

ASPECTOS DE INGENIERIA SANITARIA EN LA INDUSTRIA DE LA ENERGIA ATOMICA*

Ing. ARTHUR S. GORMAN

Ingeniero Sanitario, División de Reactores, Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, Washington, D. C.

La expansión en escala mundial de la industria de la energía atómica presenta a los ingenieros sanitarios, en muchos países, problemas especiales en el campo de la eliminación de residuos industriales y en el del saneamiento ambiental. Nuestra profesión tiene la obligación ineludible de prepararse para afrontar la nueva situación. Este trabajo tiene por objeto discutir los problemas de ingeniería sanitaria surgidos como resultado del desenvolvimiento de esta industria en los Estados Unidos, y se presenta con la esperanza de que su contenido pueda ser útil a los colegas de otros países.

ASPECTOS PROPIOS DE LA INDUSTRIA DE LA ENERGIA ATOMICA

Cuando se trata de problemas de la industria de la energía atómica, debe prestarse especial atención a ciertos aspectos exclusivos de esta nueva industria, tales como:

1. Las posibles aplicaciones de la energía nuclear son tan halagüeñas que, dentro de pocos años, pueden establecerse cerca de ciudades populosas e incluso en remotos lugares de la tierra, plantas e instalaciones de esta energía para fines de investigación, industriales y muchos otros.

2. La tecnología de la industria está experimentando transformaciones rápidas y significativas.

3. La radiación constituye un nuevo factor de contaminación, de propiedades distintas por entero de las de los desperdicios de otras industrias.

4. Ciertos componentes de los residuos radiactivos constituyen un riesgo por largos períodos y crean así problemas especiales en lo que atañe a su eliminación.

* Trabajo presentado en el V Congreso de la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria (AIDIS), Lima, Perú, 19-25 de marzo de 1956.

Las aplicaciones potenciales de la energía nuclear son incalculables. En el momento actual, por lo tanto, nadie puede evaluar las consecuencias de esta industria en la economía, o su reajuste social.

Una larga experiencia ha enseñado a los ingenieros sanitarios que, como consecuencia del desenvolvimiento de nuevas industrias, surgen grandes transformaciones en lo que se refiere a las normas de vida y de trabajo de los individuos y de las colectividades, del mismo modo que saben que, con frecuencia, nuevas industrias plantean arduos problemas de saneamiento y de eliminación de sus desechos.

EL IMPACTO DE OTRAS INDUSTRIAS

Los efectos del ferrocarril, del automóvil, de las industrias químicas y del transporte aéreo son elocuentes a este respecto. Estas industrias han acortado las distancias y, en la misma proporción, el tiempo de viaje; hicieron accesibles por igual puntos cercanos y remotos del planeta; contaminaron la atmósfera y las vías fluviales; transformaron los viejos caminos en una moderna red de carreteras; zonas residenciales, pujantes de vida, han venido a reemplazar los suburbios deprimentes de muchas ciudades; praderas y campos de cultivo se convirtieron en aerodromos, y pequeñas agrupaciones tribales se transformaron, como por arte de magia, en modernas colectividades.

Hay una abundante documentación a propósito de los problemas planteados, por estas y por otras industrias, al ingeniero sanitario en lo concerniente a la eliminación de los desperdicios, al abastecimiento de agua, a la contaminación de las corrientes fluviales, al saneamiento urbano y rural, a la lucha contra los insectos y los roedores, a la hi-

giene de los alimentos y a la del trabajo. Es, pues, muy conveniente considerar cuidadosamente qué planes están en proceso de desenvolvimiento en lo que atañe a la industria de la energía nuclear y, a partir de ellos, intentar el aforo de lo que se avecina en el terreno de la ingeniería sanitaria con el avance de estas novísimas industrias.

Una de las aplicaciones de la energía atómica y en torno a la cual existe gran interés y muchas esperanzas, es proveer fuerza motriz o potencia. El problema de abastecer de combustible o materia prima un reactor nuclear, cuyo objeto es producir fuerza motriz, es bastante simple en comparación con el abastecimiento de otros combustibles, tales como carbón o petróleo. Esto tiene una elevada significación en cuanto a la conveniencia de construir tales reactores o plantas nucleares en aquellos puntos donde abundan los recursos naturales y el mercado, pero el desenvolvimiento económico se ha estancado por falta de energía. Es lógico suponer que surgirá una viva competencia, en escala mundial, en cuanto a venta y construcción de plantas de todos los tamaños de energía nuclear en todo el mundo.

La Conferencia Internacional sobre las Aplicaciones Pacíficas de la Energía Atómica, celebrada en Ginebra, Suiza, del 8 al 20 de agosto de 1955, marcó un nuevo rumbo a la historia de la utilización de esta fuente de energía. Puso de relieve el interés general por estas aplicaciones y por los adelantos de la investigación y de la producción de reactores, así como los muchos usos de esta forma de energía en las ciencias biológicas, en la medicina y en la industria.

