

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 979 341**

51 Int. Cl.:

G21F 3/00 (2006.01)

G01N 23/22 (2008.01)

H01J 35/16 (2006.01)

G21F 7/00 (2006.01)

G21F 5/00 (2006.01)

G21F 1/00 (2006.01)

G01N 23/221 (2006.01)

H05H 6/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.06.2017 PCT/AU2017/050643**

87 Fecha y número de publicación internacional: **27.12.2018 WO18232435**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.06.2017 E 17914289 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.04.2024 EP 3642851**

54 Título: **Un aparato de radiación de rayos X blindado**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.09.2024

73 Titular/es:

**CHRYSOS CORPORATION LIMITED (100.0%)
Waite Road
Urrbrae, South Australia 5064, AU**

72 Inventor/es:

TICKNER, JAMES

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 979 341 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Un aparato de radiación de rayos X blindado

Campo técnico

5 Las realizaciones descritas en la presente memoria se refieren en general a un aparato de blindaje para blindar una fuente de rayos X de alta energía y alta potencia. En este caso, por alta energía se denotan rayos X con energías en el rango de energía de multi-MeV. En particular, las realizaciones se refieren a un aparato para el blindaje de una fuente de rayos X, en donde la fuente de rayos X está destinada al uso del análisis de activación gamma. Las aplicaciones particulares se refieren al uso de la fuente de rayos X para el análisis de oro y otros elementos valiosos tales como plata, cobre y plomo en muestras de mineral.

10 **Antecedentes**

El análisis de activación gamma (GAA), también conocido como análisis de activación de fotones, usa una fuente de rayos X de alta energía para inducir unas reacciones nucleares en elementos objetivo de una muestra, y a continuación mide la radiación de desintegración emitida por la muestra activada para determinar las concentraciones de estos elementos.

15 Normalmente, los rayos X en el rango de energía de multi-MeV se producen utilizando fuentes que usan un acelerador de electrones equipado con un objetivo de conversión para producir rayos X a través del proceso de Bremsstrahlung. Un tipo común de acelerador de electrones es un acelerador lineal o LINAC.

20 Si los elementos presentes a bajas concentraciones han de ser detectados con una buena sensibilidad, entonces se requiere una fuente de rayos X de alta intensidad. Por ejemplo, se puede usar una potencia de haz de acelerador lineal de 5-10 kW o superior. La potencia de haz descrita en la presente memoria se refiere a la potencia del haz de electrones acelerado incidente sobre el objetivo de conversión de rayos X. Tales fuentes de alta intensidad producen cantidades enormes de radiación de rayos X, a menudo en el rango de 100-200 Sieverts(Sv)/min, medida a un metro desde el punto de emisión de rayos X. Tales niveles de radiación presentan un grave riesgo para el personal, y deben reducirse usando un blindaje apropiado.

25 Las fuentes de rayos X utilizadas para el GAA se hacen funcionar generalmente a energías de fuente de al menos 7 MeV, y se pueden utilizar a energías de hasta 15 MeV, o incluso superiores. La energía de fuente se refiere a la energía pico del haz de electrones acelerado, que corresponde a la energía de punto final del espectro de Bremsstrahlung de rayos X. Estas energías son suficientemente altas para inducir reacciones nucleares en ciertos elementos. Estas reacciones incluyen comúnmente la producción de neutrones, que presentan un riesgo de radiación adicional. Es necesario que el blindaje esté diseñado para reducir también los niveles de radiación de neutrones en zonas accesibles hasta un nivel aceptable.

30 Convencionalmente, los sistemas basados en acelerador para aplicación industrial se dividen en tres amplias categorías:

35 1. Los utilizados para la terapia de radiación en entornos hospitalarios. Las fuentes de rayos X asociadas con estos sistemas se hacen funcionar típicamente a energías de fuente que oscilan desde unos pocos MeV hasta 15-18 MeV, pero tienen una potencia relativamente baja (una dosis por unidad de tiempo de unos pocos Sv/min) y un ciclo de trabajo muy bajo (hasta 500 Sv/semana). El blindaje se proporciona normalmente por medio de la construcción de un "bunker" de hormigón macizo con un paso o "laberinto" de forma enrollada para proporcionar acceso.

40 2. Aceleradores usados para esterilización industrial o irradiación de productos y que se hacen funcionar típicamente a energías de fuente de hasta 10 MeV. En este tipo de sistema, las potencias de haz pueden ser muy altas, del orden de 10-20 kW o más. De nuevo, el blindaje se proporciona mediante una construcción de hormigón maciza, siendo los objetos que se van a irradiar transportados en una trayectoria curva para evitar la transmisión de radiación. También se pueden disponer puertas de blindaje macizas.

45 3. Aceleradores usados para aplicaciones de tratamiento de imágenes de seguridad tales como de escaneado de carga. Tales sistemas se hacen funcionar generalmente a una energía de fuente baja de aproximadamente 6 MeV o en un modo de energía dual (por ejemplo, alternando entre 3 y 6 MeV), aunque se pueden utilizar energías de hasta 9 MeV en algunas aplicaciones. En estos sistemas, la potencia de haz es también generalmente muy baja y la producción de neutrones no es una consideración significativa. El blindaje comprende generalmente plomo o tungsteno alrededor del acelerador, y una cabina de paredes de acero.

50 Los métodos convencionales de despliegue del tipo de fuente de acelerador de alta potencia usado para el GAA requieren la construcción de un blindaje de hormigón dedicado, de propósito especial. Típicamente, el grosor de blindaje requerido es del orden de 1,5-2,0 m, lo que da lugar a una gran superficie y a masas de cientos a miles de toneladas.

Los enfoques existentes alternativos para el blindaje de acelerador incluyen el desarrollo de materiales de propósito especial que proporcionan un blindaje tanto de rayos X como de neutrones. Un ejemplo consiste en una mezcla de hormigón combinada con aditivos especiales absorbentes de rayos X y neutrones. Sin embargo, tales enfoques aumentan la masa total de blindaje requerida.

- 5 Es deseable proporcionar un aparato de blindaje mejorado para su uso con una fuente de rayos X de alta energía y alta potencia adecuada para el GAA.

Es conocida técnica anterior útil a partir del documento de Ticker James et al.: "Improving the sensitivity and accuracy of gamma activation analysis for the rapid determination of gold in mineral ores", Applied radiation and isotopes, Elsevier, Oxford, GB, vol. 122, 1 de enero de 2017 (2017-01-01), páginas 28-36, XP029949277, ISSN: 0969-8043, DOI: 10.1016/J.APRADISO.2016.12.057.

10 Todo análisis de documentos, leyes, materiales, dispositivos, artículos o similares que se ha incluido en la presente memoria descriptiva no debe tomarse como una admisión de que alguno o todos estos asuntos formen parte de la base de la técnica anterior o de que fueran conocimientos generales comunes en el campo relevante de la presente invención tal y como existían antes de la fecha de prioridad de cada reivindicación de esta solicitud.

- 15 A lo largo de toda esta memoria descriptiva, se entenderá que la palabra "comprender", o variaciones tales como "comprende" o "que comprende", implica la inclusión de un elemento, número entero o etapa especificado, o de un grupo de elementos, números enteros o etapas, pero no la exclusión de ningún otro elemento, número entero o etapa, o grupo de elementos, números enteros o etapas.

Compendio

- 20 Se proporciona un aparato de radiación de rayos X blindado según la reivindicación 1. El aparato de radiación de rayos X blindado para el análisis de materiales por medio de análisis de activación gamma comprende:

una fuente de rayos X, en el que la fuente de rayos X incluye un acelerador de electrones para generar un haz de electrones que tiene una dirección de haz de electrones, y un objetivo de los electrones al que se dirige el haz de electrones;

- 25 un blindaje de atenuación de rayos X que incluye una cavidad alargada que tiene una zona en un extremo para alojar una muestra;

un blindaje de atenuación de neutrones;

un blindaje de atenuación de gamma; y

- 30 en el que el blindaje de atenuación de neutrones es adyacente al blindaje de atenuación de rayos X y lo rodea substancialmente; y

en el que el blindaje de atenuación de gamma es adyacente al blindaje de atenuación de neutrones y lo rodea substancialmente.

- 35 La fuente de rayos X puede ser cualquier dispositivo adecuado para el análisis de activación gamma. La fuente de rayos X puede incluir un acelerador de electrones para generar un haz de electrones que tiene una dirección de haz de electrones, y un objetivo de conversión al que se dirige el haz de electrones.

