

Stralingsbeschermings- deskundige



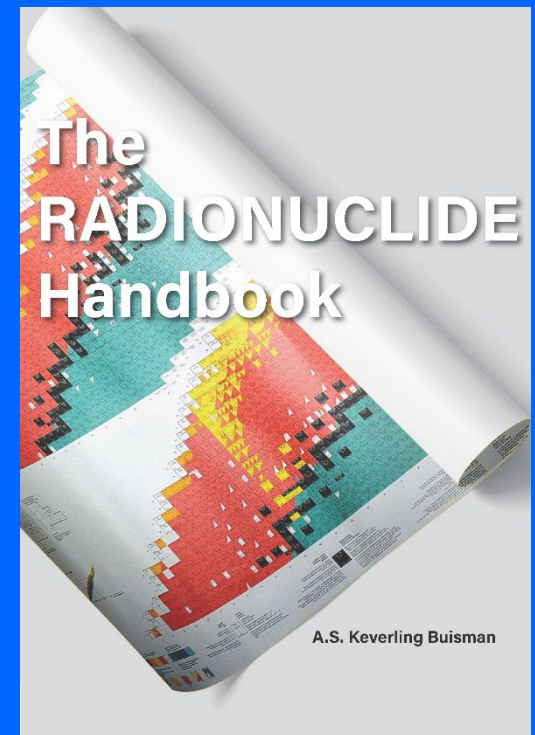
The RADIONUCLIDE Handbook

A.S. Keverling Buisman

The RADIONUCLIDE Handbook

Compilatie van gegevens van 117 radionucliden:

- Natuurlijke radioactieve stoffen (o.a. radon)
- Radiopharmaceutica
- Radioactieve stoffen rond kernreactor
- Radioactieve stoffen na kernexplosie
- Cyclotronproducten
- Splitsstoffen



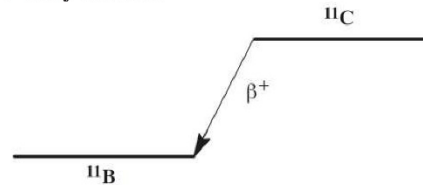
^{11}C

$Z = 6$

Half-life, decay constant and carrier free specific activity

$$T_{1/2} = 20,39 \text{ min} = 1,22 \times 10^3 \text{ s} \quad \lambda = 5,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \quad A_{\text{sp}} = 3,10 \times 10^{19} \text{ Bq/g}$$

Decay scheme



Emitted radiation

Type	γ (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β^+	1,00	385 960
γ^+	2,00	511

External irradiation

Ambient dose equivalent	0,14 $\mu\text{Sv/h}$ per MBq/m^2
Contamination skin dose equivalent	2,26 mSv/h per kBq/cm^2

Exemption levels

Unlimited quantities of solid material	10^3 Bq/g
Moderate quantities, all materials	10 Bq/g
^{11}CO and $^{11}\text{CO}_2$	10^9 Bq
Other ^{11}C -compounds	10^6 Bq

Clearance level

Unlimited quantities of solid material	10^3 Bq/g
--	---------------------

Transportation

$$A_1 = 1 \text{ TBq}$$
$$A_2 = 0,6 \text{ TBq}$$

Production and application

Carbon-11 is produced via the $^{11}\text{B}(p,n)$ or the $^{14}\text{N}(p,\alpha)$ reaction.

Applications usually involve medical positron-emission tomography (PET-scan).

Overzicht

Linker pagina:
Fysica
Wetgeving
Toepassing

Voorbeeld: ^{11}C

Overzicht

Rechter pagina Inwendige besmetting

Biokinetic behaviour

There are two carbon models: the CO₂-model and the generic organic model. Carbon entering the blood compartment as CO₂ or HCO₃⁻ is transferred quickly ($t_{1/2} = 10$ min): 60% to soft tissue, 36% to exhalation en 4% to other organs among which bone tissue. The larger part of ¹¹C in soft tissue returns rapidly ($t_{1/2} = 20$ min) to blood.

Half of the carbon entering blood as organic material is excreted via the bladder, 40% goes to soft tissue ($t_{1/2} = 3$ d) and the rest to adipose tissue ($t_{1/2} = 70$ d).

Effective committed dose conversion coefficients

Ingestion		
Compound	f_A	$e(50)$ (Sv/Bq)
All	1,0	$2,7 \times 10^{-11}$

Inhalation			
Compound	Class	AMAD (μm)	$e(50)$ (Sv/Bq)
Ba ¹¹ CO ₃	F	1	$6,2 \times 10^{-12}$
	F	5	$9,9 \times 10^{-12}$
Unspecified ¹¹ C	M	1	$1,2 \times 10^{-11}$
	M	5	$1,8 \times 10^{-11}$
¹¹ CO	-	-	$2,4 \times 10^{-12}$
¹¹ CO ₂	-	-	$3,6 \times 10^{-12}$
¹¹ CH ₄	V	-	$8,5 \times 10^{-15}$
Unspecified ¹¹ C gas or vapour	V	-	$2,6 \times 10^{-11}$

Injection, incl. radiopharmaceuti	
Compound	$e(50)$ (Sv/Bq)
Unspecified ¹¹ C	$6,6 \times 10^{-12}$
¹¹ C-acetate	$3,5 \times 10^{-12}$
¹¹ C-aminoacid	$5,6 \times 10^{-12}$
¹¹ C-brain receptor, general	$4,3 \times 10^{-12}$
¹¹ C-raclopride	$5,0 \times 10^{-12}$
[¹¹ C-methyl]-thymidine	$3,5 \times 10^{-12}$
[2- ¹¹ C]-thymidine	$2,7 \times 10^{-12}$
¹¹ C-methionine	$8,2 \times 10^{-12}$

Fysica

^{11}C

$Z = 6$

Half-life, decay constant and carrier free specific activity

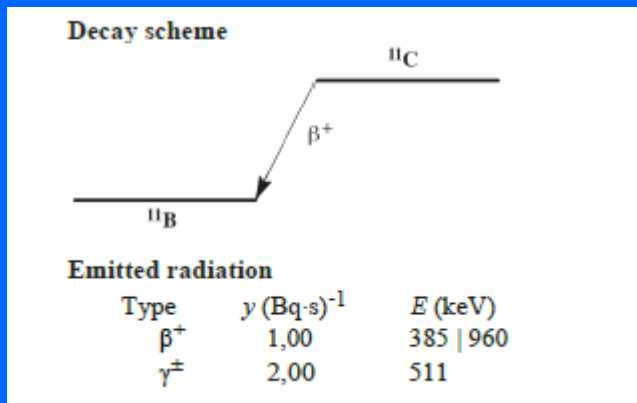
$$T_{1/2} = 20,39 \text{ min} = 1,22 \times 10^3 \text{ s} \quad \lambda = 5,67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \quad A_{\text{sp}} = 3,10 \times 10^{10} \text{ Bq/g}$$

Halveringstijd: $T_{1/2}$, ook in s

Vervalconstante: λ in s^{-1} (fractie die per s verval)

Massieke activiteit (dragervrij): A_{sp} in Bq/g

Fysica



Vervalschema

Uitgezonden straling: Emissiewaarschijnlijkheid γ en energie E

β -straling: Gemiddelde energie | Maximum energie

Oorsprong gegevens

Alle gegevens afkomstig uit elektronische bijlage bij ICRP-107
Programma: DECDATA

DECDATA - A Summary of Radiation Emissions

Summary of C-11 Emissions

Half-Life : 20.39 m
Decay Mode: EC B+

SpA = 3.099E+10 TBq/kg
Data files: ICRP-07

Radiations	Number Records	Yield (/nt)	Energy (MeV/nt)	Mean Energy (MeV)	Delta (Gy kg/nt)
Annh photons	1	1.995E+00	1.020E+00	5.110E-01	1.634E-13
Beta +	1	9.977E-01	3.847E-01	3.856E-01	6.164E-14
Totals	2		1.404E+00		2.250E-13

Point Source Air Kerma Coefficient = 3.86E-17 Gy m²/(Bq s)

Wat is nieuw?

ICRP-107

Zo compleet mogelijk!

