

Lessen uit Japan

Jan Leen Kloosterman



Beschrijving kokend-water reactor



Verloop van het ongeval



Splijfstofopslagbassins in centrales 1-4

Tohoku aardbeving

Op 11 maart 2011 om 14:46 uur lokale tijd vond op 90 km uit de kust van Japan een grote aardbeving plaats met kracht 9.0 op de schaal van Richter. Deze beving leidde binnen een uur tot twee tsunami's waarvan de eerste ruim 15 meter hoog was.

In totaal zijn in de dagen voorafgaand en na deze beving ruim 500 schokken met kracht 6 of hoger geregistreerd. Deze natuurramp heeft in totaal tot meer dan 25000 slachtoffers geleid.

Op 160 km van het epicentrum staan op de locatie

Fukushima Dai-ichi 6 kokendwaterreactoren (BWRs) met elektrisch vermogen van 460 MW (reactor 1), 784 MW (reactoren 2-5) en 1100 MW (reactor 6). De oudste centrale stamt uit 1971 en zou door de eigenaar TEPCO na 40 jaar bedrijf in 2011 worden stilgelegd. De jongste centrale stamt uit 1979. De tsunami's waren 5 meter hoger dan waarop de kerncentrales waren berekend waardoor de turbinegebouwen vol stroomden en de noodstroomaggregaten en schakelstations uitvielen. Dit had een grote invloed op de ontwikkeling van dit kernongeval. Door de lange golflengte van de tsunami's heeft de locatie gedurende 30 tot 60 minuten onder water gestaan.

Kernsplijting, kettingreactie en splijtingsproducten

In een kerncentrale komt energie vrij door splijting van atoomkernen geïnitieerd door neutronvangstprocessen. De bindingsenergie die daarbij vrijkomt, bedraagt ongeveer 8 MeV en is voor nucliden met een oneven aantal neutronen

zoals uranium-235 en plutonium-239 voldoende om de Coulombbarrière te overwinnen en te splitsen. De twee splijtingsproducten die daarbij vrijkomen, staan hun kinetische energie van 160 MeV direct af in de splijstof. De andere bijdragen

worden gevormd door de kinetische energie van de splijtingsneutronen (5 MeV), prompte straling (15 MeV), en beta- en gammastraling ten gevolge van verval van splijtingsproducten (12 MeV). De laatste vermogensbijdrage komt vertraagd vrij en vormt een gevaar voor de integriteit van de splijtstof indien zij niet wordt afgevoerd. In lichtwaterreactoren vervult het water een dubbelfunctie. Het koelt niet alleen de splijtstofstaven maar modereert ook de neutronen wat een gunstig effect heeft op de kettingreactie. Dit geeft een belangrijk terugkoppel-effect: als de moderatortemperatuur onverhoopt toeneemt,

