



VROM-Inspectie
Ministerie voor Infrastructuur en Milieu

RT10-073_547_VeM

**Beoordelingsrapport veiligheidstechnische
onderbouwing behorende bij de aanvraag
Brandstofdiversificatie KCB.**

Kernfysische Dienst

INHOUD

| | | |
|-----|--|-----------|
| | Management samenvatting | 3 |
| 1. | Inleiding en werkwijze beoordeling | 10 |
| 2. | Korte technische inhoud | 13 |
| 3. | Aanvraag | 17 |
| 4. | Belangrijkste veiligheidsissues en verschillen tussen MOX en UO2 splijtstof | 19 |
| 5. | Gebruikte rekenmethodiek | 25 |
| 6. | Onderbouwende analyses neutronenfysica en kernontwerp | 28 |
| | a. MOX | 28 |
| | b. c-ERU | 30 |
| 7. | Thermohydraulische veiligheidsanalyses | 31 |
| | a. Breuk van hoofdstoomleiding na aardbeving | 33 |
| | b. Onbedoeld openen van de turbine omloopkleppen | 36 |
| | c. Regelstaaf uitwerp ongeval | 39 |
| | d. Groot koelmiddelverlies ongeval | 44 |
| | i. de invloed van de opbrand op de integriteit van de splijtstofomhulling | 45 |
| | e. Verlies koelwaterdebiet gevolgd door falen reactorsnelafschakeling (ATWS) | 48 |
| 8. | Radiologische veiligheidsanalyses | 51 |
| 9. | Mechanisch ontwerp van de splijtstofelementen | 53 |
| 10. | Invloed van neutronenspectrum MOX op vatwand reactor | 55 |
| 11. | Vervalwarmte | 57 |
| 12. | Risico's voor de bevolking (resultaten PSA niveau-3) | 58 |
| 13. | Wijzigingen in ontwerp en procedures t.g.v. invoering van MOX | 60 |
| 14. | Ingebrachte zienswijzen | 63 |
| 15. | Afhandeling van tussentijdse vragen en commentaren | 71 |
| 16. | Conclusies | 75 |
| | a. Reactorfysische veiligheidsanalyses | 75 |
| | b. Thermohydraulische veiligheidsanalyses | 75 |
| | c. Radiologische veiligheidsanalyses | 75 |
| | d. Mechanisch ontwerp van de splijtstofelementen | 76 |
| | e. Invloed van neutronenspectrum MOX op vatwand | 76 |
| | f. Vervalwarmte | 76 |
| | g. Niveau-3 PSA uitkomsten | 76 |
| | h. Wijzigingen in ontwerp en procedures t.g.v. invoering van MOX | 77 |
| | i. Ingebrachte zienswijzen | 77 |
| | j. Afhandeling van tussentijdse vragen en commentaren | 77 |
| 17. | Aanbevolen voorschriften vergunning | 78 |
| 18. | Beoordeelde en referentie documenten behorende bij de Aanvraag | 80 |
| 19. | Verklarende woordenlijst | 83 |

Management samenvatting

Op 6 mei 2008 heeft de N.V. Elektriciteitsproduktiemaatschappij Zuid-Nederland (EPZ), de vergunninghouder van de kernenergiecentrale Borssele, een startnotitie Milieu Effect Rapportage (m.e.r.) ingediend. Het betrof het voornemen van EPZ om een vergunning aan te vragen om naast de bestaande 4,4% verrijkte uraniumoxide splijtstof en verrijkt gerecycled uraniumoxide (ERU) zowel mengoxide splijtstof (MOX) als splijtstofelementen met gecompenseerd verrijkt gerecycled uraniumoxide (c-ERU) in te kunnen zetten. Deze uitbreiding van mogelijkheden om verschillende splijtstoftypen in te zetten wordt door EPZ als splijtstofdiversificatie aangeduid. Op 7 juli 2010 heeft EPZ de vergunningsaanvraag ingediend.

In dit beoordelingsrapport wordt een oordeel gegeven over de technische inhoud van de rapporten die ter onderbouwing van de vergunningsaanvraag splijtstofdiversificatie kernenergiecentrale Borssele in het kader van het zgn. vooroverleg aan de KFD zijn overlegd. In het rapport wordt ingegaan op de veiligheidstechnische zaken die door de KFD en de ondersteunende organisatie GRS bekeken zijn. GRS staat voor "Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit" en is een gerenommeerde onderzoeksinstituut die veel de Duitse overheden ondersteunt bij allerlei veiligheidsbeoordelingen van de kerncentrales in Duitsland. Daar waar door de KFD nodig geacht, worden in dit rapport voorstellen gedaan voor aanvullende eisen in de vorm van vergunningsvoorschriften.

Toepassing van MOX is maatschappelijk nogal een beladen onderwerp, omdat de verse splijtstof naast uranium ook plutonium bevat. Om die reden is bij het schrijven van dit rapport naast de direct betrokkenen zo veel mogelijk rekening gehouden met externe belangstellenden, zoals degenen die zienswijzen naar voren hebben gebracht in de procedure rond de startnotitie m.e.r. Daarom wordt hier en daar meer uitleg gegeven dan gebruikelijk is voor een beoordelingsrapport van de KFD en wordt expliciet ingegaan op een aantal van de zienswijzen voor zover die rechtstreeks betrekking hebben op de zaken die door de KFD beoordeeld zijn. Aan het einde van deze samenvatting wordt daar eveneens kort op ingegaan.

De KFD is van oordeel dat de aanvraag technisch gezien ambitieus is. Desondanks is de KFD van mening dat de technische onderbouwingen die door de vergunninghouder zijn overlegd van voldoende kwaliteit zijn om vertrouwen in de uitkomsten daarvan te kunnen hebben. De KFD concludeert dan ook dat splijtstofdiversificatie onder voorwaarden veilig kan worden toegepast. Deze voorwaarden betreffen enerzijds een aantal gesignaleerde kwesties die een verdere onderbouwing behoeven, en anderzijds een nadere beperking van het hoge ambitieniveau voor wat betreft MOX. Hieronder wordt op deze kwesties nader ingegaan.

1. Aanvullende opbouw bedrijfservaring MOX.

De belangrijkste kwestie is het ontbreken van bedrijfservaring met de aangevraagde hoeveelheid MOX splijtstofelementen (40%) in combinatie met de hoeveelheid splijtbaar plutonium dat in deze elementen aanwezig is (5,41% uitgedrukt in gewichtsprocenten). Dat er gesproken wordt over splijtbaar plutonium komt omdat niet al het plutonium dat afkomstig is uit opwerkingsfabrieken goed splijtbaar is. Slechts 65% bestaat uit splijtbaar plutonium; ca. 55% is plutonium-239 en ca. 10% is plutonium-241.

De bedrijfservaringen met MOX die het meest in de buurt komen van het door Borssele aangevraagde, betreffen een centrale in Duitsland, een centrale in Zwitserland en een aantal Franse kerncentrales. In de Duitse kerncentrale Isar 2 is er ervaring met 40% MOX in combinatie met 4.53 gewichtsprocenten splijtbaar plutonium. In de Zwitserse kerncentrale Gösgen (Siemens reactor) is er ervaring met 36% MOX met 4.8% splijtbaar plutonium en er is in een aantal Franse centrales (Framatome reactoren) ervaring met 33% MOX met 5.36% splijtbaar plutonium. Deze ervaringen worden voor zover dat mogelijk is (afhankelijk van wie de splijtstofleverancier is), door AREVA gebruikt in het validatieproces van de computercodes. De gebruikte computercodes die het reactorfysische gedrag moeten berekenen zijn tot nu toe gevalideerd door het narekenen van

allerlei experimenten en de bedrijfservaringen met vooral de SIEMENS reactoren. Om er zeker van te zijn dat de voorspellingen die de gevalideerde codes doen ook het gebied afdekken waarvoor geen bedrijfservaring is, wordt aanvullende validatie door de inzet van zgn. voorloperelementen voorgesteld. Het inzetten van voorloperelementen houdt in dat eerst een beperkt aantal splijtstofelementen van een nieuw type wordt ingezet, waarmee zoveel mogelijk informatie over het gedrag van deze elementen in de kern verzameld wordt. Gebruikelijk is een aantal van 4 voorloperelementen (het getal 4 hangt samen met feit dat het kernontwerp in Borssele en de meeste andere lichtwater kerncentrales symmetrisch is opgebouwd over 4 kwadranten), maar door het ontwerp van de kern van kerncentrale Borssele staan dan slechts 2 elementen op een positie van het neutronenfluxmeetsysteem. Daarom is de KFD van oordeel dat 8 MOX elementen als voorloperelement bij de eerste MOX belading dienen te worden ingezet, zodat 4 daarvan op de positie van het neutronenfluxmeetsysteem staan. Dit is in een voorstel voor een vergunningsvoorschrift vastgelegd.

Naast deze beperking is ook een beperking opgelegd op het aantal verse MOX elementen dat in de 4 daaropvolgende cycli in de kern mag worden geplaatst. Dit aantal blijft beperkt tot 12 om de opbrand van de MOX elementen in de kern in lijn te houden met de opbrand (mate waarin de splijtstof verspleten is in het kernsplijttingsproces) van de uranium elementen in de kern en er dus geen al te grote afwijkingen met de zgn. evenwichtkern ontstaan die als basis heeft gediend van alle veiligheidsanalyses. Met name wordt hiermee voorkomen dat de zgn. effectieve fractie vertraagde neutronen (te) dicht in de buurt van de gestelde grenswaarden komt. Deze effectieve fractie vertraagde neutronen speelt een belangrijke rol bij het regelen van de reactor. Hoe kleiner deze fractie hoe sneller de reactor reageert. Een gevolg van deze beperking is eveneens dat bij de vierde cyclus nog niet direct 40% MOX in de kern staat, zodat ook dan eerst meer informatie verzameld kan worden. Pas vanaf de zesde cyclus mag, indien het kernontwerp het nodig maakt, maximaal 16 verse MOX elementen in de kern geplaatst worden mits:

- a. er voldoende afstand blijft bestaan tot de alle veiligheidsrelevante grenswaarden, met name die van de effectieve fractie vertraagde neutronen, en
- b. het totale aantal van 48 MOX elementen in de kern niet wordt overschreden.

Tenslotte wordt vereist dat het percentage van de posities van het neutronenflux meetsysteem dat gedurende de eerste 4 cycli door een MOX element wordt bezet, zoveel als redelijkerwijs mogelijk, evenredig is aan het percentage MOX splijtstofelementen in de kern, met een ondergrens van 4 posities. De 4 voorloper MOX elementen die gedurende de eerste cyclus op een positie van het neutronenflux meetsysteem worden geplaatst dienen eveneens in de drie daarop volgende cycli eveneens op een positie van dit systeem te worden geplaatst. Met deze maatregelen kan zonder meer worden gesteld dat, ook wanneer mocht blijken dat de codes afwijken van wat gemeten wordt, de veiligheid op geen enkele wijze in het geding is.

2. Gedrag splijtstofomhulling bij hoge opbrand en opbrandbeperking.

Voor wat betreft de splijtstofomhulling doet zich bij zeer hoge opbrand (> 60 MWd/kg splijtstof) de vraag voor of falen daarvan tijdens sommige ongevallen is uit te sluiten. Een risico van hoge opbrand is namelijk dat door opzwellen van de splijtstoftabletten de splijtstofomhulling oprekt, wat in combinatie met allerlei materiaalkundige en chemische mechanismen die bij hoge opbrand een rol spelen, tot verzwakking van het materiaal van de splijtstofomhulling kan leiden. Het materiaal van de splijtstofomhulling van MOX elementen voor Borssele, het zogenaamde M5 materiaal, wordt wereldwijd toegepast en wordt als stand der techniek beschouwd. Ook wordt het M5 materiaal nu al enige jaren in Borssele gebruikt voor de bestaande uraniumoxide splijtstofelementen. De bedrijfservaring bij hoge opbranden is echter nog beperkt, ook voor uraniumoxide elementen. Om die reden wordt voorgesteld om de bestaande staafgemiddelde opbrandbeperking tot 60 MWd/kg splijtstof van de 4.4% verrijkte uraniumoxide splijtstof te handhaven voor MOX splijtstof. Dit zal zo blijven totdat er naar het oordeel van de KFD voldoende kwalificatie in dat hoge opbrandgebied is geleverd door ervaringen elders en/of door daarop toegesneden laboratoriumexperimenten.

3. Vormvastheid splijtstofomhulling en daarop toegesneden monitoringsprogramma.

Een ander aandachtspunt is de vormvastheid van de splijtstofelementen. Door bestraling met snelle neutronen zetten metalen uit. Hoe meer snelle neutronen per seconde door het materiaal stromen, hoe groter dit effect. Als door een splijtstofelement aan de ene kant meer snelle neutronen stromen dan aan de andere kant zal dat splijtstofelement aan de ene kant dus meer uitzetten dan aan de andere kant, waardoor het kan kromtrekken. Dit kan een rol spelen als een uraniumoxide splijtstofelement pal naast een vers MOX splijtstofelement staat. Berekeningen laten zien dat het verschil in uitzetting heel gering is. Uit bedrijfservaringen met MOX in andere centrales is niets gebleken van kromtrekken van splijtstofelementen met een vergelijkbare lengte en vervaardigd met dezelfde materialen als de splijtstofelementen in Borssele. Omdat de aangevraagde hoeveelheid MOX (40%) gecombineerd met de hoeveelheid splijtbaar plutonium in de MOX splijtstofelementen als ambitieus gezien wordt, kan een eventueel kromtrekken toch niet geheel worden uitgesloten. Daarom beveelt de KFD een vergunningsvoorschrift aan voor een monitoringsprogramma met als doel eventueel kromtrekken van splijtstofelementen in een zo vroeg mogelijk stadium op te sporen.

4. Levensduur reactorvat t.g.v. inzet MOX.

Het staal van het reactorvat wordt brosser naarmate het langer bestraald wordt door snelle neutronen en het staal daardoor gevoeliger voor scheurvorming. Daarom is er in het ontwerpverslag van het reactorvat een limiet gesteld aan het totaal aantal snelle neutronen dat gedurende de hele levensduur van de centrale door een vierkante centimeter van de binnenkant van het reactorvat heen mag stromen. Omdat het neutronenspectrum van MOX relatief meer snelle neutronen bevat, zou een overschrijding van deze limiet een probleem kunnen vormen voor de nu voorziene einde levensduur van de kerncentrale Borssele (31-12-2033). Deze datum komt overeen met ongeveer 52 jaar continu bedrijf op vol vermogen. Dat wil zeggen de echte levensduur van de centrale waarbij de tijd dat de centrale door een splijtstofwisselstop, of modificaties buiten bedrijf was, is afgetrokken. De berekeningen geven aan dat enige jaren na 2033, als de centrale nog in bedrijf zou zijn, de limiet al zal zijn bereikt. Hoewel er nu nog geen probleem is, kan er rond de sluitingsdatum in 2033 wel een probleem ontstaan. In deze berekening is n.l. uitgegaan van twee belangrijke aannames die aan verandering onderhevig kunnen zijn en daardoor bronnen van onzekerheden kunnen zijn, i.e.:

- a) Aanname 1. De gemiddelde opbrand over de kern van de huidige UO_2 splijtstof is de laatste jaren 38 MWd/kg splijtstof. Echter, bij een kern met gemiddeld versere UO_2 en/of MOX splijtstof, en dus lagere opbrand, zullen meer neutronen door een vierkante centimeter van het binnenoppervlak van de reactorvatwand heen stromen dan bij een wat meer opgebrande kern het geval zal zijn.
- b) Aanname 2. Het huidige concept van een zgn. 'Low Leakage' kern (kern waarbij de verse en dus meest 'actieve' splijtstofelementen niet aan de rand staan maar meer naar binnen toe) voor de kernbelading blijft gehandhaafd.

Daarom wordt er een vergunningsvoorschrift voorgesteld waarin wordt gesteld dat wanneer deze aannames structureel wijzigen de vergunninghouder vooraf nieuwe berekeningen aan de KFD moet overleggen uitgaande van de nieuwe situatie.

5. Wat te doen bij aanzienlijke afwijkingen in de onderlinge plutonium samenstelling MOX.

Aangezien wereldwijd er een tendens bestaat om naar steeds hogere opbranden te gaan zal in de toekomst ook de onderlinge samenstelling van het plutonium dat afkomstig is van het opwerkingsproces navenant veranderen. Het feit dat er geen ervaring bestaat met de effecten van andere verhoudingen tussen splijtbaar en niet splijtbaar plutonium met daarbij een fractie splijtbaar plutonium van 5.4% of meer, is de reden dat de KFD een vergunningsvoorschrift voorstelt dat wanneer er alleen nog maar MOX geleverd kan worden met een samenstelling die 10% of meer afwijkt van de hier geanalyseerde MOX kern, de vergunninghouder nieuwe kernberekeningen moet overleggen. Met afwijking wordt bedoeld de verhouding tussen de hoeveelheid splijtbaar plutonium en niet-splijtbaar plutonium (bij een gelijkblijvend gewichtspercentage splijtbaar plutonium) en/of de verhouding tussen plutonium-239 en plutonium-241 binnen de fractie splijtbaar plutonium. De factor 10% is louter arbitrair en is in feite alleen bedoeld om ook in de toekomst een vinger aan de pols te kunnen blijven houden indien dergelijke wijzigingen optreden.

6. Noodzaak tot verhoging borium-10 gehalte in het boorzuur bij MOX inzet.

Om te zorgen dat de kritikaliteit van een kernreactor constant blijft, wordt in een reactor van het type Borssele boorzuur toegevoegd aan het koelmiddel dat door de kern heen stroomt. Het borium in dit boorzuur is borium zoals dat in de natuur voorkomt, en bestaat voor het grootste gedeelte uit het isotoop borium-11 en voor een kleine 20% uit het isotoop borium-10. Borium-10 is een zeer goede neutronenvanger, maar hoe sneller de neutronen zijn hoe slechter het neutronenabsorberend vermogen van borium-10 wordt. Daarom is bij inzet van MOX meer borium-10 nodig dan in een vergelijkbare situatie met alleen uraniumoxide splijtstof. Dat kan in het algemeen door de concentratie van het boorzuur te verhogen. Daar zitten echter grenzen aan, omdat boorzuur bij hoge concentraties onder bepaalde omstandigheden kristalliseert en neerslaat. De enige methode om dit neerslaan te voorkomen en toch de concentratie borium-10 te verhogen is om niet de totale boorzuurconcentratie te verhogen, maar alleen het aandeel borium-10 daarin. Dit kan bereikt worden door het gehalte van het neutronenabsorberend isotoop borium-10 te verhogen van 19,78% naar 32% verrijkt boor. De KFD stelt daarom een vergunningsvoorschrift voor met de eis dat de vergunninghouder tenminste 6 maanden voordat de eerste MOX elementen worden geladen de KFD een zgn. MOX implementatieplan overhandigt met daarin een plan van aanpak betreffende de invoering van boorzuur met verrijkt boor.

7. Vervalwarmte

Ten gevolge van het kernsplijtingsproces splijt een uranium-235 kern of een plutonium-239 kern in twee brokstukken. Deze twee nieuwe atoomkernen worden splijtingsproducten genoemd. De splijtingsproducten blijven in de splijtstof dan wel de splijtstofomhulling achter. Veelal zijn deze splijtingsproducten radioactief. Door het radioactieve verval ontstaat er warmte. Deze warmteontwikkeling gaat ook door nadat de reactor gestopt is. Splijtstof die al aan het kernsplijtingsproces heeft meegedaan, moet gekoeld worden. In ieder geval is de eerste 4 à 5 jaar waterkoeling onontbeerlijk. Onderdeel van de aanvraag is de onderbouwing dat de vervalwarmte te allen tijde afgevoerd kan worden. De KFD is het eens met de wijze waarop de vervalwarmte is berekend. De KFD vindt de berekende vervalwarmte als functie van de tijd na afschakeling ruimschoots voldoende om als input te dienen in veiligheidsanalyses waarbij vervalwarmte een rol speelt.

8. c-ERU

Gerecycled uranium heeft een andere samenstelling dan natuurlijk uranium. Met name bevat het een kleine fractie uranium-236. Uranium-236 heeft het nadeel dat het neutronen absorbeert en nagenoeg niet splijt. Hierdoor wordt de reactiviteit van de splijtstof ongunstig beïnvloed. Met andere woorden splijtstofelementen met verrijkt gerecycled uranium hebben een lagere effectieve verrijkingsgraad dan splijtstofelementen met verrijkt natuurlijk uranium met overeenkomstige verrijkingsgraad.

Uit analyses blijkt dat de extra hoeveelheid uranium-235 die nodig is om het verlies t.g.v. neutronenvangst door uranium-236 te compenseren ca. 1/3 is van het aantal gewichtprocenten uranium-236 in het gerecyclede uranium. De uitgevoerde analyses zijn echter afdekkend tot een maximale compensatie met 0.2 gewichtsprocenten uranium-235. De KFD stelt voor een extra voorschrift aan de vergunning toe te voegen met daarin de voorwaarde dat de hoeveelheid extra uranium-235 ter compensatie niet meer mag bedragen dan 1/3 van de hoeveelheid uranium-236 in het gerecyclede uranium met een maximum van 0.2 gewichtsprocenten uranium-235. De overige beoordeelde aspecten geven naar het oordeel van de KFD geen aanleiding tot noemenswaardige op- of aanmerkingen en hebben niet geleid tot voorstellen voor aanvullende vergunningsvoorschriften.

9. Hantering verse MOX splijtstofelementen.

Aangezien verse MOX elementen actiever zijn dan verse UO₂ splijtstof elementen dienen er hogere eisen te worden gesteld aan de stralenbescherming van het personeel betrokken bij zowel het transport van deze elementen als bij het hanteren daarvan (laden en ontladen van de

splijtstofcontainer). Daarom wordt er een apart vergunningsvoorschrift voorgesteld waarin, ruim voordat de eerste MOX-splijtstofelementen op de centrale arriveren, de vergunninghouder een implementatieplan behorende bij het hanteren van deze splijtstofelementen aan de directeur KFD dient te overleggen. Hierin moet een opleiding- en trainingsprogramma beschreven worden voor het bedrijfseigen personeel dan wel hoe zeker wordt gesteld dat personeel van derden voldoende gekwalificeerd is om deze splijtstof te hanteren.

10. Reactie van KFD op enige ingebrachte zienswijzen.

De in de zienswijzen genoemde punten dat bepaalde reactorfysische parameters, zoals de fractie vertraagde neutronen, de moderatortemperatuurcoëfficiënt, de regelstaafwerkzaamheid en de werkzaamheid van het boorzuur voor plutonium ongunstiger zijn dan voor uranium, zijn correct. De in de zienswijzen getrokken conclusies dat het daarom onveiliger wordt, worden niet door de KFD gedeeld.

In de eerste plaats zijn andere factoren die van invloed zijn om zo'n conclusie te kunnen trekken niet altijd meegenomen. Bijvoorbeeld worden in een zienswijze punten genoemd, die op zichzelf juist zijn, aangaande plutonium; maar plutonium is niet hetzelfde als MOX. In MOX zit, net als bij de nu in Borssele toegepaste uraniumoxide splijtstof, nog steeds ruim 90% uranium-238. Uranium-238 doet niet mee aan het kernsplijtingsproces maar absorbeert wel neutronen. Dit heeft een grote en zelfs dominante invloed op allerlei verstoringen waardoor deze gedempt worden.

In de tweede plaats hebben de diverse veiligheidsanalyses naar mening van de KFD overtuigend aangetoond dat alle veiligheidsrelevante grenswaarden niet worden overschreden. Ondanks conservatieve uitgangspunten in de berekeningen blijft er voldoende afstand tot de veiligheidsgrenzen bestaan. Met andere woorden, alle relevante veiligheidsparameters vallen binnen de daartoe gestelde limieten. Juist door het gebruik van die conservatieve uitgangspunten in de berekeningen kan nu met zekerheid gesteld worden dat er nog steeds een ruime marge bestaat tot desbetreffende limieten.

De naar voren gebrachte zienswijzen waarin wordt gesteld dat het risico als gevolg van ernstige ongevallen is toegenomen, wordt evenmin door de KFD gedeeld. De analyses laten zien dat ondanks de verschillen in de samenstelling van lozingen (brontermen) behorende bij ernstige ongevallen met respectievelijk MOX kernen en UO₂ kernen, er weinig verschil zit in de gevolgen daarvan. Evenmin zijn de kansen op ongevallen toegenomen door het in de zienswijzen genoemde verschil in de vervalwarmte van respectievelijk MOX en uraniumoxide splijtstof. In de zienswijze wordt vermeld dat de vervalwarmte van MOX groter is dan die van uranium. Dat is ten dele waar. Kort na afschakeling van de reactor is de vervalwarmte van MOX juist lager dan die van uraniumoxide splijtstof, en pas 46 uur na afschakeling vindt een omslag plaats waarna de vervalwarmte van MOX hoger ligt. De meeste scenario's waarbij kernschade optreedt, vinden juist in de eerste uren plaats, waardoor het smeltproces ingeval van MOX dus niet sneller zal gaan dan dat bij uraniumoxide splijtstof zou zijn. Voor ongevallen die pas na enkele dagen in een kernsmelt scenario ontaarden, is een verhoging van de vervalwarmte t.g.v. de toepassing van MOX niet echt meer van belang, aangezien de vervalwarmte dan veel lager is dan die gedurende de eerste uren na afschakeling van de reactor. De effecten van de hogere vervalwarmte van MOX die na 2 dagen optreedt, vallen dan geheel weg tegen die van de lagere vervalwarmte van MOX gedurende de eerste twee dagen.

De naar voren gebrachte zienswijze dat er een vergunning wordt aangevraagd om gerecycled uranium met een hogere verrijgingsgraad te mogen gebruiken zodat deze brandstof qua energiepotentiaal equivalent is aan verrijkt uranium en daardoor, mede door hogere opbranden, de veiligheidsmarges van de reactor kleiner worden, is onjuist. Dat komt omdat er geen daadwerkelijke verhoging van de verrijgingsgraad plaatsvindt. De verhoogde verrijgingsgraad is niets anders dan een compensatie van de reactiviteit van de splijtstof die verloren is gegaan door het neutronen absorberende U-236. Er is dus geen sprake van een daadwerkelijke verhoging van de reactiviteit, maar er is alleen sprake van een compensatie voor het verlies van reactiviteit ten

gevolge van de "vervuiling" van de splijtstof met U-236. Het verlies wordt aangevuld tot de oorspronkelijke waarde, en niets meer. Ook blijft de opbrand onderhevig aan dezelfde restricties zoals nu ook al gelden en vindt er geen verhoging van de opbrand plaats.

De naar vorengebrachte zienswijze dat door de hogere opgeslagen energie in de splijtstofstaven het risico op een kernsmelt bij gebruik van MOX hoger is niet juist. Het is wel zo dat de kans op schade aan de splijtstofomhulling tijdens koelmiddelverlies ongevallen hoger is dan dat het geval zou zijn bij UO₂ splijtstof. Tijdens een kernsmelt ongeval is er altijd sprake van een langdurige verstoring van de warmteafvoer en is de vervalwarmte de "drijvende kracht". Tijdens de hier bedoelde koelmiddelverlies ongevallen is er een korte onderbreking van de warmte afvoer tijdens de uitstroomfase van het koelmiddel voordat de noodkoelsystemen in werking treden. Door de opgeslagen warmte is er een kleine kans dat in hoog opgebrande splijtstofstaven lokale schade van de splijtstofomhulling kan plaatsvinden. Door een beperking te vereisen van de maximaal te bereiken opbrand, wordt deze kans marginaal. Overigens heeft voornoemde lokale schade van de splijtstofomhulling niets met kernsmelten van doen. Mocht om een of andere reden de noodkoeling niet in werking treden en er toch kernsmelten dreigt, dan heeft het feit dat er lokaal al wat schade aan de omhulling is toch geen invloed meer op het verdere smeltproces omdat de initiële schade zeer lokaal en beperkt is.

De naar voren gebrachte zienswijze dat door de grotere risico's ten gevolge van de inzet van MOX-splijtstof in combinatie met de dientengevolge extra beheersmaatregelen die nodig zijn om het huidige veiligheidsniveau van de centrale te kunnen handhaven, het totale bedrijfsrisico wordt verhoogd is op zichzelf juist. De getrokken conclusie dat het bijbehorende risico, mede gezien de geringe bedrijfservaring met 40% MOX, groot is en derhalve onacceptabel, is naar mening van de KFD onjuist. Alle relevante veiligheidsrelevante parameters blijven nog steeds ruimschoots binnen de daartoe gestelde grenzen. Dat er overigens beheersmaatregelen noodzakelijk zijn is op zich geen teken van onveiligheid, laat staan een introductie van extra onveiligheid. De beheersmaatregelen zijn op zich adequaat genoeg om alle ongunstiger geworden reactorfysische aspecten het hoofd te kunnen bieden. Alleen het risico op falen van deze beheersmaatregelen laat het risico op beperkte en lokale schade van de splijtstofomhulling verwaarloosbaar toenemen.

Voor wat betreft het naar voren gebrachte dat er te weinig bedrijfservaring met 40% MOX is, is de KFD van mening dat de inzet van zgn. voorloperelementen een goede manier is om op een veilige manier afdoende ervaring op te doen met MOX voordat van een inzet van 40% MOX sprake is. Op deze wijze kunnen voldoende waarborgen worden geleverd dat ook in Borssele een inzet van 40% MOX veilig kan plaatsvinden.

11. Conclusie

Uit de beoordeling blijkt dat de risico's voor zowel de bevolking door de gewijzigde samenstelling van de splijtingsproducten van MOX, als die voor de kans op splijtstofschade bij z.g.n. ontwerpbasis ongevallen, door o.a. de grotere hoeveelheid opgeslagen warmte in MOX, marginaal zijn toegenomen. De vraag: "Is een marginale toename van veiligheidsrisico's niet in strijd met het concept van continue verbetering van de veiligheid?" doet zich dan ook voor. Ten aanzien hiervan vindt de KFD dat in principe een toename van de risico's, hoe gering dan ook, niet acceptabel is, tenzij:

- de activiteit (hier brandstofdiversificatie) gerechtvaardigd is, d.w.z. de voordelen (ook bedrijfseconomische) van de verandering ruimschoots opwegen tegen de toename van het risico,
- de vergunninghouder zoveel als redelijkerwijs mogelijk is, er alles aan gedaan heeft om de toename zo klein als mogelijk te houden,
- de duur van de verhoging van het risico beperkt is,
- er voldoende afstand is en blijft tot de vigerende veiligheidsgrenzen en er een meer dan ruime afstand bestaat tot de in artikel 18 van het BKSE (kernenergiewet) genoemde risicocriteria.

Voor wat betreft de rechtvaardiging kan worden verwezen naar het MER waarin de motivatie van de aanvraag wordt beschreven. De KFD is van mening dat de marginale toename van het risico voldoende ruimte biedt voor een afweging door het bevoegd gezag of desbetreffende aanvraag voor brandstofdiversificatie gerechtvaardigd is. Voor wat betreft de drie volgende bullets is de KFD eveneens van mening dat hierop bevestigend kan worden geantwoord.

Behalve dat de toename van het risico marginaal is wordt eveneens geconcludeerd dat de van toepassing zijnde deterministische veiligheidsregels niet overschreden worden door de hier voorgestelde splijtstofdiversificatie. Eveneens blijft het gelaagde veiligheidsconcept (defence-in-depth) geheel intact.

Tot nu toe is de kerncentrale min of meer continu verbeterd op basis van eigen bedrijfservaringen, ervaringen elders, bevindingen van periodieke veiligheidsevaluaties, voortschrijdend inzicht en nieuwe technische ontwikkelingen. Er zijn geen redenen om aan te nemen dat het in de toekomst anders zal zijn. In 2011 begint EPZ met de derde 10-jaarlijkse her-evaluatie van de veiligheid. Naar verwachting zullen de veiligheidsverbeterende maatregelen het risico dermate verkleinen dat de marginale verhoging van het risico t.g.v. de invoering van de brandstofdiversificatie meer dan gecompenseerd worden.

De afstand tot de risico criteria is en blijft meer dan ruim.

Inleiding en werkwijze beoordeling

Dit rapport is primair geschreven voor twee doelgroepen, te weten:

- de vergunninghouder EPZ (de N.V. Elektriciteitsproduktie maatschappij Zuid-Nederland) zijnde de indieners van de veiligheidsanalyses, en
- de Taakgroep Straling van de directie risicobeleid van het ministerie VROM zijnde het bevoegd gezag bij de vergunningverlening.

Daarnaast kunnen o.a. de personen en groeperingen die zienswijzen naar voren hebben gebracht tegen het voornemen van EPZ voor brandstofdiversificatie gedurende de procedure Milieu Effect Rapportage (MER) mogelijk belangstelling voor het oordeel van de KFD hebben. Daarom is in dit beoordelingsrapport, meer dan gebruikelijk, rekening gehouden met een niet-specialistische maar wel geïnformeerde lezer. Zowel een management samenvatting, een verklarende woordenlijst, voetnoten en verduidelijkingen in de tekst zijn als extra toegevoegd. Het rapport blijft echter in de eerste plaats een beoordelingsrapport, maar dat wel zo goed als mogelijk is, een balans is gezocht tussen langdradigheid voor de ervaren lezer en voldoende uitleg voor de minder ervaren lezer.

Nadat op 6 mei 2008 de startnotitie was ingediend werden bij de KFD in de daarop volgende maanden vele analyses ingediend. Deze moesten dienen als onderbouwing van de officiële documenten die bij een vergunningaanvraag moeten worden ingediend, te weten: het veiligheidsrapport, het Milieu Effect Rapport (MER) en het zgn. aanvraagdocument.

Mengoxide (MOX) splijtstofelementen bevatten, ook wanneer ze nog ongebruikt zijn, naast uranium ook plutonium dat afkomstig is van de opwerking van opgebrande uranium splijtstofelementen. In splijtstofelementen met alleen uraniumoxide zit in eerste instantie geen plutonium. Omdat het gebruik van plutonium en alles wat daar betrekking op heeft een beladen onderwerp is, is voordat de KFD met het beoordelingswerk begon, gekeken naar de internationale ervaring met mengoxide splijtstof (MOX) (zie tabel 1.1).

Uit deze tabel werd zonder meer duidelijk dat het in eerste instantie beoogde percentage MOX van 53% naar het oordeel van de KFD te ambitieus was. In de startnotitie MER werd nog gesproken van ca. 50%

Omdat er bij de KFD relatief minder veiligheidstechnische kennis en ervaring aanwezig is betreffende de toepassing van MOX dan t.a.v. UO_2 splijtstof, is aan het Duitse Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gevraagd om een oordeel over de reactorfysische analyses, de thermohydraulische analyses en het mechanisch ontwerp van de splijtstofelementen. De belangrijkste reden om GRS te kiezen, was dat GRS veel ervaring heeft met beoordelingen van Duitse MOX-aanvragen in de hoedanigheid van adviseur van de Duitse overheid. De uitkomsten van deze beoordeling zijn meegenomen in deze integrale beoordeling van de veiligheidstechnische achtergrondinformatie die door EPZ is ingediend als onderbouwing van de aanvraag voor vergunningswijziging aangaande splijtstofdiversificatie.

Daarnaast heeft de KFD een bezoek gebracht aan AREVA, de ontwerper en bouwer van de kerncentrale Borssele, [44] voor een uitleg van de door hen uitgevoerde analyses. De gesprekken met AREVA zijn een belangrijke bron geweest voor de meningsvorming van de KFD en hebben als zodanig dan ook een belangrijke input geleverd voor het gegeven oordeel. Het gesprek met AREVA werd gekenmerkt door een zeer open sfeer, waarbij al gauw duidelijk werd dat AREVA een onafhankelijke houding had en niet per definitie aan de kant van de vergunninghouder stond.

Tabel 1.1 Internationale Europese ervaringen met MOX

| Duitsland | | Gererealiseerd Percentage MOX | Vergund Percentage MOX | Vergund Percentage Splijtbaar plutonium |
|--------------------|------------------|-------------------------------|------------------------|---|
| 1 | Brokdorf | 33% | 33% | 3.86% |
| 2 | Unterweser | 33% | 50% | 4.48% |
| 3 | Grohnde | 33% | 33% | 3.09% |
| 4 | Emsland | 25% | 25% | 4.63% |
| 5 | Philippsburg 2 | 37% | 37% | 4.41% |
| 6 | Neckarwestheim 1 | 9% | 9% | |
| 7 | Neckarwestheim 2 | 37% | 37% | 4.50% |
| 8 | Isar 2 | 40% | 50% | 4.53% |
| 9 | Grafenrheinfeld | 33% | 33% | 4.52% |
| Zwitserland | | | | |
| 10 | Beznau 1 | 34% | 40% | 4.3% |
| 11 | Beznau 2 | 34% | 40% | 4.3% |
| 12 | Gösgen | 36% | 37% | 4.8% |
| België | | | | |
| 13 | Doel | ± 20% | 24% | 5.0% |
| 14 | Tihange | ± 20% | 24% | 5.0% |
| Frankrijk | | | | |
| 15 t/m 36 | 900 MWe eenheden | 33% | 33% | 5.36% |

Omdat c-ERU in feite zowel reactorfysisch, thermohydraulisch en materiaalkundig gezien geen nieuwe veiligheidsissues teweeg brachten, heeft de KFD zelf de desbetreffende rapporten beoordeeld. Alleen was er een mogelijke invloed te verwachten radiologisch gebied. Binnen de KFD is daarvoor in ruimere mate expertise dan voor voornoemde aspecten. Het enige aspect met een reactorfysische invalshoek betrof het feit dat de hoeveelheid uranium-235 die nodig is om de aanwezigheid van uranium-236 te compenseren slecht 33.3 gewichtsprocenten van het aantal gewichtsprocenten uranium-236 in het opgewerkte uranium. Om niet in het gedrang met de oorspronkelijke vergunde 4.4% verrijkingsgraad voor splijtstof afkomstig van natuurlijk uranium te komen, werd een navenant vergunningsvoorschrift geadviseerd.

De beoordeling van de KFD betrof de volgende aspecten van de nucleaire veiligheid:

- de reactorfysica
- de thermohydraulische veiligheidsanalyses van daartoe geselecteerde storingen en ongevallen
- het mechanische ontwerp van de splijtstofelementen
- de radiologische analyses van daartoe geselecteerde storingen en ongevallen
- de risicoanalyse
- de invloed van de gewijzigde vervalwarmte op zowel ongevallen als opslag in het splijtstofopslag bassin
- reactie op ingebrachte zienswijzen
- voorstellen voor aanvullende vergunningsvoorschriften.

Voor wat betreft de reactorfysica is gekeken naar:

- de wezenlijke reactorfysische verschillen tussen splijtstoffen bestaande uit mengoxiden en een volledige UO₂ kern, zoals de fractie vertraagde neutronen, de invloed van de temperatuur van het koelmiddel op de reactiviteit of de werkzaamheid van de regelstaven;

- of de gekozen methodiek (computer codes) wel bruikbaar is voor het berekenen van MOX kernen zoals hier voorgesteld;
- of de voorgestelde hoeveelheid compensatie in gerecyclede UO_2 splijtstofelementen (C-ERU) zich verhoudt met de hoeveelheid neutronenabsorberende uraniumisotopen U-234 en U-236;
- de invloed van de nieuwe splijtstoffen op de zgn. sleutelparameters en of de berekende waarden van deze parameters in de haalbaarheidstudies wel binnen de daartoe gestelde grenswaarden bleven.

In de veiligheidsanalyses is gebruik gemaakt van de zgn. sleutelparameter methodiek. Deze methodiek en de numerieke grenswaarden van de sleutelparameters is destijds tijdens de invoering eind negentiger jaren uitvoerig door experts van het Duitse GRS en het Belgische AIB Vinçotte Nucleaire (AVN) beoordeeld. Met de sleutelparameters wordt een set parameters bedoeld die berekend worden op basis van een specifiek ontwerp van een kern. Te denken valt bijv. aan de opbrand per element aan het einde van de cyclus, de hoeveelheid boorzuur die gedurende de cyclus in het koelmiddel aanwezig moet zijn en de vermogensverdeling over de kern. Voor de sleutelparameters zijn grenswaarden vastgesteld waarvan is aangetoond dat daarbinnen de reactor veilig bedreven kan worden, zowel tijdens normaal bedrijf als tijdens ontwerpongevallen. Als de waarde van een sleutelparameter buiten de vastgestelde grenzen valt, zijn aanvullende veiligheidsanalyses om veilig bedrijf aan te tonen. Deze methodiek is dus onafhankelijk van het type splijtstof (UO_2 , MOX, verrijkt gerecycled uranium). In de "Machbarkeitsstudie" [4] en "Verträglichkeitsstudie" [7] zijn deze sleutelparameterwaarden voor resp. een MOX evenwichtskern en een evenwichtskern met gerecycled uranium berekend. Die beoordeling van het sleutelparameter concept is derhalve geen onderdeel van het onderhavige oordeel en wordt geacht een betrouwbare en bruikbare methodiek te zijn voor veiligheidsanalyses.

Ook de methodiek en uitkomsten van de gebruikte PSA niveau-3 (PSA = Probabilistic Safety Assessment = risicoanalyse) worden geacht stand der techniek te zijn. Niveau 3 wil zeggen het gedeelte van de risicoanalyse dat zich bezig houdt met de gevolgen voor de omgeving gegeven een radioactieve lozing. De PSA is in het verleden veelvuldig getoetst door zowel KFD als het Internationale Atoomenergie Agentschap (IAEA). Daarnaast heeft de KEMA en later NRG nog door EPZ geïnitieerde onafhankelijke toetsen uitgevoerd. Deze beoordelingen maken eveneens geen onderdeel uit van het onderhavige oordeel.

Voor wat betreft de radiologische veiligheidsanalyses is uitgebreid gekeken in hoeverre de numerieke uitgangspunten/randvoorwaarden van deze analyses voldoende conservatief zijn om te waarborgen dat voldaan is aan de dosiscriteria voor ontwerpongevallen zoals vermeld in het Besluit Kerninstallaties, Splijtstoffen en Ertsen (BKSE). Ook is door KFD gekeken naar de methodiek om de isotopensamenstelling van de splijttingsproducten in MOX-kernen te berekenen. Dit als invoer voor de PSA niveau 3 berekeningen. Door de KFD zijn via EPZ aan NRG ter verduidelijking vragen gesteld over de radiologische veiligheidsanalyses en PSA niveau 3. Deze zijn tot tevredenheid van de KFD beantwoord. Zie verder het hoofdstuk radiologische veiligheidsanalyses.

De KFD heeft ook de wijzigingen in de beveiliging (security) en safeguards t.g.v. het transporteren en opslaan van onbestraalde MOX elementen beoordeeld. Hierover kunnen geen verdere mededelingen gedaan worden. Als leidraad voor deze beoordeling geldt het IAEA document: "Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities INFCIRC/225/Rev 4".

Ten aanzien van de startnotitie Milieu Effect Rapportage "Brandstofdiversificatie Kernenergiecentrale Borssele" zijn schriftelijke zienswijzen naar voren gebracht. Op die zienswijzen die heel sterk gerelateerd zijn aan hetgeen in dit beoordelingsrapport beschreven is wordt in Hoofdstuk 13 nader ingegaan. Op de overige zienswijzen o.a. die van minder technische aard wordt, naast de hier genoemde zienswijzen expliciet in de ontwerp beschikking ingegaan.

