere decir que deberán fijarse criterios relativos a las condiciones en que debe procederse al desmantelamiento de las instalaciones y a la reutilización del terreno de su emplazamiento y, una vez sentados esos criterios, tener en cuenta los planes de desmantelamiento al preparar los proyectos de instalación y determinar los procedimientos para su explotación y conservación. Esta planificación del futuro desmantelamiento de la instalación y reutilización del terreno equivale a seguir una vía que se aparta totalmente del camino trillado que actualmente se sigue, pero hasta que no se actúe de esa forma no cabe esperar que pueda inculcarse en la opinión pública y en la mente de los detractores de la energía nucleoeléctrica la idea de que no se están levantando perennes "monumentos" nucleares.

CRIPTON-85 Y TRITIO

En los desechos radiactivos gaseosos, el nucleido que mayor preocupación había venido suscitando hasta el presente era el yodo-131. Ahora bien, al tener este nucleido un período de 8 días, su control resulta bastante sencillo, bien recurriendo a la sorción en un medio apropiado en el que se deja que se desintegre, o bien dejando que transcurra tiempo suficiente para su desintegración antes de reelaborar el combustible.

Los radionucleidos gaseosos que podrían llegar a constituir un problema en el futuro son el tritio, el criptón-85 y, posiblemente también, el yodo-129. Por lo que respecta al

xenón-133, de período relativamente corto (5,3 días), se estima que no debiera llegar a plantear problemas. Por el contrario, se está poniendo de manifiesto una cierta preocupación acerca de la acumulación de carbono-14 en la atmósfera y en la biosfera, como fuente de radioexposición de la población imputable a la industria nucleoeléctrica. Aunque todavía no está bien determinada la capacidad de recepción del medio ambiente con respecto al tritio, al criptón-85 y al yodo-129, se ha calculado que las concentraciones mundiales de los dos primeros podrían aproximarse a los valores límite admisibles en el curso de la primera mitad del siglo que viene. Ahora bien, donde se libera mayor cantidad de criptón y de tritio es, precisamente, en las operaciones de reelaboración del combustible.

Algunos críticos e incluso algunos grupos encargados de funciones de reglamentación sostienen que debería aplicarse inmediatamente la tecnología de que hoy se dispone e iniciarse sin demora la recuperación de los radionucleidos gaseosos. Al parecer, las memorias e informes publicados acerca de los resultados de trabajos efectuados con gases puros les ha inducido a creer, equivocadamente, que se dispone ya de tal técnica y que se la puede adaptar a las condiciones que realmente concurren en una planta de reelaboración. A decir verdad, la tecnología principal que se precisa desarrollar respecto de todos los procesos de separación de radionucleidos gaseosos consiste en la depuración y el tratamiento previo del gas para obtener un medio que se preste al proceso de separación.

No puede decirse que la separación del criptón y del tritio del conjunto de desechos gaseosos constituya una necesidad inmediata en materia de gestión de los desechos, pero sí puede muy bien llegar a constituirla en el futuro. Como consecuencia de ello, en el curso del próximo decenio debiera quedar demostrada la viabilidad de métodos para la separación y el confinamiento de esos dos radioisótopos gaseosos, y podérseles llevar a la práctica. Para lograrlo será preciso, al parecer, un esfuerzo mayor que el que hoy día se despliega para desarrollar una tecnología adecuada. Además de este desarrollo de técnicas de separación del tritio y del criptón-85, también debiera investigarse, colateralmente, la gestión de los desechos en lo que se refiere al carbono-14.

