Referate

Kompakte natuurlik-veilige kernkragreaktore*

W.A. Schumann
Departement Meganiese Ingenieurswese, Universiteit van Pretoria

Ontvang 1 Desember 1989; aanvaar 13 Maart 1990

UITTREKSEL

Onderskeid word tussen groot, medium en klein kernkragreaktore ten opsigte van veral veiligheidskarakteristieke getref. Die huidige behoefte aan klein, kommersiële reaktore asook bemarkingsprobleme word behandel. Voordele en kostes van klein en natuurlik-veilige reaktore word uitgelig en na aanleiding van die spesifieke voorbeeld van 'n modulêre hoëtemperatuurgasverkoelde reaktor bespreek.

ABSTRACT

The difference, especially concerning the safety characteristics of large, medium and small nuclear power reactors is discussed. The present need and marketing problems of small commercial reactors as well as advantages and costs of these small naturally safe systems are highlighted against the background of a specific example of a modular high temperature gas cooled reactor.

1.0 INLEIDING

Die beskikbaarheid van elektrisiteit beïnvloed die kwaliteit van ons lewe geweldig. Derhalwe kan elektrisiteit as die ruggraat van die Eerste Wêreld beskou word en as 'n beskawendmakende medium vir die Derde Wêreld.

Die wyse van elektrisiteitsopwekking is 'n bekommernis in die groot nywerheidslande, veral vanweë die besoedeling wat deur fossielbrandstofstasies veroorsaak word. Benewens die besoedeling en suurreën word die sogenaamde "glashuiseffek", waar 'n klaarblyklike verwarmingstendens van die aarde se atmosfeer as gevolg van 'n toename in atmosferiese koolsuurgaskonsentrasie en konsentrasies van ander ekwivalente gasse plaasvind, as 'n onomkeerbare nadelige ontwikkeling beskou. In hierdie verband is die feit dat Sjina op die punt van grootskaalse benutting van sy eie steenkoolafsettings vir sy volgende "sprong" vorentoe staan, ook 'n bron van groot bekommernis.

Die gevoel is dat al bostaande bekommernisse maklik met die publiek gedeel kan word en dat juis dit kan dien as motivering vir die werklik grootskaalse instelling van kernkrag. Om kernkrag nog aanvaarbaarder te maak kan op die ontwerp van sogenaamde "natuurlik"- of "inherent"-veilige stelsels gekonsentreer word. Die strewe moet dus wees vir veilige, betroubare, eenvoudige, verstaanbare ekonomiese stelsels.

Harde ervaringslesse ten opsigte van veral die ekonomie van groot, komplekse reaktorstelsels met lang aanloop- en oprigtingstye, rente-gedurende-konstruksie wat handuit ruk, inflasie, lisensiëringsprobleme ens. het utiliteitsmaatskappye gedwing om alternatiewe moontlikhede te beskou.

Tans is daar groot aktiwiteit in verband met die modernisering en herontwerp van ligtewaterreaktore, swaarwaterreaktore, vloeimetaalkwekers, hoëtemperatuurgasverkoelde stelsels en 'n paar ander moontlikhede.

Die verwagting is dat 'n algemene oplewing op die gebied van kernkrag aan die kom is. Die redes hiervoor is o.a.

(i) 'n hernude positiewe groei, selfs groter as geprojekteer, van elektrisiteitsbehoefte in sommige lande, aangesien die effek van vroeëre besparingsmaatreëls begin afwater;
(ii) talle fossielbrandstof- en kernstasies nader die einde van 'n nuttige lewe en moet verplaas word;
(iii) die volgende werklike oliekrisis wat binne die bestek van 'n dekade of twee verwag word;
(iv) die aanvaarbaader natuurlik-veilige konsepte wat aangebied kan word;
(v) die reeds genoemde besoedelingsprobleem en atmosferiese verwarmingseffek wat langs die weg vertraag en deels opgelos kan word.

Kategorieë van reaktorgroottes word behandel en die huidige behoefte aan kleiner reaktore bespreek.

Vestigingsprobleme en voordele van kleiner reaktore in die algemeen en ook na aanleiding van 'n spesifieke voorbeeld word behandel.

