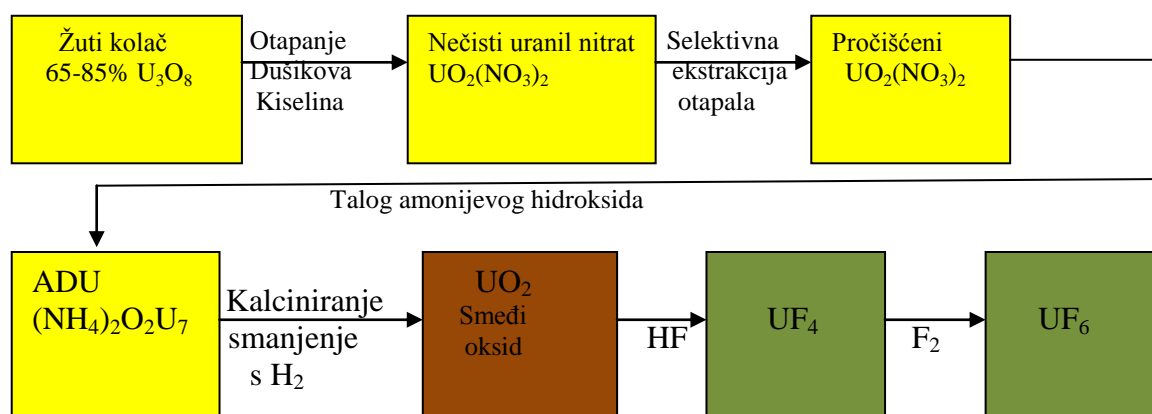


NUKLEARNI GORIVNI CIKLUS

KONVERZIJA

Prirodni uran proizvodi se u formi stabilnog oksida poznatog kao uranov peroksid (žuti kolač koji sadrži 70% do 90% U_3O_8). Kako prirodni uran još uvijek sadrži nečistoće to se prije obogaćivanja prirodni uran mora rafinirati, a zatim ga je potrebno pretvoriti u uranov heksafluorid (UF_6). Taj proces prevođenja žutog kolača u uranov heksafluorid naziva se konverzija. Nakon obogaćivanja uranov heksafluorid mora se opet konvertirati u uranov dioksid (UO_2), koji služi za izradu tableta goriva. Kapacitet postrojenja za konverziju izražava se u proizvedenim tonama urana na godinu. Komercijalna postrojenja za konverziju u pogonu su u Francuskoj, Kanadi, Velikoj Britaniji, Sjedinjenim Američkim Državama, Kini i Rusiji. Ukupni svjetski kapacitet komercijalnih postrojenja za primarnu konverziju urana iznosi oko 76.000 tU/god. U prvoj fazi procesa konverzije odstranjuju se nečistoće otapanjem žutog kolača dušičnom kiselinom i zatim se selektivnom ekstrakcijom organskim otapalom dobiva pročišćeni uranil nitrat(kao što je prikazano na slici ispod) do potrebnog stupnja nuklearne čistoće urana. Nadalje se djelovanjem amonijevog hidroksida dobiva amonijev diuranat koji se grijanjem u pećima za sušenje uz dovođenje vodika reducira u uranov dioksid. Djelovanjem fluorovodika na uranov dioksid stvara se uranov tetrafluorid, koji se u zadnjoj fazi procesa konverzije spajanjem s plinovitim fluorom prevodi u uranov heksafluorid (UF_6). Uranov heksafluorid pogodan je za korištenje u procesu obogaćivanja jer je na relativno niskoj temperaturi (više od 56°C) u plinovitom stanju. Na sobnoj temperaturi uranov heksafluorid je u krutom stanju što omogućuje njegovo jednostavno rukovanje.



Slika. Konverzija U_3O_8 u UF_6

OBOGAĆIVANJE

Većina komercijalnih energetskih nuklearnih reaktora, koji su u pogonu ili u izgradnji, koriste kao gorivo uran obogaćen u izotopu ^{235}U . Kako prirodni uran sadrži svega 0,7% fisibilnog urana (^{235}U), to se u uranu, koji se koristi kao gorivo u većini energetskih nuklearnih reaktora, mora udio ^{235}U povećati i taj proces povećanja udjela ^{235}U naziva se obogaćivanje.

Metode obogaćivanja urana

Plinska difuzijska metoda

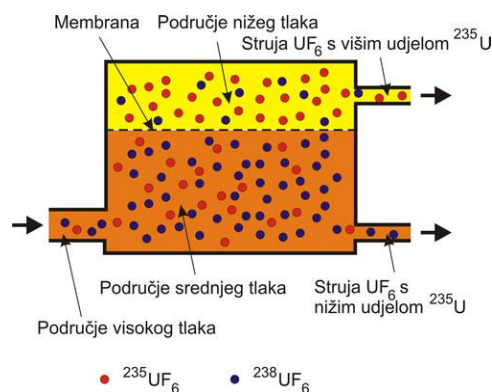
Metoda se temelji na činjenici da unutar plina koji se sastoji od mnogo različitih molekula svaka skupina molekula ima istu prosječnu kinetičku energiju. Razlog tome je velik broj sudara molekula unutar samog plina, pri čemu dolazi do prijenosa kinetičke energije, što znači da se dodavanjem komponente visoke kinetičke energije u smjesu njezina energija brzo podijeli s ostalim komponentama i to zahvaljujući sudarima. Jednoliko dijeljenje energije se naziva termičko uravnoteženje (engl. *thermal equilibrium*). Kinetička energija računa se prema formuli:

$$E_K = m \cdot v^2 / 2$$

Iz gornje formule može se zaključiti da će dvije molekule iste prosječne kinetičke energije imati različite brzine koje će biti obrnuto proporcionalne korijenu njihove mase.

