

Kernenergie én Nederland



Een verkenning naar de rol van Nederland
op het gebied van kernenergie

Januari 2007

Kernenergie én Nederland

Een onderzoek naar de mogelijkheden voor Nederland op het gebied van kernenergie

Geschreven door:

Mark Veltman
Student nr.: 204759

In opdracht van:

Hiteq, *centrum van innovatie*

Begeleiding:

Ir. Daan Maatman
Hiteq

Ir. Michael Broomhead
Hogeschool van Amsterdam

Januari 2007

Illustratie voorblad: kerncentrale in Borssele (bron: ANP)



Voorwoord

Voor u ligt het rapport met de titel ‘Kernenergie én Nederland’. Met dit rapport heb ik geprobeerd een neutraal beeld weer te geven van de bezig- en mogelijkheden van Nederland op het gebied van kernenergie en is het resultaat van mijn 5 maanden durende stage welke ik bij Hiteq, *centrum van innovatie* gevolgd heb.

Het onderwerp ‘kernenergie’ is zeer actueel en de meeste mensen hebben hier ook een mening over, echter zijn niet al deze meningen gebaseerd op relevante feiten. Bij deze meningen speelt er vaak ook een grote emotionele factor mee, deze bemoeilijkt het soms een neutraal beeld te vormen.

Omdat je een onderzoek niet alleen kunt doen wil ik iedereen die zijn/haar steentje heeft bijgedragen aan de totstandkoming van dit product hartelijk bedanken. En dan in het bijzonder, Daan Maatman (begeleider Hiteq) en Michael Broomhead (begeleider HvA).

Ook wil ik Jacques Grupa, Frodo Klaassen, Tony Donné, Tim van der Hagen, Hans Codée, Wim Turkenburg en Gert van Uitert bedanken voor de medewerking aan dit rapport in welke vorm dan ook. Verder wil ik al mijn Hiteq collega’s hartelijk bedanken voor de mooie en leerzame tijd die ik met hun heb doorgebracht.

En last but not least wil ik Aly Hendriks bedanken voor haar kritische maar zonder meer zinvolle taalkundige begeleiding bij het schrijven van dit rapport. Mede dankzij haar kan ik trots zijn op dit eindresultaat.

Mark Veltman

Inhoud

Voorwoord	5
Samenvatting	8
1. Inleiding	9
2. Wat is kernenergie?	10
3. Kernsplijting	12
3.1 Het principe van kernsplijting.....	12
3.1.1 Geschiedenis van kernsplijting.....	13
3.1.2 Splijstof.....	15
3.1.3 Actieve landen op de kernenergiemarkt.....	18
3.2 Radioactiviteit en straling.....	19
3.2.1 Radioactiviteit.....	19
3.2.2 Straling.....	19
3.3 Radioactief afval.....	23
3.3.1 Verwerking van het radioactieve afval.....	23
3.3.2 Ondergrondse opslag.....	24
3.3.3 Transmutatie.....	26
4. Kernfusie	27
4.1 Het principe van kernfusie.....	27
4.2 Korte geschiedenis van kernfusie.....	28
4.3 Kernfusieprojecten.....	29
4.4 Bijdrage Nederland.....	30
5. Conclusie	31
5.1 Technologisch gebied.....	31
5.2 Opleidingsmogelijkheden.....	33
5.3 Maatschappelijk vlak.....	33
Bronnen	34
Termenlijst en afkortingen	36
Bijlagen	38
Bijlage 1: Typen reactoren.....	38
Bijlage 2: Kernenergiecyclus.....	46
Bijlage 3: Actieve landen.....	47
Bijlage 4: De voor- en nadelen van kernsplijting.....	48
Bijlage 5: De COVRA.....	50
Bijlage 6: Het obstakel van kernfusie, plasma.....	52

Samenvatting

Met kernenergie wordt de energie bedoeld die vrijkomt bij het splijten (kernsplijting) of fuseren (kernfusie) van atoomkernen. Momenteel wordt alleen kernsplijting als commerciële energieopwekkingmethode gebruikt, dit omdat de techniek achter kernfusie niet ver genoeg door ontwikkeld is. Kernsplijting is het splijten van een uranium-235 atoom door middel van een neutron. Wanneer dit atoom gespleten wordt komen er (minimaal) twee brokstukken, twee á drie neutronen en een grote hoeveelheid energie vrij.

Kernenergie heeft een aantal grote voordelen, maar heeft ook een groot nadeel dat voor veel mensen zwaarder weegt dan de voordelen. Dit nadeel is het afval, geen gewoon afval, maar afval dat ioniserende straling uitzendt, beter bekend als radioactief afval. Radioactief afval blijft voor duizenden jaren schadelijk voor mens en milieu. Echter, met de huidige technieken op het gebied van afvalverwerking kan de levensduur (tijd waarin het afval schadelijk is) al flink gereduceerd worden tot enkele honderden jaren.

Momenteel wordt er onderzoek gedaan om het afval ondergronds in geologisch stabiele lagen op te slaan of door middel van transmutatie de langlevende (gevaarlijke) deeltjes om te zetten in kortlevende deeltjes. Onderzoek hiernaar wordt onder andere gedaan bij de Nuclear Research and consultancy Group (NRG) in Petten.

Doordat de benodigde grondstof eindig is en afval met zich meebrengt mag kernsplijting niet tot een vorm van duurzame energie benoemd worden. Kernfusie daarentegen mag zich hier wel tot benoemen. Dit komt doordat de brandstof voor kernfusie bestaat uit waterstof isotopen (oneindige hoeveelheid aanwezig op aarde) en het afval-/restproduct uit helium (een onschadelijk gas) bestaat. Kernfusie staat echter nog voor een aantal grote technische uitdagingen. Eén van deze uitdagingen is dat het fuseren van atomen een extreem hoge temperatuur vereist. En omdat nog niet bewezen is dat kernfusie rendabel is, is men momenteel bezig met de bouw van een wereldproject op het gebied van kernfusie. De schatting is dat wanneer alle proefprojecten goed gaan, er in 2050 de eerste commerciële kernfusiereactor zal zijn.

Nederland kan met de aanwezige organisaties en instellingen op dit gebied een belangrijke rol spelen in zowel het onderzoek naar en optimalisering van kernsplijting. Op het gebied van kernfusie kan Nederland een belangrijke rol spelen binnen het wereldwijde 'ITER' project.

Bij de rol van Nederland op het gebied van kernsplijting is te denken aan het hoog aangeschreven fysische onderzoek en de industriële automatisering. Ook heeft Nederland met haar onderzoeksreactoren goede gelegenheden om onderzoek te doen naar speciale materialen. Materialen welke goed neutronen in kunnen vangen of materialen die tegen extreem hoge temperaturen bestand zijn.

Tenslotte worden er bij de TU-Delft en NRG een tal van opleidingen verzorgd voor onder andere reactorpersoneel.

1. Inleiding

Kernenergie is een beladen onderwerp. In 1955 voorspelde een stofzuiger fabrikant dat er binnen tien jaar een ‘nucleair aangedreven stofzuiger’ op de markt zou komen. Ook voorzag destijds een fabrikant van boilers en radiatoren een huisreactor verschijnen op de markt¹. Echter is van deze beide ideeën nooit iets terecht gekomen. En deze euforische stemming begon begin jaren ’70 last te krijgen van een maatschappelijke weerstand, welke eind jaren ’70 sterke politieke steun kreeg na het reactorongeval in de Amerikaanse kerncentrale ‘Three Mile Island’. De plannen die destijds op tafel lagen voor de nieuwbouw van kerncentrales (ook in Nederland) werden helemaal van de tafel geveegd na het reactorongeval in Tsjernobyl.

De behoefte aan energie neemt steeds verder toe en nu er een te kort aan fossiele brandstoffen dreigt te ontstaan én het klimaat een steeds grotere kwestie wordt, zal er gekeken moeten worden naar andere vormen van energieopwekking. Om deze redenen is de Staatssecretaris van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) in september 2006 met ‘Randvoorwaarden voor nieuwe kerncentrales’ gekomen. Dit geeft een leidraad aan waar eventuele nieuwe kerncentrales aan moeten voldoen.

‘Welke technologische rol kan Nederland spelen op de internationale markt van de kernenergie?’, luidt de onderzoeksvraag en zal worden beantwoord in de loop van het rapport. Doordat alle (soms toch wel) lastige onderwerpen binnen dit rapport voorzien zijn van een uitleg, is er geprobeerd het duidelijk leesbaar te maken voor een breed publiek.

Het rapport is als volgt opgebouwd. Het begint met een kort overzicht van wat kernenergie nou precies is (tweede hoofdstuk). Nadat verduidelijkt is wat het woord ‘kernenergie’ inhoudt en dat kernenergie eigenlijk in twee vormen bestaat (kernsplijting en kernfusie) zal er in het derde hoofdstuk dieper op de belangrijkste vorm (kernsplijting) in worden gegaan. Omdat momenteel kernsplijting de enige commercieel toepasbare vorm van kernenergie is, wordt kernsplijting grondiger behandeld dan dat er in het vierde hoofdstuk gebeurt met kernfusie. In het vijfde en tevens laatste hoofdstuk komt de conclusie van het onderzoek naar voren, deze is gevormd op basis van een drietal punten, te weten: Technologisch gebied, opleidingsmogelijkheden en maatschappelijk vlak.

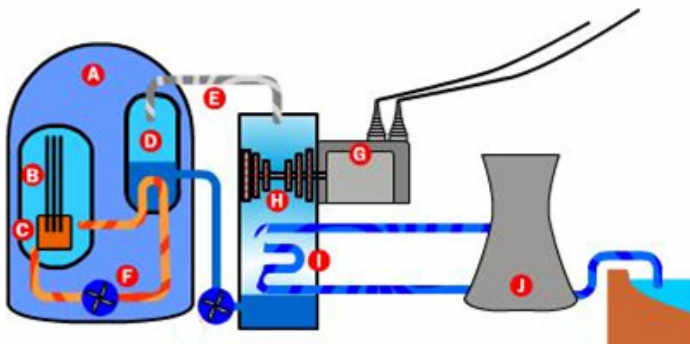
Omdat getracht is dit rapport een neutraal beeld te laten weergeven van de mogelijkheden voor Nederland op het gebied van kernenergie, wordt er gehoopt dat het een bijdrage kan leveren aan de verbreding van het gezichtsveld van de mensen die voor, tegen of nog geen mening hebben betreffende kernenergie.

¹ Uit: ‘Energie, van brandhout tot zonnecel.’ van Lucas Reijnders

2. Wat is kernenergie?

Kernenergie of atoomenergie is de energie die vrijkomt bij splitsing of fusie van atoomkernen (aldus de Dikke van Dale) en voorziet zo'n 16% van de wereldwijde vraag naar elektriciteit. De techniek van alle 441 in bedrijf zijnde kerncentrales wereldwijd, berust op het principe van kernsplijting. Dit is het splijten van (voornamelijk) uraniumatomen met behulp van neutronen. Wanneer een uraniumatoom een neutron invangt, wordt de kern van het atoom instabiel en zal na een zeer korte tijd breken (splijten) in twee brokstukken van ongelijke grootte. Bij dit proces komen weer twee à drie nieuwe neutronen vrij die op hun beurt weer nieuwe uraniumatomen kunnen splijten. Dit 'domino effect' wordt ook wel aangeduid met een kettingreactie. Wanneer de kern splijt komen er niet alleen neutronen en twee brokstukken (xenon, strontium of krypton) vrij, maar komt er ook een grote hoeveelheid energie vrij in de vorm van warmte (enkele honderden graden Celsius). De kern van een kerncentrale wordt (in de meeste gevallen) gekoeld door water; dit water neemt de vrijgekomen energie op. Bij een Pressurized Water Reactor (PWR, reactortype dat het meest voorkomt, 268 centrales) staat dit koelwater onder hoge druk (155 bar). Hierdoor neemt het wel de warmte op, maar niet gaat koken. Dit koelwater bevindt zich in een primaire kringloop dat in verbinding staat met een secundaire kringloop. Deze secundaire kringloop staat onder een vele malen lagere druk, waardoor het water in deze kringloop wel gaat koken en zo stoom produceert. Met deze stoom wordt een stoomturbine aangedreven die zijn bewegingsenergie door middel van een generator omzet in elektriciteit² (zie afbeelding 1). De stoom die door de stoomturbine gegaan is wordt door middel van een condensator weer omgezet naar water, omdat het een gesloten circuit is (geen verlies van water) kan dit (koel)water constant de zelfde route doorlopen.

Bij een Boiling Water Reactor (BWR, 94 centrales) is dit anders, hier is namelijk geen scheiding van het koelwater met de stoomproductie. Het koelwater van een BWR staat onder een druk van 80 bar en gaat koken bij zo'n 300°C waardoor het koelwater direct wordt omgezet in stoom. De primaire en secundaire kringloop zijn bij de BWR toegevoegd tot één circuit. De stoom wordt op de zelfde wijze als bij de PWR omgezet in elektriciteit.



Afbeelding 1: schematische weergave van een kerncentrale (type PWR), A= reactor, B= regelstaven, C= brandstof kern, D= stoom generator, E= stoom, F= pomp, G= generator, H= stoomturbine, I= condensator en J= koeltoren. De eerste kringloop(C,D,F) is de primaire, de kringloop van D, E en H is de secundaire en de kringloop van het koelwater (I en J) wordt ook wel de tertiaire kringloop genoemd.

² Dit wordt ook wel de conventionele manier van energie (elektriciteit) opwekken genoemd. Dit principe is ook terug te vinden bij de gas- en kolencentrales

Kernfusie heeft meer verschillen dan overeenkomsten met kernsplijting. De grootste overeenkomst is dat bij kernfusie op de zelfde wijze (conventionele manier) elektriciteit wordt opgewekt. De andere is dat de (grote hoeveelheid) energie opgewekt wordt door middel van atomen. Grote verschillen zijn, dat er nog geen commerciële kernfusiecentrale staat en dat dit ook nog lang kan gaan duren (naar schatting rond 2050 eerste commerciële kernfusie centrale). Een ander verschil is dat het kernsplijtprincipe zich richt op het splijten van ‘grote/zware’ atomen (uranium) en het kernfusieprincipe zich richt op het samensmelten (fuseren) van ‘lichte’ atomen (waterstof). Bovendien is er voor het fuseren van atomen een extreem hoge temperatuur vereist, 100-150 miljoen °C.



Afbeelding 2: schematische weergave van een kernfusie centrale, het gele gedeelte is het plasma, hier vindt het fuseren plaats (100-150 miljoen °C). (bron: www.fusie-energie.nl)

Om een beeld te geven van de hoeveelheid brandstof tegenover de hoeveelheid energie die vrijkomt bij kernenergie, volgt hier een korte vergelijking.

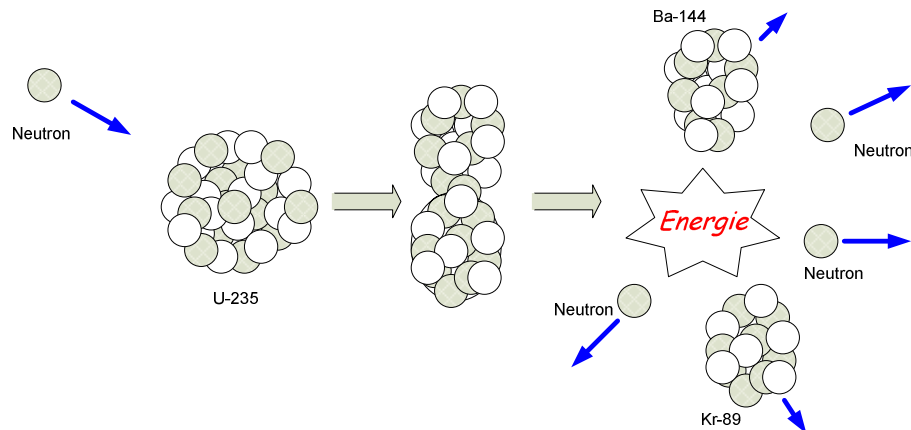
Het splijten van 1 gram uranium levert evenveel energie als het verbranden van 2500 liter benzine of 3000 kilogram kolen. (bron: *Reactor Instituut Delft*).

Relativiteitstheorie

De energie die vrijkomt bij kernsplijting is te berekenen aan de hand van de relativiteitstheorie van Einstein, $E = mc^2$. Hierbij staat de E voor de vrijgekomen energie, de m voor het massaverschil en de c voor de lichtsnelheid. De lichtsnelheid is een zeer groot getal (300.000.000 m/s).

3. Kernsplijting

Kernsplijting is de methode die in alle 441 kerncentrales op de wereld wordt toegepast en berust op het principe van het uit elkaar vallen (splijten) van ‘zware’ atomen in twee lichtere brokstukken wat gepaard gaat met een grote uitzending van energie. Dit principe wordt op afbeelding 3 schematisch weergegeven.

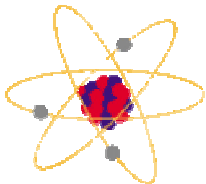


Afbeelding 3: het splijten van een uraniumatoom (kernsplijting)

3.1 Het principe van kernsplijting

Om het principe van kernsplijting te kunnen verduidelijken zal er eerst dieper op het ‘atoom’ worden ingegaan.

Alle materie op aarde is opgebouwd uit atomen. Deze bouwstenen zijn, voornamelijk, de kleinste scheikundige elementen. Een atoom bestaat uit een kern van twee verschillende elementen, protonen (positief geladen) en neutronen (ongeladen) waar omheen een wolk van elektronen (negatief geladen) draait. Deze wolk bepaald de grootte van het atoom.



Afbeelding 4: een (willekeurig) atoom

De elektronenwolk blijft om de kern heen zitten door middel van een kernbinding, de elektrische aantrekking tussen de positief geladen kern en de negatief geladen elektronen. Veel natuurkundige eigenschappen (onder andere de massa en het radioactieve gedrag van het atoom) hebben niets met de elektronen te maken, maar met de (extreem kleine) kern (de protonen en de neutronen). Omdat de elektronen vrijwel geen massa hebben, bevindt zich alle massa in de uitermate kleine kern. De protonen en neutronen worden in de kern bij elkaar gehouden door de sterke kernkracht; dit is de sterkste kracht van de vier fundamentele natuurkrachten.

Het aantal protonen is gelijk aan het atoomnummer en dit bepaalt de chemische eigenschappen van het atoom. Een stof die bestaat uit atomen met hetzelfde atoomnummer wordt een element genoemd, enkele voorbeelden hiervan zijn waterstof (atoomnummer 1), helium (atoomnummer 2), ijzer (atoomnummer 26) en uranium (atoomnummer 92). De 118

momenteel (anno 2006) bekende elementen zijn gerangschikt in het periodieke systeem³. Het is mogelijk dat atomen van hetzelfde element niet hetzelfde aantal neutronen bezitten (en dus ook een massaverschil hebben); dit worden isotopen genoemd. Isotopen hebben dezelfde chemische maar andere fysische eigenschappen. Isotopen van een bepaald element hebben dus hetzelfde atoomnummer maar een verschillend massagetal.

Een voorbeeld met het element uranium. Uranium heeft atoomnummer 92, dus 92 protonen in de kern. Natuurlijk uranium komt in de meeste gevallen (99,3%) voor met het massagetal 238 (dit wordt verkort weergegeven als ${}_{92}^{238}\text{U}$ of als U-238). Dit houdt dus in dat er $238 - 92 = 146$ neutronen in deze kern zitten. Een isotoop van uranium, komt in 0,7% van de gevallen voor, is uranium met massagetal 235 (${}_{92}^{235}\text{U}$ of U-235). Dit isotoop heeft 92 protonen en 143 neutronen in de kern. En kan, in tegenstelling tot U-238, splijten door het invangen van thermische neutronen (= kernsplijting).

