(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 377 370**

(21) Número de solicitud: 201132106

(51) Int. Cl.:
G21B 1/03 (2006.01)
G21B 1/11 (2006.01)

(12) PATENTE DE INVENCIÓN CON EXAMEN PREVIO B2

(22) Fecha de presentación: **26.12.2011**

(43) Fecha de publicación de la solicitud: **27.03.2012**

Fecha de la concesión: **15.11.2012**

Fecha de modificación de las reivindicaciones: **14.06.2012**

(45) Fecha de anuncio de la concesión: **27.11.2012**

(45) Fecha de publicación del folleto de la patente: **27.11.2012**

(73) Titular/es:
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
C/ Ramiro de Maeztu, 7
28040 Madrid, ES

(72) Inventor/es:
GONZÁLEZ DÍEZ, José Luis

(74) Agente/Representante:
CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

(54) Título: **REACTOR NUCLEAR DE FUSIÓN.**

(57) Resumen:
Reactor nuclear de fusión, con una vasija (20) que tiene una cámara de fusión (21) en la que se produce la fusión, y una pluralidad de cámaras (2, 4, 6) por cuyo interior circula fluido, separadas entre sí por paredes de blindaje (3, 5). El reactor también tiene una pared de contención (10) que rodea la vasija (20), un equipo para el bombeo de fluidos, un equipo para el tratamiento de los fluidos que circulan por la vasija (20), un equipo de control de la presión de la cámara de fusión (21), un dispensador que proporciona combustible al interior de la cámara de fusión (21), y una pluralidad de equipos láser (17) que inciden dentro de la cámara de fusión sobre los productos de fusión. El reactor nuclear se aplica a la fusión de deuterio-tritio, deuterio-deuterio, hidrógeno-hidrógeno, y conversión total de materia en energía.

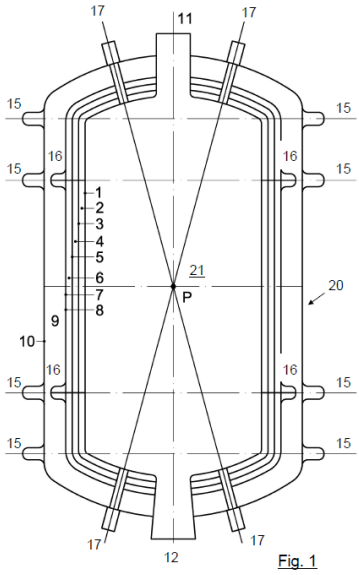


Fig. 1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 40.2.8 LP.

ES 2 377 370 B2

DESCRIPCIÓN

Reactor nuclear de fusión

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCIÓN

La presente invención pertenece al campo técnico de la energía nuclear, y más concretamente a la producción de energía nuclear de fusión. En particular, la presente invención se refiere a un reactor nuclear de fusión “limpio”, de mínima contaminación, de deuterio-tritio, de deuterio-deuterio, de hidrógeno-hidrógeno, y de conversión total de materia en energía.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Los desafíos de la energía y del cambio climático imponen una profunda transformación de nuestras sociedades. Será preciso modificar nuestros modos de vida altamente consumidores de energía para satisfacer las necesidades de nueve mil millones de habitantes, población prevista en el año 2050; cambiar nuestros hábitos de producción; y nuestras costumbres de consumo. Prepararse a largo plazo supone explorar las posibilidades de numerosas tecnologías que están aún en los laboratorios. Se confirma lo que se ha dicho con frecuencia, que el riesgo cero no existe, y una parte considerable de la población interpreta que los reactores nucleares son máquinas peligrosas. Por ello, se estima que deben realizarse estudios con nuevos escenarios.

Tenemos que aceptar que en la naturaleza existen fuerzas que están fuera de nuestro control, que pueden arruinar nuestras economías, y que muestran un carácter destructivo posiblemente mayor que ciertos accidentes nucleares. Evidentemente, no se deberían construir reactores nucleares en zonas sísmicas, aunque estén diseñados para aguantar terremotos de unas características determinadas. La IAEA ha informado que en la fecha del accidente nuclear de Fukushima había 88 plantas nucleares situadas en zonas sísmicas activas, de un total de 442 centrales existentes en el mundo.

Asimismo, desde el Centro de Seguridad Sísmica Internacional de IAEA se informa que las agencias de regulación nuclear deberán examinar los riesgos de tsunamis en plantas nucleares en la zona del Pacífico y posiblemente en otros océanos. Aunque las compañías eléctricas realizan estimaciones de terremotos y tsunamis en base a

estudios geológicos de la zona, siempre existe la posibilidad de que cualquier experiencia del pasado pueda ser superada en el futuro.

Así pues, el accidente de Japón ha puesto en duda la opción nuclear. Tanto más cuanto que este accidente se ha producido, como en el caso del accidente de TMI, en 1979, en un país tecnológico con muchos ingenieros. Existe la opinión bastante generalizada de que no se puede aceptar la repetición de este tipo de accidentes por más tiempo, por lo que algunos países han decidido modificar su política energética radicalmente.

Dos retos para el futuro, aumentar las fuentes de energía y reducir hasta donde sea prácticamente posible la contaminación ambiental; en nuestro caso, con reactores nucleares avanzados y con tecnologías limpias.

En cuanto a energía nuclear de fisión, en el momento actual, el elemento más importante para la producción de energía nuclear de fisión es el uranio que se presenta en la naturaleza, generalmente, con números másicos 234, 235 y 238. La composición porcentual es como sigue: uranio 238, 99.274; uranio 235, 0.720; uranio 234, 0.0055. De estos isótopos, el uranio 235 es el más utilizado en la generación de este tipo de energía. Otros nucleidos fisionables son el uranio 233 y el plutonio 239 que se obtienen a partir del torio 232 y del uranio 238, respectivamente.

En la fisión de un núcleo de uranio 235 se produce una liberación de energía de aproximadamente 200 MeV, es decir, 32 pJ. Así pues, la energía liberada en el proceso de fisión de una masa determinada de uranio 235 equivale aproximadamente a tres millones de veces la energía producida por la combustión de la misma masa de carbón. La fisión de 1.08 kg de material fisil produce aproximadamente una energía térmica de 1,000 MW.d.

Los tipos de reactores nucleares de fisión más utilizados son los siguientes: PWR, BWR, GCR, HWMR y FBR, entre otros.

La fisión nuclear sufre las consecuencias de ser considerada como una fuente de energía sucia, peligrosa y limitada. En efecto, esta energía genera desechos radiactivos que no se sabe que hacer con ellos; los reactores que producen esta energía pueden sufrir serios accidentes; y el uranio y plutonio que se utilizan como combustibles, no son ilimitados, y se pueden emplear en la producción de bombas nucleares.

No existe al presente mecanismo alguno que pueda llevar un reactor nuclear de fisión a una explosión atómica. El uranio que se utiliza generalmente en los reactores nucleares térmicos y epitérmicos puede ser natural o enriquecido en uranio 235.

Cuando el combustible nuclear se empieza a calentar en el proceso de fisión, la sección eficaz de absorción del uranio 238 aumenta y por ello disminuye la multiplicación neutrónica, lo que constituye un efecto autolimitador. Las bombas nucleares se fabrican con material altamente enriquecido de uranio 235 para evitar el citado efecto Doppler. En las etapas de diseño ya se han tomado las debidas precauciones para que no se produzcan configuraciones de masas supercríticas. En realidad no es fácil hacer una bomba nuclear.

La liberación de medios radiactivos producidos durante un accidente nuclear es el primer problema que debe tratarse. Estos productos pueden producir daños por exposición a la radiación, por inmersión en la nube o corriente de agua radiactivas movidas por el viento o el mar. Los efectos de esta radiación, según su intensidad y tiempo exposición, podrían dar lugar a enfermedades e incluso muertes. Por ello, se utilizan barreras para evitar la salida de los productos radiactivos al exterior.

Cuando el sistema de refrigeración del reactor sufre una rotura lo suficiente grande de tal forma que el contenido del refrigerante no puede mantenerse por el sistema de alimentación normal, se tiene un LOCA. Para disminuir los efectos de este accidente las centrales nucleares están dotadas de sistemas de seguridad apropiados. Si estos sistemas funcionan adecuadamente en un LOCA, no debe esperarse un daño no previsto al público.

Una opinión general es que una posible fusión de núcleo podría traer graves consecuencias al público. Por esta razón una de las mayores preocupaciones es el tratar de evitar este tipo de accidentes. Se cree que una posible fusión parcial del núcleo podría llevar a la fusión total del mismo con liberación de los productos radiactivos a tierra o al mar. También puede originarse fallo por sobrepresión de la contención por los gases no condensables liberados en la contención en la fusión del núcleo. En este proceso pueden darse condiciones adecuadas para que en un momento dado se produzca una explosión de vapor.

Después del núcleo del reactor, la piscina de almacenamiento de combustible gastado, se identifica como la zona con inventario mayor de radiactividad. La falta de refrigeración de la misma por rotura de su estructura por seismos , tsunamis u otros accidentes; los fallos de los equipos que tienen encomendada función de refrigeración; y la caída de algún elemento pesado en la piscina, son los caminos más probables para que se pueda producir un accidente en la piscina.

El gran problema de la energía nuclear de fisión es que los daños al público pueden afectar a varias generaciones en caso de accidente, y en condiciones normales los

almacenamientos de sustancias radiactivas suponen una herencia no deseada. Además, los períodos de los radionucleidos solo explican una parte de la historia, pues su actividad se prolonga indefinidamente.

En cuanto a la energía nuclear de fusión, actualmente no existe en funcionamiento ningún reactor de fusión para producción de energía eléctrica de alta potencia. Muchos científicos e ingenieros vienen investigando desde hace varias décadas la aplicación de la energía de fusión en el diseño de reactores nucleares como alternativa a las fuentes energéticas para disminuir la dependencia de otras opciones más onerosas, sin embargo, no se han obtenido aún resultados satisfactorios en este sentido. En el entorno científico se estima que un reactor de fusión no necesita diseñarse necesariamente para la generación neta de energía pues existen otras muchas aplicaciones en las que puede representar un medio útil.

En las reacciones de fusión se forman núcleos más pesados por combinación de núcleos ligeros de determinadas características. La posibilidad de combinación de núcleos ligeros de hidrógeno consigo mismo o con sus isótopos más pesados es baja para su contención a “temperaturas razonables”. El deuterio D (1,2), sin embargo, tiene mayor probabilidad para reaccionar con él mismo, así como con tritio T (1,3) y con helio ligero He (2,3).

D (1,2) + D (1,2) > He (2,3) + n(0,1) + 3.27 MeV

D (1,2) + D (1,2) > T (1,3) + p(1,1) + 4.03 MeV

D (1,2) + He (2,3) > He (2,4) + p (1,1) + 18.3 MeV

El tritio reacciona fácilmente y rápidamente con el deuterio y aunque existen algunas reacciones del deuterio que generan mayor energía, tienen una probabilidad baja de que se produzcan, como la última reacción citada.

T (1,3) + D (1,2) > He (2,4) + n (0,1) + 17.6 MeV

En esta reacción la energía impartida al neutrón es de, aproximadamente, 14 MeV, suficiente para hacer relativista el neutrón.

Cuando los neutrones producidos entran en contacto con un moderador que contiene Li (3,6), entonces éste reacciona con los neutrones y produce tritio que puede separarse fácilmente

Li (3,6) + n (0,1) > Li (3,7) > T (1,3) + He (2,4)

Para que pueda producirse la fusión se necesitan temperaturas muy altas. Dos núcleos que colisionan deben tener suficiente energía para vencer las fuerzas electrostáticas de repulsión por sus cargas. La temperatura a la que la reacción se convierte en autosostenida se llama temperatura de ignición. A esta temperatura el

plasma caliente se mantiene en contacto físico con las paredes de la contención mediante un campo magnético. Esta técnica se denomina fusión por confinamiento magnético, y la energía producida energía de fusión magnética (MFE). Para que se produzca energía debe cumplirse el criterio de Lawson.

EL proyecto más avanzado de reactor de fusión por confinamiento magnético es el Iter (International termonuclear experimental reactor), situado en Cadarache, Bouches – du-Rhone, Francia, actualmente en construcción, y destinado a reproducir sobre la Tierra la energía del Sol. El coste de este reactor se ha elevado de 5 a 15 mil millones de euros, lo que retrasaría la puesta en marcha, inicialmente prevista para 2016, hasta 2019.

Una técnica totalmente diferente para controlar la fusión consiste en crear un plasma reaccionante mucho más denso, confinado en un tiempo mucho más corto que en MFE. Este es el procedimiento de fusión por confinamiento inercial, y la energía obtenida se denomina energía de fusión inercial (IFE). En esta alternativa las condiciones de fusión se obtienen calentando y comprimiendo pequeñas cantidades de combustible, en cápsulas, hasta conseguir la ignición por medio de haces de fotones o partículas cargadas. Se tienen tiempos medios de confinamiento del orden de 10 (-10) segundos y densidades de varios cientos o miles de veces mayores que los cuerpos sólidos normales. La explosión se produce en una cámara de ignición donde se colocan las cápsulas que actúan de blancos, produciéndose el equivalente a una explosión termonuclear de condiciones reducidas. Aunque las condiciones de las ecuaciones de fusión aplicables en la fusión MFE e IFE son equivalentes, así como la posibilidad de disponer de tritio para completar el proceso; sin embargo, los conocimientos y los medios necesarios para llevar a término la producción de energía difieren apreciablemente en ambas tecnologías. En la fusión IFE es necesario alimentar los equipos que envían energía al combustible de los blancos con energía de la red, cuyo consumo puede ser muy elevado, por ello es muy importante conocer la relación entre la energía producida y la energía suministrada. La energía se suministra al combustible por varios medios, como los láseres de estado sólido, láseres KrF, aceleradores de iones ligeros y aceleradores de iones pesados, entre otros.

Se han investigado dos técnicas en IFE para estudiar los efectos de los láseres sobre los blancos. En los blancos de acción directa la energía de impacto se absorbe en la cápsula diectamente; sin embargo, en los blancos de acción indirecta, la cápsula se introduce en una cavidad, denominada hohlraum, que tiene unas aberturas por donde

atraviesan los rayos láser que inciden sobre el combustible de la cápsula. Las dimensiones de las cápsulas son del orden de 1-3 milímetros de diámetro.

Uno de los más fascinantes acontecimientos en la historia del desarrollo del láser desde 1960 es el importante incremento en la potencia disponible en los láseres. Puesto que la potencia se define como la energía entregada por unidad de tiempo, cuando se produce un impulso de luz emitido por un láser y la duración del impulso decrece, la potencia (pico de potencia) durante ese tiempo aumenta. El láser pulsado encuentra muchas aplicaciones, y entre ellas el control de la fusión nuclear. El pico de potencia en un láser ha ido aumentando en un factor de aproximadamente 1,000 cada 10 años durante los últimos cincuenta años. Esto se ha debido a varios avances en la tecnología del láser.

El primer láser de Maiman tenía una potencia bastante alta con una fuente de luz continua. La posibilidad de obtener altas potencias es consecuencia de la física en que se apoya la operación de un láser. La producción de altas potencias con estos equipos está de acuerdo con la mecánica cuántica en este tipo de aplicación. Según su definición, láser significa: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, lo que implica bombeo de energía en los electrones de los átomos de ciertas sustancias, llamado gain material. Estos átomos pueden estar agrupados en diferentes formas y medios para que los láseres puedan desarrollarse. Cuando se excitan electrones de átomos en un medio, los electrones pueden adquirir energías discretas. Si estos electrones son llevados a niveles cuánticos más elevados pueden retener la energía durante un período de tiempo. Cuando la luz con una determinada longitud de onda pasa cerca de estos, se extrae la energía almacenada por los electrones. Así el electrón cede su energía al paso de los fotones de luz y amplifica el haz.

