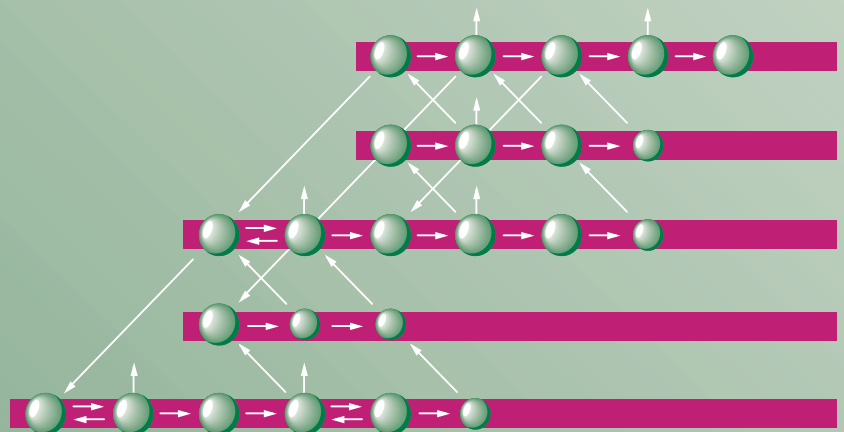


# Levensduurverkorting Radioactief Afval

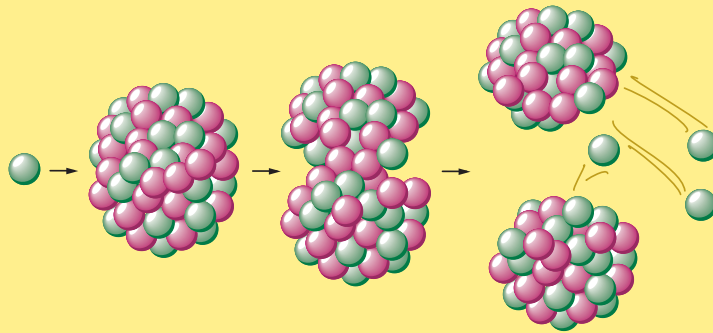
## Optie voor de aanpak van het kernafvalprobleem





# **LEVENSDUURVERKORTING RADIOACTIEF AFVAL**

**Optie voor de aanpak van het kernafvalprobleem**



## Splijting

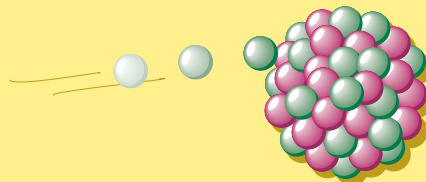
In een kerncentrale wordt uranium verspleten en de bij dit proces vrijkomende energie omgezet in elektriciteit. Dat splijten vindt plaats als een uraniumkern wordt getroffen door een neutron met een bepaalde snelheid. Een neutron is een van de bouwstenen waaruit elke atoomkern (behalve waterstof) is opgebouwd. Bij de splijting van een uraniumkern ontstaan twee, soms drie, nieuwe, kleinere kernen, de splijtingsproducten, en er komen enkele neutronen bij vrij. Als steeds één van die neutronen een volgende uraniumkern doet splijten wordt het splijtingsproces in stand gehouden. In een kernreactor wordt ervoor gezorgd dat de neutronen worden afgeremd tot de juiste snelheid om een uraniumkern te splijten en dat de overbodige neutronen worden weggevangen.

De ene uraniumkern valt uiteen in xenon en yttrium, de andere in bijvoorbeeld jodium en strontium. Zo ontstaan er tientallen verschillende splijtingsproducten die bijna alle sterk radioactief zijn.

Uranium komt in de natuur voor in twee soorten: uranium met 238 kerndeeltjes en uranium met 235 kerndeeltjes. Deze soorten noemt men isotopen. Uranium-235 is gemakkelijk splijtbaar, uranium-238 juist niet.

## Neutronenvangst

Als uranium-238 door een neutron wordt getroffen is de kans dat het neutron wordt ingevangen in de kern groter dan de kans dat de kern splijt. Door neutronenvangst ontstaan zwaardere elementen. Die zwaardere elementen zijn alle radioactief en vervallen uiteindelijk vanzelf weer naar lichtere elementen. Dat zal voor een aantal isotopen echter honderdduizenden jaren duren.



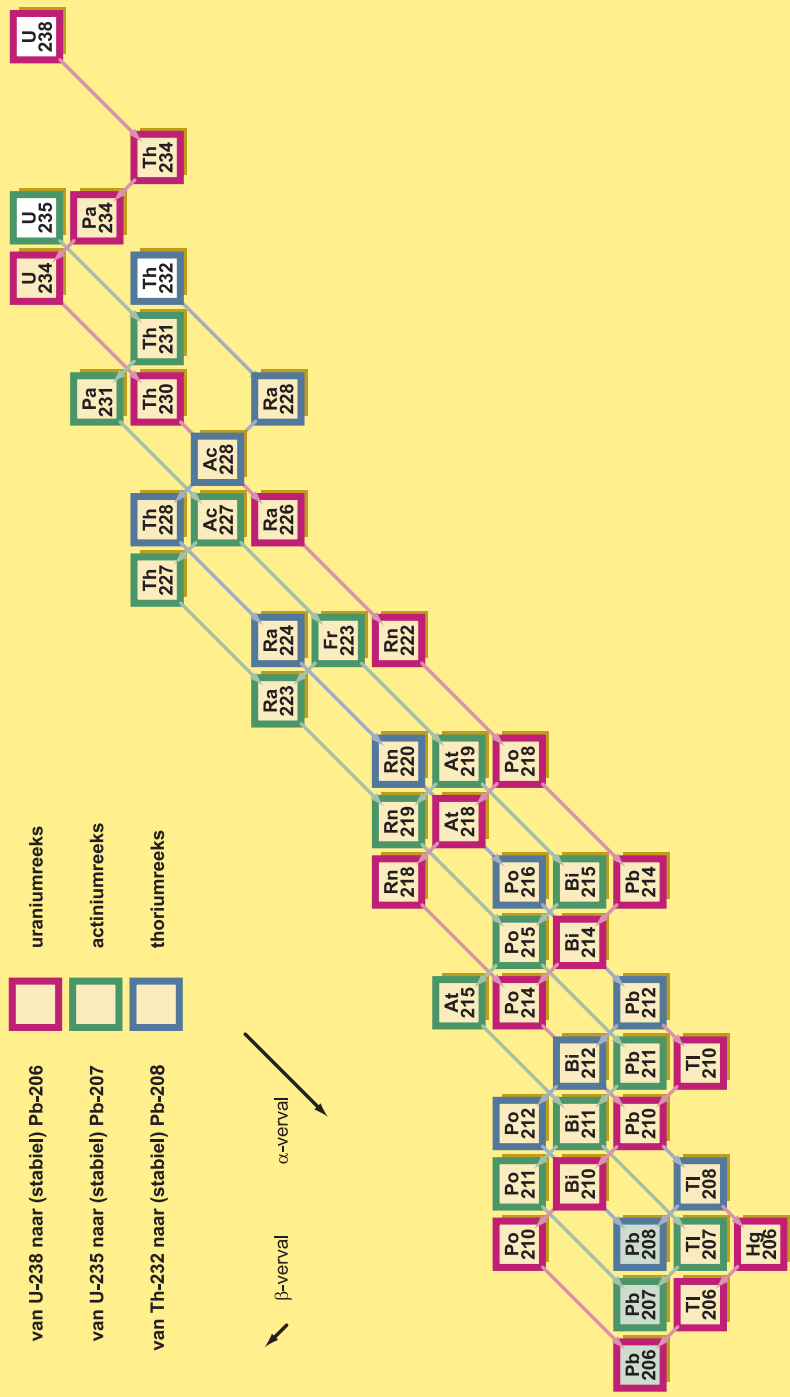
# LEVENSDUURVERKORTING RADIOACTIEF AFVAL

## Optie voor de aanpak van het kernafvalprobleem

**Kernenergie biedt in principe grote mogelijkheden voor de wereld-energievoorziening. Toch wordt kernenergie niet door iedereen omarmd. De bezwaren betreffen vooral het afval. Weliswaar gaat het om relatief geringe hoeveelheden, maar het kernafval is sterk radioactief en blijft dat nog gedurende lange tijd. Naast onderzoek naar opberging in de diepe ondergrond worden daarom ook de mogelijkheden onderzocht om de ‘levensduur’ van het radioactieve afval te verkorten.**

