



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2013 00360

(22) Data de depozit: 15.11.2011

(30) Prioritate:

15.11.2010 US 61/413 803

(41) Data publicării cererii:

30.01.2014 BOPI nr. 1/2014

(86) Cerere internațională PCT:

Nr. CA 2011/001262 15.11.2011

(87) Publicare internațională:

Nr. WO 2012/065249 24.05.2012

(71) Solicitant:

• ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED,
2251 SPEAKMAN DRIVE, MISSISSAUGA,
ONTARIO, CA

(72) Inventatori:

• BOUBCHER MUSTAPHA,
4680 BRACKNELL ROAD, BURLINGTON,
ONTARIO, CA;

• KURAN SERMET,

946 PORCUPINE AVENUE, MISSISSAUGA,
ONTARIO, CA;

• COTTRELL CATHY, 79 THOROUGHbred
BOULEVARD, ANCASTER, ONTARIO, CA,
CA;

• BODNER ROBERT R., 2458 BLUE HOLLY
CRESCENT, OAKVILLE, ONTARIO, CA

(74) Mandatar:

NESTOR NESTOR DICULESCU KINGSTON
PETERSEN - CONSILIERE ÎN P.I. S.R.L.,
ȘOS.BUCUREȘTI PLOIEȘTI NR.1A,
BUCHAREST BUSINESS PARK, CORP A,
ET.1, CAMERELE 9 ȘI 10, BUCUREȘTI

(54) COMBUSTIBIL NUCLEAR CONȚINÂND UN ABSORBANT DE NEUTRONI

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un fascicul de combustibil nuclear conținând un absorbant de neutroni. Fasciculul de combustibil, conform invenției, cuprinde elemente de combustibil având un conținut fisionabil de ^{235}U , în care fiecare dintre elementele de combustibil ale fasciculului are un conținut fisionabil de ^{235}U cuprins între 0,9%...5% în greutate, și în care cel puțin unul dintre elementele de combustibil este un element de combustibil din uraniu slab îmbogățit, incluzând un absorbant de neutroni într-o concentrație mai mare de aproximativ 5,0% în volum.

Revendicări: 27

Figuri: 5

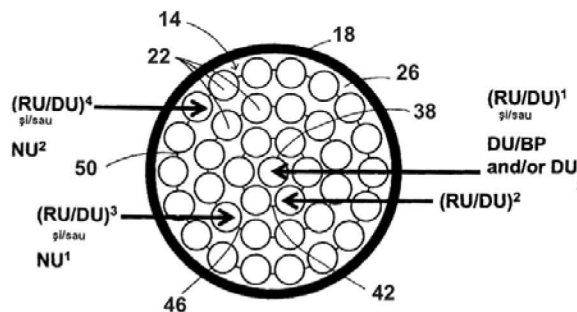


Fig. 1

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



COMBUSTIBIL NUCLEAR CONȚINÂND UN ABSORBANT DE NEUTRONI

GENERALITĂȚI

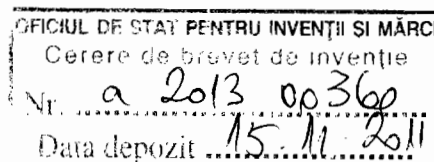
Reactoarele nucleare generează energie dintr-o reacție nucleară în lanț (ex. fisiune nucleară) în care un neutron liber este absorbit de nucleul unui atom fisionabil, cum ar fi Uranium-235 (^{235}U). Când neutronul liber este absorbit, atomul fisionabil se scindează în atomi mai ușori și eliberează mai mulți neutroni liberi care se absorb de către alți atomi fisionabili, rezultând o reacție nucleară în lanț, după cum este bine înțeles din stadiul tehnicii. Energia termică eliberată din reacția nucleară în lanț este convertită în energie electrică printr-un număr de alte procese, de asemenea, cunoscute specialiștilor în domeniu.

Apariția reactoarelor cu putere nucleară adaptate să ardă combustibil nuclear având niveluri cu conținut fisionabil scăzut (ex., atât de scăzut cât cel al uraniului natural) a generat multe noi surse de combustibil nuclear inflamabil. Aceste surse includ deșeuri de uraniu sau uraniu reciclat din alte reactoare. Acest lucru nu este numai atractiv din punct de vedere al costurilor, dar și din punct de vedere al capacității de a recicla, în esență, uraniul uzat înapoi în ciclul combustibilului. Reciclarea combustibilului nuclear uzat reprezintă un contrast puternic față de stocarea în instalații valoroase și cu contaminare limitată cu deșeuri nucleare.

Pentru aceste motive, precum și pentru orice alte motive, combustibilul nuclear și tehnologiile de procesare a combustibilului nuclear care susțin practicile de reciclare a combustibilului nuclear și de ardere a respectivului combustibil în reactoare nucleare continuă să reprezinte o dezvoltare binevenită a stadiului tehnicii.

REZUMAT

În unele moduri de realizare a prezentei invenții, se asigură un fascicul de combustibil pentru un reactor nuclear, care cuprinde o multitudine de elemente de combustibil fiecare incluzând un primă componentă de combustibil de uraniu reciclat; și o a doua componentă de combustibil din cel puțin unul dintre uraniu sărăcit și uraniu natural amestecate cu prima componentă de combustibil, în care prima și cea de a doua componentă amestecate au un prim conținut fisionabil de mai puțin de 1,2% în greutate de ^{235}U .



Unele moduri de realizare a prezentei invenții asigură un fascicul de combustibil pentru un reactor nuclear, în care fasciculul de combustibil cuprinde un prim element de combustibil incluzând uraniu reciclat, primul element de combustibil având un prim conținut fisionabil de nu mai puțin de 0,72% în greutate de ^{235}U ; și un al doilea element de combustibil incluzând cel puțin unul dintre uraniu sărăcit și uraniu natural, cel de al doilea element de combustibil având un al doilea conținut fisionabil nu mai mare de 0,71% în greutate de ^{235}U .

Unele exemple de realizare a prezentei invenții asigură un combustibil nuclear pentru un reactor nuclear în care combustibilul nuclear cuprinde elemente de combustibil având un conținut fisionabil de ^{235}U și fiecare dintre elementele de combustibil are un conținut fisionabil de ^{235}U între aproximativ 0,9 % în greutate de % ^{235}U și 5,0 % în greutate ^{235}U . Mai mult decât atât, cel puțin unul dintre elementele de combustibil este un element de combustibil cu uraniu slab îmbogățit otrăvit care include o otrăvă de neutroni într-o concentrație mai mare de aproximativ 5,0 vol%.

Anumite moduri de realizare a prezentei invenții asigură o metodă de operare a unui reactor cu apă grea sub presiune în care este prevăzut un prim fascicul de combustibil care este făcut dintr-o multitudine de elemente de combustibil fiecare având un conținut fisionabil de ^{235}U între aproximativ 0,9% în greutate ^{235}U și 5,0% în greutate ^{235}U , cel puțin unul dintre elementele de combustibil fiind un element de combustibil cu uraniu slab îmbogățit otrăvit incluzând o otrăvă de neutroni într-o concentrație mai mare decât aproximativ 5.0 vol%. Primul fascicul de combustibil este inserat într-un tub de presiune al reactorului nuclear cu apă grea sub presiune. Reactorul nuclear cu apă grea sub presiune funcționează pentru a arde elementele de combustibil, producând o putere utilă cel puțin la fel de mare ca un fascicul de combustibil din uraniu natural în timp ce produce un coeficient negativ de temperatură al combustibilului (FTC), un coeficient negativ de putere (PC) și un coeficient de vid al agentului de răcire (CVR) care este mai mic decât acela dat de funcționarea reactorului nuclear cu apă grea sub presiune cu combustibil de uraniu natural.

În unele moduri de realizare, sunt utilizate oricare dintre fasciculele de combustibil și metodele descrise anterior într-un reactor cu apă grea sub presiune, în care fasciculele de combustibil sunt localizate într-unul sau mai multe tuburi cu apă sub

presiune care trece peste fasciculele de combustibil, absorb căldura din fasciculele de combustibil și funcționează în aval de fasciculele de combustibil.

Alte aspecte ale prezentei invenții vor deveni evidente prin analiza descrierii detaliate și a desenele însoțitoare.

SCURTĂ DESCRIERE A DESENELOR

Fig. 1 este o vedere în secțiune transversală a unui prim mod de realizare a unui fascicul nuclear în conformitate cu invenția, arătând un număr de posibile aranjamente de combustibil în fasciculul de combustibil.

Fig. 2 este o vedere în secțiune transversală a unui al doilea mod de realizare a unui fascicul nuclear în conformitate cu invenția, de asemenea, arătând un număr de posibile aranjamente de combustibil în fasciculul de combustibil.

Fig. 3 este o vedere în secțiune transversală a unui al treilea mod de realizare a unui fascicul nuclear în conformitate cu invenția, de asemenea, arătând un număr de posibile aranjamente de combustibil în fasciculul de combustibil.

Fig. 4 este o vedere în secțiune transversală a unui al patrulea mod de realizare a unui fascicul nuclear în conformitate cu invenția, de asemenea, arătând un număr de posibile aranjamente de combustibil în fasciculul de combustibil.

Fig. 5 este o diagramă schematică a unui reactor nuclear utilizând oricare dintre fasciculele de combustibil din Figurile 1-4.

DESCRIEREA DETALIATĂ

Înainte ca fiecare dintre modurile de realizare a invenției să fie explicate în detaliu, trebuie să se înțeleagă că invenția nu este limitată în aplicarea sa la detaliile modului de realizare și a aranjamentelor prezentate în descrierea următoare sau ilustrate în desenele însoțitoare. Sunt posibile și alte moduri de realizare a invenției, aceasta putând fi pusă în practică sau realizată în diferite feluri.

În prezenta este dezvăluit un număr de combustibili nucleari conform diferitelor moduri de realizare a prezentei invenții. Acești combustibili pot fi utilizați într-o varietate de reactoare nucleare și sunt descriși aici prin referință la reactoarele cu apă grea sub presiune. Astfel de reactoare pot avea, spre exemplu, tuburi orizontale sau verticale sub presiune în care este poziționat combustibilul. Un exemplu de un astfel de reactor este un reactor nuclear Canadian Deuterium Uranium (CANDU), o porțiune a

căruia este prezentată schematic în Fig. 5. Alte tipuri de reactoare pot avea tuburi orizontale sau verticale nepresurizate cu găuri în ele.

Reactoarele nucleare cu apă grea sub presiune sunt doar un tip de reactoare nucleare în care se pot arde diferiții combustibili nucleari ai prezentei invenții. Astfel, astfel de reactoare sunt descrise aici doar pentru exemplificare, înțelegându-se că diferiții combustibili ai prezentei invenții pot fi arși în alte tipuri de reactoare nucleare.

În mod similar, diferiții combustibili ai prezentei invenții descrisă aici pot fi poziționați în orice formă într-un reactor nuclear pentru a fi arși. Doar pentru exemplificare, combustibilul poate fi încărcat în tuburi sau poate fi conținut în alte forme alungite (fiecare dintre acestea fiind în mod obișnuit denumită ca „piciorușe” sau „elemente”, la care se face referire în prezenta, pentru simplitate, doar ca „elemente”). Exemplele de elemente utilizate în unele moduri de realizare a prezentei invenții sunt indicate și 22 în Fig. 1-4 și sunt descrise mai în detaliu mai jos. În cazul combustibilului conținut în tuburi, tuburile pot fi făcute sau pot include zirconiu, un aliaj de zirconiu sau un alt material convenabil sau o combinație de materiale care, în unele cazuri, este caracterizată prin absorbție joasă de neutroni.