$$v_1/v_2 = (m_2/m_1)^{1/2}$$

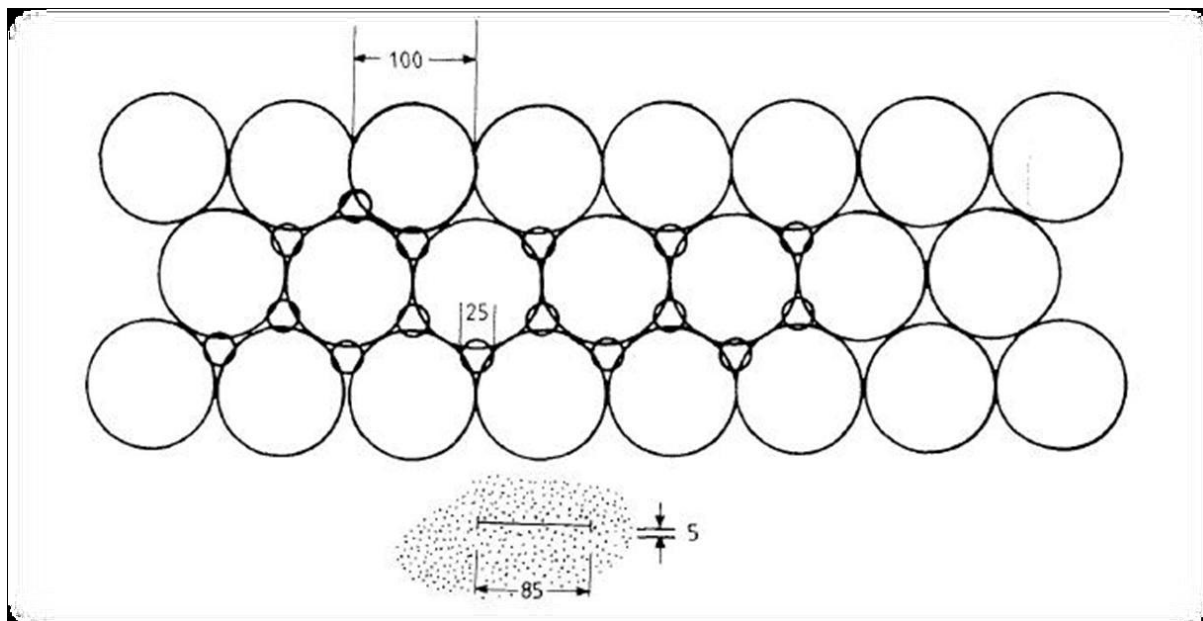
U plinu koji se sastoji od $^{235}\text{UF}_6$ i $^{238}\text{UF}_6$ omjer prosječnih brzina iznosi 1,0043 u korist molekula s ^{235}U . Bitno je napomenuti da se molekule u stvarnosti gibaju različitim brzinama i da gornji izraz vrijedi za prosječne brzine i za jako veliki broj molekula. Difuzijska metoda temelji se na spomenutoj razlici u prosječnim brzinama, tako što razlikom tlakova tjera plin kroz poroznu barijeru. Barijera je sastavljena od tankog čvrstog materijala koji ima veliki broj malih pora. Brže molekule imaju veću vjerojatnost prolaska kroz barijeru i tako se povećava njihova koncentracija iza barijere. Ova metoda je jedna od najstarijih i prvi put je korištena 1920. za razdvajanje izotopa neona.



Najveću prepreku ovoj metodi predstavlja problem proizvodnje adekvatnog materijala za barijeru. Problemi pri proizvodnji barijere su sljedeći:

1. Promjer pora mora biti značajno manji od prosječnog puta kojeg molekula prođe između dva sudara. Razlog tome je što bi se u suprotnom molekule sudarale ispred i unutar barijere i tako poništavala razliku u brzini koja je temelj ove metoda. Pore moraju biti dovoljno velike kako bi se omogućio razuman protok kroz njih.
2. Barijera mora biti dovoljno tanka kako bi imala adekvatnu propusnost pri razumnom tlaku. Također mora biti i dovoljno debela da izdrži razliku u tlaku za koju je poželjno da bude što veća kako bi povećala protok kroz barijeru.
3. Kako je UF_6 iznimno korozivan, materijal od kojeg je izrađena barijera mora biti otporan na koroziju jer u protivnom dolazi do začepljenja rupica.