Meerdere atomen in een vaste rangschikking van chemische bindingen met elkaar verbonden zijn, worden moleculen genoemd. Hierbij hoeft het niet te gaan om atomen van het zelfde element. Zo bestaat een watermolecuul uit 2 waterstofatomen en 1 zuurstofatoom.

Natuurkrachten

Alle krachten kunnen worden afgeleid uit een viertal krachten, te weten: 1° sterke kernkracht – houdt de protonen en neutronen bij elkaar, 2° elektromagnetische kracht – houdt de elektronen vast, 3° zwakke kernkracht – speelt een rol in vervalprocessen en 4° de zwaartekracht – houdt materie op grote schaal bij elkaar. (de krachten zijn van sterk naar zwak opgesomd).

Atoomkernen van het isotoop U-235 kunnen door kernsplijting worden gesplitst tot kleinere kernen onder het uitzenden van warmte, neutronen en straling. Wanneer een U-235 isotoop een neutron invangt, wordt dit U-236, een uraniumisotoop die niet in de natuur voorkomt en een zeer korte halveringstijd heeft. Hierdoor splitst het uraniumisotoop zich in twee ongelijke brokstukken. Deze brokstukken kunnen bestaan uit één van de volgende elementen krypton (Kr), barium (Ba), cesium (Cs), jodium (I), strontium (Sr) of xenon (Xe). Het splijten van een uraniumatoom is in afbeelding 3 schematisch weergegeven en ziet er in formulevorm als volgt uit ${}_{92}^{235}\text{U} + \text{neutron} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{144}\text{Ba} + {}_{36}^{89}\text{Kr} + 3 \text{ neutronen} + \text{straling}$.

Per reactie komt er een heel grote hoeveelheid energie vrij in de vorm van warmte. Ter vergelijking, het splijten van 1 gram uranium levert evenveel energie op als de verbranding van 2500 liter benzine of de verbranding van 3000 kg kolen. Met de vrijgekomen warmte wordt op conventionele manier energie. Het opwekken van stoom wordt niet in alle typen kerncentrales op dezelfde wijze gedaan. (zie Bijlage 1: Typen reactoren). De neutronen die vrijkomen, kunnen op hun beurt weer een nieuwe reeks splijtingen veroorzaken (kettingreactie).

3.1.1 Geschiedenis van kernsplijting

In 1939 ontdekten twee Duitse scheikundigen dat uraniumatomen zich laten splitsen, wanneer hier neutronen op afgeschoten worden. In 1942 vond in de eerste kerncentrale een kettingreactie plaats van splijtende uraniumatomen. Deze centrale was geladen met uranium en had als moderator⁴ grafiet. Zonder moderator dooft de kettingreactie, in een met alleen natuurlijk uranium geladen kerncentrale, meteen. Het doel van deze eerste kerncentrale was

³ In het periodiek systeem (der elementen) zijn de chemische en fysische eigenschappen van de elementen in kaart gebracht.

⁴ Een moderator is een stof welke in een kerncentrale ervoor zorgt dat de snelle neutronen zodanig worden afgeremd dat ze deel blijven nemen aan de kettingreactie en niet voortijdig de reactor verlaten

het aantonen dat het splijten van uranium middels een kettingreactie zichzelf op gang kan houden. Het opwekken van elektrische energie was hier nog niet het doel. Tijdens en na de Tweede Wereldoorlog was de ontwikkeling van kernenergie voornamelijk gericht op militaire doeleinden, namelijk voor de atoombom en voor de aandrijving van onderzeeërs. In een atoombom wordt energie op ongecontroleerde wijze opgewekt met kernsplijtingreacties, deze reacties treden op gecontroleerde wijze ook op in een kerncentrale. In 1954 werd de eerste atoomonderzeeër van de Amerikaanse marine te water gelaten. Deze werd aangedreven door een drukwaterreactor (PWR), wat als concept meteen een succes werd. De Amerikaanse elektriciteitssector nam dit concept over en later zijn ook industrieën uit andere landen dit reactortype gaan produceren. Tot de jaren '90 is de ontwikkeling van kernenergie een zeer nationale ontwikkeling geweest, elk land bouwde zijn eigen nucleaire sector op, mits dit land groot genoeg was. De kleinere landen (Nederland ed.) deden dit met ondersteunende bedrijven en geïmporteerde kerncentrales. Ook andere concepten dan de PWR werden in deze tijd ontwikkeld.

Na een aanvankelijk euforische stemming begon in de jaren '70 een maatschappelijke weerstand de kop op te steken. Deze maatschappelijke beweging kreeg politieke steun na het reactorongeval in de Amerikaanse kerncentrale 'Three Mile Island' in 1979 en daarna in sterke mate na de ramp in het (toen nog) Sovjet-Russische Tsjernobyl in 1986. Dit had enerzijds tot gevolg dat het politieke klimaat de bouw van kerncentrales in een aantal landen praktisch verhinderde, maar anderzijds werd hierdoor overal het klimaat van regelgeving en overheidstoezicht strenger, waardoor de betrouwbaarheid en de economische prestaties bij de nieuwe centrales verbeterde ten opzichte van de oude. Gedurende de jaren '90 werd de nieuwe generatie (Generatie III) reactoren alleen gebouwd in het Verre Oosten (Japan en Korea). In 2006 is Finland begonnen met de bouw van een nieuwe Generatie III reactor, de European Pressurized Reactor (EPR), in Frankrijk liggen de papieren klaar voor de bouw van een zelfde type kerncentrale.

In Nederland heeft van 1968 tot 1997 een BWR van de eerste generatie gedraaid in Dodewaard, deze centrale had een elektrisch vermogen van 54 MW. In 1973 kwam hier een tweede generatie PWR bij in Borssele, deze centrale is onlangs opgewaardeerd van 450 MW naar 480 MW (door verbetering van onder andere turbines). In 2006 is besloten dat de centrale tot 2033 operationeel mag blijven. Verder beschikt de Technische Universiteit Delft sinds 1963 over de Hoger Onderwijs Reactor met een thermisch vermogen van 2 MW. Ook staan er in Petten, onder het beheer van de NRG (Nuclear Research & consultancy Group), twee onderzoeksreactoren. Deze twee reactoren wekken samen met de reactor in Delft geen elektriciteit op en worden daarom ook niet tot kerncentrales gerekend. (*bron: nrg-nl.com*)

Kernenergierampen

Het ongeluk op 'Three Mile Island' in 1979 is de grootste kernenergieramp uit de Amerikaanse geschiedenis, hier vielen geen slachtoffers bij en na de nodige werkzaamheden kon de reactor weer in bedrijf gesteld worden.

Het ongeluk in Tsjernobyl (1986) is waarschijnlijk het bekendste ongeluk op het gebied van kernenergie. De oorzaak van dit ongeval was een menselijk falen met als gevolg een oververhitte reactorkern. Bij de hierdoor veroorzaakte explosie en brand kwamen 31 mensen om het leven. Door slechte communicatie en slechte (voorzorg)maatregelen is het niet bij dit aantal slachtoffers gebleven (het exacte aantal slachtoffers is niet aan te tonen en tot op de dag van vandaag wordt hier nog fel over gediscussieerd). Een dergelijk ongeluk was destijds al niet mogelijk geweest in een westerse kerncentrale.

3.1.2 Splijtstof

De splijtstof (brandstof) welke in de meeste gevallen gebruikt wordt, in een kerncentrale, is uranium. En dan is vooral het (splijtbare) isotoop U-235 van groot belang. Echter bestaat natuurlijk uranium voor 99,3 % uit U-238 en voor 0,7 % uit U-235 én is er voor een rendabele reactie tussen de 3 en 5% U-235 nodig. Dit probleem is op te lossen door middel van het verrijken van uranium. Dat wil zeggen een hoger percentage U-235 bereiken (van 0,7% naar minimaal 3%). Dit verrijken kan op twee manieren gedaan worden, namelijk via gascentrifuge en via gasdiffusie.

Bij beide methodes wordt gebruik gemaakt van het massaverschil (U-235 is lichter dan U-238). Het uranium wordt in beide gevallen aan fluor gebonden, waardoor er uraniumhexafluoride ontstaat (het binden van uranium aan fluor wordt ook wel conversie genoemd), deze verbinding is bij 60°C gasvormig.

Bij gascentrifuge wordt het gas in een ultracentrifuge (met zeer hoge snelheid draaiende gascentrifuge) bewerkt. De zwaardere fractie (U-238) wordt naar de buitenkant geslingerd en kan zo worden afgetapt, in de centrifuge zelf blijft voornamelijk het lichtere U-235 over. Het op deze manier verrijken van uranium wordt onder andere toegepast bij Urenco in Almelo.

Bij gasdiffusie wordt het gas door een membraam geperst, waarbij de lichtere fractie (U-235) gemakkelijker door het membraam gaat dan de zwaardere fractie. Het gehalte U-235 neemt hierdoor toe.

Tot aan 1942 werd eigenlijk alleen de gascentrifuge methode gebruikt, echter lukte het de Amerikanen niet om de technische problemen hiermee op te lossen en stapten over op de gasdiffusie methode (kost veel meer energie). Tot op heden hielden de Amerikanen en de Fransen vast aan dit principe, maar er schijnen plannen te zijn om ook over te stappen op de techniek van de gascentrifuge.

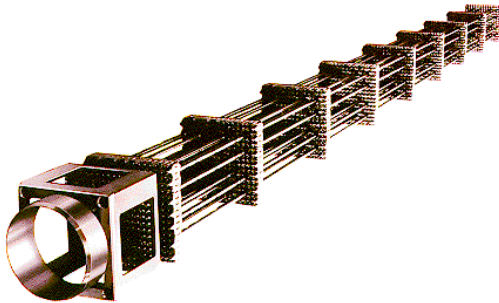
Uranium, de brandstof voor vrijwel alle kerncentrales, is na raffinage een zilverwit licht radioactief metaal dat iets zachter is dan staal. Het is buigzaam, vervormbaar en heeft een zeer hoge dichtheid (65% dichter dan lood). Uraniniet is het uraniumerts dat van nature het meest op aarde voorkomt. Het bestaat voornamelijk uit uraniumdioxide, voor verdere verwerking wordt dit verwerkt tot ammoniumdiuranaat, wat beter bekend is onder de naam 'Yellow Cake', dit bevat 70 tot 80% uraniumoxide. Om U-235 te winnen moeten grote hoeveelheden erts gedolven worden, want in 1000 kilo uraniumerts zit slechts 1 kilo U-235. Uraniummijnen zijn onder andere te vinden in Australië, Canada, Niger, de Verenigde Staten en Zuid-Afrika. Echter kan uranium ook gewonnen worden als bij-/afvalproduct bij de goud- en zilvermijnbouw.

Voordat het uranium vanuit de mijn in de kerncentrale terechtkomt, ondergaat het een aantal handelingen.

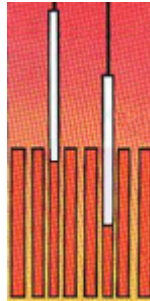
Nadat de erts gewonnen is en verwerkt is tot 'Yellow Cake' zal dit via chemische handelingen omgezet worden tot uraniumhexafluoride (UF_6) dit wordt ook wel conversie genoemd. Na het omzetten van de 'Yellow Cake' in UF_6 , zal dit worden verrijkt om een groter aandeel van splijtbare isotopen te verkrijgen. Het deel waar minder splijtbare isotopen in voor komen, wordt ook wel 'verarmd uranium' genoemd. Het verrijkte deel gaat vervolgens naar een 'splijtstof' fabriek, waar de splijtstofstaven voor de kerncentrale worden gemaakt. In deze fabriek wordt het fluor uit het UF_6 verwijderd, waardoor uraniumdioxide (UO_2) ontstaat. Dit zwarte poeder wordt tot tabletjes geperst en verpakt in hulzen (van roest vast staal of Zircaloy⁵) die in bundels bij elkaar de splijtstofelementen vormen. De totale hoeveelheid

⁵ Legering op basis van zirkonium en tin

uranium in een splijtstofelement is circa 500 kg voor een drukwaterreactor (PWR) en circa 200 kg voor een kokendwaterreactor (BWR). In een kerncentrale zijn meerdere splijtstofelementen aanwezig, welke gescheiden (kunnen) worden door regelstaven. Met deze staven is het vermogen te beïnvloeden van de centrale, hoe verder de staven naar beneden gaan des te kleiner is de kans dat de splijtbare isotopen nog kunnen splijten. Wanneer de staven helemaal naar beneden staan, zal de kettingreactie stoppen.



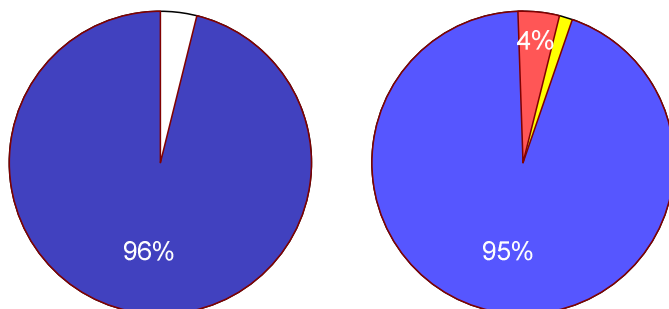
Afbeelding 5: splijtstofelement



Afbeelding 6: schematische weergave regelstaven

Na enige tijd is er te weinig splijtbaar uranium over in de splijtstofelementen om de het splijtingproces op gang te houden en moeten de elementen vervangen worden door nieuwe splijtstofelementen.

Het nieuwe (of verse) splijtstofelement dat gebruikt wordt bestaat voor circa 96% uit U-238 en voor circa 4% uit U-235. De oude (of opgebrande) splijtstofelementen bestaan voor 95% uit uranium (voornamelijk U-238), voor 1% uit plutonium en voor 4% uit splijtingsproducten.



Afbeelding 7: links de verse splijtstof (96% U-238 en 4% U-235) en rechts de gebruikte splijtstof (95% uranium, 4% splijtingsproducten en 1% plutonium).

Als een U-238 atoom een neutron invangt, kan dit (het niet in de natuur voorkomende) Pu-239 (plutonium) worden. Pu-239 is splijtbaar net zoals U-235 en zorgt daardoor ook deels voor de warmteontwikkeling in de kerncentrale.

Actiniden en splijtingsproducten

De actiniden zijn een serie van 15 elementen met een atoomnummer van 89 tot en met 103. Alle actiniden zijn radioactief en vervallen spontaan naar lagere elementen. Alleen thorium (90) en uranium (92) komen nog in de natuur voor, dan andere actiniden kunnen op kunstmatige wijze gemaakt worden.

Splijtingsproducten ontstaan door het splijten van zware atomen (uranium, plutonium en thorium) of door het daarop volgende radioactieve verval, enkele van deze producten zijn: xenon, americium, cesium, strontium en krypton.

Wanneer de splijtstofelementen uit de kerncentrale gehaald zijn, kunnen deze op twee manieren behandeld worden. De eerste manier is om de splijtstofelementen direct op te bergen, dit wordt ook wel de ‘open splijtstof- of kernenergiecyclus’ genoemd (*zie bijlage 2: Kernenergiecyclus*). Bij de tweede manier wordt het grootste gedeelte (96%) gerecycled of opgewerkt, dit wordt ook wel de ‘gesloten splijtstof- of kernenergiecyclus’ genoemd (*zie bijlage 2: Kernenergiecyclus*). Bij opwerken wordt door middel van een chemisch proces de nog waardevolle stoffen (uranium en plutonium) uit de opgebrande splijtstofelementen gehaald. Hierdoor blijven alleen de splijttingsproducten (afval) over, met als gevolg veel minder (radioactief) afval. Opwerkingsfabrieken zijn te vinden in Engeland, Frankrijk, Rusland en Japan. Het teruggewonnen uranium en plutonium kunnen na een passende chemische bewerking weer opnieuw in de centrale gebruikt worden, het uranium kan de gehele kernenergiecyclus (van uraniumerts tot afval) weer doorlopen en het plutonium kan gebruikt worden bij de splijtstofstavenfabricage. Door het plutonium te mengen met uranium ontstaat er een splijtstofmengsel dat bekend staat als MOX (Mixed Oxide). Dit splijtstofmengsel kan in alle typen kerncentrales gebruikt worden, echter is er wel een vergunning nodig voor het gebruik van MOX, dit om proliferatie te kunnen voorkomen. In Europa zijn er 50 kerncentrales met een dergelijke vergunning. De gesloten kernenergiecyclus wordt in Nederland toegepast, deze methode is wel duurder, maar levert veel minder afval op.

Chronologische volgorde van de kernenergiecyclus

Uraniumwinning: De twee voornaamste methodes welke gebruikt worden voor de winning van uranium zijn: ondergrondse mijnbouw (40%) en open mijnbouw (28%). Een derde methodiek welke niet overal toegepast kan worden is ‘In Situ Leaching’(ISL) in het Nederlands komt dat overeen met het oplossen van het uranium en het vervolgens omhoog pompen (21% toegepast). Uranium wordt ook gewonnen als bijproduct in koper- en goudmijnen (11%).

Conversie: Een chemisch proces waarmee UF_6 (uraniumhexafluoride) wordt geproduceerd. Dit is een vluchtige stof welke bij $60^\circ C$ gasvormig is.

Verrijken: Procédé waarbij het percentage van een bepaald isotoop in een element wordt vergroot (in dit geval het percentage U-235 in het natuurlijke uranium). Dit kan op twee manieren gebeuren, namelijk met behulp van ultracentrifuges en via gasdiffusie.

Splijtstof: Iedere stof die zich door neutronen laat splijten en waar vervolgens weer neutronen bij vrijkomen, bijvoorbeeld uranium-235 en plutonium-239.

Opwerken: Toepassing van chemische processen om uit splijtstof na gebruik in de centrale (de verspleten splijtstof) de waardevolle stoffen (het nog aanwezige uranium en het gevormde splijtbare plutonium) te scheiden van de splijttingsproducten.

Het teruggewonnen uranium en het plutonium kunnen na passende chemische bewerking weer als splijtstof in een kerncentrale gebruikt worden. Hierdoor kan 30 à 40% meer energie uit eenzelfde hoeveelheid uranium worden geproduceerd.

Conditioneren: Het afval ‘verpakken’ en ‘klaarmaken’ voor definitieve opslag.

Naast uranium en plutonium kan ook thorium worden gebruikt als brandstof voor een kerncentrale. Thorium is een zacht zilverwit metaal en komt veelvuldig voor in India én de totale wereldvoorraad is te vergelijken met de hoeveelheid lood. Echter, thorium kan zelf niet splijten. Als het thoriumisotoop Th-232 een neutron invangt wordt dit Th-233, wat is een zeer instabiele thoriumisotoop (halveringstijd van 22 minuten). Dit zal snel vervallen tot Pa-233 (protactinium) dat eveneens zeer instabiel is (halveringstijd van 27 dagen). Pa-233 vervalt uiteindelijk tot U-233. U-233 is een uraniumisotoop die niet in de natuur voorkomt, maar wel zeer goed splijtbaar is en waarbij meer energie vrijkomt dan bij het splijten van U-235. Een op thorium gebaseerde splijtstofcyclus produceert vrijwel geen plutonium, maar vergt nog wel

veel ontwikkelingswerk voordat dit commercieel toegepast kan worden. Want thorium kan niet worden gebruikt in de momenteel in gebruik zijnde kerncentrales.

3.1.3 Actieve landen op de kernenergiemarkt

In de wereld staan 441 kerncentrales (anno 2006), deze wekken 16% van de totale energie op. Deze kerncentrales zijn opgedeeld over 31 landen. Wereldwijd zijn er 23 in aanbouw en er wordt geschat dat er komende (tientallen) jaren honderden kerncentrales bijkomen en dan vooral in landen als: China (20 stuks), India (24 stuks) en Zuid-Afrika (24 stuks).