Inclusief alle atomaire processen:

- Fotonen (Kar. röntgenstraling)

- Elektronen (Auger/Coster-Kronig)

Nucleaire processen

- Alfa/beta-straling

- Gamma

- Conversie-elektronen

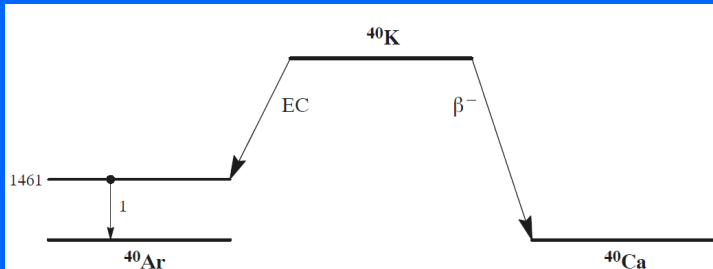
Bijzondere processen

- Annihilatiefotonen

- Spontane splijting

Uitgezonden deeltjes in detail
File in OUTPUT van ICRP-107

K-40 straling



In boek als
 $E > 10 \text{ keV}$ én
 $y > 0,01$
 (in principe)

(Bq.s) ⁻¹	E(MeV)	Code	
9,61E-14	2,34E-06	X	X Atomair foton
3,85E-01	1,70E-05	X	AQ Annihilatie
5,02E-06	6,40E-05	X	G Gamma
1,35E-05	6,63E-05	X	B+ Positron
6,10E-05	2,18E-04	X	B- Betastraling
2,97E-05	2,21E-04	X	AE Auger elektron
1,30E-08	2,32E-04	X	IE Conversie elektron
1,28E-08	2,33E-04	X	
1,28E-08	2,35E-04	X	
3,92E-06	2,99E-04	X	
6,19E-06	2,99E-04	X	
2,96E-03	2,93E-03	X	
5,85E-03	2,93E-03	X	
2,42E-04	3,16E-03	X	
4,79E-04	3,16E-03	X	
1,80E-03	5,11E-01	AQ	
1,07E-01	1,46E+00	G	
9,00E-04	2,52E-01	B+	
8,91E-01	5,85E-01	B-	
3,87E-02	4,41E-05	AE	
1,67E-01	2,16E-04	AE	
6,20E-02	2,65E-03	AE	
1,12E-02	2,90E-03	AE	
5,07E-04	3,14E-03	AE	
2,81E-06	1,46E+00	IE	
2,31E-07	1,46E+00	IE	
5,44E-10	1,46E+00	IE	
8,23E-10	1,46E+00	IE	

Fysica



Algemeen:

- Halveringstijd is het meest belangrijk!
- Uitgezonden straling zo volledig mogelijk, geen weglatingen

N = 5

¹¹C**Biokinetic behaviour**

There are two carbon models: the CO₂-model and the generic organic model. Carbon entering the blood compartment as CO₂ or HCO₃⁻ is transferred quickly (t_{1/2} = 10 min): 60% to soft tissue, 36% to exhalation en 4% to other organs among which bone tissue. The larger part of ¹¹C in soft tissue returns rapidly (t_{1/2} = 20 min) to blood.

Half of the carbon entering blood as organic material is excreted via the bladder, 40% goes to soft tissue (t_{1/2}= 3 d) and the rest to adipose tissue (t_{1/2}= 70 d).

Effective committed dose conversion coefficients**Ingestion**

Compound	f _A	e(50) (Sv/Bq)
All	1,0	2,7×10 ⁻¹¹

Inhalation

Compound	Class	AMAD (µm)	e(50)(Sv/Bq)
Ba ¹¹ CO ₃	F	1	6,2×10 ⁻¹²
	F	5	9,9×10 ⁻¹²
Unspecified ¹¹ C	M	1	1,2×10 ⁻¹¹
	M	5	1,8×10 ⁻¹¹
¹¹ CO	-	-	2,4×10 ⁻¹²
¹¹ CO ₂	-	-	3,6×10 ⁻¹²
¹¹ CH ₄	V	-	8,5×10 ⁻¹⁵
Unspecified ¹¹ C gas or vapour	V	-	2,6×10 ⁻¹¹


Injection, incl. radiopharmaceuti

Compound	e(50) (Sv/Bq)
Unspecified ¹¹ C	6,6×10 ⁻¹²
¹¹ C-acetate	3,5×10 ⁻¹²
¹¹ C-aminoacid	5,6×10 ⁻¹²
¹¹ C-brain receptor, general	4,3×10 ⁻¹²
¹¹ C-raclopride	5,0×10 ⁻¹²
[¹¹ C-methyl]-thymidine	3,5×10 ⁻¹²
[2- ¹¹ C]-thymidine	2,7×10 ⁻¹²
¹¹ C-methionine	8,2×10 ⁻¹²

Rechts

Rechter pagina
Inwendige
besmetting

Inwendige besmetting



Metabool model

Effectieve-dosisconversiecoëfficiënten

Ingestie

Inhalatie (F, M, S, V)

Injectie

Effectieve dosis bij radiofarmaceutica

Lichaams/urine/schildklier-activiteit na
ongeval

Inwendige besmetting

Nieuwe berekeningen e(50) volgens

Occupational Intakes of Radionuclides (OIR-serie)

	ICRP 103	Weegfactoren w_T , w_R
	ICRP 107	Fysica (y_i en E_i)
	ICRP 110	Wiskundige fantomen
Part 1	ICRP 130	Algemene werkwijze
	ICRP 133	SAF berekeningen
Part 2	ICRP 134	Radionuclide serie 1
Part 3	ICRP 137	Radionuclide serie 2
Part 4	ICRP 141	Radionuclide serie 3
Part 5	ICRP 151	Radionuclide serie 4

Later: Environmental Intakes of Radionuclides (EIR-serie)

Inwendige besmetting

Bijdrage aan equivalente dosis : ΔH_T
voor 1 deeltje i vanaf bronorgaan S naar
doelorgaan T :

$$\Delta H_T = U_S w_R \gamma_i E_i \frac{AF(T \leftarrow S)}{m_T} =$$

$$\Delta H_T = \underbrace{U_S}_{\text{Uit metabool model}} w_R \underbrace{\gamma_i E_i}_{\text{Uit fysica}} \underbrace{SAF(T \leftarrow S)}_{\text{Uit fantoom}}$$

Uit metabool model

Uit fysica

Uit fantoom

Inwendige besmetting

$$\Delta H_T = U_S w_R y_i E_i \text{SAF}(T \leftarrow S)$$

U_S Aantal desintegraties in bronorgaan per Bq inname in Bq·s/Bq

w_R Stralingsweegfactor (uit ICRP-103)

y_i Emissiewaarschijnlijkheid in (Bq·s)⁻¹

E_i Uitgezonden energie (J)

$\text{SAF}(T \leftarrow S)$ Massieke geabsorbeerde fractie (kg⁻¹)

Referentiemens



Vastgelegd in ICRP-23:

Massa 70 kg, lengte 170 cm

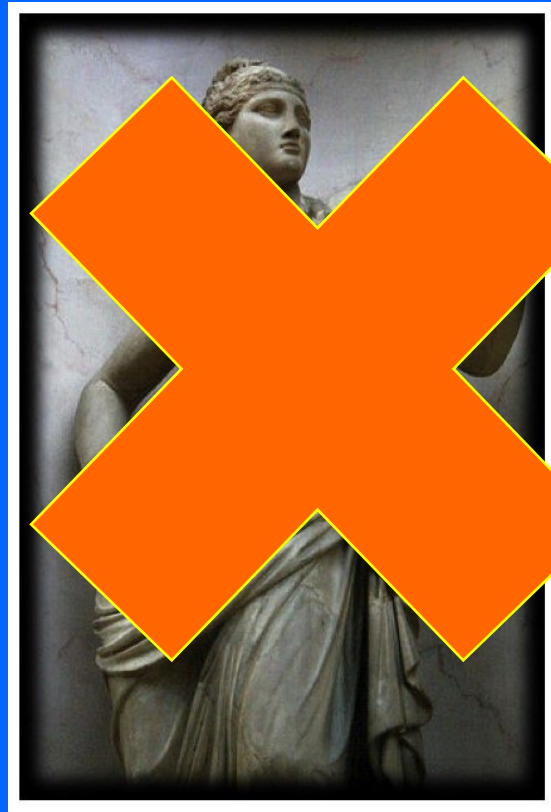
Massa van organen/weefsels vastgelegd

Alle geslachtsgebonden organen aanwezig:

Testes, prostaat, eierstokken, baarmoeder

Referentiemens

Referentiemens is hermafrodit!



