

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 685 616**

51 Int. Cl.:

G21C 19/20	(2006.01)
G21C 17/00	(2006.01)
F01K 13/02	(2006.01)
G21D 3/10	(2006.01)
G21D 3/00	(2006.01)
F22B 37/00	(2006.01)
G06F 17/50	(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.09.2014 PCT/US2014/058097**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **02.04.2015 WO15048667**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.09.2014 E 14792919 (4)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.07.2018 EP 3053170**

54 Título: **Accionamiento de un reactor nuclear usando un modelo de depósito de una superficie de transferencia de calor del reactor nuclear**

30 Prioridad:

30.09.2013 US 201314041806

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
10.10.2018

73 Titular/es:

**FRAMATOME INC. (100.0%)
3315 Old Forest Road
Lynchburg, VA 24501, US**

72 Inventor/es:

**POP, MIHAI, G. M.;
WYATT, JOSEPH, R. y
GRIFFITH, JOHN, C.**

74 Agente/Representante:

SALVÀ FERRER, Joan

ES 2 685 616 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

Accionamiento de un reactor nuclear usando un modelo de depósito de una superficie de transferencia de calor del reactor nuclear

5

[0001] La presente invención se refiere en general a un reactor nuclear de agua ligera y más específicamente a un procedimiento de accionamiento de un reactor nuclear basado en el modelado de depósitos en superficies de transferencia de calor.

10 ANTECEDENTES

[0002] Los generadores de energía, incluidos los reactores nucleares, se usan para la generación de energía, la investigación y la propulsión. Un circuito de generación de energía generalmente incluye una fuente de calor tal como un núcleo nuclear u horno y un circuito de refrigerante. Para reactores de agua ligera, los circuitos respectivos de tuberías de refrigerante transportan el agua caliente o vapor a un generador de vapor y luego a una turbina, o directamente a una turbina, y después de pasar por un condensador (disipador de calor), transportan agua circulante o de alimentación de vuelta a la fuente de calefacción. Las temperaturas y la presión de funcionamiento pueden alcanzar o superar el punto crítico del agua. Dependiendo de las condiciones operativas, los diversos materiales usados deben soportar diversas condiciones de carga, ambientales y de radiación.

20

[0003] El material usado como tubería de refrigerante y otros componentes de circuito y fuente de calor incluyen, pero sin limitación, aceros al carbono, aceros inoxidable, a base de níquel y otros aceros aleados y aleaciones a base de zirconio. Estos materiales deben soportar las condiciones de alta temperatura y alta presión. Aunque los materiales han sido cuidadosamente seleccionados, la corrosión se produce debido a la naturaleza corrosiva del entorno: alta temperatura, agua a alta presión, vapor, radiólisis del agua, aditivos en el agua y efectos de radiación. Dichos procedimientos de corrosión limitan la vida operacional de los sistemas en contacto con el fluido refrigerante e incluyen, pero sin limitación, agrietamiento por corrosión bajo tensión, corrosión acelerada por flujo, corrosión por grietas, corrosión por erosión, corrosión generalizada y corrosión nodular.

[0004] El agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC), incluido el agrietamiento por corrosión bajo tensión intergranular (IGSCC), es un fenómeno bien conocido que ocurre con los componentes estructurales en los circuitos de refrigerante de un reactor nuclear, que afecta la base y los materiales de soldadura. El SCC se produce a través de la iniciación de grietas y la propagación, que son causadas por una combinación de tensiones químicas, de tracción y dúctiles (estáticas y dinámicas). Dichas tensiones son comunes en entornos nucleares causados por expansión y contracción térmica, tensiones residuales de soldadura, trabajo en frío, etc. La susceptibilidad hacia SCC a menudo se ve incrementada por el entorno del refrigerante operativo, la soldadura, el tratamiento térmico, la radiólisis y la radiación.

[0005] Se ha demostrado que un alto contenido de oxígeno en el fluido refrigerante acelera el SCC a través de velocidades más altas de iniciación y propagación de grietas. El alto contenido de oxígeno en el fluido refrigerante puede provenir de la intrusión de oxígeno y los procedimientos de radiólisis del agua, que crean especies altamente oxidantes como el radical de oxígeno, el peróxido de hidrógeno y muchas otras especies radicales en el gamma, neutrón, beta y flujo alfa.

[0006] Los productos de corrosión presentes en el fluido refrigerante se acumulan en última instancia en la superficie de transferencia de calor, por ejemplo, en superficies formadas por zirconio de los elementos combustibles de un núcleo de reactor nuclear o en superficies internas de tubos generadores de vapor fabricados de acero inoxidable, formando una capa de depósito comúnmente llamada crud. La estructura de la capa de depósito varía dentro de su espesor y comprende una porción externa de crud suelta de baja densidad, que alberga principalmente agua, que está en constante intercambio con el agua del reactor circulante, pero que proporciona una estructura de óxido metálico capaz de atraer y conservar partículas coloidales. Esta porción de crud suelta de baja densidad se llama crud esponjoso. Por debajo de la porción de crud esponjoso, más cerca de la superficie de transferencia de calor, la capa de depósito comprende una porción interna de crud de mayor densidad, llamada crud tenaz adherido a la superficie de transferencia de calor. El crud tenaz se forma en una capa de óxido metálico de la superficie de transferencia de calor, que se forma en la superficie de transferencia de calor debido al calentamiento de la superficie de transferencia de calor (es decir, corrosión general). Por ejemplo, en superficies de elementos combustibles formadas por zirconio, el calentamiento da como resultado el aumento de una capa de óxido de zirconio nativa. La fracción de crud tenaz en la capa de depósito aumenta a medida que aumenta la deposición de crud y envejece la crud. La densificación se acelera por el calor excesivo y la exposición prolongada al entorno del reactor.

55

- [0007]** La naturaleza esponjosa de la capa de depósito crea las condiciones correspondientes al movimiento del agua capilar. Las muy bajas velocidades capilares de los fluidos en la crud, que crean condiciones casi confinadas, favorecen las reacciones de radiólisis del agua que forman las especies moleculares, es decir, hidrógeno, oxígeno, peróxido de hidrógeno y el radical HO. Estudios, tales como S. Le Caër y col., *Hydrogen Peroxide Formation in the Radiolysis of Hydrated Nanoporous Glasses: A Low and High Dose Study*, Chem.Phys.Lett.450 (2007) 91-95, han demostrado que el hidrógeno en espacios confinados es ineficaz para facilitar la reacción de recombinación al agua. Por lo tanto, en espacios confinados, la suma de las especies oxidantes, es decir, oxígeno, peróxido de hidrógeno y radical de oxígeno, crean de manera eficaz un entorno saturado de oxígeno.
- [0008]** La cantidad y la forma de la capa de depósito formada en las superficies de transferencia de calor dependen de las concentraciones y los tipos de los elementos químicos en el agua que se convertirá en vapor. Los elementos típicamente están en forma de especies particuladas, coloidales y/o iónicas. A medida que el agua se convierte en vapor, los procedimientos químicos, físicos y termodinámicos trabajarán en conjunto (interactivamente) para producir la evolución de la capa de depósito.
- [0009]** A lo largo de los años, se han realizado varios esfuerzos para comprender y modelar la evolución de la capa de depósito y el rendimiento resultante de la transferencia de calor. El depósito típicamente evoluciona como una capa porosa. La transferencia de calor a través de la capa de depósito es principalmente una combinación de conducción a través del depósito y la matriz de agua y la convección a través del agua en la matriz que se convierte en vapor.
- [0010]** Las teorías y los modelos se han centrado en un concepto de pequeños capilares dentro de la matriz porosa que conducen el agua a aberturas de mayor diámetro llamadas "chimeneas de vapor", en las que el agua se convierte en vapor. A continuación, el vapor se desplaza desde la chimenea de vapor hacia el fluido refrigerante transfiriendo convectivamente el calor de vaporización. Se usó un diámetro fijo para delinear las aberturas que se suponía eran capilares y las que se suponía que eran chimeneas de vapor. La patente de los EE.UU. n.º 7.420.165 muestra un procedimiento para calcular la transferencia de energía de un componente nuclear basado en varias chimeneas de vapor en una capa de depósito en el componente nuclear.
- [0011]** En la mayoría de las condiciones, los depósitos en las superficies de transferencia de calor hacen que la transferencia de calor sea menos eficiente y aumenta el potencial de daño térmico o por corrosión de la superficie de transferencia de calor. Los esfuerzos de modelado proporcionan una mejor comprensión del fenómeno de deposición y, por tanto, ayudan en el desarrollo de acciones mitigadoras y correctivas.
- [0012]** Aunque algunos de los primeros modelos de depósitos en superficies de transferencia de calor trataban el depósito como una capa con un coeficiente modificado de conductividad térmica, pronto se dieron cuenta de que la transferencia de calor a través de una capa de depósito porosa era mucho más compleja que la conducción simple.
- [0013]** En estas líneas, se desarrolló el modelo de transferencia de calor de mecha. El modelo de transferencia de calor de mecha justificó el hecho de que la transferencia de calor en un depósito poroso es una combinación de transferencia de calor conductiva y convectiva. La conducción es a través de la matriz de depósito y la convección proviene del movimiento y el calentamiento del fluido refrigerante dentro de la matriz de depósito. La transferencia de calor convectiva primaria es del movimiento del fluido refrigerante a la matriz de depósito en la que se convierte en vapor y regresa al fluido refrigerante.
- [0014]** La Fig. 1 muestra una versión del modelo de transferencia de calor de mecha que ilustra una capa de depósito 10, que tiene un espesor X en una superficie de transferencia de calor 12. Los solutos en el fluido refrigerante 14 se transportan a los poros formados en la superficie exterior 16 de la capa de depósito 10 mediante una red de "capilares" 18 de pequeño diámetro que introducen el fluido 14 en "chimeneas de vapor" 20 en las que el agua puede absorber el calor latente de vaporización y regresar al fluido 14 como vapor. El diámetro de una abertura dada dentro de la capa de depósito 10 se usó para definir si la ruta serviría como un capilar 18 que suministra fluido 14 o como una chimenea de vapor 20 en la que el fluido 14 se convirtió en vapor. Las aberturas de menor diámetro fueron capaces de absorber el fluido en las regiones más calientes de la capa de depósito 10 sin hervir. Si el fluido de un capilar 18 se conecta al diámetro más grande de una chimenea de vapor 20, la abertura de flujo más grande permite que el fluido 14 se vaporice y fluya hacia el fluido 14. Cualquier abertura de superficie de depósito más grande que un diámetro específico se contó como chimeneas de vapor 20 y se obtuvieron relaciones empíricas para relacionar el número de chimeneas de vapor 20 a la capacidad de flujo de calor de la capa de depósito 10.

[0015] El documento US 2009/0292574 describe un procedimiento para determinar acciones correctivas de un generador de vapor nuclear que tiene las etapas de modelado de un tubo generador de vapor y características de transferencia de calor de depósito mediante características de depósito específicas de procedencia analítica y parámetros de modelos descriptivos.

5

[0016] El artículo titulado "A model of chemistry and thermal hydraulics in PWR fuel crud deposits", de Jim Henshaw y *col.*, describe un modelo de simulación de condiciones de térmicas, hidráulicas y químicas en depósitos de crud combustibles.

