

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: 12 december 2011

examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- ❑ **Deze examenopgaven omvatten 22 genummerde pagina's. Wilt u dit controleren!**
- ❑ Schrijf uw oplossingen en antwoorden op de daartoe verstrekte uitwerkbladen. Ook alle niet gebruikte uitwerkbladen en het grafiekpapier dient u in te leveren.
- ❑ Vermeld **alleen uw examenummer** op de uitwerkbladen (dus niet uw naam en adres).
- ❑ Het is geoorloofd boeken, persoonlijke aantekeningen en ander documentatie-materiaal 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: 14 punten
 - Vraagstuk 2: 17 punten
 - Vraagstuk 3: 18 punten
 - Vraagstuk 4: 18 punten

Vraagstuk 1 Dosismeting bij een I-CAT

Op een afdeling Tandheelkunde wordt een nieuw toestel in gebruik genomen. Het betreft een I-CAT, een CT voor tandheelkundige toepassingen. Deze I-CAT geeft gedetailleerde informatie omtrent belangrijke anatomische structuren en kan worden ingezet bij de planning van kaakimplantaten.

Tot nu toe werd dit gedaan met behulp van een OPG (orthopantomograaf), een röntgentoestel voor panoramische röntgenopnamen van het gebit. Een OPG kan worden ingezet voor het plannen van implantaten in de voorzaak, maar belangrijke anatomische structuren worden niet altijd duidelijk afgebeeld.

Voordat de I-CAT voor patiënten gebruikt gaat worden, moeten een aantal controles worden uitgevoerd, waaronder een aantal dosismetingen. Om de effectieve dosis voor de patiënt te bepalen wordt op en in een fantoom een aantal TLD's geplaatst in het hoofd-halsgebied. Het fantoom met TLD's wordt in de I-CAT geplaatst, vervolgens wordt een volledige opname van het gebit gemaakt.

Ter vergelijking wordt op dezelfde wijze ook de effectieve dosis bepaald in de OPG.

Tabel 1: netto TLD-meetwaarden in mGy per opname

positie	dosis I-CAT	dosis OPG
huid	7,8	0,53
keel	1,0	0,032
schildklier	1,3	0,041

Bij de onderzoeken wordt slechts een deel van de huid bestraald. Bij de I-CAT is dit bestraalde huidoppervlak 650 cm², bij de OPG is dit 100 cm².

Gegevens:

- Totale huidoppervlak: 1,78 m² (gemiddelde voor de gehele bevolking)
- Buisspanning I-CAT = 120 kV
- Aangenomen mag worden dat de gemeten dosis in de keel representatief is voor de dosis op de gehele slokdarm
- Aangenomen mag worden: $K_{\text{lucht}} = D_{\text{weefsel}}$
- Aangenomen mag worden dat de verstrooiingshoek 90° bedraagt
- Bijlage 1: Weefselweegfactoren w_T : tabel 2.2 uit Besluit stralingsbescherming
- Bijlage 2: Kermatempo in lucht tengevolge van onder 90° verstrooide röntgenstraling aan verschillende materialen. De bundel is schuin invallend op een dik verstrooiend oppervlak. Het percentage verstrooide straling is gerelateerd aan het kermatempo vrij-in-lucht van de primaire bundel in het punt waar de bundel invalt.

Vraag 1

Bereken de equivalente dosis per opname voor het gehele orgaan huid, voor respectievelijk de I-CAT en de OPG.

Vraag 2

Bereken de effectieve dosis voor een patiënt bij een I-CAT en een OPG-opname, gebaseerd op de equivalente doses van de huid, slokdarm en de schildklier.

In het kader van de benodigde risicoanalyse wordt ook berekend wat het gevolg zou zijn indien de tandarts tijdens een opname met de I-CAT niet de ruimte verlaat maar zonder loodschoot op 2 meter afstand van het hoofd van de patiënt blijft staan.

Vraag 3

Maak een schatting van de effectieve dosis voor de tandarts in deze situatie.

Bijlage 1

Tabel 2.2: Weefselweefactoren w_T voor de weging van de equivalente dosis H_T (Ontleend aan: Besluit stralingsbescherming).

Weefsel of orgaan T	Weefselweefactor w_T *
Gonaden	0,20
Rood beenmerg	0,12
Dikke darm (colon)	0,12****
Longen	0,12
Maag	0,12
Blaas	0,05
Borstweefsel	0,05
Lever	0,05
Slokdarm	0,05
Schildklier	0,05
Huid	0,01
Botoppervlak	0,01
Overige weefsels en organen	0,05** ***

* De waarden zijn vastgesteld op basis van een referentiepopulatie met een gelijk aantal mannen en vrouwen van uiteenlopende leeftijd. Bij de bepaling van de effectieve dosis zijn zij van toepassing op de werknemers en de bevolking in haar geheel, en op beide geslachten.

** Voor de berekening worden tot de overige weefsels en organen gerekend: bijnieren, hersenen, bovenste dikke darm (colon ascendens), dunne darm, nieren, spieren, alvleesklier, milt, thymus, extrathoracale deel van de ademhalingswegen (ET) (zie ICRP publicatie nr 68) en baarmoeder. De lijst omvat organen die selectief kunnen worden bestraald. Van sommige organen op de lijst is bekend dat zij kankergevoelig zijn. Indien later blijkt dat er nog andere weefsels en organen zijn die gevoelig zijn voor nieuwvormingen, dan worden zij met een eigen w_T waarde of in deze lijst van overige organen opgenomen. Deze laatste kan ook andere selectief bestraalde weefsels en organen omvatten.

