

# Nuklearni reaktori

## 1. Nuklearna energija

Više od dvije milijarde ljudi širom svijeta nema pristup električnoj energiji. Taj će se problem rastom populacije i dalje pogoršavati. Globalno oslanjanje na fosilna goriva i velike hidroelektrane ostati će trend barem do 2020. godine, ali to neće biti dovoljno da pokrije rastuće potrebe čovječanstva. Nuklearna energija izdvaja se kao jedno od mogućih rješenja tog problema. U zadnja tri desetljeća nuklearna energija ima značajnu ulogu u proizvodnji električne energije. Oko 16% ukupno proizvedene električne energije u svijetu trenutačno se dobiva pomoću nuklearne energije. Jaki proboj nuklearne energije može se zahvaliti njezinoj čistoći i gotovo nikakvim ispuštanjem stakleničkih plinova. Do sad se u svijetu nakupilo ukupno više od 9000 godina rada nuklearnih reaktora, pa se akumuliralo i potrebno iskustvo u iskorištavanju te energije.

Kao i svi procesi proizvodnje energije iz neobnovljivih izvora i nuklearne elektrane proizvode otpad. Tu spadaju radioaktivni otpad i vruća voda. Budući da nuklearne elektrane ne proizvode ugljikov dioksid, njihovom uporabom se ne povećava efekt staklenika. Radioaktivni otpad dijeli se na dvije osnovne kategorije; niskoradioaktivni i visokoradioaktivni otpad. Većina nuklearnog otpada je niskoradioaktivna. Obično su tu radi o smeću, alatkama, zaštitnim odjelima i sličnom. Taj je otpad kontaminiran malom dozom radioaktivnog praha ili čestica, a mora se čuvati na način da ne dođe u kontakt s predmetima izvana.

U nuklearnih elektrana pravi problem predstavlja ostatak iskorištenog goriva. To je visokoradioaktivni otpad i mora se skladištiti ili u

suhim kontejnerima ili u specijalnim bazenima s vodom, gdje voda ohladi nuklearno gorivo i ponaša se kao štit od radijacije. Starije i manje radioaktivno gorivo skladišti se u suhim skladištima. Tamo se zatvara u specijalno konstruirane kontejnere iz armiranog betona.

Pravilno kontroliran rad nuklearne elektrane ne utječe na okoliš. Međutim, nepravilno korištenje izaziva mogućnost katastrofe i velika je prijetnja okolišu. U mirnodopskom iskorištavanju nuklearne energije dosad su se u svijetu dogodile tri velike havarije, i to: 1979. - godine "Otok tri milje", (Pennsylvania, SAD), 1986. godine - Chernobyl (Ukrajina) i nedavno, 2011. godine - Fukushima (Japan), dok je manjih problema bilo dosta, ali su nasreću uspješno otklonjeni.

Primjena nuklearne energije obuhvaća svako iskorištavanje energije koja potječe iz atomske jezgre. U središtu svakog atoma nalazi se sićušna skupina čestica zvano jezgra. Te čestice nazvane su protonima i neutronima, a na okupu ih drži snažna sila. Nuklearna energija oslobađa se na tri načina; umjetnim cijepanjem jezgre zvanim **fisija**, zatim umjetnim spajanjem jezgri zvanim **fuzija** te prirodnim načinom, tj. spontanom radioaktivnim raspadom nestabilnih atomskih jezgri zvanim **zračenje**. Svu tu energiju još nazivamo i atomskom energijom.

Rekli smo da se cijepanje jezgre atoma naziva nuklearnom fisijom. Neki teški kemijski elementi imaju nestabilnu jezgru koja se može rascijepiti bombardiranjem pomoću neutrona. Kad se jezgra rascijepi, oslobađa se još više neutrona koji pogađaju druge jezgre i tako započinje tzv. „lančana reakcija“.

Fisijska nuklearna energija iskorištava se u nuklearnim uređajima zvanim reaktori. Nuklearni reaktori se dijele u tri grupe i to na; **eksperimentalne reaktore** (za istraživanje prirode i djelovanja zračenja u fizikalne, tehnološke, kemijske i biološke svrhe), **produkcijske reaktore** (za proizvodnju novih umjetnih nuklearnih goriva) i **energetske reaktore** (za proizvodnju elektroenergije, pogon plovila i vozila te za grijanje). Osim toga, velika energija koje se oslobađa pri eksploziji atomske bombe mogla bi se korisno primijeniti umjesto eksploziva, ali djelatnost na tom polju još nije prešla okvire praktične primjene.

Nuklearna fisija teškog elementa uranija, izazvana bombardiranjem neutronima, otkrivena je krajem 1938. godine, a objavljena u siječnju 1939. godine neposredno pred II. svjetski rat. Već i prije otkrića fisije uranija 1934. godine mađarski fizičar L. Szilard je predvidio mogućnost nastanka lančane nuklearne reakcije, ukoliko bi se pronašla reakcija izazvana neutronima, a u kojoj bi neutroni bili i proizvod te reakcije. Fizičari su odmah prepoznali da je fisija uranija takva reakcija, te da postoji mogućnost širenja lančane reakcije u makroskopskim količinama uranija uz oslobađanje golemih količina energije po jedinici mase; milijun puta više nego u konvencionalnih kemijskih eksploziva. Nuklearne elektrane kao gorivo najčešće koriste izotop uranija U-235 koji je vrlo pogodan za fisiju.

U prirodi se može naći velika količina uranija čiji sadržaj ima više od 99% izotopa U-238, ali svega oko 0,7% izotopa uranija U-

235. Dok U-238 apsorbira brze neutrone, U-235 se u sudarima sa sporim neutronima raspada na vrlo radioaktivne fizijske produkte, a pri tome se oslobađa još više brzih neutrona. Lančana reakcija ostvaruje se usporavanjem (moderacijom) tih brzih neutrona u sudarima s molekulama teške vode, koja se pri tome zagrijava. Oslobođena toplina predstavlja iskoristivu energiju.

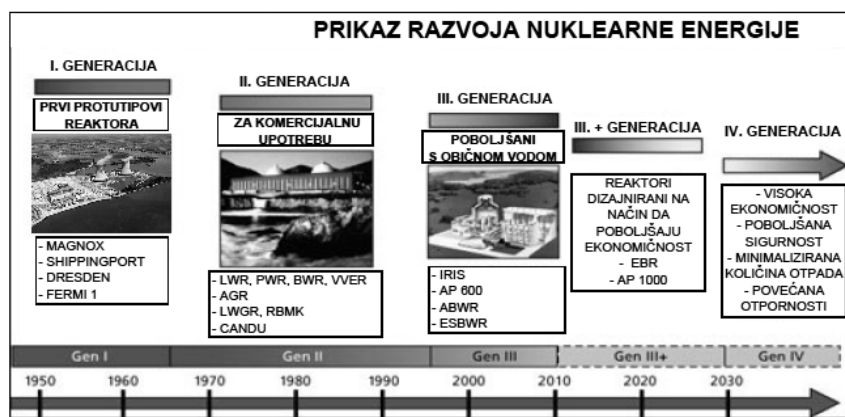
Iako uranija u prirodi ima relativno puno (sto puta više od srebra), izotopa U-235 ima vrlo malo. Zbog toga se provodi postupak obogaćivanja uranija kemijskim putem. U konačnoj uporabljivoj fazi, nuklearno gorivo izrađuje se u formi tableta dugih oko dva i pol centimetra. Jedna takva tableta može dati otprilike istu količinu energije kao i jedna tona ugljena. Energija koja se oslobađa sudaranjem neutrona s uranijem koristi se za zagrijavanje vode. Ta voda (para) tada pokreće parnoturbinski generator, a nakon toga treba je rashladiti i ponovo vratiti natrag u reaktor. Oko jezgre reaktora potreban je stalan i velik protok vode.

Energija nuklearne fuzije još uvijek nije tehnički iskoristiva. Znanstvenici do sada još nisu uspjeli izraditi fuzijski reaktor koji bi se mogao koristiti u komercijalne svrhe.

Energija radioaktivnog zračenja iskorištava se primjenom radioaktivnih izvora za ozračivanje materijala, za defektoskopiju u tehnici i za terapijske svrhe u medicini, Radioaktivni izotopi još se koriste u istraživanjima, ili u proizvodnji za obilježavanje toka procesa. Na slici lijevo može se vidjeti grafički prikaz povijesnog razvoja nuklearnih reaktora.

## 2. Nuklearne elektrane

Nuklearne elektrane su energetska postrojenja koja toplinsku energiju nastalu u nuklearnom reaktoru pretvaraju u električnu energiju. Toplinska energija nastaje u nuklearnom



SLIKA 1. POVIJESNI RAZVOJ NUKLEARNE ENERGIJA

gorivu kao posljedica samoodržavajuće i kontrolirane fisije atoma uranija ili plutonija. 50-tih godina prošlog stoljeća započeo je razvoj civilne primjene nuklearne energije za proizvodnju električne i toplinske energije. Danas je u pogonu preko 400 komercijalnih nuklearnih elektrana u 30 zemalja svijeta s preko 370 GW ukupno instalirane snage.

Prvi nuklearni reaktori koristili su se za proizvodnju plutonija Pu-239 koji se inače koristi za nuklearno oružje. Danas im je primjena šira, te se osim za proizvodnju električne energije koriste i za pokretanje brodova i podmornica, zatim za proizvodnju radioaktivnih izotopa i za opskrbu toplinskom energijom. Nadalje, osim energetske reaktora postoje i istraživački reaktori, ali moguća je i kombinirana uporaba. Danas je u 56 zemalja svijeta locirano oko 280 istraživačkih nuklearnih reaktora. Neki reaktori koriste se i za proizvodnju plutonija i električne energije istovremeno. U Kanadi i Rusiji reaktori se koriste za proizvodnju tople vode i vodene pare za primjenu u industriji, te za desalinizaciju vode.

Što se proizvodnje električne energije tiče, nuklearna je elektrana slična termoelektrani na fosilna goriva. Razlika je, naravno, u proizvodnji toplinske energije koja se u nuklearnoj elektrani dobiva fisijom nuklearnog goriva u reaktoru, a kod termoelektrane izgaranjem fosilnog goriva u kotlovima. Današnje velike nuklearne elektrane koriste Rankineov kružni proces, u kojem se proizvedena toplinska energija koristi za pretvaranje vode u vodu paru visokog tlaka i temperature. Proizvedena para odvodi se u parnu turbinu, gdje se energija vodene pare pretvara u mehanički rad koji pokreće turbinsku osovinu. Parna turbina goni električni generator, gdje se mehanička energija turbine pretvara u električnu energiju koja se nakon toga prenosi u elektroenergetski sustav. Iz niskotlačnog dijela turbine vodena para odlazi u kondenzator u kojem se ponovo pretvara u vodu. Taj kondenzat se nakon toga odvodi natrag u sustav za proizvodnju pare i ciklus se ponavlja. Kondenzator se hladi mor-

skom, jezerskom ili riječnom vodom, a često i zrakom u rashladnim tornjevima.

Glavne komponente sustava za proizvodnju pare u nuklearnoj elektrani su nuklearni reaktor, primarni rashladni krugovi (koji s pripadajućim primarnim pumpama služe za protok rashladnog sredstva kroz reaktor), izmjenjivači topline i parni generatori.

Stupanj djelovanja toplinskog ciklusa nuklearnih elektrana niži je nego u modernih termoelektrana na fosilna goriva. Razlog tome je niža srednja temperatura rashladnog sredstva reaktora u odnosu na temperaturu ložišta parnih kotlova u termoelektranama. Temperatura rashladnog sredstva određena je temperaturom košuljice gorivnih štapova i maksimalnom temperaturom goriva. Visoka temperatura goriva dovodi do njegova taljenja, a previsoka temperatura košuljice izaziva njeno mehaničko oštećenje i ispuštanje fizijskih produkata u rashladno sredstvo.

