El transporte de materiales radiactivos en bultos del tipo A, exentos y de baja actividad específica

por M. White

Las encuestas acerca del transporte de materiales radiactivos y otros informes sobre el particular indican que la mayoría de los envíos se hacen en bultos del Tipo A, exentos y de baja actividad específica, tal como se definen en el Reglamento del OIEA para el transporte de dichos materiales (Refs. [1]* y [2]. Por ejemplo, los datos recogidos en los Estados Unidos en 1975 (Ref. [3]) muestran que, de un total cercano a 2 500 000 de bultos transportados durante ese año, aproximadamente 1 200 000 (48%) eran del Tipo A, 700 000 (28%) eran exentos y 310 000 (12%) eran de baja actividad específica (BAE). Es lógica esta distribución si se tienen en cuenta las formas de empleo de los materiales radiactivos en la industria, la investigación, la medicina, los productos de consumo y la generación de electricidad. Algunos de los radionucleidos utilizados más corrientemente se enumeran en el Cuadro 1; la mayoría de los materiales de baja actividad específica transportados consisten en concentrados físicos y químicos de uranio natural, por ejemplo la "torta amarilla" (un diuranato), el hexafluoruro de uranio y el combustible nuclear nuevo, así como en desechos de baja radiactividad (objetos y materiales contaminados por pequeñas cantidades de radionucleidos diversos). Además, muchos otros nucleidos se utilizan para los fines mencionados en el Cuadro 1 y otras aplicaciones (Ref. [4]).

En el Cuadro 2 se indican las cantidades máximas de estos nucleidos admisibles en bultos del Tipo A y exentos. En muchos casos en que los radionucleidos se utilizan directamente, por ejemplo en radiofármacos y compuestos trazadores, los materiales se transportan a granel, como sucede con los generadores de tecnecio-99m, de los cuales se extraen después las diferentes dosis que resulten necesarias.

BULTOS DEL TIPO A

Los bultos del Tipo A constituyen un medio para el transporte de cantidades intermedias de materiales radiactivos (así como los bultos exentos sirven para el envío de cantidades pequeñas y los bultos del Tipo B para el transporte de cantidades grandes) con costes moderados, pero con un alto grado de seguridad. Las características de esta clase de bultos, así como las disposiciones del reglamento referentes a la misma, tienen sus orígenes en las prácticas y reglas establecidas en los últimos años cuarenta y en los cincuenta, si bien han evolucionado notablemente desde entonces, tanto desde el punto de vista práctico como teórico (Ref. [5]). Las figuras 1 y 2 muestran embalajes típicos usados actualmente, provistos de sistemas de contención (receptáculos y absorbente), blindaje, elementos separadores y contenedor externo; en las Refs. [6], [7], [8] y [9] se describen otras formas corrientes.

* Denominado en adelante, en este artículo simplemente "el reglamento".

El Sr. White es el Jefe de la Sección de Transporte de la Junta de Energía Atómica, Ottawa (Canadá).