*** In de uitzonderlijke gevallen waarin slechts een van de overige weefsels of organen een equivalente dosis ontvangt die de hoogste equivalente dosis in een van de twaalf organen met een eigen weefactor overtreft, dient voor dat weefsel of orgaan een weefactor van 0,025 te worden gebruikt, en op de gemiddelde equivalente dosis in de rest van de overige weefsels en organen, zoals hierboven gedefinieerd, een weefactor van 0,025.

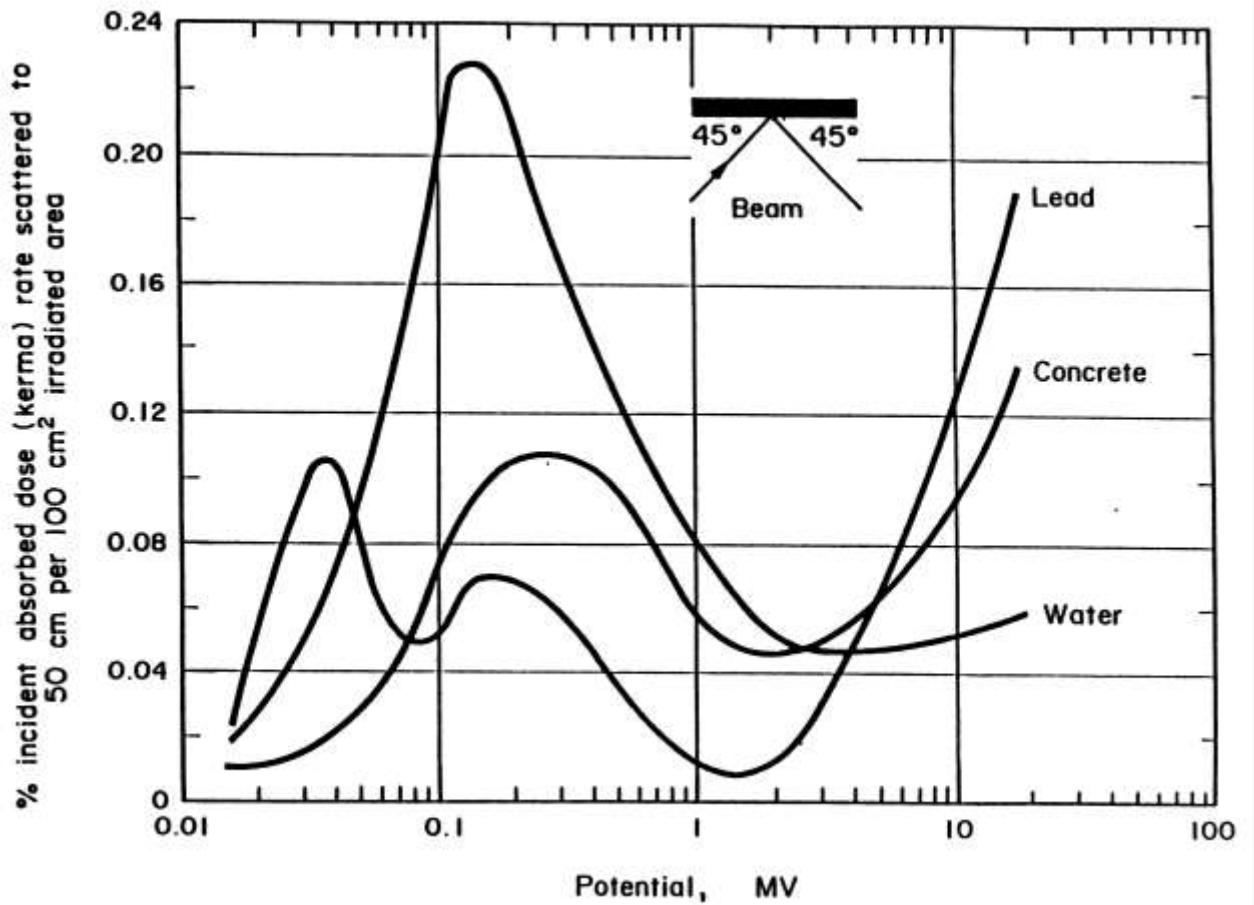
**** colon is bovenste deel dikke darm (ULI = colon ascendens + transversum) plus onderste deel dikke darm en overige delen (LLI = colon descendens + lagere delen). De ICRP geeft in publicatie 67 aanbevelingen over het gebruik van weefselweefactoren voor verschillende delen van het colon.^{1) 2)}

De *effectieve dosis*, E , is de som van de gewogen equivalente doses in alle in tabel 2.2 genoemde weefsels en organen ten gevolge van inwendige en uitwendige bestraling:

1) International Commission on Radiological Protection, Publication 68 (Annals of the ICRP Vol. 24 No. 4) Dose coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers (Pergamon Press, Oxford).

2) International Commission on Radiological Protection, Publication 67, (Annals of the ICRP Vol. 23 No. 3/4) Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2 (Pergamon Press, Oxford).

