LÖSNINGAR TILL TENTAMEN I TILLÄMPAD KÄRNKEMI DEN 12 MAJ 2001

1. ASEA-ATOM gav i sin specifikation för BWR-75 följande data: Bränslepinnarnas ytterdiameter = 12.25 mm, väggtjocklek på kapslingsrören av zircaloy-4 = 0.8 mm, kutsdiameter = 10.44 mm, kutsdensitet = 10500 kg UO_2/m^3, högsta värmeflödestäthet på kapslingens yta = 1.08 MW/m^2, ångtemperatur vid mättnadstryck = 286 C. Om filmkoefficienten mellan kapsling och kylmedel antages vara 5 W/cm^2K, samt mellan kuts och höljesrör 1.5 W/cm^2K, och värmeledningsförmågan hos UO_2 är 2.5 W/m K, vad blir då den högsta beräknade bränsle-temperaturen (°C)? (10p) Lösning:

$d_{yc} := 12.25 \cdot mm$ $\quad r_{yc} := \frac{d_{yc}}{2}$ $\quad r_{ic} := r_{yc} - 0.8 \cdot mm$ $\quad r_{yc} = 6.125 \cdot mm$ $\quad r_{ic} = 5.325 \cdot mm$

$d_{kuts} := 10.44 \cdot mm$ $\quad r_{kuts} := \frac{d_{kuts}}{2}$ $\quad r_{kuts} = 5.22 \cdot mm$

$T_{coolant} := (286 + 273.15) \cdot K$ $\quad T_{coolant} = 559.15 \cdot K$

$Q_{yc} := 1.08 \cdot 10^6 \cdot \frac{watt}{m^2}$

$a_{yc} := 5 \cdot \frac{watt}{cm^2 \cdot K}$ $\quad DT_{yc} := \frac{Q_{yc}}{a_{yc}}$ $\quad DT_{yc} = 21.6 \cdot K$

$A_{kuts} := p \cdot r_{kuts}^2$ $\quad L_{kuts} := 1 \cdot m$

$Y_{can} := L_{kuts} \cdot p \cdot d_{yc}$ $\quad Y_{can} = 0.038 \cdot m^2$

$p_{kuts} := \frac{Q_{yc} \cdot Y_{can}}{A_{kuts} \cdot L_{kuts}}$ $\quad$ Viktigt att beräkna effekten rätt m.a.p. UO_2-kutsen $\quad p_{kuts} = 4.855 \cdot 10^8 \cdot \frac{watt}{m^3}$

$k_{can} := 16 \cdot watt \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

$DT_{can} := p_{kuts} \cdot r_{kuts}^2 \cdot \frac{r_{yc} - r_{ic}}{2 \cdot r_{ic} \cdot k_{can}}$ $\quad DT_{can} = 62.113 \cdot K$

$a_g := 1.5 \cdot \frac{watt}{cm^2 \cdot K}$ $\quad DT_{gap} := \frac{p_{kuts} \cdot r_{kuts}}{2 \cdot a_g}$ $\quad DT_{gap} = 84.483 \cdot K$

$T_{rf} := T_{coolant} + DT_{yc} + DT_{can} + DT_{gap}$ $\quad T_{rf} = 727.345 \cdot K$

$k_{kuts} := 2.5 \cdot \frac{watt}{m \cdot K}$ $\quad T_0 := T_{rf} + \frac{p_{kuts} \cdot r_{kuts}^2}{4 \cdot k_{kuts}}$ $\quad T_0 = 2.0503 \cdot 10^3 \cdot K$

$\frac{T_0}{K} - 273.15 = 1777$ °C

2. En stor tryckvattenreaktor har i kallt, avställt tillstånd följande data:

B^2	2.35×10^{-4} cm^{-2}
k_{eff}	1.25 (vid helt urdragna styrstavar)
p	0.85
ε	1.06
f	0.87

Om allt bränsle är nytt och har samma sammansättning, vilken anrikning har då uranet i bränslet (%)? (10p)
Lösning: Börja med att beräkna k_∞.