In *Bijlage 3: actieve landen* is een duidelijk overzicht weergegeven van de actieve landen.

Uranium wordt gewonnen in: Australië, Canada, Niger, de VS, Rusland en Zuid-Afrika. Canada is met 32% van de totale hoeveelheid uranium de grootste leverancier, Australië en Niger volgen met respectievelijk 19% en 8,5%.

3.2 Radioactiviteit en straling

3.2.1 Radioactiviteit

Het grootste nadeel van kernenergie is dat het afval dat kernenergie met zich meebrengt radioactief is, dat wil zeggen dat dit afval hele kleine deeltjes en/of elektromagnetische straling⁶ uitstoot. (zie Bijlage 4: De voor- en nadelen van kernsplijting)

Radioactiviteit is een natuurverschijnsel en is een uiting van een niet-stabiele atoomkern. De meeste atomen zijn stabiel, wat betekent dat hun kern niet verandert. Echter, sommige atomen hebben een onstabiele kern. Een dergelijke kern heeft te veel protonen (positief geladen deeltjes) en/of neutronen (neutrale deeltjes). Een onstabiele atoomkern 'wil' stabiel worden en dat kan door het uitzenden van één of meerdere deeltjes (protonen of neutronen). Hierbij komt straling uit de kern vrij. Onstabiele atomen noemen we radioactief. Elke keer als een atoom van een radioactieve stof vervalft ontstaat er een andere stof of atoomvariant die meestal zelf niet radioactief is. Er blijft dus steeds minder van de oorspronkelijke radioactieve stof over. Hoe snel deze verzwakking van de radioactiviteit gaat, wordt uitgedrukt met de halveringstijd (of halfwaardetijd). Dit is de tijd die een radioactieve stof nodig heeft om de helft van haar radioactiviteit te verliezen en is voor alle radioactieve stoffen verschillend, gaande van enkele seconden tot duizenden jaren.

3.2.2 Straling

Straling is het uitzenden van energie als golven (elektromagnetische straling) of als deeltjes (deeltjesstraling). Straling kan ontstaan door een aantal natuurkundige processen, zoals radioactief verval, kernsplijting, (hoge)temperaturen of materialen die onder invloed van elektriciteit kunnen gaan stralen.

Straling kan onderverdeeld worden in twee soorten, te weten: ioniserende straling en niet-ioniserende straling. Deze onderverdeling wordt gemaakt om het energiegehalte en de mate van gevaar van de straling aan te geven. Ionisatie is een proces waarbij elektronen uit atomen of moleculen verwijderd worden, hierdoor blijven elektrisch geladen deeltjes achter, ionen.

Niet-ioniserende straling: vele stralingsvormen. Warmte, zichtbaar licht, microgolven en radiogolven bezitten allemaal te weinig energie om elektronen uit atoomkernen te verwijderen en behoren tot de niet-ioniserende straling.

Ioniserende straling: straling die voldoende energetisch is om een elektron uit het atoom weg te slaan. Hierdoor krijgt het atoom een positieve lading in plaats van een neutrale lading, het atoom wordt geïoniseerd en veranderd in een ion.

Ioniserende straling is te onderscheiden in deeltjesstraling (alfa- en bètastraling en elektronen en neutronen) en in elektromagnetische straling (röntgen- en gammastraling). Deze vorm van straling wordt vaak radioactieve straling genoemd wat echter niet terecht is, want de straling zelf is niet radioactief, maar is het gevolg van radioactiviteit.

De ioniserende straling kan opgedeeld worden in Alfastraling(α), Bètastraling(β) en Gammastraling(γ).

De blootstelling aan ioniserende straling brengt risico's met zich mee, echter is het onmogelijk om blootstelling hieraan volledig te vermijden. Want straling is altijd in de natuur en in onze organismen aanwezig.

⁶ Elektromagnetische straling is de voortplanting door de ruimte van elektrische en magnetische trillingen. Licht is hier een voorbeeld van.

Soorten ioniserende straling

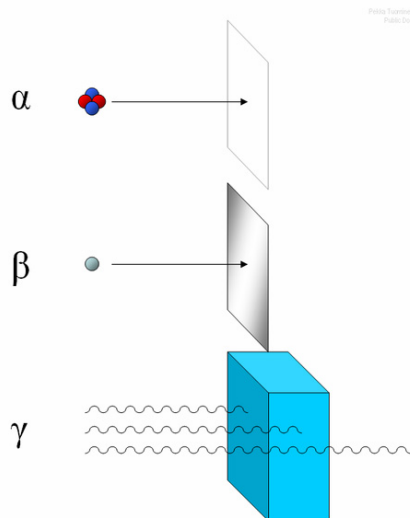
De Alfastraling (α), relatief grote en zware energiedeeltjes (helium atomen, bestaande uit twee protonen en twee neutronen). Alfastralen hebben geen goed doordringend vermogen en worden snel afgeremd. Een blad papier of een luchtlag van ongeveer 3 cm is voldoende om de straling te stoppen.

De Bètastraling (β), zijn lichte energiedeeltjes (elektronen) met een zeer hoge snelheid (270.000 km/ sec). Deze vorm van straling kan tegengehouden worden door een aluminiumplaat van enkele millimeters dik of door een luchtlag van ongeveer 3 m.

De Gammastraling (γ), zijn elektromagnetische golven met een hoge energie en zijn minder ioniserend dan alfa- en bètastraling, maar hebben wel een veel groter doordringend vermogen. Bescherming tegen deze straling vergt ook een dikkere beschermingslaag, zoals een centimeters tot meters dikke (afhankelijk van de intensiteit) laag van zware stoffen, ijzer, beton of lood. Gammastraling kan honderden meters lucht doorkruisen zonder noemenswaardig te verzwakken.

Natuurlijke achtergrondstraling

De aarde en al het leven hierop, staan constant bloot aan straling uit de ruimte. Geladen deeltjes van de zon en andere sterren vertonen een wisselwerking met de atmosfeer en het magnetische veld van de aarde. Hierdoor ontstaat er een 'stortregen' van straling (voornamelijk bèta- en gammastraling). Dit wordt ook wel de kosmische straling genoemd en verschilt op verschillende plaatsen op de aarde, dit verschil wordt veroorzaakt door een verschil in hoogte en de invloed van het aardmagnetische veld (het magnetische veld in en om de aarde).



Afbeelding 8: schematische weergave van de verschillende soorten ioniserende straling met bijbehorend doordringend vermogen (bron: nl.wikipedia.org)

Radioactief materiaal wordt overal in de natuur gevonden. Het komt voor in de bodem, in lucht, water en planten. De isotopen van uranium samen met zijn vervalproducten, thorium, radium en radon zijn de belangrijkste veroorzakers van natuurlijke straling. Sommige van deze materialen kunnen door het lichaam worden opgenomen via voedsel en water, terwijl andere kunnen worden opgenomen middels inademing. In gebieden waar uranium en thorium wordt gewonnen is een grotere achtergrondstraling aanwezig. Naast de aardse en de kosmische straling, hebben alle mensen radioactieve isotopen in hun lichaam, onder andere kalium-40, koolstof-14 en lood-210.

Naast de natuurlijke achtergrondstraling, zijn er ook stralingsbronnen die door de mens zelf worden veroorzaakt, dit zijn de zogenoemde kunstmatige stralingsbronnen. Kunstmatige stralingsbronnen zijn voor wat betreft het effect te vergelijken met natuurlijke stralingsbronnen. De blootstelling van een gemiddeld persoon is ongeveer 2 tot 2,5 mSv/jaar (*zie kader*), 81% hiervan komt van natuurlijke stralingsbronnen, het overige aantal komt van door de mens gemaakte stralingsbronnen (*bron: VROM, 2006*). Verreweg de belangrijkste bron van door de mens veroorzaakte straling wordt veroorzaakt door medische handelingen (röntgenstraling, radioactieve medicijnen en bestralingstherapieën).

Daarnaast staat de mensheid bloot aan straling afkomstig van gebruiksgoederen. Enkele voorbeelden hiervan zijn: tabak (polonium-210), bouwmaterialen (radium en radon), televisietoestellen, röntgentoestellen (op bijv. het vliegveld) en kousjes van gaslampen (thorium). In mindere mate wordt men blootgesteld aan de straling ten gevolge van de hele cyclus van de nucleaire brandstof. De uraniumertsen welke gewonnen worden hebben wel een grotere stralingsintensiteit dan kolen (welke gebruikt worden in een kolencentrale), maar het aantal gewonnen uraniumertsen is der mate weinig, in vergelijking met kolen, dat de straling die vrijkomt bij uraniummijnbouw gelijk danwel minder is dan bij kolenmijnbouw.

Enkele voorbeelden van beroepsgroepen die bloot worden gesteld aan ioniserende straling:

- Industriële energieopwekking
- Industriële doorlichting (voedselbehandeling tegen schimmels)
- Radiologisch personeel in ziekenhuizen
- Personeel in kerncentrales
- Laboratoria voor wetenschappelijk onderzoek
- Luchtvaartpersoneel

Hoewel de ioniserende straling niet te voelen, zien of te ruiken is, zijn er toch een aantal eenvoudige en gevoelige instrumenten om de minieme hoeveelheden straling uit natuurlijke en kunstmatige bronnen te meten en dus te ontdekken. Geigertellers en scintillometers meten bijvoorbeeld onmiddellijk de dosis van de ioniserende straling.

De hoeveelheid straling wordt weergegeven met de Becquerel, de energie van deze straling wordt weergegeven met de Gray en de gevolgen van deze straling wordt gemeten met de Sievert.

Eenheden straling

Becquerel. De eenheid voor het meten van radioactiviteit is de Becquerel (afgekort tot Bq). De Becquerel meet de hoeveelheid straling die een radioactieve stof uitzendt. Eén Becquerel komt overeen met één vervallen kern per seconde.

Gray. Ioniserende straling draagt energie over op weefsel. De hoeveelheid energie die wordt overgedragen op een bepaalde hoeveelheid weefsel, wordt de geabsorbeerde dosis genoemd. Deze wordt uitgedrukt in Gray (Gy). Eén Gray komt overeen met 1 Joule/kilogram.

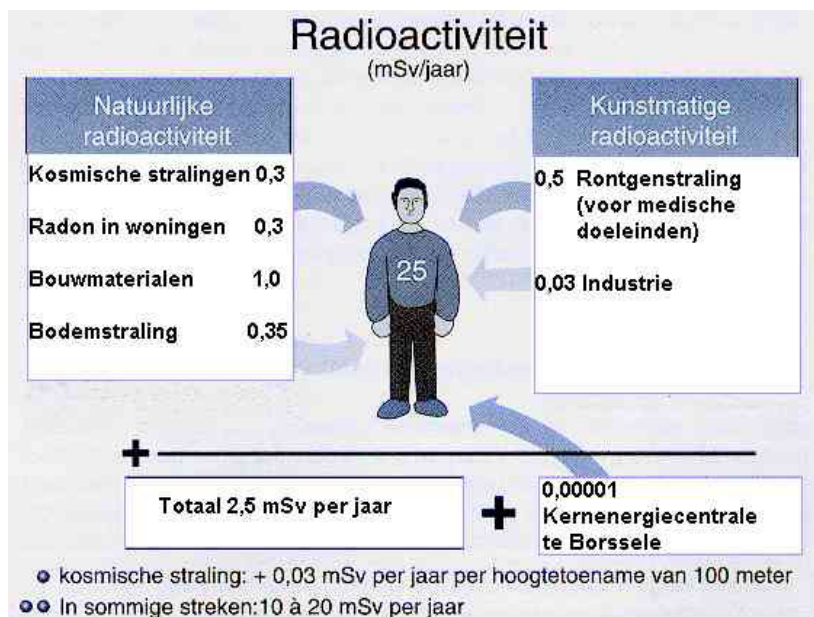
Sievert. Sommige soorten straling veroorzaken meer ionisatie dan andere. Alfastralen meer dan bèta- en gammastralen. Om hiermee rekening te houden wordt de geabsorbeerde dosis vermenigvuldigd met een factor om te komen tot de equivalente dosis. Dit wordt ook wel de effectieve dosis genoemd, weergegeven met de Sievert (Sv).

De effectieve dosis heeft een zeer lage waarde, daarom wordt er ook vaak over milliSievert (een duizendste van een Sievert) gesproken.

MilliSievert. Sommige weefsels en organen zijn gevoeliger voor straling dan andere (genitale klieren zijn gevoeliger dan bijvoorbeeld botten). Om hiermee rekening te houden wordt de equivalente dosis (Sv) gewogen met een specifieke risicofactor voor elk weefsel of orgaan om de effectieve dosis te krijgen, milliSievert (mSv). Dit biedt het voordeel dat alle soorten menselijke blootstelling aan ioniserende straling op één risicoschaal kan worden uitgezet. (*bron: Nirond.be*)

De effecten die straling op het menselijke lichaam kunnen hebben, zijn te onderscheiden in directe en late effecten. Om het risico van deze effecten zo klein mogelijk te houden heeft de overheid strikte normen opgesteld voor de maximale stralingsdosis. In deze normen staat vastgesteld dat een burger maximaal 1 mSv extra (bovenop de 2,5 mSv/jaar) per jaar mag ontvangen en dat radiologische medewerkers⁷ 20 mSv per jaar extra mogen ontvangen. De stralingsdosis voor reactor personeel ligt in de orde van 3 á 5 mSv per jaar, en daarmee dus ver beneden het maximaal toelaatbare.

Beneden een stralingsdosis van 200 mSv kan geen direct effect worden waargenomen, wanneer het hele lichaam wordt blootgesteld aan meer dan 1000 mSv, zal de getroffene ziek worden. Een eenmalige dosis van 5000 mSv of meer kan binnen enkele dagen de dood tot gevolg hebben, de zogenoemde stralingsziekte (een toenemend te kort aan rode bloedlichaampjes met als gevolg ernstige bloedingen en een verhoogde kans op infectieziekten). Een van de meest bekende late effecten van een te grote stralingsdosis is kanker.



Afbeelding 9: weegave van de stralingsdosis van een gemiddelde Nederlander. (bron: kerncentrale.nl)

Vier elementen spelen een belangrijke rol bij bescherming tegen ioniserende straling.

- De duur van de blootstelling. Hoe korter men aan straling bloot gesteld wordt, hoe kleiner de (gevaarlijke) dosis.
- De afstand tot de bron. Hoe verder de radioactieve bron verwijderd is, hoe kleiner de stralingsdosis. Twee keer zo ver weg, komt overeen met een kwart van de stralingsdosis.
- Afscherming. Een schild van lood, gewapend beton of water zijn voorbeelden van goede beschermingen tegen het door dringen van straling. Hierom worden bepaalde radioactieve materialen opgeslagen in een bassin van water of achter grote/dikke betonnen wanden, welke in veel gevallen gevoerd zijn met lood.
- Insluiting. Bescherming tegen besmetting en verspreiding van radioactieve stoffen: het dragen van aangepaste kledij en maskers beperken het gevaar op besmetting. Het omhullen van de radioactieve bron gaat verspreiding ervan tegen.

⁷ Met radiologische medewerkers wordt hier niet alleen het reactor personeel bedoeld, maar ook piloten, stewardessen, tandartsen en ziekenhuispersoneel.

3.3 Radioactief afval

Radioactief afval is het afval dat, onder andere, als restproduct overblijft na het opwekken van energie middels kernenergie. Het gevaar van radioactief afval is dat het ioniserende straling uitzendt. Deze straling is (afhankelijk van de halfwaardetijd) voor korte of zeer lange tijd schadelijk voor mens en milieu.

Kerncentrales zijn belangrijke producenten van radioactief afval, echter zijn kerncentrales niet de enige verantwoordelijken voor het radioactieve afval, want het is ook afkomstig van ziekenhuizen en andere industrieën. Er wordt wel onderscheid in verschillende typen radioactief afval, namelijk laag-, middel- en hoogradioactief afval. Deze indeling is gemaakt aan de hand van de mate van radioactiviteit.

Het lage- en middelradioactieve afval zorgt voor 97 procent van het totale volume aan radioactieve afval en bezit 5 procent van de totale hoeveelheid radioactiviteit. Dus de overige 95 procent van de radioactiviteit wordt geproduceerd door 3 procent van het totale volume aan radioactief afval, het gaat hier om het hoogradioactieve afval. Ter verduidelijking, een PWR van gemiddelde grootte (1000 MW) produceert per jaar ongeveer 25 tot 30 ton hoogradioactief afval, dit heeft een volume van 2 tot 3 m³. (*bron: world-nuclear.org*)

Verschillende typen radioactief afval

Laagradioactief afval. Laagradioactief afval ontstaat niet alleen in de splijtstofcyclus maar is ook afkomstig uit ziekenhuizen en andere industrieën. Het gaat hier om een verscheidenheid aan materialen, zoals gereedschappen, filters, doeken, kleding en bijvoorbeeld injectienaalden, die met een kleine hoeveelheid, meestal kortlevende isotopen (dus snel stabiel), besmet zijn. Dit soort afval hoeft tijdens behandeling en transport niet te worden afgeschermd.

Middelradioactief afval. Middelradioactief afval bevat materialen met een hogere radioactiviteit en moet in sommige gevallen wel afgeschermd worden. De voornaamste bestanddelen hiervan zijn, verontreinigde chemische harsen, slib en metalen brandstofstaafomhulsels, maar er kan ook materiaal bijzitten van ontmantelde kerncentrales.

Hoogradioactief afval. Hoogradioactief afval wordt ook wel kernsplijttingsafval genoemd. Dit is het directe afvalproduct dat ontstaat bij het gebruik van uranium (of ander splijtbaar materiaal) als brandstof in een kerncentrale. Dit materiaal is zeer radioactief en door de hoge radioactiviteit komt er ook nog veel vervalwarmte vrij (de warmte die vrijkomt bij het vervallen/splijten van atomen, dit komt nog enige tijd, nadat het splijten niet meer gestimuleerd wordt, vrij). Wanneer de gebruikte splijtstof niet opgewerkt (bruikbare bestanddelen eruit gehaald) wordt, is dit afval voor 100.000 jaar gevaarlijk. Echter als de gevaarlijkste producten er wel uit gehaald worden kan de radiotoxiciteit (de tijd waarin de straling schadelijk is) gereduceerd worden naar enkele duizenden jaren.

3.3.1 Verwerking van het radioactieve afval

Voor verwerking van (alle soorten) afval zijn twee strategieën, namelijk:

- verdunnen en verspreiden (in Engelse termen D&D of Dispose & Discharge)
bijv. schoorstenen of lozen van koelwater
- concentreren en bewaren (in Engelse termen C&C of Concentrate & Contained)
bijv. radioactief afval

Doordat de radioactiviteit bij de drie typen radioactief afval verschillend is, worden deze vormen van afval ook op verschillende manieren verwerkt.

Laag- en middelradioactief afval bestaan voornamelijk uit kortlevende isotopen en een betonnen omhulsel is voldoende om de radioactieve stoffen in te sluiten en de straling tegen te houden.

Het afval wordt als volgt verwerkt. Het vaste afval komt eerst in een pers waar het onder zeer hoge druk wordt samengeperst tot een massief blok dat vervolgens in beton wordt verpakt (C&C-methode). Kadavers van dierexperimenten en laagradioactieve vloeistoffen worden in een speciale verbrandingsoven vernietigd (D&D-methode). De rookgassen van deze ovens worden gereinigd. Grotere metalen delen worden verkleind in de verschrotingsinstallatie en daarna ook in beton verpakt (C&C-methode). Waterige vloeistoffen worden met een biologische en chemische behandeling schoongemaakt. Omdat dit verpakte afval geen gevaren meer met zich meebrengt (na enkele jaren is de totale radioactiviteit verdwenen) kan dit gewoon bovengronds worden opgeslagen en naar verloop van jaren kunnen de betonnen omhulsels hergebruikt worden.