En una publicación reciente (1) se da una lista de más de 120 reactores nucleares, bien en funcionamiento, en construcción o en una fase avanzada de su planificación, en doce países distintos. Se dan datos sobre diez tipos de reactores, y sus usos incluían la producción de elementos fisionables, de potencia con destino a varios servicios de interés general, así como a la propulsión de submarinos, de barcos y aviones, a la investigación, a la producción de radioisótopos y

CUADRO No. 1.—*Datos relativos a la distribución de radioisótopos.*

Periodos de envío	Envío a	
	usuarios norteamericanos	usuarios extranjeros
De 1 de enero a 30 de noviembre, 1955.....	—	719
Total de enero, 1947, a noviembre 30, 1955.....	—	3.893
De 1 de enero, 1955, a 30 de noviembre, 1955.....	11.533	—
Total de 2 de agosto, 1946, a noviembre 30, 1955.....	75.735	—

de fuentes radiactivas, y a la prueba de materiales. Se sabe que esta lista no está completa y que, por lo menos, está en proyecto la instalación de cinco reactores más, algunos de ellos en América del Sur. Del total mencionado, 88 figuran como estadounidenses, y de ellos 33 están o estuvieron en funcionamiento.

Otro importante aspecto de esta industria, que se está expandiendo en todo el mundo es la producción de los radioisótopos y sus aplicaciones. En el Cuadro No. 1 se presenta un resumen de los envíos hechos públicos (2) por Estados Unidos.

Los tres isótopos más corrientes enviados, por orden de aplicación, fueron el I^{131} , el P^{32} y el C^{14} . Estos elementos representan 47.451 envíos para uso interno, o sea el 55,7% del total, y 2.550 de las remesas al exterior, o sea el 65,5% de todas ellas. Entre los demás isótopos figuran el S^{35} , el Fe^{55} y Fe^{56} , el Co^{60} , el Sr^{89} y Sr^{90} , y el Ca^{45} .

DESECHOS DE LA INDUSTRIA DE ENERGIA ATOMICA (3)

Los desechos de los procesos de la energía atómica son a la vez tóxicos y radiactivos. Los desechos radiactivos tienen propiedades peculiares que es necesario conocer. Se diferencian de los desechos de otras industrias en el hecho de que la radiación no puede ser revelada por los sentidos de la vista y del olfato, pero se puede descubrir, por supuesto, mediante instrumentos apropiados. El

peligro que dichos desechos representan consiste en que los efectos de la radiación se suman o acumulan con el correr del tiempo, y el daño que ocasionan a los tejidos del organismo son difíciles de contrarrestar. Estos desechos radiactivos pueden hallarse en estado sólido, en estado líquido y en estado gaseoso. Y el período o vida media de radiación puede variar de segundos a siglos. Y por lo que se refiere al grado de actividad puede ser bajo, medio o alto.

Desechos varios de bajo nivel radiactivo

Hay en esta industria muchas fuentes de contaminación radiactiva de actividad baja y media. Estas fuentes abarcan la minería, el manejo y el tratamiento de las materias primas de que se obtienen los elementos fisionables, y el empleo de los radioisótopos en una vasta gama de investigaciones y en el tratamiento médico. Los posibles efectos letales de la radiación aconsejan ejercer alguna forma de supervisión sobre todos los materiales radiactivos y sus desechos. Los de niveles inferiores de radiactividad (del orden de unos pocos microcuries por galón o menos) se producen por lo general en cantidades mucho menores que los desechos de un elevado nivel de actividad (varios centenares de curies por galón). Se suelen retener estos desechos radiactivos de baja o media actividad para fines comprobatorios antes de devolverlos al medio ambiente. Caso de que su grado de actividad sea superior al límite de lo permitido, se retienen para que se desintegren más o se disipen sus efectos. Por el contrario, si dicha actividad no excede el patrón asignado como máximo, se pueden eliminar sin peligro. Los desechos, en estado de solución, de bajo o medio nivel radiactivo se pueden tratar, a los efectos de contrarrestar o eliminar su actividad nociva, por varios métodos, entre ellos la evaporación, la coprecipitación y el intercambio de iones. Todos ellos son relativamente caros y conducen a un concentrado que, tarde o temprano, tiene que ser eliminado como un desecho de radiactividad de alto grado. Por lo que se refiere a los desechos de baja radiactividad y

en estado gaseoso, se pueden eliminar diluyéndolos en la atmósfera, en caso de que las condiciones atmosféricas sean propicias para ello.

Investigaciones llevadas a cabo en años recientes han mostrado que mucha de la radiactividad procedente de los desechos de bajo grado radiactivo se puede eliminar por adsorción o por absorción en suelos arcillosos (montmorrillonita). Como consecuencia de ello se está generalizando la práctica de descargar dichos desechos en hoyos confinados, lagunas o pozos a fin de que el suelo absorba tanta radiactividad como pueda.

