

Billedet er fra en lagerhal til midlertidig opbevaring lavradioaktivt affald i metaltønder. Foto: Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT), CC BY-SA 4.0.



ATOMAFFALD

kræver langtidsplanlægning



Forfatteren
Nicolaj Kofod er uddannet ph.d. fra Københavns Universitet. De sidste to år har han arbejdet som postdoc på University of Manchester.

Hans forskning omhandler sjældne jordartsmetaller og nu også uran og atomkraft. Han er særligt interesseret i disse metaller elektroniske og foto-fysiske egenskaber, og hvordan de opfører sig i opløsning.

Hans forskning er støttet af Carlsbergfondet og Danmarks Frie Forskningsfond.
nicolaj.kofod@chem.ku.dk

Faktaboksene er udarbejdet af Aktuel Naturvidenskab.

Håndteringen af det radioaktive affald fra atomkraftværker – dvs. det brugte brændsel – har historisk været et af de helt store emner i debatten om atomkraft. Et nyt dansk forskningsprojekt skal se nærmere på et aspekt af denne affalds-problematik, nemlig hvordan uran opfører sig i vandige miljøer.

Danmark drukner i regn, og Sydeuropa koger – det er efterhånden svært at undgå at bemærke effekten af klimaforandringerne i Europa. Og selv om både Europa og Danmark udleder mindre CO₂ nu end omkring årtusindskiftet, stiger den globale CO₂-udledning stadig støt. I bestræbelserne på at gøre Danmark uafhængig af fossile energikilder er en gammel debat nu begyndt at røre på sig igen: Atomkraft.

Atomkraft er unik blandt grønne energikilder, fordi et kernekraftværk – modsat for eksempel vind-

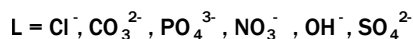
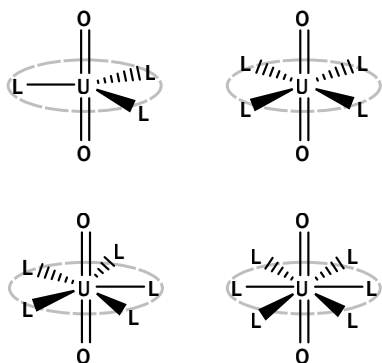
og solenergi – ikke er afhængig af vejret. Og den enorme energidensitet i atombrændsel bringer CO₂-udledningen per kilowatt på niveau med vind og sol, selv når udledningen forbundet med minedrift og konstruktion af kraftværker er taget med. Atomkraft er derfor en vigtig del af verdens fremtidige energiforsyning, og FN vurderer, at vedvarende energikilder som vind og sol ikke alene kan erstatte fossile brændstoffer.

I Danmark blev det i 1985 – efter massivt pres fra befolkningen – besluttet, at der ikke skulle være kerne-

kraftværker i Danmark. Men siden da er folkestemningen vendt, og nye meningsmålinger viser, at størstedelen af danskerne er positivt stemt over for mulighederne for atomkraft.

Fra uranmalm til atomaffald

En af de helt store udfordringer ved atomkraft ligger i håndteringen af atombrændstoffet. Fordi radioaktivt henfald kan være en langvarig proces, skal affaldshåndtering tænkes flere generationer frem. Hvis du havde arvet en tønde med atomaffald fra Julius Cæsar i år 44 før vores tidsregning, ville du skulle vente yderligere 2.000 år, før



Den lineære form af ionen molekylet uranyl (UO_2^{2+}) gør, at der i et bælte omkring uranatomet kan bindes 3-6 negativt eller delvist negativt ladede ligander via elektrostatiske kræfter.



Billedet viser det midlertidige opbevaringsbassin til brugt atombrændsel på atomkraftværket Fukushima Daiichi i 2013. Hertil overførte man brændsel fra reaktor 4, som blev beskadiget ved en hydrogeneksplosion fire dage efter tsunamien i 2011. Foto: Greg Webb / IAEA CC BY-SA 2.0

radioaktiviteten i affaldet var faldet til samme niveau som uranmalmen, det blev produceret fra – og mindst 100.000 år mere, før radioaktiviteten kan tolereres. Den tidsskala gør det enormt vigtigt, at vi forstår, hvordan komponenterne i atombrændsel opfører sig – både i designede systemer som geologiske depotfaciliteter og midlertidige opbevaringsbassiner samt i naturlige miljøer i tilfælde af udslip.