Cuadro 1. Algunos de los radionucleidos de uso más corriente

Radionucleido*	Empleo/Finalidad	Cantidades empleadas
Americio-241	Detectores de humo	• hasta 5 μCi en los modelos de uso doméstico 15 + μCi en los aparatos de uso comercial/industrial
(con berilio)	Indicadores de humedad-densidad	• del orden de 50 mCi
	Sondeos en pozos de petróleo y de gas	• hasta 15 Ci
Oro-198**	Investigación/trazador	• hasta varios Ci, según se trate de trabajos de laboratorio o de estudios sobre el terreno
Carbono-14**	Investigación/trazador	• del orden del μCi
Cobalto-57, 58, 60**	Medicina/diagnóstico	• del orden de 1 μCi por dosis
Cromo-51**	Medicina/diagnóstico	• del orden de 50 μCi por dosis
Cesio-137	Indicadores de humedad-densidad	• hasta decenas de mCi
	Medicina/terapéutica	• hasta unos 200 mCi por tratamiento
	Sondeos en pozos de petróleo y de gas	• hasta 1—2 Ci
	Indicadores de densidad y de nivel	• hasta 5 Ci
Galio-67**	Medicina/diagnóstico	• del orden de 1,5 mCi por dosis
Tritio	Aparatos luminiscentes	• hasta 200 mCi en relojes • hasta 25 Ci en letreros indicadores de "salida" y similares
Tritio**	Investigación/trazador	• del orden del μCi
	Pozos de petróleo y de gas/estudios mediante trazadores	• hasta decenas de Ci
Yodo-125**	Medicina ensayos *in vitro*	• del orden del μCi
	Investigación trazador	• del orden del μCi
Yodo-131**	Medicina/diagnóstico	• hasta unos 50 μCi por dosis
	Medicina/terapéutica	• hasta 100 mCi por dosis
Iridio-192**	Sondeos en pozos de petróleo y de gas	• del orden del μCi
Criptón-85	Indicadores de espesor	• hasta 1 Ci
Neodimio-147**	Investigación/trazador	• hasta varios Ci, según se trate de trabajos de laboratorio o de estudios sobre el terreno
Polonio-210	Eliminadores de electricidad estática	• hasta unos 100 mCi en aparatos de uso industrial
Escandio-46**	Investigación/trazador	• hasta varios Ci, según se trate de trabajos de laboratorio o de estudios sobre el terreno
Estroncio-90	Indicadores de espesor	• hasta 25 mCi
Tecnecio-^{99m}**	Medicina/diagnóstico	• hasta 20 mCi por dosis
Talio-201	Medicina/diagnóstico	• del orden de 1,5 mCi por dosis

* En fuentes selladas, salvo los señalados con dos asteriscos.

Como ponen de manifiesto estos ejemplos y sucede en general, los bultos del Tipo A se componen de elementos básicamente ligeros y de escasa resistencia. En consecuencia, es verosímil que resulten dañados en caso de accidente. Al elaborar el reglamento se ha tenido en cuenta esta posibilidad, que se refleja en los límites fijados al contenido de los bultos. Estos límites son consecuencia de las premisas admitidas, a saber, que en un accidente de "mediana magnitud" (Ref. [10]):

i) resulta completamente destruido el blindaje del bulto,

ii) puede escapar del sistema de contención hasta una milésima parte (10^{-3}) de los materiales radiactivos,

(Se admite que pueden ocurrir escapes mayores, pero tales escapes serían causados por accidentes más graves que el accidente de "mediana magnitud" supuesto; ahora bien, la probabilidad de tales accidentes se consideró tan pequeña, que no es necesario tenerlos en cuenta. Hasta la fecha, la experiencia ha justificado este criterio.)

iii) la dosis de radiación externa recibida por cualquier persona como consecuencia de la destrucción del blindaje no ha de exceder de tres rem, suponiendo que la persona permanezca hasta tres horas a una distancia de tres metros de la fuente.

(En otros términos, en el caso de un radionucleido emisor gamma la intensidad máxima de radiación admisible a un metro de distancia de la fuente descubierta es de nueve rem por hora. Los criterios análogos para los emisores alfa, beta, de neutrones y de rayos X, así como para los radionucleidos que emiten diversos tipos de radiación son ligeramente diferentes. Véase la Ref. [10].

iv) la cantidad de material radiactivo introducida en el cuerpo de una persona como consecuencia de la pérdida de contención no ha de exceder de la mitad de la absorción anual máxima admisible para los trabajadores expuestos profesionalmente a las radiaciones (equivalente a una dosis máxima de radiación de tres rem cuando el órgano crítico* es todo el cuerpo, las gónadas o la médula ósea roja); se considera que esto representa, a lo sumo, una milésima parte (10^{-3}) de los materiales escapados.

(En otros términos, en el cuerpo de una persona puede entrar, como máximo, hasta una millonésima parte (10^{-6}) del contenido de un bulto, como consecuencia de la pérdida de la contención de un material en forma susceptible de escape o dispersión, es decir, en forma no especial en caso de accidente de mediana magnitud.)