2. Korte technische inhoud van dit beoordelingsrapport

Werkwijze beoordeling

In de eerste paar hoofdstukken wordt ingegaan op de werkwijze van deze beoordeling en de daarbij gepleegde consultaties.

Verschillen MOX en UO₂ splijtstof

Vervolgens worden de belangrijkste verschillen tussen mengoxide splijtstof (MOX) en de huidige uraniumoxide splijtstof (UO₂) uiteengezet. Met name betreft dat de geringere werkzaamheid van zowel de regelstaven als het boorzuur dat in het koelmiddel zit als neutronen absorberend middel. Een ander belangrijk verschil tussen MOX en UO₂ splijtstof is de sterkere invloed van temperatuurveranderingen van het koelmiddel op de reactiviteit bij MOX. Dat wil zeggen dat bij MOX storingen en ongevallen die gepaard gaan met een sterke temperatuursdaling van het primaire koelmiddel, zorgen voor een sterkere en soms ook langduriger stijging van de reactiviteit. Naast deze reactorfysische verschillen is er nog een ander belangrijk verschil, n.l. de vervalwarmte. Gedurende de eerste 46 uur is de hoeveelheid vervalwarmte van MOX lager, maar voor perioden daarna is de vervalwarmte groter dan bij UO₂. Dit heeft o.a. gevolgen voor zowel de opslag als het transport van opgebrande splijtstof.

Neutronenfysica

Ten aanzien van de door EPZ geleverde onderbouwing dat de door hen aangevraagde splijtstofdiversificatie een veilige toepassing van splijtstofgebruik is, wordt sterk geleund op de zgn. sleutelparameter methodiek. Sleutelparameters zijn de uitkomsten van reactorfysische berekeningen die gebruikt kunnen worden als invoerparameters in de thermohydraulische veiligheidsanalyses. Wanneer die uitkomsten binnen reeds eerder bepaalde grenswaarden blijven, weet men zeker dat de veiligheidsgrenzen niet worden overschreden en zijn in principe geen aanvullende thermohydraulische veiligheidsanalyses noodzakelijk. Door de verminderde werkzaamheid van boor kon in eerste instantie niet voldaan worden aan de eis van langdurige onderkritikaliteit ingeval van een groot koelmiddelverliesongeval of een zgn. externe begingebuurtenis. Daarom moest een aantal bestaande veiligheidsanalyses opnieuw worden uitgevoerd. Van de overige analyses kon op basis van zgn. "Plausibilitätsbetrachtungen" door middel van de sleutelparameters aannemelijk worden gemaakt dat de bestaande veiligheidsanalyses voor kernen met 4,4% verrijkte UO₂ splijtstof ook voor MOX geldig waren.

Nadat er aanvankelijk enige twijfel was of de door AREVA gebruikte computercode voor de reactorfysische berekeningen nog wel stand der techniek was (oudere versie), bleek na aanvullende documentatie aangaande de validatie van deze methodiek dat die twijfel ongegrond was. De voornoemde sleutelparameters zijn dus voldoende betrouwbaar om gebruikt te kunnen worden in de verdere onderbouwing dat splijtstofdiversificatie veilig kan worden toegepast.

Aangezien de hoeveelheid splijtbaar plutonium in de MOX splijtstofelementen groter is dan waarmee in de Siemens/KWU reactoren (ontwerptype Borssele) ervaring mee opgedaan is, wordt wel aanbevolen om eerst 8 zogenaamde voorloper MOX splijtstofelementen te laden voordat met een jaarlijkse batch van 12 MOX elementen wordt begonnen. Door 4 elementen te plaatsen op posities van het kogelmeetsysteem (fluxmetingen) kan aangetoond worden dat de berekende reactorfysische waarden overeenkomen met de gemeten uitkomsten.

c-ERU

Mengoxide (MOX) elementen bevatten, ook wanneer ze nog ongebruikt zijn, naast uranium ook plutonium dat afkomstig is van de opwerking van opgebrande uranium splijtstofelementen. In splijtstofelementen met alleen uraniumoxide zit in eerste instantie geen plutonium. Pas nadat deze elementen meedoen aan het kernsplijtingsproces ontstaat er ook plutonium. Natuurlijke uranium bevat naast de uranium isotopen uranium-235 (U-235) en uranium-238 (U-238) ook in geringe mate een ander uranium isotoop, n.l. uranium-234 (U-234). In gerecycled uranium komen de energieproductie belemmerende isotopen uranium-234 en uranium-236 (U-236) in hogere

mate voor dan in brandstof dat vervaardigd is van natuurlijk verrijkt uranium. U-236 ontstaat door neutronvangst in U-235. Gecompenseerd verrijkt gerecyclede uranium (c-ERU) compenseert dit verlies aan reactiviteit door de aanwezigheid van deze 'even' uranium isotopen U-234 en U-236, door het uranium-235 iets verder te verrijken dan oorspronkelijk zonder deze absorberende isotopen gedaan zou zijn.

Ten aanzien van het gecompenseerde verrijkte gerecyclede uranium (c-ERU = compensated enriched recycled uranium) blijkt dat de hoeveelheid extra uranium-235 (het splijtbare uranium isotoop) die nodig is om dezelfde reactiviteit te leveren als de vergunde verrijkingsgraad van niet gerecyclede uranium splijtstofelementen ca. 1/3 bedraagt van het percentage uranium -236 dat in het gerecyclede materiaal zit. Ook is in de door AREVA uitgevoerde haalbaarheidsstudie uitgegaan van maximaal 0,2% extra uranium-235 boven de nu vergunde 4,4%. De KFD stelt derhalve een extra vergunningsvoorschrift voor dat naast de aangevraagde 4,6% stelt:

“De maximale hoeveelheid gewichtsprocenten uranium-235 ter compensatie van het reactiviteitsverlies ten gevolge van neutronenabsorptie door uranium-236 mag niet meer bedragen dan 33.3% van de aantal gewichtsprocenten uranium-236 aanwezig in desbetreffende splijtstof met een maximum van 0.2 gewichtsprocenten uranium-235.”

Thermohydraulische veiligheidsanalyses

Vervolgens worden in het rapport de uitkomsten van een aantal veiligheidsanalyses in meer detail behandeld om de invloeden van de andere reactorfysische eigenschappen van MOX te illustreren. Uit de veiligheidsanalyses betreffende een aantal ontwerpbasis ongevallen die gekenschetst worden door een snelle grote temperatuurdaling van het primaire koelmiddel, blijkt dat er kortdurend re-kritikaliteit optreedt. Dit is overigens niet nieuw; dit is namelijk ook het geval in de overeenkomstige veiligheidsanalyses van de nu vergunde 4,4% verrijkte uraniumoxide kernen. Als conclusie kan gesteld worden dat aan alle veiligheidseisen voldaan blijft worden bij de voorziene en aangevraagde inzet van MOX elementen. Voor c-ERU zijn geen nieuwe veiligheidsanalyses uitgevoerd omdat de bestaande veiligheidsanalyses geheel afdekkend zijn en er reactorfysisch gezien geen wezenlijk verschil is tussen gerecyclede en niet-gerecyclede uranium splijtstof.

Radiologische veiligheidsanalyses

In een volgend hoofdstuk wordt ingegaan op de uitkomsten van de radiologische veiligheidsanalyses. In deze veiligheidsanalyses wordt aangenomen dat er op beperkte schaal splijtstofschaadte optreedt, ondanks dat de overeenkomstige thermohydraulische analyses laten zien dat dit **niet** gebeurt. Vervolgens worden op basis van allerlei verspreidingspaden vanuit de kernenergiecentrale naar buiten lozingen ten gevolge van die ongevallen berekend. Voor wat betreft die verspreidingspaden moet gedacht worden aan lozingen via het ventilatiesysteem of via een klein gepostuleerd lek in de veiligheidsomhulling. Hierbij zijn op conservatieve wijze de vangstrendementen van de filters (filterefficiënties) in het ventilatiesysteem aangenomen om de lozingen te maximaliseren. Zelfs met deze conservatismen blijkt dat de ongevallozingen ver onder alle limieten te blijven zoals die gesteld zijn in artikel 18 van het Bestuut kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen.

Mechanisch ontwerp splijtstofelementen

In de beschouwingen over het mechanisch ontwerp van de splijtstofelementen is gekeken naar een tweetal aspecten die ook al door GRS waren aangekaart. Het eerste aspect betrof het feit dat metalen uitzetten door neutronenstraling. Als gevolg van het hardere neutronenspectrum (meer energie; hogere snelheid) van MOX in vergelijking met UO₂ splijtstof kan er een verschil ontstaan in uitzetting tussen de regelstaaf geleidingsbuizen aan de kant waar zich MOX bevindt en de regelstaaf geleidingsbuizen aan de kant waar de UO₂ splijtstofelementen zich bevinden. Hierdoor zou kromtrekken kunnen optreden. Hoewel de berekeningen laten zien dat de uitzetting zeer gering is, is kromtrekken na langdurige bestraling niet uit te sluiten. Daarom wordt aanbevolen om een daarop toegesneden monitoringsprogramma op te zetten. Het andere aspect betrof het feit dat splijtstoftabletten als gevolg van het kernsplijtingsproces uitzetten; MOX wat meer dan UO₂ splijtstof. Ten gevolge van dat uitzetten zullen bij toenemende opbrand de splijtstoftabletten

de binnenwand van de splijststofomhulling raken, waardoor deze gaat oprekken. Als de daardoor ontstane omtreksspanning te groot wordt kan er een heroriëntatie gaan plaatsvinden van de textuur van zirconiumhydriden (zirconium-waterstofverbindingen) aan de buitenzijde van de splijststofomhulling die daar ontstaan zijn door corrosieverschijnselen. Door deze heroriëntatie van de omtreksrichting naar de radiale richting loodrecht daarop, neemt de sterkte van de splijststofomhulling relatief sterk af. Het blijkt dat de spanning waarbij heroriëntatie plaatsvindt pas optreedt bij zeer hoge opbrand (meer dan 70 MWd/kg splijststof). (Opm: kg splijststof is kg U of kg MOX). Dit is echter boven de beperking die aan de opbrand in de vigerende vergunning is opgelegd en daarom vooralsnog geen issue. Wil EPZ dat de huidige beperking aan de opbrand wordt opgeheven dan dient EPZ de bestaande kwalificatie-eis uit te breiden met het aantonen dat het desbetreffende spanningsniveau niet wordt overschreden.

Invloed 'hardere' neutronenspectrum MOX op vatwand reactor

In een volgend hoofdstuk is ook de invloed van de hardere neutronenstraling van MOX op de verbrossing van het staal van de reactorvatwand bekeken. Het blijkt dat, uitgaande van een MOX evenwichtskern met een gemiddelde opbrand van 38 MWd/kg splijststof, na 55 jaar vol vermogen (reactorjaar) de neutronenfluentie dicht in de buurt komt van de ontwerpwaarde. Aangezien de voorziene levensduur van Borssele ca. 52 reactorjaar zal zijn is er vooralsnog geen probleem mits de gemiddelde opbrand en de huidige configuratie van een "Low Leakage" kern niet verandert.

Vervalwarmte

Ruwweg de eerste twee dagen na reactorafschakeling is de vervalwarmte van MOX splijststofelementen iets lager dan die van UO₂ splijststofelementen. Daarna is het omgekeerde het geval. Hierdoor is de minimum tijd na afschakeling waarbij het reactorvat geopend mag worden om splijststofelementen te verwisselen met een kleine twee dagen toegenomen. Deze beperking komt doordat de capaciteit van het zgn. bassinkoelsysteem dan nog onvoldoende is om de kern te koelen. Deze functie wordt dan door het reactor nakoelsysteem verricht. Na ca. 150 uur kan het vat geopend worden; de vervalwarmte is dan zover gedaald dat koeling van het splijststofopslagbassin toereikend is. In de praktijk blijkt dit echter geen knelpunt te zijn. Een bijkomend issue is dat de MOX splijststofelementen minimaal een jaar langer in het splijststofopslagbassin moeten blijven alvorens deze kunnen worden afgevoerd.

Risico's voor omwonenden

Omdat de inventaris aan splijtingsproducten van MOX splijststof, UO₂ splijststof en c-ERU splijststof (maximaal 0.2% meer uranium-235 dan in de bestaande 4.4% verrijkte UO₂ splijststof) iets van elkaar verschillen zijn, zijn ingeval van zeer ernstige ongevallen met kernschade de brontermen eveneens iets verschillend. De kans op ongevallen neemt echter niet toe, omdat o.a.

- de veiligheidsmarges (de afstand tot de gestelde veiligheidsgrenzen) door introductie van MOX of c-ERU niet meetbaar veranderen,
- de kans op systeem- en componentfalen niet wijzigt,
- de vervalwarmte voor MOX, c-ERU en de huidige UO₂ splijststof weinig van elkaar verschilt en daarmee dus ook directe oorzaak van kernsmelten niet onderscheidbaar is voor de drie typen splijststof, en
- daar waar nodig tegenmaatregelen worden getroffen, zoals toepassing van verrijkt boor.

Door de iets qua samenstelling gewijzigde brontermen, maar geen gewijzigde kansen op die brontermen verandert ook het individuele- en groepsrisico maar heel weinig.

Wijzigingen ontwerp en procedures (noodzaak verrijkt boor)

Om langdurige sub-kritikaliteit te waarborgen dient een wijziging te worden doorgevoerd in de boreersystemen van de kernenergiecentrale door gebruik te maken van zgn. verrijkt boor. Dat betekent dat de in natuurlijk boor aanwezige 19.78% B-10 door verrijking moet worden verhoogd

naar 32%. De reden daarvoor is dat door de geringere werkzaamheid van zowel het oorspronkelijke boorzuur zelf als van de regelstaven, alsmede de sterkere negatieve koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt er bij bepaalde ongevallen, wanneer die plaatsvinden direct aan het begin van de cyclus, te weinig negatieve reactiviteit in de kern zit. Dat komt omdat tijdens de opstart boorzuur aan het primaire systeem wordt onttrokken. Dat boor zuur wordt dan via verdampers tot de oorspronkelijke concentratie teruggebracht waarin het in de boorzuuropslag tanks kan worden opgeslagen. Voor dat verdampingsproces is tijd nodig. Direct aan het begin van de cyclus is nog niet al het boorzuur beschikbaar. Voor sommige ongevallen is echter veel boorzuur nodig, zoals ongevallen waarbij het reactor snelafschakelsysteem wordt verondersteld te falen. Om de hoeveelheid boorzuur dat wel beschikbaar effectiever te laten zijn is verrijking met boor-10 de oplossing.

Ingebrachte zienswijzen

Vervolgens is in dit rapport ingegaan op een select aantal ingebrachte zienswijzen t.a.v. zowel de startnotitie MER als het MER zelf. Het betreft die zienswijzen die rechtstreeks de fysische verschillen tussen MOX- en UO₂-splijtstof raken, met name zienswijzen die de kleinere fractie vertraagde neutronen, de geringere werkzaamheid van zowel het boorzuur als de regelstaven en de sterkere koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt van MOX t.o.v. die van UO₂ splijtstof betreffen. Hoewel de uitgangspunten juist zijn, wordt de conclusie dat het door die uitgangspunten onveilig zou zijn niet door de KFD gedeeld. In het betreffende hoofdstuk wordt uitgelegd waarom de KFD tot deze conclusie komt.

Afwikkeling tussentijdse vragen en opmerkingen GRS

In het daaropvolgende hoofdstuk wordt ingegaan op de tussentijdse vragen en opmerkingen van GRS naar aanleiding van de op dat ogenblik aan KFD en GRS overhandigde analyses. Een aantal vragen en opmerkingen was al beantwoord door EPZ m.b.v. AREVA voordat het eindrapport van GRS (d.d. 31 maart 2010) gereed was. In het eindrapport is maar ten dele met deze antwoorden rekening gehouden. Naderhand heeft KFD alle dan nog openstaande vragen, opmerkingen en issues waar nog discussie over was opnieuw per brief aan EPZ voorgelegd. Deze zijn per brief van 2 juni 2010 beantwoord. De KFD is van mening dat:

- alle gestelde vragen afdoende en adequaat zijn beantwoord,
- alle opmerkingen afdoende zijn opgevolgd dan wel weerlegd, en
- alle openstaande issues inmiddels uit de wereld zijn, dan wel dat verdere bewijsvoering daarvan middels een monitoring- of kwalificatieprogramma op een later tijdstip dient te worden gegeven.

Voorgestelde vergunningsvoorschriften

Als laatste is een twaalftal vergunningsvoorschriften voorgesteld ter verdere regulering van dit splijtstofdiversificatie project.

Overall conclusie

Als conclusie stelt de KFD dat, mits aan de voorgestelde vergunningsvoorschriften wordt voldaan, de toepassing van de splijtstofdiversificatie veilig kan geschieden zonder dat er sprake is van een toenemend gevaar, schade of hinder. De KFD vindt wel dat het personeel extra getraind moeten worden in het hanteren van onbestraalde c-ERU en MOX splijtstofelementen bij de ontlading en belading van de splijtstofcontainers om de stralingsbelasting minimaal te laten zijn. Dit is dan ook opgenomen in de vergunningsvoorwaarden.

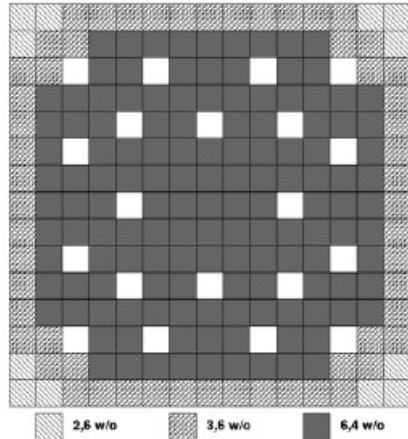
3. Aanvraag

Aanvankelijk had EPZ het voornemen om een vergunning voor 53% MOX aan te vragen dat wil zeggen, dat er op een totaal van 121 splijtstofelementen maximaal 64 MOX (4 cycli met 16 verse MOX elementen) konden worden ingezet. De KFD heeft, toen EPZ zijn ideeën bekend maakte, aan EPZ de nodige twijfels uitgesproken omtrent de haalbaarheid daarvan, aangezien er wereldwijd geen enkele ervaring was met een MOX inzet van meer dan 40%. Zowel tijdens de voorbereidingen van als tijdens het werkbezoek dat de KFD aan AREVA in november 2009 [44] bracht, werd duidelijk dat er voor een 53% MOX kern geen onderbouwende analyses waren opgesteld. De zgn. "Machbarkeitsstudie" ging uit van een 40% MOX kern (dwz. 48 MOX elementen in de kern; 4 cycli met 12 verse MOX elementen). EPZ heeft deze bezwaren ter harte genomen en is op het aanvankelijke voornemen van 53% MOX teruggekomen. EPZ heeft de aanvraag aangepast naar een 40% kern (maximaal 48 MOX splijtstofelementen in de kern).

Ten gevolge van het kernsplijtingsproces kan één neutron door het U-238 worden ingevangen waardoor U-239 ontstaat. Door middel van een dubbel bètaverval vervalt dit isotoop via Np-239 binnen enkele dagen tot Pu-239; d.w.z. een neutron vervalt in een proton plus een elektron (bèta deeltje) plus een anti-neutrino. De laatste twee deeltjes worden uitgezonden, terwijl het proton in de kern achterblijft. Met dit activeringsproces ontstaan op gelijksoortige wijze ook Pu-240, Pu-241, Pu-242 en Pu-244 en andere actiniden. Met toenemende opbrand neemt aldus het plutonium gehalte in UO₂-splijtstof onvermijdelijk toe. Pu-239 en Pu-241 (samen Pu_{fiss}) nemen net als U-235 deel aan het versplijtingsproces zodat er ook weer een gedeelte verdwijnt. Bij hoger opgebrande UO₂ splijtstofelementen is het aandeel van plutonium in de energieproductie groter dan dat van U-235. Met het idee om het aldus ontstane plutonium in nieuwe splijtstof te hergebruiken wordt geen nieuw fysisch proces geïntroduceerd.

Voor wat betreft de hoeveelheid splijtbaar plutonium¹ in de splijtstof wordt uitgegaan van gemiddeld 5,41% per MOX-element (12 staven met 2,6% Pu_{fiss} op de 4 hoeken, 56 staven met 3,6% Pu_{fiss} aan de buitenste rand en 137 staven met 6,4% Pu_{fiss} in het midden. Gemiddeld levert dit 5,41 % splijtbaar plutonium. Voor het overige bestaat de MOX splijtstof uit verarmd uranium met 0,25% U-235. Zie figuur hieronder. In de analyses is uitgegaan van een zgn. plutonium vector bestaande uit: 2,74% Pu-238, 54,82% Pu-239, 25,28% Pu-240, 9,54% Pu-241 en 7,62% Pu-242, wat een totale fractie van 64,36% splijtbaar plutonium oplevert.

¹ Splijtbaar plutonium wil zeggen de totale hoeveelheid van alle splijtbare plutonium isotopen in het plutonium dat via opwerking uit opgebrande UO₂ splijtstof is verkregen. In feite zijn alle oneven plutonium isotopen splijtbaar; dus Pu-239 en Pu-241. De even plutonium isotopen zijn niet splijtbaar.



Schema van de positie van verschillende MOX splijfstoffstaven in een MOX element. De blanco vakken betreffen regelstaafposities.

Naast MOX wil EPZ ingeval van verrijkt gerecycled uranium splijstof een vergunning aanvragen voor een verrijktingsgraad van 4,6% U-235 i.p.v. de huidige 4,4%, d.w.z. een toename met 0,2 gewichts %. Dit om de negatieve effecten t.g.v. neutronenabsorptie van U-234 en U-236 in gerecycled uranium te compenseren. Dit gecompenseerde ERU wordt c-ERU genoemd. De isotopensamenstelling (in gewichtsprocenten) van de ERU (Enriched Recycled Uranium) voor KCB bevatte in het verleden 0,1% U-234, 4% U-235, 0,42% U-236 en 95,48% U-238 [7]. Om de reactiviteitsverminderende invloed van U-236 in de ERU-elementen te compenseren, is een verhoging van het U-235 gehalte met ongeveer 1/3 van de U-236 concentratie noodzakelijk. Dit zou neerkomen op zo'n 0,14%. Rekening houdend met een trend van toenemende opbrand en verrijktingsgraad bij splijstoffen zal de U-236 fractie in ERU alleen maar toenemen. Indien ERU afkomstig zou zijn van EPZ splijstof met een opbrand van 50 MWd/kgU en een oorspronkelijke verrijktingsgraad van 4,4%, dan bedraagt de hoeveelheid U-236 zelfs ca. 0,7% [7]. In dat laatste geval zou een compensatie van 0,23% noodzakelijk zijn om het verlies aan reactiviteit goed te maken. Dit is hoger dan de door EPZ aangevraagde compensatie.

4. Belangrijkste veiligheidsissues en verschillen tussen MOX en UO₂ splijtstof.

De werkzame doorsneden voor neutronenabsorptie van zowel de regelstaven als het boorzuur zijn relatief verminderd t.g.v. een grotere absorptie werkzame doorsnede van plutonium vergeleken met die van uranium en een harder neutronenspectrum, d.w.z. de effectiviteit van de regelstaven is kleiner. Ook komen bij de splijting van Pu-239 en Pu-241 kernen, in vergelijking met de splijting van U-235 kernen, relatief hoog energetische neutronen vrij. In figuur 4.4 wordt het splijtingspectrum van resp. U-235 en Pu-239 gegeven bij splijting door thermische neutronen. Uit deze figuur is af te lezen dat de gemiddelde energie van de neutronen afkomstig van Pu-239 versplijting hoger ligt dan die behorende bij U-235. Daarbij absorberen Pu-239 en Pu-241 kernen sterker thermische neutronen dan het geval is bij U-235. Door deze twee effecten is het neutronenspectrum van MOX harder dan van UO₂ splijtstof. Dit hardere spectrum zorgt er mede voor dat de effectiviteit van de regelstaven en het boorzuur afneemt. Zo is bijvoorbeeld de boorzuur effectiviteit voor MOX aan het begin van de cyclus (BOC) direct na de opstart -5.3 pcm/ppm terwijl die voor een 4.4% verrijkte UO₂ kern -7.5 pcm/ppm is. Voor het einde van de cyclus (EOC) is dat resp. -7.5 pcm/ppm voor MOX en -8.8 pcm/ppm voor UO₂. Het B-10 dat van nature voor zo'n 20% aanwezig is in het boorzuur absorbeert beter thermische neutronen dan hoger energetische neutronen. Door de verminderde effectiviteit van zowel het niet-verrijkte boorzuur als de regelstaven is de afschakel marge kleiner. Om die vermindering tegen te gaan is verrijking van B-10 in boorzuur noodzakelijk.

Opm.: *De werkzame doorsnede van regelstaven en boor is niet verminderd maar het relatieve aandeel in neutronenvangst is kleiner waardoor het sturend effect lager is.*

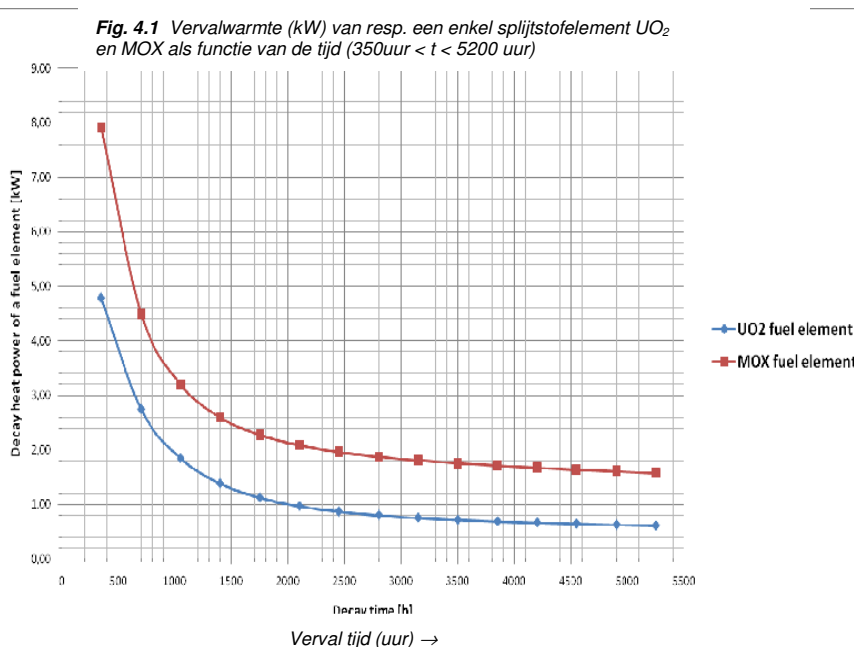
Uit fig. 4.2 is af te lezen dat de reactiviteit van een vers MOX-splijstofelement lager is dan de reactiviteit van een vers UO₂ splijstofelement voor de verrijkingsgraden zoals die voorzien zijn om in de kerncentrale Borssele te worden ingezet. De reden hiervoor is het hardere neutronenspectrum van MOX. Naarmate de splijstofelementen worden 'opgebrand' wordt dit verschil kleiner. Bij een opbrand van ca. 35 MWd/kg splijtstof is de reactiviteit even groot. Bij nog grotere opbranden is de situatie andersom en wordt MOX reactiever. Als gevolg daarvan is de hoeveelheid energie die uit een MOX splijstofelement gehaald kan worden, indien desbetreffend element maximaal wordt opgebrand tot ca. 60 MWd/kg splijtstof, nog maar marginaal minder of zelf gelijk aan die van een UO₂ splijstofelement.

De koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt en dampbelcoëfficiënt zijn voor MOX sterker negatief dan die voor uranium. Hierdoor wordt gedurende die fasen van een storing of ongeval die gekenmerkt worden door een sterke temperatuursdaling, er meer reactiviteit toegevoegd. Dat gekoppeld aan een verminderde werkzaamheid van zowel de regelstaven als het boorzuur geeft aanleiding tot een kortdurende re-kritikaliteit bij die ontwerpongevallen die gekenmerkt worden door een sterke afkoeling. Deze re-kritikaliteit treedt overigens ook op bij UO₂ kernen; alleen iets minder sterk. Deze re-kritikaliteit is zoals gezegd kortdurend en de extra toegevoegde warmte door het kernsplijtingsproces is beperkt, zodat de veiligheidsgrenzen behorende bij de integriteit van de splijstofstaven/-elementen niet worden overschreden.

De fractie vertraagde neutronen (β) is voor Pu-239 kleiner (0.22%) dan die voor U-235 (0.67%) waardoor de marge van Pu-239 tot prompt kritisch kleiner is. Echter omdat de fractie vertraagde neutronen voor Pu-241 bijna gelijk is aan die van U-235 wordt het overall effect in een MOX kern toch enigszins afgezwakt. Bij toenemende oprand is in een UO₂ kern steeds meer plutonium aanwezig. Door deze twee effecten zal de fractie vertraagde neutronen van een MOX kern die van een uranium kern steeds meer benaderen bij toenemende opbrand.

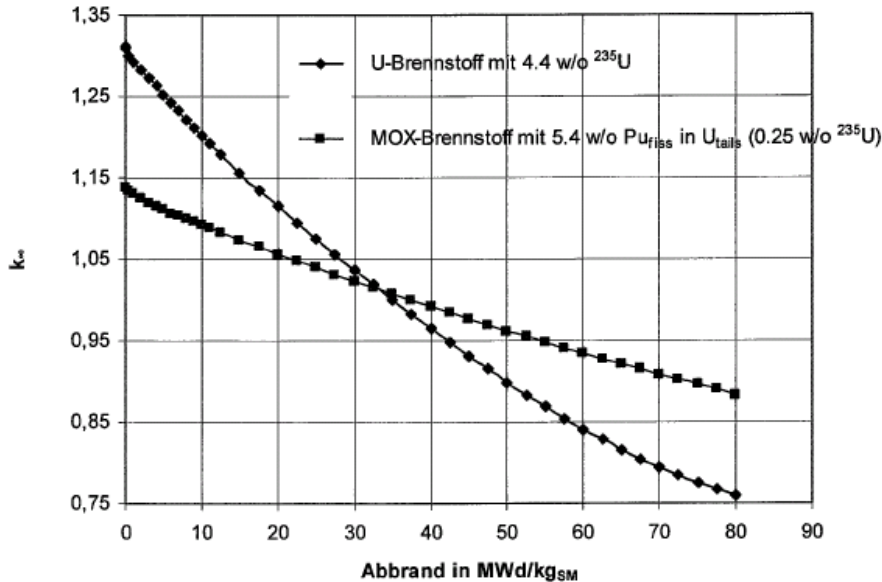
De promptneutronenlevensduur² is voor MOX kleiner door de toegenomen werkzame doorsnede voor plutonium voor neutronenabsorptie. De promptneutronenlevensduur is van invloed op de responsietijd van een reactor op veranderingen van de reactiviteit. Hoe korter de promptneutronenlevensduur, hoe sneller een reactor reageert op een verstoring van de reactiviteit. Dit effect wordt echter sterk gedempt door zowel de fractie vertraagde neutronen als door de min of meer instantane terugkoppeling t.g.v. de splijtstoftemperatuurcoëfficiënt en de iets minder instantane terugkoppeling van de koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt. Door de hoeveelheid MOX-elementen te beperken tot 40% blijft het overall effect zeer beperkt. Door een kleine aanpassing van de instelwaarden van het reactorregelsysteem kan dit systeem nog eerder ingrijpen bij kleine verstoringen zodat het totale effect praktisch gezien nihil is.

De vervalwarmtekromme van MOX als functie van de tijd ligt voor tijden > 46 uur hoger dan die van UO₂. Zie figuur hieronder. Daardoor kan de capaciteit van o.a. het warmteafvoersysteem van het Splijtstof Opslag Bassin voor het ontladen van kern een issue zijn. In hoofdstuk 11 wordt hier nader op ingegaan. Hierin wordt ook een grafiek gegeven van de eerste 150 uur.



² Promptneutronen zijn neutronen die direct bij de splijting van het splijtstofproduct (bijv. U-235 of Pu-239) vrijkomen. De promptneutronenlevensduur is de gemiddelde tijd tussen vrijkomen van het neutron tijdens de splijting en absorptie in een atoomkern.

Fig. 4.2 De reactiviteit (k_{∞}) als functie van de opbrand van zowel een MOX splijtstofelement met 5.4 % splijtbaar plutonium als van een UO_2 splijtstofelement met een verrijkingsgraad van 4.4%.



In hoofdstuk 14 wordt nader ingegaan op het effect van de vervalwarmte op het verloop van ernstige ongevallen die gepaard gaan met kerndegradatie.

De reactiviteit (k_{∞}) als functie van de opbrand is voor MOX splijtstof met 5.4 gew% Pu_{fiss} voor lage opbrand aanzienlijk lager dan die van 4.4% verrijkte UO_2 splijtstof, maar wordt bij hogere opbrand (> 35 MWd/kg splijtstof) groter [5].

De werkzame doorsneden van Pu-239 voor thermische neutronen zijn voor zowel splijting als absorptie aanzienlijk groter dan die van U-235. Daarom zal bij gelijke geometrie van de splijtstofelementen, splijtstofdichtheid en vermogen er bij MOX een reductie van de thermische flux optreden ten gunste van de snelle neutronenflux. Zie figuur 4.5.

Effecten van splijtstoftemperatuur.

Wanneer thermische neutronen in aanraking komen met warmere materialen nemen ze de energie van de omgeving op aan gaan sneller bewegen. Wanneer de gemiddelde snelheid van de neutronen toeneemt nemen de werkzame doorsneden (absorptie doorsnede en splijtingsdoorsnede) af en neemt de flux toe. In eenvoudige bewoordingen, een verschuiving van het neutronenspectrum naar hogere energieën zorgt ervoor dat meer thermische neutronen heen en weer in een gebiedje gaan, maar tegelijkertijd de afmetingen van de kernen waarmee ze botsen (targets) doet afnemen. Dus deze twee effecten werken elkaar tegen. Voor uranium-235 zijn ze zelfs even sterk. Een $1/v$ afname van de werkzame doorsneden heft min of meer de toename in de flux op, zodat de temperatuur uiteindelijk geen effect heeft op de reactiesnelheid $R = \Sigma \phi$ (Σ = macroscopische werkzame doorsnede en ϕ is flux). Voor plutonium-239 die geen $1/v$ werkzame doorsneden heeft, verandert de reactiesnelheid wel met de temperatuur. Zowel de absorptie- als de splijtingsdoorsnede nemen veel minder af met toenemende energie (temperatuur) dan $1/v$ (zie bovenstaande tabel), waardoor de reactiesnelheden voor absorptie en splijting toenemen bij toenemende temperatuur.

De gemiddelde flux in elk klein volume-element in een kern kan worden beschreven met behulp van een zeer eenvoudige formule: $\phi(E) = n(E)v(E)$ waarbij n het aantal neutronen per volume-

eenheid (1 cm^3) is en v de gemiddelde snelheid van die neutronen is (m/sec); beide als functie van de energie E . Voor splijtbare isotopen is voor lage neutronenergieën de splijtingsdoorsnede evenredig met $1/v$. Echter uranium-235 blijft deze trend tot hogere energieën volgen terwijl plutonium-239 hiervan sterk gaat afwijken. In de volgende tabel (tabel 4.1) worden de zgn. non-conformity factoren (afwijkingen) gegeven van de $1/v$ relatie als functie van de temperatuur (temperatuur is energie via $E=kT$). Hieruit is duidelijk af te lezen dat naarmate de temperatuur en daarmee de snelheid van de neutronen toeneemt de werkzame doorsneden voor absorptie en splijting van plutonium-239 steeds minder sterk gaat dalen dan $1/v$.

| T °C | U-235 | | U-238 | Pu-239 | |
|------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | $G_{\text{absorptie}}$ | $G_{\text{splijting}}$ | $G_{\text{absorptie}}$ | $G_{\text{absorptie}}$ | $G_{\text{splijting}}$ |
| 20 | 0.9780 | 0.9759 | 1.0017 | 1.0723 | 1.0487 |
| 100 | 0.9610 | 0.9581 | 1.0031 | 1.1611 | 1.1150 |
| 200 | 0.9457 | 0.9411 | 1.0049 | 1.3388 | 1.2528 |
| 400 | 0.9294 | 0.9208 | 1.0085 | 1.8905 | 1.6904 |
| 600 | 0.9229 | 0.9108 | 1.0122 | 2.5321 | 2.2037 |
| 800 | 0.9182 | 0.9036 | 1.0159 | 3.1006 | 2.6595 |
| 1000 | 0.9118 | 0.8956 | 1.0198 | 3.5353 | 3.0079 |

Tabel 4.1: 'Niet-1/v' factoren U-235, U-238 en Pu-239

Zowel de absorptiedoorsnede als de splijtingsdoorsnede van plutonium nemen bij toenemende energie van de neutronen nog wel gestadig af, weliswaar minder sterk dan bij uranium-235, tot ca. 0.1 eV. Tussen de 0.1 eV en de 1 eV is er een sterke resonantiepiek voor zowel absorptie als voor splijting met een maximum bij ca. 0.2 eV. Qua definitie behoort dit nog tot het thermische gebied. Tussen de 1 eV en 1keV spreken we van epi-thermische neutronen. Na de resonantiepiek dalen de werkzame doorsneden drastisch tot 10 eV. Tussen de 10 en 100eV is het zgn. resonantiegebied met vele resonantiepieken. Zie figuur 4.3.

In splijtstoffen waarover we het hier hebben, zoals verrijkt natuurlijk uraniumoxide of MOX, hebben we niet alleen te maken met uranium-235 of plutonium-239 maar ook met uranium-238. Bij toenemende temperatuur neemt de resonantievangst van epi-thermische neutronen enorm toe door de zgn. Dopplerverbreiding van de resonantiepieken. Dit effect domineert alle andere temperatuurseffecten, en dus ook de toename in de reactiesnelheid voor splijting van plutonium-239.

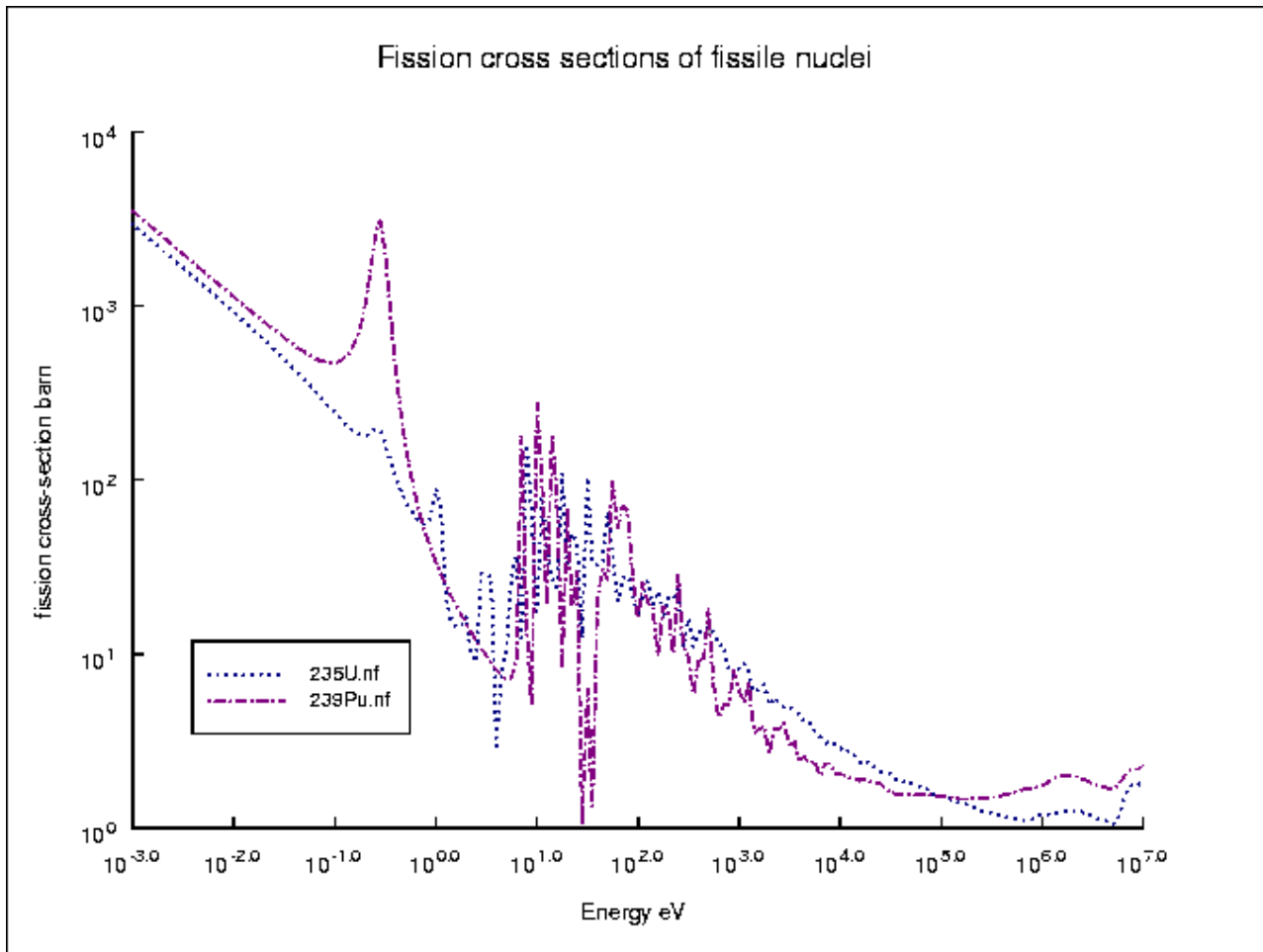


Fig. 4.3 Splijtingsdoorsneden uranium-235 en plutonium-239 als functie van de neutron energie.

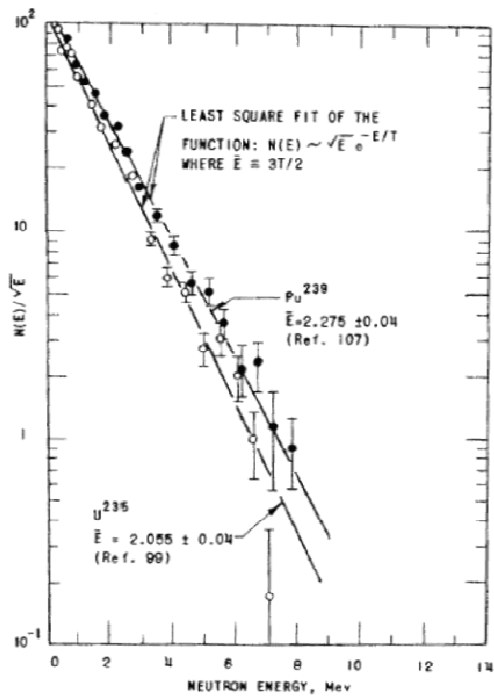


Fig. 4.4 Spectrum van neutronen die vrijkomen bij splijting van resp. uranium-235 en plutonium-239 door thermische neutronen.

