

Examen Coördinerend Deskundige Stralingsbescherming

Nuclear Research and consultancy Group	NRG
Technische Universiteit Delft	TUD
Boerhaave Nascholing/LUMC	BN/LUMC
Rijksuniversiteit Groningen	RUG
Radboudumc	RUMC
TU Eindhoven	TU/e

examendatum: 15 mei 2017
examenduur: 13.30 - 16.30 uur

Instructie:

- ❑ **Dit examen omvat 13 genummerde pagina's en een losse bijlage met gegevens van 13 pagina's. Controleer dit!**
- ❑ 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 en adres).
- ❑ 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/of 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: 17 punten
 - Vraagstuk 2: 16 punten
 - Vraagstuk 3: 17 punten
 - Vraagstuk 4: 17 punten
- ❑ U bent voor dit examen geslaagd als u minstens 55% van het totaal aantal punten hebt behaald. Dit komt overeen met een score van ten minste 36,85 punten.

Vraagstuk 1. De route van een ^{99m}Tc -koe

Enkele dagen vóór vrijdag 28 april 2017 wordt een molybdeen-technetium generator door de producent verstuurd naar een ziekenhuis. Het (berekende) kalibratie-tijdstip van deze generator is op vrijdag 28 april 2017 's morgens om 6:00 uur, dit tijdstip is enige tijd ná het versturen door de producent.

Bij het ziekenhuis wordt de generator een paar dagen gebruikt en men stuurt deze vervolgens op maandag 1 mei 2017 's morgens door naar een diergeneeskundige kliniek. Het ^{99m}Tc wordt daar een week gebruikt voor diagnoses bij honden en katten. Vanaf de diergeneeskundige kliniek gaat de generator op 8 mei 's morgens naar een opleidingsinstituut en weer een week later sturen de medewerkers van het opleidingsinstituut de gebruikte generator terug naar het ziekenhuis. Het ziekenhuis zorgt voor het retourneren naar de producent. Zie ook tabel 1 voor de kalibratiegegevens en het meer gedetailleerde verzendschema.

Tabel 1. Kalibratiegegevens met verzendschema, het type vervoersetiket met de genoteerde activiteiten en de vermelde transportindices (TI).

Kalibratiegegevens:

De activiteit ^{99}Mo is op vrijdag 28 april 6:00 u gelijk aan 25,8 GBq

Verzending door:	Verzending aan:	Datum:	Vervoers-etiket:	Genoteerde ^{99}Mo -act.:	TI
Producent	Ziekenhuis	Onbekend, vóór vrijdag 28 april	III Geel	88,25 GBq	1,3
Ziekenhuis	Dierenkliniek	Maandag 1 mei 10 u	II Geel	11,6 GBq	0,2
Dierenkliniek	Opleidings-instituut	Maandag 8 mei 10 u	II Geel	1980 MBq	0
Opleidings-instituut	Ziekenhuis	Maandag 15 mei 10 u	I Wit	340 MBq	

Gegevens:

- Werking ^{99m}Tc -koe samengevat:
In een molybdeen-technetium generator is door de producent ^{99}Mo aangebracht. Bij elutie met fysiologisch zout (het 'melken van de koe') lost ^{99m}Tc daarin op. Resultaat is een flesje met ^{99m}Tc opgelost in fysiologisch zout, zoals bij nucleaire geneeskunde wordt gebruikt voor diagnoses.

- **Bijlage, blz. 3-5:** Handboek Radionucliden, A.S. Keverling-Buisman (2^e druk 2007), blz. 120, 122 en 124, gegevens van respectievelijk ^{99}Mo , ^{99}Tc en $^{99\text{m}}\text{Tc}$.
- De activiteit is in het midden van de Mo-Tc-generator gepositioneerd en mag als een puntbron worden beschouwd.
- Om de activiteit heen is zoveel lood aangebracht, dat de door $^{99\text{m}}\text{Tc}$ uitgezonden straling daardoor als volledig geabsorbeerd mag worden beschouwd.
- De transportverpakking van de Mo-Tc-generator is steeds dezelfde standaard type A verpakking, een kartonnen doos van 39 cm × 39 cm × 39 cm.
- De Mo-Tc-generator is in het midden van de doos geplaatst en wel zo dat de activiteit zich precies in het centrum van de verpakking bevindt.

