



Overzicht van nieuwe kerncentrales

J.L. Kloosterman

PNR-131-2006-003 / Rev 1
September 2006

INHOUD

| | |
|-----------------------------|----|
| 1. Inleiding | 3 |
| 2. Generatie III en III+ | 9 |
| 3. Generatie IV | 16 |
| 4. GNEP | 21 |
| 5. Conclusies | 25 |
| 6. Geraadpleegde literatuur | 26 |

1. INLEIDING

1.1 Achtergrond

Kernenergie voorziet thans in de elektriciteitsvoorziening van circa 1 miljard mensen. Dit aandeel komt overeen met 17% van het totale elektriciteitsverbruik in de wereld en is al jaren stabiel, dankzij efficiëntieverbetering en een gestage groei van het aantal kerncentrales in voornamelijk het Verre Oosten. Zo zijn in 2005 zeven centrales in bedrijf gekomen met een totaal vermogen van ruim 8000 MWe (18 keer het vermogen van de kerncentrale in Borssele), en zijn er 27 in aanbouw. In West-Europa voorziet kernenergie in 35% van het elektriciteitsverbruik.

Recent is kernenergie ook in het Westen opnieuw in de belangstelling gekomen vanwege de mogelijkheid om zonder productie van broeikasgassen en tegen concurrerende kosten elektriciteit te produceren. Om deze redenen wordt momenteel een kerncentrale gebouwd in Finland en wordt binnenkort gestart met de bouw van een nieuwe kerncentrale in Frankrijk. Ook in de VS lopen diverse initiatieven die moeten leiden tot nieuwbouw van kerncentrales.

Dit document geeft een overzicht van de verschillende typen kerncentrales die nu op de markt zijn of in de nabije toekomst (10 jaar) zouden kunnen worden gebouwd. Tevens wordt een overzicht gegeven van de zogenaamde "Generatie-IV" reactoren die nog enkele decennia ontwikkeltijd vergen.

1.2 Typen reactoren

De huidige generatie kerncentrales bestaat voor meer dan 80% uit *lichtwaterreactoren* (LWR). Dit zijn kerncentrales waarvan de reactor kern is samengesteld uit enkele tienduizenden splijtstofstaven met een lengte van circa vier meter en een diameter van één centimeter. Deze staven zijn gevuld met uraniumoxide tabletten waarin de kernsplijtingen plaatsvinden. Langs de splijtstofstaven stroomt water dat de geproduceerde warmte opneemt en wegvoert. Bij een ingestelde druk van 75 bar raakt het koelwater in de reactor kern aan de kook en spreekt men van *kokendwaterreactoren* (Boiling Water Reactor-BWR). Bij een tweemaal zo hoge druk, kan het koelwater niet koken en spreekt men van *drukwaterreactoren* (Pressurized Water Reactor-PWR). In het laatste geval wordt het verhitte water eerst naar een stoomgenerator geleid. In beide typen centrales wordt de stoom naar een reeks turbines geleid die een generator aandrijven voor de productie van elektriciteit. Wereldwijd zijn bijna 60% van de ruim 440 kerncentrales drukwaterreactoren, terwijl ruim 20% bestaat uit kokendwaterreactoren. De resterende fractie kerncentrales wordt gekoeld met gas (helium of kooldioxide) of een vloeibaar metaal zoals gesmolten natrium of lood. Hiertoe behoren de zogenaamde 'snelle' reactoren die betere mogelijkheden bieden voor de recycling van plutonium.

1.3 Veiligheid van kerncentrales

Vervalwarmteproductie

In kerncentrales wordt warmte geproduceerd door atoomkernen van uranium en plutonium te laten splijten in twee brokstukken. De splijtingsproducten zenden nog gedurende enkele tientallen jaren ioniserende straling uit die schadelijk is voor mens en milieu. Het overgrote deel van de radioactieve splijtingsproducten zullen echter vervallen gedurende de tijd dat de splijtstofelementen nog in de reactorkern zitten. De vervalwarmte van splijtingsproducten bedraagt circa 7% van het totale reactorvermogen en moet te allen tijde worden afgevoerd om beschadiging van de splijtstof in de reactorkern (kernsmeltongevallen) te voorkomen.

Verkleining van de kernsmeltfrequentie

De kans dat de kern door oververhitting beschadigd raakt kan worden berekend met probabilistische methoden en wordt aangeduid met de kernsmeltfrequentie. Om deze kans te reduceren tot $<10^{-5}$ /jaar vertrouwen de ontwerpers van kerncentrales op diverse redundante en gescheiden noodkoelsystemen, waarvan de werkingsprincipes in de loop van de tijd zijn verschoven van "actief veilig" (berustend op activerende krachten zoals elektriciteit), via "passief veilig" (berustend op passieve krachten zoals de zwaartekracht of natuurlijke circulatie) tot "inherent veilig" (geen extra systemen benodigd).

Beperking van de verspreidingskans

Hoewel de kernsmeltfrequentie algemeen wordt gezien als maat voor de veiligheid van een reactor, is het voor omwonenden relevanter te weten of bij een ongeval radioactieve splijtingsproducten vrijkomen. Om deze kans te verkleinen, zijn kerncentrales voorzien van meervoudige omhullingen die enerzijds een grote overdruk kunnen weerstaan en anderzijds invloeden van buiten kunnen tegenhouden. Zo heeft de kerncentrale Borssele een gasdichte stalen omhulling die een overdruk van 4,5 bar kan weerstaan en een koepel van gewapend beton. Pas in uiterste nood zou bij een kernsmeltongeval gebruik gemaakt hoeven te worden van de gefilterde afblaasinstallatie. De nieuw ontworpen EPR die later zal worden besproken, bevat een zogenaamde 'core catcher' die de gevolgen van een kernsmeltongeval sterk reduceert, en een dubbele betonnen omhulling die bestand is tegen de gevolgen van een dergelijk ongeval. Deze reactor zal dus in geval van een kernsmeltongeval niet hoeven te lozen via een gefilterd afblaassysteem.

1.4 Brandstoftypen

Uraniumoxide en MOX brandstof

Vrijwel alle kerncentrales maken gebruik van uranium als brandstof. Omdat in lichtwaterreactoren het gebruik van natuurlijk uranium niet mogelijk is, wordt het uranium verrijkt in de splijtbare isotoop uranium-235 van 0.7% in uraniumerts

tot circa 4.5%. Dit vindt onder andere plaats bij URENCO in Almelo. Na bestraling in de reactor, zal de splijtstof nog circa 1% uranium-235 bevatten, evenals 4% splijtingsproducten, 1% plutonium en circa 0.1% andere actiniden¹ (de zogenaamde 'minor' actiniden zoals neptunium, americium en curium). Het plutonium en uranium zijn nog bruikbare componenten die kunnen worden gerecycleerd. Daartoe wordt plutoniumoxide gemengd met uraniumoxide in zogenaamde Mixed-Oxide (MOX) splijtstof en teruggevoerd in de reactor. De oudere kernreactoren kunnen voor 1/3 deel worden beladen met MOX splijtstofelementen, terwijl nieuwe reactoren meestal geheel kunnen worden beladen met MOX. In het eerste geval kan de productie van plutonium worden afgeremd, terwijl in het tweede geval de hoeveelheid plutonium in absolute zin kan worden gereduceerd. Recycling van alle actiniden inclusief de zogenaamde 'minor' actiniden kan alleen in snelle reactoren.

Brandstof voor kogelbedreactoren

Een speciaal type brandstof is die van de Hoge Temperatuur Reactor (HTR) die later zal worden besproken. De kern van deze reactor bestaat uit grafietbollen met een diameter van 6 cm die elk circa 15000 kleine uraniumoxidekorrels bevatten. Iedere korrel heeft een diameter van 0,5 mm en is omgeven door een drievoudige gasdichte omhulling. Dit type splijtstof staat bekend om zijn goede retentie-eigenschappen tot zeer hoge temperaturen van 1600 °C.

1.5 Afvalproductie

In kernreactoren, zowel LWRs als HTRs, worden twee soorten radioactief afval geproduceerd: kernsplijtingsafval en hogere actiniden zoals plutonium en americium. De eerste afvalsoort is een direct gevolg van het kernsplijtingsproces en kan niet worden vermeden. Wel zullen reactoren met een hogere efficiëntie verhoudingsgewijs minder kernsplijtingsafval produceren. De productie van plutonium kan worden gereduceerd door de brandstof beter te benutten. De huidige tendens om te streven naar hogere opbrandwaarden voor de splijtstof levert dan ook kleinere hoeveelheden plutonium. De gebruikte splijtstof van lichtwaterreactoren kan worden opgewerkt waarbij het nog bruikbare uranium en plutonium wordt gescheiden van het kernsplijtingsafval en de andere actiniden. De gebruikte splijtstof van een HTR kan met de huidige technologie niet worden opgewerkt, maar moet direct worden opgeslagen. Doordat de splijtstofkorrels van dit type reactor zit ingebed in een matrix van grafiet levert dit verhoudingsgewijs een groot volume aan afval op.