2.0 REAKTORGROOTTE

Vir die huidige tydsomstandighede kan kernreaktore gerieflikheidshalwe soos volg geklassifiseer word, nl.:-

(i) Groot (Arbitrêr $\geq$ 600 MW(e))

"Groot" reaktore is normaalweg van ingewikkelde "gegenieerde" of "aktiewe" veiligheidstelsels voorsien om naylwarmte, d.i. die warmte wat steeds ontwikkel word as

*Referaat gelewer tydens 'n vergadering van die Tak Suid-Transvaal, Afdeling Ingenieurswese van die S.A. Akademie vir Wetenskap en Kuns te Sasolburg op 15 November 1989.

gevolg van radio-aktiwiteit nadat 'n reaktor afgesluit is, onder noodtoestande te verwyder. Moderne groot kragreaktore lewer gewoonlik 600 MW(e) tot 1400 MW(e) per reaktorhart. Tydens 'n hoogs onwaarskynlike ongeluk met 'n groot ligtewaterreaktor sal daar slegs sowat 20 minute beskikbaar wees vir optrede voordat radio-aktiwiteit vrygelaat word.

(ii) Medium (200 MW(e) – 600 MW(e))

Mediumgrootte reaktore verteenwoordig 'n klas van reaktore waar veiligheidstelsels tot sogenaamde "passiewe" stelsels vereenvoudig is en ontwerpsvereistes nie meer op die maksimum moontlike kragdigtheid ingestel is nie. By "gevorderde" waterverkoelde reaktore word ontwerpkragdigtheid en maksimum temperatuur verminder en groot, passiewe tenks water vir naylwarmte-verwydering tydens ongelukstoestande of 'n totale kragonderbreking voorsien. Die water word òf deur middel van gravitasie na die reaktorhart gevoer (ontwerpe van Westinghouse, General Electric ens.) òf die hart kan met 'n vat geboreerde water omhul wees soos in die geval van die PIUS-ontwerp van ABB van Swede. Die PIUS-ontwerp laat 'n week responstyd toe in geval van 'n ernstige ongeluk en die ander ontwerpe ongeveer drie dae. By mediumgrootte reaktore kan dus van 'n "uitstel"-beginsel gepraat word. Moderne hoëtemperatuurgasverkoelde reaktore val ook in hierdie klas met responstye van ongeveer agt uur of langer as gevolg van die groot warmtekapasiteit van hulle harte.

(iii) Klein (< 200 MW(e))

'n Reaktor is "klein" of natuurlik-veilig indien dit van alle naylwarmte (na neutroniese afsluiting) op 'n natuurlike wyse, byvoorbeeld deur middel van geleiding, natuurlike konveksie en straling tydens ongelukstoestande ontslae kan raak, sonder dat die reaktorhart as gevolg van oorverhitting beskadig raak of dat enige radio-aktiewe vrystellings veroorsaak word. Vanweë die fisiese beperkings van "natuurlike" prosesse is gevind dat die maksimum elektrisiteitsopwekkingsvermoë van klein reaktore tot sowat 100 tot 200 MW(e) beperk is.

Die ontwerp van klein reaktore is relatief eenvoudig en responstyd vir vrylatings is onbeperk in geval van 'n ernstige ongeluk. Hier geld die sogenaamde "wegstap"-beginsel dus waar die reaktor in sito gelaat kan word sonder die nodigheid van enige optrede van buite.

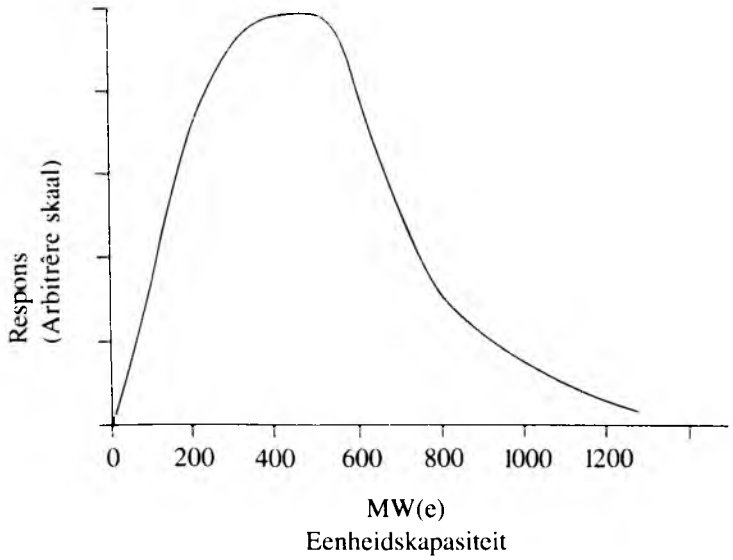
'n Voorbeeld van 'n natuurlik-veilige reaktor is die PRISM-konsep van General Electric en Rockwell International. Dis 'n natriumverkoelde stelsel met 'n dubbelwandige reaktorvat. Drie reaktore, wat elk 155 MW(e) lewer, word saamgetros om stoom vir 'n enkel turbiengenerator te voorsien. Ander voorbeelde is die klein hoëtemperatuurgasverkoelde konsepte van Siemens/Interatom en KFA (Jülich) in Wes-Duitsland en General Atomics in die V.S.A.

