

Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama

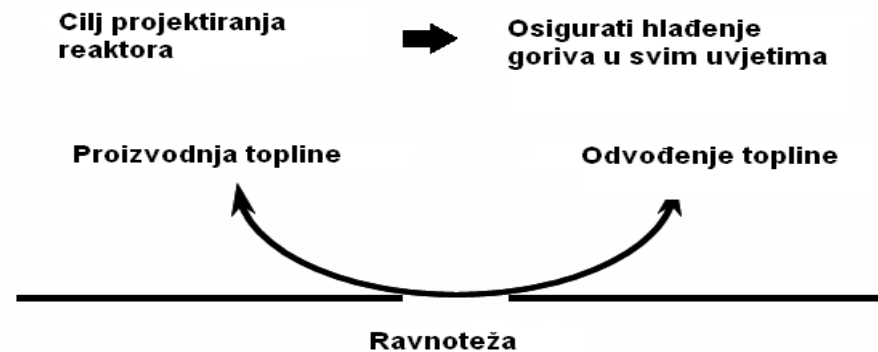
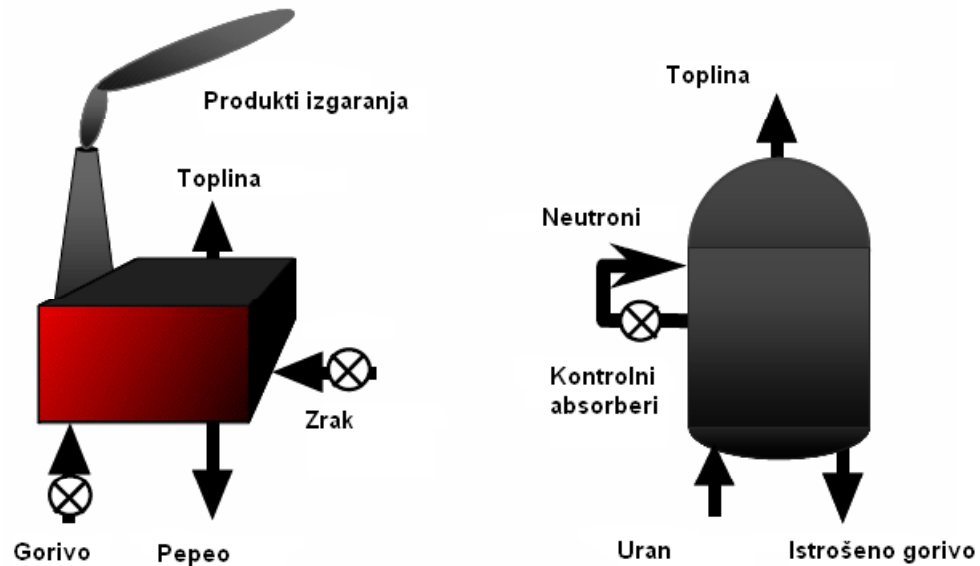
Tipovi Nuklearnih elektrana – II
Energijske tehnologije
FER 2008.



Sadržaj

- Podjela nuklearnih elektrana
- PWR elektrane
- BWR elektrane
- Teškovodni reaktori
- Brzi reaktori
- Sigurnost nuklearnih elektrana
- Dodatak: Fuzijski uređaji

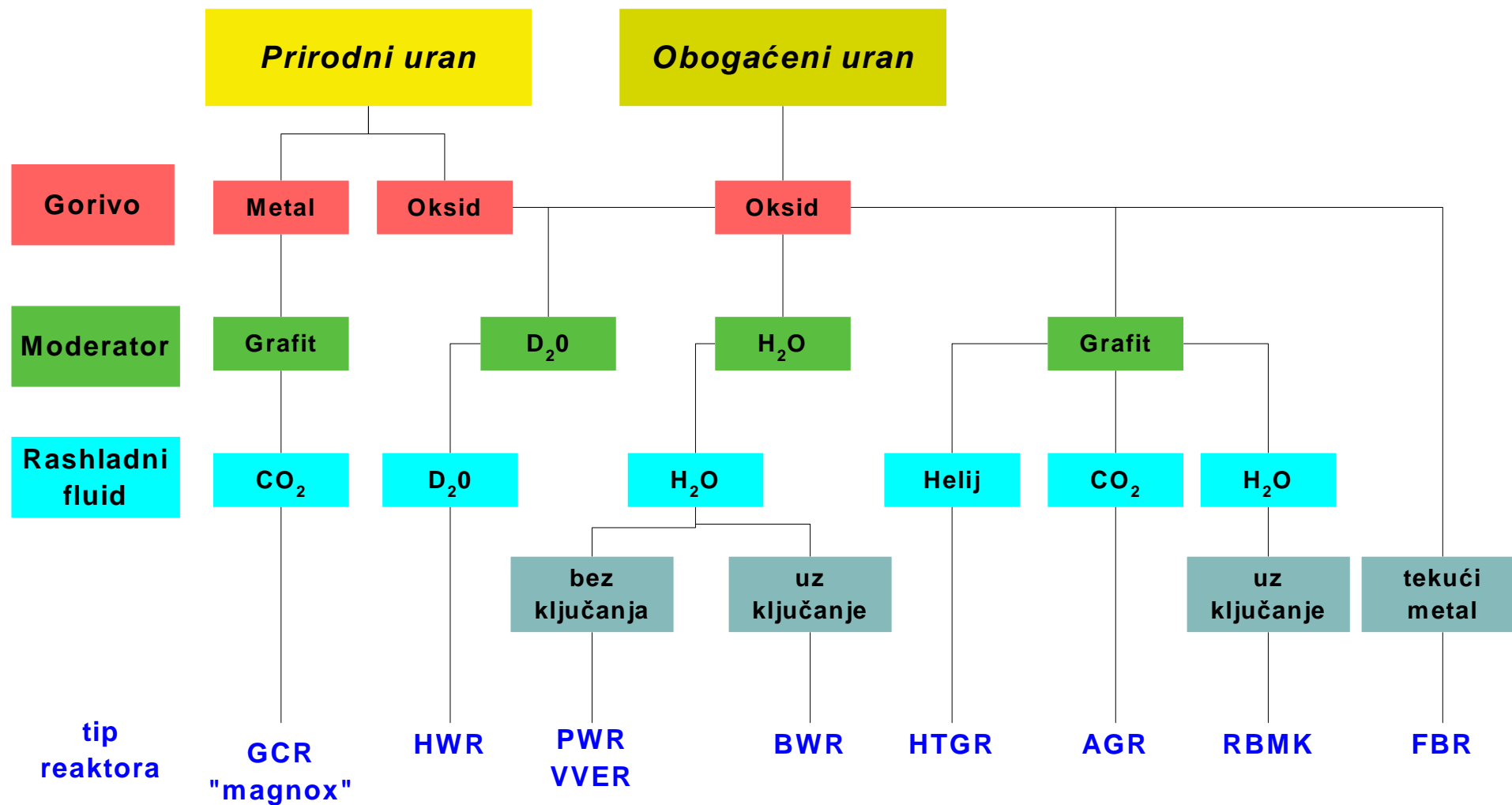
Usporedba klasične i nuklearne termoelektrane



Tipovi reaktora

- **Reaktori se mogu podijeliti:**
 - prema tipu goriva
 - korištenom hladiocu (rashladnom sredstvu)
 - potrebi za usporavanje neutrona
 - brzi reaktori
 - termički reaktori (tip moderatora)
 - namjeni reaktora
 - istraživački reaktori,
 - proizvodnja električne energije i/ili topline,
 - proizvodnja nuklearnog materijala
 - proizvodnja vodika
 - desalinizacija
- **Da se osigura lančana reakcija potrebno je:**
 - imati odgovarajuću količinu goriva
 - ograničiti apsorpciju neutrona
 - ograničiti bijeg neutrona (kritične dimenzije reaktora i reflektor)

Kriteriji za podjelu NE



Gorivo

- U-235 gorivo – obogaćenje (maseni udjel U-235 u uranu):
 - prirodni uran: 0.7% U-235, 99.3% U-238
 - obogaćeni U-235 (do 5% težinski)
- Mješavina urana i plutonija Pu-239 (MOX – Mixed OXide)
- U-233 gorivo (moguća proizvodnja u reaktoru iz torija-232.)
- **Forme goriva:**
 - metal, keramika (oksid npr UO_2 , PuO_2 , uran karbid)
 - cilindrične tablete, šipke, kuglice, homogena mješavina uranovih soli
- U sadašnjim NE koristi se približno 1% potencijala fisijske energije
- Odgor goriva se izražava u MWd/tU (tipično za LWR oko 60 GWd/tU)
- U teškovodnim reaktorima približno 50% energije iz fisije Pu
- U lakovodnim na kraju ciklusa oko 30-40% energije dolazi od Pu

Moderator

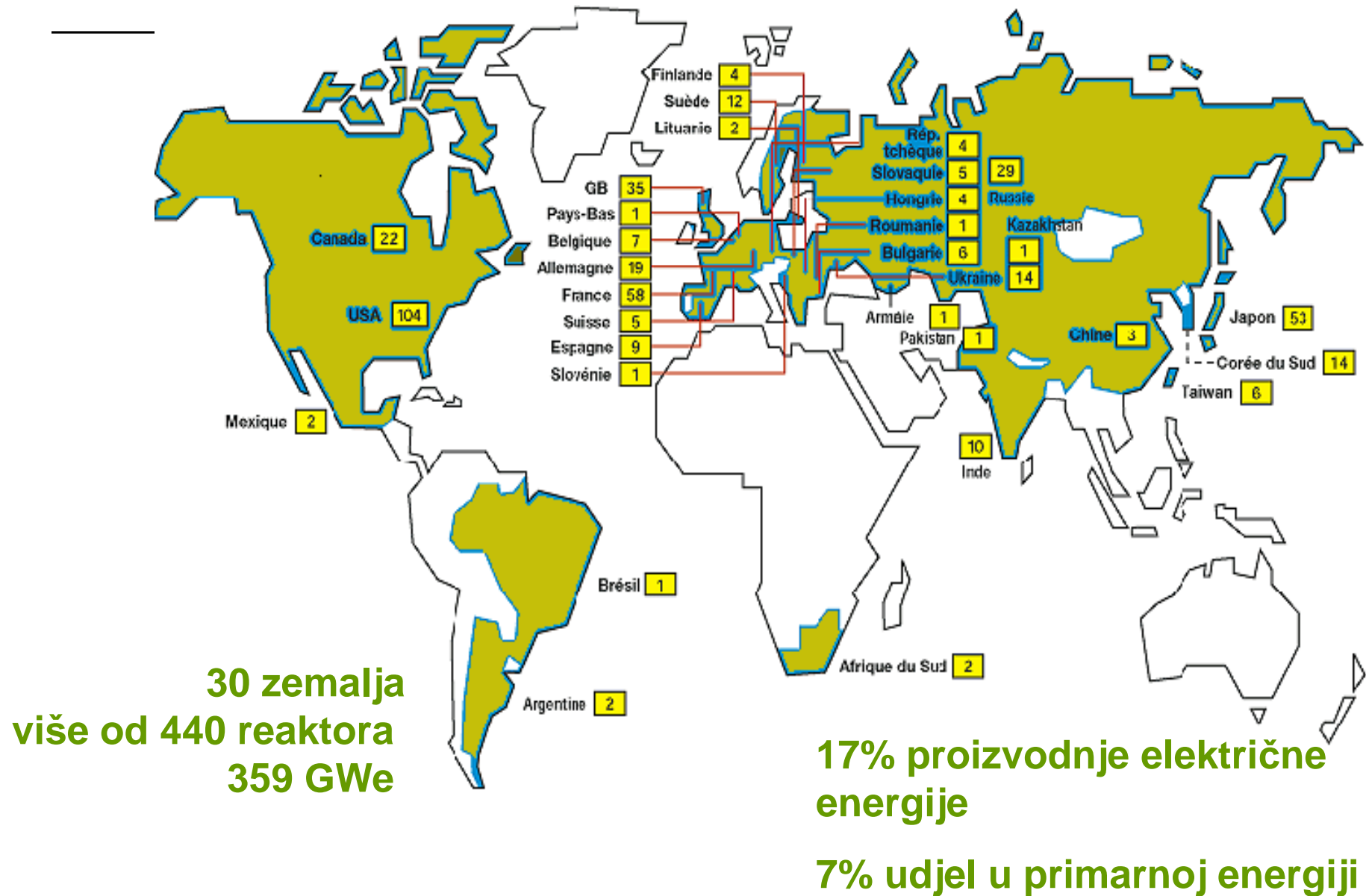
- Koristi se u reaktorima s termičkim neutronima (ispod 0.625 eV) da se poveća vjerojatnost fisije
- Usporiti neutrone elastičnim sudarima uz minimalnu apsorpciju
- **Obična voda** (H₂O) – lakovodni reaktori (LWR- Light Water Rector): reaktor s vodom pod tlakom PWR (Pressurized Water Reactor) i reaktor s vodom koja ključa BWR (Boiling Water Reactor), dobro usporava neutrone ali ih i absorbira, traži obogaćeno gorivo, kompaktna jezgra
- **Teška voda** (D₂O) – teškovodni reaktori (HWR Heavy Water Reactor), manje efikasno usporavanje i mala apsorpcija neutrona, zastupljenost u prirodi: na 6700 atoma običnog vodika dođe jedan atom deuterija, reaktor većih dimenzija
- **grafit** (C) – grafitom moderirani reaktori, manje efikasno usporavanje i mala apsorpcija neutrona, reaktor velikih dimenzija
- **berilij** (Be) – specijalne izvedbe reaktora
- **bez moderatora** – razne izvedbe brzih reaktora

Rashladno sredstvo

- Odvesti toplinu iz jezgre reaktora i osigurati transformaciju u neki drugi oblik energije
- Obična voda
- Teška voda
- Plin: CO₂, helij
- Tekući metali: natrij, olovo, olovo-bismut
- Rastopljene soli

- Homogena i heterogena konfiguracija reaktora:
 - kriterij, postoji li jasna granica između moderatora/rashladnog sredstva i goriva

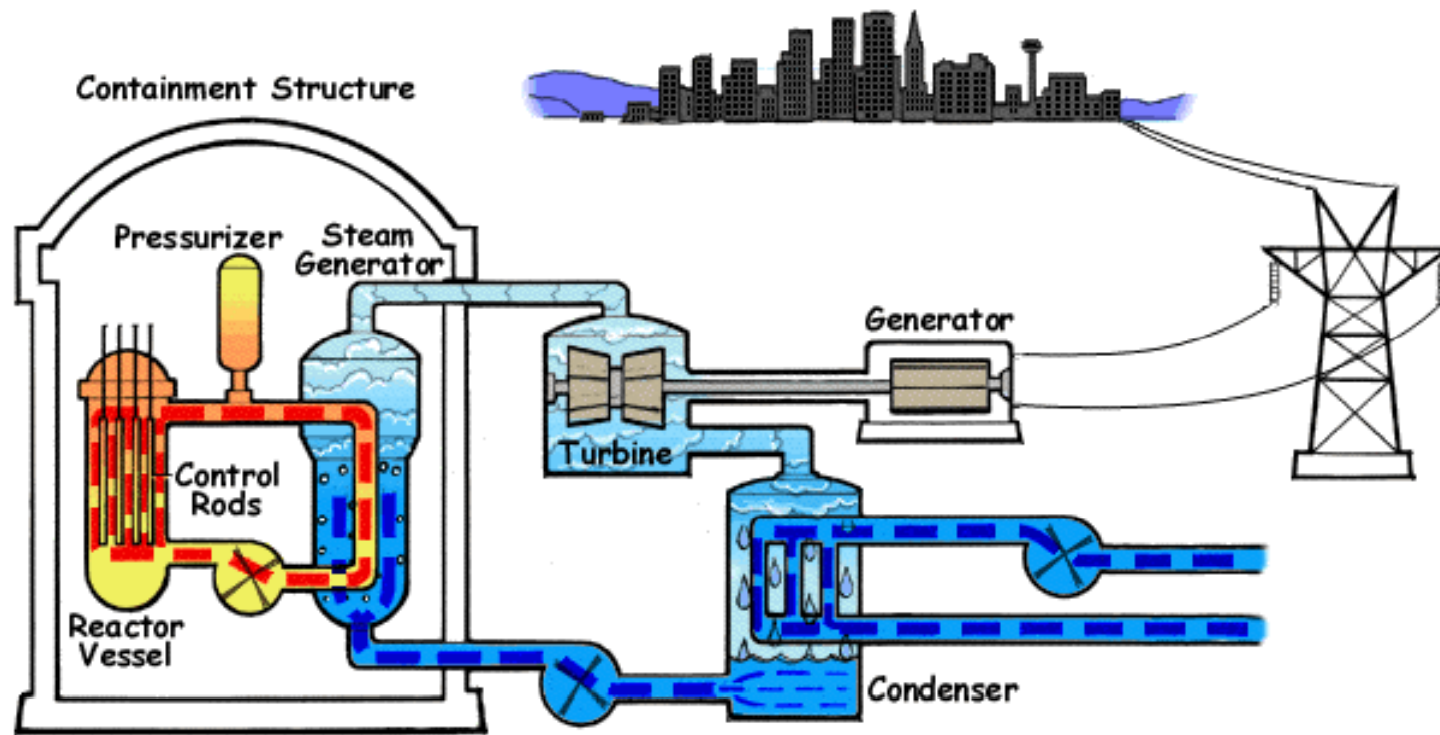
Zastupljenost NE u svijetu



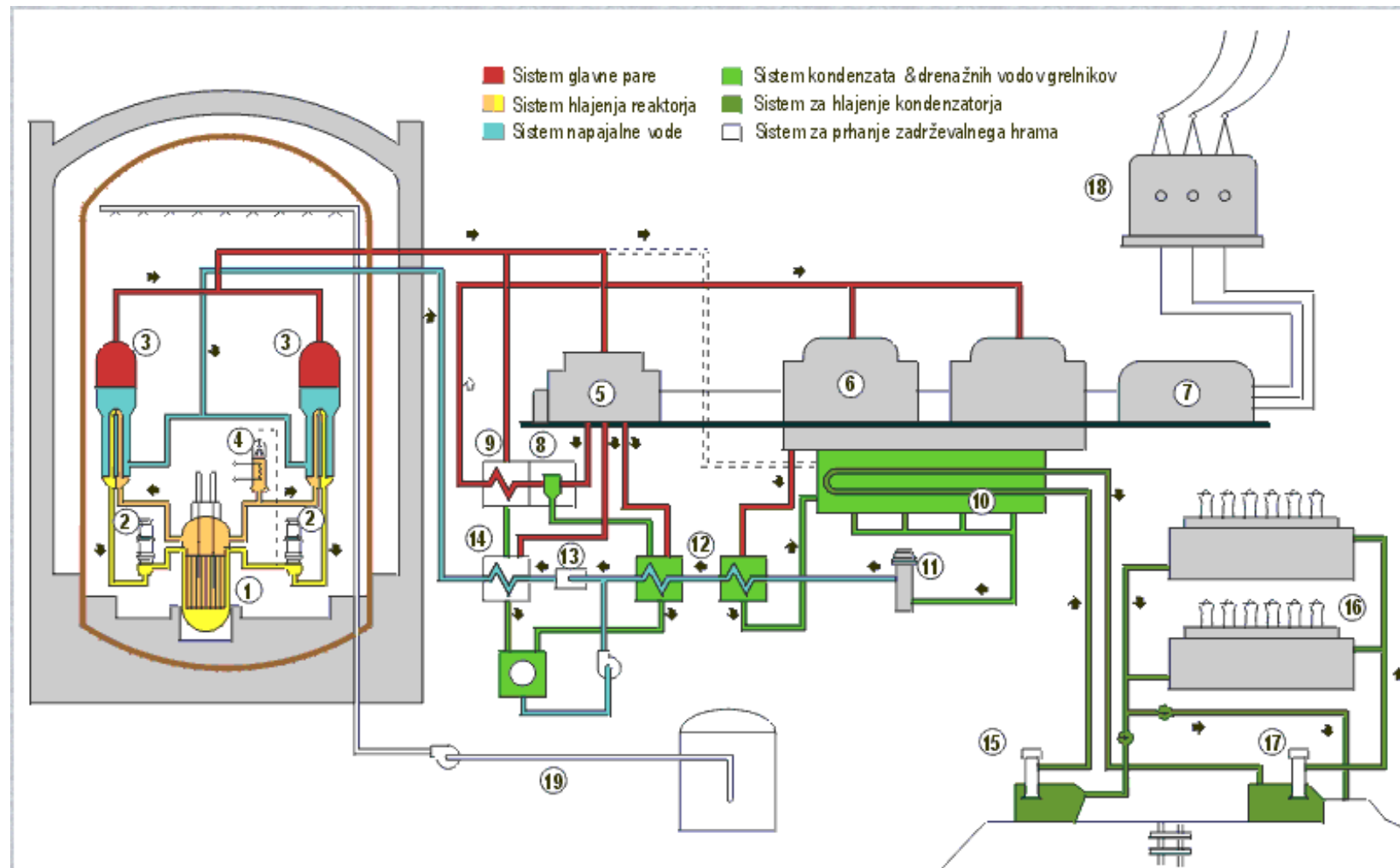
Generacije NE

- Podjela nuklearnih elektrana prema projektnim karakteristikama odnosno prema vremenu ulaska u komercijalni pogon u 4 generacije:
 - prva generacija uključuje prototipna postrojenja koja su u pogon ulazila pedesetih godina 20. stoljeća
 - nuklearna energetska postrojenja u pogonu krajem 20. i početkom 21. stoljeća elektrane su druge generacije (tu pripada i NE Krško)
 - treća generacija nuklearnih elektrana su postrojenja napredne izvedbe koja koriste poboljšanja postojeće tehnologije kojima se poboljšava sigurnost i ekonomičnost, kao što je npr. intenzivnija upotreba oblika pasivne sigurnosti
 - elektrane četvrte generacije ući će u pogon nakon 30-te godina 21. stoljeća