Împreună, o multitudine de elemente poate defini un fascicul de combustibil într-un reactor nuclear. Astfel de fascicule de combustibil sunt indicate schematic la reperul 14 în Fig. 5. Elementele fiecărui fasciculul 14 se poate întinde paralel unul cu altul în fascicul. Dacă reactorul include o multitudine de fascicule 14 de combustibil, fasciculele 14 pot fi plasate cap la cap în interiorul unui tub 18 de presiune. În alte tipuri de reactoare, fasciculele 14 de combustibil pot fi aranjate în alte moduri după cum se dorește.

Făcând referire în continuare la Fig. 5, când reactorul 10 este în funcțiune, peste fasciculele 14 de combustibil curge un agent de răcire 14 de tip apă grea pentru a răci elementele de combustibil și pentru a îndepărta căldura din procesul de fisiune. Combustibilii nucleari ai prezentei invenții pot fi, de asemenea, aplicați și reactoarelor cu tuburi sub presiune cu diferite combinații de lichide/gaze în sistemele lor de moderare și transport de căldură. În orice caz, agentul de răcire 26 care absoarbe căldura combustibilul nuclear poate transfera căldura către echipamentul din aval (ex. un

generator 30 de abur), pentru a acționa un motor primar (ex. o turbină 34) pentru a produce energie electrică.

Cererea de brevet de invenție canadiană nr. 2174983, depusă pe 25 aprilie 1996, descrie exemple de fascicule de combustibil pentru un reactor nuclear care pot cuprinde oricare dintre combustibilii nucleari descriși aici. Conținutul cererii de brevet de invenție canadiene nr. 2174983 este încorporat aici prin referință.

Diferiții combustibili nucleari ai prezentei invenții pot fi utilizați (ex. amestecați) în combinație cu unul sau mai multe alte materiale. Fie că sunt utilizați singuri sau în combinație cu alte materiale, combustibilul nuclear poate fi sub formă de pelete, sub formă de pulbere sau în oricare altă formă convenabilă sau într-o combinație de forme. În alte moduri de realizare, combustibilii prezentei invenții iau forma unei tije, cum ar fi o tijă de combustibil presată în forma dorită, o tijă de combustibil conținută într-o matrice a unui alt material și altele. De asemenea, elementele de combustibil făcute din combustibili conform prezentei invenții pot include o combinație de tuburi și tije și/sau alte tipuri de elemente.

După cum este descris mai în detaliu în continuare, combustibilii conform diferitelor moduri de realizare a prezentei invenții pot include diferite combinații de combustibili nucleari, cum ar fi uraniu sărăcit (DU), uraniu natural (NU) și uraniu reprocessat sau reciclat (RU). Așa cum se utilizează aici și în revendicările anexate, referirile ș-a „procente” de componente constituente de material incluse în combustibilul nuclear se referă la procente în greutate, dacă nu este specificat altfel. De asemenea, după cum se definește aici, DU are un conținut fisionabil de aproximativ 0,2% în greutate la aproximativ 0,5% în greutate de ^{235}U (incluzând aproximativ 0,2% în greutate și aproximativ 0,5% în greutate), NU are un conținut fisionabil de aproximativ 0,71% în greutate de ^{235}U , și RU are un conținut fisionabil de aproximativ 0,72% în greutate la aproximativ 1,2% în greutate de ^{235}U (incluzând aproximativ 0,72% în greutate și aproximativ 1,2% în greutate).

Uraniu Reciclat

Uraniul reprocessat sau reciclat (RU) este fabricat din combustibil uzat creat din producerea de putere nucleară utilizând reactoare cu apă ușoară (LWRs). O fracție de combustibil uzat este fabricată din uraniu. De aceea, o reprocessare chimică a

combustibilului uzat lasă în urmă uraniu separat, la care se face referire în industrie ca uraniu reprocessat sau reciclat. Uraniul natural (NU) conține trei izotopi ^{234}U , ^{235}U și ^{238}U . Cu toate acestea, după iradiere într-un LWR și răcire, RU rezultat are o compoziție izotopică diferită de aceea a uraniului natural. În special, RU include patru tipuri suplimentare de izotopi de uraniu care nu sunt prezenți în uraniul natural: ^{236}U și ^{232}U , ^{233}U și ^{237}U (în general considerate impurități). Astfel, prezența acestor patru tipuri suplimentare de izotopi poate fi considerată ca semnătură pentru RU.

De asemenea, trebuie înțeles faptul că compoziția de izotopi a RU depinde de mulți factori, cum ar fi conținutul inițial de ^{235}U în combustibil dinaintea de iradiere (ex. combustibil proaspăt), originea(ile) combustibilului, tipul reactorului în care a fost ars combustibilul, istoricul iradierii combustibilului în reactor (ex. incluzând consumul) și perioadele de răcire și stocare a combustibilului după iradiere. Spre exemplu, combustibilii cei mai iradiați sunt răciți timp de cel puțin cinci ani în bazine special proiectate pentru a asigura siguranța radiologică. Însă, perioada de răcire poate fi extinsă la 10 sau 15 ani sau mai mult.

RU include adesea impurități chimice (ex. gadoliniu) cauzate de placarea combustibilului, doparea combustibilului și metodele de separare și purificare utilizate pe RU. Aceste impurități chimice pot include cantități foarte mici de izotopi transuranici, cum ar fi plutoniu-238 (^{238}Pu), ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu , ^{242}Pu , neptuniu-237 (^{237}Np), americium-241 (^{241}Am), curiu-242 (^{242}Cm) și produși de fisiune, cum ar fi zirconiu-95/niobiu-95 ($^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$), ruteniu-103 (^{103}Ru), ^{106}Ru , cesiu-134 (^{134}Cs), ^{137}Cs și tehneciū-99 (^{99}Tc). Alte impurități prezente adesea în RU includ: aluminiu (Al), bor (B), cadmiu (Cd), calciu (Ca), carbon (C), clor (Cl), crom (Cr), cupru (Cu), disprosiu (Dy), fluor (F), fier (Fe), magneziu (Mg), mangan (Mn), molibden (Mo), nichel (Ni), azot (N), fosfor (P), potasiu (K), siliciu (Si), sodiu (Na), sulf (S) și toriu (Th).

Uraniu sărăcit

Așa cum s-a arătat mai sus, uraniu sărăcit (DU) are un conținut fisionabil de aproximativ 0,2% în greutate la aproximativ 0,5% în greutate de ^{235}U (incluzând aproximativ 0,2% în greutate și aproximativ 0,5% în greutate). DU este uraniu compus în principal din izotopi de uraniu-238 (^{238}U) și uraniu-235 (^{235}U). Prin comparație, uraniul natural (NU) este aproximativ 99,28% în greutate ^{238}U , aproximativ 0,71% în greutate

^{235}U și aproximativ 0,0054% în greutate ^{234}U . DU este un produs secundar al îmbogățirii uraniului și conține, în general, mai puțin de o treime de ^{235}U și ^{234}U față de uraniul natural. DU include, de asemenea, diferite impurități, cum ar fi: aluminiu (Al), bor (B), cadmiu (Cd), calciu (Ca), carbon (C), clor (Cl), crom (Cr), cupru (Cu), disprosiu (Dy), fluor (F), gadolinu (Gd), fier (Fe), magneziu (Mg), mangan (Mn), molibden (Mo), nichel (Ni), azot (N), fosfor (P), potasiu (K), siliciu (Si), sodiu (Na), sulf (S) și toriu (Th).

Combustibil amestecat

Se va aprecia că în multe aplicații, conținutul de uraniu al multor combustibili nucleari este prea mare sau prea scăzut pentru a permite acestor combustibili să fie arși într-un număr de reactoare nucleare. În mod asemănător, componentele constituente ale RU (^{234}U , ^{235}U , ^{236}U și ^{238}U) precum și impuritățile descrise mai sus (^{232}U , ^{233}U și ^{237}U) care se găsesc în mod obișnuit în RU pot împiedica RU să devină un combustibil viabil în multe reactoare. Cu toate acestea, inventatorii au descoperit că prin amestecarea RU cu DU, conținutul fisionabil de ^{235}U în combustibilul nuclear rezultat poate fi adus într-un domeniu care este acceptabil a fi ars ca combustibil proaspăt în multe reactoare nucleare, incluzând fără limitare reactoarele nucleare cu apă grea sub presiune (ex. reactoare nucleare cu apă grea sub presiune având tuburi de combustibil orizontale, cum ar fi cele din reactoarele CANDU). Rezultate similare pot fi obținute prin amestecarea RU cu NU pentru a reduce conținutul fisionabil de ^{235}U în combustibilul nuclear rezultat la un domeniu acceptabil pentru a fi ars ca combustibil proaspăt.

Fie că este amestecat cu DU sau cu NU, RU poate fi amestecat folosind orice metodă cunoscută în domeniu, cum ar fi, dar fără a se limita la aceasta, utilizarea unei soluții acide sau amestecarea uscată.

În unele moduri de realizare, combustibilul pentru reactorul nuclear al prezentei invenții include o primă componentă de combustibil de RU și o a doua componentă de combustibil de DU care au fost amestecate pentru a avea un conținut fisionabil combinat de mai puțin de 1,2% în greutate de ^{235}U . În astfel de combustibili, RU poate avea un conținut fisionabil de la aproximativ 0,72% în greutate ^{235}U la aproximativ 1,2% în greutate ^{235}U . În alte moduri de realizare, RU în astfel de combustibili au un conținut fisionabil de la aproximativ 0,8% în greutate ^{235}U la aproximativ 1,1% în greutate ^{235}U . În alte moduri de realizare, RU în astfel de combustibili poate avea un conținut fisionabil

de aproximativ 0,9% în greutate ^{235}U la aproximativ 1,0% în greutate ^{235}U . Și în alte moduri de realizare, RU în astfel de combustibili poate avea un conținut fisionabil de aproximativ 0,9% în greutate ^{235}U . În fiecare din aceste moduri de realizare, DU al unor astfel de combustibili poate avea un conținut fisionabil of aproximativ 0,2% în greutate ^{235}U la aproximativ 0,5% în greutate ^{235}U .

Prin urmare, în unele moduri de realizare, prin amestecarea DU cu conținut fisionabil de ^{235}U mai scăzut cu RU cu conținut fisionabil de ^{235}U mai ridicat, combustibilul nuclear RU/DU amestecat rezultat poate avea un conținut fisionabil de mai puțin de 1,0% în greutate ^{235}U . În alte moduri de realizare, combustibilul nuclear RU/DU amestecat rezultat poate avea un conținut fisionabil de mai puțin de 0,8% în greutate ^{235}U . În alte moduri de realizare, combustibilul nuclear RU/DU rezultat poate avea un conținut fisionabil de mai puțin de 0,72% în greutate ^{235}U . De asemenea, în alte moduri de realizare, combustibilul nuclear RU/DU rezultat poate avea un conținut fisionabil de aproximativ 0,71% în greutate ^{235}U , rezultând astfel un combustibil echivalent cu uraniul natural, generat prin amestecarea RU cu DU.

