

BIJLAGE bij Examen
Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van
coördinerend deskundige

NRG PALLAS
Technische Universiteit Delft
Rijksuniversiteit Groningen
Radboudumc

NRG PALLAS
TUD
RUG
RUMC

examendatum:
12 mei 2025
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- ❑ Wanneer u andere gegevens gebruikt dan in deze bijlage zijn genoemd, vermeld dan de herkomst!
- ❑ Deze bijlage omvat 12 doorlopend genummerde pagina's. Controleer dit!

INHOUDSOPGAVE

Bladzijde

- 3 Massieke verzwakkingscoëfficiënten voor fotonen in water en lucht
- 4 Experimenteel bepaalde opbouwfactoren in water
- 5-6 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3e druk 2015), blz. 18 en 19, gegevens ^3H
- 7 Luchtkerma vrij-in-lucht in $\mu\text{Gy}/(\text{mA}\cdot\text{s})$ door stroostraling, bij CT-scans met 140 kVp op verschillende afstanden van het isocentrum
- 8 Effectieve dosis per eenheid van luchtkerma
- 9 Transmissie van stroostraling van CT-scans door lood
- 10 Standaard bijlage Radionuclidenlaboratoria
- 11 Vereenvoudigd overzicht van de halveringstijden, energie E (in MeV) en emissiewaarschijnlijkheid (yield) van de meest relevante β - en γ -overgangen in het verval van ^{225}Ac en haar dochters
- 12 Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3e druk 2015), blz. 104, gegevens ^{90}Sr

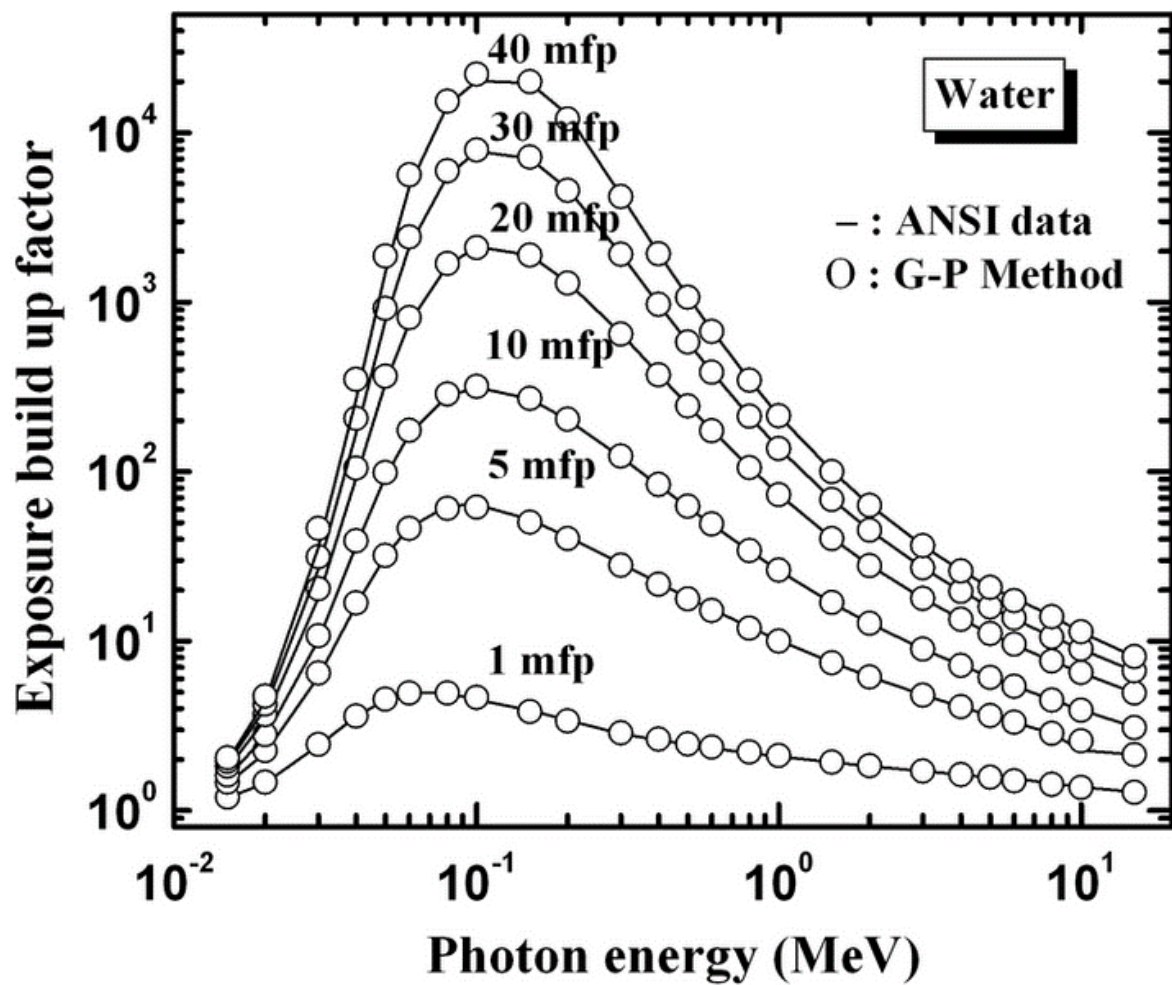
Massieke verzwakkingscoëfficiënten voor fotonen in water en lucht

