



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA
Zavod za visoki napon i energetiku

**Energijske tehnologije
Nuklearne elektrane – riješeni primjeri i zadaci**

Siniša Šadek, Davor Rašeta, Igor Vuković

Zagreb, 2012.

Nuklearne elektrane

1. Potrebno je osigurati napajanje svemirske sonde tijekom jednogodišnje misije. Sondi je potrebno najmanje 25 W električne energije za nesmetan rad. Električna energija se proizvodi u uređaju efikasnosti 10%. Kao izvor energije koristi se α -raspad Po-210. Vrijeme poluraspada Po-210 je 138 dana, a energija po raspodu $Q = 5,4 \text{ MeV}$.

Koliko je grama Po-210 je potrebno i koja je početna snaga izvora?

$$P_e = 25 \text{ W}$$

$$t = 1 \text{ god}$$

$$\eta = 0,1$$

$$T_{1/2} = 138 \text{ dana}$$

$$Q = 5,4 \text{ MeV}$$

$$m, P_0 = ?$$

a)

Da bi sonda radila zadano vrijeme, potrebno je osigurati da je na kraju tog intervala još uvijek raspoloživa dovoljna električna snaga. Na početku rada će biti raspoloživa veća snaga nego što je potrebno.

Toplinska snaga izvora nakon godinu dana misije sonde:

$$P = N \cdot \lambda \cdot Q = P_e / \eta = 25 / 0,1 = 250 \text{ W}$$

Konstanta radioaktivnog raspada

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 0,693 / (138 \cdot 86400) = 5,81 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

Broj jezgara Po-210 nakon godinu dana

$$N = P / (\lambda \cdot Q) = 250 / (5,81 \cdot 10^{-8} \cdot 5,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}) = 4,98 \cdot 10^{21} \text{ atom Po-210}$$

Zakon radioaktivnog raspada

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Broj jezgara u trenutku stavljanja izvora

$$N_0 = N(t) \cdot e^{\lambda t} = 4,98 \cdot 10^{21} \cdot e^{(5,81 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 365 \cdot 86400)} = 3,1 \cdot 10^{22} \text{ atom Po-210}$$

$$N = m \cdot N_A / A_{Po-210}$$

Masa Po-210 u trenutku stavljanja izvora

$$m = N_0 \cdot A_{Po-210} / N_A = 3,1 \cdot 10^{22} \cdot 210 / 6,022 \cdot 10^{23} = 10,81 \text{ g}$$

b)

Početna aktivnost radioaktivnog izvora

$$A_0 = N_0 \cdot \lambda = 1,8 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

Početna raspoloživa toplinska snaga

$$P_0 = A_0 \cdot Q = N_0 \cdot \lambda \cdot Q = 3,1 \cdot 10^{22} \cdot 5,81 \cdot 10^{-8} \cdot 5,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} = 1556 \text{ W}$$

$$\mathbf{m = 10,8 \text{ g}, P_0 = 1556 \text{ W}}$$

2. Jezgra nuklearnog reaktora sastavljena je od 121 gorivnog elementa. Gorivni elementi su tipa 16×16 s 20 mjesta za kontrolne šipke i jednim za instrumentaciju. Aktivna dužina goriva je $3,7 \text{ m}$ a nazivna linearna gustoća snage je $19,2 \text{ kW/m}$ (prosječna snaga proizvedena po metru gorivne šipke u nominalnim uvjetima). Reaktor je radio 7 mjeseci na punoj snazi i onda je zaustavljen.
- Izračunajte koliki je maksimalni porast temperature hladioca u jezgri 12 sati nakon konačne obustave ako pretpostavimo da sustav za odvođenje ostatne topline ima ukupan protok hladioca $192,5 \text{ kg/s}$.
 - Kolika se toplinska snaga stvara u gorivu 12 h nakon obustave? Specifični toplinski kapacitet hladioca $c_p = 4,2 \text{ kJ/kgK}$.

$$N = 121 \text{ gorivni element } (16 \times 16, 20 + 1)$$

$$L = 3,7 \text{ m}$$

$$q_l = 19,2 \text{ kW/m}$$

$$t_0 = 7 \text{ mjeseci}$$

$$\tau - t_0 = 12 \text{ sati}$$

$$\dot{m} = 96,25 \text{ kg/s}$$

$$c_p = 4,2 \text{ kJ/kgK}$$

$$\Delta T, P_{0,5 \text{ dan}} = ?$$

a)

Snaga jezgre u nominalnim uvjetima

$$P_0 = (256 - 21) \cdot 121 \cdot 3,7 \text{ m} \cdot 19,2 \text{ kW/m} = 2020 \text{ MW}$$

Ostatna toplinska snaga u ovisnosti o vremenu τ [dan] nakon t_0 dana pogona na snazi

$$P_0$$

$$P(\tau) = 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot P_0 \cdot [(\tau - t_0)^{-0,2} - \tau^{-0,2}]$$

Vrijeme pogona je 210 dana, vrijeme nakon obustave $\tau - t_0$ je 0,5 dana

$$P_{0,5 \text{ dan}} = 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot P_0 \cdot [(210+0,5-210)^{-0,2} - (210+0,5)^{-0,2}] = 9,93 \text{ MW}$$

Snaga odvedena rashladnim sustavom, pri masenom protoku \dot{m} i porastu temperature ΔT

$$P = 2 \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ (sustav za odvođenje ostatne topline ima 2 grane)}$$

Porast temperature vode u rashladnom sustavu

$$\Delta T = P / (2 \dot{m} \cdot c_p) = 9,93 \cdot 10^6 / (96,25 \cdot 2 \cdot 4,2 \cdot 10^3) = 12,3 \text{ K}$$

