



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 362 233**

51 Int. Cl.:

G21C 3/36 (2006.01)

G21C 3/04 (2006.01)

G21C 3/06 (2006.01)

G21C 3/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **06792729 .3**

96 Fecha de presentación : **08.08.2006**

97 Número de publicación de la solicitud: **1913600**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **23.04.2008**

54 Título: **Elemento combustible de tipo placa macro-estructurada.**

30 Prioridad: **10.08.2005 FR 05 52488**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
30.06.2011

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
30.06.2011

73 Titular/es: **Commissariat à l'Énergie Atomique et
Aux Énergies Alternatives
Bâtiment "Le Ponant D"
25, rue Leblanc
75015 Paris, FR**

72 Inventor/es: **Ravenet, Alain**

74 Agente: **Justo Bailey, Mario de**

ES 2 362 233 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

5 Elemento combustible de tipo placa macro-estructurada

Campo técnico

10 La presente invención se refiere al sector de los elementos combustibles utilizados en los reactores nucleares, y principalmente a las placas combustibles desarrolladas en el marco de las nuevas concepciones de reactores denominados de cuarta generación.

15 Más en particular, el dispositivo conforme a la invención ha sido concebido para las instalaciones que funcionan en el dominio de las altas temperaturas, es decir, para los reactores HTR (« *High Temperature Reactors* ») en los que la temperatura del fluido de refrigeración a la salida del reactor es superior a 800 °C; con preferencia, se trata de reactores con caloportador gaseoso que funcionan con un flujo neutrónico rápido refrigerado por un gas, o GFR (equivalente a « *Gas Fast Reactor* »).

20 La invención propone así una concepción de elemento adaptada a condiciones de funcionamiento impuestas y que ofrece rendimientos incrementados; la misma propone, más en particular, un nuevo diseño de «elemento de placa» combustible compuesto macro-estructurado que responde al pliego de condiciones de los GFR.

Estado de la técnica anterior

25 Las centrales de producción de energía a partir de reacciones de fisión nuclear, utilizan elementos combustibles en los que se producen fisiones que liberan una potencia calórica, que es extraída por intercambio térmico con un fluido caloportador que asegura su refrigeración.

30 A este efecto, soportando siempre las restricciones que imponen el comportamiento del combustible y sus condiciones de funcionamiento, los principios generales de concepción de los elementos combustibles de base pretenden satisfacer las funcionalidades siguientes:

- tener un contenido volúmico en átomos fisibles compatible con las condiciones de funcionamiento neutrónico y con la densidad de potencia volúmica del volumen reactivo,
- 35 - asegurar la transferencia térmica entre el material combustible y el fluido caloportador,
- confinar los productos de fisión sólidos y gaseosos liberados por el combustible.

40 En efecto, las reacciones de fisión en el seno del combustible generan productos de fisión sólidos y gaseosos que provocan un hinchamiento de la estructura del material, fenómeno activado por la energía térmica que induce igualmente mecanismos de liberación de los gases hacia fuera del material combustible. Un enfundado del material combustible permite albergar estas deformaciones sin perder la integridad del elemento.

45 La densidad de las fisiones en el seno del combustible está directamente correlacionada con la potencia volúmica que se ha de evacuar hacia el caloportador a través de la funda. La resistencia térmica entre la fuente de calor y el caloportador debe ser por tanto mínima para aprovechar la temperatura máxima del combustible y los efectos inducidos por este flujo de calor, a saber el gradiente en el seno del material y las dilataciones diferenciales entre el combustible y la funda.

50 La densidad de materia fisible en el volumen reactivo depende en sí mismo, principalmente, de la forma de los elementos de combustible: la forma determina la capacidad de la materia fisible para ser dispuesta en un volumen dado previendo un índice de relleno máximo, pero proporciona también la permeabilidad necesaria al caloportador para asegurar la evacuación de la potencia producida por los elementos con una pérdida de carga aceptable.

55 En las instalaciones nucleares, de forma convencional, se pueden utilizar tres familias de elementos combustibles de base: elemento de tipo placa (con formas cualesquiera), elemento de tipo cilíndrico (la más frecuente, con sección circular o anular) que se extiende según su eje, y elemento de tipo esférico, con mayor frecuencia en forma de partículas de pequeño diámetro (del orden del milímetro). Por otra parte, las partículas esféricas pueden ser revestidas con una matriz inerte para generar elementos combustibles compuestos, los cuales pueden presentarse igualmente bajo las tres formas anteriores de bola, de placa y macizo. Cada uno de los tipos de elementos
60 combustibles combina soluciones diferentes para los problemas planteados, y constituye un objeto de compromiso en cuanto a su dominio de funcionamiento.

65 Así, por ejemplo, en las placas, las fundas se comportan como cascos de gran esbeltez (relación entre la longitud libre del casco y su espesor). El material de funda adapta, en virtud de su maleabilidad, su geometría a la del núcleo del combustible, lo que permite la absorción de deformaciones diferenciales (hinchamiento y dilatación) con relación al material combustible, transversalmente y a nivel muy bajo de contracciones. Esta estructura de placa presenta, sin

embargo, una baja capacidad para absorber las deformaciones en el sentido del espesor debido a la muy baja rigidez de las fundas perpendicularmente a su plano, y esta libertad permite que el combustible se deforme de manera anisótropa preferentemente en esta dirección. Por otra parte, esta estructura es inestable en cuanto a pandeo en caso de una puesta bajo compresión de su plano, globalmente o localmente (sobre un punto caliente por ejemplo), en particular en el caso de que el alma combustible no esté unida, o lo esté débilmente, a las fundas.

A la vista de estas deficiencias, los elementos de placa no se utilizan, de hecho, más que para combustibles fríos, es decir, en el dominio de temperatura en el que el material combustible no libera sus productos gaseosos, y a niveles moderados de la potencia volúmica. Los parámetros de optimización se apoyan generalmente, para un nivel pretendido de potencia volúmica, en el espesor de la placa y la calidad del contacto combustible/ funda, en el control de la corrosión de la funda y en la no degradación de sus propiedades de ductilidad y funcionamiento. De hecho, los principales modos de invalidación de las placas están asociados, ya sea a una falta de ductilidad de la funda en cuanto a deformación impuesta (degradación por corrosión o endurecimiento bajo irradiación), o ya sea a un incremento de la resistencia térmica entre el combustible y el caloportador (zona corroída resistiva sobre la funda, descohesión combustible/ funda con apertura de un juego por pandeo local de la funda, por ejemplo), que provoca un calentamiento del combustible con liberación de gases de fisión y puesta bajo presión interna de la funda, lo que conduce a la rotura por inestabilidad en deformación de la funda.