¹ De actiniden is een groep van elementen met gelijksoortige chemische eigenschappen. Hiertoe behoren uranium evenals alle elementen die door kernreacties met uranium (behalve splijting) worden gevormd, zoals neptunium, plutonium, americium en curium. Omdat neptunium, americium en curium in veel kleinere hoeveelheden worden gevormd in kernreactoren dan plutonium, worden deze de 'minor' actiniden genoemd.

1.6 Proliferatieaspecten

Zoals vermeld, kunnen uranium en plutonium via het proces van opwerking worden afgescheiden van de restmaterialen. Hoewel dit proliferatie in de hand zou kunnen werken, is het plutonium uit lichtwaterreactoren, zeker uit splijtstof van moderne centrales met een hoge opbrandwaarde, niet geschikt voor gebruik in kernwapens. Plutonium uit gebruikte splijtstof bestaat namelijk uit een mengsel van isotopen terwijl kernwapenplutonium voor meer dan 90% uit de splijtbare isotoop plutonium-239 bestaat. Voorkoming van diefstal van plutonium zal echter altijd de nodige zorg eisen.

De gebruikte splijtstofkorrels van HTRs kan vooralsnog niet worden gescheiden van het grafiet en vormt dus ook geen gevaar t.a.v. proliferatie. Wel zou een dergelijk scheidingsproces in de toekomst kunnen worden ontwikkeld.

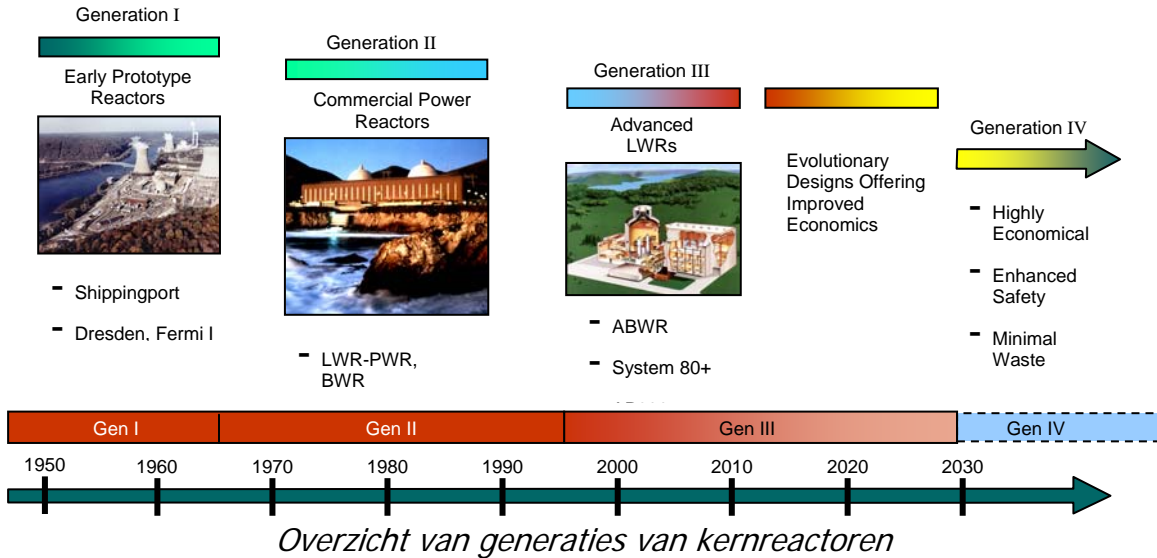
1.7 Generaties van kerncentrales

Generaties II, III, en III+

Onder de eerste generatie reactoren worden de prototypen verstaan die in de jaren '50 en '60 zijn gebouwd en die niet meer in bedrijf zijn. Vrijwel alle kerncentrales in het Westen zijn van de tweede generatie die zijn ontworpen en gebouwd in de jaren '70 en '80 van de vorige eeuw. De derde generatie kerncentrales is ontworpen in de jaren '90 als evolutionaire opvolger van de tweede generatie. Hiervan zijn er reeds enkele in bedrijf, zoals de Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) in Japan (sinds 1996), of in aanbouw, zoals de ABWR in Japan en Taiwan en de European Pressurized Water Reactor (EPR) in Finland. Momenteel wordt door diverse fabrikanten gewerkt aan het ontwerp en de certificering van generatie-III+ reactoren, die in grote mate gebruik zullen maken van passieve veiligheidssystemen.

Kogelbedreactoren

Momenteel kunnen alleen de HTRs tot de categorie 'inherent veilig' worden gerekend. Hiertoe behoort ook de kogelbedreactor die momenteel erg in de belangstelling staat. Deze zal pas rond 2015 op de markt komen. Het type HTR met extra hoge bedrijfstemperatuur, de zogenaamde Very High Temperature Reactor (VHTR), valt in de categorie van de vierde generatie reactoren (zie hierna) en zal via een geleidelijke ontwikkeling later op de markt komen.



Generatie-IV

Het doel van het generatie-IV programma is om reactoren te ontwerpen die excelleren op de gebieden van veiligheid, economie, grondstoffengebruik en non-proliferatie. Er is echter niet één reactortype dat al deze eigenschappen in zich verenigt. Integendeel, de thermische reactoren zullen waarschijnlijk nooit alle actiniden kunnen recyclen, terwijl snelle reactoren veel eerder als passief veilig dan als inherent veilig zullen worden beschouwd. Het is vooral de combinatie van reactoren die in goede samenwerking een veilige kernenergiemix vormen met een maximale benutting van de grondstoffen.

Tabel I: Schematisch overzicht van de verschillende generaties kerncentrales.

| Gen | Kenmerken | Periode | Voorbeeld |
|---------------------------------|--|---|---|
| I | Prototypen | 1945-1965 | Shippingport (VS), Magnoxreactoren (UK) |
| II | Productiereactoren vooral gebaseerd op lichtwaterreactortechnologie. | 1965-1995 | Alle LWRs in de VS en West-Europa, ook KCB. |
| III | Evolutionaire opvolger van Gen-II. Betere actieve veiligheidssystemen. Hogere efficiëntie. Groot productievermogen per eenheid ('economy by scale'). | 1995-2025 | ABWR (General-Electric, Hitachi, Toshiba), EPR (Framatome-ANP) |
| III+ LWR | Evolutionaire opvolger van Gen-III. Meer passieve vervalwarmteafvoer. Goedkoop door simpeler ontwerp en modulaire productie. | Vanaf 2010 | ESBWR (GE), AP1000 (Westinghouse), |
| III+ HTR (Pebble -bed) | Kogelbed reactoren gekoeld met helium. Relatief klein vermogen. Inherent veilige vervalwarmteafvoer. Goedkoop door simpel ontwerp en modulaire productie. | Vanaf 2010 | PBMR (ESKOM) HTR-PM (Chinergy) |
| IV | Andere koelmiddelen zoals helium, gesmolten zout en vloeibaar metaal. Hogere bedrijfstemperatuur en hoge efficiëntie. Nieuwe toepassingen zoals productie van waterstof. Reactortypen die in samenhang de splijtstofcyclus sluiten. | VHTR en SFR vanaf 2020 Andere vanaf 2030 | Very High Temperature Reactor (VHTR) Molten Salt-cooled Reactor (MSR) Super Critical Water-cooled Reactor (SCWR) Sodium-cooled Fast Reactor (SFR) Lead-cooled Fast Reactor (LFR) Gas-cooled Fast Reactor (GFR) |

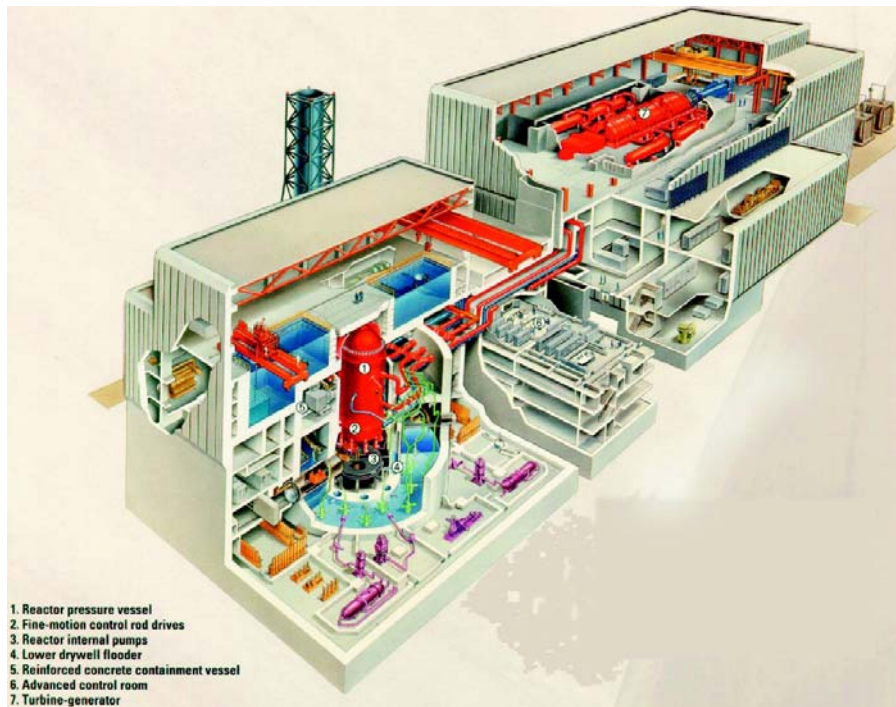
2. GENERATIE III EN III+

De gegevens in dit hoofdstuk zijn voornamelijk afkomstig uit informatiemateriaal verstrekt door de fabrikanten van de betreffende ontwerpen.

