

Los radisótopos y la tecnología de las radiaciones en la industria

Informe sobre algunas aplicaciones industriales menos conocidas pero de amplia utilización

por Jacques Guizerix, Vitomir Markovic y Peter Airey

El tratamiento industrial por irradiación se basa en el empleo de las radiaciones como fuente de energía para inducir determinados cambios químicos, físicos y biológicos. Por otra parte, las aplicaciones de los *isótopos* en la industria, ya sea como fuentes selladas o como trazadores, dependen de las mediciones de señales físicas que permiten observar las propiedades de interés.

Las aplicaciones son muy numerosas: por ejemplo, en las industrias papelera y siderúrgica se emplean miles de medidores nucleónicos con vistas a lograr la óptima calidad de los productos y la eficiencia de la producción mediante la vigilancia constante del peso del papel por unidad de superficie o el espesor del acero. Existen muchas decenas de miles de medidores de nivel que generalmente permiten realizar mediciones en condiciones difíciles, por ejemplo, en medios corrosivos, o adoptar soluciones sencillas, fiables y poco costosas que compiten ventajosamente con las que se logran con equipo no radiactivo. El ensayo no destructivo se realiza en todo el mundo, y la gammagrafía, que se aplica conjuntamente con otros métodos no nucleares, es un componente clásico de todos los laboratorios modernos especializados en este esfera.

Muchas de esas aplicaciones, en las que están presentes fuentes selladas de baja o de alta actividad —es decir, desde unos cuantos milicurios hasta varios curios— son bien conocidos por el público en general*. En este artículo se ofrece una panorámica del tratamiento por irradiación y de las aplicaciones de trazadores que quizás sean menos conocidos, aunque se emplean ampliamente en beneficio de la industria.

Aplicaciones industriales de la irradiación

En las aplicaciones industriales, los efectos de la irradiación se producen a ritmos comparables a los ritmos

de producción de otras técnicas industriales. Así pues, tanto la energía —para garantizar la adecuada penetración en los productos— como la potencia —para garantizar un volumen de producción adecuado— desempeñan un importante papel. Otros factores importantes para las aplicaciones industriales son la fiabilidad de la operación (por lo general, no menos del 90% de utilización) y el control, la eficiencia y la seguridad del proceso.

Varios tipos de fuentes de radiación cumplen todos estos requisitos. Cabe afirmar con certeza que actualmente la ingeniería y la tecnología de las fuentes de radiación pueden responder a casi cualquier exigencia de la industria. Las principales fuentes de radiación son el isótopo radiactivo cobalto 60 para la radiación gamma, y los aceleradores de haces electrónicos (HE) para electrones de alta energía, de 0,15 a 10 megaelectronvoltios (MeV).

Tecnología y fuentes de radiación gamma. El cobalto 60 ha predominado de manera casi exclusiva en este mercado, situación que probablemente persista ya que el cesio 137, otro isótopo que llegó a considerarse como posible sustituto, no existe en las cantidades necesarias para el volumen de la producción industrial. Aunque recientemente se instaló en los Estados Unidos un irradiador industrial de ese tipo, es poco probable que en el próximo decenio se pongan en funcionamiento muchos más.

La radiación gamma del cobalto 60 penetra profundamente en los materiales irradiados y es muy aconsejable para el tratamiento de productos voluminosos y empacados. Se emplea principalmente en la esterilización industrial de productos médicos desechables y, en menor grado, en la esterilización de medicamentos, especias y otros productos.

En todo el mundo se encuentran en explotación industrial cerca de 140 instalaciones (distribuidas en unos 40 países) para la esterilización por irradiación. La actividad total instalada es de alrededor de $3,10^{18}$ bequerelios (Bq), o sea, 80 megacurios (MCi). Una instalación industrial típica cargada con $3,7 \times 10^{16}$ Bq (1 MCi) tiene una capacidad equivalente a cerca de 15 kilovatios (kW) de potencia de radiación. Esa instalación puede esterilizar (a 2 Mrad) aproximadamente de 25 000 a

El Sr. Guizerix es jefe de la Sección de Química y Aplicaciones Industriales de la División de Ciencias Físicas y Químicas, de la que el señor Markovic es funcionario. El señor Airey es miembro de la División de Asistencia y Cooperación Técnicas del Organismo.