In een kernreactor waar uraniumkernen zijn blootgesteld aan beschieting door neutronen kan een neutron dat een uraniumkern treft die kern doen splijten (zie ook het kader Splijting). Dan valt de uraniumkern uiteen in twee nieuwe, lichtere kernen: de splijttingsproducten. Maar een neutron dat een uraniumkern treft zal niet in alle gevallen een splijting bewerkstelligen. Het neutron kan ook in de uraniumkern worden ingevangen (zie het kader Neutronenvangst). Dan ontstaat juist een zwaardere kern. Dat proces kan zich in de zwaardere kern herhalen zodat steeds zwaardere elementen ontstaan. Uit uranium, met elementnummer 92, worden zo neptunium (93), plutonium (94), americium (95) en curium (96) geboren. Hun chemische eigenschappen lijken sterk op die van actinium (89). Daarom noemt men de verzameling van deze elementen meestal ‘actiniden’. Neptunium, americium en curium worden slechts in heel geringe mate aangemaakt. De Engelsen spreken van ‘minor actinides’ als alleen die drie worden bedoeld. In het Nederlands hebben we voor neptunium, americium en curium geen aparte verzamelnaam.

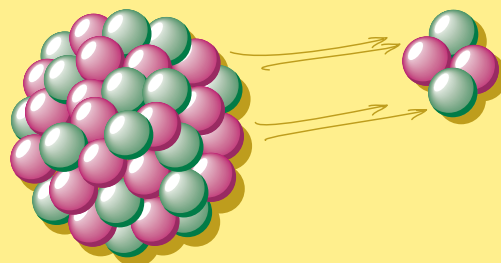
Splijtstof die een paar jaar in een kerncentrale heeft bijgedragen aan de elektriciteitsproductie moet ververst worden. In de gebruikte splijtstof die wordt ontladen hebben zich dan twee soorten radioactieve stoffen gevormd: splijttingsproducten en actiniden. Vrijwel alle splijttingsproducten hebben een relatief korte levensduur. Zij zijn wel sterk radioactief. Immers, hoe sneller een stof zijn activiteit verliest des te sterker hij daarbij straalt. De meeste actiniden zijn langlevend. Zij zijn daarom slechts licht radioactief.

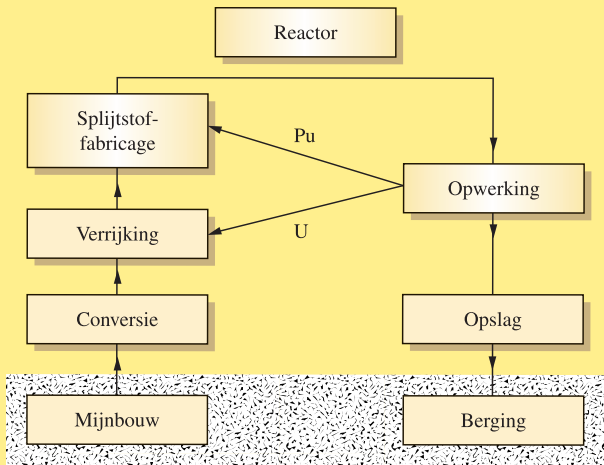


## Radioactief verval

Een radioactieve stof gaat na verloop van tijd over in een andere stof. Die verandering vindt plaats door de spontane uitstoot van deeltjes en/of straling. De nieuw ontstane stof wordt vaak als de 'dochter' aangeduid. Ook deze dochter kan radioactief zijn, evenals de kleindochter. Het vervalproces stopt pas als een stabiele stof wordt bereikt. In de natuur komen drie indrukwekkende voorbeelden voor van zulke vervalreeksen: uranium-238, uranium-235 en thorium-232 zijn radioactief en vervallen naar respectievelijk lood-206, lood-207 en lood-208, drie stabiele loodisotopen. De weg die wordt afgelegd is lang en complex, zie het schema hiernaast dat dit in beeld brengt. Tezamen gaat het om 46 vervallende radioactieve stoffen, waaronder het bekende (gasvormige) radon. De straling die deze stoffen gezamenlijk uitzenden is 90% van de natuurlijke aardse achtergrondstraling. De laatste 10% komt van kalium-40 en rubidium-87, net als het radioactieve uranium en thorium stoffen die bij de vorming van ons zonnestelsel zijn ontstaan en nog niet zijn vervallen.

De zware stoffen die door neutronenvangst in een kernreactor ontstaan, de actiniden, vervallen, met of zonder tussenstappen, in de loop van een paar honderdduizend jaar naar uranium of thorium, en vervolgens via wegen als hier beschreven in de loop van miljoenen jaren naar stabiel lood.





*Figuur 1: De splijstofketen  
Gebruikte splijstof uit een kernreactor bevat nog veel ongebruikt uranium (U) en voorts enig plutonium (Pu) dat uit het uranium is ontstaan. In een aantal landen, waaronder Nederland, wordt gebruikte splijstof daarom nog niet als afval beschouwd. Zij extraheren eerst het overgebleven uranium en ook het plutonium dat eveneens splijtbaar is en weer voor energieopwekking kan worden gebruikt. Dit afscheidingsproces noemt men 'opwerken'.*

*In Zuid-Frankrijk langs de Rhône bij Pierrelatte ligt Tricastin, het grootste nucleaire complex ter wereld. Hier wordt een groot deel van de bovengeschetste splijstofketen in beeld gebracht. Behalve een onderzoekcentrum telt Tricastin een fabriek waar uraniumerts wordt gereedgemaakt voor verrijking, een verrijkingsfabriek, een uraniumsplijstof-fabriek, een fabriek waar uraniumpoeder voor de productie van MOX-splijstof (zie bladzijde 12) wordt vervaardigd en vier lichtwaterreactoren van elk 900 MW elektrisch.*

*Frankrijk beschikt niet over olie- of gasvoorraden, maar wel over uranium en stromend water. Daarom produceert Frankrijk vrijwel al zijn elektriciteit uit waterkracht (15%) en kernenergie (80%).*



## Radiotoxiciteit

De ene radioactieve stof kan voor de mens schadelijker zijn dan de andere. Het verschil zit in het soort straling dat de stof bij zijn verval uitzendt. Stoffen die alfa-straling uitzenden kunnen, in geval van opname in het lichaam, vele malen meer schade aanrichten dan stoffen die bèta- of gamma-straling uitzenden. Dit belangrijke verschil wordt tot uitdrukking gebracht in de grootte radiotoxiciteit (stralingsgiftigheid). Alfa-straling is dus potentieel veel schadelijker dan andere straling, maar daar staat tegenover dat alfa-straling zeer gemakkelijk is af te schermen: een sigarettenvloeijs is al voldoende. Dus ook de (dode) opperhuid houdt alfa-straling al tegen. Maar inslikken en vooral inademen van alfa-stralers kan zeker wèl schadelijk kan zijn.