Klasifikacija reaktora može se napraviti prema energiji koja izaziva fisiju (termički i brzi reaktori), prema materijalu moderatora, prema materijalu rashladnog sredstva, prema razvojnim kategorijama, prema vrstama nuklearnog goriva i prema primjeni.

Reaktori u kojima fisije uglavnom izazivaju neutroni u termičkom području od  $E_n \leq 0,625$  eV nazivaju se termički reaktori. Takvi reaktori koriste moderator za usporenje neutrona. Reaktori bez moderatora, gdje fisiju izazivaju neutroni energije između nekoliko MeV-a do ispod keV-a, nazivaju se brzi reaktori.

Današnji reaktori su uglavnom heterogenog tipa, odnosno gorivo, moderator i rashladno sredstvo fizički su odvojeni jedno od drugog. Ako je gorivo pomiješano s moderatorom i rashladnim sredstvom onda se radi o reaktoru homogenog tipa.

Glavne komponente jezgre nuklearnog reaktora su gorivo, moderator, rashladno sredstvo te kontrolne šipke. Glavna razlika pojedinih tipova reaktora ovisi o izboru materijala tih komponenti.

Od elemenata koji se nalaze u prirodi, a koriste se u nuklearnoj energetici kao gorivo imamo **uranij (U-233, U-235, U-238)** i **torij (Th-232)**. Uranij U-238 i torij Th-232 nisu fisibilni termičkim neutronima, već se koriste kao oplodni materijali. Uhvatom neutrona iz uranija U-238 nastaje najprije uranij U-239 koji  $\beta$ -raspadom prelazi u neptunij Np-239, a njegovim, također  $\beta$ -raspadom, nastaje fisibilni plutonij **Pu-239**. Slično je s torijem Th-232, također nefisibilnim izotopom, koji se nakon apsorpcije neutrona i dva  $\beta$ -raspada pretvara u fisibilni uranij **U-233**. Fisibilni izotopi plutonij Pu-239 i plutonij Pu-241 ne nalaze se u prirodi zbog njihova relativno kratkog vremena poluraspada. Uranij **U-235** je jedini fisibilni izotop koji se u prirodi može naći, ali samo u ograničenim količinama. U konvencionalnim reaktorima gorivo se pretežno nalazi u formi uranijeva oksida (**UO<sub>2</sub>**), s time da je težinski udio uranija U-235 različit (različito obogaćenje).

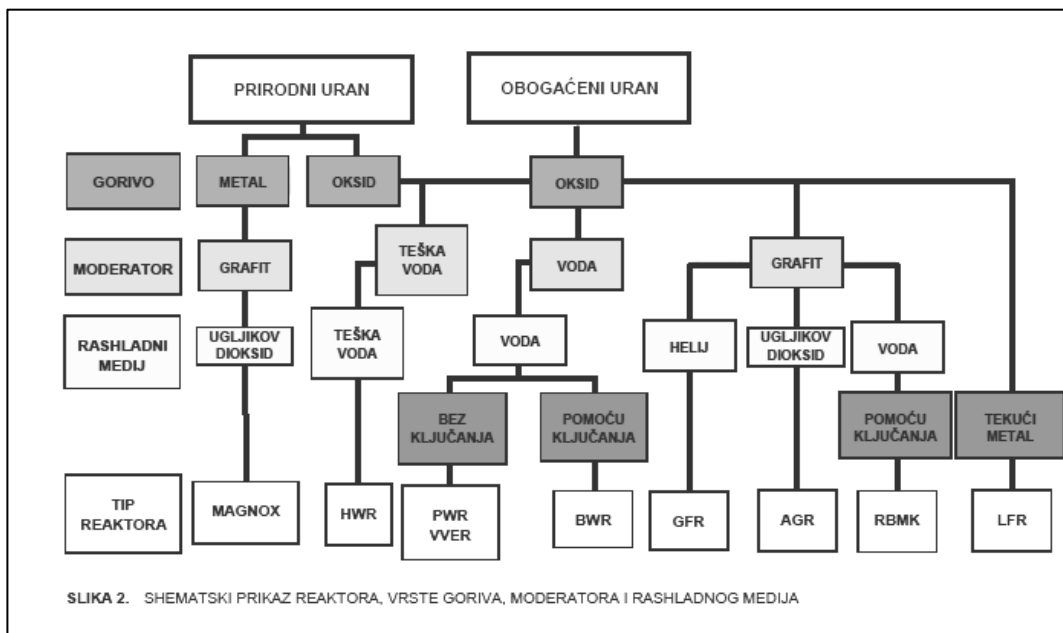
Moderatori koji se koriste u termičkim reaktorima služe za usporavanje neutrona. S obzirom da neutron najviše energije gubi prilikom sudara s lakim jezgrama, izbor materijala i nije previše velik. Materijal mora imati visoku sposobnost moderacije, ne smije imati velik udarni presjek za apsorpciju neutrona, mora biti jeftin i ne smije biti toksičan. Najčešće se koriste voda, teška voda i grafit. Od navedenih materijala obična voda ima najveću sposobnost usporavanja neutrona, ali, po kvaliteti moderacije najbolji izbor je teška voda zbog bitno manjeg udarnog presjeka za apsorpciju neutrona, što omogućava čak i uporabu prirodnog urana za nuklearno gorivo. Najveći nedostatak teške vode je visoka cijena proizvodnje. Prema materijalu moderatora reaktori se dijele na:

- grafitom moderirane reaktore,
- vodom moderirane reaktore,
- teškom vodom moderirane reaktore,
- lakim elementima moderirane reaktore,
- organskim materijalima moderirane reaktore.

Rashladno sredstvo u elektranama služi za prijenos energije od goriva do turbine, bilo izravno ili posredno. Rashladno sredstvo može biti tekućina ili plin. U termičkim reaktorima najčešće se koriste voda, teška voda, ugljikov dioksid i helij, dok se u brzim reaktorima koriste tekući metali. Prema korištenom rashladnom sredstvu reaktori se dijele na:

- reaktore hladene plinom **GCR** (eng. – Gas Cooled Reactor),
- brze reaktore hladene plinom **GFR** (eng. – Gas-cooled Fast Reactor),
- napredne reaktore hladene plinom **AGR** (eng. – Advanced Gas Reactor),
- reaktore hladene običnom vodom **LWR** (eng. – Light Water Reactor),
- reaktore s tlakovodnim hlađenjem **PWR** (eng. – Pressurized Water Reactor) i **VVER** – (- vodo-vodnoj energetskejskij reaktor),
- reaktore s ključajućom vodom **BWR** (eng. – Boiling Water Reactor),
- reaktore hladene i moderirane teškom vodom **HWR** (eng. – Heavy Water Reactor),
- reaktore hladene vodom i moderirane grafitom **LWGR** (eng. – Light Water Cooled Graphite-moderated Reactor) i **RBMK** (- Reaktor Boljšoi Močnosti Kipjaščij),
- visokotemperaturne reaktore **HTGR** (eng. High Temperature Gas Reactor) hladene tekućim metalom,
- brze reaktore hladene natrijem **SFR** (eng. – Sodium-cooled Fast Reactor),
- brze reaktore hladene olovom **LFR** (eng. – Lead-cooled Fast Reactor),
- brze reaktore hladene s rastaljenim solima **MSR** (eng. – Molten Salt Reactor).





Nuklearni reaktor je uređaj u kojem se zbiva kontrolirana lančana nuklearna reakcija. Osnovni materijali prema kojima se nuklearni reaktori razlikuju su nuklearno gorivo, moderator i rashladni medij. Svrha nuklearnog goriva je proizvodnja toplinske energije procesom fisije. Nuklearno gorivo mogu biti prirodni ili obogaćeni uranij u formi metalnog uranija ili uranijeva dioksida. Moderator je medij za usporavanje neutrona, a svrha mu je usporiti neutrone kako bi se povećala vjerojatnost nastanka reakcije fisije u izotopu urana U-235. Rashladni fluid odvodi toplinsku energiju nastalu raspadom uranija i fisijskih produkata. Pregled tipova nuklearnih energetske reaktora, nuklearnog goriva, moderatora i rashladnih sredstava (hladila), shematski su prikazani na slici 2.

### 3. Nuklearni reaktori I. generacije

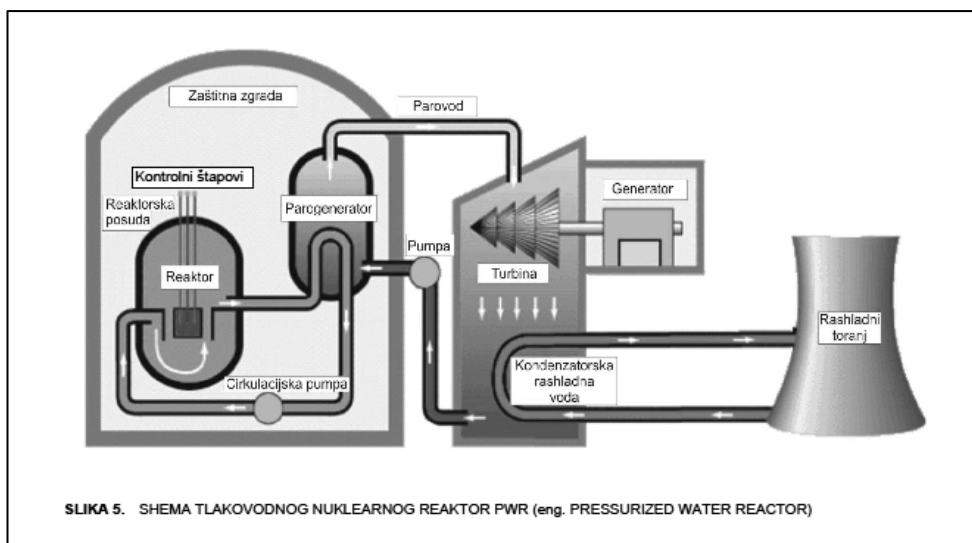
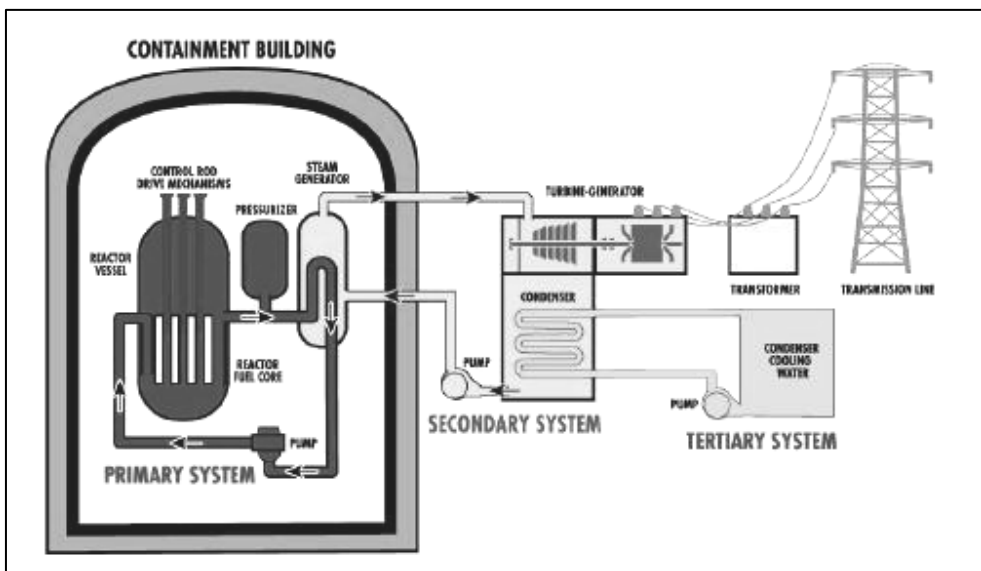
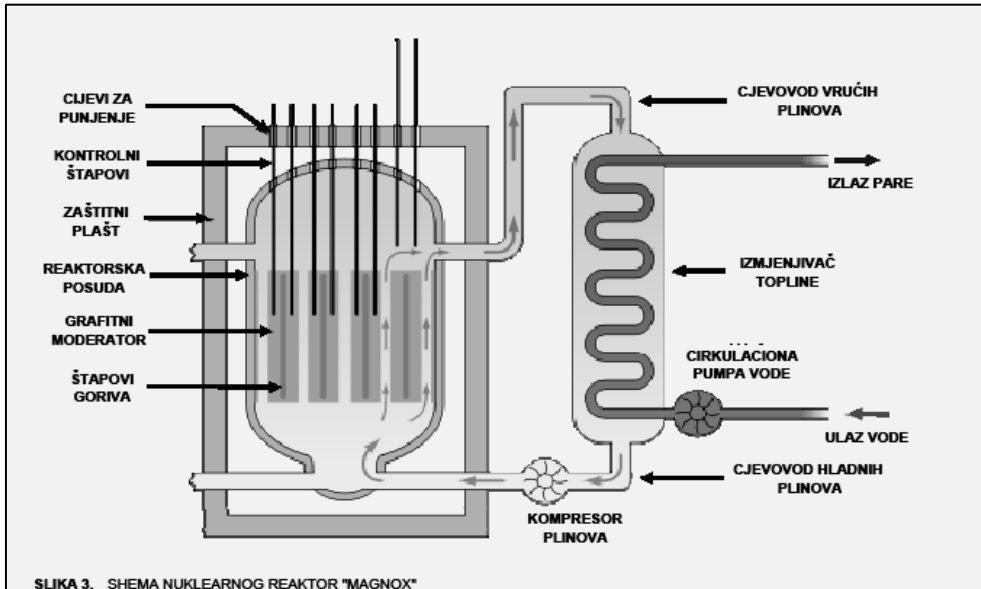
Prva generacija nuklearnih reaktora služila je za istraživanje, a današnji reaktori zapravo predstavljaju tu prvu generaciju, poboljšanu za komercijalno korištenje. Imaju sigurnosne sustave koji trebaju spriječiti topljenje jezgre reaktora, ili propuštanje radioaktivnih tvari u prirodu.

