

Gecoördineerd examen stralingsbescherming Deskundigheidsniveau 3

Nuclear Research and Consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave/IRS-stralingsbeschermingscursussen	BHC/IRS
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboud Universiteit/ UMC St.Radboud	RU/UMC

examendatum: 10 december 2007

examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- **Deze examenopgaven omvatten 13 genummerde pagina's. Wilt u dit controleren!**
- Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Ook alle niet gebruikte uitwerkbladen dient u in te leveren.
- Vermeld **alleen uw examenummer** op de uitwerkbladen (dus niet uw naam).
- Het is geoorloofd boeken, persoonlijke aantekeningen en ander documentatiemateriaal te raadplegen voor het beantwoorden van de vragen.
- *Met nadruk wordt erop gewezen dat u ook dient aan te geven via welke **berekeningsmethode** en volgens welke **beredenering** u tot de oplossing komt.*
- Indien u een onderdeel van een vraagstuk niet kunt uitrekenen en het antwoord nodig is voor het oplossen van de rest van het vraagstuk, mag u uitgaan van een fictief antwoord.
- Voor sommige vraagstukken behoeven niet alle gegevens noodzakelijkerwijs te worden gebruikt.
- In totaal kunt u 67 punten behalen bij het goed oplossen van de vraagstukken. De puntenverdeling over de vraagstukken is als volgt:
 - vraagstuk 1:16 punten
 - vraagstuk 2:17 punten
 - vraagstuk 3:17 punten
 - vraagstuk 4:17 punten

Vraagstuk 1 Kalibratie van een edelgasmonitor

In lucht is een geringe hoeveelheid stabiel ^{40}Ar aanwezig; door bestraling met neutronen kan een deel worden omgezet in het instabiele ^{41}Ar . In het uitgaande ventilatiekanaal van een kernreactor bevindt zich daarom een argonmonitor. Dit instrument meet de activiteitsconcentratie van het edelgas ^{41}Ar in de geloosde lucht door middel van continue meting met een GM-buis die in het midden van een vast volume is gemonteerd. Op regelmatige tijden wordt deze monitor gekalibreerd.

Voor deze kalibratie wordt de monitor in een aparte gesloten opstelling gebracht. In het gesloten volume wordt vervolgens een kwartsampul met een bekende hoeveelheid ^{41}Ar gebroken. Omdat het volume van de opstelling bekend is (6,8 liter) kan de ^{41}Ar -activiteitsconcentratie worden berekend.

Voor de kalibratie is 1,50 MBq ^{41}Ar nodig. Dit wordt geproduceerd door bestraling van een kwartsampul, gevuld met ^{40}Ar . Na afloop van de bestraling wordt de activiteit gecontroleerd met een gekalibreerde dosistempometer.

Gegevens:

- ^{41}Ar heeft een halveringstijd van 110 minuten.
- ^{41}Ar zendt per desintegratie één bèta-deeltje (yield = 100%) uit met een gemiddelde energie van 459 keV en tevens één gamma (yield = 100%) met een energie van 1294 keV.
- De massieke energie-overdrachtsdoorsnede, μ_{tr}/ρ , in lucht bij deze fotonenergie bedraagt $0,027 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$.

Vraag 1

Welk kermatempo in lucht (in $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$) verwacht u op 50 cm van de kwartsampul gevuld met 1,50 MBq ^{41}Ar ? Beschouw de ampul als een puntbron en maak gebruik van de hierboven gegeven waarde van μ_{tr}/ρ .

Eén uur na afloop van de bestraling wordt het buisje in de opstelling gebroken. Het netto teltempo, gemeten met de GM-buis in de monitor, bedraagt 13.600 cps.

Vraag 2

Bereken de kalibratiefactor in cps per $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ van de monitor.

Eenmaal gekalibreerd wordt de monitor teruggeplaatst in zijn oorspronkelijke locatie. Bij het in bedrijf zijn van de reactor wijst deze gemiddeld 87 tellen per minuut aan. Is de reactor buiten bedrijf dan is het teltempo 45 tellen per minuut.