En una realización, la energía del haz de electrones generado por el acelerador de electrones puede estar entre 7 MeV y 15 MeV y el acelerador de electrones se puede hacer funcionar con una potencia de haz de al menos 0,5 kW, y preferiblemente de aproximadamente 8 kW. La potencia de haz máxima puede ser una función decreciente de la energía de haz.

- 40 En otra realización, la energía del haz de electrones generado por el acelerador de electrones puede estar entre 7 MeV y 10 MeV. En tal realización, el acelerador de electrones puede tener una potencia de haz máxima de 2 kW.

Posiblemente, la energía del haz de electrones generado por el acelerador de electrones puede estar entre 8 MeV y 10 MeV. En tal realización, el acelerador de electrones puede tener una potencia de haz máxima de entre 8 kW y 20 kW.

- 45 El blindaje de atenuación de rayos X está construido preferiblemente a partir de un material de alta densidad, y está preferiblemente construido principalmente de plomo. Menos preferiblemente, el blindaje de atenuación de rayos X está construido principalmente de tungsteno. Alternativamente, el blindaje de atenuación de rayos X está construido de capas de plomo y tungsteno.

- 5 El blindaje de atenuación de neutrones está construido preferiblemente a partir de un material polimérico que tiene una densidad de hidrógeno de aproximadamente 0,1 g/cm³. Los polímeros con la fórmula genérica (-CH₂)_n, tales como el polietileno, son especialmente adecuados. Alternativamente, el blindaje de atenuación de neutrones puede estar hecho a partir de una resina moldeada, tal como resina de poliuretano. El blindaje puede incluir materiales enriquecedores de hidrógeno, tales como, pero sin limitarse a ellos, uno o más de entre polietileno o polipropileno. El material polimérico puede incluir opcionalmente, o de forma adicional, una proporción de un elemento substancialmente absorbente de neutrones elegido del grupo que incluye boro y litio. La proporción del elemento absorbente de neutrones puede estar en el rango de un 1-5 % en peso, y preferiblemente ser de un 5 % en peso.
- 10 El blindaje de atenuación de gamma está preferiblemente construido principalmente de plomo. Menos preferiblemente, el blindaje de atenuación de gamma está construido principalmente de acero.
- Alternativamente, el blindaje de atenuación de gamma está construido de capas de material compuesto de plomo y acero.
- 15 Una parte de las paredes interiores de la cavidad puede estar revestida con una carcasa de soporte para soportar al menos el acelerador de electrones, el objetivo de conversión de rayos X y la muestra irradiada en las posiciones relativas correctas. Preferiblemente, la carcasa de soporte está construida de acero. Se pueden seleccionar materiales alternativos siempre que los materiales estén substancialmente libres de elementos que se activen fácilmente mediante reacciones nucleares inducidas por rayos X o por neutrones.
- 20 El grosor del blindaje de atenuación de rayos X a un ángulo de 90° con respecto a la dirección de haz de electrones puede estar en el rango del 60-80 % del grosor en la dirección hacia delante, y el grosor a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones puede estar en el rango del 25 al 50 % del grosor en la dirección hacia delante. Más preferiblemente, el grosor del blindaje de atenuación de rayos X a un ángulo de 90° con respecto a la dirección de haz de electrones puede ser aproximadamente el 75 % del grosor en la dirección hacia adelante, y el grosor a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones puede ser aproximadamente el 50 % del grosor en la dirección hacia adelante.
- 25 El grosor del blindaje de atenuación de rayos X en la dirección hacia delante puede estimarse usando capas de valor décimo tabuladas y un factor de atenuación de dosis deseado. Más particularmente, el grosor del blindaje de atenuación de rayos X (t_{XR}) en la dirección hacia delante puede estimarse mediante la ecuación: $t_{XR} = TVL \times \log_{10} [(R \times 60 \times 10^6)/(r d^2)]$, en donde d es la distancia con respecto al objetivo a la que se ha de calcular la dosis por unidad de tiempo reducida, R es la dosis por unidad de tiempo a 1 m del objetivo producida por la fuente sin blindar, r es la dosis por unidad de tiempo blindada deseada en el punto más próximo accesible por el personal a distancia d y TVL es la capa de valor décimo predefinida para el material de blindaje de atenuación de rayos X.
- 30 El grosor de la capa de atenuación de neutrones puede determinarse a partir del conocimiento de la velocidad de producción de neutrones de la fuente de rayos X. La velocidad de producción de neutrones es una función del diseño de la fuente, particularmente del objetivo de conversión de rayos X, y de la energía del haz de electrones.
- 35 Comúnmente, la velocidad de emisión de neutrones será proporcionada por el fabricante de la fuente en términos de la dosis por unidad de tiempo (Sv) debida a la emisión de neutrones dividida por la dosis por unidad de tiempo (Sv) debida a la emisión de rayos X. A partir de este parámetro, la dosis por unidad de tiempo de neutrones sin blindar a una distancia dada de la fuente se puede calcular a partir del conocimiento de la dosis por unidad de tiempo de rayos X dirigida hacia delante.
- 40 El factor de atenuación de neutrones requerido f se puede calcular como la ratio entre la dosis por unidad de tiempo sin blindar y la dosis por unidad de tiempo blindada deseada. El grosor del blindaje de neutrones en la dirección hacia delante puede estimarse usando la fórmula $TVL \cdot \log_{10}(f)$, en donde TVL es el grosor de valor décimo tabulado de neutrones de baja energía en el material de atenuación de neutrones elegido. Por ejemplo, el TVL en polietileno borado para neutrones producidos por rayos X con energías de punto final de hasta 15 MeV es de 62 mm. Un blindaje de neutrones de un grosor de 200-300 mm reducirá entonces el flujo de neutrones por un factor de 1700-7000.
- 45 Como la emisión de neutrones es substancialmente isotrópica, el grosor de la capa de atenuación de neutrones puede elegirse para que sea aproximadamente constante con el ángulo con respecto a la dirección de haz de electrones. Si la longitud del blindaje requerido para alojar la fuente de rayos X es considerable, el punto accesible más próximo en la dirección hacia atrás (próximo a 180°) puede estar significativamente más alejado del objetivo de conversión de rayos X que el punto accesible más próximo en la dirección hacia delante. En este caso, el grosor del blindaje de atenuación de neutrones en la dirección hacia atrás puede reducirse proporcionalmente. Preferiblemente, el grosor en la dirección hacia atrás es un 50-100 % del grosor en la dirección hacia delante.
- 50 Preferiblemente, el blindaje de atenuación de gamma tiene un grosor que es proporcional al grosor optimizado del blindaje de atenuación de neutrones.
- 55 El aparato de radiación de rayos X blindado puede comprender además unos medios de inserción de muestra extraíbles para insertar muestras en el interior de la cavidad alargada; en el que los medios de inserción de muestra extraíbles están compuestos por unos bloques de materiales adyacentes, teniendo cada bloque respectivo un grosor y una composición que coinciden substancialmente con el grosor y con una composición de uno de los blindajes de

atenuación de rayos X, de atenuación de neutrones y de atenuación de rayos gamma.

Los medios de inserción de muestra extraíbles pueden comprender además un miembro de plataforma sobre el que se puede situar una muestra que se ha de irradiar; y en el que los bloques de materiales adyacentes comprenden un primer bloque adyacente al miembro de plataforma, un segundo bloque que hace tope con el primer bloque, y un tercer bloque que hace tope con el segundo bloque; en el que:

el primer bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente rayos X y que tiene un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de rayos X,

el segundo bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente neutrones y que tiene un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de neutrones, y

el tercer bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente rayos gamma con un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de gamma; y

en el que el aparato de radiación de rayos X blindado comprende un manguito a través del cual es capaz de atravesar el miembro de plataforma.

Preferiblemente, el manguito del aparato y los medios de inserción de muestra extraíbles tienen una tolerancia de holgura de menos de 2,00 mm, más preferiblemente de menos de 1,00 mm, y más preferiblemente de menos de 0,50 mm.

El miembro de plataforma de los medios de inserción de muestra extraíbles puede fabricarse de acero, o de cualquier otra substancia que esté libre de elementos que experimenten una activación significativa por rayos X o por neutrones.

En una realización, el perfil exterior de los medios de inserción de muestra extraíbles es escalonado, aumentando al menos una de las dimensiones de uno o más de los bloques en una dirección perpendicular a una dirección de desplazamiento de distancia creciente con respecto al miembro de plataforma. La anchura del escalón, o de cada escalón, está preferiblemente en el rango de 5 a 15 mm.