NE PWR – princip rada



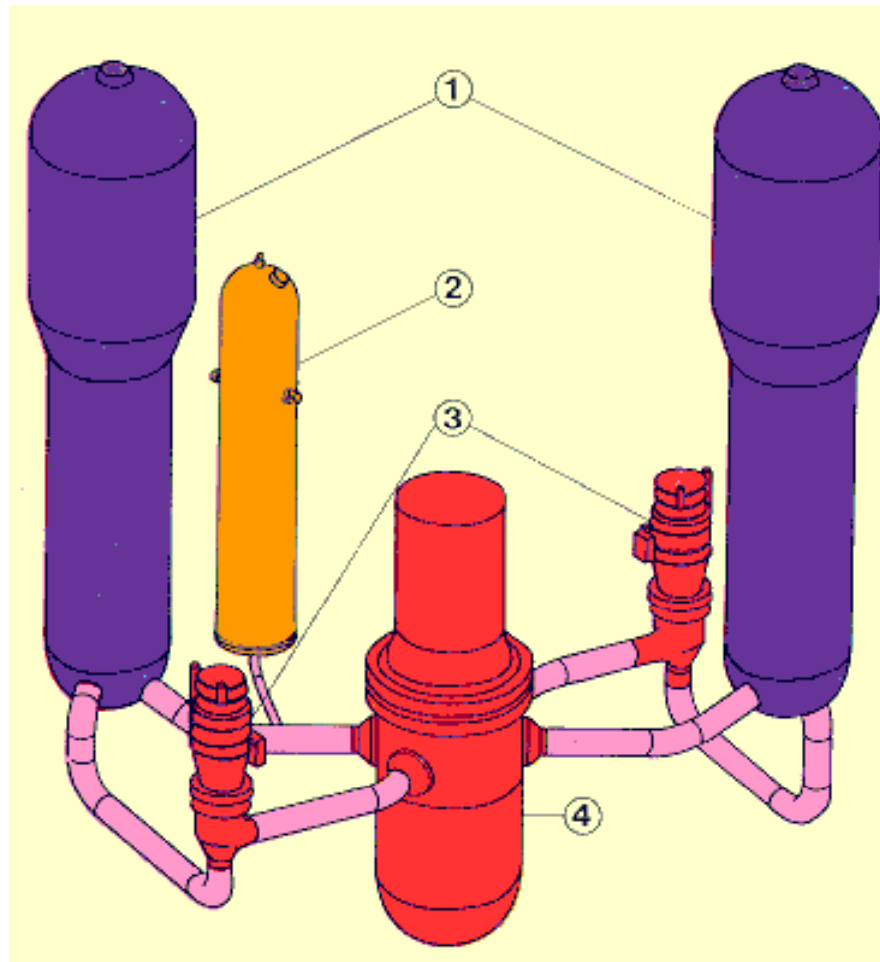
Funkcionalna shema NE Krško



PWR – glavne komponente

- reaktorska posuda
- parogeneratori
- tlačnik
- reaktorske pumpe
- cjevovodi

Primarni rashladni krug



Primarni i sekundarni krug

Koncepcija rashladne petlje

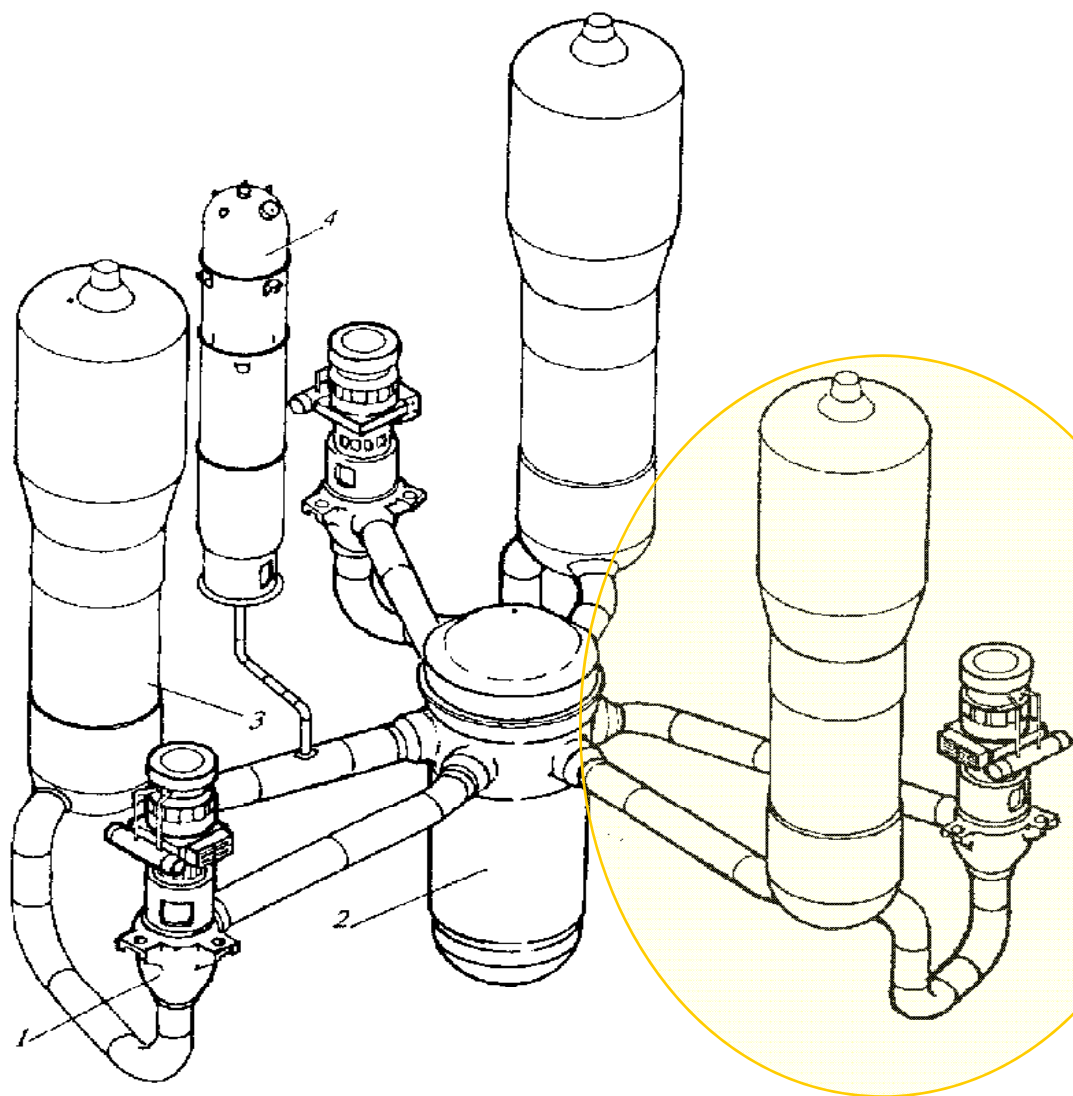
Približna snaga po jednoj
petlji 300 MWe

Izmjena goriva za vrijeme
obustave svakih 12, 15 ili
18 mjeseci

Količina goriva u jezgri: oko
90 t U za NE 1000 MWe

Obogaćenje U-235 do 5%

Stupanj djelovanja oko 33%



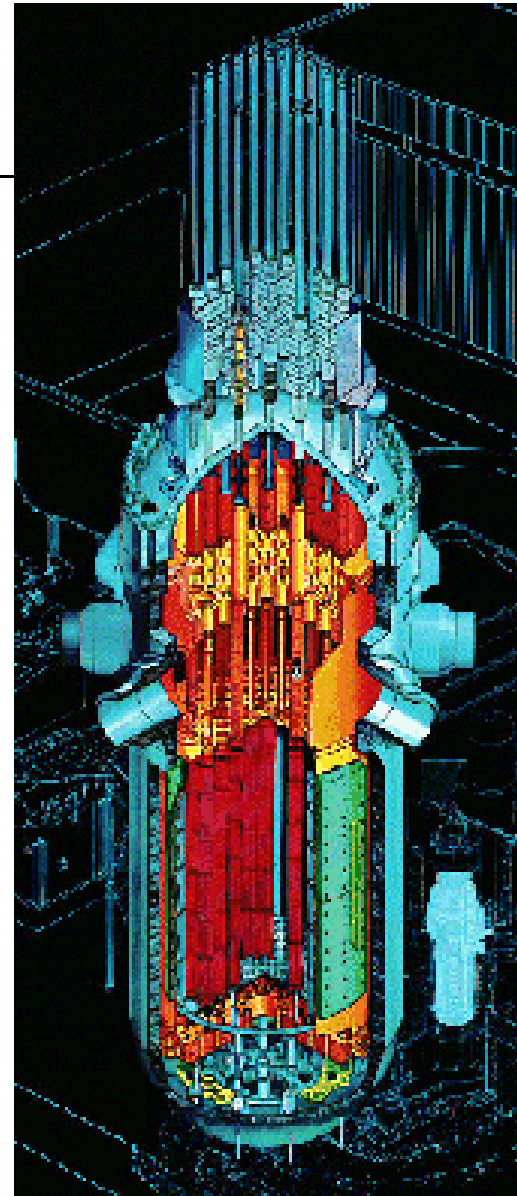
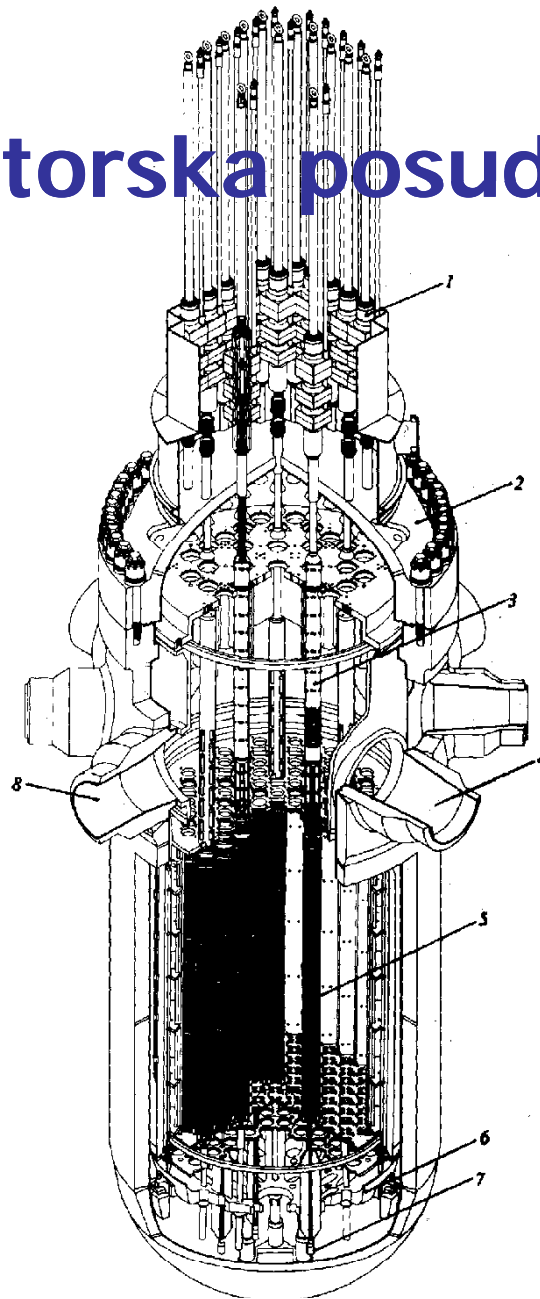
Tipični parametri PWR-a:

- snage 500 do 1500 MWe
- tlak 15 do 16 MPa
- prosječna temp. hladioca 580 K
- promjena temp. u reaktoru i parogeneratoru 40 do 50 K
- protok po rashl. krugu 6 m³/s

Snaga petlje oko 300 MWe
izvedbe s 2, 3 i 4 petlje

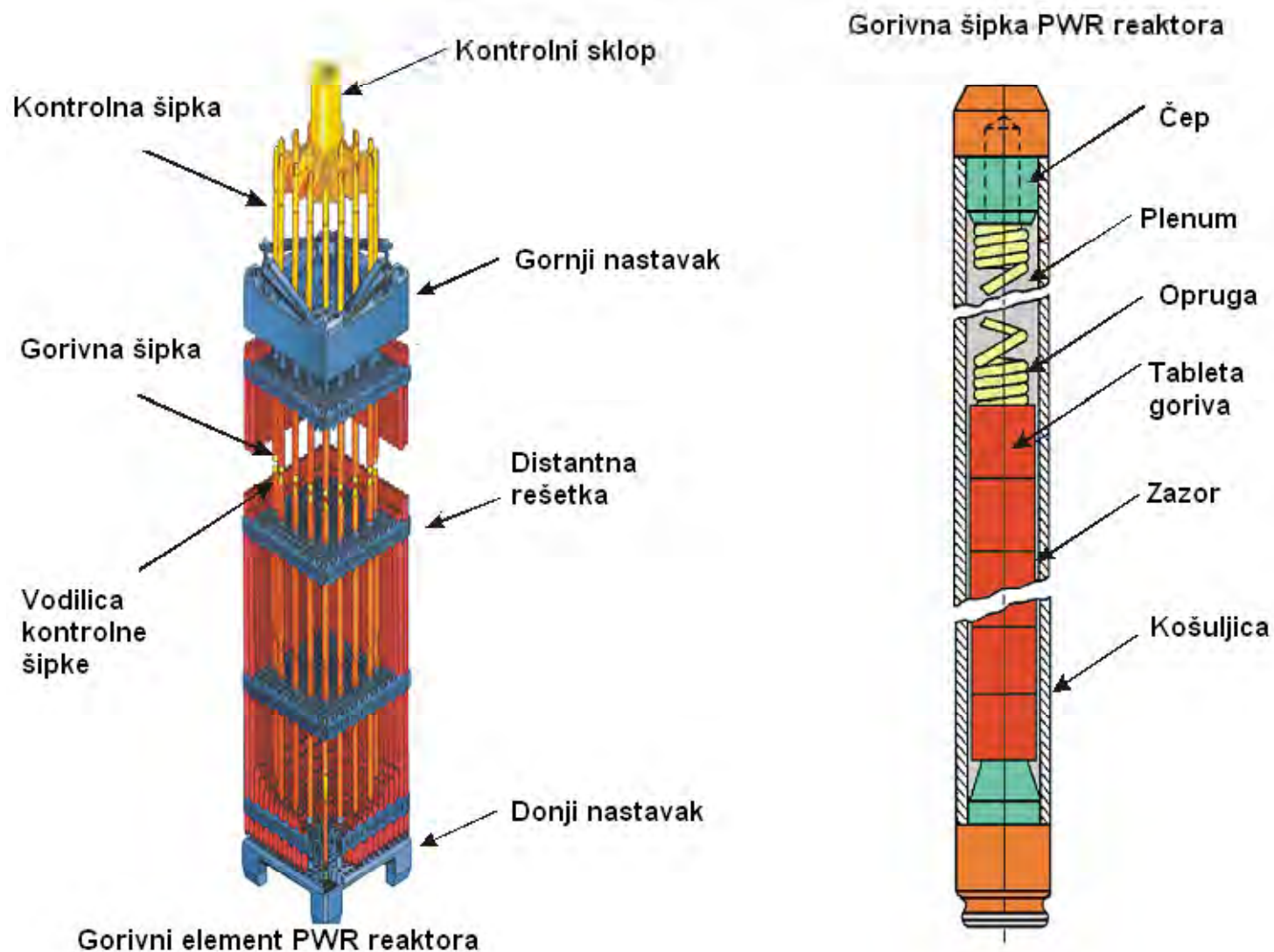
Slika 3.2.2. Prostorni raspored osnovnih komponenta reaktorskog postrojenja s tlakovodnim reaktorom (PWR) i tri rashladna kruga: 1 – cirkulacijska pumpa, 2 – nuklearni reaktor, 3 – parogenerator, 4 – tlačnik.

Reaktorska posuda

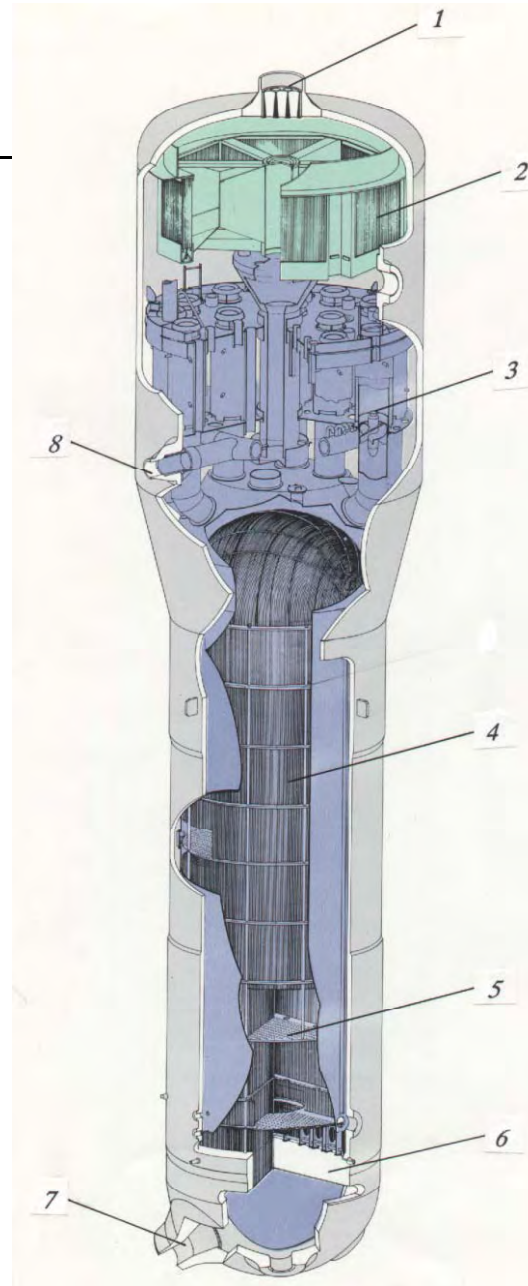


Slika 3.3.5. Tlakovodni reaktor (PWR): 1 – elektromagneti za pogon regulacijskih sklopova, 2 – poklopac reaktorske posude, 3 – vodilice regulacijskih sklopova, 4 – ulaz rashladnog sredstva, 5 – gorivni element, 6 – donja potpora jezgre, 7 – neutronske detektore.

Gorivni element i gorivna šipka



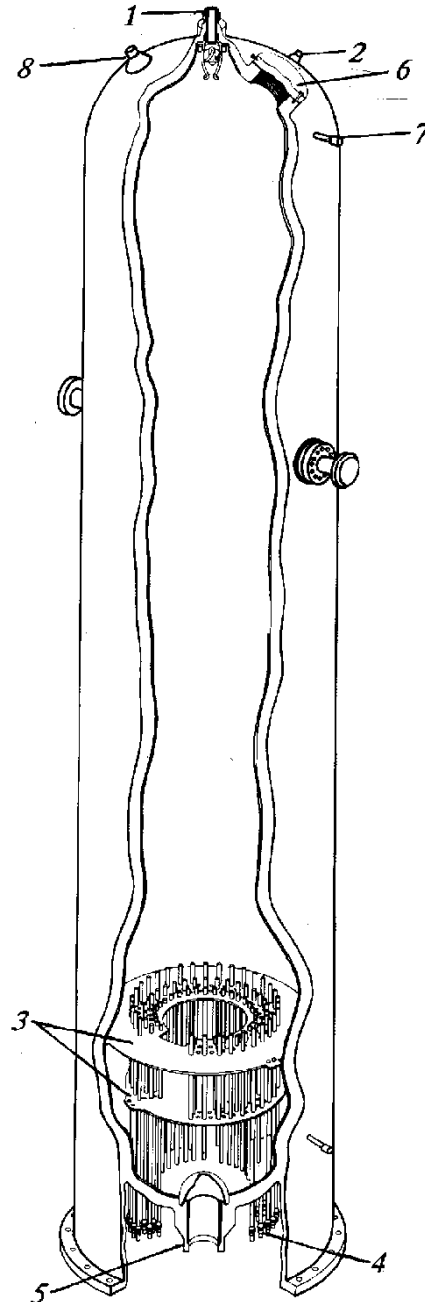
Parogenerator



Parogenerator PWR-a:

1. izlaz pare
2. sušionik pare
(promjena smjera protoka)
3. separator vlage
(rotacijsko kretanje, centrif.s.)
4. cijevni snop
5. potporna rešetka
6. cijevna stijenka
7. ulaz primarnog fluida
8. ulaz pojne vode

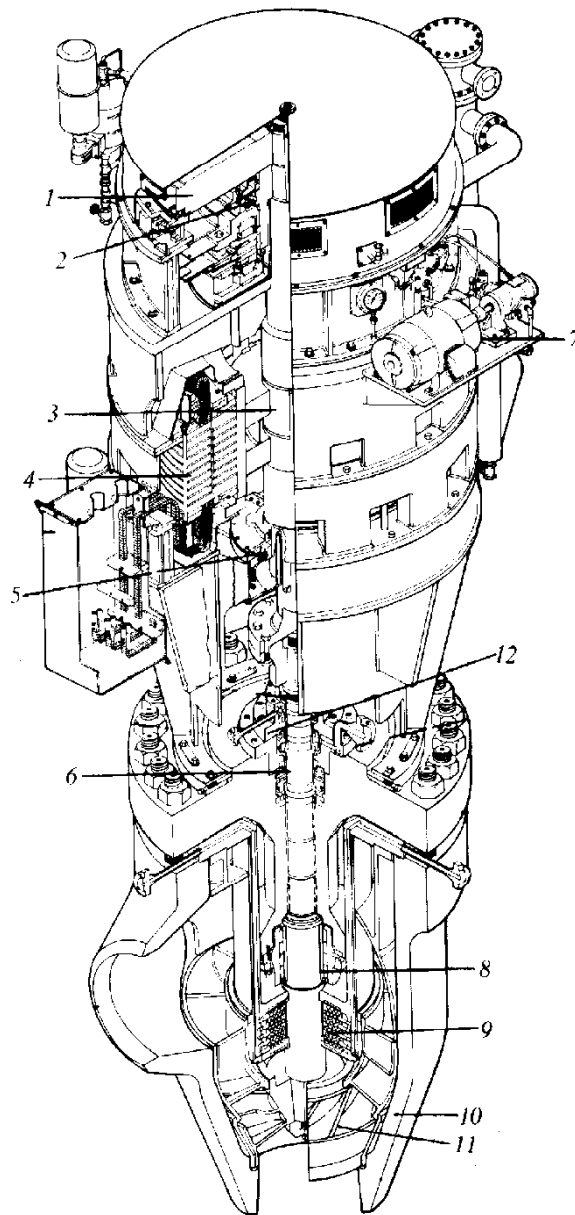
Tlačnik



- Osigurava konstantan tlak

- volumen posude 40-60 m³
- promjer 2-2,5 m
- debljina stijenke 100 mm
- snaga el. grijača 1 - 2 MW

