

## Lösningar till: Tentamen i Tillämpad Kärnkemi den 31 maj 1995

1 a. Beskriv munstycksmetoden (separation-nozzle) för anrikning av uran i teknisk skala. (max 2p). Svar: Se sid. 37-38 och figur 2.11 i läroboken.

2. a. Vad menas med xenonförgiftning? (max 2p), b. Vilken mekanism ligger bakom detta fenomen? (max 1p), c. Hur påverkar detta möjligheten att starta en reaktor efter stopp? (max 1p). Svar: Se sid 532 i läroboken.

3. Efter uttag ur en kraftreaktor utvecklar bränslet fortfarande värme genom radioaktivt sönderfall av de olika isotoper som bildats under reaktordriften. Vid tider över någon vecka och upp till ca 200 år kommer värmeutvecklingen i det uttagna bränslet att domineras av den energi som frigörs vid sönderfall av  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ - $^{90}\text{Zr}$  och  $^{137}\text{Cs}$ - $^{137\text{m}}\text{Ba}$ - $^{137}\text{Ba}$ .  $^{90}\text{Sr}$  och  $^{137}\text{Cs}$  bildas under reaktordriften genom fission av U och Pu med totala fissionsutbytena 4.8% respektive 6.2% (försumma  $n, \gamma$  reaktioner). Medelenergierna i MeV/sönderfall för dessa nuklider är 0.196 ( $^{90}\text{Sr}$ ), 0.936 ( $^{90}\text{Y}$ ), 0.816 ( $^{137}\text{Cs}$ ) och 0.664 ( $^{137\text{m}}\text{Ba}$ ). Om energifrigörelsen vid klyvning av en U eller Pu atom antages vara 200 MeV och reaktorn körts kontinuerligt på konstant effekt under 4 år, vad är energiutvecklingen (W/kg initialt uran) i bränsle med ett energiuttag på 45 MWd/kg initialt uran 10 år efter uttag ur reaktorn? (max 5p). Lösning (räkna på 1 kg initialt uran hela vägen så blir svaret per kg initialt uran):

$$\text{MeV} := 1.60217733 \cdot 10^{-13} \cdot \text{joule} \quad Q_{\text{fiss}} := 200 \cdot \text{MeV} \quad B_{\text{tot}} := 45 \cdot 10^6 \cdot \text{watt} \cdot \text{day} \quad t_{\text{tot}} := 4 \cdot \text{yr}$$

$$P_{\text{avg}} := \frac{B_{\text{tot}}}{t_{\text{tot}}} \quad R_{\text{avg}} := \frac{P_{\text{avg}}}{Q_{\text{fiss}}} \quad R_{\text{avg}} = 9.612 \cdot 10^{14} \cdot \text{sec}^{-1} \quad \text{medelklyvningsraten}$$

$$y_{90} := 4.8\% \quad y_{137} := 6.2\% \quad \lambda_{90\text{Sr}} := \frac{\ln(2)}{28.6 \cdot \text{yr}} \quad \lambda_{137\text{Cs}} := \frac{\ln(2)}{30.2 \cdot \text{yr}}$$

$$t_{\text{cool}} := 10 \cdot \text{yr} \quad Bq := \text{sec}^{-1} \quad \text{Finessen är nu att } \phi \cdot \sigma \cdot N = R_{\text{avg}} \cdot y$$

$$A_{90} := R_{\text{avg}} \cdot y_{90} \cdot (1 - \exp(-\lambda_{90\text{Sr}} \cdot t_{\text{tot}})) \cdot \exp(-\lambda_{90\text{Sr}} \cdot t_{\text{cool}}) \quad A_{90} = 3.345 \cdot 10^{12} \cdot Bq$$

$$A_{137} := R_{\text{avg}} \cdot y_{137} \cdot (1 - \exp(-\lambda_{137\text{Cs}} \cdot t_{\text{tot}})) \cdot \exp(-\lambda_{137\text{Cs}} \cdot t_{\text{cool}}) \quad A_{137} = 4.156 \cdot 10^{12} \cdot Bq$$

Vi kan antaga radioaktiv jämvikt i kedjorna 10 år efter uttag ur reaktorn då detta är en lång tid jämfört med döttrarnas halveringstider.

$$Q_{90} := (0.196 + 0.936) \cdot \text{MeV} \quad Q_{137} := (0.816 + 0.664) \cdot \text{MeV}$$

$$P_{90} := Q_{90} \cdot A_{90} \quad P_{90} = 0.607 \cdot \text{watt}$$

$$P_{137} := Q_{137} \cdot A_{137} \quad P_{137} = 0.985 \cdot \text{watt}$$

$$P_{\text{fuel}} := P_{90} + P_{137} \quad P_{\text{fuel}} = 1.592 \cdot \text{watt} \quad \text{Svar: 1.59 W/kg}$$

4. a. Hur ser flödeschemat ut för gasrenings-systemet för en typisk svensk kokvattenreaktor? (max 4p), b. Varför återföres sorberade nuklider till kondensorn? (max 1p). Svar: Se §20.4.1, sid 572 och figur 20.5 i läroboken.