Nuklearni reaktor tipa **Magnox** dobio je

naziv prema slitini magnezija koja se koristi kao materijal za oblogu gorivnih štapova s malim dodatcima aluminija i ostalih metala. Moderiran je grafitom, hlađen ugljikovim dioksidom, a za gorivo koristi metalni prirodni uranij. Kratica mu je **GCR** (eng. Gas Cooled Reactor), odnosno reaktor hlađen pomoću plina (ugljkovog dioksida). Magnox je danas zastarjeli tip nuklearnog reaktora koji je osmišljen u Velikoj Britaniji i još uvijek je u uporabi.

Prvi Magnox reaktori su bili dizajnirani prvenstveno za proizvodnju plutonija za nuklearno oružje. Nakon što su u bivšem SSSR-u sagrađeni prvi energetske reaktori (Obninsk 1954. godine), Magnox reaktor u Calder Hallu (V. Britanija) predstavlja prvu nuklearnu elektranu koja je korištena u komercijalne, odnosno industrijske svrhe, a istovremeno je proizvodila i plutonij za vojnu namjenu.

U to vrijeme se smatralo da Magnox reaktori imaju znatan stupanj imanentne sigurnosti zbog njihova jednostavnog dizajna, pa zbog toga oni nisu ni dobili sekundarnu zaštitu. Treba znati da je izmjenjivač topline bio izvan betonske zaštite od zračenja. Ova nuklearna elektrana zatvorena je 2003. godine, što znači da je taj prvi nuklearni reaktor bio u uporabi 47 godina. Shema rada reaktora Magnox prikazana je na slici 3.



Znanstvenik Enrico Fermi vodio je tim koji je 1942. godine u Chicagu (SAD) izgradio prvi fizijski nuklearni reaktor od prirodnog urana i grafita kao moderatora. Prva nuklearna elektrana tipa „Fermi 1“ nalazi se u Monroe Countyju (Michigan, SAD), a s radom je započela 1963. godine. „Fermi 1“ je brzi nuklearni reaktor koji koristi tekući natrij kao rashladno sredstvo. Maksimalni kapacitet ovog reaktora bio je 430 MW. Shema nuklearne elektrane „Fermi 1“ prikazana je na slici 4.

Nuklearna elektrana Shippingport, smještena u blizini današnjeg Beaver Valley (Pennsylvania, SAD), poznata je po tome što je to bila prva nuklearna elektrana izgrađena u SAD-u, a namijenjena isključivo za komercijalne svrhe. Rad te elektrane započeo je 1957. godine, i bila je u upotrebi do 1982. godine. Kapacitet reaktora bio je 60 MW, reaktor je hlađen vodom pod tlakom.

Prva privatno financirana nuklearna elektrana, tipa Dresden, izgrađena je u Grundy Countyju (Illinois, SAD). Nuklearna elektrana Dresden 1 aktivirana je 1960. godine, a s radom je prestala 1978. godine. Od 1970. godine u radu je postrojenje Dresden 2, a od 1971. godine i Dresden 3, koji se protežu na 3,9 km<sup>2</sup> ukupne površine, te proizvode električnu energiju za Chicago i sjeverni dio države Illinois. 2004. godine nuklearna komisija obnovila je radne dozvole za oba reaktora za slijedećih 20 godina. Za hlađenje u reaktorima obje jedinice koriste ključajuću vodu pod tlakom. Dresden 2 proizvodi 869 MW električne energije, dok Dresden 3 daje 871 MW.

#### 4. Nuklearni reaktori II. generacije

Nuklearni reaktori II. generacije razvili su se iz svojih prethodnika. Za taj razvoj trebalo je proći čitavih 30 godina, sve do sredine 90-ih godina prošlog stoljeća. Promjene u dizajnu bile su značajne, ali ipak ne u cijelosti revolucionarne. Dva su podtipa reaktora s običnom

vodom **LWR** (eng. - Light Water Reactor) ili lakovodnih reaktora:

- reaktor s vodom pod tlakom **PWR** (eng.- Pressurized Water Reactor) ili tlakovodni reaktor.
- reaktor s ključajućom vodom **BWR** (eng.- Boiling Water Reactor) ili ključajući reaktor.

U bivšem Sovjetskom Savezu građena je serija tlakovodnih reaktora s kraticom **VVER** (rus. vodo-vodnoj energetičeskij) sa snagama do 1000 MW. Kao gorivo se koristio malo obogaćeni uranijev dioksid (UO<sub>2</sub>). Danas je u pogonu oko 50 reaktora ovakvog ruskog tipa.

Tlakovodni reaktor najrašireniji je tip reaktora II. generacije koja započinje 1977. godine. Više od polovine nuklearnih elektrana koje su još u pogonu imaju tlakovodni reaktor, a kao gorivo koriste obogaćeni uranij. Rashladna voda (primarni rashladni krug) u reaktorskoj posudi pod većim je tlakom od zasićenoga parnoga tlaka pri najvišoj radnoj temperaturi. Stoga se reaktorsko hladilo u reaktorskoj posudi ne može pretvoriti u paru. Do pretvaranja vode u paru dolazi tek u parnom generatoru (sekundarni rashladni krug), gdje je velik broj tankih cijevi. Snažne primarne pumpe tjeraju kroz njih rashladni medij, a on svoju toplinu šalje sekundarnom rashladnom mediju, koji kruži oko cijevi parnog generatora. Uslijed zagrijavanja sekundarni se rashladni medij prevara u paru. Ta para pokreće parnu turbinu, a nakon završetka rada kondenzira se u kondenzatoru i potom se vraća u parni generator. Kod tlakovodnog reaktora primarni i sekundarni rashladni krug su odvojeni. U ovog tipa reaktora rashladni medij, koji je istovremeno i moderator, nalazi se pod visokim tlakom od približno 155 bara, što omogućava njegovu visoku radnu temperaturu bez promjene agregatnog stanja. Par stotina tlačnih reaktora razvijeno je i koristi se u vojne svrhe, primjerice u nosača aviona, nuklearnih podmornica i ledolomaca. Tlakovodni reaktor prvotno je raz-

vijen u Oak Ridge National Laboratoryju (SAD) za pogon nuklearnih podmornica.

Dakle, tlakovodni reaktori najrašireniji su tip reaktora u svijetu; njih više od 230 se koristi za proizvodnju električne energije, a nekoliko stotina za pogon nuklearnih podmornica, u koju svrhu su izvorno i bili dizajnirani. Hrvatsko-slovenska nuklearna elektrana „Krško“, jedina u nas, također je ovog tipa. Tlakovodni reaktor shematski je prikazan na slici 5.

Ključajući reaktor je jedna vrsta tlakovodnih reaktora koju je sredinom 50-ih godina prošlog stoljeća razvio General Electric (SAD). Petina aktivnih nuklearnih elektrana ima ključajući reaktor. Zbog svoje robusnosti ovi reaktori se nisu razvijali za pogon podmornica, nego isključivo za proizvodnju električne energije. Gorivo je obogaćeni uranij. U reaktorskoj posudi kipućeg reaktora tlak je niži nego u tlakovodnim reaktorima. Za njih je karakteristično da se voda pretvara u paru pri prolasku kroz reaktor i vodi izravno u turbinu, gdje se nakon obavljenoga posla kondenzira, te se vraća natrag u reaktorsku posudu. Budući da ključajući reaktor nema parni generator, u usporedbi s tlakovodnim on je jednostavnije konstrukcije.

U ključajućem reaktora rashladno sredstvo nalazi na nižem tlaku (70 bara) što omo-

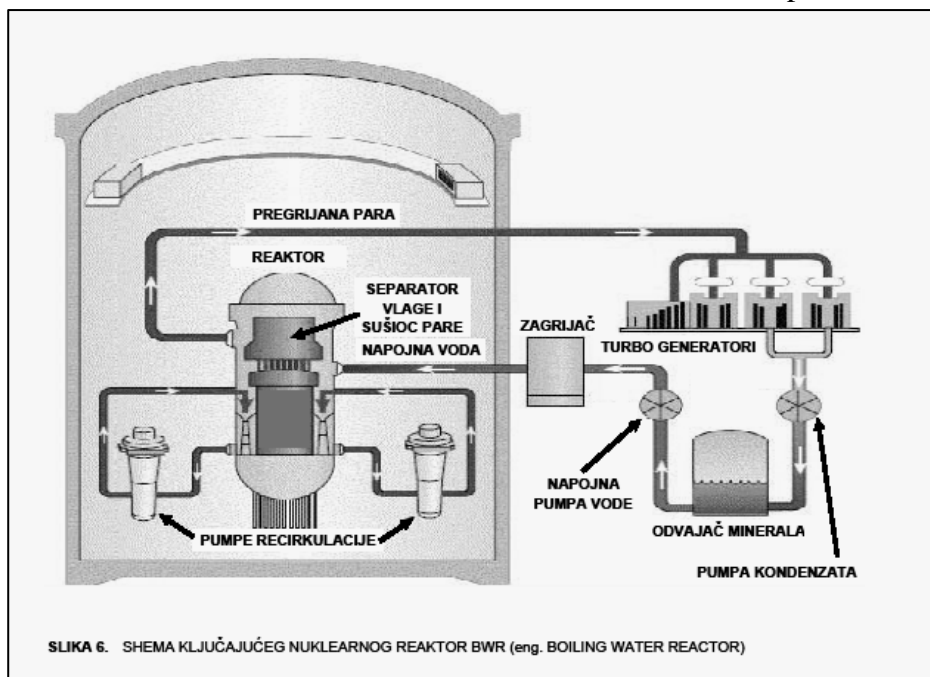
gućava ključanje vode unutar reaktorske posude tako da para, nakon prolaska kroz separatore vlage i sušioce pare, direktno odlazi u turbinu. S obzirom da para nastaje u reaktoru, sekundarni krug i parni generatori nisu potrebni, što je iz sigurnosnih razloga pozitivno.

Nadalje, ako u ključajućem reaktoru prestanu raditi cirkulacijske pumpe tada se zbog povećanog udjela pare unutar posude povećava prirodna cirkulacija koja je dovoljna za odvod zaostale topline. Osim toga, povećanje snage reaktora povećava udio pare, što smanjuje moderaciju, a to za posljedicu ima smanjenje snage, što znači da reaktor ima samoregulacijsko svojstvo.