La actividad calculada partiendo de las premisas i) y iii) se denomina el límite A_1; por definición, este límite es solo aplicable a los materiales en forma especial. La cifra deducida de las premisas ii) y iv) para los materiales en forma no especial se llama el valor A_3; para la mayoría de los radionucleidos este valor es superior al límite A_1. Se considera que las premisas i) y iii) son superiores a las ii) y iv) (porque, evidentemente, proporcionan un margen adicional de seguridad); en consecuencia, la actividad máxima de los materiales en forma no especial que se pueden transportar en un bulto del tipo A, llamada el límite A_2, se restringe al menor de los valores A_1 y A_3. De todos modos, ambos límites están sujetos a un máximo arbitrario general de 1000 curios.

Aunque se da por supuesto que los bultos de esta categoría no permanecerán intactos en caso de accidente, han de ser capaces de resistir, sin ninguna pérdida o dispersión del contenido radiactivo y sin ningún aumento del nivel máximo de radiación en la superficie externa del embalaje, lo que el reglamento denomina "condiciones normales de transporte". Estas condiciones comprenden los factores ambientales, las fuerzas externas y las diferentes adversidades que puede sufrir una expedición, tales como exposición a la lluvia, caídas, golpes recibidos de objetos largos y agudos o soportar el peso de otros bultos apilados encima. Para garantizar una resistencia suficiente en estos aspectos, el reglamento prescribe que al diseñar los embalajes se tengan en cuenta las variaciones de la temperatura y la presión (respectivamente de -40 a $+70°C$ y hasta una presión nominal de 0,25 atmósferas), así como los esfuerzos producidos durante las operaciones de elevación (inclusive las

* Nota: las recomendaciones y conceptos contenidos en el documento CIPR-26 todavía no se han incorporado al reglamento.

Cuadro 2. Cantidades máximas de ciertos radionucleidos admisibles en todos los bultos del Tipo A y exentos,* en curios

	Bultos del Tipo A		Bultos exentos		
Radionucleido	FE	FNE	FE**	FNE**	Estado líquido
Americio-241	8	0,008	0,008	8×10^{-6}	8×10^{-7}
Oro-198	40	40	0,04	0,04	0.004
Carbono-14	1000	100	1	0,1	0,01
Cobalto-57	90	90	0,09	0,09	0,009
Cobalto-58	20	20	0,02	0,02	0,002
Cobalto-60	7	7	0,007	0,007	7×10^{-4}
Cromo-51	600	600	0,6	0,6	0,06
Cesio-137	30	20	0,03	0,02	0,002
Galio-67	100	100	0,1	0,1	0,01
Tritio #	1000/20	1000/20		véase la nota	
Yodo-125	1000	70	1	0,07	0,007
Yodo-131	40	10	0,04	0,01	0,001
Iridio-192	20	20	0,02	0,02	0,002
Criptón-85 +	20/0,6	20/0,6	$0,2/6 \times 10^{-4}$	$0,02/6 \times 10^{-4}$	—
Neodimio-147	100	100	0,1	0,1	0,01
Polonio-210	200	0,2	0,2	2×10^{-4}	2×10^{-5}
Escandio-46	8	8	0,008	0,008	8×10^{-4}
Estroncio-90	10	0,4	0,01	4×10^{-4}	4×10^{-5}
Tecnecio-^{99m} § Molibdeno-99)	100 (100)	100 (100)	0,1 (0,1)	0,1 (0,1)	0,01 (0,01)
Talio-201	200	200	0,2	0,2	0,02

(FE significa materiales en "forma especial", tal como se definen en el reglamento (Ref. [1]); FNE significa materiales en forma no especial).

* Cifras tomadas del Cuadro VII del regalmento (Ref. [1]).

** Si el material radiactivo va incorporado a un instrumento, reloj o aparato similar, estos límites son 10 veces mayores por artículo y cada bulto puede contener hasta 100 de esos artículos.