În unele moduri de realizare, combustibilul pentru reactorul nuclear al prezentei invenții include o primă componentă de combustibil de RU și o a doua componentă de combustibil de NU care au fost amestecate pentru a avea un conținut fisionabil combinat de mai puțin de 1,2% în greutate ^{235}U . În astfel de combustibili, RU poate avea un conținut fisionabil de la aproximativ 0,72% în greutate ^{235}U până la aproximativ 1,2% în greutate ^{235}U . În alte moduri de realizare, RU în acești combustibili poate avea un conținut fisionabil de la aproximativ 0,8% în greutate ^{235}U până la aproximativ 1,1% în greutate ^{235}U . În alte moduri de realizare, RU în astfel de combustibili poate avea un conținut fisionabil de la aproximativ 0,9% în greutate ^{235}U până la aproximativ 1,0% în greutate ^{235}U . În alte moduri de realizare, RU în astfel de combustibili poate avea un conținut fisionabil de aproximativ 0,9% în greutate de ^{235}U .

Prin urmare, prin amestecarea NU cu conținut fisionabil de ^{235}U mai scăzut cu RU cu conținut fisionabil de ^{235}U mai ridicat, în unele moduri de realizare, combustibilul nuclear RU/NU amestecat rezultat poate avea un conținut fisionabil de mai mic de 1,0% în greutate ^{235}U . În alte moduri de realizare, combustibilul nuclear RU/NU amestecat rezultat poate avea un conținut fisionabil de mai puțin de 0,8% în greutate ^{235}U . În alte

moduri de realizare, combustibilul nuclear RU/NU rezultat poate avea un conținut fisionabil de mai puțin de 0,72% în greutate ^{235}U . De asemenea, în anumite moduri de realizare, combustibilul nuclear RU/NU rezultat poate avea un conținut fisionabil de aproximativ 0,71% în greutate de ^{235}U , rezultând, așadar, într-un combustibil echivalent cu uraniul natural generat prin amestecarea RU și NU.

În anumite moduri de realizare, RU se amestecă atât cu DU cât și cu NU pentru a produce combustibili având aceleași conținuturi sau intervale de conținut fisionabile de ^{235}U cu cele descrise mai sus, în legătură cu combustibilii nucleari RU/DU amestecat și cu RU/NU amestecat. În astfel de cazuri, conținuturile și intervalele de conținut fisionabil de ^{235}U ale RU și conținuturile și intervalele de conținut fisionabil de ^{235}U ale DU pot fi aceleași cu cele descrise mai sus.

Combustibilii nucleari potrivit diferitelor moduri de realizare ale prezentei invenții pot include o otravă inflamabilă (BP). De exemplu, oricare dintre combustibilii nucleari descriși în prezenta poate include un amestec de RU și DU cu o otravă inflamabilă (BP), sau un amestec de RU și NU cu o otravă inflamabilă (BP). Otrava inflamabilă se poate amesteca cu diferite amestecuri de RU/DU, amestecuri de RU/NU, precum și cu amestecurile de RU/DU/NU descrise în prezenta.

Construirea fasciculului de combustibil

Amestecarea combustibilului nuclear (potrivit celor descrise mai sus) este o modalitate puternică de a produce combustibili nucleari proaspeți din RU, de altfel, neutilizabil. Cu toate acestea, o astfel de amestecare reprezintă doar o tehnică prin care RU se poate utiliza pentru ardere în multe tipuri de reactoare, incluzând reactoare cu apă grea sub presiune. În multe moduri de realizare, combustibilii RU amestecați descriși aici pot fi utilizați într-un mod extrem de eficient, în fascicule de combustibil în funcție, cel puțin parțial, de locațiile respectivelor combustibili amestecați din fasciculele de combustibil. De asemenea, RU poate fi utilizat chiar cu succes în fascicule de combustibil fără a fi în mod necesar amestecat potrivit celor descrise mai sus. În schimb, atunci când RU este inclus în anumite locații într-un fascicul de combustibil, are anumite conținuturi fisionabile de ^{235}U , și/sau este utilizat cu combinațiile vizate de DU și/ sau NU, fasciculul de combustibil rezultat prezintă caracteristicile dorite. Aceste caracteristici

includ un mai mare control la arderea combustibilului și un coeficient de vid al agentului de răcire mai scăzut (descriș mai jos).

Figurile 1-4 ilustrează diferite moduri de realizare a unui fascicul de combustibil nuclear pentru utilizarea într-un reactor nuclear, precum reactorul 10 cu apă grea sub presiune evidențiat schematic în FIG. 5. În special, fiecare dintre Figurile. 1-4 ilustrează o vedere în secțiune transversală a unui număr de moduri de realizare a unui fascicul 14 de combustibil poziționat într-un tub 18 sub presiune. Aranjamentele de combustibil ilustrate în fiecare din Figurile 1-4 sunt furnizate ca exemplu, înțelegându-se că alte aranjamente de combustibil în fasciculele de combustibil din Figurile 1-4 sunt posibile, și sunt în spiritul și în aria de protecție a prezentei invenții. De reținut, de asemenea, că sunt furnizate mai sus acele caracteristici (incluzând conținuturile fisionabile de ^{235}U și intervalele de conținut fisionabil de ^{235}U) ale diferiților combustibili descriși în raport cu Figurile 1-4 de mai jos (RU, DU, NU, amestecuri RU/DU, amestecuri RU/NU și amestecuri RU/DU/NU).

Agentul de răcire 26 de tip apă grea este conținut în tubul 18 de presiune și ocupă subcanalele dintre elementele 22 de combustibil ale fasciculului 14 de combustibil. Elementele 22 de combustibil pot include un element central 38, o primă multitudine de elemente 42 poziționate radial către exterior față de elementul central 38, o a doua multitudine de elemente 46 poziționate radial către exterior față de prima multitudine de elemente 42 și o a treia multitudine de elemente 50 poziționate radial către exterior față de a doua multitudine de elemente 46. Se înțelege că în alte moduri de realizare, fasciculul 14 de combustibil poate include mai puține sau mai multe elemente și poate include și elemente în alte configurații decât acelea ilustrate în Figurile 1-4. Spre exemplu, elementele 22 de combustibil pot fi poziționate în paralel unul cu celălalt într-unul sau mai multe planuri, elemente aranjate într-o matrice sau serie având formă bloc sau orice altă formă în secțiune transversală și elemente în orice alt model sau configurație fără model. Tubul 18 de presiune, fasciculul 14 de combustibil și/sau elementele 22 de combustibil pot fi, de asemenea, configurate în diferite forme sau mărimi. Spre exemplu, tuburile 18 de presiune, fasciculele 14 de combustibil și elementele 22 de combustibil pot avea orice forme în secțiune transversală (altele decât formele rotunde arătate în Figurile 1-5) și mărimi, după cum se dorește. Ca un alt

exemplu, elementele 22 de combustibil în fiecare dintre fasciculele 14 de combustibil pot avea orice dimensiuni relative (altele decât dimensiunea uniformă sau versiunile cu două dimensiuni ale elementelor 22 de combustibil arătate în Figurile 1- 4).

În exemplele de realizare din Figurile 1 și 2, este ilustrat un fascicul de combustibil cu 37 de elemente în care toate elementele 22 de combustibil au o dimensiune uniformă în secțiune transversală (sau diametru, în cazul elementelor având o formă rotundă în secțiune transversală). Prima multitudine de elemente 42 din fiecare dintre Figurile 1 și 2 include șase elemente dispuse paralel unele față de altele, într-un model în general circular. A doua multitudine de elemente 46 din fiecare dintre Figurile 1 și 2 include douăsprezece elemente, de asemenea, aranjate paralel unele față de altele într-un model, în general, circular. A treia multitudine de elemente 50 din fiecare dintre Figurile 1 și 2 include optsprezece elemente de asemenea, aranjate paralel unele cu altele într-un model, în general, circular. Elementul central 38, prima multitudine de elemente 42, a doua multitudine de elemente 46, și a treia multitudine de elemente 50 sunt aranjate concentric astfel încât toate elementele 22 sunt dispuse paralel unele cu altele. De asemenea, trebuie să se înțeleagă că liniile incluse în Figurile 1 – 2 indicând poziția general circulară a elementelor 22 sunt date doar în scop exemplificativ și că acestea nu indică, în mod necesar, că elementele 22 sunt legate împreună sau sunt altfel cuplate într-un aranjament special.

În modul de realizare din Figurile 3 și 4, este ilustrat un fascicul 14 de combustibil cu 43 de elemente. Prima multitudine de elemente 42 din fiecare dintre Figurile 3 și 4 include șapte elemente aranjate în paralel unele cu altele într-un model, în general, circular. A doua multitudine de elemente 46 din fiecare dintre Figurile 3 și 4 include paisprezece elemente aranjate în paralel unele cu altele într-un model în general circular. A treia multitudine de elemente 50 din fiecare dintre Figurile 3 și 4 include douăzeci și un de elemente dispuse paralel unele cu altele într-un model, în general, circular. Elementul 38 central, prima multitudine de elemente 42, a doua multitudine de elemente 46 și a treia multitudine de elemente 50 sunt aranjate concentric astfel încât toate elementele 22 sunt paralele unele cu altele. Elementul central 38 și fiecare dintre prima multitudine de elemente 42 au o primă dimensiune în secțiune transversală (sau un diametru, în cazul elementelor având o formă rotundă în secțiune transversală), și

fiecare dintre a doua multitudine 46 și a treia multitudine 50 de elemente au o a doua dimensiune în secțiune transversală (sau un diametru, în cazul elementelor având o formă rotundă în secțiune transversală) diferită de prima dimensiune transversală. În special, prima dimensiune în secțiune transversală este mai mare decât a doua dimensiune în secțiune transversală. În acest sens, termenul "formă în secțiune transversală" face referire la forma în secțiune transversală generată de un plan care trece prin corpul raportat la o orientare care este perpendiculară pe o axă longitudinală a corpului. De asemenea, trebuie să se înțeleagă că liniile incluse în Figurile 3 și 4 indicând poziția general circulară a elementelor 22 sunt date doar în scop exemplificativ și că acestea nu indică, în mod necesar, că elementele sunt legate împreună sau sunt altfel cuplate într-un aranjament special.

În anumite moduri de realizare, fiecare dintre elementele 22 de combustibil din Figurile 1-4 include un tub umplut cu combustibil nuclear. Tubul poate fi realizat din sau poate include zirconiu, un aliaj de zirconiu sau alt material convenabil sau o combinație de materiale, fiind în anumite cazuri caracterizat prin absorbție mică de neutroni. Tubul poate să fie umplut cu unul sau mai multe materiale, cum ar fi combustibil nuclear simplu sau în combinație cu alte materiale. Materialul(ele) poate(pot) fi sub formă de pelete, sub formă de pulbere sau sub altă formă convenabilă sau combinații de forme. În alte exemple de realizare, fiecare dintre elementele 22 de combustibil include o tijă formată dintr-unul sau mai multe materiale (ex. combustibil nuclear simplu sau în combinație cu alte materiale), cum ar fi combustibil nuclear conținut în matricea unui alt material. De asemenea, în anumite forme de realizare, elementele 22 de combustibil dintr-un fascicul 14 pot include o combinație de tuburi sau tije și/sau alte elemente conținând combustibil și elementele 22 de combustibil pot lua alte configurații potrivite unei aplicații speciale.

