

skih uložaka, taloga iz isparivača, kontaminirane odjeće i različitih otpadaka iz kontaminiranih prostorija (papiri, krpe i sl.), te kontaminiranih alata i dijelova opreme.

Najveći volumen krutih otpadaka potječe iz ionskih izmjnjivača i filtara. Kruti se radioaktivni otpaci prešaju i odlazu u bačve koje su iznutra obložene slojem betona radi zaštite od zračenja. Talozi se isparivača prije ulaganja u bačve mijesaju s betonom u krutu kompaktну masu. Otpaci se mogu učvrstiti i u staklenu masu. U toku pogona nuklearne elektrane treba godišnje odložiti 400–1000 bačava s krutim radioaktivnim otpacima. Bačve se nakon privremenog uskladištenja u nuklearnoj elektrani šalju u skladište za krute radioaktivne otpatke (sl. 87).



Sl. 87. Skladište krutih radioaktivnih otpadaka

LIT.: G. Masse, Systems Summary of a Westinghouse Pressurised Water Reactor Nuclear Power Plant. Westinghouse PWRSD 1971. — R. Salvatori, The Environmental Impact of Nuclear Power Plants in United States. Westinghouse, NES 1974. — J. Bebin, Fonctionnement et technologie des réacteurs à eau pressurisée. FRAMATOM 1974. — CANDU 600 MW (c) Pressurised Heavy Water Reactor. CANATOM 1976. — H. Požar, Osnove energetike, I, II. Školska knjiga, Zagreb 1976/78. — D. M. Considine, Energy Technology Handbook. McGraw-Hill, 1977. — T. Maruzlova, Атомные электрические станции. Вицкая школа, Москва 1978. — D. Popović, Nuklearna energetika. Naučna knjiga, Beograd 1978. — Nuclear Power Plant with Pressurised Heavy Water Reactor, KWU 1979. — Fast Breeders, IAEA INFCE Working Group 1980. — General Description of a Boiling Water Reactor. General Electric Atomic Power Dept. 1980. — Nuclear Power Reactors in the World. IAEA Reference Data, Series 1982.

* D. Feretić

NUKLEARNA ENERGIJA, energija koja se oslobođa u nuklearnim transformacijama, tj. transformacijama atomskih jezgara. Nuklearne transformacije mogu biti spontane (radioaktivni raspad) ili nastaju sudarom neke vanjske čestice s jezgrom (nuklearna reakcija).

Nuklearna reakcija može se simbolički napisati u obliku

$$a + X \rightarrow b + Y, \quad (1)$$

kad sudarom čestice a s jezgrom X nastaje jezgra Y uz emisiju čestice b . Prema zakonu o održanju mase i energije vrijedi

$$m_a c^2 + M_X c^2 + E_{kp} = m_b c^2 + M_Y c^2 + E_{kk}, \quad (2)$$

gdje su M_X , M_Y , m_a i m_b mase jezgara i čestica, E_{kp} i E_{kk} početna i konačna kinetička energija, a c brzina svjetlosti. Razlika između konačne i početne kinetičke energije Q naziva se vrijed-

nošću reakcije, pa je $Q = E_{kk} - E_{kp}$. Ako Q ima pozitivnu vrijednost, reakcija je egzoergična, pa se tom reakcijom oslobađa energija. Zakon o održanju mase i energije pokazuje da to oslobađanje energije ide na račun dijela mase koji se pretvara u energiju

$$Q = (M_X + a)c^2 - (M_Y + b)c^2. \quad (3)$$

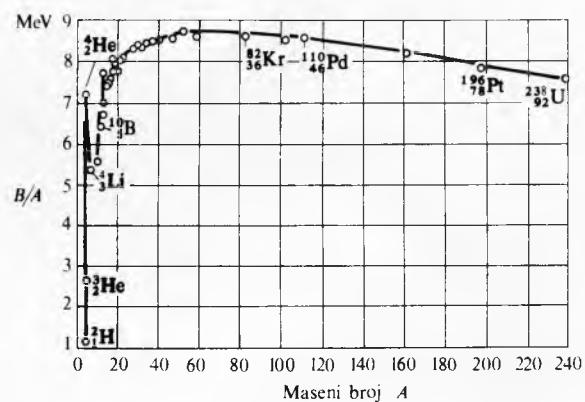
Egzoergične nuklearne reakcije osnovni su izvor energije Sunca i zvijezda. U nuklearnim procesima ekvivalencija mase i energije manifestira se mnogo više nego u atomskim procesima u kojima se mijenja samo raspored elektrona oko jezgara. Mase atomskih jezgara manje su za $\sim 1\%$ od zbroja masa protona i neutrona od kojih su sastavljene, jer se u procesu sastavljanja jezgre oslobađa mnogo veća energija. Ukupna oslobodena energija pri spajanju jezgre koja ima maseni broj A i koja sadrži Z protona mase m_p i $A - Z$ neutrona mase m_n iznosi

$$B(Z, A) = [Zm_p + (A - Z)m_n - M(Z, A)]c^2, \quad (4)$$

gdje je $M(Z, A)$ masa jezgre.

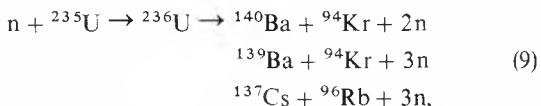
Energija $B(Z, A)$ naziva se *energijom vezanja* jezgre, a smanjenje mase prikazano u uglatim zagradama *defektom mase*. Vrlo važnu informaciju o jezgri daje energija vezanja po jednom sastojku jezgre, tj. omjer B/A (sl. 1), koji je nazvan specifičnom energijom vezanja ili čvrstoćom vezanja. Energije se iskazuju u elektronvoltima, uobičajenoj jedinici u nuklearnoj fizici ($eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$).

Iako se može kazati da je vrijednost omjera B/A približno konstantna, odstupanja imaju dalekosežne posljedice. S maksimumom od $\sim 8,5$ MeV za $A = 60$, smanjenje čvrstoće vezanja i prema laganijim i prema težim jezgrama vrlo je važna činjenica iz koje proizlazi mogućnost dobivanja energije nuklearnim reakcijama. U okviru semiempiričkoga nuklearnog modela u kojemu se jezgra uspoređuje s električki nabijenom kapljicom tekućine može se uspješno kvalitativno rastumačiti empirička krivulja na sl. 1. Manje vrijednosti čvrstoće vezanja za lagane jezgre posljedica su slabijeg vezanja nukleona na površini, njihov udio je veći u laganim jezgrama. Manje vrijednosti čvrstoće vezanja za teške jezgre nastaju zbog sve većeg odbijanja među protonima zbog djelovanja električnih sila. Od opće tendencije odstupa jezgra helija koja, iako vrlo malena, ima veliku vrijednost omjera B/A (7,07 MeV). To je odraz težnje istovrsnih nukleona da se slažu u parove i svojstva zasićenja nuklearnih sila. U principu spajanje laganih (nuklearna fuzija) i cijepanje teških jezgara (nuklearna fiksija) vodi na jezgre koje su bliže maksimalnoj vrijednosti omjera B/A , dakle i na oslobađanje energije.

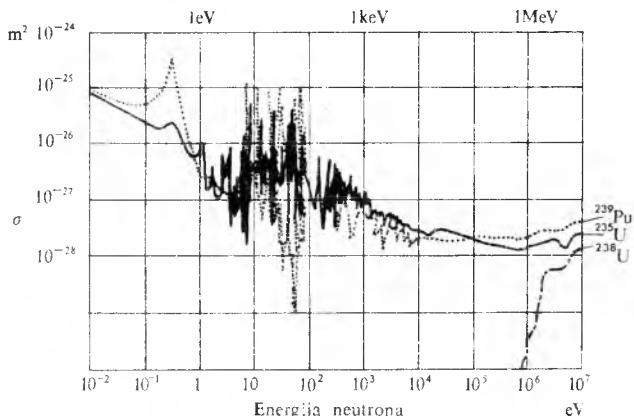


Jezege ${}^2\text{H}$ i ${}^3\text{H}$ obično se zovu deuterion i triton, a atomi s takvim jezgrama deuterij i tricij.

U procesu nuklearne fisije teška se jezgra cijepa u dva dijela, tj. $X \rightarrow A + B$. Neke teške jezgre cijepaju se spontano (radioaktivni raspad). Dovođenjem u pobjuđeno stanje vjerovatnost se fisije znatno povećava. To se najlakše postiže za jezre s neparnim brojem nukleona: ${}^{233}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{239}\text{Pu}$. Tada apsorpcija i sasvim sporog neutrona već toliko pobuduje jezgru da je to dovoljno da nastupi fisija. Vjerovatnosti nuklearnih reakcija izražavaju se tzv. udarnim presjecima (v. *Nuklearna fizika*). Udarni presjek σ je prividna površina koju jezgra izlaže upadnim česticama. Reakcija će, naime, nastati ako upadna čestica pogodi taj presjek. Stara jedinica za udarni presjek bila je barn, $b = 10^{-28} \text{ m}^2$. Na sl. 2 prikazane su vrijednosti udarnih presjeka za fisiju jezgara ${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{235}\text{U}$ i ${}^{238}\text{U}$. Razabire se da vjerovatnost fisije ${}^{239}\text{Pu}$ i ${}^{235}\text{U}$ ima relativno velike vrijednosti za neutrone niskih energija, dok je za cijepanje ${}^{238}\text{U}$ potrebno da neutron ima energiju od barem 1 MeV. Jezege koje su podložne fisiji pomoću sporih neutrona nazivaju se fisijskim jezgrama. Primjeri fisije jezgre ${}^{235}\text{U}$, navedeni sljedećim relacijama:



samo su neki među mnogobrojnim mogućim diobama jezgre ${}^{236}\text{U}$.



Sl. 2. Udarni presjeci za fisiju (σ) jezgara ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$ i ${}^{239}\text{Pu}$ prema energiji neutrona

Pri svakoj diobi moraju biti ispunjeni zakoni održanja naboja i broja nukleona. Vrlo je važna činjenica da se pri fisiji oslobođaju i neutroni. Jezege nastale fisijom nazivaju se fisijski fragmenti i gotovo su redovno radioaktivne.

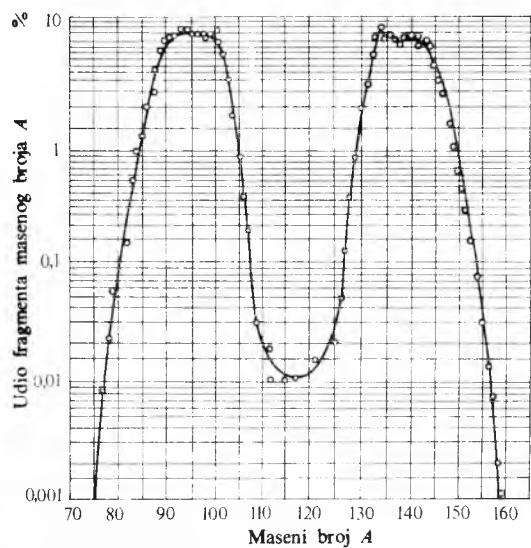
Karakteristično je za fisiju pobuđenu neutronima niske energije da cijepanje osnovne jezgre nije simetrično (sl. 3). Kvalitativno tumačenje moguće je pomoću tzv. ljkastog modela koji opisuje strukturu jezgre pri niskim pobuđenjima.

Fisijski neutroni emitiraju se sa širokim spektrom energija. On se može analitički izraziti ovisnošću o energiji neutrona E relacijom

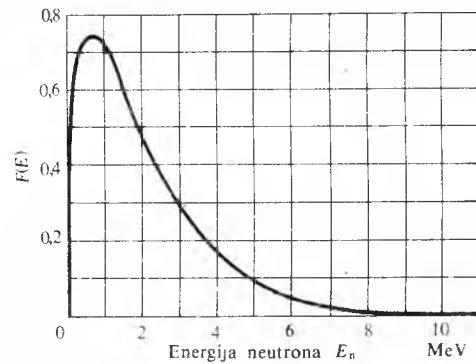
$$F(E)dE = \frac{2}{\pi e} e^{-E} \sinh \sqrt{2E} dE, \quad (10)$$

gdje je $F(E)dE$ dio neutrona emitiran s energijom u području od E i $E + dE$. Pri fisiji ${}^{235}\text{U}$ maksimum je raspodijeljen na 0,72 MeV, dok je srednja energija neutrona ~ 2 MeV (sl. 4).

Prosječan broj neutrona oslobođenih u jednoj fisiji, v , ovisan je o energiji neutrona koji je pobudio fisiju. Za ${}^{235}\text{U}$ taj broj za neutrone s malim energijama iznosi 2,43. On raste gotovo linearno s porastom energije neutrona do vrijednosti 2,50 za neutrone s energijom od 1 MeV. Kako dio apsorbiranih neutrona ne uzrokuje fisiju, važnija je veličina broj fisijskih neutrona po jednom apsorbiranom neutronu. Ta se veličina zove neutronski prinos η i ona je to manja od v što je nefisijska apsorpcija



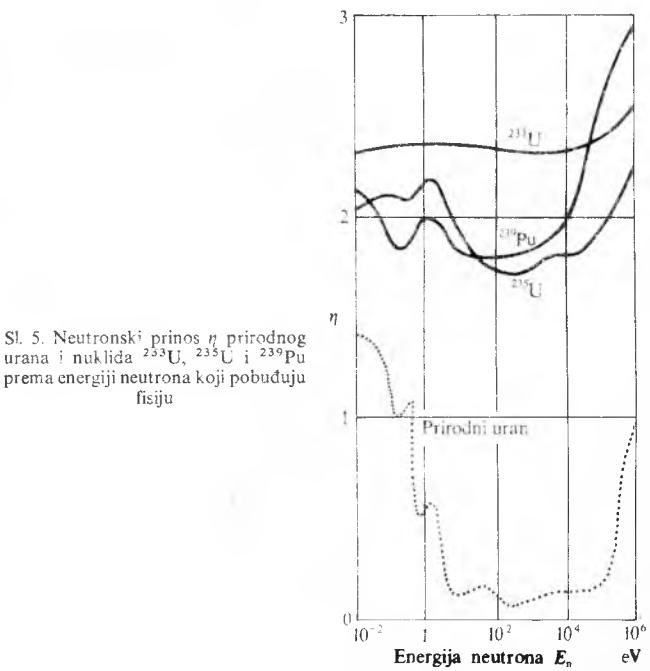
Sl. 3. Postotni udio fisijskih fragmenata prema njihovu masenom broju za fisiju ${}^{235}\text{U}$ pobuđenu sporim neutronima



Sl. 4. Energetska raspodjela fisijskih neutrona

veća. Visokim neutronskim prinosom u području niskih energija ističe se ${}^{233}\text{U}$, a u području visokih energija neutrona ${}^{239}\text{Pu}$ (sl. 5).

Najveći dio fisijskih neutrona emitira se istodobno, odnosno, gotovo istodobno s fisijom, a manji dio iz fisijskih fragmenata



sa zakašnjenjima koja mogu iznositi i više desetaka sekundi. Pri fizijskoj ^{235}U udio zakašnjelih neutrona iznosi 0,65%, a srednje zakašnjenje 13 sekunda.

Energija oslobođena u procesu fizijske može se približno ocijeniti iz dijagrama specifičnih energija vezanja (sl. 1). Ako se radi jednostavnosti pretpostavi da se jezgra mase A i rednog broja Z raspada u dva jednakna fragmenta, fisijsom oslobođena energija može se ocijeniti iz relacije $E_f = 2B(Z/2, A/2) - B(Z, A)$ koja daje razliku energija vezanja fragmenata i početne jezgre. Izraz se može prikazati i pomoću specifičnih energija vezanja:

$$E_f = A \left[\frac{B(Z/2, A/2)}{A/2} - \frac{B(Z, A)}{A} \right]. \quad (11)$$

Za odabranu vrijednost A može se razlika u uglatim zgradama odrediti iz krivulje na sl. 1. Ako se pretpostavi da je $A \approx 240$, razlika iznosi skoro 1 MeV, što znači da se raspalom jedne takve jezgre oslobođa energija od ~200 MeV. Fisijska se energija oslobođa u različitim oblicima (tabl. 1): dio koji se emitira kao energija neutrina izgubljen je zbog vrlo velike prodornosti tih čestica.

Tablica 1
RASPOĐELA FISIJSKE
ENERGIJE OSLOBOĐENE
FISIJOM ^{235}U

Fisijski proizvod	Energija MeV
Teški fragmenti	167
Neutroni	5
β -čestice	8
γ -zračenje	6
Naknadno γ -zračenje fisijskih fragmenata	6
Neutrini	10
<i>Ukupno</i>	202

Radioaktivnost. Postoji li mogućnost oslobođanja energije u transformaciji $X \rightarrow b + Y$ i bez intervencije vanjske čestice, to jest, ako je $Q = [M_X - (M_Y + m_b)]c^2 > 0$, jezgra se u principu može spontano transformirati, odnosno raspasti se. Vremensko odvijanje raspada određeno je zakonima kvantne mehanike (v. *Mehanika, kvantna*, TE 8, str. 188), iz kojih slijedi da je vjerojatnost raspada u jedinici vremena stalna, ovisna o karakteristikama jezgre, ali potpuno nezavisna o dotadašnjem trajanju, odnosno duljini postojanja jezgre. Matematički je izraz za vremenski stalnu vjerojatnost raspada za skup od N istovrsnih jezgara: $dN = -\lambda N dt$, gdje je dN broj raspada u vremenu dt , a λ konstanta. Za broj jezgara N koji je ostao nepromijenjen u trenutku t , ako ih je u početku bilo N_0 , dobiva se integracijom:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (12)$$

Radioaktivni raspad karakterizira se još i srednjim vremenom života \bar{T} , definiran relacijom

$$\bar{T} = \frac{\int_0^0 t dN}{\int_0^0 dN}, \quad (13)$$

iz koje se dobiva da je $\bar{T} = 1/\lambda$. Srednje vrijeme života može se interpretirati i kao vrijeme za koje se broj jezgara raspadi smanji od N_0 na $N = N_0/e$.

Često se govori i o vremenu poluraspada $T_{1/2}$. To je vrijeme za koje se broj jezgara smanji na polovicu, $T_{1/2} = \bar{T} \ln 2$.