Afbeelding 10: opslag van laag- en middelradioactief afval bij de COVRA in Vlissingen (bron: COVRA)

Het hoogradioactieve afval (kernsplijtingsafval) daarentegen heeft een heel andere vorm van verwerking nodig. De gebruikte splijtstofstaven welke uit een kerncentrale komen worden, in het geval van Nederland, opgewerkt in het buitenland (gesloten splijtstofcyclus). De afvalstoffen hiervan moeten in eigen land opgeslagen worden. Dit afval wordt in glas gesmolten/gegoten, zodat het één glazen blok wordt. Dit glazen blok wordt in een stalen cilinder verpakt. Deze cilinder wordt op zijn beurt weer in een grotere cilinder verpakt, waar hij de mogelijkheid heeft zijn (verval)warmte kwijt te raken. Dit afval wordt in Nederland voor 100 jaar bovengronds opgeslagen in een speciaal hiervoor ontworpen gebouw in Vlissingen, de HABOG⁸ bij de COVRA⁹ (zie *Bijlage 5: De COVRA*). Echter zijn er veel landen (onder andere de Verenigde Staten en Canada) van mening dat het beter is om het kernsplijtingsafval meteen op te slaan, dus niet op te werken (open splijtstofcyclus), dit zou namelijk (onder andere) de kans op proliferatie verkleinen.

3.3.2 Ondergrondse opslag

Voor de definitieve opslag van radioactief afval (definitief van de samenleving afgesloten) wordt er gekeken naar het opbergen van het radioactieve afval in geologische stabiele lagen (klei, zout of graniet). Voordat het afval ondergronds opgeslagen kan worden moeten er eerst een aantal fasen doorlopen worden.

Fase 1. Een haalbaarheidsstudie gedaan worden.

⁸ HABOG - Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslag Gebouw

⁹ COVRA - Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval, opslag van radioactief afval in Nederland

Fase 2. Een onderzoekslab onder de grond gebouwd worden.

Fase 3. Een pilot (test versie) gemaakt worden.

Fase 4. De definitieve opslag van radioactief afval.

Veel landen zijn momenteel in fase 2 (zo ook Nederland), echter de landen met een grote kernenergiemarkt (Frankrijk etc) zijn in fase 3. Finland (het land dat zojuist begonnen is aan de bouw van een nieuwe kerncentrale) en Zweden zijn al vergevorderd in fase 3.

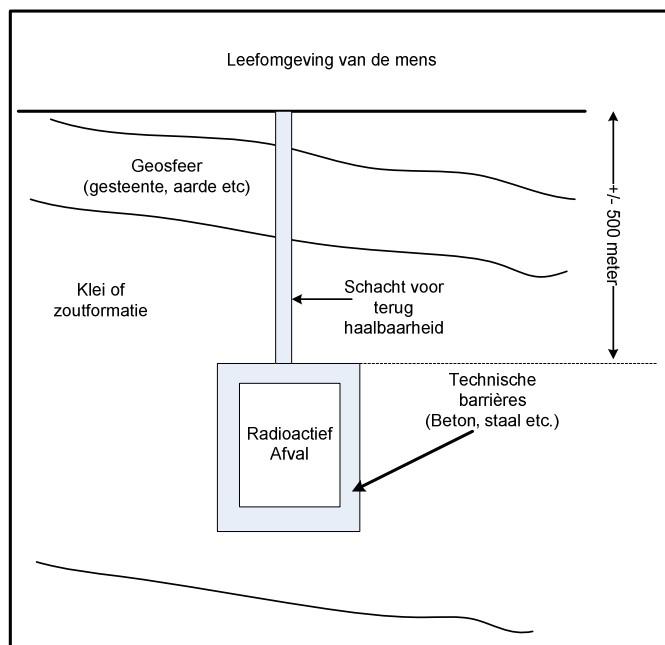
In Nederland wordt onderzoek gedaan naar twee opties, namelijk de mogelijkheden voor de diepondergrondse opslag in klei en in diepe steenzoutformaties.

Voordelen van kleilagen:

- Er is amper sprake van grondwaterstroming, dus één van de belangrijkste verspreidingsmechanisme voor oplosbaar radioactief afval wordt hier door onderdrukt.
- De klei absorbeert de meeste radioactieve stoffen.
- Scheuren of lekkages in de opslagfaciliteit zullen in de loop van de tijd worden dicht gedrukt, omdat de klei plastisch (vervormbaar) is. Dit is niet het geval bij zware gesteentes.

Voordelen steenzoutformaties:

- Er stroomt geen grondwater doorheen.
- Het is mechanisch zeer stabiel, het uitgraven van gangen en dergelijke gaat relatief gemakkelijk.
- Het heeft een goede thermische geleiding, eventuele vervalwarmte kan goed worden afgevoerd.
- Het heeft een zelfherstellend vermogen, uitgravingen zullen langzaam dichtvloeiën, hierdoor wordt het afval uiteindelijk helemaal geïsoleerd van de omgeving.



Afbeelding 11: schematische weergave van de ondergrondse opslag van radioactief afval

Om het (geringe) risico van de opslag van radioactief afval in een zout- of steenformatie in te zien, volgt hier in het kort de weg die het radioactieve materiaal af moet leggen om in de leefomgeving van de mens te komen.

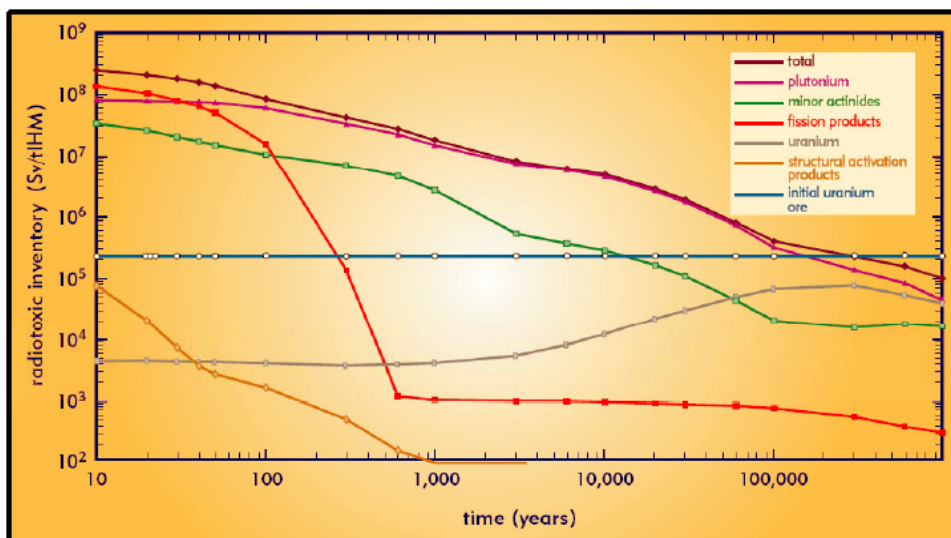
Het grootste gevaar van de ondergrondse opslag van radioactief afval is dat de vaten gaan lekken (zeer gering risico). Echter kan er maar een heel kleine hoeveelheid radioactief

materiaal bij ons terecht komen (via de bodem naar de planten en dan via het opeten van de planten door dieren, kan het pas bij ons komen). De stralingsdosis welke hierdoor bij ons terecht komt is minimaal en zeker vele malen kleiner dan de dosis welke de opslag verlaat. Dit is een goed voorbeeld van de afvalverwerking methode van D&D (verdunnen en verspreiden).

3.3.3 Transmutatie

Transmutatie of Partitioning & Transmutation (P&T) is een zeer geavanceerde vorm van opwerking, hierbij worden naast uranium en plutonium ook enkele andere transuranen en langlevende splijtingsproducten chemisch afgescheiden (partitioning) om vervolgens in speciale systemen te worden omgezet tot kortlevende radionucliden¹⁰ (transmutation). Het doel hiervan is het verkleinen van de schadelijkheid en/of duur van de schadelijkheid van het radioactieve afval. Bestraalde (oude) splijtstof bevat, zonder dat dit wordt opgewerkt, langlevende bestanddelen. Van deze langlevende bestanddelen is plutonium het belangrijkste (pas na circa 200.000 jaar is de radiotoxiciteit gelijk aan die van uraniumerts), als dit plutonium middels (normale) opwerking verwijderd wordt, is de resterende radiotoxiciteit van het afval na circa 10.000 jaar gelijk aan die van uraniumerts. Als ook de andere langlevende transuranen en de langlevende splijtingsproducten verwijderd worden kan er een radiotoxiciteit bereikt worden welke na 200 jaar gelijk is aan die van de uraniumertsen. Deze langlevende producten zouden met speciale systemen zoals snelle reactoren (Generatie IV) of versnellers worden ‘verbrand’ tot korter levende producten.

Deze veelbelovende technologie is nog niet operationeel. Momenteel doen veel landen, zo ook Nederland, onderzoek naar deze technologisch ingewikkelde processen en het zal ook nog zeker 20 jaar duren voordat deze methode op industriële schaal toegepast kan worden.



Afbeelding 12: Tijdschaal van de radiotoxiciteit van de splijtingsproducten, de horizontale lijn in het midden geeft de radiotoxiciteit van uraniumerts weer. (bron: VROM)

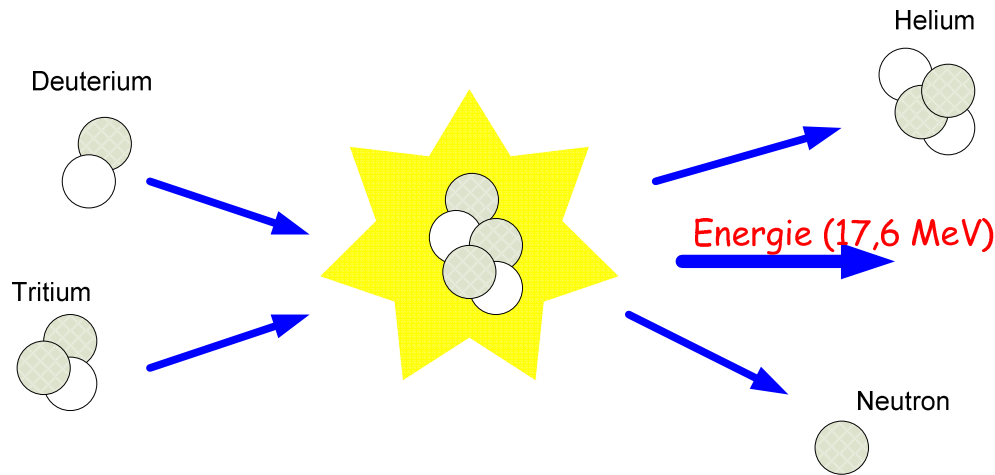
Transuranen

Een transuraan element is een chemisch element met een atoomnummer groter dan 92 (uranium). Deze elementen komen niet meer (natuurlijk) op aarde voor. Deze elementen kunnen wel kunstmatig worden gemaakt, door bijvoorbeeld een kerncentrale. Enkele voorbeelden van transuranen zijn: plutonium, neptunium, americium en curium.

¹⁰ Radionuclide is een instabiele nuclide (atoomkern) die spontaan zonder invloed van buitenaf vervalt onder uitzending van straling.

4. Kernfusie

Kernfusie is het proces dat de zon en de sterren van energie voorziet. Bij dit proces smelten lichte kernen samen tot zwaardere. Dit gaat gepaard met een grote energielevering. Echter om de kernen samen te laten smelten is een extreem hoge temperatuur vereist, 100-150 miljoen graden Celsius.



Afbeelding 13: De samensmelting van twee waterstof isotopen (kernfusie)

4.1 Het principe van kernfusie

In de fusiereactor smelten de lichte atoomkernen (waterstof isotopen) samen, waarbij zeer veel energie vrij komt. Dit is alleen mogelijk bij een extreem hoge temperatuur, 150 miljoen graden Celsius, omdat bij een dermate hoge temperatuur de elektronen los worden geslagen van de atomen. Als gevolg hierop ontstaat er een gas waarin de atoomkernen los van de elektronen bewegen, dit wordt ook wel een plasma genoemd (zie Bijlage 6: *Het obstakel van kernfusie, plasma*).

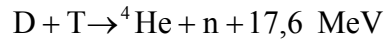
De brandstof die gebruikt wordt bij kernfusie bestaat uit een mengsel van deuterium (waterstof met in de kern 1 proton en 1 neutron, ook wel zwaar water genoemd) en tritium (waterstof met in de kern 1 proton en 2 neutronen).

Deuterium, de niet-radioactieve isotoop van waterstof, is in al het water aanwezig (1 liter water bevat 33 mg deuterium) en is daardoor overvloedig aanwezig op de aarde. Tritium, de radioactieve isotoop, komt daarentegen niet voor in de natuur (halfwaardetijd van 12,3 jaar). Maar is wel te verkrijgen door lithium-6 (niet-radioactief en een metaal dat overvloedig aanwezig is op de aarde) met neutronen te bestralen. Doordat de omzetting van lithium in tritium binnen in de kernfusiecentrale gebeurt en het enige 'afvalproduct' dat ontstaat, helium (een onschadelijk gas), niet radioactief is, bevinden zich buiten de kernfusiecentrale geen radioactieve stoffen. Dit is een groot voordeel ten opzichte van kernsplijting waarbij als reactieproduct radioactief afval ontstaat.

Een ander groot voordeel is dat de benodigde brandstoffen in hele grote mate (onuitputtelijk) aanwezig zijn en waarvan maar heel weinig benodigd is. Ook is het fusieproces goed beheersbaar (zodra de brandstoftoevoer afgesloten wordt zal de reactie na enkele seconden stoppen). Om deze redenen behoort kernfusie tot een vorm van duurzame energie.

Door de fusie van een deuterium- en tritiumatoom ontstaat er een helium atoom en een vrij neutron. Dit neutron bevat 80% van alle energie en wordt (in de meeste gevallen) ingevangen door de wand of komt terecht in het lithium waardoor er nieuw tritium ontstaat. De neutronen welke in de wand terecht komen geven hun energie (warmte) af aan de wand (hierdoor wordt

de binnenkant van de wand licht radioactief, echter zo minimaal dat het na enkele jaren uitgestraald is). In deze wand bevinden zich warmtewisselaars welke deze warmte overdragen aan water (dit water is tevens koelmiddel voor de wand). Met behulp van deze warmte wordt er op de conventionele manier energie opgewekt.



Vergelijking van de reactie welke plaats vindt in een kernfusiereactor. D= deuterium, T= tritium, ${}^4\text{He}$ = helium-4 en n= neutron.

Het fuseren van deuterium en tritium wordt momenteel in de (experimentele)fusiereactoren toegepast, echter is het gebruikte tritium radioactief. Het is ook mogelijk om een fusiereactie plaats te laten vinden tussen twee deuterium atomen, wat overvloedig aanwezig is en niet radioactief is. Het probleem hiervan is alleen dat het een veel hogere temperatuur vereist en 50% van deze reacties levert een proton en een tritiumkern op, en 30% een neutron en ${}^3\text{He}$ (helium-3). De tritiumkernen kunnen op hun beurt weer reageren met deuterium, waardoor de machine geactiveerd wordt (wand wordt radioactief).

Een ander alternatief zou de fusiereactie tussen deuterium en helium-3 zijn. Dit levert namelijk ${}^4\text{He}$ en een proton op als fusieproducten en deze reactieproducten zijn allebei niet radioactief (er zijn geen neutronen, dus ook geen activering van de machine). De optimale temperatuur ligt iets hoger dan de vereiste temperatuur voor de reactie tussen deuterium en tritium, dit is echter niet het (grootste) probleem. Want op de aarde is maar een zeer geringe hoeveelheid helium-3 voorhanden, waardoor je al snel met een brandstof te kort wordt opgescheept (op de maan is overigens genoeg helium-3).

Duurzame energie

Duurzame energie is de energie waarover de mensheid in de praktijk voor onbeperkte tijd kan beschikken en waarbij, door het gebruik ervan, het leefmilieu en de mogelijkheden voor toekomstige generaties niet worden benadeeld. (bron: Brundtland)

4.2 Korte geschiedenis van kernfusie

1950-1960: Ontwikkelingen van concepten om plasma's op te sluiten door middel van magneetvelden.

1960-1970: Experimenten van de verschillende opsluitsystemen. Uiteindelijk leverde de tokamak¹¹ vooruitstrevende resultaten op. In 1970 werd een temperatuur van meer dan 1 KeV¹² gemeten.

1970-1980: Explosieve groei van de bouw van Tokamaks. Wetenschappers slagen er echter nog maar zeer globaal in om de temperatuur en dichtheid van het plasma te meten.

1980-1990: In deze periode worden er zeer grote Tokamaks gebouwd oa. TFTR (USA), JT60 (Japan) en JET (Joint European Torus, Europa). De plasmatemperaturen (welke steeds nauwkeuriger gemeten kunnen worden) beginnen in het werkgebied van een fusiereactor te komen (>10 KeV). Wetenschappers krijgen steeds meer inzicht in de fysica.

1990-2000: De methodes om het plasma te beheersen worden in deze jaren sterk verbeterd. In JET en TFTR wordt met een mengsel van deuterium en tritium geëxperimenteerd. Dit levert fusievermogens op van respectievelijk 16 en 10 MW. Ook wordt in JET en JT60 het

¹¹ Een torus-vormige kamer waarin het plasma wordt opgesloten door middel van magnetische spoelen, van Russische makelij.

¹² 1 KeV komt overeen met 10.000 Kelvin

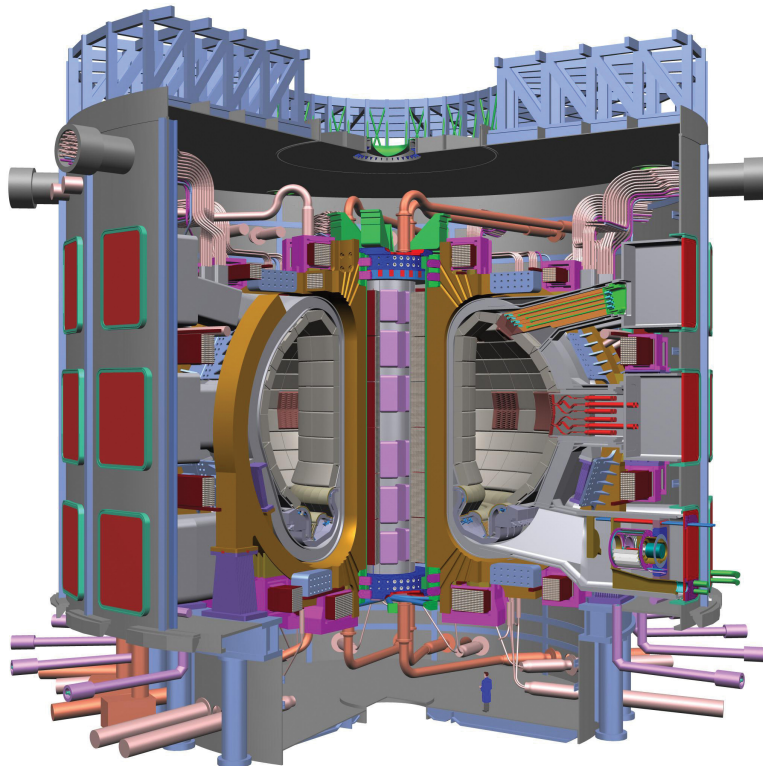
breakeven punt bereikt, dat wil zeggen dat in geoptimaliseerde condities het extern toegevoerde vermogen gelijk is aan het geproduceerde fusievermogen.

4.3 Kernfusieprojecten

De grootste kernfusiecentrale (JET) staat momenteel in Groot-Brittannië. Echter is deze reactor alleen bestemd voor onderzoek. (Een commerciële kernfusiereactor bestaat nog niet). JET wordt voornamelijk gebruikt om materialen te testen voor de wand van het vacuümvat en om onderzoek te doen naar meet- en regelmethoden onder realistische fusiecondities.