Vraag 3

Bereken de gemiddelde ^{41}Ar -activiteitsconcentratie in de geloosde lucht in $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

Stel dat er medewerkers gedurende 4 uur per dag en 200 dagen per jaar gedurende de tijd dat de reactor in bedrijf is in de met ^{41}Ar besmette lucht werkzaamheden verrichten. De dosisconversiecoëfficiënt voor ^{41}Ar is (uit ICRP-68): $5,3 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/d}$ per $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

Vraag 4

Bereken de effectieve dosis per jaar voor een medewerker ten gevolge van het werken in de met ^{41}Ar besmette lucht.

Vraagstuk 2 I-131-therapie

Radioactief ^{131}I wordt therapeutisch toegepast bij verschillende schildklieraandoeningen, bijvoorbeeld bij hyperactieve schildklieren of kwaadaardige aandoeningen. Een toegediende activiteit tot 400 MBq wordt meestal poliklinisch gegeven; dit betekent dat de patiënt niet wordt opgenomen, maar na toediening naar huis mag met enkele leefregels.

Gegevens:

- *Handboek Radionucliden*, A.S. Keverling Buisman: gegevens ^{131}I (eerste druk).
- Ontslagcriterium therapiepatiënt: het omgevingsdosisequivalenttempo op 1 meter van de patiënt $\leq 20 \mu\text{Sv/h}$.
- $H^*(10)$ is een goede schatter voor de effectieve dosis.

Vraag 1

Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo, $\dot{H}^*(10)$, op 1 meter afstand van de patiënt (aan de voorzijde gemeten) bij een toegediende activiteit van 400 MBq ^{131}I . De patiënt mag als puntbron worden beschouwd, aangezien verondersteld wordt dat het grootste deel van de activiteit zich in de (relatief kleine) schildklier bevindt.

Vraag 2

Na toediening van radioactief jodium wordt er een verplichte meting verricht. Vaak blijkt dat patiënten dan voldoen aan het ontslagcriterium. Geef de belangrijkste reden waarom de meting van het omgevingsdosisequivalenttempo lager is dan de berekende waarde bij vraag 1.

Casus:

Patiënt A wordt na een opname van twee dagen 's middags om 16.00 uur ontslagen. Het omgevingsdosisequivalenttempo op 1 meter van de schildklier is dan $19 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$. De patiënt woont in een tussenwoning (zie figuur 1). Zijn slaapkamer bevindt zich op de eerste verdieping. Het bed staat met hoofdeind gericht naar de rechterburen. Hij ligt de eerste dagen continu op bed. Achter de muur bevindt zich de slaapkamer van de zoon van de buren, van wie het bed tegen de muur staat.

Gegevens:

- Afstand patiënt-buurjongen (zie figuur 1): 70 cm
- Dikte muur, inclusief spouw : totaal 30 cm
- Transmissie door muur voor ^{131}I : $6 \cdot 10^{-2}$
- Biologische halveringstijd : 50 uur*
- Oplossing integraal : $\int_0^t e^{-\lambda t} dt = \left[-\frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda t} - 1) \right]_0^t$

*Deze waarde komt niet overeen met die in het *Handboek Radionucliden* (eerste druk), dit wordt veroorzaakt doordat de schildklier van de patiënt niet normaal functioneert.

Vraag 3a

Bereken de effectieve halveringstijd.