Desechos procedentes de los reactores y de las plantas químicas

Los problemas más difíciles los plantean los desechos procedentes de los reactores y de las plantas químicas de separación y tratamiento. La construcción de estas plantas es muy costosa porque requieren precisa fabricación y montaje, una cantidad excepcional de instalaciones auxiliares, una pesada coraza para la protección del obrero contra los altos grados de radiación, y múltiples y complejos mecanismos de regulación a control remoto para el funcionamiento del conjunto.

Dentro de los reactores, el bombardeo con neutrones del material fisionable libera la energía de que dependen la economía y los posibles servicios de esta industria. En estos procesos se engendran cantidades enormes de calor, se forman nuevos elementos fisionables y se desprenden nuevos neutrones que se añaden a los que iniciaron la reacción nuclear. El calor debe ser eliminado por ciertas sustancias refrigerantes, pues de lo contrario acabaría por destruir el reactor mismo. La conveniente utilización de esta energía calorífica y de los neutrones resultantes de la reacción en cadena es la finalidad perseguida por cuantos instalan dichos reactores.

A medida que refrigeradores tales como el aire, el agua y los metales líquidos pasan al través del reactor, se exponen al bom-

bardeo de los neutrones, lo que hace que, como consecuencia, algunos de sus componentes se conviertan en radiactivos. De aquí que la eliminación de corrientes de estos refrigerantes de los reactores debe mantenerse siempre bajo supervisión. Los productos de la fisión, son como las cenizas de los combustibles nucleares, y contienen radioisótopos con números de masa que varían entre 72 y 163.

En asociación con los reactores nucleares hay plantas químicas cuyo objeto es separar el combustible no utilizado de los productos de la fisión. Una de estas plantas podría servir a varios reactores. Utilizando recipientes bien protegidos o acorazados se pueden remitir de un punto o país a otro elementos combustibles previamente irradiados en un reactor y que tienen un alto grado de radiactividad; pero su manejo y envío son costosos y no están exentos de riesgos. A fin de aminorar el grado de radiactividad, permitiendo la desintegración de los productos fisionables de vida media breve, se acostumbra almacenar bajo el agua por muchas semanas los elementos combustibles extraídos de los reactores. Tratándose de reactores que emplean combustibles homogéneos, la unidad química que provee el combustible puede hallarse adyacente al reactor y la separación de los productos de la fisión podría operar de una manera ininterrumpida, en vez de hacerlo por lotes.

Considerando las operaciones día a día, los desechos de la planta química de obtención de productos fisionables presentan riesgos ambientales más serios a la industria. Los desechos en disolución contienen varias sales y ácidos, además de los productos de la fisión. Las características de estos desechos se resumen en el Cuadro No. 2.

La manera en que el combustible nuclear es utilizado en el seno del reactor, bien en estado sólido o en estado líquido, determina los procesos de separación particulares utilizados y las propiedades químicas y radio-químicas de los desechos en solución que resultan. Las operaciones se hacen en

CUADRO No. 2.—Características de los desechos procedentes de las plantas de preparación de combustible para un reactor típico.

(Desechos de un alto grado de radiactividad)		
Radiación beta total, recuentos/min/ml,	1,6 × 10 ⁶ —2,2 × 10 ¹⁰	
Radiación alfa, recuentos/min/ml,	6,0 × 10 ³ —6,0 × 10 ⁵	
Radiactividad—de 1 a 4 × 10 ² curies por galón (3,79 l.)		
Calor engendrado—de 1 a 3 Btu (British thermal units) Unidades térmicas inglesas/hora/galón (3,79 l.)		
Equivalente de potencia: g. de U ²³⁵ = 24.000 Kwh (eficiencia 100%)		
Desechos de fisión: 1 g. de U ²³⁵ forma 1 g. de productos de la fisión		
Desechos de preparación del combustible: de 0,5 a 5,0 galones de solución de desechos/g. de U ²³⁵ (consumido)		
Química de los desechos:		
Iones	Concentraciones en moles por litro	
Al.....	0,5	2,5
NO ₃	2,0	8,0
H.....	0,5	3,0
Na.....	0,1	0,2
F.....	2,0	3,0
Zr.....	0,3	0,6
SO ₄	0,3	0,6
Peso específico: de 1,1 a 1,4.		

recipientes y tuberías inoxidables, aislados por pesadas corazas o parapetos mediante reguladores a distancia.

En los varios procesos de separación y recuperación se emplean los métodos químicos acuosos corrientes. Los desechos líquidos

CUADRO No. 3.—Isótopos que tienen especial significación en lo que atañe a la eliminación de los desechos de la energía atómica procedentes de las operaciones químicas.

