

Ni umnožavanje neutrona u gorivu ne predstavlja pravo umnožavanje neutrona u reaktoru: neutroni se gube i van goriva, npr. apsorpcijom u materijalima koji se nalaze u reaktoru, ili umicanjem iz reaktorskog sistema. Da bi lančana reakcija mogla da se održi, mora umnožavanje neutrona u reaktoru ( $k$ ) da bude veće od jedinice, odnosno da se po svakom neutronu izgubljenom na koji način stvori bar jedan novi neutron. Zbog toga je važno da faktor umnožavanja neutrona u nuklearnom gorivu bude što veći od jedinice. Iz tabele 5 vidi se da je u oblasti termalnih neutrona faktor  $\eta$  za prirodni uran samo nešto veći od jedinice. Zbog toga treba, kad je reč o prirodnom uranu, strogo voditi računa o bilansu neutrona i moraju se što više smanjiti gubici. Zato reaktori sa prirodnim uranom koriste samo moderatore koji vrlo slabo apsorbuju neutrone, kao što su teška voda, berilijum i grafit, a obična se voda, koja je inače najbolji usporivač neutrona, ne može koristiti. I ostali konstruktivni materijali u reaktoru moraju imati male preseke za apsorpciju neutrona (aluminijum, cirkonijum i dr.), makar imali nepovoljnije osobine sa stanovišta mehaničke i kemijske otpornosti.

Faktor umnožavanja neutrona u nuklearnom gorivu određuje i mogućnosti konverzije goriva. Da bi se ostvario oplodni reaktor, tj. reaktor u kome se više fisibilnog materijala stvara nego što se troši, faktor  $\eta$  mora očigledno biti veći od dva: jedan neutron je potreban za održavanje lančane reakcije, a jedan za nadoknađivanje izgubljenog atomskog jezgra fisibilnog materijala. Kao što se vidi iz tabele 5, u reaktorima na brze neutrone oplodni sistem se može najlakše realizovati ako je osnovno gorivo plutonijum-239, a u termalnim reaktorima sa gorivom od urana-235.

**Energija iz fisije.** Energija oslobođena po jednoj fisiji iznosi za uran-235 oko 207 MeV. U tabeli 6 data je raspodela ove energije. Kao što se vidi, najveći deo oslobođene energije nose u obliku kinetičke energije fisioni fragmenti (168 MeV). U interakciji fisionih fragmenata sa okolnim atomima ova energija se pretvara u toplotnu energiju. Jedan deo energije fisije (7 MeV) emituje se u obliku gama-zračenja koje nastaje direktno pri fisiji, a jedan deo (5 MeV) nose neutroni nastali pri fisiji u obliku kinetičke

Kako jedan gram-atom sadrži  $6,025 \cdot 10^{23}$  atoma, a jedan gram-atom urana-235 teži  $\sim 235$  g, pri fisiji se jednog grama urana-235 oslobađa energija od

$$(6,025 \cdot 10^{23}/235) \times 200 \times 1,6 \cdot 10^{-13} = 8,2 \cdot 10^{10} \text{ J/g}$$

ili  $\sim 0,95 \text{ MWd/g} = 22,8 \text{ GWh/kg}$ .

Međutim, s obzirom na to da je proces radijativne apsorpcije neutrona u kompeticiji sa procesom fisije, neće sva utrošena atomska jezgra fisibilnog materijala pretrpeti fisiju, već samo deo  $\sigma_f/(\sigma_f + \sigma_a)$ . U slučaju urana-235 i termalnih neutrona na  $20^\circ\text{C}$  energija koja se oslobodi iz jednog grama utrošenih jezgara iznosi

$$0,95 [\sigma_f/(\sigma_f + \sigma_a)] \approx 0,8 \text{ MWd/g} = 19,2 \text{ GWh/kg}.$$

Ova gustina energije odgovara  $1,6 \cdot 10^7$  kcal/g, te je  $\sim 3 \cdot 10^6$  puta veća od specifične energije koja se dobija pri sagorevanju uglja ogrevne moći od 5500 kcal/kg.

**Prinos fisionih fragmenata.** Pri fisiji atomsko se jezgro deli na dva dela, dva nova jezgra. Ova podela može se izvršiti na više načina i dati pri pojedinim fisijama različite parove jezgara. Analiza velikog broja fisija pokazuje da se među fisionim fragmentima nalaze jezgra skoro svih masenih brojeva između  $A = 72$  i  $A = 166$ . Raspodela mase jezgara iz velikog broja fisija zavisi kako od fisibilnog jezgra tako i od energije neutrona kojima se vrši fisija. Na sl. 7 data je raspodela masa fisionih fragmenata urana-235 za slučaj fisije termalnim neutronima i neutronima energije 14 MeV. Kao što se iz dijagrama vidi, simetrična fisija ( $235/2 \approx 118$ ) vrlo je malo verovatna, a najverovatnija je raspodela na mase  $\sim 138$  i  $98$ . Sa povećanjem energije neutrona, međutim, verovatnoća simetrične fisije raste. Prinos pojedinih jezgara pri velikom broju fisija daje se u procentima. Ukupan zbir svih prinosa je jednak 200% s obzirom na to da se procenti odnose na broj fisija, a pri svakoj fisiji nastaju dva fisiona fragmenta.

