

De 50 MW beproevingsinstallatie voor de ontwikkeling van componenten voor snelle natriumgekoelde reactoren

Ir. A. R. Braun**

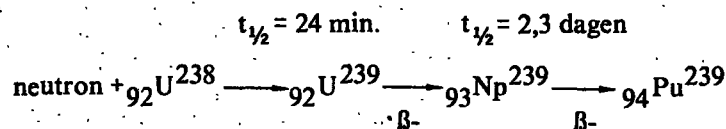
Vanuit de fysische en historische achtergrond van met natrium gekoelde snelle kernreactoren wordt nader ingegaan op de bijzondere eisen welke aan constructies in natriumsystemen worden gesteld. Na het belichten van de Nederlandse inspanningen op het gebied van de natriumtechnologie wordt een uitvoerige beschrijving gegeven van de inmiddels uitgevoerde 50 MW beproevingsinstallatie.

1. FYSISCH ACHTERGROND VAN MET NATRIUM GEKOELDE KERNREACTOREN

De natriumreactor behoort tot het type van de zgn. kweekreactoren, d.w.z. dat bij de energieproductie meer nucleaire brandstof wordt geproduceerd dan gebruikt. Dit in tegenstelling tot de huidige vermogen leverende kernreactoren van het met water gekoelde type, die slechts in zeer geringe mate de eigenschap tot kweken hebben.

De productie van nucleaire brandstof door het kweekproces vindt plaats door omzetting van een niet zonder meer splijtbaar isotoop in een splijtbaar isotoop.

Een omzettingsproces van een niet splijtbaar isotoop in een nucleaire brandstof is die waarbij de U^{238} isotoop wordt omgezet in Pu^{239} volgens het proces dat afgebeeld is in de bovenste regel van afb. 1.



Het zo geproduceerde ${}_{94}Pu^{239}$ nu is een splijtbaar isotoop, waarbij bij geëigende maatregelen geldt dat bij de splijting voldoende neutronen vrijkomen om:

- het splijttingsproces voort te zetten;
- het kweekproces voort te zetten door vorming van Pu uit U^{238} en
- parasitaire absorptie in koelmiddel en constructiematerialen in haalbare mate toe te staan.

De belangrijkheid van het kweekproces voor de oplossing van het energievraagstuk over langere tijd werd reeds vroeg ingezien, omdat de wereldvoorraad aan direct splijtbaar materiaal slechts betrekkelijk gering is. Slechts 0,7 % van het uranium dat wordt aangetroffen, bestaat uit de splijtbaar isotoop ${}_{92}U^{235}$, terwijl de rest bestaat uit de kweekisotoop ${}_{92}U^{238}$.

Volledigheidshalve zij vermeld, dat volgens een soortgelijk kweekproces uit ${}_{90}Th^{232}$, dat niet splijtbaar is, de splijtbaar isotoop ${}_{92}U^{233}$ kan worden geproduceerd, zoals aangegeven in de onderste regel van afb. 1.

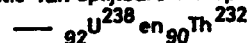
Kwantitatief betekent het volledig geschikt maken van het kweekproces dat de wereldvoorraad aan primaire energiebronnen zeker vertienvoudigd kan worden, waarmee het energievraagstuk gedurende eeuwen zou zijn opgelost.

Met het bovenstaande is nog op geen enkele wijze verband te leggen met de keuze van het wat exotisch aandoende koelmiddel natrium voor het type snelle kweekreactor dat op dit ogenblik in de wereld de meeste aandacht ontvangt. Voor de rechtvaardiging van deze keuze het volgende: — de waarschijnlijkheid dat een neutron kernsplijting in een kernbrandstof veroorzaakt of parasitair wordt weggevangen zonder te splijten of te kweken (in het koelmiddel, of in de in de reactor aanwezige constructiematerialen) neemt af met toenemende snelheid van dat neutron. Gezien de delicate neutroneneconomie in een kweekreactor, moet het parasitair invangen zoveel mogelijk worden voorkomen, hetgeen de keuze van een hoge neutronensnelheid rechtvaardigt. Om nu ondanks die hoge neutronensnelheid toch de waarschijnlijkheid van splijting voldoende groot te houden, dient een hoge concentratie van splijtbaar materiaal in de kern te worden toegepast. Hoog geconcentreerd splijtbaar materiaal is echter zeer kostbaar, zodat — om tot een economische vermogenopwekking te komen — getracht moet worden een hoge vermogensdichtheid in het splijtbaar materiaal te bereiken, die wordt uitgedrukt in MW/ton splijtbaar materiaal. De grootte orde van de vermogensdichtheid bedraagt in een snelle kweekreactor enige honderden MW/ton.

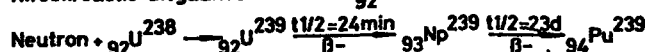
Uit deze overwegingen volgen voor het noodzakelijke warmtetransportmiddel een aantal eisen:

- De warmte-overdrachts- en warmtetransporteigenschappen dienen goed te zijn.
- De nucleaire eigenschappen dienen goed te zijn, hetgeen betekent dat
 - de parasitaire invang van neutronen zo klein mogelijk dient te zijn;

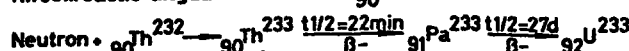
Kweekreactie voor de productie van splijtbare isotopen uit



Kweekreactie uitgaande van



Kweekreactie uitgaande van



* Lezing gehouden op de 33e Vakantieleergang op 24 augustus te Utrecht

** Centraal Technisch Instituut T.N.O. afd. Warmtetechnologie te Hengelo

b) de neutronenenergie zo weinig mogelijk dient af te nemen door botsing met koelmiddelatomen.

Daarnaast zijn er nog een aantal vragen van andere aard, die mede bepalend zijn met betrekking tot de bruikbaarheid van het koelmiddel zoals bijv.:

- de economische eigenschappen,
- de technische eigenschappen en tenslotte
- de psychologische eigenschappen.

Als mogelijke koelmiddelen vindt men ingedeeld naar kwaliteit ongeveer het volgende zeer globale beeld van de diverse aspecten, waarbij de symbolen de volgende betekenis hebben:

- ++ zeer positieve waardering;
- + positieve waardering
- ± tamelijk hoge waardering;
- negatieve waardering.

In afb. 2 worden onderling vergeleken:

2

	Water Stoom	Vloeib. metalen	Edele gassen	Gesmolten zouten
Warmte overdracht en transport eigenschappen	±	++	+	++
Nucleaire eigenschappen	±	++	+++	+
Technische eigenschappen	+	+	+	+
„Psychologische” eigensch.	++	-	+	±
„Economische” eigensch.	+	+	+	±

- water respectievelijk stoom;
- vloeibare metalen (bijv. natrium, kalium, Bismuth, lood)
- edele gassen (bijv. helium)
- gesmolten zouten (meestal bestaande uit een eutectisch mengsel van fluoriden, zoals natriumfluoride, lithiumfluoride e.d. of een eutectisch mengsel van nitraten en nitriten zoals NaNO_2 , NaNO_3 , KNO_3).

Betreffende de warmtetransporteigenschappen is het volgende te zeggen: (over de vergelijking van water en vloeibare metalen hierna meer)

- gesmolten zouten zijn vergelijkbaar met vloeibare metalen;
- de edele gassen hebben een relatief lage dichtheid en een lage soortelijke warmte, zodat — om tot een goed warmte-transport te komen — relatief hoge drukken nodig zijn.