Prirodna radioaktivnost. Kad bi vrlo teška jezgra imala specifičnu energiju vezanja manju od 7,07 MeV, tj. manju od energije vezanja α -čestice (jezgra helija, ${}^4\text{He}$, $A = 4$, $Z = 2$), postojao bi za takve jezgre energetski dobitak pri raspodu u α -čestice. To bi nastupilo kad bi broj nukleona A u teškoj jezgri iznosio ~300. Međutim, emisijom α -čestice može se iz jezgara s manje nukleona ostvariti dobitak energije ako vrijedi nejednadžba

$B(Z, A) < B(Z - 2, A - 4) + B(2, 4)$. To je ispunjeno za sve teške jezgre s atomskim brojem većim od 82, pa su one sve α -radioaktivne (v. *Kemijski elementi*, TE 7, str. 50). Nakon α -raspada mogu uslijediti dalji raspadi (emisija elektrona ili ponovni α -raspad) sve dote dok se od početne jezgre ne dođe do olova koje ima atomski broj 82. Budući da se pri emisiji elektrona ne mijenja broj nukleona, a emisijom α -čestice uvijek se smanjuje za 4, mogu postojati, već prema početnoj jezgri, samo četiri radioaktivna niza u kojima su maseni brojevi određeni relacijom

$$A = 4n + i \quad i = 0, 1, 2, 3. \quad (14)$$

Zbog takvih karakteristika raspada jezgra koja pripada jednom nizu ne može prijeći u drugi niz. U prirodi, međutim, postoje samo tri niza. To su torijev, uran-radijev i uran-aktinijev niz s početnim jezgrama ^{232}Th , ^{238}U i ^{235}U (tabl. 2). Četvrti niz koji bi bio moguć počinje s jezgom ^{237}Np , ali je vrijeme poluraspada neptunija suviše kratko s obzirom na starost Zemlje, odnosno prema vremenu nastanka elemenata. Mali udio ^{235}U (~0,7%) u prirodnom uranu, uz veliki udio ^{238}U (~99,3%), tumači se kraćim vremenom poluraspada ^{235}U s obzirom na ^{238}U (tabl. 2). Na osnovi astrofizičkih predodžbi o nastanku elemenata smatra se da su početne količine dvaju izotopa urana bile podjednake.

Tablica 2
RADIOAKTIVNI NIZOVI I NJIHOVE POČETNE I KONAČNE JEZGRE

	Maseni broj	Početna jezgra	$T_{1/2}$ godina	Konačna jezgra
Torijev niz	4n	^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10}$	^{208}Pb
Neptunijev niz	4n + 1	^{237}Np	$2,2 \cdot 10^6$	^{209}Bi
Uran-radijev niz	4n + 2	^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$	^{206}Pb
Uran-aktinijev niz	4n + 3	^{235}U	$7,2 \cdot 10^8$	^{207}Pb

Postoji samo nekoliko radioaktivnih jezgara izvan tih nizova s atomskim brojem manjim od $Z = 82$. Najvažniji je ^{40}K , s vremenom poluraspada od $1,3 \cdot 10^9$ godina, jer doprinosi prirodnom zračenju okoliša i zračenju u našem tijelu. Ostali imaju duža vremena poluraspada i zbog toga i manje značenje (tabl. 3).

Tablica 3
PRIRODNI RADIJOIZOTOPI IZVAN
RADIOAKTIVNIH NIZOVA

Izotop	Vrijeme poluraspada godina	Raspad
^{40}K	$1,3 \cdot 10^9$	β^-
^{50}V	$5 \cdot 10^{15}$	β^-
^{87}Rb	$5 \cdot 10^{10}$	β^-
^{113}In	$6 \cdot 10^{14}$	β^-
^{138}La	$1 \cdot 10^{11}$	β^-
^{144}Nd	$3 \cdot 10^{15}$	α
^{147}Sm	$1,3 \cdot 10^{11}$	α
^{176}Lu	$4,5 \cdot 10^{10}$	β^-
^{187}Re	$4 \cdot 10^{12}$	β^-

Inducirana radioaktivnost. Ako je radioaktivna jezgra X provedena nekom nuklearnom reakcijom na stabilnoj jezgri Y (u reaktoru ili pomoću akceleratora), govorit će o induciranoj radioaktivnosti. Ona se mnogo primjenjuje u znanosti i tehnici. U energetskim nuklearnim reaktorima inducirana radioaktivnost konstruktivnih materijala predstavlja nepoželjnu smetnju.

ISKORIŠTA VANJE ENERGIJE NUKLEARNIH REAKCIJA

Iako postoji vrlo mnogo nuklearnih reakcija s pozitivnom vrijednošću Q , tj. s dobitkom energije, one ipak ne mogu biti iskoristene za dobivanje nuklearne energije ako se čestice koje pobuduju reakcije moraju proizvesti ili ubrzati u akceleratorima (v. *Akceleratori nuklearnih čestica*, TE 1, str. 39). Akceleratori su obično dosta nedjeljovorni uređaji, ako se usporedi energija utrošena za njihov pogon s energijom ubrzanih, odnosno proizvedenih čestica. Osim toga, ako se radi o nabijenim česticama,

najveći dio njih utrošit će svoju energiju za pobuđenje ili ionizaciju atoma bez pobuđivanja nuklearne reakcije.

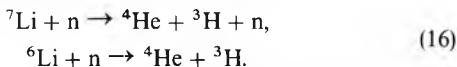
U spontanim nuklearnim transformacijama, tj. radioaktivnim raspadima, oslobađa se energija, ali je upotreba ograničena na vrlo male snage i uz posebne uvjete. Za praktično iskorištanje nuklearne energije u velikim količinama dolaze u obzir procesi fizijske i fuzije s kojima je moguće ostvariti samoodržavanje nuklearne reakcije. Samoodržavanje nuklearnih reakcija može se usporediti sa samoodržavanjem kemijskih reakcija. Pri izgaranju, npr., energija oslobođena kemijskim procesom zagrijava okolišno gorivo i time ga aktivira na dalje izgaranje. Reakcija se pokreće početnim paljenjem.

Samoodržavanje fizijske reakcije. Nuklearni procesi u unutrašnjosti zvijezda i Sunca primjer su samoodržavanja fizijske reakcije. Na temperaturama od više desetaka milijuna kelvina tvar je potpuno ionizirana. To je plinska plazma, neutralna mješavina pozitivnih i negativnih iona, pa se energija ne troši na atomska pobuđenja ili ionizaciju. Kinetička energija termičkog gibanja dovoljna je za svladavanje odbojnih sila među laganim jezgrama. Dobitak fizijske energije dovoljno je velik da održava potrebnu visoku unutrašnju temperaturu uz pokriće svih gubitaka i uz emisiju svjetlosti. Fizijska reakcija u unutrašnjosti zvijezda potpuna je nuklearna analogija atomskih procesa izgaranja. U zemaljskim uvjetima samoodržavanje fizijske reakcije ostvareno je pri eksploziji tzv. hidrogenske bombe, pri čemu je početno zagrijavanje, tj. paljenje smjese lakih jezgara postignuto fizijskom nuklearnom eksplozijom. Ostvarenje samoodržavanja fizijske reakcije zagrijavanjem smjese lakih jezgara naziva se termonuklearnom fuzijom. Ostvarenje uvjeta za kontroliranu termonuklearnu fuziju, za razliku od eksplozivne fizijske reakcije, problem je koji se proučava već skoro 30 godina. Postignut je velik napredak, ali samoodržavanje kontrolirane fizijske reakcije još nije dostignuto. U plinskoj plazmi danas se postižu temperature i od više desetaka milijuna kelvina. Energija iz plazme gubi se zračenjem i bijegom brzih iona, pa je problem samoodržavanja fizijske reakcije zapravo problem ostvarenja pozitivne energetske bilance između proizvodnje fizijske energije i različitih gubitaka.

O prinosu fizijske energije odlučuje najprije vjerojatnost fuzije pri sudaru lakih jezgara, a zatim gustoća i brzina čestica, čime je određen broj sudara. Udarni presjek za fuziju pri sudaru lakih jezgara određen je relacijom

$$\sigma(E) = \frac{a}{E} e^{-b/\sqrt{E}}, \quad (15)$$

gdje su a i b konstante ovisne o nuklearnim karakteristikama jezgara, a E je energija njihovog relativnog gibanja. Uz jednaku energiju E vjerojatnost je za fuziju jezgara atoma deuterija i tricija ($D + T$, ${}^2H + {}^3H$) za približno dva reda veličine veća nego za fuziju dviju jezgara atoma deuterija, ($D + D$ reakcija), pa je postizanje fuzije deuterijsko-tricijskom reakcijom toliko lakše. Za tu reakciju, međutim, potreban je tricij, izotop vodika s masenim brojem $A = 3$ koji se ne nalazi u prirodi, jer je nestabilan i ima vrijeme poluraspađa ~ 12 godina. Može se proizvesti bombardiranjem litija neutronima u reakcijama:



Upotrebom neutrona iz fizijske reakcije moguće je postići da fizijski uređaj proizvodi i potreban tricij. Ako je u plinskoj plazmi N_D i N_T gustoća jezgara (broj jezgara u jedinici volumena) deuterija i tricija, v relativna brzina, E energija jezgara, a $\sigma(E)$ udarni presjek fuzije, broj fizijskih reakcija u jediničnom volumenu i u jedinici vremena iznosi

$$R = N_D N_T \sigma(E) v. \quad (17)$$

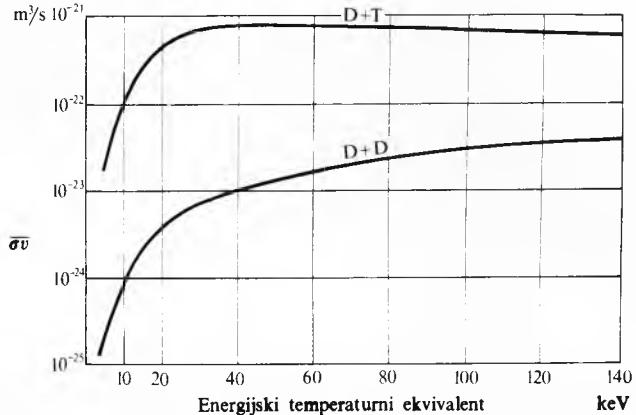
Uz statičku raspodjelu energija i brzinu, broj reakcija može se izraziti pomoću prosječne vrijednosti umnoška udarnog presjeka i brzine:

$$R = N_D N_T \overline{\sigma(E)} v. \quad (18)$$

Ovisnost prosječne vrijednosti $\overline{\sigma(E)} v$ o temperaturi plazme za

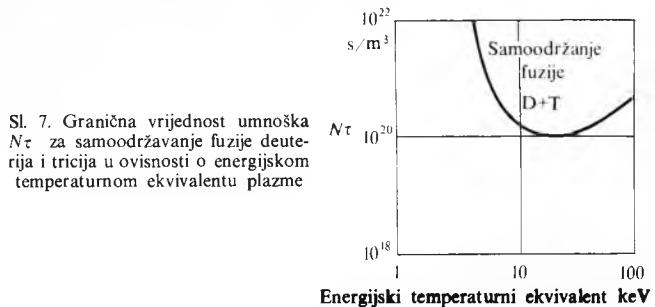
reakcije $D + D$ i $D + T$, a uz pretpostavku Maxwell-Boltzmannove statističke raspodjele, vidi se na sl. 6.

Temperatura plazme često se izražava energijskim temperaturnim ekvivalentom plazme, koji se navodi u jedinicama energije, npr. u kiloelektronvoltima. Pri tome postoji odnos da $1 \text{ keV} \equiv 11,6 \cdot 10^6 \text{ K}$. Prema sl. 6 se vidi da je za postizanje veće vjerojatnosti fuzije pri sudaru čestica potreban energijski temperaturni ekvivalent plazme $\sim 10 \text{ keV}$, a to je temperatura $\sim 10^8 \text{ K}$.



Sl. 6. Prosječna vrijednost umnoška $\overline{\sigma v}$ kao funkcija energijskog temperaturnog ekvivalenta plazme uz Maxwell-Boltzmannovu raspodjelu brzina ($1 \text{ keV} \equiv 11,6 \cdot 10^6 \text{ K}$)

Da bi se u fizijskoj reakciji dobila pozitivna energetska bilanca, tj. da se postignu uvjeti za samoodržavanje reakcije, potrebno je da se plazma održi dovoljno dugo na dovoljno velikoj gustoći i na dovoljno visokoj temperaturi. Detaljnijom usporedbom gubitaka i dobitaka energije može se postaviti kvantitativni uvjet za samoodržavanje fizijske reakcije poznat kao Lawsonov kriterij. Prema tom uvjetu umnožak gustoće plazme $N(N = 2N_D = 2N_T)$ i vremena τ u kojemu se održava gustoća jezgara i temperatura plazme mora iznositi najmanje 10^{20} s/m^3 . Vrijednost umnoška $N\tau$ ovisi o temperaturi plazme i ima najnižu vrijednost uz temperaturu od $(100 \dots 200) \cdot 10^6 \text{ K}$ (sl. 7).



Sl. 7. Granična vrijednost umnoška $N\tau$ za samoodržavanje fuzije deuterija i tricija u ovisnosti o energijskom temperaturnom ekvivalentu plazme

Samoodržavanje fisijske lančane reakcije. Samoodržavanje fisijske reakcije moguće je zbog toga jer se u procesu fisijske oslobođaju i neutroni, u prosjeku $\sim 2,5$ po svakoj raspadnutoj jezgri. Samoodržavanje fisijske reakcije može se ostvariti ako najmanje jedan od tih neutrona prouzrokuje fisijsku jedne od okolišnih jezgara. Tada neutroni proizvedeni fisijskom reakcijom održavaju takvu reakciju, pa se proces naziva lančanom reakcijom. Za vremensko odvijanje lančane reakcije odlučne su dvije veličine: faktor multiplikacije K i trajanje τ fisijske generacije.

Da bi fisijski neutroni bili emitirani i da bi dospjeli do jezgara koje će oni svojim djelovanjem rascijepiti, potrebno je neko vrijeme. Trajanje je fisijske generacije prosječno vrijeme između suksesivnih fisijskih generacija, a faktor je multiplikacije omjer broja fisijskih generacija i broja fisijskih generacija u prethodnoj generaciji. Lančana reakcija je divergentna, što znači da se broj fisijskih generacija povećava ako je $K > 1$, a konvergentna (smanjenje broja raspada) ako je $K < 1$. Kad je $K = 1$, lančana se reakcija

održava trajno na istoj razini, što znači da broj fisija u svakoj fizijskoj generaciji ostaje konstantan.

Kritična masa lančane reakcije. Budući da je prosječna energija fizijskih neutrona $\sim 2 \text{ MeV}$, postoji mala vjerojatnost da će se njihovim djelovanjem raspasti pogođene jezgre (sl. 2). Sudaranjem s jezgrama urana njihova se energija smanjuje, ali oni pri tom mogu biti izgubljeni za fizijski proces na dva načina: a) apsorpcijom u ^{238}U , koji s velikom vjerojatnošću apsorbira neutrone što imaju energiju od $\sim 5\text{--}300 \text{ eV}$, i b) bijegom iz mase urana u okoliš.

Prvi se gubitak može smanjiti tako da se masi urana dodaju lagane jezgre, pa neutroni u sudaru s njima brže gube energiju i brže prolaze kroz energetsko područje u kojemu postoji velika vjerojatnost da budu apsorbirani u ^{238}U . Dodane lagane jezgre nazivaju se moderatorskim jezgrama, a materijali, kojima je zadatak da usporuju neutrone, nazivaju se moderatorima.

Drugi, odnosno dodatni, način da se smanji gubitak neutrona zbog apsorpcije u ^{238}U jest da se smanji relativna količina ^{238}U , tj. da se upotrijebi uran u kojemu je udio ^{235}U veći od 0,7%, koliko ga ima u prirodnom uranu. Takav uran nazvan je *obogaćenim uranom*.

Bijeg neutra u okolišni prostor može se smanjiti dodavanjem tzv. reflektora kojim se okružuje uran. Na jezgrama materijala od kojeg je načinjen reflektor dio će se neutrona reflektirati i vratiti natrag u uran. Dalje smanjenje bijega može se postići povećanjem mase urana tako da postiže manji omjer površine (kroz koju bježe neutroni) i volumena, odnosno mase (u kojoj nastaju fizijski neutroni). Za odabране materijale moderatora i reflektora te za određeni sastav urana (udio ^{235}U) i njegov geometrijski raspored postoji minimalna masa urana uz koju se još može postići da je faktor multiplikacije $K = 1$. Ako je masa urana manja od minimalne mase, ne može se održavati lančana reakcija jer je bijeg neutra suviše velik. Ta najmanja masa potrebna za održavanje lančane reakcije naziva se kritičnom masom. U posebnim uvjetima kritične mase izdvojenih nuklida (^{239}Pu ili ^{235}U) mogu biti i manje od 1 kg, dok u reaktorima iznose i više desetaka tona. Za metalni ^{235}U u obliku kugle kritična masa iznosi $\sim 16 \text{ kg}$.

Nuklearna bomba prije upotrebe ima faktor multiplikacije $K < 1$, a za njezino aktiviranje potrebno je postići natkritičnost ($K > 1$). Jedan od načina je naglo dovođenje u kontakt pomoću konvencionalnih eksploziva dviju ili više potkritičnih masa. Druga metoda za aktiviranje bombe sastoji se u smanjenju površine za bijeg neutrona, a bez smanjenja mase. To se postiže povećanjem gustoće implozijom, također pomoću konvencionalnih eksploziva.

Uredaji u kojima se ostvaruju uvjeti za održavanje kontrolirane lančane reakcije zovu se nuklearni reaktori. U reaktoru mora biti više urana nego što iznosi kritična masa, kako bi se pri stavljanju u pogon mogao ostvariti faktor multiplikacije veći od 1 i divergentna lančana reakcija. Kada se dostigne poželjna razina snage, faktor multiplikacije $K = 1$ postiže se dodavanjem neutronskih apsorbera u reaktor. Promjena faktora multiplikacije prema potreboj snazi naziva se kontrolom reaktora. To se najčešće ostvara kontrolnim šipkama ili dodavanjem apsorbera moderatoru (v. *Nuklearni reaktor*, v. *Nuklearna energetska postrojenja*).

Vremensko odvijanje lančane reakcije određeno je faktorom multiplikacije K i srednjim trajanjem τ generacije fizijskih neutrona prema relaciji

$$N = N_0 \exp\left(\frac{K-1}{\tau}t\right), \quad (19)$$

gdje je N broj neutrona u trenutku t , a N_0 njihov broj u trenutku $t = 0$. U reaktoru s moderatorom generacija neutrona traje najmanje toliko koliko traje i proces usporavanja neutrona. Međutim, dio fizijskih neutrona emitira se sa zakašnjnjem, pa ako je faktor $K > 1$, koji uključuje i zakašnjene neutrone, njihovo zakašnjnjene određuje efektivno trajanje generacije. Producenje trajanja jedne generacije je znatno, pa to omogućuje sigurnu kontrolu reaktora. Relacija koja opisuje vremensko odvijanje lančane reakcije ima u tim uvjetima složeniji oblik (v. *Nuklearni reaktori*).

NUKLEARNI REAKTORI

Fizijski reaktori su uređaji u kojima se lančana reakcija održava i kontrolira, a različiti oblici fizijske energije transformiraju u toplinu da bi se rashladnim sredstvom odvela iz reaktora.