Bijlage 2



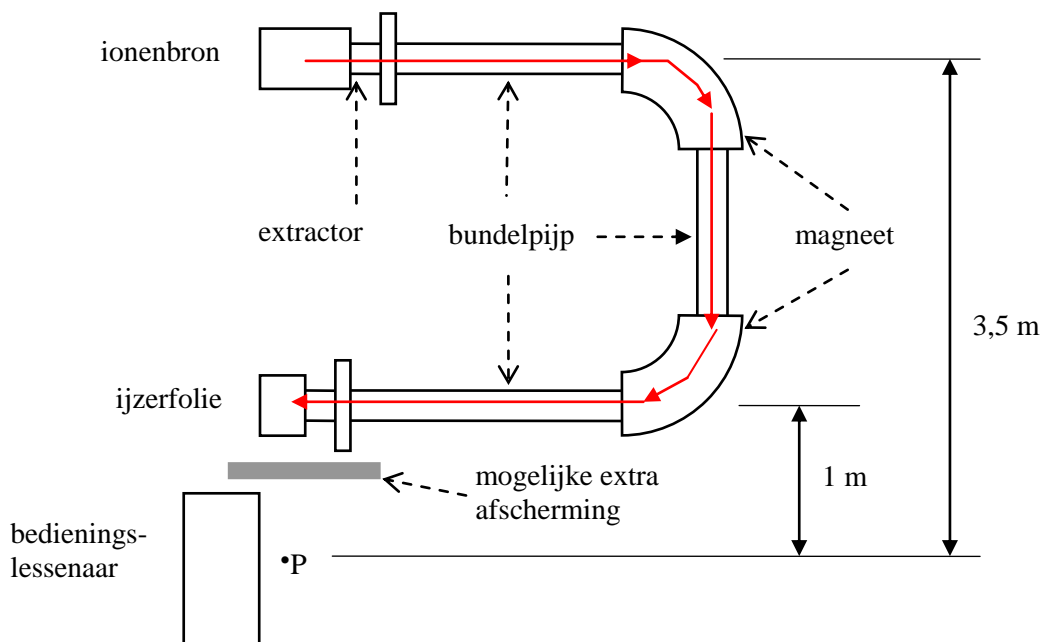
Kermatempo in lucht tengevolge van onder 90° verstrooide röntgenstraling aan verschillende materialen. De bundel is schuin invallend op een dik verstrooiend oppervlak. Het percentage verstrooide straling is gerelateerd aan het kermatempo vrij-in-lucht van de primaire bundel in het punt waar de bundel invalt.

Vraagstuk 2 Afscherming bij isotopen-implantatie

Een onderzoeksinstituut beschikt over een faciliteit waarmee specifieke radionucliden in een uiterst dunne oppervlaktelaag van een ijzerplaat kunnen worden geïmplantieerd; zie de situatieschets van de faciliteit in Figuur 1.

Men wil eens per maand ^{181}Hf implanteren in een ijzerfolie. De stralingsdeskundige wordt gevraagd enkele stralingshygiënische aspecten te analyseren.

Implanteren is het inbrengen van radionucliden in een ijzerfolie door de folie te gebruiken als trefplaat voor versnelde ionen. Daarbij gaat men als volgt te werk. De te versnellen ionen worden in een ionenbron geproduceerd. Vervolgens worden ze met een hoogspanning versneld en bij de extractor uit de bron ‘getrokken’ (geëxtraheerd). De ionenbundel passeert vervolgens twee magneten waarbij de bundel telkens over een hoek van 90° graden wordt afgebogen, waarna de bundel in de ijzerfolie wordt gestopt. Uiteindelijk bereikt 2% van de ionen de ijzerfolie en blijft 98 % achter in de extractor en ionenbron.



Figuur 1. Situatieschets van de faciliteit. De ionen bewegen zich van de ionenbron via de bundelpijpen en magneten naar de ijzerfolie. Tijdens de implantatie bevindt de medewerker zich in positie P aan de bedieningslessenaar. De afstand van P tot de ijzerfolie is 1 meter, de afstand van P tot de ionenbron en extractor is 3,5 meter. Tussen punt P en de faciliteit kan als extra afscherming een loodwand worden aangebracht.

Gegevens:

- Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2^e druk 2007), blz 206-207; gegevens ^{181}Hf .
- Tabel 1: de p-waarden volgens de Bijlage radionucliden-laboratorium, die deel uitmaakt van de Kernenergiewetvergunning van het onderzoeksinstituut.
- De beginactiviteit bedraagt 370 MBq ^{181}Hf .
- Een implantatie duurt gemiddeld 5 uur. Tijdens de implantatie bevindt de werknemer zich aan de bedieningslessenaar. De benodigde afstanden zijn aangegeven in figuur 1.
- De gezamenlijke activiteit in de ionenbron en op de extractor neemt tijdens de implantatie lineair met de tijd af van de beginwaarde tot 98% hiervan. Slechts 2% van de ionen bereikt de ijzerfolie.
- Alle wanden van ionenbron, bundelpijpen en kamer rond de ijzerfolie bestaan uit 1 mm staal, dat qua afschermingseigenschappen gelijk mag worden gesteld aan ijzer.
- De soortelijke massa van ijzer: $\rho_{\text{ijzer}} = 7,87 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- De soortelijke massa van lood: $\rho_{\text{lood}} = 11,34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- Tabel 2: massieke verzwakkingdoorsneden van ijzer en lood als functie van de γ -energie.
- Voor de berekening van transmissies mag in deze opgave worden aangenomen dat door ^{181}Hf per desintegratie één γ -foton met een energie van 0,5 MeV wordt uitgezonden.
- In deze opgave hoeft geen rekening met dosisopbouwfactoren te worden gehouden (ofwel: $B = 1$).