Betreffende de nucleaire eigenschappen:

- water heeft een sterk remmende werking op de neutronen door de aanwezigheid van waterstof, hetgeen zoals eerder uiteengezet minder gewenst is uit overwegingen van neutronoeconomie;
- de edele gassen zijn hier favoriet, althans voor zover het gaat om helium. Enerzijds is de parasitaire invang van neu-

tronen door helium gering, terwijl bovendien de afremming van de neutronen door helium gering is.

Bij de technische eigenschappen dient een complex van factoren voor de vergelijking van de verschillende koelmiddelen te worden bekeken.

Het betreft o.a.:

- de corrosieve eigenschappen;
- de dampdruk of noodzakelijke druk voor voldoende koel-eigenschappen;
- het noodzakelijke pompvermogen om het warmtetransport te verwezenlijken;
- het smeltpunt en
- eventueel nodige bijzondere voorzieningen.

Bij afweging van deze factoren blijken de voor- en nadelen van de verschillende media zodanig verdeeld te zijn, dat voor de technische eigenschappen een gelijke beoordeling gerechtvaardigd is.

Over wat ik de psychologische eigenschappen heb genoemd, is op te merken dat in afb. 2 de bekendheid als koelmiddel het voornaamste waarderingscriterium is geweest. Hieruit volgt dan de negatieve waardering voor de vloeibare metalen, welke waardering verder nog wordt beïnvloed door wat men zich van de middelbare school weet te herinneren van de explosief verloopende reactie tussen natrium en water. Water is hier om overduidelijke reden als koelmiddel het hoogst gewaardeerd.

Onder economische eigenschappen zijn hier vooral te verstaan de prijs van het koelmiddel en de bijzondere voorzieningen die noodzakelijk zijn bij gebruik ervan. De waardering is voor water, vloeibare metalen en edele gassen ongeveer gelijk, de gesmolten zouten zijn hier enigszins in het nadeel door het hoge smeltpunt.

De voorgaande beschouwing is betrekkelijk globaal; de beoordeling is daardoor tamelijk arbitrair. Bij een meer gedetailleerde beschouwing blijkt dat de vloeibare metalen een goede plaats in de vergelijking kunnen innemen.

Uit de vloeibare metalen kan — zoals eerder genoemd — worden gekozen uit:

lithium: Op gronden van invang van neutronen zou men de Li^7 -isotoop moeten toepassen. Hierdoor zou de prijs zeer hoog worden, aangezien het in de natuur voorkomende lithium bestaat uit 92,5 % Li^6 (dat in sterke mate de eigenschap heeft neutronen in te vangen) en slechts 7 1/2 % Li^7 . Bovendien bedraagt het smeltpunt van lithium ca. 180 °C. Een andere mogelijkheid is:

lood: Het smeltpunt bedraagt ca. 330 °C, hetgeen zoveel problemen met zich brengt dat het op grond hiervan reeds afvalt.

bismuth: Valt op dezelfde grond reeds af (het smeltpunt is ca. 270 °C). Bovendien ontstaat de α straler Polonium bij neutroneninvang, waardoor een aanzienlijk gezondheidsprobleem ontstaat.

Blijven over:

natrium en een eutectisch natrium-kalium mengsel: De keuze valt daarbij op natrium, gezien de lagere prijs en het geringere gevaar dat verbonden is aan het gebruik van natrium.

2. HISTORISCHE ACHTERGROND VAN DE SNELLE REACTOREN

Reeds sedert 1946 heeft men in de VS getracht een snelle reactor te bouwen met als eersteling Clementine (20 KW), die met kwik werd gekoeld. (Kwik is overigens geen gelukkige keuze, gezien de giftigheid en de prijs). Ook de eerste stappen op het gebied van de natriumreactoren zijn in de VS gedaan, spoedig gevolgd door het Verenigd Koninkrijk, USSR, Frankrijk en wat later door Duitsland in samenwerking met België, Nederland en Luxemburg, terwijl de rij wordt gesloten door Japan, dat eerst recentelijk met de ontwikkeling ervan is begonnen.

Bij de ontwikkeling van de vermogensleverende reactor zijn de volgende stadia herkenbaar: Men begint met kritische experimenten voor reactor-fysische doeleinden en gaat dan over tot experimentele reactoren voor het bestuderen van technologische problemen (vooral rond de problematiek van splijststoffen en splijststofelementen). De volgende stap is dan de bouw van een prototype vermogen leverende reactor en tenslotte komt de fase van de commerciële, vermogen leverende reactoren.

Afb. 3 geeft weer wat op dit gebied is bereikt. U ziet dat het stadium van de kritische experimenten ruimschoots voorbij is. Uit de stand van zaken is af te leiden welke landen laat zijn begonnen met de ontwikkelingen, gezien hun nog durende werkzaamheden aan experimentele reactoren (Duitsland, Japan, Italië). Voorlopig lopen zonder twijfel de USSR, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk, waarbij opgemerkt dat de stand voor de VS, Japan en de Benelux

landen enigermate geflatteerd is weergegeven, aangezien de bouwwerkzaamheden aan het prototype nog niet zijn begonnen.

Naast de bouw van de verschillende typen reactoren zijn op diverse plaatsen in de wereld een groot aantal grote en kleine installaties gebouwd voor verschillende technologische onderzoeken. Aangezien de technologie van natrium betrekkelijk nieuw is, dient een aanzienlijke hoeveelheid ontwikkeling van zeer verschillende aard te worden verricht. Voorbeelden zijn onderzoeken op het gebied van:

- materialen en materiaalcombinaties voor gebruik in natrium;
- bijzondere constructies in verband met de eigenschappen van natrium, waarover hierna meer;
- ontwikkeling en beproefing van componenten, indien mogelijk op een voor de toepassing representatieve schaal.

Dit type onderzoeken is gericht op het vinden van oplossingen in verband met de bijzondere eigenschappen van natrium.

3. BIJZONDERE EISEN TE STELLEN AAN CONSTRUCTIES VOOR TOEPASSINGEN IN NATRIUMSYSTEMEN

In afb. 4 zijn enige fysische eigenschappen van natrium (bij 500 °C) vergeleken met die van water bij 200 °C). Opvallende verschillen doen zich voor bij het warmtegeleidend vermogen, de soortelijke warmte en dampspanning. Wat zijn van deze verschillen de consequenties?

— Dampspanning: De zeer lage dampspanning maakt het mogelijk dunwandige constructies toe te passen, daar de inwendige druk in hoofdzaak beperkt blijft tot de door de pomp voor het transport van het natrium opgewekte druk.

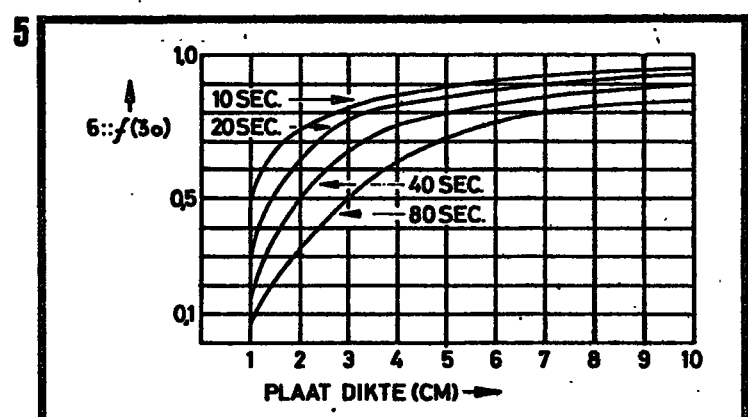
Kritische experimenten, laagvermogen reactoren				
Land	Naam	Therm. MW vermogen	Eerste in-bedrijfstelling	Opmerking
USA	Clementine	0,025	1946	Gesloopt
"	EBR-1	1,0	1951	Gesloopt
"	Lampre	1,0	1961	Gesloopt
USSR	BR 2	0,1	1956	Gesloopt
"	BR 5	5	1959	
UK	Zephyr	—	1954	
"	Zeus	—	1955	
Frankrijk	Masurca	—		

Experimentele reactoren				
Land	Naam	Therm. MW vermogen	Electr. MW vermogen	Eerste in-bedrijfstelling
USA	EBR II	625	20	1964
"	EFFBR	200	66	1963
"	SEFOR	20	—	1969
"	FFTF	400	—	1974?
UK	DFR	60	15	1959
Frankrijk	Rapsodie	40	—	1967
USSR	BOR 60	60	12	1970
Japan	JEFR	100	—	1973?
Duitsland	KNK	58	20	1972?
Italië	PEC	140	—	1975?