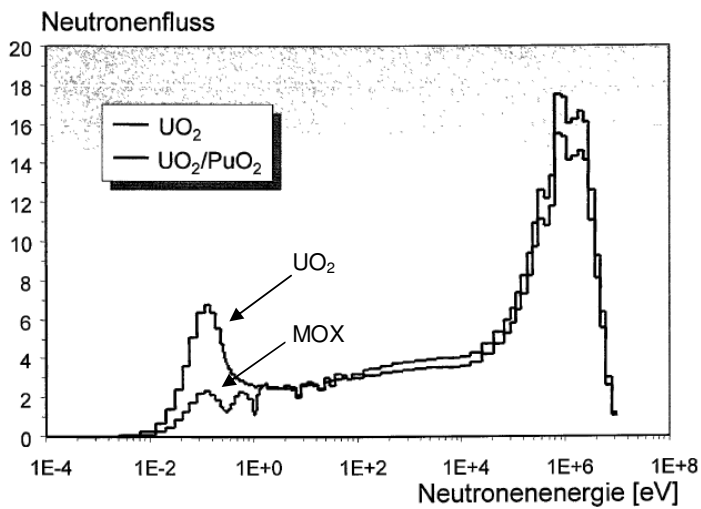


Fig. 4.5 Typische neutronenflux van een MOX splijtstofelement en een UO₂ splijtstofelement

5. Gebruikte rekenmethodiek

De reactorfysische berekeningen zijn door AREVA met het rekenpakket 'CASCADE-3D' uitgevoerd. 'CASCADE-3D' omvat naast de 3D-code 'SAV95' (Standard-Auslegungs-Verfahren) voor de berekening van het steady state kernontwerp ook nog de programma's 'PANBOX/COBRA' en 'RELAP5'. 'SAV95' wordt gekenschetst door een 3- dimensionale beschrijving van de reactor kern. Door de 2-dimensionale neutronen transport code 'CASMO' worden, samen met de 3-dimensionale opbrand code 'PRISM', d.m.v. roosterberekeningen de voornaamste reactorfysische parameters berekend zoals: piekfactoren, fluxen, lokale opbrand, etc. Op basis van deze gegevens berekent 'PINPOWL' de belangrijkste veiligheidsparameters zoals DNBR en verdelingsfactoren voor het vermogen en opbrand. 'PANBOX' berekent het reactor kinetische gedrag als functie van de tijd, o.a. tijdens transiënten, en 'COBRA' de daarbij behorende thermodynamische (warmte overdracht) aspecten in de kern. 'RELAP' is de thermohydraulische code die de massa-warmte-balans van het hele primaire systeem beschrijft als functie van de tijd. Hierin zitten ook bijv. de stoom generator als warmte afvoer, de leidingen waardoor effecten van een verlies aan koelmiddel kunnen worden geïntroduceerd in de berekening.

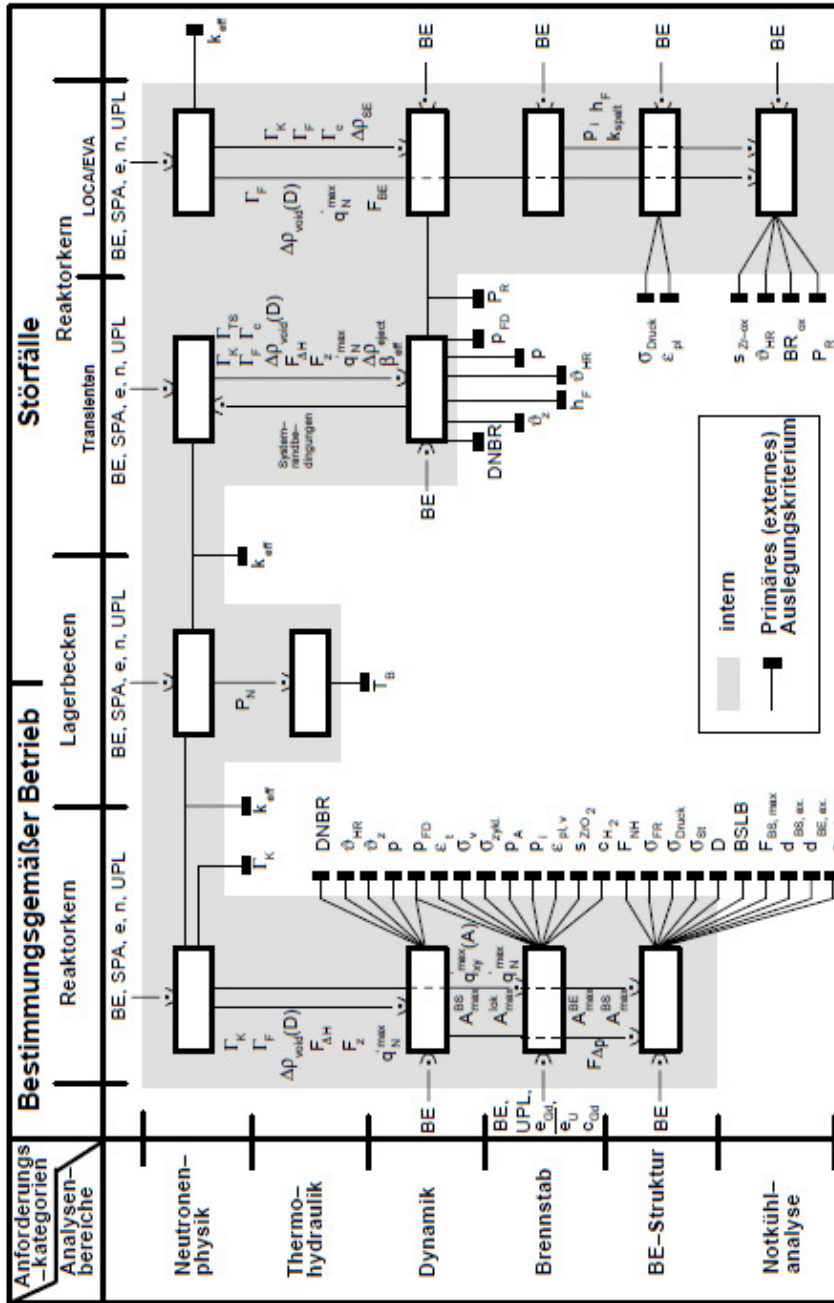
In de "Machbarkeitsstudie" [4] worden op basis van 'CASCADE-3D' de zgn. sleutelparameters berekend van een evenwichtskern voor zowel BOC als EOC. Deze sleutelparameters zijn reactorfysische gegevens die direct gebruikt kunnen worden in de thermohydraulische veiligheidsanalyses die m.b.v. 'RELAP5' worden uitgevoerd. Deze parameters moeten in eerste instantie vallen binnen de grenswaarden die daarvoor worden gehanteerd om zeker te zijn dat tijdens ongevalcondities de veiligheidsgrenzen niet worden overschreden. Belangrijke sleutelparameters voor MOX zijn o.a. de moderator temperatuurcoëfficiënt, de boorzuur werkzaamheid (pcm/ppm), de regelstaafwaarden en reactiviteitwaarden van de verschillende regelstaafconfiguraties, β_{eff} , de axiale en de radiale vermogensverdelingen over de splijtstofstaven van de heetste staaf. Indien mocht blijken dat de berekende waarde van een sleutelparameter te dicht bij een grenswaarde komt te liggen kan eventueel deze grenswaarde aangepast worden indien er in de gekozen waarde voldoende conservatisme zit. Dat wil zeggen indien een iets minder conservatieve waarde van de grenswaarde van desbetreffende sleutelparameter bij gebruik als invoerparameter in de veiligheidsanalyses nog steeds een ruime marge oplevert voor wat betreft de veiligheidsgrenzen, kan overwogen worden de grenswaarde van desbetreffende sleutelparameter iets ruimer te stellen.

Om de veiligheidsanalyses de noodzakelijke mate van conservatisme te geven worden veelal niet de in de Machbarkeitsstudie berekende waarden van de sleutelparameters als input in de veiligheidsanalyses gebruikt, maar de juist daarbij behorende grenswaarden. Blijkt uit de RELAP5 berekening van de diverse gepostuleerde begingebourtenissen (ontwerp basis ongevallen) dat een veiligheidsgrens wordt, dan wel bijna wordt, overschreden dan kan onderzocht worden of een of meer grenswaarden van de sleutelparameters kunnen worden aangescherpt totdat deze veiligheidsgrens niet meer wordt overschreden. Mocht uit de Machbarkeitsstudie of het kernontwerprapport blijken dat dan een of meer berekende sleutelparameters niet meer binnen deze nieuwe grenswaarde vallen, dan dient de kern qua samenstelling opnieuw ontworpen te worden totdat alles weer klopt. Zie o.a. [18]. In hoofdstuk 7 wordt een kort overzicht gegeven van enige sleutelparameter grenswaarden zoals voor UO_2 evenwichtskernen met een resp. verrijkingsgraad van 3.3% en 4.0%, en voor een MOX evenwichtskern zijn berekend en gebruikt in de veiligheidsanalyses. Indien de veiligheidstechnische grenzen niet worden overschreden is alles acceptabel. Indien dat wel het geval is, moet ofwel het kernontwerp worden aangepast zoals een andere configuratie, of ultimo minder MOX. Als voorbeelden voor die veiligheidstechnische grenzen zijn dat bij een groot koelmiddelverlies ongeval (LBLOCA = Large Break Loss of Coolant Accident):

- op beperkte schaal is filmkoken (DNBR = Departure of Nucleate Boiling Ratio < 1.3) toelaatbaar is, mits: de temperatuur van de splijtstofomhulling < 600 °C blijft, en
- is kortdurende re-kritikaliteit toegestaan, maar

- voor de lange termijn moet de onder-kritikaliteit gewaarborgd zijn.

In de volgende figuur is schematisch aangegeven hoe de parameterstromen tussen de verschillende analyses verlopen. Zo zien we onder het kopje ongevallen (Störfälle) dat zowel de analyses van transiënten als LOCA analyses al dan niet gecombineerd met externe gebeurtenissen (aardbevingen) de diverse reactiviteitscoëfficiënten (Γ en $\Delta\rho_{\text{void}}$) gebruiken, de effectieve fractie vertraagde neutronen (β_{eff}), heetkanaalfactor $F_{\Delta H}$ met betrekking tot enthalpiestijging, en nog andere sleutelparameters. Als uitkomsten worden o.a. de externe sleutelparameters DNBR (afstand tot kiemkoken), primaire druk p en secundaire stoomdruk p_{FD} berekend. Voor wat betreft het splijtstofopslagbassin (Lagerbecken) wordt de vervalwarmte P_{N} gebruikt om de temperatuur van het water in het splijtstofopslagbassin T_{B} te berekenen.



6. Onderbouwende analyses neutronenfysica en kernontwerp [4 t/m 6].

6A. MOX

In de loop van het beoordelingsproces zijn er door GRS [41] vragen gesteld betreffende de validatie van de codes voor het neutronenfysische kernontwerp. Het betrof hier met name het gebruik van CASMO-3, waarvan er inmiddels nieuwere versies bestaan. Deze vragen zijn naar tevredenheid van GRS door AREVA beantwoord en als opgelost beschouwd. AREVA heeft o.a. door middel van rapportage betreffende de validatie van CASMO-3 als onderdeel van het rekenpakket CASCADE bewezen zeer betrouwbare resultaten te leveren en aangetoond dat een overstap op CASMO-4 geen duidelijke verbetering qua accuraatheid en voorspellingskracht heeft t.a.v. CASMO-3 berekeningen. Als conclusie schrijft GRS [41]:

“The reviewer is willing to follow the arguments of AREVA that the core design procedure used for the KCB core design is in principle suitable for the new assembly types with 5.4% Pu_{fiss} -contents, and an overall fraction of 40% MOX in the core....”

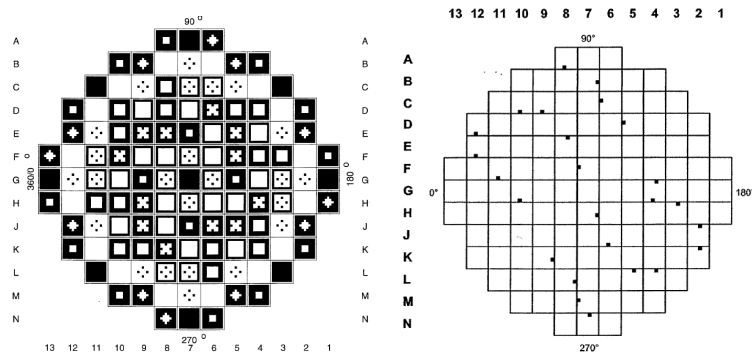
Echter omdat het voornemen van EPZ zowel qua hoeveelheid MOX splijtstofelementen in de kern als de hoeveelheid splijtbaar plutonium nogal ambitieus is beveelt GRS wel aan om voorloper elementen in te zetten:

“A survey on MOX utilization in German power plants shows, that no German plant actually utilizes a MOX fraction similarly large to what is planned in KCB, and that the Pu_{fiss} contents is also throughout lower than the intended 5.4% in KCB. GRS understands that, within the nuclear core design procedure, there are in principle no indications of unexpected outcomes when moving to higher Plutonium contents. However, the fact remains that no operation experience is available from any KWU-type plant, therefore it is “first-of-its-kind”. Moreover, the intended MOX fraction reaches 40% in equilibrium, which is also larger than in any other plant AREVA is in charge of the core design. To guarantee proper long-term operation of the new assembly types, GRS recommends to reduce the number of MOX assemblies in the first reload batch...”

De hierboven genoemde aanbeveling tussen de aanhalingstekens om zgn. voorloper elementen in te zetten bij de eerste lading MOX in de kern wordt door de KFD overgenomen. Voorloperelementen zijn splijtstofelementen die 1 cyclus voorafgaande aan de commerciële inzet van een nieuw type splijtstof in geringe hoeveelheid (meestal 4) in de kern wordt geladen om eventuele extra kwalificatie te krijgen van het gedrag van desbetreffend splijtstofelement, zoals bijvoorbeeld corrosiegevoeligheid. Deze voorloper blijven minimaal even lang in de kern staan als de commercieel ingezette splijtstofelementen om ook het gedrag bij hogere opbrand te bepalen. De reden om ook in Borssele voorloperelementen te vereisen is om zeker te stellen dat de reactorfysische rekencodes betrouwbare voorspellingen doen voor een 40% MOX kern met een Pu-fractie van 5.4% splijtbaar plutonium gemiddeld over de verse MOX splijtstofelementen. Dit omdat AREVA alleen voor de Zwitserse kerncentrale Gösgen ervaring heeft met een Pu-fractie van 5.1% splijtbaar plutonium. (Overigens heeft EDF wel ervaring met een plutonium fractie van 5.36% splijtbaar plutonium). Hoewel er geen reden is om te twijfelen dat de codes betrouwbare resultaten geven boven de 5.1% is het verstandig om dit toch zeker te stellen. De KFD geeft dan ook het advies om bij de eerste lading verse MOX elementen maximaal 8 elementen te plaatsen waarvan er 4 op posities van het kogelmeetsysteem geplaatst dienen te worden.

Alhoewel een aantal van 4 voorloperelementen gebruikelijk is, wordt toch gekozen voor 8 voorloperelementen omdat de posities van neutronenflux meetsysteem slechts spiegelsymmetrisch t.o.v. de resp. $45^\circ - 225^\circ$ as en $135^\circ - 315^\circ$ as verdeeld zijn over de

kerndoorsnede i.p.v. symmetrisch over de 4 kwadranten van de kerndoorsnede (spiegelsymmetrisch t.o.v. de resp. 0° - 180° as en 90° - 270° as). Hierdoor is de combinatie van een symmetrische plaatsing in de 4 kwadranten en plaatsing op 4 posities van de opnemers van het neutronenflux meetsysteem niet mogelijk. Met 4 elementen kunnen er slechts 2 op zo'n positie staan. Zie onderstaande figuur waarin: links de posities van de splijstofelementen staan met de verschillende standtijden en rechts de posities van het neutronenflux meetsysteem.



De jaarlijkse kernbelading is op de centrale positie na, altijd symmetrisch over de 4 kwadranten en worden er derhalve altijd een veelvoud van 4 splijstofelementen met dezelfde verrijkingsgraad/opbrand/Pu-fractie/etc. geladen.

In de "Reaktorphysikalische Machbarkeitsstudie zum Einsatz von MOX-Brennelementen" worden de moderatortemperatuurcoëfficiënt Γ_T , de splijstoftemperatuurcoëfficiënt Γ_{TF} en de boorwerkzaamheid Γ_c berekend voor zowel het begin van de cyclus (BOC) als voor het einde van de cyclus (EOC) en vervolgens vergeleken met desbetreffende grenswaarde(n). Voor wat betreft de spectraal coëfficiënt Γ_{TS} is een zeer conservatieve waarde aangenomen van + 10 pcm/K (BOC) als invoerparameter voor ATWS (scramfalen) analyses en LOCA analyses. Dat wil zeggen dat er 10 pcm reactiviteit wordt toegevoegd naarmate de moderator per graad K heter wordt. Zelfs met deze conservatieve waarde en met een minder steil lopende 'voidkromme' voor ATWS (dichter tegen de grenswaarde) dan die in de "Machbarkeitsstudie" conservatief berekend is, blijft aan de voor ATWS gestelde acceptatiecriteria voldaan worden. Zie verder thermohydraulische veiligheidsanalyses.

Voor wat betreft de fractie vertraagde neutronen is er in een 40% MOX kern een duidelijke reductie te zien t.g.v. het plutonium wanneer het vergeleken wordt met een UO_2 kern. Echter deze waarden (voor resp. BOC en EOC) vallen ruimschoots binnen de daartoe gestelde limieten. De waarden zijn respectievelijk 0,507 voor het begin van de cyclus (BOC) met als grenswaarde: $\geq 0,485$, en 0,479 voor het eind van de cyclus (EOC) met als grenswaarde: $\geq 0,427$.

De KFD beschouwt de gekozen uitgangspunten van de analyses voldoende conservatief om een gefundeerde uitspraken te kunnen doen dat de reactorfysische parameters binnen de daartoe gestelde veiligheidslimieten blijven voor zowel een 40% MOX kern als voor een kern waarbij gebruik is gemaakt van gerecycled uranium en het reactiviteitsverlies door U-236 door een

³ Een verandering van de koelmiddeltemperatuur bij gelijkblijvende dichtheid zorgt voor een verandering van de thermische eigenbeweging van de atomen in het koelmiddel. Doordat het verstrooiingsproces van de neutronen navenant verandert, komt er een verschuiving in het neutronenenergiespectrum. Omdat de thermische eigenbeweging alleen de verstrooiing van laag energetische neutronen beïnvloedt, beperken de spectrale veranderingen zich voornamelijk tot het thermische gebied van het neutronenspectrum. Voor MOX (3.91 % Pu_{fiss}) is een relatieve fluxtoename berekend van 2%/K voor neutronenenergieën tussen de 0.2 en 0.3 eV maar een fluxafname van -2%/K onder de 10^{-2} eV.

verhoging van de verrijgingsgraad van maximaal 0,2% U-235 is gecompenseerd. Hierbij moet wel de inzet van bovengenoemde voorloperelementen worden mee beschouwd.

6B. c-ERU

Gerecycled uranium heeft een andere samenstelling dan natuurlijk uranium. Met name bevat het een kleine fractie U-236 dat afkomstig is van neutronenvangst door U-235 zonder dat vervolgens de U-235 kern ging splijten. U-236 heeft het nadeel dat het vooral neutronen absorbeert en nagenoeg niet splijt, waardoor het de reactiviteit van de splijtstof ongunstig beïnvloedt. Dat heeft als gevolg dat splijtstofelementen met verrijkt gerecycled uranium een lagere reactiviteit hebben dan splijtstofelementen met natuurlijk uranium met dezelfde verrijgingsgraad. In feite betekent het dus dat de **effectieve** verrijgingsgraad van gerecyclede uranium lager is dan van die natuurlijk uranium bij dezelfde verrijgingsgraad.

Voor wat betreft de inzet van gerecycled uranium is het gerechtvaardigd om het verlies aan reactiviteit door het neutronen absorberende U-236 te compenseren tot een maximum waarde van 0.2% U-235. De waarde van 0.2 gew.% U-236 is de waarde die door EPZ in de vergunningsaanvraag is genoemd. Voor grotere waarden zijn geen afdekkende analyses uitgevoerd. Omdat de hoeveelheid U-235 die nodig is om het verlies t.g.v. U-236 te compenseren ca. 1/3 is van het aantal gewichtprocenten U-236 in het gerecyclede uranium is, stelt de KFD voor een extra voorschrift aan de vergunning toe te voegen. Daarin komt de voorwaarde dat de hoeveelheid extra U-235 ter compensatie niet meer mag bedragen dan 1/3 van de hoeveelheid U-236 in het gerecyclede uranium met een maximum van 0.2 gewichtsprocenten U-235.

Indien 0.2% extra U-235 meer zou zijn dan 1/3 van het aantal gewichtsprocenten U-236 hebben we in feite te maken met een extra verhoging van de nu vergunde 4.4% verrijgingsgraad van de uranium splijtstof. Voor zo'n situatie zijn geen analyses uitgevoerd. Indien de hoeveelheid extra U-235 ter compensatie niet meer bedraagt dan 1/3 van de hoeveelheid U-236 zijn de huidige analyses van de uranium splijtstof met een verrijgingsgraad van 4.4% U-235 in samenhang met de haalbaarheidsstudie van ERU uit 2002 [7] afdekkend om aan te tonen dat de veiligheidsgrenzen niet worden overschreden tijdens de ontwerpongevallen. Voor wat betreft c-ERU was er dan ook geen noodzaak om de thermohydraulische veiligheidsanalyses opnieuw uit te voeren. Door de iets gewijzigde kerninventaris aan splijtingsproducten t.g.v. gewijzigde U-235 fractie in de kern zijn de radiologische ongevalsanalyses wel opnieuw uitgevoerd. Daarbij is uitgegaan van een 100% c-ERU kern.

7. Thermohydraulische veiligheidsanalyses

In de veiligheidsanalyses zijn de volgende uitgangspunten/randvoorwaarden gebruikt om een zo conservatief (maximaal) mogelijke reactorwerking te hebben waardoor deze zo ongunstig mogelijk voor de afloop van de verstoring is. Uitgangspunt hierbij is dat als de uitkomsten van de analyses voor het meest ongunstige scenario binnen de veiligheidsnormen blijven, dat ook geldt voor de minder ongunstige scenario's.

| Aard van de verstoring | Terugkoppeling reactiviteit | | | Aantal vertraagde neutronen | Opbrand |
|---|-----------------------------|-----------|--------------------|-----------------------------|---------|
| | moderator | splijstof | toedienen boorzuur | | |
| Toename koelmiddeltemperatuur | zwak | sterk | zwak | groot | BOC |
| Afname koelmiddeltemperatuur | sterk | zwak | zwak | klein | EOC |
| Toename reactiviteit door uittrekken regelstaaf | zwak | zwak | zwak | klein | BOC |
| Afname reactiviteit door inbewegen regelstaaf | sterk | sterk | zwak | groot | EOC |
| Boorzuurverduunning | zwak | zwak | sterk | klein | BOC |

In [19] worden de hierbij behorende numerieke punt kinetische waarden gegeven. In de tabel 7.1 worden van die hierboven genoemde verstoringen de grenswaarden van de bijbehorende sleutelparameter (reactiviteitscoëfficiënten) gegeven.

Voor de onderbouwing dat geen veiligheidsgrenzen worden overschreden door een inzet van MOX zijn de volgende thermohydraulische ongevalsanalyses opnieuw uitgevoerd, dan wel is in een zgn. "Plausibilitätsbetrachtung" aangegeven dat de bestaande analyse voor een 4,4% verrijkte UO₂ kern nog geldig is. Het achtervoegsel PIE betekent "Postulated Initiating Event". Deze veronderstelde begingebourtenissen moeten gezien worden als ontwerpgevallen.

1. Onbedoeld openen van twee secundaire turbine omloopkleppen; PIE 1.4
2. Niet isoleerbare breuk van de hoofd stoomleiding; PIE 1.5.4
3. Lastafworp en overgang op eigen bedrijf; PIE 2.2
4. Turbine trip zonder turbine bypass; PIE 2.3.2
5. Verlies extern net en noodstroom; PIE 2.5.1
6. Uitval hoofdvoedingswaterpompen; PIE 2.6.1
7. Uitval 1 hoofdkoelmiddelomp; PIE 3.1.1
8. Breuk as van hoofdkoelmiddelomp; PIE 3.2
9. Uitworp meest effectieve regelstaaf; PIE 5.2
10. Onbedoeld openen en vervolgens weer sluiten primaire afblaasklep; PIE 7.1.1
11. Onbedoeld openen primaire afblaasklep en niet meer willen sluiten; PIE 7.1.2
12. Klein lek primaire leiding; PIE 7.2.2
13. Groot Koelmiddel Verlies Ongeval (Breuk van de hoofdkoelmiddelleiding); PIE 7.2.3
14. Stoomgenerator pijpbreuk met gelijktijdig uitval van 10kV net; PIE 7.3.2
15. Stoomleidingbreuk t.g.v. een aardbeving; PIE 9.1.1
16. Verlies voedingwater debiet en scramfalen (ATWS); PIE 10.5

Bij een tussentijdse rapportage van de GRS-beoordeling waren nog niet alle analyses gereed. Tevens vond GRS dat enkele andere analyses uitgevoerd moesten worden die niet in de planning stonden. Per brief [42] is daarom aan EPZ meegedeeld deze analyses te leveren dan wel uit te laten voeren en aan de KFD ter beoordeling op te sturen. Inmiddels zijn alle analyses

geleverd en aan GRS ter beoordeling opgestuurd. In de "eindrapportage" van GRS kon de beoordeling een aantal van deze extra analyses niet meer worden meegenomen.

Echter, omdat:

1. de invoergegevens [19] en [22] van de thermohydraulische berekeningen al eerder door GRS beoordeeld waren en voldoende bevonden waren, en
2. de code RELAP 5 die bij de analyses gebruikt wordt, een internationaal geaccepteerde code is,

vindt de KFD deze beperking in de stellingname van GRS geen reden om in het KFD-oordeel een voorbehoud op te nemen dat er nog een tweede onafhankelijk oordeel van deze analyses (al dan niet door GRS) moet komen alvorens tot een eindoordeel te komen. In een telefonische consultatie met GRS werd dit bevestigd

De KFD heeft wel de resultaten van deze laatste analyses in dit beoordelingsrapport meegenomen. Tevens beschouwt de KFD de gekozen verzameling veiligheidsanalyses voldoende afdekkend voor alle ontwerpbasis ongevallen die leiden tot een verstoring van de warmte- en neutronenhuishouding.

In onderstaande tabel [22] wordt een overzicht gegeven van de waarden van sleutelparameters cq. grenswaarden van de sleutelparameters zoals in de veiligheidsanalyses in het verleden als invoerparameter zijn gebruikt. Het betreft o.a. de waarden zoals deze: in de MOX veiligheidsanalyses zijn gebruikt, voor een MOX evenwichtskern, en voor een actuele 4.4% UO₂ kern (huidige cyclus van 2010) zijn berekend. Overigens is duidelijk uit deze tabel te zien dat het huidige boorzuur met natuurlijk boor niet meer toerijkend voor MOX is en dat verrijking van het boor met meer boor-10 noodzakelijk is.

| Reactiviteitscoëfficiënten | | grenswaarden | | | Berekende waarde (kern-ontwerp evenwichts kern MOX) | Berekende waarde Cyclus 37 4.4% UO ₂ |
|--|-------|---------------------|-------------------|------------|---|---|
| | | 3.3% verrijkt ('93) | 4% verrijkt ('95) | MOX | | |
| Moderatortemperatuur-coëfficiënt Γ_K (pcm/K) | zwak | ≤ -23.5 | ≤ -6 | ≤ -6 | -34.8 BOC | -21 BOC |
| | sterk | ≥ -37.3 | ≥ -70 | ≥ -75 | -62.4 EOC | -60 EOC |
| Splijstoftemperatuur-coëfficiënt Γ_{TF} (pcm/K) | zwak | ≤ -5.1 | ≤ -2.5 | ≤ -2 | -3.1 BOC | -2.7 BOC |
| | sterk | ≥ -3.35 | ≥ -4 | ≥ -4 | -3.2 EOC | -3.0 EOC |
| Boorzuur werkzaamheid Γ_c (pcm/ppm) | zwak | ≤ -10.28 | ≤ -7 | ≤ -7 | -5.3 BOC | -7.5 BOC |
| | | | | | -6.3 EOC | -8.8 EOC |

Tabel 7.1 grenswaarden voor de sleutelparameters aangaande de reactiviteitscoëfficiënten zoals die voor resp. 3.3% en 4.4% verrijkt UO₂ splijstof en MOX splijstof gelden en de werkelijk berekende waarden voor MOX en de huidige (2010) UO₂ kern

Hieronder zullen vijf van deze analyses in meer detail worden besproken om een gevoel te geven van de effecten van bijvoorbeeld de sterker negatieve moderatortemperatuurcoëfficiënt, zwakkere boorzuurwerkzaamheid en iets zwakkere splijstoftemperatuurcoëfficiënt (Dopplercoëfficiënt).

a) Breuk van hoofdstoomleiding na aardbeving

Door de aardbeving wordt aangenomen dat:

1. de hoofd stoomleiding faalt tussen containment en de hoofd stoomafsluiters resp. turbine omloopkleppen;
2. het externe net niet beschikbaar is (hierdoor o.a. primaire pompen, hoofd voedingwaterpompen niet beschikbaar);
3. noodstroomnet 1 niet beschikbaar is (hierdoor o.a. volumeregelsysteem [TA], kern nood- en nakoeling [TJ], nood- en nevenvoedingwatersysteem niet beschikbaar).

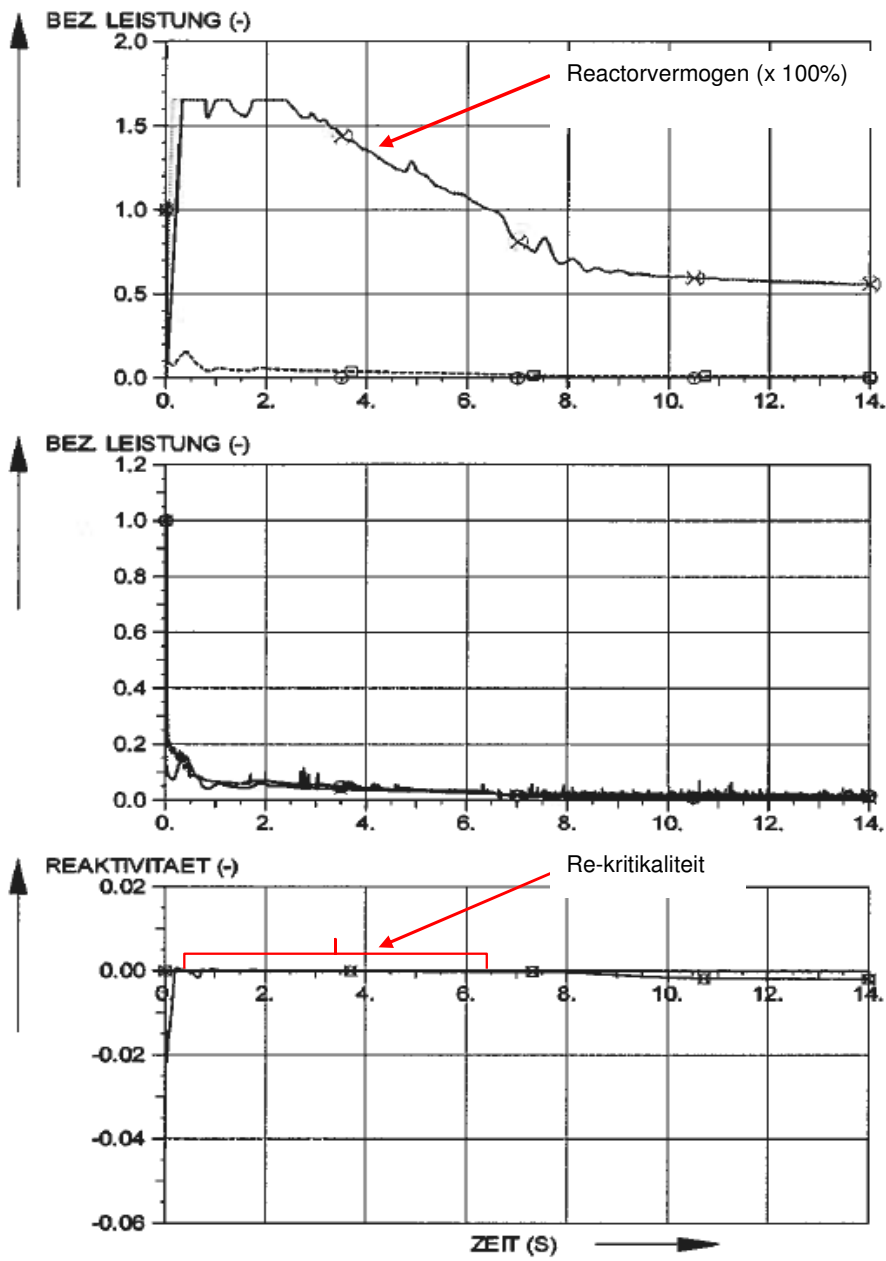
De stoomgeneratoren worden slechts gevoed vanuit het reserve suppletiesysteem RS (17 kg/s per strang). T.g.v van de sterke afkoeling door de breuk in de stoomleiding zakt de primaire druk tot 118 bar en de primaire temperatuur tot 226 °C. T.g.v. de verminderde regelstaafwerking en een gepostuleerde extra sterke negatieve koelmiddeltemperatuur coëfficiënt (-75 pcm/K) zal door deze sterke afkoeling na 200 seconden gedurende zo'n 2 uur re-kritikaliteit optreden (Zie figuur 7.1).

Door de continue injectie van het gebunkerde nood injectie systeem TW met een boorzuurconcentratie van 2300 ppm zullen na ca. 8000 seconden de reactiviteitstoelagen t.g.v. moderator temperatuur coëfficiënt en Doppler (splijstoftemperatuurcoëfficiënt) teniet gedaan worden en zal de reactor blijvend onder-kritisch worden. De warmteafvoer van de kern is gedurende het hele verloop van het ongeval gewaarborgd en de veiligheidsgrenzen worden niet overschreden. Het ongevalverloop verschilt bij de inzet van MOX nagenoeg niet met een inzet van louter UO₂ splijstof in de kern.

In figuur 7.2 is de re-kritikaliteit ingeval van een 4.4% verrijkte UO₂ kern gegeven in geval van dezelfde gepostuleerde begingebuurtenis, i.e.: een breuk van de hoofdstoomleiding t.g.v. een aardbeving.

De KFD beschouwt de gekozen uitgangspunten van de analyse voldoende conservatief om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen dat desbetreffend ontwerpbasis ongeval niet leidt tot een overschrijding van de geldende veiligheidsgrenzen. Zoals in hoofdstuk 5 al beschreven is t.a.v. de veiligheidstechnische grenzen voor LOCA's geldt ook hier dat kortdurende re-kritikaliteit toelaatbaar is maar op lange termijn sub-kritikaliteit gewaarborgd moet zijn. Dat is hier duidelijk het geval.

Fig. 7.1 Re-kritikaliteit MOX kern bij breuk hoofdstoomleiding t.g.v. aardbeving



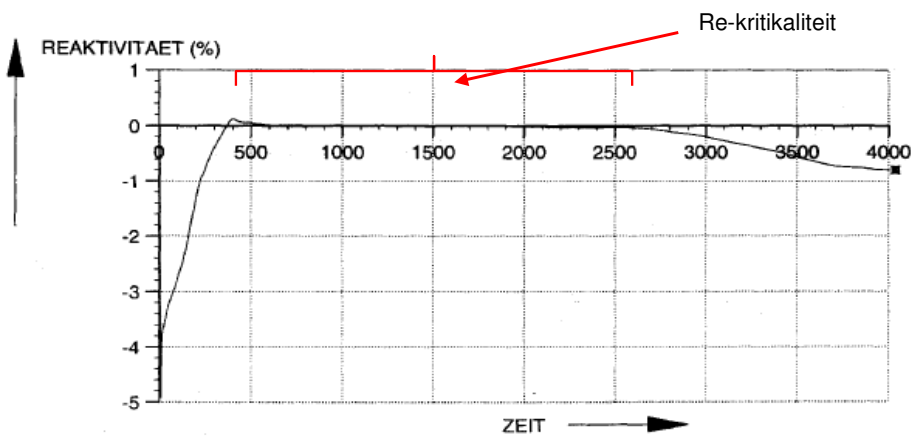
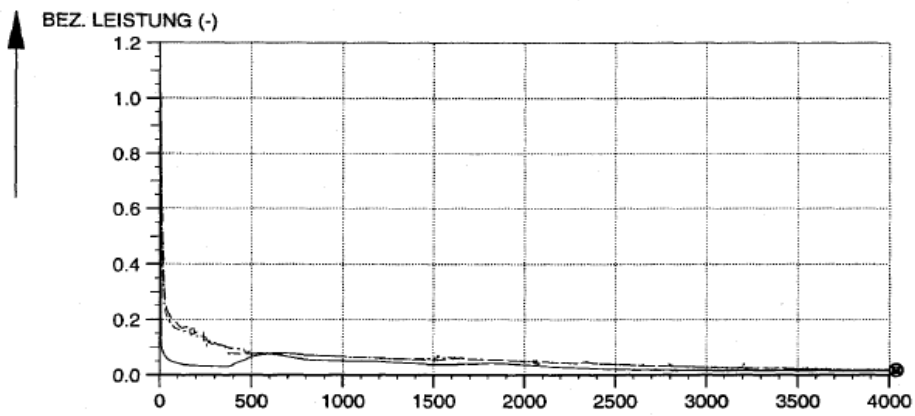
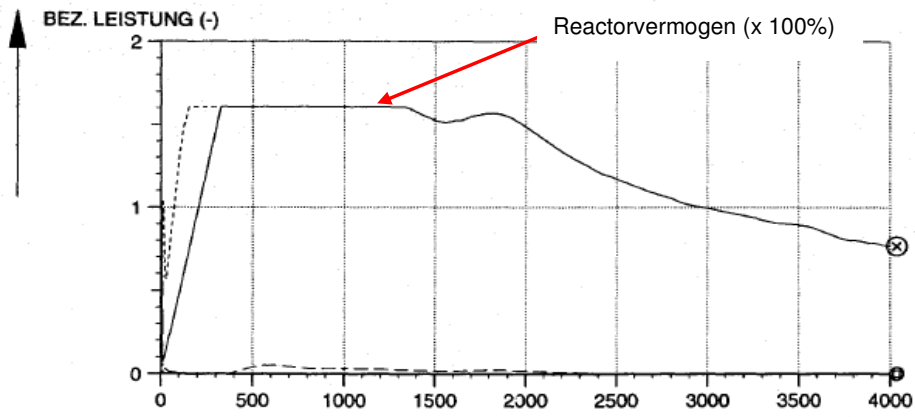


Fig. 7.2 Re-kritikaliteit 4.4% verrijkte UO_2 kern bij hoofdstoomleidingbreuk t.g.v. aardbeving

b) **Onbedoeld openen van de turbine omloopkleppen**

Voor wat betreft de groep storingen/ongevallen betreffende het hoofd stoomsysteem, te weten:

- onbedoeld openen van alle turbine omloopkleppen
- onbedoeld openen van niet alle turbine omloopkleppen (slechts 2 van de 3)
- onbedoeld openen van een veiligheidsklep van het hoofd stoomsysteem
- onbedoeld openen van een afblaasklep van het hoofd stoomsysteem

is het scenario: onbedoeld openen van 2 v 3 turbine omloopkleppen het ongunstigste geval om een zo maximaal mogelijke onderkoeling te bereiken.

De geldende veiligheidsgrenzen zijn:

- De zgn. afstand tot kiemkoken mag slechts beperkt in tijdsduur worden overschreden, dan wel de minimaal optredende DNB-verhouding (overgang van kiemkoken tot filmkoken) mag zeer begrenst de grenswaarden van 1.3 cq. kookafstand van 15 bar overschreden.
- De daarbij optredende maximale temperaturen van de splijststof en splijststofomhulling mogen niet boven de gestelde grenswaarden komen.

Door het openen van de twee turbine omloopkleppen (de stoom gaat niet meer via de stoomturbine maar rechtstreeks naar de condensor) daalt de stoomdruk en neemt de stoomonttrekking uit de stoomgeneratoren toe, zodat er meer primaire warmte wordt afgevoerd. Daardoor daalt de temperatuur van het primaire koelmiddel. Door de sterke negatieve moderator temperatuurscoëfficiënt (conservatief -75 pcm/K aangenomen) neemt het vermogen (de reactiviteit) van de reactor toe. Bij een reactorvermogen > 105% zou de reactorvermogen begrenzing in moeten grijpen en zowel de L- als de D-bank moeten insturen waardoor het vermogen binnen de grenzen blijft. Verondersteld wordt dat dit systeem faalt. Deze extra conservatieve aanname was er overigens in eerdere analyses voor UO₂ kernen niet. Hierdoor verandert het verloop van het ongeval t.o.v. eerdere analyses. Door het falen van de vermogensbegrenzing grijpt het reactorbeveiligingssysteem bij het aanspreken van de tweede grenswaarde in en volgt er een reactorsnelafschakeling.

Ruim 2 minuten na het begin van het ongeval is de reactiviteitstoename door de negatieve moderator temperatuur coëfficiënt en Dopplercoefficiënt groter dan de (verminderde) werkzaamheid van de regelstaven en zal de reactor gedurende ongeveer 25 seconden weer kritisch zijn (zie figuur 7.4). Als de vermogensbegrenzing wel aanspreekt, is de afkoeling minder geprononceerd waardoor er geen re-kritikaliteit optreedt. In dat geval wordt er zowel primair minder warmte geproduceerd (107% vermogen i.p.v. 110%) als dat de reactor niet scramt. In figuur 7.3 wordt het normale geval weergegeven waarbij de vermogensbegrenzing ingrijpt.

In figuur 7.4 wordt de situatie weergegeven waarbij vermogensbegrenzing niet ingrijpt en waarbij de reactorsnelafschakeling bij 110% vermogen ingrijpt. Na 2,5 minuten vanaf het begin van het ongeval is de stoomdruk zover gedaald, dat de hoofdstoom isolatiekleppen automatisch gesloten worden evenals de toevoerkleppen van het voedingwatersysteem. Hierdoor wordt er minder warmte via de stoomgeneratoren afgevoerd en stijgt de primaire temperatuur weer waardoor de negatieve terugkoppeling van de moderator temperatuur coëfficiënt en de splijstoftemperatuur coëfficiënt (Doppler) vermindert en de reactor weer subkritisch wordt. Via normale herstelacties wordt vervolgens de reactor in de zgn. koud onderkritische toestand gebracht en gehouden, waarna het ongeval voorbij is.