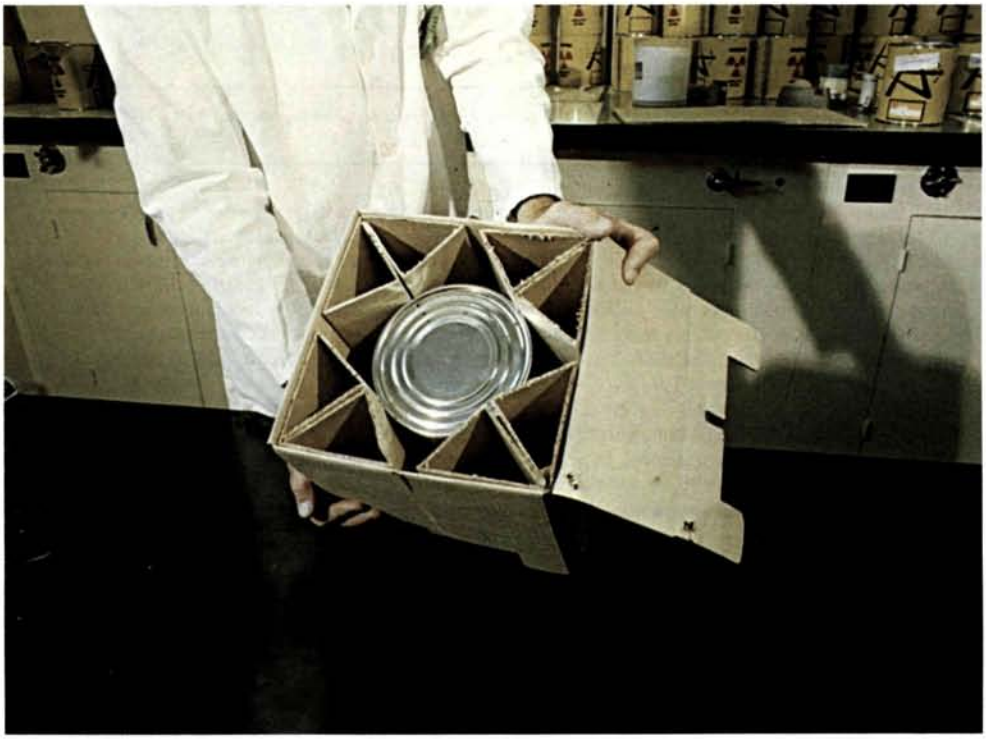
\# El límite superior se refiere al tritio en fase gaseosa (sin comprimir o comprimido), en pintura luminosa, en agua tritiada o absorbido en un portador sólido; el límite inferior se refiere al tritio en otras formas. Los bultos exentos pueden contener hasta 20 Ci de tritio en fase gaseosa, en pintura luminosa o absorbido en un portador sólido; hasta 1000 Ci en el caso de agua tritiada con concentración inferior a 0,1 Ci/l; hasta 100 Ci para concentraciones de 0,1 a 1,0 Ci/l; y hasta 1 Ci para concentraciones superiores a 1,0 Ci/l.

\+ Estos dos casos se refieren respectivamente al gas en estado no comprimido (presión atmosférica) y comprimido (presión mayor que la atmosférica).

§ El tecnecio-99m se transporta como tal y también en forma de generador de tecnecio que contiene principalmente molibdeno-99, el nucleido padre.

elevaciones bruscas) y los efectos de las vibraciones y/o aceleraciones; además prescribe que los bultos satisfagan ciertas normas de comportamiento. Estos últimos requisitos se estipulan en forma de ensayos: el ensayo de aspersión con agua; el ensayo de caída libre (sobre un blanco duro e indeformable); el ensayo de penetración (en el que se deja caer sobre el bulto una barra pesada de poco diámetro), y el ensayo de compresión (para simular el apilamiento). Para los bultos que contengan materiales líquidos o gaseosos se prescriben,

Figuras 1a, ab. Componentes y montaje de un bulto del Tipo A.



Figuras 2a, 2b. Componentes y montage de un bulto del Tipo A de diseño diferente.

en los ensayos de caída libre y de penetración, alturas mayores que para los materiales sólidos, a fin de tener en cuenta y compensar las diferencias en las propiedades reológicas y la probabilidad consiguiente de que escape una mayor parte del contenido en el caso de un fluido. (El efecto global de estos aumentos de la altura es reducir la probabilidad de que el bulto resulte dañado durante las operaciones normales de transporte.)