Los elementos cilíndricos comprenden los cartuchos de los reactores de grafito/ gas, los lápices de los reactores de agua a presión (REP) o las agujas de los reactores de neutrones rápidos (RNR), por ejemplo. Aquí, existe un juego radial entre el combustible en forma de pastillas y la funda en la que éstas se encuentran ensartadas, juego que permite la absorción de las deformaciones diferenciales entre el material combustible y la funda: este juego es capaz, como mínimo, de compensar las dilataciones diferenciales durante la primera subida de potencia del elemento, y el hinchamiento del combustible no reabsorbible en sí mismo por fluencia y re-densificación sobre sus cavidades internas. De hecho, el material combustible debe funcionar a una temperatura que le permita activar sus propios mecanismos de absorción de sus deformaciones; en contrapartida, éste libera una parte de su gas de fisión. Un segundo volumen de expansión ha sido previsto en la funda, en el extremo de los apilamientos de pastillas de combustible, con el fin de limitar la presión en el interior del elemento. La transferencia térmica entre las pastillas combustibles y el caloportador, se realiza así radialmente a través de una resistencia térmica constituida por un juego radial de pastilla/ funda rellena de gas, y el espesor de la funda. El control de esta resistencia térmica a todo lo largo de la vida del elemento, permite garantizar el respeto de los límites de temperatura aceptables en el combustible. En esta concepción de elementos, existe por tanto una transferencia térmica a través de una junta gaseosa calibrada, y un vaso de expansión proporcionado en la dirección transversal a la de transferencia térmica.

Los principales parámetros de optimización de estos elementos cilíndricos son el juego radial inicial entre el combustible y la funda, la cantidad del fluido que asegura la conexión térmica entre el combustible y la funda (junta gaseosa o junta metálica fundida), la densidad de relleno efectivo del combustible en la sección de la funda (juego radial, porosidad, presencia de deficiencias tales como un orificio central y/o huecos lenticulares en el extremo de la pastilla), la rigidez de la funda (espesor), las leyes de comportamiento (hinchamiento y fluencia) de los materiales de la funda y del combustible, y sus propiedades mecánicas (resistencia y ductilidad).

La presencia de un juego entre combustible/ funda, aporta sin embargo una resistencia térmica variable en funcionamiento (evolución del juego y degradación de la conductibilidad por la presencia de los gases de fisión), que complica el control de la temperatura máxima del combustible respecto a que no se alcance el límite de fusión del material combustible en todas las situaciones de funcionamiento. Por otra parte, el funcionamiento en «recinto de presión» de este tipo de elemento implica la utilización de materiales capaces de asegurar la resistencia mecánica del elemento sin riesgo de rotura súbita (instantánea y/o diferida) por presión; a este fin, la sección circular, que presenta la mejor resistencia a la presión, es la que se adopta con mayor frecuencia: en situación de interacción mecánica entre el combustible y la funda, ésta opone una rigidez anular importante en virtud de su puesta en tracción circunferencial, y la presión circunferencial ejercida por la funda sobre el combustible activa sus mecanismos de recomposición en sí mismos.

La elección del material de funda parece así primordial debido a que debe presentar una resistencia a la rotura compatible con las temperaturas de funcionamiento previstas, una ductilidad en cuanto a plasticidad y fluencia térmica, y una tenacidad suficiente (típicamente $> 20 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$); esta elección (límite de resistencia instantánea y a la fluencia) y la del material combustible (temperatura de fusión), determinan las condiciones límite (temperaturas y potencia volúmica) de funcionamiento de los elementos de combustible. El principal modo de anulación residual asociado a este tipo de elementos es, en efecto, la interacción mecánica de combustible/ funda instantánea que supera la capacidad de deformación de la funda (caso de subida de potencia a un nivel superior del funcionamiento precedente o en un régimen de funcionamiento en el que la temperatura del combustible no active sus mecanismos de auto absorción de sus deformaciones).

En lo que se refiere a los elementos esféricos, se depositan diferentes capas de recubrimiento sucesivamente sobre un núcleo fisil que debe estar centrado; se crean así espacios vacíos, en forma de porosidades, en el seno del núcleo fisil y en una capa tampón intermedia, denominada «buffer», de porosidad muy fuerte, que asegura la continuidad inicial entre el núcleo fisil y las capas de funda. La absorción de las deformaciones diferenciales entre el

combustible y la funda, es decir, la capa de revestimiento, se realiza mediante relleno de las deficiencias: en funcionamiento, la densidad progresiva del buffer genera un juego radial que permite impedir una interacción mecánica fuerte entre el núcleo fisil y las capas de funda. Además, los volúmenes libres por el interior de la funda retienen los gases de fisión liberados por el material fisil: la forma esférica de la funda está también bien adaptada para resistir la presión interna que se establezca. Los parámetros de optimización de las partículas elementales son esencialmente la elección de los materiales (naturaleza, estructura, propiedades y leyes de comportamiento bajo flujo neutrónico y frente a temperatura) y del espesor de las diferentes capas.

Estos elementos combustibles no se utilizan más que en los reactores de flujo térmico refrigerados por gas que funcionan a alta temperatura. Su principal modo de invalidación residual corresponde a la fuerte interacción entre el núcleo fisil y las capas de funda (puesta bajo tracción por deformación impuesta de la funda), lo que puede provocar la rotura de la funda de confinamiento: desde este punto de vista, la forma esférica del enfundado, si bien es óptima en lo que se refiere a la interacción mecánica, es la más desfavorable puesto que la misma no deja libre ninguna dirección de deformación del material combustible (más allá de su densificación máxima) para absorber los esfuerzos de interacción (puesta bajo presión hidrostática del volumen interno de la funda).

Este tipo de elemento combustible esférico se utiliza, de hecho, principalmente como parte de elementos compuestos de formas diversas que diluyen las partículas en una matriz que asegura la transferencia térmica hacia el caloportador, con una débil fracción volúmica (algún %) del material fisil en el volumen reactivo.

Los elementos compuestos han sido desarrollados principalmente para disminuir el riesgo de contaminación del circuito primario del caloportador en caso de rotura de elementos combustibles, con el fin de reducir al máximo la cantidad de productos de fisión susceptibles de ser liberados a continuación de un evento iniciador de rotura. En particular, los elementos en forma de placas macro-estructuradas pueden ser considerados como una solución, con la disposición ordenada de las partículas de combustible y/o la búsqueda de una densidad de partículas compatible con la fracción volúmica de la aplicación planteada. En todo caso, para obtener una buena conductibilidad homogeneizada a través de la placa, se utiliza una matriz de dilución del combustible y de las placas de funda, de material metálico, para las aplicaciones previstas.