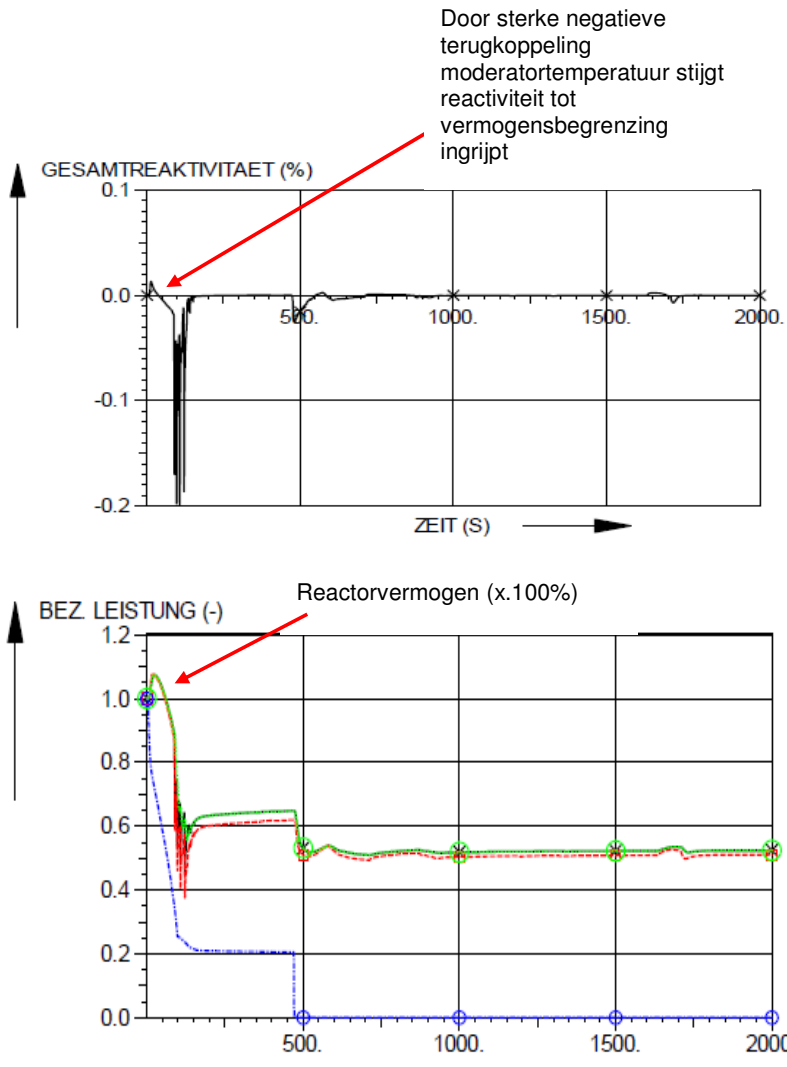


Fig. 7.3 Reactiviteit en vermogen reactor met MOX kern t.g.v. "Onbedoeld openen van de turbine omloopkleppen"; vermogensbegrenzing grijpt in.

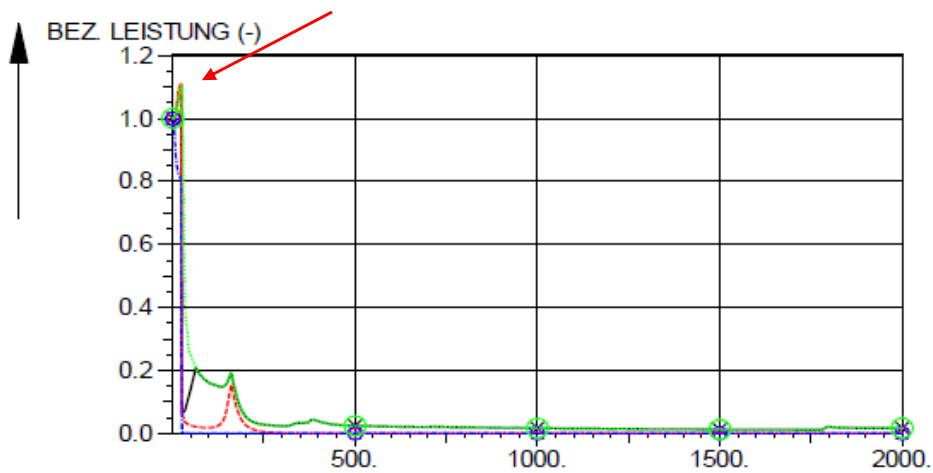
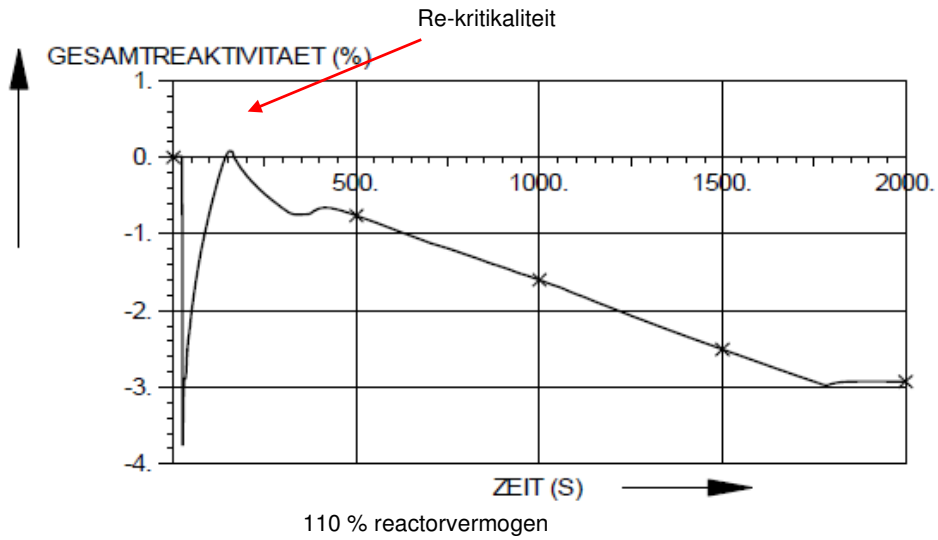


Fig. 7.4 Reactiviteit en vermogen reactor met MOX kern t.g.v. "Onbedoeld openen van de turbine omloopkleppen"; vermogensbegrenzing grijpt niet in; reactor scramt bij 110% vermogen.

De KFD beschouwt de gekozen uitgangspunten van de analyse voldoende conservatief om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen dat desbetreffend ontwerpbasis ongeval niet leidt tot een overschrijding van de geldende veiligheidslimieten.

c) **Regelstaaf uitworp ongeval**

In de regelstaafuitworp analyse heeft AREVA een drietal situaties onderzocht. Hierbij zijn zeer conservatieve regelstaaf posities aangenomen.

| Reactorvermogen | Positie regelstaven |
|--|--|
| vol vermogen reactor (103% vermogen) | regelstaven D-bank 85 cm in kern (dit is verder dan de procedureel vastgelegde waarde) |
| 50% vermogen reactor | 1 D bank volledig in de kern |
| Hot Zero Power (HZP; nullast; 4% vermogen) | Beide D banken volledig in de kern |

Verder is de werkzaamheid (regelstaafwaarde) met 45% verhoogd waarmee de berekende reactiviteitsprongen ook afdekkend kunnen zijn voor toekomstige nog niet gedefinieerde kernbeladingen met nog reactievere splijstofelementen. Het aantal vertraagde neutronen is eveneens gereduceerd ten opzichte van de conservatief berekende waarde in de "Machbarkeitsstudie": 450 pcm bij BOC en 425 pcm bij EOC (Zie laatste alinea in bovenstaand hoofdstuk over neutronenfysica). Daarnaast is de splijstoftemperatuur coëfficiënt gereduceerd (-2 pcm/K i.p.v. -3.1 pcm/K). Een afgezwakte splijstoftemperatuurcoëfficiënt leidt tot een grotere vermogensexcursie omdat in dat geval de negatieve terugkoppeling gereduceerd wordt. Om dezelfde reden is ook een gereduceerde koelmiddeltemperatuur coëfficiënt aangenomen (-6 pcm/K bij BOC en -40 pcm/K bij EOC i.p.v. de respectievelijk berekende -34.8 pcm/K BOC en -62.4 pcm/K EOC. Ook is de warmteoverdracht via de spleet tussen splijstoftablet en splijstofomhulling (cladding) conservatief aangenomen om een zo groot mogelijke opwarming van de splijstoftablet te bewerkstelligen.

In tabel 7.2 worden de resultaten weergegeven.

| Reactor vermogen | BOC ($\beta_{\text{eff}} = 450$ pcm) | | EOC ($\beta_{\text{eff}} = 425$ pcm) | |
|------------------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| | [pcm] | [\$] | [pcm] | [\$] |
| Vol vermogen | 60 | 0.13 | 74 | 0.17 |
| 50% vermogen | 347 | 0.77 | 406 | 0.96 |
| HZP (1%) | 509 | 1.13 | 528 | 1.24 |

Tabel 7.2 Maximaal toegevoegde reactiviteit bij een regelstaafuitworp ongeval bij de verschillende vermogenstoestanden, uitgaande van conservatieve uitgangspunten.

Het feit dat in HZP condities meer dan 1\$ reactiviteit wordt toegevoegd, waardoor de reactor enige milliseconden prompt kritisch wordt is op zich niet ernstig. Het gaat nl. om de energie die gedurende die korte periode van enige milliseconden vrijkomt en of die tot splijstofschade kan leiden. Door de terugkoppeling t.g.v. de Dopplercoëfficiënt is de periode van prompt kritisch zijn maar heel kort. De hierbij horende maximale verhoging van de enthalpie bedraagt niet meer dan 30 cal/g (126 J/g) en is vrijwel constant voor het hele versplijtingsgebied tussen 0 en 70 MWd/kg splijstof. Deze waarde voldoet hiermee ruimschoots aan het daartoe gestelde criterium. Splijstofschade is derhalve zeer onwaarschijnlijk, mede gezien dat in deze analyses de vooruitgang die de laatste jaren geboekt is bij verbetering van de materialen van de splijstofomhulling niet is meegenomen. Wordt overigens uitgegaan van best-estimate berekeningen, d.w.z. uitgaande van realistische waarden i.p.v. conservatieve waarden, dan zijn deze waarden veel geringer [4]. Ook in HZP condities blijft de hoeveelheid toegevoegde reactiviteit ruimschoots onder de 1\$.

| Reactorvermogen | BOC ($\beta_{\text{eff}} = 0.507$ pcm) | | EOC ($\beta_{\text{eff}} = 0.479$ pcm) | |
|-----------------|---|------|---|------|
| | [pcm] | [\$] | [pcm] | [\$] |
| Vol vermogen | 65.2 | 0.13 | 89.9 | 0.19 |
| HZP | 225,2 | 0.44 | 270.2 | 0.56 |

Tabel 7.3 Maximaal toegevoegde reactiviteit bij een regelstaafuitworp ongeval bij de verschillende vermogenstoestanden, realistische uitgangspunten.

EPZ maakt tegenwoordig gebruik van het Niobium houdende M5 materiaal dat nog beter bestand is tegen hoge opbranden dan PCA 2b dat destijds werd ingezet bij de eerste verhoging van de verrijkingsgraad van 3.3% naar 4 %. Ook toen speelde hoge opbrand een belangrijke rol in de bijbehorende vergunningsprocedure. In onderstaande figuur wordt de maximale temperatuur van de splijtstofomhulling gegeven ingeval van een uitgeworpen regelstaaf vanuit een toestand waarbij alle regelstaven geheel in de kern zijn, en de reactor op 4% vermogen draait.

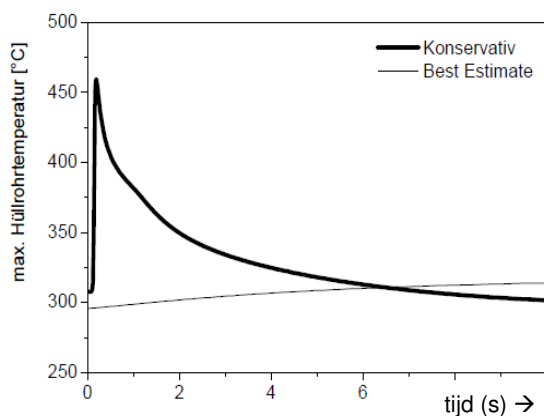


Fig. 7.5 maximale temperatuur splijtstofomhulling (MOX)

In figuur 7.6 wordt de maximale enthalpiesprong (cal/g) gegeven als functie van de maximale lokale opbrand van de splijtstofelementen die naast de uitgeworpen regelelement gepositioneerd zijn. De getrokken lijn is de grenswaarde waaronder deze enthalpiesprongen moeten blijven.

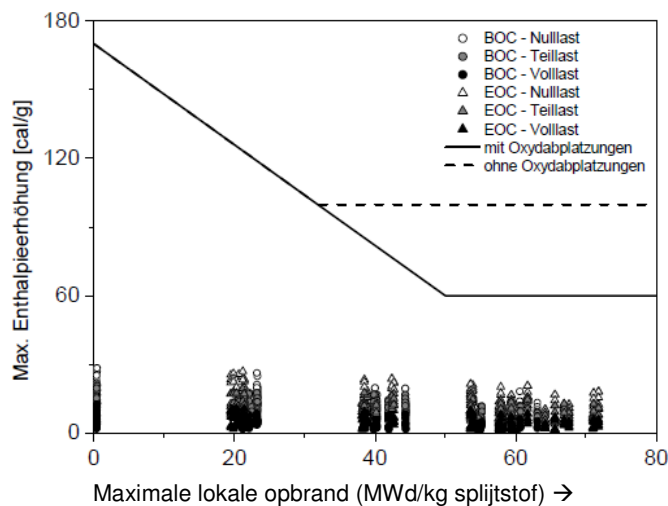


Fig. 7.6 maximale te bereiken enthalpiesprong als functie van de opbrand

Voor wat betreft de regelstaaf uitworpongevallen (het uitschieten van een regelstaaf uit de kern door het afbreken van de stomp van de regelstaafdoorvoering op het vatdeksel) heeft GRS de aanbeveling gedaan om naast het meest ongunstige geval (het uitschieten van een regelstaaf tijdens Hot Zero Power) ook andere, niet toegestane regelstaaf configuraties, te analyseren. Uit de analyse blijkt dat tijdens het uitschieten van een regelstaaf uit de kern tijdens HZP condities niet meer dan ca. 1,24 \$ reactiviteit wordt toegevoegd, wat leidt tot een enthalpiesprong van minder dan 30 cal/g. Indien men echter een situatie bedenkt waarbij de D-bank gedeeltelijk in de kern is inbewogen, i.p.v. bovenin de kern, zijn grotere reactiviteittoenames denkbaar. GRS gaat er echter van uit dat deze niet toegestane D-bank posities slechts voorkomen kunnen worden door procedurele maatregelen. Dit blijkt niet helemaal het geval; de D-bankregeling is gekoppeld aan de boorzurregeling en derhalve ook gedeeltelijk in de automatische reactorregeling opgenomen waardoor niet procedurele D-bank posities min of meer als uitgesloten kunnen worden beschouwd. Dat wil zeggen dat de kans daarop uiterst klein is, d.w.z. < 1.10⁻⁶/jaar en daarmee zonder meer als buiten-ontwerp ongeval beschouwd moet worden. Overigens is de kans op voorkomen zo klein dat dit scenario zelfs in de risicoanalyse is weggescreeend. Wanneer de D-bank door wat voor omstandigheid dan ook, gedeeltelijk wordt inbewogen zal er via TB boorzuur worden geïnjecteerd en worden vervolgens de regelstaven weer uitbewogen.

De KFD beschouwt de gekozen uitgangspunten van de analyse voldoende conservatief om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen dat desbetreffend ontwerpbasis ongeval niet leidt tot een overschrijding van de geldende veiligheidslimieten.

Aangezien regelstaaf uitworpongevallen nog steeds punt van onderzoek zijn voor wat betreft de invloed van nieuwe materialen voor splijststofomhulling en de invloed van hoge opbrand zal de KFD de ontwikkelingen op het gebied van RIA limieten (RIA = Reactivity Insertion Accident) bij hoge opbrand (> 50 MWd/kg) blijven volgen. Daarbij valt niet uit te sluiten dat de huidige RIA curve voor wat betreft het hoge opbrand gebied herzien zal worden. Daarbij wordt verwezen naar de ontwikkelingen die hebben plaatsgevonden in een aantal Europese landen (o.a. Zweden en Zwitserland) en Japan. Zie de grafiek hieronder (Bron: Fuel Safety Criteria in OECD-NEA member countries" NEA/CSNI/R(2003)10).

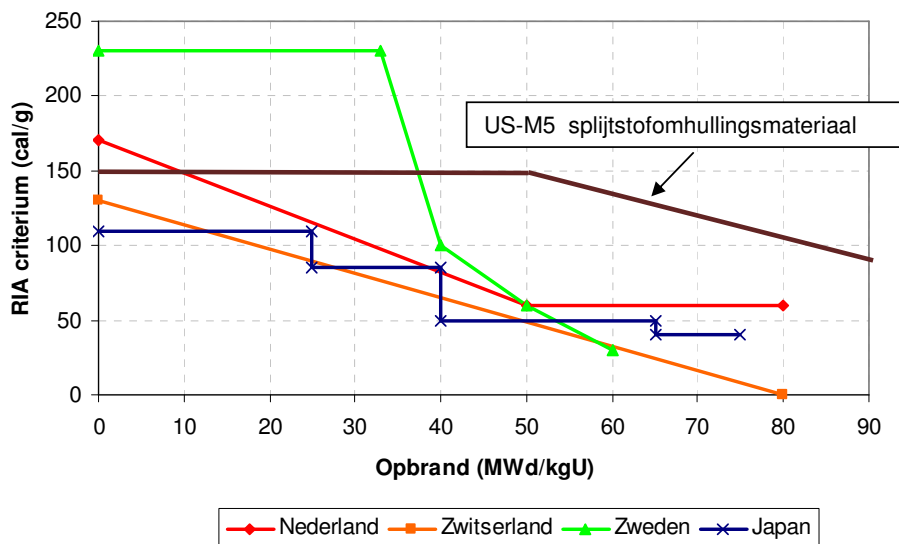


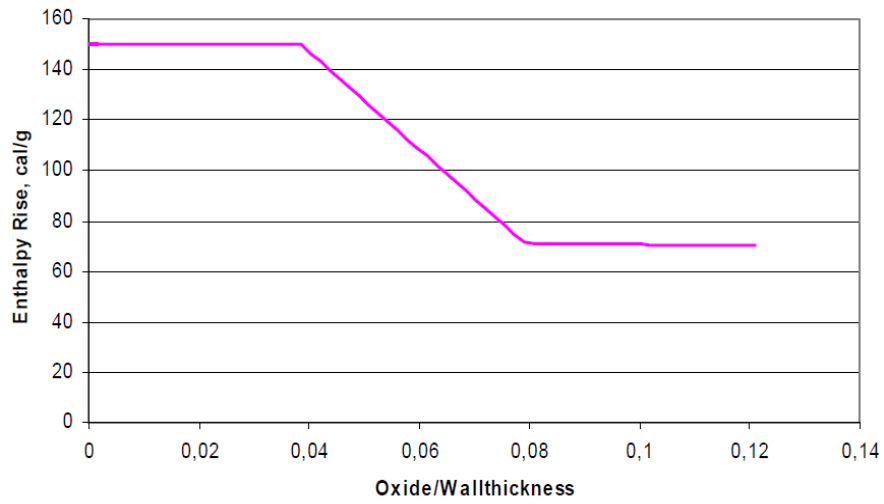
Fig. 7.7 Veiligheidscriteria m.b.t. regelstaafuitworp ongevallen in een viertal OECD-NEA lidstaten

Bij bovenstaande criteria is geen rekening gehouden met het type materiaal van de splijfstofomhulling. De Amerikaanse overheid (US-NRC) heeft dat wel gedaan en heeft een generieke curve waar niet de opbrand maar de verhouding tussen de oxidelaagdikte en de wanddikte van de splijfstofomhulling is afgezet tegen de maximaal toelaatbare enthalpietoeename bij een regelstaafuitworp ongeval. Voor M5, dat zeer goed bestand is tegen corrosie, zou dat neerkomen op een curve die aanzienlijk hoger ligt.

Dit neemt echter niet weg dat er nog steeds onzekerheden zijn m.b.t. het gedrag van MOX elementen bij hoge opbrand. Er zijn aanwijzingen dat de geringere warmtegeleidbaarheid en een iets hogere productie van splijtingsgassen in MOX-splijstof een invloed kunnen hebben op het gedrag bij regelstaafuitworp ongevallen. Met name zouden bij hoog opgebrande MOX elementen onder RIA condities eerder zgn. "pellet-clad" interacties op kunnen treden. Dit zijn mechanisch-chemische reacties tussen splijstoftablet en splijstofomhulling. Zie verder [39].

Opm.: Sterke zwellingen voegt niets toe aan het beschrijven van de oorzaak van PCI. Zeker onder RIA-condities spelen vele andere fenomenen een rol.

NRC RIA



Voor M5 komt dit neer op:

Example M5 Cladding (M5-Model)

100cal/g; 87 MWd/kg

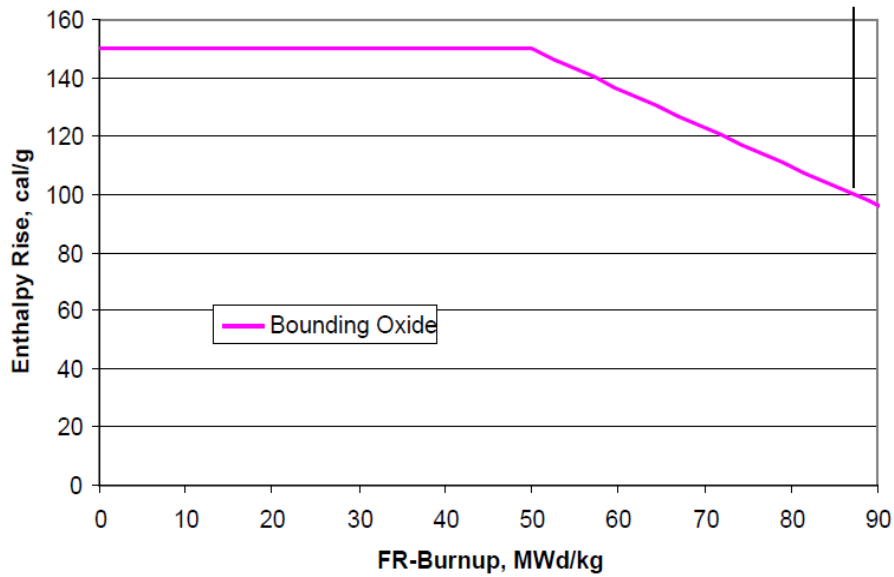


Fig. 7.8 Veiligheidscriteria VS m.b.t. regelstaaftuitworp ongevallen voor M5 splijststofomhulling materiaal.

d) Groot Koelmiddelverlies Ongeval (LB-LOCA)

Voor dit ongeval wordt een dubbelzijdige guillotinebreuk verondersteld in de hoofdkoelmiddel leiding tussen het reactorvat en een hoofdkoelmiddelpomp.

De veiligheidsgrenzen zijn:

- De splijststofomhulling temperatuur mag niet boven de 1200 °C komen.
- De oxidatiediepte mag niet meer dan 17% van de wanddikte zijn van de splijststofomhulling.
- Er mag niet meer dan 1% van het aanwezige zirconium in de totale hoeveelheid splijststofomhulling met water reageren.

Aangezien de hoeveelheid opgeslagen warmte in MOX groter is dan bij UO₂ splijststof moesten de LOCA analyse opnieuw gedaan worden. Omdat de warmtegeleiding in de splijststof geringer wordt al naar de opbrand toeneemt is de analyse voor 3 opbrandintervallen uitgevoerd, te weten:

- ≤ 40 MWd/kg splijststof
- > 40 tot ≤ 55 MWd/kg splijststof
- > 55 MWd/kg splijststof

Berekeningen laten zien dat de splijststoftemperatuur door de opgeslagen energie in de splijststof en het kortdurend onderbreken van de warmteoverdracht tot maximaal 1053 °C kan oplopen.

| Opbrand MWd/kg | Vermogensfactor splijststofstaf F _{BE} | Vermogen splijststofstaf W/cm | Maximale cladding temperatuur zonder opzwellen en barsten | | Maximale cladding temperatuur met opzwellen en barsten | | Maximale lokale oxidatie |
|-------------------|--|-------------------------------------|---|---------------|--|---------------|--------------------------------|
| | | | 1. maximum | 2. maximum | 1. maximum | 2. maximum | |
| ≤ 40 | 1.65 | 568 | 774 °C | 1053 °C | 747 °C | 1035 °C | 4.03% |
| > 40 tot ≤ 55 | 1.30 | 520 | 779 °C | 941 °C | 664 °C | 1011 °C | 3.60% |
| > 55 | 1.20 | 490 | 701 °C | 921 °C | 655 °C | 916 °C | 3.42% |

In bovenstaande tabel zijn de maximale lokale temperaturen gegeven van de splijststofomhulling van de heetste staf na ca 2.2 sec (1) en na ca. 50 sec.(2). In figuur 7.9 wordt het verloop weergegeven van de temperatuur van de splijststofomhulling bij verschillende opbrand voor zowel het geval dat de splijststofomhulling zwelt en vervolgens barst en voor het geval dat het niet gebeurt.

Direct na het begin van het ongeval zal door de sterke drukverlaging het water gaan koken. Door het filmkoken wordt de warmteafvoer sterk gereduceerd, waardoor de temperatuur van de cladding begint te stijgen en na 2 tot 3 seconden een maximum wordt bereikt, omdat in die periode de opgeslagen energie in de splijststoffabletten maatgevend is. Door de stroming van het koelmiddel door de kern vanuit het hete been via het reactorvat door de kern naar het gat in het koude been zal de warmte afvoer verbeterd worden en zal de temperatuur van de splijststofomhulling in eerste instantie met zo'n 140 °C tot 180 °C zakken. Hierna zal de temperatuur oplopen tot boven de 1000 °C gedurende de latere leeglooffase van het vat en voordat de lage druk TJ pompen voldoende debiet leveren. Afhankelijk van de veronderstelling of de splijststofomhulling opbolt en barst t.g.v. inwendige gasdruk in de splijststofstaven, zal de maximale temperatuur iets verschillend zijn.

De KFD beschouwt de gekozen uitgangspunten van de analyse voldoende conservatief om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen dat desbetreffend ontwerpbasis ongeval niet leidt tot een overschrijding van de geldende veiligheidslimieten.

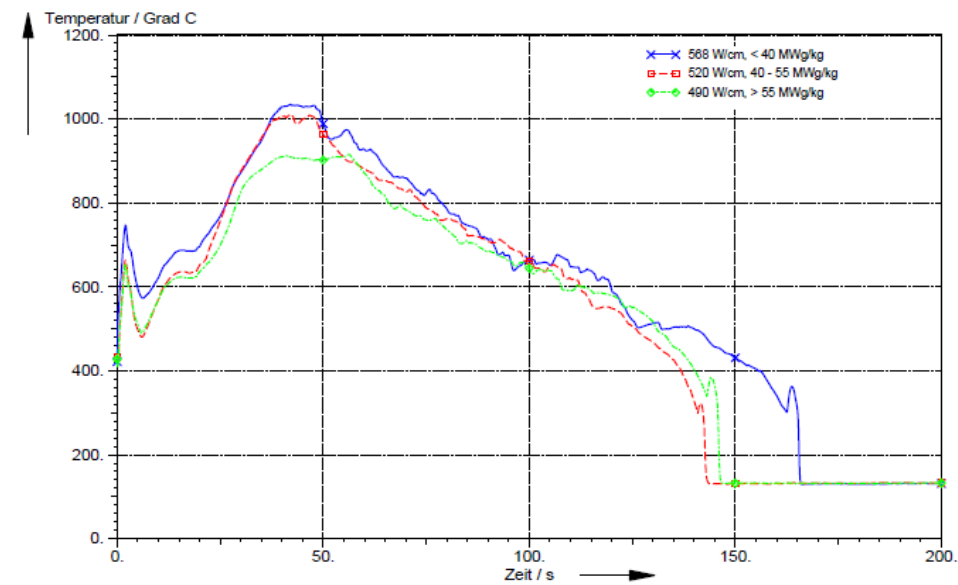
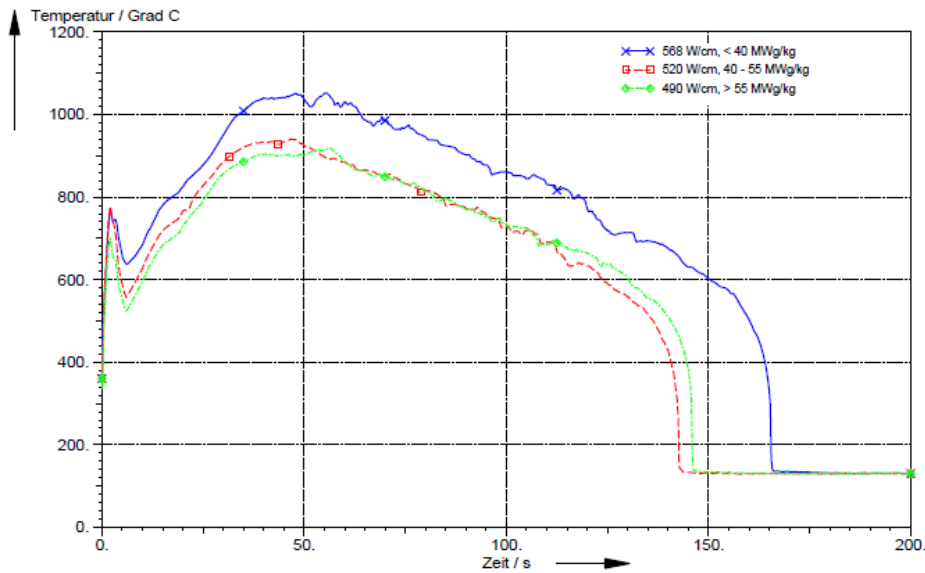


Fig. 7.9 Verloop van de temperatuur van de splijtstofomhulling (cladding) bij een groot Koelmiddel Verlies Ongeval; boven zonder opzwellen en barsten van de cladding en onder met opzwellen en barsten van de cladding

- **De invloed van opbrand op de splijtstofintegriteit tijdens LB-LOCA [40]**

De berekeningen hebben aangetoond dat tijdens een eventueel groot koelmiddellek het koelwater rondom de de splijtstof tijdelijk sterk gaat koken. Tijdens dit zogenaamde filmkoken wordt de warmteoverdracht van de splijtstof naar het koelwater belemmerd en warmt de splijtstof

tijdelijk sterk op. In sommige gevallen kan onder invloed van deze opwarming schade aan de huls om de splijtstoftabletten ontstaan, waardoor splijtingsproducten in het koelmiddel terecht kunnen komen en via het lek in het containment. Of de splijtstofomhulling wel of niet beschadigt hangt af van de mechanische eigenschappen van het omhullingsmateriaal, en die kunnen met toenemende opbrand veranderen.

De splijtstofomhulling is gemaakt van een zirkoniumlegering waarvan de atomen bij productie in een hexagonale dichte bolstapeling zijn geordend (HCP, zie figuur 7.10). Deze structuur wordt ook wel de α -fase genoemd. De α -fase blijft stabiel tot zo'n 815 °C. Bij hogere temperaturen transformeert de α -fase naar de zogenaamde β -fase, waarin de atomen kubisch ruimtelijk gecentreerd zijn (BCC, zie figuur 7.10)

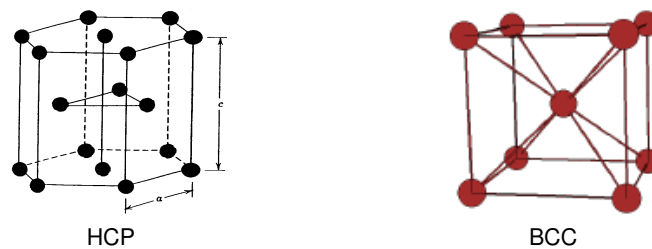


Fig 7.10 Hexagonaal dicht opeengepakt rooster HCP en kubisch ruimtelijk gecentreerd rooster BCC

Door het contact van het omhullingsmateriaal met het koelwater wordt aan de buitenzijde van de splijtstofhuls een oxidelaag gevormd, die tijdens bedrijf in dikte toeneemt. Dit heeft een afname van de hulsdikte tot gevolg. Verder komt er bij de oxidatie waterstof vrij dat gedeeltelijk oplost in de zirkonium huls. Bij grote hoeveelheden kan dat tot verbrossing van het materiaal leiden. Dit alles gebeurt onder normale bedrijfsomstandigheden en daarom wordt internationaal veel werk verzet om de gebruikte zirkoniumlegeringen zo goed mogelijk bestand te maken tegen oxidatie.

Tijdens het LB-LOCA scenario loopt de temperatuur in de splijtstof en in de huls op. Boven de 815 °C begint de transformatie van α - zirkonium naar β -zirkonium en gelijktijdig neemt de oxidehuid in dikte toe. Een deel van de zuurstof in de oxidelaag diffundeert de zirkonium in en veroorzaakt de terugtransformatie van de β -fase naar de α -fase. De zuurstof in de α -fase maakt dit materiaal brosser. In figuur 7.11 wordt de verdeling van het hulsmateriaal in de verschillende fases schematisch weergegeven.

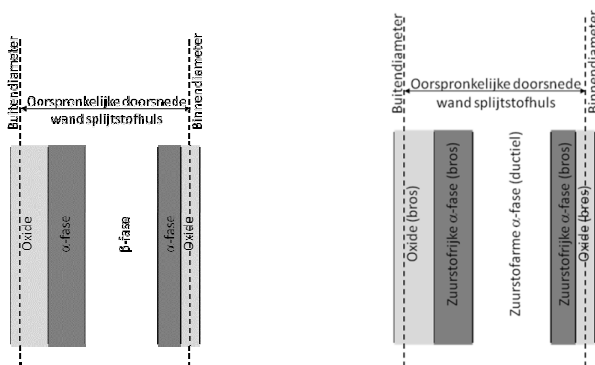


Fig. 7.11 Schematische illustratie van de verschillende lagen binnen de hulswand bij temperaturen boven de 815 °C en na de sterke afkoeling (quench).

Als nu de koeling hersteld wordt, transformeert de β -fase terug naar de α -fase –maar dan met een lagere zuurstofconcentratie- en bestaat de huls wand alleen nog uit de oxidelagen en α -zirkonium met een zuurstofrijke buitenschil en een zuurstofarm binnengedeelte. De belangrijkste verschillen met de situatie voor het wegvallen van de koeling zijn de toegenomen laagdikte van de oxide, de verhoogde zuurstofconcentratie in de α -fase en de aanwezigheid van spanningen ten gevolge van de snelle afkoeling. Al deze drie factoren zorgen voor een aanzienlijke verbrossing van de huls wand.

Bij hoge opbrand is de oxidelaag aan de buitenkant aanzienlijk dikker dan bij laag opgebrande splijtstof en is er navenant meer zuurstof opgelost in het α -fase zirkonium. Daarom bestaat voor hoog opgebrande splijtstof een grotere kans dat tijdens een LOCA de oxidelaag plus zuurstofrijke α -fase laag te dik wordt en de β -fase laag navenant te dun.

Andere nadelen van hoge opbrand zijn meer splijtingsgassen, hydridevorming en stralingsschade.

Splijtingsgassen hopen zich op in de vrije ruimte binnen de splijtstofomhullingen en in de poriën rond de kristalgrenzen van de splijtstof (grain boundaries) Bij een LOCA kunnen deze gasvormige splijtingsproducten gemakkelijk vrij komen.

Daarnaast speelt hydridevorming t.g.v. chemische reacties van zirconium met waterstof bij hogere concentraties eveneens een negatieve rol voor wat betreft de taaiheid van het materiaal. Ca. 20% van alle waterstof die ontstaat tijdens het oxidatieproces lost op in de splijtstofomhulling. Hoe hoger de opbrand, hoe meer hydridevorming.

T.g.v. de stralingsschade door de snelle neutronen (> 1 MeV) is er bij hoge opbrand een toegenomen kans op zowel materiaalbroosheid als op verminderde weerstand tegen corrosie Door de grotere hoeveelheid opgeslagen warmte (soortelijke warmte) in MOX zal tijdens een LOCA de temperatuur van de splijtstofomhulling hoger worden dan bij UO_2 splijtstof en zal de oxidatie daarom sterker zijn dan bij UO_2 .

Dat deze bedreigingen van de splijtstofomhulling van hoog opgebrande MOX-splijtstofstaven tijdens LOCA condities, ondanks de grotere hoeveelheid opgeslagen warmte en hardere neutronenstraling van MOX, voor Borssele geen al te grote rol spelen, komt omdat:

- de staafgemiddelde opbrand wordt beperkt tot maximaal 60 MWd/kg splijtstof, en
- gebruik wordt gemaakt van M5 als materiaal, en
- voldaan wordt aan de voorwaarde dat de aan het begin van deze LOCA paragraaf genoemde veiligheids grenzen niet worden overschreden.

M5 is een zirkoniumlegering die o.a. niobium bevat. M5 is tot zeer hoge opbranden zeer corrosiebestendig (corrosielaagdikte $< 10\mu\text{m}$ bij een opbrand van 70 MWd/kg). Een dunne corrosielaag zorgt er tevens voor dat er in totaal weinig zuurstof in deze laag aanwezig is waardoor er weinig zuurstof kan migreren in de buitenste laag van de splijtstofomhulling. Tevens zorgt de corrosiebestendigheid ervoor dat ook tijdens LOCA condities er weinig corrosie zal plaatsvinden en navenant weinig zuurstof wordt opgenomen en dientengevolge de zuurstofrijke α -fase laag ook dun blijft.

Het is wel zo dat indien de temperatuur van de splijtstofomhulling langdurig boven de 1000°C zou blijven, de oxidelaag af zou beginnen te brokkelen. In dat geval vindt opnieuw oxidatie plaats met als gevolg een aanzienlijke waterstofopname. Hierdoor neemt de verbrossing van het materiaal verder toe. Door de capaciteit van de kernnoodkoelsystemen in Borssele treedt deze situatie echter niet op.

e) **Verlies koelwaterdebiet gevolgd door falen reactorsnelafschakeling (ATWS)**

Voor dit ongeval wordt een uitval van de hoofdvoedingwaterpompen aangenomen gevolgd door een afschakeling van de turbines en een falen van de reactorsnelafschakeling (scramfalen).

De veiligheidsgrenzen zijn:

- Langdurige subkritikaliteit door boorzurinjectie.
- Waarborgen dat de warmte kan worden afgevoerd.
- Primaire druk nooit boven de limiet van 1.3 maal de ontwerpdruk van 175 bar --> 238 bar.
- Secundaire druk nooit boven de limiet van 1.3 maal de ontwerpdruk van 90 bar --> 127 bar.

Ten gevolge van uitval van de hoofd voedingwaterpompen, daalt het secundaire niveau in de stoomgeneratoren snel. Als gevolg daarvan volgt een afschakeling van de turbine en openen de turbine omloopkleppen waardoor de stoom rechtstreeks naar de condensor wordt gevoerd. De reserve voedingwaterpompen worden gestart. Ten gevolge van de afschakeling van de turbine wordt er minder energie afgevoerd waardoor, ondanks het openen van de omloopkleppen, de stoomdruk en de verzadigingstemperatuur secundairzijdig stijgen, alsmede de primaire temperatuur en druk. Door de negatieve koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt loopt het reactorvermogen terug. Aangezien zowel druk als temperatuur omhoog gaan, blijft de dichtheid van het primaire koelmiddel min of meer gelijk bij toenemende temperatuur. Hierdoor speelt de spectraalcoëfficiënt Γ_{TS} een rol van betekenis. Door de aangenomen conservatieve waarde van +10 pcm/K daalt de reactiviteit en daarmee het vermogen minder snel. Ondanks activering van de drukhouder sproei en de reductie in reactorvermogen blijft de druk stijgen. Bij een grenswaarde van 167 bar. wordt het signaal reactorsnelafschakeling bereikt. Als door scramfalen de staven niet vallen wordt het signaal ATWS gegeven en stoppen de hoofdvoedingpompen, worden de twee volumeregelpompen (TA) en beide boorzur injectiepompen (TB) gestart. Door de grote temperatuurstijging stijgt het niveau in de drukhouder zo sterk dat de drukhouder bijna vol met water is. De druk blijft stijgen tot bij 177.7 bar. de eerste grenswaarde wordt bereikt voor het openen van een veiligheidsklep. Omdat de temperatuur wel verder blijft stijgen i.t.t. de druk, worden er na ruim 2 minuten stoombellen in de kern gevormd. Hierdoor komen er schommelingen in de reactiviteit, het reactorvermogen en de temperatuur en koelmiddeldruk. Dit komt omdat de stoombellen de reactiviteit doen verminderen (negatieve koelmiddeldichtheid (void) coëfficiënt). Tegelijkertijd stijgt door de stoomontwikkeling de primaire druk en het debiet door de kern (opdrijfkrachten bellen; op gang komen stroming t.g.v. openen primaire veiligheidsklep) waardoor de stoombellen weer verdwijnen. Door het toenemende debiet wordt de koelmiddeltemperatuur weer verlaagd waardoor de reactiviteit en daardoor het reactorvermogen weer toeneemt en er weer stoombellen worden gevormd. In fig.7.12 wordt het vermogen van de reactor, de totale reactiviteit en de druk van het primaire circuit als functie van de tijd weergegeven. In figuur 7.13 wordt de temperatuur van het primaire koelmiddel en de kookafstand in het primaire koelmiddel gedurende het verloop van de ATWS weergegeven. Wat betreft de figuur aangaande de kookafstand is af te lezen dat tussen de 100 en 450 sec. de kookafstand 0 bar is en er daadwerkelijk koken plaatsvindt.

Ten gevolge van de boorzurinjectie wordt de reactor na ca. 10 minuten permanent onderkritisch.

De KFD beschouwt de gekozen uitgangspunten van de analyse voldoende conservatief om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen dat desbetreffend ontwerpbasis ongeval niet leidt tot een overschrijding van de geldende veiligheidslimieten.