După cum este arătat în Figurile 1-4, elementele 22 de combustibil pot include diverse combinații de combustibili nucleari, cum ar fi uraniu sărăcit (DU), uraniu natural (NU), uraniu reprocessat sau reciclat (RU). Făcând mai întâi referire la FIG. 1, fasciculul 14 de combustibil ilustrat în aceasta include 37 de elemente. Elementul central 38 din FIG. 1 include un amestec de RU și DU având un prim conținut fisionabil (i.e., (RU/DU)¹) și/sau un amestec de DU și o otravă inflamabilă (BP) și/ sau DU. Potrivit celor descrise

mai sus, un amestec (desemnat, în general, în prezenta prin utilizarea unei bare "/") de materiale se poate crea cu ajutorul unei metode cunoscute în stadiul tehnicii, cum ar fi, dar fără a se limita la acestea, utilizarea unei soluții acide sau amestecarea uscată a materialelor care fac obiectul prezentei. Întorcându-ne la FIG. 1, prima multitudine de elemente 42 include un amestec de RU și DU având un al doilea conținut fisionabil (i.e., $(RU/DU)^2$). A doua multitudine de elemente 46 include un amestec de RU și DU având un al treilea conținut fisionabil (i.e., $(RU/DU)^3$) și/ sau NU având un prim conținut fisionabil (i.e., NU^1). A treia multitudine de elemente 50 include un amestec de RU și DU având un al patrulea conținut fisionabil (i.e., $(RU/DU)^4$) și/sau NU având un al doilea conținut fisionabil (i.e., NU^2).

În modurile de realizare ilustrate în FIG. 1, (precum și cele ale celorlalte figuri din prezenta cerere), se face referire la materialele care au fost amestecate cu bara "/". Cu toate acestea, în fiecare dintre astfel de cazuri, aranjamente alternative de combustibil pentru astfel de elemente includ utilizarea elementelor 22 de combustibil, fiecare având doar unul dintre combustibilii menționați, dar utilizați în combinație cu elementele 22 de combustibil având celălalt combustibil menționat. Utilizarea unor astfel de elemente 22 de diferite tipuri de combustibil (ex. în același inel de elemente 22) poate fi asigurată în locul sau în plus față de elementele 22 având un amestec de tipuri de combustibil, potrivit celor descrise mai sus.

De exemplu, inelul de elemente 22 $(RU/DU)^2$ din FIG. 1 indică faptul că fiecare element 22 ilustrat din prima multitudine de elemente 36 este un amestec de RU și DU. Totuși, alternativ sau în plus, prima multitudine de elemente 36 poate include, în schimb, unul sau mai multe elemente de RU și unul sau mai multe elemente de DU. Elementele 22 de combustibil rezultate care conțin RU sau DU pot fi aranjate în diferite configurații, ca într-un aranjament alternativ cu o poziție radială care se modifică în funcție de fasciculele de combustibil 14.

În anumite moduri de realizare, conținutul fisionabil de ^{235}U al amestecurilor RU/DU incluse în fasciculul de combustibil 14 din FIG. 1 este aproximativ aceleași (de la inel la inel, sau cu modificarea distanței radiale de la centrul fasciculului 14 de combustibil). În alte moduri de realizare, conținutul fisionabil de ^{235}U al amestecurilor RU/DU incluse în fasciculul 14 de combustibil se modifică de la inel la inel, sau cu

modificarea distanței radiale de la centrul fasciculului 14 de combustibil. De exemplu, amestecul RU/DU inclus în cel puțin unul dintre elementul central 38, prima multitudine de elemente 42, a doua multitudine de elemente 46 și a treia multitudine de elemente 50 din FIG. 1 poate avea un conținut fisionabil diferit de un conținut fisionabil al unui amestec inclus într-unul sau mai multe dintre celelalte elemente. În anumite moduri de realizare, un amestec (RU/DU)¹ inclus în elementul central 38 din FIG. 1 conține, în general, un procent mai scăzut de ²³⁵U decât amestecul (RU/DU)² inclus în prima multitudine de elemente 42, amestecul de (RU/DU)² inclus în prima multitudine de elemente 42 conține în general un procent mai scăzut de ²³⁵U decât orice amestec (RU/DU)³ inclus în a doua multitudine de elemente 46, și orice amestec (RU/DU)³ inclus în a doua multitudine de elemente 46 are, în general, un procent mai scăzut de ²³⁵U decât orice amestec (RU/DU)⁴ inclus în a treia multitudine de elemente 50. Prin urmare, conținutul fisionabil de ²³⁵U al combustibilului nuclear inclus în fasciculul 14 de combustibil poate crește într-o direcție radială către exterior, de la centrul fasciculului 14 de combustibil. Cu toate acestea, în alte moduri de realizare, conținutul fisionabil de ²³⁵U scade într-o direcție radială către exterior de la centrul fasciculului 14 de combustibil.

În același mod, conținutul fisionabil al oricărui NU utilizat în modurile de realizare din FIG. 1 poate fi aproximativ același sau poate fi modificat prin schimbarea distanței de la centrul fasciculului 14 de combustibil. De exemplu, orice NU¹ inclus în a doua multitudine de elemente 46 poate avea, în general, un procent mai scăzut de ²³⁵U decât orice NU² inclus în a treia multitudine de elemente 50. Alternativ, orice NU² inclus în a treia multitudine de elemente 50 poate avea, în general, un procent mai scăzut de ²³⁵U decât orice NU¹ inclus în a doua multitudine de elemente 46.

În plus, în anumite moduri de realizare, conținutul fisionabil specific al unui element combustibil specific 22 se poate modifica prin una sau mai multe multitudini de elemente 42, 46 și 50 (ex., într-o direcție radială din fasciculul 14 de combustibil) sau de-a lungul lungimii longitudinale a fasciculului 14 de combustibil. De asemenea, o BP poate fi inclusă în oricare dintre sau în toate elementele 22 de combustibil din FIG. 1, precum în elementul central 38, așa cum a fost ilustrat.

Următoarele aranjamente de fascicul de combustibil se bazează pe modurile de realizare a fasciculului de combustibil ilustrat în FIG. 1, și sunt prezentate ca exemple de

fascicule de combustibil având caracteristici care sunt, în mod special, dorite, dar nu trebuie avute în vedere ca limitând scopul prezentei invenții sau celelalte moduri de realizare posibile avute în vedere în FIG. 1. Potrivit utilizării de aici, termenul "inel" include doar un element central

EXEMPLUL #1

Element central:	RU/DU
Primul inel de elemente 42:	RU/DU
Al 2-lea inel de elemente 46:	RU/DU
Al 3-lea inel de elemente 50:	RU/DU

EXEMPLUL #2

Element central:	(RU/DU) ¹
Primul inel de elemente 42:	(RU/DU) ²
Al 2-lea inel de elemente 46:	(RU/DU) ³
Al 3-lea inel de elemente 50:	(RU/DU) ⁴

În care (RU/DU)² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹, (RU/DU)³ are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹ și/sau (RU/DU)², și/sau în care (RU/DU)⁴ are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹, (RU/DU)², și/sau (RU/DU)³.

EXEMPLUL #3

Element central:	(RU/DU) ¹
Primul inel de elemente 42:	(RU/DU) ²
Al 2-lea inel de elemente 46:	(RU/DU) ³
Al 3-lea inel de elemente 50:	NU

În care (RU/DU)² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹, și în care (RU/DU)³ are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹ și/sau (RU/DU)².

EXEMPLUL #4

Elementul central:	(RU/DU) ¹
Primul inel de elemente 42:	(RU/DU) ²
Al 2-lea inel de elemente 46:	NU
Al 3-lea inel de elemente 50:	(RU/DU) ³

În care (RU/DU)² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹, și în care (RU/DU)³ are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât al (RU/DU)¹ și/sau (RU/DU)².

EXEMPLUL #5

Elementul central:	(RU/DU) ¹
Primul inel de elemente 42:	(RU/DU) ²
Al 2-lea inel de elemente 46:	NU
Al 3-lea inel de elemente 50:	NU

În care (RU/DU)² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹.

FIG. 2 ilustrează o altă realizare a unui fascicul 14 de combustibil cu 37 elemente. Elementul central 38 din FIG. 2 include RU având un prim conținut fisionabil (i.e., RU¹) și/ sau DU având un prim conținut fisionabil (i.e., DU¹). Prima multitudine de elemente 42 din FIG. 2 include RU având un al doilea conținut fisionabil (i.e., RU²) și/ sau DU având un al doilea conținut fisionabil (i.e., DU²). A doua multitudine de elemente 46 include RU având un al treilea conținut fisionabil (i.e., RU³). A treia multitudine de elemente 50 include RU având un al patrulea conținut fisionabil (i.e., RU⁴).

Conținuturile fisionabile de ²³⁵U ale RU incluse în fiecare element 22 de combustibil pot fi aproximativ aceleași și/sau se pot modifica. În acele moduri de realizare în care conținutul fisionabil de ²³⁵U al RU din FIG. 2 se modifică, această modificare poate apărea cu distanța radială de la centrul fasciculului de combustibil și/sau o poziție circulară în fasciculul 14 de combustibil, și poate exista între oricare sau toate inelele din FIG. 2, și/ sau între oricare dintre sau toate pozițiile circulare ale oricărui inel. De exemplu, în anumite moduri de realizare, RU¹ inclus în elementul central 38, are, în general, un procent mai scăzut de ²³⁵U decât RU² inclus în prima multitudine de elemente 42, amestecul RU² inclus în prima multitudine de elemente 42 are, în general, un procent mai scăzut de ²³⁵U decât RU³ inclus în a doua multitudine de elemente 46, și/ sau RU³ inclus în a doua multitudine de elemente 46 are, în general, un procent mai scăzut de ²³⁵U decât RU⁴ inclus în a treia multitudine de elemente 50. Prin urmare, în anumite moduri de realizare, conținutul fisionabil de ²³⁵U al combustibilului nuclear al fasciculului 14 de combustibil crește într-o direcție radială către exterior de la centrul fasciculului 14 de combustibil. Cu toate acestea, în alte moduri de realizare, conținutul

fisionabil de ^{235}U scade într-o direcție radială către exterior de la centrul fascicului 14 de combustibil.

Se înțelege că, chiar și atunci când conținutul fisionabil al RU inclus în fasciculul 14 de combustibil din FIG. 2 este modificat în oricare dintre modalitățile descrise mai sus, fiecare element 22 de combustibil încă are un conținut fisionabil de ^{235}U situat în general între și incluzând aproximativ de la 0,72% până la aproximativ 1,2% de ^{235}U . Doar ca exemplu, conținutul fisionabil de RU^1 inclus în elementul central 38 este ales din intervalul definit mai sus pentru RU, iar conținutul fisionabil al RU^2 inclus în prima multitudine de elemente 42 este, de asemenea, ales din același interval definit, dar poate fi diferită de conținutul fisionabil ales pentru elementul central 38.

În mod similar, conținutul fisionabil al oricărui DU utilizat în modurile de realizare din FIG. 2 poate fi aproximativ același sau variază – fie cu distanța radială de la centrul fascicului 14 de combustibil, fie cu schimbarea poziției circulare în fasciculul 14 de combustibil. Din nou, doar pentru exemplificare, orice DU^1 inclus în elementul 38 central poate avea, în general, un procent mai scăzut de ^{235}U decât orice DU^2 inclus în cea de a doua multitudine de elemente 42. Alternativ, orice DU^2 inclus în cea de a doua multitudine de elemente 42 poate avea, în general, un procent mai scăzut de ^{235}U decât orice DU^1 inclus în elementul 38 central.

