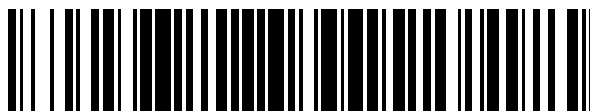


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 390 940**

51 Int. Cl.:  
**G21C 15/18** (2006.01)  
**G21C 9/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **08842963 .4**  
96 Fecha de presentación: **20.10.2008**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2201576**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **30.06.2010**

54 Título: **Reactor nuclear con refrigeración mejorada en caso de accidente**

30 Prioridad:  
**22.10.2007 FR 0758463**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**19.11.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**19.11.2012**

73 Titular/es:  
**COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET  
AUX ENERGIES ALTERNATIVES (100.0%)  
BATIMENT "LE PONANT D" 25, RUE LEBLANC  
75015 PARIS, FR**

72 Inventor/es:  
**PELISSON, ROLAND, FRANCIS**

74 Agente/Representante:  
**PÉREZ BARQUÍN, Eliana**

ES 2 390 940 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

Reactor nuclear con refrigeración mejorada en caso de accidente

5 **Campo técnico y técnica anterior**

La presente invención se refiere a un reactor nuclear cuya refrigeración está mejorada en caso de accidente, de manera más particular la refrigeración exterior de la vasija del reactor en la cual está confinado el núcleo de reactor, en caso de un accidente grave.

10 Un reactor nuclear comprende, de manera general, un núcleo de reactor que contiene el combustible nuclear, por ejemplo en forma de barra o de placa, el núcleo encontrándose confinado dentro de una vasija, permitiendo un circuito primario que el agua entre dentro de la vasija, que circule por ella para arrastrar las calorías generadas por la reacción nuclear dentro del núcleo y que salga de ella. El reactor también comprende un circuito secundario, por el cual también circula agua. Los circuitos primario y secundario están aislados el uno del otro, pero se producen intercambios térmicos entre el agua del circuito primario que sale de la vasija y el agua del circuito secundario. El agua del circuito secundario se evapora y se envía hacia unas turbinas para producir corriente eléctrica.

20 El núcleo del reactor está, en consecuencia, en funcionamiento normal sumergido en agua.

La vasija, por su parte, se encuentra dentro de un pozo de hormigón que le sirve de soporte y que constituye un blindaje contra las radiaciones.

25 Están previstos unos sistemas de emergencia para garantizar, en caso de avería o fuga de los circuitos primarios o secundarios que provoquen una degradación de la refrigeración normal del reactor, la refrigeración del núcleo. No obstante, en caso de fallos simultáneos de los sistemas de emergencia, la potencia residual del núcleo no se evacúa de manera suficiente, lo que provoca una evaporación del agua alrededor del núcleo que provoca una reducción progresiva del nivel de agua en la cual se encuentra normalmente sumergido el núcleo.

30 La evaporación progresiva del agua líquida provoca entonces un recalentamiento de las barras (o de las placas) de combustible del núcleo, este recalentamiento viéndose amplificado por la presencia de vapor que crea una reacción muy exotérmica de oxidación de las vainas de las barras. Las vainas se rompen, liberan su contenido y forman un lecho de desechos que se puede transformar en magma, denominado corio.

35 En casos extremos, el núcleo del reactor tiende a recolocarse en el fondo de la vasija en forma de flujos sucesivos de corio. El baño que se obtiene de este modo (denominado baño de corio), que representa varias decenas de toneladas a unas temperaturas del orden de 2.700 K, puede provocar una reducción del espesor de la vasija, e incluso su perforación.

40 Una solución para evitar la perforación de la vasija consiste entonces en realizar una refrigeración externa sumergiendo la vasija dentro del agua. Para ello, el pozo dentro del cual se encuentra la vasija, se llena con agua disponible en las piscinas y otras reservas de la central nuclear. Siendo mucho mejores los intercambios térmicos con el agua que los intercambios con el aire debido a la baja convección con el aire y a la radiación térmica obstaculizada por la presencia del blindaje, la temperatura externa de la vasija se mantiene muy próxima a la del agua. En estas condiciones, incluso con grandes flujos, se puede mantener una espesor de pared de la vasija suficiente y una temperatura de la pared inferior a la de fluencia, que es el orden de 600 °C, para garantizar la contención del corio.

50 La refrigeración de la vasija se realiza entonces por convección natural.

No obstante, en la práctica, la convección natural se ve a menudo alterada por:

- el espacio insuficiente entre la vasija y el blindaje térmico;

55 - el recubrimiento de la pared inferior de la vasija por el vapor;

- la aparición de taponamientos de vapor que se forman en la parte superior de la vasija.

60 Además, el fenómeno de convección natural viene acompañado de una formación importante de burbujas de vapor sobre la pared externa de la vasija, sobre todo en los casos en los que los flujos de energía entre el agua y la vasija son muy grandes, del orden del megavatio/m<sup>2</sup> o más en el caso de un gran reactor.

65 Estas burbujas de vapor, cuando su cantidad es limitada, tienen un efecto positivo sobre la refrigeración de las paredes de la vasija provocando una microagitación del agua a lo largo de la pared, lo que favorece los fenómenos de intercambios térmicos; este fenómeno se denomina ebullición nucleada.

Por el contrario, con muy grandes flujos térmicos, la cantidad de burbujas de vapor se hace muy grande y as burbujas de vapor se encuentran pegadas contra la pared, formando entonces una capa térmicamente aislante, que hace caer el coeficiente de intercambio térmico entre la pared y el agua. Este fenómeno se denomina la crisis de ebullición ligada a la presencia de un flujo crítico. En ese caso, para los reactores de gran potencia, la pared ya no se enfría correctamente, la integridad de la vasija ya no se puede garantizar. Esta crisis de ebullición, en el caso de una refrigeración por simple convección natural, prácticamente no se puede evitar.

Se ha propuesto, por ejemplo, para retrasar la aparición de la capa aislante de vapor y, por lo tanto, la aparición de la crisis de ebullición, prever la presencia de nanopartículas en el agua o un revestimiento de superficie sobre la cara externa de la vasija, e incluso una simple oxidación de esta, destinado a favorecer el aspecto mojado de la pared y, por lo tanto, evitar la acumulación de burbujas de vapor.

Por otra parte, para los reactores de más de 600 MW, en particular en el caso en el que una capa metálica se forma por encima de los óxidos del baño de corio, la energía térmica se focaliza en una zona de la vasija debido a su convección horizontal y a su alto coeficiente de intercambio con la pared de la vasija, este fenómeno se conoce por « focusing effect » en la terminología anglosajona, provocando la perforación de la pared de la vasija en el punto en el que se concentra la energía del baño de corio.

El documento US 8825838 describe un sistema de recirculación de agua por un canal anular, en el cual el vapor se evacúa en el interior del recinto de contención. El documento EP 1233423 describe un sistema en el cual el vapor se condensa y se recoge en una cámara separada prevista dentro del recinto de contención.

