Förslag till lösningar. Tentamen i Kärnkemi KKK030 - 2002.12.14

Del A

1. Utgå ifrån hur bindningsenergin per nukleon beror av A för att förklara 2 olika sätt att producera energi mha den starka kärnkraften. Motivera. (2 p)
Lösning/Svar:
När 2 lätta kärnor fusionerar frigörs bindningsenergi, eftersom bindningsenergin per nukleon ökar med A, när A<60.
När en tung kärna fissionerar frigörs också bindningsenergi, eftersom bindningsenergin per nukleon minskar med A, när A > 60, dvs då man går från en tung kärna, t. ex. Z=42 (Uran) till 2 lätta kärnor frigörs energi.

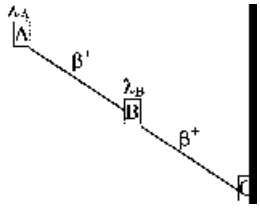
2. Vad är Heliosfären? (1 p)
Lösning/Svar: Solens magnetosfär.

3. Har en 1 MeV p högre LET än en 1 MeV/u α , när den far genom en absorbator? Motivera! (2 p)
Lösning/Svar: LET är proportionell mot Z^2_{proj}/mv^2, vilket ger att ifall den kinetiska energin per nukleon är samma så kommer den partikel som har högst laddning att ge högst LET, dvs α-partikeln.

4. Man brukar dela upp "stopping power", dE/dx i 2 termer.
a) Vilka termer? (1 p)
Lösning/Svar: $S = (dE/dx)_{tot} = (dE/dx)_{kärn} + (dE/dx)_{elektron}$
b) Förklara vilka processer resp. term står för. (2 p)
Lösning/Svar:
$(dE/dx)_{kärn}$ = energiöverföring pga elastiska "coulomb-kollisioner" med target-nuklider.
$(dE/dx)_{elektron}$ = energiöverföring pga inelastiska "coulomb-kollisioner" med elektroner hos target-kärnorna.

5. Definiera
a) RBE (1 p)
Lösning/Svar: RBE = Relative Biological Effectiveness
RBE = [dos för given "end point" (ref. strålning)]/[dos för given "end point" (test strålning)] där "end point" = överlevnadsfunktion. Ref. strålning är ofta 250 keV röntgenstrålning.
b) Dos (1 p)
Lösning/Svar: Dos = energi absorberad per massenhet av absorbatorn. SI-enhet: 1 Gy = 1 J/kg
c) Dosekvivalent (1 p)
Lösning/Svar: Dosekvivalent = Ekvivalentdos. $H_T = \Sigma W_R D_{T,R}$ där $D_{T,R}$ är dosen från ett visst strålslag och W_R är viktningsfaktorn för detta strålslag.
d) OER (1 p)
Lösning/Svar: OER = Oxygen Enhancement Ratio.
OER = [dos i N_2 för given "end point"]/[dos i O_2 (eller luft) för given "end point"]
e) Hadron (1 p)
Lösning/Svar: En hadron är en meson eller baryon, dvs en partikel som deltar i den starka växelverkan kärnkraften.

6. I ett radioaktivt sönderfall, sönderfaller nukliden A till en nuklid B, vilken också är radioaktiv. Antag att sönderfallskonstanten för nukliden A är λ_A och för nukliden B är λ_B. Hur många B-kämor finns det vid en godtycklig tidpunkt t, om antalet B-kämor vid tiden t = 0 är 0 och antalet A-kärnor vid samma tidpunkt är N_{AO}?
(6 p)



Lösning/Svar:
Vid tiden t = t finns antal A-kärnor:
$dN_A/dt = -\lambda_A N_A$ och $N_A = N_{AO}\, e^{-\lambda(A)t}$
Antalet B-kärnor ges av:
$dN_B/dt = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B$
$dNB/dt = \lambda_A N_{AO}\, e^{-\lambda(A)t} - \lambda_B N_B$ (1)
Antag lösning av form:
$N_B(t) = k_1\, e^{-\lambda(A)t} + k_2\, e^{-\lambda(B)t}$ (2)
Radvillkor; vid t=0 är $N_B=0$
ger $k_1 = -k_2$ (3)
(1), (2) och (3) ger nu:
$k_1 e^{-\lambda(A)t}(\lambda_B - \lambda_A) = \lambda_A N_{AO} e^{-\lambda(A)t}$
och således $k_1 = \lambda_A N_{AO}/(\lambda_B - \lambda_A)$
$N_B(t) = [\lambda_A N_{AO}/(\lambda_B - \lambda_A)]\, (e^{-\lambda(A)t} - e^{-\lambda(B)t})$