Rashladna pumpa



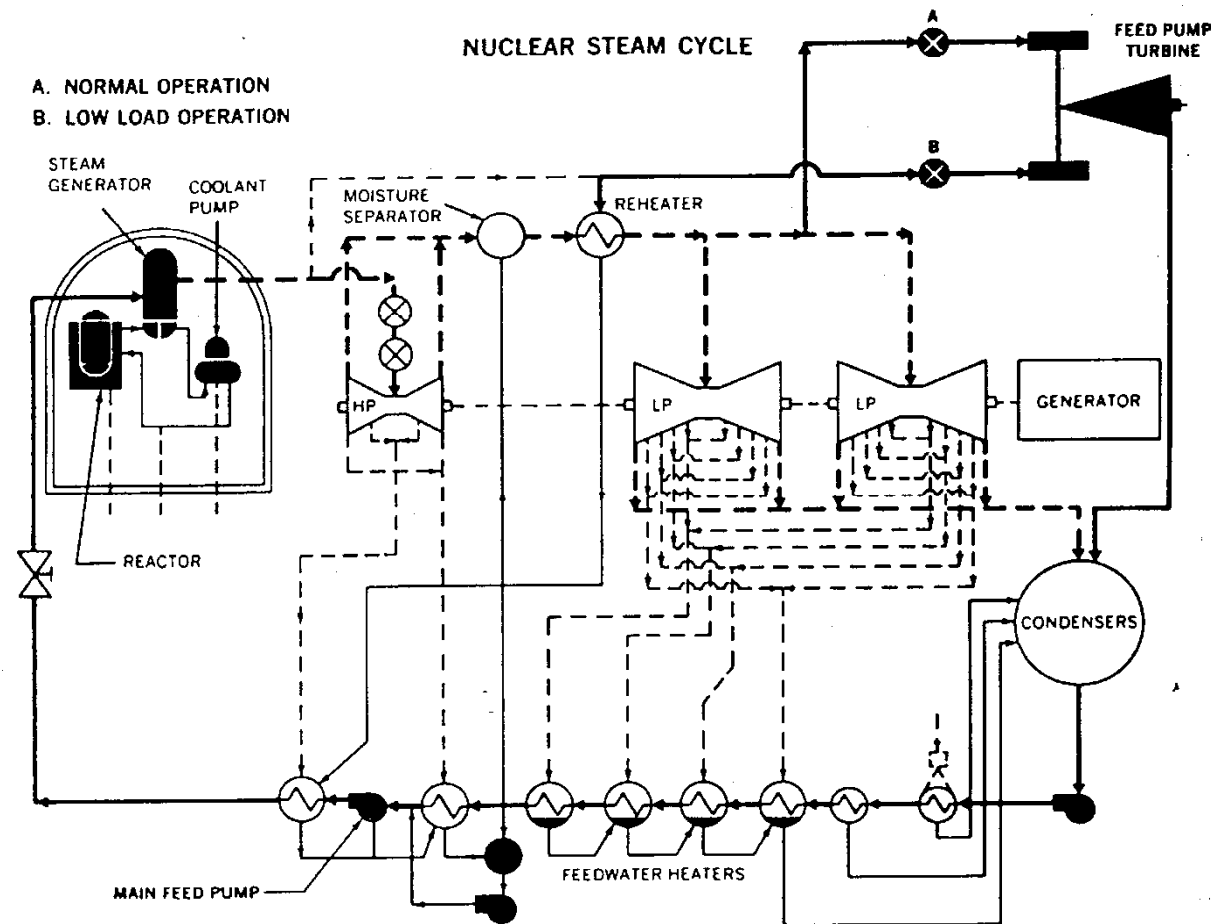
Cirkulira rashladno sredstvo:

- centrifugalna pumpa
- pogonjena asinkronim motorom
- snaga pogonskog motora 6 do 7 MW
- protok kroz pumpu oko $6,5 \text{ m}^3/\text{s}$
- razlika tlaka fluida na pumpi 0,9 - 1 MPa
- visina 8,5 m
- masa oko 100 tona

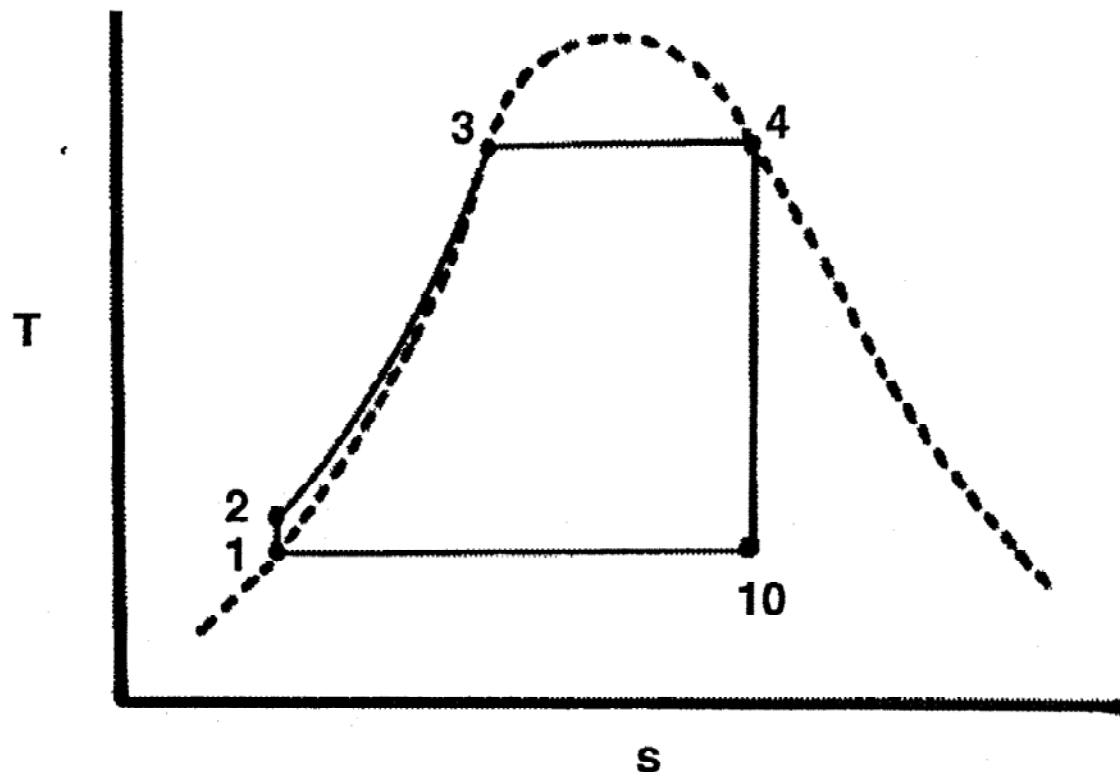
Slika 3.3.16. Pumpa rashladnog fluida reaktora: 1 – zamašnjak, 2 – gornji radijalni ležaj, 3 – osovina motora, 4 – stator motora, 5 – donji radijalni ležaj, 6 – osovina pumpe, 7 – pumpa za ulje, 8 – ležaj pumpe, 9 – hladnjak, 10 – kućište pumpe, 11 – rotor pumpe, 12 – brtve na osovini.

Sekundarni dio NE

- Rankineov ciklus sa zasićenom parom
- Niži tlakovi i temperature nego za odgovarajuću TE



Rankine-ov ciklus sa zasićenom parom



Dovedena toplina $q_{in}=h_4-h_2$

Rad turbine $w_{turb}=h_4-h_{10}$

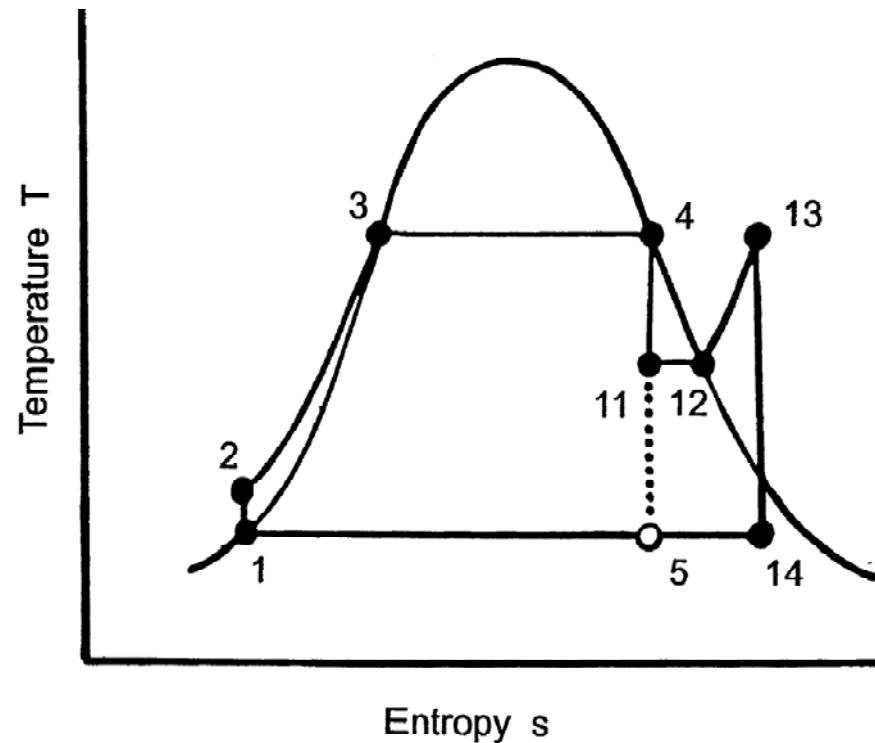
Rad pumpe $w_{pump}=h_1-h_2$

Odvedena toplina $q_{out}=h_{10}-h_1$

Stupanj djelovanja

$$\eta=(w_{turb}-|w_{pump}|)/q_{in}$$

Rankine-ov ciklus sa zasićenom parom, separacijom i pregrijanjem pare



Dovedena toplina $q_{in} = h_4 - h_2 + h_{13} - h_{12}$ Rad turbine $w_{turb} = h_4 - h_{11} + h_{13} - h_{14}$

Rad pumpe $w_{pump} = h_1 - h_2$

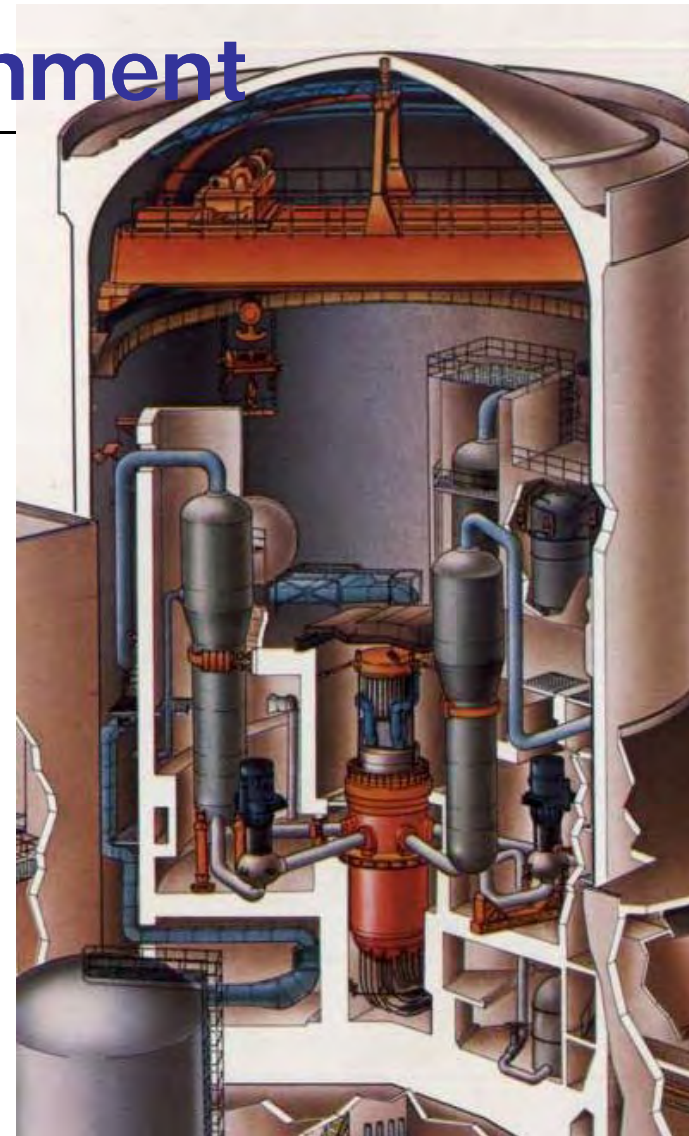
Odvedena toplina $q_{out} = h_{14} - h_1$

Stupanj djelovanja $\eta = (w_{turb} - |w_{pump}|) / q_{in}$

Zaštitna zgrada - kontejnment

Zaštititi primarni krug od vanjskog djelovanja (projektirana da izdrži pad aviona)

Zaštititi okolinu od radioaktivnog zagađenja u slučaju kvara u postrojenju (nepropusna do nadtlaka od 3 bara)



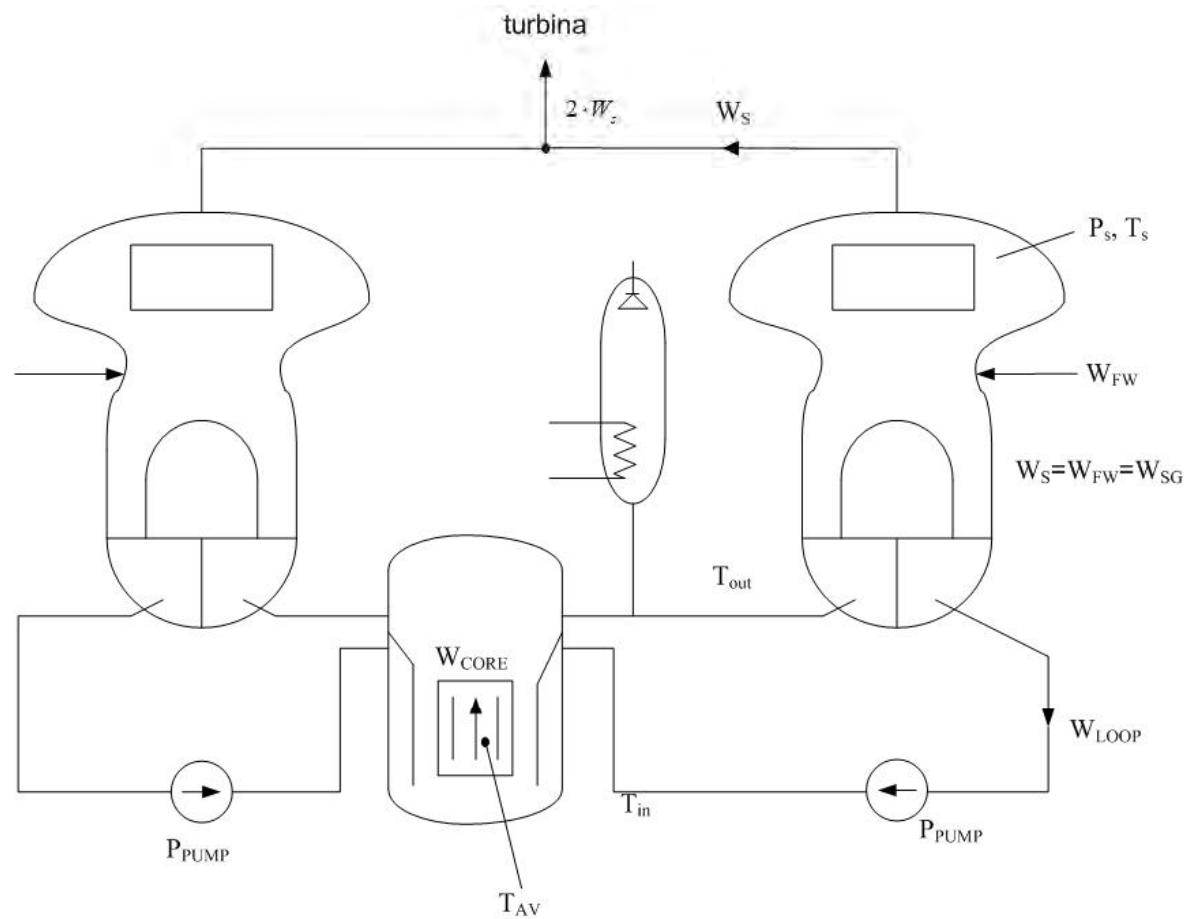
Razmještaj objekata na lokaciji NE



Zadatak: PWR

- Nuklearna elektrana s 2 rashladne petlje i PWR reaktorom ima električnu snagu na pragu 632 MWe. Ako je ukupna efikasnost pretvorbe toplinske energije u električnu (uzevši u obzir sve gubitke i vlastitu potrošnju) $\eta=33.58\%$, izračunati: toplinsku snagu jezgre, protok pare po parogeneratoru, ukupni protok primarnog rashladnog sredstva i srednju temperaturu hladioca na primarnoj strani.
- Poznati su sljedeći podaci: svaka od dvije primarne pumpe unosi u sustav po 3 MW toplinske energije, temperatura hladioca na ulazu u jezgru je $T_{ul}=560.3\text{ K}$, entalpija pojne vode je $h_{vode}=9.508 \cdot 10^5\text{ J/kg}$, entalpija zasićene pare u parogeneratoru je $h_{pare}=2.78868 \cdot 10^6\text{ J/kg}$, tlak i srednja temperatura na sekundarnoj strani parogeneratora su $p_s=5.6\text{ MPa}$ i $T_s=544.24\text{ K}$. Pretpostaviti da je efektivni specifični toplinski kapacitet primarnog hladioca $c_p=5.8855\text{ kJ/kgK}$, a da je efektivni toplinski otpor za prijelaz topline kroz cijevi parogeneratora $R_T=0.037\text{ K/MW}$.

Zadatak: PWR - rjesenje



Zadatak: PWR - rješenje

Stupanj djelovanja

$$\eta = P_E / (P_{\text{jezgre}} + 2P_{\text{pumpe}}),$$

Snaga jezgre

$$P_{\text{jezgra}} = P_E / \eta - 2P_{\text{pumpe}} = 632. / 0.3358 - 2 * 3 = 1876. \text{ MW}$$

Snaga parogeneratora

$$P_{\text{PG}} = 0.5 P_{\text{jezgre}} + P_{\text{pumpe}} = 938 + 3. = 941. \text{ MW}$$

m_{PG} – maseni protok pare u parogeneratoru

$h_{\text{pare}} - h_{\text{vode}}$ – entalpija zasićene pare i pojne vode

$$P_{\text{PG}} = m_{\text{PG}} (h_{\text{pare}} - h_{\text{vode}}), \text{ pa je}$$

$$m_{\text{PG}} = P_{\text{PG}} / (h_{\text{pare}} - h_{\text{vode}}) = 941. \cdot 10^6 / (2.78868 \cdot 10^6 - 9.508 \cdot 10^5) = 512 \text{ kg/s}$$

T_{sr} i T_{S} srednja temperatura primarne i sekundarne strane

R_T – ekvivalentni toplinski otpor parogeneratora

$$P_{\text{PG}} = (T_{\text{sr}} - T_{\text{S}}) / R_T, \text{ pa je}$$

$$T_{\text{sr}} = P_{\text{PG}} * R_T + T_{\text{S}} = 941. * 0.037 + 544.24 = 579.05 \text{ K.}$$

Porast temperature hladioca u jezgri

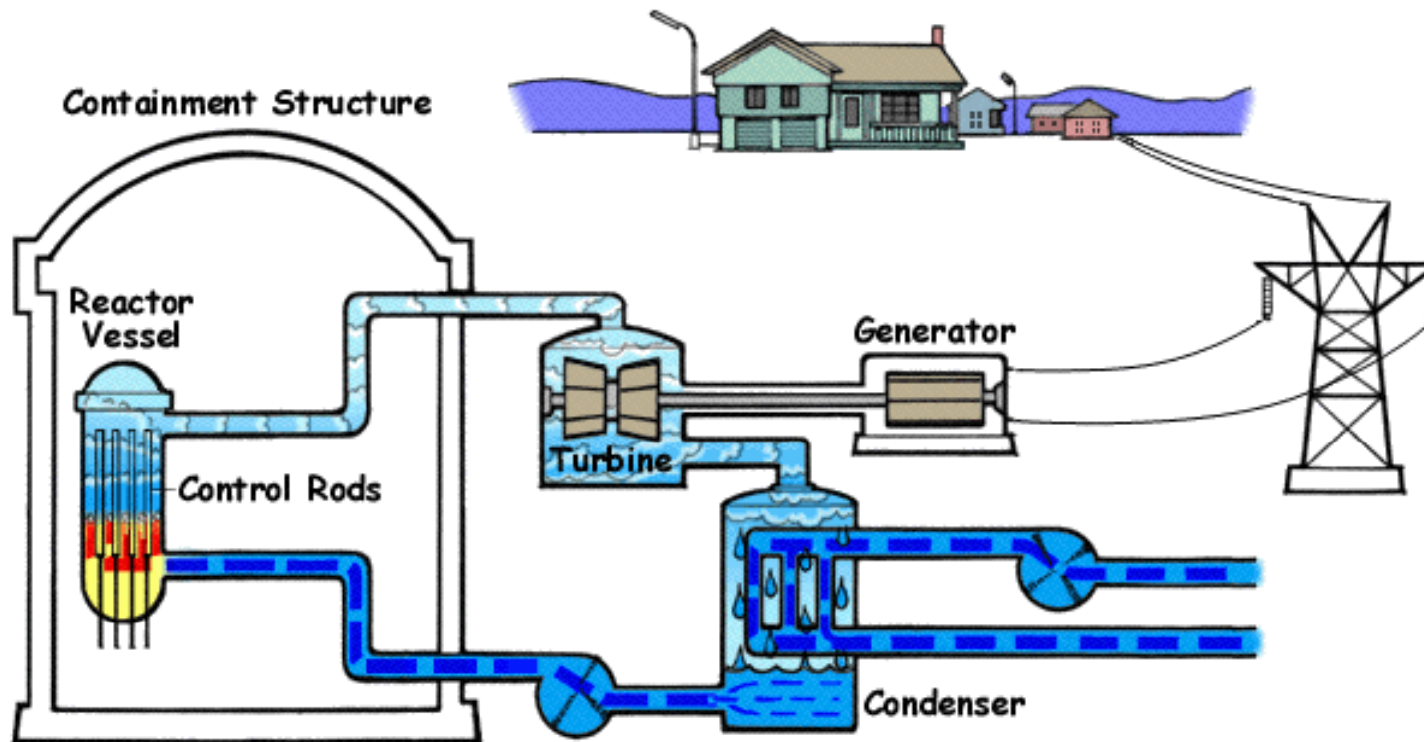
$$\Delta T_{\text{jezgre}} = 2 (T_{\text{sr}} - T_{\text{ul}}) = 2 (579.05 - 560.3) = 37.5 \text{ K}$$

$$P_{\text{jezgra}} = m_{\text{jezgra}} c_p \Delta T_{\text{jezgra}}, \text{ pa je}$$