Water				Lucht			
E_r (MeV)	μ/ρ (m ² /kg)	μ_{tr}/ρ (m ² /kg)	μ_{en}/ρ (m ² /kg)	E_r (MeV)	μ/ρ (m ² /kg)	μ_{tr}/ρ (m ² /kg)	μ_{en}/ρ (m ² /kg)
0,01	0,52	0,479	0,479	0,01	0,50	0,466	0,466
0,02	0,078	0,051	0,051	0,02	0,076	0,052	0,052
0,03	0,037	0,015	0,015	0,03	0,035	0,015	0,015
0,04	0,027	0,0068	0,0068	0,04	0,025	0,0064	0,0064
0,05	0,023	0,0042	0,0042	0,05	0,021	0,0038	0,0038
0,06	0,021	0,0032	0,0032	0,06	0,019	0,0029	0,0029
0,08	0,018	0,0026	0,0026	0,08	0,017	0,0023	0,0023
0,1	0,017	0,0026	0,0026	0,1	0,015	0,0023	0,0023
0,15	0,015	0,0028	0,0028	0,15	0,014	0,0025	0,0025
0,2	0,014	0,0030	0,0030	0,2	0,012	0,0027	0,0027
0,3	0,012	0,0032	0,0032	0,3	0,011	0,0029	0,0029
0,4	0,011	0,0033	0,0033	0,4	0,0095	0,0030	0,0030
0,5	0,0097	0,0033	0,0033	0,5	0,0087	0,0030	0,0030
0,6	0,0090	0,0033	0,0033	0,6	0,0081	0,0030	0,0030
0,8	0,0079	0,0032	0,0032	0,8	0,0071	0,0029	0,0029
1,0	0,0071	0,0031	0,0031	1,0	0,0064	0,0028	0,0028
1,5	0,0056	0,0028	0,0028	1,5	0,0052	0,0026	0,0026
2,0	0,0049	0,0026	0,0026	2,0	0,0044	0,0023	0,0023
3,0	0,0040	0,0023	0,0023	3,0	0,0036	0,0020	0,0020
4,0	0,0034	0,0021	0,0021	4,0	0,0031	0,0019	0,0019
5,0	0,0031	0,0020	0,0019	5,0	0,0027	0,0018	0,0017
6,0	0,0028	0,0019	0,0017	6,0	0,0025	0,0016	0,0016
8,0	0,0024	0,0018	0,0017	8,0	0,0022	0,0015	0,0015
10	0,0022	0,0017	0,0016	10	0,0020	0,0014	0,0014

Massieke verzwakkingscoëfficiënten voor fotonen in water ($\rho = 997 \text{ kg/m}^3$) en lucht ($\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$).