Vraag 1.1a

Wanneer (dag en uur) is de generator verstuurd door de producent, volgens de gegevens op het vervoersetiket?

Vraag 1.1b

Bereken de transmissie van de totale verpakking van de generator, uitgaande van de gegevens op het door de producent ingevulde etiket.

De generator wordt op maandag 15 mei in de originele verpakking vanaf het opleidingsinstituut retour gestuurd naar het ziekenhuis. Voor berekeningen aan het omgevingsdosisequivalenttempo van de generator worden bij het opleidingsinstituut alleen door de producent vermelde getallen gebruikt.

Vraag 1.2

Maak voor maandag 15 mei 2017 een schatting van het hoogste omgevingsdosisequivalenttempo op 1 meter afstand van de ingepakte generator en bepaal tevens de TI voor maandag 15 mei 2017.

In de diergeneeskundige kliniek worden per jaar onder andere ongeveer 100 botskans van honden gemaakt. Eén van de aannames in de risicoanalyse is de volgende voorziene onbedoelde gebeurtenis:

Een hond bij wie 3 uur eerder 1500 MBq $^{99\text{m}}\text{Tc}$ is ingespoten, is net uitgelaten in de speciaal daarvoor



aanwezige uitlaatplek, maar doet toch een plasje op de gang naar de scannerkamer. Hierbij komt 5% van de toegediende activiteit, inmiddels gedeeltelijk vervallen, op de vloer terecht in een plasje van circa 10 ml. Dit plasje wordt opgeruimd door het direct met een gehandschoende hand in celstof op te nemen en in een afvalzak te stoppen. Dit opruimen duurt 1 minuut en gedurende die minuut zijn de handen op 1 cm afstand van de activiteit.

Vraag 1.3

Bereken het omgevingsdosisequivalent ter plekke van de handen voor degene die opruimt, onder de aannames van de voorziene onbedoelde gebeurtenis. Het plasje van 10 ml mag ter vereenvoudiging als een puntbron worden beschouwd.

De dieren gaan pas de dag na het onderzoek naar huis en zijn dus nog geruime tijd na de toediening van de activiteit in de dierverblijven aanwezig. Deze dierverblijven hebben een kleine uitloop naar buiten waar uiteindelijk alle uitwerpselen in de grond terecht komen.

Deze onderzoeken vinden al 40 jaar plaats op diezelfde locatie en met dezelfde frequentie. De belangrijkste ervan, in aantal en met de hoogste ^{99m}Tc -activiteit, staan in tabel 2.

Men is benieuwd naar de activiteit ^{99}Tc die in de grond bij de dierverblijven aanwezig zal zijn.

Tabel 2. Overzicht van de belangrijkste onderzoeken met ^{99m}Tc en de toegediende activiteit, op jaarbasis:

Type onderzoek	Aantal maal per jaar	Activiteit per onderzoek
Botscans	100	$1,50 \cdot 10^9$ Bq
Schildklierscans	100	$1,50 \cdot 10^8$ Bq

Vraag 1.4

Bereken de activiteit van ^{99}Tc in de grond.

Neem hierbij aan dat de dieren gedurende hun aanwezigheid al het toegediende ^{99m}Tc en ^{99}Tc hebben uitgescheiden en dat al het gevormde ^{99}Tc ook daar ter plekke in de grond is achtergebleven.

Vraagstuk 2. Besmetting bij ^{131}I -therapie

Bij behandeling van schildkliercarcinoom wordt aan de patiënt ^{131}I toegediend in de vorm van natriumjodide, nadat de schildklier met tumor zo veel mogelijk is verwijderd. De dosering om het resterende tumorweefsel te vernietigen (schildklier-ablatie) is afhankelijk van de verwachte opname van jodium in het resterend tumorweefsel in de halsstreek.

Gegevens:

- **Bijlage, blz. 6:** Verloop van ^{131}I -opname inclusief verval in twee organen na ^{131}I -ingestie bij de behandeling van metastases, berekend met het HARAS-model.
- **Bijlage, blz. 7-8:** Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (2^e druk 2007), blz. 164-165, gegevens ^{131}I .

Voor een therapeutische schildklierablatie wordt aan een volwassen patiënt oraal (via ingestie) 7400 MBq ^{131}I toegediend. Bij de patiënt wordt de blaas continu gelegegd door middel van een blaaskatheter. De urine wordt verzameld in een kunststof reservoir voorzien van stralingsafscherming.