ALMACENAMIENTO Y EVACUACION DE DESECHOS DE ALTA ACTIVIDAD Y DE EMISORES ALFA

Para cada sector del ciclo del combustible nuclear se está demostrando ya la viabilidad de una tecnología satisfactoria o incluso se está aplicando ésta con carácter ordinario, excepción hecha del sector que corresponde precisamente a la evacuación de los desechos de alta actividad, empleándose aquí el término "evacuación" en el sentido de que determinados radionúclidos, en concentraciones peligrosas, quedan eficazmente aislados de la biosfera en un lugar de almacenamiento definitivo en el que con el tiempo podrá llegar a prescindirse del control y de la vigilancia radiológica iniciales. En efecto, después de más de 20 años de ejecución de programas de energía nucleoeléctrica en varios de los principales países desarrollados, todavía no se emplea con carácter continuo y a escala industria la técnica de solidificación y almacenamiento de los desechos de alta actividad procedentes de la reelaboración del combustible irradiado en reactores de potencia; de manera análoga, los métodos de evacuación de desechos de alta actividad y de emisores alfa no ha pasado de la etapa de su estudio, sin aplicación practica alguna generalizada. Aunque es posible efectuar proyecciones, en lineas generales, del empleo de las diversas soluciones posibles, los explotadores de reactores y las autoridades que tienen a su cargo los programas de energía nucleoeléctrica no poseen aún un conocimiento suficiente de cuáles serán las responsabilidades y los gastos que derivarán de la reelaboración del combustible y de la evacuación de los desechos radiactivos resultantes de ella.

Debido al período extremadamente largo de los emisores alfa, y al convencimiento que se abriga de que es preciso mantenerlos eficazmente confinados por espacio de centenares

de milenios, la idea de eliminarlos del grueso de los desechos, en particular de los de alta actividad, se ofrece como sumamente interesante. El éxito de este procedimiento, es decir, de la separación de los emisores alfa, dependería, en esencia, de la eficaz separación cuantitativa de esos nucleidos del conjunto de los productos de fisión y de activación presentes en la corriente de desechos de las plantas de reelaboración. Actualmente se cuenta con técnicas adecuadas para conseguir separar de los productos de fisión virtualmente la totalidad de los emisores alfa; los problemas se plantean en el terreno de los costos y de los controles operacionales necesarios que han de aplicarse para lograr tal separación en la práctica. Como es natural, de la operación derivarían una diversificación de los efluentes radiactivos y una multiplicación de las instalaciones y equipo contaminados a las que habría que hacer frente y que podrían constituir un problema mayor aún que el planteado por la contaminación alfa inicial.

Si la separación de los emisores alfa pudiera aplicarse a una operación de producción, nos enfrentaríamos con preguntas como las siguientes: ¿Justifican las ventajas que supone operar con desechos integrados por productos de fisión libres de emisores alfa la suma de los gastos y de los riesgos de una manipulación y un tratamiento adicionales así como un aumento de las instalaciones y equipo contaminados? ¿Qué habría de hacerse con los emisores alfa?

El problema de la evacuación de los desechos radiactivos constituye un verdadero reto que no cabe eludir, y cuanto antes se demuestre la viabilidad de un método perfectamente adecuado de evacuación, mejor será. En efecto, mientras esta cuestión no quede resuelta satisfactoriamente, cabe esperar que los programas de energía nucleoeléctrica tropiecen con una oposición cada vez mayor, en particular en el terreno de la construcción de nuevas plantas de reelaboración de combustible así como en el de la energía nucleoeléctrica propiamente dicha. Los detractores del empleo de la energía nuclear se van percatando de que los reactores de potencia, por sí solos, liberan cantidades relativamente pequeñas de radiactividad comparada con la que resulta de las plantas de elaboración de combustible. Sin embargo, excepción hecha de los residuos volátiles, prácticamente todos los desechos radiactivos se acumulan en zonas de almacenamiento. Ahora bien, la construcción de instalaciones destinadas al almacenamiento de esos desechos en sus diversas formas con carácter provisional pero durante un período de tiempo indeterminado, mientras se estudian y perfeccionan otros posibles métodos para su evacuación definitiva, no puede constituir, ni constituye, una manera acertada de afianzar la confianza de la opinión pública en las ventajas se la energía nucleoeléctrica sino que, sin duda alguna, facilita nuevos argumentos a quienes se oponen a ella.