Radioisótopo	No. de masa	No. atómico	Vida media
Cesio.....	137	55	33,0 años
Estroncio.....	90	38	19,9 años
Estroncio.....	89	38	53 días
Yodo.....	131	53	8,1 días
Niobio.....	95	41	35 días
Cerio-praseodimio...	144	58-59	280 días
Itrio.....	91	39	61 días
Bario.....	140	56	12,8 días
Circonio.....	95	40	65 días

resultantes complican el problema de la eliminación. Se vienen haciendo esfuerzos por obtener métodos secos satisfactorios de separación y recuperación, utilizando una técnica piro-química o metalúrgica. De obtenerse resultados satisfactorios de estos esfuerzos, el problema de la eliminación de los desechos resultará más fácil.

Como consecuencia de su vida media, o de su radiotoxicidad, tienen especial significación, en lo que atañe a la eliminación de los desechos de la energía atómica procedentes de las operaciones químicas, los isótopos mencionados en el Cuadro No. 3.

ALMACENAMIENTO Y TRATAMIENTO DE LOS DESECHOS

Almacenamiento

Lo general hoy día es almacenar los desechos de elevada radiactividad en tanques subterráneos. Los desechos neutros se mantienen en tanques de acero dulce, y los ácidos en tanques de acero inoxidable. Con el objeto de aislarlos, algunos tanques están empotrados en concreto y recubiertos con tierra; otros se construyen en bóvedas de cemento subterráneas, sirviendo las bóvedas para prevenir los escapes de radiación que pudieran ocurrir. La capacidad de dichos tanques puede variar de decenas de miles de galones hasta millones de éstos. Debido al calor engendrado por el proceso de la desintegración radiactiva de los desechos, se hace necesario enfriar, mediante una red de cañerías por donde circula agua fría, los desechos en solución de elevado grado de radiactividad almacenados, a fin de regular la temperatura y evitar la corrosión. El período durante el cual es necesaria esta refrigeración puede llegar a quince años. El almacenaje en tanques subterráneos de los desechos resulta caro (de 0,30 a 2,00 dólares norteamericanos por galón), sin contar el gasto de refrigeración y de prueba de su intensidad radiactiva. No es una solución definitiva del problema de eliminar los desechos, porque la duración de un tanque (dígase de 50 a 75 años) es demasiado corta

en relación con el período durante el cual elementos radiactivos tales como el Cs¹³⁷ y el Sr⁹⁰ constituyen un peligro.

Tratamiento

Se ha llevado a cabo mucha investigación y trabajos de otra índole con miras a encontrar otras soluciones al problema de la eliminación, económica y segura, de los desechos de alto nivel radiactivo, distintas de la de los tanques de almacenamiento. Uno de los métodos de ataque consiste en eliminar los elementos radiactivos Cs¹³⁷ y Sr⁹⁰, y, a ser posible, otros de larga vida media y núcleos más peligrosos. Si se hiciese esto, los desechos que contuvieran contaminantes de vida media más corta podrían en muchos puntos ser descargados sin riesgos, en terrenos apropiados, bajo condiciones controladas. Hay la esperanza de que los gastos ocasionados por la remoción de dichos elementos sería, en parte, compensada por los ingresos derivados de su venta como fuente de materiales.

Otra manera de abordar el problema consiste en inmovilizar los desechos en una forma sólida, de la cual no se escapen por solución, filtrado o por otro medio. Los desechos del producto de la fisión asociados a las sales de nitrato de aluminio se pueden transformar en un óxido pulverizado por medio del calor, y en este proceso se puede recuperar ácido nítrico. Los desechos podrían recogerse en forma de sal fundida en un recipiente de acero, el cual se enfriaría hasta convertirlo en un bloque sólido del cual sólo podría escaparse una mínima fracción de material radiactivo. Otro método que promete consiste en mezclar los desechos con arcillas nativas y a continuación fundir la mezcla en un horno de cochura para formar una masa de cerámica a una temperatura de alrededor de 1.000°C. En tal forma no habría escapes y los desechos podrían ser, bien almacenados o bien enterrados. Un tercer sistema consistiría en la absorción de los desechos por una columna de arcilla montmorillonita (4). Esta arcilla fundida se expele a presión bajo la apariencia

de alambre de pequeño diámetro, y en esta forma se la coloca en la columna de absorción. La arcilla de esta forma de alambre ofrece buenas condiciones hidráulicas para verter la solución de los desechos en la columna. Más tarde la arcilla saturada se calienta hasta la temperatura de unos 800°C para que adquiera el estado de cerámica. El producto final del que la radiactividad no puede escaparse tiene la apariencia de tallarines chinos. Hay también posibilidad de fijar o inmovilizar los desechos radiactivos en vidrio y en medios de silicato de aluminio, que se calientan después. Por ser polivalente, la eliminación por varios tratamientos del Ru¹⁰⁶, cuya vida media es de un año, ofrece especiales problemas.