Osnovna klasifikacija osniva se na različitim fizikalnim pristupima uspostavljanju lančane reakcije u uranu. U prirodnom uranu nije moguće uspostaviti lančanu reakciju jer ^{238}U apsorbira previelik dio oslobođenih neutrona. Doda li se prirodnom uranu moderator koji pospješuje proces usporavanja neutrona, smanjuje se, kako je već spomenuto, apsorpcija neutrona u ^{238}U . Reaktori u kojima se lančana reakcija održava sa sporim neutronima nazivaju se termičkim reaktorima (tabl. 4). Dalje smanjenje apsorpcije u ^{238}U moguće je postići grupiranjem urana u moderatoru, kako bi se proces usporavanja prostorno odvojio od goriva. Takva raspodjela goriva i moderatora karakteristika je danas razvijenih reaktora (heterogeni reaktori). S obzirom na gorivo, materijal moderatora i rashladno sredstvo moguće je ostvariti mnoge različite koncepcije termičkih reaktora. Najčešće upotrebljavana rashladna sredstva jesu obična i teška voda, te plinovi ugljik-dioksid i helij. Najvažniji su moderatori obična i teška voda, te grafit. Ako je moderator obična voda, koja intenzivno apsorbira neutrone, potrebno je to kompenzirati povećanom koncentracijom ^{235}U u gorivu, tj. obogaćenjem urana. To su danas najrašireniji reaktori. Grade se u dvije verzije; u jednoj je voda pod dovoljno velikim tlakom da u reaktoru ne ključa. Para se proizvodi izvan reaktora u parogeneratoru. To su reaktori s vodom pod tlakom. Uobičajena je međunarodna kratica PWR (Pressurised Water Reactor). U drugoj verziji voda ključa u reaktoru u kojemu se, dakle, neposredno proizvodi vodenu para. To su reaktori s kipućom vodom, a uobičajena im je oznaka BWR (Boiling Water Reactor). Teškovodni reaktori s prirodnim uranom razvijeni su u Kanadi, njihova je opća oznaka HWR (Heavy Water Reactor). Sustav razvijen u Kanadi poznat je pod oznakom CANDU (CANada Deuterium Uranium).

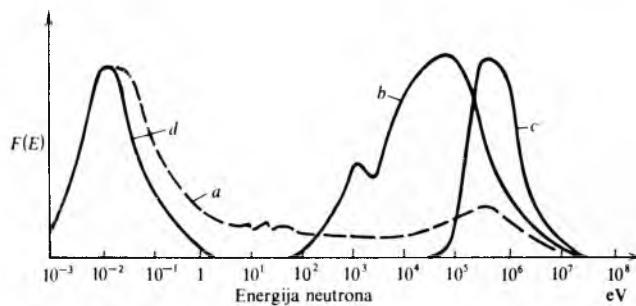
Tablica 4
GORIVA, MODERATORI I RASHLADNA SREDSTVA U NAJVAŽNIJIM TERMičKIM REAKTORIMA

Reaktor	Gorivo, (kemijski oblik)	Moderator	Rashladno sredstvo
GCR	Prirodni uran (metal)	grafit	CO_2
AGR	Obogaćeni uran, $\sim 2\%$ (oksid)	grafit	CO_2
HTR	Obogaćeni uran, $\sim 93\%$ (karbid)	grafit	He
LWR (PWR i BWR)	Obogaćeni uran, $\sim 3\%$ (oksid)	H_2O	H_2O
HWR	Prirodni uran (oksid)	D_2O	D_2O
Vodografitni	Obogaćeni uran, $\sim 2\%$ (oksid)	grafit	H_2O

Osim grupe reaktora hlađenih vodom, grade se u SSSR i reaktori hlađeni običnom vodom u kojima je moderator grafit. Gorivo je malo obogaćeni uran (2..3%). U svima plinom hlađenim reaktorima grafit služi kao moderator, ali se razlikuju u gorivu i rashladnom plinu. Najstariji tip reaktora je reaktor hlađen ugljik-dioksidom s prirodnim uranom kao gorivom. Uobičajena je oznaka GCR (Gas Cooled Reactor). Novija verzija takva reaktora s malo obogaćenim uranom kao gorivom poznata je kao usavršeni plinom hlađeni reaktor AGR (Advanced Gas Cooled Reactor). Danas su u razvoju reaktori sa

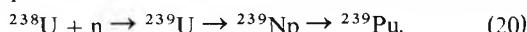
srednje obogaćenim uranom kao gorivom i helijem kao rashladnim sredstvom. To su visokotemperaturni reaktori HTR (High Temperature Reactor). Bitna im je karakteristika da je rashladno sredstvo na visokim temperaturama.

Ako se lančana reakcija održava bez prisutnosti moderatora, a to se postiže kad se smanji udio ^{238}U , odnosno kad se poveća udio ^{235}U , govori se o brzim reaktorima, jer u njima brzi (neusporeni) neutroni uzrokuju raspad jezgara urana (sl. 8). Zato što u njima nema moderatora jezgre brzih reaktora mnogo su manje od jezgara termičkih reaktora. Zbog toga je u njima mnogo veća volumna i masena koncentracija snage, pa to postavlja posebne zahtjeve na rashladni sustav. To je razlog što se u svim većim brzim reaktorima upotrebljava tekući natrij kao rashladno sredstvo.

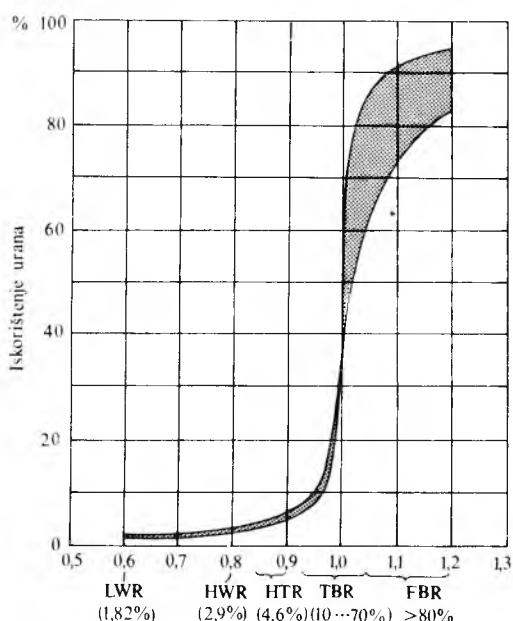


Sl. 8. Tipične energetske raspodjele neutrona u termičkom (a) i brzom reaktoru (b) u usporedbi s fizijskom (c) i Maxwell-Boltzmannovom raspodjelom (d) neutrona na temperaturi goriva, odnosno moderatora

Brzi reaktori poznati su pod punim nazivom kao brzi oplođni reaktori FBR (Fast Breeder Reactor), što odražava još jednu veoma važnu karakteristiku takvih reaktora. Bitna je fizikalna razlika između termičkih i brzih reaktora u tzv. faktoru konverzije, kojim je određen stupanj iskoristištenja nuklearnog goriva. Reaktorskom konverzijom, naiće, naziva se pojava kada se u reaktoru stvaraju novi fizički nuklid. Apsorpcija neutrona u ^{238}U nepovoljna je s obzirom na održavanje lančane reakcije, ali ona djelomično ili potpuno kompenzira utrošak ^{235}U , jer se apsorpcijom neutrona u ^{238}U stvara ^{239}Pu slijedom reakcija, odnosno raspada



Plutonij ^{239}Pu , je nuklid s neparnim brojem neutrona, cijepa se nakon apsorpcije sporog neutrona i sličan je po nuklearnim



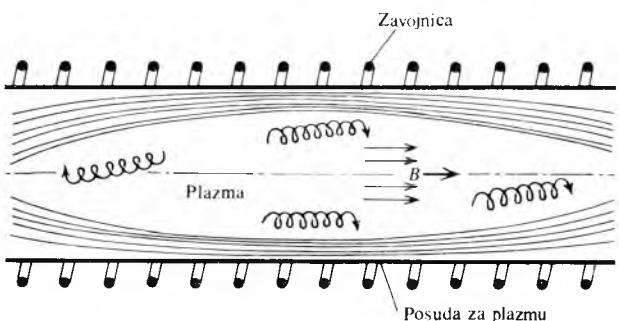
Sl. 9. Iskoristištenje urana prema faktoru konverzije (gubici u preradbi 1%, tokom obogaćivanja 2%). LWR lakovodni, HWR teškovodni, HTR visokotemperaturni, TBR termički oplođni, FBR brzi oplođni reaktor

svojstvima ^{235}U , te ga može zamijeniti u održavanju lančane reakcije. U fizijsi brzim neutronima ^{239}Pu ima zbog većeg neutronskog prinosa prednost pred ^{235}U (sl. 5). Faktor konverzije je omjer brzine stvaranja jezgara ^{239}Pu i brzine trošenja jezgara ^{235}U . S faktorom konverzije ≥ 1 utrošak ^{235}U u reaktoru nadoknađuje se ^{239}Pu proizvedenim od ^{238}U , pa se u reaktoru efektivno iskoristišuje ^{238}U . U termičkim reaktorima dodavanjem moderatora smanjuje se apsorpcija neutrona u ^{238}U , dok je u brzim reaktorima ta apsorpcija kompenzirana povećanjem obogaćenjem urana. Zbog toga je smanjen faktor konverzije u termičkim reaktorima te iznosi 0,4...0,8, već prema tipu reaktora. U brzim reaktorima, međutim, on može doseći vrijednost i dosta veću od 1, što omogućuje gotovo potpuno iskoristištenje energije urana. Tako visok faktor konverzije postiže se oblaganjem reaktorske jezgre s prirodnim ili osiromašenim uranom, što omogućuje mala jezgra brzog reaktora. Neutroni koji pobjegnu iz jezgre apsorbiraju se u omotaču od ^{238}U , te se i tu proizvodi plutonij. Kad je faktor konverzije veći od 1, naziva se i faktorom oplođnje, a reaktor se tada naziva oplođnim. Iskoristištenost energije prirodnog urana veoma ovisi o faktoru koverzije, odnosno o faktoru oplođnje (sl. 9).

No i u termičkim reaktorima uz dalji razvoj i nova goriva (^{233}U) može se faktor koverzije približiti jedinici, a u nekim još nerazvijenim tipovima reaktora i premašiti je. To su termički oplođni reaktori TBR (Thermal Breeder Reactor).

Fuzijski reaktori. Da bi se postiglo samoodržavanje fizijske reakcije, potrebno je da plazma određene gustoće ostane dovoljno dugo u tom stanju, u skladu s Lawsonovim kriterijem, i na temperaturi od $\sim 100 \cdot 10^6$ K. Dvije su osnovne metode zadržavanja, odnosno prostornog ograničenja fizijske plazme: a) magnetsko ograničenje i b) inercijsko ograničenje, prema kojima se i klasificiraju različite koncepcije fuzijskih reaktora.

Magnetsko ograničenje. S obzirom na temperaturu na kojoj je potrebno održavati fuzijsku plazmu, obavezno je spriječiti dodir s okolišnim stijenkama da se plazma ne ohladi i da se stijenke ne oštete. Zbog svojstava plazme, koja je mješavina ioniziranih atoma i elektrona, njeni se ekspanziji može zadržati magnetskim poljem koje djeluje i kao toplinski izolator između plazme i stijenke posude. Najjednostavniji je takav sustav cilindričko magnetsko polje s plazmom na osi zavojnice koja proizvodi magnetsko polje (sl. 10).



Sl. 10. Otvoreni sustav magnetskog ograničenja plazme

Elektromagnetske sile koje djeluju na ione plazme ne ograničuju im gibanje uzduž silnica magnetskog polja, tj. uzduž osi cilindra, ali gibanje iona okomito na smjer silnica zakreće u kruženje u ravnini okomitoj na silnice. Djelovanjem tih sila plazma se ne širi i vanjsko magnetsko polje ne prodire u plazmu, jer je poništeno magnetskim poljem kružnog ionskog gibanja, nego tlači na nju. Taj je tlak proporcionalan s kvadratom magnetske indukcije, pa uz indukciju od 1 T iznosi $\sim 0,4$ MPa. S druge strane, tlak se plazme prenosi na magnetsko polje, a njegovim posredovanjem i na mehaničku konstrukciju. Ravnoteža je plazme i magnetskog polja nestabilna, poput ravnoteže užeta koje je izravnato ravnomernim rasporedom sila oko njega. Stabilnost se poboljšava povećanjem tlaka polja prema tlaku plazme. Odnos tih dvaju tlakova izražava se faktorom proporcionalnosti β pa vrijedi relacija $P_p = \beta P_M$, gdje su P_p i P_M tlak plazme, odnosno magnetskog polja. Faktor β manji je od 1,

odnosno tlak plazme manji je od tlaka magnetskog polja. Razlog je tome što magnetsko polje kružnog ionskog gibanja samo djelomično poništava vanjsko polje, koje ipak prodire u plazmu. Za neke tipove ograničenja β može biti manji od 0,1. Prema vrijednosti faktora β klasificiraju se magnetska ograničenja u ona s velikim i ona s malim vrijednostima faktora β . Uz male vrijednosti β dobiva se stabilnija plazma, ali tada nije dovoljno iskoristeno magnetsko polje, jer je njegova jakost ograničena karakteristikama magnetskih materijala. Maksimalna jakost magnetskog polja utječe na fizijski uređaj dvojako. Tlakom magnetskog polja, preko faktora β , određen je i tlak plazme, a time i njena gustoća. Gustoćom plazme, s jedne strane, prema Lawsonovu kriteriju, određeno je potrebno trajanje ograničenja plazme. Što je naime, manja gustoća plazme, potrebno je duže trajanje ograničenja. S druge strane, učestalost fizijske reakcije, a time i snaga uređaja po jedinici volumena, proporcionalna je kvadratu gustoće, pa ekonomično iskoristjenje instalacije traži da gustoća plazme bude dovoljno velika. Zbog toga se nastoji da se u fizijskom uređaju postigne što veća vrijednost faktora β uz maksimalnu vrijednost jakosti polja. Pomoću supravodljivih magneta mogu se postići indukcije od $3\text{--}10\text{ T}$, pa i veće. Zapravo, u velikim fizijskim uređajima supravodljivi su magneti prijevo potrebni i zato jer bi upotrebo običnih magneta neizbjegljivi gubici energije u zavojnicama bili toliki da se uređaji ne bi mogli napajati vlastitom energijom.

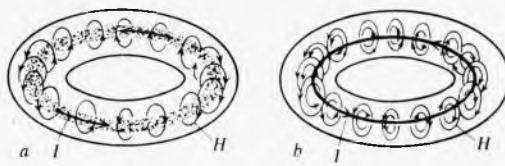
Sa supravodljivim magnetima i uz male vrijednosti faktora β moguće je ostvariti ograničenja vruće plazme do gustoće od $\sim 10^{20}$ čestica u kubnom metru. Prema Lawsonovu kriteriju trebalo bi da se vruća plazma te gustoće nalazi najmanje 1 sekundu na temperaturi od $\sim 100 \cdot 10^6\text{ K}$ da bi se ostvarila pozitivna energetska bilanca. Međutim, plazma bi na krajevima cilindričnog uređaja pobjegla puno prije.

Prema sprečavanju bijega plazme razlikuju se otvoreni (linearni) i zatvoreni fizijski uređaji.

Cilindar je izrazito otvoreni sustav, a bijeg plazme može se smanjiti postavljanjem tzv. magnetskih zrcala na krajeve cilindra (sl. 11). Magnetska zrcala proizvode dodatna magnetska polja koja stežu plazmu na krajevima; bježanje je smanjeno, ali se ne može potpuno spriječiti.

Ako se savije cilindar i spoje njegovi krajevi, dobiva se zatvoren toroidalni sustav (sl. 12). Bježanje na krajevima je uklo-

njeno, ali je sustav postao dodatno nestabilan jer se pritisak polja na plazmu smanjuje s povećanjem udaljenosti od osi torusa. Plazma bježi u područje nižeg tlaka. Ona, dakle, ekspandira radikalno. U toroidalnom sustavu plazma se stabilizira dodatnim poljem koje pretvara kružne silnice toroidalnog polja u spirale što obilaze torusom omatajući se oko njegove osi. Pri tom se hod spirale mora smanjivati s povećanjem polumjera spirale koja se omata oko osi torusa. To se najjednostavnije postiže induciranjem struje u plazmi, koja tada djeluje kao svojevrsni sekundarni namot transformatora. To se može ostvariti promjenom magnetskog toka u otvoru torusa. Magnetsko polje proizvedeno induciranim električnom strujom koja teče kroz plazmu zajedno s uzdužnim toroidalnim poljem stvara traženu spiralnu, odnosno helikoidalnu konfiguraciju polja. Uredaji toga tipa poznati su kao tokamak uređaji (sl. 13), prema uređaju izgrađenom u Institutu Kurčatova u Moskvi kojim je potkraj šezdesetih godina postignut velik napredak u približavanju fizijskim uvjetima. Uredaji sa zavojnicama koje proizvode helikoidalno polje zovu se stelaratori, prema uređaju izgrađenom u Princetonu (SAD).



Sl. 13. Tokamak, uređaj za magnetsko ograničenje plazme. Izmjenečno magnetsko polje inducira kružnu struju kroz plazmu (a), a njezino magnetsko polje komprimira plazmu (b)

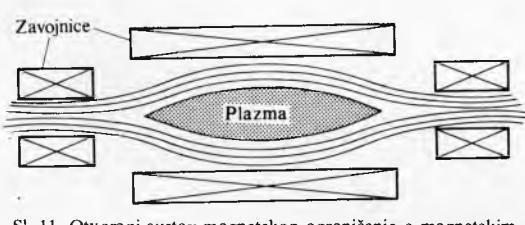
Kroz više od dva desetljeća istraživanja uspjelo je utvrditi uvjete za pojavu i metode za kontrolu gotovo svih oblika makroskopskih nestabilnosti, tj. onih nestabilnosti koje deformiraju stupac ili torus plazme. No još su uvjek nedovoljno proučene tzv. mikronestabilnosti unutar stupca plazme koje mogu znatno ubrzati gubitak energije iz vruće plazme i time otežati ili onemogućiti postizanje fizijskih uvjeta. Kontrola tih nestabilnosti središnje je pitanje u istraživanju magnetskog ograničenja plazme i još je neizvjesno koja će se geometrijska konfiguracija u tom pogledu pokazati najuspješnijom. Treba napomenuti da otvoreni sustavi ostaju privlačni jer je u njima moguće dostići visoke vrijednosti faktora β , prema tome, velike gustoće plazme pri ograničenim indukcijama magnetskog polja. Prije nekoliko godina sovjetski i američki istraživači predložili su novu konцепциju složenog magnetskog zrcala koja obećava velik napredak u zatvaranju linearног sustava. Sustav je poznat pod nazivom tandem zrcalnog fizijskog uređaja.

Grijanje plazme u uređajima s magnetskim ograničenjem. Zagrijavanje magnetski ograničene plazme na vrlo visoke temperature moguće je na više načina.