$B2 := 2.35 \cdot 10^{-4} \cdot cm^{-2}$ $\quad k_{eff} := 1.25$ $\quad p := 0.85$ $\quad e := 1.06$ $\quad f := 0.87$

Från tabell 19.3 erhålles: $L2m := 7.62 \cdot 10^{-4} \cdot m^2$ $\quad t := 0.0028 \cdot m^2$

$L2 := L2m \cdot (1 - f)$ $\quad M2 := L2 + t$

$k_{eff} = \dfrac{k_{inf}}{1 + B2 \cdot M2}$ $\quad k_{inf} := k_{eff} \cdot (1 + B2 \cdot M2)$ $\quad k_{inf} = 1.259$

Men nu gäller 4-faktorformeln också, varför:

$k_{inf} = h \cdot e \cdot p \cdot f$ $\quad h := \dfrac{k_{inf}}{e \cdot p \cdot f}$ $\quad h = 1.606$

Eftersom vi bara har två isotoper i bränslet att bekymra oss om, varav bara ^{235}U är klyvbar gäller (Data från Tabell 19.2 för PWR):

$n := 2.43$ $\quad x_5 + x_8 = 1$ $\quad S_g(x_5) := 107.5 \cdot x_5 + 1.5 \cdot (1 - x_5)$ $\quad S_f(x_5) := 448.1 \cdot x_5$

$a(x_5) := \dfrac{S_g(x_5)}{S_f(x_5)}$ $\quad G(x) := \dfrac{n}{1 + a(x)} - h$ $\quad x := 1 \cdot \%$ $\quad$ Sök nollstället hos G(x):

$x_{235} := root(G(x), x)$ $\quad x_{235} = 1.208 \cdot \%$

3. En sats bränsle anrikat i Eurodif till 3.3% från natururan kostade 6214 kr/kgU. Kostnaden för konvertering av U_3O_8 till UF_6 anges ha varit 50 kr/kg UF_6. Anrikningsarbetet kostade 720 kr/kgSWU vid ett avrikat uran som höll 0.23% ^{235}U. Bränsletillverkningen kostade 300 kr/kg U. Vid tillverkning av anrikat uran från återvunnet uran måste anrikningen höjas med en faktor 1.05 för att kompensera för närvaron av ^{236}U. Hur många kronor per kilo uran är återvunnet uran med 0.8% ^{235}U värt (som U_3O_8) om man använder detta som ersättning för natururanet men betalar samma pris för det färdiga bränslet? (10p) Lösning:

$M_{wU} := 238$ $\quad M_{wF} := 19$ $\quad M_{wUF6} := M_{wU} + 6 \cdot M_{wF}$ $\quad P := 1 \cdot kg$

$M_{wO} := 16$ $\quad M_{wU3O8} := 3 \cdot M_{wU} + 8 \cdot M_{wO}$ $\quad M_{wU3O8} = 842$ $\quad kr := 1$

$P_{fuel} := 6214 \cdot kr \cdot kg^{-1}$ $\quad P_{convUF6} := 50 \cdot kr \cdot kg^{-1}$

$P_{convU} := P_{convUF6} \cdot \frac{M_{wUF6}}{M_{wU}}$ $\quad P_{convU} = 73.95 \cdot \frac{kr}{kg}$

$P_{fabr} := 300 \cdot kr \cdot kg^{-1}$ $\quad P_{SWU} := 712 \cdot kr \cdot kg^{-1}$

$x_F := 0.8 \cdot \%$ $\quad x_P := 3.3 \cdot 1.05 \cdot \%$ $\quad x_W := 0.23 \cdot \%$

$V(x) := (2 \cdot x - 1) \cdot ln\left(\frac{x}{1 - x}\right)$

$F := P \cdot \frac{x_P - x_W}{x_F - x_W}$ $\quad F = 5.675 \cdot kg$

$SWU := V(x_W) \cdot (F - P) + P \cdot V(x_P) - F \cdot V(x_F)$ $\quad SWU = 4.438 \cdot kg$