Maseni protok kroz jezgru

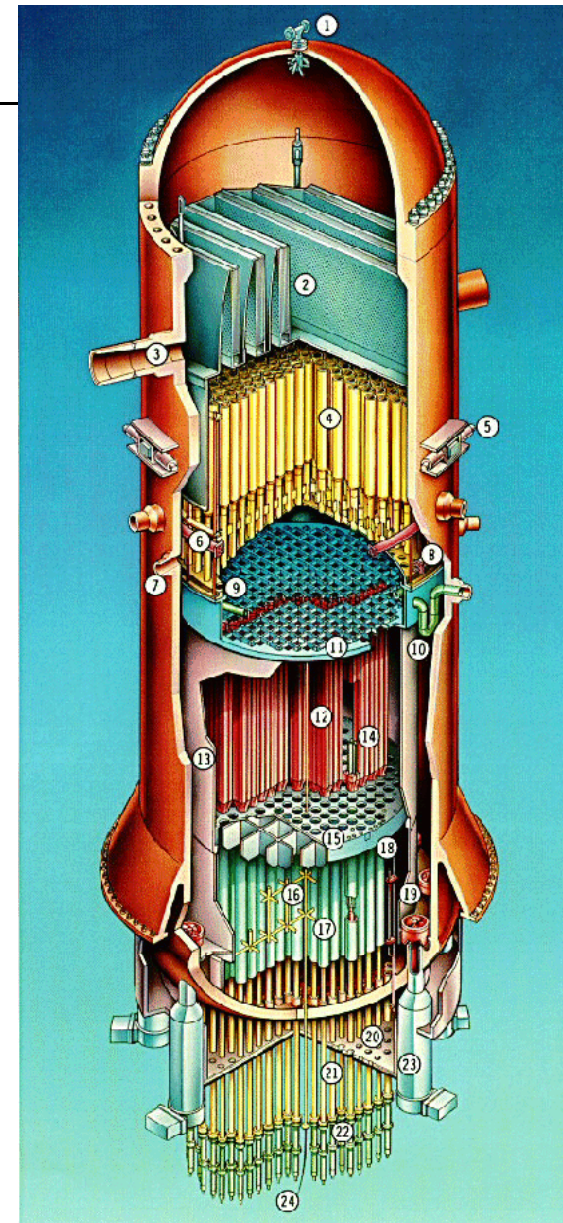
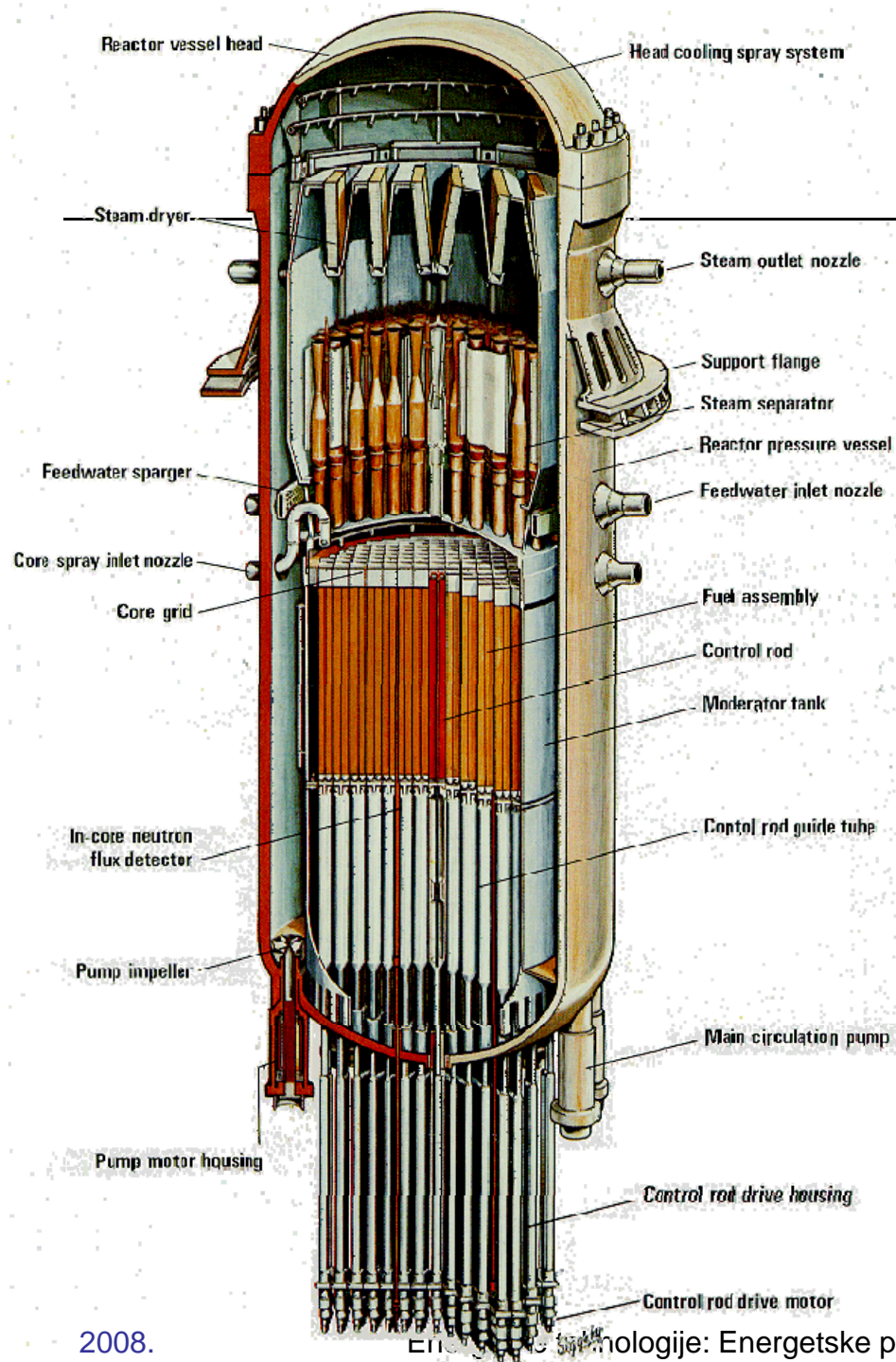
$$m_{\text{jezgra}} = P_{\text{jezgra}} / (c_p \Delta T_{\text{jezgra}}) = 1876. \cdot 10^6 / (5.8855 \cdot 10^3 * 37.5) = 8500. \text{ kg/s.}$$

NE BWR – princip rada



BWR - ukratko

- Drugi tip reaktora po brojnosti,
- Jedinične snage od 300 do 1600 MWe
- Voda isparava u reaktoru
- Direktni ciklus moguća kontaminacija turbine
- Niža gustoća snage u odnosu na PWR
- Velika posuda
- Regulacijske šipke ulaze u jezgru s donje strane
- Recirkulacijske petlje omogućuju regulaciju snage i odgovarajuće hlađenje goriva
- Izvedbe kontejnmenta – manji nego PWR kontejnment, aktivna kondenzacija pare u bazenima
- Nije pogodan za nuklearnu propulziju pa je razvijen isključivo za proizvodnju električne energije
- Ostala svojstva slična kao PWR



Strujanje hladioca u posudi BWR-a

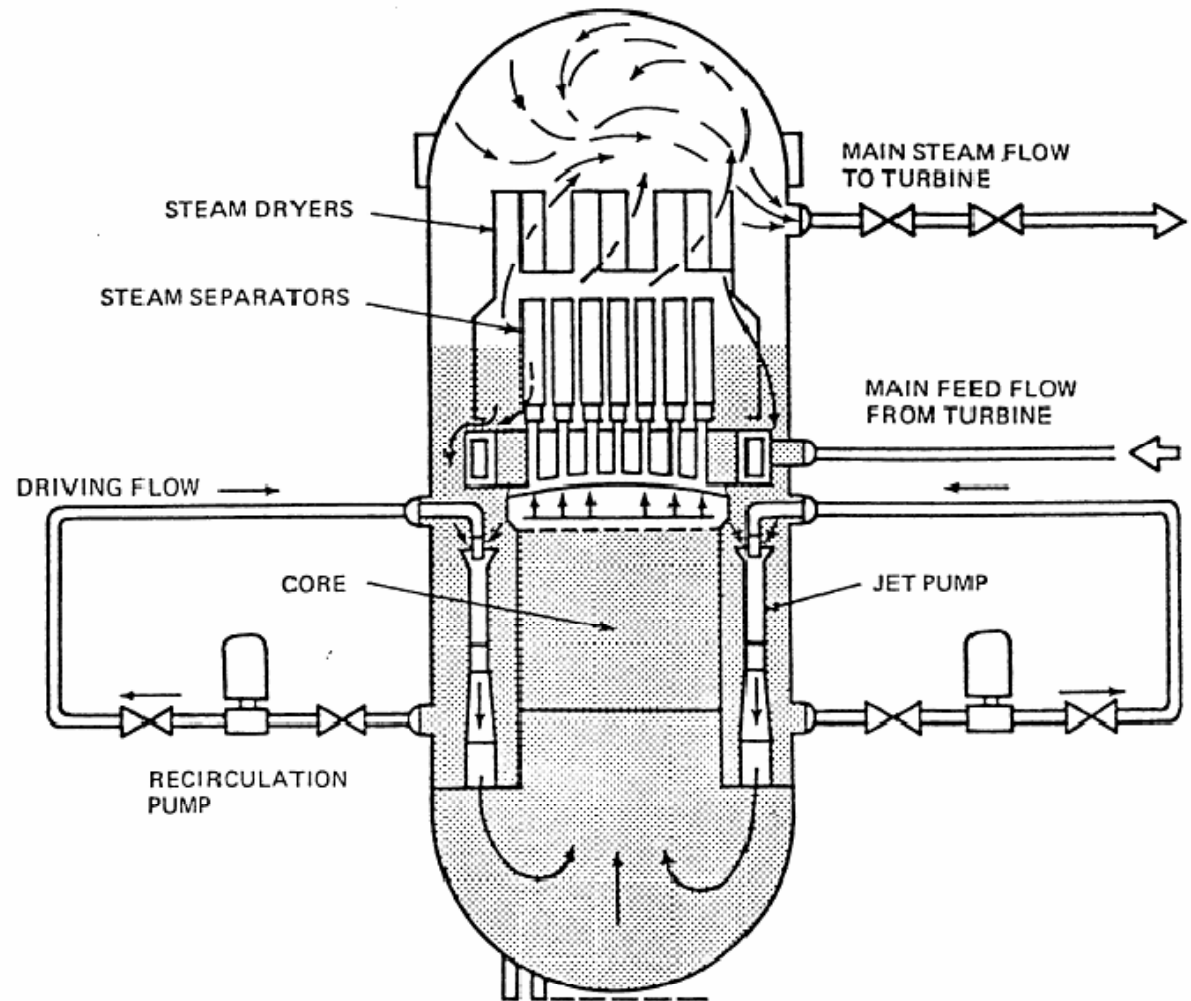
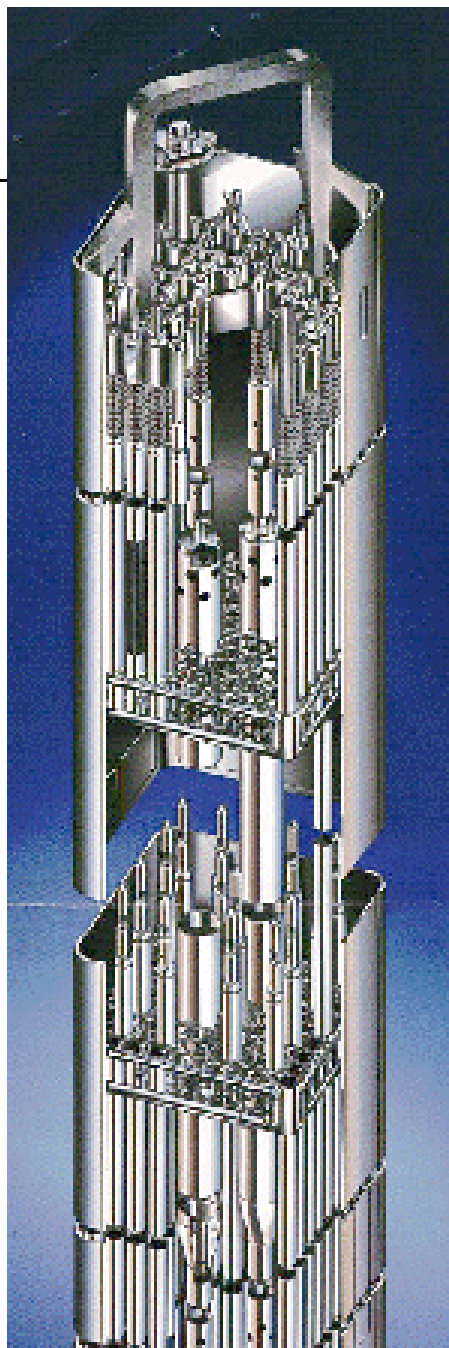


Figure 10-17 BWR reactor vessel internal flow paths.



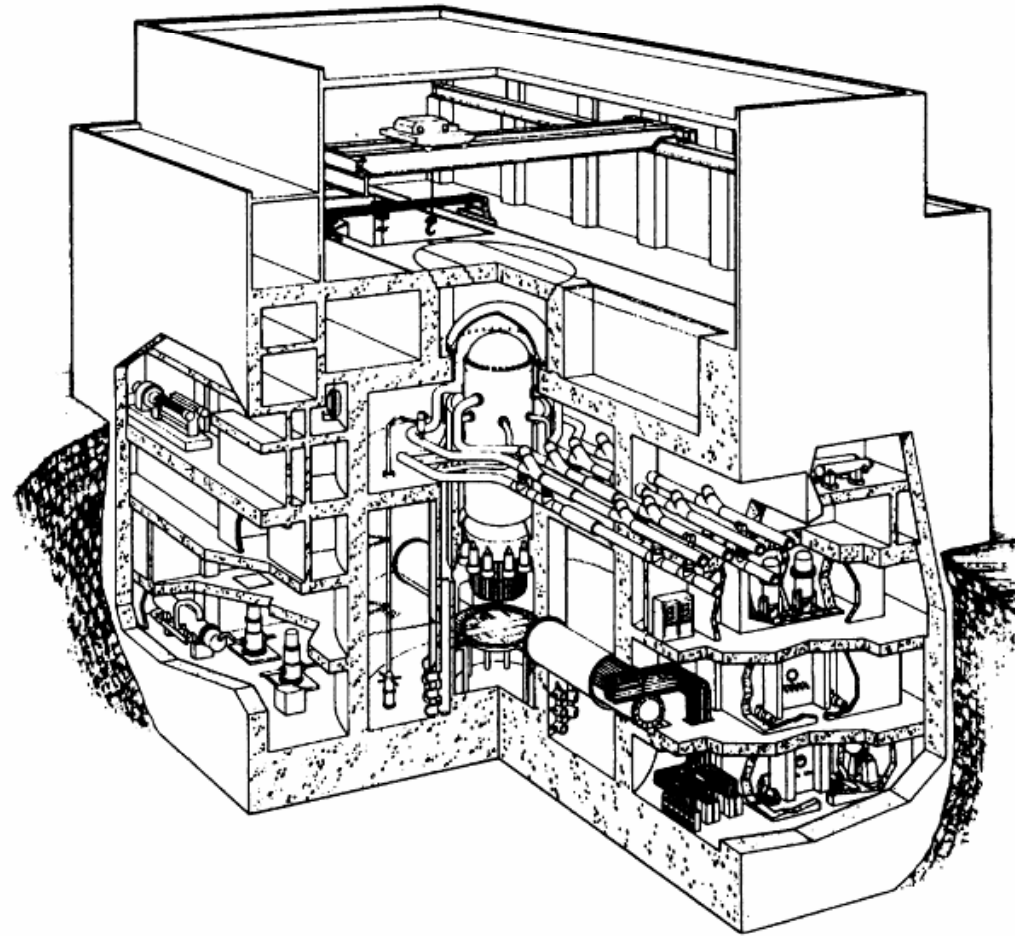
BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

- 1.TOP FUEL GUIDE
- 2.CHANNEL FASTENER
- 3.UPPER TIE PLATE
- 4.EXPANSION SPRING
- 5.LOCKING TAB
- 6.CHANNEL
- 7.CONTROL ROD
- 8.FUEL ROD
- 9.SPACER
- 10.CORE PLATE ASSEMBLY
- 11.LOWER TIE PLATE
- 12.FUEL SUPPORT PIECE
- 13.FUEL PELLETS
- 14.END PLUG
- 15.CHANNEL SPACER
- 16.PLENUM SPRING

GENERAL  ELECTRIC



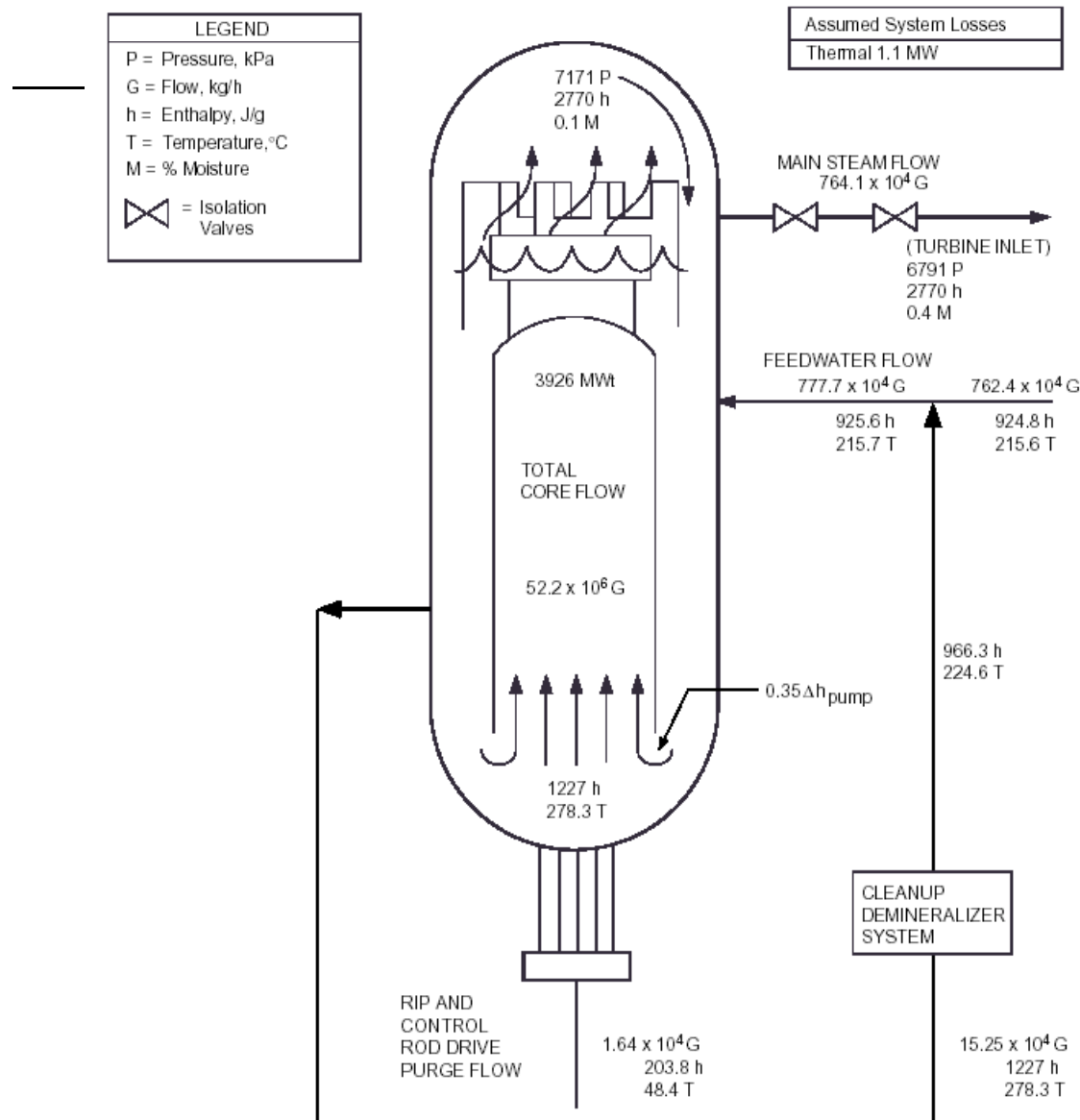
Reaktorska zgrada BWR reaktora



Slika 4.6.1. Postrojenje naprednog kipućeg reaktora (ABWR).

Zadatak 2: BWR reaktor

- BWR reaktor u stacionarnom stanju na punoj snazi proizvodi $m_{\text{pare}} = 760 \cdot 10^4 \text{ kg/h}$ pare s udjelom vlage 0,1% pri tlaku 7,2 MPa. Entalpija pojne vode temperature 216 °C je $h_{\text{vode}} = 926,7 \text{ kJ/kg}$ a entalpije zasićene vode i pare na tlaku od 7,2 MPa su $h_f = 1278 \text{ kJ/kg}$ i $h_g = 2770 \text{ kJ/kg}$. Izračunati termičku snagu jezgre i potrebnu masu UO_2 goriva obogaćenja $e = 4\%$ ako se zna da je srednji tok termičkih neutrona u reaktoru $\Phi = 3,8 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$ a mikroskopski udarni presjek za fisiju $\sigma_f = 580 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$. Pri fisiji se oslobodi 200 MeV energije. Zanimariti gubitke topline iz reaktora i porast energije fluida zbog rada pumpanja recirkulacijskih pumpi.



Toplinska bilanca
 BWR reaktora koji
 je poslužio kao
 podloga za podatke
 u zadatku

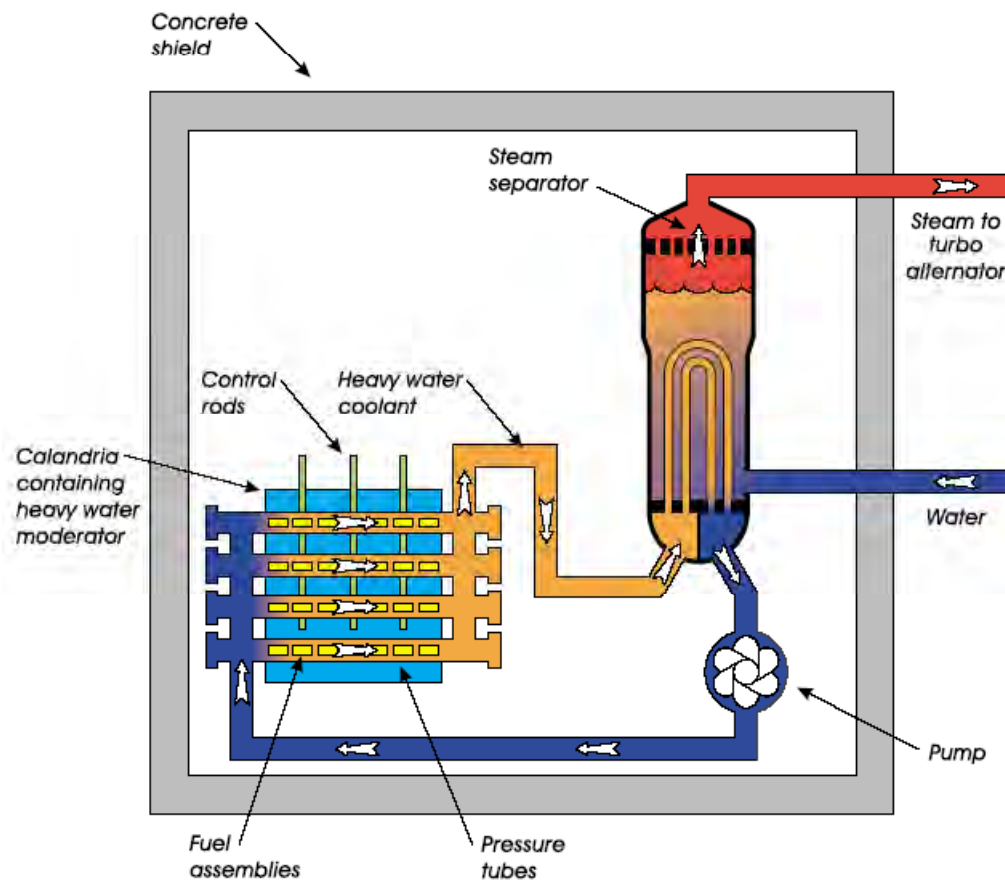
Zadatak 2: BWR reaktor – rješenje

- Maseni sadržaj pare u proizvedenoj pari je
 $x = 1 - 0,001 = 0,999$
- Entalpija proizvedene vlažne pare je
 $h_{\text{pare}} = (1-x) h_f + x h_g = 0,001 * 1278 + 0,999 * 2770$
 $h_{\text{pare}} = 2768,5 \text{ kJ/kg}$
- Snaga jezgre je $P_{\text{jezgre}} = m_{\text{pare}} (h_{\text{pare}} - h_{\text{vode}})$
 $P_{\text{jezgre}} = 760 \cdot 10^4 / 3600 * (2768,5 - 926,7)$
 $P_{\text{jezgre}} = 3888,26 \text{ MW}$
- Ta je snaga rezultat $N * \Phi * \sigma_f$ fisija u svakoj sekundi.
 N je broj jezgara U-235 u reaktoru.
- $P_{\text{jezgre}} = 200 * 1,6 \cdot 10^{-13} * N * \Phi * \sigma_f$
 $P_{\text{jezgre}} = 3,2 \cdot 10^{-11} * N * 3,8 \cdot 10^{13} * 580 \cdot 10^{-24} = 3888,26 \cdot 10^6 \text{ W}$
- Potrebni broj jezgara U-235 u jezgri iznosi $N = 5,51 \cdot 10^{27}$