3.0 BEHOEFTES

Die grootte van die huidige behoefte vir bykomstige kernkragvermoë vir elektrisiteitsopwekking verskil van land tot land en word hoofsaaklik deur die volgende oorwegings gedikteer:

(i) Die totale vermoë van die kragnetwerk of netwerke
(ii) Elektrisiteitsgroeikoers
(iii) Nodigheid vir verplasing van uitgediende kragstasies
(iv) Ekonomie van die reaktorstelsel
(v) Gevestigde belange
(vi) Of dit 'n reedsbewese stelsel is
(vii) Publieke aanvaarding (veiligheid)
(viii) Regeringsbeleid
(ix) Lisensiëringsgemak

Opnames in talle lande, selfs in groot nywerheidslande, toon dat daar tans 'n redelike groot behoefte aan veral kleiner reaktore in die 100 tot 700 MW(e)-gebied bestaan. In meeste ontwikkelde lande sal toevoegings – indien volgens die reël gewerk word dat die toevoegingsvermoë $\leq$ 10% van die totale geïnstalleerde netwerkvermoë moet wees – ook relatief klein wees, omdat hulle netwerke nog maar klein is. 'n Voorbeeld van die behoeftetendense word in figuur 1 opgesom. Die figuur is bloot 'n aanduiding van die aantal utiliteitsmaatskappye in die V.S.A. wat in die toekoms in kleiner reaktore mag belangstel, met ander woorde, slegs 'n markspotensiaal word deur die figuur aangedui:



Figuur 1: Responsdistribusie van utiliteitsmaatskappye in die Verenigde State van Amerika ten opsigte van die gewenste grootte van die eenheidskapasiteit van kernkragreaktore.

4. KLEIN REAKTORE: VESTIGINGSPROBLEME EN VOORDELE

Om die tegnologie van "klein" reaktore te vestig en ter wille van die algemene kommersiële aanvaarding van voorgestelde konsepte, sal voorstaanders die volgende moet oorbrug, nl.:

(i) die bestaande stelsel van reeds gekommersialiseerde reaktore, belange en ervaring wat daarmee gepaard gaan en ook die feit dat bestaande stelsels natuurlik ook verder verbeter en gestandaardiseer kan word;

(ii) voldoende bewyslewering dat klein reaktore ekonomies kan kompeteer en wel so veilig is soos voorgehou;

(iii) die tydsagterstand, aangesien die eerste demonstrasieprototipes eers in die negentiger jare beskikbaar sal wees.

Belangrike oorwegings ten gunste van klein reaktore kan geopper word, nl.:

(i) Daar is 'n wesentlike behoefte aan kleiner stelsels wat reeds, volgens opnames, in talle lande bestaan.

(ii) 'n Algehele vereenvoudiging van die reaktorontwerp kan as gevolg van die afwesigheid van komplekse veiligheidstelsels plaasvind.

(iii) Ondervindingslesse is by die groter stelsels opgedoen en bepaalde bewese komponente is reeds ontwikkel en kan sonder meer in klein reaktore gebruik word.

(iv) Kennis in verband met wisselende terreintoestande, byvoorbeeld van groot seismiese aktiwiteit, kan vroegtydig gebruik word om standaard beveiligingseienskappe in ontwerpe in te bou.

(v) Eienskappe wat op die aanpassing in klein, swak reedsbestaande netwerke t.o.v. lasvolging en selfaansit gemik is, kan maklik in klein stelsels ingebou word.

(vi) Kleiner reaktore geniet reeds die ondersteuning van baie elektrisiteitsmaatskappye in die V.S.A. en elders.

(vii) Massavervaardigingsbeginsels kan baie beter in die geval van kleiner reaktore toegepas word. Dit beteken onder andere:

(a) produksie en samestelling van die meeste komponente in 'n produksiefasiliteit in plaas van op die terrein, soos met groot reaktore;

(b) outomatisasie;

(c) groter produktiwiteit;

