

Radioaktivt Affald

Indhold — Opbevaring — Problemer

Indhold, 1. Del

- 1) Indledning
- 2) Radioaktivt Affald
- 3) Andet Affald
- 4) Behandling af radioaktivt Affald
- 5) Slutdepot
- 6) Sikkerhedsanalyser
- 7) Mellemlager

Indhold, 2. Del

- 1) Isotoper
- 2) Typer af radioaktive Henfald
- 3) Halveringstider
- 4) Baggrundsstråling
- 5) Spaltning af Uran
- 6) Aktivitet
- 7) Afskærmning
- 8) Dosis

1.1) Indledning

Efter at Folketinget i 1985 vedtog, at Danmark ikke skulle have a-kraft, har der været stille om dette emne, og kun store ulykker som Three Mile Island, Tjernobyl og Fukushima har haft offentlighedens opmærksomhed.

Det betyder imidlertid ikke, at vi kan glemme alt om radioaktive stoffer.

De findes i vores omgivelser, og vi bliver ramt af radioaktiv stråling hele tiden (baggrundsstrålingen, se afsnit 2.4). Vi har radioaktivt affald, som stammer fra den nu nedlagte atomforsøgsstation Risø, mens hospitalet, industri og forskningsinstitutioner producerer radioaktivt affald løbende.

Vi kan ikke gøre ret meget for at beskytte os mod baggrundsstrålingen, hvorimod vi kan gøre meget for at beskytte os mod strålingen fra det radioaktive affald.

Spørgsmålet om, hvordan vi skal gøre det, er presserende på grund af den radioaktive strålings farlighed, og vanskeligt, fordi strålingen vil fortsætte i tidsrum af en længde, der langt overstiger, hvad mennesker er i stand til at forestille sig.

Denne rapport er skrevet for at gøre rede for dette spørgsmål. Den er delt i to: Første del beskriver problemer i forbindelse med håndteringen af det radioaktive affald, mens anden del forklarer kort om de fysiske processer, der ligger bag.

Målet har været at skrive en forholdsvis kort redegørelse, og derfor henvises de, der ønsker nærmere besked, til de mange udmærkede bøger, der er udgivet om dette emne.

Rapporten er skrevet ud fra det synspunkt, at mellemlager-løsningen er langt at foretrække frem for slutdepot-løsningen. Jeg har svært ved at se, hvordan man skulle kunne skrive en rapport om dette emne, uden at den er farvet af ens grundholdning. De forsøg, andre har gjort på at skrive "neutralt" om dette emne, er efter min mening alt andet end overbevisende.

1.2) Radioaktivt Affald

Affald fra reaktorer. I en atomreaktor sker der mange forskellige processer, som direkte eller indirekte er fremkaldt af de neutroner, der dannes ved spaltningen af uran-235. Uranet sidder i brændselsstavene, som udover U-235 indeholder U-238, sommetider også plutonium-239.

Ved optagelse af en langsom neutron kan et uran-235-atom spaltes til lettere atomer, hvoraf de fleste er radioaktive med korte halveringstider (mindre end et par uger). Den energi, reaktoren producerer, frigøres for størstedelens vedkommende ved spaltningen og for en mindre dels vedkommende ved henfald af disse kortlivede isotoper.

To af spaltningssprodukterne, Cæsium-137 og Strontium-90, har dog halveringstider, der er så lange (ca. 30 år), at der stadig er meget tilbage af dem, når brændselsstavene tages ud af reaktoren efter brug. De udgør størstedelen af det, der kaldes det "kortlivede" affald, fordi det "kun" er radioaktivt i ca. 300 år.

I en reaktor sker der også processer, hvor uran-238 optager en eller flere neutroner og (via mellemed) omformes til grundstoffer, som er tungere end uran (transuraner). Disse isotoper er alle radioaktive, og nogle af dem skal holdes adskilt fra levende væsener i titusinder af år. De udgør størstedelen af det, der kaldes det "langlivede" affald.

De brugte brændselsstave indeholder derfor en blanding af mange forskellige radioaktive isotoper og er stærkt radioaktive.

Når reaktoren til sidst bliver skilt ad (dekommissioneret), fås en stor mængde affald (bygningsmaterialer mm.), som er blevet forurenset (kontamineret) med radioaktive stoffer, og stoffer, som er blevet radioaktive som følge af den neutronbestråling, de har været ude for. Hertil kommer kontaminerede genstande som beskyttelsesdragter, laboratorieudstyr mm., der har været brugt i forbindelse med håndtering af radioaktivt materiale.

Drift af reaktorer, hvad enten det er til energiproduktion eller til forskning (som for eksempel på Risø), producerer derfor affald, som er mere eller mindre radioaktivt, og som er det i kortere eller længere tid. Det skal altså indsamles og opbevares forsvarligt.

