

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 939 289**

51 Int. Cl.:

H05H 1/14

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.02.2015 E 21163727 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.11.2022 EP 3863383**

54 Título: **Ciclo de combustible avanzado y reactores de fusión que utilizan el mismo**

30 Prioridad:

07.02.2014 US 201461937030 P

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

20.04.2023

73 Titular/es:

**HELION ENERGY INC. (100.0%)
8549 154th Avenue
Redmond, WA 98052, US**

72 Inventor/es:

**SLOUGH, JOHN THOMAS;
KIRTLEY, DAVID EDWIN y
PIHL, CHRISTOPHER JAMES**

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 939 289 T3

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

DESCRIPCIÓN

Ciclo de combustible avanzado y reactores de fusión que utilizan el mismo

5 **Referencia cruzada a solicitud(es) relacionada(s)**

La presente solicitud reivindica los derechos de la fecha de presentación anterior de la solicitud provisional US 61/937.030, presentada el 7 de febrero de 2014.

10 **Campo técnico**

Las formas de realización de la invención se refieren de manera general a la fusión, y se describen ejemplos de un ciclo de combustible de helio-3 para un reactor de fusión.

15 **Antecedentes**

Durante muchos años, la noción de la fusión termonuclear para la producción de energía eléctrica se basó en combustibles de deuterio y tritio en los que la mayor parte de la energía de fusión se libera como neutrones de 14.1 MeV. Por lo tanto, los requisitos de ingeniería debidos a la carga de pared en un reactor de fusión comercial son difíciles de alcanzar. Se han estudiado combustibles avanzados para mitigar estos problemas de ingeniería y posiblemente encontrar un sistema de reactor razonable con una eficacia de central superior

El ciclo de combustible de $P\text{-}^{11}\text{B}$ parece ser atractivo porque no se generan neutrones con este ciclo de combustible, sin embargo debe decirse que existen reacciones secundarias con los productos de fusión ($^{11}\text{B} + ^4\text{He} \rightarrow ^{14}\text{N} + n + 157 \text{ keV}$) que sí que generan un componente de neutrones pequeño pero significativo. No obstante, la temperatura requerida para la fusión de $P\text{-}^{11}\text{B}$ es de hasta 400 keV. Debido a la utilización de boro, que tiene un número atómico mucho mayor que los isótopos de helio o hidrógeno, las pérdidas de radiación de Bremsstrahlung (radiación de frenado) asociadas son grandes y no puede obtenerse la ignición. La reacción de fusión de $D\text{-}^3\text{He}$ tampoco produce neutrones ($D + ^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} (3.6 \text{ MeV}) + H (14.7 \text{ MeV})$). Sin embargo, la reacción secundaria de $D\text{-}D$, aunque no es frecuente, puede generar neutrones de 14.1 MeV mediante una de sus reacciones de producto de fusión ($D + T \rightarrow ^4\text{He} + n + 14.1 \text{ MeV}$). Asimismo está la propia reacción de $D\text{-}D$ que produce un neutrón de energía inferior (2.45 MeV) que está por debajo del umbral para la activación de la mayoría de los materiales nucleares y, por tanto, es mucho menos perjudicial. Mauel *et al.*: "Fusion Technologies for Tritium-Suppressed D-D Fusion", libro blanco preparado para FESAC Materials Science Subcommittee, 19 de diciembre de 2011 (19-12-2011), páginas 1-11, URL: http://fire.pppl.gov/FESAC_WP_TsuppDDuMauel.pdf, da a conocer un procedimiento para potenciar la fusión nuclear que comprende suministrar deuterio a un reactor de fusión, llevar a cabo una reacción de fusión de $D\text{-}D$ para producir energía y subproductos de tritio, someter un reactor de fusión a pulsos y crear ^3He mediante decaimiento del tritio.

M. E. Sawan *et al.*: "Impact of tritium removal and He-3 recycling on structure damage parameters in a D-D fusion system", Fusion Engineering and Design, 61-62 (2002), páginas 561-567, propone desarrollar grandes planes de potencia de fusión magnética de $D\text{-}D$ en los que se retira tritio producido mediante fusión de $D\text{-}D$ y se produce ^3He mediante su decaimiento.

El documento US 2011/293056 A1 da a conocer un reactor de fusión casi estacionario con expectativas de recuperación de tritio casi unitaria.

Sumario

50 La presente invención proporciona un procedimiento según la reivindicación 1. En las reivindicaciones dependientes se definen las formas de realización preferidas de la invención.

En la invención, se suministra deuterio a un reactor de fusión. Se realiza una reacción de fusión de $D\text{-}D$ para producir energía, ^3He y subproductos de tritio. Se somete el reactor de fusión a pulsos para retirar por lo menos algunos de los subproductos de tritio producidos en la reacción de $D\text{-}D$ antes de una reacción de fusión de $D\text{-}T$.

El ^3He puede crearse en algunos ejemplos mediante decaimiento del tritio retirado.

En algunos ejemplos, el reactor de fusión se somete a pulsos de manera repetitiva.

60 En algunos ejemplos, el ^3He retirado a partir del reactor de fusión se utiliza en reacciones de fusión de $D\text{-}D$ y/o $D\text{-}^3\text{He}$ posteriores.

En algunos ejemplos, el ^3He se suministra al reactor de fusión junto con deuterio adicional.

65 En algunos ejemplos, se proporciona suficiente ^3He al reactor de fusión a partir de reacciones de fusión de $D\text{-}D$

anteriores para permitir un ciclo de combustible de D-³He autosostenido sin adición de ³He externa.

En algunos ejemplos, los subproductos de tritio se almacenan de manera remota.

- 5 En algunos ejemplos, llevar a cabo la reacción de fusión de D-D incluye formar por lo menos dos plasmoides y acelerar los por lo menos dos plasmoides uno hacia el otro.

En algunos ejemplos, llevar a cabo la reacción de fusión de D-D incluye aumentar la temperatura de un plasma hasta 70 keV o menos.

- 10 En algunos ejemplos, se proporciona un manto de litio para la producción de ³He adicional y/o para la producción de neutrones adicionales. En algunos ejemplos, el procedimiento incluye almacenar energía generada durante la reacción de fusión de D-D.

- 15 En la invención, se recibe deuterio en un reactor de fusión. Asimismo se recibe ³He en el reactor de fusión, en el que el ³He se generó a partir de subproductos y/o decaimiento de subproductos producidos anteriormente en el reactor de fusión o en otro reactor de fusión. El deuterio se hace reaccionar con el ³He en una reacción de fusión, y los subproductos de tritio de la reacción de deuterio y ³He se retiran a partir del reactor de fusión.

- 20 Algunos ejemplos de procedimiento incluyen además producir el decaimiento de los subproductos de tritio para producir ³He adicional. La retirada y el decaimiento pueden producirse en una ubicación remota con respecto al reactor de fusión.