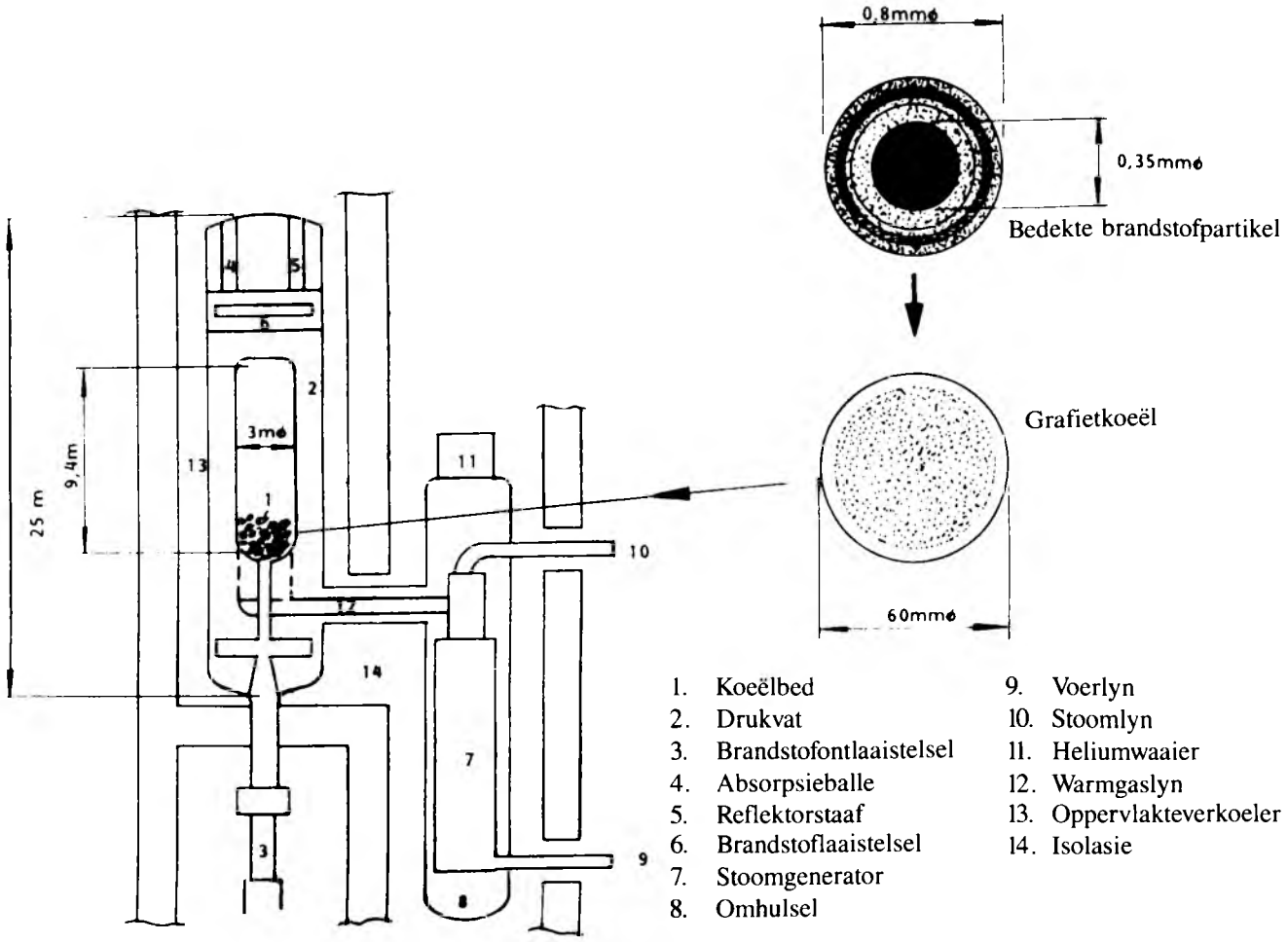
(d) beter kwaliteitsbeheer;

(e) standaardisasie;

(f) korter leerkromme, d.i. ervaring wat gouer opgedoen word;

(g) beter skedulering van produksie volgens aanvraag met 'n gevolglike meer konstante produksietempo.

(viii) Kragstasiebeplanning kan met behulp van standaardmodules vereenvoudig word.



Figuur 2: Primêre lus van MHTGR.