Experimenteel bepaalde opbouwfactoren in water

Experimenteel bepaalde opbouwfactoren in water (aangegeven met cirkels) en gegevens van ANSI/ANS-6.4.3 (doorgetrokken lijnen) voor verschillende waarden van μd (=mfp).



Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 18-19, gegevens ³H

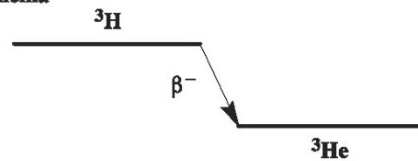
³H
Z = 1

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 12,35 \text{ j} = 3,90 \times 10^8 \text{ s}$$

$$\lambda = 1,78 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	$y \text{ (Bq}\cdot\text{s)}^{-1}$	$E \text{ (keV)}$
β^-	1,000	5,7 18,6

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 3,57 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^6 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^9 \text{ Bq}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} < 10^{-14} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 1,8 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq (water)}$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 4,1 \times 10^{-11} \text{ Sv/Bq (organisch)}$
Vervoer	$A_1 = 40 \text{ TBq}$
	$A_2 = 40 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Tritium wordt geproduceerd door bestraling van lithium met neutronen: ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$. Tritium ontstaat ook op natuurlijke wijze. Het wordt gevormd in de buitenste lagen van de atmosfeer, door interactie van kosmische straling met stikstof, voornamelijk via de reactie ${}^{14}\text{N}(n,{}^3\text{H}){}^{12}\text{C}$. Zodoende komt tritium voor in de biosfeer: de tritiumconcentratie in zeewater ten gevolge van het natuurlijke tritium bedraagt 0,1–1 Bq/l. De tritiuminventaris van de gehele aarde wordt geschat op 1–2 EBq. Door proeven met thermonucleaire explosies in de atmosfeer is hieraan inmiddels ongeveer 200 EBq toegevoegd. Elk persoon bevat hierdoor 100 Bq tritium.

Van de vele toepassingen van tritium zijn de volgende het belangrijkste:

- tritium-houdende trefplaat voor neutronengenerator via D,T-reactie;
- als lichtbron (o.a. EXIT-bord en horloge): β -light;
- als grondstof voor thermonucleaire reactie (waterstofbom)
- als merker van biologische verbindingen, o.a. voor geneesmiddelenonderzoek
- als merker bij geologische onderzoeken, o.a. bij olie-exploratie
- als bron in een electroncapture-detector.

N = 2 **³H**

Metabool model

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat tritium bij inhalatie en ingestie volledig en instantaan in het lichaam wordt opgenomen. Verder wordt het ook via de intacte huid opgenomen.

De biologische halveringstijd voor alle organen/weefsels wordt gesteld op:

Water	$T_{1/2}$	Organisch	$T_{1/2}$
97%	10 d	50%	10 d
3%	40 d	50%	40 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie	
Alle verbindingen	$f_1 = 1$
Inhalatie	
Waterdamp	SR-2
Organisch	SR-2

Voor waterdamp geldt een extra inname van 0,6 Bq/h per Bq/m³ ten gevolge van opname door de huid.


**Dosisconversiecoëfficiënt en radiotoxiciteitsequivalent
zowel voor werknemers als voor leden van de bevolking**

	Ingestie en inhalatie		Ingestie en inhalatie	
	Water(damp)		Organisch	
$e(50)$	$1,8 \times 10^{-11}$		$4,1 \times 10^{-11}$	Sv/Bq
A_{Re}	$5,6 \times 10^{10}$		$2,4 \times 10^{10}$	Bq

Gegevens voor urine-analyse

Na eenmalige inname		
Tijd (d)	Urineconcentratie (Bq/l per Bq inname)	Urine-uitscheidingstempo (Bq/d per Bq inname)
1	$2,3 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-2}$
2	$2,1 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$
3	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-2}$
5	$1,7 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$
7	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$