Prototype reactoren				
Land	Naam	Therm. MW vermogen	Electr. MW vermogen	Eerste in-bedrijfstelling
USA	LMFBR	ca 1000	ca 400	1976?
UK	PFR	600	250	1972?
Frankrijk	Phenix	600	250	1973?
USSR	BN 350	1000	?	1971?
DEBENELUX	SNR 300	720	300	1975?
Japan	JPFBR	750	300	1976?

"Commerciële" reactoren				
Land	Naam	Therm. MW vermogen	Electr. MW vermogen	Eerste in-bedrijfstelling
USSR	BN600	1500	600	1974?

Enige eigenschappen van Na. in vergelijking met water en enige constructie materialen						
Eigenschap	Symbool	Eenheid	Na 500°C	Water 200°C	SS 304 500°C	10CrMo9.10 500°C
Warmte geleid.	λ	W/m°C	67	0,665	21,6	31,4
Soort.warmte	Cp	J/kg°C	1270	450	~600	~730
Dichtheid	ρ	kg/m³	834	863	7900 (20°C)	7850 (20°C)
Lineaire uitzett.	α	1/°C	—	—	18.10 ⁻⁶	13.9.10 ⁻⁶
Smeltpunt		°C	-100°C	0°C	—	—
Kookpunt		°C	-880°C	100°C	—	—
Dampspanning	p	bar	~5.10 ⁻³	~16	—	—
Dyn.viscositeit	η	kg/msec	2,4.10 ⁻⁴	1,35.10 ⁻⁴	—	—



— **Warmte-geleidingsvermogen:** Het ten opzichte van water ca. 100 x zo groot warmte-geleidingsvermogen heeft een bijzonder goede warmte-overdracht tot gevolg zoals, hiervoor uiteengezet, gewenst is in verband met de hoge specifieke warmteproductie in de kern van de reactor. Het nadeel ervan is, dat temperatuurvariaties in het natrium vrijwel onverzwakt aan het constructiemateriaal worden overgedragen. De oppervlakte van het materiaal zal door de onvermijdelijk optredende temperatuurvariaties aan een wisselende spanning worden onderworpen, hetgeen tot scheurvorming door vermoeidheid aanleiding zou kunnen geven.

Om wat meer inzicht te krijgen in de grootte van de optredende warmtespanningen geldt onder de beperkende bepalingen dat:

- de warmte-overdracht van de vloeistof aan de wand zeer groot is (hetgeen bij natrium het geval is);
- de wand volkomen geïsoleerd is;
- de wandtemperatuur uniform is bij het begin van de temperatuurverandering in het natrium;
- de temperatuurvariatie lineair met de tijd verloopt; voor de temperatuurspanning die wordt opgewekt de uitdrukking:

$$\sigma = \frac{\alpha F \cdot \Delta T}{1 - r} \cdot f(\zeta) \quad \text{of}$$

de opgewekte spanning (σ) is evenredig met de uitzettingscoëfficiënt α , met het optredende totale temperatuursverschil met een functie van het fouriergetal (ζ_0), dat gegeven wordt door

$$\frac{\alpha \cdot t}{s^2} \quad \text{waarin } \alpha \text{ de warmtevereffeningscoëfficiënt}$$

voorstelt ($\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$).

De overige symbolen stellen voor:

λ = geleidingsvermogen;

ρ = dichtheid;

c = soortelijke warmte;

t = tijd en

s = beschouwde plaatdikte.

Uitgaande van het fouriergetal kan de functie ervan bij de genoemde beperkingen worden berekend. Voor de variabelen tijd en plaatdikte vindt men zo voor een roestvast staal van het type 18/8 de in **afb. 5** weergegeven relatie tussen de functie van het fouriergetal (en dus de spanning) en de plaatdikte, uitgaande van gegeven temperatuurspan. De lijnen geven verschillende tijden weer, gedurende welke de totale temperatuursschok wordt gerealiseerd.

De conclusies zijn:

a) Uiteraard zijn voor geringe wanddikten de thermische spanningen laag; de geringe dampspanning van natrium, die leidt tot dunwandige constructies, speelt hier dus een zeer gunstige rol.

b) Bij plaatdikten > 3 cm speelt de tijd waarin de temperatuurverandering optreedt, ten opzichte van de optredende spanning slechts een ondergeschikte rol.

N.B.: De totale temperatuursverandering echter speelt een zeer grote rol, daar de opgewekte thermische spanning recht evenredig is met de temperatuurverandering, hetgeen eveneens het geval is met de lineaire uitzettingscoëfficiënt.

Uit het voorgaande volgt dat effectieve maatregelen voor beperking van de gevolgen van een thermische schok zijn:

- a) de beperking van de optredende totale temperatuursverandering op de bedreigde plaats;

- b) het bij voorkeur toepassen van een constructiemateriaal met een relatief lage lineaire uitzettingscoëfficiënt en een goede warmtegeleiding

In **afb. 4** zijn voor een vergelijking in de laatste twee kolommen de fysische eigenschappen van twee mogelijke constructiematerialen voor gebruik met natrium opgenomen. Het betreft het materiaal met een austenietische structuur van het type met 18 % Cr en 8 % Ni (Amerikaanse aanduiding 304) en één met een ferrietische structuur (Duitse aanduiding 10CrMo9.10).

Uit de gegevens blijkt vanuit het oogpunt van thermische spanningen een voorkeur voor het ferrietische materiaal (uitzettingscoëfficiënt lager en gunstiger warmtegeleidings-eigenschappen).

De uiteindelijke keuze van het constructiemateriaal is uiteraard mede afhankelijk van andere factoren zoals mechanische eigenschappen bij de gebruikstemperatuur en de weerstand tegen corrosie door natrium. Gewoonlijk dient na afweging van deze en andere overwegingen een compromis bij de materiaalkeuze te worden gesloten.

Andere overwegingen die bij de materiaalkeuze een rol spelen, zijn bijvoorbeeld: de verkrijgbaarheid van het materiaal, de prijs, de be- en verwerkbaarheid (zoals lasbaarheid), de geometrie van het beschouwde onderdeel, de toepassing van het beschouwde onderdeel, de te verwachten schokgrootte en tijdsduur waarin de thermische schok tot stand komt (bij grotere materiaaldikten), de structurele stabiliteit van het materiaal bij de gebruikstemperatuur en dergelijke. Niettemin biedt de ontwikkelde uitdrukking voor de thermische spanning de mogelijkheid van een eerste selectie.

Verdere mogelijkheden voor beperking tot de gevolgen van thermische schokken zijn:

- c) Keuze van zo gering mogelijke wanddikte (s kwadratisch in noemer ζ_0 en afname van s betekent toename van ζ_0 en eveneens van $f(\zeta_0)$ en dus van de spanning (effectief voor zover van grotere wanddikten sprake is, **afb. 5**).