7. Vad menas med ett "Halo", när man pratar om atomkärnor? (1 p)
Lösning/Svar: Kärnor som har en "gloria" av några neutroner som är separerade från resten av kärnan, t.ex. ^{11}Li, som har 6 n i kärnan och två som cirkulerar utanför kärnan på ett avstånd som gör att de ca 50 % av tiden är utanför räckvidden för den starka kärnkraften.

8. Härled kinetiska energin för α-partikeln resp. dotterkäman, B, i ett α-sönderfall. A -> B + α (5 p)
Lösning/Svar:
$Q_\alpha = -931.5\ (M_B + M_\alpha - M_A)$ [MeV]
Antag att A är i vila före sönderfallet. B och α kan betraktas icke-relativistiska då $v_B << c$ och $v_\alpha << c$
Impulsens bevarande ger: $m_B v_B = m_\alpha v_\alpha$ Kvadrera och halvera så erhålls $(m_B v_B)^2/2 = (m_\alpha v_\alpha)^2/2$
Detta kan skrivas som $m_B E_B = m_\alpha E_\alpha$ varför $E_\alpha = E_B(m_B/M_\alpha)$ (1)
Kinetisk energi hos B och α (om produkterna bildas i sina grundtillstånd):
$Q_\alpha = E_B - E_\alpha = E_B - E_B(m_B/m_\alpha) = E_B(m_\alpha - m_B)/m_\alpha$ (2)
Ifall vi försummar massdefektenändringen är $m_A = m_\alpha + m_B$ (3)
(3) insatt i (2) ger:
$Q_\alpha = E_B(m_A/m_\alpha)$ eller $E_B = Q_\alpha(m_\alpha/m_A)$
Insatt i (1) ger detta:
$E_\alpha = Q_\alpha(m_\alpha/m_A)(m_B/m_\alpha) = Q_\alpha(m_B/m_A)$

9. Varför är α-strålning farligare för biologiskt liv än γ-strålning? Resonera och motivera. (5 p)
Lösning/Svar: α-strålning har högre LET än γ-strålning, dvs joniserar mer per längdenhet och skapar därför fler primära och sekundära elektroner (δ-elektroner), samt radikaler. Sannolikheten för ett dubbelsträngbrott på DNA är avsevärt högre för α-strålning än γ-strålning.

10. Man planerar en rymdresa som skall vara i ca 3 månader. Eftersom strålningen är hög i rymden vill man kunna detektera den totala dosen för varje astronaut efter återkomsten till jorden. Man vill även kunna skilja på doserna från olika partiklar. Föreslå detektor! Motivera. (2 p)
Lösning/Svar: Film-detektorer. Emulsioner med olika skärmning för att differentiera mellan dosen från β-, γ- och n-partiklar.

11. Nämn 5 skyddsbarriärer som hindrar radioaktiva ämnen från att komma ut i omgivningen från ett kärnkraftverk. (2,5 p)
Lösning/Svar:
1) Bränsle i form av UO_2, dvs en keram.
2) Bränslestavar av Zircaloy.
3) Reaktortank gjord av 15 - 20 cm tjockt stål.
4) Reaktorinneslutning av metertjock betong. I betongen finns ingjuten gastät skyddsplåt-
5) Reaktorbyggnaden + Extra filter för filtrerad tryckavlastning.