Parece que los GFR, en los que el gas caloportador, He por ejemplo, permite alcanzar a la salida del reactor un nivel de temperatura suficientemente elevado compatible con las aplicaciones previstas de producción de electricidad con gran rendimiento (por ejemplo, en ciclo directo) o de producción de hidrógeno, deben funcionar con un flujo rápido que asegure la posibilidad de alcanzar un índice de conversión superior a 1 (sobregeneración) y/o una capacidad de transmutar los residuos (productos de fisión y actínidos menores): resulta por tanto deseable que los niveles de seguridad y de fiabilidad en funcionamiento se adapten a estas exigencias con relación a las ya alcanzadas en los sistemas de las generaciones precedentes.

El problema que se ha de resolver para tener un elemento combustible compatible con el pliego de condiciones de los GFR, está basado en cuatro componentes:

- 1) asegurar una fracción volúmica importante de combustible en la matriz;
- 2) garantizar la resistencia mecánica de cada célula respecto a la presión interna de los gases de fisión liberados por el combustible;
- 3) evitar las interacciones fuertes entre el combustible (mediante su hinchamiento) y las estructuras de la célula, y
- 4) evacuar la potencia producida hacia el caloportador con una buena conductividad a través de la placa para controlar las temperaturas en el centro de la placa, y las tensiones inducidas en las estructuras.

En particular, para alcanzar las características neutrónicas de los núcleos GFR, las fracciones volúmicas de combustible en el alma compuesta del elemento de placa deberían ser superiores al 50%, estando el resto constituido por una matriz inerte. Al alcanzar la densidad de potencia en el alma compuesta algunas centenas de MW/m³, la transferencia térmica hacia el caloportador induce diferencias de temperatura importantes entre la funda (superficies de intercambio del elemento de placa con el caloportador) y el alma compuesta de la placa; el funcionamiento a alta temperatura (temperatura de caloportador superior a 850 °C) impone por otra parte utilizar para la funda y la matriz del elemento de placa, materiales que tengan propiedades compatibles de conductibilidad térmica, transparencia a los neutrones y resistencia mecánica, en particular metales y aleaciones refractarias o cerámicas.

Por otra parte, los fuertes índices de combustión alcanzados van a provocar un hinchamiento importante del combustible (varios %) y una liberación significativa de productos de fisión gaseosos, agravada además por la temperatura del combustible. Cada célula elemental de la placa de combustible debe, si es posible, poder absorber estas sollicitaciones sin rotura y sin deformación excesiva de la placa, lo que podría influir sobre la sección de paso del caloportador entre los elementos de placa: el volumen de expansión previsto en cada célula entre el combustible y la matriz debería estar garantizado para evitar una interacción mecánica fuerte que genere niveles de tensiones inaceptables por la estructura matriz/ funda, y para mantener un nivel de la presión interna de los gases de fisión compatible con la resistencia mecánica de la funda en todas las situaciones de funcionamiento del elemento

combustible (normales, en caso de incidente, entiéndase accidente).

Este problema es aún más difícil de resolver que lo que implica en el nivel de temperaturas de funcionamiento para las estructuras del elemento en forma de placa, el uso de materiales de baja ductilidad y tenacidad, lo que hace que sean particularmente más sensibles a las cargas del tipo de las deformaciones impuestas, tales como los gradientes de dilatación térmica y de hinchamiento interno de los materiales, así como las interacciones entre el combustible y las estructuras (hinchamiento y dilatación térmica diferenciales).

Ninguna de las estructuras existentes cumple con estos criterios de forma óptima.

En particular, el documento US 3 097 152 propone una geometría de células que incluyen partículas de combustible, que no es apta para cubrir el dominio de las temperaturas de funcionamiento y de flujo previsto en los GFR: los materiales de la estructura de placa no son compatibles con las temperaturas previstas principalmente en los contactos de la matriz y del combustible, con una gran densidad de combustible en la matriz y una potencia volúmica elevada. Por otra parte, la ausencia de volumen libre alrededor de las partículas de combustible no permite a la vez el almacenamiento, a una presión aceptable por la estructura, de los gases de fisión liberados por la combustión y las deformaciones diferenciales de combustible/ matriz repercutidas de ese modo integralmente en el espesor de la placa.

La concepción de las placas descritas en el documento US 3 070 527 no está adaptada a las condiciones de funcionamiento de los GFR: la placa está constituida por un alma central compartimentada, recibiendo cada uno de los compartimentos un combustible metálico o cerámico, asegurando las fundas chapeadas a una y otra parte la obturación. Siendo el objetivo previsto los reactores de agua, el combustible se define de modo que esté más frío, con placas de estructuras metálicas (aluminio, acero inoxidable, zirconio, aleaciones de zirconio) delgadas y del mismo calibre, no relacionadas con el combustible.

El documento US 3 855 061 describe una concepción de placa basada en el principio de una red ordenada de partículas esféricas de combustible, cuyo campo de aplicación concierne a los reactores de agua hirviendo (BWR) y de agua a presión (PWR o REP): se busca el control de la dispersión y de la fracción volúmica de combustible en el compuesto y su capacidad para alcanzar niveles de combustión más elevados. Las esferas de combustión están así dispuestas en placas metálicas perforadas con agujeros cilíndricos circulares (el espesor de cada una de las placas y el diámetro de los agujeros son iguales que el diámetro de las esferas), lo que libera, en torno a cada esfera, un volumen de expansión que recibe los gases de fisión y que permite una cierta expansión geométrica del combustible. Dos placas de funda metálica aseguran, a una y otra parte, la estanquidad del elemento. Las densidades de relleno de material combustible de la matriz central de las placas pueden aproximarse a un 20 a 25%; no se ha abordado su aptitud para alcanzar fracciones volúmicas importantes con densidades de potencia y temperaturas de funcionamiento elevadas.

Exposición de la invención

El desarrollo de una nueva generación de reactores, la cuarta, debe ir por tanto acompañada, con preferencia, de una concepción de nuevos elementos combustibles que subsane los inconvenientes de las estructuras existentes.

La invención propone por tanto una configuración para el combustible nuclear susceptible de funcionar con los reactores GFR, si bien esta utilización no debe entenderse como limitativa.

De manera más general, la invención se refiere a un elemento combustible que comprende una placa de funda provista de una red de paredes que forman alveolos, con preferencia en forma de nido de abeja, ventajosamente unitaria con la placa, y al menos una pastilla de combustible nuclear localizado, con juego radial, en un alveolo. Cada pastilla de combustible del elemento se extiende a lo largo de un eje entre dos caras opuestas, por ejemplo en forma de un cilindro de revolución; ventajosamente, una al menos de las caras opuestas está abombada, con preferencia en su centro, es decir que presenta un saliente hacia el exterior, de modo que se deja igualmente un espacio axial inicial entre la pastilla y el alveolo.