2.1 ABWR

Veiligheidsaspecten

De Advanced Boiling Water Reactor is een 1350 MWe kokendwaterreactor (BWR) van Amerikaanse herkomst (General Electric) die is ontworpen in samenwerking met het Japanse Hitachi en Toshiba. Deze derde generatie reactor is simpeler, veiliger en economischer dan zijn generatie-II voorgangers. Zo heeft de ABWR intern (in het reactorvat) geplaatste koelmiddelpompen, een sterk versimpeld primair koelmiddelcircuit, een versterkte betonnen omhulling en meerdere gescheiden noodkoelsystemen. De ontwerpers claimen een 10-100 lagere kans op kernsmeltongevallen ($2 \cdot 10^{-7}$) dan vergelijkbare generatie-II reactoren. Het containment bestaat uit een koepel van gewapend beton met stalen binnenwand en een betonnen reactorgebouw.



Opengewerkte dwarsdoorsnede van de ABWR

Economische aspecten / Marktpositionering

De ABWR is al sinds 1997 volledig door de Nuclear Regulatory Commission (NRC) gecertificeerd (zogenaamde Design Certification), wat betekent dat bij de bouw van een ABWR in de VS alleen locatie-specifieke effecten hoeven te worden beoordeeld. Een consortium geleid door Tennessee Valley Authority (TVA) heeft in

september 2005 een uitgebreide studie afgerond naar de kosten van twee nieuw te bouwen reactoren in Bellefonte (Alabama). Binnenkort wordt een beslissing verwacht over de aanvraag van een Construction en Operating License (COL) bij de NRC. In Japan zijn al vier reactoren in bedrijf (de eerste sinds 1996) en is er nog één in aanbouw, terwijl in Taiwan twee reactoren van dit type worden gebouwd.

Brandstof/afval

De ABWR gebruikt lichtverrijkt (tot 4,2%) uranium als splijtstof waarvan elke twee jaar circa 35% dient te worden gewisseld. Tevens is de ABWR geschikt voor recycling van plutonium in MOX splijtstof in de gehele reactorkern. De gebruikte splijtstof van de ABWR is in principe geschikt voor opwerking.

2.2 EPR

Veiligheidsaspecten

De European Pressurized-water Reactor (EPR) is een derde generatie reactor van Europese afkomst, gebaseerd op de N4 reactor van het Franse Framatome en de Konvoi reactor van het Duitse Siemens/KWU. Beide bedrijven fuseerden in 2001 tot Framatome-ANP en heet nu AREVA. De EPR onderscheidt zich op het gebied van veiligheid door een vergaande "defense-in-depth" strategie:

- Een dubbele betonnen omhulling om zowel grote overdruk (6,5 bar) van binnenuit als vliegtuigcrashes (type F16) van buitenaf te weerstaan.
- Vier gescheiden veiligheidsvoorzieningen die de kans op een verlies aan koelmiddel sterk reduceren.
- Grotere watervolumes in het primaire circuit om een langere respijttijd te verkrijgen tot een kernsmelt in het geval van een verlies aan koelmiddel.
- Een zogenaamde 'core catcher' om de gevolgen van een kernsmelt te beperken tot de eerste betonnen omhulling en zo verspreiding van radioactieve stoffen te voorkomen.

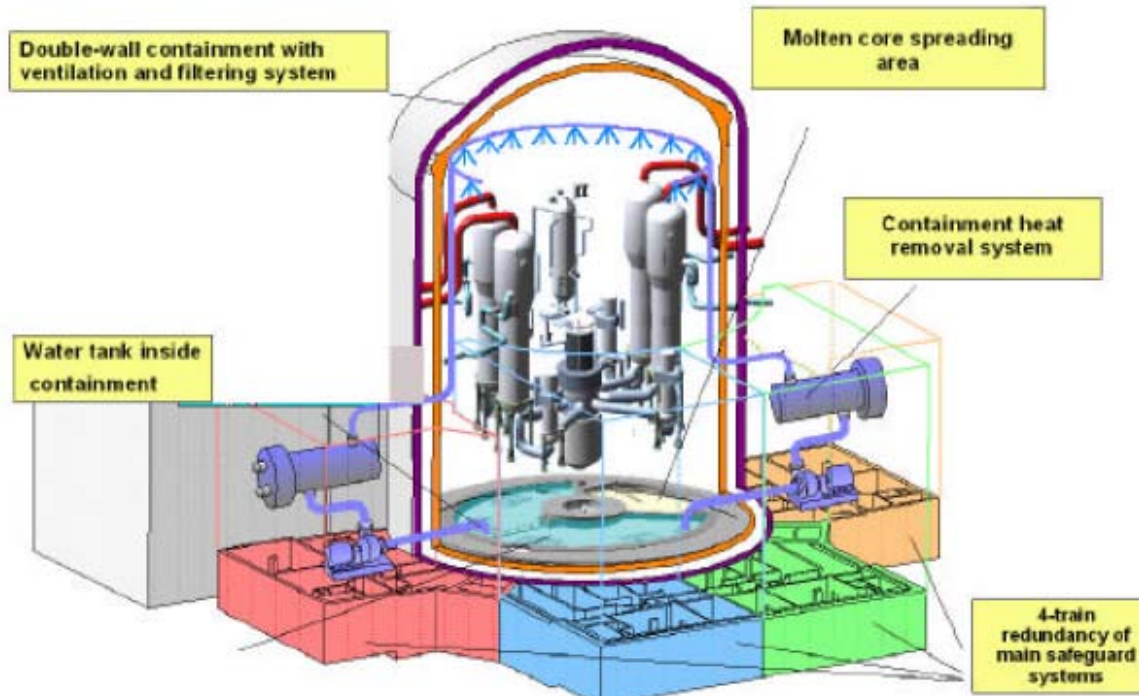
Volgens AREVA reduceren bovenstaande maatregelen de kans op een kernsmeltongeval tot een waarde van $1.3 \cdot 10^{-6}$ per jaar.

Economische aspecten / Marktpositionering

Door een bovengemiddeld rendement van 36% produceert een EPR gemiddeld 10% meer elektriciteit en 10% minder afval dan een generatie II reactor. Volgens AREVA bedragen de productiekosten circa 2,5 tot 3 eurocent/kWh. In Finland (Olkiluoto) wordt momenteel een EPR gebouwd, terwijl in Frankrijk binnen 2 jaar zal worden gestart met de bouw van een reactor in Flamanville. Bovendien heeft de fabrikant de EPR geoffreerd aan China voor de locaties Sanmen en Yangjiang (2x2 reactoren) en is zij recent gestart met het certificeringproces in de VS.

Brandstof/afval

De EPR gebruikt lichtverrijkt uranium als splijtstof die een 10-20% hogere opbrandwaarde kan bereiken dan de splijtstof in huidige reactoren. Tevens is de EPR geschikt voor recycling van plutonium in MOX splijtstof in de gehele reactorkern. De gebruikte splijtstof is in principe geschikt voor opwerking.



Opengewerkte dwarsdoorsnede van de EPR met veiligheidssystemen

2.3 AP1000

Veiligheidsaspecten

De AP1000 is een 1150 MWe drukwaterreactor (PWR) gebaseerd op het ontwerp van de kleinere AP600. Beide reactoren zijn ontworpen door het Amerikaanse Westinghouse, een dochteronderneming van het Japanse Toshiba die recent is overgenomen van BNFL. De AP1000 is een generatie-III+ reactor die zich onderscheidt van andere drukwaterreactoren door vergaande vereenvoudiging van het ontwerp, wat heeft geresulteerd in 50% minder kleppen, 80% minder buizen en 35% minder pompen. Verder wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van passieve veiligheidssystemen, waarvan de werking berust op natuurwetten zoals zwaartekracht en natuurlijke circulatie (bijvoorbeeld voor koeling van het containment), of van actieve systemen in 'fail-safe mode', bijvoorbeeld kleppen die zich openen als de netspanning wegvalt. Bovendien zijn nieuw ontworpen componenten zoveel mogelijk gebaseerd op bestaande ontwerpen die hun kwaliteiten hebben bewezen.