10 RESUMEN DE LA INVENCION

[0017] Se proporciona un procedimiento para accionar un reactor nuclear según la reivindicación 1.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

15

[0018] La presente invención se describe a continuación con referencia a los siguientes dibujos, en los que:

La Fig. 1 muestra una vista en sección transversal de una versión del modelo de transferencia de calor de mecha;

20 La Fig. 2 muestra una vista en planta de un ejemplo de una distribución de canales de diferentes tamaños en un incremento de capa de depósito real;

La Fig. 3 muestra un gráfico ejemplar de los datos de población reales medios observados de una distribución para su uso en la creación de un incremento de capa de depósito modelado según la invención;

25

La Fig. 4 muestra una curva de regresión calculada para una parte del gráfico ejemplar de la Fig. 3;

La Fig. 5 muestra esquemáticamente una vista en perspectiva de una representación del incremento de capa de la capa de depósito según la invención;

30

La Fig. 6 muestra esquemáticamente canales como volúmenes abiertos irregulares;

Las Fig. 7a a 7c muestra la evolución de los incrementos de capa al ilustrar vistas en planta de tres incrementos de capa diferentes de un modelo de depósito;

35

La Fig. 8 muestra un incremento de capa en el que cada canal ha alcanzado el radio mínimo debido a las altas concentraciones de especies en el incremento de capa;

40 La Fig. 9 muestra un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para accionar un reactor nuclear conforme a una realización de la presente invención;

La Fig. 10 muestra esquemáticamente un reactor nuclear accionado conforme a una realización de la presente invención;

45 La Fig. 11 muestra una interfaz de usuario de gráfica ejemplar que visualiza las entradas que un módulo químico puede usar para definir un incremento de capa;

La Fig. 12 muestra una interfaz de usuario de gráfica ejemplar que visualiza las entradas que un módulo de geometría puede usar para definir el equilibrio químico de una capa de depósito;

50

La Fig. 13 muestra una interfaz de usuario de gráfica ejemplar que visualiza los valores para los parámetros del núcleo del reactor y los parámetros de modelado para una capa de depósito; y

55 las Fig. 14-24 muestran interfaces gráficas que ilustran la evolución de las propiedades ejemplares de cada incremento de capa a lo largo del tiempo.

DESCRIPCIÓN DETALLADA

- [0019]** Los estudios de superficies internas y externas de capas de depósito 10, es decir, superficie de depósito en contacto con una superficie de transferencia de calor 12, respectivamente con un fluido refrigerante 14, al usar software de procesamiento de imágenes han ilustrado que las aberturas en depósitos en superficies de transferencia de calor están representadas con mayor precisión como una distribución de canales de diferentes tamaños, en lugar de como dos poblaciones separadas y distintas de capilares y chimeneas de vapor. Uno de estos estudios es Pop y col., PWR Fuel deposit Analysis at a B&W Plant with a 24 Month Fuel Cycle, 15.^a conferencia internacional sobre degradación ambiental de materiales en sistemas de energía nuclear-reactores de agua, del 7 al 11 de agosto de 2011. La física y la química del sistema determinan qué canales dentro de la capa de depósito 10 son lo suficientemente grandes como para permitir el escape de vapor y qué poros son lo suficientemente pequeños como para proporcionar la fuerza motriz capilar para atraer agua a la región de la capa de depósito en la que se convierte en vapor. Los procedimientos químicos y de transferencia de calor implicados determinan la evolución de la porosidad y la estructura de la capa de depósito a medida que se atrae más agua a la capa de depósito 10 y se convierte en vapor.
- [0020]** Las capas de depósito de modelado 10 en las superficies de transferencia de calor 12 según las realizaciones de la presente invención usan una población de canales cuyos miembros se definen en términos de una cantidad y un radio inicial. La capa de depósito 10 se define en términos de un área de superficie de transferencia de calor 12, por ejemplo, un metro cuadrado. Para cada nuevo incremento de capa, la membresía de la población se construye usando un radio mínimo y un incremento de radio para determinar los radios y las cantidades de los miembros de modo que el área total sumada de toda la población de canales no exceda el área de la superficie de transferencia de calor definida multiplicada por el espesor del incremento de capa. Este enfoque representa más de cerca la estructura de depósito observada y proporciona valores de porosidad inicial y fracción sólida más realistas para cada nuevo incremento de capa.
- [0021]** El modelo de depósito considera que la evolución de la capa de depósito 10 es un procedimiento en desarrollo. Cuando las partículas en el fluido refrigerante 14 en contacto con la superficie de transferencia de calor 12 se unen a la superficie de transferencia de calor 14, el espesor de la capa de depósito 10 crece. A medida que se forma la estructura de depósito, el fluido 14 y las especies contenidas continúan siendo arrastradas hacia la capa de depósito 10 y el fluido a convertir en vapor. Como el fluido 14 dentro de un canal de depósito se convierte en vapor, algunas de las especies contenidas precipitan y el canal puede alcanzar un radio mínimo en el que el canal no puede transportar las mismas sustancias fuera del depósito. Esta deposición continuada dentro de la estructura de depósito reduce el volumen abierto en los canales en los que el fluido se convierte en vapor. Con el tiempo, los incrementos de capa del depósito que están más cerca de la superficie de transferencia de calor 12 continúan haciéndose menos porosos debido a la deposición continuada de sustancias particuladas, coloidales e iónicas del fluido 14.
- [0022]** A partir de mediciones conocidas en la superficie del depósito en contacto con el fluido refrigerante 14, hay una población de aberturas que se puede caracterizar como una distribución. Dado que esta población será la estructura de depósito formada más recientemente, se usa para definir una condición inicial típica para cada incremento de capa en el modelo de depósito.
- [0023]** El modelo de depósito se basa en una distribución observada de las aberturas de depósito en el límite del fluido refrigerante de la capa de depósito 10, por ejemplo, usando un microscopio electrónico de barrido (MEB) como se describe, por ejemplo, en la patente de EE.UU. n.º 7.822.259. La Fig. 2 muestra una vista en planta de un ejemplo de una distribución de canales de diferentes tamaños 22 en un incremento de la capa de depósito 24 como se puede observar en una escama real de una capa de depósito 10 eliminada de una superficie de transferencia de calor de un reactor nuclear. Como se muestra en la Fig. 2 los canales 22 varían en diámetro a lo largo del incremento de capa 24. Los canales 22 en combinación con el flujo de calor local y las condiciones químicas determinan el funcionamiento térmico e hidráulico de las diferentes aberturas.
- [0024]** La Fig. 3 muestra un gráfico ejemplar de los datos reales de la población observada de una distribución para su uso en la creación de un modelo de incremento de la capa de depósito. El gráfico muestra la población de canales 22 para cada tamaño de radio en la distribución. Como se muestra en este ejemplo, la mayoría de los canales 22 tienen un radio que es menor de 2 micrómetros. Se aplican diferentes distribuciones de población si las condiciones de depósito de escamas observadas son diferentes. La Fig. 4 muestra una vista ampliada de una parte del gráfico ejemplar de la Fig.3 alrededor de 1 a 2 micrómetros con la curva de regresión calculada correspondiente.
- [0025]** En el modelo de depósito, cada nuevo incremento de capa 24 se añade en la parte superior de los incrementos de capa anteriores 24, adyacente al fluido refrigerante 14, y comienza con la porosidad y la estructura física definida por la porosidad observada de una capa exterior de una muestra de depósito real, como, por ejemplo,

la estructura representada por la distribución que se muestra en la Fig. 3. El flujo del fluido refrigerante 14 en los incrementos de capa más antiguos 24 continúa a través de los canales más pequeños 22 (los que actúan como capilares). El fluido se vaporiza en los canales más grandes 22 (los que actúan como chimeneas) dejando atrás la mayoría de las sustancias, las especies insolubles, que estaban en el fluido 14 y las especies inicialmente solubles transformadas en especies insolubles debido a las condiciones localizadas. La deposición continuada dentro de estos canales más grandes 22 reduce el volumen abierto. Este procedimiento de consolidación da como resultado la reducción de la porosidad del incremento de capa 24 desde su condición inicial. El radio de los canales más grandes 22 se reduce por deposición dentro de los canales 22. Dado que el efecto es acumulativo, la reducción de la porosidad será más significativa en los incrementos de capa más antiguos 24 (más cercanos a la superficie de transferencia de calor 12). La velocidad de acumulación de depósitos es una función de la química del fluido refrigerante y del flujo de calor.

[0026] Debido a la termodinámica de la capa de depósito 10, existe un límite en el radio más pequeño de un canal dentro del depósito. Cuando el canal se vuelve demasiado pequeño para permitir que el fluido refrigerante se convierta en vapor, la velocidad de deposición disminuye o se detiene. Por tanto, existe un límite de radio mínimo a partir del cual se considera que los canales actúan como chimeneas.

[0027] La Fig. 5 muestra esquemáticamente una vista en perspectiva de una representación del incremento de la capa de depósito 24 de la capa de depósito 10, que podría tener, por ejemplo, un espesor del orden de 1 micrómetro, dependiendo de los parámetros del modelo. También debe observarse que el diámetro real del canal y el número de canales 22 en un incremento de capa 24 sería coherente con los canales 22 representados en la Fig. 3. La Fig. 5 ilustra los canales 22 como completamente cilíndricos en toda su longitud; sin embargo, cada canal 22 tiene cierta tortuosidad en una escala macro como se ilustra en la Fig. 6 con variaciones de diámetro tales que los canales 22 se modelan en el modelo de depósito como volúmenes abiertos irregulares, cilindros no perfectos. Como un incremento de capa 24 de la capa de depósito 10 se modifica con el tiempo, el efecto de tortuosidad puede aumentarse. La adición de material a un volumen abierto irregular cambia la dirección del flujo capilar o la evacuación de vapor a través de esos espacios libres, lo que resulta en última instancia en una ruta de fluido o vapor más larga hasta el punto de salida.

[0028] La Fig. 7 muestra la evolución de los incrementos de capa 24 ilustrando vistas en planta de tres incrementos de capa 24 diferentes de una capa de depósito 10. La ilustración superior muestra un incremento de capa superior o más reciente 40, formado recientemente en la superficie exterior de la capa de depósito 10 en contacto con el fluido 14. La ilustración del medio muestra un incremento de la capa de depósito del medio 42, que está localizado aproximadamente a medio camino entre la capa más reciente 40 y la superficie de transferencia de calor 12. La ilustración inferior muestra un incremento de capa de depósito inferior o más antiguo 44 formado directamente en la superficie de transferencia de calor 12. Estas tres ilustraciones de capas muestran que los canales 22 en la capa de depósito 10 reducen su radio debido a una deposición aún mayor dentro de los incrementos de capa hasta que cada canal alcanza un radio mínimo.

[0029] La Fig. 8 muestra un incremento de capa 46 en el que cada canal 22 ha alcanzado el radio mínimo debido a las altas concentraciones de sustancias depositadas en los canales 22 del incremento de capa 46. En este caso, el incremento de capa 46 será principalmente una capa de conducción y, por tanto, la transferencia de calor de este incremento de capa particular 46 está como mínimo.

[0030] La Fig. 9 muestra un diagrama de flujo que ilustra un procedimiento para accionar un reactor nuclear conforme a una realización de la presente invención. En una etapa 102, se obtiene una muestra de depósito real de la superficie de transferencia de calor de un reactor nuclear, por ejemplo, un elemento de combustible (es decir, una barra de combustible o varilla de combustible) o un tubo generador de vapor. En una etapa 104, la muestra de depósito real se analiza usando un MEB para determinar la porosidad de la muestra de depósito. Específicamente, la muestra de depósito de crud real se analiza para determinar la porosidad de un segmento de capa de la muestra de depósito. En una realización preferida, el segmento de capa es un segmento de la capa exterior de la muestra de depósito, que forma una superficie del depósito que interactúa con el fluido refrigerante en el núcleo del reactor. Por ejemplo, el segmento de capa puede ser de un micrómetro de espesor.

[0031] El ordenador inicia un modelo de un depósito real que se forma en la superficie de transferencia de calor. El ordenador construye la capa de depósito modelada 10 en incrementos de capa 24 que permiten un procedimiento de análisis de equilibrio cuasi-estático que sigue a la formación del depósito real en el núcleo de un reactor nuclear operativo real. El modelo puede mantener la condición de equilibrio cuasi estático suponiendo que el calor disponible en la superficie de transferencia de calor 12 se transfiere a través de la capa de depósito modelada al fluido refrigerante 14. Si bien se puede conceder una excepción durante periodos transitorios cortos, el sistema se

adapta para transferir el calor disponible. La adaptación típicamente es en la forma de una temperatura incrementada en la superficie de transferencia de calor 12 hasta que la capa pueda volver a transferir todo el calor desde la superficie de transferencia de calor 12. La conducción combinada y la convección de la capa de depósito modelada 10 son iguales al flujo de calor de entrada. El modelo en esta realización usó un equilibrio iterativo de balances de deposición

- 5 térmica, hidráulica, química y física durante un periodo operativo definido. Mediante el uso de pequeños incrementos de tiempo y volumen, la capa de depósito modelada 10 se mantiene cerca de un estado de cuasi equilibrio a medida que se forma el depósito y a medida que aumenta la densidad de las capas más antiguas, las más cercanas a la superficie de transferencia de calor 12.
- 10 **[0032]** En una etapa 106, el ordenador define la geometría de un incremento de capa 24 de la capa de depósito modelada 10 estableciendo una población de canal inicial para el incremento de capa 24 basada en la porosidad del segmento de capa analizado por MEB. El incremento de capa definido 24 se usa para iniciar cada nuevo incremento de capa 24 añadido a la capa de depósito modelada 10. Una realización ejemplar de valores numéricos para la población de canal inicial se muestra en la Fig. 3, que define la población de canales inicial en el número de canales
- 15 22 y los radios de los canales 22. Dependiendo del radio mínimo y el incremento del radio de la población del canal inicial, que puede establecerse arbitrariamente para representar razonablemente el segmento de capa del depósito real, el ordenador puede crear incrementos de capa 24 de modo que cada nuevo incremento de capa 24 tiene una porosidad inicial, es decir, una fracción de volumen de vacíos sobre el volumen total, de entre 0,90 y 0,95, que está de acuerdo con los datos MEB observados. El ejemplo de la Fig. 3 usa un radio mínimo de 3,0 E-7 metros y un
- 20 incremento de radio de 2,5 E-8 metros para producir una distribución de población discreta de cincuenta y tres (53) radios de canal diferentes con un radio máximo de 1,625 E-6 metros y una porosidad de 0,91.