Es perfectamente comprensible que sean muy escasos — si es que existe alguno — los centros de población que se sienten inclinados a aceptar la proximidad inmediata de una planta de reelaboración de combustible o de un lugar de almacenamiento de desechos, o de la combinación de una y otro, ante la perspectiva de verse transformados en lo que popularmente se llama "un vertedero de desechos radiactivos", por muchas garantías que los técnicos proclamen de que tales materiales quedan almacenados de forma que no entreñan riesgos. No obstante, estamos persuadidos de que esas comunidades de población se mostrarían menos reacias a aceptar la construcción de plantas de reelaboración de combustible en lugares debidamente seleccionados si pudiera demostrárseles la viabilidad de un método aceptable de evacuación.

En la actualidad, parecen ser cuatro las fórmulas generales principales ideadas para el almacenamiento o evacuación definitivos de aquellos desechos radiactivos que es preciso mantener aislados por espacio de siglos; esas fórmulas o conceptos son los siguientes:

1. Lanzamiento al espacio ultraterrestre;

2. Transmutación — por ejemplo, recurriendo al bombardeo con partículas atómicas — en elementos estables o en radioisótopos de período corto;
3. Empleo de la superficie terrestre como lugar de evacuación, solución que comprende tanto el empleo de instalaciones especiales construidas a tal efecto en tierra firme como el depósito controlado de los desechos en el fondo del mar;
4. Aprovechamiento de formaciones geológicas, bien en tierra firme o bajo el fondo del mar.

Si bien todas estas posibles soluciones se han estudiado desde el punto de vista teórico, las únicas que parecen ofrecerse como viables durante el siglo en que vivimos son las dos últimas, es decir, las consistentes en recurrir a la superficie de nuestro planeta o a formaciones geológicas. De respetar el criterio de prever una futura recuperación, que podría resultar necesaria de producirse acontecimientos imprevistos, quedan virtualmente eliminados con ello los océanos, con lo que el conjunto de posibles soluciones queda reducido a la siguiente alternativa: emplear instalaciones construidas al efecto en la superficie terrestre, o recurrir a formaciones geológicas en tierra firme.

Por el momento cabe considerar, en vista de lo anteriormente expuesto, solo dos modalidades actualmente viables de aislar de la biosfera los desechos durante largos períodos de tiempo: recurrir a una instalación de almacenamiento construida al efecto en la superficie terrestre y sometida a continua vigilancia material y radiológica, y recurrir a una técnica de evacuación que es de suponer que no dejaría como herencia carga alguna para las futuras generaciones. Si bien es preciso admitir que no puede haber garantía absoluta alguna de que no llegue a producirse un escape de radionúclidos del seno de una formación geológica, también hay que tener en cuenta que tampoco cabe esperar una garantía absoluta de la vigilancia material y radiológica continuas de una instalación de almacenamiento en la superficie. Tal vez el problema quede reducido, a fin de cuentas, a una cuestión de decidir si debe confiarse más en el hombre que en la naturaleza o al contrario.