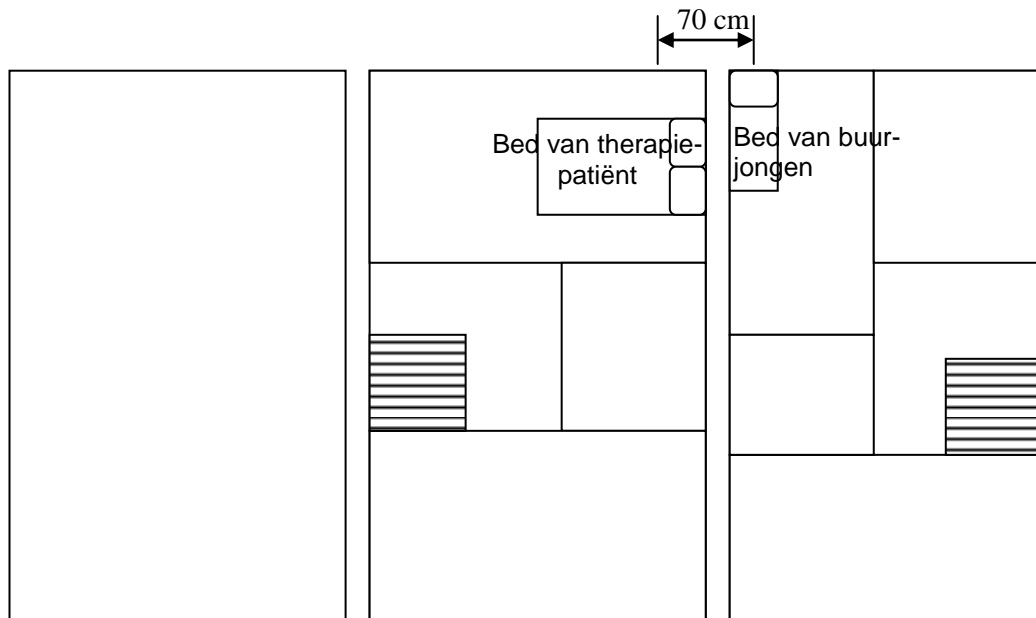
Bereken vervolgens het omgevingsdosisequivalenttempo waaraan de buurjongen de eerste avond om 21.00 uur wordt blootgesteld (hij ligt dan al op bed).

Vraag 3b

Bereken de effectieve dosis van de buurjongen gedurende de eerste nacht, als hij van 21.00 uur tot 7.00 uur in zijn bed ligt en de therapiepatiënt gedurende die periode ook op zijn bed verblijft.

Vraag 4

In deze situatie van blootstelling van de buurjongen door de buurman gaan we uit van de effectieve-dosislimiet van 0,1 mSv voor een lid van de bevolking per bron. Wat mag de transmissie van de muur maximaal bedragen opdat deze limietwaarde niet wordt overschreden? Ga uit van de meest ongunstige situatie, waarbij beide personen chronisch ziek op bed liggen, totdat alle ^{131}I is vervallen en uitgescheiden.



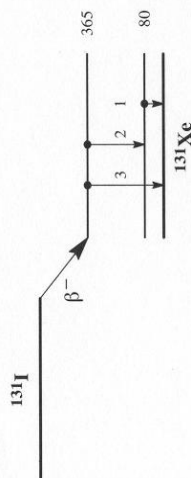
Figuur 1: Plattegrond 1^e verdieping woning

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 8,021 \text{ d} = 6,95 \times 10^5 \text{ s}$

$\lambda = 9,98 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$

Verval-schema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β^-	0,894	192
γ_1	0,026	80
ce K γ_1	0,036	5
γ_2	0,061	284
γ_3	0,812	365

Bronconstanten

Kermtempo in lucht
Omgevingsdositestempo

$k = 0,052 \mu\text{Gy}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$
 $h = 0,066 \mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$

Diversen

Specifieke activiteit
Radiotoxiciteit
Vrijstellingsgrenzen
Huidbesmetting
Wondbesmetting
Vervoer

$A_{sp} = 4,58 \times 10^{18} \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$
Hoog (2)
 $10^2 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ en 10^6 Bq
 $H_{\text{huid}} = 4 \times 10^{-10} \text{ Sv}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{cm}^2$
 $e(50) = 2,2 \times 10^{-8} \text{ Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$
 $A_1 = 3 \text{ TBq}$
 $A_2 = 0,5 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ¹³¹I is een belangrijk splijtingsproduct. Het wordt veelvuldig toegepast in de diagnostische en therapeutische nucleaire geneeskunde.