[0033] Después de que se define el incremento de capa 24, el ordenador inicia un procedimiento iterativo para modelar el crecimiento del depósito real sobre la superficie de transferencia de calor de la barra de combustible a lo largo del tiempo. Cada incremento de capa 24 se define como compuesto por una matriz porosa que consiste en agua, sólidos y una distribución de canales abiertos 22. La matriz porosa transferirá calor por conducción a través de la matriz sólida y líquida combinada. Los canales abiertos 22 transferirán calor a través de la evaporación del líquido que rezuma en sus superficies interiores y la posterior transferencia convectiva a través de la evacuación del vapor resultante.

30 **[0034]** Por tanto, cada incremento de capa 24 consiste en tres fases, sólida, líquida y vapor, de material en proporciones determinadas por el modelo. El sólido poroso de la capa de depósito 10 forma la matriz física de la capa. El material líquido impregna el sólido poroso y los canales más pequeños 22 conducen líquido a la matriz. Los canales más grandes 22 contienen el componente de vapor del material. Las proporciones volumétricas de cada fase evolucionan con el tiempo a medida que avanza la iteración del modelo. Este equilibrio entre sólido, líquido y vapor se usa para determinar la transferencia de calor de la masa de depósito combinada. A medida que la iteración del modelo continúa, se añaden nuevos incrementos de capa 24 y los incrementos de capa más antiguos continúan la deposición y la reducción de los radios (o diámetros) del canal hasta que se alcanza el radio mínimo.

40 **[0035]** A continuación, el modelo itera el procedimiento de espera hasta que la capa de depósito 10 crece en una cantidad que tiene el espesor de un incremento de capa 24, creando el incremento de capa 24 basado en la estructura abierta observada y la porosidad, calculando el perfil de temperatura en todo el espesor de la capa de depósito, determinando la deposición dentro de las aberturas de los incrementos de capa anteriores 24 y determinando las nuevas condiciones de equilibrio químico para la capa de depósito completa 10. Esta iteración se continúa durante un tiempo especificado y se usa para monitorizar al menos una variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12 para garantizar que la superficie de transferencia de calor no se caliente a un valor peligrosamente alto.

50 **[0036]** Más específicamente, una realización preferida del modelado funciona de acuerdo con las siguientes etapas 108 a 120.

[0037] En una etapa 108, después de que haya transcurrido una cantidad de tiempo suficiente para que el ordenador calcule un espesor de depósito igual al espesor de incremento de capa a la superficie de transferencia de calor 12, el ordenador añade un incremento de capa 24 que tiene la geometría predefinida a la capa de depósito 10. Inicialmente, durante una primera iteración, se forma un primer incremento de capa 24 de la capa de depósito 10 que representa un segmento de capa inicial formado directamente sobre la superficie de transferencia de calor 12 del reactor nuclear. Durante una segunda iteración por el ordenador, se forma un segundo incremento de capa 24 de la capa de depósito 10 en la superficie exterior del primer incremento de capa 24 en contacto con el fluido 14. Para cada iteración posterior de la etapa 108, se añade un incremento de capa adicional 24 a la capa de depósito 10.

[0038] A continuación, en una etapa 110, el ordenador usa una composición de especies sólidas en el fluido refrigerante 14 para definir la composición de especies sólidas en cada uno de los incrementos de capa 24 de la capa de depósito 10. Las especies sólidas son elementos en forma de sustancias particuladas, coloidales y/o iónicas en el fluido refrigerante 14 que son atraídas hacia la superficie de transferencia de calor 12 del reactor nuclear. Un aumento de la diferencia de temperatura entre la superficie de transferencia de calor 12 y el fluido refrigerante 14 aumenta la velocidad de atracción de la especie sólida a la superficie de transferencia de calor 12. La deposición de la especie es una función del flujo de calor de la superficie de transferencia de calor 12, que por ejemplo depende del calor generado por la superficie calentada, la transferencia de calor de la capa de depósito 10 y la temperatura del fluido refrigerante 14.

[0039] En una etapa 112, el ordenador usa la temperatura y la presión de los incrementos de capa 24 para definir un perfil de temperatura de la capa de depósito 10 para un espesor completo de la capa de depósito 10, incremento de capa 24 por incremento de capa 24. Cada capa de deposición tiene su propia presión de vapor interna. La presión es más alta en las capas más cercanas a la superficie calentada, lo que hace que el vapor sea evacuado hacia el agua en la superficie de la deposición. Allí, la presión es aproximadamente igual (ligeramente más alta) a la presión en el fluido de refrigeración a granel. El perfil de temperatura se calcula dentro de cada incremento de capa 24 usando una distribución dada de canales 22 que actúan como chimeneas de vapor (miembros de evacuación de vapor) que evacúan el calor de la capa de depósito 10 al fluido refrigerante 14. La distribución de los canales 22 cambia el incremento de capa 24 por incremento de capa 24. Por ejemplo, el perfil de temperatura puede basarse en el número de canales 22 en el incremento de la capa de depósito 24 que tiene un radio mayor que un límite predefinido en el cual un canal 22 actúa como una chimenea de vapor, extrayendo fluido refrigerante de los capilares, calentando el fluido y dando salida al fluido refrigerante 14 como vapor. El perfil de temperatura depende de la cantidad y la composición de las especies sólidas que forman cada incremento de capa 24 y el flujo de calor de la superficie de transferencia de calor.

[0040] En una etapa 114, el ordenador usa el perfil de temperatura determinado en la etapa 112 para cada incremento de capa 24 y una presión calculada para cada incremento de capa para definir las condiciones de equilibrio químico de la capa de depósito, incremento de capa por incremento de capa. Durante la etapa 114, el ordenador determina la solubilidad y la difusividad de las diferentes especies en la capa de depósito 10 y en el soluto dentro de los canales 22 de la capa de depósito 10. En otras palabras, concentraciones de especies solubles (como hidróxidos) en la capa de depósito 10, es decir, en cada incremento de capa 24 de la capa de depósito 10, y su difusividad están determinadas. La difusividad depende de la especie soluble en cada incremento de capa 24 y del perfil de temperatura en cada incremento de capa 24, como se determina en la etapa 112. La definición de las condiciones de equilibrio químico implica calcular las formas de hidróxido de las especies solubles depositadas como especies insolubles en los incrementos de capa 24 de la capa de depósito 10 y los coeficientes de difusividad de cada forma de hidróxido líquido. La difusividad y la solubilidad de la especie en la capa de depósito 10 se usan para definir el equilibrio químico determinando la conversión de especies solubles en especies insolubles y la deposición de las especies insolubles en los incrementos de capa 24.

[0041] En una etapa 116, el ordenador usa el equilibrio químico establecido en la etapa 114 para redefinir la distribución de la especie en la capa de depósito 10 para determinar la deposición real de la especie soluble dentro de la capa de depósito 10. La cantidad y la composición de la especie sólida en los incrementos de capa 24 como se determina en la etapa 110 y la cantidad y la composición de la especie insoluble en los incrementos de capa 24 como se determina en la etapa 114 se suman juntas. El ordenador calcula los balances de masa de los elementos (*p. ej.*, Fe, Zn, Si y Cu) como hidróxidos (*p. ej.*, en partes por millón) en cada incremento de capa 24, basado en el movimiento capilar de la especie hacia la evacuación a través del vapor y la difusión a y desde los incrementos de la capa vecina 24. La deposición de la especie soluble transformada en especies insolubles debido a las condiciones localizadas en los incrementos 24 de la capa se produce dentro de los canales 22 que actúan como chimeneas (pero no dentro de los canales que actúan como capilares). En consecuencia, la cantidad de deposición dentro de cada incremento de capa 24 depende del número y el volumen de los canales 22 que actúan como chimeneas. Cuando el canal 22 que actúa como una chimenea se vuelve demasiado pequeño para permitir que el fluido refrigerante 14 se convierta en vapor, la velocidad de deposición dentro del canal 22 disminuye o se detiene, haciendo que el canal 22 actúe como un capilar. Si el canal 22 que actúa como una chimenea experimenta una reducción en el radio para tener un radio más pequeño que un canal adyacente 22 que actúa como capilar, el canal adyacente 22 que actúa como capilar puede forzarse a actuar como una chimenea. Por tanto, las chimeneas se pueden convertir en capilares y los capilares se pueden convertir en chimeneas. En última instancia, el ordenador puede calcular la velocidad de deposición de la especie, que puede incluir Zn_2SiO_4 , ZnO, CuO y SiO_2 , en gramos/segundo, para determinar la deposición total de especies en cada incremento de capa 24 durante cada iteración.

[0042] En una etapa 118, el ordenador usa la deposición de la especie en cada incremento de capa 24 para volver a calcular la geometría de la capa de depósito 10. Los volúmenes de las especies insolubles se distribuyen en los canales 22 de cada incremento de capa 24 para redefinir la geometría de la capa de depósito completa 10. La porosidad y los radios de los canales 22 que actúan como chimeneas son disminuidos por el ordenador. A medida que el fluido refrigerante se convierte en vapor dentro de un incremento de capa 24, las especies solubles que se transforman en especies insolubles debido a las condiciones locales dentro de cada incremento de capa 24 quedan en las chimeneas de vapor reduciendo el diámetro de las chimeneas y reduciendo la porosidad global del incremento de capa 24. El volumen de las especies combinadas depositadas en cada incremento de capa 24 contribuye a cambiar el volumen libre al disminuir la porosidad de los incrementos de capa 24.

[0043] En una etapa 120, basada en la geometría recalculada de la capa de depósito 10, se determina y se compara al menos una variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12 del reactor nuclear con un límite correspondiente. El aumento de la acumulación del depósito real en la superficie de transferencia de calor afecta la capacidad del fluido refrigerante para enfriar la superficie de transferencia de calor. Si la variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12 alcanza el límite predeterminado, se altera el funcionamiento del reactor nuclear real. El modelado vuelve entonces a la etapa 108 y transcurre a través de los bucles iterativos de las etapas 108 a 120 para añadir otro incremento de capa 24 a la capa de depósito 10 y volver a calcular las propiedades de la capa de depósito 10 y la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12. Tal como se usa en esta invención, la variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12 incluye la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12 o cualquier variable que dependa de la temperatura y por tanto puede considerarse una medida indirecta de la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12. Por ejemplo, la expansión térmica del material de revestimiento es una medida indirecta de la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12 y es una variable relacionada con la temperatura.

[0044] Con el fin de que el reactor nuclear funcione con seguridad, la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12 se mantiene por debajo de un valor predeterminado. Una vez que los incrementos de capa 24 de la capa 10 depositada sobre la superficie de transferencia de calor 12, hacen que la temperatura de la superficie de transferencia de calor 12 alcance el valor predeterminado (u otra variable relacionada con la temperatura alcance el límite correspondiente), en una etapa 122, el funcionamiento del reactor nuclear se ve alterado, ya sea automáticamente por un sistema informático programado para monitorizar y controlar el reactor nuclear conforme a las etapas anteriores o por un operario del reactor nuclear. En algunos casos, la alteración del funcionamiento del reactor nuclear puede incluir la detención del funcionamiento del reactor nuclear y luego la sustitución de la superficie de transferencia de calor 12. Por ejemplo, en un reactor nuclear, una vez que la temperatura en el punto más caliente del elemento de combustible nuclear más caliente alcanza el valor predeterminado, el reactor nuclear se detiene, los elementos de combustible se retiran del reactor nuclear y los elementos de combustible de sustitución se insertan en el reactor nuclear. El reactor nuclear puede reiniciarse con los elementos de combustible de sustitución.