Vraag 2.1

Verklaar waarom het continu legen van de blaas een aanzienlijke dosisreductie kan geven voor de patiënt. Maak hierbij gebruik van het opnameverloop en het vervalschema.

De patiënt wordt 12 uur na toediening agressief, neemt het opvangreservoir uit de afscherming en stoot het reservoir lek. De ontstane besmetting op de vloer wordt schoongemaakt door één medewerker. Daarbij worden maatregelen getroffen om inwendige besmetting te voorkomen. Uit meting blijkt dat een groot deel van de activiteit nog in het reservoir aanwezig is. Het omgevingsdosisequivalenttempo $\dot{H}^*(10)$ van het onafgeschermd reservoir bedraagt 22 $\mu\text{Sv/h}$ op 3,0 meter afstand.

Vraag 2.2

Toon aan de hand van het omgevingsdosisequivalenttempo aan dat de activiteit van de resterende urine in het opvangreservoir circa 3 GBq is. U mag bij de berekening uitgaan van een puntbrongeometrie.

Bij de medewerker die de besmetting heeft opgeruimd wordt door de stralingsdeskundige een veegmonster genomen van de neusholte en de mondholte. Uit analyse blijkt zowel het veegmonster uit de neus als uit de

mond positief. De stralingsdeskundige laat daarom een dag na het incident een meting uitvoeren met een NaI-detector om de activiteit van het ^{131}I in het lichaam te bepalen. De schildklier van de medewerker wordt gedurende 1 minuut gemeten met als resultaat 567 pulsen in de 365 keV- fotopiek. Het achtergrondteltempo in deze fotopiek bedraagt 80 pulsen per minuut. De detectie-efficiëntie voor de 365 keV-fotopiek in deze opstelling bedraagt $1,0 \cdot 10^{-3}$ pulsen per uitgezonden foton.

Vraag 2.3

Schat de activiteit van ^{131}I in de schildklier van de besmette medewerker op het moment dat de meting wordt uitgevoerd.

Vraag 2.4

Geef een schatting van de effectieve volg dosis bij de besmette medewerker. Ga hierbij uit van een inwendige besmetting als gevolg van inhalatie van natriumjodide en maak daarbij gebruik van de bijlage, blz. 7-8, betreffende gegevens ^{131}I .

Vraagstuk 3. Vrijgave van absoluutfilters

Een bedrijf beschikt over een faciliteit waarmee specifieke radionucliden kunnen worden geproduceerd. Eén van deze radionucliden is ^{99}Mo . Tijdens de productie kan er radioactiviteit in de lucht vrijkomen. Om ervoor te zorgen dat er zo weinig mogelijk in het milieu terecht komt wordt er gebruik gemaakt van absoluutfilters. Deze zijn geplaatst in het uitgaande luchtventilatiekanaal.

Na verloop van tijd worden deze absoluutfilters vervangen door nieuwe exemplaren. De KEW-vergunning van het bedrijf schrijft voor dat gebruikte absoluutfilters, voordat ze als afval worden afgevoerd, formeel worden vrijgegeven na het uitvoeren van een geschikte meting. Daartoe wordt een nieuwe opstelling ontworpen, waarbij de filters onder een Ge(Li)-detector worden gelegd. De detector wordt recht boven het midden van het filter geplaatst. Als referentiebron wordt een ^{57}Co -plaatbron gebruikt met dezelfde geometrie als het absoluutfilter.

Gegevens:

- **Bijlage, blz. 9-10:** Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (3^e druk 2007), blz 66-67, gegevens ⁵⁷Co.
- **Bijlage, blz. 3:** Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (3^e druk 2007), blz 120, gegevens ⁹⁹Mo.
- **Bijlage, blz. 5:** Handboek Radionucliden, A.S. Keveling Buisman (3^e druk 2007), blz 124, gegevens ^{99m}Tc.
- De totale massa van het absoluutfilter is 3200 gram.
- Alle metingen zijn uitgevoerd op 1 december 2016 en hebben 30 minuten geduurd.
- De dode tijd mag verwaarloosd worden.
- Op het moment van de meting is ^{99m}Tc in evenwicht met ⁹⁹Mo.
- De voor de 136 keV fotonen van ⁵⁷Co bepaalde efficiency mag gelijk worden gesteld aan die voor de 141 keV fotonen afkomstig van ⁹⁹Mo/^{99m}Tc.