$$\Delta T = 12,3 \text{ K}, P_{0,5 \text{ dan}} = 9,93 \text{ MW}$$

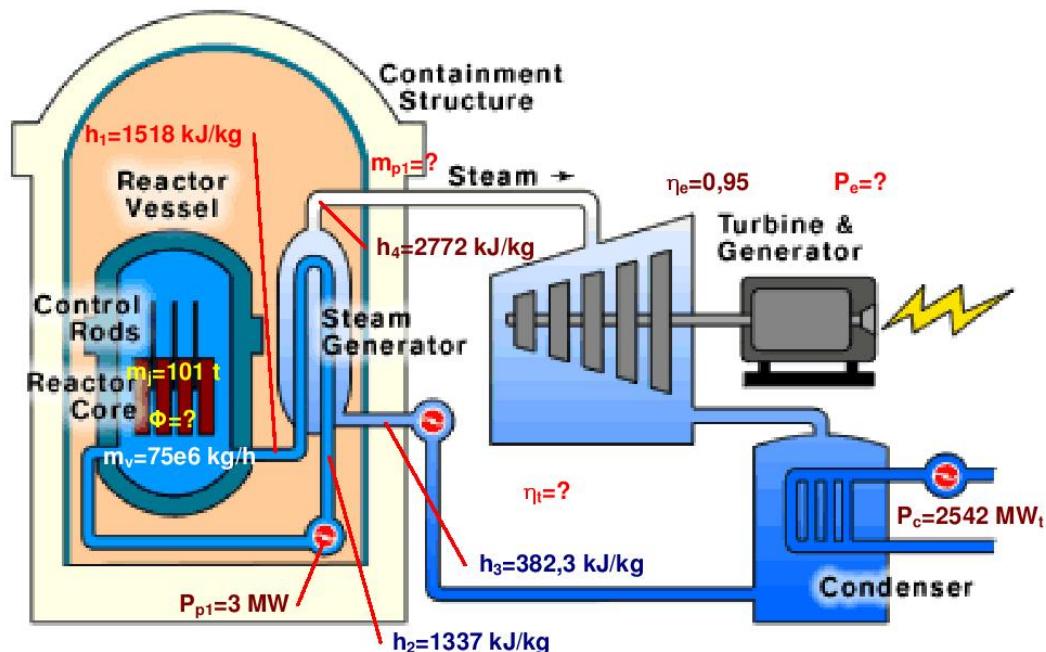
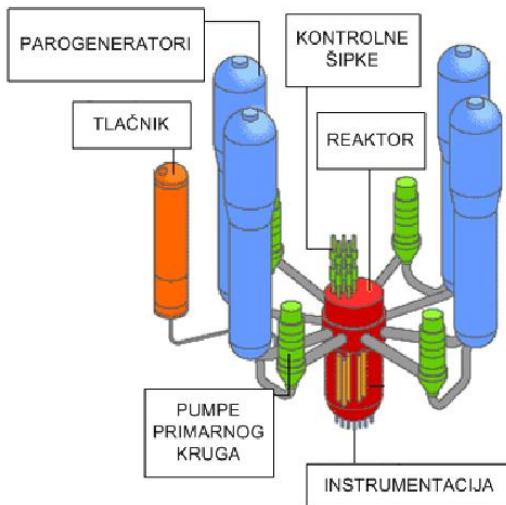
3. Nuklearna elektrana PWR tipa s 4 rashladne petlje ima ukupan maseni protok primarnog hladioca $75 \cdot 10^6 \text{ kg/h}$, a entalpije primarne vode na ulazu i izlazu iz generatora pare su $1518,1 \text{ kJ/kg}$ i $1337,3 \text{ kJ/kg}$. U kondenzatoru se predaje toplina riječnoj vodi u iznosu od 2551 MW , a ukupni stupanj djelovanja generatora je 0,95. Entalpija pojne vode generatora pare je $382,3 \text{ kJ/kg}$ a entalpija zasićene pare na izlazu je $2772,1 \text{ kJ/kg}$. Svaka od 4 primarne pumpe unese u krug toplinsku snagu od 3 MW . Ukupna snaga pumpi pojne vode na sekundarnoj strani je 9 MW . Jezgra sadrži 101 t 3% obogaćenog UO_2 , efektivnog udarnog presjeka za fisiju 580 barn ($1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$).

Odredite:

- stupanj djelovanja elektrane i maseni protok pare po generatoru pare,
- srednji neutronski tok.

$$\begin{aligned}
m_{ukupni} &= 75 \cdot 10^6 \text{ kg/h} \\
h_{prim\ ulaz} &= 1518,1 \text{ kJ/kg} \\
h_{prim\ izlaz} &= 1337,3 \text{ kJ/kg} \\
P_{kond} &= 2551 \text{ MW}_t \\
\eta_{TG} &= 0,95 \\
h_{FW} &= 382,3 \text{ kJ/kg} \\
h_{ST} &= 2772,1 \text{ kJ/kg} \\
P_{pump} &= 3 \text{ MW} \\
P_{FWtot} &= 9 \text{ MW} \\
m_{UO2} &= 101 \text{ t} \\
e &= 0,03 \\
\sigma &= 580 \text{ barn}
\end{aligned}$$

$$P_e, \eta_T, m_{sek}, \Phi = ?$$



a)

Ukupna toplinska snaga predana parogeneratorima

$$\begin{aligned}
P_T &= m_{ukupni} \cdot (h_{ulaz} - h_{izlaz}) = 75 \cdot 10^6 / 3600 \cdot (1518,1 - 1337,3) = 3766,67 \text{ MW} \\
\text{Električna snaga} &
\end{aligned}$$

$$P_e = \eta_{TG} \cdot (P_T - P_{kond} + P_{FW}) = 0,95 (3766,67 - 2551 + 9) = 1163,44 \text{ MW}$$

Stupanj djelovanja na stezaljkama generatora

$$\eta_T = P_e / P_T = 1163,44 / 3766,67 = 0,3089$$

b)

Protok pare po parogeneratoru

$$\dot{m}_{sek} = P_T / 4 / (h_{sizlaz} - h_{sulaz}) = 3766,67 \cdot 10^6 / 4 / (2772,1 \cdot 10^3 - 382,3 \cdot 10^3) = 394,05 \text{ kg/s}$$

$$P_{jezgre} = P_T - 4 \cdot P_{pumpa} = 3766,67 - 12 = 3754,67 \text{ MW}$$

c)

Toplinska snaga nuklearnog reaktora

N – broj jezgara U-235,

σ_f – mikroskopski udarni presjek za fisiju

Φ – neutronska tok

$$P = 200 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13} N \cdot \sigma_f \cdot \phi$$

e – obogaćenje goriva (težinski udjel U-235 u ukupnom uranu)

N_A – Avogadrov broj

Pretpostavljene su aproksimativne vrijednosti za atomske mase urana i kisika:

$$N = e m \frac{238}{270} \frac{N_A}{235} = 0.03 \cdot 101000 \cdot \frac{238}{270} \cdot \frac{6.022 \cdot 10^{26}}{235} = 6.844 \cdot 10^{27}$$

$$\phi = P / (200 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13} N \cdot \sigma_f)$$

$$\phi = 3754.67 \cdot 10^6 / (3.2 \cdot 10^{-11} \cdot 6.844 \cdot 10^{27} \cdot 580 \cdot 10^{-28}) = 2.96 \cdot 10^{17} n/m^2 s$$

$$\eta_T = 0,31, \dot{m}_{sek} = 394 \text{ kg/s}, \Phi = 2.96 \cdot 10^{17} n/m^2 s$$

4. Nuklearni reaktor PWR tipa ima toplinsku snagu jezgre 3800 MWt . Jezgra se sastoji od 241 gorivnog elementa s 236 gorivnih šipki po elementu. Širina gorivnog elementa je $20,7 \text{ cm}$, duljina gorivne šipke je $3,81 \text{ m}$, radijus šipke je $4,85 \text{ mm}$.

Odrediti:

- ekvivalentni promjer jezgre
- srednju volumnu gustoću snage u jezgri [MW/m^3],
- srednju snagu proizvedenu po metru duljine gorivne šipke (linearna gustoća snage šipke) [kW/m],

$$P_t = 3800 \text{ MWt}$$

$$N_{ge} = 241$$

$$N_s = 236$$

$$a_{ge} = 20,7 \text{ cm}$$

$$l_s = 3,81 \text{ m}$$

$$r_s = 4,85 \text{ mm}$$

$$D, q_v, q_l = ?$$

Površina presjeka gorivnog elementa: $a_{ge}^2 = (0,207)^2 = 0,04285 \text{ m}^2$

Površina presjeka jezgre: $A_j = 241 \cdot 0,04285 \text{ m}^2 = 10,327 \text{ m}^2$

Ekvivalentni promjer jezgre: $A_j = D^2 \pi / 4 \rightarrow D = 3,626 \text{ m}$

Aktivna visina jezgre: $L = l_s$

Aktivni volumen jezgre: $V = A_j \cdot L = 39,34 \text{ m}^3$

Volumna gustoća snage jezgre: $q_v = \frac{P_t}{V} = \frac{3800}{39,34} = 96,59 \text{ MW} / \text{m}^3$

Linearna gustoća snage šipke: $q_l = \frac{P_t}{N_{ge} \cdot N_s \cdot l_s} = \frac{3800 \cdot 10^3}{241 \cdot 236 \cdot 3,81} = 17,535 \text{ kW} / \text{m}$

5. Jezgra nuklearnog reaktora tipa PWR sadrži 76,33 t urana. Specifična snaga te jezgre na punoj snazi je $36,88 \text{ kW/kgU}$. Elektrana koristi 3 % obogaćeno gorivo. Mikroskopski udarni presjek za fisiju je $580 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$. Po jednoj fisiji oslobođe se $3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$ energije. Temperatura vode na ulazu u reaktor iznosi 296°C , a srednja temperatura vode u jezgri iznosi 312°C . Specifična toplina primarne vode je $5,875 \text{ kJ/kgK}$. Svaka primarna pumpa dovodi 3889 kg/s vode u nuklearni reaktor. U nominalnim uvjetima svaka primarna pumpa predaje vodi 4 MW topline, a u kondenzatoru se rashladnom vodom odvodi 1889 MW topline. Unutrašnji stupanj djelovanja turbine je 0,95, a stupanj djelovanja sinkronog generatora jednak je 1. Ukupna snaga pumpi pojne vode na sekundarnoj strani je 9 MW .