Economische aspecten / Marktpositionering

De productie van de AP1000 zal in vergaande mate modulair en fabrieksmatig plaatsvinden, wat de kosten reduceert en de bouwtijd verkort tot 36 maanden. Het ontwerp heeft zeer recent (Jan 2006) de laatste stap in het certificatieproces (Design Certification) van de Nuclear Regulatory Commission (NRC) doorlopen. Een consortium van negen Amerikaanse elektriciteitsbedrijven (NuStart Energy) doorloopt in samenwerking met de NRC het traject gericht op de bouw van twee kerncentrales in de VS, waaronder de AP1000 van Westinghouse (de andere is de ESBWR die hierna besproken zal worden). Bovendien heeft Westinghouse de AP1000 geoffreerd aan China voor de locaties Sanmen en Yangjiang (2x2 reactoren).

Brandstof/afval

De AP1000 gebruikt lichtverrijkt uranium als splijtstof waarvan elke twee jaar een gedeelte moet worden gewisseld. De AP1000 is ook geschikt voor recycling van plutonium in MOX splijtstof in de gehele reactorkern. De gebruikte splijtstof is in principe geschikt voor opwerking.

2.4 ESBWR

Veiligheidsaspecten

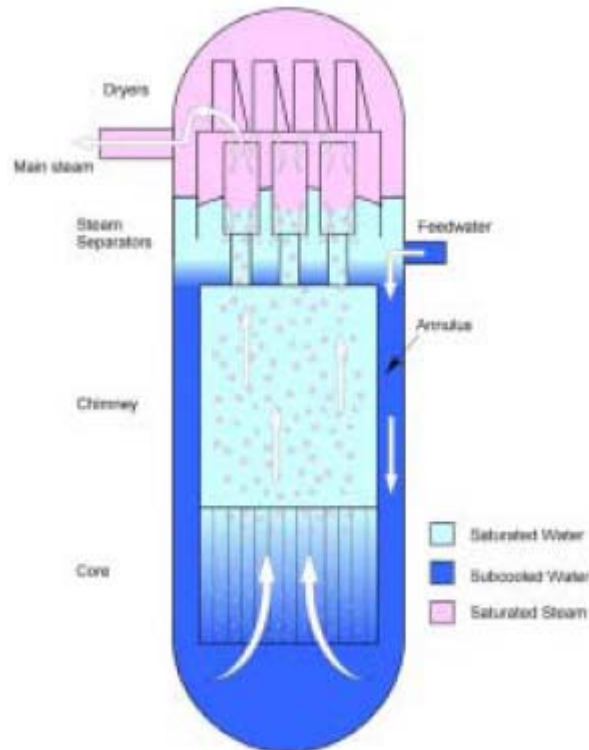
De Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR) is een grote centrale met een vermogen van 1550 MWe die is gebaseerd op een studie van General Electric uit de jaren '90. Zijn de primaire koelmiddelpompen in de ABWR in het reactorvat geplaatst, wat het reactorontwerp al sterk heeft versimpeld, in de ESBWR zijn deze pompen helemaal komen te vervallen en wordt de primaire koelmiddelcirculatie in stand gehouden door natuurlijke dichtheidsverschillen in het koelwater. De kokendwaterreactor in Dodewaard stond model voor dit werkingsprincipe. De toepassing van een 'core catcher' zorgt ervoor dat een eventueel kernsmeltongeval geen consequenties heeft voor de directe omgeving van de reactor.

Economische aspecten / Marktpositionering

Door het feit dat de primaire koelmiddelpompen en het bijbehorende circuit zijn komen te vervallen, is het aantal nucleair-gecertificeerde componenten sterk gereduceerd, wat samen met het grote eenheidsvermogen van de centrale ('economy by scale') sterk heeft bijgedragen aan de goede economie van dit reactorontwerp. Zowel het consortium NuStart Energy als Dominion overweegt de bouw van een ESBWR in de VS. Het verkrijgen van het 'Design Certificate' van de NRC wordt verwacht rond 2010, wat zou inhouden dat de eerste ESBWR in de VS vanaf 2015 in bedrijf kan komen.

Brandstof/afval

De ESBWR gebruikt lichtverrijkt (tot 4,2%) uranium als splijtstof waarvan elk jaar 20% moet worden gewisseld of elke twee jaar 42%. De ESBWR is naar verwachting geschikt voor recycling van plutonium in MOX splijtstof (fractie onbekend). De gebruikte splijtstof is in principe geschikt voor opwerking.



Schema van natuurlijke circulatie van koelwater door de ESBWR reactorkern

2.5 PBMR

Veiligheidsaspecten

De Pebble-Bed Modular Reactor is een kogelbed-HTR van Zuid-Afrikaanse herkomst gebaseerd op Duitse technologie. Door het ontwerp van de reactor zodanig te kiezen dat zelfs bij een verlies aan koelmiddel de temperatuur in de splijtstof onder het toegestane maximum van 1600 °C blijft, kan deze reactor als inherent veilig worden beschouwd. Dit betekent dat onder alle omstandigheden de splijtstof zijn integriteit behoudt en geen splijttingsproducten kunnen vrijkomen. Ook is het niet nodig noodkoelwaterreservoirs aan te leggen.

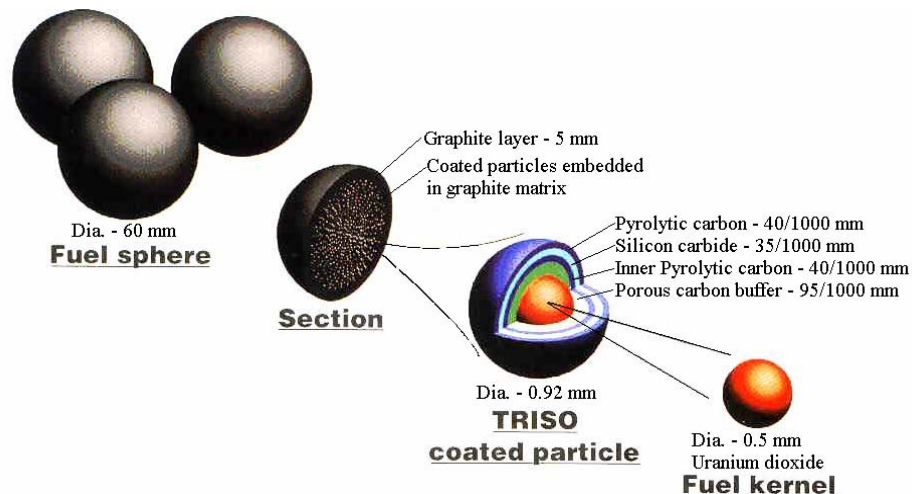
Economische aspecten / Marktpositionering

De reactorkern wordt gekoeld met helium dat direct naar een gasturbine wordt geleid die op haar beurt is gekoppeld aan een generator. Door de hoge bedrijfstemperatuur van deze reactor (circa 850°C versus 330°C voor een LWR) is de efficiëntie beduidend hoger dan voor standaard LWRs (groter dan 40%

versus 33% voor een LWR). Hoewel HTR technologie gedurende lange tijd als niet-rendabel werd beschouwd, claimen de ontwerpers dat door de hoge efficiency en modulaire productie elektriciteit kan worden geproduceerd tegen 1.5 eurocent/kWh. Dit lijkt echter een waarde specifiek voor Zuid-Afrika te zijn. In West-Europa of de VS zullen naar verwachting de kosten tweemaal zo hoog uitvallen. Om de kostprijs te drukken heeft men al meermalen het reactorvermogen moeten bijstellen tot de huidige waarde van 165 MWe per module. Grote vermogens kan men verkrijgen door meerdere modules bij elkaar te zetten, mogelijksterwijs bestuurd vanuit één regelzaal. Volgens planning zal in 2007 worden gestart met de bouw van het prototype, waarna in 2014 de eerste commerciële reactoren in bedrijf zouden kunnen komen. De bouwtijd van de commerciële reactoren bedraagt naar verwachting slechts 2 jaar. Het Zuid-Afrikaanse elektriciteitsbedrijf ESKOM heeft zich voorgenomen enkele tientallen reactoren te bouwen.

Brandstof/afval

De PBMR gebruikt lichtverrijkt (10%) uranium als splijtstof. Hoewel de HTR in principe geschikt is voor andere splijtstoffen, zoals plutonium en uranium-233 gekweekt uit thorium, wordt dit voornamelijk niet overwogen. De gebruikte splijtstof zit ingebed in grafiet en kan met de huidige technologie niet aan deze matrix worden onttrokken.