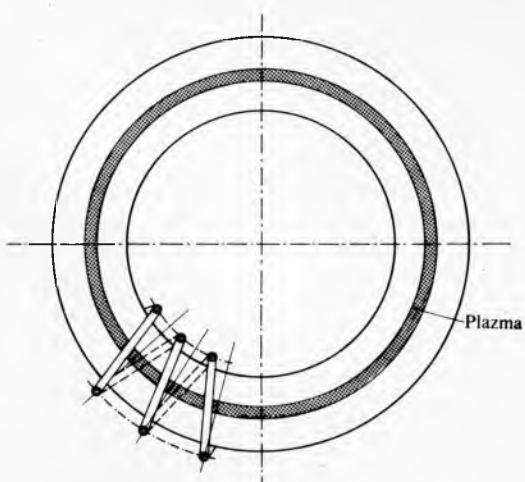
U uređajima tipa tokamak struja kroz plazmu ne samo što stvara polje potrebno za stabilizaciju plazme već je i zagrijava. Metoda je djelotvorna na temperaturama do nekoliko milijuna stupnjeva, jer je tada omni otpor plazme relativno velik. Otpor se plazme, međutim, smanjuje s daljim porastom temperature, pa se zagrijavanje smanjuje uz konstantnu struju. Struja se kroz plazmu radi kompenzacije smanjenja otpora može povećavati samo do neke maksimalne vrijednosti. Prekoračenjem te granične struje, naime, plazma postaje nestabilna. Stoga je potrebno dodatno zagrijavanje plazme.

U linearnim sustavima često se primjenjuje tzv. *theta pinch* postupak za zagrijavanje plazme. Naglim porastom jakosti magnetskog polja plazma se komprimira i zbog toga zagrijava. To se može postići izbijanjem velikih kondenzatora kroz magnetski namot uređaja. Čitava grupa linearnih uređaja, koji su građeni sa svrhom da se postignu velike gustoće i visoke temperature plazme magnetskom kompresijom, naziva se theta pinch uređajima. Magnetska kompresija može se, međutim, primjeniti i u toroidalnom sustavu. Takav je Scyllac uređaj u Los Alamosu (SAD).

U posljednje vrijeme sve se više radi na zagrijavanju plazme snopovima neutralnih atoma. Ioni se najprije ubrzaju u visoko-



Sl. 11. Otvoreni sustav magnetskog ograničenja s magnetskim zrcalima na krajevima cilindra

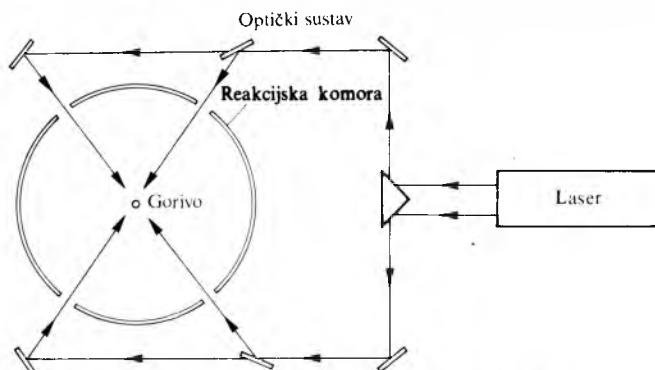


Sl. 12. Zatvoren toroidalni sustav magnetskog ograničenja

strujnom akceleratoru, zatim se neutraliziraju prolazom kroz razrijeđeni plin i poslije toga uvedu u fuzijski uređaj. To uvađanje nije problem jer su ubrzane čestice u toj fazi električki neutralne. U sudarima sa zagrijanom plazmom neutralne se čestice ioniziraju i predaju svoju energiju plazmi. Današnji izvori neutralnih atoma daju snopove snage oko 1 MW, a grade se mnogo veći. Takvo grijanje plazme primjenljivo je u linearnim i toroidalnim uređajima.

Proučavaju se i primjenjuju, osim toga, i metode zagrijavanja plazme izmjeničnim elektromagnetskim poljem u području frekvencija od nekoliko MHz do 100 GHz.

Inercijsko ograničenje. Inercijskim ograničenjem nastoji se tako zagrijati plazma da fuzijska reakcija nastupi prije nego što plazma ekspandira. Plazma je pri tom ograničena samo inercijom sastojaka. Ekspanzija će nastupiti vrlo brzo, u vremenu kraćem od stominjutog dijela sekunde, a plazmu treba zagrijati u još kraćem vremenu. Prema tome, potrebne su goleme trenutačne snage. Računa se da će tolike snage biti moguće ostvariti pomoću laserskih uređaja (v. *Laseri*, TE 7, str. 465). Laserski snop svjetlosti može dati ogromne trenutačne snage, ali ne i velike iznose energije, pa je laserskim snopom moguće zagrijati samo male količine plazme. Ostvarenje fuzijske reakcije inercijskim ograničenjem nastoji se postići obasjavanjem sa svih strana sitne kuglice od smjese deuterija i tricia, promjera $\sim 0,1$ mm, (sl. 14) laserskom svjetlošću u trajanju od $\sim 10^{-9}$ s i trenutačne snage od nekoliko desetaka TW. Takav sitan volumen plazme zagrijane na temperaturu od 10^8 K elektromagnetskom energijom laserskog snopa ekspandira u izvanredno kratkom vremenu od nekoliko 10^{-9} s, pa je Lawsonov uvjet moguće postići tek s gustoćom plazme koja je oko milijardu puta veća nego u uređajima s magnetskim ograničenjem. To je gustoća koja je čak za tisuće puta veća nego gustoća krute tvari u normalnim uvjetima. Pokazalo se, najprije teorijski, a kasnije i eksperimentalno, da takvo, do nedavno nepoznato, stanje tvari nastaje pri obasjavanju snažnim laserima kad ekspanzija površinskih slojeva obasjane kuglice proizvodi reakcijski udarni val koji komprimira središnje dijelove. U tom središnjem dijelu nastaje fuzija, odnosno, može se reći, fuzijska mikroeksplozija.



Sl. 14. Principijelna shema laserskog fuzijskog uređaja

Osnovni je fizikalni problem za ostvarenje fuzijskih uvjeta pri inercijskom ograničenju plazme postizanje dovoljno velike kompresije. Postoje problemi nestabilnosti takve kuglice tokom kompresije i djelotvornog prijenosa energije na središnji dio kuglice, koji se ne bi smio suviše zagrijati prije nego što dosegne potrebnu gustoću. Ti fizikalni problemi ovisni su o valnoj duljini laserske svjetlosti. Međutim, ako se uspješno riješe fizikalni problemi laserske fuzije, tehnički je veoma teško graditi lasere s karakteristikama potrebnima za gradnju fuzijske elektrane. Najkritičnije karakteristike su valna duljina, djelotvornost lasera i brzina ponavljanja svjetlosnog impulsa.

Neki od problema koji se javljaju izgledaju lakše riješivi ako bi se kuglica goriva umjesto laserom zagrijavala snopovima nabijenih čestica. Razmatraju se i sustavi u kojima bi se fuzijske mikroeksplozije ostvarivale kratkim i snažnim impulsima nabijenih čestica ubrzanih u akceleratorima. Danas je, međutim, i suviše rano ocijeniti praktičnu upotrebljivost bilo kojeg sustava za inercijsko ograničenje plazme.

Specifična energija nuklearnih procesa. Raspadom jezgre oslobođa se energija od ~ 200 MeV. Dio te energije, $\sim 5\%$, odnose neutroni, ali se u hvatom fisijskih neutrona u reaktoru dobiva skoro jednaka energija u obliku gama-zračenja koje nastaje nakon uhvata. Dio fisijske energije oslobođa se zakašnjelim radioaktivnim raspadom fisijskih proizvoda. Ako je gorivo dovoljno dugo u reaktoru, a reaktor dovoljno velik, najveći dio energije uhvata i radioaktivnog raspada iskoristiće se u reaktoru. Podaci o energiji raspada teških jezgara vide se u tabl. 5. To su podaci dobiveni mjeranjem u američkom brzom oplodnom reaktoru FBR II.

Tablica 5
ENERGIJA (MeV) FISIJE TEŠKIH NUKLIDA U BRZOM OPLODNOM REAKTORU FBR II

Nuklid	Q_f	E_γ	Q_γ	Q_T
^{232}Th	196,37	13,3	8,88	$192,0 \pm 1,0$
^{233}U	197,99	7,8	9,71	$200,0 \pm 0,6$
^{235}U	202,74	10,3	2,29	$201,7 \pm 0,7$
^{238}U	205,39	14,7	11,82	$203,0 \pm 1,1$
^{239}Pu	207,16	8,8	12,26	$210,6 \pm 0,7$
^{240}Pu	206,4	10,1	14,17	$210,5 \pm 2,2$
^{241}Pu	210,92	11,5	12,63	$212,0 \pm 0,8$
^{242}Pu	210,8	12,9	14,24	$212,1 \pm 4,2$

Q_f fisijska energija, E_γ energija neutrina, Q_γ energija γ -zračenja nakon uhvata neutriona, Q_T ukupna energija koja ostaje u reaktoru.

Računajući s energijom od 200 MeV po jednoj fisiji, fisijom 1 kg ^{235}U dobiva se energija od $8,21 \cdot 10^{13}$ J, odnosno 951 MWd (1MWd = 24 MWh). Ako se, međutim, iskoristi samo ^{235}U , koji se nalazi u prirodnom uranu, energija je za istu masu prirodног urana manja za ~ 140 puta, pa iznosi $5,86 \cdot 10^{11}$ J, odnosno 6,8 MWd po kilogramu prirodног urana.

Tablica 6
ENERGIJA OSLOBOĐENA PO JEDINICI MASE GORIVA U NUKLEARnim REAKTORIMA

Tip reaktora	Energija po kg goriva MWd	Specifična energija prirodног urana MWd/kg
PWR	33...35	5,7...6
HWR	7,3...7,5	7,3...7,5
FBR	—	350

PWR reaktor s običnom vodom pod tlakom, HWR teškovodni reaktor, FBR brzi oplodni reaktor

U tabl. 6 nalaze se podaci o energiji koja se dobiva po kg goriva, odnosno po kg prirodног urana u današnjim reaktorima. Energija dobivena iz 1 kg reaktorskog goriva ovisi o obogaćenju urana, tj. o sadržaju ^{235}U u gorivu, pa je korisniji podatak o energiji dobivenoj iz 1 kg prirodног urana, bez obzira na to da li se u reaktoru iskoristiće prirodni ili obogaćeni uran.

Ako se u istim jedinicama izrazi sadržaj energije standardnog ugljena ogrevne vrijednosti od ~ 30 MJ/kg (7000 kcal/kg = $29,3$ MJ/kg), dobiva se energija od $3,4 \cdot 10^{-4}$ MWd, pa 1 kg urana upotrijebljen u termičkom reaktoru s iskorištenjem od 6 MW dan/kg daje energiju koliko i 17 600 kg ugljena. Iskoristi li se uran u oplodnom reaktoru, 1 kg urana dao bi energije koliko otprilike i milijun kg ugljena. U konvencionalnoj termoelektrani električne snage 1000 MW godišnjeg iskorištenja od 80% izgori $\sim 2,5 \cdot 10^6$ t ugljena ogrevne vrijednosti od 30 MJ/kg. Termički reaktor iste snage troši godišnje uz iste uvjete 120...160 tona prirodног urana.

Za fuzijski proces mogu se navesti samo teorijske procjene. Ako bi 1 kg smjese deuterija i tricia (0,4 kg D i 0,6 kg T) potpuno izgorio, termouklearnom reakcijom dobila bi se energija od $34 \cdot 10^{13}$ J, odnosno 3934 MWd. Za istu količinu energije bilo bi potrebno 11,57 milijuna kg ugljena. Ogroman potencijal fuzije može se razabrati i uz realističniju procjenu iskorištenja. Ako bi se iskoristilo samo $\sim 1\%$ od procijenjene teorijske energije fuzije, energija 1 kg smjese deuterija i tricia odgovarala bi

energiji od ~ 100 t ugljena. Kako se potreban deuterij za 1 kg smjese nalazi u ~ 13 t vode, energetski je sadržaj obične vode više puta veći od energetskog sadržaja iste mase ugljena. Energetski je potencijal termonuklearne fuzije, dakle, praktički neiscrpan.

RAZVOJ NUKLEARNE ENERGIJE

Početkom tridesetih godina ovog stoljeća pažnja fizičara, dotada najvećim dijelom zaokupljena istraživanjem strukture atoma, usmjerena je na atomsku jezgru. Važna je 1932. god. po otkriću neutrona (J. Chadwick) i gradnji prvog akceleratora čestica (J. D. Cockcroft i E. T. S. Walton, 1932). To je mnogo doprinijelo istraživanju atomske jezgre; akcelerator kao obilan izvor čestica za istraživanje nuklearnih reakcija, a neutron kao neutralna čestica koja lako prodire u jezgru.

Sva bitna otkrića vezana uz fisiju ostvarena su u jednom desetljeću poslije 1932. god. E. Fermi povećava vjerojatnost pojave neutronskih reakcija usporavanjem neutrona u sudarima s lakiim jezgrama, tj. njihovom termalizacijom. Fisija je otvorena istraživanjem radioaktivnosti inducirane u uranu koji je obasjavavan neutronima, za koju se smatralo da je nastala apsorpcijom neutrona. Najprije su I. Curie i P. Savić (1937) eksperimentalno pretpostavljenu aktivnost aktinija s kemijski sličnim lantanom, a zatim su potkraj 1938. god. O. Hahn i F. Strassman eksperimentalno radioaktivnost pripisali radiju s kemijski sličnim barijem. Nakon toga bezuspješno pokušavaju izdvojiti radij iz barija te na kraju zaključuju da radioaktivnost ne pripada radiju nego bariju, tj. da je ozračenjem urana proizvedena radioaktivna jezgra upola manje mase (O. Hahn i F. Strassman, 1938). Zaključak koji su eksperimenti gotovo nametnuli izriču L. Meitner i O. Frisch (1939). Prema njihovoj interpretaciji, nakon apsorpcije sporog neutrona jezgra se deformira i cijepa u dva dijela sličnih masa, koji su zbog viška neutrona dalje radioaktivni.

u kojoj je bilo raspoređeno ~ 50 tona prirodnog urana. Rat je tada bio već u punom toku i prva primjena bila je usmjerenja na vojne potrebe, u okviru tzv. Manhattan projekta formiranog (1942) u najvećoj tajnosti.

Sa dvije nuklearne eksplozije 6. i 9. VIII 1945. nad Hirošimom i Nagasakijem završava rat s Japanom. Reaktori, u kojima se za vrijeme rata proizvodio plutonij kao nuklearni eksploziv, postaju zanimljivi i kao izvor energije, iako najprije za pogon ratnih brodova i podmornica.

Prvi eksperimentalni reaktor kojim se proizvodi električna energija bio je američki reaktor EBR-1 (Experimental Breeder Reactor, eksperimentalni oplodni reaktor 1951). Slijedi sovjetska eksperimentalna elektrana APS-1 (1954), te nuklearna elektrana Calder Hall u Velikoj Britaniji (1956) koja sa snagom od 60 MW predstavlja za svoje vrijeme važnu energetsku instalaciju. Elektrana Calder Hall je početak nove etape u razvoju nuklearne energetike. Međutim, dostupnost do informacija potrebnih za iskorištavanje nuklearne energije bila je u godinama poslije drugoga svjetskog rata strogo ograničena. Promjena započinje američkom iniciativom, poznata pod nazivom Atomi za mir (Atoms for peace, 1953), koja je nastojala ukloniti ograničenje i omogućiti širenje informacija potrebnih za miroljubivo iskorištavanje nuklearne energije.

Na Konferenciji o miroljubivoj upotrebi atomske energije (Ženeva, 8—20. VIII 1955), deset godina poslije nuklearnih eksplozija nad Japanom, više je zemalja prikazalo svoje programe razvoja u kojima je nuklearna energija veoma važna. Objavljivanje do tada nedostupnih znanstvenih podataka stimuliralo je dalju aktivnost te se u mnogo zemalja donose nuklearni programi i stvaraju organizacije za njihovu provedbu. Tehnički razvoj reaktora ipak je ograničen na samo nekoliko zemalja. U početnoj fazi grade se eksperimentalni reaktori različitih konceptacija s ciljem da se provjere fizikalni parametri i materijali, te da se utvrde tehnički problemi.

Tablica 7
GODIŠNJA PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE U NUKLEARnim ELEKTRANAMA

	1970.		1975.		1979.	
	Broj reaktora	Proizvodnja GWh	Broj reaktora	Proizvodnja GWh	Broj reaktora	Proizvodnja GWh
Argentina	—	—	1	2517	1	2517
Belgijska	1	720	4	6173	4	9574
Finska	—	—	—	—	2	6671
Francuska	6	5057	9	19783	15	43538
Indija	1	2176	3	2612	3	2927
Italija	3	3176	3	3800	4	2627
Japan	3	3296	10	15938	22	62003
Kanada	2	1054	7	13422	10	38478
Koreja (Južna)	—	—	—	—	1	3152
Nizozemska	1	368	2	3335	2	3995
SR Njemačka	6	6417	10	21859	15	42289
Pakistan	—	—	1	545	1	35
SAD	13	22818	52	175056	71	279718
Španjolska	1	923	3	6657	3	5897
Švedska	1	56	5	11997	6	21039
Švicarska	1	1945	3	7721	4	11848
Velika Britanija	13	5057	14	30508	17	38327
<i>Ukupno*</i>	52	74294	127	321944	184	580141

* bez SSSR i istočnoevropskih zemalja

N. Bohr i J. A. Wheeler vrlo brzo razvijaju i teoriju nuklearne fisije, na osnovi nuklearnog modela kapljice, te zaključuju da se fisijom raspada rijetki izotop urana ^{235}U . To se ubrzo eksperimentalno potvrdilo. Na konferenciji Američkog fizikalnog društva u Washingtonu (siječnja 1939) u diskusiji o novim nuklearnim reakcijama E. Fermi iznosi mogućnost da se fisijkim raspadom jezgre, osim teških fragmenata oslobođaju i neutroni, pa predviđa i mogućnost održavanja fisijске reakcije emitiranim fisijskim neutronima. Mjerenja su potvrdila i tu pretpostavku, ali su kvantitativni rezultati ostali u tajnosti sve do svršetka rata. Konačna potvrda mogućnosti lančane reakcije uslijedila je u Chicagu 2. XII 1942. Tada je E. Fermi sa suradnicima postigao kritičnost u sfernoj strukturi grafita promjera od ~ 5 m,

Tokom šezdesetih godina izbor se sužava na termičke reaktore hladene vodom i plinom te na brze oplodne reaktore hlađene natrijem. Daljim razvojem i gradnjom jedinica velikih snaga potkraj šezdesetih godina, termički reaktori hlađeni plinom i vodom dostižu tehničku razvijenost i ekonomski karakteristike kompetitivne elektranama na fosilna goriva.

Početkom sedamdesetih godina razvoj je nuklearne energetike veoma intenzivan. Te su godine karakterizirane velikim povećanjem cijena nafta, ali i povećanjem otpora prema uvođenju nuklearne energije, što odgadja i usporuje gradnju nuklearnih elektrana u više zemalja (SAD, Švedska, Japan, Austrija).

