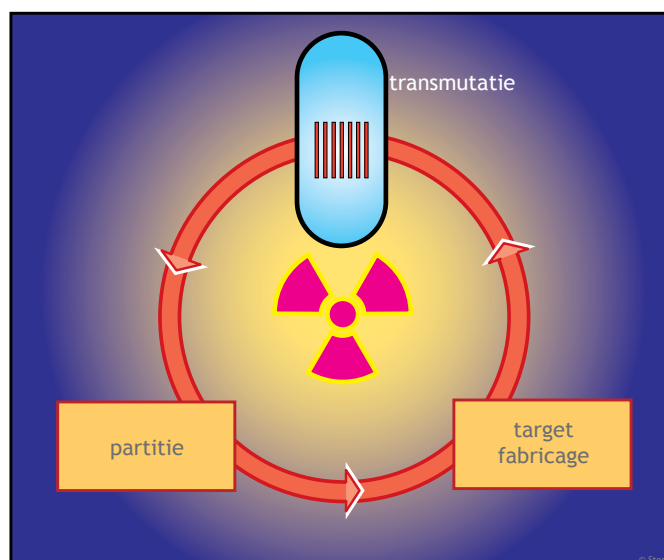


Partitie en transmutatie van radioactief afval



Jan Willem Storm van Leeuwen

Partitie en transmutatie van radioactief afval

Jan Willem Storm van Leeuwen

independent consultant
member of the Nuclear Consulting Group

storm@ceedata.nl

april 2011

Dit rapport is geschreven in opdracht van en gefinancierd door Greenpeace Nederland

Samenvatting

Partitie en transmutatie (afkorting P&T, Engels: partitioning and transmutation) wordt door de nucleaire industrie gepresenteerd als een methode om het probleem van het radioactief afval van kerncentrales tot weinig belastende proporties terug te brengen, door te zorgen dat het minder **langdurig** radioactief blijft. Dit zou bereikt worden door de radionucliden met lange halfwaardetijden om te zetten in radionucliden met korte halfwaardetijden.

Het concept van partitie en transmutatie van radioactief afval omvat een cyclus van drie op elkaar afgestemde processen: een chemische scheidingsfabriek (partitie), een splijtstoffabriek (Engels: target fabrication) en een transmutatiereactor.

De P&T cyclus verkeert nog in het stadium van ontwerp en laboratoriumonderzoek.

P&T kan geen oplossing zijn van het radioactief afvalprobleem

Volgens de nucleaire industrie en de daarmee samenwerkende onderzoeksgroepen zou partitie en transmutatie van radioactief afval een aantrekkelijk alternatief zijn voor de enige optie die er momenteel is: de afgewerkte splijtstof verpakken en opbergen in een diepe geologische bergplaats (Engels: deep geologic repository). P&T zou weliswaar de aanleg van een dergelijke bergplaats niet overbodig maken, maar zou wel de opslagcapaciteit van zo'n bergplaats kunnen vergroten, omdat het volume van het hoog radioactief afval aanzienlijk kleiner zou worden. Het P&T concept heeft de pretentie dat het een afval-arme vorm van kernenergie mogelijk maakt.

Analyse van het P&T concept brengt evenwel een aantal aspecten aan het licht die prohibitief lijken te zijn voor de verwezenlijking van P&T als 'oplossing van het radioactieve afvalprobleem'. Deze aspecten worden hieronder nader toegelicht.

Toename gezondheidsrisico's

Met de keuze voor P&T zouden de chronische radioactieve besmetting van de bevolking en de kans op grootschalige ongelukken met radioactiviteit de komende eeuwen sterk toenemen. De gezondheidsrisico's ten gevolge van radioactieve besmetting zouden daardoor eveneens sterk toenemen. Verschillende factoren dragen bij aan de toename:

- Door de partitie van afgewerkte splijtstof wordt de kunstmatige radioactiviteit verspreid over aanzienlijk grotere volumes en massa's materie. Dit afval zou een lagere concentratie radioactiviteit bevatten, zodat het volgens de nucleaire industrie niet in eenzelfde soort geologische bergplaats hoeft te worden opgeborgen als afgewerkte splijtstofstaven. Echter, een groter volume en verspreiding van radioactief materiaal over meer plaatsen betekenen uiteraard meer kans op vrijkomen van radioactiviteit in het milieu. Bovendien wordt tijdens het proces een deel van de radioactieve bestanddelen routinematig geloosd in lucht en water.
- Transmutatie vergroot de hoeveelheid hoog radioactief afval, door twee effecten:
 - langlevende radionucliden worden omgezet in korter levende, dus intenser stralende radionucliden,
 - in de transmutatiereactor worden nieuwe radionucliden gegenereerd uit stabiele, niet-radioactieve nucliden.
- Door de grotere mobiliteit van de antropogene radioactiviteit in de P&T cyclus – er zijn immers veel transporten nodig – neemt de kans op ongelukken toe.
- Door een langer verblijf van het radioactief afval in voorlopige en steeds onveiliger wordende bovengrondse opslagfaciliteiten neemt de kans op vrijkomen van radioactiviteit toe.
- Door de toename van de operationele lozingen van radioactiviteit in het milieu wordt de bevolking chronisch blootgesteld aan grotere hoeveelheden radioactiviteit.

Onbeantwoorde vraag

Kort levende radionucliden zijn in principe gevaarlijker dan nucliden met lange halfwaardetijden, al zijn ze minder **langdurig** gevaarlijk. De vraag rijst wat de zin is voor de huidige en toekomstige generaties als het afval over 200-300 jaar net zo gevaarlijk is als uraniumerts in plaats van over 250 000 jaar. De P&T onderzoeken gaan niet in op deze vraag en evenmin op de vraag wat er met de door P&T vermeerderde hoeveelheid radioactiviteit moet gebeuren gedurende de komende eeuwen.

Tijdpad

De totstandkoming van het eerste P&T systeem zou vanaf heden ettelijke decennia vereisen, zo het al uitvoerbaar is. Voor de reductie tot 1% van de oorspronkelijke hoeveelheid langlevende radionucliden zou een perfect werkend P&T systeem daarna nog meer dan een eeuw nodig hebben. Dat zou betekenen dat de eerste tranche radioactief afval op zijn vroegst halverwege de 22e eeuw behandeld zou kunnen zijn in een P&T cyclus.

Inherente beperkingen

Het P&T concept heeft inherente beperkingen wat betreft de transmutatiemogelijkheden van radionucliden met lange halfwaardetijden. Zo is de transmutatie van technetium-99 en jodium-129 marginaal, zelfs onder ontwerpcondities, en die van koolstof-14, strontium-90, cesium-135 en cesium-137 niet uitvoerbaar. De transmutaties van chloor-36, calcium-41, nikkel-59, selenium-79, zirconium-93, molybdeen-93, niobium-94, palladium-107, tin-126, samarium-151, zijn niet in de studies meegenomen.

Een volledige transmutatie van de actiniden is niet mogelijk, in theorie is een vermindering tot 1% van de oorspronkelijke hoeveelheid mogelijk.

Technische uitdagingen

- Het is niet aangetoond dat de scheidingstechnieken nodig voor een goed werkende partitie aan de gestelde eisen zouden kunnen voldoen.
- De target fabricage moet geheel met robots gebeuren, onder zeer hoge stralingsbelasting. Deze techniek is nog niet in de praktijk aangetoond.
- Het is niet aangetoond dat transmutatie met een subkritische reactor en deeltjesversneller (Accelerator Transmutation of Waste, ATW) technisch uitvoerbaar zal zijn.
- De installaties van een P&T cyclus zouden minimaal een eeuw continu en zonder haperen moeten kunnen functioneren om de gestelde doelen te kunnen bereiken.

Kosten

De kosten zijn niet goed te becijferen, omdat P&T berust op niet-bewezen technologie en nog alleen in cyberspace bestaat. In de eerste voorlopige schattingen is sprake van bedragen in de orde van honderden miljarden euro voor een systeem nodig voor 100 conventionele kerncentrales. De kosten van de ontmanteling van de radioactieve installaties van de P&T cyclus zijn hierin niet meegerekend. Amerikaanse studies hebben aangetoond dat de kosten van gecompliceerde technische projecten, vooral als het nieuwe technologie betreft, altijd veel te laag worden ingeschat.

Zwaartepunt van het huidige internationale P&T onderzoek

Gedurende het afgelopen decennium is de aandacht van het internationale P&T onderzoek verschoven naar de ontwikkeling van kernenergie met een gesloten splijtstofcyclus en snelle-neutronen reactors. De kweekcyclus is in feite een eenvoudiger variant van de P&T cyclus.

Inhoud

Samenvatting

- 1 Inleiding
 - Wat is partitie en transmutatie
 - Wat is het idee achter partitie en transmutatie
 - Vragen
 - Indeling van dit rapport

- 2 Radioactiviteit
 - 2.1 Kerncentrales genereren radioactiviteit
 - 2.2 Radioactiviteit en gezondheid
 - Aantonen van stochastische effecten
 - Gebrekkige modellen
 - Meetbaarheid
 - 2.3 Radioactiviteit en risico's
 - Radioactiviteit is onvernietigbaar
 - Immobiliseren en isoleren van radioactiviteit
 - Risicofactoren

Kader 1 Radioactiviteit en halfwaardetijd

Kader 2 Splitsingsproducten

Kader 3 Actiniden

Kader 4 Activeringsproducten

Kader 5 Radioactiviteit en gezondheidseffecten

- 3 P&T: het concept
 - 3.1 Wat is transmutatie
 - Empirische gegevens
 - 3.2 Cyclus
 - 3.3 Huidige splijtstofcyclus: once-through

- 4 P&T: de machinerie
 - 4.1 Partitie
 - Opwerking van splijtstof
 - Onvolledige scheiding
 - Radioactieve lozingen
 - Volumetoename radioactief afval
 - Ontmanteling
 - 4.2 Target fabricage
 - 4.3 Reactor
 - Thermische neutronen reactor
 - Snelle neutronen reactor
 - Subkritische reactor met deeltjesversneller (ADS of ATW)
 - Thorium-uranium reactor
 - 4.4 Integratie

- 4.5 Tijdpad
 - Wanneer beschikbaar?
 - Tijd nodig voor omzetting
 - 4.6 Omvang van een transmutatiesysteem
 - 4.7 Inherente beperkingen
 - 4.8 Technische uitdagingen
 - 4.9 Energiebalans
 - 4.10 Personele aspecten
 - 4.11 Kosten
- 5 Discussie
- Historie P&T onderzoek
 - Onderbelichte vraagstukken in het P&T onderzoek
 - Verschuiving van de focus van het P&T onderzoek
 - Economische aspecten
 - Wat wordt verwacht van de nucleaire afvalverwerking?

Conclusies

Referenties

1 Inleiding

Wat is partitie en transmutatie?

Partitie en transmutatie (afkorting P&T, Engels: partitioning and transmutation) is een uiterst gecompliceerd samenspel van fysische en chemische processen, dat door de nucleaire wereld wordt gepresenteerd als een methode om het probleem van het radioactief afval van kerncentrales tot weinig belastende proporties terug te brengen.

Partitie is de verdeling via chemische scheidingstechnieken van het radioactieve afval in een aantal specifieke fracties, zodanig dat de radionucliden gesorteerd worden naar de lengte van halfwaardetijden.

Transmutatie is het kernfysische proces waarbij nucliden met lange halfwaardetijden omgezet kunnen worden in nucliden met kortere halfwaardetijden, door middel van neutronenstraling.

Wat is het idee achter partitie en transmutatie?

Het idee achter het concept om transmutatie toe te passen is “de verkorting van de levensduur van radioactief afval” (ECN 1998 [1]) als middel om de problemen met het radioactieve afval van kerncentrales te verminderen. Hiermee wordt bedoeld dat de radionucliden met lange halfwaardetijden in het nucleaire afval zouden worden omgezet (getransmuteerd) in andere radionucliden met aanzienlijk kortere halfwaardetijden. Met name wordt hierbij gedacht aan de actiniden. De betekenis van termen als halfwaardetijd, splijttingsproducten en actiniden wordt uitgelegd in aparte kaders in het volgende hoofdstuk.