12. Hur reglerar man normalt effekten i en BWR? (2 p)
Lösning/Svar: Med circulationspumpar och styrstavar.

13. Vilka 4 naturkrafter tror dagens vetenskap finns? Nämn de kraftförmedlande partiklarna för dessa krafter. Har man verifierat alla kraftförmedlande partiklar? (5 p)
Lösning/Svar:
Krafter:
1) Gravitationskraft, 2) Elektromagnetisk kraft, 3) Stark växelverkan (kärnkraft), 4) Svag växelverkan (kärnkraft)
Kraftförmedlande partiklar:
1) Graviton, 2) Foton, 3) Gluon, 4) $W^\pm$ och Z
Man har ännu inte verifierat gravitonen.

14. En 20-årig man råkade utsätta sig för en γ-dos som var 1 mSv under en vecka. Finns det någon hälsorisk? Motivera. (2 p)
Lösning/Svar: Dagens vetenskap vet ej säkert detta. Vissa teorier antar ett tröskelvärde för den minsta dos som kan gen en långsiktig ökad cancerrisk, andra teorier antar ett linjärt dos-effekt samband, dvs inget tröskelvärde. Vissa teorier tror t. o. m. att låga doser kan minska risken för cancer genom att man aktiverar immunsystemet.

15. Ungefär hur mycket energi frigörs vid fisson av en ^{235}U med termiska neutroner? (1 p)
Lösning/Svar: Ca 200 MeV

16. Vilka är konstanslagerna för kärnreaktioner? (2,5 p)
Lösning/Svar: 1) Energins bevarande/konstans, 2) Impulsens bevarande/konstans, 3) Laddningens bevarande/konstans, 4) Masstalets bevarande/konstans, 5) Kärnimpulsmomentets/Spinnets bevarande/konstans.

17. Vilka krav ställer man på de geologiska formationema för ett slutförvar av använt kärnbränsle? (3 p)
Lösning/Svar: 1) Geologisk stabilitet, dvs områden med mycket låg seismisk aktivitet, dvs inga vulkaner, jordbävningar eller andra geologiska aktiviteter. 2) Frånvaro av stora sprickor, hål, etc. 3) Ogenomtränglighet till ytvatten. 4) Försumbar grundvattencirculation och ingen kontakt med närliggande potentiella inflödeskällor. 5) Bra värmekonduktivitet. 6) Av så litet intresse för människor som möjligt (dvs frånvaro av brytvärd malm), samt helst så långt från bebyggelse som möjligt.

18. Vad menas med en detektors dödtid? (1 p)
Lösning/Svar: Den tid efter en jonisation under vilken ingen ny jonisation kan registreras av detektorn, dvs den tid efter det att detektorns elektronik har registrerat en puls som den inte kan registrera en ny puls.

Del B

1. Ett plutoniumprov består av en okänd mängd av ^{239}Pu och ^{240}Pu. Halveringstiderna för ^{239}Pu och ^{240}Pu är 2,411*10^4 år och 6,653*10^3 år. Provets specifika aktivitet uppmättes till 1,72*10^8 sönderfall per minut och milligram. Vilken procentuell viktssammansättning har provet? (10 p)

Lösning/Svar:

Specifik aktivitet: $A = \lambda N_A/M$ [Bq/g]

Givet i uppgiften: $t_{½239} := 2.411 \cdot 10^4 \cdot yr$ $\lambda_{239} := \frac{ln(2)}{t_{½239}}$ $\lambda_{239} = 9.11032 \cdot 10^{-13} \cdot sec^{-1}$

$t_{½240} := 6.653 \cdot 10^3 \cdot yr$ $\lambda_{240} := \frac{ln(2)}{t_{½240}}$ $\lambda_{240} = 3.30151 \cdot 10^{-12} \cdot sec^{-1}$

$Bq := sec^{-1}$ $A_{prov} := \frac{1.72 \cdot 10^8}{60 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{Bq}{gm}$ $A_{prov} = 2.867 \cdot 10^9 \cdot \frac{Bq}{gm}$

X_{239} = viktsandel ^{239}Pu och X_{240} = viktsandel ^{240}Pu $X_{239} + X_{240} = 1$

