

NUKLEARNI GORIVNI CIKLUS

ZADACI

1. U nekom reaktoru nalazi se prva jezgra od 3 tone obogaćenog urana u iznosu 2% u U^{235} . Ta je jezgra u nekom vremenskom intervalu dala energiju od $4,1 \cdot 10^5$ MWh. Koliki je odgor (stupanj izgaranja goriva) jezgre na kraju tog vremenskog intervala?
(7 kg/t, 35%, 5700 MWd/t)
2. Koliko grama U^{235} ima u 1 toni rude iskopane u rudniku Žirovski Vrh (Slovenija), ako je poznato da 1 tona rude iz tog rudnika sadrži 840 grama uranovog peroksida U_3O_8 ?
(5,05 g)
3. Ruda sadrži 0,5% karnotita ($K_2O \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 3H_2O$). Kolika je masa urana sadržana u jednoj toni te rude?
(2,64 kg)
4. Tvornica za proizvodnju gorivnih elemenata treba 10.000 kg urana obogaćenog 3% u U^{235} . S kojom količinom prirodnog urana treba snabdjeti postrojenje za obogaćivanje ako je rezidualno obogaćenje tog postrojenja 0,2%? Kolika će biti cijena procesa obogaćivanja ako je cijena 1 kg separacijskog rada 100 \$?
(54795 kg, 43065 kg separacijskog rada, 4.306.500 \$)
5. Koliku količinu rude treba iskopati u rudniku Los Ratones (Španjolska) da bi se dobilo 50 tona urana obogaćenog 3% u U^{235} ? Rezidualno obogaćenje postrojenja za obogaćivanje iznosi 0,2%. Ruda sadrži 0,527% uranovog peroksida U_3O_8 . Koliko više rude treba iskopati ako se rezidualno obogaćenje postrojenja za obogaćivanje poveća na 0,3%? Koje rezidualno obogaćenje je ekonomičnije ako je cijena prirodnog urana po kilogramu za 50% veća od cijene separacijskog rada?
(61312 t, 12135 t, prvo jer je $P_1=625P_S$ a $P_2=662P_S - P_S$ je jedin. cijena sep. rada)
6. Termički reaktor koji kao gorivo koristi prirodni uran proizveo je tijekom nekog vremenskog intervala energiju u iznosu 150.000 MWh. Koliki je postotak U^{235} u gorivu na kraju tog vremenskog intervala ako je na početku rada u reaktoru bilo 30 kg U^{235} ?
(0,52%)
7. Koliko je rezidualno obogaćenje postrojenja za obogaćivanje urana za koje će cijena dobivenog urana biti minimalna, ako je jedinica mase prirodnog urana za 50% skuplja od jedinice separacijskog rada i ako je ulazni uran prirodni uran? (0,185%)