El documento FR 2507373 describe un dispositivo que utiliza la condensación del vapor de agua contenido en la atmósfera interna del recinto de contención de la vasija para obtener la energía mecánica que permite la preservación de la instalación.

Es, por lo tanto, un objetivo de la presente invención ofrecer un sistema de seguridad capaz de evitar la perforación de la vasija en caso de accidente sin necesitar ninguna intervención humana externa o un aporte de energía externa, siendo tal el sistema que pueda funcionar en unas condiciones extremas y variables.

### Exposición de la invención

El objetivo que se ha expuesto con anterioridad se alcanza con un reactor nuclear provisto de un sistema autónomo de puesta en convección forzada del agua de refrigeración situada alrededor de la vasija del reactor nuclear, en caso de accidente grave, para permitir la retención en la vasija del corio, por medio de la supresión del riesgo de aparición de la crisis de ebullición más allá de los flujos máximos considerados para los escenarios de accidentes graves.

El sistema comprende en particular una bomba para forzar la circulación del agua a lo largo de la pared exterior, esta bomba accionándose con el vapor de agua a partir del agua que contiene el pozo de vasija, y dentro del cual se sumerge la vasija en caso de accidente. De este modo, no es necesario ningún aporte de energía para provocar esta convección forzada. Esta convección forzada está por lo tanto garantizada incluso en caso de averías graves que provoquen la interrupción del suministro eléctrico.

En otras palabras, se prevé mejorar la refrigeración externa en agua de la vasija del reactor nuclear mediante unos dispositivos que provocan una refrigeración al poner en convección forzada el agua alrededor de la vasija, añadiéndose esta refrigeración a la refrigeración por convección natural, funcionando estos dispositivos de manera autónoma.

Para ello, el reactor de acuerdo con la presente invención comprende unos dispositivos para recuperar el vapor que se genera alrededor de la vasija, unos dispositivos para accionar una bomba a partir de la energía cinética del vapor -no estando valorada actualmente la energía cinética de este vapor-, una bomba accionada por esta energía, adaptada para provocar una convección forzada del agua alrededor de la vasija. Se realiza un cerramiento de separación dentro del recinto de contención, de tal modo que forme una cámara colectora del vapor producido al nivel del pozo de vasija y que provoque la aparición de una sobrepresión. Este cerramiento separa la cámara colectora del recinto de contención.

Se utiliza, por lo tanto, la fuerza motriz de la sobrepresión del vapor recogido.

En convección forzada, el caudal del agua en circulación sería del orden de 3 m/s, mientras que en convección natural se puede estimar en alrededor de 0,5 m/s el caudal de agua alrededor de la vasija. Por otra parte, el flujo crítico, que conduce a la perforación de la vasija, depende de la carga a la potencia  $1/3$ . En consecuencia, un aumento de la carga del agua provoca un aumento del flujo crítico, al que se rechaza más allá del flujo máximo al cual se puede someter la vasija en la zona del « focusing effect ».

Hay que señalar que la presente invención ofrece un último sistema de seguridad que puede funcionar en unas condiciones extremadamente degradadas, por ejemplo cuando todas las fuentes de suministro eléctrico o de otro

tipo, por ejemplo de diesel, están averiadas.

5 La invención consiste, por lo tanto, en poner en movimiento el agua en el exterior de la vasija a lo largo de su pared por medio de una bomba que favorece la convección externa, y esto utilizando el vapor que genera la disipación en el exterior de la vasija de la energía residual del núcleo fundido.

La invención presenta la ventaja de ser autónoma formando en efecto un último sistema de seguridad que no necesita ni la presencia de un operario, ni ninguna otra fuente de energía que no sea la que libera el accidente.

10 Además, el sistema de acuerdo con la presente invención da preferencia a la robustez, p. ej. la capacidad para funcionar en unas condiciones extremas, más que al funcionamiento con un alto rendimiento, con el fin de que su funcionamiento esté garantizado en unas condiciones precarias en las que el agua que circula puede estar cargada de residuos y pueden existir fugas de vapor tras el accidente.

15 Además, el sistema de seguridad de acuerdo con la invención puede funcionar en unos amplios intervalos de caudal de vapor y de presión, por ejemplo entre 1 bar y 5 bares dentro del recinto de contención y un caudal de vapor que puede alcanzar hasta 10 m<sup>3</sup>/s.

20 La presente invención tiene, por tanto, principalmente por objeto un reactor nuclear que comprende una vasija destinada a contener un núcleo de reactor, un circuito primario para la refrigeración del reactor, un pozo de vasija dentro del cual se sitúa la vasija, un canal anular que rodea una parte inferior de la vasija dentro del pozo de vasija, unos dispositivos adaptados para rellenar el pozo de vasija con un líquido, un recinto de contención del reactor, unos dispositivos colectores del vapor que se genera en un extremo superior del pozo de vasija situados dentro del recinto y que definen un espacio separado con respecto al espacio del recinto de contención, de tal modo que permita la aparición de una sobrepresión de vapor, unos dispositivos capaces de generar una convección forzada del agua dentro del canal anular, y unos dispositivos para accionar los dispositivos capaces de generar una convección forzada por medio de dicho vapor recogido.

30 Por ejemplo, los dispositivos adaptados para recoger el vapor están compuestos por una cámara colectora separada del recinto de contención y comprenden un paso de evacuación que pone en comunicación la cámara colectora y el recinto de contención, estando los dispositivos para accionar los dispositivos capaces de generar una convección forzada insertados en dicho paso de evacuación para transformar la energía cinética/potencial del vapor recogido en energía motriz que acciona los dispositivos capaces de generar una convección forzada.

35 Los dispositivos para accionar los dispositivos capaces de generar una convección forzada comprenden de manera ventajosa una bomba lobular y un mecanismo de transmisión unido a los dispositivos capaces de generar una convección forzada, ofreciendo la bomba lobular una gran robustez y una gran simplicidad de construcción.

40 Los dispositivos capaces de generar una convección forzada pueden comprender una bomba de circulación situada en un extremo inferior del pozo de vasija a la altura de una entrada del canal anular.

45 El mecanismo de transmisión comprende, por ejemplo, un primer y un segundo árboles unidos respectivamente con la bomba lobular y la bomba de circulación y un engranaje en ángulo entre el primer y el segundo árboles. Este mecanismo es muy simple y está adaptado para el funcionamiento en condiciones extremas.

Los dispositivos para llenar el pozo de vasija con líquido comprenden, por ejemplo, una reserva de líquido y un conducto que une dicha reserva con el extremo inferior del pozo, estando dicho conducto adaptado para abastecer el pozo con aire de refrigeración en funcionamiento normal.

50 La reserva adaptada para comunicarse con la cámara colectora y el conducto está conectada a la cámara colectora mediante un conector que presenta de manera ventajosa una forma acampanada, lo que permite evitar los fenómenos de cavitación.

