Tentamen i Tillämpad Kärnkemi den 9 mars 2000

1. a. Vad menas med ett fördröjt kritiskt system? (max 2p),
   b. Varför bör en reaktor drivas som ett fördröjt kritiskt system? (max 2p),
   c. När bör man vara speciellt uppmärksam på detta? (max 1p).

Svar: a) Ett system där keff-1 är mindre än β. b) Fördröjt kritiska system har en reaktorperiod i sekundområdet i motsats till prompt kritiska system där reaktorperioden är i millisekundområdet eller kortare. Härigenom blir reaktoreffekten lätt reglerbar. c) Vid start och effektökningar.

2. Man tänker lösa upp UO_2 anrikad till 30% med aveende på ^{235}U i 98.2 liter 9 M salpetersyra. Försumma volymen av satsad urandioxid och ändringen i total volym vid bildning av uranylnitrat. Ett cylindriskt kärl med diametern 50 cm och höjden 100 cm används för ändamålet. För att förhindra oavsiktlig kriticitet måste man begränsa mänden UO_2 som satsas. Använd moderatordata för rent vatten, tvärsnitt för ^{235}U och ^{238}U med termiska neutroner, ε*p=1, samt försumma inverkan av nitratjoner etc. Hur måga kilogram UO_2 kan satsas för att precis nå gränsen för kriticitet? (10p)

$barn := 10^{-28} \cdot m^2$ $\quad N_A := 6.0221367 \cdot \frac{10^{23}}{mole}$ $\quad x := 30 \cdot \%$

$M_{W235} := 235 \cdot \frac{gm}{mole}$ $\quad M_{W238} := 238 \cdot \frac{gm}{mole}$ $\quad M_{WU} := x \cdot M_{W235} + (1 - x) \cdot M_{W238}$

$M_{WO} := 16.00 \cdot \frac{gm}{mole}$ $\quad M_{UO2} := M_{WU} + 2 \cdot M_{WO}$ $\quad M_{UO2} = 269.1 \cdot \frac{gm}{mole}$

$M_{WH} := 1.008 \cdot \frac{gm}{mole}$ $\quad M_{WH2O} := 2 \cdot M_{WH} + M_{WO}$ $\quad M_{WH2O} = 18.016 \cdot \frac{gm}{mole}$

$\sigma_{m\gamma235} := 98.6 \cdot barn$ $\quad \sigma_{nf235} := 582.2 \cdot barn$ $\quad \sigma_{a235} := \sigma_{m\gamma235} + \sigma_{nf235}$

$\sigma_{m\gamma238} := 2.70 \cdot barn$

$diam := 50 \cdot cm$ $\quad Volym := 98.2 \cdot liter$ $\quad h := \frac{Volym}{\left(\frac{diam}{2}\right)^2 \cdot \pi}$ $\quad h = 50.013 \cdot cm$

$b := \frac{diam + h}{2}$ OBS: diam nästan samma som höjden

$N_{vU} = \frac{m_{UO2}}{M_{UO2}} \cdot N_A$ $\quad N_{v235U} = N_{vU} \cdot x$ $\quad N_{v238U} = (1 - x) \cdot N_{vU}$

$\Sigma_{afuel} = N_{v235U} \cdot \sigma_{a235}$ $\quad \Sigma_{amod} := \frac{0.66 \cdot barn \cdot 98.2 \cdot kg}{M_{WH2O}} \cdot N_A$ $\quad \Sigma_{aother} = N_{v238U} \cdot \sigma_{m\gamma238}$

$f = \frac{\Sigma_{afuel}}{\Sigma_{afuel} + \Sigma_{amod} + \Sigma_{aother}}$ $\quad B2 := \frac{33}{b^2}$ $\quad B2 = 131.966 \cdot m^{-2}$

$\tau := 0.0028 \cdot m^2$ $\quad L2_m := 7.62 \cdot 10^{-4} \cdot m^2$ $\quad L2 = L2_m \cdot (1 - f)$

$\varepsilon := 1$ $\quad p := 1$ $\quad \eta := 2.068$ $\quad M2 = L2 + \tau$

$k_{inf} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$ $\quad k_{eff} = \frac{k_{inf}}{1 + B2 \cdot M2}$ Substituera baklänges och lös ut m_{UO2}

$$m_{UO2} := \frac{\left(1 + B2 \cdot L2_m + B2 \cdot \tau\right) \cdot \left(\Sigma_{amod} \cdot M_{UO2}\right)}{N_A \cdot \left[-x \cdot \sigma_{a235} + \sigma_{m\gamma238} \cdot (x - 1) + B2 \cdot \sigma_{m\gamma238} \cdot (x - 1) \cdot \left(L2_m + \tau\right) - B2 \cdot \tau \cdot x \cdot \sigma_{a235} + \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot x \cdot \sigma_{a235}\right]}$$

$m_{UO2} = 10.174 \cdot kg$ **Svar: 10.17 kg**

3. Ett kraftföretag köpte 20 ton 3.5% anrikat uran från Urencos anläggning i Holland. Man betalade därvid ett pris på 4833 kr/kg U. Priset för det använda natururanet var 140 kr/kg U_3O_8, kostnaden för konvertering till UF_6 var 75 kr/kg U, samt anrikningskostnaden var 700 kr/kgSWU. Vilken isotopsammansättning hade det avrikade uranet från centrifugprocessen? (Försumma halten av ^{234}U vid beräkningarna). (10p).