Splijtstofontwerp van de PBMR en de HTR-PM

2.6 HTR-PM

Veiligheidsaspecten

China heeft net als Zuid-Afrika grote belangstelling voor de kogelbed-HTR. Ofschoon het ontwerp van de High Temperature Reactor Pebble-bed Module (HTR-PM) later is gestart dan van de PBMR, zal de commerciële introductie van deze reactor waarschijnlijk niet ver achterblijven. Door de bouw en exploitatie van de HTR-10, een prototype, heeft China meer ervaring met HTR technologie. Door de toepassing van de stoom-watercyclus zou het veiligheidsniveau lager kunnen liggen dan bij de PBMR, doordat water uit het secundaire circuit naar de reactorkern zou kunnen lekken. Dit moet echter nog worden onderzocht. Door de inherent veilige vervalwarmteafvoer is het niet nodig noodkoelwaterreservoirs aan te leggen.

Economische aspecten / Marktpositionering

Voor het energieconversiesysteem van de HTR-PM heeft men gekozen voor de minder geavanceerde stoom-watercyclus. Ondanks het feit dat dit een lager rendement en een potentieel hoger veiligheidsrisico oplevert, is de bedrijfszekerheid van de stoom-watercyclus waarschijnlijk groter dan door toepassing van gasturbines kan worden verkregen. Recent hebben PBMR en Chinergy een overeenkomst getekend voor samenwerking bij demonstratieprojecten en commercialisering van HTR technologie daarna. Het vermogen van de HTR-PM is met 190 MWe iets hoger dan van de PBMR (165 MWe).

Brandstof/afval

De HTR-PM gebruikt lichtverrijkt (10%) uranium als splijtstof. Hoewel de HTR in principe geschikt is voor andere splijtstoffen, zoals plutonium en uranium-233 gekweekt uit thorium, wordt dit vooralsnog niet overwogen. De gebruikte splijtstof zit ingebed in grafiet en kan met de huidige technologie niet of nauwelijks aan deze matrix worden onttrokken.

Tabel II: Overzicht van Generatie-III en Generatie-III+ kerncentrales.

| | ABWR | EPR | AP1000 | ESBWR | PBMR | HTR-PM |
|-----------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------|---------------|
| Type | BWR | PWR | PWR | BWR | HTR | HTR |
| Generatie | III | III | III+ | III+ | III+ | III+ |
| Vermogen | 1350 | 1600 | 1150 | 1550 | 165 | 190 |
| VS certificatie | Ja | Nee | Ja | Nee (2010) | Nee | Nee |
| In gebruik | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| In aanbouw | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kernsmeltfrequentie (1/jaar) | $2 \cdot 10^{-7}$ | $1.3 \cdot 10^{-6}$ | $4 \cdot 10^{-7}$ | $3 \cdot 10^{-8}$ | 0 | 0 |
| 'core catcher' | Nee | Ja | Nee | Ja | Niet nodig | Niet nodig |
| Constructietijd (jr) | 4 | 4 | 3 | ? | 2 | ? |
| Technisch ontwerp levensduur (jr) | ? | 60 | ? | 60 | ? | ? |

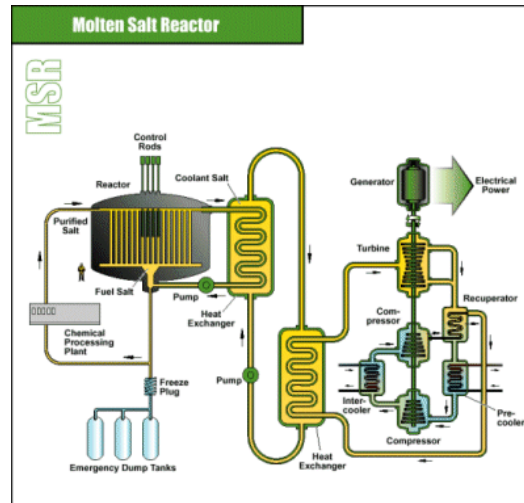
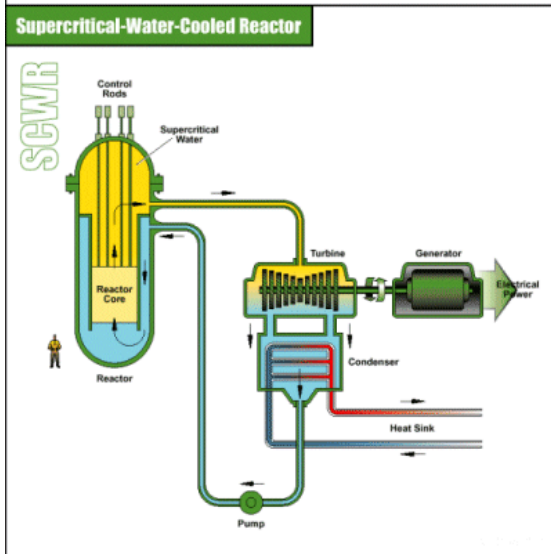
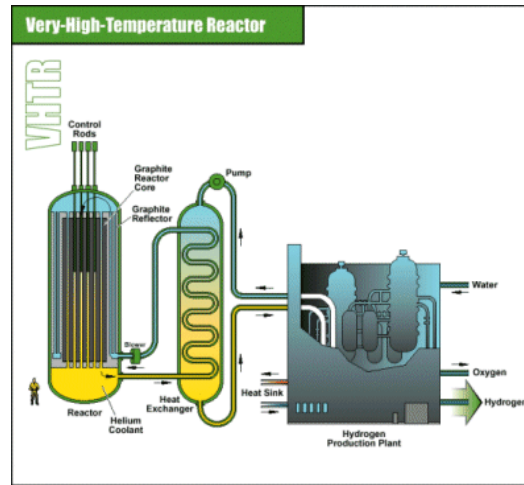
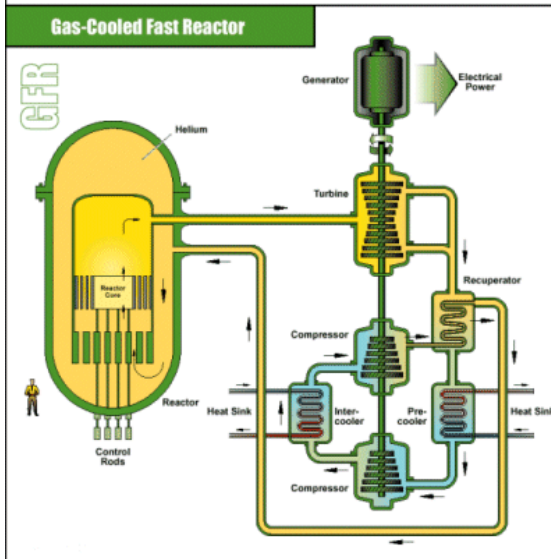
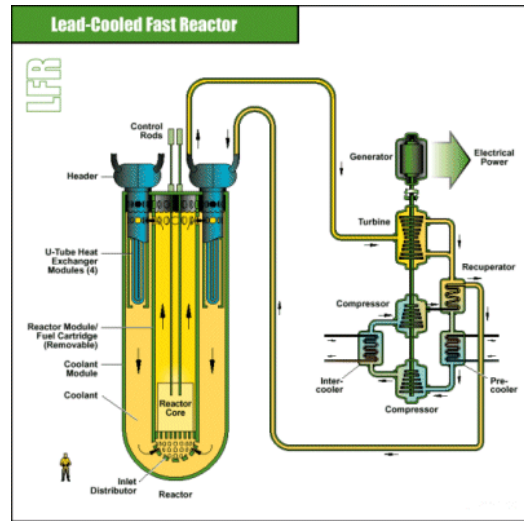
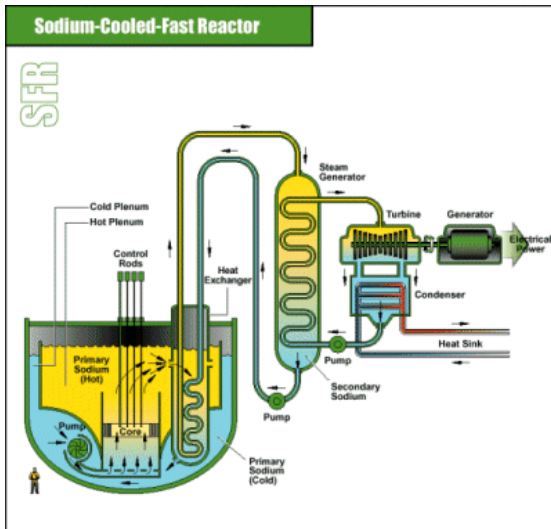
3. GENERATIE IV

3.1 Inleiding

Binnen deze generatie is een zestal reactortypen geselecteerd waarop het onderzoek zich richt: drie met een thermisch neutron spectrum en vier zogenaamde 'snelle' reactoren (één reactor, de Super Critical Water-cooled Reactor (SCWR), kan worden ontworpen met een thermisch spectrum of een snel neutronspectrum). In de eerste categorie hebben vrijwel alle neutronen in de reactorkern een lage energie, terwijl in snelle reactoren het hoge energiegebied veel sterker is vertegenwoordigd. Snelle reactoren hebben als voordeel dat ze beter dan thermische reactoren plutonium en andere actiniden kunnen recyclen en de hoeveelheid langlevend afval kunnen reduceren, maar vergen nog veel onderzoek op de gebieden van veiligheid en nieuwe materialen.