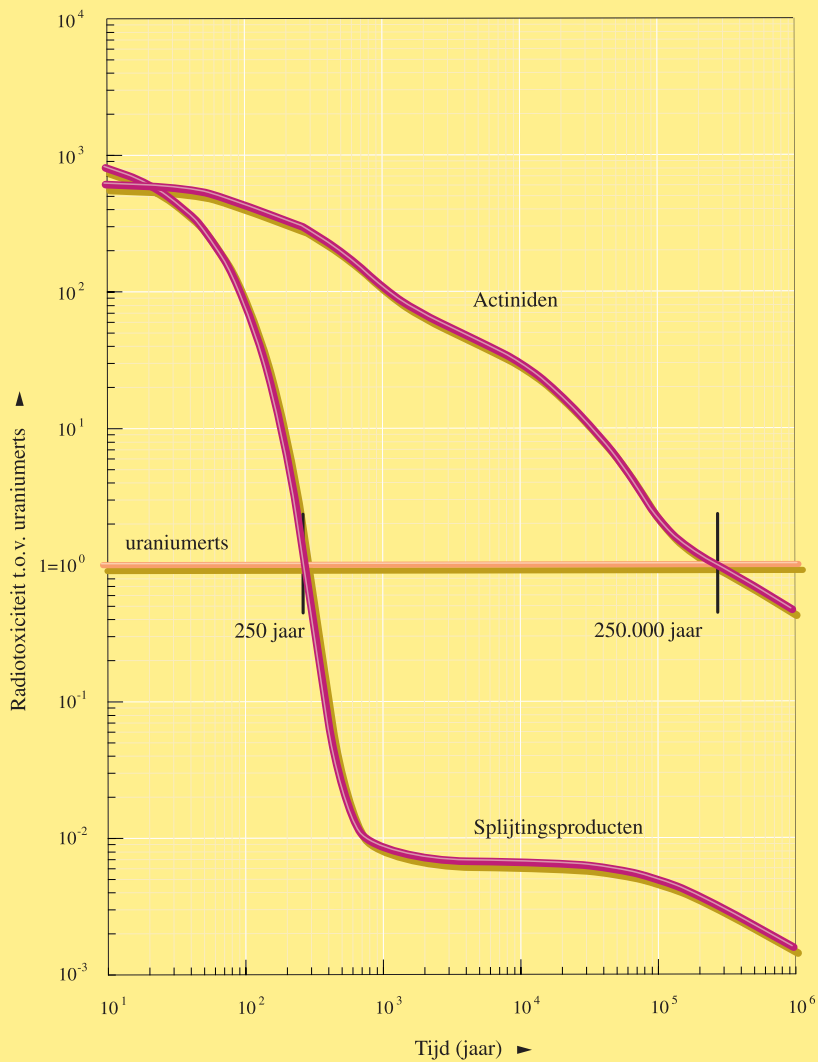
De in gebruikte splijtstof ontstane actiniden zijn alfa-stralers en zij hebben daarom een hoge radiotoxiciteit, die ze bovendien heel lang houden, als gevolg van hun lage radioactiviteit.

---

soort	hoeveelheid	radioactiviteit	radiotoxiciteit
In 100 kg gebruikte splijtstof bevinden zich			
• resterend uranium	95,4 kg	zeer laag	laag
• splijttingsproducten	3,5 kg	hoog	hoog, neemt relatief snel af
• actiniden:			
plutonium	1,0 kg	laag	hoog, neemt langzaam af
overige actiniden	0,1 kg	laag	hoog, neemt langzaam af

---

In figuur 2 is weergegeven hoe de radiotoxiciteit van de splijttingsproducten en die van de actiniden met de tijd verlopen. Om dit verloop over een miljoen jaar goed in beeld te brengen is het nodig een dubbel-logaritmische schaal te gebruiken. Te zien is dat de bijdrage van de splijttingsproducten in de eerste honderden jaren snel afneemt, maar daarna veel minder snel. Dat komt doordat er zich tussen de vele tientallen splijttingsproducten toch ook enkele *langlevende* bevinden, zoals technetium-99 en jodium-129. Toch bepalen de actiniden in feite het verloop van de radiotoxiciteit van het totale afval. Alleen de eerste honderd jaar leveren de splijttingsproducten een significante bijdrage. De totale radiotoxiciteit is in de figuur dan ook niet getekend. Die lijn zou vrijwel geheel samenvallen met de actinidenlijn.



*Figuur 2: Radiotoxiciteit van gebruikte splijtstof, uitgesplitst naar splijtingsproducten en actiniden, als functie van de tijd. De radiotoxiciteit is genormeerd op die van het in de natuur voorkomende uraniumerts waaruit de splijtstof en vervolgens de splijtingsproducten en actiniden zijn voortgekomen. De grootte radiotoxiciteit is gekozen als voor de hand liggende maat voor 'mogelijk gevaar'. Uraniumerts, actiniden en splijtingsproducten zijn voor de mens gevaarlijk als hij wordt blootgesteld aan hun straling, in het bijzonder als die radioactieve stoffen in het lichaam terechtkomen. Als ze goed van de mens worden afgeschermd blijft de radiotoxiciteit even groot als zij is, maar is het effect op de mens nihil.*

## **‘Levensduur’ van kernafval**

Zoals eerder aangegeven is de radiotoxiciteit van een stof een goede maat voor het potentiële gevaar dat die stof voor de mens inhoudt. De tijd die verstrijkt totdat de radiotoxiciteit van kernafval is gezakt tot het radiotoxiciteitsniveau van het erts waaruit het afval is voortgekomen geeft aan hoe lang het afval gevaarlijk blijft, althans gevaarlijker dan dat erts. Deze grootte noemen we de ‘levensduur’ van het kernafval, ook al is de radiotoxiciteit na die periode nog niet nul. Dit laatste is een goede reden om ‘levensduur’ consequent met aanhalingstekens te spellen. Bovendien moet duidelijk zijn dat met ‘levensduur’ niet de fysieke levensduur van het afval wordt bedoeld, hoewel de snelheid van het radioactieve verval de ‘levensduur’ natuurlijk wel in sterke mate bepaalt.

In figuur 2 is af te lezen dat de ‘levensduur’ van alleen de splijtingsproducten 250 jaar is en die van de actiniden (en van het totale kernafval) 250.000 jaar. Verkorting van deze lange ‘levensduur’ is het hoofdonderwerp van dit boekje.

## **Plutonium, een begeerd en verafschuwd actinide**

Plutonium is het 94ste element in het periodiek systeem. Het ontstaat als bijproduct in kernreactoren waarin het, na ontstaan, ook weer voor een deel wordt verspleten. Uiteindelijk bestaat ongeveer 1% van de gebruikte splijtstof uit plutonium. Dit ‘civiele’ plutonium is voor militaire toepassing (kernbommen) niet erg geschikt. Het is een mengsel van verschillende plutoniumsoorten (isotopen) die niet alle even goed splijtbaar zijn. Tijdens de Koude Oorlog werd daarom in speciale militaire reactoren *weapons-grade* plutonium geproduceerd, namelijk het isotoop plutonium-239 dat wel goed splijtbaar is.

Maar in principe kan toch ook civiel plutonium, langs een moeilijk begaanbare weg, worden misbruikt voor de aanmaak van nucleaire explosieven. Aan de aanwezigheid van en de omgang met civiel plutonium kleeft daarom een zogenoemd proliferatierisico (proliferatie = verbreiding), het gevaar dat plutonium in handen komt van terroristen of van landen, *rogue nations* (‘boevenstaten’), die ook over een kernbom willen beschikken. Dit aspect kan uiteraard niet worden veronachtzaamd en daarom is naast fysieke bewaking en beveiliging een uitgebreid internationaal registratie- en controlesysteem ingevoerd dat misbruik van civiel plutonium moet voorkomen.

Tenslotte nog een opmerking over de radiotoxiciteit van plutonium. Die is zonder meer hoog, maar toch niet hoger dan de radiotoxiciteit van natuurlijke alfa-stralers als polonium of radium.

## Natuurlijk en kunstmatig plutonium

Al het plutonium dat tijdens de vorming van onze planeet aanwezig was is inmiddels vervallen. Door de vangst van zwerfneutronen in uranium wordt in de natuur echter continu een weinig plutonium aangemaakt. In uraniumhoudende mineralen (uraniniet en carnotiet) treft men concentraties aan van één plutoniumdeeltje per biljoen deeltjes uranium. In de biosfeer is van dit natuurlijk plutonium niets te vinden. Sinds 1940 komt ook kunstmatig gemaakt plutonium op aarde voor. Het grootste deel daarvan ligt zorgvuldig opgeslagen en is goed van de biosfeer afgeschermd. Helaas is door de bovengrondse proeven met kernbommen een paar duizend kilogram plutonium over de aarde verspreid. Ieder mens heeft daarom nu ook plutonium als één van de tientallen aantoonbare spore-elementen in zijn lichaam.