$N_A := 6.0221367 \cdot \frac{10^{23}}{mole}$ $M_{239} := 239 \cdot \frac{gm}{mole}$ $M_{240} := 240 \cdot \frac{gm}{mole}$

$$A_{prov} = \frac{X_{239} \cdot \lambda_{239} \cdot N_A}{M_{239}} + \frac{X_{240} \cdot \lambda_{240} \cdot N_A}{M_{240}}$$ och

$$X_{239} := \frac{-\left(A_{prov} - \lambda_{240} \cdot \frac{N_A}{M_{240}}\right)}{\left(-\lambda_{239} \cdot \frac{N_A}{M_{239}} + \lambda_{240} \cdot \frac{N_A}{M_{240}}\right)}$$ $X_{239} = 0.905$ $X_{240} := 1 - X_{239}$

$X_{240} = 0.095$

Svar: $X_{239} = 90.5 \cdot \%$ $X_{240} = 9.5 \cdot \%$

2. Sovjetunionen meddelade inte omvärden om när reaktorolyckan i Tjernobyl inträffade. I Sverige kunde man dock genom att mäta förhållandet mellan aktiviteten hos olika isotoper, i det stoftmoln som passerande Sverige dagarna efter olyckan, bestämma tidpunkten för reaktorhaveriet. Relativa aktiviteten av ^{133}I och ^{131}I uppmättes kl. 17:00, måndagen 28/4, 1986, till 270 mBq/m^3 resp. 1000 mBq/m^3.

a) Bestäm tidpunkten för reaktorhaveriet i Tjernobyl. (8 p)
Lösning/Svar:

Från nuklidkartan: $t_{½133} := 20.8 \cdot hr$ $\quad t_{½131} := 8.02 \cdot day$

$$\frac{R_{0131}}{R_{0133}} = \frac{2.885}{6.609} \qquad R_{131} = R_{0131} \cdot e^{-\lambda_{131} \cdot t} \qquad R_{133} = R_{0133} \cdot e^{-\lambda_{133} \cdot t}$$

$$\frac{R_{131}}{R_{133}} = \frac{R_{0131} \cdot e^{-\lambda_{131} \cdot t}}{R_{0133} \cdot e^{-\lambda_{133} \cdot t}} \quad \text{dvs:} \quad \frac{R_{131}}{R_{133}} = \frac{R_{0131}}{R_{0133}} \cdot exp\left[t \cdot \left(-\lambda_{131} + \lambda_{133} \right) \right]$$

men: $\lambda_{131} := \frac{ln(2)}{t_{½131}}$ och $\lambda_{133} := \frac{ln(2)}{t_{½133}}$

insätt och förenkla så erhålles:

$$\frac{R_{131}}{R_{133}} = \frac{R_{0131}}{R_{0133}} \cdot exp\left[t \cdot \left(\frac{-ln(2)}{t_{½131}} + \frac{ln(2)}{t_{½133}} \right) \right]$$

men: $\frac{R_{131}}{R_{133}} = \frac{1000}{270}$

lös sedan ut t:

$$t = \frac{-ln\left(\frac{R_{131}}{R_{133}} \cdot \frac{R_{0133}}{R_{0131}} \right)}{\left(\frac{ln(2)}{t_{½131}} - \frac{ln(2)}{t_{½133}} \right)} \qquad t := \frac{-ln\left[\frac{\frac{1000}{270}}{\frac{2.885}{6.609}} \right]}{\left(\frac{ln(2)}{t_{½131}} - \frac{ln(2)}{t_{½133}} \right)}$$

$$t = 2.59 \cdot 10^5 \cdot sec$$

$$t = 71.9 \cdot hr$$

Således inträffade olyckan ca kl 17:00 den 25/4, 1986.

