



**República Federativa do Brasil**  
Ministério da Indústria, Comércio Exterior  
e Serviços  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) PI 0511684-8 B1**

**(22) Data do Depósito:** 13/05/2005

**(45) Data de Concessão:** 20/06/2017



---

**(54) Título:** METODO DE TRATAMENTO DE MATERIAL IRRADIADO

**(51) Int.Cl.:** G21F 9/18

**(30) Prioridade Unionista:** 30/05/2004 ZA 2004/3296

**(73) Titular(es):** PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PROPRIETARY) LIMITED

**(72) Inventor(es):** MICHAEL PHILIP; LESZEK ANDRZEJ KUCZYNSKI; FRANCIS PIETER VAN RAVENSWAAY

## **MÉTODO DE TRATAMENTO DE MATERIAL IRRADIADO**

[001] Esta invenção se refere a um método de tratamento de dejetos radioativos. Mais particularmente, a invenção se refere a um método de tratamento de material estrutural irradiado de um reator nuclear, a um método de tratamento de dejetos radioativos e a um método de tratamento de elementos de combustível nuclear usado.

[002] De acordo com um aspecto da invenção, é fornecido um método de tratamento de material irradiado, método esse que inclui as etapas de:

reduzir material irradiado à forma particulada para produzir material irradiado particulado;

suspender o material irradiado particulado ou derivados dele, num fluido para formar uma suspensão; e

remover radioisótopos da suspensão através de tratamento biológico.

[003] Tipicamente o material irradiado será material de grafite derivado de um componente estrutural de um reator nuclear, ex., uma coluna moderadora central do núcleo do reator ou um refletor superior, lateral ou inferior de um núcleo de reator, de um elemento de combustível nuclear compreendendo grafite e material físsil (incorporado em partículas de combustível) ou de elementos moderadores. O material inicial de grafite será então tipicamente na forma de blocos, no caso da grafite derivado de componentes estruturais, ou esferas, no caso de elementos de combustível nuclear e elementos moderadores.

[004] O método pode incluir a etapa de reduzir o tamanho do material irradiado particulado suspenso no fluido anteriormente à remoção de radioisótopos da suspensão. Reduzir o tamanho do material irradiado particulado pode incluir moer ou triturar as partículas em suspensão.

[005] Quando o material irradiado é derivado de elementos de combustível nuclear compreendendo material de grafite e partículas de combustível dispersas nele, tipicamente tanto o material irradiado particulado

de grafite, ou derivados dele, quanto as partículas de combustível estarão presentes na suspensão de fluido e o método pode então incluir a etapa de separar as partículas de combustível da suspensão antes de remover os radioisótopos da suspensão ou antes de reduzir o tamanho do material irradiado particulado de grafite em suspensão, se for o caso.

[006] O método pode incluir expor as partículas de combustível separadas à radiação de nêutron de modo a induzir transmutações nucleares de produtos de fissão para espécies de vida mais curta. A radiação de nêutron pode ter uma energia de no máximo 4 eV. O método pode incluir extrair o calor gerado durante a ascensão de nêutron pelos produtos de fissão para utilização em corrente ou processos externos.

[007] O material irradiado pode ser reduzido a material irradiado particulado com um tamanho de no máximo 3mm. Reduzir o material irradiado a material irradiado particulado pode incluir esmagar o material irradiado. Por outro lado, reduzir o material irradiado à forma particulada pode incluir suspender o material irradiado num meio líquido e sujeitar o material irradiado a vibrações mecânicas. As vibrações podem ser vibrações de baixa frequência. Por outro lado, as vibrações podem ser vibrações de alta frequência, ou ultrassônicas. Em outra representação, o material irradiado pode ser reduzido à forma particulada através de campos elétricos de pulsação de alta frequência, ex. "iluminação artificial". Em ainda outra representação, reduzir o material irradiado à forma particulada pode incluir aquecer o material irradiado e aplicar um fluido de baixa temperatura a uma superfície do material irradiado aquecido. Mais particularmente, o fluido de baixa temperatura pode ser hélio líquido. O hélio líquido pode ser pressurizado. O material irradiado pode ser aquecido através de radiação de microondas.

[008] Ainda em outra representação, reduzir o material irradiado à forma particulada pode incluir esfriar o material irradiado até uma temperatura entre cerca de -250 graus Celsius e cerca de -270 graus Celsius e então

rapidamente aquecer o material irradiado a uma temperatura entre cerca de 180 graus e cerca de 200 graus. Resfriar o material irradiado pode incluir imergir o material irradiado num fluido refrigerante a uma temperatura entre cerca de -250 graus Celsius e cerca de -270 graus Celsius. Rapidamente aquecer o material irradiado pode incluir imergir o material irradiado num meio fluido que é aquecido a entre cerca de 180 graus Celsius e cerca de 200 graus Celsius.

[009] Suspende o material irradiado particulado ou seus derivados em fluido pode incluir formar uma emulsão do material irradiado particulado num líquido. O líquido pode ser fornecido por um emulsificador/surfactante, como aquele disponível sob o nome de 'EKOL35N'. O método pode incluir a etapa de, antes de formar a emulsão, aquecer o material irradiado particulado a cerca de 200 graus Celsius. Tipicamente, o material irradiado incluirá material de grafite compreendendo grafite natural e grafite pirolítico ligado por uma resina carbonizada. A resina carbonizada, bem como as ligações na estrutura de cristal de grafite, podem ser quebradas pelo emulsificador enquanto o material particulado de grafite está em suspensão no emulsificador.

[010] Por outro lado, suspender o material irradiado particulado ou derivados dele num fluido pode incluir aquecer o material irradiado particulado na presença de um agente oxidante como, por exemplo, flúor ou gás de oxigênio, para produzir derivados de material irradiado particulado numa suspensão gasosa, ex. derivados de partículas de grafite composto de carbono e/ou produtos de oxidação gasosa de carbono tais como CO e CO<sub>2</sub>. O material irradiado particulado pode ser aquecido sob pressão.

[011] Remover radioisótopos da suspensão pode incluir direcionar a suspensão para um trajeto de escoamento, defletindo os radioisótopos da suspensão para uma zona de coleta de isótopos definida ao longo de uma extensão do trajeto de escoamento, e coletando isótopos na zona de coleta de isótopos.