**Luchtkerma vrij-in-lucht in $\mu\text{Gy}/(\text{mA}\cdot\text{s})$ door
strooiestraling, bij CT-scans met 140 kVp op
verschillende afstanden van het isocentrum**

	1.5 m	1.0 m	0.5 m	0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m	
2.0 m	0.020	0.031	0.036	0.038	0.037	0.031	0.017	
1.5 m	0.010	0.047	0.064	0.070	0.063	0.045	0.007	
1.0 m	0.002	0.013	0.127	0.166	0.130	0.011	0.002	
0.5 m	0.001	0.653						0.001
0 m	0.002	 isocentrum						0.001
0.5 m	0.010	0.066	0.326	0.629	0.312	0.089	0.011	
1.0 m	0.047	0.079	0.127	0.162	0.122	0.078	0.046	
1.5 m	0.035	0.047	0.060	0.067	0.061	0.047	0.034	
2.0 m	0.025	0.030	0.035	0.038	0.035	0.030	0.024	
2.5 m	0.018	0.020	0.022	0.023	0.022	0.020	0.017	
3.0 m	0.013	0.014	0.015	0.015	0.015	0.014	0.013	
3.5 m	0.010	0.011	0.012	0.011	0.011	0.011	0.010	

B

A

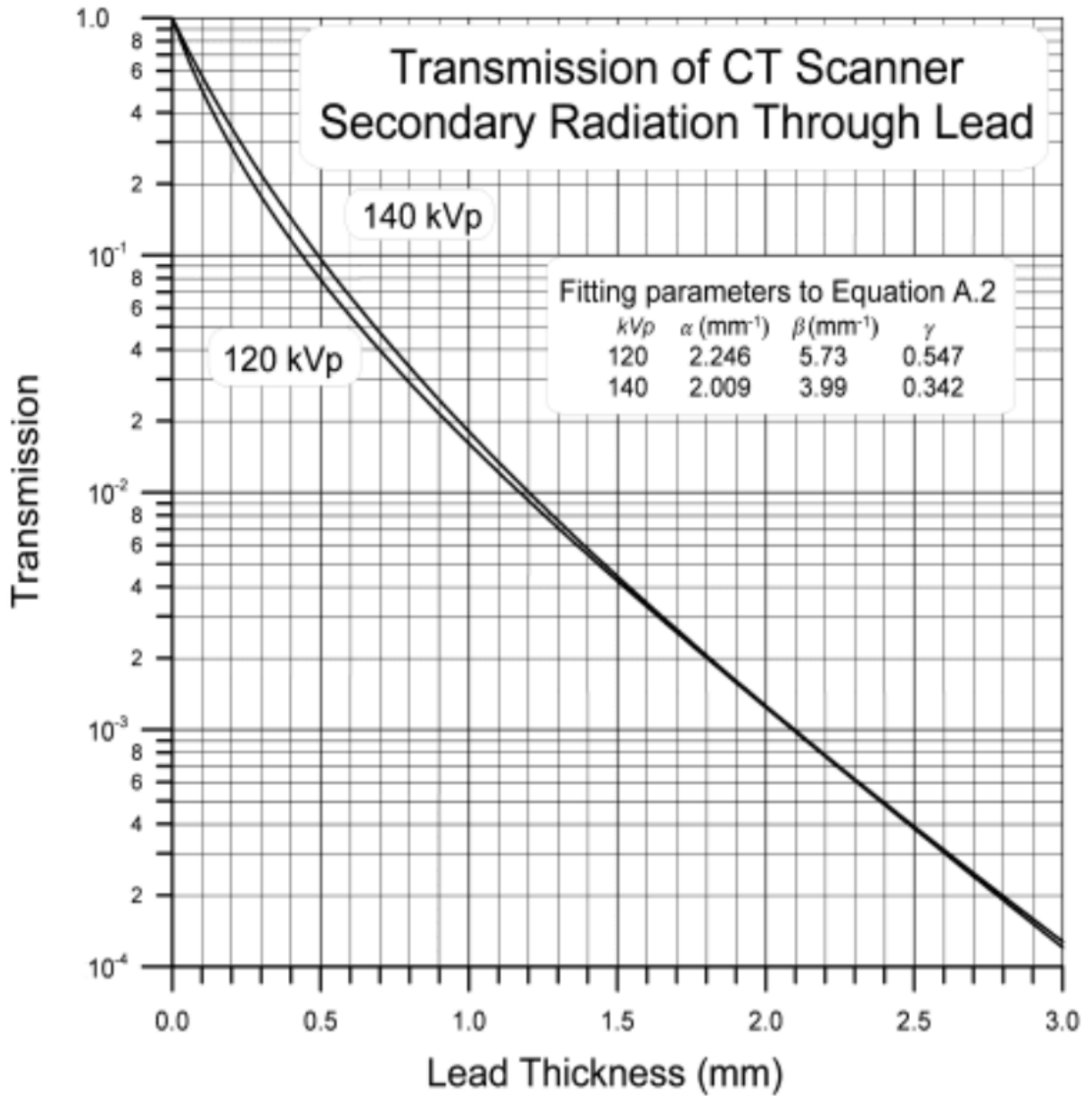
Effectieve dosis per eenheid van luchtkerma