In het B-laboratorium van het onderzoeksinstituut wordt een capsule met ^{181}Hf in een gesloten handschoenenkast (klasse III) geplaatst. Daarin wordt de capsule gebroken en de poedervormige activiteit overgebracht in de ionenbron. Het rendement van het overbrengen is 100%.

Vraag 1

Is het breken van de capsule en het overbrengen van het poeder toegestaan volgens de Richtlijn Radionuclidenlaboratoria? Beargumenteer uw antwoord.

Na het vullen wordt de ionenbron naar de faciliteit gebracht.

Aanvullende gegevens:

- De gemeten looptijd van het B-laboratorium naar de faciliteit bedraagt 90 seconden.
- De afstand tussen activiteit en werknemer bedraagt 50 cm.
- $H^*(10)$ is een goede schatter voor de effectieve dosis.
- De implantatie vindt maandelijks plaats.

Vraag 2

Bereken de effectieve jaardosis tengevolge van het wegbrengen van de ionenbron naar de faciliteit. De afschermende werking van de wand van de ionenbron mag worden verwaarloosd in deze vraag.

Nadat de ionenbron is aangekoppeld, begint de implantatie.

Vraag 3

Bereken de effectieve jaardosis van de werknemer aan de lessenaar, tengevolge van de implantatie, indien geen extra afscherming is aangebracht. Bereken daartoe eerst de transmissie T van γ -fotonen afkomstig van het verval van ^{181}Hf door 1 mm ijzer. Neem in de berekening de bijdragen van de ionenbron, de extractor en de ijzerfolie mee. De ionenbron en extractor mogen hierbij als één bron worden opgevat.

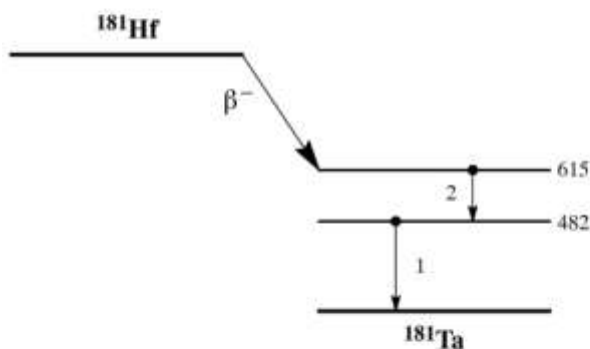
Vraag 4

Bereken de benodigde dikte (afgerond op halve centimeters) van de loodmuur tussen de werknemer (punt P in figuur 1) en de isotopengenerator indien geëist wordt dat de effectieve jaardosis tengevolge van deze handeling niet meer bedraagt dan 0,1 mSv. Indien u het antwoord van vraag 3 schuldig moet blijven, gebruik dan 0,2 mSv als antwoord op vraag 3.

^{181}Hf **$Z = 72$** **Halveringstijd en vervalconstante**

$$T_{1/2} = 42,39 \text{ d} = 3,66 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\lambda = 1,89 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema (vereenvoudigd)**Belangrijkste uitgezonden straling**

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
β^-	0,930	119 407
β^-	0,070	118 403
γ_1	0,860	482
γ_2	0,430	133
ce K γ_2	0,214	66
ce L γ_2	0,250	122
K_α	0,264	57

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	$k = 0,072 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosis-equivalenttempo	$h = 0,093 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{\text{sp}} = 6,29 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^1 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 5,4 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 2 \text{ TBq}$
	$A_2 = 0,5 \text{ TBq}$

N = 109

 ^{181}Hf **Productie en toepassingen**

Het radionuclide ^{181}Hf is een activeringsproduct.

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat hafnium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 50% naar bot en 50% naar overige organen/weefsels.

De biologische halveringstijd voor bot is gesteld op 8000 dagen, terwijl voor overige organen/weefsels een halveringstijd van 7 dagen wordt genomen.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie

Alle verbindingen $f_1 = 0,002$

Inhalatie

Hydroxide, oxide, halogenide

carbide, nitraat $f_1 = 0,002$ Klasse MOverige verbindingen $f_1 = 0,002$ Klasse F**Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)**

	Ingestie $f_1 = 0,002$	Inhalatie F	Inhalatie M	
$e(50)(w)$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,8 \times 10^{-9}$	$4,1 \times 10^{-9}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$9,1 \times 10^8$	$5,6 \times 10^8$	$2,4 \times 10^8$	Bq
$e(50)(b)$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-9}$	$4,7 \times 10^{-9}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$9,1 \times 10^8$	$7,1 \times 10^8$	$2,1 \times 10^8$	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)		
0,25	$9,8 \times 10^{-1}$	$7,4 \times 10^{-1}$	$7,4 \times 10^{-1}$
1	$7,1 \times 10^{-1}$	$5,4 \times 10^{-1}$	$4,9 \times 10^{-1}$
2	$3,2 \times 10^{-1}$	$3,7 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-1}$
3	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,9 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-1}$
5	$1,9 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$8,3 \times 10^{-2}$
7	$3,7 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-2}$

Tabel 1. De p-waarden volgens de Bijlage radionucliden-laboratorium.