Andet radioaktivt affald. Radioaktivt affald fås også fra:

- sundhedssektoren, hvor radioaktive stoffer bruges til undersøgelser og behandlinger
- industrien
- forskningsinstitutioner
- forskellige andre kilder (for eksempel røgalarmer)

En særlig kategori af radioaktivt affald udgøres af **NORM-affaldet**. Det er affald fra bl. a. olie- og gasudvinding, hvor mængden af naturligt forekommende radioaktive stoffer er blevet forøget som følge af de processer, affaldet har været igennem. Det skal derfor opbevares med samme sikkerhedsforanstaltninger som andet radioaktivt affald.

NORM = Naturally Occurring
Radioactive Material

1.3) Andet Affald

Ved siden af det radioaktive affald opbevarer man på Risø giftige stoffer, som enten ikke er radioaktive eller kun svagt radioaktive.

Metalaffaldet. Det drejer sig om følgende metaller:

- Ca. 2 tons uran
- 50 - 70 tons bly
- Ca. 200 kg cadmium
- Ca. 80 kg beryllium

Affald fra udvinding af uran af malm fra Grønland (Kuannersuit / Kvanefjeldet). På Risø opbevares 1 130 tons "tailings", der er et restprodukt fra denne produktion, og det indeholder både radioaktive og giftige stoffer. Det har en lav, men langlivet aktivitet og afgiver så meget af det radioaktive grundstof radon, at det skal opbevares under vand. Desuden har man ca. 2 000 m³ (4 000 tons, jf. notat 2-2-01) ubehandlet uranmalm plus 1000 m³ underliggende jord, som er forurenet (kontamineret) med radioaktive stoffer.

Disse stoffer er som nævnt ikke radioaktive eller kun svagt radioaktive, men på grund af deres giftighed er det nødvendigt at holde dem adskilt fra levende væsener, for størstedelens vedkommende i tidsrum af helt uoverskuelig længde.

En del af det radioaktive affald findes opløst i vand. Det behandles ved at destillere vandet fra (det er jo ikke radioaktivt) og opbevare resten i **bitumen** (det er hovedbestanddelen af asfalt). På Risø opbevares ca. 40 tons bitumen.

1.4) Behandling af Radioaktivt Affald

Det radioaktive affald skal afskærmes fra levende væsener, og denne afskærmning skal være effektiv, så længe der er radioaktivitet af betydning tilbage i affaldet. Dette kræver enten

- at man **isolerer** affaldet fra alt levende og venter, indtil radioaktiviteten er faldet til et niveau under baggrundsstrålingen

eller

- at man **omdanner** de langlivede radioaktive isotoper til isotoper med kortere halveringstid ved kernefysiske metoder (transmutation)

Isolering. Vælger man muligheden a) og anser en tusindedel af det oprindelige strålingsniveau som uskadeligt, skal man vente 10 gange halveringstiden. Denne grænse kan diskuteres, men den er nem at bruge, og præcise grænser kan man alligevel ikke få, fordi radioaktiviteten jo aftager gradvist i tidens løb (se afsnit 2.3).

For isotoperne Cs - 137 og Sr - 90 (som udgør hovedbestanddelen af det "kortlivede" affald) betyder det, at affaldet skal holdes isoleret i ca. 300 år. Det er tvivlsomt, om man kan lave en indeslutning, bestående af stålbeholdere og betonkonstruktioner, som kan være tætte i tidsrum af denne længde.

Man må derfor enten deponere affaldet i jordlag, der er så tætte og så stabile, at de kan sikre mod udsivning af radioaktivt materiale i tiden efter at de menneskeskabte konstruktioner er blevet utætte. Dette er princippet bag slutdepotet, som er nærmere beskrevet i afsnit 1.5.

Eller man kan anbringe affaldet i en bygning, hvor det overvåges, således at man kan gribe ind, hvis affaldsbeholderne viser tegn på rustdannelse, sprækker eller lignende. Dette er princippet bag mellemlageret, som er nærmere beskrevet i afsnit 1.7.

For affald indeholdende Pu-239 og andre langlivede isotoper skal opbevaringen ifølge dette kriterium være sikker i flere hundrede tusinde år. Det betyder, at hverken slutdepot- eller mellemlager-løsningen kan anvendes alene.

Transmutation. Det er muligt, at det på et senere tidspunkt bliver muligt at omdanne disse langlivede isotoper til andre med kortere halveringstid ved kernefysiske metoder.

Sådanne teknologier findes allerede: De er dels baseret på neutronbestråling (formeringsreaktorer), dels på beskydning af affaldet med energi-rige protoner (spallation). Med de mængder af langlivet affald, der hober sig op i de a-kraftproducerende lande, er der et stærkt incitament til at udvikle disse teknologier til en bedre og navnlig mere sikker form i løbet af de kommende årtier.