- d) Keuze van een zodanige systeemopzet dat de totale schokgrootte over een zo lang mogelijke tijdsduur wordt uitgesmeerd. Uit de afbeelding blijkt voor grotere materiaaldikten deze invloeds-grootte slechts een beperkte rol te spelen.

Op een verdere uitwerking hiervan kom ik later terug.

4. ACHTERGROND EN ONTWIKKELING VAN DE NEDERLANDSE INSPANNINGEN

In Nederland werd de interesse voor de ontwikkeling van de natriumtechnologie omstreeks 1960 geconcretiseerd met het aanschaffen van een natriumcircuit door het Centraal Technisch Instituut TNO. Na eerste proefnemingen werd een samenwerking voor verdere ontwikkeling gevonden met de Nederlandse industrie, belichaamd in de NV Neratoom. In een volgend stadium werd in een associatie-overeenkomst TNO/Euratoom begonnen met het ontwerp van een stoomgenerator. Vervolgens ontstond uit de samenwerking tussen TNO en Neratoom (belichaamd in een TNO/Neratoom natriumtechnologieproject) een volledig industrieel project met als doelstelling: de bouw van een

prototype natriumgekoelde reactor in een samenwerking tussen Duitse, Nederlandse, Belgische en Luxemburgse industrieën. De rol van TNO werd daarbij: het verrichten van het noodzakelijke basisonderzoek.

In alle stadia van het project moet de buitengewoon stimulerende rol van de Nederlandse overheid worden genoemd; vrijwel de gehele financiering van de Nederlandse ontwikkelingen ten behoeve van de Nederlandse rol in de Debenelux-samenwerking is door de overheid gedragen.

Binnen de Debenelux-samenwerking werd besloten dat voor de bouw van de prototypereactor een aantal grote beproevingsinstallaties zouden worden gebouwd, waarin de meest kritisch beoordeelde componenten op zo groot mogelijke schaal zouden kunnen worden beproefd. Als kritische componenten in de warmte-overdrachtsketen werden beoordeeld: de stoomgeneratoren en de natriumpompen.

Naast de reeds bestaande kleinere faciliteiten werd op grond van bovenstaande overweging besloten over te gaan tot de bouw van:

- een installatie voor de beproeving van grote natriumpompen (tot een capaciteit van 5000 m³/u) in Duitsland;
- een installatie voor de beproeving van grote warmte-overdrachtscomponenten (stoomgeneratoren, warmtewisselaars) in Nederland.

5. KEUZE VAN DE ONTWERPGROOTHEDEN EN OPZET VAN DE 50 MW INSTALLATIE, ORGANISATIE, EIGENDOM EN BEDRIJFSVOERING

Deze laatste faciliteit heeft gestalte gekregen in de 50MW natriumbeproevinginstallatie.

Allereerst iets over de keuze van de belangrijkste ontwerp-grootheden van de installatie. De belangrijkste te kiezen ontwerp-grootheden in verband met de bouw en exploitatiekosten van een dergelijke grote installatie zijn:

- het thermische vermogen;
- de maximale natriumtemperatuur, o.a. in verband met de materiaalkeuze;
- de maximaal benodigde pompcapaciteit;
- de maximale stoomdruk en stoomtemperatuur die men bij de beproeving wil kunnen verwerken;
- de opzet van de installatie.

Hieronder worden deze factoren enigszins toegelicht om een indruk te geven van de wijze waarop de installatie gestalte heeft gekregen.

De voor investeringen en exploitatiekosten bepalende factor is:

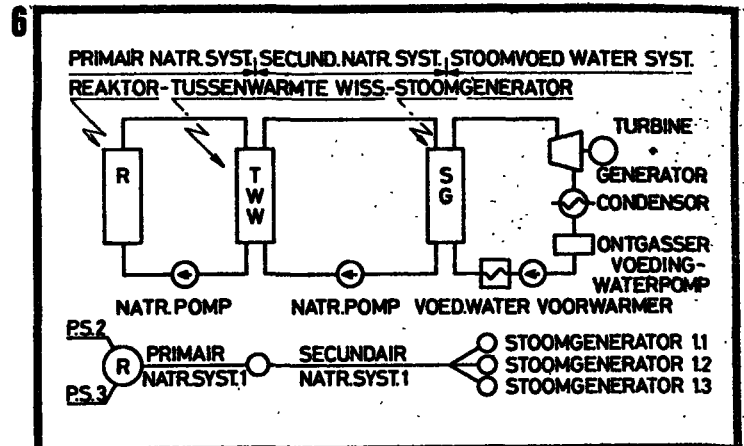
Het vermogen van de installatie

Een principe-opzet van de natriumgekoelde snelle reactor is weergegeven in **afb. 6**. De warmte opgewekt in de reactorkern, wordt getransporteerd naar een tussenwarmtewisselaar en afgestaan aan een tweede gesloten natriumkringloop. De warmte wordt vervolgens in een tweede warmtewisselaar (de stoomgenerator) overgedragen aan water resp. stoom en in de derde kringloop omgezet in mechanische energie door een turbine.

De tweede natriumkringloop is ingevoegd om een tweetal redenen, nl. ten eerste om het natrium dat onder invloed van de neutronenbestraling in de kern radioactief wordt, te lokaliseren in een begrenzing die wordt gevormd door de voor kernreactoren karakteristieke opsluitvaten en in de tweede plaats, omdat natrium heftig met water reageert. Deze reactie gaat gepaard met drukstoten, die

bij de directe koppeling van de stoomgenerator aan de reactor schade aan de reactorkern tot gevolg zouden kunnen hebben. Bovendien zou waterstof dat ten gevolge van de reactie in de kern zou komen, de neutronenbalans in onveilige zin beïnvloeden door de sterk remmende werking die waterstof op de neutronen uitoefent.

In werkelijkheid is de opstelling zó, dat gebruik wordt gemaakt van een aantal (meestal drie) primaire kringlopen en een even groot aantal secundaire natriumkringlopen. Schematisch is dit in het onderste deel van de afbeelding aangegeven. Daarin zijn drie primaire natriumsystemen en drie



secundaire natriumsystemen weergegeven, terwijl per secundair systeem drie stoomgeneratoren staan opgesteld.

De toepassing van meer dan één primair circuit is op grond van veiligheids- en bedrijfsoverwegingen gekozen. Indien één primair natriumcircuit zou uitvallen, is de koeling van de kern door de overige circuits gewaarborgd, terwijl de vermogensproductie kan worden voortgezet.

In de commerciële fase zal blijken economische beschouwingen een dergelijke reactorinstallatie een vermogen van ca. 1000 MW elektrisch moeten opwekken, waarbij het in de kern opgewekte vermogen ca. 2500 MW bedraagt.