Volgens een aantal publicaties, bijvoorbeeld ECN 1998 [1] en CEA 2002 [2], vervallen de splijttingsproducten uit een kernreactor in 250 jaar tot het radiotoxisch niveau van uraniumerts. Het ECN lijkt hiermee te suggereren dat radiotoxisch niveau van uraniumerts onschadelijk zou zijn. Met behulp van transmutatie zou het verval van de radiotoxiciteit van de actiniden tot het niveau van uraniumerts teruggebracht kunnen worden van 250000 jaar tot 1000 jaar; met toepassing van geavanceerde processen en technieken zou de ‘gevaarlijke periode’ teruggebracht kunnen worden tot 250 jaar.

Volgens DOE-NE 2009 [3] zou met P&T 99,9% van het radioactief afval uit kerncentrales getransmuteerd kunnen worden. Een diepe geologische bergplaats zou weliswaar niet overbodig worden, maar de opslagcapaciteit ervan zou toenemen met een factor 50.

De radioactiviteit van het afval zou door het P&T proces enorm toenemen, maar door de kortere halfwaardetijden zou die radioactiviteit in een kortere tijdspanne afnemen tot een zeker niveau dan zonder P&T. Na 250-1000 jaar zou het afval net zo radiotoxisch zijn als uraniumerts.

Vragen

De publicaties over P&T, bijvoorbeeld NWMO 2008 [4] en SKB 2010 [5], laten een aantal vragen open, zoals:

- Wat moet er met het radioactief afval gebeuren in die eeuwen totdat het ‘onschadelijk’ zou zijn?
- Levert het radioactief afval gedurende die eerste eeuwen niet meer risico op dan zonder P&T, omdat het sterker radioactief is en verspreid is over grotere volumes materialen?
- Hoe is de radiotoxiciteit van uraniumerts gedefinieerd?
- Is de radiotoxiciteit van uraniumerts op een onschadelijk niveau?
- Hoe groot is de uiteindelijke ‘winst’ van P&T, zowel wat betreft de hoeveelheden resterende radioactiviteit, als ten aanzien van gezondheidsrisico’s, ten opzichte van direct opbergen van afgewerkte splijtstof in diepe geologische bergplaatsen?

- Wat zijn de economische voordelen van P&T van nucleair afval ten opzichte van directe berging in een geologische bergplaats?

Indeling van dit rapport

Dit rapport kan bovenstaande vragen niet of slechts ten dele beantwoorden, omdat de essentiële bestanddelen en technieken van het partitie en transmutatie concept nog alleen in cyberspace bestaan, zoals nader zal worden toegelicht.

Om een oordeel te kunnen vormen over de merites van P&T en om misverstanden te voorkomen lijkt het zinvol om enkele begrippen en verschijnselen te introduceren uit de nucleaire wereld. Sommige items worden hierna in de lopende tekst aangestipt, andere worden kort besproken in aparte kaders.

Om te beginnen wordt in hoofdstuk 2 het kernprobleem van kernenergie kort besproken: het ontstaan van radioactiviteit en de gezondheidsrisico's daarvan. Hierover circuleren misverstanden die leiden tot onderschatting van de ernst van het probleem.

Daarna wordt in hoofdstuk 3 het P&T concept in grote lijnen besproken zoals dat door de nucleaire industrie en de daarmee samenwerkende onderzoeksgroepen aan de buitenwereld wordt gepresenteerd. Partitie en transmutatie is alleen mogelijk in een geïntegreerde cyclus van drie processen.

Hoofdstuk 4 omvat een meer gedetailleerde analyse van de P&T cyclus en belicht kort enkele technische en praktische aspecten van het P&T concept:

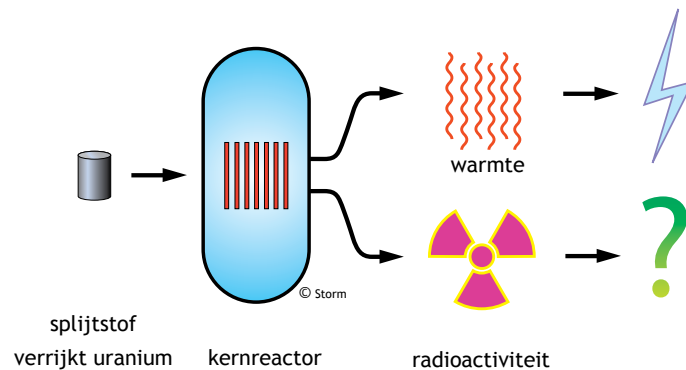
- technische mogelijkheden, moeilijkheden en onzekerheden betreffende de drie componenten van de P&T cyclus: partitie, target fabricage en transmutatiereactor
- inherente beperkingen van het P&T concept
- technische uitdagingen die overwonnen moeten worden voordat sprake kan zijn van een functionerende P&T cyclus
- praktische vragen, zoals: op welke termijn zou P&T mogelijk kunnen zijn, hoe lang duurt het voordat een gegeven hoeveelheid radioactief afval verwerkt is in de P&T cyclus, personele aspecten, kosten, energiebalans.

Hoodstuk 5 gaat in op verschuiving van de aandachtspunten van het internationale onderzoek van de mogelijkheden van partitie en transmutatie gedurende de afgelopen twee decennia in de richting van een gesloten splijtstofcyclus met snelle-neutronen reactoren.

2 Radioactiviteit

2.1 Kerncentrales genereren radioactiviteit

Bij het splijtingsproces in een kernreactor komt energie vrij in de vorm van warmte die via stoom en turbines omgezet wordt in elektriciteit. In het splijtingsproces ontstaat gelijktijdig radioactiviteit (zie kader 1), onontkoombaar en onomkeerbaar.



Figuur 1

Een kernreactor genereert warmte en radioactiviteit. De warmte wordt via stoom en turbines deels omgezet in electriciteit. Wat er moet gebeuren met de radioactiviteit is na 60 jaar kernenergie nog een onopgelost probleem. Alle antropogene radioactiviteit ooit gegenereerd staat nog opgeslagen in voorlopige en steeds kwetsbaarder wordende opslagplaatsen. Een deel van de antropogene radioactiviteit wordt op routinebasis geloosd in het milieu.

De antropogene radioactiviteit ontstaat door nucleaire processen in de reactor. Men maakt onderscheid tussen drie groepen radioactieve stoffen die ontstaan in de kernreactor:

- splijtingsproducten (zie kader 2)
- actiniden (zie kader 3)
- activeringsproducten (zie kader 4)

De hoeveelheid radioactiviteit in een kernreactor neemt ten gevolge van verschillende kernreacties toe met een factor **een miljard**, vergeleken met de radioactiviteit van de verse splijstof die in de reactor geplaatst wordt.

Een kerncentrale van 1 GWe (= 1 gigawatt-elektrisch = 1000 megawatt elektrisch) produceert per jaar een hoeveelheid radioactiviteit equivalent met die van 1000 ontplofte atoombommen van 15 kiloton, ongeveer de explosiekracht van de bom op Hiroshima. In de koelbasins van de kerncentrales ligt afgewerkte splijstof van vaak vele jaren opgeslagen, met een radioactieve inhoud van duizenden bomequivalenten.

In principe is elke hoeveelheid radioactiviteit boven de lichaamseigen radioactiviteit waarmee een mens in contact komt schadelijk voor de gezondheid. In welke mate radioactiviteit schadelijk kan zijn hangt af van een aantal factoren, die worden aangestipt in de volgende paragraaf.

2.2 Radioactiviteit en gezondheid

Aantonen van stochastische effecten

Bij blootstelling aan relatief lage doses radioactiviteit treden stochastische effecten op (zie kader 5): het is niet te voorspellen wie en wanneer welke aandoening zal krijgen. Wegens de lange incubatietijden (soms tientallen jaren) is moeilijk of niet te bewijzen of een ernstige aandoening het gevolg is van de blootstelling aan een dosis radioactiviteit jaren eerder. Alleen door een epidemiologisch onderzoek van een groot aantal individuen kunnen ondubbelzinnige verbanden worden aangetoond tussen radioactieve besmetting en gezondheidseffecten. Een complicerende factor is dat besmetting met radioactiviteit een groot aantal verschillende ernstige aandoeningen kan veroorzaken (kader 5) en niet één specifieke, zoals bij asbest en tabaksrook.

Omgekeerd is zonder epidemiologisch onderzoek ook niet te bewijzen dat het optreden van ernstige aandoeningen **niet** door radioactiviteit is veroorzaakt.

Gebrekkige modellen

De klassieke radiologie is gebaseerd op computermodellen, met alle beperkingen aan modellen eigen. Deze modellen kunnen niet de aangetoonde schadelijke en lethale effecten verklaren van blootstelling aan zeer lage dosis radioactiviteit in de omgeving van kerncentrales (KiKK [6]). Ook houdt de klassieke radiologie geen rekening met de biochemische eigenschappen van radionucliden in het lichaam, noch met de aangetoonde **non-targeted and delayed effects**. Het is gebleken dat ook stralingschade aan andere molekulen dan DNA ook tot ernstige aandoeningen en erfelijke effecten kan leiden.

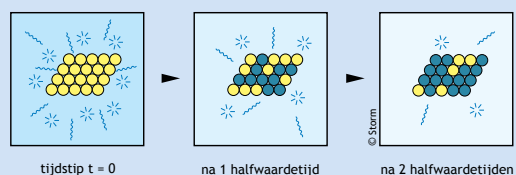
Meetbaarheid

Kader 1

Radioactiviteit en halfwaardetijd

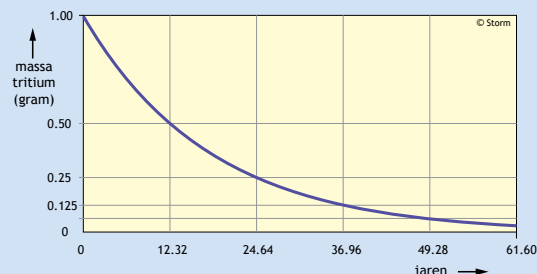
Radioactiviteit is het verschijnsel dat de onstabiele kern van een radioactief atoom vanzelf overgaat in een stabiele atoomkern, onder uitzending van kernstraling (alpha, bèta en/of gammastraling). De overgang van een onstabiele naar een stabiele atoomkern heet radioactief verval. Dit proces kan niet door de mens beïnvloed worden. De tijd waarin een zekere hoeveelheid van een bepaalde soort radioactieve atomen vervallen is blijkt een vaste waarde te hebben: de halfwaardetijd. Deze heeft voor elk soort radionuclide een vaste, kenmerkende waarde, die kan uiteenlopen van seconden tot miljarden jaren.

Een voorbeeld is tritium, radioactief waterstof, dat door uitzending van bèta deeltjes uit de kern overgaat in helium.



Figuur 2

Na één halfwaardetijd is de helft van een bepaalde hoeveelheid radioactief materiaal vervallen. Na nog een halfwaardetijd is de helft van het overgebleven materiaal overgegaan in een andere stof. De massa van het stukje materiaal is niet veranderd, alleen de samenstelling. De hoeveelheid straling die per seconde door de massa wordt uitgezonden is na een halfwaardetijd ook tot de helft afgenomen.



Figuur 3

Radioactief verval van tritium. Een gegeven hoeveelheid tritium neemt exponentieel af met de tijd. Steeds na 1 halfwaardetijd is de resterende hoeveelheid tot de helft afgenomen.

Kader 2

Splijtingsproducten

Uranium-235 of plutonium-239 kernen splijten bij invang van een neutron in twee of soms drie lichtere atoomkernen: de splijtingsproducten. Doordat de splijting van de zware atoomkernen min of meer willekeurig gebeurt, ontstaan zeer veel verschillende atoomkernen. Dit heeft tot gevolg dat tientallen atoomsoorten van het Periodiek Systeem in de splijtstof aanwezig zijn. Een deel van de gevormde lichtere kernen

is onstabiel en dus radioactief. De halfwaardetijden van de splijtingsproducten lopen uiteen van fracties van seconden tot miljoenen jaren.