TOEPASSING	<i>p</i>
Eenvoudige bewerking met gassen Hanteren van poeders in 'open' systeem bijvoorbeeld mengen of malen Vloeistof met temperatuur tegen kookpunt Sterk spattende bewerkingen	- 4
Labeling met vluchtig nuclide (bijv. jodium) Koken van vloeistoffen in 'gesloten' systeem Centrifugeren en mengen op vortex Eenvoudige bewerking van poeders in 'gesloten' systeem Opslag van edelgas in toediensysteem	- 3
Labeling met niet-vluchtig nuclide Eenvoudige chemische bepaling met tracers (bijv. RIA)	- 2
Eenvoudige handelingen in 'gesloten' systemen zoals: Elutie Tc-generator Optrekken van spuit Labeling in gesloten systemen Kalibratie I-131 capsule Metingen aan stoffen in moeilijk verspreidbare vorm (bijvoorbeeld in ampul) Opslag van radioactief afval in werkruimte	- 1

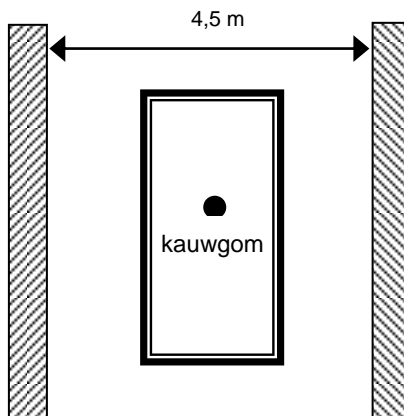
Tabel 2. Massieke verzwakkingsdoorsneden van ijzer en lood als functie van de γ -energie

γ -energie (MeV)	$(\mu/\rho)_{\text{ijzer}}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	$(\mu/\rho)_{\text{lood}}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
0,10	0,372	5,78
0,15	0,196	2,07
0,20	0,146	1,014
0,30	0,110	0,406
0,40	0,094	0,233
0,50	0,084	0,1614
0,60	0,077	0,1249
0,80	0,067	0,0886
1,00	0,060	0,0708

Vraagstuk 3 Besmetting in een papiercontainer

Op 13 maart 2011 is in een papiercontainer op de Maasvlakte in Rotterdam met behulp van een stralingsdetectiepoort een verhoogd stralingsniveau aangetroffen. Na analyse met een gammadetector, geeft het gammaspectrum aan dat deze verhoging wordt veroorzaakt door een stukje kauwgom met het radionuclide ^{131}I . De betreffende container blijkt afkomstig te zijn van een ziekenhuis waar patiënten met een schildklierandoening worden behandeld met ^{131}I . Deze patiënten worden aangemoedigd om na de toediening kauwgom te kauwen om de speekselklieren te stimuleren en zo de stralingsbelasting van die speekselklieren te beperken. Een patiënt heeft waarschijnlijk het kauwgom weggegooid in een papierbak. Deze is in de papiercontainer geleegd.

De stralingsdetectiepoort heeft aan beide zijden een grote scintillatieplaat met elk een oppervlak van $2,0\text{ m} \times 0,50\text{ m}$ op een afstand van 4,5 meter van elkaar. De container wordt langs deze monitoren voortgetrokken met een snelheid van 6 meter per minuut. De wand van de container is van 2 mm dik ijzer en 5 mm hout. Alleen het ijzer zorgt praktisch gezien voor extra afscherming. Build-up in het ijzer mag worden verwaarloosd.



Figuur 1: Bovenaanzicht van de poortdetector met twee scintillatiedetectoren op een afstand van 4,5 m uit elkaar. De bron bevindt zich in het centrum van de scintillatiedetectoren.

Gegevens:

- Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (2^e druk 2007), blz 164-165; gegevens ^{131}I
- Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (2^e druk 2007), blz 74-75; gegevens ^{60}Co

- Bijlage 3: Inleiding tot de stralingshygiëne, 2007, A.J.J. Bos e.a., p.384: Tabel Massieke verzwakkings- en energie-absorptiedoorsneden voor verschillende fotonenergieën in verschillende materialen
- $\rho_{\text{ijzer}} = 7,87 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- Het gevonden kauwgom heeft een massa van 2 gram.
- De scintillatiedetector meet het omgevingsdosisequivalent, hierbij gelden onderstaande rendementen:
 - 1,0 – 1,3 MeV is 80%
 - 0,7 – 1,0 MeV is 60%
 - 0,3 – 0,7 MeV is 40%
 - < 0,3 MeV is 20%
- Het minimale detecteerbare omgevingsdosisequivalenttempo is $20 \text{ nSv}\cdot\text{h}^{-1}$, als gemiddelde over de gehele container met de activiteit precies in het midden tussen de scintillatiedetectoren.

Vraag 1

Bereken de minimaal detecteerbare activiteit van een ^{60}Co bron, die zich in het midden van de container bevindt. De afscherming door de inhoud van de container mag u verwaarlozen. Hanteer een gemiddelde fotonenergie van 1,25 MeV.

Vraag 2

Op 13 maart 2011 wordt de bewuste papiercontainer op de Maasvlakte gemeten. Tijdens dit proces wordt een verhoogde (netto) waarde van het omgevingsdosisequivalenttempo gemeten van 40 nSv h^{-1} .

Wat was de ^{131}I -activiteit van het kauwgom, toen dit op 8 maart 2011 in een papiercontainer het ziekenhuis verliet?

De afscherming door de inhoud van de container mag u verwaarlozen. Hanteer een gemiddelde fotonenergie van 0,365 MeV en een yield van 1.

Vraag 3

Is dit stukje kauwgom op het moment dat het het ziekenhuis verlaat vergunningsplichtig, meldingsplichtig of vrijgesteld? Licht toe.

Vraag 4

Noem minstens één maatregel die genomen kan worden ter voorkoming van een dergelijk incident. Licht toe.