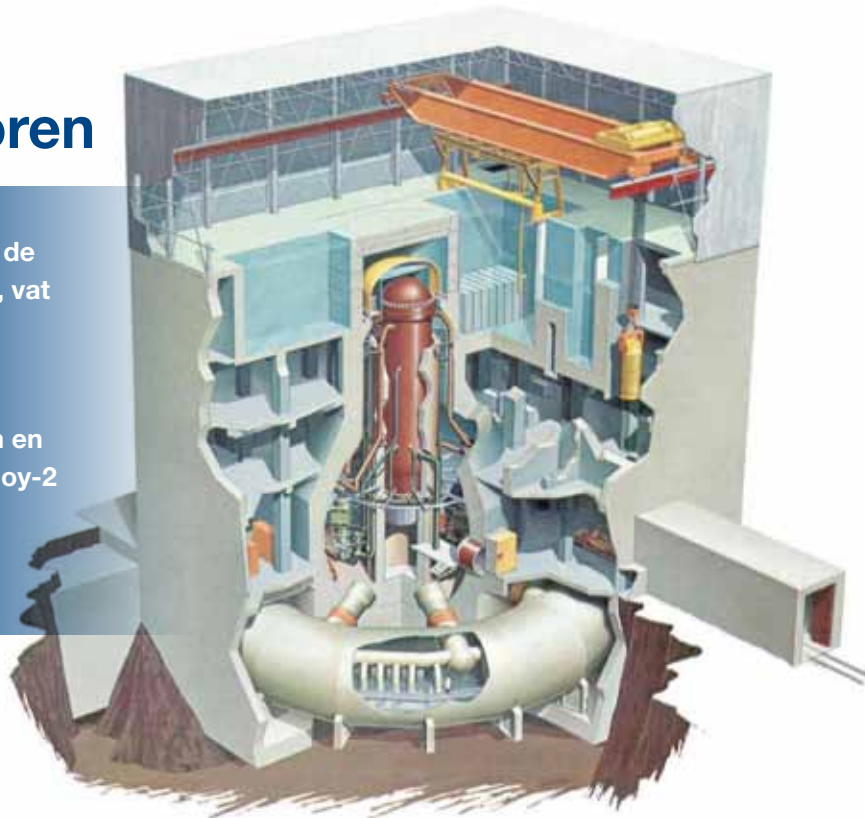
zal de dichtheid ervan afnemen en zullen de splijtingsneutronen minder modereren, waardoor de kettingreactie vanzelf dooft. Eenzelfde effect wordt bewerkstelligd door het nucleaire Dopplereffect, dat zijn oorsprong vindt in de beweging van de splijtstofatomen. Omdat tijdens de moderatie van splijtingsneutronen absorptie vooral plaatsvindt in resonanties van uranium-238 en deze verbreden bij toenemende splijtstoftemperatuur, zal een grotere fractie splijtingsneutronen worden geabsorbeerd bij toenemende splijtstoftemperatuur. Als gevolg daarvan zal eveneens de kettingreactie vanzelf doven.

Beschrijving kokendwaterreactoren

In figuur 1 is een opengewerkt model van de centrales 1-5 gegeven. Het centrale, rode, vat is het reactorvat met daarin de splijtstofbundels (400 in reactor 1 en 548 in reactoren 2-5) gemaakt van UO_2 splijtstofstaafjes met diameter van 11 mm en lengte van 366 cm in een gasdichte zircalloy-2 omhulling), de regelstaven (kruisvormige bladen gemaakt van boorcarbide), en de stoomafscidders en -drogers.

Bij normaal bedrijf bedraagt de druk in het reactorvat ongeveer 70 bar en de temperatuur circa 300 °C. De stoom wordt direct naar de turbines in het naastgelegen gebouw gevoerd en als condensaat teruggepompt. De fractie koelwater die niet wordt omgezet in stoom wordt via twee recirculatiepompen rechtstreeks teruggevoerd naar de reactorkern.

Om het reactorvat bevindt zich een stalen containment dat bestaat uit een droge ruimte (de 'drywell',) en een torus met een inhoud van 3000 m³ die gedeeltelijk is gevuld met water. Dit containment vormt een extra barrière voor de radioactieve inventaris van de kern. Om het containment staat het reactorgebouw gemaakt van gewapend beton. Rechtsboven in de figuur



Figuur 1: Opengewerkt model van een kokendwaterreactor zoals in reactoren 1-5 in Fukushima Dai-ichi. (bron: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/03.pdf>).

bevindt zich de opslag voor nieuwe en gebruikte splijtstofbundels. In dit reactorontwerp staan deze dus onbeschermd buiten het containment. Drukwaterreactoren zoals in Borssele hebben een veel groter containment omdat dat ook de stoomgeneratoren en andere grote componenten moet huisvesten. Bovendien is in Borssele het opslagbassin voor gebruikte splijtstofstaven binnen het containment geplaatst.