(ix) Verskaffers kry groter geleentheid vir bedryfservaring. Voorheen is gevind dat in die geval van groot kragstasies die nuutste ontwerpe totaal van vroeëre ontwerpe verskil vanweë lang intervalle tussen oprigting van stasies, sodat sekere ervaring later glad nie meer toepaslik is nie.
(x) Operateursopleiding is eenvoudiger.
(xi) Minimum oprigtingstyd is nodig en rentegedurende-konstruksie word bespaar. Baie beter beheer kan ook gedurende oprigting uitgeoefen word.
(xii) Lisensiëring is eenvoudiger en gevolglik word baie koste en tyd bespaar.
(xiii) Bedryf word oor die algemeen baie vereenvoudig.
(xiv) Bepaalde veiligheidseienskappe kan maklik in die praktyk gedemonstreer word, terwyl dit by groot reaktore moeilike en duur prosedures sou behels.
(xv) Natuurlike veiligheid sal groter aanklank by die publiek en ander betrokkenes vind, in teenstelling met stelsels waar operateursfoute die toestand onveilig kan maak.
(xvi) Beskikbaarheid, om 'n bepaalde las te voorsien, is beter met 'n groter aantal kleiner eenhede.
(xvii) Konvensionele oprigting kan van die kerngedeelte van 'n aanleg geskei en apart hanteer word.
(xviii) Toevoeging van bykomstige vermoë kan in klein stappe plaasvind en beter by behoeftegroei inpas.
(xix) Ten spyte van die kleiner skaal is eenheidselektrisiteitskoste vergelykbaar met dié van groter stelsels vanweë die wegdoen van talle gegenieerde veiligheidstelsels en -toerusting. Kapitaalkoste is ietwat hoër.

5.0 'N VOORBEELD VAN 'N KLEIN REAKTOR MET VERSKEIE UNIEKE VOORDELE

'n Skematiese uitleg van 'n klein hoëtemperatuurgasverkoelde reaktor word in figuur 2 getoon.

Ten opsigte van die hartkonfigurasie van hierdie tipe reaktor is daar twee ontwerpsfilosofieë wat tans van belang is, nl.:
(i) die Wes-Duitse koeëlbedkonsep
(ii) die Amerikaanse heksagonale prismatiese blokkonsep

Beide konsepte word in genoemde lande asook in Rusland, Japan, Switserland en Rooi Sjina ondersoek.

Die maksimum vermoë van natuurlik-veilig-gasverkoelde stelsels is weens temperatuurlimiete en bepaalde konfigurasie-oorwegings tot sowat 135 MW(e) beperk. 'n Groterige kragsentrale sal derhalwe uit 'n tros van hierdie modules, sê vier tot agt saamgestel word. Tipiese ontwerpdimensies en ander ontwerpparameters vir hierdie soort reaktore val binne die volgende grense:

Elektriese vermoë	70 tot 135 MW(e)
Termiese vermoë	180 tot 350 MW(t)
Leeftyd	30 tot 40 jaar
Druk van verkoelingsmiddel (helium)	4,5 tot 7 MPa
Drukverlies in primêre lus	0,1 tot 0,2 MPa
Heliumvloeitempo	60 tot 120 kg/s
Hartdimensies: hoogte	4 tot 10 m
diameter	2,5 tot 3,5 m
Drywingsdigtheid	4 tot 7 MW/m^3
Heliumtemperature:	
Inlaat	250 tot 350°C
Uitlaat	750 tot 950°C
Verbranding	30 000 tot 150 000 MWd/ton
Gemiddelde brandstofleeftyd	500 tot 1 000 dae
Aantal brandstofkoeëls (vir Wes-Duitse ontwerp)	150 000 tot 400 000
Verryking	8 tot 10%
Termodinamiese effektiwiteit	38 tot 45%

Beheerstawe word gebruik om 'n reaktor te beheer en veiligheidstawe en neutronabsorberende balletjies (Wes-Duitse konsep) om 'n reaktor tydens 'n reaktiwiteitsekskursie neutronies af te sluit.

Vervolgens word veral op die veiligheidseienskappe van die klein modulêre hoëtemperatuurgasverkoelde reaktor (MHTGR) gekonsentreer. Die meeste hiervan sal ook vir medium- en groot gasverkoelde reaktore toepaslik wees.

5.1 Veiligheid

Veiligheidskarakteristieke van die MHTGR is die resultaat van die gebruik van keramiese brandstof wat hoë temperature kan weerstaan, 'n inerte koelmiddel (helium) en 'n grafiethart en -ondersteuningstrukture wat 'n groot temperatuurstabiliteit en warmtekapasiteit besit.

Belangrike oorwegings:

(i) Bedryfservaring van meer as 20 jaar het bewys dat klowingsprodukte in die klein keramiese brandstofelemente van hoëtemperatuurgasverkoelde reaktore (HTGR) onder uiterste toestande ingeperk kan word. Elke brandstofpartikel bestaan uit 'n kern van òf uraandioksied (UO_2), uraanoksikarbied (UCO) of thoriumdioksied (ThO_2) met 'n diameter van ongeveer 0,35 mm. Normaalweg word die partikel bedek met opeenvolgende lae van poreuse grafiet, pirolitiese koolstof, silikonkarbied en nog pirolitiese koolstof tot by 'n diameter van 0,8 mm. Hierdie laaste drie lae perk die klowingsprodukte uiters doeltreffend in tot by 'n temperatuur van 1 600°C.