Pri tlaku od 50 kPa i temperaturi od 80 °C molekula uranovog heksafluorida ima promjer od 0,7 nm, a prosječna udaljenost između molekula iznosi 5 nm. Put koji ta molekula prođe između sudara onda iznosi 85 nm, stoga bi promjer rupica na barijeri trebao biti oko 25 nm. Takve rupice moguće je dobiti kombiniranjem sfera čiji je promjer otprilike 100 nm (slika)



Slika barijere nastale kombinacijom sfera promjera 100 nm

Metode za proizvodnju barijera pojedinih država su tajne ali se zna da u SAD-u koriste niklov prah, a u Francuskoj su barijere keramičke. Japanci eksperimentiraju korištenjem nikla, aluminija i teflona. Neovisno o materijalu, sve barijere se proizvode pri visokom tlaku i temperaturi komprimiranjem u listove debljine nekoliko mikrometara. Ti tanki listovi moraju podnijeti razliku u tlaku od 30 do 50 kPa tijekom nekoliko godina. Barijere moraju biti složene tako da površina kontakta s plinom bude maksimalna.

Učinak barijere ne ovisi isključivo o njoj samoj već i o temperaturi i tlaku plina. Povećanjem tlaka na ulaznoj strani smanjuje se slobodni put molekule prije sudara, a time se povećava broj sudara u blizini rupica, što smanjuje efikasnost procesa. Uz to je poželjno da tlak na produktnoj strani bude što niži kako bi se smanjio broj molekula koje se vraćaju unazad kroz barijeru. Povećanjem temperature povećava se protok plina, ali se i povećava rad kompresora za istu količinu plina, stoga se temperatura mora držati na najmanjoj mogućoj razini na kojoj plin neće prijeći u neko drugo agregatno stanje. Uz to, na niskim temperaturama smanjuje se problem korozije.

Obogaćivanje centrifugama

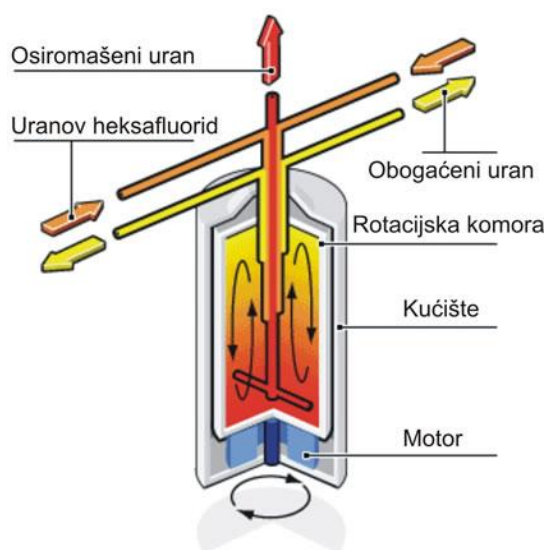
Metoda centrifuga danas je dominantna metoda za proizvodnju obogaćenog urana. Prednosti metode su niska potrošnja energije, veći separacijski efekt, ali su zahtjevi za održavanjem veći nego kod difuzijske metode. Princip rada je relativno jednostavan: u rotirajući se cilindar uvodi uranov-heksafluorid u plinovitom stanju. Teže molekule ($^{238}\text{UF}_6$) zbog veće centrifugalne sile pomiču se dalje od osi rotacije dok bliže osi rotacije ostaje više lakših molekula ($^{235}\text{UF}_6$). Plin unutar centrifuge nalazi se u dinamičkoj ravnoteži između centrifugalne sile koja potiskuje plin prema stijenci cilindra i difuzijske sile koja nastoji plin jednoliko raspodijeliti unutar volumena rotirajućeg cilindra. U slučaju prisustva dvije vrste molekula (binarna smjesa) različitih masa ravnotežni separacijski faktor α_0 predstavlja razliku koncentracija molekula različitih masa (na vanjskoj stijenci rotirajućeg cilindra) i dan je izrazom

$$\alpha_0 = \exp[(M_2 - M_1)v^2/2RT],$$

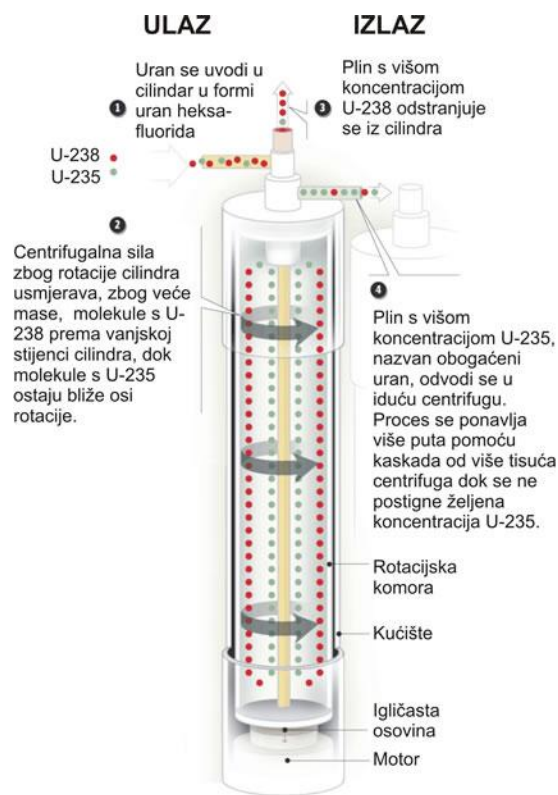
gdje je v obodna brzina rotora, M_2 i M_1 mase molekula, R univerzalna plinska konstanta, a T temperatura plina. Normalno, povratni tok se uspostavlja i lakše molekule grupiraju se u gornjim dijelovima centrifuge, a teže u donjim. Rezultat grupiranja molekula je aksijalni separacijski faktor koji može biti mnogo veći od radijalnog separacijskog faktora. Ukupan separacijski faktor za centrifuge definiran je kao