55 La reserva está prevista de manera ventajosa a una altura superior a la del pozo de vasija de tal modo que la circulación del agua de la reserva hacia el pozo de vasija se realice por gravedad, lo que evita tener que poner en marcha un dispositivo adicional, o por medio de una bomba accionada por los dispositivos para generar una convección forzada; el sistema de refrigeración es, por tanto, completamente autónomo.

60 Los dispositivos para accionar los dispositivos capaces de generar una convección forzada también pueden estar conectados a un dispositivo de conversión de energía mecánica en energía eléctrica, para abastecer unos sistemas de emergencia y/o de vigilancia.

65 La cámara colectora comprende de manera ventajosa una válvula de seguridad que permite una evacuación del vapor hacia el recinto de contención en caso de aparición de una sobrepresión dentro de la cámara colectora superior a un valor dado, por ejemplo del orden de 0,3 bares.

El reactor nuclear de acuerdo con la invención también puede comprender un separador agua/vapor aguas arriba de la bomba y de la válvula en el caso de una cámara colectora de pequeñas dimensiones.

5 La presente invención también tiene por objeto la utilización del vapor que se genera alrededor de un reactor nuclear cuando se produce un accidente, comprendiendo dicho reactor nuclear una vasija que contiene un núcleo nuclear, un pozo de vasija en el cual está situada dicha vasija y un canal anular entre la vasija y el pozo de vasija, siendo dicho vapor el vapor que genera un líquido que llena el canal anular en un accidente, utilizándose dicho vapor para accionar unos dispositivos capaces de generar una convección forzada de dicho líquido en el canal anular alrededor de la vasija.

10 El vapor generado también se puede utilizar para accionar una bomba de suministro de agua del pozo de vasija.  
El vapor generado también se puede utilizar para producir electricidad para abastecer unos dispositivos de vigilancia.

### 15 **Breve descripción de los dibujos**

La presente invención se entenderá mejor a través de la descripción que se da a continuación y de los dibujos, en los que:

20 - la figura 1 es una vista esquemática en sección que representa parcialmente un reactor provisto de un sistema de seguridad de acuerdo con la presente invención;

- la figura 2 es una representación gráfica de la distribución de temperatura en la pared del fondo de la vasija en el caso de una refrigeración en agua de un reactor de acuerdo con la presente invención;

25 - las figuras 3A y 3B son unas representaciones gráficas de la velocidad de circulación del agua a lo largo de la vasija dentro de un reactor de acuerdo con la invención y dentro de un reactor del estado de la técnica respectivamente;

30 - las figuras 4A y 4B son unas representaciones gráficas de la presión a lo largo de la vasija dentro de un reactor de acuerdo con la invención y dentro de un reactor del estado de la técnica respectivamente.

### **Exposición detallada de modos de realización particulares**

35 La presente invención se describirá en el marco de un reactor de agua a presión (REP) de alta potencia, superior a 1.000 MWe, pero la presente invención también se aplica a los reactores de menor potencia.

40 En la descripción que se da a continuación, el líquido de refrigeración que se utiliza es el agua pura, pero cualquier otra composición que ofrezca unas propiedades térmicas adaptadas puede resultar adecuada (agua sucia de escorrentía, agua cargada de nanopartículas para favorecer los intercambios, etc.).

45 En la figura 1, se puede ver representado parcialmente un reactor 2 de acuerdo con la presente invención que comprende una vasija 4 cuya parte inferior está situada dentro de un pozo de vasija 6 de hormigón. La vasija 4 descansa sobre un extremo superior 6.1 del pozo de vasija 6 a través de una brida 8 anular que sobresale radialmente hacia el exterior de la vasija. La vasija 4 se alberga con una holgura dentro del pozo de vasija 6, un espacio anular está presente entonces entre la pared lateral 10 de la vasija y la pared del pozo de vasija 6.

50 La vasija 4 delimita un espacio cerrado que recibe combustible nuclear que forma el núcleo de reactor (no representado); el combustible nuclear se presenta, por ejemplo, en forma de haces de barras (o de placas) de combustible nuclear.

El pozo de vasija 6 también comprende un blindaje contra las radiaciones térmicas que emite el núcleo de reactor.

55 El reactor 2 comprende también un circuito primario 12 formado por unos conductos hidráulicos que entran en y salen de la vasija por encima del pozo de vasija 6, y por el cual el agua entra y sale de la vasija 4. Esta agua constituye un fluido refrigerante destinado a recoger la energía del núcleo de reactor. El circuito primario coopera con un circuito secundario (no representado) por el cual el fluido que este transporta se enfría. El vapor que se genera en el circuito secundario se utiliza para que giren las turbinas destinadas a producir electricidad.

60 Está previsto un canal anular 16 alrededor de la pared de la vasija 4 para garantizar una función de aislamiento térmico en funcionamiento normal y la convección natural del agua en funcionamiento degradado, cuando el pozo de vasija 6 está sumergido.

65 Este canal de refrigeración 16 está delimitado por una cubierta metálica 18 que rodea la parte inferior de la vasija 4 que se encuentra dentro del pozo de vasija 6.

Esta cubierta 18, que tiene la forma de la parte inferior de la vasija 4 y que sirve como blindaje térmico en funcionamiento normal, comprende un paso 20 en su extremo inferior para la entrada del agua en funcionamiento en caso de accidente.

5 Esta cubierta 18 forma un blindaje térmico que protege al hormigón de la radiación térmica y lo mantiene a una temperatura moderada, estando prevista una circulación de aire entre el exterior de este blindaje y el hormigón del pozo de vasija 6.

10 El reactor también comprende un recinto de contención 22 que rodea la vasija 4 destinada a evitar, por ejemplo en caso de rotura del circuito primario, una fuga de agua cargada de elementos radioactivos. El recinto de contención es una cubierta, por lo general con una forma cilíndrica, de gran tamaño, realizada por ejemplo en hormigón y que rodea el reactor, el circuito primario, los intercambiadores y las bombas primarias.

15 También se puede prever un blindaje térmico a la altura del extremo superior de la cubierta 18 con el fin de proteger la estructura de hormigón a la altura a la que esta soporta la vasija 4.

La brida de soporte 8 y el blindaje térmico superior están previstos para evitar que se formen obstáculos para la evacuación del aire de refrigeración y del agua durante el funcionamiento.

20 En el fondo del pozo de vasija 6 está prevista una entrada de admisión 24 del aire de refrigeración en funcionamiento normal, que constituye una fuente de suministro de agua del pozo de vasija para sumergirlo.

25 De acuerdo con la presente invención, el reactor prevé confinar el vapor que se produce en una refrigeración en agua en caso de accidente y utilizar la energía cinética/potencial del vapor de agua para accionar una bomba capaz de provocar una convección forzada en el canal anular de refrigeración 16.