Odrediti:

- snagu jezgre, potreban maseni protok vode kroz jezgru, i broj primarnih rashladnih krugova;
- koliki je termički stupanj djelovanja ove elektrane i snaga na stazejkama generatora;
- srednji neutronski tok.

$$P_s = 36,88 \text{ kW/kgU}$$

$$e = 3 \%$$

$$\sigma = 580 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$k = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

$$m_U = 76,33 \text{ t}$$

$$\tau_{ul} = 296^\circ\text{C}$$

$$\tau_{sr} = 312^\circ\text{C}$$

$$c_v = 5,875 \text{ kJ/kgK}$$

$$m' = 3889 \text{ kg/s}$$

$$P_p = 4 \text{ MW}$$

$$P_{odv} = 1889 \text{ MW}$$

$$\eta_T = 0,95$$

$$\eta_G = 1$$

$$P_{FWtot} = 9 \text{ MW}$$

$$\Phi, P_j, m', n_{RK}, \eta_b, P_{el} = ?$$

a)

Toplinska snaga jezgre: $P_j = P_s \cdot m_U = 2815 \text{ MW}$

Potrebni maseni protok vode kroz jezgru:

$$T_{sr} = \frac{T_{ul} + T_{iz}}{2}$$

$$\Delta T = T_{iz} - T_{ul} = 2(T_{sr} - T_{ul}) = 32 \text{ K}$$

$$m' = \frac{P_j}{c_v \cdot \Delta T} = \frac{2815 \cdot 10^6}{5,875 \cdot 10^3 \cdot 32} = 14973,4 \text{ kg / s}$$

Broj primarnih rashladnih krugova:

$$n_{RK} = m' / m' = 14973,4 / 3889 = 3,85 \approx 4 \text{ kruga}$$

b)

Toplinska snaga koja se predaje vodi u parogeneratoru u sekundarnom krugu nuklearne elektrane jednak je snazi jezgre uvećanoj za količinu energije koju pumpe primarnog kruga predaju vodi:

$$P_{dov} = 2815 + 4 \cdot 4 = 2831 \text{ MW}$$

Termički stupanj djelovanja nuklearne elektrane (u kondenzatoru se odvodi 1889 MW topline):

$$\eta_t = 1 - P_{odv}/P_{dov} = 1 - 1889/2831 = 0,33$$

Snaga na stezaljkama sinkronog generatora:

$$P_e = \eta_T \eta_G \cdot (P_T - P_{kond} + P_{FW}) = 0,95 (2831 - 1889 + 9) = 903,45 \text{ MW}$$

c)

$$N_{U235} = e \cdot m \cdot \frac{N_A}{A} = 0,03 \cdot 1 \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{26}}{235} = 7,688 \cdot 10^{22} / \text{kg}$$

$$P_s = k \cdot N_{U235} \cdot \Phi \cdot \sigma$$

$$\Phi = \frac{P_s}{k \cdot N_{U235} \cdot \sigma} = \frac{36,88 \cdot 10^3}{3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 7,688 \cdot 10^{22} \cdot 580 \cdot 10^{-28}} = 2,585 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2 \text{ s}$$

$$\phi = 2,6 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2 \text{ s}, P_j = 2815 \text{ MW}, m = 14973 \text{ kg/s}, n_{RK} = 4, \eta_t = 0,33, P_{el} = 896 \text{ MW}$$

6. Toplinska snaga jezgre PWR reaktora iznosi 3500 MW. Reaktor ima 4 primarna rashladna kruga. Maseni je protok vode u svakom rashladnom krugu 3889 kg/s, a toplina predana vodi u primarnoj pumpi 4 MW. Entalpija pojne vode generatora pare je 380 kJ/kg, a entalpija zasićene pare na izlazu iz generatora pare 2780 kJ/kg. Koliki je maseni protok pare kroz turbinu i koliki je porast temperature vode u jezgri reaktora? Nakon 11 mjeseci rada na punoj snazi elektrana će biti obustavljena zbog remonta i izmjene goriva planiranog trajanja mjesec dana. Koliko je iznosio faktor opterećenja opisane elektrane i koliki je potrebeni maseni protok vode kroz jezgru 3 dana nakon obustave reaktora ako je izmjereni porast temperature rashladne vode od ulaza do izlaza jezgre 10 K? Specifična toplina vode je 5,875 kJ/kgK. Ako je termički stupanj djelovanja 34%, ukupna efikasnost pretvorbe mehaničke u električnu energiju 0,94 i snaga vlastite potrošnje 25 MW odrediti snagu na pragu elektrane.

ukupni maseni protok vode kroz jezgru = $4 \cdot 3889 = 15556 \text{ kg/s}$

porast temperature vode u nuklearnom reaktoru

$$\delta T = 3500 \cdot 10^6 / (15556 \cdot 5,875 \cdot 10^3) = 38,3 \text{ K}$$

toplinska snaga predana pari

$$P_t = 3500 + 4 \cdot 4 = 3516 \text{ MW}$$

maseni protok vode kroz turbinu =

$$= 3516 \cdot 10^6 / (2780 \cdot 103 - 380 \cdot 10^3) = 1465 \text{ kg/s}$$

Maseni protok kroz jezgru 3 dana nakon obustave

reaktora:

$$P = P_0 \cdot 0,0061 [(t-t_0)^{-0,2} - t^{-0,2}]$$

$$P = 3500 \cdot 0,0061 \cdot [(333-330)^{-0,2} - 333^{-0,2}] = 10,45 \text{ MW}$$

$$P = m \cdot c_v \cdot \delta T$$

$$\text{Maseni protok kroz jezgru 3 dana nakon obustave reaktora} = 10,45 \cdot 10^6 / (10 \cdot 5,875 \cdot 10^3) =$$

$$178 \text{ kg/s}$$

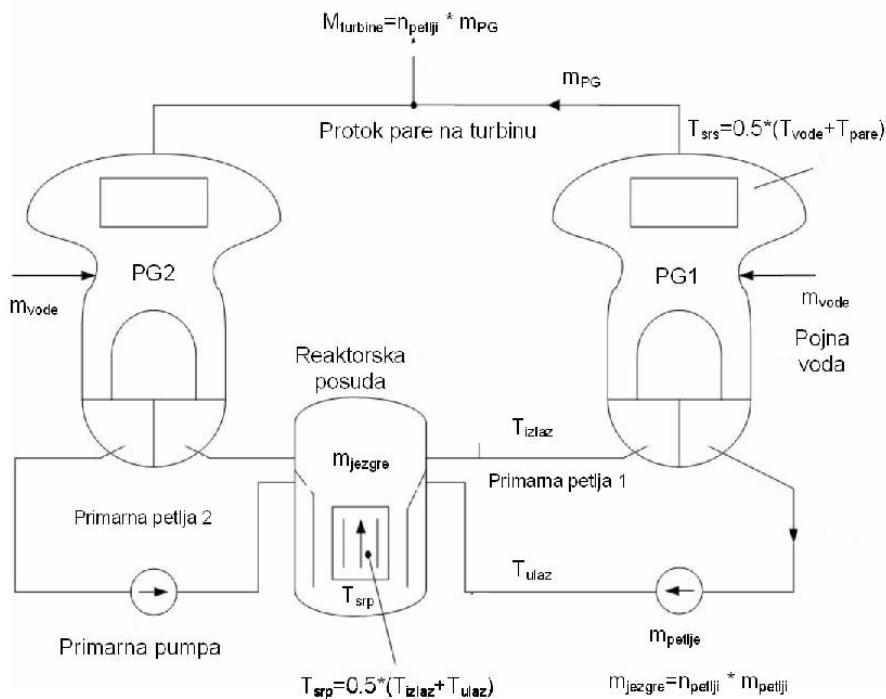
$$\text{Faktor opterećenja} = 11/12 = 91,67\%$$