[012] Coletar os radioisótopos pode incluir embeber os isótopos num leito para depósito de isótopos. O leito de depósito de isótopos pode incluir pelo menos uma camada de um material resistente à difusão de isótopos. O material resistente à difusão de isótopos pode ser selecionado no grupo consistindo de grafite, cromo, platina, uma liga de cromo, carboneto de silício, SiN, SiFC e diamantes de carbono. Preferivelmente o leito de depósito de isótopos compreende uma primeira camada de grafite, uma segunda camada de um material selecionado do grupo consistindo de cromo, platina, uma liga de cromo, mercúrio e sódio líquido, e uma terceira camada de um material selecionado do grupo consistindo de carboneto de silício, SiN, SiFC e diamante. A segunda camada pode fornecer uma camada intermediária intercalada entre a primeira camada e a terceira camada. A primeira camada fornecerá tipicamente uma camada operativamente interna e a terceira camada fornecerá tipicamente uma camada operativamente externa adjacente ao trajeto de escoamento. Numa representação, o leito de depósito de isótopos inclui pelo menos uma camada de material de depósito fluido, o método incluindo então remover e substituir o material de depósito fluido do leito de depósito de isótopos. Mais particularmente, o método pode incluir circular o material de depósito fluido. Circular o material de depósito fluido pode incluir sujeitar o material de depósito fluido a uma etapa secundária de remoção de isótopos, que inclui direcionar o material de depósito fluido através de um trajeto de escoamento, defletindo isótopos do material de depósito fluido em direção a uma zona de coleta de isótopos ou séries de zonas de coleta de isótopos definidas ao longo da extensão do trajeto de escoamento, e coletando isótopos na zona de coleta de isótopos.

[013] Por outro lado, coletar os radioisótopos pode incluir fornecer uma passagem contínua e canalizar os isótopos para ela. Canalizar os radioisótopos para a passagem contínua pode incluir aplicar o campo magnético através da passagem contínua.

[014] Defletir os radioisótopos da suspensão pode incluir aplicar um campo magnético através do trajeto de escoamento de modo que os isótopos carregados são magneticamente defletidos no trajeto de escoamento. Quando os isótopos são magneticamente defletidos na zona de coleta de isótopos, o método pode incluir a etapa anterior de passar a suspensão, contendo os radioisótopos, através de um ionizador de isótopos, como por exemplo, uma fonte de nêutron ou uma radiação eletromagnética, mais particularmente emissor de raio X ou UV.

[015] Aplicar o campo magnético pode incluir colocar pelo menos um magneto permanente em relação de deflexão magnética com o trajeto de escoamento. Por outro lado, aplicar o campo magnético pode incluir colocar pelo menos um eletromagneto em relação de deflexão magnética com o trajeto de escoamento. Aplicar o campo magnético pode então incluir pulsar o campo magnético.

[016] Remover radioisótopos da suspensão por tratamento biológico pode incluir separar o material irradiado particulado da suspensão, misturar o assim separado material irradiado particulado com água para produzir uma pasta, e então tratar biologicamente a pasta. Quando a suspensão compreender derivados do material irradiado particulado em suspensão gasosa, remover radioisótopos da suspensão por tratamento biológico pode incluir dissolver a suspensão gasosa em água para produzir uma pasta e então tratar biologicamente a pasta.

[017] Tratar biologicamente a pasta pode incluir passar a pasta por um biofiltro. Por “biofiltro” deve-se entender um dispositivo de filtragem que emprega organismos vivos, ex. bactérias, para consumir/quebrar as partículas na pasta bem como capturar contaminantes a serem removidos da pasta. Mais particularmente, os organismos/bactérias podem capturar radioisótopos, ex. átomos mais pesados do que carbono-12, tais como carbono-14, contidos na pasta. Tipicamente, o biofiltro compreenderá elementos de filtro membranoso

impregnados com microorganismos e/ou canais de escoamento de pasta cobertos com microorganismos através ou com os quais a pasta terá que passar.

[018] O método pode incluir medir os níveis de radioisótopos presentes na pasta após o tratamento biológico da pasta e, onde os níveis excederem a um valor máximo predeterminado, reciclar a pasta para outro tratamento biológico.

[019] A invenção será agora descrita, a título de exemplo, com referência aos desenhos diagramáticos em anexo.

[020] Nos desenhos,

[021] A Figura 1 mostra uma representação esquemática das etapas seqüenciais num método de tratar material de grafite irradiado de acordo com a invenção;

[022] A Figura 2 mostra uma representação esquemática das etapas seqüenciais em outro método de tratar material de grafite irradiado de acordo com a invenção;

[023] A Figura 3 mostra uma visão tridimensional de parte do trajeto de escoamento através do qual a suspensão deve passar de acordo com um método da invenção;

[024] A Figura 4 mostra uma seção longitudinal através de parte de um trajeto de escoamento através do qual uma suspensão deve passar de acordo com um método da invenção;

[025] A Figura 5 mostra uma visão esquemática de um campo magnético aplicado através da parte do trajeto de escoamento da Figura 3 de acordo com o método da invenção e de deflexões de partículas carregadas naquela parte do trajeto de escoamento em seção longitudinal tridimensional; e,

[026] A Figura 6 mostra uma seção longitudinal através de parte de outro trajeto de escoamento ao longo do qual uma suspensão deve passar de acordo com um método da invenção.

[027] Na Figura 1, o numeral de referência 10 se refere geralmente a um método de tratamento de material de grafite irradiado de acordo com a invenção. Em 12, o material de grafite irradiado, tipicamente originário de um componente estrutural de um reator nuclear, ex. uma coluna central do núcleo do reator ou refletor lateral, de um elemento moderador de grafite, ou de um elemento de combustível nuclear compreendendo grafite e material físsil, incorporado em partículas de combustível, é reduzido à forma particulada. O material inicial de grafite é tipicamente na forma de blocos, onde o material é derivado de um componente estrutural de reator nuclear, ou esferas no caso de elementos de combustível nuclear ou elementos moderadores. Entretanto, a invenção também é aplicável à grafite de outros formatos.

[028] Em um método da invenção, o material de grafite é reduzido à forma particulada em 12 por trituração mecânica através da utilização de um moinho de campânulas, um britador de mandíbulas, ou outros. Esse método é tipicamente utilizado para blocos de grafite de material estrutural de reator ou elementos moderadores, e conseqüentemente não para material inicial de grafite incorporando partículas de combustível. Os blocos, com tamanho de cerca de 2m x 1m x 1m, ou elementos moderadores são inseridos no triturador e são reduzidos a partículas do tamanho de no máximo 3mm.