Inwendige besmetting

Metabolisch model.
Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat jodium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 70% directe excretie en 30% naar de schildklier. Jodium in de schildklier verblijft aldaar met een biologische halveringstijd van 80 dagen, van waaruit het in de vorm van organisch jodium homogeen over het lichaam wordt verdeeld. Het verblijft in andere organen/weefsels dan de schildklier geschied met een halveringstijd van 12 dagen. Een tiende van het organisch jodium wordt onmiddellijk uitgescheiden via de faeces, terwijl de rest (90%) terugkeert in het transfercompartment. Zodoende wordt de biologische halveringstijd in de schildklier effectief gelijk aan 90 dagen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	$f_1 = 1$	
Alle verbindingen	$f_1 = 1$	
Inhalatie		
Damp (I ₂)	$f_1 = 1$	Klasse SR-1
Overige verbindingen	$f_1 = 1$	Klasse F

Dosisconversiecoëfficiënten na inwendige besmetting

	Ingestie	Inhalatie	Inhalatie
$e(50)$ (Sv/Bq)	$f_1 = 1$	F	SR-1
RE (Bq)	$2,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$
	5×10^7	1×10^8	5×10^7

Gegevens voor schildkliermeting

Enmalige inname	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)
Tijd (d)	
0,25	$1,3 \times 10^{-1}$
1	$2,6 \times 10^{-1}$
2	$2,5 \times 10^{-1}$
3	$2,3 \times 10^{-1}$
5	$1,9 \times 10^{-1}$
7	$1,6 \times 10^{-1}$

Continue inname	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)
Bq/(Bq·d ⁻¹)	
3,3	$1,5$
$1,6 \times 10^{-6}$ Sv·j ⁻¹ ·Bq ⁻¹	$3,8 \times 10^{-6}$
	$3,3$
	$3,8 \times 10^{-6}$

Vraagstuk 3 Afscherming ^{60}Co -radiografiebron

Een bedrijf gespecialiseerd in Niet Destructief Onderzoek wil voor haar werkzaamheden een nieuwe ^{60}Co -bron aanschaffen met een activiteit van 4,0 TBq. De door het bedrijf in gebruik zijnde ^{60}Co -bronnen zijn geen van alle sterker dan 2,0 TBq en worden opgeslagen en vervoerd in transportcontainers van verarmd uranium. Het bedrijf heeft een extra, ongebruikte, transportcontainer en wil deze uit kostenoverwegingen gebruiken voor de nieuwe ^{60}Co -bron. Als stralingsdeskundige van het bedrijf wordt u gevraagd om na te gaan of deze transportcontainer geschikt is voor de nieuwe ^{60}Co -bron van 4,0 TBq.

Gegevens:

- **Bijlage 1:** ^{60}Co , *Handboek Radionucliden*, A.S. Keverling Buisman (2^e druk).
- De verarmd uraniumwanden van de transportcontainer zijn aan alle zijden 10 cm dik.
- De bron in dit vraagstuk is een puntbron.
- De afstand van de bron tot aan het buitenoppervlak van de transportcontainer is 12,5 cm.
- Er hoeft in dit vraagstuk geen rekening te worden gehouden met het feit dat verarmd uranium van zichzelf ook radioactief is en daardoor een dosistempo produceert.
- In dit vraagstuk zijn het dosisequivalent, het omgevingsdosisequivalent en de effectieve dosis numeriek aan elkaar gelijk.
- **Bijlage 2:** *Transmissie van brede bundels gammastraling van verschillende radionucliden door verarmd uranium (Ontleend aan ICRP-publicatie 15/21).*

Vraag 1

Bereken het omgevingsdosisequivalenttempo op zowel het buitenoppervlak als op 1 m vanaf het buitenoppervlak van de transportcontainer met daarin de nieuwe 4,0 TBq ^{60}Co -bron.

Vraag 2a

Bepaal de transportindex.

Vraag 2b

Mag de nieuwe bron vervoerd worden in de transportcontainer? Voorwaarde hierbij is dat dit middels een regulier transport (dus geen exclusief transport) moet kunnen plaatsvinden.