ITER (International Tokamak Experimental Reactor) is een wereldwijd (kernfusie)project, waarbinnen Europa een leidende rol vertegenwoordigt en heeft als doel om te demonstreren dat fusie-energie technisch en wetenschappelijk haalbaar is. ITER zal de eerste kernfusiereactor worden waar meer energie uitkomt (500 MW) dan dat er ingaat (50 MW). Dit is bij de huidige fusiereactoren niet realiseerbaar. De huidige partners van het ITER-project zijn de Europese Unie (als 1 land), de Verenigde Staten, Japan, China, Rusland en Zuid-Korea. Europa (leider van het project) zal 40% van de kosten voor haar rekening nemen. In 2016 wordt het eerste plasma in ITER verwacht. De Zuid-Franse plaats Cadarache is de thuishaven van dit wereldwijde project.

Wanneer ITER heeft bewezen aan alle verwachtingen te kunnen voldoen, zal er begonnen worden met de bouw van DEMO, de eerste kernfusiecentrale die moet bewijzen dat kernfusie commercieel gebruikt kan worden (energie leveren aan het elektriciteitsnet). De schatting is dat DEMO in 2035 operationeel is. Nadat DEMO rendabel is gebleken, zal de verwachting zijn dat rond 2050 de eerste commerciële kernfusiereactor zijn opwachting zal maken, echter ligt dit geheel aan de industrie.



Afbeelding 14: ITER (bron: www.fusie-energie.nl)

4.4 Bijdrage Nederland

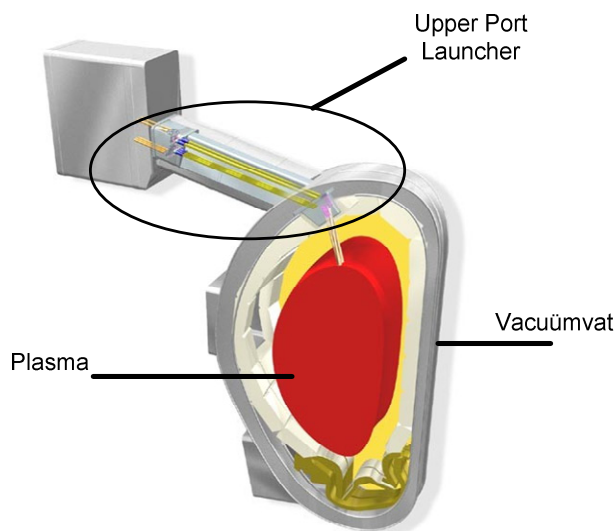
De Nederlandse afdeling, ITER-NL, kan een belangrijke positie bekleden binnen het ITER project op basis van specifieke kennis en kunde in zowel de industrie als de kennisinstellingen. ITER-NL is een consortium van TNO, NRG en FOM en heeft twee doelen voor ogen, te weten een wetenschappelijk programma op poten zetten en voor minimaal €100 miljoen aan orders binnenhalen voor de Nederlandse industrie.

Het wetenschappelijke programma zal bestaan uit het ontwerpen en ontwikkelen van twee instrumenten, de UPL (Upper Port Launcher) en de UPV (Upper Port Viewer).

Met deze instrumenten kunnen Nederlandse onderzoekers zich bezighouden met de beheersing van turbulente processen in de reactor. De turbulentie bepaalt het succes van ITER en is daarmee één van de meest uitdagende wetenschappelijke onderwerpen van dit project.

Het doel van de UPL is het zeer lokaal verhitten van het plasma teneinde mogelijke instabiliteiten te voorkomen of reduceren. Dit gebeurt via het injecteren van hoog-vermogen microgolven (170 GHz, 20 MW) door een viertal microgolflaunchers.

Het doel van de UPV is het meten van plasma parameters zoals ionentemperatuur en heliumconcentraties. En het optimaliseren van de ITER-performance.



Afbeelding 15: Upper Port Launcher (bron: www.iter.org)

Om de prestaties van ITER te optimaliseren wordt er in Nederland veel materiaalonderzoek verricht bij NRG en FOM. En dan voornamelijk hoogwaardig wandmateriaal voor het reactorvat, dat getest kan worden in de Hoge Flux Reactor van NRG in Petten.

“Het is van groot belang dat Nederland op een adequaat niveau in ITER deelneemt. ITER is een politieke ‘showcase’ en als een innovatief land behoort Nederland hier heel zichtbaar aanwezig te zijn – zowel industrieel als wetenschappelijk.” (Smart Energy Mix, publicatie naar aanleiding van jaarcongres KIVI NIRIA).

5. Conclusie

In Nederland is niet te spreken van een echte kernenergie-industrie, dit omdat Nederland maar één in bedrijf zijnde kerncentrale rijk is en dat deze voor maar ongeveer 4 % van de totale vraag naar energie voorziet. Echter bezit Nederland kennis op een aantal gebieden welke een belangrijke rol kunnen spelen op de internationale kernenergiemarkt. Het gaat hier dan niet over de bouw van een kerncentrale zelf, maar om aan het onderzoek naar en optimalisering van kernenergie (zowel kernsplijting als kernfusie) deel te nemen.

5.1 Technologisch gebied

De kernenergie-industrie is niet meer zo als vroeger gericht op één land. De ontwikkeling binnen deze industrie worden veelal gemaakt door grote samenwerkingsprojecten van meerdere landen (vooral in Europa). Dit is terug te zien bij de ontwikkelingen van de Generatie IV reactoren.

Nederland kent zes (heel belangrijke) spelers op de markt van de kernenergie:

- Urenco, uraniumverrijking, in Almelo
- COVRA, opslag van radioactief afval, in Vlissingen
- EPZ, eigenaar van de kerncentrale in Borssele
- NRG, onderzoekinstelling met twee onderzoeksreactoren (veelal materiaal-onderzoek), in Petten
- Reactor Instituut Delft, onderzoekinstelling met één onderzoeksreactor, in Delft
- FOM Rijnhuizen, plasma instituut (het hart van het kernfusieonderzoek in Nederland), in Nieuwegein

Buiten de hier genoemde spelers, speelt de overheid, ondanks de liberalisering van de energiemarkt, ook nog een belangrijke rol. Bij deze rol is te denken aan besluiten die door de overheid genomen worden (vergunningen afgeven, vaststellen van veiligheidseisen) en financiële zekerheid. Dit laatste is zeer belangrijk voor de investeerders in kernenergie, omdat de bouw, het in bedrijf houden en de afbouw (ontmanteling) van een kerncentrale lange tijd in beslag neemt en waar een groot geldbedrag mee gepaard gaat (enkele miljarden Euro's). Een deel van de bouwtijd wordt in beslag genomen door de aanvraag van vergunningen, dit komt omdat er niet één duidelijke vergunning is voor de bouw van een kerncentrale, maar dat er een tal van (verouderde) vergunningen benodigd zijn.

Dit zou verholpen kunnen worden als er met de juiste kennis en eventuele hulp van buitenaf (het buitenland) één complete vergunning opgesteld zou worden en/ of dergelijke centrales van een (CE) keurmerk worden voorzien.

Op technologisch/wetenschappelijk gebied speelt Nederland een bescheiden rol. De hoofdrollen zijn weggelegd voor onder andere Frankrijk, de Verenigde Staten, Japan en China (de grote kernenergielanden). Echter blijft het heel belangrijk om aansluiting (deelname aan onderzoek) te houden en de kennis in Nederland in stand te houden. Dit is belangrijk om:

- Als 'informed customer' op te kunnen treden (weten/begrijpen wat je koopt).
- Nucleaire faciliteiten veilig en optimaal in bedrijf te kunnen houden en te ontmantelen.
- Goed toezicht te kunnen houden (de overheid).
- Het publiek te kunnen informeren (voor- en nadelen en de technische aspecten).

Omdat er in de jaren '90 vanuit is gegaan dat de kerncentrale in Borssele in 2003 zou sluiten en dat er geen nieuwe kerncentrales meer bij zouden komen, is de ontwikkeling van het

beleid, de regelgeving, de beschikbare kennis en capaciteit op het gebied van nucleaire technologieën sterk verouderd. Dit resulteert erin dat zowel de overheid als de industrie deskundig en (hoog) opgeleid personeel nodig zal hebben op het gebied van nucleaire technologieën, wat te verwezenlijken is door middel van her- en bijscholing van het huidige personeelsbestand en door het opleiden van een nieuwe generatie (nucleaire) wetenschappers en personeel wat zich gespecialiseerd heeft op dit gebied. Nu (anno 2006) gebleken is dat de kerncentrale in Borssele tot 2033 open mag blijven, er een eventuele vervanger komt voor de onderzoeksreactor in Petten en er mogelijkheden bestaan voor de uitbreiding van kernenergie in Nederland¹³, is dit zeker niet ondenkbaar.

Het onderzoek dat plaatsvindt in de onderzoeksreactoren (Delft en Petten) is veelal in samenwerking met andere (Europese) partners en richt zich voornamelijk op het materiaal- en brandstofonderzoek.

Bij het materiaalonderzoek is te denken aan materialen welke tegen zeer hoge temperaturen zijn bestand (voor kernfusie) en materialen die goed neutronen absorberen.

Het brandstofonderzoek (of het onderzoek naar de splijtstofcyclus) dat in Nederland plaatsvindt, richt zich voornamelijk op innovatieve splijtstoffen (thorium) en de verbetering hiervan (verrijking, recycling en de terugneembare berging). Echter beperkt het onderzoek in Nederland zich niet alleen tot materiaal- brandstofonderzoek, want dat Nederland de mogelijkheid heeft gekregen om de UPL en UPV (ITER) te ontwerpen wijst op de ervaring van Nederland op het gebied van de high tech systemen (oa de industriële automatisering).

De ervaring die opgedaan is in de HFR (Hoge Flux Reactor in Petten) op het gebied van de Hoge Temperatuur Gasgekoelde Reactor spelen ook een belangrijke rol in de ontwikkeling van de kernenergie. Ook wordt er in de HFR veel onderzoek gedaan naar nucleaire geneeskunde, zowel naar bestraling als naar nucleaire medicijnen.

Daar komt bij dat het fysische onderzoek in Nederland en de verrijkingstechniek die Urenco bezit, hoog aangeschreven staan op wereldniveau. Dit biedt grote kansen voor Nederland.

Andere kansen liggen op het gebied van de ontwikkeling en verbetering van analyse- en simulatietools voor nucleaire systemen evenals van de bijbehorende (nucleaire) data.

De bovengrondse opslag van radioactief afval is voor honderd jaar geregeld. Dit biedt genoeg perspectief en ruimte voor ontwikkeling op het gebied van de afvalverwerking. De producenten van het afval (voornamelijk de kerncentrale in Borssele) betalen €25.000/m³ voor laag- en middelradioactief afval en €600.000/glascilinder voor hoogradioactief afval aan de COVRA. Als dit bedrag betaald is, is het afval eigendom van de COVRA en heeft de 'vervuiler' (Borssele) er niets meer mee te maken. Doordat de COVRA eigenaar van het afval wordt, is dit beter te registreren en is er maar één partij die zich over het afval hoeft te bekommeren. De belangrijkste ontwikkeling in de verwerking zijn (vooralsnog) optimalisaties, gericht op de vermindering van het afvalvolume. Zelf voert de COVRA beperkt onderzoek uit. Want, zoals al eerder genoemd, vindt het onderzoek (in Nederland) naar transmutatie plaats bij de NRG.

Bouwtijd

De bouw van een centrale (van de eerste plannen tot het in bedrijf stellen van) neemt ongeveer 10 jaar in beslag, de kerncentrale kan maximaal 60 jaar in bedrijf zijn en de afbouw/ontmanteling neemt ook nog ongeveer 10 jaar in beslag (na de bedrijfstijd kan de centrale niet meteen en geheel gedemonteerd worden in verband met de aanwezigheid van radioactief materiaal).

¹³ De Staatssecretaris van VROM heeft randvoorwaarden opgesteld waar nieuwe kerncentrales aan moeten

5.2 Opleidingsmogelijkheden

Op het gebied van studies betreffende kernenergie worden er in Delft (TU-Delft) een twaalftal relevante opleidingen verzorgd, onder andere *Nuclear reactor physics*, *Radiation shielding*, *Nuclear Chemistry* en *Medical physics and radiation technology imaging*. De NRG neemt de basisopleiding voor reactoroperators op zich en samen verzorgen NRG en TU-Delft opfriscursussen voor operators.

Bij het Belgische studiecentrum SCK-CEN is een éénjarige master te volgen op het gebied van ‘nuclear engineering’. Het doel van deze opleiding is de huidige en toekomstige deskundigen en onderzoekers een stevige achtergrond in de verschillende disciplines van de ‘nuclear engineering’ bieden.

5.3 Maatschappelijk vlak

Om aan de voorzieningszekerheid van energie te kunnen voldoen en om zorg te dragen voor het klimaatprobleem kan men het zich niet meer permitteren om een ‘niet-CO₂’ producerende vorm van energieopwekking¹⁴ buiten beschouwing te laten.

De discussie die momenteel gevoerd wordt over kernenergie is voornamelijk gebaseerd op oude feiten en meningen, want de laatste jaren is er op technologisch gebied zo’n grote vooruitgang geboekt (nieuwe en verbeterde reactortypen en optimalisering van de afvalverwerking) dat deze feiten en meningen (grotendeels) niet meer relevant zijn. Naar aanleiding van de door mij bezochte lezingen en symposia én gevoerde gesprekken is te zeggen dat de technische en financiële aspecten geen groot probleem (meer) vormen op het gebied van kernenergie (mits de overheid duidelijke plannen maakt), maar dat het voornamelijk het ontbreken van het maatschappelijke draagvlak het grootste probleem is. Dit komt doordat de inwoners slechte geïnformeerd zijn waardoor ze kernenergie altijd gelijk associëren met grote rampen (ramp in Tsjernobyl en de atoombom op Hiroshima). Het taboe welke waar te nemen is neemt de laatste jaren wel licht af (te zien aan de randvoorwaarden voor kernenergie welke opgesteld zijn door het Ministerie van VROM).

Om het maatschappelijke draagvlak te vergroten zal de overheid een duidelijke visie moeten vaststellen over het toekomstige energiebeeld en de burgers moeten informeren over de voor- en nadelen van de hedendaagse kernenergie. Want wil Nederland een rol blijven spelen op de internationale markt van de kernenergie moet er nu wat gedaan worden, anders is er een grote kans dat de aanwezige kennis en kunde op dit gebied verspeeld wordt, net zoals is gebeurd met windenergie¹⁵.

voldoen, het is verder aan de industrie wat hiermee gedaan wordt.

¹⁴ Hier wordt buiten de vormen van duurzame energie (zon, wind, biomassa etc.) ook kernenergie bedoeld.

¹⁵ In de jaren ’80 was Nederland voorloper op het gebied van windenergie echter zijn (door onder andere trage besluitvormingen) Duitsland en Denemarken, Nederland nu voorbijgestreefd.

Bronnen

Boeken, tijdschriften en readers:

A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Systems – *U.S. DOE, december 2002*
All About Nuclear Energy, from atom to Zirconium – *AREVA, november 2003*
De Ingenieur – *nr 3, maart 2006, nr 14/ 15, september 2006 en nr 19 november 2006*
Energie, van brandhout tot zonnecel. – *Lucas Reijnders, 2006*
Het nucleaire landschap- *Rathenau instituut, werkdocument 94, april 2004*
Kernenergie kan, maar nu nog niet – *Christian Jongeneel, voorjaar 2006*
Milieu – *special kernenergie, nr 4 2006 en nr 6 2006*
Natuur Wetenschap & Techniek – *December 2006*
Ontwikkelingen met betrekking tot eindverwerking van gebruikte splijtstof – *NRG, april 2005*
Overzicht van nieuwe kerncentrales – *J.L. Kloosterman, TU-Delft, september 2006*
Physics and Safety of Transmutation Systems – *Nuclear Energy Agency, 2006*
Randvoorwaarden voor nieuwe kerncentrales – *Ministerie van VROM, september 2006*
Smart Energy Mix, publicatie naar aanleiding van jaarcongres KIVI NIRIA – *J. van Alten, oktober 2006*
Terugneembare berging: een begaanbaar pad? – *Ministerie van Economische Zaken, 2001*
The history of nuclear energy – *DOE/NE, Washington D.C.*
Uraniumwinning – *Clingendael, oktober 2006*

Websites:

www.kernenergie.nl
www.epz.nl
www.rid.tudelft.nl/~hagen
www.ecn.nl
www.kernvisie.com
www.tegenstroom.nl
www.nrg-nl.com
www.world-nuclear.org
www.kernenergie.startpagina.nl
www.fusie-energie.nl
www.iter.org
www.rijnh.nl/ITER-NL/iter.htm
www.iaea.org/programmes/a2/index.html
www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html
www.kerncentrale.nl
<http://gif.inel.gov/roadmap/>
www.nirond.be
www.sckcen.be
nl.wikipedia.org/wiki/Hoofdpagina
http://wwwtest.iri.tudelft.nl/~klooster/onderzoek_pnr.php

Symposia/congressen/bezoeken

22 september 2006	Lezingen KNAW (onderwerp oa. kernfusie), Amsterdam
11 oktober 2006	Bezoek COVRA, Vlissingen
12 oktober 2006	Smart Energy Mix, jaarcongres KIVI NIRIA, Zwolle
13 oktober 2006	Lezingen KNAW (onderwerp oa. kernsplijting), Amsterdam\
9 november 2006	Seminar WISE, Amsterdam

14 november 2006

Symposium 'Kernenergie, de principes voorbij', Delft

21 november 2006

ITER-NL industriedag, Nieuwegein

20 januari 2007

Bezoek HFR, Petten

Gecontacteerde organisaties

Nuclear Research and consultancy Group (NRG), Petten

the Interfaculty Reactor Institute (IRI), Delft

COVRA, Vlissingen

FOM-Instituut voor Plasmafysica 'Rijnhuizen', Nieuwegein

Ministerie van Economische Zaken

Universiteit van Utrecht

Termenlijst en afkortingen

Actiniden	Elementen met een atoomnummer van 89 tot en met 103
Atoom	Een kern van protonen en neutronen, met daar omheen elektronen
Atoommassa	Massa van een atoom
Atoomnummer	Geeft het aantal protonen aan in de atoomkern
Deuterium	Isotoop van waterstof, waarvan de atoomkern één neutron en één proton bevat
Elektron	Elementair deeltje met een negatieve elektrische elementaire lading
Elektronvolt	In de atoom- en kernfysica een gebruikelijke eenheid van energie $1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ J}$
Halfwaardetijd	De tijdsduur waarin de helft van de kernen van een radionuclide vervalt
Inherente veiligheid	Ook wel natuurlijke of intrinsieke veiligheid genoemd, kan worden beschouwd als een ver doorgevoerde vorm van passieve veiligheid (veiligheid gewaarborgd door meerdere modules)
Ion	Elektrisch geladen materieel deeltje
Isotoop	Element met hetzelfde aantal protonen, maar met verschillend aantal neutronen
Kernenergiecyclus	Cyclus van het uraniumerts tot aan het kernafval
Kernfusie	Het samensmelten (fuseren) van lichte atomen (waterstof)
Kernsplijting	Het splijten van ‘grote en zware’ atomen (uranium)
Moderator	Stof (water, grafiet) die de snelle neutronen afkomstig van kernsplijtingen afremt om het splijtingsproces in stand te houden
Molecuul	Een door chemische krachten samengehouden groep atomen
Neutron	Ongeladen elementair deeltje
Nuclide	Atoomkern, gekenmerkt door het massagetal en atoomnummer
Passieve veiligheid	Veiligheid gewaarborgd door uit zichzelf functionerende systemen zonder hulpenergie en actieve componenten
Plasma	Heet gas (100-150 miljoen °C) van geladen deeltjes
Proliferatie	Verspreiding van materiaal waarmee kernwapens gemaakt kunnen worden
Proton	Stabiel elementair deeltje met een positieve elektrische elementaire lading
Radioactief	Element dat materiële deeltjes en/of elektromagnetische straling uitstoot
Radioactiviteit	Eigenschap van bepaalde stoffen om zonder invloed van buitenaf een karakteristieke straling uit te zenden en daarbij doorgaans in een andere stof over te gaan
Radionuclide	Instabiele nuclide die spontaan zonder invloed van buitenaf vervalt onder uitzending van straling
Radiotoxiciteit	De mate waarin de straling schadelijk is
Splijtstof	Elke stof dat zich door middel van neutronen laat splijten en waarbij weer nieuwe neutronen vrijkomen (bijvoorbeeld uranium en plutonium)
Splijtstofelement	Een uit meerdere splijtstofstaven samengestelde constructie
Splijtstofstaaf	Met splijtstof gevulde buis
Straling	uitzending van energie door middel van elektromagnetische golven of deeltjes met hoge snelheid
Transmutatie	Het omzetten van de ene atoomkern in de andere
Transuraan element	Een chemisch element in het periodiek systeem, waarvan het aantal protonen groter is dan 92 en komt alleen nog kunstmatig voor