Også denne omstændighed taler for at anbringe affaldet i et mellemlager, så man kan hente denne del af det ud på et senere tidspunkt.

1.5) Slutdepot

Ved slutdeponering anbringes affaldet, emballeret i stålcontainere, i betonforede hulrum i jorden. Når depotet er fyldt, lukkes det og overlades til sig selv. Spørgsmålet er derfor, hvor længe disse indeslutninger kan holde.

Det afhænger både af affaldets kemiske sammensætning og af de omgivende jordlag. Men der er almindelig enighed om, at de menneskeskabte spærringer vil blive utætte på et eller andet tidspunkt, spørgsmålet er bare hvornår. Forskellige vurderinger giver forskellige skøn: 100 – 200 år, måske 300 år har været nævnt.

Men selv en tidshorisont på 300 år er utilstrækkelig for det langlivede og det permanent giftige affald. For at gardere sig mod udsivning, efter at de menneskeskabte spærringer er nedbrudt, skal et eventuelt slutdepot placeres i jordlag, der er så tætte, at de kan forhindre udsivning, når de menneskeskabte barrierer ikke længere er effektive.

For tiden er den geologiske vurdering, at det bedste er at anbringe slutdepotet enten i finkornet ler med et højt indhold af organisk materiale eller i sprækkefri granit. De danske myndigheder vurderer, at slutdeponering i den slags lag vil give så lille udsivning, at det kun vil medføre en ubetydelig ekstra bestråling af de mennesker, der opholder sig i nærheden. Sådanne vurderinger er baseret på sikkerhedsanalyser (se næste afsnit).

Der er flere problemer med slutdeponering.

For det første er forsikringer om, at de menneskeskabte barrierer kan være tætte i 300 år, ikke forbundet med nogen form for ansvar på grund af den lange "garantiperiode".

For det andet har de sikkerhedsanalyser, der bruges til at vurdere udsivningen på længere sigt, nogle grundlæggende begrænsninger, som gør, at de efter min mening ikke kan stå alene (se næste afsnit).

For det tredje er der et problem af mere principiell karakter. Det må forudsættes, at de lag, der omgiver et slutdepot, skal bevare deres tæthed i meget lange tidsrum, ja i princippet til evig tid. Hvis der kan ske geologiske forandringer i lagene omkring et slutdepot, som ændrer deres tæthed, bliver hele ideen med slutdeponering af langlivet radioaktivt affald tvivlsom.

Geologien kan ikke give en sådan garanti. Den giver sig af med at beskrive jordskorpens udvikling i fortiden, ikke med at forudsige dens udvikling i fremtiden. Påstande om den fremtidige stabilitet af lagene omkring et slutdepot savner derfor et videnskabeligt grundlag.

1.6) Sikkerhedsanalyser

Til beregning af sandsynligheden for uheld mm. bruges en metode, som kaldes et "Bayesian Network", se for eksempel COWI's "Pre-feasibility Study" fra maj 2011. Den tjener til at give et overblik over alle tænkelige måder, hvorpå et uheld kan ske, og hvilke konsekvenser, det vil få.

Metoden består meget groft sagt i at opdele komplicerede hændelser i simple, hvis sandsynlighed kan bestemmes ad erfaringens vej, hvorefter den samlede sandsynlighed beregnes ved brug af sandsynlighedsregningens regler. Fordelen ved denne fremgangsmåde er, at den giver overblik over beregningerne og sikkerhed for, at man får brugt al relevant viden.

At udregningerne tit bliver enormt indviklede, betyder intet: det tager computerne sig af. Det betyder også mindre, at sandsynlighederne for enkeltbegivenheder kun er kendt med begrænset nøjagtighed, fordi man kan beregne den resulterende sandsynlighed for mange sæt af input-sandsynlighederne, og derved få et indtryk af, hvor meget disse variationer betyder for slutresultatet.

Metoden er et imponerende stykke anvendt matematik, og dens begrænsninger er godt gemt. Men netværket og dermed sandsynligheden for et uheld vil altid være baseret på, hvad modelkonstruktørerne forestiller sig, der kan ske. Hvad der ligger uden for deres synsfelt, eksisterer ikke i modellen. Men det eksisterer sommetider i virkeligheden.

Det er ifølge sagens natur ikke muligt for ophavsmændene selv at vurdere betydningen af disse begrænsninger, for hvis de kendte dem, kunne de jo have inkorporeret dem i modellen. Udenforstående, som fornemmer, at der er noget galt, har svært ved at udtrykke deres skepsis af nogenlunde samme grund som ophavsmændene: De har en fornemmelse, at der kan ske ting, de ikke kan forestille sig, men de kan ikke gøre nærmere rede for denne fornemmelse.