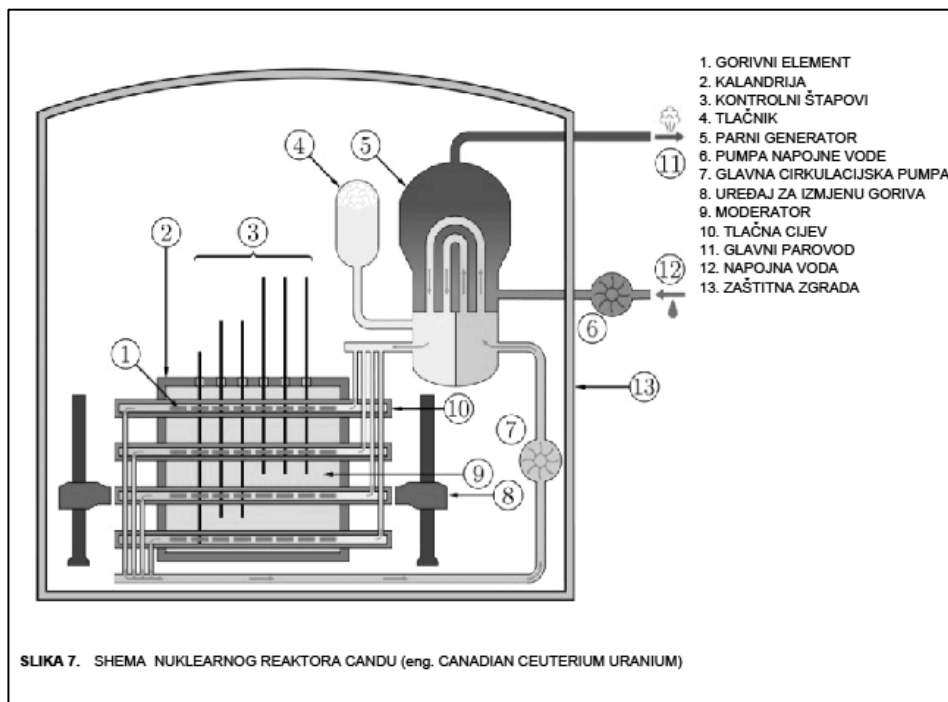
Protok rashladne tekućine kroz jezgru ključajućeg reaktora niži je nego u tlakovodnog reaktora zbog visoke topline isparavanja vode. Približno 15% vode ispari prilikom prolaska kroz jezgru. Uz to, nejednaka aksijalna raspodjela gustoće moderatora uzrokuje aksijalnu ovisnost snage (snaga je veća u donjem dijelu jezgre), te je nužna regulacija rada kontrolnim štapovima. Kontrolni štapovi ulaze u jezgru s donje strane, za razliku od tlakovodnog reaktora, gdje se nalaze iznad jezgre reaktora. Loša mu je osobina da slabo radioaktivna para kontaminira turbinu. Niži radni tlak zahtijeva manju debljinu stjenke reaktorske posude, ali je sama posuda većih dimenzija, odnosno mase.

Danas je u uporabi više od 80 reaktora ovoga tipa. Shema ključajućeg reaktora prikazana je na slici 6.

Tlakovodni teškowodni reaktori **PHWMR** (eng. - Pressurized Heavy Water Moderated Reactor) ili **CANDU** (eng. CANadian Deuterium Uranium) moderiraju se i hlade teškom vodom. Teška voda je bolji moderator od lake, ali je taj način hlađenja skuplji.







rada reaktora. Danas je u pogonu oko 40 CANDU reaktora, uglavnom u Kanadi i Indiji. Shema CANDU reaktora prikazana je na slici 7.

Reaktori hlađeni plinom **GCR** (eng. - Gas Cooled Reactor) plinski su reaktori moderirani grafitom, a rashladni plin je ugljikov dioksid. Plin zagrijava vodu, koja se pretvara u paru i pokreće parnu turbinu. Kao gorivo koriste prirodni uranij u obliku metala.

Omogućeno je korištenje neobogaćenoga uranija. Voda u reaktoru ne vrije, a u parnom generatoru u paru se pretvara sekundarna voda.

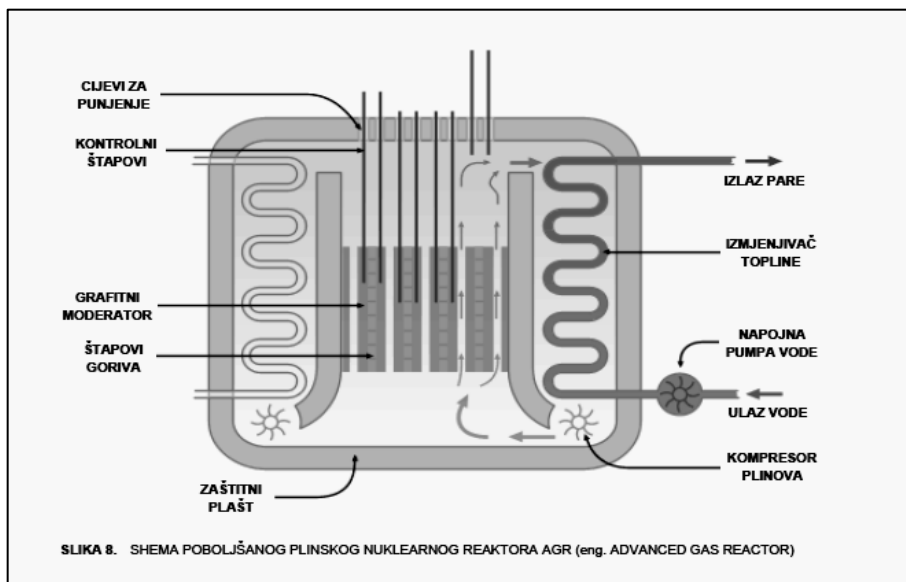
Osim što se teška voda odvojeno koristi i za moderaciju i kao rashladno sredstvo, a prirodni ili malo obogaćeni uranij kao gorivo, specifičnost teškovodnog reaktora, kanadske proizvodnje, je i uporaba horizontalno postavljene reaktorske posude (kalandrije). Dvanaest gorivnih elemenata, svaki duljine 0.5 metara položeni su u unutrašnjost tlačne cijevi u kojoj se nalazi rashladno sredstvo pod tlakom od 11 bara. Svaka tlačna cijev koaksijalno je postavljena unutar jedne od ukupno 380 cijevi kalandrije nešto većeg polumjera. Moderator (teška voda) temperature 603 °C nalazi se oko cijevi kalandrije, pri tlaku malo većem od atmosferskog. Zamjena goriva obavlja se tijekom rada reaktora posebnim strojevima. Rashladni krug izvan kolektora kalandrije isti je kao i kod tlakovodnog reaktora. Teška voda temperature oko 853 °C prolazi kroz U-cijevi parnog generatora i nakon što preda toplinu običnoj vodi na sekundarnoj strani parnog generatora vraća se natrag u reaktor. Specifičnost kanadskog teškovodnog reaktora CANDU kontinuirana izmjena goriva, što znači da se izmjena goriva obavlja tijekom normalnog

Napredni reaktori hlađeni plinom **AGR** (engl. - Advanced Gas Reactor) bitno se razlikuju po izvedbi od prvih plinskih reaktora, a nastali su razvojem Magnox reaktora. Obloge gorivnih štapova su iz nehrđajućeg čelika, a gorivo je oksid obogaćenog urana. Danas je u pogonu sedam naprednih plinom hlađenih reaktora snage od 555 MW do 625 MW. Svi takvi reaktori nalaze se u Velikoj Britaniji. Shema naprednog reaktora hlađenog plinom prikazana je na slici 8.

U II. generaciju spada i reaktor koji je hlađen vodom, te moderiran grafitom **LWGR** (eng. - Light Water-cooled Graphite-moderated Reactor), odnosno ruska verzija kipućeg reaktora kanalnog tipa **RBMK** (rus. Reaktor Bolšoj Močnosti Kanalnij). Ovaj je tip reaktora moderiran grafitom i hlađen kipućom vodom.

Gorivo mu je oksid obogaćenog uranija, čime je smanjena potreba za učestalim zamjenama goriva. Za razliku od svojih prethodnika, ti reaktori koriste više temperature rashladnog sredstva.

Osim povoljnih ekonomskih okolnosti u ovog tipa reaktora gorivo se može mijenjati za



tonija Pu-239 koji je fisibilan s termičkim neutronima na sličan način kao i uranij U-235. Ova vrsta reaktora omogućava daleko ekonomičnije korištenje uranija u odnosu na termičke reaktore. Njihova uporaba trenutno je manje isplativa, ali će postajati sve aktualnija i konkurentnija sa smanjenjem raspoloživih količina uranija i rastom cijena energenata na svjetskom tržištu.

vrijeme rada reaktora, odnosno bez zaustavljanja, a reaktor je proizvodio i plutonij za vojne svrhe. Građen je samo u bivšem SSSR-u i bio vrhunac sovjetskog nuklearnog programa za proizvodnju reaktora u vojne svrhe.

Kako je VVER reaktor bio tehnološki puno zahtjevniji, bivši SSSR se više zalagao za gradnju RBMK reaktora. Reaktor tipa RBMK bio je uključen u Černobilsku katastrofu. RBMK tehnologija je razvijena pedesetih godina prošlog stoljeća i sada se smatra zastarjelom. Danas je u pogonu još 10-ak ovakvih reaktora i to isključivo u Rusiji. Ovaj tip reaktora shematski je prikazan na slici 9.

Visokotemperaturni reaktor **HTGR** (eng. - High Temperature Gas Reactor) posljednji je korak u razvoju grafitom moderiranih reaktora. Hlađen je helijem, a koristi oksid obogaćenog urana.

Svi spomenuti reaktori pripadaju skupini termalnih reaktora, što znači da rabe moderator za termalizaciju neutrona. Brzi oplodni reaktor nema moderatora, a hlađen je tekućim metalom. Za gorivo koristi oksid uranija višeg obogaćenja ili oksid plutonija, a kao oplodni materijal prirodni uranij U-238.

Nakon reakcije uhvata neutrona, te nakon dva uza-stopna  $\beta$  - raspada nastaje izotop plu-

## 5. Nuklearni reaktori III. generacije

Reaktori III. generacije nastali su evolucijom dizajna na osnovu prethodne generacije. Dizajn je standardiziran za svaki od tipova, što rezultira manjim kapitalnim troškovima i kraćim vremenom izgradnje. Dizajn je pojednostavljen pa je lakše upravljanje i manja je osjetljivost na kvarove. Radni je vijek produžen na 60 godina.

Uz povećanu raspoloživost postrojenja, smanjena je vjerojatnost taljenja jezgre i povećana je otpornost na ozbiljna oštećenja uzrokovana čak i udarom aviona. Uporaba novih sagorivih apsorbira produžava duljinu ciklusa, a visoki odgor goriva reducira potrebe za gorivom i količinu otpada. Ipak, najveći odmak od prethodne generacije je ugradnja pasivnih sigurnosnih sustava čije se djelovanje oslanja na gravitaciju, prirodnu konvekciju i uskladištenu energiju, a ne na komponente ovisne o vanjskim naponskim izvorima. Električna energija je potrebna za signalizaciju i upravljanje magnetskim ventilima, a dobiva se iz akumulatora. Različiti reaktori III. generacije i 'III.+' generacije u završnoj su fazi dizajna, a već su u pogonu napredni reaktori s kipućom vodom (eng. **ABWR** - Advanced Boiling Water Reactor).