En la invención, hacer reaccionar el deuterio con el ³He comprende acelerar dos plasmoides uno hacia el otro.

- 25 En la invención, retirar subproductos de tritio incluye someter a pulsos un plasma utilizado en la reacción de fusión.

En los reactores de fusión de la invención, se proporciona una región de formación de plasma para la recepción de combustible de deuterio y ³He. El reactor de fusión está configurado para acelerar y comprimir plasmoides generados uno hacia el otro. Los ejemplos de reactor de fusión incluyen una cámara de interacción en la que pueden fusionarse los plasmoides y puede producirse una reacción de fusión. Los ejemplos de reactor de fusión incluyen además uno o más desviadores para la extracción de subproductos de la reacción de fusión. Los subproductos incluyen ³He y/o tritio en la invención.

- 35 Algunos ejemplos comprenden hacer funcionar el reactor de fusión a una temperatura en la que una sección transversal de fusión para la reacción de D-³He es más grande que una sección transversal de fusión para la reacción de fusión de D-D.

- 40 Algunos ejemplos comprenden retirar por lo menos algunos de los productos de reacción incluyendo los subproductos de ³He y los subproductos de tritio en un desviador del reactor de fusión.

Algunos ejemplos comprenden suministrar los por lo menos algunos de los productos de reacción de ³He a un reactor de fusión diferente.

- 45 Algunos ejemplos comprenden separar los subproductos de ³He y los subproductos de tritio en el desviador.

Algunos ejemplos comprenden permitir que los subproductos de tritio retirados a partir del reactor de fusión experimenten decaimiento para producir ³He.

- 50 Algunos ejemplos comprenden suministrar el ³He producido a partir el decaimiento de los subproductos de tritio retirados al reactor de fusión y/o a un reactor de fusión diferente.

Breve descripción de los dibujos

- 55 la figura 1 es una ilustración esquemática de una parte de un reactor de fusión según ejemplos descritos en la presente memoria;

la figura 2 es una ilustración de líneas de campo y contornos de presión para un plasmoides de FRC obtenido a partir de un cálculo de código magnetohidrodinámico (MHD) en dos dimensiones resistivo;

- 60 la figura 3 es una ilustración esquemática de reacciones que se producen en ejemplos de ciclo de combustible de D-³He descritos en la presente memoria;

- 65 la figura 4 es un gráfico de razón de helión con respecto a deuterón en ejemplos de plasma de fusión en diversos modos de funcionamiento; y

la figura 5 es un gráfico de potencia de neutrones fraccional en función de la razón de helión-deuterón en el plasma de fusión.

Descripción detallada

5

A continuación se establecen ciertos detalles para proporcionar una comprensión suficiente de las formas de realización de la invención. Sin embargo, resulta evidente para un experto en la materia que pueden ponerse en práctica otras formas de realización de la invención sin apartarse del alcance de la invención.

10

Los ejemplos de sistemas y procedimientos descritos en la presente memoria pueden utilizar un ciclo de combustible de ^3He que puede reducir o suprimir una reacción secundaria de D-T peligrosa extrayendo los iones de tritio a medida que se crean. El tritio extraído es inestable y puede experimentar decaimiento beta en un periodo relativamente corto de 11 años para proporcionar ^3He , un combustible primario para la reacción de D- ^3He . Por lo tanto, los ejemplos de sistemas, reactores y procedimientos descritos en la presente memoria pueden disfrutar de un ciclo de combustible autosostenido en el que el ^3He requerido para hacer funcionar el reactor puede generarse mediante el decaimiento de iones de tritio extraídos a partir del propio reactor. En algunos ejemplos, puede suprimirse o reducirse una reacción secundaria de D-D haciendo funcionar un plasma de fusión a una temperatura superior a la que una sección transversal de fusión para D- ^3He es mucho más grande que para D-D.

15

20

Los ejemplos de reactor descritos en la presente memoria y/o que pueden utilizarse con ciclos de combustible descritos en la presente memoria incluyen generalmente sistemas en los que se forman plasmoides y se aceleran uno hacia el otro. Se describen ejemplos de reactores de fusión adecuados, por ejemplo, en la solicitud de patente internacional nº PCT/US2010/024172, presentada el 12 de febrero de 2010, titulada "Method and apparatus for the generation, heating and/or compression of plasmoids and/or recovery of energy therefrom" (que reivindica la prioridad del documento USSN 61/152.221, presentado el 12 de febrero de 2009), el documento US nº de serie 13/201.428, presentado el 12 de febrero de 2010, titulado "Method and apparatus for the generation, heating and/or compression of plasmoids and/or recovery of energy therefrom", la solicitud de patente internacional nº PCT/US2011/047119 (documento WO/2012/021537), presentada el 9 de agosto de 2011, titulada "Apparatus, systems and methods for establishing plasma and using plasma in a rotating magnetic field" (que reivindica la prioridad del documento USSN 61/372.001, presentado el 9 de agosto de 2010) y la solicitud de patente internacional nº PCT/US2012/063735 (documento WO/2013/112221), presentada el 6 de noviembre de 2012, titulada "Apparatus, systems and methods for fusion based power generation and engine thrust generation" (que reivindica la prioridad del documento USSN 61/556.657, presentado el 7 de noviembre de 2011).

25

30

35

La figura 1 es una ilustración esquemática de una parte de un reactor de fusión según los ejemplos descritos en la presente memoria. El reactor 5 de fusión puede incluir una cámara 10 de interacción en el centro, una sección de formación, acelerador y compresión 36 en cada extremo de la cámara 10 de interacción, y una sección de formación de plasmoides 34 junto a cada sección de acelerador/compresión 36. El reactor 5 de fusión puede incluir adicionalmente un desviador 14 en el extremo exterior de cada sección de formación 34. El reactor 5 de fusión asimismo puede incluir bobinas de cámara de interacción 30, 32 alrededor del perímetro exterior de la cámara 10 de interacción, bobinas de acelerador 22 alrededor del perímetro exterior de la sección de aceleración/compresión 36, bobinas de formación 18 alrededor del perímetro exterior de la sección de formación 34, y bobinas de extremo 28 alrededor del perímetro exterior del reactor 5 de fusión entre el extremo final de cada sección de formación 34 y el desviador 14 respectivo. El reactor 5 de fusión puede incluir además una matriz anular de fuentes 38 de plasmoides pequeños ubicadas cerca de una pared de tubo de vacío dieléctrico bajo la primera bobina de formación/aceleración 18 más próxima a las bobinas de extremo 28. La pared 16 de cámara del reactor 5 de fusión puede actuar como límite de vacío.