Zadatak 2: BWR reaktor – rješenje

- Broj jezgara U-235 u masi UO_2 m_{UO_2} je
$$N = e \cdot A_{\text{U}}/A_{\text{UO}_2} \cdot m_{\text{UO}_2} N_{\text{A}}/A_{\text{U}235}$$
- Računajući s približnim atomskim masama atomska masa urana je
$$1/A_{\text{U}} = e/A_{\text{U}235} + (1-e)/A_{\text{U}238}.$$
Za $e = 0.04$ A_{U} je 237,88 a atomska masa UO_2 ,
$$A_{\text{UO}_2} = A_{\text{U}} + A_{\text{O}_2} = 237,88 + 32 = 269,88.$$
- Za obogaćenja do 10% uobičajeno je računati s približnim atomskim masama $A_{\text{U}} = 238$ i $A_{\text{UO}_2} = 270$.
Relativna greška u masenim udjelima urana u UO_2 je tom prilikom mala $(238/270 - 237,88/269,88)/(237,88/268,88) = 0,006\%$.
- $$N = 0,04 \cdot 238/270 \cdot m_{\text{UO}_2} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}/235 = 5,51 \cdot 10^{27},$$
$$m_{\text{UO}_2} = 60982,5 \text{ kg}.$$
- Odgovarajuća masa urana je
$$m_{\text{U}} = m_{\text{UO}_2} \cdot A_{\text{U}}/A_{\text{UO}_2} = 60982,5 \cdot 238/270 = 53755 \text{ kg}$$

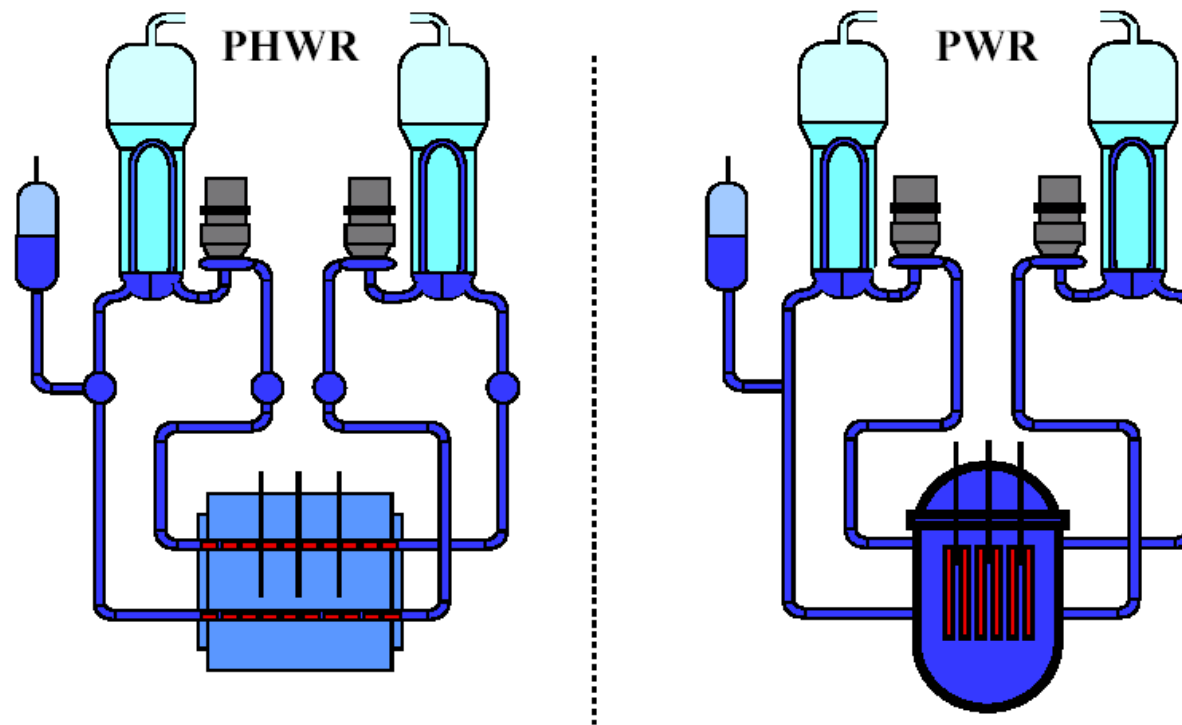
CANDU (CANada Deuterium Uranium) reaktor s teškom vodom



HWR CANDU

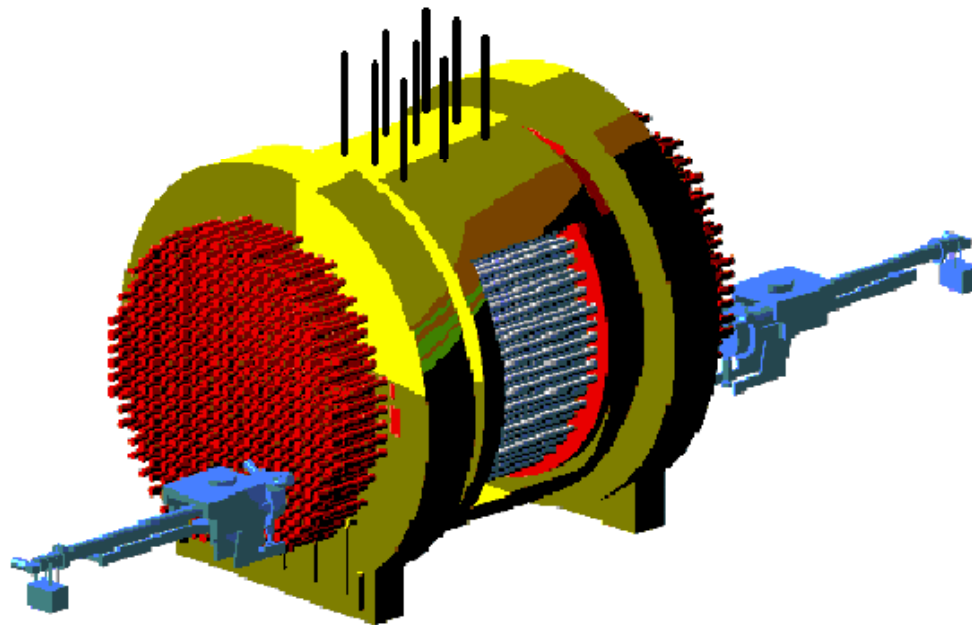
- Prirodni ili slabo obogaćeni uran
- Teška voda je moderator i hladilac
- Dva rashladna kruga kao i PWR
- Horizontalni rashladni kanali
- Veliki volumen reaktora
- Niski odgor (3 do 4 puta manji nego PWR i odgovarajuće više proizvedenog istrošenog goriva)
- Izmjena goriva bez zaustavljanja

Sličnosti i razlike PWR i CANDU reaktora

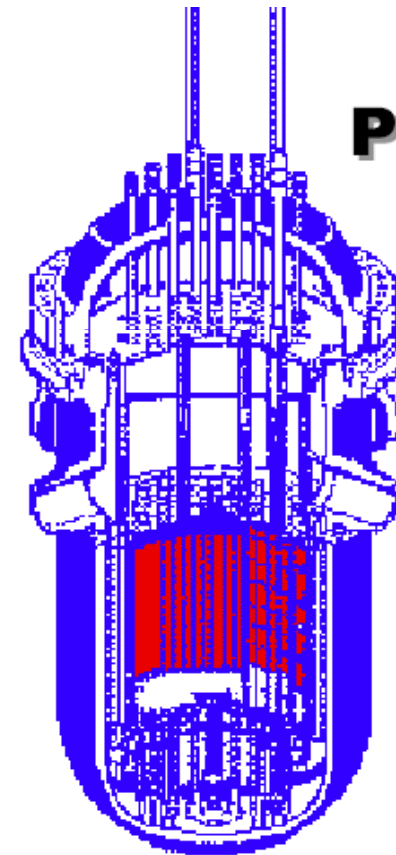


Reaktorska posuda CANDU i PWR

CANDU



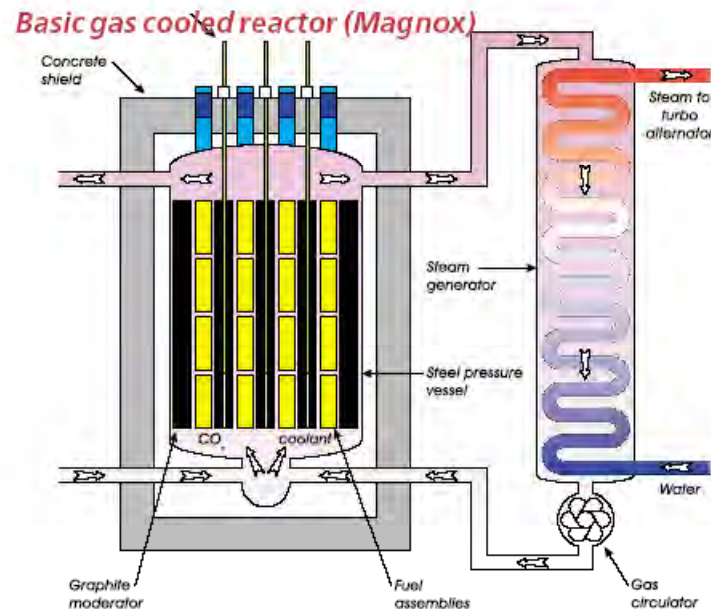
PWR



Plinom hlađeni reaktori

- Prošlost i budućnost
- Moderator je grafit
- Nekad hlađeni s CO_2 , danas uglavnom He
- Relativno veliki volumen jezgre
- Moguća izvedba s Rankineovim i Braytonovim ciklusom
- Mogućnost proizvodnje procesne pare
- Visokotemperaturne izvedbe će se koristiti za industrijsku proizvodnju vodika

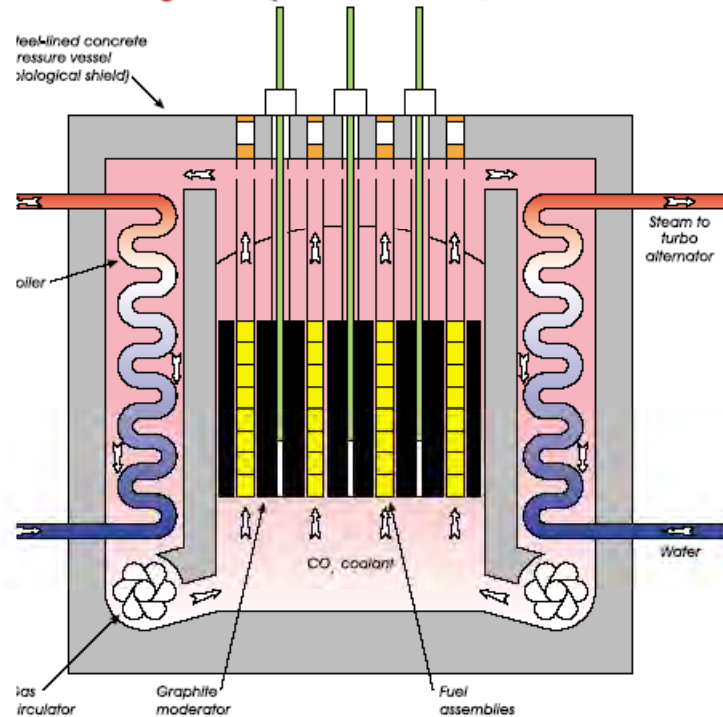
GCR (Gas Cooled Reactor) Magnox



Fuel rod casing material	Magnesium - 0.8% Al
Tonnes of fuel (U) per reactor (approx)	230-595
Fuel Enrichment % U-235	Metallic natural U
Output per reactor MWe	50-420
Typical thermal Efficiency %	27
Moderator	graphite
Coolant	carbon dioxide
Coolant pressure bar	10-27
Coolant outlet temperature C	360
Mean fuel burnup at discharge MW(th)/d/tU	4,000
Fuel loading arrangements	On load
How many operating UK	20
How many operating - world (1998 excluding China)	20

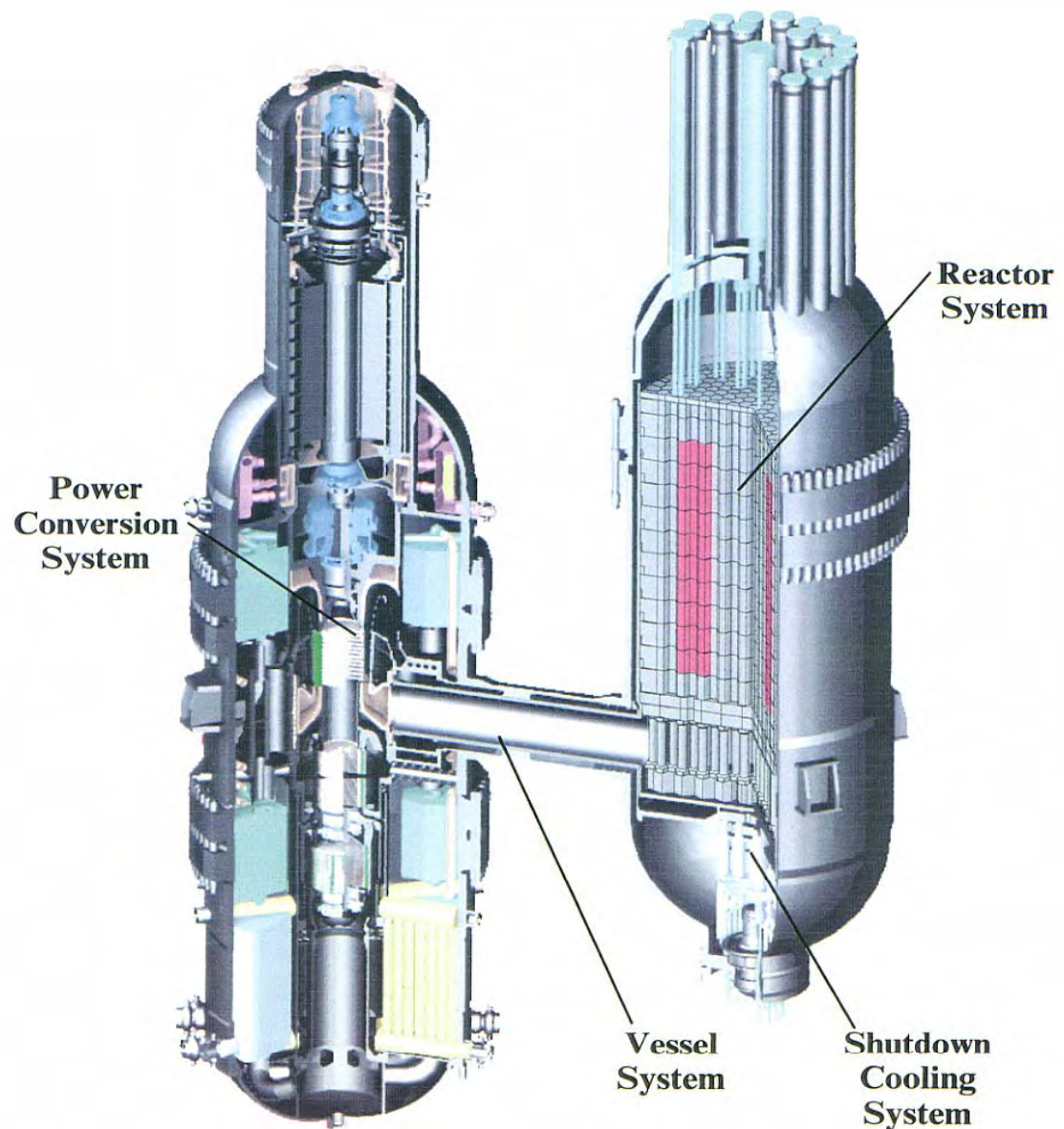
AGR (Advanced Gas Reactor)

Advanced gas cooled reactor (AGR)

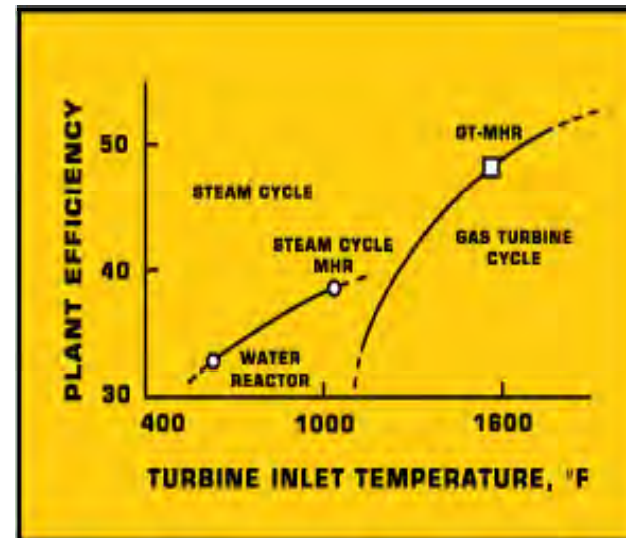
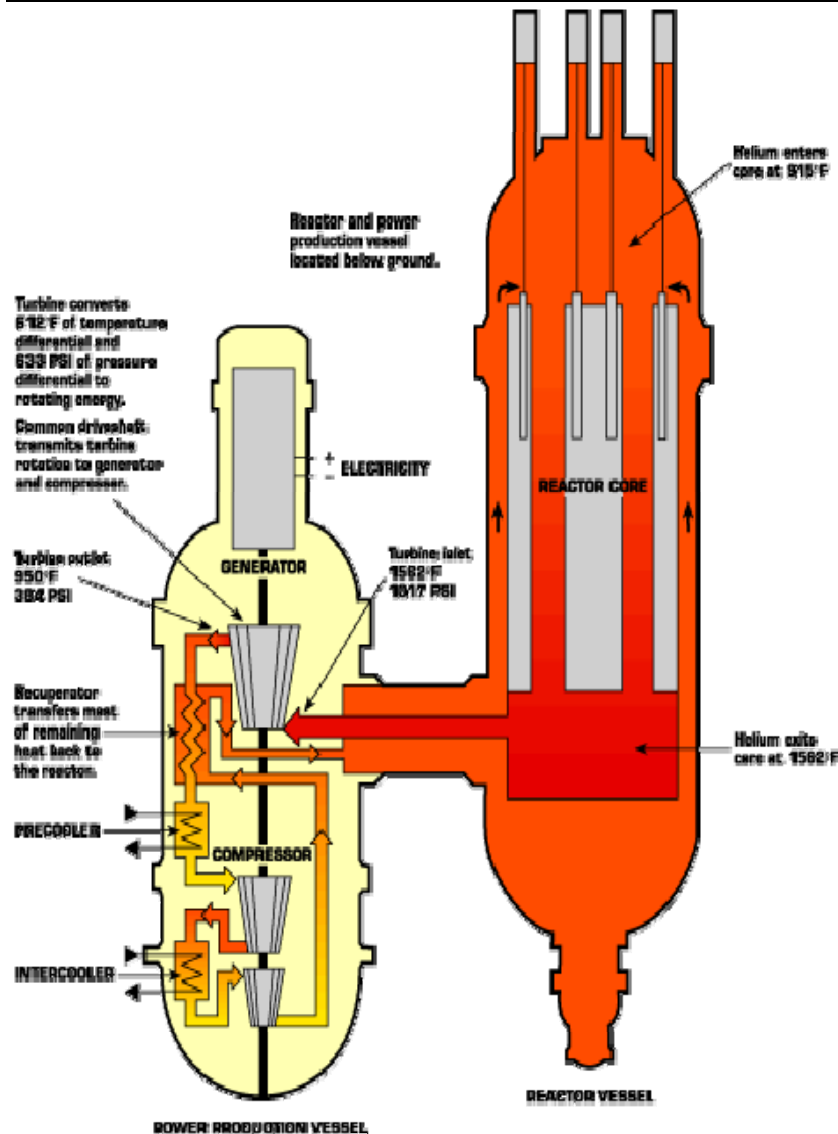


Fuel rod casing material	20%Cr/25%Ni/Nb stainless steel
Tonnes of fuel (U) per reactor (approx)	130
Fuel Enrichment % U-235	Uranium oxide 2.7-3.4%
Output per reactor MWe	600-625
Typical thermal Efficiency %	41
Moderator	graphite
Coolant	carbon dioxide
Coolant pressure bar	30-40
Coolant outlet temperature C	640
Mean fuel burnup at discharge MW(th)/tU	27,000
Fuel loading arrangements	On load
How many operating UK	14
How many operating - world (1998 excluding China)	14

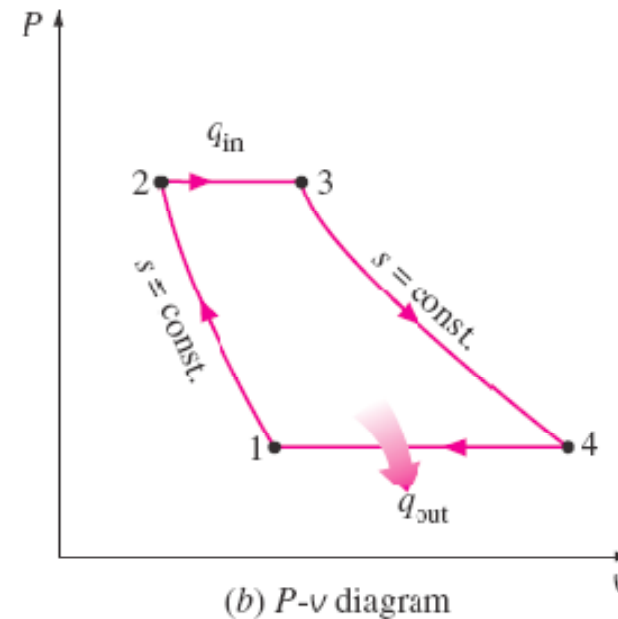
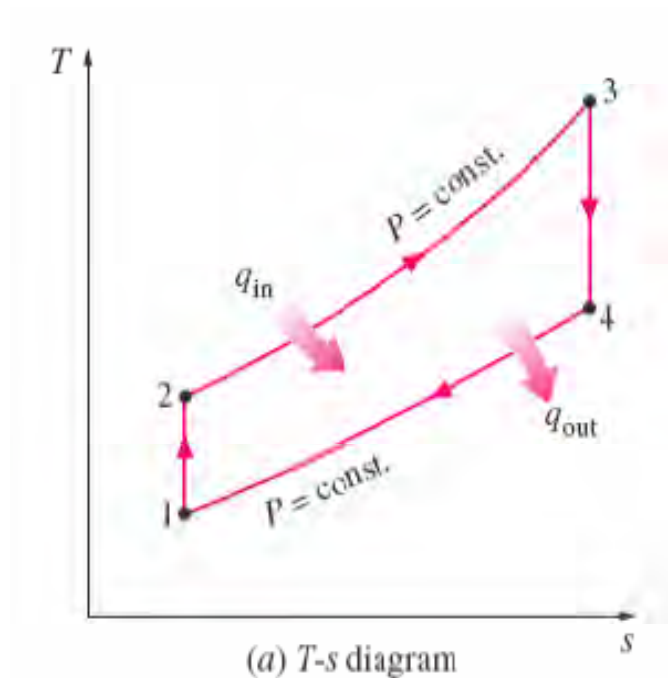
Reaktorska posuda i sustav za pretvorbu energije – Modularni He reaktor 286 MWe