8. Kolika je ukupna cijena po kg urana proizvedenog gorivnog elementa obogaćenja 3.3 w/o, ako su poznati sljedeći podaci: cijena prirodnog urana je 60 \$/kgU, cijena konverzije je 10 \$/kgU, cijena separacijskog rada je 100 \$/SWU, cijena proizvodnje gorivnog elementa je 250 \$/kgU, gubici zbog konverzije iznose 0.2%, gubici pri proizvodnji nuklearnog goriva iznose 0.5%, rezidualno obogaćenje postrojenja za obogaćivanje je 0.3%?
(1163 \$/kgU)
9. Na kolikoj snazi radi termički reaktor ako potrošnja goriva iznosi 0,5 kg U^{235} na dan?
(406 MW)
10. Koliki je iznos fisijske energije sadržan u 1 kilogramu uranovog peroksida U_3O_8 ?
($4,82 \cdot 10^{11}$ J)
11. Kapacitet postrojenja za obogaćivanje je 1.000 t separacijskog rada godišnje. Koliku masu urana obogaćenog 3% u U^{235} se može proizvesti godišnje iz prirodnog urana u tom postrojenju, ako je rezidualno obogaćenje tog postrojenja 0,2%?
(232 t)
12. U termičkom reaktoru snage 64 MW nalazi se 7 tona urana obogaćenog 4,4% u U^{235} . Koliko će biti obogaćenje urana na kraju radnog ciklusa od 800 dana?
(3,5%).
13. Nuklearna elektrana snage 1000 MW(e) ima stupanj iskorištenja 30%. Koliki će srednji odgor u MWd/tU postići gorivo u prvom radnom ciklusu nakon što je reaktor radio neprekidno 365 dana na punoj snazi, ako na početku tog radnog ciklusa jezgra reaktora sadrži 90 tona uranovog oksida? (O=16, U=238)
(15336 MWd/tU)
14. Koliku masu morske vode treba preraditi da bi se proizvela količina urana potrebna za proizvodnju jednog gorivnog elementa koji sadrži 464 kg uranovog dioksida i ima aksijalne regije od po 15.24 cm prirodnog urana, a obogaćenje centralnog dijela je 3.1 % u U-235. Duljina gorivnih tableta u štapu goriva je 365.76 cm. Rezidualno obogaćenje postrojenja za obogaćivanje je 0.2 %. Svi gubici u proizvodnji urana su 10%, a koncentracija urana u morskoj vodi je 0.004 ppm.
($6 \cdot 10^8$ t)
15. Nuklearna elektrana snage 1000 MW(e) koristi prirodni uran i postiže odgor 5000 MWd/tU uz stupanj iskorištenja od 33%. Koliko će se plutonija (Pu-239) stvoriti za godinu dana u reaktoru te elektrane, ako je faktor raspoloživosti elektrane 0.75, a

faktor konverzije 0.4? Za omjer udarnog presjeka za radijativni uhvat i fisiju uzmite 0.17!

(414,6 kg Pu239)

16. Koliki mora biti koeficijent konverzije termičkog reaktora na prirodni uran da bi na kraju ciklusa postotak fisibilnih izotopa bio 0.35 %, ako je na početku rada reaktora bilo 9 tona goriva, a reaktor je dao ukupnu energiju od 900,000 MWh? Za omjer udarnih presjeka radijativnog uhvata i fisije uzmite 0.17!

(0,288)

17. Gorivni element s recikliranim plutonijem sastoji se od 4% plutonija i 96% urana 238. Sadržaj fisibilnog plutonija je 75%. Ako je srednji faktor konverzije goriva 0,5 za vrijeme provedeno u reaktoru koje odgovara stupnju izgaranja 30 MWd/kg, dio brzih fisija u U^{238} 8%, omjer udarnih presjeka za uhvat i fisiju za plutonij 0,5, kolika je količina fisibilnog izotopa (grama fisibilnog plutonija po kilogramu goriva) po jedinici mase izvađenog goriva? Koristite da 1 gram fisibilnog materijala daje energiju od 1 MWd.

(9,3 g/kg)

18. Termički oplodni reaktor koji radi u $U^{233} - Th^{232}$ ciklusu ima snagu od 1000 MWth, stupanj iskorištenja 40%, faktor oplodnje 1,06, a specifična snaga mu je 2,5 MW po kilogramu U^{233} . Koliko je linearno i eksponencijalno vrijeme udvostručenja za taj reaktor i kolika je netto produkcija U^{233} godišnje? Za omjer udarnih presjeka uhvata i fisije uzmite vrijednost 0,09!

(15,96 god.; 11,06 god.; 62,7 kg/god)

19. Brzi oplodni reaktor snage 270 MWe ima stupanj iskorištenja 42%, a faktor kapacitivnosti 0,8. Koliko je linearno vrijeme udvostručenja ako je početna količina goriva 1000 kg fisibilnog plutonija, faktor oplodnje 1,25, a srednji omjer makroskopskog udarnog presjeka za radijativni uhvat i fisiju 0,25?

(16,2 god)

20. Koliki je vremenski period u kojem će se u oplodnom reaktoru na plutonij snage 1250 MWth stvoriti netto količina od 1260 kg fisibilnog materijala, ako je faktor oplodnje reaktora 1,27. Za omjer udarnih presjeka uhvata i fisije uzmite vrijednost 0,25!