Beschrijving

Noodkoelsystemen

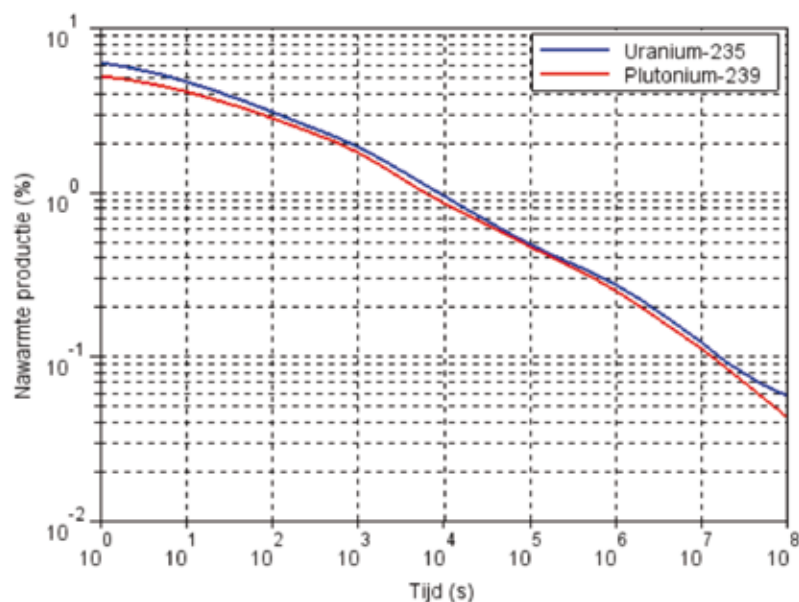
Als de temperatuur van de splijtstof of het koelmiddel toeneemt, zal door inherent veilige terugkoppelmechanismen zoals het nucleaire Dopplereffect de kettingreactie vanzelf doven. Bovendien worden in noodgevallen, automatisch of door operators, de stopstaven ingedreven waardoor de kettingreactie onmiddellijk zal stoppen.

Een klein deel van de warmteproductie zal echter doorgaan ten gevolge van het radioactief verval van de splijttingsproducten. Deze nawarmte bedraagt initieel 6% van het totale vermogen, maar is binnen enkele dagen al met een factor 10 afgenomen. Daarna duurt het een jaar voordat het weer met een factor 10 is afgenomen (zie figuur 2). Als een centrale voor onderhoud of splijtstofwissel wordt stilgelegd, wordt de nawarmte in eerste instantie afgevoerd door de stoom direct naar de condensor te voeren via het turbineomloopsysteem, waarna het nakoelsysteem ('Residual Heat Removal System') deze functie overneemt. Dit is een systeem waarbij het primaire water uit de recirculatiekringloop via een warmtewisselaar wordt afgekoeld. De pompen in dit circuit zijn kleiner dan de

primaire recirculatiepompen en kunnen door noodstroomaggregaten worden aangedreven. In de jaren '90 heeft TEPCO extra voorzieningen getroffen om via het nakoelsysteem extern koelwater in het reactorvat te kunnen pompen. Hiervan is volop gebruikgemaakt tijdens de ongevalbestrijding.

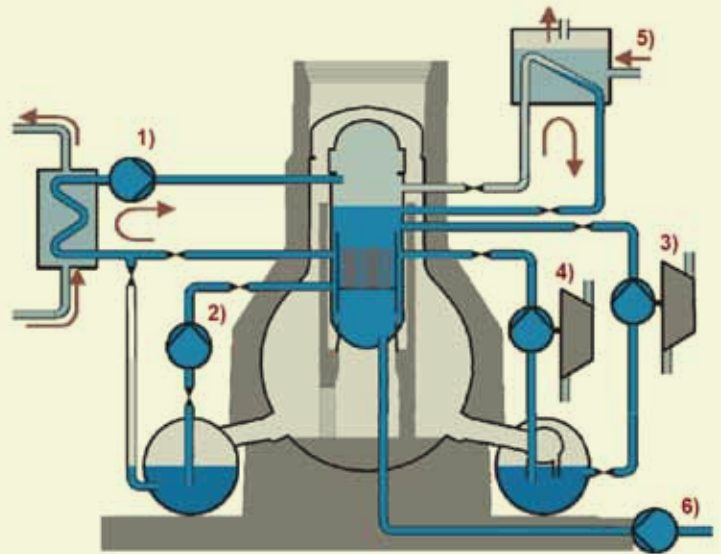
Als de druk en temperatuur in het reactorvat te hoog oplopen, wat het geval is als de reactor van de turbine wordt geïsoleerd, zal het nakoelsysteem niet goed functioneren en moet de nawarmte worden afgevoerd via het Reactor Core Isolation Cooling (RCIC) systeem (zie figuur 3). Voor centrale 1 bestaat dit uit een hooggelegen isolatiecondensor waarin de stoom uit het reactorvat kan condenseren waarna het terugstroomt naar het reactorvat. Ofschoon de aandrijving van de stoom en het water via spontane convectie plaatsvindt, vereist dit systeem wel extern vermogen voor de bediening van de regelkleppen en voor de toevoer van koelwater in de secundaire kringloop van de condensor. De andere centrales hebben een systeem tot hun beschikking dat wél de nawarmte verdeelt over het primaire circuit maar niet afvoert naar de omgeving. Hier drijft stoom uit het primaire circuit een kleine turbine aan die is gekoppeld aan een pomp die vervolgens water uit de torus naar het reactorvat pompt. Dit systeem bevat ook regelkleppen. Uiteraard werkt dit systeem alleen zolang er water aanwezig is in de torus.