Mai mult, în unele moduri de realizare, conținutul fisionabil special al unui anumit element 22 de combustibil poate varia de-a lungul unuia sau mai multora din multitudinea de elemente 42, 46 și 50 (ex. într-o direcție circulară în fasciculul 14 de combustibil) sau de-a lungul lungimii longitudinale a fascicului 14 de combustibil. De asemenea, o BP poate fi inclusă în oricare sau toate elementele 22 de combustibil din FIG. 2.

Următorul aranjament al fascicului 14 de combustibil se bazează pe modurile de realizare a fascicului de combustibil ilustrate în FIG. 2 și este prezentat ca un exemplu de fascicul 14 de combustibil având caracteristici deosebit de dorite, dar nu este considerat ca limitând scopul prezentei invenții sau celelalte moduri de realizare posibile avute în vedere în FIG. 2. Așa cum se utilizează aici, termenul „inel” include un singur element central.

EXEMPLUL #6

Elementul central:	DU ¹
Primul inel de elemente 42:	DU ²
Al 2-lea inel de elemente 46:	RU ¹
Al 3-lea inel de elemente 50:	RU ²

În care DU² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al DU¹, și în care RU² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al RU¹.

Modurile de realizare din FIG. 3 sunt semnificativ similare cu modurile de realizare din FIG. 1 descrise mai sus, cu excepția faptului că fasciculul 14 de combustibil este un fascicul de combustibil cu 43 de elemente și are elementele 22 de combustibil neuniforme, așa cum s-a descris mai sus. Dat fiind că distribuția combustibilului nuclear în elementul central, prima, a doua și a treia multitudine de elemente 38, 42, 46, și respectiv 50, este similară cu FIG. 1, prin prezenta se face referire la descrierea care însoțește FIG. 1 de mai sus pentru detalii suplimentare privind modurile de realizare (și posibilele alternative la acestea) evidențiate în FIG. 3.

Următoarele aranjamente de fascicul de combustibil se bazează pe modurile de realizare a fasciculului de combustibil ilustrate în FIG. 3, și sunt prezentate ca exemple de fascicule de combustibil având caracteristici care sunt, în mod special, dorite, dar nu trebuie considerate ca limitând obiectul prezentei invenții sau celelalte moduri de realizare posibile avute în vedere în FIG. 3. Potrivit utilizării de aici, termenul "inel" include doar un element central.

EXEMPLUL #7

Element central:	RU/DU
Primul inel de elemente 42:	RU/DU
Al 2-lea inel de elemente 46:	RU/DU
Al 3-lea inel de elemente 50:	RU/DU

EXEMPLUL #8

Element central:	RU/DU
Primul inel de elemente 42:	RU/DU
Al 2-lea inel de elemente 46:	RU/DU
Al 3-lea inel de elemente 50:	NU

EXEMPLUL #9

Element central: RU/DU
 Primul inel de elemente 42: RU/DU
 Al 2-lea inel de elemente 46: NU
 Al 3-lea inel de elemente 50: RU/DU

EXEMPLUL #10

Element central: DU/BP
 Primul inel de elemente 42: (RU/DU)¹
 Al 2-lea inel de elemente 46: (RU/DU)²
 Al 3-lea inel de elemente 50: (RU/DU)³

În care (RU/DU)² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹, și în care (RU/DU)³ are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât al (RU/DU)² și/sau (RU/DU)¹.

EXEMPLUL #11

Elementul central: DU
 Primul inel de elemente 42: (RU/DU)¹
 Al 2-lea inel de elemente 46: (RU/DU)²
 Al 3-lea inel de elemente 50: (RU/DU)³

În care (RU/DU)² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹, și în care (RU/DU)³ are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât al (RU/DU)² și/sau (RU/DU)¹.

EXEMPLUL #12

Element central: DU/BP
 Primul inel de elemente 42: (RU/DU)¹
 al 2-lea inel de elemente 46: (RU/DU)²
 al 3-lea inel de elemente 50: NU

În care (RU/DU)² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹.

EXEMPLUL #13

Element central: DU/BP
 Primul inel de elemente 42: (RU/DU)¹
 al 2-lea inel de elemente 46: NU
 al 3-lea inel de elemente 50: (RU/DU)²

În care (RU/DU)² are un conținut fisionabil de ²³⁵U mai mare decât cel al (RU/DU)¹.

Modurile de realizare din FIG. 4 sunt semnificativ similare cu modurile de realizare din FIG. 2 descrise mai sus, cu excepția faptului că fasciculul 14 de combustibil este un fascicul de combustibil cu 43 de elemente și are elementele 22 de combustibil neuniforme, așa cum s-a descris mai sus. Dat fiind că distribuția combustibilului nuclear în elementul central, în prima, a doua și a treia multitudine de elemente 38, 42, 46 și, respectiv, 50 este similară cu FIG. 2, prin prezenta se face referire la descrierea care însoțește FIG. 2 de mai sus pentru detalii suplimentare privind modurile de realizare (și posibilele alternative la acestea) evidențiate în FIG. 4.

Următoarele aranjamente de fascicul de combustibil se bazează pe modurile de realizare a fasciculului de combustibil ilustrat în FIG. 4, și sunt prezentate ca exemple de fascicule de combustibil având caracteristici care sunt, în mod special, dorite, dar nu trebuie avute considerate ca limitând obiectul prezentei invenții sau celelalte moduri de realizare posibile avute în vedere în FIG. 4. Potrivit utilizării de aici, termenul "inel" include doar un element central.

EXEMPLUL #14

Elementul central:	DU/BP
Primul inel de elemente 42:	RU
Al 2-lea inel de elemente 46:	RU
Al 3-lea inel de elemente 50:	RU

EXEMPLUL #15

Elementul central:	DU
Primul inel de elemente 42:	RU
Al 2-lea inel de elemente 46:	RU
Al 3-lea inel de elemente 50:	RU

EXEMPLUL #16

Elementul central:	DU
Primul inel de elemente 42:	DU
Al 2-lea inel de elemente 46:	RU
Al 3-lea inel de elemente 50:	RU

Modurile de realizare din Figurile 3 și 4 prezintă exemple ale modurilor în care un anumit număr de elemente de combustibil, aranjarea elementului de combustibil (ex. inele de elemente în modurile de realizare ilustrate), dimensiunile elementului de combustibil și dimensiunile relative ale elementului de combustibil se pot schimba în timp ce pot, însă, să întruchieze prezenta invenție. În unele moduri de realizare, conținutul fisionabil de ^{235}U al combustibilului nuclear scade într-o direcție radială către exterior dinspre centrul fasciculului 14 de combustibil. În alte moduri de realizare, conținutul fisionabil de ^{235}U crește într-o direcție radială către exterior dinspre centrul fasciculului 14 de combustibil.

În reactoarele răcite cu apă grea, viteza de multiplicare a neutronilor crește când apar goluri în agentul de răcire. Goluri în agentul de răcire apar, spre exemplu, când agentul de răcire începe să fiarbă. Coeficientul de vid al reactivității agentului de răcire este o măsură a abilității unui reactor de a multiplica neutronii. Acest fenomen este datorat coeficientului de vid pozitiv al reactivității agentului de răcire și se poate produce în toate reactoarele, pentru diferite situații. Prezenta invenție poate asigura o reducere semnificativă a coeficientului de vid al reactivității agentului de răcire și poate, de asemenea, asigura un coeficient de temperatură negativ al combustibilului și/sau un coeficient negativ de putere.

Modurile de realizare descrise mai sus și ilustrate în figuri sunt prezentate doar în scopul exemplificării și nu sunt prevăzute ca o limitare a conceptelor și a principiilor prezentei invenții. Astfel, se va aprecia de un specialist în domeniu că diferite schimbări ale elementelor și ale configurațiilor acestora sunt posibile fără a se îndepărta de la spiritul și scopul prezentei invenții. Spre exemplu, în diferite moduri de realizare descrise și/sau ilustrate în prezenta, amestecurile de RU și DU mai sunt amestecate cu diferite tipuri de combustibil nuclear sau cu alte materiale pentru a produce combustibili nucleari având conținutul fisionabil dorit. De exemplu, RU și DU se pot amesteca (separat sau ca un amestec RU/DU) cu un uraniu ușor îmbogățit (SEU) și cu un uraniu slab îmbogățit (LEU). Potrivit definiției din prezenta, SEU are un conținut fisionabil de la aproximativ 0,9% până la aproximativ 3% în greutate de ^{235}U (incluzând aproximativ 0,9% în greutate și aproximativ 3% în greutate) și LEU are un conținut fisionabil de la

aproximativ 3% în greutate până la aproximativ 20% în greutate de ^{235}U (incluzând aproximativ 3% în greutate și aproximativ 20% în greutate).

De asemenea, modurile de realizare descrise în prezenta pot fi utilizate cu tuburi de presiune mai mari sau mai mici decât cele utilizate în reactoarele actuale cu tuburi sub presiune și pot fi, de asemenea, utilizate pentru viitoare reactoare cu tuburi sub presiune. În plus, prezenta invenție poate fi utilizată în fascicule de combustibil având un număr și un aranjament diferit al elementelor, și nu se limitează la modelele și aranjamentele fasciculului de combustibil cu 43 și 37 de elemente, precum cele ilustrate cu titlu de exemplu în Figurile 1-4. De exemplu, deși modurile de realizare din Figurile 3 și 4 utilizează două dimensiuni diferite ale elementelor în fasciculele 14 de combustibil ilustrate, pe când modurile de realizare din Figurile 1 și 2 utilizează dimensiuni uniforme ale elementelor de-a lungul fasciculelor 14 de combustibil ilustrate, se va aprecia că oricare dintre fasciculele de combustibil descrise în prezenta pot avea elemente de aceeași dimensiune sau elemente de dimensiuni diferite în diferite inele și/ sau diferite poziții circulare din cadrul fasciculelor de combustibil, fără a se îndepărta de la spiritul și scopul prezentei invenții. Ca alt exemplu, elemente de dimensiuni mai mare nu trebuie să fie, în mod necesar, situate doar în primul și / sau în al doilea inel al unui fascicul 14 de combustibil. În alte moduri de realizare, aceste dimensiuni ale elementelor relativ mai mari sunt situate în inelele exterioare radiale ale fasciculului 14 de combustibil (ex., inel situat radial către exterior și/ sau inel adiacent acestuia).

Construcția fasciculului de combustibil pentru CVR redus sau negativ

Așa cum s-a descris mai sus, se dorește să se scadă coeficientul de vid al agentului de răcire (CVR) și chiar să se obțină un CVR negativ, într-un reactor nuclear cu apă grea sub presiune, cum ar fi reactorul Canadian Deuterium Uranium (CANDU). Cererea de brevet de invenție canadiană nr. 2097412, al cărui conținut este încorporat prin referință în prezenta, oferă cunoștințe generale utile în ceea ce privește știința reducere coeficientului de vid al agentului de răcire, în special în reactoarele CANDU. Un absorbant de neutroni sau „otravă ” poate să fie inclus împreună cu conținutul fisionabil într-un fascicul de combustibil pentru a reduce sau pentru a aduce la valori complet negative valorile pozitive ale CVR. Spre exemplu, se poate amesteca o otravă

cu unul sau mai multe tipuri de uraniu în unul sau mai multe dintre elementele 22 ale oricăror dintre fasciculele 14 de combustibil (incluzând fasciculul de combustibil cu 37 de elemente din Fig. 1 și 2 și fasciculul de combustibil cu 43 de elemente din Fig. 3 și 4). Otrava poate fi o otravă inflamabilă cum ar fi disprosiu or gadoliniu sau, alternativ, poate să fie o otravă neinflamabilă cum ar fi hafniu. Pentru a compensa efectul absorbției de neutroni al otrăvii, este necesară o creștere a materialului fisionabil în comparație cu un uraniu natural neotrăvit folosit în mod obișnuit într-un reactor CANDU. Pentru a atinge o anumită țintă a arderii combustibilului și un anumit CVR, se poate folosi o schemă de îmbogățire gradată în crearea fasciculului 14 de combustibil.