Por ejemplo, el primer bloque puede comprender al menos dos escalones, de manera que las dimensiones del bloque aumentan en forma escalonada desde los escalones más interiores hasta los más exteriores. La anchura de cada escalón puede estar en el rango de 5 a 15 mm. El primer bloque está hecho preferiblemente de un material que atenúa substancialmente los rayos X, tal como plomo o tungsteno.

El primer bloque puede estar adherido al miembro de plataforma por cualquier medio adecuado. Por ejemplo, la plataforma puede comprender un soporte en ángulo que incorpora unos orificios a través de los cuales se pueden insertar unos pernos para fijar rígidamente la primera parte de bloque a la plataforma.

El segundo bloque puede ser un bloque unitario que tiene una cara interior y una cara exterior. La cara interior de la segunda parte de bloque hace tope preferiblemente con la cara exterior del escalón más exterior del primer bloque. El segundo bloque puede estar adherido al primer bloque por cualquier medio adecuado, por ejemplo, por medio de un soporte de acero que atornilla las secciones respectivas entre sí. El segundo bloque está hecho preferiblemente del material usado para construir el blindaje de atenuación de neutrones, o puede estar hecho de un material alternativo que atenúa substancialmente los neutrones, tal como polietileno que contiene un 5 % en peso de boro.

El tercer bloque puede ser un bloque unitario que tiene una cara interior y una cara exterior. La cara interior del tercer bloque hace tope preferiblemente con la cara exterior del segundo bloque. El tercer bloque puede estar adherido al segundo bloque por cualquier medio adecuado, tal como por un soporte de acero que atornilla las secciones respectivas entre sí. Alternativamente, el tercer bloque puede estar conformado para proporcionar unos medios directos de atornillado al segundo bloque. El tercer bloque está hecho preferiblemente de un material que substancialmente atenúa los rayos gamma, tal como plomo o tungsteno.

Los medios de inserción de muestra extraíbles pueden comprender además una parte de fijación que tiene una cara interior, en donde las dimensiones de la cara interior son iguales o mayores que las dimensiones de la cara exterior del tercer bloque, y en donde la cara exterior del tercer bloque hace tope con la cara interior de la parte de fijación. La parte de bloque de fijación puede estar adherida al tercer bloque por cualquier medio adecuado. La parte de fijación puede ser hueca. El material del que está construida la parte de fijación no necesita ser un material de blindaje de radiación. Los medios de fijación pueden estar unidos a un mecanismo de accionamiento lineal para insertar y retirar los medios de inserción de muestra extraíbles con respecto al blindaje de rayos X.

Ventajosamente, las realizaciones que utilizan los medios de inserción de muestra extraíbles permiten la inserción y la retirada de muestras que se han de analizar a través del blindaje secuencial en capas sin comprometer su integridad de blindaje.

Se proporciona un aparato de radiación de rayos X blindado adicional, comprendiendo el aparato de radiación:

una fuente de rayos X;

un blindaje de atenuación de rayos X que incluye una cavidad alargada para alojar la fuente de rayos X y que incorpora una zona para alojar una muestra;

5 un blindaje de atenuación de neutrones adyacente al blindaje de atenuación de rayos X y que lo rodea substancialmente;

un blindaje de atenuación de gamma adyacente al blindaje de atenuación de neutrones y que lo rodea substancialmente; y

10 unos medios de inserción de muestra extraíbles para insertar muestras en el interior de la cavidad alargada; en el que los medios de inserción de muestra extraíbles están compuestos por bloques de material adyacentes, teniendo cada bloque respectivo un grosor y una composición que coinciden substancialmente con el grosor y con una composición de los blindajes de atenuación de rayos X, de atenuación de neutrones y de atenuación de rayos gamma, respectivamente.

15 Los medios de inserción de muestra extraíbles pueden comprender además un miembro de plataforma sobre el que se puede situar una muestra que ha de ser irradiada; en el que los bloques de materiales adyacentes comprenden un primer bloque adyacente al miembro de plataforma, un segundo bloque que hace tope con el primer bloque, y un tercer bloque que hace tope con el segundo bloque; en el que:

el primer bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente rayos X y que tiene un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de rayos X,

20 el segundo bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente neutrones y que tiene un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de neutrones, y

el tercer bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente rayos gamma con un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de gamma; y

25 en el que el aparato de radiación de rayos X blindado comprende un manguito a través del cual es capaz atravesar el miembro de plataforma.

El manguito del aparato y los medios de inserción de muestra extraíbles pueden tener una tolerancia de holgura de menos de 2,00 mm, más preferiblemente de menos de 1,00 mm, y más preferiblemente de menos de 0,50 mm.

30 El perfil exterior de los medios de inserción de muestra extraíbles puede ser escalonado, aumentando al menos uno de los bloques adyacentes en altura o anchura, en una dirección perpendicular a una dirección de desplazamiento de distancia creciente con respecto al miembro de plataforma. La anchura del escalón, o de cada escalón, puede estar en el rango de 5 a 15 mm. En una realización, el primer bloque comprende al menos dos escalones, de manera que las dimensiones del primer bloque aumentan en forma escalonada desde los escalones más interiores hasta los más exteriores.

35 El blindaje de atenuación de rayos X puede tener un grosor que disminuye con un ángulo creciente con respecto a la dirección de haz de electrones. El grosor del blindaje de atenuación de rayos X a un ángulo de 90° con respecto a la dirección de haz de electrones puede estar en el rango del 60-80 % del grosor en la dirección hacia delante, y el grosor a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones puede estar en el rango del 25 al 50 % del grosor en la dirección hacia delante. Más preferiblemente, el grosor del blindaje de atenuación de rayos X a un ángulo de 90° con respecto a la dirección de haz de electrones puede ser aproximadamente el 75 % del grosor en la dirección hacia delante, y el grosor a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones puede ser aproximadamente el 50 % del grosor en la dirección hacia delante.

40 El grosor y los materiales a partir de los cuales están hechos los blindajes respectivos pueden configurarse de acuerdo a la descripción enseñada hasta aquí.

45 Se proporciona un método para optimizar el blindaje para un aparato de radiación de rayos X, en donde el aparato comprende un blindaje de atenuación de rayos X que incluye una cavidad alargada para alojar una fuente de rayos X, un blindaje de atenuación de neutrones adyacente al blindaje de atenuación de rayos X y que lo rodea substancialmente, y un blindaje de atenuación de gamma adyacente al blindaje de atenuación de neutrones y que lo rodea substancialmente, comprendiendo el método:

50 determinar un primer grosor (t_{XR}) del blindaje de atenuación de rayos X en la dirección hacia delante mediante la ecuación: $t_{XR} = TVL \times \log_{10} [(R \times 60 \times 10^6)/(r \ d^2)]$, en donde d es la distancia con respecto a un objetivo de los electrones, R es la dosis por unidad de tiempo a 1 m del objetivo de los electrones producida por una fuente de rayos X, r es la dosis por unidad de tiempo blindada en el punto más próximo accesible por el personal y TVL es una capa de valor décimo predefinida para el material de blindaje de atenuación de rayos X;

determinar un grosor del blindaje de atenuación de rayos X a un ángulo de 90° con respecto a la dirección de haz de electrones que esté en el rango del 60-80 % del grosor en la dirección hacia delante; y

determinar un grosor del blindaje de atenuación de rayos X a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones que esté en el rango del 25-50 % del grosor en la dirección hacia delante.

5 El método para optimizar el blindaje para un aparato de radiación de rayos X puede comprender además determinar un grosor del blindaje de atenuación de rayos X a un ángulo de 90° con respecto a la dirección de haz de electrones que sea aproximadamente el 75 % del grosor en la dirección hacia delante.

10 El método para optimizar el blindaje para un aparato de radiación de rayos X puede comprender además determinar un grosor del blindaje de atenuación de rayos X a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones que sea aproximadamente el 50 % del grosor en la dirección hacia delante.

15 El método para optimizar el blindaje para un aparato de radiación de rayos X puede comprender además determinar un grosor (t_{nt}) del blindaje de atenuación de neutrones en una dirección hacia delante mediante la ecuación: $t_{nt} = TVL_n \log_{10}(f)$, en donde TVL_n es una capa de valor décimo predefinida para la atenuación de neutrones de baja energía en el blindaje de atenuación de neutrones y f es una ratio entre una dosis por unidad de tiempo sin blindar y una dosis por unidad de tiempo blindada deseada.

El método para optimizar el blindaje para un aparato de radiación de rayos X puede comprender además determinar que el grosor del blindaje de atenuación de neutrones a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones en una dirección hacia atrás es del 50 % al 100 % del grosor (t_{nt}) en la dirección hacia delante.