ICRP 119 ANNEX I. CONVERSION COEFFICIENTS FOR AIR KERMA FREE-IN-AIR AND EFFECTIVE DOSE PER AIR KERMA FREE-IN-AIR

Table I.1. Conversion coefficients for air kerma free-in-air, K_a/ϕ , and effective dose per air kerma free-in-air, E/K_a , for mono-energetic photons incident in various geometries on an adult anthropomorphic computational model.

E_{photon} (MeV)	K_a/ϕ (pGy/cm ²)	E/K_a (Sv/Gy)					
		AP	PA	LLAT	RLAT	ROT	ISO
0.01	7.60E+00	6.53E-03	2.48E-03	1.72E-03	1.72E-03	3.26E-03	2.71E-03
0.015	3.21E+00	4.02E-02	5.86E-03	5.49E-03	5.49E-03	1.53E-02	1.23E-02
0.02	1.73E+00	1.22E-01	1.81E-02	1.51E-02	1.55E-02	4.62E-02	3.62E-02
0.03	7.39E-01	4.16E-01	1.28E-01	9.08E+00	9.04E-02	1.91E-01	1.43E-01
0.04	4.38E-01	7.88E-01	3.70E-01	2.05E-01	2.41E-01	4.26E-01	3.26E-01
0.05	3.28E-01	1.11E+00	6.40E-01	3.45E-01	4.05E-01	6.61E-01	5.11E-01
0.06	2.92E-01	1.31E+00	8.46E-01	4.55E-01	5.28E-01	8.28E-01	6.42E-01
0.07	2.97E-01	1.41E+00	9.66E-01	5.22E-01	5.98E-01	9.24E-01	7.20E-01
0.08	3.08E-01	1.43E+00	1.02E+00	5.54E-01	6.28E-01	9.61E-01	7.49E-01
0.1	3.72E-01	1.39E+00	1.03E+00	5.71E-01	6.41E-01	9.60E-01	7.48E-01
0.15	6.00E-01	1.26E+00	9.59E-01	5.51E-01	6.20E-01	8.92E-01	7.00E-01
0.2	8.56E-01	1.17E+00	9.15E-01	5.49E-01	6.15E-01	8.54E-01	6.79E-01
0.3	1.38E+00	1.09E+00	8.80E-01	5.57E-01	6.15E-01	8.24E-01	6.64E-01
0.4	1.89E+00	1.06E+00	8.71E-01	5.70E-01	6.23E-01	8.14E-01	6.67E-01
0.5	2.38E+00	1.04E+00	8.69E-01	5.85E-01	6.35E-01	8.12E-01	6.75E-01
0.6	2.84E+00	1.02E+00	8.70E-01	6.00E-01	6.47E-01	8.14E-01	6.84E-01
0.8	3.69E+00	1.01E+00	8.75E-01	6.28E-01	6.70E-01	8.21E-01	7.03E-01
1.0	4.47E+00	1.00E+00	8.80E-01	6.51E-01	6.91E-01	8.31E-01	7.19E-01
2.0	7.51E+00	9.92E-01	9.01E-01	7.28E-01	7.57E-01	8.71E-01	7.74E-01
4.0	1.20E+01	9.93E-01	9.18E-01	7.96E-01	8.13E-01	9.09E-01	8.24E-01
6.0	1.58E+01	9.93E-01	9.24E-01	8.27E-01	8.36E-01	9.25E-01	8.46E-01
8.0	1.95E+01	9.91E-01	9.27E-01	8.46E-01	8.50E-01	9.34E-01	8.59E-01