En toda evaluación de riesgos que se lleve a cabo comparando los que entraña el almacenamiento de los desechos en la superficie y los que corresponden a su almacenamiento en una formación geológica, no puede pasarse por alto el hecho de que los desechos evacuados o almacenados con arreglo a esta última modalidad, a una profundidad de, por ejemplo, varios centenares de metros, quedan mucho mejor protegidos frente a la posibilidad de catástrofes tanto naturales como provocadas por el hombre, y frente a la tendencia de este último a dejar las cosas para mañana y a despreocuparse de los problemas, que los desechos almacenados en instalaciones construidas en la superficie. Se tiene así que el almacenamiento en formaciones geológicas pudiera muy bien considerarse como la mejor solución de compromiso entre dos realidades imperiosas: la seguridad y la responsabilidad. Por cierto que el término "almacenamiento en formaciones geológicas" se utiliza aquí porque hasta que no se hayan comprobado razonablemente las garantías de seguridad que ofrecen esas formaciones para la "evaluación" de los desechos radiactivos, habrá de ser en ellas donde en un principio tendrán que "almacenarse". Tanto la vigilancia radiológica como la recuperabilidad son cuestiones relativas. En efecto, si bien esa vigilancia radiológica y esa recuperabilidad resultarían más sencillas de emplearse una instalación de almacenamiento en la superficie, ambas cosas — vigilancia y recuperabilidad — podrían también conseguirse con facilidad recurriendo a la modalidad de almacenamiento en formaciones geológicas de contarse con un acondicionamiento técnico idóneo y una gestión adecuada del lugar de almacenamiento y de su contenido.

El único mecanismo concebible por el que los radionucleidos confinados en una formación geológica pueden llegar a la biosfera y convertirse en un riesgo para los seres humanos consiste en su desplazamiento bajo la acción de las aguas subterráneas. Por consiguiente, el criterio principal que debe gobernar la evacuación en formaciones geológicas es utilizar

una formación seca o bien una formación en la que el movimiento de las aguas subterráneas sea muy escaso o inexistente y en la que concurran pruebas geológicas de que tal condición se mantendrá invariable por espacio de centenares de milenios. Otro criterio sería proteger los desechos o los radionucleidos presentes en ellos – o unos y otros – frente al riesgo de verse afectados por el movimiento de las aguas subterráneas; para mayor seguridad, muy bien podrían adoptarse ambos criterios. En efecto, además de la barrera natural que las formaciones geológicas en que se depositan los desechos constituyen para el movimiento de los radionucleidos, la forma de los desechos y el tipo de embalaje o recipiente empleado constituyen otros dos importantes factores que pueden acrecentar las características de seguridad y de confinamiento en los casos de depósito de desechos en formaciones geológicas. Las diversas combinaciones de esos tres factores pueden ofrecer un margen considerable de flexibilidad para lograr un aislamiento perpetuo entre los radionucleidos y la biosfera.

Existen formaciones geológicas tales como las de sal gema, granitos, esquistos y arcillas que se han mantenido relativamente estables por espacio de millones o de cientos de millones de años. Una detenida investigación de esas formaciones y de las que las contienen permite determinar su estabilidad en función del tiempo así como la presencia, ausencia o tipo de agua intersticial o próxima que pudiera servir de vía para conducir los radionucleidos hacia la biosfera y hacia el hombre. Independientemente de que las formaciones consistan en yacimientos de sal, calizas, esquistos, granitos, etc., la mayoría de esos lugares y depósitos constituirán probablemente casos únicos en su clase y habrán de ser examinados y evaluados atendiendo a su respectiva estructura y a sus características hidrológicas propias. Es posible que algunas formaciones o situaciones sean consideradas "menos seguras" que otras, pero sin que esto quiera decir necesariamente que hayan de considerarse "inadmisibles".

Existe toda una serie de pruebas de que, hasta el presente, la gestión de los desechos de alta radiactividad y emisores alfa se ha efectuado de manera que no entraña riesgos; ahora bien, son muchas las preguntas que inquietan a la opinión pública sin que sea posible contestarlas aportando pruebas fehacientes: ¿Qué se hará finalmente con esos desechos? ¿Cómo se conseguirá aislarlos del medio ambiente durante los miles o los millones de años por espacio de los cuales entrañarán un posible riesgo? ¿Cómo es posible tener la seguridad de que no contaminarán la biosfera? ¿Qué garantía puede tenerse de que será posible evacuarlos sin que representen un peligro? ¿Dónde habrá de hacerse? . Y así sucesivamente. Parece, por tanto, absolutamente necesario llevar adelante la necesaria labor de investigación para seleccionar posibles lugares de evacuación en formaciones geológicas, y lanzarse sin más demora a ejecutar proyectos demostrativos de la viabilidad de tal solución. Conforme se ha indicado anteriormente, toda demostración de la viabilidad del método de evacuación en una formación geológica debe iniciarse como una operación de almacenamiento. Solo después de que haya quedado demostrada y probada sin que quepa duda alguna la seguridad que ofrecen el lugar de evacuación y la operación en sí podrá abandonarse el propósito de recuperación ulterior de los desechos, reducirse el grado de vigilancia y proseguirse las operaciones con carácter ya de evacuación en vez de con carácter de almacenamiento.