Para su utilización, el elemento según la invención comprende una segunda placa de funda, provista de la misma red de paredes que la primera o plana, que puede ser adaptada sobre la primera placa de modo que los alveolos sean cerrados. Ventajosamente, una soldadura con aleación metálica, un encolado o una soldadura de otro tipo, permiten obtener alveolos estancos, que con preferencia están rellenos de gas neutro, como el helio, y con una pastilla de combustible cada uno.

Las placas y las paredes de los alveolos del elemento según la invención pueden estar realizadas con metal refractario o con cerámica, monolítica o reforzada con fibras, como un carburo de silicio con fibras de la misma naturaleza o de naturaleza diferente. En el caso de placas cerámicas en particular, se puede intercalar una capa metálica en los alveolos, entre la pastilla y las paredes, para perfeccionar el confinamiento de los productos de fisión.

Las dimensiones de las placas y de las pastillas están adaptadas y optimizadas en función del reactor. Con

preferencia, la fase fisil representada por las pastillas supone más del 20% en volumen del medio reactivo (núcleo), es decir, más de un 50% del volumen del alma compuesta del elemento de placa, y el volumen libre entre pastillas y paredes internas del alveolo representa más del 40% del volumen de las pastillas.

5 Breve descripción de los dibujos

Las características y ventajas de la invención podrán ser mejor comprendidas con la lectura de la descripción que sigue y con referencia a los dibujos anexos, dados a título ilustrativo y en ningún caso limitativo.

10 La Figura 1 ilustra un modo de realización de un elemento conforme a la invención.

Las Figuras 2A y 2B, respectivamente 2C y 2D, esquematizan modos de realización de elementos según la invención.

15 Exposición detallada de modos de realización particulares

Para comprender mejor el carácter innovador del elemento propuesto, un análisis previo de los fenómenos que se producen en los reactores de tipo GFR para los que ha sido concebido en principio el elemento combustible según esta invención, incluso siendo posibles otras aplicaciones, permitirá deducir las limitaciones que han de tenerse en cuenta.

Los reactores nucleares que funcionan con un flujo rápido tienen necesidad de elementos combustibles que aseguren una fracción volúmica importante de materiales fisiles en el núcleo. El funcionamiento del combustible a alta temperatura impone, por otra parte, tener en los elementos combustibles un volumen de expansión que permita recoger los gases de fisión liberados. Teniendo en cuenta el espacio necesario para el paso del fluido caloportador para limitar las pérdidas de carga a valores razonables, y del volumen que ocupan las demás estructuras del núcleo, la parte de volumen restante para las estructuras y volúmenes de expansión de los elementos combustibles es pequeña. Para la invención, se trata por tanto de reducir al máximo el volumen de la estructura (funda y matriz) en el elemento combustible para obtener una cantidad suficiente de combustible e igualmente de volumen de expansión entre el combustible y la célula de confinamiento que lo contiene.

En particular, para que los GFR alcancen condiciones neutrónicas de funcionamiento satisfactorias, las fracciones volúmicas de material combustible en el medio reactivo (núcleo) son del orden de, por lo menos, el 20-25% según la densidad y el enriquecimiento en materia fisil del combustible. Las densidades de potencia volúmica en el núcleo son del orden de 100 MW/m³, y la fracción volúmica ocupada por el gas caloportador necesario para la refrigeración con una pérdida de carga aceptable y una temperatura de caloportador que respete el objetivo de T > 850 °C, debería ser de al menos un 40%. Las potencias volúmicas en el material fisil alcanzan como media valores de 400 a 500 MW/m³, a saber valores máximos de 600 – 750 MW/m³ en función de los perfiles de flujo en el núcleo. Los otros materiales que intervienen en la composición de las estructuras que ocupan la fracción volúmica del 30 a 35% restante (por fuera del juego), deben tener una transparencia neutrónica tal que no degrade el flujo (en cuanto a intensidad y espectro).

Por último, para reducir el riesgo de contaminación del circuito primario del caloportador en caso de rotura, la cantidad de productos de fisión susceptibles de ser liberados se reduce mediante una geometría compuesta de los elementos combustibles.

Así, los principios de concepción del nuevo elemento combustible en forma de placa para los GFR son:

- 50 - la dispersión del combustible en células elementales que aseguren, cada una de ellas, con un buen nivel de fiabilidad (estanquidad y margen de rotura), el confinamiento de los productos de fisión gaseosos liberados a la temperatura de funcionamiento del combustible, lo que implica una resistencia a la presión de las células y la absorción del hinchamiento y la dilatación térmica diferencial entre el combustible y la estructura de la célula, sin deformación excesiva de la célula,
- 55 - la disposición de las células elementales para que correspondan con la fracción volúmica del producto fisil en el núcleo,
- un enfriamiento homogéneo de las célula mediante el caloportador para disminuir la gama de variación de la temperatura de funcionamiento del combustible de una célula a otra y en el transcurso de la irradiación,
- la utilización de materiales compatibles con el nivel de las temperaturas de funcionamiento, la transparencia y la no ralentización de los neutrones, y los flujos térmicos a evacuar,
- 60 - un valor de esbeltez (relación de espesor o diámetro respecto a la dimensión mayor del elemento) compatible con una buena resistencia mecánica global del elemento, garantizando su mantenimiento en posición desde el punto de vista estructural en la arquitectura del núcleo (índice vibratorio y no deslocalización del combustible),
- 65 - una forma de elemento que absorba las deformaciones impuestas por los gradientes de las condiciones de funcionamiento (temperatura, flujo neutrónico) a las que esté sometido, con un nivel de tensiones inducidas compatible con su resistencia mecánica.

Se ha encontrado que una estructura adaptada comprende un elemento compuesto en forma de placa, con una macro-estructura que defina alveolos individuales para cada pastilla, ilustrada según una forma preferida en la Figura 1. El elemento de placa compuesta macro-estructurada 1 está construido en base a un panel sándwich con dos placas de funda 2, 4 cuya alma es una red 6 de alveolos 8 ordenados en nido de abeja, dispuestos de manera sensiblemente ortogonal a las caras de las placas 2, 4.

La estructura 6 en nido de abeja es la red que proporciona a la vez:

- la mayor compacidad de alveolos 8 en el plano, y por lo tanto el mayor volumen libre para colocar el combustible 10 en la red 6,
- una buena isotropía de comportamiento mecánico del elemento 1 en su plano,
- una buena rigidez del elemento 1 en cuanto a flexión, y
- una resistencia elevada en cuanto a pandeo por compresión en su plano.

Sin embargo, es posible adoptar, según las circunstancias, otras redes de alveolos, regulares (por ejemplo, un reticulado cuadrado) o no (por ejemplo, una estructura mixta de octógonos y cuadrados).