Na kraju 1982. god bilo je u pogonu 281 nuklearni reaktor ukupne snage na pragu elektrane od 161,74 GW, a u gradnji,

odnosno narudžbi još 229 reaktora (v. *Nuklearna energetska postrojenja*, tabl. 2). Kad svih 610 reaktora ukupne snage od ~369 GW bude u pogonu, potkraj osamdesetih godina, nuklearna energija predstavljaće će skoro 10% od ukupne primarne energije, dok će udio nuklearnih elektrana u proizvodnji električne energije iznositi ~25%. Današnja proizvodnja u nuklearnim elektranama (tabl. 7) iznosi ~8% od ukupne proizvodnje električne energije.

I vojna primjena nuklearne fuzije prethodila je mirnodopskoj SAD i SSSR aktivirale su 1952. god. fuzijske eksplozivne uređaje, tzv. hidrogenске bombe (Vel. Britanija 1957, NR Kina 1967, Francuska 1968). Istraživanja za mirnodopsku upotrebu fuzijske energije počinju oko 1955. god. Na drugoj Konferenciji o mirnodopskoj upotrebi atomske energije (1958) kontroliranoj fuziji posvećeno je mnogo referata.

Prvo desetljeće istraživanja počinje s dosta preuranjenog optimizma, koji postepeno ustupa mjesto realističnoj ocjeni teškoća. Potkraj toga razdoblja nailazi se na problem dinamičke nestabilnosti plazme, pa je to osnovna zapreka u približavanju fuzijskim uvjetima. Istraživači shvaćaju da suviše slabo poznaju osnovna svojstva tvari s kojom rade, tj. plinske plazme, i da je potrebno opće istraživanje plazme. Postalo je također jasno da su problemi tako međusobno povezani da koncentracija na neke od njih čak usporuje njihovo rješavanje. Široko zasnovana istraživanja tokom sljedećih deset godina znatno su unaprijedila poznavanje plazme, razvijeno je novo područje fizike, fizika visokotemperaturne plazme. Sedamdesetih godina znatno se približilo fuzijskim uvjetima s tokamak uređajima i njihova gradnja je osnovna karakteristika tog razdoblja.

Inercijalno ograničenje plazme i posebno laserska fuzija razvijaju se kao sasvim novi i različiti prilazi, također sedamdesetih godina. Time je zaobidena čitava grupa problema koji se odnose na stabilnost magnetski ograničene plazme. Međutim, da li će problemi gradnje djelotvornih i snažnih lasera te kompresije plazme biti manji, to će se tek vidjeti. Potkraj sedamdesetih godina postignut je ohrabrujući napredak u zatravanju linearnih sustava s magnetskim ograničenjem, a razvijene su i nove perspektivne koncepcije.

Razvoj nuklearne energetike u Jugoslaviji. Pripreme za razvoj nuklearne energije u našoj zemlji počinju rano osnivanjem nuklearnih instituta (Institut Boris Kidrič, 1947; Institut Jože Štefan, 1949. i Institut Ruder Bošković, 1950.) koji svojim širokim i komplementarnim programom istraživanja stvaraju znanstvene i tehničke podloge tom razvoju. Paralelno se razvijalo i istraživanje nuklearnih sirovina (Institut za istraživanje nuklearnih sirovina, Institut za tehnologiju mineralnih sirovina).

SR Hrvatska i SR Slovenija (1970) sporazumjele su se o zajedničnoj gradnji nuklearne elektrane kod Krškoga (u Sloveniji), a nakon složenih predradnji, u prosincu 1974. god. započela je gradnja prve nuklearne elektrane u našoj zemlji. Nuklearna elektrana Krško u pogonu je od 1982. god.

Studije razvoja jugoslavenskog energetskog sustava pokazuju da je potrebno do 2000. god. izgraditi nuklearne elektrane ukupne snage od više tisuća MW.

Nuklearna energija u transportu. Nuklearni pogon brodova razvija se još od kraja četrdesetih godina, pa je to zapravo i najranija upotreba nuklearnih reaktora za proizvodnju energije. Reaktortipa PWR izgrađen je za pogon podmornica i površinskih brodova. Budući da kisik nije potreban za pogon nuklearnih podmornica, one mogu ploviti punom snagom pod morem, te svojom brzinom, veličinom i akcionim polujmerom mnogo nadmašuju konvencionalne podmornice (v. *Podmornica*). Do sada je izgrađeno više desetaka nuklearnih podmornica, a gradnja površinskih nuklearnih ratnih brodova izgleda da je zbog njihove ranjivosti manje atraktivna. Upotreba nuklearnih reaktora za pogon trgovackih i putničkih brodova ovisi u prvom redu o ekonomskim prednostima, pa je prijelaz na nuklearni pogon bio mnogo sporiji. Nisu još riješena pitanja pribavata nuklearnih brodova u trgovacke luke, te sigurnosti pri sudaru ili potapanju. Izgrađeno je do sada samo pet eksperimentalnih jedinica (v. *Nuklearna energetska postrojenja*). Šezdesetih godina, naime prednosti brodova s nuklearnim pogonom nisu bile posebno izražene,

ali, zbog današnjih i budućih cijena nafte, izgleda da se prilike razvijaju u prilog nuklearnom pogonu brodova.

U kopnenom ili zračnom prometu problemi sigurnosti i posljedice prometnih nesreća mnogo su ozbiljniji, pa se upotreba nuklearne energije za takav transport ne očekuje. Razmatra se, međutim, mogućnost primjene nuklearnog pogona za interplanetarne raketu.

REZERVE NUKLEARNIH GORIVA

Rezerve fizijskog goriva. Iako se lančana reakcija može održavati fisiom ^{235}U , ^{239}Pu ili ^{233}U , jedino se ^{235}U nalazi u prirodi kao sastavni dio prirodnog urana, dok su ^{239}Pu i ^{233}U sekundarni fizijski materijali koji nastaju u reaktorima apsorpcijom neutrona u ^{238}U i ^{232}Th . Inicijalnu lančanu reakciju i proizvodnju potrebnih neutrona za te pretvorbe moguće je dobiti samo raspadom ^{235}U , pa je količina toga izotopa, odnosno količina urana mjerodavna za procjenu potencijala fizijske energije.

Kad se govori o rezervama fizijskog goriva, misli se u prvom redu na rezerve urana. Istraživanju tih rezerva posvećuje se znatna pažnja. Interes za istraživanje torija bio je do sada mnogo manji, jer se njegova upotreba u reaktorima tek priprema.

Element uran je vrlo raširen u Zemljinoj kori, ali su koncentracije malene, pa su troškovi izdvajanja veliki. Stoga se zalihe urana klasificiraju prema troškovima ekstrakcije i ispitaniosti ležišta. Prema troškovima ekstrakcije razlikuju se obično tri kategorije: do 80 \$ po kg urana, od 80...130 \$/kg, i više od 130 \$/kg (vrijednost dolara u 1977. god.). Prema istraženosti razlikuju se potvrđene, dodatne i moguće rezerve. Najčešće se, međutim, pod rezervama podrazumijevaju potvrđene rezerve uz troškove ekstrakcije do 80 \$/kg (sl. 15).

Troškovi eksploatacije	Subekonomische rezerve		
	više od 130 \$/kg	80...130 \$/kg	do 80 \$/kg
Ekonomske rezerve			Rezerve
			Potvrđene rezerve
			Procjena dodatnih rezerva
			Moguće rezerve

← Sigurnost procjene

Sl. 15. Prikaz klasifikacije rezerva prema troškovima eksploatacije i sigurnosti procjene

Prema klasifikaciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency, IAEA) potvrđene rezerve smatraju se one količine urana koje se nalaze u poznatim mineralnim ležištima i koje se mogu izdvojiti primjenom današnje rudarske i prerađivačke tehnologije uz troškove u određenim granicama. Procjena količina i troškova osniva se na uzorcima, mjerenu ležišta i poznavanju karakteristika ležišta. Potvrđene rezerve karakterizirane su visokim stupnjem sigurnosti procjene.

Dodatane rezerve odnose se na uran kojega se pronalaženje očekuje na osnovi geoloških činjenica: a) u blizini istraživanih ležišta, b) u slabo istraženim ležištima, c) u još neotkrivenim ležištima na osnovi geoloških karakteristika. Stupanj je sigurnosti pronalaženja tih rezerva naravno niži nego za kategoriju potvrđenih rezerva.

U tabl. 8 prikazane su potvrđene i dodatne zalihe urana prema stanju iz 1977. god. U podacima o rezervama urana navedene su i rezerve urana u Jugoslaviji. S obzirom da je za elektranu snage od 1000 MW kroz njezin radni vijek potrebno

Tablica 8
REZERVE URANA (10^3 t)

Država	Rezerve		Potvrđene rezerve		Dodatne rezerve	
	do 80\$/kg	80...130 \$/kg	do 80\$/kg	80...130 \$/kg		
Alžir	28	0	50	0		
Argentina	17,8	24	0	0		
Australija	289	7	44	5		
Austrija	1,8	0	0	0		
Bolivija	0	0	0	0,5		
Brazil	18,2	0	8,2	0		
Cile	0	0	5,1	0		
Danska	0	5,8	0	8,7		
Filipini	0,3	0	0	0		
Finska	1,3	1,9	0	0		
Francuska	37	14,8	24,1	20,0		
Gabon	20	0	5	5		
Indija	29,8	0	23,7	0		
Italija	1,2	0	1	0		
Japan	7,7	0	0	0		
Jugoslavija	4,5	2	5	15,5		
Južnoafrička Republika	306	42	34	38		
Kanada	167	15	392	264		
Koreja	0	3	0	0		
Madagaskar	0	0	0	2		
Meksiko	4,7	0	2,4	0		
Niger	160	0	53	0		
Portugal	6,8	1,5	0,9	0		
SAD	523	120	838	215		
Somalija	0	6,2	0	3,4		
Srednjoafrička Republika	8	0	3	0		
SR Njemačka	1,5	0,5	3	0,5		
Španjolska	6,8	0	8,5	0		
Švedska	1	300	3	0		
Turska	4,1	0	0	0		
Velika Britanija	0	0	0	7,4		
Zair	1,8	0	1,7	0		
Ukupno	1650	510	1510	590		

~5000 t urana, bit će potreban znatan uvoz urana za predviđene nuklearne elektrane. To vrijedi usprkos činjenici da dio područja Jugoslavije nije još dovoljno istražen te da je utvrđivanje novih rezerva moguće i vjerojatno. Glavna su nalazišta urana u nas: Žirovski vrh (SR Slovenija), Zletovska reka (SR Makedonija) i Bukulja (SR Srbija).

Potrebe količine urana. Procjena potrebnih količina urana ovisi o pretpostavljenoj dinamici gradnje nuklearnih elektrana i o pretpostavkama o roku uvođenja reaktora s boljim iskoristnjem urana. Pregled potreba osniva se na kanadskoj studiji izraženoj za Svjetsku energetsku konferenciju (World Energy Conference, WEC), objavljenoj 1978. god. i prihvaćenoj kao osnovni dokument za INFCE (International Nuclear Fuel Cycle Evaluation). Taj je međunarodni skup stručnjaka tokom 1978. i 1979. god. detaljno razmatrao ključne elemente u razvoju nuklearne energetike, napose one koji se tiču goriva.

U procjeni potrebnih količina urana polazi se od prognoze o porastu potrošnje električne energije, također izrađene za WEC, uz pretpostavku porasta od 4,2% godišnje u razvijenim zemljama i 6,9% u zemljama u razvoju. Procjena se temelji na pretpostavci razvoja nuklearnih elektrana do sudjelovanja od 50% u ukupnoj proizvodnji električne energije, s početkom gradnje nuklearnih elektrana kad instalirana snaga svih elektrana u zemlji postane veća od 5000 MW.

U tabl. 9 prikazan je predviđeni razvoj nuklearnih elektrana u razvijenim zemljama (Sjeverna Amerika, zapadna Evropa,

Tablica 9
PROGNOZA RAZVOJA NUKLEARNIH ELEKTRANA
SVJETSKE ENERGETSKE KONFERENCIJE

Godina	1975 GW	1985 GW	2000 GW	2020 GW
Razvijene zemlje	68	247	955	2423
Zemlje u razvoju	1	23	186	1000
Ukupno	69	270	1141	3423

Projekcija nuklearnih instalacija u svijetu prema WEC

Australija, Novi Zeland, Japan) i u zemljama u razvoju (Latinska Amerika, Srednji istok i sjeverna Afrika, Afrika južno od Sahare, istočna Azija, južna Azija). U pregledu nisu obuhvaćene zemlje s centralnim planiranjem.

U tabl. 10 spomenuta je projekcija uspoređena s projekcijom Agencije za nuklearnu energiju Evropskog zajedničkog tržišta (Nuclear Energy Agency, NEA), s prognozom grupe Workshop on Alternate Energy Strategies (WAES) i s prognozom u studiji International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (INFCE). Dosta velike razlike u procjenama pokazuju na današnje neizvjesnosti u razvoju nuklearne energetike.

Tablica 10
USPOREDBA PROGNOZA RAZVOJA FISIJSKIH NUKLEARNIH ELEKTRANA (GW)

Godina	Projekcija			
	WEC	NEA	WAES	INFCE
1985	270	278...368	291...412	—
2000	1141	1000...1890	913...1772	850...1200
2020	3423	—	—	—
2025	—	2157...6650	—	1800...3900

WEC Svjetska energetska konferencija, NEA Agencija za nuklearnu energiju OECD, WAES Seminar o alternativnim energetskim strategijama, SAD, INFCE, Međunarodna studija o nuklearnim gorivim ciklusima

Na osnovi pretpostavljene dinamike gradnje nuklearnih elektrana prema studiji za WEC određene su potrebne količine urana za dvije dugoročne strategije (tabl. 11). U prvoj (A), grade se termički (lakovodni) reaktori bez recikliranja. Prema drugoj strategiji (B), poslije termičkih (lakovodnih) reaktora grade se oplodni reaktori uz pretpostavku da se njihova snaga udvostručuje u 24 godine. Računa se da će prvi komercijalni oplodni reaktori biti stavljeni u pogon 1987. god. u zapadnoj Evropi, 1993. u SAD. a 2000. u Japanu. U procijenjene kumulativne potrebe do određene godine uključen je i uran potreban za 30-godišnji radni vijek elektrana, računajući od početne godine.

Tablica 11
KUMULATIVNE POTREBNE KOLIČINE URANA DO 2020. GOD. (10^6 t)

Pretpostavljena nuklearna strategija	Razvijene zapadne zemlje*	Ostali**	Ukupno svijet
A	13,0	4,8	17,8
B	7,0	4,8	11,8

A grade se samo termički reaktori bez iskoristavanja plutonija,

B grade se osim termičkih i oplodnih reaktori

* Sjeverna Amerika, zapadna Evropa, Australija, Novi Zeland, Japan

** Bez zemalja SEV i NR Kine

Kao što se razabire (tabl. 8 i 11), postoje raskorak između rezerva i procjene potreba. Postoje, međutim, mogućnosti da se potrošnja urana smanji i u termičkim reaktorima, osobito u teškovodnim, na što valja računati u razdoblju do 2020. god. U tom bi se razdoblju moglo računati i na razvoj tzv. fuzijsko-fisijskih hibrida, što bi osjetno smanjilo potrebe za uranom. Nadalje novije geološke procjene zaliha urana pokazuju da bi urana, osobito u kategoriji od 80...130 \$/kg trebalo biti mnogo više od današnjih procjena, pa se može očekivati da će dalja istraživanja znatno povećati rezerve nuklearnog goriva. Procjene zaliha navedene u tabl. 8 za 1977. god. rasle su u prethodnim godinama za 10...15% godišnje. Postoji mišljenje da će se nuklearni programi realizirati sporije, pa će se smanjiti problemi opskrbe uranom. Takva tendencija, međutim, bila bi nepovoljna za većinu zemalja u razvoju koje nemaju rezerva fosilnih goriva, jer bi nuklearna energija mogla bitno doprinijeti njihovu razvoju. Dugoročne potrebe za uranom u Jugoslaviji penju se na više desetaka tisuća tona, što je mnogo više od vlastitih rezerva, pa je osiguranje urana jedno od najvažnijih pitanja dugoročnog razvoja fisijske energije.

Rezerve fuzijskog goriva. Budući da se deuterij, jedna od komponenata potrebnih za fuzijsku reakciju deuterija s tricijem, nalazi u vodi u omjeru 1:7000, njegove su rezerve praktički neiscrpane. Ograničenje se pojavljuje s obzirom na tricij koji se treba proizvesti nuklearnim reakcijama s litijem, pa rezerve litija teorijski postaju faktor ograničenja za energetsko iskorištenje fuzijske reakcije deuterija s tricijem. No današnje preliminарne procjene pokazuju da će rezerve relativno dostupnijeg litija dostići u nekoliko stoljeća. Smatra se da je to dovoljno vremena za uspješno ovladavanje fuzijskom reakcijom deuterija s deuterijem za koju to ograničenje ne postoji. Može se zaključiti, prema tome, da u iskorištanju nuklearne fuzije ograničenja ne proizlaze iz raspoloživih energetskih sirovina, i da će taj izvor biti toliko neiscrpan kao što je neiscrpan deuterij u oceanima.

EKOLOŠKE I POLITIČKE IMPLIKACIJE NUKLEARNE ENERGIJE

Fizijska energija i okoliš. Proizvodnja energije, od pripreme goriva, izgradnje energetskih objekata do, konačno, proizvodnje potrebnih oblika energije, ne može a da ne utječe na okoliš. Efekti su, dakako, specifični za pojedine energetske izvore, a proporcionalni su opsegu proizvodnje energije. I izvori koji na prvi pogled ne djeluju negativno na okoliš, npr. vjetrenjače ili solarni uređaji, čine to posredno jer su za njihovu gradnju potrebne velike količine različitih konstruktivnih materijala, a njihovi proizvodni procesi utječu na okoliš. Pri iskorištanju vodnih snaga izvor opasnosti i utjecaja na okoliš mogu biti velike brane i drugi hidroenergetski objekti. Pri proizvodnji energije iz fosilnih goriva opasnosti i utjecaji na okoliš pojavljuju se najprije tokom eksploracije nalazišta i transporta do mjesta potrošnje. Nesreće u rudnicima ugljena u svijetu svake godine odnose stotine života, a učestala oštećenja i potapanja velikih tankera za prijevoz naftne te platformi za podmorska bušenja ozbiljno oštećuju i ugrožavaju život u morima. Nakon što je gorivo dospjelo do mesta potrošnje, novi su utjecaji posljedica emisija štetnih plinova koji nastaju pri izgaranju. Najveća je opasnost od emisije sumpor-dioksida, jer ugljen i nafta sadrže više ili manje sumpora. Detaljne analize utjecaja na okoliš u kojima se uzimaju u obzir i sve faze koje prethode pogonu elektrane pokazuju da relativno velik utjecaj imaju elektrane u kojima se iskorištuju izvori energije male gustoće jer su potrebne velike količine materijala za njihovu gradnju. To se odnosi na iskorištenje energije Sunčeva zračenja i vjetra, bez obzira na mali utjecaj u pogonskoj fazi. Nuklearna energija jedan je od najpovoljnijih izvora energije kad se promatra cijeloviti utjecaj na okoliš.