En el proceso del Q-switching láser, en lugar de extraer la energía de la luz durante el período de tiempo de bombeo, la energía se extrae en el tiempo que tardan los fotones en circular adelante y atrás varias veces en el recorrido no obstruido entre dos espejos. El proceso se describe en función de un Q-factor, en el lenguaje de energía eléctrica.

El primer Q-switched láser fue mostrado en 1961. Este láser entrega impulsos de 100 nanosegundos de duración, con un pico de potencia de aproximadamente 1 MW, un salto en potencia de un factor de 1,000 sobre el dispositivo original de Maiman. Desde entonces se han introducido implementaciones en Q-switching en muchos tipos de láseres, particularmente en los que usan cristales de neodimio insertado (Nd:YAG), así como (Nd:glass). Un equipo moderno de este tipo puede entregar impulsos de energía

de hasta un julio con una duración de 1 a 10 nanosegundos, con pico de potencia de un gigawatt. Un láser más avanzado es el MOPA, con impulsos de láser de varios julios.

En 1970, el Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), en California, ha comenzado a desarrollar una serie de láseres cada vez más potentes utilizando la arquitectura MOPA. Este desarrollo viene motivado por la posibilidad de utilizar láseres de alta potencia, de varios cientos de kilojulios, para implosionar cápsulas en instalaciones de fusión de laboratorio, según la técnica conocida como fusión por confinamiento inercial (ICF).

El desarrollo láser ICF en LLNL ha durado más de 40 años y ha culminado con la demostración en 2008 de la National Ignition Facility (NIF), de un láser que imparte impulsos de nanosegundos con la energía combinada de 192 haces que producen 4 millones de julios, un billón de veces más energético y potente que el primer Q-switched láser. También han sido desarrollados Gas láseres según una arquitectura MOPA para aplicaciones de alta energía.

El segundo mayor acontecimiento en el desarrollo de láseres high-peak-power se llevó a cabo en paralelo con la invención del Q-switching. Este desarrollo se conoce con el nombre de mode locking, y los láseres que trabajan con este sistema producen impulsos de una duración más corta de un picosegundo hasta solo unos pocos femtosegundos en algunos casos. Esta técnica ha permitido desarrollar un campo en la óptica dedicado a la utilización de impulsos ultrarrápidos para realizar estudios de física y química. La generación de impulsos ultrarrápidos en mode locking ha desempeñado un papel importante en el desarrollo de láseres de alta potencia. Otro avance significativo en la tecnología mode locked se produjo en 1982 con la invención de Peter Moulton del láser de titanio insertado (Ti:sapphire), cuyas importantes propiedades hacen de él hoy en día, el medio de elección más idóneo para láseres ultrarrápidos.

Strickland y Mourou, utilizando la técnica Chirped-Pulse Amplification, o CPA, han mostrado un sistema láser que genera impulsos de picosegundos con una amplificación de potencia de 100 gigawatts, y se han presentado equipos avanzados con potencias que superan un terawatt, para su utilización en el control de la fusión nuclear, lo que ha supuesto un revolución en high-peak-power láseres ultrarrápidos.

La pasada década ha visto el desarrollo de la tecnología CPA Ti:sapphire en petawatt-class láseres con impulsos de 20 a 50 femtosegundos en los laboratorios del Japanese Atomic Energy Research Institute, cerca de Kyoto, en Japón; en el

Laboratoire d´Optique Appliquée, en Francia; así como en LLNL. Estos sistemas petawatt láser se han utilizado en aceleración de protones y en producción de haces de electrones con energías próximas a los aceleradores de partículas de gran escala. No obstante, los láseres Nd:glass permanecen como el material más idóneo para crear láseres de las más altas potencias.

Recientemente, LLNL en unión con varios socios de U.S., han desarrollado un diseño de una planta de energía IFE, conocida como LIFE (Laser Inertial Fusion Energy), para incorporar todas las tecnologías y materiales disponibles.

La fusión puede llevarse a efecto según el concepto convencional descrito (Conventional ICF), o bien, mediante el concepto más avanzado de ignición rápida (Fast Ignitor ICF), cuyo proceso esta aún en fase de investigación en el OMEGA EP petawatt y OMEGA láseres en la Universidad de Rochester y en GEKKO XII láser en el Instituto de Ingeniería Láser en Osaka, Japón.

Existen dos métodos para producir fusión por impacto de haces de partículas: el blanco estacionario y el blanco no estacionario. La fusión por impacto en blanco estacionario se produce bombardeando un blanco de este tipo o material fusible con partículas rápidas, como por ejemplo, utilizando una corriente de deuterones sobre una pastilla de deuterio. La fusión por impacto sobre blanco no estacionario se lleva a término bombardeando blancos de esta clase de material fusible con partículas rápidas, como por ejemplo, colisionando un haz de de partículas rápidas con otro haz de las mismas características. Estos procedimientos han presentado problemas por la dispersión de las partículas que interaccionan debido a la repulsión de Coulomb.

El interés generalizado en reducir los problemas asociados a la emisión de neutrones en instalaciones nucleares de fusión, tales como el daño por radiaciones ionizantes, activación neutrónica, requerimientos de blindajes biológicos, mantenimiento en plantas, y seguridad, ha generado una serie de trabajos de investigación para estudiar las reacciones de fusión que no producen neutrones. Algunos centros, como el Fusion Technology Institute de la Wisconsin-Madison University han considerado varias etapas en el proceso de implantación de combustibles avanzados para la fusión: el ciclo D-T o D-D (primera generación); el ciclo D-He(2,3) (segunda generación) ; y el ciclo He(2,3)-He(2,3) (tercera generación).

Se pueden citar aquí las investigaciones del Lawrence Plasma Physics, con el programa

Dense Plasma Focus (DPF), soportado inicialmente por el Jet Propulsion Laboratory de la NASA, y en otras investigaciones por el Air Force Research Laboratory; la fusión

Pollywell, con financiación de US Navy; y la máquina Z en el Sandia National Laboratory.

Desde otro punto de vista, la fusión nuclear surge a partir de núcleos atómicos ligeros que se unen para formar un átomo más pesado; un proceso que parece presentar ventajas tales como:

Cuando se produce la parada del reactor, desaparece el término fuente.

No existe la posibilidad de fusión del núcleo.

No se necesita un sistema de enfriamiento en caso de parada rápida.

El almacenamiento de combustible gastado no es necesario.

No se genera "casi" ningún residuo peligroso, ni de riesgo de proliferación.

Se utilizan átomos ligeros, como los isótopos de hidrógeno, que en algunos casos se pueden encontrar fácilmente.

No es posible un embalamiento del reactor.

En caso de accidente, se puede detener fácilmente el reactor y no existen problemas de impacto ambiental, o son mínimos.

Seguridad en el suministro de energía, pues no depende de la importación de otros combustibles.

No se necesitan plantas de enriquecimiento, ni reprocesamiento.

No se producen gases contaminantes como en el caso del carbón.

Proporciona mucha más energía para un peso dado de combustible que cualquier otra tecnología en uso.

Potencialmente, puede suministrar energía por millones de años.

El coste de producción no sufre por problemas de economía de escala.

El coste de la energía del agua y del viento se incrementa después de agotar las zonas óptimas.

Existe una intensa colaboración internacional.

Así pues, se puede calificar la energía de fusión, como una energía limpia, segura, pacífica y sin límite. Con un gramo de deuterio contenido en 30 litros de agua de mar, la fusión puede generar tanta energía como 60 barriles de petróleo de 158 litros cada uno.

Desde que en 1920 el astrofísico A. Eddington emitise la hipótesis de que la energía del Sol podría venir de la fusión de átomos de hidrógeno, una serie de acontecimientos culminarían con los acuerdos de 1985, en los que Gorbatchev y Reagan dejarían sentadas las bases del proyecto internacional Iter, para producir energía por confinamiento magnético, considerado como uno de los proyectos

científicos internacionales más caros, más complejo, más ambicioso y más largo jamás concebido en la historia, pero también el que aporta grandes esperanzas para que la humanidad pueda un día próximo aprovechar las fantásticas promesas de la energía nuclear. Un proyecto que vería su terminación en el año 2027.

Técnicamente, en el proyecto Iter, se trata de engendrar campos magnéticos potentes en el entorno de átomos de deuterio y tritio, para conseguir la fusión de los mismos. Al aumentar la presión y la temperatura se forma un plasma inestable semejante al que se tiene en el Sol. En este estado se producen reacciones nucleares con formación de neutrones y altas energías que se utilizan para estabilizar el plasma y generar calor que se convertirá en energía eléctrica mediante los equipos y máquinas térmicas correspondientes.

Antes de convertirse en una realidad el proyecto Iter, deben resolverse ciertos retos que aún no tienen una solución definitiva, incluyendo el coste actualizado de la construcción de la planta. El primer desafío que debe resolverse es testar la estabilidad del plasma, aunque algunos investigadores opinan que la cuestión más urgente consiste en solucionar los problemas de resistencia de materiales del recinto; si no se resuelven estos problemas el proyecto no habrá servido para nada Además, aunque los átomos de deuterio se encuentran en forma abundante en el agua de mar, los átomos de tritio casi no existen en estado natural. El control del reactor de fusión parece más comprometido que en los reactores de fisión actuales.

El plasma se forma como consecuencia del calentamiento de los componentes del material de fusión hasta lograr las condiciones adecuadas para que se produzca dicha reacción. Se trata de un estado muy particular de la materia – ni sólida, ni líquida, ni gaseosa – que se manifiesta a muy altas temperaturas bajo forma de una sopa de electrones y de núcleos atómicos. Son muchas las inestabilidades susceptibles de desestabilizar el plasma y se producen a todas las escalas, desde el plasma entero hasta la escala de partículas. En un plasma se puede observar el equivalente de todas las inestabilidades que se manifiestan en la superficie del Sol. El comportamiento de las partículas alfa es el punto principal de interrogación en cuanto a la estabilidad del plasma. Si la estabilidad no marcha, no se podrá continuar con el proyecto Iter.

La cuestión de los materiales es una de las claves de la fusión controlada. En primer lugar se consideran los materiales que recubren la cara interna de la cámara del plasma. Estas paredes se pueden recubrir con placas de carbono, átomo ligero resistente a los choques térmicos. Pero el carbono tiene dos inconvenientes mayores: se combina fácilmente con el tritio y pierde su conductividad térmica con el tiempo.

Por ello, en la reparación del recubrimiento interior del tokamak JET (Joint European Torus) situado en Culham, cerca de Oxford (Gran Bretaña), que ha permanecido un año en parada completa, hasta el mes de agosto de 2011, las piezas de carbono se han reemplazado por dos materiales: el tungsteno, muy resistente a elevados flujos de potencia, para cubrir el divertor (la parte de abajo de la cámara de fusión), y el berilio, ligero y resistente, para recubrir el resto de la cámara. Su instalación, que constituye una primicia mundial, tendrá que efectuarse con brazos manipuladores para limitar la exposición a las radiaciones. Esta configuración permitirá ensayar la eficacia de de estos materiales para su utilización en otros reactores de fusión. El óxido de berilio es tóxico, por ello las placas deben manipularse bajo atmósfera controlada. Además, este metal alcalinotérreo sufre un ligero fenómeno de erosión por efecto del plasma.

Los materiales de la estructura también presentan otros problemas por efecto de los neutrones de alta energía, del orden de 14 MeV, frente al espectro de neutrones instantáneos en una reacción de fisión con una mayoría entre 1 y 2 MeV, pero también con neutrones de más de 10 MeV. En estos niveles de energía, los neutrones no solo ocasionan desplazamientos atómicos en los materiales de la estructura, sino que también son fuente de reacciones que producen helio en el seno de estos materiales con formación de microburbujas que pueden dañar los mismos. Actualmente son desconocidos los efectos del bombardeo neutrónico, por ello se ha puesto en marcha el programa IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), para ensayar desde el año 2011 hasta el 2018, con un acelerador de partículas, el comportamiento de los materiales frente a neutrones de 14 MeV.

Se dice que un litro de agua puede proporcionar tanta energía como una tonelada de carbón. No deja de ser una afirmación sin mucho sentido. En efecto, la reacción de fusión implica la interacción de dos átomos de unas características determinadas y en unas condiciones muy especiales para producir energía. Ahora bien, si se utilizase en el proceso de fusión un átomo de deuterio, que se puede extraer fácilmente del agua del mar, cuya reserva en el planeta es abundante, y otro átomo de deuterio, el problema del combustible quedaría resuelto. Sin embargo, esta reacción no se reproduce con facilidad, aunque se sigue investigando tal posibilidad para obtener una posible solución en el futuro. Por ello, los físicos han optado por la combinación del deuterio y el tritio, ya que estos dos átomos fusionan fácilmente, aunque el tritio es radiactivo, con un período de 12.3 años; y contrariamente al deuterio, el tritio es rarísimo.

Se estima que pueden existir solamente 3 o 4 kg de tritio sobre la Tierra y también se encuentra en la alta atmósfera en forma de gas. Los reactores canadienses de tipo CANDU producen tritio como desecho, pero la cantidad disponible, actualmente, por año, no sería superior a 20 kg. Puesto que un reactor de potencia reducida puede requerir anualmente, más de 100 kg de tritio, es evidente que el propio reactor tiene que generar el tritio que necesita para poder funcionar. Este isótopo se formaría a partir de las reacciones de neutrones con litio, material que se debe incorporar en el reactor. Será necesario producir un poco de tritio más que el consumido para poder mantener el funcionamiento del reactor.

Algunos ingenieros del proyecto Iter piensan que así como han surgido dificultades imprevistas en el desarrollo de dicho proyecto, también pueden aparecer buenas sorpresas. Existen científicos y técnicos cualificados que no creen que este tipo de fusión pueda convertirse en una fuente industrial de energía eléctrica en el curso de este siglo.

Desde 1951 algunos países como Rusia, China y, sobre todo Estados Unidos, han venido considerando el interés de un reactor de fusión-fisión en el que no se pediría a la fusión ser una fuente de energía eficaz, sino una simple fuente de suministro de neutrones que irían a bombardear y excitar el combustible nuclear para producir su fisión, multiplicando la energía generada en un factor de 5 a 10.

Existen otras alternativas actuales a los sistemas de fusión por confinamiento magnético (tokamak, stellarator); entre otros, el Laser Megajoule y el proyecto de la Máquina Z, en donde una corriente de 20 millones de amperios circula a través de una red de filamentos metálicos; las densidades y las temperaturas alcanzadas en el plasma formado al fundirse los filamentos crean unas condiciones propicias para la fusión.

Así pues, después de analizar los problemas generados por la energía nuclear de fisión, y las ventajas que ofrece la energía de fusión frente a aquella opción, hemos decidido considerar solamente esta última alternativa. Ahora bien, dentro del campo de la fusión nuclear, también se han expuesto algunos de los grandes retos que tiene planteados el proyecto Iter, de un reactor de fusión que se puede considerar como el proyecto más avanzado en fusión por confinamiento magnético. Por todo ello, hemos estimado oportuno dirigir nuestra invención a la investigación y desarrollo de reactores de fusión por confinamiento inercial con sistemas D-T, D-D, H-H y conversión total.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

En el diseño de una planta nuclear deben tomarse las precauciones convenientes para evitar dosis de radiación indebidas al personal y, asimismo, para la protección de los materiales y equipos de las radiaciones. Para solucionar estos problemas se utiliza la atenuación con la distancia y la introducción de blindajes. Existen dos tipos de blindajes en reactores nucleares: el blindaje biológico, que sirve para reducir las exposiciones a la radiación en la proximidad de las fuentes radiactivas; y el blindaje térmico, que se emplea para evitar un calentamiento excesivo de la vasija del reactor.

