

NUKLEARNE ELEKTRANE

OSNOVI ELEKTROENERGETIKE

Dr Ivana Vlajić-Naumovska

Sadržaj

2

- Nuklearne elektrane
- Nuklearna fisija
- Nuklearna fuzija
- Osnovni delovi nuklearnih elektrana
- Ciklus goriva
- Uticaj na prirodnu sredinu (ekologija)

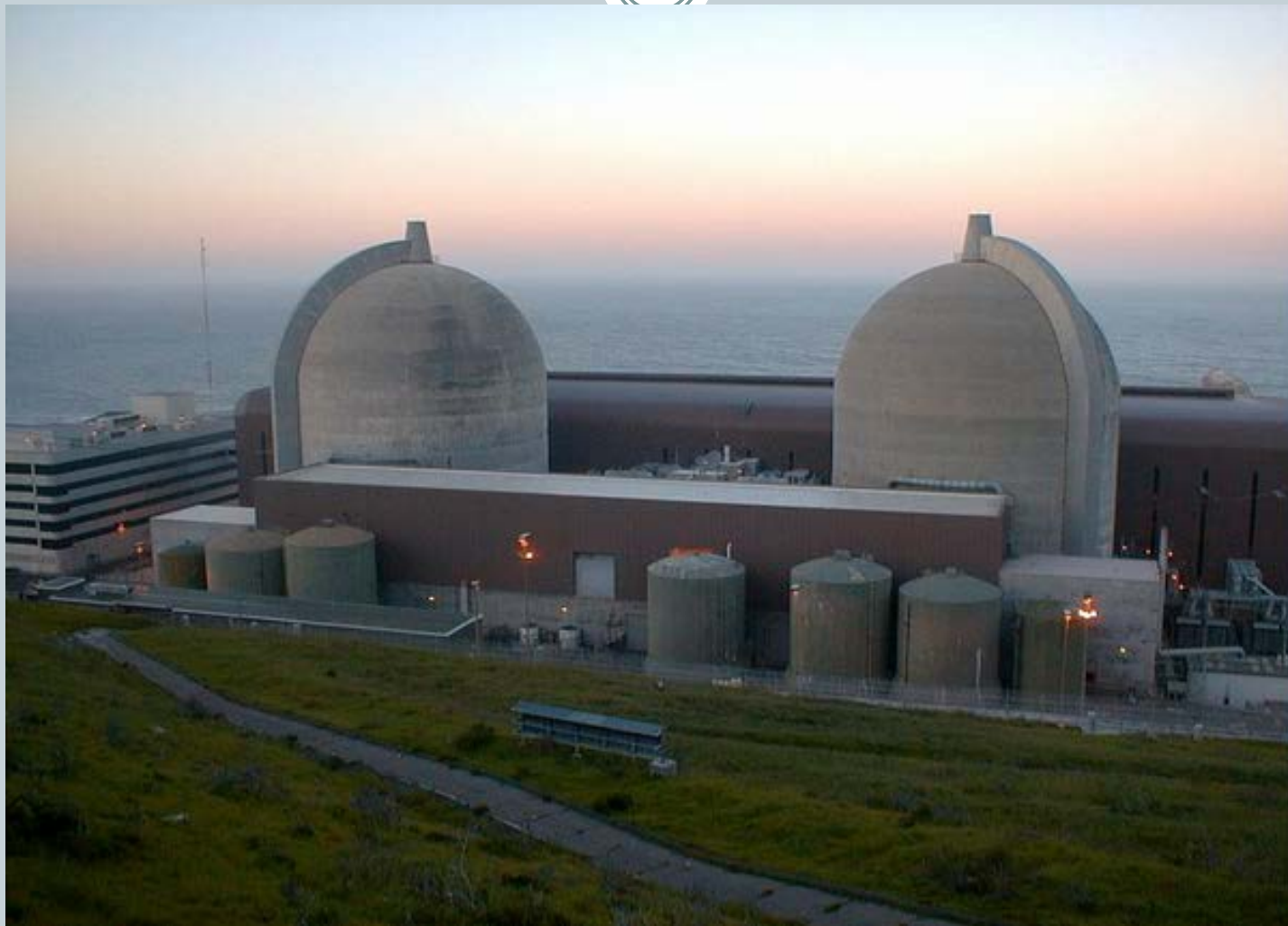
Nuklearne elektrane

3

- Nuklearne termoelektrane su postrojenja u kojima se električna energija proizvodi iz toplotne energije koja se oslobađa u nuklearnim reaktorima prilikom raspadanja (fisiije) atoma nuklearnih goriva (urana i plutonijuma).
- Razlika između *TE* i *NE* je u tome što se u *TE* generisanje toplote i proizvodnja pare vrši u kotlovskom postrojenju kroz hemijski proces sagorevanja goriva, dok se u *NE* toplota generiše u reaktoru kroz proces fisiije nuklearnog goriva.
- Kod *TE* se gorivo skoro u potpunosti iskorištava, dok se kod *NE* iskorišćava samo mali deo energije nuklearnog goriva.