Hieronder volgen de zes reactoren die zijn geselecteerd, waarvan (naar inschatting van de auteur) de eerste twee duidelijk verder ontwikkeld zijn dan de andere vier:

| | Nederlandse benaming | Engelse benaming | Acroniem |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| 1 | Zeer-hoge temperatuur reactor | Very High Temperature Reactor | VHTR |
| 2 | Natriumgekoelde snelle reactor | Sodium-cooled Fast Reactor | SFR |
| 3 | Loodgekoelde snelle reactor | Lead-cooled Fast Reactor | LFR |
| 4 | Gesmolten-zoutgekoelde reactor | Molten Salt-cooled Reactor | MSR |
| 5 | Superkritieke watergekoelde reactor | Super Critical Water-cooled Reactor | SCWR |
| 6 | Gasgekoelde snelle reactor | Gas-cooled Fast Reactor | GFR |



De zes reactortypen geselecteerd binnen generatie-IV

3.2 Ontwikkeltraject

De Very High Temperature Reactor (VHTR) is een opvolger van de HTR zoals die momenteel wordt ontworpen in Zuid-Afrika en China. Waarschijnlijk zullen zowel een kogelbedreactor als een reactor met prismatisch kernontwerp op de markt komen. In het laatste geval bestaat de kern uit grafietblokken met daarin de TRISO splijtstofdeeltjes verdeeld. Voor de veiligheid van de reactor en het vereiste ontwikkeltraject maakt dit geen verschil. De eerste demonstratiereactor zal waarschijnlijk tussen 2015 en 2020 in bedrijf komen (wellicht in Idaho, VS).

Hetzelfde geldt voor de natriumgekoelde snelle reactor (SFR), waarvan enkele prototypes in bedrijf zijn en enkele demonstratiereactoren reeds voor korte tijd in bedrijf zijn geweest (bijv. SuperPhenix in Frankrijk en Monju in Japan). Zowel de VHTR als de SFR vergen elk nog circa 700 miljoen US dollar aan onderzoek.

Op het gebied van de gesmolten zoutgekoelde reactoren (MSR) is veel ervaring uit het verleden verloren gegaan (in de jaren '60 heeft voor korte tijd een testreactor gedraaid in Oak Ridge, VS). Hetzelfde geldt voor de gasgekoelde snelle reactor (GFR). Op het gebied van de loodgekoelde snelle reactoren (LFR) bestaat al ervaring in Rusland en de voormalige Soviet-republieken. Het onderzoek naar de superkritieke watergekoelde reactor (SCWR) wordt voornamelijk uitgevoerd in Japan. Commerciële introductie van de laatste vier reactoren (MSR, GCFR, LFR en de SCWR) wordt pas na 2030 verwacht en vergt per reactor nog circa 1 miljard US dollar aan onderzoeksinspanningen.

3.3 Veiligheid

Niet alle generatie-IV reactoren zijn inherent veilig. Sommige zullen slechts met moeite het predicaat passief veilig in ontvangst kunnen nemen. Als maat voor veiligheid wordt hier verstaan de kans op een incident waarbij schade aan de reactorkern wordt aangericht. Evacuatie van omwonenden tijdens een incident is echter voor geen van de generatie-IV reactoren nodig.

De VHTR wordt algemeen beschouwd als inherent veilig. Echter, omdat de VHTR op hogere temperatuur wordt bedreven als de vergelijkbare generatie-III+ reactoren, zullen nauwkeurige berekeningen en experimenten moeten uitwijzen of de splijtstoftemperatuur tijdens incidenten (bijvoorbeeld een verlies aan koelmiddel) onder de limiet blijft van 1600⁰C. Om deze grenswaarde te kunnen verruimen, wordt onderzoek gedaan naar materialen die hogere temperaturen kunnen weerstaan, zoals zirconiumcarbide.

Zowel de MSR, de SFR en de LFR maken gebruik van een vloeibaar koelmiddel met hoge warmtecapaciteit dat onder lage druk door de reactorkern circuleert. Om deze redenen scoren deze reactoren hoog op het gebied van veiligheid. De loodgekoelde reactor kan zelfs worden ontworpen met natuurlijke circulatie van het koelmiddel door de kern. Van zowel de gasgekoelde snelle reactor (GFR) als de SCWR moet het veiligheidsniveau nog worden aangetoond.

3.4 Economie

De economie van een reactor wordt behalve door de efficiëntie van de reactor en de bedrijfsvoering ook bepaald door de toegepaste splijtstofcyclus en de mogelijkheid om verschillende producten te kunnen leveren. Dit betekent dat een reactortype beter scoort als deze ook op efficiënte wijze waterstof kan leveren. Andere producten zijn levering van proceswarmte bij hoge temperatuur, stadsverwarming, drinkwater, etc. Bovendien zal een reactortype met een gunstig bereik van het reactorvermogen aantrekkelijker zijn, omdat daarmee het toepassingsgebied wordt verbreed.

De VHTR scoort het beste op dit onderdeel. Niet alleen is door de hoge efficiëntie het rendement van de centrale hoog (45%), ook kan deze reactor worden gebruikt voor productie van waterstof via thermo-chemische processen. Van de loodgekoelde snelle reactor (LFR) kan niet alleen een grote centrale voor de productie van elektriciteit worden ontworpen, maar ook een kleine versie met een zeer lange bedrijfstijd (een zogenaamde 'long-life battery core').

De MSR scoort slecht op dit aspect, vanwege de verwachte complexiteit van de centrale.

3.5 Grondstoffengebruik

De mate waarin een reactor voldoet aan dit aspect, wordt vooral bepaald door het rendement van de kerncentrale en de mogelijkheid tot recycling van (alle) actiniden in de gebruikte splijtstof.

Ondanks het hoge rendement, scoort de VHTR niet goed op dit aspect, omdat deze reactor voornamelijk zal worden bedreven in zogenaamde "once-through mode". Dit betekent dat het plutonium in de verbruikte splijtstof niet wordt gerecycleerd, hoewel deze optie nog wel in onderzoek is. De andere reactoren zouden in meer of mindere mate alle geproduceerde actiniden wel kunnen recyclen en zo tot een splijtstofcyclus kunnen komen waarbij veel minder langlevend afval wordt geproduceerd. De zogenaamde snelle reactoren bieden wat dit aspect betreft betere perspectieven dan de thermische. Zij zouden ook de langlevende actiniden uit andere reactoren kunnen versplijten.

3.6 Non-proliferatie en terrorisme bestendigheid

Dit onderdeel is zeer breed interpreteerbaar en daardoor moeilijker te kwantificeren. Het behelst zowel de mogelijkheid van ontvreemding van nucleaire materialen, als wel de mogelijkheid tot terroristische aanvallen.

De loodgekoelde reactor met zeer lange bedrijfstijd, de zogenaamde 'long-life battery core', scoort hier hoog omdat de splijtstof van deze reactor slechts een enkele keer hoeft te worden gewisseld. Bij de kogelbed-HTR, wordt echter continue splijtstof ontladen en toegevoerd, wat extra controlemaatregelen noodzakelijk maakt om te voorkomen dat splijtstof ongemerkt aan het proces zou kunnen worden onttrokken. Een voordeel van dit reactortype is dat de

splijstof is ingepakt in een grafietmatrix waaraan het uranium moeilijk kan worden onttrokken.