Figuur 2: Nawarmteproductie ten gevolge van splijttingsproducten (in percentage van nominaal vermogen) als functie van de tijd. 10^8 s komt ongeveer overeen met drie jaar. Na één jaar is de nawarmte met ongeveer een factor 100 afgenomen. (Bron: figuur geproduceerd op basis van American National Standard ANS -5.1-1979)



In noodgevallen kan het RCIC systeem ook water tappen uit externe voorraden. De reactoren hebben ook 'System Relief Valves' (SRV) om stoom direct in de torus te kunnen condenseren. Voor noodgevallen kunnen zogenoemde 'Pressure Relief Valves' (PRV) worden geopend om stoom en gasen uit het containment na filtering via de schoorsteen af te laten naar de omgeving. Daarnaast bevatten de centrales nog hoge- en lagedruk injectiesystemen voor situaties waarin koelmiddelverlies optreedt. In beide systemen worden stoomturbines aangedreven die koelwater uit de torus of uit een externe voorraad (bijvoorbeeld uit de condensortank) in het reactorvat kunnen pompen. Ook deze systemen hebben extern vermogen nodig voor de aansturing van kleppen. Tevens bevatten de centrales nog een systeem om geboreerd water te injecteren om eventuele recriticaliteit van de splijtstof te voorkomen.

Figuur 3: Schematische voorstelling van de noodkoelsystemen in reactoren 1-5 in Fukushima Dai-ichi (Bron: AREVA NP).



Emergency Core Cooling Systems

- | | |
|---|---|
| 1. Residual Heat Removal System | 4. Reactor Core Isolation Cooling (Unit 2/3: BWR-4) |
| 2. Low-Pressure Core Spray (LOCA) | 5. Isolation Condenser (Unit 1 BWR-3) |
| 3. High-Pressure Coolant Injection (LOCA) | 6. Borating System |

Verloop van het ongeval

Omdat het te ver voert een gedetailleerd verslag te geven van het ongevalverloop in elk van de reactoren, zal hier alleen de grote lijn van de gebeurtenissen worden geschetst. Gedetailleerde informatie staat op het internet (zie referenties).

- De gemeten door de aardbeving veroorzaakte grondversnelling van 0,56g ($1g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) lag ver boven de grenswaarde van 0,125g waarboven de centrales door het indrijven van de regelstaven worden stilgelegd. De kettingreactie stopte onmiddellijk in alle centrales maar niet de nawarmteproductie. De grondversnelling lag 25% boven de ontwerpwaarden van de kerncentrales, maar heeft waarschijnlijk alleen in reactor 1 schade toegebracht aan het primaire systeem.



- Vervolgens werden de stoomleidingen van reactor- naar turbinegebouw gesloten om de reactoren te isoleren en traden de noodstroomaggregaten (2 stuks per reactor) in werking voor de instrumentatie van de centrales, de regeling van de RCIC systemen en de aandrijving van injectiesystemen (hoge druk systeem voor het reactorvat en het containment injectiesysteem voor de torus). Bij te hoge druk werden ook de SRV's bediend om stoom direct in de torus te condenseren.