Nuklearne elektrane

4



Slika 1 Nuklearna elektrana

Nuklearne elektrane

5

- Nuklearni reaktor je smešten u sfrenoj zaštitnoj zgradi za zadržavanje radijacije.
- Levo i desno su rashladni dimnjaci koji su česti rashladni sistemi u svim nuklearnim elektranama.



Slika 2 Nuklearna elektrana

Nuklearne elektrane

6

Country	Number of operated reactors	Capacity Net-total (MW_e)	Generated electricity (GWh)	%-share of domestic generation
France	58	63130	416800.00	76.34%
Ukraine	15	13107	82300.00	56.49%
Slovakia	4	1814	14083.68	55.90%
Hungary	4	1889	14955.71	52.67%
Slovenia	1	688	5371.66	38.01%
Belgium	7	5913	24571.70	37.53%
Armenia	1	375	2576.00	34.51%
Sweden	10	9651	54347.00	34.33%
Finland	4	2752	22323.00	33.74%
Switzerland	5	3333	22100.00	33.48%
Czech Republic	6	3930	25337.32	32.53%
Korea, Republic of	25	23073	157196.00	31.73%
Bulgaria	2	1926	15379.00	31.32%
Spain	7	7121	54740.00	20.34%
United States	99	99185	797178.00	19.50%
United Kingdom	15	8918	63894.54	18.87%
Russia	35	25443	195213.58	18.59%
Romania	2	1300	10695.00	17.33%

Tabela 1 Udeo nuklearnih elektrana u ukupno proizvedenoj električnoj energiji

Nuklearne elektrane

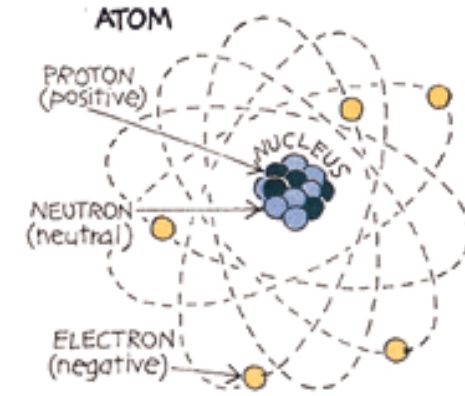
7

Country	Number of operated reactors	Capacity Net-total (MW_e)	Generated electricity (GWh)	%-share of domestic generation
Canada	19	13524	98374.97	16.60%
Taiwan	6	5052	35143.03	16.32%
Germany	8	10799	86810.32	14.09%
Mexico	2	1440	11176.54	6.79%
Argentina	3	1632	6519.00	4.83%
South Africa	2	1860	10965.14	4.73%
Pakistan	4	1030	4332.70	4.40%
Netherlands	1	482	3861.63	3.67%
India	21	5780	34644.45	3.53%
China Mainland	35	28792	170355.00	3.03%
Brazil	2	1884	14809.16	2.76%
Iran	1	915	3547.00	1.27%
Japan	43	40290	4346.49	0.52%
Korea, Democratic People's Republic of	30	Unknown	0.00	0.00%
World total	479	387,106 MW_e	2,798 TWh	10.9%

Tabela 1 Udeo nuklearnih elektrana u ukupno proizvedenoj električnoj energiji

Nuklearna fisija

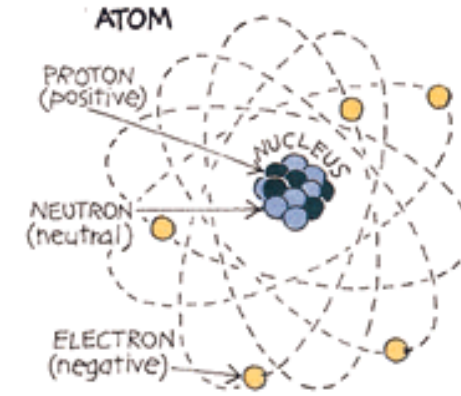
8



- *Atomsko jezgro* je centar atoma, ogromne gustine koji se sastoji od nukleona - protona i neutrona.
- Broj protona u atomskom jezgru se zove atomski broj, i određuje kom hemijskom elementu atom pripada (na primer vodonik, ugljenik, kiseonik, itd.).
- Broj neutrona određuje izotop elementa.
- Protoni i neutroni imaju skoro jednake mase, i njihov zajednički broj maseni broj, je približno jednak atomskoj masi atoma (svaki izotop elementa ima jedinstvenu atomsku masu).
- Masa elektrona je mala i ne doprinosi značajno atomskoj masi.