(ii) In die prismatiese ontwerp van die Amerikaners word die partikels saamgebind in stawe wat in vertikale gate in prismatiese grafietblokke geplaas word terwyl, betreffende die Duitse ontwerp, partikels vir die koeëlbed in 6 cm-sfere van grafiet isostaties saam gegietpers word.

As gevolg van die sterkte van die grafiethart en stabiliteit van die keramiese brandstof bestaan daar 'n groot speling (sowat 700°C) tussen maksimum bedryfstemperature (900 na 1 000°C) en temperature waarby hartskade sou voorkom.

Die groot warmtekapasiteit en relatief lae kragdigtheid van die MHTGR-reaktorhart veroorsaak dat temperatuurveranderings stadig en voorspelbaar is.

(iii) Benewens die inperking van radio-aktiewe klowingsprodukte in die brandstof self (eerste linie) en deur

die keramiese dop van silikonkarbied (tweede linie), d.i. by die bron van hulle ontstaan, vorm die stawe of koeëls van grafiet waarbinne die bedekte partikels ingebed is 'n derde inperklinie.

'n Vierde inperkingsgrens is die staaldrukvat waarbinne die hart van die reaktor geplaas word. 'n Vyfde beveiligingsgrens is die teenwoordigheid van die inperkgebou. Sommige persone voel dat die laaste maatreël oorbodig is.

Die uitstekende inperkende eienskappe van die klein, bedekte brandstofsfeertjies waarborg baie lae blootstellingsvlakke, naamlik van die orde tien tot honderd maal kleiner as in ligtewaterreaktore vir sowel bedryfspersoneel as die publiek. Dit is moontlik dat sfeertjies kan breek, maar toetse het aangetoon dat dit slegs in uiterste omstandighede kan plaasvind en dat die persentasie nalaatbaar klein is.

(iv) Die gebruik van die inerte enkelfase-verkoelingsgas, helium, het bepaalde voordele. Geen afflitsing van koelmiddel is moontlik nie, drukmetings kan met groter sekerheid gedoen word en geen pompkavitasie vind plaas nie. Chemies en neutronies is die gas passief t.o.v. die reaktorhart, primêre kringloopkomponente en algemene werking.

(v) Die hart van die MHTGR-reaktor is so ontwerp dat indien die primêre verkoelingstelsel, die afsluitverkoelingstelsel en die verkoelingstelsel vir die ruimte tussen die reaktorvat en betonafskerming almal faal, die naylwarmte deur natuurlike meganismes van geleiding, konveksie en straling na die omgewing verloor kan word sonder dat die maksimum toelaatbare brandstoftemperatuur van 1 600°C oorskry word.

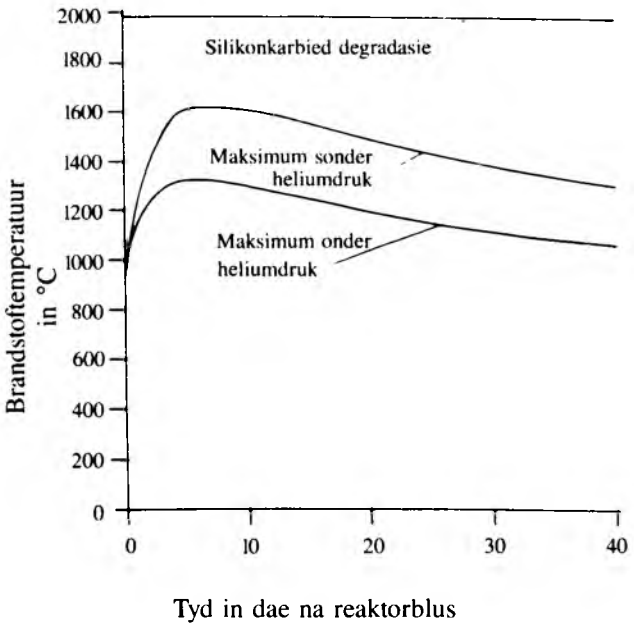
Selfs al sou heliumdruk in die drukvat as gevolg van 'n breuk verloor word, styg die maksimum brandstoftemperatuur tot net oor die 1 600°C. Kyk figuur 3 vir maksimum temperatuurverlope met en sonder heliumdruk. Die silikonkarbiedbedekking begin in werklikheid eers by 2 000°C degradeer.