[0045] En otros casos, alterar el funcionamiento del reactor nuclear puede incluir accionar el reactor nuclear en condiciones modificadas. Una vez que la variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor alcanza el valor predeterminado, la operabilidad del reactor puede verse comprometida y una región del límite de la superficie de transferencia de calor puede tener un alto riesgo de fallo. En dichas situaciones, puede ser posible suprimir el funcionamiento de la región de la superficie de transferencia de calor que tiene un alto riesgo de fallo. Por ejemplo, en un reactor nuclear, una vez que la variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor alcanza el valor predeterminado, el límite del elemento combustible nuclear más caliente puede tener un alto riesgo de fallo (es decir, el revestimiento tiene un alto riesgo de rotura) y el reactor nuclear puede accionarse en un modo de alto riesgo. A continuación, el elemento combustible nuclear más caliente se suprime limitando, por ejemplo, la potencia del reactor nuclear.

[0046] La Fig. 10 muestra esquemáticamente un reactor nuclear 200 accionado conforme a una realización de la presente invención. El reactor nuclear 200 incluye una pluralidad de elementos combustibles 202 que se muestran esquemáticamente en su núcleo. Se proporciona un controlador 204 para accionar el reactor nuclear 200 conforme a un medio legible por ordenador no transitorio programado o estructurado para definir módulos que tienen lógica para realizar las etapas descritas con respecto al procedimiento de la Fig. 9. Los medios legibles por ordenador no transitorios incluyen etapas de procedimiento ejecutables por ordenador accionables para controlar el controlador 204 conforme al procedimiento descrito con respecto a la Fig. 9.

[0047] El controlador 204 puede estar en comunicación cableada o inalámbrica con un dispositivo de visualización 206 y al menos un dispositivo de entrada de usuario, por ejemplo, un teclado 208 y un ratón 210. El

dispositivo de visualización 206 también puede ser una pantalla táctil que puede usarse como un dispositivo de entrada de usuario adicional o alternativo. El dispositivo de visualización 206 puede visualizar interfaces de usuario gráficas que ilustran los valores usados en el procedimiento para el usuario y que permiten al usuario alterar los valores.

5 **[0048]** En la Fig. 11 se muestra una primera interfaz de usuario gráfica ejemplar que visualiza las entradas que un módulo químico puede usar en las etapas 110 o 114 para definir el equilibrio químico de la capa de depósito 10. Como se muestra en la Fig. 11, las entradas usadas en la etapa 110 o 114 pueden incluir las partículas totales, disueltas y sólidas de sustancias en el fluido refrigerante 14 (p. ej., hierro, zinc, silicio y cobre) y el contenido del fluido refrigerante 14 (p. ej., H_2O_2 , H_2 , O_2 y contenido de óxidos). Las entradas pueden ser generadas automáticamente por
10 el módulo de química o pueden ser ingresadas o alteradas por el usuario a través de uno o más de los dispositivos de entrada del usuario.

[0049] En la Fig. 12 se muestra una segunda interfaz de usuario gráfica ejemplar, que visualiza las entradas que un módulo de geometría puede usar en las etapas 106 o 118 para definir un incremento de capa. En la Fig. 12,
15 chimenea significa canal 22, crud significa capa de depósito 10, incremento de crud significa incremento de capa de depósito 24. Como se muestra en la Fig. 12, las entradas usadas en la etapa 106 o 118 pueden incluir el radio de canal mínimo para el incremento de capa definido 24, el incremento de radio para el incremento de capa definido 24, el radio de canal máximo para el incremento de capa definido 24, el número de miembros de canal para el incremento de capa definido 22, la porosidad inicial para el incremento de capa definido 22, el espesor máximo de capa de depósito (es decir, espesor de crud) del depósito modelado, el espesor de cada incremento de capa definido 24 y la tortuosidad inicial para el incremento de capa definido 24. El espesor máximo de capa de depósito es el límite del espesor de todo el depósito. El operario programa el controlador 204 para establecer que este valor supere el espesor máximo estimado de todo el depósito. Si el valor calculado del espesor de todo el depósito supera el espesor máximo de la capa de depósito, el controlador 204 abortará el modelado de la capa de depósito. Las entradas pueden ser generadas
20 automáticamente por el módulo de geometría o pueden ser ingresadas o alteradas por el usuario a través de uno o
25 más de los dispositivos de entrada del usuario.

[0050] En la Fig. 13 se muestra una tercera interfaz de usuario gráfica ejemplar, que visualiza los valores para los parámetros del núcleo del reactor (es decir, flujo de calor de la barra de combustible, temperatura del fluido refrigerante, temperatura de la barra de combustible, presión del fluido refrigerante) y los parámetros de modelado (es decir, duración de la etapa de tiempo de cada iteración y etapas de tiempo total, que es la cantidad de días que el combustible nuclear estará dentro del reactor) que se pueden usar en las etapas 108 a 120. Las entradas pueden generarse automáticamente o pueden ser ingresadas o alteradas por el usuario a través de uno o más de los dispositivos de entrada del usuario.
35

[0051] Las etapas 108 a 120 se realizan usando representaciones matemáticas almacenadas en el medio legible por ordenador. Los valores numéricos usados en las etapas 108 a 120 se definen como constantes, tablas de búsqueda o ajustes de curvas que pueden evitar las interpolaciones requeridas para una tabla de búsqueda.

40 **[0052]** Según lo dirigido por los medios legibles por ordenador y/o uno o más de los dispositivos de entrada del usuario, el dispositivo de visualización 206 puede visualizar representaciones de una pluralidad de propiedades en tiempo real y pasadas de la capa de depósito 10, incremento de capa 24 por incremento de capa 24. Las Figs. 14 a 24 muestran interfaces gráficas que ilustran la evolución de las propiedades ejemplares de cada incremento de capa 24 (eje X) a lo largo del tiempo (eje Y). Los incrementos de capa más antiguos 24 cerca de la superficie de transferencia de calor 12 se muestran en el lado izquierdo de los gráficos y los incrementos de capa externa más recientes 24 cerca del fluido refrigerante circulante 14 se muestran en el lado derecho de los gráficos. La Fig. 14 muestra un gráfico del perfil de temperatura de cada incremento de capa 24 a lo largo del tiempo que ilustra que la temperatura es más alta cerca de la superficie de transferencia de calor 12 y aumenta con el tiempo dentro de un incremento de capa 24; la Fig. 15 muestra un gráfico de la conductividad de cada incremento de capa 24 a lo largo del tiempo, que ilustra que debido a que la conductividad es función de una composición de incremento de capa y porosidad, la conductividad de los incrementos de capa (externa) más recientes 24 es menor que la de los incrementos de capa más antiguos 24; la Fig. 16 muestra un gráfico de la porosidad de cada incremento de capa 24 a lo largo del tiempo, que ilustra que los incrementos de capa más antiguos 24 son menos porosos que los incrementos de capa más recientes 24; la Fig. 17 muestra un gráfico del sólido fraccional (es decir, el inverso de la porosidad) de cada incremento de capa 24 a lo largo del tiempo; la Fig. 18 muestra un gráfico de la salida de calor evacuada (también llamada evaporativa o convectiva) de cada incremento de capa 24, que se debe principalmente a la conversión de agua dentro de los canales más grandes 22 en vapor, a lo largo del tiempo; la Fig. 19 muestra un gráfico del calor total de cada incremento de capa 24 a lo largo del tiempo (que ilustra el estado de equilibrio cuasi estático de la capa de depósito modelada 10); la Fig. 20 muestra un gráfico de la concentración de $FeOH_2$ (hierro soluble) de cada incremento de capa 24 a lo largo del
55

tiempo: la Fig. 21 muestra un gráfico de la concentración de Fe_2O_3 (óxido de hierro depositado) de cada incremento de capa 24 a lo largo del tiempo; la Fig. 22 muestra un gráfico del volumen depositado de cada incremento de capa 24 a lo largo del tiempo; y las Figs. 23 y 24 muestran gráficos de radios de canal a lo largo del tiempo, cada uno para una familia dada de canales diferente 22. Los canales 22 de la familia en la Fig. 24 tienen cada uno un radio que es
5 mucho mayor que los canales 22 de la familia en la Fig. 23. La capacidad del usuario para ver estas propiedades del análisis del modelo permite una validación del modelo más sencilla y una comprensión más completa de la evolución de la capa de depósito 10 y el rendimiento de transferencia de calor asociado.

[0053] En la memoria descriptiva anterior, la invención se ha descrito con referencia a realizaciones ejemplares
10 específicas y ejemplos de las mismas. Sin embargo, será evidente que se pueden hacer diversas modificaciones y cambios a los mismos sin apartarse del alcance de la invención como se establece en las reivindicaciones que siguen. En consecuencia, la memoria descriptiva y los dibujos deben considerarse de una manera ilustrativa en lugar de en un sentido restrictivo.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para accionar un reactor nuclear que comprende:
 - 5 definir un incremento de capa (24) de una capa de depósito (10) que modela un depósito en una superficie de transferencia de calor (12) del reactor nuclear; actualizar periódicamente un espesor de la capa de depósito (10) añadiendo el incremento de capa a la capa de depósito (10); volver a calcular las propiedades de la capa de depósito (10) después de añadir cada incremento de capa (24) a la
 - 10 capa de depósito (10); determinar una variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor (12) en función de las propiedades recalculadas de la capa de depósito (10); y alterar el funcionamiento del reactor nuclear cuando la variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor (12) alcanza un valor predeterminado.
 - 15 2. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1, en el que la alteración del funcionamiento del reactor nuclear incluye detener el reactor nuclear o suprimir el funcionamiento de una región de condiciones de funcionamiento del reactor nuclear.
 - 20 3. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1, en el que el recálculo de las propiedades de la capa de depósito (10) después de añadir cada incremento de capa (24) a la capa de depósito (10) incluye volver a calcular las propiedades geométricas de cada incremento de capa (24).
 4. El procedimiento como se relata en la reivindicación 3, en el que las propiedades geométricas incluyen
 - 25 distribuciones de canales y radios de canales.
 5. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1, en el que el recálculo de las propiedades de la capa de depósito (10) después de añadir cada incremento de capa (24) a la capa de depósito (10) incluye volver a calcular un equilibrio químico de la capa de depósito (10).
 - 30 6. El procedimiento como se relata en la reivindicación 5, en el que recálculo del equilibrio químico incluye volver a calcular una deposición de especies solubles que se transforman en especies insolubles debido a las condiciones locales dentro de cada incremento de capa (24).
 - 35 7. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1, en el que el recálculo de las propiedades de la capa de depósito (10) después de añadir cada incremento de capa (24) a la capa de depósito (10) incluye volver a calcular un perfil de temperatura de cada incremento de capa (24).
 8. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1 que comprende además muestrear un depósito
 - 40 real en una superficie de transferencia de calor (12) en el reactor nuclear.
 9. el procedimiento como se relata en la reivindicación 8, en el que cada incremento de capa (24) de la capa de depósito (10) se define inicialmente basándose en una porosidad del depósito real.
 - 45 10. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1, en el que el recálculo de las propiedades de la capa de depósito (10) después de añadir cada incremento de capa (24) a la capa de depósito (12) comprenden las siguientes etapas:
 - 50 definir una composición de especies sólidas en un incremento de capa más reciente (24) añadido a la capa de depósito (10); definir un perfil de temperatura de la capa de depósito (10); definir las condiciones de equilibrio químico de cada uno de los incrementos de capa (24) de la capa de depósito (10); definir un balance de masa de especies sólidas en cada incremento de capa (24) de la capa de depósito (10); y redefinir una geometría de cada uno de los incrementos de capa (24) de la capa de depósito (10) en función del
 - 55 balance de masa.
 11. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1, que comprende además visualizar al menos una de las propiedades recalculadas en un dispositivo de visualización.

12. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1, en el que el recálculo de las propiedades de la capa de depósito (10) después de añadir cada incremento de capa (24) a la capa de depósito (10) incluye calcular un equilibrio iterativo de condiciones de deposición térmica, hidráulica, química y física durante un periodo operativo definido

5

13. El procedimiento como se relata en la reivindicación 1, en el que la variable relacionada con la temperatura de la superficie de transferencia de calor es la temperatura de la superficie de transferencia de calor (12).

14. Un sistema para accionar un reactor nuclear, comprendiendo el sistema un controlador programado para ejecutar las etapas del procedimiento como se relata en la reivindicación 1.

10

15. Un medio legible por ordenador no transitorio que almacena un producto de programa informático, incluyendo el producto las etapas de procedimiento ejecutables por ordenador operables para controlar un controlador para accionar un reactor nuclear según el procedimiento como se relata en la reivindicación 1.

15

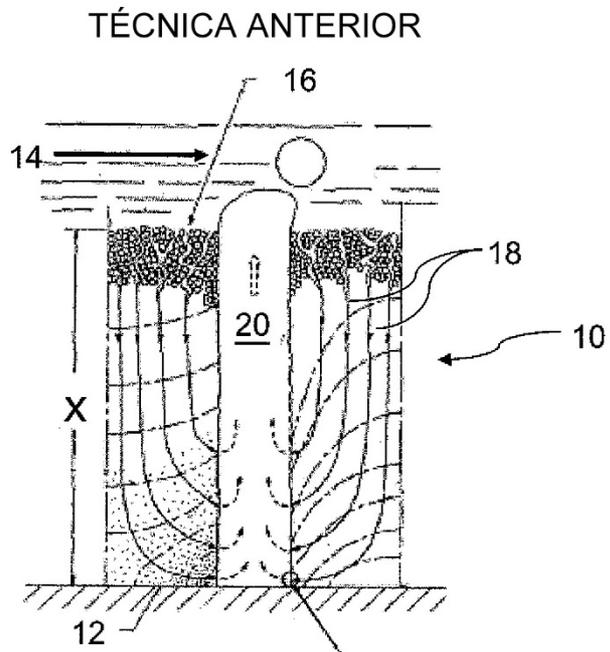


FIG.1

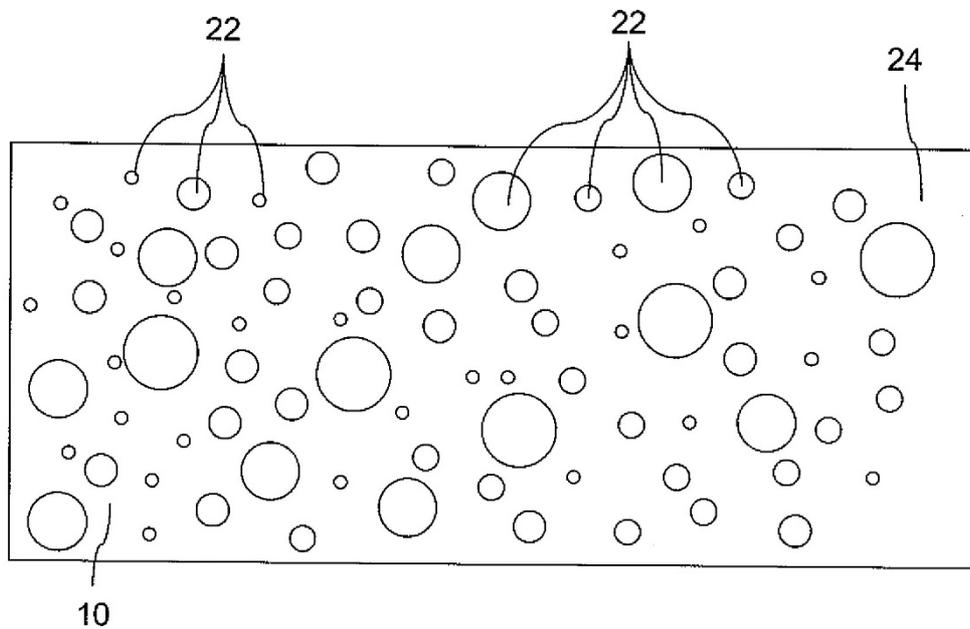


FIG.2

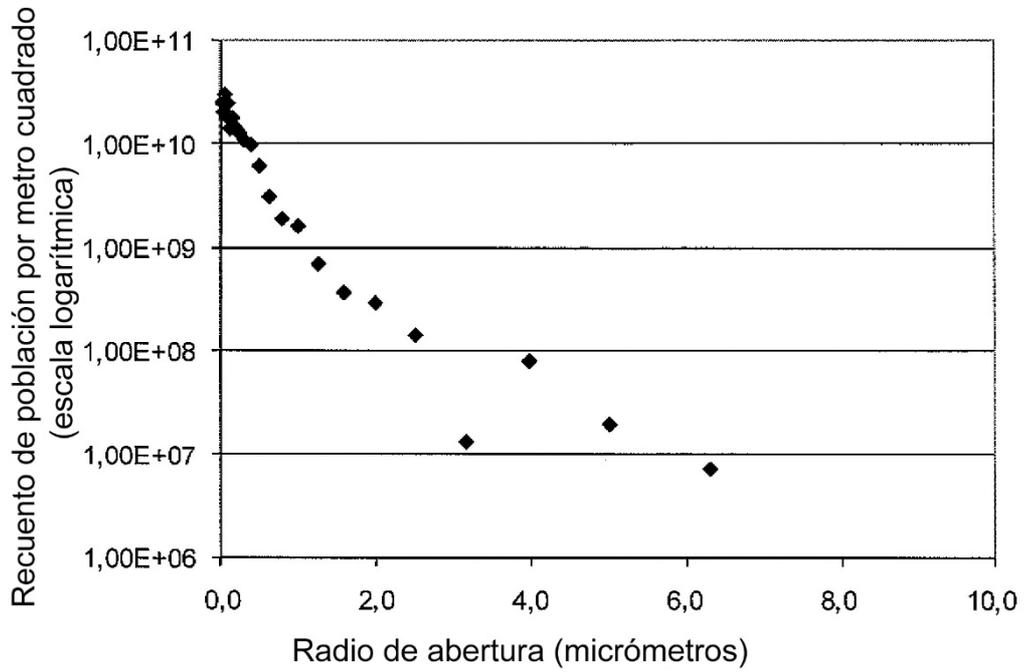


FIG.3

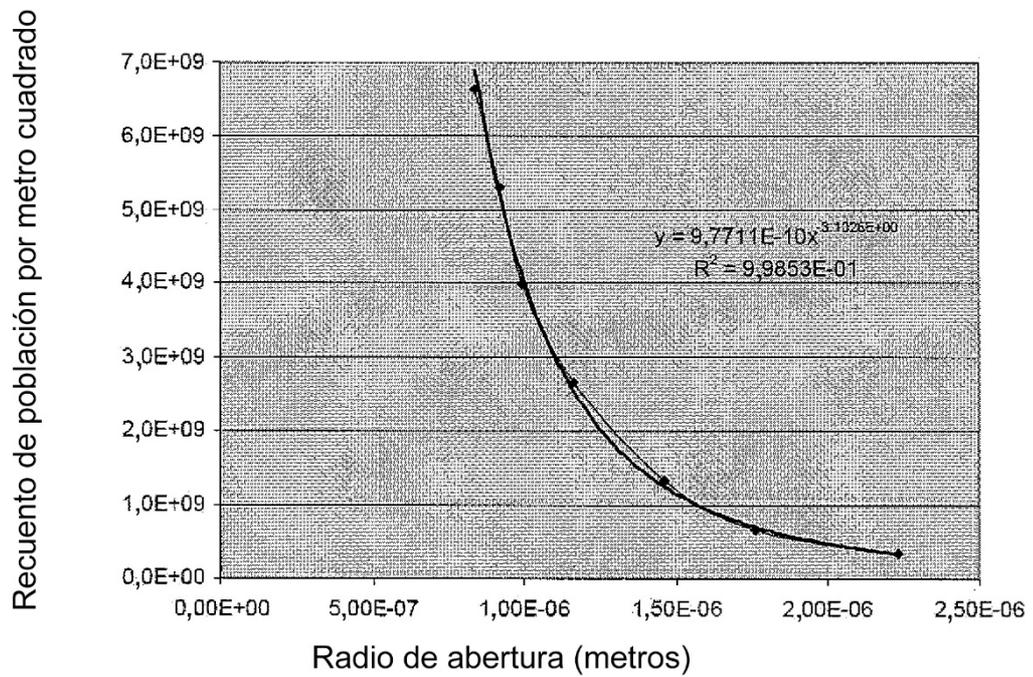


FIG.4

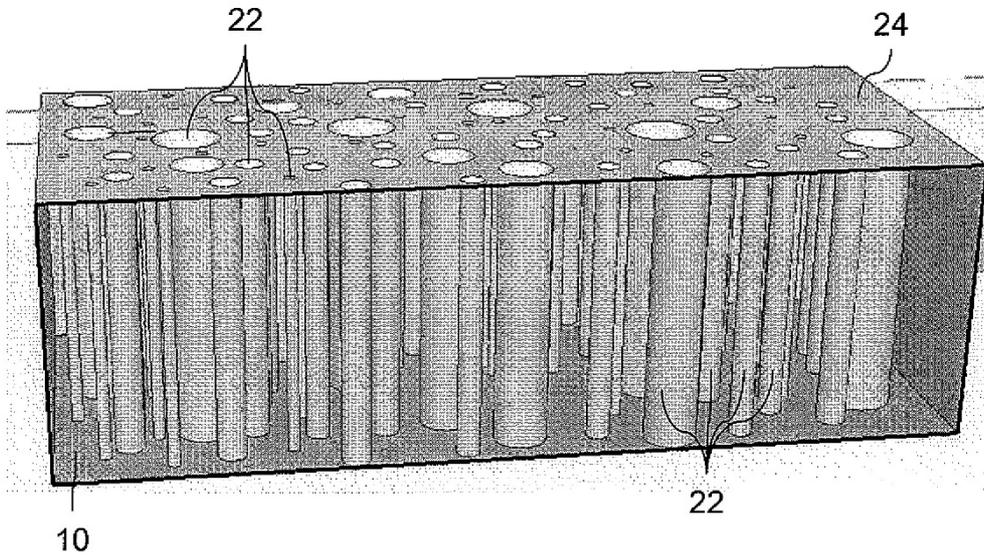


FIG. 5

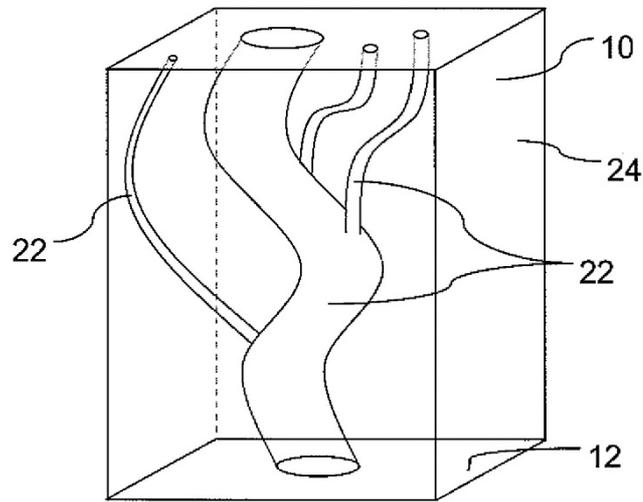


FIG. 6

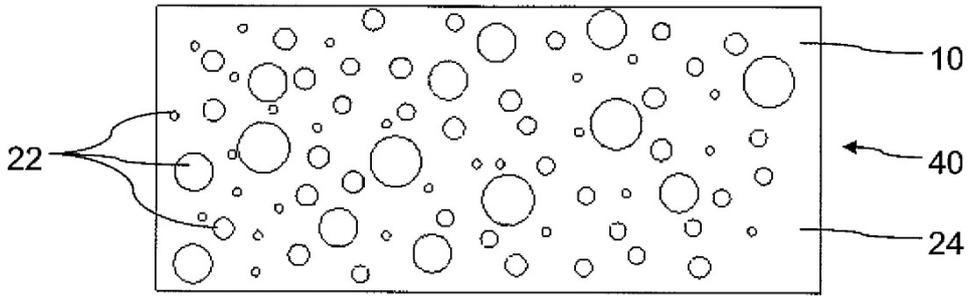