Vraag 3

Bepaal hoeveel centimeter (afgerond op een veelvoud van een halve cm) verarmd uranium minimaal aan de buitenzijde van de container moet worden toegevoegd om het omgevingsdosisequivalenttempo op het oppervlak van de containerwand te reduceren tot 2,0 mSv/h.

Volgens een interne eis van het bedrijf zelf mogen de blootgestelde werknemers tijdens het transport van de nieuwe bron met een auto niet meer dan 50 μSv per week aan effectieve dosis ontvangen. Neem aan dat een blootgestelde werknemer gemiddeld 15 uur per week met de nieuwe bron in de aangepaste container zal rondrijden. De afstand tussen het buitenoppervlak van de transportcontainer (= collo) en de blootgestelde werknemer bedraagt tijdens het transport 1,5 m. Ga uit van totale-lichaamsbestraling.

Vraag 4a

Bereken de wekelijkse effectieve dosis voor de blootgestelde werknemer. Ga ervan uit, dat de extra afscherming zoals berekend bij vraag 3, is aangebracht.

Vraag 4b

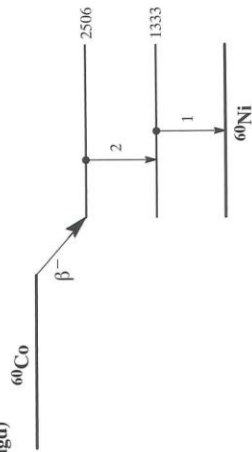
Welk advies geeft u als stralingsdeskundige met betrekking tot het gebruik van de transportcontainer voor de nieuwe ^{60}Co -bron. Geef minimaal twee suggesties voor optimalisatie van de transportcondities.

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 5,272 \text{ j} = 1,66 \times 10^8 \text{ s}$

$\lambda = 4,17 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β^-	0,999	96 318
γ_1	1,000	1333
γ_2	0,999	1173

Bronconstanten

Kermatempo in lucht $k = 0,31 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
 Omgevingsdosis-equivalenttempo $h = 0,36 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