Lösning:

$kr := 1$ $\quad x_{fuel} := 3.5 \cdot \%$ $\quad pris_{swu} := 700 \cdot kr \cdot kg^{-1}$ $\quad pris_{konv} := 75 \cdot kr \cdot kg^{-1}$

$pris_{natU3O8} := 140 \cdot kr \cdot kg^{-1}$ $\quad M_{WU} := 238 \cdot gm \cdot mole^{-1}$ $\quad M_{WO} := 16.00 \cdot gm \cdot mole^{-1}$

$$pris_{natu} := pris_{natU3O8} \cdot \left(\frac{3 \cdot M_{WU}}{3 \cdot M_{WU} + 8 \cdot M_{WO}} \right) \qquad pris_{natu} = 118.717 \cdot kr \cdot kg^{-1}$$

Tabell 2.1 ger: $\quad x_{natu} := 0.724 \cdot \%$ $\quad pris_{anru} := 4833 \cdot kr \cdot kg^{-1}$

Först beräknar vi de ingående uranmängderna till isotopseparationen med hjälp av ekv (2.49) och sedan anrikningsarbetet med hjälp av ekv (2.57) och (2.56). Räkna på 1 kg anrikat uran.

$$P := 1 \cdot kg \qquad F_{natu} = P \cdot \frac{x_{fuel} - x_w}{x_{natu} - x_w} \qquad W = F_{natu} - P$$

$$V(x) := (2 \cdot x - 1) \cdot ln\left(\frac{x}{1 - x} \right) \qquad SWU = W \cdot V(x_w) + P \cdot V(x_{fuel}) - F_{natu} \cdot V(x_{natu})$$

$$pris_{anru} = F_{natu} \cdot pris_{natu} + F_{natu} \cdot pris_{konv} + SWU \cdot pris_{swu}$$

Nu kan vi räkna baklänges genom att substituera tidigare ekvationer i denna:

$$P \cdot pris_{anru} = F_{natu} \cdot pris_{natu} + F_{natu} \cdot pris_{konv} + SWU \cdot pris_{swu}$$

Definiera hjälpfunktionen $Z_w(x_w)$ för att förnkla beräkningen: $\quad Z_w(x_w) := P \cdot \frac{(x_{fuel} - x_w)}{(x_{natu} - x_w)}$

$$difr(x_w) := P \cdot pris_{anru} \ldots$$
$$+ -\left[(pris_{natu} + pris_{konv}) \cdot Z_w(x_w) + \left[\left[(Z_w(x_w) - P) \cdot V(x_w) + P \cdot V(x_{fuel}) - Z_w(x_w) \cdot V(x_{natu}) \right] \cdot pris_{swu} \right] \right.$$

Initial gissning $\quad x_w := 0.3 \cdot \%$

$root(difr(x_w), x_w) = 0.216 \cdot \%$ $\qquad$ **Svar: 0.216%**

4. En pinne MOX-bränsle med ytterdiametern 0.95 cm i en BWR-bränslepatron drivs normalt med en maximal linjär effekt på 50 kW/m. Höljesröret av zircaloy-2 har en väggtjocklek på 0.7 mm och värmeledningsförmågan 0.16 W cm^{-1} K^{-1}. Bränslet är UO_2+PuO_2 med en normal täthet på 10.3 g/cm^3 och en värmeledningsförmåga på 0.032 W cm^{-1} K^{-1}. Värmeöverföringskoefficienten i det 0.1 mm stora gapet mellan hölje och bränsle är normalt 4 W cm^{-2} K^{-1}. Kylmedlet har temperaturen 257ºC och temperatursprånget till pinnens yta är 5ºC. Genom en felaktighet i tillverkningen av MOX-kutsar fick en sats av dessa tätheten 10.5 g/cm^3 efter sintringen (vikten oförändrad). Härigenom ökar den linjära effekten något och samtidigt minskar värmeöverförings-koefficienten mellan hölje och kutsar till 75% av sitt normala värde. Beräkna maximaltemperaturen för en MOX-pinne med dessa felaktiga kutsar om värmeledningsförmågan i kutsarna är oförändrad. (10p)

Lösning:

$d_y := 0.95 \cdot cm$ $\quad r_y := \frac{d_y}{2}$ $\quad r_{inr} := r_y - 0.7 \cdot mm$ $\quad r_y = 4.75 \cdot mm$ $\quad r_{inr} = 4.05 \cdot mm$

$r_{fnorm} := r_{inr} - 0.1 \cdot mm$ $\quad \rho_{norm} := 10.3 \cdot gm \cdot cm^{-3}$ $\quad r_{fnorm} = 3.95 \cdot mm$