1.7) Mellemlager

(Denne beskrivelse af et mellemlager er inspireret af det hollandske mellemlager COVRA)

Ved mellemlagring opbevares affaldet i en bygning ved jordoverfladen, der er så tæt og så robust, at den kan modstå voldsomme begivenheder som ekstreme vejsituationer, oversvømmelser, jordskælv, gasekspllosioner og flystyrt. Der skal ikke være vinduer eller gulvafløb, så man undgår udslip til omgivelserne, hvis der skulle ske en ulykke inde i lageret. Luftfugtigheden i lageret skal kunne kontrolleres, så korrosion af affaldsbeholderne holdes på et minimum. Bygningen skal kunne holde i mindst 100 år, men skal med passende vedligeholdelse kunne holde endnu længere. Det vil give en senere tids beslutningstagere større frihed mht. hvad der skal ske med affaldet.

Inde i bygningen skal beholderne opbevares, så de kan inspiceres visuelt og repareres, hvis de viser tegn på rust eller sprækkedannelse. Desuden sørger man for, at dele af affaldet kan tages ud, hvis der senere bliver udviklet pålidelige teknologier, der gør det muligt at omdanne de langlivede radioaktive isotoper til mere kortlivede (transmutation, se afsnit 1.4).

Ved pakningen af affaldet skal man sørge omhyggeligt for, at der ikke kommer radioaktivt materiale på ydersiden af beholderne. På den måde kan man opnå, at bygningen som sådan er fri for radioaktivitet og kan bruges til andre formål, hvis affaldet bliver flyttet på et senere tidspunkt.

Mellemlageret skal være åbent for besøg af interesserede, og personalet skal kunne deltage i formidlingen af mellemlagerets formål og funktion. Det skal være et led i en informationsstrategi, der går ud på at afmystificere radioaktive stoffer og radioaktiv stråling, og forklare samfundets politik mht. til disse emner på en saglig og forståelig måde.

2.1) Isotoper

Alt stof på Jorden er opbygget af atomer, og hvert atom svarer til et af ca. 100 grundstoffer med forskellige kemiske egenskaber. Grundstoffer betegnes med et "grundstofsymbol" bestående af 1 eller 2 bogstaver, hvoraf nogle er angivet i tabellen til højre. Grundstofferne kan ordnes i en række efter stigende vægt af atomerne og ordnes i det såkaldte "periodiske system".

Grundstof	Nr.	Symbol
Brint (hydrogen)	1	H
Kulstof	6	C
Kalium	19	K
Iod	55	I
Bly	82	Pb
Radium	86	Ra
Uran	92	U

I løbet det 20. århundrede opdagede man, mange af disse grundstoffer bestod af flere såkaldte isotoper, som er atomer med næsten samme kemiske egenskaber, men som vejer lidt forskelligt. Desuden opdagede man, at der også fandtes radioaktive isotoper af alle grundstoffer.

Radioaktive isotoper er ustabile atomer, der udsender stråling, når de omdannes til andre atomer (henfalder).

En isotop, hvad enten den er radioaktiv eller stabil, betegnes ved grundstofnavnet eller grundstofsymbolet efter fulgt af et tal, for eksempel indeholder uran i naturen to isotoper: Uran-238 (eller U-238) og Uran-235 (eller U-235), mens kulstof indeholder tre isotoper: C-12, C-13 og C-14. Begge uranisotoper og C-14 er radioaktive, mens C-12 og C-13 er stabile.

Blandt isotoperne i det radioaktive affald kan nævnes:

Cæsium-137 (Cs-137) og **Strontium-90 (Sr-90)**, som dannes ved spaltning af uran-atomer i en atomreaktor, altså ved selve den energiproducerende proces. Stabile isotoper af disse grundstoffer (for eksempel Cs-133 og Sr-88) findes i naturen, og de er helt uskadelige.

Plutonium-239 (Pu-239). I en atomreaktor sker der mange andre processer end spaltning af uran-atomer. Blandt andet dannes isotoper af grundstoffer, der er tungere end uran (trans-uraner), og et af disse grundstoffer er plutonium, især isotopen Pu-239. Plutonium-isotoper er meget skadelige, både på grund af den stråling, de udsender, og på grund af deres kemiske giftighed.

Technetium-99 (Tc-99), som bruges til medicinske formål.

Atomets Opbygning, Atomnummer og Massetal

Et atom består af en kerne, som har positiv elektrisk ladning, omgivet af et antal elektroner, som har negativ ladning. Selvom kernen kun fylder en meget lille del af atomets rumfang, indeholder den næsten hele atomets masse (vægt). Kernen består af protoner og neutroner, hvor af de første har positiv ladning, mens neutronerne er elektrisk neutrale. Antallet af protoner i kernen kaldes **atomnummeret**, og det bestemmer atomets kemiske egenskaber. Det samlede antal protoner og neutroner kaldes **massetallet**.