En el Laboratorio Nacional de Oak Ridge (5) se vienen haciendo investigaciones sobre evaluación de la posibilidad de colocar desechos líquidos de elevado grado de radiactividad en pozos perforados en arcillas naturales y en pizarras, dejando que el calor engendrado por la desintegración radiactiva de los desechos expela el agua acumulada en dichos pozos. Los desechos concentrados permanecerían en el lugar convertidos en una masa sólida de la cual la radiactividad podría no ser lixiviada, en cantidades apreciables.

Otros varios métodos de eliminación de desechos, en proceso de estudio, son: (1) descarga, para que alcancen inactividad definitiva, en disolución en lechos profundos de sal o en domos; (2) descarga con bombas impelentes después de haber sido tratados, a alta presión, en depósitos profundos (1.524–4.572 m.) de arena empapada en salmuera natural, y sin posibilidad de que contaminen agua potable u otros recursos naturales; (3) descarga en puntos escogidos del mar, donde el fondo marino está en proceso activo de ser recubierto por depósitos de cieno.

Pequeñas cantidades de desechos, de grado bajo o intermedio de radiactividad, procedentes de las plantas de la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos, fueron eliminados por este medio, o sea arrojándolos al mar (6). Por lo general se

envasan en recipientes de hormigón, recubiertos a su vez por tambores de acero, que se echan al fondo del mar más allá del zócalo continental, tanto del Atlántico como del Pacífico. Es necesario contar con más datos sobre el destino definitivo de estos desechos de alto nivel radiactivo arrojados al mar, y sobre su efecto sobre las cadenas biológicas de alimentos, antes de proseguir con este método de eliminación de los desechos radiactivos con garantías de seguridad. El costo de aislamiento y de transporte de estos desechos hasta el punto de destino son factores que se deben tener en cuenta también.

Caso de que se emplee el aire para la refrigeración de un reactor, es necesario filtrarlo antes a fin de eliminar las partículas que pueda contener, pues, si llegasen a adquirir radiactividad, irradiadas, contaminarían el efluente. Se cuenta con filtros de elevada eficiencia (7) para eliminar de los efluentes gaseosos las partículas radiactivas. Por lo general resulta más económico eliminar tales contaminantes mediante filtros colocados en las cercanías de la fuente o punto de procedencia, que tratar de hacerlo con una corriente de desechos de gran volumen. Hay filtros de lana de vidrio o de papel "kraft" y asbestos de diferentes tamaños. Cuando el volumen de aire que hay que tratar es muy grande se recurre a grandes filtros de cámaras de arena. Gases radiactivos tales como el yodo, el argón, el criptón y el xenón, que se hallan en la corriente de salida de los desechos de las plantas dedicadas a la obtención y separación del combustible nuclear, se pueden descargar en la atmósfera por las chimeneas fabriles si las condiciones son favorables a su disolución hasta que alcancen niveles de seguridad.

La altura de las chimeneas se debe determinar por un meteorólogo competente, basado en el estudio de las condiciones atmosféricas que prevalecen en la localidad. Si el agua de enfriamiento de un reactor se recircula, se acostumbra reducir continuamente la radiactividad de un pequeño porcentaje del flujo, con el fin de evitar la

acumulación de la misma. Esto se consigue por lo común mediante el método del intercambio de iones, para lo cual se utilizan resinas seleccionadas. Tratándose de un flujo único de refrigeración de agua, ésta se purifica hasta que alcanza el grado del agua potable o lo supera. Tras su salida del reactor, el agua refrigerante se retiene en tanques por varias horas generalmente, para dar tiempo a la disipación de la radiactividad hasta alcanzar un grado seguro. Este nivel se puede calcular de un modo aproximado si se conocen las características del refrigerador, el caudal del río o corriente natural a donde el agua va a parar una vez que sale del reactor, y la distancia aguas abajo a que se encuentran los usuarios del agua del río. La medición de la radiactividad del aire y de los ríos a donde van a parar los refrigerantes de los reactores es algo que debe hacerse de acuerdo con un estricto programa.

Es natural que, pese a las precauciones de rigor, se produzca, aunque con rara frecuencia, algún escape de productos de la fisión de un elemento combustible defectuoso de un reactor. Como consecuencia se producirá la contaminación de la corriente de refrigerante. Si este sistema refrigerador fuese de aire, debe contener filtros de elevada eficiencia para depurar el efluente durante tales percances, pues de otro modo puede ser necesario cerrar el reactor hasta que el elemento de combustible donde se produjo el escape se substituye y el sistema vuelve a la normalidad.

