

UITWERKINGEN

Gecoördineerd examen stralingsbescherming Deskundigheidsniveau 3

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave Nascholing/LUMC	BN/LUMC
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC
TU Eindhoven	TU/e

Examendatum: 8 december 2014

Vraagstuk 1 Productie van ^{11}C voor PET Uitwerking

Vraag 1.1

In het Handboek Radionucliden staat dat het radionuclide ^{11}C wordt geproduceerd met een cyclotron via de $^{11}\text{B}(p,n)$ - of de $^{14}\text{C}(p,\alpha)$ -reactie. Een deel van deze bewering is onjuist. Welk deel is onjuist? Beargumenteer uw antwoord.

De eerste reactie is mogelijk. De tweede reactie leidt niet tot ^{11}C maar tot ^{11}B .

(Het gevraagde nuclide kan geproduceerd worden via de $^{14}\text{N}(p,\alpha)$ -reactie).

Vraag 1.2a

Laat door middel van een berekening zien dat de in de werkzaamheden gebruikte maximale hoeveelheid ^{11}C is toegestaan in een B-laboratorium. Ga voor de verspreidingskans van de serie handelingen met het ^{11}C -choline uit van een waarde voor $p = -2$.

$$A_{\max} = \frac{0,02 \cdot 10^{p+q+r}}{e(50)_{\text{inh}}} = \frac{0,02 \cdot 10^{-2+3+3}}{1,8 \cdot 10^{-11}} = 1,1 \cdot 10^{13} = 11 \text{ TBq}$$

De $e(50)_{\text{inh}}$ voor organische aerosolen (klasse M) moet gebruikt worden in de berekening. Op basis van de A_{\max} is de gebruikte hoeveelheid, 3,5 TBq, dus toegestaan.

Vraag 1.2b

Bereken de belastingsfactor B_w voor de ruimte als gevolg van de werkzaamheden met het ^{11}C .

De bijdrage in de belastingsfactor B_w is

$$B_w = \sum_{j=1}^n \frac{t_j}{40} \times \frac{A_j}{A_{\max,j}} = \sum_{j=1}^n \frac{3 \cdot 1}{40} \times \frac{3,5 \text{ TBq}}{11 \text{ TBq}} = 2,4 \cdot 10^{-2}$$

Vraag 1.3a

Bepaal de effectieve halveringstijd van $^{11}\text{CO}_2$ in het lichaam. Motiveer uw antwoord.

De fysische halveringstijd = 20,39 minuut en de biologische halveringstijd = 40 dagen. Omdat de fysische halveringstijd zoveel korter is zal de effectieve halveringstijd bepaald worden door de fysische, en dus 20,39 minuut zijn.

Dit kan ook berekend worden:

$$T_{\frac{1}{2},eff} = \frac{T_{\frac{1}{2},fys} \cdot T_{\frac{1}{2},biol}}{T_{\frac{1}{2},fys} + T_{\frac{1}{2},biol}} = \frac{20,39 \text{ min} \cdot (40 \cdot 24 \cdot 60) \text{ min}}{20,39 \text{ min} + (40 \cdot 24 \cdot 60) \text{ min}} = 20,38 \text{ min}$$

Vraag 1.3b

Toon door berekening aan dat de lichaamsactiviteit zes uur na eenmalige inname van 1 Bq $^{11}\text{CO}_2$ overeenkomt met $4,8 \cdot 10^{-6}$ Bq.

Fractie nog in het lichaam:

$$e^{-\lambda t} = e^{-\frac{\ln 2}{20,38 \text{ min}} \cdot (6 \cdot 60) \text{ min}} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ Bq per Bq inname}$$

Vraag 1.4

Bereken de effectieve volg dosis die de laborant heeft ontvangen als gevolg van deze blootstelling.

Gebruik de gegevens voor de totale-lichaamstelling uit het Handboek Radionucliden bij berekening van de effectieve dosis door deze inhalatie van $^{11}\text{CO}_2$,

$$A_{in} = \frac{572 \text{ [Bq]}}{4,9 \cdot 10^{-6} \text{ [Bq per Bq}_{inname}\text{]}} = 1,2 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

$$E(50) = e(50) \cdot A_{in} = 2,2 \cdot 10^{-12} \text{ [Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}\text{]} \cdot 1,2 \cdot 10^8 \text{ [Bq]} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,26 \text{ mSv}$$

Indien de gegevens voor de totale-lichaamstelling uit vraag 2.3b worden gebruikt is het antwoord eveneens 0,26 mSv.

[Ter informatie:

De effectieve dosis van de laborant is vermoedelijk veel hoger door de bijdrage van externe bestraling].