Atombrændselscyklussen starter ved udvindingen af uranmalmen, typisk i Kasakhstan, Canada eller Australien. Uranmalmen oparbejdes, og det rene uran bliver konverteret til uranhexafluorid (UF_6), så det kan blive beriget. Simpelt set foregår det ved, at uranhexafluorid bliver varmet op til kogepunktet (57°C) og centrifugeres. Derved kan man udnytte forskellen i atommassen på de to primære isotoper Uran-235 (^{235}U) og uran-238 (^{238}U) til at opkoncentrere isotopen uran-235, som er den isotop, der driver selve kædereaktionen i atomreaktoren. Typisk skal uran beriges fra 0,7 % uran-235 i naturligt forekommende uran til 2-5 %. Derefter kan den berigede uran omdannes til atombrændsel egnet til kernekraftværket. Anlæg til berigelse af uran findes mange steder i verden, men størstedelen af produktionen foregår i Rusland og Kina.

Gennem brændselsprocessen omdannes uran via fission til lettere grundstoffer, for eksempel radioaktive isotoper af iod, strontium og cæsium. Efter brændselsprocessen er det brugte atombrændsel varmt – både hvad angår radioaktivitet og temperatur. For at håndtere temperaturen sænkes det brugte atombrændsel ned i et midlertidigt opbevaringsbassin. Efter at have opholdt sig der i typisk 1-3 år, er de mest intense, kortlevede isotoper henfaldet, og varmeafgivelsen fra brændslet er reduceret nok til, at brændslet kan overføres til store, solide beholdere med flere beskyttelseslag. Disse beholdere sendes derefter til langsigtet opbevaring i geologiske depotfaciliteter.

Uran udgør klart størstedelen af det brugte atombrændsel (atomaffaldet), omkring 95 procent. Andre grundstoffer som promethium, americium og cæsium, der er dannet i brændselscyklussen, er kritiske at håndtere på den korte bane. I starten bidrager de nemlig med størstedelen af den kraftige radioaktivitet. Men i forhold til langsigtede løsninger er uran en vigtig komponent at kunne håndtere.

Hvor mobilt er uran?

Så længe atomaffald er i sin faste form, bliver det, hvor det er. Men, hvis det kommer i kontakt med

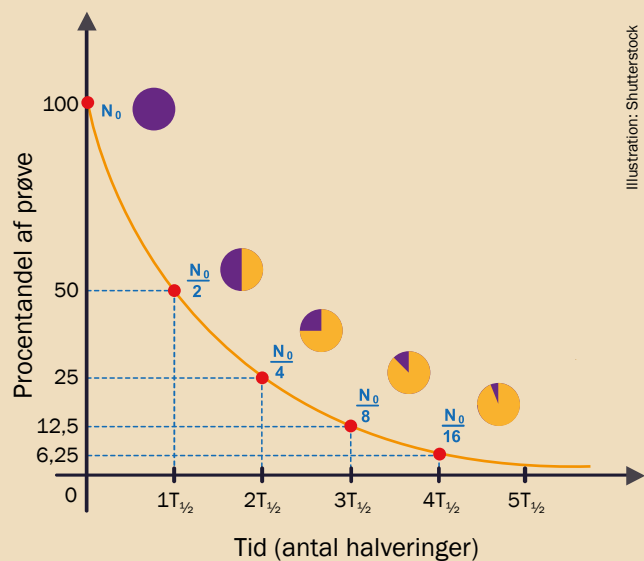
vand, kan det blive opløst og derved flytte sig ud i miljøet. Atomaffaldet bliver altså mobilt. Det kan ske enten ved udslip i de midlertidige opbevaringsbassiner, eller ved at grundvand trænger ind i de geologiske depotfaciliteter.