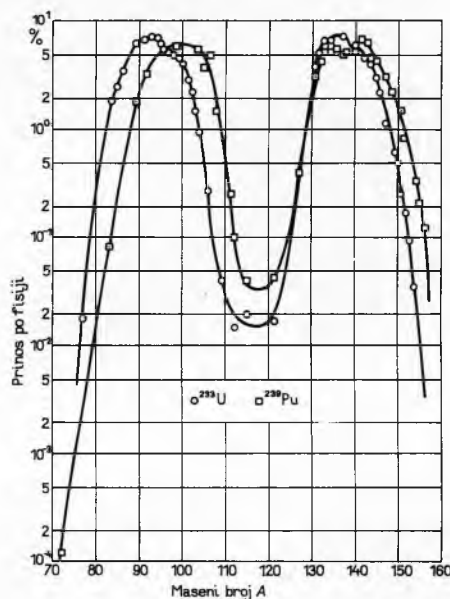
Tabela 6  
RASPODELA ENERGIJE OSLOBOĐENE PRI FISIJU URANA 235

Nosilac energije	Emitovana energija MeV	Energija apsorbovana u reaktoru MeV
Fisioni fragmenti	168	168
Gama-zraci iz fisije	7	7
Radioaktivni raspored fisionih fragmenata		
beta-zračenje	8	8
gama-zračenje	7	7
neutrino	12	—
Fisioni neutroni	5	5
Nefisiona apsorpcija neutrona	—	3...12
<b>Ukupno</b>	<b>207*</b>	<b>198...207</b>

\* Energija oslobođena pri fisiji  $^{235}\text{U}$  je  $\sim 2\%$  manja, a  $^{239}\text{Pu}$   $\sim 4\%$  veća od energije oslobođene pri fisiji  $^{235}\text{U}$ .

energije. Ostali deo od 27 MeV emituje se u obliku radioaktivnog zračenja fisionih fragmenata, i to delom kao beta-zračenje (8 MeV), delom kao gama-zračenje (7 MeV), a delom emisijom neutrina (5 MeV). U tabeli 6 dat je i deo fisione energije koji se apsorbuje u reaktoru i pretvara u toplotnu energiju. Kao što se vidi, u reaktoru će biti apsorbovana sva kinetička energija fisionih fragmenata, zatim skoro sva energija koju nosi gama- i beta-zračenje. Jedino energija neutrina, koji vrlo slabo interaguje sa materijalom, biće odneta van reaktora. Međutim, pri radijativnoj apsorpciji jednog dela neutrona u raznom materijalu u reaktoru oslobodiće se izvesna energija u obliku gama-zračenja, koja će takode skoro u celosti biti zadržana u reaktoru.

Ukupna energija fisije zadržana u reaktoru samo je vrlo malo manja od energije oslobođene pri fisiji i može se uzeti da iznosi  $\sim 200$  MeV. Kako 1 MeV odgovara energiji od  $1,6 \cdot 10^{-13}$  J (džula), snazi od jednog vata odgovara  $1/(200 \times 1,6 \cdot 10^{-13}) = 3,1 \cdot 10^{10}$  fisija u sekundi.



Sl. 7. Raspodela masa fisionih fragmenata urana-235 termalnim neutronima i neutronima energije 14 MeV

Među fisionim fragmentima i njihovim produktima radioaktivnog raspada nalazi se 38 različitih hemijskih elemenata (od  $Z = 30$  do  $Z = 68$ ). Fisioni produkti oštećuju gorivo u reaktoru (v. *Nuklearno gorivo*), pri čemu posebnu ulogu igraju fisioni fragmenti koji pripadaju gasovitim elementima.

**Radioaktivnost fisionih fragmenata.** Fisioni fragmenti po pravilu su radioaktivni, jer odnos broja protona i neutrona u njima znatno odstupa od oblasti stabilnosti. Na sl. 8 prikazana je zavisnost broja neutrona  $N$  od broja protona  $Z$  za sva stabilna atomska jezgra koja se nalaze u prirodi. Kao što se iz dijagrama vidi, sasvim laka jezgra su stabilna ako im je broj protona otprilike jednak broju neutrona, a za teža jezgra broj neutrona sve više prevladuje nad brojem protona. Prema tome, posle fisije