Bij het splijtingsproces ontstaan vrije neutronen die nieuwe splijtingen kunnen veroorzaken of activeringsreacties, zie kader 3 actiniden en kader 4 activeringsproducten.

Kader 3

Actiniden

De niet-splijtbare uranium-238 kernen in de splijtstof gaan door neutroneninvang over in neptunium dat in relatief korte tijd overgaat in plutonium. Plutoniumkernen op hun beurt kunnen door invang van neutronen en radioactief verval overgaan in nog zwaardere atoomsoorten, zoals americium, curium en californium. Plutonium en de zwaardere atoomsoorten komen niet in de natuur voor: het zijn kunstmatige elementen. Van elk van deze atoomsoorten worden verschillende isotopen gevormd. Meestal wordt deze groep elementen de *actiniden* genoemd, omdat ze chemisch op actinium lijken. Neptunium en de elementen zwaarder dan plutonium worden gewoonlijk aangeduid met de Engelse term *minor actinides*.

De actiniden zijn aanzienlijk radioactiever (hebben kortere halfwaardetijden) dan het uranium waaruit ze zijn

ontstaan. De meeste vervallen onder uitzending van krachtige alfastraling. Hierdoor zijn de actiniden bij inwendige besmetting zeer gevaarlijk.

Doordat een aantal ervan spontane splijting vertonen, heeft men, behalve met α , β en γ straling, ook te maken met neutronenstraling. Dit maakt de actiniden tot een moeilijk hanteerbaar materiaal, hetgeen nog versterkt wordt door het feit dat enkele actiniden een zeer lage kritische massa hebben. Opeenhoping ervan tijdens de bewerking van afgewerkte splijtstof in een opwerkingsfabriek zou gemakkelijk kunnen leiden tot spontane kettingreacties.

Kader 4

Activeringsproducten

De vrije neutronen die ontstaan bij het splijtingsproces worden alle ingevangen door atoomkernen. Sommige neutronen brengen een nieuwe kernsplijting teweeg als ze ingevangen worden door een splijtbaar atoom.

Als een stabiele atoomkern een neutron absorbeert, ontstaat een nieuwe atoomkern die meestal onstabiel is: het atoom is radioactief geworden. Een atoom kan meer dan één neutron absorberen. Dit proces wordt activering genoemd en de ontstane atomen *activeringsproducten*. In het radioactief verval van de activeringsproducten ontstaan andere elementen: neutronenstraling veroorzaakt transmutatie

Ten gevolge van activeringsreacties worden de materialen van de kernreactor en omringende constructies, staal, beton steeds sterker radioactief.

Neutronen kunnen ook ingevangen worden door radioactieve atomen. Soms ontstaat daardoor een stabiele atoomkern, maar meestal is de nieuwe atoomkern nog onstabiel dan de oude: het nieuwe atoom is dus sterker radioactief. Sterker radioactief wil zeggen een kortere halfwaardetijd.

Een extra complicerende factor is dat een aantal biologisch gevaarlijke radionucliden, zoals tritium en koolstof-14, niet zijn aan te tonen met de gebruikelijke stralingsdetectors, maar speciale meetmethoden vereisen. Tritium en koolstof-14 worden op routinebasis in grote hoeveelheden geloosd door nominaal werkende kerncentrales en komen via de lucht, drinkwater en voedsel in het lichaam. In het lichaam worden deze radioactieve atomen ingebouwd in biomolekules, waaronder DNA.

2.3 Radioactiviteit en risico's

Radioactiviteit is onvernietigbaar

De radioactiviteit van gebruikte splijtstof is gedurende de eerste eeuw na verwijdering uit de reactor en factor 100 miljard hoger dan de natuurlijke radioactiviteit van het menselijk lichaam. De radioactiviteit van de splijtstof neemt langzaam af met de tijd, maar is na tienduizend jaar nog altijd 100 miljoen maal zo sterk als van het menselijk lichaam (zie Figuur 4).

Aangezien radioactiviteit onvernietigbaar is – met transmutatie wordt geen radioactiviteit vernietigd, integendeel – is er maar één manier om te voorkomen dat mensen besmet raken met antropogene radioactiviteit, namelijk al het nucleaire afval immobiliseren en isoleren van de biosfeer. Voorkomen moet worden dat de radioactiviteit die gevormd wordt in kerncentrales zich verspreidt in het milieu, de leefomgeving van de mens, wegens de ernstige aantasting van de gezondheid van mens en dier, en de onomkeerbare en ontwrichtende effecten op de samenleving en op de economie. Een gebied dat eenmaal besmet is blijft dat gedurende perioden die thuishoren op geologische tijdschalen.

Kader 5

Radioactiviteit en gezondheidseffecten

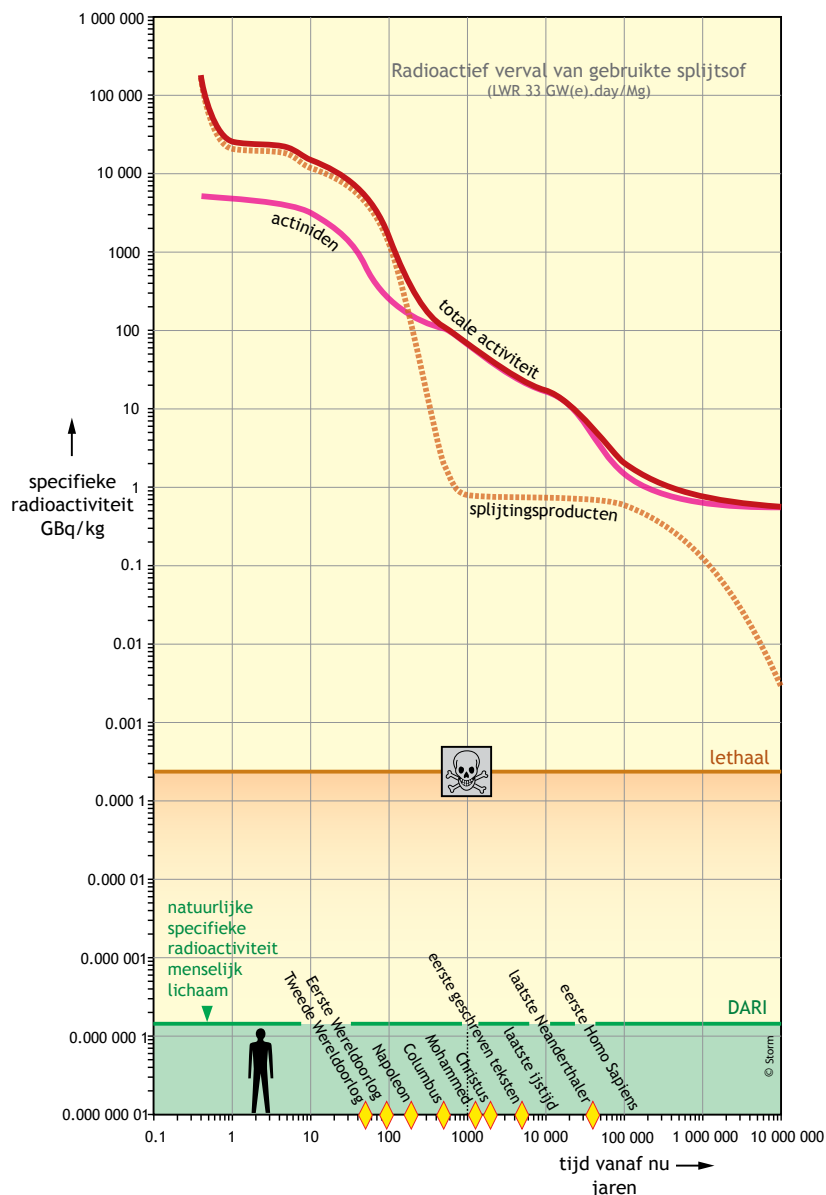
Blootstelling aan radioactiviteit boven de lichaamseigen radioactiviteit heeft in principe altijd ongunstige effecten op de gezondheid van de mens. Men maakt onderscheid tussen niet-stochastische effecten en stochastische effecten.

Niet-stochastische effecten treden op na blootstelling aan hoge doses radioactiviteit, zoals die voorkomen bij atoomexplosies en ernstige nucleaire ongelukken. De effecten, 'stralingsziekte', openbaren zich binnen uren of dagen en leiden meestal tot een spoedige dood.

Stochastische gezondheidseffecten treden op na blootstelling aan lage doses radioactiviteit. Deze effecten omvatten ernstige aandoeningen als:

- chronische ziekten, zoals diabetes
- kanker en leukemie
- aangeboren afwijkingen, misgeboorten
- erfelijke afwijkingen

Het is niet te voorspellen welke effecten een bepaald individu zal ondervinden ten gevolge van de besmetting met een bepaalde dosis radioactiviteit. De kans op schade en de omvang van de schade aan de gezondheid hangt af van een aantal factoren, zoals dosis, aard van de straling, in- of uitwendige besmetting (Inademen, voedsel, drinkwater), biochemische eigenschappen van de radionucliden, leeftijd, algemene gezondheidstoestand van het individu.



Figuur 4

De radioactiviteit per ton (Mg) afgewerkte splijtstof na verwijdering uit de reactor. Bij de nieuwste typen kernreactoren is de verblijftijd van de splijtstof in de reactor aanzienlijk langer dan hier is aangenomen en zal de specifieke activiteit aanzienlijk hoger zijn dan deze grafieken. Bij de berekening van deze grafieken zijn de bijdragen van tritium, koolstof-14 en de activeringsproducten niet meegenomen.

Let op dat zowel de horizontale as als de verticale as een logaritmische schaal hebben. Elk schaaldeel betekent een factor 10 groter of kleiner. Op de horizontale as is een historisch perspectief aangegeven, om een idee te vormen over de tijdvakken waarover het hier gaat. De groene lijn geeft de natuurlijke radioactiviteit aan van het menselijk lichaam (143 Bq/kg). De dosis straling die de mens hierdoor krijgt wordt de DARI genoemd: Dose Annuelle due au Radiations Internes. Aangenomen wordt dat een dosis van 25000 DARI dodelijk is. In het diagram is deze aangegeven met een oranje lijn en doodskop, waarbij is aangenomen dat de dosis op dezelfde manier tot stand komt als de DARI. In de praktijk zal de dodelijke limiet bij een aanzienlijk lagere hoeveelheid interne radioactiviteit dan hier aangegeven bereikt kunnen worden, als het biologisch actieve nucliden betreft. Na 1 miljoen jaar is de specifieke activiteit van afgewerkte splijtstof nog altijd een factor 10 miljoen hoger dan van het menselijk lichaam.

Bronnen: Hollocher 1975 [7], JPL77-69 1977 [8], Bell 1973 [9], Charpak&Garwin 2002 [10].

Immobiliseren en isoleren van radioactiviteit

Op dit moment verkeert al het nucleaire afval dat ooit gegenereerd is nog in mobiele toestand, opgeslagen in voorlopige en kwetsbare opslagplaatsen. De beste methode om de antropogene radioactiviteit te isoleren van de biosfeer is het afval te verpakken in speciale containers en die op te bergen in wat genoemd wordt een **diepe geologische bergplaats** (Engels: deep geologic repository). Daaronder wordt meestal verstaan een gangenstelsel diep (500 meter of meer) in een geologisch stabiele formatie, bijvoorbeeld graniet. Na plaatsing van het afval moeten de gangen worden afgedicht met bentoniet, om ervoor te zorgen dat radionucliden uit lekkende containers – op den duur zullen ze alle gaan lekken – zo traag mogelijk met het grondwater mee migreren.

Nog nergens ter wereld is een geologische bergplaats voltooid en in gebruik.