Tabel 1. Resultaten van een referentiemeting (N_b is bruto aantal counts, N_a is aantal counts tijdens de achtergrondmeting).

Nuclide	Energie (keV)	Activiteit (kBq) op 1-4-2015	N_b op 1-12-2016	N_a op 1-12-2016
⁵⁷ Co	136	469	$59,2 \cdot 10^3$	$50,7 \cdot 10^3$

Tabel 2. Resultaten van een meting van een absoluutfilter (N_b is bruto aantal counts, N_a is aantal counts tijdens de achtergrondmeting).

Nuclide	Energie (keV)	N_b op 1-12-2016	N_a op 1-12-2016
⁹⁹ Mo/ ^{99m} Tc	141	$331,3 \cdot 10^3$	$50,9 \cdot 10^3$

Vraag 3.1

Toon aan dat de efficiency van de opstelling voor ^{57}Co -energie van 136 keV gelijk is aan $4,5 \cdot 10^{-4}$ counts per foton.

Vraag 3.2

^{99}Mo en $^{99\text{m}}\text{Tc}$ zenden beide fotonen van 141 keV uit. Verifieer dat de yield van deze gezamenlijke fotonen gelijk is aan 0,828 fotonen per desintegratie van ^{99}Mo , indien de activiteit van $^{99\text{m}}\text{Tc}$ in evenwicht is met de activiteit van ^{99}Mo .

Om de meting te laten slagen moeten de vrijgavegrenzen meetbaar zijn en dus hoger liggen dan de minimaal detecteerbare activiteit (MDA) en activiteitsconcentratie (MDC). Voor zowel de MDA als de MDC geldt als criterium dat deze leidt tot een verhoging van het teltempo met meer dan drie keer de standaarddeviatie van de achtergrond (3σ).

Vraag 3.3

Laat zien dat voor ^{99}Mo de MDA en de MDC kleiner zijn dan de vrijgavegrenzen.

Vraag 3.4a

Bepaal aan de hand van de meting van het absoluutfilter (zie tabel 2) hoeveel activiteit ^{99}Mo er maximaal aanwezig is in het absoluutfilter, inclusief het 95% betrouwbaarheidsinterval (2σ) van deze activiteit.

Vraag 3.4b

Bepaal of het absoluutfilter vrijgegeven kan worden. Houdt hierbij ook rekening met het ontstane $^{99\text{m}}\text{Tc}$, wat in evenwicht is met de activiteit van ^{99}Mo . Dit filter bevat enkel de radionucliden ^{99}Mo en $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Vraagstuk 4. Lecture bottle

Een 'lecture bottle' is een miniatuurgascilinder. In het radionuclidenlaboratorium van een universiteit gaat een docent in één van de zuurkasten een stalen lecture bottle gebruiken, die gevuld is met ^{14}C -gelabeld kooldioxide. De verantwoordelijk stralingsdeskundige voert vooraf een risicoanalyse uit. Hij veronderstelt daarbij aanvankelijk dat de remstraling, die ontstaat als de β -deeltjes afkomstig van het verval van ^{14}C in de wand van de gasfles worden gestopt, verwaarloosbaar is. Na de komst van de lecture bottle voert hij zekerheidshalve toch een meting uit. Op de buitenkant van de gasfles wordt een omgevingsdosisequivalenttempo $\dot{H}^*(10) = 0,17 \mu\text{Sv h}^{-1}$ gemeten bij een achtergrond van $0,06 \mu\text{Sv h}^{-1}$. Hij wil door een berekening verifiëren of deze meetwaarde verwacht had kunnen worden.