[029] Em outro método da invenção, em 12 o material de grafite é suspenso num meio líquido, que é tipicamente fornecido pelo fluido de suspensão (ver abaixo), e é sujeito no interior do meio líquido a vibrações mecânicas causadas por ondas de baixa freqüência que resultam na trituração do material de grafite para produzir partículas. Esse método é tipicamente utilizado para elementos de combustível nuclear esféricos.

[030] Por outro lado, o material de grafite no interior do meio líquido pode ser sujeito a vibrações mecânicas causadas por ondas de alta freqüência, ou ultra-sônicas, com resultado similar na trituração e redução do material de

grafite à forma particulada. Esse método é tipicamente utilizado para blocos de grafite de material estrutural de reator.

[031] Ainda em outra representação da invenção, o material a ser reduzido à forma particulada é sujeito a campos elétricos de alta frequência, ex. iluminação artificial.

[032] Em outro método ainda, o material de grafite é reduzido à forma particulada pelo aquecimento em 12, através de radiação de microondas a cerca de 600 graus Celsius, e simultaneamente aplicando um fluido de baixa temperatura, como hélio líquido pressurizado, ex. borrifando com esguichos, numa superfície do material de grafite. Isso tem o efeito de quebrar e “descascar” camadas do material de grafite de uma maneira rápida. Esse método é tipicamente usado tanto para blocos de grafite de material estrutural de reator quanto para elementos de combustível nuclear esféricos e elementos moderadores.

[033] Em outro método ainda, o material de grafite é reduzido à forma particulada em 12 pelo resfriamento do material de grafite a uma temperatura entre cerca de -250 graus Celsius e cerca de -270 graus Celsius imergindo o material de grafite num fluido refrigerante nessa temperatura, e então rapidamente aquecendo o material de grafite a uma temperatura entre cerca de 180 graus Celsius e cerca de 200 graus Celsius. O material de grafite é aquecido rapidamente, após o resfriamento, pela imersão num meio fluido que é aquecido até entre cerca de 180 graus Celsius e cerca de 200 graus Celsius e que, numa representação, é fornecido pelo emulsificante (descrito abaixo). Esse método é tipicamente usado tanto para blocos de grafite de material estrutural de reator quanto para elementos de combustível nuclear esféricos e elementos moderadores.

[034] Em 14, o material particulado de grafite é aquecido a entre cerca de 180 graus Celsius e cerca de 200 graus Celsius e é suspenso num líquido fornecido por um emulsificante, para formar uma emulsão de material

particulado de grafite no líquido. O emulsificante pode ser o emulsificante disponível com o nome de 'EKOL35N'. Naturalmente, entretanto, qualquer outro emulsificante adequado pode ser utilizado. Tipicamente, o material de grafite inclui tanto a grafite natural quanto a grafite pirolítico que são ligados por uma resina carbonizada. O emulsificante age para quebrar a resina carbonizada e as ligações na estrutura de cristal de grafite. O calor facilita esse processo de quebra e o material particulado de grafite produzido pela quebra química é suspenso no emulsificante/líquido. Em temperaturas entre 160 graus Celsius e 200 graus Celsius a emulsão/suspensão possui uma viscosidade comparável à da água.

[035] Quando o material de grafite é derivado de elementos de combustível nuclear, as partículas de combustível de material físsil que constituem parte dos elementos de combustível e conseqüentemente são mantidas em suspensão junto com o material particulado de grafite, são filtradas da suspensão em 16. As partículas de combustível são opcionalmente suspensas num gás condutor de hélio e alimentadas através de um reator de transmutação, ou o assim chamado "incinerador actínídeo", ou são transferidas para latas para serem passadas através do reator de transmutação a granel em 18. Aqui as partículas são expostas a radiação de nêutron para induzir transmutações nucleares de produtos de fissão de vida longa contidos nas partículas de combustível. A radiação de nêutron tipicamente possui uma energia de no máximo 4eV de modo que induz a ascensão de nêutron sem a substituição associada de partículas sub-atômicas e o resultante início de reações em cadeia. Observar-se-á que a ascensão de nêutron proporciona vida longa aos produtos/actínídeos de fissão contidos nas partículas de combustível em espécies radioativas com meias-vidas mais curtas. O depositante acredita que isso servirá efetivamente para reduzir o número de actínídeos presentes nas partículas de combustível a níveis aceitáveis para o armazenamento a longo prazo. Tipicamente o calor é gerado durante essa

ascensão de nêutron e transmutação nuclear, e esse calor pode ser extraído para utilização em processos a jusante ou externos, como, por exemplo, processos de dessalinação ou geração de força.

[036] Em 20, a suspensão de material particulado de grafite é alimentada através de um dispositivo de moagem e é sujeita a uma ou mais etapas de moagem. A suspensão é tipicamente passada através de uma bomba que bombeia a suspensão/emulsão através do dispositivo de moagem. Cada etapa de moagem reduz o tamanho do material particulado de grafite na emulsão/suspensão. Após sucessivas etapas de moagem as partículas de grafite tipicamente têm um tamanho de no máximo cerca de 4 nanômetros.

[037] Em 22, a suspensão refinada que contem radioisótopos é primeiramente passada através de um ionizador de isótopos, fornecido, por exemplo, por uma fonte de fóton, uma fonte de nêutron, uma fonte de calor ou uma fonte de radiação eletromagnética, como um raio X ou um emissor de UV. A suspensão é passada em seguida por um trajeto de escoamento em relação de deflexão magnética no qual é colocado um dispositivo de deflexão magnética para defletir partículas carregadas, incluindo radioisótopos carregados, da suspensão. Um leito de depósito de isótopos é colocado no trajeto de escoamento no qual ou em direção ao qual as partículas carregadas são defletidas e no qual as partículas carregadas são coletadas e retidas. Os radioisótopos são então removidos da suspensão em 22.

[038] É feita referência à Figura 3 dos desenhos, na qual o numeral de referência 150 geralmente se refere a um dispositivo de deflexão magnética para utilização no método da invenção. O dispositivo de deflexão magnética 150 inclui magnetos colocados ao redor do meio de definição de trajeto de escoamento 152 definindo o trajeto de escoamento 154 através do qual a suspensão é direcionada. Os magnetos são magnetos permanentes. Deve-se notar, entretanto, que por outro lado os magnetos podem ser eletromagnetos. O dispositivo de deflexão magnética 150 inclui dois pares 156, 158 de

magnetos de segmento anelar 160 colocados adjacentes ao meio de definição do trajeto de escoamento 152 em posições espaçadas longitudinalmente. Os magnetos 160 de cada par 156, 158 estão localizados em posições diametralmente opostas e são dispostos de modo que os pólos de polaridade oposta dos magnetos 160 se voltem para o interior e para o exterior, respectivamente. Dessa forma, cada par de magnetos 156, 158 um pólo norte direcionado para o exterior e um pólo sul oposto direcionado para o exterior, e um correspondente pólo sul direcionado para o interior e um pólo norte oposto direcionado para o interior, respectivamente. Os pólos de polaridade semelhante dos pares 156, 158 dos magnetos 160 são angularmente afastados. Preferivelmente, como mostrado na Figura 3, os pólos dos magnetos 160 dos pares 156, 158 estão afastados em cerca de 45 graus.