Risicofactoren

Het risico van besmetting met antropogene radioactiviteit en de ongunstige gevolgen vandien, dat wil zeggen de kans op besmetting, de mate van besmetting en de aard van de besmetting, wordt bepaald door een aantal factoren. In tegenstelling tot wat de nucleaire industrie suggereert, is het risico nauwelijks afhankelijk van het volume van het nucleaire afval. Het risico wordt bepaald door factoren als:

- hoeveelheden radioactiviteit
- aard van de radionucliden
- mobiliteit van de radioactieve stoffen en de kans op verspreiding in het milieu; van belang hiervoor zijn:
 - aantal plaatsen waar het radioactieve materiaal opgeslagen ligt
 - de tijdsduur dat het radioactieve materiaal ergens opgeslagen ligt
 - mechanismen die tot verspreiding in het milieu leiden, zoals: onachtzaamheid, veroudering van materialen, ongelukken, verlies van koeling, terrorisme.

Mondiaal gezien nemen de gezondheidsrisico's ten gevolge van antropogene radioactiviteit met de dag toe, om verschillende redenen:

- de hoeveelheid antropogene radioactiviteit neemt voortdurend toe (ongeveer 370 000 kernbomequivalenten per jaar)
- er komen steeds meer plaatsen waar steeds grotere hoeveelheden opgeslagen liggen
- door onvermijdelijke verouderingsverschijnselen neemt de betrouwbaarheid van de tijdelijke opslagfaciliteiten voortdurend af.

3 P&T: het concept

3.1 Wat is transmutatie

In de kernfysica is transmutatie het verschijnsel dat een kern van een bepaalde atoomsoort (element X) overgaat in de kern van een andere atoomsoort (element Y). In feite zijn alle kernreacties waarbij vrije neutronen betrokken transmutatie-reacties (zie ook kader 4). Vrije neutronen komen voor in werkende kernreactors, maar kunnen ook worden gegenereerd met speciale deeltjesversnellers.

Als een stabiele atoomkern, dus de kern van een niet-radioactief atoom, een neutron absorbeert, ontstaat daardoor meestal een onstabiele kern: het atoom is radioactief geworden. In zo'n geval spreekt men van 'activering'.

Als een onstabiele kern – de kern van een radioactief atoom – een neutron invangt, ontstaat meestal een nog onstabielere atoomkern. Dit komt tot uiting in een kortere halfwaardetijd van het ontstane atoom.

De grafieken in Figuur 4 laten zien dat na enkele eeuwen afkoelen de radioactiviteit van afgerwerkte splijtstof gedomineerd wordt door de actiniden. Daarmee is geenzins gezegd dat de resterende splijtstofproducten ongevaarlijk zouden zijn.

Empirische gegevens

Experimenten op laboratoriumschaal met kleine monsters (grammen) van één der actiniden hebben het principe van nucleaire transmutatie aangetoond, in die zin dat door bestraling met neutronen sommige langlevende radionucliden kunnen worden omgezet in nucliden met kortere halfwaardetijden.

In de praktijk zou het gaan om de bestraling van tientallen tonnen per jaar, een opschaling met een factor tien miljoen. Bovendien zouden in de praktijk mengsels van een groot aantal verschillende radionucliden behandeld moeten worden, hetgeen het proces heel veel ingewikkelder en minder efficiënt maakt.

3.2 Cyclus

Het partitie en transmutatie concept omvat drie processen die samen één geïntegreerd systeem, een cyclus, vormen (zie Figuur 5):

- partitie
- fabricage van de transmutatietargets
- transmutatie

Een P&T systeem werkt alleen als aan twee voorwaarden is voldaan:

- elk deelsysteem op zich functioneert feilloos én volgens het ontwerp, én
- de drie deelsystemen zijn nauwkeurig op elkaar afgesteld en functioneren zonder haperen.

Als één deelsysteem faalt, faalt het hele systeem.

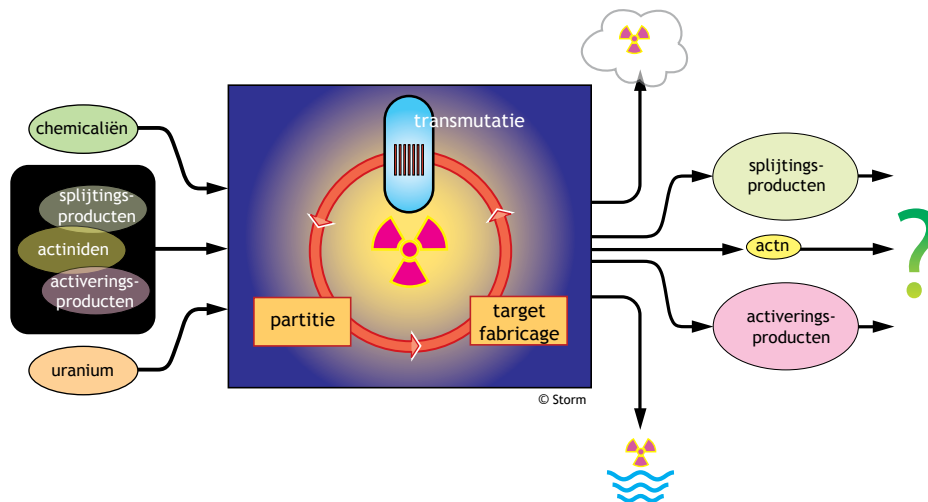
De cyclus begint met de partitie (= verdeling), dat is de scheiding van afgewerkte splijtstof uit kerncentrales in een aantal fracties. Sommige van deze fracties moeten de transmutatiecyclus doorlopen, andere worden direct afgevoerd voor definitieve opslag. Wegens de cruciale rol en de inherente problemen bespreekt het volgende hoofdstuk de partitie in meer detail.

In het proces volgend op de partitie worden de te transmuteren nucliden geconcentreerd in speciale splijtstofelementen, **targets** genoemd, die in de transmutatiereactor geplaatst worden, voor de derde

fase van de cyclus. Zowel de target fabricage als de transmutatiereactor worden hierna eveneens apart besproken.

Als de splijtstofelementen en targets in de reactor zijn blootgesteld aan een zekere hoeveelheid neutronenstraling worden ze uit de reactor gehaald, om kernfysische redenen. Het bestraalde materiaal gaat naar de partitie: de nucliden met een korte halveringstijd worden afgescheiden en de resterende langlevende nucliden worden gereedgemaakt voor een nieuwe cyclus.

Onvermijdelijk ontstaan in de transmutatiereactor nieuwe radioactieve atomen uit niet-radioactieve door invang van neutronen. Bovendien ontstaan er splijttingsproducten door de versplijting van actiniden, waaronder nieuwe lang-levende splijttingsproducten. In sommige P&T concepten worden de neutronen die nodig zijn voor de transmutatie opgewekt door versplijting van uranium en/of plutonium. Onvermijdelijk wordt daarbij een deel van het uranium en plutonium in de reactor omgezet in nieuwe actiniden door absorptie van neutronen.



Figuur 5

Een transmutatiesysteem zou bestaan uit drie deelprocessen die nauwkeurig op elkaar afgestemd en feilloos moeten functioneren. Als één component faalt, faalt het hele systeem. De input bestaat uit afgewerkte splijtstof van kerncentrales, uranium en chemicaliën. De hoeveelheid actiniden neemt na een eeuw functioneren af tot enkele procenten van de oorspronkelijke hoeveelheid. De totale hoeveelheid radioactiviteit die het systeem verlaat is echter aanzienlijk groter dan de hoeveelheid die erin gaat: het transmutatiesysteem genereert zelf ook splijttingsproducten en activeringsproducten. Het volume van de radioactieve stoffen die het systeem verlaten is een veelvoud van het volume van de radioactieve input, ten gevolge van het scheidingsproces (partitie). Bovendien worden grote hoeveelheden vluchtige en goed oplosbare radionucliden geloosd in lucht en water. De uiteindelijke afhandeling van het niet-geloosde radioactieve afval van het systeem is nog een open vraag.

Gedurende de bestraling in de reactor wordt slechts een klein deel van de ongewenste nucliden getransmuteerd, terwijl nieuwe ongewenste nucliden ontstaan door bovenvermelde processen. Om deze redenen is de netto transmutatiesnelheid laag: in veel gevallen kunnen niet meer dan enkele procenten van de langlevende radionucliden kunnen per cyclus worden omgezet. Om een significante vermindering van de hoeveelheid ongewenste langlevende nucliden te bewerkstelligen zijn daarom vele cycli nodig.

3.3 Huidige splijtstofcyclus: once-through

De kerncentrales die thans operationeel zijn in de wereld, merendeels licht-water reactors (LWR), werken in de zogenoemde 'weggooi'-cyclus (once-through cycle). Dat houdt in dat de afgewerkte splijtstof uit de reactor wordt verwijderd en opgeslagen wordt in gekoelde basins totdat de radioactiviteit en de warmteontwikkeling zover zijn gedaald dat definitieve opslag of berging mogelijk zou zijn. De definitieve berging zou moeten gebeuren in een diepe geologische bergplaats (zie paragraaf 2.3).

Van een, mondiaal gezien, beperkt deel van de afgewerkte splijtstof wordt in opwerkingsfabrieken het niet-verspleten uranium en het gevormde plutonium chemisch gescheiden van de splijtingsproducten en actiniden. Het plutonium wordt in sommige LWRs teruggevoerd in plaats van het splijtbare uranium-235, in de vorm van MOX splijtstof. MOX staat voor Mixes OXides, dat wil zeggen uraniumoxide plus plutoniumoxide. Afgewerkte MOX splijtstof wordt niet opnieuw opgewerkt, zodat er niet echt sprake is van een gesloten splijtstofcyclus.

Tot op heden ligt alle afgewerkte splijtstof uit het nucleaire tijdperk, vanaf de jaren '40 van de vorige eeuw, nog opgeslagen in tijdelijke opslagplaatsen, met een gezamenlijke radioactieve inventaris van ruwweg 10 miljoen kernbomequivalenten. Eén kernbomequivalent is de hoeveelheid radioactiviteit die vrijkomt bij de ontploffing van een kernwapen met een kracht van 15 kiloton, ongeveer de kracht van de Hiroshima bom. Nog nergens ter wereld is een veilig geachte diepe geologische bergplaats gerealiseerd. Dit is niet zozeer een technisch probleem, als wel een paradigmatisch probleem. De kosten van een diepe geologische bergplaats zullen hoog zijn, maar zullen niet bijdragen aan een meetbare verbetering van de economische infrastructuur, omdat alle investeringen: menselijke inspanningen, energie en materialen, gezien moeten worden als verliesposten. De bedoeling is immers dat al het materiaal voorgoed verdwijnt uit de menselijke omgeving. Mogelijk dat economische overwegingen ten grondslag liggen aan de thans overheersende attitude ten aanzien van nucleair afval van 'après nous le déluge'.

4 P&T: de machinerie

4.1 Partitie

Een cruciaal onderdeel van een P&T systeem is de partitie, hiermee begint de cyclus. Partitie is in feite het scheiden van de bestanddelen van de afgewerkte splijtstof en ze verdelen in verschillende fracties.

De fracties met kortlevende splijtingsproducten (korte halfwaardetijden) en stabiele atoomsoorten moeten niet bestraald worden en worden afgevoerd voor opslag. De fracties met de langlevende splijtingsproducten en de actiniden moeten wel in de transmutatiereactor bestraald worden en gaan naar de volgende fase van de P&T cyclus.

Opwerking van gebruikte splijtstof

De partitie verloopt via een ingewikkelde reeks van voornamelijk chemische scheidingsprocessen. Er zijn twee hoofdroutes die gevolgd kunnen worden: de hydrochemische route, die berust op chemische processen in water, en de pyrochemische route, die berust op reacties in gesmolten zouten (chlorides of fluorides) bij hoge temperaturen.

De chemische bewerking van afgewerkte splijtstof wordt gewoonlijk opwerking genoemd, in het Engels: reprocessing. Het enige verschil tussen partitie en opwerking is dat bij partitie de gebruikte splijtstof in meer fracties wordt verdeeld. In het thans operationele opwerkingsprocessen, die gebaseerd zijn op waterchemie, wordt de splijtstof verdeeld in drie fracties: uranium, plutonium en de restfractie. De restfractie bevat alle splijtingsproducten en de actiniden. Bij partitie wordt de restfractie van de eerste scheiding verder gescheiden in vier fracties: actiniden, lanthaniden (een chemisch specifieke groep splijtingsproducten), langlevende splijtingsproducten en de overige nucliden, waaronder de kortlevende splijtingsproducten (zie ook Figuur 6).