Puntentelling

Vraagstuk 1	
Vraag	Punten
1.1	3
1.2a	3
1.2b	2
1.3a	2
1.3b	2
1.4	4
Totaal	16

Vraagstuk 2 Radioactieve besmetting

Vraag 2.1

Bereken of deze besmetting een significante verhoging van het teltempo veroorzaakt.

Het rendement voor ^{99m}Tc is 3,0 % cps/Bq op 1 cm afstand van een oppervlak.

Totale activiteit op het oppervlak: $5 [\text{cm}^2] \times 40 [\text{Bq}/\text{cm}^2] = 200 \text{ Bq}$

$200 (\text{Bq}) \times 3\% / 100\% = 6 \text{ cps}$

Een verhoging van het teltempo minstens gelijk aan het achtergrondteltempo wordt als significant gezien. Het achtergrondteltempo is 10 cps. Wanneer het netto teltempo 6 cps bedraagt is dit dus geen significante verhoging van het teltempo en dus niet aantoonbaar.

Vraag 2.2

Wanneer het homogeen besmette oppervlak groter is dan de detector van de LB 122 A, wat is dan de laagste besmettingsgraad (in Bq/cm²) van ^{99m}Tc die kan worden aangetoond?

Het oppervlak van de LB 122 A is 218 cm². Het netto teltempo boven 40 Bq/cm² is dan dus $218 [\text{cm}^2] / 5 [\text{cm}^2] \times 6 [\text{cps}] = 262 \text{ cps}$.

Een netto teltempo van 10 cps is een significante verhoging, dit wordt bereikt bij $10 [\text{cps}] / 262 [\text{cps}] \times 40 [\text{Bq} / \text{cm}^2] = 1,5 \text{ Bq} / \text{cm}^2 = 2 \text{ Bq}/\text{cm}^2$.

of

10 cps netto, komt overeen met $A = 10 [\text{cps}] / 0,030 [\text{cps}/\text{Bq}] = 333 \text{ Bq}$. Het oppervlakte is 218 cm². Dus $333 [\text{Bq}] / 218 [\text{cm}^2] = 1,5 \text{ Bq}/\text{cm}^2 = 2 \text{ Bq}/\text{cm}^2$.

Vraag 2.3

Bereken het netto teltempo (in cpm) wanneer een veegpapiertje wordt gemeten in de 1470 Wizard, nadat met dit papiertje het met ^{99m}Tc besmette oppervlak van 5 cm^2 met een besmettingsgraad van 40 Bq per cm^2 is afgeveegd.

De afgeveegde activiteit is van $5 \text{ (cm}^2) \times 40 \text{ (Bq per cm}^2) \times 10\%/100\% = 20 \text{ Bq}$.

De efficiency voor ^{99m}Tc is 86% (cpm/dpm) volgens bijlage 2.

Het netto teltempo is dan:

$$20 \text{ (dps)} \times 60 \text{ (s/m)} \times 86\%/100\% \text{ (cpm/dpm)} = 1 \cdot 10^3 \text{ cpm.}$$

Vraag 2.4

Toon aan dat met de 1470 Wizard zelfs bij een teltijd van slechts 1 seconde de afgewreven ^{99m}Tc -activiteit kan worden aangetoond, waarbij het netto teltempo minimaal 3 maal de standaarddeviatie van het achtergrondteltempo moet bedragen.

$$t = 1 / 60 \text{ minuut} = 0,017 \text{ minuut}$$

$$R_{\min} = 3 \sqrt{(R_{\text{bkgr}} / t)} = 3 \sqrt{(17 / 0,017)} = 95 \text{ cpm}$$

Het teltempo van $1 \cdot 10^3 \text{ cpm}$ overschrijdt R_{\min} ruimschoots.

Puntentelling

Puntentelling	
Vraagstuk 2	
Vraag	Punten
2.1	4
2.2	4
2.3	4
2.4	4
Totaal	16

Vraagstuk 3 Voorziene onbedoelde gebeurtenis bij bereiding van ^{123}I radiofarmacon

Vraag 3.1

Laat door berekening zien welke effectieve dosis de operator oploopt bij het opruimen van deze besmetting. Gebruik bij de berekening $H^*(10)$ als schatter voor de effectieve dosis.

$$H^*(10) = (h \times A \times t) / r^2$$

$$= 0,046 \cdot 10^{-12} (\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{m}^2) \times 25 \cdot 10^9 (\text{Bq}) / 0,5^2 (\text{m}^2) \times 1 / 60 (\text{h})$$

$$E = H^*(10) = 0,767 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,077 \text{ mSv}$$

Vraag 3.2

Bereken de transmissie door de loden afvalcontainer voor gammafotonen afkomstig van het verval van ^{123}I en bereken hiermee het omgevingsdosisequivalenttempo op de buitenzijde van de afvalcontainer. U dient hiervoor de gegevens uit de pagina's 11 tot en met 13 uit de bijlage te gebruiken. Voor de build-up mag u de waarde 100.000 aannemen.