20 El método para optimizar el blindaje para un aparato de radiación de rayos X puede comprender además determinar que el grosor del blindaje de atenuación de gamma es proporcional al grosor del blindaje de atenuación de neutrones.

Breve descripción de los dibujos

A continuación, se describirán realizaciones haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

La figura 1 es una ilustración esquemática de una realización de la configuración de blindaje.

25 La figura 2 es una vista en perspectiva de una realización de los medios de inserción de muestra extraíbles para llevar a cabo aspectos de la invención descrita en la presente memoria; y

La figura 3 muestra un gráfico que ilustra la ratio entre la dosis por unidad de tiempo de neutrones y la dosis por unidad de tiempo de rayos X hacia delante no blindada frente a la energía de punto final para un acelerador de electrones equipado con un objetivo convertidor de Bremsstrahlung de tungsteno.

Descripción de realizaciones

30 La figura 1 ilustra un ejemplo de un aparato de radiación de rayos X blindado 100 que está configurado para funcionar con una energía de punto final que puede variar en el rango de 8-14 MeV. La dosis por unidad de tiempo máxima de rayos X suministrada por el generador de rayos X (no mostrado) varía desde 160 Sv/min a una energía de funcionamiento de 8 MeV hasta 25 Sv/min a una energía de funcionamiento de 14 MeV.

35 El aparato de radiación de rayos X blindado 100 incluye un blindaje de atenuación de rayos X 110 y 111, un blindaje de atenuación de neutrones 120 y 121 y un blindaje de atenuación de gamma 130 y 131. El blindaje de atenuación de rayos X incluye una cavidad 106 que tiene aproximadamente 1,5 m de longitud que aloja el LINAC (no mostrado). El LINAC acelera un haz de electrones 101 contra un objetivo de conversión 102, produciendo una radiación de rayos X de Bremsstrahlung que se dirige substancialmente en la dirección de haz de electrones. En funcionamiento, la radiación de rayos X irradia una muestra 103.

40 La cavidad 106 que aloja la parte delantera del LINAC, el objetivo de conversión 102 y la muestra 103, está substancialmente rodeada por una carcasa de soporte 104 que proporciona unos medios para soportar el LINAC, el objetivo y la muestra en las posiciones relativas de corrección. El plomo, que es un material blando y maleable, es poco adecuado para este fin. En este ejemplo, la carcasa de soporte 104 está hecha de un material tal como el acero. En otros ejemplos, el material seleccionado debe estar substancialmente libre de elementos que se activen fácilmente mediante reacciones nucleares inducidas por rayos X o por neutrones. Por ejemplo, la carcasa debe estar libre del elemento cobalto, el cual da lugar a la formación del isótopo de vida larga ^{60}Co a través de la captura de neutrones. La formación de tales isótopos de vida larga puede dar lugar a dificultades en el desmantelamiento o eliminación final de los componentes de blindaje.

50 El blindaje de atenuación de rayos X (un blindaje primario) comprende una parte de cabeza 110 y una parte de cuerpo 111. El grosor del blindaje de atenuación de rayos X es una función del ángulo con respecto a la dirección de haz de electrones: las direcciones de 0, 30, 60, 90, 120, 150 y 180 grados se indican en la figura 1. El grosor se calcula de acuerdo a la descripción proporcionada más adelante en la memoria descriptiva. El blindaje de atenuación de rayos X 110, 111 puede formarse por moldeado de plomo fundido en un molde o armazón de acero.

El blindaje de atenuación de rayos X 110, 111 está rodeado por un blindaje de atenuación de neutrones 120, 121 (un blindaje secundario) hecho de polietileno que contiene un 5 % en peso de boro. El grosor del blindaje de atenuación de neutrones es según la descripción proporcionada más adelante en la memoria descriptiva. En este ejemplo, el blindaje de atenuación de neutrones 110, 111 está hecho de láminas planas de material.

- 5 El blindaje de atenuación de neutrones 110, 111 está rodeado por un blindaje de atenuación de gamma 130, 131 (un blindaje terciario) hecho a partir de láminas de plomo. La blindaje de atenuación de gamma tiene un grosor proporcional al grosor del blindaje de atenuación de neutrones subyacente. En el ejemplo mostrado, la ratio de grosor entre el blindaje de atenuación de gamma y el blindaje de atenuación de neutrones es 1:10.

- 10 Las dimensiones en conjunto del blindaje en capas (110 y 111, 120 y 121, 130 y 131) son de aproximadamente 3300 mm de longitud y 1650 mm de anchura, y la masa total de blindaje es de aproximadamente 22 toneladas. En consecuencia, el diseño de blindaje se puede alojar cómodamente dentro de las restricciones de tamaño y masa de un contenedor de transporte estándar de 6,096 m (de 20').

- 15 La muestra 103 que se ha de irradiar se inserta y se retira a través del blindaje en capas por medio de unos medios de inserción de muestra móviles, a los que se denomina también tapón 140. El tapón 140 pasa a través de un manguito 141 encajado en las capas de blindaje primario, secundario y terciario. La holgura entre el manguito 141 y el tapón 140 ha de ser tan pequeña como sea posible de forma práctica, permitiendo el movimiento del tapón. La tolerancia es preferiblemente inferior a 0,5 mm.

- 20 El diseño del tapón 140 se muestra con más detalle en la figura 2. La muestra 103 se soporta sobre un miembro de plataforma 150 que está hecho de acero o un material similar. De acuerdo al diseño de la carcasa 104, el material del que se fabrica el miembro de plataforma también debe estar libre de elementos que experimenten una activación significativa por rayos X o por neutrones.

- 25 La segunda sección del tapón 160 comprende al menos dos partes escalonadas 161, 162, siendo las dimensiones del escalón más exterior 162 mayores que las del más interior 161. En el ejemplo mostrado, el escalón tiene una anchura de 10 mm. La segunda sección del tapón 160 está hecha de un material que proporciona una atenuación eficaz de los rayos X, tal como plomo o tungsteno. Preferiblemente, esta sección del tapón 160 se formará a partir de un material substancialmente similar al usado para el blindaje de atenuación de rayos X 110, 111.

- 30 La tercera sección del tapón 170 está construida de un material que detiene eficientemente los neutrones. Preferiblemente, la tercera sección del tapón está fabricada de un material substancialmente similar al utilizado para fabricar el blindaje de atenuación de neutrones 120, 121. Se proporciona un miembro de unión 171 para unir las secciones segunda y tercera del tapón. El miembro de unión 171 es un soporte de acero atornillado a la segunda y tercera secciones del tapón.

La cuarta sección del tapón 180 está construida de un material que proporciona una atenuación eficaz de los rayos X, tal como plomo o tungsteno. En este ejemplo, la cuarta sección del tapón incluye dos escalones, aunque en otros ejemplos podría incluir más de dos escalones, o sólo un único escalón.

- 35 La última sección del tapón 190 está dispuesta para permitir que todo el tapón sea fijado a un mecanismo que proporciona un movimiento lineal (no mostrado) para transportar el tapón hacia dentro y hacia fuera de la cavidad. Esta sección 190, que no se requiere para proporcionar ninguna función de blindaje, puede ser una estructura sólida o hueca con unos medios para fijarse a un dispositivo de movimiento lineal.

Blindaje de atenuación de rayos X

- 40 Las tablas de la eficacia de blindaje de rayos X de diferentes materiales están fácilmente disponibles (por ejemplo, en el NCRP Report 151 "Structural shielding design and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities"). La eficiencia de blindaje es referida comúnmente como "capas de valor décimo" (TVLs), siendo el grosor de material requerido para reducir la dosis por unidad de tiempo de rayos X por un factor de 10. Las TVLs son una función de la composición de material, la densidad de material y la energía de la fuente de rayos X.

- 45 Por ejemplo, los valores de TVL declarados para una fuente de rayos X de 10 MeV son 57/57 mm para el plomo, 410/370 mm para el hormigón y 110/110 mm para el acero. En cada caso, el primer valor declarado es la TVL para la primera capa de blindaje, y el segundo valor declarado es la TVL para todas las capas de blindaje posteriores. Consideremos un diseño de blindaje para una fuente de rayos X particular, diseñado para reducir las dosis por unidad de tiempo según un factor particular. Supongamos que el blindaje está construido de plomo y que tenga una masa total M. Si el material de blindaje se cambia a acero, entonces cada dimensión lineal del blindaje necesitará ser aumentada en un factor de $110/57 = 1,93$ para conseguir el mismo factor de reducción de dosis por unidad de tiempo. La masa del nuevo blindaje, M', estará dada por:

$$M' = M \times 1,93^k \times \text{densidad del acero} / \text{densidad del plomo}$$

en donde k es un exponente con un valor comprendido entre 1 y 3.