I vandig opløsning findes uran næsten udelukkende som ionen uranyl. Uranyl dannes ved, at et uran-atom afgiver 6 elektroner fra sin metalliske tilstand og bindes stærkt til to oxygenatomer, så det danner et lineært molekyle med den kemiske formel UO_2^{2+} . Molekylets lineære form frigør et "bælte", hvor negativt eller delvist negativt ladede ioner eller ligander kan binde elektrostatisk til uranyl-ionen. Alt efter bindingsstyrken og størrelsen af ionen kan uranyl have 3-6 ioner bundet. Typen og antallet af ioner, der er bundet til uranyl, kan have stor betydning for, hvor mobil ionen er i forskellige miljøer. Derfor er det vigtigt at forstå, hvordan uran binder sig i forskellige komplekse kemiske blandinger. Hvis vi ved, hvordan uran opfører sig kemisk, kan vi bedre forudsige, hvor uran vil bevæge sig hen i tilfælde af udslip.

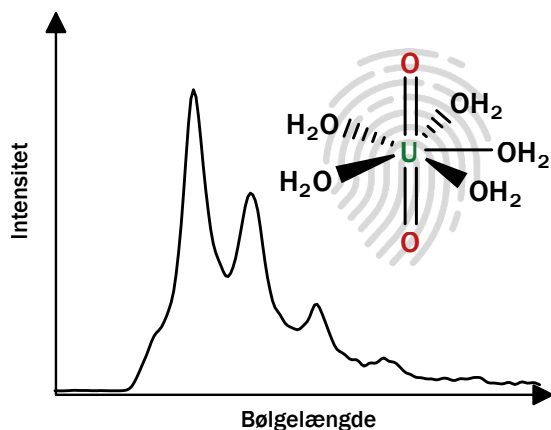
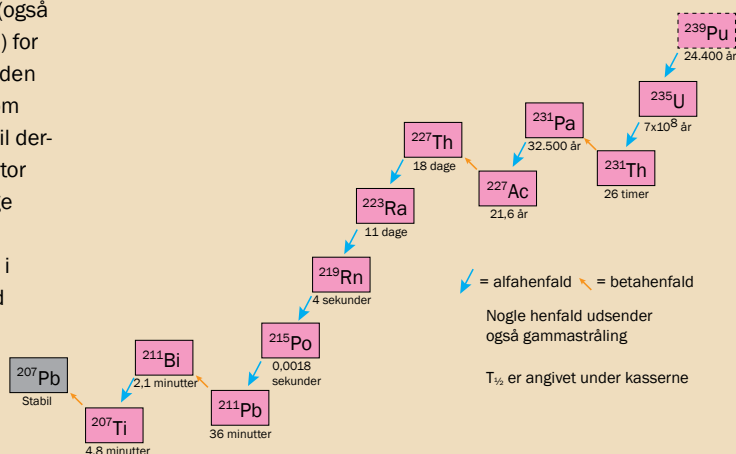
Ny forskning fra England viser, at der kan være god grund til at være opmærksom på netop det. En gruppe forskere fra University of Manchester har undersøgt Uran

Radioaktivt henfald og halveringstid

De to begreber radioaktivt henfald og halveringstid er helt centrale for at forstå problematikken omkring håndtering af atomaffald. Radioaktivt henfald er en proces, hvor ustabile atomkerner spontant omdannes til mere stabile kerner ved udsendelse af stråling. De mest almindelige typer henfald er: Alfahenfald, hvor kernen udsender en alfapartikel (der består af to protoner og to neutroner, dvs. en heliumkerne), betahenfald, hvor kernen udsender en elektron eller en positron (kaldet henholdsvis beta-minus og beta-plus) og gammahenfald, hvor kernen udsender elektromagnetisk stråling med høj energi. Halveringstiden er den tid, det tager, for halvdelen af atomkernerne i et materiale at henfalde. Grafen viser, hvordan henfaldet af et hvilket som helst radioaktivt stof beskriver en eksponentiel kurve.



De fleste radioaktive isotoper henfalder ikke direkte til et stabilt stof, men gennemløber en serie af henfald til den stabile isotop. På figuren ses en sådan henfaldsserie (også kaldet henfaldskæde, i dette tilfælde actinium-kæden) for isotopen plutonium-239, der ultimativt henfalder til den stabile isotop bly-207. Plutonium-239 kan bruges som brændsel i en atomreaktor, og alle de viste isotoper vil derfor være til stede i affaldet. Som det fremgår, er der stor forskel på, hvor lang henfaldstiden er for de forskellige isotoper i henfaldskæden. Nogle har henfaldstider, der skal tælles i sekunder eller minutter, mens andre i dage eller år. Plutonium-239 selv har en halveringstid på 24.400 år (og uran-235 på millioner af år). Derfor er det i sidste ende disse isotoper, der udgør den langsigtede udfordring for opbevaring af atomaffald, selvom nogle af de mere kortlevede isotoper i starten kan bidrage med størstedelen af strålingen.