Nuklearna fisija

9



- *Fisija* je nuklearna reakcija *cepanja* jezgara teških atoma usled udara neutrona koji nosi dovoljno energije. Broj oslobođenih neutrona može da bude jedan, dva ili više, što zavisi od načina provođenja fisije.
- Činjenica da se pri fisiji oslobađaju i neutroni omogućuje, pri određenim uslovima, postizanje kontinualnog procesa cepanja atoma koji se naziva *lančana reakcija* fisije, a time i praktično korišćenje nuklearne energije.
- Srednje teška jezgra nastala pri fisiji jednog teškog jezgra nazivaju se fisioni fragmenti i obično su radioaktivni.
- Najlakše dolazi do fisije teških jezgra sa neparnim brojem nukleona, kao što su izotopi urana U-233 i U-235 i plutonijuma Pu-239 i Pu-241.

Nuklearna fisija

10

- Fisiju ovih jezgara izaziva apsorpcija neutrona bilo kojih energija, pošto je sama energija vezivanja neutrona dovoljna za pobudu.
- Značajna količina energije oslobođene fisijom ravna je razlici energije vezivanja polaznog jezgra i stvorenih fisionih fragmenata (za veći broj teških jezgara iznosi oko 200MeV).
- Ova energija se javlja u obliku kinetičke energije fisionih fragmenata (što se manifestuje u obliku toplote) i energije alfa, beta i gama zračenja.
- Iz jednog kilograma U-235 može se dobiti 23000 MWh energije.

Nuklearna fuzija

11

- *Fuzija* je nuklearna reakcija *spajanja* lakih atomskih jezgara u jezgra nešto težih, ali takođe lakih elemenata, i može se uporediti sa sagorevanjem, tj. hemijskim spajanjem slabije vezanih atoma ili molekula u hemijski jače vezane.
- Da bi započela reakcija fuzije, tj. spajanja, potrebno je jezgra atoma dovesti na dovoljno malo rastojanje, manje od prečnika atoma, pri čemu je potrebno savladati odbojne elektrostatske sile, jer su jezgra atoma pozitivno nalelektrisana.
- Te sile su veće u jezgara sa većim brojem protona, pa su otuda potrebne i veće energije, odnosno brzine jezgara koje ulaze u proces fuzije.
- Postoje u principu dva glavna načina za ostvarenje toga procesa.

Nuklearna fuzija

12

- Jedan je ubrzavanje čestica pomoću akceleratora, a drugi ostvarenje veoma visokih temperatura (više od 10 miliona stepeni) na kojima jezgra poseduju veoma visoku energiju toplotnog kretanja, odnosno brzine.
- Međutim, kontrolisana reakcija fuzije, koja bi se kontinualno, jeftino i sa dobrim prinosom vršila u nekom uređaju (tzv. termonuklearni reaktor), za sada nije ostvarena.
- Fizičari su uvereni u to da će jednog dana energija fuzije, za čije dobijanje praktično postoje neiscrpne rezerve vodonika i deuterijuma u okeanima, postati stvarnost, tj. da će enegija fuzije u budućnosti zameniti klasične izvore energije.
- Smatra se postoje uticajni lobiji kojima nije u interesu ovakvo rešenje energetske potrebe čovečanstva.