FIG. 7a

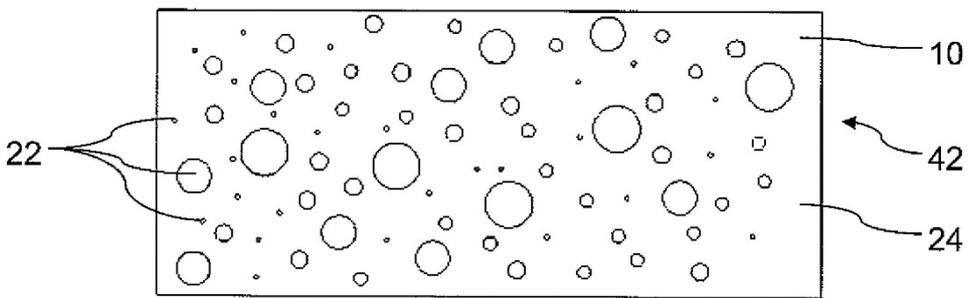


FIG. 7b

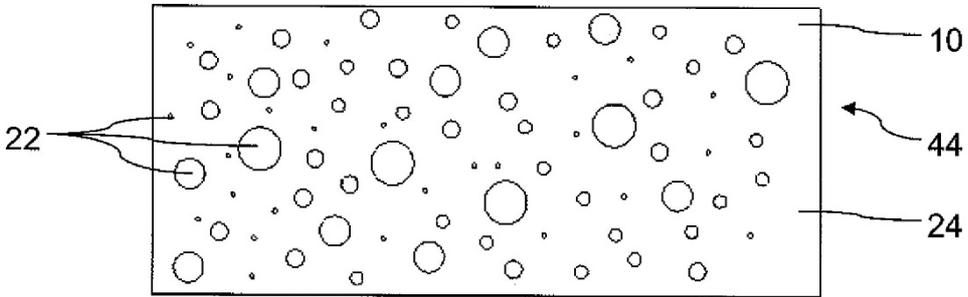


FIG. 7c

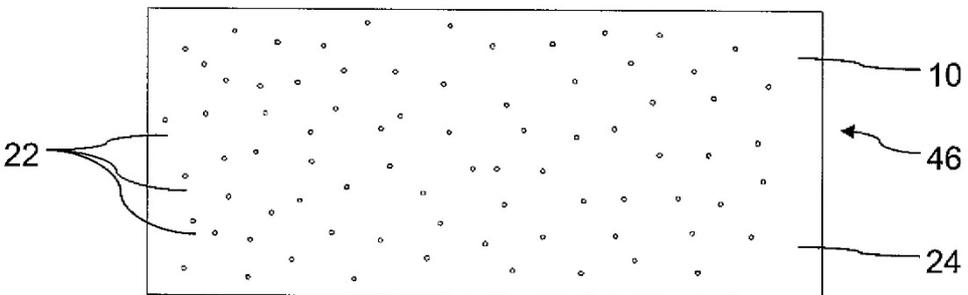


FIG. 8

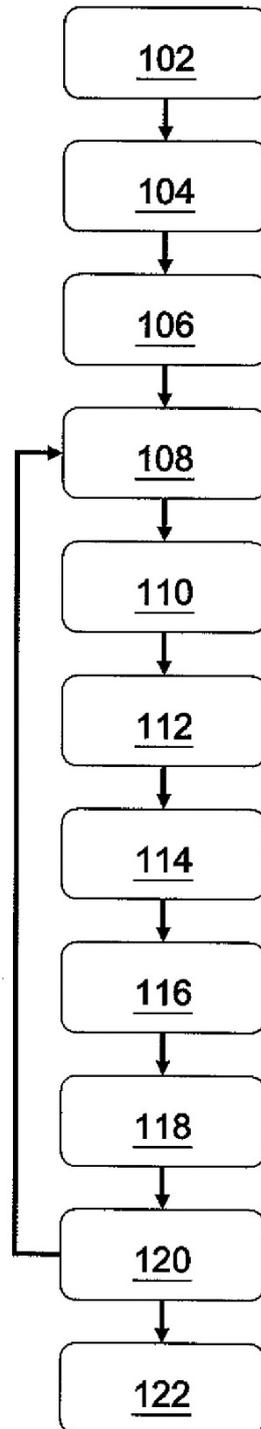


FIG.9

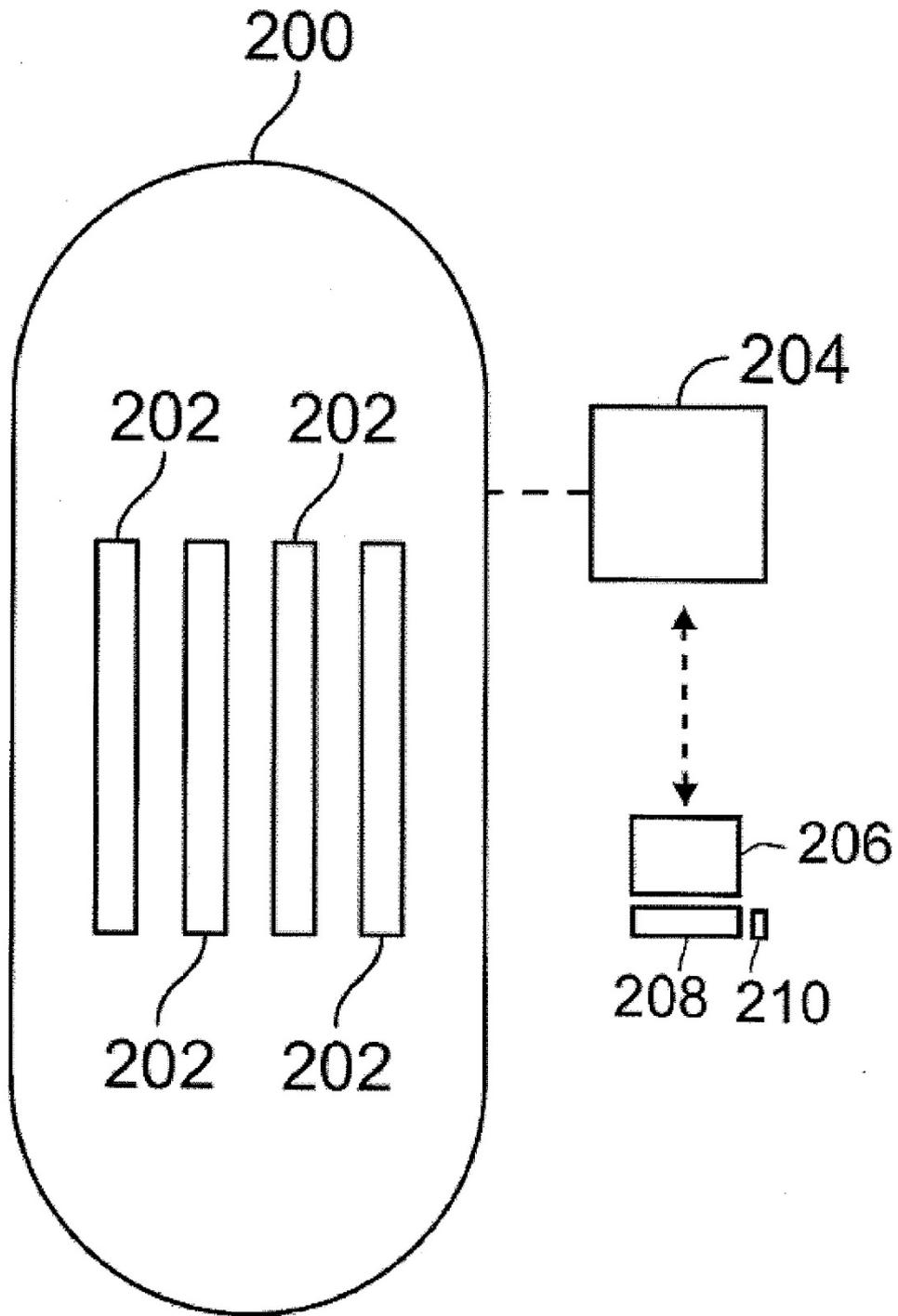


FIG.10

FIG.11

AREVA BWR Crud Model Chemistry	
0.030000	Bulk Coolant Total Iron [ppm]
0.016133	Bulk Coolant Dissolved Iron [ppm] (calculated)
0.013867	Bulk Coolant Particle Iron [ppm] (calculated)
0.220000	Bulk Coolant Total Zinc [ppm]
0.220000	Bulk Coolant Dissolved Zinc [ppm] (calculated)
0.001000	Bulk Coolant Particle Zinc [ppm] (calculated)
0.500000	Bulk Coolant Total Silicon [ppm]
0.500000	Bulk Coolant Dissolved Silica [ppm] (calculated)
0.001000	Bulk Coolant Particle SiO2 [ppm] (calculated)
0.005200	Bulk Coolant Total Copper [ppm]
0.005200	Bulk Coolant Dissolved Copper [ppm] (calculated)
0.001000	Bulk Coolant Particle Copper [ppm] (calculated)
0.400000	Bulk Coolant H2O2 [ppm]
0.010000	Bulk Coolant H2 [ppm]
0.100000	Bulk Coolant O2 [ppm]
0.026098	The Ox (calculated)
Close	

FIG.12

AREVA BWR Crud Model Geometry	
3.0000E-07	Minimum Chimney Radius (m)
2.5000E-08	Radius Increment (m)
1.6250E-06	Maximum Chimney Radius (m) (calculated)
53	Chimney Members (n) (calculated)
0.91	Initial porosity (calculated)
1.0000E-04	Maximum Crud Thickness (m)
1.0000E-06	Crud Thickness Increment (m)
0.09	Initial tortuosity (calculated)
Close	