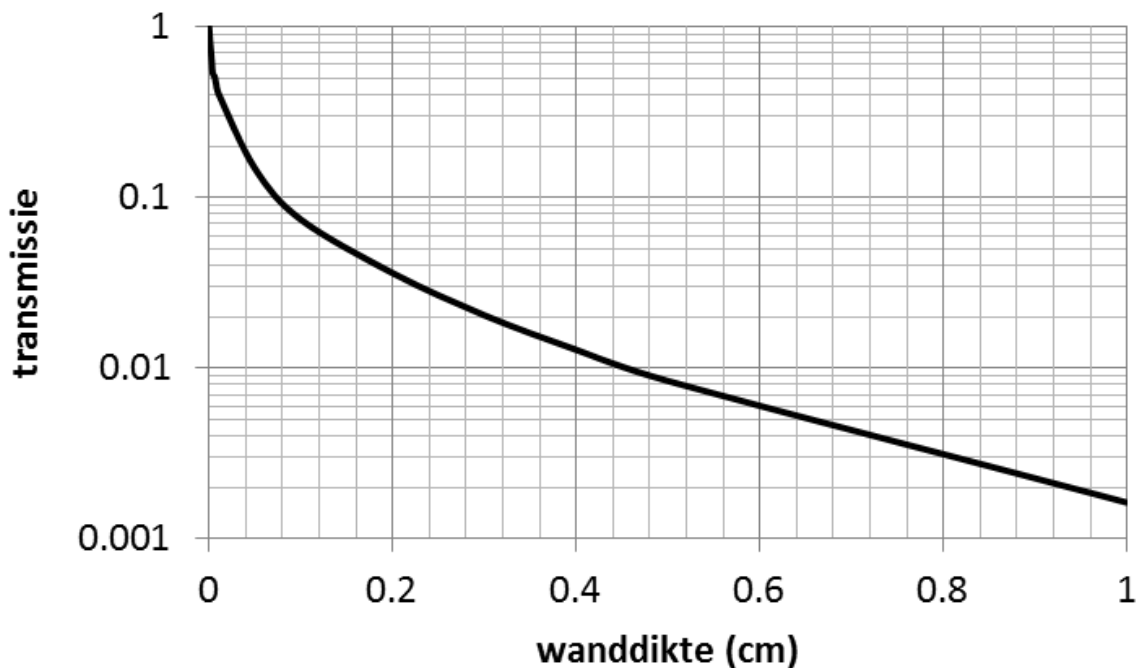


Figuur 1. Lecture bottle

Gegevens:

- Volgens het etiket bevat de lecture bottle een activiteit van $480 \text{ MBq } ^{14}\text{C}$.
- De lecture bottle heeft een lengte van 18 cm, een buitendiameter van 3,2 cm en een wanddikte van 3,0 mm.
- De oppervlakte van de zijwand van een cilinder is $O = 2\pi \times r \times l$, waarbij r de afstand van de as tot de buitenkant van de cilinder is, en l de lengte van de cilinder.
- Voor staal mogen in deze opgave de eigenschappen van ijzer gebruikt worden.

- De dichtheid van ijzer is $\rho_{\text{ijzer}} = 7,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.
- Het atoomnummer van ijzer is $Z = 26$.
- De fractie van de β -energie die wordt omgezet in remstraling is bij benadering gelijk aan $g = 2 \cdot 10^{-4} Z E_{\beta, \text{max}}$.
- **Bijlage, blz. 11-12:** Handboek Radionucliden, A.S. Keeverling Buisman (2^e druk, 2007) blz. 24-25: gegevens ^{14}C .
- **Bijlage, blz. 13:** Interactiecoëfficiënten voor fotonen in ijzer (ontleend aan Inleiding tot de Stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al, 2^e druk, 2007, p.384).
- De dosisopbouwfactor mag in dit vraagstuk gelijk worden gesteld aan $B = 1$.
- **Bijlage, blz. 13:** Dosisconversiecoëfficiënten voor externe blootstelling aan fotonen (ontleend aan Inleiding tot de stralingshygiëne, A.J.J. Bos et al, 2^e druk, 2007, p. 386).
- **Figuur 2:** Transmissie door ijzer van remstraling opgewekt door β -deeltjes van ^{14}C ; Radioisotopes 57 (2008) 605-616.



Figuur 2. Transmissie door ijzer van remstraling opgewekt door β -deeltjes van ^{14}C ; Radioisotopes 57 (2008) 605-616.