30 Para ello, el reactor comprende unos dispositivos para recoger el vapor que se produce en una refrigeración en agua de la vasija y llevarlo hasta una zona en la cual este se podrá utilizar para accionar unos dispositivos que permiten la puesta en marcha del agua.

35 Estos dispositivos cierran en particular los pasos de los conductos del circuito primario practicados en la estructura de hormigón, y comprenden una cámara 26 añadida en un lado del pozo de vasija 6 en comunicación con este. La cámara 26 se sitúa dentro del recinto manteniéndose al mismo tiempo separada del recinto de contención de tal modo que forme un espacio cerrado con respecto al gran espacio del recinto de contención.

La cámara colectora 26 está de manera más particular en comunicación con el extremo superior del canal de refrigeración 16.

40 Este cerramiento en el interior del recinto aísla un pequeño espacio del recinto de contención con respecto a su espacio total. Este pequeño espacio recibe el vapor que se produce dentro del pozo de vasija y permite la aparición de una sobrepresión local que se aprovechará como fuerza motriz.

45 Esta cámara 26 recoge el aire caliente que sale en situación normal y el vapor más una parte del agua que sale del canal de refrigeración en caso de accidente 16. Está, por ejemplo, realizada en hormigón armado capaz de resistir una presión diferencial con el recinto de contención de 0,5 bares. Esta se comunica en la parte inferior con un conducto 28 que desemboca en la entrada de admisión 24 garantizando el suministro de aire fresco del pozo de vasija 6 en funcionamiento normal y el suministro de agua del pozo de vasija 6 en caso de accidente tal y como se explicará a continuación.

50 La cámara colectora 26 comprende en una parte superior una salida 30 de evacuación del vapor, estando equipada esta salida 30 con unos dispositivos 32 adaptados para accionar una bomba por medio del vapor. Estos dispositivos 32 son, por ejemplo, una turbina o una bomba lobular.

55 Se selecciona, de manera ventajosa, una bomba lobular para recuperar la energía del vapor, porque esta es especialmente robusta. En efecto, esta solo comprende dos piezas en movimiento giratorio y no necesita mantenimiento. Se puede prever, además, aumentar los palieres con el fin de aumentar aún más la resistencia de la bomba.

60 Además, la puesta en marcha es automática, incluso en el caso de un pequeño flujo de vapor, al contrario que una turbina. La presión que se aplica sobre los lóbulos se transmite directamente a la bomba acelerando la circulación del fluido alrededor de la vasija.

También se podría considerar utilizar una máquina motriz con pistón de vapor.

65 La cámara colectora 26 comprende también una válvula de seguridad 36 que funciona por gravedad, garantizando que el límite superior de la sobrepresión no se alcanzará nunca, estando comprendido este límite, por ejemplo, entre

## ES 2 390 940 T3

0,2 y 0,3 bares. Esta válvula 36 está destinada a funcionar, por ejemplo en el caso de que la bomba lobular o la turbina no funcionara e impidiera que el vapor saliera hacia el recinto de contención.

5 La cámara colectora comprende en su parte inferior una salida 34 unida al conducto 28 que desemboca en el fondo del pozo de vasija 6.

En el ejemplo representado, la cámara colectora 26 está adaptada para comunicarse con unas reservas de agua 38, por ejemplo almacenadas en unas piscinas para poder, en caso de accidente grave, sumergir el pozo de vasija, circulando el agua procedente de estas reservas por el conducto 28 dentro del pozo de vasija 6.

10 La puesta en comunicación de la cámara colectora 26 con unas reservas 38 se puede realizar mediante un canal horizontal 37 situado en el nivel inferior de la cámara colectora 26 y comunicándose con el recinto de contención.

15 Se puede considerar que el llenado del pozo de vasija 6 se realice por gravedad, sobreelevándose las reservas de agua con respecto al pozo.

Por otra parte, se prevé regular el nivel de agua líquida dentro del pozo con el fin de mantener este prácticamente constante a pesar de la evaporación.

20 Se puede prever, por lo tanto:

- Una bomba accionada por el vapor a través de la bomba lobular que inyecta líquido dentro del pozo para compensar las pérdidas de fluido causadas por el vapor que sale, la cantidad máxima de agua inyectada debería ser de alrededor de 10 kg/s. En ese caso, el canal horizontal 37 situado en el nivel inferior de la cámara 26 colectora del vapor está provisto de una válvula de retención 39 para garantizar el mantenimiento de la sobrepresión dentro de la cámara 26.

30 - Que la compensación del volumen de agua evaporada se realiza mediante un aporte de agua liberada por gravedad desde una reserva de agua permanente situada a entre 2 y 3 m aproximadamente por encima del nivel de agua deseado dentro de la vasija, lo que garantizaría un aporte de agua a pesar de la mayor presión interna dentro del sistema, que es como máximo de 0,3 bares debido al tarado de la válvula. La compensación por gravedad presenta la ventaja de reducir el número de piezas en movimiento, lo que es preferible para un funcionamiento en condiciones degradadas.

35 Se prevé de manera ventajosa disponer unos dispositivos de filtrado 50 en el suministro de agua que impidan que entren los desechos demasiado grandes. En efecto, en un accidente, una parte de esta agua habría salido de la condensación del vapor dentro del recinto (en las paredes o a través de las barras de aspersión) y de su escurrimiento hasta el pozo de vasija. En el ejemplo que se representa los dispositivos de filtrado están dispuestos dentro de la reserva de agua.

40 También se puede prever una zona de depósito 52 en el fondo del pozo de vasija, esta zona de depósito se encuentra por debajo de la entrada de admisión 24, esta zona de depósito 52 completa de manera ventajosa la filtración que realizan los dispositivos 50.

45 En el ejemplo representado, la reserva de agua 38 está representada adyacente a la cámara colectora 26, pero obviamente se puede disponer alejada de esta y unida a esta mediante unos conductos. Se puede prever que haya varias reservas separadas geográficamente. Por ejemplo, se puede prever que ciertas reservas sean unas reservas de seguridad que se activan al inicio de un accidente para sumergir el pozo de vasija 6 y que otras reservas sean unos depósitos colectores de las aguas de escorrentía durante la refrigeración de la vasija. En ese caso, se prevén 50 varios conductos distintos de suministro de agua del pozo.

La bomba lobular 32 está conectada mecánicamente a una bomba de circulación 40 situada en el fondo del pozo de vasija 6, justo por debajo del paso 20 en el fondo de la cubierta anular 18, para poner en convección forzada el agua de refrigeración.

55 La bomba lobular 32 está conectada a la bomba de circulación mediante una transmisión mecánica 42 adaptada para transmitir el giro de la bomba lobular o de la turbina 32 giratoria de la bomba de circulación 40. En el ejemplo representado, la transmisión mecánica comprende un primer árbol 44, un segundo árbol 46 y un engranaje en ángulo 47 entre los dos árboles 44, 46, garantizando una desmultiplicación adecuada.