Los bultos del Tipo A deben cumplir igualmente otros requisitos en lo que respecta al tamaño mínimo (para que no se puedan meter en un bolsillo y colocarse así junto al cuerpo, a la calidad de las juntas realizadas por soldadura corriente, soldadura fuerte u otro método similar, a la seguridad del cierre del sistema de contención y la retención de los materiales radiactivos dentro del blindaje, a las características externas del embalaje, y a las disposiciones generales del reglamento relativas a los niveles de radiación externa, a la contaminación no fija y al etiquetado.

BULTOS EXENTOS

La categoría de bultos exentos* constituye un medio para la expedición de pequeñas cantidades de materiales radiactivos a costo relativamente bajo, pero con un grado de seguridad comparable y hasta superior al ofrecido por los bultos del Tipo A. Esta categoría se funda, en lo esencial, en uno de los supuestos fundamentales para el concepto de bulto del Tipo A, es decir, que de todo material en forma no especial que escape a causa de los daños sufridos por una expedición, solo se introducirá en el cuerpo de cualquier persona una milésima parte, a lo sumo (supuesto corroborado por la experiencia, Ref. [5]).

La característica fundamental de esta categoría es que el embalaje debe cumplir solo algunas disposiciones de carácter general; no le son aplicables las consideraciones de diseño ni las normas de comportamiento prescritas para los bultos del Tipo A, resumidas en los párrafos anteriores (de ahí la denominación "bultos exentos"). Juntamente con esta flexibilidad se admite el supuesto de que el contenido íntegro del bulto (en vez de la milésima parte) se escapa en un accidente de magnitud mediana; por tanto, según la premisa iv) antes enunciada, la actividad máxima de un material en forma no especial admisible en un bulto exento ha de limitarse a una milésima parte de A_2. Este límite se aplica a los materiales sólidos y gaseosos; ahora bien, se reduce a una diezmilésima parte de A_2 en el caso de los líquidos, para tener en cuenta la posibilidad de que la absorción de tales materiales exceda de una milésima parte de la cantidad derramada. A fin de mantener la uniformidad, el límite fijado para los materiales en forma especial contenidos en un bulto es una milésima de A_1; esto, en efecto, brinda un mayor grado de seguridad que el que ofrece un bulto del Tipo A que contenga A_1 curios, pues el nivel de radiación a 3 metros de una y otra fuente tras la pérdida total del blindaje, como se supone que sucede en un accidente de mediana magnitud, sería de 1 mrem/h y 1 rem/h, respectivamente. Las cantidades de tritio, en forma de elemento o de compuesto, permitidas en los bultos de la categoría exenta se han determinado utilizando modelos ligeramente diferentes. (Véase la Ref. [10].)

Cuando la pieza que contiene el radionucleido forma un componente de un artículo manufacturado, tal como un indicador, un reloj o aparato similar, se tiene en cuenta la resistencia adicional que supone la estructura de dichos aparatos y se elevan los límites a una centésima parte de A_1 o A_2 curios por artículo, según la forma del material radiactivo, y a A_1 o A_2 curios por bulto, es decir, se pueden embalar juntos 100 o más artículos.

En cualquier caso, todas las disposiciones precedentes quedan sujetas por lo menos a una de dos limitaciones absolutas: el nivel de radiación no ha de ser superior a 10 mrem/h en

* Llamada también en algunos reglamentos "categoría de cantidades limitadas".

cualquier punto situado a 10 cm por encima de la superficie del aparato sin embalar, ni superior a 0,5 mrem/h en la superficie del bulto. En caso de contravenirse una u otra de estas restricciones, se tendrá que emplear un bulto del Tipo A. Los bultos de la categoría exenta no están sujetos a las prescripciones generales del reglamento sobre etiquetado, pero han de llevar una etiqueta interior que advierta que el contenido es radiactivo. Deben igualmente ajustarse a los límites establecidos para la contaminación radiactiva no fija en la superficie externa.

En la literatura publicada no se da prácticamente información sobre los bultos de esta categoría, por lo que no es posible describir formas típicas.