40

45

50

Durante el funcionamiento, la matriz axial de bobinas puede energizarse de una manera en secuencia apropiada para obtener las reacciones descritas en la presente memoria. Generalmente, los sistemas de bobinas pueden proporcionar la formación, aceleración y compresión de plasmoides de configuración de campo inverso (FRC) con alta velocidad unos con respecto a otros (por ejemplo, de hasta 800 km/s). La energía de movimiento de los plasmoides de FRC puede proporcionar una fracción significativa de la energía necesaria para calentar el plasma hasta la temperatura de fusión. La energía de movimiento puede convertirse en energía térmica cuando se fusionan dos plasmoides de FRC. Las bobinas de formación 18 pueden suministrarse con una polarización inversa inicial. Se aplica una polarización directa a las bobinas de extremo 28 y a las bobinas de acelerador 22, así como a las bobinas de cámara de interacción 30, 32. Puede aumentarse el radio de la sección de formación de plasma 34 para proporcionar una mayor energía y flujo inicial. Esto va seguido a un radio más pequeño por un conjunto de bobinas de acelerador/compresión 22 con polarización directa que aumenta a medida que disminuye el radio desplazándose hacia la cámara 10 de interacción. Una reducción gradual del radio y un aumento de la compresión puede producirse como resultado, en algunos ejemplos, a medida que un plasmoides se desplaza hacia abajo por la sección de aceleración/compresión 36.

55

60

65

Las bobinas de formación 18 pueden energizarse secuencialmente para formar, acelerar y comprimir ambas los plasmoides simultáneamente. De esta manera, pueden aislarse magnéticamente los plasmoides a partir de la pared de vacío y moverse hacia y al interior de la cámara de interacción en la que se fusionan con su imagen

especular para formar un plasmoido fusionado que puede comprimirse hasta condiciones termonucleares. Por lo tanto, puede utilizarse un control preciso de las bobinas para impulsar de manera repetida plasmoides al interior de la cámara de interacción desde sentidos opuestos, haciendo colisionar y fusionando los plasmoides. Después de haberse fusionado un par, otro par puede entrar en la cámara de interacción para fusionarse y producir una reacción termonuclear. Estos "pulsos" de colisión en la cámara de interacción permiten ventajosamente el acceso a los productos de reacción (por ejemplo, durante un tiempo entre colisiones en la cámara de interacción) y, por lo tanto, permiten la retirada de tritio formado durante una reacción de deuterio. En algunos ejemplos, el tritio puede retirarse entre cada pulso, por ejemplo los plasmoides pueden colisionar y producirse reacciones de fusión de D-D, después pueden retirarse subproductos de tritio antes de que tengan lugar reacciones de D-T no deseadas, después puede producirse una colisión de plasmoides posterior, seguida por retirada de subproducto de tritio, etc.

Por lo tanto, se introducen deuterio y ^3He en la región de formación del reactor de fusión. Pueden recogerse subproductos incluyendo ^3He y tritio en la región de desviador (por ejemplo, el desviador 14 de la figura 1).

El desviador, por ejemplo el desviador 14 de la figura 1, puede servir para una variedad de fines. En la región de desviador puede extraerse energía y combustible a partir de la reacción de fusión entre pulsos. Por ejemplo, pueden extraerse subproductos de combustible, incluyendo partículas de hidrógeno, deuterio, tritio, helio-3 (helió) y helio-4 (alfa), o combinaciones de las mismas, y separarse en la región de desviador. Existen varias técnicas que pueden utilizarse, y la técnica particular en un ejemplo dado puede seleccionarse basándose en la economía específica de una instalación particular. Generalmente, las técnicas de extracción aprovechan el hecho de que todas las partículas presentan diferentes razones de masa con respecto a carga y presentan una gran extensión de energía. Las técnicas adecuadas incluyen, pero no se limitan a, separación criogénica, separación de cuadrupolo de masa, extracción en ciclotrón con inversión de iones, así como una gran cantidad de procedimientos químicos convencionales. La extracción y la separación pueden realizarse *in situ* o en una ubicación externa. De esta manera, pueden extraerse helio-3 (por ejemplo, ^3He) y tritio a partir del subproducto de una reacción de fusión y almacenarse. El tritio puede experimentar decaimiento para proporcionar ^3He . El ^3He recogido puede utilizarse como combustible para reacciones de fusión posteriores en el mismo reactor de fusión o en uno diferente.

Generalmente, la naturaleza de pulsos repetitivos de ejemplos de reactores de fusión, junto con las regiones de desviador/convertidor, por ejemplo 14 de la figura 1, ubicadas de manera remota con respecto a la cámara de combustión de fusión (ver, por ejemplo, el elemento 10 de la figura 1), la extracción de tritio puede obtenerse suprimiendo completamente o reduciendo esta reacción secundaria. La supresión de la reacción de D-D puede obtenerse aumentando la temperatura de plasma hasta 70 keV, lo cual asimismo puede garantizar un estado de autoencendido que puede ser apreciablemente inferior al de otros ciclos de combustible avanzados en algunos ejemplos. Al someterse a pulsos, es posible que los ejemplos de reactores de fusión descritos en la presente memoria puedan retirar el subproducto de tritio de la reacción de D-D reduciendo cada pulso la generación de neutrones de alta energía (14.1 MeV) a partir de la reacción de D-T hasta casi cero. Esto puede reducir tanto el daño como la activación de materiales de reactor circundantes, así como proporcionar una fuente de ^3He mediante el decaimiento beta del tritón recuperado para proporcionar un heliό. Por tanto, este ciclo de combustible puede denominarse D-D catalizado por heliό mediante ^3He autosuministrado, o HelCat-DD.

Por lo tanto, tras un pulso de plasma (por ejemplo, colisión de plasmoides), se retiran subproductos de la reacción, incluyendo ^3He y tritio, a partir del reactor de fusión. En algunos ejemplos, los subproductos pueden retenerse, por ejemplo, en un depósito y procesarse posteriormente. El procesamiento de los subproductos puede incluir la retirada del ^3He y el almacenamiento del tritio para permitir el decaimiento del tritio para proporcionar ^3He . El ^3He retirado a partir del reactor de fusión puede utilizarse en reactores de fusión posteriores en ese reactor de fusión o en uno diferente. De manera similar, el ^3He producido mediante decaimiento de tritio producido en el reactor de fusión puede utilizarse en reacciones de fusión posteriores en ese reactor de fusión o en uno diferente. De esta manera, en algunos ejemplos puede hacerse funcionar un reactor utilizando únicamente ^3He que se produjo a partir de reacciones de fusión anteriores (o bien directamente o bien mediante decaimiento de tritio en el mismo reactor de fusión o en uno diferente).

Una vez establecido el suministro de combustible inicial en algunos ejemplos de reactores de fusión descritos en la presente memoria, el único nuevo combustible que puede requerirse para un funcionamiento continuado puede ser el deuterio, que es abundante en la tierra y puede suministrarse fácilmente a partir de agua de cualquier fuente. Estando principalmente toda la energía de fusión en forma de energía de partículas de fusión, puede obtenerse una alta eficacia de generación eléctrica de la central neta a partir de la conversión directa tanto del producto de fusión como de las partículas de plasma de fusión en algunos ejemplos. Esto puede lograrse mediante el ciclo de compresión y expansión electromagnético utilizado para crear las condiciones de fusión y, por tanto, puede evitar los problemas de baja eficacia y desperdicio de calor normalmente encontrados en el ciclo térmico habitual utilizado por otras fuentes de potencia basadas en energía nuclear y carbón.