Foto: Japan Defense Ministry

- Door de twee tsunami's vielen alle noodstroomaggregaten uit, waardoor de warmteafvoer naar de omgeving volledig wegviel. Dit wordt een 'Loss of Heat Sink' genoemd. Omdat de verbinding met het externe elektriciteitsnet al tijdens de aardbeving verloren was gegaan, waren de centrales nu volledig geïsoleerd. Dit is een 'Station Black Out'.
- Door de tsunami's waren ook de accu's voor de noodstroomvoorziening van reactor 1 niet beschikbaar en konden zowel de regelklep van de isolatiecondensator als het hoge-druk injectiesysteem niet meer automatisch worden gestuurd. Omdat het primaire circuit van een kerncentrale niet sneller mag afkoelen dan circa 55 °C/uur wordt de isolatiecondensator intermitterend bediend en stonden de regelkleppen ten tijde van de tsunami dicht. Deze konden vervolgens wel handmatig worden bediend, maar onder deze zware omstandigheden lukte dat pas 4-5 uur na het begin van het smelten van de reactorkern.
- In reactoren 2 en 3 traden de RCIC systemen in werking waardoor stoom uit het reactorvat in de torus kon worden gecondenseerd en water uit de condensatoropslag en later uit de torus in het primaire circuit kon worden gepompt. Doordat met dit systeem de warmte slechts wordt herverdeeld, werd het koelmiddel uiteindelijk zo heet dat de turbine en pompen faalden. Voor reactor 2 was dat op 14 maart (13:25 uur) en voor reactor 3 al op 12 maart (11:36 uur). In die reactor werd vervolgens het hoge-druk injectiesysteem gestart dat tot 13 maart (14:42 uur) heeft gefunctioneerd. Vier uur later was het waterniveau echter al tot net boven de reactorkern gezakt.
- Doordat in alle reactoren uiteindelijk de noodkoeling is uitgevallen, heeft gedurende langere tijd een fractie van de splijtstof droog gestaan. Precieze tijdstippen zijn (nog) niet te geven, maar zodra het waterniveau zakt tot de bovenzijde van de splijtstofstaven duurt het slechts enkele uren voordat de splijtstof helemaal droog staat (de inhoud van het reactorvat bedraagt 350 m³ voor reactor 1 en 500 m³ voor reactoren 2 en 3). In reactor 1 was het waterniveau binnen drie uur na de aardbeving al gezakt tot aan de bovenrand van de splijtstofstaven wat erop duidt dat door de aardbeving een lek in het primaire circuit was ontstaan. Hier was dus ook al sprake van een 'Loss of Coolant Accident' (LOCA). In reactor 2 duurde het tot 75 uur na de aardbeving voordat de splijtstof begon droog te koken en in reactor 3 tot 52 uur.
- In alle drie reactoren is uiteindelijk de temperatuur van de splijtstof zo hoog opgelopen dat eerst de Zircaloy omhulling is geoxideerd (1200 °C) en gesmolten (1800 °C), en vervolgens een deel van de splijtstof is gesmolten (circa 2600 °C). De eerstgenoemde reactie is exothermisch en leidt

Foto: www.emergencysurvivalgear.net



Foto: Kyodo News



tot productie van waterstofgas en vrijkomen van gasvormige splijtingsproducten zoals edelgassen, terwijl de tweede en derde reacties leiden tot vrijkomen van vluchtige splijtingsproducten zoals jodium, cesium en tellurium.

- Ten gevolge van de stoom- en gasproductie, liep de druk in het containment van de reactoren zo hoog op (tot twee keer de ontwerpdruk van 4 bar) dat stoom moest worden afgelaten naar de omgeving. In reactor 1 vond dit plaats op 12 maart om 9:15 uur, terwijl dit in reactor 2 pas gebeurde op 14 maart om 16:34 uur. In reactor 3 vond dit plaats op 13 maart om 8:41 uur.
- Door de hoge druk in de containments hebben deze waarschijnlijk gelekt langs de deksels en konden het waterstof en andere gassen ontsnappen naar de splijtstofwisselruimte bovenin de reactorgebouwen. Dit heeft uiteindelijk op 12 en 14 maart tot waterstofontploffingen geleid in eenheden 1 en 3, respectievelijk, terwijl in reactor 2 op 14 maart een ontploffing heeft plaatsgevonden binnenin het reactorgebouw, waarschijnlijk tengevolge van een lek in de torus.
- Om het verloren water aan te vullen werden brandweerpompen gebruikt. Deze konden op