$$P_{prag} = 3516 \cdot 0,34 \cdot 0,94 - 25 = 1098,7 \text{ MW}$$

7. Nuklearna elektrana PWR tipa, stupnja djelovanja 33%, s 2 rashladne petlje, daje u mrežu snagu od 690 MWe. Svaka od 2 primarne pumpe predaje hlađiocu toplinsku snagu u iznosu od 3 MW. Temperatura pojne vode je 224°C , a temperatura zasićene pare na izlazu parogeneratora je $275,6^{\circ}\text{C}$. Entalpija pojne vode i zasićene pare su $9,63 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ i $2,785 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$. Srednja temperatura primarne vode je 305°C , srednja gustoća primarne vode 716 kg/m^3 , a srednji specifični toplinski kapacitet je $5,16 \text{ kJ/kgK}$. Porast temperature hlađioča u jezgri reaktora je 40 K . Potrebno je odrediti:
- efektivni toplinski otpor cijevi parogeneratora $R_T [\text{K/MW}]$,
 - ukupni protok pare u turbinu,
 - ukupni maseni protok primarnog rashladnog sredstva kroz jezgru,
 - toplinsku snagu jezgre i
 - promjenu tlaka na primarnoj pumpi.

Potrebno je izračunati i masu UO_2 goriva u jezgri reaktora ako znamo da je srednji neutronski tok $2,8 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2\text{s}$, a obogaćenje goriva je 3% (udarni presjek za fisiju je 580 barn, a prinos energije po fisiji je 200 MeV).

Kolika je toplinska snaga ostatne topline za navedeni reaktor 3 dana nakon prekida rada koji je trajao 12 mjeseci?



Termička snaga elektrane u parogeneratorima P_T

Stupanj djelovanja: $\eta = P_E/P_T$

$$P_T = P_E / \eta = 690 / 0,33 = 2090,9 \text{ MW}$$

Broj petlji n_{petlji}

$$\text{Snaga jezgre: } P_{jezgre} = P_T - n_{petlji} \cdot P_{pumpe} = 2090,9 - 2 \cdot 3 = 2084,9 \text{ MW}$$

$$\text{Snaga parogeneratora: } P_{PG} = P_T / n_{petlji} = 2090,9 / 2 = 1045,45 \text{ MW}$$

Entalpija pare h_{pare} , entalpija pojne vode h_{vode}

Maseni protok pare na turbinu m_{turb} :

$$m_{turb} = P_T / (h_{pare} - h_{vode}) = 2090,9 \cdot 1 \cdot 10^6 / (2,785 \cdot 10^6 - 9,63 \cdot 10^5) = 1147,1 \text{ kg/s}$$

Maseni protok kroz jezgru m_{jezgre} :

$$m_{jezgre} = P_{jezgre} / (c_p \Delta T_{jezgre}) = 2084,9 \cdot 10^6 / (5,16 \cdot 10^3 \cdot 40) = 10101,3 \text{ kg/s}$$

Protok kroz petlju m_{petlje} : $m_{petlje} = m_{jezgre} / n_{petlji} = 10101,3 / 2 = 5050,65 \text{ kg/s}$

Volumni protok hladioca u petlji v_{petlje} : $v_{petlje} = m_{petlje} / \rho = 5050,65 / 716 = 7,054 \text{ m}^3/\text{s}$

Srednje temperature hladioca na primarnoj strani: $T_{srp} = 0,5 \cdot (T_{ulaz} + T_{izlaz}) = 305 \text{ }^\circ\text{C}$

Srednje temperature hladioca na sekundarnoj strani T_{srs} : $T_{srs} = 0,5 \cdot (T_{pare} + T_{vode})$

$$T_{srs} = 0,5 \cdot (275,55 + 224) = 249,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

Efektivni toplinski otpor $R_T = (T_{srp} - T_{srs}) / P_{SG} = (305 - 249,8) / 1045,45 = 0,0528 \text{ K/MW}$

Promjenu tlaka na primarnoj pumpi $\Delta p_{pumpe} \cdot P_{pumpe} = v_{petlje} \cdot \Delta p_{pumpe}$, pa je:

$$\Delta p_{pumpe} = P_{pumpe} / v_{petlje} = 3 \cdot 10^6 / 7,054 = 425,3 \text{ kPa}$$

$$P_{jezgre} = 200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot \Phi \cdot \sigma_{fis} \cdot N_{235} \rightarrow N_{235} = 2084,9 \cdot 10^6 / (200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 2,8 \cdot 10^{17} \cdot 580 \cdot 10^{-28}) = 4,0119092 \cdot 10^{27}$$

$$N_{235} = e \cdot 238 / 270 \cdot m_{UO_2} \cdot 6,022 \cdot 10^{26} / 235 \rightarrow m_{UO_2} = 59203 \text{ kg}$$

“Hlađenje”

$t = 365 + 3 = 368$ dana (od početka pogona)

$t_0 = 365$ dana (na snazi)

$$\text{Ostatna toplina } P_{ostatno} = 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot P_{jezgre} \cdot ((t - t_0)^{-0,2} - t^{-0,2})$$

$$P_{ostatno} = 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2084,9 \cdot (3^{-0,2} - 368^{-0,2}) = 6,3 \text{ MW}$$

8. Za PWR nuklearnu elektranu (lakovodni reaktor s vodom pod tlakom), s dva rashladna kruga, poznati su ovi podaci.

Primarni krug: porast temperature vode u jezgri nuklearnog reaktora $37,5 \text{ K}$, gustoća vode na izlazu iz pumpe 750 kg/m^3 , volumni protok vode na izlazu iz pumpe $6,2 \text{ m}^3/\text{s}$, porast tlaka u pumpi 609 kPa , specifična toplina vode $5,74 \text{ kJ/kgK}$.

Sekundarni krug: entalpija pojne vode parogeneratora $9,4 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$, entalpija zasićene pare na ulazu u turbinu $2,78 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$.

Tercijarni krug: porast temperature riječne vode korištene za kondenzaciju pare 15 K , specifična toplina riječne vode $4,78 \text{ kJ/kgK}$.

Termički stupanj djelovanja nuklearne elektrane: 33% .

Potrebn je izračunati:

- toplinsku snagu jezgre i snagu koju pumpa predaje vodi u primarnom krugu nuklearne elektrane (računajte s konstantnom gustoćom vode);
- maseni protok riječne vode za kondenzaciju pare;
- masu urana obogaćenja 4% potrebnu za pogon reaktora na srednjem neutronskom toku od $3,0 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2\text{s}$ (udarni presjek za fisiju je 582 barn , a energija oslobođena po fisiji 200 MeV).