Puede haber varias ventajas de ejemplos de implementaciones del ciclo de combustible de D- ^3He combinado con el plasma de fusión de configuración de campo inverso (FRC) generado en ejemplos de reactores de fusión descritos en la presente memoria. En la presente memoria se describen ventajas a título de ejemplo y no se pretende que sean limitativas. Debe apreciarse que puede que no todos los ejemplos presenten todas, o incluso

ninguna, de las ventajas descritas. La FRC representa un sistema de confinamiento magnético prometedor para la fusión independientemente del ciclo de combustible. La figura 2 es una ilustración de líneas de campo y contornos de presión para un plasmoide de FRC obtenido a partir de un cálculo de código magnetohidrodinámico (MHD) en dos dimensiones resistivo. El plasmoide de FRC no presenta generalmente ninguna estructura mecánica interna, ningún campo toroidal apreciable o transformada de rotación, y una beta de ingeniería próxima a la unidad (en la que β es la razón de plasma con respecto a densidad de energía de campo magnético de confinamiento). La corriente de equilibrio se debe generalmente al diamagnetismo del plasma evitando o reduciendo de ese modo las inestabilidades impulsadas por corriente que afectan a otros conceptos de fusión. La pérdida de plasma en el límite de FRC se produce generalmente a lo largo de una separatriz magnética garantizando que el plasma perdido se conduce muy lejos de la región de combustión hasta una cámara remota en la que tanto el plasma como la energía de partículas de fusión pueden convertirse directamente en electricidad con una alta eficiencia. Como resultado de estas características, la FRC ofrece un cambio de transformación en cuanto al atractivo del reactor. Los ejemplos de reactores de fusión basados en FRC proporcionan generalmente una alta densidad de potencia, topología magnética y estructural sencilla, gestión de escapes de calor directa, capacidad para quemar combustibles avanzados para una conversión de energía directa y costes radicalmente reducidos, debido por lo menos en parte a su pequeño tamaño y baja fluencia de neutrones.

Un problema significativo para plasmas magnéticamente confinados es la radiación de sincrotrón a medida que la intensidad de campo magnético se aumenta para alcanzar las temperaturas y presiones superiores requeridas para ciclos de combustible avanzados tales como D-³He. Los dispositivos tales como el tokamak que presentan una presión de plasma relativamente pequeña en comparación con la gran presión magnética necesaria para confinar el plasma ($\beta \sim 4\%$), no pueden funcionar con combustibles avanzados debido a la alta pérdida de energía a partir de radiación de sincrotrón. Para ser viable, el valor local de β , la razón de plasma con respecto a densidad de energía magnética, debe ser generalmente alta ya que esto garantiza que dentro del plasma la magnitud del campo magnético nunca es lo suficientemente grande como para provocar pérdidas de sincrotrón significativas. Debido a la naturaleza de β alta del equilibrio de FRC, esencialmente todo el volumen de reacción de la FRC se caracteriza por un campo magnético con una intensidad de campo de muy baja a despreciable, y por tanto una cantidad insignificante de radiación de sincrotrón.

Un problema práctico al que se enfrenta el ciclo de combustible de D-³He es la baja disponibilidad de ³He en la naturaleza. Para evitar esta dificultad, el helión (³He) en ejemplos descritos en la presente memoria se crea o bien directamente o bien mediante el decaimiento de tritio producido en la reacción de D-D. De esta manera, los iones de helión necesarios para el funcionamiento del reactor se suministran por las reacciones secundarias de D-D. Por tanto, este ciclo de combustible puede denominarse D-D catalizado por helión mediante ³He autosuministrado, o HelCat-DD. De esta manera, una vez establecido el funcionamiento de la central, el único nuevo combustible requerido para el funcionamiento continuado en algunos ejemplos es deuterio, procediendo todos o sustancialmente todos los átomos de helión de los producidos directamente en la reacción de D-D o del decaimiento de los tritones extraídos a partir del reactor después de cada pulso.

La figura 3 es una ilustración esquemática de reacciones que se producen en ejemplos de ciclos de combustible de D-³He descritos en la presente memoria. Durante el funcionamiento, se proporcionan deuterio (D) y ³He a un reactor de fusión (por ejemplo, al reactor 5 de la figura 1). En la cámara de combustión (por ejemplo, la cámara 10 de interacción de la figura 1), D y ³He reaccionan tal como se muestra para producir protones y ⁴He. En el desviador (por ejemplo, el desviador 14 de la figura 1), puede producirse conversión de energía proporcionando protones de 3.02 MeV, tritones de 1.01 MeV y ³He de 0.82 MeV. El ³He puede retirarse a partir del desviador y devolverse al reactor de fusión para su utilización en la reacción con deuterio entrante adicional. Los tritones pueden retirarse a partir del desviador y dejar que experimenten decaimiento en una ubicación de almacenamiento remota. En algunos ejemplos, no se necesita que la ubicación de almacenamiento sea remota. Los tritones pueden experimentar decaimiento para proporcionar ³He y electrones de 0.018 MeV. El ³He puede proporcionarse de vuelta al reactor de fusión para su utilización en reacciones de D-³He posteriores. Las reacciones secundarias de D+D en la cámara de combustión producen neutrones y ³He, así como protones y tritones. En el desviador, estas reacciones secundarias pueden proporcionar protones de 14.7 MeV y ⁴He de 3.67 MeV.

En algunos ejemplos, puede proporcionarse un manto de litio (por ejemplo en o alrededor de la cámara 10 de interacción de la figura 1). Tal como se representa en la figura 3, las reacciones de deuterio pueden producir además neutrones de 2.45 MeV, que pueden reaccionar con litio ⁶Li para formar tritones y ⁴He. En el desviador, esto puede producir ⁴He de 1.8 MeV y tritones de 3.0 MeV. Los tritones pueden transportarse fuera del reactor de fusión y pueden experimentar decaimiento para proporcionar ³He que puede utilizarse en reacciones posteriores por el reactor de fusión.

Por lo tanto, generalmente se proporciona deuterio a un reactor. Se proporciona algo de ³He para iniciar el reactor en la invención. En algunos ejemplos, puede proporcionarse ³He posterior mediante decaimiento de productos del reactor. Las reacciones de fusión tienen lugar acelerando y comprimiendo secuencialmente plasmoides hasta que se fusionan en una cámara de interacción. Tras la fusión de los plasmoides, se retiran productos de reacción incluyendo tritones a partir del reactor de fusión y se permite que experimenten decaimiento. La retirada puede producirse después de cada pulso (por ejemplo, fusión de plasmoides) del reactor en algunos ejemplos.