Cuando los productos de la fisión de un elemento de combustible contaminan la corriente de agua de refrigeración puede ser preciso verter el refrigerante y volver a cargar el sistema a expensas de un depósito de repuesto. Mediante una unidad de intercambio de iones el refrigerante contaminado se puede recuperar y almacenar. Si se cuenta con una instalación de intercambio de iones suficientemente grande, el sistema podría ser desactivado de una manera progresiva durante un período más o menos largo, sin necesidad de verter el refrigerante. Con el tiempo las resinas utilizadas en estas uni-

dades de intercambio de iones llegan a un alto grado de radiactividad. De aquí que sea lo corriente colocarlas detrás de una coraza aisladora. Cuando se gastan las resinas de la unidad del intercambio de iones se recomiendan dos soluciones: regeneración de dichas resinas mediante soluciones químicas apropiadas, en cuyo caso los productos de la fisión que se liberan tienen que ser eliminados como desechos de elevado grado de radiactividad; y substitución de la unidad por otra nueva. En este caso, es necesario contar con medios adecuados para el transporte y protección de la unidad altamente radiactiva hasta el lugar de eliminación. Su enterramiento intacto, en un lugar destinado a la eliminación de desechos de elevada radiactividad, es probablemente el método más satisfactorio de eliminar dichas unidades.

Es remota la posibilidad de que en un reactor bien planeado se produzca un grave accidente que tenga por consecuencia el desprendimiento de productos de la fisión y de combustible volatilizado desde el núcleo del reactor al exterior. Pero a pesar de las precauciones tomadas, si tal accidente llegase a ocurrir, los efectos podrían ser serios. Lo corriente ha sido en Estados Unidos, cuando el reactor está colocado relativamente cerca de centros urbanos, rodearlo de una coraza de acero capaz de resistir el impacto de una explosión local y de confinar cualesquiera elementos resultantes de la fisión que pudiesen quedar libres hasta que se pudiera emprender la tarea de eliminarlos. Tal precaución hace subir el costo del reactor de un 10 a un 15%. Ejemplo de tal coraza de acero es la esfera de 68,60 m. de diámetro (8), de planchas de acero de casi 2,5 cm. de espesor, que resguarda el reactor de prueba de submarinos establecido en West Milton, Nueva York.

LIMITES DE EXPOSICION A LA RADIATIVIDAD

Por suerte, como resultante de muchas investigaciones y estudios, comités nacionales e internacionales de consulta han podido

recomendar (9) límites de seguridad de la exposición de los seres humanos a la acción radiactiva de los varios isótopos contenidos en el aire y en el agua. Estos estándares constituyen medidas provisionales aplicables a los empleados de una industria que están bajo supervisión constante y bajo normas de exposición. Fueron establecidos a base de un acuerdo de puntos de vista y de juicios de expertos, y se consideran conservadores. Cuando se refieren a personas no dedicadas a la industria y a habitantes de las colectividades próximas a las plantas, se aplican estándares diez veces más conservadores.

Partiendo de los niveles de exposición a la radiación que se consideran seguros en el agua o en el aire, el ingeniero sanitario tiene que determinar y evaluar los factores de dilución o de concentración existentes, bajo diversas condiciones ambientales, entre el punto de descarga de los desechos radiactivos y los lugares de exposición posible de los seres humanos o de sus fuentes de alimento. Al hacerlo así hay que prestar la debida atención al factor tiempo, puesto que todos los materiales radiactivos se desintegran de acuerdo con leyes naturales. Este factor tiempo es importante en especial cuando se trata de radioisótopos de breve vida media, a causa de los cambios de actividad que pueden resultar en cortos períodos de tiempo. Por el contrario, en el caso de elementos de desecho de larga vida media, las variaciones de dicha actividad tienen menos importancia.

Por lo general un radioisótopo se considera peligroso durante un lapso de 8 a 10 vidas medias. Así, tratándose del Sr^{90} o del Cs^{137} , cuyas vidas medias respectivas son de 20 y 33 años, su riesgo se debe evaluar por un período de más de dos siglos. El lapso durante el cual deben hallarse bajo vigilancia tales radioisótopos a fin de evitar el peligro de sus efectos, es causa de que la responsabilidad de la eliminación de los desechos radiactivos sea tan importante, y da nuevo significado a la profunda y continua responsabilidad de los profesionales de ingeniería sanitaria.

SELECCION DEL EMPLAZAMIENTO DE LA PLANTA

Una de las consideraciones más importantes en relación con el reactor nuclear o de la planta química de preparación de su combustible, es su conveniente emplazamiento. Es imprescindible el contacto, desde los primeros pasos, entre la empresa constructora de la instalación y los funcionarios públicos. Un error sobre el punto de instalación podría constituir un grave inconveniente para la operación ulterior de la planta y requerir la construcción de costosas instalaciones imprevistas para el tratamiento y control de efluentes de desecho. Por otra parte, la selección de un emplazamiento apropiado debe tener en cuenta la posible expansión futura de las instalaciones sin que ello implique peligro para el público, y debe permitir sacar ventaja de factores de dilución natural, tales como condiciones atmosféricas favorables, caudal abundante de agua superficial y subterránea y capacidad de absorción radiactiva por parte del terreno.