* El curio es una unidad que expresa la tasa de desintegración isotópica. Un curio equivale a 37×10^9 desintegraciones por segundo, o sea, 37 gigabequerelios (37 GBq).

30 000 metros cúbicos de materiales al año. Actualmente funcionan instalaciones con una actividad total instalada de hasta $2,2 \times 10^{17}$ Bq (6 MCi ó 90 kW).

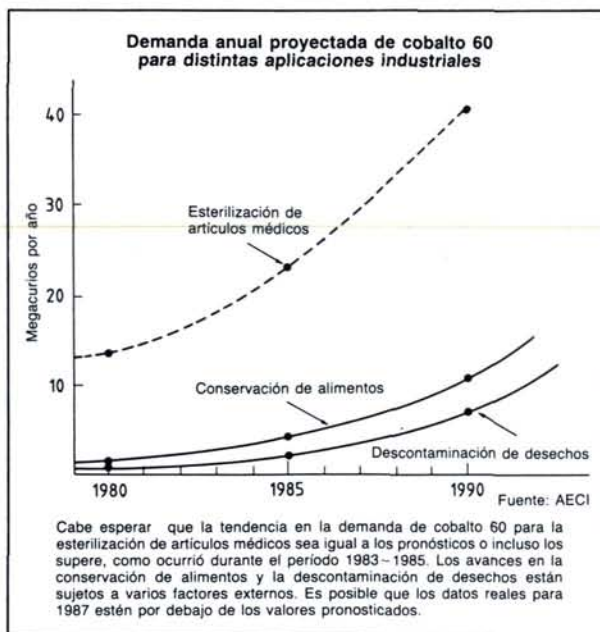
Entre otras aplicaciones están la irradiación de alimentos (varias instalaciones industriales y algunas unidades de demostración de menor tamaño), la desinfección de los lodos cloacales (un irradiador industrial en la República Federal de Alemania) y varias de tipo piloto; así como algunas otras aplicaciones en pequeña escala o especiales dedicadas, por ejemplo, a compuestos de maderaplástico, polimerización, injertos por irradiación para separadores de baterías, aplicaciones biomédicas, y vulcanización del látex de caucho.

Tecnología y fuentes de radiación de los HE. Las aplicaciones industriales de los haces de electrones comenzaron en los años cincuenta con la radioreticulación de películas de polietileno (para producir películas termoencogibles destinadas a envases) y el aislamiento de cables, y se han ampliado de manera sostenida. En la actualidad, se utilizan varios cientos de aceleradores de HE para diferentes aplicaciones industriales y se han desarrollado dos clases definidas de aceleradores y aplicaciones:

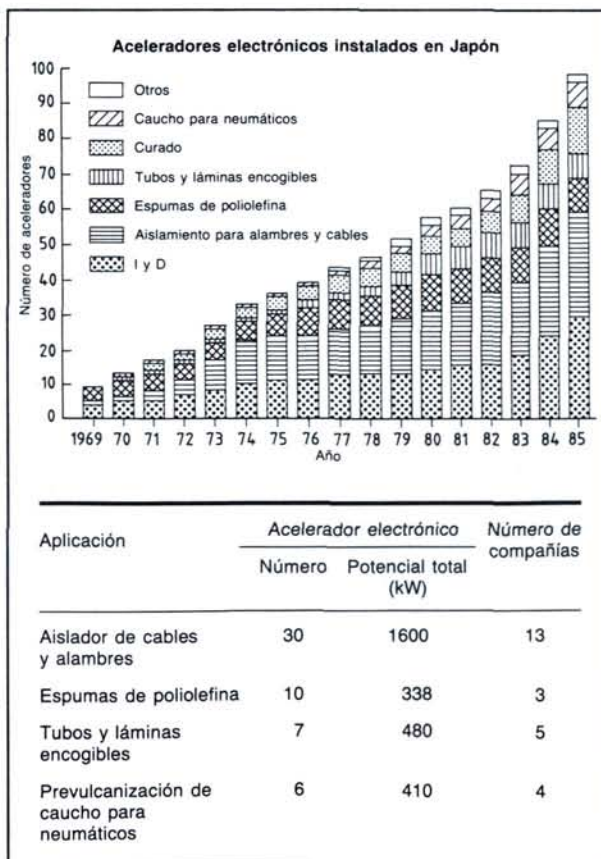
● **Acelerador de HE de baja energía.** Estos aceleradores, con una gama de energía de entre 0,15 y 0,5 MeV, están dotados de zonas totalmente blindadas para la manipulación de los productos; además, el blindaje contra las radiaciones es una parte integrante del acelerador. Su volumen es relativamente pequeño, por lo que no requieren de mucho espacio y pueden instalarse de manera sencilla y conveniente en cualquier zona de trabajo o en las líneas de producción existentes. La gama útil de electrones dentro de esta gama de energía es muy pequeña (menos de 1 milímetro) y las aplicaciones se limitan a la irradiación de las capas superficiales. Entre las aplicaciones típicas se encuentran la radioreticulación de películas plásticas finas, la radioreticulación del material de aislamiento de alambres finos, el curado de recubrimientos en papel, madera, plásticos, metal, etc.; el curado de recubrimientos con desprendimiento de silicio en papel y películas, el curado de tintas de offset, y el curado de materiales adhesivos para laminado.

La técnica de curado por irradiación sustituye a la técnica de rayos ultravioleta siempre que se empleen recubrimientos pigmentados o se precisen velocidades de producción muy altas. En muchas aplicaciones, tales como el curado del material adhesivo para laminado que se encuentra entre paneles de madera y papel metálico, conjuntamente con el curado de la capa superficial protectora, ningún otro método puede sustituir al de la irradiación. Existen máquinas de haces electrónicos de alta potencia, de 300 a 500 kW, con una gama de energía de hasta 0,3 MeV. Con los aceleradores comerciales se pueden obtener fácilmente capacidades de producción del orden de los 1000 metros por minuto (con una dosis absorbida de 10 kilogram). Estas máquinas también se han probado con buenos resultados en el tratamiento de gases de combustión para la conservación del medio ambiente. (Véase el artículo sobre este tema que figura en la presente edición del Boletín del OIEA, página 25.)

● **Aceleradores de HE en la gama de energía de 0,5 a 10 MeV.** En el mercado existen estas máquinas con una potencia nominal de hasta 200 kW aproximadamente.



Las zonas de irradiación están rodeadas de gruesos blindajes de hormigón de 1,5 a 2 metros. En la actualidad estas máquinas se utilizan en muchas de las principales industrias, incluidas la del plástico, la automotriz, la de artículos de caucho, la petroquímica y la de alambre y cables. Entre las principales aplicaciones se encuentran la radioreticulación de plásticos (aislamientos para



cables y alambres, materiales termoencogibles, tubos de polietileno para agua caliente, espuma, etc.); la radiovulcanización del caucho y la modificación de masas de polímeros (degradación controlada).

La gama de energía de la mayoría de los aceleradores que se utilizan en estas aplicaciones es de entre 0,5 y 4 MeV. Algunos se emplean en la irradiación de alimentos (desinfestación de cereales en la URSS y descontaminación de forraje en Israel). Hasta el momento la utilización de los aceleradores en la descontaminación de lodos cloacales no ha sido satisfactoria si bien todavía no se ha llegado a una conclusión definitiva. Al parecer, las máquinas con una gama de energía entre 600 y 800 kV tienen grandes posibilidades de empleo en la esfera del medio ambiente, concretamente en el tratamiento de los gases de combustión.