60 El primer árbol 44 está unido a un primer extremo con la bomba lobular o la turbina 32, y comprende en un segundo extremo un piñón cónico 45, y un segundo árbol 46 ortogonal al primer árbol 44 provisto en un primer extremo de un piñón cónico 48 que engrana el piñón cónico 45 y unido a un segundo extremo con la bomba de circulación 40.

65 El mecanismo de transmisión por supuesto puede presentar una forma más compleja y tener un rendimiento mejorado, pero se da preferencia a un mecanismo robusto capaz de funcionar en unas condiciones degradadas.

- 5 La bomba de circulación 40, debido a su disposición en la parte inferior de la vasija, está destinada a funcionar a una temperatura ligeramente por debajo de la temperatura de saturación, esta va por lo tanto a funcionar próxima a la cavitación. En consecuencia, se prefiere elegir colocar esta lo más abajo posible en el circuito y seleccionarla de gran tamaño para que genere una baja depresión de entrada. Se puede seleccionar, por ejemplo, una hélice en tobera en calidad de bomba de circulación.
- 10 De manera ventajosa, se prevé que la conexión del conducto 28 con la cámara colectora 26 sea acampanada, lo que permite reducir al máximo las pérdidas de carga localizadas ligadas a la unión de una tubería con un espacio. En efecto, en este punto, la temperatura del agua de refrigeración está próxima a la temperatura de saturación, en consecuencia se podría dar un fenómeno de cavitación en este punto, si la circulación no está optimizada, lo que podría llenar parcialmente de vapor el conducto. Al escoger este tipo de conexión, se reduce este riesgo de cavitación.
- 15 También se puede considerar acoplar la bomba lobular 32 a un generador eléctrico (no representado), en paralelo a la bomba de circulación 40, para abastecer unos sistemas anexos, como unos sistemas de vigilancia, por ejemplo unos indicadores de estado, como unas sondas de temperatura o de radioactividad, y unos sistemas de emergencia adicionales. Esto permite de manera ventajosa tener un sistema completamente autónomo.
- 20 Se va a explicar a continuación el funcionamiento del sistema de seguridad de acuerdo con la invención, y de manera más general se va a describir el comportamiento del reactor de acuerdo con la invención.
- 25 En funcionamiento normal, circula agua por la vasija 4 a través del circuito primario, esta agua se calienta mediante intercambios térmicos con el núcleo de reactor. El agua calentada se enfría mediante intercambio térmico con el circuito secundario, el vapor que se produce en el circuito secundario se utiliza para accionar unas turbinas y producir electricidad. Por medio de los intercambios térmicos entre el núcleo de reactor y el circuito primario y entre el circuito primario y el circuito secundario, la temperatura del núcleo de reactor se mantiene a una temperatura a la cual la integridad de las barras está garantizada.
- 30 En caso de avería en el sistema de refrigeración del núcleo, por ejemplo en el circuito secundario y en caso de que fallen los sistemas de refrigeración de emergencia, la ebullición del agua del circuito primario, a pesar de la parada del núcleo (caída de las barras de control), conduce a su vaciado, su temperatura alcanza entonces una temperatura que provoca la fusión de las vainas de las barras, se produce entonces la formación de corio. La refrigeración por convección natural no es suficiente. Aparece un riesgo importante de perforación de la pared de la vasija.
- 35 El sistema de seguridad de acuerdo con la invención prevé el llenado del pozo de vasija 6 con agua para sumergir el exterior de la vasija 4 por medio del agua que contienen las reservas, el agua circula dentro del pozo por el conducto 28 o por otros conductos directamente unidos a las reservas de seguridad.
- 40 El agua que rodea la vasija 4 se evapora parcialmente; el vapor que se forma de este modo se recoge en la cámara colectora 26, la cámara pasa a una ligera sobrepresión, a continuación el vapor circula por la salida de evacuación de la cámara colectora, provocando el giro de la bomba lobular 32, que, a través de la transmisión 42, acciona la bomba de circulación 40 situada en el fondo del pozo de vasija 6. El accionamiento de esta bomba 40 produce entonces una convección forzada del agua, evitando entonces la aparición de la crisis de ebullición; por lo tanto se evita la perforación de la vasija.
- 45 El retorno del agua se realiza en parte por el canal delimitado por la cubierta 18 y la pared del pozo de vasija 6, y en parte por el conducto 28 a través de la cámara colectora 26. El volumen de agua evaporada se evacúa tal y como se ha descrito con anterioridad.
- 50 La invención presenta la ventaja de no perturbar el funcionamiento clásico del sistema de refrigeración. En efecto, en funcionamiento normal, el aire de refrigeración bordea la bomba 40 y, en caso de accidente, si la bomba no funciona, la convección natural del agua se realiza normalmente bordeando las palas de la bomba 40.
- 55 Se van a describir a continuación los resultados que se ha obtenido de la simulación por medio del programa europeo de cálculo de escenarios de accidentes de centrales nucleares: ASTEC V1, este programa habiéndose adaptado para tratar el caso de retención en vasija con refrigeración externa.
- 60 La figura 2 representa la distribución de temperatura T en K en el fondo de la pared de la vasija, 3.349 segundos después de que un baño de corio se haya vertido en un único flujo en el fondo de la vasija. Se representa un cuarto inferior del fondo de la vasija, se puede leer en abscisas el radio R de la vasija en metros, y en ordenadas la altura h en metros de la vasija.
- 65 Para la simulación, se ha considerado que el agua en el exterior de la vasija circulaba en convección forzada por un canal de refrigeración de 15 cm de espesor. Esta geometría corresponde a la de un reactor de fuerte potencia.



Se comprueba que, por medio de la invención, la temperatura del fondo de la vasija se mantiene entre 600 K y 1.000 K, es decir por debajo de la temperatura de fluencia evitando por lo tanto la perforación de la vasija.

5 La curva de la figura 3A representa las velocidades  $V$  del agua en m/s circulando por el canal de refrigeración dentro del reactor de acuerdo con la invención a diferentes alturas por lo tanto en convección forzada en función del tiempo  $t$  en s; la figura 3B representa la velocidad  $V$  del agua en m/s en convección natural en el canal de refrigeración a diferentes alturas en función del tiempo  $t$  en s. Las referencias I, II, III, IV y V que se utilizan designan diferentes alturas desde abajo hacia arriba.

10 Se comprueba que, por medio de la invención, se produce una ganancia de un factor 6 sobre la velocidad de circulación del agua en la zona del fondo de la vasija donde se sitúa el corio. El régimen de circulación tampoco se ve alterado por el vapor que se forma en la subida, gracias a la sobrepresión generada por la bomba de circulación 40. Por medio de la invención, se obtiene una ganancia de un 80 % sobre el flujo máximo admisible, p. ej. el flujo con el cual aparece la crisis de ebullición, ya que el valor del flujo depende de la velocidad elevada al cubo.