diverse punten worden aangesloten, waaronder de kringloop van het nakoelsysteem. In reactor 1 vond dit voor het eerst plaats op 12 maart vroeg in de ochtend (5:46 uur), nadat de reactor 14 uur zonder koeling was geweest, en in reactor 3 een dag later. Omdat de zoetwatervoorraden al snel waren uitgeput, werd daarna besloten tot injecteren van zeewater; ook in reactor nummer 2. Op 31 mei was in alle reactoren ongeveer 2,5 keer meer water geïnjecteerd dan op basis van berekeningen had kunnen verdampen, wat een sterke aanwijzing is dat in alle reactoren het reactorvat lek is. Dit verklaart ook de hoge activiteit van het bluswater dat zich in de eerste weken na de aardbeving in de laaggelegen ruimtes van de reactor- en turbinegebouwen had verzameld en dat uiteindelijk grotendeels in zee is weggestroomd.

- Omdat zoutaanslag in de installatie de effectieve koeling sterk belemmert, is op 25 maart weer overgeschakeld op injectie met zoet water. Half juli is TEPCO erin geslaagd om het koelcircuit sluitend te krijgen door het gecontamineerde water op te vangen en na filtering terug te voeren. De reactoren moeten tot eind 2011 op deze wijze worden gekoeld.

Splijtstofopslagbassins in centrales 1-4

In reactor nummer vier was vanwege een voorgenomen inspectie van het reactorvat alle splijtstof ontladen en opgeslagen in het splijtstofopslagbassin.

Dit had echter tot gevolg dat de nawarmteproductie in dat bassin veel groter was dan in de andere centrales. In totaal stonden er

1331 splijtstofbundels die samen meer dan 3 MW produceerden. Omdat ook in dit bassin de koeling was uitgevallen, raakte het water snel aan de kook. Samen met het feit dat waarschijnlijk een groot deel van het koelwater al tijdens de aardbeving was weggelekt (de bassins waren open aan de bovenzijde; zie figuur 1), kwamen de splijtstofbundels al snel gedeeltelijk droog te staan. Dit heeft wellicht geleid tot oververhitting van de splijtstofomhulling en productie van waterstofgas en afgifte van gasvormige radionucliden. Op 15 en 16 maart is zelfs rook waargenomen, wat zou kunnen duiden op zirconiumbranden. Latere inspectie heeft echter aangetoond dat van het smelten van splijtstof nauwelijks sprake is geweest. Wellicht dat de waterstofontploffing in reactor 4 kon plaatsvinden doordat waterstof uit reactor 3 naar reactor 4 is gelekt. Soortgelijke problemen hebben zich ook voorgedaan in de splijtstofopslagbassins van reactoren 1-3.



Huidige status

Momenteel (december 2011) worden de reactoren 1-3 gekoeld met zoet water dat na gebruik wordt opgevangen en wordt hergebruikt. De temperatuur van het reactorvat bedraagt circa 40 °C in reactor 1 en 70 °C in reactoren 2 en 3. In deze drie reactoren heeft zich een smelting van de kern voorgedaan en in reactor 1 is zelfs een groot deel van de splijtstof buiten het reactorvat terechtgekomen. Aangenomen wordt dat in alle reactoren de gehele inventaris aan gasvormige splijtingsproducten, vooral edelgassen, is vrijgekomen, terwijl dit voor de nucliden jodium, tellurium en cesium varieert van



circa 1% in reactoren 1 en 3 tot maximaal 7%, 3% en 6%, respectievelijk, in reactor 2. Om nieuwe waterstofontploffingen te voorkomen worden de containments van de drie reactoren continue aangevuld met stikstof.

Lessen

Uiteraard kunnen uit deze ongevallen vele technische lessen worden getrokken zoals het beter beschermen van essentiële componenten waaronder de noodstroomvoorziening; het sneller onschadelijk maken van waterstof; het beschermen van de splijtstofopslagbassins, etc. Veel van deze maatregelen zijn echter al standaard geïmplementeerd in moderne reactoren.