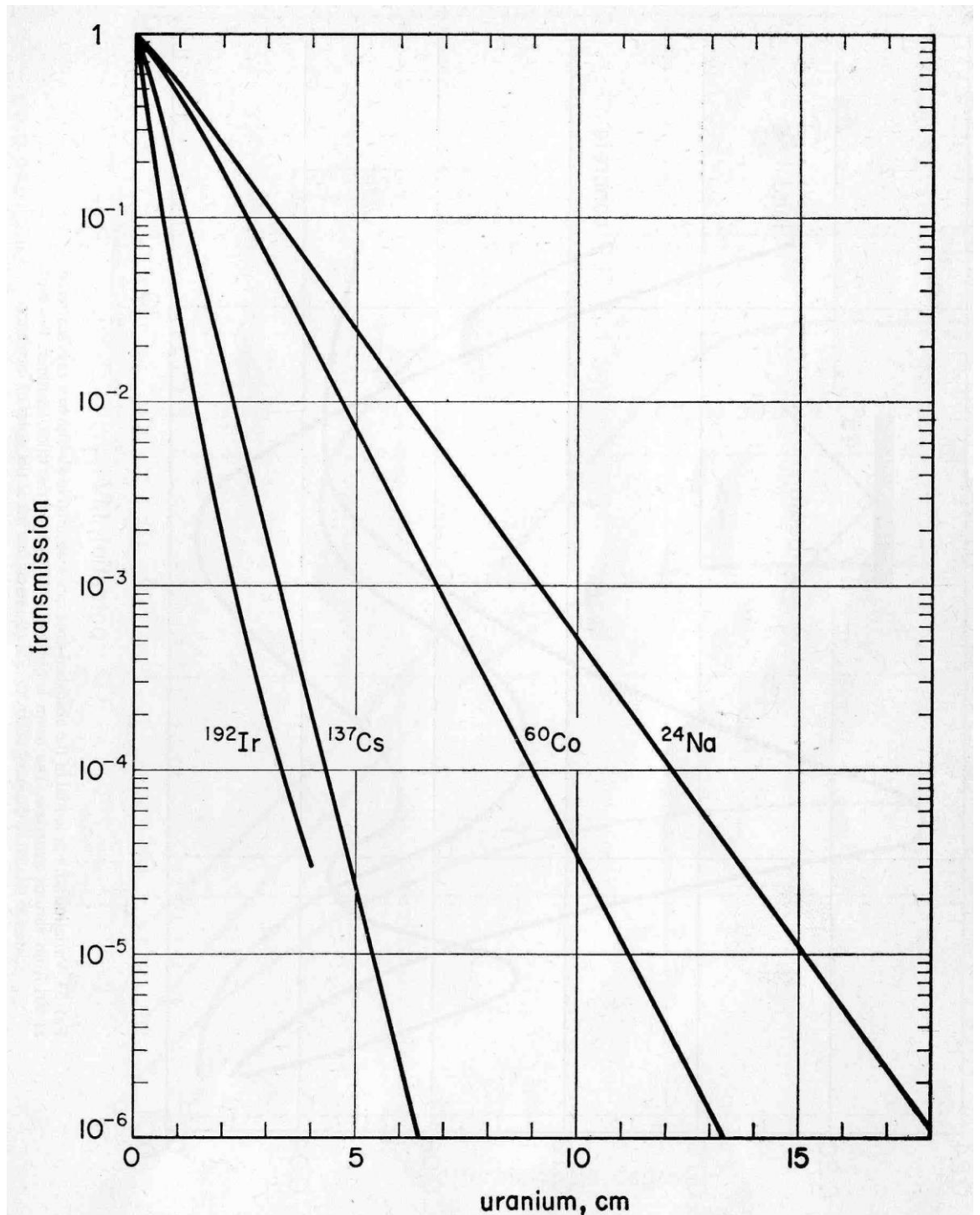
Diversen

Specifieke activiteit $A_{sp} = 4,18 \times 10^{13} \text{ Bq/g}$
 Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^0 = 1 \text{ Bq/g !}$
 $A_v = 10^5 \text{ Bq}$
 Huidbesmetting $H_{\text{hand}} = 3 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
 Wondbesmetting: Injectie $e(50) = 1,9 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
 Vervoer $A_1 = 0,4 \text{ TBq}$
 $A_2 = 0,4 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ⁶⁰Co is een activeringsproduct. Het komt voor als bijproduct in reactoren ten gevolge van de activering van staal. Daarnaast wordt het op velerlei terreinen toegepast. Voorbeelden zijn: radiotherapie, gammagrafie, doorstraling, ijking, demonstratie.

Bijlage 1: ⁶⁰Co, Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2^e druk).



Bijlage 2: Transmissie van brede bundels gammastraling van verschillende radionucliden door verarmd uranium (Ontleend aan ICRP-publicatie 15/21).

Vraagstuk 4 Inwendige besmetting met ^{210}Po

Een promovendus doet onderzoek naar de opname van polonium-210 door planten in het milieu. Als modelplant gebruikt hij tomatenplanten die hij, vanuit zaadjes, opkweekt in een kleine plantenkas geplaatst in een B-laboratorium. Aan de potgrond in de plantenkassen voegt hij na het zaaien eenmalig een bekende hoeveelheid ^{210}Po toe. Vanaf dat moment moet hij regelmatig de plantenkas betreden om monsters te nemen van de groeiende planten zoals stengels, bladeren, bloemen en uiteindelijk tomaten. Op het moment dat de tomatenplanten in bloei staan neemt de promovendus weer monsters. De stralingsbeschermingsdienst (SBD) ontdekt dan echter dat de planten een onbekende vluchtige verbinding uitscheiden welke ^{210}Po -activiteit bevat. De SBD besluit in overleg met de promovendus verdere toegang tot de plantenkas te ontzeggen en start een onderzoek om zijn inwendige-besmettingsdosis te kunnen vaststellen.