## Onderzoek naar kernafvalverwerking

Hergebruik van materialen, ketenbeheer, evaluatie van milieuaspecten en risicoanalyse zijn onderwerpen die de laatste jaren bij alle industriële activiteiten ruime aandacht krijgen en ook moeten krijgen. Op deze gebieden heeft 'de' kernenergie zonder meer een voorsprong; zij tracht dit streven al tientallen jaren lang in praktijk te brengen.

In het huidige decennium is het internationale onderzoek naar kernafvalverwerking vooral gericht op:

- het verminderen van de plutoniumvoorraden
- het verkorten van de levensduur van het kernafval (waarvan het verminderen van de plutoniumvoorraden feitelijk deel uitmaakt)
- het produceren van minder langlevend afval (dan hoeft er minder onschadelijk gemaakt te worden).

Ook ECN draagt aan dit internationale onderzoek bij, via het programma RAS (zie kader). Op elk van de drie bovenvermelde onderzoeksterreinen wordt nu nader ingegaan.

## RAS

Begin jaren '90 heeft het Energieonderzoek Centrum Nederland een onderzoekprogramma gestart naar de mogelijkheid om de levensduur van kernsplijtingsafval te verkorten. Dit programma kreeg de naam RAS, Recycling van Actiniden en Splijtingsproducten. In andere landen waren soortgelijke programma's van start gegaan, zoals OMEGA in Japan en SPIN in Frankrijk. In 1993 adviseerde de Algemene Energieraad om RAS in een internationaal kader te brengen. Sindsdien is het programma aanzienlijk geïntensiveerd door financiële steun van het ministerie van Economische Zaken en van de Europese Unie (Vierde Kaderprogramma), en zijn samenwerkingsverbanden tot stand gekomen met Europese en Japanse onderzoekorganisaties.

ECN levert, dankzij zijn experimentele faciliteiten en ervaring van een halve eeuw, en zeker ook dankzij de steun van het ministerie van Economische Zaken, een significante en internationaal gewaardeerde bijdrage aan het langlopende internationale onderzoek naar verkorting van de levensduur van kernafval, zo mag worden vastgesteld. De Pettense hoge-fluxreactor (HFR) speelt een centrale rol in het experimentele deel van het onderzoek in Europa. In de HFR is een serie experimenten uitgevoerd voor het onderzoek aan uraniumvrije splijtstoffen. Recentelijk is in de HFR de technische haalbaarheid van verbranding van americium aangetoond. Eerder zijn monsters van langlevende splijtingsproducten zoals bijvoorbeeld technetium-99 bestraald. Ook deze stoffen zijn onschadelijk te maken, zo laat het onderzoek zien.

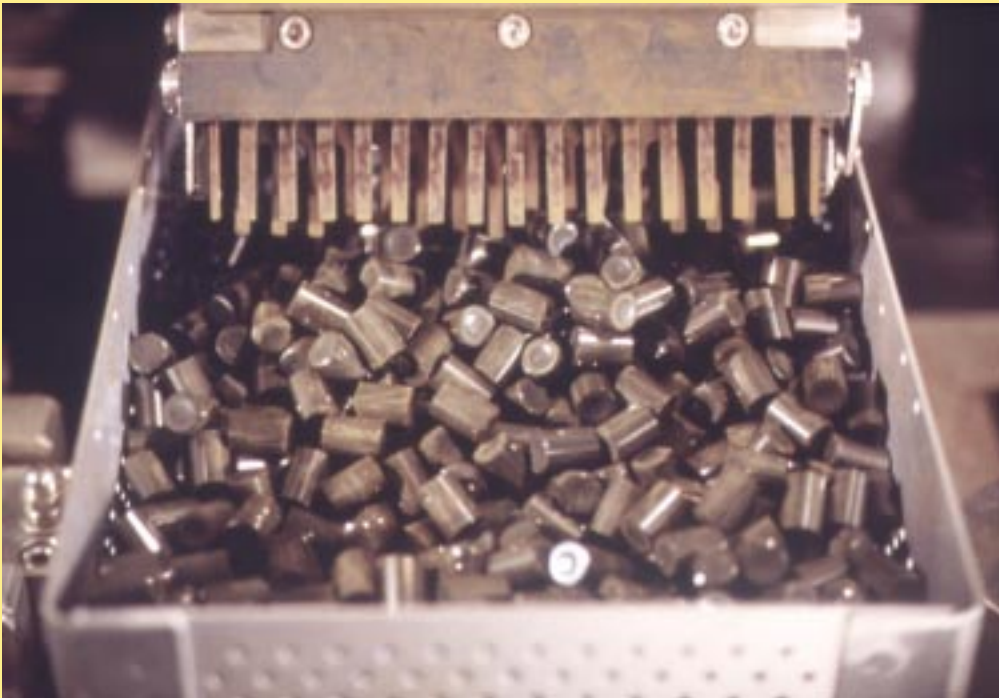


*In het actinidenlaboratorium worden onder meer monsters gemaakt van uraniumvrije splijtstof voor onderzoek in de hoge-fluxreactor. Handschoenkasten zijn nodig om te voorkomen dat de alfadeeltjes uitzendende actiniden in de onderzoeker terechtkomen.*

## MOX-splijstof

MOX-splijstof bestaat uit een mengsel van uraniumoxide en plutoniumoxide. Het oxide is de chemische vorm waarin zowel uranium als plutonium doorgaans worden verwerkt. MOX staat voor meng-oxide, in het Engels *mixed oxide*.

MOX is in feite gewone uraniumsplijstof waarin de splijtbare component, uranium-235, door plutonium is vervangen. Het is gemakkelijk te fabriceren. Men neemt verarmd uranium, dat overblijft bij het maken van verrijkt uranium, en mengt daar een paar procent plutonium doorheen als splijtbare component. Zo ontstaat uitstekende splijstof die overigens duurder is dan normale uraniumsplijstof. De reden om toch MOX te maken ligt dan ook in een ander vlak: beter voor het milieu. Immers, bestaand plutonium wordt nuttig gebruikt en er hoeft aanzienlijk minder uranium gemijnd te worden. MOX is niets nieuws. MOX wordt al jaren gebruikt in reactoren in Duitsland, Zwitserland, België en Frankrijk, waarbij het tot maximaal een derde van de normale splijstof vervangt. Wel nieuw is het onderzoek dat plaatsvindt naar aanpassingen aan de reactor die nodig zijn om de kern met méér MOX te kunnen beladen.



*Tabletten MOX: uitstekende splijstof gemaakt uit plutonium en verarmd uranium, twee 'afval'producten.*

## Verminderen van de plutoniumvoorraden

De hoeveelheid afgescheiden 'civiel' plutonium op de wereld bedraagt ongeveer 100 ton. De opwerkingsfabrieken in Frankrijk (La Hague) en Engeland (Sellafield) voegen daar gezamenlijk jaarlijks 25 ton aan toe. Door ontmanteling van kernwapens zal de voorraad plutonium nog met 120 ton groeien (50 ton uit de USA, 70 ton uit Rusland).

Dit plutonium, in volume overigens niet meer dan een fietsenschuurtje vol, is enerzijds ongewenst vanwege zijn hoge radiotoxiciteit en zijn militaire toepassingsmogelijkheden maar kan anderzijds nuttig worden gebruikt voor energieopwekking.

### *Verbranden én nuttig gebruiken*

Plutonium is een splijtstof die in elk type reactor, dus ook in een 'gewone' reactor (een LWR, lichtwaterreactor), kan worden verspleten. In plaats van versplijten noemt men dat proces ook wel verbranden of opbranden, wat enigszins slordig is, of transmuteren, wat deftig is. Maar hoe dat versplijten ook wordt aangeduid, men raakt het plutonium daardoor (deels) kwijt én er wordt elektriciteit mee geproduceerd. Waarom deels? Omdat er door neutronenvangst in het uranium weer nieuw plutonium ontstaat. In een LWR wordt de kwaliteit van het plutonium ook nog langzaam slechter omdat het nieuw gevormde plutonium voor een deel uit moeilijk splijtbaar plutonium bestaat. Om plutonium in een LWR op te branden kan het eenvoudigste MOX-splijtstof (zie hiernaast), een mengsel van uranium en plutonium, worden gebruikt.