Figuren viser en illustration af det "molekylære fingeraftryk" af $[\text{UO}_2(\text{H}_2\text{O})_5]^{2+}$, den mest almindelige form af uranyl i vandig opløsning. Spektret vil være unikt for forskellige former for uranyl.

(IV) – dvs. uran, der har afgivet 4 elektroner fra sin metalliske tilstand – i systemer, der efterligner miljøet i midlertidige opbevaringsbassiner, hvor vandet har høj saltholdighed

og et højt indhold af jern. Uran (IV) bliver normalt anset som komplet uopløseligt i vandholdige miljøer og regnes derfor ikke som en mobil form for uran. Men den nye forsk-

ning viser, at Uran (IV) kan danne nanopartikler af uran-silikat, som findes i visse midlertidige opbevaringsbassiner. Da nanopartiklerne er mobile, kan de virke som transportører af uran og derved potentielt være en hidtil ukendt kilde til spredning af uran i miljøet.

Denne problemstilling vil jeg arbejde med de næste to år via en bevilling fra Danmarks Frie Forskningsfond. Min forskning udnytter, at en af egenskaberne ved uranyl er, at ionen er luminiscerende – altså at ionen kan optage og udsende lys. Det spektrum af lys, som ionen udsender, afhænger af den kemiske form og det kemiske miljø, som ionen befinder sig i. Derfor kan spektret bruges som et

Strålingens rækkevidde

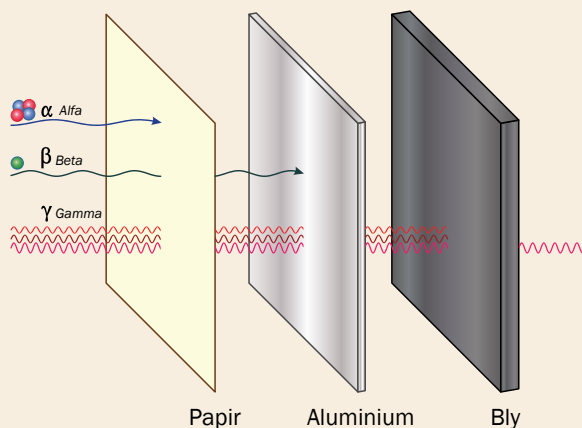
Alle typer af stråling kan være skadelig for levende væv, men i særlig grad alfastråling, fordi alfapartiklerne kan afsætte mest energi i kroppen. Til gengæld er alfapartikler lette at stoppe. De kan for eksempel ikke trænge igennem et stykke papir – eller hud. I den henseende er gammastråling mere problematisk, fordi den kan gennemtrænge mange typer materialer.

Hvordan især gammastråling absorberes af stof kan beregnes ved hjælp af den såkaldte absorptionslov, som har formen $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$

Her er $I(x)$ strålingens intensitet målt i afstanden x inde i et bestemt materiale

I_0 er strålingens intensitet målt ved overfladen af det absorberende materiale.

μ er absorptionskoefficienten, som er karakteristisk for et givet materiale. Materialer som bly, der absorberer megen stråling, har en høj absorptionskoefficient og vice versa.



slags molekylært fingeraftryk. Ved hjælp af avancerede spektroskopiske teknikker kan vi adskille fingeraftrykket for forskellige former af uranyl og derved lave et register med det karakteristiske fingeraftryk af de mest almindelige uranyl-molekyler. Ved at kombinere disse spektre med moderne kvantekemiske beregninger håber vi at kunne forudsige fingeraftrykket af ukendte molekyler og få en dybere forståelse af, hvordan spektret bliver påvirket af kemiske bindinger og det kemiske miljø.