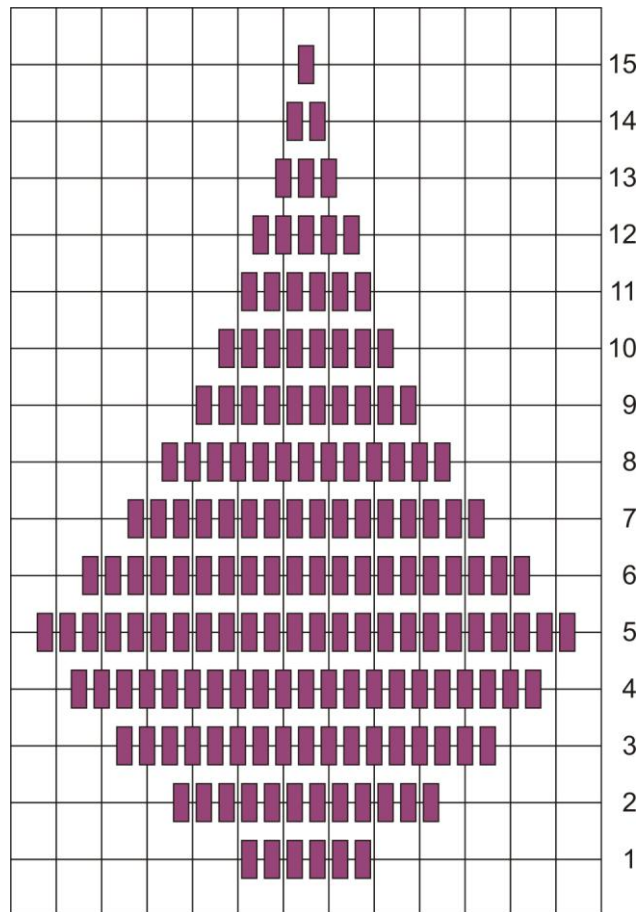
$$\alpha = [x_p/(1 - x_p)]/[x_w/(1 - x_w)]$$

gdje su x_p i x_w koncentracije ^{235}U u produktu (obogaćenom uranu) i osiromašenom uranu (jalovini).



Centrifuge se izrađuju od različitog materijala, različitih su duljina cilindara, promjera cililindara te radnih brzina. Centrifuge tvrtke USEC u Ohio visoke su 12 m, Urencove do 5 m, a najviše pakistanske, bazirane na starom Urenco dizajnu, manje se od 2 m. Samostalna centrifuga nije u stanju postići prihvatljivo obogaćenje i brzinu protoka obogaćenog urana te se zbog toga centrifuge spajaju u kaskade. Serijskim spajanjem povećava se nivo obogaćenja, a paralelnim spajanjem povećava se brzina protoka (strujanja) obogaćenog urana. Na Slici 1. shematski je prikazana kaskada. Broj centrifuga u retku određen je performansama svake centrifuge i određenim stupnjem obogaćenja.





Slika Shematski prikaz kaskada

Količina UF_6 ograničena je tlakom kondenzacije na stijenu cilindra te stoga UF_6 mora ostati u plinovitom stanju jer u protivnom dolazi do disbalansa rotora i pucanja. Maksimalan tlak pri radnoj temperaturi reda veličine je 0,001 bar što odgovara količini plina od nekoliko grama.