Referentiemens

ICRP 89: Update referentiemens

Vrouw

Man

163 cm

176 cm

60 kg

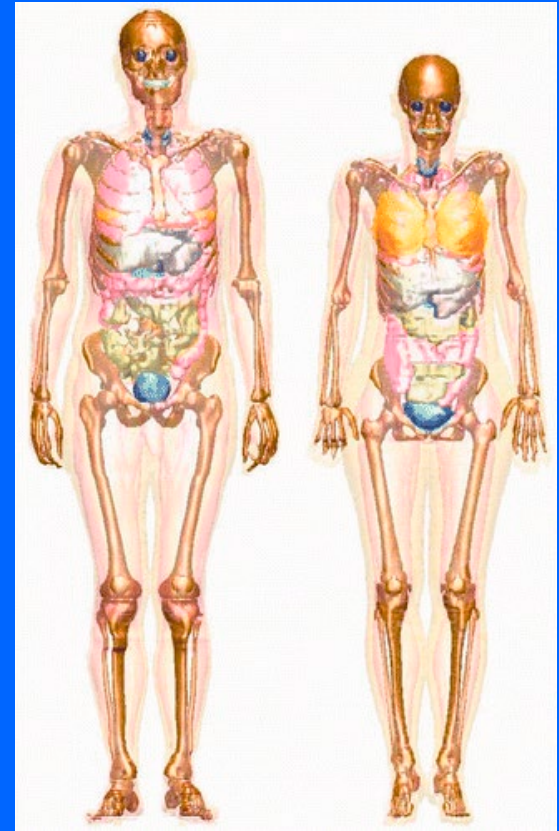
73 kg

ICRP 110

CT-scans van echte mensen:

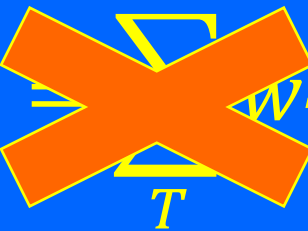
Voxelfantomen:

4M (v) en 2M (m) voxels!



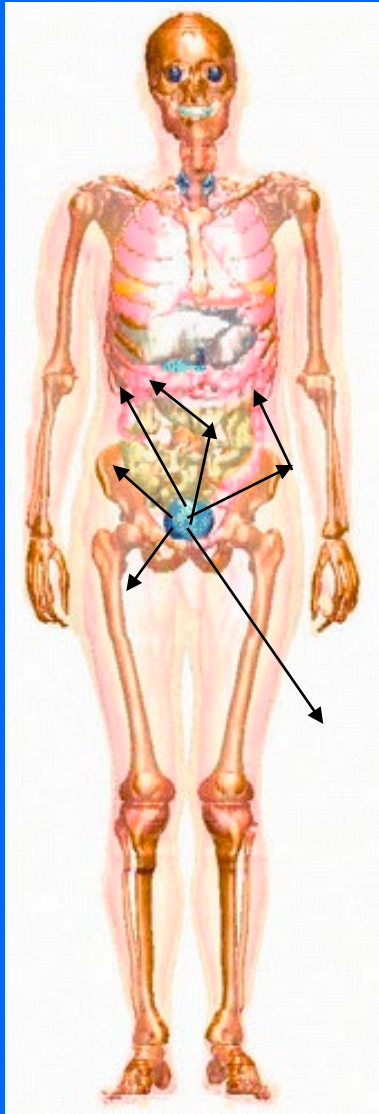
Golem Laura

Definitie effectieve dosis

$$E = \sum_T w_T H_T$$


$$E = \sum_T w_T \frac{1}{2} [H_{T,man} + H_{T,vrouw}]$$

Geabsorbeerde fractie



Monte Carlo methode

Hier voor fotonen of elektronen uit
blaas:

Start in willekeurige richting

Interactiekans bekend

(foto/compton/paarvorming)

(o.a. remstraling bij elektronen)

Herhaal 1-10 miljoen keer.

Geeft geabsorbeerde fractie (AF)

Hier AF(doelorgaan ← blaas)

Nu nog delen door de massa

Massa doelorganen/doelregio's m_T
te vinden in ICRP 133 voor man en vrouw

NB. De massa is inclusief bloed!

Geeft Specific Absorbed Fraction
SAF ($T \leftarrow S$)

Voor 4 soorten deeltjes (elektron, foton, alfa, neutron)
voor beide geslachten: 8 sets van 3000 getallen

Specific Absorbed Fractions

Specific absorbed fractions of energy (1/kg)

2017-03-07

Adult Female Reference Computational Phantom

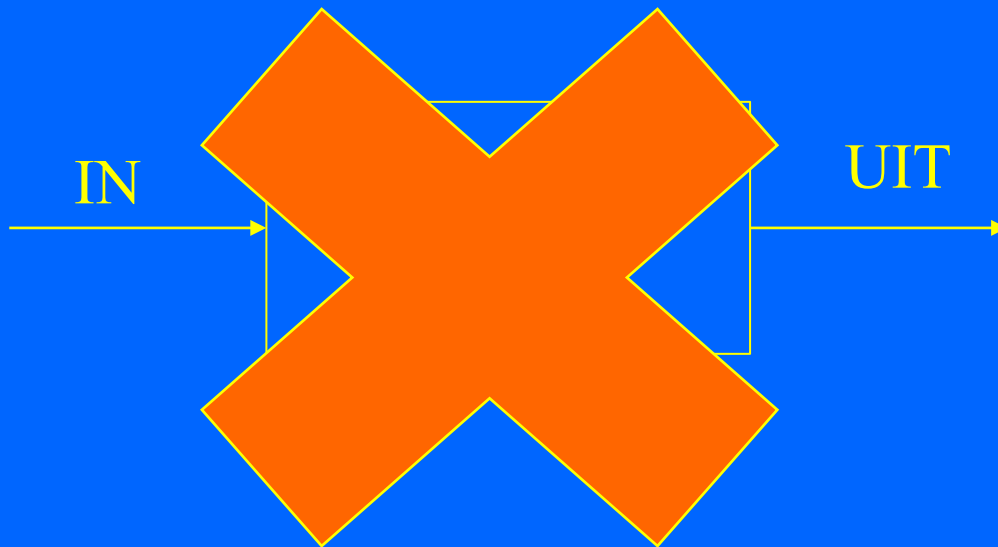
|
Photons (MeV)