En el Reino Unido, los Estados Unidos, Francia, Dinamarca y Polonia se utilizan comercialmente varios aceleradores lineales de haces electrónicos (LINAC) para esterilizar artículos médicos. No obstante, debido principalmente a su elevado coste y bajos niveles de

energía, su empleo no está tan generalizado como el de las máquinas de corriente continua de baja energía. El sostenido aumento de las aplicaciones de HE queda bien ilustrado en el caso del Japón, como se ve en el cuadro.

Tratamiento por irradiación en los países en desarrollo

La transferencia de la tecnología de las radiaciones a los países en desarrollo tiene lugar con mayor o menor éxito, en dependencia del tipo de tecnología, la infraestructura del país y muchos otros factores externos. La radioesterilización es sin duda el proceso que más se ha desarrollado en el plano comercial. Unos 20 países tienen en explotación actualmente alrededor de 25 instalaciones industriales que utilizan los rayos gamma de cobalto 60 para la esterilización de artículos médicos.

Las otras esferas de aplicaciones comerciales no están, por lo general, muy desarrolladas y son muy pocas las instalaciones industriales que están en explotación.

El Organismo sigue apoyando decididamente el fomento y la transferencia de la tecnología de las radiaciones mediante diversas actividades, entre las que se destaca por su eficacia la de los proyectos regionales. Ejemplo de ello es el proyecto para Asia y el Pacífico auspiciado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Organismo en el marco del Acuerdo de Cooperación Regional (ACR). Unas 140 personas han recibido adiestramiento en distintos aspectos de la tecnología de las radiaciones durante los últimos cinco años. Sólo en 1986 se celebraron ocho seminarios nacionales de dirección ejecutiva sobre radioesterilización y curado por irradiación, y para el período 1987-1991 se prevé la celebración de otros seminarios y cursos de capacitación. Como resultado de estas actividades, se han determinado y comenzado varios proyectos industriales en la región.

Aplicaciones de los trazadores industriales

Al resolver problemas relacionados con el transporte de materiales, los ingenieros suelen necesitar mediciones absolutas del "flujo a granel". Debido a que, por lo general, esa información no se puede obtener directamente, lo que hacen es añadir un flujo auxiliar, conocido con exactitud, de una sustancia que pueda medirse, es decir, un "trazador". No obstante, es preciso establecer primeramente la relación entre la información obtenida del flujo del trazador y el flujo a granel deseado.

La información que proporciona el trazador se interpreta mediante una señal que puede ser eléctrica, por ejemplo, la salida de un instrumento detector, o las variaciones de oscuridad de una emulsión nuclear, como sucede en la autorradiografía. (Véase en el diagrama el tipo de información que suministran los trazadores.)

Cabe señalar como ejemplo el problema de la detección de fugas en un intercambiador de calor, que consiste en el flujo de líquidos en dos circuitos. Puede plantearse una pregunta sencilla: ¿Existe una conexión entre los dos flujos? La respuesta es sí o no, y la presencia de una fuga queda demostrada cuando el trazador que se inyecta en el primer circuito se detecta en el segundo.

En las aplicaciones más avanzadas de los trazadores se utiliza el análisis de sistemas, método basado en la

Tipo de información que proporcionan los trazadores			
Tipo "Sí - No"		prueba la realidad de los lazos de unión entre dos poblaciones	
Tipo analógico		establece una relación cuantitativa entre dos poblaciones	
Preguntas	Señal	Función de tiempo	Ejemplos
¿Conexión?		no	● detección de fugas
¿Conexión? ¿dónde?		no	● autorradiografía
¿Conexión? ¿dónde? ¿cuánto?		no	● autorradiografía + densitometría
¿Cuánto?		no	Método de dilución ● pesaje del mercurio en células electrolíticas
¿Cuánto? ¿cuándo?		f(t)	● medición del caudal
¿Cuánto? ¿cuándo?		f(t)	Análisis de Sistemas ● función de flujo de masa
		h(t)	● distribución de tiempo de tránsito
¿Conexión? ¿dónde? ¿cuánto? ¿cuándo?		f(t x y)	● cartografía de la dispersión de contaminantes