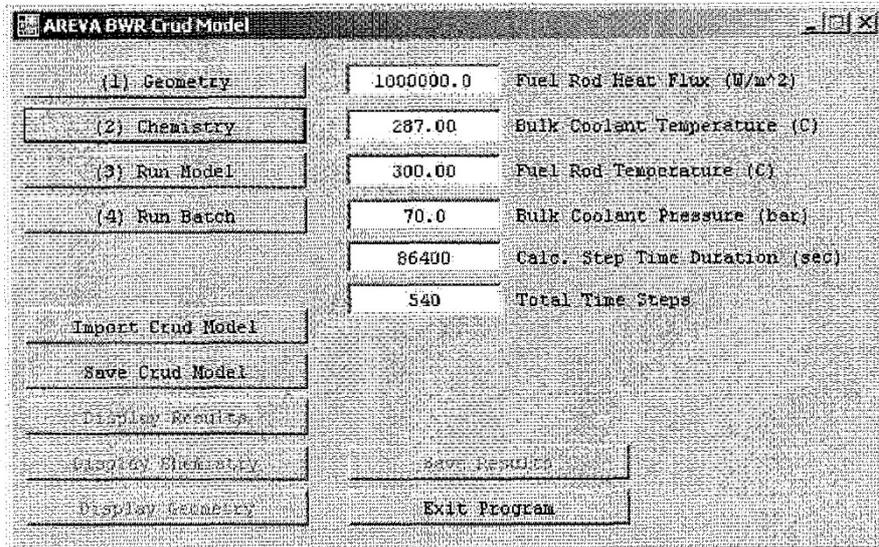


FIG.13

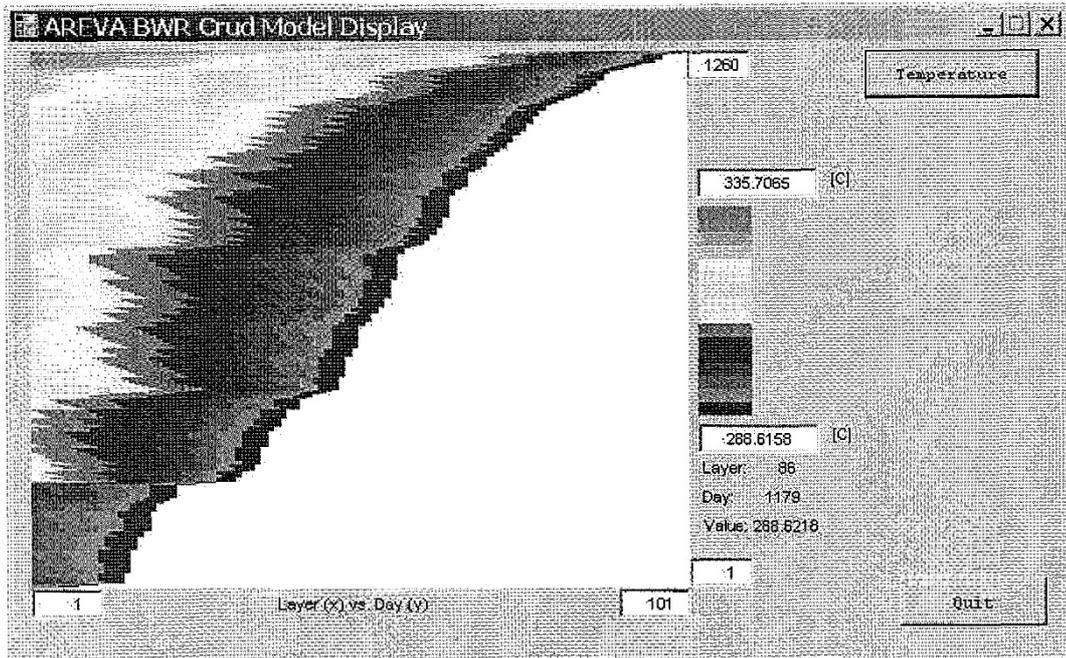


FIG.14

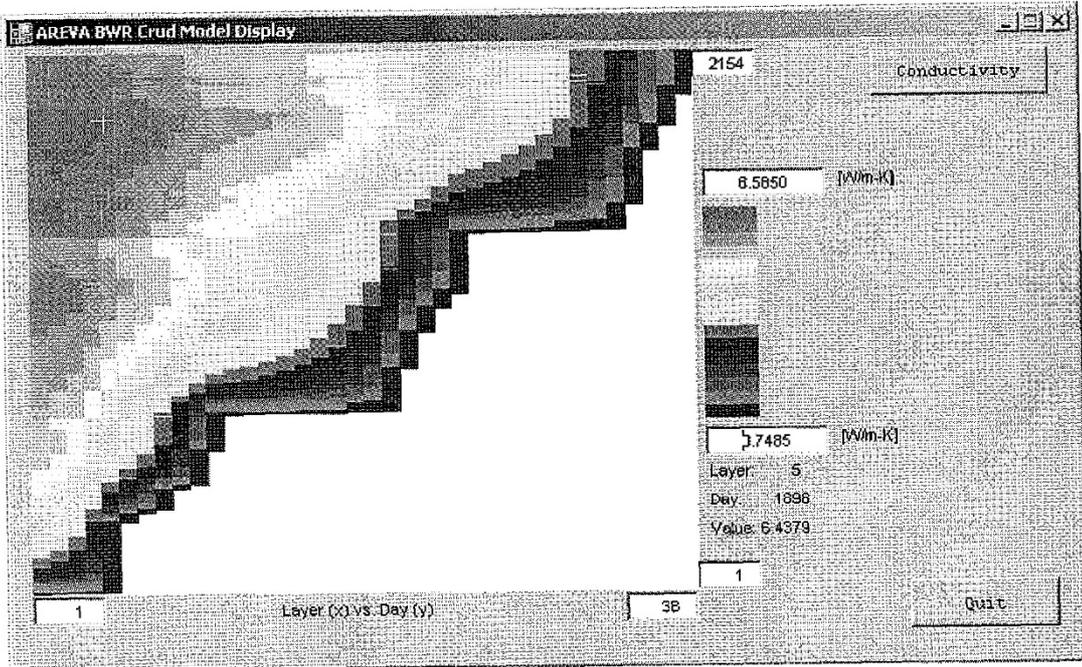


FIG.15

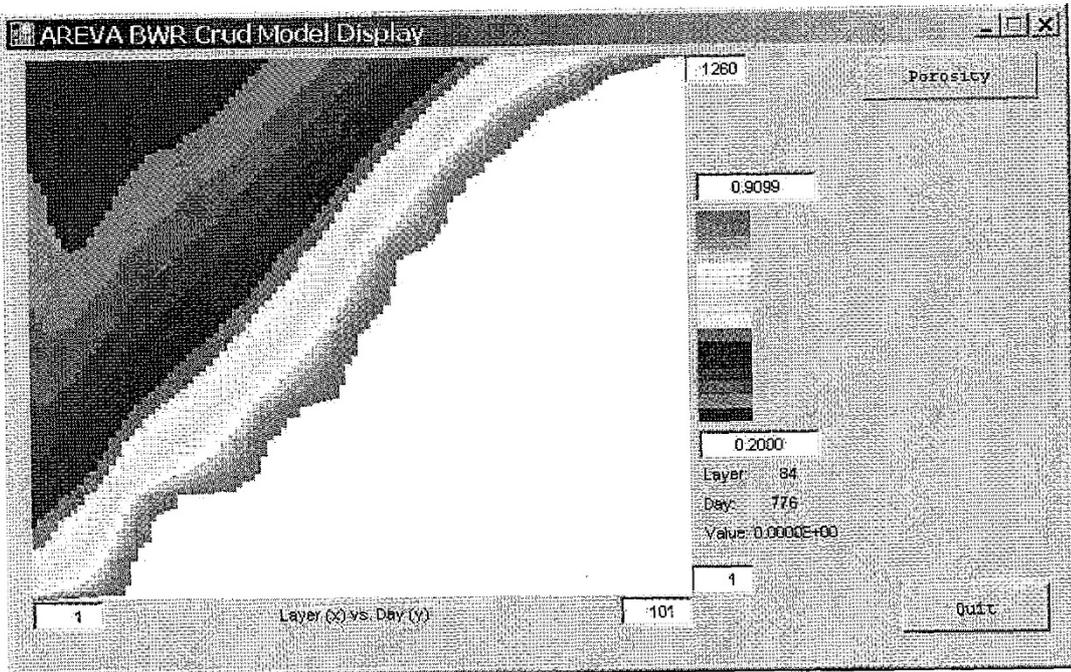


FIG.16

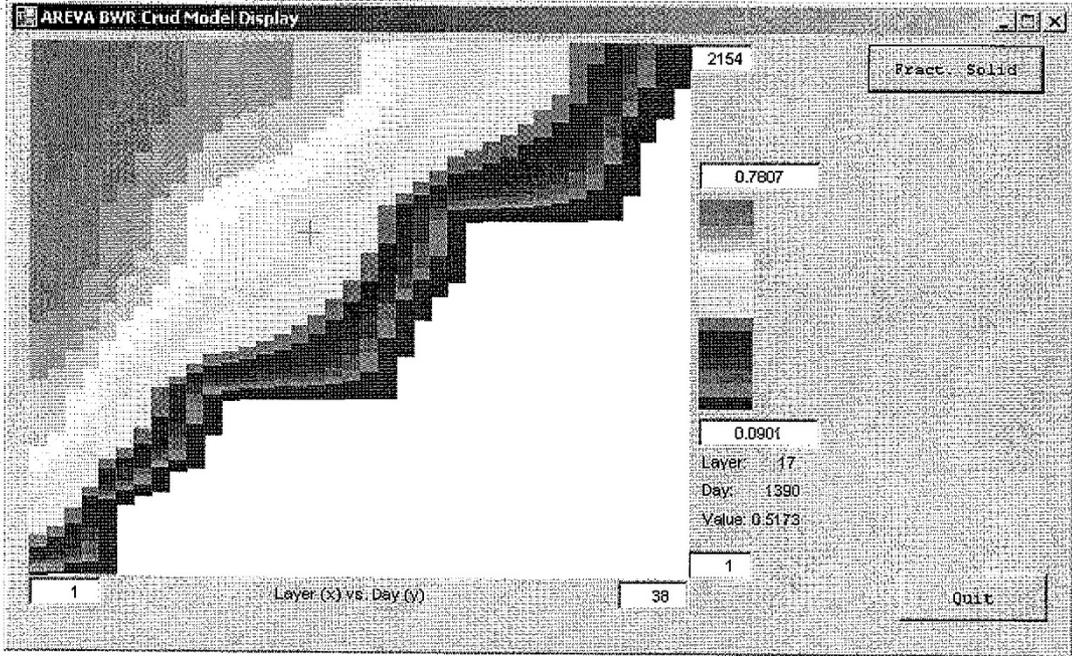


FIG.17

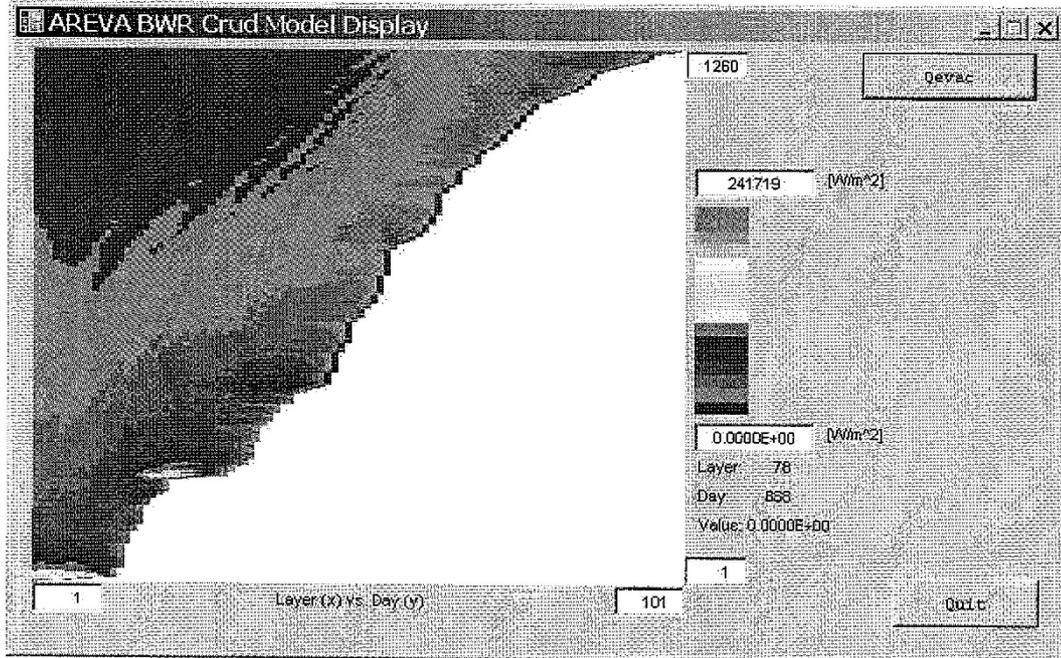


FIG.18