Napredni, kipućom vodom hlađeni reaktor ABWR jedini je reaktor III. generacije koji je već danas u komercijalnom pogonu i to od 1996. godine, a razvio ga je General Electric. Osim tri postrojenja u izgradnji, u planu je izgradnja još devet reaktora u Japanu i dva u SAD-u. Reaktor karakterizira poboljšana sigurnost i pouzdanost, te pojednostavljeno upravljanje i održavanje. Također, smanjeni su troškovi pogona i održavanja, a trajanje izgradnje iznosi svega 39 mjeseci (doduše samo u Japanu). Dizajn naprednog kipućeg reaktora koristi unutarnje pumpe čime je eliminiran vanjski recirkulacijski sustav, što doprinosi povećanju sigurnosti. Integrirani kontejnment (zaštitni oklop) i reaktorska zgrada povećavaju seizmičku otpornost, a postignuta je veća kompaktnost i lakša izgradnja. Kompaktna reaktorska zgrada skraćuje vrijeme izgradnje uz manji utrošak materijala. Optimiran modularni dizajn je poboljšán i provjeren u već izgrađenim nuklearnim elektranama. Usavršen kontrolni sustav je potpuno digitaliziran te omogućava pouzdano i točno nadgledanje elektrane, njenu kontrolu i detektiranje kvarova. Unaprijeđena je kemijska kontrola i integritet goriva, smanjena je količina radioaktivnog otpada, a smanjena je i izloženost radnika zračenju. Snaga poboljšanog kipućeg reaktora kreće se između 1.350 MW i 1.460 MW.

Europski reaktor s tlakovodnim hlađenjem **EPR** (eng. - European Pressurized Reactor), snage oko 1600 MW, jedini je reaktor III. + generacije čija je izgradnja već počela u Europi. Za sada su u izgradnji dva takva reaktora, a to su Flamanville 3 u Francuskoj i Olkiluoto u Finskoj. Predviđa se da će oba reaktora biti puštena u pogon do kraja 2012. godine, iako je gradnja finskog reaktora trebala završiti već 2009. godine. Cijene ova dva postrojenja su između 3,3 i 3,7 milijardi eura, a predviđeno trajanje izgradnje je 54 mjeseca. Planira se gradnja šesnaest evropskih tlakovodnih reaktora, od toga sedam u SAD-u.

Prednosti i poboljšanja europskog reaktora s tlakovodnim hlađenjem u odnosu na obični

reaktor s tlakovodnim hlađenjem u prvom redu povećana redundancija (rezerva zamjen-ske opreme) i odvojenost sustava. Instalirana su 4 neovisna sustava za zaštitno hlađenje jezgre, a svaki od njih može sam hladiti jezgru nakon obustave rada reaktora, što znači da je u ovom slučaju redundancija višestruko ostvarena. Smanjena je i vjerojatnost oštećenja jezgre, zatim je smanjena vjerojatnost ispuštanja radioaktivnih tvari i posljedica koje iz toga proističu, pa je manja vjerojatnost početnih nezgoda. Smanjena je i vjerojatnost teških kvarova i posljedica istih u slučaju topljenja jezgre ili narušavanja integriteta reaktorske posude, jer je povećana robusnost kontejnmenta. Zaštita kritičnih sustava od utjecaja vanjskih događaja provedena je postavljanjem dvostrukog betonskog zida ukupne debljine 2,6 m, sposobnog izdržati nadtlak u slučaju nezgode ili udara aviona.

Zbog većih parnih generatora i tlačnika produženo je vrijeme potrebno za reagiranje operatera u slučajevima kvarova ili prolaznih pojava. Ostvarena je i manja osjetljivost na ljudske pogreške korištenjem digitaliziranog sustava instrumentacije i kontrole te korištenjem najnovijih informacijskih sustava, pojednostavljenjem sigurnosnih sustava i funkcionalnom odvojenosti. Pogreške u zajedničkom načinu rada eliminirane su fizičkom odvojenosti, te primjenom različitih podrški za pojedinu sigurnosnu funkciju.

Napredni pasivni reaktor s tlakovodnim hlađenjem **AP1000** (eng. Advanced Passive) je Westinghouseov reaktor ' III. + ' generacije snage od 1.117 MW do 1.154 MW. Do danas su sklopljeni ugovori za gradnju 4 (od planiranih 14) AP1000 reaktora u SAD-u, te još 4 u Kini. Dizajn ovog reaktora nastavak je dizajna AP600 reaktora koji je u SAD-u licenciran još 1999. godine. Značajke AP1000 reaktora su znatno pojednostavljenje s manje komponenata. Povećan mu je razina sigurnosti uporabom pasivnih sustava bez potpore izmjenične naponske mreže. Uporaba modularne konstrukcije rezultira skraćenim vremenom

izgradnje. Reducirani su troškovi pogona i održavanja, te su niži kapitalni troškovi postrojenja, što rezultira nižim troškovima proizvodnje električne energije. Rad je pouzdan i siguran zbog dizajnom ugrađenih sigurnosnih granica (niža gustoća snage na kojoj reaktor radi i veći tlačnik). Navedene značajke nisu potpuno neovisne jedna o drugoj. Pojednostavljenje vodi na uporabu pasivnih sigurnosnih sustava umjesto tradicionalnih aktivnih sustava koji su izbačeni (aktivni sustavi za zaštitno hlađenje jezgre, sustavi za odvođenje ostatne topline i sustavi za tuširanje kontejnmenta) čime je prestala potreba za pomoćnim sustavima potrebnim za njihovu funkcionalnost. Time je eliminirano i obavezno osiguravanje napajanja pomoćnih sustava iz izmjenične naponske mreže, te osiguravanje napajanja rashladne vode, grijanja, ventilacije i klimatizacije. Izostankom aktivnih sustava prestaje i potreba za njihovom redundancijom koja je bila potrebna zbog zahtijeva za visokom pouzdanošću sustava. Pasivni sustavi, za razliku od aktivnih, nalaze se uglavnom unutar zaštitne zgrade. Pasivni sustav za hlađenje kontejnmenta oslanja se na gravitacijom uzrokovano pražnjenje bazena smještenog iznad kontejnmenta i na zračno hlađenje prirodnom konvekcijom, gdje se uz pomoć posebno oblikovanih vodilica stvara jako strujanje uz posudu i time isparavanje vode.

Svi sustavi su projektirani tako da ne zahtijevaju intervenciju operatera unutar 72 sata. Pojednostavljenje u primarnom krugu vidljivo je iz izvedbe parnih generatora (dvije pumpe i jedan parni generator čine jednu mehaničku cjelinu, a AP1000 ima ukupno dva rashladna kruga). Time je izostavljen cjevovod između parnih generatora i pumpi, te zasebna potporna konstrukcija pumpi. Pumpe su zatvorene izvedbe što doprinosi sigurnosti pogona, jer ne može doći do istjecanja rashladnog sredstva uz osovину, niti postoji mogućnost curenja iz primarnog kruga zbog degradacije brtvi na osovini. Uporabom tzv. „sivih“ kontrolnih štapa u normalnom pogonu smanjuje se potreba za boriranjem/deboriranjem jezgre, što olak-

šava rad i pojednostavljuje sustav volumne i kemijske kontrole. Ukratko, AP1000 u odnosu na klasični tlakovodni reaktor ima 50% manje sigurnosnih ventila, 35% manje sigurnosnih pumpi i 80% manje cijevi, ali time sigurnost nije narušena, već je nasuprot povećana.

Potpuno drugačiji pristup od europskog tlakovodnog reaktora vidljiv je u projektu međunarodnog inovativnog i sigurnosnog tlakovodnog reaktora **IRIS** (eng. International Reactor Innovative and Secure) ' III. + ' generacije. Projekt je započeo prije 10 godina pod vodstvom Westinghousea, a u njemu uz dvadeset instituta i sveučilišta iz svijeta sudjeluje i FER - Zagreb. Reaktor je snage 335 MW, a predviđa se izgradnja jednog ili više modula.

Glavne osobine ovog reaktora su integralni raspored komponenata primarnog kruga, 48-mjesečni radni ciklus, čelični reflektor i tzv. „Safety-by-Design“ način projektiranja kojim se isključuje vjerojatnost pojave nekih nezgoda. Iako je reaktor manje snage, reaktorska posuda visoka je 21,3 m, a njen je promjer 6,2 m. Međutim, osim jezgre reaktora i kontrolnih štapa s pogonskim mehanizmom, unutar reaktorske posude nalaze se i parni generatori, te cirkulacijske pumpe i tlačnik. Ukupna veličina postrojenja zbog toga je smanjena, što pozitivno djeluje na sigurnost i ekonomičnost. Prednost integralnog reaktora je u eliminaciji primarnih cjevovoda čime nestaje opasnost od posljedica njihova loma, a olakšano je i hlađenje jezgre prirodnom cirkulacijom. Jezgra IRIS reaktora nešto je duža od standardne jezgre tlakovodnog reaktora, a sastoji se od 89 gorivnih elemenata. Postizanje odgora i korištenje većeg obogaćenja za sada nisu predviđeni, no ostaju kao opcija za budućnost.

„Safety-by-Design“ načinom projektiranja fizički su uklonjene mogućnosti za nastanak niza nezgoda, te tako otpada potreba za sigurnosnim sustavima koji sprječavaju posljedice tih nezgoda. Vjerojatnost pojave ostalih akcidentnih situacija umanjena je, a smanjene su i posljedice vjerojatnih akcidentalnih scenarija. Primarni rashladni krug unutar reaktorske po-



sude eliminira mogućnost pojave puknuća glavnog cjevovoda i posljedica tog najtežeg kvara tlakovodnog reaktora. Veličina posude i veća količina vode u njoj zahtijeva veći vremenski interval potreban za grijanje ili hlađenje rashladnog sredstva kao posljedice nezgode. Visinska razlika između jezgre i parnih generatora omogućava prirodnu cirkulaciju u slučaju ispada cirkulacijskih pumpi, a velik broj parnih generatora i pumpi predstavlja visoku redundanciju i umanjuje posljedice ispada bilo koje od tih komponenata. Eliminiranjem mogućnosti pojave nekih kvarova omogućeno je pojednostavljenje sigurnosnih sustava i s time cjelokupnog dizajna IRIS-a, što u konačnici daje povećanu sigurnost, ekonomičnost i pouzdanost. Naravno, sve akcidente nije moguće potpuno spriječiti, ali se njihove posljedice nastoje smanjiti inherentnim svojstvima reaktora i primjenom pasivnih sustava. Pod pojmom „pasivni sustav“ smatra se osiguranje zaštitnih barijera koje ne ovise o električki pokretanim komponentama, nego o djelovanju uvijek prisutnih sila (gravitacija), o uskladištenoj energiji (komprimirani plin, akumulatorske baterije) i o pasivnim mehaničkim komponentama (nepovratni ventili). Treba napomenuti da od svih naprednih reaktora IRIS osigurava najmanju učestalost oštećenja jezgre.

Ekonomični i jednostavniji kipući reaktor (eng. **ESBWR** - Economic Simplified Boiling Water Reactor) predstavlja evolutivni dizajn u odnosu na poboljšani kipući reaktor. Temelji se na naprednijem reaktoru koji je hlađen plinom, a također ga je dizajnirao General Electric. Pojednostavljeni dizajn omogućava povećanje sigurnosti, izvrsnu ekonomiku i povećanu raspoloživost. Broj pumpi, ventila i motora smanjen je za četvrtinu u odnosu na poboljšani kipući reaktor. U odnosu na prethodni dizajn eliminirano je 11 sustava, a ostatna toplina može se odvoditi direktno u atmosferu. Pasivni sustavi hlađenja kontejnmenta reduciraju broj aktivnih komponenti, što doprinosi povećanju sigurnosti. Od ostalih pasivnih sustava i komponenata ekonomičnog jednostavnog kipućeg reaktora ističu se izolacijski kondenzatori i

pasivni sustav za zaštitno hlađenje jezgre. Planirano vrijeme izgradnje je 42 mjeseca za elektranu snage 1.590 MW, čemu doprinosi i uporaba standardiziranih modula. Nuklearna elektrana s ovim tipom reaktora koristi sve provjerene karakteristike kipućeg reaktora (uporaba izolacijskih kondenzatora). Ipak, u odnosu na prethodnike, glavna razlika je u primjeni pasivnih sustava za zaštitu reaktora i izostanak recirkulacijskih pumpi, jer se protok fluida kroz jezgru obavlja prirodnom cirkulacijom. Povećanje prirodne cirkulacije zahtijeva višu reaktorsku posudu (27,7 metara) što nosi i svoju prednost. Naime, u slučaju prekida dovoda napojne vode velika količina vode iznad jezgre proizvodi vrijeme do ogoljenja jezgre, a veliki volumen u slučaju prekida vanjskog napajanja posude usporava povišenje tlaka. Reaktor je manje osjetljiv na prijelazne pojave koje za posljedicu imaju promjenu tlaka zbog većeg omjera voda / gorivo u posudi. Prijelazne pojave vezane uz pumpe za prisilnu cirkulaciju i sigurnosne pumpe eliminirane su dizajnom, što uz izostanak parnih generatora rezultira izuzetno niskom vjerojatnošću oštećenja jezgre.