131I

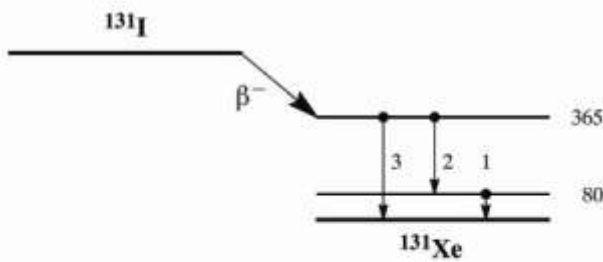
Z = 53

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 8,021 \text{ d} = 6,93 \times 10^5 \text{ s}$$

$$\lambda = 1,00 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
β^-	0,894	192 606
γ_1	0,026	80
ce K γ_1	0,036	46
γ_2	0,061	284
γ_3	0,812	365

Bronconstanten

Kermatempo in lucht	$k = 0,052 \text{ } \mu\text{Gy/h per MBq/m}^2$
Omgevingsdosisequivalenttempo	$h = 0,066 \text{ } \mu\text{Sv/h per MBq/m}^2$

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 4,60 \times 10^{15} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^6 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 4 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 2,2 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 3 \text{ TBq}$ $A_2 = 0,7 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ^{131}I is een belangrijk splijttingsproduct. Het wordt veelvuldig toegepast in de diagnostische en therapeutische nucleaire geneeskunde.

N = 78

131I

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat jodium zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 70% directe uitscheiding 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 verblijf in andere organen/weefsels dan de schildklier geschiedt 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 transfercompartiment. Zodoende wordt de biologische halveringstijd in de schildklier effectief gelijk aan 90 dagen.

N.B. Dit model geldt niet voor patiënten, zie pagina 14.

Ingestie- en longzuiveringsklassen**Ingestie**

Alle verbindingen $f_1 = 1$

Inhalatie

Damp (I ₂)	$f_1 = 1$	Klasse SR-1
Damp (CH ₃ I)	$f_1 = 1$	Klasse SR-1 70% depositie
Overige verbindingen	$f_1 = 1$	Klasse F

Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie $f_1 = 1$	Inhalatie F	Inhalatie I ₂	Inhalatie CH ₃ I	
$e(50)(w)$	$2,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$4,5 \times 10^7$	$9,1 \times 10^7$	$5,0 \times 10^7$	$6,7 \times 10^7$	Bq
$e(50)(b)$	$2,2 \times 10^{-8}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$2,0 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$4,5 \times 10^7$	$1,3 \times 10^8$	$5,0 \times 10^7$	$6,7 \times 10^7$	Bq

Gegevens voor schildkliertelling (na eenmalige inname)

Tijd (d)	Activiteit in schildklier (Bq per Bq inname)			
	$f_1 = 1$	F	I ₂	CH ₃ I
0,25	$6,0 \times 10^{-2}$	$5,2 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-1}$
1	$2,4 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,3 \times 10^{-1}$	$1,8 \times 10^{-1}$
2	$2,5 \times 10^{-1}$	$1,2 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$1,7 \times 10^{-1}$
3	$2,3 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-1}$
5	$1,9 \times 10^{-1}$	$9,0 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-1}$	$1,3 \times 10^{-1}$
7	$1,6 \times 10^{-1}$	$7,5 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$	$1,1 \times 10^{-1}$

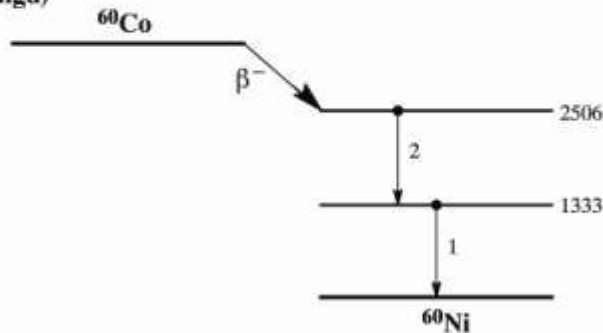
^{60}Co $Z = 27$

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	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
β^-	0,999	96 318
γ_1	1,000	1333
γ_2	0,999	1173

Bronconstanten

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

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	$H_{\text{huid}} = 3 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
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 ^{60}Co 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.

N = 33

 ^{60}Co **Metabool model**

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat kobalt zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 50% directe uitscheiding, 5% naar lever en 45% naar de rest van het lichaam, met een biologische halveringstijd van 0,5 dag.

De biologische halveringstijden voor de organen zijn:

Fractie	$T_{1/2}$
0,6	6 d
0,2	60 d
0,2	800 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen**Ingestie**

Oxide, hydroxide en anorganisch	$f_1 = 0,05$
Overige verbindingen	$f_1 = 0,1$

Inhalatie

Oxide, hydroxide, halogenide, nitraat	$f_1 = 0,05$	Klasse S
Overige	$f_1 = 0,1$	Klasse M

Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie $f_1 = 0,05$	Ingestie $f_1 = 0,1$	Inhalatie M	Inhalatie S	
$e(50)(w)$	$2,5 \times 10^{-9}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$7,1 \times 10^{-9}$	$1,7 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$4,0 \times 10^8$	$2,9 \times 10^8$	$1,4 \times 10^8$	$5,9 \times 10^7$	Bq
$e(50)(b)$	$2,5 \times 10^{-9}$	$3,4 \times 10^{-9}$	$9,6 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$4,0 \times 10^8$	$2,9 \times 10^8$	$1,0 \times 10^8$	$3,4 \times 10^7$	Bq