Modularni reaktor hlađen He



Brayton (Joule) ciklus



$$\eta_{th} = W_{net}/Q_{in} = 1 - Q_{out}/Q_{in}$$

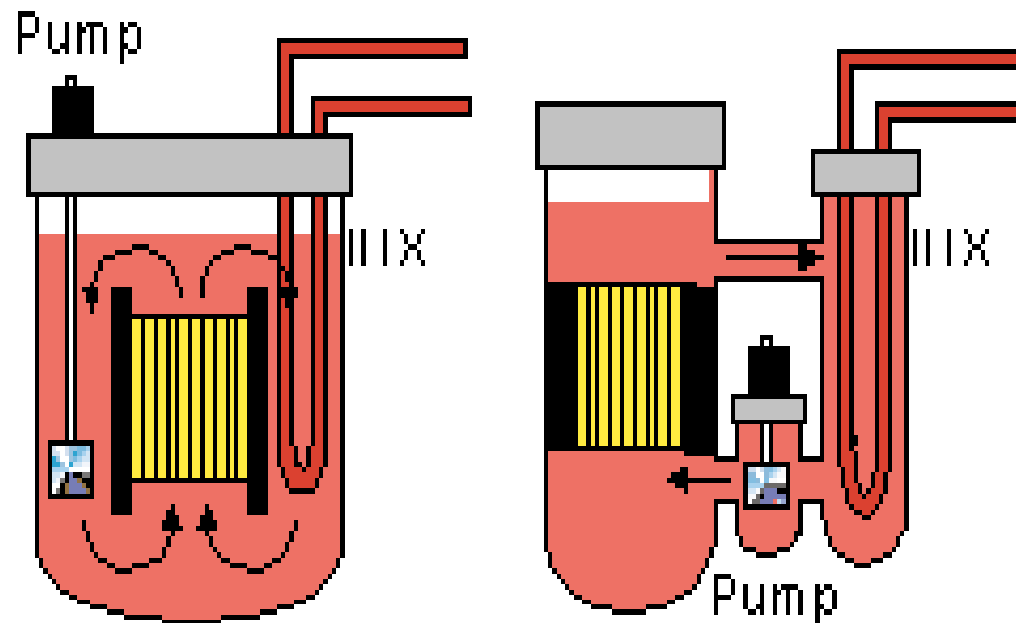
omjer kompresije $r_p = p_2/p_1$

$$\eta_{th, Joule} = 1 - \frac{1}{r_p^{(\kappa-1)/\kappa}}$$

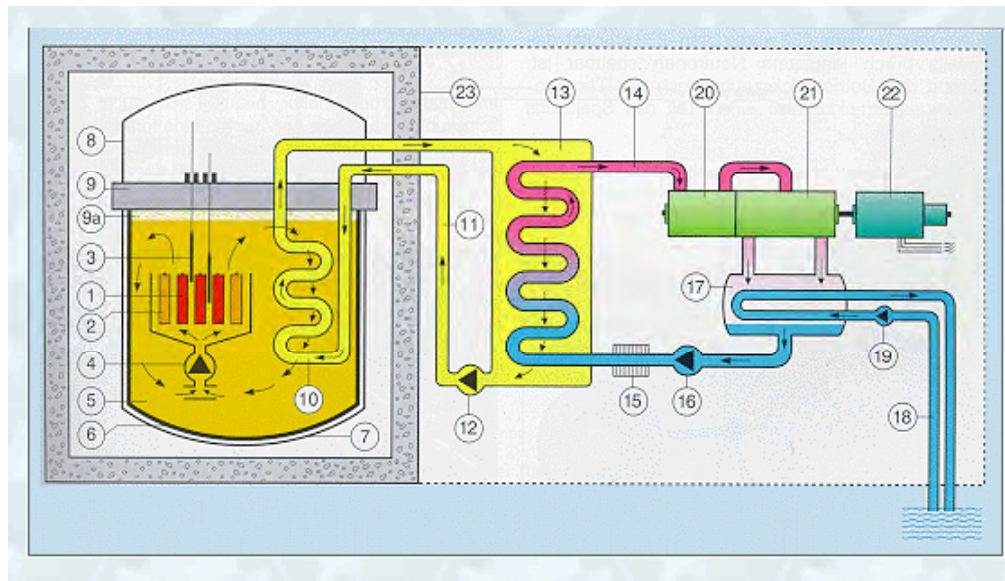
Brzi oplodni reaktori

- Ne trebaju moderator
- Proizvode Pu-239 iz U-238 ili U-233 iz Th-232
- Uhvatom neutrona nastaje novi fisibilni materijal
- Moguća je veća proizvodnja nego potrošnja goriva
- Potrebna prerada goriva
- Potreba za većim obogaćenjem goriva (15 do 20%)
- Velika gustoća snage
- Hlađenje tekućim metalom ili plinom
- U slučaju Na hlađenja obično 3 rashladna kruga

Brzi reaktor bazenskog i petljastog tipa

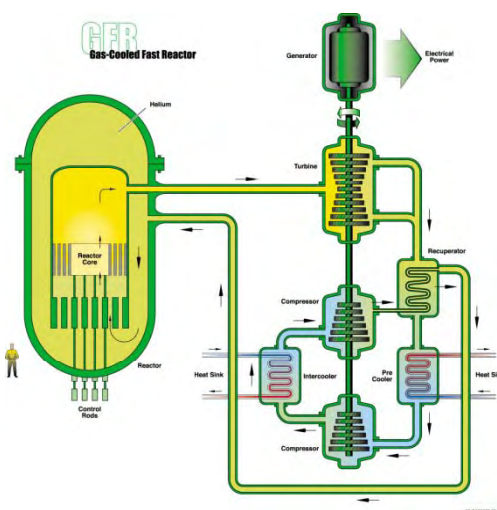


Bazenski brzi reaktor (Phenix) , 250MWe

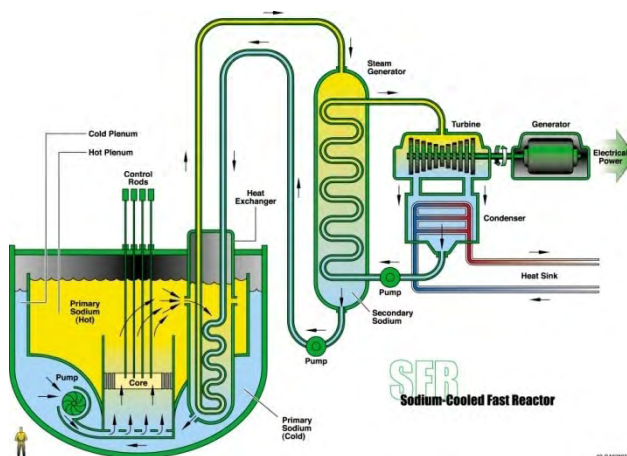


1 Fuel (fissile material)	9 Cover	17 Condenser
2 Fuel (breeder material)	10 Na/Na heat exchanger	18 Cooling water
3 Control rods	11 Secondary Na pump	19 Cooling water pump
4 Primary Na pump	12 Secondary Na pump	20 High pressure turbine
5 Primary Na coolant	13 Steam generator	21 Low pressure turbine
6 Reactor vessel	14 Fresh steam	22 Generator
7 Protective vessel	15 Feedwater pre-heater	23 Reactor building
8 Reactor cover	16 Feedwater pump	

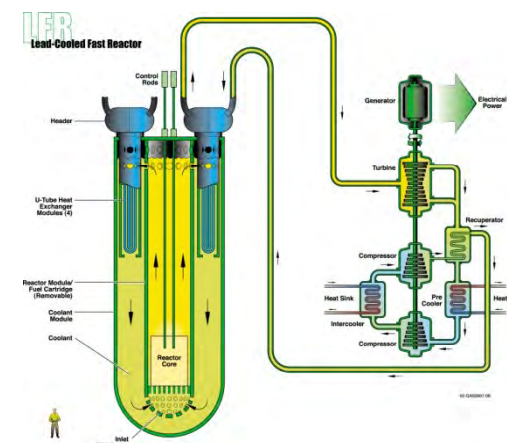
Izvedbe budućih brzih reaktora



Hlađen plinom
850°C / visoki tlak

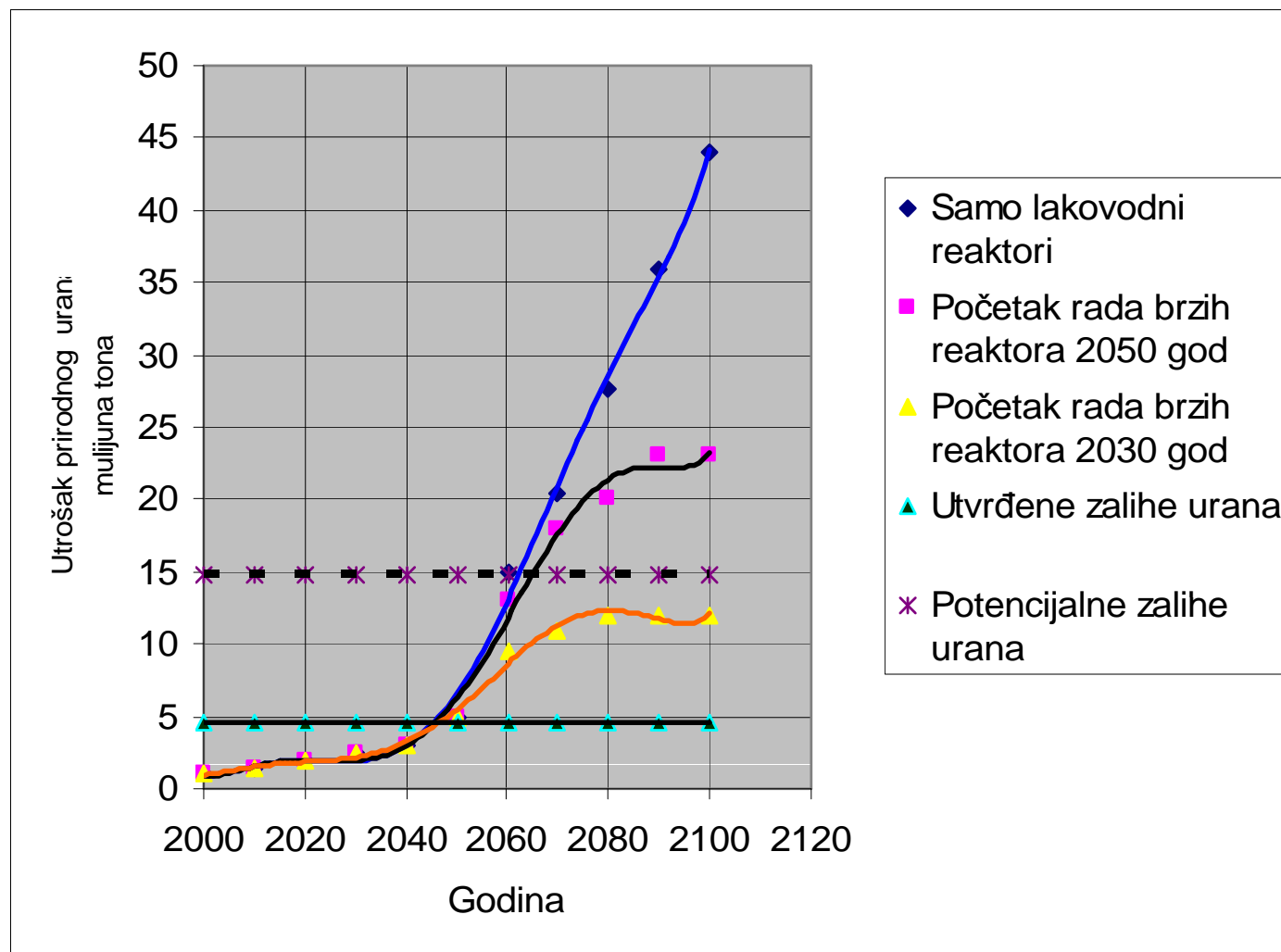


Hlađen natrijem
550°C / niski tlak.



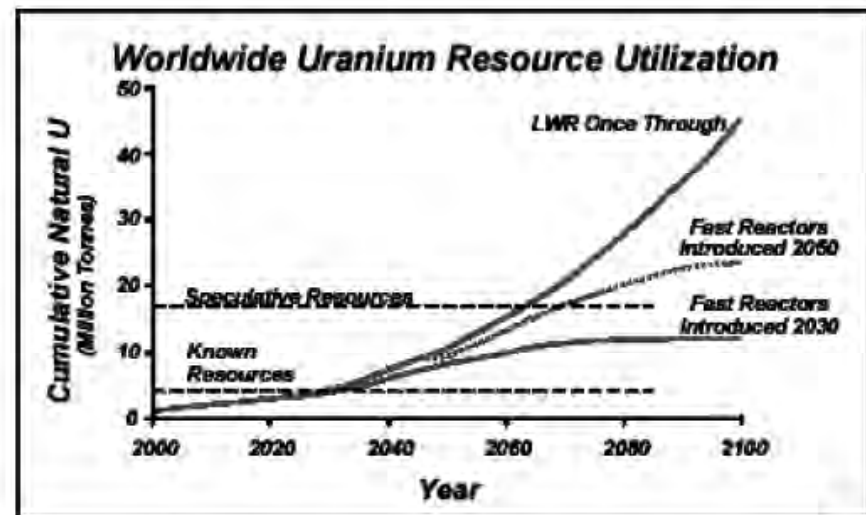
Hlađen olovom
550/800°C / niski tlak.

Kumulativni potrošak prirodnog urana u ovisnosti o strategiji razvoja nuklearne energetike



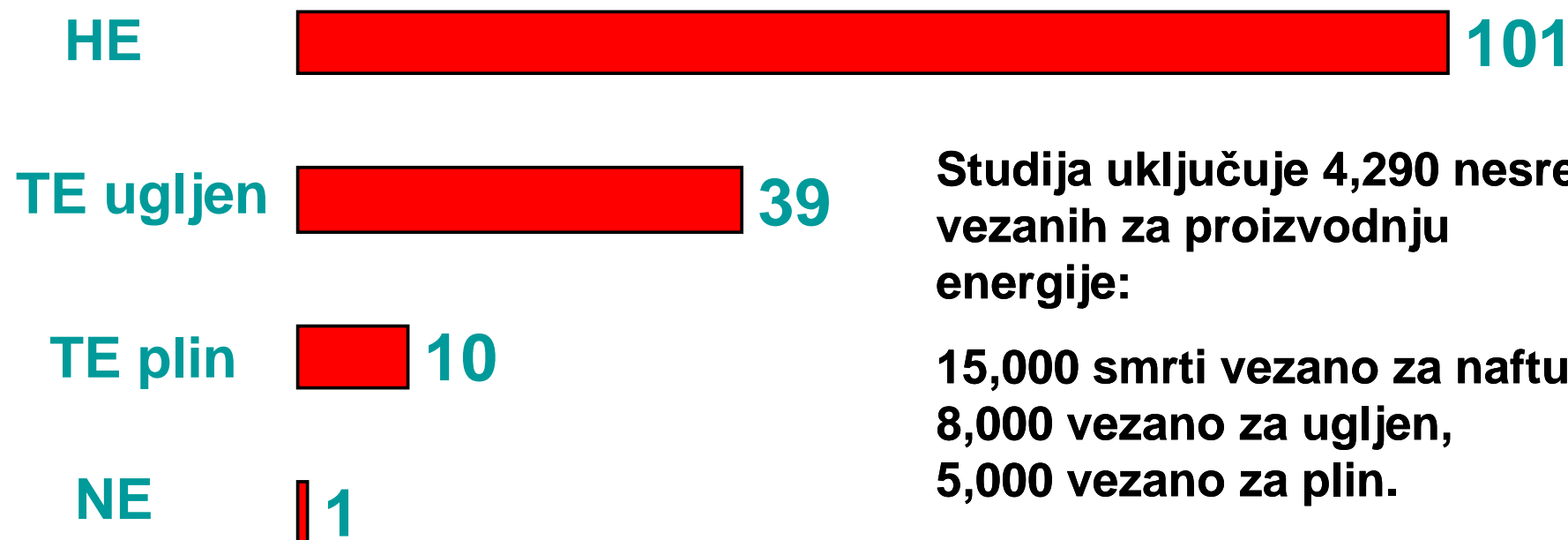
Koncept rješenja problema

- Oplodni reaktori povećavaju rezerve goriva
- Transmutacija i izgaranje aktinida smanjuju dugovječnost i količinu visokoaktivnog otpada



Sigurnosne statistike različitih načina proizvodnje električne energije

**Broj smrti u nesrećama po 1000 TWh
proizvedene električne energije**



**Studija uključuje 4,290 nesreća
vezanih za proizvodnju
energije:**

**15,000 smrti vezano za naftu,
8,000 vezano za ugljen,
5,000 vezano za plin.**

***uključuje Černobil**

**Izvor: Paul Scherrer Institute,
Švicarska, 2001**

Sigurnost nuklearnih elektrana

- Zanemarive emisije u normalnom pogonu
- Konzervativan projekt s visokim stupnjem sigurnosti
- Visoki zahtjevi na kvalitetu materijala i ugradnje
- Da bi se postigao siguran pogon potrebno je:
 - spriječiti nagle poraste snage
 - osigurati odvođenje ostatne topline
 - spriječiti ispuštanje radioaktivnog materijala
 - pospremiti na siguran način istrošenog gorivo

Principi sigurnosnih mjera u nuklearnim elektranama

- **Nuklearna eksplozija reaktora je onemogućena projektom**
- **U svojoj jezgri nuklearni reaktor sadrži veliku količinu radioaktivnih tvari, pretežno fisijskih proizvoda.**
- **Sigurnost se u osnovi odnosi na onemogućenje širenja radioaktivnih materijala unutar postrojenja i u okoliš**
- **Do akcidentnog ispuštanja uglavnom dolazi samo ako dođe do pregrijanja goriva**
- **Sigurnost nuklearne elektrane se postiže nizom mjera u fazi projektiranja, gradnje i tijekom pogona.**

Obrana po dubini

- Osnova filozofije projektiranja nuklearne elektrane sa stajališta sigurnosti je tzv. obrana po dubini.
- Obrana po dubini pretpostavlja postojanje višestrukih barijera za širenje radioaktivnosti i sigurnosnih sustava koji osiguravaju njihovu nepropusnost
- Barijere u smislu zaštite okoliša djeluju serijski, jedna nakon druge.
- Izgubljenu funkciju jednog sustava važnog za sigurnost automatski preuzima drugi.
- Bitni sustavi su u najmanju ruku udvojeni
- Sustavi mogu biti aktivni ili pasivni (kako dobivaju energiju potrebnu za izvršavanje sigurnosne funkcije)
- Barijere možemo razmatrati kao stvarne fizičke barijere ugrađene u nuklearnu elektranu i kao fizičke i administrativne mjere koje se poduzimaju u nuklearnoj elektrani za zaštitu tih barijera.

Obrana po dubini

- **Fizičke barijere su:**
 - matrica nuklearnog goriva
 - obloga gorivnog elementa
 - primarni rashladni krug
 - zaštitna posuda (kontejnment)
- **Tehnički sustavi koji osiguravanju funkciju fizičkih barijera:**
 - sustav za zaštitno hlađenje jezgre reaktora (štiti gorivne elemente od pregrijanja)
 - sustav za ograničavanje porasta tlaka u kontejnmentu (štiti zaštitnu posudu od previsokog tlaka i temperature)