En términos generales, la resolución de los problemas que plantean los desechos de alta actividad y los emisores alfa parece constituir uno de los objetivos más difíciles de alcanzar y, a la vez, de máxima prioridad, de cuantos ha de perseguir hoy la industria nuclear. La construcción y mantenimiento de instalaciones de almacenamiento provisional en la superficie no constituye una solución definitiva y podría muy bien no lograr tranquilizar a la opinión pública. Hoy día se dispone de recursos tecnológicos capaces de demostrar prácticamente, aportando pruebas, de que determinadas formaciones geológicas pueden llegar a ser utilizadas eficazmente como lugares de evacuación. Cabría preguntarse si no sería mejor que los fondos y demás recursos necesarios para la construcción y mantenimiento de instalaciones de almacenamiento provisional en la superficie se dedicasen

en los diez próximos años a evaluar y demostrar prácticamente la viabilidad y ventajas del almacenamiento en formaciones geológicas, teniendo siempre presente la idea de una futura evacuación.

La energía nucleoeléctrica atraviesa hoy una etapa difícil precisamente porque no se ha demostrado la existencia de ningún enfoque eficaz ni de ninguna solución real del problema de la evacuación de los desechos cuya radiactividad subsiste durante enormes períodos de tiempo. Los detractores de la energía nucleoeléctrica esgrimen ese argumento cada vez con mayor eficacia. Es de temer que determinados sectores de la opinión pública y determinados grupos políticos presten seriamente oídos a esas críticas, en particular cuando se plantee la cuestión de construir plantas de reelaboración de combustible. Ahora bien, una vez que se almacenen desechos nucleares en una formación geológica considerada como aceptable y de manera que sea posible su ulterior recuperación, demostrandose así la viabilidad de esta técnica, y una vez también que este método pueda ser explicado de una manera lógica y ser defendido en tribunas y foros públicos, la energía nucleoeléctrica y, especialmente, las plantas de reelaboración de combustible no podrían por menos de llegar a gozar de mayor aceptación.

CENTROS REGIONALES DE REELABORACION DE COMBUSTIBLE Y DE GESTION DE DESECHOS

Parece probable que del total de 3500* GW(e) a que se calcula que ascenderá la capacidad de las centrales nucleares que se prevé que estarán en explotación para el año 1990, unos 3000 GW(e) corresponderán a una decena de países que contarán con sus propias plantas de reelaboración de combustible. Los restantes 500 GW(e) se generarán en un número mucho mayor de países distribuidos por el mundo entero. He aquí una serie de preguntas que cabe formular respecto de estos últimos países: ¿Optarán por reelaborar por *sí* mismos su combustible nuclear o preferirán contratar tal operación con aquellos países que cuenten con plantas de reelaboración? ¿Quién se encargará de las operaciones de evacuación de los desechos radiactivos? ¿Qué responsabilidades podrán derivar exactamente de esas operaciones en el terreno jurídico? ¿Venderán esos países su combustible irradiado como materia prima a otros países capaces de reelaborarlo? ¿U optarán por descartar como desechos radiactivos los elementos combustibles agotados? Cualesquiera que sean las respuestas a estas preguntas, una cooperación internacional en el terreno de la gestión sin riesgos de los desechos radiactivos parece que ofrecería interesantes ventajas.