De igual modo, es preferible que las paredes que forman la red 6 sean de espesor idéntico para cada alveolo 8, y que las mismas sean perpendiculares al plano de la estructura 1; sin embargo, son previsibles variaciones, por razones constructivas principalmente.

Cada alveolo 8, delimitado por las paredes 6 y cerrado en sus extremos por las caras 2, 4 del elemento de placa 1, constituye una célula elemental construida según los principios de concepción enunciados anteriormente para asegurar la transferencia térmica entre el combustible 10 que estará situado en la misma, y las caras de las placas de funda 2, 4 refrigeradas por el caloportador, para controlar el volumen de expansión de los gases de fisión, para aprovechar el volumen de expansión de los gases de fisión, y para favorecer una interacción mecánica entre combustible 10/ funda 2, 4 con un bajo nivel de tensiones en las estructuras de la célula.

Cada alveolo 8 de sección hexagonal puede recibir, y ventajosamente recibe, una pastilla combustible 10 de forma cilíndrica circular aprovechando (véanse las Figuras 2):

- un juego axial 12 calibrado entre la pastilla 10 y la funda 2, 4 (por ejemplo, de algunas decenas de μm) para regular la temperatura en el núcleo del combustible durante toda la duración del aprovechamiento del elemento 1, siendo el objetivo el de asegurar la transferencia de toda la potencia de la pastilla 10 a través de este juego,
- un juego radial 14 entre la pastilla 10 y las paredes del alveolo 8, dimensionado para crear el volumen de expansión necesario en la célula y para impedir la interacción mecánica circunferencial entre la pastilla 10 y el alveolo 8.

El volumen de expansión está constituido, de hecho, por el juego circunferencial 14 y la diferencia de volumen que queda libre entre la forma hexagonal interna del alveolo 8 y el cilindro circular 10 inscrito en el hexágono. El juego radial 14 es con preferencia importante (por ejemplo, algunas centenas de μm) para asegurar el desacoplamiento térmico entre la pastilla 10 y la pared 6 del alveolo 8. De ese modo se evitan los intercambios térmicos radiales a través de las paredes del alveolo, o al menos se minimizan, con el fin de mantener la red 6 a una temperatura media igual a la de las fundas 2, 4 y evitar así las dilataciones diferenciales entre las fundas 2, 4 y la estructura central 6 del compuesto.

Resulta además posible crear una interacción mecánica controlada entre la pastilla 10 y la funda 2, 4 en dirección axial, regulando el juego inicial y utilizando en particular pastillas 10 con un perfil en el extremo de forma abombada que establece un contacto progresivo del centro desde el alveolo 8 hacia la periferia (sería previsible cualquier otra protuberancia, pero la geometría abombada, además de su simplicidad de fabricación, permite obtener una simetría y un contacto progresivo que reparte el esfuerzo sobre una superficie grande). La deformación por flexión impuesta a las fundas 2, 4 por la pastilla es así absorbida, por una parte, por la propia pastilla 10 (que se deforma radialmente: véase lo que sigue), y por otra parte, por flexión de la funda cuya rigidez está adaptada (espesor de la funda 2, 4 y lados sobre los alveolos 8) para minimizar las tensiones inducidas en las estructuras de la célula 8.

La absorción por parte del propio combustible 10 de ciertas deformaciones impedidas axialmente debido al contacto mecánico, se hace preferentemente en cuanto a expansión circunferencial en el juego radial 14. Las deformaciones de la pastilla de combustible 10 se hacen por tanto en un sistema en el que una dirección está limitada (dirección según el eje AA de la pastilla 10), y las otras dos están libres (expansión circunferencial). En este sistema, la pastilla de combustible 10 presenta una rigidez mínima en su dirección AA de interacción con la funda 2, 4.

De ese modo, tal y como se ha ilustrado en las Figuras 2, la red 6 en nido de abeja presenta de manera particularmente preferida, alveolos 8 hexagonales con una pastilla combustible 10 cada uno de ellos, de sección circular. Se ha formado un volumen libre 14 entre la pastilla 10 y las paredes 6, que garantiza la ausencia de

interacción radial entre las pastilla 10 y el alveolo 8; las fundas 2, 4 cierran los extremos del alveolo 8, con un juego axial 12 que asegura la transferencia térmica entre la pastilla 10 y la funda 2, 4. Cada cara opuesta de la pastilla combustible 10 a lo largo de su eje AA presenta una convexidad 16 para localizar el contacto progresivo entre pastilla 10/ funda 2, 4 en el centro del alveolo 8.

5 Con preferencia, el conjunto de la estructura del elemento 1, es decir la red 6 y cada una de las placas 2, 4 de funda, se ha fabricado con el mismo material refractario, el cual puede ser un metal o una cerámica, pudiendo la cerámica ser monolítica o incorporar fibras igualmente cerámicas.

10 En particular, cuando las paredes son de cerámica, tal y como se ha ilustrado en la Figura 2C, es posible añadir una capa metálica 18, o «*liner*», aplicada sobre las paredes de cada célula 8. La tira 18 encapsula, con preferencia, completamente a la pastilla 10 y a su volumen de expansión 12, 14 para aumentar así el confinamiento de los productos generados durante el funcionamiento del reactor.

15 En lo que se refiere al montaje, tal y como se ve en la Figura 1, el elemento de placa 1 puede estar constituido por dos semi-elementos ensamblados en el plano en relación de semi-espesor, es decir, a media altura de las paredes 6. Los dos semi-elementos 2, 6' y 4, 6, pueden ser de hecho idénticos e incluir, cada uno de ellos, sobre una cara de la placa de funda 2, 4, la red de alveolos 6, 6' hexagonales «de forma impresa». En otro modo de realización, se puede tratar del montaje de una placa 4 que incluye de forma impresa, sobre una cara, la red 6 completa de alveolos 8 con una placa de funda lisa que se destina a cerrar las células 8 sobre el otro plano. Es igualmente posible realizar la rejilla 6 central según una estructura en nido de abeja independientemente, y después ensamblarla con dos placas planas 2, 4 fabricadas por separado.

20 Cuando las estructuras del elemento combustible 1 (fundas 2, 4 y rejilla 6) permiten la elección de un material metálico, son previsibles los tres modos de realización anteriores: el posicionamiento del, o de los, plano(s) de unión entre las estructuras 2, 4, 6, se determina en virtud de consideraciones de facilidad de realización. Por el contrario, en el caso de una realización de un elemento «todo de cerámica», puede ser preferible no utilizar más que un plano de unión entre dos sub-estructuras, y situado en el plano medio del elemento 1 (tal como se ha ilustrado en a Figura 1), es decir, allá donde las tensiones de funcionamiento son más bajas; esta opción aumenta la elección de los procedimientos de unión de cerámica – cerámica utilizables (soldadura con aleación metálica, soldadura por difusión, encolado mediante un precursor de cerámica,).

