

Reaktorska tehnika in energetika

Vaje za šolsko leto 2013/2014

1 Uvod

1.1 Diskusija

1. Po čem se razlikujeta konvencionalna in jedrska elektrarna!
2. Kakšne so prednosti in slabosti izkoriščanja jedrske cepitve za proizvodnjo energije?
3. Identificiraj šest referenčnih tipov reaktorjev, ki so danes v uporabi!

1.2 Osnovni preračuni

4. Poenostavimo, da je naše osončje nastalo zgolj iz ene eksplozije supernova. Kdaj je prišlo do te eksplozije, če je bilo ob nastanku supernove masno razmerje med ^{235}U in ^{238}U 1.65, danes pa je 0.007?
5. Pridobili smo 1 tona rude, v kateri je delež urana 0.25wt%. V uranu je delež ^{235}U 0.7wt%.
 - a. Koliko je uranove rude in ^{235}U je v 1 toni rude?
 - b. Pridobljeno uranovo rudo je potrebno obogatiti (želimo povečati delež ^{235}U). Dobiti želimo frakcijo s 3wt% ^{235}U in osiromašeno frakcijo z 0.3wt%. Koliko gramov obogatene urana smo pridobili?
6. Kakšna je aktivnost uranove rude?

1.3 Jedrska varnost

7. Zakasnelo toploto popisuje enačba: $\frac{P(t)}{P_0} = 0.066(t^{-0.2} - (t + t_0)^{-0.2})$. Kako hitro se bo sredica segrela uro po zaustavitvi, če v tistem trenutku zanemarimo vse prenose toplote? Reaktor je deloval zelo dolgo pri moči 2000 MW, masa sredice je 50 ton in specifična toplota 500 J/kg/K.

2 Jedrska fizika

2.1 Jedrske reakcije

8. Obravnavaj naslednje reakcije:
 - a. $^1_1\text{H} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^2_1\text{H})^* \rightarrow ^1_1\text{H} + ^1_0\text{n}$
 - b. $^{56}_{26}\text{Fe} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^{57}_{26}\text{Fe})^* \rightarrow (^{56}_{26}\text{Fe}) + ^1_0\text{n}$
 - c. $^{23}_{11}\text{Na} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^{24}_{11}\text{Na})^* \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + ^0_0\gamma$
 - d. $^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^{11}_5\text{B})^* \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\alpha$
 - e. $^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^{11}_5\text{B})^* \rightarrow ^3_1\text{H} + 2^4_2\alpha$
 - f. $^{16}_8\text{O} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^{17}_8\text{O})^* \rightarrow ^{16}_7\text{N} + ^1_1\text{p}$
 - g. $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^{236}_{92}\text{U})^* \rightarrow \text{F1} + \text{F2} + \text{X}^1_0\text{n} + \text{Y}^0_0\gamma$
 - h. $^9_4\text{Be} + ^4_2\alpha \rightarrow (^{13}_6\text{C})^* \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^1_0\text{n}$
 - i. $^2_1\text{H} + ^0_0\gamma \rightarrow (^2_1\text{H})^* \rightarrow ^1_1\text{H} + ^1_0\text{n}$
9. Z uporabo podatkov v tabeli analiziraj naslednje jedrske reakcije:
 - a. $^2_1\text{H} + ^0_0\gamma \rightarrow (^2_1\text{H})^* \rightarrow ^1_1\text{H} + ^1_0\text{n}$
 - b. $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow (^5_2\text{He})^* \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$
 - c. $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow (^{236}_{92}\text{U})^* \rightarrow ^{143}_{54}\text{Xe} + ^{91}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

| Nukleid | masa |
|------------|--------------|
| 1_0n | 1.008665 amu |
| 1_1H | 1.007825 amu |
| 2_1H | 2.014102 amu |
| 3_1H | 3.016047 amu |
| 4_2He | 4.002603 amu |

| Število nukleonov | Vezavna energija |
|-------------------|------------------|
| 90-91 | 8.8 MeV/nukleon |
| 143-144 | 8.3 MeV/nukleon |
| 235 | 7.6 MeV/nukleon |