Aunque la sección transversal de reacción puede ser igual de grande para la operación de D-³He que para el ciclo de combustible de D-T, generalmente debe obtenerse a una temperatura de plasma aumentada, T. La presión de plasma Ppl presenta una escala lineal con respecto a T. Tal como se indica, esto requiere un campo magnético de confinamiento más grande, B (Ppl ~ B²). Para dispositivos tales como el tokamak, que ya requieren el funcionamiento casi al campo práctico máximo que puede obtenerse para imanes superconductores (B ~ 15 T), generalmente no puede aumentarse adicionalmente el campo magnético. La consecuencia es que la densidad de plasma, n, debe reducirse (Ppl ~ n·T). La potencia de fusión presenta una escala como n² de modo que el volumen del reactor, y con ello el coste, debe aumentar drásticamente para producir la misma potencia de salida. Sin embargo, los ejemplos de reactores de fusión descritos en la presente memoria utilizan la FRC como plasma de fusión. Entonces, la densidad de potencia de fusión presenta una escala como β²B⁴. En algunos ejemplos, la FRC puede presentar la β más alta de todos los plasmas de fusión magnéticos y puede contenerse en algunos ejemplos mediante simples imanes cilíndricos que pueden hacerse funcionar a los campos prácticos más altos. En algunos ejemplos puede realizarse el funcionamiento repetitivo de campos pulsados hasta 30 T con bobinas de aleación de cobre convencionales. Presentar una densidad de potencia muy superior en algunos ejemplos ayuda a mantener la potencia de salida a partir de la fusión cuando se utiliza el ciclo de HelCat DD, y la potencia sólo puede mantenerse en el ciclo de compresión de FRC pulsado encontrado en ejemplos de reactores de fusión, e incluso aumentarse con el ciclo de combustible avanzado de HelCat DD debido a la carga de pared de neutrones muy reducida. Al ser compacto, la razón de volumen de reacción con respecto a área de superficie de recepción asimismo puede minimizarse o reducirse, permitiendo el funcionamiento a una densidad de potencia más alta. Al ser pulsado, la duración de pulso puede prolongarse o la tasa de repetición aumentarse para mantener la potencia de salida de fusión a los niveles más altos compatibles con la retirada de calor.

Pueden seleccionarse parámetros del plasma de fusión para garantizar o fomentar un bajo rendimiento de neutrones y una alta eficiencia para la producción de energía. Los parámetros pueden basarse en el valor en estado estacionario de las cantidades relativas de cada elemento de combustible (D y ³He). Asimismo son posibles variantes del ciclo de D-³He con autosuministro de ³He en las formas de realización no reivindicadas. Estando principalmente toda la energía de fusión en forma de energía de partículas de fusión, puede obtenerse una alta eficiencia térmica de central neta a partir de la conversión de gran parte de la potencia de fusión mediante conversión directa. El bajo rendimiento de energía de neutrones asimismo puede proporcionar un coste menor de primeras estructuras de pared y blindaje en algunos ejemplos. Asimismo puede proporcionar una mayor disponibilidad de central y vida útil de funcionamiento debido a la menor carga de pared, calor residual e inventario de isótopos radiactivos en algunos ejemplos.

Un atributo de los ejemplos de reactores de fusión descritos en la presente memoria es el acceso relativamente sencillo a los productos de fusión en la corriente de gas de escape después de cada pulso (por ejemplo, fusión de plasmoides). Esto permite la retirada selectiva de productos de fusión. En los ejemplos, los productos de fusión cargados, incluyendo ³He y T, pueden moderarse en el plasma liberando su energía al mismo. Esto permite la conversión de energía directa en la cámara de combustión a partir de la expansión de plasma y posterior conversión de energía accionada por flujo. El T retirado puede almacenarse y el ³He que se obtiene puede utilizarse para suministrar uno de los componentes de combustible de D-³He. Los ejemplos de este tipo de funcionamiento pueden presentar ventajas en comparación con sistemas en estado estacionario, o sistemas en los que no hay un fácil acceso a los subproductos de fusión.

En primer lugar, los tritones creados generalmente no disponen de tiempo para la interacción con D, lo cual permite obtener una mayor cantidad de ³He. En segundo lugar, dado que la reacción de D-T es generalmente despreciable, el flujo de neutrones a la primera pared es reducido en comparación con el consumo *in situ* del tritón. La reducción se debe en gran parte a la eliminación de los neutrones de alta energía más peligrosos creados mediante la reacción de D-T ($E_{\text{neut}} = 14.1 \text{ MeV}$).

En algunos ejemplos, el neutrón originado en la reacción de D-D (ver la figura 3) puede utilizarse para crear heliones adicionales mediante producción de tritio en presencia de litio en el manto. En tales ejemplos, asimismo puede utilizarse el ³He y T producidos en el plasma de FRC. Generalmente, las dos reacciones de fusión de D-D en la figura 3 sirven principalmente para la producción de ³He y T (esto asimismo se aplica a las reacciones secundarias con los neutrones de fusión si se desea). Esta parte del ciclo puede proporcionar eventualmente el ³He para completar el ciclo en el que la fracción mayoritaria de la energía de fusión generada se proporciona por la reacción de D con ³He. El efecto de los diferentes ciclos de funcionamiento sobre la fracción en estado estacionario de ³He se muestra en la figura 4. A partir de este gráfico resulta evidente que la razón de helión con respecto a deuterón se potencia en gran medida a baja temperatura de plasma debido al aumento relativo de reacciones de D-D. La conversión de neutrones en tritio para su decaimiento para proporcionar ³He se logra fácilmente con un manto de litio natural (7.56% de ⁶Li, el resto de ⁷Li) en el que la reacción ${}^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + n - 2.47 \text{ MeV}$ produce un segundo neutrón garantizando un rendimiento de ³He total por cada neutrón de D-D mayor de uno (hasta un máximo de 1.9).

La figura 4 es un gráfico de la razón de helión con respecto a deuterón en ejemplos de plasmas de fusión en diversos modos de funcionamiento. La línea 44 ilustra un modo en el que se produce ³He principal o únicamente

en la reacción de D-D. La línea 43 ilustra un modo en el que se produce ^3He en la reacción de D-D junto con decaimiento de ^3He de T a partir de la reacción de D-D. La línea 42 ilustra un modo en el que se proporciona un manto de Li de tal manera que cada neutrón puede producir un tritón. La línea 41 ilustra un modo en el que cada neutrón puede producir 1.9 tritones.

Aunque una temperatura de plasma relativamente baja proporciona los niveles fraccionales más altos de ^3He , no proporciona necesariamente la mejor supresión de la energía de neutrones (la fracción más baja de potencia de neutrones con respecto a potencia de fusión total, ϵ_{neut}) o la eficacia de conversión más alta (fracción más alta de partícula con respecto a potencia de fusión total, ϵ_{part}). Se proporciona información sobre cuál es la condición de funcionamiento más favorable mediante la dependencia de ϵ_{neut} tanto de la temperatura de plasma como de la razón de helión con respecto a deuterio. En la figura 5 se encuentra un gráfico que refleja estos compromisos.