15 La curva de la figura 4A representa la presión  $P$  en Pa en el canal de refrigeración 16 a diferentes alturas generada por la bomba de circulación dentro del sistema de acuerdo con la presente invención en el canal de refrigeración 16 de la vasija 4 en función del tiempo  $t$  en segundos. Se comprueba la aparición de una sobrepresión que permite entre otras cosas evitar la formación de tapones de vapor en la subida, lo que mejora la convección natural y, por lo tanto, la refrigeración. Las referencias I', II', III', IV', V' y VI' que se utilizan designan diferentes alturas desde abajo hasta arriba.

Para la simulación, se ha considerado:

25 - un coeficiente de pérdida de carga localizada en la salida alta del espacio anular, en el punto donde el agua de refrigeración se aleja de la vasija, igual a 0,5, idéntico al de un conducto que sale en un ángulo vivo;

30 - un coeficiente de pérdida de carga localizada, en la parte alta del canal descendente que abastece la bomba se considera igual a 0,03, idéntico al de un colector circular con un radio de curvatura relativamente elevado.

La figura 4B representa la presión que se genera en el canal de refrigeración de un reactor del estado de la técnica a diferentes alturas. No se ha constatado ninguna sobrepresión. En consecuencia, los riesgos de aparición de los tapones de vapor son mayores que para el reactor de acuerdo con la invención.

35 Hay que señalar que la recogida del vapor no es necesariamente de gran calidad, en efecto se puede prever que el sistema de recuperación de la energía del vapor pueda ser muy rudimentaria y con un bajo rendimiento, ya que la energía emitida es muy alta, en efecto la potencia residual liberada por el núcleo es del orden de 20 MW al inicio, luego decrece a continuación, a título de ejemplo, es la de veinte locomotoras a vapor o de un ferri; y la energía necesaria para el funcionamiento de la bomba de circulación 40 es baja frente a la cantidad de vapor que se emite.

40 Del mismo modo, la estanquidad al nivel del circuito primario puede ser rudimentaria sin perjudicar a la potencia necesaria para el sistema.

45 Este sistema tiene la ventaja de que ve incrementarse su rendimiento en el momento en el que los flujos más fuertes se producen en dirección contraria a los sistemas que trabajan únicamente en convección natural que alcanzan sus límites en el momento en que el flujo de calor que hay que evacuar es grande. Su autonomía total de funcionamiento y su arranque automático permiten por lo tanto al sistema de refrigeración de acuerdo con la invención sustituir a la refrigeración por convección natural desde el momento en que la cantidad de vapor producido es suficiente.

50 A título de ejemplo, se pueden dar las dimensiones siguientes: para una vasija de 4 m de diámetro, sería adecuado un espacio anular 16 de entre 5 cm y 15 cm de anchura, este valor habiéndose obtenido por la experiencia SULTAN, llevada a cabo en el CEA de Grenoble, sobre el estudio de la crisis de ebullición en un canal inclinado calentado con convección forzada. Por otra parte, sabiendo además que el vapor puede alcanzar 10 kg/s, esto es más de 10 m<sup>3</sup>/s a la presión de funcionamiento, se prefiere una cámara colectora 26 de gran volumen, por ejemplo de 10 m<sup>3</sup> o más. Esto facilita también las operaciones de mantenimiento. En el caso de una estructura más reducida, se puede prever

55 añadir un dispositivo separador agua/vapor aguas arriba de la bomba lobular y de la válvula.

La presente invención se adapta en particular a los reactores con retención en vasija, en concreto los reactores de agua a presión (REP).

60 La presente invención se aplica a los reactores con refrigeración en agua por convección, pero también se puede aplicar a otros tipos de reactores, en particular los reactores de agua en ebullición, por ejemplo. Así como a cualquier reactor (tipo de agua a presión (REP) o de otro tipo) cuya geometría en su diseño no se haya previsto para una refrigeración externa de la vasija en agua por convección natural. En ese caso, debido a una geometría incompatible o demasiado estrecha, solo un paso de agua en convección forzada obtenida de manera simple y robusta por la

65 presente invención puede garantizar la resistencia de la vasija.

## REIVINDICACIONES

1. Reactor nuclear que comprende una vasija (4) que contiene un núcleo de reactor, un circuito primario para la refrigeración del reactor, un pozo de vasija (6) en el cual está situada la vasija (4), un canal anular (16) que rodea la parte inferior de la vasija (4) dentro del pozo de vasija (6), unos dispositivos adaptados para llenar el pozo de vasija con un líquido, un recinto de contención (22) del reactor dentro del cual están dispuestos el pozo de vasija y la vasija, que se caracteriza porque también comprende unos dispositivos colectores (26) del vapor que se genera en un extremo superior del pozo de vasija (6), situados dentro del recinto y que definen un espacio separado con respecto al espacio del recinto de contención (22) de tal modo que permite la aparición de una sobrepresión de vapor, unos dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada del líquido en el canal anular (16), y unos dispositivos (32, 42) para accionar los dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada por medio de dicho vapor recogido.
2. Reactor nuclear de acuerdo con la reivindicación 1, en el cual los dispositivos adaptados para recoger el vapor (26) están compuestos por una cámara colectora separada del recinto de contención (22), y comprenden un paso de evacuación (30) que pone en comunicación la cámara colectora (26) y el recinto de contención (22), estando los dispositivos (32, 42) para accionar los dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada introducidos en dicho paso de evacuación para transformar la energía cinética/potencial del vapor recogido en energía motriz que acciona los dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada.
3. Reactor nuclear de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el cual los dispositivos (32, 42) para accionar los dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada comprenden una bomba lobular (32) y un mecanismo de transmisión (42) unido a los dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada.
4. Reactor nuclear de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 3, en el cual los dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada comprenden una bomba de circulación situada en un extremo inferior del pozo de vasija (6) a la altura de una entrada (20) del canal anular (16).
5. Reactor nuclear de acuerdo con la reivindicación 4 combinada con la reivindicación 3, en el cual el mecanismo de transmisión (42) comprende un primer (44) y un segundo (46) árboles conectados respectivamente con la bomba lobular y la bomba de circulación y un engranaje en ángulo (47) entre el primer (44) y el segundo (46) árboles.
6. Reactor nuclear de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 5, en el cual los dispositivos para llenar el pozo de vasija (6) de líquido comprenden una reserva de líquido y un conducto (28) que une dicha reserva con el extremo inferior del pozo de vasija (6), estando adaptado dicho conducto (28) para abastecer el pozo de vasija (6) con aire de refrigeración en funcionamiento normal.
7. Reactor nuclear de acuerdo con la reivindicación 6, en el cual la reserva está adaptada para comunicarse con la cámara colectora (26) y el conducto (28) está conectado con la cámara colectora (26) mediante un conector con forma acampanada.
8. Reactor nuclear de acuerdo con la reivindicación 6 o 7, en el cual dicha reserva está prevista a una altura superior a la del pozo de vasija de tal modo que la circulación del líquido de la reserva hacia el pozo de vasija se realice por gravedad.
9. Reactor nuclear de acuerdo con la reivindicación 6 o 7, que comprende una bomba accionada por los dispositivos (32) para accionar los dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada destinada a dirigir el líquido de dicha reserva al pozo de vasija (6).
10. Reactor nuclear de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 9, en el cual los dispositivos para accionar los dispositivos (40) capaces de generar una convección forzada también están unidos a un dispositivo de conversión de energía mecánica en energía eléctrica.
11. Reactor nuclear de acuerdo con una de las reivindicaciones anteriores combinada con la reivindicación 2, en el cual la cámara colectora (26) comprende una válvula de seguridad (36) que permite una evacuación del vapor hacia el recinto de contención (22) en caso de aparición de una sobrepresión dentro de la cámara colectora superior con un valor dado, por ejemplo del orden de 0,3 bares.
12. Reactor nuclear de acuerdo con la reivindicación 4 combinada con la reivindicación 11, que también comprende un separador líquido/vapor aguas arriba de la bomba y de la válvula.
13. Utilización de la energía cinética/potencial del vapor que se genera en torno a un reactor nuclear en un accidente, comprendiendo dicho reactor nuclear una vasija que contiene un núcleo nuclear, un pozo de vasija dentro del cual está situada dicha vasija y un canal anular que rodea una parte inferior de la vasija dentro del pozo de vasija, siendo dicho vapor el vapor generado por un líquido que llena el pozo de vasija en un accidente, utilizándose dicho vapor para accionar unos dispositivos capaces de generar una convección forzada de dicho líquido en el canal