$E_0=931.5 \text{ MeV/amu}$

10. Koliko energije se sprosti pri reakciji ${}^{235}_{92}U + {}^1_0n \rightarrow ({}^{236}_{92}U)^* \rightarrow {}^{143}_{54}Xe + {}^{91}_{38}Sr + 2{}^1_0n$? Vezavno energijo jedra lahko popišemo s semi-empirično formulo $BE \left[\frac{\text{MeV}}{\text{nukleon}} \right] = 15.75 - \frac{17.8}{A^3} -$

$$23.7 \left(\frac{N-Z}{A} \right)^2 - 0.711 \frac{Z^2}{A^3} - \delta(A), \text{ kjer je } \delta(A) = 0 \text{ za jedra z lihimi } A.$$

2.2 Mikroskopski in makroskopski preseki

11. Mikroskopski in makroskopski presek

- Identificiraj, katere so mogoče reakcije nevtronov z jedri in kakšna je verjetnost za interakcijo z njimi?
- Oceni delež absorbiranih termičnih nevtronov, ki v naravnem uranu povzročijo cepitev. Uporabi podatke iz tabele.
- Oceni delež cepitev U238 s hitrimi nevtroni (2 MeV) v naravnem uranu. Uporabi podatke iz tabele.

| | termični | hitri |
|-----------------|----------|-------|
| σ_f^{25} | 585 b | 0.4 b |
| σ_a^{25} | 684 b | |
| σ_f^{28} | | 0.4 b |
| σ_a^{28} | 2.68 b | |

12. Naravni bor ima gostoto $0.128 \cdot 10^{24} \text{ at/cm}^3$. Za termične nevtrone je presek za absorpcijo 764 b in za sipanje 4 b.
- Določi skupni mikroskopski presek za termične nevtrone in oceni skupni mikroskopski presek pri energiji 100 eV, če je presek v tem območju sorazmeren z $1/v$.
 - Kako debela plast bora zadrži 99% termičnih nevtronov?
13. Ker ima B10 velik absorpcijski presek 3838 b za termične nevtrone, je primeren kakor ščit. Gostota materiala je $0.128 \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-3}$. Določi:
- Povprečno prosto pot!
 - Delež termičnih nevtronov, ki pride skozi 1 mm materiala!
 - Kakšna bi morala biti gostota materiala, da bi skozi 1 mm plast prišlo 1% nevtronov?
14. V PBMR reaktorju, naj bi bil rezervni medij za ugasnitev reaktorja He3 (absorpcijski 5330 b). Določi makroskopski presek pri standardnih pogojih.
15. Moderator v CANDU reaktorju je težka voda. Predpostavimo, da moderator vsebuje 99.75 wt % D_2O in 0.25 wt% H_2O . Oceni kolikšen delež termičnih nevtronov se absorbira v deuteriju. Mikroskopski absorpcijski presek za devterij je 0.53 mb in za vodih 0.333 b.

16. Kolikšna moč se proizvede pri cepitvi 1 g U235? Povprečni nevtronski fluks termičnih nevtronov je $5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Presek za cepitev je 585 b.
17. Jedrska letalonosilka gre na 36.000 km dolgo pot. Povprečna hitrost je 36 km/h. Moč termičnega reaktorja je 100 MW. Oцени, koliko U235 bo letalonosilka porabila na tej poti, če se pri vsaki cepitvi sprosti 200 MeV. Mikroskopski absorpcijski presek je 684 b in mikroskopski cepitveni presek je 585 b.
18. Cepitvena celica vsebuje tanko folijo z 10^{20} atomi U235. Mikroskopski presek za cepitev je 585 b. Fluks termičnih nevtronov je $10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Če predpostavimo, da ob vsaki cepitvi nastanejo v povprečju 4 pozitivni naboji, določi kakšen je električni tok, ki prihaja iz celice?