La figura 5 es un gráfico de la potencia de neutrones fraccional en función de la razón de helión-deuterón en el plasma de fusión. Las líneas discontinuas indican el plasma de 50 keV mientras que las líneas continuas son para 70 keV. Las líneas 51 se refieren a ejemplos en los que el tritio producido en reacciones de D-D no puede retirarse. Las líneas 52 reflejan la retirada de tritio después de cada pulso en el reactor de fusión. El gráfico ilustra un ejemplo del papel de la retirada de tritio en la reducción de la exposición de neutrones independientemente de la razón de helión con respecto a deuterón. Aunque la sensibilidad con respecto a la temperatura de plasma no es grande, los plasmas a temperatura inferior experimentan pérdidas más sustanciales debido a radiación de Bremsstrahlung. La razón de pérdida de potencia de Bremsstrahlung con respecto a potencia de fusión total producida, ϵ_{brem} , presenta una escala como T2 a lo largo de este intervalo de temperaturas de plasma, lo cual favorece en gran medida las temperaturas superiores además de la potencia de neutrones inferior con la temperatura.

Un ejemplo de resultados de optimización para un ejemplo de motor de fusión proporciona los parámetros de plasma básicos encontrados en la siguiente tabla que proporciona ejemplos de valores de parámetros en cada uno de tres modos de funcionamiento: (1) D-D sin retirada de tritio; (2) D-D con retirada de tritio; y (3) D-D con retirada de tritio y manto de litio.

Parámetro	Cat D-D	Cat D-D (retirada de T)	Cat D-D (retirada de T con manto de Li)
$^3\text{He}/\text{D}$	0.125	0.158	0.245
$n_{\text{T}}/n_{\text{D}}$	0.006	$\sim 10^3$	$\sim 10^{-3}$
n_{D} (10^{22} m^{-3})	0.75	0.75	0.62
n_{tot} (10^{22} m^{-3})	1.95	1.88	1.72
$T_{\text{i}} = T_{\text{e}}$ (keV)	70	70	70
B (T)	22	22	22
τ (s)	0.157	0.103	0.088
ϵ_{brem}	0.25	0.23	0.22
ϵ_{neut}	0.27	0.06	0.04
P_{fus} (MW) (a 1 Hz)	72	72	72

Revisando la tabla, el funcionamiento con retirada de tritio puede preferirse considerablemente más que el funcionamiento sin retirada de tritio. La carga de pared por sí sola limitará el funcionamiento a menos de 25 MW en este ejemplo ya que puede requerirse una reducción de la tasa de pulsos para limitar una carga de pared excesiva. El reactor de fusión puede hacerse funcionar con o sin generación de ^3He con los neutrones de D-D. La decisión entre estos dos modos reflejará muy probablemente el coste de la tecnología adicional, aunque parece ser una utilización bastante directa de litio a granel en un manto sencillo extraíble. Dado que la ventaja no es grande, el ^3He adicional puede utilizarse para el inicio de nuevos reactores de fusión si se necesita. En cualquier caso, ejemplos de reactores de fusión con supresión de tritio, autosuministrados, que utilizan ciclos de combustible de D- ^3He descritos en la presente memoria pueden constituir un gran avance hacia un procedimiento libre de carbono, seguro y eficiente para la generación de electricidad a partir de fusión.

A partir de lo anterior, se apreciará que, aunque en la presente memoria se han descrito formas de realización específicas de la invención con fines de ilustración, pueden introducirse diversas modificaciones sin apartarse del alcance de la invención tal como se define por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento que comprende:

5 suministrar deuterio a un reactor de fusión (5);

suministrar ^3He al reactor de fusión

10 llevar a cabo reacciones de fusión de deuterio-deuterio (D-D) para producir productos de reacción que comprenden ^3He y subproductos de tritio;

llevar a cabo reacciones de deuterio- ^3He (D- ^3He);

15 someter a pulsos el reactor de fusión (5) energizando secuencialmente las bobinas de formación (18) del reactor de fusión (5) para formar, acelerar y comprimir simultáneamente unos plasmoides de configuración de campo inverso y para permitir el acceso a productos de reacción que permite la retirada de subproductos de tritio formados durante las reacciones de fusión de D-D;

20 retirar, en respuesta a someter a pulsos el reactor de fusión, por lo menos algunos de los subproductos de tritio del reactor de fusión (5) producidos en la reacción de fusión de D-D antes de una reacción de fusión de D-T;

en el que el ^3He suministrado procede de los productos de reacción de las reacciones de fusión de D-D y/o el decaimiento de los subproductos de tritio retirados, y

25 estando el procedimiento caracterizado por que

se seleccionan una cantidad de deuterio y tasa de reacciones de fusión de manera que la cantidad del ^3He suministrado que va a producirse a través de los productos de reacción de las reacciones de fusión de D-D y/o el decaimiento de los subproductos de tritio a partir de dicha reacción de fusión permite un ciclo de combustible de D- ^3He autosostenido.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que someter a pulsos comprende someter a pulsos de manera repetitiva.

35 3. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además almacenar de manera remota los subproductos de tritio.

40 4. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que llevar a cabo la reacción de fusión de D-D comprende formar por lo menos dos plasmoides y acelerar los por lo menos dos plasmoides uno hacia el otro.

5. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que llevar a cabo la reacción de fusión de D-D comprende aumentar una temperatura de un plasma hasta 70 keV o menos.

45 6. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además proporcionar un manto de litio para la producción de neutrones adicionales.

7. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además almacenar la energía que se genera durante la reacción de fusión de D-D.

50 8. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además hacer funcionar el reactor de fusión a una temperatura en la que una sección transversal de fusión para la reacción de D- ^3He es más grande que una sección transversal de fusión para la reacción de fusión de D-D.

55 9. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además retirar por lo menos algunos de los productos de reacción que incluyen los subproductos de ^3He y los subproductos de tritio en un desviador del reactor de fusión.

10. Procedimiento según la reivindicación 9, que comprende además suministrar los por lo menos algunos de los productos de reacción de ^3He a un reactor de fusión diferente.

60 11. Procedimiento según la reivindicación 9, que comprende además separar los subproductos de ^3He y los subproductos de tritio en el desviador.

65 12. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además permitir que los subproductos de tritio retirados del reactor de fusión decaigan para producir ^3He .

13. Procedimiento según la reivindicación 12, en el que el ^3He producido a partir del decaimiento de los

subproductos de tritio retirados se suministra al reactor de fusión y/o a un reactor de fusión diferente.