[039] O dispositivo de deflexão magnética 30 inclui também um magneto toroidal 164 colocado ao redor do meio de definição do trajeto de escoamento 152 e longitudinalmente espaçado dos pares de magnetos 156, 158. O dispositivo de deflexão magnética 150 gera um campo magnético no trajeto de escoamento 154. Observar-se-á que uma partícula possuindo uma carga, como um radioisótopo ionizado em suspensão, e se movendo com velocidade através do campo magnético experimentará uma força e será defletida desse trajeto em direção a uma superfície interna do meio de definição do trajeto de escoamento 152.

[040] A Figura 4 dos desenhos mostra parte do meio de definição do trajeto de escoamento 152 em corte transversal longitudinal e, salvo outra indicação, os mesmos numerais de referência utilizados acima em relação à Figura 3 são utilizados para designar partes similares. Uma superfície interna do meio de definição do trajeto de escoamento 152 possui um revestimento de depósito 170. O revestimento de depósito 170 define um leito de depósito de isótopos que fornece por outro lado uma zona de coleta na qual radioisótopos

ionizados podem ser defletidos e embebidos (i.e. coletados e retidos) para serem removidos da suspensão.

[041] O revestimento de depósito 170 compreende uma pluralidade de camadas de materiais que resistem à difusão de radioisótopos. Numa representação preferível, o revestimento 170 inclui uma camada radialmente mais interna 172 de grafite, fornecendo uma zona de assentamento de isótopos ionizados e um desacelerador para os radioisótopos. A camada 172 pode, entretanto, ser formada de qualquer outro material flexível adequado resistente à temperatura. Uma camada intermediária 174 de cromo é intercalada entre a camada de grafite 172 e uma outra camada externa de carbonato de silício 176. Ao invés de cromo, a platina ou uma liga resistente aos danos da radiação, como uma Liga Especial de Cromo, pode ser utilizada. Em outra representação ainda, a camada intermediária 174 é de um material de depósito fluido, como por exemplo, mercúrio ou sódio líquido. O material de depósito fluido é tipicamente circulado e sujeito a uma etapa secundária de remoção de isótopos durante a circulação, na qual o material de depósito fluido é passado através de um trajeto de escoamento, similarmente à suspensão de partículas de grafite, através de um dispositivo de deflexão magnética, através do qual os isótopos contidos no material de depósito fluido (carreados ali tendo sido removidos da suspensão de partículas de grafite) são defletidos na direção de uma zona de coleta de isótopos para serem coletados ali. O carbonato de silício fornece uma camada de barreira externa 176 para inibir a difusão de isótopos ionizados e outros íons através do meio de definição do trajeto de escoamento 152. Ao invés de carbonato de silício, a camada externa pode ser de SiN, SiFC, ou diamante.

[042] Em outra representação da invenção, mostrada na Figura 6 dos desenhos, uma zona de coleta de isótopos é fornecida por outro lado por uma série de alçapões magnéticos espaçados longitudinalmente 200 fornecidos numa superfície interna 206 do meio de definição do trajeto de escoamento

152, cada alçapão magnético 200 tendo uma formação anelar em forma de U 202, com paredes internas magnéticas 204. As formações anelares 202 são colocadas em relação lado a lado contra uma superfície interna 206 do meio de definição do trajeto de escoamento 152 de modo a se estender circunferencialmente em torno do meio de definição do trajeto de escoamento 152 e definir canais periféricos espaçados longitudinalmente 208, cada um fornecendo uma passagem contínua. Um campo magnético é gerado no interior de cada canal 208 pelas paredes internas magnéticas 204 de modo que um isótopo ionizado defletido num canal 208, pelo campo magnético aplicado através do trajeto de escoamento 154, será deslocado ao longo da passagem contínua sob a influência do campo magnético do canal 208.

[043] A Figura 5 dos desenhos ilustra o campo magnético para o dispositivo de deflexão magnético 150 da Figura 3 dos desenhos. Ilustra também os trajetos dos radioisótopos defletidos na suspensão. A Figura 5 possui apenas um propósito ilustrativo, sendo que as partículas para as quais são ilustrados os trajetos são partículas simuladas.

[044] Os radioisótopos removidos em 22 são secos e compactados para armazenamento a longo prazo em 24.

[045] Em 26, o material particulado de grafite é separado da emulsão pela adição de água à emulsão num tanque em separado. Com a adição de água, a emulsão se deposita em três camadas distintas de emulsificante (superior), água (intermediária) e o material particulado de grafite depositado no fundo do tanque de separação. Antes de passar ao 26, uma verificação espectrométrica pode ser conduzida na emulsão. O material particulado de grafite é coletado em 28 e o processo de separar o material particulado de grafite da emulsão é repetido para assegurar que não haja emulsificante remanescente nas partículas de grafite. Em 30, o material particulado de grafite coletado é misturado com água para produzir uma pasta.

[046] Em 32, a pasta é biologicamente tratada passando através de um dispositivo de filtragem biofiltro empregando bactérias como as bactérias do gênero *bacillus*, para consumir/quebrar o material particulado de grafite na pasta depois bem como capturar radioisótopos, tipicamente possuindo átomos mais pesados que o carbono-12 e mais especificamente o carbono-14, contidos na pasta. Qualquer emulsificante remanescente pode impedir a eficiência do biofiltro como um meio de remoção das partículas mais pesadas que o carbono-12. Numa representação, o biofiltro compreende elementos de filtragem membranosos, na forma de bandejas, impregnadas com bactérias e através das quais a pasta é passada. Em outra representação, o biofiltro define canais de fluxo de pasta cobertos com bactérias ao longo dos quais a pasta deve passar.