Si la cavidad 106 que aloja el generador de rayos X es grande en comparación con el grosor de blindaje en capas (como es común en las unidades de radioterapia, en donde la fuente de rayos X está situada en una habitación lo suficientemente grande como para acomodar a un paciente), entonces k es aproximadamente 1. Si el grosor del blindaje en capas es grande en comparación con el tamaño de la cavidad 106, entonces k está cerca de 3. Para diseños de blindaje relativamente compactos, el valor de k está entre 2 y 3.

Con $k = 2$, $M' = 2,6 M$; para $k = 3$, $M' = 5,0$. Por lo tanto, la consecuencia de cambiar de blindaje de plomo a blindaje de acero es aumentar la masa requerida del blindaje por un factor de 2,6-5,0. Si el blindaje de atenuación de rayos X 110, 111 está construido de hormigón, en lugar de plomo, que tiene una densidad todavía menor, el aumento de masa es por un factor de 8,8 - 57. El inventor ha determinado que es ventajoso construir el blindaje de atenuación de rayos X 110, 111 a partir de un material de alta densidad, y de la forma más preferible de plomo, si el objetivo es reducir la masa total del blindaje.

Blindaje de atenuación de neutrones

Un inconveniente significativo de construir el blindaje de atenuación de rayos X a partir de un elemento tal como plomo es la producción de fotoneutrones. Generalmente, la energía umbral de rayos X para la producción de neutrones a través de reacciones (g,n) disminuye con el aumento del número atómico, y la probabilidad de reacción o sección transversal aumenta.

El plomo consta de 4 isótopos de origen natural: ^{204}Pb (1,4 %), ^{206}Pb (24,1 %), ^{207}Pb (22,1 %) y ^{208}Pb (52,4 %). Los umbrales (g, n) para estos isótopos son de 8,4, 8,1, 6,7 y 7,4 MeV, respectivamente. Esto significa que un acelerador que se hace funcionar para producir rayos X con una energía de punto final de aproximadamente 6,7 MeV o superior dará lugar a fotoneutrones, aumentando la producción de neutrones rápidamente con el aumento de la energía de rayos X. Los metales pesados tales como el plomo no son muy buenos para blindar los neutrones.

El inventor ha considerado la adición de un blindaje de atenuación de neutrones por fuera del blindaje de rayos X, que está formado a partir de un material que ralentiza (ralentiza) y absorbe neutrones de forma eficiente. Los materiales con un alto contenido de hidrógeno son muy eficientes en la ralentización de los neutrones, debido a la pérdida de energía elevada que se produce en las colisiones elásticas (n,p) . Los ejemplos de materiales adecuados que tienen un alto contenido de hidrógeno incluyen polímeros con la fórmula genérica $(-\text{CH}_2-)_n$, tal como polietileno y polipropileno, y agua. El contenido de hidrógeno de estos materiales es de aproximadamente 0,11-0,13 g/cm³. Ventajosamente, los polímeros tales como polietileno están disponibles en grandes láminas auto-portantes, lo que simplifica la construcción del blindaje. Otras opciones de blindaje de neutrones incluyen materiales tales como la resina de poliuretano, que pueden ser moldeados según la forma requerida. La resina puede mezclarse con materiales tales como gránulos de polietileno para aumentar el contenido de hidrógeno.

Ventajosamente, la capa de blindaje de neutrones está diseñada para incluir una proporción de un elemento, tal como boro (B), que absorbe fuertemente neutrones térmicos. El isótopo ^{10}B (19,9 % de boro natural) tiene una sección transversal de absorción de neutrones térmicos de 3835 barns, en comparación con un valor de sólo 0,333 barns para el ^1H y de 0,00353 barns para el ^{12}C . El rayo gamma producido cuando el boro absorbe un neutrón tiene una energía de 478 keV, en comparación con los 2234 keV resultantes de la captura neutrónica por el hidrógeno. Opcionalmente, se puede seleccionar el litio (Li) como elemento absorbente. El isótopo ^6Li (7,6 % de litio natural) tiene una sección transversal de absorción de neutrones térmicos de 940 barns. La sección transversal inferior y la fracción isotópica inferior significan que el litio es un absorbente de neutrones menos eficiente que el boro. Sin embargo, el litio no produce rayos gamma durante la captura de neutrones.

El boro o el litio pueden incorporarse en el blindaje de neutrones de diferentes formas. El polietileno cargado con boro y cargado con litio está disponible con diversas concentraciones de dopantes. Una carga del 5 % es típica y proporciona una absorción eficiente de neutrones térmicos. Se pueden añadir compuestos solubles de boro o litio al agua. Se pueden añadir compuestos de boro o litio en polvo a la resina o a mezclas de perlas de resina-polímero.

El grosor de capa de valor de décimo (TVL) para neutrones en un material tal como polietileno borado es una función de la energía de neutrón. Los neutrones producidos en reacciones (g,n) tienen una energía máxima igual a la energía del haz de electrones del acelerador menos el umbral de reacción, pero la mayoría de los neutrones se producen a una energía muy baja. En casos en los que la energía del acelerador es menor que 15 MeV, la energía de neutrón media es $\ll 1$ MeV. El valor para la TVL de neutrones en el polietileno borado es de aproximadamente 62 mm [NCRP Report No. 79, Neutron contamination from medical neutron accelerators]. Un blindaje de neutrones de un grosor de 200-300 mm reducirá entonces el flujo de neutrones por un factor de 1700-7000.

Blindaje de atenuación de gamma

El diseño de un blindaje de radiación apropiado se complica de forma adicional debido a que la captura de neutrones en la capa de blindaje de neutrones puede producir rayos gamma energéticos. Los materiales hidrogenados de baja densidad utilizados para la capa de blindaje de neutrones proporcionan un blindaje muy limitado de estos rayos gamma, que pueden bloquearse de la forma más eficiente utilizando un blindaje terciario (blindaje de atenuación de gamma) compuesto por plomo, acero u otro metal de alta densidad.

Si se usa boro como material absorbente de neutrones en el blindaje de atenuación de neutrones, entonces el flujo de rayos gamma por fuera del blindaje está dominado por los rayos gamma de 478 keV resultantes de la captura de neutrones por parte del ¹⁰B. La TVL para los rayos gamma de 478 keV en plomo es de aproximadamente 1,2 cm, y en hierro, de 5,2 cm. Proporcionar una atenuación de 100 veces de la dosis por unidad de tiempo de rayos gamma inducida por neutrones requeriría un grosor de aproximadamente 2,5 cm de plomo o 10 cm de hierro. La masa de blindaje de hierro requerida para producir este nivel de atenuación sería aproximadamente 3 veces mayor que la masa de blindaje de plomo. En consecuencia, el plomo es la elección preferida para el blindaje de atenuación de gamma.

Miembro de inserción y retirada de muestras

Se desea un mecanismo para insertar y retirar rápidamente muestras de las proximidades de la fuente de rayos X. Esto es particularmente cierto para reacciones de activación de vida corta, tales como la formación del meta-estado de ¹⁹⁷Au que tiene una vida media de 7,73 s.

El blindaje en capas incluye un manguito, o un canal de acceso de muestra, que es substancialmente recto. El tapón 140 llena completamente el canal de acceso de muestra cuando está insertado, y proporciona los medios para insertar y retirar muestras, como se ha descrito anteriormente. Como se ilustra en la figura 2, el perfil exterior del tapón 140 es escalonado para eliminar toda trayectoria en línea recta a través de la cual pudiera escapar radiación de rayos X o de neutrones. Ventajosamente, esto permite dejar mayores tolerancias entre los lados del tapón 140 y las paredes del canal a través del cual pasa el tapón, simplificando tanto la fabricación como el movimiento del tapón.

