

BIJLAGE bij Examen Stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van coördinerend deskundige

NRG PALLAS

Technische Universiteit Delft

Rijksuniversiteit Groningen

Radboudumc

NRG PALLAS

TUD

RUG

RUMC

examendatum:

8 december 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 15 doorlopend genummerde pagina's. Controleer dit!

INHOUDSOPGAVE

Bladzijde

- 3-4 Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (3e druk 2015), blz. 36-37, gegevens ^{35}S
- 5 Tabel met depositiefracties (in procent) van geïnhaleerde activiteit voor twee AMAD-waarden
- 6 Tabel met dikte van de benodigde afscherming van bètadeeltjes en bijbehorende effectieve dosistempoconstanten ten gevolge van remstraling voor aluminium en lood
- 6 Tabel met transmissie van remstraling geproduceerd door bètadeeltjes uit een $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -bron in verschillende diktes aluminium en lood
- 7 Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (3e druk 2015), blz. 104, gegevens ^{90}Sr
- 8 Etikettering Klasse 7
- 9 Output luchtkermatempo van röntgentoestellen met verschillende filters en buisspanningen
- 10 Percentage van het luchtkermatempo als gevolg van verstrooiing van röntgenstraling voor verschillende kV en hoeken op een weefselfantoom
- 11 Activiteit van de belangrijkste nucliden in het bestraalde gasmengsel direct na het vervangen van het gas
- 12 Uitsneden van de nuclidenkaart rondom helium en neon
- 13-14 Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (3e druk 2015), blz. 18-19, gegevens ^3H
- 15 Berekening maximale jaarlijkse lozing van radionucliden in lucht

Handboek Radionucliden, A.S. Keverling Buisman (3e druk 2015), blz. 36-37, gegevens ³⁵S

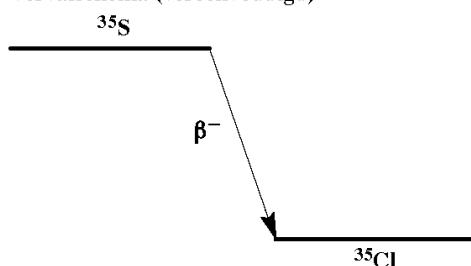
³⁵S
Z = 16

Halveringstijd en vervalconstante

$$T_{1/2} = 87,44 \text{ d} = 7,55 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\lambda = 9,17 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

Vervalschema (vereenvoudigd)



Belangrijkste uitgezonden straling

Straling	y (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β ⁻	1,000	49 167

Diversen

Specifieke activiteit	$A_{sp} = 1,58 \times 10^{15} \text{ Bq/g}$
Vrijstellingsgrenzen	$C_v = 10^6 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^9 \text{ Bq (damp)}$ $C_v = 10^5 \text{ Bq/g}$ en $A_v = 10^8 \text{ Bq (overig)}$
Huidbesmetting	$H_{\text{huid}} = 3 \times 10^{-11} \text{ Sv/s per Bq/cm}^2$
Wondbesmetting; Injectie	$e(50) = 7,7 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq (organisch)}$ $e(50) = 1,2 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq (anorganisch)}$
Vervoer	$A_1 = 40 \text{ TBq}$ $A_2 = 3 \text{ TBq}$

Productie en toepassingen

Het radionuclide ³⁵S is een activeringsproduct. Het nuclide wordt toegepast bij medisch-biologisch onderzoek als merker.

Metabool model

Organisch zwavel

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat organisch zwavel zich homogeen over het lichaam verdeelt en met een biologische halveringstijd van 140 dagen wordt uitgescheiden.

N = 19

35S

Ingestie		
Zwavel in voedsel	$f_1 = 1$	$e(50) = 7,7 \times 10^{-10}$ Sv/Bq
Inhalatie		
CS ₂ , H ₂ S, COS	SR-1	$e(50) = 7,0 \times 10^{-10}$ Sv/Bq

Anorganisch zwavel

Voor stralingshygiënische doeleinden wordt aangenomen dat anorganisch zwavel zich vanuit het bloed als volgt verdeelt: 80% directe uitscheiding en 20% verdeeld over alle organen/weefsels.