Gegevens voor totale-lichaamstelling

Tijd (d)	Lichaamsactiviteit (Bq per Bq inname)			
0,25	$9,9 \times 10^{-1}$	$9,9 \times 10^{-1}$	$7,4 \times 10^{-1}$	$7,4 \times 10^{-1}$
1	$7,1 \times 10^{-1}$	$7,1 \times 10^{-1}$	$4,9 \times 10^{-1}$	$4,9 \times 10^{-1}$
2	$3,4 \times 10^{-1}$	$3,5 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-1}$
3	$1,5 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-1}$	$1,5 \times 10^{-1}$	$1,4 \times 10^{-1}$
5	$3,7 \times 10^{-2}$	$5,6 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-2}$	$8,0 \times 10^{-2}$
7	$2,0 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-2}$	$7,8 \times 10^{-2}$	$6,9 \times 10^{-2}$

Bijlage 3:Massieke verzwakkings- en energie-absorptiedoorsneden in verschillende materialen in $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

Fotonen- energie (MeV)	beton ¹ $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$		ijzer $\rho = 7,87 \text{ g/cm}^3$		PMMA (perspex) $\rho = 1,19 \text{ g/cm}^3$	
	μ/ρ (cm^2/g)	μ_{en}/ρ (cm^2/g)	μ/ρ (cm^2/g)	μ_{en}/ρ (cm^2/g)	μ/ρ (cm^2/g)	μ_{en}/ρ (cm^2/g)
0,01	26,6	25,2	170,7	139	3,36	2,84
0,015	8,31	7,68	57,1	48	1,1	0,76
0,02	3,66	3,22	25,7	22,1	0,571	0,3
0,03	1,22	0,92	8,18	7,2	0,303	0,0856
0,04	0,613	0,381	3,63	3,18	0,235	0,041
0,05	0,395	0,195	1,96	1,63	0,207	0,028
0,06	0,296	0,118	1,2	0,944	0,192	0,0237
0,08	0,213	0,059	0,595	0,411	0,175	0,0222
0,10	0,178	0,041	0,372	0,219	0,164	0,0232
0,15	0,143	0,03	0,196	0,08	0,146	0,0265
0,2	0,127	0,029	0,146	0,0483	0,133	0,0286
0,3	0,108	0,029	0,11	0,0336	0,115	0,031
0,4	0,0963	0,0294	0,094	0,0304	0,103	0,0318
0,5	0,0877	0,0299	0,0841	0,0293	0,0941	0,0321
0,6	0,0810	0,0296	0,077	0,0288	0,087	0,0318
0,8	0,0710	0,0287	0,067	0,0272	0,0764	0,031
1,0	0,0638	0,0279	0,06	0,026	0,0687	0,0301
1,25	0,0571	0,0249	0,0535	0,0232	0,0614	0,0269
1,5	0,0520	0,0254	0,0488	0,0237	0,0559	0,0275
2	0,0448	0,0235	0,0426	0,0221	0,048	0,0252
3	0,0365	0,0208	0,0362	0,0294	0,0384	0,022
4	0,0319	0,0193	0,0331	0,0199	0,0328	0,0199
5	0,029	0,0183	0,0315	0,0198	0,0292	0,0184
6	0,027	0,0177	0,0306	0,0201	0,0266	0,0173
7	0,0255	0,0168	0,0301	0,0198	0,0247	0,0161
8	0,0345	0,017	0,0299	0,0206	0,0232	0,0158
10	0,0231	0,0166	0,0299	0,0213	0,0211	0,0149

1) samenstelling beton in gewichtsprocenten: H:0,56%; O:49,81%; Si:31,51%; Ca:8,29%; Na: 1,71%; Mg: 0,26%; Al: 4,57%; S: 0,13%; K: 1,92%; Fe: 1,24%

Vraagstuk 4 Besmette vissen

In de benedenloop van de rivier de Hudson werd eind 2005 ^{90}Sr gevonden. Dit ^{90}Sr kwam uit één van de reactoren van een nabijgelegen energiecentrale en lekte via het grondwater naar de rivier. Uit ervaring weet men dat het nuclide zich kan ophopen in vissen en krabbetjes. Bij consumptie van deze visserijproducten kunnen mensen inwendig besmet raken.

Aangezien leden van de bevolking mogelijk een risico lopen bij het opeten van met ^{90}Sr wordt u gevraagd een schatting te maken van de mogelijk ontvangen inwendige besmettingsdosis.

Gegevens:

- Ga ervan uit dat de vis gegeten wordt op dezelfde dag, dat deze gevangen is.
- Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (2^e druk 2007), blz 104-105
- Gemiddelde hoeveelheid vis per maaltijd: 250 gram.
- Tabel 1: ^{90}Sr activiteitsconcentraties gemeten op drie verschillende locaties in Bq per kg vis (van Skinner et al. 2009)
- Tabel 2: Geabsorbeerde energiefracties ($T \leftarrow S$) voor de berekening van de dosis in het botoppervlak en het rood beenmerg (Inleiding in de stralingshygiëne, Bos et al., 2^e druk 2007)
- Verwaarloos het ^{90}Y -gehalte in de vis.
- Doelorganen zijn rood beenmerg (1500 gram) en botoppervlak (120 gram).
- ^{90}Sr is bij bot een oppervlaktezoeker. Metabool gedrag van ^{90}Sr : 50% wordt opgenomen door compact botweefsel (cortical bone (CB)), 50% wordt opgenomen door sponsachtig botweefsel (trabecular bone (TB)).
- Biologische halveringstijd van ^{90}Sr in zowel trabecular bone als cortical bone is 1500 dagen.
- $$\int_0^T e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda T})$$

Tabel 1. ^{90}Sr activiteitsconcentraties per kg vis, gemeten door monsternamen op drie verschillende locaties (naar Skinner et al, 2009).