anular alrededor de la vasija.

14. Utilización del vapor generado de acuerdo con la reivindicación anterior para accionar una bomba de suministro de líquido del pozo de vasija.

5 15. Utilización del vapor generado de acuerdo con la reivindicación 13 o 14 para producir electricidad para abastecer unos dispositivos de vigilancia.

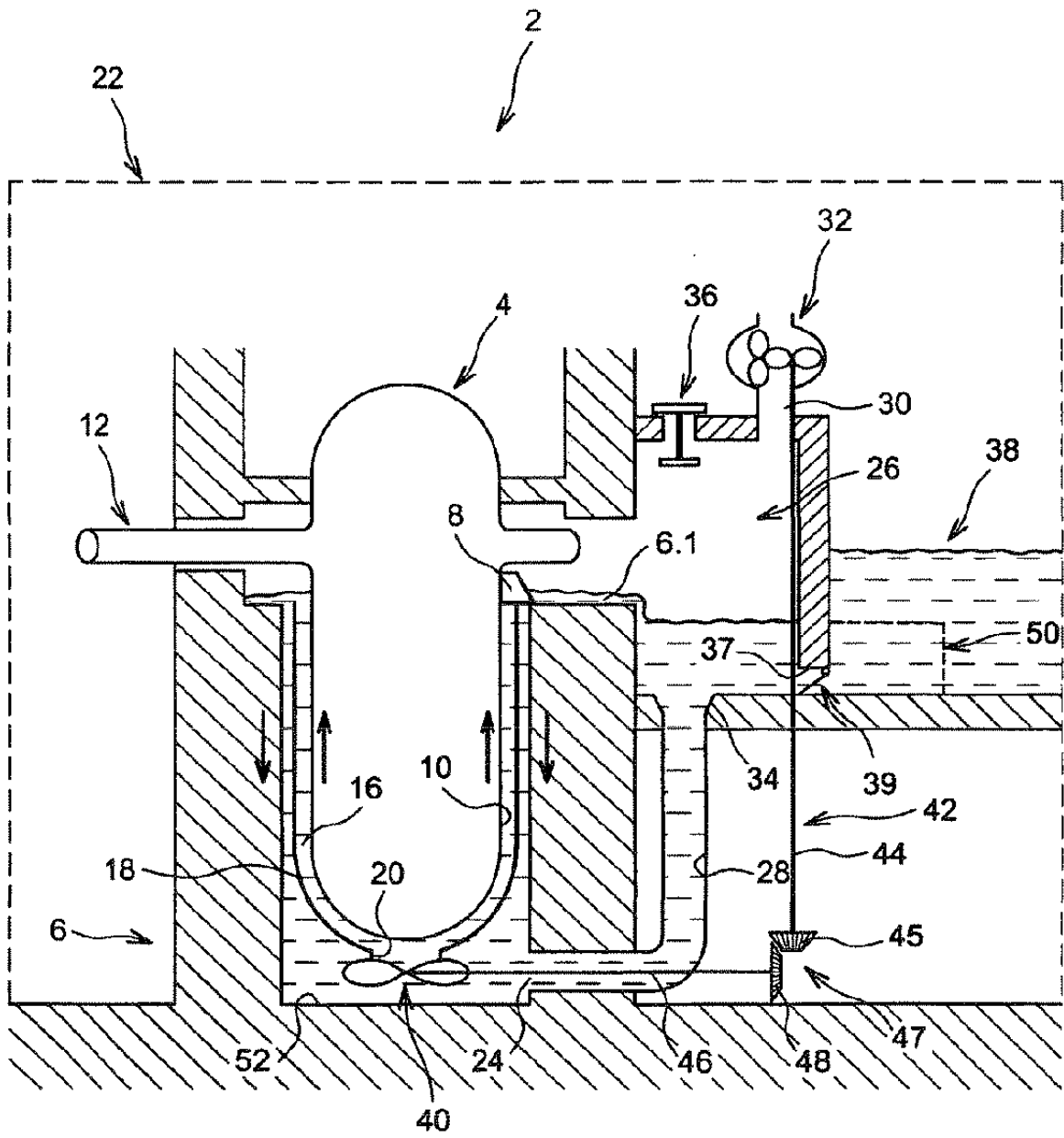


FIG. 1

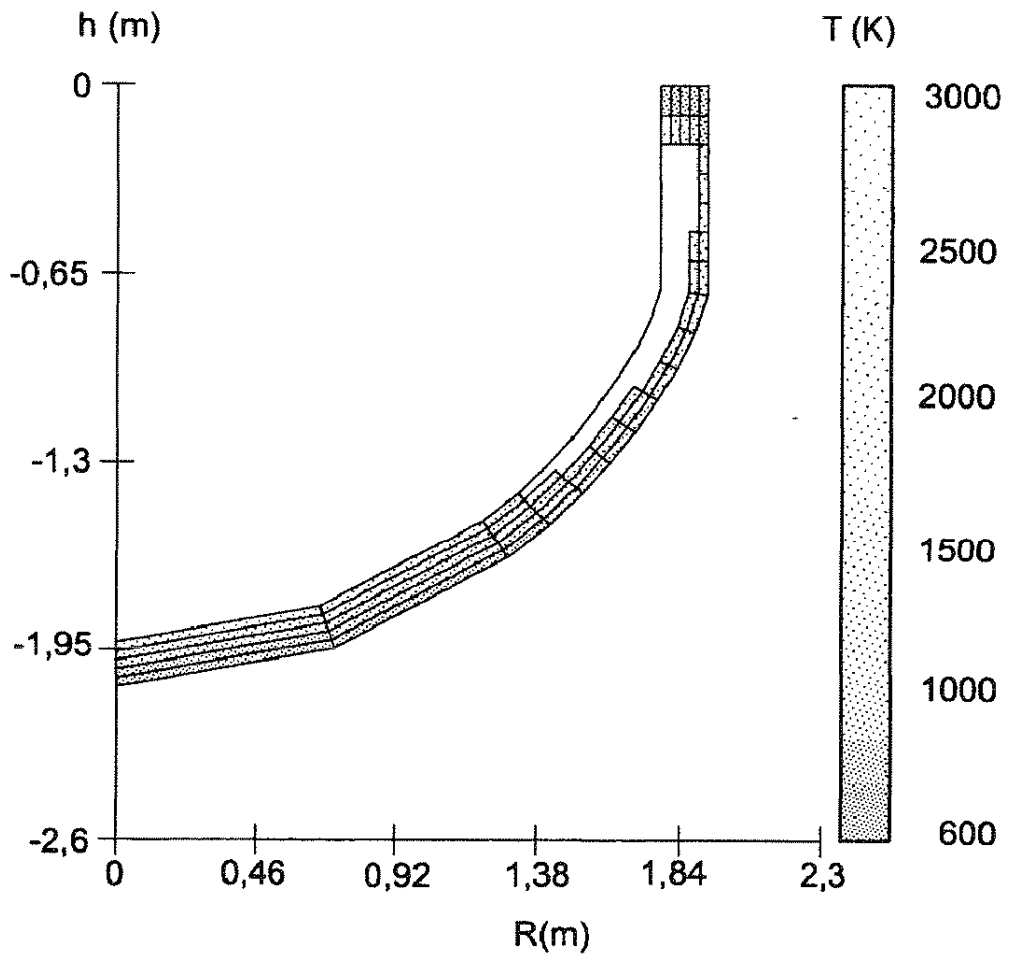


FIG. 2

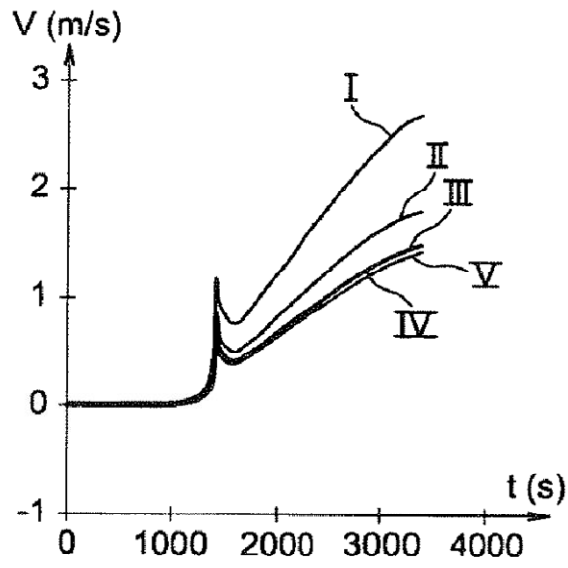


FIG. 3A

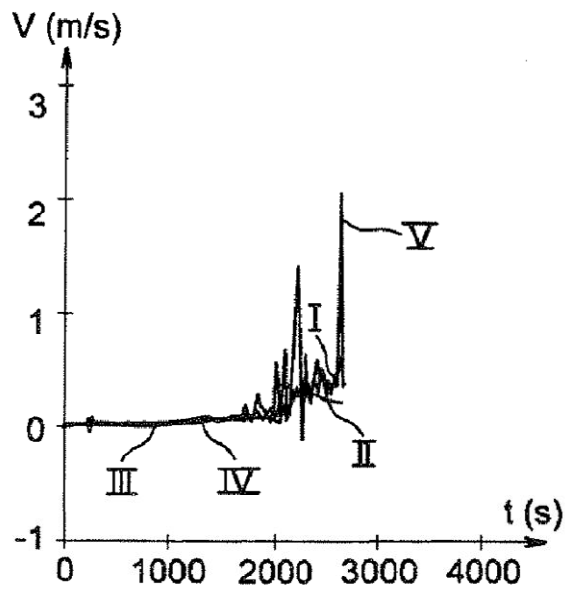


FIG. 3B

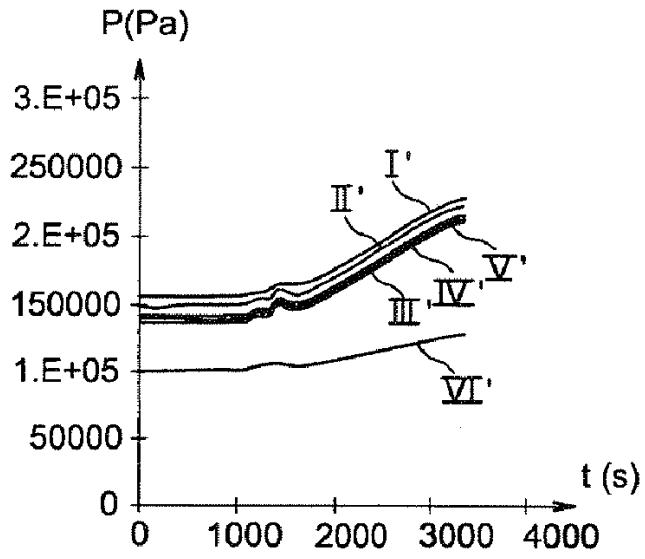


FIG. 4A

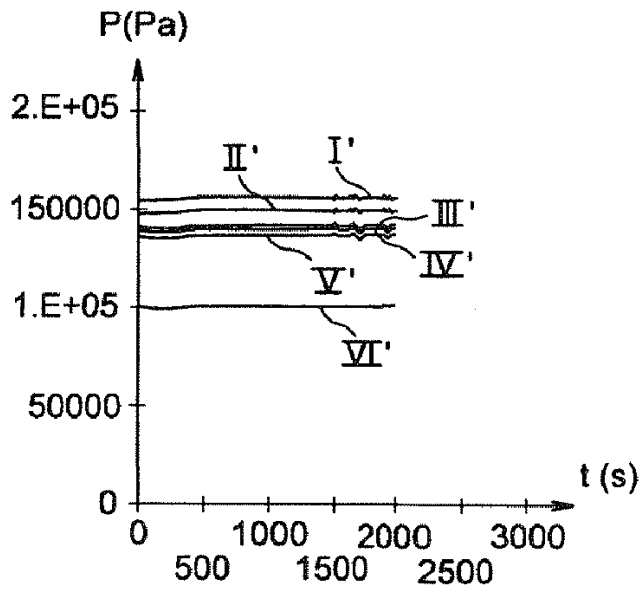


FIG. 4B