Tritium	Radioactief isotoop van waterstof met twee neutronen en één proton in de kern
Kerncentrale Kernreactor	Elektriciteitscentrale met als warmtebron een kernreactor Kern waar een kettingreactie van splijtingen in gang kan worden gezet, waarbij warmte ontstaat
Rendement	Het rendement van een machine geeft de verhouding weer van het afgegeven nuttige vermogen tot het verbruikte vermogen
Tokamak	Vat met toroïdale magneetvelden voor opsluiting van thermonucleaire plasma's, waarin experimenten worden gedaan ten behoeve van onderzoek aan kernfusiereacties

Bron: nrg-nl.com

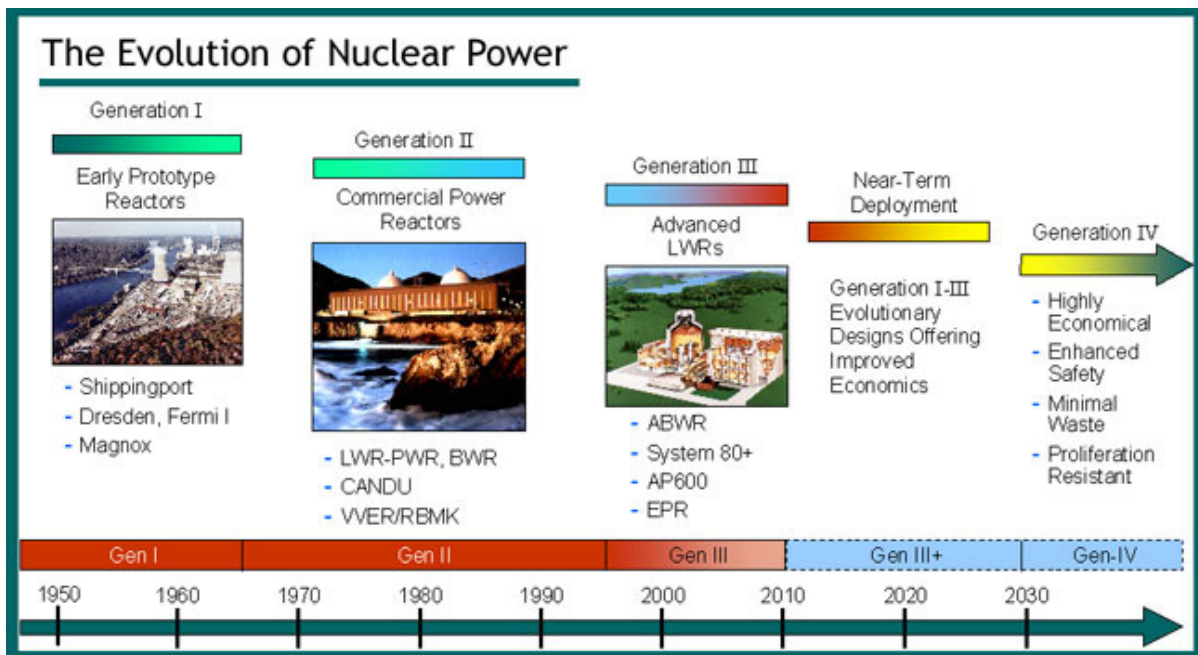
AGR	Advanced Gas-cooled Reactor
AP1000	Advanced Pressurized 1000 MW
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	CANada Deuterium Uraniumreactor (Pressurized Heavy Water Reactor)
COVRA	Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval
EPR	European Pressurized (water) Reactor
EPZ	Elektriciteits Productiemaatschappij Zuid-Nederland
ESBWR	Economic and Simplified Boiling Water Reactor
eV	Elektronvolt
FBR	Fast Breeder Reactor
FOM	Fundamenteel Onderzoek der Materie
GFR	Gas-cooled Fast Reactor
HABOG	Hoogradioactief Afval Behandelings- en Opslag Gebouw
HFR	Hoge Flux Reactor
HTR-PM	High Temperature Reactor Pebble-bed Module
IAEA	International Atomic Energy Agency
ITER	International Tokamak Experimental Reactor
JET	Joint European Torus
kWh	Kilowattuur
LFR	Lead-cooled Fast Reactor
LWR	Light Water Reactor
MOX	Mixed Oxide
MSR	Molten Salt-cooled Reactor
MW	Mega Watt
NRG	Nuclear Research and consultancy Group
PBMR	Pebble Bed Modular Reactor
PWR	Pressurized Water Reactor
RBMK	<i>reaktor bolshoy moshchnosti kanalny</i> (LightWater Graphite Reactor)
SCK/CEN	Studiecentrum voor Kernenergie/Centre d'étude de l'Energie Nucléaire, nationaal onderzoekcentrum in Mol (België).
SCWR	Super Critical Water Reactor
SFR	Sodium-cooled Fast Reactor
TNO	Toegepast Natuurkundig Onderzoek
UPL	Upper Port Launcher
UPV	Upper Port Viewer
VHTR	Very High Temperature Reactor
VROM	Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
WNA	World Nuclear Association

Bijlagen

Bijlage 1: Typen reactoren

Er zijn veel verschillende soorten reactoren, welke onderverdeeld zijn in generaties. De meeste reactoren zijn evoluties (verbeteringen) van de eerdere generaties. Zo kunnen de reactoren uit generatie I (reactor in Dodewaard) gezien worden als prototype reactoren, de reactoren van generatie II (reactor in Borssele) zijn momenteel in bedrijf, de reactoren die momenteel gebouwd worden zijn van generatie III (reactor in Finland) en de reactoren van de toekomst zijn van generatie IV.

Alle generaties en bijbehorende reactoren zullen nu verder worden toegelicht.



Afbeelding B1.1: generaties kerncentrales (bron: www.gen-4.org)

Generatie I

De reactoren die tot deze generatie behoren zijn gebouwd tussen 1950 en 1970 én kunnen gezien worden als prototype reactoren. Overigens zijn alle reactoren van deze generatie niet meer in bedrijf.

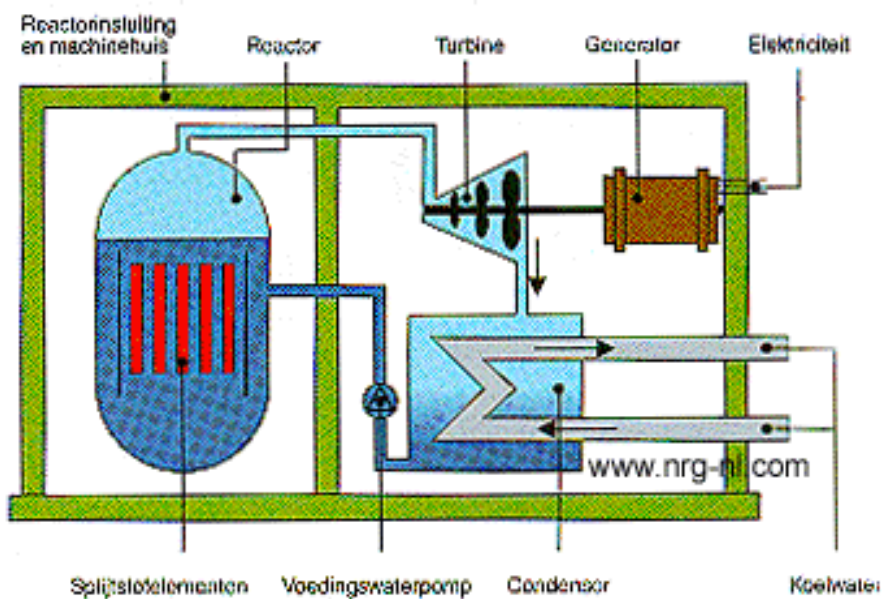
Generatie II

Tot deze generatie behoren de reactoren welke gebouwd zijn tussen 1970 en midden 1990. De reactoren welke nu in bedrijf zijn behoren allemaal tot deze generatie.

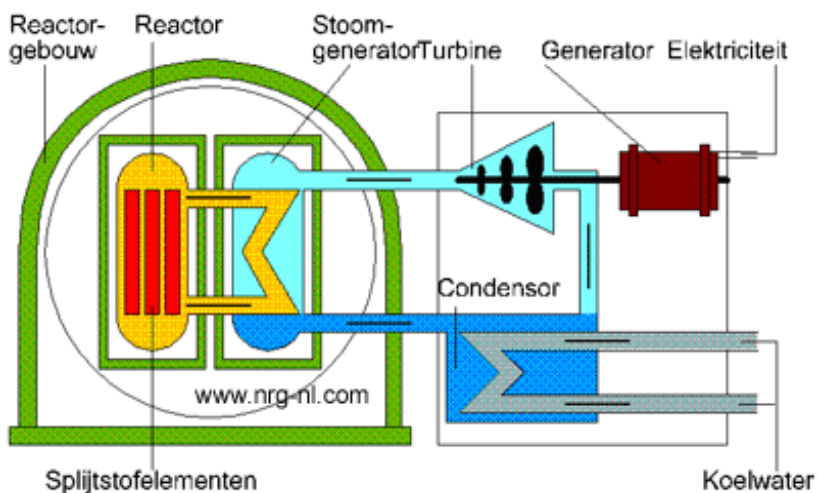
Type kerncentrale	Aantal in bedrijf	Landen (oa.)
PWR - Pressurized Water Reactor	268	VS, Frankrijk en Japan
BWR - Boiling Water Reactor	94	VS, Japan en Zweden
CANDU -Pressurised Heavy Water Reactor	40	Canada
Magnox & AGR -Gas cooled Reactor	23	Groot-Brittannië
RBMK - Light Water Graphite Reactor	12	Rusland
FBR - Fast Breeder Reactor	4	Japan en Rusland
Totaal	441	

TabelB1.1: overzicht van kerncentrales

PWR staat voor Pressurized Water Reactor (druk water reactor) en valt samen met de **BWR**, Boiling Water Reactor (kokend water reactor), onder de groep van de lichtwaterreactoren (LWR). De reactoren welke tot deze groep behoren worden allemaal gekoeld door 'licht' (=normaal) water en hebben ditzelfde soort water ook als moderator¹⁶. Het grootste verschil tussen de PWR en de BWR is dat het water binnen de PWR opgedeeld is in twee aparte circuits. Het eerst (primaire) circuit neemt de warmte op van de reactie, dit water staat onder hoge druk (155 bar), zodat het niet kan gaan koken. Het (primaire) water geeft zijn warmte over aan een tweede (secundaire) circuit. Het water in dit circuit staat onder veel lagere druk, waardoor dit gaat koken (met als gevolg dat er stoom ontstaat en zo een stoomturbine aangedreven kan worden). Bij een BWR mist dit eerste circuit. Bij dit type centrale wordt het koelwater meteen omgezet in stoom, door middel van de warmte die ontstaat bij de reactie, echter staat dit water wel nog onder een druk van 80 bar, dit houdt in dat het water pas bij 300°C gaat koken.



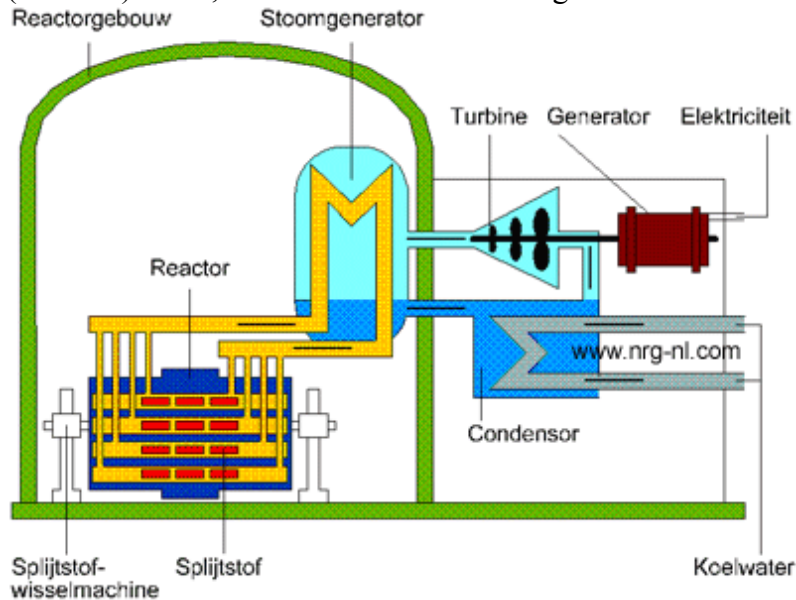
Afbeelding B1.2: schematische weergave van een BWR (bron: www.nrg-nl.com)



Afbeelding B1.3: Schematische weergave van een PWR (bron: www.nrg-nl.com)

¹⁶ Een moderator is een stof welke in een kerncentrale ervoor zorgt dat de snelle neutronen zodanig worden afgeremd dat ze deel blijven nemen aan de kettingreactie en niet voortijdig de reactor verlaten.

De **CANDU** (Pressurized Heavy Water Reactor) reactor valt onder de ‘zwaar water’¹⁷ reactoren. En gebruikt zwaar water voor zowel de koeling als voor moderator. De splijfstofstaven worden horizontaal (in tegenstelling tot de LWR) geplaatst. Omdat zwaar water weinig neutronen absorbeert gaan er ook weinig neutronen verloren, dit heeft als voordeel dat er met natuurlijk uranium gewerkt kan worden. Met gevolg dat er geen verrijkingsinstallaties benodigd zijn. Zwaar water als moderator is minder effectief dan licht (normaal) water, maar wel effectiever dan grafiet.

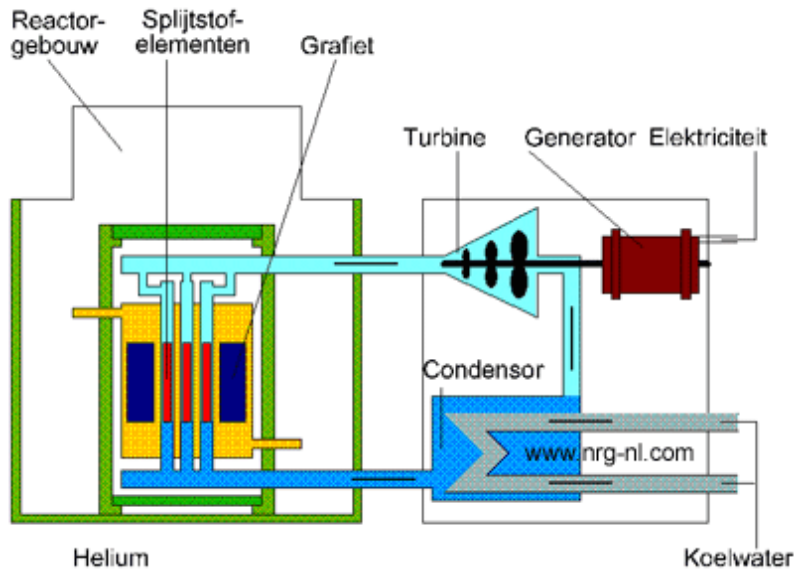


Afbeelding B1.4: Schematische weergave van een CANDU reactor (bron: www.nrg-nl.com)

De **RBMK** (Russische afkorting voor *reaktor bolshoy moshchnosti kanalniy*, vrij vertaald in het Engels Light Water Graphite Reactor) is een watergekoelde grafietgemodereerde reactor van Russische makelaardij. De reactor in Tsjernobyl was van dit type en dit type is overigens alleen in Rusland in gebruik (geweest). Het grootste verschil met LWRs is dat er geen drukvat is, de reactorkern is opgebouwd uit grafietblokken waarin kanalen zitten. In deze verticale kanalen liggen drukbuizen met daarin de splijfstofstaven. Dit type reactor wordt gekoeld door (normaal) water en gebruikt grafiet als moderator. Grafiet is een stuk slechtere moderator dan water, hierdoor moeten de splijfstofstaven een stuk verder uit elkaar liggen. Dit heeft als gevolg dat de omvang van een RBMK een stuk groter is als die van een PWR.

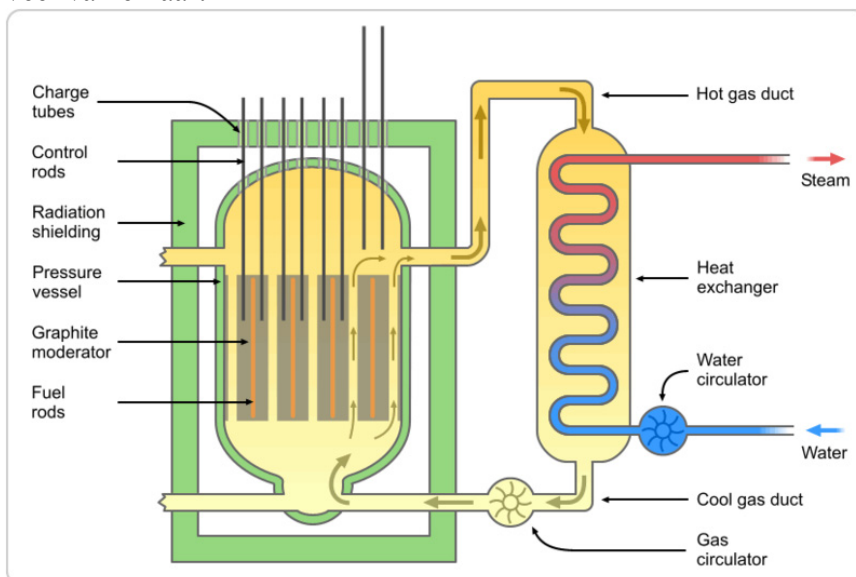
De RBMK had als tweede functie, buiten energieproductie, het produceren van plutonium voor de Russische wapenindustrie. Doordat de buizen horizontaal geplaatst zijn, kunnen ze gewisseld worden als de reactor nog in bedrijf is. De buizen konden gewisseld worden wanneer er genoeg plutonium was vrijgekomen.

¹⁷ Zwaar water is chemisch gezien identiek aan normaal water, alleen de waterstofatomen zijn vervangen door deuteriumatomen (deuterium is een isotoop van waterstof, naast een proton bevat de kern ook een neutron).