## 6. Nuklearni reaktori IV. generacije

Nakon inicijative američke vlade za razvoj novih reaktora IV. generacije, osnovan je međunarodni forum koji je definirao ciljeve tehnološkog razvoja novih reaktora. Nove nuklearne elektrane moraju udovoljiti zahtjevima održivog razvoja, uz zanemariv utjecaj na okoliš. Proliferacija nuklearnog materijala praktično mora biti onemogućena na tehnološkom nivou. Stvaranje nuklearnog otpada mora se smanjiti na najmanju moguću mjeru, uz znatno smanjenje dugotrajnih utjecaja na okoliš. Potrebno je postići izvrsnost u sigurnosti i pouzdanosti, te ostvariti zanemarivu mogućnost oštećenja jezgre. Treba biti eliminirana potreba za planiranjem zaštitnih akcija izvan kruga postrojenja. U odnosu na ostale tehnologije

potrebno je ostvariti ekonomsku prednost cjelokupnog gorivnog ciklusa. Financijski rizik potrebno je izjednačiti s ostalim tehnologijama. Prvi reaktori IV. generacije, za koje se smatra da predstavljaju budućnost nuklearne energije, trebali bi biti izgrađeni do 2030. godine.

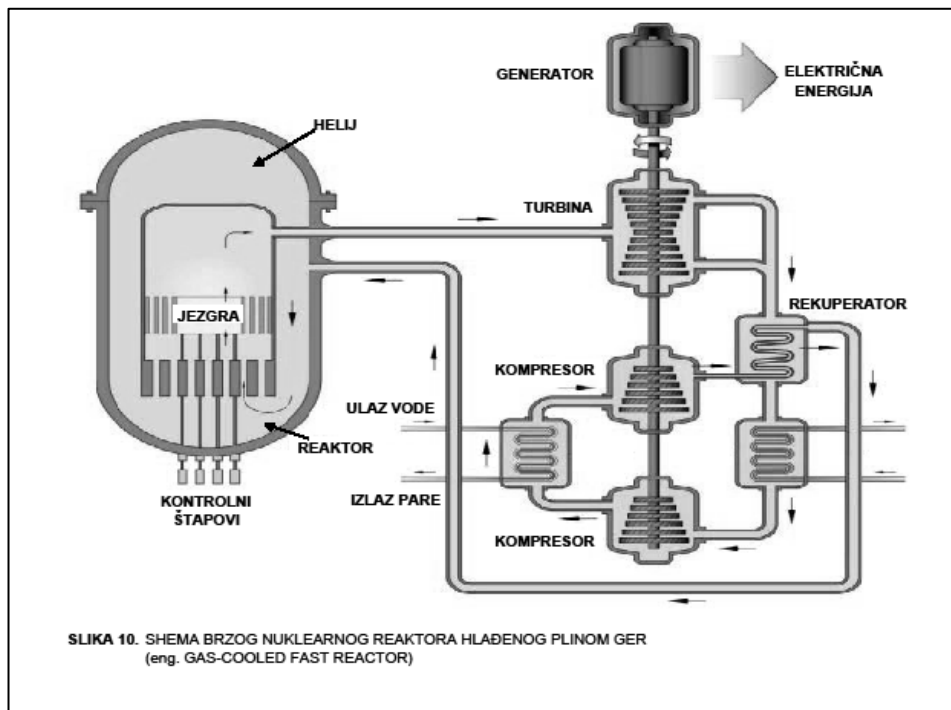
Odabir je napravljen na osnovi ekoloških, sigurnosnih i ekonomskih parametara. Tri od predloženih šest sustava pripadaju grupi brzih reaktora. Dva su termička, dok je jedan epitermički. Osim za proizvodnju električne energije, neki od njih mogu se koristiti i za proizvodnju vodika.

Trenutačno je u razvoju plinom hlađeni brzi reaktor **GFR** (eng. - Gas-cooled Fast Reactor). Tvrtka General Atomics radi na razvoju helijem hlađenog brzog reaktora snage 600 MW i 2.400 MW, pogodnog za proizvodnju električne energije i za termokemijsku proizvodnju vodika.

U prvom slučaju rashladni plin direktno pokreće plinsku turbinu koristeći tzv. Braytonov ciklus. Gorivo, koje sadrži uranij i plutonij, u formi je karbida ili nitrida, a predviđeni odgor je do 250 GWd/t teškog metala. Predviđa se recikliranje istrošenog goriva direktno na lokaciji elektrane. Tako bi se ekstrahirani aktinidi vraćali natrag u reaktor u svrhu smanjenja proizvodnje dugoživućeg radioaktivnog otpada na najmanju moguću mjeru. Plinom hlađeni brzi reaktor ima visok stupanj korisnog djelovanja, u visini od 48%. Ulazna temperatura rashladnog sredstva iznosi 490 °C, a izlazna temperatura 850 °C, dok gustoća snage iznosi 100 MWt/m<sup>3</sup>. Od visokotemperaturnog plinom hlađenog reaktora, ovaj tip reaktora se razlikuje po odsustvu moderatora, većoj gustoći snage i većem udjelu fisibilnog materijala u jezgri.

Plinom hlađeni brzi reaktor shematski je prikazan na slici 10.

Rashladno sredstvo u brzom reaktoru hlađenom olovom **LFR** (eng. - Lead-cooled Fast Reactor) je tekuće olovo ili tekuća slitina olova i bizmuta, a hlađenje se obavlja prirodnom konvekcijom. Gorivo je metalni uranij ili

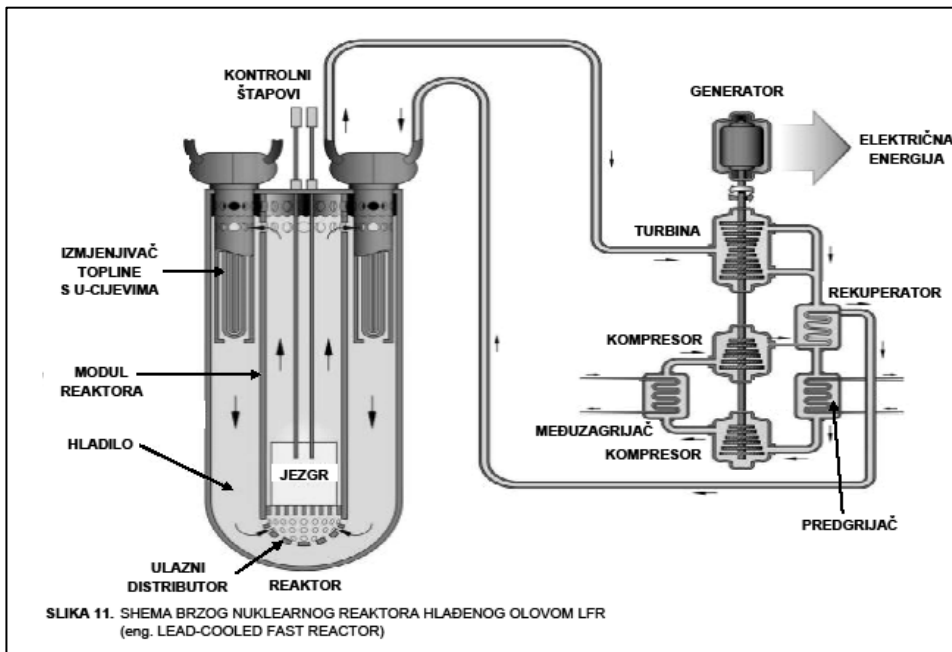


SLIKA 10. SHEMA BRZOG NUKLEARNOG REAKTORA HLAĐENOG PLINOM GER (eng. GAS-COOLED FAST REACTOR)

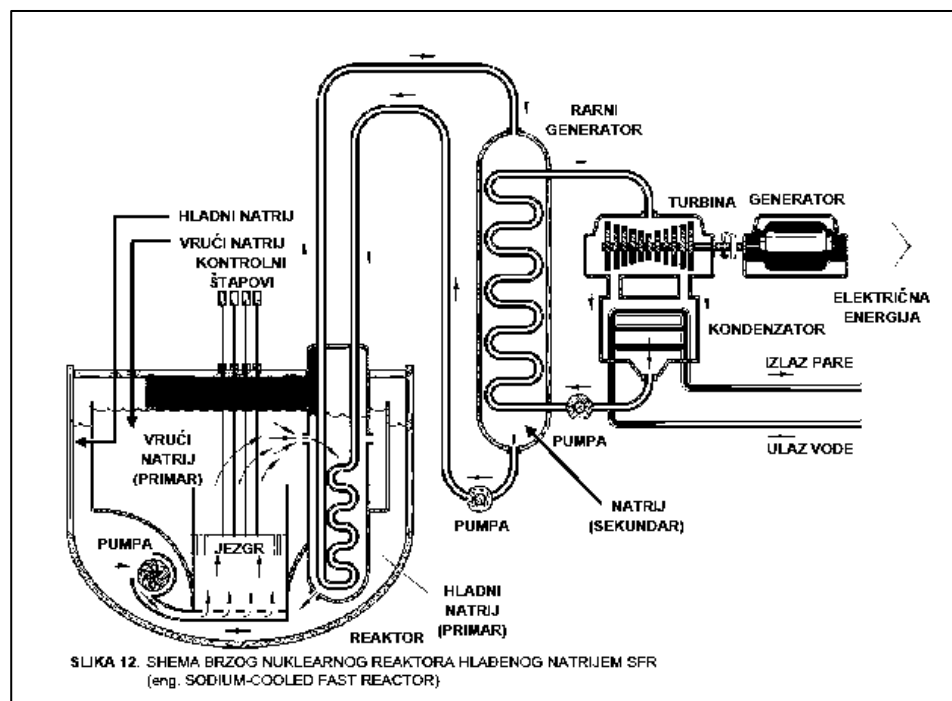
je u formi uranij-plutonij nitrida s dodatkom aktinida dobivenih u postrojenjima za recikliranje. Predviđena snaga reaktora je od 50 MW do 1.200 MW. Radna temperatura je za sada oko 550 °C, a pretpostavka je da će razvoj novih materijala omogućiti povećanje radne temperature na preko 800 °C.

Koncept brzog reaktora hlađenog olovom uglavnom prati dizajn i tehnologiju ruskog olovom hlađenog **BREST** reaktora razvijenog na temelju iskustva s olovo-bizmut hlađenim reaktorima korištenima u podmornicama, te u još dva eksperimentalna dizajna. Shema ovog tipa reaktora prikazana je na slici 11.

Uporaba natrija kao rashladnog sredstva u brzim reaktorima **SFR** (eng. - Sodium - Cooled Fast Reactor) uvjetovana je većom gustoćom snage, temperature i neutronske toke unutar jezgre, odnosno potrebom za efikasnijim



prijelazom toplote na rashladni fluid. Nadalje, natrij ima relativno nisku temperaturu vrenja (98 °C), nizak apsorpcijski udarni presjek, dobru kompatibilnost s gorivom i strukturnim materijalima, te dobra svojstva što se tiče strujanja. Loša strana natrija je jaka korozivna aktivnost u doticaju sa zrakom i vodom.