De biologische halveringstijden voor de alle organen/weefsels wordt gesteld op:

Fractie	$T_{1/2}$	Fractie	$T_{1/2}$
0,75	20 d	0,25	2000 d

Ingestie- en longzuiveringsklassen

Ingestie			
Elementair zwavel	$f_1 = 0,1$		
Overige anorg. verbindingen	$f_1 = 0,8$		
Inhalatie			
Elementair zwavel, de meeste sulfiden	$f_1 = 0,8$	Klasse M	
Overige anorganische verbindingen	$f_1 = 0,8$	Klasse F	
SO ₂	Gas	Klasse SR-1, 85% depositie	

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

	Ingestie $f_1 = 0,1$	Ingestie $f_1 = 0,8$	Inhalatie F	Inhalatie M	Inhalatie SO ₂
$e(50)(w)$	$1,9 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$8,0 \times 10^{-11}$	$1,1 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-10}$ Sv/Bq
$A_{Re}(w)$	$5,3 \times 10^9$	$7,1 \times 10^9$	$1,2 \times 10^{10}$	$9,1 \times 10^8$	$9,1 \times 10^9$ Bq
$e(50)(b)$	$1,9 \times 10^{-10}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$5,3 \times 10^{-11}$	$1,3 \times 10^{-9}$	$1,1 \times 10^{-10}$ Sv/Bq
$A_{Re}(b)$	$5,3 \times 10^9$	$7,1 \times 10^9$	$1,9 \times 10^{10}$	$7,7 \times 10^8$	$9,1 \times 10^9$ Bq

Gegevens voor urine-analyse

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

**Tabel met depositiefracties (in procent) van
geïnhaleerde activiteit voor twee AMAD-waarden**

Gebied	1 μm	5 μm
ET ₁	16,5	33,9
ET ₂	21,1	39,9
BB	1,2	1,8
bb	1,7	1,1
A1	10,7	5,3
totaal	51,2	82,0

Tabel met dikte van de benodigde afscherming van bètadeeltjes en bijbehorende effectieve dosistempoconstanten ten gevolge van remstraling voor aluminium en lood

Nuclide	Z	ρ (g·cm ⁻³)	minimale dikte (cm)	h (μ Sv/h per MBq op 1 m van een puntbron)
Aluminium (Al)	13	2,76	0,427	1,052E-03
Lood (Pb)	82	11,3	0,102	5,357E-03

Bron: Shigeo Fukano, Calculation of the Permeability of Bremsstrahlung Generated Inside the Shield, Radioisotopes 58 (2009) 517.

Tabel met transmissie van remstraling geproduceerd door bètadeeltjes uit een ⁹⁰Sr/⁹⁰Y-bron in verschillende diktes aluminium en lood

Dikte (in cm)	T (Al)	T (Pb)
0,102		1
0,200		0,569
0,300		0,480
0,400		0,414
0,427	1	
0,500		0,363
0,600		0,321
0,700	0,991	0,286
0,800		0,256
0,900		0,231
1,00	0,980	0,208
2,00		0,085
3,00	0,850	0,039

Bron: Shigeo Fukano, Calculation of the Permeability of Bremsstrahlung Generated Inside the Shield, Radioisotopes 58 (2009) 517. Deze transmissiewaarden kunnen gebruikt worden in combinatie met de effectieve dosistempoconstanten h uit de eerste tabel op deze pagina.