Afbeelding B1.5: schematische weergave van een RBMK reactor (bron: www.nrg-nl.com)

De Magnox-reactoren zijn van Brits ontwerp en worden ook voornamelijk in Groot-Brittannië gebruikt. De naam Magnox komt van het materiaal dat gebruikt wordt voor de bekleding van de splijfstofstaven binnen deze reactor. Dit type reactor wordt gekoeld door middel van kooldioxide en gebruikt grafiet als moderator. Verder kan deze reactor natuurlijk uranium (dus niet verrijkt) gebruiken als brandstof. De splijfstofstaven kunnen verwisseld worden terwijl de installatie in bedrijf is. Als vervolgonwikkeling op de Magnox-reactor is in Groot-Brittannië de AGR (Advanced Gascooled Reactor) ontwikkeld. Door verbeteringen op het gebied van de splijfstofstavenbehuizing en een verhogen van de druk van het koelgas, kon het thermische rendement van 30% worden verhoogd tot 40%. Door de grotere absorptie van neutronen in het buismateriaal moest er wel overgestapt worden op verrijkt uranium (in plaats van natuurlijk uranium). Verder onderscheiden deze reactoren (Magnox en AGR) zich niet veel van elkaar.



Afbeelding B1.6: schematische weergave van een Magnox-reactor (bron: nl.wikipedia.org/wiki/Magnox)

De FBRs (Fast Breeder Reactor) welke nu op de markt zijn, behoren tot Generatie II.

De Fast Breeder Reactoren (snelle (kweek) reactoren) hebben geen moderator, hierdoor worden de vrijgekomen neutronen niet afgeremd met als voordeel dat de langlevende actiniden (welke vrijkomen bij splijting) gereduceerd worden.

Gen-IV richt zich zeer nadrukkelijk op FBRs: tenminste 3 van de 6 geselecteerde systemen zijn snelle kweekreactoren.

Generatie III

Generatie III reactoren zijn de ontwikkelingen van de twee eerdere generaties. Men is begonnen met bouwen van deze reactoren in 1995 en er wordt verwacht dat ze in 2010 overgenomen worden door de (tussen)generatie III+ reactoren. Op basis van redundantie (overvloed aan gegevens), separatie (scheidende), diversificatie (verscheidenheid), kortere/minder pijpleidingen en grotere watervolumes (voor de warmte na het afschakelen) kunnen de generatie III reactoren een hogere betrouwbaarheid en veiligheid garanderen.

Vooralsnog zijn enkele van deze reactoren alleen in Azië gebouwd. De EPR (European Pressurized Reactor) is een evolutie van de PWR en behoort tot de derde generatie. Deze reactor (EPR) wordt momenteel in Finland gebouwd en in Frankrijk zijn plannen om er ook één te bouwen. Een andere reactor die tot deze generatie behoort is de Advanced Boiling Water Reactor (ABWR).

Generatie III+

De reactoren die tot deze (sub)groep horen zullen van nu tot ongeveer 2030 op de markt komen/zijn. De verbeteringen van deze generatie ten opzichte van Generatie III zijn terug te vinden in de passieve componenten. Te weten: natuurlijke circulatie kernkoeling, zwaartekracht gedreven noodkoeling en convectieve koeling van de veiligheidsomhulling. De generatie III+ reactoren zijn een stuk kleiner dan de generatie III reactoren. Tussen de 1000 en 1600 MW voor de generatie III tegenover ongeveer 160 MW voor de generatie III+. Dit grote verschil is terug te vinden in het principe dat de generatie III+ uit verschillende modules bestaat (dus niet één grote reactor, maar meerdere kleine reactoren, zodat het makkelijker voor het onderhoud is en deze ook veiliger zijn).

De volgende reactoren behoren tot deze generatie:

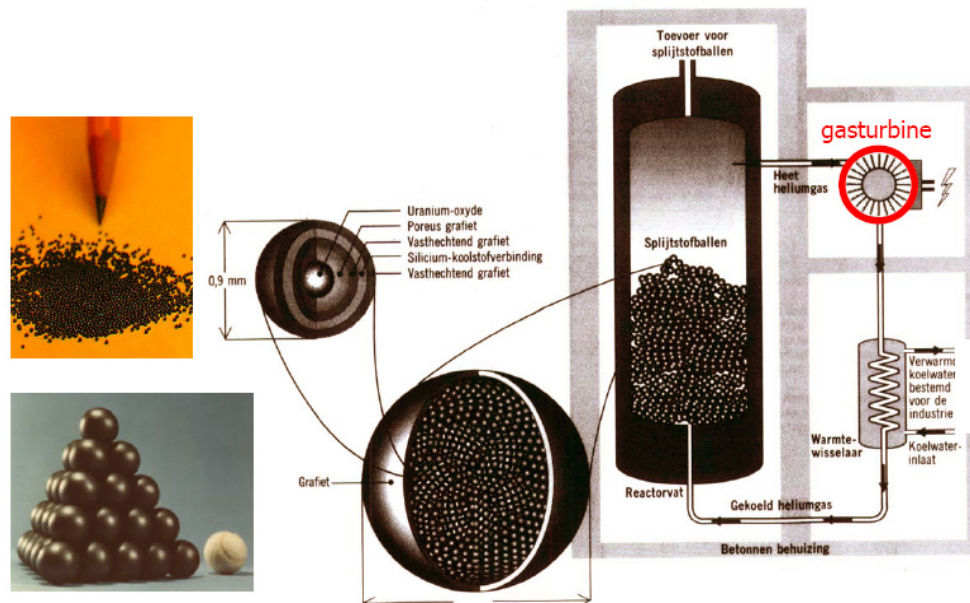
- PBMR (Pebble Bed Modular Reactor, en is een helium gekoelde kogelbed hoge temperatuur reactor. Met dit ontwerp zijn ze bezig in Zuid-Afrika (demoproject)).
- HTR-PM (High Temperature Reactor Pebble-bed Module, en is net als de PBMR helium gekoeld. Deze reactor is in China in ontwikkeling en het grootste verschil met de PBMR is, dat deze reactor net als de generatie III reactoren via stoom energie opwekt en de PBMR direct via het helium een gasturbine aandrijft en zo energie opwekt).
- AP1000 (Advanced Pressurized 1000 MW)
- ESBWR (Economic en Simplified Boiling Water Reactor en is een verbetering van de BWR).

De PBMR werkt met een heel ander principe dan de eerder genoemde reactoren.

De Pebble-Bed Modular Reactor (PBMR) is namelijk een kogelbed-HTR (High Temperature Reactor) van Zuid-Afrikaanse herkomst en gebaseerd op Duitse technologieën. Door het ontwerp van de reactor zo te kiezen dat zelfs bij verlies aan koelmiddel de temperatuur in de splijtstof onder het toegestane maximum van 1600°C blijft, kan deze reactor als inherent¹⁸

¹⁸ Inherente veiligheid maakt veiligheidssystemen overbodig, terwijl toch de publieke veiligheid gewaarborgd blijft. Dit principe stelt een sterke beperking aan het maximale vermogen dat uit een reactor te halen is en stelt hoge eisen aan de hittebestendigheid van de gebruikte materialen. Het idee achter dit principe is, om met meerdere modules te werken. Inherente veiligheid wordt ook wel natuurlijke of intrinsieke veiligheid genoemd en kan worden beschouwd als een ver doorgevoerde vorm van passieve veiligheid.

veilig worden beschouwd. De reactorkern wordt gekoeld met helium dat direct naar een gasturbine wordt geleid die op haar beurt weer verbonden is met een generator. Door de hoge bedrijfstemperatuur (ongeveer 850°C) ligt het rendement een stuk hoger dan bij de LWRs. Dit type reactor gebruikt lichtverrijkte (10%) uranium als brandstof. De gebruikte splijstof zit ingebed in grafiet en kan met de gebruikte technologie niet aan deze matrix worden onttrokken.



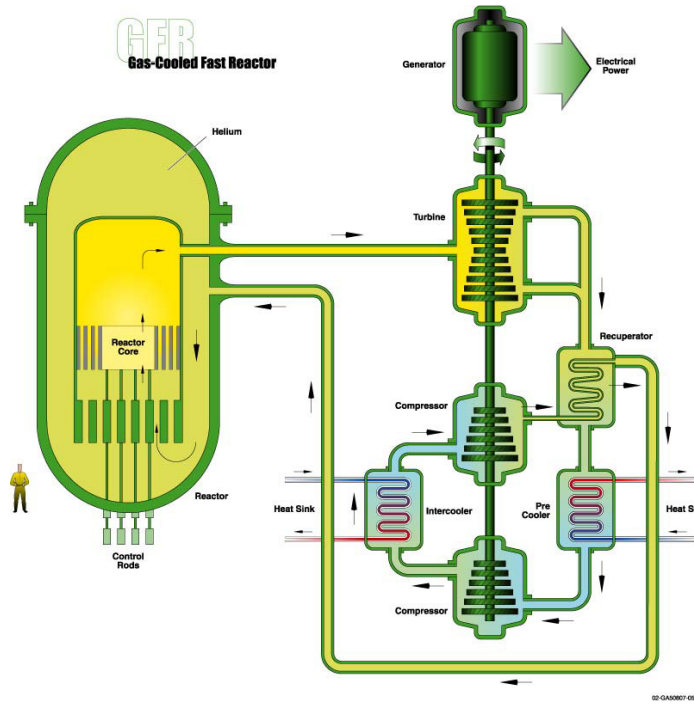
Afbeelding B1.7: schematische weergave van de PBMR en ter vergelijking de Pebbles (links boven de brandstof, links onder de Pebbles in hun geheel).

Generatie IV

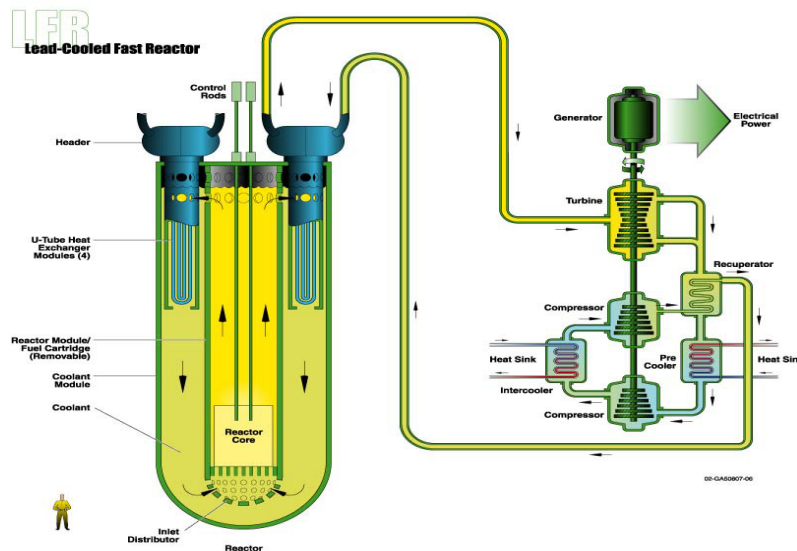
De reactoren die tot deze generatie behoren, zijn de kerncentrales van de toekomst (vanaf ongeveer 2030 op de markt). En zijn niet alleen verbeteringen ten opzichte van de eerdere generaties op de gebieden van regelgeving en economie, maar ook op de gebieden van veiligheid, duurzaamheid, proliferatie- en terrorismebestendigheid. Onder duurzaamheid wordt hier bedoeld dat men enerzijds zuinig omgaat met de grondstof (uranium) en anderzijds het zo weinig mogelijk produceren van radioactief afval. Dit houdt in dat niet alleen de reactortechnologieën verder worden ontwikkeld maar dat ook de complete splijstofcycli onder handen genomen wordt. Binnen deze generatie is een zestal reactortypen geselecteerd waar het onderzoek zich op richt. Dit onderzoek wordt gedaan op initiatief van de volgende landen: Argentinië, Brazilië, Canada, Frankrijk, Japan, Zwitserland, Zuid-Afrika, Zuid-Korea, Groot-Brittannië, Verenigde Staten en de Europese Unie.

Het zestal reactoren is te onderscheiden in de 'thermische (neutron spectrum) reactoren' (vrijwel alle neutronen in de reactorkern hebben een lage energie) en de 'snelle reactoren' (hier is het hoge energiegebied veel sterker vertegenwoordigd). De snelle reactoren hebben als voordeel dat ze, beter dan de thermische reactoren, plutonium en andere actiniden kunnen recyclen en de hoeveelheid langlevend afval kunnen reduceren, echter vergt deze groep nog veel onderzoek op het gebied van veiligheid en nieuwe materialen.

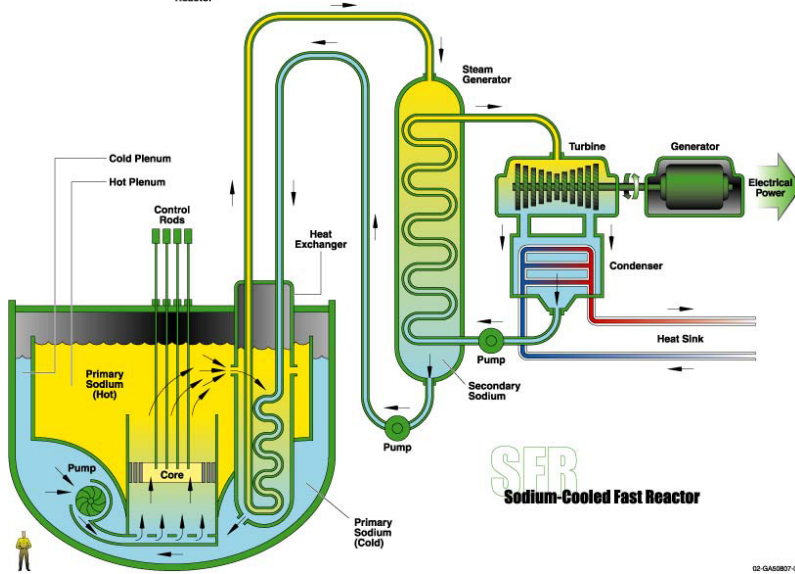
Op de hierna volgende afbeeldingen zijn de 6 verschillende typen Generatie IV reactoren te bezichtigen. (bron: www.gen-4.org)



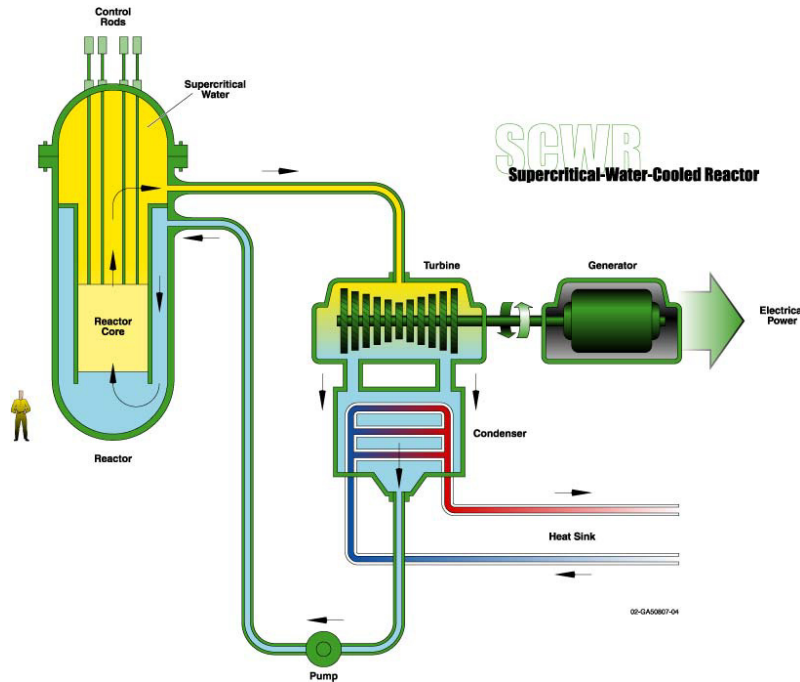
De GFR (Gas-cooled Fast Reactor) is een gas(helium)gekoelde snelle reactor. Met een verwacht vermogen van ongeveer 300 MWe per reactor.



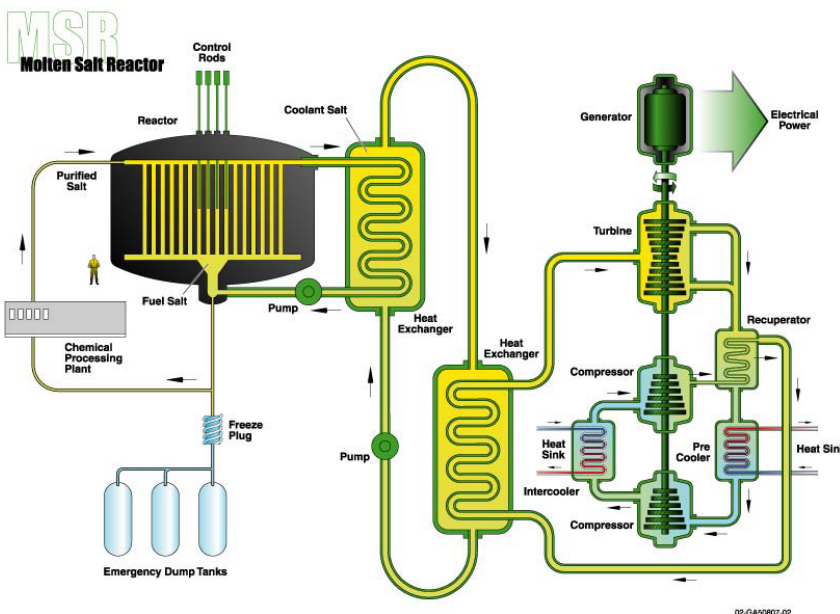
De LFR (Lead-cooled Fast Reactor) is een met vloeibaar lood gekoelde snelle reactor. Met een vermogen tussen de 50 en 1200 MWe.



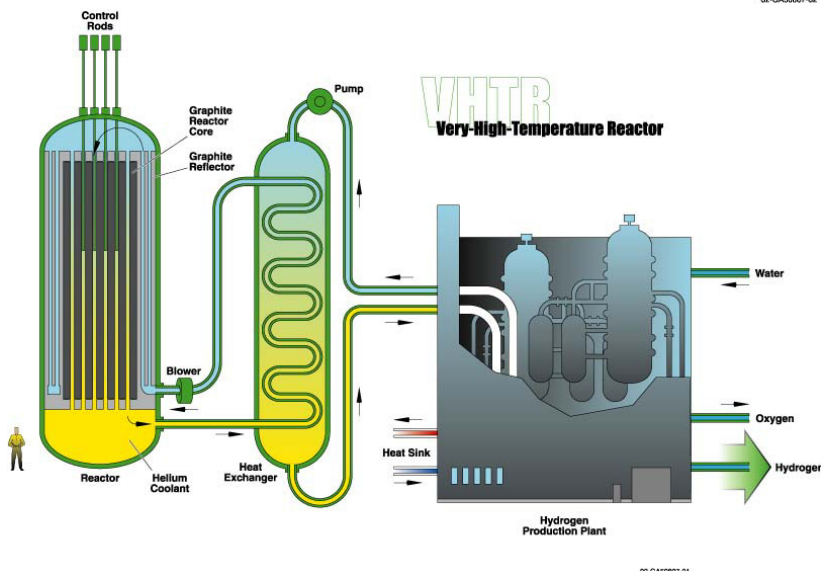
De SFR (Sodium-cooled Fast Reactor) is een met natrium gekoelde snelle reactor. Met een vermogen tussen de 150 en 1500 MWe.



De SCWR (Super Critical Water-cooled Reactor) kan worden ontworpen met een thermisch spectrum of met een snel neutronenspectrum. De kern van deze reactor wordt gekoeld door middel van water en zal met een vermogen van 1700 MWe de grootste worden van deze generatie.