Zadano:

$$\delta T_v = 37,5 \text{ K}$$

$$\rho_p = 750 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V} = 6,2 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned}
\delta p_p &= 609 \text{ kPa} \\
\eta &= 0,33 \\
\delta T_{RV} &= 15 \text{ K} \\
c_{RV} &= 4780 \text{ J/kgK} \\
e_{235} &= 4\% \\
\Phi &= 3,0 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2 \text{s} \\
\sigma_f &= 582 \text{ barn} = 582 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2 \\
E_f &= 200 \text{ MeV} = 200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/fisiji}
\end{aligned}$$

$P_j, P_p, \dot{m}_{RV}, m(U) = ?$

Rj.

a)

- toplinska snaga jezgre nuklearnog reaktora:

$$P_j = \dot{m}_v \cdot c_v \cdot \delta T_v [\text{MW}]; \dot{m}_v = ?$$

- maseni protok vode kroz jezgru nuklearnog reaktora odredit ćemo poznavajući karakteristike protoka vode kroz pumpu rashladnog kruga:

$$\begin{aligned}
\rho_v &= \frac{\dot{m}_p}{\dot{V}_p} = \frac{\dot{m}_v}{\dot{V}_p} = \frac{\dot{m}_v}{2 \cdot \rho_p \cdot \dot{V}_p} = \\
&= 2 \cdot 750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 6,2 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 9300 \frac{\text{kg}}{\text{s}}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_j &= \dot{m}_v \cdot c_p \cdot \delta T_v = 9300 \cdot 5,74 \cdot 37,5 = \\
&= 2001,8 \text{ MW}
\end{aligned}$$

- snaga koju pumpa predaje rashladnoj vodi:

$$\begin{aligned}
P_p &= \frac{\dot{m}_v}{2} \cdot v_p \cdot \delta p = \frac{9300}{2} \cdot \frac{1}{750} \cdot 609 \cdot 10^3 \\
&= 3,78 \text{ MW}
\end{aligned}$$

b)

- snaga toplinske energije predane sekundarnom krugu (u parogeneratoru):

$$\begin{aligned}
P_{SK} &= P_{PK} = P_j - 2P_p = 2001,8 - 2 \cdot 3,78 \\
&= 2009,36 \text{ MW}
\end{aligned}$$

- snaga toplinske energije koja se iz kondenzatora odvodi u okolicu:

$$\begin{aligned}
P_{kond} &= (1 - \eta) \cdot P_{SK} = (1 - 0,33) \cdot 2009,36 = \\
&= 1346,27 \text{ MW}
\end{aligned}$$

- potrebiti maseni protok rashladne (riječne) vode kroz kondenzator:

$$P_{kond} = \dot{m}_{RV} \cdot c_{RV} \cdot \delta T_{RV} \Rightarrow$$

$$\dot{m}_{RV} = \frac{P_{kond}}{c_{RV} \cdot \delta T_{RV}} = \frac{1346,27 \cdot 10^6}{4780 \cdot 15} =$$

$$= 18776,43 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

c)

$$P_j = 200 \text{ MeV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}} \cdot N_{235} \cdot \Phi \cdot \sigma_f \Rightarrow$$

$$N_{235} = \frac{P_j}{200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot \Phi \cdot \sigma_f} =$$

$$= \frac{2001,8 \cdot 10^6}{200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 3 \cdot 10^{17} \cdot 582 \cdot 10^{-28}} = 3,58 \cdot 10^{27}$$

$$m_{235} = \frac{N_{235}}{N_A} \cdot M_{235} = \frac{3,58 \cdot 10^{27}}{6,022 \cdot 10^{26}} \cdot 235 =$$

$$= 1397,04 \text{ kg}$$

$$m_{235} = e \cdot m(U) \Rightarrow m(U) = \frac{m_{235}}{e} =$$

$$= \frac{1397,04}{0,04} = 34926 \text{ kg}$$

9. Nuklearna elektrana PWR tipa ima 241 gorivni element u jezgri. Gorivni element je dužine 3,75 m, tipa 18x18 i ima 36 vodilica za kontrolne absorbere. Nominalna linearna gustoća snage gorivne šipke je 18,6 kW/m. Odrediti snagu jezgre. Porast temperature u jezgri reaktora je 33 K a specifični toplinski kapacitet hlađioca je 5,54 kJ/kg-K. Reaktor ima 3 rashladne petlje. Odredite maseni protok u jednoj petlji ovog reaktora. Ako je porast tlaka na rashladnoj pumpi je 686 kPa kolika se snaga predaje fluidu (srednja gustoća fluida je 700 kg/m^3)? Ako znamo da je stupanj djelovanja elektrane 35% koliko se topline odvodi iz kondenzatora turbine? Entalpija pojne vode je 991,3 kJ/kg a entalpija zasićene pare je 2764,13 kJ/kg. Koliki je maseni protok pojne vode po parogeneratoru? Trajanje ciklusa izgaranja je 18 mjeseci (mjesec ima 30 dana). Faktor opterećenja elektrane u tom periodu je 0,92. Kolika je masa UO_2 goriva koju je potrebno zamijeniti tijekom izmjene goriva ako računamo da je potrebno nadoknaditi samo potrošeno gorivo i da su fisije bile samo u ^{235}U ? Težinsko obogaćenje goriva je 4,3% a prinos fisije je 205 MeV. Skicirati izgled jedne petlje ovog reaktora.

$$P_j = 4841 \text{ MW}_t, m_{\text{petlje}} = 8827 \text{ kg/s}, P_{\text{pumpe}} = 8,65 \text{ MW}, P_{\text{sekundar}} = 4867 \text{ MW}_t,$$

$$P_{\text{kondenzator}} = 3164 \text{ MW}_t, P_e = 1704 \text{ MW}_e, m_{\text{pojne vode}} = 915 \text{ kg/s}, m_U = 57,5 \text{ t}, m_{\text{UO}_2} = 65,2 \text{ t}$$

10. Nuklearna elektrana tipa PWR ima 4 rashladne petlje. Temperatura rashladnog fluida na ulazu u jezgru je 290°C , a na izlazu iz jezgre 325°C . Svaka od 4 primarne pumpe unosi u krug toplinski snagu od 5 MW. Promjena tlaka na primarnoj pumpi je 700 kPa. Srednja gustoća primarnog rashladnog fluida je 727 kg/m^3 , a efektivni specifični toplinski kapacitet 5,46 kJ/kgK. Izračunati:

a) masu 2% obogaćenog UO_2 goriva za proizvodnju 1 MW snage jezgre, ako je srednji neutronski tok u jezgri $3 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2\text{s}$. Efektivni udarni presjek za fisiju je $580 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$. Prinos energije po fisiji je 200 MeV.

b) električnu snagu elektrane, ako je termički stupanj djelovanja 0.30.

$$m = 39,8 \text{ kg}, P_e = 1197 \text{ MW}$$

11. BWR reaktor u stacionarnom stanju na punoj snazi proizvodi 1950 kg/s pare s udjelom vlage 5 % pri tlaku 7,2 MPa. Entalpija pojne vode je 927 kJ/kg, a entalpije zasićene vode i pare na tlaku od 7,2 MPa su $h = 1278 \text{ kJ/kg}$ i $h'' = 2770 \text{ kJ/kg}$. Izračunati toplinsku snagu reaktora. Zanemariti gubitke topline iz reaktora i porast energije fluida zbog rada pumpanja recirkulacijskih pumpi.

$$P_t = 3450 \text{ MW}$$

12. Nuklearno gorivo je u trenutku vađenja iz reaktora postiglo odgor od 40 GWd po toni urana. Inicijalno je obogaćenje bilo 5% ^{235}U . Koliko je obogaćenje u trenutku vađenja goriva iz reaktora ako prepostavimo da je jedina nuklearna reakcija koja se odvijala tijekom boravka goriva u reaktoru reakcija fisije u ^{235}U i da se jednom fisijom oslobodi 200 MeV energije? Obogaćenje izraziti kao maseni udio ^{235}U u inicijalnoj masi uran metalala.

$$e = 0,785\%$$

Rj.

Početna masa ^{235}U je $0,05 * 1000 \text{ kg} = 50 \text{ kg}$

Da se proizvede 40 GWd energije treba $40 \cdot 10^9 \cdot 86400 / (200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}) = 1,09 \cdot 10^{26}$ fisija
Što odgovara masi od $m = 235 \cdot N / 6,022 \cdot 10^{26} = 42,145 \text{ kg } ^{235}\text{U}$.