To atomer med samme antal protoner i kernen, men forskellige neutrontal, har næsten samme kemiske egenskaber. De kaldes **isotoper** af det pågældende grundstof. Antallet af elektroner i atomet er det samme som antallet af protoner. Hvis elektroner er fjernet fra eller føjet til atomet kaldes det en **ion**.

Et atom er derfor helt bestemt, hvis man kender atomnummeret og massetallet. I stedet for at angive atomnummeret kan man angive atomets kemiske symbol, som kan findes ved hjælp af det periodiske system. Atomer angives her som det kemiske symbol efterfulgt af massetallet, for eksempel U-235.

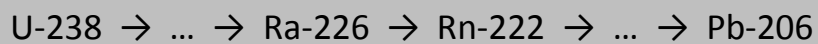
2.2) Typer af radioaktive Henfald

Radioaktive atomer kan henfalde på forskellige måder, hvoraf de vigtigste for radioaktivt affald er

- **Alfa-Henfald** (α -henfald), hvor den radioaktive kerne udsender en kerne af grundstoffet helium (He-4 = alfa-partikel), og omdannes til et lettere grundstof.
- **Beta-Henfald** (β -henfald), hvor den radioaktive kerne udsender en beta-partikel (en elektron), og omdannes til et andet grundstof.
- **Gamma-henfald** (γ -henfald), hvor den radioaktive kerne udsender gamma-stråling, som er elektromagnetisk stråling, beslægtet med Röntgen-stråling og synligt lys. Her sker der ingen grundstof-omdannelse.

Alfa- og beta-henfald er ofte ledsaget af udsendelse af gamma-stråling.

For de tunge grundstoffer gælder, at det atom, der dannes ved henfaldet, ofte selv er radioaktivt, således at man får en kæde af henfald. For U-238 ("uran-familien") fås (med overspringelse af adskillige mellemled):



Både Ra-226 (radium-226) og Rn-222 (radon-222) er alfa-radioaktive, mens det sidste, Pb-206 (bly-206), er stabilt og dermed afslutningen på kæden.

Ved **alfa-henfald** udsendes en kerne af He – 4, som indeholder to protoner og to neutroner. Datterkernens atomnummer bliver derfor 2 mindre og massetallet 4 mindre end moderkernens.

Ved **beta-henfald** omdannes en neutron i kernen til en proton, samtidig med, at der udsendes en elektron (og en såkaldt neutrino). Datterkernens atomnummer er altså 1 højere end moderkernens, mens massetallet er uforandret.

Ved **gamma-henfald** ændres hverken atomnummer eller massetal. Kernen afgiver bare noget overskydende energi.

2.3) Halveringstid

Det tidsmæssige forløb af radioaktive henfald af en bestemt isotop sker gradvist og bestemmes af den såkaldte **halveringstid**.

Har man et stort antal ens radioaktive atomer, henfalder en bestemt brøkdel af dem hvert sekund. Det betyder, at der efter en vis tid (halveringstiden) kun er halvdelen af atomerne (og halvdelen af radioaktiviteten) tilbage, at der efter to gange halveringstiden er en fjerdedel (nemlig halvdelen af halvdelen), og så videre. Efter ti halveringstider (dvs. 10 på hinanden følgende halvinger) er antallet af radioaktive atomer faldet til lige under en tusindedel af det oprindelige:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \left(\frac{1}{2}\right)^{10} = \frac{1}{1024} = \text{ca. } 0,001$$

Halveringstiderne for radioaktive isotoper varierer meget, fra under en milliontedel af et sekund til mange milliarder år.

I affaldssammenhæng kan man se bort fra isotoper med halveringstider, der er kortere end et par uger, fordi de når at henfalde, inden affaldet bliver oplagret. Det gælder for eksempel iod-isotopen I-131, hvis halveringstid er 8 døgn. Den er farlig umiddelbart efter en reaktorulykke, hvor radioaktivt materiale er sluppet ud i omgivelserne, men efter få måneder er næsten al I-131 henfaldet.

I tabellen er angivet henfaldsmåde og halveringstider for nogle isotoper.

Isotop	Sr - 90	Cs - 137	Tc - 99	Rn - 222	Ra - 226	U - 238	Pu - 239
Henfald	β	β	β	α	α	α	α
Halveringstid	29 år	30 år	210 000 år	3,8 døgn	1 600 år	4,5 mia år	24 000 år

Halveringstiden for uran-238 er langt større end halveringstiderne for de senere medlemmer af den radioaktive "familie" (se afsnit 2.2). I stoffer, der indeholder uran (mineraler, radioaktivt affald osv.), vil der altid være små mængder af disse isotoper til stede, blandt andre radium-226 og radon-222. Både radium og radon er opløselige i vand og kan dermed transporteres væk fra mineralet af strømmende vand. Radon er gasformigt, og kan derfor undvige, selvom der ikke er vand til stede. Både radium og radon frigøres i stor målestok ved brydning af uran-holdig malm.