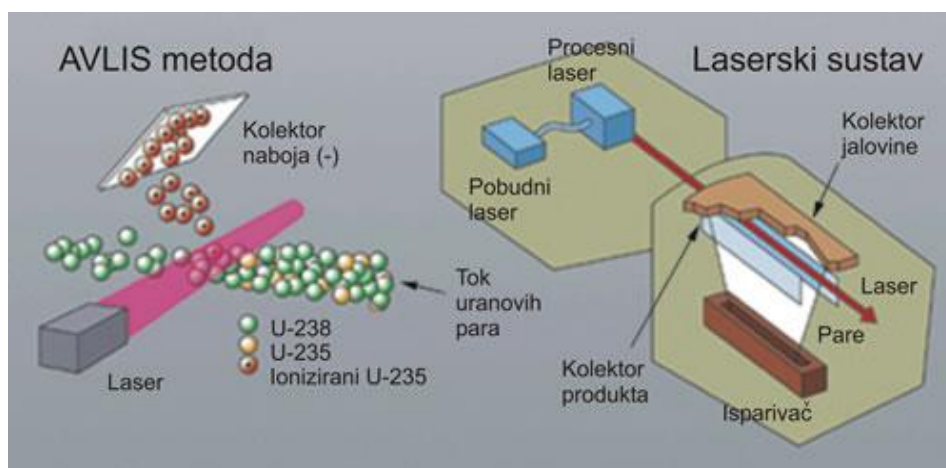


Obogaćivanje urana pomoću lasera

Iako je predloženo više laserskih metoda obogaćivanja urana danas su u fazi razvoja sljedeće dvije laserske metode obogaćivanja urana: AVLIS (Atomic Vapour Laser Isotopic Separation) i SILEX (Separation of Isotopes by Laser Excitation).

AVLIS metoda

AVLIS metoda koristi lasere s finim podešavanjem valne duljine izlaznog snopa koji se koristi za selektivnu ionizaciju atoma urana. Apsorpcijske linije ^{235}U i ^{238}U razlikuju se za 0,01 nm, (502,73 nm, prema 502,74 nm). Laser se podesi na valnu duljinu od 502,73 nm tako da se tada obavlja pobuđivanje i fotoionizacija samo atoma ^{235}U . Ionizirani atomi se elektrostatički nakupljaju u kolektoru dok neutralni atomi ^{238}U prolaze. AVLIS sistem sadržava isparivač i kolektor, koji zajedno čine separacijski sistem, te laserski sistem. Metoda ima veću energetska efikasnost nego plinske centrifuge, veći separacijski faktor i manji volumen radioaktivnog otpada. Međutim, 1999, nakon pet godina rada na poboljšanju metode u SAD-u, tvrtka USEC obustavila je AVLIS program.

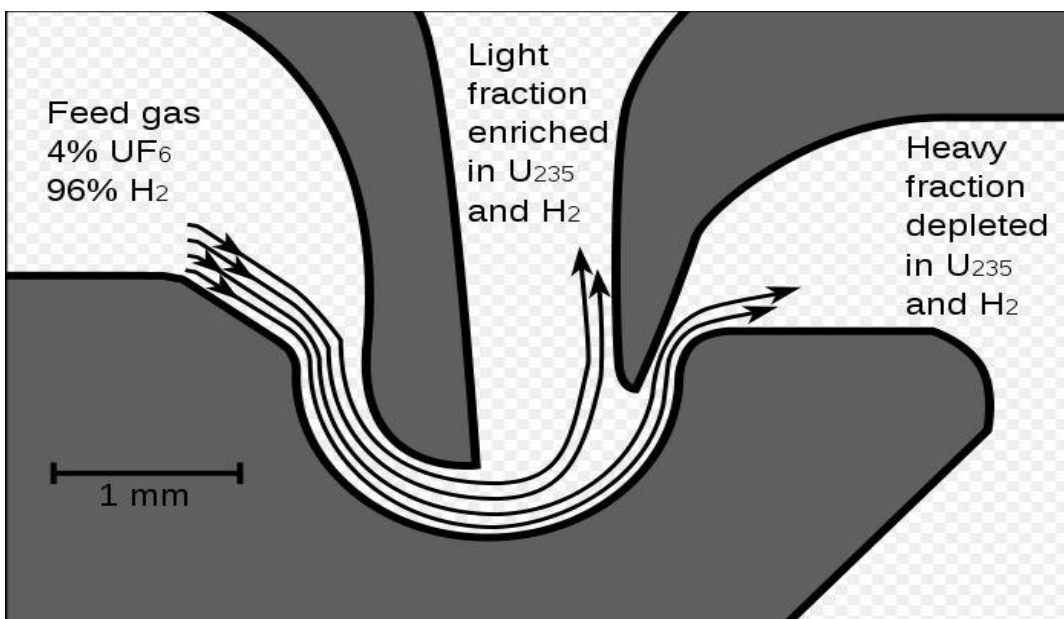


SILEX metoda

Za razliku od AVLIS metode koja koristi metalni uran, SILEX metoda koristi UF_6 . Prema navodima iz tvrtke USEC metoda je u ranoj fazi razvoja, a navodno se umjesto elektrostatskog odvajanja iona koristi magnetno. 2003. godine USEC je objavio da će istraživanja nastaviti na metodi centrifuga, a na razvoju metode 2006. godine se uključio GE (General Electric) Energy.

Aerodinamičke metode

Aerodinamičko obogaćivanje temelji se na centrifugalnoj separaciji pri skretanju mlaza plina. Uranovom-heksafluoridu dodaje se laki plin, He ili H_2 , jer je time povećana brzina strujanja plina. Smjesa plinova ($UF_6 + H_2$) uvodi se u kompresor, a nakon toga u sustav dvostrukog odvajanja. U prvom se separacijskom stupnju odvaja lakši dio, a ostatak toka ponovo dijeli na srednji i teški dio. Srednji se dio ponovo uvodi u kompresor dok se teški dio odvodi u donje nivoe separacijske kaskade.