$$\text{We gebruiken hiervoor: } \dot{H}^*(10) = T \times \frac{h \times A}{r^2} = B \times e^{-\mu d} \times \frac{h \times A}{r^2}$$

Omgevingsdosisequivalenttempo $h = 0,046 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{m}^2$
 $A = 0,85 \times 25 \text{ GBq} = 21,25 \text{ GBq}$; $d = 2,5 \text{ cm}$; $r = 3,5 \text{ cm}$ ($1+2,5 \text{ cm}$);
 $\rho = 11,34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.
 massieke verzwakkingsdoorsnede voor 159 keV na interpolatie van de waarde uit appendix D in bijlage 3.2:

$$\mu/\rho = 2,07 - \frac{(159 - 150)}{(200 - 150)} \times (2,07 - 1,014) = 1,88 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$$

Merk op: lineaire interpolatie is hier discutabel. $1,8 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ is ook verdedigbaar. Ieder antwoord tussen 2,07 en $1,8 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ wordt goed gerekend mits wordt aangegeven dat voor de verzwakkingsdoorsnede bij 159 keV die van 150 keV wordt gehanteerd dan wel dat er geïnterpoleerd wordt.

verzwakking door 2,5 cm lood voor 159 keV is:

$$e^{-\mu/\rho \cdot \rho \cdot d} = e^{-1,88 \cdot 11,34 \cdot 2,5} = e^{-53,3} = 7,14 \cdot 10^{-24}$$

Met behulp van de gegeven build-up factor wordt de transmissie voor een brede bundel $7,14 \cdot 10^{-19}$

Dus het omgevingsdosisequivalenttempo op de buitenzijde van de container is dan:

$$\dot{H}^*(10) = 1 \cdot 10^5 \times 7,14 \cdot 10^{-24} \times \frac{0,046 \times 21250}{0,035^2} = 5,7 \cdot 10^{-13} \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}; \text{ (dit is praktisch natuurlijk nul).}$$

NB: voor de berekening van de verzwakking wordt 4 punten gegeven. Voor de berekening van het omgevingsdosisequivalenttempo of de argumentatie dat deze verwaarloosbaar is wordt 1 punt gegeven.

Vraag 3.3a

Behalve de gammalijn van 159 keV (bijlage blz 11) zendt ^{123}I nog meer fotonen uit per desintegratie. Beredeneer, aan de hand van zowel de gegevens als de grafiek uit de bijlage (blz 14 en 15, respectievelijk blz 16) hoe de in vraag 2 berekende transmissie verandert wanneer ook met deze extra fotonen rekening wordt gehouden en waarom de transmissiecurve (smalle bundel) geen rechte lijn is.

Doordat met meer fotonenenergieën rekening moet worden gehouden, heeft de transmissie geen lineair verloop meer als functie van de afschermdikte. Doordat de hoger energetische fotonen steeds belangrijker worden (opharden van de straling) is steeds meer afschermingsmateriaal nodig om het stralingsniveau met eenzelfde factor te verlagen. De halveringsdikte of tiendewaardedikte neemt toe.

Vraag 3.3b

Maak een nieuwe berekening van het omgevingsdosisequivalenttempo aan de buitenzijde van de container met behulp van de grafiek uit de bijlage (blz 16). Houd hierbij rekening met build-up.

We gebruiken hiervoor: $\dot{H}^*(10) = T \times \frac{h \times A}{r^2}$, met $T = 0,0020$ uit de grafiek. Keuze voor de smalle bundel geometrie is fout want deze houdt geen rekening met de build-up.

$$\dot{H}^*(10) = 2,0 \cdot 10^{-3} \times \frac{0,046 \times 21,25 \cdot 10^3}{0,035^2} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ } \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} = 1,6 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1}$$

Vraag 3.4

Beredeneer op basis van het bij vraag 3b berekende stralingsniveau welk etiket op het collo moet worden aangebracht en wat de transportindex is. Indien u het antwoord op vraag 3b schuldig bent gebleven mag u uitgaan van 1 mSv/h.

Stralingsniveau aan het oppervlak van het collo is $1,6 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$. Voor een stralingsniveau $> 0,5 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ en $\leq 2 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1}$ aan het oppervlak van het collo moet een etiket van categorie III-Geel worden toegepast.