| 0.100 0.150 0.200 0.300 0.400 0.500 0.600 0.800 1.000

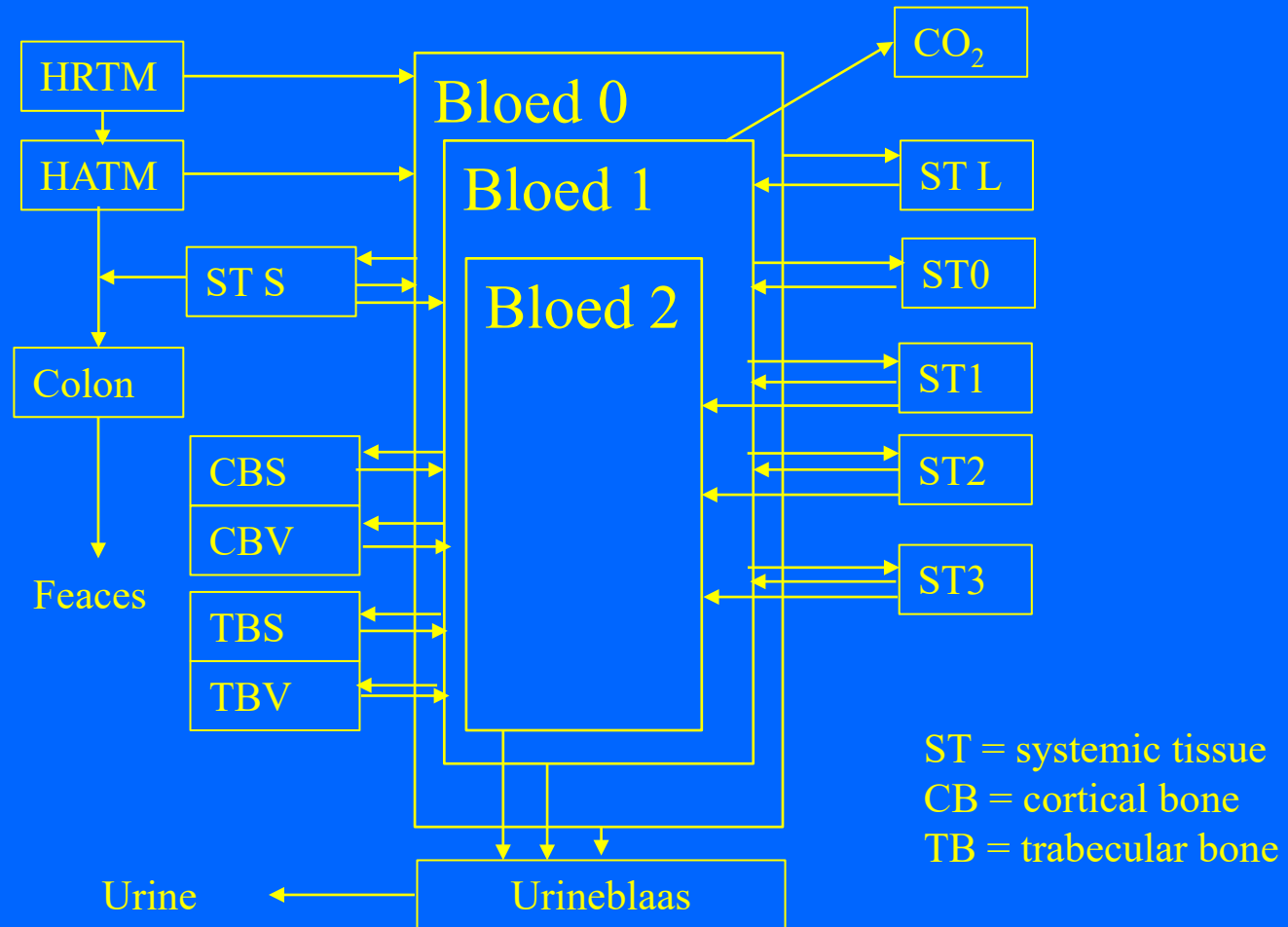
Adrenals	<-Liver	7.122E-02	6.370E-02	6.020E-02	5.837E-02	5.751E-02	5.631E-02	5.535E-02	5.421E-02	5.252E-02
Liver	<-Liver	1.020E-01	8.911E-02	8.454E-02	8.315E-02	8.331E-02	8.315E-02	8.222E-02	8.044E-02	7.789E-02
Pancreas	<-Liver	4.674E-02	4.142E-02	3.857E-02	3.672E-02	3.582E-02	3.505E-02	3.437E-02	3.356E-02	3.251E-02
Kidneys	<-Liver	3.624E-02	3.232E-02	3.008E-02	2.866E-02	2.799E-02	2.746E-02	2.701E-02	2.636E-02	2.560E-02
Spleen	<-Liver	1.596E-02	1.481E-02	1.392E-02	1.321E-02	1.283E-02	1.254E-02	1.234E-02	1.211E-02	1.184E-02
GB-wall	<-Liver	1.063E-01	9.440E-02	8.932E-02	8.662E-02	8.576E-02	8.449E-02	8.306E-02	8.111E-02	7.874E-02
Ureters	<-Liver	1.100E-02	1.046E-02	1.003E-02	9.694E-03	9.510E-03	9.391E-03	9.247E-03	9.145E-03	8.901E-03
UB-wall	<-Liver	3.113E-04	4.070E-04	4.677E-04	5.302E-04	5.862E-04	6.389E-04	6.831E-04	7.420E-04	8.090E-04
Ovaries	<-Liver	3.280E-04	4.361E-04	5.097E-04	5.313E-04	5.997E-04	6.492E-04	7.132E-04	7.493E-04	7.959E-04
Testes	<-Liver	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Prostate	<-Liver	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Uterus	<-Liver	2.856E-04	3.924E-04	4.588E-04	5.306E-04	5.973E-04	6.683E-04	7.241E-04	7.743E-04	8.186E-04
LN-Sys	<-Liver	1.193E-02	1.079E-02	1.018E-02	9.869E-03	9.717E-03	9.542E-03	9.383E-03	9.213E-03	9.053E-03
Skin	<-Liver	2.537E-03	2.410E-03	2.380E-03	2.418E-03	2.488E-03	2.551E-03	2.580E-03	2.582E-03	2.562E-03
Adipose	<-Liver	2.963E-03	2.984E-03	3.055E-03	3.162E-03	3.257E-03	3.326E-03	3.357E-03	3.357E-03	3.334E-03
Muscle	<-Liver	3.649E-03	3.425E-03	3.308E-03	3.259E-03	3.264E-03	3.273E-03	3.273E-03	3.255E-03	3.216E-03

Wat is nieuw?

Oude model voor koolstof



Nieuw model voor koolstof



Bloed!

Bloed is centraal in biokinetiek

Bloed is belangrijk bronorgaan,

Bloed is géén doelorgaan

Bloed doorstroomt alle organen

(behalve oog lens)

Bloed bestraalt deze organen van binnen uit

Ook door alfa's!

SAF's (vrouw)
voor alfa's

Thyroid	<-Blood	3.083E-02	Ureters	<-Blood	7.281E-03
Breast	<-Blood	7.281E-03	UB-wall	<-Blood	4.900E-03
Thymus	<-Blood	7.281E-03	Ovaries	<-Blood	3.165E-02
Ht-wall	<-Blood	3.436E-02	Testes	<-Blood	0.000E+00
Adrenals	<-Blood	3.881E-02	Prostate	<-Blood	0.000E+00
Liver	<-Blood	5.525E-02	Uterus	<-Blood	7.281E-03
Pancreas	<-Blood	4.150E-02	LN-Sys	<-Blood	1.325E-02
Kidneys	<-Blood	5.602E-02	Skin	<-Blood	1.238E-02
Spleen	<-Blood	7.471E-02	Adipose	<-Blood	3.907E-03
GB-wall	<-Blood	7.281E-03	Muscle	<-Blood	5.856E-03

Resultaat voor ^{11}C

Effective committed dose conversion coefficients				
Ingestion				
Compound		f_A		$e(50)$ (Sv/Bq)
All		1,0		$2,7 \times 10^{-11}$
Inhalation				
Compound	Class	AMAD (μm)		$e(50)$ (Sv/Bq)
$\text{Ba}^{11}\text{CO}_3$	F	1		$6,2 \times 10^{-12}$
	F	5		$9,9 \times 10^{-12}$
Unspecified ^{11}C	M	1		$1,2 \times 10^{-11}$
	M	5		$1,8 \times 10^{-11}$
^{11}CO	-			$2,4 \times 10^{-12}$
$^{11}\text{CO}_2$	-			$3,6 \times 10^{-12}$
$^{11}\text{CH}_4$	V			$8,5 \times 10^{-15}$
Unspecified ^{11}C gas or vapour	V			$2,6 \times 10^{-11}$

Dosisconversiecoëfficiënt in Sv/Bq

Verbinding: Chemische symbool!

AMAD 1 μm : bevolking (?)

AMAD 5 μm : werkers

Klasse V: Zeer snelle opname in bloed (Vapour)

Gebruik van e(50)'s

- Inrichting en bedrijven van radionuclidenlaboratorium via radiotoxiciteitsequivalent (= 1 Sv/e(50))
- Vrijstelling bij lozingen (ook RE)
- Voor risico-inventarisatie en evaluatie (RI&E)
- Voor ongevalsanalyse

Ongevalsanalyse

- Voorbeeld voor ^{22}Na

Data for whole body counting (Bq in body per Bq inhaled by workers)

t (d)	F
0,25	$7,4 \times 10^{-1}$
1	$5,9 \times 10^{-1}$
2	$4,8 \times 10^{-1}$
3	$4,2 \times 10^{-1}$
5	$3,5 \times 10^{-1}$
7	$3,1 \times 10^{-1}$

- Fractie van inname die na 0,25 – 7 dagen overblijft in het lichaam
- Voor zuivere alfa/bètastralers: urine-excretie per dag
- Voor jodium-isotopen: schildklier-activiteit
- Afkomstig uit OIR-gegevens (of eerdere gegevens als nodig).

Geslachtsafhankelijkheid

Parameter	Geslachtsafhankelijk	
	Nee	Man/vrouw
Deeltjes energie E_i	✓	
Deeltjes yield y_i	✓	
$SAF_i (T \leftarrow S)$		✓ ✓
Biokinetiek (U_s)	✓	
Ademhalingswegen		✓ ✓
Spijsverteringsmodel		✓ ✓
<i>HATM Referentiewerker</i>	✓	<i>maar gelijk aan man!</i>
Vraag: Is OIR-DCC voor ingestie geldig voor bevolking?		
Is OIR-DCC voor inhalatie met AMAD= 1 μm geldig voor bevolking?		