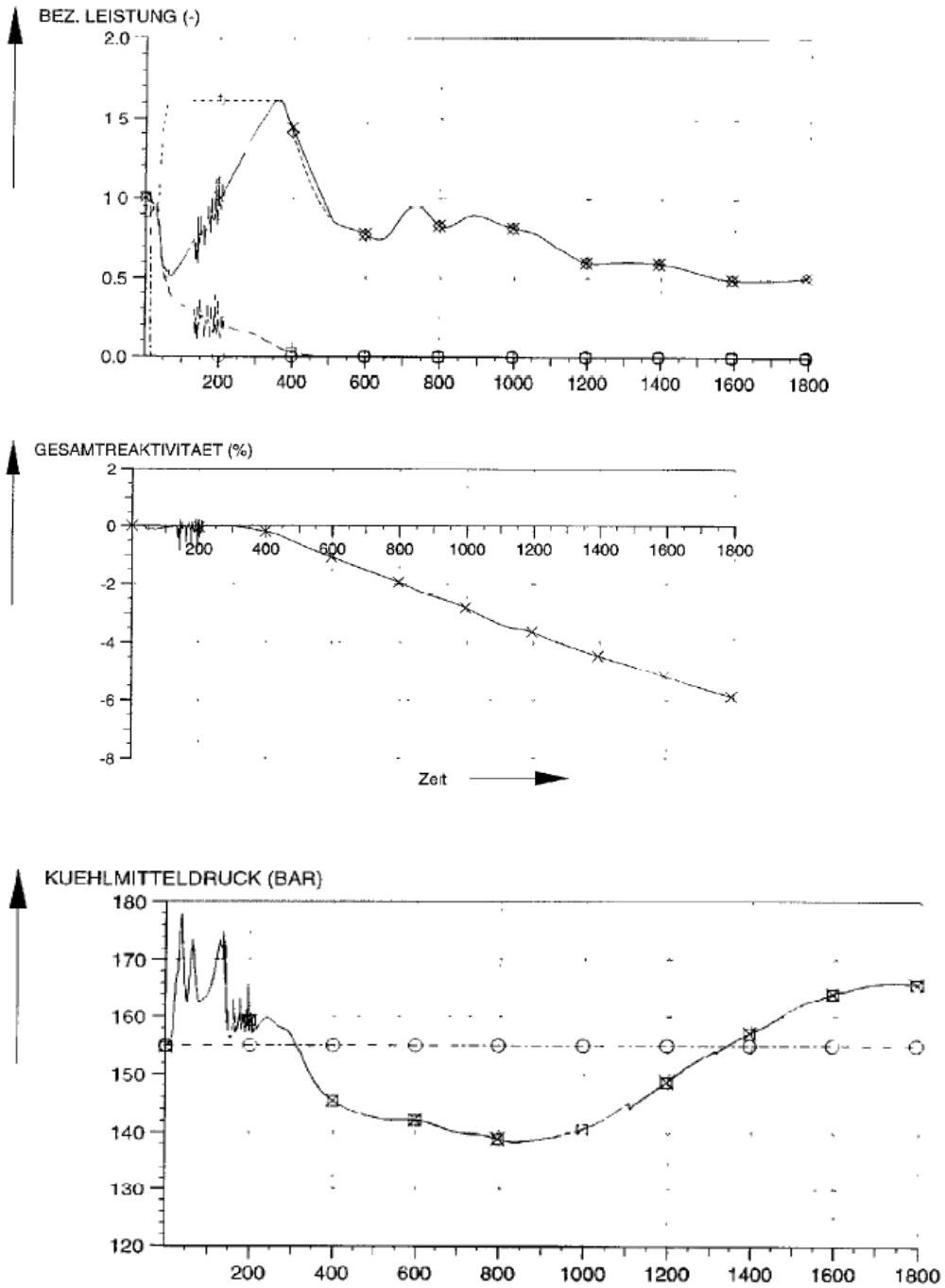


Fig. 7.12 het verloop in de tijd van het vermogen van de reactor, de totale reactiviteit en de primaire druk gedurende een ATWS ongeval. De tijd is in seconden.

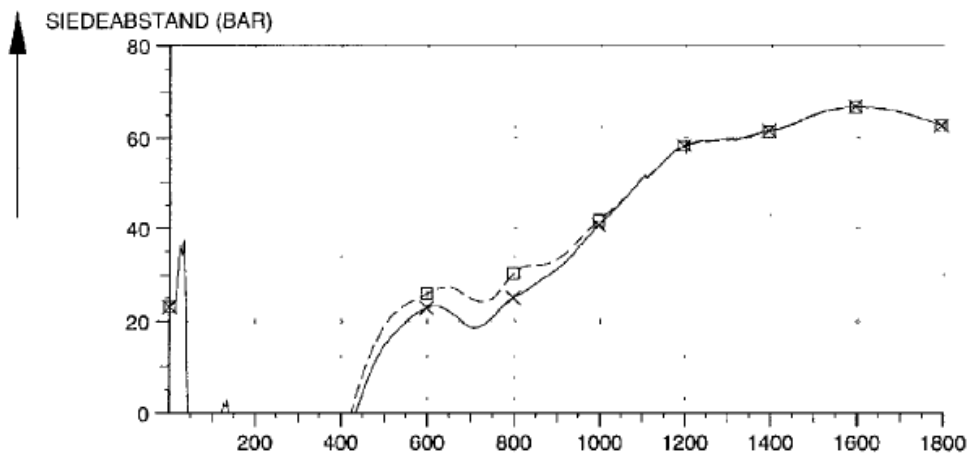
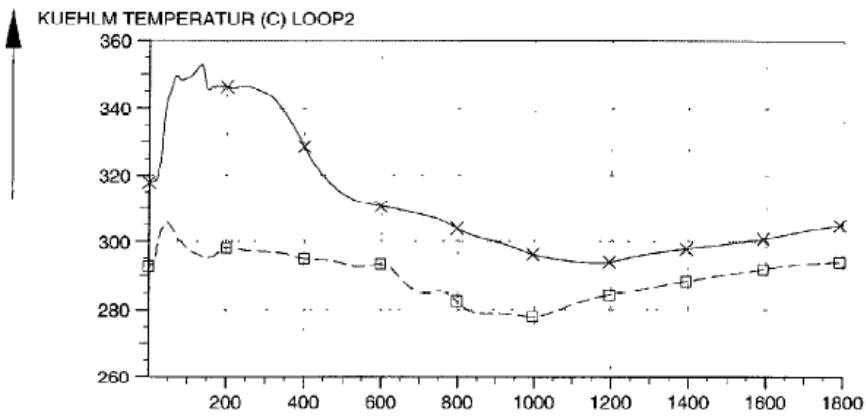
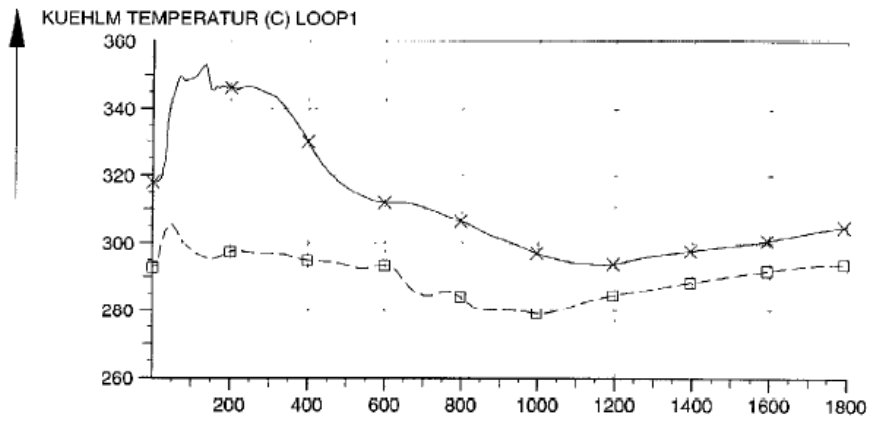


Fig. 7.13 Temperatuur primaire koelmiddel (°C) en kookafstand (bar) gedurende ATWS. Tijd is in seconden,

8. Radiologische ongevalanalyses

Voor de radiologische analyses dient een aantal omhullende gepostuleerde begingebourtenissen (ontwerpgevalen) te worden gekozen, waarbij op conservatieve wijze aangetoond moet worden dat ondanks het optreden van zo'n ongeval toch aan de wettelijke dosislumieten, zoals vermeld in het Besluit Kerninstallaties, Splijststoffen en Ertsen (BKSE) Art 19, wordt voldaan.

De resultaten van de radiologische analyses van een UO₂- kern met 4.45% verrijkt uranium van natuurlijke oorsprong (ENU = Enriched Natural Uranium), een c-ERU-kern met 4.65% verrijkt gerecycled uranium en een 40% MOX kern zijn in onderstaande tabel weergegeven [31 t/m 33].

| Veronderstelde representatieve begingebourtenissen | | 4.45 % verrijkt ENU | | MOX | | 4.65 % verrijkt c-ERU | | Dosislumieten | |
|--|---|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| | | Effectieve dosis (mSv) | Schildklier dosis (mSv) | Effectieve dosis (mSv) | Schildklier dosis (mSv) | Effectieve dosis (mSv) | Schildklier dosis (mSv) | Effectieve dosis (mSv) | Schildklier dosis (mSv) |
| 1.5.1 | Langdurige uitval van de secundaire hoofdkoeling bij bedrijfslekkage stoomgeneratorpijpen | 0.024 | 0.466 | 0.025 | 0.475 | 0.024 | 0.466 | 0.4 | 500 |
| 7.2.2 | Onbedoeld openen en open blijven primaire drukafslaatklep | 0.0008 | 0.0143 | 0.00082 | 0.147 | 0.00081 | 0.014 | 4 | 500 |
| 7.2.3 | Breuk hoofdkoelmiddel-leiding | 0.684 | 4.5 | 0.695 | 4.58 | 0.696 | 4.51 | 40 | 500 |
| 7.3.2.2 | Bezwijken stoomgeneratorpijpen met kortstondige noodstroom-situatie | 0.19 | 3.4 | 0.19 | 3.48 | 0.19 | 3.41 | 4 | 500 |
| 7.4.2 | Lekkage meetleiding buiten veiligheids-omhulling | 0.12 | 2.42 | 0.13 | 2.47 | 0.12 | 2.42 | 4 | 500 |
| 8.2 | Lekkage in een leiding van het afgassysteem | 0.0099 | 0.0111 | 0.0100 | 0.011 | 0.010 | 0.012 | 0.04 | 500 |
| 8.4.1 | Splijstof hanterings-ongeval | 0.0097 | 0.191 | 0.0099 | 0.196 | 0.0090 | 0.191 | 0.4 | 500 |
| 9.1.2 | Gevolgen van een aardbeving op het reactorhulgebouw | 0.20 | 0.717 | 0.20 | 0.733 | 0.20 | 0.717 | 4 | 500 |

- De keuze van de diverse gepostuleerde begingebourtenissen is geheel volgens de stand der techniek uitgevoerd.
- De radiologische analyse van een klein lek in het primaire koelsysteem en groot LOCA zijn volgens de stand der techniek uitgevoerd.
- De berekening van de kerninventaris van de diverse MOX kernen en c-ERU kernen is volgens stand der techniek uitgevoerd.
- De radiologische analyse van een lek in een aan het primaire systeem hangende meetleiding buiten de veiligheidsomhulling is volgens de stand der techniek uitgevoerd.
- De radiologische analyse van een lekkage in een leiding van het afgassysteem is volgens de stand der techniek uitgevoerd.
- De radiologische analyse van een door een aardbeving leeggelopen verdamperconcentraat opslagtank van het hoofdkoelmiddel reinigingssysteem in het reactor hulgebouw is volgens stand der techniek uitgevoerd.
- De berekening van de gevolgen van een Stoomgenerator pijpbreuk analyse zijn volgens stand der techniek uitgevoerd.

- De berekening van het splijtstofhanteringsongeval is volgens stand der techniek uitgevoerd. Het is wel aan te bevelen om bij de volgende integrale herziening van het veiligheidsrapport in het kader van het project "10EVA13" de bestralingsduur van 2.5 vollast jaren te verhogen tot 4 vollast jaren, om ook voor wat betreft de langlevende nucliden aan de conservatieve kant te zitten. Dit geldt ook voor de huidige UO₂ kernen met 4.4% verrijkte splijtstof en de gemiddeld hogere opbrand dan eertijds.

De KFD is het eens met de conclusies dat:

1. De keuze van de diverse gepostuleerde begingebourtenissen voldoende afdekkend is voor het hele spectrum van mogelijke storingen en ongevallen binnen de ontwerpbasis waarbij lozingen kunnen plaatsvinden en dat de bijbehorende analyses geheel volgens de stand der techniek zijn uitgevoerd.
2. De analyses voldoende conservatisme bevatten om zeker te stellen dat de dosislimieten bij de hier beschouwde gepostuleerde begingebourtenissen niet worden overschreden.

9. Mechanisch ontwerp van de splijtstofelementen

Ten gevolge van de snelle neutronen flux afkomstig van het splijtingsproces zet het M5 zirconium metaal van de geleidingsbuizen voor de regelstaafvingers in de splijtstofelementen uit. Omdat bij plutonium een groter aandeel snelle neutronen vrijkomt bij splijting, is het proces sterker dan bij UO_2 . Waar UO_2 splijtstofelementen grenzen aan MOX splijtstofelementen kunnen er verschillen optreden in de snelle neutronen flux tussen de zijde van het UO_2 element die aan het MOX element grenst en de meest verafgelegen zijde van het UO_2 element. Hierdoor zullen de twee zijden in een verschillende mate uitzetten waardoor het element mogelijk kan kromtrekken. Ondanks het feit dat de groeisnelheid zeer gering is ($0,025\% / 1 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$ voor fluenties $< 5 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$ oplopend tot $0,1\% / 1 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$ voor fluenties boven $5 \cdot 10^{21} \text{ n/cm}^2$) is kromtrekken resulterend in een afwijking van 3.5 mm ter hoogte van het middenvlak van desbetreffend splijtstofelement niet uit te sluiten.

Daarom beveelt KFD, mede op grond van GRS-advies, een monitoringprogramma aan voor de splijtstofelementen t.a.v. eventueel kromtrekken. KFD zal met EPZ nadere afspraken maken hoe dit programma er uit moet komen te zien.

Bij normaal bedrijf zetten de splijtstoftabletten uit; voor MOX splijtstof geldt dat sterker dan voor UO_2 splijtstof. Door het uitzetten van de tabletten kan er bij hoge opbrand vanuit de binnenzijde een spanning op de splijtstofomhulling komen te staan. Door deze zwelling van de splijtstof ontstaat er contact tussen splijtstof en splijtstofomhulling, waardoor de splijtstofomhulling gestaag gaat uitzetten door de dientengevolge optredende kruip. Deze kruip reksnelheid (ook wel plastische reksnelheid genoemd) is een functie van de temperatuur van de splijtstofomhulling, de snelle neutronenflux ($> 1 \text{ MeV}$) en de tangentiële spanning.

$$\varepsilon = a \cdot e^{-b/T} \cdot \phi^{0.85} \cdot \sinh(c\sigma),$$

Waar: ε = de plastische reksnelheid (1/uur)
a, b en c = constanten,
T = de temperatuur (K) van de splijtstofomhulling,
 ϕ = de snelle neutronenflux (neutronen/cm²s), en
 σ = de tangentiële spanning (MPa).

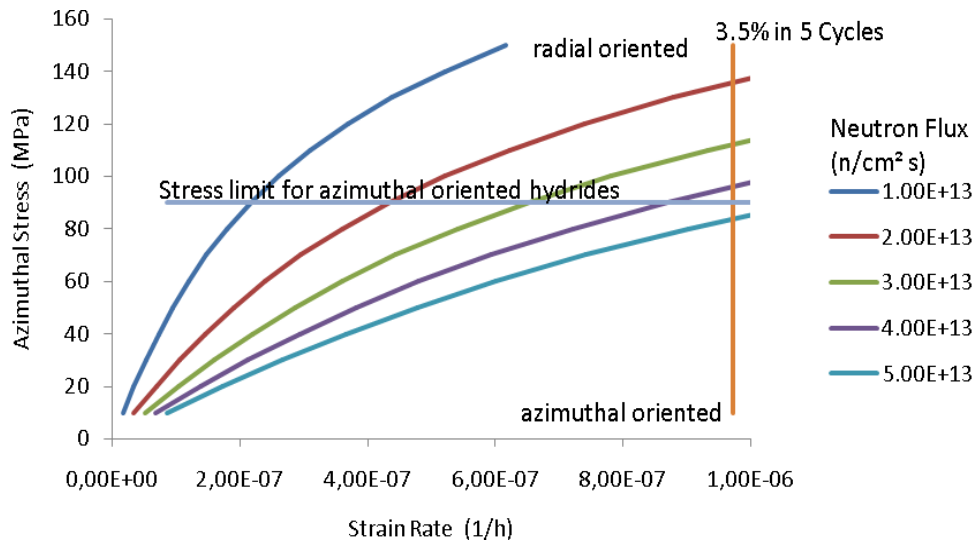
De afhankelijkheid van de snelle neutronenflux is, zoals hierboven al vermeld ten gevolge van de rek in de lengtes van de splijtstofstaven. Deze ontstaat omdat de kleine defecten aan de grenzen van de hexagonale kristalroosters uitgroeien tot zeer kleine holtes als gevolg van het neutronenbombardement. De afhankelijkheid van de temperatuur komt omdat er al bij temperaturen in de buurt van de halve smelttemperatuur (in graden K uitgedrukt) er kruip in het materiaal op kan gaan treden wanneer er een belasting op dat materiaal staat.

Om zeker te stellen dat er geen schade t.g.v. kruip van de splijtstofomhulling ontstaat zijn er limieten gesteld aan de maximale plastische rek van de splijtstofomhulling. Aangezien de bestaande limiet van 2,5% voor de equivalente plastische rek voor UO_2 splijtstof door MOX bij hoge opbrand ($> 70 \text{ MWd/kg}$ splijtstof) kan worden overschreden, heeft AREVA aangetoond dat zelfs een hogere limiet van 3,5% voor M5 materiaal toch voldoende waarborg geeft dat er geen schade optreedt. Door de t.g.v. de uitzetting van de splijtstoftablet ontstane spanningen in de splijtstofomhulling, kan er bij een tangentiële spanning boven 90 MPa een heroriëntatie van de in de buitenzijde aanwezige hydriden plaatsvinden van een oriëntatie evenwijdig aan het oppervlak (tangentiële richting) van de splijtstofomhulling naar een oriëntatie loodrecht daarop (radiale richting). Deze heroriëntatie leidt tot een reductie van de sterkte van het materiaal [39, 40]. De heroriëntatie is sterk afhankelijk van de hoeveelheid opgesloten waterstof in het metaal van de splijtstofomhulling. AREVA heeft aangetoond dat de hoeveelheid waterstof die in het materiaal van de splijtstofomhulling opgenomen is, zelfs bij hoge opbrand heel gering is; zeker

onvoldoende voor een heroriëntatie van de hydriden. Tevens heeft AREVA aangetoond dat de maximale spanning in de orde van 20 MPa ligt bij een typische plastische reksnelheid van $5 \cdot 10^{-7}$ /uur voor hoge opbrand. Deze waarde ligt ver beneden de waarde van voornoemde 90 MPa.

Alhoewel GRS het niet oneens is met bovenstaande bewering, blijft GRS bedenkingen houden tegen de verhoging van de limiet van 2,5% rek naar 3,5% rek. Met name omdat acceptatie van een 3,5 % plastische rek een acceptatie inhoud van een veel grotere plastische reksnelheid van $9,5 \cdot 10^{-7}$ /uur. Omdat deze kwestie eigenlijk niet speelt voor het opbrandgebied dat nu middels een voorschrift beperkt wordt tot ≤ 60 MWd/kg splijtstof, stelt de KFD voor om aan het bestaande voorschrift betreffende de kwalificatie-eis voor een opbrand tussen de 60 en 65 MWd/kg splijtstof een extra voorschrift toe te voegen. Zie H.16 punt 5.

Fig. 9.1 Relatie tussen tangentiële spanning en reksnelheid als functie van de neutronenflux.



10. Invloed neutronenspectrum MOX op vatwand reactor

Omdat het neutronenspectrum van MOX harder is dan van UO_2 splijtstof, kan de neutronenverbrassing van de wand van het reactorvat een issue zijn. De berekeningen laten zien dat de snelle flux zo'n kleine 20% groter is ingeval van een evenwicht MOX-kern wanneer deze vergeleken wordt met de gemiddelde UO_2 -kern van de afgelopen 3 jaar. Met een gemiddelde opbrand van 38 Mwd/kg splijtstof in de MOX-kern (evenwichtskern) is de gemiddelde toename van de snelle flux ter hoogte van de binnenkant van de vatwand (liner) 17%. Dit verschil varieert afhankelijk van de richting. Op sommige plaatsen staan de MOX elementen dichter bij de vatwand dan op andere plaatsen. Geïntegreerd over een totale levensduur van de centrale van 55 jaren vol vermogen levert dit een toename van de fluentie van $3.22 \cdot 10^{19}$ (geen MOX toepassing) tot $3.40 \cdot 10^{19}$ neutronen/cm² (met MOX toepassing). Door gebruik te maken van andere computercodes kwam GRS tot een iets hogere waarde, n.l. $3.50 \cdot 10^{19}$ neutronen/cm². Deze waarde komt in dat geval net op de ontwerpwaarde van het reactorvat, eveneens $3.5 \cdot 10^{19}$ n/cm². In figuur 10.1 is het verloop van de snelle neutronenflux te zien (> 1 MeV) in radiale richting ter hoogte van het middenvlak van de kern. Uit deze figuur blijkt dat de snelle neutronenflux aan de binnenkant van het reactorvat ca. $2 \cdot 10^{10}$ n/cm² seconde is. In figuur 10.2 is het verloop van de snelle neutronen fluentie te zien als functie van het aantal vol vermogen reactor jaren. Aangezien het convenant over de restlevensduur van Borssele een sluitingsdatum van 31-12-2033 behelst, is de totale levensduur van de centrale uitgedrukt in jaren vol vermogen geen 55 jaar maar 52 jaar. Hierdoor wordt de marge tot de ontwerpwaarde wel iets ruimer.

Zodra de gemiddelde opbrand beduidend onder de 38 Mwd/kg splijtstof uitkomt (bijv. door 3 cycli met elk 16 MOX elementen i.p.v. 4 cycli met 12 elementen in te zetten) of Borssele significant gaat afwijken van de huidige praktijk van de zgn. "Low Leakage Kern" dienen de berekeningen van het effect van die nieuwe situatie op de snelle neutronen fluentie (> 1 MeV) opnieuw te worden uitgevoerd. Om deze veranderingen in de voornoemde invloeden op de verdere fluentie en daarmee de levensduur van het reactorvat te beperken wordt een voorschrift dienaangaande voorgesteld (zie hoofdstuk 17)

Fig. 10.1 Verloop van de neutronenflux met een energie > 1 MeV in radiale richting vanaf de kern tot in het beton van het biologische schild

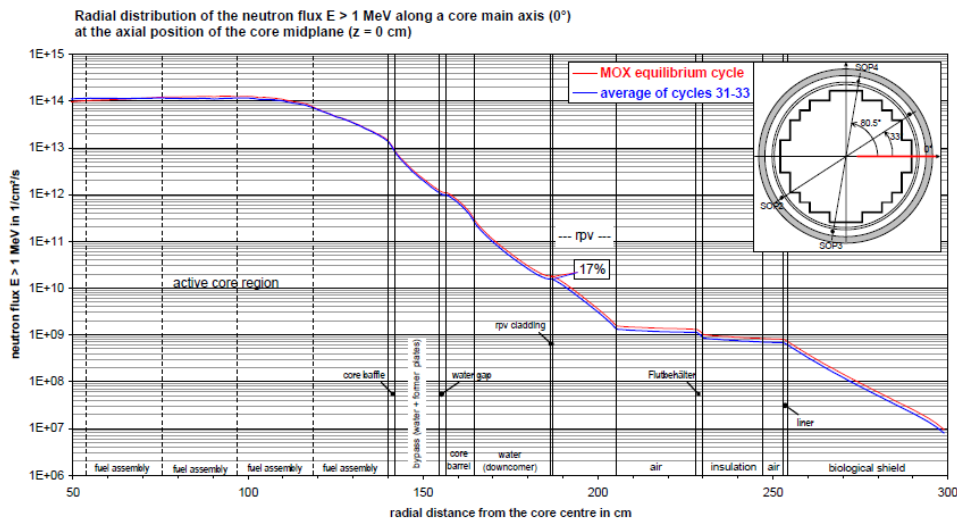
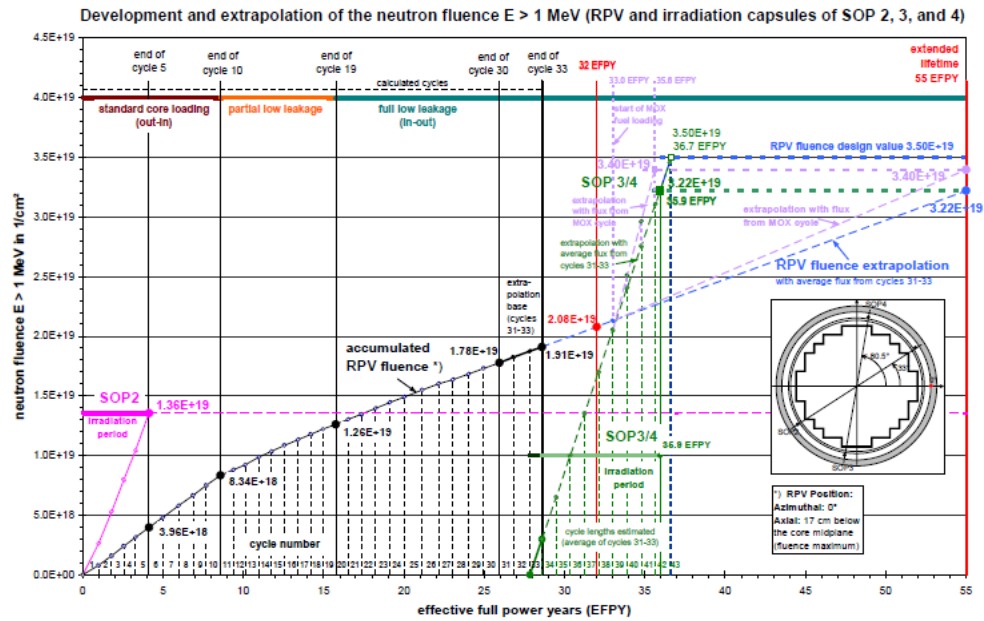


Fig. 10.2 Neutronenfluentie van de neutronen met een energie > 1MeV als functie van het aantal vol vermogen reactorjaren



11. Vervalwarmte

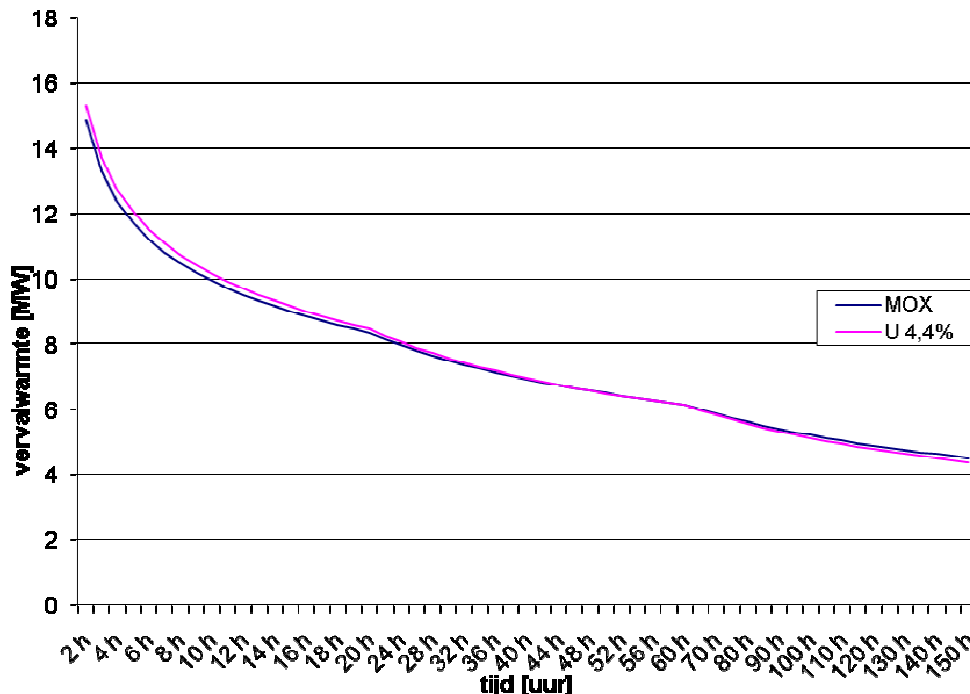
Voor de berekening van de vervalwarmte is voor een MOX kern uitgegaan,

- voor wat betreft de MOX elementen, van 4 cycli van 350 dagen met een inzet van 12 MOX elementen per cyclus, en
- voor wat betreft de UO₂ splijtstofelementen, van 5 cycli van 350 dagen met een inzet van respectievelijk 16, 16, 16, 16, 9 elementen per cyclus.

Voor de bijbehorende vermogensfactoren is voor de MOX elementen voor de 4 cycli resp. 1.28, 1.31, 1.20, en 0.56 aangenomen en voor de UO₂ elementen voor de 5 cycli resp. 1.18, 1.29, 1.10, 0.5 en 0.45 aangenomen. Eveneens is er voor de duur van de splijtstofwisselstop geen tijd in rekening gebracht, d.w.z. 0 dagen. De berekeningen laten zien dat de vervalwarmte van een MOX kern 1 sec na de scram ca. 5% lager ligt dan die van een UO₂ kern; na 46 uur is dit verschil teruggelopen tot 0%. In onderstaande figuur is de vervalwarmte van een 40% MOX evenwichtskern en een 4.4% UO₂ evenwichtskern (0 tot 18 MW) uitgezet als functie van de tijd (0 tot 150 uur).

Uit de berekeningen die GRS met een ander programmapakket heeft uitgevoerd komen ongeveer dezelfde waarden, alleen liggen de waarden van GRS categorisch enkele procenten lager dan die door AREVA zijn uitgevoerd. Hiermee is naar mening van de KFD voldoende aangetoond dat alle analyses waarbij vervalwarmte een rol speelt voor wat betreft dat aspect adequaat zijn uitgevoerd. In het hoofdstuk: `Ingebrachte zienswijzen` wordt nog ingegaan op het effect van de lagere vervalwarmte van MOX gedurende de eerste 46 uur.

Uit de berekeningen van GRS blijkt dat de vervalwarmte afkomstig van actiniden bij MOX splijtstofelementen is toegenomen t.o.v. die van UO₂ splijtstofelementen. Aan de andere kant is de vervalwarmte afkomstig van Cesium-134 een factor twee kleiner bij MOX dan bij UO₂.



12. Risico's voor de bevolking (resultaten PSA niveau-3)

Wettelijk zijn er limieten gesteld aan de mogelijke optredende stralingsrisico's bij buitenontwerpongevallen van een kernenergiecentrale (Bkse, Art 18).

Dat de analyses van de PSA-3 voor MOX en c-ERU opnieuw uitgevoerd moesten worden, is het gevolg van het feit dat de inventaris aan splijtingsproducten voor een MOX kern dan wel een c-ERU kern anders is dan die van de traditionele UO_2 kern. Omdat de splijtingsopbrengst van Pu-239 anders is dan die van U-235 en omdat de kernsamenstelling van een MOX evenwichtskern verschillend is van een UO_2 kern, is ook de opbrand van de MOX evenwichtskern en daarmee kerninventaris aan splijtingsproducten voor beide kernen verschillend.

In de volgende figuur is de splijtingsopbrengst van Pu-239 en U-235 voor thermische neutronen weergegeven. Hieruit is af te lezen dat Pu-239 met name een hogere splijtingsopbrengst heeft van de isotopen met een massagetal tussen de 100 en 125.

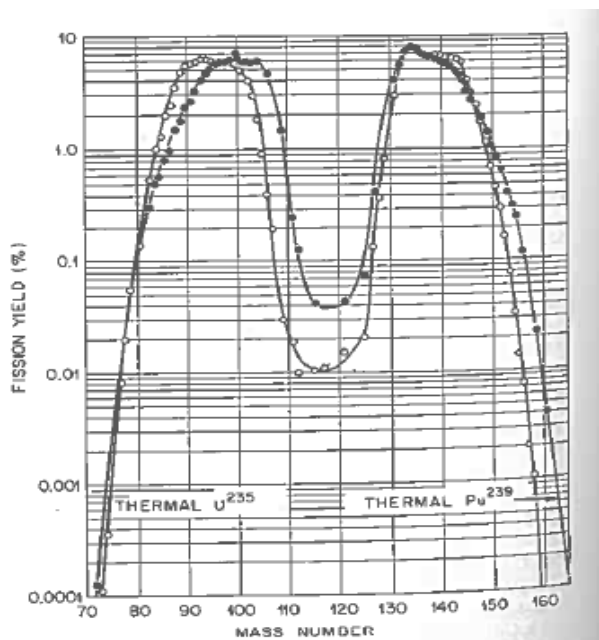


Fig. 12.1 Splijtingsopbrengst Pu-239 en U-235

Omdat het enige verschil in de drie analyses de kerninventaris aan splijtingsproducten is, kan duidelijk de invloed van de verschillende inventarissen getoond worden. Ondanks de verschillen die bovenstaande figuur doet vermoeden, zijn de verschillen in de uitkomsten niet zo groot. Dit komt doordat voor de gebruikte kerninventarissen gebruik is gemaakt van gedetailleerde opbrandberekeningen waarbij voor de drie respectievelijke evenwichtskernen voor zowel BOC als voor EOC voor elk splijstofelement de gemiddelde opbrand is bepaald. Dezelfde uitgangspunten die bij de berekening van de vervalwarmte zijn gebruikt voor wat betreft:

- het aantal dagen (350) dat de reactor vol vermogen draait,
- de vermogensfactoren,
- de duur van de splijstofwisselstop,
- het aantal verse splijstofelementen per cyclus, etc. ,

en conservatief genoeg om afdekkend te zijn voor alle mogelijke cycli, zijn in deze opbrandberekeningen toegepast.

In onderstaande tabel wordt het individuele overlijdensrisico op 350 m (buiten de inrichting) gegeven voor zowel de kritieke groep (eenjarige kinderen) als voor volwassenen door buitenontwerpongevallen bij een 4.4 % ENU kern, een c-ERU kern en een MOX-kern.

| Individueel risico ENU evenwichtskern | | Individueel risico c-ERU evenwichtskern | | Individueel risico MOX evenwichtskern | |
|---------------------------------------|-------------|---|-------------|---------------------------------------|-------------|
| Kritieke groep | Volwassenen | Kritieke groep | Volwassenen | Kritieke groep | Volwassenen |
| 2.0 E-8 | 9.6 E-9 | 1.98 E-8 | 9.75 E-9 | 2.0 E-8 | 1.0 E-8 |

Ook voor het groepsrisico zijn geen duidelijke verschillen te zien tussen een situatie waarbij wordt uitgegaan van een ENU kern, dan wel een c-ERU kern, dan wel een MOX kern.

Wel moet hierbij de volgende kanttekening geplaatst worden:

- Alhoewel in [31 t/m 33] , en derhalve het MER, geen gebruik is gemaakt van het laatste bevroren model van de PSA (status 2009; deze was ten tijde van de analyse nog niet gereed) voor wat betreft de frequenties van de brontermen, is dit acceptabel omdat alle frequenties van de brontermgroepen in het hier gebruikte model gelijk dan wel groter zijn dan diezelfde brontermgroepen in het bevroren model. De hier gepresenteerde resultaten zijn derhalve als conservatief te beschouwen.

De analyse van de radiologische gevolgen van buiten-ontwerpongevallen is, gegeven de resultaten van de eerder uitgevoerde PSA-1 en PSA-2, geheel volgens stand der techniek uitgevoerd volgens de daartoe geldende richtlijn (Richtlijn niveau-3 PSA, ECN-C-93-057 (1993)).

13. Wijzigingen in ontwerp en procedures t.g.v. invoering van MOX

- Om langdurige subkritikaliteit te waarborgen dient een wijziging te worden doorgevoerd in de boreersystemen van de kernenergiecentrale door gebruik te maken van verrijkt boor. D.w.z. dat het percentage B-10 wordt verhoogd van 19.78% in natuurlijk boor naar 32%.
- In vergelijking met UO₂ elementen moeten MOX elementen in het algemeen 1 a 2 jaar langer in het Splijstof opslag Bassin (SOB) afkoelen alvorens ze kunnen worden afgevoerd.
- Door de grotere hoeveelheid vervalwarmte van MOX na 46 uur is de tijd dat de gehele kern kan worden ontladen na afschakeling toegenomen tot 150 uur.
- Door het initiële Pu, U-234 en U-236 in MOX zijn verse MOX elementen actiever dan verse UO₂ elementen. Daarom worden er hogere eisen gesteld aan het transport van verse splijstof. Daarbij komt dat door de aanwezigheid van plutonium de transporten in een strengere beveiligingsklasse vallen.
- Door de hogere activiteit van MOX zal de werkwijze voor het ontladen van de splijstofcontainer en het laden van de MOX elementen in de kern ook iets aangepast worden.
- Er zullen ook enige instelwaarden in het reactorregelsysteem moeten worden aangepast. Informatie hierover ontbreekt nog.

Voor wat betreft de stralingsbeschermingsaspecten betreffende het hanteren van verse MOX-splijstofelementen wordt een apart vergunningsvoorschrift voorgesteld [zie H. 17 punt 13] met daarin speciale aandacht voor opleiding- en trainingsaspecten aangaande dat hanteren van deze splijstofelementen.

In [50] is onderzocht of de verhoging van de B-10 verrijkingsgraad alle gevallen afdekt voor wat betreft de directe beschikbaarheid van boorzuur mocht dat onverwijld nodig zijn. Met name direct na opstart, wanneer de reactor kritisch is gemaakt, is er ondanks dat er boorzuur wordt onttrokken aan het primair systeem door het verdunningsproces (van 2300 ppm naar de hoeveelheid die nodig is om de reactor kritisch te maken; d.w.z. 1037 ppm bij BOC, 0 vollast dagen, Xe-vrij; L+D bank 10 cm ingestoken en 306.1 °C) nog maar weinig boorzuur in de voorraadtanks over. Dat komt doordat het meeste uit het primaire water onttrokken boorzuur zich nog in de zgn. verdampers bevindt. Het kost 16 uur om weer in de juiste concentratie van 21000 ppm voor opslag in de voorraadtanks te komen. Er zit direct na de opstart nog maar 2710 kg geboreerd water in de voorraadtanks met een concentratie van 21000 ppm boorzuur. De maximale hoeveelheid na ca. 16 uur indampen bedraagt 15.590 kg geboreerd water met 21000 ppm boorzuur. In figuur 13.1 wordt een overzicht gegeven van het boreersysteem TB en bijbehorend verdampersysteem TN.

In het rapport wordt voor een normale scram, een LOCA situatie, een ATWS situatie en een extern ongeval bij aanvang cyclus (0 vollast dagen) onderzocht of de hoeveelheid beschikbaar boor voldoende is, en indien dat niet direct het geval is hoelang het duurt eer de juiste hoeveelheid wel beschikbaar is om de benodigde concentratie te bereiken.

| Toestand reactor, Nullast, 50 °C, 31 bar, Xe-vrij | Benodigde boorconcentratie (ppm) | |
|---|----------------------------------|-----|
| | BOC; 0 vollast dagen | EOC |
| C _{HK} ; ρ = 0% L+ D = 0 | 1304 | 703 |
| LOCA; ρ = -1% L+D = 0 | 1395 | 782 |
| Splijstofwissel; ρ = -5% L+D = 0 | 1790 | - |
| Verlies extern vermogen; ρ = -1% L+D volledig in de kern | 1054 | 471 |
| Verlies extern vermogen; ρ = -1% netto bank volledig in de kern | 1198 | 590 |

| | | |
|--|------|-----|
| ATWS; $\rho = -1\%$ L+D =0 | 1395 | 782 |
| Toestand reactor, Nullast, 294 °C, 155 bar, Xe vrij | | |
| C_H ; $\rho = 0\%$ L+D =0 | 1226 | 433 |
| Kritische boorconcentratie | | |
| 6 vollast dagen; Xe-evenwicht, L+D = 10 cm, 306.1 °C | 766 | |
| 0 vollast dagen; Xe-vrij; L+D = 10 cm, 306.1 °C | 1037 | |

Om in korte tijd een hoge boorzuurconcentratie in het hoofdkoelmiddel te krijgen kan het noodzakelijk zijn om van het gebunkerde TW-systeem gebruik te maken (watervoorraad met 2300 ppm boorzuur).

Normaal bedrijf

Voor het uit bedrijf gaan direct na de opstart naar een warm onder-kritische toestand (C_{HK} en 200 °C) is 3470 kg water met 21000 ppm boorzuur noodzakelijk. Door de indamping van de hoeveelheid water die t.g.v. de uitzetting van het primaire water bij de opstart was geëxtraheerd uit het primaire systeem wordt deze hoeveelheid ruimschoots afgedekt. Naar een koud onder-kritische toestand (1% onderkritisch, 50 °C, Xenon vrij) is nog eens extra 3110 kg geboreerd water nodig. De tijd die nodig is om door indamping deze hoeveelheid te verkrijgen bedraagt ongeveer 3.2 uur. Om alle boorzuur terug te winnen heeft men 15.9 uur nodig. Voor normaal bedrijf en voorzienbare storingen is dit ruimschoots voldoende.

LOCA

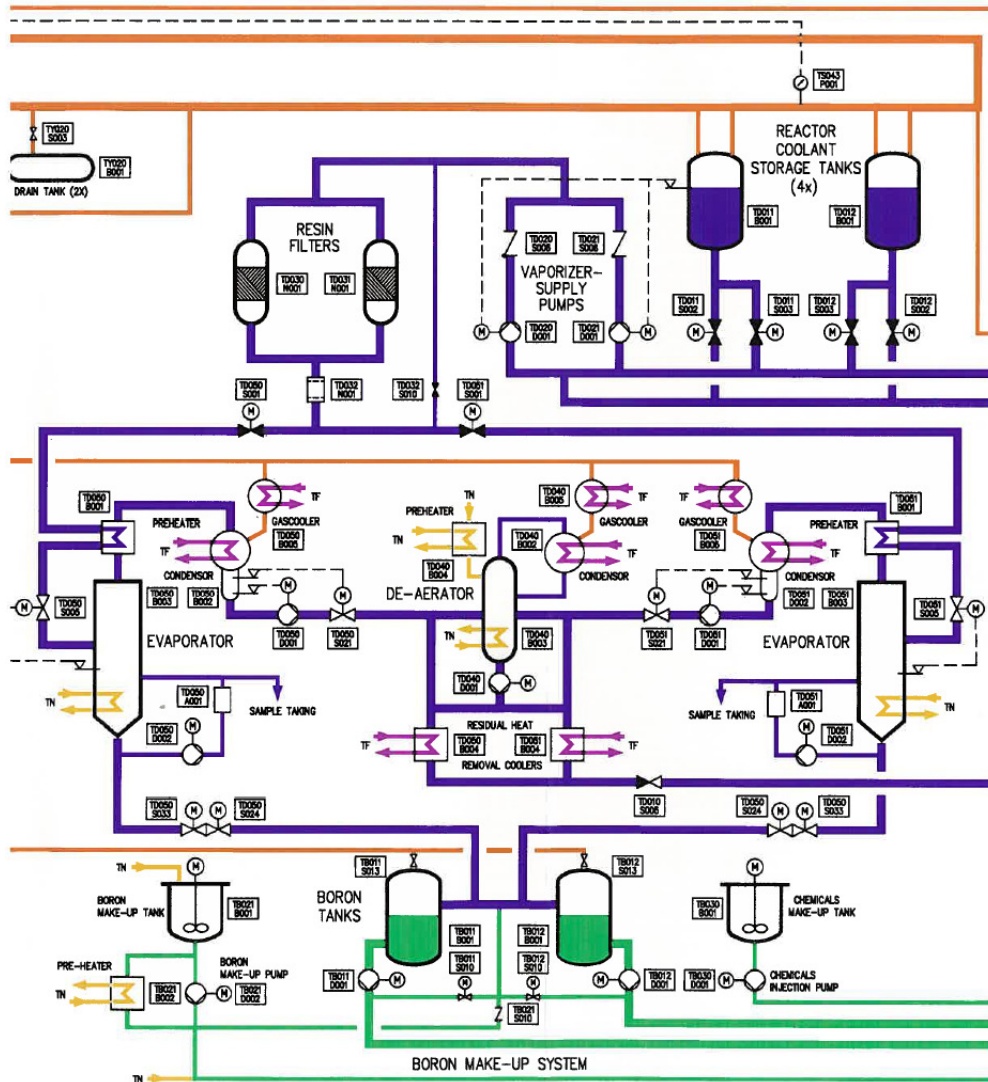
Voor een 2F-LOCA's is de 2300 ppm in de 4 buffervaten en de 4 TJ opslag tanks ruim voldoende.