(vi) Die sterk negatiewe temperatuurkoëffisiënt en die nulleegtekoëffisiënt van die reaktorhart, wat slegs met helium gevul is, laat die reaktor outomaties afsluit vir temperatuurstygings wat groter as normaal is.

(vii) Chemiese reaksies tussen stoom of water en grafiet kan plaasvind indien die stoomgenerator sou faal. By gewone reaktorbedryfstemperature (900 na 1000°C) is reaksietempo's nalaatbaar klein. Die reaksietempo neem toe met temperatuur, maar omdat dit uiters endotermies (warmte-absorberend) is, sal die reaksie vanself blus.

(viii) Lug- ofte wel suurstofreaksies met grafiet is eksotermies. Dit sal slegs kan voortgaan indien daar op 'n bepaalde oomblik baie breuke gelyktydig in die reaktorvat sou ontstaan en indien die grafiet tot heelwat hoër as normale bedryfstemperatuur verhit sou word. Volgens ontwerp word die reaktorvat in 'n ondergrondse afgesluite silo geplaas wat beskikbare lug dus beperk.

Selfs al sou die grafiet wegbrand, sal die bedekking van die brandstofkorreltjies steeds klowingsprodukte inperk.



Figuur 3: Maksimum brandstoftemperature tydens 'n verlies-van-vloei-en-koelmiddel-ongeluk in 'n MHTGR.

5.2 Brandstofsiklus, wegdoening en herprosessering

Vir huidige hoëtemperatuurgasverkoelde reaktore kan twee brandstofstrategieë oorweeg word, nl.:

(i) 'n 235U/238U-siklus waar die 238U na kloofbare plutonium omgeskakel word. 235U-verryking van die orde 10-20% is nodig. Hoë uitbranding van tot 150 000 MW dae/ton is haalbaar sonder enige herprosessering. In die algemeen is dit waar dat HTGR'e met bogenoemde siklus sonder herprosessering ongeveer dieselfde hoeveelheid uraan verbruik as ligte waterreaktore met brandstofherprosessering.

(ii) Die 235U/232Th-siklus waar die thorium na kloofbare 233U omgeskakel word. Vir hierdie siklus is verrykte uraan met 'n verrykingsgraad > 90% sowel as herprosessering nodig, maar die verbruik van uraan is heelwat minder as in (i).

Vanweë proliferasie-oorwegings, en omdat die publiek dit klaarblyklik moeilik vind om herprosessering te aanvaar, word daar tans op die eerste alternatief, nl. (i), gekonsentreer.

In die geval van die koeëlbedreaktor is verskeie aanvaarbare alternatiewe vir wegdoening voorgestel.

Sonder om te veel tegniese detail te gee word die volgende belangrike oorwegings uitgelig:

(i) Die langtermynintegriteit van die brandstofkorrelbedekking kan die nodigheid vir addisionele inperkstelsels vir klowingsprodukte laat verval.

(ii) Die lae kragdigtheid verskaf die moontlikheid vir natuurlike konveksieverkoeling in intermediêre berggingsfasiliteite en maak die gebruik van tegnieke wat vir medium aktiewe afval ontwikkel is, moontlik.

(iii) Die grafietkoeël waarbinne die uitgebrande brandstofkorrels ingebed is, maak die gebruik van eenvoudige hanteringstoerusting en -sarke moontlik vir inter-

mediêre en finale berging. Die bedekking is ook bestand teen soutoplossings en minimeer brandstofkondisionering vir finale wegdoening.

5.3 Omgewingsimpak

Die relatiewe hoë termodinamiese effektiwiteit en goeie inperking van klowingsprodukte by MHTGR'e verseker goeie samevoegbaarheid met die omgewing, bv.:

(i) As gevolg van die goeie inperkende eienskappe sal daar uiters klein radio-aktiewe vrystellings in afvalstrome binne die reaktorkompleks wees. Na verwerking en filtrering van hierdie strome sal vrystellings na die omgewing prakties nul wees.

(ii) Uitskotwarmte vanaf MHTGR's is tans sowat 25% minder per eenheid elektrisiteit gelewer as vir konvensionele kernstasies, vanweë 'n heelwat hoër termodinamiese effektiwiteit. Koeltorings is dus in verhouding kleiner en goedkoper. Hoë temperature maak die gebruik van droëverkoeling prakties en water kan dus bespaar word.

(iii) Wegruiming van radio-aktiewe uitskot sonder herverwerking is relatief eenvoudig en die omgewingsimpak baie klein.