Radiofarmacie, injectie

Injection, incl. radiopharmaceuti

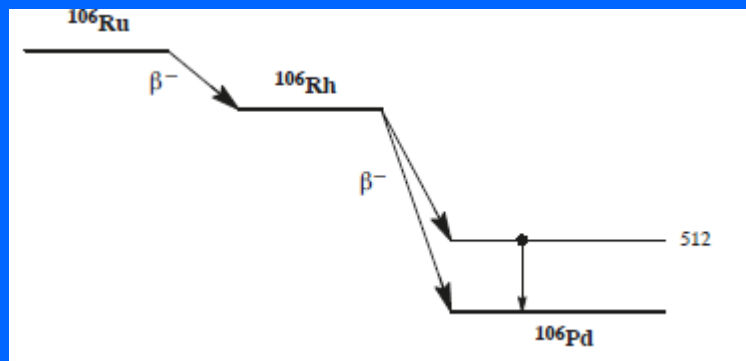
Compound	e(50) (Sv/Bq)
Unspecified ^{11}C	$6,6 \times 10^{-12}$
^{11}C -acetate	$3,5 \times 10^{-12}$
^{11}C -aminoacid	$5,6 \times 10^{-12}$
^{11}C -brain receptor, general	$4,3 \times 10^{-12}$
^{11}C -raclopride	$5,0 \times 10^{-12}$
[^{11}C -methyl]-thymidine	$3,5 \times 10^{-12}$
[2- ^{11}C]-thymidine	$2,7 \times 10^{-12}$
^{11}C -methionine	$8,2 \times 10^{-12}$

Eigen biokinetisch model

Dosisconversiecoëfficiënt in Sv/Bq

Alle getalwaarden uit ICRP-128 (=ICRP-60)

Radioactieve dochters

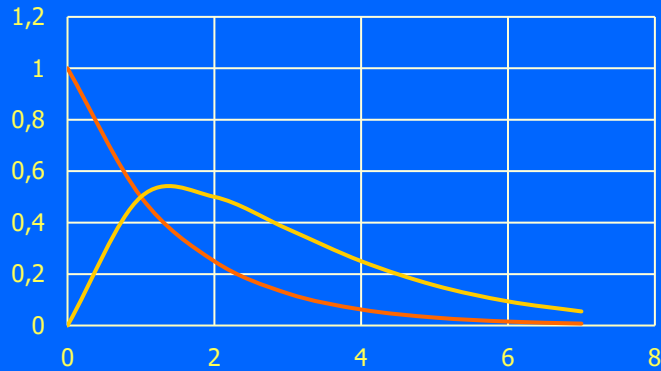


ICRP: Gaat uit van zuivere radionuclide

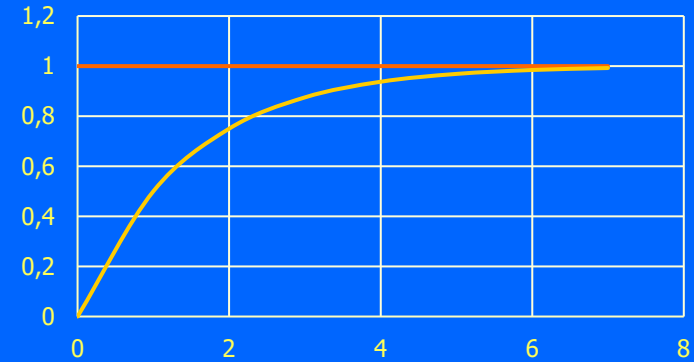
Vier situaties afhankelijk van halveringstijden

Radioactieve dochters

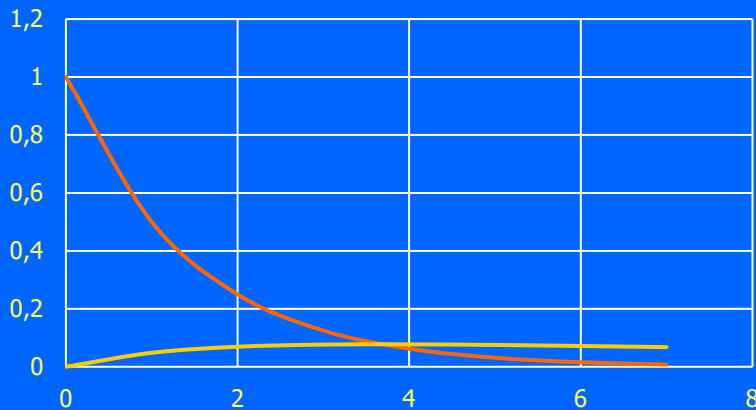
M = moeder D = dochter



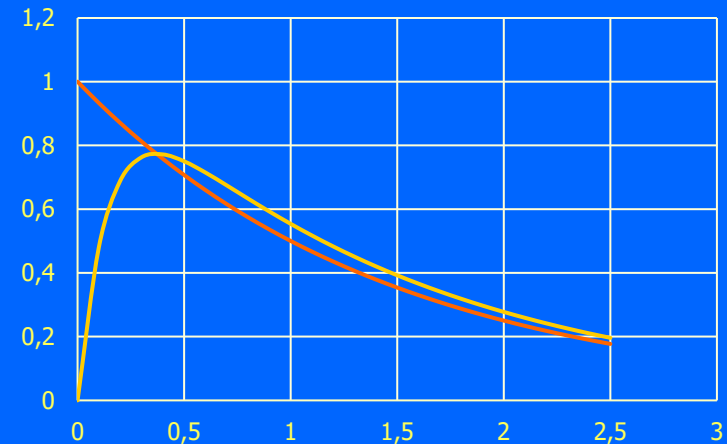
$T_D \approx T_M$



$T_D \ll T_M$: gelijke activiteit

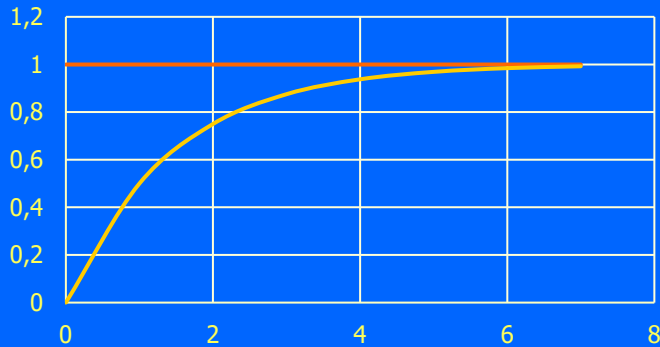


$T_D \gg T_M$



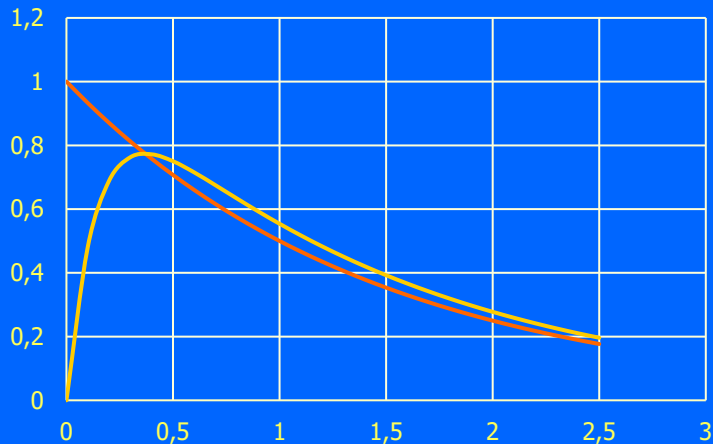
$T_D = 0,1 T_M$: seculair evenwicht

(Seculair) evenwicht



$$A_D = yA_M$$

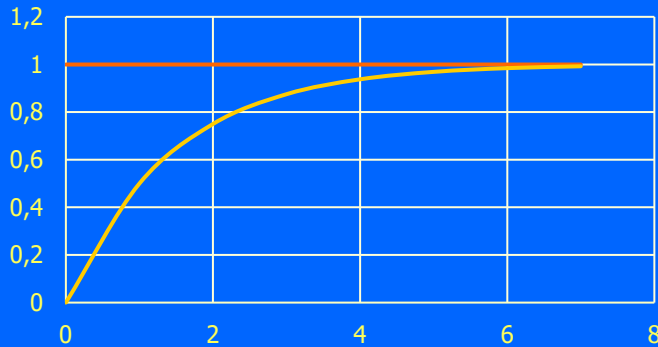
Evenwicht



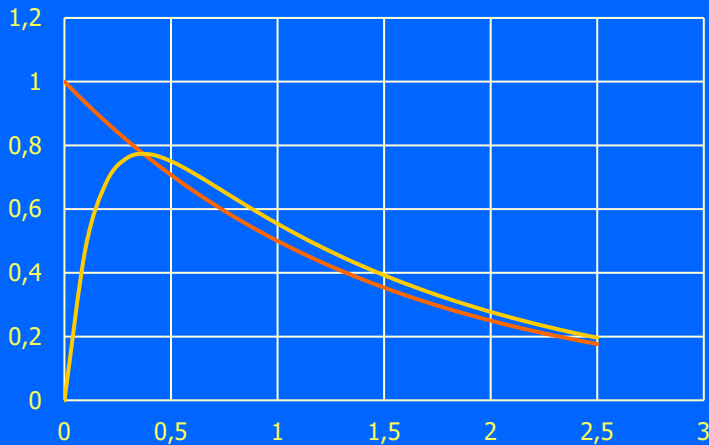
$$A_D = A_M \frac{yT_M}{T_M - T_D}$$

Seculair evenwicht

Voorbeelden



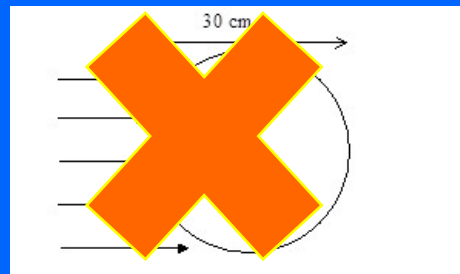
$^{69m}\text{Zn} \rightarrow ^{69}\text{Zn} \quad y=1$
 13 h 1 h Evenw.
 e(ing) 1,4E-10 2,9E-11 1,7E-10