Determinación de los grosores de los blindajes de atenuación de rayos X, de neutrones y de gamma

El grosor de blindaje de atenuación de rayos X en la dirección hacia delante se estima usando las TVLs tabuladas y el factor de atenuación de dosis deseado. Consideremos un acelerador que produce una dosis por unidad de tiempo sin blindar a 1 m del objetivo en la dirección hacia delante de R Sv/min. Supóngase que la dosis por unidad de tiempo blindada deseada en el punto más próximo accesible por el personal a una distancia d del objetivo sea de r microSv/hora. Para un blindaje de atenuación de rayos X de plomo en el que la TVL para radiación de Bremsstrahlung es independiente de la energía del acelerador en al menos el rango de energía de 4-25 MeV, el grosor de blindaje t está dado por:

$$t = TVL \times \log_{10} [(R \times 60 \times 10^6)/(r d^2)] \quad (1)$$

Por ejemplo, considérese un LINAC que produce una dosis por unidad de tiempo máxima sin blindar de 160 Sv/min. Si el punto más próximo accesible está a 1 m del objetivo y la dosis por unidad de tiempo blindada deseada es de 2,5 microSv/hora, entonces t = 9,8 TVL. Sustituyendo el valor tabulado de 57 mm por TVL se obtiene t = 560 mm.

La determinación del grosor óptimo de blindaje de atenuación de rayos X en diferentes ángulos es un cálculo más complejo, ya que depende no sólo del perfil angular de la emisión de rayos X desde la fuente, sino también de los procesos de dispersión y absorción de rayos X dentro del blindaje. El inventor ha determinado empíricamente que para fuentes de acelerador que producen rayos X con energías de punto final en el rango de 8-14 MeV, los grosores de blindaje de atenuación de rayos X dentro del rango del 60-80 % (y más preferiblemente del 75 %) y dentro del rango del 25-50 % (y más preferiblemente del 50 %) del grosor en la dirección hacia delante son adecuados para ángulos de 90° y 180° con respecto al haz de electrones, respectivamente. Para el ejemplo considerado, se requiere un grosor de blindaje de atenuación de rayos X de 420 mm a un ángulo de 90°, y se requiere un grosor de aproximadamente 280 mm a un ángulo de 180°.

Dentro de estos requisitos globales relativos al grosor de blindaje, la configuración detallada del blindaje puede optimizarse de la forma más conveniente utilizando un código informático de transporte de radiación, tal como una simulación de Monte Carlo. El código de simulación puede usarse para modelar la producción, dispersión y absorción de rayos X, y para registrar la dosis por unidad de tiempo simulada en diferentes posiciones de todo el modelo. La configuración de blindaje puede optimizarse entonces para conseguir la dosis por unidad de tiempo deseada en todos los puntos de la superficie exterior del blindaje. Códigos de simulación de Monte Carlo de propósito general tales como EGS, MCNP y GEANT están fácilmente disponibles.

La determinación del grosor del blindaje de atenuación de neutrones depende de la velocidad de producción de neutrones, que es una función fuerte de la energía de punto final de acelerador. La producción de neutrones puede ocurrir en el objetivo del acelerador, en la muestra irradiada y en el blindaje de atenuación de rayos X. Los datos de producción de neutrones son suministrados por los fabricantes de muchos sistemas de acelerador. También pueden medirse experimentalmente, o calcularse usando códigos informáticos de simulación.

La figura 3 representa la dosis por unidad de tiempo de neutrones por unidad de dosis de rayos X dirigida hacia delante para un acelerador con un objetivo de tungsteno y un blindaje de atenuación de rayos X de plomo. La energía de funcionamiento del acelerador de electrones, y por lo tanto la energía de punto final de rayos X se varía entre 8 y 14 MeV. Los resultados fueron determinados por el inventor utilizando una simulación por ordenador del transporte de rayos X y producción de neutrones, realizada utilizando el código de Monte Carlo MCNP.

Volviendo al ejemplo de un LINAC que produce una dosis por unidad de tiempo de rayos X hacia delante sin blindar de 160 Sv/min, si la energía de funcionamiento del LINAC es de 8,5 MeV, entonces la dosis por unidad de tiempo de neutrones correspondiente será de aproximadamente $160 \times 2 \times 10^{-6} \text{ Sv/min} = 3,2 \times 10^{-4} \text{ Sv/min}$. Si se desea reducir esta dosis por unidad de tiempo a 2,5 microSv/h a una distancia de 1 m, entonces se puede utilizar la ecuación 1 para determinar que $t = 3,9 \text{ TVL}$. Con una TVL de 62 mm para neutrones de baja energía, el grosor de blindaje correspondiente es de 240 mm. Como la producción de neutrones es una función de la energía del LINAC, el grosor diseñado debe calcularse para la curva de energías de funcionamiento/salidas de dosis por unidad de tiempo para la aplicación en cuestión, y seleccionar el grosor mayor.

Como la producción de neutrones es aproximadamente isotrópica, se requiere un grosor de blindaje similar en todas las direcciones. Si el diseño del acelerador de electrones requiere una cavidad substancial para alojar la estructura de aceleración, de manera que la parte del blindaje en una dirección hacia atrás está significativamente más alejada del objetivo que la parte en una dirección hacia delante, entonces la ecuación 1 predice que un grosor de blindaje reducido puede ser aceptable en la dirección hacia atrás, debido al valor mayor de d^2 .

Se puede utilizar una simulación de Monte Carlo acoplada de fotoneutrones para optimizar el diseño detallado del blindaje de atenuación de neutrones. Se crea un modelo de blindaje de atenuación de rayos X y de blindaje de atenuación de neutrones, y los rayos X y los neutrones inducidos por rayos X se rastrean a través del modelo. La dosis por unidad de tiempo de neutrones se registra entonces en los puntos de la superficie del blindaje de atenuación de neutrones. El grosor del blindaje de atenuación de neutrones se puede ajustar para asegurar que esta superficie exterior coincide aproximadamente con un contorno de iso-dosis de neutrones al nivel de dosis por unidad de tiempo deseado.

Como la producción de rayos gamma inducidos por neutrones es proporcional al flujo de neutrones, y los respectivos grosores del blindaje de atenuación de neutrones y del blindaje de atenuación de gamma requeridos para reducir los flujos de neutrones y de rayos gamma a niveles aceptables son ambos proporcionales al logaritmo del factor de reducción de flujo, el grosor requerido del blindaje de atenuación de gamma es proporcional al grosor optimizado del blindaje de atenuación de neutrones.

En el caso de que el blindaje de atenuación de neutrones esté hecho de polietileno que contenga un 5 % de boro en peso, y de que el blindaje de atenuación de gamma esté hecho de plomo, el inventor ha determinado que el grosor óptimo del blindaje de atenuación de gamma es 0,1 veces el grosor de la capa de polietileno secundaria. Por ejemplo, si el grosor del blindaje de atenuación de neutrones en una posición particular es de 300 mm, entonces el grosor óptimo del blindaje de atenuación de gamma en esa posición es de 30 mm. Si se cambia la composición de los blindajes de atenuación de neutrones o de gamma, se puede determinar una constante de proporcionalidad diferente, por ejemplo, mediante el uso de una simulación de Monte Carlo.

La realización descrita en la presente memoria tiene la ventaja de que puede proporcionar servicios de GAA en un formato compacto y reubicable. La realización descrita en la presente memoria permite desplegar una fuente de rayos X basada en LINAC de 8 kW, 8-14 MeV en la superficie de un contenedor de transporte estándar de 6,096 m (de 20'). Con la adición de contenedor(es) adicional(es) que alojan sistemas de manipulación de muestras y de detección de radiación, puede construirse una instalación de GAA completa en una fábrica y luego ser transportada y montada rápidamente en cualquier ubicación deseada. Esto es particularmente ventajoso cuando se desea montar un laboratorio de análisis de minerales en una ubicación remota, tal como en una mina.

Las realizaciones de la invención proporcionan un blindaje de radiación diseñado para su uso alrededor de una fuente de rayos X de alta energía de tal manera que se reduce el tamaño y el peso del blindaje en comparación con los diseños existentes. Ventajosamente, una reducción de tamaño y peso que sea conforme con los parámetros permitidos para un contenedor de transporte estándar de 6,096 m (de 20') permite una instalación más fácil de un equipo de rayos X de alta energía.

A pesar de que se han descrito realizaciones de la invención como particularmente aplicables a campos que requieren el análisis de elementos en muestras minerales, la invención es aplicable también a aplicaciones que incluyen la radiografía, cribado de carga, detección de material fisionable y esterilización. En esencia, la invención es de aplicación en cualquier aplicación que requiera el despliegue de fuentes de rayos X que funcionen a una energía suficientemente alta para producir neutrones.

Aunque no se ilustra, debe apreciarse que para permitir el mantenimiento del acelerador, el aparato estará configurado, en la mayoría de las circunstancias, para permitir el acceso al acelerador. El aparato puede estar configurado, por tanto, con unas puertas en la zona próxima al acelerador. En un caso, el aparato puede estar configurado con unas puertas situadas en el extremo trasero del acelerador, inmediatamente detrás del acelerador, que permiten este acceso. Los expertos en la materia apreciarán que pueden realizarse numerosas variaciones y/o modificaciones a las realizaciones descritas anteriormente sin salirse del alcance de la presente invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas. Por lo tanto, las presentes realizaciones deben considerarse en todos los aspectos como ilustrativas y no limitativas.