(12,35 godina)

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

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

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

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

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

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

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_{1gorel} .

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

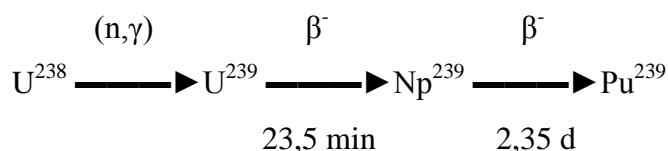
Cijena goriva C_{goriva} jednaka je zbroju cijene prirodnog urana C_{prir} , cijene obogaćivanja C_{obog} , cijene konverzije C_{konv} i cijene proizvodnje gorivnih elemenata C_{gorel} .

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

Stvaranje fisibilnih izotopa

U nuklearnom reaktoru, koji kao gorivo koristi uran, se fisibilni izotopi i stvaraju radijativnim uхватom na izotopu U²³⁸. Nastali izotop U²³⁹ je beta-radioaktivan i s vremenom poluraspada od 23,5 minuta prelazi u radioaktivni nuklid neptunija Np²³⁹. Taj izotop nadalje beta raspadom s vremenom poluraspada od 2,35 dana prelazi u fisibilni nuklid Pu²³⁹.

Lanac transformacije je sljedeći:



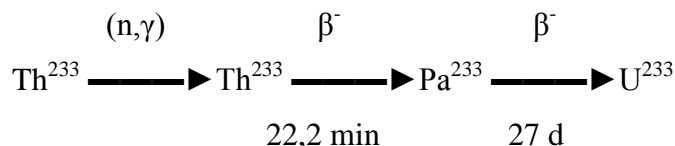
Pu²³⁹ je fisibilna jezgra i proizvodnja tog nuklida u nuklearnom reaktoru je značajna.

Apsorpcijom neutrona na Pu²³⁹ dolazi se na teže izotope plutonija Pu²⁴⁰, Pu²⁴¹, Pu²⁴² i Pu²⁴³ od kojih je i izotop Pu²⁴¹ fisibilan. S obzirom na relativno kratka vremena poluraspada U²³⁹ i Np²³⁹ apsorpcija neutrona na njima je zanemariva. Nuklid U²³⁸ iz kojeg nastaje fisibilni nuklid Pu²³⁹ naziva se fertilnim nuklidom.

Pored U²³⁸ fertilni nuklid je i Th²³² iz kojeg nastaje fisibilni nuklid U²³³. Apsorpcijom neutrona na Th²³² nastaje radioaktivni nuklid Th²³³. Nastali izotop Th²³³ je beta-radioaktivan i s vremenom poluraspada od 22,2 minute prelazi u radioaktivni nuklid protaktinija Pa²³³. Taj

izotop nadalje beta raspadom s vremenom poluraspada od 27 dana prelazi u fisibilni nuklid U^{233} .

Lanac transformacije je sljedeći:



Time se torij, iako nije fisibilan, može koristiti kao fertilni materijal za proizvodnju fisibilnog nuklida U^{233} , te je upotrebljiv kao nuklearno gorivo.

Nastajanje novih fisibilnih nuklida u reaktoru se kvantitativno opisuje pomoću fizikalne veličine koja se naziva faktor konverzije i označava se s C . Faktor konverzije C definiran je kao omjer broja atoma novostvorenih fisibilnih nuklida i broja atoma utrošenih fisibilnih nuklida

$$C = N_{\text{stvor}} / N_{\text{utr}}$$

Ako se stvara fisibilni nuklid Pu^{239} a troši fisibilni nuklid U^{235} tada se gornja relacija može pisati

$$C = (m_{\text{stvor}}/m_{\text{utr}}) \cdot (235/239)$$

Odnosno općenito ako se troši fisibilni nuklid masenog broja M_{utr} i stvara fisibilni nuklid masenog broja M_{stvor} tada vrijedi

$$C = (m_{\text{stvor}}/m_{\text{utr}}) \cdot (M_{\text{utr}} / M_{\text{stvor}})$$

Kod termičkih reaktora faktor konverzije manji je od 1 i iznosi između 0,5 i 0,7. Kod oplodnih reaktora je broj stvorenih jezgri fisibilnih izotopa veći od broja utrošenih jezgri fisibilnog izotopa pa je u tom slučaju faktor konverzije C veći od 1. To znači da je po svakom utrošenom fisibilnom atomu proizveden više od jednog fisibilnog atoma. Da bi se to moglo ostvariti mora faktor η , koji je definiran kao broj neutrona dobivenih fisijom po neutronu apsorbovanom u fisibilnoj jezgri, biti veći od 2.