Desde el punto de vista de la segura eliminación de los desechos radiactivos y de su efecto, inmediato y a largo plazo, sobre el medio ambiente, la adecuada selección del emplazamiento de una planta de energía nuclear requiere un alto grado de competencia técnica y de capacidad para trabajar en equipo. El ingeniero químico o nuclear encargado del diseño y operación debe estar preparado para suministrar datos en lo que atañe al tipo de los desechos, a su cantidad y a los lugares de descarga de las corrientes que los contienen—bien sea en estado sólido, líquido o gaseoso. Estos datos deben basarse en la estimación del rendimiento diario, así como en las circunstancias que se pueden producir en caso de un accidente serio de la planta. Aplicando tales datos a los factores de dilución o concentración resultantes de los estudios meteorológicos, geológicos o hidrológicos de la localidad se puede hacer una evaluación racional de los riesgos del medio ambiente en consonancia con las varias condiciones y emplazamientos.

Este es el procedimiento que se viene siguiendo en Estados Unidos (10), (11).

El emplazamiento, bien de un reactor o de una planta química, en una comarca en que se presentan frecuentes y duraderas inversiones atmosféricas no es algo de desear, pues en tales comarcas son difíciles la buena difusión y dilución de los efluentes gaseosos, y se requeriría compensarlas con costosas instalaciones para librar el aire de emanaciones dañinas. Y en caso de un serio accidente la inmovilización de gases del efluente y de partículas liberadas a la atmósfera podría crear serios riesgos para las personas y para las propiedades de la comarca afectada. Mucho mejor, en igualdad de las demás condiciones, sería el emplazamiento en un punto donde los vientos, de una velocidad de alrededor de 25 Km/h, son frecuentes y soplan en dirección opuesta a las ciudades, existentes ya o posibles en un futuro cercano.

Al considerar la localización de una planta de energía atómica sería prudente contar todo alrededor con una reserva de suficiente extensión que permitiese suficiente distancia entre las instalaciones anejas a la planta principal, así como entre ésta y el complejo industrial, colectividades y emplazamiento de nuevas plantas que, en el futuro, se puedan necesitar. Sería también prudente hacer planes por anticipado en relación con la construcción de viviendas para los empleados de la fábrica, pues con frecuencia, como consecuencia de la expansión de nuevas industrias, surgen imprevistas colectividades en sus inmediaciones. Constituiría un serio inconveniente para los administradores de la empresa que, como consecuencia del crecimiento de la población en la vecindad, surgieran regulaciones públicas incompatibles con el pleno funcionamiento de la planta de energía atómica.

La instalación tanto de un reactor como de una planta química no debe hacerse inmediatamente aguas arriba de una toma, ya existente o futura, de agua destinada al abastecimiento público, pues tanto los reactores nucleares como las plantas de productos radiactivos requieren por lo

general gran cantidad de agua de buena calidad para fines de refrigeración y para los procesos de obtención del combustible. Y a su vez este hecho demanda una planificación cuidadosa de los lugares destinados a la descarga de grandes cantidades de desechos industriales. La hidrología de la comarca debe ser objeto de cuidadosa atención por parte de los ingenieros encargados de la planificación. Por otra parte, se debe contar con el consejo de un geólogo en relación con la estructura de los cimientos, con la existencia de corrientes subterráneas de agua de abastecimiento, y de facilidades de almacenaje y de eliminación de desechos. Tanto los reactores como las plantas químicas pueden sufrir serios perjuicios y dejar libres altas dosis de radiactividad como consecuencia de un terremoto que afecte el punto en que están instalados.

Si se pretende eliminar o depositar desechos en tanques subterráneos por largos períodos, es conveniente contar con capas de arcilla entre el nivel de las capas freáticas y los estratos en cuyo seno se almacenan los desechos. Son muy convenientes los terrenos que tienen la capacidad de absorber y adsorber los materiales radiactivos, y estas características se deben determinar por pruebas de columna de muestras de profundidad cuidadosamente recogidas. Una profundidad de la capa freática bastante grande, como suele serlo en las regiones áridas, constituye una gran ventaja, en especial si los estratos subyacentes son un tanto permeables y tienen el poder de eliminar los componentes radiactivos de los desechos de bajo o intermedio nivel radiactivo.

Lugares de enterramiento

En las plantas de energía atómica se producen desechos sólidos en cantidad considerable, que presentan todos los grados de actividad radiactiva. Tales desechos pueden variar desde desperdicios ordinarios, objetos de vidrio, restos de animales muertos de los laboratorios de investigación, hasta voluminosos materiales de construcción y equipo procedente de la demolición de edificios e

instalaciones. Pueden contener también concentrados radiactivos de las plantas químicas, partículas y polvo de operaciones metalúrgicas y filtros de aire contaminados de radiactividad. Es factible el entierro de tales desechos en condiciones seguras.