Den eksponentielle Henfaldslov, henfaldskonstanten og halveringstiden:

Radioaktive henfald følger alle den eksponentielle henfaldslov, som kan udtrykkes ved, at hvis der til tiden $t = 0$ er N_0 radioaktive kerner til stede, så vil der til tiden t være

$$N = N_0 \exp(-k t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

Konstanten k kaldes **henfaldskonstanten**, mens konstanten T kaldes **halveringstiden**. De er omvendt proportionale:

$$T = \frac{\ln(2)}{k} = \frac{0,693}{k}$$

Den eksponentielle henfaldslov er en følge af, at en radioaktiv isotop har en bestemt sandsynlighed for at henfalde inden for et kort tidsrum (for eksempel 1 sekund), og denne sandsynlighed er uafhængig af, hvor længe isotopen har eksisteret. Radioaktive isotoper henfalder derfor ikke, fordi de "ældes".

2.4) Baggrundsstråling

Mennesker og andre levende væsener bliver ramt af radioaktiv stråling uafbrudt. Der er flere kilder til denne stråling, som under et kaldes **baggrundsstråling**.

Kosmisk Stråling

Jorden rammes hele tiden af stråling fra verdensrummet (kosmisk stråling). Det meste af denne stråling bliver standset i den øverste del af jordens atmosfære, mens en mindre del når jordoverfladen. Desuden producerer den kosmiske stråling radioaktive isotoper på sin vej gennem atmosfæren, blandt andre C-14 med halveringstiden 5730 år, og tritium, radioaktiv brint, H-3, med halveringstiden 12,3 år. Begge disse isotoper optages det kemiske stofkredsløb på linje med de stabile isotoper af kulstof og brint, indtil de henfalder.

Naturligt radioaktive stoffer i Miljøet

Det stof, hvoraf Jorden (og det øvrige solsystem) blev dannet for ca. 4,5 milliarder år siden, indeholdt forskellige radioaktive isotoper, og enkelte af disse med særlig lange halveringstider har "overlevet" til vore dage. Det drejer sig blandt andet om de to uran-isotoper, U-235 og U-238, samt kalium-isotopen K-40 med halveringstiden 1,3 milliarder år.

Disse stoffer findes i miljøet, K-40 endda i levende væsener. For uran-isotopernes vedkommende findes også deres datterprodukter, blandt andre isotoper af radium og radon. Selvom disse isotoper har langt kortere halveringstider, bliver de hele tiden dannet ved henfald af de foregående medlemmer af den radioaktive familie.

Menneskeskabte radioaktive Stoffer i Miljøet

Radioaktive stoffer, som skyldes menneskelige aktiviteter, findes også i vores omgivelser. De stammer dels fra

- kernevåbensprængninger i atmosfæren, som fandt sted i årene 1945 – 80
- reaktorulykker, hvoraf de bedst kendte er Three Mile Island (1979), Tjernobyl (1986) og Fukushima (2011)

De stammer også fra normale processer i tilknytning til a-kraft. Der er udslip af radioaktive stoffer fra

- brydning af uran
- fremstilling og transport af brændselsstave
- selve driften af reaktorerne
- oplagring af radioaktivt affald

Endelig stammer de fra

- medicinsk og anden brug af radioaktive isotoper

Apparater som Röntgen-apparater, acceleratorer og lignende afgiver stråling, som er beslægtet med radioaktiv stråling.

2.5) Spaltning af Uran

Uran i naturen findes som en blanding af to isotoper, U-235, som udgør 0,7 % og U-238, som udgør 99,3 %. U-235 kan optage en "langsom" neutron (en neutron med lille kinetisk energi), hvorefter den dannede uran-isotop kan spaltes i to lettere kerner samt 2 – 3 "hurtige" neutroner, hvis kinetiske energi er mange millioner gange større end de langsomme neutroners.

En reaktor er udstyret med en **moderator**, som er et stof, der kan bremse neutronerne uden at binde dem til deres atomkerner. På den måde opnår man, at de hurtige neutroner mister deres kinetiske energi. Almindeligt vand, "tungt vand" (som indeholder brint-isotopen H-2 i stedet for almindelig brint, H-1) og grafit (dvs. almindeligt kulstof) er de stoffer, der bruges til dette formål.

Når neutronerne er blevet langsomme, kan de fremkalde nye spaltninger. Ved normal drift af en reaktor producerer hver spaltning i gennemsnit en langsom neutron, således at spaltningerne og dermed energi-produktionen sker i et konstant tempo.

Hvis der af en eller anden grund dannes mere end en langsom neutron for hver spaltning, risikerer man, at reaktoren "løber løbsk" (nedsmelter), og at der sker udslip af radioaktive stoffer til omgivelserne. For at forebygge dette benyttes **kontrolstænger** af grundstoffet cadmium, som meget let optager neutroner. De kan føres ind i reaktoren, hvis den er ved at løbe løbsk.