Višeslojna zaštita



Kontejnmentska posuda

4 cm čelika

Kontejnmentska zgrada

1 m prenapregnutog betona

Unutrašnja betonska struktura

1.5 m prenapregnutog betona

Biološki štit

1,2 m teškog betona +
4 cm čelika

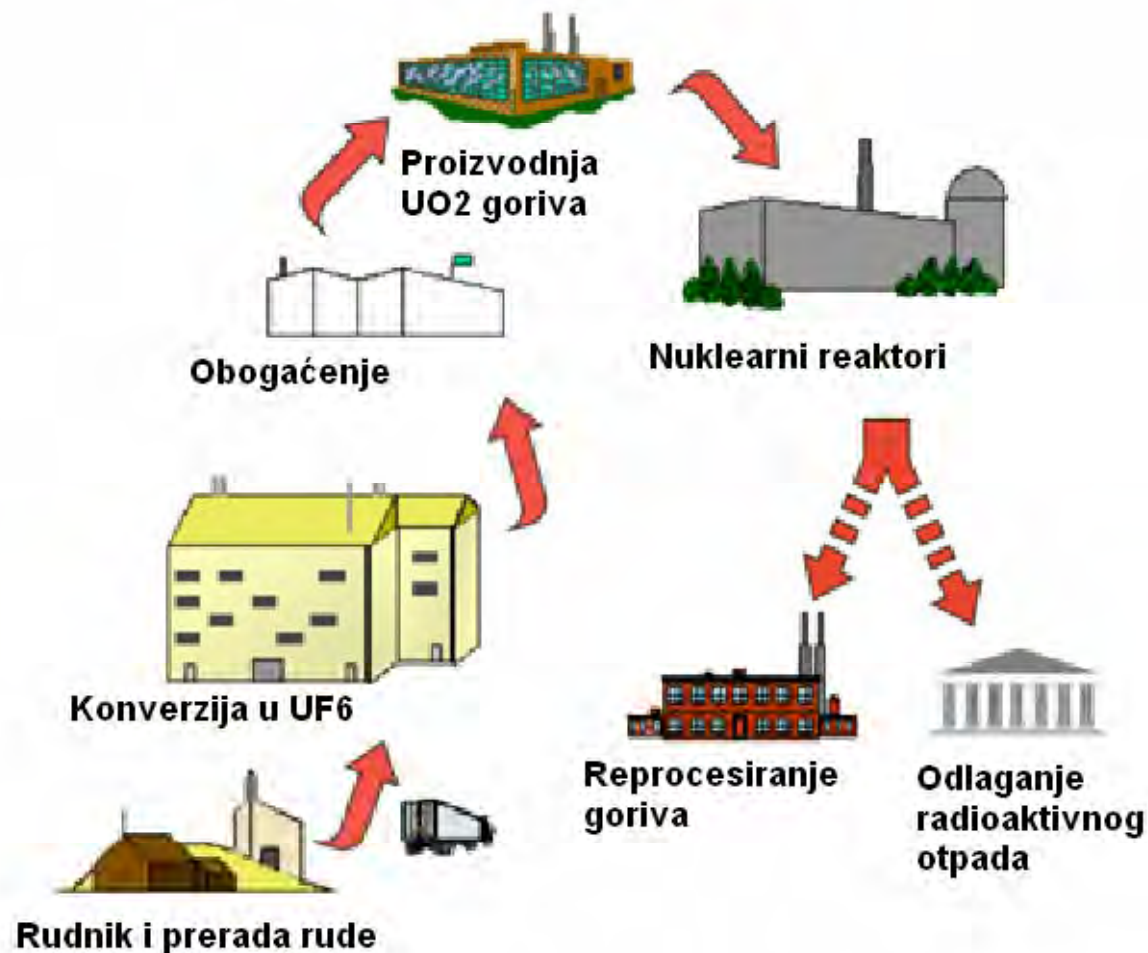
Reaktorska posuda

20 cm čelika

Matrica goriva + košuljica

Nuklearni gorivni ciklus

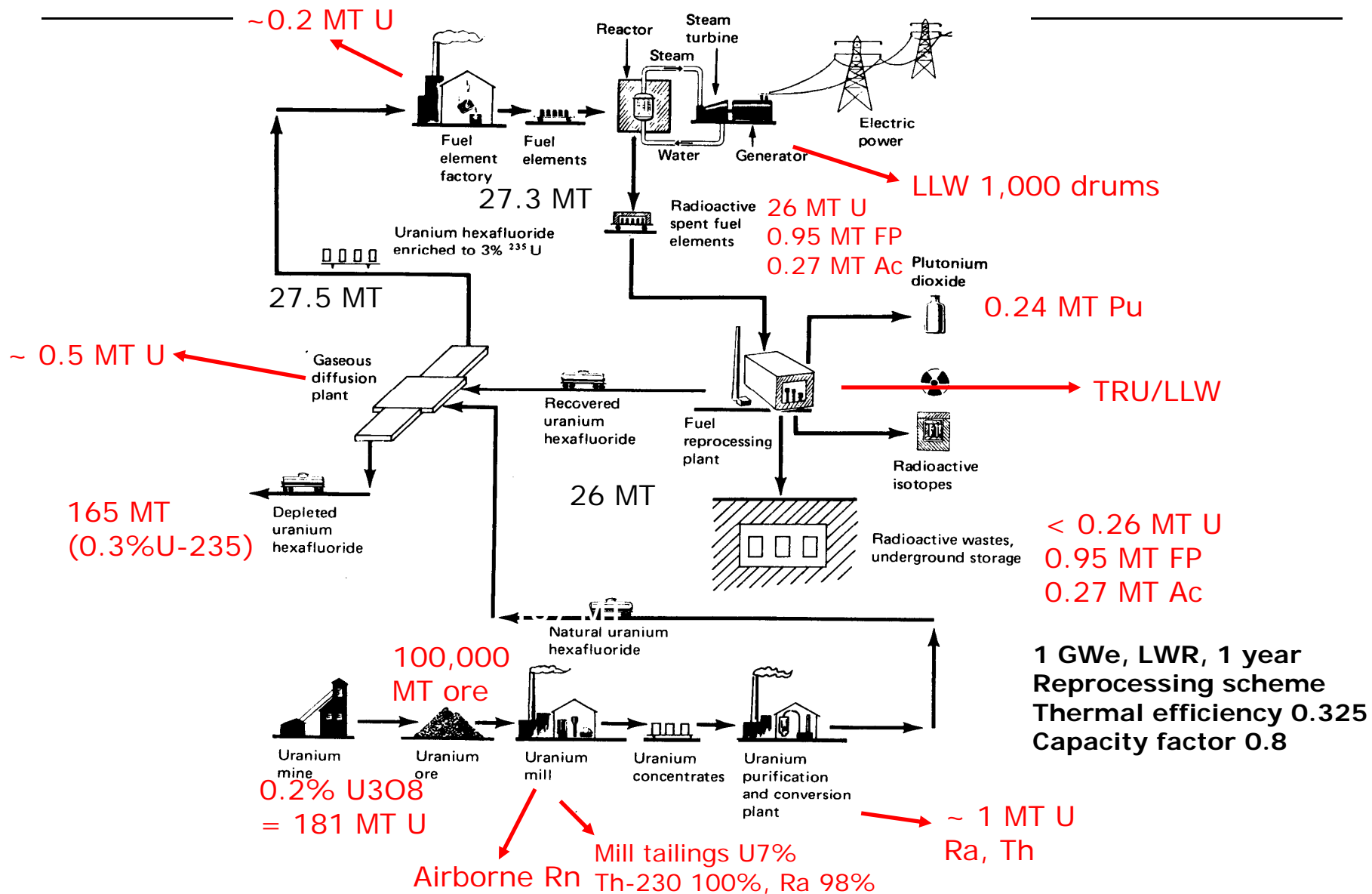
- Obuhvaća sve aktivnosti od vađenja urana do konačnog odlaganja radioaktivnog otpada



Istrošeno gorivo

- Gorivo provede 3 godine u reaktoru
 - svake godine se mijenja približno trećina
 - sprema se privremeno u bazen za istrošeno gorivo
- Reprocesiranje
 - kemijsko izdvajanje neiskorištenog uranija i plutonija
 - drobljenje tableta goriva, otapanje u dušičnoj kiselini
 - organska otapala za uranij i plutonij
 - opasnost za proliferiranja (širenja) nuklearnih materijala
 - 30% povećanje dostupne energije (cijena NE)
 - važno za tehnologiju oplodnih reaktora
 - smanjuje problem odlaganja radioaktivnog otpada
- Transmutacija istrošenog goriva
 - dodatno izlaganje toku neutrona
 - smanjuje količinu radioaktivnog otpada
 - smanjuje aktivnost i udjel dugoživućih izotopa

Mase materijala u nuklearnom gorivom ciklusu (istrošeno gorivo i radioaktivni otpad)



Odlaganje nuklearnog otpada

- nisko i srednje radioaktivni otpad
- škole, bolnice, industrija, nuklearna elektrana
- visoko radioaktivni otpad
 - Ono što karakterizira visoko aktivni otpad:
 - Nivo radijacije
 - fisijski produkti
 - aktinidi
 - otrovnost

Zadatak:

Pouzdanje izolirati otpad od dolica s eko-sustavom za dugi niz godina

- Tehnička rješenja postoje



Marine pollution: case histories of offshore waste disposal. A barrel of the fully enriched radioactive waste lying on the steep continental slope at 1000 m depth.



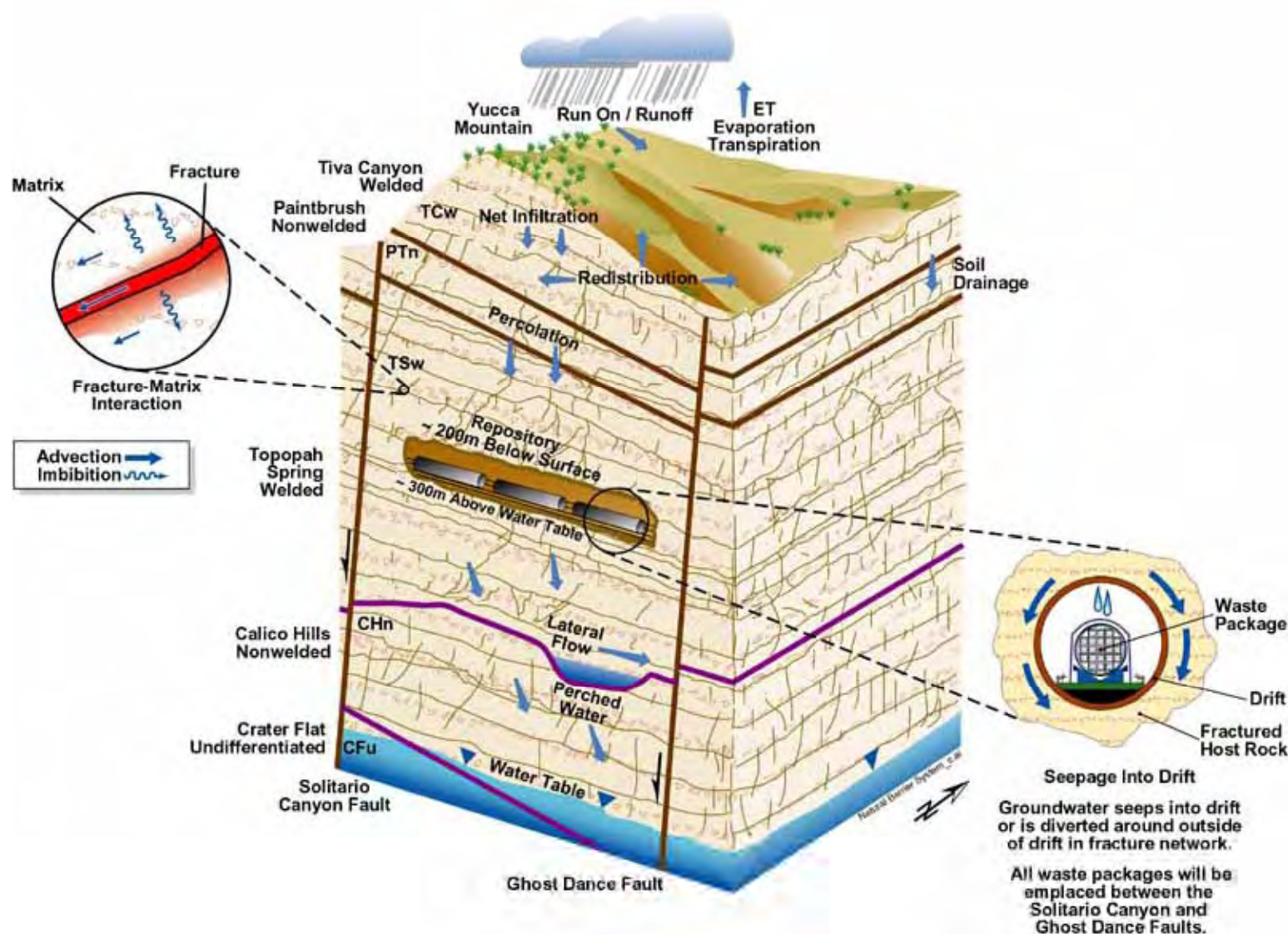
Location and remediation of such barrels before they leak is an important but difficult task. Nearly 50,000 barrels of hazardous and radioactive wastes were dumped between 1966 and 1970 over a 350 square nautical mile area that overlaps the Farallones National Marine Sanctuary. Studies to locate the containers (using broad-area sonar scanning) and to assess their environmental effects are underway during the mid-1990's.

Ocean Disposal of Radioactive Waste

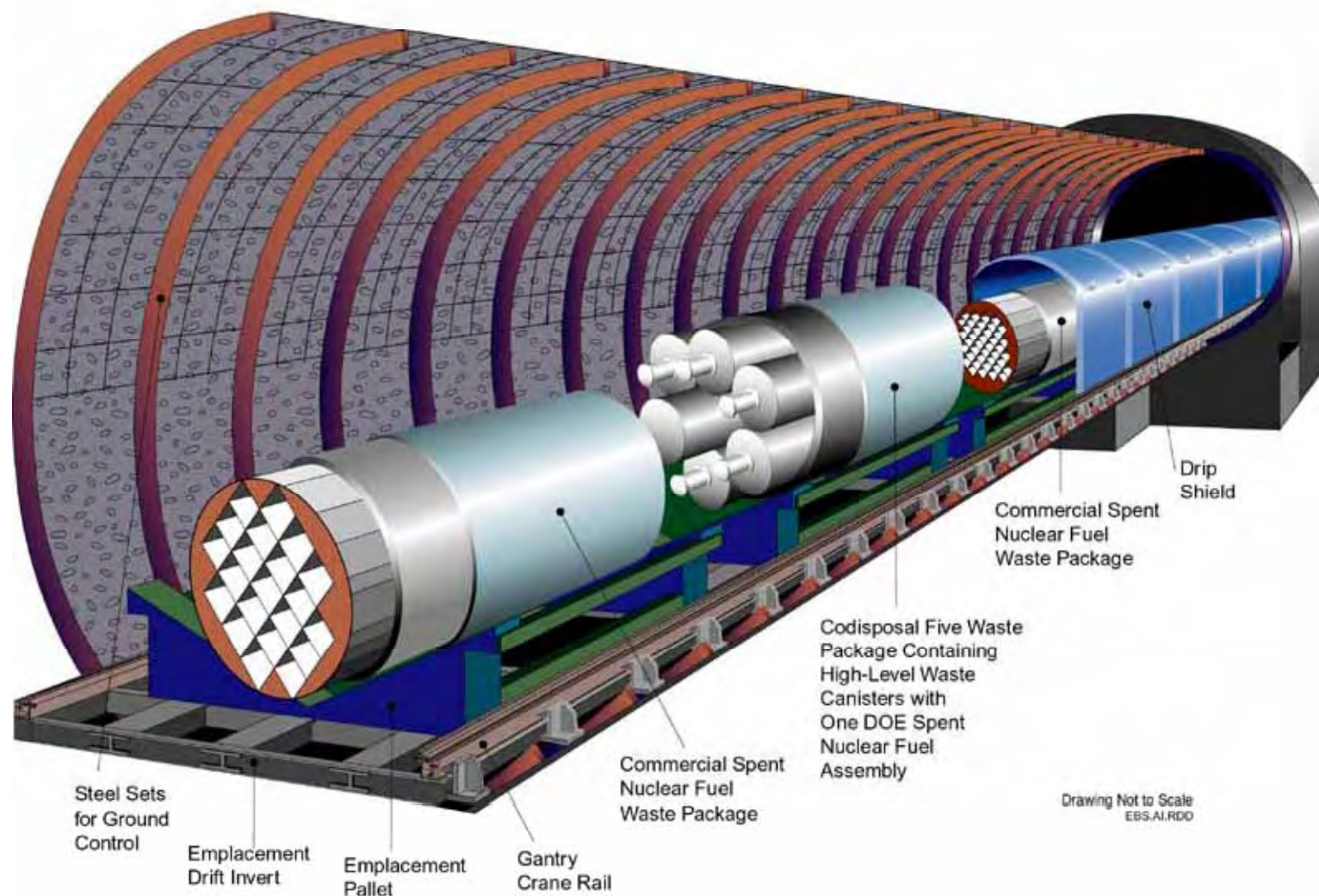


Marine pollution: offshore waste disposal. Proposed methods of seabed disposal of radioactive wastes at sites in deep-water areas of the Atlantic and Pacific Oceans. Although marine disposal incorporates significant hazards, it may be preferable to any on-land disposal methods. (See article in U.S. News and World Report, 7 Nov. 1994, 64-66)

Trajno odlagalište - sustav prirodnih barijera



Trajno odlagalište - sustav inženjerskih barijera

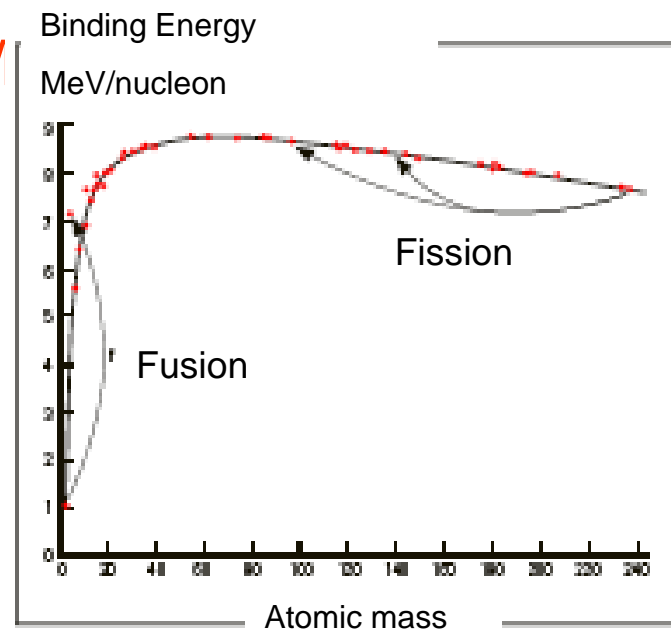
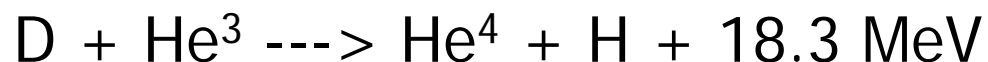
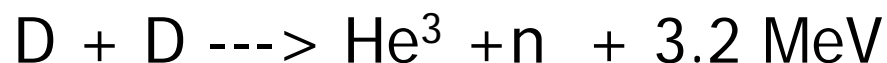


Dodatak - Nuklearna fuzija

Nuklearna fuzija

- Spajanje lakših jezgara u teže uz oslobađanje energije
- Prvi kandidat za fuzijske uređaje je D-T reakcija
- Potrebno je postići i održavati temperaturu od desetak miliona K
- Problem održavanja plazme – elektromagnetsko ograničavanje
- Tokamak uređaji i inercijalni fuzijski uređaji
- Problem materijala (visoke temperature i veliki fluks brzih neutrona)
- Komercijalna primjena nije moguća prije sredine stoljeća a i onda će biti ograničena na uski krug zemalja

Fuzijske reakcije



U reaktoru koji koristi D-T reakciju tricij se proizvodi u oplodnom omotaču iz litija uhvatom brzih neutrona

Koji su razlozi za razvoj fuzije?

- o Praktično neiscrpan izvor energije (velike rezerve D i Li)
- o Nema emisije stakleničkih plinova
- o Smanjena proizvodnja radioaktivnog otpada u odnosu na fisiju
- o Povoljna sigurnosna svojstva

Udarni presjeci (vjerojatnosti)

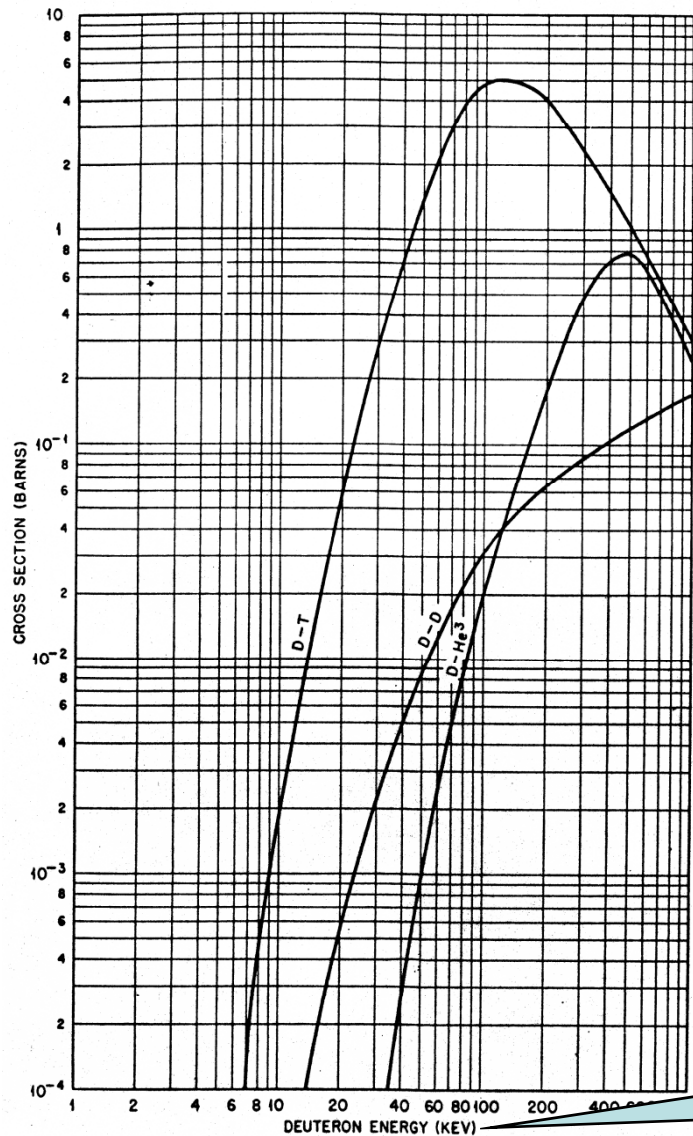
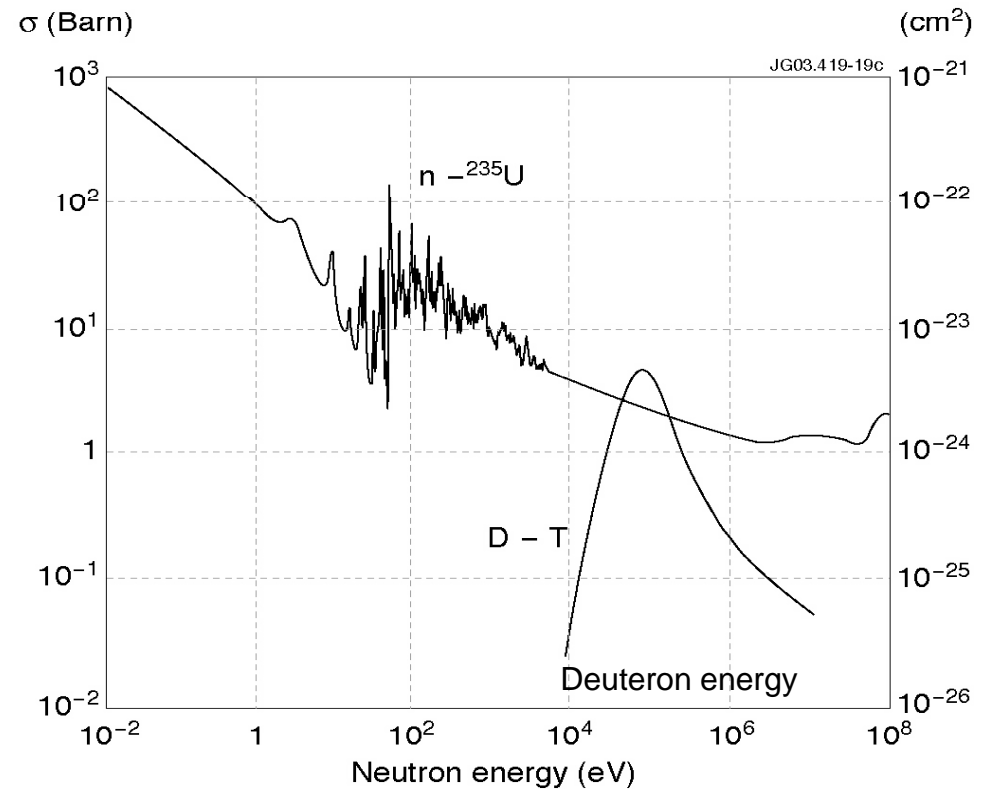


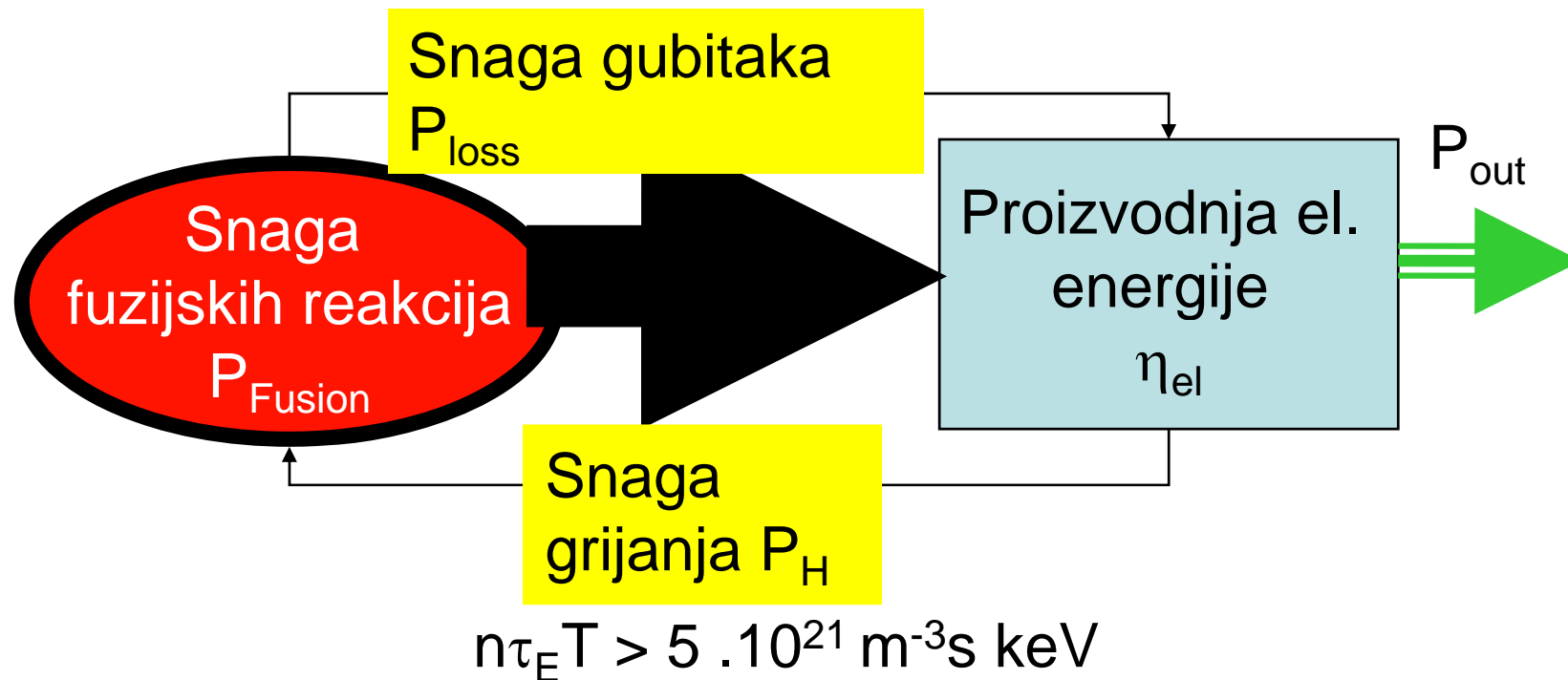
FIG 2.3. Cross sections for D-T, D-D (total), and D-He³ reactions.