Para poder diseñar un blindaje correcto es preciso conocer las fuentes de radiación. En el caso de reactores nucleares las fuentes de neutrones y de radiación gamma son las más importantes aunque también pueden formarse neutrinos y partículas cargadas, entre otras. La existencia e importancia de cada una de estas fuentes varía según el tipo de reactor.

Fuentes de neutrones en los reactores nucleares pueden ser neutrones instantáneos, neutrones diferidos de fisión, neutrones de activación, fotoneutrones, y neutrones procedentes de reacciones.

En determinados casos, la desintegración de algunos nucleidos radioactivos puede efectuarse por emisión de un neutrón. Esto ocurre cuando la energía de excitación del núcleo padre excede de la energía de ligadura de los neutrones dentro del núcleo. De hecho, cuando existe este exceso de energía, la emisión de neutrones es la forma más normal de desexcitación.

Los fotoneutrones son los neutrones producidos como resultado de las reacciones (γ,n). Este tipo de reacciones tiene una alta energía umbral, superior a 7 MeV en la mayoría de los casos. Normalmente, los fotoneutrones, debido a su baja probabilidad de producción no presentan problemas en blindaje de reactores. Los nucleidos que pueden emitir fotoneutrones, y que se pueden presentar en algún estudio más detallado de blindajes, son: D 2, Be 9, C 13 y Li 6. Las energías umbrales para estos isótopos son respectivamente: 2.23, 1.67, 4.9, y 5.3 MeV.

Se producen neutrones como consecuencia de reacciones de partículas alfa con núcleos de litio, berilio, oxígeno, boro y flúor. Estos elementos se hallan presentes en algunas fuentes de neutrones para uso en experimentación y en el arranque de reactores de fisión. Es preciso tener en cuenta en el blindaje estos neutrones que pueden llegar a energías de 10 MeV.

Se pueden considerar las siguientes fuentes de radiación gamma en reactores nucleares: radiación gamma instantánea, radiación gamma diferida de fisión, radiación gamma de captura, radiación gamma de activación, radiación gamma de reacciones, radiación gamma de dispersión inelástica, radiación gamma de aniquilación, y bremsstrahlung.

La captura radiativa de neutrones por núcleos a energías térmicas y epitérmicas produce radiación gamma secundaria, comúnmente llamada radiación gamma de captura. Los rayos gamma procedentes de captura radiativa y los de dispersión inelástica de neutrones se emiten simultáneamente con el proceso de interacción. El núcleo se puede activar también en una interacción neutrónica con un período que puede durar años, emitiendo fotones y otros tipos de radiación. Hay que tomar en consideración la activación de refrigerantes y moderadores además de los materiales estructurales y el propio blindaje, por lo cual hay que estudiar por separado cada uno de los materiales utilizados.

En ciertas reacciones de neutrones con núcleos se emite una partícula distinta de un neutrón, acompañada de una emisión de radiación gamma. Así sucede, por ejemplo, en la reacción B 10 (n,α) Li 7. El boro actúa en este caso como un supresor de fotones, ya que se produce radiación gamma de baja energía que desaparece rápidamente, propiedad que también gozan el Li 6 y N 14.

Los rayos gamma de dispersión inelástica proceden de la desexcitación del núcleo después de la emisión inelástica del neutrón. Pueden ser importantes en el blindaje y en el núcleo, sobre todo cuando la energía de los neutrones es elevada.

La radiación gamma de aniquilación y bremsstrahlung son de menor importancia que las anteriores, pero la última debe tomarse en consideración cuando se emiten partículas beta de alta energía, como en el caso de absorción de neutrones por el Li 7 que pasa a Li 8 y después se desintegra a Be 8 con emisión de partículas beta de hasta 13 MeV.

Aparentemente cualquier material podría utilizarse para blindaje, aún los gases tienen cualidades para ello, sin embargo, la baja densidad de estos últimos no parece indicar que sean elementos apropiados. El aire, a pesar de su baja densidad, se emplea con frecuencia como medio de blindaje.

El agua es un mal atenuador de la radiación gamma pero tiene propiedades excelentes de atenuación frente a los neutrones de energía moderada por su elevado contenido de hidrógeno. Como el oxígeno no tiene capturas de neutrones térmicos y la sección de captura del hidrógeno para neutrones térmicos es baja, con emisión de

rayos gamma de 2.2 MeV, la producción de rayos gamma secundarios por el agua es relativamente baja.

El agua no es el medio ideal para el blindaje frente a neutrones rápidos, pero afortunadamente el hierro del acero es bastante efectivo contra este tipo de neutrones y además blinda contra gammas también, aunque no es el medio ideal para esta última clase de blindaje. Así pues, los tanques de acero conteniendo agua pueden realizar un buen blindaje. La pared del tanque más próxima al núcleo de un reactor de fisión eliminará los neutrones rápidos, el agua interior del tanque termalizará los neutrones y capturará algunos de ellos. La pared más alejada del núcleo anulará los rayos gamma de captura.

Uno de los mejores materiales para blindaje gamma es el plomo. También podría blindarse esta radiación con uranio pero este elemento es más útil como combustible nuclear que como material de blindaje. El tungsteno es un buen atenuador de la radiación gamma, mejor que el plomo, pero su coste es elevado. El plomo puede utilizarse en zonas de difícil blindaje por otros medios, pero no es un material estructural y por ello debe diseñarse la estructura soporte previamente, salvo en los casos que se extienda sobre el suelo o paredes. Sus propiedades se debilitan a temperaturas por encima de 60 grados centígrados, aproximadamente. Así pues, el plomo debe unirse al acero. El plomo tiene propiedades relativamente pobres frente a los neutrones y produce rayos gamma de 7.4 MeV por captura de neutrones térmicos. Las impurezas del plomo pueden causar importantes problemas de activación.

Por sus propiedades de moderación y como reflector, el grafito se ha utilizado ampliamente en el diseño de reactores. Cuando se emplea en forma pura no muestra apenas rayos gamma secundarios.

El hierro se encuentra en los reactores formando parte de las estructuras de acero. Este es un buen material de blindaje por su alta densidad pero presenta ciertos inconvenientes frente a la atenuación neutrónica. El hierro produce rayos gamma secundarios de hasta 10 MeV, la mayor parte de 7.6 MeV. Sus propiedades de blindaje se encuentran entre las del agua y el plomo. La activación del Fe 58 produce Fe 59 con un período de 59 días, con emisión de radiación gamma de 1.5 MeV. Este fenómeno puede originar problemas de acceso al reactor. Los aceros pueden sufrir fragilización después de estar sometidos a altos flujos neutrónicos integrados. El hierro presenta una sección eficaz total mínima de 0.15 barn para neutrones de aproximadamente 25 MeV. Esto puede facilitar el paso de este tipo de neutrones en un blindaje, lo que no sucede si se añade algún material como el agua u hormigón, ya

que en este caso después de ser moderados los neutrones, son finalmente absorbidos.

Por la gran sección de absorción del boro 10 para los neutrones térmicos, con liberación de partículas alfa de fácil absorción y radiación gamma de 0.5 MeV que se atenúa con facilidad, se utiliza este material solo o combinado con otros elementos. El agua borada representa una mejora sobre el agua ordinaria.

El litio 6 y el nitrógeno 14 también actúan como el boro 10 en la supresión de fotones de captura ya que se emiten partículas alfa en las absorciones de neutrones.

El polvo de tungsteno mezclado con níquel, cobre y hierro ha sido utilizado en aleaciones de alta densidad (18 gr/cm3). Este material tiene mejores propiedades estructurales que el plomo pero puede requerirse el empleo de acero par soportar el tamaño limitado de las piezas de tungsteno. Aunque es mejor que el plomo por unidad de espesor para la atenuación de neutrones, es peor para las producciones secundarias, teniendo el tungsteno un coeficiente de atenuación másico inferior al plomo para la radiación gamma.

El mejor atenuador de neutrones conocido es el hidruro de litio que contiene 12,6 % de peso en hidrógeno, una densidad de 0.78 gr/cm3 y un punto de fusión de 683.5 grados centígrados. Se combina activamente con agua y es de difícil fabricación. Otros materiales de blindaje lo constituyen el uranio 238, que es uno de los mejores atenuadores de los rayos gamma; el polietileno, que por su baja densidad se utiliza en reactores móviles; los vidrios de alta densidad conteniendo plomo, que presentan buenas propiedades ópticas; el hormigón, que es un buen medio de blindaje para todo tipo de radiaciones, como por ejemplo para la absorción de radiación gamma y la atenuación de neutrones; y el suelo ordinario.

Por tanto, para producir una reacción de fusión eficiente y segura con respecto a posibles radiaciones, la presente invención se refiere a un reactor nuclear de fusión, que tiene al menos una vasija de acero en la que se produce la fusión de unas pastillas de combustible, que son las que producirán la fusión. La vasija del reactor está formada por una cámara de fusión en la que se produce la fusión, que está delimitada por una pared interna, por una pluralidad de cámaras por cuyo interior circula fluido, separadas entre sí por respectivas paredes de blindaje, y por una pared externa, que comprende a su vez un recubrimiento de grafito. Las paredes interna y externa, así como las paredes de blindaje presentan aberturas por donde se introducen canalizaciones que permiten la comunicación de la vasija con el exterior

para la introducción del combustible, fluidos, y todos los elementos necesarios para que se produzcan las reacciones.

El reactor presenta también al menos una pared de contención la cual rodea la vasija, existiendo entre dicha pared de contención y la pared externa de la vasija un espacio de separación.

De forma preferente, la pared de contención está realizada mediante una matriz de resina de epoxi y refuerzo de grafito, o equivalentemente en acero.

Adicionalmente, el reactor objeto de la presente invención tiene un equipo de bombeo, para el bombeo de fluidos a la vasija y la circulación de dichos fluidos por ésta, un equipo de tratamiento de fluidos para el tratamiento de los fluidos que circulan por la vasija, un equipo de control de la presión de la cámara de fusión, un dispensador de combustible que proporciona pastillas de combustible al interior de la cámara de fusión, y una pluralidad de equipos láser que inciden en la cámara de fusión sobre las pastillas de combustible.

De acuerdo con una realización particular de la invención, la pared interna de la vasija puede presentar un recubrimiento sólido, pudiendo ser dicho recubrimiento litio sólido poroso.

Alternativamente, la protección adicional de la pared interna de la vasija puede consistir en un recubrimiento líquido.

Preferentemente, las paredes interna y externa, y las paredes de blindaje de la vasija tienen forma cilíndrica en su parte central y forma de casquete esférico en su parte superior e inferior.

En cuanto a los equipos láser que inciden sobre las pastillas de combustible, de forma particular, éstos están dispuestos en la zona superior e inferior de la vasija, y producen incidencia en el interior de una zona cónica de vértice un punto interior de la cámara de fusión, donde se realiza la fusión, y su zona cónica simétrica respecto de dicho punto interior, dirigiendo de esta forma los productos de fusión de las pastillas de combustible a la zona central de la vasija y evitando así el impacto sobre los propios equipos láser.

Las reacciones que se pueden llevar a cabo en el presente reactor nuclear de fusión son las siguientes: reacción deuterio-tritio, en la que las pastillas de combustible son de deuterio y de tritio; reacción deuterio-deuterio, en la que las pastillas de combustible son de deuterio, reacción hidrógeno-hidrógeno, en la que las pastillas de combustible son de hidrógeno; y de conversión total de hidrógeno, u otro elemento, u otro compuesto.

De acuerdo con aplicaciones particulares de la invención, el reactor nuclear puede tener estructura modular, presentando una pluralidad de vasijas conectadas en línea.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

A continuación, para facilitar la comprensión de la invención, a modo ilustrativo pero no limitativo se describirá una realización de la invención que hace referencia a una serie de figuras.

La figura 1 es una sección esquemática de una realización de la vasija y pared de contención de un reactor de fusión objeto de la presente invención, que muestra los componentes esenciales.

La figura 2 representa la sección de una realización particular de la vasija y pared de contención de un reactor de fusión que presenta un recubrimiento sólido en la superficie que recibe el impacto de los productos procedentes de la fusión.

La figura 3 muestra un detalle de la sección del recinto de contención, con indicación de las paredes y zonas de circulación de fluidos.

La figura 4 ilustra el mismo esquema que la figura 3, pero sin revestimientos.

La figura 5 corresponde a un reactor con un recubrimiento líquido en la superficie que recibe el impacto de los productos procedentes de la fusión, que además muestra entradas y salidas de tuberías.

La figura 6 muestra un detalle de las conexiones de las tuberías y las zonas por donde circulan los fluidos dentro de la vasija.

La figura 7 representa la deformación de la pastilla de combustible durante la fusión, y su evolución, como consecuencia del impacto de los rayos láser en un diseño especial del proceso de ignición.

La figura 8 ilustra la disposición general de una Planta Nuclear con dos reactores de fusión.

La figura 9 representa esquemáticamente la sección transversal de un reactor de fusión en posición vertical montado sobre la bancada de un barco.

La figura 10 muestra la sección de un reactor de fusión en posición horizontal sobre una bancada.

La figura 11 representa el esquema de un reactor de fusión módular formado por cinco vasijas en línea.

La figura 12 ilustra el diseño de una vasija con varias secciones, de un reactor nuclear de fusión.

En estas figuras se hace referencia a un conjunto de elementos que son:

1. pared interna de la vasija del reactor
2. primera cámara de circulación de fluido de la vasija
3. primera pared de blindaje de la vasija
4. segunda cámara de circulación de fluido de la vasija
5. segunda pared de blindaje de la vasija
6. tercera cámara de circulación de fluido de la vasija
7. recubrimiento de grafito
8. pared externa de la vasija del reactor
9. espacio de separación entre la vasija y la contención
10. pared contención de la vasija
11. entrada de helio y combustible
12. salida de helio
13. espacio de refrigeración de la zona superior
14. espacio de refrigeración de la zona inferior
15. primeras bridas de la pared contención
16. segundas bridas de la vasija
17. láseres
18. distribuidor
19. recubrimiento sólido de la vasija
20. vasija
21. cámara de fusión de la vasija
22. recubrimiento líquido de la vasija
23. pastillas de combustible

P punto interior de la cámara de fusión donde se realiza la fusión

DESCRIPCIÓN DE REALIZACIONES PREFERENTES DE LA INVENCIÓN

El objeto de la presente invención es un reactor nuclear de fusión.

Tal y como se puede apreciar en las figuras, el reactor nuclear de fusión está formado por al menos una vasija 20 de acero en la que se produce la fusión de unas pastillas de combustible 23, y por al menos una pared de contención 10 que rodea la vasija 20, existiendo entre dicha pared de contención 10 y la pared externa 8 de la vasija 20 un espacio de separación 9. De forma preferente, esta pared de contención 10 está realizada en una matriz de resina de epoxi y refuerzo de grafito.

A su vez, la vasija 20 presenta una cámara de fusión 21 en la que se produce la fusión, delimitada por una pared interna 1, una pluralidad de cámaras 2,4,6 por cuyo interior circula fluido, que están separadas entre sí por respectivas paredes de blindaje 3,5, y una pared externa 8, que comprende a su vez un recubrimiento de grafito 7.

Las paredes interna 1 y externa 8, así como las paredes de blindaje 3,5 de la vasija 20 tienen aberturas para la introducción de canalizaciones, las cuales permiten la introducción de las pastillas de combustible 23 y los fluidos necesarios.

Adicionalmente, el reactor objeto de la presente invención tiene un equipo de bombeo, para el bombeo de fluidos a la vasija 20 y la circulación de dichos fluidos por ésta, un equipo de tratamiento de fluidos para el tratamiento de los fluidos que circulan por la vasija 20, un equipo de control de la presión de la cámara de fusión 21, un dispensador de combustible que proporciona pastillas de combustible 23 al interior de la cámara de fusión 21 a través de la entrada 11, y una pluralidad de equipos láser 17, los cuales inciden en la cámara de fusión sobre las pastillas de combustible 23.