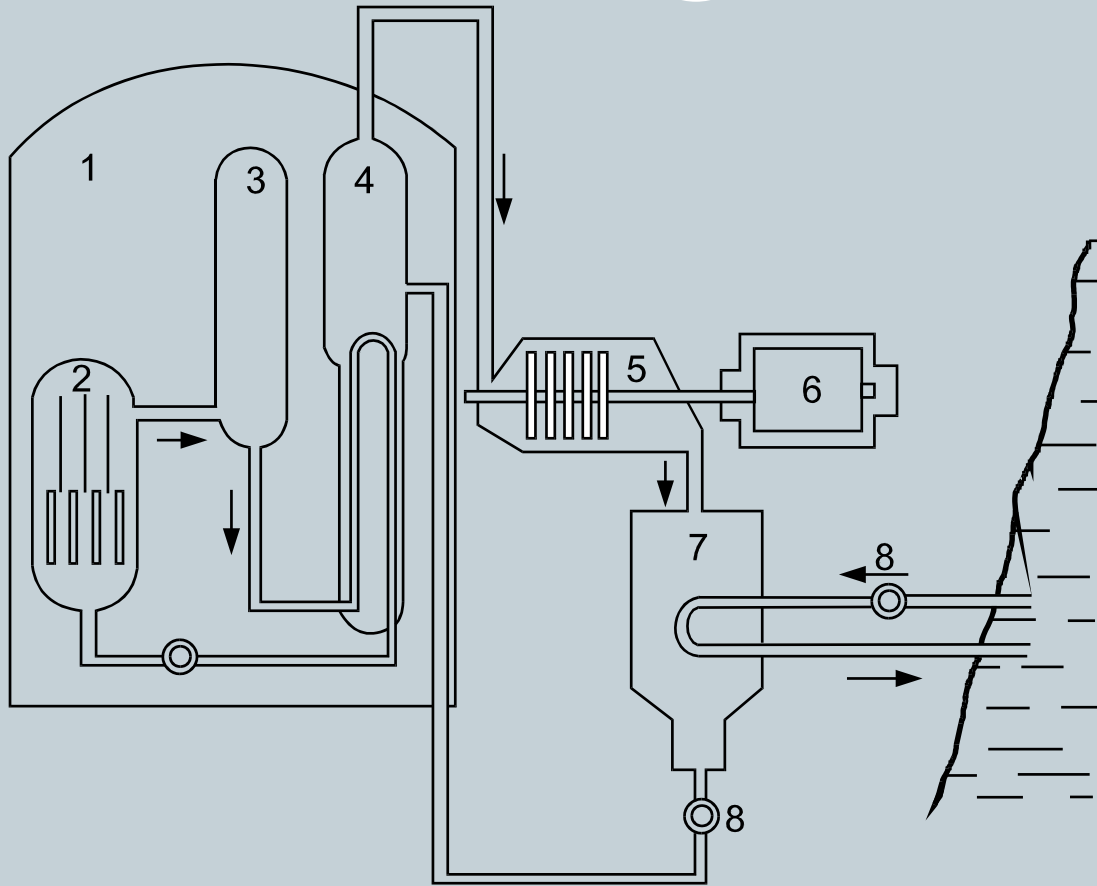
Osnovni delovi nuklearnih elektrana

13

- Osnovni delovi nuklearne elektrane su:
 - zaštitna zgrada;
 - nuklearni reaktor;
 - generator pare;
 - pumpe;
 - sud za održavanje konstatnog pritiska;
 - klasični sistemi.