Afgewerkte splijtstof bevat een mengsel van vele tientallen verschillende atoomsoorten, elk vaak met diverse isotopen, dat ingedeeld wordt in drie groepen: splijtingsproducten, actiniden en activeringsproducten (zie kaders 2, 3 en 4). Dit uiterst ingewikkelde mengsel moet worden gescheiden in de bovengenoemde specifieke fracties. De scheidingsprocessen berusten op de chemische eigenschappen van de radionucliden. Sorteren op halfwaardetijden is niet mogelijk.

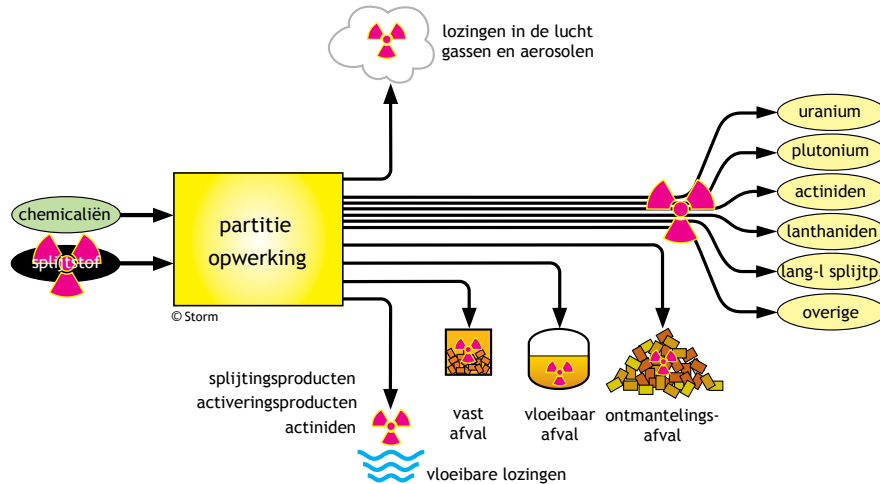
Sommige atoomsoorten lijken chemisch sterk op elkaar, waardoor ze moeilijk te scheiden zijn.

De lanthaniden bijvoorbeeld lijken chemisch sterk op de actiniden, maar moeten toch daarvan gescheiden worden. De meeste lanthaniden zijn stabiel, en gaan door neutronenbestraling over in andere lanthaniden. Belangrijk echter is dat deze atoomsoorten in zo sterke mate neutronen absorberen dat daarmee het transmutatieproces van de actiniden belemmerd wordt.

Onvolledige scheiding

De scheiding van een mengsel bestaande uit tientallen componenten in een x aantal 100% zuivere fracties is niet mogelijk op grond van natuurwetten, met name de Tweede Hoofdwet van de thermodynamica. Hoe meer componenten een mengsel bevat hoe lastiger het wordt dit in verschillende fracties van voldoende zuiverheid te scheiden en hoe meer verliezen er optreden in de scheidingsprocessen. Elke fractie zal verontreinigd zijn met componenten die thuishoren in andere fracties. De fracties die bestemd zijn voor transmutatie moeten voldoen aan hoge eisen van zuiverheid. De selectiviteit van een bepaalde scheiding

kan soms verbeterd worden door toepassing van geavanceerde technieken, maar dat vergt de inzet van meer selectieve chemicaliën en een aanzienlijk hoger energieverbruik van het proces als geheel. Optimalisatie van de afscheiding van één bepaald atoomsoort kan gemakkelijk ten koste gaan van de selectiviteit van de scheidingen van andere atoomsoorten uit het mengsel.



Figuur 6

De partitie, dat is de sortering van de bestanddelen van afgewerkte spleijstof in verschillende fracties, is een ingewikkeld samenstel van chemische en fysische processen. In principe zou de gebruikte spleijstof verdeeld moeten worden in zes fracties. Een significant deel van de radioactieve stoffen uit de spleijstof (gassen, chemisch moeilijk te binden elementen) worden geloosd in het milieu. Omdat scheidingsprocessen nooit volledig verlopen blijft een niet te verwaarlozen deel van de radioactieve stoffen achter in de afvalstromen. Aan het eind van zijn technische levensduur moet de opwerkingsfabriek ontmanteld worden en komen grote volumina radioactief sterk verontreinigd puin en schroot vrij. Al met al wordt in het opwerkingsproces de radioactiviteit uit de spleijstof verspreid over zeer grote volumina gassen, vloeistoffen en vaste stoffen.

Het is wel mogelijk om één stof uit een ingewikkeld mengsel in hoge zuiverheid af te scheiden, maar dat gaat ten koste van procesverliezen van de gewenste stof in de afvalstromen en vergt veel energie. De procesverliezen nemen toe naarmate het mengsel meer componenten bevat en naarmate hogere eisen aan de zuiverheid van de geëxtraheerde stof worden gesteld. Het energieverbruik neemt navenant toe.

De scheidingsprocessen in een nucleaire opwerkingsfabriek worden bovendien bemoeilijkt door de radioactiviteit van de te fractioneren spleijstof, die radiolyse van de gebruikte chemicaliën veroorzaakt. In de transmutatiecyclus neemt de radioactiviteit van de te fractioneren spleijstof- en target-elementen sterk toe met elke cyclus. De straling, waaronder neutronenstraling van sommige actiniden, en de warmte-ontwikkeling is reeds na één cyclus zo intens dat met kleine hoeveelheden tegelijk en met gerobotiseerde apparatuur moet worden gewerkt. De scheidingsprocessen verlopen minder efficiënt naarmate het mengsel sterker radioactief is. Daar komt bij dat de kans op spontane kritikaliteit toeneemt met elke cyclus omdat de bestraalde targets steeds meer zware actiniden kunnen bevatten die spontane spleijting ondergaan. Sommige actiniden hebben een heel lage kritische massa.

Radioactieve lozingen

Een weinig bekend risicoverhogend aspect van de partitie is dat door de opwerkingsfabriek alle vluchtige

splijtingsproducten in de lucht geloosd worden, zoals: tritium T of ^3H (als HTO), koolstof-14 (als $^{14}\text{CO}_2$), krypton-85 en xenon-133 (edelgassen), benevens een belangrijk deel van jodium-129 en jodium-131. Van andere radionucliden uit de splijtingsproducten die moeilijk chemisch te binden zijn worden aanzienlijke hoeveelheden met het afvalwater in zee geloosd, zoals: strontium-90, technetium-99, ruthenium-106, jodium-129 en jodium-131, cesium-137 en andere radionucliden. Ook komen significante hoeveelheden actiniden en activeringsproducten in het milieu terecht via de afvalstromen.

Volumetoename radioactief afval

In de afgewerkte splijstofelementen zijn de radioactieve stoffen samengebaldd in een minimaal volume. In de loop van de scheidingsprocessen in de opwerkingsfabriek raken de radioactieve stoffen verspreid over zeer grote volumina gassen, vloeistoffen en vaste stoffen (zie Figuur 6). De gassen worden vrijwel zonder retentie geloosd in de atmosfeer. De vloeistoffen worden deels geloosd in zee, deels opgeslagen in tanks. De vaste stoffen, waaronder de sterk radioactieve splijstofhulzen en onopgeloste bestanddelen van de splijstof, worden opgeslagen tanks of bunkers.

Ontmanteling

Als elke machine en fabriek heeft een opwerkingsfabriek een beperkte levensduur, doorslijtage en veroudering. Door toenemende radioactieve besmetting raken steeds meer onderdelen van de fabriek onklaar en moeten buiten gebruik gesteld worden. Op een gegeven moment moet de opwerkingsfabriek worden ontmanteld. Voorlopige kostenramingen van de ontmanteling van de West Valley fabriek in de Verenigde Staten (UCS 2007 [11]) en van Sellafield in het Verenigd Koninkrijk [12] wijzen op ontmantelingskosten in de orde van €10 miljoen per ton verwerkte splijstof. Deze kosten zijn exclusief de bouwkosten en de bedrijfskosten. Als een kerncentrale 25 ton afgewerkte splijstof per jaar levert, belopen de kosten van alleen de ontmanteling van één opwerkingsfabriek al 250 miljoen euro per jaar per kerncentrale (zie ook paragraaf 4.11). Het radioactieve puin en schroot, het gaat om tienduizenden tonnen, is besmet met alle mogelijke radionucliden en zal moeten worden opgeborgen in een geologische bergplaats.

4.2 Target fabricage

De te bestralen fracties uit de afgewerkte splijstof moeten worden verwerkt tot speciale splijstofelementen, die **targets** worden genoemd. Deze worden in de transmutatiereactor geplaatst. Aan deze targets worden hoge kernfysische eisen gesteld, om de transmutatie zo efficiënt en veilig mogelijk te kunnen laten verlopen. Wegens de hoge radioactiviteit en de neutronenstraling van de actiniden moet de fabriek geheel gerobotiseerd zijn.

4.3 Reactor

Als neutronenbron, waarmee de target elementen bestraald worden met neutronen, zouden in grote lijnen drie reactortypen in aanmerking kunnen komen, elk met zijn eigen voor- en nadelen en met zijn technische problemen. Deze drie types zijn:

- een reactor, die met langzame (zogenaamde thermische) neutronen werkt
- een reactor die met snelle neutronen werkt
- een subkritische reactor waarin de neutronen hoofdzakelijk afkomstig zijn van een externe deeltjesversneller.

Thermische neutronen reactor

Dit type reactor, dat met langzame (thermische) neutronen werkt, lijkt beter geschikt voor transmutatie van langlevende splijtingsproducten dan een reactor met snelle neutronen, maar minder geschikt voor transmutatie van actiniden. Alle kerncentrales ter wereld, op één na, werken met thermische reactoren, waarvan het grootste deel uit licht-water reactoren (LWR) bestaat. In principe zou een LWR aangepast kunnen worden om langlevende splijtingsproducten te bestralen met neutronen en om te zetten in stabiele of kortlevende nucliden. Het voordeel is dat een gewijzigde LWR ook voor elektriciteitsopwekking gebruikt zou kunnen worden. Met de LWR is veel operationele ervaring, zij het nog niet met een gewijzigd type dat voor transmutatie geoptimaliseerd is.

Gedurende de afgelopen twee decennia is het zwaartepunt van het onderzoek naar partitie en transmutatie verschoven naar versplijting van de actiniden en integratie daarvan in geavanceerde kernenergiesystemen met gesloten splijstofcyclus. De thermische reactor, gebaseerd op de thans operationele reactortypes, lijkt nu buiten beeld te zijn geraakt in het internationale P&T onderzoek.

Snelle neutronen reactor

Een reactor die werkt met snelle neutronen is zou geschikt zijn voor de versplijting van actiniden die daarmee in splijtingsproducten worden omgezet, maar niet voor transmutatie van langlevende splijtingsproducten. Aangezien de hoeveelheid langlevende splijtingsproducten toeneemt in een snelle reactor door de versplijting van de actiniden, zou de inzet van dit type reactor slechts in beperkte mate bijdragen aan de 'levensduurverkorting' van het radioactieve afval.

Op de tekentafel staan verschillende ontwerpen van snelle reactoren, gekoeld door vloeibare metalen (natrium, lood-bismut legering), een mengsel van gesmolten zouten of door helium. Vaak worden deze concepten aangeduid als Generatie IV reactoren. Vijf van de zes Gen IV ontwerpen hebben een gesloten splijstofcyclus [13]. Er bestaat een beperkte ervaring met prototypes van natrium-gekoelde snelle reactoren, met name in Frankrijk en Rusland.