Tabel III: Overzicht van kerncentrales binnen Generatie-IV. De waardering van reactoren met 0/+/++ is uitsluitend bedoeld voor onderlinge vergelijking.

| | Thermische reactoren | | | Snelle reactoren | | |
|---|----------------------|----------------|-------------|------------------|-----------------|------------|
| | VHTR | MSR | SCWR | SFR | LFR | GFR |
| Veiligheid | ++ | + | 0 | + | + | 0 |
| Grondstoffengebruik | 0 | + | + ++ | ++ | ++ | ++ |
| Economie | ++ | 0 | + | + | ++ | + |
| Non-proliferatie | + | + | + | + | ++ | + |
| Vermogen (MWe) | 300 | 1000 | 1700 | 150-1500 | 50-1200 | 300 |
| Koelmiddel | Helium | Gesmolten zout | Water | Natrium | Lood (/Bismuth) | Helium |
| Vereist onderzoeksbudget (miljoen US\$) | 700 | 1000 | 900 | 600 | 1000 | 1000 |
| Jaartal introductie na | 2020 | 2030 | 2030 | 2020 | 2030 | 2030 |

4. GNEP

4.1 Inleiding

Het Global Nuclear Energy Partnership bouwt voort op het Generatie-IV initiatief en het "Advanced Fuel Cycle Initiative" (AFCI) van het Amerikaanse Department of Energy. Het behelst de toepassing van bestaande (generatie-III+) en nieuwe (generatie-IV) kerncentrales en de benodigde splijtstofcyclustechnologieën om te komen tot een gesloten splijtstofcyclus met volledige recycling van plutonium en minor actiniden. Bovendien zou opwerking van splijtstof en verrijking van uranium alleen plaatsvinden in een select groepje landen. (Hier worden alleen de landen beschouwd die de opwerkingstechnologie beheersen, te weten: Japan, Frankrijk, Rusland, het Verenigd Koninkrijk en de Verenigde Staten. De status van landen die alleen verrijken, zoals Nederland en Duitsland, is vooralsnog onduidelijk). Deze landen zouden verrijkt uranium moeten leveren aan alle landen die zich aan een streng inspectieregime willen onderwerpen, en bovendien de gebruikte splijtstof terugnemen voor opwerking en recycling in thermische of nieuw te ontwikkelen snelle reactoren. Deze optie wordt aangeboden onder de voorwaarde dat alle benodigde stappen in de splijtstofcyclus (opwerking, splijtstoffabricage, transmutatie) operationeel zijn. Dit vergt zeker enkele miljarden dollars en tientallen jaren voor onderzoek en ontwikkeling.

4.2 Hoofdpunten van het GNEP

Hoofdpunten van het GNEP zijn:

- Expansie van kernenergie in de VS en uiteindelijk wereldwijd.
- Ontwikkeling van proliferatiebestendige opwerkingstechnologieën, zoals het UREX+ proces en het zogenaamde pyroproces.
- Ontwikkeling van de natriumgekoelde snelle reactor t.b.v. transmutatie van plutonium en minor actiniden, te beginnen met de Advanced Burner Test Reactor (ABTR).
- Reductie van de hoeveelheid langlevend afval bestemd voor geologische berging. Het streven is om de huidige Yucca Mountain site te laten volstaan voor alle kernafval geproduceerd in deze eeuw. Dit betreft de recycling van actiniden en de afscheiding en aparte opslag van warmteproducerende splijtingsproducten zoals Cesium en Strontium.
- De vorming van een betrouwbaar internationaal consortium van "fuel supplier nations" die splijtstof zouden leveren en na gebruik weer zouden terugnemen van "user nations". De gebruikte splijtstof zou dan worden opgewerkt en hergebruikt in snelle reactoren.
- Ontwikkeling van proliferatiebestendige kernreactoren met relatief klein vermogen (50-350 MWe) t.b.v. opkomende economieën. Deze reactoren zouden een minimum aan nucleaire infrastructuur vergen.
- Ontwikkeling en integratie van geavanceerde "nuclear safeguards" t.b.v. kerncentrales en de splijtstofcyclustechnologieën.

Naar inzicht van de auteur, lijkt het plan vooral ingegeven te zijn door het feit dat bij toepassing van de "once-through" splijtstofcyclus de voorraden goedkoop uranium binnen 50-100 jaar zullen zijn uitgeput, terwijl voor de opslag van de gebruikte splijtstof in dat geval maar liefst 8 "Yucca Mountains" nodig zullen zijn (bij gelijkblijvend aandeel kernenergie in de VS van 20% tot het eind van deze eeuw). De ingebruikname van deze ondergrondse opslag voor gebruikte kernsplijtstof is echter met 15 jaar vertraagd, en de verwachting is dat pas aan het eind van het volgend decennium Yucca Mountain daadwerkelijk in gebruik genomen zal worden. Er is dan voldoende kernafval geproduceerd om Yucca Mountain met een capaciteit van 77.000 ton geheel te vullen.

4.3 Budget

Het budget voor 2006 bedroeg 80 miljoen US dollar, terwijl voor 2007 circa 250 miljoen is aangevraagd. Het Congres heeft dit verzoek niet gehonoreerd, maar gereduceerd tot 120 miljoen. Vooral op de volgende punten bestaat onvoldoende inzicht:

- Integratie van de benodigde splijtstofcyclustechnologieën (verrijken, opwerken en fabricage).
- Benodigde interim opslagcapaciteit voor gebruikte splijtstof.
- Resulterende afvalstromen, kosten, tijdplanning en risico's.

Verder wordt de introductie van GNEP gekoppeld aan de vertraging van de ingebruikname van Yucca Mountain. Dit laatste is alleen acceptabel voor het Congres als GNEP zou voorzien in voldoende interim opslagcapaciteit. Temeer daar de gewenste introductie van nieuwe reactoren (in de VS vele tientallen reactoren in de komende decennia) anders in gevaar zou kunnen komen.

Bovendien zal GNEP ten koste gaan van lopende generatie-IV projecten. Zo zal in 2007 het budget voor de ontwikkeling van de VHTR met 40% worden gereduceerd omdat in eerste instantie prioriteit gegeven zal worden aan generatie-III(+) reactoren. Ook het "Nuclear Hydrogen Initiative", dat sterk gekoppeld is aan de ontwikkeling van de VHTR, wordt gereduceerd. Daarentegen is de verwachting dat de VS meer onderzoek zullen doen naar snelle natriumgekoelde reactoren (zie volgende sectie).

Schattingen voor het totale GNEP budget lopen uiteen van 20 miljard US dollar tot 100 miljard. Het Department of Energy verwacht de komende 3 jaar in totaal 3 miljard dollar te spenderen om te komen tot een gefundeerde go/nogo beslissing in 2009. Andere bronnen spreken van 3 tot 6 miljard dollar in 5 jaar.

4.4 Splijfstofcyclustechnologieën

Uraniumverrijking

Hiervoor wordt geen nieuwe technologie ontwikkeld. De huidige ultracentrifuge technieken zoals die worden toegepast bij URENCO zullen ook worden toegepast in nieuw te bouwen installaties in Frankrijk en de VS. De status binnen GNEP van landen met alleen verrijkingsinstallaties maar geen opwerkingsfabrieken, zoals Nederland en Duitsland, is de auteur (nog) niet duidelijk.

Kernreactoren

Het GNEP voorziet in de ontwikkeling van kernreactoren met een vermogensbereik van 50-350 MWe. Alhoewel deze reactoren kunnen worden beschouwd als generatie-III+ reactoren, zouden ze een grote mate van passieve veiligheid moeten hebben en een reactorkern die langere tijd kan worden bedreven zonder splijfstofwissel. De IRIS reactor, een 335 MWe LWR, wordt hier als voorbeeld gesteld.

Splijstfopwerking

Omdat opwerking van gebruikte splijstof met het PUREX proces indruist tegen de huidige non-proliferatiepolitiek van de Amerikaanse overheid, zal binnen GNEP geen gebruik worden gemaakt van deze methode waarbij plutonium apart wordt afgescheiden, maar van het UREX+ proces waarbij plutonium samen met de minor actiniden en een kleine hoeveelheid uranium wordt afgescheiden. Dit is een proces dat alleen nog maar op laboratoriumschaal is getest. Opschaling vergt circa 2 miljard US dollar. Ook wordt gekeken naar het Co-ex proces, waarbij plutonium met een kleine hoeveelheid uranium wordt afgescheiden dat vervolgens in MOX splijstof kan worden gebruikt. Dit proces is eenvoudiger en op korte termijn te implementeren, maar biedt minder weerstand tegen proliferatie dan het UREX+ proces. Voor de opwerking van metallische splijstof die wellicht in snelle reactoren zal worden gaan gebruikt, wordt het pyro-opwerkingsproces ontwikkeld. Landen die reeds het PUREX proces gebruiken, zoals Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk, zouden onder een strikt inspectieregime hiermee door kunnen gaan en intussen, in GNEP verband, nieuwe technologieën ontwikkelen die een grotere weerstand bieden tegen proliferatie van plutonium.

Splijststoffabricage

Over de bouw en bijbehorend tijdschema van splijststoffabricage wordt nauwelijks geschreven, terwijl deze stap zeker nog niet tot bestaande technologie kan worden gerekend. Duidelijk is dat de opgewerkte splijstof zeer radioactief zal zijn en dat de splijststoffabricage volledig zal moeten worden geautomatiseerd.