2.3 Radioaktivni razpad

19. Oцени čas potreben za 50 oziroma 90 % pretvorbo fiksne količine Pa233 v cepljivi U233!

3 Fizika jedrskih reaktorjev

3.1 Neskončni in končni sistem

20. Želimo imeti zelo velik homogeni reaktor. Uporabili bomo raztopino soli, U235 in vode. Na podlagi podatkov v tabeli določi vse parametre v enačbi štirih faktorjev tako, da bo reaktor kritičen.

| parameter | Vrednost |
|-------------------|---|
| σ_f^{25} | 585 b |
| σ_c^{25} | 99 b |
| σ_c^{salt} | 25 b |
| σ_c^{voda} | 0 b |
| n^{25} | 10^{21} at/cm^3 |
| n^{salt} | $4 \cdot 10^{21} \text{ at/cm}^3$ |
| ν | 2.5 |
| ϵ | 1.03 |

21. Ali je mogoče ustvariti reaktor s homogeno/heterogeno mešanico naravnega urana in vode? Pomagaj si s parametri enačbe štirih faktorjev.
22. Imejmo hitri reaktor s homogeno mešanico natrija in Pu239. Kakšno mora biti masno razmerje med plutonijem in natrijem, da je neskončni sistem kritičen?

| element | σ_f | σ_a | ν |
|--------------|------------|------------|-------|
| Na | 0 | 0.0008 | |
| Pu239 | 1.85 | 2.11 | 2.98 |

23. Kakšen je maksimalni prenos energije pri trku nevtrona z drugimi jedri?

3.2 Difuzijska teorija

24. Določi porazdelitev fluksa in geometrijski buckling za kritični sistem:
- neskončna plošča debeline A
 - končni cilindar višine H in premera D
 - sfera premera D

25. Sfera Pu239 s premerom 10 cm je kritična. Napravimo kritični cilindar. Upoštevajmo, da tako sfera kakor cilindar nista obdana z reflektorjem. Za koliko je večji volumen cilindra z razmerje med višino in premerom 3, če je:

- ekstrapolacijska razdalja enaka 0 cm;
- ekstrapolacijska razdalja enaka 2 cm.

26. Imejmo homogen sferični reaktor. Gostota Pu je $0.004 \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-3}$ in Na $0.02 \cdot 10^{24} \text{ cm}^{-3}$.

- Določi kritični radij. Upoštevaj, da lahko difuzijski koeficient aproksimiramo kakor $D = \frac{\lambda_{tr}}{3}$, kjer je λ_{tr} povprečna prosta pot, ki je določen kakor $\lambda_{tr} = \frac{1}{\Sigma_{tr}}$. Pri tem je Σ_{tr} makroskopski presek za transport (je odvisen od makroskopskega preseka za sipanje in povprečnega kota, pod katerem se nevtroni sipajo). Ekstrapolacijsko razdalja izrazimo z $d = 0.71\lambda_{tr}$
- Kakšna je verjetnost, da se nevtroni izognejo pobegu?

| element | σ_f [b] | σ_a [b] | σ_{tr} [b] | v |
|---------|----------------|----------------|-------------------|------|
| Na | 0 | 0.0008 | 3.3 | |
| Pu239 | 1.85 | 2.11 | 6.82 | 2.98 |

27. Kolikšen bi bil radij kritičnega sferičnega reaktorja, ki je obdan z natrijem? Gostota natrija je 0.8 g/cm^3 .

| element | σ_f | σ_a | σ_{tr} | v |
|---------|------------|------------|---------------|------|
| Na | 0 | 0.0008 | 3.3 | |
| Pu239 | 1.85 | 2.11 | 6.82 | 2.98 |

3.3 Kinematika

28. Aproksimativna rešitev točkovne enačbe za eno skupino zakasnelih nevtronov je: $\frac{P(t)}{P(0)} =$

$$\frac{\beta}{\beta - \rho} e^{\lambda \rho t / (\beta - \rho)} - \frac{\rho}{\beta - \rho} e^{-\frac{(\beta - \rho)t}{l^*}}.$$

Rešitev velja za ρ vsaj 0.05β stran od promptne kritičnosti. Za tipični LWR velja: $\beta_{\text{eff}} = 0.0070$, $l^* = 3 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ in $\lambda = 0.084 \text{ s}^{-1}$.