Slika. Aerodinamička separacija

Optimalni radni tlak separacijskih mlaznica inverzno je proporcionalan njihovoj dimenziji. Zbog ekonomskih razloga poželjno je da je radni tlak sto je moguće viši. Zbog toga su dimenzije mlaznica vrlo male: srednji radius separacijskih kanala je oko 0,05 mm dok je tlak na ulazu sistema mlaznica oko 0,5 bar. Metoda ima vrlo visok utrošak energije – oko 3000 kWh/kgSWU, ali je separacijski učinak po kaskadi veći nego kod difuzijske metode.

U Brazilu je bila sagrađena instalacija za obogaćivanje urana metodom dvostrukog odvajanja.

Elektromagnetsko odvajanje izotopa

Da bi se izotopi urana odvojili pomoću ove metode metalni se uran mora prevesti u plinovito stanje i nakon toga ionizirati (npr. bombardiranjem elektronima visokih energija). Dobiveni pozitivno naelektrizirani ioni nakon toga se ubrzavaju, a zatim im se pomoću magnetskog polja zakrivljuje putanja. Radius zakrivljenosti putanje ovisan je o masi iona; teži ioni imaju veći radius zakrivljenosti što se koristi za odvajanje izotopa na kolektoru. Budući da su razlike u masi izotopa malene, radiusi iona su vrlo bliski. Visoko obogaćeni uran upotrijebljen u bombi bačenoj na Hiroshimu dobiven je ovom metodom. Danas se elektromagnetsko odvajanje izotopa urana komercijalno ne koristi.

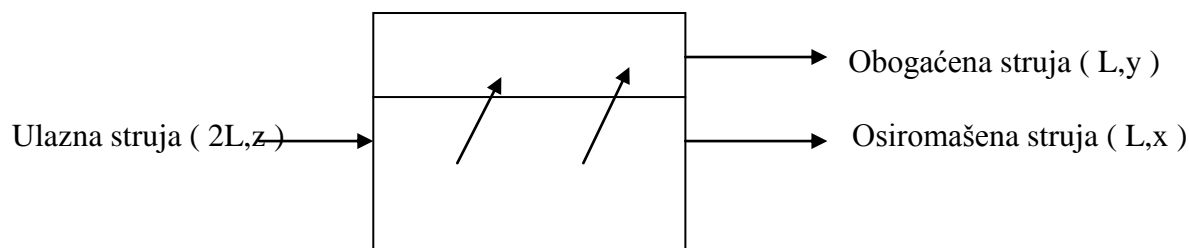
Kemijske metode obogaćivanja urana

Francuski postupak kemijskog obogaćivanja urana nazvan CHEMEX koristi promjenu valencije (U^{3+} i U^{4+}) uranovih iona u vodenoj otopini. ^{238}U je više koncentriran u trovalentnim uranovim spojevima, dok je ^{235}U koncentriraniji u četverovalentnim spojevima. Uklanjanjem U^{4+} iona pomoću organskog otapala nepomiješanog s vodenom otopinom moguće je dobiti obogaćeni uran. Kao sredstvo za ekstrakciju koristi se tributil fosfat.

Koncept separacijskog rada

Separacijski rad nema dimenziju energije već ga možemo definirati kao funkciju koja ovisi o koncentraciji sirovine, obogaćenog izlaza i nusprodukata nastalih pri obogaćivanju, govori nam koliki napor moramo uložiti da odvojimo dva izotopa, u našem slučaju ^{235}U i ^{238}U . Isti iznos separacijskog rada zahtjeva različite iznose energije ovisno o efikasnosti separacijske tehnologije. Separacijski rad mjerimo u *kilogramima separacijskog rada*.

Postrojenje koje obavlja separaciju dijeli uranij na dva dijela, dio koji je obogaćen izotopom ^{235}U i na dio koji je osiromašen, obavljajući pri tom separacijski rad. U svrhu matematičkog modeliranja postrojenja zamislimo da se postrojenje za obogaćivanje sastoji od velikog broja elementarnih faza procesa separacije izotopa (model elementarne faze procesa separacije izotopa predložen je donjom slikom). Kako je prikazano na slici u svakoj se elementarnoj fazi procesa separacije izotopa ulazna struja dijeli u dvije izlazne frakcije, jednu koja je malo obogaćena i drugu koja je malo osiromašena izotopom ^{235}U .



Slika Elementarna faza procesa separacije izotopa

2L-Količina urana koja uđe u razinu

z-varijabla koja opisuje sirovinu koja ulazi u elementarnu jedinicu

x-varijabla koja opisuje izlazni tok nusprodukata nastalih obogaćivanjem

y-varijabla koja opisuje izlazni tok obogaćenog izotopa ^{235}U

U slučaju separacije uranovih izotopa UF_6 plinskom difuzijom, separacijski faktor elementarne faze separacije se označava grčkim slovom α i definira se kao:

$$(1) \quad \alpha = \frac{\frac{y}{1-y}}{\frac{x}{1-x}}$$

Alfa u izrazu u najgorem slučaju poprima vrijednost 1 (slučaj kad elementarna faza procesa separacije izotopa nije zaustavila niti jednu molekulu ^{238}U), svaka vrijednost viša od jedinice definira malu, ali ključnu razliku kojom možemo opisati vrijednost separacije na elementarnoj fazi procesa separacije izotopa te pomoću takvog opisa elementarne faze modelirati čitavo postrojenje koje se sastoji od niza takovih elementarnih faza.