Bij drie primaire kringlopen komt men zo voor het vermogen van de tussenwarmtewisselaars op circa 800 MW. Bij drie of vier stoomgeneratoren per secundaire kringloop komt men tot een vermogen van ca. 200 tot 250 MW per stoomgenerator. Een beproevingsinstallatie van een dergelijk vermogen behoort op grond van de bouw- en exploitatiekosten tot de onmogelijkheden. Voor de prototypereactor ziet de zaak er gunstiger uit. Het thermisch vermogen is daar ca. 750 MW en bij 12 stoomgeneratoren komt men tot een vermogen van ca. 60 MW per stuk. Om tot beproeving van warmte-overdragende componenten op een enigszins redelijke schaal te komen dient men dus over een vermogen van enige tientallen MW te beschikken. Op grond van het benodigde vermogen voor het prototype is binnen de beschikbare financiële middelen gekozen voor een vermogen van bijna 60 MW. Opgemerkt daarbij zij, dat de stoomgeneratoren meestal bestaan uit een samenstelling van een verdamper en een oververhitter (eventueel met heroververhitter), waarbij ca. 60 % van het over te dragen vermogen voor rekening van de verdamper komt. Of: bij een stoomgenerator van 200 MW bedraagt de bijdrage van de verdamper ca. 120 MW, hetgeen betekent dat het meest interessante gedeelte van de commerciële stoomgenerator (de verdamper) toch nog op een schaal 1:2 kan worden beproefd.

De maximale natriumtemperatuur:

Als maximale natriumtemperatuur is 650 °C gekozen, terwijl de maximale stoomcondities 610 °C bij een druk van 210 bar bedragen.

Afb. 6 geeft de hoofdopzet van de kringlopen bij een natriumgekoelde reactor. Zoals toegelicht zijn er primaire en secundaire natriumcircuits die thermisch zijn gekoppeld door een tussenwarmtewisselaar. Bij een beproevingsinstallatie is een opzet in deze vorm niet noodzakelijk; er is immers geen sprake van kernreacties en dus ook niet van radioactief natrium. Voor beproefing van een stoomgenerator kan men bij de afwezigheid van kernstraling volstaan met één natriumcircuit, hetgeen een aanzienlijke kostenbesparing met zich brengt. Om onderdelen van het beschouwde type onder de condities zoals die in verschillende reactoren gelden te kunnen beproeven, zal een aantal voorzieningen nodig zijn.

Welke beproevingen en beproevingscondities zijn nu bij de ontwikkeling van een stoomgenerator van belang?

In de eerste plaats zou men het thermo-hydraulisch gedrag van een component onder reactorcondities willen nabootsen. Dat zijn bijvoorbeeld:

- het vermogen bij stationaire condities en zo mogelijk: de bepaling van de vermogensverdeling in de beschouwde component;

- het gedrag bij kleine verstoringen zoals die in een reactorinstallatie kunnen voorkomen met het oog op het ontwerp van de regeling, en

- de stabiliteitsbepaling bij lage last, samenhangend met de fase-overgang aan de waterzijde.

Deze zaken zijn dan na te gaan bij de twee principieel verschillende regelmogelijkheden voor de reactor nl.:

- de reactor volgt de turbine, die op haar beurt de afname van de zijde van de verbruikers aan het elektrische net volgt (pieklust bedrijf), of

- de reactor levert een opgelegde hoeveelheid warmte af, waardoor de energieproductie aan de zijde van het elektrische net is vastgelegd (basis lastbedrijf). Voor een economisch verantwoorde bedrijfsvoering is bij de grote vermogens waarvan hier sprake is, deze regeling de voor de hand liggende.

Tenslotte zijn van belang:

- de sterkte-eigenschappen van de component bij de bijzondere belastingen die in een natriumsysteem voorkomen. Over de sterkte-eigenschappen het volgende. Hiervoor is uiteengezet dat de keuze van natrium als koelmiddel gepaard gaat met het nadeel van het mogelijk optreden van grote thermische schokken, welke door de opgewekte thermische wisselspanningen tot vermoeiingsscheuren aanleiding kunnen geven.

Voor de opzet van een beproevingsinstallatie van het hier beschouwde type is de ontstaanswijze en de grootte van de in een reactorinstallatie optredende thermische schokken essentieel. Eén mogelijkheid voor het ontstaan van ernstige thermische schokken is een reactorstop bij voortgezet natriumdebiet. De thermische schok ontstaat als volgt: De warmteproductie in de kern komt bij een stop vrijwel direct en geheel tot stilstand en ten gevolge daarvan neemt de temperatuur van het natrium dat de kern verlaat snel af. De temperatuurafname wordt slechts in zeer geringe mate getemperd, daar de geaccumuleerde warmte in de kern slechts zeer beperkt is. De zo aan de uitlaat van de reactor

optredende temperatuurschok wordt naar de primaire inlaat van de tussenwarmtewisselaar getransporteerd en daar — gezien de goede warmteoverdrachtseigenschappen van natrium — vrijwel onverzwakt aan de secundaire zijde doorgegeven. Een temperatuurschok aan de secundaire zijde van de tussenwarmtewisselaar komt weer terecht in de stoomgenerator. Voor een geval waarbij de reactor-uitlaat-temperatuur 650 °C is, bij een inlaat van 500 °C vindt U de gevolgen van een reactorstop op de secundaire uitlaattemperatuur van de tussenwarmtewisselaar in afb. 7.

De aannamen voor de berekening van het verloop zijn, dat de debieten van de primaire en secundaire natrium onveranderd blijven, terwijl het temperatuurspan over de kern exponentieel afneemt. In de eerste 10 seconden blijft de temperatuur van het natrium dat de tussenwarmtewisselaar verlaat, met ca. 100 °C af te nemen. Deze thermische schok zal vertraagd, doch slechts in geringe mate gedempt de stoomgenerator bereiken. De bovenste lijn geeft de temperatuurafname aan van het natrium dat de tussenwarmtewisselaar aan de secundaire zijde verlaat, de onderste lijn het verloop van de natriumtemperatuur dat de tussenwarmtewisselaar aan de primaire zijde verlaat.

Andere mogelijke, ernstige temperatuurschokken zijn:

- het uitvallen van de primaire natriumpomp en doorlopen van de secundaire met als gevolg: een koude schok op de inlaat van de stoomgenerator, of

- het uitvallen van de secundaire natriumpomp met doorlopende primaire pomp, waarbij een warme temperatuurschok de generator zal bereiken, en

- het uitvallen van de voedingwaterpomp bij doordraaiende natriumpompen, waardoor een warme schok op de uitlaat van de stoomgenerator zal ontstaan.

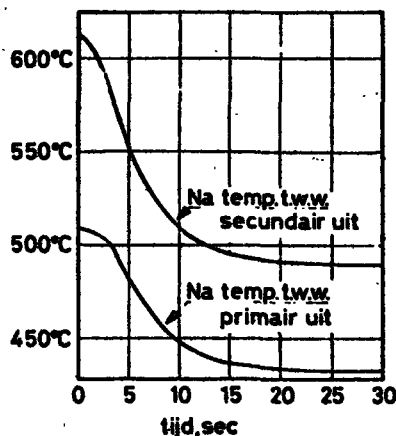
De hier genoemde temperatuurschokken zijn weliswaar betrekkelijk extreme gevallen, die door geëigende ingrepen zoals vergrendelingen zijn te onderdrukken, doch ook

Temperatuurverloop na reactor-scram zonder debiet regeling

Reaktor uit: 650 °C

Reaktor in: 500 °C

Aannamen: primair debiet constant
secund. debiet constant
exponentiële afname van
Δt over reaktorkern