Preostala masa ^{235}U nakon boravka u reaktoru je $50 - 42,145 = 7,855 \text{ kg}$, a odgovarajuće obogaćenje je $7,855 / 1000 = 0,785\%$

13. Gorivni element obogaćenja 5% postigao je u trenutku vađenja iz reaktora srednji odgor od 35000 MWd/t_U (energija proizvedena po toni urana). Koji je postotak inicijalno prisutnih jezgara ^{235}U doživio fisiju ako prepostavimo da su sve fisije bile s ^{235}U i da se po jednoj oslobodi 210 MeV energije?

$$70\%$$

14. Izračunati potrebnu masu UO_2 goriva obogaćenja 3 % ako se zna da je snaga jezgre 1994 MW, srednji tok termičkih neutrona u reaktoru $3 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$, a mikroskopski udarni presjek za fisiju $580 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2$. Pri fisiji se oslobodi 200 MeV energije. Atomsku masu urana računati aproksimativno.

$$m = 52830 \text{ kg}$$

15. Sustav za odvođenje ostatne topline projektiran je tako da svaki od njegova dva podsustava može odvesti toplinu u iznosu od 5,96 MW. Ako je nominalna snaga jezgre 1994 MW koliko najviše dana smije iznositi vrijeme neprekidnog pogona reaktora na punoj snazi da bi 3 dana nakon obustave za hlađenje bio dovoljan samo jedan podsustav za odvođenje topline.

$$331 \text{ d}$$

16. Obogaćenje goriva nekog PWR reaktora je 4,3%, mikroskopski udarni presjek za fisiju 580 barn ($1 \text{ barn} = 1 \cdot 10^{28} \text{ m}^2$), prosječni neutronski tok na punoj snazi $1,4 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2\text{s}$ (pri

jednoj fisiji se osloboodi 205 MeV energije, 1 MeV je $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, a masa UO_2 goriva u jezgri reaktora je 187 t . Izračunati ostatnu toplinsku snagu jezgre 5 dana nakon obustave reaktora koji je na 95% pune snage besprekidno radio 2 mjeseca (mjesec ima 30 dana).

$$P_t = 4836,67 \text{ MW}, \text{ostatna toplina } 8,152 \text{ MW}$$

17. Koliko iznosi srednja linearna gustoća snage gorivne šipke reaktora koji ima snagu jezgre 1994 MW sa 121 gorivnim elementom tipa 16×16 (gorivni element ima 21 lokaciju za vodilice kontrolnih šipki). Dužina gorivnog elementa je $3,66 \text{ m}$ a poznato je da se $97,4\%$ ukupne nuklearne topline osloboodi u gorivu.

$$18,66 \text{ kW/m}$$

Rj.

$$\begin{aligned} 121 \cdot (16 \cdot 16 - 21) \cdot 3,66 &= 104072,1 \text{ m} \\ 1994 \cdot 10^3 \cdot 0,974 / 104072,1 &= \mathbf{18,66 \text{ kW/m}} \end{aligned}$$

18. Nuklearna elektrana PWR tipa s 3 primarne rashladne petlje ima 157 gorivnih elemenata u jezgri. Gorivni element ima 260 gorivnih šipki dužine $4,2 \text{ m}$ i nominalne lineарне gustoće snage $15,5 \text{ kW/m}$. Primarna rashladna pumpa u nominalnoj radnoj točki predaje fluidu $3,75 \text{ MW}$ i ostvaruje porast tlaka od 600 kPa .

Koliki je porast temperature hladioca u jezgri reaktora ako je specifični toplinski kapacitet i gustoća hladioca $5,17 \text{ kJ/kg K}$ i 753 kg/m^3 ?

Odredite snagu elektrane na pragu uz stupanj djelovanja od 34% i vlastitu potrošnju elektrane od 35 MW .

$$\Delta T = 36,4 \text{ K}, P_e = 872 \text{ MW}$$

19. Radioizotopni generator efikasnosti 15% pogoni neki električni uređaj. Kao izvor energije koristi se α raspad ^{241}Am . Za pogon uređaja potrebna je minimalna električna snaga od 15 We . U kojem trenutku (u godinama) će uređaj prestati funkcionirati ako je početna masa ^{241}Am 1 kg ? Konstanta radioaktivnog raspada ^{241}Am je $51 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$, a energija dobivena jednim raspadom $5,6 \text{ MeV}$.

$$t = 82 \text{ g}$$

20. Radioizotopni izvor stupnja djelovanja 15% koristi se za pogon električnog uređaja. Po jednom raspodu ^{238}Pu osloboodi se $5,68 \text{ MeV}$ energije. Ako je inicijalna masa PuC 200 g i vrijeme poluraspada 86 godina, koliko je ukupno električne energije proizvedeno tijekom prve godine pogona izvora?

$$E = 146 \text{ kWh}$$

21. Svetarska sonda je projektirana za dvogodišnju misiju (standardna godina od 365 dana) izvan granica Sunčeva sustava. Ukupna snaga električnih uređaja koje nosi iznosi 100 W . Snabdijeva ih radioizotopni termoionski generator na bazi ^{210}Po . Ako je efikasnost pretvorbe 15% , vrijeme poluraspada ^{210}Po 138 dana, a energija po raspodu $Q = 5,4 \text{ MeV}$ izračunati inicijalnu masu ^{210}Po .

$$m = 181 \text{ g}$$

(9) PWR

-241 gorimi element dužine 3,75m, tipa 18x18 s 36 vodilica za kontrolne absorbere