Într-o construcție, se asigură un fascicul de combustibil cu 37 de elemente așa cum este arătat în Fig. 1 și 2 în care fiecare dintre elementele 22 de combustibil are un conținut fisionabil de ^{235}U între aproximativ 0,9 % în greutate ^{235}U și 5,0 % în greutate ^{235}U și cel puțin unul dintre elementele 22 de combustibil este un element de combustibil din uraniu ușor îmbogățit otrăvit incluzând o otravă de neutroni într-o concentrație mai mare de aproximativ 5,0 vol%. Cu alte cuvinte, toate elementele 22 de combustibil se califică ca fiind „ușor-îmbogățite” și se pot califica drept sau pot conține uraniu „slab-îmbogățit”. În anumite construcții, conținutul fisionabil al cel puțin unui element de combustibil din uraniu slab-îmbogățit otrăvit este de cel puțin aproximativ 3,0 % în greutate ^{235}U , și în special, poate fi între aproximativ 3,0 % în greutate ^{235}U și aproximativ 3,5 % în greutate ^{235}U . Conținutul de otravă de neutroni al cel puțin unui element de combustibil din uraniu slab-îmbogățit otrăvit poate fi cuprins între aproximativ 5,0 vol% și aproximativ 8,0 vol%. Într-un exemplu special, conținutul fisionabil al cel puțin unui element de combustibil din uraniu slab-îmbogățit otrăvit este de aproximativ 3,21 % în greutate ^{235}U și concentrația de otravă de neutroni în cel puțin unul dintre elementele de combustibil din uraniu slab-îmbogățit este de aproximativ 6,82 vol%. Otrava de neutroni în acest exemplu special poate fi disprosiu. Otrava de neutroni poate, de asemenea, să fie un amestec de disprosiu și o altă otravă inflamabilă, cum ar fi gadoliniu.

În exemplele de mai sus, printre alte configurații din sfera de protecție a invenției, cel puțin unul dintre elementele de combustibil din uraniu slab îmbogățit al fasciculului 14 de combustibil include elementul 38 central al fasciculului și fiecare dintre elementele

de combustibil al primei multitudini 42 care înconjoară în imediata apropiere elementul 38 central. Elementele 22 de combustibil rămase ale fascicului 14 de combustibil (adică, elementele de combustibil ale celei de a doua și ale celei de a treia multitudini 46, 50) sunt elemente de combustibil neotrăvite dispuse radial în afara elementelor 38, 42 de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvite. Fiecare dintre elementele 46, 50 de combustibil neotrăvite are un conținut fisionabil de ^{235}U ce nu depășește conținutul fisionabil al elementelor 38, 42 de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit, și cel puțin unele dintre elementele 46, 50 de combustibil neotrăvite au un conținut fisionabil de ^{235}U care este mai mic decât conținutul fisionabil al elementelor 38, 42 de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit.

În anumite construcții, elementele de combustibil ale celei de a doua multitudini 46 au un conținut fisionabil mai mare decât acela al elementelor de combustibil din cea de a treia multitudine 50. Spre exemplu, elementele de combustibil ale celei de a doua multitudini 46 pot avea un conținut fisionabil între aproximativ 3,0 % în greutate și aproximativ 3,5 % în greutate ^{235}U , și elementele de combustibil din cea de a treia multitudine 50 au un conținut fisionabil mai mic decât aproximativ 2,0% în greutate ^{235}U . Mai special, elementele de combustibil ale celei de a doua multitudini 46 pot avea un conținut fisionabil de aproximativ 3,18 % în greutate ^{235}U , și elementele de combustibil din cea de a treia multitudine 50 pot avea un conținut fisionabil de aproximativ 1,73 % în greutate ^{235}U .

În alte construcții, conținutul fisionabil al elementelor 22 de combustibil poate fi tot același cu cel al elementelor de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit, sau cel puțin poate să fie mai mare decât nivelurile din exemplul special de mai sus. Pentru a menține un CVR scăzut (adică, mai mic decât cel al unui fascicul de combustibil din uraniu natural) și, în anumite cazuri, CVR negativ, cu niveluri ale conținutului fisionabil mai mari decât cele exprimate în exemplul special de mai sus, elementele 38, 42 de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit pot avea un conținut de otrăvă mai mare decât 6,82 vol%. Spre exemplu, conținutul de otrăvă al elementelor 38, 42 de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit poate crește până la 20 vol% în raport cu conținutul fisionabil.

Deși materialul pentru elementele de combustibil descrise mai sus poate fi produs prin îmbogățirea uraniului natural pentru a atinge conținutul fisionabil dorit, surse alternative pot furniza flexibilitate în alimentare. Pentru a limita volumul de îmbogățire cerut pentru a produce un conținut fisionabil predeterminat de ^{235}U într-un element 22 special de combustibil și pentru a se utiliza surse alternative de uraniu se poate amesteca o cantitate de uraniu slab îmbogățit cu o cantitate din oricare dintre uraniu natural, uraniu reciclat și uraniu sărăcit. Spre exemplu, pentru a produce un element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit având un conținut fisionabil de 3,21 % în greutate ^{235}U , se poate amesteca o cantitate mică de uraniu slab îmbogățit având un conținut fisionabil mai mare decât 3,21 % în greutate ^{235}U cu uraniu reciclat (care are un conținut fisionabil cuprins între aproximativ 0,72 % în greutate ^{235}U și 1,2 % în greutate ^{235}U). Dacă este prezent suficient ^{235}U în uraniul slab îmbogățit, amestecul poate include uraniu reciclat și/sau cel puțin unul dintre uraniu natural și uraniu sărăcit.

Un fascicul de combustibil cum ar fi acela descris mai sus asigură un coeficient de vid al agentului de răcire (CVR) și un coeficient de temperatură a combustibilului (FTC) mai mici decât CVR și FTC corespunzătoare ale unui fascicul de combustibil echivalent din uraniu natural, fără o reducere a puterii utile, când se folosește drept combustibil într-un reactor nuclear cu apă grea sub presiune. Un astfel de fascicul de combustibil poate asigura un CVR negativ, un FTC negativ și un coeficient negativ de putere (PC). CVR pentru acest tip de fascicul de combustibil nu este foarte sensibil la consumul combustibilului. Spre exemplu, un fascicul de combustibil așa cum s-a descris mai sus poate conduce la valori ale CVR de -3 mk la un consum mediu.

Pentru a utiliza un fascicul de combustibil incluzând elemente de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit, un fascicul de combustibil (sau fascicule de combustibil similare multiple) având caracteristicile descrise mai sus este inserat în unul dintre tuburile 18 de presiune ale unui reactor nuclear cu apă grea sub presiune și se pune în funcțiune reactorul pentru a arde combustibilul. Când este ars în reactor, fasciculul de combustibil produce o putere cel puțin la fel de mare ca aceea produsă de un fascicul de combustibil din uraniu natural în timp ce, însă, asigură un coeficient de vid negativ al agentului de răcire (CVR), un coeficient negativ de temperatură a combustibilului (FTC) și un coeficient negativ de putere (PC). De aceea, după golirea agentului de răcire în

interiorul tubului de presiune, reactivitatea fasciculului de combustibil scade, de fapt. Un reactor construit pentru a arde combustibil din uraniu natural poate fi alimentat prin înlocuirea unuia sau mai multora dintre fasciculele de combustibil din uraniu natural cu fasciculele de combustibil incluzând elemente de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit. Reactorul poate funcționa fără discriminare cu tipul de fascicule de combustibil care sunt încărcate, astfel încât nu este necesară o reconfigurare a reactorului pentru combustibilul diferit. Fasciculele de combustibil de înlocuire incluzând elemente de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit asigură performanțe similare cu acelea ale uraniului natural cu un factor de siguranță crescut. Fasciculele de combustibil de înlocuire pot, de asemenea, să reducă dependența de proviziile de uraniu natural proaspăt profitând de uraniul reciclat și/sau uraniul sărăcit.

În anumite construcții, unul sau mai multe tuburi 18 de presiune sunt umplute cu fascicule de combustibil similare cu fasciculul de combustibil descris mai sus. Spre exemplu, fiecare tub 18 de presiune primește 12 fascicule de combustibil dintr-o dată. Deoarece rețeaua k-infinit a fasciculului de combustibil având uraniu slab îmbogățit și otrăvit de neutroni este mai mare decât un fascicul de combustibil similar din uraniu natural, nu se poate folosi o schemă convențională de alimentare cu un schimb de 8 fascicule. În schimb, se poate folosi o schemă de schimbare a combustibilului cu 4 sau cu 2 fascicule. Mai mult, se poate folosi o combinație de schimbare a fasciculelor cum ar fi un schimb mixt de 2 și 4 fascicule sau un schimb mixt de 4 și 8 fascicule. Realimentarea tubului(lor) 18 de presiune se face cu una dintre aceste scheme în timpul funcționării reactorului nuclear (adică, fără oprirea reactorului).

Revendicări

1. Fascicul de combustibil pentru un reactor nuclear, fasciculul de combustibil cuprinzând:

elemente de combustibil având un conținut fisionabil de ^{235}U , în care fiecare dintre elementele de combustibil ale fasciculului de combustibil are un conținut fisionabil de ^{235}U între aproximativ 0,9 % în greutate ^{235}U și 5,0 % în greutate ^{235}U , și în care cel puțin unul dintre elementele de combustibil este un element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit incluzând o otrăvă de neutroni într-o concentrație mai mare decât aproximativ 5,0 vol%.

2. Fascicul de combustibil conform revendicării 1, în care conținutul fisionabil al cel puțin unui element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit este de cel puțin aproximativ 3,0% în greutate de ^{235}U .

3. Fascicul de combustibil conform revendicării 2, în care conținutul fisionabil al cel puțin unui element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit este între aproximativ 3,0 % în greutate de ^{235}U și aproximativ 3,5 % în greutate de ^{235}U .

4. Fascicul de combustibil conform revendicării 1, în care concentrația de otrăvă de neutroni în cel puțin element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit este între aproximativ 5,0 vol% și aproximativ 8.0 vol%.

5. Fascicul de combustibil conform revendicării 4, în care conținutul fisionabil al cel puțin unui element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit este de aproximativ 3,21 % în greutate de ^{235}U și concentrația de otrăvă de neutroni în cel puțin un element de combustibil din uraniu slab îmbogățit este de aproximativ 6,82 vol%, și în care otrăva de neutroni este disprosiu.

6. Fascicul de combustibil conform oricăreia dintre revendicările 1-5, în care cel puțin un element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit include un element de combustibil central care se extinde de-a lungul unei axe a fasciculului de combustibil și o primă multitudine de elemente de combustibil înconjurând în imediata apropiere elementul de combustibil central și în care restul elementelor de combustibil ale fasciculului de combustibil sunt elemente de combustibil neotrăvite dispuse radial în afara elementelor de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit.

7. Fascicul de combustibil conform revendicării 6, în care fiecare dintre elementele de combustibil neotrăvit are un conținut fisionabil de ^{235}U care nu depășește conținutul fisionabil al elementelor de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit și cel puțin unele dintre elementele de combustibil neotrăvit au un conținut fisionabil de ^{235}U care este mai mic decât conținutul fisionabil al uraniului slab îmbogățit otrăvit.