En octubre de 1974, un grupo de funcionarios del Organismo realizó un rápido y somero estudio para evaluar las ventajas económicas que podrían resultar de la creación de plantas o centros regionales encargados de la reelaboración de combustible nuclear. Se estudió lo que podía considerarse sobre poco más o menos como una "región tipo", utilizando una proyección hasta el año 1990 del volumen de trabajo de reelaboración estimado, y se examinaron los tres siguientes enfoques estratégicos de la reelaboración del combustible y gestión conexa de los desechos, a fin de determinar y comparar sus costos:

I. Una sola planta de reelaboración de combustible para la región.
II. Dos plantas de reelaboración de combustible para la región.
III. Una planta de reelaboración de combustible para cada país de la región.

Se calcularon y totalizaron los costos de infraestructura y operacionales que supondría cada uno de esos enfoques estratégicos para distintas capacidades de reelaboración y de gestión de desechos, y se compararon entre sí. Se partió del supuesto de que cada planta

---

* Hoy día parece que esta cifra puede considerarse un tanto optimista, pero se la utilizará con fines ilustrativos en el presente trabajo.

de reelaboración de combustible se ocuparía de enterrar sus propios desechos sólidos de baja actividad y de almacenar en instalaciones de superficie los desechos sólidos portadores de emisores alfa y los desechos solidificados de alta actividad, en espera de poder disponer de lugares adecuados para su evacuación definitiva. También se previó un margen para comprender los costos de los cofres para el transporte del combustible irradiado o agotado, y de su transporte propiamente dicho, de no reelaborarse el combustible en el propio país que lo hubiera utilizado. Además, se incluyó en la comparación el posible enfoque estratégico consistente en centralizar el almacenamiento del combustible nuclear irradiado. A fin de fijar una base de comparación común entre los costos, se supuso que tanto las instalaciones de almacenamiento de desechos como las de almacenamiento de combustible irradiado se construirían con capacidad suficiente para atender las necesidades por espacio de 20 años al ritmo que se calculó que alcanzaría en la región, en 1990, el volumen del combustible irradiado descargado de las centrales, así como que la totalidad de dichas instalaciones quedarían amortizadas por completo dentro de ese mismo periodo de 20 años previsto para su explotación.

Suponiendo un índice base igual a la unidad (1,0) para las inversiones iniciales de capital previstas (costos de infraestructura) y, de manera análoga, un índice base igual a la unidad (1,0) para los costos operacionales previstos de las plantas regionales, los resultados de la comparación efectuada para la región elegida como tipo fueron los que se indican en el cuadro que figura a continuación:

COMPARACION DE LOS INDICES DE COSTOS CORRESPONDIENTES A LOS POSIBLES ENFOQUES ESTRATEGICOS DE LA GESTION DEL COMBUSTIBLE*

	Costos de infraestructura	Costos operacionales
Reelaboración del combustible**:		
Por una sola planta para toda la región	1,0	1,0
Por dos plantas para toda la región	1,1	1,1
Por una planta para cada país de la región	1,5	1,6
Almacenamiento centralizado del combustible	0,6	0,3

Debe subrayarse que estos índices no reflejan las posibles ventajas económicas que derivarían para un determinado país de la región, sino solamente las que se obtendrían para el conjunto de países que la integran. No obstante, los estudios realizaron sí pusieron de manifiesto la repercusión de la reelaboración del combustible y de la correspondiente gestión de los desechos producidos durante la misma sobre un programa de energía nucleoeléctrica. La **Figura 2** indica la parte de los costos de producción de la energía nucleoeléctrica que habrían de imputarse a la reelaboración del combustible y a la gestión de los desechos radiactivos. Los costos de dicha gestión incluyen los correspondientes al enterramiento de los desechos sólidos, relativamente poco importantes, y los de la solidificación de los desechos de alta actividad y almacenamiento transitorio de los desechos sólidos de alta actividad y portadores de emisores alfa.