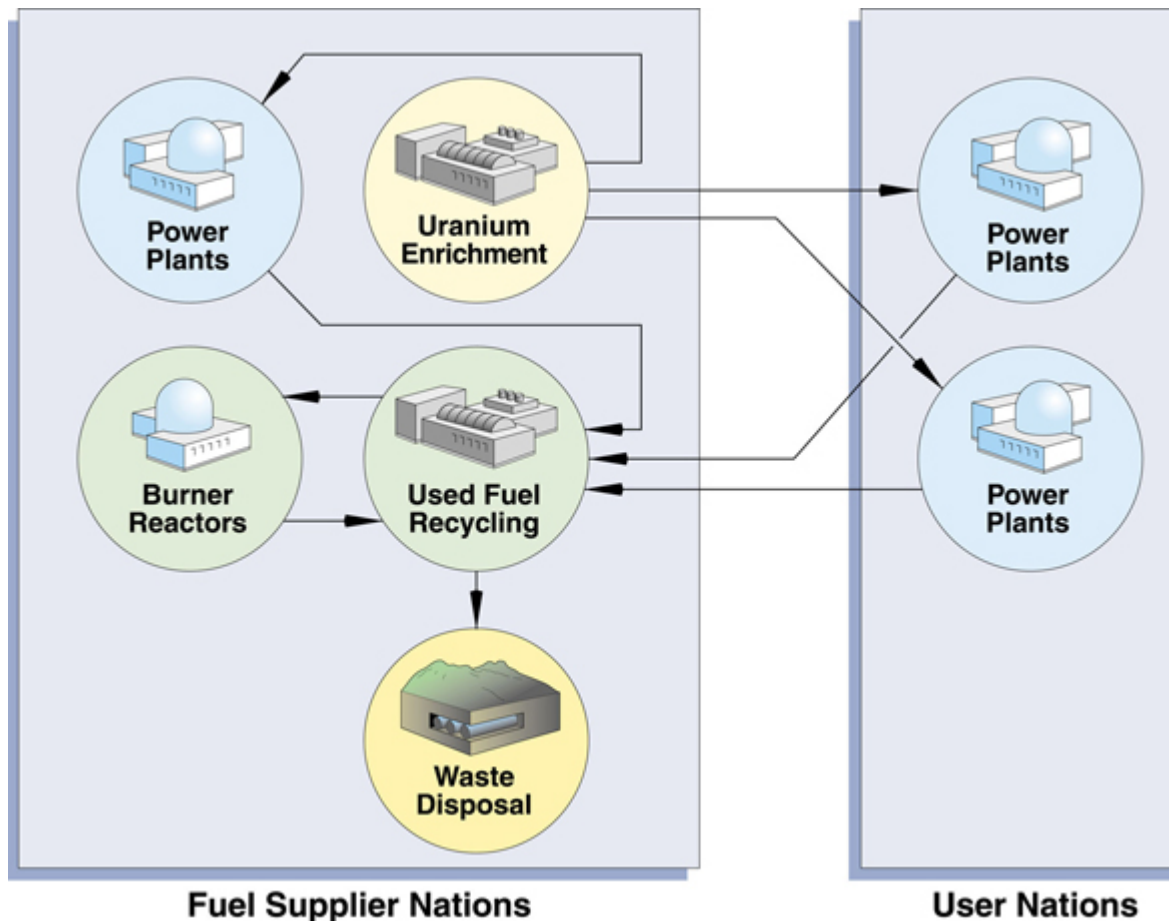
Transmutatiereactoren

Het plutonium en de minor actiniden zullen in speciale transmutatiereactoren worden ingezet. Deze reactoren zullen in eerste instantie gebaseerd zijn op

natriumgekoelde snelle reactoren. Gestart wordt met een Advanced Burner Test Reactor (ABTR) die al in 2014 operationeel zou moeten zijn. Vervolgens komen grotere versies in bedrijf. Hiervoor is echter nog geen planning gegeven.

4.5 GNI

Parallel aan GNEP heeft Rusland het Global Nuclear Initiative (GNI) gelanceerd dat in grote lijnen hetzelfde beoogt: namelijk te komen tot uitbreiding van kernenergie en volledige recycling van plutonium en minor actiniden in snelle metaalgekoelde reactoren. Ook binnen GNI zouden reactoren (Russische drukwaterreactoren) kunnen worden geëxporteerd naar andere landen die zich strikt aan het non-proliferatie verdrag houden. Rusland zou ook de splijtstof leveren en de gebruikte splijtstof terugnemen om deze vervolgens in Rusland op te werken en het plutonium en minor actiniden te recyclen in snelle reactoren. Het doel is om op commerciële basis vanaf 2030 snelle reactoren te kunnen bouwen en bedrijven.



Schematisch overzicht van het Global Nuclear Energy Partnership

5. CONCLUSIES

Vrijwel alle kerncentrales die nu operationeel zijn, stammen uit de jaren 70 en 80 van de vorige eeuw en worden gerekend tot de tweede generatie. Afhankelijk van het moderniseringstraject dat deze centrales hebben doorlopen en het onderhoudsbeheer dat wordt toegepast, kunnen deze centrales tot 60 jaar in bedrijf blijven. Een voorbeeld hiervan is de kerncentrale Borssele.

Generatie-III reactoren zijn nieuw ontworpen kerncentrales met een hoger veiligheidsniveau als oogmerk. Van deze generatie zijn er al enkele in bedrijf en/of in aanbouw. Hiertoe worden gerekend de ABWR van General Electric en de EPR van Areva (voorheen Framatome-ANP).

Voortgaand op de zelfde evolutionaire weg wordt gewerkt aan generatie-III+ reactoren die in grote mate vertrouwen op passieve veiligheidsprincipes. Voorbeelden zijn de AP1000 van Westinghouse, de ESBWR van General Electric, en de twee besproken Hoge Temperatuur Reactoren, te weten de Zuid-Afrikaanse PBMR en de Chinese HTR-PM. Deze generatie reactoren zou vanaf 2015 op de markt kunnen komen.

Generatie-IV is een verzamelnaam voor reactoren die in samenhang op veilige en economische wijze met een gesloten splijtstofcyclus de energievoorziening van de toekomst zouden kunnen verzorgen. De meest veelbelovende reactortypen, de gasgekoelde VHTR en de natriumgekoelde snelle reactor SFR zouden vanaf 2020 op de markt kunnen komen. De andere vier reactortypen vergen meer tijd.

Het Amerikaanse Global Nuclear Energy Partnership (GNEP) bouwt voort op het generatie-IV programma en het "Advanced Fuel Cycle Initiative". Het doel is om te komen tot een gesloten splijtstofcyclus waarbij snelle metaalgekoelde reactoren worden ingezet t.b.v. transmutatie van plutonium en minor actiniden. Zodra dit realiteit is, zouden landen die deze technologie beheersen (de "fuel supplier nations") splijtstof leasen aan landen die kernenergie willen toepassen onder een strikt inspectieregime. Deze landen zouden de bestaande generatie reactoren kunnen gebruiken of nieuwe reactoren met een grote mate van passieve/inherente veiligheid.

6. GERAADPLEEGDE LITERATUUR

Hieronder volgt een kleine selectie van relevante literatuur en webpagina's die zijn gebruikt voor dit rapport.

Generatie-IV

- AP1000, <http://www.ap1000.westinghousenuclear.com/>
- D. Hinds, C. Maslak, "Next-generation nuclear energy: The ESBWR, Nuclear News, Jan 2006.
- EPR, <http://www.framatome-anp.com/scripts/info/publigen/content/templates/show.asp?P=1654&L=US>
- EPR, http://www.cri.ca/nuclear_energy/datagb/actualites/epr.htm
- International Atomic Energy Agency, <http://www.iaea.org/>
- P. Lako, M.J.J. Scheepers, A.I. Van Heek, R. Jansma, F.C. Klaassen, "Factsheets ten behoeve van Kernenergiesdiscussie", ECN-CX-05-110, Dec 2005.
- Nuclear Energy Institute, <http://www.nei.org/>
- Nuclear Engineering International Magazine, <http://www.neimagazine.com/>
- Nuclear Plant Journal, <http://npj.goinfo.com/>
- Nuclear Power 2010, <http://np2010.ne.doe.gov/NP2010CurProjects.asp>
- PBMR, <http://www.pbmr.com/>
- Pebble-bed Reactors, <http://www.pebblebedreactors.com/>
- A.C. Kadak, "A Future for Nuclear Energy-Pebble-Bed Reactors", MIT, 2004, http://web.mit.edu/pebble-bed/papers1_files/PBReactors.pdf
- Physics Today, <http://www.physicstoday.org/>
- Uranium Institute, <http://www.uic.com.au/>
- World Association of Nuclear Operators, <http://www.wano.org.uk/>
- US-DOE, "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", March 2003.

GNEP

- GNEP, <http://www.gnep.energy.gov/>
- GNEP, <http://www.aip.org/fyi/2006/070.html>
- GNEP, <http://www.fas.org/main/content.jsp?formAction=297&contentId=525>
- GNEP, <http://fpc.state.gov/fpc/61808.htm>
- GNEP, <http://www.twanetwerk.nl/default.aspx?DocumentID=6009>
- GNEP, <http://www.uic.com.au/nip72.htm>
- GNEP, <http://www.irisreactor.org/>
- *Nuclear News*, American Nuclear Society, March 2006.
- *Nuclear News*, American Nuclear Society, August 2006.
- S. Kidd, *GNEP: The way forward?*, Nucl. Eng. Int., July 2006.