Op 1 m van oppervlak van het collo wordt het stralingsniveau met behulp van de kwadratenwet:

$$\dot{H}^*(10) = 1,6 \times \frac{0,035^2}{1,035^2} = 0,0018 \text{ mSv}\cdot\text{h}^{-1} = 1,8 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$$

Dit stralingsniveau (in microsievert per uur) moet door 10 worden gedeeld en op 1 cijfer achter de komma naar boven worden afgerond voor de transportindex:

$$TI = 1,8 / 10 = 0,2$$

Het fictieve antwoord voor vraag 3b levert resp. $1,1 \mu\text{Sv/h}$ en een TI van 0,1 op.

Puntentelling

Vraagstuk 3	
Vraag	Punten
3.1	3
3.2	5
3.3a	3
3.3b	3
3.4	4
Totaal	18

Vraagstuk 4 Demonstratie met een uraniumbron

Vraag 4.1

Toon aan dat uranylmetaat onder de definitie van splijtstof valt, zoals deze in de kernenergiewet gedefinieerd is in combinatie met het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen.

$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ heeft molmassa $M = 238 \text{ (u)} + 8 \times 16 \text{ (u)} + 2 \times 14 \text{ (u)} = 394 \text{ u}$

massapercentage U in $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 = \frac{238 \text{ (u)}}{394 \text{ (u)}} \cdot 100 \% = 60 \%$

Het massapercentage is hoger dan 0,1%, waardoor uranylmetaat splijtstof is.

Vraag 4.2

Toon door berekening aan dat 15 gram natuurlijk uranium niet vrijgesteld is van het Besluit vervoer van splijtstof, ertsen en radioactieve stoffen, door de activiteit van de uranium-isotopen te berekenen. Indien u de activiteit niet kunt bepalen, gebruik dan in de rest van dit vraagstuk $A_{\text{U-238}} = 190 \text{ kBq}$ en $A_{\text{U-235}} = 10 \text{ kBq}$.

99,3% ^{238}U ; 0,7% ^{235}U

$M = 238 \text{ u}$ (zie gegevens)

$$N = \frac{m \times N_A}{M} = \frac{15 \text{ (g)} \times 6,02 \cdot 10^{23} \text{ (mol}^{-1}\text{)}}{238 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)} = 3,79 \cdot 10^{22} \text{ atomen}$$

$$A_{235\text{U}} = f \times N \times \lambda = 0,007 \times 3,79 \cdot 10^{22} \times 3,12 \cdot 10^{-17} \text{ (s}^{-1}\text{)} = 8,29 \text{ kBq}$$

$$A_{238\text{U}} = f \times N \times \lambda = 0,993 \times 3,79 \cdot 10^{22} \times 4,92 \cdot 10^{-18} \text{ (s}^{-1}\text{)} = 185 \text{ kBq}$$

$$A_{\text{tot}} = A_{235\text{U}} + A_{238\text{U}} = 8,29 \text{ (kBq)} + 185 \text{ (kBq)} = 193 \text{ kBq}$$

De activiteit van ^{238}U alleen is al voldoende om te concluderen dat 15 g natuurlijk uranium niet is vrijgesteld van dit Besluit.

Vraag 4.3

Bepaal of de demonstratiebron met 15 gram natuurlijk uranium, in oplossing als uranyl-nitrat, meegenomen mag worden in een vrijgesteld collo. De verpakking is kubusvormig met een afmeting van $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$. Aangenomen mag worden dat de bron als puntbron in het midden van de verpakking aanwezig is.

$$\dot{H}^*_{U-238} = \frac{h \times A}{r^2} = \frac{0,041 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{MBq}} \right) \times 185 \cdot 10^{-3} (\text{MBq})}{(0,15 \text{ m})^2} = 0,34 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$$

$$\dot{H}^*_{U-235} = \frac{h \times A}{r^2} = \frac{0,239 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{MBq}} \right) \times 8,29 \cdot 10^{-3} (\text{MBq})}{(0,15 \text{ m})^2} = 0,088 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$$

$$\dot{H}^*_U = \dot{H}^*_{U-238} + \dot{H}^*_{U-235} = 0,43 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$$

De bron mag worden meegenomen in een vrijgesteld collo.

Vraag 4.4

Bereken het omgevingsdosisequivalent per jaar op de positie van de medewerker van het opleidingsinstituut ten gevolge van de demonstraties.

Het omgevingsdosisequivalenttempo op 0,15 m van de bron is 0,43 microSv/h. Op 30 cm van de bron is het omgevingsdosisequivalent in 30 minuten:

$$H^* = 0,43 \left(\frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \right) \times \left(\frac{0,15 \text{ m}}{0,30 \text{ m}} \right)^2 \times \frac{30 \text{ min}}{60 \text{ min}} \times 10 \text{ j}^{-1} = 0,54 \mu\text{Sv} / \text{j}$$

Puntentelling

Vraagstuk 4	
Vraag	Punten
4.1	4
4.2	5
4.3	4
4.4	4
Totaal	17