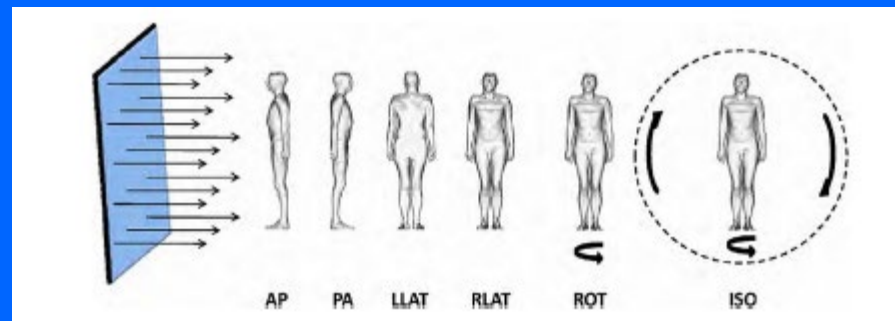
$$A_D = A_M \frac{yT_M}{T_M - T_D}$$
 $^{90}\text{Mo} \rightarrow ^{99m}\text{Tc} \quad (y = 0,88)$
 66 h 6 h Sec. evenw.
 e(ing) 4,4E-10 1,4E-11 4,5E-10

Omgevingsdosis

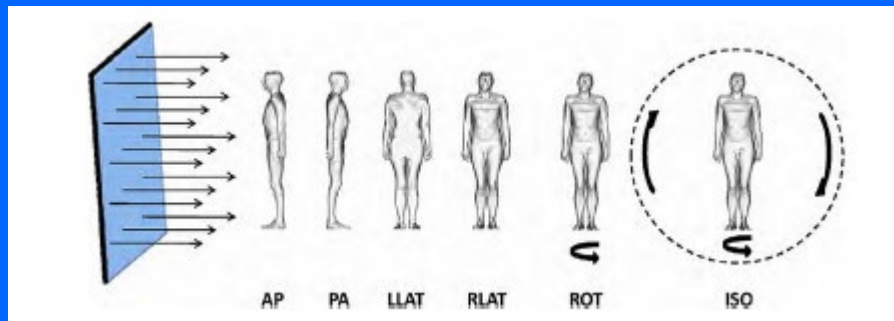
Oud
 $H^*(10)$



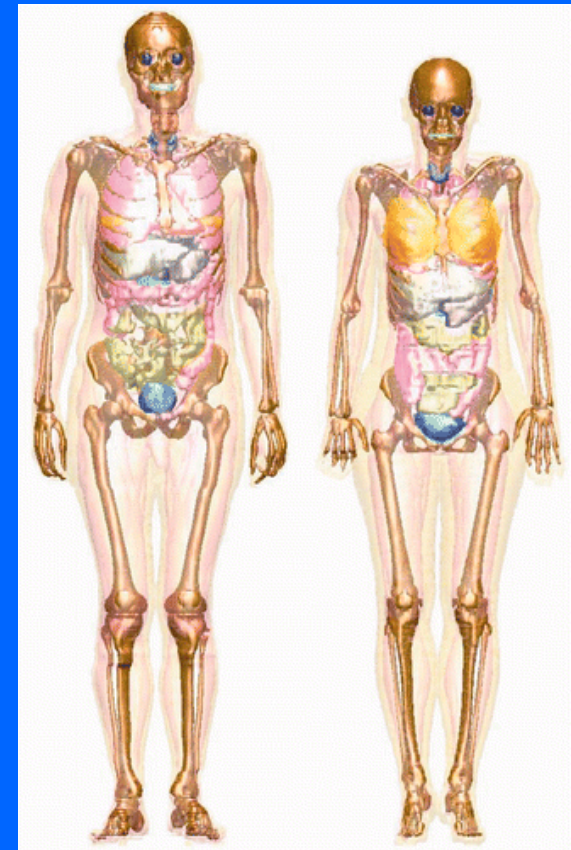
Nieuw
 h^*



Omgevingsdosis



Kies hoogste effectieve dosis (gem m/v) van de 6 configuraties:
Voor fotonen: AP



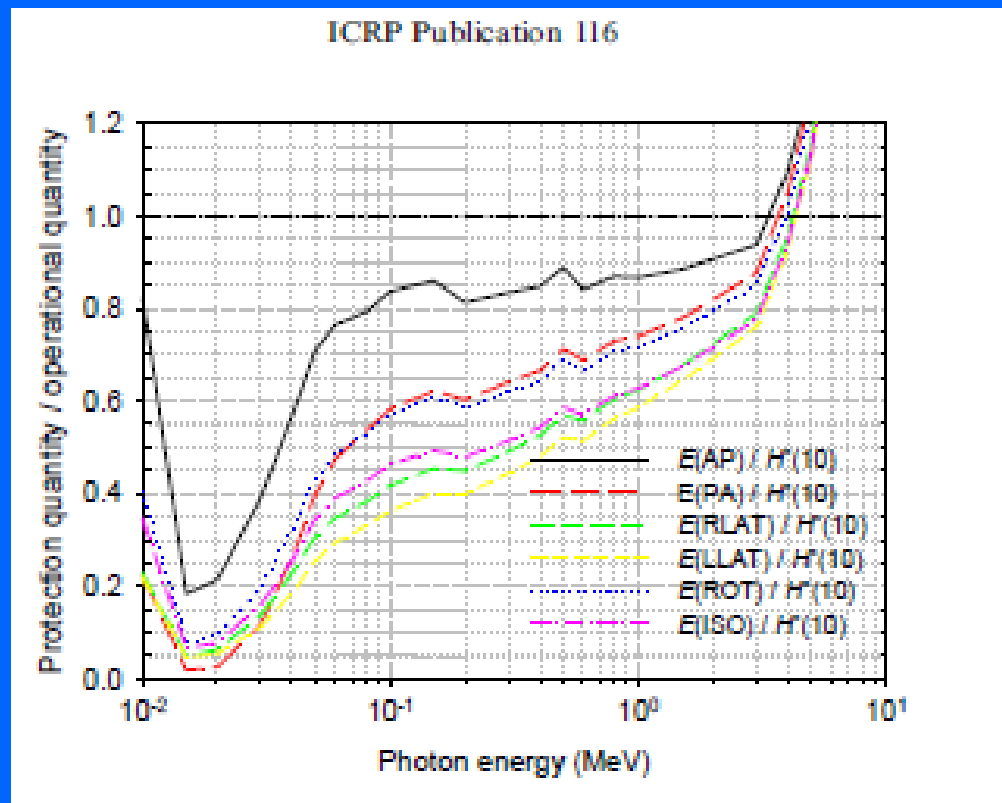
Golem Laura

Relatie E en $H^*(10)$

Nieuw!

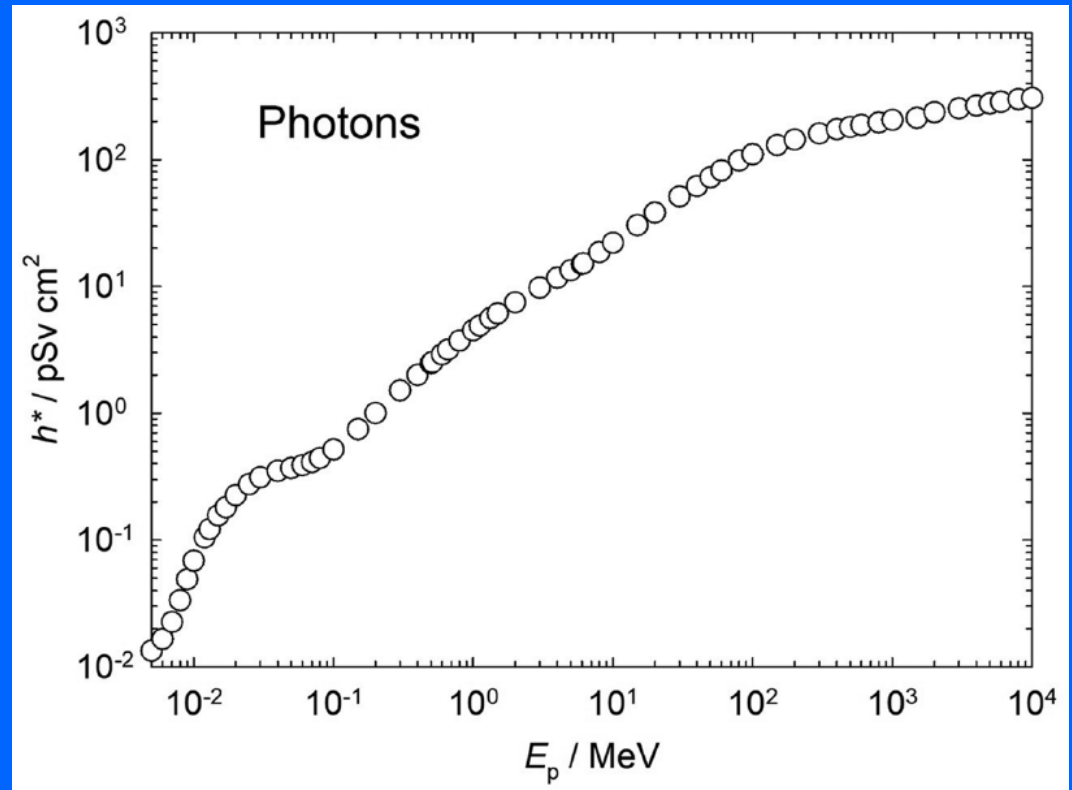
Voor fotonen:
Ambient dose
 $h^* = E(AP)$