Gegevens:

- **Bijlage:** ^{210}Po , *Handboek Radionucliden*, A.S. Keverling Buisman (2^e druk).
- Afmetingen plantenkas: 3 m × 2 m × 2,5 m (lengte × breedte × hoogte).
- Ventilatievoud van de plantenkas: 0,5 h⁻¹.
- De activiteitsconcentratie in geval van een evenwichtssituatie kan worden beschreven met de volgende formule: $C_{\text{evenwicht}} = \frac{\dot{P}}{\lambda_{\text{effectief}}}$.
- Het nemen van monsters door de promovendus kan worden opgevat als lichte werkzaamheden.

De SBD concludeert na het nemen van luchtmonsters dat de ^{210}Po -concentratie in de lucht van de plantenkas 2,8 Bq·m⁻³ bedraagt. Tevens wordt geconstateerd dat deze concentratiewaarde constant blijft.

Vraag 1

Bereken het tempo P [Bq·h⁻¹] waarin de bloeiende tomatenplanten de vluchtige ^{210}Po -verbinding uitscheiden.

De laatste keer dat de promovendus in de plantenkas monsters nam duurde 25 minuten. Ga er voor het beantwoorden van de volgende vraag vanuit dat de tomatenplanten pas vanaf het bloeien de vluchtige verbinding gingen uitscheiden.

Vraag 2

Bereken de effectieve volg dosis voor de promovendus.

De SBD verzoekt de promovendus om op dag drie na het incident zijn 24-uursurine te verzamelen voor nader onderzoek. Het totale volume van deze verzamelde 24-uursurine bedraagt 1,5 liter.

Vraag 3

Bereken de ^{210}Po -concentratie [Bq·l⁻¹] in het urinemonster van de promovendus op dag 3 na het incident. Kies dezelfde inhalatieklasse als bij vraag 2.

Het totale 24-uursurinemonster wordt gevriesdroogd. Hierna wordt de hoeveelheid ^{210}Po in het residu bepaald met behulp van alfaspectrometrie (het verlies aan ^{210}Po tijdens het vriesdroogproces mag worden verwaarloosd). De meting duurt 72 uur en levert 186 counts netto op. De alfaspectrometer heeft een totaal meetrendement ε voor ^{210}Po van 40%.

Vraag 4

Bereken de ^{210}Po -concentratie [$\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$] in de urine aan de hand van de alfaspectrometriemeting.

Vraag 5

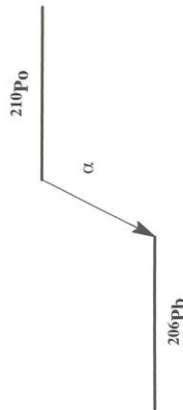
Vergelijk uw antwoorden op vraag 3 en 4. Geef twee mogelijke oorzaken voor het verschil aan.

Halveringstijd en vervalconstante

$T_{1/2} = 138,38 \text{ d} = 1,20 \times 10^7 \text{ s}$

$\lambda = 5,80 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
α_1	1,000	5297
α terugstoot	1,000	103

Diversen

- Specifieke activiteit $A_{sp} = 1,66 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$
- Vrijstellingsgrenzen $C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^4 \text{ Bq}$
- Huidbesmetting $H_{\text{huid}} < 10^{-14} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
- Wondbesmetting; Injectie $e(50) = 2,4 \times 10^{-6} \text{ Sv/Bq}$
- Vervoer $A_1 = 40 \text{ TBq}$
 $A_2 = 0,02 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ²¹⁰Po is een natuurproduct. Het komt voor in de uraniumvervaltreeks. De vluchtigheid van polonium maakt dat het nuclide vrijkomt bij processen waarbij stoffen met (sporen) uranium verhit worden. Grotere hoeveelheden ²¹⁰Po kunnen worden geproduceerd door bestraling van bismuth met neutronen. In 2006 is bekend geworden dat dit nuclide onder spionnen als effectieve gifstof toepassing vindt. Een inname van enkele microgrammen is al dodelijk (hoge specifieke activiteit, hoge radiotoxiciteit, opname in essentiële organen).