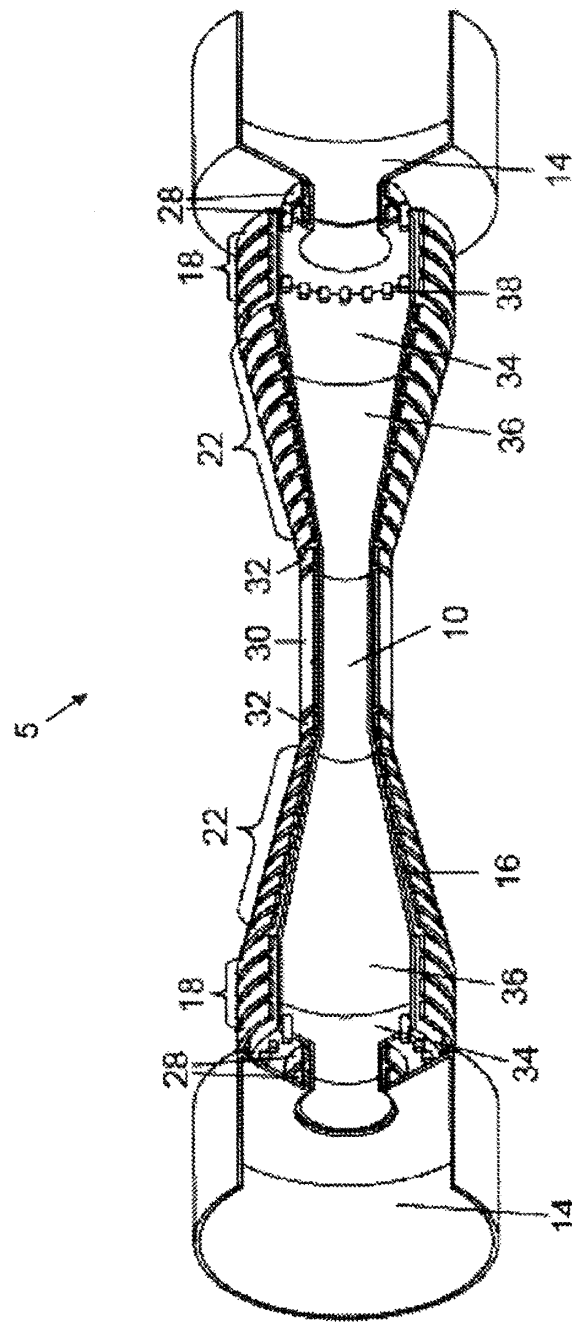


FIG. 1

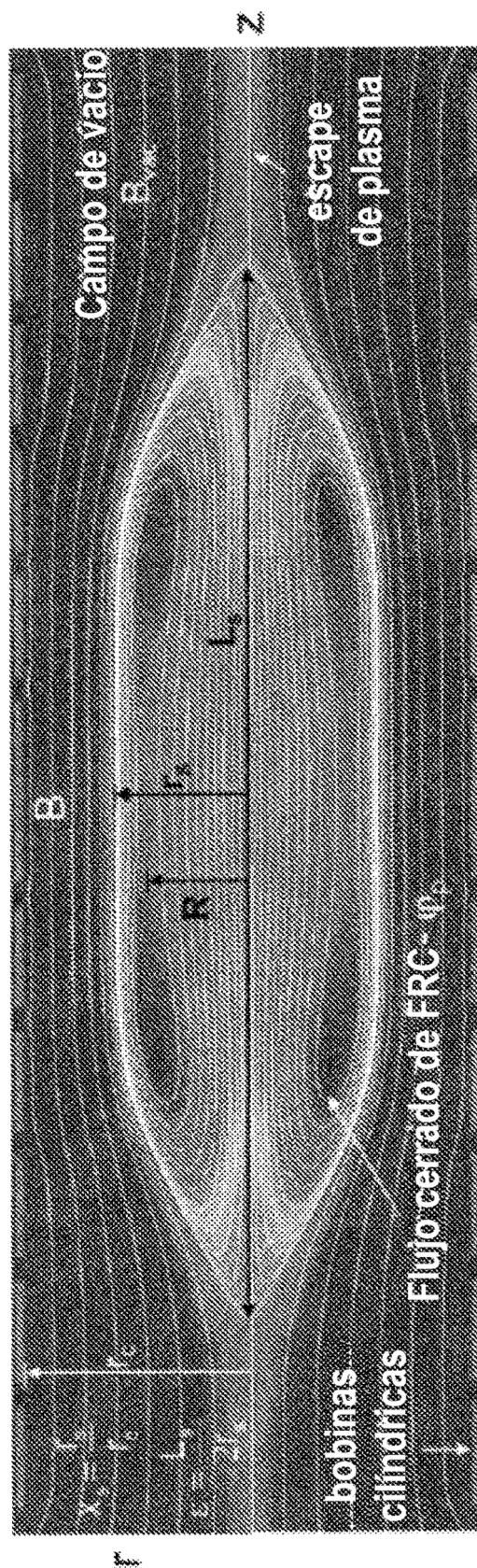


FIG. 2

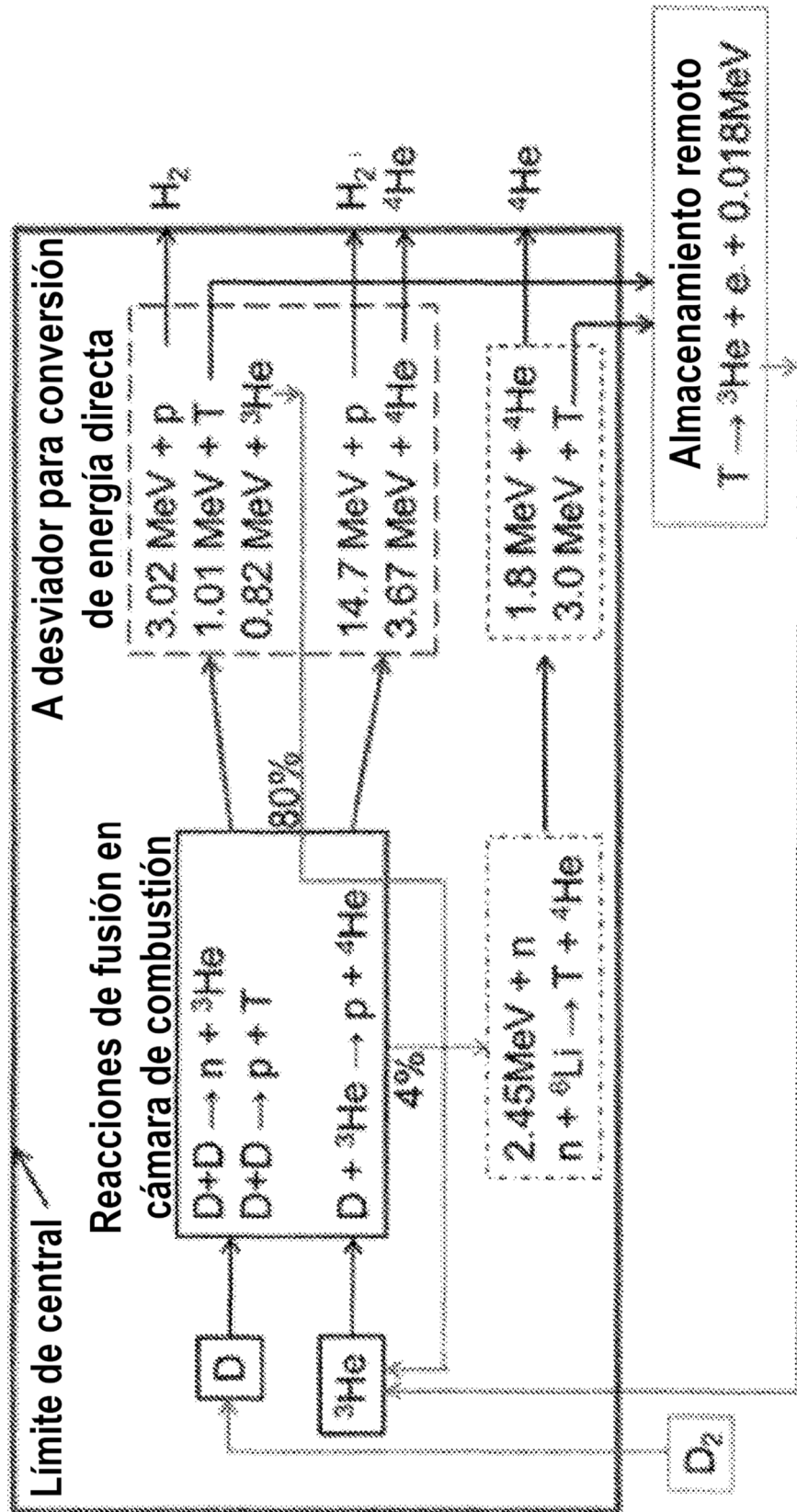