- Izpelji aproksimativno rešitev.
- Nariši $P(t)/P(0)$ za $\rho = 0.05\beta$ in $\rho = 1.5\beta$.
- Oceni kateri vnos reaktivnosti bo imel periodo 1 h in 1 dan.

3.4 Kontrola

29. PWR reaktor naj ima povprečni reaktivnostni koeficienti: $\langle \alpha_f \rangle = -1 \cdot 10^{-5} \frac{\Delta \rho}{\text{°F}}$ in $\langle \alpha_m \rangle = -0.2 \cdot$

$10^{-4} \frac{\Delta \rho}{\text{°F}}$ na začetku gorivnega cikla oziroma $\langle \alpha_m \rangle = -2 \cdot 10^{-4} \frac{\Delta \rho}{\text{°F}}$ na koncu gorivnega cikla. V stanju vroče ustavitve (0 % moč) sta temperaturi moderatorja in hladila enaki 530°F . Na polni moči je temperatura goriva 1200°F in temperatura 572°F moderatorja. Kakšen je povprečni močnostni koeficient za prehod iz 0 na 100% moči in sicer za začetek in konec gorivnega cikla? Kaj je vzrok razlike v moderatorskem temperaturnem koeficientu med začetkom in koncem cikla?

30. Imejmo dva RBMK reaktorja. V prvem reaktorju je, pri obogatitvi goriva 1.8 wt% U235 in zgorelosti 5000 MWD/t, koeficient reaktivnosti za praznine $\langle \alpha_v \rangle = +0.15 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta \rho}{\% \text{ praznin}}$. V drugem reaktorju je, pri obogatitvi goriva 2.0 wt% U235 in zgorelosti 10000 MWD/t, koeficient reaktivnosti za praznine $\langle \alpha_v \rangle = +0.2 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta \rho}{\% \text{ praznin}}$. Delež zakasnelih nevtronov je 0.0048 in povprečen čas

generacije takojšnjih nevtronov 0.77 ms. Oceni kako hitro bi bilo potrebno s kontrolnimi palicami kompenzirati spremembo v reaktivnosti , če se delež praznin spremeni iz 0% na:

- a. 14.5 % na izhodu iz sredice (predpostavi, da je povprečje sredice polovica te vednosti);
- b. 100 % praznin (nezgoda).

3.5 Pojavi povezani z izrabo goriva

31. Imejmo termični reaktor s konstantnim fluksom $5 \cdot 10^{13}$ nevtronov/cm²/s. Na podlagi podatkov (npr. slike v R.A. Knief, Nuclear Engineering) oceni:
 - a. Delež zgorelosti U235 v obdobju 1 leta obratovanja.
 - b. Delež U238, ki se v 1 letu pretvori v U239.
 - c. Oceni kakšen delež absorpcij v U238, se pretvori v Pu239.
32. Analiziraj pomen Sm149 v termičnem reaktorju z fluksom $5 \cdot 10^{13}$ nevtronov/cm²s v katerem je cepljivo jedro U235. Verjetnost za nastanek Nd149 je 0.0113. Absorpcijski presek Sm149 je 40000 b.
33. Reaktorja A in B sta identična. V sredici imamo sveže gorivo. Ob času $t=0$ h začne reaktor A delovati na 100 % moči in reaktor B na 50 % moči. Po 1000 h oba reaktorja ugasnemo. Skiciraj kako se v reaktorju A in B spremeni koncentracija Sm v prvih 2000 h.