$6214 = P \cdot P_{fabr} + SWU \cdot P_{SWU} + F \cdot (P_{convU} + P_{natU})$ $\quad V(x_F) = 4.743$ $\quad V(x_W) = 6.045$

$P \cdot P_{fabr} = 300$ $\quad SWU \cdot P_{SWU} = 3.16 \cdot 10^3$ $\quad F \cdot P_{convU} = 419.696$ $\quad V(x_P) = 3.097$

$P_{natU} := \frac{(6214 - P \cdot P_{fabr} - SWU \cdot P_{SWU} - F \cdot P_{convU})}{F}$ $\quad P_{natU} = 411.284 \cdot \frac{kr}{kg}$

$P_{U3O8} := \frac{P_{natU} \cdot 3 \cdot M_{wU}}{M_{wU3O8}}$ $\quad P_{U3O8} = 348.76 \cdot \frac{kr}{kg}$

4. En slutdeponerad kopparkapsel, som innehöll 30 år gammalt bränsle vid tillverkningen, brister vid ett jordskalv som inträffar 5 år efter deponeringen. Innehållet av jod i kapslingsspalten tvättas omedelbart ut av tillrinnande vatten. Normalt finns ca 50% av all jod som bildats under reaktordriften i kapslingsspalten. Antag att kedjeutbytet för A=127 är 0.1233%, för A=129 är 0.7787% och för A=131 är 2.885%. Vad är specifika aktiviteten (Bq/g) hos uttvättad jod om n,γ-reaktioner i samtliga nuklider kan försummas och bränslet har en utbränning på 47 MWd/kgU, ursprunglig anrikning 4%, och suttit i reaktorn under 900 fulleffektdygn? Använd vid behov nuklidkartans reaktionstvärsnitt och halveringstider, samt försumma ändringar i bränslets innehåll av fissilt material under reaktordriften. (10p) Lösning: De kortlivade jodisotoperna har redan avklingat efter 30+5 år.

$MeV := 1.60217733 \cdot 10^{-13} \cdot joule$ $\quad N_A := 6.0221367 \cdot \frac{10^{23}}{mole}$ $\quad M_{wU} := 238 \cdot gm \cdot mole^{-1}$

$Q_{fiss} := 200 \cdot MeV$ $\quad Utbr := 47 \cdot 10^{6} \cdot watt \cdot day$

$N_{fiss} := \frac{Utbr}{Q_{fiss}}$ $\quad N_{fiss} = 1.267 \cdot 10^{23}$

$t_{irr} := 900 \cdot day$ $\quad s_{fiss} := 586 \cdot 10^{-28} \cdot m^2$ Enligt nuklidkartan

$N_{fiss} = f \cdot s_{fiss} \cdot \left(\frac{1 \cdot kg \cdot 4 \cdot \%}{M_{wU}} \right) \cdot N_A \cdot t_{irr}$ $\quad f := \frac{N_{fiss}}{\left(s_{fiss} \cdot kg \cdot 4 \cdot \% \right)} \cdot \frac{M_{wU}}{\left(N_A \cdot t_{irr} \right)}$ $\quad f = 2.748 \cdot 10^{17} \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$

Bildningshastigheterna ges då av:

A=127: $\quad y_{127} := 0.1233 \cdot \%$ $\quad r_{127} := f \cdot s_{fiss} \cdot \left(\frac{1 \cdot kg}{M_{wU}} \right) \cdot N_A \cdot y_{127}$ $\quad r_{127} = 5.024 \cdot 10^{13} \cdot sec^{-1}$

A=129: $\quad y_{129} := 0.7787 \cdot \%$ $\quad r_{129} := f \cdot s_{fiss} \cdot \left(\frac{1 \cdot kg}{M_{wU}} \right) \cdot N_A \cdot y_{129}$ $\quad r_{129} = 3.173 \cdot 10^{14} \cdot sec^{-1}$