De verhouding
 $E(AP)/$ fluentie
is bekend



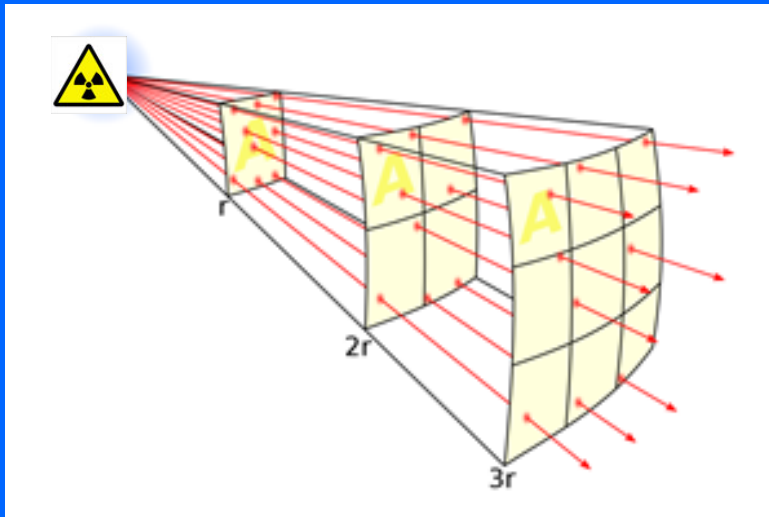
Ambient dose berekenen uit fotonfluentie

De verhouding
 $E(AP)/$ fluentie
is bekend
(ICRU 95)



Ambient dose berekenen uit fotonfluentie

Puntbron: bereken voor elk foton het fluentietempo op 1 m
Omrekenen naar omgevingsdosistempo met behulp van IRCU-95-data. Ook hier evenwicht voor dochters!



Toepassing



Klassiek gebruik

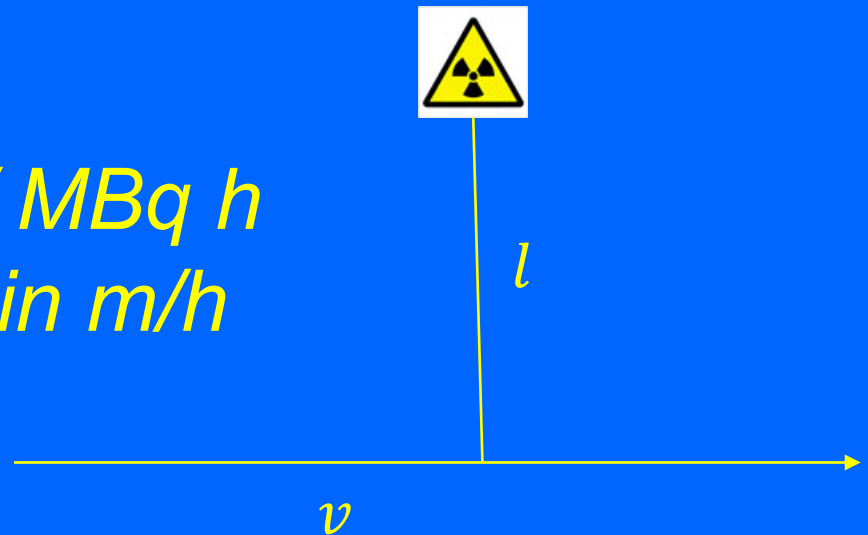
$$\dot{E} = \frac{h^* A}{l^2}$$

Toepassing

Gebruik bij passeerdosis

$$E = \frac{\pi h^* A}{lv}$$

met h^ in $\mu\text{Sv m}^2 / \text{MBq h}$
 A in MBq; l in m; v in m/h*



Relatie h^* met luchtkermatempo k_a

ICRP-107 geeft luchtkerma k_a op 1 m per Bq.s

DECDATA - A Summary of Radiation Emissions

Summary of C-11 Emissions

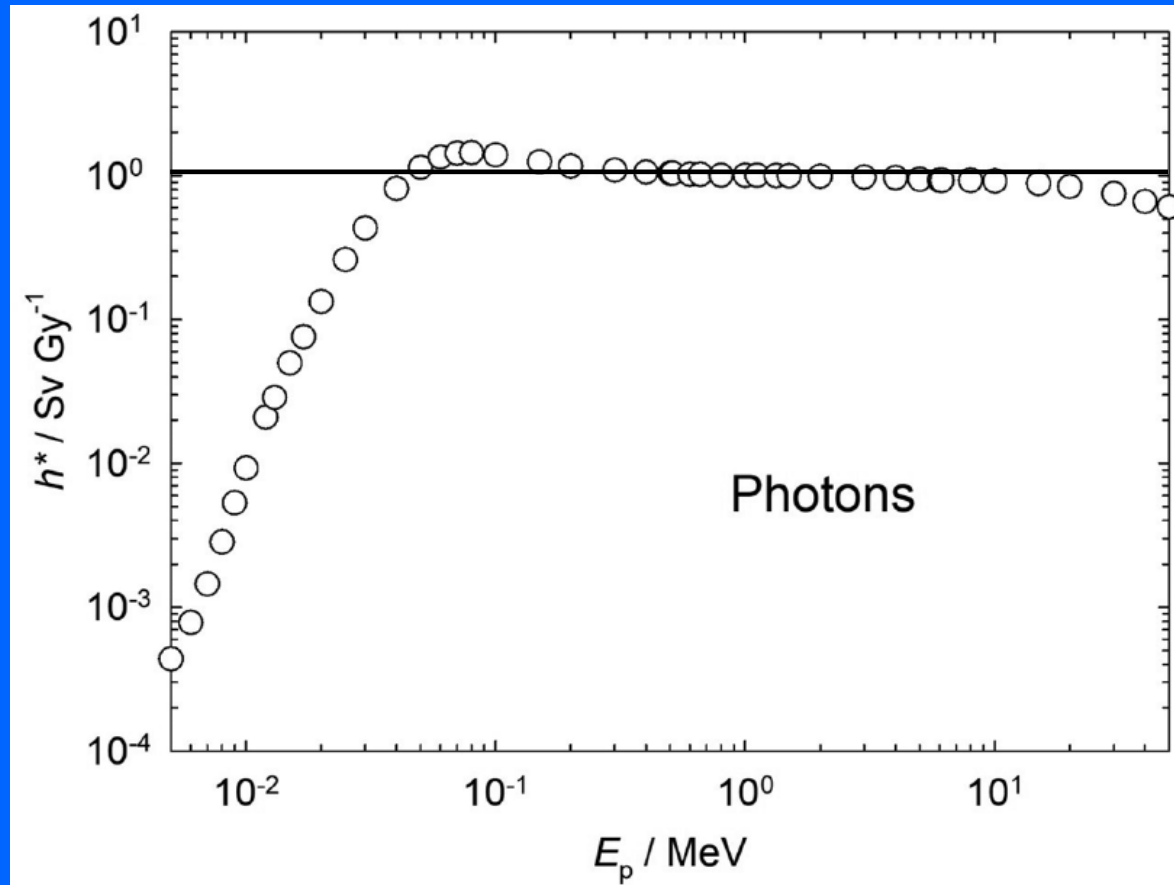
Half-Life : 20.39 m
Decay Mode: EC B+

SpA = 3.099E+10 TBq/kg
Data files: ICRP-07

Radiations	Number Records	Yield (/nt)	Energy (MeV/nt)	Mean Energy (MeV)	Delta (Gy kg/nt)
Annh photons	1	1.995E+00	1.020E+00	5.110E-01	1.634E-13
Beta +	1	9.977E-01	3.847E-01	3.856E-01	6.164E-14
Totals	2		1.404E+00		2.250E-13

Point Source Air Kerma Coefficient = 3.86E-17 Gy m²/(Bq s)

Relatie h^* met luchtkermatempo k_a



h^* vrijwel gelijk aan k_a voor $E_f > 50$ keV !