Specifičnost je fizijske nuklearne elektrane vrlo velika radioaktivnost sadržana u nuklearnom gorivu, te opasnost koju bi predstavljalo širenje te radioaktivnosti u okoliš. No, specifičnost je nuklearne elektrane i u tome što je moguće spriječiti to širenje, jer proces oslobođanja energije fisiom ne traži kontakt s okolišem koji je potreban pri izgaranju fosilnih goriva radi dovođenja kisika iz okolišnog zraka. Nuklearno se gorivo upotrebljava u fizički i kemijski stabilnom spoju, najčešće u obliku uran-dioksida, iz kojega se radioaktivni proizvodi teško izdvajaju. Taj se materijal, osim toga, zatvara u nepropusne metalne košuljice, koje su smještene u reaktorskemu posudu koja je takoder barijera za prolaz radioaktivnih tvari. Na kraju, čitav se reaktor s rashladnim sustavom zatvara u veliku nepropusnu posudu ili zgradu (sigurnosni štit, v. *Nuklearna energetska postrojenja*), što dalje sprečava širenje radioaktivnosti u okoliš pri gotovo svim zamislivim teškim kvarovima.

Utjecaj je ionizirajućeg zračenja na čovjeka jedan od najbolje istraženih faktora čovječje okoline, zahvaljujući upotrebi zračenja u medicini tokom desetljeća. Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja (International Commission on Radiation Protection, ICRP) osnovana je, naime, još 1928. god.

Dugogodišnja istraživanja pokazuju da ozračenje energetskom (ekvivalentnom) dozom od 1 Sv rezultira u $\sim 0,01$ slučajeva pojavom raka u godinama poslije ozračenja. Na osnovi te spoznaje mogu se odrediti utjecaji nuklearne elektrane na okoliš.

U normalnom pogonu emisija radioaktivnosti svedena je na količinu kojom se u okolišu elektrane može primiti doza zračenja do $10 \mu\text{Sv}/\text{godinu}$, što je tek nešto više od 1% prirodnog zračenja kojemu je čovjek u više i svugdje izložen. Druga dodatna zračenja, koja su posljedica ljudskih aktivnosti, mogu biti mnogo veća, kao što pokazuju podaci u tabl. 12.

Tablica 12
OZRAČENJE STANOVNIŠTVA* IZ POJEDINIH IZVORA

Izvor zračenja	Ekvivalentna energetska doza μSv	Udjel %
Prirodno zračenje	960	74
Medicinsko ozračenje	300	23
Nuklearne eksplozije	20	1,6
Profesionalno ozračenje	7	0,5
Avionski letovi	6	0,5
Radioaktivni otpad	2	0,2
Ručni satovi s fluorescentnim brojkama	2	0,2

* U V. Britaniji god. 1978.

Reaktorski akcidenti. Danas se polemike manje vode oko malih učinaka u normalnom pogonu nuklearnih elektrana na okoliš, a više oko mogućih učinaka pri teškim reaktorskim kvarovima, odnosno nenormalnom pogonu.

Za razliku od konvencionalnih termoelektrana, nuklearne elektrane imaju svojstva da snaga u reaktoru može porasti i nekoliko puta iznad normalne ako se pojavi nekontrolirani porast reaktivnosti. Takvu pojavu treba spriječiti, a ako nastane, mora se što brže potisnuti, i to prije nego što se zbog povišenja temperature ošteći gorivo ili drugi dijelovi reaktora. Osiguranje od takvih pojava postiže se najprije reaktorom, koji ima takvu sposobnost samoregulacije da porast snage automatski smanjuje višak reaktivnosti, i zatim s dodatnim kontrolnim i sigurnosnim sustavima.

Nuklearne elektrane posjeduju, naime, višestruke redundantne sigurnosne sisteme kojima se osigurava obustava pogona reaktora i hlađenje jezgre i u normalnim i u nenormalnim uvjetima. Budući da radioaktivni proizvodi raspada nastavljaju razvijati toplinu u gorivu (v. *Nuklearna energetska postrojenja*) i nakon obustave pogona reaktora, posebno je važan sustav za hlađenje jezgre u nuždi.

Može se, međutim, ipak zamisliti takav slijed kvarova koji bi uzrokovao prestanak rada toga sigurnosnog sustava pa i taljenje reaktorske jezgre. Detaljne probabilističke tehničke analize (službeni američki izvještaj WASH-1400 poznat kao Rasmussenov izvještaj, 1974) pokazuju da je i tada potreban niz dodatnih nepovoljnih okolnosti da se pojavi opasna emisija radioaktivnosti u okoliš, pa je vjerojatnost takva događaja izvanredno malena, a prosječan utjecaj kvarova nezнатan na normalni pogon.

Usporedba rizika zbog postojanja nuklearnih elektrana, 100 postrojenja, s rizikom zbog ostalih ljudskih aktivnosti i s rizikom zbog elementarnih nepogoda, daje barem kvalitativnu sliku odnosa i omogućuje da se opasnost od nuklearnih elektrana stavi u korektni odnos s drugim opasnostima (sl. 16). Rezultati probabilističkih analiza mogu se osporavati, već i zato jer ocjene vjerojatnosti kvarova reda veličine 10^{-5} ili manje nije moguće eksperimentalno provjeriti. No, čak ako bi se procjene iz Rasmussenova izvještaja uvećale i 25 puta (sl. 16), nema bitne promjene u zaključcima.

Kasnija studija nuklearne sigurnosti koju jeiniciralo Ministarstvo za znanost i tehnologiju SR Njemačke 1976. god. služila se metodama razvijenima u američkoj studiji, ali je uzimala u obzir njemačke specifičnosti u reaktorskoj tehnici, u demografskim, klimatološkim i drugim uvjetima.

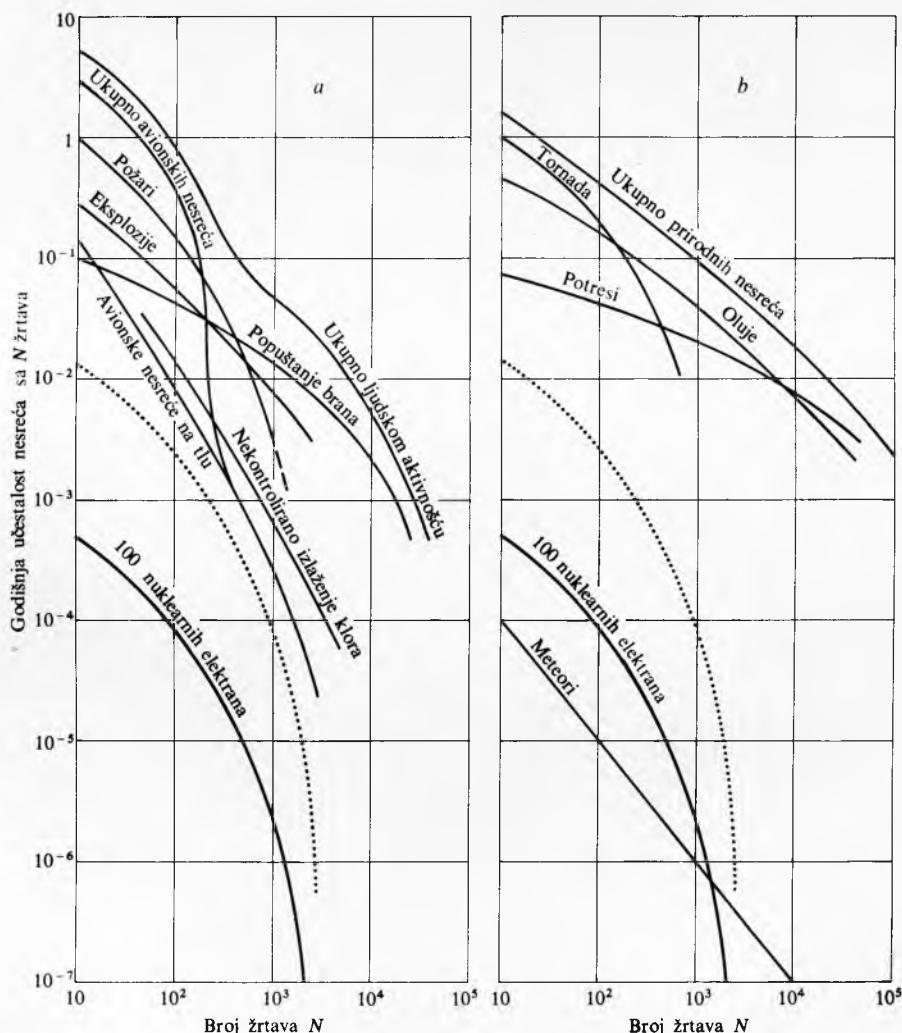
Osim razumljivih razlika zbog poboljšanja ulaznih podataka i uzimanja u obzir specifičnih uvjeta, u rezultatima njemačke studije, objavljenima 1979. god., nema znatnih razlika s obzirom

na američku studiju WASH-1400. Rezultati njemačke studije sumarno su prikazani u tabl. 13. Prikazani su rizici smrti zbog različitih aktivnosti i rizik u okolišu nuklearne elektrane.

Tablica 13
RIZIK SMRTNOSTI OD RAZLIČITIH UZROKA

Uzrok rizika	Godišnja smrtnost na milijun stanovnika
Zaposlenje (prosjek)	130
Zaposlenje u rudarstvu	540
Zaposlenje u zdravstvenoj službi	40
Kućanstvo i slobodno vrijeme	230
Promet (75 min dnevno)	240
Letenje (1 sat tjedno)	50
Privatno letenje (1 sat tjedno)	1000
Udar groma	0,6
Strujni udar	4
Rak i leukemija (iz svih uzroka)	2700
Akutno ozračenje (rane smrti)	0,01
Kasni učinci ozračenja (smrt od raka ili leukemije)	0,2

Rizici u blizini nuklearne elektrane, prema podacima za SR Njemačku.



Sl. 16. Učestalost nesreća uzrokovanih ljudskom aktivnošću (a) i prirodnim pojавama (b) sa N ljudskih žrtava, te učestalost nesreća uzrokovanih postojanjem 100 nuklearnih elektrana (crkvana krivulja). Točkasta krivulja prikazuje učestalost nesreća uzrokovanih postojanjem 100 nuklearnih elektrana kad bi broj žrtava bio i 25 puta veći od onoga što se procjenjuje za 100 nuklearnih elektrana (prema američkom izvještaju WASH-1400).

Procjene u WASH-1400 i u njemačkoj studiji sigurnosti osnivale su se na određenim pretpostavkama o emisiji ^{131}I u teškim kvarovima. Pri visokom stupnju oslobađanja ^{131}I iz reaktorskog goriva, što je pretpostavljeno u američkoj i u njemačkoj studiji, taj izotop najviše doprinosi broju neposrednih žrtava. Visok stupanj oslobađanja posljedica je pretpostavke da se jed

u gorivu nalazi u obliku elementa. Istraživanja posljednjih nekoliko godina pokazala su da su pretpostavke o kemijskom obliku joda bile pogrešne, te da su procjene posljedica teških kvarova na vodom hlađenim reaktorima znatno precijenjene. Osobito je potrebna velika redukcija broja neposrednih žrtava, za faktor 100 ili za još veći faktor. Istraživanja koja su u toku u nizu zemalja, sa simulacijom kvarova, dat će uskoro realniji prikaz posljedica teških reaktorskih kvarova.

Analice ranijih kvarova, odnosno namjerno pobuđenih nenormalnosti na eksperimentalnim reaktorima, i kvara na američkoj elektrani »Otok tri milje« također potvrđuju te nove nalaze o emisiji radioaktivnog joda.

U svijetu se razvija opsežan program istraživanja i poboljšanja nuklearne sigurnosti. Eksperimentalna istraživanja usmjeravaju se na one komponente i sustave za koje je probabilističkom analizom nadeno da, ako iznevjere, mnogo doprinose vjerovatnosti pojave teških kvarova. U idućim godinama, osim realnije procjene posljedica teških kvarova, može se očekivati i smanjenje vjerovatnosti teških kvarova.

Radioaktivni otpad. Iako se radioaktivnost fizijskih fragmenata naglo smanjuje, jedan dio ostaje radioaktiv i poslije stotina

i tisuća godina, te je potrebno sprječiti njihovo širenje u okoliš. U raspravama o tom važnom pitanju najčešće se naglašava vremenski rok unutar kojega je potrebno osigurati uskladištenje radioaktivnih otpadaka, pa se taj problem često i preuvećuje. Problem nije urgentan, jer se nuklearni otpaci mogu prije konačnoga dugoročnog odlaganja kroz više desetljeća privremeno

pohraniti za što postoje razvijene i iskušane metode. Danas već postoje i dalje se proučavaju metode i za dugoročno odlaganje otpada. Tu se radi u prvom redu o odlaganju u ležišta soli i u granitnim stijenama. Ta su spremista prema svojim geološkim i drugim karakteristikama takva da mogu sprječiti širenje radioaktivnosti tokom stotina tisuća godina.

Fuzijske elektrane i okoliš. Proizvodi izgaranja u fuzijskim elektranama nisu radioaktivni, pa otpada problem radioaktivnog otpada i mogućnost širenja radioaktivnosti iz reaktora kao iz fizijskih elektrana. I u fuzijskim elektranama ipak ima znatnih radioaktivnosti koje se induciraju u konstrukcijskim materijalima obasjavanim intenzivnim tokom fuzijskih neutrona, osobito u prvoj stjenki reakcijske komore. Ta će radioaktivnost stvarati teškoće pri održavanju i popravcima, ali neće imati ozbiljnijeg utjecaja na okoliš osim pri vrlo nevjerljativim okolnostima. Mnogo važnije je pitanje tricija, koji će se u fuzijskoj elektrani proizvoditi u vrlo velikim količinama. Sprečavanje širenja tricija u okoliš bit će osnovni sigurnosni problem u fuzijskim elektranama. Kako u fuzijskoj elektrani ne postoji mogućnost znatnog porasta snage iznad normalne, sigurnosni problemi odnose se na uvjete normalnog pogona i u toliko su lakše predvidivi i rješivi.

Političke implikacije. Nuklearna energija najprije je razvijena i upotrijebljena za vojne svrhe (v. *Nuklearno oružje*). Širenje nevojne upotrebe nuklearne energije počinje poslije 1954. god. kada SAD otkrivaju do tada nedostupna znanja iz reaktorske tehnologije. Sa zadatom da pomognu mirnodopsku upotrebu atomske energije Ujedinjeni narodi formiraju (1956) u Beču posebnu organizaciju, Međunarodnu agenciju za atomsku energiju (International Atomic Energy Agency, IAEA). Nepovoljan opći politički razvoj djelova je da gotovo četiri desetljeća od svršetka rata vojna primjena nuklearne energije još uvijek dominira. Ravnoteža između dviju vodećih nuklearnih sila održava se gradnjom nuklearnog arsenala tolikog da pri iznenadnom nuklearnom napadu omogućuje odmazdu i jednoj i drugoj sili. Svaka od tih dviju sila posjeduje mnoga tisuća atomskih bombi većinom mnogo snažnijih od onih koje su uništile Hirošimu i Nagasaki. To je stravična ravnoteža koja je i nestabilna jer se vodeće sile i dalje naoružavaju. Zbog toga što ne napreduje nuklearno razoružanje, zaostaje razvoj mirnodopske upotrebe nuklearne energije.

Nuklearna elektrana srednje snage godišnje proizvede toliko plutonija koliko je dovoljno za desetak bombi onolike razorne snage kao one bačene na Japan. Zbog toga zemlje s razvijenom nuklearnom tehnologijom nastoje sprječiti širenje tehnologija potrebnih za razvoj nuklearnog oružja. Nažalost, te su tehnologije potrebne i za mirnodopsko iskorištavanje nuklearne energije. To su u prvom redu tehnologija obogaćivanja urana, preradbe i ekstrakcije plutonija potrebnog za recikliranje i za gradnju oplodnih reaktora. Statut Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) predviđa kontrolu i inspekciju kojima se želi sprječiti upotreba nuklearnog goriva u vojne svrhe, ali je njezina primarna uloga da stimulira razvoj mirnodopske upotrebe nuklearne energije. Taj se duh mijenja (1970) Ugovorom o neširenju nuklearnog oružja (Non Proliferation Treaty, NPT) u kojem je težište na kontrolama i ograničenjima za zemlje bez nuklearnog oružja. Inicijatori su bile zemlje koje su ovladale nuklearnom tehnologijom. Kao kompenzaciju za ograničenja u razvoju nuklearne tehnologije na koja ugovor obvezuje ne-nuklearne zemlje, zemlje s razvijenom nuklearnom tehnologijom obvezale su se da će smanjiti nuklearno naoružanje. U dobroj vjeri više od stotinu zemalja potpisalo je Ugovor o neširenju nuklearnog oružja. Napredak je u smjeru razoružanja, međutim, izostao pa se taj ugovor smatra danas neravnopravnim.

Sadašnja je situacija takva da se može tvrditi da su sve zemlje svijeta ugrožene ako dode do nuklearnog sukoba, ali i da ne postoji ravnopravnost u miroljubivom iskorištavanju nuklearne energije.

Problem širenja nuklearne tehnologije zaoštvara se nakon pokusne nuklearne eksplozije u Indiji (1974) i zbog sporazuma o razvoju tehnologije gorivog ciklusa koje su Francuska i SR Njemačka potpisale s Južnom Korejom, Pakistanom i Brazilom (1975 i 1976).

Nova su ograničenja u prijenosu nuklearne tehnologije uvedena formiranjem tzv. Londonskog kluba (London Club of Suppliers, 1975). Klub obuhvaća šesnaest zemalja koje proizvode nuklearnu opremu, a glavni su članovi SAD, SSSR, Velika Britanija, SR Njemačka, Francuska i Japan. Uveden je novi pojam *osjetljivih* tehnologija i materijala, te posebna kontrola nad izvozom postrojenja, opreme ili tehnologije za obogaćivanje goriva i ostalih uređaja koji su definirani kao osjetljivi.

Poslije toga jednostrano su prekinuti ugovori o isporuci nuklearne opreme i sa zemljama koje su potpisale Ugovor o neširenju nuklearnog oružja.