$a_{norm} := r_{fnorm}^2 \cdot \pi$ $\quad p_{norm} := 50 \cdot 10^3 \cdot watt \cdot m^{-1}$

$p_{fnorm} := \frac{p_{norm}}{a_{norm}}$ $\quad p_{fnorm} = 1.02 \cdot 10^3 \cdot watt \cdot mL^{-1}$

$\rho_{anorm} := 10.5 \cdot gm \cdot cm^{-3}$ $\quad r_{fanorm} := r_{fnorm} \cdot \left(\frac{\rho_{anorm}}{\rho_{norm}}\right)^{-\frac{1}{3}}$ $\quad r_{fanorm} = 3.925 \cdot mm$

$p_{fanorm} := p_{fnorm} \cdot \frac{\rho_{anorm}}{\rho_{norm}}$ $\quad p_{fanorm} = 1.04 \cdot 10^3 \cdot watt \cdot mL^{-1}$

$\alpha_{norm} := 4 \cdot watt \cdot cm^{-2} \cdot K^{-1}$ $\quad \alpha_{anorm} := \alpha_{norm} \cdot 75 \cdot \%$ $\quad \alpha_{anorm} = 3 \cdot watt \cdot cm^{-2} \cdot K^{-1}$

$T_{vatten} := (257 + 273.15) \cdot K$ $\quad T_{yttre} := T_{vatten} + 5 \cdot K$ $\quad T_{yttre} = 535.15 \cdot K$

$\Delta T_{can} := p_{fanorm} \cdot r_{fanorm}^2 \cdot \frac{r_y - r_{inr}}{2 \cdot r_{inr} \cdot 0.16 \cdot watt \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}}$ $\quad \Delta T_{can} = 86.516 \cdot K$

$\Delta T_{gap} := \frac{p_{fanorm} \cdot r_{fanorm}}{2 \cdot \alpha_{anorm}}$ $\quad \Delta T_{gap} = 68.021 \cdot K$

$\Delta T_{centr} := \frac{p_{fanorm} \cdot r_{fanorm}^2}{4 \cdot 0.032 \cdot watt \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}}$ $\quad \Delta T_{centr} = 1.251 \cdot 10^3 \cdot K$

$T_{centr} := \Delta T_{centr} + \Delta T_{gap} + \Delta T_{can} + T_{yttre}$ $\quad T_{centr} = 1941 \cdot K$

$T_{Ccentr} := \frac{T_{centr} - 273.15 \cdot K}{K}$ $\quad T_{Ccentr} = 1668$ C

Svar: 1668 ºC

5. Hur och varför flyttas bränslepatroner mellan olika positioner i härden på en tryckvattenreaktor vid årlig omladdning? (5p)

Svar: Vid ett givet n-flöde blir effektutvecklingen större ju färskare bränslet är på grund av högre halt fissilt material och lägre halt FP. Eftersom man eftersträvar jämnast möjliga effektbelastning på alla patroner placerar man de nyaste relativt nära härdens periferi medan utbrännt bränsle tas ut nära härdens centrum. Bränsle som ännu ej är färdigbränt flyttas sedan inåt centrum av härden. Härigenom får det nyaste bränslet lägst n-flöde, medan det äldre bränslet får ett högre n-flöde. Detta kallas i renodlad form för zon-omladdning. För att ytterligare förbättra effektprofilen i härden under hela den kommande driftcykeln brukar man införa en liten slumpvis omflyttning av bränslet överlagrad på ren zon-omladdning, vilket kallas zon-spridnings-omladdning. Placeringen av bränslepatronerna sker efter beräkningar med hjälp av särskilda dataprogram.

6. Vi kan förenkla dagsläget i Sverige genom att antaga att landet nu har 3 kraftreaktorer på vardera 500 MWe och 8 kraftreaktorer på vardera 1000 MWe i drift. Dessa kan antas ha en genomsnittlig termisk verkningsgrad på 33% och en genomsnittlig lastfaktor på 85%. Bränslet anses då få en medelutbränning på 38 MWd/kg oanvänt bränsle. Beräkna med dessa antaganden den totala mängden använt kärnbränsle som skall slutlagras från och med nu om alla reaktorerna drivs under ytterligare 40 år. (10p)

$P_{eltot} := (3 \cdot 500 + 8 \cdot 1000) \cdot 10^{6} \cdot watt$ $\quad \eta_{term} := 33 \cdot \%$ $\quad P_{termtot} := \frac{P_{eltot}}{\eta_{term}}$ $\quad P_{termtot} = 2.879 \cdot 10^{10} \cdot watt$

$p_{bränsle} := 38 \cdot 10^{6} \cdot watt \cdot day \cdot kg^{-1}$ $\quad tid := 40 \cdot yr$

$Q_{th} := tid \cdot P_{termtot} \cdot 85 \cdot \%$ $\quad m_{fuel} := \frac{Q_{th}}{p_{bränsle}}$ $\quad m_{fuel} = 9.408 \cdot 10^{6} \cdot kg$

$m_{fuel} = 9.408 \cdot 10^{3} \cdot tonne$

Svar: 9408 ton bränsle