8. Fascicul de combustibil conform revendicării 7, în care elementele de combustibil neotrăvit sunt aranjate pentru a include o a doua multitudine de elemente de combustibil înconjurând în imediata apropiere prima multitudine de elemente de combustibil și o a treia multitudine de elemente de combustibil înconjurând în imediata apropiere a doua multitudine de elemente de combustibil și în care elementele de combustibil ale celei de a doua multitudini au un conținut fisionabil mai mare față de elementele de combustibil ale celei de a treia multitudini.

9. Fascicul de combustibil conform revendicării 8, în care elementele de combustibil ale celei de a doua multitudini au un conținut fisionabil între aproximativ 3,0 % în greutate și aproximativ 3,5 % în greutate de ^{235}U , și elementele de combustibil ale celei de a treia multitudini au un conținut fisionabil mai mic de aproximativ 2,0 % în greutate de ^{235}U .

10. Fascicul de combustibil conform revendicării 9, în care elementele de combustibil ale celei de a doua multitudini au un conținut fisionabil de aproximativ 3,18 % în greutate de ^{235}U , și elementele de combustibil ale celei de a treia multitudini au un conținut fisionabil de aproximativ 1,73 % în greutate de ^{235}U .

11. Fascicul de combustibil conform oricăreia dintre revendicările 1-10, în care cel puțin un element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit include un amestec de uraniu slab îmbogățit și cel puțin unul dintre: uraniu natural, uraniu reciclat și uraniu sărăcit pentru a atinge conținutul fisionabil dorit predeterminat de ^{235}U .

12. Fascicul de combustibil conform oricăreia dintre revendicările 1-11, în care fiecare dintre elementele de combustibil include cel puțin unul dintre uraniu ușor îmbogățit și uraniu slab îmbogățit amestecate cu cel puțin unul dintre: uraniu natural, uraniu reciclat și uraniu sărăcit pentru a atinge conținutul fisionabil dorit predeterminat de ^{235}U .

13. Fascicul de combustibil conform oricăreia dintre revendicării 1-12, în care fasciculul de combustibil include 37 de elemente de combustibil în total având dimensiune substanțial uniformă.

14. Fascicul de combustibil conform oricăreia dintre revendicării 1-12, în care fasciculul de combustibil include 43 de elemente de combustibil în total, și în care cel puțin un element de combustibil slab îmbogățit otrăvit include 8 elemente de combustibil mari poziționate în centru.

15. Fascicul de combustibil conform oricăreia dintre revendicării 1-14, în care otrava de neutroni include cel puțin o otravă de neutroni inflamabilă.

16. Fascicul de combustibil conform revendicării 15, în care otrava de neutroni include disprosiu.

17. Fascicul de combustibil conform revendicării 15, în care otrava de neutroni include gadoliniu.

18. Fascicul de combustibil conform oricăreia dintre revendicării 1-14, în care otrava de neutroni este o otravă de neutroni neinflamabilă.

19. Fascicul de combustibil conform oricăreia dintre revendicării 1-18, în care fasciculul de combustibil asigură un coeficient de vid al agentului de răcire (CVR) și un coeficient de temperatură al combustibilului (FTC) mai mici decât ale CVR și FTC ale unui fascicul de combustibil echivalent din uraniu natural, fără o scădere a puterii utile când este folosit drept combustibil într-un reactor nuclear cu apă grea sub presiune.

20. Fascicul de combustibil conform revendicării 19, în care fasciculul de combustibil asigură un CVR negativ, un FTC negativ și un coeficient negativ de putere (PC).

21. Metodă pentru punerea în funcțiune unui reactor nuclear cu apă grea sub presiune cuprinzând

asigurarea cu un prim fascicul de combustibil realizat dintr-o multitudine de elemente de combustibil fiecare având un conținut fisionabil de ^{235}U între aproximativ 0,9 % în greutate ^{235}U și 5,0 % în greutate ^{235}U , cel puțin unul dintre elementele de combustibil fiind un element de combustibil din uraniu slab îmbogățit otrăvit incluzând o otravă de neutroni într-o concentrație mai mare de aproximativ 5,0 vol%;

inserarea primului fascicul de combustibil într-un tub de presiune al reactorului nuclear cu apă grea sub presiune;

punerea în funcțiune a unui reactor nuclear cu apă grea sub presiune pentru a arde elementele de combustibil, producând o putere utilă cel puțin la fel de mare ca un fascicul de combustibil din uraniu natural în timp ce asigură un coeficient negativ de temperatură (FTC), un coeficient negativ de putere (PC) și un coeficient de vid al agentului de răcire (CVR) care este mai mic decât cel asigurat prin funcționarea unui reactor nuclear cu apă grea sub presiune cu combustibil din uraniu natural.

22. Metodă conform revendicării 21, în care primul fascicul de combustibil este inserat pentru a înlocui fasciculul de combustibil din uraniu natural.

23. Metodă conform oricăreia dintre revendicările 21 sau 22, care mai cuprinde umplerea tubului 12 de presiune cu fascicule de combustibil similare cu primul fascicul de combustibil.

24. Metodă conform revendicării 23, care mai cuprinde realimentarea tubului de presiune în timpul funcționării reactorului nuclear cu un schimb de 4 fascicule.

25. Metodă conform revendicării 23, care mai cuprinde realimentarea tubului de presiune în timpul funcționării reactorului nuclear cu un schimb de 2 fascicule.

26. Metodă conform revendicării 23, care mai cuprinde realimentarea tubului de presiune în timpul funcționării reactorului nuclear cu un schimb mixt de 2 și 4 fascicule.

27. Metodă conform revendicării 23, care mai cuprinde realimentarea tubului de presiune în timpul funcționării reactorului nuclear cu un schimb mixt de 4 și 8 fascicule.