Voorbeeld voor ^{11}C

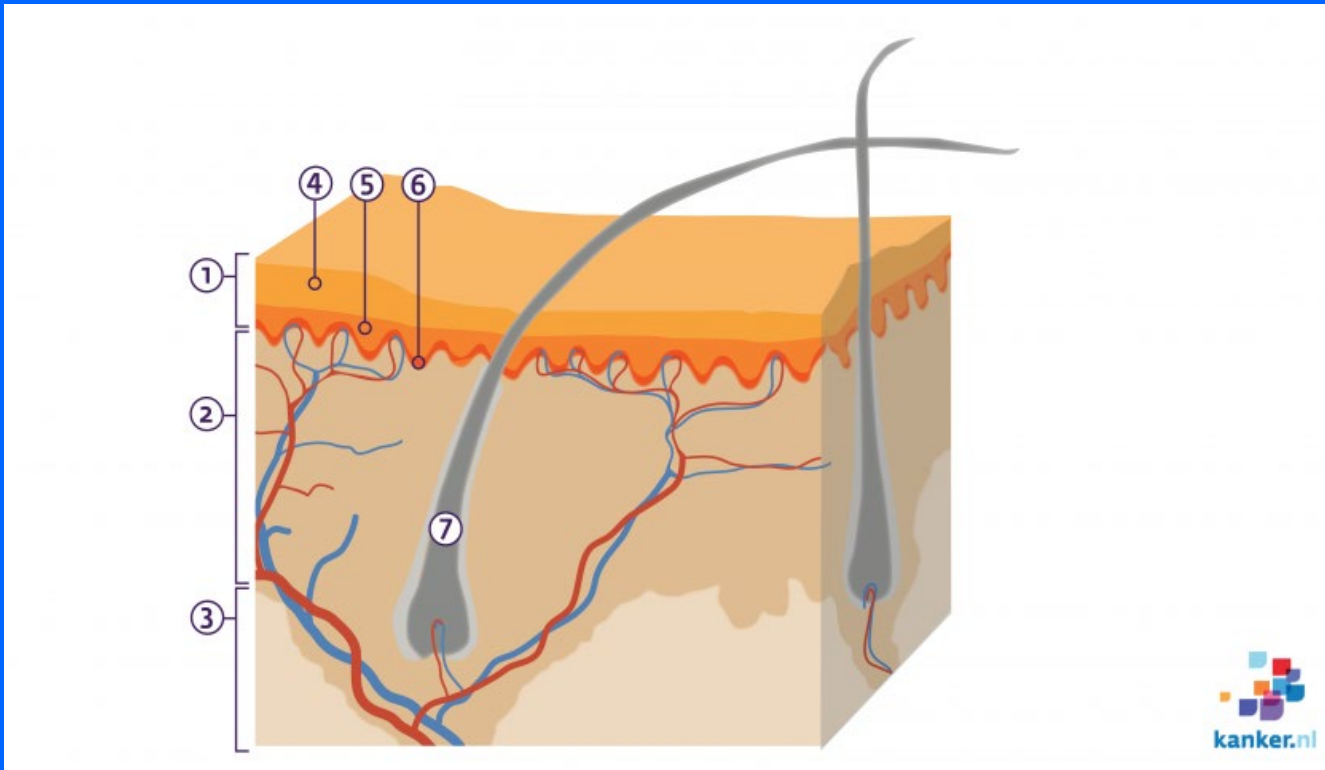
Emitted radiation

Type	y (Bq·s) ⁻¹	E (keV)
β^+	1,00	385 960
γ^\pm	2,00	511

External irradiation

Ambient dose equivalent	0,14 $\mu\text{Sv/h}$ per MBq/m^2
Contamination skin dose equivalent	2,26 mSv/h per kBq/cm^2

Locatie basale cellen



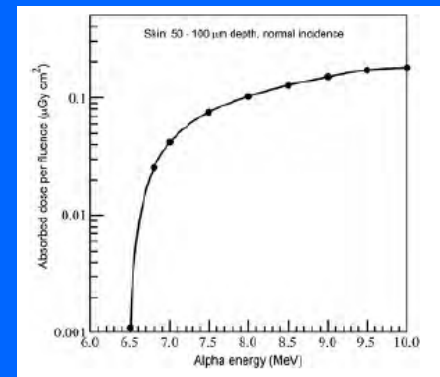
6 = basale laag, op 50-100 μm diepte
Huidosis getabelleerd in ICRP-107 voor
elektronen (β en e^-)

Huid dosis voor fotonen en alfa's

Voor fotonen: meestal verwaarloosbaar, in elk geval véél kleiner dan voor elektronen

Voor alfastraling: meestal dracht te klein om basale cellen te bereiken, maar voor $E_\alpha > 6,5 \text{ MeV}$ lukt dat wel.

Komt in handboek niet voor!



Vrijstellingsgrenzen



Hoeveelheden van een radioactieve stof waarvoor geen vergunning of melding vereist is. Vrij beschikbaar.

Definitie radioactieve stof

Kernenergiewet:

d. radioactieve stoffen: stoffen met uitzondering van splijtstoffen en ertsen, die in zodanige mate radionucliden bevatten dat zij, voorzover het de bescherming tegen ioniserende straling betreft, niet mogen worden verwaarloosd.

Vergunning of melding nodig

Controlesysteem radioactieve stoffen



Voor kunstmatige radioactieve stoffen > vrijstelling:
altijd vergunning vereist.

Vrijstelling (exemption)

Onbeperkte hoeveelheden vaste stof:
grens in Bq/g die max. 10 μ Sv/j geeft
Allerlei scenario's

Vaak beperkend: werker op deponie

Voor matige hoeveelheden (< 1000 kg)
ook grens in Bq (maximale bronsterkte)

Vrijgave (clearance level)

Gelijk aan vrijstelling voor onbeperkte hoeveelheden (in Bq/g)

Uitzonderingen aanvragen bij ANVS: bv voor scenario verbranding

Natuurlijke radioactieve stoffen

Vrijstelling voor natuurlijke stoffen

^{40}K 10 Bq/g*

^{238}U -reeks 1 Bq/g = 1000 Bq/kg

^{232}Th -reeks 1 Bq/g = 1000 Bq/kg

* K-zouten tot 1000 kg vrijgesteld

Natuurlijke radioactieve stoffen activiteit in Bq/kg

	^{40}K	^{232}Th	^{226}Ra
Rivierklei	450	40	30
Löss	550	50	30
Zeeklei	500	35	25
Zand	250	15	10
Veen	200	25	10
Duinzand	180	<5	5
Zeewater	12	0,1	0,05
Vrijstelling	10.000	1000	1000

Voorbeeld voor ^{11}C

Exemption levels

Unlimited quantities of solid material	10^3 Bq/g
Moderate quantities, all materials	10 Bq/g
^{11}CO and $^{11}\text{CO}_2$	10^9 Bq
Other ^{11}C -compounds	10^6 Bq

Clearance level

Unlimited quantities of solid material	10^3 Bq/g
--	-------------

Bijzonder geval! Niet realistisch scenario!

Transport

Transportation

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 \text{ TBq} \\ A_2 &= 0,6 \text{ TBq} \end{aligned}$$

Type A container
Tegen veel bestand,
maar niet tegen brand!



A_1 voor onverwoestbare matrix: bij brand toch alleen externe straling
 A_2 voor andere vormen, dus bij brand ook inhalatie mogelijk

Productie en toepassing

Production and application

Carbon-11 is produced via the $^{11}\text{B}(p,n)$ or the $^{14}\text{N}(p,\alpha)$ reaction.

Applications usually involve medical positron-emission tomography (PET-scan).

Productie: natuurlijk, reactor, splijting,
cyclotron

Toepassing: al naar gelang
Alleen ter informatie!

Recapitulatie



Compilatie met 117 radionucliden

Fysica: Zo compleet mogelijk

Inwendige besmetting

- Nieuwe definitie $e(50)$: gem. m/v
- Nieuw wiskundig fantoom (m/v)
- Inhalatie klasse V (zeer snelle opname)
- Nieuw biokinetisch model (alles via bloed)
- Verblijftijden maag-darm: werker = man
- Inclusief radiofarmaceutica

Recapitulatie

Externe straling:

- Puntbron: $h^* = E(AP)$ (m/v) (fotonen)
- Luchtkerma = h^* voor $E_f > 50$ keV
- Huid dosis: 50-100 μm diepte voor β/e^-

Vrijstelling: nodig, maar niet veel gebruikt

Transport: A_1 en A_2

Productie en toepassing: alleen ter informatie

Einde

Met dank voor de aandacht!