De neutroner, som "flyder rundt" i en reaktor i drift kan også reagere med U-238 og (gennem to beta-henfald) omdannes til Pu-239. Optages to eller flere neutroner, dannes andre plutonium-isotoper og isotoper af endnu tungere grundstoffer, Americium, Curium osv.

Neutronerne kan også reagere med andre atomer i reaktoren, og det vil ofte give anledning til dannelse af radioaktive isotoper med kortere eller længere halveringstider (neutronaktivering). De dannede isotoper er for de flestes vedkommende beta-radioaktive.

Nogle eksempler på sådanne radioaktive isotoper er vist i tabellen til højre.

(Kilde: Databog fysik kemi (F & K Forlaget))

Isotop	Halveringstid
Ca-41	103 000 år
Fe-55	2,69 år
Co-60	5,27 år
Ni-63	100 år
Ba-133	10 700 år

2.6) Aktivitet

For en stofmængde, der indeholder radioaktive isotoper (en radioaktiv kilde), angives radioaktivitetens størrelse som antallet af henfald per sekund. Det kaldes kildens **aktivitet**, og enheden for denne størrelse kaldes **1 Becquerel** (1 Bq). Den svarer til 1 henfald per sekund.

I en radioaktiv kilde vil det radioaktive stof ofte være en blanding af flere radioaktive isotoper og være blandet med andre, ikke-radioaktive stoffer. Hvis kilden udelukkende består af en type radioaktiv isotop, vil dens aktivitet være proportional med antallet af radioaktive atomer og omvendt proportional med halveringstiden.

Eksempler:

- 1 g uran-238 har aktiviteten ca. 1250 Bq, mens 1 g radium-226 har aktiviteten ca. 37 000 000 000 Bq. Antallene af uran- og radium-isotoper er omtrent lige store, så den markante forskel i aktivitet skyldes forskellen i halveringstider (4,5 mia år og 1600 år).
- Noget radioaktivt affald har aktiviteten 10 000 Bq. Hvis dette udelukkende skyldes Cs-137, vil indholdet af denne isotop i affaldet være ca. 3 milliardedele af 1 gram. Eksemplet viser, at de radioaktive stoffer i en radioaktiv kilde ofte er en meget lille del af den samlede stofmængde af kilden.
- Naturligt forekommende kalium indeholder en lille mængde af den radioaktive isotop K-40 med halveringstiden 1,3 mia år, og det betyder, at 1 g kalium har aktiviteten 31 Bq. Et voksent menneske indeholder ca. 160 g kalium og er derfor en radioaktiv kilde med aktiviteten ca. 5000 Bq. Aktiviteten er faktisk større, fordi der også er andre radioaktive stoffer i vores krop, især C-14.
- Naturligt forekommende kulstof indeholder en lille mængde af den radioaktive isotop C-14 med halveringstiden 5730 år. En teskefuld sukker (5 mL) har som følge deraf aktiviteten 0,6 Bq. Aktiviteten, hidrørende fra C-14 i et voksent menneske, er omtrent den samme som den, der hidrører fra K-40.

Den eksponentielle henfaldslov (se afsnit 5)

Hvis en radioaktiv kilde indeholder N ens atomer, er aktiviteten (k er henfaldskonstanten og T er halveringstiden)

$$A = - \frac{dN}{dt} = k N = \frac{0,693}{T} N$$

Aktiviteten aftager derfor på samme måde som antallet af atomer.

2.7) Afskærmning

Radioaktiv stråling medfører energi, og når den passerer et stoflag, vil en del af denne energi afgives til stoffet, hvor energien bruges til at ødelægge de atomer og molekyler, stoffet består af. Hvis det sker i dødt stof, betyder det ikke noget, men i levende væv kan de afspore de normale kemiske processer i cellerne.

Radioaktiv stråling kan dels løsrive elektroner fra atomer og molekyler, dels spalte molekylerne. Resultatet er ioner og radikaler (det er "stumper" af molekyler), som let reagerer med andre stoffer.

Jo tykkere stoflaget er, jo større del af den radioaktive strålings energi bliver afgivet i det, og jo svagere bliver strålingen på den anden side af stoflaget.

Dette kan udnyttes til beskyttelse mod radioaktiv stråling. Hvis man omgiver kilden med et tilstrækkeligt tykt lag stof, kan man opnå, at den stråling, der trænger igennem beskyttelseslaget, er svagere end baggrundsstrålingen, altså den stråling, vi ikke kan undgå at blive ramt af. Har man opnået dette, nytter det ikke at gøre mere.