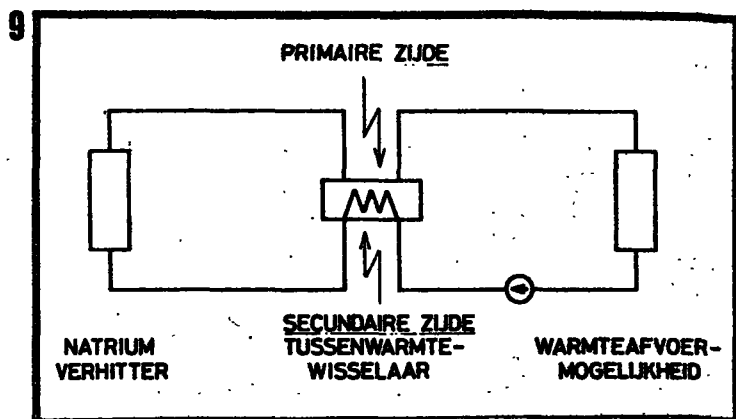


bij het uitlopen van een pomp ten gevolge van een storing of bij een veiligheidsstop zijn temperatuurschokken van de genoemde grootte-orde niet uit te sluiten. Ook snelle belastingwisselingen (zoals het geval waarbij de generator „van het net valt”, terwijl de reactor zijn volle vermogen levert) behoren tot de gewone praktijk van de energie-opwekking. De gevolgen van deze schokken voor de stoomgenerator dienen nader te worden onderzocht, aangezien juist in de stoomgenerator — ten gevolge van hoge drukken aan de stoomzijde dikwandige constructie-elementen (zoals pijpplaten) voorkomen, waardoor — zoals eerder uiteengezet — deze componenten de meest gevoelige uit de warmte-overdrachtsketen zijn voor temperatuurschokken.

In afb. 8 wordt de principiële opzet van de installatie weergegeven. Voor de beproeving van een stoomgenerator is een warmtebron voor het scheppen van een temperatuurverschil in het natrium en een warmte-afvoermogelijkheid in het stoomsysteem nodig (bovenste deel van de afbeelding). Met de transportleidingen en pompen komt men tot de tweede afb.

Het deel links van de stoomgenerator dient om een reactor met primaire kringloop, tussenwarmtewisselaar en secundaire kringloop na te bootsen, terwijl het deel rechts ervan een turbine-installatie met condensor en verder voedingwatercircuit moet kunnen simuleren. De mogelijkheid van het opwekken van thermische schokken zoals bij de reactor, ontstaan door relatief koud natrium aan de inlaat van de stoomgenerator te injecteren. Dat koude natrium kan daartoe aan de perszijde van de pomp onttrokken worden. De zo ontstane schakeling geeft de derde figuur.

Om nu de installatie zelf tegen de temperatuurschokken te beschermen, die zich ook naar de uitlaat van de stoomgenerator zullen voortplanten, dient zo dicht mogelijk na de uitlaat van de stoomgenerator de mogelijkheid te bestaan, koud of warm natrium te injecteren in de stroom die de stoomgenerator verlaat. Daartoe wordt een natriumstroom van de uitlaat van de natriumverhitter afgetakt en warm of koud — dat laatste door koeling in een luchtkoeler — in de uitlaatleiding van de stoomgenerator



gebracht. Het volledige stroomschema geeft dan de onderste afb.

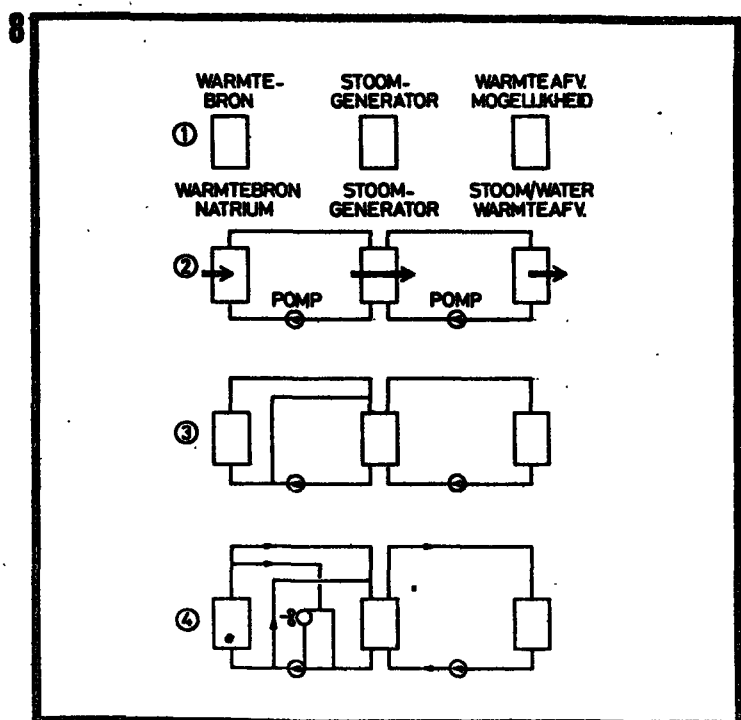
In de installatie is voorts nog de mogelijkheid opgenomen om tussenwarmtewisselaars te beproeven. De basisschakeling geeft afb. 9. De schakeling is regeneratief, d.w.z.: hetzelfde natrium doorstroomt de primaire en secundaire zijde van de tussenwarmtewisselaar. De werkwijze is als volgt: Uitgaande van een isotherme temperatuurverdeling in de installatie wordt bij een bewenst debiet de primaire ingaande temperatuur door middel van de natriumverhitters in stappen opgevoerd naar de gewenste waarde. Bij het doorstromen van de primaire zijde zal het natrium afkoelen, terwijl aan de secundaire zijde de natriumtemperatuur stijgt. Door middel van de warmte-afvoermogelijkheden wordt nu de secundaire inlaattemperatuur eveneens op de gewenste waarde gebracht.

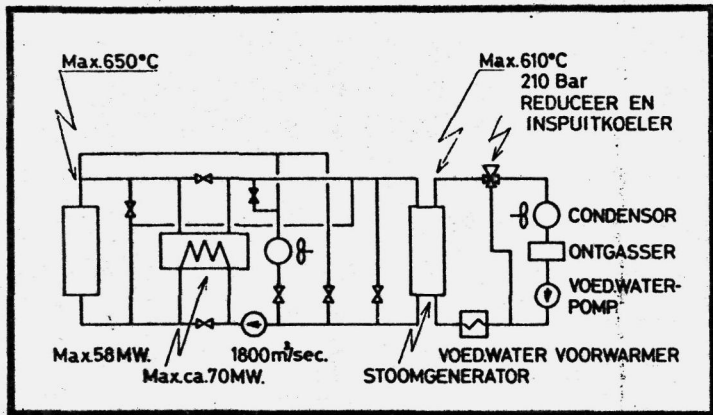
Uit de geometrie van de tussenwarmtewisselaar volgen nu met de debieten aan primaire en secundaire zijde en de ingestelde temperaturen de overige natriumtemperaturen en dus het overgedragen vermogen. Als warmte-afvoermogelijkheid kunnen worden gebruikt de gemonteerde stoomgenerator en het daaraan gekoppelde stoomsysteem met condensor of de eerder genoemde natriumkoeler voor het geval dat geen stoomgenerator in de installatie beschikbaar is. Het over te dragen vermogen in de tussenwarmtewisselaar wordt in eerste aanleg niet meer bepaald door het vermogen van de natriumverhitters, maar door de mogelijkheid van warmte-afvoer en het beschikbare natriumdebiet.

Afb. 10 toont tenslotte de totale opzet van de installatie. Over de natriumkringloop behoeft na het voorgaande niet veel meer te worden gezegd. U herkent de natriumverhitters, de natriumkoeler, de tussenwarmtewisselaar en de stoomgenerator. Door de aangegeven kortsluitleidingen over de primaire en secundaire zijde kan een ongebalanceerd debiet aan de twee zijden van de tussenwarmtewisselaar worden verkregen. In de stoomvoedingwater kringloop valt naast de gebruikelijke hoofdcomponenten het ontbreken van een turbine op. Turbinebedrijf kan worden gesimuleerd door smoren van de verse stoom, gevolgd door waterinspuiting. Een vermogensafhankelijke instelling van de belangrijkste procesgrootheden zoals bijvoorbeeld de voedingwater inlaattemperatuur, de ontgasserdruk en -temperatuur e.d. kan eveneens op deze wijze worden gesimuleerd. Tot zover de beproevingsmogelijkheden met de installatie van warmtewisselende apparatuur.