[047] Preferivelmente, os níveis de radioisótopos presentes na pasta após passar através do biofiltro são detectados e mensurados e comparados com um valor máximo predeterminado, e quando o valor máximo predeterminado é excedido a pasta é reciclada através do biofiltro repetidamente até que níveis aceitáveis sejam atingidos. Se a eficiência do biofiltro cair abaixo de um nível predeterminado isso pode indicar a necessidade de um novo lote de bactérias.

[048] Tipicamente, as bactérias empregadas no biofiltro são mortas pelo contato com átomos mais pesados. De qualquer modo, quaisquer bactérias sobreviventes são extintas imediatamente após o tratamento biológico da pasta para evitar sua mutação.

[049] É feita agora referência à Figura 2 dos desenhos na qual, salvo outra indicação, os mesmos numerais de referência utilizados acima são utilizados para designar etapas similares.

[050] Em 12 o material de grafite é reduzido à forma particulada por métodos similares àqueles descritos com referência à Figura 1 acima.

[051] Em 34, o material particulado de grafite é aquecido sob pressão numa câmara na presença de um agente oxidante gasoso, como por exemplo, oxigênio ou flúor, de modo a produzir compostos de carbono em suspensão gasosa e/ou oxidação gasosa em produtos de carbono.

[052] A suspensão gasosa é passada ao 16 onde partículas de combustível, se presentes, são removidas da suspensão e tratadas em 18 como descrito acima.

[053] Radioisótopos são removidos da resultante suspensão de material particulado de grafite em fluido gasoso em 22, como descrito para a etapa 22 acima em relação à Figura 1.

[054] Em 36, o fluido gasoso contendo o material particulado de grafite em suspensão é dissolvido em água para formar uma pasta. A pasta é passada através de um biofiltro em 32, como para o método da Figura 1.

[055] O material particulado de grafite que emerge do biofiltro 32 é tipicamente seco, comprimido e reconstituído em, por exemplo, componentes estruturais para um reator nuclear.

[056] O depositante acredita que os métodos da invenção fornecerão um meio efetivo para tratar material de dejetos radioativos, mais particularmente radioisótopos contidos em grafite de um reator nuclear ou elementos de combustível nuclear ou elementos moderadores. Acredita-se que os métodos de tratamento da invenção produzirão combustível nuclear que é mais adequado ao armazenamento a longo prazo, o volume do combustível sendo efetivamente reduzido em até cerca de 95% pela remoção do grafite circundante e produtos de fissão de vida longa sendo transmudados em espécies de vida curta de modo que o armazenamento é facilitado. Acredita-se que o material particulado de grafite que emerge do processo da invenção será suscetível de reutilização e pode ser reconstituído como elementos estruturais para um reator nuclear.

[057] Num reator refrigerado a gás, o manuseio do carbono-14, bem como de outros núclídeos, é particularmente importante. Qualquer liberação/escape de carbono-14 para a atmosfera não é desejável de um ponto de vista ambiental e afeta a capacidade de datar pela utilização de métodos de datar carbono. O depositante acredita que o método da invenção, incorporando a etapa do tratamento biológico com bactérias para remover o carbono-14 e outros núclídeos, aliviará esses problemas.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método (10) de tratamento de material irradiado caracterizado pelo método incluir as etapas de:

reduzir (12) o material irradiado a forma particulada para produzir material particulado irradiado;

suspender (14) o material irradiado particulado, ou derivados do mesmo em um fluido para formar uma suspensão;

reduzir (20) o tamanho do material particulado irradiado suspenso; e,

em seguida, remover radioisótopos da suspensão,

separar (26) o material irradiado particulado da suspensão;

misturar (30) o material irradiado particulado assim separado com água para produzir uma lama; e,

tratar biologicamente (32) a lama.

2. Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por o material irradiado incluir material derivado de um componente estrutural de um reator nuclear ou de um combustível nuclear ou elementos moderadores.

3. Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por o material irradiado compreender um material de grafite.

4. Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por o tratamento biológico da lama incluir passar a lama através de um biofiltro.

5. Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por incluir medir os níveis de radioisótopos presentes na lama após tratamento biológico da lama e, onde os níveis excederem a um valor máximo pré-determinado, reciclar a lama para tratamento biológico adicional.

6. Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por a redução do tamanho do material irradiado particulado suspenso incluir moer ou triturar as partículas em suspensão.

7. Método de acordo com a reivindicação 4 caracterizado por incluir, onde o material irradiado for derivado de elementos de combustível nuclear

compreendendo material de grafite e partículas de combustível dispersadas no mesmo, a separação (16) das partículas de combustível da suspensão antes da remoção dos radioisótopos da suspensão.

**8.** Método de acordo com a reivindicação 7 caracterizado por incluir exposição (18) das partículas de combustíveis separadas a uma radiação de nêutron de forma a induzir transmutações nucleares de produtos de fissão para espécies de vida menor.

**9.** Método de acordo com a reivindicação 8 caracterizado por a radiação de nêutron possuir uma energia de mais de 4 eV.

**10.** Método de acordo com a reivindicação 9 caracterizado por incluir extrair calor gerado durante o consumo de nêutron pelos produtos de fissão para uso em processos posteriores ou processos externos.

**11.** Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por a redução do material irradiado para material irradiado particulado incluir amassar o material irradiado.

**12.** Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por a redução do material irradiado para a forma particulada incluir suspender o material irradiado em um meio de líquido e submeter o material irradiado a vibrações mecânicas.

**13.** Método de acordo com a reivindicação 12 caracterizado por as vibrações serem vibrações de baixa frequência.

**14.** Método de acordo com a reivindicação 12 caracterizado por as vibrações serem vibrações de alta frequência.

**15.** Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por a redução do material irradiado para a forma particulada incluir aplicação de campos magnéticos pulsados de alta frequência no material.

**16.** Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por a redução do material irradiado para a forma particulada incluir aquecimento do material

irradiado e aplicação de um fluido de baixa temperatura em uma superfície do material aquecido.

**17.** Método de acordo com a reivindicação 16 caracterizado por o fluido de baixa temperatura ser hélio líquido.

**18.** Método de acordo com a reivindicação 16 caracterizado por o material irradiado ser aquecido por meio de radiação de microondas.

**19.** Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por a redução do material irradiado para a forma particulada incluir refrigeração do material irradiado para uma temperatura entre de  $-250^{\circ}\text{C}$  e  $-270^{\circ}\text{C}$  e, em seguida, aquecimento rápido do material para uma temperatura entre  $180^{\circ}\text{C}$  e  $200^{\circ}\text{C}$ .