De uitkomsten van het onderzoek naar mogelijkheden om plutonium op te branden zijn in de tabel op bladzijde 15 weergegeven. Een lichtwaterreactor (LWR) die voor een derde met MOX is geladen produceert evenveel plutonium als hij verbruikt. Bij 100% belading met MOX zal de gemiddelde LWR (die 1000 MW elektriciteit genereert) zo'n 550 kg plutonium per jaar verbruiken. Als plutonium in uraniumvrije splijtstof (zie kader) wordt ingezet - dan kan dus geen nieuw plutonium worden gevormd omdat er geen uranium aanwezig is dat neutronen invangt - kan tot 1250 kg plutonium per jaar en per reactor worden verbrand. Ook met thoriumsplijtstof (zie kader) kan dit worden bereikt.

## **Uraniumvrije splijtstof**

De actiniden ontstaan uit het niet-splijtbare deel van uranium (U-238) dat als drager fungeert voor splijtbaar uranium (U-235) of voor een mengsel van splijtbaar uranium en plutonium (MOX). Zo'n drager, ook wel matrix genoemd, is nodig om twee redenen. Hij dient als verpakkings- en verdunningsmateriaal voor de splijtstof en hij fungeert als opslagmedium voor de gevormde splijtingsproducten en actiniden. Als het drager-uranium wordt vervangen door een matrix die geen neutronen invangt zal dat de vorming van actiniden sterk verminderen. In het RAS-programma worden experimenten uitgevoerd met splijtstof met diverse keramische dragermaterialen om te onderzoeken welke van deze materialen geschikt zijn. De splijtstof ondervindt in de reactor namelijk een bombardement van neutronen, alfa-deeltjes en splijtingsproducten dat microscopische schade veroorzaakt waardoor het materiaal na verloop van tijd zijn gunstige drager-eigenschappen zou kunnen verliezen. Inzet van uraniumvrije splijtstof brengt overigens ook reactorfysische nadelen met zich mee waarvoor echter goede oplossingen zijn aan te geven, zo wijst het onderzoek uit.

## **Thoriumsplijtstof**

Een andere mogelijkheid voor uraniumvrije splijtstof zou zijn om plutonium in een matrix te plaatsen van thoriumoxide dat van nature veel minder gevoelig is voor straling. Thorium vangt echter neutronen in waardoor splijtbaar uranium ontstaat, het isotoop uranium-233. De plutoniumvoorraad kan zo dus heel goed worden verminderd, tot twee keer zo efficiënt als met MOX, maar in de plaats van het plutonium ontstaat dan wel een nieuwe, maar kleinere hoeveelheid van een ander splijtbaar materiaal: uranium-233. Deze manier om plutonium te verbranden wordt vooral aantrekkelijk als er vraag zou ontstaan naar een nieuwe generatie reactoren die dan voor thorium als brandstof - preciezer: kweekstof, want de reactor 'brandt' op het gegenereerde uranium - ontworpen zou moeten worden. Een thoriumreactor produceert bijna geen plutonium en andere zware actiniden. En de voorraad thorium op de wereld is vele malen groter dan de voorraad uranium.

*Capaciteit van een lichtwaterreactor om plutonium op te branden, voor verschillende soorten splijfstof*

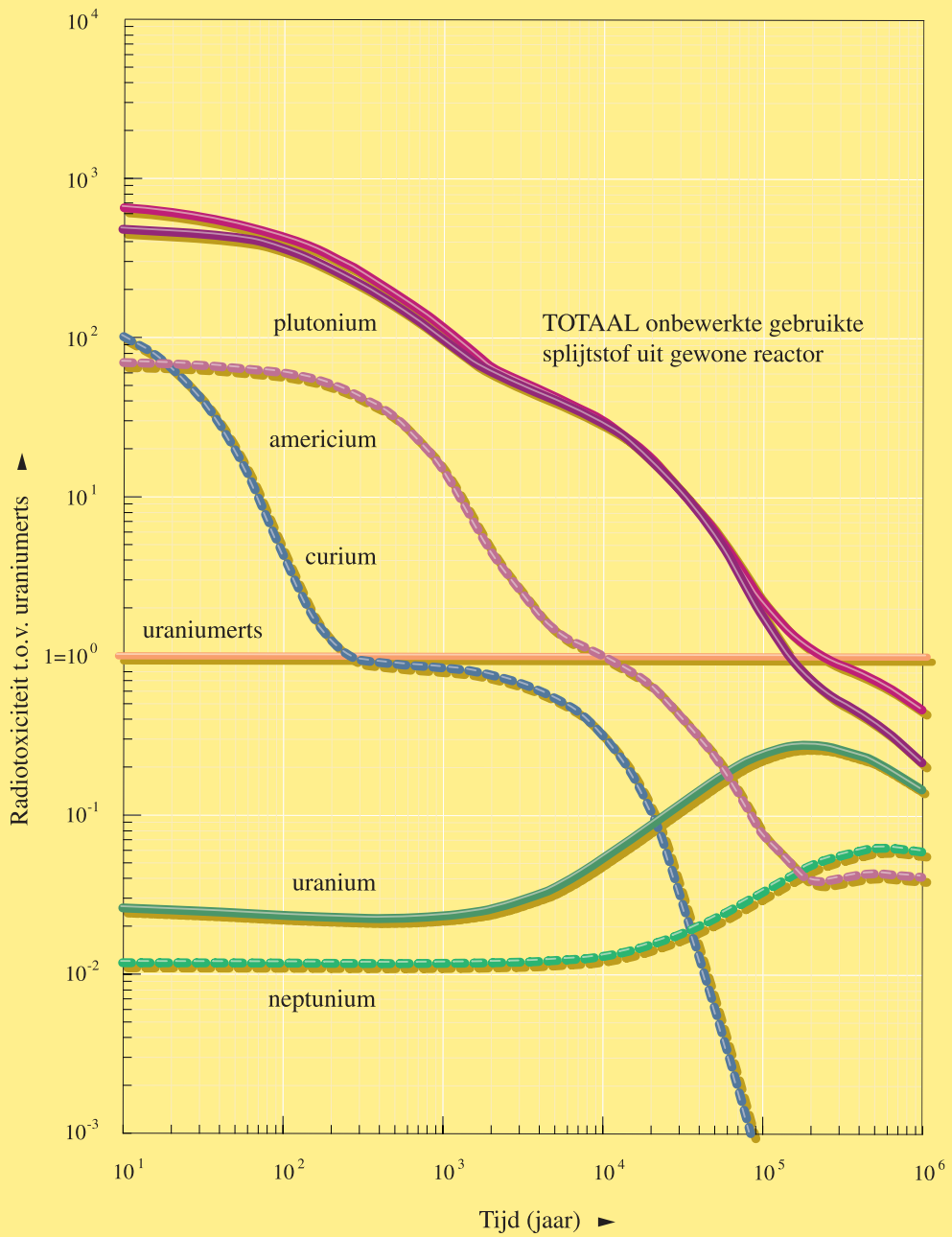
splijfstof	netto plutoniumverbruik (kg/jaar)*	
alleen uranium	- 250	dus: productie
1/3 MOX (=U+Pu) en 2/3 uranium	0	productie=verbruik
alleen MOX (=U+Pu)	550	verbruik
plutonium in thoriumsplijfstof	1000	verbruik
plutonium in andere uraniumvrije splijfstof	1250	verbruik

\* voor gemiddeld bedrijf in middelgrote reactor (reactor die 1000 MW elektriciteit genereert)

De bovenstaande tabel geeft het netto plutoniumverbruik, het verschil tussen de opbrand en de aanmaak van plutonium. Gebruikte splijfstof bevat dus altijd een restant plutonium. Directe opberging van de gebruikte splijfstof is mogelijk - met daarin het restant plutonium - maar het is ook mogelijk om het restant plutonium uit de gebruikte splijfstof te extraheren en dit opnieuw in MOX te verwerken voor verdere verbranding. Opwerkingsfabrieken kunnen daarbij niet gemist worden. En een snelle reactor is nodig als ook de laatste, moeilijk splijt-bare restanten nog onschadelijk gemaakt moeten worden. In de volgende paragrafen komt dit laatste nog uitvoeriger aan de orde.