Tu razliku definiramo kao:

$$(2) \quad \psi = \alpha - 1.$$

Kombinirajući jednačbu (1) s jednačbom (2) dobivamo:

$$(3) \quad y = \frac{x * (1 + \psi)}{1 + \psi * x}.$$

Pretpostavljamo veoma malu razliku tj. $\Psi \ll 1$, te uz tu pretpostavku možemo razvojem u geometrijski red gornju jednačbu (3) pisati na sljedeći način:

$$(4) \quad y = x * (1 + \psi) * (1 - \psi * x + \psi^2 x^2 + \dots).$$

Zanemarivanjem svih članova gornjeg reda u kojima su potencije Ψ veće ili jednake 2 dolazimo do sljedećeg izraza:

$$(5) \quad y - x = \psi * x * (1 - x).$$

Jednačba (5) nam je važna jer nam daje razliku masenog udjela ^{235}U između izlazne obogaćene struje i izlazne osiromašene struje:

Da bi dobili potrebni stupanj obogaćenja plin UF_6 mora strujati kroz velik broj elementarnih faza procesa separacije koje čine postrojenje za obogaćivanje.

Vrijednosna funkcija

Valja naći vrijednosnu funkciju koja nam “reflektira” vrijednost jedinice mase urana kao funkciju obogaćenja ^{235}U i pomoću takve funkcije pokušat ćemo ocijeniti povećanje vrijednosti obje struje pri prolazu kroz elementarnu fazu procesa separacije..

Pretpostavimo da vrijednosna funkciju $V(x)$ koju trebamo odrediti ima sljedeća svojstva:

1. $V(x)$ predstavlja vrijednost jedinične mase urana s obogaćenjem ^{235}U x , odnosno $M \cdot V(x)$ predstavlja vrijednost M jedinica mase urana s obogaćenjem ^{235}U x .
2. Pošto rad utrošen za separaciju izotopa dane količine ulaznog materijala u elementarnoj fazi procesa ne ovisi o obogaćenju to ni povećanje vrijednosti u elementarnoj fazi procesa separacije izotopa ne ovisi o stupnju obogaćenja.

Tada će promjena vrijednosti Δ na elementarnoj fazi procesa separacije izotopa biti jednaka:

$$(6) \Delta = L \cdot V(x) + L \cdot V(y) - 2 \cdot L \cdot V(z).$$

Razvijanjem $V(y)$ i $V(z)$ oko x u Taylorov red dobivamo:

$$(7) V(y) = V(x) + (y - x)V'(x) + \frac{(y - x)^2}{2} \cdot V''(x) + \dots$$

$$(8) V(z) = V(x) + (z - x)V'(x) + \frac{(z - x)^2}{2} \cdot V''(x) + \dots$$

Nadalje iz sačuvanja ^{235}U u elementarnoj fazi procesa separacije izotopa dobivamo relaciju:

$$(9) z - x = \frac{y - x}{2}.$$

Uvrštavanjem jednadžbi (7), (8), (9) u jednadžbu (6) i zanemarujući članove koji sadrže $(y - x)$ na potenciju veću od stupnja 2 dobivamo:

$$(10) \Delta = \frac{L \cdot (y - x)^2 \cdot V''(x)}{2}.$$

Umjesto člana $(y - x)$ možemo pisati jednadžbu (9):

$$(11) \Delta = \frac{L \cdot x^2 \cdot (1 - x)^2}{2} \cdot V''(x) \cdot \psi^2.$$

Da bi Δ učinili nezavisnim o varijabli x , $V''(x)$ nam mora iznositi:

$$(12) V''(x) = \frac{1}{[x(1 - x)]^2}.$$

Dobivena jednadžba je linearna diferencijalna jednadžba drugog stupnja koju možemo riješiti dvostrukim integriranjem:

Solve $\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = \frac{1}{x^2 (-x+1)^2}$:

Integrate both sides with respect to x :

$$\frac{dV(x)}{dx} = \int \frac{1}{x^2 (-x+1)^2} dx = -\frac{1}{x} + 2 \log(x) - 2 \log(-x+1) - \frac{1}{x-1} + c_1$$

, where c_1 is an arbitrary constant.

Integrate both sides with respect to x :

$$V(x) = \int \left(-\frac{1}{x} + 2 \log(x) - 2 \log(-x+1) - \frac{1}{x-1} + c_1 \right) dx =$$

$$-\log(x) + 2x \log(x) + \log(-x+1) - 2x \log(-x+1) + c_1 x + c_2$$

, where c_2 is an arbitrary constant.