ATWS

Voor ATWS is om de reactor in een warm onderkritische toestand ($\rho=0$; 294 °C; Xenon-vrij; L+D =0) te brengen een boorzuurconcentratie van 1226 ppm nodig. De hoeveelheid geboreerd water in de TB- voorraadtanks is hiervoor voldoende en is de reactor onderkritisch totdat de Xenon vervallen is. Om de reactor in een koud onderkritische toestand te brengen ($\rho=-1$; 50 °C; Xe-vrij; L+D =0) is nogmaals 4500 kg water met 21000 ppm boorzuur noodzakelijk. Om tot de juiste hoeveelheid te komen is 6.5 uur verdampen nodig. Indien direct na de opstart begonnen wordt met de bereiding van het boorzuur uit het geëxtraheerde water via de verdampers, is er voor ATWS geen probleem.

Externe gebeurtenissen

In geval van externe ongevallen geschiedt de boorzuur injectie via de EVA bestendige TW systeem. Hierdoor is voor minimaal de eerste 24 uur onderkritikaliteit gewaarborgd. Om de noodzakelijke 2300 ppm boor in het hoofdkoelmiddel te garanderen staan 2 x 200.000 kg TW geboreerd water ter beschikking.



Figuur 13.1 De boorzuurvoorradetanks van het boreersysteem TB en de bijbehorende verdamper van het TN systeem.

14. Ingebrachte zienswijzen

Tegen het MER zijn o.m. de volgende zienswijzen ingebracht (in italics weergegeven):

- *Het gebruik van MOX brandstof leidt tot een vermindering van het aantal 'nakomende neutronen' waardoor de reactie moeilijker onder controle te houden is.*

De fractie vertraagde neutronen (β) is voor Pu-239 kleiner (0,22%) dan die voor uranium-235 (0,67%) waardoor de marge van Pu-239 tot prompt kritisch kleiner is. MOX bevat echter niet alleen Pu-239, maar ook Pu-241. Het gehalte Pu-241 neemt toe met toenemende opbrand. De fractie vertraagde neutronen voor Pu-241 is bijna gelijk is aan die van U-235. Daarom is het overall effect in een MOX kern toch gering en zal die van een UO₂ kern benaderen bij toenemende opbrand.

Overigens is de **effectieve** fractie vertraagde neutronen (de fractie vertraagde neutronen die weer beschikbaar is voor kernsplijting) in een reactorkern hoger dan de fractie vertraagde neutronen die geproduceerd wordt. Dit komt o.a. doordat de vertraagde neutronen gemiddeld een beduidend lagere energie hebben dan de prompte neutronen die direct bij de splijting vrijkomen en daarom minder makkelijk uit de reactorkern ontsnappen dan snelle neutronen. De verhouding tussen vertraagde neutronen en prompte neutronen in de kern is dus hoger dan de verhouding bij het vrijkomen van die neutronen. Dit effect is door de zgn. "Low Leakage" kern in Borssele echter beperkt.

Ter illustratie worden hier enige waarden gegeven voor de fractie vertraagde neutronen afhankelijk van type splijstof en mate van opbrand. De huidige toegestane grenswaarde aan het begin van de cyclus (BOC) is $\geq 0,485$ en aan het einde van de cyclus (EOC) $\geq 0,427$. Voor de huidige UO₂ cyclus (cyclus 37) zijn deze waarden resp. 0.608 (BOC) en 0.538 (EOC). Voor een 40% MOX kern nemen de waarden af tot 0,507 (BOC) en 0,479 (EOC). Het feit dat β_{eff} aan het einde van de cyclus kleiner is dan aan het begin van de cyclus komt voor wat betreft UO₂ splijstof o.a. door het ontstane Pu-239 tijdens de cyclus t.g.v. neutronenvangst van U-238. Uit deze waarden is duidelijk af te lezen dat het effect bij UO₂ duidelijk groter is dan bij MOX. Dit komt omdat bij UO₂ splijstof de hoeveelheid Pu-239 toeneemt, terwijl bij MOX wel Pu-239 gevormd wordt, maar uiteindelijk de totale hoeveelheid afneemt door versplijting van het plutonium dat al in het MOX aanwezig was. De hoeveelheid van dat initiële plutonium die verspeten wordt is groter dan de hoeveelheid die gevormd wordt via neutronvangst door U-238. Dat β_{eff} bij MOX afneemt komt door de 60% UO₂ splijstof in de kern.

Overigens is in de loop der jaren door over te gaan op hoger verrijkte UO₂ splijstof, de splijstof ingezet tot hogere opbrand. Hierdoor werd er relatief meer plutonium 'gekweekt' waardoor de effectieve fractie vertraagde neutronen navenant afnam van ca. 0.65% BOC naar 0.61% BOC. Deze afname heeft niet geleid tot merkbare verschillen. Zo zal een verdere afname bij de inzet van MOX naar 0.51% (BOC) en 0.48% (EOC) evenmin leiden tot merkbare verschillen omdat er nog steeds een ruime afstand is tot de grenswaarden. Daarnaast wordt er een voorschrift voorgesteld waarin de inzet van verse MOX splijstofelementen wordt beperkt tot 12 elementen per cyclus omdat daarmee grote afwijkingen van de evenwichtkern worden voorkomen. D.w.z. door een grotere hoeveelheid verse MOX elementen in een keer zou de fractie vertraagde neutronen wel dicht in de buurt van de grenswaarden kunnen komen te liggen zonder er nog overheen te gaan. De KFD vindt dit echter toch niet wenselijk.

- *De reactiviteit van plutonium is hoger bij hogere temperatuur waardoor de reactie moeilijker onder controle te houden is.*

De bewering dat plutonium reactiever wordt naarmate de temperatuur stijgt klopt, maar is hier niet zo belangrijk, omdat:

- a) we het hier over een MOX kern hebben en niet over een zuivere plutonium kern; 60% van de kern bestaat uit (verrijkte) UO_2 splijtstofelementen, en
- b) meer dan 90% van de MOX splijtstofstaven bestaat net als van de UO_2 staven uit U-238.

De reactie van de splijtstof op een temperatuurverandering wordt bepaald door de splijtstoftemperatuurcoëfficiënt (ook wel Dopplercoëfficiënt). Het teken van deze coëfficiënt bepaalt of een temperatuurstijging van de splijtstof resulteert in een toename of afname van de reactiviteit (negatief betekent een afname) en de absolute waarde bepaalt hoe sterk dit effect is. Een algemene eis is een negatieve splijtstoftemperatuurcoëfficiënt, omdat in dat geval een mogelijke ongewenste toename in reactiviteit, die zich uit in een temperatuurverhoging van de splijtstof, gelijk tegengewerkt wordt.

De splijtstoftemperatuurcoëfficiënt wordt voornamelijk bepaald door de resonantie absorptie van U-238. Hoe hoger de temperatuur, hoe meer neutronen door U-238 geabsorbeerd worden. U-238 is dus geen nutteloos materiaal dat niet uit de splijtstof gehaald kan worden, maar een belangrijke waarborger van een veilige kern. Naast U-238 spelen ook alle andere isotopen in de splijtstof een rol in de splijtstoftemperatuurcoëfficiënt, maar hun bijdrage is veel kleiner.

Voor Pu-239 geldt dat bij een hogere temperatuur de werkzame doorsneden voor absorptie en splijting van Pu-239 afnemen voor thermische neutronen. Dit suggereert dat er minder splijtingen van en absorpties in Pu-239 optreden. De thermische neutronenflux neemt echter sterker toe, waardoor de reactiesnelheden voor zowel absorptie als voor splijting bij Pu-239 netto toenemen. Uiteindelijk is de splijtstoftemperatuurcoëfficiënt van een MOX kern hierdoor inderdaad minder negatief dan die bij een uranium kern, maar wel nog steeds negatief. De resonantievangst van U-238 neemt namelijk sterk toe naarmate de temperatuur stijgt en is numeriek gezien belangrijker dan de toename van de reactiesnelheden voor absorptie en splijting van plutonium-239 bij temperatuurstijging.

Het is wel zo dat het neutronen spectrum verandert naarmate de temperatuur stijgt. Er worden iets meer thermische neutronen weggevangen door absorptie in plutonium en nog meer epithermische neutronen door resonantievangst in uranium-238. Hierdoor blijven er relatief meer snelle neutronen over. Overigens is de toegenomen resonantievangst door U-238 ook het geval bij uraniumoxide splijtstof. Dat door het verschoven neutronenspectrum als gevolg van de temperatuurstijging iets minder effectief te controleren zou zijn is alleen een theoretisch gevolg. Echter deze veranderingen zijn zo gering en relatief traag dat het reactorregelsysteem er in feite niets van merkt en geen aanpassingen in de zin van snellere responstijden of iets dergelijks, noodzakelijk zijn

- *De vervalwarmte van MOX-brandstof is hoger dan bij uranium splijtstof waardoor de koeling van de reactor bij een loss of coolant accident (LOCA) bemoeilijkt wordt.*
- *De hogere burn-up van MOX, de hogere brandstoftemperatuur en de toename van de vorming van splijtingsgas verhogen het risico op schade aan splijtstofstaven.*

Dat door de hogere vervalwarmte van MOX de koeling bij een LOCA bemoeilijkt wordt is onjuist. Dat komt omdat de vervalwarmte van MOX gedurende eerste 46 uur na afschakeling van de reactor juist lager is. Zodra tijdens vermogensbedrijf er een koelmiddelverliesongeval (LOCA) plaatsvindt, schakelt de reactor automatisch af en treden de veiligheidssystemen voor noodkoeling in werking. Deze noodkoelsystemen die vanuit allerlei watervoorraden water in het reactorvat suppleren, zijn dermate gedimensioneerd dat deze de vervalwarmte van de reactor direct na afschakeling moeten kunnen afvoeren. Indien er een koelmiddelverliesongeval op zou treden gedurende de periode van de zgn. splijtstofwisselstop, wanneer de reactor al enige dagen

afgeschakeld is, maar de vervalwarmte van MOX wel groter is dan die van een vergelijkbare 4.4% verrijkte uraniumoxide kern, dan is deze vervalwarmte al zo laag dat 1 pomp van zo'n noodkoelsysteem al voldoende is om de kern te koelen. Zie verder de reactie op de zienswijze ten aanzien van de radioactievere splijtingsproducten van MOX.

Het is juist dat er aanwijzingen zijn dat een toename van de vorming van splijtingsgassen, een slechtere warmtegeleidbaarheid en een hogere brandstoftemperatuur een negatieve invloed kunnen hebben op het gedrag van hoog opgebrande MOX-elementen tijdens regelstaafuitworpongevallen. Echter de analyses laten zien dat de enthalpiesprong tijdens zo'n ongeval gering is; ca. 30 cal/gram splijtstof. Daarbij komt nog dat de huidige materialen van splijtstofomhullingen veel beter bestendig zijn tegen de bovengenoemde zgn. "pellet-clad interacties".

Hoge opbrand speelt naast de regelstaafuitworpongevallen ook een rol bij grote koelmiddelverliesongevallen (LOCA) [40]. Met name de oxidelaagdikte die met toenemende opbrand ook toeneemt, is daarbij een parameter. Gedurende een LOCA, neemt de temperatuur van de splijtstofomhulling toe tot boven de 1000 °C. Als de temperatuur boven de 800 °C komt, verandert zgn. α -fase zirconium in β -fase zirconium, terwijl tegelijkertijd de oxidatie versneld toeneemt. Het zuurstof dat in het metaal opgelost is stabiliseert de α -fase. Een laag α -fase zirconium met een hoog gehalte aan zuurstof vormt zich tussen de oxide laag en de β -fase zirconium laag. Deze laag is redelijk bros. Daarom wordt er een grenswaarde gesteld aan de dikte van deze zuurstofrijke α -fase zirconiumlaag. De dikte van deze laag is sterk afhankelijk van de oxidelaagdikte die tijdens de LOCA bereikt wordt. De oxidatiesnelheid van het in de kernenergiecentrale Borssele voor de splijtstofomhulling gebruikte M5 materiaal is dermate laag, dat voor de te bereiken opbranden dit probleem niet speelt.

Niettegenstaande, de slechts geringe effecten die er te verwachten zijn, blijven de huidige beperkingen die er in de vergunning gesteld zijn aan de opbrand (< 68 MWd/kg splijtstof, voor opbranden groter dan 60 +/- 1 MWd/kg splijtstof dient eerst aanvullend bewijs te worden geleverd) van kracht, ook voor MOX-splijtstofstaven. Het gedrag van de MOX elementen bij nog hogere opbrand zal gevalideerd moeten worden door ervaringen en metingen elders.

- *Omdat de energie van neutronen vrijgekomen bij splijting van plutonium hoger is dan bij uranium kunnen structuren in de kern zoals het reactorvat beschadigd worden.*

Uit de analyses van AREVA [34] blijkt dat ondanks de hoger energetische neutronen (toename met zo'n 17%-19%) de totale geïntegreerde flux (fluentie) t.g.v. snelle neutronen (> 1 MeV) over de hele levensduur van het reactorvat nauwelijks toeneemt. In 2033 is de totale bereikte snelle neutronenfluentie in geval van 40% MOX: $3,40 \cdot 10^{19} \cdot \text{cm}^{-2}$ i.p.v. $3,22 \cdot 10^{19} \cdot \text{cm}^{-2}$ met alleen 4,4% verrijkte UO₂ splijtstof. Dit is nog steeds onder de ontwerp limiet van $3,50 \cdot 10^{19} \cdot \text{cm}^{-2}$ die voor het reactorvat geldt. De controle berekeningen die door GRS zijn uitgevoerd laten overigens een geringere toename van de snelle neutronenfluentie zien en blijven nog verder van de grenswaarde.

- *Omdat bij het verbranden van MOX splijtingsproducten ontstaan die radioactiever zijn dan in geval van uraniumoxide zijn de radiologische gevolgen van een ongeval waarbij een deel van de inhoud van de kern vrijkomt ernstiger. Doordat ook de kans op een dergelijk ongeval toeneemt bij gebruik van MOX neemt de kans op een ongeval met ernstige radiologische consequenties toe.*

De eerste 46 uren is de vervalwarmte van een MOX kern juist lager dan van een UO₂ kern. Uit de risicoanalyses blijkt dat het verloop van bijna alle kernsmeltscenario's dermate snel gaat, dat kerndegradatie juist in de eerste paar uur na afschakeling van de reactor een dreigt. Uitval van alle noodzakelijke veiligheidssystemen om desbetreffend ongeval te beheersen wordt veelal min

of meer simultaan en als directe respons op de inleidende gebeurtenis verondersteld. Omdat de inzet van de veiligheidssystemen al snel na het optreden van de inleidende gebeurtenis wordt vereist, is in deze analyses een paar uur na die inleidende gebeurtenis de kern ofwel grotendeels gesmolten of in een vergevorderd stadium op weg daar naartoe, omdat die systemen niet functioneerden.

Voor ongevallen die pas na enkele dagen in een kernsmeltscenario ontaarden is een verhoging van de vervalwarmte niet echt meer van belang omdat absoluut gezien de vervalwarmte al behoorlijk is afgenomen van tientallen megawatten tot enkele megawatten en daardoor geheel wegvallen tegen de lagere vervalwarmte van MOX gedurende de eerste 46 uur. Veelal zijn dergelijke ongevalsverlopen sowieso in de risicoanalyses al gemajoreerd tot kortdurende scenario's en komen variaties op de effecten van die scenario's, qua timing en qua aangenomen gedeeltelijk geslaagde herstelacties die later weer teniet worden gedaan door andere gebeurtenissen, terecht in de onzekerheidsanalyse.

Een bijkomend feit is dat als de temperatuur in de kern voldoende hoog is geworden, het belang van de vervalwarmte afneemt. Dit wordt veroorzaakt door de warmte die vrijkomt ten gevolge van de sterk exotherme water metaal oxidatiereacties die bij hoge temperatuur optreden en die veel groter is dan de vervalwarmte. Dat de kansen op grote ongevallen door inzet van MOX dus zullen toenemen is niet aannemelijk te maken, ondanks een kleinere fractie vertraagde neutronen, verminderde regelstaafwerkzaamheid en boorwerkzaamheid (zie hierboven voor de onderbouwing).

- *EPZ vraagt een vergunning aan RepU met een hogere verrijkingsgraad te mogen gebruiken zodat deze brandstof qua energiepotentiaal equivalent is aan verrijkt uranium. Door de hogere verrijkingsgraad en hogere burn-up van de brandstof worden de veiligheidsmarges van de reactor kleiner. Door het hogere stralingsniveau treedt onder andere eerder corrosie op in de brandstofstaven en het reactorvat.*

De verhoogde verrijkingsgraad is niets anders dan een compensatie van de reactiviteit van de splijtstof die verloren is gegaan door het neutronen absorberende U-236. Er is dus geen sprake van een daadwerkelijke verhoging van de reactiviteit, maar er is alleen sprake van een compensatie voor het verlies van reactiviteit ten gevolge van de "vervuiling" van de splijtstof met U-236. Het verlies wordt aangevuld tot de oorspronkelijke waarde, en niets meer. Ook blijft de opbrand (burn-up) onderhevig aan dezelfde restricties zoals nu ook al gelden (zie punt 6, H17: "Voorgestelde voorschriften..."). Voor wat betreft de invloed van stralingsniveau op de corrosie van splijtstofomhulling en reactorvat zie eerdere tekst in dit hoofdstuk en Hoofdstuk 15, punt 7 (waar verwijst dit precies naar en wat is het verschil met in dit hoofdstuk?) waarin uitgelegd wordt dat de invloed daarvan op het reactorvat gering is.

- *Vanwege de hogere opgeslagen energie in splijtstofstaven is het risico op een kernsmelt bij gebruik van MOX hoger [Aanvraag, p31].*

De desbetreffende tekst op blz. 31 van de aanvraag luidt evenwel anders, n.l.:

"Het belangrijkste effect van de inzet van MOX is dat de in de splijtstoftabletten opgeslagen energie hoger is dan in die van uraniumelementen. Het vrijkomen van deze hogere opgeslagen energie tijdens een LOCA zou kunnen leiden tot onacceptabele splijtstofomhullingstemperaturen en als gevolg daarvan tot schade aan de splijtstofstaaf."

Schade van de splijtstofomhulling als gevolg van een groot koelmiddelverlies ongeval (LB-LOCA) is, alhoewel op zichzelf ernstig genoeg, iets anders dan kernsmelten en heeft als zodanig niets daarmee van doen. Bij kernsmeltprocessen hebben we te maken met langdurige uitval van kernkoeling waarbij de vervalwarmte de bepalende factor is. Bij een groot koelmiddelverlies ongeval is het niet de vervalwarmte die bepalend is, maar de opgeslagen warmte t.g.v. het kernsplijtingsproces zelf uitgedrukt in kJ/kg. De warmteafvoer van deze opgeslagen warmte die tijdens een LOCA kortdurend wordt verstoord, is een kortdurend proces in tegenstelling tot

Met opmaak: Markeren

Verwijderd: 16

Met opmaak: Markeren

Met opmaak: Tekstkleur: Rood, Markeren

Verwijderd: 14

Met opmaak: Tekstkleur: Rood, Markeren

Met opmaak: Markeren

kernsmeltsenario's. Tijdens de hier bedoelde koelmiddelverlies ongevallen is er een korte onderbreking van de warmte afvoer tijdens de uitstroombfase van het koelmiddel voordat de noodkoelsystemen in werking treden. Er is dus wel sprake van lange termijn koeling, waardoor er geen sprake van kernsmelten kan zijn.

De opgeslagen warmte is afhankelijk van de opbrand, de vermogensfactor van het splijtstofelement en het zgn. lineaire staafermogen. Gedurende de levensduur van een splijtstofelement in de kern neemt de opbrand toe en nemen de vermogensfactoren en het lineaire staafermogen af. Netto leidt dit tot een afname van de opgeslagen warmte. Deze afname is echter beperkt, zodat in het hoge opbrand gebied waar de splijtstofomhulling al enige mate van oxidatie heeft ondergaan, er een probleem voor de integriteit van de splijtstofomhulling zou kunnen ontstaan. Door de tijdelijke onderbreking van de warmteafvoer bij LOCA situaties loopt de temperatuur in de splijtstof op. Dit kan leiden tot extra oxidatie van de splijtstofomhulling [40], waardoor deze lokaal defect kan raken. De thermo-hydraulische berekeningen met het internationale standaard rekenmodel RELAP laten zien dat de grenswaarden, met name de maximaal te bereiken dikte van de oxidelaag, niet worden overschreden waardoor schade van de splijtstofomhulling onwaarschijnlijk is. Om echter deze kans nog verder te minimaliseren wordt er voorgesteld om de bestaande beperking aan de opbrand voor UO₂ splijtstof ook voor MOX te laten gelden (zie H.17 voorschrift 7). Zie verder H.7, Groot Koelmiddelverlies Ongeval.

Mocht om een of andere reden de noodkoeling niet in werking treden en er toch kernsmelten dreigt, dan heeft het feit dat er lokaal al wat schade aan de omhulling is geen invloed op het verdere smeltproces omdat de initiële schade zeer lokaal en beperkt was.

- *De verminderde werking van boorzuur en regelstaven bij MOX brandstof hebben tot gevolg dat het bereiken van onderkritikaliteit in geval van incidenten langer duurt [Aanvraag, p33].*

Het klopt dat door de verminderde werking van het boorzuur en de regelstaven er meer boorzuur moet worden toegediend om de onderkritikaliteit te bereiken. Het daarmee gepaard gaande tijdsprobleem alsmede de mogelijkheid tot overschrijding van de gestelde grenswaarde aan de verdunningsgraad van het boor in het primaire koelwater (2300 ppm) kan echter ondervangen worden door in plaats van natuurlijk boor gebruik te maken van zgn. verrijkt boor. In verrijkt boor is de hoeveelheid van het neutronen absorberende isotoop B-10 via een verrijkingsproces toegenomen van een kleine 20% tot 32%. De hoeveelheid benodigd boorzuur kan daardoor min of meer hetzelfde blijven.

- *Door gebruik van MOX is er een verhoogd risico op vervormingen van splijtstofelementen [Aanvraag, p27].*

Het klopt dat er een verhoogd risico op het kromtrekken van splijtstofelementen is t.g.v. het hardere neutronen spectrum van MOX splijtstofelementen t.o.v. de UO₂ splijtstofelementen. Alhoewel dit effect tot nu toe niet is waargenomen, ook niet bij de veel langere splijtstofelementen van de 900 MW_e en 1300 MW_e centrales in Frankrijk en Duitsland waar MOX wordt toegepast wordt er toch een voorschrift voorgesteld waarin een monitoringsprogramma dienaangaande wordt vereist (zie H.17 voorschrift 5). Omdat een proces van kromtrekken een geleidelijk proces is, is zo'n monitoringsprogramma een afdoende waarborg dat het inbewegen van een of meerdere regelstaven niet wordt belemmerd door een of meerdere kromgetrokken elementen. Zie verder H.15, punt 12.

- *Door het hardere neutronenspectrum van MOX slijt het reactorvat sneller [MER, p57].*

Het klopt dat door het gebruik van MOX de neutronen fluentie van de snelle neutronen (> 1 MeV) toeneemt waardoor de daartoe gestelde grenswaarde eerder wordt bereikt. Echter deze grenswaarde zal pas worden bereikt na 2033, de datum die nu wordt gehanteerd als einddatum voor het bedrijven van de kerncentrale Borssele. Deze grenswaarde die tijdens het ontwerp van

de kerncentrale werd geformuleerd, is overigens zeer conservatief gesteld. Achteraf blijkt het staal van het reactorvat qua samenstelling veel beter te zijn dan destijds voorzien was. Zie verder H.10 en H.17, voorschrift 11.

- *MOX splijtstofstaven zijn minder goed bestand tegen ongevallen met reactiviteitstoevoer door een hogere vorming van splijtingsgassen [MER, p 58].*

Het klopt dat er mogelijk negatieve effecten zijn t.g.v. een toename van de hoeveelheid splijtingsgassen door een andere splijtingsopbrengst van plutonium dan van uranium. Door zowel de opbrand te beperken als door een beperking te stellen aan de maximale enthalpiesprong die op mag treden bij een reactiviteitsongeval (uitgedrukt in cal/g) zal de invloed van de extra inwendige gasdruk t.g.v. splijtingsgassen beperkt blijven. Overigens zijn de splijtstofstaven al gevuld met helium om de uitwendige druk in de reactor tijdens vol vermogen te kunnen weerstaan. Bij de bepaling van de hoeveelheid is al rekening gehouden met de vorming van splijtingsgassen.

- *Voor alle geanalyseerde ongevalsscenario's geldt dat hoe groter het percentage MOX, hoe groter de effectieve en schildklierdosis bij ontwerpongevallen [MER, p64,65].*

Het klopt dat door de gewijzigde samenstelling van de inventaris splijtingsproducten de effectieve en schildklierdosis toeneemt bij toenemend percentage MOX. Deze toename is zowel procentueel als absoluut gezien zeer gering. De totale effectieve dosis en schildklier dosis is voor alle beschouwde ontwerpbasis ongevallen orden van grootte kleiner dan de daartoe gestelde dosislimieten.

Overigens zijn de dosisberekeningen van de ontwerpbasis ongevallen niet bedoeld om een schatting te geven van de stralingsbelasting van de omgeving, maar om een beoordeling te maken van de effectiviteit van de veiligheidsinsluiting (containment) en de ventilatiesystemen met daarbij behorende filters. Het recept om de zgn. brontermen (de hoeveelheid radioactieve stoffen die vrijkomt binnen het containment, dan wel de reactorbijgebouwen) te berekenen is dan ook zeer conservatief gesteld om zeker te stellen dat ondanks gemaximaliseerde brontermen het ontwerp van het containment, andere insluitsystemen en ventilatiesystemen van voldoende kwaliteit zijn om te zorgen dat de belasting voor de bevolking ruimschoots onder de daartoe gestelde limieten blijft. De werkelijke stralingsbelasting bij deze scenario's zal dus altijd lager zijn dan de berekende waarden.

- *Het groepsrisico en individueel risico bij buitenontwerpongevallen neemt toe [MER, p68]*
Het klopt dat zowel het individuele als het groepsrisico toenemen. Deze toenames worden echter als niet significant gezien. Zie tabel hieronder.

| | Bestaande situatie | 40% MOX | c-ERU |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|
| Maximaal individueel risico (per jaar) | $1,9 \cdot 10^{-8}$ | $2,0 \cdot 10^{-8}$ | $2,0 \cdot 10^{-8}$ |
| Maximaal groepsrisico > 10 slachtoffers (per jaar) | $5,6 \cdot 10^{-9}$ | $5,6 \cdot 10^{-9}$ | $5,6 \cdot 10^{-9}$ |

Uit bovenstaande tabel (MER, p 68) blijkt dat de toenames zowel procentueel als absoluut gezien, marginaal zijn. Een toename van het maximale individuele risico van $1,9 \cdot 10^{-8}$ /jaar naar $2,0 \cdot 10^{-8}$ /jaar wordt door de KFD als niet significant bestempeld. Zowel het totale individuele risico als het groepsrisico blijven ruimschoots onder de daartoe gestelde limieten.

- *De individuele dosislimiet van werknemers van de kerncentrale zal moeten worden verhoogd van <0.05 naar <1,0 mSv per jaar [MER, p72]*

Niet de dosislimiet wordt verhoogd maar de te verwachten op te lopen dosis voor werknemers die belast zijn met het hanteren van de verse splijtstof tijdens het ontladen van de aanvoercontainers. De dosislimiet blijft voor die werknemers 20 mSv per jaar.

- *Uit de MER en de aanvraag blijkt dat er extra beheersmaatregelen in de centrale nodig zijn om het huidige veiligheidsniveau van de centrale te kunnen handhaven. Die beheersmaatregelen zijn nodig omdat het gebruik van met name mengoxide splijtstof (MOX) in de kerncentrale hogere radioactiviteit en daarmee grotere risico's met zich brengt dan de inzet van natuurlijk uranium. Zo blijkt dat met de toename van de grootte van de snelle flux gradiënt het risico op kromtrekken van de splijtstofelementen toeneemt. Bij een ongeval met koelmiddelverlies en bij een snelle enthalpiestijging kan schade aan de splijtstofstaven ontstaan. Door de verminderde werking van regelstaven en boorzuur is de reactor eerder kritisch en het bereiken van onderkriticaliteit duurt langer. Ook heeft het hardere neutronenspectrum een negatieve invloed op het reactorvat.*

Het gegeven van extra risico's en daarmee de noodzakelijke toepassing van maatregelen om veilige bedrijfsomstandigheden te borgen, verhogen het totale bedrijfsrisico. Daar komt bij dat uit wordt gegaan van een bedrijfsvoering met een MOX-inzet tot 40% van het aantal splijtstofelementen in de kern. Dat betekent in totaal 48 MOX-elementen die in de kern zullen worden geplaatst. De bedrijfservaringen met het hoge niveau van 40% MOX-inzet zijn bijna afwezig. Toch wordt besloten om jaarlijks 12 MOX-elementen in de kern te plaatsen tot een maximum van 48 is bereikt. Gezien de zeer grote risico's die het reactorproces met MOX met zich meebrengt, gelet op extra beheersmaatregelen die noodzakelijk zijn, en rekeninghoudend met de ontbrekende bewijsvoering dat een hoge inzet van 40% volledig beheersbaar is, mag niet worden overgegaan tot acceptatie van de aanvraag.

Het is juist dat de door de inzet van MOX bepaalde reactorfysische parameters wat ongunstiger worden waardoor de risico's toenemen en hier en daar, waar dat mogelijk is, tegenmaatregelen vereisen. Dat deze risico's groot zijn, wordt door de KFD betwist op grond van eerder genoemde argumenten. Dat er extra beheersmaatregelen noodzakelijk zijn is op zich geen teken dat het zonder die maatregelen onveilig zou zijn, laat staan dat door invoering van die maatregelen extra onveiligheid wordt toegevoegd. Een aantal maatregelen zijn vooral bedoeld om gegeven een zgn. ontwerpongeval de kans op splijtstofschade te verkleinen, terwijl andere maatregelen bedoeld zijn om mogelijke negatieve effecten, mochten deze tegen de verwachting in toch optreden, in een zo vroeg mogelijk stadium te detecteren. Onder de eerste categorie valt de invoering van verrijkt boor en onder de tweede categorie valt het monitoringsprogramma om eventueel kromtrekken van splijtstofelementen in een zo vroeg mogelijk stadium te detecteren. Ook zit er nu al boorzuur in het primaire koelmiddel als neutronen absorberend middel om de kernsplijting in de reactor te reguleren. Of het nu 20% verrijkt is of 32% verrijkt maakt dan in principe ook niets uit of het veilig is of niet; alleen de combinatie van de hoeveelheid boor-10 met de hardheid van het neutronenspectrum is dan bepalend. Natuurlijk is er een kans dat er fouten worden gemaakt bij de implementatie en de uitvoering van die maatregelen. Wordt daarbij echter de kans toegevoegd dat er zo'n ontwerpongeval plaatsvindt, dan is de toename van het risico op splijtstofschade verwaarloosbaar. Wellicht ten overvloede, dient wel te worden vermeld dat splijtstofschade, zonder dit te willen bagatelliseren en hoe ernstig ook, geen kernsmeltongeval is. Te allen tijde blijven de gevolgen voor de bevolking ten gevolge van zo'n ontwerpongeval beneden de daartoe gestelde limieten zoals die staan vermeld in het Besluit Kerninstallaties, Splijtstoffen en Ertsen van de Kernenergielwet.

Voor wat betreft de geringe bedrijfservaring is de KFD van mening dat de inzet van zgn. voorloperelementen een goede manier is om voldoende waarborgen te kunnen leveren dat ook in Borssele een inzet van 40% MOX veilig kan plaatsvinden. Voor die percentages MOX (ca. 33%) waarvoor ruime ervaring bestaat, blijken de computercodes die ook voor de veiligheidsanalyses

betreffende deze aanvraag voor Borssele zijn gebruikt, goede voorspellingen te doen. De combinatie van veiligheidsanalyses en verificatie door metingen wordt daarom door de KFD als afdoende beschouwd om aan te tonen dat toepassing van 40% MOX veilig is.

Uit de beoordeling blijkt dat de risico's voor zowel de bevolking door de gewijzigde samenstelling van de splijtingsproducten van MOX, als die voor de kans op splijtstofschaade bij z.g.n. ontwerpbasis ongevallen, door o.a. de grotere hoeveelheid opgeslagen warmte in MOX, marginaal zijn toegenomen. De vraag: "Is een marginale toename van veiligheidsrisico's niet in strijd met het concept van continue verbetering van de veiligheid?" doet zich dan ook voor. Ten aanzien hiervan vindt de KFD dat in principe een toename van de risico's, hoe gering dan ook, niet acceptabel is, tenzij:

- de activiteit (hier brandstofdiversificatie) gerechtvaardigd is, d.w.z. de voordelen (ook bedrijfseconomische) van de verandering ruimschoots opwegen tegen de toename van het risico,
- de vergunninghouder zoveel als redelijkerwijs mogelijk is, er alles aan gedaan heeft om de toename zo klein als mogelijk te houden,
- de duur van de verhoging van het risico beperkt is,
- er voldoende afstand is tot de vigerende veiligheidsgrenzen en er een meer dan ruime afstand bestaat tot de in artikel 18 van het BKSE (kernenergiewet) genoemde risicocriteria.

Dit gehanteerde uitgangspunt is overigens niet iets nieuws, maar is heel sterk gebaseerd op de internationale uitgangspunten van zowel de stralenbescherming als de nucleaire veiligheid (IAEA Safety Fundamentals; IAEA Series SF-1, Fundamental Safety Principles, Vienna, 2006). Een activiteit is dan pas toelaatbaar wanneer deze gerechtvaardigd is, de risico's zo klein als redelijkerwijs mogelijk zijn, maar in ieder geval onder de daartoe gestelde limieten dienen te liggen. Dit uitgangspunt is als zodanig ook verwoord in art. 4 en 5 van het Besluit Stralenbescherming (BS) en van toepassing verklaard voor nucleaire installaties middels Art. 19 van het BKSE (kernenergiewet).

Voor wat betreft de rechtvaardiging kan worden verwezen naar het MER waarin de motivatie van de aanvraag wordt beschreven. De KFD is dat de marginale toename van het risico voldoende ruimte biedt voor een afweging of desbetreffende activiteit gerechtvaardigd is. Voor wat betreft de drie volgende bullets is de KFD eveneens van mening dat hierop bevestigend kan worden geantwoord. Naar verwachting zullen de veiligheidsverbeterende maatregelen het risico dermate verkleinen dat de marginale verhoging van het risico t.g.v. de invoering van de brandstofdiversificatie meer dan gecompenseerd worden. Hiermee wordt dan ook aan de derde bullet voldaan.

Behalve dat de toename van het risico marginaal is wordt eveneens geconcludeerd dat de van toepassing zijnde deterministische veiligheidsregels niet overtreden worden door de hier voorgestelde splijtstofdiversificatie. Eveneens blijft het gelaagde veiligheidsconcept (defence-in-depth) geheel intact. In 2011 begint EPZ met de derde 10-jaarlijkse her-evaluatie van de veiligheid.

15. Afhandeling van tussentijdse vragen en commentaren

Gedurende het beoordelingsproces zijn er vanuit de KFD twee brieven naar EPZ gestuurd met tussentijdse vragen, op- en aanmerkingen betreffende de uitgevoerde analyses [42 en 43]. Hieronder volgt een overzicht van het gestelde en de antwoorden van EPZ [51], al dan niet via AREVA.

1. Omdat het project nogal ambitieus werd gevonden, dat wil zeggen aan de bovengrens van de internationale ervaringen, werd gesteld dat de oorspronkelijk voorgestelde verzameling uit te voeren analyses te mager qua omvang was. GRS had in het beoordelingsrapport een lijst met uit te voeren analyses, dan wel een lijst van te beschouwen bestaande analyses waarvan onderzocht moest worden of deze ook voor MOX nog steeds geldig waren: de zgn. "Plausibilitätsbetrachtungen". EPZ heeft desbetreffende opmerkingen ter harte genomen en alle aanbevelingen overgenomen. Alle analyses en Plausibilitätsbetrachtungen zijn uitgevoerd.
2. GRS had aanvankelijk bedenkingen tegen de reactorfysische rekencode CASMO-3 omdat er een nieuwere versie beschikbaar zou zijn (CASMO-4E). Gevraagd werd om de berekeningen opnieuw uit te voeren met CASMO-4E, dan wel om aan te tonen dat de gebruikte versie nog steeds stand der techniek was en dat de codes gevalideerd waren om een 40% MOX kern met gemiddeld 5,41% splijtbaar plutonium in de verse MOX splijstofelementen. EPZ heeft aanvullende validatierapporten ter onderbouwing gestuurd. GRS was het met de conclusie eens dat de codes voldoende gevalideerd waren voor het uitvoeren van de berekeningen. Wel werd gesteld dat 5,41% splijtbaar plutonium buiten de ervaringsbasis lag en derhalve werd aanbevolen om zgn. voorloper elementen in te zetten. Zie H.6A en [41]. De KFD heeft de aanbeveling om voorloperelementen in te zetten ter harte genomen en vertaald in een vergunningsvoorschrift.
3. De samenstelling van de plutoniumvector is geen vaststaand gegeven en afhankelijk van de kwaliteit van het plutonium dat uit het opwerkingsproces gewonnen wordt. Er wordt steeds hoger opgebrande splijstof aangeboden aan de opwerkingsfabriek in Cap-la-Hague, waardoor er meer niet-splijtbaar plutonium wordt gevormd dat niet wordt verspleten terwijl het splijtbaar plutonium deels wel wordt verspleten tijdens de inzet in een reactor voordat het wordt opgewerkt. Er werd door GRS aanbevolen om een gevoeligheidsstudie uit te voeren over de hele range van waarden van de plutonium-vector die in de toekomst mogelijkerwijs te verwachten zijn; met name de invloed op de koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt waarvan de haalbaarheidsstudie liet zien dat de berekendewaarde dicht tegen de ondergrens zit (resp. -62,4 pcm/K en -70 pcm/K, die later verlaagd is tot -75 pcm/K). In dit verband werd verwezen naar de Duitse praktijk waar dat wel gebeurd zou zijn. Uit het antwoord dat AREVA via EPZ gaf bleek:
 - a. dat daar deze analyses waren uitgevoerd, er ook ofwel een vermogensverhoging van de reactor was aangevraagd ofwel een gelijktijdige verhoging van de verrijkingsgraad van de UO₂ splijstof, maar nooit een aanvraag voor MOX alleen.
 - b. Verder werd verwezen naar het feit dat bij iedere splijstofwissel stop de sleutelparameters opnieuw worden berekend voor de komende kern en dat daarin de exacte samenstelling van de plutonium-vector wordt meegenomen.
 - c. Ook werd aangegeven dat de onderste grenswaarde van de koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt was verlaagd van -70 pcm/K naar -75 pcm/K en dat desondanks de veiligheidsgrenzen in de beschouwde veiligheidsanalyses (met name de snelle afkoelingstransienten) niet werden overschreden.KFD gaat akkoord met deze zienswijze.
4. De officiële rapporten waarin voortaan de nieuwe grenswaarden van de sleutelparameters staan aangegeven die voor alle aangevraagde ENU, c-ERU en MOX

- kernen moeten worden gebruikt bij kernbeladingen, moeten nog worden geactualiseerd. Dit is door EPZ toegezegd.
5. Omdat de methodiek van het gebruik van een negatieve boorzuurconcentratie bij de berekening van de scram reactiviteit bij 100% vermogen aan het einde van de cyclus niet voldoende duidelijk was voor GRS en KFD werd de twijfel geuit of e.e.a. wel zorgvuldig was uitgevoerd. Deze twijfel bleek achteraf onterecht. Met name ging het hierbij om de bepaling van de afschakelreactiviteit van de regelstaven aan het einde van de cyclus bij vol vermogen en waarbij als randvoorwaarde wordt verondersteld dat de regelstaven 60 cm moeten zijn ingestoken in de kern. In de praktijk blijkt dat de combinatie vol vermogen, insteekdiepte 60 cm en einde van de cyclus niet mogelijk. Zelfs bij een boorzuurconcentratie van 0 ppm is bij een insteekdiepte van de regelstaven van 60 cm de reactor niet meer op vol vermogen. Om de analyse toch uit te kunnen voeren wordt derhalve een fictieve negatieve boorzuurconcentratie verondersteld die verder niets met enige realiteit van doen heeft. KFD gaat akkoord met deze verklaring.
 6. In de haalbaarheidsstudie [4] wordt nog uitgegaan van natuurlijk boor in het boorzuur. Omdat met name de eisen voor sub-kritikaliteit tijdens de splijfstofwisselstop en tijdens de stabiele eindtoestand bij ontwerpongevallen niet meer gehaald kunnen worden met natuurlijk boor moet van verrijkt boor worden uitgegaan. Alhoewel de analyses wel goed zijn uitgevoerd wordt toch aanbevolen om de haalbaarheidsanalyse qua tekst aan te passen. EPZ wil dat op verzoek doen. KFD beschouwt door deze toezegging de zaak daarmee als afgedaan.
 7. Voor de invloed van het gebruik van MOX op de levensduur van het reactorvat is de snelle neutronenflux berekend. Wat nog ontbrak, dan wel niet geheel duidelijk was, was een vertaling van de 17% hogere snelle neutronenflux naar de levensduur van het vat. Een rapport ter zake werd alsnog naar GRS gestuurd. Het blijkt dat zelfs met een sterkere snelle neutronenflux de totale fluentie van de snelle neutronen ($> 1 \text{ MeV}$) van $3,22 \cdot 10^{19} \cdot \text{cm}^{-2}$ toeneemt tot slechts $3,40 \cdot 10^{19} \cdot \text{cm}^{-2}$ en daarmee onder de ontwerpwaarde van $3,50 \cdot 10^{19} \cdot \text{cm}^{-2}$ blijft. Zie ook H. 13 van dit rapport.
 8. AREVA heeft voor de beoordeling van de tangentiële spanning bij hoge opbrand de limiet van de zgn. 'cladding equivalent strain'⁴ verhoogd van 2,5% naar 3,5%. In dat geval moet volgens GRS en KFD aangetoond worden dat de tangentiële spanning onder de 90 MPa blijft. Aangezien dit vraagstuk pas speelt bij hoge opbrand (hoger dan nu vergund is) is dit vooralsnog geen issue. Wel heeft de KFD e.e.a. vertaald in een vergunningsvoorschrift waarin wordt gesteld, ingeval EPZ de huidige beperking in de opbrand wil opheffen, dat deze eis mee genomen moet worden in de bestaande kwalificatie-eis voor hoge opbrand. Zie punt 5 van H. 16. In H. 9 is dit vraagstuk in meer detail besproken.
 9. Voor de beoordeling van de faalgrenzen die bij zgn. regelstaafuitworp ongevallen kunnen optreden wordt door GRS gewezen op het feit dat MOX splijfstof zich niet zo hoeft te gedragen als UO_2 splijfstof bij hoge opbrand. Met name wordt daarbij gerefereerd aan de CABRI repNa 9 MOX test. AREVA heeft aangetoond dat voor het hele opbrand interval tot 70 MWd/kg splijfstof de maximale enthalpiesprong onder de 30 cal/gram blijft. Daarbij is voor zowel vol vermogen, 50% vermogen en Hot Zero Power (4% vermogen) een uitworp van de meest effectieve regelement aangenomen bij een conservatief gedefinieerde insteekdiepte van de regelstaven. EPZ heeft daarbij aangetoond dat er voldoende waarborgen zijn om een conservatievere insteekdiepte of combinatie van regelement insteekdiepten uit te sluiten, zodat analyses bij andere insteekdiepten niet nodig zijn. De KFD is het met deze stellingname eens.
 10. In het staafontwerprapport wordt zowel CARO-E als CARO-E3 genoemd. CARO-E is een niet gevalideerde code terwijl CARO-E3 dat wel is. Indien er berekeningen met CARO-E zijn uitgevoerd dienen deze opnieuw met CARO-E3 te worden uitgevoerd. EPZ geeft aan dat daar waar CARO-E wordt genoemd er CARO-E3 wordt bedoeld. Indien nodig wil

⁴ De cladding equivalent strain (equivalente rek) in de splijfstofomhulling is een maat voor de rek waarbij de rek in de omtreksrichting van de splijfstofstaaf en de rek in verticale richting van de splijfstofstaaf tot één waarde gecombineerd zijn.