explotación de la respuesta de un sistema a un estímulo que se le aplica a la entrada. Cabe entonces imaginar un flujo constante de agua en un mezclador de una planta química, en el cual la concentración de una especie dada varía a la entrada. Se inyecta un impulso de trazador de esta especie a la entrada del sistema y se mide la concentración a la salida. Esta función precisa la distribución del tiempo de tránsito (DTT) de este material y constituye la mejor "muestra de traspaso en masa" que puede obtenerse. Se puede emplear para estimar la variación de la concentración a la salida del sistema siempre que se conozca la variación de la concentración a la entrada.

El mejor método para obtener la DTT de un sistema es la técnica de los trazadores. Se comprende fácilmente la importancia de esta función, que permite incorporar el tiempo de permanencia y la dispersión al análisis de los problemas. Se puede optar por explotar estos fenómenos en la industria, por ejemplo, en los mezcladores, o minimizarlos, por ejemplo, cuando por un oleoducto se transportan en serie muchos tipos de combustibles.

La técnica de trazadores radiactivos presenta ventajas. En primer lugar, es posible medir su concentración con detectores situados fuera de las tuberías o vasijas. En segundo lugar, las mediciones realizadas en las muestras obtenidas de un flujo son sencillas e independientes de la matriz de las muestras. Tercero, el trazador radiactivo es único para el marcado de elementos concretos o especies químicas. Por ejemplo, en los estudios de corrosión térmica en aleaciones de acero, el azufre puede marcarse con azufre 32 y detectarse en la frontera reticular mediante la autorradiografía. Desde el punto de vista de los costos, la información que se obtiene mediante los trazadores radiactivos es, por lo general, muy superior a la obtenida con trazadores no radiactivos.

Las autoridades nacionales competentes regulan las aplicaciones de los trazadores radiactivos. Los bajísimos niveles de concentración y el corto período de los trazadores de uso común permiten por lo general utilizar niveles muy inferiores al máximo que prescriben las regulaciones.

Situación actual de las aplicaciones de trazadores industriales

En estos momentos el OIEA está elaborando una guía que demuestra la utilidad de los trazadores para la mayoría de las industrias. (Véase el recuadro). En la elaboración de esta guía participan 20 autores de 11 países, entre ellos, Checoslovaquia, los Estados Unidos de América, Finlandia, Francia, la India, Israel, los Países Bajos, Polonia, el Reino Unido, la República Democrática Alemana y la República Federal de Alemania. Además, otros países están utilizando de manera significativa las aplicaciones de trazadores. En la guía se hace patente que prácticamente todas las industrias pueden beneficiarse de las aplicaciones de trazadores. El 68% del contenido del libro trata sobre la ingeniería química, en tanto que el resto se refiere principalmente a la metalurgia, la exploración de minerales y la ingeniería ambiental y sanitaria.

Las aplicaciones de trazadores se realizan en los laboratorios, por ejemplo, en estudios relacionados con los

mecanismos cinéticos y de reacción química, y también en las plantas para realizar investigaciones de emergencia (detección de fugas y obstrucción de tuberías); determinar las características de los circuitos (caudales, volumen muerto, relación de ramificación y derivaciones); y para optimizar y controlar los procesos. Son utilizadas por los laboratorios en sus investigaciones, o por instituciones públicas y privadas que ofrecen servicios con carácter comercial. Entre las organizaciones comerciales se encuentran los *Physics and Radioisotope Services*, ICI, del Reino Unido; la Comisión de la Energía Atómica, de Francia; una compañía privada de la India, que se dedica sólo a realizar inventarios de mercurio, y otra en Finlandia especializada en mediciones de caudales. El éxito alcanzado por esas empresas, sujetas a las leyes de la oferta y la demanda, es buena muestra de los beneficios económicos obtenibles gracias a las aplicaciones de los trazadores.