FIG. 3

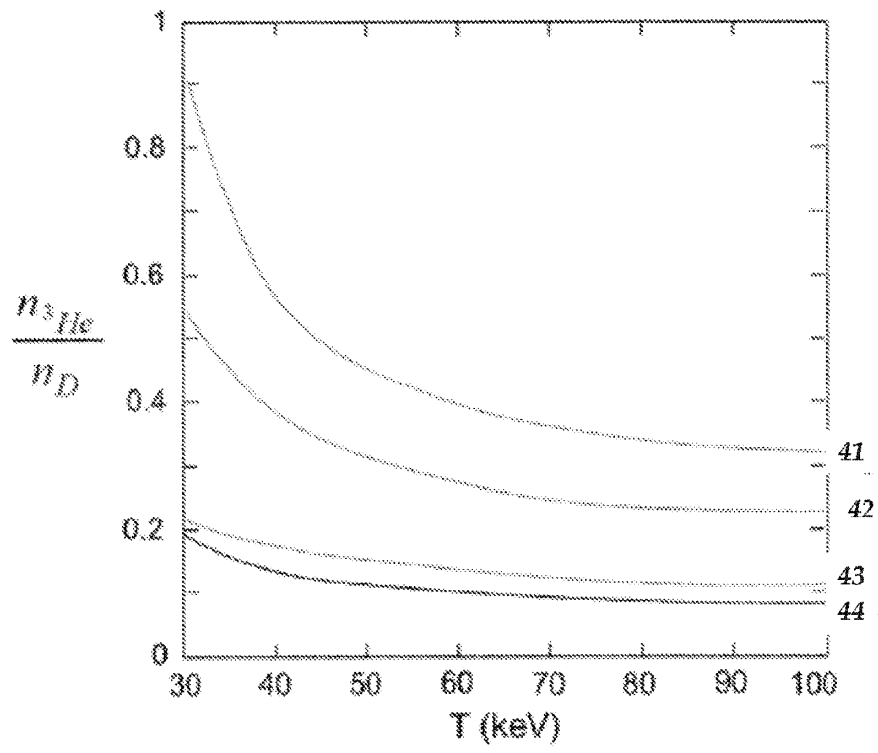


FIG. 4

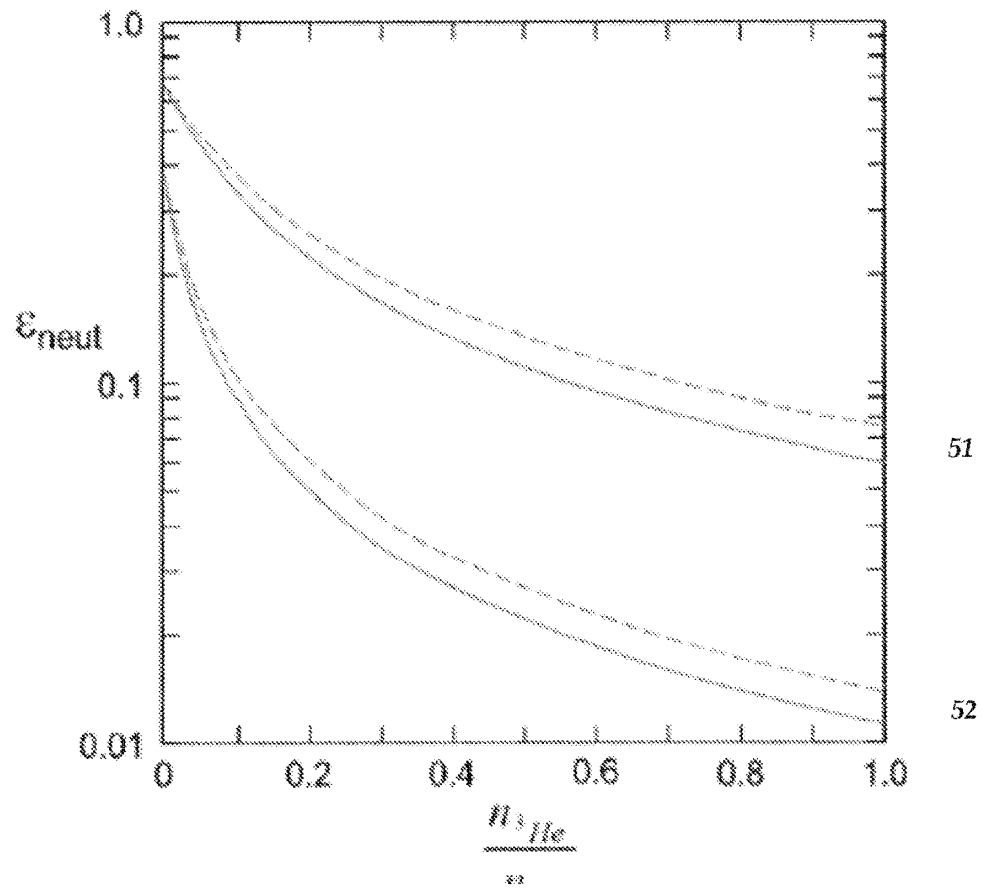


FIG. 5