Osnovni delovi nuklearnih elektrana

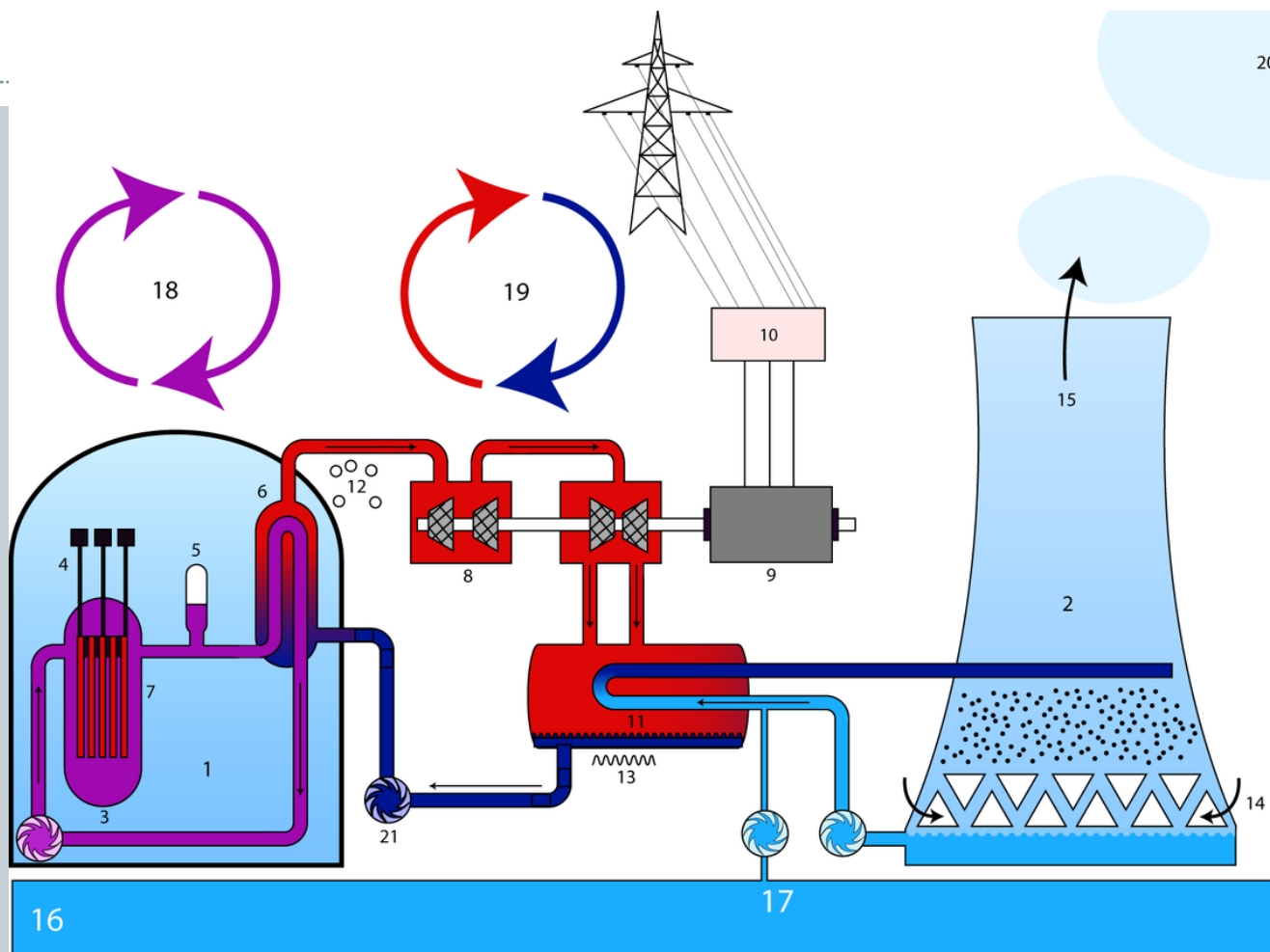
14



Slika 3 Osnovna šema nuklearne elektrane

(1 - zaštitna zgrada; 2 - nuklearni reaktor; 3 - sud za izjednačenje pritiska;
4 - generator pare; 5 - turbina; 6 - generator; 7 - kondenzator; 8 - pumpe)

Osnovni delovi nuklearnih elektrana



Slika 4 Osnovna šema nuklearne elektrane sa reaktorom PWR: 1. zaštitna zgrada, 2. rashladni toranj, 3. gorivni štapovi nuklearnog goriva, 4. kontrolni štapovi, 5. sud za izjednačenje pritiska, 6. generator pare, 7. zaštitna reaktorska posuda, 8. parna turbina, 9. električni generator, 10. transformator, 11. kondenzatorska rashladna voda, 12. parovod, 13. izmenjivač toplote, 14. kondenzator rashladnog tornja, 16. cirkulacijska pumpa, 17. pumpa napojne vode.

Osnovni delovi nuklearnih elektrana

16

- *Zaštitna zgrada* (kontejnment) ima cilj da onemogući prodiranje flukseva neutrona, alfa, beta i gama zračenja i produkata sagorevanja u okolinu, kako u redovnom radu, tako i pri havarijama.
- Izradjuje se od unutrašnje čelčne ljuske i spoljašnje armiranobetonske zgrade, od specijalne vrste betona.
- *Nuklearni reaktori* su uređaji u kojima se ostvaruje i kontrolisano održava lančana reakcija cepanja, tj. fisije teških atomskih jezgara, a različiti oblici energije fisije se pretvaraju u toplotu koja se odgovarajućim rashladnim fluidom izvodi iz reaktora.
- Osnovni delovi nuklearnog reaktora su:
 - jezgro,
 - reflektor,
 - rashladni sistem,
 - sistemi za regulaciju,
 - sistem za merenje.

Osnovni delovi nuklearnih elektrana

17

- *Jezgro* čini nuklearno gorivo, a kod izvesnih nuklearnih reaktora i moderator. Kao gorivo se najčešće koristi prirodni uran U-238, koji sadrži 0,7% izotopa U-235 ili obogaćeni uran, koji sadrži 2% U-235. Za prirodni uran proces se vrši neutronima visokih energija (brzi neutroni), dok se za obogaćeni uran vrši termičkim neutronima (brzine reda termičkog kretanja molekula).
- *Moderator* je specijalni materijal koji neutrone usporava, a da ih ne apsorbuje. Može biti pomešan sa gorivom. Usporavanje neutrona se vrši njihovim elastičnim sudarom s atomskim jezgrama moderatora. Kao moderator se upotrebljavaju teška voda, grafit, obična voda, berilijum.
- *Reflektor* služi za vraćanje u jezgro onih neutrona koji nastoje da umaknu iz NE. Postavlja se oko samog jezgra, a obično je istog sastava kao moderator.

Osnovni delovi nuklearnih elektrana

18

- *Sistem za regulaciju* brzina lančane reakcije, a time i oslobađanje energije, reguliše se povećanjem ili smanjenjem broja neutrona u sistemu. Obično se provodi menjanjem količine materijala koji apsorbuje neutrone u nuklearnom reaktoru (kontrola apsorbovanog broja neutrona), što se realizuje uvlačenjem i izvlačenjem šipki apsorbera neutrona (od kadmijuma ili čelika legiranog borom, kadmijumom) u jezgo ili reflektor.
- Da bi se rad nuklearnog reaktora prekinuo, šipke se spuštaju u NR. Nedostatak ovog načina regulacije nuklearnog reaktora je gubitak neutrona koji se apsorbuju u materijalu kontrolnih šipki.
- *Sistem za merenje* služi za kontrolu parametara nuklearnog reaktora u radu: snaga, neutronske tok, temperatura, pritisak, protok fluida za hlađenje.
- *Generator pare* je izmenjivač toplote u kome rashladni fluid reaktora predaje toplotnu energiju vodi, odnosno pari u sekundarnom kolu nuklearne elektrane.