Bestaande reactoren kunnen zonder meer voor een derde deel met MOX worden geladen. Voor gebruik van splijfstof met een hoger MOX-gehalte dient de reactor aangepast te worden. De te volgen strategie ligt nu voor de hand: allereerst zoveel mogelijk bestaande reactoren voor een derde met MOX beladen. Daardoor neemt om te beginnen de voorraad plutonium minder snel toe. En hoewel de hoeveelheid plutonium in de wereld daardoor niet minder wordt, wordt wel een flink deel daarvan in werkende reactoren ondergebracht. De voorraad opgewerkt plutonium die bij de opwerkingsfabrieken ligt opgeslagen wordt dan dus wel kleiner. De volgende stap kan zijn om reactoren geschikt te maken voor 100%-MOX-belading, of beter nog voor belading met uraniumvrije splijfstof. Dan pas zal de voorraad plutonium echt kunnen afnemen.

Deze strategie geldt de 'gewone' reactoren. Opnieuw gebruikt plutonium kan het meest effectief worden verspleten in een reactor waarin de neutronen een hogere snelheid hebben. Zo'n reactor wordt snelle reactor, maar ook wel plutonium- of actinidenverbrander genoemd. Maar om de plutoniumvoorraad te verminderen is zo'n actinidenverbrander dus voorlopig nog niet nodig.



*Figuur 3:  
Bijdrage van de verschillende actiniden aan de radiotoxiciteit van gebruikte splijtstof*

## Verkorten van de 'levensduur' van het kernafval

Het afval bestaat uit splijttingsproducten en actiniden, het is al eerder gezegd. De splijttingsproducten hebben een veel kortere 'levensduur' dan de actiniden. De radiotoxiciteit van de splijttingsproducten is na een paar honderd jaar al zeer laag, zie figuur 2. Maar de actiniden doen er 250.000 jaar over om te zakken tot het radiotoxiciteitsniveau van het oorspronkelijke uraniumerts waaruit ze zijn voortgekomen. Kan deze 'levensduur' worden verkort?

De verschillende actiniden dragen elk hun portie bij aan de radiotoxiciteit van het afval. Omdat de hoeveelheden actiniden en de snelheid van hun verval verschillen zal de bijdrage van elke stof in de totale radiotoxiciteit met de tijd veranderen. Hoe dat gebeurt is te zien in figuur 3. Er zijn stoffen bij - uranium en neptunium - waarvan de hoeveelheid radiotoxiciteit niet af- maar toeneemt. Hoe is dat mogelijk? Een radioactieve stof vervalt toch, de radiotoxiciteit kan daarom toch alleen maar afnemen? De verklaring is 'ingroei' van dochters. Als de radiotoxiciteit van de dochter of van verder nageslacht groter is dan die van de moeder zal de radiotoxiciteit door het natuurlijk verval toenemen.

### *Opwerken*

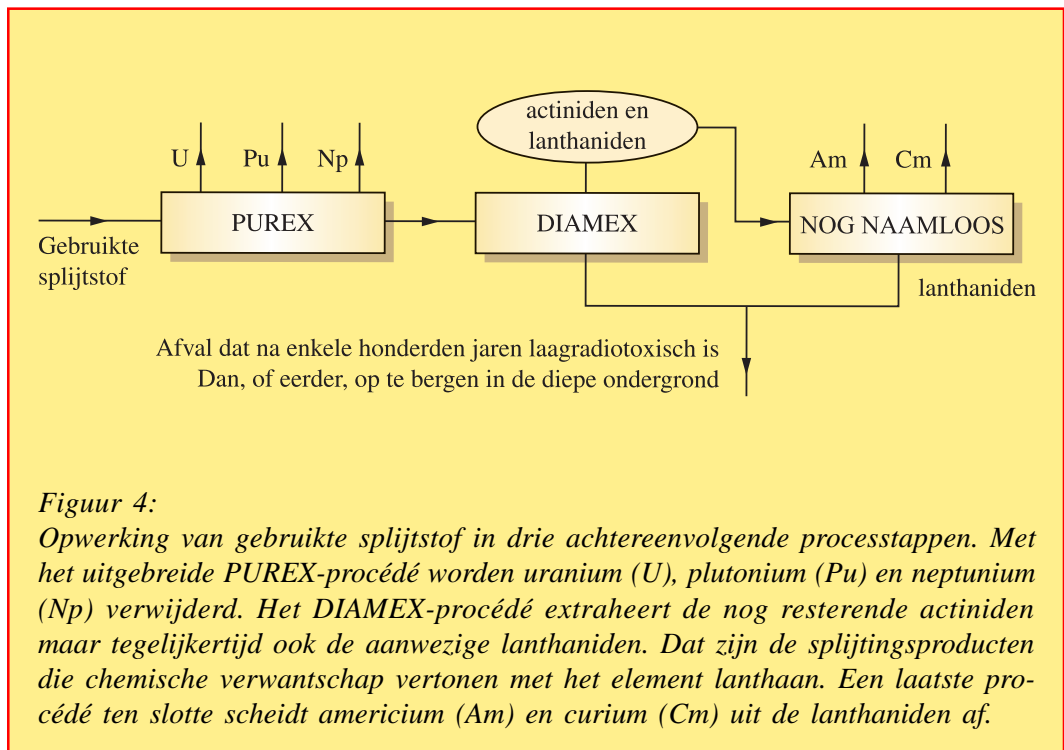
Al decennia lang scheiden Britse, Franse, Amerikaanse en Russische opwerkingsfabrieken uranium en plutonium af uit gebruikte splijtstof. De proces- en bedrijfsvoering is niet altijd overal vlekkeloos verlopen. Het is algemeen bekend: in het verleden zijn rond een aantal opwerkingsfabrieken, zoals overigens ook rond zoveel 'gewone' fabrieken, vervuilingen ontstaan door lozingen van schadelijke stoffen, als gevolg van - vanuit het hedendaags gezichtspunt - onzorgvuldig en nonchalant handelen. De ervaringen uit het verleden en zeker ook de strengere milieuregelgeving hebben echter geleid tot aangescherpte procedures, hogere normen, nieuwe en betere installaties en een andere attitude.

Met aanpassing en uitbreiding van het bestaande scheidingsproces kunnen ook neptunium, americium en curium worden afgescheiden, zo wijst onderzoek uit. Na die afscheiding zal de radiotoxiciteit van het resterende afval al na 250 jaar onder die van het oorspronkelijke erts zijn gezakt. Dat afval zou dan, of al eerder, voor eindberging in aanmerking komen. De oorspronkelijk radiotoxiciteit van de gebruikte splijtstof is uiteraard nog niet verdwenen, maar slechts geïsoleerd door het extraheren van de actiniden. Het verbranden van deze actiniden moet de volgende en laatste stap zijn.

## Verbranden van de resterende actiniden

Americium en neptunium zijn te verbranden in een reactor met snelle neutronen. Neptunium kan het beste in plutoniumsplijtstof, bijvoorbeeld MOX, worden bijgemengd; voor americium zal bij voorkeur uraniumvrije splijtstof moeten worden ontwikkeld. In het RAS-programma zijn reeds proeven genomen met americium in een inerte matrix. Zowel MOX als uraniumvrije splijtstof kan ook in een LWR worden ingebracht, maar daarin duurt het verbrandingsproces beduidend langer. Bovendien is de netto actinidenverbranding niet zo groot omdat in een LWR ook weer relatief veel actiniden worden gevormd.

Ook curium kan het beste in een uraniumvrije splijtstof worden verbrand. Curium laat zich echter minder gemakkelijk in splijtstof verwerken omdat het sterk straalt. Dat laatste kan ook als voordeel worden gezien omdat het daardoor al na 100 jaar vrijwel geheel is vervallen. Dan is het nog niet onschadelijk want het vervalt naar plutonium. Opslag van het curium gedurende honderd jaar en daarna verbranding van het plutonium volgens de eerder vermelde route is dus waarschijnlijk de beste oplossing.