De acuerdo con diferentes realizaciones de la invención, la pared interna 1 de la vasija 20 tiene un recubrimiento para aumentar la protección. Las figuras 2 y 3 muestran una realización del reactor en la que la pared interna 1 de la vasija 20 tiene un recubrimiento sólido 19, que preferentemente estará realizado en litio sólido poroso. Alternativamente, la figura 5 muestra una realización del reactor en la que la pared interna 1 de la vasija 20 tiene un recubrimiento líquido 22.

Tal y como se puede observar en las figuras, de acuerdo con una realización preferente de la invención, las paredes interna 1 y externa 8, y las paredes de blindaje 3,5 de la vasija 20 tienen forma cilíndrica en su parte central, y forma de casquete esférico en su parte superior e inferior.

De acuerdo con realizaciones particulares de la invención, la pared de contención 10 se une a una estructura soporte mediante primeras bridas 15, mientras que las diferentes cámaras 2,4,6 de la vasija 20 están unidas entre sí mediante segundas bridas 16.

Con referencia a los equipos láser, para producir la fusión, preferentemente éstos están dispuestos en la zona superior e inferior de la vasija 20, y además producen su incidencia en el interior de una zona cónica de vértice un punto interior P de la cámara de fusión 21 donde se realiza la fusión, y su zona cónica simétrica respecto de dicho punto interior P, dirigiendo los productos de fusión de las pastillas de combustible 23 a la zona central de la vasija 20.

De acuerdo con diferentes aplicaciones del presente reactor, en éste se llevan a cabo las siguientes reacciones de fusión.

Reacción de fusión deuterio-tritio, en la que las pastillas de combustible 23 son deuterio y tritio, confinados inercialmente.

Para dicha reacción el reactor tiene una pared de contención 10, y dentro de la contención 10 se aloja una vasija 20 que tiene en su interior varias cámaras 2,4,6 de forma cilíndrica en la zona central y de casquete esférico en la parte superior e inferior. Esta vasija 20 tiene forma modular para facilitar el mantenimiento y en su parte más interior se aloja la cámara de fusión 21, que incorpora las capas de revestimiento. También incluye otras cámaras y los espacios para los refrigerantes, moderadores y blindajes.

La planta se proyecta para producir 1,000 megawatts de potencia eléctrica con un rendimiento de conversión termoeléctrica estimado de 33 por ciento, para poder realizar estudios comparativos con otros tipos de centrales nucleares de fisión. De acuerdo con el cálculo efectuado se ha determinado un diámetro de 15 metros de la circunferencia interior de la primera pared de impacto de los neutrones procedentes del centro de la cámara 21 en donde se produce la ignición del combustible (Fig.1). Las dimensiones interiores de la cámara de fusión 21 dependen de la potencia del reactor, del sistema de fusión, de los materiales empleados, de la clase de revestimientos utilizados, del período de vida estimado del reactor y del tipo de aplicación, entre otros factores.

El reactor de potencia utiliza cápsulas esféricas de combustible que son suministradas automáticamente por un inyector situado en la parte superior de la cámara, con una secuencia que puede variar de 10 a 15 por segundo, es decir, de 864,000 a 1.29 millones por día, a través de la entrada 11; y van dirigidas hacia el centro de la cámara de fusión 21 donde son implosionadas; o mediante un prolongador que contiene un peine con cápsulas situadas en el centro de la cámara 21, o por otro procedimiento equivalente. Estas cápsulas contienen deuterio y tritio, tienen un espesor de 1-3 milímetros y se mantienen a temperaturas suficientemente bajas para que estos elementos se encuentren en estado líquido. Para efectuar la fusión de las cápsulas se utilizan haces de rayos láser procedentes de equipos láser 17 situados en las zonas de los casquetes, u otros procedimientos equivalentes. Estas cápsulas se colocan, generalmente, en el centro de la cámara de fusión, pero puede variarse su posición

modificando la dirección de los rayos láser 17 mediante un equipo automático que permite desplazar el punto de impacto, o con otros procedimientos.

El sistema para energizar el combustible está basado en láser-diodos, que permiten emitir haces de rayos de 10 a 15 veces por segundo, indefinidamente. El equipo consta de 400 líneas que pueden producir hasta 4 megajulios. Se considera que tiene un rendimiento del 15% y una ganancia en la fusión de las cápsulas de 60.

Aunque se ha observado en pruebas de implosión de cápsulas muy pequeñas, realizadas aisladamente, que no se producían daños importantes en la primera pared, esta situación varía cuando las cápsulas son grandes y las implosiones muy repetidas, como en el caso de la producción de potencia útil en sistemas de fusión por confinamiento inercial, y, por ello, deben desarrollarse medios para la protección de la cámara de fusión, de los productos de fusión de las cápsulas. Aproximadamente, el 75% de la energía de fusión se produce por neutrones de alta energía, procediendo el resto de la radiación primaria y residuos de los blancos. Así pues, se necesita un medio moderador para convertir la energía cinética del neutrón en energía térmica. Se han utilizado varios materiales para efectuar esta función. En el caso del litio se tienen las siguientes reacciones:

$$Li(3,6) + n(0,1) > He(2,4) + T(1,3)$$

$$Li(3,7) + n(0,1) > He(2,4) + T(1,3) + n(0,1)$$

Como se puede observar, el Li(3,7) permite evitar la pérdida de neutrones, produciendo, además, tritio. Esta última reacción tiene una energía umbral de 4 MeV y una sección eficaz más baja que la reacción del Li(3,6). En caso de moderación de los neutrones antes de alcanzar el litio fértil, no tiene lugar la reacción del Li(3,7) y entonces la relación de enriquecimiento se hace inferior a la unidad, siendo necesario incorporar en el manto un multiplicador de neutrones. Como consecuencia del enriquecimiento de neutrones producido por estas reacciones se produce un factor de multiplicación de 1.2.

Para evitar los daños producidos por los neutrones de 14 MeV y los residuos de las microexplosiones, y asimismo conseguir el tritio necesario para poder mantener la reacción de fusión, es preciso colocar capas de litio, sólidas o líquidas, u otro material equivalente, recubriendo las paredes del interior de la primera cámara. Existen varias soluciones:

Una de ellas son los recubrimientos sólidos 19, (Fig.2), en los que se dan varias posibilidades:

O bien, recubriendo la pared interna 1, de acero, con una capa de litio en forma sólida porosa de 50 centímetros de espesor por el interior, y la parte exterior, con una capa de litio en forma sólida porosa de 100 centímetros de espesor (Fig.3).

O bien, recubriendo la pared interna 1, de acero, con una capa de litio en forma sólida porosa de 100 centímetros de espesor por el interior.

Alternativamente, la pared interna 1 es de una aleación de tungsteno y cromo, y tiene por el exterior un revestimiento de 50-100 centímetros de espesor de litio en forma sólida porosa, o sin revestimiento (Fig.4).

Puede utilizarse directamente como primera pared interna de impacto “nanosteel”.

La “sonda atómica” va a permitir investigar nuevos materiales cuyo análisis con microscopio electrónico resultaba extremadamente difícil. Así se podrán estudiar aceros destinados a reactores de fusión para resistir el impacto de los neutrones en la primera pared.

Alternativamente se pueden utilizar los recubrimientos líquidos 22 (Fig.5), los cuales también presentan diferentes opciones:

O bien, recubriendo la pared interna 1con una capa líquida de litio por el interior de un espesor de 50 centímetros, y una capa líquida de litio por el exterior de 100 centímetros.

O bien, recubriendo la pared interna 1 con una capa líquida de litio de 100 centímetros por el interior.

Los casquetes de la cámara 21 requieren un tratamiento especial por su posición en la misma y por la proximidad de los equipos de láser 17.

En el caso de recubrimientos sólidos 19, una corriente de helio atraviesa la cámara 21 introduciéndose por un orificio situado en la parte superior y saliendo por otro orificio posicionado en la parte inferior. El espacio posterior de la pared interna 1 se refrigera también por helio. El calor acumulado por el helio a su paso por la cámara 21 se cede en los intercambiadores a los fluidos que accionan las turbinas. El tritio se separa para introducirlo en cápsulas. En los revestimientos con líquidos 22 se utilizan refrigerantes líquidos. Existen múltiples alternativas para la disposición de los refrigerantes y moderadores lo que supone unas condiciones de diseño especiales en cada caso (Fig.6).

Por consideraciones de corrosión, en caso de utilización de acero inoxidable, la temperatura del litio debe ser inferior a quinientos grados centígrados, lo que

determina una presión de vapor en el interior de la cámara 21, que debe ser adecuada para que pueda producirse la fusión por láser de las cápsulas de combustible en la cámara 21. Por ello, deben efectuarse experimentos para fijar la presión de vacío requerida en la cámara 21 antes de la implosión y durante la evolución de ésta, con la instalación de un equipo de control de presión.

A pesar de las ventajas que supone la exposición del interior de la cámara 21 a un flujo de radiación uniforme, como consecuencia del proceso de fusión de las cápsulas, el diseño de la cámara de fusión 21 en forma esférica presenta problemas de ingeniería; por ello, se ha preferido la geometría cilíndrica. Además, con esta disposición quedan más protegidos los equipos láser 17, al estar más alejados del centro de la cámara 21. Esta situación se mejora con la invención que se aporta del proceso de ignición secuenciada por colisión de haces de láser exawatts sobre la cápsula, o medios equivalentes, que deforman convenientemente la misma, proyectando los productos de fusión fundamentalmente sobre la zona cilíndrica de la cámara, evitando los casquetes.

Este reactor incorpora, además, en la cámara 21, un equipo de impulsión de haces de partículas de materiales ligeros para producir energía de fusión. Se ha dispuesto una configuración geométrica cúbica en donde los haces que se introducen por los vértices siguen la dirección de las diagonales interiores, impactando en el centro del cubo, lo que constituye una solución de mayor rendimiento. También se han preparado configuraciones en forma de icosaedro y de dodecaedro regulares. En el momento actual las posibilidades de producción de energía de alta potencia por este procedimiento son reducidas debido a las limitaciones que impone el número máximo de partículas que pueden llevar estos haces. Se ha previsto su utilización para realizar investigación observando la luminosidad.

Considerando los valores de los rendimientos de las diferentes etapas del proceso de generación de energía, el cálculo muestra que se puede obtener una ganancia total de 3.56 en la planta de fusión de deuterio- tritio propuesta.

Reacción de fusión deuterio-deuterio, en la que las pastillas de combustible 23 son deuterio.

Como desventajas en la generación de energía de fusión mediante el sistema deuterio-tritio, comentado anteriormente, se pueden citar:

La radioactividad que se produce en la estructura interior del reactor como consecuencia de los neutrones que se originan en la fusión.

Depende de la posibilidad de disponer de litio para la producción del tritio necesario para la reacción deuterio-tritio.

Requiere el manejo del radioisótopo tritio.

La mayor parte de la energía es debida a los neutrones generados en la fusión, lo que limita su utilización en un proceso de conversión directa de energía.

Por tanto, para intentar solventar estas objeciones se puede tratar de producir la reacción deuterio-deuterio.

Si bien es más difícil de producir la reacción deuterio-deuterio que la deuterio-tritio, también puede llevarse a término. Aunque en los sistemas deuterio-deuterio se cuenta con la presencia de tritio, sin embargo, no es preciso su enriquecimiento y gran parte del tritio producido se quema en el reactor, lo que implica la producción de neutrones y algunos de alta energía. Los neutrones procedentes de la reacción de fusión en los sistemas deuterio-deuterio tienen una energía de 2.45 MeV, mientras que en una reacción deuterio-tritio los neutrones llevan una energía de 14.1 MeV. Además, no existe el problema que puede imponer la limitación de los recursos de litio y el espectro neutrónico es de más baja energía. Asimismo, como sucede en una de las reacciones aneutrónicas más investigadas, la del boro (5,11) con hidrógeno (1,1), el confinamiento energético es mayor que en el proceso deuterio-tritio y la energía producida mucho menor.

Así pues, en los reactores de fusión de sistemas deuterio-deuterio se puede simplificar el equipamiento de la cámara de fusión 21 y las instalaciones anexas puesto que ya no es necesaria la producción de tritio para el mantenimiento de la reacción. Las especificaciones para estos sistemas deuterio se deducen fácilmente de la exposición realizada para los sistemas deuterio-tritio.

Reacción de fusión hidrógeno-hidrógeno, en la que las pastillas de combustible 23 son hidrógeno.

Ahora se propone el análisis de la fusión del hidrógeno ligero consigo mismo, en base a las reacciones termonucleares. La probabilidad de que se produzca este tipo de reacciones y las combinaciones de este elemento con sus isótopos más pesados es muy pequeña para la contención a temperaturas razonables; sin embargo, ahora disponemos de equipos de rayos láser 17 de alta potencia que aplicados secuencialmente pueden lograr la fusión hidrógeno-hidrógeno.

El desarrollo de la tecnología CPA con Ti:sapphire y Nd:glass, que permite la amplificación de impulsos de alta energía con una duración por debajo de 100

femtosegundos, hace pensar en equipos con muy elevadas potencias de pico. Actualmente existen planes en algunos países para desarrollar láseres exawatts (1,000 petawatts), y se están investigando arquitecturas con impulsos de 50 femtosegundos. La potencialidad que ofrecen estos equipos para explorar la ciencia es todavía desconocida. Procede investigar las secuencias más idóneas de láseres exawatts, o equivalentes, para lograr la ignición de las pastillas de combustible hidrógeno-hidrógeno, en un proceso que denominamos ignición secuenciada con ultra energía (ISUE)

Entre las ventajas que ofrecen los reactores de fusión hidrógeno-hidrógeno pueden citarse las siguientes:

Con formulaciones adecuadas no es necesario incorporar en el reactor el radioisótopo tritio ni el litio.

Generan más energía por kilogramo de combustible que los reactores de fisión y los de los ciclos deuterio-deuterio y deuterio-tritio.

No se generan neutrones y por consiguiente existe la posibilidad de conversión directa de la energía.

Los reactores se pueden clasificar como limpios.

No es necesario disponer en el interior del reactor de mantos de protección ni de enriquecimiento especiales.

Las dimensiones de la cámara pueden reducirse.

Anteriormente se han analizado las características de los reactores de fusión con sistemas deuterio-tritio, deuterio-deuterio e hidrógeno-hidrógeno. Los reactores de fusión de ciclo hidrógeno-hidrógeno suponen una novedad puesto que hasta el momento su estudio ha sido obviado por las dificultades que presenta el conseguir que la reacción correspondiente se pueda llevar a efecto en la práctica en las condiciones habituales. Es objetivo de nuestra invención, en este apartado, la propuesta de un prototipo de reactor de potencia, para generación de energía por conversión total de la materia (proceso m-e), máximo nivel energético y de carácter limpio, utilizando un combustible barato, abundante y fácilmente asequible, como el hidrógeno (agua), lo que puede constituir una solución sin precedentes para conseguir el suministro de energía a la población mundial durante millones de años. Con los conocimientos actuales y los equipos disponibles, esta idea puede convertirse en una realidad.

Los estudios sobre el neutrón se han venido realizando desde 1920 por muchos investigadores, entre ellos, Ernest Rutherford. En 1932 James Chadwick pensó que

había descubierto el sistema de unión del protón-electrón, el neutrón. Pero en 1935, con motivo de la lectura del premio Nobel, Chadwick reveló que la teoría de la combinación del protón-electrón había muerto.