Osnovni delovi nuklearnih elektrana

19

- Za odvođenje toplote iz reaktora koriste se laka i teška voda, gasovi i rastopljeni metali.
- Medijum za odvođenje toplote iz reaktora mora da ima mali udarni presek apsorpcije, a ako se koristi i kao moderator, treba da ima i veću stabilnost pod udarima neutrona.
- Odvođenje toplote proizvedene u reaktoru se može izvesti posredstvom radnog fluida turbine po jednokonturnoj, dvokonturnoj ili višekonturnoj šemi.
- Svaka kontura je zapravo zatvoren sistem. Višekonturna šema obezbeđuje radijacionu bezbednost i pogodnija je za opsluživanje postrojenja.
- Izbor broja kontura zavisi od tipa reaktora i osobina odnosioca toplote, pogodnosti i karakteristike radnog fluida za korišćenje na turbini.
- *Klasični sistemi* u nuklearnoj elektrani identični su sa sistemima u klasičnoj termoelektrani (turbina, generator, kondenzator, pumpe).

Osnovni delovi nuklearnih elektrana

20

- U svetu se danas uglavnom grade dva tipa nuklearnih elektrana:
 - sa reaktorom tipa PWR (pressurized light water moderated and cooled reactor) – reaktor sa običnom vodom pod pritiskom. Rashladna voda primarnog kola koja odnosi toplotu iz nuklearnog reaktora u izmenjivač toplote nalazi pod takvim pritiskom da u reaktoru ne ključa. Para se proizvodi u izmenjivaču toplote izvan reaktora. Korišćenje obične vode značajno uprošćava tehnološku šemu. Ovaj tip reaktora se najviše gradi u Rusiji, SAD i Japanu;
 - sa reaktorom tipa BWR (boiling water cooled and moderated reactor) reaktor sa ključalom vodom. Voda se pretvara u paru u samom nuklearnom reaktoru pa nije potreban izmenjivač toplote. Osnovna prednost ovih elektrana je niži pritisak u primarnom kolu, dok se proizvodnja pare odvijau aktivnoj zoni. Kod ovih generatora nema parnih generatora. Neželjena posledica ovakve konstrukcije je mogućnost prenosa radioaktivnosti do turbine. Uređaj je jednostavniji ali zahteva vrlo elastičnu regulaciju.

Ciklus goriva

21

- *Ciklusom goriva naziva se skup aktivnosti kojima se dobija sirovina za gorivo, izrađuje gorivo, upravlja njegovim korištenjem i brine o istrošenom gorivu, tj. o spremanju, preradi i odlaganju radioaktivnog otpada. Deo tih aktivnost se odvija u elektrani.*
- **Faze ciklusa goriva pre ulaska u elektranu**
Faze ciklusa goriva pre njegovog ulaska u elektranu su:
 - *dobijanje rude, prerada i izdvajanje urana,*
 - *konverzija i obogaćenje (nije potrebna za reaktore sa prirodnim uranom),*
 - *izrada goriva do oblika u kojem se stavlja u reaktor.*

Faze ciklusa goriva pre ulaska u elektranu

22

- Uran nije redak element, međutim ima vrlo malo minerala, koji ga sadrže u većoj količini.
- Većina nalazišta urana sadrže rudu sa 0,1% do 0,5% urana, dakle potrebno je obraditi relativno velike količine rude.
- Nalazišta mogu da budu površinska ili podzemna.
- Tehnika iskopa se ne razlikuje značajno od onih u rudnicima uglja, osim što postoji i opasnost od radioaktivnosti za rudničko osoblje.

Faze ciklusa goriva pre ulaska u elektranu

23

- S obzirom na to da je uran u uranovoj rudi pomešan sa mnogim drugim mineralima, ruda se mehaničkim i hemijskim metodama obrađuje, a uranski koncentrat izdvaja kao oksid U_3O_8 (tzv. žuti kolač).
- Konverzija žutog kolača U_3O_8 u uranov heksafluorid UF_6 predstavlja pripremnu fazu za obogaćivanje.
- U procesu konverzije odstranjuju se i nečistoće do potrebnog stepena nuklearne čistoće urana.
- Zemlje izvoznice urana nastoje da obave konverziju kako bi povećale izvoznu cenu urana.