Vraag 4.1

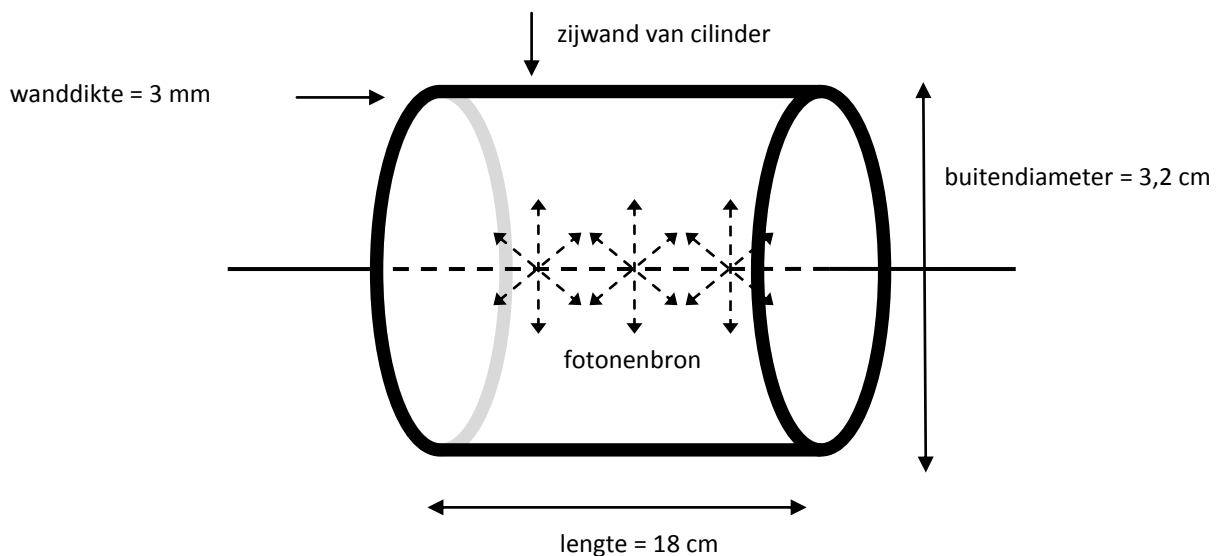
Toon aan dat alle β -deeltjes afkomstig van het verval van ^{14}C in de wand van de gasfles worden gestopt.

Om het vraagstuk hanteerbaar te maken, gaat de deskundige rekenen met een benadering dat er geen ^{14}C in de cilinder zit, maar een mono-energetische fotonenbron, met een energie gelijk aan de bij vraag 4.2 te bepalen effectieve fotonenergie E_{foton} . Deze fotonenbron bevindt zich op de as in het midden van de cilinder en is homogeen verdeeld over die as; zie figuur 3. Het aantal fotonen per tijdseenheid schat hij door de per tijdseenheid geproduceerde remstralingsenergie te delen door E_{foton} .

Vraag 4.2

Bereken op basis van de transmissie door ijzer de 'effectieve' waarde van μ/ρ van ijzer voor de remstraling van ^{14}C . Bepaal hieruit de 'effectieve' fotonenergie E_{foton} (d.w.z. de energie die correspondeert met de berekende waarde van μ/ρ) van de remstraling.

Mocht u het antwoord op deze vraag schuldig blijven, stel dan in het vervolg van dit vraagstuk E_{foton} gelijk aan de gemiddelde β -energie.



Figuur 3. Schets van een segment van de gasfles. De as in het centrum van de cilinder wordt beschouwd als bron van fotonen.

Vraag 4.3a

Bereken de totale per tijdseenheid geproduceerde remstralingsenergie (in $\text{MeV}\cdot\text{s}^{-1}$). Gebruik hierbij de fractie g van de per tijdseenheid afgegeven β -energie.

Vraag 4.3b

Bereken de gemiddelde fluxdichtheid of fluentietempo ϕ (in fotonen $\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) die de denkbeeldige lijnvormige fotonenbron veroorzaakt op de buitenzijde van de gasfles (zie figuur 3). U hoeft geen rekening te houden met de uiteinden van de gasfles: u mag er dus van uitgaan dat de fotonen uitsluitend de binnenkant van de zijwand treffen.

Vraag 4.4

Bereken, uitgaande van het antwoord bij vraag 4.3b, het omgevingsdosisequivalenttempo $\dot{H}^*(10)$ (in $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) op de buitenkant van de gasfles. Indien u het antwoord op vraag 3b schuldig bent gebleven kunt u uitgaan van $40\text{ fotonen}\cdot\text{cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$.