1 keV is equivalent to 10^7 °K

Uvjeti za izvedbu fuzijskog reaktora

- Bilanca topline

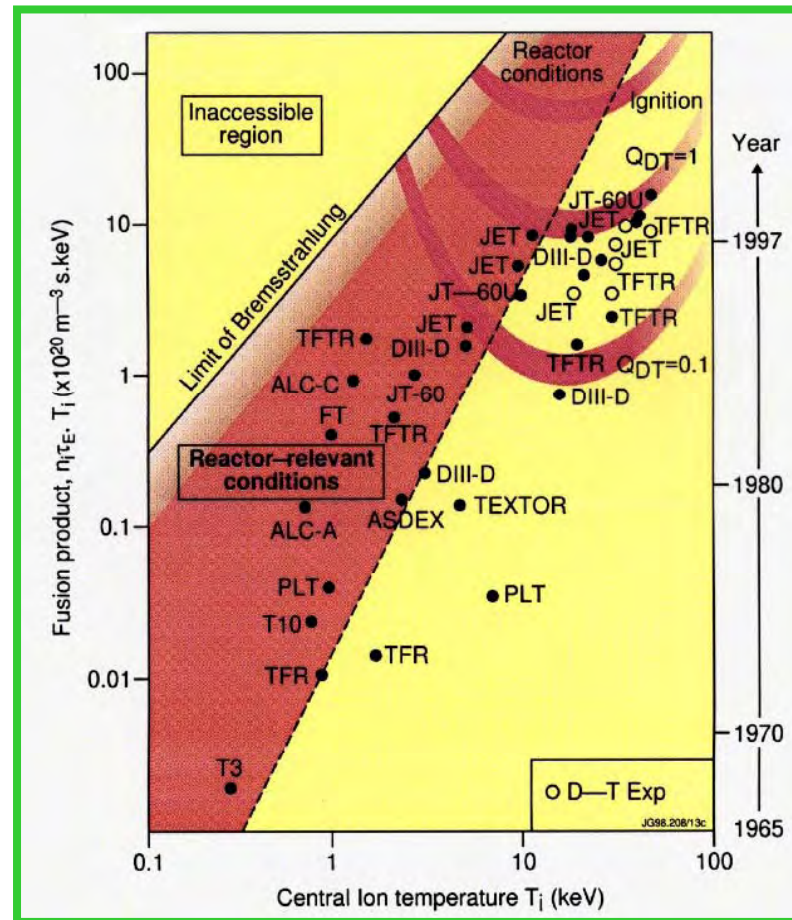


n = gustoća šestica, T = temperatura,
 τ_E = vrijeme održavanja plazme

Uvjeti za izvedbu fuzijskog reaktora

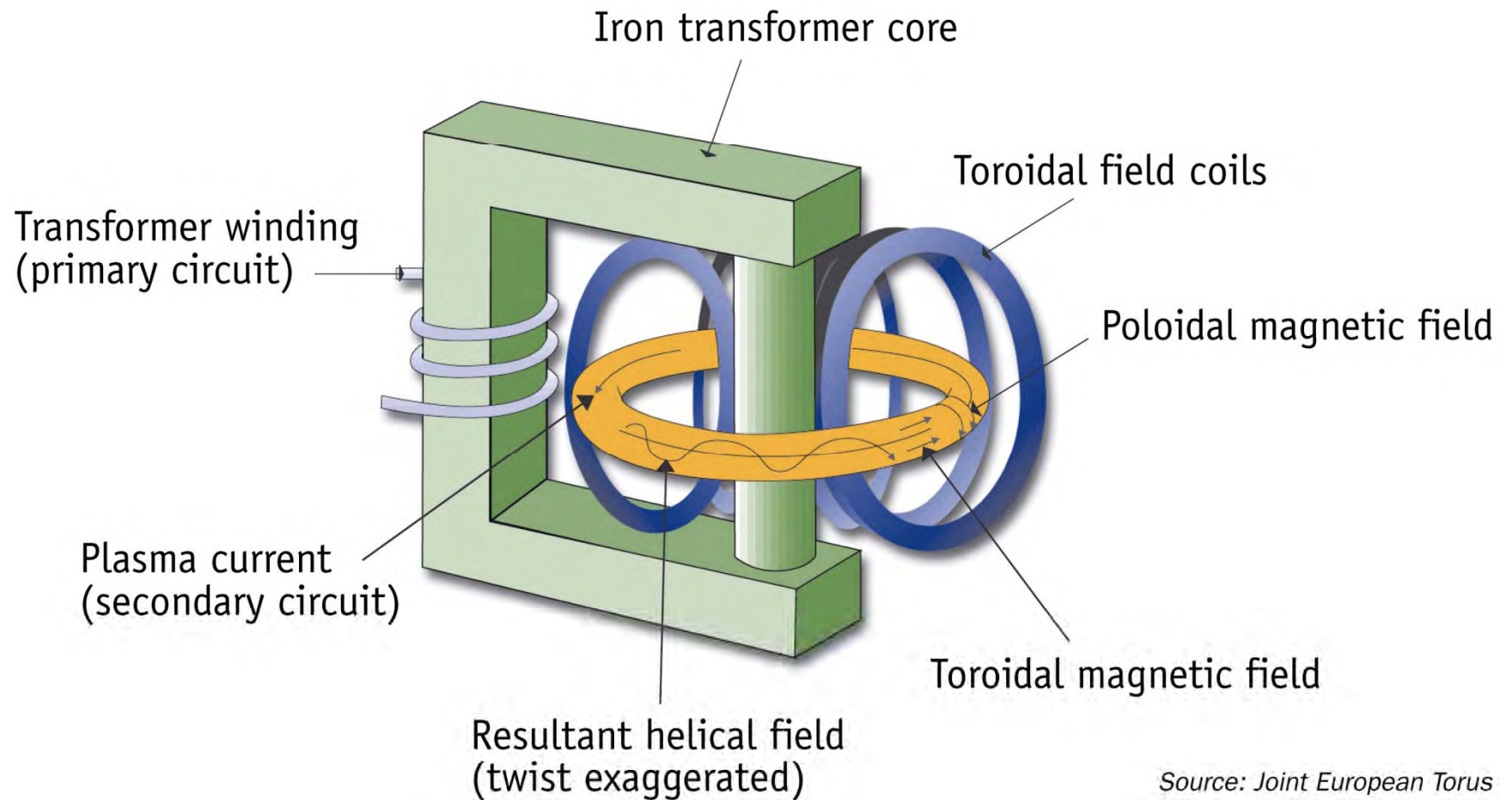
- Temperatura u području od 100 MK.
- Na temperaturi 10^4 - 10^5 K, materija je u stanju plazme (ionizirani globalno neutralni plin).
- Stvaranje, održavanje i ograničavanje plazme na 10^8 K (inicijalno niski tlak):
 - ograničavanje magnetskim poljem;
 - grijanje RF valovima (170 GHz, 5 GHz, i 50 MHz za ITER) i ubacivanjem snopova neutralnih čestice velike energije

74



Fuzijski uređaj tokamak tipa

Simple diagram of a Tokamak fusion reactor



Source: Joint European Torus

Fuzijski uređaji s inercijalnim ograničavanjem plazme

- Laserski snopovi ili čestični snopovi fokusiraju se na površinu mete promjera nekoliko milimetara koja sadrži malu količinu fuzijskog D-T goriva
- Isparivanje i ioniziranje površinskog sloja mete dovodi do formiranja plazme.
- Kako ovaj sloj isparenog materijala ekspandira prema van tako se po principu akcije i reakcije (efekt se može usporediti s lansiranjem mnogo malih raketa ili projektila s površine kuglice) formira tlačna fronta koja ekspandira prema unutrašnjosti mete i komprimira je grijući unutrašnje slojeve materijala.

Fuzijski uređaji s inercijalnim ograničavanjem plazme

- Centralni dio mete komprimira se do gustoće koja je nekoliko tisuća puta veća od gustoće tekućeg stanja materijala mete i paljenje nuklearne reakcije počinje kad se dostigne temperatura od oko sto milijuna stupnjeva.
- Fuzijska reakcija se brzo širi kroz komprimirani materijal mete proizvodeći energiju koja je tipično nekoliko puta veća od energije deponirane u meti pod djelovanjem inicijalnog snopa.
- Vrijeme unutar kojeg se odvija fuzijska reakcija u ovakvom sustavu je ograničeno jedino inercijom samog goriva pa se zato za skup ovakvih postupaka koristi ime fuzija s inercijalnim ograničenjem plazme.

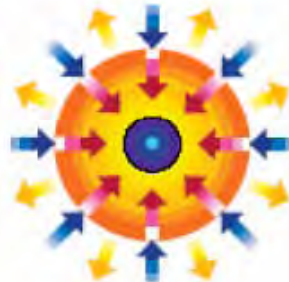
Princip rada inercijalne fuzije

→ Čestični snop



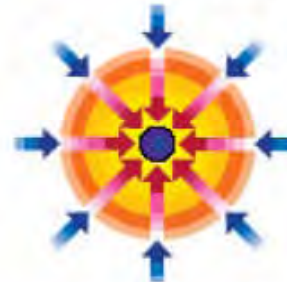
Grijanje mete

↗ Ekspanzija



Kompresija

↗ Prijenos energije prema središtu



Paljenje



Fuzija



Indirektno

Štit

Kapsula

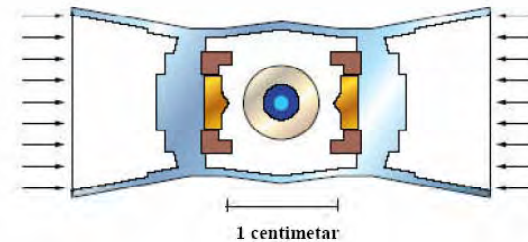
0,35 μm
laserske
zrake



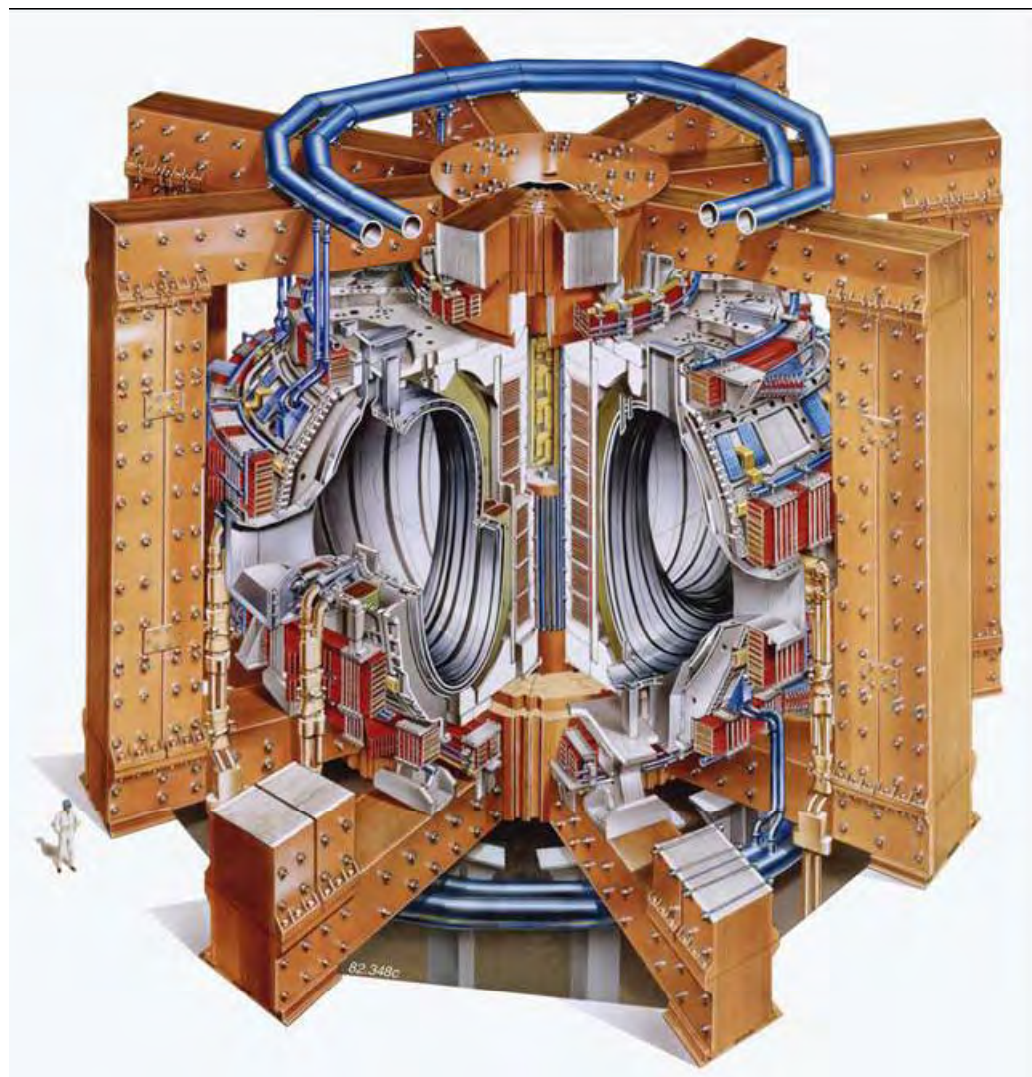
Direktno

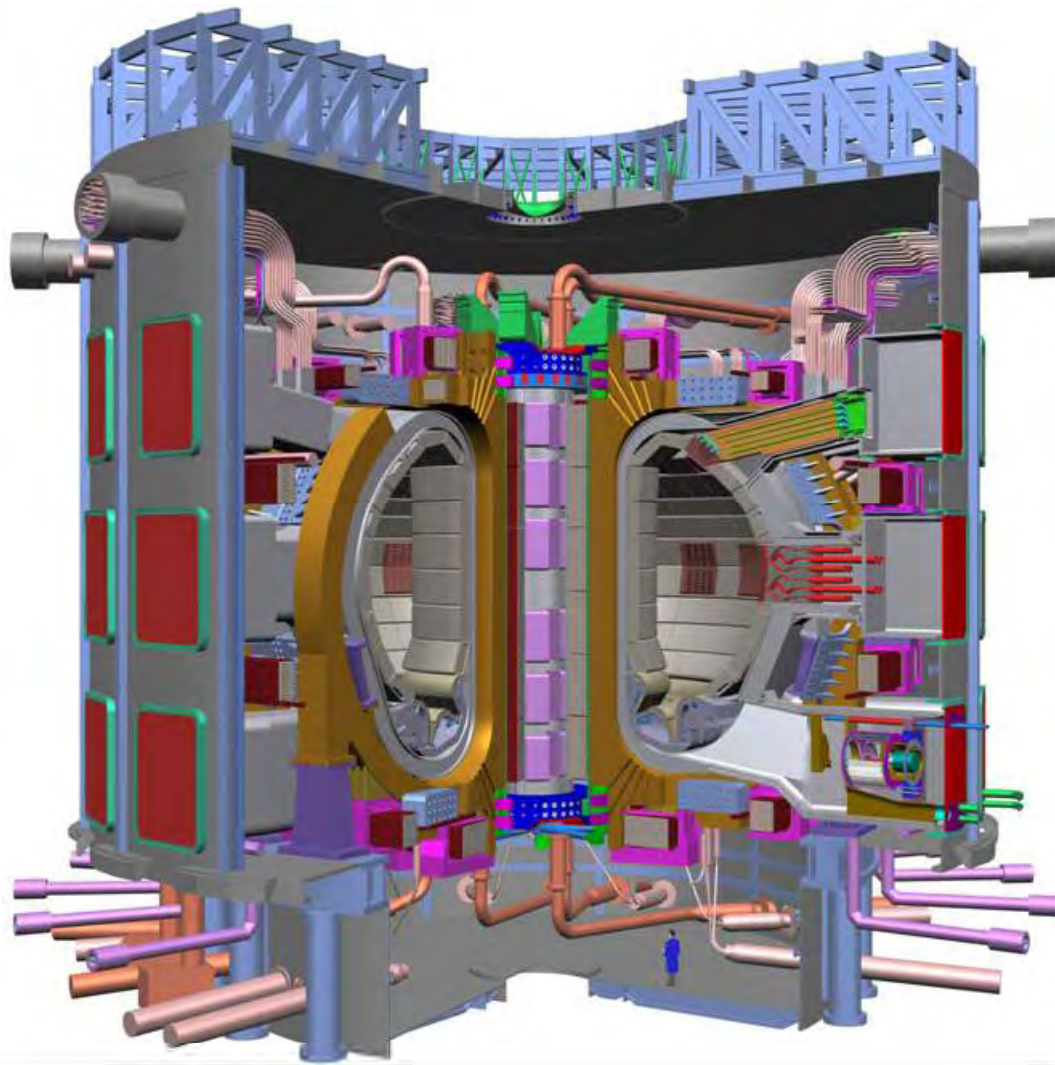
Laserske
zrake iz svih
smjerova

Indirektno i direktno obasjavanje mete laserom i meta za snop teških iona

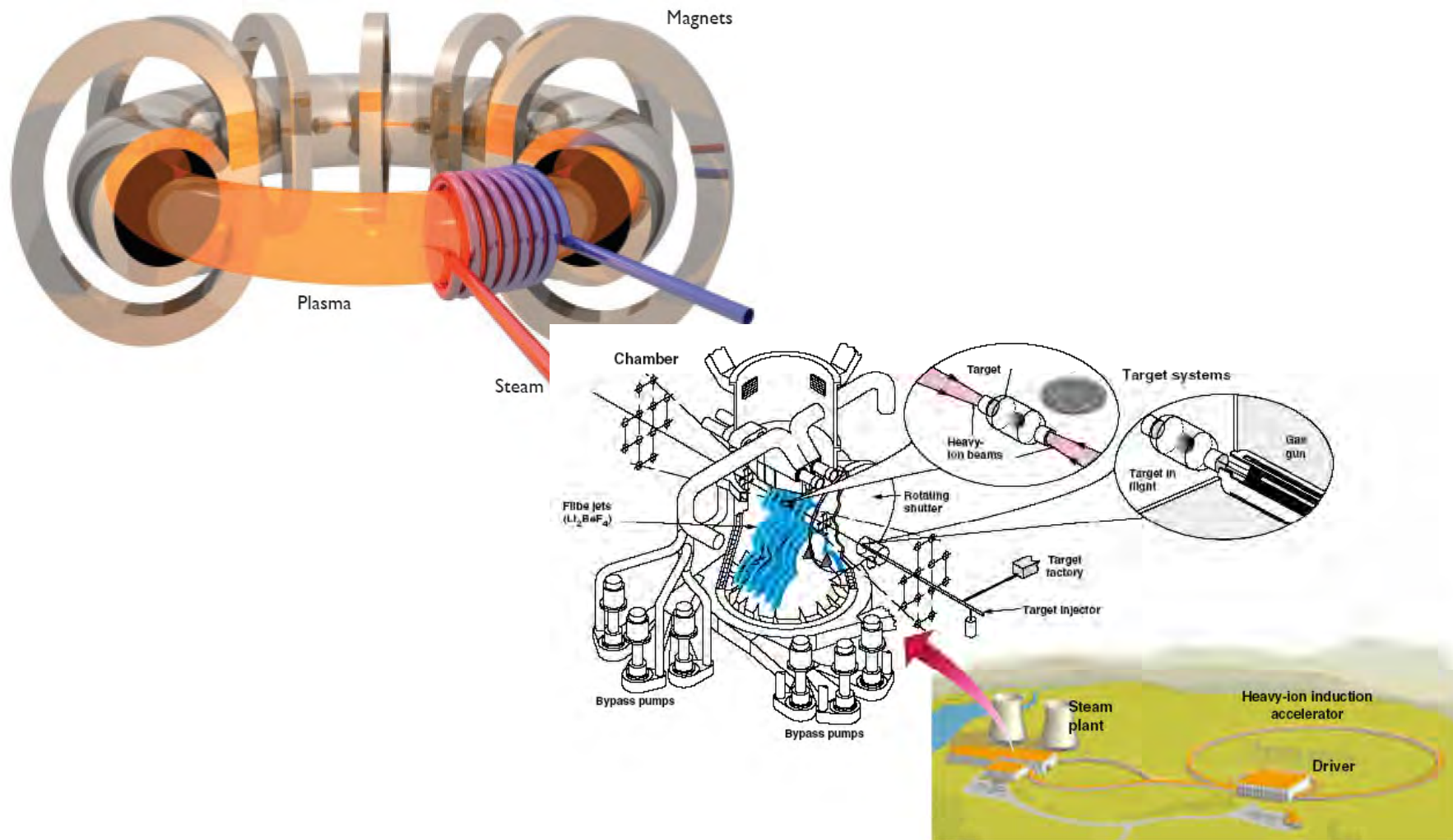


1 centimetar





Fuzijska elektrana, tip pretvorbe?



Konceptualna studija fuzijske NE

- Nastavak ITER projekta
- Definirati parametre fuzijske elektrane i potrebni razvoj
- Ocijeniti sigurnost i utjecaj na okoliš
- Ocijeniti ekonomske aspekte projekta
- Posebni projekt za tokamak a posebni za inercijalnu fuziju