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

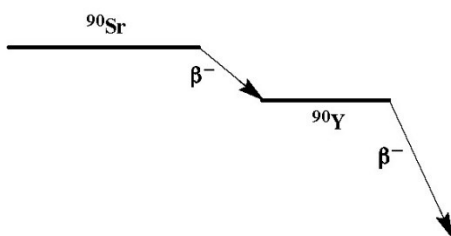
⁹⁰Sr
Z = 38

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

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

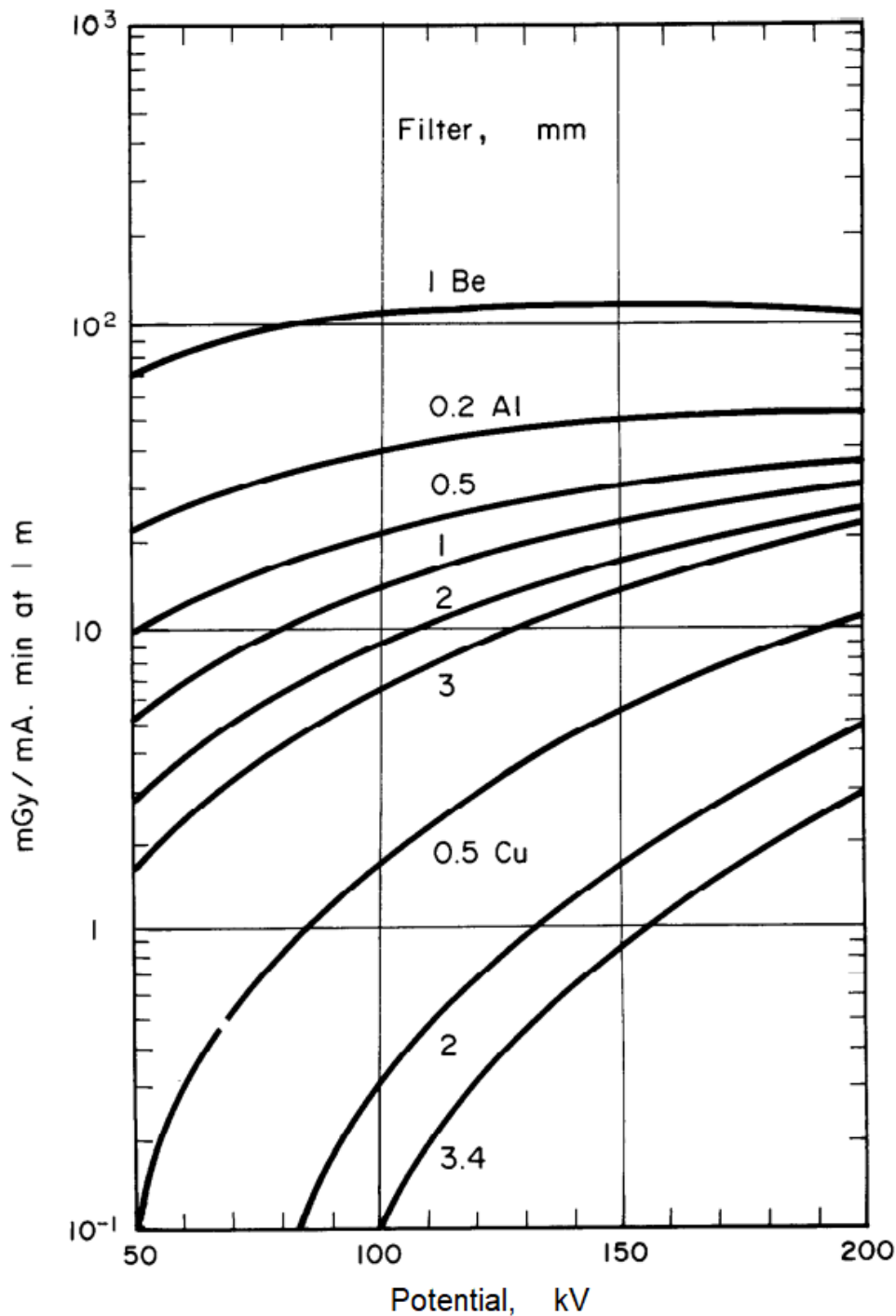
Het radionuclide ⁹⁰Sr is een splijttingsproduct dat door bovengrondse kernexplosies in de atmosfeer is gebracht. Door zijn lange halveringstijd en zijn chemische eigenschappen (botzoeker) is ⁹⁰Sr een belangrijke contaminant.

Het wordt gebruikt, vanwege de hoge beta-energie van dochter ⁹⁰Y, als beta-standaard, bron voor diktemeting, bij brachytherapie en in een opthalmisch applicator.

Etikettering Klasse 7

klasse	sticker	max. dosistempo op oppervlak	maximale transportindex
I-wit		5 $\mu\text{Sv/h}$	
II-geel		0,5 <u>mSv/h</u>	1,0 (10 $\mu\text{Sv/h}$)
III-geel		2 <u>mSv/h</u>	10 (100 $\mu\text{Sv/h}$)

Output luchtkermaptempo van röntgentoestellen met verschillende filters en buisspanningen



Output op 1 m afstand van een röntgengenerator met wolfram reflectietarget en constante hoogspanning voor verschillende bundelfiltraties. Het 1 mm beryllium is het buisvenster. [ICRP 33, figuur 2]