**20.** Método de acordo com a reivindicação 19 caracterizado por a refrigeração do material irradiado incluir imersão do material em um fluido refrigerante em uma temperatura entre  $-250^{\circ}\text{C}$  e  $-270^{\circ}\text{C}$ .

**21.** Método de acordo com a reivindicação 19 caracterizado por o aquecimento rápido do material irradiado incluir imersão do material em um meio fluido que é aquecido entre  $180^{\circ}\text{C}$  e  $200^{\circ}\text{C}$ .

**22.** Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por a suspensão de material irradiado particulado ou derivados do mesmo no fluido incluir formar uma emulsão das partículas em um líquido.

**23.** Método de acordo com a reivindicação 22 caracterizado por antes de formar a emulsão, aquecer as partículas a  $200^{\circ}\text{C}$ .

**24.** Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por quando a suspensão compreender material irradiado particulado ou derivados do material irradiado particulado em suspensão gasosa, a remoção de radioisótopos da suspensão por tratamento biológico inclui dissolução da suspensão gasosa em água para produzir uma lama e em seguida tratar biologicamente a lama.

**25.** Método de acordo com a reivindicação 24 caracterizado por a suspensão de material irradiado particulado ou derivados do mesmo no fluido, incluir aquecimento do material irradiado particulado na presença de um agente

oxidante para produzir derivados de material irradiado particulado na suspensão gasosa.

**26.** Método de acordo com a reivindicação 1 caracterizado por incluir remoção (22) de radioisótopos da suspensão antes do tratamento biológico da suspensão por direcionamento da suspensão ao longo de um percurso de fluxo, desviar radioisótopos da suspensão em direção a uma zona de coleta de isótopos definida ao longo de um comprimento do percurso de fluxo, e coletar isótopos na zona de coleta de isótopos.

**27.** Método de acordo com a reivindicação 26 caracterizado por a coleta de radioisótopos incluir incrustar os isótopos em um leito de deposição de isótopos (170) que inclui ao menos uma camada de um material resistente a difusão de isótopos selecionado do grupo consistindo de grafite, cromo, platina, uma liga de cromo, carbetto de silício, SiN, SiFC e diamante.

**28.** Método de acordo com a reivindicação 27 caracterizado por incluir, quando o leito de deposição de radioisótopo incluir ao menos uma camada de material de deposição de fluido, a remoção e substituição do material de deposição de fluido do leito de deposição de isótopo.

**29.** Método de acordo com a reivindicação 28 caracterizado por incluir circular o material de deposição de fluido e submeter o material de deposição de fluido a uma etapa secundária de remoção de isótopo, que inclui direcionar o material de deposição de fluido ao longo de um percurso de fluxo, desviar os isótopos do material de deposição de fluido em direção a uma zona de coleta de isótopo ou uma serie de zonas de coleta de isótopo definidas ao longo do comprimento do percurso de fluxo, e coletar dos isótopos na zona de coleta de isótopo.

**30.** Método de acordo com a reivindicação 26 caracterizado por a coleta de radioisótopos incluir proporcionar uma passagem sem fim e canalizar os isótopos na mesma.

**31.** Método de acordo com a reivindicação 30 caracterizado por a canalização dos radioisótopos na passagem sem fim incluir aplicar um campo magnético através da passagem sem fim.

**32.** Método de acordo com a reivindicação 26 caracterizado por o desvio de radioisótopos da suspensão, incluir a aplicação de um campo magnético através do percurso de fluxo tal que os isótopos carregados são magneticamente desviados no percurso de fluxo.

**33.** Método de tratamento de material irradiado caracterizado por incluir as etapas de:

reduzir (12) o material irradiado a forma particulada para produzir material particulado irradiado;

suspender (34) o material irradiado particulado, ou derivados do mesmo em um gás para formar uma suspensão gasosa;

dissolver (36) a suspensão gasosa em água para produzir uma lama; e, em seguida, tratar biologicamente (32) a lama, para remover radioisótopos da suspensão.

**34.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por o tratamento biológico da lama incluir passar a lama através de um biofiltro.

**35.** Método de acordo com a reivindicação 34 caracterizado por incluir medir os níveis de radioisótopos presentes na lama após tratamento biológico da lama e, onde os níveis excederem a um valor máximo pré-determinado, reciclar a lama para tratamento biológico adicional.

**36.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por incluir a etapa de redução do tamanho do material irradiado particulado suspenso em um fluido antes da remoção de radioisótopos da suspensão.

**37.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por a redução do tamanho do material irradiado particulado suspenso incluir moagem ou trituração das partículas em suspensão.

**38.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por incluir, onde o material irradiado for derivado de elementos de combustível nuclear compreendendo material de grafite e partículas de combustível dispersadas no mesmo, a separação (16) das partículas de combustível da suspensão antes da remoção dos radioisótopos da suspensão.

**39.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por a redução do material irradiado para material irradiado particulado incluir amassar o material irradiado.

**40.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por a redução do material irradiado para a forma particulada incluir suspender o material irradiado em um meio de líquido e submeter o material irradiado a vibrações mecânicas.

**41.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por a redução do material irradiado para a forma particulada incluir aplicar campos elétricos pulsados de alta frequência.

**42.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por a redução do material irradiado para a forma particulada incluir aquecimento do material irradiado e aplicação de um fluido de baixa temperatura em uma superfície do material aquecido.

**43.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por a redução do material irradiado para a forma particulada incluir refrigeração do material irradiado para uma temperatura entre  $-250^{\circ}\text{C}$  e  $-270^{\circ}\text{C}$  e, em seguida, aquecimento rápido do material para uma temperatura entre  $180^{\circ}\text{C}$  e  $200^{\circ}\text{C}$ .

**44.** Método de acordo com a reivindicação 33 caracterizado por a suspensão de material irradiado particulado ou derivados do mesmo no fluido, incluir aquecimento do material irradiado particulado na presença de um agente oxidante para produzir derivados de material irradiado particulado na suspensão gasosa.

**45.** Método de acordo com a reivindicação 31 caracterizado por incluir remover (22) radioisótopos da suspensão antes do tratamento biológico da suspensão pelo direcionamento da suspensão ao longo do percurso de fluxo, desviar radioisótopos da suspensão em direção a uma zona de coleta de isótopo ao longo de um comprimento do percurso de fluxo, e coletar isótopos na zona de coleta de isótopos.