Gezien de beschikbaarheid van een aanzienlijk natriumdebiet en de aanwezigheid van hoge druk stoom, zijn ook andere experimenten met de installatie mogelijk.

Voor wat de stoomzijde betreft wordt een proefopstelling





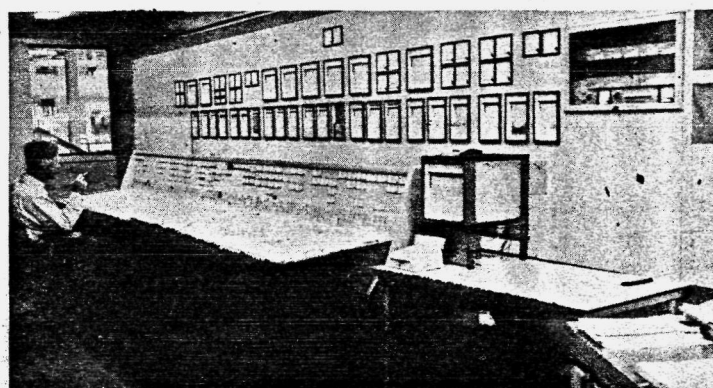
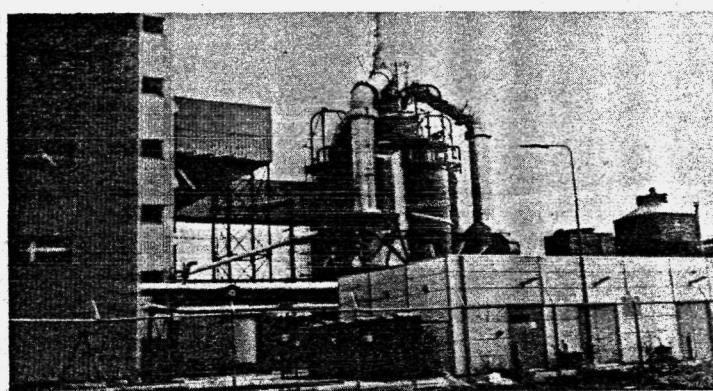
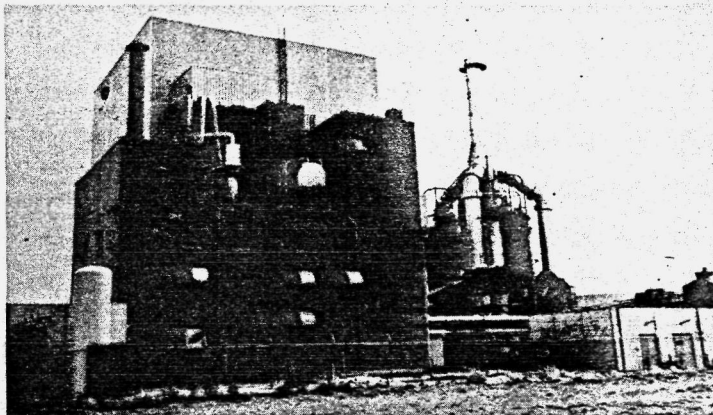
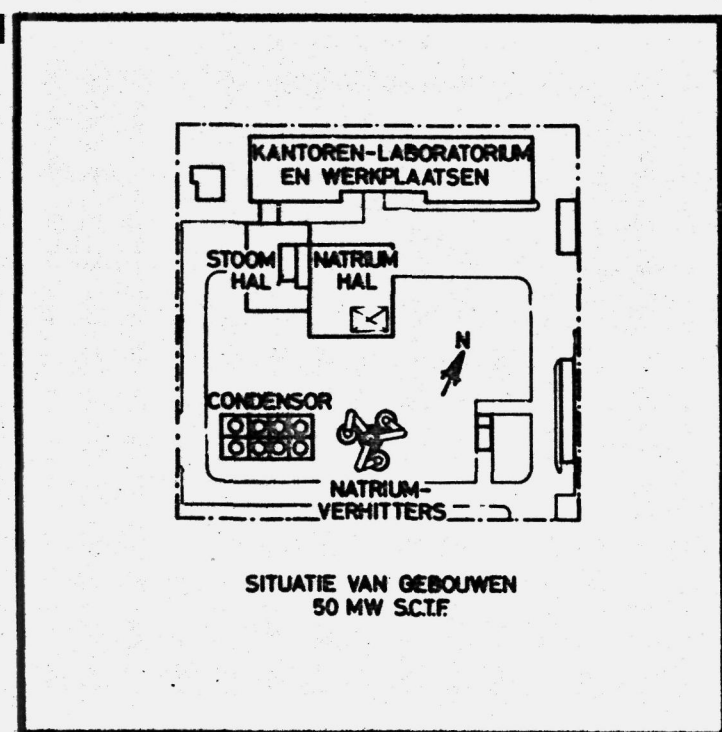
voor de dynamische beproeving van stoomveiligheden voorbereid met als doel: bepaling van capaciteit, openings- en sluitkarakteristiek, dichtheid e.d.

Voorts wordt een proefopstelling voor de beproeving van zeer grote stoomdrogers overwogen (capaciteit ca. 600 ton/uur). Dit type experimenten kan betrekkelijk goedkoop worden uitgevoerd, gezien de grote hoeveelheid stoom van hoge kwaliteit, die als een soort afvalproduct ter beschikking staat, waardoor de exploitatiekosten voor dit type nevenexperimenten betrekkelijk laag kunnen zijn.

Aan de natriumzijde is een zodanig interessant debiet van 1800 m³/u beschikbaar dat onderzoeken aan procesapparatuur (zoals afsluiters en andere procesapparatuur zoals apparatuur voor handhaving van de natriumkwaliteit) en belangrijke installatiedelen van kernreactoren mogelijk is. Bij dit laatste kon worden gedacht aan stromingsonderzoek van: splijtstofelementen of delen van reactor-kernen met hun ondersteuning, regelstaven en hun aandrijving e.d.

Tenslotte een aantal foto's van de installatie zoals die is gebouwd te Hengelo.