25 Según un modo de realización particularmente ventajoso, para satisfacer las condiciones de funcionamiento de flujo rápido, de temperatura de caloportador elevada y de gran densidad de potencia de un GFR, las pastillas 10 de combustible son cilíndricas circulares de 11,18 mm de diámetro y de 4,9 mm de altura que comprenden una forma abombada 16 en los extremos (flecha en el centro de 30 μm por lo menos); estas pastillas son fabricadas a partir de (U, Pu)C siguiendo un procedimiento estándar con un índice de porosidad del 15%.

30 Debe entenderse que los valores numéricos dados son solamente a título indicativo, y deben en cualquier caso ser entendidos con los márgenes de error habituales.

35 El elemento combustible 1 está entonces concebido con una funda 2, 4, 6 de cerámica monolítica (SiC por ejemplo), o de un compuesto con fibra (SiC – SiCf por ejemplo), de un espesor total de 7 mm. Éste se realiza por ensamblaje de dos semi-elementos idénticos, cada uno de los cuales incluye un fondo plano 2, 4 de 1 mm de espesor y una red 6, 6' de 2,5 mm de altura que define una rejilla en nido de abeja con un paso de alveolos 8 de 14 mm, y con paredes de espesor uniforme de 1,3 mm. El ensamblaje de los dos semi-elementos se realiza mediante soldadura con aleación metálica (con el procedimiento adaptado a la cerámica y al dominio de temperaturas), mediante soldadura por difusión o mediante encolado.

40 Las células están llenas de gas, de helio, a la presión atmosférica. El juego axial 12 entre pastilla 10 y funda 2, 4, es de 100 μm , siendo el juego radial 14 (entre planos del hexágono) de 760 μm : el volumen libre inicial entre la pastilla 10 y la funda 2, 4, 6 (sin contar el volumen de las porosidades del combustible) representa entonces el 47% del volumen de la pastilla de combustible.

45 En el caso de la colocación en su lugar de una tira metálica 18, su espesor, comprendido entre 25 y 100 μm , está incluido en el espesor de las paredes 6 de los alveolos 8 y de las fundas 2, 4; por ejemplo, el espesor de las paredes se lleva de 1,3 mm a 1,1 mm para un espesor de tira de 100 μm . La tira puede estar constituida por aleaciones de metales semi-refractarios, por ejemplo a base de tungsteno, molibdeno, niobio,

50 Por otra parte, los carburos de titanio o de zirconio pueden reemplazar al carburo de silicio; se pueden prever igualmente carburos terciarios, o nitruros de titanio o de zirconio, especialmente para un combustible nitrurado como por ejemplo UPuN.

55 Con esta configuración, la fracción volúmica de combustible en el alma central compuesta de la placa es del 56%.

60 Las placas 2, 4 son rectangulares y de unas dimensiones de alrededor de 120 x 250 mm. La disposición de estos

elementos 1 en el núcleo del reactor asegura la fracción volúmica del 22,4% de fase fisil en el medio reactivo necesaria para el funcionamiento del núcleo GFR.

5 El comportamiento de este elemento 1 ha sido analizado en las condiciones de funcionamiento de un GFR de 2400 MW con una densidad de potencia volúmica en el núcleo de 100 MW/m³, una temperatura a la salida del caloportador de 850 °C y un índice de combustión de al menos un 10% atómico. El análisis del comportamiento termomecánico de una célula elemental ha sido realizado con el código para los elementos acabados CAST3M en el conjunto de situaciones de funcionamiento que permiten el dimensionamiento: funcionamiento normal y situación de parada (retorno a un estado frío isoterma sin presión del caloportador), incidentes con variación de carga rápida (incremento de potencia del 10%), y situaciones accidentales con despresurización lenta o rápida del gas caloportador.

Este estudio ha sido llevado a cabo:

- 15 1) sobre la célula que tiene el valor de densidad máxima de potencia en el núcleo (en el plano de flujo máximo en el centro del núcleo), es decir, un valor de 670 MW/m³ y una temperatura externa de las caras de la placa de 872 °C;
- 20 2) para células que tienen condiciones de funcionamiento diferentes a lo largo de un perfil axial en el centro del núcleo condiciones que varían desde la entrada a la salida del núcleo pasando por el plano de flujo máximo).

Los resultados muestran que, para el funcionamiento normal hasta un 10% atómico, considerando la hipótesis de un índice de liberación de gases de fisión de un 10% del combustible (U-Pu)C:

- 25 i. la presión interna al final de la vida en la célula 8 más cargada (6,2 MPa) vuelve a tomar justamente el valor de la presión externa del caloportador (7 MPa). El conjunto 1 de células 8 funciona entonces durante toda su vida con una presión interna inferior a la presión externa, lo que favorece un quasi-contacto entre placa y pastilla (cuyos efectos beneficiosos se discuten en lo que sigue)
- 30 ii. el juego axial 12 a lo largo de lo que dure su vida, se alcanza con una interacción entre la pastilla 10 y las fundas 2, 4 que induce:
- 35 a. una regulación de la temperatura del combustible 1 en el transcurso de la irradiación (si la potencia volúmica se supone constante, la temperatura máxima del combustible varía en un rango de 50 °C y se mantiene inferior a 1300 °C); el cierre progresivo del juego axial 12 compensa la pérdida de conductibilidad del gas a medida que se libera gas de fisión,
- 40 b. una expansión diametral del combustible 10 (por anisotropía del hinchamiento y por fluencia), con un nivel de deformación axial de la célula 8 que se mantiene muy bajo (deformación máxima en medio de la célula del espesor de la placa de 44 μm),
- 45 c. un bajo nivel de tensión inducida en las estructuras, tanto si es la tensión de flexión en las fundas 2, 4 como si es la tensión de tracción en el plano de unión 6, 6', que se mantiene inferior a 10 MPa.
- iii. No existe ninguna recuperación del juego radial 14, permitiendo el juego residual al final de la vida y la degradación progresiva de su conductibilidad por parte de los gases de fisión, aislar térmicamente los tabiques 6 de los alveolos 8 de la pastilla combustible 10. Al ser la temperatura media de estas paredes 6 la misma que la de las fundas 2, 4, no existen por tanto deformaciones diferenciales entre los nidos de abeja 6 y las dos placas 2, 4 (por dilatación e hinchamiento).

La simulación de un incremento rápido de la potencia volúmica de un 10% mientras la pastilla 10 está en interacción con las fundas 2, 4, muestra que la baja rigidez en cuanto a flexión de las fundas permite absorber, sin tensiones suplementarias significativas, la deformación instantánea impuesta a la célula 8 por la pastilla 10.