$$a) N = 241 \quad (18 \times 18, 36)$$

$$L = 3,75 \text{ m}$$

$$g_0 = 18,6 \text{ kW/m}$$

~~~

$$P_j = ?$$

$$P_j = (18 \times 18 - 36) \cdot N \cdot L \cdot g_0 = (324 - 36) \cdot 241 \cdot 3,75 \cdot 18,6 \cdot 10^{-3} = 4841,21 \text{ MW}$$

$$b) \Delta T_j = 33 \text{ K}$$

$$c_p = 5,54 \text{ kJ/kgK} = 5540 \text{ J/kgK}$$

$$\eta_{petlje} = 3$$

$$\dot{m}_j = \frac{P_j}{c_p \cdot \Delta T_j} = \frac{4841,21 \cdot 10^6}{5540 \cdot 33} = 26480,75 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{petlje} = \frac{\dot{m}_j}{\eta_{petlje}} = \frac{26480,75}{3} = 8826,92 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$c) \Delta p_{pumpe} = 686 \text{ kPa}$$

$$\rho = 700 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{v}_{petlje} = \frac{\dot{m}_{petlje}}{\rho} = \frac{8826,92}{700} = 12,61 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$P_{pumpe} = \dot{v}_{petlje} \cdot \Delta p_{pumpe} = 12,61 \cdot 686 \cdot 10^3 = 8,65 \text{ MW}$$

$$d) \eta = 35 \%$$

broj petlji

$$P_{Sk} = P_j + 3 \cdot P_{pumpe} = 4841,21 + 3 \cdot 8,65 = 4867,16 \text{ MWt}$$

$$P_{kond} = (1 - \eta) P_{Sk} = 0,65 \cdot 4867,16 = 3163,65 \text{ MWt}$$

$$e) h_{vode} = 991,3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{pare} = 2764,13 \text{ kJ/kg}$$

$$P_T = \frac{P_{Sk}}{\eta_{petlje}} = \frac{4867,16 \cdot 10^6}{3}$$

$$\dot{m}_{pojne vode} = \frac{P_T}{h_{pare} - h_{vode}} = \frac{4867,16 \cdot 10^6}{3(2764,13 - 991,3) \cdot 10^3} = 915 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$f) t = 18 \text{ mjeseci} = 18 \cdot 30 \text{ dana} = 540 \text{ dana} = 540 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}$$

$$\text{- nominalna snaga: } P_0 = \dot{P} = 4841,21 \text{ MW}$$

$$\epsilon = 4,3\% = 0,043$$

$$E_f = 205 \text{ MeV} = 205 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$\text{proizvedena energija} = P_0 \cdot t \cdot 0,92 = 4841,21 \cdot 10^6 \cdot 540 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 0,92 = 2,078 \cdot 10^{17} \text{ J}$$

$$N_{U235} = \frac{\text{proizvedena energija}}{\text{prirodnji fizičke}} = \frac{2,078 \cdot 10^{17}}{205 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}} = 6,3354 \cdot 10^{27} \text{ atoma}$$

$$N_{U235} = e \cdot m_{UO2} \cdot \frac{228}{270} \cdot \frac{N_A}{235}$$

$$\Rightarrow m_{UO2} = \frac{N_{U235} \cdot 270 \cdot 235}{e \cdot 238 \cdot N_A} = \frac{6,3354 \cdot 10^{27} \cdot 270 \cdot 235}{0,043 \cdot 238 \cdot 6,022 \cdot 10^{26}} = 65,226 \text{ t}$$

$$\eta_{235} = \frac{m_{235}}{M_{235}} = \frac{N_{235}}{N_A}$$

$$m_{235} = \frac{N_{U235} \cdot M_{U235}}{N_A} = \frac{6,3354 \cdot 10^{27} \cdot 235}{6,022 \cdot 10^{26}} = 2,47 \text{ t}$$

$$e = \frac{m_{235}}{m_u} \Rightarrow m_u = \frac{m_{235}}{e} = \frac{2,47}{0,043} = 57,44 \text{ t}$$

(10) PWR

$$\begin{aligned}n_{\text{pettji}} &= 4 \\T_{1a2} &= 290 + 273,15 \text{ K} \\T_{2a2} &= 325 + 273,15 \text{ K} \\P_{\text{pumpe}} &= 5 \text{ MW} \\\Delta p_{\text{pumpe}} &= 700 \text{ kPa} \\g &= 727 \text{ kg/m}^3 \\c_p &= 5,46 \text{ kJ/kg K}\end{aligned}$$

a)  $e = 2\% = 0.02$

$$\begin{aligned}P_j &= 1 \text{ MW} \\\Phi &= 3 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2 \text{s} \\O_f &= 580 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2 \\E_f &= 200 \text{ MeV}\end{aligned}$$

$$m_{UO_2} = ?$$

$$P_j = E_f \cdot N_{U235} \cdot O_f \cdot \Phi$$

$$\Rightarrow N_{U235} = \frac{P_j}{E_f \cdot O_f \cdot \Phi} = \frac{10^6}{200 \cdot 1,6 \cdot 10^{-18} \cdot 580 \cdot 10^{-28} \cdot 3 \cdot 10^{17}} = 1,7959 \cdot 10^{24}$$

$$N_{U235} = e \cdot m_{UO_2} \cdot \frac{238}{270} \cdot \frac{N_A}{235}$$

$$\Rightarrow m_{UO_2} = \frac{N_{U235} \cdot 270 \cdot 235}{e \cdot 238 \cdot N_A} = \frac{1,7959 \cdot 10^{24} \cdot 270 \cdot 235}{0,02 \cdot 238 \cdot 6,022 \cdot 10^{26}} = 39,75 \text{ kg}$$

b)  
 $P_e = ?$

$$\eta_T = 0,3$$

$$P_{\text{pumpe}} = \dot{v}_{\text{pettji}} \cdot \Delta p_{\text{pumpe}}$$

$$P_{\text{pumpe}} = \frac{\dot{m}_{\text{pettji}}}{g} \cdot \Delta p_{\text{pumpe}}$$

$$P_{\text{pumpe}} = \frac{\dot{m}_j}{\frac{n_{\text{pettji}}}{g}} \cdot \Delta p_{\text{pumpe}}$$

$$\dot{m}_j = \frac{P_j}{c_p \cdot \Delta T_j} \Rightarrow P_{\text{pumpe}} = \frac{\frac{P_j}{c_p \cdot \Delta T_j}}{\frac{n_{\text{pettji}}}{g}} \cdot \Delta p_{\text{pumpe}}$$

$$P_{\text{pumpe}} = \frac{P_j}{c_p \cdot \Delta T \cdot n_{\text{pettji}} \cdot g} \cdot \Delta p_{\text{pumpe}} \Rightarrow P_j = P_{\text{pumpe}} \cdot \frac{c_p \cdot \Delta T \cdot n_{\text{pettji}} \cdot g}{\Delta p_{\text{pumpe}}} =$$

$$P_j = 3969,42 \text{ MW}$$

$$P_j = P_T - \eta_{pump} \cdot P_{pumpe}$$

$$\Rightarrow P_T = P_j + \eta_{pump} \cdot P_{pumpe} = 3989,42 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{P_E}{P_T} \Rightarrow P_E = P_T \cdot \eta = 3989,42 \cdot 0,3 = \boxed{1196,82 \text{ MW}}$$

### 11. BWR

$$\dot{m}_{pare} = 1950 \text{ kg/s}$$

$$h_{paročne vode} = 927 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned} h' &= 1278 \text{ kJ/kg} \\ h'' &= 2770 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$P_t = ?$$

- maseni sadržaj pare je:

$$x = 1 - 0,05 = 0,95$$

$$h_{pare} = (1-x)h' + x \cdot h'' = 0,05h' + 0,95h'' = 2695,4 \text{ kJ/kg}$$

- snaga jesgre:

$$P_j = \dot{m}_{pare} \cdot (h_{pare} - h_{paročne vode}) =$$

$$P_j = 1950 \cdot ((2695,4 - 927) \cdot 10^3) = \boxed{3448,38 \text{ MW}}$$

- piše u zadatku zanemariti gubitke zbog topline i pumpi,  
pa je  $P_j = P_T$  tražena snaga.

(13) početna masa  $^{235}\text{U}$  je  $0.05 \cdot 1000 \text{ kg} = 50 \text{ kg} = m_0$

$$N/N_0 = \frac{m_0 \cdot N_A}{M} \cdot \frac{50 \cdot 6,022 \cdot 10^{26}}{235} = 1,28127 \cdot 10^{26}$$

$$N = \frac{35000 \cdot 10^6 \cdot 86400}{2 \cdot 10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}} = 9 \cdot 10^{25}$$

postotak jezgara u fizijsi:  $\frac{N}{N_0} = \boxed{70.29\%}$

(14)

$$e = 3\% = 0.03$$

$$P_j = 1994 \text{ MW}$$

$$\bar{\Phi} = 3 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{s} = 3 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^2 \text{s}$$