Op langere termijn zouden nieuwe materialen ontwikkeld moeten worden die hogere temperaturen kunnen weerstaan en minder snel oxideren. Ook zouden nieuwe inherent veilige reactoren ontworpen moeten worden die geen noodstroomvoorziening nodig hebben, zoals de hoge temperatuur reactor en de gesmolten zout reactor. TU-Delft doet veel onderzoek naar deze reactortypen. Van de eerstgenoemde wordt momenteel een

prototype gebouwd in China. De belangrijkste oorzaak van het ongeval is echter dat TEPCO en de betreffende overheidsinstanties onzorgvuldig hebben gehandeld en het gevaar van tsunami's sterk hebben onderschat. In een tijdsbestek van ruim honderd jaar hebben zich in de omgeving van Fukushima drie grote aardbevingen voorgedaan met verwoestende tsunami's tot gevolg. Volgens de Duitse VGB (zie www.vgb.org) is de kans op een tsunami van deze omvang in Japan eens per 30 jaar en voor de locatie Fukushima eens per 100 tot 1000 jaar. De reactoren op die locatie hadden dus veel beter beschermd moeten zijn tegen tsunami's. Dat had eenvoudig gekund bijvoorbeeld met hogere dijken en waterbestendige deuren in gebouwen. Deze constatering heeft geleid tot een inspectie en test van alle reactoren in de EU om de robuustheid voor extreme omstandigheden te toetsen als aanvulling op de nationale veiligheidsstandaarden. De uitkomsten daarvan zullen worden beoordeeld



door de nationale toezichthouder en die van zeven andere EU landen om eventuele blinde vlekken in de veiligheidsbeoordeling te identificeren. Kerncentrale Borssele heeft de uitkomsten van deze test op 1 november j.l. gepubliceerd. Hieruit volgt dat de kerncentrale Borssele bestand is tegen een waterstand van 7,30 meter boven NAP ("Amersfoort in zee"), maar dat tot 8,55 meter geen enkel relevant veiligheidssysteem wordt getroffen. De luchtinlaat voor het tweede niveau noodstroomdiesels ligt zelfs bij 9,80 meter boven

NAP. De aardbevingsbestendigheid bedraagt 0,15g; ongeveer tweemaal de ontwerpeis. Verder hebben de analyses aangetoond dat de kerncentrale Borssele meer dan twee weken geïsoleerd als 'eiland' kan opereren. Als conclusie kan worden gesteld dat de Nederlandse kerncentrale ruime veiligheidsmarges heeft bovenop de gestelde ontwerpeisen. Daarnaast zijn diverse verbeterpunten geïdentificeerd die na realisatie de veiligheid van de centrales verder zullen verhogen.

Enkele algemene referenties

(te downloaden van het internet):

- The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety, Juni (2011)
- IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-Ichi Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami, 24 Mei - 2 Juni 2011.
- Japanese Earthquake and Tsunami: Implications for the UK Nuclear Industry, Final Report, September 2011.
- Fukushima Daiichi Nuclear Disaster, Wikipedia, 2011.
- Technical Lessons Learned from the Fukushima-Daiichi Accident and Possible Corrective Actions for the Nuclear Industry: an Initial Evaluation, MIT-NSP-TR-025 Rev. 1, 26 July 2011.

Colofon

KernVisie Extra is een bijlage van KernVisie
Oplage 2200 ex

Grafische realisatie

De OntwerpStek.nl, Den Helder

Bestuur van de Stichting KernVisie

Ir. A.M. Versteegh, *voorzitter*

Ir. G.H. Boersma, *secretaris*

Ir. E.W. Schuuring, *penningmeester*

Ir. J.C. van Cappelle

Dr. F.C. Klaassen

Prof. Ir. R.W.J. Kouffeld

Ir. G.C. Van Uitert

Redactie KernVisie

Ir. G.H. Boersma

Ir. P.J. van der Hulst

Dr. F.C. Klaassen

Ir. B.J. Visser

Redactie adres

Notarisappel 37, 6662 JN Elst

Telefoon: 0481-841156

E-mail: kernvisie@kernvisie.com

Internet: www.kernvisie.com

Bankrekening 6851370,

t.n.v. Kernvisie, Foundation for
Nuclear Energy te Zwijndrecht.

Distributie, onder vermelding

Stichting Kernvisie, via eigen

**e-mail systemen en gebruik van de informatie
voor lezingen, presentaties, studies, discus-
sies, publicaties, enz. wordt op
prijs gesteld en toegejuicht.**