Predviđene su tri izvedbe brzog reaktora hlađenog natrijem i to kompaktni tip (600 MW do 1.500 MW), bazenski tip (300 MW do 600 MW), te modularni tip (50 MW do 150 MW). Gorivni ciklus koristi potpuno recikliranje ak-

tinida u bilo kojoj od predloženih izvedbi.

Predloženi sustavi koriste brzi dio neutronskog spektra, natrij kao rashladno sredstvo, zatvoreni gorivni ciklus, uranij kao oplodni materijal te učinkovitost u tretmanu aktinida. Kompaktni tip koristi gorivo MOX (miješani oksid uranija i plutonija), a modularni koristi leguru uranija, plutonija, aktinida i cirkonija. Sa

sigurnosnog aspekta pozitivan je dugačak termički odziv sustava, visoka temperatura vrenja natrija, nizak radni tlak, odvojenost sustava za proizvodnju para natrija za hlađenje reaktora (postojanje tercijarnog kruga).

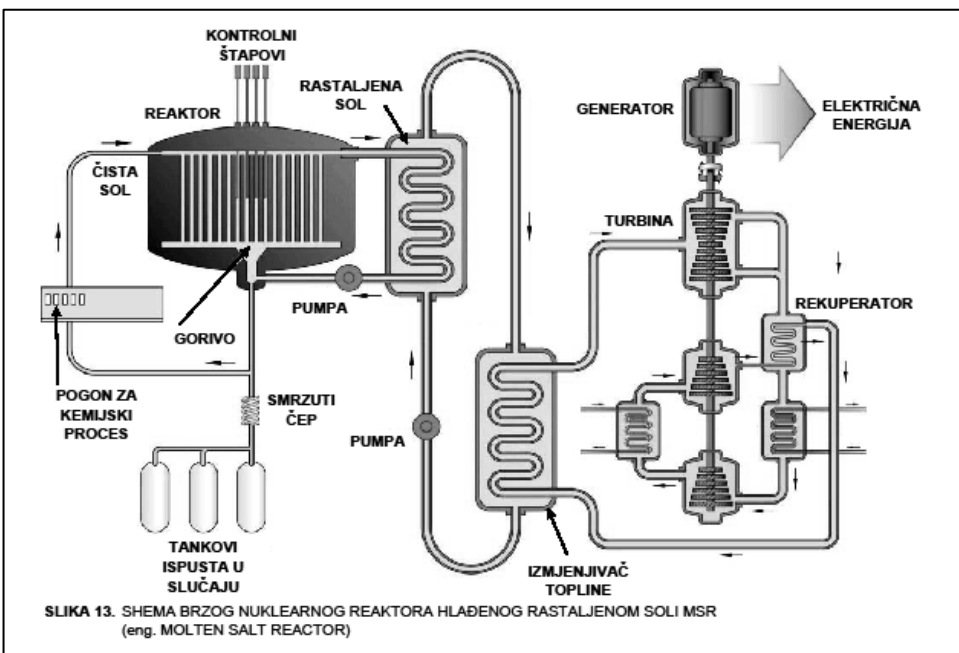
Osim vodene pare u dijelu za konverziju energije razmatra se i uporaba ugljikovog dioksida. Prednost u odnosu na druge sustave je mogućnost korištenja transuranskih elemenata kao goriva koji će značajno smanjiti količinu aktinida u visokoradioaktivnom otpadu.

Reduciranje kapitalnih troškova i povećanje pasivne sigurnosti, naročito pri prijelaznim pojavama, područja su za unapređenje brzih reaktora hlađenih natrijem. Ovaj tip reaktora shematski je prikazan na slici 12.

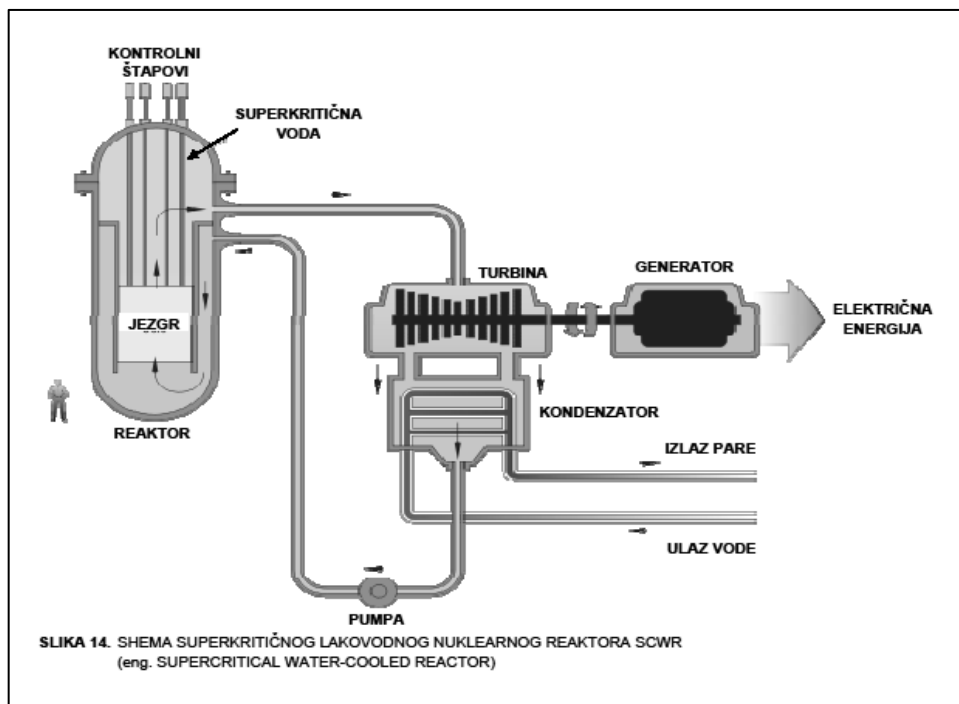
Predstavljeno je i nekoliko dizajna nuklearnog reaktora hlađenog rastaljenom soli MSR (eng. - Molten Salt Reactor), a napravljeno je i nekoliko prototipova. Ranija rješenja oslanjala su se na nuklearno gorivo otopljeno u rastalje-

nim solima flora tvoreći uranov tetrafluorid. Kritičnost se doseže ulaskom medija u grafitnu jezgru koja ujedno služi kao moderator. Neki današnji koncepti više se osla-

Reactor) je visokotemperaturni visokotlačni vodom hlađeni reaktor koji radi na temperaturama hladila iznad kritične točke vode (920 °C, 221 bar), što omogućava visoku termičku efikasnost



(za trećinu veću nego u konvencionalnih lakovodnih reaktora). Sustav s ovim tipom reaktora nema izmjenjivač toplote. Pošto superkritična voda ne mijenja agregatno stanje, s njom se direktno pogoni turbina. Referentni je sustav snage oko 1700 MW, radnog tlaka od 250 bara, a izlazna temperatura rashladnog fluida 510 °C, s mogućim povećanjem do 550 °C. Gorivo je uranijev dioksid u slučaju otvorenog gorivnog ciklusa. Ovaj tip reaktora prikazan je na slici 14.



Reaktor vrlo visoke temperature **VHTR** (eng. - Very High Temperature Reactor) koncept je plinom hlađenog termičkog reaktora koji se osim za proizvodnju električne energije može koristiti i za proizvodnju vodika, te proizvodnju toplote za potrebe različitih procesa. Dva su osnovna VHTR dizajna. U prvome je jezgra sastavljena od velikih

ju na gorivo disperzirano unutar grafitne matrice s rastaljenom soli čime se osigurava hlađenje pri visokoj temperaturi i niskom tlaku. Inicijalno, referentni dizajn je reaktor snage 1.000 MW, a ciljani datum uvođenja je 2025. godine. Shema tog tipa reaktora prikazana je na slici 13.

Superkritični vodom hlađeni reaktor **SCWR** (eng. – Super - Critical Water - cooled

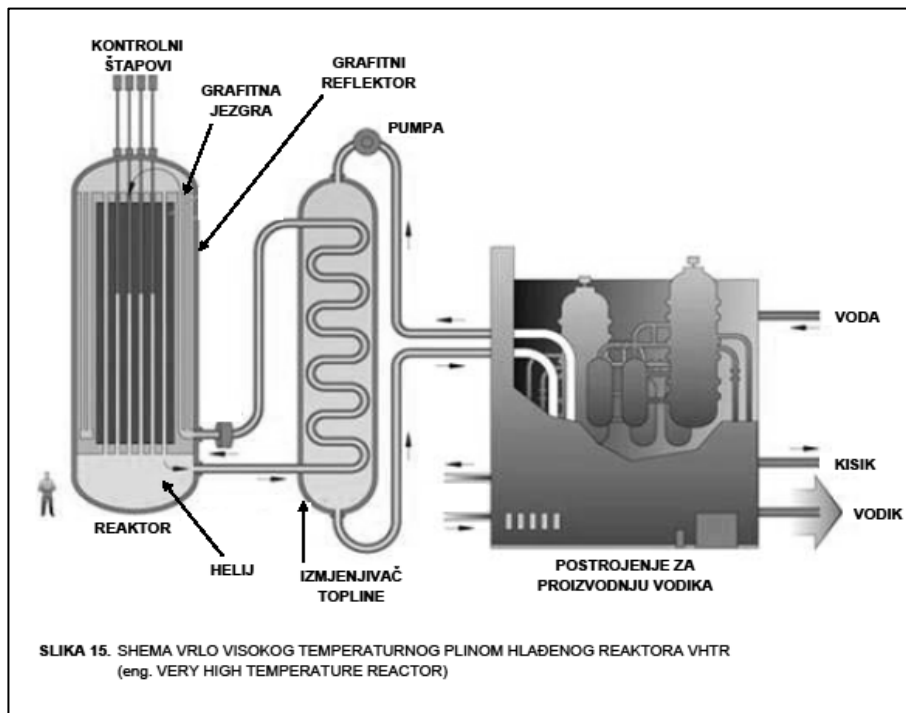
heksagonalnih grafitnih gorivnih elemenata (blok dizajn), a u drugome koji je nazvan reaktor s ležištem od oblutaka **PBR** (eng. - Pebble Bed Reactor) gorivni elementi su grafitne kuglice s gorivnom jezgrom.

U svrhu postizanja visokog odgora i sprječavanja ispuštanja fizijskih produkata ovaj tip reaktora koristi čestice goriva nazvane **TRISO** (gorivo visokih performansi). Svaka



kuglica sastoji se od jezgre i četiri koncentrične ljuske ukupnog promjera manjeg od 1 mm. Gorivna jezgra je napravljena od uranijeva ili plutonijeva oksida. Obogaćenje uranija iznosi između 10% i 20%. Gorivna jezgra ima različite polujere, od 350 – 500  $\mu\text{m}$  u slučaju korištenja niskoobogaćenog uranija, odnosno 150 – 300  $\mu\text{m}$  u slučaju korištenja transuranijskih elemenata. Oko jezgre je ljuska ili omotač napravljen od poroznog ugljika, a svrha mu je osiguravanje prostora za plinovite fizijske produkte. Drugi omotač je pirolitički ugljik visoke gustoće koji štiti treći omotač tijekom ozračivanja i preventivno sprječava djelovanje klora na jezgru prilikom njene izrade, te štiti od djelovanja fizijskih produkata. Treći omotač je otporan na kemijsko djelovanje te predstavlja zaštitu od curenja pli-

verzije ovog tipa reaktora, japanski dizajn predviđa da se gorivni štapiovi stavljaju u relativno velike rashladne kanale i neovisno hlade. Shema ovog tipa reaktora prikazana je na slici 15.