En 1935, el físico Hideki Yukawa trabajando en la Universidad de Osaka, en Japón, descubre las causas de la unión de los nucleones entre sí. La fuerza nuclear es diferente de la fuerza gravitacional o de la fuerza electromagnética, pues tiene un alcance muy corto del orden de uno o dos fermis. Yukawa propone una nueva clase de partículas, los mesones, que pueden viajar una distancia muy corta entre nucleones y unirlos efectivamente. El primer tipo de mesón, el pión, no sería observado hasta doce años después. En 1950, se acepta generalmente que existe una nube de piones rodeando los nucleones. Los piones son creados y absorbidos en la superficie de los protones y de los neutrones constantemente.

En 1964, cambió radicalmente la idea de lo que sucede en el interior del protón, el neutrón y pión, cuando Murray Gell-Mann en el Instituto de Tecnología de California, y George Zweig en el CERN, en Suiza, independientemente propusieron el modelo quark.

De acuerdo con sus teorías, los protones, los neutrones, y otras partículas exóticas pertenecen a un grupo denominado bariones, que están constituidos por tres quarks. Los mesones están formados por un quark-antiquark. Los antiquark son antimateria y tienen propiedades de la misma magnitud pero de carga opuesta a los quarks. Las partículas ligeras como electrones se denominan leptones. Estas son partículas fundamentales y por ello no se componen de quarks. Existen seis tipos de quarks, también llamados flavors, y muchas partículas están formadas por dos quarks de los tipos más ligeros: los up-quarks y los down-quarks. El modelo quark es una parte importante en la teoría de la cromodinámica cuántica.

Un protón está formado por dos up-quarks y un down-quark, que se escribe (uud); el neutrón está formado por dos down quarks y un up-quark, (udd). Estos grupos se denominan quarks de valencia y proporcionan a la partícula sus propiedades, que se pueden apreciar desde el exterior, como el tipo de partícula y su carga. También existen los gluones que van y vienen entre los quarks y los unen, como los piones hacen con los nucleones. En el interior del nucleón existe también el quark-sea, un suministro sin fin de pares quark-antiquark que nacen y permanecen en existencia por unos momentos y después se desvanecen. El cuadro completo de quantum-chromodynamic de lo que está sucediendo en el interior de un neutrón es complejo,

importante y difícil de calcular, por ello se describen los nucleones en términos del constituent quark model (CQM).

En el modelo quark que incluye spin, existe una repulsión entre quarks con spins paralelos, por ello los quarks tienen órbitas ligeramente distosionadas. En el protón el efecto de la carga en el radio no es casi notorio. Sin embargo, en el neutrón se produce una superficie ligeramente negativa y un centro ligeramente positivo. Esta diferencia en la distribución de una densidad de carga cero, convierte al neutrón en una partícula especialmente curiosa. Así pues, el neutrón no es una partícula muerta, ya que muestra una dinámica especial, absorbiendo y expulsando mesones. La superficie está dominada por up-quarks negativos, el interior tiene una zona donde se encuentra el up-quark positivo y el centro es una región de fuertes efectos relativistas. Posiblemente, con nuevas investigaciones quizás tengamos que modificar algunos de los conceptos que actualmente tenemos de los protones y neutrones.

En el proceso de creación de nuevas partículas existen determinadas leyes, como la de conservación de la energía, el momento, la carga y las reglas cuánticas, que nos imponen ciertos comportamientos. Así por ejemplo, al colisionar un protón con otro protón se genera un neutrón, un pión positivo y otro protón. Este es un proceso de creación usual gobernado por la interacción fuerte. Otra clase de creación se tiene cuando se produce una colisión de la materia y la antimateria, como por ejemplo en el caso de un protón y un antiprotón, en lo que se conoce como proceso de aniquilación, transformándose toda la materia en energía.

Si el número bariónico se conserva de forma estricta, el protón libre no podrá desintegrarse nunca, ya que todos los posibles aspirantes como productos de la posible reacción tienen un número bariónico cero. La colisión de un protón y un antiprotón tiene un número bariónico cero, y por ello, la reacción debe ser consecuente con este resultado. Asimismo, el neutrón, que se desintegra en un protón, un electrón y un antineutrino, conserva el número bariónico, y también el protón dentro del núcleo, al desintegrarse en un neutrón, un positrón y un neutrino. No obstante, nuevas teorías de campo unificadas predijeron que el número bariónico no se conserva estrictamente. Las teorías de gran unificación (GUT) predicen la existencia de partículas de una gran masa, muy superior a la que tienen los protones, y podrían justificar la desintegración de los protones. Así pues, si se pudiera convertir el núcleo de hidrógeno en radiación pura se obtendría por unidad de masa una energía muy superior a la obtenida por fisión o fusión. Las condiciones iniciales obligan a calentar el agua hasta temperaturas de GUT.

Una idea nueva, es que el espacio contiene un campo que se extiende por todo él y que genera toda la masa en reposo, es el campo escalar H, una sola partícula H o varias familias de partículas H, puesto que los cuantos de un campo son un conjunto de partículas. La cantidad de masa que toman las partículas de este campo varía en cada caso según los diferentes tipos de partículas. En esta teoría, son las partículas de nuestro modelo estándar las que se acoplan a este campo con diferentes intensidades, determinando las masas de las mismas. Se considera que la masa puede ser un atributo fundamental de las partículas que se adquiere por su relación con el entorno. Asimismo, se cuestiona el proceso real del incremento de la masa con el movimiento.

Se estima que será necesario invertir grandes cantidades de energía para descerrajar el protón o el neutrón. Al desintegrarse el protón, las estructuras interiores recogen la energía que se ha invertido, que puede mostrarse una parte en forma de altas velocidades y otra parte en forma de grandes masas. Así, los tres quarks que tenían dentro del protón una masa total de 0.02 GeV/c2, muy inferior a la masa del protón (0.938 GeV/c2); ahora, con las altas energías aportadas, puede convertirse cada uno de ellos en una partícula con más masa que el propio protón continente. Los quarks liberados pueden tener una gran tendencia a unirse, por las propiedades de un campo cuya naturaleza se desconoce. La nueva agrupación de los quarks haría que se produjera una reducción de la masa. El proceso de agrupación se realizaría con una reducción de la masa de los quarks que en conjunto quedarían con una masa inferior a la de un protón. Actualmente se está investigando la evolución del proceso de ignición del hidrógeno por láser, pero aún se desconoce el comportamiento real.

A continuación se hace un análisis comparativo de la energía obtenida con diferentes sistemas de generación para poder determinar la eficacia de cada uno de ellos, en cuanto a energía producida por unidad de masa de combustible.

En los reactores de fisión que utilizan uranio como combustible solo una pequeña parte del material físil (U 235) se convierte en energía, liberándose 0.8 × 10(14) J en la fisión de un kilogramo de este material; equivalente a la producción de 1,000 MW.d de energía térmica, y a un gramo de m-e.

Cuando se produce la fusión de un kilogramo de combustible en un ciclo deuterio-tritio, la energía que se genera es de 3.31 × 10(14) J ; equivalente a 4.13 gramos de m-e. Para producir 1,000 MW . d, se necesitan 242 gramos de combustible.

En un ciclo deuterio-deuterio, la fusión de un kilogramo de combustible produce 3.38 × 10(14) J ; equivalente a 4.23 gramos de m-e. Para generar 1,000 MW . d, son necesarios 236 gramos de combustible.

La fusión de un kilogramo de combustible en un proceso hidrógeno-hidrógeno genera 6.15 × 10(14) J, equivalente a 7.69 gramos de m-e. Así pues, se necesitan 130 gramos de combustible para generar 1,000 MW . d.

En un proceso de generación de energía por conversión total de la materia de un kilogramo de hidrógeno combustible se obtienen 0.8 × 10(17) J, y equivalen, evidentemente, a 1,000 gramos de m-e. En este sistema la energía de 1,000 MW . d se puede proporcionar con un gramo de combustible.

Por comparación, en la reacción de un kilogramo de materia con un kilogramo de antimateria se produciría 1.6 × 10(17) J de energía. Se estima que en este proceso, con las tecnologías actuales, no sería aprovechable toda la energía producida.

Esta invención se ha realizado en base a un sistema de conversión total de materia en energía aplicado a un combustible de hidrógeno, por entender que es el combustible más simple para obtener grandes energías con cantidades mínimas de masa, al descerrajar los átomos de hidrógeno con el método de ignición secuenciada utilizando equipos láser exawatts (ISUE), o con otros procedimientos equivalentes que puedan mostrar el mismo efecto. En los cálculos arriba realizados para determinar la energía generada por los combustibles analizados en los diversos sistemas de fusión estudiados no se ha tomado en consideración la energía exterior suministrada para iniciar y mantener el proceso de fusión, actualmente en fase de investigación, y, por ello, esta aportación debe valorarse debidamente para determinar el balance energético final. La invención es aplicable también a otros elementos y compuestos siguiendo la misma metodología.

Como características más significativas del reactor objeto de la presente invención, se pueden citar:

El combustible hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo y en la Tierra se puede encontrar en condiciones ordinarias como gas diatómico.

La producción de hidrógeno se puede realizar de varias formas diferentes siendo el proceso más económico la extracción a partir hidrocarburos.

En este reactor no se forman neutrones y por consiguiente es un reactor limpio.

Es posible diseñar un proceso para conversión directa de energía a la red.

Este reactor nuclear, con un consumo estimado de 4,320 gramos de hidrógeno, puede entregar durante un año la energía de 3,000 MWt (1,000 MWe), equivalente a la

energía que suministran muchos de los reactores nucleares de fisión actuales, con un consumo aproximado de 1,080 kilogramos de uranio 235, y mayores cantidades de uranio en el reactor.

En la Fig.8 se representa un esquema de la disposición general de una planta nuclear con dos reactores de fusión.

De forma particular, se trata de determinar las características generales de dos reactores navales de fusión, de 100 MWe cada uno, para la propulsión nuclear de un portaviones de última generación. Aunque en esta aplicación se ha supuesto que la energía eléctrica necesaria para otros servicios del buque, incluyendo el consumo de los equipos láser y de la maquinaria auxiliar necesaria para el funcionamiento de los reactores, se suministra por medios convencionales, también puede generarse esta energía por los propios reactores con un nuevo diseño que tenga en cuenta la potencia total requerida desde el momento inicial del proyecto.

En la exposición realizada anteriormente en esta invención se han indicado las dimensiones de la cámara de fusión 21 de un reactor de 1,000 MWe, que han sido calculadas de acuerdo con el flujo neutrónico incidente sobre la pared interna 1 del interior de la vasija 20. El radio interior de esta pared varía de acuerdo con los factores indicados. En un reactor de fusión de 100 MWe funcionado con un sistema deuterio-tritio, el valor de este radio sería de 100 centímetros, que podría reducirse utilizando otros sistemas de fusión. El diseño de la cámara de fusión 21 en buques de propulsión nuclear puede realizarse de acuerdo con los modelos propuestos. Por la naturaleza del servicio, no serían de aplicación en buques de propulsión nuclear las cámaras de fusión 21 con recubrimiento líquido 22en forma de cascada. Las vasijas 20 pueden colocarse en posición vertical (Fig.9) u horizontal (Fig.10), situación ésta más comprometida, como en el caso de submarinos nucleares.

Además, de acuerdo con una realización preferente de la invención, el reactor nuclear de fusión tiene estructura modular, y puede estar formado por una pluralidad de vasijas 20 conectadas en línea, u otra disposición modular.

En la Fig.11 se representa un esquema del diseño de una estructura modular de un reactor de fusión de 100 MWe que tiene acopladas en línea en una misma unidad, en posición vertical, cinco vasijas 20 iguales (Fig.12), con un radio interior de la cámara de fusión 21 de 20 centímetros. Estas disposiciones permiten una mayor versatilidad. Así por ejemplo, se puede variar la energía generada en las vasijas 20 modificando la cadencia de disparo del láser de ignición y/o el peso de las cápsulas.

El equipo de láser 17 y el almacenamiento de pastillas de combustible son dos aspectos muy importantes del diseño de una planta de fusión. Actualmente, se han reducido considerablemente las dimensiones de las unidades de láser 17 para su incorporación en instalaciones móviles. Los equipos generales y accesorios necesarios para el funcionamiento de los reactores de fusión en buques de propulsión nuclear tienen que disponerse en zonas continuas a la sala de reactores y su conocimiento, generalmente, está en el estado del arte.

REIVINDICACIONES

1. Reactor nuclear de fusión, caracterizado por que comprende

- al menos una vasija (20) de acero en la que se produce la fusión de unas pastillas de combustible (23), que comprende a su vez
  - una cámara de fusión (21) en la que se produce la fusión, delimitada por
  - una pared interna (1),
  - una pluralidad de cámaras (2,4,6) por cuyo interior circula fluido, separadas entre sí por respectivas
  - paredes de blindaje (3,5),
  - y una pared externa (8), que comprende a su vez un recubrimiento de grafito (7),

  teniendo las paredes interna (1) y externa (8), y las paredes de blindaje (3,5) aberturas para la introducción de canalizaciones que permiten la introducción de las pastillas de combustible (23) y los fluidos necesarios,
- al menos una pared de contención (10) que rodea la vasija (20), existiendo entre dicha pared de contención (10) y la pared externa (8) de la vasija (20) un espacio de separación (9),
- un equipo de bombeo, para el bombeo de fluidos a la vasija (20) y circulación de dichos fluidos por ésta,
- un equipo de tratamiento de fluidos para el tratamiento de los fluidos que circulan por la vasija (20),
- un equipo de control de la presión de la cámara de fusión (21),
- un dispensador de combustible que proporciona pastillas de combustible (23) al interior de la cámara de fusión (21) a través de la entrada (11)
- una pluralidad de equipos láser (17) que inciden en la cámara de fusión sobre las pastillas de combustible (23), y que producen incidencia en el interior de una zona cónica de vértice un punto interior (P) de la cámara de fusión (21) donde se realiza la fusión mediante ignición secuenciada de ultra-energía, y otro proceso equivalente, y su zona cónica simétrica respecto de dicho punto interior (P), dirigiendo los productos de fusión de las pastillas de combustible (23) a la zona central de la vasija (20) y evitando el impacto sobre los equipos láser (17).

2. Reactor nuclear de fusión, según la reivindicación 1, caracterizado por que la pared interna (1) de la vasija (20) comprende un recubrimiento sólido (19).

3. Reactor nuclear de fusión, según la reivindicación anterior, caracterizado por que el recubrimiento sólido (19) está realizado en litio sólido poroso.

4. Reactor nuclear de fusión, según la reivindicación 1, caracterizado por que la pared interna (1) de la vasija (20) comprende un recubrimiento líquido (22).

5. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las paredes interna (1) y externa (8), y las paredes de blindaje (3,5) de la vasija (20) tienen forma cilíndrica en su parte central y forma de casquete esférico en su parte superior e inferior.

6. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que

- la pared de contención 10 está unida a una estructura de soporte por medio de primeras bridas (15),
- y por que las diferentes cámaras (2,4,6) de la vasija (20) están unidas entre sí mediante segundas bridas (16).

7. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la pared de contención (10) está realizada en una matriz de resina de epoxi y refuerzo de grafito.

8. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los equipos láser (17) están dispuestos en la zona superior e inferior de la vasija (20).

9. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que pastillas de combustible (23) son deuterio y tritio.

10. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que pastillas de combustible (23) son deuterio y deuterio.

11. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que pastillas de combustible (23) son hidrógeno e hidrógeno.

12. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que es de conversión total, y las pastillas de combustible (23) están seleccionadas entre hidrógeno y otro elemento, y están sometidas a un proceso especial seleccionado entre secuenciado de ultra-energía de rayos láser, y otro proceso equivalente.

13. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que realiza la propulsión de buques nucleares.