La selección de un lugar apropiado para este enterramiento debe hacerse con la asesoría de un geólogo de experiencia. Por anticipado hay que probar la capacidad de los terrenos para absorber y retener la radiactividad, y la superficie del terreno escogido se debe demarcar y vallar bien para limitar el acceso al mismo. Este terreno de enterramiento constituye un lugar reservado y no se debe dedicar a otro fin por un largo período. Por razón de esta exclusividad debe haber un mínimo de estas reservas compatible con la economía del transporte. En la periferia de estos lugares debe haber pozos de prueba y se harán análisis periódicos del agua y del terreno para determinar el grado de desplazamiento de los desechos a contar del punto de su primitiva localización. Se debe llevar un inventario de estos puntos de enterramiento.

ADIESTRAMIENTO DE INGENIEROS SANITARIOS

A medida que se expande la industria de la energía atómica, los ingenieros sanitarios de una formación tradicional y de una experiencia de tipo general sobre los organismos reguladores y la industria de la eliminación de los desechos y de saneamiento del medio, irán reconociendo la necesidad de un adiestramiento especial en las ciencias nucleares. Este adiestramiento es imprescindible para una apreciación de los problemas de la industria y para estar en condiciones

de participar en su desenvolvimiento y comprender sus aspectos técnicos, su terminología y sus normas legales y de otro tipo, así como para darse cuenta de sus posibilidades y de sus objetivos. Se han hecho algunos progresos por parte de la profesión de ingeniería sanitaria para servir la industria, pero hay que ensanchar el alcance y los objetivos de estos esfuerzos. El Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos en su centro de ingeniería sanitaria "Robert A. Taft", de Cincinnati, Ohio, ha organizado y dirigido muchos cursos de salubridad radiológica. Y varias universidades estadounidenses que vienen colaborando con la Comisión de Energía Atómica según contratos de investigación y desenvolvimiento, vienen enseñando cursos de adiestramiento en las varias facetas de las ciencias nucleares, que están abiertos a los estudiantes de ingeniería sanitaria. La Sección de Ingeniería Sanitaria de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles cuenta con un comité sobre ingeniería sanitaria que está tratando de ensanchar el conocimiento y los contactos de los ingenieros sanitarios en lo que a la industria se refiere.

En conclusión, parece enteramente claro que la industria de la energía atómica está llamada a ocupar el puesto que le corresponde, al lado de otras grandes industrias, al servicio de la humanidad. A medida que avanza, sus efectos se harán sentir en el mundo entero. Los problemas planteados por la eliminación de los desechos radiactivos y tóxicos derivados de esta nueva industria son únicos y tienen consecuencias de gran duración y de profunda importancia. Estos problemas constituyen a la vez una coyuntura favorable y una prueba que la profesión de la ingeniería sanitaria tiene que afrontar.

REFERENCIAS

- (1) *Nuclear Reactor Data*. Rathcon Manufacturing Company, Waltham, Massachusetts, E. U. A.
- (2) *19th Semi-Annual Report of the U. S. Atomic Energy Commission*, U. S. Government Printing Office, Washington 25, D. C.
- (3) Wolman, Abel, y Gorman, Arthur E.: "*Management and Disposal of Radioactive Wastes*". International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, UN-310.
- (4) Hatch, L. P.; Regan, W. H., y Nanowits, B.: "*Processes for High Level Radioactive Wastes*", International Conference for Peaceful Uses of Atomic Energy, UN-553.
- (5) Struxness, E. G.; Morton, R. J., y Straub, C. P.: "*Disposal of High Level Radioactive Liquid Wastes in Terrestrial Pits*".
- (6) Joseph, Arnold B.: "*Report on Meeting on Ocean Disposal of Reactor Wastes*", The Johns Hopkins University, AEG. No. At-(30-1)-1477, marzo 15, 1955.
- (7) Little, A. D.: "*Development of High Temperatures—High Efficiency Air Filters*". Summary Report to AEG, agosto, 1953.
- (8) *General Electric Review*, General Electric Company, Schenectady, Nueva York, noviembre, 1955.
- (9) "*Maximum Permissible Amounts of Radioisotopes in the Human Body and Maximum Permissible Concentrations in Air and Water*". National Bureau of Standards Handbook No. 52, Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington 25, D. C., 1953, Manual.
- (10) "*Meteorology and Atomic Energy*", U. S. Weather Bureau, Superintendent of Documents, U. S. Government Printing Office, Washington 25, D. C., julio, 1955.
- (11) Theis, C. V.: "*Problems of Ground Disposal of Nuclear Wastes*", International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, UN-564.