Del mismo modo, la pérdida de la presión externa, en la situación de parada considerada y en los accidentes de despresurización, que pone las células de los elementos 1 bajo una sobrepresión interna, provoca una puesta en tensión aceptable de las estructuras 2, 4, 6 de la célula: flexión moderada de las fundas y puesta bajo tracción del plano de unión con un valor máximo de 24 MPa en caso de despresurización rápida.

Este estudio revela que una parte importante de las tensiones en las estructuras 2, 4, 6 de las células 8 en funcionamiento es inducida por las cargas de las deformaciones impuestas, en dilatación térmica y en hinchamiento, localmente en los espesores, longitudinalmente o entre las sub-estructuras. Estas tensiones pueden ser absorbidas después de la irradiación por fluencia (fluencia de irradiación y fluencia térmica). Su nivel depende también directamente de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados.

El módulo $M = \frac{E \times \alpha}{\lambda \times (1 - \nu)}$, donde E es el módulo de Young, α es el coeficiente de dilatación térmica, λ es la

65 conductibilidad térmica y ν es el coeficiente de Poisson, permite elegir el material que minimiza estas cargas mediante un valor bajo de M. A título de ejemplo, la tabla que sigue proporciona los valores de M a 1000 °C para una

funda metálica de Nb-1Zr-C y la cerámica compuesta SiC-SiCf.

Propiedades a 1000 °C	Nb-1Zr-C	SiC-SiCf
E (GPa)	84	192
α ($10^{-6}/K$)	7,185	4
λ (W/m.K)	61,16	10
ν	0,4	0,18
M	16,645	93,66

El elemento combustible según la invención, mientras que satisface el pliego de condiciones de las cargas impuesto por los GFR, muestra de ese modo su aptitud para cubrir un dominio de condiciones de funcionamiento y de mayor rendimiento que los elementos existentes, para cualquier hilera:

- posibilidad de acceder a densidades de relleno con combustible superiores al 50% en el compuesto 1 (el documento US 3 855 061 no permitía más que el 25%), gracias a la geometría de placa compuesta,
- capacidad de asegurar el confinamiento de los gases de fisión (así como los elementos de los RNR y de las esferas HTR actuales) y de absorber la interacción de pastilla 10/ funda 2, 4, 6 sin rotura gracias al bloqueo, con una rigidez baja, de una sola dirección AA de las deformaciones (mejor que los elementos RNR que bloquean 2 direcciones de deformación del combustible, y las que esferas HTR que bloquean las tres),
- capacidad de asegurar un intercambio térmico hacia el caloportador regulando la temperatura máxima en el núcleo del combustible,
- capacidad para funcionar de manera eficiente (temperatura, índice de combustión y densidad de potencia elevados), con materiales con estructuras de tipo cerámico (monolítica o compuesta con fibras) o metálicas refractarias absorbiendo las cargas de deformación impuestas con un nivel de tensiones bajo.

Este tipo de elemento puede ser adaptado a las aplicaciones en las otras hileras (reactores experimentales, reactores térmicos, reactores rápidos, reactores de alta temperatura térmicos, principalmente). Las parejas de materiales de funda/ combustible utilizados habitualmente en estas aplicaciones, pueden ser efectivamente incorporadas de forma directa en el diseño de elementos de placas macro-estructuradas según la invención: la estructura de nido de abeja que funciona en las mismas condiciones de sollicitaciones térmica, química, mecánica que las fundas usuales, estando así el mismo material implícitamente cualificado.

El elemento combustible de placa compuesta concebido según la invención, permite por tanto:

- tener una densidad de núcleos pesados compatible con la obtención de flujos rápidos, permitiendo la estructura en nido de abeja de malla hexagonal del compuesto fracciones volúmicas de relleno de combustible superiores al 50%,
- utilizar, para rellenar los alveolos, pastillas de un combustible tal como UO_2 , UO_2-PuO_2 , UC, (U, Pu)C, UN, (U, Pu)N, ..., realizadas con procedimientos estándar,
- limitar la presión interna de los gases de fisión liberados por el combustible en los alveolos gracias al volumen de expansión definido por los juegos entre la pastilla y la matriz, representando este volumen de expansión del orden de 0,5 veces el volumen de la pastilla combustible, lo que permite combustiones nucleares («*burnups*») eficaces,
- reducir el inventario de productos de fisión que pueden ser lixiviados en el caloportador en caso de pérdida de estanquidad de la célula, constituyendo cada alveolo cerrado por sus extremos mediante las fundas una célula estanca,
- absorber las deformaciones diferenciales (dilatación térmica e hinchamiento) entre el combustible y las estructuras del alveolo con deformaciones muy pequeñas del elemento de placa que no ponen en peligro la distribución de los caudales de refrigeración entre elementos,
- optimizar el tamaño de las células (no de la red hexagonal) con alveolos de tamaño centimétrico y espesores de velo y de funda milimétricos para:
 - o asegurar la transferencia térmica hacia el caloportador preferentemente por los extremos de las pastillas,
 - o obtener una homogeneidad de las temperaturas medias en los materiales estructurales,
 - o ajustar la rigidez de flexión de las fundas que cierran los alveolos,
 - o minimizar las tensiones inducidas en las estructuras de las células (a este nivel interviene igualmente la elección de los materiales para minimizar las cargas de tipo deformación impuesta, por dilatación térmica e hinchamiento, con la búsqueda, como criterio de elección, del módulo más pequeño de $M = (E \times \alpha) / [\lambda \times (1 - \nu)]$, para optimizar el comportamiento de la célula,
- regular la temperatura máxima del combustible durante toda vida mediante la gestión de los contactos progresivos de pastilla/ funda que aseguran la transferencia térmica,
- poder funcionar en todos los tipos de reactores rápidos o térmicos con niveles de densidad de potencia en el combustible que pueden alcanzar algunas centenas de MW/m^3 con materiales estructurales (metálicos) de la placa adaptados a las temperaturas de funcionamiento, a la naturaleza del caloportador y del combustible,

- poder funcionar en los reactores de alta temperatura rápidos o térmicos con un elemento realizado completamente en cerámica monolítica o reforzada con fibras,
- añadir un componente metálico refractario, en forma de tira delgada o de depósito para garantizar la estanquidad en el caso de un combustible para reactor de alta temperatura, previniendo de ese modo una calidad insuficiente de confinamiento de la cerámica.