14. Reactor nuclear de fusión, según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que

- tiene estructura modular,
- y por que comprende una pluralidad de vasijas (20) cuya disposición está seleccionada entre conexión en línea y cualquier otra disposición modular.

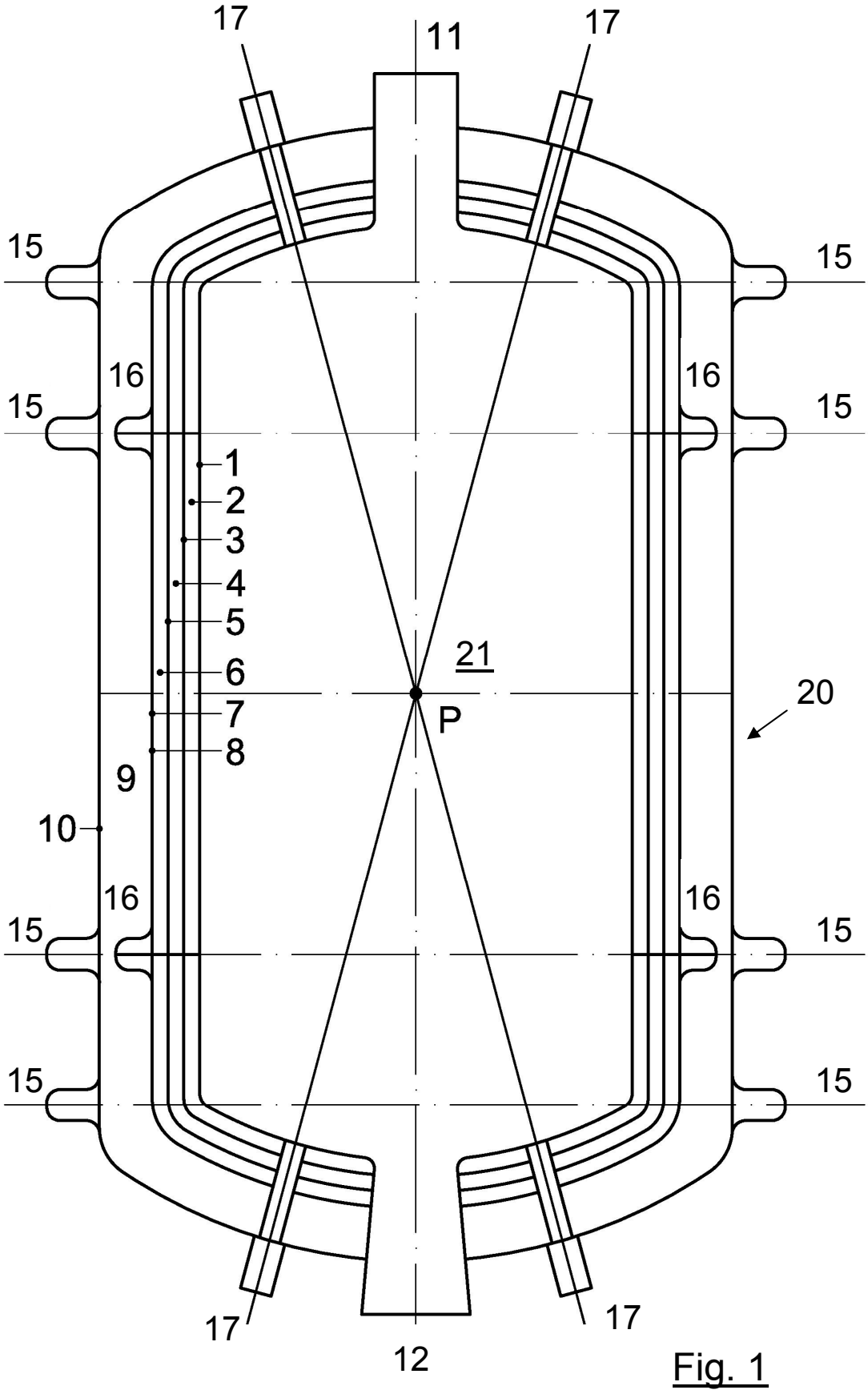

17
11
17
15
15
16
16
15
15
1
2
3
4
5
6
7
8
21
P
20
9
10
16
16
15
15
15
15
17
17
12

Fig. 1