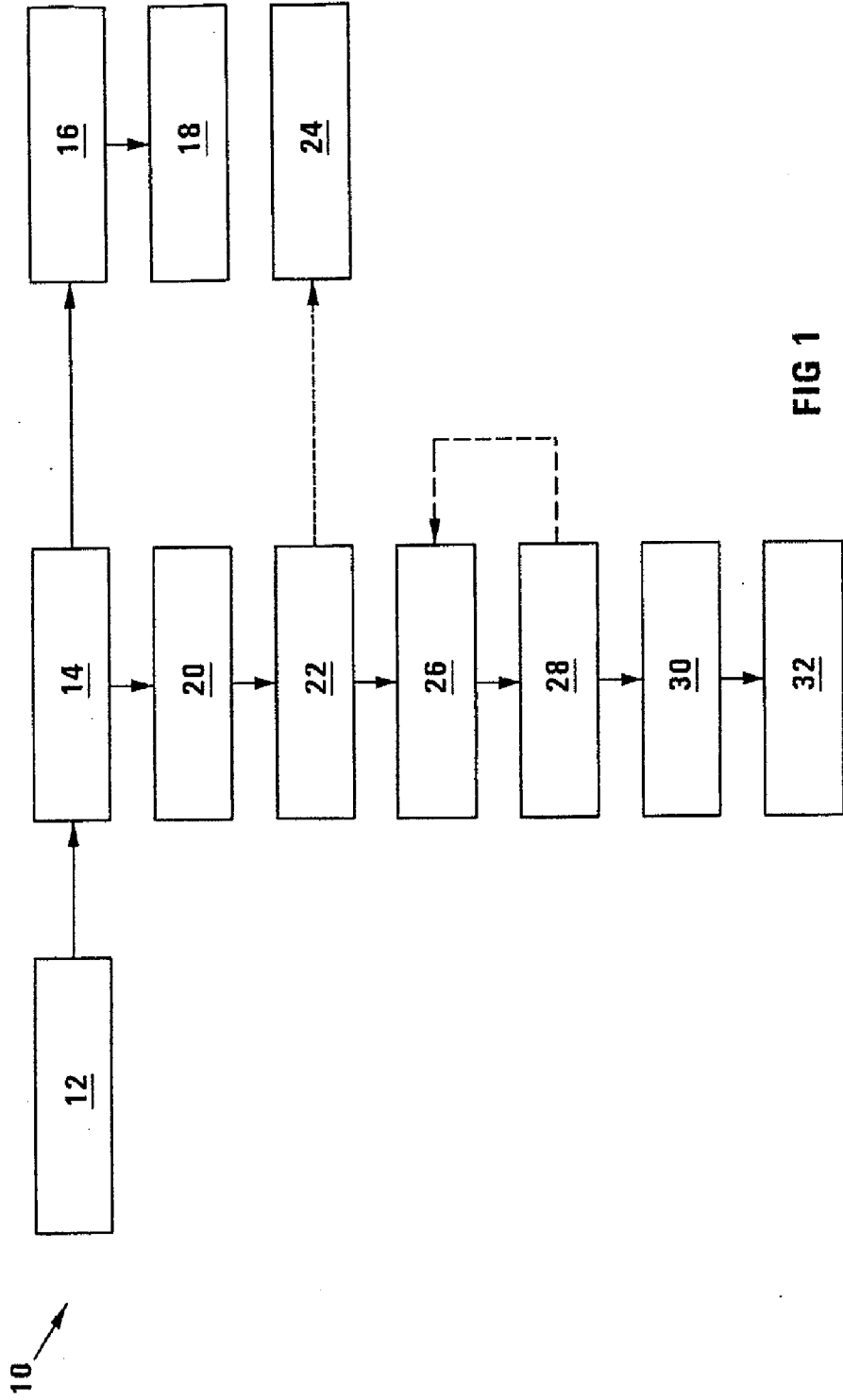


FIG 1

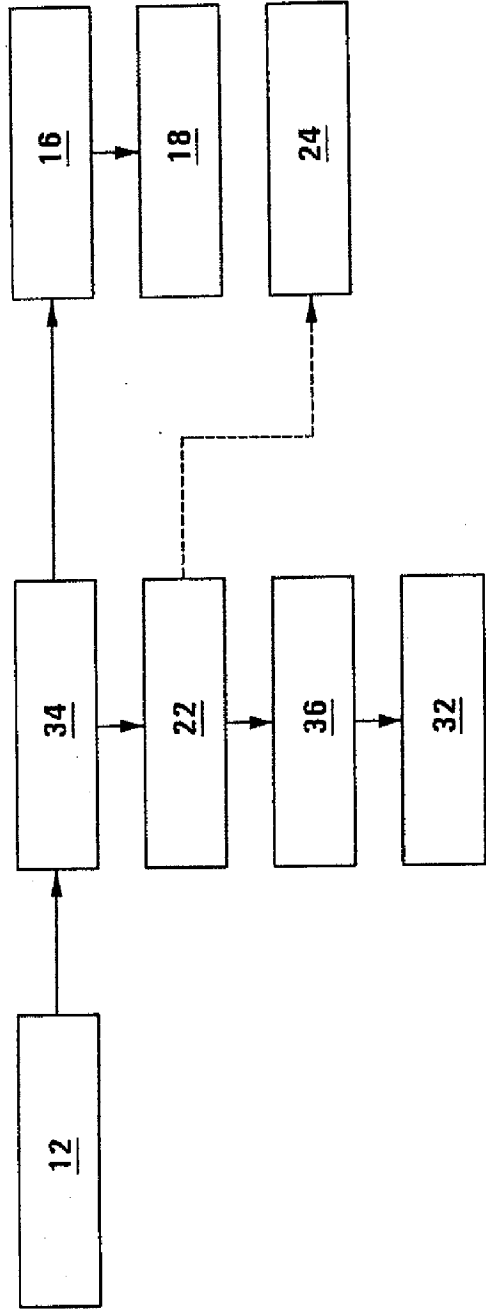


FIG 2

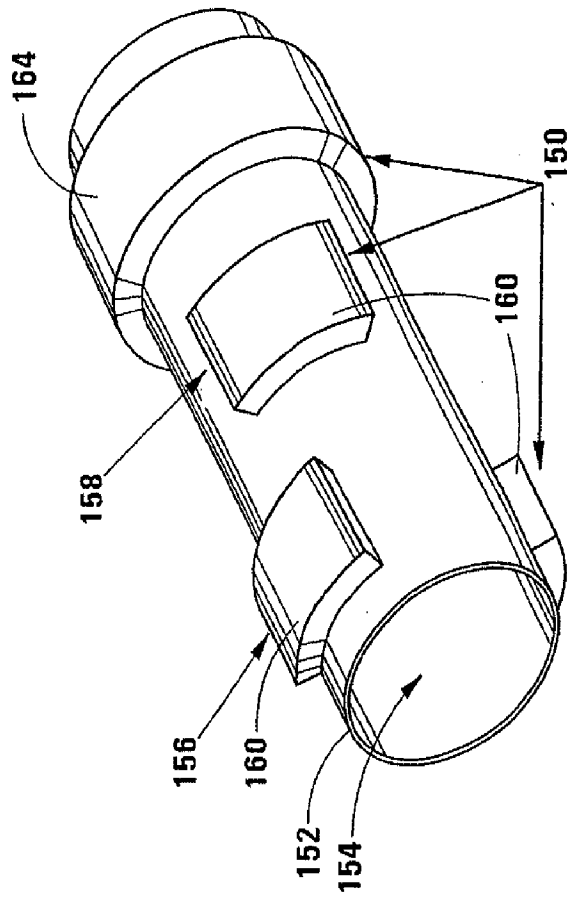


FIG 3