5. En pinne i en bränslepatron har ytterdiametern 0.9 cm. Höljesröret av zircaloy-2 har en tjocklek på 0.8 mm och värmeledningsförmågan  $0.16 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Bränslet utgöres av  $\text{UO}_2$  med en täthet på  $10.5 \text{ g/cm}^3$  och en värmeledningsförmåga på  $0.033 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Försumma temperatursprånget i gapet mellan hölje och bränsle. Vad blir maximala centrumtemperaturen i en stav med en linjär energibelastning på  $20 \text{ W/cm}$ . Kylmedlet har temperaturen  $258^\circ\text{C}$  och denna temperatur antages  $2^\circ\text{C}$  lägre än den på stavens yta? (max 5p). Lösning:

$$T_0 := (258 + 273.15) \cdot \text{K} \quad dT := 2 \cdot \text{K} \quad T_{\text{can}} := T_0 + dT \quad r_c := \frac{0.9}{2} \cdot \text{cm} \quad r_f := r_c - 0.8 \cdot \text{mm}$$

Vi försummar gapets tjocklek varför  $r_i := r_f$

$$k_c := 0.16 \cdot \text{watt} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad k_f := 0.033 \cdot \text{watt} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\text{För enkelhets skull räknar vi på en 1 cm hög bit av staven.} \quad V := 1 \cdot \text{cm} \cdot \pi \cdot r_f^2 \quad p := \frac{20 \cdot \text{watt}}{V}$$

$$dT_{\text{can}} := p \cdot r_f^2 \cdot (r_c - r_i) \cdot (2 \cdot r_i \cdot k_c)^{-1} \quad dT_{\text{can}} = 4.301 \cdot \text{K} \quad T_{\text{rf}} := T_{\text{can}} + dT_{\text{can}}$$

$$T_{\text{center}} := T_{\text{rf}} + p \cdot r_f^2 \cdot (4 \cdot k_f)^{-1} \quad T_{\text{center}} = 585.68 \cdot \text{K} \quad 585.53 - 273.15 = 312.38 \quad ^\circ\text{C}$$

6. Man vill komplexbinda aktinider med en oorganisk envärd halogenid-anjon. a) Vilken ger kraftigaste komplexet? Motivera varför. (max 3p), b) Varför blir motsvarande komplex starkare för  $\text{Cm}^{3+}$  än för  $\text{Am}^{3+}$ ? (max 2p), c) Varför blir detta komplex starkare för  $\text{Th}^{4+}$  och ännu starkare för  $\text{Pu}^{4+}$  (max 2p). Svar: a) Fluoridjon. Orsak: Aktiniderna bildar "hårda" joner, dvs bindningen är i huvudsak av elektrostatisk natur. Detta leder till en stabilitetsordning  $\text{F}^-$  mycket större än  $\text{Cl}^-$  större än  $\text{Br}^-$  något större än  $\text{I}^-$ . b)  $\text{Cm}^{3+}$  har mindre jonradie än  $\text{Am}^{3+}$  pga aktinidkontraktionen, vilket leder till högre elektrostatisk bindningsenergi. c)  $\text{Th}^{4+}$  har högre laddning per jonradie-enhet än både  $\text{Am}^{3+}$  och  $\text{Cm}^{3+}$ .  $\text{Pu}^{4+}$  har ännu högre laddning per jonradie-enhet än  $\text{Th}^{4+}$  pga aktinidkontraktionen.

7. I Sverige har speciella filtersystem installerats vid samtliga reaktorer för att begränsa verkningarna av ett eventuellt reaktor haveri. a) Varför kan dessa filter minska verkan av svåra haverier? (max 2p), b) Vilka typer av sådana filter finns det? (max 2p), c) Hur trädde sådana filter i funktion? (max 1p). Svar: a) Övertryckning av inneslutningen kan leda till brott på denna med åtföljande utsläpp av aktivt material till omgivningen. Genom att inneslutningen vid behov tryckavlastas automatiskt via anslutet filter behålls inneslutningens täthet och eventuellt aktivt material (utom ädelgaser) som ventileras stannar i filtret. När trycket sänkts stängs förbindelsen till filtret och vi har en tät inneslutning som hindrar utsläpp av aktivt material. b) Stenfilter (Barsebäck) och venturi-skrubbers (övriga reaktorer). c) Via sprängbleck mellan inneslutningen och filtret som öppnar när max tillåtet tryck uppnås i inneslutningen.

8. Ange med vilken faktor ( $\times 2200$  m/s värdet) neutronvärsnittet för en  $(n,\gamma)$ reaktion (vars tvärsnitt antages variera normalt med n-energin) avviker från 2200 m/s värdet om reaktionen sker med neutroner som står i termisk jämvikt med en moderator med medeltemperaturen 275 C. (max 5p). Lösning: Ekvation (2.26) ger

$$\frac{m_n \cdot v^2}{2} = k \cdot T \quad \text{där} \quad k := 1.38066 \cdot 10^{-23} \cdot \text{joule} \cdot \text{K}^{-1} \quad m_n := 1.6749286 \cdot 10^{-27} \cdot \text{kg}$$

$$T := (275 + 273.15) \cdot \text{K} \quad v := \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{m_n}} \quad v = 3.006 \cdot 10^3 \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$$

men enligt 1/v-lagen gäller att  $\sigma$  är proportionellt mot  $1/v$   $v_0 := 2200 \cdot \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$

$$\text{Faktorn} := \frac{\frac{1}{v}}{\frac{1}{v_0}} \quad \text{Faktorn} = 0.732$$

9. Ange ett skäl till varför man föredrar styrtstavar med  $\text{B}_4\text{C}$  i stället för Ag-Cd-In legering vid konstruktion av kokvattenreaktorer? (max 2p). Svar: Ofullständig moderering pga förekomst av ånga i hårdan ger ett mer energirikt n-spektrum i en kokvattenreaktor än i en tryckvattenreaktor.  $^{10}\text{B}$  har ett större infångningstvårsnitt vid högre n-energies än Ag-Cd-In legeringen.