*Figuur 4:*

*Opwerking van gebruikte splijtstof in drie achtereenvolgende processtappen. Met het uitgebreide PUREX-procédé worden uranium (U), plutonium (Pu) en neptunium (Np) verwijderd. Het DIAMEX-procédé extraheert de nog resterende actiniden maar tegelijkertijd ook de aanwezige lanthaniden. Dat zijn de splijtingsproducten die chemische verwantschap vertonen met het element lanthaan. Een laatste procédé ten slotte scheidt americium (Am) en curium (Cm) uit de lanthaniden af.*

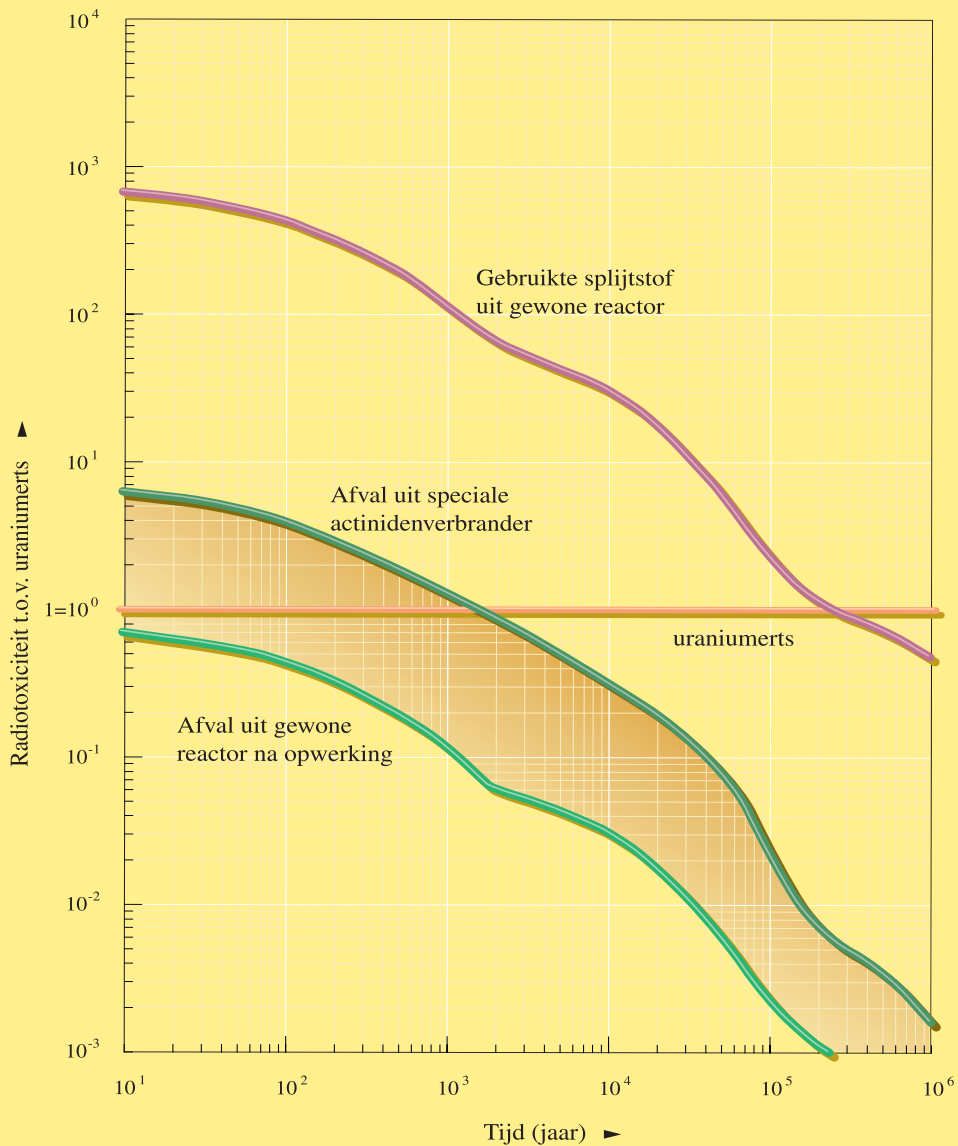
Met het afscheidingsprocédé dat in figuur 4 is geschetst en met speciale actinidenverbranders kan uiteindelijk de 'levensduur' van het kernafval met ruwweg een factor 100 worden teruggebracht tot waarden in de orde van duizend jaar (zie figuur 5). Nieuwe ontwikkelingen zoals een pyrometallurgisch afscheidingsprocédé en versneller-aangedreven actinidenverbranders zoals het 'Rubbiatron' (zie kader) bieden uitzicht op het bereiken van een nog kortere 'levensduur' met 250 jaar als hoogst haalbaar resultaat.

Eventueel zijn in de toekomst ook nog de langlevende splijtingsproducten zoals technetium-99, jodium-129 en cesium-135 aan te pakken. In het RAS-programma zijn hiertoe al proeven ondernomen.

### **Minder langlevend afval produceren**

Als er minder langlevend afval wordt geproduceerd, hoeft er ook minder onschadelijk gemaakt te worden. Hoe valt dit doel te bereiken? Actiniden ontstaan, het is eerder gezegd, door neutronenvangst vooral in uranium-238. Door gebruik te maken van zuivere splijtstof zoals uranium-233 of -235 zullen veel minder zwaardere actiniden worden gevormd. De lichtste splijtstof, uranium-233, geeft wat dit betreft het beste resultaat. Maar uranium-233 komt in de natuur niet voor en moet gevormd (gekweekt) worden uit thorium. Gebruik van thorium vereist daarom een type reactor waarin voldoende neutronen voorhanden zijn voor dit kweekproces.

De ontwerpen voor geavanceerde reactoren die een lagere actinidenproductie hebben liggen al op de tekentafel. Snelle reactoren of systemen zoals het Rubbiatron die gebruik maken van thorium als brandstof lijken de beste vooruitzichten te hebben. Nauwkeurige berekeningen laten zien dat het met thorium mogelijk moet zijn afval te produceren met een 'levensduur' die de limiet van 250 jaar benadert. Overigens - het zij nog eens benadrukt - ook met deze geavanceerde systemen en invoering van thorium als brandstof blijft opwerking van de gebruikte splijtstof nodig. Het ontstaan van actiniden is wel te verminderen maar niet geheel te verhinderen.