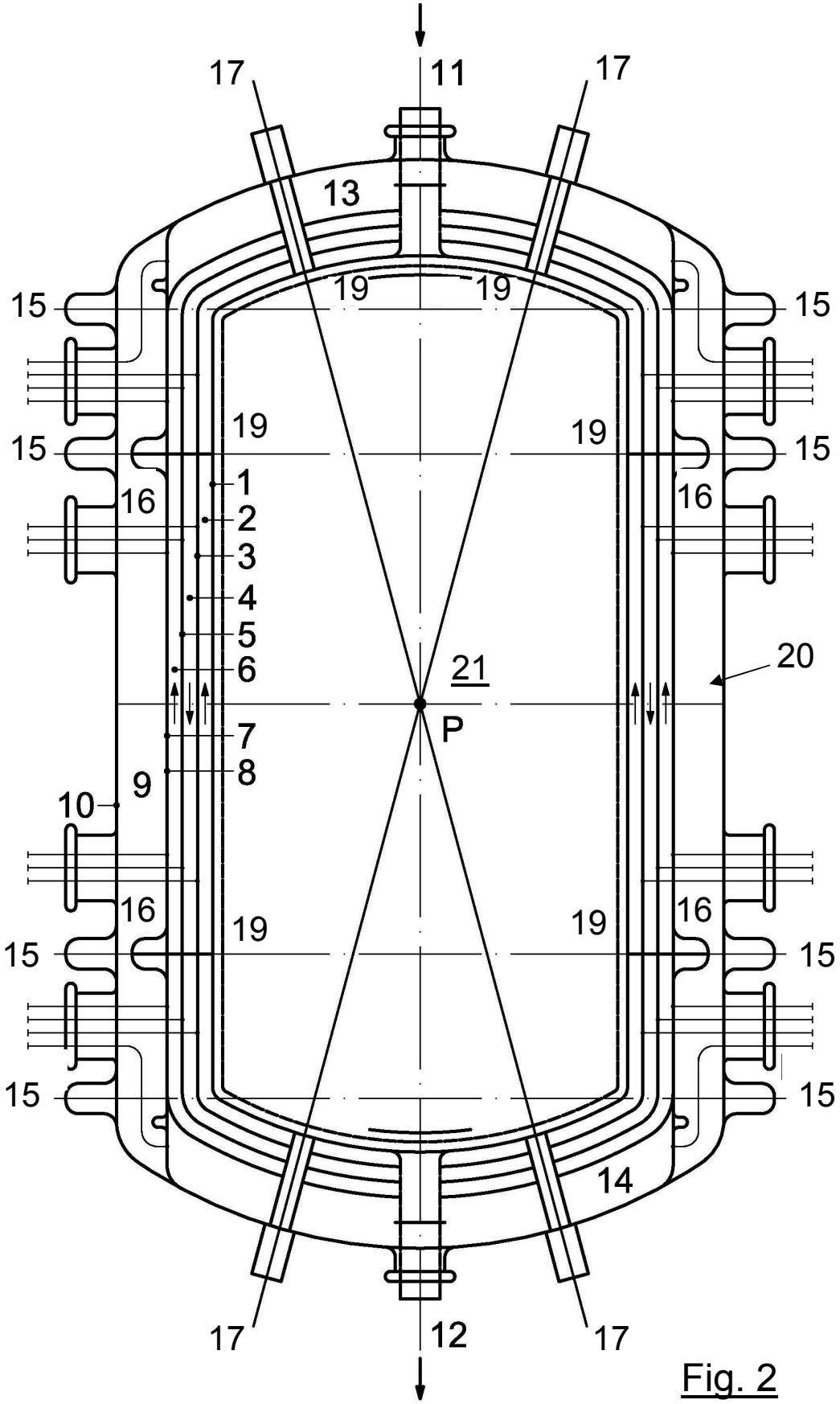


Fig. 2

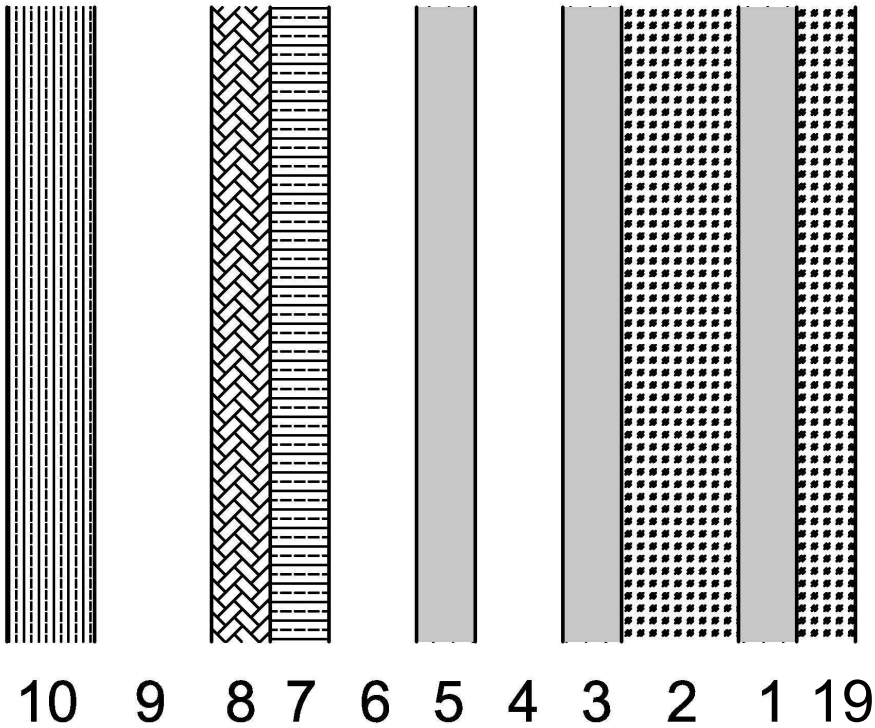


Fig. 3

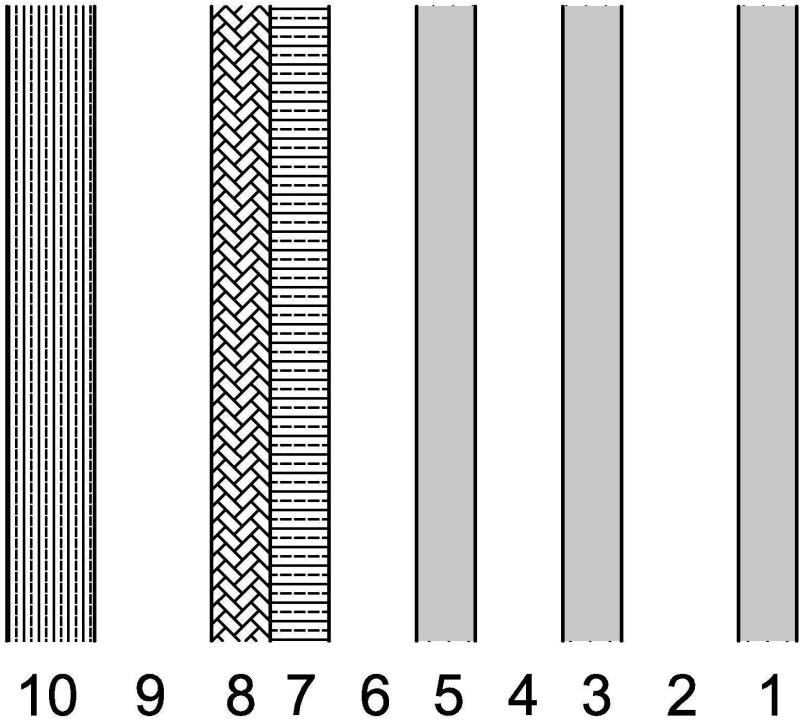


Fig. 4

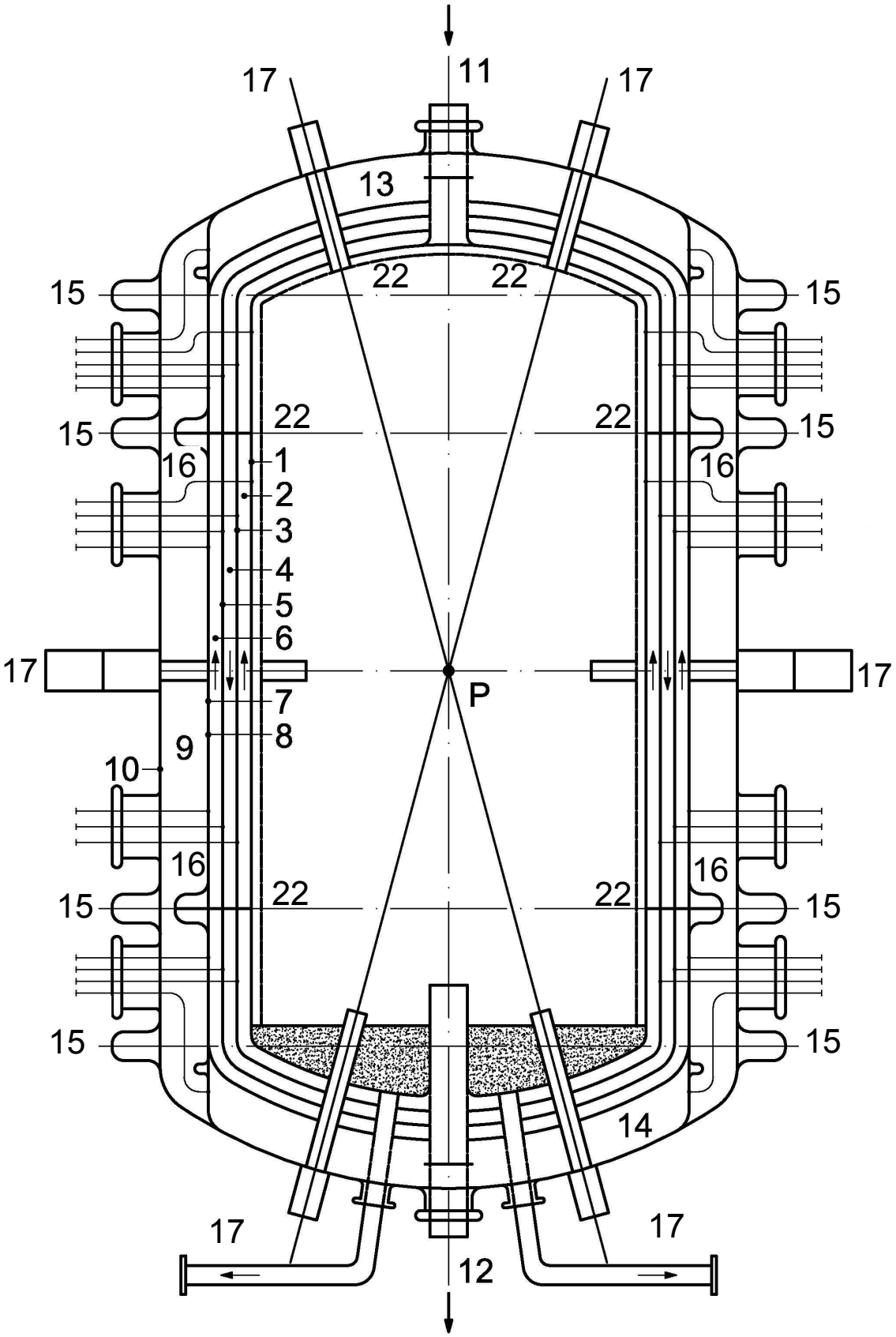

11
17
17
13
22
22
15
15
22
22
15
15
16
1
16
2
3
4
5
6
17
17
P
7
8
9
10
16
16
22
22
15
15
15
15
14
17
17
12

Fig. 5

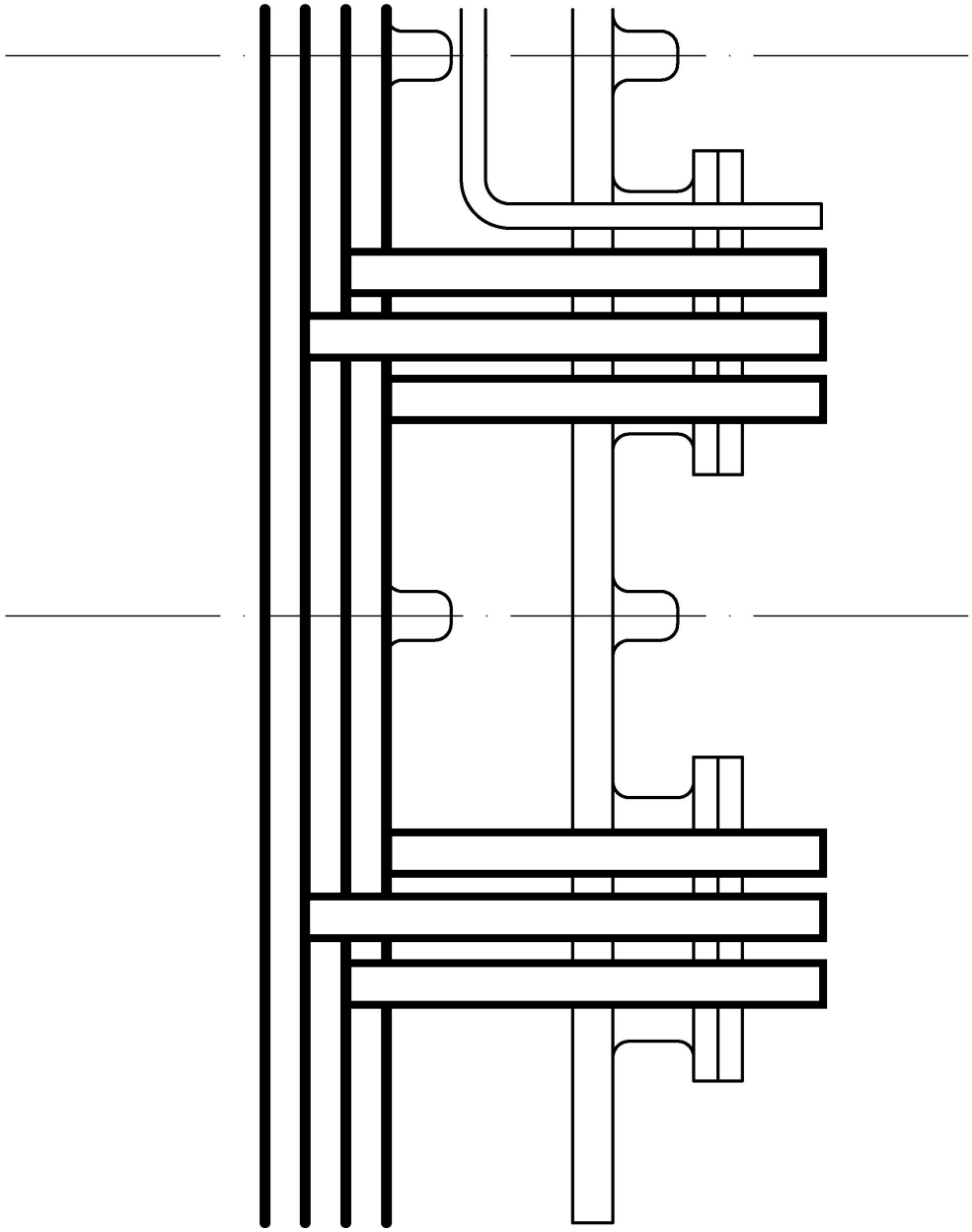


Fig. 6

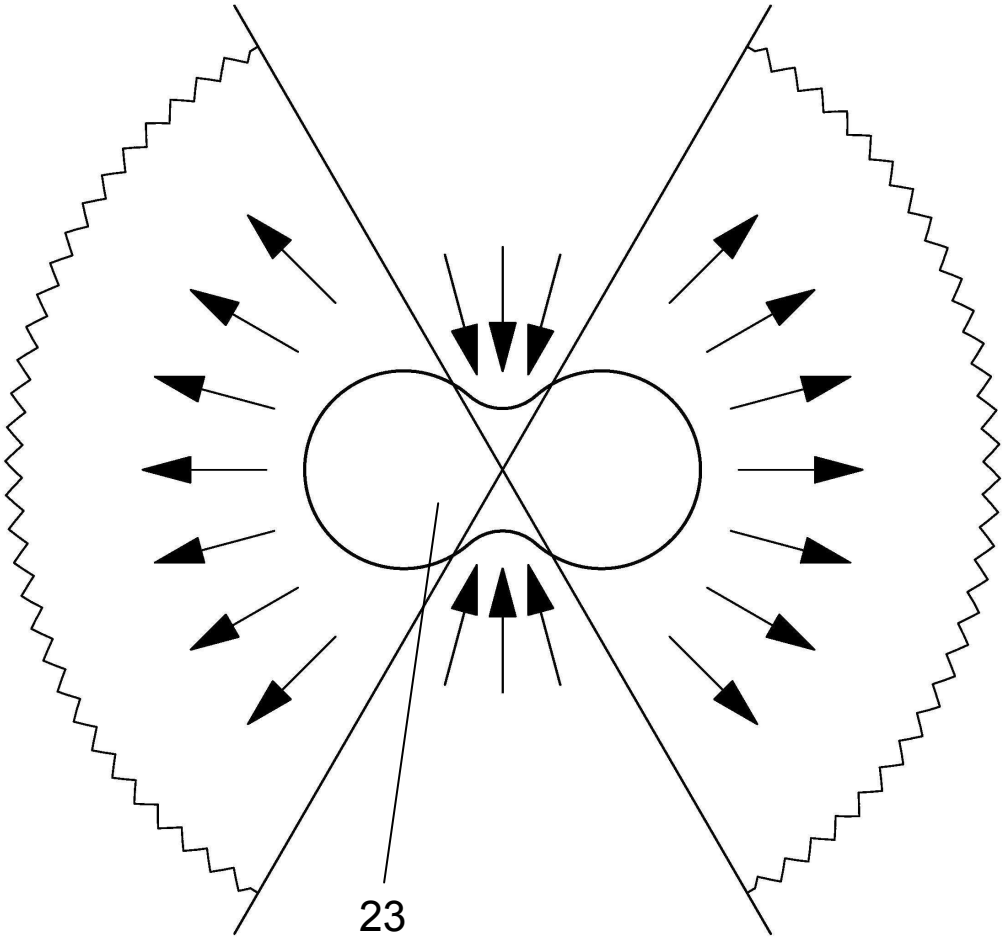
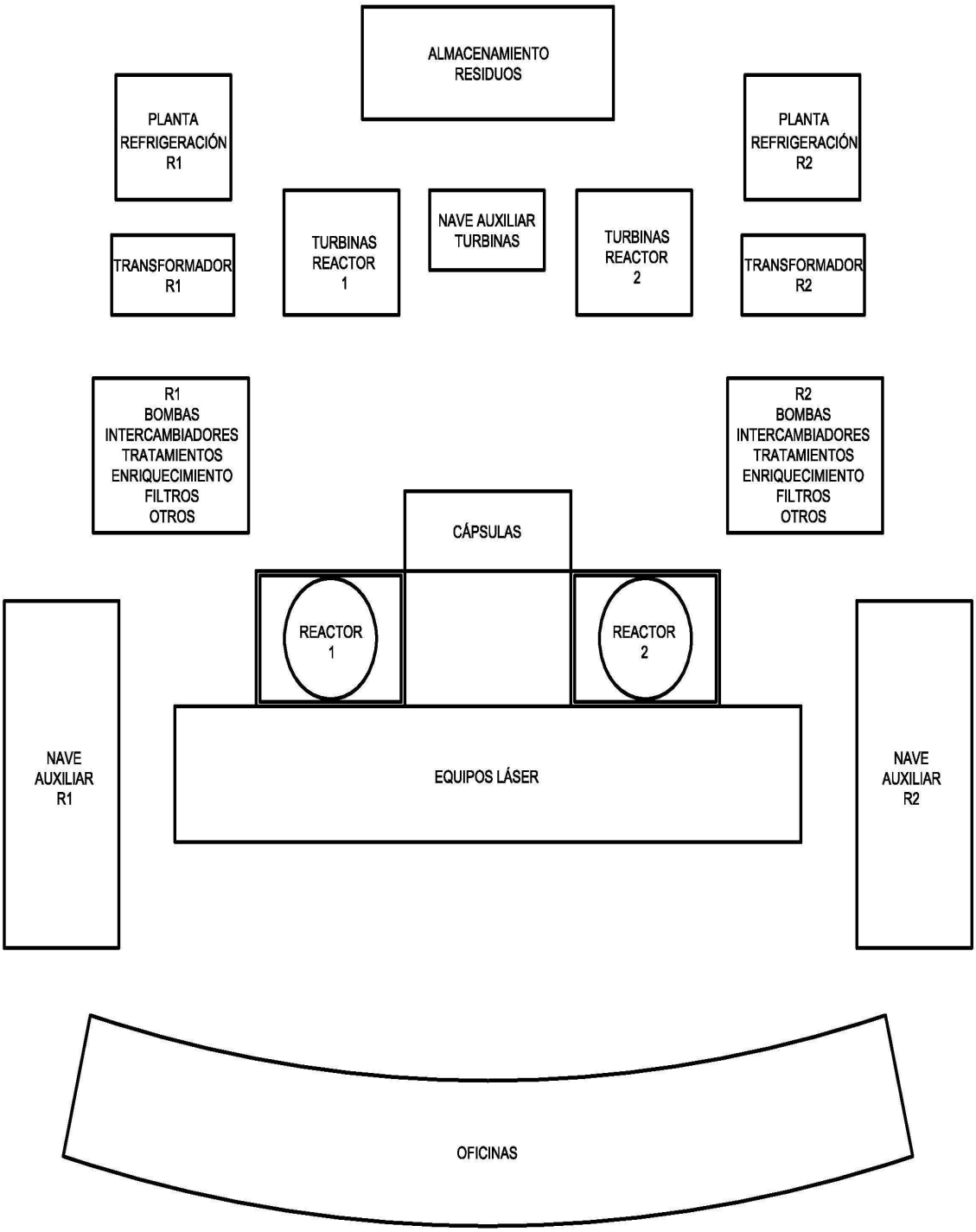