Termički oplodni reaktor jedino je moguće realizirati ako se kao fisibilni nuklid koristi U^{233} . Intermedijarni oplodni reaktor moguć je jedino ako se kao fisibilni nuklid koristi U^{233} , dok je brzi oplodni reaktor moguć uz korištenje svih fisibilnih nuklida.

Oplodnjom se dobiva višak od $G=(C-1)$ atoma stvorenog fisibilnog materijala po atomu utrošenog goriva. Oplodnja se kvantitativno opisuje vremenom udvostručenja. Vrijeme

udvostručenja definirano je kao hipotetski vremenski interval u kom se količina fisibilnog materijala u reaktoru udvostručuje.

Označimo li s P_0 termičku snagu reaktora u MW, tada taj reaktor troši wP_0 grama fisibilnog izotopa na dan, gdje je w brzina utroška goriva po jedinici snage ($w=1,05 \cdot (1+\alpha)$ g/MWd).

Ako je gorivo U^{235} tada je $w=1,23$ g na dan po termičkom MW. Broj utrošenih fisibilnih atoma je $w \cdot P_0 \cdot N_A / M_{\text{utrf}}$, gdje N_A Avogadrov broj a M_{utrf} maseni broj fisibilnog nuklida koji se troši. Oplodnjom je dobiven višak od $G \cdot w \cdot P_0 \cdot N_A / M_{\text{utrf}}$ atoma stvorenog fisibilnog nuklida, odnosno $G \cdot w \cdot P_0 \cdot M_{\text{stvorf}} / M_{\text{utrf}}$ grama stvorenog fisibilnog nuklida na dan. M_{stvorf} je maseni broj fisibilnog nuklida koji se stvara. Ako se gorivo ne vadi iz reaktora tada će se ukupna količina goriva povećavati linearno s vremenom. Linearno vrijeme udvostručenja je definirano kao vrijeme t_{DL} za koje će se količina goriva u reaktoru udvostručiti. Dakle

$$G \cdot w \cdot P_0 \cdot M_{\text{stvorf}} / M_{\text{utrf}} \cdot t_{DL} = m_0$$

odakle slijedi

$$t_{DL} = m_0 \cdot M_{\text{utrf}} / (G \cdot w \cdot P_0 \cdot M_{\text{stvorf}})$$

U slučaju da se novostvoreno gorivo vadi iz reaktora i koristi u drugim reaktorima dolazi do povećanja snage dobivene iz čitavog goriva, tako da je $P=\beta \cdot m$, gdje je $\beta=P_0/m_0$. Brzina stvaranja goriva je tada $dm/dt = G \cdot w \cdot P \cdot M_{\text{stvorf}} / M_{\text{utrf}} = G \cdot w \cdot \beta \cdot m \cdot M_{\text{stvorf}} / M_{\text{utrf}}$. Rješavanjem gornje diferencijalne jednadžbe uz početni uvjet da je za $t = 0$ $m = m_0$ dobivamo da masa goriva raste eksponencijalno s vremenom, tj.

$$m = m_0 \cdot \exp(G \cdot w \cdot P_0 \cdot M_{\text{stvorf}} \cdot t / m_0 \cdot M_{\text{utrf}})$$

Iz uvjeta $m=2m_0$ dobivamo eksponencijalno vrijeme udvostručenja t_{DE} .

$$t_{DE} = m_0 \cdot M_{\text{utrf}} \cdot \ln 2 / (G \cdot w \cdot P_0 \cdot M_{\text{stvorf}}) = \ln 2 \cdot t_{DL}$$