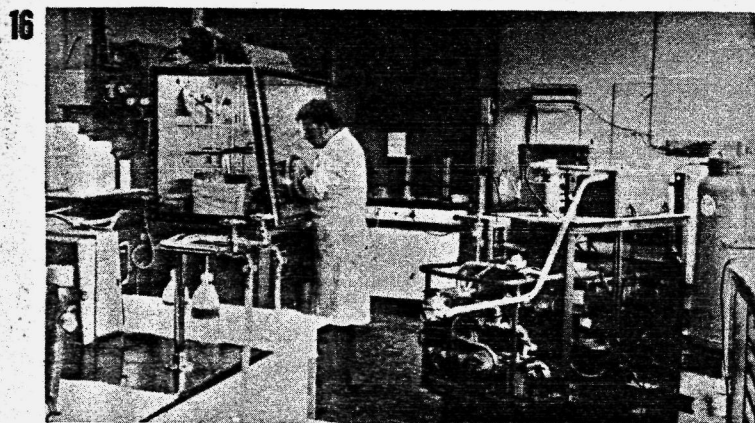
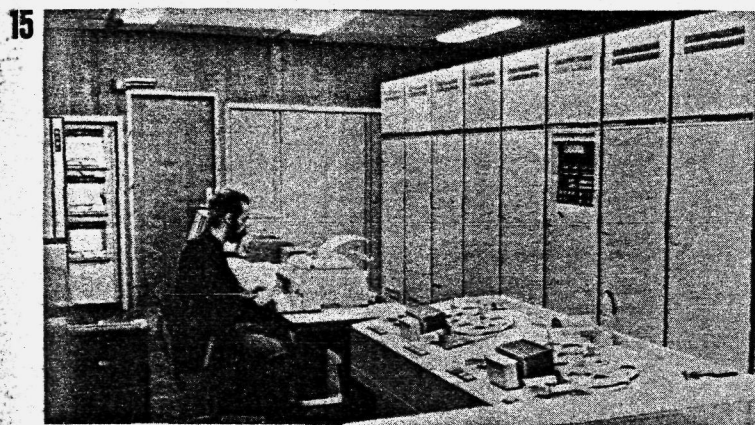
Afb. 11 toont een plattegrond met de opstelling van de diverse installatiegedeelten. (De afkorting SCTF staat voor: Sodium Component Test Facility). U ziet als belangrijkste gedeelten:



- de natriumhal, waarin de belangrijkste natriumcomponenten en het grootste deel van de verbindingsledingen is ondergebracht. Tevens bevindt zich hier een testcel voor de opstelling van de te beproeven stoomgeneratoren.
- de stoom/voedingwaterhal, waarin het grootste deel van de stoomkringloop is ondergebracht;
- de natriumverhitters, die in een parallelstelling van drie eenheden van ca. 20 MW elk buiten de gebouwen zijn opgesteld;
- de condensor, waarvoor als koelmiddel lucht wordt gebruikt.

Afb. 12 geeft een overzicht van de installatie gezien vanuit het westen. Het hoogste, licht gekleurde gebouw bevat de natriuminstallatie en de stoomgeneratorcel. Het donker gekleurde gebouw bevat de stoominstallatie met in de verhoging links de computerruimte. De verhoging rechts bevat de regelkamer, vanwaar de installatie wordt bestuurd. Geheel rechts ziet U de drie natriumverhitters, die rondom een centrale schoorsteen zijn gegroepeerd. Achter het bijgebouw rechts is nog juist iets van de condensor te zien.

Afb. 13 toont de natriumverhitters meer in detail. De zwarte cilindrische delen zijn de eigenlijke verhitters; de licht gekleurde verbindingsledingen naar de schoorsteen komen



van de voorwarmers voor de verbrandingslucht. De verhiters worden met aardgas gestookt.

Afb. 14 geeft een overzichtsfoto van een deel van de regelkamer. Op de lessenaar op de voorgrond een grafische voorstelling van de installatie, waarin de bedieningsorganen zijn opgenomen. In de panelenwand registrerende apparatuur voor het vastleggen van relevante bedrijfsgegevens. Geheel gescheiden van de regeling worden meetwaarden vastgelegd en verwerkt.

Afb. 15 toont de datalogger-computer. Achter de opstaande panelen is de eigenlijke computer opgesteld. Van de beschikbare randapparatuur is zichtbaar:

- op de voorgrond: de sneldrukker, waarmee meetgegevens kunnen worden zichtbaar gemaakt;
- links achter: een magneetbandapparaat en daarvoor:
- de kaartlezer/ponser;
- midden achter: het externe schijfgeheugen met daarvoor:
- een X-Y plotter;
- daarvoor: respectievelijk de dialoge schrijfmachine en de ponsband lees- en ponsapparatuur.

De belangrijkste gegevens van de apparatuur zijn:

Capaciteit: 500 meetpunten; aftast snelheid tot 10.000 kan/sec.

Interne geheugencapaciteit: 48.000 woorden van acht tekens elk, uitgebreid met een extern schijfengeheugen, waardoor een zeer grote reken capaciteit bestaat.

Invoermogelijkheden: ponsband en ponskaart.

Uitvoermogelijkheden: sneldrukker, X-Y plotter en lichtaflezing.

Opslagmogelijkheden: magneetbandapparaat en het eerder genoemde schijfengeheugen.

Een strenge scheiding met de bedrijfsvoering is doorgevoerd zowel ruimtelijk als wat betreft de herkomst van de signalen. Dit op grond van:

— de bescherming van de vertrouwelijkheid van meetgegevens

— het verschillende karakter van de functies van bedrijfsvoering en experimenten, waardoor geen beïnvloeding van ingrepen ten behoeve van de metingen bij de beheersing van de installatie mogen optreden en v.v.

Uit overwegingen van een veilige bedrijfsvoering en op grond van het uitgangspunt de condities die in een kernreactorsysteem voorkomen, na te bootsen, is naast een omvangrijke in-line apparatuur voorzien in een chemisch laboratorium voor de kwaliteitscontrole van de belangrijkste toegepaste media nl.:

— natrium;

— het dekgas dat boven het hoogste natriumniveau in de installatie voorkomt, waarvoor argon van een zeer hoge zuiverheid wordt gebruikt;

— water, waaraan — gezien de hoge warmtestroomdichtheden in de verdampers — hoge zuiverheidseisen worden gesteld.

Afb. 16 toont een gedeelte van het chemisch laboratorium. Voor natriumanalysen dient — gezien de grote affiniteit van natrium ten opzichte van zuurstof — gebruik gemaakt te worden van een gecontroleerde atmosfeer. De atmosfeer wordt gehandhaafd in de handschoenenkast door middel van argon onder een lichte overdruk. In de handschoenenkast wordt op de foto juist gewerkt. Links achter de handschoenenkast is nog juist een hoog frequent verhitte voor vacuümdistillatie ten behoeve van de analyse van natrium zichtbaar. Op de voorgrond rechts een gaschromatograaf voor de bewaking van het argon in het dekgas-systeem van de natriuminstallatie.

Nu nog iets over eigendom, beheer en organisatie van de installatie.

De bouw van de installatie is door de Staat der Nederlanden betaald, evenals dat met de exploitatie het geval zal zijn.

De bouw van de installatie is uitgevoerd door een combinatie van Nederlandse bedrijven op het gebied van de kern-energie (NV Neratoom in Den Haag), terwijl de exploitatie in opdracht van de Staat is toevertrouwd aan het Centraal Technisch Instituut TNO. De keuze voor het Centraal Technisch Instituut TNO voor de exploitatie is gebaseerd op de overwegingen van de aanwezigheid van een veeljarige ervaring met de natriumtechnologie bij het instituut en de noodzaak te kiezen voor een onafhankelijke positie van de exploitant om optimale geheimhouding bij de uitvoering van experimenten te verzekeren.

De installatie staat uiteraard primair ten dienste van de Nederlandse industrie.

Het aanvaarden van opdrachten ten behoeve van buitenlandse geïnteresseerden behoort uitdrukkelijk ook tot de mogelijkheden.

6. STAND VAN ZAKEN MET BETREKKING TOT DE 50 MW INSTALLATIE

De bouwwerkzaamheden aan de installatie zijn beëindigd. Sedert april van dit jaar zijn beproevingen van de installatie zelf met natrium gaande. Begin 1972 zal het maximaal over te dragen vermogen worden bereikt, waarna de eerste stoomgenerator van Nederlandse makelij voor een periode van ca. 1 jaar aan beproevingen zal worden onderworpen, terwijl in die periode tevens een tussenwarmtewisselaar met een vermogen van 70 MW en stoomveiligheden zullen worden beproefd.