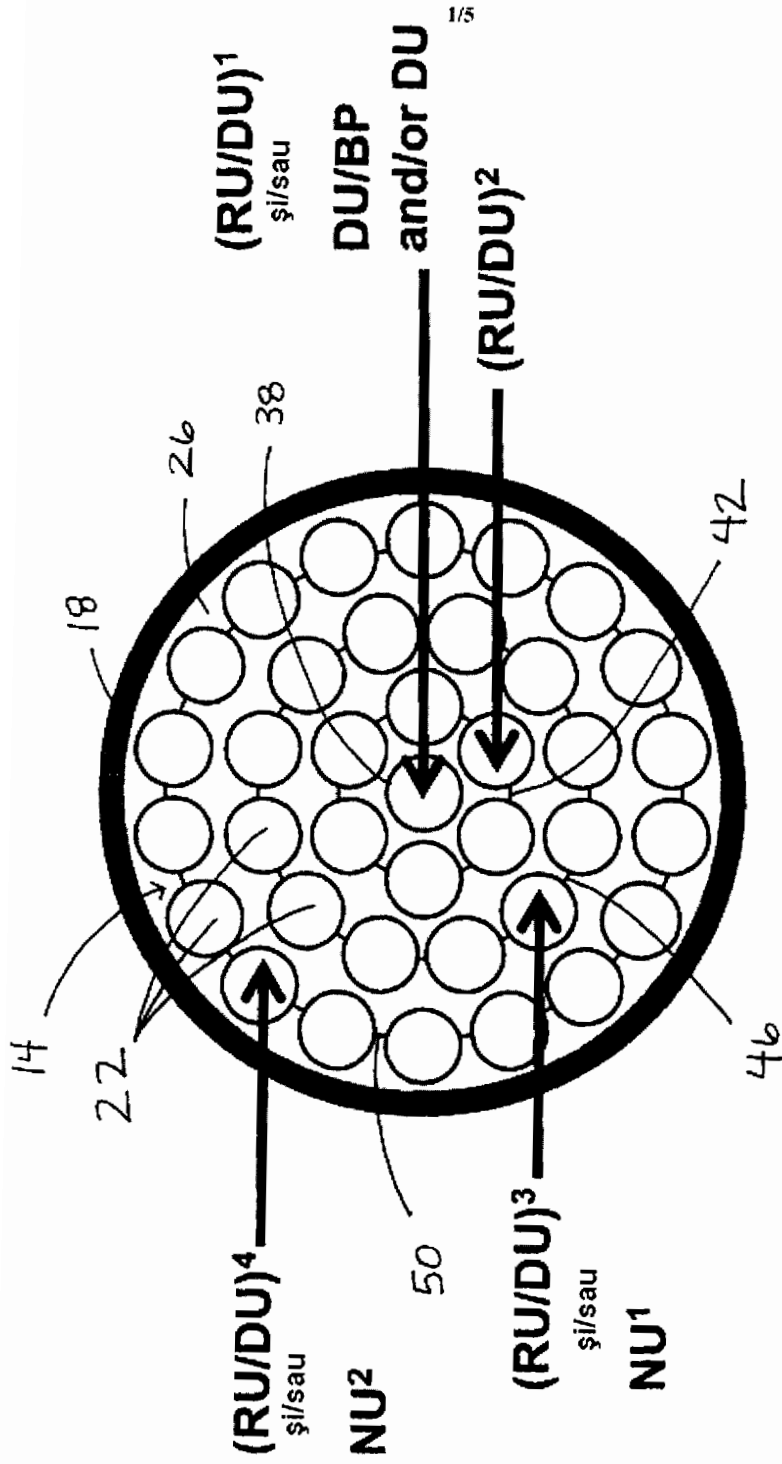


FIG. 1

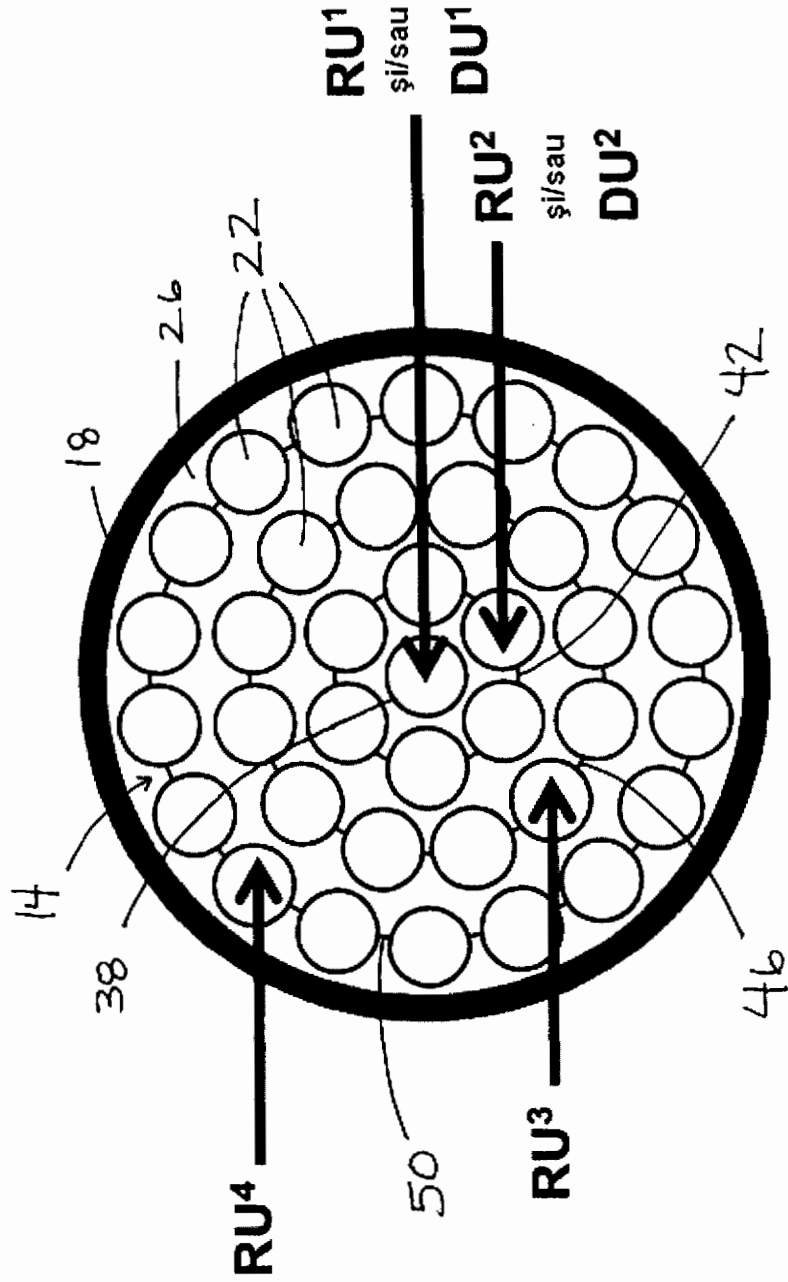


FIG. 2

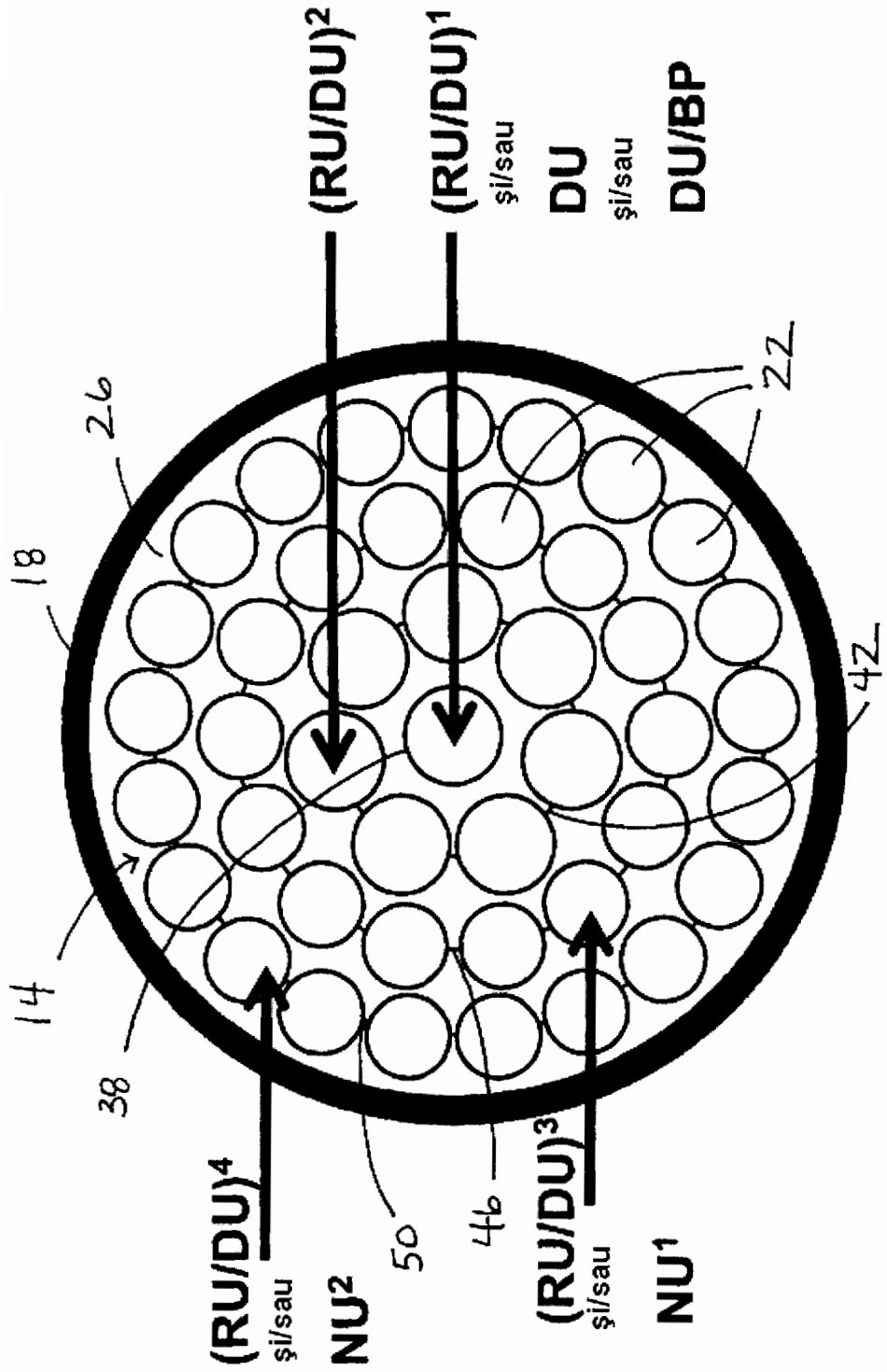


FIG. 3

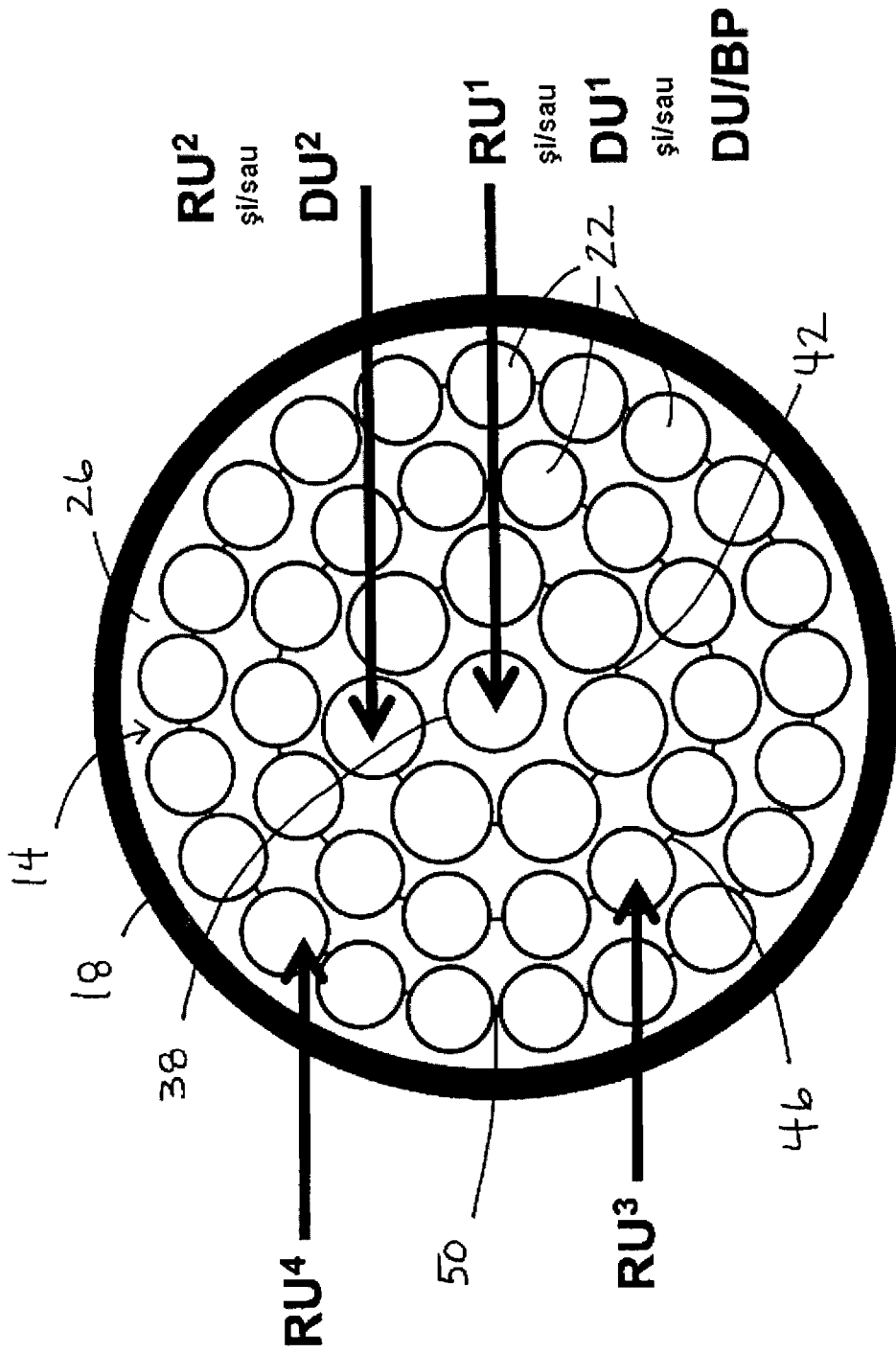


FIG. 4

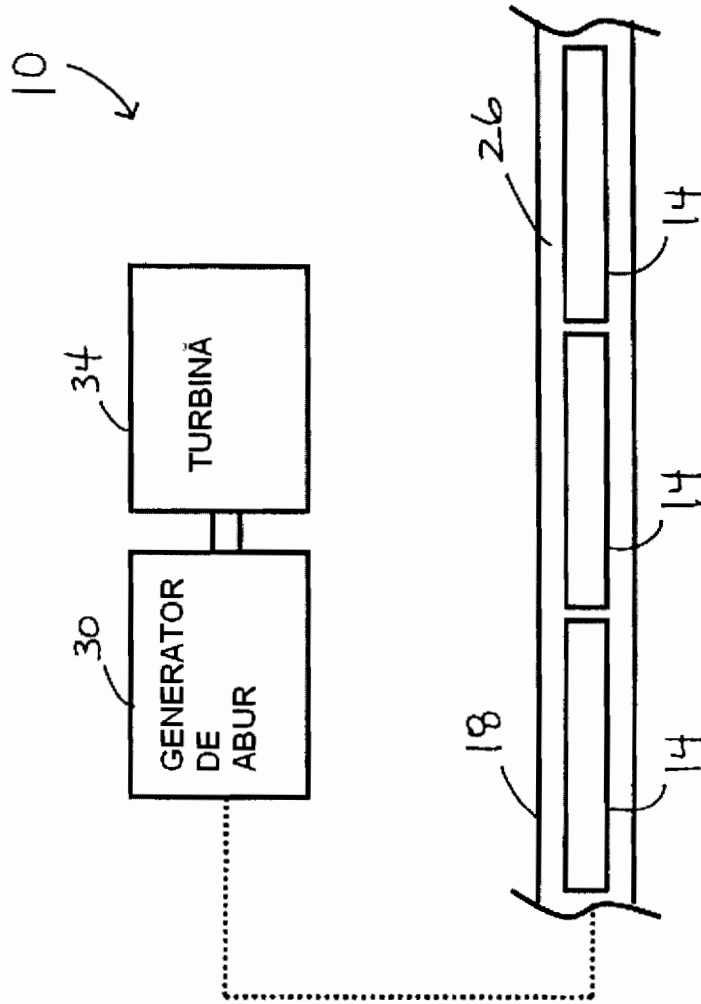


FIG. 5