Subkritische reactor met deeltjesversneller (ADS of ATW)

Dit betreft een systeem gebaseerd op een proton versneller en een sub-kritische reactor, een reactor die alleen kritisch kan worden en een splijtingsproces onderhouden met behulp van een externe neutronenbron. Dit concept is bekend onder twee namen: Accelerator-Driven System (ADS) en Accelerator Transmutation of Waste (ATW). Mogelijk dat de keuze van de aanduiding ADS of ATW samenhangt met de beoogde toepassing van het concept in een bepaald onderzoek.

De benodigde deeltjesversneller zou een grote machine zijn: in lineaire vorm ongeveer 2 kilometer lang [14]. Er bestaan op papier verschillende concepten van een ADS/ATW, maar er is geen praktische ervaring. De proton-straal zou gefocuseerd worden op een metalen doel, waarbij neutronen vrijkomen. De splijstof en de te bestralen radionucliden zouden rondom deze neutronenbron gerangschikt zijn, in de vorm van metalen of keramische tabletten, of in andere vorm, bijvoorbeeld 'opgelost' in een mengsel van gesmolten zouten (fluoriden of chloriden). Praktijkervaring met Accelerator-Driven Systems bestaat nog niet. Er zijn enkele bescheiden laboratorium experimenten met bestraling door een deeltjesversneller gerapporteerd in 2010 [15].

Als bezwaar tegen de thermische en snelle reactortypes wordt aangevoerd dat deze reactoren nieuwe actiniden genereren. Een ADS zou de mogelijkheid bieden om uranium-vrije splijstof in combinatie met targets te gebruiken, zodat geen nieuwe actiniden zouden ontstaan. Op dat punt zou nog veel onderzoek nodig zijn. Bij de splijting van de actiniden komt weliswaar warmte vrij, maar het is niet duidelijk of een

transmutatorreactor op basis van een deeltjesversneller geschikt te maken is voor electriciteitsopwekking. Bovendien verbruikt de deeltjesversneller zelf zeer veel electriciteit, die zou moeten worden opgewekt door conventionele kerncentrales, die wel nieuwe actiniden en langlevende splijtingsproducten genereren.

Thorium-uranium reactor

Een ADS zou ook de mogelijkheid bieden om thorium als splijtstof te gebruiken via de thorium-232 - uranium-233 kweekcyclus. Een Th-U reactor zou veel minder actiniden genereren dan een conventionele kernreactor (LWR) of een uranium-plutonium reactor.

Kernfysisch lijkt een Th-U reactor gekoppeld aan een ADS gunstig, omdat een Th-U reactor te weinig neutronen genereert om het splijtingsproces, gekoppeld aan de transmutatie van thorium-232 in uranium-233, gaande te houden. Er zijn extra neutronen nodig, die in sommige concepten geleverd worden door versplijting van plutonium of of verrijkt uranium, maar die ook met een ADS opgewekt kunnen worden [15].

Een bijkomend voordeel zou zijn dat de thorium reserves in de aardkorst groter zouden zijn dan die van uranium. De inzet van thorium levert wel nieuwe, onopgeloste problemen op, en vergt een extra cyclus in het totale energiesysteem, met alle complicerende consequenties vandien.

4.4 Integratie

Daadwerkelijke transmutatie van nucleair afval hangt niet alleen af van een goed werkende transmutator (transmuter), maar ook van feilloos werkende scheidingsfabrieken en fabrieken voor de fabricage van splijtstof en target elementen. Bovendien moeten de drie componenten nauwkeurig op elkaar afgestemd zijn en geïntegreerd worden tot één systeem. Materialen in opslag liggen of op transport zijn, worden niet bestraald, waardoor het tempo van transmutatie van het systeem afneemt. Geïntegreerde werking van de deelsystemen die leidt tot minimale verblijftijden van het materiaal buiten de transmutator is een vereiste om het transmutatietempo te maximaliseren, maar zal een moeilijk probleem zijn [14].

Momenteel is internationaal laboratoriumonderzoek gaande naar verschillende chemische vormen waarin de splijtstof en de te transmuteren radionucliden in de transmutatie reactor zouden kunnen worden geplaatst: in metallische vorm, of in keramische materialen zoals oxides, carbides of nitrides. Er wordt ook onderzoek gedaan naar suspensies in licht water of zwaar water (D_2O) en naar mengsels van gesmolten zouten (fluoriden of chloriden) waarin de radionucliden, ook in de vorm van fluoriden of chloriden, zijn opgelost.

De chemische vorm bepaalt in belangrijke mate welke chemische processen in de opwerkingsfabriek voor de partitie gebruikt kunnen worden. De keuze voor een bepaalde chemische vorm hangt af van een groot aantal factoren, onder andere het type transmutatiereactor dat optimaal geacht wordt voor het gekozen doel. Uiteraard worden de processen in de targetfabriek ook bepaald door de chemische vorm waarin de targets afgeleverd moeten worden.

Als zou blijken dat in één van de drie componenten van de transmutatiecyclus een eenmaal gekozen chemische vorm niet voldoet aan de eisen, moeten alle drie de componenten van de cyclus gewijzigd worden.

Het falen van de integratie van opwerking, splijtstoffabricage en kweekreactor tot een functionerende kweekcyclus is een belangrijke oorzaak van de gebleken onuitvoerbaarheid van de kweekcyclus, naast onoverkomelijke problemen met elk van de deelsystemen apart. De belofte van de kweekcyclus was dat

60% van de atomen in natuurlijk uranium nuttig verspleten zou kunnen worden, via omzetting in plutonium. In de thans operationele kerncentrales kan niet meer dan 0,6% van de atoomkernen in natuurlijk uranium verspleten worden.

4.5 Tijdpad

Wanneer beschikbaar?

Volgens SKB 2010 [5] zal de ontwikkeling van een P&T systeem verscheidene decennia in beslag nemen. De inzet en bedrijfsvoering van de vereiste industriële faciliteiten zal daarna nog 100 jaar of meer vergen voordat de voorraden langlevende radionucliden van de thans bestaande kerncentrales getransmuteerd zullen zijn.

Tijd nodig voor omzetting

Zelfs met een feilloos en volgens het ontwerp werkend transmutatiesysteem, zouden extreem lange operationele perioden nodig zijn om een gegeven hoeveelheid actiniden en langlevende splijtingsproducten tot een minimum te reduceren. Per P&T cyclus kan slechts een fractie van deze radionucliden worden omgezet: afhankelijk van het toegepaste type transmutatiereactor is het netto omzettingspercentage soms niet meer dan enkele procenten per cyclus.

Volgens de Zweedse studie SKB 2010 [5] zou minimaal een eeuw en waarschijnlijk langer nodig zijn om de thans aanwezige voorraad actiniden te transmuteren vóór splijting. Dit komt overeen met uitkomsten van een omvangrijke studie van de Amerikaanse National Research Council (NRC) in 1996 [14], waarin sprake is van één tot enkele eeuwen, in sommige scenario's zelfs duizend of meer jaren. Twee rekenvoorbeelden hierna laten zien hoeveel keer een zekere hoeveelheid langlevende nucliden, de P&T cyclus moet doorlopen om tot 1% van de oorspronkelijk waarde gereduceerd te worden.

Voorbeeld 1: langlevende splijtingsproducten

Volgens NRC 1996 [Q16] zou met een ADS met thermische neutronen 2,5 tot 3% van de langlevende splijtingsproducten kunnen worden getransmuteerd per cyclus. Uitgaande van een netto omzetting van 3%, zouden er in het ideale geval 152 cycli nodig zijn om 100 kg langlevende splijtingsproducten om te zetten in 99 kg kortlevende en stabiele nucliden + 1 kg resterende langlevende splijtingsproducten.

De omzetting van actiniden zou met thermische neutronen slechts 2,2% per cyclus kunnen zijn.

Voorbeeld 2: actiniden

Een ADS met snelle neutronen zou in het ideale geval per cyclus ongeveer 22% van een gegeven hoeveelheid actiniden kunnen omzetten [14]. In dat geval zouden ongeveer 18 cycli nodig zijn om die hoeveelheid te reduceren tot 1% van de oorspronkelijke waarde.

Langlevende splijtingsproducten worden met snelle neutronen niet of nauwelijks omgezet.

Tijdsduur

De doorlooptijd van de P&T cyclus is de tijd die nodig is voor een gegeven hoeveelheid nucliden om de hele cyclus te doorlopen: neutronenbestraling in de reactor, opwerken (partitie) en targetfabricage. Aangenomen dat de doorlooptijd in het transmutatiesysteem 1 jaar per cyclus is, dan zou voor omzetting van 99% van de langlevende splijtingsproducten in voorbeeld 1 een onafgebroken periode van 152 jaar nodig zijn, en 18 jaar

voor de actiniden in voorbeeld 2.

De veronderstelde doorlooptijd van 1 jaar per cyclus is erg kort, gelet op de technische complexiteit van de processen in de transmutatiecyclus en de extreem hoge radioactiviteit van de materialen in de cyclus. De huidige ervaringen met recycleren van uranium en plutonium – een analoog maar veel eenvoudiger proces vergeleken met de transmutatiecyclus – wijzen op doorlooptijden van vele jaren, soms in de orde van 10-20 jaar. In de praktijk zullen vele decennia P&T nodig zijn om een gegeven hoeveelheid actiniden te reduceren met een factor 100, aangenomen dat een P&T systeem continu werkt volgens de ontwerpspecificaties.

4.6 Omvang van een transmutatiesysteem

Hoe zou een transmutatiesysteem in de praktijk opgebouwd zijn? Voorop gesteld zij dat een P&T systeem een hypothetisch concept is dat nog alleen in cyberspace bestaat.

Een transmutatiesysteem kan niet los gezien worden van een aantal kerncentrales waarvan de afgewerkte splijtstof behandeld zou worden in dat transmutatiesysteem. In feite vormen die samen één nucleair energiesysteem.

Volgens NRC 1996 [14] zou een conventioneel systeem van 100 LWRs, waarvan de afgewerkte splijtstof niet behandeld wordt, in principe vervangen kunnen worden door een systeem bestaande uit:

- 80 LWRs
- 20 transmutatie reactoren (Engels: transmuters)
- twee opwerkingsfabrieken
- fabrieken voor de fabricage van splijtstofelementen en targets
- fabrieken voor de verpakking van radioactief afval

Hierbij is aangenomen dat een transmutator evenveel electriciteit levert als een conventionele LWR, maar het is de vraag of dat technisch haalbaar is.

Aangenomen dat een LWR per jaar ongeveer 30 ton splijtstof verbruikt, dan zou het transmutatiesysteem per jaar 3000 ton afgewerkte splijtstof moeten kunnen verwerken. Ter vergelijking: de reusachtige opwerkingsfabriek van Cogema in La Hague heeft een nominale capaciteit van 1700 ton per jaar. Gelet op het feit dat de doorzet van een fabriek in de praktijk altijd een stuk lager is dan de nominale capaciteit, zouden twee van deze fabrieken nodig zijn voor de P&T van 100 LWR kerncentrales. Gedurende een of meer eeuwen zouden steeds twee van zulke fabrieken zonder haperen continu in bedrijf moeten zijn. Deze fabrieken zouden ettelijke keren vervangen moeten worden, aangezien de levensduur van opwerkingsfabrieken beperkt is.

4.7 Inherente beperkingen

De voorgestelde P&T systemen vertonen een aantal inherente tekortkomingen, die niet te omzeilen zijn met geavanceerde technieken, maar deels van kernfysische aard zijn. NRC 1996 [14] noemt onder meer:

- Transmutatie van technetium-99 en jodium-129, twee lang-levende splijtingsproducten die van groot belang zijn voor de gezondheidsrisico's, is op zijn best marginaal, zelfs onder ontwerpcondities.
- Transmutatie van koolstof-14, een ander problematisch radionuclide in kernafval, is niet mogelijk wegens de uiterst kleine werkzame doorsnede voor neutroneninvang.
- Transmutatie van strontium-90 en cesium-137, van groot belang gedurende de eerste duizend jaar van de opslag van het kernafval, is praktisch niet uitvoerbaar, evenmin als transmutatie van het lang-levende cesium-135.