- AREVA alle tekst met CARO-E veranderen in CARO-E3. De KFD beschouwt dit punt verder als afgedaan.
11. De KFD constateert dat de toegenomen afkoeltijd ver van de huidige minimale afkoeltijd van 72 uur, die als eis geldt voor het Splitsstof Opslag Bassin (SOB), is komen te liggen. KFD vraagt derhalve aan EPZ hoe hier mee om zal worden gegaan en welke structurele maatregelen daarbij genomen zullen worden. EPZ antwoordt dat de huidige praktijk zal worden gehandhaafd, waarbij de kern op z'n vroegst 136 uur na afschakeling wordt ontladen en dat de ontlading ca. 24 uur duurt. Als basis voor de transiënten analyse betreffende de SOB koeling geldt nu dat tot het einde van de kernontlading (160 uur) de 2 strangen van SOB koelsysteem beide beschikbaar zijn en dat de maximale temperatuur van het bassinwater niet meer dan 50 °C mag bedragen. Na 160 uur wordt verlies van 1 keten (strang) van het koelsysteem verondersteld, de maximum toegestane temperatuur is dan 60 °C. De genoemde 72 uur uur geldt als de splitsstof nog in het geopende vat zit en gekoeld wordt via het nakoelsysteem.
Tevens wordt de daadwerkelijke vervalwarmte in het jaarlijkse kernontwerp rapport berekend en zal als extra check de kern pas ontladen worden als de koelcapaciteit van het SOB als functie van de temperatuur van de Westerschelde vergeleken is met de vervalwarmte van de kern en als voldoende is beoordeeld. De KFD accepteert deze stellingname.
 12. GRS heeft aangegeven dat bij de inzet van MOX splitsstofelementen in de kern de grootte van de snelle flux gradiënten kan toenemen. Hierdoor neemt het risico op het kromtrekken van de splitsstofelementen ten gevolge van een ongelijk uitzetten van de regelstaafgeleidebuizen toe. AREVA geeft als antwoord dat de ervaring tot nu toe is dat alleen bij splitsstofelementen met een totale lengte van 4.83 m en een actieve lengte (gedeelte waarin de splitsstoftabletten zitten) groter dan 3.90 m in de afgelopen jaren bij sommige Duitse centrales een duidelijk kromtrekken gedetecteerd kon worden. Bij elementen zoals die van Borssele met een lengte van ca. 3.30 m en een actieve lengte van 2.65 m is dat niet het geval omdat deze door hun compactere afmeting veel stijver zijn. Dezelfde trend wordt wereldwijd waargenomen. Zover het fenomeen van kromtrekken nu begrepen wordt, spelen niet alleen de mechanische belastingen t.g.v. door straling geïntroduceerde kruip een rol maar zijn de hydraulische stromingsbelastingen van een nog groter belang. Ook laten waarnemingen betreffende problemen met het kromtrekken van splitsstofelementen duidelijke patronen in kernen zien waar meerdere elementen waren kromgetrokken, die niet verklaarbaar waren door fluentie gradiënten maar wel door stromingsprofielen. Ofschoon er weinig correlatie bestaat tussen het buigen van splitsstofelementen en neutronenfluentie/opbrand, wenst KFD gezien het ambitieuze MOX programma toch een soort monitoring programma met een nadruk op zowel de mogelijkheid van het kromtrekken van splitsstofelementen als het vroegtijdig detecteren daarvan. Zie verder H17, voorschrift 5.
 13. GRS adviseert een kwalificatie te eisen voor hoog opgebrande MOX/M5 splitsstofstaven (> 60 MWd/kg splitsstof). EPZ zegt toe de kwalificatie van de MOX elementen voor het hoge opbrandgebied mee te laten lopen met het bestaande kwalificatieprogramma van de UO₂/M5 splitsstof in Borssele. Zie verder het voorgestelde vergunningsvoorschrift H16, punt 6, waarin tevens de beperking in de maximale opbrand van 60 MWd/kg splitsstofstaven wordt herhaald.
 14. In navolging van punt 9 hierboven verzoekt KFD om duidelijk aan te tonen dat regelstaafposities die een rol spelen in de analyse van regelstaafuitworpongevallen conservatief zijn en andere nog conservatievere posities niet mogelijk zijn ofwel om een aantal fictieve nog ongunstiger posities te analyseren. In de stellingname van EPZ [51] geeft EPZ duidelijk aan dat gegeven de door het reactorregelsysteem ingebouwde begrenzingen conservatievere regelstaafstanden niet mogelijk zijn. Alleen indien willens en wetens, geheel tegen de voorschriften in, het reactorregelsysteem wordt overbrugd en buiten de in de bedrijfsvoorschriften voorgeschreven gestelde grenzen de regelstaven handmatig bedient, is dat mogelijk. Een dergelijk onwaarschijnlijk scenario valt naar mening van de KFD buiten de definitie van ontwerpbasis ongeval.

15. KFD vraagt om de nadere onderbouwing van de verandering van de onderste grenswaarde van de koelmiddel temperatuurcoëfficiënt van -70 pcm/K in -75 pcm/K. In de stellingname van EPZ [51] wordt gesteld: "Om een ruime afstand te bewaren tussen de berekende beste schatting (-63 pcm/K) en de in de thermohydraulische analyses gebruikte conservatieve waarde is deze laatste gewijzigd van -70 pcm/K in -75 pcm/K" De KFD vindt deze verklaring afdoende.
16. KFD vraagt om een analyse naar de mogelijkheden en de effectiviteit van het boreringsysteem gegeven het gebruik van verrijkt boor. EPZ antwoordt dat in de haalbaarheidsstudie uit is gegaan van natuurlijk boor. Eén essentieel resultaat is dat langdurige sub-kritikaliteit (met de huidige concentratie natuurlijk boor) niet gewaarborgd kan worden voor LOCA en externe begingebourtenissen. Daarom is een aanvullend onderzoek uitgevoerd waarbij is gekeken naar de eisen aan de boreersystemen om de verrijkt boor (^{10}B) samenstelling te bepalen waarbij aan alle veiligheid- en operationele eisen wordt voldaan. Indien verrijkt boor wordt toegepast met een concentratie van 32% w/o ^{10}B wordt voldaan aan alle veiligheidscriteria zoals beschreven in [50]. De KFD is het met deze stellingname eens. Zie verder H. 12 van dit rapport.
17. GRS beveelt aan om de borium terugkoppelingscoëfficiënt opnieuw te berekenen wanneer de uiteindelijke specificaties van het boorzuur bekend zijn. De KFD gaat er van uit dat dit ook in het kader van de daadwerkelijke jaarlijkse kernontwerprapporten zal gebeuren. In [51] stelt EPZ dat deze aanbeveling wordt overgenomen. De exacte specificaties van het boorzuur zullen als onderdeel van een wijzigingsplan voor invoering van verrijkt boorzuur worden vastgesteld.

16. Conclusies

a. Reactorfysische veiligheidsanalyses

De KFD beschouwt de gekozen uitgangspunten van de analyses voldoende conservatief om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen dat de reactorfysische parameters binnen de daartoe gestelde veiligheidslimieten blijven voor:

- zowel een 40% MOX kern,
- als voor een c-ERU kern,
- als voor combinaties daarvan.

Hoewel er geen redenen zijn om eraan te twifelen dat de gebruikte reactorfysische modellen tot goede en betrouwbare uitspraken leiden in een gebied waar tot op heden geen uitgebreide bedrijfservaringen bestaan; n.l. een plutonium vector met 5,4 % splijtbaar plutonium, wordt toch aanbevolen om voorzichtig te beginnen met 8 voorloper elementen. Hiervan dienen er 4 geplaatst te worden op de posities van het zgn. kogelmeetsysteem. Tot nu toe heeft alleen de Zwitserse kernenergiecentrale Gösgen ervaring met een plutoniumvector met 5,1% splijtbaar plutonium.

Voor wat betreft de inzet van gerecycled uranium is het gerechtvaardigd om het verlies aan reactiviteit door het neutronen absorberende U-236 te compenseren tot een maximum waarde van 0,2% U-235. Omdat de hoeveelheid U-235 die nodig is om het verlies t.g.v. U-236 te compenseren ca. 1/3 is van het aantal gewichtprocenten U-236 in het gerecyclede uranium, stelt de KFD voor een extra voorschrift aan de vergunning toe te voegen. Daarin komt de voorwaarde dat de hoeveelheid extra U-235 ter compensatie niet meer mag bedragen dan 1/3 van de hoeveelheid U-236 in het gerecyclede uranium met een maximum van 0,2 gewichtprocenten U-235. Indien de extra hoeveelheid U-235 meer zou zijn dan 1/3 van het aantal gewichtprocenten U-236 hebben we in feite te maken met een extra verhoging van de nu vergunde 4,4% verrijkingsgraad van de uranium splijtstof. Voor zo'n situatie zijn geen reactorfysische en thermohydraulische analyses uitgevoerd.

Indien de hoeveelheid extra U-235 ter compensatie niet meer bedraagt dan 1/3 van de hoeveelheid U-236 zijn de huidige analyses van de uranium splijtstof met een verrijkingsgraad van 4,4% U-235 afdekkend om aan te tonen dat de veiligheidsgrenzen niet worden overschreden tijdens de ontwerpbasisongevallen. Nieuwe veiligheidsanalyses voor c-ERU zijn derhalve niet nodig.

b. Thermohydraulische veiligheidsanalyses

De KFD beschouwt de gekozen verzameling van 16 veiligheidsanalyses voldoende afdekkend om aan te tonen dat tijdens alle voorzienbare ontwerpbasis ongevallen die kunnen leiden tot een verstoring van de warmte- en neutronenhuishouding, de gestelde veiligheidsgrenzen niet worden overschreden.

De KFD beschouwt de bestaande praktijk, door zowel hardware maatregelen als procedurele maatregelen, voldoende om nog ongunstiger regelstaafstanden dan die in de analyse van regelstaafuitworp ongevallen zijn geanalyseerd, als praktisch uitgesloten te bestempelen. Verdere analyses van regelstaafuitworp ongevallen zijn niet nodig.

c. Radiologische veiligheidsanalyses

De KFD is het eens met de conclusies dat:

- De keuze van de diverse gepostuleerde begingebourtenissen geheel volgens de stand der techniek is uitgevoerd.
- De analyses voldoende conservatisme bevatten om zeker te stellen dat de dosislimieten bij de hier beschouwde gepostuleerde begingebourtenissen niet worden overschreden.

d. Mechanisch ontwerp van de splijstofelementen

De KFD neemt de aanbeveling van GRS over voor een monitoring programma om een eventueel kromtrekken van de splijstofelementen in een zo vroeg mogelijk stadium te detecteren. Met name die UO₂ elementen die naast MOX elementen hebben gestaan verdienen speciale aandacht. Overigens beperkt dit monitoringsprogramma zich niet tot UO₂ splijstof elementen alleen, maar ook MOX elementen dienen daarvan uit te maken. Een en ander afhankelijk van de fluxverschillen tussen twee tegenovergestelde zijanten van desbetreffend splijstofelement.

Voor wat betreft de theoretische mogelijkheid dat bij zeer hoge opbrand de tangentiële spanning in de splijstofomhulling boven de 90 MPa komt t.g.v. het uitzetten van de splijstoftabletten, stelt de KFD een extra vergunningsvoorschrift voor om deze kwestie te incorporeren in de overige kwalificatie-eisen van de splijstofelementen in het opbrandgebied boven het nu vergunde.

e. Invloed van neutronenspectrum MOX op vatwand reactor

De KFD is het eens met de constatering van AREVA dat de snelle neutronen (> 1MeV) fluentie na 55 jaar vol vermogen reactorbedrijf de ontwerpwaarde van $3.50 \cdot 10^{19}$ neutronen/cm² dicht benadert. Alhoewel het voorziene einde van de levensduur van KCB ca. 52 jaar vol vermogen reactorbedrijf is, waarmee de marge iets groter wordt, is handhaving van de uitgangspunten van de analyse van groot belang voor de voorziene levensduur. Daarom stelt de KFD een vergunningsvoorschrift voor waarin wordt gesteld dat:

1. Indien de gemiddelde opbrand kleiner wordt dan 38 MWd/kg splijstof,
2. òf indien het huidige concept van een "Low Leakage" kern wordt verlaten, bijv. door het plaatsen van verse splijstofelementen in de buitenste ring,

dan dient de vergunninghouder opnieuw desbetreffende berekeningen uit te voeren onder de nieuwe randvoorwaarden.

f. Vervalwarmte

De KFD is het eens met de wijze waarop de vervalwarmte is berekend. Het feit dat de door GRS verrichte controleberekeningen categorisch resultaten opleverden die enkele procenten lager liggen, geeft naar mening van de KFD een voldoende basis om de analyses waarbij vervalwarmte een rol speelt voor wat betreft dat aspect als onderbouwing bij de aanvraag te laten dienen. Met name de huidige praktijk met inbegrip van de bijbehorende interne voorschriften betreffende het tijdstip wanneer het reactorvat ontladen mag worden, geven voldoende garantie dat de koeling van het splijstof opslagbassin voldoende is om de vervalwarmte uit het SOB af te voeren.

g. Niveau-3 PSA uitkomsten.

Zowel het berekende individuele risico als het groepsrisico ten gevolge van buitenontwerpongevallen laten geen noemenswaardige verschillen zien indien wordt uitgegaan van dan wel een ENU kern (uraniumoxide kern op basis van verrijkt natuurlijk uranium), dan wel een c-ERU kern, dan wel een MOX kern.

De berekening van de respectievelijke kerninventarissen door middel van opbrandberekeningen van zowel de MOX als de c-ERU evenwichtskernen is geheel volgens de stand der techniek uitgevoerd.

De rekenmethode voor de verspreidings- en dosisberekeningen is geheel volgens "Richtlijn niveau-3 PSA" uitgevoerd. Hiervoor is het rekenprogramma 'COSYMA' gebruikt.

h. Wijzigingen in ontwerp en procedures t.g.v. de invoering van MOX

Om de boorzuurvoorziening ook gedurende alle ontwerpbasis ongevallen effectief te laten zijn is het noodzakelijk om de verrijkingsgraad van het B-10 te verhogen van 19,78% naar 32% . De KFD heeft vanzelfsprekend hiertegen geen bezwaar. Wel wil de KFD tenminste 6 maanden voordat de eerste MOX elementen worden geladen een implementatieplan overhandigd krijgen.

Voor wat betreft de aanpassing van de instelwaarden van het reactorregelsysteem is nog geen informatie ontvangen. Ook ten aanzien hiervan wil de KFD minimaal 6 maanden voordat de eerste MOX splijstofelementen in de kern geladen worden, een wijzigingsplan ter goedkeuring voorgelegd krijgen.

i. Ingebrachte zienswijzen

De in de zienswijzen genoemde feiten dat bepaalde reactorfysische parameters, zoals fractie vertraagde neutronen, moderatortemperatuur coëfficiënt, regelstaafwerkzaamheid en werkzaamheid boorzuur voor plutonium ongunstiger zijn dan voor uranium zijn correct. De conclusie dat het daarom onveilig wordt, wordt echter niet door de KFD gedeeld omdat er nog steeds ruime afstand bestaat tot de daartoe geldende veiligheidsgrenzen.

De zienswijze dat er te weinig bedrijfservaring is om een inzet van 40% MOX veilig kan te kunnen waarborgen wordt door de KFD niet gedeeld omdat:

- de gebruikte analyses in het gebied waar wel ruime ervaring bestaat, correcte voorspellingen doen, en
- voor het gebied waar minder ervaring bestaat de inzet van zgn. voorloperelementen tijdig voldoende bedrijfservaringen en meetgegevens oplevert om de veiligheid bij 40% MOX inzet te kunnen waarborgen.

De combinatie van goede veiligheidsanalyses en verificatie door metingen wordt als afdoende beschouwd om aan te tonen dat toepassing van 40% MOX veilig is.

De ingebrachte zienswijze dat het risico als gevolg van ernstige ongevallen is toegenomen wordt evenmin door de KFD gedeeld omdat:

- er aan de kans op die ongevallen niets verandert,
- de vervalwarmte van MOX elementen de eerst twee dagen juist lager is dan van UO₂ splijstofelementen en dus dientengevolge geen negatief effect op het kern degradatieproces zal zijn,
- de verandering van de inventaris splijtingsproducten in de brontermen marginaal is.

De ingebrachte zienswijze dat het risico op splijstofschade onder LOCA condities van MOX splijstofelementen is toegenomen t.g.v. de toegenomen opgeslagen warmte, wordt door de KFD aannemelijk geacht. Met name speelt het een rol bij hoog opgebrachte splijstof. De zienswijze dat desbetreffend risico groot is wordt niet door de KFD gedeeld, omdat:

- er nog steeds een ruime afstand is tot desbetreffende veiligheidsgrenzen ,
- er een beperking geldt t.a.v. de opbrand van de splijstofelementen.

j. Afhandeling van tussentijdse vragen en commentaren

Alle tussentijdse vragen, aanbevelingen en opmerkingen zijn tot volle tevredenheid van de KFD beantwoord, dan wel opgevolgd dan wel gecorrigeerd door de vergunninghouder EPZ.

17. Voorgestelde voorschriften vergunningswijziging betreffende splijfstofdiversificatie

1. De maximale hoeveelheid gewichtsprocenten U-235 ter compensatie van het reactiviteitsverlies ten gevolge van neutronenabsorptie door U-236 in c-ERU mag niet meer bedragen dan 33.3% van de aantal gewichtsprocenten U-236 aanwezig in desbetreffende splijstofelementen en mag daarbij een waarde van 0.2 gewichtsprocenten U-235 niet overschrijden.
2. Bij de eerste kernbelading waarbij MOX elementen worden geladen mag het aantal te beladen MOX elementen niet meer dan 8 bedragen. Deze elementen dienen als voorloperelementen beschouwd te worden. Daarom dienen tenminste 4 daarvan op posities van het kogelmeetsysteem te worden geplaatst. Een analyse van de kogelmetingen dient binnen drie maanden na de volgende splijstofherlading aan de directeur KFD te worden overlegd.
3. In de 4 daarop volgende cycli mogen slechts maximaal 12 verse MOX elementen worden geladen. Gedurende deze cycli dienen zoveel als redelijkerwijs mogelijk en uitvoerbaar is, de MOX elementen op een positie van het kogelmeetsysteem te staan. In ieder geval dienen de voorloperelementen die gedurende de eerste cyclus op een positie van het kogelmeetsysteem hebben gestaan gedurende hun restlevensduur in de kern op een (willekeurig welke) positie van het kogelmeetsysteem te worden geplaatst. Een analyse van de resultaten van de kogelmetingen dient jaarlijks aan de directeur KFD te worden overlegd. In de cycli na deze eerste 5 cycli mag maximaal 16 verse MOX elementen per cyclus worden geplaatst mits er voldoende afstand tot de grenswaarden van de sleutelparameters blijft bestaan en het maximum van 48 MOX elementen in de kern niet wordt overschreden. Met voldoende afstand wordt hier een foutenmarge van 2σ bedoeld, dan wel 5% van desbetreffende grenswaarde.
4. Tenminste 6 maanden voorafgaande aan de eerste kernbelading met MOX elementen dient EPZ een plan van aanpak betreffende het bijbehorende meetprogramma ter goedkeuring aan de directeur KFD te overleggen.
5. EPZ dient tenminste 6 maanden voorafgaande aan de eerste kernbelading met MOX elementen een plan van aanpak ter goedkeuring aan de directeur Kernfysische Dienst te overleggen omtrent een monitoringsysteem betreffende eventuele vormveranderingen van de splijstofelementen. Met name dient aandacht te worden geschonken aan de mogelijkheden voor het kunnen detecteren van een beginnend kromtrekken van de splijstofelementen. De resultaten van het monitoringsprogramma dient jaarlijks aan de directeur KFD te worden overlegd.
6. Het lopende kwalificatieproces voor de bestaande M5 HTP UO_2 splijstofelementen dient voor een staaftgemiddelde opbrand boven de 60 MWd/kg splijstof uitgebreid te worden voor MOX elementen. Daarnaast wordt lopende het kwalificatieproces een opbrandlimiet gesteld aan de maximaal te bereiken opbrand binnen de MOX splijstofstaven van 65 MWd/kg splijstof. Met name de rechtvaardiging van de verhoging van de limiet voor de equivalente rek van de splijstofomhulling ten gevolge van het opzwellen van de splijstoftabletten bij hogere opbrand van 2,5% naar 3,5% dient onderdeel van dit kwalificatieproces te zijn. Daarbij dient aangetoond te worden dat de tangentiële spanning niet boven de 90 MPa uitkomt om zeker te stellen dat er geen heroriëntatie van de gevormde hydriden plaatsvindt.
7. De bestaande beperking voor de maximale staaftgemiddelde opbrand van de 4,4% verrijkte UO_2 splijstofelementen tot 60MWd/kg splijstof wordt uitgebreid naar zowel c-ERU als MOX splijstofelementen.
8. Indien de huidige MOX splijstof niet meer verkrijgbaar is en daardoor alleen nog maar MOX met een afwijkende samenstelling te verkrijgen is, dan dient EPZ de Kernfysische Dienst daarvan onmiddellijk in kennis te stellen. Met afwijkende samenstelling wordt hier bedoeld een samenstelling waarvan de verhouding tussen de hoeveelheid splijtbaar plutonium en niet-splijtbaar plutonium met meer dan 10% wijzigt (bij een gelijkblijvend

- gewichtpercentage splijtbaar plutonium) en/of de verhouding tussen Pu-239 en Pu-241 binnen de fractie splijtbaar plutonium met meer dan 10% verandert. Minimaal i jaar voordat desbetreffende veranderde MOX in de kern geladen kan worden dient EPZ nieuwe kernberekeningen van de evenwichtskern, d.w.z. een evenwichtskern waarvan de 48 MOX elementen de nieuwe samenstelling van het MOX hebben, aan de directeur Kernfysische Dienst ter goedkeuring te overleggen. Te allen tijde blijft gelden dat er voldoende afstand tot de grenswaarden van de sleutelparameters blijft bestaan (2σ dan wel 5% van desbetreffende grenswaarde)
9. Voordat c-ERU en/of MOX splijstofelementen op de locatie Borssele worden afgeleverd, dient het personeel dat belast is met de hantering van de splijstofelementen extra getraind te zijn in de specifiek daarbij behorende stralenbeschermingsprocedures. Deze procedures dienen uiterlijk 6 maanden daarvoor aan de Kernfysische Dienst ter beoordeling te worden overlegd.
 10. Binnen 3 maanden na publikatie van de definitieve beschikking dient de vergunninghouder:
 - de herziene sleutelparameter rapporten,
 - een integraal MOX-implementatieplan met ondermeer daarin (a) een plan van aanpak betreffende de invoering van boorzuur met verrijkt boor, (b) een lijst van aan te passen instelwaarden van het reactorregelsysteem en (c) een lijst van (procedure)wijzigingen behorend bij de invoering van MOX.ter goedkeuring aan de directeur van de Kernfysische Dienst te overleggen.
 11. Zodra de gemiddelde opbrand van de MOX evenwichtskernen structureel ruim (>10%) onder de 38 MWd/kg splijstof uitkomt, of wanneer Borssele structureel significant gaat afwijken van de huidige praktijk van de zgn. "Low Leakage Kern", bijvoorbeeld door het plaatsen van verse MOX en/of UO₂ splijstofelementen in de buitenste ring van de kern, dienen de berekeningen van het effect van die nieuwe situatie op de inwerking van de snelle neutronen fluentie (> 1 MeV) op de wand van het reactorvat opnieuw te worden uitgevoerd. De gemiddelde opbrand voor zowel BOC als EOC dienen jaarlijks in het kernontwerprapport te worden vermeld. Daarnaast dient EPZ de fluentie op het reactorvat in de 10-jaarlijkse veiligheidsevaluatie te herevalueren.
 12. De procedure voor het vergelijken van de koelcapaciteit van het SOB als functie van de temperatuur van de Westerschelde en de vervalwarmte van de afgeschakelde kern als functie van de tijd dient in het bedrijfshandboek te worden vastgelegd.
 13. De vergunninghouder dient minimaal 1 jaar voor de eerste inzet van MOX-splijstofelementen een plan van aanpak betreffende zowel de transporten als het hanteren van verse MOX-splijstofelementen aan de directeur KFD ter informatie voor te leggen. Een wezenlijk onderdeel van dat plan van aanpak is een opleiding- en trainingsprogramma voor het bedrijfseigen personeel dan wel een beschrijving hoe zeker gesteld wordt dat personeel van derden voldoende gekwalificeerd is om deze splijstof te hanteren.

18. Beoordeelde en referentie documenten behorende bij de aanvraag

A. Documenten die bij de aanvraag voor vergunningswijziging zijn ingediend

1. Beschrijving van de voorgenomen wijziging; brandstofdiversificatie d.m.v. de inzet van c-ERU en MOX ten behoeve van de aanvraag om een wijzigingsvergunning ingevolge de kernenergiewet voor de kerncentrale Borssele; NRG-22277/10.100325; 2010
2. Wijzingen Veiligheidsrapport
3. Milieu Effect Rapportage

B. Onderbouwende documenten

Neutronenfysica en kernontwerp

4. KCB- Reactorphysikalische Machbarkeitsstudie zum Einsatz von MOX-Brennelementen; AREVA Arbeitsbericht A1C-1334644-0; 25-04-2008.
5. KCB; Neutronenphysikalische Auslegung von MOX-Brennelementen; AREVA Arbeitsbericht A1C-1334588-0; 30-04-2008.
6. NPP Borssele, shutdownmargin and reactivity at HZP, EPZ raport KTO/JKr/Bec./R106034; 06-02-2010.
7. KCB- Reactorphysikalische Verträglichkeitsstudie zum Einsatz von ERU-Brennelementen; Framatome ANP Arbeitsbericht A1C-1311067-0; 12-06-2002.

Mechanisch ontwerp splijtstofelementen

8. Borssele: Fuel Rod Design Report for MOX fuel in M5 fuel rods; AREVA Work-Report A1C-1334810-2; 26.01.2010.
9. Kriechdehnfähigkeit von Brennstab-Hüllrohren aus Zirkon-Basislegierungen während des Reaktoreinsatzes und bei der Trockenlagerung; AREVA Technischer Bericht A1C-1333024-0; 11.4.2007.
10. KCB: Anforderungen an die Boriersysteme beim Einsatz von MOX-BE; AREVA Arbeitsbericht NESS-G/2009/de/0030; 2009-05-27.

Validatie en kwalificatierapporten kernberekening codes

11. SAV95 Qualification Report (Verification and Validation); SIEMENS Technical Report A1C-1303128-2; 31-07-1997.
12. CASCADE-3D-Status of Qualification for Siemens Built Reactors; SIEMENS Work-Report A1C-1323421-2; 18.01.2010
13. CASCADE-3D/SAV95 Status of Qualification for Non Siemens PWR; AREVA Work Report A1C-1310569-2; 15.02.2008.
14. D.Porsch, H.-D.Berger and L.Hetzelt; Validation of Cascade-3D for PWR MOX Core Design- an On-going Process; Proceedings PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002.

Thermohydraulische veiligheidsanalyses

15. KCB: Einsatz von MOX-BE PIE 1.4 Fehlöffnen von Armaturen im Sekundärkreis; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0178; 2008-11-17.
16. KCB: Einsatz von MOX-BE PIE 2.6.1: Ausfall der betrieblichen Bespeisung. Dokumentation der begleitenden Rechnung zur Plausibilitätsbetrachtung; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0234; 2009-03-20.

17. KCB: Einsatz von MOX-Brennelemente- PIE 2.3.2 TUSA ohne FDU; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0160; 2008-11-17.
18. KCB: Heißstabanalyse; Bestimmung von LOCA – Eingabedaten für S-RELAP5 für einen UO₂- und MOX Brennstab mit M5-Hüllrohr, Erweiterte Abbrandintervalle; AREVA Arbeitsbericht A1C-13335811-1; 22.02.2010.
19. KCB: MOX-Studie; Neutronenphysikalische Eingangsdaten für Punktkinetikrechnungen; AREVA Arbeitsbericht A1C-1335291-0; 2008.
20. KCB MOX Plausibilitätsbetrachtungen PIE 2.5.1 kurzfristiger Notstromfall PIE 7.3.2.1 DE-Heizrohrversagen ohne Notstrom; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2010/de/0027; 2010-03-26
21. KCB; Einsatz von MOX-BE PIE 2.2 Lastabwurf auf Eigenbedarf; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2010/de/0034; 2010-03-26.
22. KCB: Einfluss der Einführung von MOX-BE auf NON-LOCA- und LOCA-Analysen; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0136; 2009-01-21.
23. KCB, MOX-Studie; Verhalten des Reaktorkerns beim Störfall Steuerelementauswurf für Kernbeladungen mit MOX-BE mit bis zu 5.4 w/o PU_{fiss}; AREVA Arbeitsbericht A1C-1337572-0; 29.01.2010.
24. KCB: MOX PIE 9.1.1 Frischdampfleitungsbruch infolge von Erdbeben; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2009/de/0189; 2010-01-21
25. KCB; Einsatz von MOX-BE PIE 2.6.1: Ausfall der betrieblichen Bespeisung. Dokumentation der begleitenden Rechnung zur Plausibilitätsbetrachtung; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0234; 2009-03-20.
26. KCB: Einsatz von MOX-Brennelementen – Plausibilitätsbetrachtungen für NON-LOCA und SB-LOCA; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0291; 2009-03-20.
27. KCB: Einsatz von MOX-Brennelemente – PIE 3.1.1 Ausfall einer Hauptkühlmittelpumpe ; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0139 ; 2008-10-28.
28. KCB: PIE 3.2 Bruch einer Hauptkühlmittel-pumpenwelle; AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0262; 2009-02-08.
29. KCB: Nachweis der ausreichenden Kernkühlung bei Kühlmittelverluststörfällen beim Einsatz vom MOX-Brennelementen (PIE 7.2.3); AREVA Arbeitsbericht NEPR-G/2008/de/0244A; 2009-10-28.
30. KCB: MOX-BE: NON-LOCA Analyse PIE 10.5: Vollständiger Ausfall der Hauptspeisewasserversorgung mit Versagen des Schnellabschaltsystems; KWU Arbeitsbericht NDS1/00/2003; 2000-01-10

Radiologische veiligheidsanalyses

31. Onderbouwende Analyses van 4,4% ENU Splijtstof t.b.v. MER en VR van de Brandstofdiversificatie KCB; NRG-22276/09.97400; 22 oktober 2009
32. Onderbouwende Analyses van ERU Splijtstof t.b.v. MER en VR van de Brandstofdiversificatie KCB; NRG-22276/09.97387; 23 oktober 2009
33. Onderbouwende Analyses van MOX Splijtstof t.b.v. MER en VR van de Brandstofdiversificatie KCB; NRG-22276/08.90048; 18 maart 2010

Materiaaleigenschappen

34. KCB: Impact of MOX fuel on the fast neutron fluence ($E > 1$ MeV) of the reactor pressure vessel and the irradiation capsules SOP 3 and 4; AREVA Work Report NEPR-G/2009/en/3502; 2009-04-07.
35. Auslegungsgrenze für die Beanspruchung von Brennstabhüllrohren aufgrund von betrieblichen Brennstoffschwellen; Framatome ANP Technischer Bericht A1C-1312833-1; 28-04-2003.

Restwarmte t.g.v. MOX elementen in SOB

36. Ergebnisse der Berechnungen zur Nachzerfallsleistung im Kern (1 s bis 720 h nach RESA) mit MOX Zuschlägen; NESS-G/2008/de/0088
37. KCB: Berechnungen der Nachzerfallsleistung im BE-Lagerbecken mit einer Mischbelegung mit Uran-BE (4.45 w/o in U235) und MOX-BE (%.41 w/o Pu-fiss in U-tails), NESS-G/2008/de/0089

C. Beoordelingskader reactiviteitsongevallen

38. Carlo Vitanza; A Review and interpretation of RIA Experiments; Nuclear Engineering and Design, Vol. 39 No. 5, october 2007.
39. Nuclear Fuel Behaviour under Reactivity-initiated Accident (RIA) Conditions; State-of-the-art Report; NEA/CSNI/R(2010)1; ISBN 978-92-64-99113-2
40. Nuclear Fuel Behaviour under Loss-of-Coolant Accident (LOCA) Conditions; State-of-the-art Report; NEA No. 6846; ISBN 978-92-64-99091-3 (2009).

D. GRS Beoordelingsrapport, brieven KFD met voorlopige stellingname en KFD reisverslagen

41. Assessment of Fuel Diversification and MOX Usage at the Borssele Power Plant (KCB); GRS Report, 16.04.2010.
42. Vergunningaanvraag brandstofdiversificatie; VI/KFD/2010002247_547_LeY; d.d. 20-01-2010
43. GRS beoordeling van de onderbouwende analyses behorende bij een inzet van MOX splijtstof in de kernenergiecentrale Borssele; VI/KFD/2010012744_547_VeM; d.d. 22-04-2010.
44. Y. v. Leeuwen en M.F. Versteeg; Reisverslag werkbezoek AREVA 22-23 november 2009, RT09-171.547
45. Y. v. Leeuwen en M.F. Versteeg; Reisverslag werkbezoek GRS 13-14 december 2009, RT10-005.547

E. Andere referentiedocumenten

46. KCB, Sicherheitstechnische Rahmenbedingungen für Auslegung und Betrieb des Reaktorkerns, Siemens-Arbeitsbericht A1C-1302106-1 rev. 3, 4 juli 2005.
47. KCB, Nachweisstand für sicherheitstechnische Parameter' Siemens-Arbeitsbericht A1C-1303165-1 rev. 3,4 juli 2005.
48. KCB-Reaktorphysikalische Rechnungen für den 37. Zyklus; vorläufiger Umsetzplan für den 36. BE-WEchsel (Stand vom 02.12.2009); AREVA Arbeitsbericht A1C-1337854-1, 02. Februar 2010.
49. KCB-Reaktorphysikalische Rechnungen für den 37. Zyklus; endgültiger Umsetzplan für den 36. BE-Wechsel (Stand vom 06.04.2010); AREVA Arbeitsbericht A1C-1338258-0, 09. April 2010.

Wijzigingen in ontwerp en procedures t.g.v. invoering van MOX

50. Anforderungen an die Boriersysteme beim Einsatz von MOX-BE, AREVA Arbeitsbericht NESS-G/2009/de/0030; 27 mei 2009.

Antwoord van EPZ (en AREVA) op beoordelingsrapport GRS en voorlopige stellingname KFD.

51. EPZ beantwoording van GRS vragen in het kader van KFD beoordeling vergunningaanvraag brandstofdiversificatie; Bijlage KT/MCr/EPR/R106115 d.d. 27 mei 2010 behorende bij EPZ brief KTO/JKr/EPR/B01004199 d.d.2 juni 2010.

19. Verklarende Woordenlijst

absorber

Een absorber is een materiaal dat neutronen absorbeert. Sterke neutronen absorbers zijn borium, gadolinium, hafnium en cadmium. Borium wordt toegepast als boorzuur dat in de moderator (primaire koelmiddel) is opgelost, cadmium wordt gebruikt in de regelementen en gadolinium kan worden toegepast als zgn. slijtend gif dat in de splijtstof is verwerkt.

absorptedoorsnede

Zie werkzame doorsnede

afschakelmarge

Afschakelmarge is de veiligheidsmarge in de negatieve reactiviteit van de regelstaven, die moet garanderen dat de reactor onder alle bedrijfs- en ongevalsomstandigheden subkritisch gemaakt en gehouden kan worden.

afschakelreactiviteit

De afschakelreactiviteit is de reactiviteit van de reactor die door afschakeling van de reactor met de regelementen in subkritische toestand is gebracht.

AREVA

Frans-Duitse reactorleverancier ontstaan uit het samengaan van de Duitse reactorbouwer SIEMENS/KWU met de Franse reactorbouwer Framatome

ATWS

Anticipated Transient Without Scram is een operationele storing waarop reactorsnelafschakeling zou moeten plaatsvinden, maar niet gebeurt door een falen daarvan en de reactor daarom in eerste instantie op vol vermogen blijft zonder dat het t.g.v. die storing de warmte kwijt kan raken.

bar

eenheid van druk (1 bar = 100 kPa = 1.01325 atm.)

barn

barn is de eenheid van botsingsdoorsnede $1 \text{ barn} = 1 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$. 1 barn is ruwweg gelijk aan het oppervlak van een atoomkern.

Bèta-straling

Met Bèta-straling worden de door atoomkernen ten gevolge van radioactief verval uitgezonden elektronen of positronen bedoeld. Veelal is er sprake van een neutron dat overgaat in een proton en tegelijkertijd een elektron (bètadeeltje) (behoud van elektrische lading) en een anti-neutrino uitzendt.

BOC

Begin Of Cycle (begin van de bedrijfsperiode) is het ogenblik waarop de reactor gestart is na de splijtstofwisselstop en op vol vermogen draait.

boorzuurwerkzaamheid

De reactiviteitsafname per ppm boorzuur in het primaire koelmiddel ten gevolge van de absorptie van neutronen door B-10. De boorzuurwerkzaamheid is o.a. afhankelijk van de energie van de neutronen; thermische neutronen worden beter geabsorbeerd door B-10 dan hoger energetische neutronen. Tevens kan de boorzuurwerkzaamheid afnemen indien er andere absorbers aanwezig zijn die de neutronenflux verlagen. Dit is o.a. het geval bij MOX waar Pu-239 en Pu-241 meer neutronen absorberen en resp. Pu-240 en Pu-242 vormen dan in geval van U-235.

botsingsdoorsnede

Zie werkzame doorsnede

bronterm

Onder bronterm verstaat men het geheel van factoren die de samenstelling, hoeveelheid en wijze van vrijkomen beschrijven van radioactieve stoffen die t.g.v. ernstige reactorongevallen in de biosfeer terechtkomen.

buiten ontwerp ongevallen

Buiten ontwerp ongevallen zijn ongevallen die het ontwerp van de kerncentrale te boven gaan. Veelal worden hier de zeer ernstige ongevallen onder verstaan die ontstaan in kernsmelt scenario's. Deze scenario's kunnen grotendeels door middel van risico analyses worden geïdentificeerd. Alhoewel in het oorspronkelijke ontwerp geen rekening is gehouden met dergelijke ongevallen is het toch mogelijk om in een aantal gevallen hier door speciale maatregelen, zowel nieuwe extra hardware voorzieningen (modificaties en backfitting van de centrale) als speciale ongevalsprocedures (de zgn. Severe Accident Management Guidelines), hier iets tegen te doen.

defence-in-depth

Zie gelaagd veiligheidsconcept

c-ERU

Compensated Enriched Recycled Uranium is verrijkt uranium waarbij het uranium afkomstig is uit de opwerkingsfabrieken en waarbij het negatieve effect door de absorptie van neutronen door U-236 is goedge maakt door er extra U-235 bij te voegen. U-236 is ontstaan tijdens de bestraling van het U-235 voordat deze opgewerkt werd door neutronenabsorptie van U-235 zonder dat de U-235 kern daarbij spleet.

Dampbelcoëfficiënt

De dampbelcoëfficiënt geeft de reactiviteitsverandering weer als functie van de dichtheid van de moderator, hier het water dat door de kern stroomt. Naarmate er meer stoombelletjes in het water zitten worden de neutronen minder afgeremd waardoor er minder splijtingen door thermische neutronen zijn en de reactiviteit dus afneemt.

D-bank

In de kern zijn op 28 posities regelementen geplaatst, die zijn verdeeld over een L-bank (Leistungsbank) en een D-bank (Dopplerbank). Iedere bank bestaat uit deelbanken van 4 regelementen. De D-bank wordt gebruikt voor compensatie van het dopplerreactiviteitseffect bij vermogensfluctuaties en voor de fijnregeling van de koelmiddeltemperatuurregeling. De L-bank treedt alleen in werking als er sprake is van een grotere reactiviteitsverandering, waarbij de inwerkregelementen dienen voor een snelle vermogensdaling.

DNB

DNB betekent Departure of Nucleate Boiling en houdt de overgang in van kiemkoken naar filmkoken. Aangezien filmkoken min of meer desastreus is voor de warmteafvoer moet altijd ruimschoots onder de grens gebleven worden waarbij filmkoken op kan treden; ook tijdens de ontwerpongevallen. Om filmkoken tegen te gaan is er een veiligheidsgrens gedefinieerd waaraan voldaan moet worden; de zgn. DNB-verhouding. Dit is de verhouding tussen de zgn. kritieke warmteflux, d.i. de warmteflux waarbij filmkoken op kan treden, en de daadwerkelijk optredende warmteflux. Deze waarde moet groter zijn dan 1.3.