Fortidens synder, fremtidens lektier

Danmark står i en interessant situation i forhold til atomkraft. 40 års politisk forbud har gjort, at Danmark har meget lidt ekspertise indenfor atomkraft og kernekraftværker sammenlignet med vores europæiske naboer. Derfor står et dansk kernekraftværk ikke lige om hjørnet – selv de mest optimistiske bud siger, at det vil tage tæt på et årti. Men det betyder ikke nødvendigvis, vi står i en dårlig situation, hvis vi beslutter, at vi skal have atomkraft.

En af de store fordele for Danmark er, at vi kan lære af vores naboers erfaring uden at stå

med problemet med såkaldt "Legacy Waste" – altså atomaffald fra produktion af atomvåben og atombrændsel i de tidligste projekter, før man havde en god forståelse for, hvordan affaldet skulle håndteres. Mange af disse faciliteter er kendetegnet ved at være nedslidte og indeholde atomaffald i svært håndterbare tilstandsformer – for eksempel i brændselsceller, som er rustet, eller i kontaminerede bassiner.

Sellafield i England – Europas største lagerplads for atomaffald – er et særdeles slemt eksempel på, hvordan Legacy Waste har skabt problemer for fremtidens generationer. Sellafield var hovedsæde for produktionen af Storbritanniens første atomvåben, som blev højt prioriteret under den kolde krig. På grund af det presserende behov for at være med i våbenkapløbet blev affaldshåndtering nedprioriteret. Det har nu efterladt Storbritannien med et meget komplekst atomaffaldsproblem, som vurderes at koste cirka 120 milliarder pund at håndtere over en århundrede lang opryddningsproces, der også involverer etableringen af en geologisk depotfacilitet.

I Danmark har vi en meget begrænset mængde atomaffald,

primært fra forskningsreaktorerne på Risø og fra radioaktive isotoper produceret i medicinalindustrien. I 2016 vurderede en rapport fra rådgivningsvirksomheden COWI og Dansk Dekommissionering, at et mellemlager til at håndtere det danske atomaffald, vil koste cirka 1,5 milliarder kroner over 100 år – håndterer i forhold til Sellafield i England.

Håndtering af atomaffald på den lange bane

Opbevaring af atomaffald på den helt lange bane, dvs. i hundreder af år, kræver geologiske depotfaciliteter – anlæg, der etableres i flere hundrede meters dybde i stabile klippeformationer. Indenfor dette område er Finland lige nu længst fremme i verden. Deres Onkalo-anlæg er i de afsluttende faser til at være klar til at kunne opbevare atomaffald, og efter planen skal anlægget tages i brug i 2026.

Anlægget bygger på den såkaldte KBS-3 teknologi, som er en særlig indkapslingsmetode til det brugte atomaffald der – i teorien – skal sikre mod udslip i op til 100.000 år. Princippet bag KBS-3 teknologien er, at atombrændslet indkapsles i flere beskyttelseslag.

Kilder og videre læsning

Øyen, M. Ny måling: Mere end hver anden vælger er åben for atomkraft i Danmark. *Altinget*, 2023.

International Atomic Energy Agency (IAEA) 1992: Annual Report www.statista.com/statistics/712841/median-construction-time-for-reactors-since-1981

Neill, T.S et al (2018): Stability, Composition, and Core-Shell Particle Structure of Uranium(IV)-Silicate Colloids. *Environ. Sci. Technol.* 52, 16, 9118–9127

The Guardian 23/10-2024: Sellafield cleanup cost rises to £136bn amid tensions with Treasury.