Kad su se Sjedinjene Američke Države (1977), radi smanjivanja mogućnosti širenja nuklearnog oružja izjasnile protiv iskorištavanja plutonija otkazom narudžaba instalacija za pregradbu goriva i zaustavljanjem komercijalnog razvoja oplodnih reaktora, sukobili su se interesi SAD i visokorazvijenih zapadnih zemalja koje nemaju dovoljnih rezerva urana i koje su u upotrebi plutonija i gradnji oplodnih reaktora vidjele mogućnost dugočlane opskrbe energijom. U toj konfliktnoj situaciji pokreću SAD (1977) izradbu studije s ciljem da se ocijene implikacije širenja nuklearne tehnologije i da se nađu rješenja koja ne bi kočila razvoj miroljubive upotrebe nuklearne energije, ali kojima bi se kontroliralo dalje širenje nuklearnog oružja. U izradbi studije pod naslovom International Fuel Cycle Evaluation (INFCE) sudjelovalo je više stotina stručnjaka iz 46 zemalja. Konačan izvještaj INFCE završen je u veljači 1980. SAD su nastojale kroz INFCE pokazati da je njihov stav protiv iskorištavanja plutonija i tehnički i ekonomski podkrijepljen. Međutim, alternativa koja bi bila po svojim tehničkim karakteristikama otporna prema širenju nuklearnog oružja, a također bi pružila i dugočlanu perspektivu upotrebe nuklearne energije, nije nađena. Pokušaj INFCE da se za političke probleme nađe tehničko rješenje nije mogao uspjeti. Možda se ipak može nadati da su dvogodišnje diskusije omogućile predstavnicima velikih zemalja s razvijenom nuklearnom tehnologijom da bolje razumiju potrebe i stavove zemalja koje žele razvijati i imati jasniju perspektivu razvoja nuklearne energije.

EKONOMSKI ASPEKTI NUKLEARNE ENERGETIKE

Fizijske nuklearne elektrane. Pri razmatranju ekonomike fizijskih nuklearnih elektrana s obzirom na konvencionalne termoelektrane na ugajli ili loživo ulje postoje dvije bitne razlike koje proizlaze iz tehničkih svojstava: a) investicijski su troškovi za gradnju nuklearnih elektrana općenito veći nego za gradnju konvencionalnih termoelektrana i b) troškovi za goriva mnogo su niži u nuklearnim elektranama.

S obzirom na to da se približno mogu usporediti investicije za reaktor s investicijama za kotao i pomoćne kotlovske pogone u konvencionalnoj termoelektrani, i jer su investicije za turboaggregate slične, veće investicije po jedinici snage u nuklearnoj elektrani potrebne su zbog dodatnih kontrolnih i sigurnosnih sustava.

Kako investicije za te dodatne i sigurnosne sustave rastu dosta sporije od porasta snage, višak se investicija relativno smanjuje s porastom snage elektrane. To je stimuliralo nagli razvoj nuklearnih elektrana prema sve većim jediničnim snagama, pa se danas grade blokovi reaktor-turboagregat sve do snage od 1300 MW.

Ukupne investicije za gradnju nuklearne elektrane ne ovise samo o snazi i tipu reaktora nego i o mnogim drugim elementima kao što je sezmičnost područja, način hlađenja, nosivost tla i dr., pa podaci o investicijama bez tih specifikacija ne znače mnogo. Na osnovi investicija za nuklearne elektrane za koje je bio sklopljen ugovor tipa *kluč u ruke* te na temelju američke studije (WASH-1345) procjenjuje se da za nuklearnu elektranu snage 2×1150 MW s rashladnim tornjevima koja će biti u pogonu 1985. specifične investicije iznose $\sim 1000 \$/\text{kW}$, uz uvjet da se elektrana gradi na *u svakom pogledu povoljnoj lokaciji*. Autori studije procjenjuju da odstupanja mogu iznositi od $-15\% + 25\%$. Točnije se, međutim, mogu uspoređivati konvencionalna i nuklearna elektrana na istoj lokaciji. Tabl. 14 prikazuje rezultate komparativnih studija za termoelektrane na

ugljen, koje bi se gradile na istoj lokaciji kao i nuklearne elektrane. Kao što se vidi, rezultati bitno ovise o tome da li je potrebno smanjiti emisiju sumpor-dioksida. Ako je to potrebno, investicije su za termoelektrane na ugljen samo za 16–18% manje od investicija za nuklearnu elektranu, jer posebni uređaji za odstranjivanje sumpor-dioksida iz plinova izgaranja znatno povećavaju investicije za termoelektrane na ugljen.

Tablica 14

INVESTICIJE ZA TERMOELEKTRANE NA UGLJEN*

Termoelektrana/projektant	Vrški sadržaj sumpora**	Nizak sadržaj sumpora***
<i>Lokacija</i>		
Northeast Electric	0,81	0,65
Pilgrim 2 (Boston Edison)	0,82	
Millstone 3 (Northeast Utilities)	1,01	0,93
Yadkin (Duke Power)	0,82	
Cherokee (Duke Power)	0,82	
Callaway (Union Electric)	0,81	0,67
<i>Projekantske organizacije</i>		
Bachtel	0,83	0,74
Ebasco	0,91	0,69
<i>Ostali</i>		
Commonwealth Edison	1	0,70
WASH—1345 (služba studija)	0,84	0,64
Westinghouse	0,83	0,71

* Relativan iznos prema investicijama za nuklearne elektrane (lakovodni reaktori) na istoj lokaciji (prema američkoj studiji: Nuclear power issues and choices, Ballinger 1977)

** S uređajima za odstranjivanje sumpor-dioksida iz plinova izgaranja

*** Bez tih uređaja

Cijene svih primarnih energetskih sirovina rastu, ali su cijene fosilnih goriva u posljednjem desetljeću rasle izvanredno brzo i to mnogo brže od cijena nuklearnog goriva.

Kad se promatraju cijene goriva za nuklearne elektrane, valja troškovima za nabavku urana dodati troškove za obogaćenje urana i za izradbu gorivnih elemenata, koji ovise o tipu elektrane. Spomenuti su dodatni troškovi manji nego troškovi za prirodnji uran (po cijenama u 1980. god.). Troškovi za gorivo u nuklearnim elektranama mnogo su niži nego u termoelektranama na loživo ulje. Lokalno proizveden ugljen može dakako biti mnogo povoljnija energetska sirovina od tekućih goriva. Porast cijena nafte, međutim, praćen je i porastom cijena ugljena, pa su u godinama nakon poskupljenja nafta nuklearne elektrane i prema ugljenu imale prednost (tabl. 15). Takvi su odnosi zadržani u posljednjem desetljeću, što pokazuju podaci o proizvodnim cijenama u elektranama u Velikoj Britaniji (tabl. 16). Ti su podaci važni jer su u Velikoj Britaniji izgrađene prve

Tablica 15
STRUKTURA TROŠKOVA U ELEKTRANAMA

Troškovi*	Nuklearne elektrane	Termoelektrane	
		na ugljen	na loživo ulje
Troškovi goriva	0,13	0,55	0,71
Ostali troškovi pogona	0,09	0,07	0,05
Amortizacijski troškovi	0,26	0,12	0,12
<i>Ukupno</i>	0,48	0,74	0,88

* U V. Britaniji 1974/75. god. (penny/kWh)

Podaci o proizvodnim troškovima električne energije koje je objavila kompanija Commonwealth Edison (1981) mogu dati sliku o tim troškovima u nuklearnim elektranama i konvencionalnim termoelektranama. Kompanija opskrbљuje električnom energijom Chicago i sjeverni dio države Illinois i raspolaže

Tablica 16
PROIZVODNI TROŠKOVI U ELEKTRANAMA*

Godina proizvodnje	Nuklearne elektrane	Termoelektrane	
		na ugljen	na loživo ulje
1971/72.	0,43	0,43	0,39
1972/73.	0,48	0,49	0,40
1973/74.	0,52	0,53	0,55
1974/75.	0,48	0,74	0,88
1975/76.	0,67	0,97	1,09
1976/77.	0,69	1,07	1,27
1977/78.	0,76	1,23	1,42

* U V. Britaniji (penny/kWh)

sa ~10% američkih nuklearnih elektrana te s mnogo termoelektrana loženim ugljenom i loživim uljem. Cijena ugljena odgovara približno prosječnim cijenama ugljena u SAD. Analiza je provedena za 17 elektrana velike snage (6 nuklearnih, 6 elektrana loženih ugljenom i 5 loženih loživim uljem) koje su stavljene u pogon poslije 1964. god. U razdoblju od 1976. do 1980. prosječna godišnja proizvodnja nuklearnih elektrana iznosila je 61,8%, termoelektrana loženih ugljenom 45,1%, a termoelektrana loženih loživim uljem 22,5% od maksimalno moguće proizvodnje. Usporedba troškova proizvodnje (tabl. 17) pokazuje prednost nuklearnih elektrana, pa i onda kad se troškovi svedu na jednak godišnje iskorištenje. Osim toga, pokazuje se (tabl. 18) da s povećanjem cijena goriva sve više dolaze do izražaja ekonomске prednosti nuklearnih elektrana.

Tablica 17
TROŠKOVI PROIZVODNJE (SMWh) ELEKTRIČNE ENERGIJE NA PRAGU ELEKTRANE

Vrsta elektrana	Skupina elektrana*	Gorivo	Troškovi pogona i održavanja	Troškovi svih investicija i otpata**	Ukupni troškovi	Troškovi svedeni na iskoristenje od 60%
Nuklearne elektrane	Sve CE elektrane 6 velikih elektrana ¹⁾	5,6 5,6	4,1 4,0	8,7 8,4	18,4 18,0	18,1 18,2
Termoelektrane na ugljen	Sve CE elektrane 6 velikih elektrana ²⁾	22,4 21,2	3,9 3,5	10,5 11,4	36,8 36,1	33,8 33,7
Termoelektrane na naftu	Sve CE elektrane 5 velikih elektrana ³⁾	65,2 70,8	3,2 2,3	24,7 27,4	93,1 100,5	75,7 78,7

* Elektrane kompanije Commonwealth Edison (CE), i to: ¹⁾ Dresden 2 i 3, Quad Cities 1 i 2, Zion 1 i 2, ²⁾ Ioliet 7 i 8, Kincaid 1 i 2, Powerton 5 i 6, ³⁾ Collins 1, 2, 3, 4 i 5

** Jednak radni vijek svih elektrana (35 godina)

nuklearne elektrane većih snaga i jer su tamo građene nuklearne elektrane s relativno visokim specifičnim investicijama (reaktori tipa Magnox, v. *Nuklearna energetska postrojenja*), pa su odnosi nešto manje povoljni za nuklearne elektrane nego u drugim zemljama gdje su građeni vodom hlađeni reaktori.

U budućnosti treba računati s daljim porastom cijena svih vrsta goriva, ali to će imati manji utjecaj na proizvodne troškove energije u nuklearnim elektranama nego u konvencionalnim termoelektranama zbog manjeg udjela troškova za gorivo u cijeni energije iz nuklearnih elektrana.

Tablica 18

USPOREDBA TROŠKOVA PROIZVODNJE (\$/MWh) ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ NUKLEARNIH ELEKTRANA I TERMOELEKTRANA NA UGLJEN*

Godina	Vrsta elektrana**	Gorivo	Ukupni troškovi	Troškovi svedeni na iskoristenje od 60%
1976.	Nuklearne Na ugljen	5,0 8,0	15,7 18,0	(Nema podataka)
1977.	Nuklearne Na ugljen	4,5 10,1	14,1 20,9	14,2 19,0
1978.	Nuklearne Na ugljen	4,7 14,0	13,6 25,3	15,1 22,7
1979.	Nuklearne Na ugljen	5,2 18,0	16,9 30,2	16,8 27,3
1980.	Nuklearne Na ugljen	5,6 21,2	18,0 36,1	18,2 33,7

* Velike termoelektrane na naftu ušle su u pogon tek 1979. god.

** Elektrane kompanije Commonwealth Edison (CE)

Ekonomičnost fizijskih elektrana. S obzirom da jošni u jednom fizijskom sastavu nije postignuto samoodržavanje fizijske reakcije, nema sustava koji bi se mogao odabrati kao realna osnovica za ekstrapolaciju na velike energetske uređaje. Mogući su ipak neki opći zaključci. Budući da se iz jedinice mase goriva dobiva velika količina energije, troškovi za gorivo u fizijskoj elektrani imat će tek neznatan udio u troškovima za proizvodnju energije. Međutim, svi fizijski sustavi koji se danas razvijaju traže izvanredno složene instalacije uz primjenu novih i komplikiranih tehnoloških postupaka (vrlo veliki supravodljivi magneti ili laserski sustavi goleme snage). Zbog toga će investicije po jedinici snage biti 2...3 puta veće nego za termičke fisijske elektrane. To prikazuje niz projektnih studija načinjenih u SAD i SSSR u kojima su obrađeni ključni tehnički i tehnološki problemi i kojima su procijenjene ekonomski karakteristike budućih fizijskih elektrana. Osim za ekstremno visoke cijene urana, treba očekivati da će fizijska energija biti skuplja od fisijske za približno isti faktor.

BUDUĆI RAZVOJ NUKLEARNE ENERGETIKE

Fisijska energija. Prema današnjem shvaćanju fisijska nuklearna energija treba da posluži kao dodatni energetski izvor uz ugljen kao osnovni izvor energije u razdoblju postepenog smanjivanja potrošnje nafta sve dok se ne ostvari iskoristavanje u velikim razmjerima fizijske nuklearne energije i energije Sunčeva zračenja. Zbog toga je, a s obzirom na relativno male rezerve jeftinog urana, potreban razvoj fisijske nuklearne energije u dva glavna smjera: povećanje iskoristenja nuklearnih goriva i poboljšanje iskoristenja proizvedene nuklearne toplinske energije djelotvornijom pretvorbom u električnu energiju i izravnom upotrebotom u industrijskim procesima.

Današnje iskoristenje nuklearne energije urana iznosi samo ~1%, a povećanjem faktora konverzije to se iskoristenje može povećati za nekoliko, pa i za nekoliko desetaka puta (sl. 9): Povećanjem faktora konverzije na iznos veći od 1, fisijska bi energija postala energetski izvor dostatan za buduća stoljeća, jer bi se tada ne samo povećalo energetsko iskoristenje urana iz nalazišta koja se danas smatraju ekonomičnima nego bi postalo opravданo iskoristavati uran s kojim se danas ne računa (npr. uran iz granita, ili čak uran iz mora). Uvođenje teorija u proces nuklearne fisije (gorivi ciklus uran-torij) može se smatrati povećanjem iskoristenja nuklearnih goriva.

Povećanje faktora konverzije može se ostvariti smanjenjem apsorpcije neutrona u moderatoru i u proizvodima raspada, te povećanjem neutronskog prinosa.

Smanjenje apsorpcije neutrona u moderatoru. Ako se smanji apsorpcija neutrona u moderatoru, ostaje više neutrona za raspad jezgara i za apsorpciju u ^{238}U . To se postiže upotrebom teške vode kao moderatora (reaktori HWR, v. *Nuklearni reaktori*). U takvim reaktorima postiže se faktor konverzije od ~0,8.

Sličan faktor konverzije može se postići u plinom hlađenim reaktorima s grafitom kao moderatorom.

Smanjenje apsorpcije neutrona u proizvodima raspada. Dio neutrona ostaje neiskorišten zbog njihove apsorpcije u proizvodima raspada, pa bi se njihovim uklanjanjem iz reaktora za vrijeme pogona veoma poboljšao faktor konverzije. To, dakako, nije moguće postići u reaktorima s krutim gorivom kakvi se danas grade. Ako je, međutim, gorivo u tekućem stanju kao što je to u eksperimentalnom reaktoru tipa MSRE (Molten Salt Reactor Experiment), koji je bio u pogonu od 1965. do 1969. u SAD, može se dio goriva odvoditi iz reaktora radi kemijskog izdvajanja proizvoda raspada, što je i provedeno u spomenutom eksperimentalnom reaktoru. Druga je mogućnost da se gorivo (UO_2) u sitnim česticama suspendira u tekućem moderatoru (KEMA Suspension Test Reactor u Nizozemskoj). Zbog velike kinetičke energije, koju dobivaju proizvodi raspada nakon raspada jezgre, oni izlaze iz sitnih čestica goriva, pa se tako odvojeni proizvodi raspada mogu izdvojiti iz moderatora.

Povećanje neutronskog prinosa. Upotrebom plutonija (^{239}Pu) kao nuklearnog goriva, uz uvjet da se raspad jezgara ostvari pomoću brzih neutrona, dobiva se mnogo veći neutronski prinos nego u termalnim reaktorima sa ^{235}U kao gorivom (sl. 5). Već je, naime, rano uočena mogućnost da se prijelazom na fizijsu s bržim neutronima i izostavljanjem moderatora, jer nije potrebno usporavanje neutrona, dobije mnogo veća vrijednost faktora konverzije. To se postiže dijelom zbog povećanog broja neutrona po raspadnutoj jezgri (skoro tri neutrona), dijelom zbog toga što nema apsorpcije u moderatoru, te dijelom što se, zbog relativno malih dimenzija reaktorske jezgre, može oko jezgre postaviti oblog od prirodnog ili osiromašenog urana u kojem će se neutroni, koji bi inače pobegli iz reaktora, iskoristiti za proizvodnju plutonija. U takvim reaktorima mogući su faktori konverzije i veći od 1, pa i do ~1,5. Razvoj brzih oplodnih reaktora počeo je rano, a sada je u toku gradnja takvih reaktora velike snage da se dokaže njihova pouzdanost i ekonomičnost. Osnovni tehnički problemi povezani su s koncentracijom velike snage u relativno malim jezgrama, pa je odvođenje topline iz takvih reaktora mnogo veći problem nego iz termičkih reaktora. Kao rashladno sredstvo upotrebljava se tekući natrij zbog njegovih povoljnih termičkih svojstava, iako se proučava mogućnost upotrebe i drugih rashladnih sredstava. Ulaganja su u razvoj oplodnih brzih reaktora golema, u skladu s perspektivom koju pružaju. Danas je u pogonu desetak eksperimentalnih oplodnih reaktora snage do 250 MW. Reaktor Superphenix snage 1200 MW, koji će biti dovršen 1984. god. u Francuskoj najvažnija je instalacija u gradnji. Gradi se sredstvima više zapadnoevropskih zemalja. Uspešan ishod togda poduhvata bio bi važan korak u razvoju oplodnih reaktora prema pouzdanom i ekonomičnom izvoru energije.

Istdobro se o opravdanosti gradnje oplodnih reaktora vode mnoge diskusije, jer se njihova komercijalna eksploatacija smatra opasnom sa stanovišta proširenja nuklearnog oružja. Gorivo za oplodne reaktore sadrži, naime, ~20% plutonija koji se može relativno jednostavno izdvojiti iz svježeg goriva. Iz tih je razloga u SAD obustavljen razvoj oplodnih reaktora, a predviđa se i zabrana upotrebe plutonija u termičkim reaktorima. U razvoju oplodnih reaktora vodi danas SSSR i zapadnoevropske zemlje koje nemaju većih rezerva urana, pa su više ovisne o upotrebi oplodnih reaktora nego SAD.