- Transmutatie van andere lang-levende splijttingsproducten, zoals selenium-79, zirconium-93, palladium-107, tin-126, samarium-151, is niet in de studies meegenomen, evenmin als die van activeringsproducten, zoals chloor-36, calcium-41, nikkel-59, molybdeen-93, niobium-94.

- De transmutatie van actiniden kan nooit volledig zijn. Zelfs in het theoretische concept zou op zijn best een vermindering met een factor 100 bereikt kunnen worden.

In de praktijk zou deze factor aanzienlijk lager zijn, omdat geen enkel technisch systeem perfect werkt gedurende zijn levensduur, ook al zouden de hierna te noemen technische uitdagingen geen rol spelen.

Mogelijk heeft vaststelling van bovengenoemde inherente beperkingen er toe geleid dat de huidige P&T onderzoeksprojecten bijna uitsluitend gericht lijken te zijn op de transmutatie van de actiniden, in het bijzonder van de minor actinides (NWMO 2008 [4]).

4.8 Technische uitdagingen

De concepten van transmutatiesysteem die door de nucleaire industrie gepresenteerd worden berusten voor een belangrijk deel op onbewezen technologie, enkele voorbeelden zijn:

- Omdat de te transmuteren nucliden vele malen de hele cyclus moeten doorlopen – per cyclus wordt een fractie van slechts enkele procenten omgezet – moeten de scheidingsprocessen aan zeer hoge eisen voldoen. De onvermijdelijke procesverliezen zouden met een factor 1000 omlaag moeten ten opzichte van de huidige scheidingsprocessen. Een 100% volledige scheiding is niet mogelijk, op grond van basale natuurwetten, zoals is besproken in paragraaf 4.1.

- De technologie van pyrochemische partitie van de gebruikte splijtstof, waarbij de chemische reacties plaatsvinden in een mengsel van gesmolten zouten bij hoge temperatuur, is nog niet gedemonstreerd op pilot schaal.

Pyrochemische opwerking wordt gezien als een mogelijkheid om partitie en een snelle-neutronen transmutatiereactor te integreren tot één systeem. De integratie van opwerking en reactor is een technische uitdaging op zich.

- Het concept van een transmutatiesysteem gebaseerd op een subkritische reactor en een deeltjesversneller (accelerator transmutation of waste, ATW) is gebaseerd op onbewezen technologie. Uitgebreid onderzoek is nodig om aan te tonen of een ATW op zich wel technisch uitvoerbaar is.

- De fabricage van de splijtstof elementen en de target-elementen zal een grote technische uitdaging zijn, wegens de hoge concentratie van actiniden en andere sterk radioactieve nucliden. De intensiteit van de radioactieve straling, waaronder ook neutronenstraling, neemt toe met elke cyclus van het bestraalde materiaal door het transmutatiesysteem.

Wegens de hoge stralingsniveau's zal een fabriek voor de productie van splijtstof- en target-elementen volledig gerobotiseerd moeten zijn, hetgeen op zich een formidabele uitdaging is. Daarbij komt dat ook het onderhoud en de reparaties door robots verricht zullen moeten worden.

- De P&T cyclus moet zonder haperen minimaal 100 jaar continu volgens ontwerp-specificaties functioneren om een reductie van de hoeveelheid van een aantal langlevende radionucliden tot 1% tot stand te brengen.

4.9 Energiebalans

De bedoeling van nucleaire elektriciteitsopwekking is dat het systeem nuttig bruikbare energie aan de samenleving levert. Met het systeem wordt bedoeld het samenstel van alle processen die nodig zijn om van uraniumerts splijtstof te maken, de centrale te bouwen en alle processen die nodig zijn om het radioactief afval veilig op te bergen. Die processen omvatten ook het opbergen van afgewerkte splijtstof in een diepe geologische bergplaats en het afbreken en opruimen van het radioactieve deel van de kerncentrale zelf.

Als een P&T cyclus wordt ingebouwd in het nucleaire energiesysteem is het zaak eerst na te gaan hoeveel netto energie het systeem van kerncentrales plus P&T als geheel levert aan de samenleving. De partitie en target fabricage zullen zeer energie-intensieve processen zijn, onder andere omdat deze fabrieken geheel met robots moeten werken. De ATW methode zou een netto elektriciteitsverbruiker kunnen zijn. Als gekozen wordt voor de ATW zou de P&T cyclus een forse netto elektriciteitsverbruiker zijn.

Het lijkt zinvol om energiebalansen op te stellen van een kernenergiesysteem zonder P&T en een met P&T en de uitkomst af te wegen tegen de gezondheidsrisico's en economische risico's van beide opties. Uit de publicaties van de nucleaire industrie blijkt niet dat de energiebalans van een geïntegreerd nucleair energiesysteem een punt van aandacht is.

4.10 Personele aspecten

Een punt van zorg voor de verwezenlijking van een partitie en transmutatie systeem is de beschikbaarheid van kwantitatief en kwalitatief voldoende geschoold personeel. De specialistische kennis betreffende de uiterst complexe technologie van de P&T cyclus, die overigens nog in het laboratoriumstadium verkeert, is geconcentreerd bij een kleine groep experts, verspreid over laboratoria in een aantal verschillende landen. Om een P&T systeem betrouwbaar, veilig en langdurig te laten functioneren is een groot aantal hoog gekwalificeerde wetenschappers en technici nodig. Het zal nodig zijn om uitgebreide opleidingsprogramma's aan universiteiten en technische opleidingen te starten om de noodzakelijke kennis te verspreiden en om te kunnen voldoen aan de vraag naar personeel en aan de gestelde kwaliteitseisen [Q447]. Ook de continuïteit van de personele bezetting en vakbekwaamheid zal verzekerd moeten zijn gedurende een periode van tenminste 100 jaar.

4.11 Kosten

Volgens [5] is het niet mogelijk om een enigszins betrouwbare kostenraming van een P&T systeem te maken in het huidige stadium.

In NRC 1996 [14] wordt gesproken over bedragen van vele tientallen tot enkele honderden miljarden dollars, die nodig zouden zijn voor de Amerikaanse situatie.

De geschiedenis leert de kosten van nieuwe complexe technologische projecten altijd te laag worden ingeschat, vaak met een factor 2-5, maar soms ook meer (RAND 1979 [16], RAND 1981 [17]). De factoren die hebben geleid tot de kostenescalaties in de door RAND onderzochte projecten zijn evenzeer van kracht bij de huidige nucleaire projecten voor de ontwikkeling van partitie en transmutatie.

De nucleaire industrie heeft talloze voorbeelden van grote kostenoverschrijdingen laten zien. De ontwikkeling van de kweekreactor, beter: van de kweekcyclus, heeft in Europa en de Verenigde Staten meer dan 100

miljard euro gekost. Het resultaat van alle inspanningen gedurende enkele decennia was dat de kweekcyclus technisch (en dus ook economisch) onuitvoerbaar bleek te zijn bij de huidige stand van techniek. Zelfs de bouwkosten van klassieke kerncentrales, waarmee toch al veel ervaring is opgedaan, vertonen een schijnbaar onbeheersbare zwelneiging.

De kosten van de ontmanteling van de sterk radioactief besmette installaties van de P&T cyclus zijn niet meegenomen in de kostenramingen. In paragraaf 4.1 zijn de eerste ruwe schattingen vermeld, die wijzen op kosten van ruwweg €10 miljoen per ton opgewerkte splijtstof. De levensduur van een opwerkingsfabriek (partitiefabriek) is beperkt. Het is denkbaar dat gedurende de periode van 100 jaar dat de P&T cyclus minimaal moet functioneren (zie paragraaf 4.8) de partitiefabrieken vier maal vervangen moeten worden.

5 Discussie

Historie P&T onderzoek

Onderzoek naar partitie en transmutatie kan gezien worden als fundamenteel nucleair onderzoek, dat politiek onbeladen is voor landen die kritisch zijn ten aanzien van kernenergie. In de jaren '80 werd duidelijk dat de U-Pu kweekcyclus onuitvoerbaar was met de toen beschikbare technieken. Er zou derhalve nog heel veel fundamenteel onderzoek nodig zijn om de beoogde doelen te bereiken. Aangezien het onderzoek voor de kweekcyclus al tientallen jaren had gelopen en een slordige 100 miljard euro had gekost, in Europa en USA samen, was voortzetting ervan politiek gezien weinig aantrekkelijk en kwam het onderzoek vrijwel stil te liggen.

Begin jaren '90 kwam partitie en transmutatie sterk in de nucleaire belangstelling te staan. Politiek is P&T aantrekkelijk omdat in de verkoopfolder beloofd wordt dat hiermee de weg geopend zou worden naar een vorm van kernenergie met veel minder radioactief afval dan de huidige methode, afval dat bovendien slechts enkele eeuwen gevaarlijk zou zijn in plaats van honderdduizenden jaren. Ook het reeds bestaande radioactieve afval zou met P&T tot weinig belastende proporties teruggebracht kunnen worden. In sommige publicaties wordt zelfs gesproken van kernenergie met '(almost) no radioactive waste', bijvoorbeeld in LPSC 2001 [18]. Een aantal studies echter, waaronder NRC 1996 [14] en SKB 2010 [5], benadrukken dat een functionerend P&T systeem een diepe geologische bergplaats (zie paragraaf 2.2) niet overbodig maakt, maar wel de opslagcapaciteit daarvan vergroot.

Onderbelichte vraagstukken in het P&T onderzoek

Opmerkelijk is dat in de publicaties vanuit de nucleaire wereld niet gerept wordt over de niet te verwaarlozen lozingen van moeilijk te immobiliseren radioactieve stoffen in lucht en water door de opwerkings- en partitiefabrieken (zie Figuur 6 en paragraaf 4.1). En dat terwijl toch mag worden aangenomen dat de geloosde radionucliden gezondheidsrisico's ten gevolge van radioactieve besmetting veroorzaken. Bij de presentatie van de voordelen van P&T wordt evenmin aandacht besteed aan de aanzienlijke hoeveelheden radioactieve afvalstromen van de separatieprocessen noch van het ontmantelingsafval van de opwerkingsfabrieken. Ook deze radioactieve afvalstromen betekenen een extra gezondheidsrisico, zolang zij niet definitief van de biosfeer geïsoleerd zijn.

Verschuiving van de focus van het P&T onderzoek

Aanvankelijk richtte het P&T onderzoek zich op transmutatie met behulp van bestaande reactoren en met een Accelerator-Driven System (ADS) ook aangeduid als Accelerator Transmutation of Waste (ATW). Gaande het afgelopen decennium is de nadruk van het onderzoek verschoven naar de ontwikkeling van snelle reactoren (Generation-IV) en is de aandacht komen te liggen op het verwerken van de actiniden (MA: minor actinides). De transmutatie van langlevende splijtingsproducten, daarbij worden alleen technetium-99 en jodium-29 met name genoemd, lijkt in de thans lopende onderzoeken geheel op de achtergrond te zijn geraakt.

De geavanceerde snelle reactoren, er circuleren verschillende ontwerpen, zouden het voordeel bieden van de beoogde kweekreactoren uit de jaren '70 en '80 en bovendien een aanzienlijk deel van de actiniden (minor actinides) kunnen versplijten.

Door versplijting van de actiniden neemt de hoeveelheid langlevende splijtingsproducten in het radioactieve afval toe. De netto vermindering van de hoeveelheden van deze radionucliden in de transmutatiecyclus wordt daarmee negatief beïnvloed en misschien zelfs ongedaan gemaakt.

Het onderzoek naar P&T betreft in principe dezelfde technische vraagstukken als die van de kweekcyclus. De kweekcyclus is bedoeld om het niet-splijtbare uranium-238 (99,3% van natuurlijk uranium) via omzetting in plutonium toch te versplijten. Via de zogenoemde U-Pu kweekcyclus zou ongeveer 60% van de atomen in natuurlijk uranium verspleten kunnen worden, terwijl de huidige kerncentrales niet meer dan 0,6% kunnen versplijten. Met kweekreactoren zou dan 100 maal meer energie uit een gegeven hoeveelheid natuurlijk uranium gewonnen kunnen worden dan met de huidige kerncentrales.