Ingeniøren 25. august 2016: Atomaffald koster 1,5 milliarder kroner over 100 år

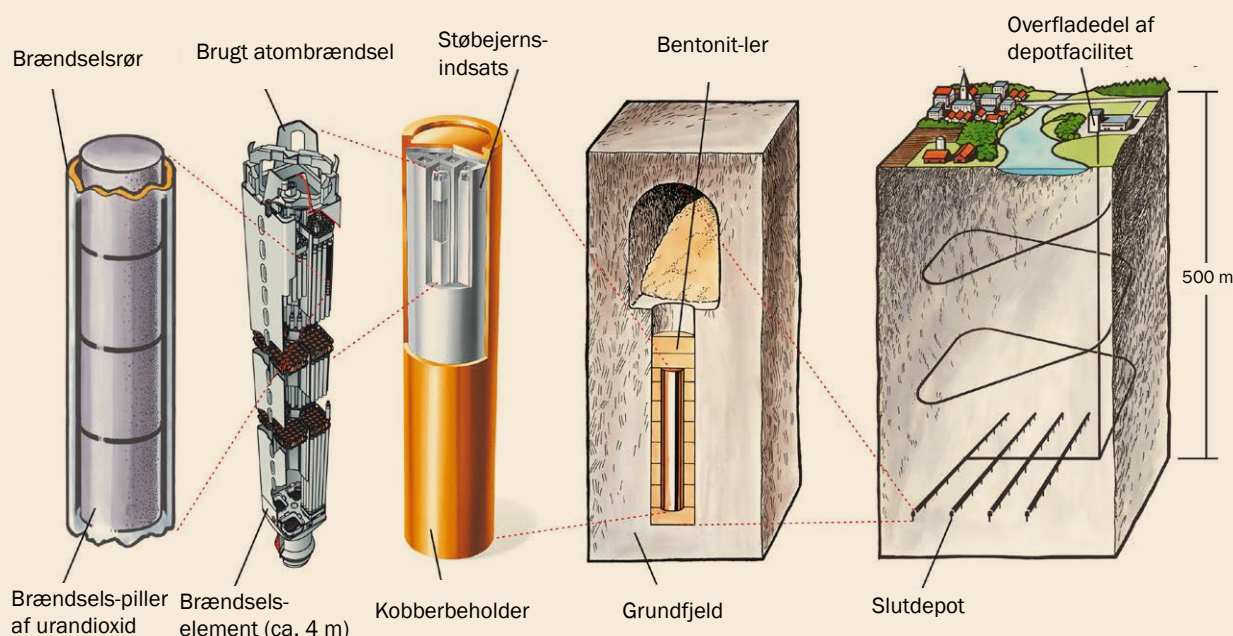
Nuclear Waste Governance – An international comparison. Springer 2015.

Om Onkalo i Finland: www.iaea.org/newscenter/news/finlands-spent-fuel-repository-a-game-changer-for-the-nuclear-industry-director-general-grosi-says

Langtidsopbevaring af atomaffald

I Forsmark i Sverige er konstruktionen af et anlæg med samme KSB-3-teknologi som den finske Onkalo-facilitet blevet påbegyndt her i 2025. Figuren viser, hvordan faciliteten vil tage sig ud, når den er fuldt udbygget – hvilket den først forventes at være engang i 2080'erne. Anlægget vil dog efter planen blive taget i brug indenfor cirka 10 år.

Illustrationer:
SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB).



Figuren viser princippet bag KSB-3-teknologien til geologiske depotfaciliteter til atomaffald. Det brugte atombrændsel bliver samlet i rør som bliver indkapslet i støbejern. Derefter kommer et lag af kobber efterfulgt af et lag af bentonit. Sidste lag er klippegrunden som depotet bygges ind i. KSB-3-teknologi er lige nu den førende teknologi indenfor sikker langtidsopbevaring af atomaffald.

Første og andet lag er et lag af støbejern efterfulgt af kobber, som skal beskytte mod rust og oxidation.

Tredje lag består af mineralet bentonit, som er et porøst og adsorberende materiale. Dette lag kan adsorbere de mobile og hurtigt henfaldende radioaktive isotoper, der løbende dannes i det brugte atombrændsel. Derved bliver disse isotoper fastholdt i bentonit-laget og trænger ikke videre ud af indkapslingen.

Det fjerde og sidste lag er klippegrunden, som anlægget bygges i, og som består af 400-500 meter klippe. Dette lag minimerer mængden af grundvand, der kommer i kontakt med resten af indkapslingslagene.

De fire uafhængige indkapslingslag virker som backup for hinanden – hvis ét lag fejler, vil det næste lag stoppe udslippet.

Selvom Danmark ikke har et oplagt område klar til at opbevare atomaf-

fald, vil vi have over et årtis erfaring fra Finland, før vi overhovedet vil være klar til at begynde at bygge et kernekraftværk.

Er atomkraft så løsningen for Danmark? Svaret er nok mest et spørgsmål om politik. Men uanset, hvad beslutningen bliver, viser atomaffaldet fra Risø og den voksende atomkrafts-industri i Danmark, at vi har brug for ekspertviden og specialister indenfor atomkraft. ■