Computed by Wolfram|Alpha

Dobiveno rješenje:

$$(13) \quad V(x) = C_0 + C_1 x + (2x-1) \ln\left(\frac{x}{1-x}\right).$$

Gdje su C_0 i C_1 konstante integracije.

Posebno pogodan oblik gornje rješenje poprima za početne uvjete $V'(0,5) = V(0,5) = 0$ jer će tada izraz $(2x-1) \ln\left(\frac{x}{1-x}\right)$ biti jednak nuli. Na taj način smo u cijelosti definirali našu vrijednosnu funkciju kao:

$$(14) \quad V(x) = (2x-1) \ln\left(\frac{x}{1-x}\right).$$

S gornjom definicijom vrijednosne funkcije jednažba (11) sad poprima oblik:

$$(15) \quad \Delta = \frac{L * \psi^2}{4}.$$

Gornji izraz definira separacijski rad koji je izvršen na elementarnoj fazi procesa separacije izotopa. Iz jednažbe (15) proizlazi da je dimenzija separacijskog rada ista kao i fizikalne veličine L , tj. kilogrami urana.

Jednažba (15) opisuje separacijski rad izvršen na elementarnoj fazi procesa separacije izotopa, a pošto smo prethodno naveli da se postrojenje sastoji od velikog broja tih elementarnih faza procesa, tada dolazimo do zaključka da je separacijski rad postrojenja jednak zbroju svih separacijskih radova elementarnih faza procesa. Za izvršeni separacijski rad postrojenja dobivamo:

$$(16) \quad \text{Izvršen separacijski rad postrojenja} \quad SWU = \frac{1}{4} * \sum_{SVEFAZE} (L * \psi^2)$$

Kvantitativni aspekti masa urana i separacijskog rada postrojenja za obogaćivanje

Pri planiranju obogaćivanja nuklearnog goriva potrebno je znati koliko prirodnog urana valja pribaviti da bi se dobila željena količina obogaćenog urana, te koliki će biti troškovi procesa obogaćivanja.

Uzimajući u obzir sačuvanje ukupne količine urana i izotopa ^{235}U u postrojenju za obogaćivanje dobivamo sljedeće relacije:

$$(1) \quad F = P + W$$

$$(2) \quad x_{\text{poč}}F = x_{\text{kon}}P + x_{\text{rez}}W$$

P – masa konačnog (obogaćenog) urana (kg)

W – masa rezidualnog (osiromašenog) urana (kg)

F – masa početnog urana (kg)

x_{kon} – obogaćenje (maseni udio ^{235}U) konačnog urana

x_{rez} – rezidualno obogaćenje (maseni udio ^{235}U osiromašenog urana)

$x_{\text{poč}}$ – obogaćenje (maseni udio ^{235}U) početnog urana

Iz relacija (1) i (2) dobivamo za masu početnog urana:

$$(3) \quad F = P(x_{\text{kon}} - x_{\text{rez}})/(x_{\text{poč}} - x_{\text{rez}})$$

Troškovi obogaćivanja određeni su separacijskim radom koji je potrebno uložiti da bi se iz mase početnog urana F obogaćenja $x_{\text{poč}}$ dobila masa konačnog urana P obogaćenja x_{kon} . Separacijski rad SWU dan je relacijom:

$$(4) \quad SWU = P * V(x_{\text{kon}}) + W * V(x_{\text{rez}}) - F * V(x_{\text{poč}}).$$

$V(x)$ označava vrijednosnu funkciju danu u jednadžbom (5) .

$$(5) \quad V(x) = (2x-1) * \ln\left(\frac{x}{1-x}\right)$$

Cijena prirodnog urana C_{prij} se dobiva množenjem mase početnog urana F i cijene jedinice mase prirodnog urana $C_{1\text{prij}}$.

$$(6) \quad C_{\text{prij}} = F * C_{1\text{prij}}$$

Cijena obogaćivanja C_{obog} se dobiva množenjem količine separacijskog rada SWU i cijene jedinice separacijskog rada $C_{1\text{sep}}$.

$$(7) \quad C_{\text{obog}} = \text{SWU} * C_{1\text{sep}}$$

Cijena konverzije C_{konv} iz UF₆ u UO₂ se dobiva množenjem mase konačnog (obogaćenog) urana P i cijene konverzije jedinice mase obogaćenog urana $C_{1\text{konv}}$.

$$(8) \quad C_{\text{konv}} = P * C_{1\text{konv}}$$

Cijena proizvodnje gorivnih elemenata C_{gorel} se dobiva množenjem mase konačnog (obogaćenog) urana P i cijene proizvodnje gorivnog elementa po jedinici mase obogaćenog urana $C_{1\text{gorel}}$.

$$(9) \quad C_{\text{gorel}} = P * C_{1\text{gorel}}$$

Cijena goriva C_{goriva} jednaka je zbroju cijene prirodnog urana C_{prir} , cijene obogaćivanja C_{obog} , cijene konverzije C_{konv} i cijene proizvodnje gorivnih elemenata C_{gorel} .

$$(10) \quad C_{\text{goriva}} = C_{\text{prir}} + C_{\text{obog}} + C_{\text{konv}} + C_{\text{gorel}}$$