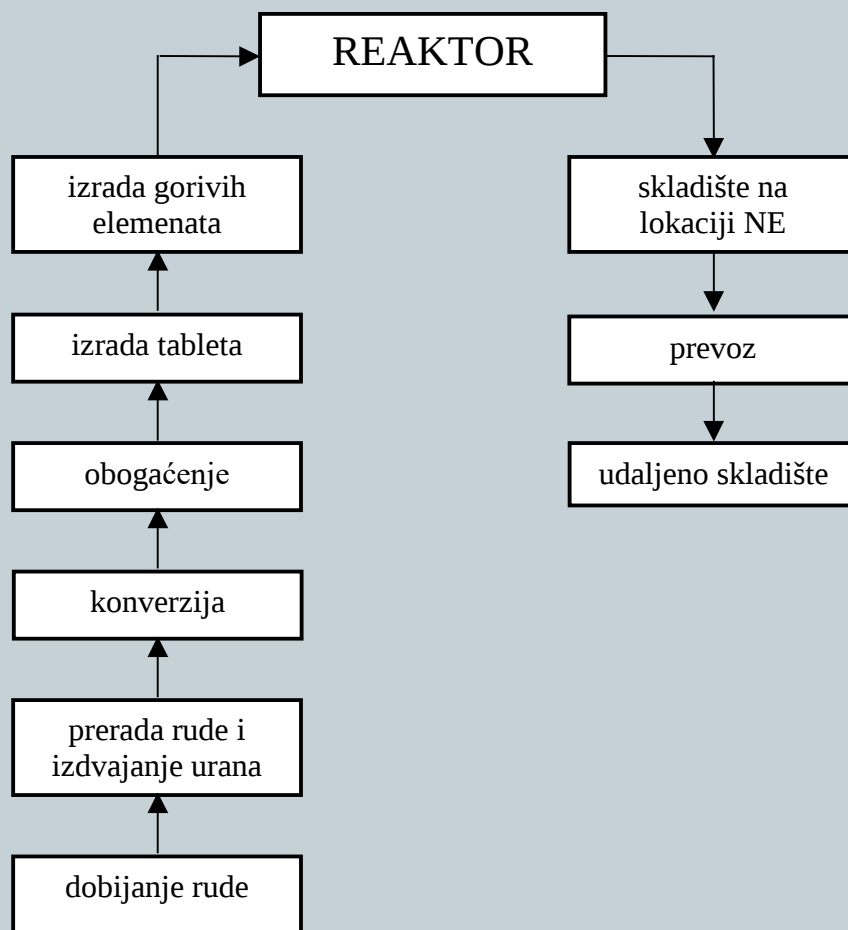
Faze ciklusa goriva pre ulaska u elektranu

24

- Obogaćivanje predstavlja povećanje sadržaja izotopa U-235 na kome se bazira održavanje lančane reakcije, sa 0,7%, koliko ga ima u prirodnom uranu, na 1,7% do 3,5%, koliko je potrebno za korišćenje u lakovodnim energetske reaktorima.
- Komercijalno su najviše zastupljeni difuzioni i centrifugalni postupak za obogaćivanje.
- Difuzioni postupak se bazira na pojavi da prolaz gasa kroz poroznu membranu zavisi od brzine molekula gasa.
- Zbog razlike u prosečnim brzinama molekula, kroz membranu prolazi više molekula izotopa U-235.
- Zbog male efikasnosti, potrebno je mnogo prolaza kroz komore s membranama vezanim u kaskade dok se ne postigne potreban stepen obogaćenja.

Faze ciklusa goriva pre ulaska u elektranu

25

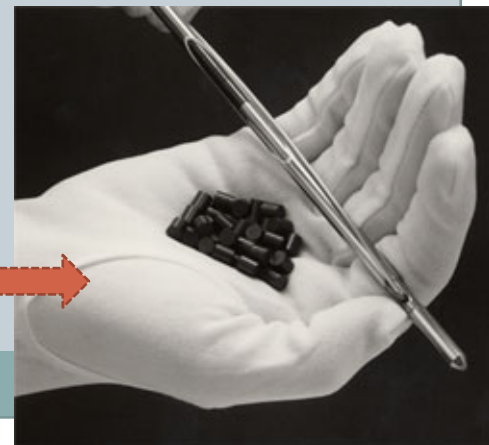


Slika 5 Faze ciklusa goriva bez prerade

Faze ciklusa goriva pre ulaska u elektranu

26

- Kod reaktora hlađenih vodom, gorivo je u obliku uranovog oksida UO_2 , koji se oblikuje u sitne tablete, koje se zatim slažu u veće celine, štap goriva i element goriva.
- Štap goriva je tanka cev od legure koja apsorbuje malo neutrona, ispunjena gorivom.
- Da bi se olakšalo postavljanje i promena goriva u reaktoru, štapovi goriva se skupljaju u čvrstu celinu koja se naziva element goriva. Element goriva reaktora tipa PWR je kvadratna matrica 15x15 i 16x16 mesta za štapove goriva.
- Deo raspoloživih mesta upotrebljen je za kontrolne štapove.
- Npr. za elektranu Krško (američki proizvođač *Westinghouse*) prečnik tablete je 8,2mm, spoljni prečnik cevi 9,4mm, ukupni broj cevi približno 25000.
- Element goriva je matrica 16x16, sa 235 štapova, dimenzija 197x197x4056 mm.
- Jedan element sadrži 404 kg urana, a ukupna masa mu je 572 kg.



Nuklearno gorivo u obliku uranijevog oksida UO_2

Faze ciklusa goriva u elektrani (unutrašnji ciklusi)

27

- Aktivnosti u elektrani (tzv. unutrašnji ciklus) su:
 - ✓ *spremanje svežeg goriva, punjenje reaktora, razmeštanje goriva u reaktoru, vađenje istrošenog goriva i njegovo čuvanje u elektrani.*
- Elementi goriva se u reaktoru raspoređuju i razmeštaju tako da se za vreme boravka u reaktoru iz goriva dobije maksimalna energija, uz zapreminski ravnomerni raspored snage u reaktorskoj posudi (jezgru).
- Iz reaktora PWR (pri normalnim uslovima rada) godišnje se vadi 1/3 elemenata goriva i zamenjuje svežim; gorivo boravi u reaktoru 3 godine.
- Iskorišćeni gorivi elementi čuvaju se pod vodom u dubokim bazenima.