Location	^{90}Sr concentration (Bq/kg)
Indian Point	7,36
Roseton	8,21
Catskill	10,0

Tabel 2. Geabsorbeerde energiefracties ($T \leftarrow S$) voor de berekening van de dosis in het botoppervlak en rood beenmerg (Inleiding in de stralingshygiëne, Bos et al, 2e druk, 2007).

Bronorgaan	Doelorgaan	α -emitter uniform in volume	α -emitter uniform op oppervlakte	β -emitter uniform in volume	β -emitter uniform op oppervlakte ¹	β -emitter uniform op oppervlakte ²
Trabecular bone	Botoppervlak	0,025	0,25	0,025	0,025	0,25
Cortical bone	Botoppervlak	0,01	0,25	0,015	0,015	0,25
Trabecular bone	Rood beenmerg	0,05	0,50	0,35	0,50	0,50
Cortical bone	Rood beenmerg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

¹ $E_{\beta, \text{gem}} \geq 0,2 \text{ MeV}$

² $E_{\beta, \text{gem}} < 0,2 \text{ MeV}$

Vraag 1

Bepaal de effectieve volg dosis als gevolg van het eten van één maaltijd vis met behulp van de dosisconversiecoëfficiënt. Ga uit van een *worst-case* scenario.

NB. vraag 2, 3 en 4 hoeven enkel uitgerekend te worden voor ⁹⁰Sr. Voor de eenvoud van de berekening wordt de inname van ⁹⁰Y en het ontstaan van ⁹⁰Y in het lichaam niet meegenomen.

Vraag 2

Bepaal het aantal desintegraties U_s voor de twee bronorganen apart in 50 jaar na het eten van een maaltijd.

Vraag 3

Bepaal de specifieke effectieve energie (SEE) per desintegratie in MeV per gram per desintegratie voor de vier combinaties van bron- en doelorganen.

Vraag 4

Bepaal de equivalente volg dosis per doelorgaan als gevolg van het eten van een portie besmette vis.

⁹⁰Sr

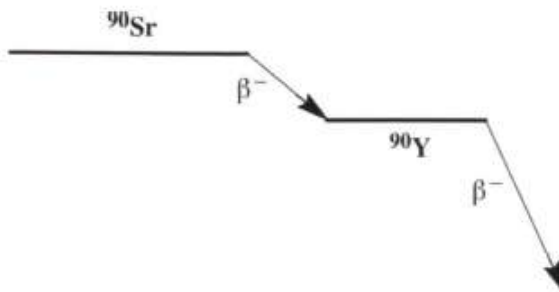
Z = 38

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 28,7 \text{ j} = 9,06 \times 10^8 \text{ s}$$

$$\lambda = 7,65 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β ⁻	1,000	196 546

Van dochter ⁹⁰Y (T_{1/2} = 64 h):

Straling	y (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β ⁻	1,000	935 2284

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 5,12 \times 10^{12} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^2 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^4 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 5 \times 10^{-10} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 8,8 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$
Vervoer	$A_1 = 0,3 \text{ TBq}$
	$A_2 = 0,3 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ⁹⁰Sr is een splijttingsproduct dat door bovengrondse kernexplosies in de atmosfeer is gebracht. Door zijn lange halveringstijd en zijn chemische eigenschappen (botzoeker) is ⁹⁰Sr een belangrijke contaminant. Het wordt gebruikt, vanwege de hoge beta-energie van dochter ⁹⁰Y, als beta-standaard, bron voor diktemeting, bij brachytherapie en in een optalmisch applicator.

N = 52

⁹⁰Sr**Metabool model**

De stofwisseling van de botzoeker strontium is uitgebreid beschreven in ICRP-67.

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie

Sr-titanaat	$f_1 = 0,01$
Overige verbindingen	$f_1 = 0,3$

Inhalatie

Titanaat	$f_1 = 0,01$	Klasse S
Overige	$f_1 = 0,3$	Klasse F

Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent voor werknemers (w) en voor leden van de bevolking (b)

	Ingestie $f_1 = 0,01$	Ingestie $f_1 = 0,3$	Inhalatie F	Inhalatie S	
$e(50)(w)$	$2,7 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-8}$	$7,7 \times 10^{-8}$	Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$3,7 \times 10^8$	$3,6 \times 10^7$	$3,3 \times 10^7$	$1,3 \times 10^7$	Bq
$e(50)(b)$	$2,7 \times 10^{-9}$	$2,8 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-7}$	Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$3,7 \times 10^8$	$3,6 \times 10^7$	$4,2 \times 10^7$	$6,7 \times 10^6$	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname

Tijd (d)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)			
1	$1,8 \times 10^{-3}$	$5,6 \times 10^{-2}$	$6,8 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-4}$
2	$7,6 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-4}$
3	$4,9 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-4}$
5	$2,8 \times 10^{-4}$	$8,3 \times 10^{-3}$	$9,2 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-4}$
7	$1,9 \times 10^{-4}$	$5,7 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-3}$	$9,0 \times 10^{-5}$