La utilización de los trazadores industriales en los países en desarrollo es muy heterogénea. Algunos de ellos han alcanzado un desarrollo en esta esfera similar al de los países más avanzados, como Chile, la India y Polonia, y otros, al igual que algunos países industrializados, aún están sujetos a la ley por la cual siempre se precisa un lapso de 15 a 20 años para aplicar una nueva tecnología. También hay algunas demoras que obedecen a razones económicas y a la falta de información. No obstante, se ha avanzado mucho. (Véase en el cuadro adjunto información sobre las aplicaciones en Asia y el Pacífico.)

Guía sobre la aplicación de radisótopos como trazadores en la industria

El Organismo está elaborando en estos momentos una guía general sobre las aplicaciones de radisótopos como trazadores en la industria, en la cual se abarcan temas que van desde la metodología de los trazadores hasta los estudios de casos en determinadas industrias. Entre los principales títulos y secciones figuran los siguientes:

- Concepto de los trazadores
- Tecnología general de los trazadores
- Metodología de los trazadores (los trazadores y el análisis de sistemas; modelación de flujos básicos; información obtenida mediante los trazadores para la modelación de sistemas mayores; información obtenida mediante los trazadores para solucionar problemas complejos; procesos con flujos y volúmenes variables)
- Aplicaciones generales (empleo de modelos de flujo; valor de los parámetros; caudales; balance másico; características y uso de los trazadores sólidos; eficacia de mezclas; emergencias; difusión, permeación; distribución de tamaño de las partículas; fenómenos de corrosión y superficie; uso de isótopos en estudios sobre la teoría de los mecanismos y la cinética; flujos bifásicos; control de procesos; parámetros cinéticos)
- Estudios de casos (industria química; industria papelera y de la pulpa de celulosa; industria del petróleo; industria del cemento; industria metalúrgica; industria energética; industria electrónica; industria mecánica; ingeniería ambiental y sanitaria; industria de los minerales)
- Tendencias actuales del desarrollo y las aplicaciones.

Para obtener más información acerca de la guía, diríjase a la Sección de Química y Aplicaciones Industriales del OIEA.