Fig. 7



DISPOSICIÓN GENERAL DE UNA PLANTA NUCLEAR CON DOS REACTORES DE FUSIÓN

Fig. 8

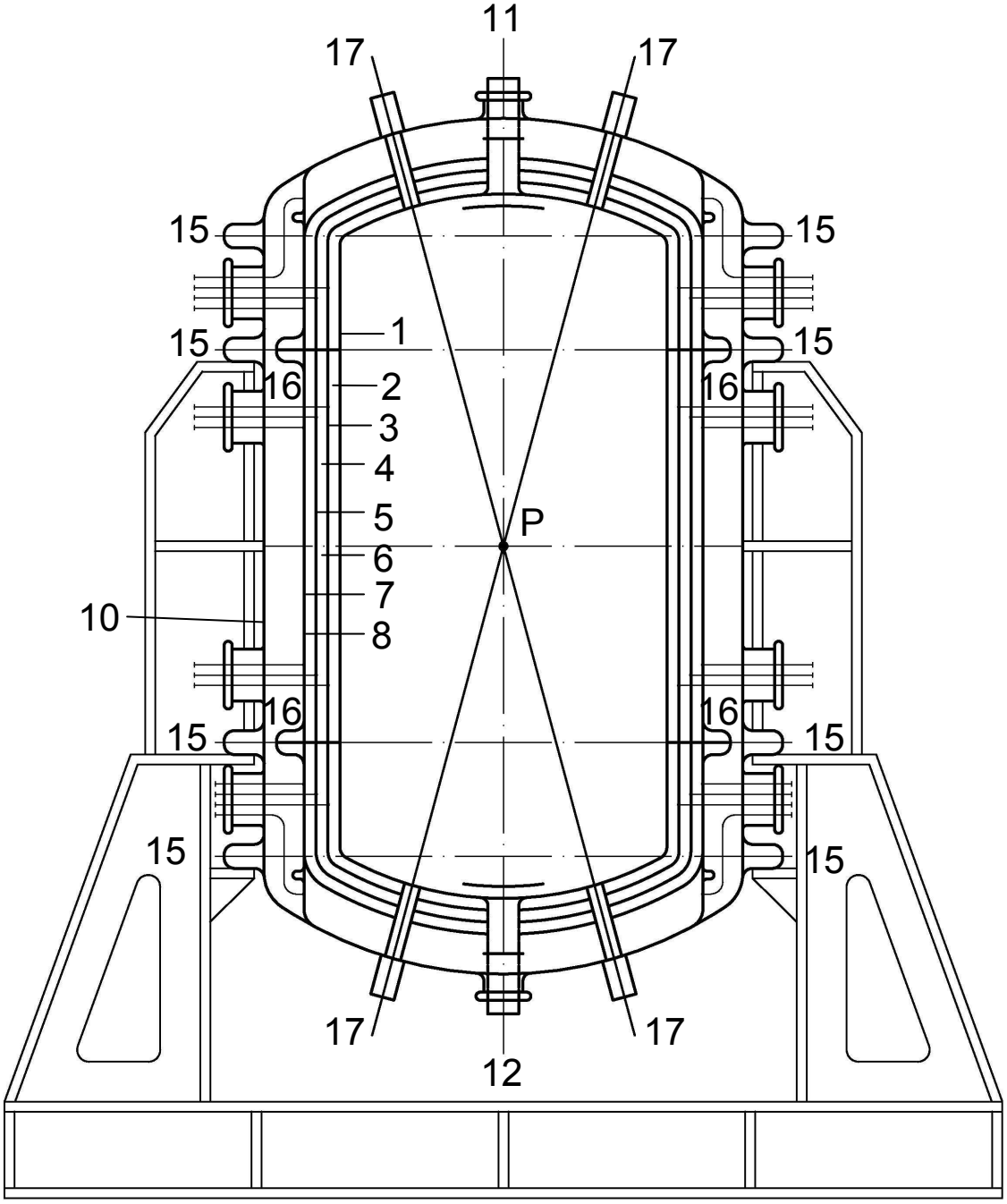


Fig. 9

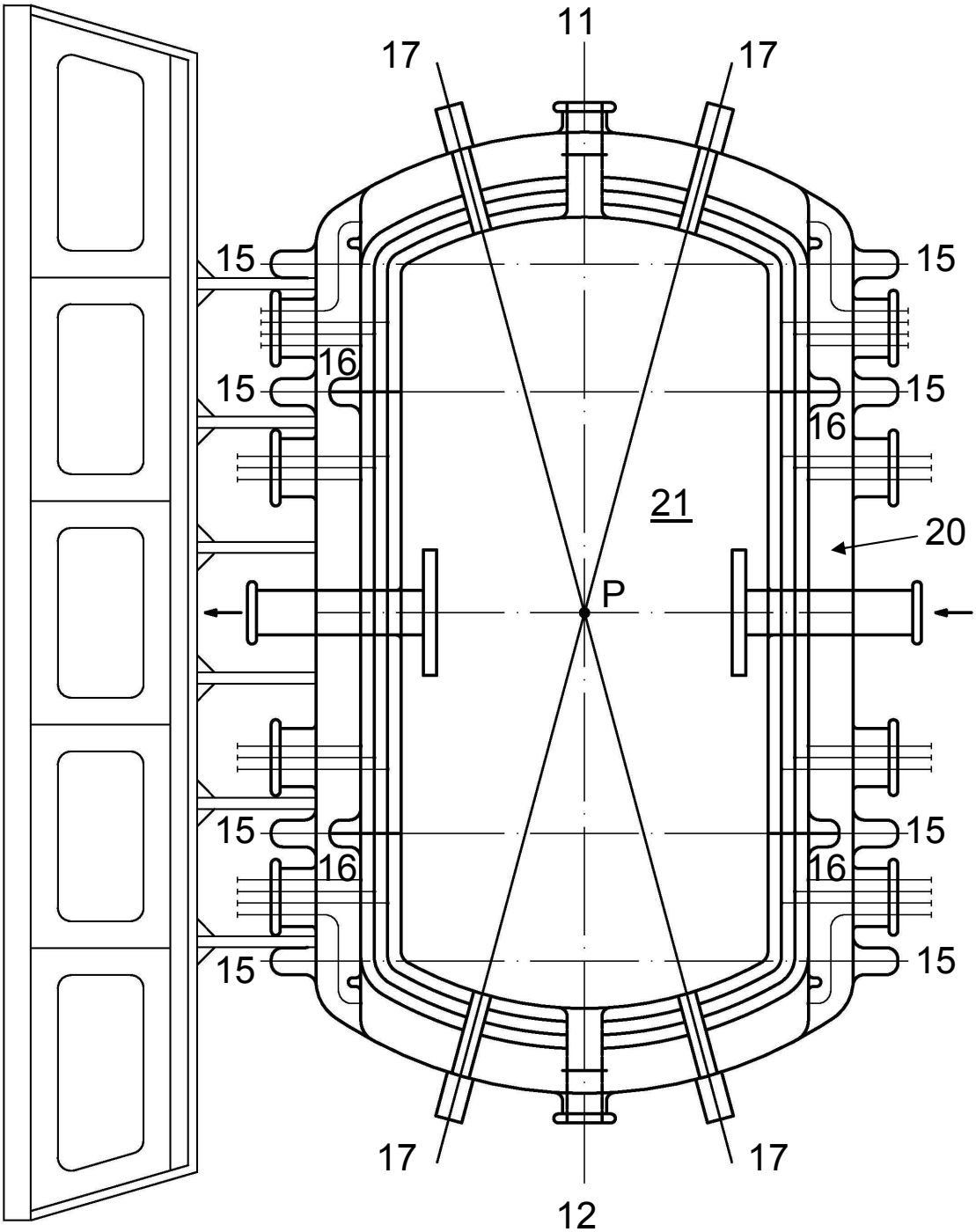


Fig. 10

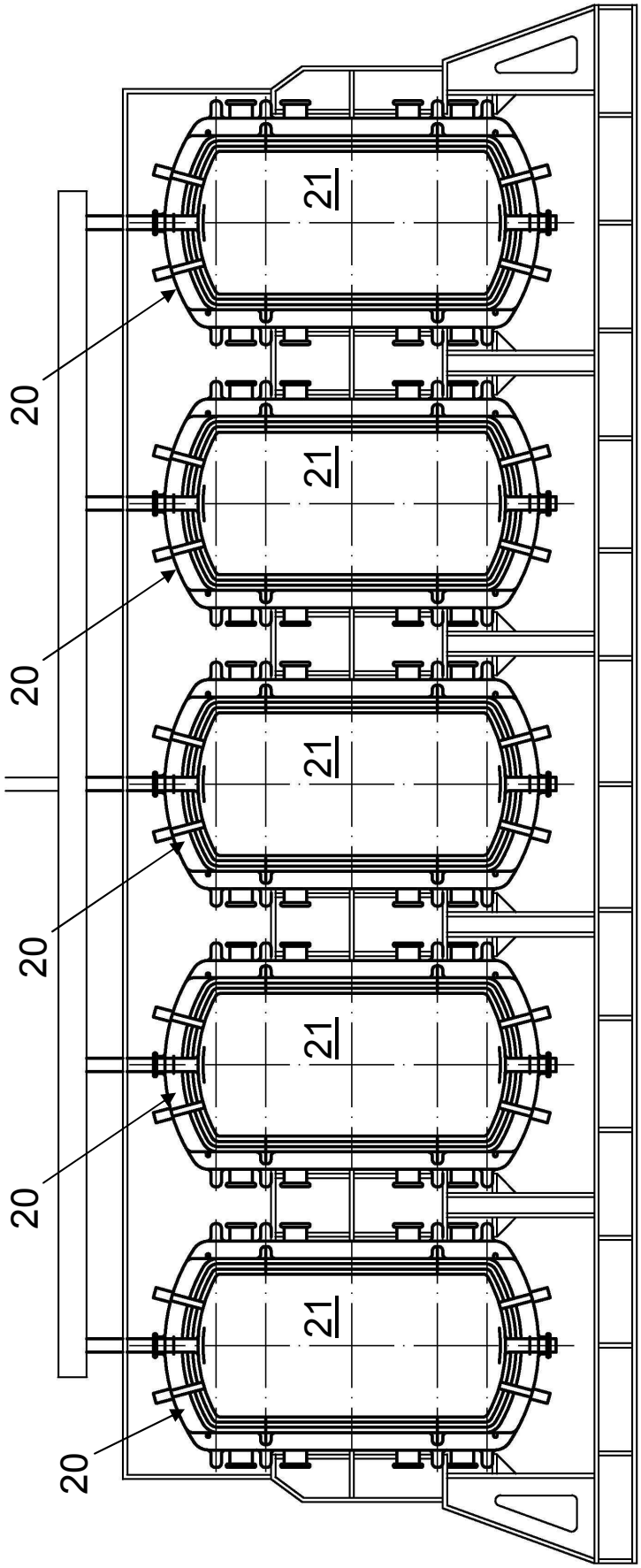


Fig. 11

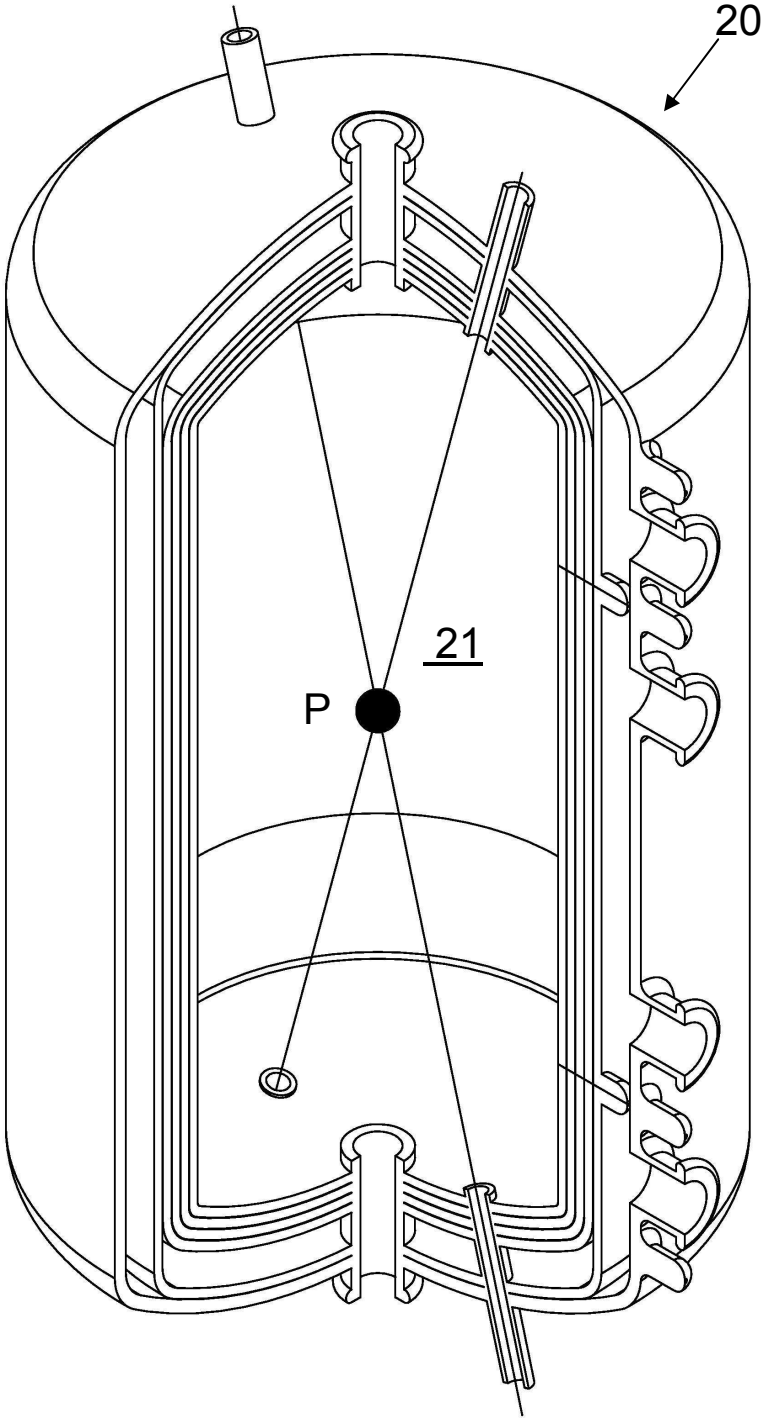


Fig. 12

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 201132106

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 26.12.2011

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) **Int. Cl. :** ***G21B1/03*** (2006.01)
G21B1/11 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
Y	US 4440714 A (ROSE) 03.04.1984, todo el documento.	1-14
Y	GB 1069036 A (BROWN BOVERY, KRUPP REAKTORBAU) 17.05.1967, página 3, línea 30 – página 4, línea 16; figuras 1-2.	1-14
A	US 3762992 A (HEDSTROM) 02.10.1973, todo el documento.	1-4,8-12
A	GB 2445011 A (JOHN S LAMONT) 25.06.2008, resumen; figuras 1-2.	1,8-12
A	US 3280330 A (H. G. FENDLER et al.) 18.10.1966	1

Categoría de los documentos citados
X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica
O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones ☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe	Examinador	Página
13.03.2012	R. San Vicente Domingo	1/5

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G21B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 13.03.2012

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones	1-14	**SI**
	Reivindicaciones		**NO**
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones		**SI**
	Reivindicaciones	1-14	**NO**

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	US 4440714 A (ROSE)	03.04.1984
D02	GB 1069036 A (BROWN BOVERY, KRUPP REAKTORBAU)	17.05.1967
D03	US 3762992 A (HEDSTROM)	02.10.1973
D04	GB 2445011 A (JOHN S LAMONT)	25.06.2008
D05	US 3280330 A (H. G. FENDLER et al.)	18.10.1966

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

El documento D01 constituye el estado de la técnica más próximo a nuestra solicitud. En dicho documento, nos encontramos con un reactor de fusión que comprende una vasija de acero compuesta a su vez por una cámara de fusión delimitada por una pared interna y una serie de mantos de blindaje a su alrededor, una pared de contención, un equipo de bombeo de un fluido para la refrigeración de la vasija, un dispensador de pastillas de combustible hacia el interior de la cámara de fusión, y una pluralidad de equipos láser que inciden sobre dichas pastillas de combustible.

Las diferencias existentes entre el documento D01 y la 1ª reivindicación de la solicitud objeto de estudio serían por un lado la pluralidad de cámaras por cuyo interior circula el fluido refrigerante, separadas entre sí por respectivas paredes de blindaje, así como el recubrimiento de grafito que comprende la pared más externa de la vasija, y por otro lado la existencia de un equipo de tratamiento del fluido refrigerante y otro equipo de control de la presión de la cámara de fusión.

En cuanto a la incorporación de los equipos de control de presión y de tratamiento de fluido refrigerante podríamos decir que son ejecuciones de conocimiento común en el campo de la técnica de los reactores nucleares, y que no confieren ningún elemento de significación inventiva con respecto al estado de la técnica desarrollado en D01.

En lo que respecta a la configuración de la vasija del reactor formada por distintas paredes de blindaje y sus respectivas cámaras para la circulación del fluido refrigerante, diríamos que sí produce un efecto técnico, y que el problema a resolver con dicha diferencia sería incorporar a la vasija del reactor del documento D01 una pluralidad de cámaras por donde circule el fluido de refrigeración y separadas por distintas paredes de blindaje.

La solución a dicho problema estaría resuelta con el documento D02, que en su figura 2 divulga una configuración de la vasija de un reactor nuclear, a base de distintas cámaras por las que circula un gas de refrigeración, que rodean a la pared interna de la cámara de reacción y separadas por sus respectivas paredes de blindaje, contemplándose también el recubrimiento de alguna de las paredes por medio de grafito, con lo cual quedaría resuelto el problema derivado del efecto técnico que produce la diferencia entre D01 y la 1ª reivindicación objeto de estudio, y por lo tanto la actividad inventiva de dicha primera reivindicación quedaría cuestionada con la combinación de los documentos D01 y D02.

El uso de litio sólido o líquido como recubrimiento de la pared interna de la vasija de un reactor, para así mejorar los daños producidos por los neutrones, es una característica ampliamente conocida en el estado de la técnica, como así se divulga en el documento D03, y diríamos también que la actividad inventiva de las reivindicaciones 2ª a 4ª quedaría antecedida asimismo combinando los documentos D01 y D02.

Asimismo el objeto de las reivindicaciones 5ª y 8ª a 12ª estaría divulgado en el propio documento D01, por desarrollarse un reactor de forma cilíndrica en su parte central y forma de casquete esférico en su parte superior e inferior, porque los equipos láser dispuestos en la zona inferior y superior producen la incidencia en el mismo vértice central descrito en la invención, y porque el contenido de las pastillas de combustible se pueda elegir entre los componentes de deuterio, tritio o hidrógeno, cuestionándose la actividad inventiva de estas reivindicaciones con la combinación de los documentos D01 y D02.

En cuanto al objeto de la reivindicación 6ª referente a la unión de la pared de contención a una estructura de soporte y de las diferentes cámaras mediante bridas, se trataría de una característica que no produce un efecto técnico inesperado, además de ser un procedimiento habitual para llevar a cabo tal unión. Por otro lado el material con el que se ha dispuesto la pared de contención descrito en la reivindicación 7ª, tampoco resulta un elemento innovador en el estado de la técnica.
Por último las reivindicaciones 13ª y 14ª también quedarían cuestionadas en cuanto a su actividad inventiva con los documentos D01 y D02 por resultar la aplicación de dicho reactor de fusión en propulsión de buques y por considerarse la disposición modular de una pluralidad de vasijas, un desarrollo obvio para un experto en la materia a partir de dichos documentos.

Los documentos D03 y D04, ambos reactores de fusión activados mediante energía láser, reflejarían el estado de la técnica anterior. En dichos documentos se describe una configuración de la vasija del reactor con cámaras y con paredes de blindaje en las que se han practicado una serie de aperturas para la circulación radial del litio como medio refrigerador. El documento D05, también del estado de la técnica anterior, desarrolla un sistema de blindaje térmico de un reactor nuclear disponiendo de cámaras alrededor de la pared interna del reactor por las que circula un líquido de refrigeración.

Por lo tanto y a modo de resumen, podríamos concluir que en las soluciones propuestas en las reivindicaciones 1ª a 14ª de la presente solicitud no se aprecia actividad inventiva por considerarse obvia para un experto en la materia la ejecución de dicho reactor nuclear de fusión a partir de los documentos D01 y D02, y por lo tanto la patentabilidad de la invención se vería cuestionada conforme al artículo 8 de la ley 11/86 de patentes