Faze ciklusa goriva u elektrani (unutrašnji ciklusi)

28

- Voda ima dvostruku funkciju: služi kao zaštita od radioaktivnog zračenja i kao sredstvo za hlađenje, budući da intenzivan radioaktivni raspad razvija i znatne količine toplote. U takvim bazenima gorivo može da leži i mnogo duže nego što je potrebno za hlađenje, ako još nije odlučeno kakav će biti dalji postupak s istrošenim gorivom.
- Pri radu *NE* nastaju gasoviti, tečni i čvrsti radioaktivni otpaci.
- Kratkoživeći nestabilni gasoviti otpaci se zadržavaju u rezervoarima dok se ne raspadnu, a preostali gasovi odlaze u atmosferu pri povoljnim metoreološkim prilikama.
- Tečni otpaci se prečišćavaju u postrojenjima koja se sastoje od rezervoara, pumpi, filtera, komore za isparavanje i demineralizatora.
- Čvrsti radioaktivni otpaci se presuju i ukrućuju, a onda se njima puni burad od čeličnog lima.
- Na lokaciji *NE* obično postoji skladište za čuvanje nuklearnog otpada, gde se ova burad privremeno odlaze.

Faze ciklusa goriva nakon izlaska iz reaktora

29

- Faze ciklusa nakon izlaska iz reaktora su:
 - ✓ *prevoz do instalacije za preradu i prerada,*
 - ✓ *prerada (recikliranje) goriva*
 - ✓ *odlaganje radioaktivnog otpada.*

Slika 6 Bazen za
privremeno odlaganje
istrošenog goriva
u nuklearnoj elektrani



Faze ciklusa goriva nakon izlaska iz reaktora

30

- Pomoću posebno zaštićenih kontejnera mogu se istrošeni ohlađeni gorivi elementi odvesti iz elektrane u fabriku za preradu istrošenog goriva, i to železnicom ili drumskim vozilima.
- Prerada (recikliranje) goriva se obavlja radi izdvajanja plutonijuma ili urana iz istrošenih gorivih elemenata.
- Istrošeno gorivo je snažno radioaktivno, zato prerada mora biti daljinski upravljana i automatizovana.
- Izdvojeni materijal, plutonijum i uran, moraju da se na kraju dobiju “nuklearno” čisti, kako bi mogli da se upotrebe za izradu goriva.

Faze ciklusa goriva nakon izlaska iz reaktora

31

- Dugoročno čuvanje, odnosno odlaganje radioaktivnog otpada je poslednja faza ciklusa goriva, ali i jedno od najprobematičnijih pitanja u vezi sa korišćenjem fisione energije.
- Nužnost nadzora nad radioaktivnim otpadom kroz dugi vremenski period, čak i vekovima, za neke je glavni argument protiv korišćenja atomske energije. Kao radioaktivni otpad, konačno se odlažu sastojci goriva koje je prerađeno.
- Za trajno odlaganje radioaktivnog otpada posmatrane su različite metode, od kojih su neke i realizovane:
 - odlaganje u okeanima (u dubokim vodama ili u tektonskim rovovima);
 - odlaganje u geološkim formacijama na kopnu (duboke, bušotine, ležišta soli);
 - odlaganje u antartički led;
 - odlaganje u kosmos.
- Faze konverzije i obogaćenja izostaju kod reaktora sa prirodnim uranom.

Uticaj na prirodnu sredinu

32

- Da bi se što više smanjio nepovoljan uticaj nuklearnih elektrana na okolinu i čoveka, primenjuju se posebne mere bezbednosti od samog početka procesa, vađenja rude, pa do kraja, konzervisanja elektrane nakon završetka životnog veka i trajnog odlaganja nuklarnog otpada.
- Međutim, uz sve mere bezbednosti, dešavaju se havarije (akcidenti), sa manjim ili većim posledicama (prisetimo se velike katastrofe koje je izazvala havarija nuklearnog reaktora u Černobilu u Ukrajini 1986. godine; oktazivanje uređaja u nuklearnoj elektrani Fukušima u Japanu 2011. godine).
- Analize i studije o uticaju nuklearnih elektrana na okolinu i ljude svode se na sledeće glavne teme:
 - uticaj elektrane na okolinu u normalnom pogonu,
 - opasnost od kvarova i njihove posledice,
 - opasnost od sabotáže, zemljotresa i vojnog napada,
 - sigurnost prevoza, spremanja i odlaganja radioaktivnog otpada,
 - odvajanje nuklarnog goriva za vojnu upotrebu.

Literatura

33

- M. Milanković, D. Perić, I. Vlajić-Naumovska, “*Osnovi elektroenergetike*”, Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd, 2016.