Förlust genom n,γ-reaktioner i båda jodisotoperna försummas. Vi får då de två diff.ekv.:

$\frac{dN_{127}}{dt} = r_{127}$ $\quad \frac{dN_{129}}{dt} = r_{129}$

Då radioaktivt sönderfall av den mycket långlivade ^{129}I inte sker i nämnvärd grad under reaktordriften har detta försummats i dessa diff.ekv. Eftersom r_{127} och r_{129} är konstanter får vi följande lösningar:

$N_{127} := r_{127} \cdot t_{irr}$ $\quad N_{127} = 3.906 \cdot 10^{21}$

$N_{129} := r_{129} \cdot t_{irr}$ $\quad N_{129} = 2.467 \cdot 10^{22}$

Nu kan vi beräkna aktiviteten och specifika aktiviteten efter 35 års avsvalning: Fortfarande kan vi försumma sönderfallet av ^{129}I under den tid som gått.

$Bq := sec^{-1}$ $\quad M_{w127} := 127 \cdot gm \cdot mole^{-1}$ $\quad M_{w129} := 129 \cdot gm \cdot mole^{-1}$

$t_{h129} := 1.57 \cdot 10^{7} \cdot yr$ $\quad l_{129} := \frac{ln(2)}{t_{h129}}$ $\quad l_{129} = 1.399 \cdot 10^{-15} \cdot sec^{-1}$

$R_{129} := l_{129} \cdot N_{129}$ $\quad R_{129} = 3.452 \cdot 10^{7} \cdot Bq$

$m_{jod} := \frac{N_{127}}{N_A} \cdot M_{w127} + \frac{N_{129}}{N_A} \cdot M_{w129}$ $\quad m_{jod} = 6.109 \cdot 10^{-3} \cdot kg$

$S_{jod} := \frac{R_{129}}{m_{jod}}$ $\quad S_{jod} = 5.65 \cdot 10^{9} \cdot \frac{Bq}{kg}$

5. En BWR har ^{235}U som fissilt material i en matris av rent $^{238}UO_2$. Vid reaktorns första uppstart med helt nytt bränsle fördubblades effekten på 15.2 sekunder. Reaktorn har en cylindrisk form med höjd = diameter = 4.5 m. Bränslet kan antagas vara homogent fördelat över volymen, termiska utnyttjandefaktorn är 0.87, och snabb-fissionsfaktorn är 1.008. Beräkna k_∞. (10p) Lösning:

$t_{dubbl} := 15.2 \cdot sec$ För 235U är medellivslängden för fördröjda neutroner 0.084 s (boken sid 531)

$2 = exp\left(\frac{t_{dubbl}}{t_{per}}\right)$ $t_{per} := \frac{t_{dubbl}}{ln(2)}$ $t_{per} = 21.929 \cdot sec$ $q_{eff} := 10^{-3} \cdot sec + 0.084 \cdot sec$

$t_{per} = \frac{q_{eff}}{(k_{eff} - 1)}$ $k_{eff} := \frac{(t_{per} + q_{eff})}{t_{per}}$ $k_{eff} = 1.0039$

Härdens geometri och storlek gör att vi kan beräkna den geometriska buktigheten (ekv 19.21c)

$b := 4.5 \cdot m$ $B2 := 33 \cdot b^{-2}$

För vanligr vatten som moderator gäller: $t := 0.0028 \cdot m^2$ $L_{m2} := 7.63 \cdot 10^{-4} \cdot m^2$

Den termiska utnyttjandefaktorn f ges som: $f := 0.87$

$L2 := L_{m2} \cdot (1 - f)$ $L2 = 9.919 \cdot 10^{-5} \cdot m^2$

$k_{eff} = \frac{k_{inf}}{(1 + B2 \cdot (L2 + t))}$ $k_{inf} := k_{eff} \cdot (1 + B2 \cdot L2 + B2 \cdot t)$ $k_{inf} = 1.009$