b) Skulle man få samma händelseförlopp i en västeuropeisk BWR ifall effekten började stiga snabbt? Motivera och jämför reaktorkonstruktionerna. (2 p)
Lösning/Svar: En inherent säkerhet som finns i alla kommersiella kärnkraftreaktorer är Doppler-koefficienten, vilken beskriver det faktum att desto varmare kärnbränslet blir desto sämre kan det använda neutroner för att fissionera (dvs. det har negativ temperaturkoefficient). I en BWR så har man också en negativ void-koefficient, vilket innebär att ifall temperaturen hos bränslet ökar så kokar kylvattnet mer, vilket leder till att det bildas fler vattenbubblor, vilket i sin tur leder till att modereringsförmågan försämras. Detta leder till att antalet fissioner minskar, vilket leder till att effekten går ned. Ifall voidkoefficienten kan bli positiv så är det viktigt att Doppler-koefficienten överväger den positiva void-koefficienten, annars börjar reaktorn att mycket snabbt öka i effekt på ett okontrollerat sätt. I en RBMK så kan den positiva void-koefficienten överväga Doppler-koefficienten (den negativa temp. koefficienten) då reaktoreffekten är lägre än ca 20 % och således ge en mycket snabb okontollerad positiv återkoppling, vilket skedde i Tjernobyl.

3. Vad är doshastigheten 2 m från ett $3{,}7*10^{10}$ Bq(1 Ci) ^{137}Cs provpreparat om attenueringsmediet är:
a) vatten (5 p)
b) luft (5 p)

^{137}Cs emitterar 0,662 MeV γ i 85 % av sönderfallen. Anv. bifogade tabeller.

Lösning/Svar:

$dD/dt = \Sigma_i \varphi_i y_i C_i$

C_i = "flödes-till-doshastighetsomvandlingsfaktor"

$\varphi_i = BSe^{-\mu r}/4\pi r^2$

y_i = antal söndefall som ger γ nr. i

I detta fall är $i = 1$ och $y = 0.85$
B = "buildup factor" (från App. E)
S = källstyrkan
μ = totala attenueringskoefficienten för 0.661 MeV g i vatten eller luft.

Interpolering i Tabell 16.3 ger: $C_i = 2.19*10^{-16}$(Sv/s)/[γ/(m^{2}s)]

Tabell App. E ger:
$B = 1 + a\mu r \exp(b\mu r)$

a) Attenueringsmedlet är vatten
Linjär interpolering i Tabell App. E ger:
a = 1.968 och b = 0.0547
Linjär interpolering i Tabell D ger:

$\mu = 0.0861$ cm^2/g = 0.00861 m^2/kg

$\mu r = 0.00861$[m^2/kg] 10^3 [kg/m^3] 2 [m] = 17.22
vilket ger
$B = 1 + 1.968*17.22*\exp(0.0547*17.22) = 87.92$
Doshastigheten i vatten 2 m från preparatet blir då:

$dD/dt = 2.19*10^{-16}*87.92*3.7*10^{10}*0.85*[\exp(-17.22)]/(4\pi*2^2) = 4.0*10^{-13}$ Sv/s

b) Attenueringsmedlet är vatten
Linjär interpolering i Tabell App. E ger:
a = 1.945 och b = 0.0540
Linjär interpolering i Tabell D ger:

$\mu = 0.0775$ cm^2/g = 0.00775 m^2/kg

$\mu r = 0.00775*1.293*2 = 17.22$
vilket ger

$B = 1 + 1.945*2.00*10^{-2}*\exp(0.0540*2.00*10^{-2}) = 1.039$
Doshastigheten i luft 2 m från preparatet blir då:

$dD/dt = 2.19*10^{-16}*1.029*3.7*10^{10}*0.85*[\exp(-2.00*10^{-2})]/(4\pi*2^2) = 1.4*10^{-7}$ Sv/s = 0.14 µSv/s

4. I ett kärnkraftverk är ^{60}Co den utan jämförelse mest betydelsefulla nukliden ur strålskyddssynpunkt och bidrar markant till den årliga kollektivdosen. Infångning av en termisk neutron i ^{59}Co är den helt dominerande av de reaktioner som kan ge ^{60}Co; $n + {}^{59}Co \rightarrow {}^{60}Co + \gamma$ (1) $^{60}Co \rightarrow {}^{60}Ni + \beta^- + \gamma + \nu$ (2)

Betasönderfallet ger 2 fotoner med energierna 1,33 och 1,17 MeV.