$$\bar{\Omega}_f = 580 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 580 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$E_f = 200 \text{ MeV}$$

$$m_{UO2} = ?$$

$$P_j = E_f \cdot N_{U235} \cdot \bar{\Omega}_f \cdot \bar{\Phi}$$

$$\Rightarrow N_{U235} = \frac{P_j}{E_f \cdot \bar{\Omega}_f \cdot \bar{\Phi}} = \frac{1994 \cdot 10^6}{200 \cdot 1,6 \cdot 10^{13} \cdot 580 \cdot 10^{-28} \cdot 3 \cdot 10^{17}} = \underline{\underline{3,58 \cdot 10^{27}}}$$

$$N_{U235} = e \cdot m_{UO2} \cdot \frac{238}{270} \cdot \frac{N_A}{235}$$

$$\Rightarrow m_{UO2} = \frac{N_{U235} \cdot 270 \cdot 235}{e \cdot 238 \cdot N_A} = \boxed{52846 \text{ kg}}$$

$$(15) \quad P = 5,96 \text{ MW}$$

$$P_j = P_0 = 1994 \text{ MW}$$

$$t = t_0 + 3 \rightarrow t_0 = t - 3$$

$$P = 0,0061 \cdot P_0 \left[ (t - t_0)^{-0,2} - t^{-0,2} \right]$$

$$5,96 = 0,0061 \cdot 1994 \left[ 3^{-0,2} - t^{-0,2} \right]$$

$$3^{-0,2} - t^{-0,2} = \frac{5,96}{0,0061 \cdot 1994}$$

$$t^{-0,2} = 3^{-0,2} - \frac{5,96}{0,0061 \cdot 1994}$$

$$t^{-0,2} = 0,3127469$$

$$t \approx 334 \text{ dana}$$

$$t_0 = t - 3 = \boxed{331 \text{ dana}}$$

$$(16) \quad e = 4,3 \% = 0,043$$

$$\sigma_f = 580 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$\rho = 1,4 \cdot 10^{17} \text{ n/m}^3$$

$$E_f = 205 \text{ MeV} = 205 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$m_{\alpha_2} = 187 \text{ t}$$

$$t_0 = 2 \text{ miesiąca} = 60 \text{ dana}$$

$$t = 65 \text{ dana}$$

$$N_{U_{235}} = e \cdot m_{\alpha_2} \cdot \frac{238}{270} \cdot \frac{N_A}{235} = 0,043 \cdot 187 \cdot 10^3 \cdot \frac{238}{270} \cdot \frac{6,022 \cdot 10^{26}}{235}$$

$$N_{U_{235}} = 1,816 \cdot 10^{28}$$

$$P_j = E_f \cdot N_{U_{235}} \cdot \sigma_f \cdot \rho = 4836,66 \text{ MW}$$

$$P_0 = 0,85 P_j = 4594,83 \text{ MW}$$

$$P = 0,0061 \cdot P_0 \left[ (65 - 60)^{-0,2} - 65^{-0,2} \right] = \boxed{8,152 \text{ MW}}$$

(18.) PWR

$$\eta_{peltje} = 3$$

$N = 157$  gorivnih elemenata s 260 šipki

$$L = 4,2 \text{ m}$$

$$g_0 = 15,5 \text{ kW/m}$$

$$P_{\text{pumpe}} = 3,75 \text{ MW}$$

$$\Delta p_{\text{pumpe}} = 600 \text{ kPa}$$

a)  $c_p = 5,17 \text{ kJ/kgK}$   
 $\gamma = 753 \text{ kg/m}^3$

$$P_j = 260 \cdot 157 \cdot 4,2 \cdot 15,5 = 2657,38 \text{ MW}$$

$$P_{\text{pumpe}} = \dot{V}_{\text{peltje}} \cdot \Delta p_{\text{pumpe}}$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{\text{peltje}} = \frac{P_{\text{pumpe}}}{\Delta p_{\text{pumpe}}} = \frac{3,75 \cdot 10^6}{600 \cdot 10^3} = 6,25 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{V}_{\text{peltje}} = \frac{\dot{m}_{\text{peltje}}}{\rho}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{\text{peltje}} = \dot{V}_{\text{peltje}} \cdot \rho = 6,25 \cdot 753 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{\text{peltje}} = \frac{\dot{m}_j}{\eta_{\text{peltje}}}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_j = \dot{m}_{\text{peltje}} \cdot \eta_{\text{peltje}} = 14118,75 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_j = \frac{P_j}{c_p \cdot \Delta T}$$

$$\Rightarrow \Delta T = \frac{P_j}{\dot{m}_j \cdot c_p} = \boxed{36,4 \text{ K}}$$

$$b) P_e = 2 \\ P_V = 35 \text{ MW} \\ \underline{\eta = 34\% = 0.34}$$

$$P_j = P_T - \eta_{\text{peltgi}} \cdot P_{\text{pumpe}} \\ \Rightarrow P_T = P_j + \eta_p P_P = 2657,38 + 3 \cdot 3,75 = 2668,63 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{P_e + P_V}{P_T} \Rightarrow P_e = \eta \cdot P_T - P_V = \boxed{872,33 \text{ MW}}$$

$$(19.) \lambda = 51 \cdot 10^{-12} \text{ s} \quad ^{241}\text{Am} \quad \alpha\text{-raspad}$$

$$E_\alpha = 5,6 \text{ MeV} = 5,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$\eta = 15\% = 0.15$$

$$P_{\text{min}} = 15 \text{ W}$$

$$m_0(^{241}\text{Am}) = 1 \text{ kg}$$

$$m_0 = N_0 \cdot \frac{A(^{241}\text{Am})}{N_A}$$

$$\Rightarrow N_0 = \frac{m_0 \cdot N_A}{A_{\text{Am}}} = \frac{1 \cdot 6,022 \cdot 10^{26}}{241} = 2,4987 \cdot 10^{24} \text{ atoma}$$

$$P = N \cdot \lambda \cdot E_\alpha = \frac{P_e}{\eta} = 100 \text{ W}$$

$$\Rightarrow N = \frac{P}{\lambda \cdot E_\alpha} = 2,188 \cdot 10^{24} \text{ atoma}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$N_0 = N \cdot e^{\lambda t}$$

$$e^{\lambda t} = \frac{N_0}{N} = 1.142 \quad / \ln$$

$$\lambda t = \ln(1.142)$$

$$t = \frac{\ln(1.142)}{\lambda} = \boxed{82,56 \text{ godine}}$$

→ dobi se u sekundama,  
pa se mora podijeliti s  
86400 da se dobe dani  
i s 365 za godine

(20)  $\eta = 15\%$   
 $Q = 5,68 \text{ MeV}$

$$m_{PuC} = 0,2 \text{ kg}$$

$$T_{1/2} = 86 \text{ godina}$$

$$N_0 = \frac{m_{PuC} \cdot N_A}{A_{PuC}} = \frac{0,2 \cdot 6,022 \cdot 10^{26}}{238 + 12} = 4,8176 \cdot 10^{23}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 2,55576 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$t = 1 \text{ god} = 365 \cdot 86400 \text{ s}$$

$$N = 4,8176 \cdot 10^{23} \cdot e^{-2,55576 \cdot 10^{-10} \cdot 365 \cdot 86400}$$

$$N = 4,7789 \cdot 10^{23}$$

$$P = N \cdot \lambda \cdot Q = 4,7789 \cdot 10^{23} \cdot 2,55576 \cdot 10^{-10} \cdot 5,68 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}$$

$$P = 111 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_e}{P} \Rightarrow P_e = P \cdot \eta = 16,65 \text{ W}$$

- za 1 godinu:

$$E = P \cdot 365 \cdot 24 = \boxed{146 \text{ kWh}}$$

(21.)

$$P = N \cdot \lambda \cdot Q = \frac{P_e}{\eta} = \frac{100}{0,15} = 666,7 \text{ W}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{12}} = \frac{0,693}{138 \cdot 86400} = 5,813 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

$$N = \frac{P}{\lambda \cdot Q} = \frac{666,7}{5,813 \cdot 10^{-8} \cdot 5,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}} = 1,327 \cdot 10^{22} \text{ atoma}$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$N_0 = N \cdot e^{\lambda t} = 1,327 \cdot 10^{22} \cdot e^{(5,813 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 365 \cdot 86400)} = 5,19 \cdot 10^{23} \text{ atoma}$$

$$N = m \cdot \frac{N_A}{A_{^{182}O}} \Rightarrow m_0 = N_0 \cdot \frac{A_{^{182}O}}{N_A} = 5,19 \cdot 10^{23} \cdot \frac{210}{6,022 \cdot 10^{23}} = \boxed{181 \text{ g}}$$