REIVINDICACIONES

1. Un aparato de radiación de rayos X blindado (100) para el análisis de materiales por medio de análisis de activación gamma que comprende:
 - 5 una fuente de rayos X, en el que la fuente de rayos X incluye un acelerador de electrones para generar un haz de electrones que tiene una dirección de haz de electrones, y un objetivo de los electrones al que se dirige el haz de electrones;
 - un blindaje de atenuación de rayos X (110, 111) que incluye una cavidad alargada (106) para alojar la fuente de rayos X y que incorpora una zona para alojar una muestra;
 - un blindaje de atenuación de neutrones (120, 121); y
 - 10 un blindaje de atenuación de gamma (130, 131);
 - en el que el blindaje de atenuación de neutrones es adyacente al blindaje de atenuación de rayos X (110, 111) y lo rodea substancialmente; y
 - en el que el blindaje de atenuación de gamma (130, 131) es adyacente al blindaje de atenuación de neutrones (120, 121) y lo rodea substancialmente.
- 15 2. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 1, en el que el blindaje de atenuación de rayos X (110, 111) y el blindaje de atenuación de neutrones (120, 121) tienen, cada uno, unos grosores en la dirección de haz de electrones calculados usando una capa de valor décimo tabulada para rayos X o para neutrones, respectivamente, las salidas de dosis por unidad de tiempo de rayos X y de neutrones de la fuente, respectivamente, y una dosis por unidad de tiempo deseada por fuera del blindaje; y en el que el grosor del blindaje de atenuación de rayos X (110, 111) disminuye con el aumento del ángulo con respecto a la dirección de haz de electrones, y el grosor del blindaje de atenuación de neutrones (120, 121) disminuye con el aumento de la distancia con respecto al objetivo de los electrones.
- 20 3. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 1 o la reivindicación 2, en el que el acelerador de electrones está configurado para generar un haz de electrones que tiene una energía entre 7 MeV y 15 MeV.
- 25 4. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 2 o 3, en el que el grosor del blindaje de atenuación de rayos X (110, 111) a un ángulo de 90° con respecto a la dirección de haz de electrones está dentro del rango del 60-80 % del grosor en la dirección hacia delante, y el grosor a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones está dentro del rango del 25-50 % del grosor en la dirección hacia delante.
- 30 5. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 4, en el que el grosor del blindaje de atenuación de rayos X (110, 111) a un ángulo de 90° con respecto a la dirección de haz de electrones es aproximadamente el 75 % del grosor en la dirección hacia delante, y el grosor a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones es aproximadamente el 50 % del grosor en la dirección hacia delante.
- 35 6. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en el que un primer grosor (t_{XR}) del grosor de blindaje de atenuación de rayos X (110, 111) en la dirección hacia delante se estima por la ecuación: $t_{XR} = TVL \times \log_{10} [(R \times 60 \times 10^6)/(r \times d^2)]$, en donde d es la distancia con respecto al objetivo de los electrones, R es la dosis por unidad de tiempo a 1 m del objetivo de los electrones producida por la fuente, r es la dosis por unidad de tiempo blindada en el punto más próximo accesible por el personal y TVL es una capa de valor décimo predefinida para el material de blindaje de atenuación de rayos X.
- 40 7. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6, en el que el blindaje de atenuación de neutrones (120, 121) tiene un grosor (t_{nt}) en la dirección hacia delante que se estima por la ecuación: $t_{nt} = TVL_n \log_{10} (f)$, en donde TVL_n es una capa de valor décimo predefinida para la atenuación de neutrones de baja energía en el blindaje de atenuación de neutrones (120, 121) y f es una ratio entre una dosis por unidad de tiempo sin blindar y una dosis por unidad de tiempo blindada deseada.
- 45 8. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 7, en el que el grosor del blindaje de atenuación de neutrones (120, 121) a un ángulo de 180° con respecto a la dirección de haz de electrones en una dirección hacia atrás es del 50 % al 100 % del grosor (t_{nt}) en la dirección hacia delante.
- 50 9. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 7 u 8, en el que el blindaje de atenuación de gamma (130, 131) tiene un grosor que es proporcional al grosor del blindaje de atenuación de neutrones (120, 121).

- 5 10. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, que comprende además unos medios de inserción de muestra extraíbles para insertar muestras en el interior de la cavidad alargada (106); en el que los medios de inserción de muestra extraíbles están compuestos por unos bloques de material adyacentes, teniendo cada bloque respectivo un grosor y una composición que coinciden substancialmente con el grosor y con una composición de los blindajes de atenuación de rayos X, de atenuación de neutrones y de atenuación de rayos gamma (110 y 111, 120 y 121, 130 y 131), respectivamente.
- 10 11. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 10, en el que los medios de inserción de muestra extraíbles comprenden además un miembro de plataforma (150) sobre el que se puede situar una muestra (103) que ha de ser irradiada; y en el que los bloques de materiales adyacentes comprenden un primer bloque adyacente al miembro de plataforma, un segundo bloque que hace tope con el primer bloque, y un tercer bloque que hace tope con el segundo bloque; en el que:
- 15 el primer bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente rayos X y que tiene un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de rayos X (110, 111),
- el segundo bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente neutrones y que tiene un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de neutrones (120, 121), y
- el tercer bloque está compuesto por un material para atenuar substancialmente rayos gamma con un grosor que es igual, o substancialmente igual, que el del blindaje de atenuación de gamma (130, 131); y
- en el que el aparato de radiación de rayos X blindado comprende un manguito (141) a través del cual es capaz de atravesar el miembro de plataforma.
- 20 12. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 11, en el que el manguito (141) del aparato (100) y los medios de inserción de muestra extraíbles tienen una tolerancia de holgura de menos de 2,00 mm, más preferiblemente de menos de 1,00 mm, y más preferiblemente de menos de 0,50 mm.
- 25 13. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 11 o 12, en el que el miembro de plataforma de los medios de inserción de muestra extraíbles está construido de acero, o de una sustancia que está libre de elementos que experimenten una activación significativa por rayos X o por neutrones.
14. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, en el que un perfil exterior de los medios de inserción de muestra extraíbles es escalonado, aumentando al menos uno de los bloques adyacentes en altura o anchura en una dirección perpendicular a una dirección de desplazamiento de distancia creciente con respecto al miembro de plataforma.
- 30 15. El aparato de radiación de rayos X blindado (100) según la reivindicación 14, en el que el primer bloque comprende al menos dos escalones, de manera que las dimensiones del primer bloque aumentan en forma escalonada desde los escalones más interiores hasta los más exteriores.