DNBR

DNBR betekent Departure of Nucleate Boiling Ratio en is de hierboven genoemde DNB verhouding. (Zie verder DNB)

dollar

Zie \$

Dopplercoëfficiënt

Zie splijstoftemperatuurcoëfficiënt

Doppler-effect

Hier verandering van de werkzame doorsnede voor absorptie van resp. uranium en plutonium als gevolg van verandering van de relatieve snelheid tussen neutronen en resp. uranium of plutonium kernen. Deze worden beïnvloed door de temperatuur in het kristalrooster van de splijststof.

effectieve dosis

Dosis is een fysische grootte die de geabsorbeerde energie per massa-eenheid aangeeft. De SI-eenheid is J/kg die de speciale naam gray (Gy) heeft gekregen. De effectieve dosis is de som van de met de bijbehorende weefselweegfactoren vermenigvuldigde orgaandoses. Op deze wijze krijgt men een maat voor het optreden

van stochastische effecten, indien het lichaam niet homogeen aan straling is blootgesteld. Dat is bijvoorbeeld het geval bij inwendige besmetting.

effectieve fractie vertraagde neutronen β_{eff}

Het blijkt dat de verhouding vertraagde neutronen en neutronen die direct vrijkomen bij de splijting van U-235 en Pu-239 (de prompte neutronen) een andere is dan de verhouding vertraagde neutronen en prompte neutronen die weer meedoen aan het kernsplijtingsproces. Deze laatste fractie wordt in de reactorfysica de effectieve fractie vertraagde neutronen genoemd. Bij reactoren met een kleine compacte kern blijkt dat deze fractie β_{eff} gemiddeld zelfs 25% groter is dan de oorspronkelijke fractie β . Dit komt omdat de vertraagde neutronen in het algemeen een lagere energie hebben (0.2-0.4 MeV) tegen 2 MeV van de prompte neutronen en dus een lagere snelheid hebben dan de prompte neutronen. Neutronen met een lagere snelheid hebben een kleinere kans om uit de reactorkern weg te lekken dan snellere neutronen. Hierdoor blijven er relatief meer vertraagde neutronen over, waardoor de effectieve fractie vertraagde neutronen groter is dan de oorspronkelijke fractie.

elektronvolt (eV)

Een eV is een energiemaat die o.a. gebruikt wordt om de kinetische energie van neutronen in een kernreactor aan te geven. Een elektronvolt is gedefinieerd als de toename van de kinetische energie van een elektron wanneer deze een potentiaalverschil van een volt passeert. Dit is gelijk aan de lading van het elektron vermenigvuldigd met het potentiaalverschil. $1 \text{ eV} \approx 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb} \times 1 \text{ volt} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$. Bij hogere energieën wordt gebruik gemaakt van MeV. $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$.

ENU

Enriched Natural Uranium is uranium dat verrijkt is in verrijkingsinstallaties, zoals die van Urenco, nadat het gewonnen is in de uranium mijnen en omgezet in speciale fabrieken tot UF₆ (uranium hexafluoride). In tegenstelling tot ERU (Enriched Recycled Uranium) waar het uranium niet uit de mijnen komt maar als teruggewonnen product uit de opwerkingsfabrieken zoals van AREVA in Cap la Hague in Frankrijk.

EOC

End Of Cycle is het einde van de cyclus, het ogenblik waarop de reactor gestopt wordt voor splijstofherlading.

EPZ

EPZ staat voor Elektriciteitsproduktie maatschappij Zuid-Nederland en is de vergunninghouder van de kernenergiecentrale Borssele.

ERU

Enriched Recycled Uranium. ERU is analoog aan c-ERU, met die uitzondering dat het verlies aan activiteit t.g.v. de absorptie van neutronen door U-236 niet wordt gecompenseerd door extra U-235, Zie verder c-ERU.

filmkoken

Bij filmkoken is er sprake van een ononderbroken stoomlaagje rond het verhittend oppervlak (hier splijstofomhulling) waardoor er geen contact meer is tussen dat verhittend oppervlak en het water. Hierdoor vindt er onvoldoende koeling plaats van de splijstofomhulling waardoor schade daaraan niet meer is uit te sluiten.

flux

flux heeft hier de betekenis van neutronenstroombichtheid (neutronen/cm²-sec)

fluentie

fluentie heeft hier de betekenis van de over een tijdsperiode geïntegreerde neutronenstroombichtheid (neutronen/cm²)

foutenmarge

Een foutenmarge heeft hier de betekenis van de afstand tussen de berekende waarde en de werkelijke waarde. Veelal gaat dat gepaard met het begrip: onzekerheidsband. Een maat voor de grootte van die onzekerheidsband is de zgn. standaard afwijking. De **standaardafwijking** of **standaarddeviatie**, een begrip in de statistiek, is een maat voor de spreiding van een variabele of van een verdeling.

fractie vertraagde neutronen β

Het grootste gedeelte van de neutronen wordt direct bij het splijtingsproces van U-235 en/of Pu-239 kernen geproduceerd. Echter een klein gedeelte neutronen ontstaat later als gevolg van radioactief verval van splijtingsproducten. De fractie vertraagde neutronen is het aantal % neutronen die niet rechtstreeks bij de splijting ontstaan maar later (wel gerelateerd aan desbetreffende splijting). De fractie vertraagde neutronen voor U-235 is 0,67% en voor Pu-239 0,22%.

De vertraagde neutronen hebben een beduidend langere cyclustijd in de kettingreactie (ook wel levensduur genoemd) dan de snelle neutronen, hetgeen het regelen van een kernreactor technisch mogelijk maakt.

gelaagd veiligheidsconcept

Het gelaagde veiligheidsconcept is het geheel van de opeenvolgende barrières tussen de radioactieve stoffen in de splijtstoftabletten (splijtingsproducten) en de omgeving van de kerncentrale in samenhang met de elkaar overlappende strategieën om de barrières in stand te houden. De strategieën omvatten o.a. de onafhankelijke veiligheidsvoorzieningen om:

- verstoringen van de normale bedrijfsvoering zoveel mogelijk te voorkomen dan wel de gevolgen daarvan te beperken,
- verstoringen betrouwbaar te detecteren en te corrigeren,
- optredende ontwerpbasis ongevallen effectief te beheersen binnen de gestelde vergunningslimieten.

Deze strategieën zorgen tevens voor een redelijke balans tussen voorkoming van kerndegradatie, voorkoming van het falen van de veiligheidsomhulling en het verzachten van de gevolgen van kerndegradatie.

grenswaarde

De term grenswaarde heeft in de tekst de betekenis van een limiet die gesteld wordt aan een zgn. sleutelparameters. Zolang de sleutelparameters, die in het jaarlijkse kernontwerprapport berekend worden, zich binnen de daartoe gestelde grenswaarden bevinden, is verzekerd dat desbetreffende kernconfiguratie geen aanleiding geeft tot een overschrijding van de veiligheids grenzen die bij de diverse ontwerpbasis ongevallen (PIE's) behoren.

heet kanaal factor

De heet kanaal factoren $F_{\Delta H}$ voor de opwarmmarge in het koelkanaal en F_Q voor de warmtebelasting in de splijtstof geven de relatie weer tussen een gemiddeld en nominaal belast koelkanaal en het meest belaste koelkanaal.

hydride

Een hydride is een klein defect in de matrix van het materiaal van de splijtstofomhulling waarin waterstof dat chemisch is gebonden aan een ander element, wordt opgenomen. Ruwweg 20% van het waterstof dat ontstaan is door de corrosie van het materiaal van de splijtstofomhulling wordt geabsorbeerd door het zircaloy. Dat opnameproces wordt beïnvloed door de water chemie, de neutronfluentie, de temperatuur en de materiaaleigenschappen van de splijtstofomhulling. De meeste hydrides bevinden zich vlak onder de oxidelaag. Bij toename van de oxidelaag ($> 50 \mu\text{m}$) zullen de hydrides door de hele wanddikte van de splijtstofomhulling gaan migreren. Bij waterstofconcentraties in het Zr die meer dan 2000 ppm bedragen, kan de splijtstofomhulling zelfs bros worden. Een ander punt van zorg is dat bij grote mechanische spanningen op de splijtstofomhulling ($> 90 \text{ MPa}$) de hydrides van oriëntatie kunnen veranderen waardoor de sterkte nog verder afneemt.

HZP

HZP is Hot Zero Power is een toestand dat de reactor nog wel kritisch is, het primaire systeem warm is en onder druk staat, maar nauwelijks nog vermogen levert (ca. 3 MW).

IAEA

IAEA staat voor International Atomic Energy Agency (Internationaal Atoomenergie Agentschap ook wel Internationaal Atoombureau genoemd) is een onderdeel van de Verenigde Naties dat zich bezig houdt met de vreedzame toepassingen van kernenergie.

isotoop

De kern van alle atomen is opgebouwd uit een aantal positief elektrisch geladen kerndeeltjes, protonen genaamd, en een aantal elektrisch ongeladen kerndeeltjes, neutronen genaamd. Het aantal protonen in de kern bepaalt tot welk element uit het periodiek systeem het atoom behoort en daarmee ook de chemische eigenschappen. Zo behoort een atoom met 8 protonen bij het element zuurstof en een atoom met 92 protonen bij het element uranium. Atomen waarvan de kernen dezelfde hoeveelheid protonen bevatten maar verschillende aantallen neutronen worden isotopen van desbetreffend element genoemd.

k_{eff}

k_{eff} is de effectieve vermenigvuldigingsfactor is het gemiddelde aantal neutronen afkomstig van een splijting die weer een volgende splijting veroorzaken. De overige neutronen zijn ofwel geabsorbeerd in niet splijtingsreacties, ofwel uit de kern gevlogen zonder een reactie te ondergaan. Als $k_{\text{eff}} < 1$ dan is het systeem subkritisch en dooft de reactie uit, als $k_{\text{eff}} = 1$, is het systeem kritisch en blijft de reactie op gang, en als $k_{\text{eff}} > 1$, dan is het systeem superkritisch waardoor het reactorvermogen toeneemt.

KFD

KFD staat voor Kernfysische Dienst. De KFD is een organisatieonderdeel van de VROM Inspectie dat toezicht houdt op de Nederlandse nucleaire installaties en als zodanig ook beoordelingen doet van alle voorgestelde veranderingen van het ontwerp en de bedrijfsvoering van de kernenergiecentrale.

kiemkoken

Bij kiemkoken, ook wel kernkoken genoemd, worden aan het verwarmend oppervlak afzonderlijke dampbellen gevormd. In tegenstelling tot filmkoken blijft het verwarmend oppervlak volledig door het water bevochtigd.

kriticiteit

Zie kritikaliteit

kritikaliteit

Kritikaliteit is de toestand van de reactor ten opzichte van de kritieke toestand. Zie verder k_{eff} .

kritische boorconcentratie

De kritische boorconcentratie is de concentratie boor (in ppm) waarbij de reactor kritisch wordt gegeven de heersende temperatuur, regelstaafstand en hoeveelheid xenon (neutronen absorberend splijtingsproduct) in de splijtstof.

kruip

Kruip is een verschijnsel waarbij een vast materiaal (zoals staal) langzaam deformeert onder invloed van spanning op dat materiaal en daarbij een pseudo-vloeistofachtig gedrag vertoont. Kruip is ernstiger in materialen die sterk verhit zijn. Als vuistregel wordt wel gezegd dat kruip op begint te treden wanneer de temperatuur de helft van de smelttemperatuur (in graden Kelvin) is. Bij metalen hebben we in plaats van een monokristal veelal te maken met een materiaal dat opgebouwd is uit kristalkorrels. Wanneer de spanning op dat materiaal hoog genoeg is en de heersende temperatuur ook voldoende hoog is kunnen de korrels gemakkelijk over elkaar heen schuiven en vertonen een soort glijgedrag.

lineair staafvermogen

Het lineaire staafvermogen is het gemiddelde vermogen van de splijtstofstaaf bij vol reactorvermogen per lengte-eenheid. Dus het vermogen van de staaf (W) gedeeld door de lengte (cm)

L-bank

Zie D-bank

LOCA

Een LOCA (Loss of Coolant Accident) is een koelmiddelverliesongeval. Ten gevolge van een lek in het primaire systeem of een in een niet afgesloten daaraan hangend systeem verliest de reactor koelwater. Dit kan zijn door of een breuk in een leidingdeel of door een openstaande afblaasklep cq. veiligheidsklep. Indien het koelmiddel niet tijdig wordt aangevuld raakt op een gegeven ogenblik de koeling van de reactor in gevaar waardoor

splijstofschade kan ontstaan. Om splijstofschade tegen te gaan zijn er diverse veiligheidssystemen die afhankelijk van de heersende druk in de reactor water suppleren.

LB-LOCA

LB-LOCA is een groot koelmiddelverliesongeval ten gevolge van een dubbelzijdige guillotinebreuk in de hoofdkoelmiddelleiding. In korte tijd verliest de reactor een grote hoeveelheid primair koelmiddel. Gedurende enige seconden kan een gedeelte van de kern zelfs droog komen te staan waardoor de oxidatiesnelheid snel toeneemt. Door injectie vanuit bijvoorbeeld de onder druk staande buffertanks en de opslagtanks van het lage druk kernnoodkoelsysteem en later door injectie van het uitgestroomde water dat zich verzameld heeft onder in de zgn. sump (reactorput) via ditzelfde systeem, wordt de kern weer bedekt en wordt splijstofschade voorkomen.

Low leakage kern

Een 'low leakage' kern is een kern waarbij de neutronenflux aan de rand beduidend lager is dan in het midden van de kern. Er vliegen daarom relatief minder neutronen naar buiten zonder dat ze ofwel aan het kernsplijtingsproces hebben meegedaan ofwel zijn geabsorbeerd in kernmaterialen zoals uranium-238. Een low leakage kern wordt veelal verkregen om de elementen met een relatief hoge opbrand aan de buitenzijde te plaatsen en de verse splijstofelementen wat meer naar het midden.

massa-warmtebalans

De massa-warmtebalans is de dynamische relatie tussen druk, temperatuur, hoeveelheid koelmiddel en stromingsdebiet, inclusief de daarbij behorende faseovergangen tussen water en stoom van het reactorsysteem. Het beschrijft o.a. met behulp van de thermodynamische behoudswetten de effecten van de in de reactorkern opgewekte warmte, de warmteoverdracht in de stoomgeneratoren, het energieverlies in de turbines, de warmteoverdracht in de condensors, en uiteindelijk de warmteoverdracht naar de Westerschelde.

moderator

De moderator is het medium dat de neutronen via elastische botsingen afremt tot ze een thermisch energieniveau bezitten. Bij lichtwaterreactoren zoals die van de kernenergiecentrale Borssele is de moderator tevens het primaire koelmiddel.

moderator temperatuurcoëfficiënt

De moderator temperatuurcoëfficiënt, ook wel koelmiddeltemperatuurcoëfficiënt genoemd, geeft de reactiviteitsverandering weer, gerelateerd aan de verandering van de hoofdkoelmiddeltemperatuur. De reactorkern is ondergemodereerd ontworpen. Dat houdt in dat een temperatuurverhoging met als gevolg een afname van de dichtheid van het koelmiddel de neutronen slechter worden afgeremd wat weer tot een afname van de reactiviteit leidt. De moderator temperatuurcoëfficiënt is derhalve negatief.

De reactiviteit van de reactorkern wordt mede beheerst door gebruik te maken van het in het koelmiddel opgeloste boorzuur. Een afname van de dichtheid van het koelmiddel (door een temperatuurverhoging) zal tevens tot een afname van de dichtheid van de neutronenabsorberende boriumatomen in het koelmiddel leiden. Als gevolg daarvan kan de moderator temperatuurcoëfficiënt bij een toenemende boriumconcentratie in de kern minder negatief worden.

MOX

MOX (Mixed Oxide) splijstof is een splijstof die samengesteld is uit een mengsel van uraniumoxide en plutoniumoxide.

MWd/kg_{splijstof}

Eenheid van opbrand; geeft aan hoeveel energie uit desbetreffende hoeveelheid splijstof is gehaald d.m.v. kernsplijting.

neutronentransport

Neutronentransport behelst de beschrijving van de stroming met bijbehorende massabalans van de neutronen in de kern. Het betreft o.a. afremmen van de neutronen door de watermoleculen, de vangst door uranium en plutoniumkernen, de verstrooiing

door uranium en plutoniumkernen, het weglekken buiten de kern in de wand van het reactorvat.

ontwerp ongeval

Een ontwerpongeval, ook wel ontwerpbasis ongeval of gepostuleerde begingebuurtenis genoemd, is een gepostuleerd ernstig voorval in de kerncentrale waarmee in het ontwerp van de centrale al rekening is gehouden door het aanbrengen van extra voorzieningen om de gevolgen van dat voorval teniet te doen dan wel de gevolgen daarvan zoveel mogelijk te beperken. Bijvoorbeeld zijn er extra noodkoel- en injectiesystemen aangebracht om in geval van een grote breuk van de primaire hoofdkoelmiddel leiding toch koelwater in het reactorvat te injecteren en daarmee de koeling te garanderen.

opbrand

De opbrand ook wel versplijtingsgraad genoemd geeft aan hoeveel energie uit desbetreffende hoeveelheid splijtstof is gehaald als gevolg van kernsplijtingen. Opbrand wordt veelal weergegeven als hoeveelheid MWd/kg splijtstof.

pcm

par cent mille ($1 \cdot 10^{-5}$) is een maat voor de reactiviteit. $1 \text{ pcm} = 1 \cdot 10^{-3} \%$

pellet-clad interacties

Pellet-clad interacties is een verzamelterm voor alle chemische en mechanische wisselwerkingen tussen splijtstoftabletten en splijtstofomhulling. Het heeft ofwel te maken met het uitzetten van de splijtstoftabletten t.g.v. een grote plotselinge warmtebelasting, of met een graduele uitzetting van de tabletten bij toenemende opbrand, vanaf het ogenblik dat de tabletten de splijtstofomhulling raken.

PIE

PIE betekent Postulated Initiating Event (gepostuleerde begingebuurtenis) en is een hypothetische verstoring en/of ongeval waarbij de veiligheidssystemen van de centrale moeten ingrijpen om verdere escalatie te voorkomen. Veelal wordt hiervoor het begrip ontwerpbasis ongeval gehanteerd. Dat wil zeggen een ongeval waarbij in het ontwerp al rekening is gehouden door de introductie van bepaalde veiligheidssystemen die voldoen aan zowel kwaliteitseisen als aan capaciteitseisen. Om bijvoorbeeld een groot koelmiddelverliesongeval te beheersen is er een nood kernkoelsysteem noodzakelijk.

ppm

parts per million is een maat voor het aantal moleculen opgeloste stof per aantal moleculen oplosmiddel zoals boorzuur in water.

precipitaat

Een precipitaat is in de scheikunde een vaste neerslag die wordt gevormd door een chemische reactie in een oplossing.

primaire koelsysteem

Het primaire koelsysteem is een gesloten koelkringloop die de in de reactor geproduceerde warmte via beide stoomgeneratoren overdraagt aan de stoom/waterkringloop, ook wel secundair systeem genoemd. Behalve het primaire koelsysteem is er nog het drukhoudsysteem. Samen vormen deze twee systemen het primaire systeem. Het drukhoudsysteem dient om op de benodigde bedrijfsdruk te komen, deze te handhaven en een ontoelaatbare drukstijging te voorkomen en om volumeveranderingen van het hoofdkoelmiddel op te vangen. Het reactorkoelsysteem bestaat in Borssele uit het reactorvat, 2 stoomgeneratoren, 2 hoofdkoelmiddelpompen en de verbindende hoofdkoelmiddelleidingen. Het drukhoudsysteem bestaat hoofdzakelijk uit drukhouder met verwarming en volumevereffeningsleiding, een sproeisysteem en 3 drukbeveiligingstoestellen.

primaire drukontlastingsklep

De druk in het reactorkoelsysteem wordt beheerst met behulp van de drukbeveiligingstoestellen. De drukontlastkleppen kunnen via handbediening worden geopend. In bepaalde ongevalssituaties is het noodzakelijk om de reactor snel van druk te brengen, waardoor injectie van water door veiligheidssystemen mogelijk is. Het

afwisselend injecteren van water en het openen van de drukontlastingsklep wordt "primaire Bleed and Feed" genoemd.

primaire veiligheidsklep

De primaire veiligheidskleppen kunnen niet via handbediening worden geopend. Alleen door een medium gestuurde pilotklep waarin de openingsdruk is ingesteld met een instelbare veer. Dat wil zeggen bij overschrijding van de ingestelde druk opent de pilotklep zich, waardoor de veiligheidsklep wordt geopend.

prompte neutronen

prompte neutronen zijn neutronen die direct bij het splijttingsproces ten gevolge van die splijting vrijkomen. Dit in tegenstelling tot vertraagde neutronen die tot tientallen seconden later kunnen vrijkomen. Zie verder vertraagde neutronen.

prompte neutronen levensduur

De prompte neutronen levensduur is de gemiddelde tijd tussen vrijkomen van het neutron tijdens de splijting en absorptie in de kern

prompt kritisch

Een reactor is prompt kritisch wanneer door de prompte neutronen alleen de reactor al kritisch zou zijn. Echter de nakomende (vertraagde) neutronen zijn er ook nog en zorgen er dan voor dat de reactor dan over-kritisch is. Het reactorvermogen stijgt heel snel totdat door de toenemende temperatuur de Dopplercoëfficiënt binnen milliseconden en de moderator temperatuurcoëfficiënt binnen seconden voldoende tegenkoppeling leveren zodat de reactor weer 'normaal' kritisch is.

PSA

PSA (Probabilistic Safety Assessment) staat voor een probabilistische veiligheidsanalyse ter bepaling van:

- o de totale kans van de ongevals scenario's die tot kerndegradatie leiden, op basis van frequenties van inleidende gebeurtenissen en betrouwbaarheidsanalyses van de diverse veiligheidssystemen (niveau-1 PSA);
- o de kans op falen van de reactorinsluiting (containment) uitgaande van van kerndegradatiescenario's en de kenmerken van de bijbehorende radioactieve lozingen (brontermen) (niveau -2 PSA);
- o De gevolgen voor de mens in termen van gezondheidsschade, zowel acuut als laat (niveau-3 PSA)

Pu_{fiss}

Pu_{fiss} is het splijtbaar deel van de plutonium dat zich in de MOX elementen bevindt. Het betreft hier de plutonium kernen met een oneven aantal kerndeeltjes (protonen en neutronen), te weten Pu-239 en Pu-241. Naast het splijtbaar deel is er ook een fractie niet splijtbaar plutonium.

reactiviteit

Reactiviteit is een maat voor het afwijken van de reactor van de kritieke toestand. De reactiviteit ρ is de fractionele verandering van de vermenigvuldigingsfactor ($\Delta k/k$) t.g.v. een verandering in de kern door het toevoegen of weghalen van neutronenabsorberende materialen. M.a.w. de reactiviteit is het aantal extra neutronen die per generatie geproduceerd wordt gedeeld door het totaal aantal geproduceerde neutronen. Het aantal extra neutronen kan een negatief getal zijn als we te maken hebben met neutronenabsorberende materialen. De reactiviteit wordt veelal weergegeven in fracties van procenten, zoals pcm, of in $\$$. We kunnen deze maat toepassen op elke bijdrage afzonderlijk, zoals absorbers, of op de reactor als geheel.

Als we de reactor als geheel beschouwen dan is in de kritische toestand de reactiviteit 0; is de reactiviteit > 0 dan stijgt het reactorvermogen en is de reactiviteit < 0 dan daalt het vermogensniveau.

reactorkern

De reactorkern is het totaal aan splijtstof- en regelementen dat zich in het reactorvat bevindt.

reactorsnelafschakeling

De reactorsnelafschakeling, ook wel scram genoemd, is het in de kern laten vallen van alle regelstaven. De regelstaven worden per regelement vastgehouden door een aandrijfstang. Deze stang wordt o.a. vastgehouden door elektromagneten. Door het ontkrachten van die magneten vallen de regelementen door de zwaartekracht omlaag.

recycle

Met recycle wordt hier terugwinnen bedoeld. Het terugwinnen van uranium wordt ook wel opwerking genoemd. Opwerking van opgebrande splijstofelementen houdt in dat het nog aanwezige uranium en het ontstane plutonium door middel van chemische processen voor terugwinning wordt gescheiden van de splijtings- en activeringsproducten.

regelement

Een regelement is een splijstofelement waarin zich 20 beweegbare regelstaven bevinden. Deze regelstaven zijn via een spinvormige constructie bevestigd aan een aandrijfstang. Elk van de 20 regelstaven is opgebouwd uit een metalen buis waarin zich een absorber bevindt, bestaande uit 80% zilver, 15% indium en 5% cadmium.

regelstaafuitworppingeval

Door het afbreken van de aandrijfstang van de regelementen in de buurt van de doorvoering in het reactorvatdeksel worden de regelstaven van desbetreffend regelement door de uitstroomkrachten uit de kern gelanceerd. Het plotseling verwijderen van negatieve reactiviteit is identiek aan het plotseling toevoegen van reactiviteit. Hierdoor wordt in de elementen rond het regelement plotseling een grote hoeveelheid energie in de vorm van warmte geproduceerd.

regelstaafwerkzaamheid

De regelstaafwerkzaamheid geeft de verandering van de reactiviteit aan, gerelateerd aan de verandering van de inschuifdiepte in de kern.

rek

Formeel is rek (in het Engels: strain) een geometrische maat voor een deformatie van een onderdeel (hier de splijstofomhulling) als gevolg van een daarop uitgeoefende kracht, die de relatieve verplaatsing van de deeltjes in het betreffende materiaal aangeeft. Rek definieert de mate waarin dat onderdeel wordt uitgerekt dan wel wordt gecomprimeerd. Rek is een dimensieloze grootte die o.a. kan worden weergegeven als percentage. Rek wordt veelal genoemd in combinatie met mechanische spanning (in het Engels: stress). Er zijn ruwweg twee fasen te onderscheiden: elastische rek waarbij het materiaal weer terugveert in z'n oorspronkelijke vorm bij het wegvallen van de belasting op het materiaal en plastische rek wanneer de vervormingen blijvend zijn. Net als bij de mechanische spanning kennen we bij de rek een axiale, radiale en tangentiële component

re-kritikaliteit

Re-kritikaliteit is het weer kritisch worden van de reactor terwijl toch alle regelstaven volledig in de reactor zijn ingeschoven.

scram

Zie reactorsnelafschakeling

resonantie (resonantievangst)

Wanneer een neutron een atoomkern raakt zal veelal in eerste instantie een nieuwe kern ontstaan met 1 neutron meer in de kern dan de oorspronkelijke 'target' kern. Het blijkt nu dat bij bepaalde energieën van het neutron het makkelijker gaat om de target kern te raken. M.a.w. de botsingsdoorsnede vertoont bij bepaalde energieën maxima. Deze worden resonanties genoemd. De reden hiervoor is dat atoomkernen verschillende aangeslagen toestanden kennen, die overeenkomen met verschillende configuraties van de kerndeeltjes. Het blijkt nu dat wanneer neutronen bepaalde energieën hebben de samengestelde kern in zo'n aangeslagen toestand geraakt. Bij zo'n energie is het veel waarschijnlijker dat er een samengestelde kern wordt gevormd. Resonantievangst speelt bijvoorbeeld een rol in de vorming van Pu-239. Door resonantievangst wordt een neutron ingevangen in U-238. Hieruit ontstaat U-239. Via β -verval (een neutron verandert in een proton en een elektron. Het elektron wordt uitgezonden; $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$) ontstaat Np-239 (Np = neptunium). Via een tweede β -verval ontstaat Pu-239.

scramfalen

Scramfalen is het weigeren van de reactorsnelafschakeling. Scramfalen speelt bij ATWS ongevallen een rol. Zie verder ATWS.

Sleutelparameter

Sleutelparameters zijn de uitkomsten van reactorfysische berekeningen die deel uitmaken van het kernontwerprapport dat jaarlijks wordt gemaakt voor de volgende cyclus. De berekende waarden van de sleutelparameters worden als invoergegevens gebruikt in de veiligheidsanalyses. Zolang de berekende waarden van de sleutelparameters zich binnen de daartoe gestelde grenswaarden bevinden, is verzekerd dat de bestaande veiligheidsanalyses nog steeds geldig zijn en derhalve geen nieuwe analyses nodig zijn en dat de veiligheidsgrenzen door de nieuwe kernconfiguratie niet worden overschreden. Indien een berekende sleutelparameter wel een grenswaarde overschrijdt kan men ofwel de kern aanpassen ofwel door nieuwe veiligheidsanalyses aantonen dat de veiligheidsgrenzen niet worden overschreden. In dat laatste geval moet de berekende waarde plus een ruime onzekerheidsmarge als invoerparameter worden genomen in desbetreffende analyses.

snelle neutronen

Snelle neutronen zijn hier alle neutronen die een veel grotere snelheid hebben dan 2200m/sec (de karakteristieke snelheid van thermische neutronen; dat wil zeggen alle niet-thermische neutronen en dus ook de zgn. epi-thermische neutronen worden hierbij meegenomen. Thermische neutronen hebben ruwweg een energie tussen de 0,001 en 1 eV, epi-thermische neutronen een energie tussen de 1 eV en 1 keV, en snelle neutronen een energie tussen de 1 keV en 10 MeV.

spanning (mechanica)

Spanning is een maat voor de gemiddelde kracht per oppervlakte eenheid binnen een deformeerbaar lichaam waarop inwendige krachten opereren. Deze interne krachten worden in het lichaam geproduceerd door de deeltjes in dat lichaam als reactie op een uitwendige kracht. Mechanische spanning werkt op een oppervlak. Als de spanning loodrecht op het oppervlak van een voorwerp werkt, spreekt men van normaalspanning. Dit is in de natuur meestal niet het geval, de spanning staat meestal onder een (niet loodrechte) hoek met het oppervlak van het voorwerp waar de spanning op werkt. De spanning kan in dat geval verdeeld worden over drie componenten, in elke ruimtelijke dimensie één. De component loodrecht op het oppervlak is de normaalspanning, de componenten parallel aan het oppervlak zijn de schuifspanningscomponenten (aangegeven met τ). Ingeval van bijvoorbeeld de splijtstofomhulling is het makkelijker om over te gaan naar cilindercoördinaten, te weten: de axiale component (in de lengterichting van de buis), de radiale component (loodrecht op het oppervlak van de buis en de tangentiële component (langs de raaklijn loodrecht op de axiale component en de radiale component)

splijtingsdoorsnede

Zie werkzame doorsnede

splijtingsopbrengst

De splijtingsopbrengst is het percentage dat een bepaald isotoop met massagetal X als splijtingsproduct ontstaat bij de versplijting van U-235 of Pu-239 of Pu-241. Zie hoofdstuk 11 waar de splijtingsopbrengst van alle isotopen met een massagetal tussen de 70 en 160 is gegeven voor zowel U-235 en U-239.

splijtstof

Materiaal waarvan bepaalde atoomkernen kunnen splijten ten gevolge van invangen van een neutron. Bij een splijting worden ook weer nieuwe neutronen generereerd die opnieuw voor kernsplijting kunnen zorgen. Indien het gemiddelde aantal neutronen dat beschikbaar is voor kernsplijting steeds hetzelfde is, is er een stabiele kritische toestand. Zie verder k_{eff} .

splijtstofelement

Een splijtstofelement is een verzameling van splijtstofstaven die in een open constructie gebundeld zijn. Door de ruimte tussen de staven stroomt het primaire koelmiddel dat tevens dienst doet als moderator. In de kern van de kernenergiecentrale Borssele

bevinden zich 121 splijtstofelementen. In 28 van die splijtstofelementen is een regelement ingeschoven. De actieve lengte van de splijtstofstaven bedraagt 2,65 m.

splijtstofomhulling

De splijtstofomhulling is de buisvormige buitenzijde van een splijtstofstaaf die van onder en van boven gesloten is. De wanddikte bedraagt ca. 1 mm en de buitendiameter is circa 10,75 mm. Het materiaal 'M5' van de omhulling is een Zirconiumlegering waaraan Niobium is toegevoegd om een nog betere corrosiebestendigheid te krijgen.

splijtstofstaaf

Een splijtstofstaaf is één van de splijtstofhoudende buizen in die zich in een splijtstofelement bevinden. Zie verder splijtstofelementelement.

splijtstoftemperatuurcoëfficiënt [pcm/K]

De splijtstoftemperatuurcoëfficiënt is de reactiviteitsverandering per graad Kelvin temperatuursverandering. Bij een toename van de temperatuur zal door de thermische beweging van de U-238 atomen in de kristalmatrix van de splijtstof de bijbehorende zgn. resonantie absorptie van U-238 voor neutronen toenemen. Hierdoor worden er meer neutronen weggevangen die daarvoor niet meer voor het kernsplijtingsproces beschikbaar zijn. Deze relatie tussen de temperatuur en de reactiviteit wordt ook wel resonantie-absorptiecoëfficiënt of Dopplercoëfficiënt genoemd. Deze terugkoppeling is in hoge mate afhankelijk van de aanwezigheid van U-238. Alhoewel de numerieke waarde klein is, is het effect op de reactiviteit groot door de bijna instantane werking.

stoomgenerator

Een stoomgenerator is een grote warmtewisselaar waardoorheen aan de primaire zijde het primaire koelmiddel stroomt en aan de secundaire zijde het secundaire water dat vanuit de condensors via de condensaat voorraadtanks binnenkomt, wordt verhit door het primaire water tot stoom en vervolgens naar de stoomturbines wordt gevoerd en vervolgens in de condensator weer condenseert tot water. Het primaire water stroomt door vele honderden U-vormige dunne buizen (pijpen) waarin het de warmte overdraagt aan het secundaire water daarbuiten.

stoomgenerator pijpbreuk ongeval

Een stoomgenerator pijpbreuk ongeval is een ontwerpongeval waarbij wordt aangenomen dat er een breuk in een van de U-vormige buizen (pijpen) optreedt. Om dat ongeval tot een goed einde te brengen moet de druk aan de primaire zijde verlaagd worden tot dezelfde druk die aan de secundaire zijde heerst zodat de drijvende kracht voor de uitstroming van primair water niet meer aanwezig is. Vervolgens wordt de water toevoer en de stoomafvoer van desbetreffende stoomgenerator geïsoleerd waardoor het ongeval in feite beëindigd is. Nadat de reactor verder koud en onder-kritisch is, kan de stoomgenerator worden geopend en desbetreffende pijp worden afgestopt, waarna de reactor vervolgens weer kan worden opgestart.

thermische neutronen

Thermische neutronen zijn langzame neutronen waarbij de kinetische energie kleiner dan 1 eV is. Thermische neutronen zijn neutronen die in thermisch evenwicht zijn met hun omgeving. Voor een temperatuur van ca. 300 K komt dat volgens de zgn. Maxwell – Boltzman verdelingsfunctie neer op een energie van 0.025 eV en een snelheid van 2200 m/s.

Het blijkt dat U-235 kernen het beste gespleten worden als de neutronen heel langzaam zijn. M.a.w. de werkzame vangstdoorsnede voor kernsplijting van U-235 kernen is het grootst voor thermische neutronen. Voor de 0.025 eV neutronen bedraagt deze ca. 600 barn. Voor neutron energieën rond de 1eV bedraagt deze nog maar 60 barn. Voor neutron energieën tussen de 1 eV en 100 eV fluctueert de vangstdoorsnede voor splijting heel sterk. Dit wordt het resonantiegebied genoemd. Voor nog grotere energieën neemt de vangstdoorsnede gestadig af. Zie verder snelle neutronen.

transiënt

Een transiënt is een verstoring van de warmtehuishouding van de kernenergiecentrale die als gevolg een reactorsnelafschakeling inhoudt. Bijvoorbeeld bij uitval van de turbine

wordt er minder warmte afgevoerd waardoor de druk en temperatuur aan de primaire zijde stijgt. Bij overschrijding van een of meer instelwaarden van het reactorbeveiligingssysteem spreekt het reactorbeveiligingssysteem aan en volgt er een scram.

turbine omloopkleppen

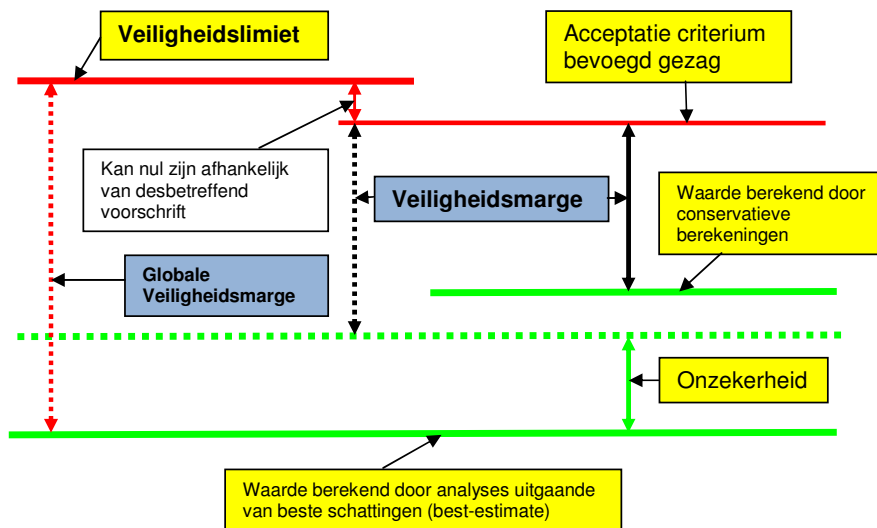
De turbine omloopkleppen leiden de stoom rechtstreeks om naar de condensor en niet eerst naar de stoomturbines.

veiligheidsgrens

Een veiligheidsgrens is een limietwaarde die gesteld wordt aan een numerieke uitkomst van een veiligheidsanalyse. Bijvoorbeeld de eis dat er geen schade van de splijstofomhulling mag plaatsvinden als gevolg van een ongeval kan vertaald worden dat de maximale temperatuur altijd onder een bepaalde waarde blijft waardoor gedeeltelijk smelten van de omhulling niet op kan treden. In dat geval is de grenswaarde een temperatuur. Een andere vertaling is dat er geen filmkoken op mag treden, want bij filmkoken is er geen voldoende warmte afvoer, waardoor desbetreffende temperatuur kan worden overschreden afhankelijk van de tijd waarin filmkoken optreedt. De maat hiervoor is DNBR (Zie verder DNB).

veiligheidsmarge

Een veiligheidsmarge is het verschil (of de verhouding) tussen de grenswaarde/limiet van een bepaalde veiligheidsrelevante parameter uit een veiligheidsanalyse en de actuele (berekende) waarde daarvan. Het overschrijden van de limiet kan aanleiding geven tot falen van een structuur, systeem of component, of kan aanleiding geven tot een ongewenst fenomeen of overgang daartoe. Veiligheidsmarges zorgen samen met het gelaagde veiligheidsconcept (defence-in-depth) ervoor dat toleranties beperkingen en onzekerheden in de veiligheidsanalyses, aannames, data, systeemgedrag en te leveren menselijke prestaties niet leiden tot overschrijding van limieten. In onderstaande figuur is op schematische wijze aangegeven wat met veiligheidsmarge bedoeld wordt en hoe deze zich verhoudt tot de veiligheidslimiet.



vermenigvuldigingsfactor

De vermenigvuldigingsfactor k is gedefinieerd als het aantal splijtingen in een generatie gedeeld door het aantal splijting in de generatie daarvoor. Als $k = 1$ noemen we de reactor kritiek, en als $k < 1$ is dan is de reactor sub-kritiek.

vermogensfactor

De vermogensfactor is een opslag op het nominale vermogen van de reactor om in de analyses een conservatief uitgangspunt te hebben voor de opbrand berekeningen van een splijtstofelement. Het geeft voor elke opvolgende cyclus de meest belaste situatie voor desbetreffend element aan. Zelfs hoog opgebrachte elementen die zelf nog maar weinig splijtstof hebben, kunnen als ze naast veel reactievere elementen staan toch nog aanzienlijk belast worden en daardoor nog een relatief hoge bijdrage aan het vermogen leveren.

verrijkingsgraad

De verrijkingsgraad is het percentage U-235 dan wel splijtbaar plutonium in de splijtstofstaven. Voor UO₂ splijtstof is meer dan 95% het niet splijtbare U-238 oxide en slechts 4,4% U-235 oxide.

vertraagde neutronen

Sommige splijtingsproducten zoals Kr-87 dat uit radioactief verval van Br-87 ontstaat, hebben een overmaat aan neutronen in de kern en zijn dermate onstabiel dat ze een neutron uitzenden. Deze neutronen worden tot tientallen seconden na de oorspronkelijke splijting uitgezonden. Alhoewel de fractie vertraagde neutronen minder dan 1% is van de neutronen die direct bij het splijtingsproces ontstaan (prompte neutronen) spelen de vertraagde neutronen een belangrijke rol bij het onder controle houden van de reactor.

vervalwarmte

De twee brokstukken van de respectievelijk gespeten uranium of plutonium kernen (de splijtingsproducten hebben direct na de splijting veelal meer neutronen in de kern dan noodzakelijk is om een stabiele kern te vormen (bij heel lichte stabiele kernen is de verhouding tussen neutronen en protonen ca. 1 en bij heel zware stabiele kernen is deze opgelopen tot ca. 1.6, d.w.z. 1.6 maal zoveel neutronen als protonen). Dus na splijting moet de oorspronkelijke verhouding van 1.6 van de gespeten splijtstofkern teruggebracht worden naar bijv. 1.3 voor beide splijtingsproducten. Dit gebeurt veelal door een reeks aan β vervallen (neutron vervalt in een proton plus elektron en een anti neutrino; $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$) Zo vervalt bijvoorbeeld Palladium 115 via Zilver 115 via Cadmium 115 naar Indium 115. Deze laatste is stabiel. De bijbehorende β - en γ -straling wordt geabsorbeerd door het materiaal rond desbetreffende kern van vervallend splijtingsproduct, waardoor dit materiaal opwarmt. Veelal is dit materiaal de splijtstofmatrix. Deze warmte wordt vervalwarmte genoemd.

voorloperelement

Voorloperelementen zijn splijtstofelementen die 1 cyclus voorafgaande aan de commerciële inzet van een nieuw type splijtstof in geringe hoeveelheid (meestal 4) in de kern wordt geladen om eventuele extra kwalificatie te krijgen van het gedrag van desbetreffend splijtstofelement, zoals bijvoorbeeld corrosiegevoeligheid. Deze voorloper blijven minimaal even lang in de kern staan als de commercieel ingezette splijtstofelementen om ook het gedrag bij hogere opbranden te bepalen.

werkzame doorsnede

De werkzame doorsnede is in de reactorfysica een maat voor de waarschijnlijkheid dat een bepaalde wisselwerking tussen een neutron en een target kern plaatsvindt (bijv. splijting of absorptie). Deze waarschijnlijkheid is sterk afhankelijk van de energie van de deeltjes of de samenstelling van een target dat wordt beschoten. De werkzame doorsnede wordt aangeduid met σ en heeft de dimensie van oppervlakte. Meestal wordt de werkzame doorsnede uitgedrukt in de eenheid barn. De werkzame doorsnede voor splijtingsprocessen wordt splijtingsdoorsnede genoemd en die voor absorptie absorptiedoorsnede

β

Zie fractie vertraagde neutronen

β_{eff}

Zie effectieve fractie vertraagde neutronen

$\$$

De hoeveelheid reactiviteit die nodig is om een reactor prompt kritisch te maken, n.l. $\rho = \beta$, wordt gebruikt om een eenheid van reactiviteit te definiëren n.l. de Dollar.