BULTOS DE BAJA ACTIVIDAD ESPECIFICA

Esta categoría de bultos constituye un medio para la expedición de sustancias de baja actividad específica: uranio y torio, en forma de minerales, concentrados físicos y químicos o en forma de metal (siempre que el material no haya sido enriquecido o irradiado), agua que contenga hasta 10 Ci/l de tritio, así como materiales y objetos con ligera contaminación radiactiva (a reserva de ciertas condiciones). Estos materiales presentan un mínimo de riesgos, si se derraman accidentalmente, porque la cantidad que es preciso absorber para producir una dosis de irradiación significativa es muy grande, en comparación con otros materiales radiactivos (del orden de miligramos en vez de nanogramos, Ref. [11]). Se considera inconcebible que tal absorción pueda producirse sean cuales fueren las circunstancias en que se realice el transporte, aun en caso de accidente grave. Por tanto, las prescripciones del reglamento para esta clase de materiales en lo que respecta a la contención son mucho menos estrictas, y los materiales pueden transportarse a granel, es decir, contenidos solo por la estructura del vehículo (excepto si son transportados por vía aérea) o prácticamente en toda clase de bultos; no se prescriben normas de comportamiento.

No obstante, se emplean corrientemente dos formas de contenedores: bidones de acero de 210 litros (55 galones de los Estados Unidos) de capacidad, y recipientes cilíndricos de acero de diversas capacidades, hasta aproximadamente 4 m^3. Por lo general, los bidones se fabrican de chapa de acero bajo en carbono, de 1,2 mm; van provistos de tapas desmontables para el transporte de materiales sólidos, tales como torta amarilla, óxido de uranio en polvo y desechos de baja radiactividad, y llevan cierre hermético para el transporte de agua tritiada y de otros líquidos. Los recipientes cilíndricos se emplean generalmente para el transporte de hexafluoruro de uranio (en estado sólido); en la mayoría de los casos se trata realmente de vasijas de presión y se ajustan a las prescripciones del código aplicable del país de origen, por ejemplo, la Sección VIII del código de la ASME (American Society of Mechanical Engineers). El modelo más grande y probablemente más corriente en servicio, designado 48Y, tiene las dimensiones nominales de 1,22 m de diámetro por 3,81 m de longitud, con paredes de un espesor de 15,8 mm y su capacidad nominal de transporte es de 12 500 kg de hexafluoruro de uranio (Ref. [12]). Se muestra este modelo en la Figura 3. La arena monacítica, un mineral que contiene del 6 al 7% de óxido de torio, se transporta en sacos de arpillera, con revestimiento interior de papel o de plástico, que pesan, llenos, unos 45 kg (Ref. [13]).

Cuando se transportan como "carga completa", es decir cuando todas las operaciones de carga, descarga y manipulación están controladas por el expedidor, el destinatario o un agente de éstos, los bultos de BAE están exentos de las prescripciones generales del reglamento referentes a etiquetado y a contaminación no fija. En otras circunstancias, cuando los bultos se transportan de acuerdo con las prácticas corrientes, han de cumplirse esas disposiciones.