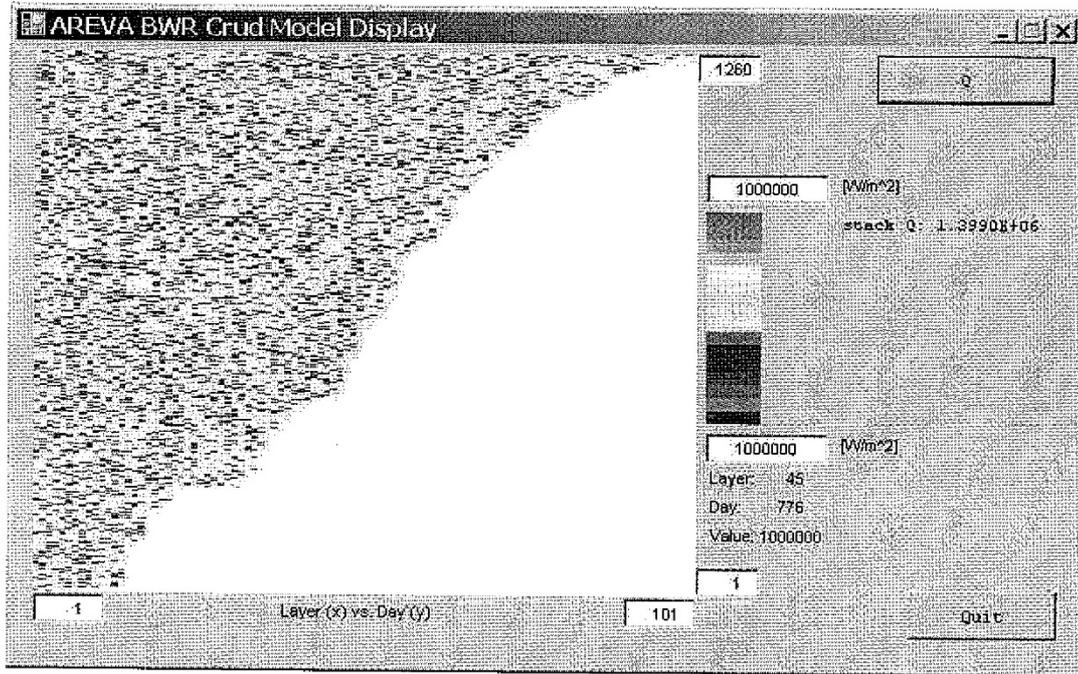


FIG.19

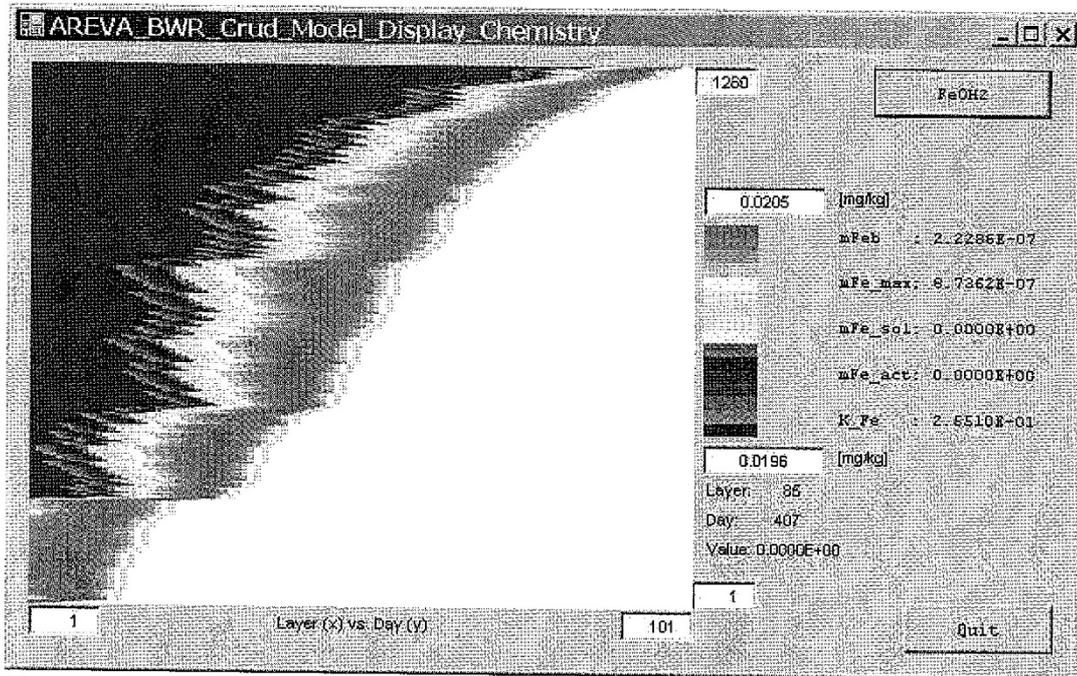


FIG.20

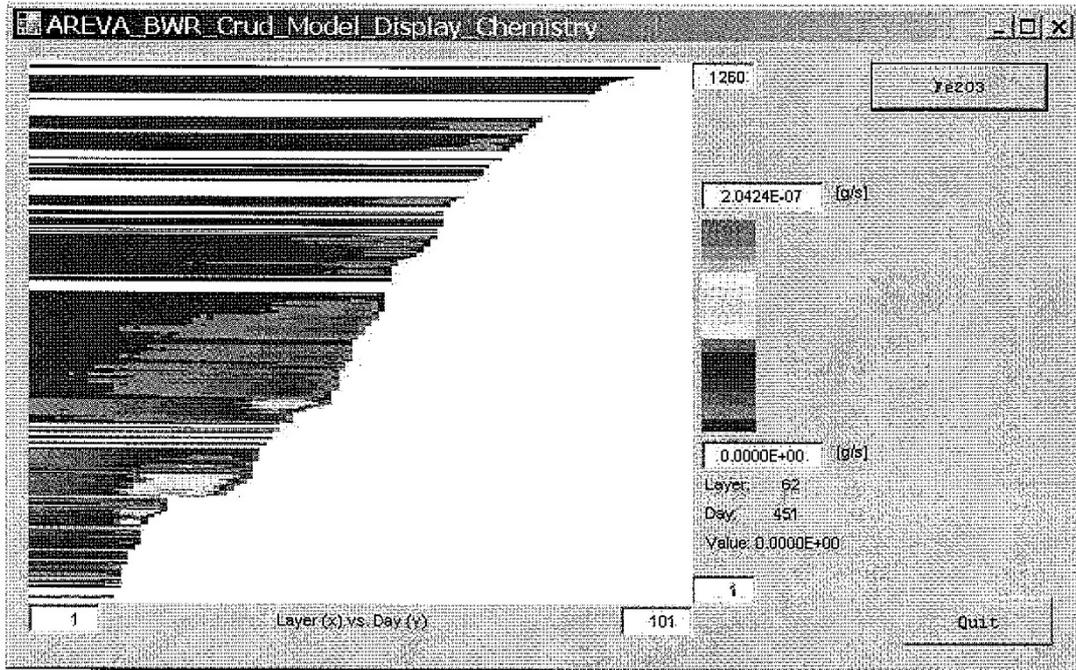


FIG.21

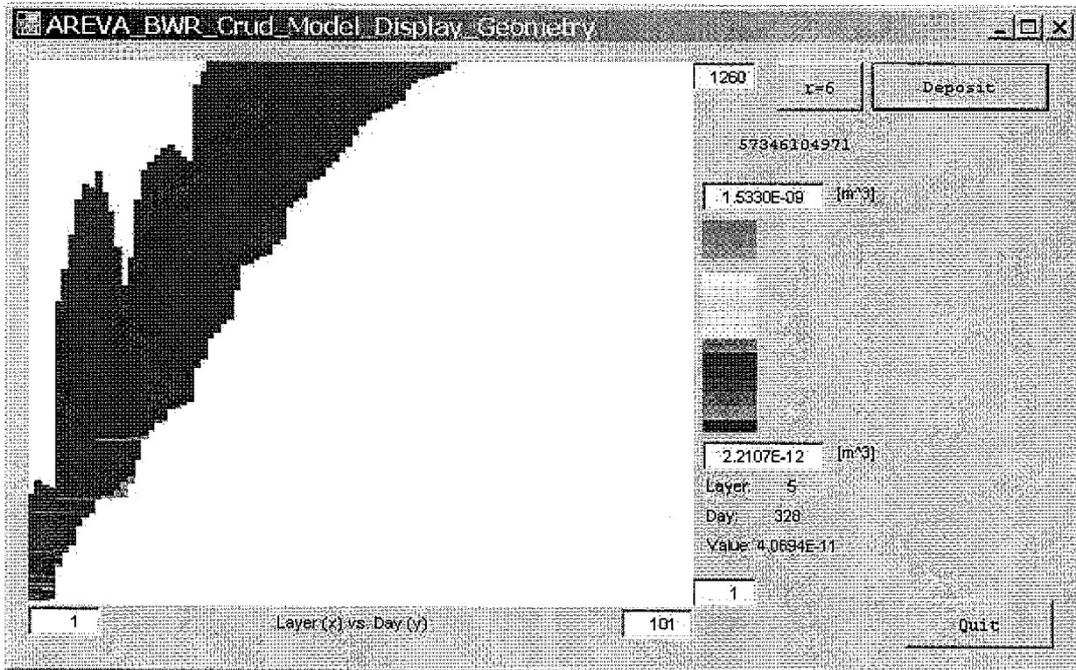


FIG.22

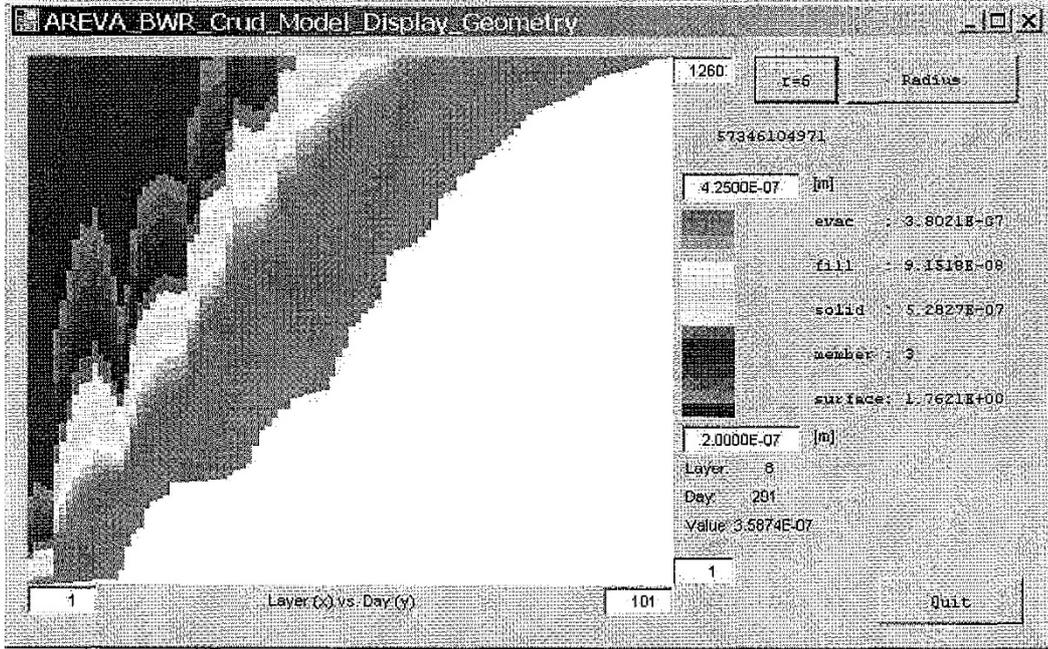


FIG.23

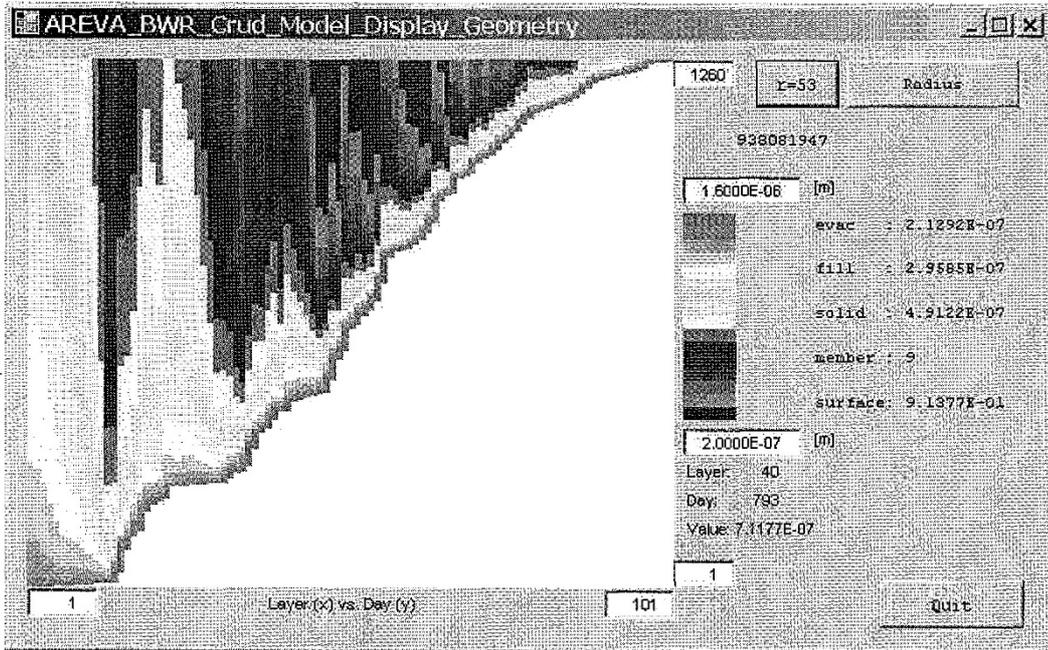


FIG.24