Transmissie van stroostraling van CT-scans door lood



Lead photon attenuation. Source: NCRP-147 figure A.2.

Standaard bijlage Radionuclidenlaboratoria

Waarde van de verspreidingsparameter p voor bepaalde handelingen binnen het laboratorium.

TOEPASSING	p
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 spuiten 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

Voor q kunnen de volgende waarden worden gehanteerd:

- $q = 0$ Werkruimtes buiten het laboratorium-beheer
- $q = 1$ D-laboratorium
- $q = 2$ C-laboratorium
- $q = 3$ B-laboratorium.

De parameter r voor de lokale ventilatievoorziening wordt als volgt ingevuld:

- $r = 0$ Voor het werken buiten de zuurkast zonder aanvullende ventilatievoorzieningen
- $r = 1$ Deze waarde mag worden gebruikt in geval van plaatselijke afzuiging of een zuurkast die niet is getest volgens DIN-12924, maar waarbij wel vaststaat dat minder dan 10% van de hoeveelheid stof die vrijkomt in de zuurkast, in de werkruimte komt
- $r = 2$ Dit geldt voor een goede zuurkast, waaronder wordt verstaan dat van de stof die vrijkomt in de zuurkast minder dan 1% in de werkruimte komt. Een zuurkast met een kwalificatie volgens DIN-12924 waarin geen opstelling is die de luchtstroom ernstig verstoort of een laminair air flow isolator (veiligheidskabinet klasse II) zullen in het algemeen aan deze norm voldoen
- $r = 3$ Gesloten werkkast. Hierbij wordt gedacht aan een klasse-III kabinet voor biologische veiligheid met een kwalificatie volgens NEN-EN 12469 of een gesloten laminair air flow isolator die aan deze eisen voldoet.

De waarde van r mag nooit hoger worden genomen dan die van q .

Vereenvoudigd overzicht van de halveringstijden, energie E (in MeV) en emissiewaarschijnlijkheid (yield) van de meest relevante β - en γ -overgangen in het verval van ^{225}Ac en haar dochters

Nuclide	$T_{1/2}$	$E_{\beta,\text{gem}}$	Y_{β}	E_{γ}	Y_{γ}
^{225}Ac	9,9 d				
^{221}Fr	4,9 min			0,218	0,11
^{217}At	33 ms				
^{213}Bi	46 min	0,49 0,32	0,67 0,30	0,44	0,26
^{213}Po	3,7 μs				
^{209}Pb	3,2 h	0,20	1,0		
^{209}Bi	stabiel				

Bron: Isotope Browser, IAEA Nuclear Data Section

Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3^e druk 2015), blz. 104, gegevens ⁹⁰Sr

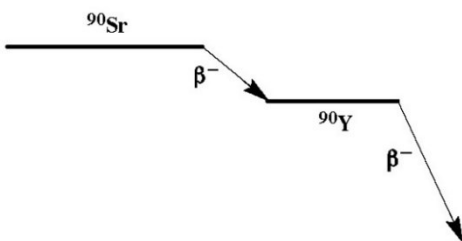
⁹⁰Sr
Z = 38

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

Van dochter ⁹⁰Y ($T_{1/2} = 64 \text{ h}$):

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