5

REIVINDICACIONES

- 5 1.- Elemento combustible nuclear (1) que comprende una primera placa (4), una red (6) con una pluralidad de paredes solidarizada a la primera placa (4) para formar alveolos separados (8), y al menos una pastilla de combustible nuclear (10) que se extiende a lo largo de un eje (AA) entre dos caras opuestas, en el que la pastilla (10) está localizada en un alveolo (8) con un juego radial (14) entre sus paredes y la pastilla (10), siendo el eje (AA) de la pastilla (10) sensiblemente paralelo a las paredes del alveolo (8).
- 10 2.- Elemento según la reivindicación 1, en el que las paredes de la red (6) tienen el mismo espesor, tomado en una dirección paralela a la primera placa (4).
- 15 3.- Elemento según una de las reivindicaciones 1 a 2, en el que la red (6) está fabricada de forma unitaria con la primera placa (4).
- 4.- Elemento según una de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende una segunda placa plana (2) solidarizada a la red (6), paralela con, y opuesta a, la primera placa (4), para cerrar los alveolos (8).
- 20 5.- Elemento según una de las reivindicaciones 1 a 3, que comprende una segunda placa (2) que comprende una red (6') sobresaliente complementaria de la red (6) de la primera placa (4) y solidarizada a la red (6) de la primera placa (4) para cerrar los alveolos (8).
- 25 6.- Elemento según una de las reivindicaciones 4 a 5, que comprende una única pastilla (10) de combustible que se extiende a lo largo de un eje (AA) entre dos caras opuestas localizada con un juego radial (14) en cada alveolo cerrado (8).
- 7.- Elemento según la reivindicación 6, en el que cada alveolo (8) cerrado está lleno de helio.
- 30 8.- Elemento según una de las reivindicaciones 4 a 7, en el que la fase fisil de las pastillas de combustible (10) representa más de un 20% del volumen del elemento (1).
- 9.- Elemento según una de las reivindicaciones 4 a 8, en el que el volumen residual generado por el juego (12, 14) en cada alveolo (8) representa al menos un 40% del volumen de la pastilla (10) localizada en el mismo.
- 35 10.- Elemento según una de las reivindicaciones 1 a 9, en el que cada pastilla (10) está localizada en el alveolo (8) adicionalmente con un juego axial (12).
- 40 11.- Elemento según la reivindicación 10, en el que al menos una de las caras opuestas de la pastilla (10) está abombada hacia el exterior de la pastilla para minimizar el nivel de tensiones en la placa (2, 4) después de haber alcanzado de nuevo el juego axial (12).
- 12.- Elemento según una de las reivindicaciones 1 a 11, en el que la red (6) es una estructura en nido de abeja con alveolos (8) hexagonales.
- 45 13.- Elemento según una de las reivindicaciones 1 a 12, en el que las placas (2, 4) y la red (6) están compuestas por el mismo material refractario, metálico o cerámico.
- 50 14.- Elemento según la reivindicación 13, en el que las placas (2, 4) y la red (6) están compuestas por una cerámica, principalmente a base de SiC, eventualmente con fibra.
- 15.- Elemento según la reivindicación 14, que comprende además una capa metálica (18) aplicada sobre las paredes de cada alveolo (8).
- 55 16.- Elemento según una de las reivindicaciones 1 a 15, en el que cada pastilla (10) tiene la forma del mismo cilindro de revolución alrededor de su eje (AA).

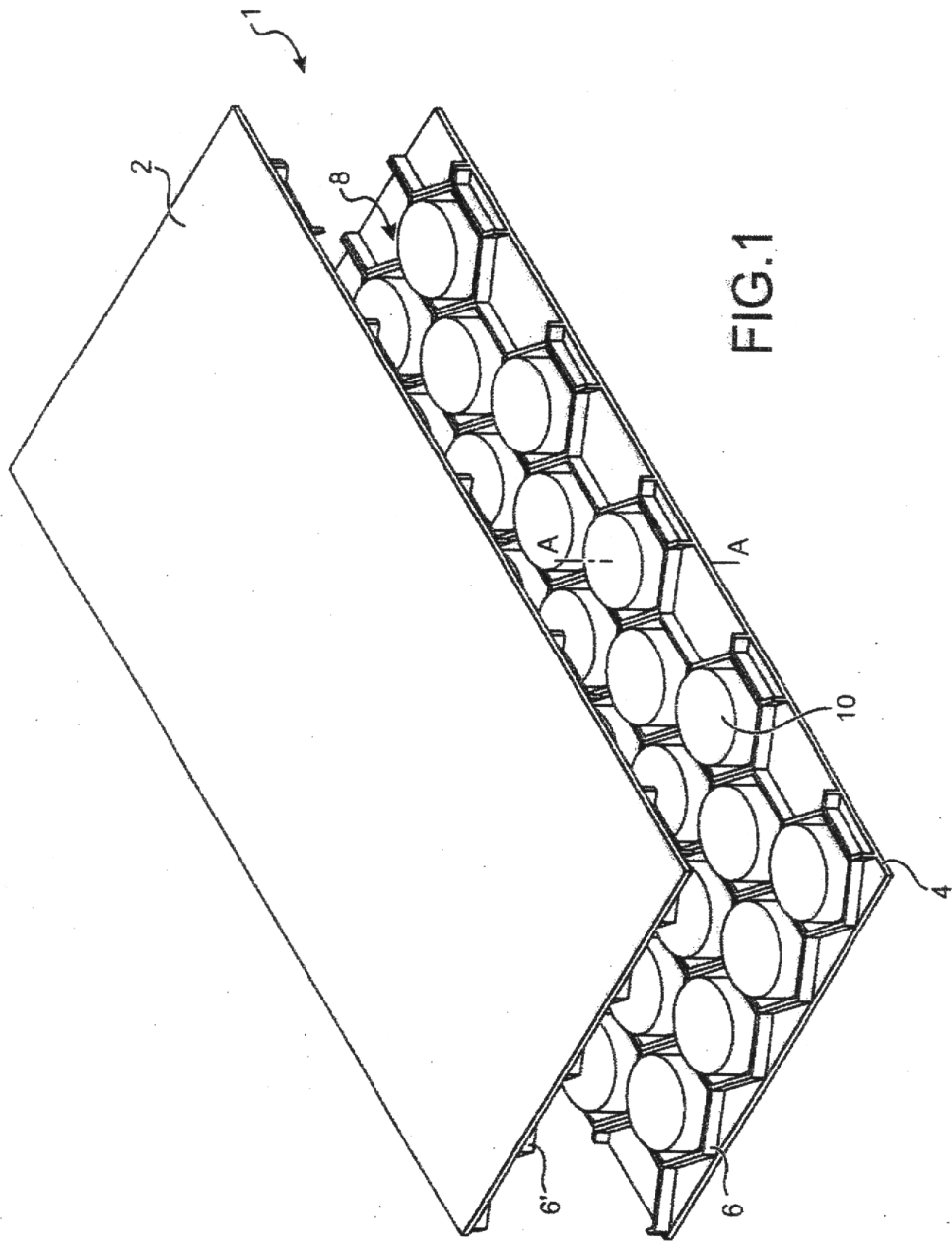


FIG. 1