## 7. Nuklearni reaktori za pogon brodova

Brodski nuklearni reaktori koriste se najviše za ratne brodove, uglavnom za podmornice i nosače zrakoplova. Vrlo je malo komercijalnih brodova izgrađeno na nuklearni pogon, od kojih su danas u uporabi još jedino nuklearni ledolomci. Rad nuklearnog reaktora za pogon broda veoma je sličan radu nuklearnog reaktora na kopnu. Već

novitih i metalnih fizijskih produkata. Četvrti ili vanjski omotač je također od pirolitičkog ugljika sa svrhom vanjske zaštite. TRISO čestice se stavljaju u predviđene otvore za gorivo (ukupno 210 takvih otvora) u grafitnoj matrici (kompaktiranje goriva), i sudjeluju s volumnim udjelom između 20% i 40%. Unutar prizmatičnog gorivnog elementa nalazi se i 108 otvora za rashladni fluid (helij), 6 otvora za sagorive apsorbere i centralni otvor za rukovanje gorivnim elementom. Za razliku od američke

je rečeno da male količine nuklearnog goriva mogu pružiti energetske ekvivalent milijun puta veći od iste količine fosilnog goriva. Iako je trošak za proizvodnju gorivnih elemenata visok u odnosu na nabavnu cijenu uranija, ukupni trošak za gorivo je znatno niži nego u slučaju korištenja fosilnih goriva. Nuklearni reaktori ne zahtijevaju zraka za izgaranje, zauzimaju manje prostora u strojarnici broda i ne ispuštaju plinove. Nuklearni propulzijski sustavi uglavnom koriste tlakovodne reaktore, izuzev ruskih podmornica Alfa klase, u kojih se reaktor

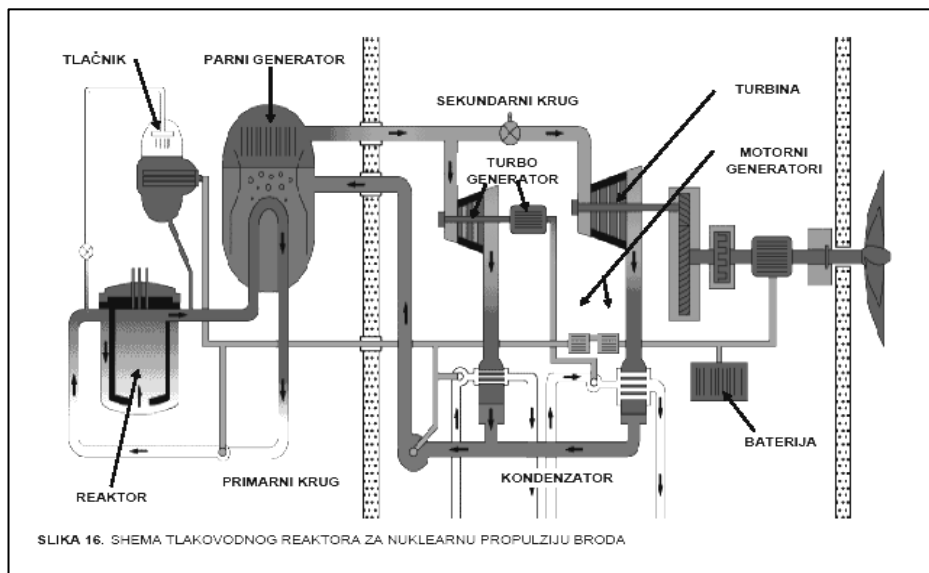
hladi tekućim metalom. Brodski se reaktori razlikuju od komercijalnih reaktora za proizvodnju električne energije po tome što trebaju proizvesti puno snage iz vrlo malog volumena reaktora, i stoga moraju kao gorivo rabiti vrlo visoko obogaćeni uranij (> 20% obogaćeni uranij U-235). Punjenje gorivom uglavnom se izvodi svakih 10 ili više godina, a predviđeni im je vijek trajanja do 40 godina. Radi sigurnosti, ovi reaktori dizajnirani su u obliku jake kompaktne posude pod pritiskom. Toplinska učinkovitost im je manja nego u komercijalne nuklearne elektrane na kopnu.

Istraživački rad na nuklearnim brodskim pogonima započeo je 1940. godine, a prvi pokusni reaktor napravljen je u SAD-u 1953. godine. Prva podmornica na nuklearni pogon (USS Nautilus) zaplovila je morem 1955. godine. To je ujedno označilo prijelaz podmornica iz sporih podvodnih plovila u brze i velike ratne brodove sposobne za održavanje brzine do 25 čvorova. Razvojem USS Nautilusa došlo je do paralelnog razvoja i Skate klase podmornica, pogonjenih jednim tlakovodnim reaktorom, te nosača zrakoplova USS Enterprise s osam tlakovodnih reaktora. Godine 1960. krstarica USS Long Beach, zatim i USS Bainbridge (1961.) imali su po dva tlakovodna reaktora. Zanimljivo je da je Enterprise još uvijek u službi američke ratne mornarice. Do 1962. godine američka ratna mornarica već ima 26 operativnih nuklearnih podmornica i još 30 njih u izgradnji. Brodski nuklearni reaktori predstavljaju značajan preokret u dizajniranju ratnih brodova.

I bivši SSSR je također razvijao tlakovodne nuklearne reaktore za pogon ratnih brodova. Najveće podmornice klase Tajfun od 26.500 tona nosivosti, pogonjene su tlakovod-

nim reaktorima snage 190 MW, a kasnije su zamijenjene nešto manjima klase Oscar-II od 24.000 tona nosivosti s istim nuklearnim reaktorima. Ovoj klasi pripada i poznata podmornica Kursk na kojoj se je dogodila strašna tragedija.

1989. godine u uporabi je bilo više od 400 podmornica na nuklearni pogon, a danas se taj broj smanjio na oko 130, uključujući i nove koje su naručene. SAD prednjače u uporabi nuklearne energije u ratne svrhe. Prvi su u svijetu koristili nuklearni pogon na nosačima zrakoplova, dok zajedno s Rusijom prednjače u primjeni nuklearne energije za pogon krstarica (SAD 9, Rusija 4). SAD su do sredine 2010. godine izgradile 219 plovila na nuklearni pogon, a te su godine imale pet podmornica i



Slika 16. Shema tlakovodnog reaktora za nuklearnu propulziju broda

jedan nosač aviona u izgradnji. Svi američki nosači zrakoplova i sve podmornice danas su na nuklearni pogon. Osim SAD-a i Rusije, nuklearne reaktore za pogon brodova ratnih mornarica koriste i Velika Britanija, Francuska, Japan, Indija i Kina.

Nuklearna propulzija pokazala se tehnički i ekonomski veoma bitnom u ruskom arktičkom području, gdje su radni uvjeti iznad mogućnosti konvencionalnog ledolomca. Razina snage potrebne za razbijanje dubokog leda, zajedno s logistikom osiguranja dobave fosilnog goriva stvarale su poteškoće, pa se razvila potreba za korištenjem nuklearne energije za

ova plovila. Ledolamac "Lenjin" nosivosti 20.000 tona bio je prvi brod na svijetu na nuklearni pogon. On je ostao u službi 30 godina do 1989. godine. Kasnije su napravljeni veći ledolomci klase Arktika, nosivosti 23.500 tona. Rusi su izgradili slijedeće arktičke ledolomce: Lenjin, Arktika, Sibir, Rosija, Sovjetski Sojuz, Jamal, a posljednji, sedmi i najveći ledolamac, "50 godina od pobjede" (50 Let Pobjedi) stavljen je u službu 2007. godine. To je ledolamac s 25.800 tona nosivosti, dužine 160 metara i 20 metara širine. Dizajniran je da probije led i do 2,8 metara debljine. Njegova učinkovitost u službi vrlo je impresivna.

Za uporabu u plitkim vodama, kao što su ušća i rijeke, u Finskoj su izgrađena dva ledolomca klase Tajmir, od 18.260 tona nosivosti, u skladu s međunarodnim sigurnosnim standardima za nuklearna plovila, a opremljeni su u Rusiji.

Razvoj nuklearne propulzije za trgovačke brodove počeo je 1950. godine, ali gledano u cjelini, uopće nije bio komercijalno uspješan. S 22.000 tona nosivosti u SAD-u je 1962. godine izgrađen NS Savannah, ali je deset godina kasnije stavljen izvan uporabe. NS Savannah je imao reaktor snage 74 MW s isporukom 16,4 MW snage na propeler. U Njemačkoj je 1968. godine u službu stavljen Otto Hahn, teretni i istraživački brod na nuklearni pogon, ali mu je 1979. zbog velikih troškova održavanja nuklearni pogon izvađen i ugrađen je dizelski motor kao glavni propulzijski stroj. 1988. godine u bivšem SSSR-u porinut je teretni nuklearni brod Sevморput s ledolomnim osobinama i još je uvijek je aktivan. Japanci su 1990. godine porinuli brod Mutsu koji nikada nije prevezio komercijalni teret, a raspremljen je 1995. godine.

Ograničena dostupnost fosilnih goriva u budućnosti može dovesti do obnovljenog interesa za razvoj nuklearnih pogona. Uz sve veću pozornost koja se posvećuje emisiji stakleničkih plinova koji proizlaze iz spaljivanja fosilnih goriva, sasvim je zamislivo da će se ponovna

pozornost posvetiti nuklearnim pogonima brodova.

Čelnik velike kineske broderske tvrtke Cosco predložio je u prosincu 2009. godine gradnju kontejnerskih brodova koji bi se pokretali pomoću nuklearne energije, kako bi se smanjila emisija stakleničkih plinova u atmosferu. Rekao je da Cosco pregovara s kineskom vladom o razvoju nuklearne propulzije za teretne brodove.

2010. godine Babcock International dovršava studiju o razvoju nuklearnog pogona za tankere koji prevoze ukapljeni prirodni plin (LNG tankeri). Istraživanje je pokazalo da bi se na pojedinim rutama nuklearna propulzija isplatila, te da je tehnološki napredak u dizajnu i proizvodnji reaktora osigurao višu pouzdanost, te da nudi opcije u koje se može imati više povjerenja.

U studenom 2010. godine britansko pomorsko klasifikacijsko društvo LR (eng. Lloyd's Register) pokrenulo je studij (u trajanju od dvije godine) sa sjedištem u SAD-u (Hyperion Power Generation). Istraživanje je namijenjeno za izradu dizajna konceptnog tankera, temeljenog na nuklearnom reaktoru snage 70 MW. Projekt obuhvaća istraživanja koja će se provoditi prema propisima Međunarodne pomorske organizacije IMO (eng. - International Maritime Organization), a podržana su od strane Međunarodne agencije za atomsku energiju IAEA (eng. International Atomic Energy Agency), te prema lokalnim propisima zemalja koje su uključene u projekt. Da bi podržao svoje zanimanje za nuklearni pogon Lloyd's Register je nedavno propisao pravila za nuklearne brodove, a odnose se na integraciju reaktora. Pritom su korištena i već postojeća pravila za nuklearne reaktore na kopnu. Nuklearna propulzija na brodovima mogla bi biti isplativa i u slučaju velikih brodova za prijevoz rasutih tereta koji plove na velikim udaljenostima. Razmatra se i nuklearni tegljač za tegalj konvencionalnih brodova preko oceana, a u obzir dolaze i neki brodovi s

rasutim teretom gdje je potrebna veća brzina. Shema nuklearne propulzije broda prikazana je na slici 16.

## **LITERATURA**

- [1] V. Knapp (1993). *Novi izvori energije, Nuklearna energija fisije i fuzije*. Školska knjiga, Zagreb.
- [2] D. Feretić, N. Čavlina, N. Debrecin (1995). *Nuklearne elektrane*. Školska knjiga, Zagreb.
- [3] [www.nei.org](http://www.nei.org) (23.03.2011).
- [4] [www.izvorienergije.com](http://www.izvorienergije.com) (24.03.2011).
- [5] [www.nukleum.tripod.com](http://www.nukleum.tripod.com) (25.03.2011).
- [6] [www.nemis.zpf.fer.hr](http://www.nemis.zpf.fer.hr)(27.03.2011).
- [7] [www.iaea.org](http://www.iaea.org) (28.03.2011).



Posada USS Enterprise, prvog nosača zrakoplova na nuklearni pogon, postrojena na palubi u obliku poznate formule  $E = mc^2$