Percentage van het luchtkermaptempo als gevolg van verstrooiing van röntgenstraling voor verschillende kV en hoeken op een weefselfantoom

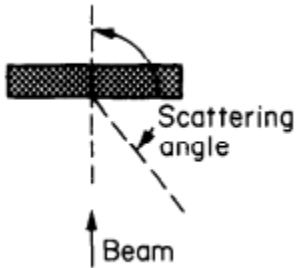


Table 6. Per cent of absorbed dose (kerma) rate due to incident radiation scattered to 1 m by a tissue-like phantom for 400 cm² irradiated area^a

Angle of scatter	100 kV ^b	200 kV ^b	300 kV ^b	⁶⁰ Co ^{c,e}	6 MV ^{d,e}
15°	—	—	—	— (0.48)	0.65 (0.48)
30°	0.02	0.24	0.34	— (0.27)	0.30 (0.24)
45°	0.03	0.23	0.26	0.18 (0.14)	0.14 (0.12)
60°	0.04	0.19	0.22	0.14 (0.08)	0.08 (0.07)
90°	0.05	0.14	0.19	0.07 (0.04)	0.04 (0.03)
120°	0.12	0.23	0.26	0.05 (0.03)	0.03 (0.02)
135°	0.17	0.30	0.33	0.04 (0.02)	0.03 (0.02)
150°	0.21	0.37	0.48	— (0.02)	— (0.02)

^a Per cent scattered radiation is related to primary beam measurements in air at the point of reference, that is, at the same position as the phantom surface or phantom centre.

^b Bomford and Burlin (1963). Cuboid phantom 30 cm wide × 22 cm deep. Field area and angle of scattered radiation referred to phantom surface.

^c Dixon *et al.* (1952). Elliptic cylinder phantom 36 cm major axis, 20 cm minor axis. Field area and angle of scattered radiation referred to phantom centre. Beam along major axis.

^d Karzmark and Capone (1968). Cylinder phantom 27 cm diameter. Field area and angle of scattered radiation referred to phantom centre.

^e Figures in brackets are from Nilsson (1975): spherical tissue irradiated; equivalent phantoms with masses in the range 0.9–30 kg. Sources located in a separate room with a collimator in the intervening wall, which largely eliminated problems of scattered radiation from the walls.

Hoeveelheid straling die onder verschillende hoeken wordt verstrooid door een weefselfantoom voor röntgenstraling die met verschillende hoogspanningen wordt gegenereerd. [ICRP 33, tabel 6]

Activiteit van de belangrijkste nucliden in het bestraalde gasmengsel direct na het vervangen van het gas

Gasmengsel 70% He en 30% Ne				
#	Nuclide	Activiteit [<i>Bq</i>]	Activiteitbijdrage [%]	$t_{1/2}$
1	²³ Ne	$1,99 \cdot 10^{10}$	71,25	37,25 s
2	²⁰ F	$6,46 \cdot 10^9$	23,11	11,00 s
3	³ H	$1,45 \cdot 10^9$	5,17	12,31 j
4	²¹ F	$5,82 \cdot 10^7$	0,21	4,16 s
5	²⁴ Na	$2,83 \cdot 10^7$	0,10	15,00 u
Totaal		$2,79 \cdot 10^{10}$	100	

Uitsneden van de radionuclidenkaart rondom helium en neon

Uitsnede van de nuclidenkaart rondom helium:

	3 Li Lithium [6.938;6.997] $\sigma_{abs} 70.5$	Li 4 5.0 MeV $91 \cdot 10^{-24} s$ p	Li 5 1.23 MeV $370 \cdot 10^{-24} s$ p	Li 6 7.59 $\sigma 0.0393, \sigma_{n,\alpha} 940$
	2 He Helium 4.002602 $\sigma_{abs} < 0.05$	He 3 0.0002 $\sigma 0.000055$ $\sigma_{n,p} 5333$	He 4 99.9998 n	He 5 648 keV $700 \cdot 10^{-24} s$ F
1 H Hydrogen [1.00784; 1.00811] $\sigma 0.3326$	H 1 99.9885 $\sigma 0.3326$	H 2 0.0115 $\sigma 0.000495$	H 3 12.312 a $\beta^- 0.0185743$ no γ $\sigma < 6E-6$	H 4 3.28 MeV $139 \cdot 10^{-24} s$ n
		n 1 10.17 m $\beta^- 0.782$	$8.40E-4$ $1.35E-3$	0.0108 0.0142
			$1.71E-3$ $4.08E-3$	