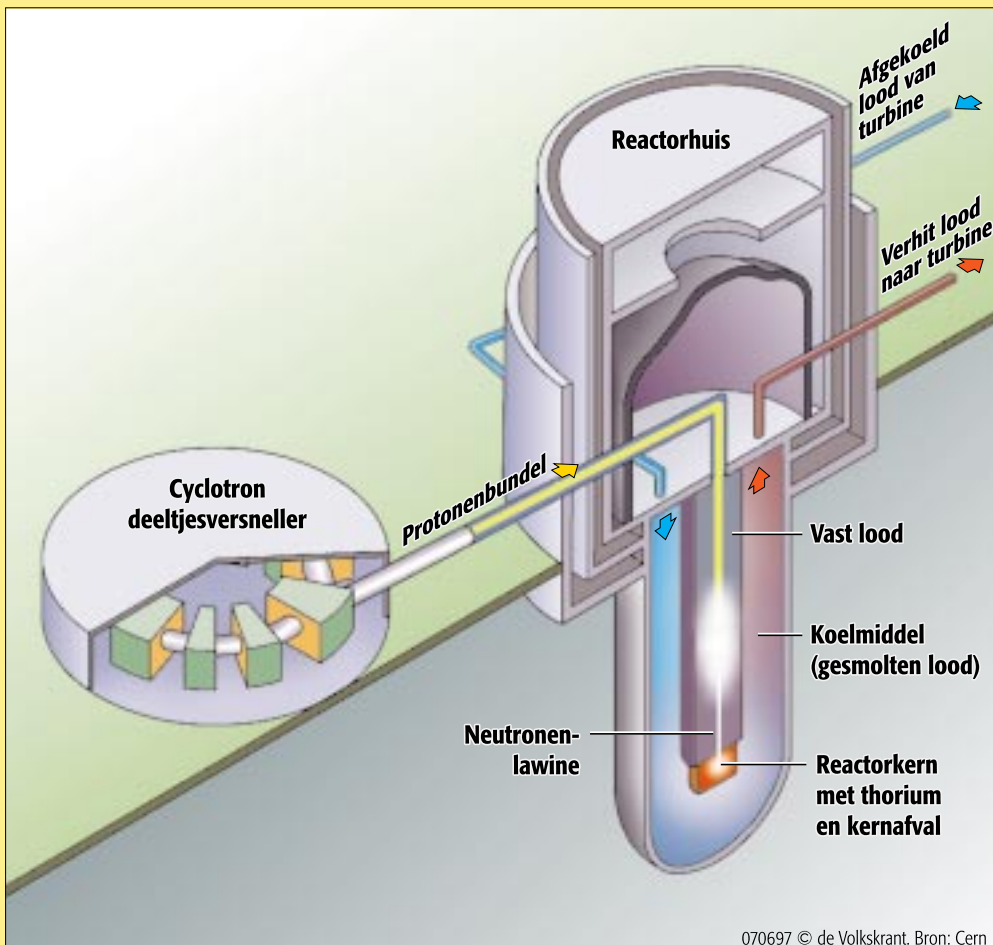


**Figuur 5:**

*Van de actiniden die uit LWR-afval worden afgescheiden en worden toegevoegd aan de brandstof van een actinidenverbrander of een ander snelle-reactorsysteem blijft uiteindelijk toch nog een kleine fractie over. De bijbehorende radiotoxiciteits-curve ligt ergens in het gearceerde gebied. De precieze ligging hangt af van de gekozen recycling-strategie.*

## Het Rubbiatron

Een origineel concept voor een snelle reactor is afkomstig van hoge-energiefysicus en Nobelprijswinnaar Carlo Rubbia. Maak een snelle reactor die net niet in staat is om een kettingreactie te onderhouden. Zet daar een sterke protonenversneller bij en laat de protonen botsen op een zwaar materiaal als bijvoorbeeld lood waardoor een lawine van neutronen ontstaat. Met de extra neutronen erbij kan de reactor zowel energie leveren als zeer effectief actiniden en langlevende splijtingsproducten verbranden. Het systeem kan worden afgeschakeld door de versneller te stoppen.



## Conclusies

De 'levensduur' van kernafval kan sterk worden verkort, door verbranden van de langlevende component, de actiniden. Daarvoor blijft allereerst opwerking nodig - het proces moet zelfs worden uitgebreid - om de actiniden af te scheiden. Het verbranden van de actiniden kan al in gewone, bestaande reactoren starten, maar op termijn zijn snelle-reactorsystemen (actinidenverbranders) nodig om ook de moeilijkst splijtbare restanten te verbranden.

De 'levensduur' van kernafval kan met ruwweg een factor 100 worden teruggebracht van 250.000 jaar tot waarden in de orde van 1000 jaar. Voor verdere verkorting, tot 250 jaar, zijn verbeterde afscheidingsprocédés en actinidenverbranders vereist.

Het afvalprobleem is dus wel degelijk, stapsgewijze, aan te pakken. Hoewel de oplossing niet op korte termijn kan worden gerealiseerd verdient het aanbeveling zo snel mogelijk actinidenafscheiding te introduceren en de splijtbare componenten in gewone reactoren te hergebruiken. De ontwikkeling van geavanceerde opwerking en van snelle-reactorsystemen, bijvoorbeeld op basis van versnellers, vergt 20-25 jaar en zal gezien de kosten in internationaal verband moeten plaatshebben. Hoewel 99,9% van het langlevende afval dan onschadelijk gemaakt kan worden, blijft voor het resterende promille en voor de splijttingsproducten een vorm van goed geconditioneerde eindberging toch noodzakelijk.

Bij verkorten van de 'levensduur' van kernafval worden de grondstoffen door recycling maximaal gebruikt, een bijkomend voordeel.

De moeilijkst splijtbare actiniden moeten in snelle reactoren worden verbrand. Maar om iets aan de plutoniumvoorraad te doen hoeft niet gewacht te worden tot die nieuwe reactoren zijn ontwikkeld. De plutoniumvoorraad is direct aan te pakken.

Verminderen van de groei van de plutoniumvoorraad in de wereld is mogelijk door bestaande reactoren voor een derde met MOX te voeden. Om niet alleen de groei van de voorraden maar ook de voorraden zelf te verminderen moeten de reactoren worden geladen met een grotere hoeveelheid MOX. Daarvoor zijn echter aanpassingen nodig aan de reactor. Het ligt daarom voor de hand allereerst zoveel mogelijk bestaande reactoren tot een derde met MOX te beladen. Dan neemt de voorraad toch al af in die zin dat plutonium uit de opslag nu in de reactoren wordt 'opgeborgen'. Meer efficiënte plutoniumverbranding kan worden verkregen door het ontwikkelen van uraniumvrije splijtstof of splijtstof met thorium als drager.

Tenslotte kan het kernafvalprobleem natuurlijk ook worden beteugeld door gewoon minder langlevend afval te produceren.

Het is mogelijk minder langlevend afval te produceren. De geavanceerde reactortypen die dat kunnen liggen al op de tekentafels. Gebruik maken van thorium als brandstof lijkt de beste vooruitzichten te hebben. Een interessante optie is het Rubbiatron.

## Tot slot

Op grond van de behaalde resultaten is duidelijk hoe het RAS-vervolgprogramma er de komende jaren uit moet zien. Het dient gericht te zijn op:

- onderzoek naar gebruik van 100% MOX in gewone reactoren
- verder onderzoek naar uraniumvrije splijtstoffen
- verder onderzoek naar versneller-aangedreven systemen met thorium als brandstof.

In dit boekje zijn de mogelijkheden van 'levensduur'verkorting van kernafval slechts vanuit technisch-wetenschappelijk oogpunt belicht. Welke van de hier geschetste mogelijkheden ook benut zal of zou moeten worden is vervolgens afhankelijk van de balans van economische en de milieuhygiënische aspecten van opwerken en verbranden van kernafval. Onlangs is in het kader van het RAS-programma een studie gestart naar de milieuhygiënische aspecten, gesubsidieerd door het ministerie van VROM. Onder aanvoering van Frankrijk vindt in Europees verband een studie plaats naar de economische aspecten. Resultaten van dit werk worden in de komende jaren verwacht.

## Colofon

Tekst en algehele realisatie: Jan Heijn, BetaText

in nauwe samenwerking met

dr. Harm Gruppelaar, dr.ir. Jan Leen Kloosterman en dr. Rudy Konings,  
auteurs van 'Advanced Technologies for the Reduction of Nuclear Waste',  
ISBN 90-375-0003-X, het rapport waarin de uitkomsten van het RAS-onderzoek  
voor de vakgenoten zijn vastgelegd

met dank aan de leden van de Begeleidingscommissie RAS-programma:  
prof.dr.ir. C.D. Andriesse, prof.dr.ir. H. van Dam, ir. G.M. van Dijk,  
prof.dr. J.N.C. van Geel (voorzitter), prof.dr. M.N. Harakeh, dr. C.M. Plug en  
drs. R.W.P. Steur voor hun deskundig commentaar

en met dank aan het ministerie van Economische Zaken dat  
het RAS-onderzoek met aanvullende subsidies heeft ondersteund.

Figuren: Onno Bos, Publikatie Services ECN

Infographic: Bert Bruin, De Volkskrant (blz. 21)

Foto's: Patrick Blot (blz. 6)

Aris Homan (blz. 11)

Patrick Lefèvre (blz. 12)

Uitgave

Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten

ISBN 90-375-0002-1

Deze uitgave is telefonisch of schriftelijk te bestellen bij:

ECN-Nucleaire Energie

Postbus 1

1755 ZG Petten

(0224) 56 40 80

Prijs f 25,-

© Energieonderzoek Centrum Nederland, 1998

Overname van gedeelten uit dit boekje is met bronvermelding toegestaan.