Algunas aplicaciones industriales de los radisótopos en Asia y el Pacífico

Industria	Aplicación	Isótopo	País	Observaciones
Petróleo	perfiles de toma de agua en pozos de inyección de agua	bario 131 (microesferas)	China	Se comprobaron 3095 pozos hasta mediados de 1985; estimación para 1990: 10 000
Petróleo	prueba de fuga en el oleoducto de petróleo crudo de Viramgam-Koyali de 140 kilómetros	bromo 82	India	5 curios/kilómetro; tras 24 horas de presión y limpieza por descarga de agua, se detectó una fuga con una precisión de un metro
Petróleo	prueba de fuga		Sri Lanka	
Petróleo	fugas en pozos subterráneos	antimonio 124 (trifenilantimonio) yodo 131, yodo benceno	China	5 ensayos de terreno desde 1968
Gas natural	distribución de agentes que retardan la corrosión en los oleoductos	agua con tritio	China	
Petroquímica	localización de obstrucciones en oleoductos	Cobalto 60	India	fuelle de curio de 3 metros para localizar obstrucciones en la tubería que conduce la nafta desde las refinerías de Trombay hasta el complejo NOCIL, Nuevo Bombay
Ingeniería mecánica	estudios de medición de desgaste en motores de combustión interna	activación mediante bombardeo neutrónico (activación de capas delgadas)	India	programa amplio que incluye el desgaste de los cojinetes de los aros del pistón, equipo de inyección de combustible, válvulas
Ingeniería mecánica	medición del consumo de aceite		India	se estudió el efecto de los índices; de carga y velocidad, freno y caballos de fuerza
Ingeniería mecánica	temperatura de trabajo más alta y distribución de la temperatura de piezas móviles	criptón 85 (implantación)	China	
Generación de energía	dinámica de la migración de las aguas reinyectadas (geotérmicas)		Filipinas	
Generación de energía	medición de la eficiencia de las turbinas	bromo 82, agua con tritio	India	caudal mediante disolución de trazadores con otras mediciones para obtener \pm un 1% de exactitud en la central hidráulica cercana a Bombay
Generación de energía	prueba de arrastre en el generador de vapor de una central nuclear	sodio 24	República de Corea	
Hierro y acero	efecto del revestimiento de la cuchara en la calidad del acero	calcio 45	China	se estudió la inclusión de productos derivados de la erosión del revestimiento de la cuchara en el acero; estimación del ahorro de material de revestimiento en 1,3 millones de yuan
Hierro y acero	efecto del calcio en la obstrucción de toberas durante la fundición de acero calmado con aluminio	calcio 45	China	estimación del ahorro anual en 52 000 yuan
Hierro y acero	corrosión por el calor de algunas aleaciones (aleaciones de hierro con base de níquel, aleaciones con base de níquel que contienen niobio)	azufre 35 (sulfato de sodio)	China	
Hierro y acero	determinación del desgaste de los revestimientos refractarios para altos hornos; investigación de las fuentes de inclusiones refractarias; determinación de arrastre de escoria en los metales fundidos		India	cinco grandes plantas de acero emplearon trazadores radiactivos: Jamshedpur (TISCO); Rourkela; Durgapur; Bhilai y Bokaro (SAIL)
Ingeniería costera	estudios de las arenas y sedimentos frente a las costas para desarrollo portuario y canales de navegación	iridio 192 (vidrio)	Indonesia	amplias aplicaciones
Ingeniería costera	movimiento del cieno para crear estrategias de dragado y ayudar al diseño de canales de navegación	escandio 46, oro 198 (arena)	India	entre los ejemplos se incluyen los estudios realizados en los puertos de Chochin y Marmugao
Ingeniería costera	estudios del movimiento de las arenas	cobalto 60 (vidrio)	República de Corea	estudios realizados en los puertos de Mukho, San Cheong y en la Bahía de Young II
Industria química	inventario de mercurio en células electrolíticas	mercurio 197	India	se presta como servicio comercial
Industria química	inventario de mercurio en células electrolíticas	mercurio 197	China	
Industria química	determinación de una gama de parámetros de procesos y de características operacionales de las plantas		India	entre los ejemplos figuran la distribución del tiempo de permanencia; dilución; caudal en la Century Rayon
Industria química	características de mezcla de un reactor de urea	dióxido de carbono 14	República de Corea	Planta de fertilizantes Chung Ju
Ingeniería de recursos hídricos	cartografía del contorno de filtración en el revestimiento de la presa Pedu	oro 198 agua con tritio	Malasia	se determinaron las principales zonas de filtración y líneas de tránsito
Ingeniería de recursos hídricos	localización de las principales zonas de filtración del embalse Kihung	sodio 24	República de Corea	
Ingeniería de recursos hídricos	medición del caudal en el sistema de alcantarillado		Filipinas	
Ingeniería de recursos hídricos	mediciones de la descarga en ríos y canales de riego	tecnecio 99 m	Malasia	trabajo realizado en los ríos Langat Semeniyh y Lui por encargo del departamento de riego y drenaje, y en los canales, por encargo de Kemulen Agriculture Development Authority (KADA), Kelantan
Electrónica	fugas en semiconductores	criptón 85	China	
Electrónica	fugas en semiconductores	criptón 85	Tailandia	

En el cuadro se estudian algunas aplicaciones industriales de los radisótopos en los Estados Miembros en desarrollo del OIEA que participan en el programa de cooperación regional en Asia y el Pacífico (Acuerdo de Cooperación Regional). El estudio no es exhaustivo y excluye a Australia y el Japón, dos países donantes del programa. Entre las aplicaciones que se excluyen se encuentran la utilización de "fuentes cerradas" como, por ejemplo, la radiografía, los medidores nucleares y la diagráfia de pozos de sondeo.