Uitsnede van de nuclidenkaart rondom neon:

Na 20 447.9 ms $\beta^+ 11.2...$ $\beta\alpha 2.15, 4.43...$ $\gamma 1634...$	Na 21 22.49 s $\beta^+ 2.5...$ $\gamma 351...$	Na 22 2.6018 a $\beta^+ 0.5, 1.8$ $\gamma 1275$ $\sigma_{n,\alpha} 262$ $\sigma_{n,p} 27840$	Na 23 100 $\sigma 0.501 + 0.024$	Na 24 20.18 ms 14.997 h $\beta^- 1.4$ $\beta^- 4.1...$ $\gamma 472$ $\beta^- 6.0$ $\gamma 1369$ $\gamma 2754...$	Na 25 59.6 s $\beta^- 3.8...$ $\gamma 975, 390, 585$ 1612...
Ne 19 17.254 s $\beta^+ 2.2...$ $\gamma (110, 197$ 1357...)	Ne 20 90.48 $\sigma 0.037$	Ne 21 0.27 $\sigma 0.666$ $\sigma_{n,\alpha} 0.00018$	Ne 22 9.25 $\sigma 0.0527$	Ne 23 37.25 s $\beta^- 4.4...$ $\gamma 440, 1637...$	Ne 24 3.38 m $\beta^- 2.0...$ $\gamma 874$ m
F 18 109.728 m $\beta^+ 0.634$ no γ	F 19 100 $\sigma 0.00951$	F 20 11.0 s $\beta^- 5.4...$ $\gamma 1634...$	F 21 4.158 s $\beta^- 5.3, 5.7...$ $\gamma 351, 1395...$	F 22 4.23 s $\beta^- 5.5, 9.6...$ $\gamma 1275, 2083$ 2166, 4366...	F 23 2.23 s $\beta^- 8.44...$ $\gamma 1701, 2129$ 1822, 3431... βn
O 17 0.038 $\sigma 0.000540$ $\sigma_{n,\alpha} 0.235$	O 18 0.205 $\sigma 0.000150$	O 19 26.476 s $\beta^- 3.3, 4.8...$ $\gamma 197, 1357...$	O 20 13.5 s $\beta^- 2.8...$ $\gamma 1057...$	O 21 3.42 ms $\beta^- 6.4...$ $\gamma 1730, 3517$ 280, 1787 1755...	O 22 2.25 s β^- $\gamma 72, 637, 1863$ 918, 710...

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

³H

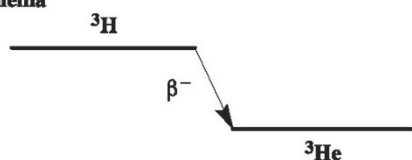
Z = 1

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	γ (Bq·s) ⁻¹	E (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		Sv/Bq Bq
	Water(damp)	Organisch	
$e(50)$	$1,8 \times 10^{-11}$	$4,1 \times 10^{-11}$	
A_{Re}	$5,6 \times 10^{10}$	$2,4 \times 10^{10}$	

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	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,8 \times 10^{-2}$

Berekening maximale jaarlijkse lozing van radionucliden in lucht

$$A_{lozing} = A_{inkoop} \cdot 10^{-p-s-4} \cdot CR_L \text{ (per jaar)}$$

Toetsingswaarden voor de jaarlijkse lozing in lucht (L_{SN})

Lozing in lucht (L_{SN}) [Re_{inh}]	Afstand tussen lozingspunt en terreingrens [m]
1	≤ 50
10	≤ 150
100	> 150

Waarde van de effectiviteitsparameter (s) voor de effectiviteit van het filtersysteem voor het beschouwde nuclide

Effectiviteitsparameter (s)	Effectiviteit van het filtersysteem
4	$\geq 99,99\%$
3	$\geq 99,9\%$
2	$\geq 99\%$
1	$\geq 90\%$
0	$< 90\%$ (geen filter of ineffectief filter)

Correctiefactoren voor lozing van radionucliden (CR_L), afhankelijk van de fysische halveringstijd $t_{1/2}$ van het nuclide

Correctiefactor (CR_L)	$t_{1/2}$
1	< 25 jaar
10	> 25 jaar
100	> 250 jaar