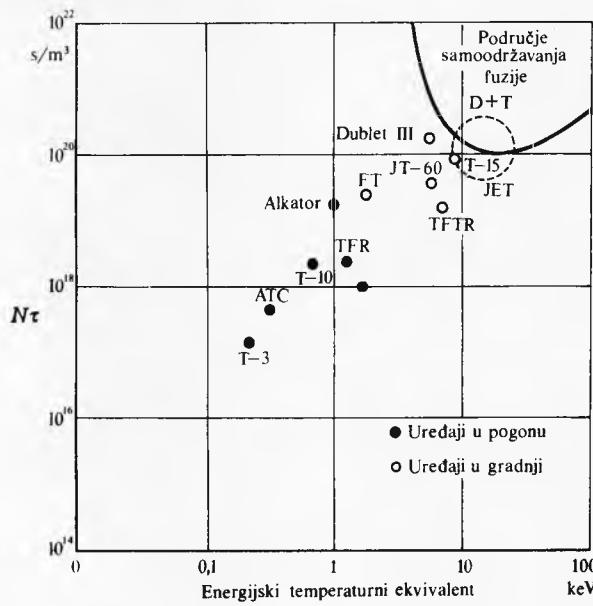
Gorivi ciklus uran-torij. Kao što je već spomenuto, ^{232}Th nije fisiabilni materijal, ali se on nakon apsorpcije neutrona slijedom raspada pretvara u ^{233}U koji je nuklearno gorivo. Ako se, naime, u reaktor kao oplodni materijal stavi ^{232}Th , umjesto ^{238}U , dobit će se ^{233}U . Gorivi ciklus u kojem je torij oplodni materijal, a ^{235}U , ^{239}Pu ili ^{233}U su fisiabilni materijali, naziva se uran-torijevim ciklusom goriva. Upotrebom ^{233}U kao nuklearnog goriva postiže se dobar faktor konverzije, ali je još važnije što se posredno omogućuje energetsko iskoristenje torija, jer su, kako se procjenjuje, rezerve torija jednake ili čak veće od rezerva urana. Uran-torijev ciklus goriva moguć je u svim tipovima termičkih reaktora, ali se najpovoljniji rezultati očekuju u teškovodnim reaktorima, jer se u njima postiže bolja ekonomija neutrona.

Za pokretanje uran-torijeva ciklusa goriva potrebni su reaktori s gorivom koje sadrži ^{235}U ili ^{239}Pu , a nakon što se proizvede dovoljno ^{233}U , može se proces održavati samo upotrebo torija.

U već spomenutom eksperimentalnom reaktoru tipa MSRE upotrebo ^{233}U kao goriva bilo je moguće postići faktor konverzije do 1,07. Razvoj tog reaktora obustavljen je 1969. god., jer se tada, izgleda, nisu dovoljno uočile njegove prednosti.

Poboljšanje termičkog stupnja djelovanja i izravna upotreba nuklearne topline. Da se povisi temperatura rashladnog sredstva, a time i djelatne tvari koja se dovodi turbini ili koja se neposredno upotrebljava u industrijskim procesima (rasplinjavanje ugljena, termička disocijacija vode), razvijaju se visokotemperaturni reaktori (HTR). U SAD je u pogonu eksperimentalna elektrana Fort St. Vrain snage 300 MW s visokotemperaturnim reaktorom. U SR Njemačkoj je u pogonu reaktor male snage (15 MW), a dovršava se reaktor veće snage (300 MW). U takvim reaktorima s helijem kao rashladnim sredstvom i sa specijalnim gorivom bez metalne košuljice dostignute su temperature i do 950°C , što je mnogo više nego u lakovodnim termičkim reaktorima (temperatura pare do $\sim 330^\circ\text{C}$).

Fuzijska energija. Približenje samoodržavanja nuklearne fuzije ostvareno u sedamdesetim godinama iniciralo je gradnju tokamak uređaja u više istraživačkih središta. Gradi se nekoliko velikih uređaja koji bi trebali omogućiti dostizanje uvjeta za samoodržavanje fuzije (sl. 17). Najprije će biti dovršeni japanski uređaj (JT-60) i američki TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor). Zajednički evropski projekt JET (Joint European Torus) gradit će se u Culhamu (Velika Britanija), a bit će u pogonu poslije 1983. god. U isto vrijeme trebao bi biti rekonstruiran tokamak T-10 u SSSR, a poslije 1985. god. izgrađen mnogo veći T-15, također u SSSR.



Sl. 17. Približenje područja samoodržavanja fuzije deuterija s tricijem u velikim tokamak uređajima u pogonu i gradnji (v. sl. 6 i sl. 7)

Tim se uređajima želi ostvariti fuzija deuterija s tricijem da bi se procijenile osnovne dimenzije i karakteristike fuzijskog reaktora. To je vrlo važno pitanje jer se sumnja, i pored toga što se upotreboom uređaja tipa tokamak najviše napredovalo u smjeru ostvarenja uvjeta za održanje fuzije, da je to najpovoljnije rješenje s obzirom na dimenzije i složenost takva reaktora. Osim toga, u posljednjim godinama ostvaren je velik napredak u zatvaranju linearnih sustava posebnim magnetskim zrcalima, pa bi, konačni uspjeh stvorio mogućnost primjene takva jednostavnijeg sustava.

Usporedno se radi na inercijskim sustavima, u prvom redu na onima s laserima, ali i s elektronskim snopovima. Grade se instalacije s laserima velike snage u čemu prednjače SAD, SSSR i Japan. Velike instalacije s elektronskim sponovima grade se u SSSR i SAD.

Ako se extrapoliraju do sada postignuti rezultati, očekuje se da će se u novim uređajima ostvariti fuzijski uvjeti, otprilike do 1985. god., ili barem prije 1990. godine, ali neočekivani rezultati, kojih je i do sada bilo u proučavanju nuklearne fuzije, nisu isključeni. Smatra se, međutim, da je nuklearna fuzija najteži tehnološki poduhvat koji je do sada poduzet. Postigne li se uspjeh, tj. dosegnu li se fuzijski uvjeti, slijedit će razdoblje istraživanja ponašanja deuterisko-tricijske plazme pri održavanju fuzijskih reakcija. Paralelno s tim, bit će potrebno riješiti mnoge tehničke i tehnološke probleme da se omogući izbor najpovoljnijeg sustava. Provjera svih komponenata fuzijske elektrane bit će moguća tek na osnovi eksperimentalnih postrojenja koja bi se mogla izgraditi pri kraju ovoga stoljeća.

Fuzijsko-fisijski hibrid. Iako se s optimizmom gleda na rješavanje fizikalnih i tehničkih problema za ostvarenje nuklearne fuzije, postaje sve jasnije da će biti najveći problem ostvariti takvo postrojenje za iskorištavanje energije nuklearne fuzije koje će moći svojim proizvodnjom troškovima konkurirati drugim energetskim izvorima. Kako je već spomenuto, izrađene projektne studije pokazuju da će specifične investicije za fuzijsku postrojenja biti 2...3 puta veće nego za postrojenja s fisijskim termičkim reaktorima. U takvoj situaciji, iako ne samo iz ekonomskih razloga, posljednjih godina razrađuje se bitno nova koncepcija iskorištavanja nuklearne energije.

Nova koncepcija ujedinjuje procese fuzije i fisijske tzv. fuzijsko-fisijski hibridom. Takvom se koncepcijom smanjuju fizikalni i tehnički zahtjevi i na fuzijski i na fisijski proces, a što je posebno važno, bitno se popravlja ekonomска perspektiva.

Fuzijsko-fisijski hibrid ima omotač od urana ili torija oko fuzijske reakcijske komore. Fuzijski neutroni tada služe ne samo za proizvodnju energije fisijsom urana i torija nego i za konverziju ^{238}U u ^{232}Th u ^{239}Pu , odnosno u ^{233}U . U omotaču je obilna proizvodnja ^{239}Pu , odnosno ^{233}U , jer se u njemu umnaža broj neutrona. Fisijsom fuzijskim neutronima energije 14 MeV oslobođa se 4...5 neutrona dok se niskoenergetskom fisijsom u termičkim reaktorima oslobođa samo 2...3 neutrona. Osim toga fuzijski neutroni pobuduju ($n, 2n$) i ($n, 3n$) reakcije. Procjenjuje se da se takvim procesima u omotaču utroštuje broj neutrona uz oslobođanje 100...200 MeV po jednom fuzijskom neutronu.

Približno trećina tih neutrona troši se za proizvodnju tricija, a ostali se apsorbiraju u uranu i toriju. Proizvedeni ^{239}Pu ili ^{233}U upotrebljavaće se u termičkim reaktorima za dalju proizvodnju energije. U današnjim termičkim reaktorima dobitivo bi se tako 600...1400 MeV po jednoj fuzijskoj reakciji.

Fuzijsko-fisijski hibrid zajedno s fisijskim reaktorima koje opskrbљuju fisibilnim materijalom jest tehničko-ekonomski cjeplina, tzv. fuzijsko-fisijski hibridni sustav. U tom sustavu efektivno izgara ^{238}U i ^{232}Th koje hibrid pretvara u fisibilne jezgre.

Za ekonomičnost fuzijsko-fisijskog hibridnog sustava odlučan je broj, odnosno snaga termičkih reaktora koje hibrid opskrbљuje gorivom, jer se s povećanjem snage termičkih reaktora smanjuju specifične investicije po jedinici snage. Investicije su za fuzijsko-fisijski hibrid, naime, kako je već spomenuto 2...3 puta veće od investicija za fisijski termički reaktor. Već prema tipu termičkog reaktora, odnosno njegovom koeficijentu konverzije, hibrid može opskrbljivati 4 lakovodna ili 8 teškovodnih reaktora, odnosno više od 20 termičkih reaktora s naprednim gorivim ciklusom. Dakako da je potrebno odrediti optimalni sastav oplodnog omotača oko jezgre hibrida i gornji ciklus fisijskih reaktora. Projektne studije i ekonomске analize pokazuju da fuzijsko-fisijski sustav omogućuje praktički neograničenu proizvodnju energije iskorištavanjem rezerva urana i torija uz proizvodnu cijenu koja je 15...20% viša od cijene energije proizvedene u termičkim lakovodnim reaktorima.

Povoljna ekonomска karakteristika nije jedina prednost hibridnog sustava. Fuzijsko-fisijski hibrid može raditi uz znatno blaže fizičalne i tehnološke uvjete nego fuzijski reaktor. Energetska bilanca u fuzijskom dijelu hibrida može biti i negativna, što omogućuje rad reaktora i kad nije zadovoljen Lawsonov kriterij, a da ipak energetska bilanca sustava bude pozitivna. U fuzijsko-fisijskom hibridnom sustavu dobiva se, naime,

700–1600 MeV po jednoj fuzijskoj reakciji, već prema tipu termičkog reaktora, dok jedna fuzijska reakcija u fuzijskom reaktoru daje samo 17 MeV.

Danas je još uvjek nesigurno kad će se postići uvjeti potrebnii za fuziju, ali postizanje uvjeta potrebnih za hibridni sustav mnogo je sigurnije. Čak i kad se fuzija postavi kao konačni cilj, put vodi preko hibridnog sustava.

Osim toga, fuzijsko-fisijski hibridni sustav ima više prednosti nego čisti fisijski sustav s brzim oplodnim reaktorima koji također omogućuju iskorištenje energije ^{238}U i ^{232}Th . Prednosti su sigurnosne, ekonomski i u pogledu mogućnosti razvoja iskorištavanja nuklearne energije.

Pogon je hibrida sigurniji, jer je masa urana u omotaču potkritična pa ne postoji mogućnost pojave lančane reakcije uz smanjenje opasnosti ako nestane hlađenje omotača.

Specifične investicije za brze oplodne reaktore bit će, prema današnjim procjenama, za 30–60% veće nego za lakovodne termičke reaktore, što je više od onoga što se može postići s hibridnim sustavom.

Uspješan razvoj hibridnih sustava mogao bi imati daleko-ježni utjecaj na razvoj iskorištavanja nuklearne energije, jer bi taj razvoj učinio neprivilačnim a i nepotrebnim razvoj oplodnih brzih reaktora. Termički reaktori u simbiozi s hibridima mogli bi osigurati opskrbu energijom kroz stoljeća. To je svakako zanimljivo pogotovo za manje zemlje koje bi tada mogle računati s dugoročnom primjenom tehnologije termičkih reaktora. Tada bi bila potrebna gradnja zajedničkih međunarodnih ili regionalnih hibridnih postrojenja za proizvodnju fisiabilnih materijala. Pri tom treba naglasiti da bez međunarodne ili regionalne suradnje nema za manje zemlje ni jedne realne strategije dugoročnog iskorištavanja nuklearne energije.

LIT.: H. Požar, Osnove energetike. Školska knjiga, Zagreb 1976. — D. Popović, Nuklearna energetika. Naučna knjiga, Beograd 1978. — S. Glasstone, A. Sesonske, Nuclear Reactor Engineering. Van Nostrand Reinhold Company, New York 1981. — V. Knapp, P. Kulišić, Novi izvori energije. Školska knjiga, Zagreb 1984.

V. Knapp

NUKLEARNA FIZIKA, dio fizike unutar koje se proučavaju atomske jezgre. Osnovna su tri područja: nuklearna struktura, nuklearni raspadi i nuklearne reakcije (v. *Atom*, TE 1, str. 456; v. *Atomska jezgra*, TE 1, str. 479).

U istraživanju atomske jezgara primjenjuju se različite eksperimentalne metode, pri čemu se upotrebljavaju akceleratori (v. *Akceleratori nuklearnih čestica*, TE 1, str. 39) i reaktori (v. *Nuklearni reaktori*), detektori (v. *Detekcija nuklearnog zračenja*, TE 3, str. 240) i elektronički uređaji (v. *Elektronička instrumentacija u nuklearnoj fizici*, TE 4, str. 443). Najburniji nuklearni procesi zbivaju se u prirodi, u unutrašnjosti zvijezda, pa se proučavanjem tih pojava može mnogo spoznati o atomskim jezgrama (v. *Kemijski elementi*, TE 7, str. 50).

Atomska jezgra je kvantomehanički sustav s diskretnim energetskim stanjima (v. *Mehanika kvantna*, TE 8, str. 188). Svojstva svakog stanja jezgre jesu energija, angularni moment i paritet. Skup svih stanja određene jezgre zove se energetski spektar. U mnogim je jezgrama eksperimentalno utvrđeno vrlo mnogo stanja, no neka nisu potpuno poznata jer se još nije uspjelo odrediti njihov angularni moment i paritet. Relativno dobro istražen je uglavnom samo niži dio spektra (sl. 1). U nuklearnim procesima, reakcijama i raspadima, jezgre prelaze iz jednih stanja u druga.

Na Zemlji ima u prirodi oko 340 vrsta atomske jezgara, od kojih su 280 stabilne, a ostale su radioaktivne. U nuklearnim laboratorijima proizvedeno ih je umjetno još oko 2000 vrsta koje su radioaktivne s vrlo kratkim vremenom života, a na osnovi teorijskih proračuna predviđa se da bi ih moglo biti još oko 6000. U svemirskim područjima, koja su izrazito nuklearno aktivna (npr. supernove zvijezde) vjerojatno se stvara mnogo takvih vrsta jezgara koje se još nije uspjelo umjetno stvoriti na Zemlji.

NUKLEARNA STRUKTURA

Jedan je od glavnih ciljeva nuklearne fizike razumijevanje strukture atomskih jezgara, tj. raznolikih aspekata gibanja nukleona u svakoj jezgri.

Prema kvantnoj mehanici svaka atomska jezgra može se nalaziti samo u određenim, njoj svojstvenim stanjima. Svako stanje opisano je određenom kvantnomehaničkom valnom funkcijom. Valna funkcija je rješenje pripadne kvantnomehaničke jednadžbe gibanja, tzv. Schrödingerove jednadžbe.

Ako se znaju valne funkcije i karakteristike (energija, angularni moment, paritet) jezgrinih stanja, mogu se izračunati fizikalna svojstva jezgre u svakom njenu stanju i procesi pri kojima jezgra prelazi iz jednog stanja u drugo.

U kvantnoj mehanici, pa stoga i u nuklearnoj fizici, svakoj fizikalnoj veličini (svostvu ili procesu) odgovara određeni matematički operator. Fizikalna veličina označuje se znakom O , a pripadni operator znakom \hat{O} . U stanju s valnom funkcijom Ψ ta fizikalna veličina ima vrijednost koja je dana matričnim elementom

$$\langle \Psi | \hat{O} | \Psi \rangle \equiv \int \Psi^* \hat{O} \Psi d\tau. \quad (1a)$$

Varijabla integracije τ razumijeva sve varijable o kojima ovise valna funkcija.

Ako se pak radi o nuklearnom procesu pri kojemu jezgra prelazi iz stanja Ψ u neko drugo stanje Ψ' , on je opisan matričnim elementom

$$\langle \Psi' | \hat{O} | \Psi \rangle \equiv \int \Psi'^* \hat{O} \Psi d\tau. \quad (1b)$$

Dakle, u nuklearnoj strukturi najvažnije su valne funkcije jezgrinih stanja.

Za jezgru sa A nukleona, i to Z protona i N neutrona, Schrödingerova jednadžba glasi

$$H\Psi(1, 2, \dots, A) = E\Psi(1, 2, \dots, A), \quad (2)$$

gdje su E i Ψ energija i valna funkcija za svako moguće stanje te jezgre. Operator H je hamiltonijan, matematički operator koji odgovara ukupnoj energiji jezgrinih nukleona.

$$H = \sum_{k=1}^A \hat{T}(k) + \sum_{\substack{l=k+1 \\ (l>k)}}^A \hat{V}(k, l). \quad (3)$$

$\hat{T}(k)$ je operator kinetičke energije k -tog nukleona

$$\hat{T}(k) = -\frac{\hbar^2}{2m_k} \left(\frac{\partial^2}{\partial x_k^2} + \frac{\partial^2}{\partial y_k^2} + \frac{\partial^2}{\partial z_k^2} \right). \quad (4)$$

$\hat{V}(k, l)$ je operator dvočestične interakcije između k -tog i l -tog nukleona.

Valja spomenuti da takav pojednostavljeni hamiltonijan ne uzima u obzir egzotične komponente u jezgri (npr. pionske, v. *Subatomske čestice*) ni višenuklearne sile, te uključuje nerelativističku koncepciju potencijala.

Samo za najjednostavnije jezgre, malonukleonske sustave, moguće je teorijski pristup s komplikiranim i izvornijim silama. Malonukleonski sustavi čine stoga posebno područje nuklearne fizike (v. *Atomska jezgra*, TE 1, str. 479).

Općenito, operator H dobiva se iz klasičnog izraza za ukupnu energiju supstitucijom.

$$\begin{aligned} P_{x_k} &\rightarrow \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x_k}, & P_{y_k} &\rightarrow \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial y_k}, & P_{z_k} &\rightarrow \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial z_k}, \\ x_k &\rightarrow x_k, & y_k &\rightarrow y_k, & z_k &\rightarrow z_k. \end{aligned} \quad (5)$$

Schrödingerova jednadžba je diferencijalna jednadžba drugog reda, formalno slična valnoj jednadžbi klasične mehanike.

Rješenja Schrödingerove jednadžbe jesu karakteristike (energija, angularni moment, paritet) i valna funkcija za svako stanje u kojemu se jezgra može nalaziti. Međutim, zbog goleme složenosti tog problema rješenje se ne može dobiti izravno, nego samo pomoću aproksimativnih metoda.

Valja istaći da je primjena aproksimativnih metoda sasvim uobičajena i za druge kvantomehaničke sustave čestica: atom (koji se sastoji od središnje jezgre, kao masivnog ishodišta