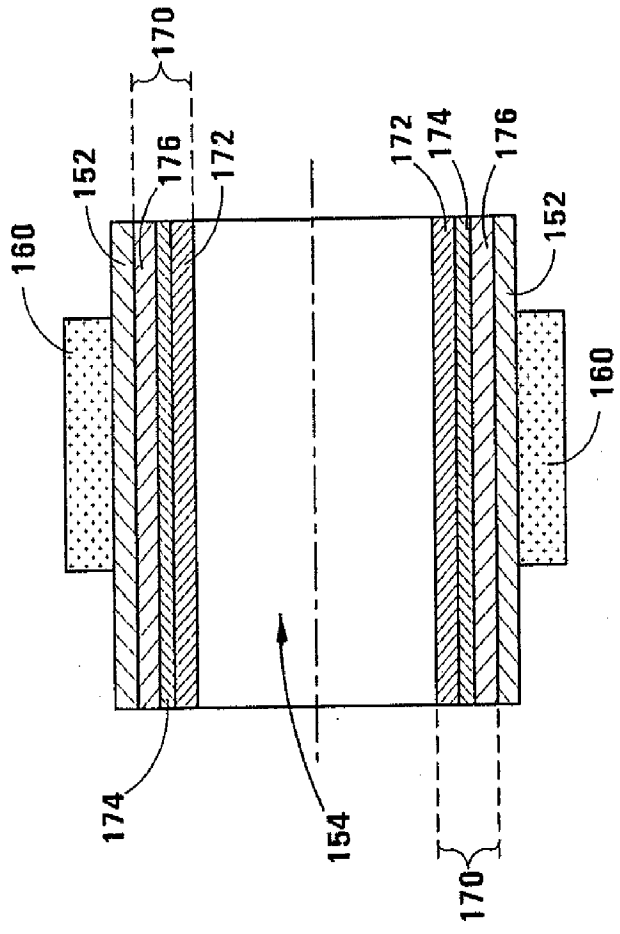


FIG 4

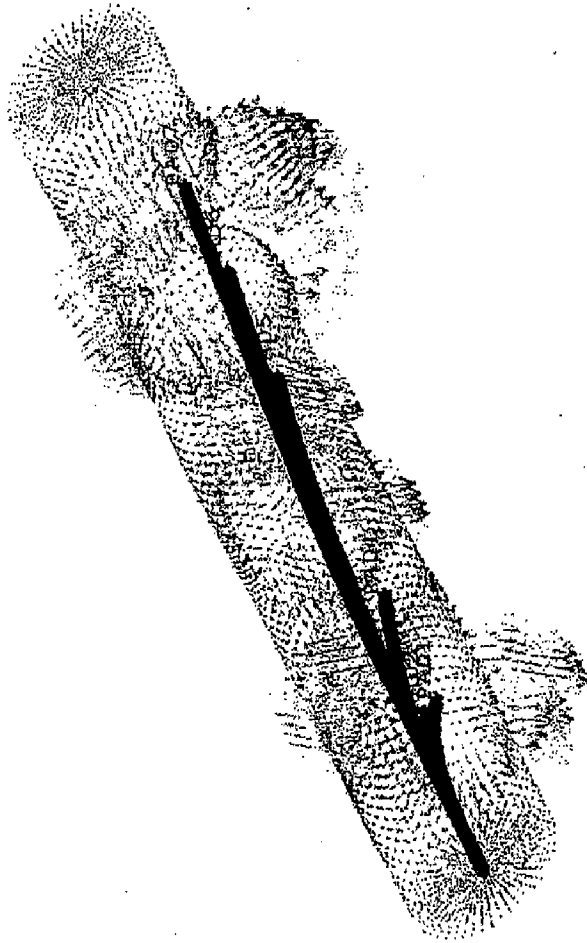


FIG 5

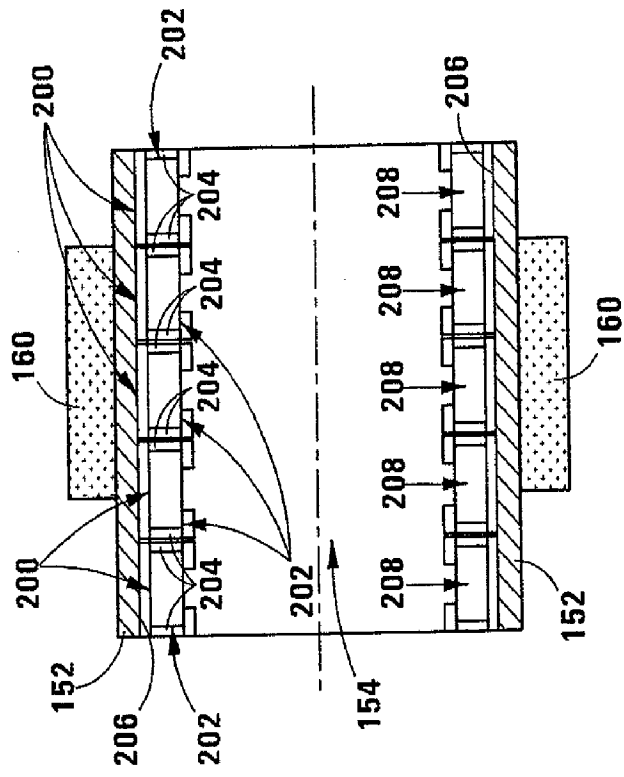


FIG 6