Op de lange duur zullen de goedkope uraniumreserves uitgeput raken en zal de snelle kweekreactor de hoofdrol in de nucleaire energie-opwekking moeten overnemen van de licht-water reactor, zo verwacht SKB 2010 [5]. De snelle reactor ('snel' omdat hij werkt met snelle neutronen) zou bovendien geschikt zijn voor transmutatie van de elementen zwaarder dan uranium.

Economische aspecten

Economische drijfveren kunnen ook nog een rol spelen. Tot op heden is de constructie van een diepe geologische bergplaats voortdurend naar de toekomst verschoven. Uit voorlopige onderzoeken was gebleken dat de kosten zeer hoog zouden zijn. Alleen al de voorbereidende werkzaamheden aan de geologische bergplaats Yucca Mountain in de Verenigde Staten hebben ruim 10 miljard dollar gekost toen het project werd afgeblazen. De constructie van een geologische bergplaats en de verpakking van het radioactief afval om het in de bergplaats te kunnen plaatsen moeten gezien worden als verliesposten, omdat alle materialen en werkzaamheden erop gericht zijn om met het radioactief afval voorgoed verwijderd te worden uit de samenleving en de economie.

Politiek lijkt dit geen aantrekkelijke optie. P&T onderzoek daarentegen zou kunnen bijdragen aan het vermeerderen van fundamentele fysische en chemische kennis. Het kiezen voor uitstel van afdoende immobilisatie en isolatie van radioactief afval op de kortst mogelijke termijn past geheel in het thans heersende paradigma van *après nous le déluge* en leven op krediet.

Wat wordt verwacht van de nucleaire afvalverwerking?

Het doel van de verwerking van radioactief afval zou moeten zijn: de vermindering tot het uiterste minimum van de gezondheidsrisico's die de radioactiviteit uit kerncentrales voor de bevolking zouden kunnen opleveren. Dat houdt onder meer in het minimaliseren van de kans op contact en/of besmetting en van de kans op ongelukken.

De minste risico's met het radioactief afval zijn te verwachten als de afgewerkte splijtstofstaven intact gelaten worden en zo snel mogelijk definitief in een diepe geologische bergplaats worden opgeborgen. De radioactiviteit blijft opgesloten in het kleinst mogelijke volume en de kansen op verspreiding in het milieu zijn dan minimaal.

Worden alle opties en ideeën betreffende de nucleaire afvalverwerking getoetst aan dit criterium, of kunnen andere criteria, bijvoorbeeld economische, prevaleren?

Conclusies

1

Het concept van partitie en transmutatie (P&T) van radioactief afval berust op een extreem gecompliceerd samenspel in een cyclus van goeddeels onbewezen technieken, waarvan niet is aangetoond of ze ooit uitvoerbaar kunnen zijn.

2

De partitie en transmutatie cyclus bestaat op dit moment alleen nog in cyberspace.

3

Radioactiviteit is onvernietigbaar. Een partitie en transmutatie cyclus zou de halfwaardetijd van een aantal radionucliden weliswaar kunnen verkorten, maar de totale hoeveelheid radioactiviteit zou daardoor sterk toenemen en ook de hoeveelheid radionucliden zou toenemen.

4

De cyclus van partitie en transmutatie kent inherente beperkingen. Een aantal langlevende splijttingsproducten zijn niet te transmuteren in kortlevende radionucliden, om kernfysische redenen. Ook de actiniden kunnen slechts voor een deel getransmuteerd worden.

5

Als maatstaf voor het problematisch karakter van radioactief afval gebruikt de nucleaire industrie de radiotoxiciteit van radioactieve materialen.

Het is echter niet duidelijk hoe de radiotoxiciteit van radioactieve materialen gedefinieerd is.

Het is bovendien niet duidelijk hoe de radiotoxiciteit van uraniumerts gedefinieerd is.

De nucleaire industrie wekt sterk de suggestie dat de radiotoxiciteit van uraniumerts, hoe ook gedefinieerd, een onschadelijk niveau heeft, althans een niveau dat geen problemen oplevert.

6

De nucleaire industrie lijkt niet in te gaan op de vraag wat er moet gebeuren met het radioactieve afval in de eeuwen totdat de radiotoxiciteit ervan vervallen zou zijn tot het niveau van uraniumerts. Evenmin lijkt de nucleaire industrie het als een probleem te zien dat de hoeveelheid radioactiviteit van het nucleaire afval enorm zou toenemen door partitie en transmutatie. Ten onrechte wordt de suggestie gewekt alsof het getransmuteerde afval na enkele eeuwen onschadelijk zou zijn en dat de tussenliggende eeuwen geen problemen en risico's zouden opleveren.

7

De studies naar partitie en transmutatie lijken uit te gaan van perfect verlopende scheidingsprocessen bij de partitie van afgewerkte splijtstof zonder rekening te houden met de fysisch/chemische procesverliezen die inherent zijn aan scheidingsprocessen. Ten gevolge hiervan verwijnt een deel van de af te scheiden nucliden in de afvalstromen, waardoor de omzetting ervan onvolledig is en er meer gezondheidsrisico's ontstaan

8

De nucleaire industrie lijkt geen rekening te houden met het feit dat bij de partitie van afgewerkte splijtstof:

- Aanzienlijke hoeveelheden gasvormige en wateroplosbare radionucliden via routinelozingen in lucht en water terecht komen. De normen voor de routinelozingen worden in feite door de nucleaire industrie zelf geformuleerd. De blootstelling van de bevolking aan radioactiviteit zal door deze lozingen sterk toenemen

- De radioactiviteit uit de afgewerkte splijtstof verspreid wordt over grote volumina verschillende materialen. Ook dit verhoogt de kans op radioactieve besmetting.

9

De nucleaire industrie lijkt geen rekening te houden met het feit dat de mobiliteit van massale hoeveelheden radioactiviteit in een P&T cyclus zeer hoog zou zijn en daarmee de kans op besmetting van de bevolking door radioactieve stoffen en de kans op grootschalige ongelukken met radioactief materiaal.

10

Een nominaal werkende cyclus voor partitie en transmutatie zou minimaal een eeuw, maar waarschijnlijk veel langer, nodig hebben om een deel van de langlevende radionucliden in het thans bestaande radioactieve afval te transmuteren tot kortlevende radionucliden.

11

De personele bezetting van de installaties van de partitie en transmutatie cyclus gedurende meer dan eeuw, zowel kwantitatief als kwalitatief, is een open vraagstuk.

12

Het is niet onderzocht of een partitie en transmutatie cyclus, indien te verwezenlijken, een netto energieverbruiker of een netto energieleverancier zou zijn.

13

De installaties van de partitie en transmutatie cyclus zullen gedurende de bedrijfsduur van de cyclus (een of meer eeuwen) ettelijke keren vervangen moeten worden.

Kosten en risico-analyse van de ontmanteling van de ernstig radioactief besmette installaties aan het eind van hun levensduur ontbreken in de beschouwingen van de nucleaire industrie.

14

Over de kosten van een partitie en transmutatie cyclus, indien te verwezenlijken, zijn nog niet te becijferen. Ervaringen in het verleden met complexe nucleaire projecten, zeker als het nieuwe technologie betreft, wijzen op bedragen die een veelvoud van 100 miljard euro zijn.

15

Gedurende het afgelopen decennium is de aandacht in het internationale partitie en transmutatie onderzoek verschoven naar de ontwikkeling van kernenergie met gesloten splijtstofcyclus en snelle-neutronen reactors, in feite geavanceerde vormen van de kweekreactor uit de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw.

16

Technologisch zijn er grote overeenkomsten tussen een P&T cyclus en een kweekcyclus, zij het dat de kweekcyclus minder gecompliceerd is. Onderzoek in de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw (kosten meer dan 100 miljard euro) hebben aangetoond dat de kweekcyclus technisch niet uitvoerbaar was met de toenmalige technieken.

Referenties

- [1]
ECN 1998
Heijn J, Gruppelaar H, Kloosterman J L & Konings R,
*Levensduurverkorting Radioactief Afval, Optie voor de
aanpak van het kernafvalprobleem*,
Energieonderzoek Centrum Petten, ECN-98-001, 1998,
ISBN 90-375-0002-1 (in Dutch)
- [2]
CEA 2002
Radiotoxicity of spent fuel,
Clefs CEA no. 46,
Commissariat à l'Energie Atomique, 2002,
<http://www.cea.fr/var/storage/static/gb/library/Clefs46/>
- [3]
DOE-NE 2009
Advanced Fuel Cycle Initiative,
Department of Energy, Office of Nuclear Energy,
date not given, probably 2009, file retrieved from web
April 10, 2011,
<http://www.ne.doe.gov/AFCI/neAFCI.html>
- [4]
NWMO 2008,
Jackson D P & Dormuth K W,
*Watching Brief on Reprocessing, Partitioning and
Transmutation and Alternative Waste Management
Technology – Annual Report 2008*,
Nuclear Waste Management Organization, Toronto,
Ontario, Canada,
NWMO TR-2008-22, December 2008,
www.nwmo.ca/
- [5]
SKB 2010,
Blomgren J, Karlsson F, Pomp S, Aneheim E, Ekberg C,
Fermvik A, Skarnemark G, Wallenius J, Zakova J, Grenthe I
& Szabo Z,
*Partitioning and transmutation. Current developments –
2010*,
Technical Report TR-10-35,
Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), January 2010,
www.skb.se/upload/publications/pdf/TR-10-35webb.pdf
- [6]
KiKK 2007
Kaatsch P, Spix C, Schmiedel S, Schulze-Rath R,
Mergenthaler A & Blettner M,
*Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der
Umgebung von Kernkraftwerken
(KiKK-Studie)*,
Vorhaben StSch 4334 (in German),
Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Bundesamtes
für Strahlenschutz, Germany, 2007,
4334_KiKK_Gesamt_T.pdf
www.bfs.de/de/bfs/druck/Ufoplan/
- [7]
Hollocher 1975
Hollocher T C,
Storage and disposal of high-level radioactive wastes, in:
The Nuclear Fuel Cycle,
Union of Concerned Scientists,
MIT Press, Cambridge, Mass., 1975.
- [8]
JPL-77-69 1977
An analysis of the technical status of high-level waste
and spent fuel management systems,
JPL-77-69,
Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, December 1977.
- [9]
Bell 1973
Bell M J,
ORIGEN, the ORNL isotope generation and depletion
code,
ORNL-4628,
Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn, 1973.
- [10]
Charpak&Garwin 2002
Charpak G & Garwin RL,
'The DARI'
Europhysics News (2002) Vol 33 No.1
www.europhysicsnews.com/full/13/article4/article4.html
- [11]
UCS 2007
*A brief history of reprocessing and cleanup in West Valley,
NY
Factsheet*,
Union of Concerned Scientists, December 2007.
www.uscusa.org
- [12]
Nature, 23 November 2006, p.415.
- [13]
www.world-nuclear.org/info/inf69.html
January 2011.
- [14]
NRC 1996
Rasmussen N C (chair) et al.,
Nuclear Wastes. Technologies for separations and
transmutation,
National Research Council, NRC
Washington DC: National Academy Press, 1996.
- [15]
www.world-nuclear.org/info/inf35.html
October 2010
- [16]
RAND 1979,

E.W. Merow, S.W. Chapel & C. Worthing,
A review of cost estimation in new technologies,
RAND-2481-DOE,
prepared for US Department of Energy,
RAND Corporation, Santa Monica, CA., July 1979.

[17]
RAND 1981
Merow E W, Philips K E & Myers C W,
*Underestimating cost growth and performance shortfalls
in pioneer process plants*,
RAND/R-2569-DOE,
prepared for US Department of Energy,
RAND Corporation, Santa Monica, CA., September 1981.

[18]
LPSC 2001
Brissot R, Heuer D, Ler Brun C, Loiseaux J-M, Nifenecker H
& Nuttin A,
Nuclear energy with (almost) no radioactive waste?
Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
de Grenoble,
<http://lpsc.in2p3.fr/gpr/english/NEWNRW/NEWNRW.html>