Kärnbränsletillverkaren McBränsle ville ett år byta ut en fjäder i alla nya bränsleknippen för BWR-bränsle. En reaktor A har 620 st. knippen i härden. Varje fjäder väger 30 g. 20 % av tot. mängden bränsle skulle bytas ut. Det makroskopiska tvärsnittet för reaktion (1) och (2) är 500 m^{-1}. Densiteten för kobolt är $8,7*10^3$ kg/m^3.

a) Eftersom man köpte in fjädern från en underleverantör ville man kontrollera att fjädern innehöll mindre än 1 ppm ^{59}Co vilket var specificerat. Man bestrålade därför 10 g av fjädermaterialet i 10 timmar i ett termiskt neutronflöde av $2*10^{12}$ n/cm^2s. Provet mättes sedan efter det fått avklinga i 90 dygn. Därvid erhålls 234 cpm i toppen med 1,33 MeV. Ett standardpreparat med 1,1 µCi ^{60}Co mättes också vid denna tidpunkt, med samma geometri, och det gav 59463 cpm i 1,33 MeV toppen. Vad var provets kobolthalt i viktsprocent? (8 p)
Lösning/Svar:

$\varphi = 2*10^{12}$ n/cm^2s

$t_{½} = 5.272$ år

$t_{irr} = 10$ h

$t_{cool} = 90$ dygn

1 Ci = $3,7*10^{10}$ s^{-1}

$A_{std} = 1,1*10^{-6}$ Ci = $4,070*10^4$ s^{-1}

$R_{std} = 59463/60 = 991,05$ s^{-1}

$\Psi_{mät} = R_{std}/A_{std} = 991,05/4,070*10^4 = 2,44*10^{-2}$

$R_{prov} = 234$ cpm = 3,90 s^{-1} varför $A_{prov} = 3,90/(2,44*10^{-2}) = 1,6016*10^2$ Bq

$A_{0prov} = A_{prov}*\exp(\lambda t_{cool})$ men $\lambda = \ln(2)/(5,272*365) = 3,6021*10^{-4}$ d^{-1}

varför $A_{0prov} = 1,6016*10^2*\exp(90*3,6021*10^{-4}) = 1,6544*10^2$ Bq

$m_{Co} = -A_{0prov} *\{M_{Co-59}/[N_A*\varphi*\sigma_{Co-59}*(-1 + \exp(-\lambda*t_{irr}))]\}$

$\Sigma = N_v*\Sigma_i^n*y_i*\sigma_i$

$N_v = (N_A*\rho/M_{Co-59})$ [m^{-3}]

$\Sigma\varphi/\rho$ [$s^{-1}kg^{-1}$]

$m_{Co} = -A_{0prov} *\{\rho/[\Sigma\varphi(-1 + \exp(-t_{irr}))]\} =$

$= 1,6544*10^2*\{8,7*10^3/[500*2*10^{12}*10^4(-1 + \exp(3,6021*10^{-4}*(10/24))]\} = 9.589*10^{-10}$ kg

Viktsandel 59Co = (mCo-59)/mprov = $(9,589*10^{-10})/(10*10^{-3}) = 9,598*10^{-8}$ dvs ca 0.1 ppm
Detta är mindre än gränsvärdet 1 ppm, varför materialet är OK

b) Antag:
1) Härden i BWR har en termisk neutrontäthet som är $1*10^{13}$ n/cm^2s på den höjd där fjädern är placerad.
2) Varje knippe sitter 5 år i härden.
Vad blir den totala aktiviteten från ^{60}Co, när man efter 5 år tar ut alla de knippen som har den nya fjädern? (6 p)
Lösning/Svar:

Produktionshastigheten $P = 1*10^{13}*10^4*500 = 5,0*10^{19}$ reaktioner/m^3s
Aktiviteten vid bestrålningens slut:
$A = P*(1 - e^{-\lambda*t}) = 5,0*10^{19}*(1 - e^{-0,1315*5}) = 2,4093*10^{19}$ Bq/m^3
Total volym kobolt i härden:
$V_{tot} = (620*0,20*30*10^{-3}*9.589*10^{-8})/(8,7*10^3) = 4,10*10^{-11}$ m^3
Total aktivitet vid bestrålningens slut blir då:
$A_{tot} = A*V_{tot} = 2.4093*10^{19}*4,10*10^{-11} = 1*10^9$ Bq = 1 GBq