Det viser sig, at den samme mængde stråling afgiver mere af sin energi i tunge stoffer end i lette. Det betyder, at man kan opnå den samme beskyttelse mod stråling ved hjælp af forholdsvis tyndt lag af et tungt stof (for eksempel bly), som med et tykkere lag af et lettere stof (for eksempel beton).

De forskellige typer af radioaktiv stråling afgiver deres energi på forskellig måde, når de passerer et stoflag.

For alfa- og betastråling gælder, at de har en bestemt, maksimal rækkevidde, bestemt af stoffets art og strålingens energi.

Alfa-stråling afgiver sin energi meget hurtigt og kan derfor standses af helt tynde stoflag, for eksempel et stykke almindeligt papir eller nogle få cm luft. Det betyder på den ene side, at alfa-stråling fra kilder udenfor legemet sjældent er farlige, fordi strålingen enten bliver standset af luften eller af de yderste lag af huden. Det betyder på den anden side, at alfa-radioaktive stoffer, der kommer ind i legemet, forvolder maksimal skade, fordi hele strålingsenergien afgives til levende celler.

Beta-stråling afgiver sin energi langsommere, men kan standses af et lag af aluminium på nogle få millimeters tykkelse.

Gamma-stråling er sværest at standse. Den har ingen bestemt rækkevidde, men strålingen svækkes med en bestemt procent ved passage af et stoflag af 1 cm's tykkelse. Procenten varierer med strålingens energi, men groft sagt skal man bruge flere centimeter tykke bly-lag for at svække strålingen til en tusindedel af sin oprindelige værdi. For almindelig beton kræves lag på op i mod 1 meters tykkelse.

Da der ved mange alfa- og beta-henfald også udsendes gamma-stråling, er det stoflag af denne tykkelse, der skal bruges til afskærmning af "blandede" radioaktive kilder, for eksempel radioaktivt affald.

Svækkelse af gamma-stråling i stof

Når gamma-stråling passerer et stoflag, aftager den eksponentielt med stoftykkelsen (på lignende måde som antallet af radioaktive kerner i tidens løb)

$$I(x) = I(0) \exp(-m x)$$

Her er I gammastrålingens intensitet efter at have passeret et stoflag med tykkelsen x , mens m er en konstant, der afhænger af gamma-strålingens energi. Intensiteten halveres ved at passere et stoflag af tykkelsen (**halveringstykkelsen**)

$$x_{1/2} = \frac{0,693}{m}$$

2.8) Dosis

Radioaktiv strålings energi-afgivelse i stof beskrives ved hjælp af den **absorberede dosis**, som er et mål for, hvor meget energi, der afgives per kilo stof. Måles energien i Joule (J), bliver enheden for absorberet dosis (eller bare dosis):

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Joule per kg} \quad \text{eller kort:} \quad 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

Når stråling rammer levende væv, vil den afgive noget af sin energi til de celler, vævet består af. I levende organismer sker der hele tiden et stort antal kemiske processer, som er indbyrdes forbundet, og den energi, som radioaktiv stråling afgiver til vævet, kan påvirke disse processer. Strålingen kan på den måde gribe ind i cellens naturlige funktion, og det kan være skadeligt for individet. Beskadigelse af DNA-molekylerne er særlig farlige.

Strålesyge optræder hos mennesker, der har modtaget en dosis på ca. 0,5 Gy eller mere. En dosis på ca. 5 Gy regnes for dødelig.

Der er stor forskel på omfanget af den skade, de forskellige typer radioaktiv stråling forvolder i levende væv. Ser man på væv, som har modtaget en bestemt mængde energi fra radioaktiv stråling, vil skadevirkningen være meget større, hvis det drejer sig om alfa-stråling, end hvis det drejer sig om beta- eller gamma-stråling.

Dette beskrives ved hjælp af en såkaldt **kvalitetsfaktor**, som på grundlag af erfaringen sættes til 20 for alfa-stråling og 1 for beta- og gamma-stråling. Den samme mængde energi, afsat i et bestemt stykke levende væv (en celle eller et organ, for eksempel) er altså tyve gange så skadelig, hvis den afsættes af alfa-stråling, som hvis den afsættes af beta- eller gamma-stråling.

Dosis multipliceret med kvalitetsfaktoren kaldes den **ækvivalente dosis**. Den måles i enheden **Sievert (Sv)**. Bor man i Danmark, modtager man en ækvivalent strålingsdosis på 0,2 – 0,6 mSv om året fra naturlige kilder.

Det skal understreges, at den ækvivalente dosis kun giver en gennemsnitlig beskrivelse af de skader, som radioaktiv stråling forårsager på levende væv. Der er forskel på skadevirkningen, hvis strålingen rammer hele kroppen, eller hvis den kun rammer et enkelt organ. Dertil kommer, at skadevirkningen ikke kun afhænger af den ækvivalente strålingsdosis, men også af, præcist hvilke molekyler, der bliver ramt, og hvordan de bliver spaltet eller ioniseret.