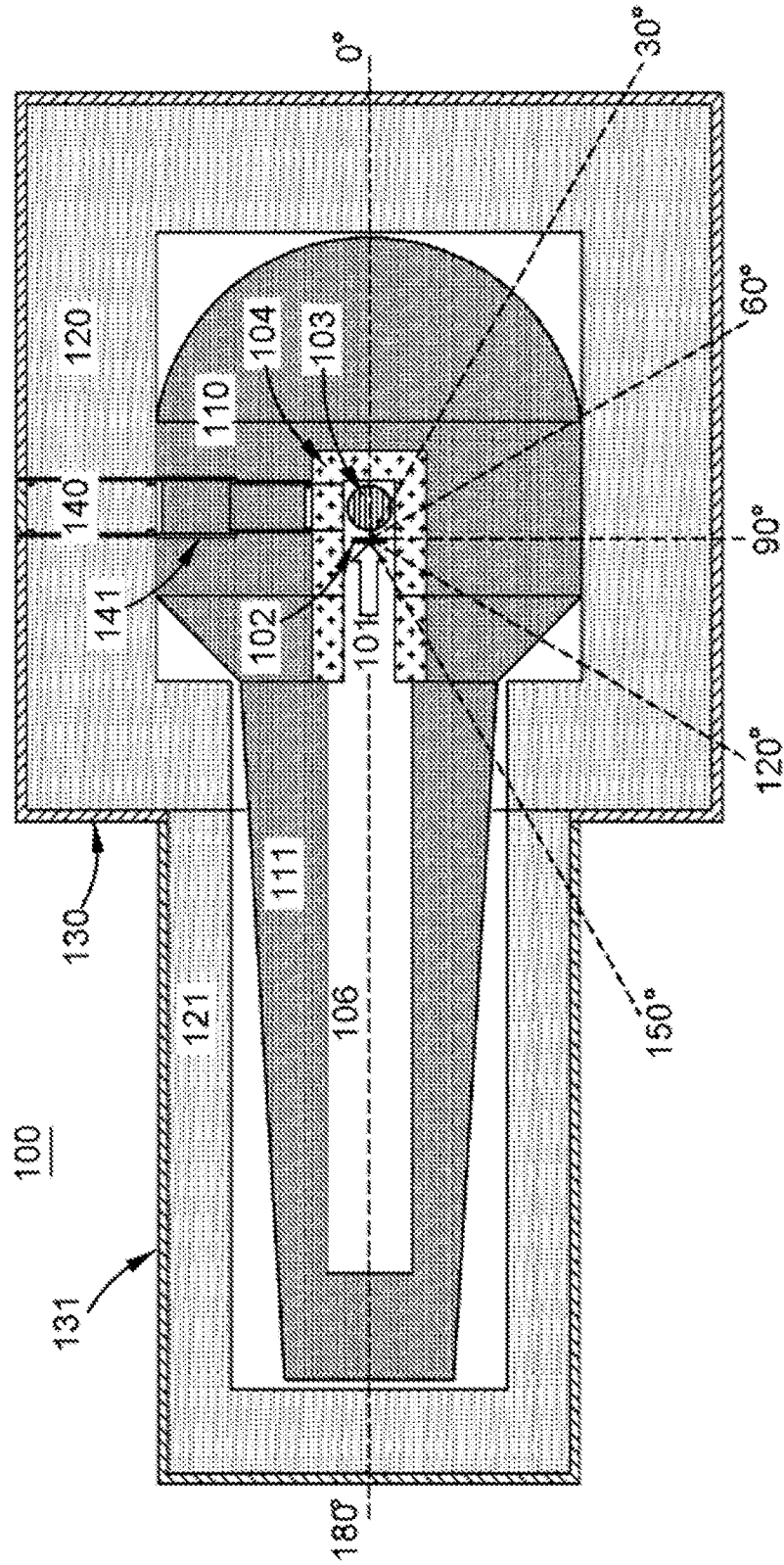


FIGURA 1

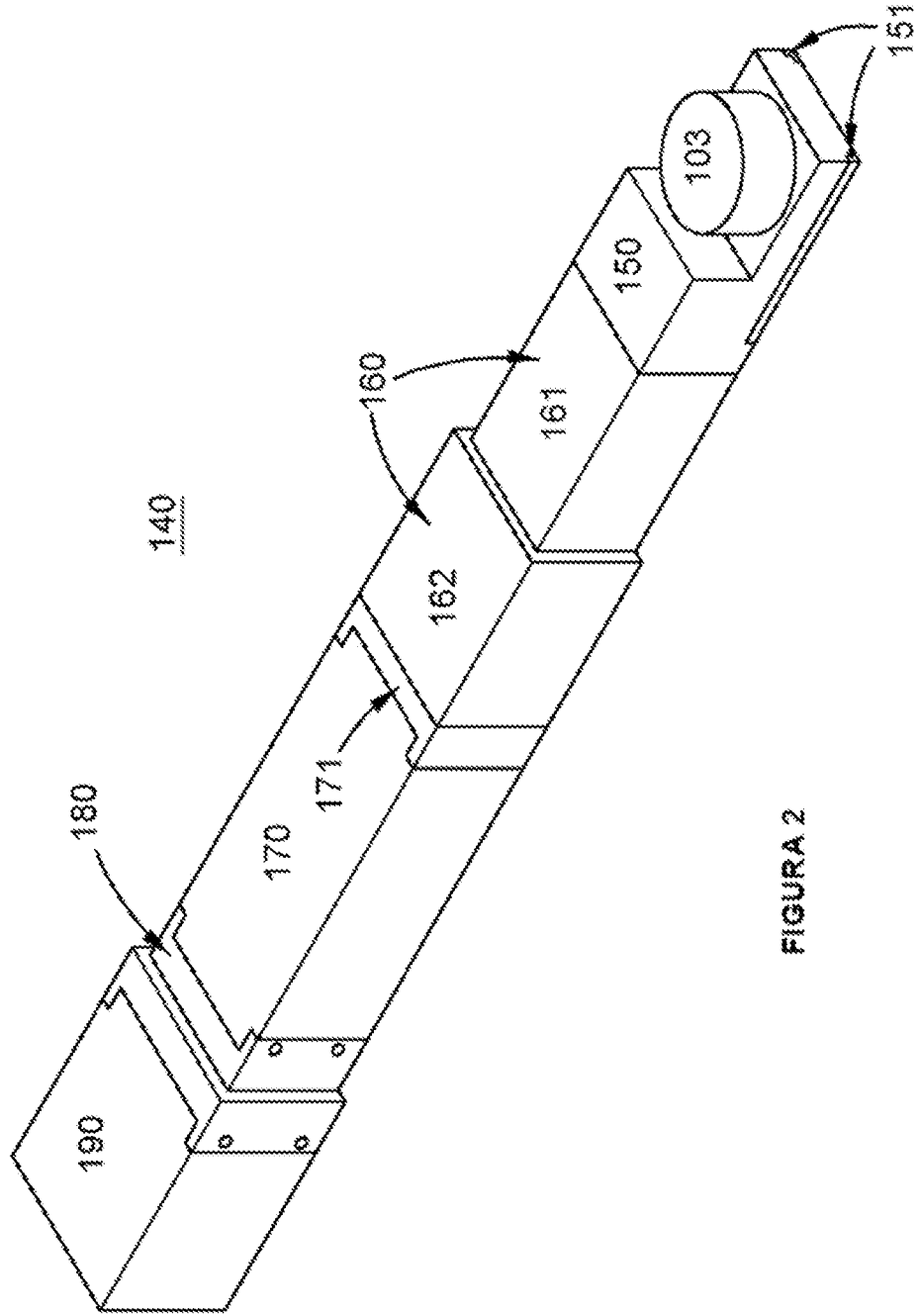


FIGURA 2

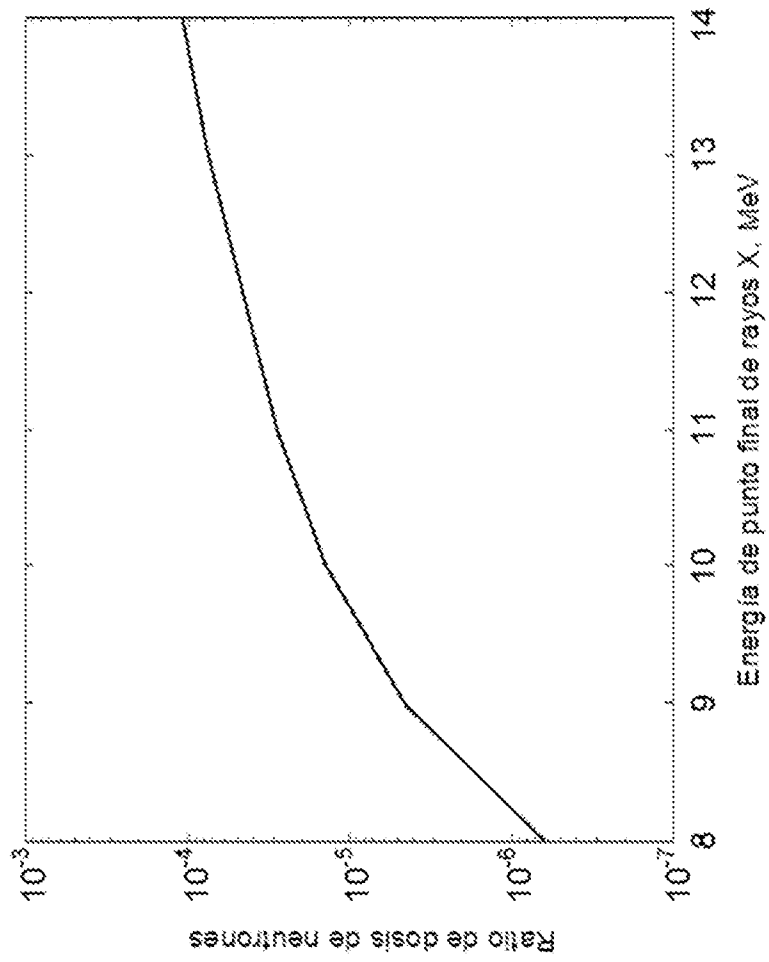


FIGURA 3