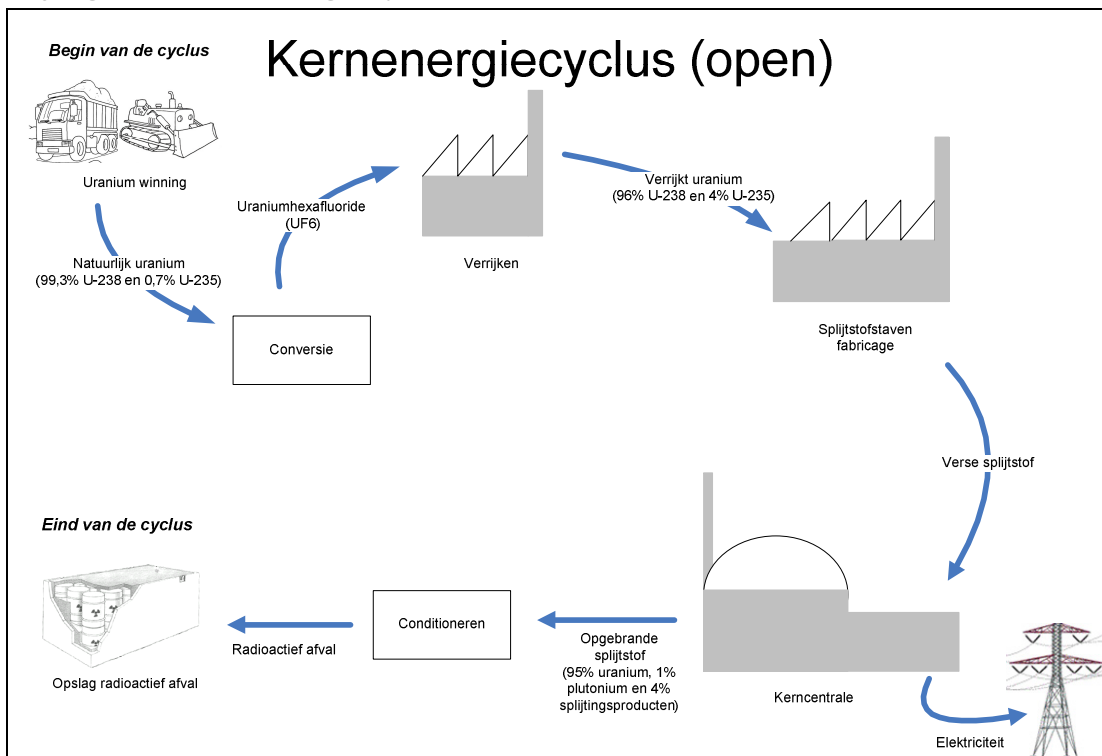


De MSR (Molten Salt-cooled Reactor) is het meest innovatieve ontwerp van deze generatie. Deze reactor wordt gekoeld met een gesmolten zout en zal een vermogen hebben van ongeveer 1000 MWe.

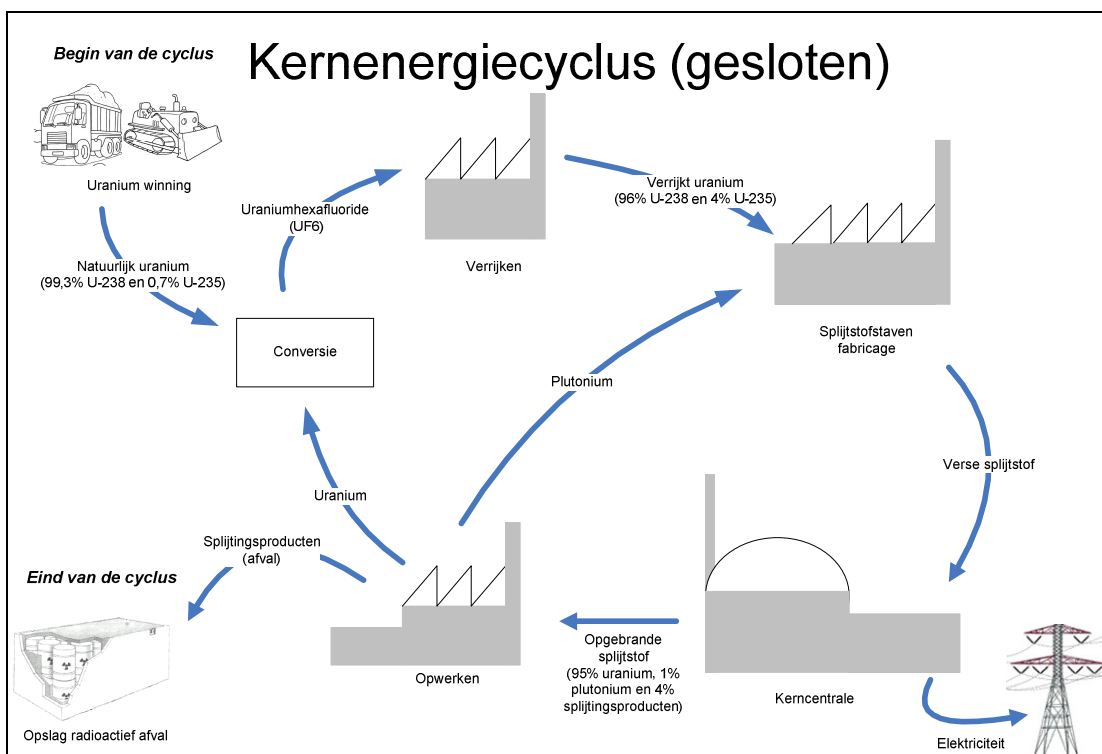


De VHTR (Very High Temperature Reactor) is een zeer hoge temperatuur reactor waarvan de hoge temperatuur (1000°C) gebruikt kan worden voor de productie van waterstof. Deze reactor wordt door middel van helium gekoeld en heeft een verwacht vermogen van 300 MWe.

Bijlage 2: Kernenergiecyclus



Afbeelding B2.1: de open splijstof- of kernenergiecyclus



Afbeelding B2.2: de gesloten splijstof- of kernenergiecyclus

Bijlage 3: Actieve landen

De grootste kernenergieproducenten van de wereld zijn in tabel 1 te vinden. De landen welke het grootste aandeel kernenergie in Europa hebben, zijn in tabel 2 te vinden. In tabel 2 is Nederland ook opgenomen, dit om een vergelijking te maken van Nederland met de rest van Europa. Kernenergie is met een aandeel van ongeveer 36% van het totale aanbod van (elektrische)energie, de belangrijkste energiebron van Europa.

De zes landen welke de meeste kernenergie produceren in de wereld				
	Kernenergie opwekking		Werkende kerncentrales	
Land	Miljard kWh	% van totale energie	aantal	Vermogen (MWe)
VS	780,5	19	103	98.054
Frankrijk	430,9	79	59	63.473
Japan	280,7	29	55	47.700
Duitsland	154,6	31	17	20.303
Rusland	137,3	16	31	21.743
Zuid-Korea	139,3	45	20	16.840
Wereld	2626	16	441	370.033

Tabel B3.1: landen wereldwijd (September 2006, bron: World Nuclear Association)

De vijf landen welke de meeste kernenergie produceren in Europa				
	Kernenergie opwekking		Werkende kerncentrales	
Land	Miljard kWh	% van totale energie	aantal	Vermogen (MWe)
Frankrijk	430,9	79	59	63.473
Duitsland	154,6	31	17	20.303
Oekraïne	83,3	49	15	13.168
Groot-Brittannië	75,2	20	23	11.852
Zweden	69,5	45	10	8.975
Nederland*	3,8	3,9	1	452
Wereld	2626	16	441	370.033

Tabel B3.2: landen Europa (september 2006, bron: World Nuclear Association)

* Nederland behoort niet tot de grotere producenten van Europa

Bijlage 4: De voor- en nadelen van kernsplijting

Voordelen:

- Geen CO₂-uitstoot. Er komt alleen CO₂ vrij bij de bouw van de kerncentrale en het winnen van de grondstof, echter is dit ongeveer hetzelfde als bij andere energiecentrales. Daarentegen komt er bij het opwekken van de (elektrische)energie zelf geen CO₂ vrij. Dus geen uitstoot van broeikasgassen.
- Zuinig met de grondstof/ brandstof (uranium). Doordat er heel veel energie vrijkomt bij het splijten van uranium, is er maar weinig van deze grondstof nodig. Ter vergelijking: de verbranding van 1 kilo hout levert 1 kWh op, de verbranding van 1 kilo kolen levert 3 kWh op en het splijten van 1 kilo uranium levert 40.000 kWh op.
- De kosten zijn goed in te schatten. De kostprijs voor 1 kWh kernenergie is goed te schatten, omdat deze als volgt is opgebouwd: kosten voor ontmanteling (5%), grondstofkosten (5%), kosten voor de opslag van kernafval (5%), verrijking en dergelijke (5%), onderhoud en management (20%) en investeringskosten (60%). Op de grondstofkosten na zijn alle kostenposten van tevoren bekend, daardoor kan er van tevoren een kWh prijs worden vastgesteld. En omdat de grondstofkosten maar een aandeel heeft van 5% op de totale kostprijs, heeft een stijging van de kiloprijs van uranium weinig invloed op de totale kWh prijs. Bij kolen- en gascentrales heeft de grondstofprijs een veel groter aandeel in de totale kWh prijs.
- Leveringszekerheid van de grondstof. Uranium is ruim voorhanden en wordt verspreid over de hele wereld gewonnen. Omdat het zo verspreid gewonnen wordt, is er een goede marktwerking. En in tegenstelling tot olie en gas, wordt uranium gewonnen in politiek stabiele regio's (oa. Canada en Australië).

Nadelen:

- Kernafval. Elke industriële activiteit brengt afval met zich mee, zo ook een kerncentrale. Echter heeft een kerncentrale te maken met radioactief afval. Radioactief afval zendt na gebruik nog straling uit en een te grote hoeveelheid straling is schadelijk voor mens en milieu. Sommige radioactieve stoffen zijn na een aantal minuten niet meer gevaarlijk, want radioactiviteit neemt namelijk in de tijd vanzelf af. Echter blijven sommige radioactieve stoffen duizenden jaren gevaarlijk. Dit afval wordt gezien als het grootste nadeel van kernenergie.
- Veiligheid. Bij kerncentrales wordt rekening gehouden met twee soorten risico's, namelijk: van buiten de centrale naar binnen toe (overstromingen, explosies, aardbevingen en na 11 september 2001 ook met neerstortende vliegtuigen) en van binnen de centrale naar buiten toe (uitval van koeling, met als gevolg oververhitting zoals bij de ramp in Tsjernobyl). De kans dat er met een moderne en goed beveiligde kerncentrale een ongeluk gebeurt waardoor er een onveilige situatie ontstaat, is uitermate klein. Echter hoe klein de kans ook is, 100% veiligheid is nooit te garanderen.
- Proliferatie. Proliferatie is de verspreiding van materiaal waarmee kernwapens gemaakt kunnen worden. In het verleden (en dan voornamelijk de Russische typen kerncentrales) waren (mede) gericht op de productie van plutonium, het belangrijkste bestandsdeel voor een kern- of atoombom, echter is het nu door strenger overheidstoezicht en betere beveiliging- en veiligheidsmaatregelen onmogelijk om aan deze bestandsdelen te komen.
- Kosten. En dan vooral de investeringskosten, deze kosten zijn 2 maal zo veel als de kosten voor steenkoolcentrale en zelfs 4 maal zo veel als voor een gascentrale van de zelfde grootte (bijvoorbeeld 1000 MW centrale). Daar komt bij dat er een groot gebrek

aan commerciële belangstelling is voor kernenergie. Hierdoor zullen investeerders minder snel gaan investeren in een kernenergieproject, dat toch al gauw gepaard gaat met enkele miljarden euro's.

Bijlage 5: De COVRA

Al het radioactieve afval wordt in Nederland opgeslagen bij de COVRA. Het in beton ingepakte laag- en middelradioactief afval ligt opgeslagen in een goed beveiligde en extra stevige loods. Het hoogradioactieve ligt in de extreem veilige HABOG opgeslagen, dit gebouw is voorzien van muren van 1,7 meter dik gewapend beton en is tegen elk gevaar van buitenaf (aardbeving, overstromingen en neerstortende vliegtuigen) beveiligd (het is vergelijkbaar met een bunker). Dit gebouw is in 2003 geopend en hier liggen de vaten/cilinders met afval zo opgeslagen dat ze al hun vervalwarmte (eerste jaar zo'n 2000 Watt) kwijt kunnen raken. Omdat er nog radioactiviteit aanwezig is in deze cilinders met afval, wordt het hele proces, van binnenkomst van het afval tot opslag, automatisch en mechanisch geregeld. Dergelijke opslag gebouwen zijn ook te vinden in Frankrijk, Engeland, Amerika en Japan.

Aan de opslag van radioactief materiaal worden strenge eisen gesteld, het afval moet zodanig opgeborgen worden dat er geen blootstelling aan radioactief materiaal te verwachten is. Zou er onder speciale omstandigheden toch radioactief materiaal uit de opbergfaciliteit komen, dan moet deze dosis, voor alle in de buurt aanwezigen, minder dan 1 mSv/jaar zijn.



Afbeelding B5.1 en B5.2: Links de HABOG en rechts het insluiten van een cilinder met hoogradioactief afval, bij de COVRA (bron: COVRA)

De regering heeft (deels in samenwerking met de COVRA) beleid opgesteld voor radioactief afval en ziet er als volgt uit:

- Er moet voorkomen worden dat het radioactief afval ongecontroleerd in het leefmilieu terechtkomt. Praktisch betekent dat Isoleren, Beheersen en Controleren van dit afval.
- Omdat in Nederland weinig radioactief afval wordt geproduceerd en omdat het een specialistische zorg vraagt, is één centrale faciliteit voor de inzameling, de verwerking en de opslag nodig (de COVRA).
- Alle soorten radioactief afval moeten ten minste gedurende 100 jaar kunnen worden opgeslagen.
- Na die periode van 100 jaar wordt bekeken of het dan nog steeds radioactieve deel van het afval definitief in eigen land kan worden opgeborgen. Misschien zijn er tegen die tijd internationale oplossingen beschikbaar of zijn er nieuwe technieken ontwikkeld die nu nog niet bekend zijn.

De methode welke gebruikt wordt voor de opslag van radioactief afval is de langdurige bovengrondse opslag (minimaal 100 jaar), echter is de wetenschap ook bezig met, de ontwikkeling en mogelijkheden van, twee andere vormen voor de opslag/verwerking van dit afval, te weten: ondergrondse opslag en transmutatie.

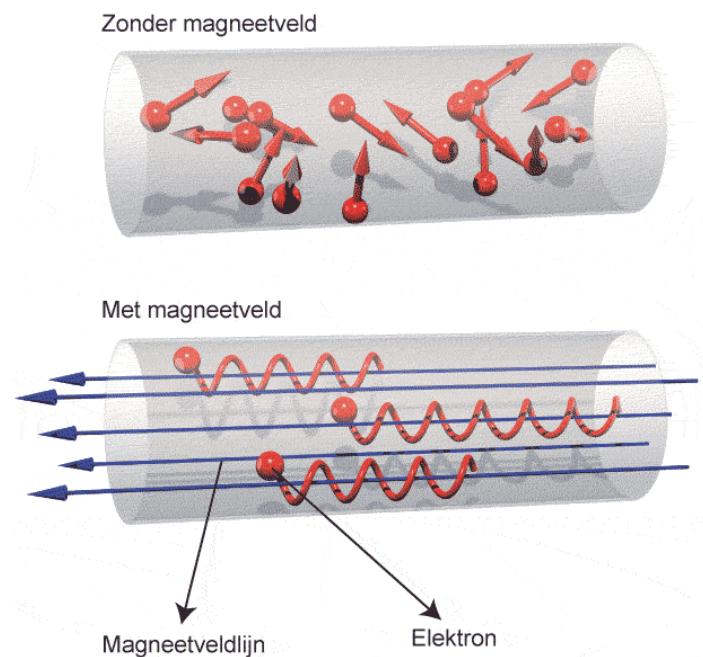
Bijlage 6: Het obstakel van kernfusie, plasma

Het grootste obstakel bij kernfusie is de extreem hoge temperatuur (100-150 miljoen °C). Bij zulke hoge temperaturen vormt materie een plasma, een heet gas van geladen deeltjes.

De opsluiting van het plasma

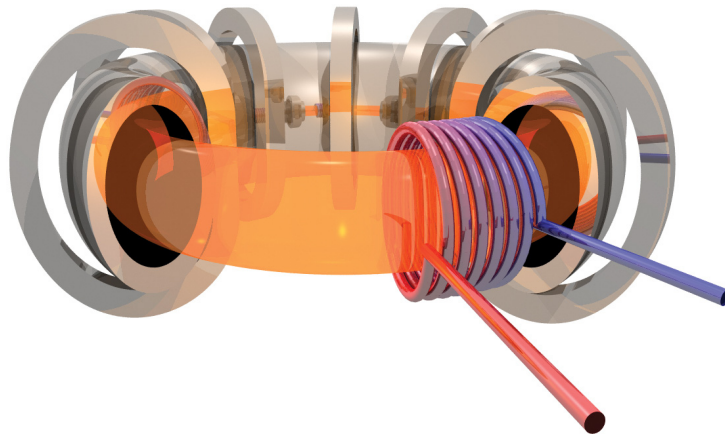
De warmteoverdracht van het plasma (100-150 miljoen °C) naar de wand moet beperkt worden om ten eerste de wand te beschermen (geen enkel materiaal is bestemd tegen een dergelijke hoge temperatuur) en ten tweede om het plasma op temperatuur te houden.

Om dit te realiseren kan er handig gebruik worden gemaakt van een van de eigenschappen van een plasma. Een plasma bestaat uit geladen deeltjes, elektronen en ionen, en kan worden gemanipuleerd door middel van magneetvelden. De geladen deeltjes worden gedwongen magneetlijnen te volgen welke zo georganiseerd zijn dat ze de binnenkant van de wand niet raken. Dit principe staat ook wel bekend als magnetische opsluiting.



Afbeelding B6.1: geladen deeltjes met en zonder magneetveld (bron: www.fusie-energie.nl)

Nadat het bekend was dat met het principe van de magnetische opsluiting het plasma in bedwang gehouden kon worden, werd er gezocht naar de juiste vorm voor een reactor. De ontdekking van de tokamak verzorgde de grote doorbraak. Een tokamak heeft de vorm van een ring en hierdoor worden uiteinden vermeden (de geladen deeltjes volgen een oneindig lange weg).



Afbeelding B6.2: Principe van een tokamak, het plasma (oranje) omringd door D-vormige magneten. (bron: www.fusie-energie.nl)

Plasma verwarmen

De elektrische stroom (verwarmd het plasma door middel van Ohmse weerstand) die door het plasma loopt is niet voldoende om de benodigde temperatuur voor kernfusie, 100-150 miljoen °C, te bereiken, hierom wordt er ook gebruik gemaakt van externe verwarmingsbronnen.

Door middel van microgolven kan het plasma deels verhit worden. Hierbij worden intense elektromagnetische golven met verschillende frequenties het plasma ingestuurd, waar ze door de deeltjes in het plasma worden geabsorbeerd. De laatste methode om de gewenste temperatuur te krijgen is het inschieten van bundels, met neutrale elektrische deeltjes en een zeer hoge energie, in het plasma. Omdat het neutrale bundels zijn, worden ze niet opgenomen door het magnetische veld, maar kunnen ze wel doordringen tot het plasma. Tenslotte kunnen ze in het plasma botsen met andere deeltjes en zo hun energie (warmte) afgeven, waardoor de temperatuur van het plasma stijgt.

De supergeleidende spoelen welke om het vacuümvat heen zitten, en ervoor zorgen dat het plasma door middel van een magnetisch veld op zijn plek blijft, worden gekoeld door helium. Het plasma (150 miljoen °C) is zeer ijl, hierdoor wordt de wand van vacuümvat niet warmer dan +/- 500 °C (afstand van de wand tot aan het plasma is ongeveer 10 cm).