5.4 Ekonomie

Amerikaanse kapitaalkosteramings vir 'n kommersiële aanleg wat uit vier MHTGR's bestaan, word gestel op $1500 tot $2500/kW(e) in vergelyking met $2000-$3500/kW(e) van konvensionele kernreaktore en $1000/kW(e) vir steenkoolstasies. Eenheidkostes van elektrisiteit is vergelykbaar, maar in die geval van steenkool is dit 'n sterk funksie van steenkoolprys. Kyk ook na tabel 1 vir algemene Amerikaanse en Duits/Switserse ramings.

5.5 Ander toepassings

Die unieke hoë temperatuur waarteen MHTGR'e werk, maak dit moontlik om die ko-generasie en prosesverwante markte, wat tradisioneel deur fossielbrandstof bedien word, te penetreer. Die inherente veiligheidseienskappe vergemaklik plasing van reaktore in die nabyheid van 'n behoeftepunt.

Spesifieke toepassings, waarvan sommige slegs moontlik is a.g.v. die baiehoëtemperatuurwarmte wat 'n MHTGR kan verskaf, is die volgende:

(i) ontsouting;
(ii) elektrisiteits- en stroomvoorsiening (ko-generasie vir sintetiese brandstofaanlegte, o.a. om steenkool te vergas);
(iii) swaarolie-, olieskalie- en teersandherwinning;
(iv) petroleum- en petrochemiese raffinering;
(v) metaanomvormingskringloop;
(vi) dissosiasie van water vir 'n waterstofgebaseerde energiestelsel

Toekomstige ontwikkelings

Ten opsigte van moontlike toekomstige ontwikkelings is daar reeds konseptuele ontwerpe gebaseer op die direkte Brayton-gassiklus.

'n Ontwerp wat aan die Massachusetts Institute of Technology gedoen is, gebruik 'n 200 MW(t) heliumverkoelde koeëlbed-MHTGR waar 'n heliumgasturbien, heliumkompressor en kraggenerator op 'n enkel as gemonteer is. Die

Tabel 1

Eenheid- en kapitaalkostes

1987-syfers

Vermoë	MHTGR-koeëlbed (Duitse ontwerp)	MHTGR-prismastelsel (V.S.A.-ontwerp)	Steenkoolstasies (Steenkool $40/ton)	Drukwaterreaktore
MW(e)	V.S.A. sent/kWh en $/kW(e)	V.S.A. sent/kWh en $/kW(e)	V.S.A. sent/kWh ton en $/kW(e)	V.S.A. sent/kWh en $/kW(e)
100	1 eenheid: 9 4600			
135		1 eenheid: 7, 2	6, 9	
200	2 eenhede: 6, 7 3 750			
270		2 eenhede; 5, 5	6, 3	
540		4 eenhede: 4, 9 2 200	5, 9 1 200	5, 1 3 500
1 080		8 eenhede: 4, 6	5, 4 (8, 5 vir steenkool teen $138/ton) 1 000	4, 4 2 400

gebruik van elektromagnetiese laers word beoog. Hierdie stelsel tesame met die hoëtemperatuurheliumhitteruiler is in 'n enkel module net langs die reaktor gemonteer. Die hele stelsel, bestaande uit warmtebron, kragopwekker en warmteruilers, is saamgevoeg in 'n uiters kompakte formaat wat maklik ondergronds geplaas kan word.

Indien bestaande materiale en ontwerpkodes gebruik word, kan 'n stelsel met 'n totale effektiwiteit van tot 50% daargestel word vir 'n turbien-inlaattemperatuur van 850°C en 'n geraamde koste wat heelwat laer sal wees as vir 'n ooreenkomstige stoomopwekkingstelsel. Met hoër inlaattemperature en laer drukvalle deur die warmteruilers sal die effektiwiteit nog verder verbeter kan word.

6. VERWYSINGS

1. Arndt, E., Roehler, E., Schoenig, J., Wachholz, W. (1988). High temperature reactor reaches threshold of commercial application. *Nuclear Engineering*, 20-28.
2. Faltermayer, E. (1988). Taking fear out of nuclear power. *Fortune:* reprint Aug. 1 1988.
3. Bogen, J., Stölzl, D. (1987). The challenge of introducing high-temperature reactor plants onto the international power plant market. Smirt seminar on small and medium-sized nuclear reactors. Lausanne.
4. International Atomic Energy Agency (1989). Design requirements, operation and maintenance of gas cooled reactors. IWGGCR/19 Technical Conference, San Diego.
5. Lidsky, L.M. et al (1988). A direct-cycle gas turbine power plant for near-term application: MGR-GT. Tenth International HTGR Conference, San Diego.