Tanto el cuadro con los índices de costos como la **Figura 2** ponen de manifiesto la existencia de un importante incentivo económico para que los países que desarrollan programas modestos de energía nucleoeléctrica cooperen en el estudio de la conveniencia de crear centros regionales de reelaboración de combustible y gestión de los desechos radiactivos conexos. En dicha **Figura 2** puede apreciarse que los costos de la gestión de los

* Los índices de costos de infraestructura y de costos operacionales no son susceptibles de suma.

** Comprende la gestión de los desechos hasta la etapa del almacenamiento de los desechos sólidos.

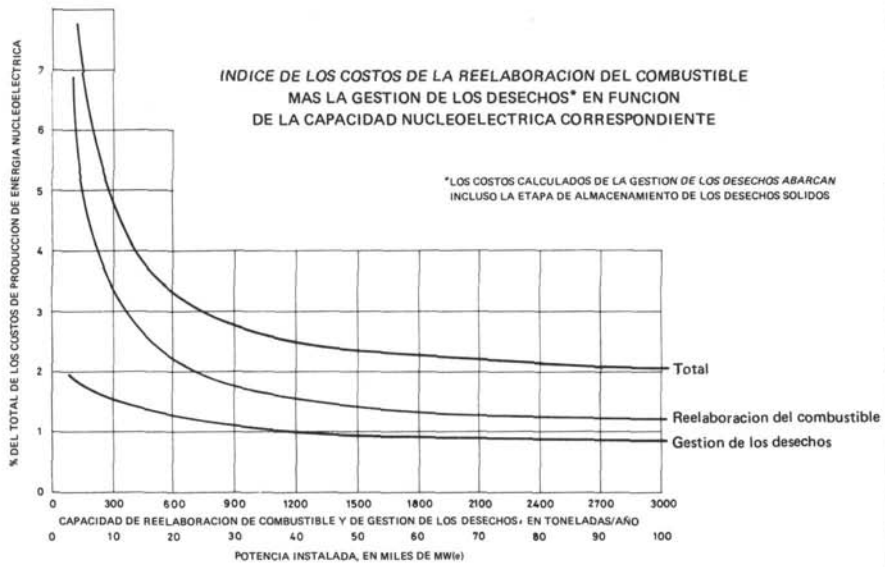


FIGURA 2

desechos representaría entre el 33 y el 40% de la suma de los costos correspondientes, por separado, a cada una de esas dos operaciones, o que oscilan desde aproximadamente la mitad hasta los dos tercios de los costos de la reelaboración del combustible. Conforme se ha indicado anteriormente, los costos de la gestión de los desechos incluyen los del enterramiento de los desechos sólidos, solidificación de los desechos de alta actividad y almacenamiento en instalaciones de superficie de los desechos sólidos de alta actividad y portadores de emisores alfa, pero no los de una evacuación propiamente dicha de los desechos.

Aparte de cualesquiera ventajas económicas, existen desde el punto de vista de la gestión de los desechos cuando menos dos poderosas razones más en apoyo de la cooperación internacional mediante la utilización de centros regionales de reelaboración del combustible nuclear y gestión de los desechos radiactivos conexos. Una de ellas es que de esa forma se reduciría el número de fuentes de radiocontaminación y el número de instalaciones radiocontaminadas. Esto encerraría particular importancia dentro de treinta a cincuenta años, cuando muchas de las actuales instalaciones nucleares hayan llegado al término de su vida útil y tengan que ser cerradas y desmanteladas en la medida necesaria para que dejen de entrañar riesgo alguno. La segunda razón es que el empleo de plantas o centros regionales bien situados, bien dirigidos, bien dotados de personal y explotados satisfactoriamente, deberían reducir notablemente tanto el riesgo de un escape accidental importante de radionucleidos al medio ambiente como el de dar lugar a una radioexposición grave de un determinado grupo de la población. Es probable, en efecto, que tal escape o radioexposición provocasen una airada reacción por parte de la opinión pública en el mundo entero que podría incluso llegar a provocar la interrupción del desarrollo de programas importantes de energía nucleoeléctrica en países desarrollados, así como influir negativamente sobre los países en desarrollo. Por consiguiente, parece que redundaría en interés de aquellos