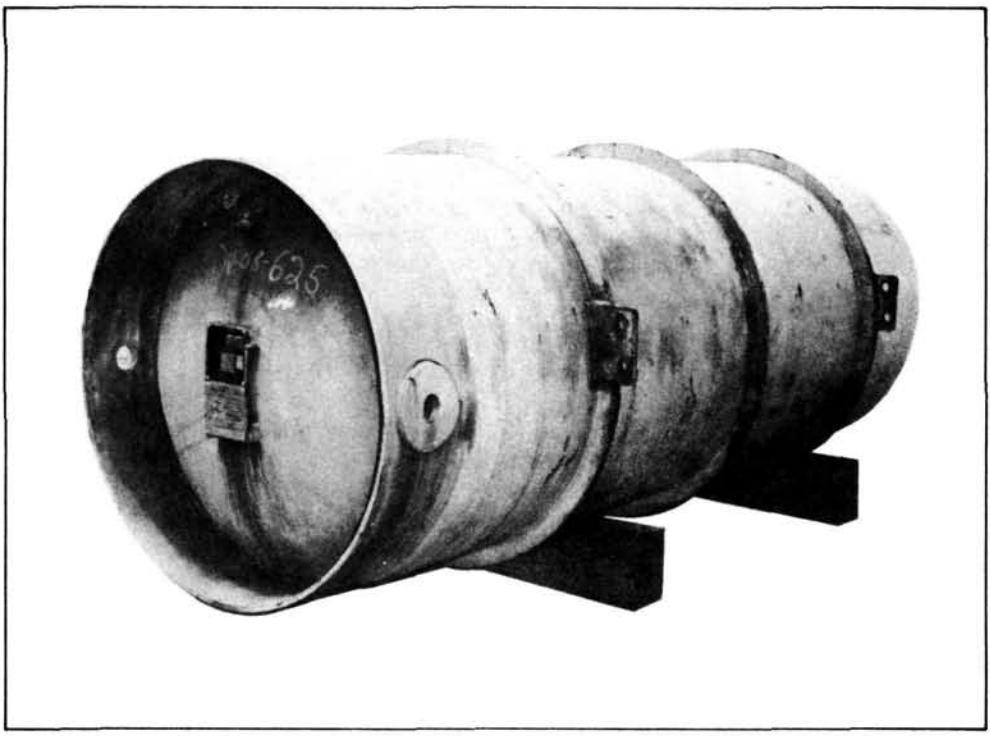


Figura 3. Recipiente cilíndrico tipo 48Y para el transporte de hexafluoruro de uranio.

Referencias

[1] Organismo Internacional de Energía Atomica, Reglamento para el transporte sin riesgos de materiales radiactivos (Edición revisada en 1973), Colección Seguridad Nº 6, OIEA, Viena (1973).

[2] Organismo Internacional de Energía Atómica, Reglamento para el transporte sin riesgos de materiales radiactivos (Edición de 1967), Colección Seguridad Nº 6, OIEA, Viena (1967).

[3] Nuclear Regulatory Commission: NUREG-0073, Transport of Radioactive Material in the U.S. (A Detailed Summary of "Survey of Radioactive Material Shipments in the United States" BNWL–1972) Washington, D.C. (Mayo de 1976).

[4] Amiel, S., "Production and Utilization of Radioisotopes: Some General Aspects", Radioisotope Production and Quality Control, Colección de Informes Técnicos Nº 128, OIEA, Viena, (1971) 7.

[5] Fairbairn, A., "The Development of the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials", Revista de Energía Atómica, II (1973) 873.

[6] Domanus, J.C., "Analysis of design and test requirements and procedures for Type A packaging" (IAEA-SM-147/35, Act. Simp., Viena, 1971) OIEA, Viena (1971) 65.

[7] Prasad, A.N., et al., "Experience with packaging for the transport of radioactive materials" (IAEA-SM-147/36, Act. Simp., Viena, 1971), OIEA, Viena (1971) 129.

[8] Edling, D.A., "Analysis of type A packaging systems based on greater than 400 individual packaging tests" (IAEA-SR-10/2, Act. Simp., Viena, 1976), OIEA, Viena (1976) 113.

[9] Taylor, C.B.G., "Packaging and transport of radioisotopes (IAEA-SR-10/45, Act. Simp., Viena, 1976) OIEA, Viena (1976) 71.

[10] Organismo Internacional de Energía Atómica, Manual de consulta para la aplicación del Reglamento de transporte del OIEA; Colección Seguridad Nº 37, OIEA, Viena (1973).

[11] Organismo Internacional de Energía Atómica, "A Basic Toxicity Classification of Radionucleides, Colección de Informes Técnicos Nº 15, OIEA, Viena (1963).

[12] United States Energy, Research and Development Administration, "Uranium Hexafluoride Handling Procedures and Container Criteria", ORO-651, Rev. 4, Oak Ridge Operations Office, Oak Ridge Tennessee, (Abril de 1977).

[13] Gibson, R., ed., "The Safe Transport of Radioactive Materials", Pergamon Press, Londres (1966).