países que se encuentran bien adelantados en la esfera de la producción de energía nucleoeléctrica y en la de la tecnología nuclear cooperar para evitar esas posibilidades y promover la creación de plantas o centros regionales de reelaboración de combustible y gestión de los desechos conexos; en efecto, esas plantas o centros regionales reducirían al mínimo el número de plantas de reelaboración de combustible de menor capacidad y el de lugares radiocontaminados, evitando asimismo la posibilidad de que algunas de esas plantas modestas se hallasen equipadas inadecuadamente o se explotasen deficientemente en lo que respecta a la manipulación sin riesgos de materiales radiactivos, especialmente de los desechos.

Conforme recientemente hizo notar un Grupo de consultores superiores reunido para examinar la situación actual de la tecnología de la gestión de los desechos radiactivos: "... no es posible separar las consideraciones sobre el tratamiento del combustible agotado de las relativas a las actividades de gestión de los desechos. La disponibilidad de un sistema adecuado y de probada eficacia para la evacuación definitiva de los desechos radiactivos constituirá un elemento de juicio de extrema importancia en las decisiones que se adopten sobre la creación de centros regionales de reelaboración". Cabría añadir que tal afirmación se aplica también a la construcción de toda planta de reelaboración de combustible dondequiera que se proyecte ubicarla. Estas consideraciones sugieren, por tanto, que aquellos países que producen ya energía nucleoeléctrica o que están estudiando la conveniencia de producirla, debieran mancomunar sus esfuerzos y cooperar en la tarea de resolver cuanto antes el problema de la evacuación de los desechos de alta actividad y de los portadores de emisores alfa. La tarea no es fácil ni mucho menos; un solo país, o un par de ellos, no lograrían rematarla totalmente. Tanto por su urgencia como por los recursos que su solución requiere, el problema justifica que haya de recurrirse a la cooperación internacional.

MADUREZ DE LA ENERGIA NUCLEAR

El tema central de la Primera Conferencia Nuclear Europea fue la madurez de la energía nuclear. El término "madurez" no debe entenderse necesariamente en el sentido de que se ha desarrollado y se está aplicando ya una tecnología óptima, es decir, la mejor posible, sino en el sentido de que la tecnología actual puede aplicarse con éxito dondequiera que se la necesite. A este respecto, puede puntualizarse que la gestión de los desechos radiactivos es una actividad nacida del aprovechamiento de la energía nuclear que, aunque progresa por buen camino, no ha alcanzado aún la madurez. ¿Qué es lo que queda por hacer? Es de esperar que en el presente trabajo hayamos expuesto con claridad lo que estimamos que debe hacerse.

A pesar de los obstáculos que levantenen el camino la opinión pública y los intereses creados, se seguirán construyendo y explotando reactores nucleares y se seguirá descargando de ellos cantidades cada vez mayores de combustible nuclear agotado. ¿Qué ha de hacerse con él y con los desechos radiactivos que contiene? Uno de los criterios determinantes de la madurez lo constituye precisamente la capacidad de cooperar. Para que las naciones alcancen su "madurez nuclear", es preciso que concierten sus esfuerzos a fin de extraer provecho de la energía nuclear de la manera más razonable y prudente posible y con el mínimo de riesgos, y tienen que unirse para reducir a un mínimo la repercusión de los inconvenientes de dicha energía, tales como los desechos radiactivos a que da lugar.

REFERENCIAS

1. Martin, A., y ApSimon, H.: (1974) Population Exposure and the Interpretation of its Significance, en Population Dose Evaluation and Standards for Man and His Environment, págs. 15–26, OIEA, Vienna. STI/PUB/375.